

パイプライン非定常流の剛性モデル・閉路解析における 全域木と補木の辺の決定支援方法

田中良和・中田 達・樽屋啓之

目 次

I 緒 言	1	V 結 言	10
II 剛性モデル理論の概説	2	参考文献	10
III 閉路解析の概説と問題点の整理	2	Summary	12
IV 全域木と補木の辺の決定支援方法の提案	6		

I 緒 言

受益地の水利用計画に合致した合理的な水管理を行うために、全国各地の幹線水路のパイプライン化が進められて久しい。さらに時代は遷移し、近年の農地利用集積、水田畑作の進展、高温障害への対応などの営農変化に伴って用水需要が変化しつつある。そのために、多くの送配水パイプラインシステムは当初の水利用計画との齟齬を来し、難しい水管理を強いられている。用水需要に弾力的に対応する方法の一つとして、中間調整池の新設やため池、地下水などの既存水源を再活用した送配水パイプラインシステムへの更新を検討することが考えられる。送配水パイプラインシステムの設計、運用管理には、管内圧力水頭や管内平均流速の制御が重要であり、これらの検討には数値解析の果たす役割が大きい。送配水パイプラインシステム内におけるバルブやポンプの操作に伴う急激な水理過渡現象を把握するためには、弾性体モデルによる数値解析が行われる。しかし、この手法はコンピュータのCPUの使用時間が長いものであるため、中間調整池や既存水源と接続した送配水パイプラインシステムの流量輸送の緩やかな過渡現象を長時間にわたって解析するには不向きである(内藤ら, 1983)。鬼塚(1971)は緩やかな過渡水理現象の数値解析手法として剛性モデル理論による非定常流解析が有効であることを明らかにした。しかしながら、現在、この手法は十分に活用されていない。その理由として、送配水パイプラインシステムの状態方程式を求めることが非常に面倒であることが挙げられる(鬼塚, 1998)。以下に、この面

倒な作業を解決するために既往の研究において行われた成果を整理してみる。

剛性モデル理論による非定常流解析とは、管路系に発生する緩やかな非定常水理現象であるサージ現象を、水の圧縮性や管体の弾性変形を考慮しない剛体水柱理論で近似できる範囲の現象として定式化し、数値解析するものである(鬼塚, 1981)。剛性モデル理論による非定常流解析として、接続解析(島田, 1991)と閉路解析(鬼塚, 1977)が知られている。

接続解析は、パイプラインシステムの流量と運動量の連続性を表す1階の連立常微分方程式(システム方程式と呼ぶ)から状態方程式を導き、ルンゲ・クッタ法などによって時間積分を行う手法である。内藤ら(1983)は、パイプラインシステム内のある水槽から他の水槽まで運動方程式を管の接続状態に従って足し合わせて経路を消去する操作(消去経路と呼ぶ)を提案した。これは、操作後の経路の数が独立変数の数と等しくなることを利用して、状態方程式の独立変数を決定し、足し合わせた経路の情報を元に状態方程式を導出する方法である。しかし、大規模なパイプラインシステムでは接続情報が複雑になるため、そもそも消去経路の操作を技術者が行うこと自体が煩雑な作業であり、機械的な操作が必要とされた。そこで、島田(1991)は、パイプラインシステムでは流量の従属変数の個数が流量の境界条件の個数と等しい特性を利用して、独立変数を決定する方法を提案し、流量の独立変数と接続情報から状態方程式を導出する方法を提案した。

他方、閉路解析は接続解析よりも技巧的な作業が必要である。つまり、システム方程式の導出には、エネルギー基準面との仮想的な経路をパイプラインシステムに追加する作業が必要である。しかし、パイプラインシステムをモデル化したシステムグラフについて全域木と補木の辺の情報を得ることができれば、自動的に流量の独

水利工学研究領域 水路システム担当

平成23年11月4日受理

キーワード: パイプライン, グラフ理論, 状態方程式, 非定常流解析, Ternary network flow 法

立変数と従属変数が判明し、独立変数と同じ数の状態方程式が得られる利点がある。ただし、大規模なパイプラインシステムでは閉路情報を得る作業は煩雑になり、この解析手法を技術者が利用しにくい状況であった。例えば、パイプラインシステムにおいて末端バルブを完全閉鎖するときの過渡現象を解析する際には、バルブ開度を絞った際に stiff な状態方程式になる問題があるため、末端バルブを完全閉鎖する直前に、末端バルブと上流側の節点間の接続を切断する対処方法が行われる(内藤ら, 1983; 島田, 1988)。閉路解析では、接続関係を変更したことに伴い閉路情報を更新する作業が必要であった。本稿では、全域木探索法と Ternary network flow 法 (Doris and Stephan, 1981) を用いて閉路情報を素早く得る方法を提案して、技術者が剛性モデル理論による閉路解析を容易に解析できるように整備することを目的とした。

II 剛性モデル理論の概説

剛性モデル理論についての説明として、単一管路における運動方程式の導出例から始めることにする。

水の圧縮性と管体の弾性変形を無視すると、Fig.1 に示すように、上流端と下流端の断面の位置が i と j である単一管路 k の運動方程式は次式になる (鬼塚, 1982)。

$$\frac{l}{g} \dot{v}_k = \left(\frac{p_i}{\omega} + z_i + \frac{v_i^2}{2g} \right) - \left(\frac{p_j}{\omega} + z_j + \frac{v_j^2}{2g} \right) - f_k \frac{l_j}{d_j} \frac{v_j^2}{2g} \quad (1)$$

ただし、 v_k のドットは単一管路 k の流速についての時間微分であることを表している。また、 l_k は管路延長、 g は重力加速度、 p_i と p_j は圧力強度、 ω は水の単位重量 ($\omega = \rho g$)、 z_i と z_j は基準面から上流端と下流端までの管軸高さ、 v_k は管内平均流速、 f_k は摩擦損失係数、 d_k は管の直径である。

上流端 i と下流端 j の地点における全水頭 h_i と h_j は (2) と (3) 式で表されるので、(1) 式は (4) 式に書き直すことができる。

$$h_i = p_i + z_i + \frac{v_i^2}{2g} \quad (2)$$

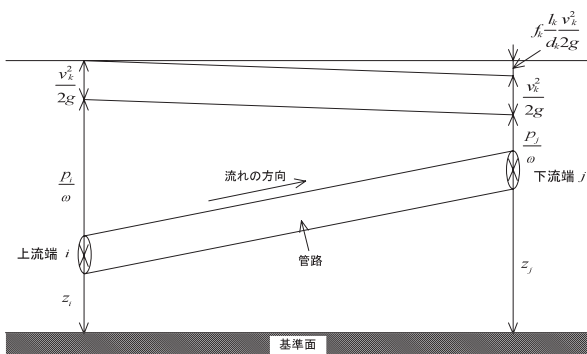


Fig.1 単一管路におけるエネルギーの模式図
Schema of various energies in single pipeline

$$h_j = p_j + z_j + \frac{v_j^2}{2g} \quad (3)$$

$$\frac{l}{g} \dot{v} = (h_i - h_j) - f_k \frac{l_k}{d_k} \frac{v_k^2}{2g} \quad (4)$$

分岐がなく管路断面積が変化する複数管路は、管径の異なる単一管路が直列に接続したパイプラインシステムであるため、システム方程式は、各単一管路において異なる流速 v_k で表記せずに一定である流量 q_k を用いれば表記が簡単になる。さらに、管路内の流れが逆向きに流れる場合にも対処するために、流れの向きを特定の方向に決めておき、その方向を正とし、逆方向を負としておくと、(5) 式で表すことができる。

$$\frac{l}{A_k g} \dot{q}_k = (h_i - h_j) - f_k \frac{l_k}{d_k} \frac{|q_k| q_k}{2g A_k^2} \quad (5)$$

ここで、 q_k のドットは単一管路 k の流量 q についての時間微分であることを表している。また、 A_k は管路断面の面積を表している。

さらに、単一管路 k の慣性定数を L_k 、流量抵抗係数をダルシー・ワイズバッハの式に基づいて K_k とすると、(5) 式は (6) 式に変形できる。

$$L_k \dot{q}_k = (h_i - h_j) - K_k |q_k| q_k \quad (6)$$

$$L_k = \frac{l_k}{A_k g}, \quad K_k = \frac{f_k l_k}{2g d_k A_k^2} \quad (7)$$

パイプラインシステムの非定常流解析では、システム内の節点間や節点と境界条件を表す点との間の各単一管路区間について水の慣性効果を表す運動方程式を立て、各々の節点における流量の連続式を組み合わせることによってシステム方程式を作成する。

浜口・鬼塚 (1980) は、末端バルブの開閉操作による過渡現象について、剛性モデルと水の圧縮性や管体の弾性変形を考慮して弾性体と見なした弾性体モデルとについて比較を行っており、剛性モデルは、弾性体モデルよりも非常に大きくて急激な圧力上昇が発生するために圧力変動については慎重な取り扱いが必要であるが、流量変動については波動モデルによる結果の平均値となるために適用範囲が高いことを明らかにしている。よって、剛性モデルは送配水パイプラインシステムの流量輸送の穏やかな過渡現象を解析するのに利用できる。

III 閉路解析の概説と問題点の整理

剛性モデル・閉路解析において、パイプラインシステムの接続関係をシステムグラフとして見た立場から全域木と補木の辺を指定できれば、容易に状態方程式を導出できることを具体例を挙げて説明する。手順として、はじめにグラフ理論に基づいてパイプラインシステムを複数の閉路で表す方法を説明する。次に、システムグラフ

の辺を全域木と補木に分解すれば、接続情報と閉路情報が得られることを説明する。最後に、接続情報と閉路情報を利用した流量連続とエネルギー連続条件から状態方程式を導出する。この導出過程を通じて、全域木と補木の辺を指定することをプログラムにより支援することが必要であることを説明する。

1 パイプラインシステムのモデル化

パイプラインシステムの接続情報や閉路情報の構造はグラフ理論に基づく回路図で表すことができる(鬼塚, 1998)。回路図は節点とそれらを連結する辺で構成されており、1方向の辺で構成されるグラフを有向グラフという。具体的にFig.2のようなパイプラインシステムをモデル化して、以後、状態方程式の導出に利用する。ここで、水頭の基準面を記号Dで表し、既知の水頭境界を H_0 , H_5 , 中間調整池の水頭を h_1 , ファームポンドの水頭 h_4 , 既知の流量境界を q_{10} , その他の q_i を管の流量とした。

パイプラインシステムを有向グラフで表したシステムグラフはFig.3である。節点は、①ファームポンドや中間調整池など未知の水頭をもつ水槽、②既知の流量境界、③既知の水頭境界を表す境界条件を含む。このシステムグラフを作図するには、境界条件となる節点と基準面Dとを辺でつなげる作業が必要である。この作業によって、グラフは複数の閉路(システムグラフ内のある節点を出発して幾つかの節点を経由して、出発した節点に戻った

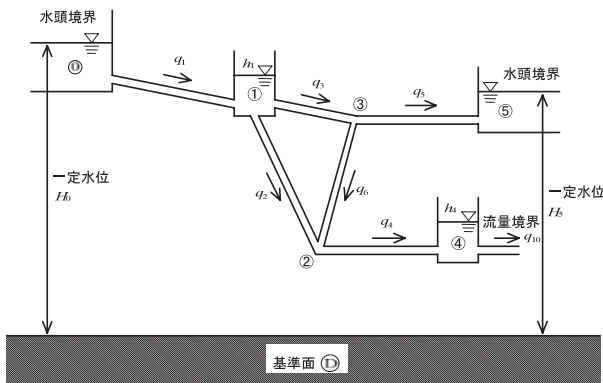


Fig.2 パイプラインシステム例
Example of pipeline system

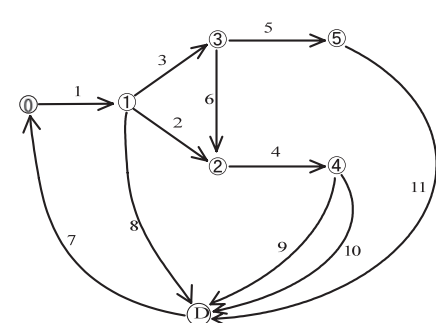


Fig.3 パイプラインシステムのシステムグラフ
System graph of pipeline system

時の経路)で構成されることになる。

システムグラフは全域木の辺と補木の辺に分解することができる。ここで、全域木とは、閉路を1つも持たないが、すべての点に接続している辺の組み合わせである。他方、補木とは全域木の辺に追加することによって閉路を作ることができる辺の集合である。この補木の辺の数は、システムグラフを構成する辺の数を n 本、節点の数を m 個とすると、 $(n - m + 1)$ 本である。

ここで、補木の辺を $(n - m + 1)$ 本だけ指定して、それぞれを一本だけ含む閉路を考えてみる。Fig.3では、辺の数11本、節点の数7個であるので、補木の辺の数は5本である。全域木を辺 {3, 4, 7, 8, 9, 11} としたとき、補木は辺 {1, 2, 5, 6, 10} になり、補木の辺を1本だけ含むように閉路を選ぶと以下の通りになる。ここで、負号は全域木の辺の向きが閉路の向きと逆方向であることを示している。Fig.4には、全域木と補木の辺をそれぞれ点線と実線で描画し、閉路を構成する辺の経路を細い実線で記している。

- 補木の辺1を指定した場合の閉路1: {補木1, 全域木8, 全域木7}
- 補木の辺2を指定した場合の閉路2: {補木2, 全域木4, 全域木9, -(全域木8)}
- 補木の辺5を指定した場合の閉路3: {補木5, 全域木11, -(全域木8), 全域木3}
- 補木の辺6を指定した場合の閉路4: {補木6, 全域木4, 全域木9, -(全域木8), 全域木3}
- 補木の辺10を指定した場合の閉路5: {補木10, -(全域木9)}

剛性モデル・閉路解析では、補木の辺を1本だけ含むように全域木の辺と接続した閉路においてエネルギーが保存されていることを利用して運動方程式を立て、各々の節点や境界条件を表す点における流量の連続式を組み合わせることによってシステム方程式を作成する。よって、システム方程式を構成するある1つの運動方程式では、流量の独立変数は閉路に1本だけ含まれる補木の辺の流量とする必要がある。つまり、補木の辺と全域木の辺を決定することは、辺に割り当てる流量をそれぞれ独立変数と従属変数とに指定していることに他ならない。

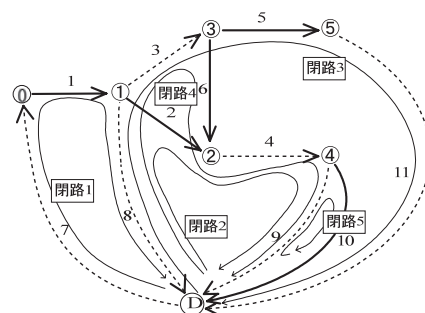


Fig.4 全域木と補木の辺の決定によって得られた閉路情報
Closed circuit information got by the decision of edges of spanning tree and cotree

補木の辺に指定する際には、節点から基準面 D へ接続するように追加した辺については、指定方法が様々であるので、以下に簡条書きすることに注意が必要である。

①未知の水頭をもつ水槽から基準面 D へ接続するように追加した辺は全域木の辺にする。

なぜなら、この辺は水槽における流量の連続性を満たすために、水槽の貯留量変化を流量と見なすことによって得られた辺である。この流量は水槽の水位によって変化するため、独立変数になり得ないためである。

②既知の流量境界を表すように基準面 D へ追加した辺は必ず補木の辺にする。

なぜなら、既知の流量境界は取り出し流量を与える必要があるため、この流量は従属変数には成り得ないためである。

③既知の水頭境界から基準面 D へ接続するように追加した辺は全域木の辺にする。

なぜなら、既知の水頭境界を表す節点における流入量は、流出量によって連続条件が決まるためである。

2 基本閉路行列の定義

補木の辺を1本しか含まない閉路を基本閉路という。よって、補木の辺の数と基本閉路の数は等しい。Fig.2において補木の辺 {1, 2, 5, 6, 10} を選択して行列の成分 b_{ij} の値を次のとおりに分類すると、(8) 式の基本閉路行列 \mathbf{B} を作成できる。

$$b_{ij} = \begin{cases} 1 \cdots \text{辺 } j \text{ が閉路 } i \text{ に含まれ、かつ、同じ向きの場合。} \\ -1 \cdots \text{辺 } j \text{ が閉路 } i \text{ に含まれ、かつ、逆向きの場合。} \\ 0 \cdots \text{辺 } j \text{ が閉路 } i \text{ に含まれない場合。} \end{cases}$$

	辺 3	4	7	8	9	11	1	2	5	6	10	
$\mathbf{B} =$	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	閉路1
	0	1	0	-1	1	0	0	1	0	0	0	2
	1	0	0	-1	0	1	0	0	1	0	0	3
	1	1	0	-1	1	0	0	0	0	1	0	4
	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	1	5
	B_i						B_c					

..... (8)

ここで、 \mathbf{B} は行方向 (横方向) に全域木の辺を若い番号順に並べ、次に、補木の辺を若い番号順に並べ替えている。さらに、 \mathbf{B} の列方向 (縦方向) の大きさは基本閉路の個数であり、その並べ方は基本閉路に含まれる補木の辺の若い順である。つまり、 \mathbf{B} を構成する木の部分を行列 B_i 、補木の部分を行列 B_c で表すと、 $\mathbf{B} = [B_i, B_c]$ で表せる。

3 基本カットセット行列の定義

B_i の転置行列をマイナスにした行列 $-B_i^T$ を全域木の辺の個数の大きさの単位行列 I に追加した行列 $\mathbf{A} = [I,$

$-B_i^T]$ は、次式である。 \mathbf{A} は基本カットセット行列と呼ばれている。基本カットセット行列の各行は個々の基本カットセットである。1つの基本カットセットは、1つのシステムグラフを2つに分離する辺の集合であり、全域木の辺を1つだけ含んでいる。 \mathbf{A} の行方向 (横方向) の順番は \mathbf{B} と同じであるが、列方向 (縦方向) は基本カットセット内に含まれる全域木の辺が若い番号順に並べている。

	辺 3	4	7	8	9	11	1	2	5	6	10	
$\mathbf{A} =$	1	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	カットセット1
	0	1	0	0	0	0	0	-1	0	-1	0	2
	0	0	1	0	0	0	-1	0	0	0	0	3
	0	0	0	1	0	0	-1	1	1	1	0	4
	0	0	0	0	1	0	0	-1	0	-1	1	5
	0	0	0	0	0	1	0	0	-1	0	0	6
	I						$-B_i^T$					

..... (9)

ここで、成分 a_{ij} の値は、以下のような意味がある。

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 \cdots \text{辺 } j \text{ が基本カットセット } i \text{ に含まれ、かつ、向きが全域木と同じである時。} \\ -1 \cdots \text{辺 } j \text{ が基本カットセット } i \text{ に含まれ、かつ、向きが全域木と反対である時。} \\ 0 \cdots \text{辺 } j \text{ が基本カットセット } i \text{ に含まれていない時。} \end{cases}$$

4 流量連続条件

状態方程式は、システムグラフの \mathbf{A} 、 \mathbf{B} を元にして、流量とエネルギーの連続性から導出される。

パイプラインシステム内の辺の流量ベクトル \mathbf{Q} は次式で表すことができる。行方向の成分の順番は \mathbf{B} と同じである。

$$\mathbf{Q} = [q_3 \quad q_4 \quad q_7 \quad q_8 \quad q_9 \quad q_{11} \quad q_1 \quad q_2 \quad q_5 \quad q_6 \quad q_{10}]$$

..... (10)

ただし、水槽1, 4と基準面 D とをつなぐ辺の流量 q_8 , q_9 は、貯留変化量であるので、水槽1, 4の水面の面積を A_1 , A_4 とし、未知の水頭の記号 h の上のドットは時間微分を表すと、次式になる。

$$\left. \begin{aligned} q_8 &= A_1 \dot{h}_1 \\ q_9 &= A_4 \dot{h}_4 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (11)$$

よって、流量ベクトル \mathbf{Q} は、

$$\mathbf{Q} = [q_3 \quad q_4 \quad q_7 \quad A_1 \dot{h}_1 \quad A_4 \dot{h}_4 \quad q_{11} \quad q_1 \quad q_2 \quad q_5 \quad q_6 \quad q_{10}]$$

..... (12)

流量の連続条件は、 $\mathbf{A}\mathbf{Q}^T = 0$ であるので、以下のシステム方程式が導かれる。

$$\left. \begin{aligned} A_1 \dot{h}_1 &= q_1 - q_2 - q_5 - q_6 \\ A_4 \dot{h}_4 &= q_2 + q_6 - q_{10} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

同時に、0, 2, 3 および 5 の節点における流量条件が導かれる。

$$\left. \begin{aligned} q_3 &= q_5 + q_6 \\ q_4 &= q_2 + q_6 \\ q_7 &= q_1 \\ q_{11} &= q_5 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

(13) 式を行列形式に書き直すと次式になる。

$$\begin{bmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{h}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{A_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{A_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 - q_2 - q_5 - q_6 \\ q_2 + q_6 - q_{10} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (15)$$

5 エネルギー連続条件

損失水頭ベクトル $\Delta \mathbf{H}$ は次式で表すことができる。ただし、行方向の成分の順番は \mathbf{B} と同じである。

$$\Delta \mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_1 - h_3 & h_2 - h_4 & -H_0 & h_1 & h_4 & H_5 & H_0 - h_1 \\ h_1 - h_2 & h_3 - H_5 & h_3 - h_2 & h_4 - 0 \end{bmatrix} \dots\dots (16)$$

節点 i と節点 j における単一管路 k についての運動方程式は II 章の (6) 式と同じ式で表されるので、損失水頭ベクトルは次式になる。

$$\Delta \mathbf{H} = \begin{bmatrix} L_3 \dot{q}_3 + K_3 |q_3| q_3 \\ L_4 \dot{q}_4 + K_4 |q_4| q_4 \\ -H_0 \\ h_1 \\ h_4 \\ H_5 \\ L_1 \dot{q}_1 + K_1 |q_1| q_1 \\ L_2 \dot{q}_2 + K_2 |q_2| q_2 \\ L_5 \dot{q}_5 + K_5 |q_5| q_5 \\ L_6 \dot{q}_6 + K_6 |q_6| q_6 \\ h_4 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (17)$$

エネルギーの連続条件 $\mathbf{B} \Delta \mathbf{H}^T = 0$ における従属変数の流量に (16) 式を代入すると、独立変数の流量について、以下のシステム方程式が得られる。

$$\begin{bmatrix} L_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_2 + L_4 & 0 & L_4 \\ 0 & 0 & L_3 + L_5 & L_3 \\ 0 & L_4 & L_3 & L_3 + L_4 + L_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \dot{q}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_0 - h_1 \\ h_1 - h_4 \\ h_1 - H_5 \\ h_1 - h_4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} K'_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K'_2 + K'_4 & 0 & K'_4 \\ 0 & 0 & K'_3 + K'_5 & K'_3 \\ 0 & K'_4 & K'_3 & K'_3 + K'_4 + K'_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_5 \\ q_6 \end{bmatrix} \dots (18)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} K'_1 &= K_1 |q_1| \\ K'_2 &= K_2 |q_2| \\ K'_3 &= K_3 |q_3| = K_3 |q_5 + q_6| \\ K'_4 &= K_4 |q_4| = K_4 |q_2 + q_6| \\ K'_5 &= K_5 |q_5| \\ K'_6 &= K_6 |q_6| \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (19)$$

(18) 式の左辺の L_i ($i=1, 2, 5, 6$) で構成される行列を \mathbf{L} 行列と呼ぶことにする。

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_2 + L_4 & 0 & L_4 \\ 0 & 0 & L_3 + L_5 & L_3 \\ 0 & L_4 & L_3 & L_3 + L_4 + L_6 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (20)$$

\mathbf{L} 行列の逆行列 \mathbf{L}^{-1} を (18) 式の両辺にかけると一般的な形式は次式になる。

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_5 \\ \dot{q}_6 \end{bmatrix} = \mathbf{L}^{-1} \begin{bmatrix} H_0 - h_1 \\ h_1 - h_4 \\ h_1 - H_5 \\ h_1 - h_4 \end{bmatrix} - \mathbf{L}^{-1} \begin{bmatrix} K'_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K'_2 + K'_4 & 0 & K'_4 \\ 0 & 0 & K'_3 + K'_5 & K'_3 \\ 0 & K'_4 & K'_3 & K'_3 + K'_4 + K'_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_5 \\ q_6 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (21)$$

6 状態方程式の導出

したがって、導出した (15) 式と (21) 式をまとめた (31) 式は、力学系の状態方程式表示と呼ばれる現代制御理論における標準的な形式である。

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{h}_4 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{A_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{A_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 - q_2 - q_5 - q_6 \\ q_2 + q_6 - q_{10} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_5 \\ \dot{q}_6 \end{bmatrix} &= \mathbf{L}^{-1} \begin{bmatrix} H_0 - h_1 \\ h_1 - h_4 \\ h_1 - H_5 \\ h_1 - h_4 \end{bmatrix} - \mathbf{L}^{-1} \begin{bmatrix} K'_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K'_2 + K'_4 & 0 & K'_4 \\ 0 & 0 & K'_3 + K'_5 & K'_3 \\ 0 & K'_4 & K'_3 & K'_3 + K'_4 + K'_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_5 \\ q_6 \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (22)$$

この状態方程式を時間積分すれば、未知の水頭 h_1, h_4 と流量の独立変数 q_1, q_2, q_5 および q_6 が求まる。さらに、これらの流量を (14) 式に代入すれば、従属変数 q_3, q_4, q_7 および q_{11} が求まる。よって、パイプラインシステムの全ての状態を求めることができる。このように、閉路解析ではシステムグラフ内の辺を全域木と補木とに分離することができれば、流量とエネルギーの連続条件を表したシステム方程式から状態方程式を導出することができる。ただし、状態方程式を導出する過程は、代入や移項などの数式処理が行われており、接続関係が複雑なパイプラインシステムの例に適用する場合には解析者の負担が大きくなる。そこで、これらの数式処理をプログラムによって自動化すると、本手法を容易に適用することができるようになるが、これについては同じ技報 (田中ら, 2012) に詳細に記す。

7 全域木と補木の辺の決定支援の必要性

本稿において、これまで状態方程式が容易に導出できた理由は、全域木と補木の辺を分離することが流量の独立変数を選定することであり、あらかじめ全域木と補木の辺が指定されていたためである。

全域木と補木の辺を指定する際の条件をまとめると、以下のとおりである。

- ① 3種類の境界（未知の水頭をもつ自由境界、既知の流量境界、既知の水頭境界）と基準面 D は辺で連結する。
- ② 未知の水頭をもつ水槽から基準面 D への辺は、全域木の辺に含める。
- ③ 既知の流量境界から基準面 D への辺は、補木の辺に含める。
- ④ 既知の水頭境界から基準面 D への辺は、全域木の辺に含める。
- ⑤ 補木の辺の数は、辺の数を n 本、節点の数を m 個とすると、 $(n - m + 1)$ 本である。
- ⑥ 補木の辺の数と基本閉路の数は等しい。

この条件を満たして全域木と補木の辺に指定できる組み合わせは複数ある。例えば、1節で指定した異なる辺の番号 $\{1, 3, 4, 6, 10\}$ や $\{1, 2, 3, 6, 10\}$ などの組み合わせが補木の辺として指定することができる。よって、補木の辺の指定は、ある程度自由度のある探索であると言える。しかし、大規模なパイプラインシステムにおいては、技術者が条件②～④はチェックできても、 $(n - m + 1)$ 本の補木の辺を選び、基本閉路を探索する作業は煩雑である。そのため、条件①～④の段階まで入力したデータから、条件⑤と⑥を素早く解決できるように全域木と補木の辺の指定を支援する探索アルゴリズムが必要である。

IV 全域木と補木の辺の決定支援方法の提案

Ⅲ章7節においてまとめた全域木と補木の辺を指定する際の条件のうち①～④は機械的な作業であるので、プログラムにてデータの入力支援をするように実装することもできるが、煩雑な処理にプログラムによる支援が必要とされている条件⑤と⑥に焦点を当てたいので、条件①～④は技術者によって入力されたデータがあることを前提条件とする。この章では、条件⑤と⑥を満たして全域木と補木の辺を指定することを支援するプログラムについて提案する。

1 方針

条件⑤、⑥とは、補木の辺を1本だけ含む閉路を $(n - m + 1)$ 本探索することである。この条件を満たす補木の辺の組み合わせは複数あるが、大規模なパイプラインシステムをモデル化したシステムグラフから補木の辺を1本だけ含む閉路を指定することは煩雑な作業であ

る。そこで、補木の辺であるかの判断は条件②～④を満たすように行ったデータ入力作業までを行い、残りの補木の判断は探索プログラムによって解決したい。

辺の数が n 本、節点の数が m 個のシステムグラフには、 $(n - m + 1)$ 本の補木の辺がある。よって、システムグラフは補木の辺と全域木の辺で構成されているので、全域木の辺の数は $(m - 1)$ 本である。この時点で、システムグラフ内のどの辺が補木または全域木の辺であるかについては指定していないとする。

このシステムグラフに、未知の水頭を持つ自由境界 m_1 個、既知の流量境界 m_2 個、既知の水頭境界 m_3 個を設定した場合に条件②～④を満たすと、 $(n - m + 1 - m_2)$ 本の補木の辺と $(m - 1 - m_1 - m_3)$ 本の全域木の辺が指定されていない状態である。指定されているのは、補木の辺 m_2 本と全域木の辺 $(m_1 + m_3)$ 本のみである。この指定を初期の入力データとする。

補木の決定支援プログラムは以下の2つのアルゴリズムを繰り返して、初期の入力データを満たすようにする。

- ① 全域木探索：システムグラフの辺を全域木と補木に分解する。
- ② 閉路解決：全域木探索によって得られた補木の辺を1本だけ含む閉路を探索する。

2 全域木探索

全域木は、すべての節点がつながっており、かつ、閉路を1つも持たない辺の組み合わせである。よって、全域木探索とは、ある節点から到達可能なすべての節点を探索することである（例えば、猪股・益崎，1994）。全域木探索のアルゴリズムとしては、深さ優先探索（depth-first search, 以下、DFS と呼ぶ）と幅優先探索（breadth-first search, 以下、BFS と呼ぶ）がある。どちらも、すべての接点を探索して、形は異なるが全域木を得ることができるので、DFS のみについてアルゴリズムを説明することにする。

着目している節点につながった複数の辺について、それらの辺の反対側にあるすべての節点を「子」と呼び、ある節点についてすべての子を得る操作を「展開」と呼ぶことにすると、DFS は、ある節点を展開して得た子から1個選択し、それをさらに展開することを繰り返す探索方法である。Fig.5 に示したシステムグラフを例に探索順序を説明する。

はじめに、節点0を探索開始の節点とする。ある節点を展開した子とつながる辺の番号が若い方を選択する方針で探索を続けると、ひとまず節点 $\{0, 1, 2, 4, 6\}$ の順に探索できる (Fig.6(a))。Fig.6 中の実線が補木の辺であり、点線が全域木の辺である。次に節点6を展開した場合、子の一つは節点0であるが、節点0を選択すると閉路を持つことになるので、節点5を選択しなければならない。よって、探索した節点の順番は $\{0, 1, 2, 4, 6, 5, 3\}$ となり、探索の際に通過した辺が全域木と

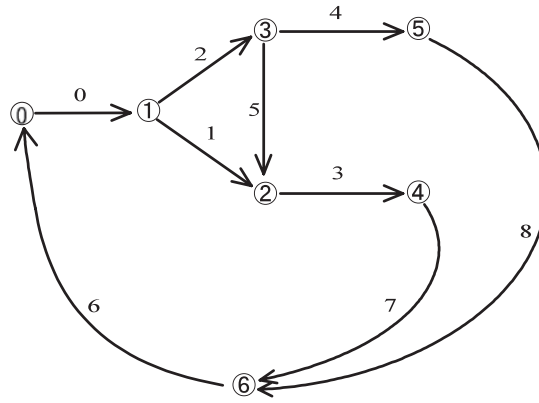


Fig.5 システムグラフの例
Example of a system graph

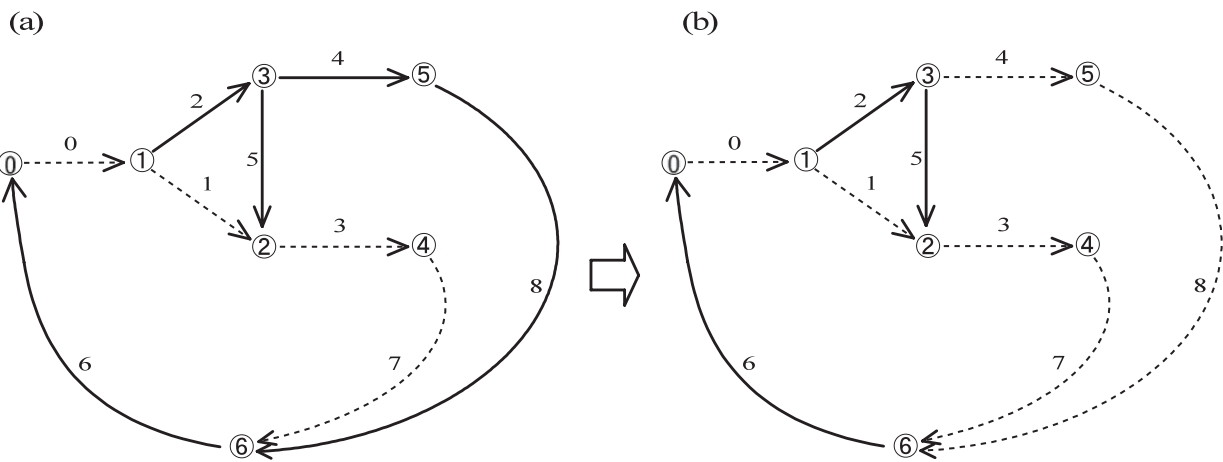


Fig.6 DFSによる節点の選択順序
Selection order of the node by DFS

なる。したがって、全域木は辺 $\{0, 1, 3, 4, 7, 8\}$ である (Fig.6(b))。システムグラフのすべての辺から全域木の辺を差し引けば、補木が辺 $\{2, 5, 6\}$ と得られる。

全域木探索では補木の辺を指定することが可能である。それは、全域木探索の際に指定の辺は通過しないという制限を与えることによって可能になる。例えば、辺 1 を通過しないと指定した場合、探索した節点の順番は $\{0, 1, 3, 2, 4, 6, 5\}$ になる。得られた全域木は辺 $\{0, 2, 3, 5, 7, 8\}$ 、補木は辺 $\{1, 4, 6\}$ である。ただし、子が1つしかない場合は、その間の辺は通過しないという制限を指定すると節点が孤立してしまうために、補木の辺として指定できない。他方、全域木探索では全域木の辺を指定しても、必ずしも満足するとは限らない。なぜなら、それは指定の辺を必ず通過しなければならないという制限を与えることであるが、全域木の辺として指定された辺が探索した最後の節点の子に属していた場合は、指定を満たすことが出来ないためである。そこで、全域木の辺の指定を完全に満たすために、本章3節の閉路解決と連携してアルゴリズムを構築した。その方法は本章4節で説明する。

3 閉路解決

全域木探索によって補木の辺が得られた時点では、基本閉路を構成する辺の経路は見つけれられていなかった。この閉路情報を得るために、補木の辺が1本だけ含まれる閉路を探索することが本節で用いる Ternary network flow 法である。この方法は network flow 理論と balanced ternary number に基づく手法である。ここで、network flow 理論とは、システムグラフにおいて flow という数値をある節点に割り振った場合に、各辺にどのように伝播するか、また、伝播がどのような保存則に従うか、などを規定した理論である。また、balanced ternary number (以下、b.t.n と呼ぶ) とは三進数の一種で、各桁において $-1, 0, 1$ のいずれかの値をとる。例えば、b.t.n と十進数との対応を 0 から 10 まで Table 1 に示す。ここで、 -1 は $\bar{1}$ と表記した。

以下、Ternary network flow 法の手順を箇条書きにて記す (Doris and Stephan, 1981)。

- 手順① すべての辺の flow に 0 を割り当てて初期化する。
- 手順② 補木の中の辺には順番を付けておく。 i 番目 ($i = 1, 2, 3 \dots$) の補木の辺の始点に -3^{i-1}

Table 1 b.t.n と十進数の関係
Relationship between decimal number and b.t.n

十進数	変換式	b.t.n
0	0×3^0	0
1	1×3^0	1
2	$1 \times 3^1 - 1 \times 3^0$	1 <u>1</u>
3	$1 \times 3^1 + 0 \times 3^0$	1 0
4	$1 \times 3^1 + 1 \times 3^0$	1 1
5	$1 \times 3^2 - 1 \times 3^1 - 1 \times 3^0$	1 <u>1</u> <u>1</u>
6	$1 \times 3^2 - 1 \times 3^1 + 0 \times 3^0$	1 <u>1</u> 0
7	$1 \times 3^2 - 1 \times 3^1 + 1 \times 3^0$	1 <u>1</u> 1
8	$1 \times 3^2 + 0 \times 3^1 - 1 \times 3^0$	1 0 <u>1</u>
9	$1 \times 3^2 + 0 \times 3^1 + 0 \times 3^0$	1 0 0
10	$1 \times 3^2 + 0 \times 3^1 + 1 \times 3^0$	1 0 1

を割り当て、終点に 3^{i-1} を割り当てる。負号は節点からの出ていく量であることを表している。補木の辺すべてについて同様に割り当てる。

手順③ すべての節点における flow の合計が 0 になるように、全域木の辺にも flow を割り当てて調整する。

手順④ 全域木の辺に割り当てられた flow の値を b.t.n に変換する。この i 桁目の値 c_i は全域木の辺と補木の辺との関係を示している。つまり、flow が割り当てられた全域木の辺は、 i 番目の補木の辺との間に以下の関係がある。ただし、 3^0 の位を 1 桁目、 3^1 の位を 2 桁目、 3^2 の位を 3 桁目として右から桁数を数えることにする。

$$c_i \begin{cases} 1 \cdots i \text{ 番目の補木の辺が含まれた基本閉路} \\ \text{に含まれ、かつ、同じ向きである。} \\ -1 \cdots i \text{ 番目の補木の辺が含まれた基本閉路} \\ \text{に含まれ、かつ、逆向きである。} \\ 0 \cdots i \text{ 番目の補木の辺が含まれた基本閉路} \\ \text{に含まれていない。} \end{cases}$$

例えば、本章 2 節 Fig.5 に対して全域木探索で得られた結果、全域木の辺 {0, 1, 3, 4, 7, 8} と補木の辺 {2, 5, 6} について、Ternary network flow 法を適用した。手順②、③を Fig.7 に図示した。図中の四角で囲んだ数字が flow である。手順④によって得られた結果を Table 2 に整理した。Table 2 を見ると、Ⅲ章 7 節の条件②~④を満たす 3 個の基本閉路が以下の通り見つかったことが分かる。ただし、負号は全域木の辺の向きが補木の辺の向きと逆方向であることを表している。

1 番目の補木 2 \cdots

基本閉路 {-(全域木 1), -(全域木 3), 全域木 4, -(全域木 7), 全域木 8}

2 番目の補木 5 \cdots

基本閉路 {全域木 3, -(全域木 4), 全域木 7, -(全域木 8)}

3 番目の補木 6 \cdots

基本閉路 {全域木 0, 全域木 1, 全域木 3, 全域木 7}

4 補木の決定支援アルゴリズム

Ternary network flow 法による閉路の探索は、システムグラフを全域木と補木に分解することが出来れば適用することができる。全域木探索では、補木の辺を指定することが可能であったが、全域木の辺の指定を必ずしも満足することは出来なかった。これを解決する方針として、はじめはすべての辺を「全域木の辺」に指定しておき、Ⅲ章 7 節の条件②~④が指定された辺の入力データに整合する閉路が得られるまで「補木の辺」を増やしてくこ

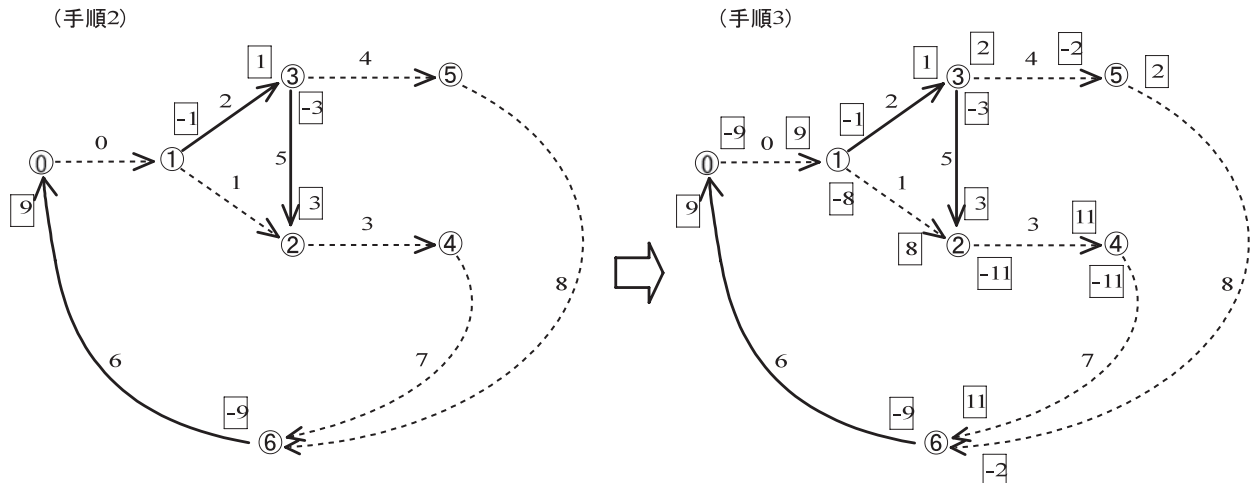


Fig.7 Ternary network flow 法における手順 2 と 3
Procedures 2 and 3 in the Ternary network flow method

Table 2 Ternary network flow 法における手順 4 の結果
Result of procedures 4 in the Ternary network flow method

全域木の辺	flow	変換式	b.t.n	補木 6	補木 5	補木 2
0	9	$1 \times 3^2 + 0 \times 3^1 + 0 \times 3^0$	1 0 0	1	0	0
1	8	$1 \times 3^2 + 0 \times 3^1 - 1 \times 3^0$	1 0 <u>1</u>	1	0	- 1
3	11	$1 \times 3^2 + 1 \times 3^1 - 1 \times 3^0$	1 1 <u>1</u>	1	1	- 1
4	- 2	$- 1 \times 3^1 + 1 \times 3^0$	<u>1</u> 1	0	- 1	1
7	11	$1 \times 3^2 + 1 \times 3^1 - 1 \times 3^0$	1 1 <u>1</u>	1	1	- 1
8	- 2	$- 1 \times 3^1 + 1 \times 3^0$	<u>1</u> 1	0	- 1	1

とによって、全域木の辺の指定を満足するようにする。そのアルゴリズムのフローチャートを Fig.8 に示し、以下、ステップごとに説明する。

ステップ①：入力ファイルからデータを読み込む。その際に、辺の指定が「全域木の辺」、「補木の辺」、または「どちらも指定しない」分類される。Ⅲ章 7 節の条件②～④が指定された辺の入力データは、境界条件と基準面との間の辺のみに全域木か補木かの指定がされ、その他の辺はどちらも指定されていない。

ステップ②：システムグラフに含まれる辺について 1 本ずつ補木となりうるか検討を行う。その際、辺の番号が若い順から補木の辺の候補とする。

ステップ③：システムグラフ内のすべての節点と辺の属性を初期化する。節点の属性は、全域木探索において探索済みかどうかのフラグを未完にし、閉路解決において使用する flow を 0 にする。辺の属性は、節点同様に flow を 0 とし、入力データにおいて指定されていない辺は「全域木の辺」と指定して初期化する。

ステップ④：全域木探索を行う。辺の指定が「補木の辺」であった場合、指定の辺は通過しないという制限を与えて全域木探索を行い、全域木を得る。

ステップ⑤：システムグラフから全域木を差し引くことによって、補木を得る。

ステップ⑥：得られた補木の辺を用いて、補木の辺を一つだけ含む閉路を構成する辺の経路を探索する。

ステップ⑦：入力データに基づく辺の指定と本アルゴリズムによって得られた辺の状態が、一致するかどうか確認する。一致した場合は、適切な全域木と補木が得られる。

ステップ⑧：妥当な閉路が得られなかった場合、検討した辺 $i - 1$ は補木の辺として適切でなかつ

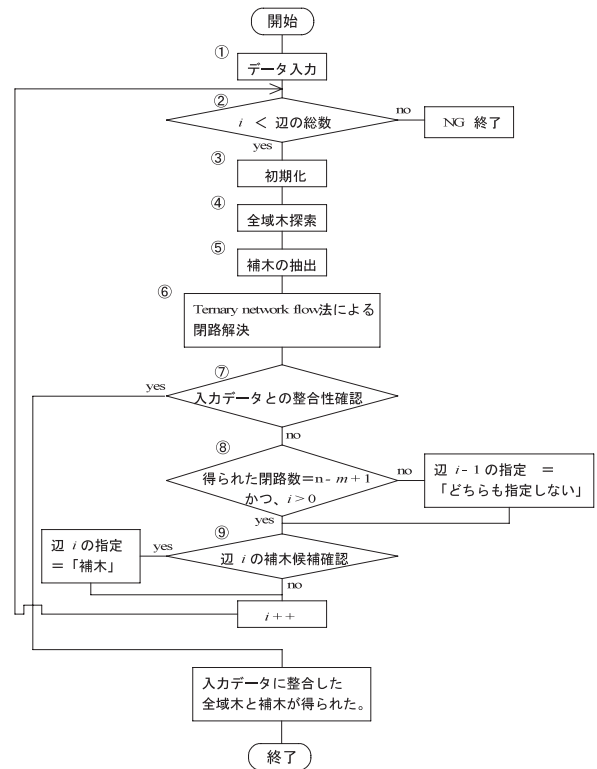


Fig.8 全域木と補木の決定支援アルゴリズムのフローチャート
Flowchart of the algorithm which supports that a spanning tree and cotree are designated

た可能性があるため、「どちらでもない」という指定に変更する。他方、補木の辺として良い場合はそのまましておく。

ステップ⑨：次に検討する辺 i を選び、それが補木に含める辺としての以下の条件を満たしていれば、「補木の辺」と指定する。

条件①：始点と終点が「補木の辺」でない辺に自身を除き最低 1 本つながっている。

条件②：入力データにおいて「全域木の辺」として指定されていない。

ステップ①から⑨までを入力データの辺の指定と整合するまで繰り返す。

5 解析例

前節で提案したアルゴリズムの動作を確認する。確認することは、全域木の辺について一部を入力データとして指定した場合に、この指定を満たした全域木と補木の辺の分離ができて、最終的に閉路情報を得ることができるかを試みることである。Fig.5のシステムグラフにFig.9に記したパイプラインシステムの物理的な条件を適用する。Ⅲ章7節の条件①～④を満たすように入力データを作成すると、節点0, 4および5は既知の水頭境界を表す点なので、これらと基準面Dとを結ぶ辺{6, 7, 8}は全域木の辺として指定することにする。

本章4節のアルゴリズムに従って、入力データにおける辺の指定と一致する閉路情報を得るまでの過程について、探索の手順を以下に説明する。

まず、補木の候補として番号が最も若い辺0を補木の辺とする。よって、辺0以外の辺はすべて全域木の辺とする。節点0を起点として深さ優先探索に基づく全域木探索を行うと、辺0は補木の辺なので通過しない。展開した子につながる辺の番号が若い方を選択する方針で探索を続けると、全域木の辺は{6, 7, 3, 1, 2, 4}、補木の辺は{0, 5, 8}となる。入力データでは、辺8を全域木の辺として指定していたが、探索の結果では補木の辺となってしまったので、この場合は入力データを満足する結果ではない。

次に、辺0は補木の辺のままに、辺1も補木の辺に追加する。節点0を起点として深さ優先探索を行うと、全域木の辺は{6, 7, 3, 5, 2, 4}、補木の辺は{0, 1, 8}となる。やはり、辺8は補木の辺となる結果が得られ、またも入力データを満たすことができなかつた。

次に、辺0と1は補木の辺のままに、新たに辺2を補木の辺に追加したいのだが、辺2は本章4節のステップ⑨における条件①を満たさないで、補木の辺にできない。よって、次の順番である辺3を補木の辺に追加して、節点0から深さ優先探索を行うと、全域木の辺は{6, 7, 8, 4, 2, 5}、補木の辺は{0, 1, 3}となる。この探索結果は、入力データで指定した全域木の辺{6, 7, 8}を満足している。その時の基本閉路行列Bは、Ternary

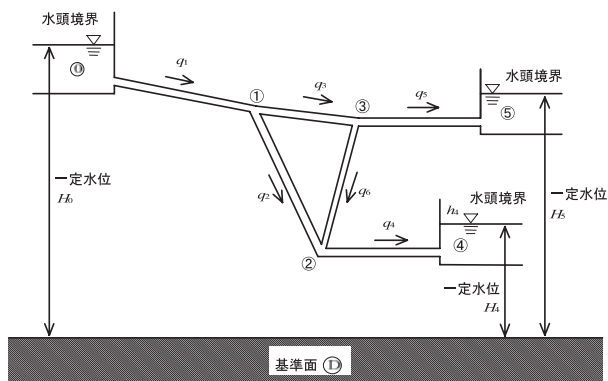


Fig.9 パイプラインシステム例2
Example of pipeline system 2

network flow 法による閉路探索によって次式の通り求められる。

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (23)$$

なお、基本カットセット行列Aは、(9)式のように基本閉路行列Bから変形して容易に求めることができる。

V 結 言

本稿を整理すると、以下のように要約できる。

- ①閉路解析における状態方程式の導出過程を具体例に基づいて行い、閉路情報からシステムグラフを全域木と補木とに分離できれば、流量の独立変数と従属変数が判明し、式を変形することにより状態方程式が得られることを説明した。
- ②パイプラインをモデル化したシステムグラフについて全域木と補木の辺を指定する際の条件を整理し、技術者が機械的に行える作業と繁雑で面倒な作業に分離した。後者はシステムグラフを全域木と補木とに分離する作業であり、これをプログラムで支援するように試みた。
- ③全域木探索法は、補木を指定して分離することは可能であるが、欠点として、全域木を指定しても完全に分離できない問題点があった。そこで、全域木を指定して分離できるアルゴリズムを構築することによって、システムグラフ内の境界条件における辺の指定を入力データとして与えるだけで、これを満たすように、システムグラフ内の補木と全域木の辺を分離して、基本閉路を見つける方法を提案した。

参考文献

- 1) Doris R. Ryan and Stephen Chen (1981) : A Comparison of Three Algorithms for Finding Fundamental Cycles in a Directed Graph, Networks, 11, 1-12
- 2) 浜口憲一郎・鬼塚宏太郎 (1980) : 管路における非定常現象の弾性水柱理論界と剛性水柱理論界の比較について, 農士学会大会講演要旨集, 22-23
- 3) 猪股俊光・益崎真治 (1994) : Schemeによる記号処理入門, 森北出版, 100-110
- 4) 内藤克美・小山潤・岩崎和己 (1983) : 管路系の”ゆるやかな過渡水理現象”解析のための汎用プログラムの開発, 農士誌, 51, 3, 215-227
- 5) 鬼塚宏太郎 (1977) : 状態空間解析による枝分かれ管路のサージング減衰特性の評価, 土木学会論文報告集, 262, 79-88
- 6) 鬼塚宏太郎 (1981) : 農業用パイプラインの非定常解析に関する研究, 東京農工大学農学部学術報告,

第 22 号

- 7) 鬼塚宏太郎 (1982) : パイプラインの水理設計 (その 7) - 剛性モデルによる過渡現象解析 -, 農土誌, 50, 3, 259-268
- 8) 鬼塚宏太郎 (1998) : 送配水システム解析入門, 技報堂出版, 61-85
- 9) 島田正志 (1988) : 接続行列による剛性モデル・パイプライン非定常流解析理論, 農土論集, 134, 77-83
- 10) 島田正志 (1991) : パイプライン非定常流の剛性モデル・接続行列法における状態変数の決定法, 農土論集, 156, 17-22
- 11) 田中良和・中田達・樽屋啓之 (2012) : パイプライン非定常流の剛性モデル・閉路解析におけるオブジェクト指向プログラミングによる数式処理の自動化, 農村工学研究所技報, 212, 13-28

Study of Supporting Method that Spanning Tree and Cotree are Designated Using Rigid Water Column Model of Analyzing Slow Transients in Pipelines

TANAKA Yoshikazu, NAKADA Toru and TARUYA Hiroyuki

Summary

The rational water management which coincides with water-use plan in proportion to the change of recent water demand has been required. Numerical method for analysis is important in order to examine the plan which carries out improvement of the elastic water management method and improvement of facilities. Rigid water column model - closed circuit analysis for slow transients in pipelines are one of effective numerical hydraulic analysis technique. In rigid water column model - closed circuit analysis, the state equation is obtained shortly, because independent variable and dependent variable of flow rate are automatically obtained, if to separate system graph which modeled pipeline to the edges of spanning tree and cotree is possible. But the work which separates a system graph to edges of spanning tree and cotree is not easy for engineers. Then, computer program which supported that work has been developed. The method is an algorithm using spanning tree search and Ternary network flow method. By the benefit of this program, it is expected that automatically deducing the state equation in rigid water column model - closed circuit analysis is possible.

Keywords : pipeline system, graph theory, state equation, unsteady flow analysis, Ternary network flow method

〔農工研技報 212〕
13 ~ 28, 2012〕

パイプライン非定常流の剛性モデル・閉路解析における オブジェクト指向プログラミングによる数式処理の自動化

田中良和・中田 達・樽屋啓之

目 次

I 緒 言	13	IV 解析例	21
II 状態方程式の導出過程における 数式処理の必要性	14	V 結 言	23
III オブジェクト指向プログラミングによる 数式処理の実現方法	17	参考文献	24
		Summary	28

I 緒 言

近年の営農変化に伴って用水需要が変化し、多くの送配水パイプラインシステムは当初の水利用計画と異なる新たな水利用計画に合致した合理的な水管理が求められている。このような用水需要に対して弾力的な水管理方法の改善や施設の改修を実施するために、数値解析によって計画や設計を検討することが必要である。パイプラインシステム内の流量輸送の緩やかな過渡現象を長時間にわたって数値解析するには、バルブやポンプの操作に伴う急激な水理過渡現象を把握するための利用される弾性体モデルによる数値解析はコンピュータのCPUの使用時間が長くなるために不向きである(内藤ら, 1983)。このような水理現象の数値解析手法として、鬼塚(1971)は剛性モデル理論による非定常流解析が有効であることを明らかにした。剛性モデル理論による非定常流解析とは、管路系に発生する緩やかな非定常水理現象であるサージ現象を、水の圧縮性と管体の弾性変形を考慮しない剛体水柱理論で近似できる範囲の現象として定式化し、数値解析するものである(鬼塚, 1981)。方法として、閉路解析(鬼塚, 1977)と接続解析(島田, 1991)が知られている。

接続解析は、パイプラインシステムの流量と運動量の連続性を表す1階の連立常微分方程式(システム方程式と呼ぶ)から状態方程式を導き、時間積分を行う数値解析手法である。接続解析において導出した状態方程式の数は状態変数よりも多いので、状態方程式の数を状態変

数に合わせる方法が、内藤ら(1983)と島田(1991)によって提案されている。

他方、閉路解析は、パイプラインシステムをモデル化したシステムグラフを全域木と補木の情報を得れば、自動的に流量の独立変数と従属変数が判明し、状態方程式が得られる利点がある。ただし、エネルギー基準面との仮想的な経路をパイプラインシステムに追加して閉じたグラフを作成し、閉路情報を利用して状態方程式を導出する作業が必要である。このため、弁の完全閉鎖を扱う問題や調整池の設置の必要性を検討する問題などでは、新たに閉じたグラフを作成し直す必要があり、状態方程式の導出が面倒であった。しかし、①閉路情報を得る作業と②数式処理を行い状態方程式を導出する作業を自動化するように支援すれば、閉路解析は技術者が扱いやすい手法となると期待できる。①については、著者ら(2011)が稿を分けて整理し、全域木探索法とTernary network flow法(Doris and Stephan, 1981)を用いて閉路情報を得る方法を提案した。本稿では、②について提案を行う。従来、数式処理はFortran言語のような手続き型言語では難しい処理であり、数式処理システム(Reduce, Maxima, および Mathematica など)を利用すれば行うことができるが、数式処理システムを利用した数値シミュレーションは農業土木分野において普及しているとはいえない。そこで、近年インターネットから数値計算まで広く普及してきたオブジェクト指向プログラミングを利用して、簡易な数式処理システムを構築し、剛性モデル理論による閉路解析を導出する方法を提案する。

水利工学研究領域 水路システム担当

平成23年12月14日受理

キーワード：パイプライン, グラフ理論, 状態方程式, 非定常流解析, 数式処理, オブジェクト指向言語

II 状態方程式の導出過程における数式処理の必要性

1 剛体モデル・閉路解析に基づく状態方程式の導出の流れ

剛性モデル・閉路解析では、作成したシステムグラフを全域木と補木の辺に分離できれば、システムグラフ内の閉路と接続関係の情報が明らかになる。これらの情報を利用した流量連続条件とエネルギー連続条件のシステム方程式を数式処理によって変形することにより、状態方程式を得ることができる。この状態方程式を時間積分することによって、状態変数の数値解を得て、非状態変数との関係式から非状態変数の数値解が得られる。導出過程をフローチャートで表すと Fig.1 の流れになる。

本章では、剛体モデル・閉路解析に基づく状態方程式の導出過程を説明して、この導出過程を自動化するためには、①全域木と補木の辺の分離と②数式処理による式の変形が必要であることを示す。さらに、②の数式処理による式の変形については、どのような式の変形が必要であることを具体的に整理する。

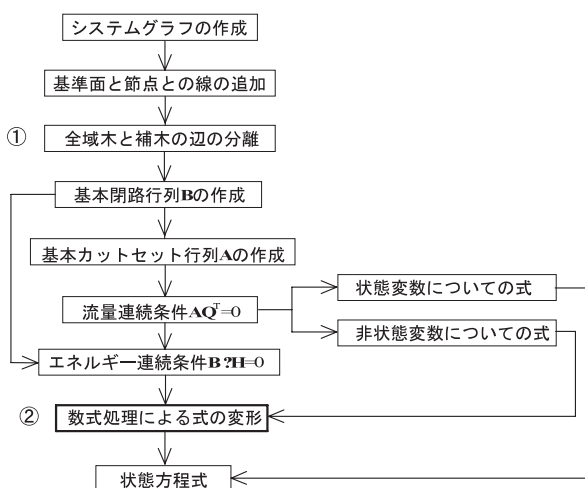


Fig.1 状態方程式の導出過程のフローチャート
Flowchart of derivation process about state equations

a システムグラフの作成

パイプラインシステムの接続情報は、グラフ理論に基づき、節点とそれらを連結する辺で表す (鬼塚, 1998)。1方向の辺で構成されるグラフを有向グラフ (以下、システムグラフと呼ぶ) である。具体的に Fig.2 のパイプラインシステムについて考える。

ここで、水頭の基準面を記号 D で表し、既知の水頭境界を H_0 , H_5 , 中間調整池の水頭を h_1 , ファームポンドの水頭 h_4 , 既知の流量境界を q_{10} , その他の q_i を管の流量とする。パイプラインシステムを有向グラフで表したシステムグラフを Fig.3 に示す。

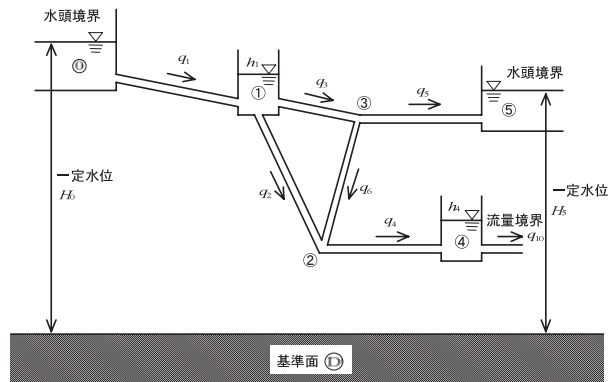


Fig.2 パイプラインシステム例
Example of pipeline system

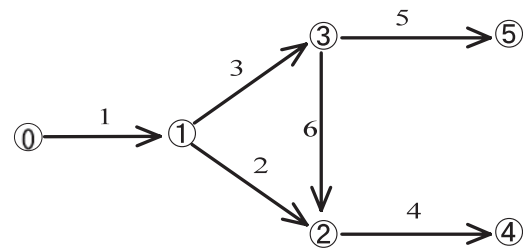


Fig.3 パイプラインシステムのシステムグラフ
System graph of pipeline system

b 基準面と接点をつなげる辺の追加

閉路解析では、システムグラフ内にある次の3つの条件に対して、基準面 D へ辺を追加してパイプラインシステムを複数の閉路 (システムグラフ内のある接点を出発して他の接点を経由して、出発した接点に戻った時の経路) で構成する作業が必要である。

①ファームポンドや中間調整池など未知の水頭をもつ水槽

水槽における連続条件を満たすのに、貯留量を流量として計算する必要がある。その流量を表すための辺が必要である。

②既知の流量境界

パイプラインシステムについての流入量や流出量を表すのに、基準面 D との流量のやりとりを表す必要がある。

③既知の水頭境界

既知の水頭の大きさを表すのに、基準面 D との水頭差で表す必要がある。

この3つの条件について、基準面 D への辺を追加したシステムグラフを Fig.4 に示す。

c 全域木と補木の分離

システムグラフは全域木と補木の辺に分解できる。ここで、全域木とは、閉路を1つも持たないが、すべての点に接続している辺の組み合わせである。補木は全域木の辺に追加することによって閉路を作ることができる辺の集合である。基準面 D へ接続する辺は、前節の3つの条件によって以下のように分類される。

①未知の水頭をもつ水槽から基準面 D への辺は、木

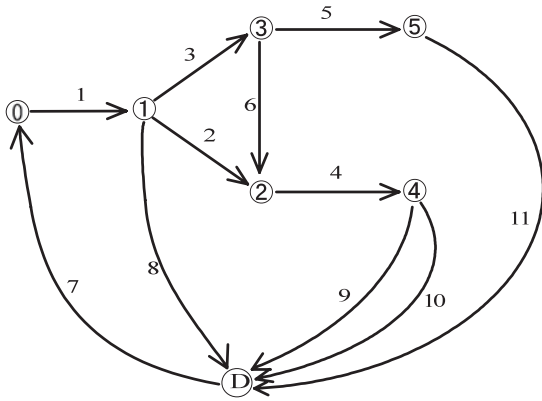


Fig.4 パイプラインシステムに境界条件を追加したシステムグラフ
System graph which added boundary condition to pipeline system

に属する。

②既知の流量境界として基準面 D へつながる辺は、補木に属する。

③既知の水頭境界から基準面 D への辺は、木に属する。

その他の辺の指定はある程度自由度があるが、補木の数は、システムグラフを構成する辺の数を n 本、接点の数を m 個とすると、 $(n - m + 1)$ 本でなければならない。著者ら (2011) は、稿を分けてシステムグラフを全域木と補木に分離する方法を提案した。

d 基本閉路行列 B の作成

基本閉路は、補木の辺を 1 本しか含まない閉路である。よって、基本閉路の数は補木の辺の数と等しい。Fig.4 において、仮に全域木の辺 $\{3, 4, 7, 8, 9, 11\}$ 、補木の辺 $\{1, 2, 5, 6, 10\}$ を選択して、行列の成分 b_{ij} の値を次のとおりに分類すると、(1) 式の基本閉路行列 B を作成できる。

$$b_{ij} = \begin{cases} 1 \cdots \text{辺 } j \text{ が閉路 } i \text{ に含まれ、かつ、同じ向きの場合。} \\ -1 \cdots \text{辺 } j \text{ が閉路 } i \text{ に含まれ、かつ、逆向きの場合。} \\ 0 \cdots \text{辺 } j \text{ が閉路 } i \text{ に含まれない場合。} \end{cases}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdots \cdots (1)$$

ここで、B は行方向 (横方向) に全域木の辺を若い番号順に並べ、次に、補木の辺を若い順に並べ替えている。

さらに、B の列方向 (縦方向) の大きさは基本閉路の個数であり、その並べ方は基本閉路に含まれる補木の辺の若い順である。つまり、B を構成する木の部分を行列 B_m 、補木の部分を行列 B_c で表すと、 $B = [B_m, B_c]$ で表せる。

e 基本カットセット行列 A の作成

B_i の転置行列をマイナスにした行列 $-B_i^T$ を全域木の辺の個数の大きさの単位行列 I に追加した行列 $A = [I, -B_i^T]$ は、基本カットセット行列である。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdots \cdots (2)$$

ここで、成分 a_{ij} の値は、以下のような意味を持つ。

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 \cdots \text{辺 } j \text{ が基本カットセット } i \text{ に含まれ、かつ、向きが全域木と同じである時。} \\ -1 \cdots \text{辺 } j \text{ が基本カットセット } i \text{ に含まれ、かつ、向きが全域木と反対である時。} \\ 0 \cdots \text{辺 } j \text{ が基本カットセット } i \text{ に含まれていない時。} \end{cases}$$

また、A の列方向の順番は B と同じであるが、行方向はカットセット内に含まれる全域木が若い順にカットセット (システムグラフを 2 つに分断する辺の集合) を並べている。各カットセットは全域木の辺を 1 本だけ含む。

以下、システムグラフの A、B を利用した流量連続条件とエネルギー連続条件から状態方程式が導出される。導出過程において、数式処理が必要になる。以下の節では、それらの数式処理方法を詳しく説明する。

f 流量連続条件

パイプラインシステム内の辺の流量ベクトル Q は次式で表すことができる。行方向の成分の順番は B と同じである。

$$Q = [q_3 \ q_4 \ q_7 \ q_8 \ q_9 \ q_{11} \ q_1 \ q_2 \ q_5 \ q_6 \ q_{10}] \cdots (3)$$

ただし、水槽 1 や水槽 4 と基準面 D との辺の流量 q_8, q_9 は貯留変化量であるので、未知の水頭の記号 h の上のドットは時間微分を表すと、次式になる。

$$\left. \begin{aligned} q_8 &= A_1 \dot{h}_1 \\ q_9 &= A_4 \dot{h}_4 \end{aligned} \right\} \cdots \cdots (4)$$

よって、流量ベクトル Q は、

$$Q = [q_3 \ q_4 \ q_7 \ A_1 \dot{h}_1 \ A_4 \dot{h}_4 \ q_{11} \ q_1 \ q_2 \ q_5 \ q_6 \ q_{10}] \cdots \cdots (5)$$

流量の連続条件 $AQ^T = 0$ として、 h_i の時間微分を含んだ項を左辺に残し、その他の項を右辺に移項して整理すると、次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} A_1 \dot{h}_1 &= q_1 - q_2 - q_5 - q_6 \\ A_4 \dot{h}_4 &= q_2 + q_6 - q_{10} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、水頭 h_1, h_4 のある時刻の状態は時間積分して求める必要があるため、状態変数である。流量 q_1, q_2, q_5, q_6 , および q_{10} は、補木に属する辺における状態変数である。

その他、木に属する辺における流量の従属変数を左辺に残し、その他の項を同様に整理すると、流量の従属変数と独立変数の関係式が導かれる。

$$\left. \begin{aligned} q_3 &= q_5 + q_6 \\ q_4 &= q_2 + q_6 \\ q_7 &= q_1 \\ q_{11} &= q_5 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、流量 q_3, q_4, q_7 , および q_{11} は、木に属する辺における流量であり、これらは従属変数である。

(6) 式を書き直すと一般的な形式は次式になる。

$$\begin{bmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{h}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{A_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{A_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 - q_2 - q_5 - q_6 \\ q_2 + q_6 - q_{10} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (8)$$

g エネルギー連続条件

損失水頭ベクトル ΔH は次式で表すことができる。ただし、行方向の成分の順番は **B** と同じである。

$$\Delta H = [h_1 - h_3 \quad h_2 - h_4 \quad -H_0 \quad h_1 \quad h_4 \quad H_5 \quad H_0 - h_1 \quad h_1 - h_2 \quad h_3 - H_5 \quad h_3 - h_2 \quad h_4 - 0] \dots (9)$$

接点 i と接点 j における単一管 k について、管の慣性定数を L_k , 管の流量抵抗係数を K_k とすると、運動方程式は次式で表される。

$$L_k \dot{q}_k = h_i - h_j - K_k |q_k| q_k \dots\dots\dots (10)$$

$$L_k = \frac{l_k}{A_k g} \dots\dots\dots (11)$$

$$K_k = \frac{f_k l_k}{2g D_k A_k^2} \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 l_k は管の延長、 A_k は管の断面積、 D_k は管の直径、 f_k は管の摩擦損失係数である。

よって、損失水頭ベクトルは次式になる。

$$\Delta H^T = \begin{bmatrix} L_3 \dot{q}_3 + K_3 |q_3| q_3 \\ L_4 \dot{q}_4 + K_4 |q_4| q_4 \\ -H_0 \\ h_1 \\ h_4 \\ H_5 \\ L_1 \dot{q}_1 + K_1 |q_1| q_1 \\ L_2 \dot{q}_2 + K_2 |q_2| q_2 \\ L_5 \dot{q}_5 + K_5 |q_5| q_5 \\ L_6 \dot{q}_6 + K_6 |q_6| q_6 \\ h_4 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (13)$$

エネルギーの連続条件 $\mathbf{B} \Delta H^T = 0$ を計算すると次式を得る。

$$B \Delta H^T = \begin{bmatrix} -H_0 + h_1 + L_1 \dot{q}_1 + K_1 |q_1| q_1 \\ L_4 \dot{q}_4 + K_4 |q_4| q_4 - h_1 + h_4 + L_2 \dot{q}_2 + K_2 |q_2| q_2 \\ L_3 \dot{q}_3 + K_3 |q_3| q_3 - h_1 + H_5 + L_5 \dot{q}_5 + K_5 |q_5| q_5 \\ L_3 \dot{q}_3 + K_3 |q_3| q_3 + L_4 \dot{q}_4 + K_4 |q_4| q_4 - h_1 + h_4 + L_6 \dot{q}_6 \\ + K_6 |q_6| q_6 - h_4 + h_4 \end{bmatrix} = 0 \dots\dots\dots (14)$$

(14) 式中の流量の従属変数に (7) 式を代入すると、以下のシステム方程式が得られる。

$$\begin{bmatrix} -H_0 + h_1 + L_1 \dot{q}_1 + K_1 |q_1| q_1 \\ L_4 (\dot{q}_2 + \dot{q}_6) + K_4 |q_2 + q_6| (q_2 + q_6) - h_1 + h_4 + L_2 \dot{q}_2 + K_2 |q_2| q_2 \\ L_3 (\dot{q}_5 + \dot{q}_6) + K_3 |q_5 + q_6| (q_5 + q_6) - h_1 + H_5 + L_5 \dot{q}_5 + K_5 |q_5| q_5 \\ L_3 (\dot{q}_5 + \dot{q}_6) + K_3 |q_5 + q_6| (q_5 + q_6) + L_4 (\dot{q}_2 + \dot{q}_6) + K_4 |q_2 + q_6| (q_2 + q_6) - h_1 + h_4 + L_6 \dot{q}_6 + K_6 |q_6| q_6 - h_4 + h_4 \end{bmatrix} = 0 \dots\dots\dots (15)$$

q_i の時間微分を含んだ項の積を展開すると、次式が得られる。

$$\begin{bmatrix} -H_0 + h_1 + L_1 \dot{q}_1 + K_1 |q_1| q_1 \\ L_4 \dot{q}_2 + L_4 \dot{q}_6 + K_4 |q_2 + q_6| (q_2 + q_6) - h_1 + h_4 + L_2 \dot{q}_2 + K_2 |q_2| q_2 \\ L_3 \dot{q}_5 + L_3 \dot{q}_6 + K_3 |q_5 + q_6| (q_5 + q_6) - h_1 + H_5 + L_5 \dot{q}_5 + K_5 |q_5| q_5 \\ L_3 \dot{q}_5 + L_3 \dot{q}_6 + K_3 |q_5 + q_6| (q_5 + q_6) + L_4 \dot{q}_2 + L_4 \dot{q}_6 + K_4 |q_2 + q_6| (q_2 + q_6) - h_4 + h_4 + L_6 \dot{q}_6 + K_6 |q_6| q_6 \end{bmatrix} = 0 \dots\dots\dots (16)$$

q_i の時間微分で因数分解した項を左辺に残し、その他の項を右辺に移項して整理すると、次式が得られる。

$$L_1 \dot{q}_1 = H_0 - h_1 - K_1 |q_1| q_1 \dots\dots\dots (17)$$

$$(L_2 + L_4) \dot{q}_2 + L_4 \dot{q}_6 = h_1 - h_4 - (K_2 + K_4) |q_2| q_2 - K_4 |q_6| (q_6) \dots\dots\dots (18)$$

$$(L_3 + L_5) \dot{q}_5 + L_3 \dot{q}_6 = h_1 - H_5 - (K_3 + K_5) |q_5| q_5 - K_3 |q_6| q_6 \dots\dots\dots (19)$$

$$L_4 \dot{q}_2 + L_3 \dot{q}_5 + (L_3 + L_4 + L_6) \dot{q}_6 = h_1 - h_4 - K_4 |q_2| q_2 - K_3 |q_5| q_5 - (K_3 + K_4 + K_6) |q_6| q_6 \dots (20)$$

ここで、流量 q_1, q_2, q_5 , および q_6 のある時刻の状態は時間積分して求める必要があるため、状態変数である。表記を簡潔にするために (21) 式を定義すると、(17)

～ (20) 式は (22) 式に書き換えられる。

$$\left. \begin{aligned} K'_1 &= K_1 |q_1| \\ K'_2 &= K_2 |q_2| \\ K'_3 &= K_3 |q_3| = K_3 |q_5 + q_6| \\ K'_4 &= K_4 |q_4| = K_4 |q_2 + q_6| \\ K'_5 &= K_5 |q_5| \\ K'_6 &= K_6 |q_6| \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (21)$$

$$\begin{bmatrix} L_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_2 + L_4 & 0 & L_4 \\ 0 & 0 & L_3 + L_5 & L_3 \\ 0 & L_4 & L_3 & L_3 + L_4 + L_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_5 \\ \dot{q}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_0 - h_1 \\ h_1 - h_4 \\ h_1 - H_5 \\ h_1 - h_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K'_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K'_2 + K'_4 & 0 & K'_4 \\ 0 & 0 & K'_3 + K'_5 & K'_3 \\ 0 & K'_4 & K'_3 & K'_3 + K'_4 + K'_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_5 \\ q_6 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (22)$$

ここで、左辺の L_i ($i=1, 2, 5, 6$) で構成される行列を L 行列と呼ぶことにする。

$$L = \begin{bmatrix} L_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_2 + L_4 & 0 & L_4 \\ 0 & 0 & L_3 + L_5 & L_3 \\ 0 & L_4 & L_3 & L_3 + L_4 + L_6 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (23)$$

L 行列の逆行列 L^{-1} を (22) 式の両辺にかけると一般的な形式は次式になる。

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_5 \\ \dot{q}_6 \end{bmatrix} = L^{-1} \begin{bmatrix} H_0 - h_1 \\ h_1 - h_4 \\ h_1 - H_5 \\ h_1 - h_4 \end{bmatrix} - L^{-1} \begin{bmatrix} K'_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K'_2 + K'_4 & 0 & K'_4 \\ 0 & 0 & K'_3 + K'_5 & K'_3 \\ 0 & K'_4 & K'_3 & K'_3 + K'_4 + K'_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_5 \\ q_6 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (24)$$

h 状態方程式

したがって、導出した (8) 式と (24) 式をまとめた (23) 式は、状態方程式である。

$$\begin{bmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{h}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{A_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{A_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 - q_2 - q_5 - q_6 \\ q_2 + q_6 - q_{10} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (25)$$

この状態方程式を時間積分することによって、未知の水頭 h_1, h_4 と流量の独立変数 q_1, q_2, q_5 および q_6 が求

まる。これらの流量を (7) 式に代入することによって、 q_3, q_4, q_7 および q_{11} が求まる。よって、パイプラインシステムの状態を求めることができる。

2 導出過程に必要な数式処理

(25) 式は、Fig.2 のパイプラインシステム例に対して得られた状態方程式であり、他の例を解く場合は新たに状態方程式を導出する必要がある。

1 節の状態方程式を導出する過程において、状態変数は、未知の水頭をもつ自由境界から基準面 D への辺における水頭と補木に属する辺の流量であることが分かる。また、数式処理による式の変形が必要な箇所は、1 節 g のエネルギー連続条件から状態方程式を導出する箇所であり、数式処理として、代入、移項、掛け算の展開、および因数分解が必要であることが分かる。以下、それぞれの数式処理について具体的に説明を行う。

a 代入

流量連続条件から得られた従属変数の関係式 (7) 式をエネルギー連続条件 (14) 式に代入して、従属変数を消去する際に必要な処理である。例えば、(14) 式中の $K_3 |q_3| q_3$ の項に、(7) 式中の $q_3 = q_5 + q_6$ を代入して $K_3 |q_5 + q_6| (q_5 + q_6)$ を得る。

b 移項

流量連続条件とエネルギー連続条件から状態方程式を得る際に、状態変数を含んだ項のみを左辺に残し、その他の項は右辺に移項する処理が必要である。例えば、(17) 式中の $-K_1 |q_1| q_1$ は (16) 式の中では左辺にあった項を右辺へ移項した項である。

c 掛け算の展開

流量連続条件から得られた従属変数の関係式 (7) 式をエネルギー連続条件から得られた (14) 式に代入した後、掛け算の展開を行う。例えば (15) 式中の $L_4 (\dot{q}_2 + \dot{q}_3)$ は掛け算を展開して、 $L_4 \dot{q}_2 + L_4 \dot{q}_3$ になる。

d 因数分解

(15) 式に掛け算の展開を行った後に、状態変数の係数をひとまとめにして、(16) 式を整理するために、状態変数が同じものがあるか式中の項を検索して、同じ状態変数があった場合は因数分解を行う。例えば、(16) 式の中では $L_2 \dot{q}_2 + L_4 \dot{q}_2$ は、(18) 式中の $(L_2 + L_4) \dot{q}_2$ に因数分解される。

III オブジェクト指向プログラミングによる数式処理の実現方法

II 章で説明したエネルギー連続条件から状態方程式を導出過程における式の変形は、従来、解析する者が手作

業で行うか、もしくは数式処理システムを用いて自動化を行う必要があった。手作業では剛性モデルの数値解析手法における手順が自動化できないため、解析対象となるパイプラインシステムの問題に応じて個別に状態方程式 (25) 式を導出する労力を解析者に強いることになり、その過程において数式の間違いが生じやすい問題がある。数式処理の自動化は便利であるが、数式処理システ

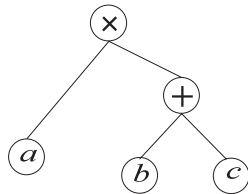


Fig.5 構文木による数式 $a(b+c)$ の表現

Mathematical expression $a(b+c)$ using by the syntax tree

ムは製品が高価であったり、フリーソフトウェアであっても利用者が少ないため、農業土木分野の技術者に普及

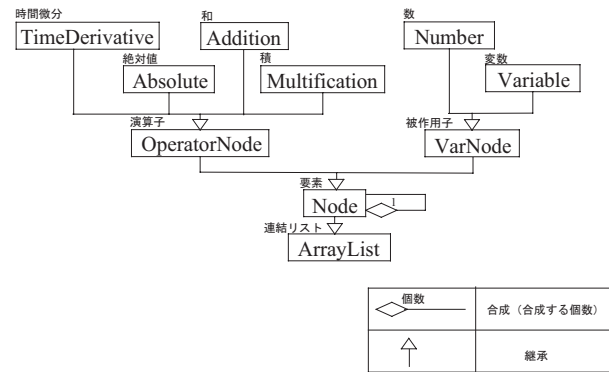


Fig.6 構文木のクラス構造

Class structure of the syntax tree

Table 1 構文木を構成するクラスの主要なフィールドとメソッド
Capital fields and methods defined in classes which constitute the syntax tree

クラス名	フィールドとメソッド	内容
ArrayList	add(Node A)	要素 A の参照を連結リストに追加するメソッド。
	remove(Node A)	要素 A の参照を連結リストから取り除くメソッド。
	size()	要素の数を返すメソッド。
	set(Node A, Node B)	要素 A の参照を要素 B に置き換えるメソッド。
Node	OPERATOR	演算子を指定する整数フラグのフィールド
	VARIABLE	変数を指定する整数フラグのフィールド
	NUMBER	定数を指定する整数フラグのフィールド
	getParent()	親要素を返すメソッド。
	setParent(OperatorNode Parent)	Parent を親要素として設定するメソッド。
OperatorNode	MULT	掛け算の演算子 \times を指定する整数フラグのフィールド
	ADD	足し算の演算子 $+$ を指定する整数フラグのフィールド
	TDER	時間微分の演算子 d/dt を指定する整数フラグのフィールド
	ABS	絶対値の演算子 abs を指定する整数フラグのフィールド
	getOperator(int A)	指定した演算子 A のインスタンスを作成して返すメソッド。
	replace(Node A, Node B, boolean C)	要素 A に要素 B を代入するメソッド。つまり、要素 A を要素 B で置き換える。C は再帰的に行うかどうかのフラグ。
	levelize()	可換な演算子を平滑化するメソッド。例えば、 $a+(b+c)$ を $a+b+c$ とする。
	facrotBy(Node A)	要素 A によって因数分解を行うメソッド。
	expandAll()	すべての子要素の expand() を呼び出して、掛け算を展開するメソッド。
	eval()	演算子を評価するメソッド。
	equals(Object O)	同じ参照であるかどうか判定するメソッド。
	TimeDerivative	expand()
eval()		子要素を評価するメソッド。
Addition	expand()	子要素の expand() を呼び出すメソッド。
	eval()	足し算を実行するメソッド。
Absolute	expand()	子要素の expand() を呼び出すメソッド。
	eval()	絶対値を評価するメソッド。
Multification	expand()	掛け算を展開する。例えば、 $a(b+c)$ を $ab+ac$ とするメソッド。
	eval()	積の演算を実行するメソッド。
VaNode	setValue()	値を設定するメソッド。
	equals(Object O)	同じ参照であるかどうか判定するメソッド。
Variable	getValue()	関数で定義された値を返すメソッド。
Number	getValue()	数の値を返すメソッド。

していないようである。本章では、より一般的に広く普及しているオブジェクト指向プログラミングに基づいて数式処理を支援するプログラムについて提案する。

1 オブジェクト指向プログラミング

オブジェクト指向プログラミングにおける「オブジェクト」とは、現実世界の「もの」の静的な構造を、計算機内へ比喩を用いて模写した知識表現形式である（たとえば、落水・東田，1998）。知識表現形式を計算機のメモリー上に動的に生成した実体（以下、インスタンスと呼ぶ）は内部記憶を持つ。インスタンス同士は互いの内部記憶を参照することによって状態を共有する。インスタンスに対しメッセージを送信すると、知識表現形式の構造から適切な操作関数を選択し実行する。その副作用として内部記憶が変更され、状態が遷移し処理が進行する。オブジェクト指向の知識表現形式は「クラス」と呼ばれる。クラスの構造は、いくつかの属性変数とその操作関数である。さらに、他クラスを属性変数として内包したり（この機能を「合成」と呼ぶ）、他のクラスの属性変数や操作関数をそのままあるいは変更して再利用（この機能を「継承」と呼ぶ）して構成される。また、Java 言語はガーベッジコレクションと呼ばれるメモリー管理機能が備わっているために、プログラミング初心者が起こしやすいメモリーリークの心配がなく、インターネットから数値計算まで幅広い用途に利用されている。本稿では、プログラミング言語として Java 言語を採用した。

2 数式処理システムのモデル化

簡易な数式処理システムをオブジェクト指向プログ

ラムング言語によって構築する。そのために、一般的な数式処理システムの基本的な仕組みをモデル化する必要がある（猪股・益崎，1994）。例えば、数式処理システム Maxima は関数型プログラミング言語 Common Lisp によって実装されている。Common Lisp における式の記述方法はすべて前置表記である（ポール・グレアム，2002）。前置表記とは、例えば $(2 + 3)$ という足算の式を $(+ 2 3)$ のように、演算子 $+$ を式の先頭に置き、その後に引数として被作用子を置く表記方法である。Common Lisp のプログラムは式で構成されており、式を実行して値を得ることを「評価する」という。Common Lisp では演算子 $+$ は引数を足しあわせる手続きを行う「関数」としてプログラミング言語処理系にあらかじめ用意されている。評価のルールは、引数が左から右への順に関数に渡され、式全体として値を返す仕組みである。逆に、この評価ルールを停止するための特殊なオペレータ `quote` も備えている。例えば、 $(+ 2 3)$ を評価して値 5 を得るのではなく、記号 $+$ 、2 および 3 が並んだリストとして数式を表現するには、特殊オペレータ `quote` による前置表記の式を作り、`(quote (+ 2 3))` とする。数式処理システムでは、評価ルールを停止する仕組みを利用して数式を記号が並んだリストのデータとして扱い、数式の値が必要ときに式の評価を行っている。数式処理システムの前置表記の式は、オブジェクト指向プログラミング言語では、構文木のクラスを作成して実現する。構文木の構造はグラフの全域木と同じ考え方で、木のルートには演算子を割り当て、その子には演算子か被作用子を割り当てる。ただし、被作用子は子を持つことが許されない。例えば、 $a(b + c)$ という数式は、前置表記による式は `(× a (+ b c))` となり、構文木は Fig.5 のように

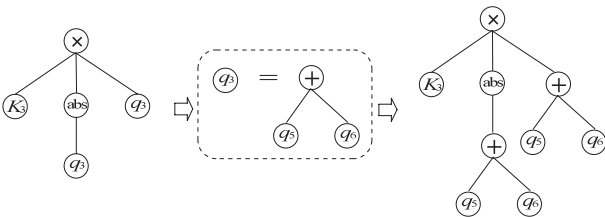


Fig.7 構文木による代入の表現

Expression of substitution using by the syntax tree

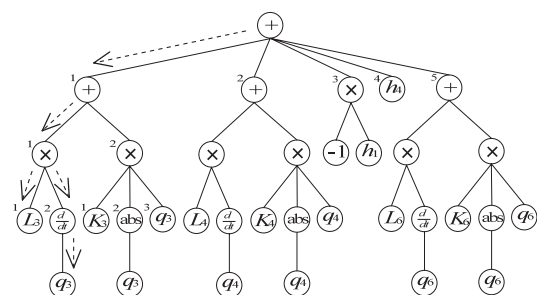


Fig.8 構文木における代入の探索手順

Search procedure of the substitution in the syntax tree

```
public void replace(VarNode key, Node node, boolean recursive) {
    for (int i = 0; i < size(); i++) {
        if (get(i).getType() == OPERATOR && recursive) //子の個数だけ以下の手順を繰り返す。
            ((OperatorNode) get(i)).replace(key, node, recursive); // i 番目の子が演算子であれば、
        // その子について、replaceメソッドを再帰的に適用する。
        if (get(i).equals(key)) // i 番目の子が、探していたインスタンスkeyであれば、
            set(i, node); // i 番目の子インスタンスの参照先をnodeインスタンスへ置き替える。
    }
}
```

Fig.9 メソッド replace における代入の手続き

Procedure of substitution in replace method

表現される。

数式処理をオブジェクト指向で表現するためには、構文木のデータ構造をクラスとして作成するとともに、演算子や被作用子をクラスとして作成する必要がある。

構文木の木構造を表すために、子は1つの親を属性変数として持ち、親は複数の子を属性変数として持つ必要がある。構文木を構成する節点を Node クラスとして定義する。1つの Node クラスのインスタンスを親として持つために自分自身と同じ Node クラスの属性変数を合成する。また、複数の Node クラスのインスタンスを子として持つ。そのために自分自身と同じ Node クラスのインスタンスを複数個格納することができる連結リストの ArrayList クラスを継承する。

構文木を構成する節点は、演算子か被作用子のどちらかであるので、演算子クラスは OperatorNode クラスとし、被作用子は VarNode クラスとして、Node クラスを継承するようにモデリングした。

剛性モデルに基づく数値解析における状態方程式の導出過程に現れる演算子は、時間微分、絶対値、足し算(引き算を含む)、および掛け算のみである。よって、それぞれ TimeDerivative, Absolute, Addition, および Multiplication クラスとしてモデリングした。これらは演算子 OperatorNode を継承している。

単なる数や変数はそれぞれ Number, Variable クラスとし、被作用子のクラス VarNode を継承するようにモデリングした。変数 Variable クラスは流量境界条件における流量を関数によって定義して与えるために必要なクラスである。

構文木のクラス構造を Fig.6 に図示する。構文木を構成する各クラスの主な操作関数を Table 1 に整理する。

① 代入

代入の数式処理を (14) 式中の項 $K_3|q_3|q_3$ について説明する。従属変数を独立変数で表した (7) 式中の $q_3=q_5+q_6$ を代入すると $K_3|q_5+q_6|(q_5+q_6)$ を得る。その際に、絶対値の演算子を abs とすると、 $K_3|q_3|q_3$ の構文木は $(\times K_3(\text{abs } q_3)q_3)$ である。(7) 式 $q_3=q_5+q_6$ は、 q_3 のインスタンスをキー、構文木 $(+ q_5 q_6)$ のインスタンスを値として格納したマップ構造によって表現する。 q_3 に $(+ q_5 q_6)$ を代入する操作は、構文木 $(\times K_3(\text{abs } q_3)q_3)$ における q_3 へ参照先を q_3 のインスタンスから構文木 $(+ q_5 q_6)$ のインスタンスへ置き換える操作である (Fig.7)。

(14) 式中の 4 番目の式の左辺は Fig.8 に示す構文木

で表される。(7) 式のマップ構造から q_3 のインスタンスをキーとして取り出し、 q_3 のインスタンスが無いかどうか再帰的に探索する。その手順は、構文木のルートである最上階演算子 \times の子を左から右へ (番号の若い) 順番に取り出す。その子が q_3 のインスタンスであれば、参照先を構文木 $(+ q_5 q_6)$ のインスタンスに置き換える。最初に見つかる q_3 のインスタンスは Fig.8 中の点線の矢印で示した手順で探索されたものである。仮に、子から q_3 のインスタンスが見つからなければ、その下の子を取り出し、その子に q_3 のインスタンスがあるかを探索し、これがあれば、構文木 $(+ q_5 q_6)$ のインスタンスに置き換えることを再帰的に繰り返す。最末端まで繰り返しても、 q_3 のインスタンスがなければ、親に戻り、右側の(次の番号の)子について、同様に探索する。最も右側の(番号が最後の)子まで探索したら、終了である。

この代入の操作は、OperatorNode クラスに replace() というメソッドを定義して実現した。Fig.9 に replace() メソッドの手続きを記した。

② 移項

移項の数式処理を、(16) 式中の項 $K_1|q_1|q_1$ を左辺から右辺へ移項する操作に着目して説明する。構文木 $(\times K_1(\text{abs } q_1)q_1)$ を、Fig.10 に示すように -1 の数インスタンスをルートの演算子 \times の子として追加して構文木 $(\times (-1)K_1(\text{abs } q_1)q_1)$ に変形する操作とする。

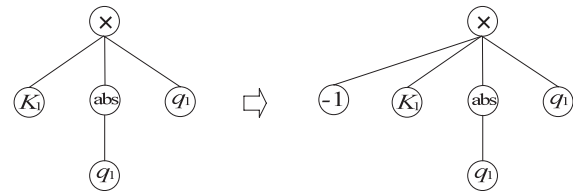


Fig.10 構文木による移項の表現
Expression of transposition using by the syntax tree

移項の手続きのコードを Fig.11 に記した。(16) 式中の流量の時間微分項を除いた全ての項を Fig.11 のコード中のインスタンス nd として、構文木 $(\times (-1) nd)$ を作成する手続きである。

③ 掛け算の展開

掛け算の展開は、演算子 \times のインスタンスの子に演算子 $+$ のインスタンスがあった場合には、新たに作成した演算子 $+$ のインスタンスをルートとして構文木を作り替える操作である。よって、演算子 \times のインスタンスの子

```

OperatorNode add1 = OperatorNode.getOperator(OperatorNode.ADD); //右辺の項として演算子+のインスタンスを作成する。
OperatorNode o = OperatorNode.getOperator(OperatorNode.MULT); //演算子×のインスタンスを作成する。
o.add(new Number(-1)); //×のインスタンスoに-1の数インスタンスを追加する。
o.add(nd); //右辺へ移項したいインスタンスndを×のインスタンスoに追加する。
add1.add(o); //×のインスタンスoを演算子+のインスタンスadd1に追加する。
    
```

Fig.11 移項の手続き
Procedure of transposition

が演算子+以外のインスタンスであれば、この変化は起こらない。(15) 式中の $L_4(q_2+q_3)$ を $L_4q_2+L_4q_3$ に展開することを例に説明すると、構文木 ($\times L_4 (+ (d/dt q_2) (d/dt q_3))$) は、ルートに演算子 \times があり、その子に演算子+があるので、構文木を $(+ (\times L_4 (d/dt q_2)) (\times L_4 (d/dt q_3)))$ に作り替える (Fig.12)。

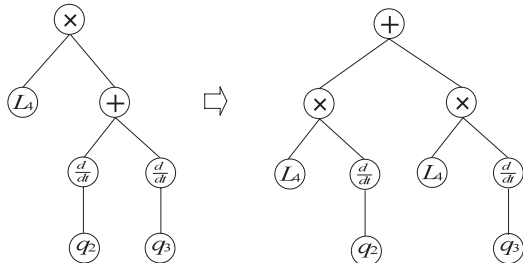


Fig.12 構文木による掛け算の展開の表現

Expression of expanding multiplication using by the syntax tree

コードでは Fig.13 のように実装される。まず、OperatorNode クラスにおいて定義された expandAll() メソッドでは、すべての子インスタンスに対して expand() メソッドを呼び出す仕組みにする。掛け算の演算子を表す Multiplication クラスでは、expand() メソッドが定義されており、子インスタンスが演算子+のインスタンスであるならば、新たに作成した演算子+のインスタンスをルートとして構文木を作り替えている (Fig.14)。

ただし、式 $a(b+c)$ を $ab+ac$ と変形するような単純な掛け算の展開しか行わず、 $(a+c)(b+c)$ のような掛け合わせる被作用子が $()$ で括られているような複雑な掛け算は対象外とした。その他の足し算、絶対値および時間微分を表す演算子クラス Addition クラス、Absolute クラスおよび TimeDerivative クラスでは、単に子インスタンスの expand() メソッドを呼び出すだけである (Fig.15)。

④ 因数分解

因数分解は、演算子+のインスタンスをルートとした構文木を演算子 \times のインスタンスがルートになる構文木に作り替える操作である。(16) 式中では $L_2q_2+L_4q_2$ を (18) 式中の $(L_2+L_4) q_2$ に因数分解することを例に説明する。Fig.16 に示すように、構文木 $(+ (\times L_2 (d/dt q_2)) (\times L_4 (d/dt q_2)))$ は、最上層に演算子 \times のインスタンスを、

また、その子に演算子+のインスタンスを作成して構文木 $(\times (d/dt q_2) (+ L_2 L_4))$ に作り替える。

因数分解の手続きのコードを Fig.17 に記した。引数として渡された要素 pe を項の中に含んでいるかを検索してあれば、新たに演算子+のインスタンスを作成して、要素 pe を取り除いた項を子の参照として追加する。この項と要素 pe の参照を、新たに作成した演算子 \times のインスタンスの子と追加すれば、要素 pe による因数分解後の式ができる。

3 エネルギー連続条件から状態方程式を導出する手続きの実装

本章 2 節で説明した種々の数式処理 (代入, 移項, 掛け算の展開および因数分解) を利用すれば、II 章 1 節 g においてエネルギー連続条件から状態方程式を導出する手続きを行うことができる。その手続きを整理して、フローチャートにすると Fig.18 になる。そのフローチャートを processEnergyCont() メソッドとして実装したコードが Fig.19 である。コード中では、(14) 式の左辺を配列 energyContEq に格納し、数式処理した後に得られた状態方程式は、その右辺を連結リスト eqFromEnergyContCond に、左辺を連結リスト eqFromEnergyContCondLHS に格納するようにした。マップ nonStateToStateVarMap は、(7) 式の流量に関する非状態変数と状態変数の関係式を、非状態変数のインスタンスをキーに、状態変数のインスタンスを値にしたマップ構造である。コード中に出てくる配列 edges はパイプラインシステムをグラフ構造で表現した時の辺をインスタンスとして格納したものである。

IV 解析例

III 章において提案した数式処理システムをオブジェクト指向プログラミング言語 Java にて実装した。そのプログラムを利用して Fig.2 に示したパイプラインシステムについて、状態方程式を導出した例を記す。ここで、Fig.2 のパイプラインシステムにおける水槽と管路の諸元は Table 2 の通りとした。ただし、流量 q_{10} は水需要の変動に伴う取り出し流量として、流量が時間 t に依存

```

public void expandAll() {
    boolean doneSomething = true;
    while (doneSomething) {
        doneSomething = false;
        for (int i = size() - 1; i >= 0; i--) {
            if (get(i).getType() == OPERATOR) //子の数だけ以下の手順を繰り返す。
                if (((OperatorNode) get(i)).expand()) //子が演算子インスタンスであれば、
                    //演算子インスタンスのexpandメソッドを呼び出す。
                    doneSomething = true;
        }
    }
}

```

Fig.13 OperatorNode クラスのメソッド expandAll における手続き
Procedure of expandAll method in OperatorNode class

```

public boolean expand() {
    boolean bb = false;
    for (int i = 0; i < size(); i++) {
        //子の数だけ以下の手順を繰り返す。
        if (get(i).getType() == OPERATOR) //子が演算子インスタンスであれば、
            if (((OperatorNode) get(i)).expand()) //演算子インスタンスのexpandメソッドを呼び出す。
                bb = true;
    }
    for (int j = i + 1; j < size(); j++) {
        //隣の子に以下の手順を繰り返す。
        if (get(i) == get(j))
            continue;
        if (get(j).getType() == OPERATOR) //子が演算子インスタンスであれば、
            if (((OperatorNode) get(j)).expand()) //演算子インスタンスのexpandメソッドを呼び出す。
                bb = true;
        if (get(j).getType() == OPERATOR
            && ((OperatorNode) get(j)).getOperatorType() == ADD
            && get(i).getType() != OPERATOR
            || get(i).getType() == OPERATOR
            && ((OperatorNode) get(i)).getOperatorType() == ADD
            && get(j).getType() != OPERATOR) {
            OperatorNode add = OperatorNode.getOperator(OperatorNode.ADD); //足し算の演算子
            VarNode v = null; //インスタンスを作成する。
            OperatorNode o = null;
            if (get(j).getType() == OPERATOR) {
                v = (VarNode) get(i);
                o = (OperatorNode) get(j);
            } else {
                v = (VarNode) get(j);
                o = (OperatorNode) get(i);
            }
            for (Node o0 : o) {
                //演算子インスタンスの場合、子の数だけ以下の手順を繰り返す。
                OperatorNode mul = getOperator(OperatorNode.MULT); //掛け算の演算子インスタンスを作る。
                mul.add(v); //参照vを掛け算演算子の子に追加する。
                mul.add(o0); //参照oの子を掛け算演算子の子に追加する。
                add.add(mul); //足し算の演算子の子に掛け算の演算子を追加する。
            }
            bb = true;
        }
    }
    return bb;
}

```

隣同士の一つが演算子でなくもう片方が足し算の演算子インスタンスであった場合以下の手順を行う。

隣同士のインスタンスの参照をそれぞれ、vとoとして得る。

Fig.14 Multiplication クラスのメソッド expand における手続き
Procedure of expand method in Multiplication class

```

public boolean expand() {
    boolean bb = false;
    for (int i = 0; i < size(); i++) {
        //子の数だけ以下の手順を繰り返す。
        if (get(i).getType() == OPERATOR) //子が演算子インスタンスであれば、
            if (((OperatorNode) get(i)).expand()) //演算子インスタンスのexpandメソッドを呼び出す。
                bb = true;
    }
    return bb;
}

```

Fig.15 Addition, Absolute および TimeDerivative クラスのメソッド expand における手続き
Procedure of expandmethod in Addition, Absolute and Multiplication class

する式で与えた。入力データでは、補木と全域木を指定して、Table 2 の諸元を与えた (Fig.20)。入力データの上から2行目までは、II章1節cの条件に基づいて記述したグラフ構造に関する情報である。1行目は節点数が7個であることを記している。2行目は線の指定である。一本の辺のデータは始点と終点の番号および補木か木か

を指定するフラグの並びで表している。全域木の辺の場合が1で、補木の辺の場合が2としている。合計11本の辺のデータをカンマ(,)で区切って番号順に並べている。それ以降の行は、パイプラインシステム内の水槽と管路の諸元を記したものである。

入力データの最終行から数えて7行目から最終行まで

は、流量境界 q_{10} を表すために追加した辺 10 の情報である。流量境界 q_{10} は水需要変動 Q_i を三角関数で表している。例えば、(26) 式のように表すことができる。入力データでは、 q_i を $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ として、この水需要変動 Q_i の式を `FunctionImpl0` という名前のクラスに実装していることを表記している。

$$Q_i = q_i (1 + 0.5 \sin(\omega t)) \dots\dots\dots (26)$$

プログラムによって出力された結果は、**Fig.21** のとおりである。数式処理されて、流量連続条件から(6)式と(7)式を導出し、エネルギー連続条件(14)式から状態方程式(25)式が導出されていることが確認できる。導出された状態方程式のインスタンスは、ルンゲ・クッタ法などの常微分方程式を時間積分を定義したクラスのインスタンスに渡され、演算子クラス `OperatorNode` のインスタンスが `eval()` メソッドを呼び出されることによって、

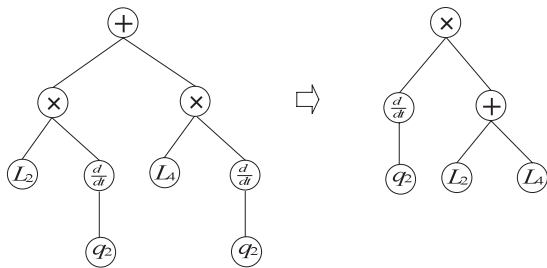


Fig.16 構文木による因数分解の表現

Expression of factorization using by the syntax tree

数式の評価が行われ、数値解が得られることになる。この例のように、簡易な数式処理システムを実装すれば、グラフ構造の情報と水槽と管路の諸元を入力することによって、状態方程式が自動的に求まる。これら一連の数値解析の作業を行うためには、その他にも、データ入力と出力を実装する必要があるが、紙面の都合上説明しない。

V 結 言

本稿を整理すると、以下のように要約できる。

- ①剛性モデルに基づく接続解析では、状態変数の数が状態方程式よりも多く冗長であった。冗長さを取り除くために、補助的な入力データが必要であった。しかし、剛性モデルに基づく閉路解析では、システムグラフを全域木と補木とに分離できれば、状態変数がどれか判明し、状態変数と同じ数だけ状態方程式が得られることを説明した。
- ②剛性モデルに基づく状態方程式は、パイプラインシステムの接続関係や境界条件の配置によって異なるので、他の問題を解く場合には、新たに状態方程式を導出する必要がある。一般に広く普及しているオブジェクト指向プログラム言語 `Java` を用いて簡易な数式処理システムを実装して、状態方程式の導出を自動化した。

```

public boolean factorBy(Node pe) {
    boolean doneSomething = false;
    OperatorNode aa = OperatorNode.getOperator(OperatorNode.ADD);
    for (int i = size() - 1; i >= 0; i--) {
        Node p = get(i);
        if (p.getType() == Node.OPERATOR
            && ((OperatorNode) p).getOperatorType() == OperatorNode.MULT
            && ((OperatorNode) p).contains(pe)) {
            if (((OperatorNode) p).size() == 1)
                aa.add(new Number(1));
            else {
                p.remove(pe);
                aa.add(p);
            }
            this.remove(p);
            doneSomething = true;
        } else if (p.equals(pe)) {
            aa.add(new Number(1));
            this.remove(p);
            doneSomething = true;
        }
    }
    if (aa.size() > 0) {
        OperatorNode mult = OperatorNode.getOperator(OperatorNode.MULT);
        mult.add(pe);
        mult.add(aa);
        this.add(mult);
    }
    return doneSomething;
}
    
```

//新たに足し算のインスタンスを作る。
//子の数だけ以下の手順を繰り返す。
// i 番目の子インスタンスをpとする。

子pが掛け算の演算子インスタンスであり、
引数で渡された要素peを含んでいる場合、
以下の手順を繰り返す。

//要素peの参照を子pから取り除く。
//足し算インスタンスへ子pの参照を追加する。

// i 番目の子pの参照を取り除く。

//要素peが子pのインスタンスと同じものであれば、
//足し算インスタンスに-1の数インスタンスを追加する。
//自分自身からi 番目の子pの参照を取り除く。

//新たに掛け算のインスタンスを作る。
//掛け算インスタンスへ要素peの参照を追加する。
//掛け算インスタンスへ足し算インスタンスの参照を追加する。
//掛け算インスタンスの参照を自分自身に追加して付け替える。

Fig.17 OperationNode クラスのメソッド factorBy における手続き
Procedure of factorBy method in OperationNode class

③著者ら (2011) が示した①に対する閉路解決方法と本稿で提案した②の数式処理の手順を一般化することによって、剛性モデルによる閉路解析の数値解析手法を自動化することが可能となった。これによって、弁の完全閉鎖を扱う問題や調整池の設置の必要性を検討する問題などの管路の接続関係を修正する必要がある場合に、新たに閉じたグラフを作成し直すれば、①閉路情報を得る作業と②数式処理を行い状態方程式を導出する作業を自動化することができるため、容易に技術者が解析する可能性が期待できる。

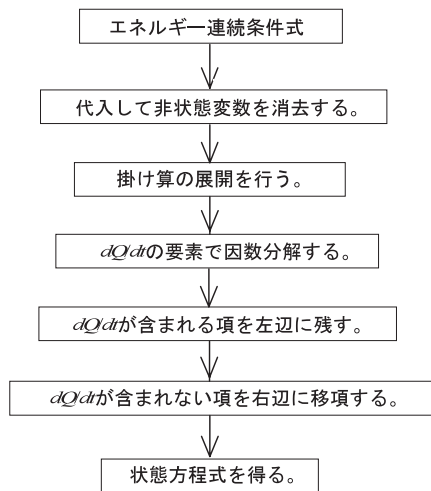


Fig.18 エネルギー連続条件から状態方程式を導出する手続きのフローチャート
Flowchart which deduces state equation from energy condition of continuity

参考文献

- 1) 猪股俊光, 益崎真治 (1994) : Scheme による記号処理入門, 57-68, 森北出版, 東京
- 2) Doris R. Ryan and Stephen Chen (1981) : A Comparison of Three Algorithms for Finding Fundamental Cycles in a Directed Graph, Networks, 11, 1-12
- 3) 内藤克美, 小山潤, 岩崎和己 (1983) : 管路系の“ゆるやかな過渡水理現象”解析のための汎用プログラムの開発, 農土誌, 51, 3, 215-227
- 4) 落水浩一郎, 東田雅宏 (1998) : オブジェクトモデリング, 新版, 4-32, アジソンウェスレイ, 東京
- 5) 鬼塚宏太郎 (1977) : 状態空間解析による枝わかれ管路のサージング減衰特性の評価, 土木学会論文報告集, 262, 79-88
- 6) 鬼塚宏太郎 (1981) : 農業用水幹線パイプラインの非定常解析に関する研究, 東京農工大学農学部学術報告, 22, 1-54
- 7) 鬼塚宏太郎 (1998) : 送配水システム解析入門, 61-85, 技報堂出版, 東京
- 8) ポール・グレラム, (訳) 久野雅樹, 須賀哲夫 (2002) : ANSI Common Lisp, 6-10, ピアソン・エデュケーション, 東京
- 9) 島田正志 (1991) : パイプライン非定常流の剛性モデル・接続行列法における状態変数の決定法, 農土論集, 156, 17-22
- 10) 田中良和, 中田達, 樽屋啓之 (2012) : パイプライン非定常流の剛性モデル・閉路解析における全域木と補木の辺の決定支援方法, 農工研技報, 212, 1-12

```

private void processEnergyCont() {
    eqFromEnergyContCond = new ArrayList<OperatorNode>();
    eqFromEnergyContCondLHS = new ArrayList<OperatorNode>();
    Object[] key = nonStateToStateVarMap.keySet().toArray();
    for (int i = 0; i < energyContEq.length; i++) {
        for (int j = 0; j < key.length; j++)
            energyContEq[i].replace((VarNode) key[j],
                nonStateToStateVarMap.get(key[j]), true);
        energyContEq[i].levelize();
        energyContEq[i].reduceMul(true);
        energyContEq[i].expandAll();
        energyContEq[i].levelize();
        energyContEq[i].reduceMul(true);
        boolean containsQdot = false;
        for (int j = 0; j < edges.length; j++) {
            if (edges[j].isStateVariable() && edges[j].getQdot() != null) {
                if (energyContEq[i].factorBy(edges[j].getQdot()))
                    containsQdot = true;
            }
        }
    }
}
    
```

状態方程式の右辺と左辺を格納する連結リストの作成

非状態変数に状態変数の関係式を代入する。

掛け算の展開を行う。

dQ/dtの要素で因数分解する。

Fig.19(a) エネルギー連続条件から状態方程式を導出する手続きのコード (前半)
Code of procedure which deduces state equation from energy condition of continuity (anterior half)


```

if (containsQdot) {
    OperatorNode add0 = OperatorNode.getOperator(OperatorNode.ADD);
    OperatorNode add1 = OperatorNode.getOperator(OperatorNode.ADD);
    loopk: for (int k = 0; k < energyContEq[i].size(); k++) {
        Node nd = energyContEq[i].get(k);
        boolean lhs = false;
        if (nd.getType() == Node.OPERATOR) {
            OperatorNode on = (OperatorNode) nd;
            for (int j = 0; j < edges.length; j++) {
                boolean contains = edges[j].isStateVariable()
                    && edges[j].getQdot() != null
                    && on.contains(true, edges[j].getQdot());
                if (contains) {
                    add0.add(nd);
                    lhs = true;
                    continue loopk;
                }
            }
        } else {
            for (int j = 0; j < edges.length; j++) {
                if (edges[j].isStateVariable()
                    && edges[j].getQdot() != null
                    && nd.equals(edges[j].getQdot())) {
                    add0.add(nd);
                    lhs = true;
                    break;
                }
            }
        }
        if (!lhs) {
            OperatorNode o = OperatorNode
                .getOperator(OperatorNode.MULT);
            o.add(new Number(-1));
            o.add(nd);
            add1.add(o);
            add1.levelize();
            add1.reduceMul(true);
        }
    }
    eqFromEnergyContCondLHS.add(add0);
    eqFromEnergyContCond.add(add1);
}
}
}

```

dQ/dt が含まれる
項を左辺に残す。

dQ/dt が含まれない
項を右辺に移項する。

状態方程式を得る。

Fig.19(b) エネルギー連続条件から状態方程式を導出する手続きのコード (後半)
Code of procedure which deduces state equation from energy condition of continuity (last half)

Table 2 パイプラインシステム (Fig.2) の水槽と管路の諸元
Dimension of tanks and pipes in pipeline system described in Fig.2

管路番号	口径 (m)	長さ (m)	摩擦損失係数	水槽番号	水面積 (m ²)	定常水位 (m)	初期水位 (m)
1	1.2	2000	0.0268	0	5000	60	60
2	0.8	1000	0.0226	1	5000	無し	50
3	0.5	1000	0.0221	4	4500	無し	30
4	0.8	4000	0.0226	5	5000	45	45
5	0.5	4000	0.0226				
6	0.5	1000	0.0221				

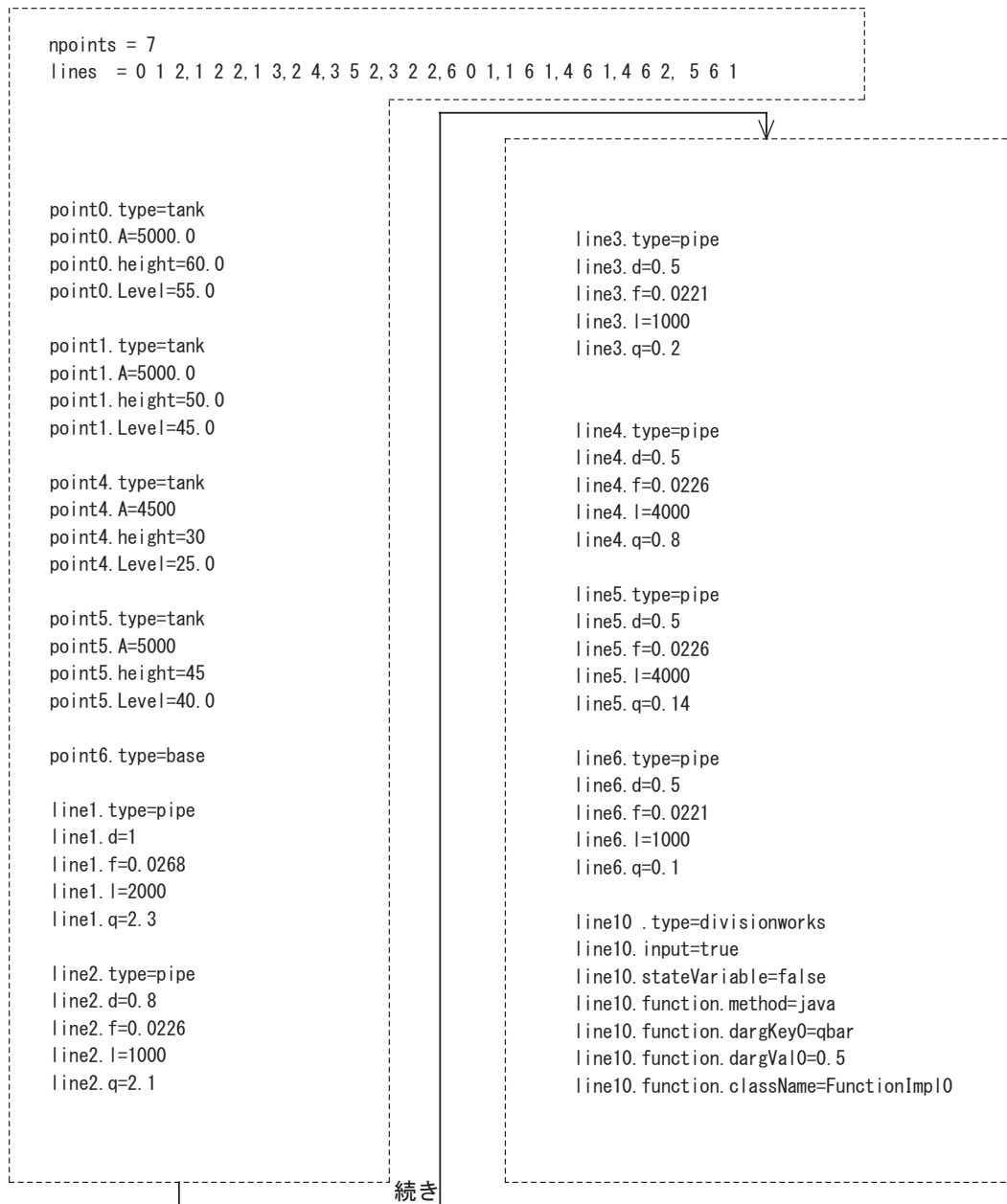


Fig.20 パイプラインシステムの水槽と管路の諸元 (Table 2) を入力するデータの書式
 Format of data which inputed the dimension of tank and pipe line in pipeline system listed at Table 2

```

--- 各辺の流量ベクトルと損失水頭ベクトル ---
流量ベクトル 3 : q3
流量ベクトル 4 : q4
流量ベクトル 7 : q7
流量ベクトル 8 : A1 x dH1/dt
流量ベクトル 9 : A4 x dH4/dt
流量ベクトル 11 : A5 x dH5/dt
流量ベクトル 1 : q1
流量ベクトル 2 : q2
流量ベクトル 5 : q5
流量ベクトル 6 : q6
流量ベクトル 10 : q10

損失水頭ベクトル 3 : (L3 x dq3/dt + K3 x |q3| x q3)
損失水頭ベクトル 4 : (L4 x dq4/dt + K4 x |q4| x q4)
損失水頭ベクトル 7 : (0 + -1.0 x H0)
損失水頭ベクトル 8 : (H1 + -1.0 x 0)
損失水頭ベクトル 9 : (H4 + -1.0 x 0)
損失水頭ベクトル 11 : (H5 + -1.0 x 0)
損失水頭ベクトル 1 : (L1 x dq1/dt + K1 x |q1| x q1)
損失水頭ベクトル 2 : (L2 x dq2/dt + K2 x |q2| x q2)
損失水頭ベクトル 5 : (L5 x dq5/dt + K5 x |q5| x q5)
損失水頭ベクトル 6 : (L6 x dq6/dt + K6 x |q6| x q6)
損失水頭ベクトル 10 : (H4 + -1.0 x 0)

--- 状態方程式の構築 ---
流量連続条件式 0 : (q3 + -1.0 x q5 + -1.0 x q6) = 0
流量連続条件式 1 : (q4 + -1.0 x q2 + -1.0 x q6) = 0
流量連続条件式 2 : (q7 + -1.0 x q1) = 0
流量連続条件式 3 : (A1 x dH1/dt + -1.0 x q1 + q2 + q5 + q6) = 0
流量連続条件式 4 : (A4 x dH4/dt + -1.0 x q2 + -1.0 x q6 + q10) = 0
流量連続条件式 5 : (A5 x dH5/dt + -1.0 x q5) = 0
|
非状態変数
q7 = 1.0 x q1
q4 = (1.0 x q2 + 1.0 x q6)
q3 = (1.0 x q5 + 1.0 x q6)
状態変数
A1 x dH1/dt = (1.0 x q1 + -1.0 x q2 + -1.0 x q5 + -1.0 x q6)
A4 x dH4/dt = (1.0 x q2 + 1.0 x q6 + -1.0 x q10)
(7)式
(6)式

--- A行列 ---
A1 = 5000.0
A4 = 4500.0

--- A行列の逆行列 ---
A^-1(0) = 2.0E-4
A^-1(1) = 2.2222222222222223E-4

エネルギー連続条件式 0 : ((0 + -1.0 x H0) + (H1 + -1.0 x 0) + (L1 x dq1/dt + K1 x |q1| x q1)) = 0
エネルギー連続条件式 1 : ((L4 x dq4/dt + K4 x |q4| x q4) + -1.0 x (H1 + -1.0 x 0) + (H4 + -1.0 x 0) + (L2 x dq2/dt + K2 x |q2| x q2)) = 0
エネルギー連続条件式 2 : ((L3 x dq3/dt + K3 x |q3| x q3) + -1.0 x (H1 + -1.0 x 0) + (H5 + -1.0 x 0) + (L5 x dq5/dt + K5 x |q5| x q5)) = 0
エネルギー連続条件式 3 : ((L3 x dq3/dt + K3 x |q3| x q3) + (L4 x dq4/dt + K4 x |q4| x q4) + -1.0 x (H1 + -1.0 x 0) + (H4 + -1.0 x 0) + (L6 x dq6/dt + K6 x |q6| x q6)) = 0
エネルギー連続条件式 4 : (-1.0 x (H4 + -1.0 x 0) + (H4 + -1.0 x 0)) = 0
(14)式

--- 非状態変数を状態変数で展開 ---
(dq2/dt x (L4 x 1.0 + L2) + dq6/dt x L4 x 1.0)
= (-1.0 x K2 x |q2| x q2 + -1.0 x H4 + 1.0 x 0 + -1.0 x (K4 x 1.0 x q2 + K4 x 1.0 x q6) x |(1.0 x q2 + 1.0 x q6)| + 1.0 x H1 + -1.0 x 0)
(dq5/dt x (L3 x 1.0 + L5) + dq6/dt x L3 x 1.0)
= (-1.0 x K5 x |q5| x q5 + -1.0 x H5 + 1.0 x 0 + -1.0 x (K3 x 1.0 x q5 + K3 x 1.0 x q6) x |(1.0 x q5 + 1.0 x q6)| + 1.0 x H1 + -1.0 x 0)

--- L行列 ---
L(0,0) = (L4 x 1.0 + L2) = 2281.7621943276827
L(0,1) = 0.0 x 0.0 = 0.0
L(0,2) = L4 x 1.0 = 2078.7584403839387
L(1,0) = 0.0 x 0.0 = 0.0
L(1,1) = (L3 x 1.0 + L5) = 2598.4480504799235
L(1,2) = L3 x 1.0 = 519.6896100959847
L(2,0) = L4 x 1.0 = 2078.7584403839387
L(2,1) = L3 x 1.0 = 519.6896100959847
L(2,2) = (L4 x 1.0 + L3 x 1.0 + L6) = 3118.1376605759083
(25)式

--- 最終的に得られた状態方程式 ---
dH1/dt = (q1 + -1.0 x q2 + -1.0 x q5 + -1.0 x q6) x A^-1(0)
dH4/dt = (q2 + q6 + -1.0 x q10) x A^-1(1)
dq2/dt =
(K2*-1.0*L^-1(0,0) x |q2| x q2 + -1.0*L^-1(0,0) x H4 + -1.0*L^-1(0,0) x (1.0*K4 x q2 + 1.0*K4 x q6) x |(1.0 x q2 + 1.0 x q6)| + L^-1(0,0) x H1 + K5*-1.0*L^-1(0,1) x |q5| x q5 + -1.0*L^-1(0,1) x H5 +
-1.0*L^-1(0,1) x (1.0*K3 x q5 + 1.0*K3 x q6) x |(1.0 x q5 + 1.0 x q6)| + L^-1(0,1) x H1 + K6*-1.0*L^-1(0,2) x |q6| x q6 + -1.0*L^-1(0,2) x H4 + -1.0*L^-1(0,2) x (1.0*K4 x q2 + 1.0*K4 x q6) x |(1.0 x q2
+ 1.0 x q6)| + -1.0*L^-1(0,2) x (K3 x q5 + K3 x q6) x |(q5 + q6)| + L^-1(0,2) x H1)
dq5/dt =
(K2*-1.0*L^-1(1,0) x |q2| x q2 + -1.0*L^-1(1,0) x H4 + -1.0*L^-1(1,0) x (1.0*K4 x q2 + 1.0*K4 x q6) x |(1.0 x q2 + 1.0 x q6)| + L^-1(1,0) x H1 + K5*-1.0*L^-1(1,1) x |q5| x q5 + -1.0*L^-1(1,1) x H5 +
-1.0*L^-1(1,1) x (1.0*K3 x q5 + 1.0*K3 x q6) x |(1.0 x q5 + 1.0 x q6)| + L^-1(1,1) x H1 + K6*-1.0*L^-1(1,2) x |q6| x q6 + -1.0*L^-1(1,2) x H4 + -1.0*L^-1(1,2) x (1.0*K4 x q2 + 1.0*K4 x q6) x |(1.0 x q2
+ 1.0 x q6)| + -1.0*L^-1(1,2) x (K3 x q5 + K3 x q6) x |(q5 + q6)| + L^-1(1,2) x H1)
dq6/dt =
(K2*-1.0*L^-1(2,0) x |q2| x q2 + -1.0*L^-1(2,0) x H4 + -1.0*L^-1(2,0) x (1.0*K4 x q2 + 1.0*K4 x q6) x |(1.0 x q2 + 1.0 x q6)| + L^-1(2,0) x H1 + K5*-1.0*L^-1(2,1) x |q5| x q5 + -1.0*L^-1(2,1) x H5 +
-1.0*L^-1(2,1) x (1.0*K3 x q5 + 1.0*K3 x q6) x |(1.0 x q5 + 1.0 x q6)| + L^-1(2,1) x H1 + K6*-1.0*L^-1(2,2) x |q6| x q6 + -1.0*L^-1(2,2) x H4 + -1.0*L^-1(2,2) x (1.0*K4 x q2 + 1.0*K4 x q6) x |(1.0 x q2
+ 1.0 x q6)| + -1.0*L^-1(2,2) x (K3 x q5 + K3 x q6) x |(q5 + q6)| + L^-1(2,2) x H1)

```

Fig.21 構築した数式処理システムによる出力結果
Output result by constructed formula manipulation system

Automation Method of State Equations by Object Oriented Programming Using Rigid Water Column Model of Analyzing Slow Transients in Pipelines

TANAKA Yoshikazu, NAKADA Toru and TARUYA Hiroyuki

Summary

The aspect of a water demand changes with agricultural business change in recent years, and the rational water management which coincides with the water-use plan has been required. Numerical fluid analysis technique is an effective technique it examines the plan which carries out improvement of the elastic method of the water management and improvement of facilities. In rigid water column model-closed circuit analysis for slow transients in pipeline, it is advantageous that independent variable and dependent variable of the flow rate are automatically got, if to separate system graph to spanning tree and cotree is possible, and shortly obtains the state equation. However, there was a problem in which to transform those mathematical expressions was very troublesome. Then, the simple formula manipulation system was constructed according to the object oriented programming language. By the benefit of this program, it would be possible to automatically deduce the state equation, and it would be possible that the numerical analysis solution was smoothly obtained. The possibility of spreading through the engineer can be expected, since the difficulty of the mathematical work for utilizing rigid water column model-closed circuit analysis for slow transients in pipeline is removed.

keywords: pipeline system, graph theory, state equation, unsteady flow analysis, formula manipulation, object oriented programming

〔農工研技報 212〕
〔29 ~ 42, 2012〕

水路の沈下による水利用・水理機能の低下に関する実態調査 および分析

中田 達*・藤山 宗**・樽屋啓之*・田中良和*

目次

I 緒言	29	3 沈下に対する地形的・地質的要因	34
II 調査地区の概要	30	V 岡堰地区における調査結果	35
1 小貝川流域の概要	30	1 水路の沈下とそれに応じた対策事業の経緯	35
2 小貝川水系における用排水システム	30	2 水路の縦断測量結果と 沈下対策区間との対応	35
III 調査方法	31	3 沈下に伴う水理機能の低下の評価	35
1 聞き取り調査	31	VI 水路の構造的な変状が引き起こす水利用・ 水理的な機能低下事例の分析	38
2 測量調査	31	VII 結言	40
IV 福岡堰地区における調査結果	31	参考文献	41
1 水路の沈下とそれに応じた対策事業の経緯	31	Summary	42
2 水路の縦断測量結果と 沈下対策区間との対応	32		

I 緒言

我が国の農業水利施設の多くが長期供用下におかれ更新の時期を迎えつつある中、農業水利システムにおける総合的な機能診断の必要性や性能照査型設計への指向が高まっている。水路システムを対象として、これまでに水利用・水理機能についての性能項目が提示され（中ら、2008）、機能診断手法の検討事例が積み上げられてきた（三春ら、2008；三春ら、2009；樽屋・三春、2009；伊藤ら、2011）。施設の補修・更新事業に際しては、現時点において保持している機能と、建設当時（過去）に保持していた機能、さらには将来的に保持すべき（計画上の）機能の全てに対して、同じ客観的基準で比較できる評価手法が望まれる。水路の本来機能である、受益面積に対する需要水量を確保し圃場へと配水するためには、水路システム内の各施設における通水性や分水制御性といった評価指標を適切に機能診断する必要がある。しかし、それらを現時点でそのような要請に一律に応えられるような方法は確立されておらず、構造性能にくらべて水利用・水理性能に関する性能設計の導入が進みにくい

理由の一つになっている。

従来、コンクリート水路では、長期間の供用によって発生する、摩耗やひび割れなどの変状が問題にされてきた。これらの変状は、水理学的には、水路潤辺の摩擦に大きな影響を及ぼすと考えられている。具体的には、変状により潤辺の摩擦力が大きくなるために、単位断面積あたりで輸送できる流量が減少し、水位が上昇し、その結果、水路の余裕高を越えて溢水するという因果関係が想定された。ストックマネジメント事業に基づく機能診断では、早い段階から、上述した考え方にに基づき、マンシングの粗度係数の変化を通じて水路の水理機能を評価する事例が蓄積されてきた（織間・中島、2004；（財）日本水土総研、2006）。

一方、水路材料の変状とは性質を異にする水路構造の変位現象として、水路の沈下がある。水路の沈下は、地震・液状化による突発的な地盤沈下だけでなく、地下水のくみ上げや脆弱な地盤などを背景とする中長期的な圧密沈下もその起因と想定され、構造物の立地条件や地形条件等の違いに基づいて不均一に生じる。これまでに水路の沈下は、余裕高さの減少に伴う溢水や切断された継ぎ目からの漏水といった流れに直接影響する要因として課題視されていた。今後、水路システムの補修・更新を性能照査型設計にしたがって進める上で、水利用・水理機能の診断は不可欠であるが、水路の沈下に伴って発生する段差や漏水などの機能低下を、バレル単位で詳細に調査した事例は少なく、また、このような構造的な変位

* 水利工学研究領域水路システム担当

** (株) 三祐コンサルタンツ

平成 24 年 1 月 17 日受理

キーワード 機能診断, 要求性能, 不同沈下, 用水システム, 漏水, 余裕高

が水路の水利機能に及ぼす影響は、これまで十分に検討されていなかった。

本報告は、小貝川水系の歴史の古い開水路系水路システムにおいて実施した、沈下の実態とその原因、水利機能に関わる項目の調査結果をまとめたものである。管理組織からの聞き取り調査や学術・技術情報などのコンクリート開水路の水利利用・水理的機能診断を実施するのに必要となるデータを広範に収集した。また、水路標高の水準測量を行って水路縦断面図を作成し、水路の沈下の程度や縦断面方向の変位パターンの実態を把握することを目的とした。

なお、本報告における調査の実施に際しては、対象地区の水路システムを管理する福岡堰土地改良区の青嶋事務局長、岡堰土地改良区の中山工務管理課長には、データの収集や聞き取り調査などの多大なるご協力を賜った。ここに記して感謝申し上げる。

II 調査地区の概要

調査対象地区は茨城県の小貝川からそれぞれ取水する、福岡堰地区および、岡堰地区の2地区で行った。

1 小貝川流域の概要 (佐藤, 1987)

Fig.1に小貝川および小貝川が合流する利根川、西側に隣接して流れ、おなじく利根川と合流する鬼怒川的位置関係を示した流域の概略図を示す。小貝川は、水源を栃木県那須郡南那須町の丘陵(標高187m)に発し、茨城県取手市南端に於いて利根川に合流する流域面積1,043.1 km²、流路延長111.8 kmの河川である。小貝川と鬼怒川は茨城県西部の氾濫原低地をながれ河道を1つに

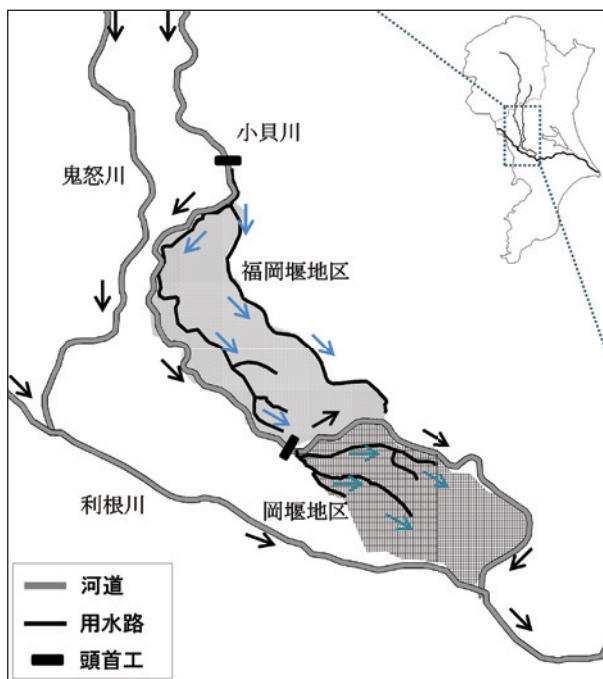


Fig.1 調査地区の概要
Study sites

合流する時代もあったが、江戸時代初期(1630年)に鬼怒川および小貝川の分離が進められた。鬼怒川と小貝川を分離することにより、広大な湿地であった谷和原領一帯を洪水被害から守るとともに、新田開発が進められた。Fig.2に国土交通省5万分の1都道府県土地分類基本調査(地形区分図)における小貝川流域の地形図を示す。小貝川下流域においては、右岸側の守谷市街をなす台地と左岸の筑波山麓台地との沖積面を流下し、福岡堰地区および、岡堰地区は鬼怒川および鬼怒川と小貝川の合流河川が形成した堆積面に位置する。

2 小貝川水系における用排水システム

小貝川流域では、上部に、鬼怒川から取水し灌漑している水田があり、その下に、上流地区から小貝川の支流へ流出してきた落水を利用する中流部の用水群がある。そして、関東三大堰(福岡堰、岡堰、豊田堰)は、これらの用水群のさらに下流に位置している。したがって、小貝川下流三大堰が利用できる水量は、鬼怒川からの取水とその用水配分、小貝川中流部での水利利用によって決まってくる。

a 福岡堰地区

小貝川の福岡堰より取水し、台通用水路(延長12.6 km, 計画最大流量6.7 m³/s)、川通用水路(延長10.5 km, 計画最大流量6.6 m³/s)等に分岐されて、灌漑が行われている(Fig.3)。台通用水路は東部の丘陵地沿いを、川通用水路は小貝川左岸沿いをながれ、それぞれの幹線水路から地区内の中央に向かって支線がめぐらされ、地

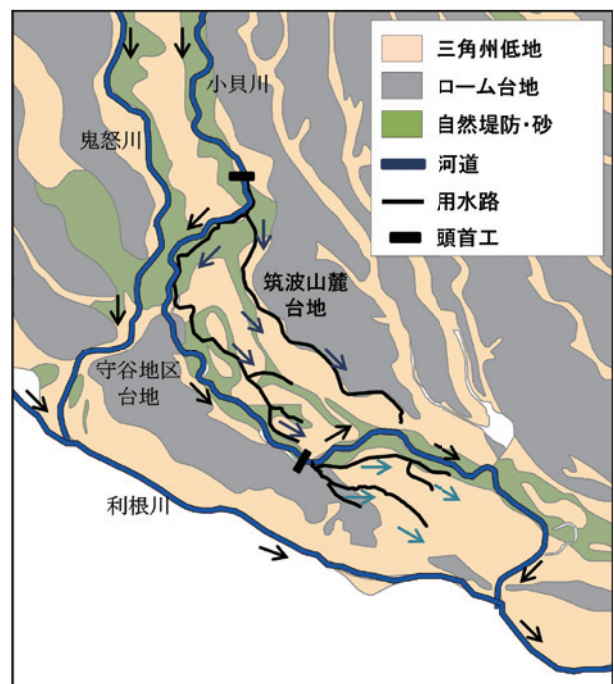


Fig.2 小貝川流域の地形区分
(国土交通省 5万分の1都道府県土地分類基本調査 地形区分図より改編)

Physiographic division in Kokai river basin

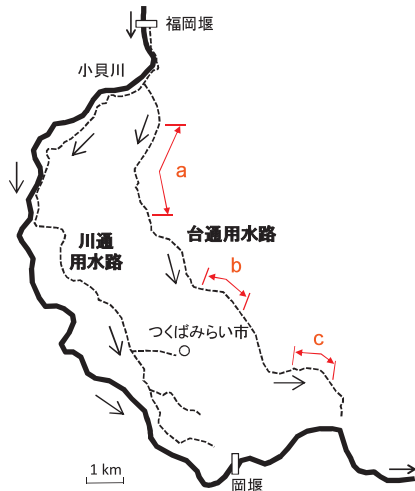


Fig.3 福岡堰地区の用水系統および測量区間

The irrigation canal systems of the Fukuokazeki area and surveying sections

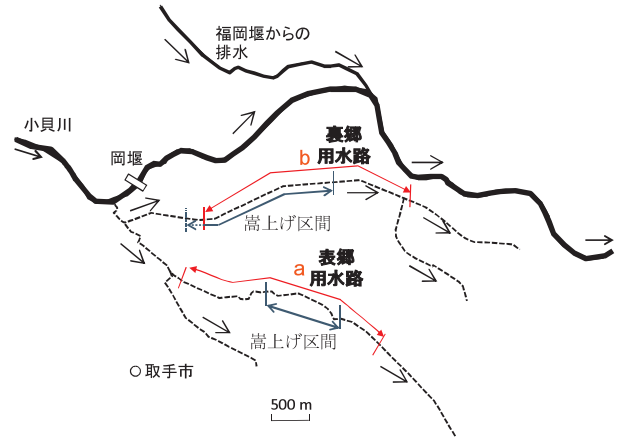


Fig.4 岡堰地区の用水系統および測量区間

The irrigation canal systems of the Okazeki area and surveying sections

区中央を流れる排水路である中通川に排水される。福岡堰地区は小貝川下流三大堰の最上流に位置しているため、水利用に関して最も有利であると言える。基本的には重力灌漑であり、地区内の上流側は用排分離であるが、代かき期には下流での水不足に陥ることもあり、支線排水路から用水路へとポンプを稼働させて用水の反復利用を行っている地区もある。

b 岡堰地区

小貝川の福岡堰より下流に位置する岡堰より取水し、表郷用水路（延長 8.1 km、計画最大流量 4.2 m³/s）、裏郷用水路（延長 9.8 km、計画最大流量 5.3 m³/s）に分岐されて、灌漑が行われている（Fig.4）。

岡堰頭首工は福岡堰地区からの排水河川である中通川の合流部より上流に位置するため、福岡堰の排水を利用することができず、水利用に関して、より不利であり、水確保のため間断取水および用水の反復利用が行われている。

III 調査方法

沈下が発生した水路において、溢水・流量不足・漏水といった水理機能の性能低下をいち早く発見するために、事前の聞き取り・文献調査などをもとに測量調査計画を立て、通水断面の変化に関する機能診断を実施した。実態調査における聞き取り調査および測量調査の方法を以下に示す。

1 聞き取り調査

対象地区の水路システムを管理する福岡堰土地改良区および岡堰土地改良区に聞き取り調査を行った。

聞き取り項目としては、水路の諸元、地区の地形的・地質的特徴、沈下している区間、過去に沈下していた区

間、沈下により生じた課題（溢水、漏水、分水障害など）、および沈下対策の概要・事業履歴などである。

2 測量調査

聞き取り調査をもとに地区内の水路敷高の水準測量調査を行う区間を決定した。それぞれの測量調査区間を Fig.3 および Fig.4 に示す。福岡堰地区は台通用水路の上流部 3.6 km（a 区間）、中流部 1.6 km（b 区間）、下流部 1.3 km（c 区間）の 3 区間を対象とした。岡堰地区は表郷用水路の 3.0 km（a 区間）、裏郷用水路の 3.3 km（b 区間）の 2 区間を対象とした。

測量は、コンクリート打設の目地と目地の 1 区切り（6～9 m 程度）を 1 バレルとし、各バレルの中央部の水路敷高を水準測量で測定した。同時に標尺・水準器を用いて水路壁高さおよび水位痕跡高さを測定した。水位痕跡は水路壁の摩擦度合いや水草・泥の痕跡が残っており、灌漑期間中の通常期の水位として、容易に特定することができた。

IV 福岡堰地区における調査結果

1 水路の沈下とそれに応じた対策事業の経緯

聞き取り調査によって、台通用水路の沈下の経緯とその対策を明らかにした。Fig.5 に水路の沈下対策にかかる事業の年表の概要図を示した。台通用水路においては、1960年代から1970年にかけて土水路から三面張りのコンクリート水路に改修した（Fig.6-a）。地下 4 m ほどの深さに松杭を打設していたものの、脆弱な地盤のため、70年代中頃から水路の沈下がみられ、水路底版の沈下が進み、L字型の側壁との継ぎ目部分から地盤へと漏水が生じるようになった。これに伴って擁壁の亀裂、漏水、溢水等が生じ始めた。底版との地盤の沈下により水路床と地盤との間に空隙ができ、漏水が流入して土砂を

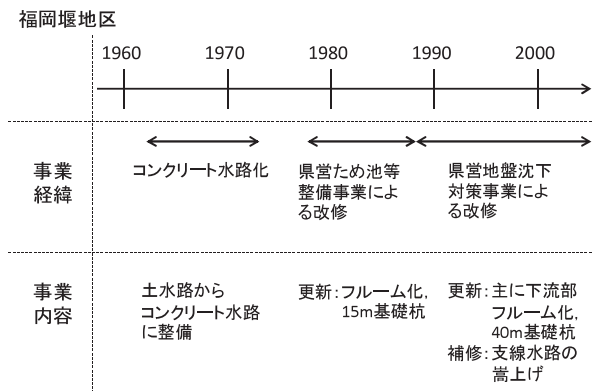


Fig.5 福岡堰地区の沈下に対する事業の経緯

Chronological table of the renewal projects for the subsidence of canals in Fukuokazeki irrigation systems

流失させ、沈下を加速させたとも考えられている。1978年から県営ため池等整備事業により沈下量の大きいところから事後保全としてバッチ状に改修を行い、各バレル(9mピッチ)の地盤に基礎杭を15m程度打設した上に受台(グレー部)を設け、L字型の側壁は採用せず、コンクリートフルーム水路として3面を継ぎ目無く敷設した(Fig.6-b)。下流区間では1988年から地盤沈下対策事業により、各バレル(9mピッチ)に深層40m程度まで基礎杭を打設して沈下区間の水路を改修している。

2 水路の縦断測量結果と沈下対策区間との対応

Fig.7に測量区間を示した。国土交通省の5万分の1都道府県土地分類基本調査 表層地質図(龍ヶ崎,土浦)を用いて水路と表層地質との対応を示した。台通用水路は表層が火山灰のロームの台地部と氾濫原の堆積物が主

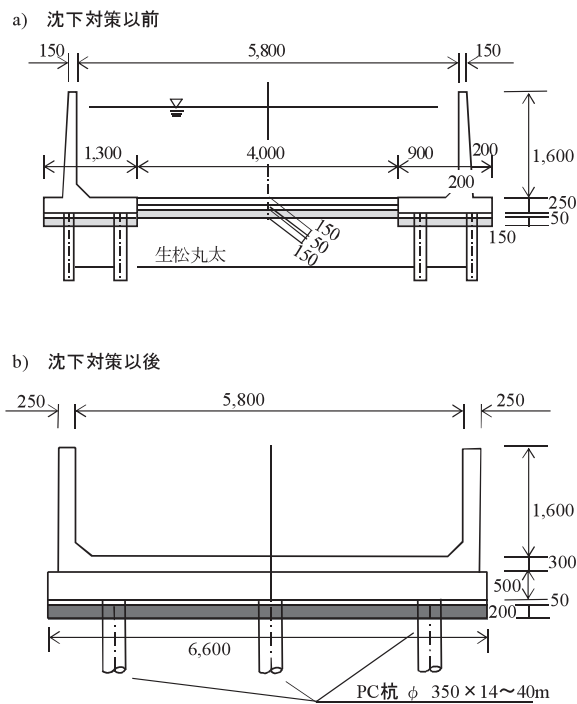


Fig.6 福岡堰地区の用水路断面形状の変遷

a) 沈下対策以前 b) 沈下対策後

The change of the irrigation canal cross-section of the Fukuokazeki area before and after maintenance for the subsidence

な谷津とが交互に入り組んだ地形となっていることがわかる。上流から中流部にかけて拡大した図において、聞き取り調査から得た県営ため池等整備事業によりバッチ状に改修を行った区間および未改修の谷津区間を図示した。台地に入り組む谷津地帯に改修区間が並び、脆弱な

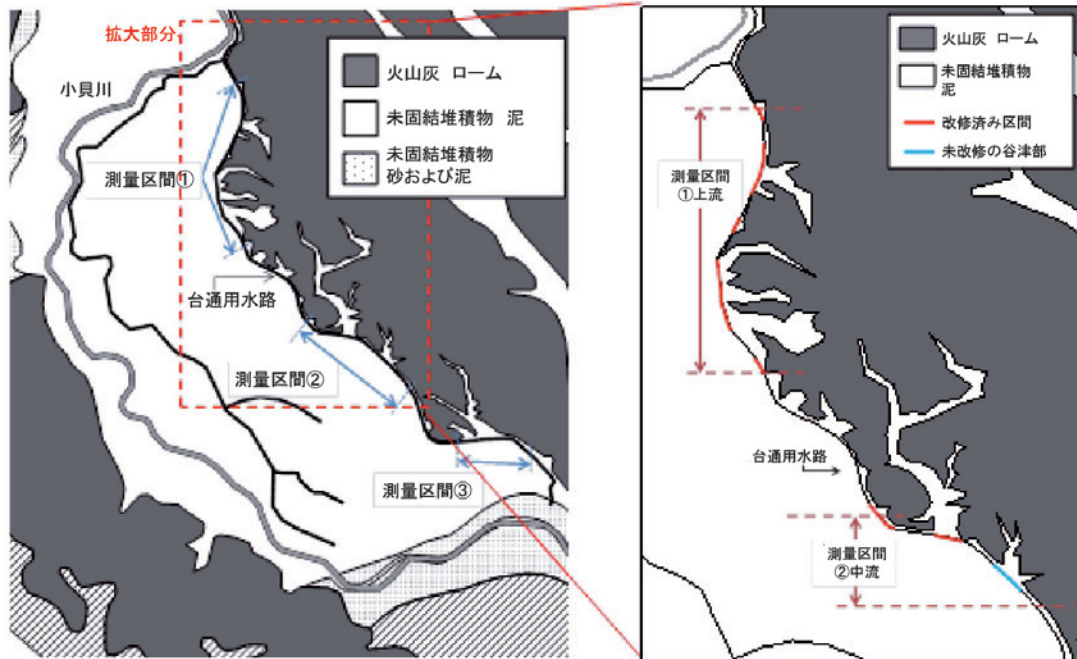
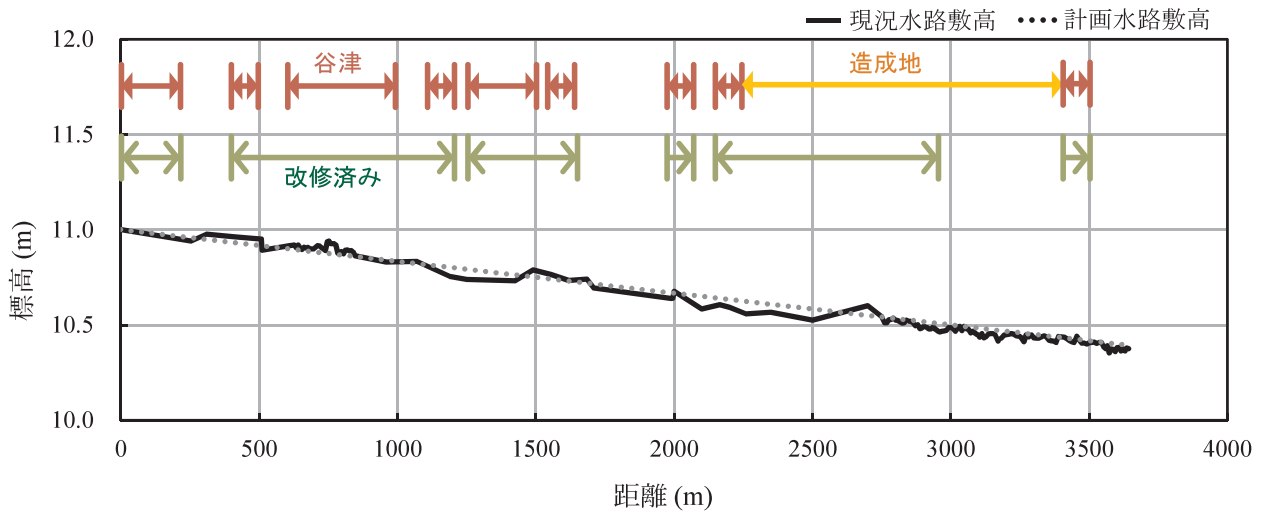


Fig.7 測量区間と表層地質の対応

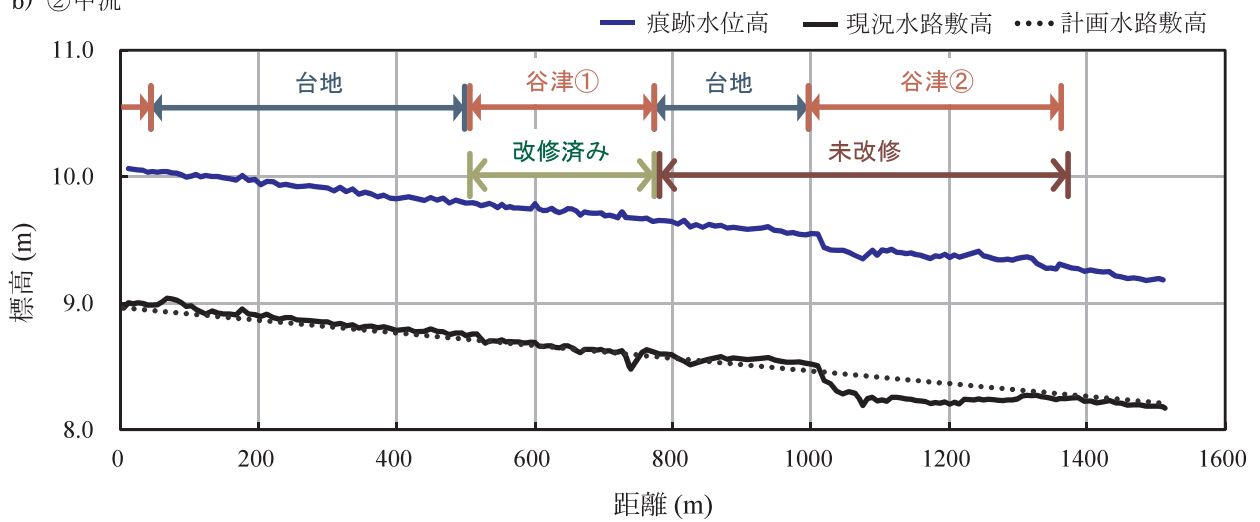
(国土交通省5万分の1都道府県土地分類基本調査 表層地質図より一部抜粋・改編)

Correspondence of surveying section and the subsurface geological map

a) ①上流



b) ②中流



c) ③下流

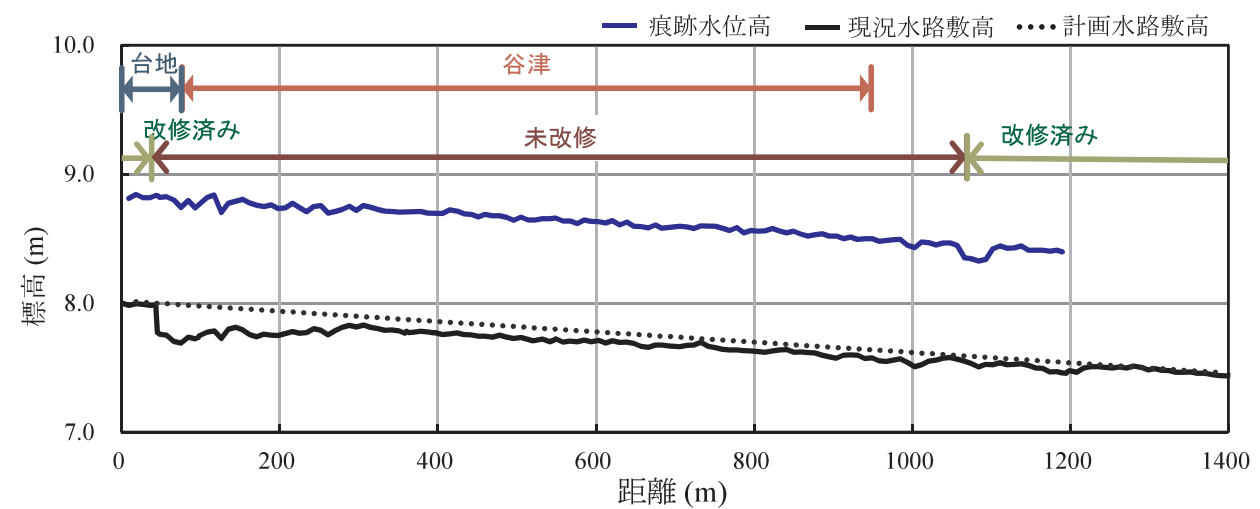


Fig.8 福岡堰地区 台通用水路の水理縦断面図

a) 上流, b) 中流, c) 下流

Longitudinal sections of irrigation canals in Fukuokazeki irrigation systems

a) upper, b) middle, c) lower stream



Fig.9 改修区間(左)と未改修区間(右)の境目
Border of repair section (left) and non-repair section (right)



Fig.10 台通用水路 下流未改修区間のバレル間の不同沈下
Subsidence between the barrels of the downstream non-repair section



Fig.11 未改修区間のバレル間の横ずれ
Wide gap between the barrels of the non-repair section

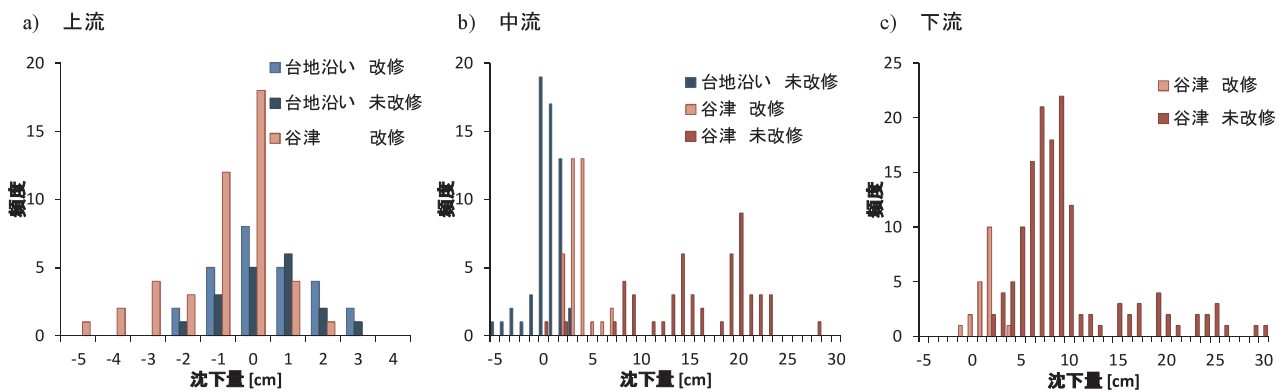


Fig.12 地形・改修履歴の分類による沈下量ヒストグラム
Subsidence histogram by the classification of the topography and the repair history

沖積土の地盤では沈下が大きかったことがうかがえる。

Fig.8に3区間の水路縦断面を示す。上流区間(Fig.8-a)では、現況では水路の改修がなされているため、谷津であっても大きな沈下は見られなかった。中流区間(Fig.8-b)では、改修がなされた谷津①では沈下が見られないが、宅地から谷津につながる未改修の区間(谷津②)では300 mほどの区間に渡って沈下していた。水路の計画水路敷高から推定する沈下量は20 cm程度であった。水路床の沈下に伴い、水位痕跡も水路床と同様の水位低下を起こしていたが、低下量は約9 cmと、水路床の沈下と比べ小さかった。谷津を超え水路左岸が台地に沿うようになると改修区間と未改修区間の境目が識別でき(Fig.9)、水路敷高は計画時の高さに戻り、沈下は生じていなかった。下流区間(Fig.8-c)はそのほとんどが未改修区間にあたるが、上流・下流を沈下対策事業の改修済み水路で挟まれている。改修区間と未改修区間の境目で20 cmほどの段差が形成され、それより200 m程度は逆勾配となっていた。これより上流ではさらに大きな沈下が生じていたために改修がなされたものと推察される。下流の未改修区間におけるバレルごとの上下のずれは最大8 cm程度であった(Fig.10)。沈下区間には土砂や貝などの堆積物がたまり、粗度係数が増加することでさらなる通水性能の低下につながる事が予想され

る。また、上下の段差だけでなく横ずれも生じており(Fig.11)、目地の補修はされているものの、漏水が課題となっているとのことであった。

国土交通省の5万分の1都道府県土地分類基本調査表層地質図と水路縦断面距離を対応させる(Fig.7-拡大図b)ことで、対象の水路区間は、水路が台地あるいは谷津に位置しているか、さらには、改修がなされたか否かによって分類できる。計画水路敷高と現況の敷高の差を沈下量として、その頻度を取り、Fig.13に示した。台地沿いに敷設された水路においては改修の有無にかかわらず、沈下量がほぼ±3 cm以内に収まり(Fig.13-a, b: 淡青, 濃青), また、地盤に基礎杭が打設されている改修後の谷津部の水路(Fig.13-a, b: 淡赤)も台地沿いと同じく沈下量は小さい。未改修の谷津部(Fig.13-b, c: 濃赤)は他の3分類と大きく異なり、中流・下流区間では10~20数cmの沈下を生じていた。施工時の計画水路敷高との誤差範囲が不明なため、現況水路敷高と計画水路敷高の相対的な差からは正確な沈下量は算定できないものの、地盤と対策履歴の分類による沈下量の差は明確に現れた。

3 沈下に対する地形的・地質的要因

福岡堰地区は小貝川の氾濫原に位置し、軟弱な地盤が

水路構造の沈下を引き起こしていると考えられる。国土交通省の5万分の1都道府県土地分類基本調査 表層地質図（龍ヶ崎、土浦）より、福岡堰地区近辺の地質について既存の資料より整理した。ボーリング位置図（Fig.13-a）地質断面図（Fig.13-b）およびボーリング柱状図（Fig.13-c）を示す。福岡堰地区中央部のボーリングA～E地点の深度10m～35m付近は、沖積層（藤代層（藤代部層）および小貝川層）が堆積しており、その下には砂礫層が堆積している。国土交通省関東地方整備局常総国道事務所が行った近隣の台地側のボーリングF地点およびG地点での標準貫入試験を行った結果をFig.13-dに示した。N値の分布をFig.13-cの柱状図と対応させると、谷部では深度25m程度までN値の小さい沖積層が主体であり、深度37m以深になってN値50以上の安定した地盤となっていることがわかる。台地上のG地点では深度10m～20m付近に見和層とみられる比較的N値が大きな層が堆積している。

台通用水路の台通用水路の谷津に沿った区間では、台地部のロームが浸食され沖積土が覆い被さった地質構造を持っていると考えられ、地盤沈下対策以前の4～5mの松杭の打設では安定した基礎となりえずに沈下が生じた。しかし流域中央部の氾濫原の地質と異なり、比較的浅い層にN値の大きな台地起源の砂礫層があり、1回目の改修事業（県営ため池等整備事業）における15m程度の基礎杭の打設であっても基礎としての効果があったと考えられ、改修がなされた谷津区間では顕著な沈下を生じていない。下流部は氾濫原の地質に近く、2回目の改修事業（県営地盤沈下対策整備事業）においては、深度40mまで基礎杭を打設して支持層とする必要があったと考えられる。

V 岡堰地区における調査結果

1 水路の沈下とそれに応じた対策事業の経緯

福岡堰地区と同様に、聞き取り調査によって、水路の沈下対策事業の年表を示した（Fig.14）。岡堰地区では、1960年代半ばに三面張りのコンクリート水路とした。水路の地盤には5m程度の松杭を打設がなされていた。しかし、福岡堰と同様に数年で沈下が生じ、現在までに2回の改修事業が行われた。一回目の改修事業の実施年度については不明であったが、二回目は1980年代後半から県営地盤沈下対策事業による改修がなされた。改修の判定基準は計画敷高より30cm以上の沈下量であった。改修時には、福岡堰と同様、深度40m程度まで基礎杭を打設してある。沈下30cm未満の水路では、計画時の壁高と同等の高さまで壁面の嵩上げ補修がなされた。

2 水路の縦断測量結果と沈下対策区間との対応

測量対象区間の水路縦断図をFig.15に示す。Fig.4に

現況の沈下区間および改修・補修区間を示した。

表郷用水路（Fig.15-a）では、改修・補修状況は大きく3つに分類される。上流の分水工から落差工がある流下距離1100m付近までは未改修区間である。この区間では、流下距離100m付近の緩やかなカーブにさしかかる区間で沈下を生じており、たびたび溢水が生じた。そのため、土地改良区によって、湾曲部外側の直下流の壁面上に13cm程度の嵩上げがされていた（Fig.16）。水路痕跡から推定される余裕高は15cmほどであり、代かき期などの最大流量を流下させる際には依然として溢水の危険性がある。落差工より下流においては、水路が沈下している区間が約1kmに渡って続いている。沈下対策として水路擁壁上部にコンクリートの嵩上げを行なわれた区間である。嵩上げ高さは最大で70cmであった（Fig.17）。改修の判定基準は30cm以上の沈下であったが、判定地点の選定によって、基準以上の沈下を生じた水路においても嵩上げによる補修で対応が済まされている実態が明らかになった。下流では水路の改修がなされ、元来の計画水路敷高に戻っている。沈下区間と改修区間の接続部は距離10mほどにわたって0.5m程度の逆勾配となっていた。沈下区間の水面形は下流の改修区間の水面形と滑らかにつながっており、水路壁の嵩上げによる対策がなされなければ、約700mにもわたって溢水の危険性を有することになっていた。

裏郷用水路においても2kmにわたる嵩上げ補修区間がみられた（Fig.15-b）。計画水路敷高と現況の敷高との差は最大70cm程度であり、こちらも補修前は溢水などの問題が生じていた可能性がある。測定開始点から250m下流において沈下量が大きくなっているが、その直上流には新たに2基の角落としが連続して設けられていた（Fig.18）。これは、水路の沈下による水位の低下に対して、上流の分水に必要な所定の水位を確保するために設置された。分水位は高すぎても問題があり、溢水しない適切な余裕高が確保されていなければならないし、漏水は水路周囲の農地の湿害、排水障害や人家への影響回避、あるいは損失水量の低減のために極力回避しなければならない。嵩上げ区間では、補修前の分水ゲート操作部の高さが不足し、改修が必要とされたゲートも存在した。水路内の水位が変化すれば、沈下前と同等の水量を支線で確保するためのゲート開度が異なると考えられ、各農家が行う分水口の操作が水路の沈下に伴ってどのような変遷を経てきたかといった管理面での対策に関して、さらなる調査が望まれる。

3 沈下に伴う水理機能の低下の評価

二つの用水路ともに水位痕跡は嵩上げ区間と改修区間で滑らかにつながっており、水面形の大きな変化は見られなかった。嵩上げ区間では水路底の沈下部に死水域があると考えられる。計画水路敷高と現況の敷高の差（Fig.15斜線部）をとり、死水量を推定したところ、表

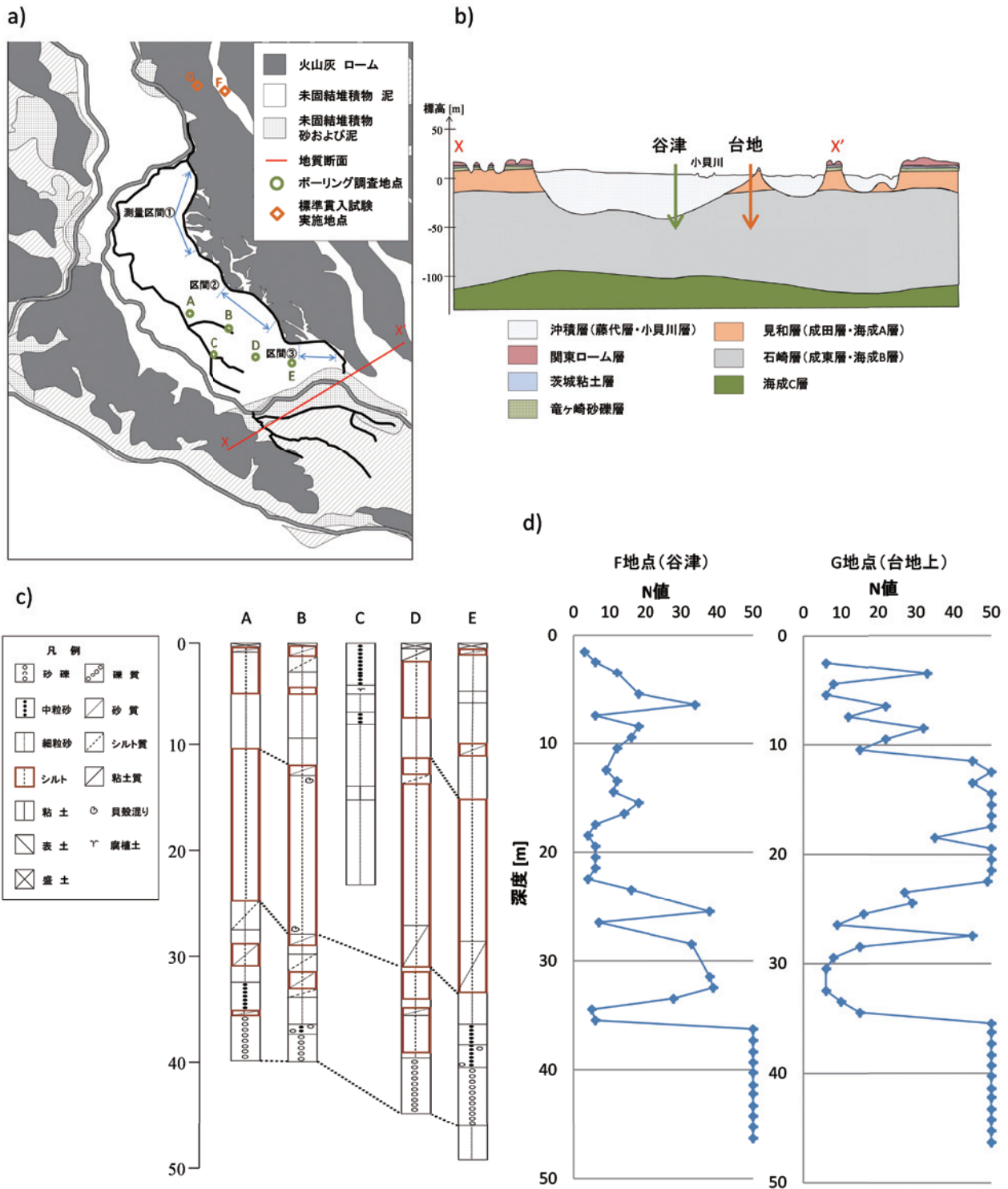


Fig.13 小貝川流域の地質構造

a: ボーリング調査地点

b: 地質断面図 (国土交通省 5万分の1 都道府県土地分類基本調査 地形区分図より改編)

c: ボーリング柱状図 (同上)

d: F, G 地点における標準貫入試験結果

(平成17年度圏央道(つくば市鳥名地区)地質調査17k32(ボーリングNo.3:F谷津, No.1:G台地上),
国土交通省 関東地方整備局 常総国道事務所, 平成18年 改編)

Geological maps in Kokai river basin

a) boring exploration points, b) geological cross-section

c) boring log, d) standard penetration test results at Point F and G

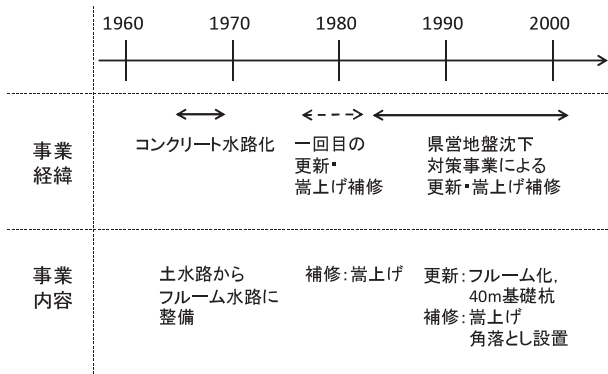


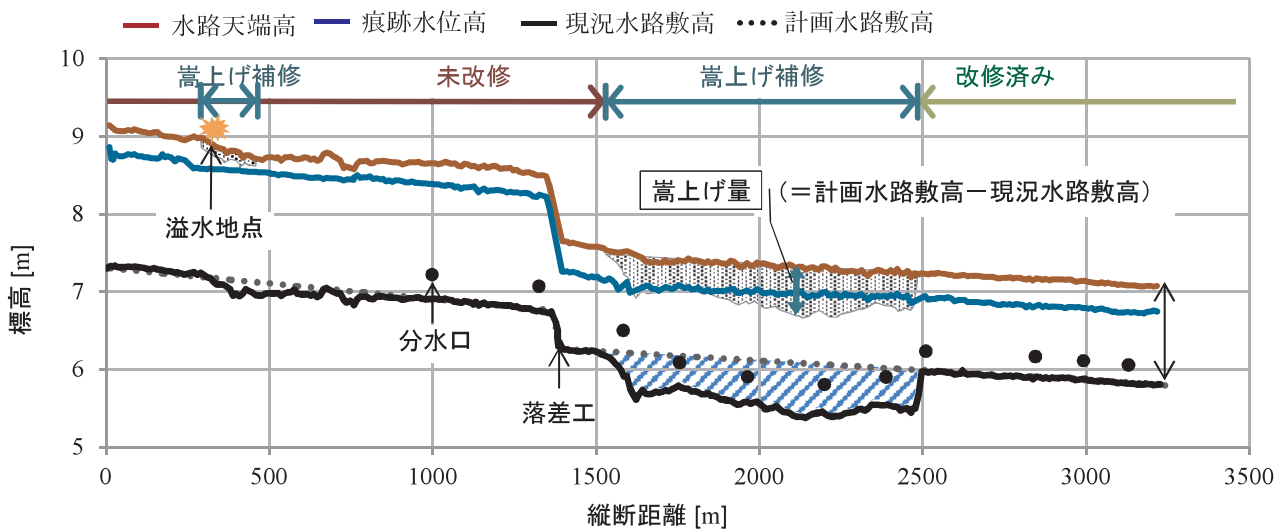
Fig.14 岡堰地区の沈下に対する事業の経緯

Chronological table of the renewal projects for the subsidence of canals in Okazeki irrigation systems

郷用水路では約 2800 m³, 裏郷用水路では約 3300 m³ と算出された。これは 1つの支線水路への分水量の 2日から3日間分に匹敵する水量となる(支線分水量 30 L/sで12時間供給するとその水量は約 1300 m³となる)。岡堰地区は前述の通り, 間断灌漑や配水のブロックローテーション, 下流での水の反復利用などを行わざるを得ないような水源事情に厳しい地区であるため, 死水量に起因する下流への水到達時間の遅れや送配水効率など水利用的機能の低下におよぼす影響を評価していくべきである。

対象区間において不等流解析をおこなった。表郷用水路では途中に落差工があるので2区間に分けて解析した。上流端, 下流端の境界条件を Table 1 に示した。下

a) 表郷用水路



b) 裏郷用水路

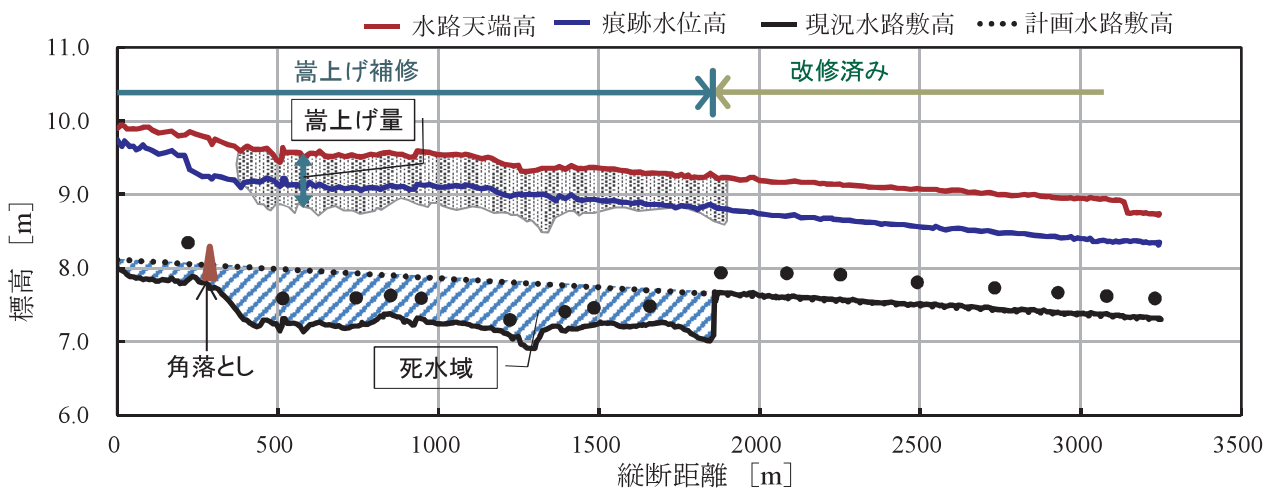


Fig.15 岡堰地区の水理縦断面図

a) 表郷用水路, b) 裏郷用水路

Longitudinal sections of irrigation canals in Okazeki irrigation systems

a) Omotego (Southern side), b) Urugo (Northern side)



Fig.16 溢水が生じた区間の嵩上げ補修状況
The expansion of canals walls on the section
where overflow occurred



Fig.17 嵩上げ補修最大時（嵩上げ量 70cm）
の水位痕跡と補修前の天端高さの比較
Comparison between water level trace and
previous wall edge height in the maximum
expansion situation



Fig.18 沈下した水路に敷設された
角落とし構造物
The intake weirs installed in subsidence canals
to keep water level

Table 1 不等流解析に用いる境界条件
Boundary condition for nonequivalent flow analysis

		水路幅	上流端	下流端
		B [m]	Q_U [m^3/s]	h_D [m]
表郷用水路	落差工の上流	1.8	2.25	1.48
	落差工の下流	2.75	2.0	0.94
裏郷用水路		3.25	3.4	1.05

流端には水位痕跡の実測値を水位の境界条件として与え、上流端は表郷用水では 2011 年 8 月の調査時の流量の実測値を与え、その計画流量との比を用いて裏郷用水路の流量を与えた。

Fig.19 に水路敷高には現況の沈下した敷高と計画時敷高の 2 パターンで解析を行った結果の水面形を示す。沈下区間での現況の水面形は計画時の水面よりも低下しており、計画水位と現況水位との差は沈下区間の上流部で最大となり、表郷用水路では 13.6 cm、裏郷用水路では 8.7 cm となった。ただし、水位痕跡はむしろ計画水位の計算値とほぼ一致していた。沈下箇所底面の逆勾配や土砂等の堆積による断面の縮小などにより、通水抵抗が上昇し、単位断面あたりで輸送できる流量が減少し、水位の上昇が引き起こされたと考えられる。また、表郷用水路上流部での沈下区間での計画水位と現況水位との差は 3.6cm であった。この区間においては溢水が発生したことが確認されている。ただし、水位の上昇要因は、水路の沈下や湾曲による流速分布の偏りなどの複合的な要因が重なったものと考えられるが、今回の不等流解析からだけでは特定できなかった。

VI 水路の構造的な変状が引き起こす水利用・水理的な機能低下事例の分析

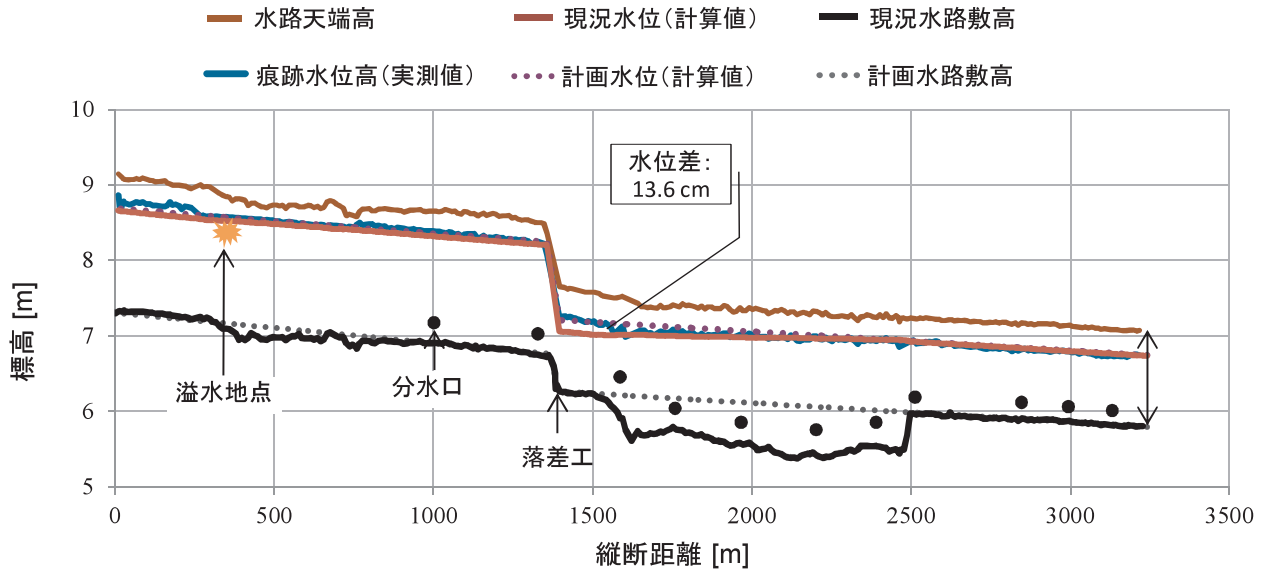
水路の機能診断に当たっては、まず水路に対する要求性能を明確にする必要がある。用水路における第一義は各圃場に所定の水量を配水することであるから、その

要求性能のいくつかは明確である。水理機能においては通水性や水密性、水利用機能においては配水均等性や分水制御性などといった機能が提示されている。本調査では水路の構造的な変状として水路の沈下をとりあげた。水路の沈下によって引き起こされうる水利用・水理機能の低下事例としては、以下の 3 つに大きく分類できる。第 1 は水位や流速の変化および水頭損失の増加などの通水性能の低下である。第 2 は、不同沈下によりバレルの縦横断面がずれ、目地やクラックから生じる漏水の発生、すなわち水密性能の低下である。第 3 は、分水工周辺での水位低下あるいは溢水などによる分水の不均等、不安定化などの分水制御性能の低下である。

現時点において保持している機能を定量化するために必要と考えられる調査項目を **Table 2** にまとめた。本調査のような詳細な測量を水路システムの全線において実施することが、人的・経済的リソースの制限上、難しい場合には、調査実施前の文献調査や農家・土地改良区の職員への聞き取り調査はより一層重要となる。とくに土地改良区の職員の方と実際に水路を一つ一つの問題を確認しながら踏査することによって沈下に関する水路の機能低下の現状とその要因を推察できる。灌漑期には流量や水面形の観測、漏水箇所の視認ができるが、水路敷の測量や分水工の位置確認は通水時には難しいため、機能診断のための調査実施に当たっては少なくとも灌漑期・非灌漑期を通して観察することが求められる。また、数年に一度の渇水時や洪水時における、機能の低下度合いや通常期にはみられなかった機能低下事例の顕在化などについても念頭に置くべきで、そのためには複数年のデータの蓄積を必要とする。

調査対象水路において、これらの要求性能を評価するために得られる現状データは限られているため、既存の資料をできる限り広範に収集することとなる。**Table 3** に水路の沈下を機能診断する際に最低限必要と思われる資料を列挙した。水利システムとその取入河川・周辺河川との関係や土地利用の変遷はその水利システムの成り

a) 表郷用水路



b) 裏郷用水路

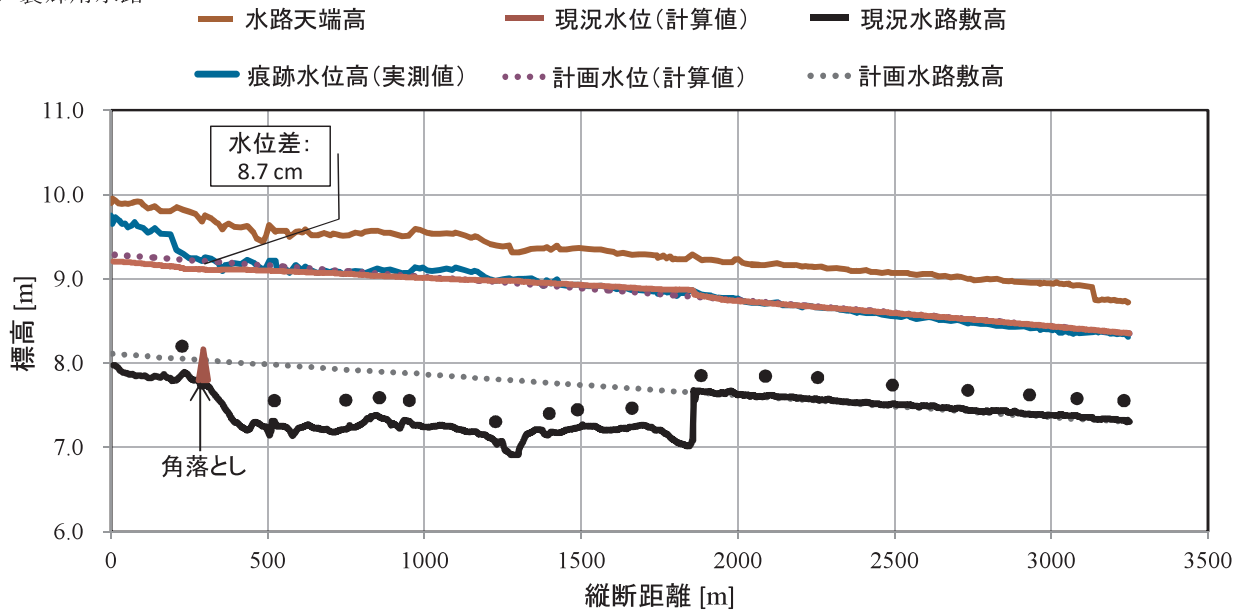


Fig.19 沈下の有無による水面形の比較

Comparison of the water surface between subsidence canal bed and original design level

立ちを説明する最も基本的な資料である。表層地質や地質の強度を示す標準貫入試験結果 (N 値) の資料の多くは既存の構造物を設計した際の蓄積があり、入手は比較的容易である。このような地形・地質に関する事項から近年の農地開発や周辺開発の動向、地震による被害履歴といった、さまざまな時間的スケールにおける地区概要に関する資料は、水路システムの持つ地域固有の背景を明らかにしてくれる。対象とする水路システムの竣工図は、竣工当時の計画水量・水位・勾配等を網羅した基本資料であり、当時求められた性能を定量的に表すことを可能とする。また、水路構造物に既に何らかの対策が施されている地区においては、その対策の経緯、事業内容を明らかにしておく必要があり、その際にも蓄積されている竣工図や地質調査図が必要である。さらには、

対象水路だけでなく、その周辺における構造物の建設の工事履歴を収集し、とくにポンプ排水を伴う工事が行われている場合には、工事による地下水の変動等が水路構造に変状をもたらしていなかったか否かの確認が必要であろう。

構造機能と直結する水利用・水理機能の照査指標の定量的評価は、今後検討していくべき課題として残っている。たとえば、通水性評価であれば、沈下や浮上の程度が軽微で、それが連続的に生じているような場合には、平均的には水路潤辺の抵抗の増加に基づく通水能力の低下、すなわち、粗度係数の増加として解釈でき、これまでの性能評価指標を参考にできるであろう。それに対して、段差の程度が大きくなるにつれて、通水断面の局所的な不連続が無視できなくなると、抵抗をエネルギーの

Table 2 水路の沈下に関する機能診断項目とそれぞれの調査項目
Function diagnosis indicators and their observation contents with the subsidence

調査期間	調査項目	水理学的性能		通水性		水密性	分水制御性	
		機能診断項目		粗度の 変化	通水断面 の変化	漏水の 有無	分水位の 過不足	分水量の 過不足
非 かん がい 期	水路敷高の測定			○	○		○	
	水路側壁高(左右岸)の測定			○	○	○		
	痕跡水位高の測定			○	○		○	○
	土砂堆積量の測定				○			○
	外観調査(目地損傷およびクラックの有無)			○		○		
	分水口高の測定						○	○
	角落し堰上げ高の測定				○		○	○
かん がい 期	水位・流量観測			○		○	○	
	縦断水面形の計測			○	○		○	
	水路背面の目視調査(緩み確認)					○		
	水路周囲への漏水の有無					○		○
通 年	調査結果に基づく不等流計算			○	○		○	
	農家・管理者への聞き取り			○	○	○	○	○

Table 3 沈下に起因した資料整理内容
Existing document contents necessary for the function
diagnosis due to subsidence

地区概要	河道の変遷
	表層地質
	標準貫入試験結果(N値)
	土地利用の変遷 (農地および宅地の区分)
	地下水位
	地震履歴
竣工図	平面図、縦断図、横断図等
工事履歴	水路構造物の工事時期および内容 対象地区周辺における 工事時期および内容 (特にポンプ排水を伴う工事)

局所損失として取り扱う段階に移行する。このような現象は、水理学的には、段上がり、段落ち、水路断面の急縮などによる局所損失としては既に整理されているものである。しかし、局所損失の影響で水路に発生する波動や流速変動などが水路機能に及ぼす影響は、必ずしも体系的に整理されているわけではない。また、水位や流速の局所的な変動が、複数の原因地点に及び、これらが相互に影響を及ぼし合うことによって、水路にとって不都合な、不安定な流れの発生なども懸念されるところである。漏水量を指標とする水密性能の評価には、バレル間の目地からの漏水量を定量的に計測する性能照査技術の開発が期待される。分水における水利用機能の維持・保全のためには、各地域に送水すべき流量に対する送水能力の維持はもちろんのこと、要所において、きちんと所定の分水位を確保していなければならない。これらの評

価においては、各分水工の持つ機能を適切に分類した上で、分水工周辺での水理現象を観測し、評価を行う必要がある。今後この種の水理機能診断調査を、多くの農業水利現場で実施できるよう、これら機能診断のためのデータ収集と照査指標の検討を進めていく必要がある。

Ⅶ 結 言

本調査は、小貝川水系の歴史の古い開水路系水路システムにおいて、沈下の実態とその原因、水理機能に関わる項目の調査結果をまとめたものである。対象としたのは、現場打ちコンクリート開水路で、全て幹線用水路である。予め関係する土地改良区での聞き取りを基に、沈下が生じた水路区間および沈下対策が施された水路区間を選んで、集中的に調査した結果、以下のような知見が得られた。

- 1) 水路の沈下には地盤条件が強く作用し、谷津のような沖積土の地盤において水路の沈下が生じやすいことが確認された。沈下への対策としては、基礎地盤までの杭の打設が有効であったことが、改修後の水路には大きな沈下はみられなかったことから確認できる。水路改修以外の沈下への対策工法として、水路壁の嵩上げ補修による事後保全が施され、余裕高の確保がなされていた。
- 2) 沈下によって性能低下を生じる水理学的機能は、通水性、水密性、および分水制御性が考えられる。現地測量調査および不等流解析による通水性の診断では、水路床の逆勾配や壁面の摩耗などにより、流水に対する摩擦抵抗が増大し、断面通水能力の低下が

生じていることが示唆された。また、水頭の損失により、下流の分水工において所定の流量・水位が維持できなくなることが懸念される。ただし、沈下に伴う段落ち流れや跳水などの局所的な流れの変化はないと考えられた。

- 3) 水利用機能の診断にあたっては、角落とし等で水位を確保し分水を制御している箇所が見受けられたため、今後、分水ゲート等の管理方法などの調査から、分水量の確保などの機能診断を実施していく必要がある。

参考文献

- 1) 茨城県 (1982) : 1/50,000 土地分類基本調査「土浦」
- 2) 茨城県 (1986) : 1/50,000 土地分類基本調査「竜ヶ崎」
- 3) 伊藤夕樹・田中良和・向井章恵・樽屋啓之・中 達雄 (2011) : 調整池容量の拡大に伴う用水路系での水利学的性能の向上効果の検証, 農業農村工学会論文集, 275, 33-40
- 4) 織間宏明・中島賢二郎 (2004) : 開水路における粗度係数の検討, JIID 研究レポート, 25, 65-69
- 5) 国土交通省 関東地方整備局 常総国道事務所 (2006) : 平成 17 年度圏央道 (つくば市島名地区) 地質調査 17k32 (ボーリング No.1, No.3)
- 6) 中 達雄・樽屋啓之 (2008) : 用水路系に対する水利学的性能の基本的考え方, 農業農村工学会論文集, 256, 9-16
- 7) 三春浩一・田中良和・向井章恵・樽屋啓之・中 達雄 (2008) : 用水路の通水性に対する性能設計の試行と機能保全対策の検討事例, 農業農村工学会論文集, 258, 51-56
- 8) 三春浩一・田中良和・向井章恵・樽屋啓之・中 達雄 (2009) : 用水路システムの水理および水利用に対する機能診断事例, 農業農村工学会論文集, 260, 113-119
- 9) 佐藤政良 (1987) : 3. 小貝川水系の水管理, 水利システムと水管理, 鈴木光剛 編, (株) 公共事業通信社, 67-101
- 10) 樽屋啓之・三春浩一 (2009) : 用水路系における水理・水利用機能診断のチェックポイント, 水土の知, 77 (4), 11-14
- 11) 山本晃一・阿左美敏和 (2007) : 第 1 編 小貝川の河道特性 - 鬼怒川に支配された河川, (財) 河川環境管理財団 河川環境総合研究所 編, 河川環境総合研究所資料 18 号 河道・環境特性情報の読み方と利用 - 事例研究を通じて -, 1-49
- 12) (財) 日本水土総合研究所 (2006) : 2. 水理的機能評価, 水土の知を語る (No.11) 性能設計を考える - その 3 - 水利システムの機能評価 -, 67-116

Field Survey on the Subsidence of the Canals and Its Influence on the Water Delivery and Hydraulic Functions

NAKADA Toru*, FUJIYAMA So**, TARUYA Hiroyuki* and TANAKA Yoshikazu*

Summary

The subsidence often occurs in the open canals under long-term service located on the weak ground. The phenomena like overflow and water leakage caused by the subsidence of the canals decreased the water use and hydraulic functions. In this study, we estimated the subsidence of the canals by interviews to irrigation systems administrators and by surveying longitudinal sections of irrigation canals in Fukuokazeki and Okazeki irrigation systems. The subsidence of the open canals was easy to occur in the valleys with the alluvial soil which deeply entrenched highland. The new canals were renovated with the deeply-driven piles to the stable ground if the subsidence occurred more than 30 cm which is one of criteria of acceptance for renewal projects. The other subsidence canals were repaired by expansion of canals walls to be equal to original design levels. Maximum expansion of canals walls reached to 70 cm. However, the water surface in subsidence channels jointed smoothly to the renewal channels without rapidly-varied flow. By water level calculations, it is estimated that water levels in subsidence canals declined around 10 cm from original design levels. The intake weirs installed in some section suggest the water management methods changed to divide water to branch lines. The check points for function diagnosis were listed based on each indicator such as free board, water level, water diversion, and water leakage. Accumulating field survey data and defining appropriate performance requirement are needed to evaluate how each problem decreases water use and hydraulic functions.

Keywords: diagnostic study, performance requirement, subsidence, irrigation canal systems, water leakage, free board

〔農工研技報 212〕
43 ~ 52, 2012〕

農村工学研究所内における総合気象観測システムの構築とそのデータ品質管理

吉田武郎*・増本隆夫**・堀川直紀*

目次

I 緒言	43	3 蒸発散量の算出とその検証	48
II 総合気象観測・公開システム	43	IV 観測データの品質評価	48
1 システムの全体構成	43	1 近傍観測値との比較結果	48
2 観測項目および方法	44	2 各種推定値を用いた観測値の検証結果	49
3 データの統計処理法	46	3 蒸発散量データの評価結果	50
4 データ公開システム	46	V 結言	50
III 観測データの品質管理手法	46	引用文献	51
1 近傍の気象観測地点との比較	48	Summary	52
2 気象推定値の算定手法と観測値の検証	48		

I 緒言

地表面付近における農業水文環境の研究には気象の長期観測データは必要不可欠なものであり、また、圃場実験やその解析のための基礎資料としても重要である。農村工学研究所（以下農工研）では所内の観測露場における気象観測を、前身の農業土木試験場（平塚）では1950年から1977年まで、つくば移転後は1978年から現在まで継続して行ってきた（上村，1975；1978）。観測システムの10～15年ごとの更新の際には観測項目の見直しとともに、観測の機械化、自動化を図っており、2010年4月の更新の際にはこれまでの気象観測要素に加え、地表面付近の水・エネルギー移動の解明に必要な短波・長波放射量（上下各2成分）、顕熱フラックス、地温、土壌水分量の常時観測を新たに追加し、さらにデータ閲覧・データベース公開機能を強化した点の特徴となっている。

新たなシステム構築に当たっては、長期間継続して観測を安定的に行うことを念頭に、気象の専門家でない者が観測を担当しても観測・管理が可能なよう、堅固であると同時にシンプルで透明性が高く、管理作業を容易に行えるシステムとした。また、障害時のデータ欠測が

少なく早期復旧できるように、センサと記録計を直結し、システム全体をプログラムで管理する構成とすることで、長期間の気象観測を日常業務への負担やトラブルが無く安定的に精度良く測定できる。また、約10年間の気象データが蓄積されると気候値が定まり、毎年の気象条件との比較が容易になることから、気象データの利活用が格段に広まるとともに（宮田，1992；渡来ら，2006）、この積み重ねが気候変動研究で活用できる長期観測資料の蓄積につながる（Sameshima *et al.*, 2007）。さらに、長期間の地表面付近の気象および水・熱収支のデータを利用し、広域の陸面水・熱収支を推定するモデルの構築等が期待できる。

本技術報告では更新した総合気象観測・公開システムの全体像と各気象観測の項目・方法についてまとめる。さらに、観測データの品質評価のための検討方法とともに、これまで1年半の観測データにそれらの方法を適用した結果を示す。なお、本システム構築の基本的指針については農研機構北海道研究センター生産環境研究領域の廣田知良上席研究員に貴重な助言をいただいた。ここに記して感謝の意を表す。

II 総合気象観測・公開システム

1 システムの全体構成

本気象観測システムは農工研内の雨量水分浸透観測露場（以下観測露場、北緯36°01′，東経140°05′，標高26m）に位置する（Fig.1）。観測露場の広さは43×56mであり、地表面は芝生で定期的に刈り込みを行っている。

* 水利工学研究領域 水文水利担当

** 資源循環工学研究領域 水資源工学担当 兼、水利工学研究領域 水文水利担当

平成24年12月14日受理

キーワード：総合気象観測，品質管理，データ公開

観測露場内の観測機器の構成および位置関係を Fig.2 に示す。観測機器は露場内に設けられた計測盤を中心とし、アルミ製観測タワー、放射量観測台、地中観測ピット、降雨量・蒸発量観測装置の4つのシステムに分けられる。

アルミ製観測タワーはトリポット型で高さは10mであり、風向風速計、気温・湿度センサ、日照計、超音波風向風速計が取り付けられている。

放射量観測台では地上1.5mの高さにおいて、短波・長波放射量をそれぞれ上向き、下向きで観測する。

地中観測ピットには深さ5cm, 10cm, 30cm, 50cm, 100cmに土壌水分計、地温計を設置したほか、地表面付近での地中熱流量を観測する。

総合気象観測システムの各センサからの出力データは全て計測盤内にあるデータロガーに一時保存され、合計、平均、最大、最小といった日統計値の演算はロガー内部で行われる。また、データロガー内部には2週間程度の10秒データを保存できるバックアップの機能がある。次に、処理されたデータを観測露場内のPCに回収し、旬、月平均等の長期統計処理や公開用データ作成等の処理を

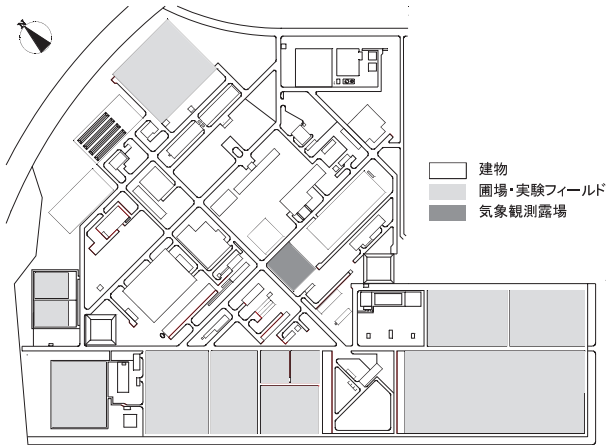


Fig.1 農工研内における観測露場の位置

Location of meteorological observation site in the Institute for Rural Engineering (IRE)

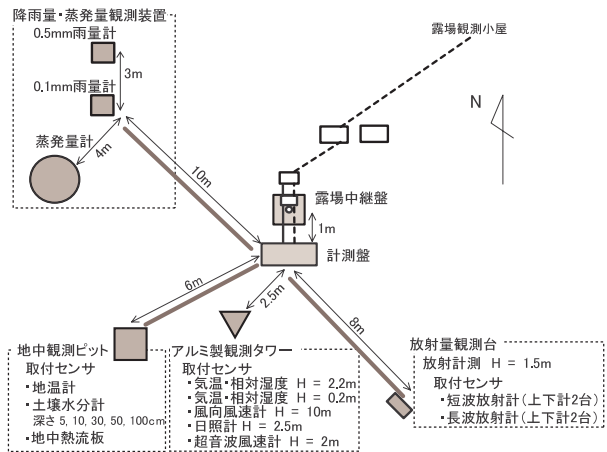


Fig.2 観測露場内における観測機器の位置関係

Overview of the integrated weather observation system

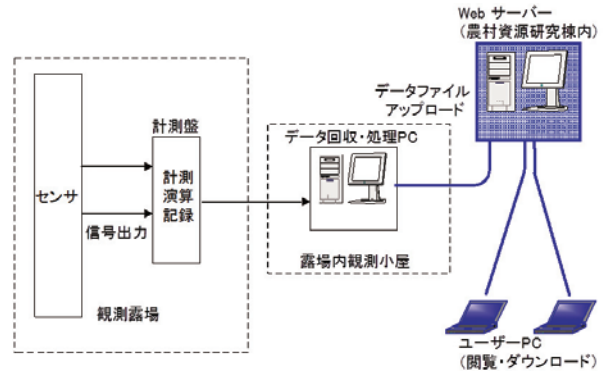


Fig.3 観測データ処理および公開の流れ

Process flow diagram of data processing and exposure

行う。最後に、それらのデータを農工研内のウェブサーバ（農村資源研究棟内に設置）にアップロードし、データ公開を行う（Fig.3）。

これらの観測、データ処理はプログラムにより制御されており、計器の交換・変更は、プログラムやプログラム中の係数を変えるだけで対応できる。また、将来的にはリモートでデータのチェック、プログラムの変更といったリモートメンテナンス等への拡張が可能である。

さらに、長期観測を安定的に行うためには停電時や電圧低下時の対応が必要となる。システム全体は外部から取り入れる交流電源を用いているが、計測部はバッテリーを介して電力を供給し停電時に1週間程度の電力供給を保証している。また、データ処理用PCおよびウェブサーバは無停電電源装置によって停電後5分間以上電源がバックアップされ、非常電源装置に切り替わって3分以内にサーバはシャットダウンする。復旧後は自動起動し、電源が切断していた期間にデータロガーに蓄積されたデータを受信して、それらに対する処理を行う。

2 観測項目および方法

a 風向・風速

風向・風速観測には飛行機型風向風速計（R.M.Young社製、モデル5103、気象庁検定付）を用い、同センサは露場中央に設置されたアルミ製観測タワーの地上10mの高さに設置されている。風向および風速を10秒間隔で測定する。風速の測定範囲および精度は0～60ms⁻¹、0.3ms⁻¹である。

日平均風向は1日の単位ベクトル平均風向（°）、日平均風速は観測値の算術平均、日最大瞬間風速は観測最大値、日最大風速は10分平均風速の最大値としてそれぞれ0.1ms⁻¹単位で算出する。また、日最大風速および日最大瞬間風速の発生時刻、そのときの風向も記録する。

b 気温・湿度

気温、相対湿度は、観測タワーの地上2.2m、0.2mの高さにある強制通風筒内に白金抵抗温度計、温湿度計をそれぞれ一体ずつ設置して計測する（Fig.4）。温度セン



Fig.4 観測用タワー

Meteorological observation tower

サ (クリマテック社製, C-HPT, 気象庁検定付) は, 計測単位 0.1°C , 測定範囲 $-80 \sim +60^{\circ}\text{C}$, 20°C における精度は 0.13°C である。また, 温湿度センサ (Vaisala 社製, HMP-155D, 気象庁検定付) は, 計測単位 $1\% \text{RH}$, 測定範囲 $0.8 \sim 100\%$, 測定精度は $0 \sim 90\%$ において $\pm 1\%$, $90 \sim 100\%$ において $\pm 1.7\%$ となっている。サンプル間隔は気温, 湿度ともに 10 秒である。

さらに, 観測した気温 T_a ($^{\circ}\text{C}$) および相対湿度 RH ($\%$) から Tetens の近似式 (式(1)) で飽和水蒸気圧 e_s (hPa) を求め, 式(2)により水蒸気圧 e_a (hPa) を算出する。

$$e_s = 6.1078 \times 10^{7.5T_a / (237.3 + T_a)} \dots\dots\dots (1)$$

$$e_a = e_s \times RH / 100 \dots\dots\dots (2)$$

c 日照時間

日照時間は太陽電池式日照計 (石川産業社製, S-162) を用い, 受光量が 0.12kWm^{-2} 以上の時間を 0.1 時間単位で測定する。観測データは 1 時間ごとに積算し, 日照時間として算出する。

d 降水量

露場地表面上に受水面が高さ 0.5m となるように転倒マス式雨量計を設置し, 降水量の観測を行う。雨量計は一転倒 0.5mm (クリマテック社製, CTK-15PC, 気象庁検定付き) および 0.1mm (クリマテック社製, CTK-11PC) のものを設置し, 前者を降水量の算出用として, 後者はより短時間の降雨強度資料として利用する。なお, 両者とも風よけ, ヒーター等の付帯設備は有していない。

一転倒 0.5mm の雨量計の測定精度時間雨量 20mm 以下で $\pm 0.5\text{mm}$, 20mm を超える時で $\pm 3\%$ である。他方, 一転倒 0.1mm の雨量計の測定精度は時間雨量 20mm 以下の時は \pm 約 0.5mm , 20mm を超える時に $\pm 5 \sim 10\%$ と若干大きくなる。

データは 1 分間隔で一転倒 0.5mm の雨量計の転倒マ

スの転倒回数を記録し, 1 日の合計値を日雨量とする。また 60 分移動積算した合計値の最大値を最大 1 時間降水量とし, 降雨強度は前 1 時間降雨強度を 10 分ごとに出す。

e 蒸発量

パン蒸発量は, 直径 120cm の蒸発パンの水位を磁歪式フロート水位センサ (クリマテック社製, CMT-RH-M-20) により 10 分間隔で 0.1mm 単位の測定を行い, 水位減少量の日単位の合計を日蒸発量とする。なお, 降水量の影響を除くため水位が上昇した時の変化量は積算しない。また, 温度補正は行っていない。

f 現地気圧

気圧計 (Vaisala 社製, PTB210, 気象庁検定付) は, 計測盤を収納したボックスに設置されている。使用温度範囲は $-40 \sim 60^{\circ}\text{C}$, 測定範囲は $800 \sim 1060\text{hPa}$, 精度 ($+20^{\circ}\text{C}$ において) $\pm 0.30\text{hPa}$ となっている。測定間隔は 10 秒で, 0.1hPa 単位で出力する。

g 地中熱流量

地中熱流量は 1m 四方の地中観測ピットの地表面付近に設置された熱伝堆式熱流板 (Hukseflux 社製, HFP-01) により 10 分間隔で測定する (Fig.5)。測定精度は $\pm 5\%$, 温度範囲 $-30 \sim +70^{\circ}\text{C}$, 測定範囲は $2 \sim -2\text{kWm}^{-2}$ である。

h 地温

地温は, 深さ 5cm , 10cm , 30cm , 50cm , 100cm の深さに埋設した白金測温抵抗体温度計 (クリマテック社製, C-PTG) により測定を行う (Fig.5)。測定温度範囲 $-100 \sim 100^{\circ}\text{C}$, 使用可能温度範囲は $-40 \sim 100^{\circ}\text{C}$ となっている。 10 分ごとに出力値を観測する。



Fig.5 地中観測ピットへの機器埋設状況

Installation of devices to subsurface observation pit

i 土壌水分量

地温と同地点、同深度に埋設した5本のTDR式土壌水分センサ(Campbell Scientific社製, CS-616)により10分間隔で体積含水率を観測する(Fig.5)。測定分解能は0.1%, 測定精度は±2.5%である。

j 短波・長波放射量

短波・長波放射量は、1.5mの高さの観測台の上下面それぞれに日射計、赤外放射計を設置し、上向き、下向きの短波放射量 S^{\uparrow} 、 S^{\downarrow} および長波放射量 L^{\uparrow} 、 L^{\downarrow} の4成分を独立して測定する(Fig.6)。なお、下向きの放射量測定機器は機器の温度上昇を防ぐためのファン付きである。

短波放射量は日射計(Kipp and Zonen社製, CMP21, WMO Secondary standard)により波長305~2800nmの範囲の放射量を10秒間隔で測定する。感度は約7~14 $\mu\text{V}/(\text{Wm}^2)$ である。長波放射量は赤外放射計(Kipp and Zonen社製, CGR4)により測定する。波長範囲4.5~42 μm 、感度5~7 $\mu\text{V}/\text{Wm}^2$ となっている。全ての機器の測定間隔は10秒であるが、1日の積算量を0.01MJm²単位で出力する。

k 顕熱フラックス

地表面からの顕熱フラックス H は、気温および鉛直風の変動値の共分散に比例し、次式(1)により表される。

$$H = c_p \rho w' T' \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 c_p は空気の体積熱容量(JK⁻¹m³)、 w' は鉛直風速の乱流変動成分(ms⁻¹)、 T' は気温の乱流変動成分(K)である。渦相関法は、これらの w' 、 T' といった変動成分の瞬間値を高速に計測することにより、地表面から大気への顕熱輸送量を直接観測して求める手法である(詳細は例えば塚本ら, 2001)。

鉛直風速および気温の乱流変動成分は超音波風向風速温度計(ソニック社製, SAT540)を用い、測定間隔

1/10秒で測定する。風速の測定範囲は0~60ms⁻¹、風速分解能0.01ms⁻¹である。これらの観測値を10分毎に平均化して顕熱フラックスの計算値を出力する。さらに、後述するように有効放射量との差をとり潜熱フラックスを算出する。ただし、これらのフラックス量に関しては統計データを作成せず、10分毎データのみ保存する。

3 データの統計処理法

データの統計処理は10分値、1時間値、日平均値についてはデータロガー内で処理を行い、それ以上の期間については日平均値、日合計値からデータ処理部で計算する。統計期間は、日、半月、月、年とし、半月統計は1ヶ月を5日ごとにわけ、最後の半月は各月の日数に応じて与える。また、旬統計は各月を1~10日、11~20日、21日~月末に分けたもの、月統計は1日から月の末日まで、年統計は1月1日から12月31日までを統計期間とする。降水量、日照時間、放射量、蒸発量については該当期間(日、半月、旬、月、年)の合計値を、風速、気温、湿度、気圧、地温、土壌水分、降雨強度については該当期間内の平均値を統計量とする。なお、風向については単位ベクトルの平均を取る。

4 データ公開システム

上記の方法により処理したデータは、以下に示したサイト「農村工学研究所 Web 気象台」(<http://150.26.59.72/>)において閲覧、データのダウンロードができる。また、同サイトは農工研ホームページの「お役立ち情報」および農研機構が運用する農業研究気象観測ポータル(<http://www.affrc.go.jp/ja/info/scs/ndb/agriresmet/index.html>)からも参照できる。

メイン画面であるリアルタイムモニターは、観測全データを1分間隔の準リアルタイムで更新して表示する(Fig.7)。また、任意日付グラフ表示では、放射量4成分、顕熱・潜熱フラックスと地温・土壌水分量の2種類のグラフの期間を指定して表示できる(Fig.8)。また、半日ごとの平均偏差グラフを表示できる。

さらに、データ公開サイトでは観測全データ帳票、データファイルを表形式で閲覧、ダウンロードできる。表示する数値の種類は、任意日付の10分値、1時間値、任意日付の日報(当日分も含む)、任意月の月報、任意年の年報となっている。また、帳票については期間を指定して印刷できる。

III 観測データの品質管理手法

気象観測データの蓄積を長期に渡って行い、信頼できるデータセットを構築するには、機器の点検およびデータの品質管理が重要である。機器の点検には日常的なメンテナンスと定期的に行う精密保守点検がある。日常的なメンテナンスは主に目視による異常確認、通風ファン



Fig.6 短波・長波放射量観測の状況
Observation of short- and long-wave radiations

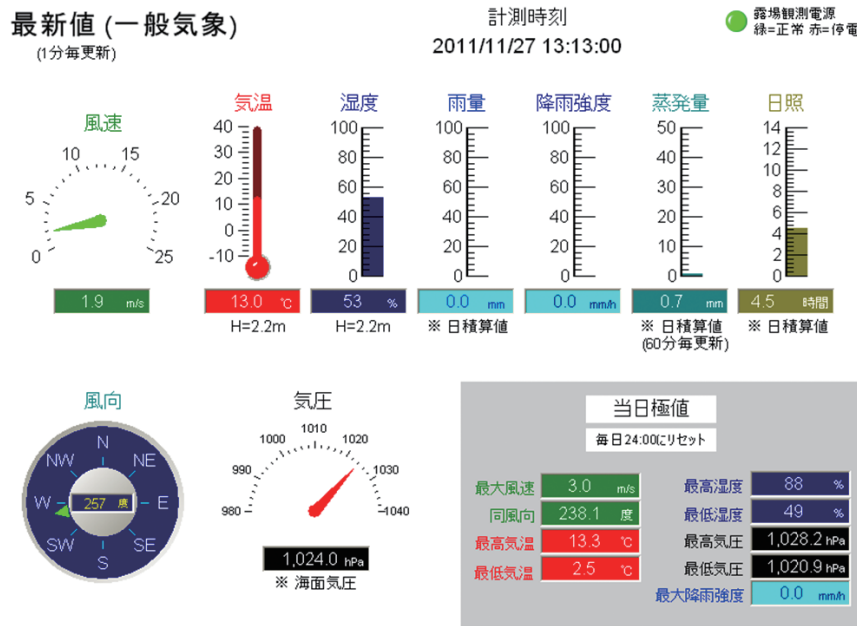


Fig.7 リアルタイムモニター画面
User interface of real time monitoring system

最新7日間 (放射・熱)

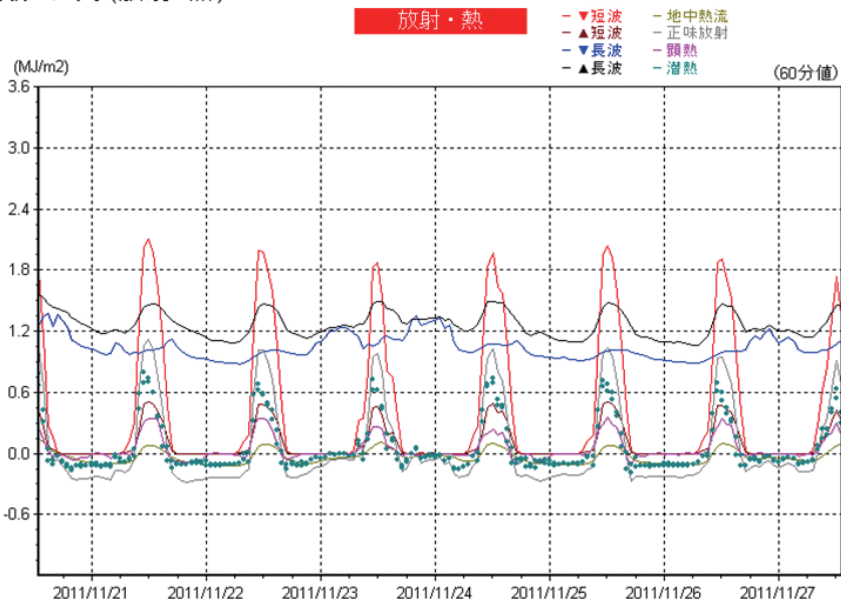


Fig.8 任意期間のグラフ表示画面
Graphic display of meteorological data for the period of interest

の動作確認、放射量観測ドームの清掃等を1週間に一度程度の頻度で行い、これに加えて台風等荒天の後には機器の点検を行うものである。さらに、各気象観測要素の値を観察して体感する値とかけ離れていないか、气象台やアメダスの観測値や各種の推定値と比較して大きく異なる値を示していないかを定期的に点検することも日常的なメンテナンスに含まれる。他方、精密保守点検は1年に一度～数度の頻度で各機器の出力値のチェック、係数の校正、気象庁検定等を行い、経年的な観測値の増加・減少傾向があればそれを補正するものである。

日常的なメンテナンスで各気象観測値の異常値を早期に検出するためには、正常に観測が行われているときの

観測値が近傍の観測値や各種推定値に対して有する誤差を評価し、それを参考値として記録しておくに立つ。そこでここでは、観測露場におけるこれまで1年半の観測値を近傍の観測値や各種推定値と比較し、その偏差やばらつきを評価する。さらに、観測データから算出した潜熱フラックス(蒸発散量)を基準蒸発散量、パン蒸発量と比較することで、観測データの整合性を評価する。

なお、現在ルーチン観測開始後の全データについて公開しているが、データの品質については最低限の日常的な点検にとどまっており、利用の際には注意が必要である。

1 近傍の気象観測地点との比較

観測露場における気象観測データの基本的な評価のため、農工研内における実測データと近傍の気象官署における観測値を比較し、その検証を行う。近傍の気象官署として、観測露場から北東約5km(北緯36°03′, 東経140°08′)に位置する気象庁高層気象台(以下館野とする)を選択し、気温、降水量、気圧、水蒸気圧、全天日射量(下向き短波放射量)の日統計値について比較検証を行う。

2 気象推定値の算定手法と観測値の検証

短波・長波放射量は地表面、植生からの蒸発散や地表面の熱収支に寄与する重要な気象要素であるが、体感値との比較が困難であることや、比較検証するための観測データが限られることからその品質評価は容易ではなく、各種推定値を用いたデータの検証が必要となる。ここではAllen(2008)の方法に従い、全天日射量と長波放射収支データの品質評価する方法を記す。

まず、全天日射量については観測値を晴天日の理論値と比較することにより、実測値の品質管理を行う。晴天日の全天日射量の理論値 S_{df} (MJm⁻²day⁻¹)は、大気上端における水平面日射量 S_{0d} (MJm⁻²day⁻¹)に対する比として次式(4)により求める(近藤, 1994)。

$$\frac{S_{df}}{S_{0d}} = (C_1 + 0.7 \times 10^{-m_d F_1})(1 - i_3)(1 + j_1) \dots (4)$$

$$i_3 = 0.014(m_d + 7 + 2 \log_{10} w) \log_{10} w \dots (5)$$

$$\log_{10} w = 0.0312 T_d - 0.0963 \dots (6)$$

$$m_d = k_3 m_{noon} \dots (7)$$

$$m_{noon} = (p / p_0) \sec(\phi - \delta) \dots (8)$$

$$k_3 = 1.402 - 0.06 \log_{10} (\beta_{DUST} + 0.02) - 0.1(m_{noon} - 0.91)^{1/2} \dots (9)$$

$$j_1 = [0.066 + 0.34(\beta_{DUST})^{1/2}](ref - 0.15) \dots (10)$$

$$F_1 = 0.056 + 0.16(\beta_{DUST})^{1/2} \dots (11)$$

ここで w は可降水量(cm), T_d は露点温度(°C), ϕ は緯度(rad), δ は赤緯(rad), m_{noon} は日平均的な光路長, p および p_0 は地上気圧および標準気圧(kPa)である。また, β は大気の混濁係数でここでは0.03(大都市から離れた空は青く澄んだ状態), ref はアルベドで0.23とした。

他方、大気上端の水平面日射量は以下により理論的に得られる。

$$S_{0d} \downarrow = \frac{I_{00}}{\pi} \left(\frac{d_0}{d} \right)^2 (H \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin H) \dots (12)$$

$$H = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \dots (13)$$

$$\left(\frac{d_0}{d} \right)^2 = 1.00011 + 0.034221 \cos \eta + 0.00128 \sin \eta + 0.000719 \cos 2\eta + 0.000077 \sin 2\eta \dots (14)$$

$$\delta = \sin^{-1}(0.398 \times \sin a_2) \dots (15)$$

$$a_2 = 4.871 + \eta + 0.033 \sin \eta \dots (16)$$

$$\eta = (2\pi / 365) i \dots (17)$$

$$i \approx 30.36(M - 1) + DAY \dots (18)$$

ここで, I_{00} は太陽定数(1365Wm⁻²), d, d_0 は太陽・地球間の距離とその平均値, H は日の出から南中までの時角(rad), M は月数, DAY は各月の日である。

次に、長波放射収支 R_{nl} の推定値は、次式を用いて算出する(Allen *et al.*, 1998)。

$$R_{nl} = \sigma \left(\frac{T_{max}^4 + T_{min}^4}{2} \right) (0.34 - 0.14 \sqrt{e}) \left(1.35 \frac{S_{obs}}{S_{df}} - 0.35 \right) \dots (19)$$

ここで, σ はStefan-Boltzmann定数(4.903×10^{-9} MJK⁻⁴ m⁻²day⁻¹), T_{max}, T_{min} はそれぞれ日最高・最低気温(K), e は日平均水蒸気圧(kPa), S_{obs} は全天日射量観測値(MJm⁻²day⁻¹)である。

3 蒸発散量の算出とその検証

正味放射量 $R_n (= S^{\downarrow} - S^{\uparrow} + L^{\downarrow} - L^{\uparrow})$, 顕熱フラックス H , 地中熱流量 G の観測値を熱収支式(20)に代入し、その残差から潜熱フラックス ιE を算出する。

$$\iota E = R_n - G - H \dots (20)$$

ここで, ι は蒸発潜熱(Jkg⁻¹)である。ただし、渦相関法による顕熱フラックスの測定が出来ない降雨日のデータは除外する。

次に、蒸発散量の比較対象である基準蒸発散量 ET_0 の算出法を示す。基準蒸発散量は土壤中に水分が充分ある草地からの蒸発散量で、修正Penman-Monteith式で定義される(Allen *et al.*, 1998)。

$$ET_0 = 0.408 \frac{\Delta(R_n - G) + 900 \gamma u (e_s - e_a) / (T + 273)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u)} \dots (21)$$

ここで, ET_0 は基準蒸発散量(mm day⁻¹), γ は乾湿球定数(kPa°C⁻¹), Δ は飽和比湿の温度に対する変化率(kPa°C⁻¹), T は日平均気温(°C), u は高度2mにおける風速(ms⁻¹), e_s は飽和水蒸気圧(kPa), e_a は水蒸気圧(kPa), Δ は水蒸気圧曲線の勾配である。

IV 観測データの品質評価

1 近傍観測値との比較結果

まず、観測露場と館野の観測データ比較の一例として、日平均気温の比較を示す(Fig.9)。回帰直線を描くと両者の間にはバイアスはみられず、非常に良く一致し、相関係数は0.999、標準偏差は(0.52°C)となった。

この他の各データも両者が高い精度で一致することが

分り、日最高気温（相関係数 0.998, 標準偏差 0.64℃）、日最低気温（同 0.997, 0.81℃）、水蒸気圧（同 0.998, 0.66hPa）、気圧（同 0.999, 0.38hPa）の結果が得られた。

次に、観測露場と館野の日降水量の比較を示す（Fig.10）。一部に 40mm day⁻¹ ほど過大、過小となっているデータもあり、必ずしも両者はよく一致するわけではない。ただし、回帰直線を描いたところ直線の傾きは 0.959 とほぼ 1 に近い値となったことから、観測露場における大多数のデータは概ね館野の値と一致し、系統的な誤差は小さいといえる。なお、相関係数は 0.954, 標準偏差は 1.81mm day⁻¹ であった。

最後に、観測露場と館野の全天日射量の観測値を比較した（Fig.11）。両者の回帰直線を描くと、1対1によく対応していた。また、両者の標準偏差は 1.19 MJm⁻²day⁻¹ であった。

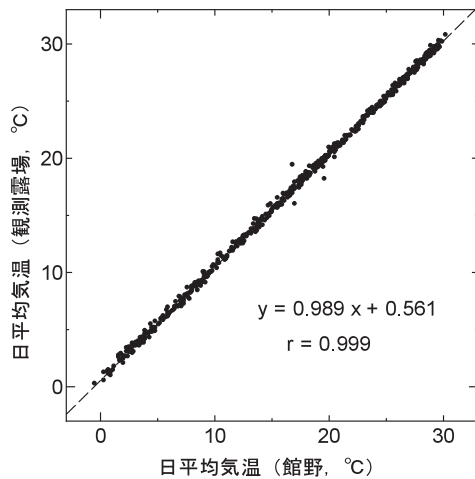


Fig.9 館野と観測露場における日平均気温の比較

Comparison of daily averaged air temperature between Tateno and observation site in IRE

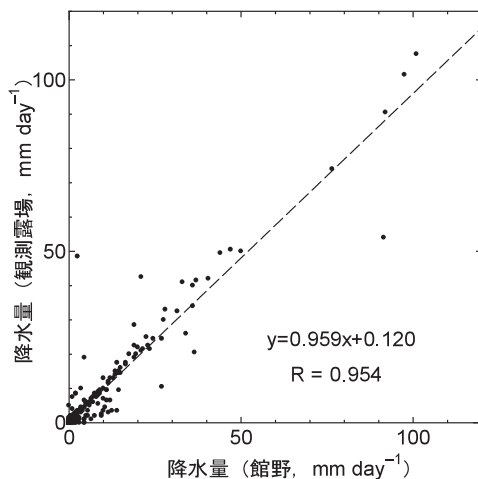


Fig.10 館野と観測露場における日降水量の比較

Comparison of daily rainfall between Tateno and observation site in IRE

2 各種推定値を用いた観測値の検証結果

まず、全天日射量の観測値を晴天日の全天日射量の理論値と比較すると、観測値は晴天日の理論値を上限とする領域内に分布していることが見て取れた（Fig.12）。観測値が晴天時の理論値を大幅に上回ったり下回ったりすることがあれば、観測ドームの汚れや傷、観測台が水平であるか等を確認する必要があるが、現在のところそのような傾向は観察されていない。

さらに、Fig.13 に長波放射収支の推定値と観測値の比較を示した。長波放射収支の観測値は推定値より若干過大となることが見て取れた。なお、推定値と観測値の標準偏差は 0.947MJm⁻²day⁻¹ であった。

ただし、Allen (2008) が指摘するとおり、これらの推定値との比較は正確に両者が一致することを期待するのではなく、観測値が大きく推定値から外れたことを検出するために用いる。そのため、上述した方法により得られた推定値の誤差の程度は、機器、観測の異常を早期発見するための参考値として今後有用になると考える。

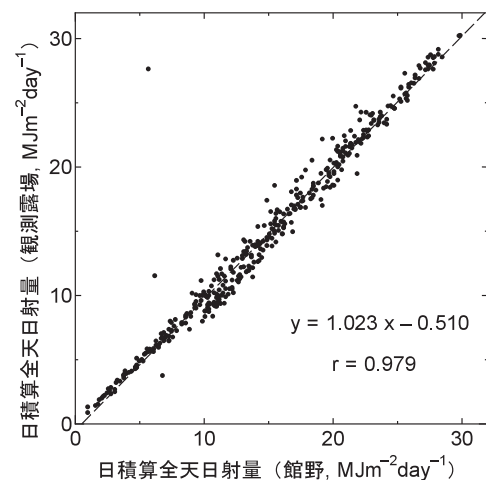


Fig.11 館野と観測露場における全天日射量の比較

Comparison of global radiation between Tateno and observation site in IRE

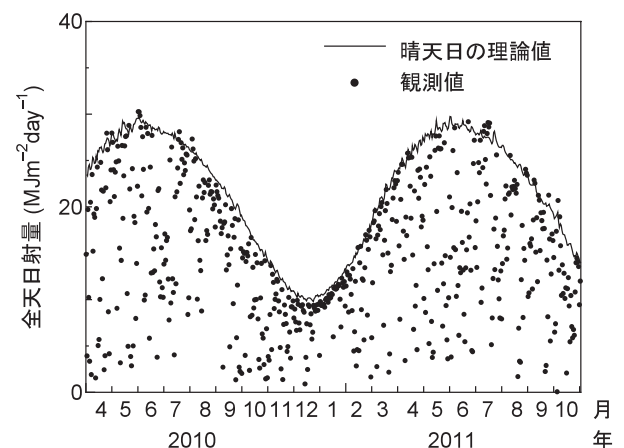


Fig.12 全天日射量の観測値と晴天日の理論値の比較

Comparison between observed global radiation and its estimated values for clear days

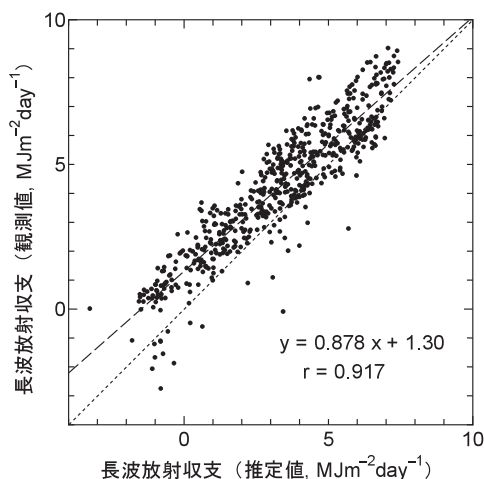


Fig.13 長波放射収支の推定値・観測値の比較

Comparison between observed and estimated values of net long-wave radiation

3 蒸発散量データの評価結果

有効放射量および顕熱フラックスの残差から熱収支式により算出した蒸発散量を、露場における基準蒸発散量、パン蒸発量と比較した。

まず、熱収支式により算定した蒸発散量の時系列を示す (Fig.14)。日蒸発散量は夏期に最大で6mm、冬期に1mmで明瞭な季節変化を示した。また、2010年4月1日から2011年3月31日までの降雨日を除いた熱収支式により算定した蒸発散量の合計値は824mmとなり、日本における平均的な値と比較して妥当な値を示した。

次に、熱収支式により算定した蒸発散量を修正Penman-Monteith式による基準蒸発散量 ET_0 (Allen *et al.*, 1998) およびパン蒸発量と比較した (Fig.15)。基準蒸発散量は熱収支式により算定した蒸発散量と同等か若干大きな値を示した。基準蒸発散量は土壌水分が充分ある条件下において、熱収支と気象条件から推定される蒸発散量であり、両者の差は観測露場の土壌水分状態を反映したものと判断できる。他方、パン蒸発量は浅い水面からの蒸発量であり、熱収支式により算定した蒸発散量より大きい値となった。蒸発散量の評価としてはこの他にもボーエン比法、傾度法による算定値と比較する方法や、土壌水分も含めた水収支を検討する方法などがあり、今後データの蓄積を行うとともにこれらの方法も含めた評価が必要となると考えられる。

V 結 言

本技術報告では、2010年4月から観測を開始した総合気象観測・公開システムの全体像と各気象観測の項目・方法についてまとめ、観測データの品質管理のための検討方法を示すとともに、これまで1年半の観測データにそれらの方法を適用した結果をまとめた。本報の内容は以下のようにまとめられる。

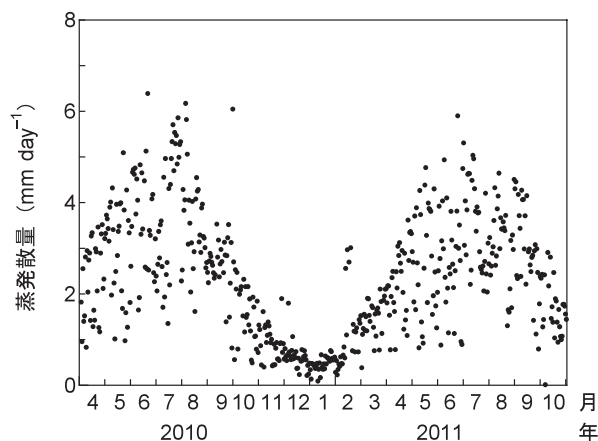


Fig.14 熱収支式により算定した蒸発散量の時系列変化
Time series of daily evapotranspiration estimated from heat balance equation

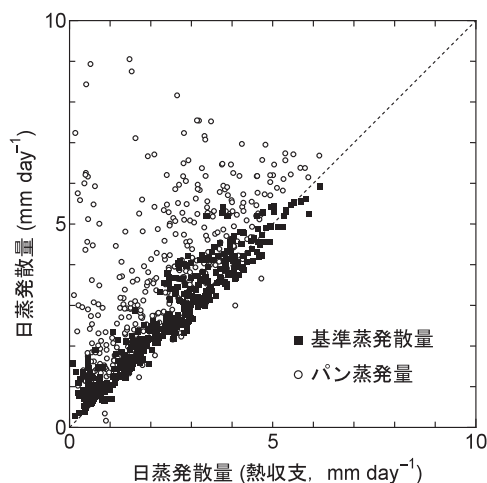


Fig.15 熱収支式により算定した蒸発散量と基準蒸発散量・パン蒸発量の比較
Comparison of estimated daily evaporation to reference evapotranspiration and pan evaporation

- 1) 構築した総合気象観測システムは、長期間継続して観測を安定的に行うことを念頭に、堅固であると同時にシンプルで透明性が高く、管理作業を容易に行えるシステムである。さらに、これまでの気象観測要素に加え、地表面付近の水・エネルギー移動の解明に必要な短波・長波放射量 (上下各2成分)、顕熱フラックス、地温、土壌水分量の常時観測を新たに追加し、さらにデータ閲覧・公開機能を強化したものである。
- 2) 気象観測データの蓄積を長期に渡って行い、信頼できるデータセットを構築するためのデータ品質管理として、近傍気象観測地点の観測値や各種推定値と観測値を比較する方法を示した。これらの比較により得られた誤差は、機器、観測の異常を早期発見するための参考値として今後有用になる。
- 3) 熱収支観測から算出した日蒸発散量、年蒸発散量

は、日本における平均的な値と比較して妥当な値を示した。また、基準蒸発散量との整合性もとれており、現在のところ安定的に観測が行えていると判断できる。今後はデータの蓄積を行うとともに、他の推定法や水収支からの検討を進める必要がある。

引用文献

- 1) Allen, R.G., L.S.Pereira, D. Raes and M.Smith (1998): Crop Evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-, FAO, Irrigation and Drainage Paper, **56**, 52
- 2) Allen, R. (2008): Quality assessment of weather data and micrometeorological flux –Impacts on evapotranspiration calculation, *J. Agric. Meteorol.*, **64**(4), 191-204
- 3) 上村春美 (1975)：平塚における 20 ヶ年平均気象の資料とその解析，農業土木試験場技報 A12, 1-85
- 4) 上村春美 (1978)：平塚における 24 ヶ年の気象の解析，農業土木試験場技報 A17, 1-39
- 5) 近藤純正編著 (1994)：水環境の気象学，朝倉書店
- 6) 宮田明 (1992)：羊ヶ丘の気象－北海道農業試験場気象観測資料 (1966-1990)－，北海道農業試験場研究資料, 44, 1-219
- 7) Sameshima, R.,T. Hirota, T. Hamasaki and S. Suzuki (2007): Temperature trends at the National Agricultural Research Center for Hokkaido Region in the 40 years from 1966 to 2005, *J. Agric. Meteorol.*, **63**(2), 95-102
- 8) 塚本修・文字信貴編著 (2001)：地表面フラックス測定法，気象研究ノート，199，日本気象学会
- 9) 渡来靖・藪崎志穂，山中勤 (2006)：TERC 熱収支・水収支観測データベース図表集，筑波大学陸域環境研究センター報告，第 7 号別冊

Configuration of Integrated Weather Observation System and Quality Assessment of Observed Data

YOSHIDA Takeo, MASUMOTO Takao and HORIKAWA Naoki

Summary

This paper outlines an automated weather observation system, which was thoroughly remodeled in April 2010 at the Institute for Rural Engineering, Tsukuba, Japan. The system was configured to carry out stable long-term meteorological observations with simple and robust settings and to be technically easy to maintain. In addition to primary variables such as temperature, precipitation, and wind speed, the system was enhanced with the observations of short- and long-wave radiation, sensible heat flux, soil temperature and moisture to clarify water and energy flows in the surface boundary layer. Because data can sometimes be impacted by measurement biases caused by sensor malfunction, sensor aging and sensor miscalibration, the observed data should be regularly checked and corrected. Therefore, we introduced some simple measures to evaluate the integrity and consistency of the observed values by comparing them with those of neighboring weather observation station and/or estimated values. Simple visual methods are able to screen and correct biased data. We obtained some reference values for checking anomalous data by using data from 18 months of observations.

keywords: automated weather station, data quality assessment, data exposure

〔農工研技報 212〕
53 ~ 96, 2012〕

バイオマス利活用システムのライフサイクルを対象とした 経済性の評価

清水夏樹*・柚山義人*・中村真人*・山岡 賢*

目次

I 緒言	53	3 生ごみ・生活廃水処理汚泥・食品加工残さ 対象シナリオ (シナリオ 3) …	75
II 評価の方法	54	4 規格外甘しょ・食品加工残さ 対象シナリオ (シナリオ 4) …	81
1 ライフサイクル評価の考え方	54	5 休耕田対象シナリオ (シナリオ 5) …	86
2 実態シナリオと計画シナリオ	55	V バイオマス利活用シナリオのライフサイクルでの 経済性評価	90
3 評価のための算出項目	55	1 コスト・収入についての実態と計画の比較	90
III 評価の対象地域およびシナリオの設計	56	2 外部経済効果の試算	91
1 評価対象地域の概要	56	VI 結言	92
2 シナリオの条件設定	56	参考文献	93
IV バイオマス利活用システムにおける コストと収入	57	Summary	96
1 乳牛ふん尿対象シナリオ (シナリオ 1) …	57		
2 豚ふん尿排水対象シナリオ (シナリオ 2) …	69		

I 緒言

バイオマス・ニッポン総合戦略が2002年12月に閣議決定されて以来、バイオマス利活用や関連技術の開発等が進められ、地域的な視点における数値目標の1つであったバイオマスタウン構想の公表数は、2011年4月までに目標の300を超える318に達した。その一方で、バイオマス活用推進基本法(2009年6月制定)に基づき2010年12月に閣議決定されたバイオマス活用推進基本計画(以下、基本計画)では、バイオマスタウン構想に基づく実際の取組が十分に進んでいないことを指摘している。基本計画では、これまでの反省点を踏まえ、2020年を目標年として、バイオマスの活用に関する各種の数値目標を示し、都道府県・市町村単位でのバイオマス活用推進計画の策定を進めることとしている。市町村バイオマス活用推進計画の策定目標数は600で、活用の進捗状況や取組効果の把握、とくにエネルギーやバイオマス変換製品の地域内自給率を算出することが求められている。

本報では、地域におけるバイオマス利活用の事業化に

係る具体的な目標設定や進捗管理に資するため、バイオマス利活用システムをライフサイクルで評価するための枠組みを示し、関東都市近郊農業地域を想定して経済性(コストと収入)を評価した事例を報告する。

バイオマス利活用システムの経済的な評価に関する研究は、各分野で行われてきている。たとえば、古市(2010)では、食品廃棄物と家畜ふん尿を対象としたバイオガス化システムの事業採算性を、バイオガスの利用方法の異なる2案を示して評価している。同様に、大久保ら(2010)は、乳牛ふん尿を主原料とするバイオガスプラントの実証運転データを基に、エネルギー収支、温室効果ガス排出削減効果、経営収支の観点から評価を行い、プラント運転方法の最適化を検討している。これらの研究はいずれも変換過程に着目した評価であり、また生成物のうち電力・熱・精製ガスなどエネルギー資源としての利用に着目している。メタン発酵プロセスに伴い生成される消化液の利用については草地還元が前提とされており、利用プロセスの評価対象には含まれていない。本報でも家畜ふん尿等のバイオガス化は主要な変換技術として採りあげているが、本報では、原料バイオマスの収集輸送や消化液の利用についても重点的に評価の対象としているため、より広範なプロセスを評価している点が異なる。

本報と類似の視点で評価を行った森本ら(2009)の研究では、バイオマスタウン構想を公表した38市町村を対象として地域経営の観点から、バイオマス発生から生

*資源循環工学研究領域資源循環システム担当

平成23年11月7日受理

キーワード：バイオマス利活用、ライフサイクル、ランニングコスト、シナリオ、外部経済効果、メタン発酵

成物の利用までを経済収支、エネルギー、環境影響の3つの点について総合的に評価するモデルを示した。さらに、濱井ら(2010)は、バイオマス利活用施設の効果を収益・社会的便益の観点から把握し、「施設が整備されない状況(なかりせば)」と「整備された状況(ありせば)」の2ケースを比較して評価している。利活用システムの関係者(セクター)毎の便益も算出しており、この点は本報でも今後取り組みたい。

また、ベスピャトコら(2009)は、市町村担当者をユーザーと想定したバイオマス会計を提案している。これはバイオマス事業の現状を、物質と金銭のフローとストックを記録することにより評価する方法であり、バイオマス利活用による直接的な収益だけでなく間接的な収益も表現することができる。また、環境負荷を推計することによる外部経済効果も扱っている。ベスピャトコら(2010)は、このバイオマス会計の入力フォームとマニュアルも公開しており、現状把握に適したこのツールは、本報で示す実態・計画シナリオの比較評価と共通する点も多い。

さらに上田(2010)は、農業系バイオマスからのバイオ燃料生産について、エネルギー収支、温室効果ガス削減効果に加えてコストを試算・検討している。実証段階から研究開発中まで幅広い作物を対象として、バイオ燃料1L当たりの生産費が算出されている。本報では、追加的な情報として、多収量米を対象とし、粗放的管理による実証栽培試験の結果に基づいたバイオ燃料生産のシナリオを設定した。

本報では、バイオマス利活用システムの経済性を評価するための評価対象、すなわちシナリオの設定方法、金額の算出方法について、できるだけ詳細に記述することに努めた。本報の知見は、主として市町村でバイオマス関連施策の立案・評価を行う担当者、バイオマス利活用事業をトータルに手がける民間事業者にとって役立つものと考えられる。担当者が入力データを各地域の実情に即したのものや、より信頼性の高いものに更新することによって、評価の精度を上げることができる。多くの紙面を費やすことになったが、収集すべきデータや評価の作業について丁寧に記述することで、市町村の担当者等がこの方法を用いた評価を自ら行えるようにしていることが、本報の特長、有用性である。

本研究は、農林水産省の委託プロジェクト研究「地域

活性化のためのバイオマス利用技術の開発(バイオマス利用シナリオの構築・実証・評価)(Cm3100)」(2007～2011年度)によるものである。本研究の実施にあたっては、千葉県香取市経済部農政課、香取市山田区事務所まちづくり課、農事組合法人和郷園、東京大学生産技術研究所他関係各機関の多くの方にご協力いただいた。ここに感謝の意を表する。

II 評価の方法

1 ライフサイクル評価の考え方

本報で述べるバイオマス利活用システムの評価に当たっては、市町村等の「地域」を範囲として、バイオマス賦存量や現状での利用状況から対象とするバイオマスを決定する(清水, 2011a)。このバイオマスの輸送、変換、利用などについて、物質の移動や活動の流れを把握したシナリオを作成する(柚山ら, 2010)。このシナリオに基づき、バイオマスの「変換」や「利用」などの各局面を維持するための物質や活動の投入と産出を年単位で把握するとともに、システム全体をとおした物質収支、エネルギー収支を算出する。シナリオは、単に物質やエネルギーのみを捉えるのではなく、システムを支える活動(担い手や組織の体制、運営方法、組織間連携等)を計画する(清水・柚山, 2010 および清水, 2005)。これらによるコスト(支出)と収入をライフサイクル全体について算出し、それぞれのシナリオに基づく計画の妥当性を判断する一助とする。

a バイオマス利活用システムのステージ

バイオマス利活用システムは、Table 1 に示すようなステージの連続である。すなわち地域内でのバイオマスの生産・発生から、これらのバイオマスを収集し、必要に応じて貯蔵しつつ変換場所まで輸送し、さらにバイオマスをエネルギーや製品に変換する。さらに、変換された生成物を需要先、利用者まで輸送あるいは貯蔵し、需要先でバイオマス由来の生成物が利用されるという複数のステージがつながったものである。本報では、これらのステージの連携全体を評価対象とする。

b 各ステージにおけるライフサイクル

個々のステージにおいては、ライフサイクルが3つの

Table 1 バイオマス利活用システムのステージ
Stages of biomass utilization system

ステージの名称	ステージの内容
①バイオマスの生産(発生)ステージ	地域内でのバイオマスの生産・発生
②収集・輸送・貯蔵ステージ	バイオマスを収集し、必要に応じて貯蔵しつつ変換場所まで輸送
③バイオマスの変換ステージ	バイオマスを変換し、エネルギーや製品を生成
④生成物の輸送・貯蔵ステージ	変換された生成物を需要先、利用者まで輸送あるいは貯蔵
⑤生成物の利用ステージ	需要先でバイオマス由来の生成物を利用

段階から構成される。第1は、各ステージの施設や機器装置等の建設・製造の段階、第2は運営段階、第3は廃棄の段階である。第1と第3段階では建設製造時あるいは廃棄時に1回だけ投入されるコストを対象とする。これらをそれぞれ初期コスト、廃棄コストと呼ぶ。第2の段階では、原材料の売買や手数料支払・収入、運転のためのコスト、生成されるエネルギーや製品の販売収入等が評価対象となる。各ステージでは、活動の時間的単位が異なるほか、施設や機器の種類や規模に基づく使用年数（耐用年数）、更新時期が異なる。そのため第2の運営段階では、1年を単位として評価する。第1と第3の段階については、計上されるコストを使用年数で割り、1年当たりのコストとした。

2 実態シナリオと計画シナリオ

評価は、「実態」と「計画」の比較である。評価対象とした地域のニーズや社会受容性を考慮して、対象とするバイオマスの活用計画をシナリオとして作成したものを計画シナリオと呼ぶ。そして計画で扱うバイオマスと同量・同質の原料バイオマスについて、「実態」をバイオマス利活用システムの各ステージに当てはめ、その流れを把握したものを実態シナリオとした。「実態」と「計画」が変わらない部分については、“neutral”と考え、比較評価においては差がないとする。実態シナリオでは、廃棄物系バイオマスは廃棄（適正処分）、未利用バイオマスは未利用である。これらを計画シナリオにおいては利活用することとなる。計画シナリオの⑤生成物の利用ステージは、対象とした「地域」内での利用を前提とした。

3 評価のための算出項目

各ステージにおいて、コスト（支出）と収入を算出した。Table 2 に算出項目、入力データの例を示す。初期

コストおよび廃棄コストについては、それらの金額を「使用年数」で除して1年毎のコストに換算した。

a 初期コスト

初期コストは、各ステージの運営に係る施設・機器の建設・整備・購入のために投入される費用である。投入金額の全体を計上する段階では補助率等は考慮していない。本報ではとくに、③バイオマスの変換ステージにおける変換施設・機器の初期コストを詳細に検討した。施設建設費は、可能な限り「建築土木」（使用年数が長い）と「設備機器」（使用年数が短い）に分けて計上するようにした。残存価額（耐用年数が到来した時の処分可能見込額）は考慮しない。

b 使用年数

前述のとおり、使用年数は施設の構造や規模、機器の種類や使用方法等によって異なるため、バイオマス利活用システムを構成する施設・機器ごとに決定する必要がある。しかし、すべての施設およびそれに含まれる機器について使用年数を個別に定めると、評価シナリオの設定が複雑になりすぎるため、本報では、バイオマス変換施設を中心に、想定される施設・機器の「総合耐用年数」を設定した。「総合耐用年数」は、文献調査、バイオマス変換施設・関連機器メーカーや実際の利用現場へのヒアリング等により決定した。車両等の一般的な機器については、税法上の固定資産の耐用年数をもって使用年数とした。

c ランニングコスト

ランニングコストは、年を単位として算出した。主に光熱費（電力、燃料）、原料費・資材費、保守点検費、人件費の費目ごとに算出し、ステージによっては事務経

Table 2 各ステージでのコストと収入算出のための項目と入力データ
Index and data for calculating cost and income in each stage

段階	算出項目	入力データ例
1（建設・製造）	初期コスト（円/使用年数）	建設費（建築土木、設備機器）、使用年数
		車両・個別機器等購入費、使用年数
2（運営）	ランニングコスト（円/年）	光熱費
		原料費・資材費
		保守点検費
		人件費
		事務経費
		サービスに対する手数料支払
		廃棄物処分委託費
収入（円/年）	製品販売	
	サービス提供料金収入	
	受入・処理手数料収入	
3（廃棄）	廃棄コスト（円/使用年数）	「建築土木」建設費の5%（仮定）、使用年数
		「設備機器」建設費・車両等価格の3%（仮定）、使用年数

費や廃棄物処分委託費（運営段階で継続的に発生する廃棄物を適正に処分するための費用）等も計上した。評価シナリオ内での地産地消、すなわち同じシナリオの中で、あるステージで生産された製品（提供されるサービス含む）を販売（提供）した際の収入が、それを購入・利用した別のステージで支払すなわちコストとして計上される場合もある。

d 収入

エネルギーや製品を生産し販売するステージでは、これらの販売料金が収入となる。また、輸送や受入・処理等のサービス活動に対する手数料収入は単価を設定して算出した。ランニングコストと同様、あるステージで製品やサービスに対して支払われたコストが、同一のシナリオ内の別のステージの担い手にとっての収入として計上される場合もある。

e 廃棄コスト

廃棄コストは施設・機器によって大きく異なり、またその価格を厳密に知ることは容易ではない。本報では一律に、施設については「建築土木」建設費の5%と「設備機器」建設費の3%とし、その他の車両・機器については購入費の3%と仮定して算出した。

III 評価の対象地域およびシナリオの設計

1 評価対象地域の概要

事例として評価対象とした地域は、関東地方の都市近郊農業地域である千葉県香取市である。香取市のバイオマス賦存量及び現在の利用状況を Fig.1 に示す。生重量として最も多い家畜ふん尿のうち、牛ふん尿は100%が何らかの形で堆肥化されており、豚ふん尿汚水（畜舎で除ふんされた後のふん尿と洗浄水が混合、水分98%以上）は固液分離され、固体分は堆肥化、液分は一部を除

いて汚水処理され河川に放流されている。しかし、これらの家畜ふん尿堆肥のなかには適切な農地還元が行われているかどうか不明なものもあり、また、品質や貯蔵の問題から、耕種農家に無料で引き取ってもらったり、畜産農家の負担で輸送・散布を行っている場合もあるなど、需要先の確保や堆肥の高品質化が課題となっている。また市面積の44%を占める田畑で発生する農作物残さの利用も進んでいない。

2010年2月に公表された香取市バイオマスタウン構想では、具体的な利活用方法として①家畜排せつ物の積極的な利用、②廃食用油のBDF化、③木質系バイオマスの総合的利用、④一般家庭生ゴミの利活用、⑤食用甘しょ等の規格外品の利用と収穫残さの利用を掲げている。たとえば①、④では、高品質な堆肥を製造し地域内農地に還元することにより資源の循環利用が目指され、将来的にはメタン発酵によるエネルギー生産も検討されている。また、⑤では新産業創出への期待もあり、実現に向けた取り組みが模索されている。

2 シナリオの条件設定

事例地域のバイオマス賦存量およびバイオマスタウン構想等を参考に、5つのバイオマス利用計画を設計した。この利用計画の各ステージの条件を計画シナリオ（以下、**計画**と表記）として設定し、同じ量・質のバイオマスの現状でのフローに基づく各ステージの条件を、対になる実態シナリオ（以下、**実態**と表記）に設定した。Table 3に5対のシナリオの概要を示す。5対のシナリオを設定したのは、これらの計画が地域活性化、循環型社会形成、環境保全等に資する候補であること、また、市町村の担当者が5つの例題を参考にすることにより自らの地域に当てはめた評価を容易に行うことができるようになることを考えたためである。

シナリオ1およびシナリオ2で対象とした家畜ふん尿については、事例地域の利用・処分実態を踏まえ、新た

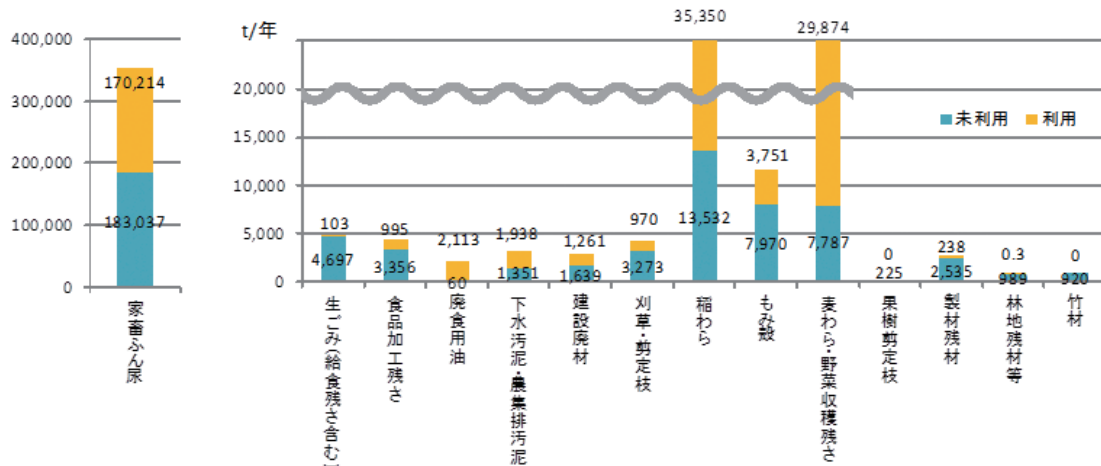


Fig.1 香取市のバイオマス賦存量と利用状況（生重量）
Amount of feedstock biomass(wet-t) and utilization in Katori city

Table 3 評価対象シナリオの概要
Outline of scenarios for evaluation

シナリオ	対象とするバイオマス			実態		計画	
	バイオマス名	生重量 (t/年)	地域内利用可能量に占める割合 (%)	シナリオ上のフロー	生成物	シナリオ上のフロー	生成物
1	乳牛ふん尿 (敷料含む)	9,119	26	堆肥化 (原料 25t/日規模, 1施設)	堆肥	メタン発酵・ガス発電+堆肥化 (原料 25t/日規模, 1施設)	電力 (施設内自給+販売) 熱 (施設内自給+販売) メタン発酵消化液 堆肥
2	豚ふん尿排水 (洗浄水含む)	96,738	20	汚水処理+堆肥化 (除ふん率 50%の原料 25t/日規模, 10施設) *固形物堆肥化はシステム外	処理水・(堆肥)	メタン発酵・ガス発電+堆肥化 (原料 26.56t/日規模, 10施設) *固形物堆肥化はシステム外	電力 (施設内自給+販売) 熱 (施設内自給) メタン発酵消化液 (堆肥)
3	生ごみ	1,920	40	焼却+焼却灰埋立 (原料 10t/日規模, 1施設)	なし	破碎後メタン発酵・ガス発電+堆肥化 (原料 10t/日規模, 1施設) *固形物堆肥化はシステム外	電力 (施設内自給+販売) 熱 (施設内自給+販売) メタン発酵消化液 (堆肥)
	生活廃水処理汚泥	1,296	39				
	食品加工残さ	434	10				
4	規格外甘しょ	1,500	18	畑に鋤込み	なし	飼料化 (原料 30t/日 (規格外甘しょ 20%, 食品残さ 75%, 添加物 5%) 規模, 1施設)	飼料
	食品加工残さ	3,917	90	焼却+焼却灰埋立	なし		
	(地域外より) 食品加工残さ	3,283	-	地域外で処理 (システム外)	なし		
5	休耕田 (386.25ha の遊休水田のうち利用可能な 266.5ha)	-	-	維持管理 (耕うん, 畦畔草刈り)	なし	簡易な農地整備後, 資源作物 (バイオ燃料原料米) 栽培→籾の乾燥調製→粗玄米のエタノール化	エタノール飼料原料
対象バイオマス合計		114,924					

な利用可能性としてエネルギー (電力・熱) と液肥を生成するメタン発酵の導入を検討した。メタン発酵工程の設計に際し, 既存の資料 (柚山ら, 2006) と事例地域の畜産経営規模を勘案し, 変換ステージへの投入バイオマスを 1施設当たり 25t/日程度と設定した。ここからの逆算により, 対象となる家畜頭数を, シナリオ 1 では乳牛 494 頭, シナリオ 2 では 1施設当たり母豚 170 ~ 180 頭 (一貫経営) と定めた。本来ならば, 生成物の需要量または新たなバイオマス利活用が必要な原料バイオマスの量に基づいて計画シナリオの設計を行うのが適切である。

なお, コストと収入の算出において, 評価対象シナリオに共通の条件を **Table 4** に示す。輸送用車両の燃費効率は積載量によりそれぞれ値を引用した。同様に, 固定費, 燃料以外の運行費についても, 車両の大きさによって税, 保険料等が異なるため, 3段階に分けて条件を設定した。人件費は, 年間雇用の場合と日単位の雇用の場合とに分け, 年単位の人件費については柚山ら (2006) の再資源化施設のコスト試算における値を用いた。日単位の雇用については, 対象地域内で実証的に行われている類似作業についてヒアリング調査を行い, 自治体のシルバー人材センターなど高齢者の雇用を想定した 8 時間/日勤務の条件, 日当 8 千円/人と設定した。メタン発酵や汚水処理等に必要な薬剤費の価格は, プラントメーカーへ発注した「メタン発酵設計及びコスト・エネルギー試算業務」報告書に基づく。堆肥およびメタン発酵消化液の販売単価は, 国内の類似の事例を参考に設定したものである。

電力販売については, 再生可能エネルギーの全量買取制度に関する議論が進められているが, 本報執筆時点では買取価格が定められていない。総合資源エネルギー調査会新エネルギー部会・電気事業分科会買取制度小委員会 (2011) では, 太陽光発電を除いた再生可能エネルギーによる発電電力の買取価格について 20 円/kWh を最低限必要なラインという意見を採り上げている。そこで, 今後のエネルギー政策により変化する可能性があるが, 本報では, 余剰電力販売単価を 20 円/kWh と設定した。また余剰熱は, 実際は利用が難しいといわれている。そのため, プラントメーカーの意見も参考に, 将来的な利用を見越し, 最低価格として 1 円/MJ と設定した。

IV バイオマス利活用システムにおけるコストと収入

1 乳牛ふん尿対象シナリオ (シナリオ 1)

香取市では 1,900 頭の乳牛 (成牛のみ。うち搾乳牛 1,742 頭, 乾乳牛 158 頭) が飼養されており, 38,744t/年のふん尿 (本シナリオでは敷料を含む) が発生する。このうちシナリオ 1 では, 成牛飼養頭数の 26% に当たる 494 頭分のふん尿 9,125t/年を対象とする。本報では, 経営規模 (飼養頭数) について, 2つのケースを設定した。「ケース 1」では, 総対象頭数 494 頭を 3 戸の酪農家が飼養する (各農家が 100 ~ 200 頭規模を飼養) と想定した。この規模は, 香取市においては相対的に大きい経営規模であり, 中心的な生産者である。「ケース 2」は, 総対象頭数 494 頭を 1 戸の酪農家が飼養するケースで,

Table 4 コストと収入の算出における共通条件
Condition to calculate cost and income

	条件項目	条件値	引用元
輸送車両燃費効率	小型	6.26km/L	神奈川県 (2010)
	中型	5.26km/L	
	大型	3.34km/L	
農業機械燃費効率	堆肥散布機	0.35L/10a	筆者らが実証試験で測定
	消化液散布機	1.83L/10a	筆者らが実証試験で測定 (清水ら, 2009)
輸送車両固定費 (税 + 自賠責保険費 + 車検費 + その他経費)	小型	337 千円 / 台	いすゞトラックステーション (2011) より各項目を積算
	中型	366 千円 / 台	
	大型	442 千円 / 台	
燃料以外の運行費 (修繕費 + 油脂費 + タイヤ・チューブ費)	小型	7.5 円 / km	
	中型	7.5 円 / km	
	大型	9 円 / km	
電力料金	基本電力	1,100 円 / kW / 月	畜産環境整備機構 (2005)
	従量電力	12 円 / kWh	
燃料費	軽油	103 円 / L	農林水産省大臣官房統計部 (2010)
人件費	年間雇用	4,500 千円 / 年 / 人	柚山ら (2006)
	日雇用 (8 時間 / 日)	8 千円 / 日 / 人	本報での設定 (※本文参照)
薬剤費	脱硫剤	180 円 / kg	プラントメーカー調査
	無機系凝集剤 (ポリ硫酸第二鉄)	31 円 / kg	
	苛性ソーダ	30 円 / kg	
	メタノール	90 円 / kg	
堆肥販売・購入価格		2 千円 / t	本報での設定 (※本文参照)
メタン発酵消化液販売・購入価格		600 円 / t	本報での設定 (※本文参照)
化学肥料購入価格		108 円 / kg	農林水産省大臣官房統計部 (2010)
電力販売価格		20 円 / kWh	本報での設定 (※本文参照)
熱販売価格		1 円 / MJ	本報での設定 (※本文参照)

酪農経営とバイオマス利用の高効率化を想定したものである。

a 実態と計画の設計

シナリオ1では、③バイオマスの変換ステージにおける原料バイオマス (乳牛ふん尿) 量を 25t/日と設定し、**実態** (堆肥化) および**計画** (メタン発酵) を作成した。**Table 5** に各ステージの内容を示す。ふん尿が堆肥化により利用されているとしても、家畜ふん尿堆肥の生産量が地域需要量に比して過剰であったり、堆肥の需要先確保が困難である地域では、メタン発酵の導入が提案できる。メタン発酵により生成されるバイオガスを用いて電力や熱等を生産し、活用することも可能である。たとえば、北海道江利市の町村農場では、ふん尿の効率的な処理と悪臭軽減のためにメタン発酵技術を導入し、農場施設で使用する電力の一部を自給 (余剰電力発生の場合は売電) するとともに、消化液を飼料畑の全てにおいて施肥の中心としている (まちむら農場, 2011)。

「ケース1」の**実態**では、3戸の酪農家で発生するふん尿 (1戸当たり 8.3t/日) は輸送されることなく各戸に1基ずつ配置された施設 (8.3t/日規模) で堆肥化され、生成された堆肥は各酪農家から地域内の農地に輸送・散布

される。堆肥化 (ステージ③) および堆肥の輸送・散布 (ステージ④) に必要な労力を、変換施設の規模や作業体系に基づき仮定した (**Fig.2** の上図)。「ケース1」の**計画**では、ふん尿を各酪農家が輸送し、共同で設置するメタン発酵施設1基 (25t/日規模) で変換する。生成したメタン発酵消化液は、共同で農地に輸送・散布される (**Fig.2** の下図)。メタン発酵 (ステージ③) および消化液の輸送・散布 (ステージ④) を生産組合等の共同組織で行うことを想定したケースである。②収集・輸送ステージでは、酪農家が自らふん尿の収集・輸送を行うため、収集手数料支払い・収入は発生せず、輸送のためのランニングコストのみを計上した。

「ケース2」の**実態**では、発生するふん尿 (25t/日) は経営内に設置 (輸送なし) された施設1基 (25t/日規模) で堆肥化され、生成された堆肥は地域内の農地に輸送・散布される (**Fig.3** の上図)。**計画**では、同量のふん尿を、経営内に設置 (輸送なし) されたメタン発酵施設1基 (25t/日規模) で変換する。生成したメタン発酵消化液は、変換施設から農地に輸送され散布される (**Fig.3** の下図)。1戸の酪農家が①バイオマスの生産 (発生) ステージから④生成物の輸送・貯蔵ステージまでを担うと仮定し、各ステージの初期コストもこの酪農家が負担するという

Table 5 シナリオ 1 の各ステージの内容
Activities of each stage in Scenario 1

ステージ シナリオ	①バイオマスの生産(発生)ステージ	②収集・輸送・貯蔵ステージ	③バイオマスの変換ステージ	④生成物の輸送・貯蔵ステージ	⑤生成物の利用ステージ
実態「ケース 1」	乳牛ふん尿の発生	輸送なし	堆肥化 (8.3t/日 × 3 基)	堆肥の輸送・散布 (水田 133ha, 畑 337ha)	水田 133ha, 畑 337ha での農作物栽培 (不足窒素成分を化学肥料で補完)
実態「ケース 2」		輸送なし	堆肥化 (25t/日 × 1 基)		
計画「ケース 1」	乳牛ふん尿の発生	各農家 15 回/週の輸送	メタン発酵 + コジェネレーション (25t/日 × 1 基)	消化液の輸送・散布 (水田 46.8ha, 畑 119ha)	水田 133ha, 畑 337ha での農作物栽培 (不足窒素成分を化学肥料で補完)
計画「ケース 2」		輸送なし			

法人形態の事例を想定している。

各ケースとも、**実態**の③バイオマスの変換ステージにおける堆肥化副資材は、おがくずとした(対象地域の酪農家で最もよく利用されている副資材であるため)。生成した堆肥の農地への施用(④生成物の輸送・貯蔵ステージ)については、施用可能量を千葉県施肥基準に基づき水田で 1t/10a, 畑で 2t/10a とし、基肥として地域内の水田および畑に輸送・散布し、これらの農地で耕種農家が農作物を栽培する(⑤生成物の利用ステージ)という条件の下、シナリオを作成した。

計画の③バイオマスの変換ステージでは、メタン発酵で生成したバイオガスをコジェネレーションに利用し、電気と熱を生産する。これらは施設の運転に利用するとともに、余剰分は販売する。また前処理で発生する固体分はおがくずを副資材として堆肥化し販売する。生成したメタン発酵消化液の農地への施用(④生成物の輸送・貯蔵ステージ)については、窒素成分をベースに施用可能量を設定し、地域市内の農地に輸送・散布することとした。作物栽培(⑤生成物の利用ステージ)においては、水田面積の一部ではメタン発酵消化液で窒素化学肥料を 100% 代替することができる。

b 各ステージにおけるコストと収入の算出

(1) バイオマスの生産(発生)ステージ

「ケース 1」と「ケース 2」では担い手の規模が異なる

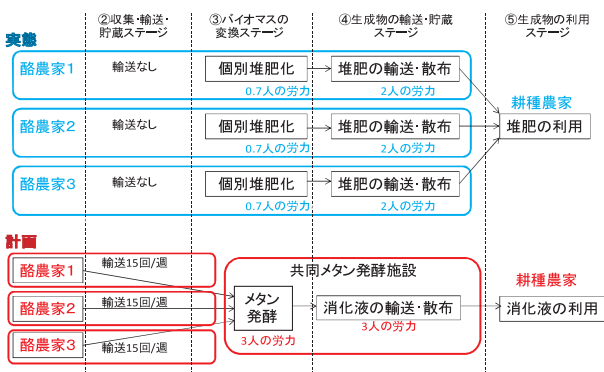


Fig.2 シナリオ 1 の「ケース 1」の条件設定
Condition of "Case 1" in Scenario 1

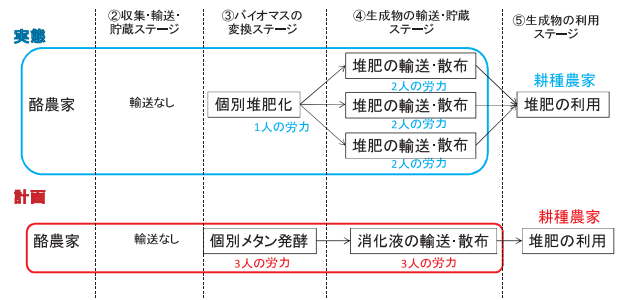


Fig.3 シナリオ 1 の「ケース 2」の条件設定
Condition of "Case2" in Scenario 1

が、評価対象とする発生ふん尿量(25t/日)は同じである。また、**実態・計画**とも、コストおよび収入は“neutral”であるとした。発生するふん尿の性状・成分は、農林水産バイオリサイクル研究「システム実用化千葉ユニット」(2007)より設定し、ふん(含水率 86%) 16.8t/日、尿(含水率 100%) 7.4t/日、敷料(含水率 15%) 0.7t/日の混合物である。混合物の含水率は 88.2% である。

(2) 収集・輸送・貯蔵ステージ

「ケース 1」では、**実態**での輸送はなく、コスト、収入ともに 0 円である。一方、**計画**では、各酪農家は 15 回/週、最大積載量 4t(6m³)の中型ダンプトラックを用いて片道 10km の輸送を行う。中型ダンプトラックに係る初期コストや廃棄コスト、輸送に係る人件費は、各酪農家の経営内に含まれるとして計上せず、輸送に係る燃料費と燃料以外の運行費のみをランニングコストに計上した。輸送は酪農家自ら行うため、収集輸送手数料等の収入は発生しない。

中型ダンプトラックの走行距離から、燃料費と運行費を計算した(**Table 4**より中型の項参照)。総走行距離は、3 戸 × 15 回 × 51 週 × 10km × 2(往復) = 45,900km/年である。以上より算出したコストと収入を **Table 6** に示す。

「ケース 2」では、**実態・計画**とも、①バイオマスの生産(発生)ステージと③バイオマス変換ステージとが同じ場所で実施されるとし、②収集・輸送・貯蔵ステージでのコストは計上しない。

(3) バイオマスの変換ステージ

シナリオ1・**実態**では、乳牛ふん尿は酪農経営内に設置された堆肥化施設で変換され、堆肥が生成される。

「ケース1」、「ケース2」で共通の条件として、変換施設は、ロータリー式発酵槽を中心とした開放型堆肥化施設であり、年間稼働日数は365日である。付属施設としておがくずを40日分貯蔵できるおがくず貯蔵庫も併せて建設されるものとした。おがくず貯蔵庫の建設費は、おがくず容積重 0.25t/m^3 （畜産環境整備機構，2004）から40日分の貯蔵体積を算出し、3mまで積み上げ可能として貯蔵庫の必要面積に建設単価12千円/ m^2 （畜産環境整備機構，1998）を乗じて算出した。おがくずの単価は、対象地域におけるヒアリング結果より5千円/tとした。総合耐用年数は、堆肥化施設の建築土木を30年、設備機器を12年、おがくず貯蔵庫を10年とした。資材や製品の搬入・搬出にバケットローダー（初期コスト・廃棄コストは酪農経営内に含まれると考え、計上しない）を用いる。バケットローダーの燃料（軽油）消費量は、作業時間当たり7L/時（畜産環境整備機構，2003）である。

人件費単価は年間雇用として算出した。施設の点検補修費は、柚山ら（2006）より、施設建設費（設備機器）の2%とした。

「ケース1」では、8.3t/日規模の堆肥化施設が3基設置される。堆肥化施設の運転条件・建設費は、畜産環境整備機構（2005）よりコクブ商事株式会社の評価書およびコクブ式コンポストシステムのカタログ値を参考に設定した。副資材の必要量を①バイオマスの生産（発生）ステージのふん尿性状（含水率）条件から算出し、発酵槽必要面積から幅4m×1レーン×長さ106mのロータリー式発酵槽とした。Fig.4に設計した変換工程のフローを示す。1施設の運営に要する労力は0.7人で年間雇用とした。

バケットローダーによる作業は、副資材投入に係る作業時間を0.25時間/日、原料投入、ストックヤードへの移動、堆肥搬出に係る作業時間を各0.5時間/日として消費量は12.25L/日と算出した。電力消費量の算出に当

たっては、攪拌機の走行速度を0.4m/分とし、1日1回、1レーンの片道攪拌（106m）を行うと仮定して稼働時間を4.4時間/日とした。ブローワーは24時間連続運転とした。以上より算出したコストと収入をTable 7に示す。

「ケース2」では、25t/日規模の堆肥化施設が1基設置される。堆肥化施設の運転条件は、「ケース1」の条件を基に、発酵槽を幅4m×3レーン×長さ106mとし、施設建設費はスケールメリットを考慮してケース2の2.5倍とした。Fig.5に設計した変換工程のフローを示す。この1基の堆肥化施設運営に要する労力は1人（年間雇用）である。バケットローダーによる作業は、副資材投入に係る作業時間を1時間/日、原料投入、ストックヤードへの移動、堆肥搬出に係る作業時間を各2時間/日として燃料（軽油）消費量を49L/日と算出した。電力消費量の算出に当たっては、攪拌機の走行速度を0.4m/分とし、1日1回、3レーンにおいて片道攪拌（106m）を行うと仮定して稼働時間を4.4時間/日とした。ブローワーは24時間連続運転とした。以上より算出されたコストと収入をTable 8に示す。

シナリオ1・**計画**では、乳牛ふん尿は共同で設置（「ケース1」）または酪農経営内に設置（「ケース2」）した25t/日規模のメタン発酵・コジェネレーション施設1基で変換される。変換ステージの担い手の条件設定は異なるものの変換工程の条件は同じである。変換施設では、メタン発酵により発生したバイオガスを用いて電力と熱が生成され、同時にメタン発酵消化液が生成される。年間稼働日数は365日、総合耐用年数は、メタン発酵・コジェネレーション施設の建築土木を30年、設備機器を12年とした。この1基のメタン発酵・コジェネレーション施設の運営に要する労力は1.5人（年間雇用）である。

付属施設として、前処理段階で発生する夾雑物を堆肥化する装置を設置するものとした。堆肥化装置は既存の設備を使用すると仮定し、初期コスト・廃棄コストは計上しない。また堆肥化に係るランニングコストは、発生する夾雑物の量から、**実態**の「ケース1」で設定した堆肥化施設1基分の60%を計上した。

Table 6 シナリオ1・計画の「ケース1」の②収集・輸送・貯蔵ステージにおけるコストと収入
Income and cost in ② Biomass transportation stage of Plan Scenario 1 ("Case 1")

算出項目	データ名	算出結果
初期コスト (円/年)	中型ダンプトラック購入費	酪農家経営内に含まれると考え計上しない
廃棄コスト (円/年)	中型ダンプトラック廃棄費	酪農家経営内に含まれると考え計上しない
ランニングコスト (円/年)	人件費 (ドライバー)	酪農家経営内に含まれると考え計上しない
	燃料費	総走行距離 45,900km/年 ÷ (5.26km/L) = 燃料消費量 8,726L/年 8,726L/年 × (103円/L) = 899千円/年
	中型ダンプトラックの固定費	酪農家経営内に含まれると考え計上しない
	中型ダンプトラックの燃料以外の運行費	総走行距離 45,900km/年 × (7.5円/km) = 344千円/年
収入 (円/年)	なし	0円/年

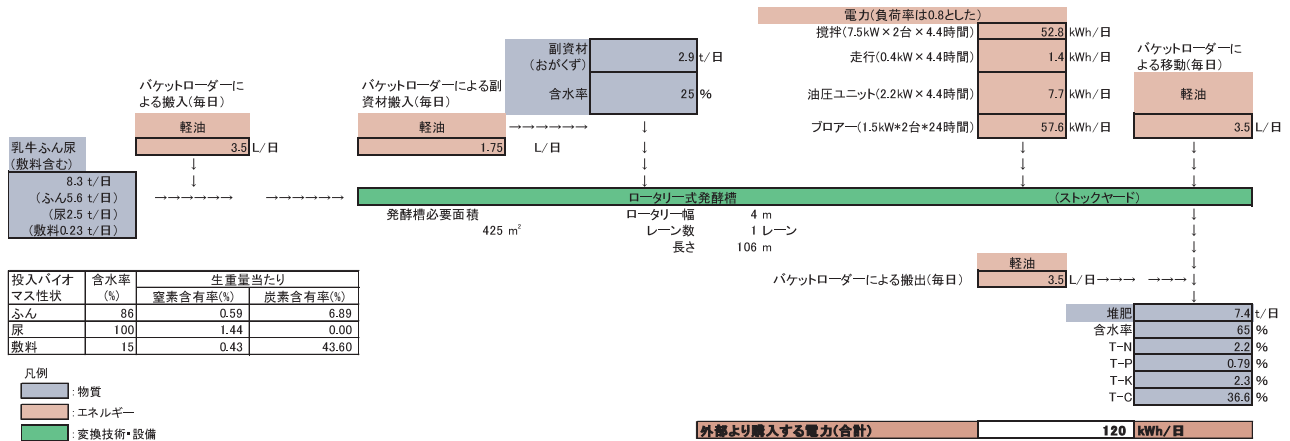


Fig.4 シナリオ1・実態の「ケース1」における変換工程フロー
Flow of composting in Present Scenario 1 ("Case 1")

Table 7 シナリオ1・実態の「ケース1」の③バイオマス変換ステージにおけるコストと収入
Income and cost in ③ Biomass conversion stage of Present Scenario 1 ("Case 1")

算出項目	データ名	算出結果
初期コスト (円/年)	堆肥化施設(建築土木)3基建設費	(34,740千円÷30年)×3基 = 3,474千円/年
	堆肥化施設(設備機器)3基建設費	(14,900千円÷12年)×3基 = 3,725千円/年
	おがくず貯蔵施設3基建設費	(1,856千円÷10年)×3基 = 557千円/年
廃棄コスト (円/年)	堆肥化施設(建築土木)3基廃棄費	((34,740千円×0.05)÷30年)×3基 = 174千円/年
	堆肥化施設(設備機器)3基廃棄費	((14,900千円×0.03)÷12年)×3基 = 112千円/年
	おがくず貯蔵施設3基廃棄費	((1,856千円×0.05)÷10年)×3基 = 28千円/年
ランニングコスト (円/年)	人件費	(0.7人×4,500千円/人・年)×3基 = 9,450千円/年
	電力料金(契約電力21kW/基, 電力消費量120kWh/日/基)	基本電力料金 21kW × (1,100円/kWh/月) × 12ヶ月 = 277千円/年/基 従量電力料金 120kWh/日 × 12円/kWh × 365日/年 = 526千円/年/基 (277千円/年/基 + 526千円/年/基) × 3基 = 2,349千円/年
	水道料金(井水利用, 排水なし)	0円/年
	燃料費(軽油12.25L/日/基)	(12.25L/日 × 365日 × 3基) × 103円/L = 1,382千円
	副資材費(おがくず, 1,059t/年/基)	1,059t/年 × 3基 × 5千円/t = 15,885千円/年
	点検補修費(設備機器費の2%)	14,900千円/基 × 0.02 = 298千円/年/基 298千円/年 × 3基 = 894千円/年
収入(円/年)	堆肥販売料金(生成量2,701t/年/基)	2,701t/年/基 × 2千円/t = 5,402千円/年/基 5,402千円/年 × 3基 = 16,206千円/年
	ふん尿処理料(委託費収入)	0円/年(経営内であるため)

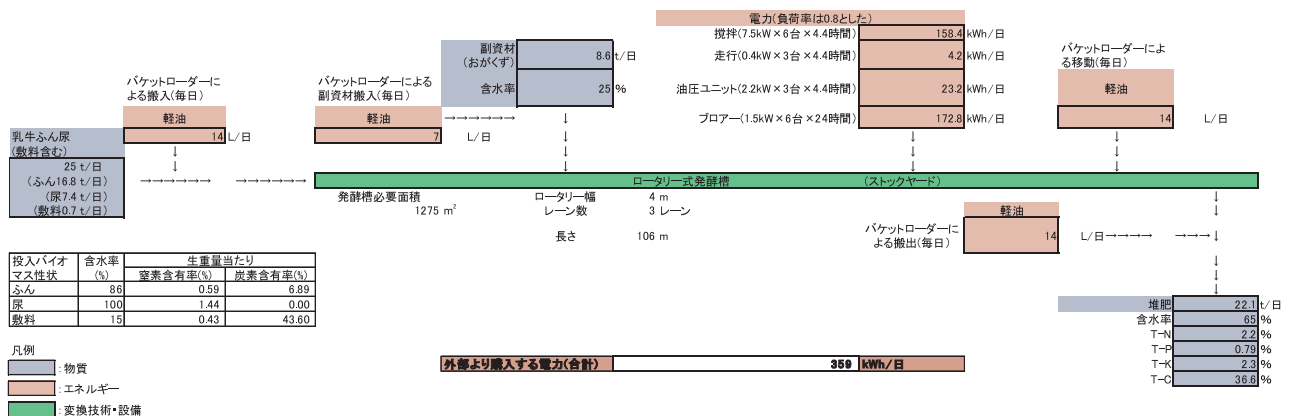


Fig.5 シナリオ1・実態の「ケース2」における変換工程フロー
Process flow of composting in Present Scenario 1 ("Case 2")

Table 8 シナリオ1・実態の「ケース2」の③バイオマス変換ステージにおけるコストと収入
Income and cost in ③ Biomass conversion stage of Present Scenario 1 ("Case 2")

算出項目	データ名	算出結果
初期コスト(円/年)	堆肥化施設(建築土木)1 基建設費	86,850 千円 ÷ 30 年 = 2,895 千円/年
	堆肥化施設(設備機器)1 基建設費	37,250 千円 ÷ 12 年 = 3,104 千円/年
	おがくず貯蔵庫 1 基建設費	5,504 千円 ÷ 10 年 = 550 千円/年
廃棄コスト(円/年)	堆肥化施設(建築土木)1 基廃棄費	(86,850 千円 × 0.05) ÷ 30 年 = 145 千円/年
	堆肥化施設(設備機器)1 基廃棄費	(37,250 千円 × 0.03) ÷ 12 年 = 93 千円/年
	おがくず貯蔵庫 1 基廃棄費	(5,504 千円 × 0.05) ÷ 10 年 = 28 千円/年
ランニングコスト (円/年)	人件費	1 人 × (4,500 千円/人・年) = 4,500 千円/年
	電力料金(契約電力 62kW/基, 電力消費量 359kWh/日/基)	基本電力料金 62kW × (1,100 円/kWh/月) × 12 ヶ月 = 818 千円/年 従量電力料金 359kWh/日 × 12 円/kWh × 365 日/年 = 1,572 千円/年 (818 千円/年 + 1,572 千円/年) = 2,390 千円/年
	水道料金(井水利用, 排水なし)	0 円/年
	燃料費(軽油 49L/日)	49L × 365 日 × 103 円/L = 1,842 千円/年
	副資材費(おがくず 3,139t/年)	3,139t/年 × 5 千円/t = 15,695 千円/年
	点検補修費(設備機器費の2%)	37,250 千円 × 0.02 = 745 千円/年
	収入(円/年)	堆肥販売料金(生成量 8,067t/年)
	ふん尿処理料(委託費収入)	0 円/年(経営内であるため)

変換施設の運転条件はプラントメーカーへ発注した「メタン発酵設計及びコスト・エネルギー試算業務」報告書をもとにシナリオの条件に合わせて設計した。Fig.6 に設計した変換工程のフローを示す。

詳細な条件設定は以下のとおりである。

【受入・前処理工程】

25t/日の乳牛ふん尿は、毎日、原料受入槽に投入され、ポンプで夾雑物脱水機に移送される。夾雑物脱水機は24時間運転であり、圧搾によるTS回収率40%で夾雑物(圧搾粕)と液分(圧搾液)に分離する。夾雑物は4.7t/日(含水率70%)が発生し、20.3t/日の液分はポンプでメタン発酵槽に移送される。4.7t/日の夾雑物は、堆肥化施設で堆肥化(3.1t/日, 含水率64%)される。

【メタン発酵工程】

メタン発酵槽は、1系列、37℃、20～27日の滞留日数とし、バイオガス635m³/日(メタン濃度65%)を生成する。メタン発酵槽の加温のために必要な熱(2,464MJ/日)は、コジェネレーションで生産した熱を用いる。メタン発酵槽での必要加温熱量は、以下の*1) + *2) + *3) = 2,464MJ/日

$$\begin{aligned} *1) \text{ 投入物の加温: } & \{20,300\text{kg/日} \times (37-14\text{ }^\circ\text{C})\} \times \\ & 4.19\text{J}/1000 = 1,956\text{MJ/日} \\ & 14^\circ\text{C: 香取市平均気温} \\ & 4.19\text{J: 水温を}1^\circ\text{C}\text{上げるのに} \\ & \text{必要な熱量} \end{aligned}$$

$$*2) \text{ 放熱: } 500\text{m}^3 \text{ (余裕をみて設計した発酵槽容量)} \\ \times 0.2^\circ\text{C/日} \cdot \text{m}^3 \times 4.19\text{MJ} = 419\text{MJ/日}$$

$$*3) \text{ バイオガス持ち出し: (発生ガス量による比率} \\ \text{計算)}$$

$$239\text{MJ/日} \times (635\text{Nm}^3/\text{日} / 1,703\text{Nm}^3) = 89\text{MJ/日}$$

$$635\text{Nm}^3/\text{日}: \text{牛ふん尿のみ}25\text{t/日のバイオ} \\ \text{ガス発生量}$$

$$1,703\text{Nm}^3/\text{日}: \text{混合原料}30\text{日のバイオガス} \\ \text{発生量}$$

【消化液殺菌・貯留】

バイオガスと同時に、メタン発酵消化液が19.5t/日(含水率97%)生成され、ポンプで殺菌槽に送られ、55℃、7.5時間で殺菌された後、貯留槽で貯留される。殺菌槽の加温に必要な熱(1,765MJ/日)はコジェネレーションで生産した熱を用いる。殺菌槽加熱に必要な熱量は、以下の*4) + *5) = 1,765MJ/日

$$*4) \text{ 加温: } \{19,500\text{kg/日(消化液量)} \times (55^\circ\text{C} - 37^\circ\text{C})\} \\ \times 4.19\text{J}/1000 = 1,471\text{MJ/日}$$

$$*5) \text{ 放熱: } 1,471\text{MJ/日} \times 0.2 = 294\text{MJ/日}$$

【バイオガス利用】

バイオガスは、脱硫塔を通して脱硫される。脱硫剤は2,987kg/年必要(発生ガス量による比率計算)である。バイオガスは、ガスコジェネレーションに用いられ、熱(7,020MJ/日)と電力(1,200kWh/日)を生成する。発電効率は32%とし、24時間運転で発電できる電力量は(412.5Nm³CH₄/日 × 35.8MJ/Nm³CH₄ × 0.32) / 3.6MJ/kWh = 1,313kWh/日(54.7kW)

であるが、既存の発電装置の規格から25kWのものを選択し、25kW × 2台 × 24時間 = 1,200kWhの発電量とする。余剰ガスはフレアスタックで燃焼させる。温水の回収効率は52%とし、回収熱量は、

$$412.5\text{Nm}^3\text{CH}_4/\text{日} \times 35.8\text{MJ}/\text{Nm}^3\text{CH}_4 \times 0.52 \times \\ (50\text{kW}/57.4\text{kW}) = 7,020\text{MJ/日}$$

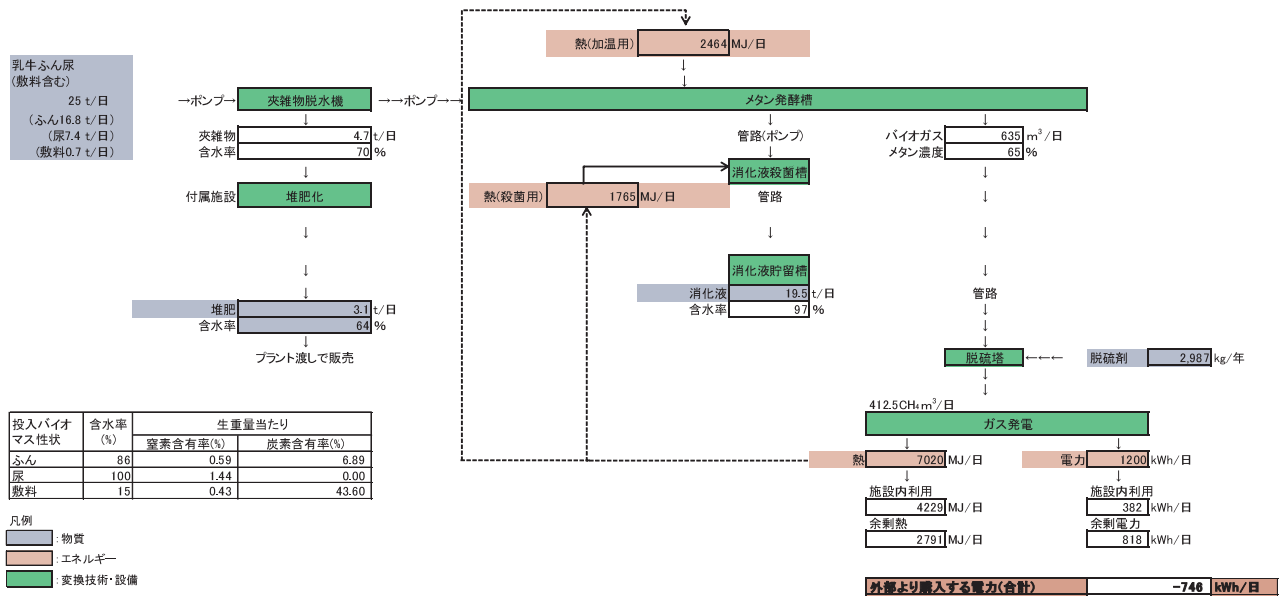


Fig.6 乳牛ふん尿のメタン発酵・コジェネレーションにおける変換フロー
Process flow of methane fermentation and cogeneration in Plan Scenario 1

である。このうち、メタン発酵槽加温に2,464MJ/日、殺菌槽に1,765MJ/日を用い、2,791MJ/日が余剰熱として販売できる。

日発電量 25kW × 24 時間 × 2 台 = 1,200kWh のうち、施設内で 382kWh/日（メタン発酵施設 311kWh/日、堆肥化施設 71kWh/日）が消費され、818kWh/日が余剰電力として販売される。

変換施設の建設費は、変換施設の規模によるスケールメリットが存在する（柚山ら，2006）。ある施設の規模と建設費が既知の場合、同種の施設の建設費は次のように計算できる（環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部廃棄物対策課，2006）。

$$C_A = A \text{ 施設の建設費}$$

$$C_B = A \text{ 施設と同種の B 施設の建設費}$$

$$S_A = A \text{ 施設の能力（規模）}$$

$$S_B = B \text{ 施設の能力（規模）とすれば，}$$

$$C_B = C_A \times (S_B / S_A)^X$$

X は、スケールファクターと呼ばれ、装置や設備の違いにより経験則として数値が与えられる。ここでは、熊本県鹿本町（2002）に掲載されているバイオガスプラント（52t/日規模、加熱殺菌槽以降の設計は 34.2t/日）の建設費計画を参考に、スケールファクターを 0.6 として算出した。

建築土木費：

$$\{ \text{土木建築費 (83,361 千円)} + (\text{共通施設整備費 (管理棟等) } 37,889 \text{ 千円} \div 2) \} \times (25/52)^{0.6} \approx 66,000 \text{ 千円}$$

設備機器費：

$$\textcircled{1} \{ (\text{受入供給設備 } 18,766 \text{ 千円}) + (\text{固液分離機 } 19,156 \text{ 千円}) \} \times (25/52)^{0.6} = 24,437 \text{ 千円}$$

$$\textcircled{2} \text{ 破砕機，脱臭設備は除き，ガスボイラー等は 2/3 のスケールとする。加熱殺菌槽以降の設計は，鹿本町で}$$

34.2t/日、本シナリオで 20.3t/日とした。

$$\{ (\text{加熱殺菌設備 } 21,537 \text{ 千円}) + (\text{嫌気性発酵処理設備 } 87,036 \text{ 千円}) + (\text{ガス発電設備 } 46,210 \text{ 千円}) + (\text{ガスボイラー等 } 17,569 \text{ 千円} \times 2/3) + (\text{計装・制御設備・試運転 } 29,737 \text{ 千円}) \} \times (20.3/34.2)^{0.6} = 143,501 \text{ 千円}$$

$$\textcircled{1} + \textcircled{2} \approx 168,000 \text{ 千円}$$

ランニングコストにおける点検補修費（施設建設費（設備機器）の 2%）は、実態と同じとした。

以上より算出した、シナリオ 1・計画のステージ③に係る初期コスト・ランニングコスト・廃棄コストと収入を Table 9 に示す。

(4) 生成物の輸送・貯蔵ステージ

シナリオ 1・実態では、堆肥はフレコンバッグ（1m³）で輸送されるとした。輸送用車両 1 便につきフレコンバッグ（1m³/袋、堆肥の容積重 0.55t/m³）× 6 袋が農地（水田および畑）に輸送され、圃場で堆肥散布機に移し替えて堆肥散布機（各圃場まで堆肥散布機輸送用トラックで輸送する）で散布される。

堆肥の輸送・散布は、①堆肥輸送用車両（3t クレーン付トラック；中型車両）、②堆肥散布機（クローラ式自走マニュアルスプレッダ（1.8t））、③堆肥散布機輸送用車両（2t トラック；小型車両）を 1 組として行い、輸送・散布のための労力は 2 人/組（日単位で雇用）である。「ケース 1」、「ケース 2」とも 3 組編成とし、輸送・散布のために必要な労力は合計 6 人となる。

各車両の価格は、①堆肥輸送用 3t クレーン付トラックと③堆肥散布機輸送用 2t トラックについては日本トラック協会等の原価計算（いすゞトラックステーション，2011）および対象地域におけるヒアリング調査より① 8,000 千円/台、③ 1,500 千円/台とし、②堆肥散布機は同タイプの車両のメーカー希望小売価格（デリカ社

Table 9 シナリオ1・計画の③バイオマス変換ステージにおけるコストと収入
Cost and income in ③ Biomass conversion stage of Plan Scenario 1

算出項目	データ名	算出結果
初期コスト (円/年)	メタン発酵施設(建築土木)1 基建設費	66,000 千円 ÷ 30 年 = 2,200 千円/年
	メタン発酵施設(設備機器)1 基建設費	168,000 千円 ÷ 12 年 = 14,000 千円/年
	夾雑物堆肥化施設建設費	既存施設利用のため 0 円
廃棄コスト (円/年)	メタン発酵施設(土木建築)1 基廃棄費	(66,000 千円 × 0.05) ÷ 30 年 = 110 千円/年
	メタン発酵施設(設備機器)1 基廃棄費	(168,000 千円 × 0.03) ÷ 12 年 = 420 千円/年
	夾雑物堆肥化施設廃棄費	既存施設利用のため 0 円
ランニングコスト (円/年)	人件費	1.5 人 × 4,500 千円/年 = 6,750 千円/年
	電力料金(基本電力料金, 契約電力 22kW/基)	22kW × (1,100 円/kW/月) × 12 ヶ月 = 290 千円/年
	電力料金(従量電力料金)	電力は自給できるため 0 円
	水道料金(井水利用, 排水なし)	0 円/年
	堆肥化作業用バケットローダー燃料費(軽油 1,533L/年)	1,533L/年 × 103 円/L = 158 千円/年
	薬剤費(脱硫剤 2,987kg/年)	2,987kg/年 × 180 円/kg = 538 千円/年
	点検補修費(設備機器費の2%)	3,360 千円/年
収入 (円/年)	消化液販売(19.5t/日)	7,118t/年 × 600 円/t = 4,271 千円/年
	余剰電力販売(818kWh/日)	298,570kWh/年 × 20 円/kWh = 5,971 千円/年
	余剰熱販売(2,791MJ/日)	2,791MJ/日 × 365 日 × 1 円/MJ = 1,019 千円/年
	夾雑物原料堆肥(3.1t/日)	3.1t/日 × 365 日 × 2 千円/t = 2,263 千円/年
	ふん尿処理料(委託費収入)	0 円/年(共同利用施設または経営内であるため)

DAM-185S, 4,148 千円/台・税込価格)とした。使用年数は、輸送車両は 8 年、堆肥散布機は農業用機械の法定耐用年数を用い 7 年とした。フレコンバッグの価格は、web サイトでの価格表示(タニ工業株式会社, 2011)により、「JFC 認定 JIS 規格準拠 JM-1 高品質フレコンバッグ M-010 タイプ」の価格を用い、1.3 千円/袋とした。1 組当たり 18 袋を使用し、使用年数を 1/12 年(1 ヶ月)とした。

圃場への堆肥の施用量は、窒素成分のみを考慮して決定した。堆肥の窒素含有率は 2.2%，肥効率 10%とし、千葉県施肥基準に基づいて水田 1t/10a、畑 2t/10a と設定した。畑における施用量は、香取市で作付面積の大きいだいこん、にんじん、キャベツ、ほうれんそうの基肥基準量を考慮して決定した。施設から各農地までの距離は平均で 10km と仮定し、堆肥輸送用車両・堆肥散布機輸送用車両について、各 1 便につき、輸送に往復 1.0 時間(時速 40km)、積み込み等に 1.0 時間の作業時間を設定した。

また、堆肥散布機は散布に 0.5 時間/10a かかるとした。

堆肥は作付前の土づくりに利用すると考えられるため、散布時期を設定した。1 年のうち、2 月と 3 月の 60 日間は水田を対象に、1 月および 4 ~ 12 月の 305 日間は畑を対象に散布するものとした。

対象地域の圃場規模や散布作業効率を考慮して設計した 1 組当たりの堆肥の輸送・散布作業の体系を Fig.7 (水田), Fig.8 (畑) に示す。水田では、1 日に 2 カ所に散布する。1 カ所は 60a 程度が、2 カ所目は 30a 程度がまとまって存在すると仮定し、合計 90a/日に散布する。水田における堆肥散布量は 1t/10a であるため、堆肥輸送車両は 3 往復(2 便 + 1 便)/日、堆肥散布機輸送用トラックは 2 往復(2 カ所)/日とする。畑は、45a 程度にまとまって存在する畑に散布すると仮定し、合計 45a/日に散布する。畑における堆肥散布量は 2t/10a であるため、堆肥輸送用車両は 3 往復(3 便)/日、堆肥散布機輸送用トラックは 1 往復(1 カ所)/日とする。

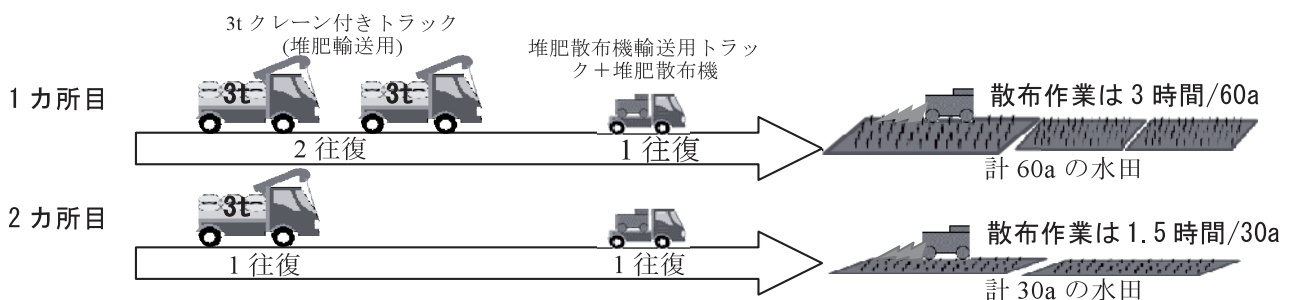


Fig.7 水田への堆肥の輸送・散布作業のシナリオ設定
Scenario of compost transportation and application to paddy field

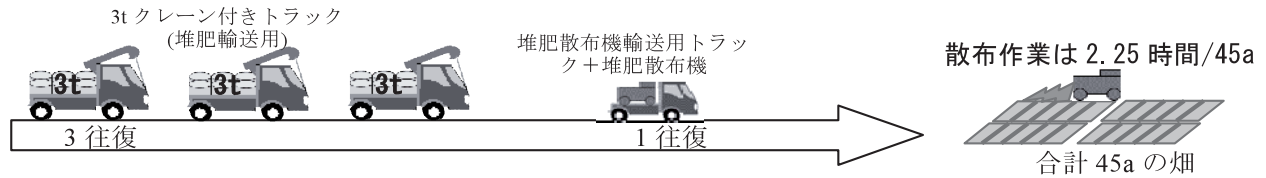


Fig.8 畑への堆肥の輸送・散布作業のシナリオ設定
Scenario of compost transportation and application to upland field

「ケース 1」の堆肥化施設 (8.3t/日規模) 3 基合計または「ケース 2」の堆肥化施設 (25t/日規模) 1 基では、2、3 月 (水田散布期間) の 60 日間で 1,326t の堆肥が生産される。各組 9t/日の堆肥が輸送・散布されることから、60 日のうち輸送・散布に係る稼働日数は 49.1 日 (≒ 50 日) である。堆肥が散布される水田面積は、1 組当たり 49.1 日 × 90a = 44.2ha/年。3 組合計では 133ha/年となる。また、1 月および 4 ~ 12 月 (畑散布期間) の 305 日間では、6,741t の堆肥が生産される。各組 9t/日の堆肥が散布されることから、305 日のうち輸送・散布に係る稼働日数は 249.7 日 (≒ 250 日) である。堆肥が散布される畑面積は、1 組当たり 249.7 日 × 45a = 112.4ha/年。3 組合計では 337ha/年となる。

燃料消費量を算出するため、走行距離を定める。1 組当たりの走行距離は、堆肥運搬車両では、 $20\text{km}(\text{往復距離}) \times 3 \text{ 回/日} \times 300 \text{ 日}(\text{年間稼働日数}) = 18,000\text{km/年}$ 、3 組合計では 54,000km/年となる。堆肥散布機輸送用車両では、 $20\text{km}(\text{往復距離}) \times 2 \text{ 回/日}(\text{水田の場合}) \times 50 \text{ 日} + 20\text{km}(\text{往復距離}) \times 1 \text{ 回/日}(\text{畑の場合}) \times$

250 日} = 7,000km/年、3 組合計では 21,000km/年となる。堆肥輸送用車両の燃費効率、車両固定費、燃料以外の運行費は、Table 4 より中型の値を、堆肥散布機輸送用車両の燃費効率は小型の値を用いた。堆肥の輸送・散布手数料収入として、⑤生成物の利用ステージの担い手である耕種農家から、2 千円/10a の支払いを受ける。

以上より算出した、シナリオ 1・実態のステージ④に係る初期コスト・ランニングコスト・廃棄コストと収入を Table 10 に示す。

シナリオ 1・計画では、メタン発酵消化液 (以下、消化液) がバキューム車で輸送されるとした。農地 (水田および畑) に輸送された消化液は、圃場で消化液散布機 (各圃場まで消化液散布機輸送用車両で輸送) に移し替えられ、散布される。

メタン発酵消化液の運搬・散布は、①消化液輸送バキューム車 (タンク容量 3.6t) 2 台、②消化液散布機 (圃場内自走式・タンク容量 1.6t) 1 台、③消化液散布機輸送用車両 (2t 車) : 1 台を 1 組として行い、輸送・散布のために必要な労力は 3 人/組 (日単位で雇用) である。

Table 10 シナリオ 1・実態の④生成物の輸送・貯蔵ステージにおけるコストと収入
Cost and income in ④ Transportation of generated material stage of Present Scenario 1

算出項目	データ名	算出結果
初期コスト (円/年)	3t クレーン付トラック 3 台購入費	$(8,000 \text{ 千円} \div 8 \text{ 年}) \times 3 \text{ 台} = 3,000 \text{ 千円/年}$
	堆肥散布機 (タンク容量 1.8t) 3 台購入費	$(4,148 \text{ 千円} \div 7 \text{ 年}) \times 3 \text{ 台} = 1,778 \text{ 千円/年}$
	堆肥散布機輸送用トラック (2t 車) 3 台購入費	$(1,500 \text{ 千円} \div 8 \text{ 年}) \times 3 \text{ 台} = 563 \text{ 千円/年}$
廃棄コスト (円/年)	3t クレーン付トラック 3 台廃棄費	$((8,000 \text{ 千円} \times 0.03) \div 8 \text{ 年}) \times 3 \text{ 台} = 90 \text{ 千円/年}$
	堆肥散布機 (タンク容量 1.8t) 3 台廃棄費	$((4,148 \text{ 千円} \times 0.03) \div 7 \text{ 年}) \times 3 \text{ 台} = 53 \text{ 千円/年}$
	堆肥散布機輸送用トラック (2t 車) 3 台廃棄費	$((1,500 \text{ 千円} \times 0.03) \div 8 \text{ 年}) \times 3 \text{ 台} = 17 \text{ 千円/年}$
ランニングコスト (円/年)	人件費	$(2 \text{ 人} \times 300 \text{ 日} \times 8 \text{ 千円/日}) \times 3 \text{ 組} = 14,400 \text{ 千円/年}$
	燃料費 (3t クレーン付トラック) 3 台分	総走行距離 18,000km/年/台 ÷ (5.26km/L) = 3,422L/年 $3,422\text{L/年} \times 103 \text{ 円/L} \times 3 \text{ 台} = 1,057 \text{ 千円/年}$
	燃料費 (堆肥散布機)	散布面積 156.6ha/年/台 × (3.5L/ha) = 548L/年 $548\text{L/年} \times 103 \text{ 円/L} \times 3 \text{ 台} = 169 \text{ 千円}$
	燃料費 (堆肥散布機輸送用トラック)	総走行距離 7,000km/年/台 ÷ (6.26km/L) = 1,118L/年 $1,118\text{L/年} \times 103 \text{ 円/L} \times 3 \text{ 台} = 345 \text{ 千円/年}$
	3t クレーン付トラックの固定費	$366 \text{ 千円/年/台} \times 3 \text{ 台} = 1,098 \text{ 千円/年}$
	堆肥散布機輸送用トラック (2t 車) の固定費	$337 \text{ 千円/年/台} \times 3 \text{ 台} = 1,011 \text{ 千円/年}$
	3t クレーン付トラック 3 台の燃料以外の運行費	$18,000\text{km/年} \times (7.5 \text{ 円/km}) \times 3 \text{ 台} = 405 \text{ 千円/年}$
	堆肥散布機輸送用トラック (2t 車) 3 台の燃料以外の運行費	$7,000\text{km/年} \times (7.5 \text{ 円/km}) \times 3 \text{ 台} = 158 \text{ 千円/年}$
フレコンバッグ	$18 \text{ 袋/組} \times 3 \text{ 組} \times 12 \text{ 袋/年} \times 1.3 \text{ 千円/袋} = 842 \text{ 千円}$	
収入 (円/年)	堆肥輸送・散布 (手数料収入)	$20 \text{ 千円/ha} \times (\text{水田 } 133\text{ha} + \text{畑 } 337\text{ha}) = 9,400 \text{ 千円/年}$

1組編成により行うため、輸送・散布のために必要な労力は合計3人となる。

各車両の価格は、①消化液輸送バキューム車と③消化液散布機輸送用トラックについては日本トラック協会等の原価計算（いすゞトラックステーション，2011）および対象地域におけるヒアリング調査より①5,000千円/台、③1,500千円/台とし、②消化液散布機は山田バイオマスプラントで使用している同タイプの車両の購入価格を参考に8,000千円/台とした。使用年数は、輸送用車両は8年、消化液散布機は農業用機械の法定耐用年数を用い7年とした。

圃場への消化液施用量は窒素成分のみを考慮し、千葉県施肥基準の基肥窒素要求量（水田3.5kgN/10a、畑15kgN/10a）の範囲内で設定した。畑については、香取市の主な栽培作物であるだいこん、にんじん、キャベツ、ほうれんそうの基肥窒素要求量（6～20kgN/10a）の平均を畑の基肥窒素要求量とした。消化液の窒素成分は山田バイオマスプラントにおける実績値よりT-Nが2,800mg/L、NH₄-Nが1,400mg/Lである。NH₄-N（アンモニア態窒素）の量が千葉県施肥基準値に合わせ、施用量を決定した。また、消化液は多量に施用すると土壤に十分にしみ込まず、表面流出を起こして施肥ムラが生じるため、施用量の上限を5t/10a（施用試験による）とした。その結果、本シナリオでは、水田で2.5t/10a、畑で5t/10aを施用することとした。変換施設から各農地までの距離は平均で10kmと仮定し、消化液輸送バキューム車・消化液散布機輸送用車両について、各1便につき、輸送に往復1.0時間（時速40km）、積み込み・片付けに1.0時間の作業時間を設定した。また、消化液散布機による散布作業は、準備も含めて0.5時間/10aと設定した。

消化液を基肥として利用するため、散布時期を**実態**の堆肥と同様、1年間のうち、2月と3月の60日間は水田を対象に散布、1月および4～12月の305日間は畑を対象に散布するものとした。対象地域の圃場規模や散布作業効率を考慮して設計した1組当たりの消化液散布作業の体系を **Fig.9**（水田）、**Fig.10**（畑）に示す。水田は86.4aがまとまって存在すると仮定し、消化液散布機輸送用車両は1往復/日、バキューム車は3往復/日×2台で、1日に86.4aに散布する設計である（消化液散布量21.6t/日）。すなわち、3.6tバキューム車1台当たり水田14.4aに散布でき、水田の窒素要求量（基肥）3.5kgN/10aに対して消化液はその100%を代替できる。畑は43.2aがまとまって存在すると仮定し、消化液散布機輸送用車両は1往復/日、バキューム車は3往復/日×2台で、1日に43.2aに散布する設計である（消化液散布量21.6t/日）。3.6tバキューム車1台当たり畑7.2aに散布でき、畑の窒素要求量（基肥）15kgN/10aに対して、消化液の施用量を5t/10aを上限とするため、窒素代替率は47%となる。

シナリオ1の**計画**においては、2、3月（水田散布期間）の60日間で1,170tの消化液が生成される。1日につき21.6tの消化液が輸送・散布されることから、この期間の稼働日数は54.2日（≒55日）である。メタン発酵消化液が散布される水田面積は、54.2日×86.4aで46.8ha。また、1月および4～12月（畑散布期間）の305日間は、5,948tの消化液が生成される。1日につき21.6t/日の消化液が輸送・散布されることから、この期間の稼働日数は275.4日（≒276日）である。消化液が散布される畑面積は、275.4日×43.2aで119haとなる。

燃料消費量を算出するため、走行距離を算出した。走

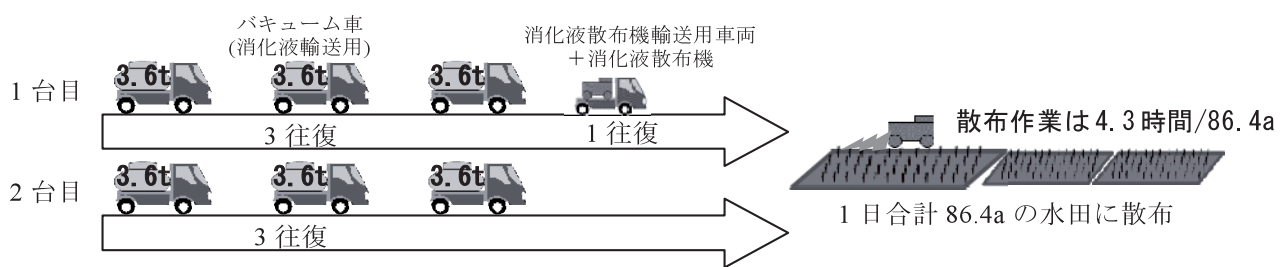


Fig.9 水田への消化液の輸送・散布のシナリオ条件（シナリオ1）
Scenario of digested liquid transportation and application to paddy field (Scenario 1)

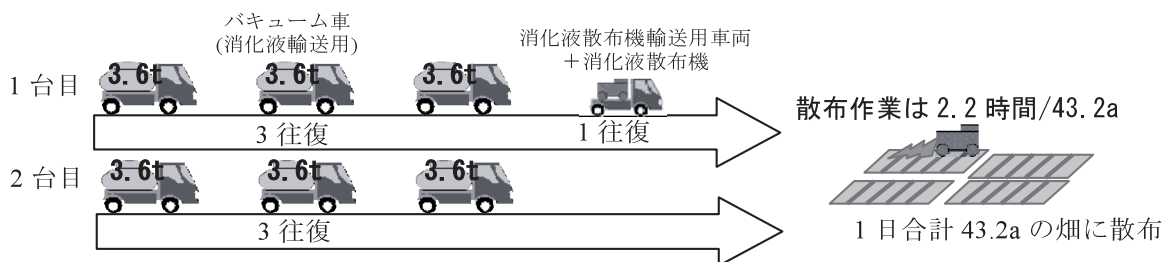


Fig.10 畑への消化液の輸送・散布のシナリオ条件（シナリオ1）
Scenario of digested liquid transportation and application to upland field (Scenario 1)

行距離は、消化液輸送バキューム車では、 $\{20\text{km}(\text{往復距離}) \times 3 \text{回/日}\} \times (55 \text{日} + 276 \text{日}) \times 2 \text{台} = 39,720\text{km/年}$ 、消化液散布機輸送用車両では、 $\{20\text{km}(\text{往復距離}) \times 1 \text{回/日}\} \times (55 \text{日} + 276 \text{日}) \times 1 \text{台} = 6,620\text{km/年}$ となる。バキューム車の燃費効率、車両固定費、燃料以外の運行費は Table 4 より中型トラックの値を、消化液散布機輸送用車両の燃費効率は小型トラックの値を用いた。消化液の輸送・散布手数料収入として、⑤生成物の利用ステージの担い手である耕種農家から、3千円/10aの支払いを受ける。

以上より算出した、シナリオ1・計画のステージ④に係る初期コスト・ランニングコスト・廃棄コストと収入を Table 11 に示す。

(5) 生成物の利用ステージ

シナリオ1・実態では、水田 133ha、畑 337ha を評価対象とした。これらの農地では、堆肥を施用することにより化学肥料が削減できる。水田の基肥における窒素要求量（千葉県施肥基準に基づき、 $3.5\text{kgN}/10\text{a}$ ）に対して堆肥 $1\text{t}/10\text{a}$ を施用するため、 $0.77\text{kgN}/10\text{a}$ が堆肥でまかなわれる。不足する窒素量 $2.73 \text{kgN}/10\text{a}$ は、化学肥料（普通化成 8-8-8、窒素成分 8%）を $34.1\text{kg}/10\text{a}$ 施用することにより補う。畑では、基肥における窒素要求量（千葉県施肥基準に基づき、 $15\text{kgN}/10\text{a}$ ）に対して堆肥 $2\text{t}/10\text{a}$ を施用するため、 $1.54\text{kgN}/10\text{a}$ が堆肥でまかなわれる。不足する窒素量 $13.46 \text{kgN}/10\text{a}$ は、化学肥料（普通化成 8-8-8）を $168.3\text{kg}/10\text{a}$ 施用することにより補う。

追肥のための肥料費や他の農業生産資材に係る費用は“neutral”として計上しない。また、堆肥施用による収量の増加、生産物の価格向上はないものとした。以上より算出した、シナリオ1・実態のステージ⑤に係る初期コスト・ランニングコスト・廃棄コストと収入を Table 12 に示す。

計画においても、実態と同じ面積（水田 133ha、畑 337ha）を評価対象とする。これらの農地のうち、水田 46.8ha については、消化液 $2.5\text{t}/10\text{a}$ を施用し、窒素要求量 $3.5\text{kgN}/10\text{a}$ の 100%が消化液でまかなわれる。この消化液施用水田では、収量は慣行栽培と差がない（米の反収を $550\text{kg}/10\text{a}$ とした）が、生産した米を「特別栽培米」として 20 円/kg 高い価格で販売できると仮定した（千葉県、2011）。耕種農家は、消化液の輸送・散布手数料として 3 千円/10a を輸送・散布作業者に支払うため、基肥に係る費用は 10a 当たり 4,500 円を計上する。消化液を施用しない水田 86.2ha については、基肥における窒素要求量のすべて（ $3.5\text{kgN}/10\text{a}$ ）を化学肥料（普通化成） $43.75\text{kg}/10\text{a}$ を施用してまかない、収量の増加や生産物の価格向上はないものとする。基肥に係るコストとして 10a 当たり 4,725 円（化学肥料 108 円 \times $43.75\text{kg}/10\text{a}$ ）を計上する。

畑 119.0ha については、消化液 $5\text{t}/10\text{a}$ を施用し、窒素要求量 $15\text{kgN}/10\text{a}$ の 47%が消化液でまかなわれる。不足する窒素量 $8\text{kgN}/10\text{a}$ は、化学肥料（普通化成） $100\text{kg}/10\text{a}$ を施用してまかなう。基肥に係る費用は、

Table 11 シナリオ1・計画の④生成物の輸送・貯蔵ステージにおけるコストと収入
Cost and income in ④ Transportation of generated material stage of Plan Scenario 1

算出項目	データ名	算出結果
初期コスト (円/年)	バキューム車 2 台購入費	$(5,000 \text{千円} \times 2 \text{台}) \div 8 \text{年} = 1,250 \text{千円/年}$
	消化液散布機 1 台購入費	$8,000 \text{千円} \div 7 \text{年} = 1,143 \text{千円/年}$
	消化液散布機輸送用車両 1 台購入費	$1,500 \text{千円} \div 8 \text{年} = 188 \text{千円/年}$
廃棄コスト (円/年)	バキューム車 2 台廃棄費	$(10,000 \text{千円} \times 0.03) \div 8 \text{年} = 38 \text{千円/年}$
	消化液散布機 1 台廃棄費	$(8,000 \text{千円} \times 0.03) \div 7 \text{年} = 34 \text{千円/年}$
	消化液散布機輸送用車両 1 台廃棄費	$(1,500 \text{千円} \times 0.03) \div 8 \text{年} = 6 \text{千円/年}$
ランニングコスト (円/年)	人件費	$(3 \text{人} \times 331 \text{日/年} \times 8 \text{千円/日}) = 7,944 \text{千円/年}$
	燃料費(バキューム車)	総走行距離 $6,600\text{km} + 33,120\text{km} = 39,720\text{km/年}$ $39,720\text{km/年} \div (5.26\text{km/L}) = 7,551\text{L/年}$ $7,551\text{L/年} \times 103 \text{円/L} = 778 \text{千円/年}$
	燃料費(消化液散布機)	年散布面積 $(0.864\text{ha/日} \times 54.2 \text{日}) + (0.432\text{ha/日} \times 275.4 \text{日}) = 46.8\text{ha} + 119\text{ha} = 166\text{ha/年}$ 燃料消費量 $166\text{ha/年} \times 18.3\text{L/ha} = 3,038\text{L/年}$ $3,038\text{L/年} \times 103 \text{円/L} = 313 \text{千円/年}$
	燃料費(消化液散布機輸送用車両)	総走行距離 $1,100\text{km} + 5,520\text{km} = 6,620\text{km/年}$ 燃料消費量 $6,620\text{km/年} \div (6.26\text{km/L}) = 1,058\text{L/年}$ $1,058\text{L/年} \times 103 \text{円/L} = 109 \text{千円/年}$
	バキューム車 2 台の固定費	$366 \text{千円/年/台} \times 2 \text{台} = 732 \text{千円/年}$
	消化液散布機輸送用車両 1 台の固定費	337 千円/年
	バキューム車 2 台の燃料以外の運行費	$39,720\text{km/年} \times (7.5 \text{円/km}) = 298 \text{千円/年}$
	消化液散布機輸送用車両の燃料以外の運行費	$6,620\text{km/年} \times (7.5 \text{円/km}) = 50 \text{千円/年}$
	収入(円/年)	消化液輸送・散布(手数料収入)

Table 12 シナリオ1・実態の⑤生成物の利用ステージにおけるコストと収入
Cost and income in ⑤ Utilization of generated material stage of Present Scenario 1

算出項目	データ名	算出結果
初期コスト(円/年)	水稲・野菜生産に係るインフラ等建設・購入費	neutral
廃棄コスト(円/年)	水稲・野菜生産に係るインフラ・機械等の廃棄費	neutral
ランニングコスト (円/年)	水稲・野菜生産に係る労働費	neutral
	水稲生産の基肥のうち堆肥購入費(133ha分)	2千円/10a × 133ha = 2,660千円/年
	水稲生産の基肥のうち化学肥料購入費(133ha分)	3,683円/10a × 133ha = 4,898千円/年
	野菜生産の基肥のうち堆肥購入費(337ha分)	4千円/10a × 337ha = 13,480千円/年
	野菜生産の元肥のうち化学肥料購入費(337ha分)	18,176円/10a × 337ha = 61,253千円/年
	堆肥輸送・散布(手数料支払)	20千円 × /ha × (水田133ha + 畑337ha) = 9,400千円/年
収入(円/年)	水稲・野菜生産物の販売金額増収分	0円/年

Table 13 シナリオ1・計画の⑤生成物の利用ステージにおけるコストと収入
Cost and income in ⑤ Utilization of generated material stage of Plan Scenario 1

算出項目	データ名	算出結果
初期コスト(円/年)	水稲・野菜生産に係るインフラ等の建設・購入費	neutral
廃棄コスト(円/年)	水稲・野菜生産に係るインフラ・機械等の廃棄費	neutral
ランニングコスト (円/年)	水稲・野菜生産に係る労働費	neutral
	水稲生産の基肥のうち、消化液購入費 (消化液施用水田46.8ha分)	(2.5t/10a × 600円/t) × 46.8ha = 702千円
	水稲生産の基肥のうち、化学肥料購入費 (消化液無施用水田86.2ha分)	4,725円/10a × 86.2ha = 4,073千円
	野菜生産の基肥のうち、消化液購入費 (消化液施用畑119ha分)	(5t/10a × 600円/t) × 119ha = 3,570千円
	野菜生産の基肥のうち、化学肥料購入費 (消化液施用畑119ha分)	16,800円/10a × 119ha = 19,992千円
	野菜生産の基肥のうち、化学肥料購入費 (消化液無施用畑218ha分)	20,250円/10a × 218ha = 44,145千円
	消化液の輸送・散布(手数料支払)	30千円/ha × 166ha = 4,980千円
	水稲・野菜生産に係る追肥肥料費および他の消耗品等 購入費	neutral
収入(円/年)	特別栽培米の販売金額増収分	46.8ha × 5,500kg × 20円/kg = 5,148千円

10a当たり16,800円を計上する。消化液を施用しない畑218haについては、基肥における窒素要求量のすべて(15kgN/10a)を化学肥料(普通化成187.5kg/10a)でまかなう。そのため基肥に係る費用として10a当たり20,250円を計上する。畑作物については、消化液の施用/非施用にかかわらず、収量の増加、生産物の価格向上はないものとし、また作物栽培に係るインフラ・機械等の初期コスト、廃棄コスト、労働費および追肥肥料費や他の農業生産資材等購入費は“neutral”とし、計上しない。以上より算出した、シナリオ1・計画のステージ⑤に係る初期コスト・ランニングコスト・廃棄コストと収入をTable 13に示す。

c 算出結果

シナリオ1における**実態**(2ケース)と**計画**(2ケース)のコストおよび収入の算出結果をTable 14にまと

めた。**実態**では、「ケース1」に比べて「ケース2」の③バイオマス変換ステージでのコストが約6,000千円/年小さい。これは8.3t/日規模の堆肥化施設3基に比べて、25t/日規模の堆肥化施設の方が初期コストとそれに伴う廃棄コスト、およびランニングコストのうち人件費が小さいためである。**計画**では両ケースとも25t/日規模のメタン発酵施設を想定したが、「ケース1」では3戸の酪農家から牛ふん尿を輸送するための費用を計上したため、「ケース2」に比べて約1,200千円/年のコスト高となった。以上のことから、輸送をできるだけ行わず、スケールメリットのあるバイオマス変換を選択することが望ましいと言える。また、両ケースとも、実態に比して計画での収入は減少しているが、ステージ③、④でのコストが小さくなっている。メタン発酵で発生したガスを用いた発電による施設内電力の自給が効果をもたらしている。また、ステージ⑤の**計画**では、消化液により化学

Table 14 シナリオ1における実態と計画のコストと収入（千円/年）
Cost and income in Present and Plan Scenario 1 (thousand yen /year)

			①バイオマスの生産(発生)	②収集・輸送・貯蔵	③バイオマス変換	④生成物の輸送・貯蔵	⑤生成物の利用	計
実態	堆肥化(ケース1)	コスト	0	0	38,029	24,986	91,691	154,706
		収入	0	0	16,206	9,400	0	25,606
	堆肥化(ケース2)	コスト	0	0	31,986	24,986	91,691	148,663
		収入	0	0	16,134	9,400	0	25,534
計画	メタン発酵(ケース1)	コスト	0	1,243	27,826	13,219	77,462	119,750
		収入	0	0	13,524	4,974	5,148	23,646
	メタン発酵(ケース2)	コスト	0	0	27,826	13,219	77,462	118,507
		収入	0	0	13,524	4,974	5,148	23,646

肥料の使用量を削減できたため、対象農地面積の施肥コストが全体で14,229千円/年削減された。本シナリオの計画は、ステージ⑤の担い手である耕種農家にとって経済的にメリットがある結果となった。

2 豚ふん尿排水対象シナリオ(シナリオ2)

香取市では豚97,478頭(子取り用雌豚10,329頭、種雄豚3,231頭、肥育豚83,918頭)が飼養されており、244,393t/年のふん尿が発生する。このうち、香取市行政担当者へのヒアリングより現在利用されていることが確認された豚尿36t/年(簡易曝気による液肥化と農地施用)および3,467.5t/年(踏み込み式の肥育豚舎)を除いた240,890t/年が利用可能量となる。現状ではこの豚ふん尿は洗浄排水とともに固液分離され、固体分は堆肥化、液分は汚水処理後に河川放流されている。香取市環境基本計画(千葉県香取市, 2009)では、市内の一部地域で確認された比較的高濃度の硝酸性窒素および亜硝酸性窒素による地下水汚染の原因の一つとして畜産排水が指摘されており、より適正な家畜ふん尿の処理が求められている。そこで、シナリオ2では、母豚170~180頭規模(千葉県平均とほぼ一致)の一貫経営養豚農家10戸に相当する豚ふん尿47,674t/年(市内で発生する豚ふん尿利用可能量の20%)と、同時に発生する洗浄排水49,064t/年を加えた96,738t/年の豚ふん尿排水を対象とする。

a 実態と計画の設計

シナリオ2の実態では、地域内の一貫経営の養豚農家

(1戸当たり母豚170~180頭規模)10戸から発生する豚ふん尿(除ふん率50%)と洗浄排水(合計250t/日)を、各養豚農家において固液分離し、固体分を堆肥化(システム外)、液体分を浄化処理装置で処理し、河川放流する。

計画では、実態と同条件の養豚農家から発生する豚ふん尿(除ふん率0%)と洗浄排水(約266t/日)を、各養豚農家において固液分離後メタン発酵する。生成したバイオガスをコジェネレーションに利用して得た電気・熱は、変換施設内で利用するとともに、余剰電力は販売する。固体分は堆肥化(システム外)、消化液は、地域内の農地(水田および畑)に輸送・散布して、作物栽培の基肥として利用する。水田では、消化液で窒素化学肥料を100%代替できるため、栽培した水稻は特別栽培米として高付加価値で販売できる。Table 15にシナリオ2の各ステージの内容を示す。

b 各ステージにおける収入とコストの算出

(1) バイオマスの生産(発生ステージ)

シナリオ2では、実態・計画とも、発生するふん尿排水の性状・成分は、農林水産バイオリサイクル研究「システム実用化千葉ユニット」(2007)および環境コミュニケーションズ(2002)より設定した。1戸当たり発生量は25t/日、含水率98.3%(乾物率1.7%)、窒素含有率(湿重ベース)は0.302%、炭素含有率(湿重ベース)は0.789%、リン含有率(湿重ベース)は0.184%である。

実態と計画で除ふん率の設定が異なるため、豚ふん尿排水の発生量は異なるが、除ふんに係るコストはシステ

Table 15 シナリオ2の各ステージの内容
Activities of each stage in Scenario 2

ステージ シナリオ	①バイオマスの生産(発生)ステージ	②収集・輸送・貯蔵ステージ	③バイオマスの変換ステージ	④生成物の輸送・貯蔵ステージ	⑤生成物の利用ステージ
実態	豚ふん尿排水の発生	輸送なし	汚水処理・処理水河川放流	なし	水田620ha、畑1,574haでの農作物栽培(全面積で化学肥料利用)
計画	豚ふん尿排水の発生	輸送なし	メタン発酵+コジェネレーション	消化液の輸送・散布(水田620ha、畑1,574ha)	水田620ha、畑1,574haでの農作物栽培(不足窒素成分を化学肥料で補完)

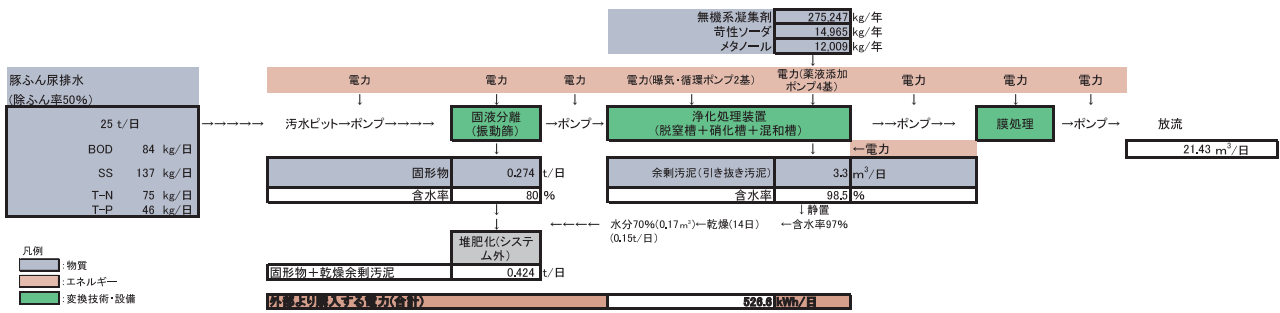


Fig.11 シナリオ2・実態における変換工程フロー
Flow of wastewater treatment in Present Scenario 2

ム外とし計上しないため、本ステージに係るコスト・収入は“neutral”とした。

(2) 収集・輸送・貯蔵ステージ

シナリオ2では、**実態・計画**とも、各養豚農家内で処理・変換されるため輸送しないことから、コスト・収入とも0円とした。

(3) バイオマス変換ステージ

シナリオ2の**実態**では、各養豚農家に污水処理施設を設置するため、施設数は10となる。各污水処理施設では、豚ふん尿排水が固液分離され、液体分は河川放流できる水質まで浄化処理される。固体分および余剰汚泥は堆肥化する(堆肥化工程および余剰汚泥の乾燥・堆肥化工程はシステム外として計上しない)。以下では、1施設単位の計算結果を示す。

污水処理施設の運転条件は、畜産環境整備機構(1998)およびプラントメーカーへ発注した「メタン発酵設計及びコスト・エネルギー試算業務」報告書をもとにシナリオの条件に合わせて設計した。設計においては、目標処理水質をT-N120mg/L以下、T-P16mg/L以下とした。この目標値は畜産廃水処理施設からの暫定放流水質基準よりも厳しい基準であるが、今後水質環境保全に対する要求が高まることは間違いないので、この条件を**実態**に設定した。**Fig.11**に設計した污水処理工程のフローを示す。具体的には、畜産環境整備機構(1998)に記載されている「母豚150頭規模一貫経営、豚ふん尿污水24.75m³/日」の事例を基に、土木工事の規模は槽容量比で算出、曝気装置は硝化分を入れ2.5倍で算出した。固液分離(平型振動篩)で分離される固体分(1施設当たり0.274t/日、含水率80%)は、堆積発酵により畜舎で分離された豚ふんと一緒に既存施設で堆肥化されると仮定した(システム外とみなし計上しない)。浄化処理装置は、脱窒槽+硝化槽+混和槽で構成される。浄化処理装置では、pH調整のため苛性ソーダを41kg/日、脱窒のための水素供与体としてメタノールを32.85kg/日、リン除去のため無機系凝集剤(ポリ硫酸第二鉄液)を754.1kg/日を投入する。浄化処理された液体分は、ポンプで消毒槽に送られ膜処理して放流される。放流量は1施設当たり21.43m³/日である。浄化処理装置より引き抜かれた

余剰汚泥(1施設当たり3.3m³/日、水分98.5%)は、静置して含水率を97%にした後、2週間乾燥(0.17m³/日、水分70%)し、固体分と一緒に堆積発酵により堆肥化される(システム外)。污水処理施設の年間稼働日数は365日、污水処理作業は通常養豚経営内で行われるが、高度な処理のために労力が増加すると考え、1施設当たり0.7人の労力(年間雇用)を追加した。污水処理施設については、総合耐用年数を用いず、畜産環境整備機構(1998)から各機器・装置の耐用年数を引用した。

污水処理施設の建設費および各装置の価格は、畜産環境整備機構(1998)をもとに算出した。各装置の補修費は、設計した污水処理施設の運転条件に基づき、規模および補修頻度を約1.5倍として設定した。補修が適宜行われることを前提に保守点検費は0円とした。以上より算出されたコストと収入を**Table 16**に示す。

シナリオ2の**計画**では、各養豚農家にメタン発酵・コジェネレーション施設を設置するため、施設数は10となる。各施設では26.6t/日の豚ふん尿排水がメタン発酵装置で変換され、生成したバイオガスを用いたコジェネレーションにより電力と熱が生成されると同時にメタン発酵消化液が生成される。固体分は堆肥化(堆肥化工程はシステム外として計上しない)する。変換施設の年間稼働日数は365日、総合耐用年数は、メタン発酵・コジェネレーション施設の建築土木を30年、設備機器を12年とした。施設運営に要する労力は、養豚経営とは別に1施設当たり1.5人の労力(年間雇用)が必要となる。以下では、1施設単位の計算結果を示す。

変換施設の運転条件は、シナリオ1の**計画**をもとに、投入原料等についてはシナリオ2の条件に合わせて設計した。**Fig.12**に設計した変換工程のフローを示す。

【受入・前処理工程】

25.56t/日の豚ふん尿排水(ふん3.12t/日、尿9.97t/日、洗浄水13.47t/日)は、夾雑物脱水機で脱水され、0.29t/日の夾雑物(含水率70%)が発生する。夾雑物は、既存施設で堆積発酵により堆肥化される(システム外として計上しない)。

【メタン発酵工程】

26.27t/日の液分は、ポンプでメタン発酵槽に移送され、

Table 16 シナリオ2・実態の③バイオマス変換ステージにおけるコストと収入（1施設）
 Cost and income in ③ Biomass conversion stage of Present Scenario 2 for each facility

算出項目	データ名	算出結果	
初期コスト (円/年)	污水処理施設(建築土木)建設費	17,320千円 ÷ 30年 = 577千円/年	
	污水処理施設建設費(設備機器)	固液分離装置(平型振動篩)	700千円 ÷ 10年 = 70千円/年
		曝気装置	6,750千円 ÷ 10年 = 675千円/年
		液中膜ユニット	850千円 ÷ 7年 = 121千円/年
		污水ピットポンプ	100千円 ÷ 5年 = 20千円/年
		污水投入ポンプ	100千円 ÷ 8年 = 13千円/年
		汚泥返送・硝化液循環ポンプ(1施設につき2台)1セット	300千円 ÷ 5年 = 60千円/年
		膜透過水吸引ポンプ	150千円 ÷ 5年 = 30千円/年
		放流ポンプ	150千円 ÷ 5年 = 30千円/年
		薬液注入ポンプ(1施設につき4台)1セット	300千円 ÷ 5年 = 60千円/年
		付属機器(自動運転操作盤)	1,500千円 ÷ 7年 = 214千円/年
工事費	機械運搬据え付け工事, 配管・電気・雑工事, 諸経費その他 (1,800千円 + 3,980千円 + 2,700千円) ÷ 30年 = 283千円/年 (※建設時のみの投入であり, 「建築土木」と同じ使用年数とした。廃棄は伴わない。)		
廃棄コスト (円/年)	污水処理施設(建築土木)廃棄費	(17,320千円 × 0.05) ÷ 30年 = 29千円/年	
	污水処理施設(設備機器)	固液分離装置(平型振動篩)廃棄費	(700千円 × 0.03) ÷ 10年 = 2千円/年
		曝気装置廃棄費	(6,750千円 × 0.03) ÷ 10年 = 20千円/年
		液中膜ユニット廃棄費	(850千円 × 0.03) ÷ 7年 = 4千円/年
		污水ピットポンプ廃棄費	(100千円 × 0.03) ÷ 5年 = 1千円/年
		污水投入ポンプ廃棄費	(100千円 × 0.03) ÷ 8年 = 0.4千円/年
		汚泥返送・硝化液循環ポンプ1セット廃棄費	(300千円 × 0.03) ÷ 5年 = 2千円/年
		膜透過水吸引ポンプ廃棄費	(150千円 × 0.03) ÷ 5年 = 1千円/年
		放流ポンプ廃棄費	(150千円 × 0.03) ÷ 5年 = 1千円/年
		薬液注入ポンプ1セット廃棄費	(300千円 × 0.03) ÷ 5年 = 2千円/年
付属機器(自動運転操作盤)廃棄費	(1,500千円 × 0.03) ÷ 7年 = 6千円/年		
工事, 諸経費(廃棄費なし)	0千円/年		
ランニングコスト (円/年)	人件費	0.7人 × 4,500千円/年 = 3,150千円/年	
	電力料金 (契約電力36kW/基, 電力消費量526.6kWh/日/基)	基本電力料金 36kW × (1,100円/kWh/月) × 12ヶ月 = 475千円/年 従量電力料金 526.6kWh/日 × 12円/kWh × 365日/年 = 2,307千円/年	
	水道料金(井水利用)	0円/年	
	薬剤費(無機系凝集剤 754.1kg/日)	754.1kg/日 × 365日/年 = 275,246.5kg/年 275,246.5kg/年 × 31円/kg = 8,533千円/年	
	薬剤費(苛性ソーダ 41kg/日)	41kg/日 × 365日/年 = 14,965kg/年 14,965kg/年 × 30円/kg = 449千円/年	
	薬剤費(メタノール 32.85kg)	32.85kg/日 × 365日/年 = 11,990.25kg/年 11,990.25kg/年 × 90円/kg = 1,079千円/年	
	機械補修費	523千円/年	
保守点検費	0円/年		
収入 (円/年)	なし	0円/年	

加温・攪拌される。加温のために必要な熱量は3,138MJ/日であり、バイオガスコジェネレーションで生産した熱を用いる。生成するバイオガス（メタン濃度65%）は434.6m³/日であり、同時に消化液25.8t/日を生成する。

【消化液殺菌・貯留】

消化液は、殺菌槽で殺菌（55℃、7.5時間）され、液

肥として利用可能な状態（25.8t/日、含水率98.9%）で貯留槽に送られる。殺菌槽で必要な熱量は、2,332MJ/日である。

【バイオガス利用】

バイオガスは脱硫後、19.3CH₄m³/日をバイオガスボイラーで利用、263.2CH₄m³/日をバイオガスコジェネレー

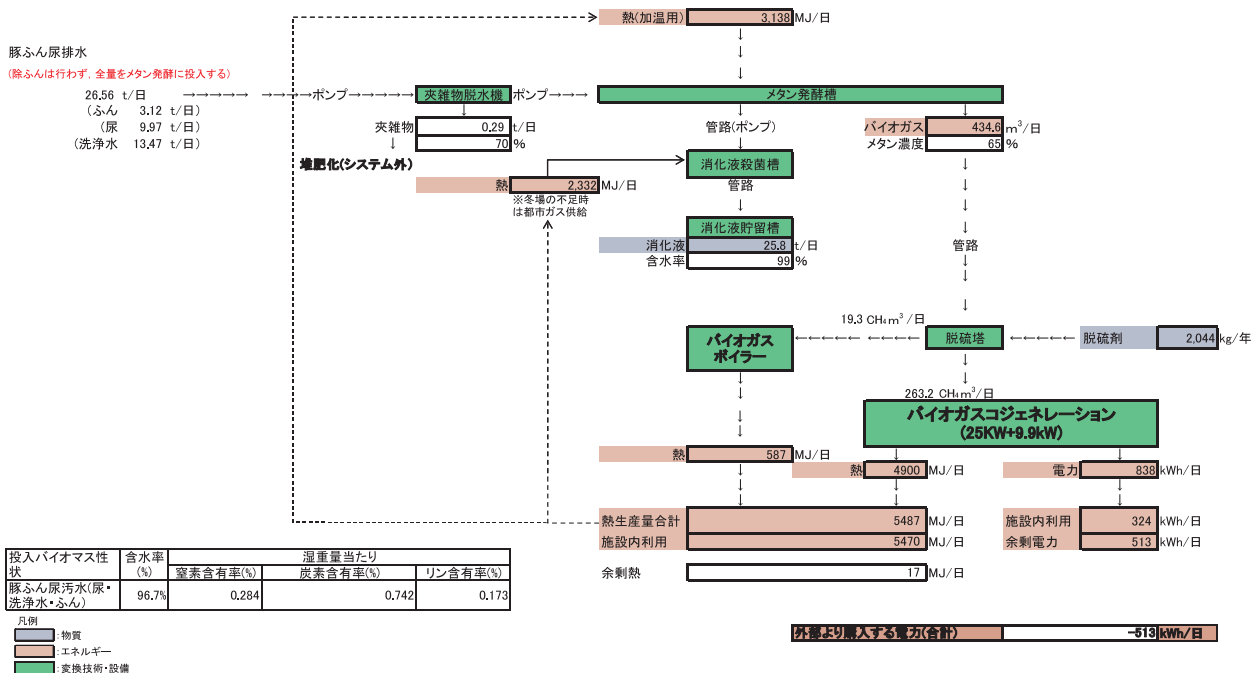


Fig.12 シナリオ 2・計画における変換工程フロー
Process flow of methane fermentation and cogeneration in Plan Scenario 2

ション (25kW + 9.9kW の 2 台) で利用する。バイオガスボイラーでは、587MJ/日の熱が生産される。バイオガスコジェネレーション装置では、熱 4,900MJ/日、電力 838kWh/日が生産される。バイオガスボイラーとバイオガスコジェネレーション装置で生産される熱の合計 5,487MJ/日のうち、5,470MJ/日がメタン発酵槽と消化液殺菌槽で利用されるため、余剰熱は発生しないものとする。

施設運転に必要な電力は 324kWh/日であり、バイオガスコジェネレーションで生産される電力でそのすべてが賄われる。余剰電力 513kWh/日は外部に販売する。

変換施設の建設費は、シナリオ 1 の算出結果に基づき、建築土木費については原料投入量に相対して算出した。スケールファクターについても同様に 0.6 とした。設備機器費については、シナリオ 1 と同額とした。

以上より算出したシナリオ 2・計画のステージ③に係る初期コスト・ランニングコスト・廃棄コストと収入を Table 17 に示す。

(4) 生成物の輸送・貯蔵ステージ

シナリオ 2 の実態においては、汚水処理された水は河川放流されるため、本ステージでのコスト・収入は計上しない。計画では、消化液 (1 施設当たり 25.8t/日) をバキューム車で農地 (水田および畑) に輸送し、圃場で消化液散布機に移し替えて散布する。消化液散布機は、各圃場まで消化液散布機輸送用車両で輸送する。以下、変換施設 1 施設単位の計算結果を示す。

メタン発酵消化液の運搬・散布は、1 施設 (養豚農家

1 戸) につき、①消化液輸送バキューム車 (タンク容量 3.6t) 3 台、②消化液散布機 (圃場内自走式・タンク容量 1.6t) 2 台、③消化液散布機輸送用車両 (2t 車) 1 台を要し、輸送・散布のために必要な労力は 5 名 (日単位の雇用) である。輸送・散布に係る各車両の価格、使用年数はシナリオ 1 と同じである。水田への輸送・散布については、対象地域の経営規模、圃場規模別分布状況から、1 日に 2 カ所のまとまった水田に散布するものとした。1 カ所目は 86.4a、2 カ所目は 43.2a がまとめて存在するものと仮定した。また、畑についても同様に 2 カ所に散布するものとし、1 カ所目は 43.2a が、2 カ所目は 21.6a が 1 圃場あるいはまとめて存在すると仮定した。輸送・散布効率を上げるため、消化液散布機輸送車両は、2 カ所の圃場に別々に用意するのではなく、1 台を往復させる。散布作業者と輸送用トラック運転者が兼任すると仮定するため、消化液散布機による散布作業は、準備も含めて約 1.0 時間/10a かかるものとした (シナリオ 1 の 2 倍)。その他の消化液散布のシナリオ設定はシナリオ 1 と同様である。以上の条件を Fig.13 (水田)、Fig.14 (畑) に示す。

シナリオ 2 の計画においては、2、3 月 (水田散布期間) の 60 日間で 1,548t の消化液が生成される。1 日につき 32.4t/日の消化液が輸送・散布されることから、この期間の稼働日数は 47.8 日 (≒ 48 日) である。また消化液が散布される水田面積は、47.8 日 × 129.6a で 62ha となる。また、1 月および 4 ~ 12 月 (畑散布期間) の 305 日間では、7,869t の消化液が生成される。1 日につ

Table 17 シナリオ 2・計画の③バイオマス変換ステージにおけるコストと収入 (1 施設)
 Cost and income in ③ Biomass conversion stage of Plan Scenario 2 for each facility

算出項目	データ名	算出結果
初期コスト (円/年)	メタン発酵施設(建築土木)建設費	68,400千円 ÷ 30年 = 2,280千円/年
	メタン発酵施設(設備機器)建設費	168,000千円 ÷ 12年 = 14,000千円
	メタン発酵施設付属施設(堆肥化施設)建設費	システム外として計上しない
廃棄コスト (円/年)	メタン発酵施設(建設土木)廃棄費	(68,400千円 × 0.05) ÷ 30年 = 114千円/年
	メタン発酵施設(設備機器)廃棄費	(168,000千円 × 0.03) ÷ 12年 = 420千円/年
	メタン発酵施設付属施設(堆肥化施設)廃棄費	システム外として計上しない
ランニングコスト (円/年)	人件費	1.5人/年 × (4,500千円/年・人) = 6,750千円/年
	電力料金(基本電力料金, 契約電力 23kW/基)	23kW × 12ヶ月 × (1,100円/kWh/月) = 304千円/年
	電力料金(従量電力料金)	電力は自給できるため 0円
	水道料金(井水利用, 排水なし)	0円/年
	薬剤費(脱硫剤 2,044kg/年)	2,044kg/年 × 180円/kg = 368千円/年
	点検補修費(設備機器費の2%)	3,360千円/年
収入(円/年)	消化液販売	9,417t/年 × 600円/t = 5,650千円/年
	余剰電力販売(514kWh/日)	187,610kWh/年 × 20円/kWh = 3,752千円/年
	余剰熱販売	ほとんどを施設内利用するため, 販売なしとした
	ふん尿処理料(委託費収入)	0円/年(養豚経営内であるため)

き 32.4t/日の消化液が輸送・散布されることから、この期間の稼働日数は 242.9 日 (≒ 243 日)、消化液が散布される畑面積は、242.9 日 × 64.8a で 157.4ha である。

燃料消費量を算出するため、走行距離を算出した。走行距離は、消化液輸送バキューム車では、{20km(往復距離) × 3回/日} × (48日 + 243日) × 3台 = 52,380km/年、消化液散布機輸送用車両では、{20km(往復距離) × 2回/日} × (48日 + 243日) × 1台 = 11,640km/年となる。各車両の燃費効率、燃料価格、固定費および燃料以外の運行費の設定は、シナリオ 1 と同様である。また、消化液の輸送・散布手数料収入についても同様に、⑤生成物の利用ステージの担い手である耕種農家から、3千円/10a

の支払いを受ける。

以上より算出した、シナリオ 2・計画のステージ④に係る初期コスト・ランニングコスト・廃棄コストと収入を **Table 18** に示す。

(5) 生成物の利用ステージ

シナリオ 2 の実態では、バイオマス由来の生成物はないが、計画との対比のため、水田 620ha、畑 1,574ha を対象として、すべての面積で基肥として化学肥料を使用した場合のコストと収入を算出した。水田・畑における基肥の窒素要求量は、シナリオ 1 と同じである。評価対象水田 (620ha) では、基肥として化学肥料 43.75kg/10a (4,725 円/10a) を、評価対象畑 (1,574ha) では、基肥

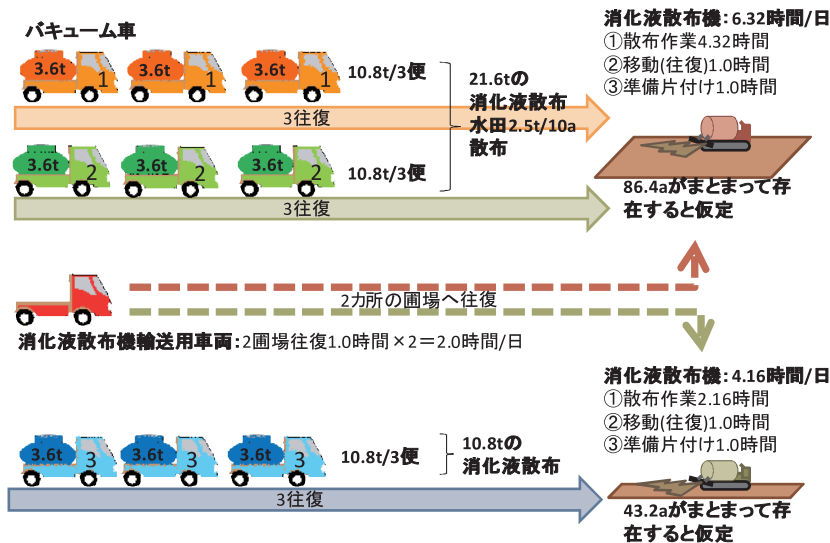


Fig.13 水田への消化液の輸送・散布のシナリオ条件 (シナリオ 2)
 Scenario of digested liquid transportation and application use to paddy field (Scenario 2)

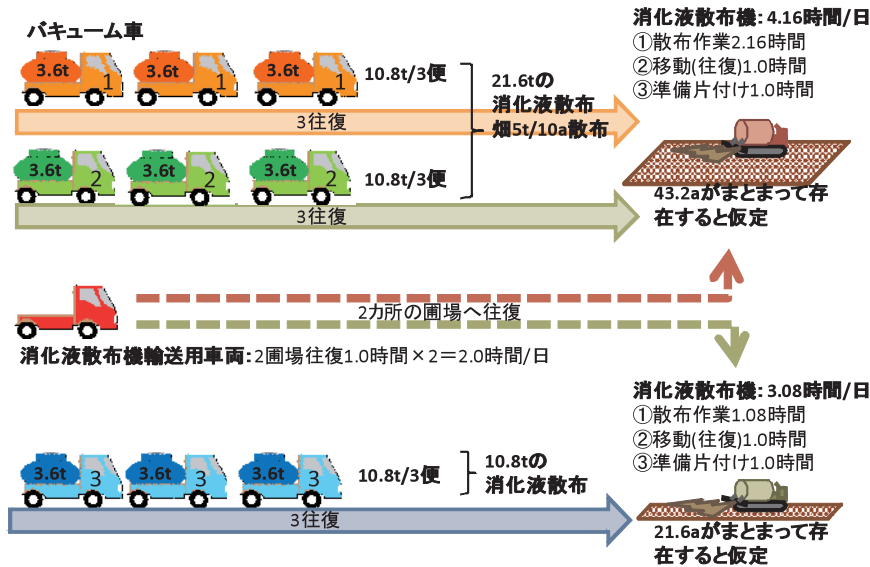


Fig.14 畑への消化液の輸送・散布のシナリオ条件 (シナリオ2)
Scenario of digested liquid transportation and application to upland field (Scenario 2)

Table 18 シナリオ2・計画の④生成物の輸送・貯蔵ステージにおけるコストと収入 (1施設当たり)
Cost and income in ④ Transportation of generated material stage of Plan Scenario 2 for each facility

算出項目	データ名	算出結果
初期コスト (円/年)	バキューム車 3台購入費	(5,000千円 × 3台) ÷ 8年 = 1,875千円/年
	消化液散布機 2台購入費	(8,000千円 × 2台) ÷ 7年 = 2,286千円/年
	消化液散布機輸送用車両 1台購入費	1,500千円 ÷ 8年 = 188千円/年
廃棄コスト (円/年)	バキューム車 3台廃棄費	((5,000千円 × 0.03) ÷ 8年) × 3台 = 56千円/年
	消化液散布機 2台廃棄費	((8,000千円 × 0.03) ÷ 7年) × 2台 = 69千円/年
	消化液散布機輸送用トラック 1台廃棄費	(1,500千円 × 0.03) ÷ 8年 = 6千円/年
ランニングコスト (円/年)	人件費	年間稼働日数 48日(水田)+243日(畑) = 291日/年 (5人 × 291日 × 8千円/日) = 11,640千円/年
	燃料費(バキューム車)	52,380km ÷ (5.26km/L) = 9,958L/年 9,958L/年 × 103円/L = 1,026千円/年
	燃料費(消化液散布機)	年散布面積(1.296ha/日 × 47.8日) + (0.648ha/日 × 242.9日/年) = 61.9ha + 157.4ha = 219.3ha 219.3ha × 18.3L/ha = 4,013L/年 4,013L/年 × 103円/L = 413千円/年
	燃料費(消化液散布機輸送用車両)	11,640km ÷ (6.26km/L) = 1,859L/年 1,859L/年 × 103円/L = 191千円/年
	バキューム車 3台の固定費	366千円/年/台 × 3台 = 1,098千円/年
	消化液散布機輸送用トラック 1台の固定費	337千円/年
	バキューム車 3台の燃料以外の運行費	52,380km/年 × (7.5円/km) = 393千円/年
	消化液散布機輸送用車両の燃料以外の運行費	11,640km/年 × (7.5円/km) = 87千円/年
収入(円/年)	消化液輸送・散布(手数料収入)	3千円/10a × (62ha + 157.4ha) = 6,582千円/年

として化学肥料 187.5kg/10a (20,250円/10a) を施用し、いずれも収量の増加や生産物の価格向上はないものとした。また、作物栽培に係るインフラ・機械の初期コスト、廃棄コスト、労働費および追肥肥料費や他の農業生産資材等購入費は“neutral”とし、計上しない。以上より算出した、シナリオ2・実態のステージ⑤に係るコストと収入を Table 19 に示す。

計画では、10の変換施設で生成された消化液を施用する水田 620ha、畑 1,574ha を対象とする。水田・畑に

おける面積当たりの消化液施用量、窒素要求量、消化液ではまかなえない窒素量を補うための化学肥料(普通化成8-8-8)の条件は、シナリオ1と同じである。水田(620ha)については、10a当たり2.5t施用した消化液により、窒素要求量の100%がまかなわれる。収量は化学肥料を用いた慣行栽培と差がないが、生産した米は「特別栽培米」として20円/kgの高い価格で販売できると仮定した。基肥に係るコストは、10a当たり(消化液購入費:2.5t × 600円/t) + (輸送・散布手数料支払:3千円) = 4,500

円である。畑 (1,574ha) については、消化液 5t/10a を施用することにより、窒素要求量の 47% が供給される。不足する窒素量は、化学肥料 100kg/10a を施用して補う。基肥に係るコストは、10a 当たり (消化液購入費: 5t × 600 円/t) + (輸送・散布手数料支払: 3 千円) + (化学肥料購入費: 100kg × 108 円/kg) = 16,800 円である。畑作物については、収量増加や生産物の価格向上はないものとした。また、作物栽培に係るインフラ・機械の初期コスト、廃棄コスト、労働費および追肥肥料費や他の農業生産資材等購入費は“neutral”とし、計上しない。以上より算出した、シナリオ 2・計画のステージ⑤に係るコストと収入を Table 20 に示す。

c 算出結果

シナリオ 2 における実態と計画のコストおよび収入の算出結果を Table 21 にまとめた。ステージ③では、実態の汚水処理のコスト (187,373 千円/年) に比べて、計画での収支(収入-コスト)は 181,940 千円/年となり、バイオマス変換ステージのみを取りあげれば、計画を採

用することにより汚水処理コストが 5,433 千円/年削減できることになる。しかし、ステージ④の消化液の輸送・散布に係るコストが大きく、ライフサイクルでの収支は、**実態**にくらべて**計画**で赤字増となった。また、シナリオ 1 と同様、ステージ⑤の**計画**では消化液により化学肥料の使用量を削減できたため、対象農地面積の施肥コストが全体で 16% 削減できたことから、ステージ⑤の担い手である耕種農家にとっては、**計画**の採用は経済的にメリットをもたらす。

3 生ごみ・生活廃水処理汚泥・食品加工残さ対象シナリオ (シナリオ 3)

シナリオ 3 では生ごみ、生活廃水処理汚泥、食品加工残さの 3 種のバイオマスを対象とした。香取市では、家庭生ごみ (ごみステーションで回収されクリーンセンターに輸送されたごみの組成分析より把握) 3,428t/年、事業系生ごみ (飲食店や総菜店、豆腐店・精肉店・製菓店などから発生する生ごみ、香取市調べ) 1,088t/年、学校等給食残さ (香取市内給食センターヒアリング値)

Table 19 シナリオ 2・実態の⑤生成物の利用ステージにおけるコストと収入
Cost and income in ⑤ Utilization of generated material stage of Present Scenario 2

算出項目	データ名	算出結果
初期コスト (円/年)	水稲・畑作物生産に係るインフラ等建設・購入費	neutral
廃棄コスト (円/年)	水稲・畑作物生産に係るインフラ・機械等の廃棄費	neutral
ランニングコスト (円/年)	水稲・畑作物生産に係る労働費	neutral
	水稲生産の基肥として化学肥料に係る費用 (対象水田 620ha 分)	47,250 円/ha × 620ha = 29,295 千円
	畑作物生産の基肥として化学肥料に係る費用 (対象畑 1,574ha 分)	202,500 円/ha × 1,574ha = 318,735 千円
	水稲・畑作物生産に係る追肥肥料費および他の消耗品等購入費	neutral
収入 (円/年)	水稲・畑作物の販売金額増収分	0 円/年

Table 20 シナリオ 2・計画の⑤生成物の利用ステージにおけるコストと収入
Cost and income in ⑤ Utilization of generated material stage of Plan Scenario 2

算出項目	データ名	算出結果
初期コスト (円/年)	水稲・畑作物生産に係るインフラ等建設・購入費	neutral
廃棄コスト (円/年)	水稲・畑作物生産に係るインフラ・機械等の廃棄費	neutral
ランニングコスト (円/年)	水稲・野菜生産に係る労働費	neutral
	水稲生産の基肥のうち、メタン発酵消化液に係る費用 (対象水田 620ha 分)	(25t/ha × 600 円) × 620ha = 9,300 千円
	畑作物生産の基肥のうち、メタン発酵消化液に係る費用 (対象畑 1,574ha 分)	(50t/ha × 600 円) × 1,574ha = 47,220 千円
	畑作物生産の基肥のうち、化学肥料に係る費用 (消化液施用畑 1,574ha 分)	1,000kg/ha × 108 円/kg × 1,574ha = 169,992 千円
	消化液の輸送・散布 (手数料支払)	30千円/ha × (620ha + 1,574ha) = 65,820千円
	水稲・畑作物生産に係る追肥肥料費および他の消耗品等購入費	neutral
収入 (円/年)	特別栽培米の販売金額増収分	620ha × 5,500kg × 20 円/kg = 68,200 千円

Table 21 シナリオ2における実態と計画のコストと収入(千円/年)
Cost and income in Present and Plan Scenario 2 (thousand yen /year)

			①バイオマスの生産(発生)	②収集・輸送・貯蔵	③バイオマス変換	④生成物の輸送・貯蔵	⑤生成物の利用	計
実態	汚水処理	コスト	0	0	187,373	0	348,030	535,403
		収入	0	0	0	0	0	0
計画	メタン発酵	コスト	0	0	275,960	196,645	292,332	764,937
		収入	0	0	94,020	65,820	68,200	228,040

Table 22 シナリオ3の各ステージの内容
Activities of each stage in Scenario 3

ステージ シナリオ	①バイオマスの生産(発生)ステージ	②収集・輸送・貯蔵ステージ	③バイオマスの変換ステージ	④生成物の輸送・貯蔵ステージ	⑤生成物の利用ステージ
実態	生ごみ・生活廃水処理汚泥・食品加工残さの発生	業者による収集輸送	焼却・焼却灰埋立	なし	水田 21.3ha, 畑 54ha での農作物栽培(全面積で化学肥料利用)
計画	生ごみ・生活廃水処理汚泥・食品加工残さの発生	業者による収集輸送	メタン発酵+コージェネレーション	消化液の輸送・散布(水田 21.3ha, 畑 54ha)	水田 21.3ha, 畑 54ha での農作物栽培(不足窒素成分を化学肥料で補完)

84t/年, 病院・介護施設等給食残さ(ベッド数×排出源単位 0.56kg/日・床) 200t/年, の合計 4,800t/年の生ごみが発生する。

生活廃水処理汚泥は, 香取市内で下水汚泥 1,700t/年, し尿処理汚泥 1,351t/年, 農業集落排水汚泥 238t/年の合計 3,289t/年が発生する(香取市担当部局へのヒアリング調査結果)。

食品加工残さとしては, 香取市内で食料品製造業, 飲料・たばこ・飼料製造業, 化学工業から動植物性残さが 4,351t/年発生する。

これらは**実態**では焼却されているが, 含水率が高いため焼却処理効率や処理コスト増の原因となっており, 循環型社会の構築を目指す上でも, 有効利用が望まれる。そこでシナリオの対象を, ①分別収集できると仮定した生ごみ総量の 40% (1,920t/年), ②生活排水処理汚泥の 39.4% の 1,296t/年, ③動植物性残さを食品加工残さと見なし, そのうち比較的含水率が高いと仮定した食品加工残さ総量の約 10% (434t/年) を対象とした。

a 実態と計画の設計

シナリオ3・**実態**では, 生ごみ(家庭系+事業系+給食残さ含む) (5.26t/日), 生活廃水処理汚泥 (3.55t/日), 食品加工残さ (1.19t/日), 合計 10t/日を業者が収集輸送し, 1カ所の焼却施設において焼却・焼却灰の処分を行う。

シナリオ3・**計画**では, 同量の生ごみ・生活廃水処理汚泥・食品加工残さを業者が収集輸送し, 1カ所の変換施設(メタン発酵・コージェネレーション施設)において破碎処理・固液分離後メタン発酵する。メタン発酵で生成したバイオガスをコージェネレーションに利用して得た

電気・熱は, 変換施設内で利用するとともに, 余剰分は販売する。同時に生成される消化液は, 地域内の農地に輸送・散布して作物栽培の基肥として利用する。水田では, 消化液で化学肥料を 100% 代替できるため, 栽培した水稲は特別栽培米として高付加価値で販売できると仮定した。**Table 22** にシナリオ3の各ステージの内容を示す。

b 各ステージにおける収入とコストの算出

(1) バイオマスの生産(発生)ステージ

シナリオ3では, **実態**・**計画**とも, 本ステージに係る初期コスト, 廃棄コスト, ランニングコスト(収集輸送手数料, 処理手数料)はいずれも“neutral”とした。また廃棄物処理と位置づけ(逆有償は考えない), 収入は0円である。

発生する生ごみは含水率 90% で, 窒素含有率は乾物重量当たり, 家庭生ごみで 1.4%, 事業系生ごみで 3.9%, 給食残さ 3.1%。炭素含有率は乾物重量当たり, 家庭生ごみ, 事業系生ごみ及び給食残さとも 44% である。生活廃水処理汚泥は含水率 83% (香取市のし尿処理汚泥平均を仮定), 窒素含有率は乾物当たり 4.7%, 炭素含有率は乾物当たり 38% である。食品加工残さは含水率 90%, 窒素含有率は乾物当たり 3.9%, 炭素含有率は乾物当たり 42% である。

(2) 収集・輸送・貯蔵ステージ

シナリオ3では, **実態**・**計画**とも, 本ステージに係る初期コスト, 廃棄コスト, ランニングコストは, 輸送距離も同じと仮定し, いずれも“neutral”とした。また, 収入(排出者から支払われる収集輸送手数料)も同じとした。

(3) バイオマスの変換ステージ

シナリオ3の実態では、地域内の焼却施設が、有料で生ごみ、生活廃水処理汚泥、食品加工残さを受入れて焼却処理し、焼却灰は施設内で埋め立て処分を行う。焼却施設の規模、能力および建設費、運転経費（事務経費、電力料金、燃料費、保守点検費、焼却灰搬出・処分経費）は香取市内に既設の焼却施設（70t/日規模）のヒアリング調査による。薬剤費は、消石灰に係るコストを単価25.7円/kg（間野，2009）と消費量（155t/年）から求め、薬剤費総額からさしひいて、活性炭に係るコストを求めた。その結果、活性炭に係るコストは8,333千円/年、年間消費量から求められる単価は757.5円/kgとなった。本シナリオの対象とするバイオマス総量は10t/日であるため、調査で知り得た上記の各コストの1/7をシナリオ3のコストとして計上した。施設の使用年数は、一般的な焼却施設の耐用年数が15～20年とされているため、15年とした。焼却施設の年間稼働日数は250日である。以上のシナリオ条件より算出されたコストと収入をTable 23に示す。

計画では、地域内に設置されたメタン発酵・コジェネ

レーション施設が、有料で生ごみ、生活廃水処理汚泥、食品加工残さを受入れて変換する。変換施設では、10t/日の混合原料が前処理段階で破碎・固液分離される。固体分（夾雑物）は堆肥化する（堆肥化工程はシステム外として計上しない）。液体分はメタン発酵され、生成したバイオガスを用いたコジェネレーションにより電力と熱が生成される。同時にメタン発酵消化液が生成される。変換施設の年間稼働日数は365日、総合耐用年数は、メタン発酵・コジェネレーション施設の建築土木を30年、設備機器を12年とした。このメタン発酵・コジェネレーション施設1基の施設運転に要する労力は1.5人（年間雇用）である。変換施設の運転条件は、シナリオ1・計画をもとに、投入原料等についてはシナリオ3の条件に合わせて設計した。Fig.15に設計した変換工程のフローを示す。

【受入・前処理工程】

10t/日の混合原料（生ごみ5.26t/日、生活廃水処理汚泥3.55t/日、食品加工残さ1.19t/日）は、破碎機を経て、原料受入槽からポンプで夾雑物脱水機に送られる。夾雑物脱水機では、0.42t/日（含水率70%）の夾雑物が発生

Table 23 シナリオ3・実態の③バイオマス変換ステージにおけるコストと収入
Cost and income in ③ Biomass conversion stage of Present Scenario 3

算出項目	データ名	算出結果
初期コスト(円/年)	焼却施設建設費(1/7負担)	414,503千円 ÷ 15年 = 27,634千円/年
廃棄コスト(円/年)	焼却施設廃棄費(1/7負担)	(414,503千円 × 0.05) ÷ 15年 = 1,382千円/年
ランニングコスト (円/年)	事務経費(人件費含む)(1/7負担)	14,170千円/年
	電力料金(1/7負担)	5,713千円/年
	燃料費(1/7負担)	173千円/年
	薬剤費(1/7負担)(活性炭: 757.5円/kg)	569千円/年
	薬剤費(1/7負担)(消石灰: 25.7円/kg)	1,190千円/年
	保守点検費(1/7負担)	11,387千円/年
	焼却灰搬出・処分経費(1/7負担)	3,382千円/年
収入(円/年)	生ごみ処理料(委託費収入)	neutral
	生活廃水処理汚泥処理料(委託費収入)	neutral
	食品加工残さ処理料(委託費収入)	neutral

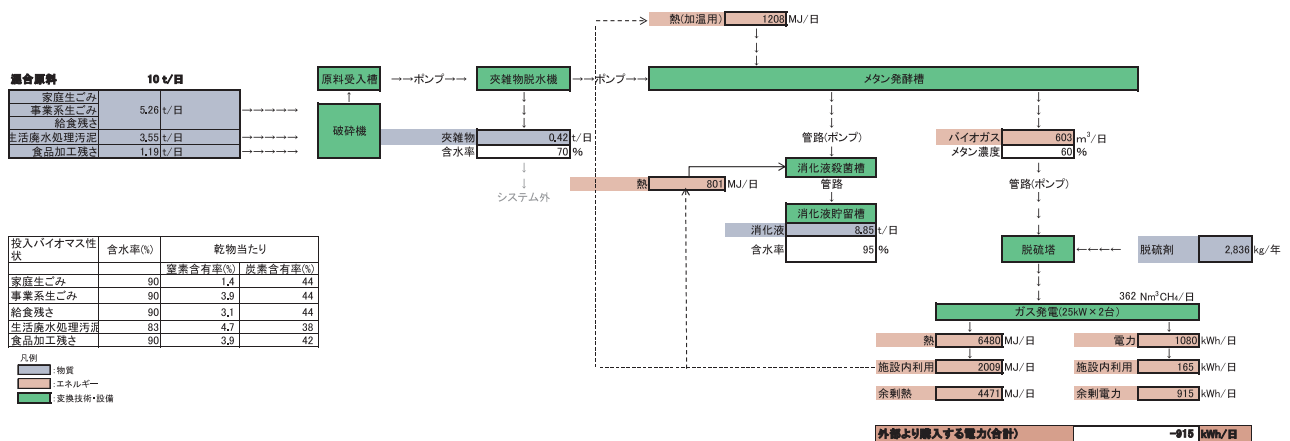


Fig.15 シナリオ3・計画における変換工程フロー
Process flow of methane fermentation and cogeneration in Plan Scenario 3

し、システム外の堆肥化施設で堆肥化される（システム外として計上しない）。

【メタン発酵工程】

9.58t/日の液分は、ポンプでメタン発酵槽に移送され、加温・攪拌される。加温のために必要な熱量は1,208MJ/日であり、バイオガスコジェネレーションで生産した熱を用いる。生成するバイオガス（メタン濃度60%）は603m³/日であり、同時に消化液を生成する。

【消化液殺菌・貯留】

消化液は、殺菌槽で殺菌（55℃、7.5時間）され、液肥として利用可能な状態（8.85t/日、含水率95%）で貯留槽に送られる。殺菌槽に必要な熱量は、801MJ/日である。

【バイオガス利用】

バイオガスは脱硫後、バイオガスコジェネレーション（25kW×2台）で利用する。バイオガスコジェネレーション装置では、熱6,480MJ/日、電力1,080kWh/日が生産される。余剰熱4,471MJ/日は、外部に販売する。施設運転に必要な電力は164.95kWh/日であり、バイオガスコジェネレーションで生産される電力でそのすべてが賄われる。余剰電力915kWh/日は外部に販売する。

変換施設の建設費は、シナリオ1の算出結果に基づき、建築土木費については原料投入量に相対して算出した。スケールファクターについても同様に0.6とした。設備機器費については、建築土木費と同様にスケールダウンした後、追加的に設置される破砕機を15,000千円、発電関連機器について5,000千円を追加して算出した。

ランニングコストにおける点検補修費は、施設建設費（設備機器）の2%とした。以上より算出したシナリオ3・計画のステージ③に係る初期コスト・ランニングコスト・

廃棄コストと収入を **Table 24** に示す。

（4）生成物の輸送・貯蔵ステージ

シナリオ3・実態においては、バイオマス由来の生成物はないため、本ステージでのコスト・収入は計上しない。計画では、消化液（8.85t/日）をバキューム車で農地（水田および畑）に輸送し、圃場で消化液散布機に移し替えて散布する。消化液散布機は、各圃場まで消化液散布機輸送用車両で輸送する。

メタン発酵消化液の輸送・散布は、①消化液輸送バキューム車（タンク容量3.6t）1台、②消化液散布機（圃場内自走式・タンク容量1.6t）1台、③消化液散布機輸送用車両（2t車）1台を要し、輸送・散布のために必要な労力は3名（日単位の雇用）である。輸送・散布に係る各車両の価格、使用年数、水田・畑への消化液施用量と散布時期、散布条件、作業効率はシナリオ1と同様である。水田は、43.2aがまとまって存在すると仮定し、消化液散布機輸送用車両は1往復/日、バキューム車は3往復/日で、1日に43.2aに散布する設計である（消化液散布量10.8t/日）。畑は、1日に21.6aに散布する（消化液散布量10.8t/日）。以上の条件を **Fig.16**（水田）、**Fig.17**（畑）に示す。

シナリオ3の計画においては、2、3月（水田散布期間）の60日間で531tの消化液が生成される。1日につき10.8tの消化液が輸送・散布されることから、この期間の稼働日数は49.2日（≒50日）である。メタン発酵消化液が散布される水田面積は、49.2日×43.2aで21.3ha。また、1月および4～12月（畑散布期間）の305日間では、2,699tの消化液が生成される。1日につき10.8t/日の消化液が輸送・散布されることから、この期間の稼働日数は249.9日（≒250日）である。消化液

Table 24 シナリオ3・計画の③バイオマス変換ステージにおけるコストと収入
Cost and income in ③ Biomass conversion stage of Plan Scenario 3

算出項目	データ名	算出結果
初期コスト (円/年)	メタン発酵施設(建築土木)1基建設費	38,100千円÷30年=1,270千円/年
	メタン発酵施設(設備機器)1基建設費	116,900千円÷12年=9,742千円/年
廃棄コスト (円/年)	メタン発酵施設(建築土木)1基廃棄費	(38,100千円×0.05)÷30年=64千円/年
	メタン発酵施設(設備機器)1基廃棄費	(116,900千円×0.03)÷12年=292千円/年
ランニングコスト (円/年)	人件費	1.5人×4,500千円/年=6,750千円/年
	電力料金(基本電力料金, 契約電力14kW)	14kW×(1,100円/kW/月)×12ヶ月=185千円/年
	電力料金(従量電力料金)	バイオガス発電で自給できるため0円/年
	水道料金(井水利用, 排水なし)	0円/年
	燃料費	熱は自給できるため0円/年
	薬剤費(脱硫剤2,836kg/年)	2,836kg/年×180円/kg=511千円/年
	点検補修費(施設建設費(設備機器)の2%)	116,900千円×0.02=2,338千円/年
収入(円/年)	消化液販売(3,230t/年)	3,230t/年×600円/t=1,938千円/年
	余剰電力販売(333,975kWh/年)	333,975kWh/年×20円/kWh=6,680千円/年
	余剰熱販売(1,631,915MJ/年)	1,632千円/年
	生ごみ処理料(委託費収入)	neutral
	生活廃水処理汚泥処理料(委託費収入)	neutral
	食品加工残さ処理料(委託費収入)	neutral

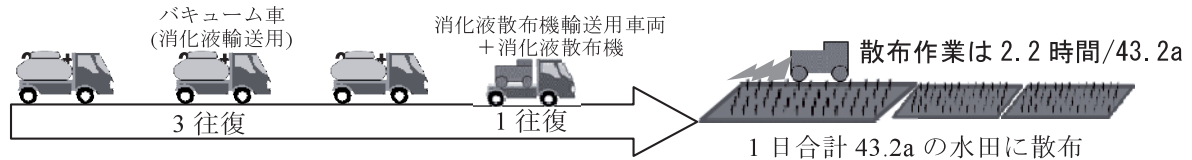


Fig.16 水田への消化液の輸送・散布のシナリオ条件 (シナリオ 3)
Scenario of digested liquid transportation and application to paddy field (Scenario 3)

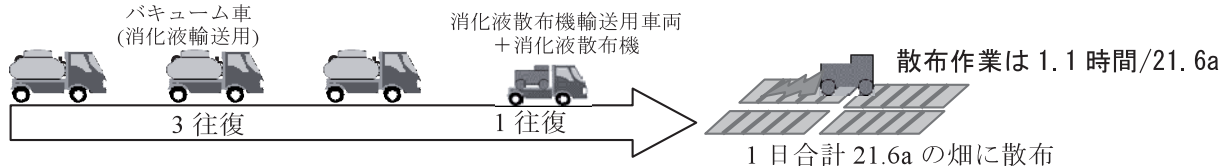


Fig.17 畑への消化液の輸送・散布のシナリオ条件 (シナリオ 3)
Scenario of digested liquid transportation and application to upland field (Scenario 3)

が散布される畑面積は、249.9日×21.6aで54haとなる。

燃料消費量を算出するため、走行距離を算出した。走行距離は、消化液輸送バキューム車では、 $20\text{km}(\text{往復距離}) \times 3 \text{ 回/日} \times (50 \text{ 日} + 250 \text{ 日}) = 18,000\text{km/年}$ 、消化液散布機輸送用車両では、 $20\text{km}(\text{往復距離}) \times 1 \text{ 回/日} \times (50 \text{ 日} + 250 \text{ 日}) = 6,000\text{km/年}$ となる。各車両の燃費効率、燃料価格、固定費および燃料以外の運行費の設定は、シナリオ1と同様である。また、消化液の輸送・散布手数料収入についても同様に、⑤生成物の利用ステージの担い手である耕種農家から、3千円/10aの支払いを受ける。

以上より算出した、シナリオ3・計画のステージ④に係る初期コスト・ランニングコスト・廃棄コストと収入

を Table 25 に示す。

(5) 生成物の利用ステージ

シナリオ3・実態では、バイオマス由来の生成物はないが、計画との対比のため、水田21.3ha、畑54haを対象として、すべての面積で基肥として化学肥料を使用した場合のコストと収入を算出した。水田・畑における基肥の窒素要求量、使用する化学肥料(普通化成8-8-8)の成分は、シナリオ1と同じである。評価対象水田(21.3ha)では、基肥として化学肥料43.75kg/10a(4,725円/10a)を、評価対象畑(54ha)では、基肥として化学肥料187.5kg/10a(20,250円/10a)を施用し、いずれも収量の増加や生産物の価格向上はないものとした。また、作物栽培に係るインフラ・機械の初期コスト、廃棄

Table 25 シナリオ3・計画の④生成物の輸送・貯蔵ステージにおけるコストと収入
Cost and income in ④ Transportation of generated material stage of Plan Scenario 3

算出項目	データ名	算出結果
初期コスト (円/年)	バキューム車1台購入費	5,000千円÷8年 = 625千円/年
	消化液散布機1台購入費	8,000千円÷7年 = 1,143千円/年
	消化液散布機輸送用車両1台購入費	1,500千円÷8年 = 188千円/年
廃棄コスト (円/年)	バキューム車1台廃棄費	(5,000千円×0.03)÷8年 = 19千円/年
	消化液散布機1台廃棄費	(8,000千円×0.03)÷7年 = 34千円/年
	消化液散布機輸送用車両1台廃棄費	(1,500千円×0.03)÷8年 = 6千円/年
ランニングコスト (円/年)	人件費	(3人×300日/年×8千円/日) = 7,200千円/年
	燃料費(バキューム車)	$(3,000\text{km} + 15,000\text{km}) \div (5.26\text{km/L}) = 3,422\text{L/年}$ 3,422L/年×103円/L = 353千円/年
	燃料費(消化液散布機)	年散布面積(0.432ha/日×49.2日)+(0.216ha/日×249.9日) = 21.3ha + 54ha = 75.3ha/年 75.3ha/年×18.3L/ha = 1,378L/年 1,378L/年×103円/L = 142千円/年
	燃料費(消化液散布機輸送用車両)	$(1,000\text{km} + 5,000\text{km}) \div (6.26\text{km/L}) = 958\text{L/年}$ 958L/年×103円/L = 99千円/年
	バキューム車の固定費	366千円/年
	堆肥散布車輸送用車両の固定費	337千円/年
	バキューム車の燃料以外の運行費	18,000km/年×7.5円/km = 135千円/年
消化液散布機輸送用車両の燃料以外の運行費	6,000km/年×7.5円/km = 45千円/年	
収入(円/年)	消化液輸送・散布(手数料収入)	30千円/ha×(21.3ha + 54ha) = 2,259千円/年

コスト、労働費および追肥肥料費や他の農業生産資材等購入費は“neutral”とし、計上しない。以上より算出した、シナリオ3・実態のステージ⑤に係るコストと収入を **Table 26** に示す。

計画では、消化液を施用する水田 21.3ha、畑 54ha を対象とする。水田・畑における面積当たりの消化液施用量、窒素要求量、消化液ではまかなえない窒素量を補うための化学肥料（普通化成 8-8-8）の成分は、シナリオ1と同じである。水田(21.3ha)については、10a 当たり 2.5t 施用した消化液により、窒素要求量の 100%がまかなわれる。収量は化学肥料を用いた慣行栽培と差がないが、生産した米は「特別栽培米」として 20 円/kg の高い価格で販売できる。基肥に係るコストは、10a 当たり（消化液購入費:2.5t × 600 円/t）+（輸送・散布手数料支払:3 千円）= 4,500 円である。畑（54ha）については、消化液 5t/10a を施用することにより、窒素要求量の 47% が供給される。不足する窒素量は、化学肥料 100kg/10a を施用して補う。基肥に係るコストは、10a 当たり（消化液購入費:5t × 600 円/t）+（輸送・散布手数料支

払:3 千円）+（化学肥料購入費:100kg × 108 円/kg）= 16,800 円である。畑作物については、収量増加や生産物の価格向上はないものとした。また、作物栽培に係るインフラ・機械の初期コスト、廃棄コスト、労働費および追肥肥料費や他の農業生産資材等購入費は“neutral”とし、計上しない。以上より算出した、シナリオ3・計画のステージ⑤に係るコストと収入を **Table 27** に示す。

c 算出結果

シナリオ3における**実態**と**計画**のコストおよび収入の算出結果を **Table 28** に示す。**実態**のステージ③では、公営の焼却施設の初期コスト、廃棄コストおよびランニングコストの事務経費や保守点検費が**計画**に比べて高額であるため、**計画**のステージ④におけるコストを加味しても、ライフサイクル全体では**計画**の採用により赤字が削減される結果となった。ステージ⑤においては、消化液の散布面積が小さいため、シナリオ1, 2 に比べて耕種農家のメリットはそれほど大きく現れなかった。

Table 26 シナリオ3・実態の⑤生成物の利用ステージにおけるコストと収入
Cost and income in ⑤ Utilization of generated material stage of Present Scenario 3

算出項目	データ名	算出結果
初期コスト (円/年)	水稲・畑作物生産に係るインフラ等建設・購入費	neutral
廃棄コスト (円/年)	水稲・畑作物生産に係るインフラ・機械等の廃棄費	neutral
ランニングコスト (円/年)	水稲・畑作物生産に係る労働費	neutral
	水稲生産の基肥として化学肥料に係る費用(対象水田21.3ha分)	47,300 円/ha × 21.3ha = 1,008 千円
	畑作物生産の基肥として化学肥料に係る費用(対象畑54ha分)	202,500 円/ha × 54ha = 10,935 千円
	水稲・畑作物生産に係る追肥肥料費および他の消耗品等購入費	neutral
収入(円/年)	水稲・畑作物の販売金額増収分	0 円/年

Table 27 シナリオ3・計画の⑤生成物の利用ステージにおけるコストと収入
Cost and income in ⑤ Utilization of generated material stage of Plan Scenario 3

算出項目	データ名	算出結果
初期コスト (円/年)	水稲・畑作物生産に係るインフラ等建設・購入費	neutral
廃棄コスト (円/年)	水稲・畑作物生産に係るインフラ・機械等の廃棄費	neutral
ランニングコスト (円/年)	水稲・野菜生産に係る労働費	neutral
	水稲生産の基肥のうち、メタン発酵消化液に係る費用(対象水田21.3ha分)	(25t/ha × 600 円/t) × 21.3ha = 320 千円
	畑作物生産の基肥のうち、メタン発酵消化液に係る費用(対象畑54ha分)	(50t/ha × 600 円/t) × 54ha = 1,620 千円
	畑作物生産の基肥のうち、化学肥料に係る費用(消化液施用畑54ha分)	1,000kg/ha × 108 円/kg × 54ha = 5,832 千円
	消化液の輸送・散布手数料(支払)	30 千円/ha × (21.3ha + 54ha) = 2,259 千円
		水稲・畑作物生産に係る追肥肥料費および他の消耗品等購入費
収入(円/年)	特別栽培米の販売金額増収分	21.3ha × 5,500kg × 20 円/kg = 2,343 千円

4 規格外甘しょ・食品加工残さ対象シナリオ（シナリオ4）

香取市の甘しょ作付面積は1,690ha（平成18年産作物統計）であり、青果用甘しょ生産に伴い8,450t/年（0.5t/10a）の規格外品が発生する。これらは、以前は隣接する旭市ででんぷん原料として利用されていたが、工場閉鎖に伴い、畑や山林に放棄されるようになってきている。シナリオ4では、規格外甘しょの17%に相当する1,500t/年を利活用の対象とした。また、食品加工残さ（動植物性残さ）のうち、シナリオ3の利活用対象量を除く3,917t/年（香取市内で発生する食品加工残さの90%）を対象とした。

a 実態と計画の設計

シナリオ4・**実態**では、地域内で発生する食品加工残さ（3,917t/年）を業者が収集・輸送し、既存の焼却施設において焼却・焼却灰の処分を行う。青果用甘しょ生産に伴って発生する規格外甘しょは全量を収集せず畑に鋤込む。

シナリオ4・**計画**では、食品加工残さと規格外甘しょの混合原料を飼料化するシナリオとした。飼料化に当たり、規格外甘しょとの混合比率を考慮し、地域内で発生する食品加工残さに加えて、地域外から食品加工残さ（3,283t/年）を輸送することとした。地域外から輸送される食品加工残さは**実態**シナリオでは地域外で焼却処分されるが、これについてはシステム外としてコストを算出しない。地域内外から収集・輸送した食品加工残さを、1カ所の飼料化工場において規格外甘しょ（1,500t/年）を合わせて乾燥・発酵し、栄養補助添加物を混合して養豚用の高付加価値飼料に変換し、販売する。**Table 29**にシナリオ4の各ステージの内容を示す。

b 各ステージにおける収入とコストの算出

(1) バイオマスの生産（発生）ステージ

シナリオ4では、**実態・計画**とも、地域内で食品加工残さ（10.7t/日）、規格外甘しょ（9～11月に1,500t/年）が発生する。地域外では食品加工残さ（9t/日）が発生する。

地域内発生分の食品加工残さは、食料品等の製造加工工程で発生する廃棄物であるため、発生に係る初期コスト、廃棄コスト、収入は計上しない。ランニングコストのうち、地域内輸送業者に支払う収集・輸送手数料は、**実態・計画**とも“neutral”とした。また、変換施設（**実態**では焼却施設、**計画**では飼料化施設）に支払う処理委託料についても、処理方法は異なるが同額とし、ここでは価格を明示しない。

地域外発生分の食品加工残さについても、発生に係る初期コスト、廃棄コスト、収入は計上しない。ランニングコストのうち、**実態**では、地域外の食品加工業者は焼却施設までの輸送手数料としてB円/年を支払う（本報では価格は定めないが、必要に応じて算出する）。**計画**では、飼料化工場までの輸送距離が長くなることから、支払額B円/年に加え、距離延長分の追加コストa円/年を支払わなければならない。ただし本報では、追加額aを飼料化工場が「原料確保のために負担する」とみなし、ステージ①における地域外の食品加工業者の負担とはしない。すなわち、輸送手数料支払はB円/年のみとなるため、“neutral”である。この追加コストaを発生者（地域外の食品加工業者）等が支払う場合は、金額を算出の上、B円に追加する必要がある。また、処理委託料は、実際は食品加工残さの種類や性状により異なるが、地域外の焼却施設で処理される場合（**実態**）も、飼料化施設に処理委託する場合（**計画**）も同額とし、支払額と

Table 28 シナリオ3における実態と計画のコストと収入（千円/年）
Cost and income in Present and Plan Scenario 3 (thousand yen /year)

			①バイオマスの生産（発生）	②収集・輸送・貯蔵	③バイオマス変換	④生成物の輸送・貯蔵	⑤生成物の利用	計
実態	焼却	コスト	0	0	65,600	0	11,943	77,543
		収入	0	0	0	0	0	0
計画	メタン発酵	コスト	0	0	21,152	10,692	10,031	41,875
		収入	0	0	10,250	2,259	2,343	14,852

Table 29 シナリオ4の各ステージの内容
Activities of each stage in Scenario 4

ステージ シナリオ	①バイオマスの生産（発生） ステージ	②収集・輸送・貯蔵 ステージ	③バイオマスの変換 ステージ	④生成物の輸送・ 貯蔵ステージ	⑤生成物の利用 ステージ
実態	地域内・地域外食品加工残さの発生、規格外甘しょの発生・鋤込み	地域内食品加工残さの収集・輸送	食品加工残さの焼却・焼却灰埋立	なし	なし
計画	地域内・地域外食品加工残さの発生、規格外甘しょの発生・分別	地域内・地域外食品加工残さの収集・輸送	食品加工残さと規格外甘しょの混合飼料化	なし	なし

しては“neutral”である(ただし、計画のステージ③では飼料化施設の収入として20千円/tを仮定した)。

規格外甘しょは、青果用甘しょ生産工程で発生する副産物であるため、初期コスト、廃棄コストは計上しない。また、実態ではそのまま畑に鋤込まれるため、ランニングコストおよび収入は0円である。計画では、生産者(農家)のランニングコストとして飼料化工場への輸送手数料(1千円/t)を負担する。一方、生産者は規格外甘しょを飼料化工場に販売した収入(17,500円/t)を得る。規格外甘しょの原料価格は、千葉県内の規格外甘しょを原料とした飼料化工場へのヒアリング調査をもとに設定した。

シナリオ4のステージ①に係る初期コスト・ランニングコスト・廃棄コストと収入をTable 30に示す。

(2) 収集・輸送・貯蔵ステージ

シナリオ4・実態では、地域内発生分の食品加工残さは、廃棄物収集許可を得た収集輸送業者により地域内の焼却施設まで毎日輸送される(貯蔵なし)。ただし、食品加工業者から焼却施設までの距離は、食品加工業者から飼料化施設までの距離と同じと仮定し、収集輸送に係る初期コスト、廃棄コスト、ランニングコスト・収集輸送手数料収入は“neutral”とした。

地域外発生分の食品加工残さについても、地域外において、収集輸送業者により焼却施設まで収集・輸送・貯蔵される。ここで収集・輸送・貯蔵に係る初期コスト、廃棄コスト・ランニングコストをC円/年と仮定する(本

報では価格は定めないが、必要に応じて算出する)。収集輸送手数料収入は、ステージ①に従い、B円/年である。規格外甘しょの収集・輸送・貯蔵は行われない。以上のシナリオ条件におけるシナリオ4・実態のステージ②に係るコストと収入をTable 31に示す。

計画では、地域内発生分の食品加工残さの収集輸送(貯蔵なし)に係る初期コスト、廃棄コスト、ランニングコスト・手数料収入は、“neutral”である。地域外発生分の食品加工残さの収集・輸送・貯蔵に係る初期コスト・廃棄コスト・ランニングコストは、輸送距離延長分を加えた(C+a)円/年となる。輸送距離延長に伴う輸送コストは、飼料化工場が支払う(原料確保のための負担金額:原料代とみなす)。輸送距離延長に伴う輸送コストは、以下の設定に基づいて算出した。地域外発生分の食品加工残さの輸送距離を片道50kmと想定し、積載容量6m³、最大積載量3,850kgの保冷装置積載小型トラック3台で運搬するとした(12t/日)。年間の総走行距離は109,500kmである。トラック本体についての初期コスト・ランニングコストのうち固定費、廃棄コストはC円/年に含むものとした。積載する保冷装置(1,000千円/台)については、別途計上した。保冷装置を積載することによりトラックの燃費効率が20%低下すると仮定し、小型トラックの燃費効率(Table 4)を基に、5km/Lとした。また、地域外発生分の食品加工残さの輸送に係る人件費は、C円/年に含めるとする(実態でも輸送人件費はかかるため)。これらにより算出された輸

Table 30 シナリオ4・実態および計画の①バイオマスの生産(発生)ステージにおけるコストと収入
Cost and income in ① Biomass production stage of Present and Plan scenario 4

算出項目	データ名	算出結果	
		実態	計画
初期コスト (円/年)	地域内外の食品加工残さ発生に係るインフラ等の建設・購入費	計上しない	
	規格外甘しょ生産に係るインフラ等の建設・購入費	計上しない	
廃棄コスト (円/年)	地域内外の食品加工残さ発生に係るインフラ・機械等の廃棄費	計上しない	
	規格外甘しょ生産に係るインフラ・機械等の廃棄費	計上しない	
ランニングコスト (円/年)	地域内発生分の食品加工残さに係る収集輸送手数料支払(地域内食品加工業者→輸送業者)	neutral	
	地域内発生分の食品加工残さに係る処理委託料支払(地域内食品加工業者→実態:焼却施設・計画:飼料化施設)	neutral	
	地域外発生分の食品加工残さに係る収集輸送手数料支払(地域外食品加工業者→輸送業者)	B円/年	B円/年 + a円/年(ただしaは飼料化工場が負担のため本ステージでは0円)
	地域外発生分の食品加工残さに係る処理委託料支払(地域外食品加工業者→実態:地域外焼却施設・計画:飼料化施設)	3,283t/年 × 20千円/t = 65,660千円/年 (= neutral)	
	規格外甘しょ生産に係るランニングコスト(輸送手数料支払:生産者→輸送業者)	発生しないため0円/年	1,500t/年 × 1千円/t = 1,500千円/年
収入(円/年)	規格外甘しょ販売収入	発生しないため0円/年	1,500t/年 × 17,500円/t = 26,250千円/年

Table 31 シナリオ4・実態の②収集・輸送・貯蔵ステージにおけるコストと収入
Cost and income in ② Biomass transportation stage of Present Scenario 4

算出項目	データ名	算出結果
初期コスト (円/年)	地域内発生分の食品加工残さの収集・輸送（貯蔵なし）に係るインフラ等の建設・購入費	neutral
	地域外発生分の収集・輸送・貯蔵に係るインフラ等の建設・購入費	C 円/年に含む
廃棄コスト (円/年)	地域内発生分の食品加工残さの収集・輸送（貯蔵なし）に係るインフラ等の廃棄費	neutral
	地域外発生分の食品加工残さの収集・輸送・貯蔵に係るインフラ等の廃棄費	C 円/年に含む
ランニングコスト (円/年)	地域内発生分の食品加工残さの収集・輸送（貯蔵なし）に係るランニングコスト	neutral
	地域外発生分の食品加工残さの収集・輸送・貯蔵に係るランニングコスト	C 円/年に含む
収入 (円/年)	地域内発生分の食品加工残さの収集・輸送手数料収入（地域内食品加工業者→輸送業者）	neutral
	地域外発生分の食品加工残さの収集・輸送・貯蔵手数料収入（地域外食品加工業者→輸送業者）	B 円/年

送距離延長分コスト a は、3,463 千円/年である。この金額は、飼料化工場から輸送業者に支払われる。

規格外甘しょは、集荷施設から飼料化工場まで輸送される。規格外甘しょの輸送には大型トラック（10t コンテナ車、積載容量 20m³、最大積載量 11,500kg）1 台を用いる。大型トラックの購入価格（消費税・自動車取得税含む）は、(社) 全日本トラック協会の事例価格（いすゞトラックステーション、2011）より 12,960 千円/台とした。甘しょ集荷施設から飼料化工場までの距離は片道 10km とした。1 便につき 10t の輸送で、飼料化施設の貯蔵可能量 (20t) を考慮して 1 日 2 往復 (40km/日走行)、年間で 150 便とする。総走行距離は 6,000km/年である。人件費については、実働 1 日 1 車当たり 243.86km でドライバー 1 名当たり固定費 3,624 千円/年（いすゞトラックステーション、2011 より国土交通省 H21 年 4・5・6 月営業車輸送原単位）であるため、ドライバー 1 名当たり固定費を 562 千円 (=3,624 千円 × (40km ÷ 243.86km)) とし、また、走行距離に応じた変動費 (18.13 円/km、いすゞトラックステーション、2011) を加えた。

加えて、本ステージでは、飼料化工場での食品残さおよび春夏冬の規格外甘しょ貯蔵のための貯蔵庫についても計上する。設置される貯蔵庫の建設費を大型冷蔵施設等のカタログから、1,000 万円/基とした。使用年数は、「飲料、たばこ又は飼料製造業用設備」の法定耐用年数 (10 年) とした。貯蔵庫（定格電力 1kW、負荷率 0.5）の運転は、年間 270 日 × 24 時間とし、消費電力は 3,240kWh/年となる。以上のシナリオ条件におけるシナリオ 4・計画のステージ②に係るコストと収入を **Table 32** に示す。

(3) バイオマスの変換ステージ

シナリオ 4・実態では、食品加工残さは焼却施設で焼却され、規格外甘しょは畑に鋤込まれる。地域外発生分の食品加工残さについては、地域外で処理されるため算出対象としない。本ステージでは、地域内発生分の食品加工残さが、既設の焼却施設で焼却され、焼却灰を施設内で埋立処分するコストについて計上した。

焼却施設の規模・能力および建設費、運転経費（事務

経費、電力料金、燃料費、保守点検費、焼却灰搬出・処分費）は、シナリオ 3・実態と同様、香取市内に既設の焼却施設 (70t/日規模) のヒアリング調査に基づく。焼却施設の 1 日当たり処理量 (70t/日) に対する地域内発生分の食品加工残さの量 (10.7t/日) の割合から、建設費・運転経費は各値の 15% として計上した。焼却施設の使用年数は、シナリオ 3 と同様 15 年である。以上より算出したシナリオ 4・実態のステージ③に係る初期コスト、廃棄コスト、ランニングコスト、収入を **Table 33** に示す。

計画では、飼料化工場が地域内・地域外で発生した食品加工残さ（食品加工業者から処理手数料の支払いを受ける）と、原料として購入 (17,500 円/t を生産者に支払う) した規格外甘しょを混合して乾燥・発酵し、栄養補助添加物（ふすまやビタミン類などの添加剤、30 千円/t）を加えて養豚用の高付加価値飼料に変換する。製造された飼料は、工場渡りで販売（販売単価 41 千円/t）する。

飼料化施設の建設費、点検補修費は、柚山ら (2006) による。年間稼働日数は 300 日とし、総合耐用年数は、建築土木と設備機器に分けることができなかったため、20 年とした。変換施設の運転条件は、千葉県内の規格外甘しょを原料とした飼料化工場へのヒアリング調査を基に設計した。施設運転に要する労力は 2 人 (年間雇用) である。変換施設は、分別機 (2t/時間規模、6 時間/日運転、定格電力 3.7kW) 2 台、発酵処理機 (4.8t/日規模、24 時間/日運転、定格電力 11kW) 6 台および原料や製品の搬送に用いる電動フォークリフトから成る。

地域内の食品加工業者が飼料化工場に支払う処理手数料は、実態（焼却）と同額のため“neutral”である。地域外発生分の食品加工残さの処理手数料は、実態では地域外に支払われるが、計画では飼料化施設の収入となる。前述のとおり、食品加工残さの種類や性状により処理手数料は変わってくるが、ここでは 20 千円/t と設定した。以上より算出したシナリオ 4・計画のステージ③に係る初期コスト・廃棄コスト・ランニングコスト・収入を **Table 34** に示す。

Table 32 シナリオ4・計画の②収集・輸送・貯蔵ステージにおけるコストと収入
Cost and income in ② Biomass transportation stage of Plan Scenario 4

算出項目	データ名	算出結果
初期コスト (円/年)	地域内発生分の食品加工残さの収集輸送(貯蔵なし)に係るインフラ等の建設・購入費	neutral
	地域外発生分の食品加工残さの収集輸送のための小型トラック3台購入費	C円/年に含む
	地域外発生分の食品加工残さの収集輸送のためのトラック積載保冷装置購入費(α に含む)	$(1,000 \text{ 千円} \div 8 \text{ 年}) \times 3 \text{ 台} = 375 \text{ 千円/年}$
	規格外甘しょの収集・輸送用大型トラック1台購入費	$\{12,960 \text{ 千円} \times (40\text{km}/243.86\text{km})\} \div 8 \text{ 年} = 266 \text{ 千円/年}$
	貯蔵庫の建設費	$10,000 \text{ 千円} \div 10 \text{ 年} = 1,000 \text{ 千円/年}$
廃棄コスト (円/年)	地域内発生分の食品加工残さに係るインフラ等の廃棄費	neutral
	地域外発生分の食品加工残さの収集輸送のための小型トラック3台の廃棄費	C円/年に含む
	地域外発生分の食品加工残さ収集輸送のためのトラック積載保冷装置3台の廃棄費(α に含む)	$\{(1,000 \text{ 千円} \times 0.03) \div 8 \text{ 年}\} \times 3 \text{ 台} = 11 \text{ 千円/年}$
	規格外甘しょの収集・輸送用大型トラック1台の廃棄費	$\{12,960 \text{ 千円} \times (40\text{km}/243.86\text{km}) \times 0.03\} \div 8 \text{ 年} = 8 \text{ 千円/年}$
	貯蔵庫の廃棄費	$(10,000 \text{ 千円} \times 0.03) \div 10 \text{ 年} = 30 \text{ 千円/年}$
ランニングコスト (円/年)	地域内発生分の食品加工残さの収集輸送(貯蔵なし)に係るランニングコスト	neutral
	地域外発生分の食品加工残さの収集輸送に係る人件費	C円/年に含む
	地域外発生分の食品加工残さの収集輸送に係るトラック(3台)の固定費	C円/年に含む
	地域外発生分の食品加工残さの収集輸送に係るトラック(3台)の燃料費(α に含む)	$109,500\text{km} \div (5\text{km/L}) \times 103 \text{ 円/L} = 2,256 \text{ 千円/年}$
	地域外発生分の食品加工残さの収集輸送に係るトラック(3台)の燃料費以外の運行費(α に含む)	$109,500\text{km} \times (7.5 \text{ 円/km}) = 821 \text{ 千円/年}$
	規格外甘しょの収集輸送に係る人件費	$562 \text{ 千円/年} + (6,000\text{km} \times 18.13 \text{ 円/km}) = 671 \text{ 千円/年}$
	規格外甘しょの収集輸送に係る大型トラックの固定費	$442 \text{ 千円/年} \times (40\text{km}/243.86\text{km}) = 73 \text{ 千円/年}$
	規格外甘しょの収集輸送に係る大型トラックの燃料費	$6,000\text{km} \div (3.34\text{km/L}) \times 103 \text{ 円/L} = 185 \text{ 千円/年}$
	規格外甘しょの収集輸送に係る大型トラックの燃料費以外の運行費	$6,000\text{km/年} \times (9 \text{ 円/km}) = 54 \text{ 千円/年}$
	貯蔵庫運転に係る電力料金	$3,240\text{kWh/年} \times 12 \text{ 円/kWh} = 39 \text{ 千円/年}$
収入(円/年)	地域内発生分食品加工残さの収集輸送手数料収入(地域内食品加工業者→輸送業者)	neutral
	地域外食品加工残さの収集輸送手数料収入(地域外食品加工業者→輸送業者)	B円/年(= neutral)
	地域外食品加工残さの収集輸送手数料(飼料化工場→輸送業者)	$\alpha \text{ 円/年} (= 3,463 \text{ 千円/年})$
	規格外甘しょの収集輸送手数料収入	$1,500\text{t/年} \times 1 \text{ 千円/年} = 1,500 \text{ 千円/年}$

(4) 生成物の輸送・貯蔵ステージおよび生成物の利用ステージ

シナリオ4・実態では、バイオマス由来の生成物はないため、本ステージでのコスト・収入は計上しない。計画では、生成物である飼料は工場渡りして販売されるため、輸送・貯蔵は行わない。飼料の利用(養豚)についても、本報では取りあげない。

c 算出結果

シナリオ4における実態と計画のコストおよび収入の算出結果をTable 35にまとめた。ステージ①では、食品加工残さの発生者である食品加工業者が支払うコストは実態・計画とも同じである。計画では、地域外からの食品加工残さを実態の焼却施設よりも遠い距離にある飼料化施設に輸送するために追加のコストが発生するが、本報ではこのコストを飼料化施設が負担すると設定した。一方、規格外甘しょの生産者にとっては、規格外甘

Table 33 シナリオ4・実態の③変換ステージにおけるコストと収入
Cost and income in ③ Biomass conversion stage of Present Scenario 4

算出項目	データ名	算出結果
初期コスト (円/年)	焼却施設建設費(15%負担)	435,228千円 ÷ 15年 = 29,015千円/年
廃棄コスト (円/年)	焼却施設廃棄費(15%負担)	(435,228千円 × 0.05) ÷ 15年 = 1,451千円/年
ランニングコスト (円/年)	人件費(事務経費)(15%負担)	14,879千円/年
	電力料金(15%負担)	5,999千円/年
	燃料費(15%負担)	182千円/年
	薬剤・消耗品費(15%負担)(活性炭:757.5円/kg)	1,250千円/年
	薬剤・消耗品費(15%負担)(消石灰:25.7円/kg)	598千円/年
	保守点検費(15%負担)	11,956千円/年
	焼却灰搬出・処分経費(15%負担)	3,552千円/年
収入(円/年)	地域内発生分の食品加工残さ処理手数料収入(地域内食品加工業者→焼却施設)	neutral

Table 34 シナリオ4・計画の③変換ステージにおけるコストと収入
Cost and income in ③ Biomass conversion stage of Plan Scenario 4

算出項目	データ名	算出結果
初期コスト (円/年)	飼料化施設建設費(建屋, 分別機2台, 発酵処理機6台, 電動フォークリフト, 袋詰め機等)	500,000千円 ÷ 20年 = 25,000千円/年
廃棄コスト (円/年)	飼料化施設廃棄費	(500,000千円 × 0.05) ÷ 20年 = 1,250千円/年
ランニングコスト (円/年)	人件費	2人 × 4,500千円/年 = 9,000千円/年
	施設電力料金(基本料金)74kW	74kW × (1,100円/kW/月) × 12ヶ月 = 977千円/年
	施設電力料金(従量料金)389,484kWh/年	389,484kWh/年 × 12円/kWh = 4,674千円/年
	フォークリフト2台バッテリー用電力料金(従量料金)8,640kWh/年	8,640kWh/年 × 12円/kWh = 104千円/年
	原料購入費(規格外甘しょ 1,500t/年)	1,500t/年 × 18.5千円/t = 27,750千円/年
	原料購入費(地域外食品加工残さの収集輸送手数料(飼料化工場→輸送業者))	α円/年 (= 3,463千円/年)
	副原料(ふすまやビタミン類など添加剤 288t/年)	288千円/t × 30千円/t = 8,640千円/年
	点検補修費	4,500千円/年
収入(円/年)	食品加工残さ(市内発生分 3,917t/年)処理委託料収入	neutral
	食品加工残さ(市外発生分 3,283t/年)処理委託料収入	3,283t/年 × 20千円/t = 65,660千円/年
	飼料販売費(5,760t/年)	5,760t/年 × 41千円/t = 236,160千円/年

Table 35 シナリオ4における実態と計画のコストと収入
Cost and income in Present and Plan Scenario 4

			①バイオマスの生産(発生)	②収集・輸送・貯蔵	③バイオマス変換	④生成物の輸送・貯蔵	⑤生成物の利用	計
実態	焼却	コスト	65,660	C	68,882	0	0	134,542+C
		収入	0	B	0	0	0	B
計画	飼料化	コスト	67,160	5,789+C	89,858	0	0	162,807+C
		収入	26,250	4,963+B	301,820	0	0	333,033+B

しょの輸送手数料を支払っても、本来商品とならないものを販売することができるため、収入増となる。また、ステージ②の計画で“neutral”とならないコスト5,789千円/年のうち、飼料化施設が負担するコストは4,532

千円/年(地域外からの食品加工残さの輸送コストと貯蔵庫コスト)である。加えてステージ③では変換(飼料化)に係るコストが89,858千円/年となったが、飼料化施設の収入はステージ②、③でのコストを大きく上回っ

た。そのため、ライフサイクル全体での収支はプラスになった。本報の仮定においては、規格外甘しょ生産者および飼料化施設にとって経済的にメリットのある結果となった。

5 休耕田対象シナリオ (シナリオ 5)

香取市における休耕水田面積は、遊休農地実態調査に基づく2005年の遊休農地対策データベース(全国農業会議所, 2007)によれば386.25haである。遊休農地実態調査では、遊休農地の活用可能性を「即可能」, 「簡単な整備で可能」, 「その他」の3段階に分けている。「即可能」な休耕水田は、「トラクター等で何度か耕起することで通常の農作物栽培が出来る状態」であり、「簡単な整備で可能」な休耕水田は、「トラクター等で何度か耕起したとしても、土壌の性質が変化したことによって、簡単な土壌改良を行わなければ通常の農作物栽培ができない状態」とされる。本報では、香取市の休耕水田面積のうち、「活用可能性」が「即可能」(34.56ha)および「簡易な整備で可能」(231.94ha)と判断された面積(266.5ha)を対象とする。この対象面積は、香取市休耕水田面積の70%, 香取市水田総面積7,820haの3.4%に相当する。本シナリオでは、これらの休耕水田は全て20a程度に整備されていると仮定した上で、「活用可能性」が「即可能」の休耕水田では、追加の整備作業なしに農業機械の進入や用排水路の利用ができるとした。また「簡易な整備で可能」の休耕水田では、疎水材を用いた暗渠工を簡易な圃場整備と見なし、施工後に通常の作付を行えるものとした。必要な整備を暗渠工とした理由は、事例地域の遊休水田での試験栽培(清水, 2011b)の際、暗渠工施工による排水改良が必須であった経験からである。

a 実態と計画の設計

シナリオ5・**実態**では、休耕水田266.5haに対し、食用生産への復帰を前提に最低限の維持(耕うん1回/年, 畦畔の除草4回/年)を行うものとした。水田には何も投入せず、何も持ち出さない。

シナリオ5・**計画**では、生産者が休耕水田266.5haのうち、「活用可能性」が「可能」の231.9haには簡易な基盤整備を行い、「活用可能性」が「即可能」の34.6ha

は追加的な整備をせずに、資源作物(バイオ燃料原料米)を栽培し、生産された初付き玄米(3,870t/年)を乾燥・調製(初すり)して、バイオエタノール生成施設が粗玄米(2,448t/年)からバイオエタノール(750kL/年)を生成する。エタノール蒸留残さ(981t/年)は飼料原料として販売する。**Table 36**にシナリオ5の各ステージの内容を示す。

b 各ステージにおける収入とコストの算出

(1) バイオマスの生産(発生)ステージ

シナリオ5・**実態**における維持管理作業(耕うん1回/年, 畦畔除草4回/年)については、2007年度に筆者らが行った栽培実証試験の結果(清水ら, 2009)に基づき、コストを算出した。維持管理作業のための農業機械は食用米のものを利用するとし、初期コスト・廃棄コストは“neutral”とした。各圃場と作業者自宅との距離は5kmとし、作業のための移動も含めた燃料費を算出した。耕うんは、27PSのトラクターに標準ロータリーを装着し、燃料消費量は軽油7.33L/作業時間として0.75時間/10aの作業である。自宅から圃場のトラクター移動(往復10km)に係る燃料(軽油)消費量は3.57Lである。畦畔除草は、各回0.5時間の作業とし、刈払機の燃料消費量は混合油0.1L/10aとなった。自宅から圃場までの移動には燃費効率(ガソリン)11km/Lの軽トラックを用いた。維持作業コストは、光熱動力費(燃料に係る費用)、土地改良及び水利費(用排水路、作業道等の生産基盤維持のためのコストとみなす)、労働費(維持管理作業に要した時間(2.75時間/10a)に対象地域の平均的な農作業委託料金(1,500円/時間)を乗じて求めた)について計上し、その他は食用水稲と共通のコストであるため発生しないものとした。以上より算出したコストと収入を**Table 37**に示す。

シナリオ5・**計画**では、対象とする休耕水田でバイオ燃料原料米を栽培する。栽培に係る作業条件やコスト、収量は、筆者らが2007年度に行なった多収品種のモミロマンの栽培実証試験(清水ら, 2009)の結果に基づき設計した。栽培作業は、耕うん(秋耕)、施肥(メタン発酵消化液を4t/10a施用)、耕うん・砕土、畦畔成形、苗準備作業(初消毒、浸水、培土殺菌、播種、育苗管理)、代かき、苗運び、田植え、補植、除草剤散布、畦畔除

Table 36 シナリオ5の各ステージの内容
Activities of each stage in Scenario 5

ステージ シナリオ	①バイオマスの生産(発生)ステージ	②収集・輸送・貯蔵ステージ	③バイオマスの変換ステージ	④生成物の輸送・貯蔵ステージ	⑤生成物の利用ステージ
実態	休耕田266.5haの維持管理	なし	なし	なし	なし
計画	休耕田266.5haでのバイオ燃料原料米栽培(うち231.94haでは簡易な農地整備実施)	圃場-乾燥調製施設の初輸送、乾燥調製、乾燥調製施設-バイオエタノール変換施設の輸送	バイオエタノール生成	なし	なし

Table 37 シナリオ5・実態の①バイオマスの生産（発生）ステージにおけるコストと収入
Cost and income in ① Biomass production stage of Present Scenario 5

算出項目	データ名	算出結果
初期コスト (円/年)	土地（休耕地）に係るインフラ等の建設・購入費	算出対象外
	休耕地維持のための農業機械等の購入費	食用米のものを利用するため neutral
廃棄コスト (円/年)	休耕地維持のための農業機械等に係る廃棄費	食用米のものを利用するため neutral
ランニングコスト (円/年)	維持管理作業に係るランニングコスト（光熱動力費，土地改良及び水利費，労働費のみ）	91,140 円/ha × 266.5ha=24,289 千円/年
収入（円/年）	なし	0 円/年

草，水管理，稲刈り・脱穀である。栽培対象水田のうち，「活用可能性」が「可能」な休耕地（231.94ha）に対して作付前に実施する簡易な農地整備については，疎水材を用いた暗渠工の単位面積当たりの費用とし，使用期間を15年として1年当たりのコストを計上した。バイオ燃料原料米栽培に必要な農業機械は，既存の食用米のものを利用するため，農業機械の初期コスト・廃棄コストは“neutral”として機械の修繕等のランニングコストは計上せずに，機械使用時の燃料費のみをランニングコストとした。これらの光熱動力費に加え，種苗費，肥料費，農業薬剤費，その他の諸材料費，土地改良及び水利費，賃借料及び料金は，実証栽培試験での測定値を用いた。物件税及び公課諸負担，生産管理費については，平成21年度米生産費調査（農林水産省，2010）の値を用いた。労働費は，実証栽培試験で得られた延べ作業時間

に，対象地域の米生産農家へのヒアリング調査で得られた農作業雇用の時間単価（1,500円/時間）を乗じて求めた。バイオ燃料原料米（籾付き，水分25%）は，すべての圃場において1,452kg/10aの収穫が得られ，45円/kg（乾燥調製手数料を含む価格）でバイオエタノール生成施設に販売する。バイオ燃料原料米の販売単価は，平成19年度より新潟県でイネ原料バイオエタノール地域協議会が実施しているバイオ燃料地域利用シナリオ実証事業における価格を参考に設定した。以上より算出したシナリオ5・計画のステージ①におけるコストと収入をTable 38に示す。

(2) 収集・輸送・貯蔵ステージ

シナリオ5・実態では，ステージ①で生産（発生）するバイオマスはないため，計上しない。

計画では，休耕水田266.5haで生産された3,870t/年

Table 38 シナリオ5・計画の①バイオマスの生産（発生）ステージにおけるコストと収入
Cost and income in ① Biomass production stage of Plan Scenario 5

算出項目	データ名	算出結果
初期コスト (円/年)	土地（休耕地266.5ha）に係る建設・購入費	算出対象外
	休耕地におけるバイオ燃料原料米栽培のための農業機械等の購入費	食用米のものを利用するため neutral
	「活用可能性」が「可能」な休耕地（231.94ha）における簡易な農地整備に係る建設・購入費※	(1,627 千円/ha × 231.94ha) ÷ 15 年 = 25,158 千円/年
廃棄コスト (円/年)	休耕地におけるバイオ燃料原料米栽培のための農業機械等に係る廃棄費	食用米のものを利用するため neutral
	「活用可能性」が「可能」な休耕地（231.94ha）における簡易な農地整備に係る廃棄費	計上しない
ランニングコスト (円/年)	種苗費	93,280 円/ha × 266.5ha = 24,859 千円/年
	肥料費（メタン発酵消化液のみ）	24,000 円/ha × 266.5ha = 6,396 千円/年
	農業薬剤費（初消毒剤，殺菌剤，殺虫剤，除草剤）	31,780 円/ha × 266.5ha = 8,469 千円/年
	光熱動力費	98,350 円/ha × 266.5ha = 26,210 千円/年
	その他の諸材料費（育苗用培土）	35,900 円/ha × 266.5ha = 9,567 千円/年
	土地改良及び水利費	35,780 円/ha × 266.5ha = 9,535 千円/年
	賃借料及び料金	46,000 円/ha × 266.5ha = 12,259 千円/年
	物件税及び公課諸負担	11,930 円/ha × 266.5ha = 3,179 千円/年
	建物費，自動車費，農機具費	食用米のものを利用するため計上しない
	生産管理費（統計値：450円/10a）	4,500 円/ha × 266.5ha = 1,199 千円/年
	労働費	378,600 円/ha × 266.5ha = 100,897 千円/年
乾燥調製手数料（支払）	3,870t/年 × 25 千円/t = 96,750 千円/年	
収入（円/年）	籾付き玄米販売（価格45円/kg）	3,870t/年 × 45 千円/t = 174,150 千円/年

※工事（疎水材を用いた暗渠工）費用の面積単価は北川巖氏（農研機構農村工学研究所・農地基盤工学研究領域）による（未公表）

(水分25%)の籾付き玄米を、生産者が圃場から乾燥調製施設(食用の既存施設を利用)まで輸送する。輸送距離は10kmとし、20a(1圃場)につき4tダンプトラックで1便とする。籾付き玄米の容積比を0.7として1,333便/年とし、総走行距離は26,660km/年である。輸送用のダンプトラックは、食用米生産と共用と考え、初期コストおよび廃棄コスト、固定費は計上せず、人件費についても生産者が持ち込むものとして0円とした。ランニングコストは、輸送に係る燃料費と燃料以外の運行費のみをTable 4より中型の値をもとに計上した。

乾燥調製施設は、食用米のカントリーエレベータ(循環式乾燥方式)を想定し、初期コストおよび廃棄コストは計上せず、運転に係る変動費と管理費(合計605円/玄米60kg)のみを農林水産技術情報協会(1999)から引用した。乾燥調製施設に対して支払われる乾燥調製手数料(1,500円/60kg)は、エタノール生成施設が支払うものとした。また、乾燥調製施設で発生するもみ殻は、1,200円/tで販売される(乾燥調製施設の収入とするが、販売については算出対象としない)。籾すり・乾燥(水分15%)された玄米(2,448t/年)は、輸送業者がエタノール化施設まで輸送する。乾燥調製施設からバイオエタノール変換施設までの輸送距離は20kmとし、大型(10t)ダンプトラック1台で輸送する。調製済み玄米の容積比

を0.7として350便/年(年間走行距離14,000km)とした。輸送用車両の初期コスト、廃棄コスト、固定費は計上せず、燃料費と燃料費以外の運行費のみを計上した。輸送に係る労力を、大型ダンプ1台当たり1名とし、国土交通省の輸送原単位(実働1日1車当たり走行距離143.86km(大型))に基づいて実働日数58日/年×30千円/日として人件費を計上した。以上より算出したシナリオ5・計画のステージ②におけるコストと収入をTable 39に示す。

(3) バイオマスの変換ステージ

シナリオ5では、本ステージは計画のみ設定した。地域内に建設されたバイオエタノール変換施設において、玄米からバイオエタノールを生成する。バイオエタノール変換施設の建設費については、原料投入量がほぼ同じであるJA全農のバイオエタノール製造所(原料投入2,250t/年、バイオエタノール生成約1,000kL/年)の値を用いた。建設費を建築土木と設備機器に分けることができなかつたため、総合耐用年数は15年(朝野・美濃輪, 2007)とした。施設の年間稼働日数は330日とした。

バイオエタノール変換施設の運転条件は、東京大学生産技術研究所・いであ株式会社(2010)による算出データを用い、エタノール変換効率を0.306kL/玄米tとした。ただし、文献値では「エタノール発酵・でんぷん系

Table 39 シナリオ5・計画の②バイオマスの収集・輸送・貯蔵ステージにおけるコストと収入
Cost and income in ② Biomass transportation stage of Plan Scenario 5

算出項目	データ名	算出結果
初期コスト (円/年)	乾燥調製施設に係る建設・購入費	食用米のものを利用するため計上せず
	籾付き玄米輸送用4tダンプトラック購入費	食用米のものを利用するため計上せず
	乾燥調製済み玄米輸送用大型ダンプトラック購入費	食用米のものを利用するため計上せず
廃棄コスト (円/年)	乾燥調製施設に係る廃棄費	食用米のものを利用するため計上せず
	籾付き玄米輸送用4tダンプトラック廃棄費	食用米のものを利用するため計上せず
	乾燥調製済み玄米輸送用大型ダンプトラック廃棄費	食用米のものを利用するため計上せず
ランニングコスト (円/年)	籾付き玄米収集輸送に係る4tダンプトラックの燃料(軽油)費	$26,660\text{km} \div (5.26\text{km/L}) \times 103\text{円/L} = 522\text{千円/年}$
	籾付き玄米収集輸送に係る4tダンプトラックの燃料費以外の運行費	$26,660\text{km} \times (7.5\text{円/km}) = 200\text{千円/年}$
	籾付き玄米収集輸送に係る人件費	農家持ち込みのため0円/年
	籾付き玄米収集輸送に係る4tダンプトラックの固定費	食用米のものを利用するため計上せず
	乾燥調製施設運転費	$2,448\text{t} \times 10,083\text{円/t} = 24,683\text{千円/年}$
	乾燥調製施設からバイオエタノール変換施設までの玄米輸送に係る人件費	$58\text{日/年} \times 30\text{千円/人} \cdot \text{日} = 1,740\text{千円/年}$
	乾燥調製施設からバイオエタノール変換施設までの玄米輸送に係る大型ダンプトラックの固定費	食用米のものを利用するため計上しない
	乾燥調製施設からバイオエタノール変換施設までの玄米輸送に係る大型ダンプトラックの燃料(軽油)費	$14,000\text{km} \div (3.34\text{km/L}) \times 103\text{円/L} = 432\text{千円/年}$
乾燥調製施設からバイオエタノール変換施設までの玄米輸送に係る大型ダンプトラックの燃料費以外の運行費	$14,000\text{km} \times (9\text{円/km}) = 126\text{千円/年}$	
収入(円/年)	乾燥調製手数料(収入)	$3,870\text{t/年} \times 25\text{千円/t} = 96,750\text{千円/年}$
	もみ殻販売(収入)(713t/年)	$713\text{t/年} \times 1,200\text{円/t} = 856\text{千円/年}$

（玄米，資源米玄米）・DDGS 生産有り」のデータは最小規模でも日投入量 100t である。本報の設定において香取市内で供給できるバイオ燃料原料米は 7.4t/日であるため，運転に要するユーティリティ（電力・スチーム・水）および副原料はすべて 1/14 として算出した。以上より，バイオエタノール変換施設に投入される玄米（水分 15%）は 2,447t/年，生成物はエタノール 750kL/年，発酵副産物 981t/年となった。副原料（薬剤）の価格は，規格外小麦を原料としたプラント操業コストの試算例（エタノール生成規模 30,000kL/年，稼働率 40%の条件で 65,000 千円/年）（十勝圏振興機構，2005）をもとに，エタノール生成規模 750kL/年（稼働率 90%）として算出した。また，人件費は JA 全農のバイオエタノール製造所の作業員体系をもとに 1 班 3 名×4 班の 3 交代制とし，1 班当たり 250 日/年の勤務として算出した。変換施設の点検補修費は，十勝圏振興機構（2005）より，建設費の 1.5%とした。生成されるエタノールは 100 円/L で，発酵副産物を飼料原料として 10 千円/t で販売できるものとした。以上より算出したシナリオ 5・計画のステージ③に係る初期コスト，廃棄コスト，ランニングコスト，収入を Table 40 に示す。

(4) 生成物の輸送・貯蔵ステージおよび生成物の利用ステージ

シナリオ 5・実態では，バイオマス由来の生成物はないため，本ステージでのコスト・収入は計上しない。計画で生成物されたバイオエタノールの貯蔵やガソリン混合，流通販売については，シナリオ作成に十分な見解が得られなかった。また，発酵副産物の利用についても実証試験が進められている段階であり，今後の課題とした。

c 算出結果

シナリオ 5 における実態と計画のコストおよび収入の算出結果を Table 41 にまとめた。シナリオ 5 では計画のステージ①と③におけるコストが非常に大きい。ステージ①では，バイオ燃料原料米の栽培に係る材料費や機器，ユーティリティ（農地整備を含む）に係るコストが約 39%，労働費が 31%を占めた。ステージ③におけるコスト・収入については不確定要素が多いため議論は難しいが，バイオ燃料の原料となる資源作物の低コスト生産が大きな課題であることが指摘できる。

Table 40 シナリオ 5・計画の③変換ステージにおけるコストと収入
Cost and income in ③ Biomass conversion stage of Plan Scenario 5

算出項目	データ名	算出結果
初期コスト (円/年)	バイオエタノール変換施設建設費	1,600,000 千円 ÷ 15 年 = 106,667 千円/年
廃棄コスト (円/年)	バイオエタノール変換施設廃棄費	(1,600,000 千円 × 0.05) ÷ 20 年 = 5,333 千円/年
ランニングコスト (円/年)	人件費	12 人 × 4,500 千円/年 × (250 日/330 日) = 40,909 千円/年
	電力料金(契約電力 43kW, 電力消費量 1,016kWh/日)	基本電力料金 43kW × (1,100 円/kWh/月) × 12 ヶ月 = 568 千円/年 従量電力料金 322,929kWh/年 × 20 円/kWh = 6,459 千円/年
	主原料購入費支払(生産者へ支払)	3,870t/年 × 45 千円/t = 174,150 千円/年
	副原料購入費(薬剤: α アミラーゼ, グルコアミラーゼ, 水酸化カルシウム, 硫酸, 尿素, 水酸化ナトリウム, 酵母)	3,668 千円/年
	点検補修費(建設費の 1.5%)	1,600,000 千円 × 0.015 = 24,000 千円/年
収入(円/年)	バイオエタノール販売(750kL/年)	750kL/年 × 100 千円/kL = 75,000 千円/年
	発酵副産物販売(981t/年)	981t/年 × 10 千円/t = 9,810 千円/年

Table 41 シナリオ 5 における実態と計画のコストと収入
Cost and income in Present and Plan Scenario 5

			①バイオマスの生産(発生)	②収集・輸送・貯蔵	③バイオマス変換	④生成物の輸送・貯蔵	⑤生成物の利用	計
実態	休耕田の維持	コスト	24,289	0	0	0	0	24,289
		収入	0	0	0	0	0	0
計画	バイオ燃料原料米栽培とバイオエタノール生成	コスト	324,478	27,703	361,754	0	0	713,935
		収入	174,150	97,606	84,818	0	0	356,574

V バイオマス利活用シナリオのライフサイクルでの経済性評価

1 コスト・収入についての実態と計画の比較

各シナリオのライフサイクル（全ステージ）のコストと収入を算出した結果を Fig.18 にまとめた。実態（上図）および計画（下図）について、収入を左軸に、コスト（初期コスト、廃棄コストおよびランニングコストの合計）を右軸に示している。この図は、地域全体での経済収支の構造を理解するのに有用である。“neutral”の部分に記載していないことに注意を要する。

シナリオ1では、約500頭の乳牛ふん尿（25t/日、香取市内牛ふん尿利用可能量の26%）を対象とし、実態では堆肥を、計画ではメタン発酵により電気・熱・消化液を生成した。ライフサイクル全体での収支（収入－コスト）は、実態のケース1（3戸の酪農家が個別で堆肥化）で129百万円/年のマイナス、ケース2（1戸の酪農家が個別で堆肥化）で123百万円/年のマイナスとなった。計画では、ケース1（3戸の酪農家が共同でメタン発酵）で96百万円/年のマイナス、ケース2（1戸の酪農家が個別でメタン発酵）で95百万円/年のマイナスになり、収支の観点では赤字がそれぞれ26%、23%縮小されたことになる。Fig.18からは、ステージ③、④、⑤でのコストが、実態に比べて計画でそれぞれ小さくなっていることが読み取れる。ステージ③では、変換施設に係る初期コストと廃棄コストが実態よりも計画で高くなったが、計画では施設運転に必要な電力・熱が自給されるためにランニングコストが低くなった。ステージ④では、堆肥の輸送・散布（実態）に必要な車両数や労力が計画に比して多く、それに伴う輸送用燃料コストも高くなった。ステージ④の輸送・散布体系は、評価対象とした千葉県香取市の道路事情や圃場条件に基づいて設定しており、計画においても輸送・散布車両を大型化するなど、より効率的な輸送・散布体系を構築することにより、コスト削減の可能性がある。

シナリオ2では、母豚170～180頭規模の養豚一貫経営10戸より発生する豚ふん尿排水（除ふんなしで266t/日、香取市内豚ふん尿利用可能量の20%）を対象とし、実態では污水处理を、計画ではメタン発酵を行った。実態では収入は発生せず、豚ふん尿排水の適切な処理と化学肥料を用いた農産物栽培のために535百万円/年が費やされる結果となった。計画では、ステージ③、④、⑤での収入が発生する一方、ステージ③やステージ④でのコストが増加したため、システム全体での収支は537百万円/年のマイナスとなり、実態に比べて1.5百万円/年の赤字増となった。計画ではライフサイクルでの収支は改善されない結果となったが、計画で算出される収入のうち、ステージ③の消化液販売とステージ④の消化液輸送・散布手数料収入は、同じシナリオのステージ⑤で耕種農家がコストとして支払ったものである。計画で

は、豚ふん尿排水の活用により地域内自給肥料が生産されるため、ステージ⑤では耕種農家にとって施肥コストが削減できたことに加え、肥料購入費として地域外に支払われるコストは50%以下になった。ステージ④でのコスト削減が課題であるが、地域を単位とすれば経済性の観点から資源の循環的活用が経済性においても評価できる。

シナリオ3では、生ごみ、生活排水処理汚泥、食品加工残さの混合物10t/日を対象とした。香取市内の各バイオマス利用可能量に占める割合は、各々40%、39%、10%である。実態では焼却処理を、計画ではメタン発酵を行った。実態では収入が発生せず、焼却処理（ステージ③）と化学肥料を用いた農産物栽培（ステージ⑤）のためのコストは78百万円/年であった。計画では、ステージ③やステージ⑤におけるコストは実態に比して小さいものの、収入がコストを上回ることはなく、システム全体の収支は27百万円/年のマイナスとなった。しかし計画では、実態に比して50百万円/年の赤字が削減された。シナリオ3においても、消化液の輸送・散布体系の効率化、たとえば消化液の用水流し込みによる散布作業の簡素化などにより、車両・機器コストおよび人件費の削減が可能になり、ステージ④の収支が改善される可能性がある。なお、計画のステージ③で仮定したメタン発酵施設は10t/日規模とシナリオ1（25t/日）、2（26.56t/日）に比して小規模であるが、1施設当たりの初期コスト、廃棄コスト、ランニングコストは大きく減少せず、変換施設のスケールメリットを考慮した計画の必要性が示唆された。

シナリオ4では、規格外甘しょ（1,500t/年、発生量の17%）と地域内発生分食品加工残さ（3,917t/年、香取市内の利用可能量の90%）に加え、地域外発生分の食品加工残さ（3,917t/年）を対象とした。実態では、規格外甘しょは利用されず、食品加工残さは焼却処理される。計画では、これらをあわせた30t/日（300日/年稼働）から19.2t/日の飼料を生成した。本シナリオで仮定した金額BおよびCについては、収支において相殺されるためグラフ上では0として表している。実態では収入は発生せず、食品加工残さの適切な処理（ステージ②の収集輸送およびステージ③の焼却処理）のためのコスト（“neutral”とした分を除く）は、135百万円/年となった。計画では、コストは実態に比して増加したが、ステージ③（飼料化）での収入が大きく、システム全体の収支が170百万円/年のプラスに転換した。食品加工残さについてはシナリオ3でも対象としたが、シナリオ4では、より収益性の高い飼料への変換によりステージ③でコストを上回る収入が得られる結果となった。ただし、本シナリオで設定した高付加価値飼料価格は、ブランド豚生産者との連携によって実現した価格であり、本報で扱わなかったステージ⑤を含めた評価が今後の課題である。

シナリオ5では、資源作物の生産とバイオ燃料生産

	実態	計画
シナリオ1	乳牛ふん尿の堆肥化	乳牛ふん尿のメタン発酵
シナリオ2	豚ふん尿排水の汚水処理	豚ふん尿排水のメタン発酵
シナリオ3	生ごみ・生活廃水処理汚泥・食品加工残さの焼却	生ごみ・生活廃水処理汚泥・食品加工残さのメタン発酵
シナリオ4	規格外甘しょ・食品加工残さの焼却	規格外甘しょ・食品加工残さの飼料化
シナリオ5	休耕田の維持	休耕田での多収量米栽培とエタノール生成

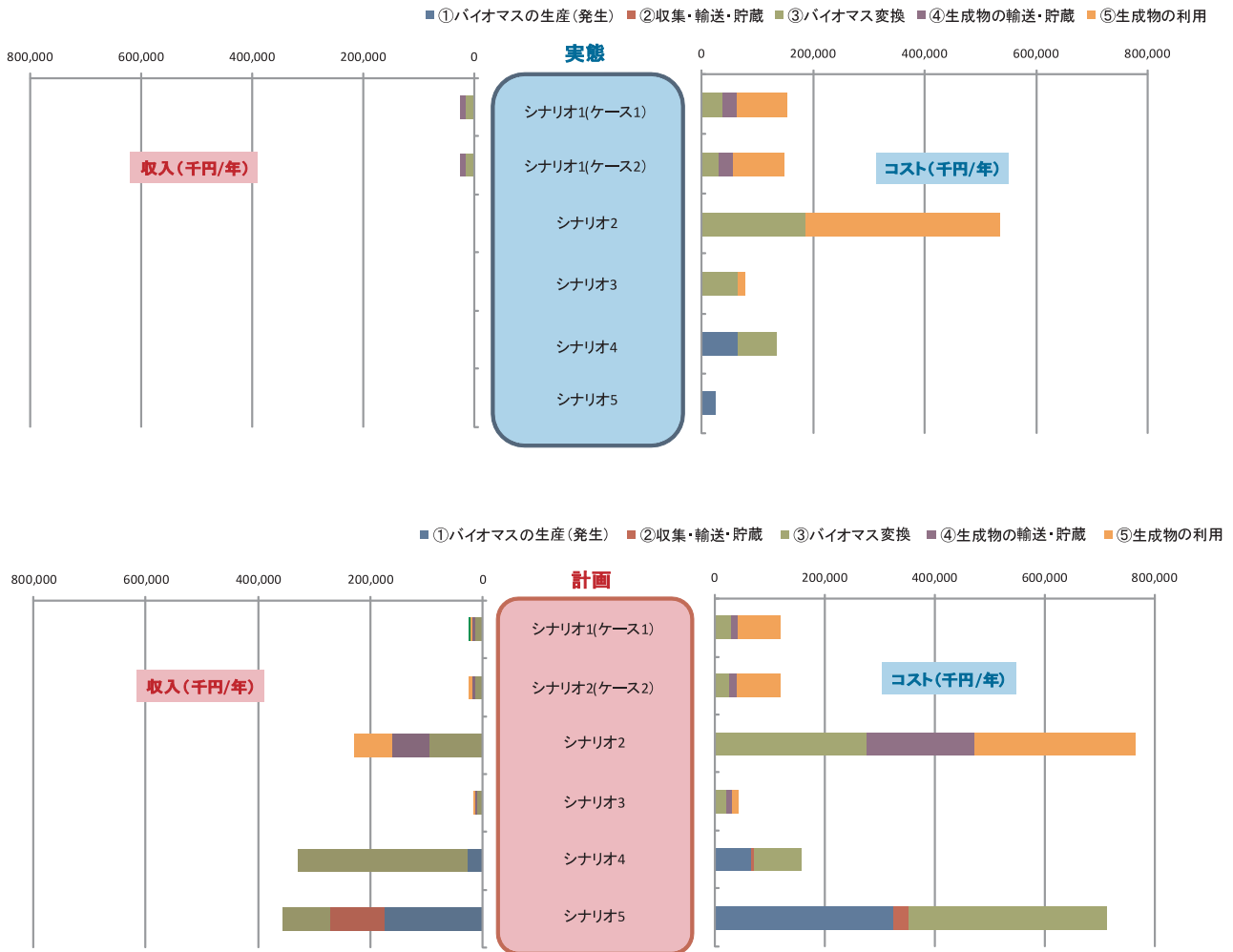


Fig.18 5シナリオにおける実態・計画のライフサイクルでのコストおよび収入
Lifecycle-basis cost and income in Present and Plan of 5 scenarios

を扱った。実態では、休耕田 266.5ha（香取市内の遊休水田の約 70%）は維持管理作業のみを行い生産しない。計画では、同じ休耕田でバイオ燃料原料米を栽培し、バイオエタノールを生成する。実態では休耕田の維持に係るコストのみであるため、コストは 24 百万円/年と小さい。一方、計画では、ステージ①での休耕田での簡易な圃場整備および多収量米栽培、ステージ③でのエタノール生成に係るコストが大きく、ステージ①、③では収入をコストが大きく上回ってしまった。そのため、システム全体の収支は 357 百万円/年のマイナスとなった。なお、シナリオ 5 については、エタノール生成やそれに伴う原料前処理に係る技術、変換工程の規模について十分な知見が得られず、今後さらなる情報収集と検討が必要である。

以上のように、「収入－コスト」の値は、シナリオ 4・計画（規格外甘しょ・食品加工残さの飼料化）を除くす

べてのシナリオでマイナス（赤字）となったが、シナリオ 1, 3 では、実態に比べて計画で赤字が縮小された。シナリオ 2 では赤字が微増となった。シナリオ 5 では、計画での「収入－コスト」は実態を大きく上回るマイナスとなった。本報では、5 対のシナリオを個別に評価した。各シナリオの対象となるバイオマスの種類および量が異なるため、シナリオ間の比較には注意が必要である。また、複数のシナリオの組み合わせにより、エネルギーや資材を地域内で効率的に活用できる可能性もある。これらの課題については、改めて別報で検討することとしたい。

2 外部経済効果の試算

バイオマス利活用システムの各ステージにおける直接的なコストおよび収入を評価することは、バイオマス利活用が持続的なビジネスとして成立するかどうかを判断

するために重要な観点である。この意味では、本報で扱った各シナリオについては高い経済性があるという評価は得られなかった。しかし、バイオマス活用推進基本計画にも述べられているように、バイオマス利活用は地球温暖化の防止や循環型社会の形成にも大きな貢献が期待されている。また、バイオマスを活用する新たな産業の発展、国際競争力の強化、農山漁村の活性化などの効果も期待されている。キャッシュフローでは直接的に表現できないこれらの副次的にもたらされる効果、すなわち外部経済効果を評価することにより、地域におけるバイオマス利活用の駆動力になると考えられる(柚山ら, 2011)。一方、バイオマス利活用システムにおける外部経済効果の定義づけや評価方法、評価項目の算出についてはさらなる議論が必要である。外部経済効果が発揮される一方で、外部不経済と見なされるものもある。たとえば、バイオマス変換により生成されたメタン発酵消化液を貯蔵したり農地に散布したりする際に発生する悪臭や、散布作業に伴う事故増加の危険性、さらには原料が廃棄物と認識されていることが多いため、作物に生育障害などが起こった場合など生成物の信用性の低下をもたらすこともありうる。これらを踏まえて総合的な評価を行っていく必要がある。

本報では試算例として、シナリオ2・計画について、外部経済効果の一部を評価した。

第1に「水質保全効果」である。シナリオ2・実態において、現時点の畜産農家に対する漸定放流水質基準が900mgN/Lであるのに対し、本報では「近い将来求められるであろう実態」として、T-Nで120mg/Lの処理水が21.43m³/日放流されると設定した。しかし、高レベルの処理を行ったとはいえ、生活廃水(原水)のT-Nが約30mg/L、一般的な河川のT-Nが約1mg/Lであることを考えると、この処理水の濃度は極めて高く、外部不経済をもたらしていると考えられる。シナリオ2・計画では消化液を液肥利用するので、この問題が解決されることから、これを外部経済効果と捉える。

実態での水処理後の放流水を1mg/Lまでに低下させるのに必要な費用が計画の採用により「代替された」と考え、「水質保全効果」を次のように金額換算した。汚水処理施設1基当たりの処理水のT-N濃度を、1mg/Lまでに低下させるのに必要な費用を見積る。このための水質浄化処理施設として、窒素除去率13%の接触酸化水路を適用する。逆算すると処理対象となる原水濃度は1.15mg/Lとなる。1日当たり21.43m³の処理対象液分のT-N量は2.572kg/日で、年間では938.6kgN/年となる。T-N濃度が1.15mg/Lの希釈水量は、816,203m³/年(上流からの希釈水を含む)である。このタイプの水質浄化施設の単位処理能力あたりの維持管理費と減価償却費として、白谷ら(2003)が整理している1m³/sの汚濁水を浄化するのに必要な1日当りの費用383,000円/(m³/s)/日を用いると、その費用は以下のように計算される。

$$383,000 \times 816,200 / 86,400 = 3,618,000 \text{ 円} = 3,618 \text{ 千円/年}$$

上記の考え方をあてはめると、シナリオ2では、10基の汚水処理施設を対象としているため、3,618千円/年×10基=36,180千円/年の「水質保全効果」が計画で得られる。

第2に「雇用創出効果」である。シナリオ2・計画では、③バイオマス変換ステージで年間8人(計画の1.5人/基と実態の0.7人/基の差である0.8人/基×10基)、また、④生成物の輸送・貯蔵ステージで50人(5人×10基)の雇用が創出される。雇用創出により支払われる賃金は152,400千円/年であり、その5%を住民税として市町村の税収増加とみなして、「雇用創出効果」を7,620千円/年と試算できた。

第3に「CO₂排出削減効果」である。Table 42に示すように、シナリオ2・実態では、購入電力により1,922,000kWh/年が使用され、化石エネルギーの代替は0である。一方、計画では、③バイオマス変換ステージで熱19,966GJ/年、電力1,182,600kWh/年が使用されるが、メタン発酵+バイオガスコジェネレーションにより熱20,028GJ/年、電力3,058,000kWh/年が生産される。これらの生産エネルギーの一部は施設内で必要な熱・電力として使用され、余剰分は外部で使用(販売)されると仮定すると、化石エネルギーの直接代替分=CO₂排出削減量と考えることができる。

各エネルギー起源のCO₂排出量を算出した結果、シナリオ2のライフサイクル全体でのCO₂収支(CO₂排出量-CO₂排出削減量)は、実態で803tCO₂/年、計画では-381tCO₂/年となり、実態に比べて計画では1,184tCO₂/年が削減できると考えられる。この結果から、CO₂単価を1,400円/tCO₂と仮定すると、「CO₂排出削減効果」は、1,658千円/年と算出された。

外部経済効果の評価額をキャッシュフローで示される収支にそのまま上乗せすることは慎重な検討が必要であるが、Fig.18において、シナリオ2の収支は、実態に比べて計画では1.5百万円/年の赤字増であったのに対し、外部経済効果として収入が45百万円/年追加されたことにより、44百万円の赤字縮小という結果となった。

以上に掲げた外部経済効果に加えて、グリーン電力証書のように化石燃料以外のエネルギーにより発電された電力に対する環境付加価値を取引することも行われている。

VI 結 言

本報では、市町村等の「地域」を対象範囲としたライフサイクルでのバイオマス利活用システムを経済性の観点から評価するための枠組みを示し、千葉県香取市を事例として評価方法を具体的に解説した。

評価に当たっては、まず、対象地域のバイオマス賦存

Table 42 シナリオ2の各ステージで消費・生産される燃料・電力・熱の量
Consumption and production of fuel, electricity and heat in each stage of Scenario 2

		化石エネルギー	①原料バイオマスの生産	②収集・輸送・貯蔵	③バイオマス変換	④生成物の輸送・貯蔵	⑤生成物の利用	CO ₂ 排出量換算* (tCO ₂ /年)
(実態) 汚水処理	エネルギー消費	軽油 (kL/年)	0	0	0	0	0	0
		電力 (kWh/年)	0	0	1,922,090	0	0	803
	エネルギー生産	軽油 (kL/年)	0	0	0	0	0	0
		電力 (kWh/年)	0	0	0	0	0	0
(計画) メタン発酵	エネルギー消費	軽油 (kL/年)	0	0	0	158	0	408
		電力 (kWh/年)	0	0	1,182,690	0	0	494
		熱 (GJ/年)	0	0	19,966	0	0	1,198
	エネルギー生産	軽油 (kL/年)	0	0	0	0	0	0
		電力 (kWh/年)	0	0	3,058,700	0	0	1,279
		熱 (GJ/年)	0	0	20,028	0	0	1,202

※「neutral」分は0と表示

*各エネルギー起源のCO₂排出係数は、環境省・経済産業省(2010)による。1) 燃料の使用(軽油): 2.58tCO₂/kL, 2) 他人から供給された電力の使用(東京電力(株)実排出係数): 0.000418tCO₂/kWh, 3) 他人から供給された熱の使用(産業用蒸気): 0.06tCO₂/GJ

量や現状での利用状況から、利活用の計画対象となるバイオマスを決定した。次に、対象バイオマスの生産(発生)から生成物の利用までを5つのステージに分け、各ステージの物質の移動や活動の流れを表す**実態**シナリオと**計画**シナリオを作成した。地域内のバイオマス利活用のライフサイクルは、この5つのステージで構成されるとともに、各ステージ内でも建設・製造、運営、廃棄の3段階のライフサイクルが設定されている。これらのライフサイクルを考慮した上で、**実態**と**計画**のシナリオ設定に沿って各ステージにおけるコストおよび収入を算出し、**実態**と**計画**における地域全体での収支構造を明らかにした。そして、**実態**と**計画**を比較し評価した。事例地域では、5対の**実態**と**計画**のシナリオを作成した。各シナリオで対象としたバイオマスは、乳牛ふん尿(シナリオ1)、豚ふん尿排水(シナリオ2)、生ごみ・生活廃水処理汚泥・食品加工残さ(シナリオ3)、規格外甘しょと食品加工残さ(シナリオ4)、休耕田で栽培されるバイオ燃料原料米(シナリオ5)である。各シナリオの**実態**は、事例地域の現状を反映したシナリオ設定とし、**計画**は、シナリオ1, 2, 3ではメタン発酵とガス発電による電熱生産および消化液の農地利用、シナリオ4では養豚用の飼料生成、シナリオ5では玄米を原料としたバイオエタノール生成を設定した。

評価の結果、規格外甘しょ・食品加工残さの飼料化シナリオ(シナリオ4・**計画**)を除くすべてのシナリオで、ライフサイクルでの収支(収入-コスト)はマイナスとなった。しかし、乳牛ふん尿対象(シナリオ1)、生ごみ・生活排水処理汚泥・食品加工残さ対象(シナリオ3)の**計画**(メタン発酵)では、収入が得られたりコストが削減されたりすることによって、**実態**に比べてライフサイクルでの赤字が縮小された。また、豚ふん尿排水のメタン発酵(シナリオ2)において、水質保全、雇用創出、

CO₂削減に関する外部経済効果を算出し加算した結果、赤字が縮小された。廃棄物系バイオマスの利活用においては、地域単位での赤字が縮小されるということは計画として意義がある。

本報で述べた評価方法は、市町村等におけるバイオマス利活用など関連施策の立案・評価の際に活用できるものである。経済性だけでなく、物質フローの観点からこのライフサイクルを追うことにより、バイオマスに関わる地域(市町村)の中での需要と供給、地域内自給率を評価することができる。また、本報の評価例では、個別のステージでの収支がプラスになる、すなわちそのステージの担い手にとっては収益が得られるシナリオも示された。システムの持続的な運営の観点からは、ステージの連携が円滑に進むために、各活動を「誰がどのように」運営するか、を各ステージの経済的収支から検討することができる。

ライフサイクルでの経済性評価は、提案されるバイオマス利活用システム導入の可否条件を判断する上で重要である。本報での算出結果そのものは、参考情報として認識いただくのが妥当である。但し、シナリオ中の仮定条件や入力データはデフォルト値として使っただけのものである。本報での算出の応用としては、補助金の活用、施設・機械等の使用年数の増減による感度解析などが考えられる。

参考文献

- 1) 朝野賢司・美濃輪智朗(2007): 日本におけるバイオエタノールの生産コストとCO₂削減コスト分析, 産業技術総合研究所バイオマス研究センターディスカッションペーパー, 2007年7月, 1-14
- 2) ベスピャトコ・リュドミラ・多田千佳・柳田高志・

- 佐賀清崇・パウティエスタ・エルマー・藤本真司・美濃輪智朗 (2009) : バイオマスタウンの現状の評価および情報提供のツールとしてのバイオマス会計の提案, 日本エネルギー学会誌, 88, 1081-1094
- 3) ベスパットコ・リュドミラ・美濃輪智朗 (2010) : バイオマス会計フォームのマニュアル, 産業技術総合研究所バイオマス研究センターバイオマスシステム技術チーム (2010年5月1日), https://unit.aist.go.jp/btrc/systemteam-kaikeihyou/systemteam_kaikeihyou.html (2011.11.2 最終確認)
 - 4) 千葉県 (2011) : ちばエコ農業情報ステーション (2011.5.6 更新), <http://www.pref.chiba.lg.jp/annou/ecojouhou/index.html> (2011.12.6 最終確認)
 - 5) 千葉県香取市 (2009) : 香取市環境基本計画, 平成21年3月, 1-126
 - 6) 畜産環境整備機構 (1998) : 家畜ふん尿処理・利用の手引き, 初版, 1-202, 畜産環境整備機構, 東京.
 - 7) 畜産環境整備機構 (2003) : 畜産環境アドバイザー養成研修会【堆肥化施設の設計・審査技術】, 1-253, 畜産環境整備機構, 東京.
 - 8) 畜産環境整備機構 (2004) : 家畜ふん尿処理施設の設計・審査技術, 初版, 17, 畜産環境整備機構, 東京.
 - 9) 畜産環境整備機構 (2005) : 家畜ふん尿処理施設・機械選定ガイドブック (堆肥化処理施設編), 86, 92 および 130-133, 畜産環境整備機構, 東京.
 - 10) 古市徹監修・有機系廃棄物資源循環システム研究会編著 (2010) : 循環型社会の廃棄物系バイオマスー利活用事業成功のためのシステム化ー, 第1版, 44-50, 環境新聞社, 東京.
 - 11) 濱井和博・豊澤健太・岡庭良安・熊谷徹 (2010) : バイオマス利活用システムの費用対効果及び温室効果ガス削減効果, 農業農村工学会資源循環研究部会論文集, 6, 131-147
 - 12) いすゞトラックステーション (2011) : トラック輸送の計数管理, <http://www.isuzu.co.jp/cv/cost/keisuu/index.html>, (2011.11.2 最終確認)
 - 13) 神奈川県 (2010) : 平成21年度 エコドライブ等実施状況調査結果, <http://www.pref.kanagawa.jp/uploaded/attachment/13376.pdf>, (2011.11.2 最終確認)
 - 14) 環境コミュニケーションズ (2002) : 小規模事業場排水処理対策全科, 小規模事業場排水対策マニュアル普及版, 5, 121-140
 - 15) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部廃棄物対策課 (2006) : 廃棄物処理施設建設工事等の入札・契約の手引き, 2006.7.18 公開, http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=8285&hou_id=7331, (2011.11.2 最終確認)
 - 16) 環境省・経済産業省 (2010) : 「温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル Ver.3 (平成22年6月)」, pp. I -1- II -228, (2011.3.11 最終確認)
 - 17) 経済産業省総合資源エネルギー調査会新エネルギー部会・電気事業分科会買取制度小委員会 (2011) : 「再生可能エネルギーの全量買取制度における詳細精度設計について」買取制度小委員会報告書 (2011.2.18 公表) http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004601/houkokusho_110218_01.pdf, (2011.11.2 最終確認)
 - 18) 熊本県鹿本町 (2002) : 鹿本町地域新エネルギービジョン策定等事業フィージビリティスタディ調査報告書, 22
 - 19) まちむら農場 (2011) : バイオガスプラントについて, 町村農場, < http://www.machimura.co.jp/gas_index.php > (2011.11.17 最終確認)
 - 20) 間野和美 (2009) : ごみ焼却施設における触媒フィルターによる排ガス処理コスト等の削減に関する事例, 環境技術会誌, 134, 89-92
 - 21) 森本英嗣・土井和之・星野敏・柚山義人・九鬼康彰 (2009) : バイオマス利活用総合評価モデルの開発とその適用ーバイオマスタウン構想公表38市町村を対象としてー, 農村計画学会誌, 27, 論文特集号, 317-322
 - 22) 農林水産バイオリサイクル研究「システム実用化千葉ユニット」(2007) : アグリ・バイオマスタウン構築へのプロローグ, 1-163, 農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究所, 茨城.
 - 23) 農林水産省大臣官房統計部 (2010) : 平成21年農業物価指数 (2010.6.22 公表), 1-24
 - 24) 農林水産技術情報協会 (1999) : エネルギー管理型農業生産システム開発調査(平成10年度エネルギー管理型農業生産システム開発調査委託事業報告書, 平成11年3月), 23-77
 - 25) 大久保天・秀島好昭・主藤祐功・近江谷和彦 (2010) : 乳牛ふん尿主体のバイオメタン製造プラント導入による温室効果ガス排出削減とその経営収支に関する分析, 農業農村工学会論文集, 270, 43-55
 - 26) 清水夏樹 (2005) : 有機性資源の利活用を促進するための支援策ー牛ふん尿の堆肥としての利用を例としてー, 農工研技報, 203, 47-56
 - 27) 清水夏樹・柚山義人 (2010) : エネルギー収支・経済性・環境負荷からみたバイオマス利活用シナリオの評価, 農村計画学会誌, 28, 論文特集号, 243-248
 - 28) 清水夏樹 (2011a) : バイオマス賦存量の算定方法, バイオマスタウンアドバイザー育成テキスト (農林水産省平成22年度国産バイオ燃料等普及促進事業) 第5章2, 375-394, 日本有機資源協会, 東京.
 - 29) 清水夏樹 (2011b) : エネルギーー農作物の栽培から収穫に要するエネルギーの実態と課題, 環境技術, 40, 345-350
 - 30) 白谷栄作・吉永育生・人見忠良 (2003) : 代替法による農地の窒素浄化・汚濁機能の経済勘定の試み,

- ワークショップ「農業・農村地域の持つ多面的機能の評価手法」, 農業工学研究所・農林交流センター, 9
- 31) タニ工業株式会社 (2011): タニバッグ事業部, <http://www.tani-k.jp/bag/bag.html>, (2011.10.24 最終確認)
- 32) 十勝圏振興機構 (2005): 北海道十勝地域の規格外農産物及び農産加工残渣物利用におけるバイオエタノール変換システムに関する事業化可能性調査報告書 (平成 17 年 3 月), 80
- 33) 東京大学生産技術研究所・いであ株式会社 (2010): バイオマス利活用システム設計・評価ソフトウェア基本版概要 (第 150 回農林交流センターワークショップ「バイオマスタウン設計・評価支援ツールの開発」テキスト『バイオマス利活用システム設計・評価ソフトウェア』, 1-12, 筑波農林交流センター・農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究所
- 34) 上田達己 (2009): 国産バイオエネルギー生産システムの効率性・コストに関する予備的調査, 研究調査室小論集, 農研機構研究調査チーム, 12, 1-54
- 35) 柚山義人・生村隆司・小原章彦・小林久・中村真人 (2006): バイオマス再資源化技術の性能・コスト評価, 農工研技報, 204, 61-103
- 36) 柚山義人・山岡賢・中村真人・清水夏樹 (2010): ライフサイクル的にみたバイオマス利活用評価の論点, 農土論集, 266, 71-76
- 37) 柚山義人・清水夏樹・山岡賢・中村真人 (2011): 外部経済効果の積極的評価によるバイオマス利活用の推進, 農業農村工学会資源循環研究部会論文集, 7, 67-79
- 38) 全国農業会議所 (2007): 2005 年遊休農地対策データベース (2007.11.12 参照)

Lifecycle-basis Evaluation of Profitability on the Biomass Utilization System

SHIMIZU Natsuki, YUYAMA Yoshito, NAKAMURA Masato and YAMAOKA Masaru

Summary

Biomass utilization system is consisted of 5 process stages of 1) production or generation of feedstock biomass, 2) collection, transportation and storage of feedstock biomass, 3) conversion of the feedstock biomass to demand-oriented energy and material (products), 4) storage, transportation of the products and 5) use of the products. Each of them has 3 time stages of 1) initial installation/construction, 2) running (operation) and 3) disposal. This paper tried to show the methodology of calculating lifecycle cost of designed biomass utilization system to contribute to the Municipal Biomass Utilization Promotion Plan under the Master Plan for the Promotion of Biomass Utilization.

To show the concrete procedures of evaluation, Katori city of Chiba prefecture was chosen as a representative of suburban agricultural and livestock industrial area. Five scenarios of biomass utilization system were designed that represent both present condition and planned condition of biomass utilization. Each process stage is considered from both needed hardware and human activities. Scenarios involved methane fermentation, composting, animal feeding and so on. Externality was counted in one scenario as an example, because adequate evaluation of externality drives promotion of biomass utilization.

The evaluation results clarified the structure of cost and income for designed biomass utilization scenarios and will provide ideas to choose suitable biomass utilization plan in terms of profitability. The lifecycle-basis evaluation is important to ensure the sustainability of biomass utilization system. The person in charge of preparing the Municipal Biomass Utilization Promotion Plan can apply this methodology for their own plans.

Keywords: biomass utilization, lifecycle, running cost, scenario, externality, methane fermentation

〔農工研技報 212〕
〔97 ~ 126, 2012〕

バイオマス利活用システムのライフサイクルを対象とした エネルギー収支の評価

清水夏樹*・柚山義人*・中村真人*・山岡 賢*

目次

I 緒言	97	4 規格外甘しょ・食品加工残さ 対象シナリオ (シナリオ 4)	115
II 評価の方法	98	5 休耕田対象シナリオ (シナリオ 5)	118
1 対象とするバイオマスの決定	98	IV バイオマス利活用シナリオのライフサイクルでの エネルギー収支の評価	121
2 ライフサイクル評価の考え方	98	1 エネルギー収支についての実態・ 計画の比較	121
3 実態シナリオと計画シナリオの作成	99	2 エネルギー収支の評価における課題	123
4 評価のための算出項目	100	V 結言	124
III バイオマス利活用システムにおける エネルギー消費とエネルギー生産	103	参考文献	125
1 乳牛ふん尿対象シナリオ (シナリオ 1)	103	Summary	126
2 豚ふん尿排水対象シナリオ (シナリオ 2)	108		
3 生ごみ・生活廃水処理汚泥・食品加工残さ 対象シナリオ (シナリオ 3)	112		

I 緒言

バイオマス活用推進基本法 (2009 年 6 月制定) に基づき 2010 年 12 月に閣議決定されたバイオマス活用推進基本計画 (以下, 基本計画) では, バイオマスの活用の推進に当たっての基本的視点として「総合的, 一体的かつ効果的な推進」, 「地球温暖化の防止」, 「循環型社会の形成」など 11 の項目が掲げられ, そのうち 7 項目でエネルギーとしての利用に言及している。エネルギーの安定的な供給確保への期待が高まる中, 再生可能エネルギー買取制度も具体化しつつあり, バイオマス由来のエネルギーも注目されている。また, バイオマスは農山村に多く存在していることから, 未利用資源の活用による新たな産業育成と経済活性化が期待される。

しかし, バイオマス利活用のライフサイクルの中で消費されるエネルギーが, バイオマス変換により生成されるエネルギーを上回ると, 環境への負荷を増大させることになる。バイオマスの持続的な利活用のためには, バイオマス利活用システム全体を通して, 化石エネルギーの使用量と環境負荷量をできるだけ小さくする計画が策

定・実施されることが求められる。そこで, 本報では, 都道府県, 市町村単位で策定が求められているバイオマス活用推進計画を念頭におき, 地域におけるバイオマス利活用システムにおける化石エネルギーの消費とバイオマス変換によるエネルギーの生産をライフサイクルで評価するための枠組みを示し, 関東都市近郊農業地域を想定した評価事例を報告する。

本報で行ったバイオマス利活用を表現するシナリオの設定およびそれに基づく物質の移動や活動の流れの把握は, LCA (ライフサイクルアセスメント) 手法におけるインベントリ分析と類似の作業である。メタン発酵やバイオエタノール生産など個別の変換技術を採り上げ, ライフサイクルを対象としたインベントリを作成してエネルギー収支を分析したものに, 大日方ら (2005), 中山ら (2006), 大村ら (2005), 佐賀ら (2007) がある。このうち, 大日方ら (2005) と中山ら (2006) では, 牛ふん尿を主原料とした共同利用型のバイオガスプラントを対象として, プラント運転に必要なエネルギーの自給を念頭に置いた変換施設の効率的な運転とエネルギー生産の可能性を検討した。これらにおけるエネルギー消費は, プラントの運転に係るエネルギー (本報でのランニングエネルギー消費に該当) のみに着目している。本報でも家畜ふん尿等を原料としたバイオガスプラントを中心に扱い, プラントの運転だけでなく, 初期投入および廃棄に係るエネルギーを評価に含めた。大村ら (2005)

* 資源循環工学研究領域資源循環システム担当

平成 23 年 12 月 15 日受理

キーワード: バイオマス利活用, ライフサイクル, 化石エネルギー消費, メタン発酵消化液, 化学肥料代替

は、バイオガスプラントから余剰ガスの利用（コジェネレーション）・精製・輸送・貯蔵に必要な施設についても、素材製造段階からのインベントリを作成し、経済収支および環境負荷量の評価を試みている。本報を踏まえ、今後の幅広いメタン発酵技術の適用のために参考としたい研究の一つである。佐賀ら（2007）では、玄米および稲わら・もみ殻を生産しバイオエタノールを生産するシステムのエネルギー収支を、エタノール・電力併産とエタノール優先の2つのシナリオを設定して分析しており、本報では農業生産プロセスにおける間接エネルギーの算出において、この研究を参考とした。

菱沼ら（2008）では、乳牛ふん尿を対象としてメタン発酵、堆肥化、固液分離による堆肥+液肥化の3つの技術による変換段階およびメタン発酵消化液、堆肥、液肥の農地への散布段階について、施設、機械の初期投入も含めた環境負荷量を算出し、LCA手法を用いて環境影響を評価している。

これらの既存の研究を踏まえ、本報では、バイオマス活用推進計画の単位となる市町村等の「地域」に着目し、「地域」の空間・社会の中で利活用される様々なバイオマスを対象とした評価を試みた。そして、バイオマス活用計画を実現した場合に、現状（実態）に比べてエネルギー収支がどの程度改善されるかを推計することを目的とした。そのため、事例地域の実態をあらかじめ調査し、バイオマスに係る生産・輸送・変換等のシナリオ条件を可能な限り実測値に基づいて設計した。たとえば、上記の佐賀ら（2007）で扱った玄米を生産してバイオエタノールを生産するシナリオ（後述のシナリオ5）においては、調査対象地域で多収量米の栽培試験を行ったデータを用いた。また、メタン発酵消化液の農地への施用に係る圃場までの輸送距離や車両、散布機械の規模などについても、事例地域の実態を反映して条件を設定した。本報で記載したデータを参考に、読者が入力データを各地域の実情に即したのものや、より信頼性の高いものに更新することによって、評価の精度を上げることができる。

バイオマスの輸送、変換などの各局面、あるいは機械製造や廃棄などの各段階についての個別のインベントリは、既往の研究で紹介したように様々な方面で整備されつつある。しかし、地域に賦存する多様なバイオマスの利用におけるライフサイクルでのエネルギー消費やエネルギー生産を評価するためには、多くのデータの収集とインベントリ作成のための専門的な知識を要する。本報では、主として市町村でバイオマス関連政策の立案・評価を行う担当者、バイオマス利活用事業を総合的に手がける民間事業者をユーザーと考え、ユーザーが自ら評価を行えるよう、データ入手や計算の方法の平易さを心がけた。また、バイオマス利活用システムにおける各活動のエネルギー消費やエネルギー生産を把握するために収集すべきデータや評価項目の算出方法について、できる

だけ詳細に記述し、多様な例題を示すため、5対のシナリオを示した。バイオマス利活用システムを評価対象として表現するためのシナリオの設定方法については、経済性（コストと収入）についての評価を行った報告（清水ら、2012）で詳述しているので、そちらを参照していただきたい。バイオマス活用推進計画の策定においては、バイオマス活用の進捗状況や取組効果の把握、とくに、エネルギーやバイオマス変換製品の地域内自給率の算出が求められる。本報で示すエネルギー消費とエネルギー生産の評価は、計画の妥当性を判断する一助とすることができる。

本研究は、農林水産省の委託プロジェクト研究「地域活性化のためのバイオマス利用技術の開発（バイオマス利用シナリオの構築・実証・評価）（Cm3100）」（2007～2011年度）によるものである。本研究の実施にあたっては、千葉県香取市経済部農政課、香取市山田区事務所まちづくり課、農事組合法人和郷園、東京大学生産技術研究所他関係各機関の多くの方にご協力いただいた。ここに感謝の意を表する。

II 評価の方法

1 対象とするバイオマスの決定

本報で述べるバイオマス利活用システムの評価の手順は、経済性の評価（清水ら、2012）とほぼ同じである。ここでは、関東地方の都市近郊農業地域である千葉県香取市の事例に基づき、手順を述べる。

まず、市町村等の「地域」を範囲として、バイオマス賦存量や現状での利用状況をもとに対象とするバイオマスを決定する（清水、2011）。

事例地域の千葉県香取市のバイオマス賦存量および現在の利用状況を調査した結果（「清水ら（2012）のFig.1」）、地域での賦存量が多く、また利用があまり進んでいないバイオマスとして、家畜ふん尿、生ごみ、食品加工残さ、農作物残さ（稲わら、もみ殻、麦わら・野菜収穫残さ）等が抽出された。また、香取市におけるバイオマス活用の方向を示した「香取市バイオマスタウン構想」からは、家畜ふん尿や生ごみの高品質堆肥化・地域内農地への還元、農作物残さのうち食用甘しょ等の規格外品の利用が求められていることがわかった。

2 ライフサイクル評価の考え方

次に、対象としたバイオマスについて、輸送、変換、利用などのライフサイクルでの物質の移動や活動の流れを把握する。バイオマスの利活用システムのライフサイクルは、以下に示す「ステージ」と「段階」から構成される。

a バイオマス利活用システムのステージ

バイオマス利活用システムのライフサイクルを、「清

水ら（2012）の Table 1」に示すような5つの局面，すなわち①バイオマスの生産（発生），②収集・輸送・貯蔵，③バイオマスの変換，④生成物の輸送・貯蔵，⑤生成物の利用が繋がったものと捉える。これらの個々の局面を「ステージ」と呼ぶ。

そして，本報では，これらのステージの連携全体を評価対象とする。LCA手法では，「システム境界」を設定するが，本報における対象バイオマスとそれに関連する活動の各ステージの①～⑤が「システム境界内」に該当する。ただし，各ステージで既存の産業や施設利用が見込まれるものについては，「評価対象外」とした。

b 各ステージにおけるライフサイクル

個々のステージについても，3つの段階から構成されるライフサイクルを考慮する。第1は，各ステージの施設や機器装置等の建設・製造の段階，第2は運営段階，第3は廃棄の段階である。第1と第3段階では建設製造時あるいは廃棄時の1回のみエネルギー投入を対象とする。第2の段階では，原材料確保や運転のためのエネルギー消費（ランニングエネルギー消費）を対象とするとともに，③バイオマスの変換ステージでは，化石エネルギーを代替できるエネルギーや製品が生成される場合，エネルギー生産として計上する。各ステージでは，活動の時間的単位が異なるほか，施設や機器の種類や規模に基づく使用年数（耐用年数），更新時期が異なる。そのため第2の運営段階では，1年を単位とした。第1と第3の段階については，計上されるエネルギー消費を使用年数で割り，1年当たりのエネルギー消費とした。

3 実態シナリオと計画シナリオの作成

評価は，実態シナリオと計画シナリオの比較である。評価対象とした地域のニーズや社会受容性，バイオマス利活用システムを支える活動（担い手や組織の体制，運営方法，組織間連携等）（清水・柚山，2010および清水，2005）を考慮して，対象とするバイオマスの活用計画を設計する（柚山ら，2010）。計画シナリオとは，このバイオマス活用計画の各ステージの条件をシナリオとして表現したものである。そして，計画シナリオと同量・同質の原料バイオマスが，現状ではどのように処理・利用されているかを計画シナリオの各ステージに対応して（計画シナリオと対になるように）把握したものが，実態シナリオである。以下，計画シナリオを「計画」，実態シナリオを「実態」と表記する。実態と計画が変わらない部分については，“neutral”と考え，比較評価においては差がないとする。

事例地域の千葉県香取市では，乳牛ふん尿，豚ふん尿排水，生ごみ・生活廃水処理汚泥・食品加工残さ，規格外甘しょの活用および休耕田での資源作物栽培を想定した5つのバイオマス活用計画を設計した。そして，各活用計画について，上記2に挙げた5つのステージの条

件を設定して，5つの計画を作成し，対になる5つの実態を作成した（「清水ら（2012）の Table 3」）。各シナリオの詳細は清水ら（2012）と共通であるため，ここでは概略を述べる。

シナリオ1は，約500頭の乳牛ふん尿9,125t/年を対象としたシナリオである。ふん尿の処理方法が酪農経営の規模や使用形態によって異なるため，経営規模（飼養頭数）と戸数について「ケース1」（100～200頭規模を飼養する酪農家3戸）と「ケース2」（約500頭を飼養する酪農家1戸）を設定した。実態・計画とも，システム全体での③バイオマスの変換ステージにおける原料投入量は25t/日と設定し，変換技術は，実態では堆肥化，計画ではメタン発酵およびコジェネレーションとした。実態では，酪農家（「ケース1」では3戸，「ケース2」では1戸）で発生するふん尿は輸送されることなく，各戸に配置された施設（「ケース1」では8.3t/日規模，「ケース2」では25t/日規模）で堆肥化され，生成された堆肥は各酪農家から地域内の農地に輸送・散布される。地域内の農地では，不足する窒素成分を化学肥料で補って農作物を栽培する。計画では，②収集・輸送・貯蔵ステージの条件が「ケース1」と「ケース2」で異なる。「ケース1」では各酪農家がふん尿をメタン発酵施設まで輸送するが，「ケース2」では輸送は行わない。両ケースとも③バイオマスの変換ステージでは25t/日規模のメタン発酵・コジェネレーション施設で変換し，生成したメタン発酵消化液は地域内の農地に輸送・散布される。地域内の農地の一部では，メタン発酵消化液で窒素化学肥料を100%代替することができる。またコジェネレーションにより生成された電気・熱は，変換施設で必要な電力・熱をまかない，余剰分は販売する。

シナリオ2は，養豚から発生する豚ふん尿と畜舎等の洗浄排水の混合物を対象としたシナリオである。母豚170～180頭規模の一貫経営養豚農家10戸を想定し，発生する豚ふん尿排水をシステム全体で96,738t/年とした。実態では，豚ふん尿排水は各養豚農家において固液分離され，固体分は堆肥化（ただし評価対象外），液体分は浄化処理装置で処理され，処理水は河川放流される。計画との対比のため，計画において消化液を施用する面積と同じ面積で化学肥料を用いた農作物栽培を行う。計画では，豚ふん尿排水を各養豚農家において固液分離後，メタン発酵する。生成したバイオガスをコジェネレーションに利用して得た電気・熱は，変換施設内で利用するとともに，余剰電力は販売する。固体分は堆肥化（ただし評価対象外），消化液は，地域内の農地に輸送・散布して，作物栽培の基肥として利用する。水田では，消化液で窒素化学肥料を100%代替することができる。

シナリオ3は，生ごみ（家庭系＋事業系＋給食残さ含む）（5.26t/日），生活廃水処理汚泥（3.55t/日），食品加工残さ（1.19t/日）の3種のバイオマス（合計10t/日）を対象としたシナリオである。実態では，これらの原料

は、業者が収集輸送し、1カ所の焼却施設において焼却・焼却灰の処分を行う。**計画**では、同量の生ごみ・生活廃水処理汚泥・食品加工残さを業者が収集輸送し、1カ所の変換施設（メタン発酵・コジェネレーション施設）において破碎処理・固液分離後、メタン発酵する。メタン発酵で生成したバイオガスをコジェネレーションに利用して得た電気・熱は、変換施設内で利用するとともに、余剰分は販売する。同時に生成される消化液は、地域内の農地に輸送・散布して、作物栽培の基肥として利用する。水田では、消化液で窒素化学肥料を100%代替することができる。

シナリオ4は、香取市内で生産量の多い甘しょの規格外品を対象としたシナリオである。規格外甘しょのみでは活用しにくいいため、併せて食品加工残さを活用することとした。**実態**では、地域内で発生する食品加工残さ(3,917t/年)を収集輸送し、既存の焼却施設において焼却・焼却灰の処分を行う。青果用甘しょ生産に伴って発生する規格外甘しょは、収集せずに全量を畑に鋤込む。**計画**では、食品加工残さと規格外甘しょの混合原料を飼料化するシナリオとした。飼料化に当たり、規格外甘しょとの混合比率を考慮し、地域内で発生する食品加工残さに加えて、地域外から食品加工残さ(3,283t/年)を輸送することとした。地域外から輸送される食品加工残さは実態シナリオでは地域外で焼却処分されるが、これについては評価対象外としてエネルギー消費を算出しない。地域内外から収集輸送した食品加工残さを、1カ所の飼料化工場において規格外甘しょ(1,500t/年)を合わせて乾燥・発酵し、栄養補助添加物を混合して養豚用の高付加価値飼料に変換し、販売する。

シナリオ5は、香取市内の休耕水田266.5haを対象としたシナリオである。**実態**では、休耕水田266.5haに対し、食用生産への復帰を前提に最低限の維持(耕うん1回/年、畦畔の除草4回/年)を行う。**実態**は、生産物はなくステージ①のみのシナリオである。**計画**では、生産者が休耕水田266.5haのうち、「活用可能性」が「可能」の231.9haに簡易な基盤整備を行い、「活用可能性」

が「可能」の34.6haは追加的な整備をせずに、資源作物(バイオ燃料原料米)を栽培し、生産された米粉玄米(3,870t/年)を乾燥・調製(粉すり)して、変換施設で粗玄米(2,448t/年)からバイオエタノール(750kL/年)を生成する。エタノール蒸留残さ(981t/年)は飼料原料として販売する。

4 評価のための算出項目

シナリオに基づき、バイオマスの変換や利用などの各ステージを維持するための物質・活動の投入に伴うエネルギー消費を把握するとともに、ライフサイクル全体でのエネルギー消費とエネルギー生産を算出する。エネルギー消費とエネルギー生産を算出する際の基本的な単位はMJ/年である。**Table 1**に算出項目、入力データの例を示す。エネルギー収支は、エネルギー生産からエネルギー消費をひいて求める。

入力データの中で示されている原単位については、南齋ら(2010)の産業連関表による環境負荷原単位(以下、3EIDと表記)の2005年表・生産者価格ベースの(I-A)⁻¹型を用いた。3EIDは、日本の産業連関表(生産活動の各部門間の経済的なつながりを年間の取引額で表現した行列形式の統計表)を用いて、各部門の単位生産活動に伴い直接間接的に発生する環境負荷量を示した数値である。環境負荷原単位は、エネルギー消費量、CO₂排出量、NO_x排出量、SO_x排出量、SPM排出量が示されている。本報ではこのうちエネルギー消費量の原単位を用いた。この原単位に製品や素材の価格を乗じることで、製品や素材の生産に伴うエネルギーが求められる。参照した2005年生産者価格に基づく原単位表は403部門に分かれており、エネルギーを算出したい製品や素材に最も近い部門の原単位を用いた。

Table 2に、本報で用いた3EIDの値をMJ/円に換算(3EID原表はGJ/百万円で表記)したものを示す。

本報で収集した価格データは、生産者価格と購入者価格が混在している。本来は購入者価格に統一した上で、生産者価格ベースの原単位に流通・販売段階での負荷を

Table 1 各ステージでのエネルギー消費とエネルギー生産の算出のための項目と入力データ
Index and data for calculating energy consumption and production in each stage

段階	算出項目	入力データ例
1 (建設・製造)	初期投入エネルギー (MJ/使用年数)	建設費(建築土木)または建設費(設備機器)、使用年数、原単位
		車両・機器購入費、使用年数、原単位
2 (運営)	ランニングエネルギー消費 (MJ/年)	(直接エネルギー)活動に伴い使用される電力、熱、化石燃料の量、各燃料等の発熱量およびWell-to-Tank ^{*1} でのエネルギー消費量
		(間接エネルギー)資材調達、保守点検、事務、労務、廃棄委託等に対する支払額(円/年)、原単位
	エネルギー生産 (MJ/年)	バイオマスを原料として生成された電力、ガス、化石代替燃料等の量、発熱量、または製品が代替する化石エネルギー
3 (廃棄)	廃棄エネルギー (MJ/使用年数)	初期投入エネルギーの5%(建築土木)、初期投入エネルギーの3%(設備機器および車両・機器等)、使用年数

*1 一次エネルギーの採掘(well)から燃料タンクに充填される(tank)まで

Table 2 3EID によるエネルギー原単位
Embodied energy intensity data from 3EID

部門名	原単位 (MJ/円)	原単位を用いたシナリオ	該当部門の原単位を用いた項目名
11 種苗	0.0223	5	種籾
21 農業サービス	0.0455	1, 2, 3, 4, 5	堆肥化施設管理運営, 汚水処理施設管理運営, メタン発酵施設管理運営, 堆肥および消化液輸送・散布作業, 飼料化施設管理運営, バイオ燃料原料米生産費の土地改良及び水利費由来, 賃借料及び料金由来, 籾乾燥調製施設運転
69 飼料	0.0420	4, 5	(代替: 甘しょ混合飼料, 発酵副産物)
70 有機質肥料	0.0406	5	バイオ燃料原料米その他の材料(育苗用培土)
104 化学肥料	0.1232	1, 2, 3	普通化成肥料, (代替: 堆肥, 消化液)
109 その他の無機化学工業製品	0.1499	2, 3, 4	汚水処理施設薬剤(無機系凝集剤, 苛性ソーダ, メタノール), 活性炭
119 その他の有機化学工業製品	0.1164	5	バイオエタノール変換施設運転作業
126 医薬品	0.0378	4, 5	飼料栄養補助添加物, バイオエタノール副原料
132 農薬	0.1054	5	殺菌剤・消毒剤等薬剤
138 プラスチック製品	0.0579	1	フレコンバッグ
157 その他の窯業・土石製品	0.0813	1, 2, 3, 4	脱硫剤, 消石灰
195 冷凍機・温湿調整装置	0.0409	4	保冷装置, 貯蔵庫
196 ポンプ及び圧縮機	0.0041	2	ポンプ類
204 農業用機械	0.0484	1, 2, 3	堆肥化施設(設備機器), メタン発酵・コジェネ施設(設備機器), 堆肥散布機, 消化液散布機, 固液分離装置, 曝気装置, 液中膜ユニット
223 電気計測器	0.00198	2	汚水処理施設付属機器
247 トラック・バス・その他の自動車	0.0520	1, 2, 3, 4	クレーン付きトラック, 堆肥散布機・消化液輸送用トラック, バキューム車, 規格外甘しょ輸送用大型トラック
284 河川・下水道・その他の公共事業	0.0413	3, 4	焼却施設建設
289 その他の土木建設	0.0428	1, 2, 3, 4, 5	堆肥化施設(建築土木)建設, おがくず貯蔵施設建設, メタン発酵施設(建築土木)建設, 汚水処理施設(建築土木)建設, 飼料化施設建設, バイオエタノール変換施設建設
297 廃棄物処理(公営)	0.0583	3, 4	焼却施設保守点検, 焼却灰搬出・処分
298 廃棄物処理(産業)	0.0345	1	牛ふん尿輸送作業, 食品加工残さ輸送作業
312 道路貨物輸送(除自家輸送)	0.0528	4	規格外甘しょ輸送作業, 玄米輸送作業
337 情報サービス	0.0142	5	バイオ燃料原料米生産費の生産管理費由来
344 公務(地方)	0.0185	3, 4	焼却施設管理事務
376 機械修理	0.0361	2	汚水施設機械据え付け工事および配管・電気・雑工事, 汚水処理施設機械補修

加算した購入者価格ベースの原単位を用いる必要があるが、本報では利用のしやすさを優先し、すべての計算で生産者価格ベースの原単位を用いた。購入者価格と生産者価格の差額(流通等の段階で発生するマージン等)にもとづいて算出されるエネルギー消費については、佐賀ら(2007)を参考に、流通等の段階で発生したエネルギーとみなした。

各エネルギー算出に用いる価格については、本報と並行して行った経済性の評価(清水ら, 2012)において、コストおよび収入として詳細な算出方法を示している。「清水ら(2012)のTable 4」に示す燃料消費量およびコストの算出条件も、本報と共通である。

a 初期投入エネルギー

各ステージの運営に係る施設・機器・車両の建設・製造のために投入されるエネルギーであり、施設建設費、機器購入費等に原単位を乗じて求めた。本報で用いる3EIDには、各施設の建設や機器製造などの固定資本形成に伴うエネルギー消費は含まれない。そのため、日本建築学会(2006)のように、産業連関表の付帯表(固定資本マトリクス)を用いて、各部門からの投入に伴うエネルギーを算出する方法がある。本報では、原単位の入手のしやすさと参照のしやすさを重視し、施設等の建設・整備・購入費を使用年数で割った減価償却費(円/年)を求め、それにエネルギー原単位を乗じて1年当たりの初期投入エネルギー(MJ/年)として算出した。同様の考え方で原単位を用いた評価例に菱沼ら(2008)がある。

本報では、使用年数の長短に対応するため、施設の建設費は可能な限り「建築土木」と「設備機器」に分けて計上し、それぞれ最も近いと考えられる原単位を用いている (Table 2)。

b 使用年数

経済性の評価と同様、機器や施設の構造物について個別に使用年数を定めることができない施設については、バイオマス変換施設を中心に、想定される施設が適切な管理運営が行われた場合の使用年数として「総合耐用年数」を設定した。「総合耐用年数」は、文献調査、バイオマス変換施設・関連機器メーカーや実際の利用現場へのヒアリング等により決定した。車両等の一般的な機器については、税法上の固定資産の耐用年数をもって使用年数とした。

c ランニングエネルギー消費

ランニングエネルギー消費は、年を単位として算出した。ランニングエネルギー消費は、直接エネルギーと間接エネルギーに分けられる。直接エネルギーは、機械や車両などでの化石燃料や電力の使用に伴うエネルギーであり、燃料については単位当たり発熱量 (環境省, 2011) と Well-to-Tank (一次エネルギーの採掘から燃料タンクに充填されるまで) のエネルギー消費量 (トヨタ自動車株式会社・みずほ情報総研株式会社, 2004) を合計した原単位を乗じて求めた。電力については、総合エネルギー統計 (経済産業省資源エネルギー庁総合エネルギー統計検討会事務局, 2007) より、購入電力については消費時発生熱量 (3.60MJ/kWh) と受電端投入熱量 (9.63MJ/kWh) の合計を原単位とし、自給電力については消費時発生熱量のみを原単位とした。直接エネルギーの算出に用いた発熱量および Well-to-Tank のエネルギー消費量を Table 3 に示す。

間接エネルギーは、原材料や副資材の調達・製造、保守点検や事務、労務、廃棄委託等のサービス等の提供に要する化石エネルギーとみなし、原材料や活動、提供されるサービス等の種類や投入量、金額から、3EID より引用したエネルギー原単位を用いて算出した。同一の評

価シナリオで生産する電力・熱を利用する (エネルギー自給) 場合でも、エネルギー消費とエネルギー生産はそれぞれ算出し、エネルギー収支の中で相殺される。

d エネルギー生産

③バイオマス変換ステージでは、熱や電力等の形で利用できるエネルギーが生産される。本報では、これらのエネルギーに加え、バイオマス変換ステージで生成される製品についても、化石エネルギーが代替できる場合は、その代替可能量をエネルギー生産として計上した。本報では、堆肥およびメタン発酵消化液を化学肥料の代替として、規格外甘しょ・食品加工残さを原料とした飼料およびエタノール発酵副産物を飼料の代替として、それぞれエネルギー生産を計上した。

化学肥料は、普通化成肥料 (8-8-8) とみなし、価格を農林水産省大臣官房統計部 (2010) より 108 円/kg と設定した。Table 2 から、普通化成肥料の間接エネルギーを 13.3MJ/kg と算出できる。普通化成肥料に含まれる窒素含有率は 8% であるため、窒素 1kg を施用しようとする場合、投入される間接エネルギーは 166.2MJ/kgN となる。これに基づき、堆肥中の窒素含有率を重量当たり 2.2%、肥効率 10% とすると、1t の堆肥が代替できる窒素量は 0.77kgN となり、代替可能エネルギーは 0.77kgN × 166.2MJ = 128MJ となる。また、メタン発酵消化液中の窒素含有率を重量当たり 0.282%、肥効率 50% とすると、1t の消化液が代替できる窒素量は 1.4kgN となり、代替可能エネルギーは 1.4kgN × 166.2MJ = 233MJ となる。

飼料については、バイオマス変換により生成される飼料および発酵副産物の一般的な価格および成分含有率が把握できなかった。そのため、成分は考えず、シナリオで設定した価格に 3EID の飼料部門の値を乗じて代替可能エネルギーとした。

e 廃棄エネルギー

廃棄エネルギーは、施設の構造や規模、機器の種類等によって大きく異なり、とりわけバイオマス変換に関連する施設機器についてのインベントリデータは整備され

Table 3 直接エネルギー算出に用いた発熱量および Well-to-Tank のエネルギー消費量
Calorific value and Well-to-Tank energy consumption for calculation of directly energy consumption

算出項目	A: 標準発熱量 (MJ/L)	B: Well-to-Tank のエネルギー消費量 ^{*2} (MJ/L)	本報で用いたエネルギー消費原単位 A+B (MJ/L)
軽油	37.7	2.769	40.47
ガソリン・混合油 ^{*1}	34.6	5.635	40.24
灯油	36.7	2.251	38.95
A 重油	39.1	3.531	42.63
電力	消費時発生熱量 3.6MJ/kWh	受電端投入熱量 9.63MJ/kWh	13.23MJ/kWh

*1: 混合油はガソリンと同じとした。

*2: 文献値は石油製品 1MJ 製造時におけるエネルギー消費量であるため、各燃料の低位発熱量を用いて 1L 当たりのエネルギー消費量に換算した。

ていない。本報では、一律に初期投入エネルギーに基づいて廃棄エネルギーを算出した。コスト算出（清水ら、2012）と同様、施設については建設（建築土木）に伴う初期投入エネルギーの5%と建設（設備機器）に伴う初期投入エネルギーの3%とし、その他の車両・機器等については初期投入エネルギーの3%と仮定して算出した。

Ⅲ バイオマス利活用システムにおけるエネルギー消費とエネルギー生産

1 乳牛ふん尿対象シナリオ（シナリオ1）

対象とするバイオマスの量・性状などの条件および**実態・計画**の各シナリオの詳細は、経済性の評価（清水ら、2012）と共通である。

a 各ステージにおけるエネルギー消費とエネルギー生産の算出

(1) バイオマスの生産（発生）ステージ

「ケース1」と「ケース2」では担い手の規模が異なるが、評価対象とするシステム全体でのふん尿発生量（25t/日）は同じである。また、**実態・計画**とも、初期投入・廃棄エネルギーおよびランニングエネルギー消費は“neutral”であるとした。

(2) 収集・輸送・貯蔵ステージ

「清水ら（2012）の Fig.2」に示すように、「ケース1」の**実態**では輸送は行わないため、エネルギー消費は0MJである。一方、**計画**では、中型ダンプトラックを用いて片道10kmの収集輸送を行うが、酪農家が自ら行うため、輸送用車両は酪農経営内で調達されると考える。よって、車両に係る初期投入エネルギーと廃棄エネルギーおよび輸送作業（人件費より算出）に由来する間接エネルギーは算出せず、収集輸送作業に伴う燃料由来の直接エネルギー、輸送車両（運行費より算出）に由来する間接エネルギーのみをランニングエネルギー消費として計上した。

中型ダンプトラックの走行距離（3戸×15回×51週×10km×2（往復）=45,900km/年）から計算した燃料消費量に基づき、エネルギー消費を算出した（Table

4）。間接エネルギーの算出に用いた3EID原単位については、部門名を付記している（Table 2 参照）。

「清水ら（2012）の Fig.3」に示すように、「ケース2」では、**実態・計画**とも、①バイオマスの生産（発生）ステージと③バイオマス変換ステージとが同じ場所で行われるとし、エネルギー消費は計上しない。

(3) バイオマスの変換ステージ

バイオマスの変換ステージにおいては、エネルギー消費に加え、変換により生成されたエネルギーや製品に由来するエネルギー生産を算出する。

シナリオ1・**実態**では、「ケース1」・「ケース2」とも、乳牛ふん尿は酪農経営内に設置されたロータリー式発酵槽を中心とした開放型堆肥化施設で変換され、堆肥が生成される。年間を通して原料が投入されるため、年間稼働日数は365日とした。堆肥の副資材であるおがくずは有価で購入されるが、ここでは廃棄物を利用するものと考え、エネルギーは計上しない。また、資材や製品の搬入・搬出に用いるバケットローダーは既存の酪農経営で用意されると考え、初期投入エネルギー・廃棄エネルギーを計上しない。「ケース1」（8.3t/日規模の堆肥化施設3基、変換工程フローについては、「清水ら（2012）の Fig.4」参照）について算出したエネルギー消費とエネルギー生産を Table 5 に、「ケース2」（25t/日規模の堆肥化施設1基、変換工程フローについては「清水ら（2012）の Fig.5」参照）について算出したエネルギー消費とエネルギー生産を Table 6 に示す。間接エネルギーの算出に用いた3EID原単位については、それぞれ部門名を付記している（Table 2 参照）。

シナリオ1・**計画**では、乳牛ふん尿は共同で設置（「ケース1」）または酪農経営内に設置（「ケース2」）した25t/日規模のメタン発酵・コジェネレーション施設1基で変換される。詳細な変換工程の条件は、清水ら（2012）を参照いただきたい。年間稼働日数は365日とした。同様のメタン発酵施設である山田バイオマスプラント（中村ら、2010）では、電気の保守点検のために数時間/年の停止はあるものの、365日/年の連続運転が実施されている。前処理段階で発生する夾雑物を堆肥化する装置は既存の設備を使用すると仮定し、初期投入エネルギー・廃棄エネルギーは算出しない。また堆肥化に係るランニ

Table 4 シナリオ1・計画の「ケース1」の②収集・輸送・貯蔵ステージにおけるエネルギー消費
Energy consumption in ② Biomass transportation stage of Plan Scenario 1 ("Case 1")

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー(MJ/年)	中型ダンプ2台購入	酪農経営内調達のため算出としない
廃棄エネルギー(MJ/年)	中型ダンプ2台購入	酪農経営内調達のため算出としない
ランニングエネルギー消費(MJ/年)	(直接エネルギー)燃料(軽油)由来	総走行距離 45,900km/年 ÷ (5.26km/L) = 8,726L/年 8,726L/年 × (軽油 40.47MJ/L) = 353,141MJ/年
	(間接エネルギー)輸送作業由来(車両)	344千円/年(輸送用車両運行費) × 0.0345MJ/円 (No.298 廃棄物処理(産業)) = 11,868MJ/年
	(間接エネルギー)輸送作業由来(労力)	酪農経営内調達のため算出としない

Table 5 シナリオ1・実態の「ケース1」の③バイオマス変換ステージにおけるエネルギー消費とエネルギー生産
Energy consumption and production in ③ Biomass conversion stage of Present Scenario 1 ("Case 1")

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー (MJ/年)	堆肥化施設(建築土木)3基建設	{(34,740千円 ÷ 30年) × 0.0428MJ/円(No.289 その他の土木建設)} × 3基 = 148,687MJ/年
	堆肥化施設(設備機器)3基建設	{(14,900千円 ÷ 12年) × 0.0484MJ/円(No.204 農業用機械)} × 3基 = 180,290MJ/年
	おがくず貯蔵施設3基建設	{(1,856千円 ÷ 10年) × 0.0428MJ/円(No.289 その他の土木建設)} × 3基 = 23,831MJ/年
廃棄エネルギー (MJ/年)	堆肥化施設(建築土木)3基廃棄	148,687MJ/年 × 0.05 = 7,434MJ/年
	堆肥化施設(設備機器)3基廃棄	180,290MJ/年 × 0.03 = 5,409MJ/年
	おがくず貯蔵施設3基廃棄	23,831MJ/年 × 0.05 = 1,192MJ/年
ランニングエネルギー消費 (MJ/年)	(直接エネルギー)軽油由来	(12.25L/日 × 365日 × 3基) = 13,414L/年 13,414L/年 × (軽油 40.47MJ/L) = 542,865MJ/年
	(直接エネルギー)電力由来	(120kWh/日 × 365日 × 3基) = 131,400kWh/年 131,400kWh/年 × (電力 13.23MJ/kWh) = 1,738,422MJ/年
	(間接エネルギー)施設管理運営由来	10,344千円/年(人件費 + 点検補修費) × 0.0455MJ/円(No.21 農業サービス) = 470,652MJ/年
	(間接エネルギー)副資材おがくず由来	廃棄物利用であるため、エネルギーは計上しない
エネルギー生産 (MJ/年)	堆肥(2,701t/年 × 3戸)による化学肥料代替	8,103t/年 × 128MJ/堆肥 t = 1,037,184MJ/年

Table 6 シナリオ1・実態の「ケース2」の③バイオマス変換ステージにおけるエネルギー消費とエネルギー生産
Energy consumption and production in ③ Biomass conversion stage of Present Scenario 1 ("Case 2")

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー (MJ/年)	堆肥化施設(建築土木)1基建設	(86,850千円 ÷ 30年) × 0.0428MJ/円(No.289 その他の土木建設) = 123,906MJ/年
	堆肥化施設(設備機器)1基建設	(37,250千円 ÷ 12年) × 0.0484MJ/円(No.204 農業用機械) = 150,242MJ/年
	おがくず貯蔵庫1基建設	(5,504千円 ÷ 10年) × 0.0428MJ/円(No.289 その他の土木建設) = 23,557MJ/年
廃棄エネルギー (MJ/年)	堆肥化施設(建築土木)1基廃棄	123,906MJ/年 × 0.05 = 6,195MJ/年
	堆肥化施設(設備機器)1基廃棄	150,242MJ/年 × 0.03 = 4,507MJ/年
	おがくず貯蔵庫1基廃棄	23,557MJ/年 × 0.05 = 1,178MJ/年
ランニングエネルギー消費 (MJ/年)	(直接エネルギー)軽油由来	49L/日 × 365日 = 17,885L/年 17,885L/年 × (軽油 40.47MJ/L) = 723,806MJ/年
	(直接エネルギー)電力由来	359kWh/日 × 365日 = 131,035kWh/年 131,035kWh/年 × (電力 13.23MJ/kWh) = 1,733,593MJ/年
	(間接エネルギー)施設管理運営由来	5,245千円/年(人件費 + 点検補修費) × 0.0455MJ/円(No.21 農業サービス) = 238,648MJ/年
	(間接エネルギー)副資材おがくず由来	廃棄物利用であるため、エネルギーは計上しない
エネルギー生産 (MJ/年)	堆肥(8,067t/年)による化学肥料代替	8,067t/年 × 128MJ/堆肥 t = 1,032,576MJ/年

ングエネルギー消費は、発生する夾雑物の量から、**実態**の「ケース1」で設定した堆肥化施設1基分の60%を計上した。堆肥化工程も簡素化されるため、堆肥化作業用のバケットローダーの燃料消費は、4.2L/日と設定した。夾雑物を原料とした堆肥については、化学肥料代替効果はないものとみなし、エネルギー生産は計上しない。

以上より算出した、シナリオ1・**計画**のステージ③に係る初期投入エネルギー・廃棄エネルギー・ランニングエネルギー消費とエネルギー生産を**Table 7**に示す。間接エネルギーの算出に用いた3EID原単位については、部門名を付記している(**Table 2**参照)。

(4) 生成物の輸送・貯蔵ステージ

シナリオ1・**実態**における生成物の堆肥は、フレコンバッグで輸送用車両に積載されて輸送されるとした。輸送および農地での散布の条件は、清水ら(2012)と同じである。各車両の価格から、初期投入エネルギーを算出した。また、フレコンバッグは消耗品(1組当たり18袋を使用、各1ヶ月使用で交換)とみなして、ランニングエネルギー消費を算出した。

シナリオ1・**実態**のステージ④に係る初期投入エネルギー・廃棄エネルギー・ランニングエネルギー消費を**Table 8**に示す。間接エネルギーの算出に用いた3EID原

Table 7 シナリオ1・計画の③バイオマス変換ステージにおけるエネルギー消費とエネルギー生産
Energy consumption and production in ③ Biomass conversion stage of Plan Scenario 1

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー(MJ/年)	メタン発酵施設(建築土木)1基建設	$(66,000 \text{ 千円} \div 30 \text{ 年}) \times 0.0428 \text{ MJ/円 (No.289 その他の土木建設)} = 94,160 \text{ MJ/年}$
	メタン発酵施設(設備機器)1基建設	$(168,000 \text{ 千円} \div 12 \text{ 年}) \times 0.0484 \text{ MJ/円 (No.204 農業用機械)} = 677,600 \text{ MJ/年}$
	夾雑物堆肥化施設1基建設	既存施設利用のため算出しない
廃棄エネルギー(MJ/年)	メタン発酵施設(建築土木)1基廃棄	$94,160 \text{ MJ/年} \times 0.05 = 4,708 \text{ MJ/年}$
	メタン発酵施設(設備機器)1基廃棄	$677,600 \text{ MJ/年} \times 0.03 = 20,328 \text{ MJ/年}$
	夾雑物堆肥化施設1基廃棄	既存施設利用のため算出しない
ランニングエネルギー消費(MJ/年)	(直接エネルギー)電力由来	$382 \text{ kWh/日} \times 365 \text{ 日} = 139,430 \text{ kWh/年}$ $139,430 \text{ kWh/年} \times (\text{自給電力 } 3.60 \text{ MJ/kWh}) = 501,948 \text{ MJ/年}$
	(直接エネルギー)熱由来	$4,229 \text{ MJ/日} \times 365 \text{ 日} = 1,543,585 \text{ MJ/年}$
	(直接エネルギー)堆肥化作業用バケットローダー燃料(軽油)由来	$4.2 \text{ L/日} \times 365 \text{ 日} = 1,533 \text{ L/年}$ $1,533 \text{ L/年} \times (\text{軽油 } 40.47 \text{ MJ/L}) = 62,041 \text{ MJ/年}$
	(間接エネルギー)脱硫剤由来	$538 \text{ 千円/年 (脱硫剤費)} \times 0.0813 \text{ MJ/円 (No.157 その他の窯業・土石製品)} = 43,739 \text{ MJ/年}$
	(間接エネルギー)施設管理運営由来	$10,110 \text{ 千円/年 (人件費 + 補修点検費)} \times 0.0455 \text{ MJ/円 (No.21 農業サービス)} = 460,005 \text{ MJ/年}$
エネルギー生産(MJ/年)	電力	$(1,200 \text{ kWh/日} \times 365 \text{ 日}) \times (\text{電力生産 } 3.60 \text{ MJ/kWh}) = 1,576,800 \text{ MJ/年}$
	熱	$7,020 \text{ MJ/日} \times 365 \text{ 日} = 2,562,300 \text{ MJ/年}$
	消化液(7,118t/年)による化学肥料代替	$7,118 \text{ t/年} \times 233 \text{ MJ/消化液 t} = 1,658,494 \text{ MJ/年}$
	夾雑物原料堆肥(1,132t/年)	化学肥料代替エネルギーは計上しない

Table 8 シナリオ1・実態の④生成物の輸送・貯蔵ステージにおけるエネルギー消費
Energy consumption in ④ Transportation of generated material stage of Present Scenario 1

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー(MJ/年)	3tクレーン付トラック3台購入	$\{(8,000 \text{ 千円} \div 8 \text{ 年}) \times 0.0520 \text{ MJ/円 (No.247 トラック・バス・その他の自動車)}\} \times 3 \text{ 台} = 156,000 \text{ MJ/年}$
	堆肥散布機(タンク容量1.8t)3台購入	$\{(4,148 \text{ 千円} \div 7 \text{ 年}) \times 0.0484 \text{ MJ/円 (No.204 農業用機械)}\} / 7 \text{ 年} \times 3 \text{ 台} = 86,041 \text{ MJ/年}$
	堆肥散布機輸送用トラック(2t車)3台購入	$\{(1,500 \text{ 千円} \div 8 \text{ 年}) \times 0.0520 \text{ MJ/円 (No.247 トラック・バス・その他の自動車)}\} \times 3 \text{ 台} = 29,250 \text{ MJ/年}$
廃棄エネルギー(MJ/年)	3tクレーン付トラック3台廃棄	$156,000 \text{ MJ/年} \times 0.03 = 4,680 \text{ MJ/年}$
	堆肥散布機3台	$86,041 \text{ MJ/年} \times 0.03 = 2,581 \text{ MJ/年}$
	堆肥散布機輸送用トラック(2t車)3台	$29,250 \text{ MJ/年} \times 0.03 = 878 \text{ MJ/年}$
ランニングエネルギー消費(MJ/年)	(直接エネルギー)輸送用燃料(軽油)由来	クレーン付トラック：総走行距離 18,000km/年/台 ÷ (5.26km/L) = 3,422L/年/台 $3,422 \text{ L/年} \times 3 \text{ 台} = 10,266 \text{ L/年}$ 堆肥散布機輸送用トラック：総走行距離 7,000km/年/台 ÷ (6.26km/L) = 1,118L/年/台 $1,118 \text{ L/年} \times 3 \text{ 台} = 3,354 \text{ L/年}$ $(10,266 \text{ L/年} + 3,354 \text{ L/年}) \times (\text{軽油 } 40.47 \text{ MJ/L}) = 551,201 \text{ MJ/年}$
	(直接エネルギー)堆肥散布作業用燃料(軽油)由来	堆肥散布面積(3台合計) 133ha/年 + 337ha/年 = 470ha $470 \text{ ha} \times (3.5 \text{ L/ha}) = 1,645 \text{ L/年}$ $1,645 \text{ L/年} \times (\text{軽油 } 40.47 \text{ MJ/L}) = 66,573 \text{ MJ/年}$
	(間接エネルギー)輸送・散布作業由来	3組合計： $\{14,400 \text{ 千円} + 2,109 \text{ 千円} + 563 \text{ 千円 (人件費 + 輸送用車両固定費 + 運行費)}\} \times 0.0455 \text{ MJ/円 (No.21 農業サービス)} = 776,776 \text{ MJ/年}$
	(間接エネルギー)フレコンバッグ由来	$1.3 \text{ 千円/袋} \times 18 \text{ 袋/組} \times 3 \text{ 組} \times 12 \text{ ヶ月} = 842 \text{ 千円/年}$ $842 \text{ 千円/年} \times 0.0579 \text{ MJ/円 (No.138 プラスチック製品)} = 48,752 \text{ MJ/年}$

単位については、部門名を付記している (Table 2 参照)。

シナリオ1・計画における生成物のメタン発酵消化液 (以下、消化液) は、バキューム車で輸送され、農地で消化液散布機 (各圃場まで消化液散布機輸送用車両で輸送) に移し替えられて散布されるとした。輸送および農地での散布の条件は、清水ら (2012) に詳述している。各車両の価格から初期投入エネルギーを算出した。

シナリオ1・計画のステージ④に係る初期投入エネルギー・廃棄エネルギー・ランニングエネルギー消費を Table 9 に示す。間接エネルギーの算出に用いた3EID原単位については、部門名を付記している (Table 2 参照)。

(5) 生成物の利用ステージ

シナリオ1の生成物の利用ステージでは、水田133ha、畑337haを評価対象とした。これは、実態で、堆肥を施用する面積である。肥料の施用量は、窒素成分のみを考慮して決定した。水田および畑の基肥における窒素要求量を千葉県施肥基準に基づき、水田3.5kgN/10a、畑15kgN/10a (香取市の主な栽培作物の基肥窒素要求量の平均)、また、同施肥基準に基づき堆肥施用量を、水田1t/10a、畑2t/10aとした。堆肥の窒素含有率を2.2%、肥効率を10%として、不足する窒素を補う化学肥料の投入量を算出した。作物栽培に係る施設・機械、追肥のための肥料や他の農業生産資材投入に由来するエネルギーは、初期投入エネルギー・廃棄エネルギー・ランニングエネルギー消費とも“neutral”として計上しない。また、堆肥施用による収量の増加はないものとした。以上より算出した、シナリオ1・実態のステージ⑤に係る初期投入エネルギー・廃棄エネルギーおよびランニング

エネルギー消費を Table 10 に示す。間接エネルギーの算出に用いた3EID原単位については、部門名を付記している (Table 2 参照)。

計画においても、実態と同じ面積 (水田133ha、畑337ha) を評価対象とする。これらの農地のうち、水田46.8haについては、③バイオマスの変換ステージで生産した消化液2.5t/10aを施用することにより、窒素要求量3.5kgN/10aの100%を代替できる。消化液で代替可能なエネルギーは、1ha当たり5,825MJ (25t/ha × 233MJ/消化液t) である。消化液を施用しない水田86.2haについては、基肥における窒素要求量のすべて (3.5kgN/10a) を化学肥料 (普通化成) 43.75kg/10aでまかなうことから化学肥料由来の間接エネルギーが消費される。

畑119haについては、同様に消化液5t/10aを施用し、窒素要求量15kgN/10aの47%が消化液でまかなわれる。不足する窒素量8kgN/10aは、化学肥料100kg/10aを施用して補う。消化液で代替可能なエネルギーは、1ha当たり11,650MJ (50t/ha × 233MJ/消化液t) である。また消化液を施用しない畑218haについては、基肥における窒素要求量のすべて (15kgN/10a) を化学肥料 (187.5kg/10a) でまかなうため、化学肥料由来の間接エネルギーが計上される。

窒素施用量は実態・計画とも同じであり、消化液中の速効性窒素を勘案した施肥設計下では、化学肥料 (硫安) に近い施肥効果がある (中村, 2011) ため、水田においても畑においても、消化液の施用/非施用にかかわらず収量の差はないものとした。また作物栽培に係る施設・機械の初期投入エネルギー、廃棄エネルギー、労働

Table 9 シナリオ1・計画の④生成物の輸送・貯蔵ステージにおけるエネルギー消費
Energy consumption in ④ Transportation of generated material stage of Plan Scenario 1

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー (MJ/年)	バキューム車2台購入	(10,000千円 ÷ 8年) × 0.0520MJ/円 (No.247トラック・バス・その他の自動車) = 65,000MJ/年
	消化液散布機 (タンク容量1.6t) 1台	(8,000千円 ÷ 7年) × 0.0484MJ/円 (No.204農業用機械) = 55,314MJ/年
	消化液散布機輸送用トラック (2t車) 1台	(1,500千円 ÷ 8年) × 0.0520MJ/円 (No.247トラック・バス・その他の自動車) = 9,750MJ/年
廃棄エネルギー (MJ/年)	バキューム車2台廃棄	65,000MJ/年 × 0.03 = 1,950MJ/年
	消化液散布機1台廃棄	55,314MJ/年 × 0.03 = 1,659MJ/年
	消化液散布機輸送用トラック (2t車) 1台廃棄	9,750MJ/年 × 0.03 = 293MJ/年
ランニングエネルギー消費 (MJ/年)	(直接エネルギー) 輸送用燃料 (軽油) 由来	バキューム車: 総走行距離 39,720km/年 ÷ (5.26km/L) = 7,551L/年 消化液散布機輸送用トラック: 総走行距離 6,620km/年 ÷ (6.26km/L) = 1,058L/年 (7,551L/年 + 1,058L/年) = 8,609L/年 8,609L/年 × (軽油 40.47MJ/L) = 348,406MJ/年
	(直接エネルギー) 消化液散布作業用燃料 (軽油) 由来	消化液散布面積 46.8ha + 119ha = 165.8ha 165.8ha × (18.3L/ha) = 3,034L/年 3,034L/年 × (軽油 40.47MJ/L) = 122,786MJ/年
	(間接エネルギー) 輸送・散布作業由来	{7,944千円 + 1,069千円 + 348千円 (人件費 + 輸送用車両固定費 + 運行費)} × 0.0455MJ/円 (No.21農業サービス) = 425,926MJ/年

および追肥肥料や他の農業生産資材等に由来する間接エネルギーは“neutral”とし、計上しない。以上より算出した、シナリオ1・計画のステージ⑤に係る初期投入エネルギー・廃棄エネルギーおよびランニングエネルギー消費をTable 11に示す。間接エネルギーの算出に用いた3EID原単位については、部門名を付記している(Table

2参照)。

b 算出結果

シナリオ1における実態(2ケース)と計画(2ケース)のエネルギー消費およびエネルギー生産の算出結果をTable 12にまとめた。ライフサイクルでのエネルギー

Table 10 シナリオ1・実態の⑤生成物の利用ステージにおけるエネルギー消費
Energy consumption in ⑤ Utilization of generated material stage of Present Scenario 1

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー(MJ/年)	水稲・畑作物生産に係る施設・機械の整備・購入	neutral
廃棄エネルギー(MJ/年)	水稲・畑作物生産に係る施設・機械の廃棄	neutral
ランニングエネルギー消費(MJ/年)	(直接エネルギー)水稲・畑作物生産に係る燃料由来	neutral
	(間接エネルギー)水稲生産(133ha)の基肥のうち堆肥で供給される窒素成分(22%)由来	$133\text{ha} \times (10\text{t}/\text{ha}) \times 128\text{MJ}/\text{堆肥} = 170,240\text{MJ}/\text{年}$
	(間接エネルギー)水稲生産(133ha)の基肥のうち化学肥料由来(窒素要求量の78%)	化学肥料施用量 $341\text{kg}/\text{ha} \times 108\text{円}/\text{kg} \times 133\text{ha} = 4,898\text{千円}/\text{年}$ $4,898\text{千円}/\text{年} \times 0.1232\text{MJ}/\text{円}(\text{No.104 化学肥料}) = 603,449\text{MJ}/\text{年}$
	(間接エネルギー)畑作物生産(337ha)の基肥のうち堆肥で供給される窒素成分(10.3%)由来	$337\text{ha} \times (20\text{t}/\text{ha}) \times 128\text{MJ}/\text{堆肥} = 862,720\text{MJ}/\text{年}$
	(間接エネルギー)畑作物生産(337ha)の基肥のうち化学肥料由来(窒素要求量の89.7%)	化学肥料施用量 $1,683\text{kg}/\text{ha} \times 108\text{円}/\text{kg} \times 337\text{ha} = 61,255\text{千円}/\text{年}$ $61,255\text{千円}/\text{年} \times 0.1232\text{MJ}/\text{円}(\text{No.104 化学肥料}) = 7,546,616\text{MJ}/\text{年}$
	(間接エネルギー)水稲・畑作物生産に係る追肥化学肥料, および他の資材・サービスや活動由来	neutral

Table 11 シナリオ1・計画の⑤生成物の利用ステージにおけるエネルギー消費
Energy consumption in ⑤ Utilization of generated material stage of Plan Scenario 1

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー(MJ/年)	水稲・畑作物生産に係る施設・機械の整備・購入	neutral
廃棄エネルギー(MJ/年)	水稲・畑作物生産に係る施設・機械の廃棄	neutral
ランニングエネルギー消費(MJ/年)	(直接エネルギー)水稲・畑作物生産に係る燃料由来	neutral
	(間接エネルギー)水稲生産(133ha)の基肥のうち消化液で供給される窒素成分由来(消化液施用面積 46.8ha の100%)	$46.8\text{ha} \times 25\text{t}/\text{ha} \times 233\text{MJ}/\text{消化液} = 272,610\text{MJ}/\text{年}$
	(間接エネルギー)水稲生産(133ha)の基肥のうち化学肥料由来(消化液無施用面積 86.2ha の100%)	$437.5\text{kg}/\text{ha} \times 108\text{円}/\text{kg} \times 86.2\text{ha} = 4,073\text{千円}/\text{年}$ $4,073\text{千円}/\text{年} \times 0.1232\text{MJ}/\text{円}(\text{No.104 化学肥料}) = 501,794\text{MJ}/\text{年}$
	(間接エネルギー)畑作物生産(337ha)の基肥のうち消化液で代替される窒素成分由来(消化液施用面積 119ha の47%)	$119\text{ha} \times 50\text{t}/\text{ha} \times 233\text{MJ}/\text{消化液} = 1,386,350\text{MJ}/\text{年}$
	(間接エネルギー)畑作物生産(337ha)の基肥のうち化学肥料由来(消化液施用面積 119ha の53%と無施用面積 218ha の100%)	$1,000\text{kg}/\text{ha} \times 108\text{円}/\text{kg} \times 119\text{ha} = 12,852\text{千円}/\text{年}$ $1,875\text{kg}/\text{ha} \times 108\text{円}/\text{kg} \times 218\text{ha} = 44,145\text{千円}/\text{年}$ $12,852\text{千円}/\text{年} + 44,145\text{千円}/\text{年} \times 0.1232\text{MJ}/\text{円}(\text{No.104 化学肥料}) = 7,022,030\text{MJ}/\text{年}$
	(間接エネルギー)水稲・畑作物生産に係る追肥化学肥料および他の資材・サービスや活動由来	neutral

Table 12 シナリオ1における実態と計画のエネルギー消費とエネルギー生産 (GJ/年)
Energy consumption and production in Present and Plan of Scenario 1 (GJ/year)

			①バイオマスの生産(発生)	②収集・輸送・貯蔵	③バイオマス変換	④生成物の輸送・貯蔵	⑤生成物の利用	計
実態	堆肥化(ケース1)	消費	0	0	3,149	1,722	9,183	14,054
		生産			1,037			1,037
	堆肥化(ケース2)	消費	0	0	3,006	1,722	9,183	13,911
		生産			1,033			1,033
計画	メタン発酵(ケース1)	消費	0	365	3,408	1,031	9,183	13,987
		生産			5,798			5,798
	メタン発酵(ケース2)	消費	0	0	3,408	1,031	9,183	13,622
		生産			5,798			5,798

収支は、“neutral”とした部分を含まないとしても、**実態**、**計画**のいずれのケースでもマイナスとなった。**実態**では、「ケース1」に比べて「ケース2」の③バイオマス変換ステージでのエネルギー消費が143GJ/年小さくなった。これは、8.3t/日規模の堆肥化施設3基(ケース1)に比べて、25t/日規模の堆肥化施設1基(ケース2)の方が施設建設費・人件費に基づく初期投入エネルギー、廃棄エネルギーおよびランニングエネルギー消費が小さいためである。また、ステージ③のみに着目すると、**実態**に比べて**計画**でのエネルギー消費は大きくなるが、**計画**ではメタン発酵・コジェネレーションによるエネルギー生産により、変換工程に必要な電力・熱を自給できるとともに、エネルギーの余剰も生じた。

2 豚ふん尿排水対象シナリオ(シナリオ2)

対象とするバイオマスの量・性状などの条件および**実態**・**計画**の各シナリオの詳細は、経済性の評価(清水ら, 2012)と共通である。

a 各ステージにおけるエネルギー消費とエネルギー生産の算出

(1) バイオマスの生産(発生ステージ)

実態と**計画**で除ふん率の設定が異なるため、豚ふん尿排水の発生量は異なるが、除ふんに係るエネルギー消費は評価対象外とし算出しないため、本ステージに係る初期投入・廃棄エネルギーおよびランニングエネルギー消費は“neutral”であるとした。

(2) 収集・輸送・貯蔵ステージ

シナリオ2では、**実態**・**計画**とも、各養豚農家内で処理・変換され、輸送しない。そのため、エネルギー消費は0MJである。

(3) バイオマス変換ステージ

バイオマスの変換ステージにおいては、エネルギー消費に加え、変換により生成されたエネルギーや製品に由来するエネルギー生産を算出する。

シナリオ2・**実態**では、各養豚農家に污水处理施設を

設置する条件としたため、施設数は10となる。各污水处理施設では、豚ふん尿排水が固液分離され、液体分は河川放流できる水質まで浄化処理される。固体分および余剰汚泥は堆肥化される(固体分の堆肥化工程および余剰汚泥の乾燥・堆肥化工程は評価対象外のためエネルギー消費は算出しない)。

污水处理施設の運転条件、建設費および各装置の価格は、「清水ら(2012)のFig.11, Table 16」に示されている。これに基づいて初期投入エネルギー・廃棄エネルギーを算出した。ランニングエネルギー消費のうち間接エネルギーは、補修費に基づき算出した。機械補修が適宜行われることを前提に保守点検に係るエネルギーは0MJとした。以上より算出したシナリオ2・**実態**のステージ③に係る1施設当たりの初期投入エネルギー・廃棄エネルギー・ランニングエネルギー消費とエネルギー生産を**Table 13**に示す。間接エネルギーの算出に用いた3EID原単位については、部門名を付記している(**Table 2**参照)。

シナリオ2の**計画**では、各養豚農家にメタン発酵・コジェネレーション施設を設置する。そのため、**実態**と同様、施設数は10となる。各施設では豚ふん尿排水がメタン発酵装置で変換され、生成したバイオガスを用いたコジェネレーションにより電力と熱が生成されると同時にメタン発酵消化液が生成される。固体分は堆肥化する(ただし堆肥化工程は評価対象外とする)。メタン発酵・コジェネレーション施設の運転条件、建設費および各装置の価格は、「清水ら(2012)のFig.12およびTable 17」に示されている。これに基づいて算出したシナリオ2・**計画**のステージ③に係る施設1施設当たりの初期投入エネルギー・廃棄エネルギー・ランニングエネルギー消費とエネルギー生産を**Table 14**に示す。間接エネルギーの算出に用いた3EID原単位については、部門名を付記している(**Table 2**参照)。

(4) 生成物の輸送・貯蔵ステージ

シナリオ2の**実態**においては、污水处理された水は河川放流されるため、本ステージでのエネルギー消費は計

Table 13 シナリオ 2・実態の③バイオマス変換ステージにおけるエネルギー消費とエネルギー生産 (1 施設)
Energy consumption and production in ③ Biomass conversion stage of Present Scenario 2 for each facility

算出項目	データ名	算出結果	
初期投入エネルギー (MJ/年)	污水处理施設(建築土木)建設	(17,320千円 ÷ 30年) × 0.0428MJ/円 (No.289 その他の土木建設)=24,710MJ/年	
	污水处理施設(設備機器)建設	固液分離装置(平型振動篩)	(700千円 ÷ 10年) × 0.0484MJ/円 (No.204 農業用機械)=3,388 MJ/年
		曝気装置	(6,750千円 ÷ 10年) × 0.0484MJ/円 (No.204 農業用機械)=32,670MJ/年
		液中膜ユニット	(850千円 ÷ 7年) × 0.0484MJ/円 (No.204 農業用機械)=5,877MJ/年
		污水ピットポンプ	(100千円 ÷ 5年) × 0.0041MJ/円 (No.196 ポンプ及び圧縮機)=82MJ/年
		污水投入ポンプ	(100千円 ÷ 8年) × 0.0041MJ/円 (No.196 ポンプ及び圧縮機)=51MJ/年
		汚泥返送・硝化液循環ポンプ(1施設につき2台)1セット	(300千円 ÷ 5年) × 0.0041MJ/円 (No.196 ポンプ及び圧縮機)=246MJ/年
		膜透過水吸引ポンプ	(150千円 ÷ 5年) × 0.0041MJ/円 (No.196 ポンプ及び圧縮機)=123MJ/年
		放流ポンプ	(150千円 ÷ 5年) × 0.0041MJ/円 (No.196 ポンプ及び圧縮機)=123MJ/年
		薬液注入ポンプ(1施設につき4台)1セット	(300千円 ÷ 5年) × 0.0041MJ/円 (No.196 ポンプ及び圧縮機)=246MJ/年
		付属機器(自動運転操作盤)	(1,500千円 ÷ 7年) × 0.00198MJ/円 (No.223 電気計測器)=424MJ/年
	機械据え付け工事, 配管・電気・雑工事 *1)	(8,480千円 ÷ 30年) × 0.0361MJ/円 (No.376 機械修理)=10,204MJ/年	
廃棄エネルギー (MJ/年)	污水处理施設(建築土木)廃棄	24,710MJ/年 × 0.05=1,235MJ/年	
	污水处理施設(設備機器)廃棄	設備機器初期投入エネルギー計(43,231MJ/年) × 0.03=1,297MJ/年	
ランニングエネルギー消費 (MJ/年)	(直接エネルギー)電力由来	526.6MJ/日 × 365日 =192,209kWh/年 192,209kWh/年 × (電力 13.23MJ/kWh)=2,542,925MJ/年	
	(間接エネルギー)薬剤(無機系凝集剤, 苛性ソーダ, メタノール)由来	(8,533千円 + 449千円 + 1,079千円(各薬剤費)) × 0.1499MJ/円 (No.109 その他の無機化学工業製品)=1,508,144MJ/年	
	(間接エネルギー)施設管理運営由来	3,150千円/年(人件費) × 0.0455MJ/円 (No.21 農業サービス)=143,325MJ/年	
	(間接エネルギー)機械補修由来	523千円/年(機械補修費) × 0.0361MJ/円 (No.376 機械修理)=18,880MJ/年	
エネルギー生産 (MJ/年)	なし	0MJ/年	

*1) 建設時のみの投入であり、「建築土木」と同じ使用年数とした。廃棄エネルギーは伴わない

上しない。計画では、消化液をバキューム車で農地に輸送し、各圃場で消化液散布機に移し替えて散布する。輸送および農地での散布の条件は、清水ら (2012) のシナリオ 2・計画 (「清水ら (2012) の Fig.13, Fig.14」参照) と同じである。

シナリオ 2・計画のステージ④に係る 1 施設当たりの初期投入エネルギー・廃棄エネルギー・ランニングエネルギー消費を Table 15 に示す。間接エネルギーの算出に用いた 3EID 原単位については、部門名を付記している (Table 2 参照)。

(5) 生成物の利用ステージ

シナリオ 2 の生成物の利用ステージでは、水田 620ha, 畑 1,574ha を評価対象とした。これは、計画で

消化液 (水田 2.5t/10a, 畑 5t/10a) を施用する面積である。実態では、バイオマス由来の生成物はないが、計画との対比のため、すべての面積で基肥として化学肥料 (普通化成肥料 8-8-8, 窒素成分 8%) を使用した場合のエネルギー消費を算出した。水田・畑における基肥の窒素要求量は、シナリオ 1 と同じである。各窒素要求量を満たすため、評価対象水田 (620ha) では化学肥料 43.8kg/10a を、評価対象畑 (1,574ha) では化学肥料 187.5kg/10a を施用し、いずれも収量の増加はないものとした。また、作物栽培に係る施設や機械、追肥のための肥料や他の農業生産資材等の投入に由来するエネルギーは、初期投入エネルギー・廃棄エネルギー・ランニングエネルギー消費とも “neutral” として計上しない。

Table 14 シナリオ2・計画の③バイオマス変換ステージにおけるエネルギー消費とエネルギー生産 (1施設)
Energy consumption and production in ③ Biomass conversion stage of Plan Scenario 2 for each facility

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー (MJ/年)	メタン発酵施設(建築土木)建設	(68,400千円 ÷ 30年) × 0.0428MJ/円 (No.289 その他の土木建設)=97,584MJ/年
	メタン発酵施設(設備機器)建設	(168,000千円 ÷ 12年) × 0.0484MJ/円 (No.204 農業用機械)=677,600MJ/年
	堆肥化施設	評価対象外のため算出しない
廃棄エネルギー (MJ/年)	メタン発酵・コジェネ施設(建築土木)廃棄	97,584MJ/年 × 0.05=4,879MJ/年
	メタン発酵・コジェネ施設(設備機器)廃棄	677,600MJ/年 × 0.03=20,328MJ/年
	堆肥化施設	評価対象外のため算出しない
ランニングエネルギー消費 (MJ/年)	(直接エネルギー)電力由来	324kWh/日 × 365日 = 118,260kWh/年 118,260kWh/年 × (自給電力 3.60MJ/kWh)=125,736MJ/年
	(直接エネルギー)熱由来	5,470MJ/日 × 365日 = 1,996,550MJ/年
	(間接エネルギー)脱硫剤由来	368千円/年(脱硫剤費) × 0.0813MJ/円 (No.157 その他の窯業・土石製品) = 29,918MJ/年
	(間接エネルギー)施設管理運営由来	10,110千円/年(人件費+補修点検費) × 0.0455MJ/円 (No.21 農業サービス) = 460,005MJ/年
エネルギー生産 (MJ/年)	電力	838kWh/日 × 365日 =305,870kWh/年 305,870kWh/年 × (電力生産 3.60MJ/kWh) =1,101,132MJ/年
	熱	5,487MJ/日 × 365日 =2,002,755MJ/年
	消化液(9,417t/年)による化学肥料代替	9,417t/年 × 233MJ/消化液 t=2,194,161MJ/年

Table 15 シナリオ2・計画の④生成物の輸送・貯蔵ステージにおけるエネルギー消費 (1施設当たり)
Energy consumption in ④ Transportation of generated material stage of Plan Scenario 2 for each facility

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー (MJ/年)	バキューム車3台購入	(15,000千円 ÷ 8年) × 0.0520MJ/円 (No.247トラック・バス・その他の自動車)=97,500MJ/年
	消化液散布機2台購入	(16,000千円 ÷ 7年) × 0.0484MJ/円 (No.204 農業用機械)=110,629MJ/年
	消化液散布機輸送用トラック1台購入	(1,500千円 ÷ 8年) × 0.0520MJ/円 (No.247トラック・バス・その他の自動車)=9,750MJ/年
廃棄エネルギー (MJ/年)	バキューム車3台廃棄	97,500MJ/年 × 0.03=2,925MJ/年
	消化液散布機2台廃棄	110,629MJ/年 × 0.03=3,319MJ/年
	消化液散布機輸送用トラック1台廃棄	9,750MJ/年 × 0.03=293MJ/年
ランニングエネルギー消費 (MJ/年)	(直接エネルギー)輸送用燃料(軽油)由来	バキューム車：総走行距離 52,380km ÷ (5.26km/L)=9,958L/円 消化液散布機輸送用トラック：総走行距離 11,640km ÷ (6.26km/L)=1,859L/年 (9,958L/年 +1,859L/年)=11,817L/年 11,817L/年 × (軽油 40.47MJ/L)=478,234MJ/年
	(直接エネルギー)消化液散布機作業用燃料(軽油)由来	消化液散布面積 62ha+157.4ha=219.4ha 219.4ha × (18.3L/ha)=4,015L/年 4,015L/年 × (軽油 40.47MJ/L)=162,487MJ/年
	(間接エネルギー)輸送・散布作業由来(人件費+輸送用車両固定費・運行費より算出)	(11,640千円 +1,098千円 + 337千円 +393千円 +87千円) × 0.0455MJ/円 (No.21 農業サービス)=616,753MJ/年

以上より算出したシナリオ2・実態のステージ⑤に係るエネルギー消費を **Table 16** に示す。間接エネルギーの算出に用いた3EID原単位については、部門名を付記している (**Table 2** 参照)。

計画では、水田 620ha、畑 1,574ha に消化液を施用する。水田・畑における面積当たりの消化液施用量、窒素要求量、消化液ではまかなえない窒素量を補うための化学肥

料(普通化成肥料 8-8-8)の条件は、シナリオ1と同じである。水田(620ha)については消化液により、窒素要求量の100%がまかなわれる。消化液で代替可能なエネルギーは、1ha当たり 5,825MJ (25t/ha × 233MJ/消化液 t) である。畑 1,574ha については、消化液 50t/ha を施用し、窒素要求量の47%がまかなわれる。代替可能なエネルギーは、1ha当たり 11,650MJ (50t/ha × 233MJ/

Table 16 シナリオ 2・実態の⑤生成物の利用ステージにおけるエネルギー消費
Energy consumption in ⑤ Utilization of generated material stage of Present Scenario 2

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー (MJ/年)	水稲・畑作物生産に係る施設・機械の整備・購入	neutral
廃棄エネルギー (MJ/年)	水稲・畑作物生産に係る施設・機械の廃棄	neutral
ランニングエネルギー消費 (MJ/年)	(直接エネルギー)水稲・畑作物生産に係る燃料由来	neutral
	(間接エネルギー)水稲生産 620ha の基肥としての化学肥料由来	化学肥料施用量 438kg/ha × 108 円/kg × 620ha=29,328 千円/年 29,328 千円/年 × 0.1232MJ/円(No.104 化学肥料)= 3,613,210MJ/年
	(間接エネルギー)畑作物生産 1,574ha の基肥としての化学肥料由来	化学肥料施用量 1,875kg/ha × 108 円/kg × 1,574ha=318,735 千円/年 318,735 千円/年 × 0.1232MJ/円(No.104 化学肥料)= 39,268,152MJ/年
	(間接エネルギー)水稲・畑作物生産に係る追肥肥料および他の資材・サービスや活動由来	neutral

消化液 t) である。不足する窒素(窒素要求量の 53%)は、化学肥料 1,000kg/ha を施用して補う。水田においても畑においても、消化液の施用/非施用にかかわらず、収量の差はないものとし、また作物栽培に係る施設・機械の初期投入エネルギー・廃棄エネルギー、労働および追肥肥料や他の農業生産資材等に由来する間接エネルギーは“neutral”とし、計上しない。以上より算出したシナリオ 2・計画のステージ⑤に係るエネルギー消費を **Table 17** に示す。間接エネルギーの算出に用いた 3EID 原単位については、部門名を付記している (**Table 2** 参照)。

b 算出結果

シナリオ 2 における **実態**と**計画**のエネルギー消費お

よびエネルギー生産の算出結果を **Table 18** にまとめた。ライフサイクルでのエネルギー収支は、“neutral”部分を含まないとしても、**実態**、**計画**ともにマイナスとなった。ステージ⑤のエネルギー消費が**実態**と**計画**で若干数値が異なるのは、算出過程での精度による誤差であり、投入される肥料成分に由来するエネルギー消費は同じである。**計画**では、消費される約 42,900GJ/年のうち、約 50%はステージ③で生成された消化液由来のエネルギーである。また、**計画**のステージ③では、初期投入エネルギー・廃棄エネルギーは**実態**に比べて約 10 倍と大きいですが、ランニングエネルギー消費は**実態**の 70%程度である。そのため、ステージ③の**計画**では、エネルギー消費は**実態**よりも小さくなり、またエネルギー生産によって

Table 17 シナリオ 2・計画の⑤生成物の利用ステージにおけるエネルギー消費
Energy consumption in ⑤ Utilization of generated material stage of Plan Scenario 2

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー (MJ/年)	水稲・畑作物生産に係る施設・機械の整備・購入	neutral
廃棄エネルギー (MJ/年)	水稲・畑作物生産に係る施設・機械の廃棄	neutral
ランニングエネルギー消費 (MJ/年)	(直接エネルギー)水稲・畑作物生産に係る燃料由来	neutral
	(間接エネルギー)水稲生産 (620ha) の基肥として消化液で供給される窒素成分由来(消化液施用面積 620ha の 100%)	620ha × 25t/ha × 233MJ/消化液 t=3,611,500MJ/年
	(間接エネルギー)畑作物生産 (1,574ha) の基肥のうち消化液で供給される窒素成分由来(消化液施用面積 1,574ha での 47%)	1,574ha × 50t/ha × 233MJ/消化液 t=18,337,100MJ/年
	(間接エネルギー)畑作物生産 (1,574ha) の基肥のうち化学肥料由来(消化液施用面積 1,574ha での 53%)	1,000kg/ha × 108 円/kg × 1,574ha=169,992 千円/年 169,992 千円/年 × 0.1232MJ/円(No.104 化学肥料)= 20,943,014MJ/年
	(間接エネルギー)水稲・畑作物生産に係る追肥化学肥料および他の資材・サービスや活動由来	neutral

Table 18 シナリオ2における実態と計画のエネルギー消費とエネルギー生産 (GJ/年)
Energy consumption and production of Present and Plan Scenario 2 (GJ/year)

			①バイオマスの生産(発生)	②収集・輸送・貯蔵	③バイオマス変換	④生成物の輸送・貯蔵	⑤生成物の利用	計
実態	汚水処理	消費	0	0	42,940	0	42,881	85,820
		生産			0			0
計画	メタン発酵	消費	0	0	37,126	14,819	42,892	94,837
		生産			52,981			52,981

変換に係るエネルギーを自給できるとともに、エネルギーの余剰も生じた。

3 生ごみ・生活廃水処理汚泥・食品加工残さ対象シナリオ (シナリオ3)

対象とするバイオマスの量、性状などの条件および**実態・計画**の各シナリオの詳細は、経済性の評価(清水ら, 2012)と共通である。

a 各ステージにおけるエネルギー消費とエネルギー生産の算出

(1) バイオマスの生産(発生)ステージ

シナリオ3では、**実態・計画**とも、本ステージに係る初期投入・廃棄エネルギーおよびランニングエネルギー消費は“neutral”であるとした。

(2) 収集・輸送・貯蔵ステージ

シナリオ3では、**実態・計画**とも車両や設備、輸送距離も同じと仮定し、本ステージに係る初期投入・廃棄エネルギーおよびランニングエネルギー消費はいずれも“neutral”とした。

(3) バイオマスの変換ステージ

バイオマスの変換ステージにおいては、エネルギー消

費に加え、変換により生成されたエネルギーや製品に由来するエネルギー生産を算出する。

シナリオ3の**実態**では、地域内の焼却施設が生ごみ、生活廃水処理汚泥、食品加工残さを受入れて焼却処理し、焼却灰は施設内で埋め立て処分を行う。エネルギー生産は0MJである。

焼却施設の建設費、運転条件等は、清水ら(2012)に詳述している。薬剤に係る間接エネルギーは、各薬剤の使用量および文献値から求めた価格(消石灰の使用量は、70t/日規模の焼却施設へのヒアリング値より155t/年、単価を間野(2009)より25.7円/kgとした。活性炭購入費は、薬剤費総額からさしひいて求めた)に3EIDより引用した各薬剤に相当する部門の原単位を乗じて求めた。本シナリオの対象とするバイオマス総量は10t/日であるため、調査により得られた各エネルギーの値の1/7をシナリオ3のエネルギー消費として計上した。

以上より算出したシナリオ3・**実態**のステージ③に係る初期投入エネルギー・廃棄エネルギー・ランニングエネルギー消費とエネルギー生産を**Table 19**に示す。間接エネルギーの算出に用いた3EID原単位については、部門名を付記している(**Table 2**参照)。

計画では、10t/日の混合原料を変換するメタン発酵・

Table 19 シナリオ3・実態の③バイオマス変換ステージにおけるエネルギー消費とエネルギー生産
Energy consumption and production in ③ Biomass conversion stage of Present Scenario 3

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー(MJ/年)	焼却施設建設(1/7負担)	(414,503千円÷15年)×0.0413MJ/円(No.284 河川・下水道・その他の公共事業)=1,141,265MJ/年
廃棄エネルギー(MJ/年)	焼却施設廃棄(1/7負担)	1,141,265MJ/年×0.05=57,063MJ/年
ランニングエネルギー消費(MJ/年)	(直接エネルギー)電力(1/7負担)	393,389kWh/年×(電力13.23MJ/kWh)=5,204,536MJ/年
	(直接エネルギー)A重油(1/7負担)	701L/年×(A重油42.63MJ/L)=29,884MJ/年
	(間接エネルギー)活性炭由来(1/7負担)	569千円/年(活性炭購入費)×0.1499MJ/円(No.109 その他の無機化学工業製品)=85,293MJ/年
	(間接エネルギー)消石灰由来(1/7負担)	1,190千円/年(消石灰購入費)×0.0813MJ/円(No.157 その他の窯業・土石製品)=96,747MJ/年
	(間接エネルギー)保守点検(1/7負担)	11,387千円/年(保守点検費)×0.0583MJ/円(No.297 廃棄物処理(公営))=663,862MJ/年
	(間接エネルギー)施設管理事務(1/7負担)	14,170千円/年(事務経費)×0.0185MJ/円(No.344 公務(地方))=262,145MJ/年
エネルギー生産(MJ/年)	なし	0MJ/年
	(間接エネルギー)焼却灰排出処分(1/7負担)	3,382千円/年(焼却灰搬出・処分費)×0.0583MJ/円(No.297 廃棄物処理(公営))=197,171MJ/年

コジェネレーション施設を1基、地域内に設置する。変換施設では、10t/日の混合原料は、前処理段階で破砕・固液分離され、発生する固体分（夾雑物）は評価対象外（エネルギー消費は算出しない）で堆肥化される。液体分はメタン発酵され、生成したバイオガスをを用いたコジェネレーションにより電力と熱が生成される。同時にメタン発酵消化液が生成される。メタン発酵・コジェネレーション施設の運転条件、建設費および各装置の価格は、「清水ら（2012）の Fig.15, Table 24」に示されている。これに基づいて算出したシナリオ3・計画のステージ③に係る初期投入エネルギー・廃棄エネルギー・ランニングエネルギー消費とエネルギー生産を Table 20 に示す。間接エネルギーの算出に用いた3EID原単位については、部門名を付記している（Table 2 参照）。

(4) 生成物の輸送・貯蔵ステージ

シナリオ3・実態においては、バイオマス由来の生成物はないため、本ステージでのエネルギー消費は計上しない。計画では、消化液をバキューム車で農地に輸送し、各圃場で消化液散布機に移し替えて散布する。輸送および農地での散布の条件は、清水ら（2012）のシナリオ3・計画と同じである（「清水ら（2012）の Fig.16, Fig17」参照）。

シナリオ3・計画のステージ④に係る初期投入エネルギー・廃棄エネルギー・ランニングエネルギー消費を Table 21 に示す。間接エネルギーの算出に用いた3EID原単位については、部門名を付記している（Table 2 参照）。

(5) 生成物の利用ステージ

シナリオ3の生成物の利用ステージでは、水田

21.3ha、畑54haを評価対象とした。これは、計画で消化液（水田2.5t/10a、畑5t/10a）を施用する面積である。実態では、バイオマス由来の生成物はないが、計画との対比のため、すべての面積で基肥として化学肥料（普通化成肥料8-8-8、窒素成分8%）を使用した場合のエネルギー消費を算出した。水田・畑における基肥の窒素要求量は、シナリオ1と同じである。評価対象水田（21.3ha）では化学肥料43.8kg/10aを、評価対象畑（54ha）では化学肥料187.5kg/10aを施用し、いずれも収量は計画と差がないものとした。また、作物栽培に係る施設・機械、労働および追肥のための肥料や他の農業生産資材等の投入に由来するエネルギーは、初期投入エネルギー・廃棄エネルギーや、ランニングエネルギー消費とも“neutral”とし、計上しない。以上より算出した、シナリオ3・実態のステージ⑤に係るエネルギー消費を Table 22 に示す。間接エネルギーの算出に用いた3EID原単位については、部門名を付記している（Table 2 参照）。

計画では、水田21.3ha、畑54haに消化液を施用する。水田・畑における面積当たりの消化液施用量、窒素要求量、消化液ではまかなえない窒素量を補うための化学肥料（普通化成肥料8-8-8）の条件は、シナリオ1と同じである。水田（21.3ha）については、消化液を施用することにより、窒素要求量の100%を代替できるため、消化液で代替可能なエネルギーは、1ha当たり5,825MJ（25t/ha × 233MJ/消化液t）である。畑54haについては、消化液50t/haを施用し、窒素要求量の47%がまかなわれる。代替可能なエネルギーは、1ha当たり11,650MJ（50t/ha × 233MJ/消化液t）である。不足する窒素（窒素要求量の53%）は、化学肥料1,000kg/haを施用して補う。

Table 20 シナリオ3・計画の③バイオマス変換ステージにおけるエネルギー消費とエネルギー生産
Energy consumption and production in ③ Biomass conversion stage of Plan Scenario 3

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー (MJ/年)	メタン発酵施設(建築土木)建設	(38,100千円 ÷ 30年) × 0.0428MJ/円 (No.289 その他の土木建設)=54,356MJ/年
	メタン発酵施設(設備機器)建設	(116,900千円 ÷ 12年) × 0.0484MJ/円 (No.204 農業用機械)=471,497MJ/年
廃棄エネルギー (MJ/年)	メタン発酵・コジェネ施設(建築土木)	54,356MJ/年 × 0.05=2,718MJ/年
	メタン発酵・コジェネ施設(設備機器)	471,497MJ/年 × 0.03=14,145MJ/年
ランニングエネルギー消費 (MJ/年)	(直接エネルギー)電力由来	165kWh/日 × 365日 = 60,225kWh/年 60,225kWh/年 × (自給電力3.60MJ/kWh)=216,810MJ/年
	(直接エネルギー)熱由来	2,009MJ/日 × 365日 = 733,285MJ/年
	(間接エネルギー)脱硫剤由来	511千円/年(脱硫剤費) × 0.0813MJ/円 (No.157 その他の窯業・土石製品) = 41,544MJ/年
	(間接エネルギー)施設管理運営由来	9,088千円/年(人件費+点検補修費) × 0.0455MJ/円 (No.21 農業サービス)=413,504MJ/年
エネルギー生産 (MJ/年)	電力	1,080kWh/日 × 365日 =394,200kWh/年 394,200kWh/年 × (電力生産3.60MJ/kWh) =1,419,120MJ/年
	熱	6,480MJ/日 × 365日 =2,365,200MJ/年
	消化液(3,230t/年)による化学肥料代替	3,230t/年 × 233MJ/消化液t=752,590MJ/年

Table 21 シナリオ 3・計画の④生成物の輸送・貯蔵ステージにおけるエネルギー消費
Energy consumption in ④ Transportation of generated material stage of Plan Scenario 3

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー (MJ/年)	バキューム車 1 台購入	$(5,000 \text{ 千円} \div 8 \text{ 年}) \times 0.0520 \text{ MJ/円 (No.247 トラック・バス・その他の自動車)} = 32,500 \text{ MJ/年}$
	消化液散布機 1 台購入	$(8,000 \text{ 千円} \div 7 \text{ 年}) \times 0.0484 \text{ MJ/円 (No.204 農業用機械)} = 55,314 \text{ MJ/年}$
	消化液散布機輸送用トラック 1 台購入	$(1,500 \text{ 千円} \div 8 \text{ 年}) \times 0.0520 \text{ MJ/円 (No.247 トラック・バス・その他の自動車)} = 9,750 \text{ MJ/年}$
廃棄エネルギー (MJ/年)	バキューム車 1 台廃棄	$32,500 \text{ MJ/年} \times 0.03 = 975 \text{ MJ/年}$
	消化液散布機 1 台廃棄	$55,314 \text{ MJ/年} \times 0.03 = 1,659 \text{ MJ/年}$
	堆肥散布車輸送用トラック 1 台廃棄	$9,750 \text{ MJ/年} \times 0.03 = 293 \text{ MJ/年}$
ランニングエネルギー消費 (MJ/年)	(直接エネルギー)輸送用燃料(軽油)由来	バキューム車：総走行距離 18,000km/年 $\div (5.26 \text{ km/L}) = 3,422 \text{ L/年}$ 消化液散布機輸送用トラック：総走行距離 6,000km/年 $\div (6.26 \text{ km/L}) = 959 \text{ L/年}$ $(3,422 \text{ L/年} + 959 \text{ L/年}) = 4,381 \text{ L/年}$ $4,381 \text{ L/年} \times (軽油 40.47 \text{ MJ/L}) = 177,299 \text{ MJ/年}$
	(直接エネルギー)散布用燃料(軽油)由来	消化液散布面積 21.3ha + 54ha = 75.3ha $75.3 \text{ ha} \times (18.3 \text{ L/ha}) = 1,378 \text{ L/年}$ $1,378 \text{ L/年} \times (軽油 40.47 \text{ MJ/L}) = 55,768 \text{ MJ/年}$
	(間接エネルギー)輸送・散布作業由来	$8,083 \text{ 千円 (人件費 + 輸送用車両固定費 + 運行費)} \times 0.0455 \text{ MJ/円 (No.21 農業サービス)} = 367,777 \text{ MJ/年}$

Table 22 シナリオ 3・実態の⑤生成物の利用ステージにおけるエネルギー消費
Energy consumption in ⑤ Utilization of generated material stage of Present Scenario 3

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー (MJ/年)	水稲・畑作物生産に係る施設・機械の整備・購入	neutral
廃棄エネルギー (MJ/年)	水稲・畑作物生産に係る施設・機械の廃棄	neutral
ランニングエネルギー消費 (MJ/年)	(直接エネルギー)水稲・畑作物生産に係る燃料由来	neutral
	(間接エネルギー)水稲生産(21.3ha)の基肥としての化学肥料由来	化学肥料施用量 $438 \text{ kg/ha} \times 108 \text{ 円/kg} \times 21.3 \text{ ha} = 1,008 \text{ 千円/年}$ $1,008 \text{ 千円/年} \times 0.1232 \text{ MJ/円 (No.104 化学肥料)} = 124,186 \text{ MJ/年}$
	(間接エネルギー)畑作物生産(54ha)の基肥としての化学肥料由来	化学肥料施用量 $1,875 \text{ kg/ha} \times 108 \text{ 円/kg} \times 54 \text{ ha} = 10,935 \text{ 千円/年}$ $10,935 \text{ 千円/年} \times 0.1232 \text{ MJ/円 (No.104 化学肥料)} = 1,347,192 \text{ MJ/年}$
	(間接エネルギー)水稲・畑作物生産に係る追肥化学肥料および他の資材・サービスや活動由来	neutral

水田においても畑においても、消化液の施用/非施用にかかわらず、収量の差はないものとし、また作物栽培に係る施設・機械の初期投入エネルギー・廃棄エネルギー、労働および追肥肥料や他の農業生産資材等に由来する間接エネルギーは“neutral”とし、計上しない。以上より算出したシナリオ 3・計画のステージ⑤に係るエネルギー消費を Table 23 に示す。間接エネルギーの算出に用いた 3EID 原単位については、部門名を付記している (Table 2 参照)。

b 算出結果

シナリオ 3 における実態と計画のエネルギー消費およびエネルギー生産の算出結果を Table 24 にまとめた。ライフサイクルでのエネルギー収支は、“neutral”部分を含めない条件では、実態ではエネルギー消費のみであるためマイナス 9,209GJ/年であるが、計画では 415GJ/年のプラスとなった。ステージ③では、実態におけるエネルギー消費が計画に比して大きく、とくにランニングエネルギー消費の約 68% を占める電力と A 重油由来の直接エネルギーの影響が大きい。計画では電力・熱に由来する直接エネルギーは小さく、また生産されたエネル

Table 23 シナリオ3・計画の⑤生成物の利用ステージにおけるエネルギー消費
Energy consumption in ⑤ Utilization of generated material stage of Plan Scenario 3

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー(MJ/年)	水稲・畑作物生産に係る施設・機械の整備・購入	neutral
廃棄エネルギー(MJ/年)	水稲・畑作物生産に係る施設・機械の廃棄	neutral
ランニングエネルギー消費(MJ/年)	(直接エネルギー)水稲・畑作物生産に係る燃料由来	neutral
	(間接エネルギー)水稲生産(21.3ha)の基肥として消化液で供給される窒素成分由来(消化液施用面積 21.3ha の100%)	21.3ha × 25t/ha × 233MJ/消化液 t=124,073MJ/年
	(間接エネルギー)畑作物生産(54ha)の基肥のうち消化液で供給される窒素成分由来(消化液施用面積 54ha での47%)	54ha × 50t/ha × 233MJ/消化液 t=629,100MJ/年
	(間接エネルギー)畑作物生産(54ha)の基肥のうち化学肥料由来(消化液施用面積 54ha での53%)	1,000kg/ha × 108円/kg × 54ha=5,832千円/年 5,832千円/年 × 0.1232MJ/円(No.104 化学肥料)=718,502MJ/年
	(間接エネルギー)水稲・畑作物生産に係る追肥化学肥料および他の資材・サービスや活動由来	neutral

Table 24 シナリオ3における実態と計画のエネルギー消費とエネルギー生産(GJ/年)
Energy consumption and production in Present and Plan of Scenario 3 (GJ/year)

			①バイオマスの生産(発生)	②収集・輸送・貯蔵	③バイオマス変換	④生成物の輸送・貯蔵	⑤生成物の利用	計
実態	焼却	消費	0	0	7,738	0	1,471	9,209
		生産			0			0
計画	メタン発酵	消費	0	0	1,948	702	1,472	4,122
		生産			4,537			4,537

ギーによりそのすべてが自給される。

4 規格外甘しょ・食品加工残さ対象シナリオ(シナリオ4)

対象とするバイオマスの量、性状などの条件および**実態・計画**の各シナリオの詳細は経済性の評価(清水ら, 2012)と共通である。

a 各ステージにおけるエネルギー消費とエネルギー生産の算出

(1) バイオマスの生産(発生)ステージ

食品加工残さについては、地域内発生分(10.7t/日)・地域外発生分(9t/日)のいずれも、食料品等の製造加工工程(評価対象外)で発生する廃棄物であるため、本ステージにおけるエネルギー消費は算出しないものとした。

規格外甘しょ(9~11月に1,500t/年)は、青果用甘しょ生産工程で発生する副産物であり、**実態**では畑に鋤込むが、鋤込みのためのエネルギーは主産物の生産(評価対象外)に含まれるとみなした。また、**計画**では、生産者(農家)が畑で収集し、集荷施設から次ステージでの輸送に供するが、主産物収穫時の作業と同時にに行われるとみな

し、エネルギー消費を算出しない。また、本ステージで生産される規格外甘しょは、化石エネルギー代替として生産されたものではなく、**実態**で鋤込まれていたもの(廃棄物とみなす)であるため、エネルギー生産としては計上しない。

(2) 収集・輸送・貯蔵ステージ

地域内発生分の食品加工残さについては、本ステージに係る車両や設備、輸送距離は、**実態・計画**とも同じとし、初期投入・廃棄エネルギーおよびランニングエネルギー消費はいずれも“neutral”とした。

地域外発生分の食品加工残さについては、**実態**では、地域外で収集輸送業者により焼却施設まで輸送される。この収集・輸送作業は評価対象外とし、初期投入・廃棄エネルギーおよびランニングエネルギー消費は算出しない。規格外甘しょの収集・輸送・貯蔵は行われない。以下、**実態・計画**で“neutral”でないもの(計画について追加的に算出すべき項目)について示す。

計画においては、地域外発生分の食品加工残さを飼料化工場に輸送するための輸送距離延長分と飼料原料としての鮮度を保つために車両に積載する保冷装置(車両は既存のものを使用すると仮定し、算出対象としない)について、追加的にエネルギーが消費されるとした。地域

外発生分の食品加工残さの輸送距離延長分を片道 50km と設定し、3 台のトラックで 365 日 / 年輸送するため、年間の輸送総距離延長分は 109,500km となる。保冷装置を積載することによりトラックの燃費効率が 20% 低下すると仮定し、小型トラックの燃費効率を基に、5km/L として燃料消費量を算出した。また、距離延長分に係る車両運行費については、間接エネルギーとして計上した。保冷装置はトラック積載型で 3 基、価格はメーカーカタログ等より 1,000 千円 / 基として初期投入エネルギー・廃棄エネルギーを算出した。

規格外甘しょ輸送のための大型トラックの購入価格および輸送条件は、清水ら (2012) のシナリオ 4・計画と同じである。トラック価格に基づき初期投入エネルギー・廃棄エネルギーを、また輸送条件に基づき燃料消費由来の直接エネルギー、人件費・車両固定費・車両運行費由来の間接エネルギーを算出した。

また、本ステージでは、飼料化工場での食品残さおよ

び春夏冬の規格外甘しょ貯蔵のための貯蔵庫についても「清水ら (2012) の Table 32」に示す価格条件・使用条件から初期投入エネルギー・廃棄エネルギーおよびランニングエネルギー消費の直接エネルギーを算出した。以上より、シナリオ 4・計画のステージ②に係るエネルギー消費を Table 25 に示す。間接エネルギーの算出に用いた 3EID 原単位については、部門名を付記している (Table 2 参照)。

(3) バイオマスの変換ステージ

バイオマスの変換ステージにおいては、エネルギー消費に加え、変換により生成されたエネルギーや製品に由来するエネルギー生産を算出する。

シナリオ 4 の実態では、地域内発生分の食品加工残さは焼却施設で焼却される。一方、地域外発生分の食品加工残さは地域外で処理され、規格外甘しょは、ステージ①で畑に鋤込まれている (発生しない) ため、評価対象外である。よって、本ステージでは、地域内発生分の食

Table 25 シナリオ 4・計画の②収集・輸送・貯蔵ステージにおけるエネルギー消費
Energy consumption in ② Biomass transportation stage of Plan Scenario 4

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー (MJ/年)	食品加工残さ(市内発生分)の収集輸送(貯蔵なし)に係る車両等購入	neutral
	食品加工残さ(市外発生分)の収集輸送のための小型トラック 3 台購入	評価対象外のため算出しない
	食品加工残さ(市外発生分)の収集輸送のためのトラック積載保冷装置 3 台購入	{(1,000 千円 ÷ 6 年) × 0.0409MJ/円 (No.195 冷凍機・温湿調整装置)} × 3 台 = 20,450MJ/年
	規格外甘しょの収集輸送用大型トラック 1 台購入	(12,960 千円 ÷ 8 年) × 0.0520MJ/円 (No.204 トラック・バス・その他の自動車) = 84,240MJ/年
	貯蔵庫設置	(10,000 千円 ÷ 10 年) × 0.0409MJ/円 (No.195 冷凍機・温湿調整装置) = 40,900MJ/年
廃棄エネルギー (MJ/年)	食品加工残さ(市内発生分)の収集輸送(貯蔵なし)に係る車両等廃棄	neutral
	食品加工残さ(市外発生分)の収集輸送のための小型トラック 3 台廃棄	評価対象外のため算出しない
	食品加工残さ(市外発生分)の収集輸送のためのトラック積載保冷装置 3 台廃棄	20,450MJ/年 × 0.03 = 614MJ/年
	規格外甘しょの収集輸送用大型トラック 1 台廃棄	84,240MJ/年 × 0.03 = 2,527MJ/年
	貯蔵庫廃棄	40,900MJ/年 × 0.03 = 1,227MJ/年
ランニングエネルギー消費 (MJ/年)	(直接・間接エネルギー)食品加工残さ(市内発生分)の収集輸送(貯蔵なし)作業由来	neutral
	(直接エネルギー)食品加工残さ(市外発生分)の収集輸送に係る燃料由来	総走行距離 109,500km ÷ (5km/L) = 21,900L/年 21,900L/年 × (軽油 40.47MJ/L) = 886,293MJ/年
	(間接エネルギー)食品加工残さ(市外発生分)の収集輸送作業由来	評価対象外のため算出しない
	(間接エネルギー)食品加工残さ(市外発生分)の収集輸送作業由来	821 千円 / 年 (輸送車両運行費) × 0.0345MJ/円 (No.298 廃棄物処理(産業)) = 28,325MJ/年
	(直接エネルギー)規格外甘しょの収集輸送に係る燃料由来	総走行距離 6,000km/年 ÷ (3.34km/L) = 1,796L/年 1,796L/年 × (軽油 40.47MJ/L) = 72,684MJ/年
	(間接エネルギー)規格外甘しょの収集輸送作業由来(人件費、車両固定費、車両運行費より算出)	{671 千円 / 年 (人件費) + 73 千円 / 年 (車両固定費) + 54 千円 / 年 (車両運行費)} × 0.0528MJ/円 (No.312 道路貨物輸送(除自家輸送)) = 42,134MJ/年
	(直接エネルギー)貯蔵庫運転電力	3,240kWh/年 × (電力 13.23MJ/kWh) = 42,865MJ/年

品加工残さの焼却処理、焼却灰の埋立処分に係るエネルギーについて計上した。**実態**でのエネルギー生産は0MJである。

焼却施設の建設費、運転条件等は、清水ら（2012）のシナリオ4・**実態**と同じである。「清水ら（2012）のTable 33」に基づき算出したシナリオ4・**実態**のステージ③に係る初期投入エネルギー・廃棄エネルギー・ランニングエネルギー消費とエネルギー生産をTable 26に示す。間接エネルギーの算出に用いた3EID原単位については、部門名を付記している（Table 2参照）。

計画では、飼料化工場が、地域内・地域外で発生した食品加工残さと、原料として購入した規格外甘しょを混合して乾燥・発酵し、栄養補助添加物（ふすまやビタミン類などの添加剤、288t/年）を加えて養豚用の高付加価値飼料に変換する。製造された飼料は工場渡りして販売するため、同量の市販飼料を代替するものとしてエネルギー生産を計上した。

飼料化施設の建設費や運転条件は、清水ら（2012）のシナリオ4・**計画**と同じである。「清水ら（2012）のTable 34」に基づき算出したシナリオ4・**計画**のステージ③に係る初期投入エネルギー・廃棄エネルギー・ランニングエネルギー消費とエネルギー生産をTable 27に示す。間接エネルギーの算出に用いた3EID原単位については、部門名を付記している（Table 2参照）。

(4) 生成物の輸送・貯蔵ステージおよび生成物の利用ステージ

シナリオ4・**実態**では、バイオマス由来の生成物はないため、生成物の輸送・貯蔵ステージおよび生成物の利用ステージでのエネルギー消費は計上しない。**計画**でも、生成物である飼料は工場渡りして販売されるため、輸送・貯蔵は行わない。飼料の利用（養豚）についても、本シナリオでは取りあげない。

Table 26 シナリオ4・実態の③変換ステージにおけるエネルギー消費とエネルギー生産
Energy consumption and production in ③ Biomass conversion stage of Present Scenario 4

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー(MJ/年)	焼却施設建設(15%負担)	$(435,228 \text{ 千円} \div 15 \text{ 年}) \times 0.0413 \text{ MJ/円 (No.284 河川・下水道・その他の公共事業)} = 1,198,328 \text{ MJ/年}$
廃棄エネルギー(MJ/年)	焼却施設廃棄(15%負担)	$1,198,328 \text{ MJ/年} \times 0.05 = 59,916 \text{ MJ/年}$
ランニングエネルギー消費(MJ/年)	(直接エネルギー)電力由来(15%負担)	$413,058 \text{ kWh/年} \times (\text{電力 } 13.23 \text{ MJ/kWh}) = 5,464,757 \text{ MJ/年}$
	(直接エネルギー)A重油(15%負担)	$736 \text{ L/年} \times (\text{A重油 } 42.63 \text{ MJ/L}) = 31,376 \text{ MJ/年}$
	(間接エネルギー)活性炭(15%負担)由来	$1,250 \text{ 千円/年 (活性炭購入費)} \times 0.1499 \text{ MJ/円 (No.109 その他の無機化学工業製品)} = 187,375 \text{ MJ/年}$
	(間接エネルギー)消石灰(15%負担)由来	$598 \text{ 千円/年 (消石灰購入費)} \times 0.0813 \text{ MJ/円 (No.157 その他の窯業・土石製品)} = 48,617 \text{ MJ/年}$
	(間接エネルギー)保守点検(15%負担)由来	$11,956 \text{ 千円/年 (保守点検費)} \times 0.0583 \text{ MJ/円 (No.297 廃棄物処理(公営))} = 697,035 \text{ MJ/年}$
	(間接エネルギー)施設管理事務(15%負担)由来	$14,879 \text{ 千円/年 (事務経費)} \times 0.0185 \text{ MJ/円 (No.344 公務(地方))} = 275,262 \text{ MJ/年}$
エネルギー生産(MJ/年)	なし	0MJ/年

Table 27 シナリオ4・計画の③変換ステージにおけるエネルギー消費とエネルギー生産
Energy consumption and production in ③ Biomass conversion stage of Plan Scenario 4

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー(MJ/年)	飼料化施設建設	$(500,000 \text{ 千円} \div 20 \text{ 年}) \times 0.0428 \text{ MJ/円 (No.289 その他の土木建設)} = 1,070,000 \text{ MJ/年}$
廃棄エネルギー(MJ/年)	飼料化施設廃棄	$1,070,000 \text{ MJ/年} \times 0.05 = 53,500 \text{ MJ/年}$
ランニングエネルギー消費(MJ/年)	(直接エネルギー)施設運転電力由来	$389,484 \text{ kWh/年} \times (\text{電力 } 13.23 \text{ MJ/kWh}) = 5,152,873 \text{ MJ/年}$
	(直接エネルギー)電動フォークリフト2台のバッテリー用電力由来	$8,640 \text{ kWh/年} \times (\text{電力 } 13.23 \text{ MJ/kWh}) = 114,307 \text{ MJ/年}$
	(間接エネルギー)栄養補助添加物(ふすまやビタミン類など添加剤)由来	$8,640 \text{ 千円/年 (栄養補助添加剤購入費)} \times 0.0378 \text{ MJ/円 (No.126 医薬品)} = 326,592 \text{ MJ/年}$
エネルギー生産(MJ/年)	飼料(5,760t/年)による化石エネルギー代替	$5,760 \text{ t/年} \times 41 \text{ 千円/t} = 236,160 \text{ 千円/年}$ $236,160 \text{ 千円/年} \times 0.042 \text{ MJ/円 (No.69 飼料)} = 9,918,720 \text{ MJ/年}$

Table 28 シナリオ4における実態と計画のエネルギー消費とエネルギー生産 (GJ/年)
Energy consumption and production in Present and Plan of Scenario 4 (GJ/year)

			①バイオマスの生産(発生)	②収集・輸送・貯蔵	③バイオマス変換	④生成物の輸送・貯蔵	⑤生成物の利用	計
実態	焼却	消費	0	0	8,170	0	0	8,170
		生産			0			0
計画	飼料化	消費	0	1,222	7,332	0	0	8,554
		生産			9,919			9,919

b 算出結果

シナリオ4における**実態**と**計画**のエネルギー消費およびエネルギー生産の算出結果を**Table 28**にまとめた。ライフサイクルでのエネルギー収支は、“neutral”部分を含めない条件において、**実態**では、マイナス8,170GJ/年(ステージ③のエネルギー消費のみ)、**計画**ではプラス1,365GJ/年となった。ステージ②の**計画**では、**実態**では発生しないエネルギー消費が計上された。これは、市外発生食品加工残さの飼料化施設までの収集輸送(保冷装置や輸送距離の延長)と規格外甘しょの収集輸送に由来するものである。しかし、ステージ③の**計画**でのエネルギー消費は、**実態**に比して小さく、また生成された飼料が代替する化石エネルギーをエネルギー生産とみなすため、**実態**に比べて**計画**ではエネルギー収支が改善される結果となった。

5 休耕田対象シナリオ(シナリオ5)

対象とする休耕水田面積や生産性等の条件、および**実態**・**計画**の各シナリオの詳細は経済性の評価(清水ら, 2012)と同じである。

a 各ステージにおけるエネルギー消費とエネルギー生産の算出

(1) バイオマスの生産(発生)ステージ

シナリオ5・**実態**における維持管理作業(耕うん1回/年, 畦畔除草4回/年)については, 2007年度に筆者らが行った栽培実証試験(清水ら, 2009)の結果に基づき,

燃料消費量から直接エネルギーを算出した。維持管理作業のための農業機械は食用米のものを利用するため, 初期投入エネルギー・廃棄エネルギーは“neutral”とした。

燃料消費量の算出に当たり, 各圃場と作業車自宅との距離を5kmとし, 作業のための移動も含めた。耕うん(27PSのトラクターに標準ロータリーを装着)は, 20aを1単位として算出した。トラクターの燃費効率は軽油7.3L/作業時間, 1.5時間の作業として, 燃料(軽油)消費量は11L/20a, 作業車自宅から圃場までのトラクター移動(往復10km)に係る燃料(軽油)消費量は3.6L/回/20aと算出され, 20a当たりの移動および耕うん作業に係る燃料(軽油)消費量は14.6L/年となった。また, 畦畔除草は, 各回0.5時間の作業とし, 刈払機の燃費効率は混合油0.2L/20aとなった。自宅から圃場までの移動には燃費効率(ガソリン)11km/Lの軽トラックを用いるものとした。以上より算出したシナリオ5・**実態**のステージ①に係る初期投入エネルギー・廃棄エネルギー・ランニングエネルギー消費を**Table 29**に示す。

シナリオ5・**計画**では, 対象とする休耕水田でバイオ燃料原料米を栽培する。栽培に係る作業条件は, 清水ら(2012)に示すシナリオ5・**計画**の①バイオマスの生産(発生)ステージと同じである。栽培対象水田のうち, 「活用可能性」が「可能」な休耕田(231.94ha)に対しては, 作付前に簡易な農地整備を実施する。この農地整備については, 疎水材を用いた暗渠工の単位面積当たりのエネルギー消費を使用期間(15年と仮定)で割り, 1年当たりの初期投入エネルギーとした。農地整備は, 定期的に

Table 29 シナリオ5・実態の①バイオマスの生産(発生)ステージにおけるエネルギー消費
Energy consumption in ① Biomass production stage of Present Scenario 5

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー(MJ/年)	土地(休耕田266.5ha)	評価対象外
	農業機械等購入	食用米のものを利用するため neutral
廃棄エネルギー(MJ/年)	農業機械等廃棄	食用米のものを利用するため neutral
ランニングエネルギー消費(MJ/年)	(直接エネルギー)トラクターの移動・耕うん作業に係る燃料(軽油)由来	$(266.5\text{ha} \div 0.2\text{ha}) \times 14.6\text{L} = 19,455\text{L/年}$ $19,455\text{L/年} \times (\text{軽油 } 40.47\text{MJ/L}) = 787,344\text{MJ/年}$
	(直接エネルギー)畦畔除草に係る燃料(混合油)由来	$(266.5\text{ha} \div 0.2\text{ha}) \times 0.2\text{L} \times 4\text{回/年} = 1,066\text{L/年}$ $1,066\text{L/年} \times (\text{混合油 } 40.24\text{MJ/L}) = 42,896\text{MJ/年}$
	(直接エネルギー)畦畔除草作業のための移動に係る燃料(ガソリン)由来	$(266.5\text{ha} \div 0.2\text{ha}) \times 0.91\text{L} \times 4\text{回} = 4,850\text{L/年}$ $4,850\text{L/年} \times (\text{ガソリン } 40.24\text{MJ/L}) = 195,164\text{MJ/年}$

施す管理作業とみなし、廃棄エネルギーは計上しない。バイオ燃料原料米栽培に必要な農業機械等（生産費調査項目の建物費、自動車費、農機具費）については、既存の食用米のものを利用するため、初期投入エネルギー・廃棄エネルギーは“neutral”とし、農業機械の機械保守点検のためのランニングエネルギー消費は計上せずに、機械使用時の燃料から算出される直接エネルギーのみを算出した。ランニングエネルギー消費のうち、バイオ燃料原料米栽培に投入される資材・サービスに係る間接エネルギーを、「清水ら（2012）の Table 38」に示す各価格と、本報 Table 2 に示す 3EID の原単位を用いて算出した。バイオ燃料原料米（籾付き、水分 25%）は、すべての圃場において 1,452kg/10a の収穫が得られると仮定した。米は、本シナリオ内でエタノール原料として利用されるため、化石エネルギー代替のエネルギー生産と

しては計上しない。以上より算出したシナリオ 5・計画のステージ①におけるエネルギー消費を Table 30 に示す。間接エネルギーの算出に用いた 3EID 原単位については、部門名を付記している（Table 2 参照）。

(2) 収集・輸送・貯蔵ステージ

シナリオ 5・実態では、ステージ①で生産（発生）されるバイオマスはないため、エネルギー消費は計上しない。

計画では、休耕水田で生産された 3,870t/年（水分 25%）の籾付き玄米を、生産者が圃場から乾燥調製施設（食用の既存施設を利用）まで輸送し、乾燥調製する。輸送に係る条件は、清水ら（2012）のシナリオ 5・計画の収集・輸送・貯蔵ステージと同じである。輸送用のダンプトラックは食用米生産と共用と考え、初期投入エネルギーおよび廃棄エネルギー、車両固定費・輸送人件費

Table 30 シナリオ 5・計画の①バイオマスの生産（発生）ステージにおけるエネルギー生産
Energy consumption in ① Biomass production stage of Plan Scenario 5

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー (MJ/年)	土地(休耕田 266.5ha)	評価対象外
	農業機械等購入	食用米のものを利用するため neutral
	「活用可能性」が「可能」な休耕田 (231.94ha)における簡易な農地整備 *1	$(59,870\text{MJ/ha} \div 15\text{年}) \times 231.94\text{ha} = 925,750\text{MJ/年}$
廃棄エネルギー (MJ/年)	農業機械等廃棄	食用米のものを利用するため neutral
	「活用可能性」が「可能」な休耕田(231.94ha)における簡易な農地整備に係る廃棄	計上しない(本文参照)
ランニングエネルギー消費 (MJ/年)	(直接エネルギー)作業及び輸送・移動に係る燃料(軽油)由来	$(327\text{L/ha} \times 266.5\text{ha}) = 87,146\text{L/年}$ $87,146\text{L/年} \times (\text{軽油 } 40.47\text{MJ/L}) = 3,526,799\text{MJ/年}$
	(直接エネルギー)作業及び輸送・移動に係る燃料(ガソリン)由来(ガソリン 54.3L/10a)	$(543\text{L/ha} \times 266.5\text{ha}) = 144,710\text{L/年}$ $144,710\text{L/年} \times (\text{ガソリン } 40.24\text{MJ/L}) = 5,823,130\text{MJ/年}$
	(直接エネルギー)作業に係る燃料由来(混合油 0.4L/10a)	$(4\text{L/ha} \times 266.5\text{ha}) = 1,066\text{L/年}$ $1,066\text{L/年} \times (\text{混合油 } 40.24\text{MJ/L}) = 42,896\text{MJ/年}$
	(直接エネルギー)作業に係る電力由来(0.26kWh/10a)	$(2.6\text{kWh/ha} \times 266.5\text{ha}) = 693\text{kWh/年}$ $693\text{kWh/年} \times (\text{電力 } 13.23\text{MJ/kWh}) = 9,168\text{MJ/年}$
	(間接エネルギー)種由来	$93,280\text{円/ha}(\text{種苗費}) \times 266.5\text{ha} = 24,859\text{千円/年}$ $24,859\text{千円/年} \times 0.0223\text{MJ/円(No.11 種苗)} = 554,356\text{MJ/年}$
	(間接エネルギー)メタン発酵消化液(化学肥料代替)由来	$266.5\text{ha} \times 40\text{t/ha} \times 233\text{MJ/消化液 t} = 2,483,780\text{MJ/年}$
	(間接エネルギー)消毒剤・殺菌剤等薬剤由来	$31,780\text{円/ha} \times 266.5\text{ha} = 8,469\text{千円/年}$ $8,469\text{千円/年} \times 0.1054\text{MJ/円(No.132 農薬)} = 892,633\text{MJ/年}$
	(間接エネルギー)その他の材料(育苗用培土)由来	$35,900\text{円/ha} \times 266.5\text{ha} = 9,567\text{千円/年}$ $9,567\text{千円/年} \times 0.0406\text{MJ/円(No.70 有機質肥料)} = 389,420\text{MJ/年}$
	(間接エネルギー)バイオ燃料原料米栽培(土地改良及び水利費+賃借料及び料金由来)	$81,780\text{円/ha}(\text{土地改良及び水利費+賃借料及び料金}) \times 266.5\text{ha} = 21,794\text{千円/年}$ $21,794\text{千円/年} \times 0.0455\text{MJ/円(No.21 農業サービス)} = 991,627\text{MJ/年}$
	(間接エネルギー)バイオ燃料原料米栽培(建物費、自動車費、農機具費由来)	食用米のものを利用するため計上しない
(間接エネルギー)バイオ燃料原料米栽培(生産管理費由来)	$4,500\text{円/ha}(\text{生産管理費}) \times 266.5\text{ha} = 1,199\text{千円/年}$ $1,199\text{千円/年} \times 0.0142\text{MJ/円(No.337 情報サービス)} = 17,026\text{MJ/年}$	

*1 面積当たりの農地整備に係るエネルギー原単位は、北川巖氏(農研機構農村工学研究所・農地基盤工学研究領域)による(未公表)

に由来するランニングエネルギー消費(間接エネルギー)は計上せず、輸送用燃料消費に伴う直接エネルギーと燃料以外の運行費由来の間接エネルギーを清水ら(2012)に基づき算出した。

次に、食用米と共用のカントリーエレベータ(循環式乾燥方式)で乾燥調製されると想定し、エネルギーを算出した。乾燥調製施設は食用米と共用のため、初期投入エネルギーおよび廃棄エネルギーは計上せず、運転に係る燃料・電力由来の直接エネルギーと管理費由来の間接エネルギーを清水ら(2012)に基づき算出した。乾燥調製施設で発生するもみ殻は販売されるが、副産物であるため化石エネルギーを代替するエネルギー生産とはみなさない。

さらに、乾燥調製済みの玄米の輸送条件(清水ら, 2012)に基づき、輸送用車両の初期投入エネルギーおよび廃棄エネルギー、車両固定費に由来するランニングエネルギー消費(間接エネルギー)は計上せず、輸送用燃料消費に伴う直接エネルギーと、人件費および燃料以外の運行費由来の間接エネルギーを計上した。以上より算出したシナリオ5・計画のステージ②におけるエネルギー消費をTable 31に示す。間接エネルギーの算出に用いた3EID原単位については、部門名を付記している(Table 2参照)。

(3) バイオマスの変換ステージ

バイオマスの変換ステージにおいては、エネルギー消費に加え、変換により生成されたエネルギーや製品に由来するエネルギー生産を算出する。

シナリオ5では、本ステージ以降は計画のみ設定した。

地域内に建設された変換施設において、玄米からバイオエタノールを生成する。本ステージにおけるエネルギー消費・エネルギー生産の算出条件は、清水ら(2012)に詳述されている。

生成されるバイオエタノールは、純エタノール理論発熱量21.2MJ/Lを用いてエネルギー生産を算出した。発酵副産物については飼料原料として販売すると仮定したが、成分等のデータが入手できなかったため、通常の飼料を代替すると仮定して販売予定価格(10千円/t)から3EIDを用いてエネルギー生産を算出した。以上より算出したシナリオ5・計画のステージ③に係る初期投入エネルギー、廃棄エネルギー、ランニングエネルギー消費およびエネルギー生産をTable 32に示す。間接エネルギーの算出に用いた3EID原単位については、部門名を付記している(Table 2参照)。

(4) 生成物の輸送・貯蔵ステージおよび生成物の利用ステージ

シナリオ5・実態では、バイオマス由来の生成物はないため、生成物の輸送・貯蔵ステージおよび生成物の利用ステージでのエネルギー消費は計上しない。計画についても、生成されたバイオエタノールの貯蔵やガソリン混合、流通販売については、シナリオ作成に十分な知見が得られなかった。また、発酵副産物の利用についても実証試験が進められている段階であり、今後の課題としたい。

b 算出結果

シナリオ5における実態と計画のエネルギー消費お

Table 31 シナリオ5・計画の②バイオマスの収集・輸送・貯蔵ステージにおけるエネルギー消費
Energy consumption in ② Biomass transportation stage of Plan Scenario 5

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー(MJ/年)	乾燥調製施設建設	食用米のものを利用するため計上しない
	初付き玄米輸送用4tダンプトラック購入	食用米のものを利用するため計上しない
	乾燥調製済み玄米輸送用10tダンプトラック購入	食用米のものを利用するため計上しない
廃棄エネルギー(MJ/年)	乾燥調製施設廃棄	食用米のものを利用するため計上しない
	初付き玄米輸送用4tダンプトラック廃棄	食用米のものを利用するため計上しない
	乾燥調製済み玄米輸送用10tダンプトラック廃棄	食用米のものを利用するため計上しない
ランニングエネルギー消費(MJ/年)	(直接エネルギー)初付き玄米収集輸送のための4tダンプトラックの燃料(軽油)由来	総走行距離26,600km/年 ÷ (5.26km/L) = 5,057L/年 5,057L/年 × (軽油40.47MJ/L) = 204,657MJ/年
	(直接エネルギー)乾燥調製施設使用燃料(灯油)由来	28,391L/年 × (灯油38.95MJ/L) = 1,105,829MJ/年
	(直接エネルギー)乾燥調製施設使用電力由来	140,978kWh/年 × (電力13.23MJ/kWh) = 1,865,139MJ/年
	(直接エネルギー)玄米輸送のための10tダンプ燃料の燃料(軽油)由来	総走行距離14,000km/年 ÷ (3.34km/L) = 4,192L/年 4,192L/年 × (軽油40.47MJ/L) = 169,650MJ/年
	(間接エネルギー)乾燥調製施設運転由来	24,683千円(管理費) × 0.0455MJ/円(No.21 農業サービス) = 1,123,077MJ/年
	(間接エネルギー)玄米輸送作業由来(乾燥調製施設→変換施設)	1,740千円/年(人件費+燃料以外の運行費) × 0.0528MJ/円(No.312 道路貨物輸送) = 91,872MJ/年

Table 32 シナリオ 5・計画の③変換ステージにおけるエネルギー消費およびエネルギー生産
Energy consumption and production in ③ Biomass conversion stage of Plan Scenario 5

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー(MJ/年)	バイオエタノール変換施設建設	(1,600,000千円÷15年)×0.0428MJ/円(No.289 その他の土木建設)=4,565,333MJ/年
廃棄エネルギー(MJ/年)	バイオエタノール変換施設廃棄	4,565,333MJ/年×0.05=228,267MJ/年
ランニングエネルギー消費(MJ/年)	(直接エネルギー)電力由来	322,929kWh/年×(電力13.23MJ/kWh)=4,272,351MJ/年
	(直接エネルギー)スチーム由来	12,626,000MJ/年
	(間接エネルギー)主原料由来	ステージ①で生産された玄米のため計上せず
	(間接エネルギー)副原料由来	3,668千円/年×0.0378MJ/円(No.126 医薬品)=141,952MJ/年
	(間接エネルギー)施設運転作業由来(点検補修費+人件費より算出)	{24,000千円/年(点検補修費)+40,909千円(人件費)}×0.1164MJ/円(No.119 その他の有機化学工業薬品)=7,555,408MJ/年
エネルギー生産(MJ/年)	バイオエタノール(750kL/年)	750,000L/年×21.2MJ/L=15,900,000MJ/年
	発酵副産物(=飼料とみなす)(981t/年)による化石エネルギー代替	9,810千円/年×0.042MJ/円(No.69 飼料)=412,020MJ/年

およびエネルギー生産の算出結果を **Table 33** にまとめた。シナリオ 5 では、**計画**のステージ③と①におけるエネルギー消費が非常に大きい。ステージ③では、バイオエタノール変換施設のランニングエネルギー消費に占める直接エネルギー(電力およびスチーム由来)が57%を占めており、これらのエネルギーの削減が技術的課題であると言える。また、ステージ①では、機械等を食用米生産と共用することにより初期投入エネルギー・廃棄エネルギーを算出していないにもかかわらず、ランニングエネルギー消費における直接エネルギー(バイオ燃料米栽培の作業及び輸送・移動に係る燃料に由来)がステージ①のエネルギー消費の約60%を占めており、省エネルギー型の農業技術体系の重要性が示唆された。

IV バイオマス利活用シナリオのライフサイクルでのエネルギー収支の評価

1 エネルギー収支についての実態・計画の比較

各シナリオのライフサイクル(全ステージ)のエネルギー消費とエネルギー生産を算出した結果(単位はGJ/年)を **Fig.1** にまとめた。**実態**(上図)および**計画**(下図)について、エネルギー消費(初期投入エネルギー、廃棄エネルギーおよびランニングエネルギー消費の合計)を

右軸に、エネルギー生産を左軸に示している。この図は、地域全体でのエネルギー収支の構造を理解するのに有用である。バイオマス利活用システムのエネルギー自給率を検討する際、バイオマス変換によって生産できるエネルギーに対して、ランニングエネルギー消費が目まされることが多い。本報で扱ったシナリオでは、ライフサイクルでのエネルギー消費のうち、ランニングエネルギー消費が占める割合が84%以上であった。ただし“neutral”の部分に記載していないことに注意を要する。

シナリオ 1 では、約500頭の乳牛ふん尿(25t/日、香取市内牛ふん尿利用可能量の26%)を対象とし、**実態**では堆肥を、**計画**ではメタン発酵とコジェネレーションにより電気・熱・消化液を生成した。システム全体でのエネルギー収支は、**実態**のケース1(3戸の酪農家が個別で堆肥化)でマイナス13,017GJ/年、ケース2(1戸の酪農家が個別で堆肥化)でマイナス12,878GJ/年となった。一方、**計画**では、ケース1(3戸の酪農家が共同でメタン発酵)でマイナス8,189GJ/年、ケース2(1戸の酪農家が個別でメタン発酵)でマイナス7,824GJ/年になり、エネルギー収支の観点では37~39%改善されたことになる。**計画**では、ステージ③で生成される消化液由来のエネルギー生産(代替可能な化石エネルギー)が、**実態**の堆肥由来のエネルギー生産に比べて大きくなって

Table 33 シナリオ 5 における実態と計画のエネルギー消費とエネルギー生産
Energy consumption and production in Present and Plan of Scenario 5

			①バイオマスの生産(発生)	②収集・輸送・貯蔵	③バイオマス変換	④生成物の輸送・貯蔵	⑤生成物の利用	計
実態	休耕田の維持	消費	1,025	0	0	0	0	1,025
		生産			0			0
計画	バイオ燃料原料米栽培とバイオエタノール生成	消費	15,657	4,560	29,389	0	0	49,606
		生産			16,312			16,312

	実態モデル	計画モデル
シナリオ1	乳牛ふん尿の堆肥化	乳牛ふん尿のメタン発酵
シナリオ2	豚ふん尿排水の汚水処理	豚ふん尿排水のメタン発酵
シナリオ3	生ごみ・生活廃水処理汚泥・食品加工残さの焼却	生ごみ・生活廃水処理汚泥・食品加工残さのメタン発酵
シナリオ4	規格外甘しょ・籾込み・食品加工残さの焼却	規格外甘しょ・食品加工残さの飼料化
シナリオ5	休耕田の維持	休耕田でのバイオ燃料原料米栽培とエタノール生成

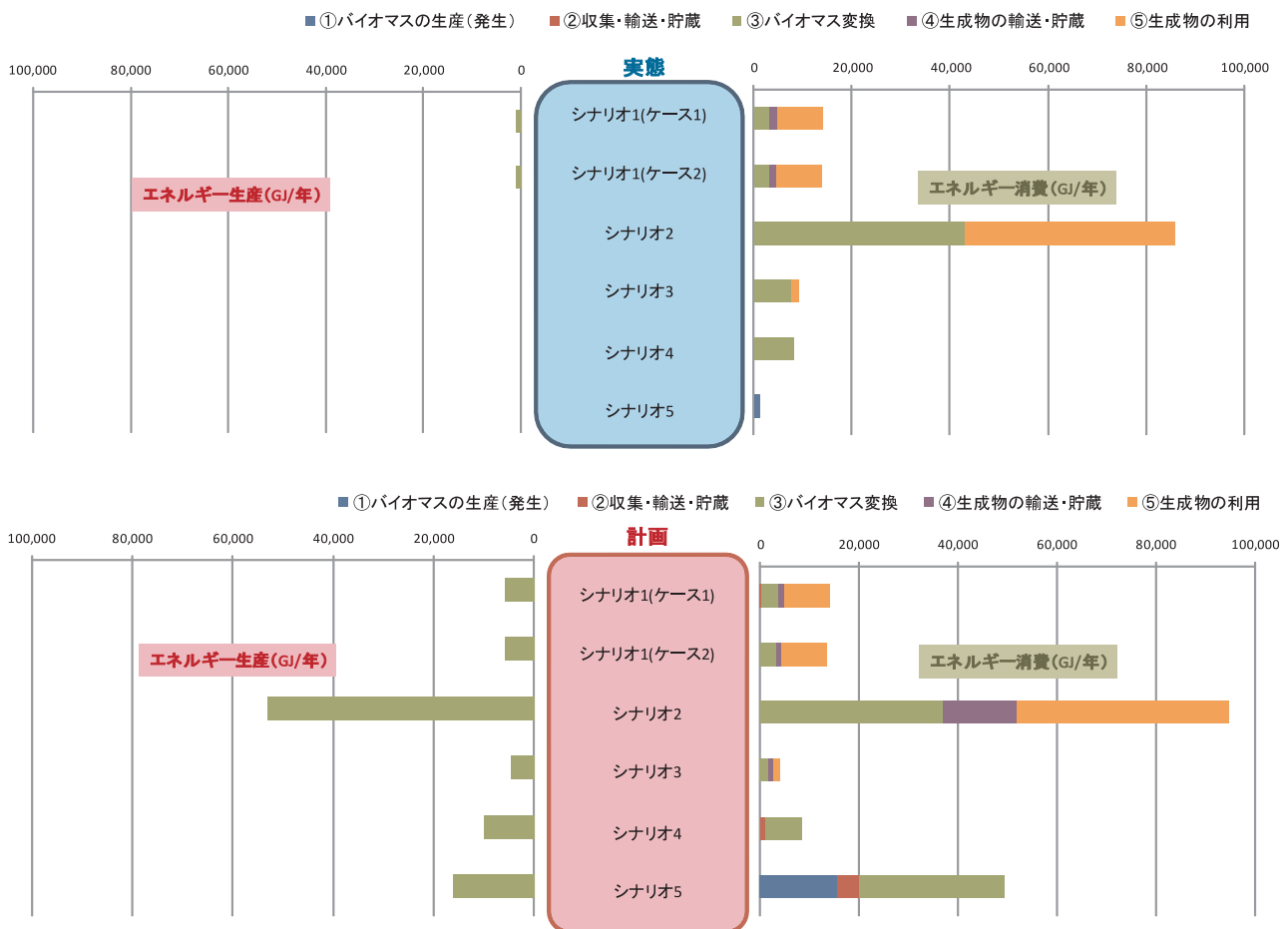


Fig.1 5シナリオにおける実態・計画のライフサイクルでのエネルギー消費およびエネルギー生産
 Lifecycle-basis energy consumption and production in Present and Plan of 5 scenarios

いる。また、Fig.1からは、ステージ④におけるエネルギー消費が、実態に比べて計画で小さくなっていることが読み取れる。本報の条件下では、ステージ⑤のエネルギー消費（投入される肥料成分に基づいて算出しているため実態・計画とも同じである）を除くと、計画のステージ②、③、④で消費されるエネルギーは、ステージ③で生産されるエネルギーよりも小さく、計画は妥当であると言える。

シナリオ2では、母豚170～180頭規模の養豚一貫経営10戸より発生する豚ふん尿排水（除ふんなしで266t/日、香取市内豚ふん尿利用可能量の20%）を対象とし、実態では汚水処理を、計画ではメタン発酵とコジェネレーションを行った。実態ではエネルギー生産はなく、豚ふん尿排水の適切な処理と化学肥料を用いた農産物栽培のために85,821GJ/年が費やされる結果となった。計画では、ステージ④でのエネルギー消費が発生する一方で、ステージ③でのエネルギー消費は実態に比べて小さ

くなり、また、電力、熱、消化液由来のエネルギーが生産された。計画におけるエネルギー収支はマイナス41,856GJ/年であるが、実態と比べると50%以上の改善となっている。計画のステージ④における消化液の輸送・散布体系は、本報で評価対象とした千葉県香取市の道路事情や圃場条件に基づいて設定しており、輸送・散布車両の大型化や消化液の中継貯留槽の設置など、より効率的な輸送・散布体系を構築することにより、エネルギー消費を削減できる可能性がある。

シナリオ3では、生ごみ、生活排水処理汚泥、食品加工残さの混合物10t/日を対象とした。実態では焼却処理を、計画ではメタン発酵・コジェネレーションを行った。実態ではエネルギー生産はなく、焼却処理（ステージ③）と化学肥料を用いた農作物栽培（ステージ⑤）のためのエネルギー消費は合わせて9,209GJ/年となった。計画では、ステージ④で消化液の輸送・散布のためにエネルギーが消費されたものの、メタン発酵・コジェネ

レーション(ステージ③)でのエネルギー消費は小さく、また生成物に基づくエネルギー生産はエネルギー消費を上回った。シナリオ3の**計画**におけるエネルギー生産は、“neutral”とみなした部分を対象外とすれば、ステージ①～⑤のエネルギー消費の合計よりも大きくなり、本報で設定した**計画**は、エネルギー収支の観点から妥当であると言える。

シナリオ4では、規格外甘しょ(1,500t/年、発生量の17%)と地域内発生分食品加工残さ(3,917t/年)に加え、地域外発生分の食品加工残さ(3,283t/年)を対象とした。地域外発生分の食品加工残さを対象としたのは、規格外甘しょの飼料化の副原料が地域内だけではまかなえなかったためである。**実態**では、規格外甘しょは利用されず、食品加工残さは焼却処理される。**計画**では、これらを合わせた30t/日(300日/年稼働)から19.2t/日の飼料を生成した。**実態**における食品加工残さの適切な処理(ステージ③の焼却処理)に係るエネルギー消費は8,170GJ/年であるのに対し、**計画**では、地域外発生分の食品加工残さの輸送に係る追加エネルギー消費も含めたシナリオ全体でのエネルギー消費は8,554GJ/年と増加した。しかし、③バイオマスの変換ステージでは、化石エネルギーを代替する飼料が生成され、“neutral”とみなした部分を評価対象外とすれば、エネルギー生産はシナリオ全体でのエネルギー消費を上回る結果となった。そのため、**計画**の②収集・輸送・貯蔵ステージで飼料原料確保のために新たに消費されるエネルギー(市外発生分の食品加工残さに係る保冷装置や輸送距離の延長、規格外甘しょの収集輸送に由来)を加味しても、本報で設定した**計画**は、エネルギー収支の観点から妥当であると言える。

シナリオ5では、資源作物(バイオ燃料原料米)の生産とこれを原料としたバイオエタノール生成を扱った。**実態**では、休耕田266.5ha(香取市内の遊休水田の約70%)は維持管理作業のみを行い何も栽培しない。**計画**では、同じ休耕田でバイオ燃料原料米を栽培し、バイオエタノールを生成する。**実態**では休耕田の維持に係るエネルギー消費のみであるため、エネルギー消費は1,025GJ/年と小さい。一方、**計画**では、ステージ①における休耕田での簡易な圃場整備およびバイオ燃料米栽培、ステージ②における原料籾・玄米輸送や乾燥調製、ステージ③におけるエタノール生成に係るエネルギー消費が大きく、シナリオ全体で49,606GJ/年のエネルギー消費となった。それに対し、ステージ③で生産されるバイオエタノールおよび飼料原料が代替可能なエネルギーは16,312GJ/年であり、エネルギー収支は大きくマイナスとなった。バイオエタノール生成においては、とくに熱の消費の小さい変換技術の開発・導入、あるいは熱を供給できる他のシナリオ(たとえばシナリオ1,3)との組み合わせにより、エネルギー収支の改善を図る必要があることが示唆された。ただし、シナリオ5について

は、エタノール生成やそれに伴う原料の前処理に係る技術、変換工程の規模について十分な知見が得られず、また、エタノール発酵残さの飼料原料としてのエネルギー代替可能性についても過大に評価している可能性があるため、今後さらなる情報収集と検討が必要である。

以上のように、シナリオ1,2,3,4では、**実態**に比べて**計画**ではエネルギー収支が改善される結果となった。シナリオ5では、**計画**でのエネルギー消費がエネルギー生産の約3倍となり、エネルギー収支の観点のみで判断すれば、望ましくない結果と言える。

本報では、5対のシナリオを個別に評価した。各シナリオの対象となるバイオマスの種類や量が異なるため、シナリオ間の比較には注意が必要である。また、シナリオ1,2,3で生産された電力・熱等のシナリオ間での融通など、複数のシナリオの組み合わせにより、地域内のエネルギー収支が改善される可能性もある。これらの課題については、改めて別報で検討することとしたい。

2 エネルギー収支の評価における課題

ここでは、本報に示した評価方法の課題を整理し、市町村担当者等が評価方法を用いる際の留意点を述べる。

本報では、バイオマス利活用システムの**実態**と**計画**をシナリオとして作成・表現し、**実態**と**計画**が変わらない部分については“neutral”と考えて、その部分のエネルギーを算出していない。また、既存の産業や施設を利用するため、「評価対象外のため算出しない」あるいは「計上しない」とした部分もある。たとえば、シナリオ1の①バイオマスの生産(発生)ステージにおいて酪農経営内で調達される中型ダンプや、シナリオ5の②収集・輸送・貯蔵ステージで利用する乾燥調製施設などである。市町村等での実務においては、公正な評価となるよう、シナリオ設計時に**実態**と**計画**のシナリオをよく比較して、“neutral”あるいは「評価対象外のため算出しない」としてよいかどうかを見極めることが必要である。

評価例として示した5対のシナリオのうち、メタン発酵技術を用いたシナリオでは、異なる原料・規模を取り上げた。メタン発酵施設の規模の大小に伴う建設費の差異は、スケールファクターを用いて算出した(環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部廃棄物対策課,2006)が、他の地域における評価においては、技術の組み合わせ(破碎や固液分離などの前処理工程等)や変換規模等のスケールメリット/デメリットを考慮する必要がある。

エネルギーの算出方法については、以下のような課題が残る。まず、本報では、変換施設(建設土木)に係る施設の初期投入エネルギーは、建設費を使用年数で割った減価償却費に3EIDの「その他の土木建設」部門等の原単位を乗じて初期投入エネルギーを求めた。可能な範囲で施設建設を建設土木および設備機器に分け、設備機器については可能な限り個別に該当部門の原単位を用い

てエネルギーを算出した。しかし、施設は様々な構造物から構成されており、また設備機器についてもさらなる細分化が必要であると考えられる。本来は、その1つ1つについてインベントリを作成することが望ましい。バイオマス変換技術の内容や組み合わせにより設備機器も異なってくるが、本報ではこれらに基づく初期投入エネルギーの差異は、建設費のみによって表現している。建築物の種類別のインベントリデータは、日本建築学会(2006)等、国内でもデータが整備されている。しかし、バイオマス変換施設のような特殊な設備機器については、新たなインベントリデータの構築・蓄積が必要である。また、廃棄エネルギーについては、初期投入エネルギーの5% (建設土木) および3% (設備機器) として算出した。廃棄といっても、木材、コンクリート、金属などリユースやリサイクルされるものもあり、どの段階までを評価対象に含めるかを決定してインベントリを作成する必要があるが、本報では、市町村等が新たにバイオマス利活用施設を建設することを前提としているため、バイオマスの利活用施設の建設については、建設コストと同様に廃棄コストも用意しておく必要があるという観点に基づき、廃棄に係る金額に相当するエネルギーと考えた。数値の妥当性の検証については今後の課題としたい。

個々のシナリオで用いたデータのうち、シナリオ4の**計画**、シナリオ5の**計画**におけるバイオマス変換ステージ(規格外甘しょ・食品加工残さの飼料化、玄米からのバイオエタノール生成)については一貫したデータが得られなかった。既存の文献や調査等から必要な数値を拾い出し、計画したシナリオに当てはまるよう按分して用いているため、これらの数値の使用には注意が必要である。

また、本報では、輸送や施設運転に伴う燃料・電力等の直接的な化石エネルギー消費(直接エネルギー)に加えて、原材料・副資材や活動、サービス等に由来するエネルギー消費として間接エネルギーを、3EIDを用いて算出した。原単位に乗じる価格データは、本来一貫して生産者価格とすべきところであるが、生産者価格と購入者価格が混在している点が課題である。また、原単位は最も近いと思われる部門のものを用いたが、評価者によって異なる見解もあると思われる。とくに新たな労力の投入に対して計上した人件費に基づいた施設管理運営や、輸送に伴う間接エネルギーの算出については、人件費には社会保険や税等を含むかどうかなど、詳細な検討が必要である。

このような課題はあるが、本報では評価の簡便性を重視した。エネルギー消費としてどのような項目を挙げればよいか、またそれらの項目からどのような考え方に基づいてエネルギーを算出すればよいか、を示すことができたと考えている。

V 結 言

本報では、市町村等の「地域」を対象範囲としたライフサイクルでのバイオマス利活用システムについて、エネルギー収支、すなわち化石エネルギーの消費とバイオマス変換によるエネルギー生産のバランスを**実態**と**計画**で比較評価するための枠組みを示し、千葉県香取市を事例として具体的な評価方法を著した。

評価に当たっては、まず、対象地域のバイオマス賦存量や現状での利用状況から、利活用の計画対象となるバイオマスを決定した。次に、対象バイオマスの生産(発生)から生成物の利用までを5つのステージに分け、各ステージの物質の移動や活動の流れを表す**実態**シナリオと**計画**シナリオを作成した。地域内のバイオマス利活用のライフサイクルは、5つのステージで構成されるとともに、各ステージ内でも建設・製造、運営、廃棄の3段階のライフサイクルが設定されている。これらのライフサイクルを考慮した上で、**実態**と**計画**のシナリオ設定に沿って、各ステージでのエネルギー消費およびエネルギー生産を算出し、**実態**と**計画**のエネルギー収支を比較評価した。事例地域では、5対の**実態**と**計画**のシナリオを作成した。各シナリオで対象としたバイオマスは、乳牛ふん尿(シナリオ1)、豚ふん尿排水(シナリオ2)、生ごみ・生活廃水処理汚泥・食品加工残さ(シナリオ3)、規格外甘しょと食品加工残さ(シナリオ4)、休耕田で栽培されるバイオ燃料原料米(シナリオ5)である。各シナリオの**実態**は、事例地域の現状を反映したシナリオ設定とし、**計画**は、シナリオ1, 2, 3ではメタン発酵とコジェネレーションによる電熱生産および消化液の農地利用、シナリオ4では養豚用の飼料生成、シナリオ5では玄米を原料としたバイオエタノール生成を設定した。

評価の結果、牛ふん尿のメタン発酵(シナリオ1・**計画**)、豚ふん尿排水のメタン発酵(シナリオ2・**計画**)、生ごみ・生活廃水処理汚泥・食品加工残さのメタン発酵(シナリオ3・**計画**)、規格外甘しょ・食品加工残さの飼料化(シナリオ4・**計画**)では、**実態**(シナリオ1では堆肥化、シナリオ2では汚水処理、シナリオ3では焼却、シナリオ4では鋤込みと焼却)に比べてエネルギー収支が改善された。

本報では、エネルギー収支の評価において、ランニングエネルギー消費だけでなく初期投入や廃棄に係るエネルギーも評価に含めた。既述したように、評価方法については精度や公平性における課題を残している。しかし、地域(市町村)の中でバイオマス利活用のライフサイクルを把握し、エネルギーを指標としてこのライフサイクルを追うことにより、エネルギーの需要と供給、また、地域内のエネルギー自給率をも評価することができる。

ライフサイクルでのエネルギー収支の評価は、提案されるバイオマス利活用システム導入の可否条件を判断する上で重要であり、また、エネルギー利用と密接に関わ

る温室効果ガス排出量の評価にも応用可能である。

参考文献

- 1) 菱沼竜男・栗島英明・楊翠芬・玄地裕 (2008) : LCA手法を用いたメタン発酵施設によるふん尿処理・利用方式の環境影響の評価－堆肥化・液肥化処理との比較－, 日本家畜管理学会誌・応用動物行動学会誌, 44(1), 7-20
- 2) 環境省 (2011) : 温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度について, 算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧 (改正後), < <http://www.env.go.jp/earth/ghg-santeikohyo/material/itiran.pdf> > (2011.11.24 最終確認)
- 3) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部廃棄物対策課 (2006) : 廃棄物処理施設建設工事等の入札・契約の手引き, 2006.7.18 公開, http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=8285&hou_id=7331, (2011.11.2 最終確認)
- 4) 経済産業省資源エネルギー庁総合エネルギー統計検討会事務局 (2007) : 2005年度以降適用する標準発熱量の検討結果と改定値について, 1-29, < <http://www.enecho.meti.go.jp/info/statistics/jukyuu/resource/pdf/070601.pdf> > (2011.11.24 最終確認)
- 5) 間野和美 (2009) : ごみ焼却施設における触媒フィルターによる排ガス処理コスト等の削減に関する事例, 環境技術会誌, 134, 89-92
- 6) 中村真人 (2011) : メタン発酵消化液の液肥利用の環境影響評価, 農研機構発－農業新技術シリーズ 3, 184-187
- 7) 中村真人・柚山義人・山岡賢・折立文子・藤川智紀・清水夏樹・阿部邦夫・相原秀基 (2010) : メタン発酵プラントのトラブル記録と長期運転データの解析－山田バイオマスプラントを事例として－, 農工研技報, 210, 11-36
- 8) 中山博敬・中村和正・大深正徳 (2006) : メタン発酵施設のエネルギー収支と光熱費に与える気温の影響, 北海道開発土木研究所月報, 634, 33-41
- 9) 南齋規介・森口祐一 (2010) : 産業連関表による環境負荷原単位データブック (3EID) : 2005年表 (β+版), 独立行政法人国立環境研究所 地球環境研究センター
- 10) 日本建築学会 (2006) : 建物のLCA指針～温暖化・資源消費・廃棄物対策のための評価ツール～, 第3版, 1-178, 日本建築学会, 東京
- 11) 農林水産省大臣官房統計部 (2010) : 平成21年農作物価指数 (2010.6.22 公表), 1-24
- 12) 大日方裕・石田哲也・栗田啓太郎・小野学・石渡輝夫 (2005) : 共同利用型バイオガスプラントの稼働状況とエネルギー収支－別海資源循環試験施設の稼働状況の総括－, 北海道開発土木研究所月報, 629, 27-39
- 13) 大村道明・竹内良曜・松井克則・菊池貞雄 (2005) : 個別農家用バイオガスプラントからの余剰ガスの輸送・貯蔵に関する予備的考察, 農業施設, 35(4), 211-220
- 14) 佐賀清崇・横山伸也・芋生憲司 (2007) : 稲作からのバイオエタノール生産システムのエネルギー収支分析, Journal of Japan Society of Energy and Resources, 29(1), 30-35
- 15) 清水夏樹 (2005) : 有機性資源の利活用を促進するための支援策－牛ふん尿の堆肥としての利用を例として－, 農工研技報, 203, 47-56
- 16) 清水夏樹・柚山義人・中村真人 (2009) : バイオ燃料原料としての多収米栽培におけるエネルギー収支と経済性, 平成21年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 筑波大学, 208-209, 2009年8月6日
- 17) 清水夏樹・柚山義人 (2010) : エネルギー収支・経済性・環境負荷からみたバイオマス利活用シナリオの評価, 農村計画学会誌, 28巻, 論文特集号, 243-248
- 18) 清水夏樹 (2011) : バイオマス賦存量の算定方法, バイオマスタウンアドバイザー育成テキスト (農林水産省平成22年度国産バイオ燃料等普及促進事業) 第5章2, 375-394, 日本有機資源協会, 東京
- 19) 清水夏樹・柚山義人・中村真人・山岡賢 (2012) : バイオマス利活用システムのライフサイクルを対象とした経済性の評価, 農工研技報, 212, 53-96
- 20) トヨタ自動車株式会社・みずほ情報総研株式会社 (2004) : 輸送用燃料のWell-to-Wheel評価 日本における輸送用燃料製造 (Well-to-Tank) を中心とした温室効果ガス排出量に関する研究報告書 (平成16年11月) 19, 2004, < <http://www.mizuho-ir.co.jp/publication/report/2004/wtwghg041130.html> > (2011.10.24 最終確認)
- 21) 柚山義人・山岡賢・中村真人・清水夏樹 (2010) : ライフサイクル的にみたバイオマス利活用評価の論点, 農土論集, 266, 71-76

Lifecycle-basis Evaluation of Energy Balance on the Biomass Utilization System

SHIMIZU Natsuki, YUYAMA Yoshito, NAKAMURA Masato and YAMAOKA Masaru

Summary

Biomass utilization system is consisted of 5 process stages of 1) production or generation of feedstock biomass, 2) collection, transportation and storage of feedstock biomass, 3) conversion of the feedstock biomass to demand-oriented energy and material (products), 4) storage, transportation of the products and 5) use of the products. Each of them has 3 time stages of 1) initial installation/construction, 2) running (operation) and 3) disposal. This paper tried to show the methodology of calculating lifecycle energy balance between energy consumption and production of designed biomass utilization system to contribute to the Municipal Biomass Utilization Promotion Plan under the Master Plan for the Promotion of Biomass Utilization. Energy consumption consisted of direct fossil energy and indirect energy. Indirect energy is fossil energy consumption to produce material and supplementary material or to provide services, calculated by price and the Embodied Energy and Emission Intensity Data for Japan Using Input-Output Tables.

To show the concrete procedures of evaluation, Katori city of Chiba prefecture was chosen as a representative of suburban agricultural and livestock industrial area. Five scenarios of biomass utilization system were designed that represent both present condition and planed condition. Each process stage is considered from both needed hardware and human activities. Biomass utilization in scenarios are composed methane fermentation, composting, animal feeding and so on.

The evaluation results clarified the structure of energy consumption and production for designed biomass utilization scenarios and will provide ideas to choose suitable biomass utilization plan in terms of energy profitability. The lifecycle-basis evaluation is important to ensure the sustainability of biomass utilization system. The person in charge of preparing the Municipal Biomass Utilization Promotion Plan can apply this methodology for their own plans.

Keywords: biomass utilization, lifecycle, fossil energy consumption, methane fermentation digested slurry, alternative chemical fertilizer

〔農工研技報 212〕
〔127 ~ 135, 2012〕

土地改良施設を利用した小水力発電計画に関する一考察

後藤眞宏*・上田達己*・浪平 篤*・廣瀬裕一*

目次

I 緒言	127	1 建設単価との関係	130
II 使用データ	128	2 償還年数と売電単価との関係	131
1 分析に使用したデータ	128	V 土地改良区への聞き取り結果	133
2 データの詳細	128	1 結果	133
III 実施地区の特徴	129	2 今後の小水力開発の方向性	134
1 実施地区の発電の特徴	129	VI 結言	134
2 発電方式のパターン	129	参考文献	134
IV 経済性の評価	130	Summary	135

I 緒言

東日本大震災以降、太陽光発電、風力、バイオマス、地熱等の再生可能エネルギーへの関心が高まっている。その中でも出力で1,000kW以下の小水力発電は、新聞、テレビ、雑誌等で数多く取り上げられ、注目を集めている。また、2011年11月には第2回全国小水力サミットが富山県黒部市で開催される等、産学官民での活動が盛んに行われている。

再生可能エネルギーを巡っては、再生可能エネルギーによる発電の全量を電力会社が一定の期間、固定価格で買い取る全量買取制度である再生可能エネルギー特別措置法が2011年8月に成立した。これまでは太陽光発電の余剰電力の買い取り制度のみであったが、本法により全量、一定期間、固定価格での買取が行われることとなり、再生可能エネルギーの開発の推進が期待されている。

水力発電に関しては、明治24年の琵琶湖疏水の蹴上発電所建設から昭和35年まではわが国最大の電力供給源であり、水主火従時代と呼ばれた。昭和36年以降は火力発電所が中心となり、2010年度末で発電設備容量は、原子力が20.1%、LNG火力が25.7%、石炭火力が16.0%、石油等火力は18.9%、水力が8.5%、揚水が10.6%、新エネルギーが0.2%となっている（資源エネルギー庁、2011）。

水力の利用は古くから行われている。古くは、1878

年（明治11年）の「共武政表」という統計では9,000台以上の水車が稼働していた（末尾、1980）。1942年（昭和17年）の調査によると、精米、タービン等農事用水車が約78,000台、このうち農事用の在来型水車が73,000台稼働していた（前田、1992）。また、1920年（大正9年）ごろに富山県で考案された動力用の螺旋水車は、全盛期の1935年（昭和10年）には約13,000台が普及していた（田中、1990）。戦後の1952年（昭和27年）には、農山漁村などの無電地区に電力を供給する目的で、農山漁村電気導入促進法が制定され、農協、土地改良区、森林組合等が事業主体となり、今日までに200地点以上の発電所が建設されて、現在でも中国地方で数十機稼働している（農村開発企画委員会、1983）。

そして、ダム、頭首工、農業用水路などの土地改良施設を利用した発電出力が数千kW以下の小水力発電は、1983年（昭和58年）から土地改良施設における電力使用料の負担軽減を目的とし、かんがい排水事業の一工種として建設が可能となった。発電所建設のための調査は、全国100地区以上で行われており、このうち2009年（平成21年）時点で全国26地区の発電所が建設されている。

そこで本報告では、このように発電調査実施地区は多いにもかかわらず、発電事業実施地区が少ない点に着目して、調査地区のデータをもとに、発電事業実施の可否に関して、主に経済的な観点から分析するとともに、事業実施地区への聞き取り調査結果についても報告し、今後の事業実施への参考とするものである。

* 資源循環工学研究領域エネルギーシステム担当

平成23年12月15日受理

キーワード：小水力発電、土地改良事業、経済性評価、建設単価

II 使用データ

1 分析に使用したデータ

1983年(昭和58年)から土地改良事業の一環として、ダム、水路等の農業水利施設が包蔵する小水力エネルギーを開発利用して水力発電を行い、土地改良施設の運転操作に必要な電力を供給し、土地改良施設の維持管理費の軽減を図る小水力発電事業が制度化された。小水力発電では、クリーンな循環型エネルギーの開発利用として環境面でも評価されており、各地で事業化についての検討が行われている。

この間、全国土地改良事業団体連合会は、平成5年度までに109地区(重複地区2地区)について発電所建設に関する概略設計及び基本設計を実施した。2007年度(平成19年度)までに26地区(表1)が建設され、そのうち22地区が上記109地区に含まれている。

本報告では、重複2地区をのぞいた107地区の概略設計及び基本設計の報告書をもとに、1995年(平成7年)

に全国土地改良事業団体連合会が各発電計画の概要について取り纏めた報告書(全国土地改良事業団体連合会、1995)を用いて分析を行う。なお、本報告書は未公表データであり、データ使用の許可を全国土地改良事業団体連合会より得ている。

2 データの詳細

本報告では、主に経済的な観点からの分析を行うため、各発電所の以下の数値データを用いた。

a 最大出力

当該発電所で発電できる最大の発電出力で、発電所で使用する最大の水量である最大使用水量時で、最大有効落差時に生じる。水車や発電機などの発電所の施設規模を決める重要な数値である。単位は、kWである。

b 年間可能発電電力量

発電所が年間を通じて事故停止もせず点検維持補修

Table 1 農村振興局所管事業による小水力発電施設設置状況
The small scale-hydropower projects funded by the Rural Development Bureau

	地区名	都道府県	事業種別	発電所名	発電方式	水車	最大出力(kW)	運転開始
1	大野原	大分県	県営かん排	大野原発電所	ダム水路式	横軸ペルトン	260	S62.6
2	庄川右岸	富山県	県営かん排	安川発電所	水路式	横軸フランシス	640	S62.12
3	備北	岡山県	県営かん排	大佐ダム発電所	ダム式	横軸フランシス	510	S63.3
4	十三塚原	鹿児島県	県営畑総	竹山ダム発電所	ダム式	横軸クロスフロー	190	S63.9
5	西目	秋田県	県営かん排	西目発電所	水路式	横軸フランシス	740	H元.10
6	愛本新	富山県	県営かん排	愛本新発電所	水路式	横軸フランシス	530	H元.12
7	加治川沿岸	新潟県	県営かん排	内の倉発電所	ダム式	縦軸フランシス	2,900	H2.4
8	両筑平野	福岡県	県営かん排	両筑江川発電所	ダム式	横軸フランシス	1,110	H2.6
9	会津北部	福島県	国営かん排	大平沼発電所	ダム式	横軸フランシス	570	H4.4
10	那須野原	栃木県	国営農地開発	那須野ヶ原発電所	水路式	横軸フランシス	340	H4.6
11	上郷	石川県	県営かん排	上郷発電所	水路式	S型チューブラ	640	H7.4
12	打尾川	富山県	県営かん排	臼中発電所	ダム式	横軸フランシス	910	H10.12
13	庄川	富山県	県営かん排	示野発電所	水路式	水中タービン型	550	H11.1
14	迫川上流	宮城県	国営かん排	荒砥沢発電所	ダム式	横軸フランシス	1,000	H11.4
15	高田	和歌山県	団体営中山間	高田小水力発電所	水路式	横軸ペルトン	282	H11.4
16	五城	新潟県	県営かん排+農村総合整備	五城発電所	水路式	横軸フランシス	1,100	H14.2
17	吉井川下流	岡山県	県営かん排	新田原井堰発電所	ダム式	横軸プロペラ	2,400	H15.4
18	胎内	新潟県	農村総合整備	鹿ノ俣発電所	ダム水路式	横軸フランシス	960	H15.4
19	川小田	広島県	農村総合整備	川小田小水力発電所	水路式	S型チューブラ	720	H15.4
20	新安積	福島県	国営かん排	安積疏水発電所	水路式	横軸フランシス	2,230	H16.4
21	会津宮川	福島県	国営かん排	新宮川ダム発電所	ダム式	横軸フランシス	1,100	H16.4
22	中島	石川県	県営かん排	七ヶ用水発電所	水路式	S型チューブラ	630	H16.4
23	金峰	鹿児島県	県営かん排	金峰発電所	ダム式	横軸クロスフロー	170	H16.4
24	大淀川左岸	宮崎県	国営かん排	広沢ダム小水力発電所	ダム式	横軸フランシス	640	H17.6
25	馬淵川沿岸	岩手県	国営かん排	大志田ダム発電所	ダム式	横軸フランシス	810	H17.7
26	曾於南部	鹿児島	国営かん排	輝北ダム発電所	ダム式	横軸クロスフロー	400	H19.4

停止もしないものと仮定した場合に、1年間に発電が可能な電力量である。電力会社への売電単価（円/kWh）を乗じることによって、年間の収益が計算でき、開発時期の変動による物価変動の影響を受けないので、経済性を検討する上で重要な数値である。単位は、kWhである。

c 建設費

水力発電所の建設工事は、ダム、取水口、導水路等の土木費、発電所や変電所の建物費、水車、発電機、配電盤等の電気関係費に大別される。このような直接的な工事関係費に加えて、仮設備、建設所運営関係費や工事資金にかかる金利なども工事費に含まれる。

d kW 当たりの建設単価

建設費を最大出力で除した数値である。kW 供給力として期待され、ピーク発電をする貯水池、調整池式発電では、この値が安いことが求められる。流れ込み式が多い小水力発電では発電所出力は小さいが設備利用率が高く年間発電電力量が大きくなることから、kW 当たりの建設単価で経済性を評価するのではなく、kWh 当たりの建設単価を指標することが一般的である。

e kWh 当たりの建設単価

建設費を年間可能発電電力量で除した数値である。計画段階において、水力発電の経済性の概略を簡便に示す指標である。

昭和55年の資源エネルギー庁の第5次包蔵水力調査において示された、kWh 当たりの建設単価をもとにした経済性の簡易な基準値が現在でも参考にされている（Table 2）。

Table 2 発電方式別基準値（経済性ランク）

Profitability criteria for hydropower generation projects
(円/kWh)

級	a	b	c
発電方式			
流れ込み式	250以下	250～500	500を越えるもの
調整池式	300以下	300～600	600を越えるもの
貯水池式	400以下	400～800	800を越えるもの

a：経済性ありと判断され、今後の調査で開発の可能性がある地点。

b：aクラスに準ずる地点。

c：開発の優先度が低い地点。

III 実施地区の特徴

1 実施地区の発電の特徴

2007年度（平成19年度）時点で発電所が設置された26地区の特徴を示す。まず、発電所の規模を示す最大出力を見ると、500～1,000kWの規模が全体の半数の13地区であり、次いで500kW以下の6地区である（Fig.1）。最大規模は、加治川沿岸地区のダム式発電の2,900kWで、一箇所の平均値では850kWである。

水車形式は、横軸フランシス水車が16地区で最も多く、次いで横軸クロスフロー水車とS型チューブラ水車が3地区、横軸ペルトン水車が2地区ずつ、水中タービン水車と横軸プロペラ水車が1地区ずつである。

経済性の指標であるkWh当たりの建設単価を見ると（Fig.2）、多くの地区で200～300円/kWh以下となった。経済性の簡易な基準値に照らし合わせてみると、ダム式及びダム水路式発電ではほとんどの地区でaランクで、2地区においてbランクとなっている。水路式では、すべてaランクまたはbランクとなっており、建設されたすべての発電所がTable 2の基準に照らすと開発可能性がある地点に含まれている。

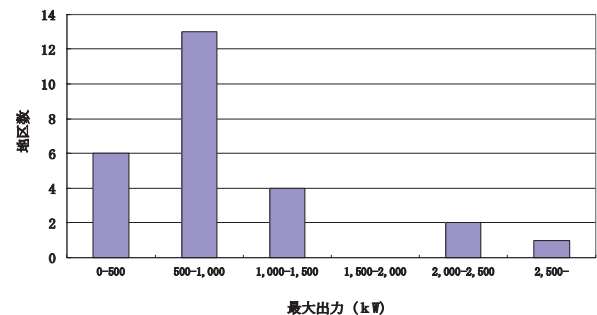


Fig.1 最大出力別の地区数

The number of project areas by maximum output

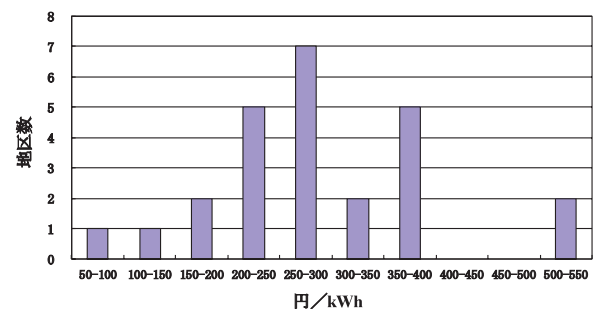


Fig.2 kWh 当たりの建設単価の分布

Distribution of the unit construction cost per kWh

2 発電方式のパターン

発電が実施された地区では、発電に使用する用水や施設の活用方法によって発電方式がいくつかのパターンに分類できる。

a ダムを利用した発電

ダムの落差を利用して発電する方式である。

(1) かんがい用水利用

ダムに貯留された農業用水を発電用水として使用して発電する方式である。従って、かんがい期間中には発電量が多くなる。一方で、非かんがい期間中の発電が困難となる地区もある。事例地区として、加治川沿岸地区の内の倉発電所がある。

(2) 河川維持用水等利用

ダムの下流河川の維持のために放流される用水や無効

放流を発電用水として使用して発電する方式である。年間を通じて流量の変化が小さいため、発電量は貯水位によって変わるものの大きな変化がない特徴がある。事例地区として、金峰地区の金峰発電所がある。

b 頭首工を利用した発電

頭首工の落差を利用して発電する方式である。

(1) かんがい用水利用

連続して設置された頭首工において、下流の頭首工で取水する農業用水を上流の頭首工で放流する際に発電する方式である。下流への放流量が多く、最大出力、年間の発電量が大きい。事例地区として、吉井川下流地区の新田原井堰発電所がある。

(2) 河川維持用水等利用

頭首工の下流河川の維持のための放流される用水や無効放流を発電用水として使用して発電する方式である。年間を通じて流量と頭首工上流水位の変化は小さいため、発電量の変化が小さい特徴がある。事例地区として、富山県の庄川合口発電所がある。

c 用水路を利用した発電

(1) 落差工利用

農業用水路内に短い区間における数mの落差地点において、発電所を設置する方式である。水圧管路を長く敷設する必要がない。事例地区として、中島地区の七ヶ用水発電所がある。

(2) 連続落差工利用

農業用水路内に連続して設置されている1m程度の小落差工地点において、水圧管路を敷設して落差を確保する方式である。事例地区として、上郷地区の上郷発電所がある。

3 発電方式とkW当たりの建設単価

発電方式とkW当たりの建設単価では、ダム式発電の多くが1,100千円/kW以下であるのに対して、水路式の多くが1,500千円/kW以上であった。これはダム式発電の場合、水圧管路などがダム建設費として計上されているため発電関連の建設費が水路式発電に比べて低くなることが考えられる。一方、水路式発電では建設費に水圧管路が計上され、水圧管路費が多い場合には高くなることが考えられる。

IV 経済性の評価

1 建設単価との関係

a kW当たりの建設単価と最大出力の関係

kW当たりの建設単価と最大出力の関係から、実施地区の最大出力は概ね200kW以上であり、未実施地区の多くは最大出力が250kW以下であった。また、実施地区のkW当たりの建設単価は500,000～1,500,000円/kWであることが明らかになった (Fig.3)。

b kWh当たりの建設単価と年間総発電量の関係

kWh当たりの建設単価と年間総発電量の関係から、実施地区の年間総発電量は概ね100万kWh以上であり、未実施地区の多くは、年間総発電量が100万kWh以下であった。また、実施地区のkWh当たりの建設単価は100～400円/kWhであることが明らかになった (Fig.4)。

c kW当たりの建設単価とkWh当たりの建設単価の関係

kW当たりの建設単価とkWh当たりの建設単価の関係から、実施地区は概ね50～150万円/kW, 150～250

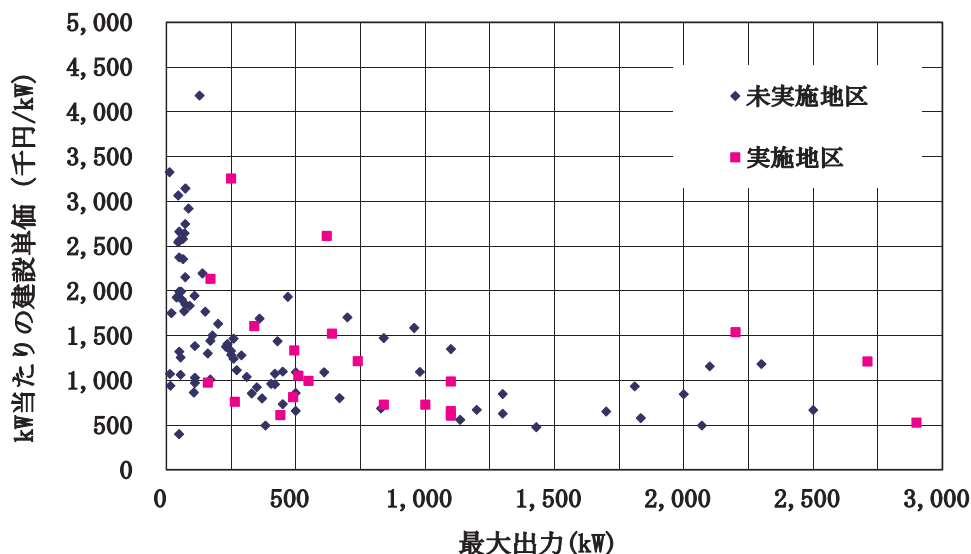


Fig.3 kW当たりの建設単価と最大出力の関係

Relationship between the unit construction cost per kW and the maximum output

円/kWhの範囲に入ることが明らかになった (Fig.5)。

d 実施地区と未実施地区における kWh 当たりの建設単価の比較

建設の適否を判断する参考値と考えられる kWh 当たりの建設単価 (円/kWh) に関して、既建設地区の平均値は 235 円/kWh、未建設地区の平均値は 353 円/kWh であった (Fig.6)。

e 実施地区と未実施地区の違い

発電実施された地区において最大出力当たりの建設費 (円/kW) が高い地区はかんがい用水を利用した水路式発電所であることが明らかになった。アンケート調査の結果、発電に到らなかった地区で経済的に有利と判断された地区の約半数は親事業である土地改良事業がないため実施できなかったこと、冬期の水利権がないこと、

地元の理解が得られないこと、管理面で地元が不安を感じていたことが明らかになった。平成 21 年度から地域用水環境整備事業において、小水力発電施設の新設、改修が土地改良事業と切り離して単独で行えるようになった。この事業により、今後小水力発電施設の建設が増加するものと思われる。

2 償還年数と売電単価との関係

Fig.5 に示した実施地区の多くが kW 当たりの建設単価が 150 万円/kW 以下、kWh 当たりの建設単価が 250 円/kWh 以下であった。そこで、kW 当たりの建設単価の 150 万円/kW、kWh 当たりの建設単価の 250 円/kWh を閾値として、kW 当たりの建設単価の 150 万円/kW の上下、kWh 当たりの建設単価の 250 円/kWh の上下を 4 ケースに分類して、未実施の 86 地区について建設の可能性について検討した。ケース 1 は、kW 当たりの建

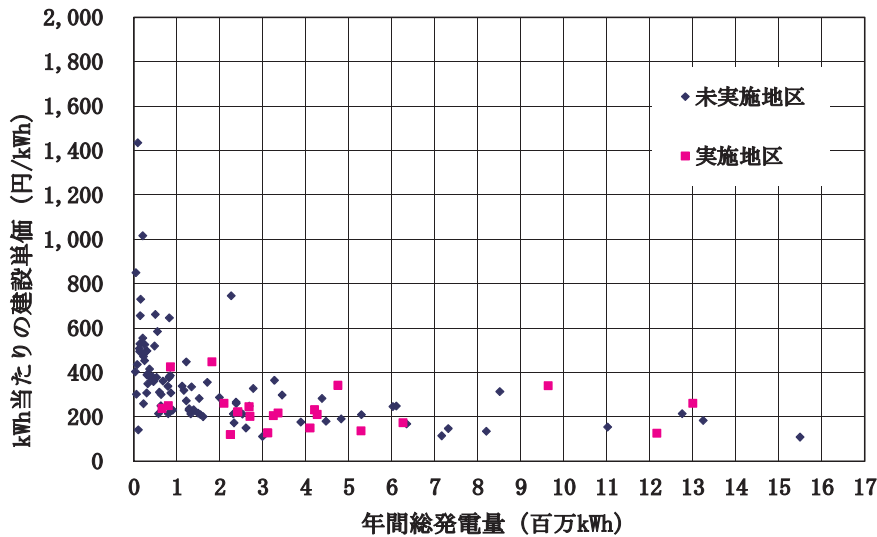


Fig.4 kWh 当たりの建設単価と年間総発電量の関係

Relationship between the unit construction cost per kWh and the annual total production of electricity

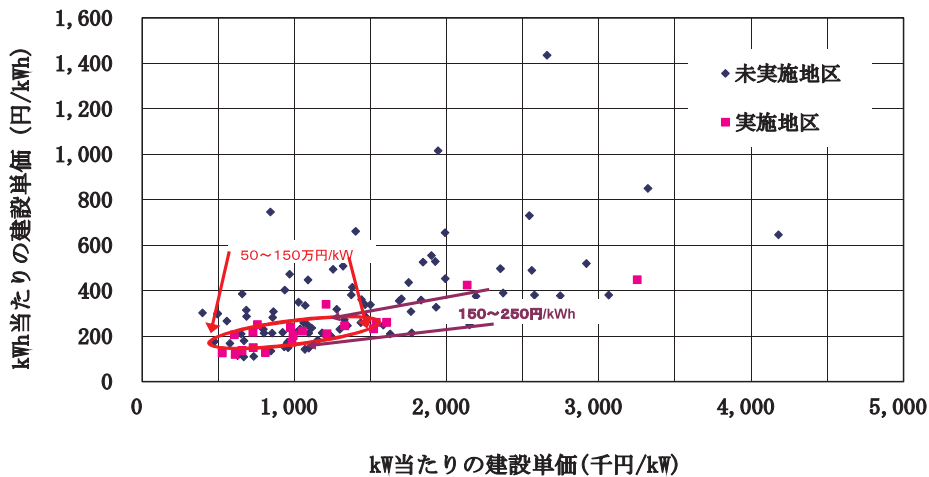


Fig.5 kW 当たりの建設単価と kWh 当たりの建設単価の関係

Relationship between the unit construction cost per kW and the unit construction cost per kWh

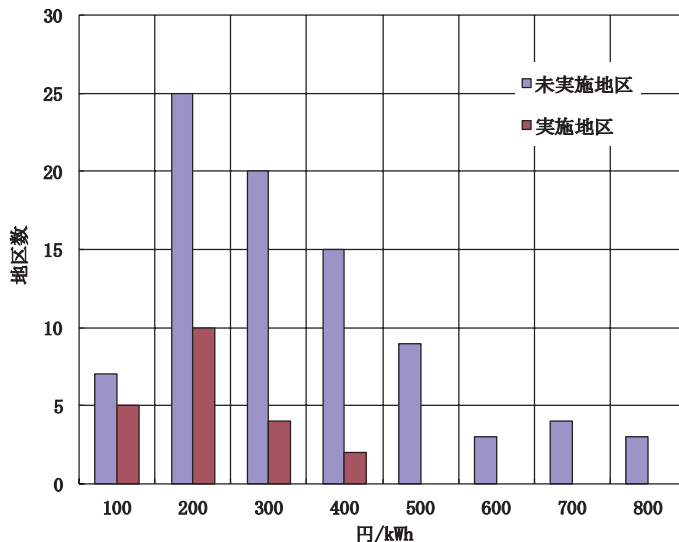


Fig.6 kWh 当たりの建設単価による実施地区と未実施地区の分布

Distribution between project areas that have installed hydropower plants and those that have not by unit construction cost per kWh

設単価が 150 万円 /kW 以上と高く、kWh 当たりの建設単価も 250 円 /kWh 以上と高い 31 地区で、ともに閾値を超えており、建設実施の可能性が低いと判断される。ケース 2 は、kW 当たりの建設単価が 150 万円 /kW 以上、kWh 当たりの建設単価が 250 円 /kWh 以下の 5 地区で、建設費が高いために実施が困難と考えられる。ケース 3 は、kW 当たりの建設単価が 150 万円 /kW 以下、kWh 当たりの建設単価が 250 円 /kWh 以下の 26 地区で、水利権などの経済性以外の理由で建設に至っていないと判断される。ケース 4 は、kW 当たりの建設単価が 150 万円 /kW 以下、kWh 当たりの建設単価が 250 円 /kWh 以上の 29 地区で、経済性が改善することにより建設可能性が向上すると判断して、以下の検討を行った。

そこでケース 4 の 29 地区について売電単価と建設率

の関係を検討した。ここで売電単価とは、電力会社が購入する単価で、単位は円 / kWh である。建設可能性とは、建設の可能性を示す値で、各地区の kWh 当たりの建設単価 (= A) と償還年数 (10 年 ~ 30 年まで 5 年間隔で変化させる) × 売電単価 (= B) を比較したときの $A < B$ となる割合である。なお、 $A > B$ では建設可能性がないと判断した。また、ここでは発電に関する人件費やメンテナンスコスト等のランニングコストは考慮せずに、償還年数を単純に kWh 当たりの建設単価 / 売電単価として検討した。

この結果、Fig.7 に示したように、売電単価が 10 円では償還年数を長くしても建設可能性は 30% 程度であること、売電単価が 15 円になると償還年数が 25 年で建設可能性が 60% を越え、売電単価が 25 円以上になると償

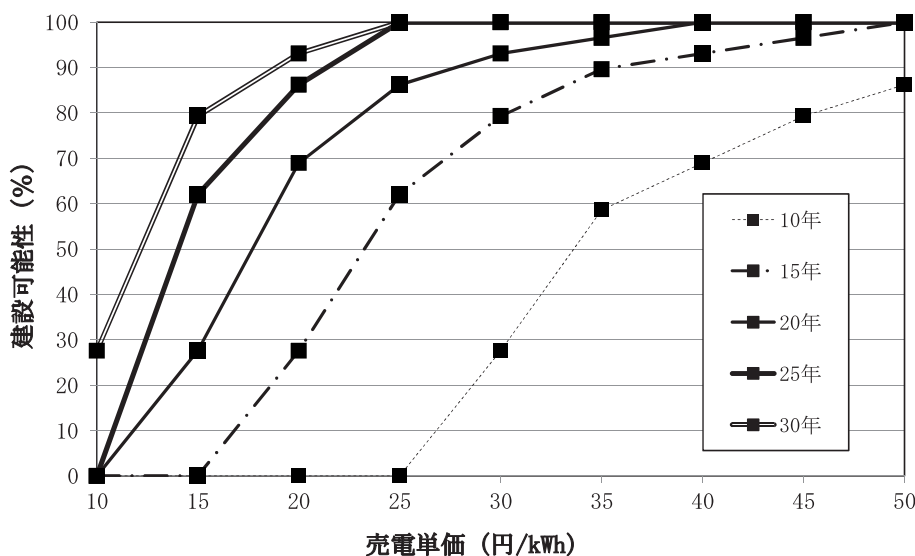


Fig.7 売電単価と建設可能性の関係

Relationship between the unit selling price of electricity and construction possibility

還年数が15年でも約60%の地区において建設可能性が高くなることが明らかになった。

2011年8月に成立した再生可能エネルギー特別措置法では、具体的な価格や買い取り期間については今後の検討となっているが、20年、20円/kWh程度の数値が議論に上がっているようである。

これまでかんがい排水事業で建設された小水力発電で生じた電力は、土地改良施設の操作等に使用される自家消費に加えて、残りの電力（余剰電力）は電力会社に売電され、売電収入となっていた。2011年11月に農林水産省は、農業水利施設の有する水力エネルギーを最大限活用する観点から、これまでの充当範囲に加えて、土地改良区が管理する土地改良施設全体の修繕費や人件費等の維持管理費にも充当できるようにした。

今回の検討では、売電収益をすべて更新に使用することの前提で償還年数を算定している。しかし、現実的には売電収益は前述のように種々の維持管理費に充当されることから、今回算出された償還年数よりも長くなると思われる。発電事業者にとっては早期の償還と維持管理費の軽減の両面が望まれる。小水力発電は維持管理を行えば数十年継続して利用可能であるが、更新のための積立期間を考慮すると償還年数は10年程度以内が望ましいと考えられる。

今回の検討では、買い取り価格が25円/kWh、補助金なしで償還年数が20～25年という値が算出された。小水力発電の建設当初には多額の資金が必要になることから、補助金制度が存続すれば償還年数が短くなり、発電事業者にとって早期に効果が見られる。買い取り価格の検討と同時に補助金のあり方についても検討が必要である。

V 土地改良区への聞き取り調査

1 結果

土地改良事業による小水力発電を実施している土地改良区に対して、小水力発電事業に関する聞き取りを実施し、以下のような回答が得られた。

①発電事業を行うことによって、発電に関する維持管理費の削減が図られ、結果として負担金軽減に役立っている。

②発電所のゴミ、落雷による発電所停止時の運転復旧、発電とかんがい用水の両立のための水管理等、発電所の運営に関する管理負担が大きい。

③土地改良施設に小水力発電所を建設する際に、たとえば発電所停止時の復旧操作を常駐管理所で遠隔操作できるなどの小水力発電所の管理を考慮したシステム設計をする必要がある。

④水車、発電機や配電盤など小水力発電機器を更新するための費用は莫大になることから、その準備が大きな負担となっている。

⑤河川法や土地改良法など小水力発電の実施に際して、種々の手続きが必要であるが、手続きが煩雑であることから、簡素化が望まれる。

⑥電気事業法に関わる電気主任技術者やダム水路主任技術者を土地改良区で専任することが負担となっている。

⑦土地改良施設を利用した小水力発電では、発電に使用できる用水は農業用水に完全従属となっているが、これでは特に非かんがい期間の発電量の増加が見込めない。

⑧地区内の消費電力量が発電候補地点の出力より小さい場合、地区内の消費電力量以上の発電が行えない、い

Table 3 現状の問題点と今後の開発の方向性
The present problem and the directions of future development

	現状の問題点	今後の開発の方向性
経済性	1. 小型水車のコストが相対的に高い 2. 建設初期の費用が他の再生可能エネルギーに比べて高い 3. 全量買い取りの期間が限定されている 4. 各種価格の積算根拠が不明確	1. 小型水車の低コスト化 出力規模別の買い取り価格の設定 2. 建設初期の助成の継続 3. 全量買い取りの期間の延長 4. 積算根拠の明確化
制度	1. 各種法手続きが繁雑 2. 冬期の流量が少なく開発可能地点が限られる 3. 見合い施設が施設規模の制限になっている 4. 他目的使用の緩和範囲が少ない 5. 各種専任技術者が必要である	1. 小型水車の場合の手続きの簡素化 2. かんがい用水完全従属から流域管理方法の開発 3. 賦存量算定による小水力開発の可能性提示 4. 小型出力水車の位置づけの明確化 5. 小型出力水車の影響の明確化
技術	1. 低落差地点が未開発 2. 小流量地点が未開発 3. 水路内のゴミ 4. 売電以外に利用方法が少ない 5. 非かんがい期の流量が少ない 6. 幅広水路への水車の設置が困難	1. 1m以下の低落差用水車の開発 2. 0.1～10m ³ /sの水車開発 3. 小さなゴミに対応する低コストな除塵装置の開発 4. EV、マイクログリッドへの利用技術の開発 5. 水利システムにおける流量調整方法の開発 6. 種々の流量に対応できる水利施設の開発

わゆる見合い施設の考え方によって、地域に賦存する小水力ポテンシャルが十分に開発されない。

2 今後の小水力開発の方向性

土地改良区への聞き取りから明らかになった現状の問題点と、問題点から見えてくる今後の開発の方向性を **Table 3** に示す。取り纏めると以下の4点に集約される。

①小規模水力技術の開発：本報告で対象とした数百kW以上の小水力発電に関する技術はほぼ完成されているが、数十kW以下の小規模水力に関する水車、除塵施設、水車設置方法などの技術開発、低コスト化は今後取り組まなければならない課題である。

②長期間を見据えた制度設計：小水力発電の建設において初期コストが大きいことから、建設に際して補助金制度や助成制度が重要である。また、小水力発電は数十年間の稼働が可能であることから、電力の買い取り価格においては、発電出力規模に応じて段階的価格を設ける、長期間安定した価格にするなど、長期間を見据えた制度設計が重要である。

③資源管理における合意形成：小水力発電は、農業用水の本来目的であるかんがい、発電を付与するものである。このため地域資源である農業用水の管理において、新たな管理ルールの構築が必要になってくることが想定される。その際には、地域住民による合意の形成が重要である。

④流域における発電用水：現状の農業用水を利用した小水力発電では、発電に用いる用水は農業用水完全従属となっている。流域全体での水力開発、エネルギー開発の視点に立ったときに、冬期間の水利権の付与や流域水管理を行い、流域全体で水力エネルギーの効率的な開発を行う必要がある。

VI 結 言

本報告では、土地改良事業における小水力発電調査実施地区のデータを用いて、発電事業実施の可否に関して、主に経済的な観点から分析するとともに、発電事業実施地区への聞き取り調査結果についても報告し、以下の結果を得た。

- 1) 平成19年度時点で発電所が設置された26地区の特徴として、発電所の規模を示す最大出力が500～1,000kWの規模が全体の半数の13地区で、次いで500kW以下の6地区で、一箇所の平均値では850kWである。

- 2) 実施地区は、kW当たりの建設単価が50～150万円/kW、kWh当たりの建設単価が150～250円/kWhの範囲に概ね入る。
- 3) kW当たりの建設単価が150万円/kW以下、kWh当たりの建設単価が250円/kWh以上の29地区について売電単価と償還年数の関係から検討した結果、売電単価が10円では償還年数を長くしても建設率は30%程度であること、売電単価が15円になると償還年数が25年で建設可能性が60%を越え、売電単価が25円以上になると償還年数が15年でも約60%の地区において建設可能性が高くなることが明らかになった。買い取り価格が20～25円/kWh、償還年数が20～25年になると建設可能性が高くなることが明らかになり、今後の参考になる数値と言える。
- 4) 発電を実施している土地改良区への聞き取りの結果、発電事業は負担金軽減に役立っている、発電事業はゴミ・落雷・水管理等管理負担が大きい、更新費用の準備が大変である、手続きの簡素化が必要であるなどの回答があった。
- 5) 土地改良区への聞き取りの結果から、今後の小水力発電開発の方向性として、小規模水力技術の開発の必要性、長期間見据えた制度設計、資源管理における合意形成手法の開発、流域管理から見た小水力の効率的利用手法の開発の必要性が示された。

参考文献

- 1) 前田清志(1992)：日本の水車と文化，玉川大学出版部，43
- 2) 農村開発企画委員会(1983)：農村工学研究33，85
- 3) 資源エネルギー庁(2011)：エネルギー白書2011，31
- 4) 末尾至行(1980)：水力開発＝利用の歴史地理，大明堂，7
- 5) 田中勇人(1990)：螺旋水車，56-61
- 6) 全国土地改良事業団体連合会(1995)：小水力発電計画状況とりまとめ報告書

A Study on Planning Small-scale Hydropower Generation Projects with Irrigation Facilities

GOTO Masahiro, UEDA Tatsuki, NAMIHIRA Atsushi and HIROSE Yuichi

Summary

Economic feasibility of implementing small-scale hydropower generation systems installed at irrigation facilities has been analyzed in this study, using information from project areas that have undergone relevant surveys. The study also reports the results of interviews to project areas that have installed such hydropower plants. The results are as follows. (1) The average output is 850 kW for the 26 project areas that have installed hydropower plants as of 2007. (2) Construction costs of the existing hydropower plants are roughly in the range of 500-1,500 thousand Yen/kW, or 150-250 Yen/kWh. (3) If the selling price for electricity is raised in the future, hydropower plants could possibly be installed in project areas whose construction costs are less than 1,500 thousand Yen/kW and though more than 250 Yen/kWh. We therefore evaluate feasibility on such project areas, and found that, at a selling price of 10 Yen/kWh, only 30% of potential projects could be pushed ahead with construction no matter how long the redemption years would be; at a price of 15 Yen/kWh, more than 60% could be pushed ahead at the redemption years of 25; and at a price of 25 Yen/kWh, the same 60% could be pushed at a shorter redemption years of 15. (4) According to our interviews, members of Land Improvement Districts possessing hydropower plants have such opinions as: a hydropower generation project can ease financial burdens of maintaining the Districts; such project however gives them some extra labor such as clearing debris in pipelines, restoring facilities from lightning damages, and water management; it is sometimes difficult to prepare funds for rehabilitating the plants; and it is necessary to simplify red tape concerning the projects with various government agencies. (5) The interviews also implied future directions for further promoting small-scale hydropower projects, such as: development of micro-scale hydropower generation technology; proposals for alternative frameworks of regulations; building consensus for water resources management; putting hydropower generation forward as one of major objectives of watershed management.

Keywords: small-scale-hydropower, land improvement project, cost analysis, unit construction cost

〔農工研技報 212〕
137 ~ 156, 2012〕

東北地方の農業用ダムを利用した小水力発電ポテンシャルの評価

上田達己*・後藤真宏*・浪平 篤*・廣瀬裕一*

目次

I 緒言	137	1 データ収集	148
II 大規模な農業用ダムにおける事例調査と 発電ポテンシャルの評価	138	2 調査結果	148
1 データ収集	138	3 まとめ	151
2 データ分析方法	138	IV 東北地方の広域ポテンシャルの評価	151
3 解析結果	141	1 はじめに	151
4 まとめ	146	2 評価方法および結果	151
III 既設の農業用ダム併設小水力発電施設に おける事例調査	148	V 結言	154
		参考文献	155
		Summary	156

I 緒言

3月11日の東日本大震災をうけて、新たな電力供給のかたちが模索されている。そこで求められているのは、①災害発生時に電力供給が急激に低下するリスクを緩和する、小規模・分散型の発電機能の確保、②今後長期間にわたると見込まれる原子力発電からの供給力低下を補完し、特に夏季・冬季のピーク需要に対応できるベース電力供給能力の増強、③自給可能でかつ温室効果ガスを排出しない発電能力の開発、といった観点である。農業水利システムのなかでも、比較的まとまった量の発電が可能な貯水池（ダム）系農業水利施設における小水力発電は、それらの性格を兼ね備えたエネルギー供給の一翼を担うことが期待される。

そこで本研究は、貯水池系農業水利施設における小水力発電に焦点をあて、エネルギー賦存量を解明することを目的とする。特に、大震災による電力不足が生じている東北地方を対象とした分析を行う。ここで、発生した電力は基本的に系統（グリッド）へ売電することを想定する。その場合には、総発生電力量のみならず、どの季節にどれだけ計画的・安定的な発電が可能であるかが重要な評価基準となる。他方で、農業用ダムの一義的な役割は、各時期の需要に応じた農業用水の供給であることは論をまたない。したがって、これら2つの役割を、整

合性をもった形で両立させることが課題である。

これまで、山本ら（1984）、後藤ら（1987；1988）が、農業用ダムにおいて発電を行う場合に予想される発電量ポテンシャルを推計する手法を開発した。そこでは、ダム運用方法をいくつかのケースに分類し、それらを数地区の事例に適用することにより、それぞれのケースにおいて得られる発電量の経時変化を具体的に明らかにした。しかし、そこで得られた成果を、広域の賦存量調査に展開する試みはまだ行われていない。一方、全国レベルでの賦存量調査としては、例えば資源エネルギー庁『未利用落差発電包蔵水力調査』（新エネルギー財団、2009）が、ダム年鑑の情報等に基づき、主要な農業用水専用ダムにおける賦存量を集計し、東北地方で約3.7万kWの未開発発電出力（既開発を含めると約4.7万kW）があることを報告した。しかし、そこでは発電出力の日・月・年変動などは検討されていない。また、環境省『再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査』（環境省、2011）では、地理情報システムを援用し河川勾配などの情報から、河川部における水力発電ポテンシャルを概算した。しかし、この調査は、最大出力3万kW以上の既設の大規模水力発電所で利用している河川区間以外の全ての河川流路において、河川水の落差ポテンシャルを利用し尽くしたと仮想した場合のポテンシャルを提示しており、既設の農業用ダムに限った発電ポテンシャルを検討する観点からは明らかに過大評価であるとともに、発電出力の日・月・年変動なども検討されていない。

そこで本研究は、続くIIで、比較的大規模だが発電施設を有しない農業用ダムにおけるダム運用の実態を事例調査し、それぞれのダムにおいて、現行の運用、すなわ

* 資源循環工学研究領域エネルギーシステム担当

平成23年12月15日受理

キーワード：小水力発電，農業用ダム，再生可能エネルギー，水管理，経済性評価

ち農業用水等の利水放流を優先させた運用を行い、利水放流に従属した発電を行った場合に想定される発電出力の経時的変動および発電事業の経済性を評価する。Ⅲでは、すでに発電事業が組み込まれている農業用・多目的ダムにおける水管理および発電事業の実態を事例調査し、前述の評価結果の妥当性を検討する。Ⅳでは、上記で得られた評価手法・結果を東北地方の他の農業用ダムに適用することにより、貯水池系農業水利施設における、広域的なエネルギー賦存量を解明するとともに、その経時的変動を評価する。

本研究の情報・データ収集にあたっては、東北農政局水利整備課、県庁担当課、ダム管理所、土地改良区等の担当者の方々の多大なご協力をいただいた。ここに謝意を表す。なお本研究では、「農業用ダム」は、灌漑専用ダムのみならず、灌漑を目的の一つとする多目的ダムを含む広義の意味で用いる。

Ⅱ 大規模な農業用ダムにおける事例調査と発電ポテンシャルの評価

1 データ収集

東北農政局管内の比較的大規模（有効貯水量1千万 m^3 以上）でかつ現時点では発電施設を有しない農業用ダムのうち3地区において現地調査および資料収集を行った。なお、これら3地区は、水田地帯を受益地にもち、灌漑単目的あるいは多目的であっても灌漑を主たる目的とするダムであるという点において、東北地方における典型的な農業用ダムである。各々のダムを管理する県・土地改良区から、ダム貯水位・流入量・放流量などの日毎の水管理データおよびダム諸元情報を入手した。

2 データ分析方法

a 発電使用可能水量

Ⅱ-2では、既存の農業用ダムに小水力発電施設を追加で設置した場合に予想される発電ポテンシャルを評価する方法を論ずる。農業用ダムには、通常、利水放流のための放流管と洪水を安全に流下させるための洪水吐が設置されている。本研究では、小水力発電施設は、利水放流管の末端部分にバイパス管を設けて設置し、利水放流（灌漑用水のほか、上水、工業用水、河川維持放流を含む）に従属した発電を行うものとし、以降利水放流管からの放流量を発電使用可能水量として扱う。しかし、Ⅱで扱う3地区については、「ダム放流量」データ、すなわち利水放流管からの放流量と洪水吐からの放流量の合算値しか入手できなかった。そこで、発電ポテンシャル試算の前提として、ダム放流量のうち、発電使用可能水量、すなわち利水放流管からの放流量を抽出する必要がある。そのための手順を以下に示す。なお、これらの手順は、ダム操作規程に則って行われるダム管理操作を模擬するためのものである。

まず、ダム放流量が「最大取水量」（利水放流管を流下できる最大流量）を下回る日においては、放流量の全量が利水放流管を通じて放流されているものとみなし、その全量を発電に使用できるものとする。他方で、ダム放流量が最大取水量を超える出水時には、ダム管理者は、「標準操作規程」（河川法研究会、2010）に鑑み、利水放流管からの放流については抑制または特段の操作を行わず、洪水吐からの放流操作に専念することが多い。そこで、このような事情を反映しつつ単純化した次の仮定を設けることにする。すなわち、ダム放流量が最大取水量を超えた日には、その日の放流管からの放流量（発電使用可能水量）は、前日（すなわち出水前）のそれと等しいと仮定し、それを越えた「超過部分」は基本的に洪水吐ゲートから放流されるとみなし、発電には使用しない水量とする。以上の仮定を、Fig.1に概念的に示す。

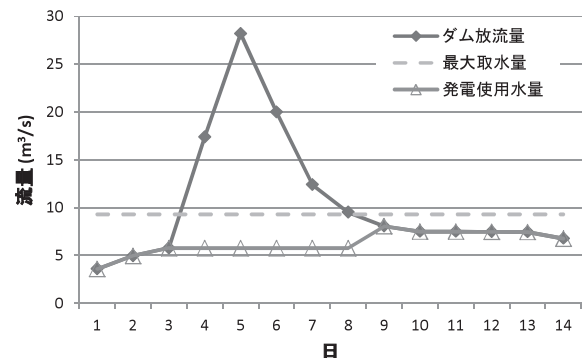


Fig.1 洪水時の発電使用水量推算方法（概念図）

A schematic diagram for estimating discharge for electricity generation

したがって、発電使用水量は、次式によって表される。

$$Q_p(i) = Q_d(i) \quad \text{if } Q_d < Q_{\max} \quad (1)$$

$$Q_p(i) = Q_p(i-1) \quad \text{if } Q_d \geq Q_{\max}$$

$Q_p(i)$: i 日における発電使用水量 (m^3/s)

$Q_d(i)$: i 日におけるダム放流量 (m^3/s)

Q_{\max} : 最大取水量 (m^3/s)

なお、Ⅱ-2-dで後述するように、現実には設置する水車の規模に応じて発電可能な流量に制約があり、実際に発電に使用する水量は、上記で抽出した水量のうち一部であることに留意されたい。

b 発電のための有効落差

Ⅱ-2-aで仮定した発電施設の設置位置に基づき、発電に使用する総落差を、ダム貯水位と放流管出口中心標高の差とする。さらに、損失落差は、一律総落差の15%と仮定する(小水力利用推進協議会、2006)。よって、有効落差は次式により求められる。

$$h_e(i) = [h_d(i) - h_0] \times 0.85 \quad (2)$$

$h_e(i)$: i 日における有効落差 (m)

$h_d(i)$: i 日におけるダム貯水位 (m)

h_0 : 放流管出口中心標高 (m)

実際には、損失落差は、流量等の変動に伴い変化するので、これは単純化された仮定である。

c 水車形式の選定

水車の形式については、Ⅱの調査対象ダムの諸元から想定される発電使用水量および有効落差の変動範囲（それぞれ 0.6 ~ 9.3 m³/s, 19 ~ 48 m）におおむね適合していると考えられる、フランシス水車を用いると仮定する。この水車は、同規模の小水力発電施設において最も広く普及している水車である。

d 水車効率、発電機効率および発電出力、電力量の推算

水車効率、発電機効率とは、それぞれ水車、発電機において生じる損失エネルギーを加味するための係数で、実発電出力の理論発電出力に対する比を示す。ここでは、両者を区別せずに、水車効率×発電機効率の合成効率（総合効率）を、70%と仮定する（小水力利用推進協議会, 2006）。したがって、基準水量、基準有効落差時の発電出力は、理論出力に 0.7 を乗じた次式で表される。

$$P_0 = 9.8 \times Q_p \times h_e \times 0.7 \quad (3)$$

P_0 : 基準水量、基準有効落差時の発電出力 (kW)

Q_p : 発電使用水量 (m³/s)

h_e : 有効落差 (m)

なお、基準水量、基準有効落差とは、ある規模の水車について水車効率がおおむね最大となる最適水量・有効落差のことである (Fig.2 参照)。

さらに、発電用水車は一般的に流量や落差の変化にともない発電効率が増減するが、そのような発電効率の変動特性を、それぞれ変流量特性および変落差特性と呼ぶ。

それらを、フランシス水車を例に示したものが、Fig.2 である（新エネルギー財団, 2002）。

Fig.2 の曲線を多項式で近似すると次式が得られる。

$$\eta_q = -3.0449r_q^4 + 7.657r_q^3 - 7.4317r_q^2 + 3.628r_q + 0.1711$$

$$R^2 = 0.9997 \quad (4)$$

$$\eta_h = -0.9313r_h^4 + 4.5696r_h^3 - 8.5793r_h^2 + 7.2r_h - 1.2577$$

$$R^2 = 0.9998 \quad (5)$$

$$r_q = \frac{Q_p}{Q_{pmax}}$$

$$r_h = \frac{h_e}{h_{estd}}$$

η_q : 変流量効率

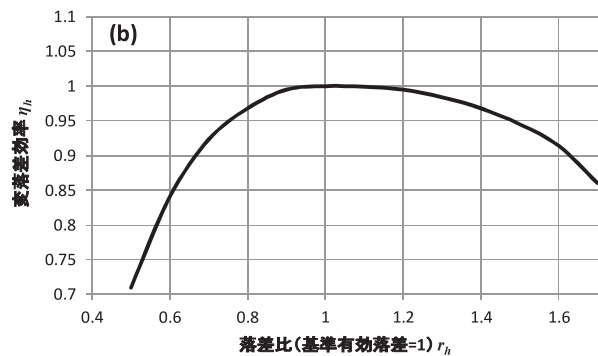
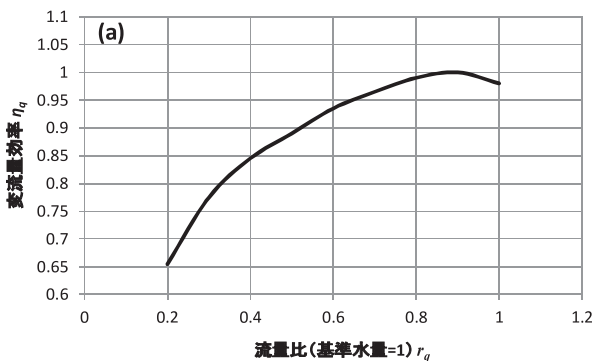
η_h : 変落差効率

Q_{pmax} : 基準水量 (= 最大発電使用水量) (m³/s)

h_{estd} : 基準有効落差 (m)

流量については、水車には設計上基準水量以上の流量を流せないため、Fig.2(a) に基づき、基準水量比で 0.2 ~ 1.0 の間においてのみ発電が可能であるとみなす。したがって、基準水量が最大発電使用水量である。有効落差については、水車など発電設備の構造からは明確な上限落差を定めがたいため、Fig.2(b) の特性曲線を、(5) 式を用いて右側に外挿し、基準有効落差比で 0.5 以上において発電が可能であるとみなす。ただし、(5) 式より、落差比がおおよそ 2.2 を超えると変落差効率が負値となり定義できないので、そのような値は除外する。（なお、Ⅱ-3 において、各種指標より現実的と考えられる基準有効落差を採用したケースでは、有効落差の変動は Fig.2(b) に図示された範囲におさまっている。）

水車の規模、すなわち基準水量および基準有効落差が決定されると、(4)、(5) 式により変流量効率および変落差効率が求められる。さらにこれら効率を、基準水量、基準有効落差時の発電出力 P_0 ((3) 式) に乗じることで、実際の水量、有効落差 (Q_p, h_e) 時の発電出力が求められる ((6) 式)。



注) Fig.2(a) は、比速度 $N_s=104$ (m-kW) のケースを示す。出典：新エネルギー財団 (2002) より作成

Fig.2 変流量効率および変落差効率特性曲線 (フランシス水車)

Relationship between electricity generation efficiency and discharge/ effective head (Francis turbine)

$$P = P_0 \times \eta_q \times \eta_h \quad (6)$$

P : 発電出力 (kW)

(6)式の発電出力を年間にわたり積算することにより、年間可能発生電力量が次の通り求められる。

$$E = \sum_{i=1}^{365} [P(i) \times 24] \quad (7)$$

E : 年間可能発生電力量 (kWh/y)

ただし、うるう年のうるう日 (2月29日) は積算から除く。

なお、本研究では、発電所内消費電力量 (自家消費量) は簡単のため無視し、いわゆる「発電端」出力および電力量について議論する。

e 水車規模の選定に関する評価指標

II -2-d でみたように、発電用水車は、発電可能な流量・落差範囲に限りがあるうえに、流量・落差の変化にともない発電効率が増減する。したがって、農業用ダムのように放流量・貯水位の季節変化が大きいダムにおいて利水従属発電を行う場合には、適正な規模の水車を選定することが肝要である。以下 II -2-e では、そのために必要となるいくつかの評価指標を説明し、最適な水車規模の議論は II -3 で行う。

(1) 発電使用水量に関する指標

Fig.3 は、一般に「河川流況曲線」と呼ばれる表現にならない、II -2-a で抽出した「発電使用可能水量」を年最大値から降順に並べたものである (これを以下「流況曲線」という)。ここで、水車の規模を、ちょうど $D-D'$ から $E-E'$ の流量範囲で発電可能となるように設定したとする。この場合、流量が D を超えた場合は、バイパスを通じて余剰分を逃がし水車にはちょうど D の流量を流す一方、流量が E を下回った場合は発電機が停止する。したがって、実際に発電に使用できる流量は、 $DFGH$ で囲まれた面積となる。ここで、次の2つの指標が導かれる。

$$e_w = (\text{面積 } DFGHO) / (\text{面積 } ACBO) \times 100 (\%) \quad (8)$$

$$e_{fw} = (\text{面積 } DFGHO) / (\text{面積 } DD'BO) \times 100 (\%) \quad (9)$$

e_w : 放流水利用率

e_{fw} : 流量設備利用率

(8)式は、利水放流管を通過する全流量に対する、発電に使用できる流量の比を表し、一般的に「河水利用率」と呼ばれる指標 (新エネルギー財団, 2002) に類似しているが、ここでは利水放流水のみが発電の対象なので、これを「放流水利用率」と称する。一方、(9)式は、流量が年間を通じて基準水量を保ち、設置した水車が100%稼働した場合に対する、実際の流量設備利用量の割合を示し、「流量設備利用率」と呼ばれる (新エネルギー財団, 2002)。

(2) 発電出力、電力量に関する指標

ある規模の水車を用いて発生させる「最大 (発電) 出力」は次式のように定義される。

$$P_{max} = 9.8 \times Q_{pmax} \times h_{emax} \times 0.7 \quad (10)$$

P_{max} : 最大出力 (kW)

Q_{pmax} : 設置した水車の最大使用水量
(= 基準水量) (m^3/s)

h_{emax} : 常時満水位時の有効落差 (m)

「発電設備利用率」 (一般的には単に「設備利用率」と呼ばれるが、ここでは「流量設備利用率」と区別するためこのように呼ぶ) は、(7)式で定義した年間可能発生電力量の、発電設備の最大出力が常時継続した場合の年間発生電力量に対する比であり、次式で定義される。

$$e_{fp} = \frac{E}{P_{max} \times 24 \times 365} \times 100 \quad (11)$$

e_{fp} : 発電設備利用率 (%)

(3) 発電の経済性に関する指標

II では、既存の農業用ダムに小水力発電施設を追加で整備することを想定している。したがって、ここでは簡単のため、小水力発電にかかる追加的な初期費用 (建設費) は、『中小水力発電ガイドブック』 (新エネルギー財団, 2002) にいう「発電所建物工事費」、「機械装置基礎工事

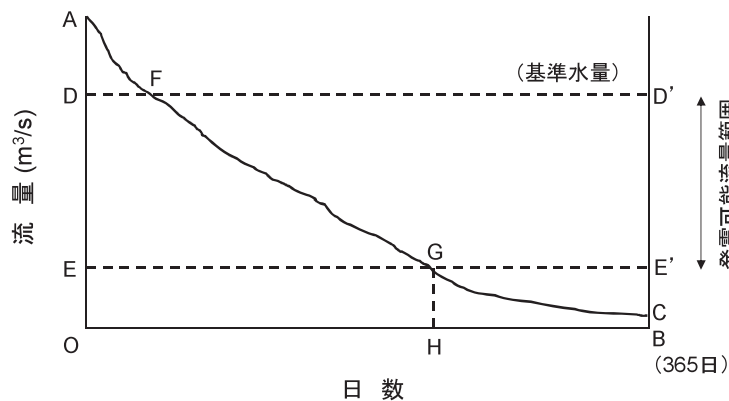


Fig.3 利水放流水の流況と放流水・流量設備利用率の算定 (概念図)
Schematic diagram for dam discharge distribution and discharge/plant factor

費]、「電気関係工事費（水車・発電機を含む）」のみとし、他の設備（ダム堤体、放流設備等）は、既存のものをそのまま利用するため建設費はかからないと想定した。また、発電所建物は地上式、水車はフランス水車を仮定した。これら仮定の下で、上記費用は次式の通り推定される（新エネルギー財団，2002）。

$$Y_h = 0.084 \times (P_{\max})^{0.830} \quad (12)$$

$$Y_b = 0.0595 \times (Q_{p\max} \times h_e^{2/3} \times n^{1/2})^{1.49} \quad (13)$$

$$Y_e = 12.8 \times \left(\frac{P_{\max}}{\sqrt{h_{e\max}}} \right)^{0.648} \quad (14)$$

- Y_h ：発電所建物工事費（百万円）
- Y_b ：機械装置基礎工事費（百万円）
- Y_e ：電気関係工事費（百万円）
- n ：発電機台数（=1）

発電設備の経済性評価の指標はいくつかあるが、ここでは、それらのうち最も簡便な指標である建設単価法（新エネルギー財団，2002）を採用する。建設単価には、出力（kW）あたり単価と発生電力量（kWh）あたり単価の2つがあり、ここではそれぞれ次のように定義される。

$$C_{kW} = \frac{(Y_h + Y_b + Y_e) \times 10^6}{P_{\max}} \quad (15)$$

$$C_{kWh} = \frac{(Y_h + Y_b + Y_e) \times 10^6}{E} \quad (16)$$

- C_{kW} ：出力（kW）あたり建設単価（円／kW）
- C_{kWh} ：発生電力量（kWh）あたり建設単価（円／kWh）

3 解析結果

II-3では、まず、比較的長期間にわたるデータが利用可能なI県Tダムにおける解析結果を事例として詳しく述べ、次に、同様の分析を他のダムについても適用し、結果を相互比較する。

a Tダムにおける事例

(1) ダムの概要

I県Tダムは、水田地帯に受益面積4,265haをもつT事業地区に灌漑用水を供給する農業用ダムであり、現在ダム管理はI県が行っている。放流設備として、最大取水量9.3m³/sの利水放流管および高さ5.5×幅8.0mの洪水吐ゲート3門を有している。有効貯水容量は23,257千m³、常時満水位時における有効落差は38.25m、灌漑期間は4月26日～9月10日である。加えて、下流市街地の上水道用水として、約0.1m³/sを年間取水している。

(2) データ分析方法

解析には、1989～2010年の日放流量・貯水位データを用いる。Fig.4に、Fig.3にならい22年間の日利水放流量について描いた流況曲線を、Fig.5に、22年間の貯水位変化を示す。これらデータより、代表値として22

年間の中央値を、1月1日から12月31日まで1日毎に求め（Figs.4, 5に示す黒破線）、以下の解析で用いる。

次に、これら中央値データを用いて、II-2-d, eで述べた各種の評価指標が、水車規模の違いによってどのように増減するかを検討する。II-2-dで議論した水車の稼働範囲に基づき、おおむね技術的に妥当と思われる、以下の水車規模の範囲において感度分析を行う。まず、基準水量については、それが最大取水量に等しいケースを最大とし、以下、発電使用水量（22年間の中央値）について流況曲線（Fig.4の黒破線）を作成した際の10%、20%、30%、40%、50%（中央値）、60%、70%超過確率流量に等しいケースを設ける。なお、これら流量は、1年365日のうち、それぞれ、37日、73日、110日、146日、183日、219日、256日（すなわちFig.4のx軸を10等分し原点側から数えた日数）でそれを超えると期待される流量のことである。次に、基準有効落差については、それが常時満水位時の有効落差（最大有効落差）38.25mに等しいケースを最大とし、以下、最大有効落差の0.9、0.8、…、0.5倍に等しいケースを設ける。

(3) 分析結果

まず、Tダムの22年間のダム貯水位変動（Fig.5）をみると、翌年の灌漑期間開始日に向けて貯水位を常時満水位にまで上げ、灌漑期間中に徐々に貯水量が減少する、農業用ダムでみられる典型的なダム運用である。ただし

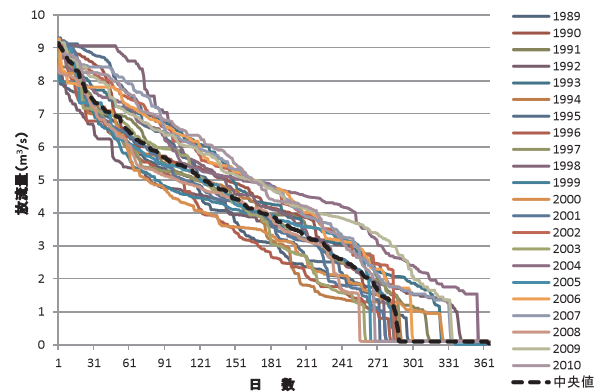


Fig.4 Tダムにおける発電使用水量（推算）の流況曲線
Distribution of discharge for electricity generation at the T dam

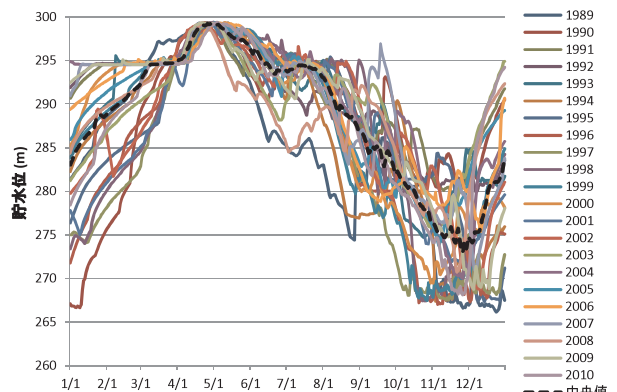


Fig.5 Tダムにおけるダム貯水位の日変動
Reservoir water level at the T dam

本ダムでは、灌漑期終了後の10～11月頃の高降雨時等に比較的高い流量で放流が行われている。結果として、Fig.4の流況曲線は、おおむね80%超過(292日)確率値あたりまで比較的なだらかに低下し、その後急に落ち

込む曲線を描いている。

次に、Table 1に、水車規模の設定と各種指標の関係を示す。

まず、経済性に関する指標について、kWあたり建設

Table 1 Tダムにおける発電施設建設に伴う各種指標の分析結果
Estimated performance indicators for power generation facility at the T dam

(a) 出力 (kW) あたり建設単価 (円/kW)								
	Q_{\max}	10%ile	20%ile	30%ile	40%ile	中央値	60%ile	70%ile
	299,934	311,283	320,872	337,109	349,985	366,850	385,647	410,314
(b) 発生電力量 (kWh) あたり建設単価 (円/kWh)								
	Q_{\max}	10%ile	20%ile	30%ile	40%ile	中央値	60%ile	70%ile
$h_{\max} \times 1.0$	140	123	112	101	95	92	93	98
$h_{\max} \times 0.9$	136	119	108	97	92	89	90	93
$h_{\max} \times 0.8$	133	116	105	94	89	86	87	90
$h_{\max} \times 0.7$	131	115	105	93	88	85	86	89
$h_{\max} \times 0.6$	135	118	107	95	90	87	87	91
$h_{\max} \times 0.5$	162	142	130	115	108	104	103	107
(c) 最大出力 (kW)								
	Q_{\max}	10%ile	20%ile	30%ile	40%ile	中央値	60%ile	70%ile
	2,440	2,128	1,908	1,603	1,409	1,202	1,018	832
(d) 年間可能発生電力量 (MWh/y)								
	Q_{\max}	10%ile	20%ile	30%ile	40%ile	中央値	60%ile	70%ile
$h_{\max} \times 1.0$	5,214	5,384	5,462	5,374	5,185	4,774	4,202	3,499
$h_{\max} \times 0.9$	5,370	5,559	5,656	5,572	5,384	4,968	4,386	3,664
$h_{\max} \times 0.8$	5,510	5,712	5,806	5,730	5,546	5,125	4,532	3,792
$h_{\max} \times 0.7$	5,568	5,759	5,855	5,798	5,609	5,185	4,586	3,840
$h_{\max} \times 0.6$	5,431	5,615	5,716	5,662	5,487	5,078	4,495	3,760
$h_{\max} \times 0.5$	4,505	4,658	4,721	4,713	4,584	4,259	3,794	3,191
(e) 発電設備利用率 (%)								
	Q_{\max}	10%ile	20%ile	30%ile	40%ile	中央値	60%ile	70%ile
$h_{\max} \times 1.0$	24.4	28.9	32.7	38.3	42.0	45.3	47.1	48.0
$h_{\max} \times 0.9$	25.1	29.8	33.8	39.7	43.6	47.2	49.2	50.3
$h_{\max} \times 0.8$	25.8	30.6	34.7	40.8	44.9	48.7	50.8	52.0
$h_{\max} \times 0.7$	26.0	30.9	35.0	41.3	45.4	49.3	51.4	52.7
$h_{\max} \times 0.6$	25.4	30.1	34.2	40.3	44.5	48.2	50.4	51.6
$h_{\max} \times 0.5$	21.1	25.0	28.3	33.6	37.1	40.5	42.5	43.8
(f) 放流水利用率 (%)								
	Q_{\max}	10%ile	20%ile	30%ile	40%ile	中央値	60%ile	70%ile
	96.7	95.0	92.5	88.0	80.4	71.9	61.3	45.7
(g) 流量設備利用率 (%)								
	Q_{\max}	10%ile	20%ile	30%ile	40%ile	中央値	60%ile	70%ile
	38.8	48.8	56.5	61.2	65.6	69.3	72.2	75.8

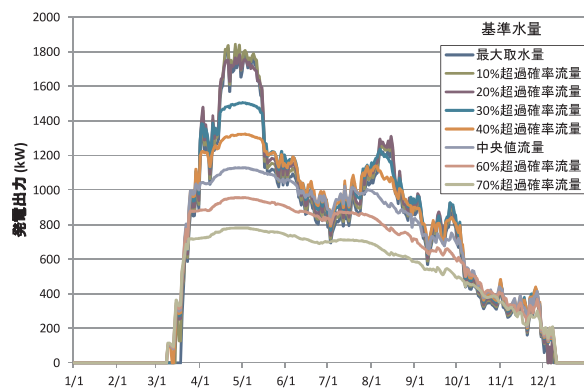
注) Q_{\max} : 最大取水量; --%ile: --%超過確率流量; $h_{\max} \times$ ---: 常時満水位時の有効落差の --- 倍
列方向に基準水量, 行方向に基準有効落差を示す。

なお, 基準有効落差の設定に左右されない指標については, 基準有効落差を示していない。

単価は、基準水量を最大値（最大取水量）に設定した場合が最も小さい一方、kWhあたり建設単価は、「基準水量＝中央値（50%超過確率流量）、基準有効落差＝最大有効落差の0.7倍」のケースで最小となった。これら2種類の単価については、一般に、ピーク電力需要（例えば夏の日中）に応える発電を行う発電所（例えば揚水発電所）ではkWあたり単価が重視され、その他の種類の発電所ではkWhあたり単価を用いることが適当であるとされている（新エネルギー財団，2002）。ここでは、利水従属発電を行うことを想定しており、ピーク対応型の発電ではないことから、kWhあたり単価を重視することが妥当と考えられる。

そこで、上記のkWhあたり単価の最小ケースに基づき、基準有効落差を最大有効落差の0.7倍に固定した場合に、基準水量の設定が発電出力の日変動に与える影響を、Fig.6に示す。kWhあたり建設単価が最小となる「基準水量＝中央値」ケースでは、灌漑期間開始日前後にみられる、融雪水増加ないし代かき用水供給に由来するピーク放流量（すなわちピーク発電出力）がカットされ、灌漑期間直前～期間中の出力変動がおおむね平滑化されていることがわかる。このことから、融雪期～代かき期の発電出力ピークに適合するような規模の発電施設の建設は、経済性の観点からはやや過大投資となりうるということが示唆される。（なお、本研究では、研究対象地域である東北地方の一般的な水文条件に鑑み、代かき期に先立つ1～2か月程度の比較的ダム流入量の多い時期を、厳密に定義することなく「融雪期」と呼ぶが、正確には融雪期間は地区・年ごとに異なり、また灌漑期間と重なる場合があることに留意されたい。）

一方で、基準水量を小さくするほど、発電可能最小流量も小さくなるため、非灌漑期の放流量が少ない時期に発電可能期間が長くなる効果（すなわちFig.3でEE'が下に移動することによりGHが右に移動する効果）が予想される。しかしながら、Fig.6をみる限りでは、基準水量を60、70%超過確率流量に設定しても発電可能



（条件：基準有効落差＝最大有効落差の0.7倍）

Fig.6 Tダムにおける基準水量設定と発電出力変動の関係
Relationship between output and size of power generation facility at the T dam

期間はほとんど増加しておらず、そのような効果は、本事例では限定的であることがわかる。Fig.4の流況曲線をもて、本事例では、最大流量と80%超過確率流量以下の低流量との差が大きく、そのような低流量を発電に使用することが困難であることがわかる。したがって本事例では、非灌漑期の発電可能期間の増加をねらって、必要以上に基準水量を小さく設定すると、経済性の観点からは、発電施設がやや過小規模となりうるということが示唆される。

Table 1の他の指標のうち、最大出力、年間可能発電電力量、放流水利用率については、基準水量を最大にしたケースまたはそれに近いケースで最大化された。したがって、放流水の持つ物理的エネルギーを、年間を通じて最大限活用することを優先するならば、基準水量は最大取水量付近に設定するのがおおむね妥当であることがわかる。とりわけ、年間可能発電電力量の最大化を目指すならば、「基準水量＝20%超過確率流量、基準有効落差＝最大有効落差の0.7倍」のケースが最適となる。前述の通り、このケースはコスト最小化の観点からは最適ではない。しかしながら、Table 1(b)のkWhあたり単価は、いずれの条件下においても小水力発電において採算性の目安とされる「建設費250円/kWh」（後藤，2010）を下回っていることから、本事例において年間可能発電電力量の最大化を優先させることは、再生可能エネルギーによる発電能力の増加という観点からみれば、一定の合理性があると考えられる。

他方で、発電設備利用率および流量設備利用率については、基準水量を小さくするほど効率が高くなる傾向がみられた（Table 1(e), (g)）。しかしながら、前述のコスト最小化の観点からは、そのようなケースが必ずしも最適とはいえない。この不一致の理由として、一般に、発電専用ダムにおいては、可能な限り一年を通じて放流量を平滑化させ（すなわちFig.3で曲線ACを水平に近づけ）、発電・流量設備利用率を高めることが経済性を高めることと整合的であることが多いが、農業用ダムにおける利水従属発電では、そのように放流量を常時固定することは事実上不可能であるため、過度に基準水量を非灌漑期の低放流量に合わせてしまうと、発電施設が過小規模となりコスト高になってしまうことが考えられる。

(4) 発電出力の年変動

以上の議論は、平年並み（22年間の中央値）の放流量・貯水位に基づく分析であったが、現実にはダム放流量は、その年の水文・水利用条件に応じて年毎に変動する。そこで次に、前述の「kWhあたり建設単価最小ケース」に発電施設の規模を固定した場合、放流量の年変動の観点から、日々の発電出力がどれくらいの確率で保証されるのかを議論する。手順としては、まず上記のケースに条件を固定したうえで、22年間の日別ダム放流量・貯水位データから日別発電出力を推算する。次に、1月1日から12月31日まで1日毎に、22個の日別発電出力デー

タから 10, 50, 90%超過確率値を求め、同%「超過確率出力」と定義する。なお、この用語は、先述の「超過確率流量」と似ているが、「超過確率流量」が1年間の流量の日変動から得られた指標であるのに対し、「超過確率出力」は、複数年にわたるデータの年変動を表す指標であることに留意されたい。Fig.7に、10, 50, 90%超過確率出力を1年間にわたり折れ線でつないだものを示す。

Fig.6で既にみたように、「kWhあたり建設単価最小ケース」では、融雪・代かき期において放流量のピークを相当カットしその一部しか発電に使用していないので、その時期において最も発電出力の年変動が小さく、確実性が高くなっている (Fig.7)。さらに、10%超過確率出力より、豊水年においては、非灌漑期にもやや変動は激しいが一定程度の発電が期待できる。他方で、90%超過確率出力より、渇水年においては、発電が見込まれるのはほぼ融雪期～灌漑期間に限られるうえに、灌漑期間中でも代かき期を過ぎるとかなり発電出力の変動が大きく、確実性が低下すると考えられる。

b Sダムにおける事例

(1) ダムの概要

I県Sダムは、水田地帯に受益面積3,890haを持つ農業用ダムであり、現在ダム管理はS土地改良区が受託している。最大取水量7.405 m³/s、有効貯水容量37,600千m³、常時満水位における有効落差は46.95mである。灌漑期間は、4月30日～9月5日である。

(2) データ分析方法および結果

データ分析方法は、II-3-aのTダムに準ずる。データ期間は、2003～2010年である。

Fig.8に、推算した発電使用水量の流況曲線を示す。Sダムでは、灌漑用水および融雪期の洪水調節のための放流以外は、ほぼ河川維持流量のみの放流を行っている。そのため、Tダムと比較して、流況曲線がおおむね中央値 (183日) にかけて急に低下し、それ以降はおおむね河川維持放流量で横ばいとなっている。

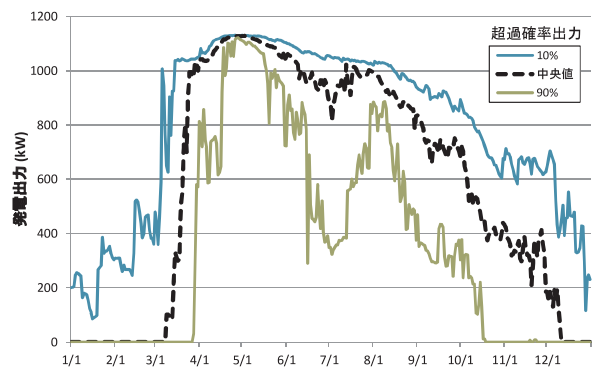


Fig.7 Tダムにおける発電出力の日・年変動特性
Daily and annual variations of estimated output at the T dam

次に、Table 2に、水車規模の設定と各種指標の関係を示す。本事例では、kWhあたり建設単価が、「基準水量 = 60%超過確率流量、基準有効落差 = 最大有効落差の0.8倍」のケースで最小となる。そこで、このケースに基づき、基準有効落差を最大有効落差の0.8倍に固定した場合に、基準水量の設定が発電出力の日変動に与える影響を、Fig.9に示す。

Fig.9より、基準水量をコスト最小ケースの60%超過確率流量にまで低下させたときに、(Fig.3のGHが右にスライドする効果により)初めて冬期 (11月下旬～3月上旬)の河川維持放流による発電が可能となるのがわかる。すなわち、本事例では、発電施設の規模を小さめに設定し、河川維持放流を含め年間を通じた発電を行うことがコスト低減につながるが示された。他方で、このコスト最小ケースでは、灌漑期間中の豊富な放流量による発電出力の増加はほとんど期待できず、発電出力曲線は、おおむねフラットなかたちとなる (Fig.9)。年間可能発生電力量をみても、最大値 (3,134 MWh/y) の3分の1にも満たない量 (982 MWh/y) しか発電できない (Table 2(d))。したがって、II-3-aのTダムと同様、本事例でも、特に夏期における発電出力・電力量の増加を重視するならば、採算性の目安である「建設費250円/kWh」に留意しつつ、ある程度発電施設の規模を大

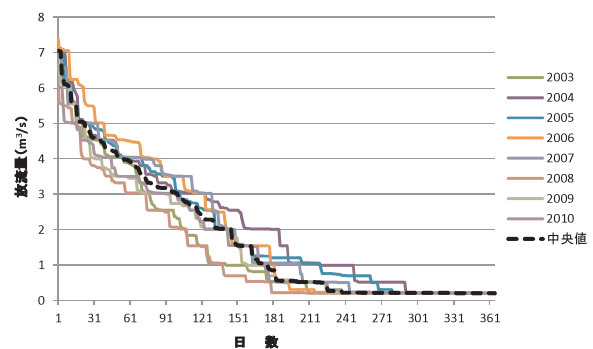
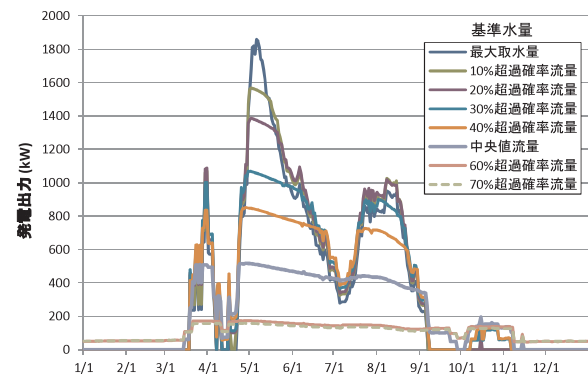


Fig.8 Sダムにおける発電使用水量 (推算) の流況曲線
Distribution of discharge for electricity generation at the S dam



(条件: 基準有効落差 = 最大有効落差の0.8倍)
Fig.9 Sダムにおける基準水量設定と発電出力変動の関係
Relationship between output and size of power generation facility at the S dam

きくすることは、一定の合理性があると考えられる。仮に年間可能発生電力量の最大化を目指すならば、本事例では、「基準水量 = 10%超過確率流量、基準有効落差 =

最大有効落差の0.8倍」のケースが最適となる（Table 2(d)）。なお、他の指標については、おおむねTダムと同様の傾向が得られた（Table 2）。

Table 2 Sダムにおける発電施設建設に伴う各種指標の分析結果
Estimated performance indicators for power generation facility at the S dam

(a) 出力 (kW) あたり建設単価 (円/kW)

	Q_{\max}	10%ile	20%ile	30%ile	40%ile	中央値	60%ile	70%ile
	282,954	314,812	326,360	352,813	378,611	442,696	631,847	651,891

(b) 発生電力量 (kWh) あたり建設単価 (円/kWh)

	Q_{\max}	10%ile	20%ile	30%ile	40%ile	中央値	60%ile	70%ile
$h_{\max} \times 1.0$	231	166	153	135	129	127	118	118
$h_{\max} \times 0.9$	228	164	151	133	128	125	116.3	116.6
$h_{\max} \times 0.8$	228	164	150	133	128	125	116.0	116.3
$h_{\max} \times 0.7$	231	166	152	134	129	126	117	118
$h_{\max} \times 0.6$	241	173	159	140	134	132	122	122
$h_{\max} \times 0.5$	305	218	199	175	168	163	151	151

(c) 最大出力 (kW)

	Q_{\max}	10%ile	20%ile	30%ile	40%ile	中央値	60%ile	70%ile
	2,387	1,630	1,440	1,108	879	535	180	164

(d) 年間可能発生電力量 (MWh/y)

	Q_{\max}	10%ile	20%ile	30%ile	40%ile	中央値	60%ile	70%ile
$h_{\max} \times 1.0$	2,924	3,095	3,081	2,903	2,574	1,863	967	906
$h_{\max} \times 0.9$	2,958	3,131	3,119	2,940	2,607	1,888	980	918
$h_{\max} \times 0.8$	2,961	3,134	3,123	2,944	2,611	1,893	982	920
$h_{\max} \times 0.7$	2,926	3,097	3,086	2,910	2,581	1,872	972	910
$h_{\max} \times 0.6$	2,804	2,969	2,959	2,793	2,476	1,800	934	875
$h_{\max} \times 0.5$	2,213	2,350	2,355	2,240	1,978	1,450	756	709

(e) 発電設備利用率 (%)

	Q_{\max}	10%ile	20%ile	30%ile	40%ile	中央値	60%ile	70%ile
$h_{\max} \times 1.0$	14.0	21.7	24.4	29.9	33.4	39.8	61.2	63.0
$h_{\max} \times 0.9$	14.1	21.9	24.7	30.3	33.8	40.3	62.0	63.8
$h_{\max} \times 0.8$	14.2	22.0	24.8	30.3	33.9	40.4	62.2	64.0
$h_{\max} \times 0.7$	14.0	21.7	24.5	30.0	33.5	40.0	61.5	63.3
$h_{\max} \times 0.6$	13.4	20.8	23.5	28.8	32.1	38.4	59.1	60.8
$h_{\max} \times 0.5$	10.6	16.5	18.7	23.1	25.7	30.9	47.8	49.3

(f) 放流水利用率 (%)

	Q_{\max}	10%ile	20%ile	30%ile	40%ile	中央値	60%ile	70%ile
	86.3	86.8	77.3	67.1	47.3	24.0	22.5	12.2

(g) 流量設備利用率 (%)

	Q_{\max}	10%ile	20%ile	30%ile	40%ile	中央値	60%ile	70%ile
	20.7	34.4	39.8	43.6	50.5	75.6	77.9	98.4

注) Q_{\max} : 最大取水量 ; --%ile: --%超過確率流量 ; $h_{\max} \times \dots$: 常時満水位時の有効落差の --- 倍
列方向に基準水量, 行方向に基準有効落差を示す。
なお, 基準有効落差の設定に左右されない指標については, 基準有効落差を示していない。

c Mダムにおける事例

(1) ダムの概要

Y県Mダムは、水田地帯に受益面積9,040 haを持つ農業用ダムであり、現在ダム管理はY土地改良区が受託している。最大取水量8.777 m³/s（うち灌漑用水（代かき期）8.279 m³/s, 上水道用水0.324 m³/s, 工業用水0.174 m³/s）、有効貯水容量30,500千m³、常時満水位における有効落差は47.94 mである。灌漑期間は、5月1日～9月10日である。一方、上水道および工業用水は、年間を通じて一定量の供給を行っている。

(2) データ分析方法および結果

データ分析方法は、II-3-aのTダムに準ずる。データ期間は、2001～2008年である。

Fig.10に、推算した発電使用水量の流況曲線を示す。本事例は、灌漑用水および融雪期の洪水調節のための放流に加えて、前述の上水道・工業用水供給のための放流をほぼ年間を通じて行っているのが特徴的である。そのため、Sダムと同様、流況曲線が中央値（183日）にかけて急に低下しているが、それ以降は、上水・工業用水供給を加味した1 m³/s前後の放流量でおおむね安定している。

次に、Table 3に、水車規模の設定と各種指標の関係を示す。本事例では、Sダムと同様、kWhあたり建設単価が、「基準水量 = 60%超過確率流量、基準有効落差 = 最大有効落差の0.8倍」のケースで最小となる。そこで、このケースに基づき、基準有効落差を最大有効落差の0.8倍に固定した場合に、基準水量の設定が発電出力の日変動に与える影響を、Fig.11に示す。

本事例では、非灌漑期の安定した放流量の効果（Fig.10）により、基準水量を20%超過確率流量まで低下させたときに、すでに年間を通じた発電が可能となる（Fig.11）。さらに、コスト最小ケースの60%超過確率流量まで低下させると、年間を通じてほぼ一定の出力を維持することが可能となる。そのため、同ケースの発電設備利用率は、他のダムと比較して高い78.8%に達し（Table 3(e)）、kWhあたり建設単価は、他のダムと比較して低い70円/kWhである（Table 3(b)）。

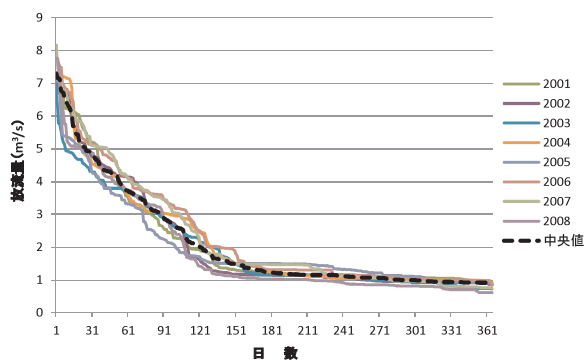


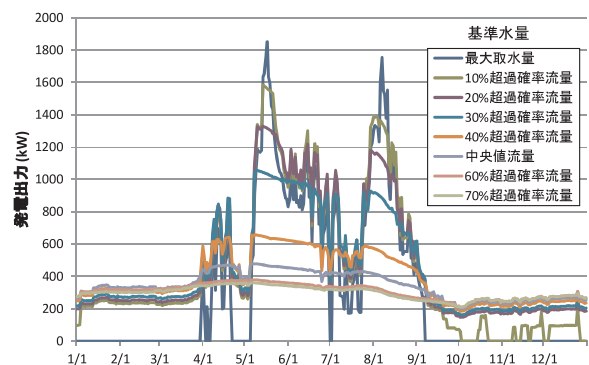
Fig.10 Mダムにおける発電使用水量（推算）の流況曲線
Distribution of discharge for electricity generation at the M dam

さらに、もし60%超過確率流量まで基準水量を下げたとしても、年間可能発生電力量は、最大値（4,196 MWh/y）の64%（2,701 MWh/y）に達し（Table 3(d)）、放流水利用率も、Sダムに比較して高い51.9%に達する（Table 3(f)）と見込まれる。他方で、年間可能発生電力量が最大となるのは、「基準水量 = 20%超過確率流量、基準有効落差 = 最大有効落差の0.8倍」のケースである（Table 3(d)）。

4 まとめ

IIでは、灌漑利用が主目的であるという意味において、典型的な農業用ダムである3つの事例地区を対象として、発電ポテンシャルの評価を行った。結果として、発電ポテンシャル・コストは、発電施設の規模、とりわけ基準水量（最大発電使用水量）の設定に大きく依存することが明らかとなった。具体的には、発電施設建設費の最小ケース（以下「コスト最小ケース」）は「基準水量 = 中央値～60%超過確率流量」であったのに対して、年間可能発生電力量の最大ケース（以下「発電量最大ケース」）は「基準水量 = 10～20%超過確率流量」であった。一方で、基準有効落差については、コスト最小ケース、発電量最大ケースとも、「最大有効落差の0.7～0.8倍」が最適であった。

「コスト最小ケース」は、各事例の流況曲線のパターンによって差はあるものの、年間を通じておおむねフラットな発電出力パターンで、2つの事例（Sダム、Mダム）で、非灌漑期の河川維持流量等をも活用できる施設規模であった。一方で、いずれの事例でも、灌漑期の発電ポテンシャルを十分に生かし切れていなかった。それに対し、「発電量最大ケース」では、灌漑期間中は、代かき期ピーク等の放流量の一部を除く大部分の発電ポテンシャルを利用できるのに対し、非灌漑期においては、2つの事例（Tダム、Sダム）で発電可能最小流量を下回り、発電が停止するとみられた。これらのことから、ダム放流量の経時変化の大きい農業用ダムでは、コスト



(条件：基準有効落差 = 最大有効落差の0.8倍)

Fig.11 Mダムにおける基準水量設定と発電出力変動の関係
Relationship between output and size of power generation facility at the M dam

最小化（ないし発電出力の平滑化）と発電量最大化の間でトレードオフがあることが明らかとなった。（なお、このようなトレードオフを克服する解決方法の一つとして、最大出力の異なる複数台の発電機を設置し、それぞれ

れ灌漑期、非灌漑期に用いることが考えられるが、本研究で対象としている規模以下の小水力発電施設では、コストの面から、そのような複数の発電機の設置は一般的に困難とみられる。）

Table 3 M ダムにおける発電施設建設に伴う各種指標の分析結果
Estimated performance indicators for power generation facility at the M dam

(a) 出力 (kW) あたり建設単価 (円/kW)

Q_{max}	10%ile	20%ile	30%ile	40%ile	中央値	60%ile	70%ile
267,271	310,931	327,568	352,129	408,070	451,384	486,417	494,666

(b) 発生電力量 (kWh) あたり建設単価 (円/kWh)

	Q_{max}	10%ile	20%ile	30%ile	40%ile	中央値	60%ile	70%ile
$h_{emax} \times 1.0$	286	133	110	97	82	75	72	72
$h_{emax} \times 0.9$	282	132	109	96	81	74	71	71
$h_{emax} \times 0.8$	282	132	109	96	81	74	70	71
$h_{emax} \times 0.7$	285	133	110	97	82	74	71	71
$h_{emax} \times 0.6$	298	139	114	101	85	77	74	74
$h_{emax} \times 0.5$	376	174	141	124	104	94	88	88

(c) 最大出力 (kW)

Q_{max}	10%ile	20%ile	30%ile	40%ile	中央値	60%ile	70%ile
2,887	1,664	1,391	1,092	677	493	391	372

(d) 年間可能発生電力量 (MWh/y)

	Q_{max}	10%ile	20%ile	30%ile	40%ile	中央値	60%ile	70%ile
$h_{emax} \times 1.0$	2,700	3,878	4,139	3,951	3,354	2,977	2,647	2,554
$h_{emax} \times 0.9$	2,737	3,923	4,190	4,000	3,398	3,017	2,689	2,594
$h_{emax} \times 0.8$	2,738	3,926	4,196	4,007	3,406	3,024	2,701	2,606
$h_{emax} \times 0.7$	2,704	3,879	4,148	3,963	3,370	2,992	2,677	2,583
$h_{emax} \times 0.6$	2,589	3,720	3,985	3,810	3,243	2,880	2,585	2,496
$h_{emax} \times 0.5$	2,054	2,981	3,230	3,102	2,661	2,380	2,157	2,091

(e) 発電設備利用率 (%)

	Q_{max}	10%ile	20%ile	30%ile	40%ile	中央値	60%ile	70%ile
$h_{emax} \times 1.0$	10.7	26.6	34.0	41.3	56.5	68.9	77.2	78.5
$h_{emax} \times 0.9$	10.8	26.9	34.4	41.8	57.3	69.8	78.4	79.7
$h_{emax} \times 0.8$	10.8	26.9	34.4	41.9	57.4	70.0	78.8	80.0
$h_{emax} \times 0.7$	10.7	26.6	34.0	41.4	56.8	69.2	78.1	79.3
$h_{emax} \times 0.6$	10.2	25.5	32.7	39.8	54.6	66.6	75.4	76.7
$h_{emax} \times 0.5$	8.1	20.5	26.5	32.4	44.8	55.1	62.9	64.2

(f) 放流水利用率 (%)

Q_{max}	10%ile	20%ile	30%ile	40%ile	中央値	60%ile	70%ile
64.1	93.6	87.5	74.1	61.7	54.7	51.9	50.7

(g) 流量設備利用率 (%)

Q_{max}	10%ile	20%ile	30%ile	40%ile	中央値	60%ile	70%ile
15.0	42.8	52.5	68.3	84.5	92.6	92.9	97.0

注) Q_{max} : 最大取水量 ; --%ile : --%超過確率流量 ; $h_{emax} \times ---$: 常時満水位時の有効落差の --- 倍
列方向に基準水量, 行方向に基準有効落差を示す。
なお, 基準有効落差の設定に左右されない指標については, 基準有効落差を示していない。

また、灌漑用水に加えて上水、工業用水を通年供給するMダムの事例では、Tダム、Sダムに比べて、各種指標についておおむね良い結果が得られた。このことから、非灌漑期においても、他の目的で安定した放流を行っている農業用ダムが、発電利用にはより適していると考えられた。

経済性の指標について、今回重視した「kWhあたり建設単価」は、ある程度単純化した仮定に基づいており、実際には、例えば、発電施設建設予定場所までのアクセス道路がなければ、それを追加整備する費用が必要である。したがって、試算した単価の絶対値の妥当性については、各事例の詳細な検討を待たなければならない。しかしながら、今回の3つの事例に関する予備的検討結果を見る限りは、コスト最小ケースのみならず、発電量最大ケースにおいても、採算性の目安といわれている「建設費250円/kWh」を下回り、事業化に際して採算をとれる可能性があることが示唆された。

Ⅲ 既設の農業用ダム併設小水力発電施設における事例調査

1 データ収集

東北農政局管内の比較的大規模（有効貯水量1千万 m^3 以上）でかつ既存の発電施設を有する農業用ダムのうち4地区において、各々のダムを管理する県、土地改良区から、可能な範囲で、日別の水管理、発電出力・発電電力量データおよびダム諸元情報を入手するとともに聞き取り調査を行った。なお、Ⅲで対象とする4地区には、Ⅱで検討したような灌漑が主目的のダムに加えて、灌漑以外の用途が重要視される多目的ダムも含め、ダムの性格による各種指標の違いを比較検討した。

2 調査結果

a Gダムにおける事例

I県Gダムは、有効貯水量46,300千 m^3 で、田畑約1,500haの受益面積をもつI開拓建設事業地区に灌漑用水を供給している。同時に、同ダムから受益農地へ送水する約7,500mの導水管路の有効落差を活用し、2か所の発電所において県企業局による発電事業が行われている。ここでは、そのうち第一発電所の事例を検討する。同発電所は、最大発電使用水量12 m^3/s （うち最大灌漑使用水量9 m^3/s ）、最大有効落差405m、最大出力41,000kW（41MW）の地下式発電所である。

ここでは、2002～2010年の発電使用水量および発電出力の日データを使用する。

Fig.12に、8年間の実データに基づいて計算した、日別の超過確率出力を示す。Gダムは、発電事業が主目的のひとつである多目的ダムであることから、最大発電使用水量12 m^3/s の水利権を通年有しており、非灌漑期においても、それを有した発電がおこなわれている。その

ため、豊水年並みの変動を表す10%超過確率出力においては、最大出力に近いレベルの出力が（秋期を除き）比較的安定して得られている。なお、発電出力に全般的に鋸歯状の変動がみられるのは、週末など電力需要の少ない日に、放流量を絞って発電出力を低く抑える（または発電を停止する）ことがしばしばあることを示唆している。しかしながら、灌漑期間中は、下流の農地に灌漑用水を供給するために比較的安定した放流（発電）が行われ、出力の変動は比較的少ない。他方で、灌漑期終了後の9月下旬～11月末頃は、放流（発電）を中断することが多いが、これは、電力需要の比較的少ない秋期に、12月以降の発電および翌年の灌漑用水供給のためダム貯水量を回復させることも目的の一つと考えられる。なお、発電設備利用率は、10%超過確率出力で86%、中央値超過確率出力で55%である。

b Yダムにおける事例

A県Yダムは、有効貯水量33,100千 m^3 で、治水、灌漑、上水供給の目的をもつ多目的ダムであり、A県が管理している。灌漑については、畑地1,864haの受益面積を有している。さらに、ダム管理費の節減および未利用エネルギー有効利用のため、管理用発電所が付設されている。発電施設は、上水および河川維持放流のための放流管に接続されており、これら放流に従属した発電を行っている。発電所は、最大使用水量6.0 m^3/s 、最大有効落差31.13m、最大出力1,500kWである。ダム管理のために消費する電力を差し引いた余剰電力は、電力会社に売電している。他方で、灌漑用水のための放流（最大取水量1.3 m^3/s ）は、発電施設を経由せずに行われているため、農業用水の取水と発電出力に直接の関連性はない。

ここでは、入手した2010年のダム放流量、発電使用水量および発電出力の日平均データを使用する。ダム管理者によると発電出力の年変動はほとんどないとのことである。

発電使用水量およびそれに洪水吐・灌漑用水放流量を加算したダム全放流量をFig.13に示す。（なお、発電使用水量以外の放流量の大部分は、洪水吐ゲートを通じた

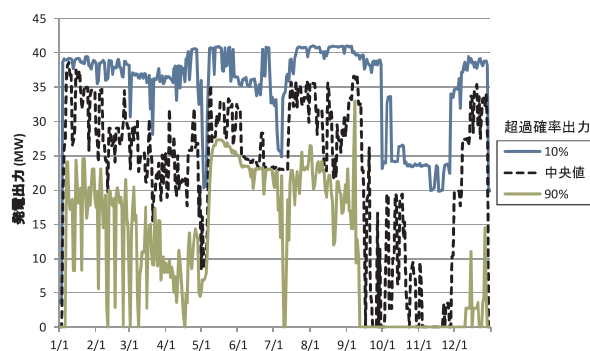


Fig.12 Gダムにおける実発電出力の日・年変動特性
Daily and annual variations of actual output at the G dam

洪水調節のための放流である。) 発電使用水量は、年間を通じておおむね 4 ~ 4.5 m³/s 程度で安定している。これは、下流の上水道用水供給のため、常時安定した放流が求められているためである。このことから、発電出力も年間を通じて安定しており (Fig.14)、発電設備利用率も 84% と極めて高い。

c Aダムにおける事例

M 県 A ダムは、有効貯水量 13,510 千 m³ を有し、洪水調節、灌漑、利水従属発電を目的とする多目的ダムである。受益面積は、水田 3,730 ha である。土地改良施設の維持管理費の節減対策のため、国営 H かんがい排水事業の一環として小水力発電所が整備された。ダムおよび発電所の維持管理は、それぞれ M 県、H 土地改良区が個別に実施しているが、両者はダム放流を通じて密接に関連しているので、緊密に連絡を取り合って調整を行っている。発電は灌漑用水・河川維持放流に従属しており、最大取水量 (代かき期) 9 m³/s のうち最大 2 m³/s を発電所経由で放流している。発電所は、最大使用水量 2.0 m³/s、最大有効落差 63 m、最大出力 1,000 kW である。発生した電力は、電力会社に売電している。

県および土地改良区より、1999 ~ 2010 年の水管理データおよび月別発生電力量のデータを収集した。しかし、A ダムでは、2008 年に発生した地震災害のため災害復旧工事中であることから、以下では 2007 年以前のデー

タを用いる。

Fig.15 に、A ダムの放流量の経時変化 (2006 年) を示す。「ゲート放流量」は、発電施設を経由しない利水放流を示し、最大発電使用水量 2.0 m³/s を上回る放流量が必要な際に使用される。また、非灌漑期にも 0.2 m³/s 前後の河川維持放流が発電所を経由してなされているものの、本発電所の発電可能流量範囲は 0.5 ~ 2.0 m³/s なので、Fig.15 の 2006 年の事例では、1 ~ 3 月と 10 月下旬 ~ 年末の期間は発電を停止していた。また、放流水利用率を、II での定義に照らして、(年間発電使用水量 (発電可能最小流量以下を除く)) / (洪水吐放流量を除く年間ダム放流量) と定義すると、76% (2006 年) と推算される。

Fig.16 に、1999 年 ~ 2007 年の月別発生電力量の実績から計算した 10、50、90% 超過確率発生電力量を示す。豊水年においては、非灌漑期においても、河川維持放流を利用した発電が、電力量は小さいながらも行われることがあるが、平年 ~ 渇水年においては、非灌漑期の放流量は発電可能最小流量を下回るため、発電はほとんど行われていない。このため、発電設備利用率は、10、50、90% 超過確率発生電力量でそれぞれ、66、38、22% にとどまっている。

Fig.17 に、データが通年で入手できた 2006 年のダム放流量の流況曲線を示す。(なお、以下 Figs.17、20 に示す流況曲線は、洪水吐放流量を含んでいる。) 放流量は、おおむね中央値 (183 日) に向けて急に低下しており、

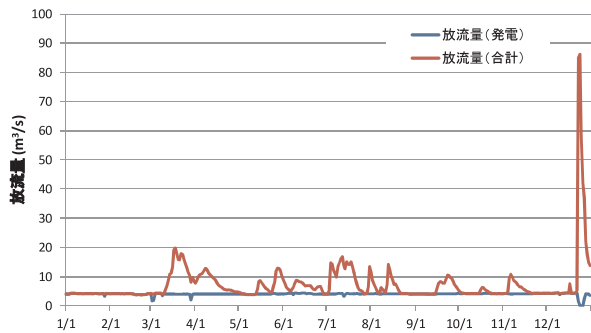


Fig.13 Yダムにおける発電使用水量・ダム放流量の日変動 (2010年)
Dam discharge at the Y dam in 2010

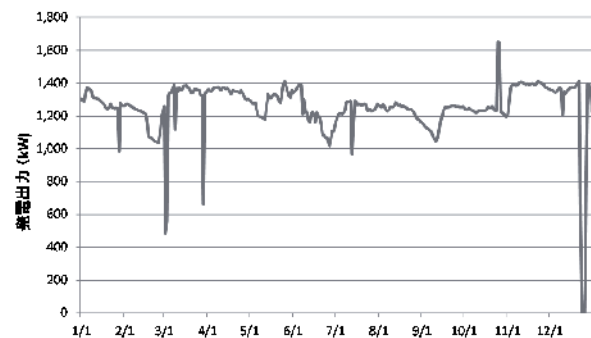


Fig.14 Yダムにおける発電出力 (日平均) の変化 (2010年)
Output at the Y dam in 2010

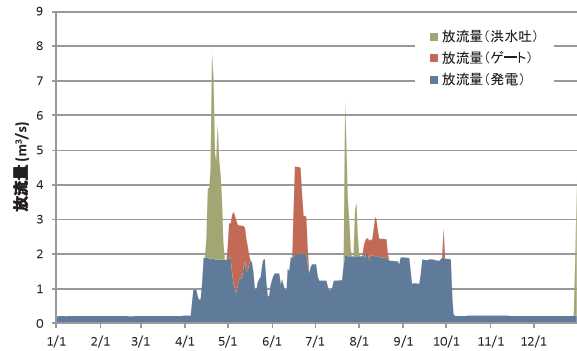


Fig.15 Aダムにおける発電使用水量・ダム放流量の変化 (2006年)
Dam discharge at the A dam in 2006

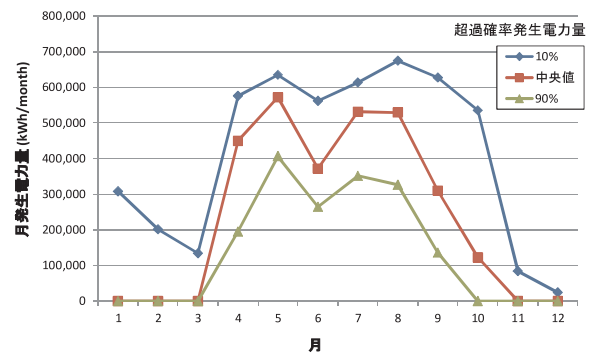


Fig.16 Aダムにおける月発生電力量 (1999 ~ 2007年)
Monthly electric energy generation at the A dam in 1999-2007

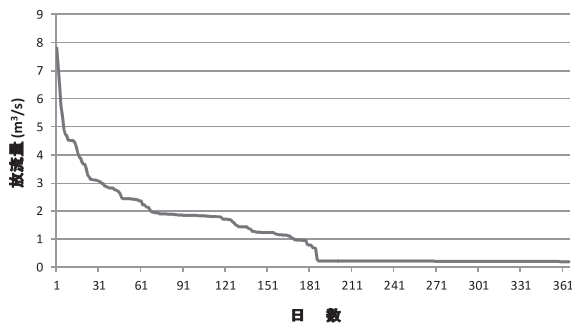


Fig.17 Aダムにおけるダム放流量の流況曲線 (2006年)
Distribution of dam discharge at the A dam in 2006

この傾向は、Ⅱで検討したⅠ県Sダムのパターンに類似している。すなわち、非灌漑期の放流量がきわめて少なく、灌漑期の発電出力の増加と1年を通じた継続的な発電のトレードオフが顕著なパターンである。しかしながら、最大発電使用水量 2.0 m³/s 付近で、流況曲線にフラットな部分が存在するのが、発電所を持たないTダム、Sダム、Mダムの流況曲線 (Figs.4, 8, 10) との相違点である。これは、特に灌漑期になるべく放流量を平滑化 (Fig.15) して、より多くの水量を発電所経由で放流しようとするダム管理上の工夫を示唆している。

また、本事例 (Aダム) では、最大発電使用水量を 2.0 m³/s と定めているが、これは、Fig.17 に照らし合わせると、19%超過確率流量に相当する。したがって、Ⅱの検討結果に照らせば (流況曲線のかたちが異なるので単純比較はできないが) 「発電量最大ケース」に近く、灌漑期の発電出力の増加 (または年発生電力量の最大化) をより重視した設計がなされているといえよう。

d Shダムにおける事例

Y県Shダムは、有効貯水量 29,800 千 m³ を有する農業用ダムであり、受益面積は水田 3,412 ha である。灌漑期間は、5月6日～9月7日である。ダム管理は、M土地改良区が受託している。さらに、Y県企業局により小水力発電所が追加整備 (仮排水路の末端に建設) され、その維持管理は同局が実施している。発電は灌漑用水・河川維持放流に従属しており、最大取水量 (代かき期) 8 m³/s のうち最大 5 m³/s を発電所経由で放流している。発電所は、最大使用水量 5.0 m³/s、最大有効落差 88.9 m、最大出力 3,700 kW である。発生した電力は、電力会社に売電している。

M土地改良区より、2009～2010年の水管理データを収集した。しかし、発電出力・電力量データは、今回は入手できなかった。

Fig.18, 19 に、ダム貯水位およびダム放流量の経時変化を示す。灌漑期直前 (3月下旬～5月上旬) に、灌漑期に向けた貯水量確保のため貯水位が常時満水位を保っている期間がある (Fig.18) が、その期間のダム流入量の多く (5.0 m³/s を超える部分) は洪水吐から放流され

(Fig.19)、発電には使用できない。他方で、続く灌漑期間においては、ダム放流がⅡの3事例地区に比べると平滑化され、また放流量の大部分を発電所経由の放流 (Fig.19の青い部分) が占めているため、灌漑放流の大部分が発電に有効利用されていると思われる。そのため、放流水利用率 (Aダムと同様の手順で推算) は 89% と比較的高い数値を示している。

さらに、ダム放流量の流況曲線 (Fig.20) において、Aダムの事例 (Fig.17) と同様に、最大発電使用水量 (5 m³/s) 付近で流況曲線がフラットになる傾向がみられる。この流量は、24%超過確率流量 (2009, 2010年平均) に相当する。したがって、本事例もAダムと同様、

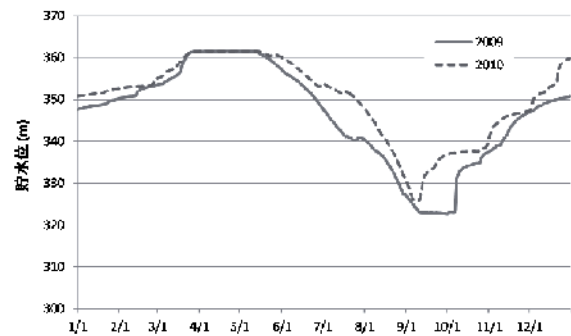


Fig.18 Shダムにおけるダム貯水位の変化
Reservoir water level at the Sh dam

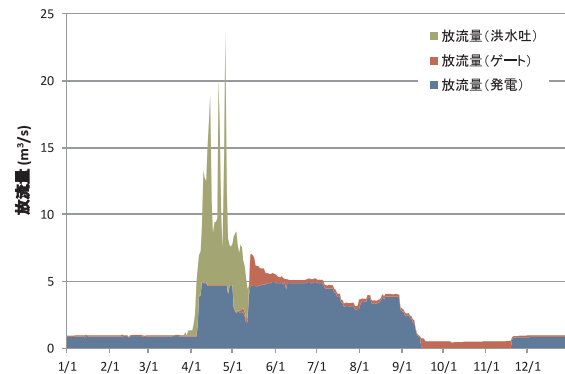
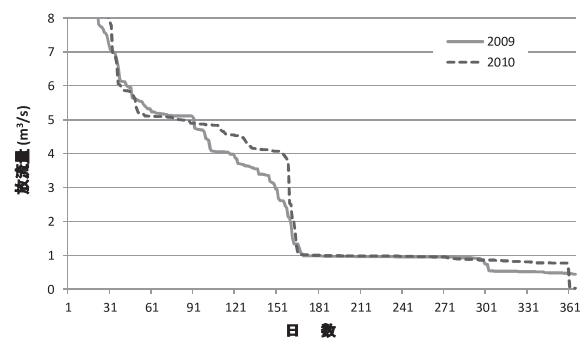


Fig.19 Shダムにおけるダム放流量の変化 (2009年)
Dam discharge at the Sh dam in 2009



注) 最大取水量 (8 m³/s) 以上の放流量は割愛した。
Fig.20 Shダムにおけるダム放流量の流況曲線
Distribution of dam discharge at the Sh dam

灌漑期の発電出力の増加(または年発生電力量の最大化)をより重視した設計とみられる。

3 まとめ

Ⅲでは、既設の農業用ダム付設小水力発電所について、タイプの異なる4つの事例を取り上げ検討した。まず、発電が主目的のひとつであるGダムでは、通年一定量の発電水利権を用いて、非灌漑期にもおおむね安定した発電を行っていた。また、Yダムにおいても、通年安定している上水・河川維持放流に従属した発電を行うことにより、高い発電設備利用率を保っていた。

これらに対して、主に灌漑用水に従属した発電を行っているAダム、Shダムにおいては、Ⅱでみたような、灌漑期の発電量増加と通年での安定した発電のトレードオフが少なからず確認された。今回検討した2地区においては、これら2つの相反する目的のうち、どちらかというと前者を重視した発電施設の設計がされていた。さらに、灌漑期間中は可能な限り放流量を最大発電使用水量付近で一定に保つことにより、できるだけ放流水利用率を高めるダム管理上の工夫がみられた。

しかしながら、灌漑用水・河川維持放流に従属した発電を行うAダム、Shダムにおいては、年間を通じて安定した発電使用水量を得られるGダム、Yダムの事例に比べて設備利用率が低いことは否定できない。これを向上させていくためには、例えば以下のことが必要となる。

- 発電施設を経由せずに放流されている、融雪期の洪水吐放流(Figs.15, 19)を、流量調節・灌漑用水確保に支障のない範囲で可能な限り平滑化するために、発電最大使用水量に近い放流量を融雪期直前に発電施設を経由してあらかじめ放流・発電利用できるようにすること。
- 翌年の灌漑期に向けたダム貯水量の確保に支障のない範囲で、非灌漑期の河川維持放流のための水量を、少なくとも発電施設の発電可能最小水量を上回る量とし、年間を通じた発電を行うこと。

ただし、これらの対策を実行するためには、例えば灌漑用水のみに従属する発電計画としている地区において新たに非灌漑期の放流を用いた発電に関する河川管理者の認可を得るなど、水利権の調整が必要となる場合があることに留意しなければならない。さらに、そのような発電機能の増強が、流量調節や灌漑用水確保など本来のダム機能を阻害するリスクについて十分に検討することも求められる。

Ⅳ 東北地方の広域ポテンシャルの評価

1 はじめに

Ⅱでは、3つの農業用ダムを対象に、発電施設の規模を変化させた際の発電ポテンシャルやコストなどを評価

し、発電量最大ケースとコスト最小ケースでは最適施設規模が異なること、また、両ケースとも、今回の調査対象についての予備的検討の範囲では、採算性が見込まれることが明らかとなった。さらに、Ⅲでは、既存の小水力発電施設においては、どちらかという発電量最大ケースに近い設計が行われていることがわかった。

これらの結果を考慮し、Ⅳは、上記の発電量最大ケースとコスト最小ケースの両者について、これまでの解析結果を、ある程度単純化した仮定を用いながら他の農業用ダムに適用し、東北地方全体の発電ポテンシャルおよびその経時変化を概算・評価する。

2 評価方法および結果

a 東北地方の総発電ポテンシャルの推計

第一に、Ⅱで推算した発電出力の日変動グラフ(Figs.6, 9, 11)から、発電量最大ケースとコスト最小ケースを抽出し、それらを最大出力 $P_{max} = 1$ とする相対出力に標準化し、さらに3つの事例地区(T, S, Mダム)の相対出力を平均した変動グラフを求める。

Figs.21, 22に、それぞれ発電量最大ケース、コスト最小ケースについての、3事例地区の相対出力変動および

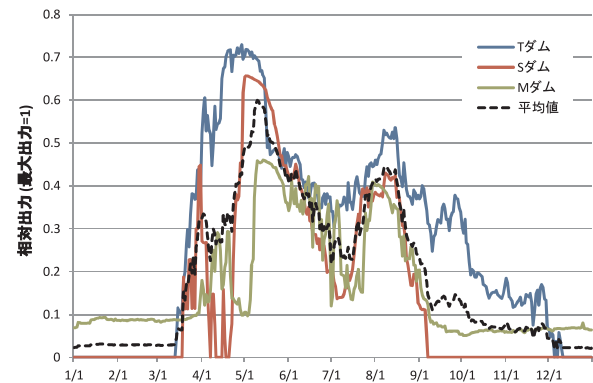


Fig.21 3つの農業用ダムにおける相対発電出力の変動(発電量最大ケース)

Estimated relative outputs at the three dams (electric energy maximization case)

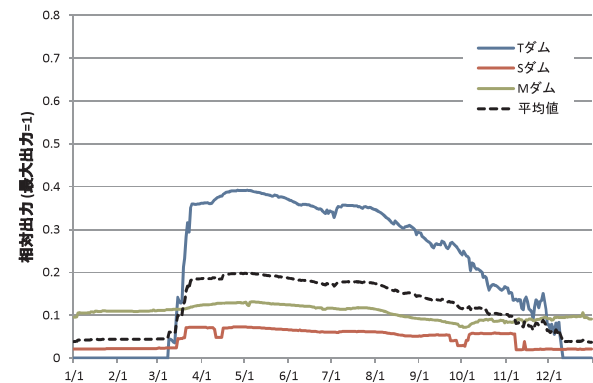


Fig.22 3つの農業用ダムにおける相対発電出力の変動(コスト最小ケース)

Estimated relative outputs at the three dams (cost minimization case)

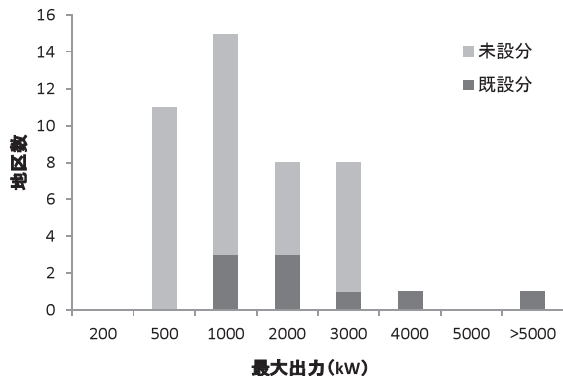
びそれらの平均値を示す。IIですでに述べたように、発電量最大ケースでは、融雪期～灌漑期の利水放流水の大部分を利用していることから、4月～9月の発電出力ピークが大きく立ち上がったグラフである (Fig.21)。一方で、コスト最小ケースでは、同じ期間のピークがかなり平滑化され、年間を通じて比較的フラットな発電出力パターンを示している (Fig.22)。

第二に、上記の結果を東北地方全体に類推し適用するために、まず『農業用ダム台帳』(農村振興局, 2005)に記載された東北6県の農業用ダム207地区について、次式により最大出力を概算する。

$$(\text{最大出力}) = 9.8 \times (\text{最大取水量}) \times (\text{利用水深}) \times 0.7 \quad (17)$$

利用水深とは常時満水位と最低水位の差で、最低水位時に有効落差が0に近くなるよう設計されているダムが多いことから、ここでは最大有効落差の近似値として採用する。この近似が必要なのは、ダム台帳や事業概要書には通常放流管出口標高が記載されておらず、最大有効落差を求められないためである。ただし、いくつかのダム(特に発電所が既設のダム)については、最大有効落差または最大出力の情報が、別途事業概要書等から得られたので、(17)式の概算値の代わりに、それら実データを使用する。

次に、上記の207地区のうち、最大出力が200 kW以上と推算される44地区(うち発電所既設9地区)を抽出する。このような閾値を設けた理由は、現在まで土地改良事業の一環として小水力発電事業を実施した地区における最大出力が、おおむね200 kW以上である(後藤ら, 2012)ことから、経済性成立のおおよその目安と考えられるためである。ただし、抽出された44地区あるいはそれ以外の地区についての発電施設建設の具体的な採算性の評価は、別途詳細な検討が必要であることに留意されたい。Fig.23に、抽出された44地区の最大出力の度数分布を示す。半数以上の地区で1,000 kW未満の出力



注) 発電施設未設置地区の出力は推定値である。

Fig.23 東北地方の44地区の農業用ダムにおける最大出力の度数分布

Histogram of maximum outputs at 44 agricultural dams in the Tohoku region

である。

第三に、上記44地区のダムすべてに発電施設を設けた場合、それら施設の発電出力変動は、3つの事例地区(T, S, Mダム)の平均変動パターン (Figs.21, 22)に従うと仮定する。ただし、これまで検討してきたように、元来発電出力の変動は、各ダムの水文・水利権等の条件に大きく左右されるので、この仮定はかなり個々の地区の事情を捨象・単純化した仮定である。しかしながら、44地区の大多数を占める灌漑専用ダム(もしくは多目的であっても灌漑が主目的のダム)に関しては、例えば、灌漑期直前にダム貯水位が常時満水位に達し、また非灌漑期に放流量が著しく減少するなどという貯水位・放流量の変動パターンはおおむね共通していると考えられることから、典型的な農業用ダムである3事例地区の平均発電出力変動パターンでもって全体の変動を代表させることは、ある程度の妥当性をもっていえると思われる。

以上の議論に従い、まず、抽出した44ダムの最大出力を合計し、総出力(設備容量)90,420 kWを得る。次にこの出力にFigs.21, 22の相対出力(平均値)を乗じたものを、44ダムの日別総発電出力とみなし、Fig.24に示す。これにより、東北地方全体では、発電量最大ケースで54,000 kW、コスト最小化ケースで18,000 kW程度のピーク出力が得られると見積もられる。また、発電設備利用率は、発電量最大ケースで20%と計算される。これは、灌漑用水従属発電のAダム(平年並みで38%)に比べても低い値にとどまっていることから、発電所が未設のダムにおいて設備利用率を高めていくためには、Aダム、Shダムで見られたような水管理上の工夫、すなわち灌漑期間中の利水放流量の平滑化などが必要と考えられる。

b 東北地方の農業用電力消費量の推計および需給バランスの評価

土地改良事業による小水力発電事業は、農業水利施設の運転操作に必要な電力を供給することを元来の目的としている。しかし現実には、発電の経時変化パターンと

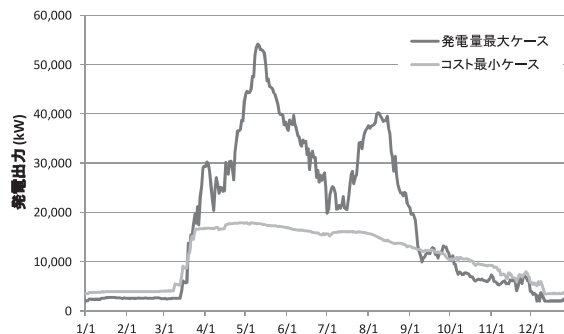


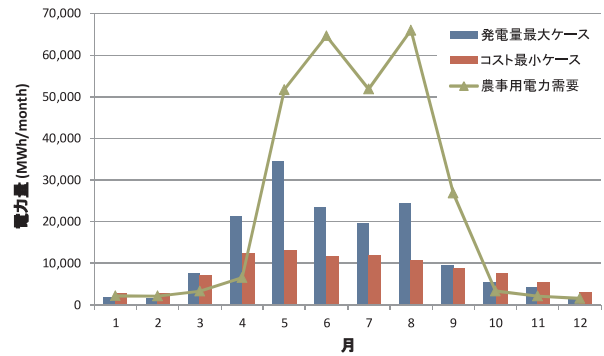
Fig.24 東北地方の農業用ダム44地区から得られる発電出力変動の推定

Estimated output potential using 44 agricultural dams in the Tohoku region

各種水利施設の電力需要パターンが一致するとは限らないこと、また小水力発電施設と水利施設を結ぶ専用の送電網を構築することはコストの面から現実的ではないことから、一般的に、発生した電力は電力会社に売電され、その収益は土地改良区等の維持管理費の軽減のために充当されている。しかしながら、小水力発電事業元来の目的に立ち返れば、農業用ダムを用いた発電ポテンシャルが、農業水利施設の電力需要をどの程度満たすことができるのか検討することは有益である。

そこで、まず各種の統計資料から、東北地方6県の農業水利施設の電力総需要を試算する。吉田(2011)によれば、電力料金体系の一つである「農事用電力」とは、農業用の安い価格設定の電力であり、その需要はおおよそ灌漑排水施設のための電力需要を示している。ただし、統計区分上の問題により、2005年以降は中規模以上の灌漑排水用電力需要を「農事用電力」の区分で把握することができなくなっている。そこで、ここではまず2004年度『電力調査統計・用途別電灯電力需要実績』(資源エネルギー庁)より、東北電力管内の月別農事用電力需要データを収集する。ただし、東北電力管内には東北6県(青森、岩手、宮城、秋田、山形、福島)のほか新潟県が含まれ、また同統計は県別のデータを提供していない。そこで、以下の方法により、東北電力管内の農事用電力総需要量から県別の需要量を推計する。まず、灌漑排水施設以外の電力需要を含む統計データである『都道府県別エネルギー消費統計』(資源エネルギー庁)に基づき、東北6県・新潟県の「農林水産業」が消費する年間電力量を2004～2008年にわたって平均する。そして、「東北6県+新潟県」全体と各県の農林水産業電力需要量の比が、東北電力管内全体と各県の農事用電力需要量の比と同じであると仮定する。次に、その比を用いて『電力調査統計』における東北電力管内の農事用電力総需要量を、県別の年間・月別農事用電力需要量に按分する。

Fig.25に、上記の手続きを経て推計した東北6県の月別農事用電力需要量、およびFig.24の総出力を積算して求めた月別発生電力量を示す。農事用電力需要は、農業水利施設の多くが稼働する灌漑期に大きなピークが存



注) 農事用電力需要については、便宜上2005年1～3月のデータを2004年4月の前に表示した。

Fig.25 東北6県の月別農事用電力需要と発生電力量ポテンシャルの推計

Estimated monthly electricity demand for agriculture and electricity generation potential in the Tohoku region

在する。一方で、発電ポテンシャルは、2つのケースとも灌漑期の電力需要を満たさきれていないが、発電量最大ケースは、相対的に灌漑期の電力供給に貢献できるポテンシャルを有している。

Table 4に、東北6県の通年の電力需給バランスの試算を示す。これにより、年間の合計値でみると、東北6県の農事用電力需要に対して、発電量最大ケースでは55%、コスト最小ケースでは34%程度の電力量を供給するポテンシャルがあると推計された。県別にみると、岩手県、福島県、山形県の順で供給/需要比が高い。岩手県の値が突出しているのは、有効落差が大きく出力の高いGダムの貢献が大きいと思われる。同様に、他県においても、ダム貯水位と放流管出口標高の差を大きく設定できる地点を見いだせれば、発電ポテンシャルの大幅な増加につながると思われる。

ちなみに、資源エネルギー庁『未利用落差発電包蔵水力調査』(新エネルギー財団, 2009)は、最大出力100kW以上が見込まれる、東北地方の「農業用水専用ダム」を利用した発電ポテンシャル(最大出力)は、約4.7万kW(うち既開発は約1.0万kW)であると報告した。これは、本研究の結果(Table 4)に比べるとやや少ない値である。その理由のひとつは、本研究では『農業用ダ

Table 4 東北各県の年間農事用電力需要と発生電力量ポテンシャルの推計
Estimated annual electricity demand for agriculture and electricity generation potential in each prefecture of the Tohoku region

	青森県	岩手県	宮城県	秋田県	山形県	福島県	東北全県	
最大出力 (kW)	8,849	47,764	9,315	1,734	8,842	13,916	90,420	
(うち既設分)	1,500	41,810	3,800	0	3,700	3,370	54,180	
年間可能発生電力量 (MWh/y)	発電量最大ケース	15,241	82,271	16,044	2,986	15,230	23,970	155,742
	コスト最小ケース	9,517	51,375	10,019	1,865	9,510	14,968	97,255
農事用電力需要 ¹⁾ (MWh/y)	52,563	59,358	43,576	36,230	35,982	54,754	282,464	
供給/需要比 (%)	発電量最大ケース	29.0	138.6	36.8	8.2	42.3	43.8	55.1
	コスト最小ケース	18.1	86.6	23.0	5.1	26.4	27.3	34.4

¹⁾ 資源エネルギー庁「電力調査統計」, 「都道府県別エネルギー消費統計」より推計

ム台帳』に記載されているダムは、多目的ダムを含め全て「農業用ダム」とみなし分析に含めたのに対して、『未利用落差発電包蔵水力調査』では、灌漑利用が目的のひとつである多目的ダムが含まれていないことではないかと考えられる。

V 結 言

本研究では、東北地方の大規模な農業用ダムにおける現地調査を通じて、発電施設が未設置のダムにおける発電ポテンシャルを評価するとともに、発電施設が付設されているダムの運用実績との比較を行った。さらに、それら結果を東北地方の他の農業用ダムへ適用することによって、東北地方全体の小水力発電ポテンシャルおよびその経時変化を試算した。主な結論は以下のとおりである。

- ① 貯水位・放流量の変動が大きい農業用ダムにおける小水力発電施設の発電コスト・ポテンシャルは、とりわけ基準水量（最大発電使用水量）の設定に大きく依存する。基準水量を最大取水量近くに設定する「発電量最大ケース」（年間可能発生電力量最大化ケース）では、灌漑期の発電ポテンシャルの大部分を利用できるが、非灌漑期は発電が停止する可能性が高くなる。他方で、基準水量（発電施設の規模）を小さくすることにより発電施設の建設費を抑制する「コスト最小ケース」（kWhあたり建設単価最小化ケース）では、年間を通じた発電出力パターンがおおむねフラットになり設備利用率が高まるが、灌漑期の取水量の大部分を発電に利用しないまま放流することになる。このように、発電量最大化とコスト最小化（ないし発電出力の平滑化）の間でトレードオフがあることが明らかとなった。しかしながら、3つの事例調査地区において、kWhあたり建設単価で経済性を評価した限りでは、両ケースとも採算性の目安とされる建設単価（250円/kWh）を下回っていた。
- ② 農業用ダムに付設された既存の小水力発電施設について調査した結果、発電事業が主目的のひとつであり通年で発電水利権を有している事例では、年間を通じて安定した出力が得られ、設備利用率が高かった。一方で、灌漑が主目的のダムにおいて主に灌漑用水に従属した発電を行っている事例では、設備利用率は比較的lowだったものの、灌漑期間中はなるべく最大発電使用水量付近で放流量を安定させることにより、設備利用率を高める水管理上の工夫がなされていた。また、基準水量は、どちらかという上記の「発電量最大ケース」に近い設定がなされていた。
- ③ 上記の検討結果を、最大出力でおおむね200kW

以上の発電規模が期待できる東北地方の農業用ダム44地区（うち発電所既設9地区）に適用し、その全発電ポテンシャルを概算した結果、東北6県の「農事用電力」の年間総需要量（およそ282,000MWh/y）に対して、発電量最大ケースでは55%、コスト最小ケースでは34%程度の電力量を供給するポテンシャルがあると推算された。

本研究で明らかとなった農業用ダムの発電ポテンシャルは、東北地方の全電力消費量と比べれば微々たる量かもしれない。ちなみに、2010年度現在東北電力が有する全発電設備の総出力は、1,721万kWである。しかし、農業水利施設の運転に要する電力は食料自給のために必須のエネルギーである。したがって、たとえ灌漑用需要を満たすだけの電力量だけであっても、それを、本研究で検討した農業用ダムにおける小水力発電を含め、農村地域に賦存し自給可能な再生可能エネルギーで極力まかなっていくという視点は今後ますます重要となると思われる。

本研究の研究対象とした東北地方では、気候や水文条件がおおよそ似通っており、また水田灌漑を主目的とする農業用ダムが大多数を占めるため、事例調査地区のダム放流などの変動パターンを他のダムへ適用するという単純化を行った。一方、今後他の地域において本研究の評価手法を適用する際には、まず地域内のダムの類型化（例えば水田／畑地灌漑ダムの仕分けなど）を行うべきかどうか検討することも必要となる。いずれにしても、対象となる全てのダムにおいて詳細な水管理データ等を収集することは、概して現実的ではない。そこで、本研究で行ったように、事例地区で詳細な検討を行ったうえで、その結果を、多少の精度の粗さを許容しつつ他の地区に適用していくというアプローチは必要となると思われる。以上の議論および本研究で用いた評価手順を踏まえて、本研究のようなポテンシャル調査を他地域で実施するにあたって、一般的に必要なと考えられる評価手順の概要を、Fig.26に示す。

農業用ダムを用いた小水力発電がもつ、一般の発電専用ダムにおける発電事業と異なる最大の特徴は、農業用ダムにおいては、灌漑用水供給という制約条件を抱えつつ、その目的と整合性をもったかたちで発電を行わなければならないことである。そのためには、本研究で明らかとなったトレードオフの関係をしっかりと認識したうえで、ダムをめぐる複数のステークホルダーが納得しうる発電施設の整備や水管理を行っていかなければならない。本研究は、そのような意思決定を支える評価手法を提示した。

さらに、広域発電ポテンシャルの推定にあたっては、上記のような農業用ダム固有の問題を十分に配慮した推定を行っていくことが肝要であろう。その意味で、本研究は、各ダムの出力・発電量の点推定のみを行った資源エネルギー庁『未利用落差発電包蔵水力調査』（新エ

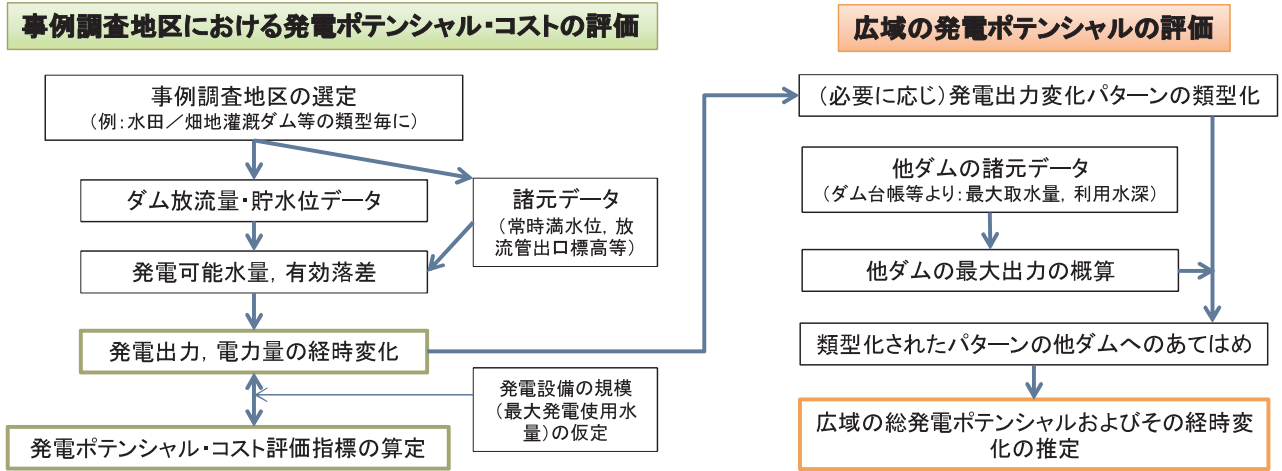


Fig.26 農業用ダムを用いた小水力発電ポテンシャル・コスト評価手順の概要

Outline procedures on estimating the potentials and costs of small hydropower generation using agricultural dams

エネルギー財団, 2009) に比べて, 事例地区の分析結果に基づき, 灌漑期・非灌漑期の違いなど発生電力量の経時変化を含めたより精緻な評価を行った。また, 環境省『再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査』(環境省, 2011) は, 農業用ダムの大多数を含む既設の小規模ダム等の存在を捨象した「仮想発電所」における発電ポテンシャルの集計にとどまっておき, 換言すれば, 灌漑利用など, 河川を利用する発電事業者以外のステークホルダーの事情を十分に考慮したポテンシャル評価となっていない。それに対し本研究は, 既設の農業用ダムに限った評価ではあるが, 時には相反する複数のダム利用目的を斟酌した評価を試みた。本研究が, 今後の農業用ダムにおける小水力発電事業の計画・設計に資するところがあれば幸いである。

参考文献

- 1) 後藤眞宏・中達雄・吉野秀雄 (1987): 灌漑用貯水池を利用した水力発電量の算定方式, 農土試技報 177, 13-25
- 2) 後藤眞宏・中達雄・吉野秀雄 (1988): 中小水力発電を行う農業用ダムにおける効率的なダム運用計画に関する考察, 農土試技報 180, 13-28
- 3) 後藤眞宏 (2010): 小水力利用からみた今後の農村開発, 農村研究フォーラム 2010「農業・農村の持続性と再生可能エネルギーの利活用」講演要旨集, 農研機構農村工学研究所, 29-38
- 4) 後藤眞宏・上田達己・浪平篤・廣瀬裕一 (2012): 土地改良施設を利用した小水力発電計画に関する一考察, 農工研技報, 212, 127-135
- 5) 環境省 (2011): 平成 22 年度再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書
- 6) 河川法研究会 (2010): 『河川法第二章第三節第三款 (ダムに関する特則) 等の規程の運用について』別添第一, 平成 22 年度版河川六法, 大成出版社, 403
- 7) 農村振興局 (2005): 農業用ダム台帳, 農村振興局整備部設計課
- 8) 新エネルギー財団 (2002): 中小水力発電ガイドブック (新訂 5 版), 新エネルギー財団水力本部
- 9) 新エネルギー財団 (2009): 平成 20 年度中小水力開発促進指導事業基礎調査 (未利用落差発電包蔵水力調査) 報告書
- 10) 小水力利用推進協議会 (2006): 小水力エネルギー読本, オーム社
- 11) 山本徳司・吉野秀雄・岩崎和巳 (1984): 汎用プログラムによる農業用水系の水力エネルギー賦存量把握, 農土試技報 162, 53-68
- 12) 吉田修一郎 (2011): 低平地水田におけるかんがい排水用エネルギー投入の実態分析, 農業農村工学会論文集, 275, 41-49

Evaluation of Hydropower Generation Potential Using Agricultural Dams in Tohoku Region

UEDA Tatsuki, GOTO Masahiro, NAMIHIRA Atsushi and HIROSE Yuichi

Summary

This study aims to evaluate the electricity generation potential using discharges and water heads available at major agricultural (irrigation) dams in the Tohoku region, where the electricity supply has been tight as a result of major accidents at large-scale power stations caused by the East-Japan great earthquake in March 2011. Since the agricultural dams are designed primarily to supply irrigation water to paddy fields from late April to early September, the discharges tend to fluctuate throughout a year, with peaks in those months. For this reason, when hydropower generation is conducted using such dams, there would be a trade-off between maximizing electric energy generation (by installing a larger hydropower station) and minimizing construction costs per kWh (by installing a smaller station thereby smoothing out outputs across a year). Nevertheless, as a result of our case studies on three representative dams, the above “electric energy maximization case”, as well as the “cost minimization case”, is supposed to be at least profitable. We therefore apply these two cases to other dams in the region, and estimate that hydropower plants at the major agricultural dams in the region would collectively generate around 155,000 MWh/y (electric energy maximization case) or 97,000 MWh/y (cost minimization case), which roughly amounts to 55% or 34%, respectively, of the electricity demands for operating irrigation facilities (such as pumps) in the same region.

Keywords: small hydropower generation, agricultural dam, renewable energy, water management, cost analysis

流速の多様化がもたらす食物連鎖の生産者の生物多様性

森 淳*・渡部恵司*・小出水規行*・西田一也*

目 次

I 緒 言	157	2 藻類等の特徴	159
II 調査方法	157	3 流速と種の関係	160
1 実験方法	157	IV 考 察	162
2 安定同位体比と分析方法	158	V 結 言	164
III 結 果	158	参考文献	165
1 流 速	158	Summary	166

I 緒 言

環境に配慮した農業水利施設の整備を行うには、水域ネットワークの保全とともに健全な生息場所を確保する必要がある。生息場所の環境を支配する主な環境要因として流速、水深、底質、植物群落を挙げることが出来る。つまりこれらを多様にすることが出来れば、少なくとも「器」としての生息場所の多様性を確保できる。

このうち流速は、すべての農業農村整備事業の設計時にコントロールできる唯一の物理性である。そして流速が多様であれば上流から流入する土砂の堆積量と粒径に違いが生じるから底質が多様化し、また水深、植生も多様となると考えられる。つまり多様な流速を確保できる設計は、その後の遷移によって生息場所の多様性を創出する可能性がある。流速の多様性は水域に多様な微生物場場所を作り出し、それぞれがいわば小さな生態系（ここでは局所的な食物網と考えてよいだろう）となって水路系全体の生態系の多様性を生み出すという仮説を提示することができる。

この仮説を検証する前に、まず本研究によって流速自体が生物界の生産者である藻類の生態に与える影響に焦点を当てる。加藤（1999）は、河川では流速が遅いほど珪藻の種多様性が高く、流速が多様な流路を確保することが重要だとしている。農業水路における流速が多様であれば一流速を大きくし流下断面の縮小を図る農業農村整備事業では、流速の多様化は小さな流速を発生させることとほぼ同義である一種多様性が高くなると考えられ

る。

また餌資源として、生物遺骸の腐食であるデトリタスも重要である。デトリタスはエネルギーの物質化を行っていない点で植物や藻類とは峻別され生産者とは見なされない。そしてデトリタスから始まる食物連鎖を腐食連鎖として別個に扱われることが多い。

しかし、自然界の水域には生食連鎖と腐食連鎖がそれぞれ独立して存在しているのではなく、少なくとも2次消費者より上位では一体化している。水域に生息する消費者の餌資源となっている点では食物連鎖の生産者と同等に扱って差し支えないだろう。デトリタスは底質等に固着していないので、流速の影響を最も受けると考えられる。

本研究では、流速が藻類・デトリタスに与える影響や食物連鎖における生産者の特徴を明らかにすることを目的とした。

なお本研究の一部は日本学術振興会科学研究費基盤研究 (B) No. 22380133 によった。ここに記して深謝の意を表す。

II 調査方法

1 実験方法

実験には農村工学研究所構内の実験水路（コンクリート三面張り、B=130cm）を用いた。藻類の生態は、成長のための栄養塩類や光などの資源、流速の大小等の外力および底生生物や魚類などによる摂食に支配される (Biggs, 1996)。このうち本実験水路で藻類の生育に影響を与える環境要因は流速だけである。

水路中央をコンクリートブロック（39cm × 19cm × 15cm）で仕切りを設けたうえで、川砂を厚さ 10cm 投入した。仕切りの右岸側の水路敷には同じブロックを千鳥

* 資源循環工学研究領域生態工学担当

平成 23 年 12 月 13 日受理

キーワード：藻類、珪藻、緑藻、デトリタス、流速、底質、生態系の多様性、炭素安定同位体比

状に設置し流れを蛇行させた（以下「蛇行区」とする）。左岸側は単調な流れのままとした。以下「対照区」という。2010年12月から2011年1月にかけて、ポンプの吐出口に設けられた三角堰を用いて一定流量 ($Q=0.05\text{m}^3/\text{s}$) にしながら通水した。

蛇行区 32 箇所、対照区 39 箇所 (Fig.1) でアクリル製の円筒 ($\phi=5\text{cm}$) を用いて砂ごとコア抜きして試料を採取した。流速をケネック社製 3 次元電磁流速計 (VP-3000) で計測した。合わせて水深を計測した。

採取した試料に蒸留水を加えてよく攪拌した後、砂と藻類等を含む液体を分離させた。この液体を再度攪拌してから 1 滴スライドグラスに採り、顕微鏡のステージを動かしながら全ての視野にある藻類等を観察した。1 箇所につきこの観察を 3 回繰り返す、非常に多いもの（たとえばしばしば視野の 1/3 以上を占めるもの）を +++、1 つの視野に 2、3 個体見られたものを +、この中間を ++ とし、これを順位と見なした。

また、藻類を 60°C で乾燥させた後専用のスズカップに充填し、Thermo Electric 社製の質量分析計 DELTA^{plus} Advantage (前処理: Flash EA-ConFlo III) で炭素安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) を計測した。

統計解析には IBM 社 SPSS Statistics 19 を用いた。

2 炭素安定同位体比と分析方法

同じ元素番号を持ちながら質量数が異なる同位体には、放射壊変して別の核種に変わる放射性同位体と放射壊変しない安定同位体が存在する。炭素には 98.9% を占める ^{12}C の他に、これより原子核中の中性子が一つ多く、したがって質量がわずかに重い ^{13}C が 1.1% 含まれている。

質量が異なる同位体は、同位体効果によって物理化学的性質が異なる。分子間に質量差が存在すれば軽い分子の方が安定的である。また、化学反応過程においては、重い同位体を含む分子の方がより多くの反応時間を要する。さらに質量差は分子の移動・拡散にも差を生じさせ



Fig.1 実験開始前の水路
Canal before experiment

る。この結果、同じ物質の間でも物質に含まれる同位体の存在比（安定同位体比）が変化する。これを同位体分別 (fractionation) という。

炭素安定同位体比 $\delta^{13}\text{C}$ (‰) は次式により算出され、‰ で表される。

$$\delta^{13}\text{C} = \frac{\left[\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}}\right]_{\text{sample}} - \left[\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}}\right]_{\text{standard}}}{\left[\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}}\right]_{\text{standard}}} \times 1,000(\text{‰}) \quad (1)$$

ここで standard はアメリカ合衆国サウスカロライナ州ピーディー層産バレムナイト化石の値である。

動物の体は、植物が生産した有機物あるいはこれに依存する動物を摂食、同化することによって作り出されている。餌となる生物と上位消費者の間では、生物体全体としての平均的な炭素安定同位体比はほとんど変わらない。したがって生産者の安定同位体比が食物網解析のカギである。

木本類や多くの植物は C_3 植物に属する。イネは C_3 植物である。一方ススキ (*Miscanthus* sp.), エノコログサ (*Setaria* sp.), イヌビエ (*Echinochloa* sp.), チガヤ (*Imperata* sp.), メヒシバ (*Digitari* sp.), カヤツリグサ (*Cyperus* sp.), トウモロコシ (*Zea mays*) など、イネ科植物の一部は C_4 植物に属する。

C_3 植物の光合成時の同位体分別は C_4 植物より大きい。そのため、生産される有機物の炭素に占める ^{13}C の割合は C_4 植物より少ない。つまり C_3 植物の炭素は C_4 植物より軽い。米山・笹山 (1994) は、 C_3 植物の $\delta^{13}\text{C}$ を $-35 \sim -25\%$ 、 C_4 植物で $-15 \sim -10\%$ としている。これまでの分析によれば水田や里山付近の C_3 植物の $\delta^{13}\text{C}$ は $-30 \sim -27\%$ 程度を示すことが多い。イネ (*Oryza sativa*) は $-27 \sim -26\%$ を示す。これに対して水田周辺の C_4 植物の $\delta^{13}\text{C}$ は $-11 \sim -13\%$ 程度を示すことが多い。

水域では C_3 植物由来のデトリタスと藻類が食物連鎖の起源であることが多い。デトリタスの $\delta^{13}\text{C}$ は $-25 \sim -27\%$ 程度を示すことが多く、 C_4 植物の影響は小さいと考えられる。これは、流域である斜面林には C_4 植物がほとんど生育していないこと、イネが C_3 植物であるためである。

陸水界の藻類の $\delta^{13}\text{C}$ は光合成に用いられる水中の溶解態無機炭素の $\delta^{13}\text{C}$ に強く影響を受ける。大気とのガス平衡が成立している場合の植物プランクトンの $\delta^{13}\text{C}$ は -20% 前後である。

III 結果

1 流速

実験水路の平均流速は、蛇行区 0.277m/s 、対照区 0.287m/s となった。両者間で Mann-Whitney の U 検定を行ったところ、平均流速に有意差はなかった。しかし

三次元の流速成分について分析したところ、水路横断方向（以下本稿において「y 方向」という、U 値 399.0 : $p=0.009$ ）および鉛直方向の流速（同様に「z 方向」という、U 値 442.0 : $p=0.035$ ）に有意差があった（Table 1）。

対照区は蛇行区と比べて一様な流れになると考えた。対照区における流れの均質性を確かめるため、流れの観察結果から右岸側（すなわち水路中央仕切り近く）、中央部および左岸側に分けて（以下、「3 グループ」とする）流速、流速の各成分および水深の環境要因について一元配置分析を行った結果、これら環境要因の平均値に有意差はみられなかった。次に、3 グループの流速分布ヒストグラムの特徴を解析したところ、尖度は、順に 2.922, 7.267, -0.604 となった。つまり、右岸は 3 に近い値を示したことからほぼ正規分布を示し、左岸はなだらかな分布を示したが、中央部は特定の流速（0.1 ~ 0.3m/s）に分布が集中する、尖ったヒストグラムとなった。

さらに 3 次元方向でみると、流下方向（以下「x 方向」という）の尖度は、右岸、中央、左岸の順に（以下、同様）1.296, 6.599, -1.167 に、y 方向が 2.448, -0.090, 1.762 に、z 方向が 0.269, 10.327, 3.015 に、平面（x 方向と y 方向の合成流速）が 1.792, 6.453, -0.866 となった。このように、中央部は y 方向を除き、ある範囲の流速が集中していることが明らかになった。

蛇行区では投入したブロックの影響により流向や流速に違いが観察されたため、ブロックとの位置関係により A ~ E の 5 グループに分けて解析した（Fig.2）。コンクリートブロックの下流側に藻類とデトリタスが堆積し、上流側は砂が洗掘されて若干薄くなっていた。蛇行区 5 グループ間において、流速（3 次元の合成流速）、流下方向流速（x 軸）、横断方向流速（y 軸）、平面流速（x 軸と y 軸の合成流速）、鉛直流速（z 軸）、水深などの物理性について一元配置分散分析を行った。その結果、群間の流速には有意差が見られ（ $F(4,27)=5.049$ ）、Tukey を用いた多重比較を行ったところ、B-C 間および C-D 間で C の流速が有意に小さいことが明らかになった。x 方向についても有意差が見られ（ $F(4,27)=9.740$ ）、A-C 間、B-C 間、C-D 間および C-E 間において C が有意に小さいことがわかった。さらに平面流速（x 軸、y 軸の合成流速）に有意差が認められ（ $F(4,27)=5.260$ ）、B-C、C-D

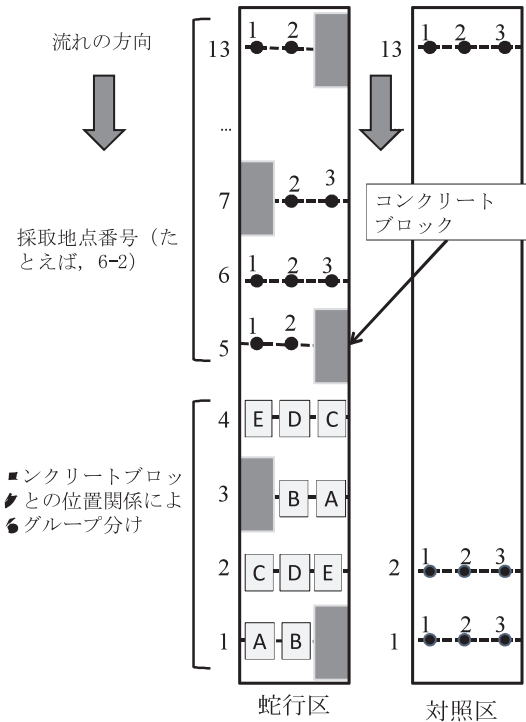


Fig.2 採取地点の位置
Location of sampling points

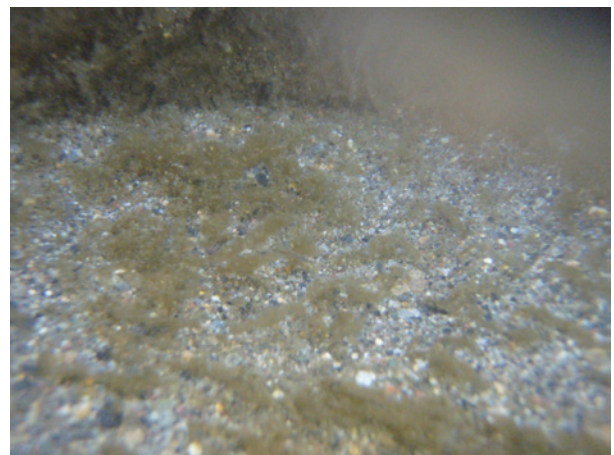


Fig.3 水路底で生育する藻類
Algae on the canal bottom

間に C の流速が有意に小さいことがわかった（いずれも $p<0.05$ ）。y 方向および z 方向については、有意差はみられなかった。以上からグループ C は成分を含めた流速が他のグループより小さいことが明らかになった。

2 藻類等の特徴

出現した藻類のタクサ数は、デトリタスを加えて調査地点全体で 34 となった。両試験区をとおした出現率 80%以上の種は、出現率の高かった順に、ディアトマ属（*Diatoma* sp.）、シネドラ属（*Synedra* sp.）、スタウラストルム属（*Staurostrum* sp.）、ナビクラ属（*Navicula* sp.）、デトリタス、セネデスムス属（*Scenedesmus* sp.）、メロシラ属（*Melosira* sp.）、アオミドロ属（*Spirogyra* sp.）だっ

Table 1 試験区毎の平均流速

Average velocity of Meandering section and Control canal

(単位：m/s)

	蛇行区		対照区	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
流速	0.277	0.109	0.287	0.132
平面流速	0.242	0.097	0.276	0.125
流下方向	0.203	0.095	0.268	0.119
横断方向*	0.102	0.087	0.055	0.057
鉛直流速*	0.094	0.109	0.051	0.071

注：* は試験区間に有意差（ $p<0.05$ ）が認められた流速成分

Table 3 種ごとの平均出現量
Average quantity in order of the algae appearance

全試験区		蛇行区		対照区	
属名等	平均量	属名等	平均量	属名等	平均量
デトリタス	2.5	デトリタス	2.2	デトリタス	2.6
シネドラ属	2.2	シネドラ属	2.0	シネドラ属	2.4
ディアトマ属	1.8	ディアトマ属	1.7	ディアトマ属	2.0
メロシラ属	1.6	アオミドロ属	1.5	ナビクラ属	1.7
アオミドロ属	1.6	メロシラ属	1.5	メロシラ属	1.7
ナビクラ属	1.5	ナビクラ属	1.3	アオミドロ属	1.6
ニッチア属	1.3	ニッチア属	1.3	ニッチア属	1.4
スタウラストルム属	1.3	スタウラストルム属	1.2	スタウラストルム属	1.3

た。このうちディアトマ属、シネドラ属、スタウラストルム属はすべての調査地点で採取された。試験区毎に出現率 80%以上の種を高い順に挙げると、蛇行区では、シネドラ属、ディアトマ属、スタウラストルム属、デトリタス、メロシラ属、ナビクラ属、セネデスム属、アオミドロ属、対照区ではシネドラ属、ディアトマ属、ナビクラ属、スタウラストルム属、デトリタス、セネデスム属、メロシラ属、アオミドロ属の順となった。

次に、出現量順の種を **Table 3** に示す。試験区間で比較すると、上位3種（デトリタス、シネドラ属、ディアトマ属）の順位は両試験区とも同じだったが、4位は蛇行区がアオミドロ属、対象区はナビクラ属だった。6位はこの両種が入れ替わり、蛇行区がナビクラ属、対象区がアオミドロ属だった。出現量をもとにクラスター分析（平方ユークリッド距離、Ward法）を行ったところ、**Fig. 4** に示すデンドログラムが得られた。

藻類に関する出現量等について両試験区間で Mann-Whitney の U 検定を行ったところ、種数、Shannon-Wienwer の多様度指数において有意差はみられなかったが、出現量の総量（U 値 362.5, $p=0.02$ ）有意差が認められた。

対照区内の3グループについては、種数、多様度指数等について有意差は見られなかったが、出現量の総量（ $F(2,38)=3.76$ ）、ニッチア属（*Nitzschia* sp., $F(2,38)=5.31$ ）およびアオミドロ属（ $F(2,38)=3.80$ ）で有意差があり、いずれも左岸側が右岸側に比し大きな値を示した。蛇行区については後述する。

蛇行区の出現藻類の順位についてグループ間で Kruskal Wallis 検定を行ったところ、シネドラ（ $p=0.019$ ）、ナビクラ（ $p=0.023$ ）、メロシラ（ $p=0.029$ ）、デトリタス（ $p=0.032$ ）およびアオミドロ（ $p=0.039$ ）について順位に違いがあることが明らかになった。

種数と出現量の総量の間には、調査地点全体で $\rho=0.86$ （蛇行区： $\rho=0.81$ 、対照区： $\rho=0.89$ ）の有意な正の相関があった（ $p<0.01$ ）。出現量の総量と多様度指数の間にも全体で $\rho=0.76$ （蛇行区： $\rho=0.73$ 、対照区： $\rho=0.80$ ）の有意な正の相関があった（ $p<0.01$ ）。

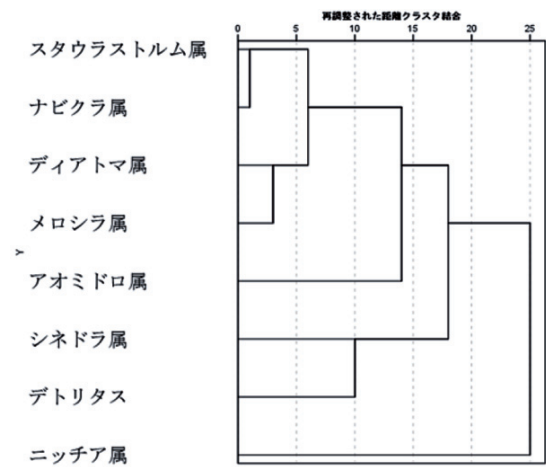


Fig.4 種の出現量によるデンドログラム
Dendrogram of cluster analysis of algae quantity

近傍の調査地点は似た藻類相を示すと予想して、藻類相をクラスター分析したが、そのような傾向はみられなかった。

Fig.5 ~ **7** に種数のヒストグラムを示す。Shapiro-Wilk 検定の結果、全体（ $p=0.192$ ）及び対照区（ $p=0.539$ ）では正規分布を示したが、蛇行区は正規性を示さなかった。

3 流速と種の関係

調査地点全体でみると、流速と種数の間には $\rho=0.49$ の正の相関が、対照区、蛇行区でもそれぞれ $\rho=0.53$ 、 $\rho=0.42$ が見られた（いずれも $p<0.05$ ）。しかし流速と多様度指数の間には、全調査地点、蛇行区および対照区のいずれにも有意な相関はみられなかった。

調査地点全体を流速 0.2m/s 未満（グループ1）、0.2m/s 以上 0.4m/s 未満（グループ2）、0.4m/s 以上（グループ3）に分けて出現量総量、種数、多様度指数等の一元配置分析を行ったところ有意差は認められなかった。主な種の出現数割合を **Fig.8** ~ **10** に示す。種別出現量は、ディアトマ属、アオミドロ属、メロシラ属では有意差なし、ニッチア属（ $F(2,68)=3.12$ ）、シネドラ属（ $F(2,68)=4.31$ ）、スタウラストルム属（ $F(2,68)=4.70$ ）、デトリタス（ $F(2,68)=3.40$ ）、ナビクラ属（ $F(2,68)=8.44$ ）にグルー

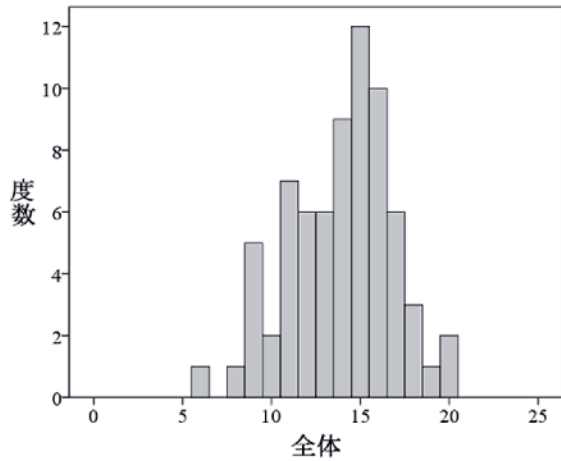


Fig.5 種数のヒストグラム (全体)
Histogram of species number (Both of the sections)

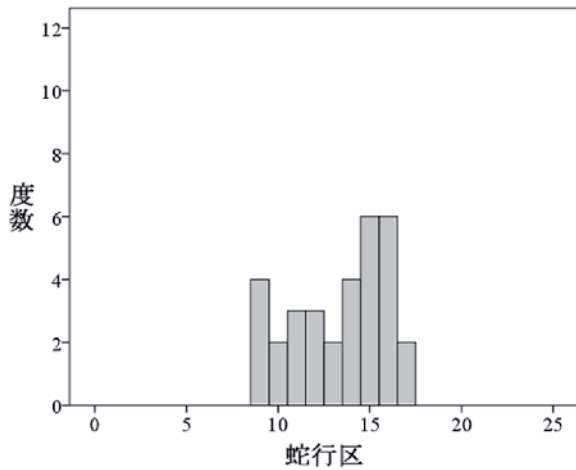


Fig.6 種数のヒストグラム (蛇行区)
Histogram of species number (Meandering section)

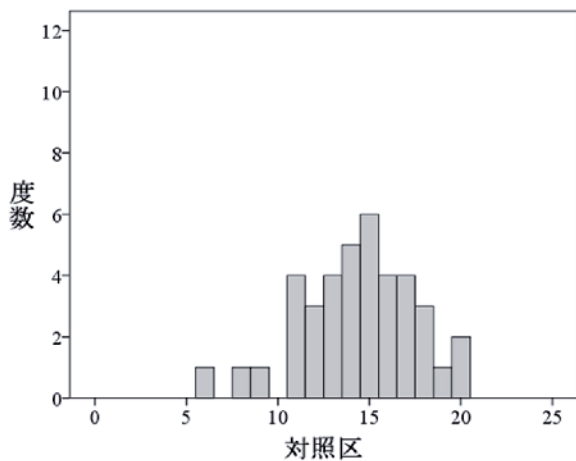


Fig.7 種数のヒストグラム (対照区)
Histogram of species number (Control section)

グループ間の有意差があった。多重比較の結果、ニッチア属はグループ3の方がグループ2より多かった。その他の種はいずれも流速の小さなグループの方が多かった。

すなわちシネドラ属はグループ1>グループ2, スタ

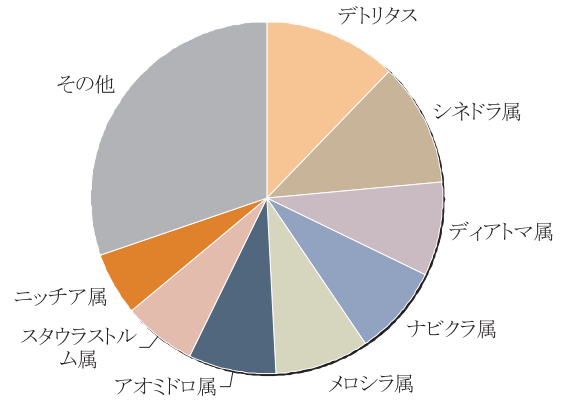


Fig.8 グループ1の出現割合 (0.2m/s未満)
Appearance ratio of algae in Group 1

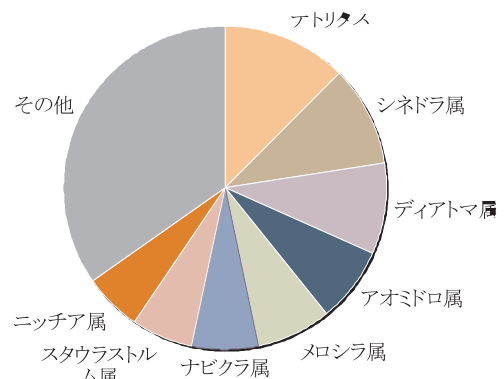


Fig.9 グループ2の出現割合 (0.2m/s以上0.4m/s未満)
Appearance ratio of algae in Group 2

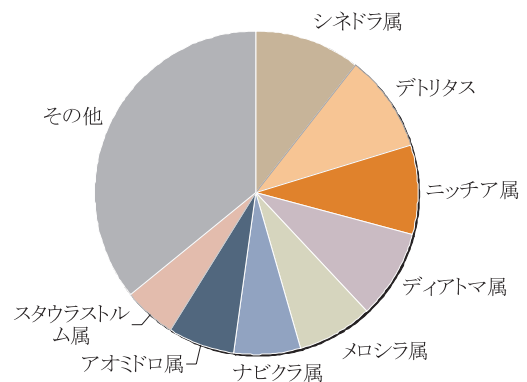


Fig.10 グループ3の出現割合 (0.4m/s以上)
Appearance ratio of algae in Group 3

ウラストルム属でグループ1>グループ2, グループ1>グループ3, デトリタスはグループ1>グループ3, ナビクラ属ではグループ1>グループ2, グループ1>グループ3だった。

流速とデトリタス量の間には有意な負の相関 ($\rho = -0.51$) が、鉛直流速とデトリタス量の間には $\rho = -0.64$ の相関が (いずれも $p < 0.05$)、また、流速と藻類総量の間には -0.88 ($p < 0.01$) の強い負の相関があった。

蛇行区各5グループの平均流速と各代表種の出現量を Fig.11 ~ 18 に示す。各グループの平均流速と、スタウラストルム属 ($\rho = -0.95$), デトリタス ($\rho = -0.91$), シネドラ属 ($\rho = -0.90$), ナビクラ属 ($\rho = -0.90$) との間に、それぞれ有意な負の相関があった ($p < 0.05$)。これらの種は、前述した流速を3グループに分けた場合グループ間に有意差が生じた種と、ニッチア属を除いて一致した。

主要8種の平均量をもとにしたクラスター分析(ユークリッド平方距離, ウォード法)のデンドログラムを Fig.19 に示す。A, E および B が類似し、ブロック直下流の C が離れて位置しており、D がもっとも遠くに位置している。

5グループの平均多様度指数は、A が 2.38, B が 2.33, C が 2.42, D が 2.45, E が 2.34 となり、いずれの間にも有意差は見られなかった (U 検定)。

5グループで一元配置分散分析を行った結果、出現量の総量 (F(4,27)=3.708), シネドラ属 (F(4,27)=4.085), デトリタス (F(4,27)=3.636), ナビクラ属 (F(4,27)=3.921), アオミドロ属 (F(4,27)=3.245), メロシラ属 (F(4,27)=3.673) で有意差がみられた。ニッチア属, ディアトマ属およびスタウラストルム属では有意差は見られなかった。多重比較の結果、有意差があった種の全てにおいて、Dグループに比しCグループの出現量が多いことが明らかになった。

4 生産者の炭素安定同位体

サンプルの平均炭素安定同位体比は、 $-20.0 \sim -22.3\%$ となった (Table 4)。 $\delta^{13}\text{C}$ と流速等との間の順位相関係数を求めたところ、流速の間に $\rho = 0.45$ (以下、いずれも $p < 0.05$) の有意な正の相関があった。 $\delta^{13}\text{C}$ と出現量の総量との間に $\rho = -0.535$, デトリタスとの間に $\rho = -0.54$, アオミドロ属との間に $\rho = -0.45$, ニッチア属との間に $\rho = -0.48$ の相関があった。

グループ間で一元配置分析を行ったところ有意差が認められた (F(4,27)=5.337)。多重比較の結果、グループ C の $\delta^{13}\text{C}$ が他のグループに比べて低いことが明らかになった。

IV 考察

1 流速

蛇行区と対照区の平均流速には有意差がなかったが、流れの成分では差が生じた。特にデトリタスの出現量と負の相関のある鉛直方向の流速は生産者の組成に影響を与える可能性があることが明らかになった。

対照区は横断的な位置の違いにより流れの均質性に差が出た。すなわち中央部は同じような流れ特定の流速が集中した一方、壁面に近いと流れが乱れることにより正規分布を呈した。今回用いた水路は幅が狭かったため壁面の影響が増幅されたと考えられるが、規模の大きな水

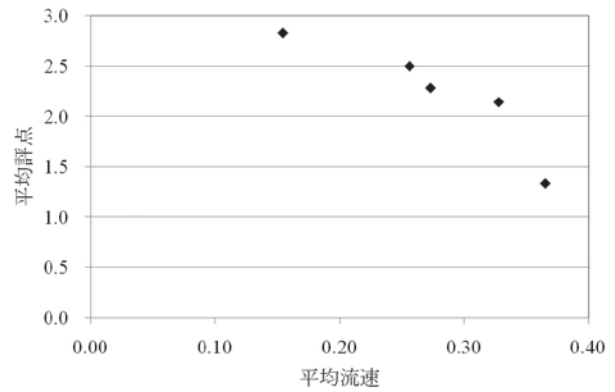


Fig.11 蛇行区の流速と出現量 (デトリタス)

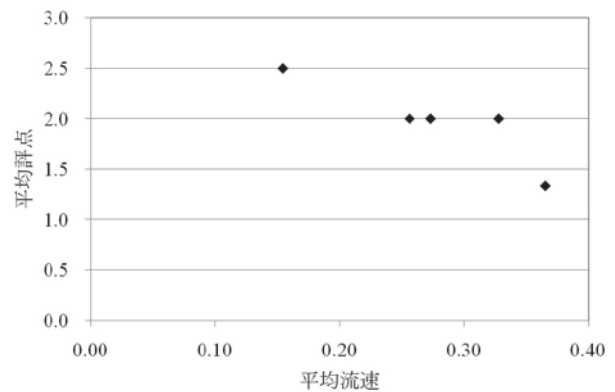


Fig.12 蛇行区の流速と出現量 (シネドラ属)

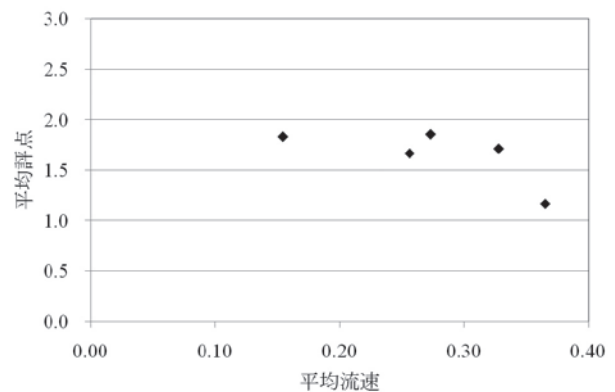


Fig.13 蛇行区の流速と出現量 (ディアトマ属)

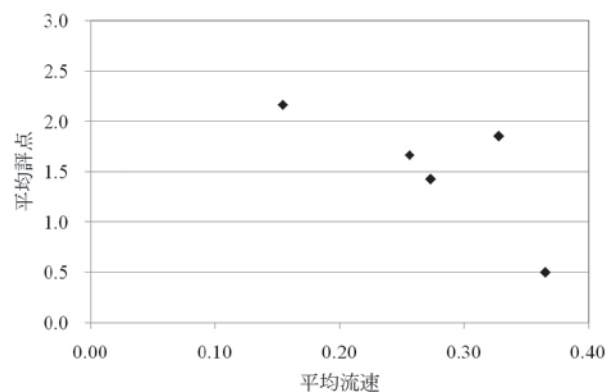


Fig.14 蛇行区の流速と出現量 (アオミドロ属)

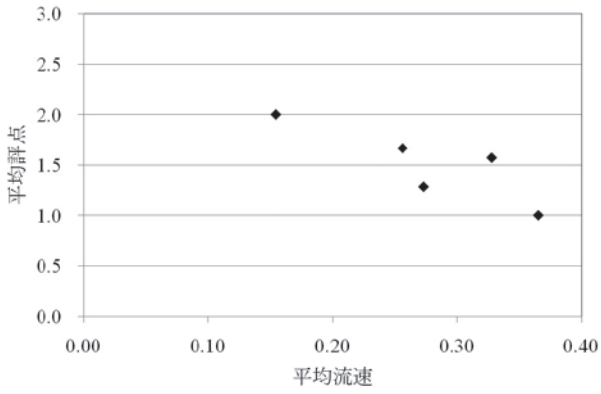


Fig.15 蛇行区の流速と出現量 (メロシラ属)

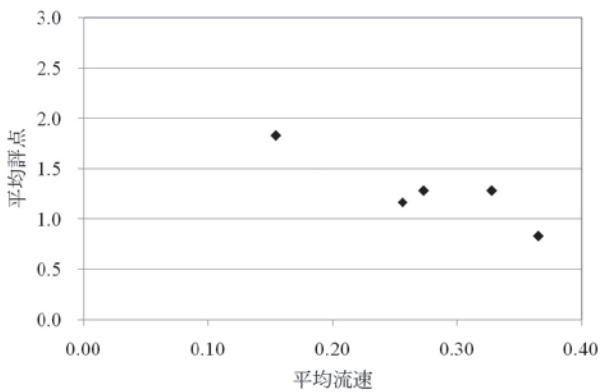


Fig.16 蛇行区の流速と出現量 (ナビクラ属)

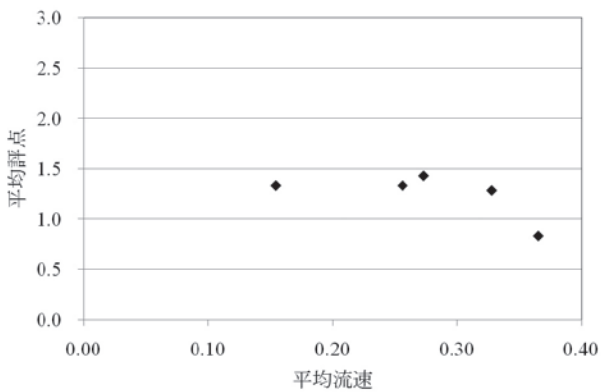


Fig.17 蛇行区の流速と出現量 (ニッチア属)

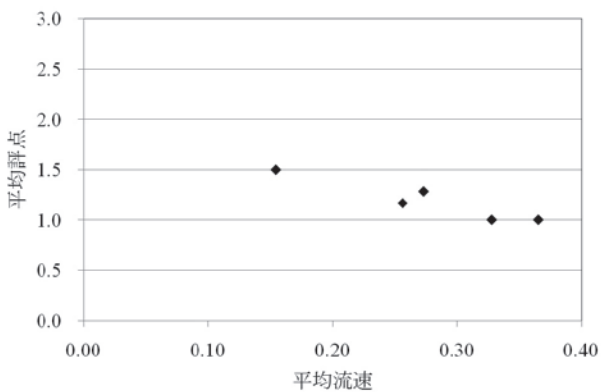


Fig.18 蛇行区の流速と出現量 (スタウラストルム属)

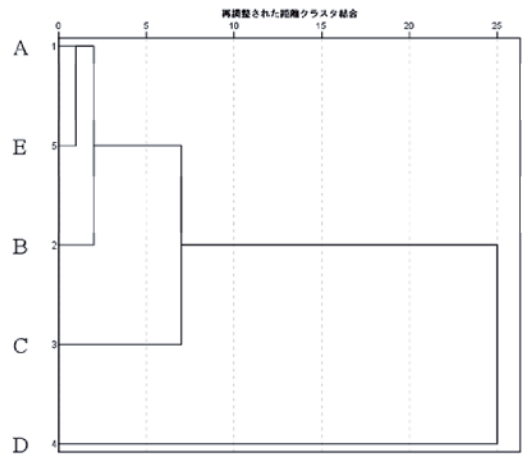


Fig.19 蛇行区5グループのデンドログラム

Dendrogram of cluster analysis of 5 Groups in meandering section

Table 4 試料の炭素安定同位体比
Stable isotope ratio of organic matter

(単位：%)

グループ	A	B	C	D	E
$\delta^{13}C$	-20.9	-21.1	-22.3	-20.0	-20.8

路ではこの中央部に相当する流れが占める割合が相対的に増加し、結果的に全体の流れの多様性が低下する可能性がある。

蛇行区においてブロックの直下流部 (C) の流速が小さくなることは予想されたが、これが定量的に裏付けられた。蛇行区における5グループ別の流速は、ブロックの直下流に位置するCと蛇行区中央部(ブロックとブロックの間)に位置するDの間で、Cが有意に小さかった。このほかの流速成分でもCは小さな流速が形成された。ブロックを投入したことにより、流速の多様性が形成されたことが確かめられた。

2 藻類

今回の研究で出現した藻類はいずれも河川などの陸水域における類出種である。珪藻群落の種構成は生息場所によって異なるが、砂上ではナビクラ属、ニッチア属などが多かったという大塚(1998)の報告と合致している。また久保田ら(1966)は流れの速さによって流速が60~140cm/sを早瀬、15~60cm/sを平瀬としたうえで、ナビクラ属が流速の小さな場所に多く出現する傾向があると述べている。この分類に従えば、本実験は平瀬に該当する。

Fig.3のデンドログラムは、ニッチア属が他の種と比べて異なる出現傾向があることを示している。すなわちデトリタスや藻類種は流速が大きいほど出現量が減少する傾向があるが、ニッチア属は、本実験の流速分布内において流速は生育の制限要因にならなかった。

河村(1994)の付着機構によって藻類を分類し、そのなかで砂底に多く生育する種は、殻の全面で基質に水

平方向に付着し、活発な滑走運動をする付着力は弱いA型(ナビクラ属, ニッチア属など)や単体で蓋面前面で気質に付着するB型が砂底で多いとしている。これは砂泥のような不安定な場所では基質自体の動きや基質表面の更新などが大きな影響を及ぼす(河村, 1998)からである。付着力の弱いA型に属するニッチア属では、本実験の範囲内の流速は出現の制限要素にならなかった。この理由として、同じA型の間でも付着力に差があるか、ニッチア属の増殖速度が他種より速いことが考えられる。流速が多様な環境では、流速に生育の影響を受ける種、あまり受けない種が適した環境が供給され、水路における種多様性が高まる。

藻類群落の遷移は被摂食と光条件の影響を受ける。まず増殖速度が速いA型がコロニーを形成した後、藻類群落は徐々に大きな群体を形成し三次元的群落が発達する。そして、次第に細胞の端を付着させてロゼット状の群体を作るアオミドロ属のような種、寒天質の柄を細胞から伸ばして付着する種などが出現する(河村, 1998)。多細胞が連結した糸状群体を形成し末端細胞で基質に付着するH型のメロシラ属が頻出したのは群落の遷移が進んでいたことを示唆している。更なる群落成長の制限要因がない場合、次にB型が卓越することになるが、本研究で認められたB型はコッコネイス属(*Cocconeis* sp.)が多少みられたのみであった。この原因として採取時点は遷移の途中だった可能性、種間競争の影響が考えられる。

流速と種数の間に正の相関がみられたことは、加藤(1999)の報告と異なる結果となった。これは本研究における流速が、大きな流速を含む河川のような環境ではなく、平瀬に該当する小さい流速範囲だったためかもしれない。すなわち、流速がある範囲を超えると種多様性が減少するが、小さな流速の狭いレンジでは、流速が藻類相の遷移速度、種間競争に影響を与え、流速が大きいほど種数が増加する可能性がある。しかし蛇行区5グループの種多様性に有意差がみられなかったことから、本研究のような小さな流速の範囲では、流速は種多様性に明瞭な違いは生じさせないと考えた。

一方、出現量と流速は負の相関がみられた。河床の礫が移動するような流速の大きな流路では底生藻類による一次生産は抑えられるが、流速の遅い部分を創出することができれば底生藻類の群落の発達が見込める(河口・中村, 2005)。水路に流速の小さな場所を確保することは水生動物の餌である藻類を確保するために重要である。さらに本研究では流速と種数が正の相関があったことから、一定の流速レンジの下では流速が小さいほど特定の種が優占する可能性が示唆された。

蛇行区の種数ヒストグラムが正規分布を示さなかったことから、藻類の生息に適した環境だけでなく、あまり適していない環境も創出されたといえる。水路には藻類種が多い水生動物にとっての餌場環境だけが用意される

必要はなく、避難場、繁殖場、越冬場など餌場以外の機能も必要である。蛇行区では様々な流速をもつ水域環境が用意され、結果的に藻類の生息にはあまり適していない空間が創出されたと解釈することもできよう。藻類群落が発達する場所、発達しない場所の特性解明は今後の課題である。

蛇行区のCは流速、藻類相だけではなく物質フローからも特徴的である。Cの $\delta^{13}\text{C}$ は他の地点と比べて低く、 C_3 植物由来の有機物であるデトリタスが他グループに比べて多く含まれていることを表している。現場の農業水路でもしばしば石の直下流に落葉・落枝やその破砕物、腐食物の堆積を見ることができる。水域中の石は匍匐型、営巣型など水生昆虫の生息場所となるだけでなく、付着力がないデトリタスが餌資源となって食物網に取り込まれる場を提供している。

本研究は生産者の生態に対する大きな因子であり、設計時にある程度制御可能な流速に着目した。現場の水路はこの他に、①底質の粒度分布、②上流からの土砂の供給、③出水による攪乱などの影響を受ける。今後これらを含めて解析することによって、水路内の食物連鎖、すなわち微小な生態系の多様性を確保する整備手法が開発される。

V 結 言

流速による藻類相の違いを把握するため、人工水路において実験を行ったところ、以下の知見が得られた。

- ① 流速と種数には正の相関が見られた。しかし流速による藻類の多様性指数の違いはみられなかった。
- ② 藻類の総量は流速と強い負の相関があった。
- ③ 本実験の条件下では、流速が小さいほど特定の種が優占する可能性がある。
- ④ 同じ付着機構を持つ種間でも出現傾向に差が見られた。ナビクラ属の出現量は流速と負の相関があるが、ニッチア属は流速の影響を受けないことが明らかになった。
- ⑤ デトリタス量は流速、特に鉛直流速と負の相関がある。
- ⑥ コンクリートブロックの直下流の試料は、他に比べて $\delta^{13}\text{C}$ が低かった。これは流速が小さく、デトリタスが溜まりやすかったためと考えた。

水路における定常的な流速環境下において、流速の影響の受けやすさに種間差があること、デトリタスは流速の小さなところに堆積しやすいことが明らかになった。底生生物(ベントス)はさまざまな生活型、摂食機能群を有する。流速の多様性は藻類種の出現、デトリタスの堆積に影響を与えるから、底質の変化などとともに、微小な生態系を形成するきっかけとなっている可能性がある。

参考文献

- 1) 加藤和弘 (1999) : 珪藻類の種多様性を保全するための河川環境整備のありかた, ランドスケープ, 65 (5), 561-564.
- 2) Biggs, B. J. F.: Patterns in benthic algae of streams, In: Stevenson, R. J., Bothwell, M. L., Lowe, R. L. (eds) *Algae ecology*, Academic Press, San Diego, CA, 1996
- 3) 米山忠克・笹川英夫 (1994) : 土壌-植物系における炭素, 窒素, 酸素, 水素, イオウの安定同位体自然存在比 : 1987年以降の研究の進歩, 日本土壌肥科学雑誌, 65 (5), 585-598.
- 4) 大塚泰介 (1998) : 河川の一形態単位内における付着藻類群落, 特に珪藻群落の生息場所による違い, 陸水学雑誌, 59, 331-328.
- 5) 久保田苑子・草間真知子・矢矧宏子 (1966) : 川の流速と付着藻類の構成-吉野川の場合-, 奈良女子大学生物学会誌, 16, 19-20.
- 6) 河村知彦 (1994) : 海産付着珪藻の分類と形態, 付着生物研究, 10 (2), 7-25.
- 7) 河村知彦 (1998) : 付着珪藻-その生態と付着生物群集における役割-, *SESSILE ORGANISM*, 15 (1), 15-22.
- 8) 河口洋一・中村太士 (2005) : 直線化された川の再蛇行化-分野間の協働について-, 日本生態学会誌, 55, 497-505.

Diversification of Water Velocity Provides Biodiversity of Producer in a Food Chain

MORI Atsushi, WATABE Keiji, KOIZUMI Noriyuki and NISHIDA Kazuya

Summary

Important factors for aquatic lives in canals involve water velocity, water depth, substrate of canal and plant community. We can control only water velocity to conserve ecosystem in canal when land improvement project is put into practice. As water velocity affects environment through succession, variety of water velocity might help us to create diversity of ecosystem. Algae and detritus are most important producers in ecological pyramid. We analyzed relationship between ecology of the producers and water velocity using an artificial canal.

Water velocity correlated with number of species. On the other hand, velocity correlated inversely with quantity of algae. Though attach mechanism of *Nitzschia* sp. is common to *Navicula* sp., the quantity of the former was not been influenced to water velocity, but the latter was negatively correlated to water velocity. Quantity of detritus correlated with water velocity, especially vertical velocity. $\delta^{13}\text{C}$ of samples collected from behind concrete blocks that have been set in order to emerge diversity of water velocity was lower than the other samples. The samples were considered to include more detritus that was derived from terrestrial plants.

農村生態系保全に向けてのドジョウと カラドジョウの簡易な種判別式

小出水規行*・森 淳*・水谷正一**・渡部恵司*・竹村武士***・西田一也*

目次

I 緒言	167	IV 考察	171
II 材料と方法	168	1 判別式の特徴	171
1 計測サンプル	168	2 1部位による予備的判別	172
2 計測部位	168	3 固定による魚体収縮	172
3 データ解析	168	V 結言	172
III 結果	169	参考文献	173
1 部位比較	169	Summary	175
2 判別式	170		

I 緒言

我が国在来のドジョウ *Misgurnus anguillicaudatus* は、全国規模で行った農林水産省・環境省連携の「田んぼの生きもの調査 (2001 ~ 2009 年)」で最も多く確認され (地域環境資源センター農村環境部, 2011), 農村生態系における主要魚種となっている。しかし, 近年の生息環境の悪化に伴い, 例えば兵庫県, 徳島県, 宮崎県ではレッドデータリストに記載される等の生息量が減少している地域もある (野生生物調査協会・環境保全事務所, 2011)。一方, 一部の水田水域ではドジョウと比較して髭が長く, 体高が大きい等の魚体部位の特徴が異なるカラドジョウ *Paramisgurnus dabryanus* が同所的に確認されている。カラドジョウは中国大陸から台湾島, 朝鮮半島を原産とする外来種であり, その学名は分類学的に *M. mizolepis* と混乱している [藤田 (2007), 本研究では便宜的に *P. dabryanus* を適用した]。我が国では輸入ドジョウに混入し, 1960 年代には兵庫県, 香川県, 長崎県で生息していたとされる (Oliva and Hensel, 1961)。田んぼの生き物調査をはじめとする近年の調査研究によると (金尾・上野, 2005; 加納ら, 2007; 小出水ら, 2009, 2010; 清水・高木, 2010; 高木ら, 2010), 現在, カラ

ドジョウの分布は東北~四国地方にかけての 23 県にまで及んでいる。

このように全国的に広がる傾向を示すカラドジョウに対し, 環境省は共存によって生息場が奪われ, ドジョウの生息量が減少すること, または交雑によって遺伝子が汚染されること等の可能性を懸念し, 本種を要注意外来生物に指定している (環境省, 2011)。実際, 我が国におけるカラドジョウの生息環境特性やドジョウとの生態比較については断片的情報しかなく (金尾・上野, 2005; 加納ら, 2007), 農村生態系への被害の実態は明らかでない。さらに, ドジョウと体形が類似し, 個体間での変異も大きいことから (李・魯, 2006), ドジョウとカラドジョウの正確な区別には高度な技術を要する側線縦列鱗数や尾柄部縁辺上部の尾鰭前部鰭条数 (unbranched spinous fin ray of above caudal fin) 等の分類形質の計測が必要となる (Yang et al., 1994)。

近年, DNA 分析技術の進展により, 塩基配列の違いから両種の判別が可能となった (小出水ら, 2010; 清水・高木, 2010; 高木ら, 2010)。しかし, DNA 分析に用いる専用機器, 費用, 時間等を勘案するとまだ一般的ではない。そのような中, 清水・高木 (2010) は DNA で判別した個体について, 計測が容易な髭長や体高等の部位を比較した結果, 種間に見られる差は Vasil'eva (2001) で指摘されている特徴と一致することを確認した。この成果は分類形質や DNA 分析を利用しなくても, 各部位を組み合わせてることによって, 汎用的な両種の判別関数式を統計的に構築できることを示している。

これまで魚体部位を用いた魚類個体群の判別式は, マコガレイ *Limanda yokohamae* とマガレイ *L. herzensteini*

* 資源循環工学研究領域生態工学担当

** 宇都宮大学農学部

*** 農村基盤研究領域資源評価担当

平成 23 年 12 月 13 日受理

キーワード: 要注意外来生物, 多変量解析, エタノール固定, 水田水域

(加藤ら, 1974), マダイ *Pagrus major* の天然魚と人工放流魚 (松宮ら, 1984), チョウセンエツ *Coilia ectenes* の個体群 (Cheng and Han, 2004), ウグイ類 *Leuciscus leuciscus burdigalensis* の個体群 (Poulet et al., 2005), トゲウナギ類 *Mastacembelus mastacembelus* の個体群 (Çakmak and Alp, 2010), ハクレン *Hypophthalmichthys molitrix* とコクレン *Aristichthys nobilis* (Yu et al., 2010), 大西洋タラ *Gadus morhua* の天然魚と人工放流魚 (Uglem et al., 2011) 等でも適用され, これらの正判別率は 67.1% (松宮ら, 1984) ~ 100% (Uglem et al., 2011) と高い。一方, ドジョウとカラドジョウについては丸山 (未発表) による取り組みしかなく, 公表には至っていない。

著者らは, 我が国の健全な農村生態系を将来にわたって保全し続けるには, カラドジョウについても生態系に及ぼす被害の実態を明らかにし, それに応じた適切な対策を講じることが肝要と考える。しかし, 被害が明らかになってからでは, 対応が手遅れとなるものも推察され (例えば, 遺伝子汚染), 早急に, カラドジョウの生息状況を調査し, それ以上分布が拡大しないよう, 被害予防三原則「(カラドジョウを) 入れない, 捨てない, 拡げない (環境省, 2011)」を世間一般に実践させて行くことが必要と判断する。そのためには, ドジョウとカラドジョウを見分けるために, 大学や独法研究機関等の研究者だけでなく, 田んぼの生きもの調査等を実施している行政機関, 民間コンサルタント, NPO 団体, ひいては地元農家にとっても簡易に判別可能な手法を開発しなくてはならない。本研究では, DNA 分析により判別したドジョウとカラドジョウを用いて (小出水ら, 2010), 各個体の部位に基づく両種の判別式を作成した。計測した各部位について種間を統計的に比較し, 作成された判別式の特徴, 利用方法, エタノール固定による個体の収縮について考察を加えた。

なお, 本研究をまとめるにあたり, メダカ里親の会事務局の中茎元一氏にはサンプル採捕に, 韓国農漁村公社の朴明洙氏にはサンプル計測に, 水利工学研究領域の李盛源氏には韓国語の日本語翻訳に, 韓国農漁村研究院の金榮得氏には韓国におけるドジョウの文献収集に, それぞれご協力いただいた。デンバー大学の T. W. Quinn 博士には英文要旨をご校閲いただいた。本研究の

一部は科学研究費助成事業 (研究課題番号 20580270, 22380133, 23580340) の支援を受けて実施した。ここに記して深謝の意を表します。

II 材料と方法

1 計測サンプル

小出水ら (2010) の DNA 分析により判別されたドジョウ 312 個体とカラドジョウ 72 個体を計測サンプルとして用いた。各個体は 2008 年 7~9 月にかけて, 栃木県内 45 地点の農業水路や河川でタモ網等により採捕され, 無水 (99.5%) エタノールで固定後, -30°C で保管された。DNA 分析ではミトコンドリア DNA のシトクローム *b* 遺伝子を利用し (小出水ら, 2010), さらに両種の交雑個体はないことを核 DNA の protein kinase C substrate 80K-H と ribosomal protein S2 の 2 遺伝子により確認した (小出水ら, 未発表)。

2 計測部位

各個体の (標準) 体長, 頭長, 体高, 尾柄高, 尾柄長, 髭長の計 6 部位について, デジタルノギスを用いて 0.1mm 単位で計測した (Fig.1)。各部位は既報 (Yang et al., 1994; Park et al., 2006; 清水・高木, 2010) を参考に, ドジョウとカラドジョウの特徴や計測の容易さ等を考慮して設定された。髭長については最長の上顎第 3 髭を計測した。

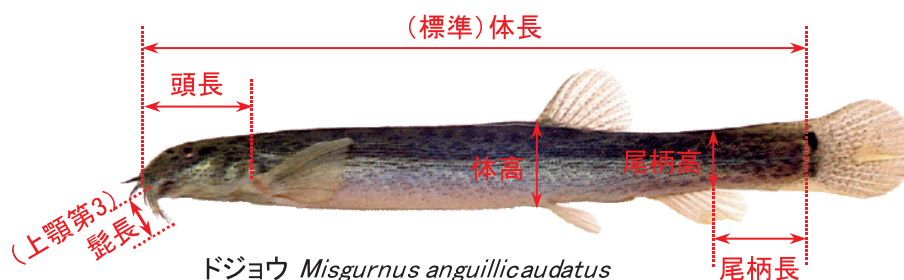
3 データ解析

a 計測データと標準化データ

解析では各部位の計測 (生) データと体長に占める割合%に換算した標準化データを用いた。標準化データは体長の大きさに伴う偏りを取り除き, 各部位における種間の差を明瞭化させるために算出した。本研究では標準化データを小数第 2 位で四捨五入して用い, 各部位に体長%を添え字して表記した (例: 頭長_{体長%}, 体高_{体長%})。

b 部位比較

計測データと標準化データを用いて, ドジョウとカラドジョウについての各部位のヒストグラムを作成すると同時に, 基礎統計量 (平均, 標準偏差, 最小~最大) を



ドジョウ *Misgurnus anguillicaudatus*

Fig.1 計測 6 部位

Six parts measured in this study

求めた。種間の差について平均の差の検定 (*t* 検定) を行い、部位間の相関分析を行った。

c 判別式作成

ドジョウとカラドジョウを外的基準 *Y* (それぞれ, 0 と 1), 各部位を独立変数 *X* とする 4 種類の判別式 A ~ D を作成した。判別式 A, B では計測データを用い, 判別式 A は全部位, 判別式 B はステップワイズ法により選択された部位を変数とした。判別式 C, D では標準化データを適用し, 判別式 C は全部位, 判別式 D は選択された部位を変数にもつ。得られた各判別式の妥当性について, 有意確率, 相関比, 正判別率, 変数等を比較した。上述の部位比較も含めて, 統計解析ソフトにはエクセル統計 2010 (社会情報サービス) を用いた。

III 結果

1 部位比較

a 計測データ

計測データによるドジョウ 312 個体とカラドジョウ 72 個体についての各部位のヒストグラム, 基礎統計量, *t* 検定結果を取りまとめて Fig.2 に示す。ヒストグラムでは, 髭長を除く各部位の種による違いが見られず, 髭長はドジョウよりカラドジョウの方が長い傾向にある。ドジョウとカラドジョウのそれぞれの平均±標準偏差 (mm) は, 体長で 60.0 ± 19.7 と 55.2 ± 14.0, 頭長で 10.6 ± 2.9 と 10.2 ± 1.8, 体高で 7.7 ± 2.9 と 8.7 ± 2.5,

尾柄高で 6.1 ± 2.2 と 6.8 ± 2.3, 尾柄長で 8.3 ± 3.4 と 8.1 ± 2.7, 髭長で 3.4 ± 1.3 と 5.3 ± 1.3 となった (Fig.2)。平均の差は髭長で有意に認められた他, 体長, 体高, 尾柄高でも有意となった (*p* < 0.01)。

計測データによる部位間の相関マトリックスを Fig.3 に示す。両種共に全ての部位間で強い正の相関が有意に認められた (*p* < 0.01)。相関係数も同程度であり, ドジョウで 0.732 (尾柄長-髭長) ~ 0.974 (体長-頭長), カラドジョウで 0.798 (尾柄長-髭長) ~ 0.976 (体高-尾柄高) となった (Fig.3)。

b 標準化データ

各部位の標準化データ (体長に占める割合%) によるドジョウとカラドジョウのヒストグラム, 基礎統計量, *t* 検定結果を Fig.4 に取りまとめて示す。計測データによるヒストグラムと比較して (Fig.2), 体高_{体長%}, 尾柄高_{体長%}, 髭長_{体長%} では種による違いを確認できる。これらの部位_{体長%} はドジョウの方がカラドジョウよりも有意に小さく (*p* < 0.01), 既報 (Yang et al., 1994; 李・魯, 2006; Park et al., 2006) における見解と一致した。ドジョウとカラドジョウのそれぞれの平均±標準偏差は, 体高_{体長%} で 12.7 ± 1.4 と 15.6 ± 1.3, 尾柄高_{体長%} で 10.0 ± 1.0 と 12.1 ± 1.5, 髭長_{体長%} で 5.6 ± 1.2 と 9.7 ± 1.2 となった (Fig.4)。頭長_{体長%} と尾柄長_{体長%} に明瞭な種間差は見られないが, 検定結果は両者ともに平均の差が有意なことを示した (*p* < 0.01)。

標準化データによる部位間の相関マトリックスを

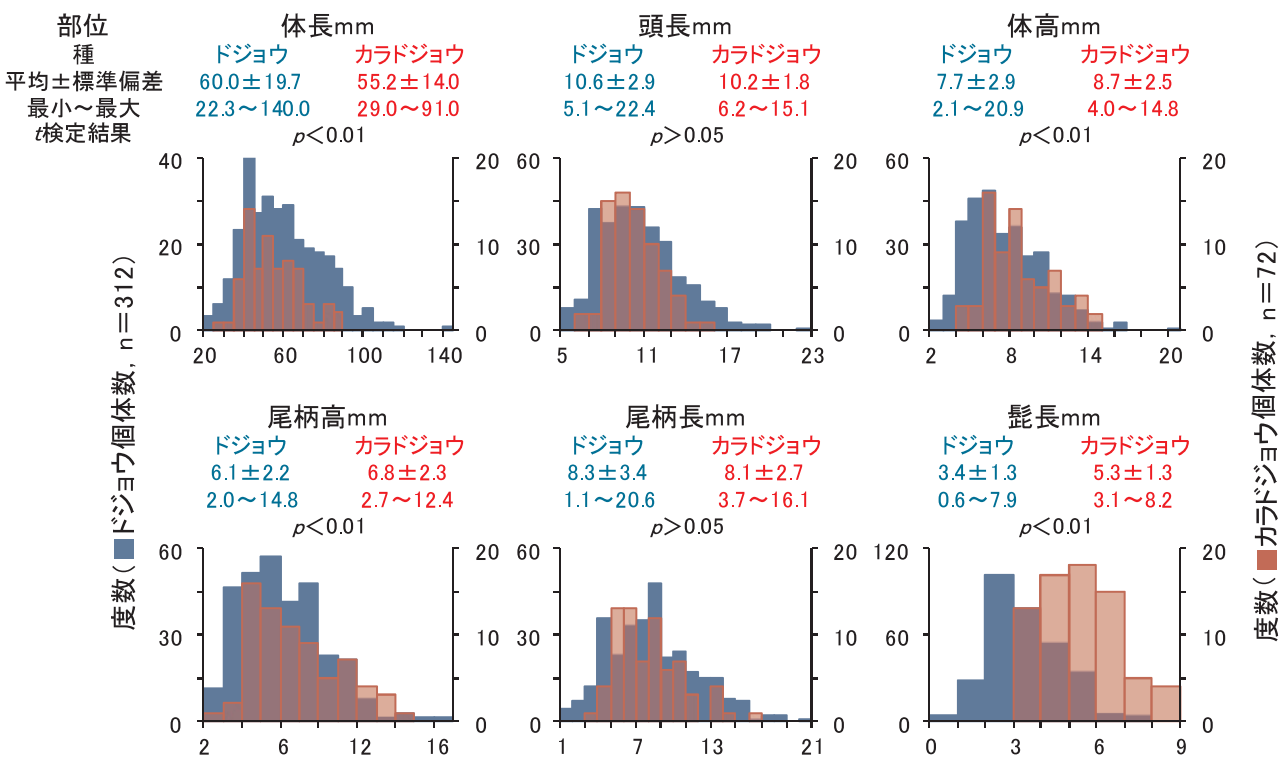


Fig.2 計測データによるドジョウとカラドジョウについての各部位のヒストグラム, 基礎統計量, *t* 検定結果
Histograms, basic statistics and results of *t*-tests for six parts of Dojo and Kara-dojo loaches based on raw measurement data

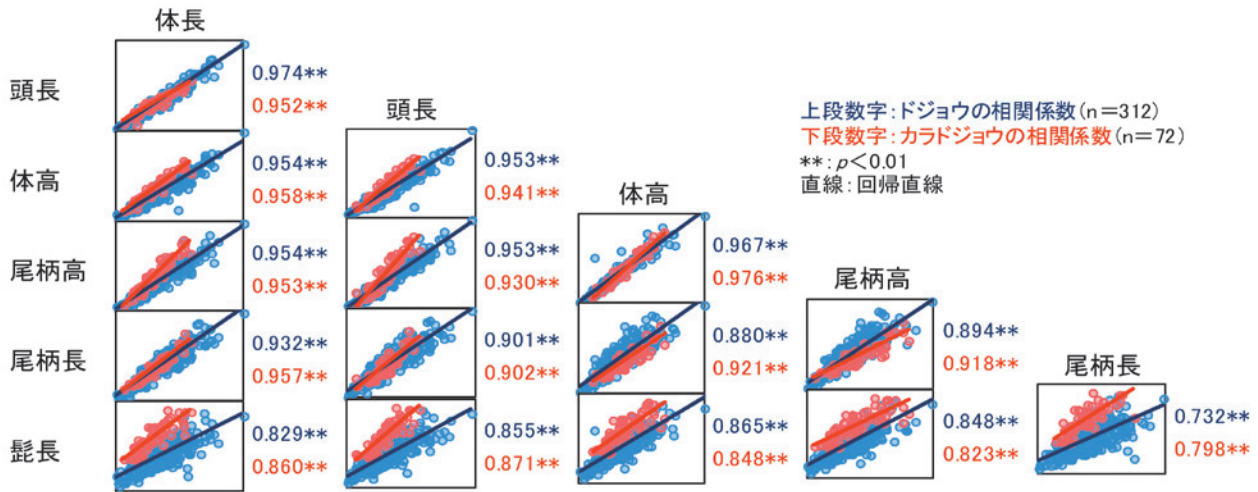


Fig.3 計測データによるドジョウとカラドジョウについての部位間の相関マトリックス
Correlation matrix among six parts of Dojo and Kara-dojo loaches based on raw measurement data

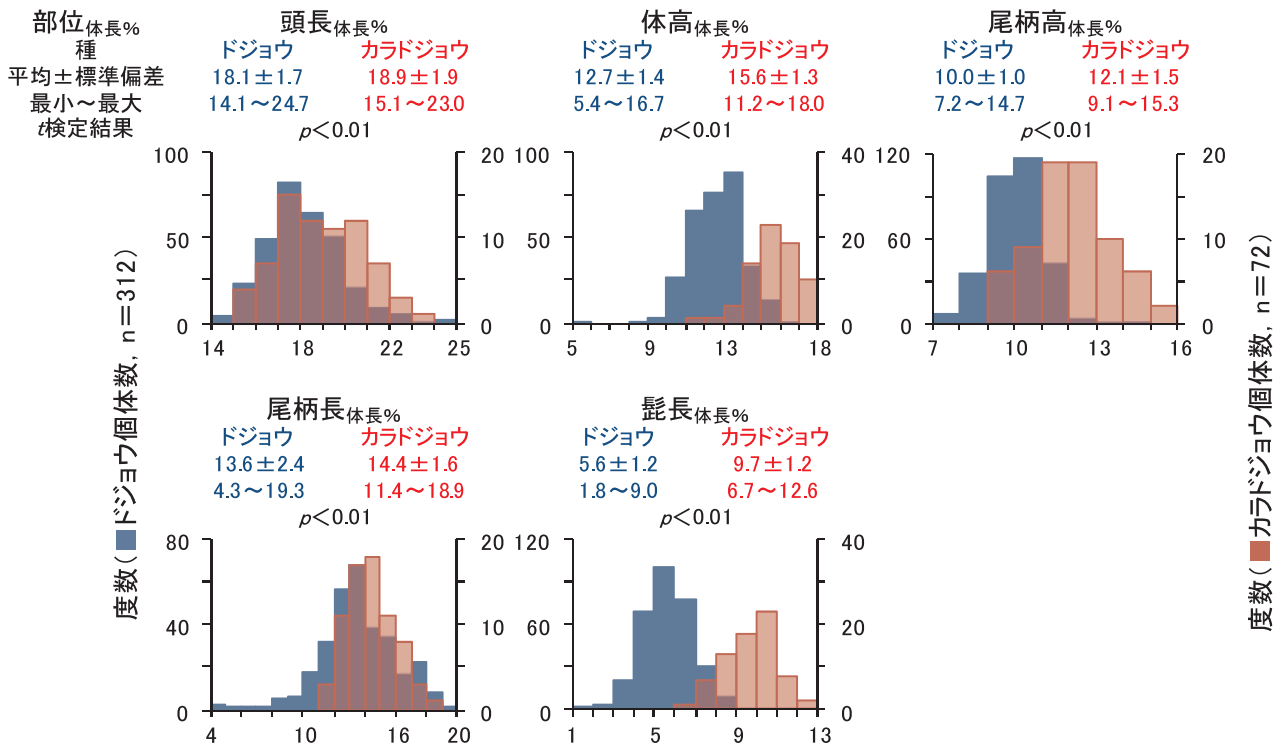


Fig.4 標準化データによるドジョウとカラドジョウについての各部位のヒストグラム, 基礎統計量, t検定結果

Histograms, basic statistics and results of t-tests for six parts of Dojo and Kara-dojo loaches based on measurement data standardized by standard length

Fig.5 に示す。相関関係は部位間や種間で異なり, 計測データにおいて見られたような (Fig.3), 統一した傾向は確認されなかった。相関係数も全体的に低い, 両種に共通して体高_{体長%} - 尾柄高_{体長%} で最も強い正の相関 (相関係数: ドジョウ 0.706, カラドジョウ 0.733), 頭長_{体長%} - 尾柄長_{体長%} で最も強い負の相関 (相関係数: ドジョウ -0.419, カラドジョウ -0.479) が同程度に示された (Fig.5)。

2 判別式

作成された判別式 A ~ D とその有意確率, 相関比,

正判別率を取りまとめて Table 1 に示す。これらの判別式は, 各変数に個体の計測または標準化データを入力し, 計算される判別値 Y が 0 以下の場合にはドジョウ, 0 より大きい場合はカラドジョウを意味する。判別式は全て統計的に有意であり (p < 0.01), 相関比は 0.790 (判別式 B) ~ 0.806 (判別式 C), 正判別率% は全体で 95.1 (判別式 C) ~ 95.8 (判別式 A) となった。判別式の違いはそれぞれの変数に反映され, 判別式 A ~ C は 5 ~ 6 変数, 判別式 D は 2 変数で構成されている (Table 1)。相関比や正判別率はどれも値が高く, 差が小さいため, 各式の

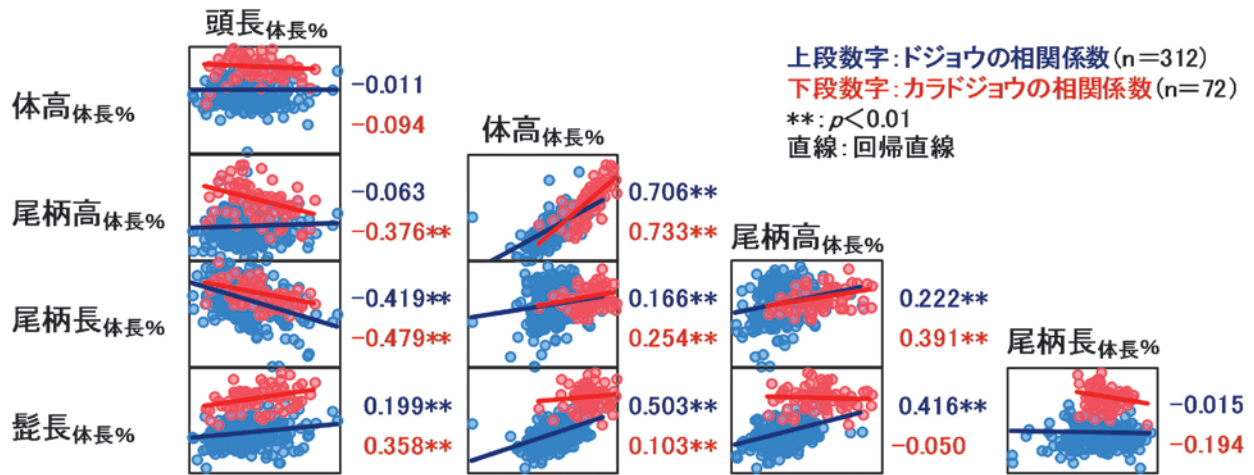


Fig.5 標準化データによるドジョウとカラドジョウについての部位間の相関マトリックス

Correlation matrix among six parts of Dojo and Kara-dojo loaches based on measurement data standardized by standard length

Table 1 部位データを用いたドジョウとカラドジョウの判別式 A ~ D
 Discriminant function A ~ D between Dojo and Kara-dojo loaches with part measurement data

種類	データ	変数 選択	判別式 Y (ドジョウ ≤ 0 < カラドジョウ, カッコ内は標準化係数, * : p < 0.05, ** : p < 0.01)	有意確率	相関比	正判別率% 上: 全体 (n/384) 中: ドジョウ (n/312) 下: カラドジョウ (n/72)
A	計測	なし	Y = - 0.117 体長 ** - 0.345 頭長 ** + 0.221 体高 * (- 2.187) (- 0.941) (0.626) + 0.213 尾柄高 + 0.220 尾柄長 ** + 1.184 髭長 ** + 0.189 (0.467) (0.731) (1.574)	< 0.01	0.792	95.8 (368/384) 95.8 (299/312) 95.8 (69/72)
B	計測	あり	Y = - 0.115 体長 ** - 0.337 頭長 ** + 0.335 体高 ** (- 2.153) (- 0.919) (0.945) + 0.239 尾柄長 ** + 1.208 髭長 ** + 0.192 (0.792) (1.605)	< 0.01	0.790	95.3 (366/384) 95.2 (297/312) 95.8 (69/72)
C	標準化	なし	Y = - 0.017 頭長 _{体長%} + 0.059 体高 _{体長%} + 0.175 尾柄高 _{体長%} * (- 0.030) (0.080) (0.199) + 0.030 尾柄長 _{体長%} + 0.714 髭長 _{体長%} ** - 8.288 (0.067) (0.876)	< 0.01	0.806	95.1 (365/384) 95.2 (297/312) 94.4 (68/72)
D	標準化	あり	Y = 0.241 尾柄高 _{体長%} ** + 0.721 髭長 _{体長%} ** - 8.140 (0.273) (0.884)	< 0.01	0.804	95.3 (366/384) 95.5 (298/312) 94.4 (68/72)

優劣は付けられないが、このような多変量統計モデルは変数が冗長（過剰）になると偏りや誤差変動が大きくなることから、判別式の頑健性を保つためには2変数による判別式Dが4種類の中で最も妥当と判断される。

判別式Dでは尾柄高_{体長%}と髭長_{体長%}が変数に選択され、正判別率は全体で95.3%に達した (Table 1)。標準化係数の比較により、髭長_{体長%}(0.884)は判別式Dの主因子と見なすことができ、その重みは尾柄高_{体長%}(0.273)の3.2倍に相当する。さらに髭長_{体長%}は誤判別を招きにくい因子でもある。Fig.6に判別式Dにおける判別値と尾柄高_{体長%}及び髭長_{体長%}との関係を示す。判別式Dではドジョウ312個体のうち、14個体がカラドジョウ、カラドジョウ72個体のうち、4個体がドジョウに誤判別される。誤判定された個体の判別値(-0.467~1.217)に対し、それに対応する尾柄高_{体長%}と髭長_{体長%}の誤判別

区間(大きさ)を比較すると、尾柄高_{体長%}は両種合わせて9.1~12.5(3.4)、髭長_{体長%}は7.2~9.0(1.8)となり、髭長_{体長%}は誤判別の少ない因子として捉えることができる (Fig.6)。

IV 考察

1 判別式の特徴と利用

本研究では、ドジョウとカラドジョウの部位比較や判別式の変数選択等を盛り込み、両種の妥当な判別式として尾柄高_{体長%}と髭長_{体長%}を変数とする判別式D(正判別率95.3%)を提案した (Table 1)。計測6部位の比較では、ドジョウの方がカラドジョウよりも体高_{体長%}、尾柄高_{体長%}、髭長_{体長%}が有意に小さい等の既報 (Oliva and Hensel, 1961; Vasil'eva, 2001; 金尾・上野, 2005;

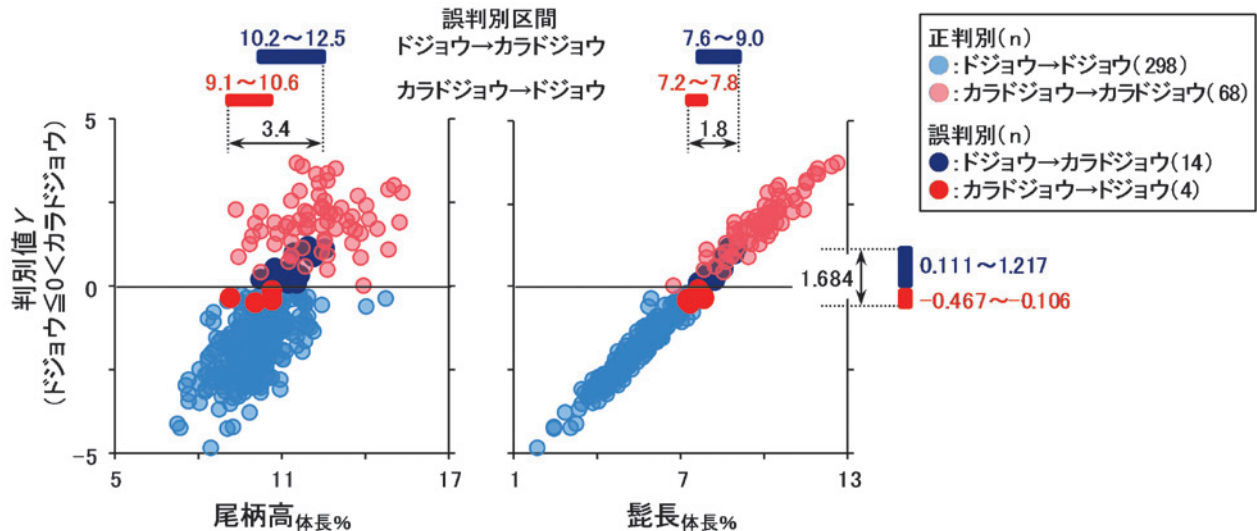


Fig.6 判別式 D における判別値と尾柄高_{体長%} (左) 及び髭長_{体長%} (右) との関係

Relationship between score of discriminant function D and caudal peduncle depth (left) and length of barbells (right) standardized by standard length

Park et al., 2006; 加納ら, 2007; 清水・高木, 2010) と共通するいくつかの特徴が確認されたが (Fig.4), 関数を用いた定量判別には3部位でも可能なことが統計的に示された。これまで難しいとされてきた両種の判別について, 判別式 D はそれを容易にできるツールとして, 今後の利用が期待される。

また, 判別式 D の利用においては, 計測個体の体長が 22.3 ~ 140.0, 尾柄高が 2.0 ~ 14.8, 髭長が 0.6 ~ 8.2 (それぞれ mm, Fig.2), 尾柄高_{体長%} が 7.2 ~ 15.3, 髭長_{体長%} が 1.8 ~ 12.6 (それぞれ %, Fig.4) の範囲にあること, 判別値 Y が -0.467 ~ 1.217 にある場合は誤判別の可能性があることに留意しなければならない (Fig.6)。

2 1 部位による予備的判別

本研究の判別式 D は2変数しかないが (Table 1), 判別値の算出にはパソコン等の計算機が必要となる。実際, 実験室等の計測現場は雑然としていることが多く, 計算機への計測データの入力には一通りの計測作業を終える必要がある。しかし, 判別式 D の特徴から体長と髭長を計測した段階で, その個体がどちらの種なのかある程度予察することもできる。

髭長_{体長%} は判別式 D の主要因子となり, そのヒストグラムと判別値との関係は Fig.2, 6 に示されている。髭長_{体長%} が 7.2 ~ 9.0 の時, 判別式 D は誤判別を招く可能性がある (Fig.6)。この特徴と計算の容易さを考慮して, 例えば体長と髭長を計測後, 髭長の計測値が体長の5%以下ならドジョウ, 10%以上ならカラドジョウと予備的な判別が可能と思われる。実際, このような簡易的判別は, 計測個体が大量な場合や DNA 分析に用いる供試個体のスクリーニングとして利用できる。本研究の計測個体数は数100に限られている。今後, 判別式や1部

位による予備的判別の精緻化を図るには, 数1,000~数10,000個体へと計測データを蓄積することが望まれる。

3 固定による魚体収縮

本研究では細胞内における DNA の分断化や劣化を防ぐために, 採捕直後に無水 (99.5%) エタノールで固定した個体を用いた。魚種や魚体の大きさによって異なるが, 固定後の魚体はエタノールの浸透によって3~10%程度収縮し, その収縮は約1ヵ月程度で安定することが確認されている (Hjörleifsson and Klein-MacPhee, 1992; Fox, 1996; Kristoffersen and Salvanes, 1998; Cunningham et al., 2000)。しかし, 判別式を作成した既報では (加藤ら, 1974; 松宮ら, 1984; Yu et al., 2010; Çakmak and Alp, 2010), 松宮ら (1984) でしか固定した個体の収縮について考察されていない。

本研究ではこのような魚体の収縮を考慮し, 固定後約6ヵ月経過したドジョウとカラドジョウを計測した。今後は固定後の収縮率についても観察し, その実態を明らかにすることも課題である。現在のところ, 判別式 D の正判別率 95.3% を期待するためには, 無水アルコールで固定後, 1ヵ月以上経過した個体を用い, 他の部位に比べて小さい髭長の計測を慎重に行うことが肝要である。

V 結言

本研究では, 我が国の健全な農村生態系の保全に向けて, 要注意外来生物に指定されているカラドジョウの分布が拡大しないよう, 世間一般にもその存在を認識させ, 予防に努めさせることを目標としている。カラドジョウはドジョウと体形が類似し, 両種の判別は困難とされて

いるが、本研究では研究者だけでなく、田んぼの生きもの調査等を実施する行政機関、民間コンサルタント、NPO 団体、地元農家等にとっても簡易に特定できる判別式を開発した。

開発においては、DNA 分析により判別したドジョウ 312 個体とカラドジョウ 72 個体を用いて、各個体の 6 部位（体長、頭長、体高、尾柄高、尾柄長、髭長）の計測データに基づく両種の部位比較と判別式作成を行った。計測（生）データによる部位比較では種間に明瞭な差は見られなかったが、体長に占める割合％に換算した標準化データでは、体高_{体長%}、尾柄高_{体長%}、髭長_{体長%}においてドジョウの方がカラドジョウよりも小さかった。

妥当な両種の判別式として、次の関数式が得られた：

$Y = 0.241 \text{ 尾柄高}_{\text{体長}\%} + 0.721 \text{ 髭長}_{\text{体長}\%} - 8.140$ ($Y \leq 0$: ドジョウ, $Y > 0$: カラドジョウ)

この式は、両変数に計測個体の標準化データを入力し、計算される判別値 Y が 0 以下の場合にはドジョウ、0 より大きい場合はカラドジョウを意味し、式の正判別率はドジョウで 95.5%、カラドジョウで 94.4%（全体で 95.3%）となる。式の利用においては、計測個体の体長が 22.3 ~ 140.0、尾柄高が 2.0 ~ 14.8、髭長が 0.6 ~ 8.2（それぞれ mm）、尾柄高_{体長%} が 7.2 ~ 15.3、髭長_{体長%} が 1.8 ~ 12.6（それぞれ %）の範囲にあること、 Y が -0.467 ~ 1.217 の場合は誤判別の可能性があることに留意しなくてはならない。判別式の精緻化を図るには、数 1,000 ~ 数 10,000 個体の計測データを蓄積すること、正判別率 95.3% を期待するには、無水アルコールで固定後、1 ヶ月以上経過した個体を用いることが望ましいと考察した。

参考文献

- Çakmak, E. and Alp, A. (2010): Morphological differences among the Mesopotamian spiny eel, *Mastacembelus mastacembelus* (Banks & Solander 1794), populations, *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **10**, 87-92
- Cheng, Q. and Han, J. (2004): Morphological variations and discriminant analysis of two populations of *Coilia ectenes*, *Journal of Lake Science*, **16**, 356-364
- 地域環境資源センター農村環境部 (2011): 田んぼの生きもの調査, <http://www.acres.or.jp/Acres/chousa/main.htm> (確認日: 2011/11/14)
- Cunningham, M.K., Granberry, W.F. and Pope, K.L. (2000): Shrinkage of inland silverside larvae preserved in ethanol and formalin, *North American Journal of Fisheries Management*, **20**, 816-818
- Fox, C.J. (1996): Length changes in herring (*Clupea harengus*) larvae: effects of capture and storage in formaldehyde and alcohol, *Journal of Plankton Research*, **18**, 483-493
- 藤田朝彦 (2007): 本邦で確認されている“カラドジョウ”の学名について, *魚類学雑誌*, **54**, 243-244
- Hjörleifsson, E. and Klein-MacPhee, G. (1992): Estimation of live standard length of winter flounder *Pleuronectes americanus* larvae from formalin-preserved, ethanol-preserved and frozen specimens, *Marine Ecology Progress Series*, **82**, 13-19
- 金尾滋史・上野世司 (2005): 滋賀県におけるカラドジョウの初記録と定着について, *関西自然保護機構会誌*, **27**, 59-63
- 環境省 (2011): 外来生物法, <http://www.env.go.jp/nature/intro/index.html> (確認日: 2012/1/17)
- 加納光樹・斉藤秀生・淵上聡子・今村彰伸・今井 仁・多紀保彦 (2007): 渡良瀬川水系の農業水路におけるカラドジョウとドジョウの出現様式と食性, *水産増殖*, **55**, 109-114
- 加藤史彦・沖山宗雄・田島迪夫 (1974): 日本海産マコガレイ属 2 種 (マコガレイおよびマガレイ) の外部形態の比較と識別, *日本海区水産研究所研究報告*, **25**, 63-87
- 小出水規行・森 淳・中荃元一・水谷正一・西田一也・竹村武士・渡部恵司・朴 明洙 (2010): 栃木県におけるドジョウの遺伝的クレードの解明, 平成 22 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 860-861
- 小出水規行・竹村武士・渡部恵司・森 淳 (2009): ミトコンドリア DNA によるドジョウの遺伝特性 - チトクローム *b* 遺伝子の塩基配列による系統解析 -, *農業農村工学会論文集*, **259**, 7-16
- Kristoffersen, J.B. and Salvanes, A.G.V. (1998): Effects of formaldehyde and ethanol preservation on body and otoliths of *Maurolicus muelleri* and *Benthosema glaciale*, *Sarsia*, **83**, 95-102
- 李 完玉・魯 世潤 (2006): 原色図鑑 特徴で見る韓半島淡水魚, 知性社, ソウル, 192-197 (in Korean)
- 松宮義晴・金丸彦一郎・岡 正雄・立石 賢 (1984): 判別関数を用いた外部形態によるマダイ人工放流魚と天然当歳魚の識別, *日本水産学会誌*, **50**, 1179-1185
- Oliva, O. and Hensel, K. (1961): Some remarks on eastern Asiatic loaches of the genus *Misgurnus* (Cobitidae), *Japanese Journal of Ichthyology*, **8**, 86-91
- Park, I.S., Nam, Y.K. and Kim, D.S. (2006): Growth performance traits and gonad development of induced reciprocal diploid and triploid hybrids between the mud loach (*Misgurnus mizolepis* Gunther) and cyprinid loach (*Misgurnus anguillicaudatus* Cantor), *Aquaculture Research*, **37**, 1246-1253
- Poulet, N., Reyjol, Y., Collier, H. and Lek, S. (2005): Does

- fish scale morphology allow the identification of populations at a local scale? A case study for rostrum dace *Leuciscus leuciscus burdigalensis* in River Viaur (SWFrance), *Aquatic Sciences*, **67**, 122-127
- 清水孝昭・高木基裕 (2010) : 愛媛県に侵入したカラドジョウ集団内に見られた起源の異なる2つの遺伝子系統, 魚類学雑誌, **57**, 125-134
- 高木基裕・大山昭代・清水孝昭 (2010) : 愛媛県におけるドジョウの遺伝的多様性と攪乱, 水産増殖, **58**, 113-120
- Uglen, I., Berg, M., Varne, R., Nilsen, R., Mork, J. and Bjørn, P.A. (2011): Discrimination of wild and farmed Atlantic cod (*Gadus morhua*) based on morphology and scale-circuli pattern, *ICES Journal of Marine Science*, **68**: 1928-1936
- Vasil'eva, E.D. (2001): Loaches (genus *Misgurnus*, Cobitidae) of Russian Asia. I. the species composition in waters of Russia (with a description of a new species) and some nomenclature and taxonomic problems of related forms from adjacent countries, *Journal of Ichthyology*, **41**, 553-563
- Yang, S.Y., Yang, H.J., Jeon, S.R., Nam, M.M., Min, M.S. and Kim, J.H. (1994): Systematic study on the fishes of the family Cobitidae (Pisces, Cypriniformes). 3. Taxonomic study on morphological variation of the *Misgurnus anguillicaudatus* and *M. mizolepis* from Korea, *Bulletin of the Institute for Basic Science, Inha University*, **15**, 79-86 (in Korean with English abstract)
- 野生生物調査協会・環境保全事務所 (2011) : 日本のレッドデータ, <http://www.jpnrdb.com/index.html> (確認日: 2011/11/14)
- Yu, H.X., Tang, W.Q. and Li, S.F. (2010): Morphological changes of silver and bighead carp in the Yangtze River over the past 50 years. *Zoological Research*, **31**, 169-176

Simple Species Identification between Dojo and Kara-dojo by Discriminant Function Analysis for Conserving Rural Ecosystem

KOIZUMI Noriyuki, MORI Atsushi, MIZUTANI Masakazu,
WATABE Keiji, TAKEMURA Takeshi and NISHIDA Kazuya

Summary

We performed simple species identification between the Dojo loach *Misgurnus anguillicaudatus* and the Kara-dojo loach *Paramisgurnus dabryanus* by discriminant function analysis on body parts, to conserve rural ecosystem in Japan. Each of 312 Dojo and 72 Kara-dojo loaches were prospectively identified by DNA sequences, and six body parts were measured with a digital caliper. These measurements included standard length (SL), head length (HL), body depth (BD), caudal peduncle depth (CPD), caudal peduncle length (CPL) and length of barbell (LB). The means of CPD/SL%, CPL/SL% and LB/SL% in the Kara-dojo loach were significantly larger than those of the Dojo loach, while the means of HD/SL% and BD/SL% did not remarkably differ between these species. The following stepwise discriminant function was selected as the best model when considering significance, correlation ratio and discriminant ratio.

$$Y = 0.241 \text{ CPD/SL\%} + 0.721 \text{ LB/SL\%} - 8.140 \quad (Y \leq 0: \text{Dojo loach}, Y > 0: \text{Kara-dojo loach})$$

The discriminant function allows for the correct classification Dojo and Kara-dojo loaches 95.5% and 94.4% of the time, respectively (95.3% in total). It therefore provides a valuable alternative method for species identification that relies on just three part measurements, without the need for other morphological or DNA sequence analysis. Because of initial shrinkage of specimens stored in absolute (99.5%) ethanol, measurements should be taken after at least one month of storage.

Keywords: caution needed invasive species, multivariate statistics, ethanol preservation, rice paddy field

〔農工研技報 212〕
〔177 ~ 188, 2012〕

流域の連続性と分断がホトケドジョウ *Lefua echigonia* の 遺伝的構造・多様性に与える影響分析

— ミトコンドリア DNA D-loop の解析 —

西田一也*・小出水規行*・竹村武士**・渡部恵司*・森 淳*

目次

I 緒言	177	3 ハプロタイプ多様度 (h)	180
II 材料と方法	178	IV 考察	180
1 対象流域	178	1 国内スケールにおける系統関係	180
2 サンプリング	178	2 流域スケールにおける遺伝的構造・多様性	184
3 遺伝子解析	178	V 結言	185
III 結果	180	参考文献	185
1 国内スケールにおける系統関係	180	Summary	188
2 遺伝的分化指数 (F_{st})	180		

I 緒言

日本では、稲作によって形成された水田水域において、多くの水生生物の生息環境が維持されてきた（守山，1997）。特に魚類ではメダカ *Oryzias latipes* やドジョウ *Misgurnus anguillicaudatus*、フナ属 *Carassius* spp. 等が水田や農業水路、河川といった水域を生活史に応じて利用している（斉藤ら，1988；Hata，2002）。しかし、これら魚類の生息環境は農業生産性の向上に貢献してきた圃場整備等によって劣化していると指摘されている（WCMC，1998；中川，2001）。

このような状況の中、水田水域に生息する魚類を保全するために、各魚種についての水路の生息場利用（例えば藤咲ら，1999）や水田利用（例えば皆川ら，2006）、移動分散特性（例えば西田ら，2006）が把握され、また、これらを踏まえた水田魚道に代表される生態系配慮工法の開発と施工（例えば鈴木ら，2004）が進められてきた。

一方、水田水域に生息する魚類のうち、標徴種であるメダカやドジョウでは、全国スケールにおける遺伝的構造が明らかにされてきたが（例えば、Takehana et al., 2003；Morishima et al., 2008；小出水ら，2009）、水田

水域に生息する多くの淡水魚は、一般的によく見られる種であっても遺伝情報の蓄積が十分でない。そのため、近縁種や個体群の判別やさまざまな空間スケールにおける個体群構造の把握が進んでいない。

本研究ではホトケドジョウ *Lefua echigonia* を対象とした。本種はコイ目ドジョウ科に属する日本固有種であり（澤田，2001）、環境省レッドリストの絶滅危惧 IB 類に指定されている（環境省，2007）。また、本種は谷津田域や低平地水田地帯の湧水を水源とする水路・小河川に生息しており（満尾ら，2007；守山ら，2007；大平ら，2008）、水域の連続性や分断が本種の生息や遺伝的多様性に影響することが予想される。

本種については、ミトコンドリア DNA（以下、mtDNA とする）の解析によって全国スケールの遺伝的構造が明らかにされており（Saka et al., 2003；Sakai et al., 2003；Mihara et al., 2005）、都道府県スケールの研究（北野ら，2008；Aiki et al., 2009）もみられるが、それ以下のスケールでの研究は谷津間の遺伝的分化や多様性を予備的に解析した小出水ら（2008）を除けば筆者らの知る限り存在しない。流域またはそれ以下のスケールにおける遺伝的構造の把握により個体群構造を推定することは、個体群の保全策（例えば魚道等の設置）を検討する上で有用と考えられる。しかし、このようなスケールでの研究は従来の系統地理研究の中には少ない（樋口・渡辺，2005）。

本研究では、多摩川流域に生息するホトケドジョウについて 1) 既往の研究で明らかにされている全国の

* 資源循環工学研究領域生態工学担当

** 農村基盤研究領域資源評価担当

平成 23 年 12 月 15 日受理

キーワード：ホトケドジョウ, *Lefua echigonia*, ミトコンドリア DNA, 流域, 谷津田域, 遺伝的構造, 遺伝的多様性

mtDNA のハプロタイプ (配列の種類) を利用して国内スケールにおける系統解析を行い、人為的移植等の有無を確認した上で、2) 流域スケールにおける水域ネットワークとその分断が本種の遺伝的構造・多様性に与える影響を分析した。

多摩川流域には関東地方に多くみられる丘陵地や、河岸段丘といった地形が存在する。本種の主な生息場はそれらに存在する谷津や段丘崖からの湧出水を水源とする水田水域である。加えて都市～都市近郊地域である当該流域では、全国的にみられる都市化の進行に伴う区画整理や河川・水路の改修による水域ネットワークの分断が進んできた。したがって、水域ネットワークの分断による本種の遺伝的構造・多様性への影響を評価するのに適切な対象地であると考えられる。

サンプリングおよび分析の一部は東京農工大学農学部水資源計画学研究室の大平充氏、山本康仁氏、正田惇氏にご協力いただきました。匿名の査読者には貴重なコメントをいただきました。ここに記して深謝いたします。また、本研究はとうきゅう環境浄化財団研究助成 (学術研究, No.288) および科学研究費補助金 (特別研究員奨励費, No.22・6719) による支援を受けたことを付記いたします。

II 材料と方法

1 対象流域

多摩川は山梨県笠取山を水源とし、東京都西部から東京都と神奈川県の間を流下して東京湾に注ぐ河川長138km、流域面積1,240km²の一級河川である。流域内には谷津および段丘崖からわき出る湧水が存在する (新多摩川誌編集委員会, 2001)。多摩川は後期更新世中期～末期 (約10～1.5万年前) に武蔵野台地を形成する過程で、徐々に流路を南へと変え、現在に近い流路を流れるようになったと推察されている (貝塚, 1997)。また、その後の縄文時代草創期 (約1万～9千年前) には南を流れる鶴見川と合流していたと推察されている (松島, 1994)。

多摩川流域はその大部分が都市～都市近郊地域である。そのため、流域内の低平地や丘陵地の谷津に存在する水田水域が戦後から現在までの都市化によって減少している (薄井, 2000)。1950年には東京都内に36,021ha存在した耕地面積は2009年には1/4以下の7,800haに減少している (農林省総務局統計課, 1952; 農林水産省大臣官房統計部, 2011)。戦後の主要作物の作付面積は米、麦、いも、野菜で高かったが、米と麦の作付面積が経年的に減少し、近年は野菜、果樹、いもの作付面積が大半を占める (仲宇佐, 2003)。すなわち、水田の耕地面積の減少が顕著であり、1950年から2009年の間に1/20 (7,265 → 301ha) 以下に減少した (農林省総務局統計課, 1952; 農林水産省大臣官房統計部, 2011)。一方で、宅

地転用等が起りやすく積極的な農地整備が行われなかったことから、当該流域内には生物の生息に良好な未整備の水田水域が局所的に残されており、生息する生物の保全方法に関する知見が必要とされている (皆川ら, 2010)。

2 サンプリング

2006年5月～2011年9月の間に、多摩川流域内の14地点において266個体 (各地点5～26個体) を採集し (Fig.1)、尾鰭の一部を切除した。切除した個体は活魚のまま採集地点に放流し、尾鰭は99.5%エタノールに浸した状態で室温または-20℃で保存した。

対象種が絶滅危惧種であるため、各サンプリング地点の詳細の説明は控えるが、Y1～8は丘陵地の谷津田域を流れ、水田の水源として利用される小河川 (以下、谷津小河川という) に位置する。T1～6は多摩川支流およびワンドに位置する。このうちT2とT3は低平地水田域を流れ、水田への水源として利用される支流に位置する。また、Y1～8は一～三次支川に、T1～6は一次支川にあたる。谷津小河川と谷津小河川が流入する河川との間には河川改修によって0.3～1.5m程度の落差が複数生じているため、他水域からY1～8への移入は強く妨げられているか、不可能であると予想される。また、本研究が対象とした谷津小河川の下流部は河川改修によって三面コンクリート化が進んでおり、本種の生息範囲と推測される区間は中～上流部に限られていた。T1～6は多摩川本流や支流によって連続しており、本流・支流を介して魚類の移出入が可能であると予想される。以降では、Y1～8に存在する個体群を「谷津個体群」、T1～6に存在する個体群を「支流・ワンド個体群」とする。

3 遺伝子解析

a 塩基配列の読み取り

mtDNAはミトコンドリアが保有する独自のゲノムであり、ほとんどの種で母系遺伝し、核DNAのような組み換えを起こさないことから、系統解析に優れている (小池・松井, 2003)。ホトケドジョウのmtDNAのD-loopでは既往の研究によって全国におけるハプロタイプが明らかにされているため、これらを利用して系統解析を行うことで人為的移植の有無を把握できると考えられる。D-loopは遺伝情報をコードしていないため突然変異による塩基置換を容易に固定し、大きな進化速度 (10万年で2%程度の塩基置換率) をもつ。そのため、種内の個体群レベルの遺伝的多様性の検出に利用されることが多い (小池・松井, 2003)。核DNAのマイクロサテライト領域も、進化速度が極めて大きいため、種内の個体群レベルの遺伝的多様性の検出に利用されるが、全国における本種の遺伝子型が明らかにされていないため、人為的移植の有無を把握することができない。そのため、



Fig.1 多摩川およびサンプリング地点の位置 (括弧内はサンプリング個体数)
Sampling locations of specimens in the Tama River Basin. The number of specimens is in parentheses.

本研究では mtDNA の D-loop を解析した。

まず、Dneasy Tissue & Blood kit (QUIAGEN) または Gene Prep Star PI-80X (KURABO) によってサンプリングした尾鰭から DNA を抽出した。次に MyCycler Thermal Cycler または C1000 Thermal Cycler (ともに BIO RAD) を用い、抽出した DNA を鋳型として Polymerase Chain Reaction (PCR) により対象領域を増幅した。PCR では、94°C、1 分の熱変性、57°C、1 分のアニーリング、72°C、1 分の伸張反応を 30 回繰り返した。プライマーとして Pro S (5'-GCATCGGTCTTGTAATCCGAAGAT-3'), Phe AS (5'-GGACCAAGCCTTTGTGCATGCGGAG-3') を使用した。PCR による増幅産物の精製には AMPure (Agencourt) を用いた。

精製した PCR 産物を使って、各検体の mtDNA の D-loop の塩基配列を読み取った。読み取り反応には BigDye Terminator ver 3.1 Cycle Sequencing Kit (Applied Biosystems) および、プライマーとして Pro S、Phe AS に加えて 296S (5'-ATATATTAATGTAGTAAGAAACCACCAACCAG-3') を使用し、反応物の精製には CleanSEQ (Agencourt) を用いた。シーケンサーには 3130xl ジェネティックアナライザ (Applied Biosystems) を使用した。

b ハプロタイプの特異性と系統関係の解析

Seqscape ver.2.6 (Applied Biosystems) を用いて塩基配列をアセンブルした後、CLUSTAL X ver.1.8 (Thompson et al., 1997) によってアラインメントし、DNaSP ver.5.1 (Librado and Rozas, 2009) によってハプロタイプを特定した。特定したハプロタイプと DNA データベース DDBJ/EMBL/GenBank に登録されている既知のハプロ

タイプを合わせて MEGA ver.5.05 (Tamura et al., 2007) を用いて最尤法により系統樹を作成し、国内スケールにおける系統関係を確認した。本種の mtDNA については全国スケールでの遺伝的構造が明らかにされており (Sakai et al., 2003; Mihara et al., 2005), 既知のハプロタイプと照合することで北関東・南関東・東海・近畿・北陸・東北などの地方スケールでの系統関係の把握が可能である。樹形の分岐パターンについては 1000 回のブートストラップ検定を行った (Felsenstein, 1985)。既知のハプロタイプには、AB102823 (新潟県長岡市), AB102831 (栃木県今市市), AB102837 (東京都浅川), AB102839 (神奈川県座間市), AB102843 (岐阜県岐阜市), AB102846 (愛知県渥美町), AB102848 (滋賀県志賀町), AB102849 (三重県伊勢市), AB177692 (福島県富岡町), AB177694 (石川県黒崎町), AB177695 (福井県敦賀市), AB177697 (京都府西方町), AB177698 (兵庫県春日町), AB177702 (福島県松川町), AB177704 (埼玉県小川町), AB177705 (山梨県忍野村), AB177708 (長野県須坂市), AB251866 (静岡県相良町), AB251867 (茨城県北茨城市), AB251868 (神奈川県相模川), AB251869 (神奈川県鶴見川), AB471827 (山形県川西町), AB471838 (宮城県仙台市), AB471843 (宮城県), AB471847 (山形県) (Sakai et al., 2003; Mihara et al., 2005; Aiki et al., 2009) を用いた。

c 遺伝子流動の推定

任意の 2 つの個体群間の遺伝的分化指数 F_{st} を DNaSP ver.5.1 によってギャップ (塩基の挿入/欠失) を考慮して算出し、谷津個体群間 (Y-Y 間, 組合せ数: 28), 谷津-支流・ワンド個体群間 (Y-T 間, 組合せ数: 48),

支流・ワンド個体群間 (T-T 間, 組合せ数 15) の 3 グループを比較した。理論上 F_{st} は 0 ~ 1 の値をとり, 値が大きいほど遺伝的分化の程度が大きく, 遺伝子流動 (個体の移出入) が少ないと判断される (Frankham et al., 2002)。得られた F_{st} の解釈として, 0 ~ 0.05 では分化なし, 0.05 ~ 0.15 で中程度の分化, 0.15 ~ 0.25 では高度の分化, 0.25 以上では極めて高度の分化が起きているとされる (Hartl, 1987)。

算出した F_{st} と水路距離 (2つのサンプリング地点間の流路に沿った最短距離) との関係から, 遺伝子流動 (個体の移出入) の程度を判断した。水路距離と無関係に F_{st} が高い場合には遺伝子流動はほとんどなく, 逆に F_{st} が低い場合には頻繁な遺伝子流動があると判断される (小泉・山本, 2004)。また, F_{st} と水路距離との間に正の相関関係が認められれば, より近くの個体群間で遺伝子流動があると判断される (小泉・山本, 2004)。水路距離は数値地図 50000 (埼玉・東京・神奈川) および表示ソフト ver.4.1 (国土地理院) を用いて測定した。 F_{st} と水路距離との相関関係を検定する場合には, Arlequin ver 3.5 (Excoffier et al., 2010) によって Mantel test (Mantel, 1967) を行った。

ハプロタイプ出現頻度の差を検定する場合には DNAsP ver.5.1 によってカイ二乗検定を行った。谷津個体群間 (Y-Y 間), 谷津-支流・ワンド個体群間 (Y-T 間), 支流・ワンド個体群間 (T-T 間) の 3 グループ間の F_{st} の差を検定する場合には R 2.11.1 を用いて Steel-Dwass test を行った。

d 個体群間のハプロタイプ多様度の比較

検体数の少ない個体群 (T1, T4) を除外した後, 各個体群のハプロタイプ多様度 h を DNAsP ver.5.1 によってギャップを考慮して算出した。 h は 0 ~ 1 の値をとり, 値が大きいほど遺伝的多様性が高いと判断される。一般に分断の進んだ小個体群の h は低い値を示す (Frankham et al., 2002)。

谷津個体群 (Y) と支流・ワンド個体群 (T) の 2 グループ間の h の差を検定する場合には R 2.11.1 を用いて Welch t test を行った。

III 結果

1 国内スケールにおける系統関係

全 266 個体について 915 ~ 925bp の塩基配列が得られ, 配列には 16 塩基サイトにおいて挿入・欠失がみられた。全配列から 30 のハプロタイプ (Hap 1 ~ 30) が検出された (Table 1)。これらのハプロタイプを DDBJ/EMBL/GenBank に登録した (Accession number: JQ410356-85)。ハプロタイプ出現頻度は地点間で異なった (カイ二乗検定, $p < 0.01$, Table 2)。

Hap 1 ~ 30 および既知のハプロタイプを元に系統樹

を作成すると, Hap 1 ~ 30 は南関東集団 (Mihara et al., 2005) のクレードに属した (Fig.2)。南関東集団クレード内において, Hap 1 ~ 29 は多摩川支流の浅川のハプロタイプおよび, 多摩川の南を流れ, 多摩川と同様に東京湾に流入する鶴見川 (Fig.1) のハプロタイプと同じサブクレード B に属した。一方, Y6 のみに出現した Hap 30 は相模川水系のハプロタイプと同じサブクレード A に属した。なお, Hap 30 と同じサブクレード A に含まれるハプロタイプ「山梨県忍野村」は相模川源流域に, 「神奈川県座間市」は相模川中流域に位置する。

2 遺伝的分化指数 (F_{st})

F_{st} について, 谷津個体群間 (Y-Y 間), 谷津-支流・ワンド個体群間 (Y-T 間), 支流・ワンド個体群間 (T-T 間) それぞれの平均値 ± 標準偏差は 0.43 ± 0.25 , 0.39 ± 0.27 , 0.16 ± 0.11 であり, それぞれの最小~最大値は $0.09 \sim 0.97$, $0.00 \sim 1.00$, $0.00 \sim 0.32$ であった (Fig.3)。谷津個体群を含む 2 個体群間 (Y-Y 間と Y-T 間) の F_{st} は, どちらも支流・ワンド個体群間 (T-T 間) の F_{st} に比べて高かった (Steel Dwass test, $p < 0.05$)。ただし, ばらつきが大きく, なかには支流・ワンド個体群間 (T-T 間) の値を下回る組み合わせも認められた。支流・ワンド個体群間 (T-T 間) の F_{st} は水路距離との間に正の相関関係が認められたが (Mantel test, $p < 0.05$), それ以外の個体群間では認められなかった (Mantel test, $p > 0.05$)。

3 ハプロタイプ多様度 (h)

h について, 谷津個体群 (Y1 ~ 8) と支流・ワンド個体群 (T2, T3, T5, T6) それぞれの平均値 ± 標準偏差は 0.48 ± 0.29 , 0.73 ± 0.14 であり, 最小~最大値はそれぞれ $0 \sim 0.76$, $0.55 \sim 0.86$ であった (Fig.4)。支流・ワンド個体群の h は 0.5 以上の値を示したのに対して, 谷津個体群の中では Y5 が 0 を示し, Y1 と Y8 が 0.5 以下の値を示した。しかし, 谷津個体群と支流・ワンド個体群の 2 グループ間の h の差は有意ではなかった (Welch t test, $p > 0.05$)。

IV 考察

1 国内スケールにおける系統関係

国内スケールにおける mtDNA の D-loop の解析によって, ホトケドジョウは南関東・東海・近畿・北陸・東北の 6 つの集団に分かれると報告されている (Sakai et al., 2003; Mihara et al., 2005)。これらの集団は 140~70 万年前に開始した日本列島における山脈の隆起によって分岐したと推定されている (Mihara et al., 2005)。本研究では, まず, 当該流域のホトケドジョウから得られたハプロタイプと既知のハプロタイプを用いて系統樹を作成し, 全国スケールでの系統関係を確認した。その結果, 全てのハプロタイプ (Hap 1 ~ 30) は南関東集団のク

Table 2 各個体群におけるハプロタイプの出現頻度 (ハプロタイプの番号は Table 1 と同様。)
Haplotype Frequencies in each population. Haplotype numbers are defined in Table 1.

ハプロタイプ	谷津個体群								支流・ワンド個体群					
	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	T1	T2	T3	T4	T5	T6
1		2												
2		24								9	5			3
3										1				
4													3	
5													2	
6		2	15	1		9	7	19	4	11	6	6	14	1
7													1	
8											1			
9		3		7		3		3	1	1	6			
10				2										
11				1										
12			6	5										
13				1	23									
14										1	1			
15														3
16						9							1	
17										1				
18							3							
19		3												
20										2	2			
21								1						
22														5
23														5
24														1
25														3
26							2							
27			2											
28		1	1											
29		8												
30						3								
合計	26	17	24	17	23	24	12	23	5	26	21	6	21	21

レードに属した。南関東集団のクレードの中では、Hap 1～29のハプロタイプは既知の多摩川、鶴見川水系のハプロタイプと同じサブクレードBに属した。鶴見川は多摩川の南を流れ、どちらも東京湾に流入しており (Fig.1), また、縄文時代草創期 (約1万～9千年前) には、多摩川は鶴見川と合流していたと推察されている (松島, 1994)。以上の地史的条件下から両河川のホトケドジョウの遺伝的差異は小さいと推察され、また、このことは本研究の系統樹において多摩川と鶴見川水系のハプロタイプがともにサブクレードBに属したことを支持する。

Hap 30は例外的に既知の相模川水系のハプロタイプと同じサブクレードAに属した。Hap 30が得られた谷津小河川 (Y6) は、多摩川と境川上流部との分水界の北側に位置している (Fig.1)。また、Hap 30が得られた谷津小河川と最も近い境川支流との直線距離は1km以内である。境川のハプロタイプは不明であるが、境川は相模川と同様に相模湾に流入しており (Fig.1), 後期更新世中期 (約10～3万年前) には相模川が境川の流路を流れていたと推察されていることから (奥村, 1981),

境川と相模川間のホトケドジョウの遺伝的差異は小さいと予想される。したがって、Hap 30が得られた谷津小河川が、過去の河川争奪 (浸食の優勢な河川上流部が他の河川上流部を自らの流域に組み込む現象) 等によって境川流域から多摩川流域に組み込まれたため、境川流域のホトケドジョウが多摩川流域の当該谷津小河川に移住した可能性が考えられる。そのため系統樹では、Hap30が相模川のハプロタイプ (境川と遺伝的差異が小さいと推察される) と同じサブクレードAに属したと推察される。河川上流部に生息する他の魚種についても河川争奪による他流域への移住が報告されている (例えばイワナ *Salvelinus leucomaenis* では Kikko et al., 2008)。なお、Hap 30が得られた谷津小河川 (Y6) と同様、多摩川流域と境川流域との分水界の北側に位置し、境川支流との直線距離は1km以内である Y7, Y8 ではサブクレードAに属するハプロタイプは検出されなかったことから、これらの谷津小河川と境川支流の間では過去に河川争奪が起こらなかったと推察される。しかし、河川争奪後に境川由来のハプロタイプが消失した可能性

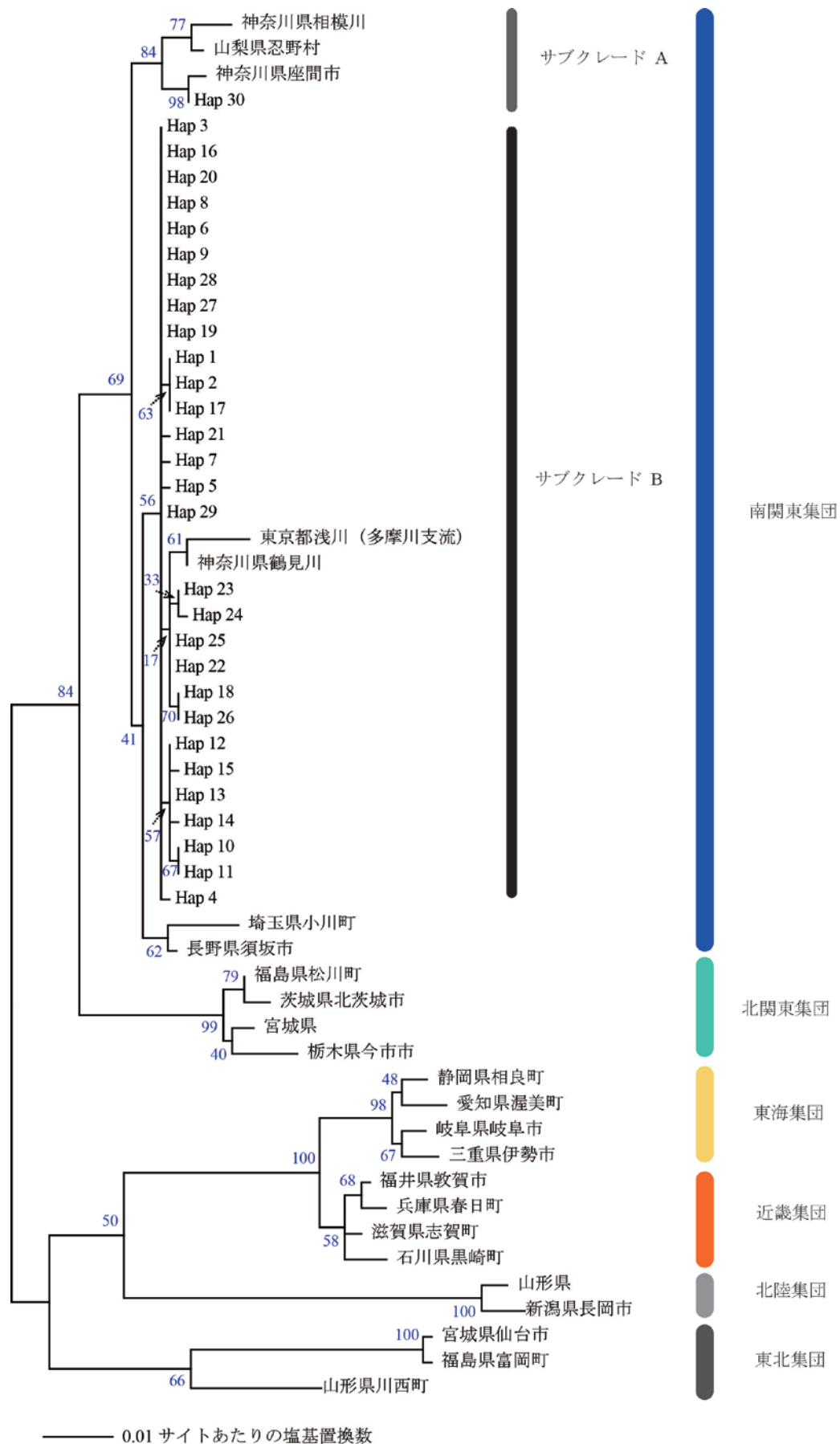


Fig.2 最尤法により作成したハプロタイプの系統樹 (数字はブートストラップ分岐確率 (%), ハプロタイプの番号は **Table 1** と同様。)
 Maximum Likelihood tree based on the genetic distance estimated from the mtDNA D-loop region sequences. The number beside each internal branch indicates bootstrap values based on 1000 replications. Haplotype numbers are defined in Table 1.

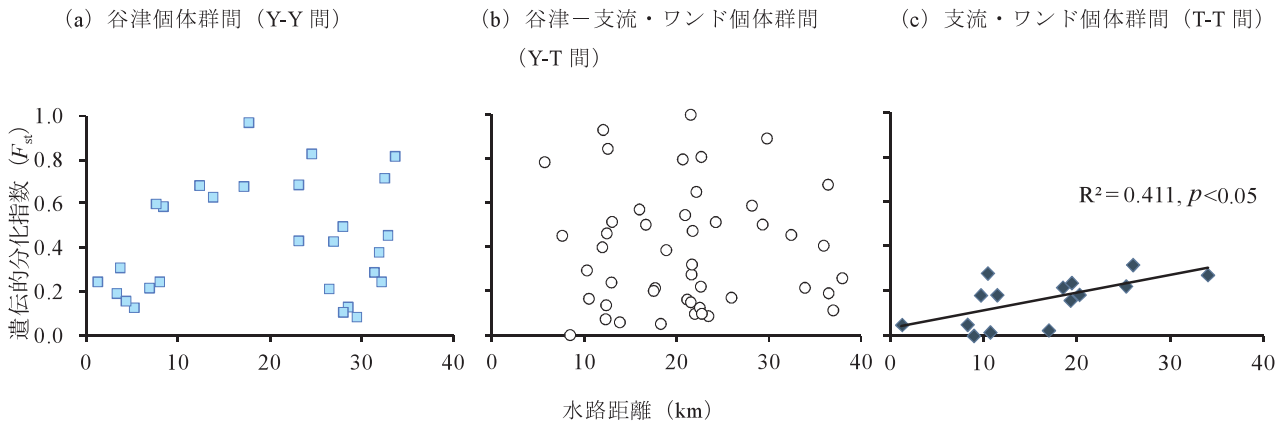
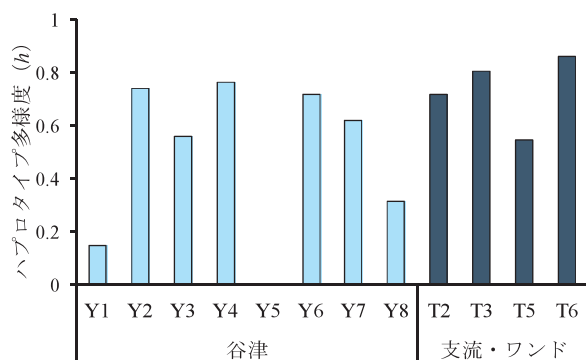
Fig.3 F_{st} と水路距離の関係Relationship between F_{st} -value and distance between populations along water course

Fig.4 ハプロタイプ多様度

Haplotypes diversity of each population

や、境川由来のハプロタイプを有する個体がサンプリングされなかった可能性も否定できない。

以上のことから、本研究で解析したホトケドジョウは、地史的イベントによって多摩川流域に生じた固有のハプロタイプを持つ個体であったと推察される。ただし、東京都内におけるゲンジボタル *Luciola cruciata* では中部や西日本のハプロタイプが、関東地方におけるメダカでは瀬戸内や九州のハプロタイプが検出されており(鈴木, 2001; 竹花・酒泉, 2002), 本種においても人為的な移殖個体が含まれていた可能性は否定できない。しかし、既往の研究における本種の mtDNA 解析では、本来その地域に分布しないと判断されるハプロタイプは検出されていない (Mihara et al., 2005; Aiki et al., 2009; 小出水ら, 2010)。ゲンジボタルやメダカといった標徴種に比べて目立ちにくい本種では、人為的な移殖の可能性は高くないと予想されるが、今後は隣接する他流域を含めたスケールでの遺伝的構造を解明する必要がある。

2 流域スケールにおける遺伝的構造・多様性

前述の国内スケールに比べて、流域またはそれ以下のスケールにおける遺伝的構造や多様性はあまり注目されてこなかったため(樋口・渡辺, 2005), 知見の蓄積は十分ではない。しかし、流域またはそれ以下のスケール

において水域ネットワークとその分断が遺伝的構造・多様性に与える影響を分析することは、生息場間を連続させる魚道の設置や、それを經由して移出入を行う個体群の保全管理などの保全策を検討するにあたって有益な情報になり得ると考える。

対象流域における谷津小河川では、1940年代から開始された河川改修(菅原, 2010)によって谷津小河川と谷津小河川の流入河川との間に落差が生じているため、他の個体群からの遺伝子の流入(個体の移入)が強く妨げられているか、不可能になっている。また同時に、谷津小河川の下流部は河川改修による三面コンクリート張り化が進み、生息場は中～上流部に限られているため、ホトケドジョウの個体群サイズが減少していると推察される。そのため、支流・ワンドの個体群間(T-T間)に比べて谷津個体群を含む個体群間(Y-Y間とY-T間)の F_{st} が高い場合や、谷津個体群の h が低い場合が認められたと考えられる。核DNAに対してmtDNAは有効集団サイズが1/4に減少するため、遺伝的浮動(確率的な遺伝子頻度の変化)を起こしやすい(小池・松井, 2003)。Pergams et al. (2003)は、過去50～150年間の都市化の進展と並行して、シロアシネズミ *Peromyscus leucopus* のmtDNAの遺伝子型が変化したことを報告している。Hirota et al. (2004)は多摩地域のアカネズミ *Apodemus speciosus* のmtDNAを解析し、市街化によって分断された個体群間の F_{st} が、多摩川の河川敷緑地によって連続する個体群間の F_{st} に比べて著しく高く、また、分断された個体群の h が低いことを報告しており、このことは本研究結果と近い。ただし、本研究では谷津個体群を含む個体群間(Y-Y間とY-T間)の F_{st} であっても低い値を示す場合や、谷津個体群の h であっても高い値を示す場合が認められた。このことの原因は不明であるが、遺伝的浮動の影響によって偶然、遺伝子頻度が類似した、または、過去の遺伝子流動の歴史や流域内における位置、個体群サイズの大小やボトルネックの有無などが影響したのかもしれない。

小出水ら(2008)は、栃木県南東部の谷津小河川に生

息する本種のマイクロサテライト DNA 領域を解析した結果、高度な遺伝的分化や著しい遺伝的多様性の低下は認められなかったことを報告している。対象地域や解析部位が異なるためこの報告と本研究を単純に比較することはできないが、多摩川流域の谷津田域における本種の高度な遺伝的分化や多様性の消失は、都市化の進行に伴う谷津小河川の改修による分断や小集団化の影響を強く受けたことを示唆している可能性がある。一般に小個体群では、遺伝的浮動や近親交配により遺伝的多様性が低下し、その結果、繁殖力や近交弱勢による適応度の低下が起これ、さらに個体数が減少することが指摘されている (Frankham et al., 2002)。これらの一連のサイクルは絶滅の渦と呼ばれる (Gilpin and Soulé, 1986)。Frankham et al. (2002) は、近親交配の悪影響は個体群に世代あたり 1 個体以上の移入があれば大幅に緩和されると指摘しており、このことは実証実験によって支持されている (例えば Bryant et al., 1999)。 F_{st} や h の結果から、谷津個体群では落差等によって遺伝子流動が強く妨げられているか、消失していたと推察される。このことは遺伝的多様性の低下を防ぐための遺伝的管理 (魚道等の水域ネットワークの整備による移出入経路の確保や他の個体群からの個体の移殖など) が必要である可能性を示唆する。したがって、今後は核 DNA のマイクロサテライト領域等異なる領域の遺伝子解析等を行うことで本種の遺伝的構造・多様性の実態を総合的に解明する必要がある。

一方、支流・ワンド個体群間 (T-T 間) の F_{st} は谷津個体群のような高い値を示さず、また、水路距離との間に正の相関関係が認められた。さらに、谷津個体群に比べれば支流・ワンド個体群の h はいずれも一定以上の値を示した。以上のことから、支流・ワンド個体群は多摩川本流・支流を介してある程度の遺伝子流動 (個体の移出入) をもったメタ個体群 (局所個体群が適度な移住によってつながりをもった集団) 構造をなしており、それによって遺伝的多様性が保たれていたと考えられる。また、多摩川本流や支流にも堰等の横断構造物が設置されているものの、谷津小河川と谷津小河川の流入河川との間の落差に比べれば、遺伝子流動 (個体の移出入) を妨げていなかった可能性が考えられる。

君塚 (1990) は多摩川支流の浅川における河床の掘り下げによって堤外地の湧水が枯渇し、ホトケドジョウが激減したことを報告している。支流・ワンド個体群では F_{st} が流路距離との間に正の相関が認められたことから、支流・ワンド個体群はより近くの個体群で遺伝子流動があると判断される。今後、河川整備等により支流・ワンド個体群においていずれかの個体群が消失し、各個体群の孤立化が進めば、遺伝子流動は起こりにくくなると予想される。したがって、各個体群の存続を維持するための生息場の保全 (繁殖場や越冬場の復元・造成など) が重要であると推察される。

今後はどのような保全技術が遺伝的多様性の維持や個体群存続に効果的であるか検討できるよう、遺伝的構造・多様性の実態に基づき、水域ネットワークの構築や生息場の保全・復元による遺伝的多様性への影響を考慮した個体群存続シミュレーション評価法を開発していくことが課題として考えられる。

V 結 言

本研究では流域スケールにおける水域ネットワークとその分断がホトケドジョウの遺伝的構造・多様性に与える影響を分析して本種の保全策を検討するため、多摩川流域に生息するホトケドジョウの mtDNA の D-loop を解析した。

既知の全国のプロタイプとともに作成した系統樹では、検出されたプロタイプが南関東集団のクレードに属し、さらに、一つのプロタイプを除けば既知の多摩川流域のプロタイプと同じサブクレードに属した。なお、一つのプロタイプは例外的に多摩川流域の南を流れる相模川流域と同じクレードに分かれたが、このことは過去の河川争奪に伴って本種が他流域から多摩川流域に移住したことを示唆していた可能性がある。以上のことから、解析したホトケドジョウは当該流域固有のプロタイプを有していたと推察される。ただし、相模川流域と同じクレードに属したプロタイプは人為的な移殖由来である可能性も否定できないため、今後は隣接する他流域を含めたスケールでの遺伝的構造を解明する必要がある。

谷津個体群を含む個体群間の遺伝的分化指数 (F_{st}) は高い値を示す場合が、また、谷津個体群のプロタイプ多様度 (h) は低い値を示す場合が認められた。一方、支流・ワンド個体群間の F_{st} は、谷津個体群を含む場合に比べて高い値を示すことはなく、流路距離との間で正の相関関係を示し、また、 h は高い値を示した。以上のことから、谷津個体群では、谷津小河川の改修によって小集団化や、遺伝子流動 (個体の移出入) の阻害が起きていると考えられる。遺伝的多様性の低下に伴う谷津個体群の脆弱化や絶滅を防ぐための遺伝的管理 (魚道等の水域ネットワークの整備による移出入経路の確保や他の個体群からの個体の移殖など) が必要である可能性を示唆する。

一方、支流・ワンド個体群はメタ個体群 (局所個体群が適度な移住によってつながりをもった集団) 構造をなしており、それに伴う遺伝子流動によって遺伝的多様性が保たれていたと考えられる。今後、河川整備等により支流・ワンド個体群においていずれかの個体群が消失し、各個体群の孤立化が進めば、遺伝子流動は起こりにくくなると予想される。そのため、各個体群の存続を維持するための生息場の保全 (繁殖場や越冬場の復元・造成など) が重要であると推察される。

今後はどのような保全技術が遺伝的多様性の維持や個

体群存続に効果的であるか検討できるよう、遺伝的構造・多様性の実態に基づき、水域ネットワークの構築や生息場の保全・復元による遺伝的多様性への影響を考慮した個体群存続シミュレーション評価法を開発していくことが課題としてあげられる。

参考文献

- Aiki, H., Takayama, K., Tamaru, T., Mano, N., Shimada, M., Komaki, H. and Hirose, H. (2009): Phylogeography of the Japanese eight-barbel loach *Lefua echigonia* from the Yamagata area of the Tohoku district, Japan, *Fishery Science*, **75**, 903-908.
- Bryant, E. H. and Reed, D. H. (1999): Fitness decline under relaxed selection in captive populations, *Conservation Biology*, **13**, 665-669.
- Excoffier, L. and Lischer, H. E. L. (2010): Arlequin suite ver 3.5: a new series of programs to perform population genetics analyses under Linux and Windows, *Molecular Ecology Resources*, **10**(3), 564-567.
- Felsenstein, J. (1985): Confidence limits on phylogenies: An approach using the bootstrap, *Evolution*, **39**, 783-791.
- Frankham, R., Ballou, J. D., Briscoe, D. A. (2002): Introduction to conservation genetics, Cambridge University Press.
- 藤咲雅明・神宮寺寛・水谷正一・後藤章・渡辺俊介 (1999): 小河川・農業水路系における魚類の生息と環境構造の関係, 応用生態工学, **2**(1), 53-61.
- Gilpin, M. E., and Soulé, M. E. (1986): Minimum viable populations: processes of species extinction, In Soule M. E.(ed), Conservation biology: the science of scarcity and diversity, *Sinauer Associates*, 19-34.
- Hartle, D. L. (1987): 集団遺伝学入門, 向井輝美, 石和貞男監訳, 培風社.
- Hata, K. (2002): Perspectives for fish protection in Japanese paddy field irrigation systems, *JARQ*, **36**(4), 211-218.
- 樋口文夫・渡辺勝敏 (2005): 横浜市を流れる河川におけるアブラハヤの遺伝的多様性と交雑, 魚類学雑誌, **52**(1), 41-46.
- Hirota, T., Hirohata, T., Mashima, H., Satoh, T. and Obara, Y. (2004): Population structure of the large Japanese field mouse, *Apodemus speciosus* (Rodentia: Muridae), in suburban landscape, based on mitochondrial D-loop sequences, *Molecular Ecology*, **13**, 3275-3282.
- 貝塚爽平 (1997): 新版東京都地学のガイド, コロナ社.
- 環境省 (2007): 哺乳類, 汽水・淡水魚類, 昆虫類, 貝類, 植物 I 及び植物 II のレッドリストの見直しについて, 報道記者発表, <http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=8648> (確認日: 2011/12/1).
- Kikko, T., Kuwahara, M., Iguchi, K., Kurumi, S., Yamamoto, S., Kai, Y. and Nakayama, K. (2008): Mitochondrial DNA population structure of the White-spotted charr (*Salvelinus leucomaenis*) in the Lake Biwa water system, *Zoological Science*, **25**, 146-153.
- 北野聡・山形哲也・柳生将之・小林尚・上原武則・市川寛・美馬純一・小林建介 (2008): 長野県におけるホトケドジョウの分布・生息環境およびミトコンドリア DNA ハプロタイプ, 長野県環境保全研究所研究報告, **4**, 45-50.
- 小池裕子・松井正文 (2003): 保全遺伝学, 東京大学出版会.
- 小泉逸郎・山本祥一郎 (2004): サケ科魚類の遺伝的構造, サケ・マス生態と進化, 前川光司編, 文一総合出版, 243-279.
- 小出水規行・竹村武士・渡部恵司・森淳 (2009): ミトコンドリア DNA によるドジョウの遺伝特性—チトクローム b 遺伝子の塩基配列による系統解析—, 農業農村工学会論文集, **77**(1), 7-16.
- 小出水規行・渡部恵司・高振麗・水谷正一・森淳・竹村武士 (2008): マイクロサテライト DNA を用いた栃木県小貝川上流域のホトケドジョウ集団の予備的解析, 農業農村工学会論文集, **76**(4), 55-61.
- 小出水規行・渡部恵司・高振麗・水谷正一・竹村武士・森淳 (2010): 栃木県東部におけるホトケドジョウのミトコンドリア DNA ハプロタイプ, 農業農村工学会論文集, **78**(1), 61-62.
- Librado, P. and Rozas, J. (2009): DnaSP v5: a software for comprehensive analysis of DNA polymorphism data, *Bioinformatics*, **25**, 1451-1452.
- Mantel, N. (1967): The detection of disease clustering and a generalized regression approach, *Cancer Research*, **27**(2), 209-220.
- 松島義章 (1994): 多摩川低地の生い立ち, 大田区史研究, 史誌 **39**, 51-62.
- Mihara, M., Sakai, T., Nakano, K., Martins, L. O., Hosoya, K. and Miyazaki, J. (2005): Phylogeography of loaches of the genus *Lefua* (Balitoridae, Cypriniformes) inferred from mitochondrial DNA sequences, *Zoological Science*, **22**, 157-168.
- 皆川明子・西田一也・藤井千晴・千賀裕太郎 (2006): 用排兼用型水路と接続する未整備水田の構造と水管理が魚類の生息に与える影響について, 農業土木学会論文集, **74**(4), 467-474.
- 皆川明子・西田一也・千賀裕太郎 (2010): 東京に現存する水田地帯の特徴とその意義, 農業農村工学会誌, **78**(7), 11-14.
- 満尾世志人・西田一也・千賀裕太郎 (2007): 谷津水域におけるホトケドジョウの生息環境に関する研究—大栗川上流域を事例として—, 農業農村工学会論文集, **75**(4), 99-105.
- Morishima, K., Nakamura-Shiokawa, Y., Bando, E., Li, Y.-J.,

- Boroń, A., Khan, M. M. R. and Arai, K. (2008): Cryptic clonal lineages and genetic diversity in the loach *Misgurnus anguillicaudatus* (Teleostei: Cobitidae) inferred from nuclear and mitochondrial DNA analyses, *Genetica*, **132**, 159-171.
- 守山 弘 (1997)：水田を守るとはどういうことか，農山漁村文化協会.
- 守山拓弥・水谷正一・後藤章 (2007)：栃木県西鬼怒川地区の湧水河川におけるホトケドジョウの季節移動，*魚類学雑誌*, 54(2), 161-171.
- 中川昭一郎 (2001)：農業農村整備とビオトープの保全・創出，*農業土木学会誌*, 69(9), 1-6.
- 仲宇佐達也 (2003) 東京農業史，けやき出版.
- 西田一也・藤井千晴・皆川明子・千賀裕太郎 (2006)：一時的水域で繁殖する魚類の移動・分散範囲に関する研究－東京都日野市の向島用水・国立市の府中用水を事例として－，*農業土木学会論文集*, 74(4), 151-163.
- 農林省総務局統計課 (1952)：昭和20年第22次農林省統計表.
- 農林水産省大臣官房統計部 (2011)：平成21年～22年第85次農林水産統計表.
- 大平充・西田一也・満尾世志人・角田裕志・千賀裕太郎 (2008)：低標高小流域における魚類の流程分布と環境条件，(社)環境情報科学センター，*環境情報科学論文集*, 22, 175-180.
- 奥村清 (1981)：改訂神奈川県地学のガイド，コロナ社.
- Pergams, O. R. W., Barnes, W. M. and Nyberg, D. (2003): Rapid change of mouse mitochondrial DNA, *Nature*, **423**, 397.
- 齊藤憲治・片野修・小泉顕雄 (1988) 淡水魚の水田周辺における一時的水域への侵入と産卵，*日本生態学会誌*, 38, 35-47.
- Saka, R., Takehana, Y., Suguro, N. and Sakaizumi, M. (2003): Genetic population structure of *Lefua echigonia* inferred from allozymic and mitochondrial cytochrome *b* variations, *Ichthyological research*, **50**, 301-309.
- Sakai, T., Mihara, M., Shitara, H., Yonekawa, H., Hosoya, K. and Miyazaki, J. (2003): Phylogenetic relationships and intraspecific variations of loaches of the Genus *Lefua* (Balitoridae, Cypriniformes), *Zoological Science*, **20**(4), 501-514.
- 澤田幸雄 (2001)：ホトケドジョウ，改訂版日本の淡水魚，川那部浩哉，水野信彦，細谷和海編，山と溪谷社，p400.
- 新多摩川誌編集委員会 (2001)：新多摩川誌，河川環境管理財団.
- 菅原健二 (2010)：川の地図辞典 多摩東部編，之潮.
- 鈴木浩文 (2001)：ホタルの保護・復元における移植の三原則－東京都におけるゲンジボタルの遺伝子調査の結果を踏まえて－，第34回全国ほたる研究会誌，5-9.
- 鈴木正貴・水谷正一・後藤章 (2004)：小規模魚道による水田，農業水路および河川の接続が魚類の生息に及ぼす影響の効果，*農業土木学会論文集*, 72(6), 59-69.
- Takehana, Y., Nagai, N., Matsuda, M., Tsuchiya, K. and Sakaizumi, M. (2003): Geographic variation and diversity of the cytochrome *b* gene in Japanese wild populations of Medaka, *Oryzias latipes*, *Zoological Science*, **20**, 1279-1291.
- 竹花佑介・酒泉満 (2002)：メダカの遺伝的多様性の危機，*遺伝*, 56, 66-71.
- Tamura, K., Dudley, J., Nei, M. and Kumar, S. (2007): MEGA4: molecular evolutionary genetics analysis (MEGA) software version 4.0, *Molecular Biology and Evolution*, **24**, 1596-1599.
- Thompson, J. D., Gibson, T. J., Plewniak, F., Jeanmougin, F. and Higgins, D. G. (1997): The CLUSTAL-X windows interface: flexible strategies for multiple sequence alignment aided by quality analysis tools, *Nucleic Acids Research*, **25**, 4876-4882.
- 薄井清 (2000)：東京から農業が消えた日，草思社.
- WCMC (World Conservation Monitoring Centre) (1998): Freshwater biodiversity: a preliminary global assessment, WCMC-World Conservation Press.

Mitochondrial DNA D-Loop Sequence-Based Analysis of the Influence of River Basin Connectivity and Fragmentation on the Genetic Structure and Diversity of the Japanese Eight-Barbel Loach *Lefua echigonia*

Nishida Kazuya, Koizumi Noriyuki, Takemura Takeshi, Watabe Keiji and Mori Atsushi

Summary

This study aims to analyze the influence of basin connectivity and fragmentation on the genetic structure and diversity of the populations of the Japanese eight-barbel loach *Lefua echigonia* in the Tama River Basin, Tokyo, by analyzing their mitochondrial DNA D-loop sequences. A total of 266 specimens were collected from 8 habitats in tributaries and oxbows that were perhaps linked by the Tama River and from 6 habitats in streams that were located in hill-bottom valley (yatsu) and were perhaps fragmented because of the installation of drop structures and concrete lining for river improvement. Thirty haplotypes were detected in the 266 specimens. Every haplotype from the Tama River Basin was identified as an endemic haplotype because these haplotypes were classified into a clade of the South-Kanto group and almost every haplotype was closely related to known haplotypes from the Tama River Basin in this clade in the phylogenetic tree. Several coefficient of genetic differentiation (F_{st}) values between populations, including those for populations in the streams in the hill-bottom valley, were high, and several haplotype diversity (h) values of the populations in the streams in the hill-bottom valley were low. The F_{st} values between populations in tributaries and/or oxbows were low, and showed significantly positive correlation with the distances between populations along the water-course. The h values of the populations in the tributaries and/or oxbows were high. These findings suggest that 1) the populations in the streams in the hill-bottom valley were segmented and reduced because of the measures implemented for the river improvement, i.e., installation of drop structures and concrete lining, and this segmentation and reduction probably decreased genetic diversity; and 2) the populations in the tributaries and oxbows constituted a metapopulation structure, and the gene flow between populations probably preserved genetic diversity.

Keywords: Japanese eight-barbel loach, *Lefua echigonia*, Mitochondrial DNA, Drainage basin, Paddy fields on hill-bottom valley, Genetic structure, Genetic diversity

A Dynamic Computable General Equilibrium (CGE) Model for Analysis of Rural Development Policies

Yoji KUNIMITSU*

Contents

I	Introduction	189
II	Model	190
1	Outline of the model	190
2	Production of firm	192
3	Consumption demand of household	195
4	Export and import	197
5	Public spending	198
6	Commodity demand by investment	199
7	Market clearing conditions and price definitions	200
III	Calibration	200
1	Production parameters	200
2	Consumption parameters	201
3	Parameters of export and import	202
4	Parameters of public spending	202
IV	Model closure, Walras' law and recursive dynamics	202
V	Outputs of the model	203
VI	Conclusion	203
	Appendix	205
	Acknowledgements	208
	References	208
	Summary (in Japanese)	209

I Introduction

Japanese rural development policies have changed many times during the 21st century. For instance, asset management measures for prolonging durable years of irrigation and drainage facilities, drastic reduction in agricultural public investment, and direct payment to farmers for income support have been decided as new policies. In addition to these policies, the agricultural trade policy may change, because Japan has expressed an intention to participate in the meeting of the Trans-Pacific Partnership (TPP). These policy measures definitely affect agricultural production, prices of food and farmers' income. To evaluate policy measures, the degree of impacts must be quantified in view of economics.

The influences of changes in the rural development policy are not only confined to the agricultural sector but spread to various fields, such as other industrial production and employment. These influences are complicated. Furthermore, economies change according to exogenous conditions, such as a rise in the petroleum price, a rise in the im-

* Laboratory of Project Evaluation, Rural Development Planning Division

Received: 13 December 2011

Keywords: Dynamic CGE model, optimization behavior, first order condition, policy evaluation

port food price, and a decrease in population of rural areas, which simultaneously affect the real economies along with policy changes. As a matter of fact, it is difficult for researchers to see exact effects of policy changes by separating exogenous changes. In order to evaluate the new rural development policy, we have to quantify and designate the exact effect of policy changes before and after (or with-and-without) the introduction of a new policy. For this purpose, an economic model based on the economic theory that can duplicate real situations is important.

Actually, many models have been used for policy evaluation. Among these models, the computable general equilibrium (CGE) model can deal with all markets related each other and can measure the ripple effects of initial policy changes. Also, this model is based on the optimization of economic actors subject to a restriction of resources such as labor and land, so the trade-off effects caused by a policy change can be easily taken into account. Trade-off effects are realized in the real economies if an increase in resources of a certain sector decreases resource inputs in other sectors. Therefore, the CGE models are useful and applicable for policy evaluations.

Several previous studies analyzed the impacts of agricultural policy reform with CGE models. Kilkenny (1993) used an interregional rural-urban CGE model to show the effects of farm subsidies in the USA and reported that coupled farm subsidies were not as effective as decoupled (nonfarm) income transfers for promotion of rural prosperity. Taylor, Yunez-Nude and Dyer (1999) also examined the effects of the agricultural decoupling policy with a village based computable general equilibrium (CGE) model. Their results demonstrated that agricultural policies decoupled from price stimulated staple production in Mexico. Philippidis and Hubbard (2001) and Gohin (2006) also used the CGE model to show the effects of the EU's common agricultural policy (CAP) including decoupled support payments and partially decoupled support under cross-compliance. These studies showed that the EU's CAP has a marked effect on increasing the diversity of production through expansion of domestic food processing sectors, but the effects of this policy on both arable crop and beef production are negative.

As for the Japanese economies, Saito (2002) analyzed the effects of a farmland consolidation project as agricultural public investment. Kunimitsu (2009) measured the economic effects of irrigation and drainage facilities in Japanese agriculture. Akune (2010) analyzed the economic linkage in the green tea industry. The CGE model used in these studies were static models. The dynamic CGE model was used by Son et al. (2006), Shibusawa et al. (2007) and Ban (2007). They respectively analyzed transportation policies, environmental policies and regional effects of policy change. The application of the dynamic CGE model is ideally suited for evaluating public capital stocks. For evaluation of the public policy, the common CGE model used in the previous studies needs to be modified in its structure by introducing policy variables.

The present study develops a dynamic CGE model for policy evaluation and explains the structure of the model in detail. Features of this model are to introduce special structures for agricultural production and food consumption and to install a recursive dynamic structure.

Following this section, how to derive the equations in the model is presented based on the optimization behavior of the economic actors in the next section. The third section explains how parameters used in the model can be calibrated from real data. The fourth section shows the model closure, Walras' condition and the recursive dynamic structure. In the fifth section, we show examples of outputs calculated by this model to show how this model functions. The final section provides the conclusions.

II Model

1 Outline of the model

CGE models are the non-linear simultaneous equations that estimated from actual economic data to duplicate and simulate how an economy might react to changes in policy, technology or other external factors. The equations are commonly based on neo-classical theory, often assuming optimizing behavior of producers, consumers and government.

The equations of the CGE model in this study are based on the course materials of EcoMod (2010) which is the world's leading research, advisory, and educational not-for-profit network dedicated to promoting advanced modeling and statistical techniques in economic policy and decision making. The equations with "*" are the same equations in these materials.

Tables 1 to 4 explain the parameters, coefficients and variables of the model. Some local variables are explained

just after equations. Hereafter, the suffix, i, j , and k show the industrial sector and i, j and $k = 1, 2, \dots, n$.

Table 1 Parameters for which values are established based on empirical studies

Parameters	Explanation
Φ	Initial value of Frisch parameter in nested-LES (Linear Expenditure System) utility function
η	Initial income elasticities of demand for commodity (sec)
σH	Elasticity of substitution between food consumption and other consumptions
$\sigma F2_i$	Initial elasticity of substitution between farmland and capital-labor bundle in the CES (Constant Elasticity of Substitution) function (second nest)
$\sigma F3_i$	Initial elasticity of substitution between capital and labor in the CES function (third nest)
σA_i	Initial substitution elasticities of the Armington function
σT_i	Initial elasticities of transformation in the CET (Constant Elasticity of Transformation) function

Table 2 Parameters for which values are estimated by the calibration

Parameters	Explanation
mps	Household's marginal propensity to save
aHF	Budget shares of CES household utility function in food consumption (CES-function)
$aHLES_i$	Power in the nested household utility function (LES-function)
μH_i	Subsistence in the household consumption quantities (LES-function)
aI_i	Cobb-Douglas power of each commodity in the bank's utility function
aIG_i	Cobb-Douglas power of each commodity in the government investment function
$aCGT$	Cobb-Douglas power of the public consumption in the government budget
aCG_i	Cobb-Douglas power of each commodity in government utility function
io_{ij}	Technical coefficients for intermediate inputs (first nest of production function)
$\gamma F2_i$	CES distribution parameter for farmland in the firms production function (second nest of production function)
$\gamma F3_i$	CES distribution parameter for capital in the firms production function (third nest of production function)
γA_i	CES distribution parameter of commodity in the Armington import function
γT_i	CET distribution parameter of commodity in the combination of domestic output and export output
$aF1_i$	Efficiency parameter for capital-labor-farmland bundle in the firm's production function (first nest)
$aF2_i$	Efficiency parameter in the firm's production function (second nest)
$aF3_i$	Efficiency parameter in the firm's production function (third nest)
aA_i	Efficiency parameter of Armington function of commodity (sec)
aT_i	Shift parameter in the CET function of firm (sec)

Table 3 Coefficients for which values are estimated by the social accounting matrix (SAM) data

Coefficients	Explanation
ty	Tax rate on income
tc_i	Tax rate on consumer commodities
tk_i	Tax rate on capital use
tl_i	Tax rate on labor use
tm_i	Tariff rate on imports
tv_i	Tax rate on value added production including gasoline tax
d_i	Depreciation rate for the firms capital stock
$growthz$	Initial steady state growth rate

Table 4 Variables used in the model

Variables	Explanation
Price	
P_i	Prices of composite commodities
PD_i	Prices of domestic commodities for producer
PDD_i	Price of domestic output delivered to home market
PK_i	Return to capital for firm
PL	Wage rate
PA	Rent for farmland
P_{AKL}_i	Price of farmland-capital-labor bundle
P_{KL}	Price of capital-labor bundle
PE_i	Export prices in national currency
PM_i	Import prices in national currency
ER	Exchange rate
PCF	Price of food bundle
PCM	Price of other bundle (not food)
$PCINDEX$	Consumer price index
Quantity	
X_i	Domestic sales of composite commodity (imported and domestic products)
XD_i	Gross domestic output
XDD_i	Domestic output delivered to home market
X_{AKL}_i	Demand of farmland-capital-labor bundle by firm (sec)
X_{KL}_i	Demand of capital-labor bundle by firms (sec)
E_i	Exports
M_i	Imports
LS^*	Labor supply
AS^*	Farmland supply
K_i	Demand of capital stock
L_i	Demand of labor
A_i	Demand of farmland
C_i	Demand of consumer for commodities
$CBUD$	Total expenditure for consumption
$CBUDF$	Total expenditure for food consumption
$CBUDM$	Total expenditure for commodities other than food
Y	Household income
SH	Household savings
IP_i	Demand of private investment for commodities
IG_i	Demand of public investment for commodities
CG_i	Demand of public consumption for commodities
SF^*	Foreign savings
SB^*	Primary balance in the government account (+ : debt from households, - : debt from government)
$TAXR$	Total tax revenues

(Note) Variables with "*" are exogenous variables and others are endogenous variables.

2 Production of firm

Figures 1 and 2 show the nested production function representing the decision process of a typical firm. According to the empirical research on Japanese agriculture, substitutability of farmland and other input factors such as labor and capital is limited (Egaitsu, 1985). For example, if the farmland areas are fixed, the production level can hardly change by changing other input factors. Considering these findings, the firms' optimization behavior is described as follows.

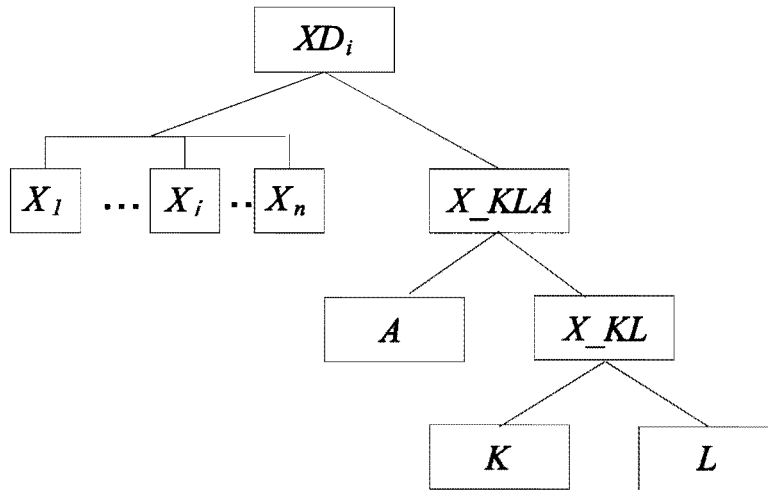


Fig.1 Structure of production in the agricultural sector

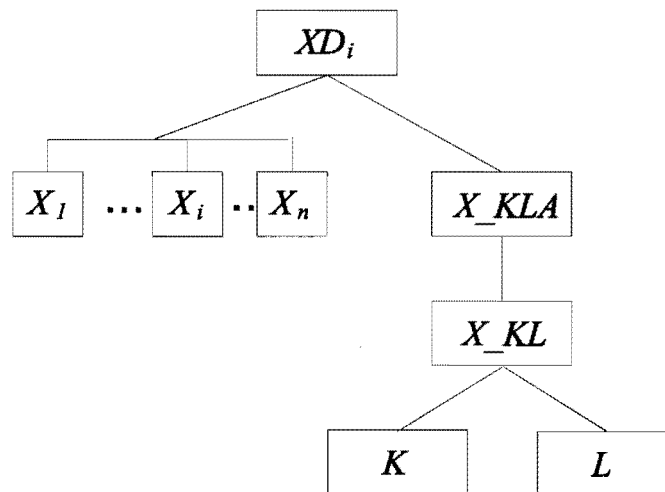


Fig.2 Structure of production in other industries

a Optimization at the 3rd level of the nested production function (K and L)

A firms' decision on selection of capital and labor for optimum production is defined as:

$$\min \text{Cost} = (1 + tk_i)PK_i \cdot K_i + (1 + tl_i)PL \cdot L_i$$

$$s.t. \quad X_{_KL_i} = aF3_i \left[\gamma F3_i \cdot K_i^{\frac{\sigma F3_i - 1}{\sigma F3_i}} + (1 - \gamma F3_i) L_i^{\frac{\sigma F3_i - 1}{\sigma F3_i}} \right]^{\frac{1}{\sigma F3_i - 1}} \quad (1)$$

From the first order condition (FOC) of Eq. (1), demands derived for capital and labor are:

$$\begin{aligned} K_i = & \gamma F3_i^{\sigma F3_i} \cdot \{(1 + tk_i)PK_i\}^{-\sigma F3_i} \left[\gamma F3_i^{\sigma F3_i} \{(1 + tk_i)PK_i\}^{1 - \sigma F3_i} \right. \\ & \left. + (1 - \gamma F3_i)^{\sigma F3_i} \{(1 + tl_i)PL\}^{1 - \sigma F3_i} \right]^{\frac{\sigma F3_i}{1 - \sigma F3_i}} \cdot (X_{_KL_i} / aF3_i) \end{aligned} \quad (M1).$$

$$L_i = (1 - \gamma F3_i)^{\sigma F3_i} \cdot \{(1 + tl_i)PL\}^{-\sigma F3_i} \cdot \left[\gamma F3_i^{\sigma F3_i} \{(1 + tk_i)PK_i\}^{1-\sigma F3_i} + (1 - \gamma F3_i)^{\sigma F3_i} \{(1 + tl_i)PL\}^{1-\sigma F3_i} \right]^{\frac{\sigma F3_i}{1-\sigma F3_i}} \cdot \left(X_{-KL_i} / aF3_i \right) \tag{M2}$$

Equations that have “M” in front of the number are used in the CGE model, and others are formulae for stages on the way.

The supply function derived from the zero profit condition is:

$$P_{-KL_i} \cdot X_{-KL_i} = (1 + tk_i)PK_i \cdot K_i + (1 + tl_i)PL \cdot L_i \tag{M3}$$

b Optimization at the 2nd level of the nested production function (A and KL-bundle)

Firms’ decision on the selection of farmland and other input bundles are defined as:

$$\min \text{ Cost} = PA \cdot A_i + P_{-KL_i} \cdot X_{-KL_i}$$

$$\text{s.t. } X_{-AKL_i} = aF2_i \left[\gamma F2_i \cdot A_i^{\frac{\sigma F2_i - 1}{\sigma F2_i}} + (1 - \gamma F2_i) X_{-KL_i}^{\frac{\sigma F2_i - 1}{\sigma F2_i}} \right]^{\frac{1}{\sigma F2_i - 1}} \tag{2}$$

From the FOC of Eq. (2), demands derived for farmland and for the KL bundle are:

$$A_i = \gamma F2_i^{\sigma F2_i} \cdot PA^{-\sigma F2_i} \left[\gamma F2_i^{\sigma F2_i} \cdot PA^{1-\sigma F2_i} + (1 - \gamma F2_i)^{\sigma F2_i} \cdot P_{-KL}^{1-\sigma F2_i} \right]^{\frac{\sigma F2_i}{1-\sigma F2_i}} \cdot \left(X_{-AKL_i} / aF2_i \right) \tag{M4}$$

$$X_{-KL_i} = (1 - \gamma F2_i)^{\sigma F2_i} \cdot P_{-KL_i}^{-\sigma F2_i} \left[\gamma F2_i^{\sigma F2_i} \cdot PA^{1-\sigma F2_i} + (1 - \gamma F2_i)^{\sigma F2_i} \cdot P_{-KL_i}^{1-\sigma F2_i} \right]^{\frac{\sigma F2_i}{1-\sigma F2_i}} \cdot \left(X_{-AKL_i} / aF2_i \right) \tag{M5}$$

The supply function derived from the zero profit condition is:

$$P_{-AKL_i} \cdot X_{-AKL_i} = PA \cdot A_i + P_{-KL_i} \cdot X_{-KL_i} \tag{M6}$$

c Optimization at the 1st level of the nested production function (Intermediate inputs and AKL-bundle)

We assume the Leontief-type production function is:

$$XD_i = \min \left(\frac{X_{-AKL_i}}{aF1_i}, \frac{IO_{1i}}{io_{1i}}, \dots, \frac{IO_{ki}}{io_{ki}}, \dots, \frac{IO_{ni}}{io_{ni}} \right) \tag{3)*}$$

where *IO* is the intermediate input for production. *aF1_i* and *io_{ki}* (*i, k = 1, …, n*) are the constant technical coefficients.

Assuming that the output *XD_i* is produced at minimum cost, so that no waste of inputs occurs and the ratios $\frac{IO_{ki}}{io_{ki}}$ are the same for all *i*, we can rewrite the above equation as:

$$XD_i = \frac{X_{-AKL_i}}{aF1_i} = \frac{IO_{1i}}{io_{1i}} = \dots = \frac{IO_{ki}}{io_{ki}} = \dots = \frac{IO_{ni}}{io_{ni}} \tag{4)*}$$

This equation represents the familiar input-output relations for a particular firm:

$$X_{-AKL_i} = aF1_i \cdot XD_i \tag{M7)* \text{ and,}}$$

$$IO_{ki} = io_{ki} \cdot XD_i \quad \text{for } i, k = 1, \dots, n \tag{5)*}$$

The supply function derived from the zero profit condition is:

$$PD_i \cdot XD_i = (1 + tv_i)P_{AKL_i} \cdot X_{AKL_i} + \sum_k (P_k \cdot io_{ki} \cdot XD_i) \tag{M8}$$

3 Consumption demand of household

Figures 3 and 4 show the structure of household utilities and the decision process for household consumption. In this model, we assumed that changes in the consumption level of food are quite limited even if the relative price of

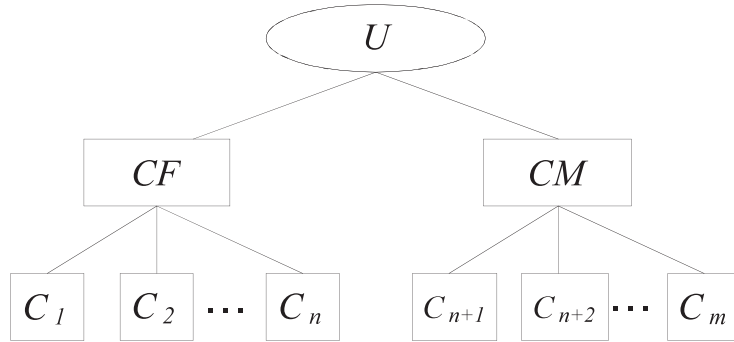


Fig.3 Structure of utilities of a representative household
 (Note) *CF* and *CM* are total consumption for food relating commodities and non-food commodities.

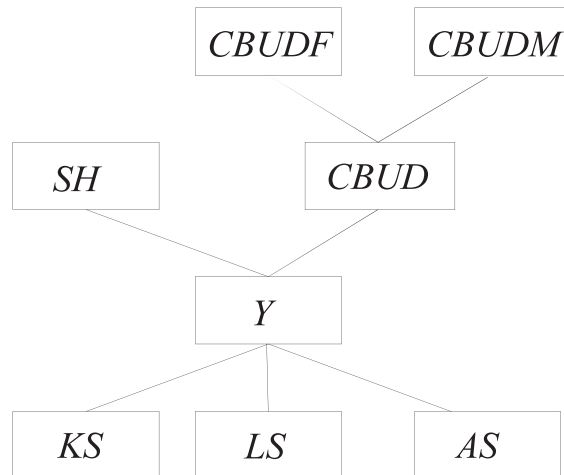


Fig.4 Decision processes of a household
 (Note) *KS* shows nominal capital stocks owned by households and equals total demand for capital stocks in nominal value represented by $PK_i \cdot K_i$.

food decreases than other manufacturing products. Also, the basic consumption level exists in consumption behavior as defined by the Stone-Geary utility function (Neary; 1997, Sadoulet and de Janvry; 1995). The concrete equations for consumer behavior are derived as follows.

Household income comes from capital revenue, labor income and asset income from land.

(Income definition)

$$Y = \sum_i PK_i \cdot K_i + PL \cdot LS + PA \cdot AS \tag{M9}$$

Consumer saves a fraction (*mps*) of his/her income, so his/her nominal savings are:

$$SH = mps(1 - tv)Y \tag{M10}^*$$

Consequently, total budget for consumption is:

$$CBUD = (1 - tv)Y - SH \tag{M11}^*$$

After reaching the above income, the household decides how much budget is for food consumption and how much is for other consumptions. Next, each commodity in the food bundle and each commodity in the other commodity bundles are decided.

Using the above budget, the household optimizes their consumption for each commodity as follows.

a Optimization at the top level of utility

The household maximizes the CES utility function, subject to budget constraints as:

$$\begin{aligned} \max \quad U &= \left[\alpha HF \cdot CF^{\frac{\sigma H - 1}{\sigma H}} + (1 - \alpha HF) CM^{\frac{\sigma H - 1}{\sigma H}} \right]^{\frac{1}{\sigma H - 1}} \\ \text{s.t.} \quad CBUD &= PCF \cdot CF + PCM \cdot CM \end{aligned} \tag{6}$$

Here, CF and CM are total consumption for food relating commodities and non-food commodities. From the FOC of Eq. (6), demand functions for the food bundle and other commodity bundles are:

$$PCF \cdot CF \equiv CBUD_F = CBUD \left/ \left[1 + \left(\frac{1 - \alpha HF}{\alpha HF} \right)^{-\sigma H} \left(\frac{PCF}{PCM} \right)^{1 - \sigma H} \right] \right. \tag{M12}$$

$$PCM \cdot CM \equiv CBUD_M = CBUD \left/ \left[1 + \left(\frac{\alpha HF}{1 - \alpha HF} \right)^{-\sigma H} \left(\frac{PCM}{PCF} \right)^{1 - \sigma H} \right] \right. \tag{M13}$$

Here, suffix F and M show classification of the food relating sectors and non-food sectors, respectively. Note that the total expenditure for food ($PCF \cdot CF$) and for other commodities ($PCM \cdot CM$) correspond to the total budget for consumption within the income ($CBUD_F$ and $CBUD_M$, respectively).

b Optimization at the 2nd level of utility

In terms of consumption of each food commodity, the household maximizes the Stone-Geary utility function defined as:

$$\begin{aligned} \max \quad U_F &= \sum_{if} (C_{if} - \mu H_{if})^{\alpha HLES_{if}} \\ \text{s.t.} \quad CBUD_F &= \sum_{if} (1 + tc_{if}) P_{if} \cdot C_{if} \end{aligned} \tag{7}$$

Here, if , jf and kf all show the sector classification of the food relating sectors, im , jm and km show the sector classification of the non-food sectors. μH_{if} is the minimum required quantity that the consumer purchases first. In these functions, $C_{if} > \mu H_{if} \geq 0$ for $if = 1, \dots, n$, $\alpha HLES_{if} > 0$ and $\sum_{if} \alpha HLES_{if} = 1$. From the FOC of Eq. (7),

$$(1 + tc_{kf}) P_{kf} \cdot C_{kf} = (1 + tc_{kf}) P_{kf} \cdot \mu H_{kf} + \frac{\alpha HLES_{kf}}{\alpha HLES_{if}} (1 + tc_{if}) P_{if} (C_{if} - \mu H_{if}) \tag{8}$$

Income restriction in Eq. (7) is rewritten as:

$$CBUD_F = (1 + tc_{if}) P_{if} \cdot C_{if} + \sum_{kf, kf \neq if} (1 + tc_{kf}) P_{kf} \cdot C_{kf} \tag{9}$$

We substitute $(1 + tc_{kf}) P_{kf} \cdot C_{kf}$ in this equation for the first-order condition and derive the demand function for the if -th commodity in the food sector as follows.

$$CBUD_F = \frac{1}{\alpha HLES_{if}} (1 + tc_{if}) P_{if} \cdot C_{if} - \frac{1 - \alpha HLES_{if}}{\alpha HLES_{if}} (1 + tc_{if}) P_{if} \cdot \mu H_{if} + \sum_{kf} (1 + tc_{kf}) P_{kf} \cdot \mu H_{kf} \quad (10).$$

$$(1 + tc_{if}) P_{if} \cdot C_{if} = (1 + tc_{if}) P_{if} \cdot \mu H_{if} + \alpha HLES_{if} \left[CBUD_F - (1 + tc_{if}) P_{if} \cdot C_{if} - \sum_{kf} (1 + tc_{kf}) P_{kf} \cdot \mu H_{kf} \right] \quad (11).$$

$$(1 + tc_{if}) P_{if} \cdot C_{if} = (1 + tc_{if}) P_{if} \cdot \mu H_{if} + \alpha HLES_{if} \left[CBUD_F - \sum_{sf=\forall sf} (1 + tc_{sf}) P_{sf} \cdot \mu H_{sf} \right] \quad (M14).$$

As for commodities other than food, a household similarly maximizes the Stone-Geary utility function as follows.

$$\begin{aligned} \max \quad U_M &= \sum_{im} (C_{im} - \mu H_{im})^{\alpha HLES_{im}} \\ \text{s.t.} \quad CBUD_M &= \sum_{im} (1 + tc_{im}) P_{im} \cdot C_{im} \end{aligned} \quad (12).$$

From the FOC of Eq. (12), we derive the demand function for the im -th commodity as:

$$(1 + tc_{im}) P_{im} \cdot C_{im} = (1 + tc_{im}) P_{im} \cdot \mu H_{im} + \alpha HLES_{im} \left[CBUD_M - \sum_{sm=\forall sm} (1 + tc_{sm}) P_{sm} \cdot \mu H_{sm} \right] \quad (M15).$$

Demand functions shown by Eqs. (M14) and (M15) are a linear expenditure system (LES) for the consumption function.

4 Export and import

Figure 5 shows the firms' decision on export and import.

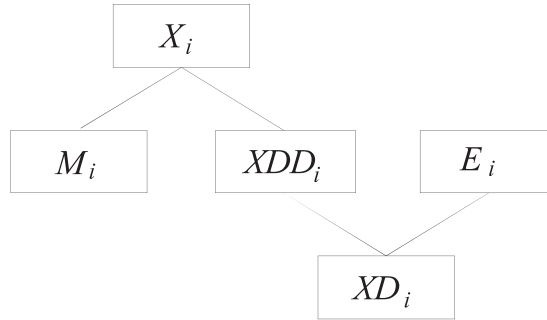


Fig.5 Firms' decision on export and import.

The firm chooses domestic market or foreign market to sell its commodities. It maximizes its sales under constraints of the constant elasticity of transformation (CET) function with the domestic commodities and export commodities as follows.

$$\begin{aligned} \max \quad \text{Sales} &= PDD_i \cdot XDD_i + PE_i \cdot E_i \\ \text{s.t.} \quad XD_i &= aT_i \left[\gamma T_i^{\sigma_i} \cdot E_i^{(\sigma_i-1)/\sigma_i} + (1 - \gamma T_i) XDD_i^{(\sigma_i-1)/\sigma_i} \right]^{\sigma_i / (1 - \sigma_i)} \end{aligned} \quad (13)*.$$

From the FOC of Eq. (13), the functions for the domestic commodities and exported commodities are:

$$XDD_i = (1 - \gamma T_i)^{\sigma_i} \cdot PDD_i^{-\sigma_i} \left[\gamma T_i^{\sigma_i} \cdot PE_i^{1-\sigma_i} + (1 - \gamma T_i)^{\sigma_i} \cdot PDD_i^{1-\sigma_i} \right]^{\sigma_i / (1 - \sigma_i)} (XD_i / aT_i) \quad (M16)*.$$

and

$$E_i = \gamma T_i^{\sigma_i} \cdot P E_i^{-\sigma_i} \left[\gamma T_i^{\sigma_i} \cdot P E_i^{1-\sigma_i} + (1-\gamma T_i)^{\sigma_i} \cdot P D D_i^{1-\sigma_i} \right]^{\sigma_i/(1-\sigma_i)} (X D_i / a T_i) \tag{M17}^*$$

The supply function derived from the zero profit condition is:

$$P D_i \cdot X D_i = P E_i \cdot E_i + P D D_i \cdot X D D_i \tag{M18}^*$$

The firm produces a composite commodity supplied to the domestic market by using the domestic and imported commodities. According to the Armington assumption, the optimization behavior is described as:

$$\begin{aligned} \min \quad & Cost = P M_i \cdot M_i + P D D_i \cdot X D D_i \\ \text{s.t.} \quad & X_i = a A_i \left[\gamma A_i^{\alpha_i} \cdot M_i^{(\alpha_i-1)/\alpha_i} + (1-\gamma A_i) X D D_i^{(\alpha_i-1)/\alpha_i} \right]^{\alpha_i/(\alpha_i-1)} \end{aligned} \tag{14}^*$$

From the FOC of Eq. (14), the import function and the function for domestic commodities are derived as:

$$M_i = \gamma A_i^{\alpha_i} \cdot P M_i^{-\alpha_i} \left[\gamma A_i^{\alpha_i} \cdot P M_i^{1-\alpha_i} + (1-\gamma A_i)^{\alpha_i} \cdot P D D_i^{1-\alpha_i} \right]^{\alpha_i/(1-\alpha_i)} (X_i / a A_i) \tag{M19}^*$$

and

$$X D D_i = (1-\gamma A_i)^{\alpha_i} \cdot P D D_i^{-\alpha_i} \left[\gamma A_i^{\alpha_i} \cdot P M_i^{1-\alpha_i} + (1-\gamma A_i)^{\alpha_i} \cdot P D D_i^{1-\alpha_i} \right]^{\alpha_i/(1-\alpha_i)} (X_i / a A_i) \tag{M20}^*$$

The supply function derived from the zero profit condition is:

$$P_i \cdot X_i = P M_i \cdot M_i + P D D_i \cdot X D D_i \tag{M21}^*$$

5 Public spending

Figure 6 shows the revenues and expenditures of the government.

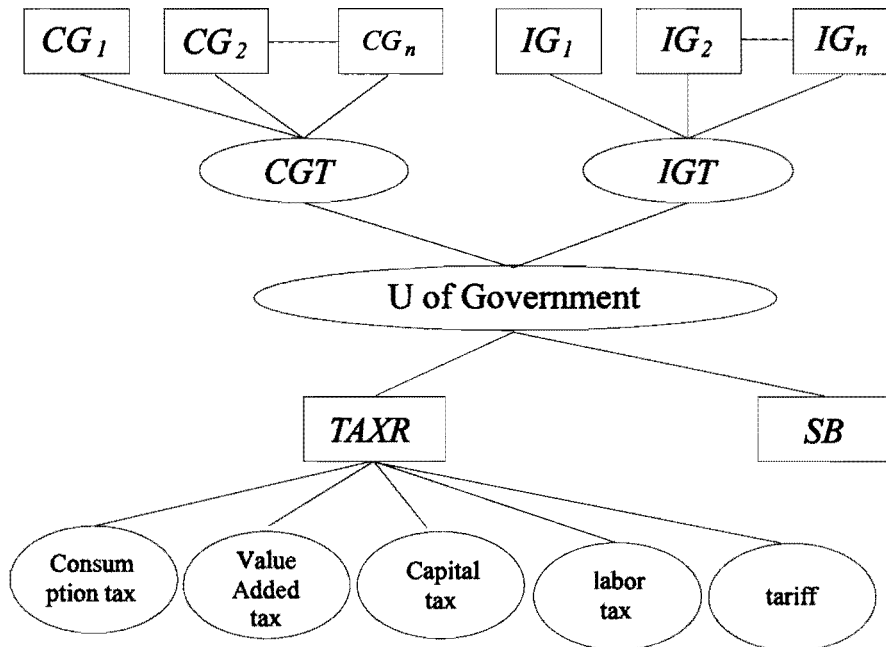


Fig.6 Government's decision on consumption and investment subject to revenues
 (Note) CGT and IGT are total government consumption and total government investment, respectively.

At the stage of taxation, the government levies taxes on the consumption of commodities, on capital and labor use

of firms and on the income of the household. In addition the government obtains revenue from tariffs. Consequently, the government tax revenues are:

$$TAXR = \sum_i (P_i \cdot tc_i \cdot C_i + tv_i \cdot P_AKL_i \cdot X_AKL_i + tk_i \cdot PK_i \cdot K_i + tl_i \cdot PL_i \cdot L_i + tm_i \cdot PWM_i^0 \cdot ER \cdot M_i) + ty \cdot Y \quad (M22).$$

Here, PWM^0 is the initial world price of import commodities.

For expenditure part, we assumed that the government decides the share of public consumption and public investment according to public opinions expressed by the national election. In other words, due to political reasons, the share of expenditures on public consumption and public investment is fixed at the constant ratio against revenue. Total revenue is defined as:

$$TAXR + SB \cdot PCINDEX \quad (15),$$

Expenditures of public consumption and public investment are:

$$PCGT \cdot CGT = \alpha CGT (TAXR + SB \cdot PCINDEX) \quad (16),$$

$$PIGT \cdot IGT = (1 - \alpha CGT) (TAXR + SB \cdot PCINDEX) \quad (17).$$

Here, CGT and IGT are total government consumption and total government investment, respectively. Total government revenue denotes nominal values, but savings from the primary balance in the national account, SB , are defined as the real value. By definition, when the primary balance is in the red, SB becomes negative indicating the government savings are negative, and vice versa.

After deciding the expenditures, we assumed the efficient behavior of the government. That is, the government optimizes each expenditure by maximizing the Cobb-Douglas utility function subject to each budget for total public consumption and total public investment. Optimization decision of the government is defined as:

$$\begin{aligned} \max \quad & U = \prod_i IG_i^{\alpha IG_i} \\ \text{s.t.} \quad & PIGT \cdot IGT = \sum_i P_i \cdot IG_i \end{aligned} \quad (18),$$

and

$$\begin{aligned} \max \quad & U = \prod_i CG_i^{\alpha CG_i} \\ \text{s.t.} \quad & PCGT \cdot CGT = \sum_i P_i \cdot CG_i \end{aligned} \quad (19).$$

Here, $\sum_i \alpha IG_i = 1$ and $\sum_i \alpha CG_i = 1$. From the FOC of Eqs. (18) and (19) and former Eqs. (16) and (17), the demand for each commodity in public investment and public consumption can be defined as:

$$IG_i = \alpha IG_i \cdot P_i^{-1} \cdot (1 - \alpha CGT) (TAXR + SB \cdot PCINDEX) \quad (M23).$$

$$CG_i = \alpha CG_i \cdot P_i^{-1} \cdot \alpha CGT (TAXR + SB \cdot PCINDEX) \quad (M24).$$

6 Commodity demand by investment

Under macroeconomic restrictions, total savings is always equal total investment. In our model, total savings consist of total household savings, SH , the savings from the primary balance in the national account, SB , and trade surplus in the foreign account, SF . Note that SB is the real value. The agent “Bank” maximizes the utility defined by a Cobb-Douglas function subject to the Investment-Savings balance as:

$$\begin{aligned} \max \quad & U = \prod_i IP_i^{\alpha_i} \\ \text{s.t.} \quad & \sum_i P_i \cdot IP_i = SH - SB \cdot PCINDEX + SF \cdot ER \end{aligned} \quad (20)^*$$

Here, $\sum_i \alpha_i = 1$. From the FOC of Eq. (20), we can derive the following demand function for investment commodities.

$$P_i \cdot IP_i = \alpha_i (SH - SB \cdot PCINDEX + SF \cdot ER) \quad (M25)^*$$

7 Market clearing conditions and price definitions

a Market clearing conditions

In order to meet the demand with supply, the market-clearing conditions required in each market are:

$$\text{Labor market: } \sum_i L_i = LS \quad (21)^*$$

$$\text{Farmland market: } \sum_i A_i = AS \quad (M26)^*$$

$$\text{Commodity market: } \sum_j i o_{ij} \cdot XD_j + C_i + IP_i + IG_i + CG_i = X_i \quad (M27)^*$$

$$\text{Trade balance: } \sum_i PWM^0_i \cdot M_i = \sum_i PWE^0_i \cdot E_i + SF \quad (M28)^*$$

Here, PWE^0 is the initial world price of export commodities.

b Price definitions

This model uses the composite price index to adjust nominal variables to real variables. The indexes used here are:

$$\text{Consumer price index: } PCINDEX = \frac{\sum_i (1 + tc_i) P_i \cdot C_i}{\sum_i (1 + tc_i) P_i^0 \cdot C_i^0} \quad (M29)^*$$

$$\text{Price of food composite: } PCF = \frac{\sum_{if} (1 + tc_{if}) P_{if} \cdot C_{if}}{\sum_{if} C_{if}} \quad (M30).$$

$$\text{Price of other product composite: } PCM = \frac{\sum_{im} (1 + tc_{im}) P_{im} \cdot C_{im}}{\sum_{im} C_{im}} \quad (M31).$$

$$\text{Price of import commodity: } PM_i = (1 + tm_i) \cdot ER \cdot PWM^0_i \quad (M32)^*$$

$$\text{Price of export commodity: } PE_i = ER \cdot PWE^0_i \quad (M33)^*$$

III Calibration

Using the data shown by the social accounting matrix (SAM), we can calibrate the parameters of each equation described above. The supply and demand in the SAM data are always balanced, so a model that uses calibrated parameters reaches equilibrium in price and commodity in the market. The equations for calibration are indicated by equation numbers with a "C". The variables with "0" over the right shoulder indicate the initial values for each variable shown by the SAM data.

1 Production parameters

From the FOC of Eq. (1), the technological parameters at the 3rd nest of the production function are calibrated by:

$$\gamma F3_i = \frac{1}{1 + \frac{(1+t_i)PL^0}{(1+tk_i)PK_i^0} \left(\frac{K_i^0}{L_i^0} \right)^{-1/\sigma F3_i}} \quad (C1).$$

$$aF3_i = \frac{X - KL_i^0}{\left[\gamma F3_i (K_i^0)^{\frac{\sigma F3_i - 1}{\sigma F3_i}} + (1 - \gamma F3_i) (L_i^0)^{\frac{\sigma F3_i - 1}{\sigma F3_i}} \right]^{\frac{\sigma F3_i}{\sigma F3_i - 1}}} \quad (C2).$$

In the same way, from the FOC of Eq. (2), the technological parameters at the 2nd nest are calibrated by:

$$\gamma F2_i = \frac{1}{1 + \frac{P - KL_i^0}{PA^0} \left(\frac{A_i^0}{X - KL_i^0} \right)^{-1/\sigma F2_i}} \quad (C3).$$

$$aF2_i = \frac{X - AKL_i^0}{\left[\gamma F2_i (A_i^0)^{\frac{\sigma F2_i - 1}{\sigma F2_i}} + (1 - \gamma F2_i) (X - KL_i^0)^{\frac{\sigma F2_i - 1}{\sigma F2_i}} \right]^{\frac{\sigma F2_i}{\sigma F2_i - 1}}} \quad (C4).$$

From Eq. (4), the technological parameters at the 1st nest are:

$$aF1_i = \frac{X - AKL_i^0}{XD_i^0} \quad (C5)*.$$

$$io_{ki} = IO_{ki}^0 / XD_i^0 \quad (C6)*.$$

2 Consumption parameters

From the FOC of Eq. (6), distribution parameters at the top level utility are calibrated by:

$$\alpha HF = \left[1 + \frac{PCM^0}{PCF^0} \left(\frac{CF^0}{CM^0} \right) \right]^{1/\sigma HF} \quad (C7).$$

From the demand functions shown by Eqs. (M14) and (M15), we can derive the income elasticity for the demands for commodities as:

$$\eta = \frac{dC_i}{dCBUD} \frac{CBUD}{C_i} = \frac{\alpha HLES \cdot \{(1+tc_i)P_i\}^{-1} \cdot CBUD}{C_i} \quad (22)*.$$

Using the empirical results of previous studies for the value of η allow us to obtain the parameter value of $\alpha HLES$ as:

$$\alpha HLES = \frac{\eta \cdot \{(1+tc_i)P_i\}^{-1} \cdot CBUD_h^0}{C_i^0} \quad (C8).$$

where $h=F$ (for the food industry) or M (for another industry).

In case of LES, the Frisch parameter ϕ is equal to:

$$\phi = \frac{d\lambda}{dCBUD} \frac{CBUD}{\lambda} = - \frac{CBUD}{CBUD - \sum_i (1+tc_i)P_i \cdot \mu H_i} \quad (23)*,$$

(Blonigen, et al., 1997). Here, λ is the marginal utility of expenditure and shown by the Lagrange multiplier in the optimization of household utility. The Frisch parameter indicates the expenditure elasticity of the marginal utility of expenditure and also indicates the money flexibility between essential and non essential goods. Using the empirical results for the value of ϕ and initial values for variables, μH_i can be calibrated as:

$$\mu H_i = C_i^0 + \alpha HLES \cdot \{(1+tc_i)P_i\}^{-1} \cdot CBUD_h^0 \cdot \phi^{-1} \quad (C9).$$

3 Parameters of export and import

From the FOC of Eq. (13), parameters in the export function are calibrated by:

$$\gamma T_i = 1 / \left[1 + (PDD^0_i / PE^0_i)(E^0_i / XDD^0_i)^{-1/\sigma_i} \right] \quad (C10)^*$$

$$\alpha T_i = XD^0_i / \left[\gamma T_i \cdot E^0_i^{(\sigma_i-1)/\sigma_i} + (1 - \gamma T_i) XDD^0_i^{(\sigma_i-1)/\sigma_i} \right]^{\sigma_i/(\sigma_i-1)} \quad (C11)^*$$

From the FOC of Eq. (14), parameters in the Armington function are calibrated by:

$$\gamma A_i = 1 / \left[1 + (PDD^0_i / PM^0_i)(M^0_i / XDD^0_i)^{-1/\sigma_i} \right] \quad (C12)^*$$

$$\alpha A_i = X^0_i / \left[\gamma A_i \cdot M^0_i^{(\alpha_i-1)/\alpha_i} + (1 - \gamma A_i) XDD^0_i^{(\alpha_i-1)/\alpha_i} \right]^{\alpha_i/(\alpha_i-1)} \quad (C13)^*$$

4 Parameters of public spending

Substituting the initial values of variables into Eqs. (16), (M23) and (M24), the values of αCGT , αIG and αCG can be calibrated as:

$$\alpha CGT = PCGT^0 \cdot CGT^0 / (TAXR^0 + SB^0 \cdot PCINDEX^0) \quad (C14)$$

$$\alpha CG_i = P^0_i \cdot CG^0_i / \{ \alpha CGT (TAXR^0 + SB^0 \cdot PCINDEX^0) \} \quad (C15)$$

$$\alpha IG_i = P^0_i \cdot IG^0_i / \{ (1 - \alpha CGT) (TAXR^0 + SB^0 \cdot PCINDEX^0) \} \quad (C16)$$

By substituting initial values into Eq. (M25), αI can be calibrated as:

$$\alpha I = P^0_i \cdot IP^0_i / (SH^0 - SB^0 \cdot PCINDEX^0 + SF^0 \cdot ER^0) \quad (C17)$$

IV Model closure, Walras' law and recursive dynamics

Due to Walras' Law: when there are n markets of which $(n-1)$ are cleared, then the n -th market is automatically cleared, and we have to fix a numeraire to solve the model. We chose to fix labor price, PL , to be 1 and eliminate the market clearing condition of labor market in Eq. (21). To check the Walras' condition, the following equations should equal zero.

$$walras = \sum_i L_i - LS \quad (28)$$

The recursive dynamic structure is composed of a sequence of several static equilibria. The first equilibrium in the sequence is given by the benchmark value at year, tI . In each time period, t , the model is solved for an equilibrium given the exogenous conditions. The sequential equilibria are connected to each other through capital accumulation.

Capital formation is based on the Putty-Clay assumption. Under this assumption capital stock can be converted from flexible capital into durable goods, but it cannot then be converted back into re-investable capital. Consequently, the amount of capital stocks by industries is fixed within the year, but investment which will be transformed to the capital in the next year can move from sector to another sector by searching more revenue. The endogenous determination of investment behavior is:

$$INV_i(t) = INV^0_i \cdot \left(\frac{PK_i(t)}{PK(t)} \right)^{0.5} \quad (M34)$$

where $INV_i(t)$ is the investment in the i -th sector at year t and its initial value is $INV^0_i(t)$. $\overline{PK}(t)$ is the average service cost of the capital stock among sectors at year t and $\overline{PK}(t) = \frac{1}{n} \sum_i PK_i(t)$. The power coefficient, 0.5, is the elasticity of the change in investment with regard to change in the service cost of the capital stocks. Total investment to sectors corresponds to total investment demand calculated at the equilibria of the model, so investment to each sector is rescaled as:

$$INV_i(t) = \frac{INV_i(t)}{\sum_i INV_i(t)} \cdot \sum_i IP_i(t) \quad (M35),$$

where $INVT(t)$ is the summation of $INV_i(t)$ in Eq. (M34).

Capital stock at year t is:

$$K_i(t) = (1 - d_i)K_i(t-1) + INV_i(t) \quad (M36).$$

V Outputs of the model

Figure 7 is future predictions of several variables for this model. In order to solve the model for simulation, the GAMS (version 2.3) is used. This software is developed by the GAMS corporation (<http://www.gams.com/>). To calibrate the parameters, we used the the SAM data on Japanese economies in 2005.

The growth rate of exogenous variables was set to zero and no technological progress was considered. Hence, this prediction is seemed to be the pessimistic case on Japanese economies and agriculture. In terms of values by sectors, we aggregated each sector into 3 groups, i.e. first industry, second industry and third industry to save space.

As time goes by, the total production of agriculture decreases because most of private investment concentrate in non-agricultural sectors which have relatively high productivity and high price of capital according to the basic assumption explained in Eq. (M34). In order to balance the demand and the supply, price of 1st industry goes down and consumption for mainly agricultural products also goes down. Also, the exports of the 1st industry decrease and the imports of 1st industry go up because of a rise in domestic market of food. Of course, if technological progress can be realized in the agricultural sector different from the settings of exogenous variables in this section, the decrease in agriculture can be avoidable. Since there is not enough space in this paper, such analysis will be conducted in the other paper.

In total, total income which is measured by the nominal term rises because of above changes. Prices of food and food relating products make comprehensive price index, *PCINDEX*, decrease. Also, the nominal tax revenue goes down as shown by the last graph. These changes simulated by the model are realistic when we consider actual situation in Japan. Hence, it can be said that the model captures the real Japanese economies.

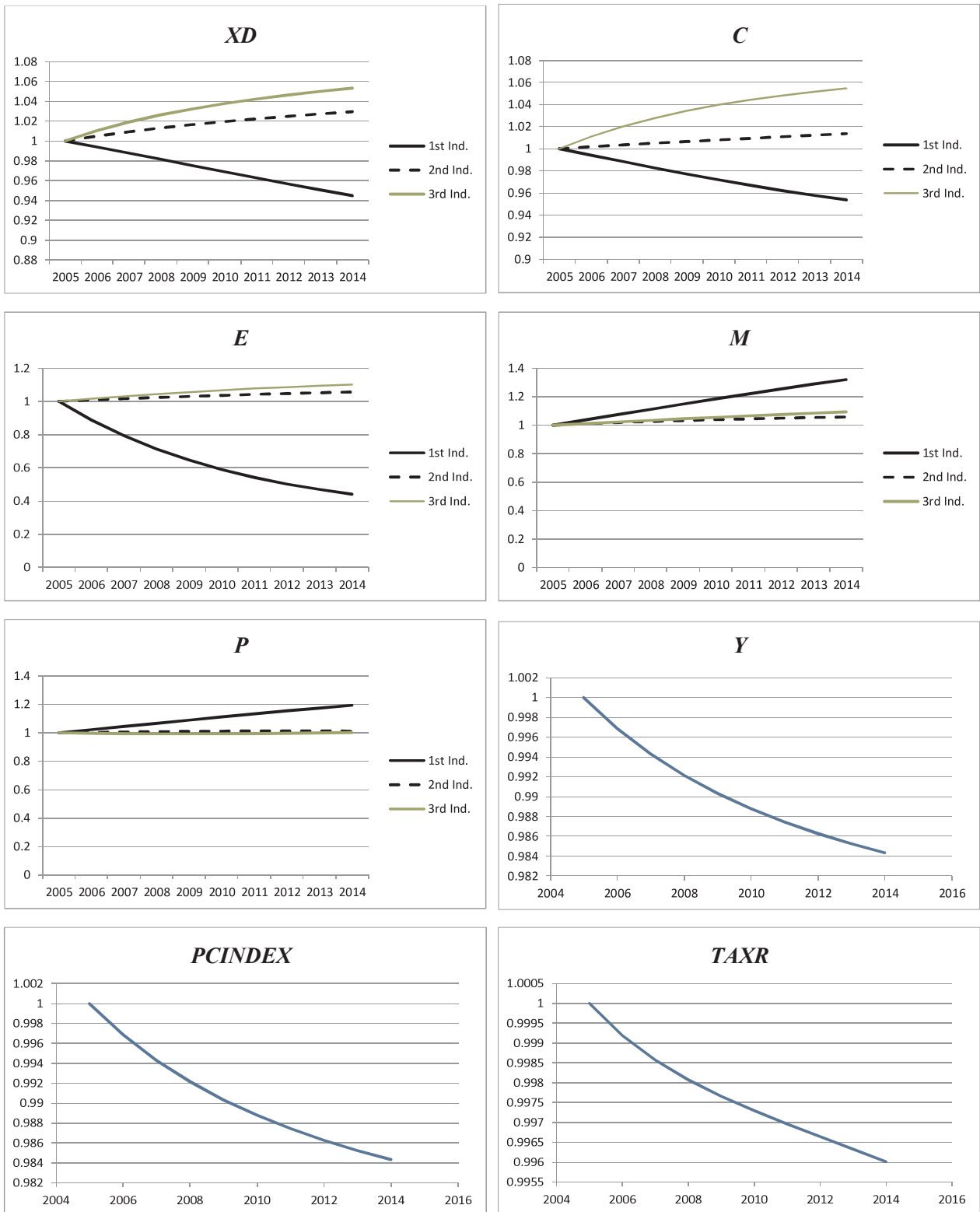
VI Conclusion

The present study developed a dynamic CGE model for evaluation of rural development policies and explained the structure of the model in detail. Features of this model are as follows.

First, the nested production structure was used in agriculture by considering farmland. Each nest for production was determined by the constant elasticity of a substitution (CES) type function and had different substitution elasticities. Especially in agriculture, the substitutability of farmland to other input factors, such as capital and labor, was assumed to be low according to previous studies. This indicates that if farmland input is fixed and other input factors are changed, the changes in agricultural production are limited. Such situations are possibly realistic in Japanese agriculture where a set aside program is mandated and possession of farmland is relatively unchangeable. Using such a production structure, it is easy for researchers to consider policy measures that affect agricultural productivity in the future.

Second, the nested consumption function was used by assuming that the substitutability of food consumption and other consumptions was low. At the bottom nest of the utility function, the Stone-Geary utility function was used to describe consumer behavior within the food sectors and other sectors. Because of such a structure, if the price of food becomes low, a decrease in food consumption seems to be low as compared to previous models used in other studies where a simple utility function was used. In Japan, consumption of rice is continuously declining and the price of rice is decreasing, so the above structure can be accorded with this real situation to make the model simulation more realistic.

Third, the recursive dynamic structure was introduced to consider the chronological accumulation of capital stocks. Asset management measures that aim to prolong the life time of capital stocks are deeply related to the capital formation process, so the above dynamic structure is necessary for evaluation of capital stock policies.



(Note) Each line shows the ratio of the annual values compared to the values in 2005.

Fig.7 Predictions by variables

Using this model, the chronological changes in production and price at the market can be predicted by sector and the situations with-and-without policy changes can be forecast. However, there are several issues remaining. Concrete rural development policies need to be evaluated by this model and real data. The model structure also needs to be improved to consider the oligopoly situation in certain industries. Furthermore, improvement of the CGE model structure by considering a forward looking process and overlapping generation structure may be useful to evaluate future situations.

Appendix

Table A1 shows the value of each parameter for simulation on Japanese economic situation. These values are based on the GTAP (Global Trade Analysis Program) database developed by the Purdue University and most of them were estimation results of previous empirical data.

Table A1 Parameters for which values are established based on empirical studies

Parameters	Set values
Φ	-1.1
η	Sec 1-7, 15: 0.5 Others : 1.1
σH	0.4
$\sigma F2_i$	0.1
$\sigma F3_i$	0.8
σA_i	Sec 1-14: 2.0 Sec 15: 3.0
σT_i	Sec 1-14: 2.0 Sec 15: 3.0

The sample data of the social accounting matrix (SAM) for the dynamic CGE model on Japanese economies were composed from the Input-Output data of Japan in 2005. The SAM data are shown in Table A2.

Acknowledgement

This study heavily depends on the EcoMod seminar organized by Dr. A. Bayer and his staff at the Free University of Brussels, Belgium. The preliminary version of this paper was checked by Dr. Demor Taylor (University of Tsukuba) for proof readings. Their contributions are greatly appreciated.

References

- 1) Akune, Y. (2010) "Quantitative analysis on economic linkage of green tea industry by using two regions computable equilibrium model," *J. of Rural Econ.* Special Issue 2010, 191-198
- 2) Ban, K. (2007) "Multi-regional Dynamic Computable General Equilibrium Model of Japanese Economies: Forward Looking Multi-regional Analysis," *RIETI Discussion Paper Series*, 07-J-043
- 3) Blonigen, B.A., J.E. Flynn and K.A. Reinert (1997) Sector-focused general equilibrium modeling, in *Applied Methods of Trade Policy Analysis: A Handbook* (Eds.) J.F. Francois and K.A. Reinert, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 189-230.
- 4) EcoMod (2011) "Environmental CGE Modeling with GAMS," Modeling School, Washington DC, USA, <http://ecomod.net/home>.
- 5) Egaitsu, N. (1985) ed. *An Economic Analysis on Japanese Agriculture: Habit Formation, Technological Progress and Information*, Taimeido press, Tokyo.
- 6) Gohin, A. (2006) "Assessing CAP Reform: Sensitivity of Modeling Decoupled Policies," *J. of Agri. Econ.* **57**(3), 415-440.
- 7) Kilkenny, M. (1993) "Rural/Urban Effects of Terminating Farm Subsidies," *Amer. J. Agr. Econ.* **75**(11), 968-980.
- 8) Kunimitsu (2009) "Macro Economic Effects on Preservation of Irrigation and Drainage Facilities: Application of Computable General Equilibrium Model," *J. of Rural Econ.* Special Issue 2009, 59-66
- 9) Neary, J. P. (1997) *R. C. Geary's Contributions to Economic Theory*, ed. Conniffe, G. Oak Tree Press, Dublin
- 10) Taylor, E. J., Yunez-Nude, A. and Dyer, G. (1999) "Agricultural Price Policy, Employment, and Migration in a Diversified Rural Economy: A Village-Town CGE Analysis from Mexico," *Amer. J. Agr. Econ.* **81**(8), 633-662.
- 11) Philippidis, G. and Hubbard, L.J. (2001) "The economic cost of the CAP revisited," *Agri. Econ.* **25**, 375-385.
- 12) Sadoulet, E. and de Janvry, A. (1995) *Quantitative Development Policy Analysis*, The Hopkins University Press, USA.
- 13) Saito, K. (1996) "Minimum Access of Rice Import," *J. of Rural Econ.* **68**(1), 9-19.
- 14) ---- (2002) "Public Investment and the Economy-Wide Effects: An Evaluation of Agricultural Land Consolidation in Japan," *Proceedings on International Conference of Policy Modeling*, 2002.
- 15) Shibusawa, H., Higano, Y., and Miyata, Y. (2007) "A Dynamic Multi-Regional CGE Model with Transportation Networks:

Table A2 SAM data

	Sectors														
	Paddy	Other Crop Farming	Animal Husbandry	Forestry, Agri. Service, Compost, Woody Prod.	Fishery	Food Processing	Beverage Prod.	Mining, Material Prod.	Machine	Construction, Water, Waste Treatment	Commerce, Finance, Insurance	Transport, Telecommunication	Catering	Other Service	Energy
\$ billion	sec1	sec2	sec3	sec4	sec5	sec6	sec7	sec8	sec9	sec10	sec11	sec12	sec13	sec14	ENG
Paddy	0.6	0.0	1.0	1.4	0.0	10.1	1.1	0.6	0.1	0.3	0.0	0.0	1.2	1.0	0.0
Other Crop Farming	0.0	1.2	2.1	2.9	0.0	21.6	2.3	1.3	0.2	0.6	0.1	0.0	2.6	2.2	0.0
Animal Husbandry	0.2	0.3	3.3	0.1	0.0	21.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.7	0.0
Forestry, Agri. Service, Compost, Woody Prod.	1.8	3.8	10.7	2.9	0.2	0.2	0.0	4.2	0.0	0.1	0.0	0.0	0.3	0.8	0.0
Fishery	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	10.4	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	2.3	1.2	0.0
Food Processing	0.0	0.0	0.3	3.1	0.7	42.0	3.9	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	30.5	12.1	0.0
Beverage Prod.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.3	3.2	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	15.1	3.3	0.0
Mining, Material Prod.	2.3	4.9	0.7	1.9	0.7	13.8	12.3	495.6	206.1	169.6	37.5	31.0	3.4	139.0	2.2
Machine	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.1	0.1	3.5	498.5	12.6	3.5	10.1	0.4	81.6	0.0
Construction, Water, Waste Treatment	0.1	0.3	0.2	0.2	0.0	1.2	0.8	16.8	5.9	10.2	43.4	11.7	5.4	43.5	12.9
Commerce, Finance, Insurance	1.3	2.8	1.5	2.6	1.2	25.3	5.6	86.2	94.7	54.9	199.6	68.8	29.1	156.7	14.8
Transport, Telecommunication	1.0	2.1	1.9	2.1	0.7	9.9	2.6	48.9	39.1	50.9	131.2	123.9	8.9	155.8	13.3
Catering	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Other Service	0.6	1.3	0.3	3.0	0.3	9.5	4.6	79.6	126.3	63.8	143.3	144.5	8.2	197.0	22.0
Energy	0.4	0.9	0.3	0.8	1.4	4.6	1.1	62.5	16.3	14.8	23.1	62.7	5.9	41.8	159.4
Capital	4.2	6.8	4.9	15.7	5.2	29.7	15.7	131.2	93.7	61.2	883.3	175.7	25.0	439.3	50.3
Labor	4.3	11.4	2.6	6.8	3.0	37.1	8.8	204.0	227.5	248.4	560.3	285.0	61.2	925.4	25.5
Land	2.2	4.6	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Household															
Government															
CGZ															
T on commodities	0.3	0.6	0.1	1.4	0.1	6.8	2.3	3.7	6.1	0.8	44.0	9.9	8.0	22.1	4.4
T on Labor	0.3	0.7	0.2	0.4	0.2	2.3	0.5	12.4	13.8	15.1	34.0	17.3	3.7	56.1	1.5
T on Capital	0.2	0.4	0.3	0.9	0.3	1.7	0.9	7.5	5.4	3.5	50.8	10.1	1.4	25.3	2.9
T on Energy	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
T on value added	0.5	1.2	-0.1	12.6	0.2	-6.1	14.1	22.7	10.8	17.5	-13.6	16.0	-4.4	-1.2	47.8
Tariffs	0.3	0.7	0.1	4.1	0.3	5.4	1.0	12.7	9.4	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	13.7
T on Income															
TRYZ															
IGZ															
Government															
JKZ															
Private															
ISZ															
ROW	4.9	10.4	0.4	7.2	2.9	37.5	3.9	169.0	183.4	0.0	12.1	43.8	9.1	43.5	149.2

Equilibrium and Optimality," *Studies in Regional Science*, **37**(2), 375-388.

- 16) Son, R., Muto, S., Tokunaga, S. and Okiyama, M. (2006) "Quantitative analysis on environmental and energy policy in Chinese automobile industries: Evaluation by the Dynamic Computable General Equilibrium (DCGE) model," *Studies in Regional Science*, **36**(1), 113-131.

農業政策の評価のための応用一般均衡モデルの構造

國光洋二

要 約

2000年代に入り、農家の戸別所得補償やストックマネジメントといった新しい政策が導入される中、これら農業政策を評価するため、現実の状況を再現でき、経済理論と整合性の高いモデルが必要と考えられる。本研究の目的は、日本の農業政策の評価のために開発した応用一般均衡モデルの構造を詳細に説明することにある。このモデルの特徴は、第1に、農業生産において重要である農地を生産要素として考慮するとともに、農地と他の生産要素（労働、資本）の代替の弾力性が限定的であるという実証研究の結果を考慮したモデル構造としていること、第2に、人間生活にとって欠かすことのできない食料消費と他の財・サービスの消費の代替性が低いことや、消費において守られるべき最低限の水準があることを考慮した消費構造としていること、第3に、資本の蓄積過程を通じた農業生産の変化を評価するため、逐次動学体系になっていること、等である。このモデルを用いることにより、農業政策の影響を価格と生産の両面から、時系列的に見ることが可能となる。

キーワード：生産要素，代替弾力性，逐次動学体系，資本，労働，農業生産，均衡価格，均衡数量

ジオウェブ作成技術の手順化と 農村地域における情報共有に関する実験

山田康晴*

目次

I 緒言	211	4 仮想実験の内容	216
II インターネットを利用した GIS (過去の構築例など)	212	VI 東日本大震災災害情報共有 プラットフォーム ¹⁾	217
III ジオウェブ技術	212	1 概要	217
IV オープンソース・フリーウェアによる ジオウェブ作成手順	213	2 試作レイヤー構成とデータ	218
V 実証実験 (N土地改良区連合)	215	3 実際の画面	218
1 ジオウェブの規格の実用性を試すための実験	215	4 パフォーマンス (使用感)	218
2 実験サイトのニーズ	215	VII 結言	218
3 実験サイトの実験条件の調査	215	参考文献	220
		Summary	222

I 緒言

著者は、TCP/IP プロトコルによるインターネットが、学術研究団体だけのネットワークであった 1980 年代から日本の実利用インターネット作りに関わってきた。地理情報システム (GIS) についても 1980 年代終わり頃には ESRI 社の Arc/Info を利用し始め、UNIX 系のシステムから、クライアント=サーバー型のシステムに利用を移行していた時期を経験している。1992 年頃にインターネットの世界でハイパーテキストファイルや画像を参照する WWW (World Wide Web) ができると、しばらくしてアメリカのセンサス統計局のタイガー (TIGER, 商標になっており、"Topologically Integrated Geographic Encoding and Referencing" system の略称) マッピングサービスが開始された。そのタイガーでは www ブラウザ上に地図が表示され、国勢調査結果を検索、地図色分け表示が可能なものであった。このようなサイトを作るためのいわゆる Web GIS 構築ツールも商業版が存在した。農業分野は土地利用型農業の統計データとして作付面積、収穫量などの統計情報データベースが存在していたので、タイガーマッピングサービスと同様に地図上で指定した地域のデータを検索し、地図上で色分け表示やグ

ラフ表示を行うシステムを 1990 年代の後半に試作した。しかし、情報発信できるのはデータベースなどのコンテンツを持つ側だけであった。

2000 年代に入ると、汎地球測位システム (GPS) を利用した位置情報付きコンテンツが増加し、カメラ付き携帯端末の普及で、農村部においても利用が考えられるようになってきた。また、業界団体の OGC (Open Geospatial Consortium) や国際標準化機構 (International Organization for Standardization) が、地理情報をネット上で流通させるための規格化作業として、XML 言語を GML 言語に、スタンダロンの GIS (地理情報システム) で扱う事の出来るラスターレイヤーを Web で配信する WMS (Web Map Service) 規格やベクターレイヤー配信の WFS (Web Feature Service) 規格などを制定している。これらは、WWW の場合に似て、レイヤーが別々のサーバーから発信されてもクライアント側は位置情報付きコンテンツを位置合わせを気にせず、正しい位置関係で閲覧することが可能になる。このような仕組みをジオウェブ (GeoWeb)⁴⁾ と呼んでいるが、農村部で情報共有する目的に利用する潜在的ニーズがあると考えられる。著者は、農業農村地域に普及させる場合に、なるべく経済的負担が少なく済むようにオープンソース・フリーウェア¹⁾の作成ツールを利用して、農村部での利用普及を図るための若干の取り組みを行ったので、その結果を報告¹⁸⁾する。

* 農村基盤研究領域 資源情報担当

平成 23 年 12 月 26 日受理

キーワード: ジオウェブ, GeoWeb, オープンソース, 情報共有, GIS

謝 辞

本研究は、文部科学省研究開発局の競争的研究予算宇宙利用促進調整委託費 衛星利用の裾野拡大プログラム ②衛星データ利用のための技術開発プログラム 「WWW 連携農村災害関連地理衛星画像分散協調サーバー GeoWeb の試作」(平成21年度, 22年度)に採択され、委託研究事業として実施した研究に加えて農研機構の経費(強化研究費)による研究内容を加えた内容である。使用した衛星データは、宇宙航空研究開発機構 ALOS 衛星第2回研究公募に採択された主任研究開発者 (PI) に対して配布を受けたものを使用した。実証実験にご協力いただいた土地改良区職員ほか関係者に御礼申し上げます。

II インターネットを利用した GIS (過去の構築例など)

著者は、共同で1998年に Web GIS 構築ツールとして AutoDesk 社の MapGuide を利用したカスタマイズ例を発表^{14,16}している。つまり、国際連合食糧農業機関 (UN/FAO) の作物統計データベース FAO-STAT のサブセットであった日本の国際農林水産業研究センターの JIRCAS-STAT (オラクル社の DBMS 上に構築した国別作物統計データベース) の一部のデータをテストデータセットとしたものである。そのデータを WWW ブラウザ上で、白地図を表示して、その地図から国を指定し、作目、年次、生産量や作付け面積などを色分け地図表示および年次間変化のグラフを表示するシステムの試作品を完成させている。システム構成概念図を Fig.1 に示す。当時の MapGuide にはバックグラウンドのデータから、白地図の色分け表示程度の機能しかなく、折れ線グラフや棒グラフのような表示機能がなかったため、JAVA Applet で表示するようにプログラミングしている。また、インターネット上で公開できるデジタル地図が1990年代の日本では見つからなかったため、当初は国境線のみ国別白地図を使用した。その後国土院の地球地図が順次公開され、インターネットで配布自由であったので背景図として用いた。

このように GIS をグラフィック・ユーザ・インタフェースとして、バックグラウンドのデータベースのデータを検索、表示するシステムをインターネット越しに行うのは、約20年ほど前に登場したクライアント=サーバシステムを利用した GIS の LAN 部分がインターネットに置き換えられたとも言える。現在では、GIS や地理データをサーバマシンに置き、クライアントからネット越しにサーバ資源を使うクラウドコンピューティング的なサービスも存在し、進化しつづけている。

農業関係では、農研機構近畿中国四国農業研究センターが、国土院の基盤地図情報を借り受けて、Web Map Service (WMS) の配信サービスを行っている。ア

メリカでは、農務省海外農業情報サービス (Foreign Agriculture Service of USDA) があり、航空宇宙局や海洋大気局が取得した衛星データを解析して配信している。イタリアに本部のある国際連合食糧農業機関 (FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations) が、GIEWS (Global Information and Early Warning System, 汎地球情報早期警戒システム) などの衛星データと現地情報や統計データなどを分析して、干ばつ情報、作況情報などに読み替え、主題図表現や文章表現で発信している。

III ジオウェブ技術

ジオウェブ技術は、従前からある WWW がハイパーテキストのファイルを地理的に異なる場所に存在するサーバーが発信していてもインターネット上にあれば、URL を指定して末端のユーザが読むことができるのに似ていて、Geographic Markup Language (GML) 言語で記述した位置情報付きファイルをユーザが特に意識しなくても正しい地理的位置関係で重ねて見る仕組みである。汎地球測位システム (GPS) やビルや地下街での位置情報サービス、あるいは携帯電話の基地局との距離からの位置情報推定など各種の位置情報サービスやスマートフォン (カメラ、GPS、加速度センサを搭載) の普及で、位置情報付きコンテンツが増加し、その流通規格が求められるようになってきた。スマートフォンでは、すでに位置情報を受信するだけでなく、利用者の位置情報をサービス提供側に通知して、その位置情報から販売促進用の情報提供をしたりする新しい商業利用サービスの提供が始まっている。ジオウェブもそういった時代背景から規格案が検討され、国際標準規格が制定されつつある。

ジオウェブ技術は国際標準規格が制定途中のものもあって、完成されたものではないが、オープンソース・フリーウェアだけでも構築できるような環境が整ってきた。しかし、LINUX OS 上で開発され、ジオウェブサーバを構築する手順についても、主として関連する情報技

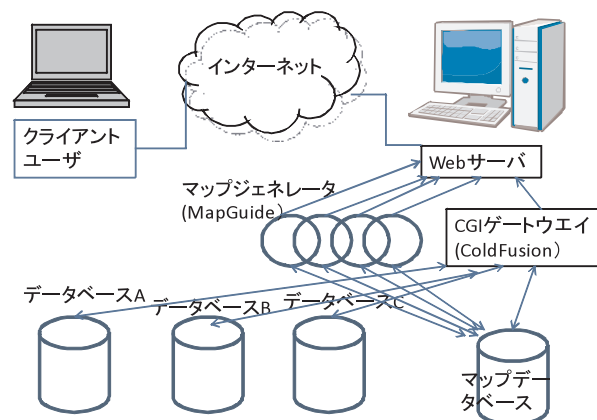


Fig.1 国際農業統計検索表示システム
Data retrieval and mapping system for international agricultural statistics

術群が多いことに起因して、慣れない技術者には常に技術動向をフォローしているのが難しい。

したがって、現時点で代表的なオープンソース・フリーウェアのツール群をどのような手順で構築すれば完成するのかを整理し、マニュアル化と必要なライブラリファイルなども提供することで、Webサーバ構築運用経験が少しあれば可能なようにした。

つぎに具体的にジオウェブの構成技術について述べる。一般に地理情報システムは、点（ポイントフィーチャ）、線図（ラインフィーチャ）、閉多角形（ポリゴンフィーチャ）の図形要素と、線図長さや面積などの属性情報を一括して管理するシステムで、データベース管理ソフトウェアと線図情報を画面表示するソフトウェアの組み合わせで成り立っている。大胆に概略を記述すれば、インターネットGISは、これらをインターネット越しにクライアントPCに表示、検索、編集できる仕組みであり、サーバ=クライアント型のシステムである。ジオウェブはサーバ側にWWWでの発信、クライアント側にインターネット閲覧ソフトウェア（ブラウザ）で表示、検索、編集出来るようにする仕組みとすることが出来る。

したがって、ジオウェブは特別な仕組みではなく、WWWを利用して緯度経度など位置情報付きの地図類を配信するために、地理情報を扱えるように規格を整えたものと言うことが出来る。国際規格としては、OGC(Open Geospatial Consortium) と ISO(the International Organization for Standardization) があり、業界団体であるOGC規格から、ISOへ移行途上のものがある。ISO規格もドラフト版を各国で閲覧審議中のものや制定済みのものなど、審議の進行状況に応じて数段階に分かれている。GML(Geographic Markup Language) は、日本のG-XML規格が持ち込まれ、バージョン3.xx以降は日本の規格と国際規格が融合したものになっている。Google社のGoogle Earth

なども類似の規格がOGC規格として認められている（例えば、OGC KML言語、WMTS; Web Map Tile Service）。

ISOの規格は、ISO19119が地理情報サービスについての記述、ISO19136がGML言語についての規格、ISO19128が、WMS(Web Map Service)サーバインタフェースに関する規格で地理画像情報を配信する際のメタデータ交換の記述になっている。これらの規格はドラフト審議中のものを含めて、実装したものが商品として地理情報システムソフトウェア作成各社から販売されているほか、オープンソースのソフトウェアとして公開されているものがある。OSGeo協会(the Open Source Geospatial Foundation)¹が公開している情報(<http://www.osgeo.org/>)では、ウェブマッピングソフトウェアとして、GeoServer, Mapbender, MapBuilder, MapFish, MapGuide Opensource, MapServer, OpenLayersなどを挙げている。

IV オープンソース・フリーウェアによるジオウェブ作成手順

筆者は、OSGeo協会のインストールパッケージを参考に、オペレーティングシステムとしては、Red Hat Linux系のCentOS5を採用した。地図サーバには、アメリカミネソタ大学で当初開発されたMapServer^{5,6,9,10}を採用し、JAVA ScriptとしてOpenLayers^{2,3}を付け加えることで、クライアント側が通常のWWW用のブラウザのみで、ジオウェブのWMSレイヤーの閲覧が可能になるようにした(Fig.2)。

バックグラウンドでデータベース管理ソフトウェアとして機能するものに、postgreSQLを採用し、地理情報を扱えるようにpostGIS⁸を加えた。座標変換機能などはGDALを搭載し、衛星画像などの加工用にGRASSも

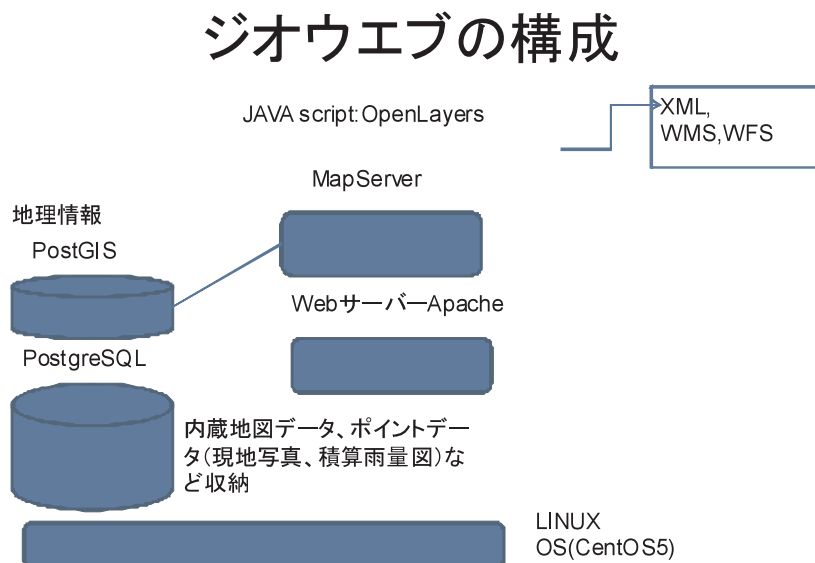


Fig.2 ジオウェブの構成図
An architecture of GeoWeb

採用している。すべてオープンソース・フリーウェアのみで構築した。具体的なインストール手順は別添 CD-ROM に譲るが以下に流れを解説する。

ジオウェブを構築するのにオペレーティング・システム (OS) を含めて、すべてのソフトウェア群をオープンソース・フリーウェアだけで構成することが可能である。OS はその場合、LINUX 系のものが考えられる。LINUX 特有の管理技術やアプリケーション・ソフトウェアのインストールに必要で、相当な数になるライブラリ群を適切なバージョンで適切な順番でインストールする必要がある、通常はインターネット上に公開されているライブラリをインストール作業が進むにつれて順次取得してくることになる。しかし、ライブラリのバージョンは適宜改訂されてバージョンが新しくなっており、ソフトウェアのインストール手順マニュアルを執筆しても、執筆時点のバージョンのライブラリが公開停止されてしまい、入手困難になることがよくある。マニュアル執筆時のバージョンのライブラリでないと、その後のインストール作業に支障を来し、最終的に目的とするアプリケーションが動作しないケースが多く生じる。また、OS のパッチの当て方一つをとっても、時間が経ってマニュアル執筆時とサービスパックなどのインストール手順そのものが変化することもある。従来は、この分野に慣れている技術者でなければ、インストールそのものが成功せず、ジオウェブの入り口に立つことも難しかった。したがって、誰でもインストールできて利用が可能になるジオウェブの普及をめざすには、LINUX 系 OS とそのアプリケーションソフトウェアが抱えるこの問題の解決策が重要である。

筆者が考えた解決方法は、必要なライブラリ群なども含めたインストール用ソフトウェア集 CD-ROM を作成することであった。このインストール用 CD-ROM を用いることにより、オペレーティングシステムなしの低価格のサーバ用ハードウェアを購入(ただし CPU は 64 ビット仕様)して、半日程度あれば、オペレーティングシステムの導入から、バックグラウンドで動かすデータベース管理ソフトウェア、アドオンのソフトウェア (postGIS など)、ジオウェブ作成ソフトウェア (MapServer, OpenLayers など) の導入インストール作業が可能である。

具体的なインストールの流れは、最初にオペレーティングシステム (OS) なしの PC を用意する。CPU がサーバ用には 64 ビットである場合が多いが、32 ビット CPU かどうかでインストールパッケージも異なることに注意する。本論では 64 ビット CPU のマシンについて記述する。CentOS 5.4 のインストールイメージをダウンロードし、インストールパッケージの表示に従って OS をインストールする。次に Web サーバとして Apache をインストールする。c および c++ 言語等のコンパイラ gcc などのインストールを行う。その後に、データベー

ス管理ソフトウェアとして、PostgreSQL をインストールする。投影法変換ツール proj 等をインストールする。PostgreSQL に地理情報を扱い易くするため、postGIS をインストールする。ライブラリ類を追加し、PostgreSQL 上に PostGIS を組み込んだテンプレートを作成する。ここまでで、地理情報(緯度経度付きデータ)をデータベースで扱う準備が整った。

つぎに MapServer をインストールするのに必要なパッケージの導入を行う (libpng-devel, freetype-devel, gd-devel, curl-devel, agg-devel, libtiff-devel, python-devel, numpy, gdal-array, libgeotiff, liviconv, gd)。これらのライブラリをシステムに反映させるため、ldconfig を実行させる。ここまでで MapServer のインストール環境が整うので、MapServer のインストール作業を行う。MapServer を利用するための作業環境として、作業用ディレクトリを生成する。

MapServer で、地図情報を登録したあと、スクリプト言語 JavaScript で配信して、クライアント側が通常の web ブラウザを用意するだけで、プラグインなどの作業をしなくても地図表示が可能になるように、OpenLayers をインストールする。以上で、MapServer+OpenLayers で地理情報の配信が可能になった。

あとは、サーバとしての作り込みになる。まず、ウイルス対策ソフトウェアの導入として、ここでは Clam Antivirus を導入する。その後は早速、ウイルススキャンを実行する。

以降は、ジオウェブサーバを実際に作り込んでいく作業を述べる。ジオウェブ構築に必要な地図や画像データなどは、LinuxOS の場合、"/opt/geoweb" ディレクトリに格納するので、ファイル属性を MapServer が参照できるように変更する。次に現場データ登録用にデータベースを作成する。perl 言語を使えるように環境を整備 (DBDpg, Text-CSV, Text-CSV_XS, Jcode をインストール) する。このあと、LinuxOS では、/var/www とする web サーバの環境構築を行う。Apache の再起動を行い、環境設定をシステムに反映させる。ここまででジオウェブに基本地図が導入され、現場データ(位置情報の緯度経度情報付き)の登録が可能になって、ジオウェブサーバとして機能するようになった。ネットで公開すれば、ネット越しに各種情報をクライアントがブラウザ出来るようになる。(必ずしもインターネットに接続しなくとも、LAN に接続して内部利用のサーバとして運用することも、サーバ内でクライアント用ブラウザで利用することも出来る。)

衛星データをジオウェブの情報として発信するためには、購入データの幾何補正やフォールスカラー画像合成などの処理を行った後に、Tiff 画像形式等で出力しなければならないので、GRASS パッケージ等の導入が必要になる。

試作したジオウェブをクライアントのインターネット

ブラウザで閲覧した例を Fig.3 に、ジオウェブ作成手順マニュアルとその改訂増補版の CD-ROM の外観を Fig.4 に示す。

V 実証実験 (N 土地改良区連合)

1 ジオウェブの規格の実用性を試すための実験^{7),12,13,15,17,19}

ジオウェブは、WWW の情報規格からいわば派生した位置情報付きの情報発信であるともいえるが、単体の地理情報システムで実現していた緯度経度付きの地図画像、線画データの配信がインターネットでうまく伝達で

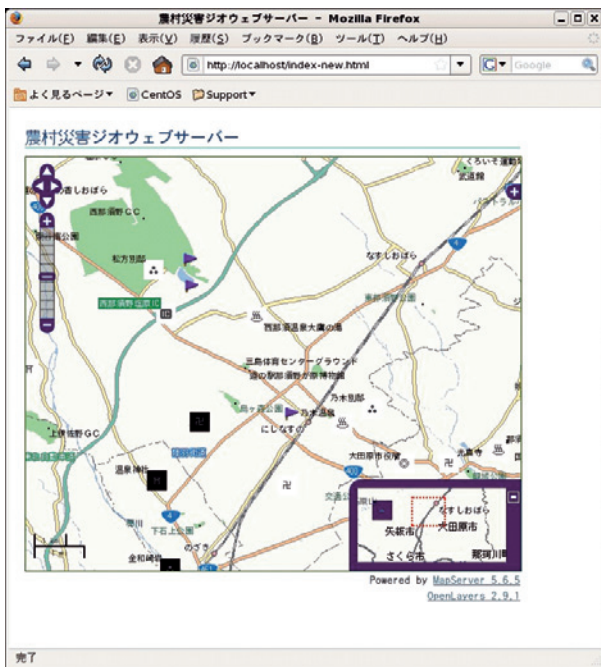


Fig.3 試作したジオウェブをクライアント用インターネットブラウザで閲覧した例

A sample image in a client's browser from the prototype GeoWeb



Fig.4 ジオウェブ作成手順マニュアルとその改訂増補版の CD-ROM

A manual how to implement a GeoWeb server and its revised CD-ROM

きて、クライアントのブラウザ上できちんと正しい位置関係で重ねられるか、実用的な描画速度で描画できるかなどの点は、確かめる必要がある。ブラウザにも一般ユーザが使っている WWW 用のブラウザで表示する場合と、WMS (Web Map Service) などの位置情報規格の配信レイヤーを表示する専用閲覧ソフトウェア (たとえば Quantum GIS) の両方で確認したい。TCP/IP プロトコルのインターネット技術の歴史は、理論家が否定的であった音声、画像、動画の転送を実際に行ってみて、改良を加えながら発展してきたので、ジオウェブ技術も同じように実証実験を行って問題点を調べて、改良していく必要があると考えた。

2 実験サイトのニーズ

実証実験を計画するにあたって、ジオウェブの潜在的なニーズがある地域を選定した。具体的に選んだ地域は、関東地方の土地改良区で、夏に雷雨が多く、地形的に一定の地表面流出が幹線水路に流れ込むので、水路があふれないように河川放流ゲートの開放や流入したゴミを取り除くスクリーンの清掃に気を遣う地区である。関係する自治体の防災担当係、消防、気象官署など、縦割り行政の中で情報共有をして、局地的な洪水が発生しないように、また、住民の避難などにも役立てたいという地域である。土地改良区の職員数も最小限の人員になっているので、夏の夕方に雷を警戒して水路監視操作パネルに監視員を置いた上に、実際のゲートはきちんと閉閉しているか、流入したゴミを取り除く必要があるかなどを現場に実際に確認に行く必要があり、そのような現場に出る人員まで毎日配置できるほどの余裕がなくなっているのが現状である。操作パネルの監視員がいったん現場に行ってしまうと、操作パネルを監視することが出来なくなってしまうという問題が生じている。そこで情報技術を用いて、関係機関と情報交換しながら、水路の安全管理も行いたいし、出先から水路の状態監視もしたいなどの要望があることがわかっている。

そこで、関係機関が持つ固有の情報、例えば、土地改良区は水路の路線図、ゲートの位置や開度情報、気象官署は雷雨の雨量などを、それぞれの機関がジオウェブを立ち上げて、情報公開、情報共有することを計画した。

3 実験サイトの実験条件の調査

実証実験サイトの実験条件の確認を現地で行った。まず、インターネットの接続環境は、もともと存在していた LAN から外部へ出ていくように接続され、ファイアウォールなしにローカルルータに固定 IP アドレス (インターネットのグローバルアドレス) を割り振っていて、ルータの DHCP 機能により、電源が入って LAN に接続されているルータ配下の機器に対して、その都度動的にローカル IP アドレスを割り振っている。LAN に接続しているデータベースサーバには、セキュリティ対策が、

導入初期のものしか施されておらず、SQL インジェクションなど、外部から不正に情報を盗み出すなどの、ハッカー対策は不十分であった。情報セキュリティ対策を現在の水準まで引き上げるには、余分なコストがかかることと、これらを見捨てずにジオウェブサーバを LAN に接続することにより、他の機器に対する影響や情報流出など悪影響が出るのが考えられ、それを避ける必要があった。

一方、土地改良区の固有の情報は、用水の使用量と料金の課金情報などで、個人情報保護の観点から公開は難しいので、公開可能なものとして用水路線図を用いることにした。気象官署の気象データも公開されているが、表形式のデータであったり、既存の WWW サーバから jpg 形式などの画像で配信されていて、衛星画像などで用いる幾何補正処理済み位置情報付き画像ではなく、受け取ったデータを WMS などのジオウェブ用データで再配信することも難しい。そこで、著者自ら雨量計を取り付けて雨量観測を行うことにした。時期的に夏を過ぎて実験を実施したため、実証実験はまず、他の地区で夏の間に観測した実測データとその積算雨量を用いることにした。

4 仮想実験の内容

ジオウェブを複数台立ち上げて、クライアントからその情報を閲覧する実験を計画した。土地改良区内の LAN にジオウェブを設置することが、情報セキュリティの観点から難しいので、仮想的な環境で実験を行うことにした。1 台目のジオウェブサーバは、マニュアルを作成した LinuxOS で作成し、ベースマップとして、オークニー社から MapServer 用に販売されている日本地図を収録した。この販売されている地図は、レイヤー数が非常に多く、クライアントのブラウザで表示する際に描画時間がかかりすぎるので、簡略化したデータのみで形成するレイヤーも用意した。その他に、ALOS 衛星の AVNIR-2 データのフォールスカラー画像を登録した。現場データとして、積算雨量のグラフを指定した緯度経度位置に登録し、ブラウザ画面で青旗印を表示して、そこをクリックすると積算雨量グラフが現れるようにした。セキュリティ対策としてウイルス対策ソフトウェア Clam AntiVirus を導入した (Fig.5, Fig.6)。

次に 2 台目のジオウェブサーバとして、マイクロソフト社 WindowsXP OS のノート PC に地図データとして用水路線図データを登録し、WMS (Web Map Service) 配信および WFS (Web Feature Service) が可能なようにした (Fig.7)。

土地改良区など農村部の多くの機関で、インターネット接続には、一般家庭と同様に、外部からインターネットルータに固定 IP アドレスを割り振って繋ぎ、その配下には動的にローカルに IP を振る DHCP 機能で接続しているため、ジオウェブサーバを接続して、インターネッ

トの世界 (外部) から、ローカルルータ内部にあるジオウェブのページを見るには、ルーター下の WWW サーバ Apache 用にポート番号 80 を設定して、インターネットの外部から web ページ閲覧のリクエストが来た場合にジオウェブのページに誘導するように、静的 IP マスカレード接続の設定をローカルルータに対して行う

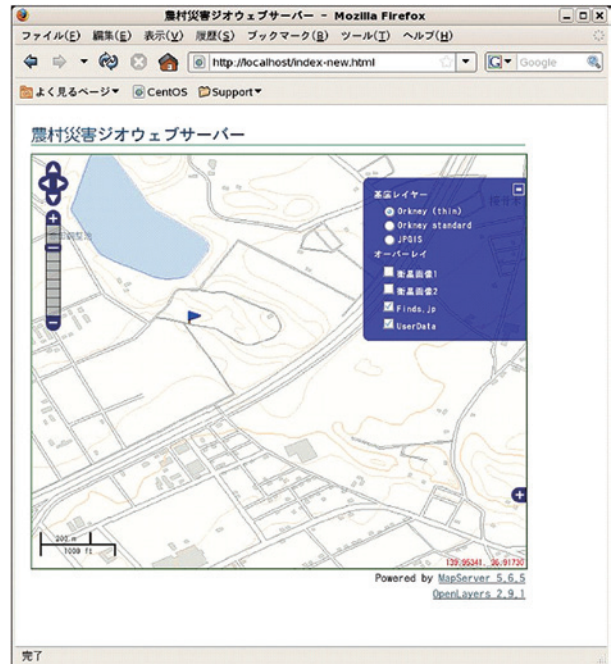


Fig.5 1 台目のジオウェブに N 土地改良区の現場データを登録した例 (画面中央の青旗印)

A sample registered in situ data indicated as a blue flag mark in the center of the image for the No.1 GeoWeb



Fig.6 1 台目のジオウェブの画面の青旗印をクリックして現れる積算雨量図

A total rainfall chart come out when the blue flag mark clicked for the No.1 GeoWeb

必要があった。

実験は、土地改良区などの農林関係の機関の状況を模して実験を実施した。具体的には、MAFFIN (Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries Research Network, 農林水産省研究ネットワーク) に接続した1台目のジオウェブは、MAFFIN 外部のインターネットから、特定の固定 IP アドレスの特定ポートだけが見えるように設定している。無線ローカルルータにその固定 IP アドレスを振り、外部から来た WWW ページ閲覧要求を、ローカルルータに接続した1台目のジオウェブの特定ポートに振り向けるように、ローカルルータ上で IP アドレスマッピングを指定して (静的 IP マスカレード接続) おいた。2台目のジオウェブは、協力企業の民間ネットワークに同様に静的 IP マスカレード接続でインターネットに向けて公開した。

マニュアル化したジオウェブでは、MapServer に加えて OpenLayers を利用しており、クライアントは WMS レイヤーを閲覧する場合でも、通常用いているインターネット閲覧ソフトウェア (ブラウザ) を用いればよい。念のため、クライアント用ソフトウェアとして、QuantumGIS でも閲覧することにした。ここまでで、サーバからの配信準備が整ったので、次にクライアント側の受信実験を行った。

産業技術総合研究所がシームレス地質図を、防災科学技術研究所が地すべり地形分布図をジオウェブの WMS レイヤーとして試験配信しており、改めてデータ登録しなくても利用が可能であったため、それらのデータレイヤーを活用した。インターネット上で先行して WMS 配信を行っている農研機構近畿中国四国農業研究センター



Fig.7 2台目のジオウェブから配信する N 土地改良区の用水路線図

A route map of irrigation canal in N land improvement district from the No.2 GeoWeb

の FINDS サーバーの基盤地図情報と、シームレス地質図、地すべり地形分布図、今回作成したジオウェブの日本地図、もう一台のジオウェブから配信している用水路線図および現場データとして積算雨量グラフを、クライアントのブラウザで重ねて表示する実験を実施した。

最初は WMS レイヤーの測地系の違いから、海岸線が最大で 200m 程度のズレが生じたため、測地系を世界測地系測地成果 2000 に変更した。このほか、配信側の WMS レイヤーにあまり多くのレイヤー数の情報を盛り込むと、クライアントの描画に時間がかかるので、適切な情報量にする方がよい。

ジオウェブサーバーは、WWW の一種と考えれば、インターネット上で公開するときに、Web の情報セキュリティ対策を考慮しなければならない。専門家にネットのセキュリティ監視を依頼するならば、サーバの運用コストとして考慮しなければならない点である。また、既存の構内 LAN にジオウェブを接続しようと計画して調査して判明したのは、個人情報である課金情報データベースサーバなどが、構内 LAN に接続され、当初はインターネットへ直接つながっていなかったと思われ、そのため、データベースの情報セキュリティ対策が設置当時のままであることがわかった。インターネットへの接続も、ファイアウォールの設定が、システム導入当時の設定のまま古い水準に留まっていた。ジオウェブの普及をめざすには、今後、既存の情報システムのセキュリティレベルを現代の水準まで引き上げる必要がある、普及時のコストとして見込んでおく必要が考えられる。

実証実験で作成した具体的な例は、Fig.5 に N 土地改良区の現場データを青旗印で登録した例図を、Fig.6 にその登録したデータを青旗印をダブルクリックして現れる図を、Fig.7 に 2 台目のノート PC のジオウェブから配信する用水路線図を示した。QuantumGIS でも同様に表示されることを確認した。

VI 東日本大震災災害情報共有プラットフォーム

1 概要

実証実験のために試作した LinuxOS (CentOS) のジオウェブは、WWW と同じようにネット上に分散して配置されたサーバから発信されたデータを、クライアントはブラウザ上でまとめて閲覧することが可能である。しかも、ジオウェブの場合は自動的に地理的位置合わせをした状態でクライアントが情報を閲覧できる。したがって、災害情報として公開データを持つ機関がそれぞれジオウェブでデータ配信をすれば、災害情報共有が可能になるプラットフォームとして活用できるはずである。

具体的には、2011 年 3 月 11 日に起きた東日本大震災の被災地域を支援するために関係者で情報共有する仕組みに改修した。登録した情報は、著作権や個人情報保護の観点から所内限定の LAN 上で閲覧できるようにし、

情報登録もサーバー管理者のみに限定した。所内用の LAN で閲覧できるだけでも、関係部署間で情報共有が図れると考えた。

2 試作レイヤー構成とデータ

改修したレイヤーは、内部地図として宮城県を登録し、初期表示画面に JR 仙台駅北側にある東北農政局の入る合同庁舎付近を中心座標とした。表示速度を考慮して情報量を落とした簡易版（内部レイヤーが少ない）と、全部の情報を表示する版とを用意した。また、RESTEC¹¹⁾（一般財団法人 リモート・センシング技術センター）が公表した災害前後の衛星画像地図（GeoPDF 形式）は、地理上の位置情報つき画像であるが、ジオウェブで直接扱えない形式であるため、通常の geotiff 形式にして、阿武隈川河口近くの画像のみ登録した。国土地理院基盤地図情報については、近畿中国四国農業研究センターが WMS 配信している FINDS サーバの情報も表示する選択ボックスも設けた。加えて、土地改良区等が日常の施設管理で用水路の補修必要箇所の調査などを行った場合に、位置情報付きの現場写真などを登録可能なように「現場写真」という選択ボックスも設けた。この現場写真の登録は、サーバー管理者しか行えない。登録した現場データは、数種類のアイコンから選んだアイコンを表示し、クライアントがダブルクリックすると、本体の写真が現れるようになっている。

3 実際の画面

試作した東日本大震災ジオウェブの初期画面を、Fig.8 に示す。宮城県 JR 仙台駅周辺を中心に表示される。

近中四農研センターが、WMS 配信している国土地理院基盤地図情報を重ねて表示した例が、Fig.9 である。現場データの代わりにサンプルとして松島瑞巖寺マップを登録した例を Fig.10 に、阿武隈川下流部の津波前後の衛星画像 (RESTEC が公開) を重ねた例を Fig.11 に示す。

4 パフォーマンス (使用感)

今回の東日本大震災のようにおおまかに4県にまたがる広域になると、シームレスにデータを扱おうとすると一つのレイヤーの地図データが大きくなり、クライアントのブラウザで表示開始するまでに時間を要する。このため、サーバ上のいくつかのレイヤーに分けておくと、今度は MapServer の表示方式がタイル状にデータを保持するため、非常に広域の地図表示は試作品ではよくできず、さらなる工夫を考える必要があった。衛星画像地図は、フォーマット変換を繰り返しているうちに、表示したときに黒抜きの空白区画が生じてしまう。解決方法は見つかっていない。現場データをサーバー管理者（兼データベースの管理者）に送付してから、管理者が登録するのは、使い勝手が悪く、現場に持ち出したスマートフォン等から直接登録できるシステム開発が求められる。

Ⅶ 結言

ジオウェブをオペレーティング・システムの段階からはじめ、ジオウェブ構築に関わるソフトウェア全てをオープンソース・フリーウェア群で構成するための手順をマニュアル化した。さらに必要なライブラリ群を納めた CD-ROM を作成し、誰でも少しコンピュータに關す

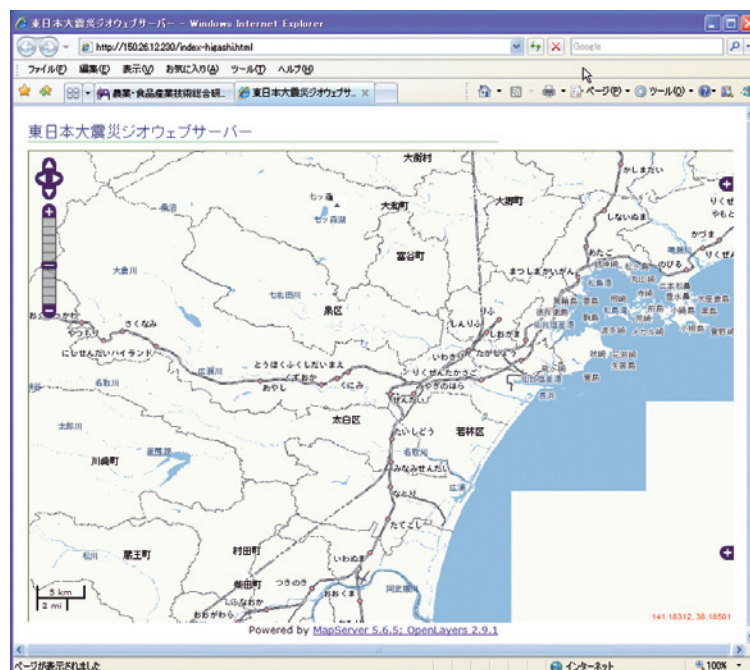


Fig.8 試作した東日本大震災ジオウェブ（宮城県 JR 仙台駅が中心座標）

An experimental GeoWeb for the purpose of helping Higashi-Nippon earthquake recovery

る普通の知識があれば、作成できるようにした。そのジオウェブを用いて、農村地域における情報共有に関する若干の実験を行い、ジオウェブの有効性を示した。

ジオウェブの普及に当たっては、既存の情報システムの情報セキュリティレベルを導入時の水準から現代のレベルに一樣に引き上げることが求められ、そのためのコストも見込んでおく必要があることが、実証実験から判明した。農学分野では、ドベネックの桶の例えで知られている肥料に関する「リービッチの最小律」で桶の中の

水の量（作物収量）が、桶の板の一番低いところ（作物に必要な栄養素、水、温度、光の供給される量）に規定されるが、情報システムの安全度を作物収量に例えると、統合される情報システムの構成要素（データベースサーバ、PC、統合前の個別のネット）の情報セキュリティレベルの一番低いところのセキュリティレベルに全体が規定される。また、ジオウェブはサーバの一種であるので、情報発信に当たっては、情報セキュリティ監視を行い、データベースから個人情報流出などの事態が生じ

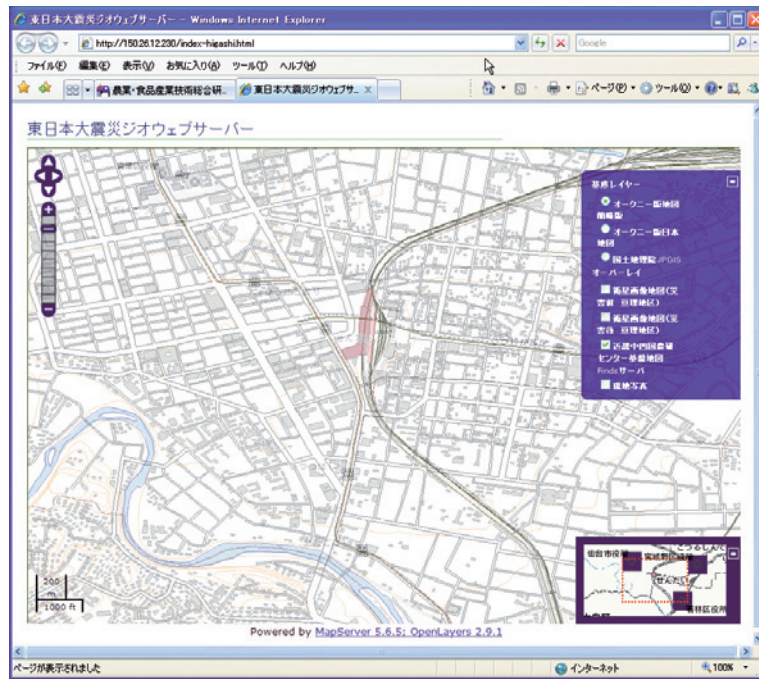


Fig.9 国土地理院基盤地図情報 WMS レイヤー（近中四農研センター）を重ねて見た図
a figure overlaid the WMS layer of GSI's Basic Map(provided by NARO/National Agricultural Research Center for Western Region)

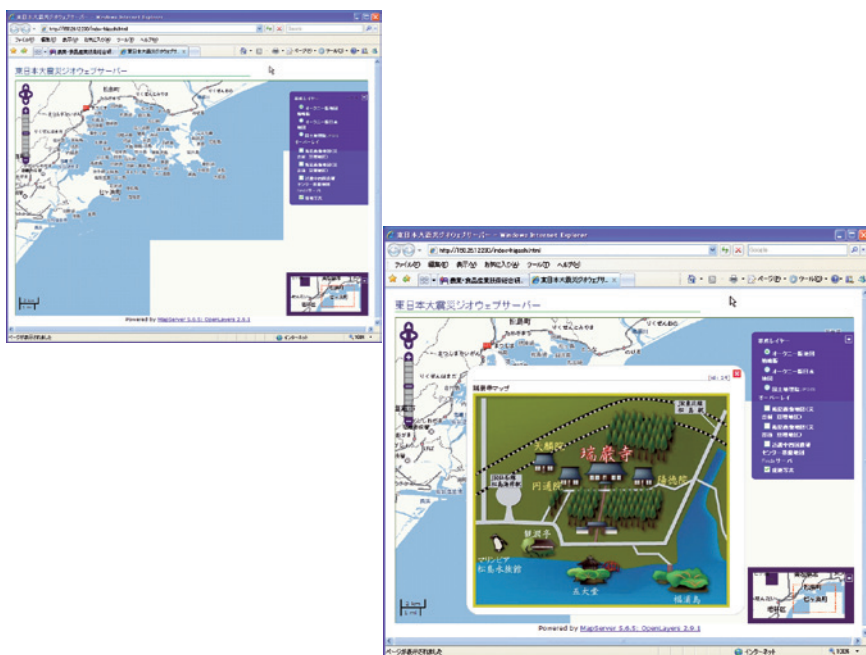


Fig.10 現場データの代わりにサンプルとして松島瑞巖寺マップを登録
To register the map of Matsushima-Zuiganji temple instead of in situ data

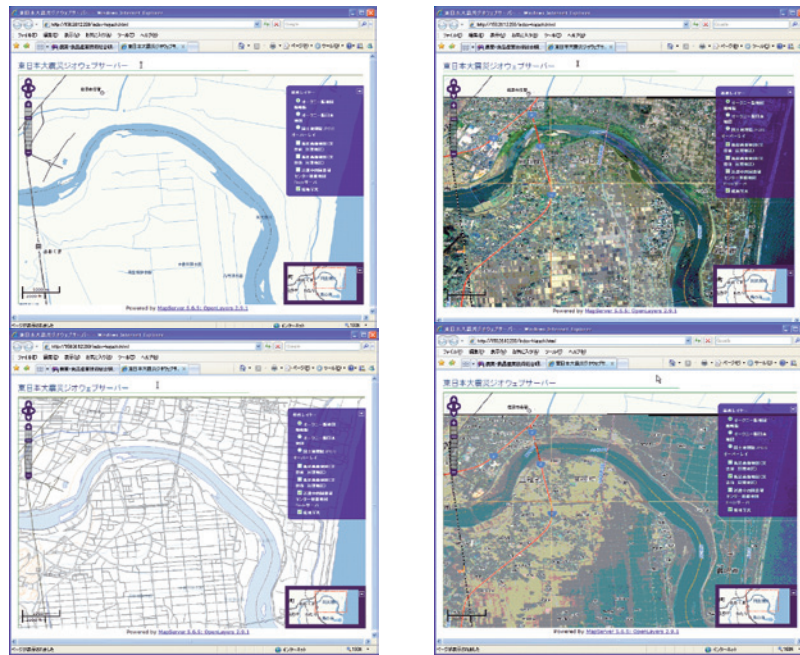


Fig.11 阿武隈川下流部の津波前後の衛星画像（RESTEC が公開）を登録

To register the satellite images (RESTEC) before and after the Tsunami event around the lower Abukuma river

ないようにすることが求められ、このセキュリティ監視コストも見込む必要がある。ジオウェブで情報共有するには、検討段階で、機関固有の情報で公開出来る範囲を整理しておくことも必要である。

参考文献

- 朝日孝輔・井上修・岩崎恒典・植村哲士・勝部圭一・嘉山陽一・林博文・原田英夫・古橋大地・ベンガテッシュ ラガワン・升本眞二・丸田哲也・森亮・山手規裕 (2011) : FOS4G Handbook, 1-230, 開発社, 東京
- Hazzard, E.(2011) : OpenLayers 2.10 Beginner's Guide, 1-351, Packt Publishing, Birmingham
- Jansen, M., Adams,T.(2010) : OpenLayers Webentwicklung mit dynamischen Karten und Geodaten, 5-344, Open Source Press, Munich
- Lake,R., Burggraf, D., Trininic, M., Rae L.(2004) : Geography Mark-up Language(GML) Foundation for the Geo-Web, 7, 54-64, John Willey & Sons Ltd., England
- Kropa,B.(2005) : Beginning MapServer: Open Source GIS Development, 1-416, Apress, Berkeley
- Mitchell,T.(2005) : Web Mapping Illustrated, 1-349, O'Reilly Media, Inc., Sebastopol
- Nayak,S. and Zlatanova,S.(2008) : Remote sensing and GIS Technologies for Monitoring and Prediction of Disasters, 121-178, Springer, Berlin
- Obe, R.O. and Hsu,L.S.(2011) : PostGIS in Action, 176, 334, 371-404, Manning Publications, Stamford
- 大塚恒平・たくほ あきお・丹羽誠・真野栄一・森亮訳・Mitchell, T.(2006) : 入門 WEB マッピング, 1-355, オライリー・ジャパン, 東京
- 山岡弘文・熊谷幸也・雫石和利・佐藤真吾・藤沢泰雄・オートデスク株式会社・木村征爾・濱田義勝・中川貴滋 (2006) : オープンソース GIS - WEB 構築ガイドブック, 1-184, 応用技術, 東京
- RESTEC (2011) : 「東北地方太平洋沖地震」における被災地域の衛星画像地図の無償提供について, URL: <http://www.restec.or.jp/?p=11728>
- Yamada,Y.(2011) : Flood Extent Detection in Paddy Area and Future Plan of Disaster Information Sharing Platform in Rural Areas, Proc. of 34th ISRSE, Sydney, 1-4
- Yamada,Y. (2010) : Web based disaster information sharing platform, "GeoWeb" using open source software and freeware for rural areas, Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Vol.XXXVIII,Part 8, Kyoto, 243-247
- Yamada,Y., Kover,M., Utashiro,K.(2000) : Data retrieval and mapping system with Global Maps for the international statistics on agriculture using Web based GIS tool, Proceedings of Global Mapping Forum 2000, Hiroshima, Japan, 1-9
- Yamada,Y.(2011) : Flood extent detection in paddy area and future plan of disaster information sharing platform in rural areas, Final Report of ALOS PI, JAXA, 1-7
- 山田康晴・歌代和男・マーク・コーバー (1998) : Web GIS ツールを利用した国際農業統計情報利用システム構築の試み, 地理情報システム学会講演論文集, 7, 297-298
- 山田康晴 (2011) : 農村工学分野でジオウェブの実用

化に関する実験とその問題点について，平成 23 年度日本写真測量学会秋季学術講演会論文集，65-66

- 18) 山田康晴 (2011) : 農村地域の防災情報を共有するためのプロトタイプ地理分散協調サーバ，平成 22 年度農村工学研究所成果情報
- 19) Zlatanova,S., Li,J.(2008) : Geospatial Information Technology for Emergency Response, 1-373, *Taylor & Francis*, London

Making Arrangements for the Procedures of GeoWeb Implementation and Its Trials on Information Sharing in Rural Areas

YAMADA Yasuharu

Summary

The GeoWeb is a sort of the modified World Wide Web interconnected geographic information sources and processing services by using Open GIS Consortium's or ISO's standards. But its procedures of GeoWeb implementation have not been well known among irrigation engineers and staffs of land improvement districts, especially using only open source software and operating systems. The author made arrangements for such procedures of GeoWeb implementation and produced some copies of the manual CD-ROM. A land improvement district and an area for the Higashi-Nippon disaster restoration support were selected as its trials on information sharing in rural areas. The author found some obstacles and difficulties, such as informaion network security, personal data protection, its maintenance expenses, for the Geoweb dissemination.

Keywords: GeoWeb, open source software, information sharing, GIS