

有畜複合農業における物質循環システム開発のための窒素フローの解析 十勝地方の畜産・畑作を事例として

竹中 洋一¹⁾・秦 隆夫²⁾

緒 言

北海道の十勝地域は、わが国有数の大規模畑作地域であると共に、酪農を中心とする畜産も盛んな地域である。かつては畜産と畑作の個別複合経営が多く存在していたが、畑作・畜産ともに規模拡大と専門化が進んでいる⁴³⁾⁴⁴⁾。このなかで、畑作部門では化学肥料の多投と有機物施用の減少による地力減退¹⁾、畜産部門では飼料自給率の低下⁴⁾や家畜糞尿処理の困難など、畜産部門と畑作部門間の連携の弱体化に起因する問題が大きくなっている⁴³⁾。

これらの問題の解決のために、畑作部門と畜産部門間の有機的結合を強め、自給飼料を始め畑作副産物や家畜排泄物等の地域資源を高度に活用した物質循環型有畜複合農業システムを構築し、畑地力の増進と家畜糞尿問題の解決を図りながら農業生産力を向上させる必要がある¹⁰⁾¹¹⁾¹⁸⁾¹⁹⁾²⁰⁾⁴³⁾。

地域先導技術総合研究「寒地土地利用型農業における環境保全型・高能率地域複合営農システムの確立(1993～7年度)」²⁵⁾では、有畜複合営農や自給飼料生産拡大および地域資源の高度利用等を目的に、十勝地域に新技術の導入を検討した。そこで、本稿では個別農家や地域、自治体レベルの物質循環(窒素フロー)モデルを構築し、モデル・シミュレーションにより新技術の環境負荷軽減効果を評価し、有畜地域複合営農システムの有効性を提示することを目的とした。

材料および方法

研究対象地域は、十勝地域の中央部に位置し、畑作が中心(農業粗生産額の約80%³⁰⁾)で、畜産は酪農経営がある程度の割合(同約15%(牛乳出荷額))を占め、肉牛飼養(同4%)も存在する、

音更町とした。

<窒素フローの推定方法>

松本らが開発したモデル¹⁶⁾をもとに十勝中央地域に適合できるように再編成した窒素循環モデルを構築した。このモデルは、農作物の生産から出荷、家畜と人間に対する飼料・敷料・食料の供給、農作物副産物と畜産・人間からの廃棄物から生ずる農地投入・環境負荷の各窒素フロー、および農地における窒素の収支を示す構成となっている。なお、放牧草地からの環境負荷は小さいとされているため³⁾、このモデルには組み込んでいない。

各窒素フローを推定するために用いた種々のパラメータは、以下に示した実態調査資料、各種統計資料、研究報告等をもとに設定した。

人口、農家数、作付面積、飼養家畜頭数、農作物収穫量、畜産物出荷量、飼料購入量については音更町³⁰⁾と音更町農協の統計資料および北海道農林水産統計年報²¹⁾の統計データを用いた。農作物主産物の生産量(窒素)は、収穫量に窒素含有率⁷⁾²⁴⁾²⁷⁾を乗じて求めた。農作物副産物の生産量は、主産物に対する副産物生産量の比⁸⁾²⁷⁾を乗じて求めた。

以下、図1の各フローを説明する。

音更町の耕地面積当たりの人口密度に人体1人分の窒素量³⁶⁾を乗じた値を、1ha当たりの人口密度(kgN/ha)として示した。食料として消費される窒素量は、農家生計費統計²²⁾の食料購入量および自給量に窒素含有率⁷⁾を乗じて求めた。堆肥として利用可能な資源である尿尿、生ゴミの排出窒素量は「河川汚濁のモデル解析」¹³⁾より求めた。また、それらの還元率は「モデル農村地区における有機物循環の実態の解明とその評価」³²⁾における数値に、音更町の実態を勘案して求めた。[人間][気圏]へのフローは、食料消費量から尿尿、生ゴミの排出窒素量を差し引いた量である。

[農作物主産物][家畜]へのフローは、自

平成13年12月20日 原稿受理

¹⁾ 現畜産草地研究所

²⁾ 現近畿中国四国農業研究センター

給飼料およびビートパルプである。〔農作物副産物〕は作物の根、茎葉などである。このうち麦稈の大部分、豆殻の一部は敷料として〔畜産廃棄物〕へ流れ、〔家畜〕の飼料となる麦稈、豆殻も少量ある。豆殻の一部は焼却され〔気圏〕へ流れる。音更町全体でみると敷料(麦稈)の生産は消費を上回っているため、敷料は全量町内で自給していることになる。ビートパルプについても麦稈と同様に生産が消費を上回るため、同様な扱いとした。麦稈の町外への売却は〔農作物副産物〕〔農畜産物出荷〕のフローに示される。

各畜種の耕地面積1ha当たりの飼養頭数に平均的な1頭当たりの体重²⁶⁾および窒素含有率⁷⁾を乗じた値を家畜密度として示した。購入飼料の窒素含有率は、現地における給与実態に則した平均的な数値を各畜種毎に設定した。

〔家畜〕〔家畜廃棄物〕には家畜糞尿およびそれ以外の排泄窒素、給餌・採食ロス、サイレージ調製ロス¹⁷⁾、変敗サイレージが含まれる。家畜糞尿の窒素量は築城らの推定プログラム⁴¹⁾により、糞と尿に分けて推定した。

酪農における糞尿処理方法については、その大部分を占めるつなぎ型牛舎で一般的に用いられている、バークリーナによる固液分離方式を想定した。なお、音更町ではフリーストール牛舎の糞尿においても固分は堆積され、堆肥として利用されている例がほとんどである。施設としては、現地の現状から、堆肥盤(屋根なし)と地下ピット方式の尿溜(雨水等によりオーバーフローする場合もある)が設置されているものとした。また、肉牛と馬の糞尿については堆肥化を想定し、豚と鶏は飼養頭数が少ない(表1)ので、この堆肥化の中に包含した。

〔畜産廃棄物〕〔水圏・地圏への廃棄〕は堆肥化過程および貯留中において流出する部分とサイレージ廃汁¹⁷⁾である。〔畜産廃棄物〕〔気圏〕は牛舎(11%)²⁹⁾および堆肥化過程³¹⁾、尿の貯留中と農地への散布時(25%)⁴⁾において揮散する気体²⁾に含まれる窒素、およびサイレージ化過程における排ガス¹⁷⁾からの窒素である。飼料作物の収穫ロス¹⁷⁾は〔農作物副産物〕に含め、〔農地投入〕に流れるものとした。

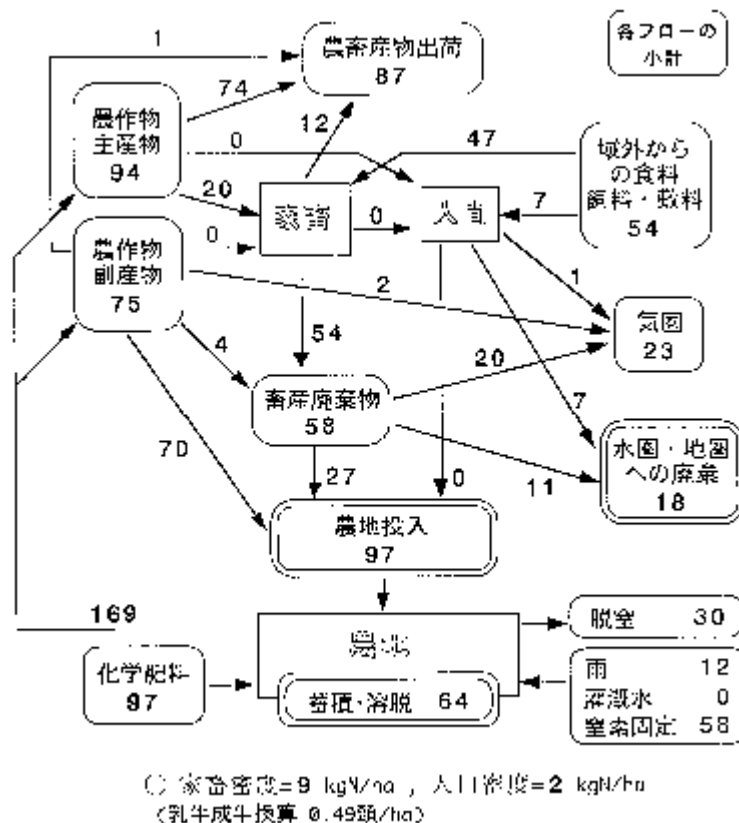


図1. 音更町耕地1ha当り窒素フロー1995年 (kg N ha⁻¹ year⁻¹)

[農地投入]される堆肥の窒素量は、各畜種の堆肥の窒素含有率⁴⁰⁾および実態調査報告³⁹⁾より堆肥全体の窒素含有率を1.9%に設定し、糞および飼料ロスと敷料の合計に堆肥化後の乾物分解率⁴⁰⁾を乗じたものに窒素含有率をかけて求めた。乳牛の尿のうち、貯留中に揮散、流出¹²⁾²⁸⁾する窒素量を差し引き、残りを[農地投入]とした。[家畜廃棄物]から[農地投入]および[気圏]への窒素量を差し引いたものを[家畜廃棄物][水圏・地圏への廃棄]とした。

農地における窒素の収支系には、インプットとして[農作物副産物]と堆肥などの[畜産廃棄物]を合算した[農地投入]の他、[化学肥料]⁶⁾³⁸⁾、[雨]¹⁶⁾、[灌漑水]¹⁶⁾、[窒素固定]²⁶⁾⁴⁶⁾があり、アウトプットとして、[農作物主産物]と[農作物副産物]へ流れる作物吸収と、[脱窒]²⁶⁾⁴⁶⁾がある。但し、この[脱窒]量は[農地投入]後に発生するため、[気圏]へのフローには算入していない。また、農地に蓄積したり、溶脱により農地から流出する経路もあるが、定量的な説明が充分にはなされていないため、ここでは[蓄積・溶脱]

にまとめ一体として取り扱うこととした¹⁶⁾。

本研究では、この窒素フローモデルを用い、まず、1)音更町の町全体における窒素フローの実態を明らかにした。2)十勝中央地域における代表的な酪農家と畑作農家のモデルを想定し、その窒素フローの特徴を明らかにした。さらに、3)それらの酪農1戸と畑作2戸が連携した有畜複合農業モデル、4)酪農家モデルにおいて飼料作を拡大し、マメ科牧草のアルファルファを導入した場合、あるいは、5)酪農家モデルの自給飼料作を増やさずに飼養頭数を倍増させた場合、そして、その倍増により問題が大きくなる糞尿処理を改善した場合の、それぞれのシミュレーションにおける窒素フローを推定した。また、6)音更町内において、農業の中で酪農が主体の地域における窒素フローを明らかにし、7)その地域に対して新技術を導入した場合の環境負荷軽減効果をシミュレーションした。

これらの各研究ステップ相互の関連についての模式図を図2に示した。

各研究ステップの詳細は以下のとおりである。

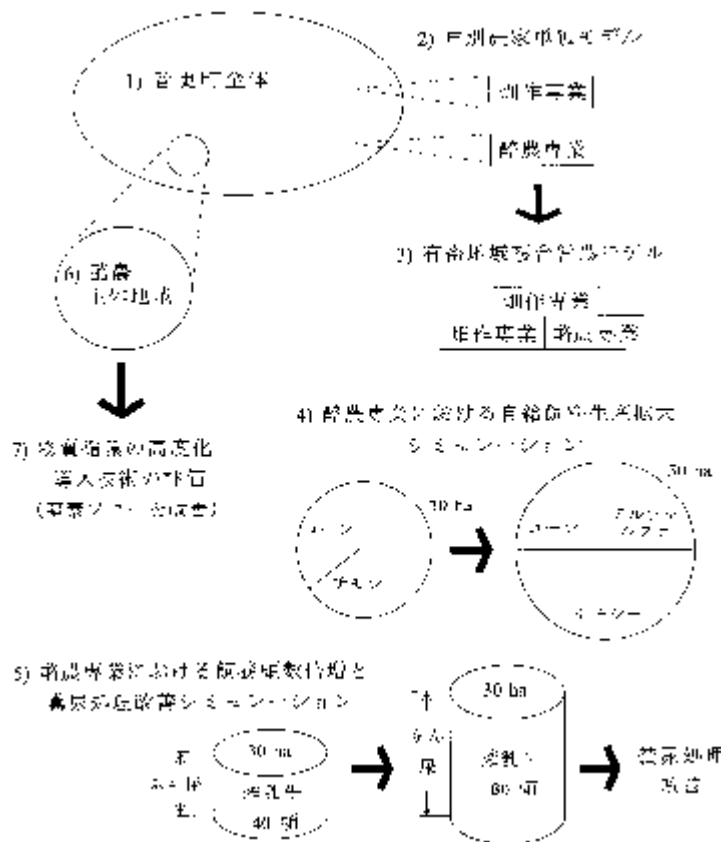


図2. 音更町および農家モデルにおける窒素フローの解析対象およびシミュレーション設定の概略

1) 音更町全体の窒素フロー

十勝支庁・音更町全体の窒素フローを統計データ(1995年および1998年)をもとに推定した。

2) 酪農家単独モデルおよび畑作農家単独モデルにおける窒素フロー

十勝中央地域における代表的な酪農家モデルおよび畑作農家モデルを設定し、これらにおける窒素フローを推定した。

酪農専業の農家単独モデル(D40モデル)は、飼養頭数80頭(経産牛46頭(搾乳牛40頭)、育成牛34頭)、飼料作面積30ha(永年牧草・チモシー単播20ha・単収34t/ha、デントコーン10ha・単収50t/ha)、経産牛1頭当たり乳量7,400kgの設定とした。糞尿処理については音更町全体と同じパラメータを設定し、敷料は全量外部依存し、堆肥、尿は全量自己耕地内に投入するものとした。

畑作専業の農家単独モデル(Fモデル)は耕地面積30ha(小麦10ha、豆類6ha、ばれいしょ7ha、てんさい7ha)で、畜産との間で麦稈や堆肥の交換のないモデルを設定した。

3) 畑作と酪農の地域複合営農モデルにおける窒素フロー

D40モデル1戸とFモデル2戸が、麦稈と堆肥の交換により連携した場合の有畜複合農業における窒素フローを検討した。畑作から畜産へ敷料として麦稈を全量供給し、畜産からは全堆肥産量の50%を畑作へ供給するモデルとした。

4) 自給飼料生産を拡大した酪農経営モデルにおける窒素フロー

D40モデルの飼料作を30haから50haに拡大し、窒素施肥量を低減できる上、採食性が高く高蛋白質のマメ科牧草アルファルファを導入したモデル(ALモデル)における窒素フローを検討した。飼料作面積はイネ科牧草(チモシー)25ha、デントコーン12.5ha、アルファルファ単播12.5ha・単収30t/haを想定した。

5) 飼養頭数倍増した酪農家単独モデルにおける窒素フロー

D40モデルの飼養頭数を経産牛・育成牛ともに2倍に規模を拡大した場合(D80sim:搾乳牛80頭)の窒素フローを検討した。個体乳量および自給飼料作面積の合計と単収は変えないが、作付け内容はチモシー10ha、デントコーン20haとした。この規模の場合、フリーストール牛舎になるのが

一般的であるが、1995年に調査した音更町の搾乳牛舎にフリーストール牛舎を導入済みの全酪農家15戸の内、糞尿をスラリー処理している酪農家は1戸のみであった。したがって、糞尿処理は堆積による固液分離を想定し、D40モデルと同じパラメータを使用した。さらに、糞尿処理を改善し、堆肥の75%を酪農経営外に移出するモデル(D80ImSim)を検討した。

6) 酪農主体地域の窒素フロー

音更町内の酪農が農業生産の過半を占める地域(S地域)について、農家の全数調査(1995年)に基づき、その窒素フローを推定した。

7) 酪農主体地域へ新技術等を導入した場合の物質循環上の環境負荷軽減効果

S地域の窒素フローに対して、以下の導入技術を組み込んだモデルを設定し、地域の物質循環における環境負荷軽減効果を検討した。ライ小麦の導入²⁵⁾、「ほくのう・S」¹⁵⁾によるアンモニア処理麦稈の飼料利用、堆肥調製システム(堆肥堆積運搬車および堆肥切り返し機²⁵⁾やその他の糞尿処理の改善。これらは、本地域先導技術総合研究において、有畜地域複合の物質循環システム構築を計るため、畑作と畜産の結合関係を強める基幹新技術として、現地試験に供したものである。

新技術等の導入モデルの前提として、小麦の作付全面積をライ小麦に転換し、ライ小麦栽培用の化学肥料の半分を畜産廃棄物(乳牛尿分を中心に:スラリー等の液状ふん尿混合物の利用も可能である)の利用で代替する、ライ小麦栽培により増加した麦稈の全量をアンモニア処理して飼料利用する、堆肥調製システムの導入、および堆肥盤への屋根かけ等による汚水流失防止対策、尿の曝気など家畜排泄物の環境保全的処理を適用し、尿の液肥化により飼料作における化学肥料施用量の削減および良質化した堆肥の域外での利用が増加するものとした。

結果および考察

1) 音更町全体の窒素フロー

音更町の農業概要を表1に、町全体の1995年1年間における窒素フローを図1に示した。

[農地投入] 97kg/ha、農地での[蓄積・溶脱] 64kg/ha、[水圏・地圏への廃棄]は18kg/haで

ある。環境負荷のなかで問題の大きい〔水圏・地圏への廃棄〕のうち、〔畜産廃棄物〕由来のものが11kg / haと60%を占めており、酪農を中心とする家畜排泄物の適正な処理・利用の重要性が示されている。また、北海道の多くの地域において共通する実態として、特に十勝において顕著であるが、ほとんどの堆肥盤において屋根が無い場合が多い³⁹⁾。雨ざらしの糞尿に起因する窒素流亡が問題を大きくしていると考えられる。

農地での〔蓄積・溶脱〕の64kg / haは、松本¹⁶⁾による茨城県牛久沼集水域（畑作・水田地域）72kg / haよりやや低い程度であり、同県里美村（山間、家畜密度24kg / ha：牛が多い）の109kg / haよりかなり低くなっている。里見村と音更町の窒素フローは全般的には似かよっているが、音更町の方が家畜密度が低いことにより、〔蓄積・溶脱〕等が低くなったものと考えられる。また、音更町

では酪農家が畑作の中に点在している地域が多く、麦稈と堆肥の交換もかなり行われており、現状のところ農地における窒素過剰は、音更町全体としては深刻な状況には至っていないものと判断される。

しかし、音更町の農地全体に畜産廃棄物が均等に散布されていれば問題は小さいが、酪農家が集中している地域が存在している。酪農家の牛舎周辺、飼料作圃場では、家畜排泄物が集中的に投入あるいは堆積されている場合があり、窒素の河川等への流亡や農地への過剰蓄積が問題となる地点が存在するものと考えられる。

音更町全体の窒素フローの1995年と1998年における比較を表2に示した。1998年は天候に恵まれたため、主要農作物である小麦、馬鈴薯、てん菜の単収が高く（表1）、主生産量、副生産量、農産物出荷は増加している。一方、酪農経営では

表1．音更町の概要および農業統計

(1) 人口，耕地面積

年	人口（人）	農家人口（人）	耕地面積（ha）
1995	37,822	4,607	20,680
1998	39,341	4,228	20,563

(2) 農家戸数（1995年）

畑作	酪農	肉牛	水田	野菜	その他	計	（1998年）
742	108	5	34	56	17	962	895

(3) 作付面積

年	稲	小麦	てん菜	豆類	馬鈴薯	雑穀	スイートコーン	野菜	牧草	デントコーン
1995	178	6,172	3,742	3,584	2,550	141	566	632	1,988	948
1998	148	6,608	3,718	3,619	2,490	81	489	597	1,997	859

(4) 10a当たり収量

年	小麦	てん菜	豆類	馬鈴薯	スイートコーン	牧草	デントコーン
1995	383	5,540	272	3,900	1,260	3,510	5,450
1998	504	6,064	208	4,170	965	3,560	5,180

(5) 家畜飼養頭数（乳牛成畜換算*）

年	乳牛	肉用牛	馬	豚	採卵鶏
1995	7,871	1,993	138	95	129
1998	7,584	2,077	143	144	98

(6) 牛乳出荷量（t）

年	牛乳出荷
1995	42,246
1998	42,935

* 家畜の乳牛成畜換算は、乳牛経産牛を1として、排泄窒素量より換算した。

資料) 平成10年度音更町農業の概要（音更町発行）

1995年に比べ1998年は、出荷総乳量はほとんど変化していないが、デントコーンの作付け面積が減少し、単収もやや少なかったため、町外からの購入飼料が増加している。家畜密度はほとんど変化していない。

これら等の影響から1995年に比べ1998年は、[農畜産物の出荷]が12kg/ha多く(以下+12kg/haと記す)、農地への[蓄積・溶脱]が5kg/ha少ない(以下-5kg/haと記す)。しかし、[畜産廃棄物][気圏][水圏・地圏への廃棄]へのフローにはほとんど変化がなかった。[気圏]と[水圏・地圏への廃棄]へのフローに対し、農産物生産の変化による影響は小さく、家畜密度に影響されるのではないかと推測される。

2) 酪農家単独モデル(D40モデル)および畑作

農家単独モデル(Fモデル)における窒素フロー

D40モデルにおける1年間の窒素フローを図3に示した。ほぼ全量外部導入する敷料は[域外からの飼料・敷料][畜産廃棄物]のフローで示している。[畜産廃棄物]259kg/ha,[農地投入]203kg/ha,農地での[蓄積・溶脱]164kg/ha,[水圏・地圏への廃棄]47kg/haと過大な量が推定された。[農地投入]は一般的な投入限界⁵⁾³⁷⁾の2~3倍と過剰である。農地での[蓄積・溶脱]

が大きく、[水圏・地圏への廃棄]による環境への悪影響が問題となると考えられる。また、農地への窒素蓄積は自給飼料中の硝酸態窒素濃度の上昇にもつながり³⁷⁾、牛乳生産や家畜繁殖へ悪影響を及ぼす可能性がある。

乳牛成牛換算の家畜密度は2.1頭/ha、1頭当たり飼料作面積は0.48haである。乳牛成牛換算の飼養密度が1ha当たり2頭以上になった場合の問題点が明示されていると考えられる。なお、1頭当たり飼料作面積は北海道平均の0.58ha/頭²³⁾(都府県平均は0.10ha/頭)よりもやや狭いモデルとなっている。

また、このモデル設定では堆肥盤に屋根は無いものの、尿溜の設置を想定している。しかし現実には、尿溜が無い、あるいは、有っても堆肥盤等の雨水や搾乳施設等の洗浄水により恒常的にオーバーフローしている例も多いため、尿溜の増設や堆肥盤からの汚水流出防止対策が急がれる。

築城ら⁴²⁾(松本¹⁶⁾が追加計算)は農林水産省牛乳生産費調査(1990)の個票データに基づく、北海道の酪農家(家畜密度1.4頭/ha)の[蓄積・溶脱]は100kg/ha、都府県の酪農家(家畜密度6.3頭/ha)の[蓄積・溶脱]は354kg/haとしている。D40モデルの[蓄積・溶脱]と比較すると、

表2. 音更町の窒素フロー(kgN ha⁻¹ year⁻¹)

	1995年	1998年	1998 - 1995
農作物生産	169	181	+ 12
主産物	94	100	+ 6
副産物	75	81	+ 6
農作物出荷	74	82	+ 8
家畜密度(頭/ha)	0.494	0.488	- 0.006
主産物 家畜	20	18	- 2
域外からの飼料	47	50	+ 3
畜産廃棄物	58	59	+ 1
気圏へ	23	22	0
水圏・地圏への廃棄	18	18	0
人間	7	8	+ 1
畜産廃棄物	11	11	0
畜産廃棄物 農地	27	27	+ 1
副産物 農地	70	75	+ 4
農地投入	97	102	+ 5
化学肥料	97	96	- 1
窒素固定	58	60	+ 2
農地における蓄積・溶脱	64	59	- 5

定することも可能である。あるいは、畑作酪農複合経営のモデルとして、畑作20ha、経産牛15頭、飼料作10haを想定した場合も、このシミュレーションとha当たりではほぼ同じ窒素フローとなる。

さらに、同じ経営規模のモデルで酪農家1戸+畑作農家1戸のシミュレーションを行ったところ、環境への窒素負荷はまだかなり大きく、6)で述べる酪農主体地域における窒素フローに近い値であった。D40およびFモデルで設定した頭数・耕地面積程度の個別経営を想定した場合、酪農家1戸に畑作農家2戸程度以上が連携し合わないと、窒素循環における問題の改善効果は小さいものと考えられる。

また、酪農家1戸+畑作農家1戸のシミュレーションは経産牛23頭、飼料作15ha、畑作15haの酪農畑作複合経営とみなすことも可能である。

なお、現実には、乳牛の尿は酪農家の飼料作圃場のみへ投入されており、そこでの窒素蓄積および流出の問題は残されている。畑作圃場と酪農家の草地および飼料作物圃場との交換耕作を促進すべきである。また、畑作物への尿の利用が現場

でも許容されるような技術開発が求められる。

個別の相対取引で行われている酪農家と畑作農家との麦稈と堆肥交換は、昔からの集落単位の結びつき、あるいは縁故関係であり、音更町では減少する傾向にあった。これを安定的に推進するには、公的機関が関与し契約制を採用するなどの、需要と供給の調整システムを形成する方策について検討する必要がある。

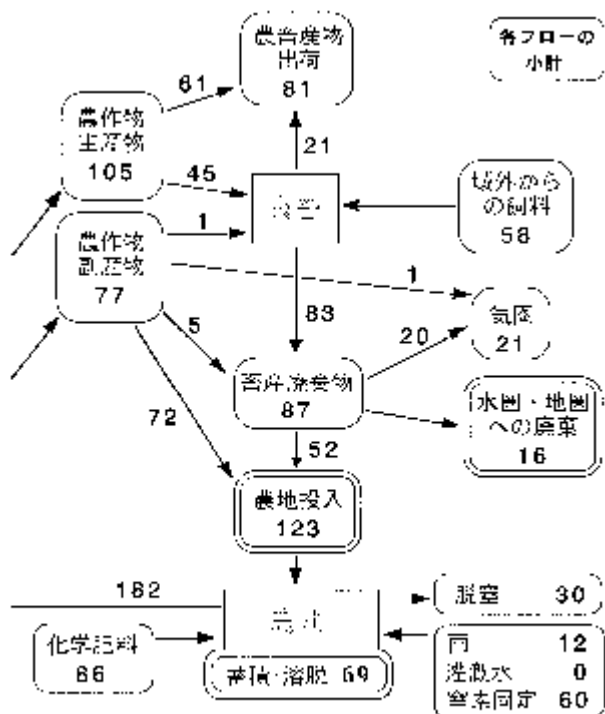
4) 自給飼料生産を拡大した酪農経営モデル (ALモデル)における窒素フロー

D40モデルに対し、ALモデルは自給飼料生産を拡大し、高蛋白質の牧草であるアルファルファを導入することにより、購入配合飼料を年間150tから80tに節減しても、同じ産乳量を維持するのに必要な養分要求量を満たすことが飼料計算上は可能であった。また、購入粗飼料も不必要となる。乳牛成牛換算1頭当たりの飼料作面積0.79ha、家畜密度1.28頭である。

ALモデル(飼料作50ha)とD40モデル(飼料作30ha)の窒素フローの比較を表3に示した。ALモデルでは、域外からの窒素の流入、農地、環境への負荷はいずれも減少し、作物による窒素吸収(農作物生産)も増加している。[域外からの飼料・敷料]65kg/ha(D40モデルと比較して142kg/ha),[畜産廃棄物]162kg/ha(同97kg/ha),[農地投入]158kg/ha(同45kg/ha),[水圏・地圏への廃棄]26kg/ha(同21kg/ha),[化学肥料]70kg/ha(同21kg/ha),農作物生産194kg/ha(同+29kg/ha),農地での[蓄積・溶脱]76kg/ha(同88kg/ha)となった。

耕地1ha当たりの家畜飼養頭数がD40モデルの3/5に減少することにより,[畜産廃棄物][気圏][水圏・地圏への廃棄]も3/5となる。自給飼料の作付面積拡大により、環境問題はかなり緩和されることが裏付けられた。なお、圃場の分散や傾斜等により堆肥や尿散布が均等に行えない条件下では、計算通りの効果は発揮されないことが現実には考えられる。

農地での[蓄積・溶脱]はD40モデルの46%にまで大幅に減少した。家畜飼養密度が3/5に減少したことによる影響が大きいのであるが、アルファルファ導入により、飼料作物生産全体で作物が吸収する窒素は1ha当たり16%増加し,[化学肥料]は23%減少している。D40モデルの[蓄積・溶脱]



○ 家畜密度=1.2 kgN/ha (成牛換算 63頭/90ha)

図5. 畑作農家2戸+酪農家1戸モデルの窒素フロー (kg N ha⁻¹ year⁻¹)

164kg / haに3 / 5をかけた数値と比較しても23%の減少である。作物生産の増大により、農地 作物 家畜 農地という経路における窒素循環量が増加したことが寄与していると考えられる。マメ科牧草の導入により、農地における窒素循環がかなり改善されることを示している。

5) 飼養頭数倍増した酪農家単独モデル (D80sim, D80ImSim) における窒素フロー

D80sim, D80ImSimとD40モデルの窒素フローの比較を表4に示した。

D80simでは飼養頭数の倍増に比例し、D40モデルに比べ[畜産物出荷][畜産廃棄物]が倍増している。また、単位面積当たりの蛋白質生産の高い作付け構成にしたものの、自給粗飼料生産を30haに限定したため、購入粗飼料が4.5倍に増え、域外からの飼料は2.3倍となった。[畜産廃棄物]から[気圏][水圏・地圏への廃棄]へのフローもD40モデルの約2倍となり、[気圏]112kg / ha, [水圏・地圏への廃棄]101kg / haと環境負荷は更に深刻になっている。[畜産廃棄物] [農地]もD40モデルの1.8倍、[農地投入]は1.6倍となり、農地での[蓄積・溶脱]は1.7倍の282kg / haと膨大な量が算出された。窒素過多で飼料生産に悪影響を及ぼし⁵⁾、乳牛の急性硝酸態窒素中毒症が発生³⁷⁾しかねない、危険な投入量になると推定され

る。

化学肥料を半減すると仮定した場合でも、農地での[蓄積・溶脱]は237kg / haといまだ過大である。現実に飼料作を拡大せずに飼養頭数のみを大きく増加した経営では、糞尿処理を改善しない場合、[水圏・地圏への廃棄]による環境汚染がD80sim以上に増加している³⁴⁾可能性が考えられる。それにより、危機的な圃場への窒素蓄積をまぬがれているのではないかと推測される。

D80ImSimにおける糞尿処理の改善を以下の様に設定した。堆肥については簡易に通気発酵⁹⁾して切り返す方式により、堆肥化過程における乾物分解率を30% (D40モデル & D80sim) 40% (D80ImSim)、窒素揮散割合を8% 20%とした。堆肥盤への屋根かけ等の汚水流出防止対策により、尿中窒素の流失を低下でき、流失率を20% 10%とした。この対策により糞中窒素の流失も低下するが、および飼養頭数も影響するため、糞中窒素の流失率はD40モデル: 18%, D80sim: 24%, D80ImSim: 9%とモデル内で計算された。尿の曝気^{2) 33) 45)}により尿中窒素の揮散が増加するため、揮散率を5% 15%とした。化学肥料は堆肥、尿の利用⁵⁾によりデントコーン、牧草ともに40%の削減とし、牧草については傾斜あるいは分散した圃場条件により尿散布困難な面

表3. ALモデルとD40モデルの窒素フローの比較 (kgN ha⁻¹ year⁻¹)

	D40モデル	ALモデル	ALモデル - D40モデル
農作物生産	164	194	+ 29
主産物 (家畜)	114	135	+ 20
副産物 (農地)	50	59	+ 9
家畜	37	22	- 15
域外からの飼料・敷料	207	65	- 142
畜産物出荷	62	37	- 25
畜産廃棄物	259	162	- 97
気圏へ	59	37	- 22
水圏・地圏への廃棄	47	26	- 21
畜産廃棄物 農地	153	99	- 54
農地投入	203	158	- 45
化学肥料	91	70	- 21
窒素固定	53	60	+ 7
農地における蓄積・溶脱	164	76	- 88
家畜密度 (頭 / ha)	2.13	1.28	

注) ALモデル: D40モデルの自給飼料生産のみを30haから50haに拡大し、アルファルファ (12.5ha) を導入

積25%を設けた。の対策により、1999年に施行された「家畜排せつ物の管理の適性化及び利用の促進に関する法律」を満たすものとなる。

D80ImSimでは域外へ堆肥の75%を移出することによる窒素139kg/haの削減効果大きい。[気圏]への排出はD80simの1.7倍となり、[水圏・地圏への廃棄]は101(D80sim)13kg/haと劇的に改善されるシミュレーションとなった。[農地投入]は[畜産廃棄物]由来が47%削減され、全体では41%の削減となった。農地での[蓄積・溶脱]は58%削減され、117kg/haとかなり改善される。この数値からさらに、ALモデル、畑作酪農複合経営や音更町全体における環境負荷のレベルにまで低下させるためには、[気圏]への悪影響を無視して、アンモニア揮散量がさらに増大する尿の曝気を強化するか、尿の畑作への施用を考える必要がある。

現在、十勝地域において一般的な規模の酪農経営に相当するD40モデルの窒素環境負荷が大きい状態にあるにもかかわらず、飼養頭数規模拡大の傾向は継続している。D80simでは環境保全型の方策をとらずに飼養頭数規模拡大した場合において、窒素環境負荷が危機的に増大することを示し

た。D80ImSimではD80simに対して糞尿処理を改善することにより、窒素の[水圏・地圏への廃棄]は十分に低下可能で、[農地投入]はある程度改善できることを提示した。

6) 酪農主体地域の窒素フロー

S地域(表5; 飼料作 215ha, 畑作物 103ha, 乳牛成牛換算家畜頭数 524頭)における1995年1年間の窒素フローを図6に示した。

S地域はS川流域の狭隘な谷地である。洪積台地、沖積平野がほとんどの面積を占める音更町において、例外的に中山間地的な土地条件である。したがって、音更町中央部に比べやや寒冷で、山からの水による湿害が問題となり、畑作にとって不利な気候・土地条件のため、酪農が中心となっている。

作付面積30ha以上の5戸の内、4戸は酪農家で、5戸の酪農家がフリーストール牛舎、4戸がミルクキングパーラを導入しており、うち3戸は雇用労働を導入しない2世代の家族経営の中で、搾乳牛頭数60~72頭と規模拡大をしている。

酪農家の糞尿処理は全戸とも固液分離方式である。乳牛の敷料である麦稈は、そのほとんどを地域外の畑作農家と堆肥交換あるいは購入で確保し

表4. 飼養頭数倍増 酪農家モデル(D80sim)と糞尿処理改善モデル(D80ImSim)の窒素フロー(kgN ha⁻¹ year⁻¹)

	D40モデル	D80sim	D80ImSim	D80ImSim - D80sim
農作物生産	164	180	180	0
主産物(家畜)	114	135	135	0
副産物(農地)	50	44	44	0
家畜	37	75	75	0
域外からの飼料	207	480	480	0
畜産物出荷	62	125	125	0
畜産廃棄物	259	491	491	0
堆肥 域外	0	0	139	+139
気圏へ	59	112	192	+79
水圏・地圏への廃棄	47	101	13	-88
畜産廃棄物 農地	153	278	146	-131
農地投入	203	322	191	-131
化学肥料	91	91	58	-33
窒素固定	53	67	67	0
農地における蓄積・溶脱	164	282	117	-165
家畜密度(頭/ha)	2.13	4.26	4.26	

注) D80sim: D40モデルに対して飼養頭数のみ2倍にしたシミュレーション

D80ImSim: D80simに対する糞尿処理改善シミュレーション

ており、堆肥の約半量は地域外へ出し、残りの堆肥および尿が自給飼料作圃場に散布されている。

S地域の家畜密度は、音更町全体（1995年）の3.4倍と高いため、窒素フローとしての飼料の移入、畜産廃棄物もそれに比例し、畜産廃棄物の単位面積当たり農地投入量が大幅に多くなり、町全

体の2.8倍になっている。[域外の農地への堆肥投入] が36kg / haもあるにもかかわらず、[畜産廃棄物] [水圏・地圏への廃棄] は44kg / haと町全体の4.1倍にも達しており、[水圏・地圏への廃棄] は町全体の2.5倍で、酪農家単独モデルと同程度となっている。

表5．酪農中心地域における農業概要（1995年）

経営類型別				作付面積規模別			合計
酪農	畑作+馬or肉牛	畑作	馬専業	30ha以上	20~10ha	10ha未満	
6	4	3	1	5	5	4	14

(1) 農家戸数 (戸)

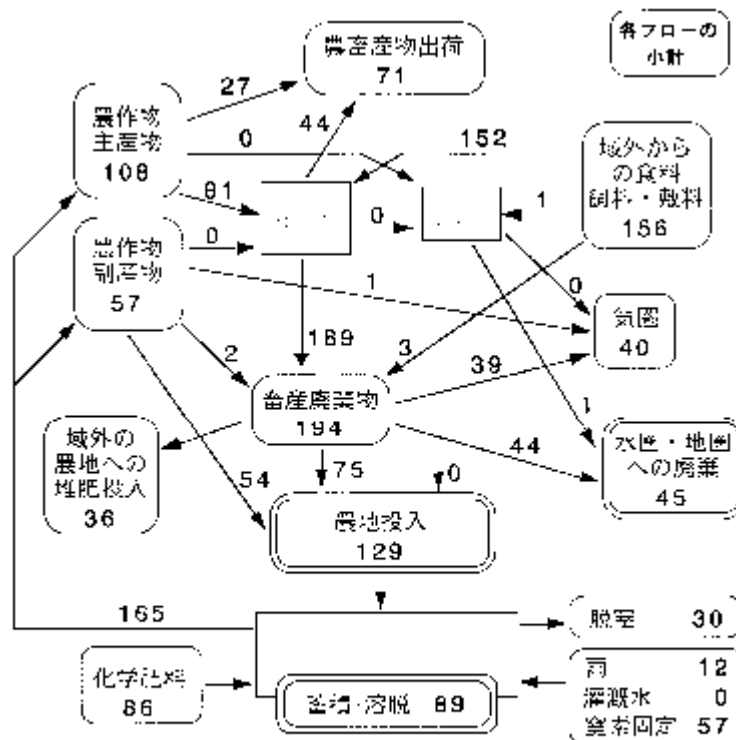
牧草	デントコーン	小麦	豆	馬鈴薯	てん菜	野菜	その他	合計
165	49	38	40	9.5	11.2	4.4	8.9	318

(2) 作付面積 (ha)

乳牛	肉牛	馬
497	13	15

(3) 家畜飼養頭数 (頭)

注) 家畜頭数は乳牛成畜換算：
乳牛経産牛を1として、排泄窒素量より換算した。



○ 家畜密度=3.0kgN/ha，人口密度=0.3kgN/ha
(乳牛成牛換算 1.88頭/ha)

図6．音更町の酪農主体地域（S地域）における窒素フロー・1995年 (kg N ha⁻¹ year⁻¹)

音更町全体に比べ、化学肥料の単位面積当たり投入量はやや少ないものの、農地での〔蓄積・溶脱〕は89kg/haと町全体に比べ38%増となっている。農地への窒素蓄積量をS地域で15kg/ha、音更町全体で5kg/haと仮定³⁵⁾すると、溶脱量はS地域で74kg/ha、町全体で61kg/haとなる。この推定では、農地からの溶脱窒素量におけるS地域と町全体との間の差は〔蓄積・溶脱〕における差よりも小さくなる。その一方、S地域の飼料作圃場での窒素の過剰蓄積の問題がよりクローズアップされることになる。

7) 酪農主体地域へ新技術等を導入した場合の物質循環上の環境負荷軽減効果

S地域に新技術等を導入した場合の窒素フローの変化を表6に示した。なお、家畜排泄物の環境保全的処理においてはD80ImSimの糞尿処理と同じパラメータを設定した。

新技術等の導入により現状に比較して〔畜産廃棄物〕〔水圏・地圏への廃棄〕は44kg/haから10kg/haと大幅に減少する。また、〔農地投入〕も129kg/haから113kg/haに、農地での〔蓄積・溶脱〕も89kg/haから41kg/haと問題の少ない量

に減少するなど、環境保全的物質循環に近づく可能性を提示していると考えられる。

導入新技術のうち、適切な家畜排泄物処理の効果が大きく、〔農地投入〕17kg/ha、〔水圏・地圏への廃棄〕35kg/haと大きな減少量となっている。前者に対しては、堆肥の良質化による域外への堆肥移出の増加21kg/haの影響が大きい。この〔農地投入〕の減少と、乳牛尿を曝気し液肥として施用することによる飼料作における化学肥料の減肥20kg/haが、農地での〔蓄積・溶脱〕の減少に大きく寄与している。この様に、糞尿処理の改善が、水圏・地圏への環境負荷や農地への窒素過剰投入を軽減する効果が大きく、環境保全的な農業を構築するための要素として重要であることが、酪農のみならず畑作と畜産の複合営農においても確認できた。

S地域の麦作付割合が小さいため、窒素フローからみた場合、ライ小麦導入の効果は直接的にはそれほど大きくは現れなかった。しかし、ライ小麦はわらの生産性(乾物量)が高いことから、有機物資源の循環利用の高度化という視点において、その導入効果は大きいと考えられる。また、スラ

表6. 新技術導入による窒素フローの変化

(kgN/ha/year)

フロー構成要素	現状	新技術導入等による窒素の増減量		
		らい小麦作付け	麦稈のアンモニア処理	環境保全型ふん尿処理システム
農作物主産物	108	+5		= 113
" 出荷	27	+5		= 32
農作物副産物	57	+2		= 59
" 家畜	0		+1	= 1
" 農地投入	54	+1		= 55
化学肥料	86	-5		= 61
農地 農作物	165	+7		= 172
域外からの飼料 家畜	152		-2	= 150
畜産廃棄物 農地投入	75			= 59
" 域外への堆肥供給	36			= 57
" 水圏・地圏への廃棄	44			= 10
" 気圏	39			= 70

農地への環境負荷に対する新技術導入による効果の積算

	現状	効果の積算	
農地投入	129	-16 (+)	= 113
農地における蓄積・溶脱	89	-48 (+ - + +)	= 41

リーや尿の利用に適した畑作物であることも重要な評価ポイントとなる。

現時点で直ちに、畑作農家において小麦の代わりにライ小麦の栽培を求めることは、価格面等から困難であろう。しかし、酪農経営における草地更新地などでの栽培等、ライ小麦導入の検討余地はあり、環境保全的有畜複合営農に向けて効果を発揮する可能性が提示できたものと考えられる。

麦稈のアンモニア処理による窒素循環の改善効果はさらに小さかった。しかしライ小麦と同様に、有機物資源の循環利用を促進させるという側面においては有効である。

摘 要

大規模畑作と酪農が混在する北海道十勝地域において、家畜糞尿問題の解決と共に農地における地力等の向上が求められている。これらの問題の解決にあたり、畑作と畜産の有機的結合の再構築の必要性がとらえられている。そこで、同地域の中央部に位置する音更町を対象に、町全体や地域、個別農家の窒素循環モデルを構築し、窒素フローを推定することにより、その物質循環上の問題点を明示した。さらに、有畜複合農業の高度化により、その問題の解決を図る導入技術の評価を環境負荷の視点から明らかにした。

音更町全体の窒素フローのうち、農地での蓄積 + 溶脱は年間64kg / haであり、環境負荷として深刻な状況をもたらす量ではないと考えられる。しかし、農地以外の水圏・地圏への廃棄量（18kg / ha）と共に家畜排泄物に由来する部分が大きく、酪農を中心とする家畜排泄物の適正な処理・利用の重要性が確認された。

十勝中央地域における代表例として想定した酪農家単独モデルでは、家畜排泄物の農地への負荷が大きく、窒素の農地投入203kg / ha、農地での蓄積 + 溶脱164kg / ha、水圏・地圏への廃棄47kg / haであった。これに対し、酪農1戸と畑作2戸が麦稈と堆肥の交換により連携する有畜複合農業モデルでは、酪農家単独モデルに比べ、窒素の農地投入は61%、農地での蓄積 + 溶脱は42%、水圏・地圏への廃棄は34%と改善される。また、酪農家が自給飼料作を1.7倍に拡大し、その1 / 4にマメ科牧草アルファルファを導入したシミュレーションでは、化学肥料の投入量を23%削減でき、農地

での蓄積 + 溶脱は46%まで低下した。この低下率は、飼料作拡大による家畜密度の低下を上回っており、マメ科牧草導入の窒素循環改善における有効性が再確認された。

自給飼料作面積を増やさずに飼養頭数を倍増したシミュレーションでは、水圏・地圏への廃棄が年間101kg / haある上に、農地での蓄積 + 溶脱が282kg / haと膨大な量となり、酪農経営の継続が困難と考えられる数値である。家畜排泄物処理を改善し、堆肥の75%を系外に移出する設定にすると窒素フローは大幅に改善され、水圏・地圏への廃棄は13kg / ha、農地での蓄積 + 溶脱は117kg / haとなった。

農家の実態調査から算出した音更町内の酪農主体地域の窒素フローでは、堆肥の半量を地域外の農地へ移出しているにもかかわらず、町全体に比べ、水圏・地圏への廃棄は2.5倍（うち畜産廃棄物に起因する部分は4.1倍）と酪農家単独モデルと同水準であった。

そこで、同地域を対象に現地導入技術（堆肥調製システム等の家畜排泄物処理技術、スラリーを利用したライ小麦栽培、麦稈のアンモニア処理技術）適用の効果を評価した。これらの技術導入により、水圏・地圏への廃棄は44kg / haから10kg / haへ大幅に減少し、農地での蓄積 + 溶脱も61kg / haと問題の少ない量とすることができた。導入技術別の窒素フローの改善効果としては、酪農経営における家畜排泄物処理によるものが大部分を占める。

謝 辞

本研究を実施するに当たり、農業環境技術研究所環境管理部資源・生態管理科資源・環境動態研究室主任研究官・松本成夫博士（現・国際農業研究センター）には地域における窒素フローの解析手法を御指導賜り、同研究室・三島慎一郎氏（現・養分動態ユニット）とは研究を共に行いながら、有益な知見を御教示頂いた。また、農業工学研究所・農村環境部長・袴田共之博士には御校閲を賜り、有益な御教示を頂いた。

音更町の農家の方々には快く調査に応じて頂き、貴重なデータの提供ならびに十勝農業の実態を御教示賜った。音更町農業共済組合の矢島正人次長（現・十勝農業共済組合音更支所長）および曾根

淳子課長(現・十勝農業共済組合)には音更町の作付け実態情報を御提供頂いた。音更農協と音更町役場の方々には統計情報を御提供頂いた。

北海道農業試験場・総合研究第3チームにおける本研究のテーマ設定を前任チーム長の萬田富治博士(現・北里大学教授)より頂き、御激励賜った。同場・総合研究部・動向解析研究室長の鷓川洋樹博士には本研究の端緒において、筆者らの前任者として音更町の統計情報を収集頂いた。総合研究部長の古川嗣彦博士(現・九州沖縄農業研究センター所長)には御激励を賜った。

畜産草地研究所・畜産環境部長 福川吟一郎博士、同部・畜産環境システム研究室長 島田和宏博士には御激励を賜り、同部の長田隆博士および羽賀清典博士には糞尿処理過程の窒素の動態について御教示頂いた。

以上の諸氏に心から感謝の意を表します。

引用文献

- 1) 井上喬二郎(1994): 地力維持のための有機物の施用と効果. 技術の窓(作物・経営編). P.70-71, 農林金融公庫, 東京
- 2) Bussink, D. W. and O. Oenema. (1998): Ammonia volatilization from dairy farming systems in temperate areas: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 51, 19-33
- 3) 袴田共之(1978): 放牧草地の養分循環と施肥管理法に関する研究, . 窒素, リン酸, カリの循環の概要と窒素循環モデル. *日草誌*. 24, 48-56
- 4) 北海道立根釧農業試験場研究部土壌肥料科(1999): 根釧農試畜産圃場における窒素フローの把握. 北海道農業試験会議(成績会議)資料 平成10年度 酪農経営における窒素フロー - 根釧農試における事例 -, P.33-38
- 5) 北海道立農業・畜産試験場 家畜糞尿プロジェクトチーム 編(1999): 糞尿施用の実際. 家畜糞尿処理・利用の手引き1999, P.59-63, 北海道立新得畜産試験場
- 6) 北海道農政部(1989): 北海道施肥基準, P. 11-44
- 7) 科学技術庁資源調査会編(1982): 四訂食品成分表
- 8) 科学技術庁資源調査所(1982): バイオマス資源のエネルギー的総合利用に関する調査. 資料96, P.246-249
- 9) Kirchmann, H. and E. Witter (1989): Ammonia volatilization during aerobic and anaerobic manure decomposition. *Plant and Soil*, 115, 35-41
- 10) 昆忠男, 佐々木東一, 藤本堯夫, 畠中哲哉, 戸沢英男, 帰山幸雄(1989): 有機物利用と栽培施肥改善による省エネルギー輪作システムの実証. グリーンエナジー計画成果シリーズV-3, P.246-272. 農林水産技術会議事務局
- 11) 越野正義(1992): いまなぜ養分の循環が必要か. *自給飼料*. 18, 2-6
- 12) 甲田裕幸, 宝示戸雅之(1999): 酪農経営における窒素フロー - 根釧農試における事例 -. 平成10年度研究成果情報 北海道農業, P.194-195, 北海道農業試験場
- 13) 國末孝男, 村松浩爾 編(1989): 河川汚濁のモデル解析, 技術堂出版, 東京
- 14) 萬田富治(1995): 畑作農業の有畜複合化による地域資源活用的高度化. 北海道農試研究資料. 50, 85-96
- 15) 萬田富治, 村井勝, 鷓川洋樹, 山崎昭夫(1992): 麦稈, 稲わら飼料化の新技術新アンモニア処理システム「ほくのう・S」. 北海道農試研究資料. 48, 1-196
- 16) 松本成夫(2000): 地域における窒素フローの推定方法の確立とこれによる環境負荷の評価. *農環研報*. 18, 81-152
- 17) McDonald, P., A.R.Henderson and S.J.E. Heron (1991): *The biochemistry of silage* 2nd ed. Chalcombe Publications, Marlow (Great Britain), P.237-251
- 18) 西宗昭(1992): 畑作におけるバイオマス資源の利用. *北農*. 59(3), 28-34
- 19) Nishimune, A. (1992): Proper application method and time of organic / inorganic fertilizer combination for crop production. *Proceeding of international seminar on proper use of chemical fertilizer combined with organic fertilizer in crop production*, Organized by UPM & FFTC in Malaysia, 13, 1-38

- 20) 西宗昭, 畠中哲哉 (1995): 農業生産における土壌管理の将来. 北農試研究資料. 50, 97-115
- 21) 農林水産省北海道統計事務所 (1997): 平成7年北海道農林水産年報
- 22) 農林水産省経済局統計情報部 (1987): 昭和60年度農家生計費統計
- 23) 農林水産省経済局統計情報部 (1995): 家畜飼養の概況 (平成5年2月1日調査), 畜産統計
- 24) 農林水産省農林水産技術会議事務局編 (1995): 日本標準飼料成分表 (1995年版)
- 25) 農林水産省農林水産技術会議事務局編 (1999): 寒地土地利用型農業における環境保全型・高効率地域複合営農システムの確立. 研究成果342, P.1-89
- 26) 農山漁村文化協会編 (1986): 農業技術大系, 農山漁村文化協会, 東京
- 27) 小川和夫, 竹内豊, 片山雅弘 (1988): 北海道の耕草地におけるバイオマス生産量及び作物による無機成分吸収量. 北海道農試研報. 149, 57-91
- 28) 大村邦男 (1995): 北海道の畑作・酪農地帯における物質循環と水質保全. 北海道立農試場報告, 86, 1-63
- 29) Oosthoek, J. (1990): Ammonia emission from dairy and pig housing systems, Odour and ammonia emissions from livestock farming (Nielsen, Voorburg and L'Hermite ed.), Elsevier Science Publishers, Amsterdam - Oxford - NewYork
- 30) 音更町: 平成10年度音更町農業の概要, 1998
- 31) Peterson, O.S., A.M.Lind and S.G.Sommer (1998): Nitrogen and organic matter losses during storage of cattle and pig manure. J. of Agricultural Science, 130, 67-79
- 32) 労働科学研究所 (1986): モデル農村地区における有機物循環の実態の解明とその評価. 「グリーンエネルギー計画」昭和60年度委託事業成績書
- 33) Sommer, S.G., B.T.Cristensen, N.E.Nielsen and J.K.Schjerring (1993): Ammonia volatilization during storage of cattle and pig slurry: effect of surface cover. J. of Agricultural Science, 121, 63-71
- 34) 杉本安寛, 保田拓洋, 武藤勲, 豊満幸雄 (1997): 宮崎県内のA酪農経営における窒素フロー. 日本家畜管理学会誌. 33, 28-29
- 35) 田村元, 山神正弘 (1997): 有機物20年連用畑圃場における養分収支からみた有機物管理法. 平成7年度研究成果情報 北海道農業, P.198-199, 北海道農業試験場
- 36) Taylor, T.G. (坂本清 訳) (1985): 人間の栄養学, 18, 朝倉書店, 東京
- 37) 畜産環境整備機構 (1997): 家畜ふん尿処理・利用の手引き, 畜産環境整備機構, 東京
- 38) 十勝園芸作物総合協議会, 十勝支庁改良普及員園芸部会, 十勝農業協同組合連合会 編 (1990): 十勝野菜発展のしるべ (改訂版), 十勝農業協同組合連合会, 帯広
- 39) 十勝支庁改良普及員畜産部会 (1995): 十勝管内における堆きゅう肥・スラリーの肥料成分の実態. マニュアルレポート'95, P.13-22
- 40) 中央畜産会 (1985): 堆肥化施設設計マニュアル, P.90-91, 中央畜産会
- 41) 築城幹典, 原田靖生 (1995): 家畜の窒素排泄量の推定プログラム. 畜産の研究, 48(7), P.773-776, 養賢堂, 東京
- 42) 築城幹典, 原田靖生 (1996): 酪農経営における物質循環の定量的な把握に関する研究. システム農学. 12(2), 113-117
- 43) 鶴川洋樹 (1995): 畑作地帯における畜産経営の展開と環境問題. 北海道農試研究資料, 50, 49-61
- 44) 鶴川洋樹 (1995): 十勝農業と音更町の特質. 北海道農試農業経営研究. 67, 1-12
- 45) Willer, H.C., P.J.L.Derikx, P.J.W.Ten Have and T.K.Vijn (1996): Emission of ammonia and nitrous oxide from aerobic treatment of veal calf slurry. J. of Agricultural Science, 63, 345-352
- 46) Yatazawa, M. (1978): Agro-ecosystems in Japan. Cycling of mineral nutrient in agricultural ecosystems (M.J.Frissel ed.), Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam-Oxford-NewYork, P.167-183