

人為的攪乱を受けない水田環境における食物網と物質フロー

森 淳* 森岡伸介** 小出水規行* Bounsong Vongvichith*** 渡部恵司*

*資源循環工学研究領域生態工学担当

**国際農林水産業研究センター水産領域

***Living Aquatic Resources Research Center, Lao PDR

キーワード：炭素安定同位体比, 窒素安定同位体比, 物質フロー, 環境要素, メコン川

I 緒言

メコン川流域に位置するラオスでは、人口増加に伴う食糧自給力の強化が喫緊の課題とされている。タンパク資源として淡水魚は重要な存在であるが、天然魚の生産量は近年停滞しており、養殖による魚類生産の増加が同国政府により施策化されている。東南アジアや中国では、水田は魚など水生生物の養殖の場として利用されてきた歴史がある。国際農林水産業研究センター (JIRCAS) ではラオスにおいて水産資源の増殖のため、水田を淡水魚の養殖に活用するための研究を行っている。水田で供された餌の利用動態すなわち物質フローを把握することによって、給餌の魚類生産に与える影響を把握し、より効率的な養殖を実現することができる。

この分析には炭素安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) と窒素安定同位体比 ($\delta^{15}\text{N}$) が有用な手法である。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ず、上位消費者の窒素の安定同位体比は約 3‰ 高くなる性質がある。このため $\delta^{13}\text{C}$ からは食物網の起源に関する、 $\delta^{15}\text{N}$ からは栄養段階に関する情報を得ることができる (和田, 1984; Canaba and Rasmussen, 1991)。食物網は物質の伝達ルートであるから、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ をマーカーとして利用できる。

アジアモンスーン地域の多くでは、水田は流域における物質発生源としての役割を有している。水路単独の生態系と溜池とつながっている水路の生態系では、後者の方が炭素・窒素安定同位体比の標準偏差が大きくなり (森ら, 2012)、これらの安定同位体比を「生息環境の多様性」の評価に用いることが出来る可能性がある。これを実用化するには、溜池や水路だけでなく、有機物や栄養塩類の挙動に影響を与えていると考えられる水田が水域の $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 動態に果たしている機能を明らかにする必要がある。

日本の水田においては、灌漑水や肥料に含まれ、水田内の生態系の中で利用される人為的な無機態窒素がノイズとなる。ラオスには、無施肥で、かつ上流に都市や畜舎が存在しない水田が残されており、これらに人為的な有機物としての餌料を供す

ることにより、物質フローからみた水田の機能が解析出来ると考えた。すなわち養殖に用いられた餌に含まれる窒素の物質フローを、可能な限りノイズの影響を軽減させたうえで把握できる。そして餌が直接的・間接的に水田内の生物が利用する態様を解明できると考えられる。本研究では給餌の有無を条件とした調査水田において食物網と、水田における物質フローを解析する。この研究は我が国の物質フロー特性を踏まえた生息環境の多様性評価手法の開発に資する。

II 調査方法

Vientiane 市の北西約 15km, Nonteng 試験場の畜養池に、ナマズ目パンガシアノドン科に属する *Pangasianodon hypophthalmus*, ナマズ目ヒレナマズ科に属する *Clarias macrocephalus* およびコイ目コイ科の *Barbonymus gonionotus* の 3 種を、2012 年 6 月 2 日から 7 月 18 日まで畜養した。餌は市販の配合飼料を与えた。中央研究院 (2013) によれば、*P. hypophthalmus* はカイヤンとも呼ばれるメコンオオナ

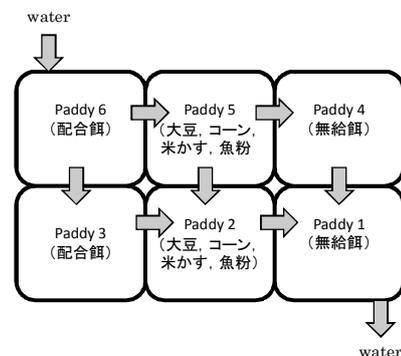


Fig. 1 実験水田の位置関係

Position of experiment paddies

マズの1種である。食性は雑食であり、植物だけではなく魚や甲殻類の他植物も食べる。*C. macrocephalus*は昆虫、プランクトン無脊椎動物、魚だけでなく幼鳥や腐肉、植物も餌とする。

*B. gonionotus*は、植物や無脊椎動物を餌とする。

7月18日に、中山間地域であるPongsavang村(Vientianeの北西約160km)に設定した実験水田に、水田1枚あたり*P. hypophthalmus*を130匹、*C. macrocephalus*を20匹、*B. gonionotus*を250匹それぞれ放流した。放流時の大きさは体長、体重の順に、*P. hypophthalmus*は7.0cm、2.6g (n=20)、*C. macrocephalus*は6.6cm、2.2g (n=20)、*B. gonionotus*は7.1cm、9.3g (n=19)であった。

水田は6区画で(いずれもほぼ10m×10m、水深は10~15cm程度)、無施肥、無農薬栽培である(Fig. 1)。灌漑は田越して行われ、Paddy1およびPaddy4は無給餌、Paddy2およびPaddy5は大豆、コーン、米かす、魚粉を混ぜたものを給餌、Paddy3およびPaddy6は市販の配合餌を与えた。ただし大豆、コーン、米かす、魚粉の構成比が正確に記録されていなかったため、Paddy2とPaddy5は本稿における考察から除外した。給餌量は1日2回、放流魚の体重の5%を目安に与えた。

7月25日、8月20日、9月22日および10月22日の4回にわたり、6試験区から魚の他、水、水田の土、プランクトン、ベントス、陸上昆虫をサンプリングした。サンプルのうち生物は乾燥・粉碎し、土は60°Cで乾燥させ、水は60°Cで濃縮したのち、それぞれ専用のスズカップに充填し、サーモエレクトロン社製の質量分析器DeltaV ADVANTAEを用いて $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ を測定した。

III 結果

3.1 畜養池で畜養された魚の特長

畜養池で供された配合飼料の $\delta^{13}\text{C}$ は-20.3‰、 $\delta^{15}\text{N}$ は6.0‰となった。仮に配合餌のみを利用していたとすれば $\delta^{13}\text{C}$ は-20‰程度、 $\delta^{15}\text{N}$ は9‰程度の値を示すと考えられる。

B. gonionotus、*P. hypophthalmus*および*C. macrocephalus*の $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ マップをFig. 2に示す。 $\delta^{13}\text{C}$ は*C. macrocephalus*の一部を除き-20‰以下となった。種別にみると、*B. gonionotus*は $\delta^{13}\text{C}$ は-26‰から-22‰に、 $\delta^{15}\text{N}$ は9‰から6‰の間に分布する。*P. hypophthalmus*は $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ の偏差が小さく、特定の餌を利用する傾向がある。また $\delta^{15}\text{N}$ は高い値を示さず、高次捕食者ではないと考えられた。

*C. macrocephalus*は $\delta^{13}\text{C}$ が-22‰から-19‰、 $\delta^{15}\text{N}$ が7‰から9‰となり、3種の中では配合飼料に近い $\delta^{13}\text{C}$ とこれより3‰高い $\delta^{15}\text{N}$ を示し。これをよく利用していると考えられる。

*B. gonionotus*は体長と $\delta^{13}\text{C}$ の間に強い正の相関 $r=0.70$ ($p<0.05$)、体長と $\delta^{15}\text{N}$ の間に強い負の相関 $r=-0.74$ ($p<0.05$)が認められた。他の2種はこれらに相関は認められなかった。

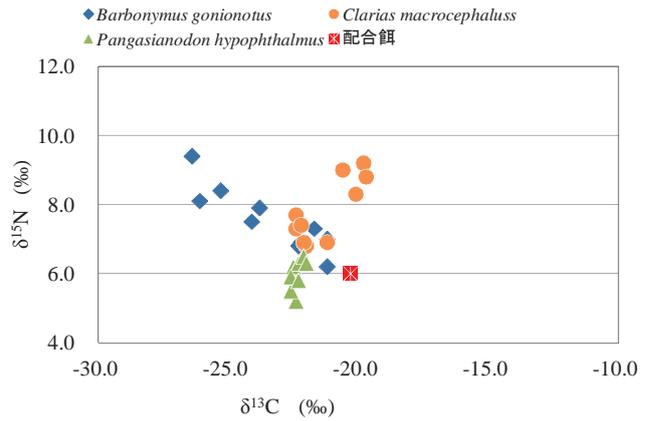


Fig. 2 畜養池で採捕した3種の $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ マップ
 $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ map of 3 species caught in the pond

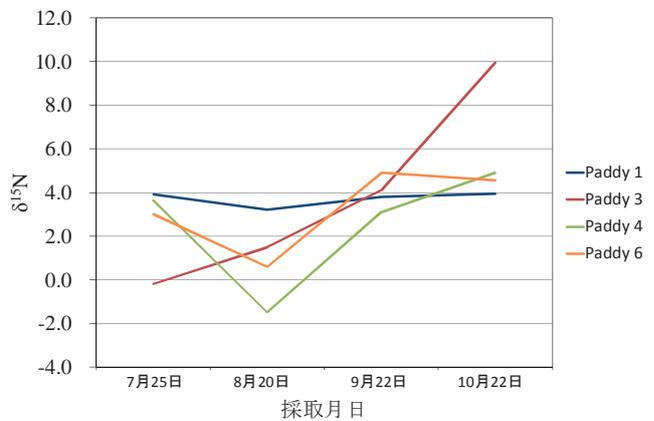


Fig. 3 水田の水の $\delta^{15}\text{N}$ 変化
 $\delta^{15}\text{N}$ variation of paddy water

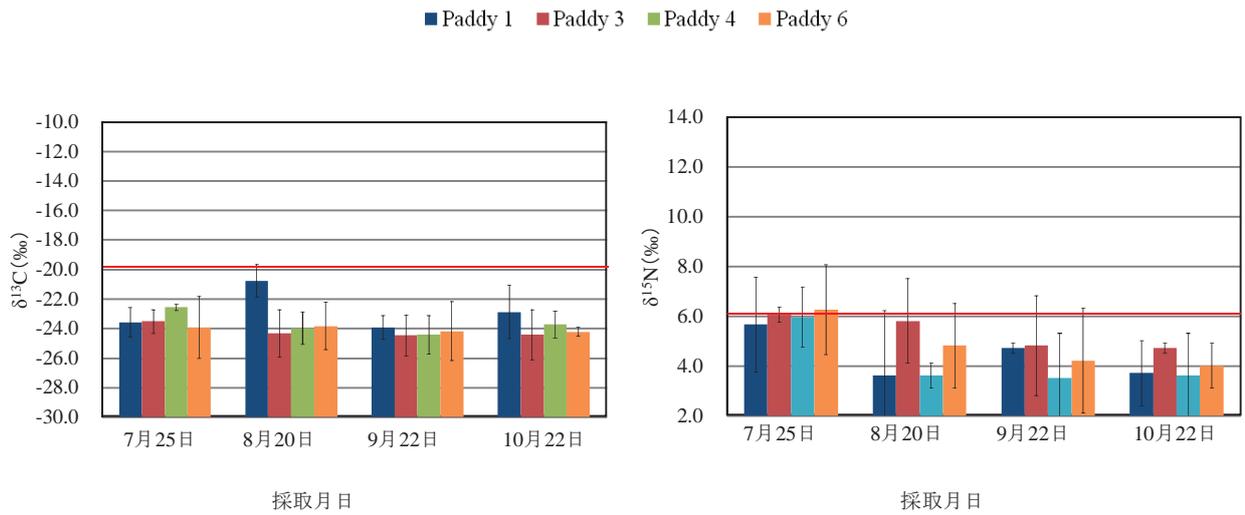
3.2 水田養魚

3.2.1 魚以外の環境要素、無脊椎動物の特徴

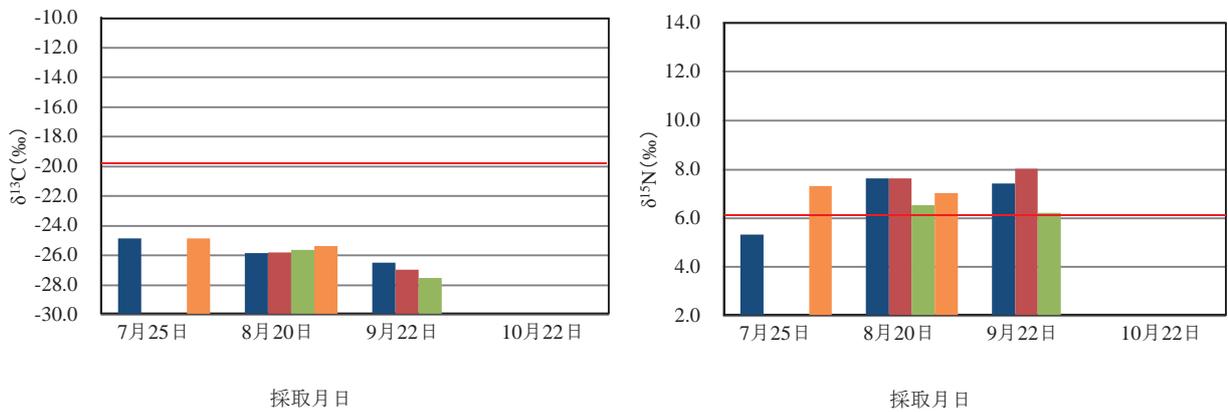
本項以降の $\delta^{13}\text{C}$ および $\delta^{15}\text{N}$ は、プランクトンを除き複数のサンプルの平均値である。水の $\delta^{15}\text{N}$ はPaddy3を除き7月から8月にかけて低下し9月に上昇した(Fig. 3)。Paddy3は8月にも上昇し、10月には10.0‰に達した。8月から9月は高水期で流入量が多かった時期にあたる。土は、 $\delta^{13}\text{C}$ は8月のPaddy1でやや高い値を示したが、-22‰から-25‰の間の値を示し、また季節変化も認められなかった(Fig. 4a)。これに対して $\delta^{15}\text{N}$ は全般的に低下する傾向が認められた。

プランクトンは $\delta^{13}\text{C}$ および $\delta^{15}\text{N}$ はほとんど変化が認められなかった(Fig. 4b)。水田間の違いも認められなかった。

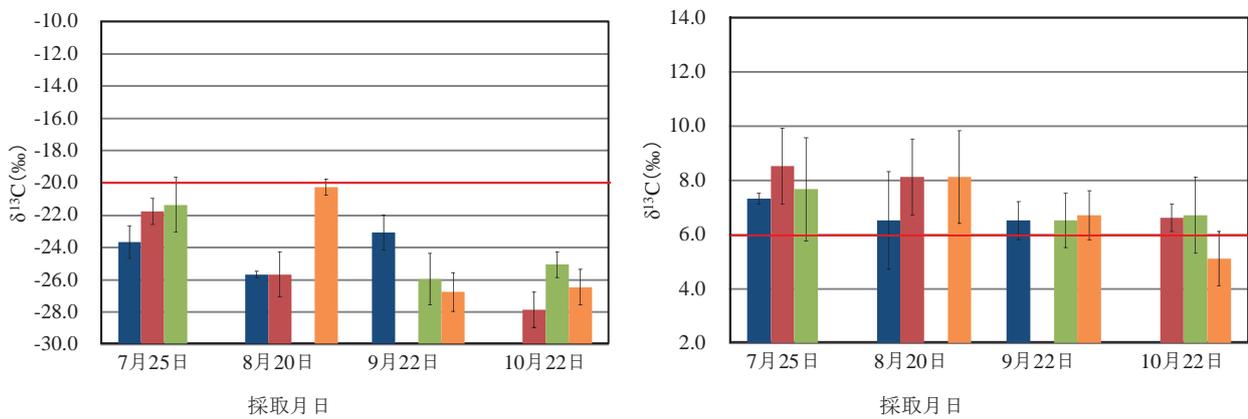
ユスリカ類は、 $\delta^{13}\text{C}$ は約-20‰から次第に低下し-25‰以下になった。 $\delta^{15}\text{N}$ はほぼ6‰から8‰の間の値を示し明らかな季節変化は認められなかった(Fig. 4c)。水田間の差も認められなかった。エビは、 $\delta^{13}\text{C}$ はわずかに低下した水田が多かった(Fig.



a 水田土壌の δ¹³C (左) と δ¹⁵N (右)
δ¹³C and δ¹⁵N of paddy soil



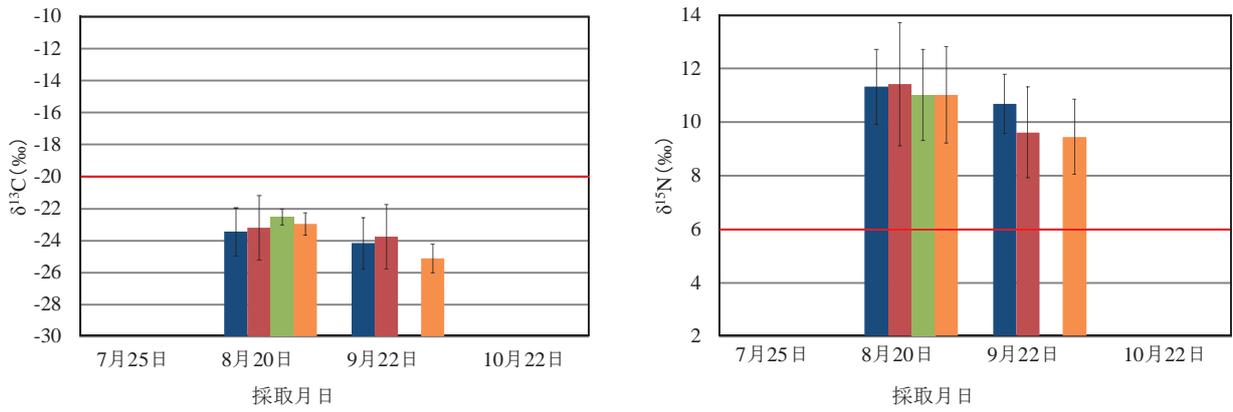
b プランクトンの δ¹³C (左) と δ¹⁵N (右)
δ¹³C and δ¹⁵N of plankton



c ユスリカ類の δ¹³C (左) と δ¹⁵N (右)
δ¹³C and δ¹⁵N of chironomid

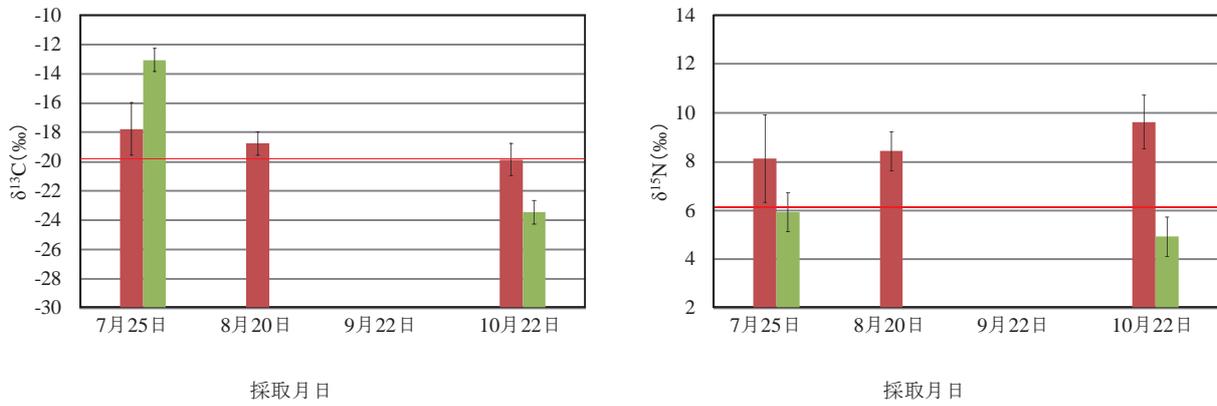
Fig. 4 環境要素, ベントスの δ¹³C と δ¹⁵N
δ¹³C and δ¹⁵N of environmental elements and benthos

■ Paddy 1 ■ Paddy 3 ■ Paddy 4 ■ Paddy 6



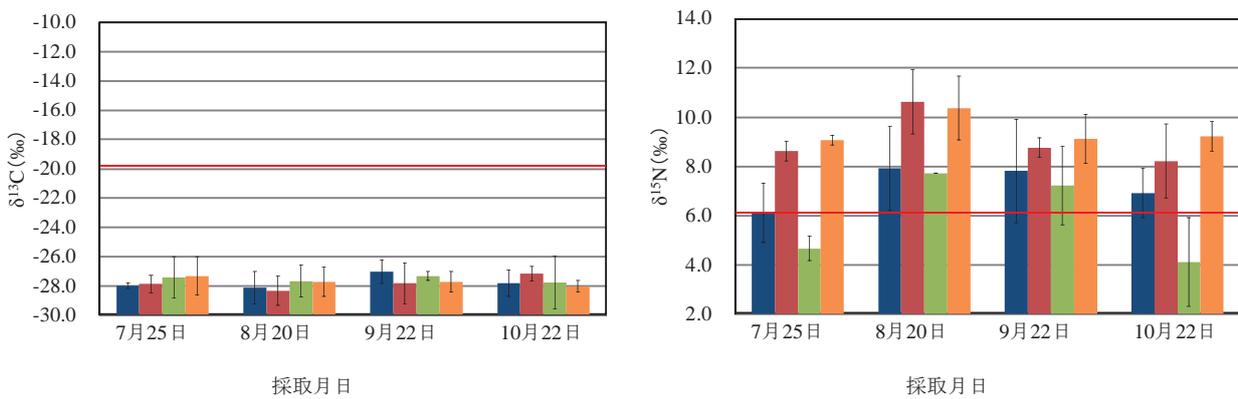
d エビ類の $\delta^{13}\text{C}$ (左) と $\delta^{15}\text{N}$ (右)

$\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of shrimp



e ミミズ類の $\delta^{13}\text{C}$ (左) と $\delta^{15}\text{N}$ (右)

$\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of earthworm

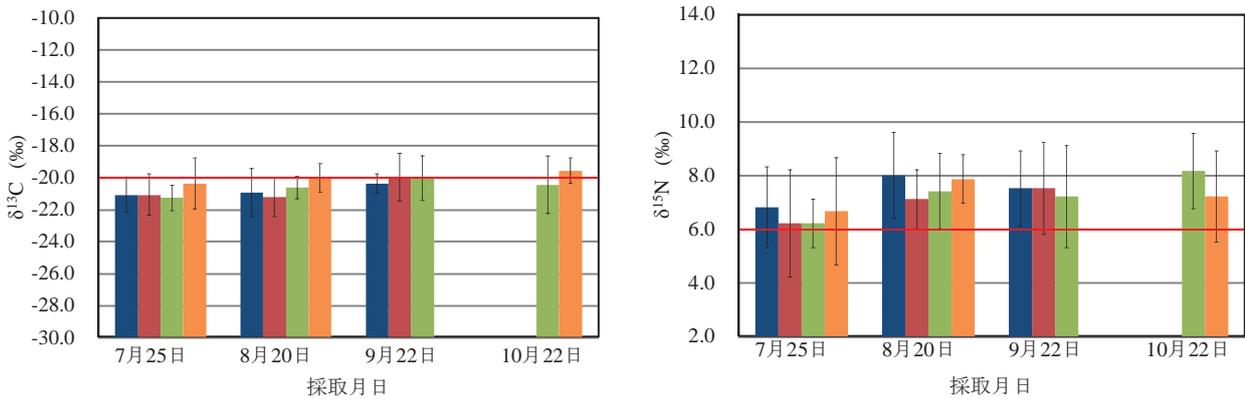


f イネの葉の $\delta^{13}\text{C}$ (左) と $\delta^{15}\text{N}$ (右)

Fig. 4 環境要素, ベントスの $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$

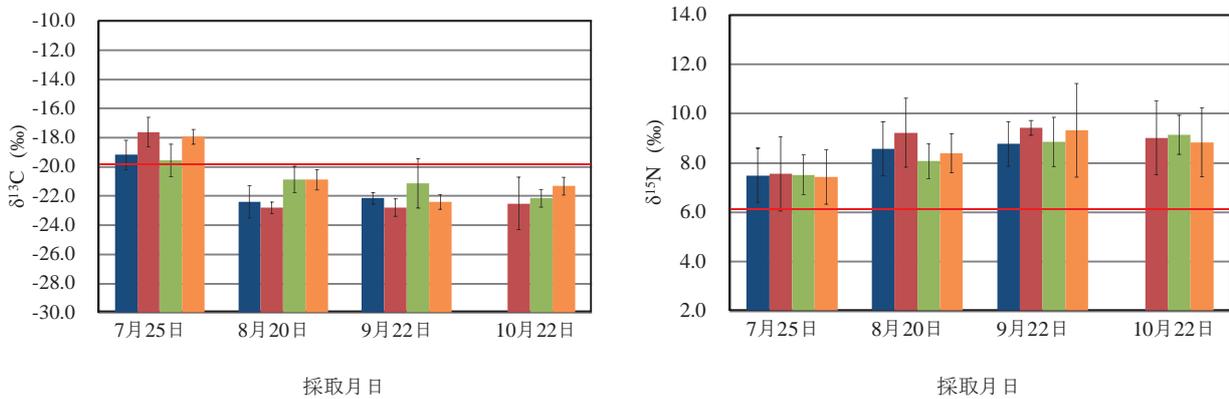
$\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of environmental elements and benthos

■ Paddy 1 ■ Paddy 3 ■ Paddy 4 ■ Paddy 6



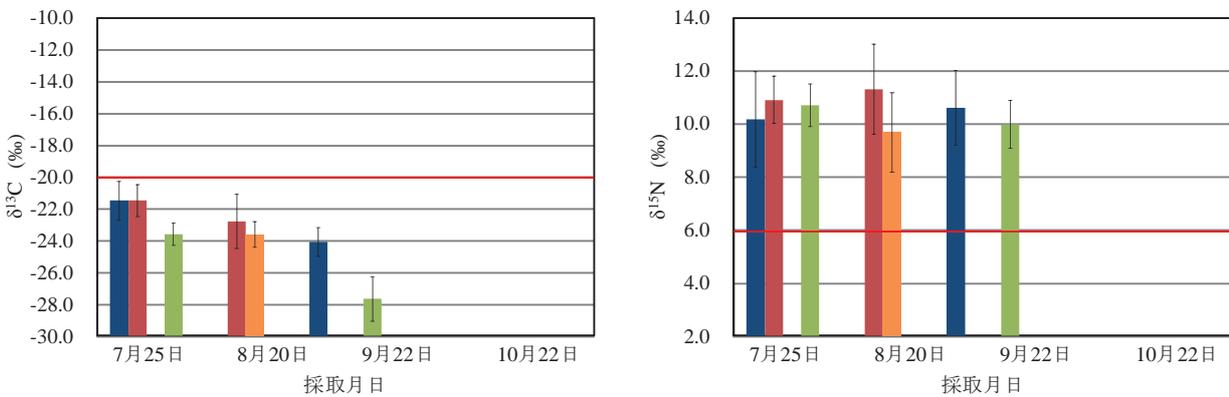
a *Pangasianodon hypophthalmus* の $\delta^{13}\text{C}$ (左) と $\delta^{15}\text{N}$ (右)

$\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of *P. hypophthalmus*



b *Barbonymus gonionotus* の $\delta^{13}\text{C}$ (左) と $\delta^{15}\text{N}$ (右)

$\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of *B. gonionotus*



c *Esomus metallicus* の $\delta^{13}\text{C}$ (左) と $\delta^{15}\text{N}$ (右)

$\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ map of *E. metallicus*

Fig.5 水田で養殖された魚の $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$

$\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of fishes cultured in paddies

4d)。 $\delta^{15}\text{N}$ もわずかに低下した。ミミズ類は採捕された個体が少なかったが、Paddy3で $\delta^{13}\text{C}$ が低下、 $\delta^{15}\text{N}$ が上昇し、 $\delta^{13}\text{C}$ は配合餌の値に近くなり、 $\delta^{15}\text{N}$ は配合餌より3%高い値を示した(Fig. 4e)。稲の葉は、 $\delta^{13}\text{C}$ は-26‰から-28‰の間の値を示し、季節変化は認められなかった(Fig. 4f)。 $\delta^{15}\text{N}$ も季節変化は認められなかったが、Paddy3およびPaddy6は、Paddy1およびPaddy4より高い値を示した。

陸上昆虫についてはイナゴ類、ショウリウウバツタ類、クモ類が採捕されたが、同じ採捕区においても $\delta^{13}\text{C}$ に著しいばらつきが認められたことから、試験区における物質フローを表していないと判断し、解析から除外することとした。

3.2.2 水田の魚の $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ の特徴

調査水田では*C. macrocephalus*がほとんど採捕されなかった。このため水田における調査結果については*P. hypophthalmus*、*B. gonionotus*に加え、水路から迷入し水田で採捕された個体数が多かった、メコン川流域の頻出種である*Esomus metallicus*についても解析することとした。

*P. hypophthalmus*はいずれの水田でも $\delta^{13}\text{C}$ はほとんど変化しなかったが、 $\delta^{15}\text{N}$ は若干上昇した。分布範囲は $\delta^{13}\text{C}$ は-22‰から-20‰、 $\delta^{15}\text{N}$ は6‰から8‰だった(Fig. 5a)

*B. gonionotus*は、Paddy1で $\delta^{13}\text{C}$ が低下し $\delta^{15}\text{N}$ は上昇した(Fig. 5b)。この傾向はPaddy3、Paddy4およびPaddy6でも認められた。分布範囲は、 $\delta^{13}\text{C}$ が-24‰から-18‰、 $\delta^{15}\text{N}$ が7‰から9‰だった。

*E. metallicus*は、Paddy3は時間とともに $\delta^{13}\text{C}$ は低下、 $\delta^{15}\text{N}$ は上昇した(Fig. 5c)。Paddy6は $\delta^{13}\text{C}$ 低下、 $\delta^{15}\text{N}$ はわずかに低下した。分布範囲は、 $\delta^{13}\text{C}$ は-20‰から-28‰と広がった。 $\delta^{15}\text{N}$ は7‰から11‰と高い値を示した。

3.2.3 水田の食物網

水田ごと、採取期ごとに食物網を解析したところ、プランクトンと*E. metallicus*、土壌とユスリカ類の間には、 $\delta^{13}\text{C}$ が近く、*E. metallicus*またはユスリカ類の $\delta^{15}\text{N}$ がプランクトンや土壌より3%程度高い関係が散見された。この結果をTable 1に示す。これらの関係はプランクトンから*E. metallicus*に、土壌からユスリカ類にエネルギーが伝達されていることを示唆している。

IV 考察

4.1 池における畜養結果

*C. macrocephalus*と*P. hypophthalmus*は同じナマズ目であり、ともに雑食とされているが、 $\delta^{15}\text{N}$ に差が生じた。*P. hypophthalmus*は低い値を示したことから、かなり植物食に近いと考えられる。

分析した3種のうち、後述する*C. macrocephalus*の一部からなるグループを除いて、 $\delta^{13}\text{C}$ は配合餌より低いので、配合餌は体の組成にほとんど影響していない。プランクトンを採取し

Table 1 土壌-ユスリカ類、プランクトン-*E. metallicus*の関係
Relationship between soil-chironomid, plankton-*E. metallicus*

	採取月	土壌-ユスリカ類	プランクトン- <i>E. metallicus</i>
Paddy 1	7月	○	○
	8月	×	—
	9月	○	○
	10月	—	—
Paddy 3	7月	○	—
	8月	○	○
	9月	—	—
	10月	×	—
Paddy4	7月	○	—
	8月	—	○
	9月	○	—
	10月	○	—
Paddy6	7月	—	○
	8月	○	—
	9月	○	○
	10月	○	—

注：○は $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ の関係から餌資源として利用している可能性があるもの、×は可能性が認められなかったもの、—は片方または双方が採取できなかったもの

なかったため水域内の生産者 $\delta^{13}\text{C}$ は不明であるが、池に陸上植物から落葉落枝が供給される立地条件ではなかったため、外部からの有機物供給は少ないと考えられる。*B. gonionotus*は成長とともに-22‰~-23‰付近に移行し、*P. hypophthalmus*と*C. macrocephalus*の一部も同様の値を示したことから、水域内生産、すなわち藻類の $\delta^{13}\text{C}$ はこの近辺の値である蓋然性が強い。魚類の $\delta^{15}\text{N}$ は餌の $\delta^{15}\text{N}$ より約3%高いから、藻類による水域内生産の $\delta^{15}\text{N}$ は4%程度と考えられる。この値は、池の水は生物濃縮の影響が小さく雨水の $\delta^{15}\text{N}$ —一般的にゼロ前後の低い値を示す—に近いと推察され、栄養段階が1上昇することと整合する。

$\delta^{13}\text{C}$ および $\delta^{15}\text{N}$ の分析結果から、畜養していた魚のうち $\delta^{13}\text{C}$ および $\delta^{15}\text{N}$ に影響が生じる程度配合餌を利用していた可能性があるのは $\delta^{13}\text{C}$ が-20‰程度、 $\delta^{15}\text{N}$ が9‰程度を示した、*C. macrocephalus*の一部である。*C. macrocephalus*が2つのグループに分かれた理由は不明である。

いずれの種についても、配合餌を含む複数の餌を利用していた可能性は否定できない。しかし配合餌の $\delta^{15}\text{N}$ が6‰であるから、主に配合餌を利用していたとすれば9‰程度を示すと考えられ、前述の*C. macrocephalus*の一部を除き、配合餌の影響は小さいと考えられる。

4.2 水田における給餌と水、ペントスなどの $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ の関係

水の $\delta^{15}\text{N}$ は水田間に明確な差が認められず、水の無機態窒素の $\delta^{15}\text{N}$ に対する給餌の影響は認められなかった。したがって下流に位置する無給餌区に給餌の影響はないと考えられる。土の $\delta^{15}\text{N}$ についても、ほとんどの水田において配合餌より低い値を示したことから、給餌の影響は認められなかった。

給餌された餌の窒素が魚以外の水田内の生物に利用されるとすれば、①直接または直接利用した生物を餌とする、②無機化された後イネ、プランクトンを通じて用いられる、のいずれかである。①の可能性があるのはユスリカ類、エビおよびミズミズ類である。配合餌の $\delta^{15}\text{N}$ は6.0‰であり、ユスリカ類がこれを利用したとすれば、配合餌が与えられた Paddy3 および Paddy6 における $\delta^{15}\text{N}$ は、施肥されていない Paddy1 および Paddy4 より高くなると考えられるが、有意差は認められず、 $\delta^{15}\text{N}$ に影響を与える窒素源とはなっていると認められなかった。

また配合餌がユスリカ類の $\delta^{13}\text{C}$ に影響を与えているならば-20‰程度の値を示すと考えられるが、配合餌を投入した Paddy3 および Paddy6 のユスリカ類の $\delta^{13}\text{C}$ は7月に-20‰程度の値を示したものの、次第に低下した。このことと7月のユスリカ類 $\delta^{13}\text{C}$ は無給餌の Paddy4 でも同程度の値であったことから、炭素についても配合餌はユスリカ類の $\delta^{13}\text{C}$ に影響を与える炭素源とはなっていないと考えられる。

エビについても、 $\delta^{13}\text{C}$ が-20‰から離れた、低い値を示したことから、エビの $\delta^{13}\text{C}$ に影響を与える炭素源とはなっていないと考えられる。

ミズミズ類については、配合餌を与えた Paddy3 は $\delta^{15}\text{N}$ が次第に上昇し、無給餌区の Paddy4 とは異なる値を示した。Paddy3 の $\delta^{13}\text{C}$ は配合餌の値に近く、 $\delta^{15}\text{N}$ の値は配合餌より約3‰高かった。ミズミズ類の $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ が土壌の影響を受けていなかったのは、土壌を採取した深さ、またはミズミズ類の餌選好性に起因する可能性がある。

以上から、①のルートでは配合餌はミズミズ類が餌として利用したと考えられる。

②のルートが機能していたならば、 $\delta^{15}\text{N}$ は Paddy3 および Paddy6 のプランクトンは Paddy1 および Paddy4 より高くなると考えられる。しかしいずれも明確な差は認められず、投入した配合餌は水田水域内の窒素フローに大きな影響を与えていなかったと考えられる。

イネの葉の $\delta^{15}\text{N}$ については、Paddy3 および Paddy6 は Paddy1 および Paddy4 より高くなり、配合餌がイネに吸収され利用されたと考えられる。

4.3 水田における給餌と魚の $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ の関係

*P. hypophthalmus*については、Paddy3、Paddy6 では配合餌を利用していると考えられる $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ を示したが、この値は無給餌区でも同様であり、本種が主に配合餌を利用したと

は断定できない。本種の $\delta^{15}\text{N}$ は、池と同様に *B. gonionotus* より低く、植物食が強いと考えられる。給餌の有無、種類に関わらず $\delta^{13}\text{C}$ は-20‰から-22‰、 $\delta^{15}\text{N}$ は6‰から8‰の狭い範囲に分布した。水田内のプランクトンはほぼ-25‰から-27‰の間の値を示したから、*P. hypophthalmus*の餌の起源は水域内で生産された有機物とは考えられない。水田内でもっとも生物生産量の大きなイネやプランクトンより高い $\delta^{13}\text{C}$ を示す有機物起源が存在し、*P. hypophthalmus*に伝達されていると考えられる。 $\delta^{13}\text{C}$ の高い生産者としては C_4 植物を餌とした無脊椎動物が水田に落下し本種の餌となる可能性もあるが、本種の $\delta^{13}\text{C}$ に影響を与えるほどの生物量が水域に落下するとは考えにくい。 $\delta^{15}\text{N}$ も動物食は濃くないことを示唆している。今回の研究では高い $\delta^{13}\text{C}$ を持ち魚類の $\delta^{13}\text{C}$ に影響を与える有機物起源を明らかにすることができなかった。

*B. gonionotus*については、成長とともに配合餌の $\delta^{13}\text{C}$ から離れていくことから、給餌は同種の $\delta^{13}\text{C}$ に大きな影響を与えていない。この種は成長とともに餌資源が変化することが明らかになった。池では成長とともに $\delta^{13}\text{C}$ が上昇し $\delta^{15}\text{N}$ は低下したのに対し、水田では $\delta^{13}\text{C}$ は低下、 $\delta^{15}\text{N}$ は上昇し、池と逆の結果となった。この機序は不明である。

*E. metallicus*については、給餌の有無による $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ の違いは認められなかった。成長とともに $\delta^{13}\text{C}$ は低下し、配合餌の値から離れていくことから、配合餌は同種の $\delta^{13}\text{C}$ に大きな影響を与えていないと考えられる。本種は $\delta^{13}\text{C}$ の分布域が広く、利用している餌が多様であることを示しているが、Paddy1、3、4のようにプランクトンを餌としていると推定できるケースがあった。 $\delta^{15}\text{N}$ が水田で採取された3種のなかで最も高かったことは、動物プランクトンを利用していることを示唆している。

*E. metallicus*は、既往文献において動物プランクトン、陸上昆虫、水生昆虫の幼虫を餌とするとされている。2010年に Vientiane 市付近で採取した *E. metallicus* は、植物プランクトンを餌としている結果となったが(森ら、2012)、本研究においては $\delta^{15}\text{N}$ が高い結果となったことから、動物プランクトンを主要な餌としている可能性がある。このことは、*E. metallicus*の餌は、利用している環境や物質など、生息環境による生態的地位の固有性があることが示唆されたこと(森ら、2012)と整合している。本種は生息地に存在する餌資源を広範囲に利用していると考えられる。

4.4 水田における物質フロー

本調査を行った水田における物質の生産・フローは Fig. 6 で表すことができる。これは考えられるフローをすべて記したものであり、 $\delta^{13}\text{C}$ 及び $\delta^{15}\text{N}$ では確かめられなかったルートを含む。今回本研究で用いた水田は無施肥であるから、外部から供給される窒素は雨水と灌漑水に含まれる溶存態無機窒素であり、給餌区においては餌に含まれる窒素化合物がこれに加わる。調査水田の立地条件を考慮すれば、水に含まれる窒素は一般的な

日本の水田より少なく、餌由来の窒素をより鋭敏に検出できたと考えられる。

餌に含まれる窒素化合物は体内で同化され魚の体に転移するルートは、今回の水田調査では明確に出来なかった。水域で分解され主にアンモニア態窒素としてイネに吸収されるルートは、給餌区のイネの葉の $\delta^{15}\text{N}$ が高かったことにより明らかになった。また餌を直接ミミズ類が利用するルート、ユスリカ類が土壌を利用するルート、プランクトン—餌に由来しない溶存態無機炭素と、灌漑用水・雨水に含まれる溶存態無機窒素を利用—から *E. metallicus* に至るルートが認められた。

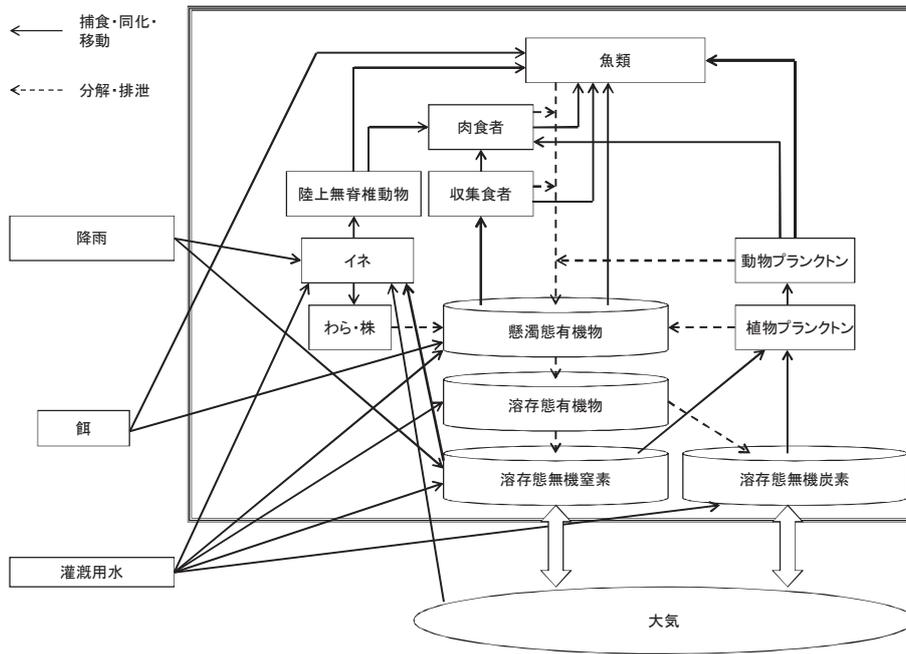
同じ収集食者であっても、ユスリカ類よりミミズ類が給餌された $\delta^{15}\text{N}$ を利用していた。我が国におけるユスリカ類の炭素安定同位体比の分析でも季節と共に $\delta^{13}\text{C}$ が低下することが報告されている (森ら, 2007)。ユスリカ類には季節による餌資源の変化など能動的な要因による $\delta^{13}\text{C}$ 変動が存在するようである。窒素起源も同様に、環境以外の要因の影響を受けている蓋然性がある。このことは物質フローを単純化して解析する上で阻害要因となり得る。水田を含めた水域で生物を用いた生息環境の多様性評価を行うには、ユスリカ類よりミミズ類の方が適していると考えられる。

V 結 言

今回の研究において、池で畜養された *C. macrocephalus* の一部について、給餌された配合餌を魚体の $\delta^{13}\text{C}$ および $\delta^{15}\text{N}$ に影響する程度まで利用していると推測された。*B. gonionotus* は成長に従って餌資源が変化することが明らかになった。その他の魚類、ユスリカ類などのベントス等は、それぞれに含まれる炭素の $\delta^{13}\text{C}$ 、窒素の $\delta^{15}\text{N}$ は、身体の組成に影響を与えるほど配合餌を利用していなかった。

$\delta^{15}\text{N}$ が比較的高い配合餌を供した水田において、イネが配合餌由来の窒素を吸収していることが確かめられた。またミミズ類が配合餌を餌としていることが示された。一般的にユスリカ類が土壌の影響を、*E. metallicus* がプランクトンの影響を受けていることが明らかになった。水田で発生した有機物は、複数のルートを通じて上位消費者に伝達され、水域の下流へ、あるいは羽化した昆虫によって近隣の陸域へ有機物が移動していると考えられる。

ユスリカ類とミミズ類は双方とも収集食者であるが、利用する餌資源が異なる。ユスリカ類は季節により、利用する餌資源が変化すると考えられる。炭素・窒素安定同位体比を用いて物



(森, 2008) をもとに作成

注: 太い線は、本研究において物質フローが示されたもの

Fig. 6 調査水田 (給餌区) における物質フロー
Material flow in an experiment paddy (feed section)

質フローや生息環境を評価するにはユスリカ類に比しミミズ類の方が適していると考えられる。

この研究により、水田における物質、とりわけ窒素フローはベントスの生態に起因する固有性を有することが示された。すなわち同じ摂食機能群に位置づけられる収集食者間においても、おそらく餌選好性により利用する餌が異なり、複数の窒素フローが存在していると考えられる。また魚類についてもこれまでの知見によれば同じ雑食と位置づけられてきた種間においても、*P. hypophthalmus* のように植物食に近い種とこれより動物食に偏る *C. macrocephalus* のように栄養段階に違いがみられることも明らかになった。このような物質フローの多様性は水田内の生態系が複雑であること、餌資源を含めた生息環境が多様である資源を利用しながら生活していることを示している。

今回水田に生息する生物の炭素・窒素同位体比分析により明らかになったフロー特性は、水田の立地環境や営農の違いにより異なる結果を示す可能性があると考えられる。なぜなら、少なくともこれらの生物は「そこにあるもの」を選好性のもとに利用しているからである。水田により生物相は異なると考えられ、上位消費者はその中から効率的な摂食行動をとる。ラオス国の小河川で採捕した *E. metallicus* は植物食に近い値を示したが(森ら, 2012)、本研究において分析した魚種の中で最も高い $\delta^{15}\text{N}$ を示したことも、この理由によると考えられる。

本研究結果は炭素・窒素安定同位体比を「生息環境の多様性」の評価に用いる可能性を増強すると同時に、水田生態系の多様性・固有性を明らかにした。

参考文献

- Canaba, G., Rasmussen, J. B. (1991): Modeling food chain structure and contaminant bioaccumulation using stable nitrogen isotopes, *Nature*, 372, 255-257
- 中央研究院: Fish Base,
<http://fishbase.sinica.edu.tw/search.php?lang=Japanese>
- 南川雅男 (1997): 安定同位体比による水圏生態系構造の解明, *水環境学会誌*, 20 (5), 12-16
- 森 淳 (2009): 安定同位体比からみた水田・水路の生態系、春の小川の淡水魚—その生息場と保全水谷正一・森 淳編著・, 学報社, 149-176
- 森 淳・森岡伸介・小出水規行・渡部恵司 (2012): 人為的攪乱を受けない環境における魚類の炭素・窒素安定同位体比特性—ラオス国農業水路系を例とする水域環境多様性の検討—, *農村工学研究所技報*, 214, 197-208
- 森 淳・水谷正一・塩山房男・中茎元一・柿野亘・松澤真一 (2007): 安定同位体比法による水田に生息するドジョウの餌の推定, 平成 19 年度農業土木学会講演要旨集, 540-541

Food Web and Material Flow in Paddy Environment Free from Human Influence

MORI Atsushi*, MORIOKA Shinsuke**, KOIZUMI Noriyuki*, Bounsong Vongvichith*** and WATABE Keiji*

Renewable Resources Engineering Research Division, Ecological Engineering*
Fisheries Division, Japan International Research Center for Agricultural Sciences**
Living Aquatic Resources Research Center, Lao People's Democratic Republic***

Summary

Paddy fields are one dominant source generating organic matter in a watershed. Our previous study showed that $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ standard variations in irrigation systems with lakes are larger than in systems without lakes. Both systems were used to evaluate environmental diversities after clarification of the role of paddies as generating sources. Considerable numbers of paddies are unaffected by human influenced nitrogen. Clarification of such paddies is possible because material flow does not contain polluted nitrogen that contributes to noise in an analysis. We studied fish cultures in paddies located in a hilly and mountainous area of Laos to analyze material flow in a food web by using blended pellets that contained high $\delta^{15}\text{N}$. Our findings were as follows:

- [1] *Clarias macrocephalus* in the pond evidently ate the pellets because their $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ were influenced by the pellets.
- [2] Nitrogen absorption from pellets to rice and from pellets to earthworms was observed.
- [3] *Barbonymus gonionotus* changed food resources as it grew.
- [4] Pellets influenced $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ were not observed in other animals and environmental elements.
- [5] Organic matter generated in paddies was transmitted to superior consumers via plural routes. This organic matter may have been transferred from paddies to downstream or nearby terrestrial areas by emerging insects.

Key words: Carbon stable isotope ratio, Nitrogen stable isotope ratio, Material flow, Environmental elements, The Mekong River