

# 食物網からみた農業生態系の物質循環

## Material Circulations in the Agricultural Ecology from the Food Web

森 淳\*・水谷正一\*・松澤真一\*

Atsushi Mori, Masakazu Mizutani and Shinichi Matsuzawa

### はじめに

陸水域における安定同位体比を用いた物質循環解析は、河川・湖沼や地下水を中心に行われてきたが、農業生態系における知見はほとんど見あたらない。農業生態系は河川、湖沼、地下水から独立して存在しているのではないから、正確には流域における「農」と「水」の相互作用を視野に入れた物質循環というべきであろう。

翻って、農業生態系の生物多様性を保全するため、2003年頃から安定同位体比を用いた水田生態系における食物網解析が着手された。生態系と物質循環は密接に関連するから、この研究の進捗とともに物質循環に関する知見が蓄積されつつある。

本稿では、灌漑排水や農地整備などをカバーする農業土木学の立場から、安定同位体比を用いてアプローチした食物網解析事例と物質循環について報告する。

### わが国の農業生態系の特徴と現状

わが国の農業生態系は、北海道の酪農地帯や生産団地を形成している畑作地帯などを除き、水田の影響を受けていることが多い。本州、九州および四国では、灌漑が出来なくて水田として利用できなかった土地が畑作に用いられてきた。この他にも生産調整により畑として用いられている水田がかなりある。これらも水田生態系の一部としてとらえられること

が多い。

縄文晩期にわが国で水稻作が始まって以来、河川の後背湿地などが水田になり、これらの湿地をハビタットとしていた生物は水田を生息空間として用いるようになった。水田生態系は、ヒトが作り出し、また関与することで継続する管理生態系である点で河川生態系や湖沼生態系とは異なる。この関与は生態系としての不完全さを意味するものではない。むしろ、人間が無意識のうちに生物多様性を保全してきたという点で特異的・自然調和的である。

現在わが国の水田面積は約260万ha(2.6万km<sup>2</sup>)、国土の約7%を占める。また、受益面積が100ha以上の基幹的農業水路の総延長は4.5万kmに達する。これは水田に接している小排水路を含まない数値であるので、水路の総延長は恐らくこの何十倍に達すると考えられる。水路は流水域を選好する生物のハビタットである。さらに全国に21万箇所の溜池がある。これらの生物多様性の保全に果たす重要性は計り知れない。

しかし、農業生産の近代化や農業や農村を取り巻く社会経済情勢の変化にともなって、水田を中心とする農業生態系の構成要素が変貌し、生物の生息空間としての機能が低下している。農業生産の近代化に伴う生態系への影響は、農薬の使用と水田などの物理的条件の変化によるものが大きい。ここでは後者について述べる。

圃場整備事業は、あちこちに分散している小さな区画の水田をまとめ、用水路と排水路を分離し、湿田の場合は暗渠排水を施備事業により、収穫ま

\* (独) 農業工学研究所 宇都宮大学農学部

第1表 農業生態系の構成要素と変貌

構成要素	特徴と変貌
水田	一時的水域（止水域）、単一植生、面的広がり、営農による管理（耕起、防除、中干） <b>圃場整備による乾田化・水路との落差形成</b>
水路	流水域、流量変動大 <b>用排分離が進み、用水はパイプライン化</b>
溜池	止水域、水位変動大 <b>用水改良事業に伴い改廃、管理放棄による環境悪化、一部で富栄養化、外来種の侵入</b>
畦畔	傾斜地では水田面積の20%を越えることも、イネ科雑草、カヤツリグサ科雑草、広葉雑草 <b>一部はコンクリート化、雑草防除のために黒マルチ化</b>
畑・樹園地	作付作目により様々な生態系 <b>転作により水田の一部が畑地化</b>
農道	緑地帯として機能 <b>畦道の消失、大規模化・アスファルト舗装化</b> <b>一定規模以上の畜舎に対して水質汚濁防止法および家畜排せつ物法の規制</b>
人家	屋敷林は鳥類など小動物の生息場所 <b>生活雑排水の水域への流入</b>
畜舎	有機性資源の農地還元 <b>経営規模の拡大・排水が周辺環境に影響</b>
里山	かつて薪炭林、肥料源などとして利用 <b>管理放棄による荒廃</b>

注：変貌を青字で標記

でに要する労働時間は大幅に短縮され農業生産の近代化に寄与し、水田を畑として利用できるようになり需給バランスに応じた農業生産が可能になった。

一方で、水田生態系に負のインパクトを与えたことも事実である。たとえば、圃場整備により乾田化が進んだため、非灌漑期に産卵するアカガエル類の産卵適地が失われた。暗渠排水を行うためには水田と排水路の高低差を確保する必要がある。水田と排水路の間には落差が生じ、水田を産卵場として用いてきたドジョウ類などの遡上が妨げられた。水路がコンクリート化、流速が増大したことにより、生物の生息環境として適さなくなった。

ハビタットの質の低下は農業生態系の脆弱化につながる。たとえば、レッドデータブック種が集中する地域の49%が里地里山と呼ばれる範囲に分布している。生態系には物質循環機能があるから、生物群集の種数・個体数の減少により、農業生態系における「生物を介在する物質循環」（食料・農業・農村基本法）は縮小したと考えられる。この全てが水田生態系の物理的条件の改変に起因するわけではないが、

かなりのインパクトを与えてきたということは容易に想像できる。農業生態系の構成要素の特徴と変貌を第1表に示す。

食料・農業・農村基本法において、農業生産基盤の整備にあたっては、「環境との調和に配慮しつつ」必要な施策を講ずることとされた。平成13年には土地改良法が改正され、事業の実施に当たっての原則に「環境との調和に配慮すること」が位置づけられた。その後も平成15年から自然再生推進法が施行されるなど、生態系保全にむけた法制度の整備が進められている。

### 農業生態系と安定同位体比

農業生態系に関する研究のうち生態系保全に関する研究としては、ここに生息する水生生物の生態の解明と移動確保に関するものが多く、生物群集間の相互作用やこれにともなう物質循環に関する知見は少ない。農業生態系の特質を把握したうえで効果的

な保全対策を講じるためには農業生態系の食物網解析が急務であり、安定同位体比法はそのための有効な手段である。また、生物を介在する物質循環を活性化させることは、栄養塩類や有機物の除去につながる。

農業生態系における安定同位体比を用いた研究としては、主として農作物の栄養構造の解析（米山, 1991）、土壌に含まれる有機物の炭素安定同位体比を用いた過去の植生の推定（Hiradate et al., 2004）、農業水域における脱窒の解析（駒田・竹内, 1998）など、作物学、土壌学、肥料学を中心に成果がある。しかし、食物網など生物界内部あるいは無生物界との相互作用および農村空間における物質移動の解析に適用した事例は少なく、ここ2、3年前にようやく着手されたところである。

食物網における消費者の $^{13}\text{C}$ は捕食によって1‰程度しか上昇しないため、起源となる有機物の $^{13}\text{C}$ を反映する。このため生産者の $^{13}\text{C}$ は食物網を解析する上で重要な情報である。炭素安定同位体比( $^{13}\text{C}$ )は $\text{C}_3$ 植物で低く(-27‰前後)、 $\text{C}_4$ 植物で高い(-13‰前後)、藻類はこの中間の-20‰前後であることが多い。このため $\text{C}_3$ 植物が多い食物網に属する動物の $^{13}\text{C}$ は低く、 $\text{C}_4$ 植物の影響を受けていれば高くなる。水域の中に $^{13}\text{C}$ の高い生物がいれば、藻類の影響が示唆される。谷津田の食物網では陸起源有機物が重要な生産者機能を有していること（松澤, 2005）、扇状地の排水路では陸起源有機物とともに藻類が生産者となっており、両者から構成される付着物の $^{13}\text{C}$ は藻類の生産が活発化する夏季に上昇したこと（森, 2006）が知られている。まず、陸起源有機物は農業生態系の水生动物の重要な栄養源となっていると考えられることから、大量の落葉落枝を水域に供給する里山で生産される有機物の $^{13}\text{C}$ 特性を報告する。

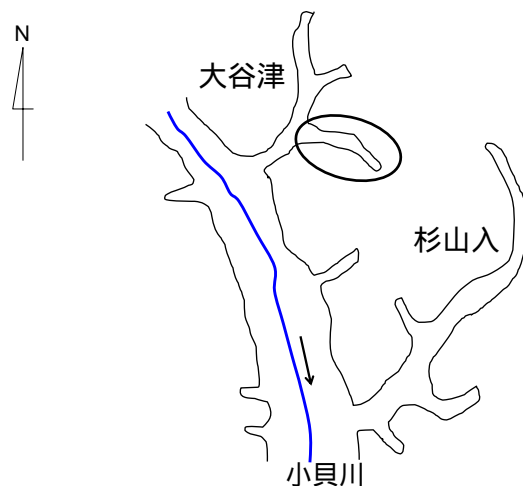
一方、 $^{15}\text{N}$ は栄養段階が1段階上がるごとに、つまり捕食が起きるたびに約3‰上昇するので $^{15}\text{N}$ によって栄養段階を知ることが出来る。また、農業生態系に多くみられる畜舎や人家からの排水に含まれる無機態窒素（多くは硝酸態窒素）の $^{15}\text{N}$ は、降雨

に含まれる無機態窒素のそれより高いので、適当な立地条件のもとで生物や無生物の $^{15}\text{N}$ を農業生態系における窒素動態を探るトレーサーとして用いることが出来る。森(2004)は農業排水路に流入した $^{15}\text{N}$ の高い無機態窒素が藻類に吸収され食物網に移動していること、生活雑排水が流入する溜池の水際に生育しているアシ類の $^{15}\text{N}$ が堤体で採取したものより高いことから、水際は水域から陸域への物質移動が発生していることを示した。本稿では松澤(2005)のデータを元に谷津田地域における窒素循環を検証する。

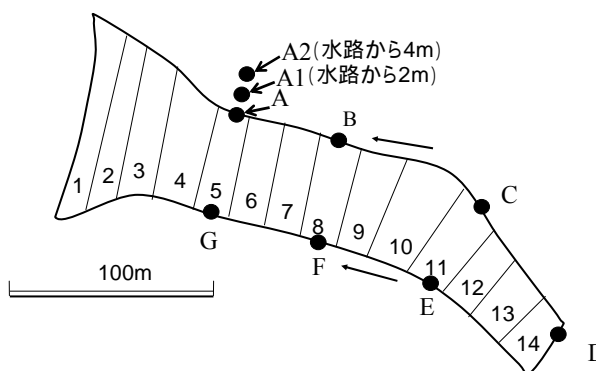
### 調査地概要と測定方法

本稿は、農業生態系における生産者の $^{13}\text{C}$ 特性と食物網の $^{15}\text{N}$ 特性から構成されている。いずれも利根川水系小貝川の上流部に位置する、栃木県市貝町の谷津田地域における調査結果を用いている。

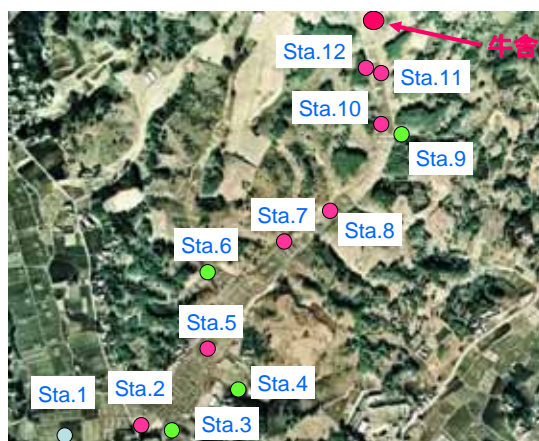
生産者の $^{13}\text{C}$ 特性調査は、同町大字大谷津で実施した（第1図, 第2図）。里山の斜面下部を土水路が流れており、傾斜はかなり急である。水面幅は50cm程度と狭い。左岸の地下水位は右岸に比べて高く、斜面法尻付近でしばしば地下水が滲出している。また小規模な斜面崩落個所には地下水の湧水がみられる。流量は右岸の方が左岸より少なく、調査を行っ



第1図 調査対象谷津の位置関係



第2図 大谷津の調査地点位置図



国土画像情報(国土交通省)より

第3図 杉山入の調査地点位置図(地点記号の桃色は谷津本流、黄緑は支流、水色は小貝川本流を示す)

た2005年1月から2月にかけては、右岸最上流部から水田10の間のところどころで水流が途絶えていた。

さらに、水生動物を介した炭素の移動を確かめるため2005年7月にこの谷津田地域においてクモ類を採取した。クモ類は水路のカバーとなっている植物をスリーピング法によって、隣接する畦畔で見取り法によって地上徘徊性種(ウツキコモリグモ)を採取した。これらの試料の $^{13}\text{C}$ をThermo Finnigan社製の質量分析計Delta plus XPで測定した。

谷津田地域における窒素循環の検証に用いるデータは、大谷津の南隣に位置する杉山入の谷津田で採取した生物の $^{15}\text{N}$ である。この谷津は、最上流部で牛舎からの排水が混入しており(第3図)、これをトレーサーとして用いることができるため物質循環の解析に適した調査サイトである。本稿では水路堆積物、ユスリカ類(幼虫)、アジアサナエトンボ類(幼虫)およびドジョウの $^{15}\text{N}$ を解析した

### 結果と考察

#### 1. 陸起源有機物の炭素・窒素安定同位体比特性

##### 1.1. $^{13}\text{C}$ の挙動

コナラ落葉の $^{13}\text{C}$ 平均は $-30.0\text{‰}$ となり、A1およびA2地点の $^{13}\text{C}$ が有意に低かった( $t(10)=4.464, p<0.05$ ) (第4図)。A地点とB、C地点の日照条件には差はないため、この差は日照以外の

環境条件の違いによるものと考えられる。

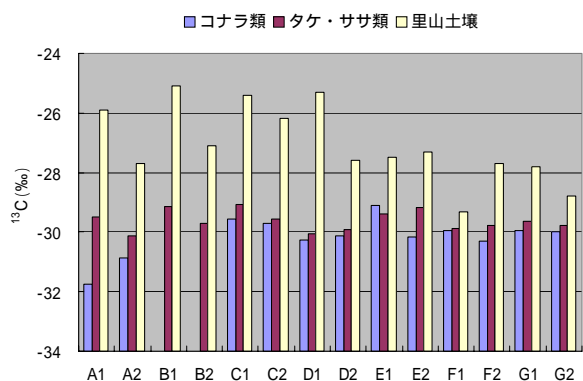
土壌の $^{13}\text{C}$ 平均は $-27.1\text{‰}$ となり、落葉より $2.9\text{‰}$ 高かった。この差は有意である( $t(20)=7.662, p<0.05$ )。しかし、落葉と土壌の $^{13}\text{C}$ に有意な相関はみられなかった。

土壌水分量と $^{13}\text{C}$ の関係を第5図に示す。土壌の $^{13}\text{C}$ と土壌水分量との間には、 $r = -0.558$  ( $p<0.05$ )のやや弱い負の相関がみられた。特に水路から2m離れた地点では $-0.900$  ( $p<0.05$ )の非常に強い負の相関が認められた。

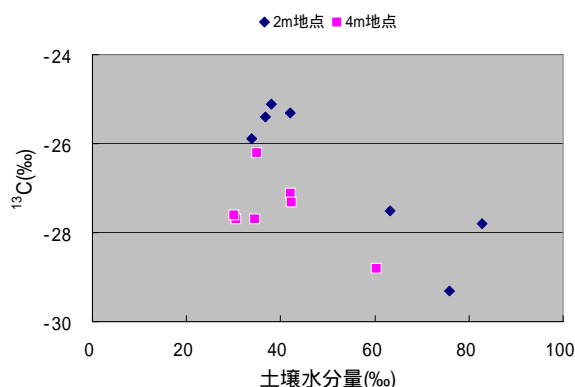
土壌の $^{13}\text{C}$ が落葉より高かったのは、有機物の分解にともなって $^{13}\text{C}$ が上昇するためと考えられる。有機物は好氣的条件下で分解が促進される。左岸では土壌水分が多いため有機物の分解が抑制され、 $^{13}\text{C}$ が相対的に低かったものと推察される。

水路堆積物の $^{13}\text{C}$ はA~G平均で $-26.7\text{‰}$ 、28地点平均で同じく $-26.7\text{‰}$ (最低値: $-29.6\text{‰}$ ,最高値: $-23.8\text{‰}$ )となり、土壌 $^{13}\text{C}$ より $0.4\text{‰}$ 高い値を示したが、この差は有意ではなかった。

堆積物の $^{13}\text{C}$ と土壌との相関はみられなかった。これは、流域から流入した有機物が混合しながら流下するためである。堆積物の特徴については後述する。



第4図 落葉と土壤の  $^{13}\text{C}$



第5図 土壤水分量と  $^{13}\text{C}$  の関係

### 1.2. $^{15}\text{N}$ の挙動

落葉の  $^{15}\text{N}$  平均は  $-2.7\text{‰}$  (最低値:  $-4.2\text{‰}$ , 最高値:  $-0.8\text{‰}$ ) となり、この里山林の樹木が降雨由来の窒素に依存していることを示している。

土壤の  $^{15}\text{N}$  平均は  $1.4\text{‰}$  となり、落葉に比べて  $4.1\text{‰}$  高かった。これは、分解過程における硝化と脱窒によるものであると考えられる。土壤の  $^{15}\text{N}$  と落葉の間に有意な相関はみられなかった。土壤の  $^{15}\text{N}$  についても  $^{13}\text{C}$  と同様に、生体の  $^{15}\text{N}$  よりも分解過程における化学反応の影響が大きいと考えられる。

堆積物の  $^{15}\text{N}$  は、A~G 平均で  $3.3\text{‰}$ 、28 地点平均で  $3.1\text{‰}$  (最低は  $0.7\text{‰}$ , 最高は  $5.6\text{‰}$ ) となり、土壤平均との差は  $1.7\text{‰}$  だった。落葉との差は  $6.0\text{‰}$  となった。これは栄養段階でいえば 2 に相当する、大きな差である。右岸 ( $3.5\text{‰}$ ) と左岸 ( $2.6\text{‰}$ ) に有意な差があった。堆積物  $^{15}\text{N}$  の分布特徴については

後述する。

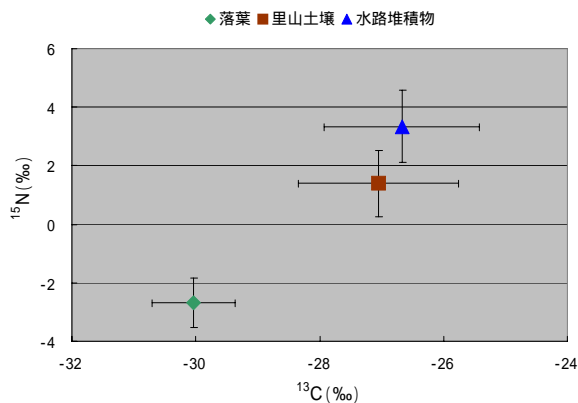
### 1.3. 堆積物の炭素・窒素安定同位体比分布

水路堆積物に含まれる有機物は、陸起源有機物と藻類で構成される。森(2006)は付着藻類の生産が活発な農業排水路で付着物の  $^{13}\text{C}$  と流速の間に相関がみられた理由を、流速の大きな地点では陸起源有機物が掃流されるためと考え、付着物に占める藻類比は付着物の  $^{13}\text{C}$  を決定する重要な要因であることを示した。

$^{13}\text{C}$  の低かった地点の中には未分解の落葉が多察されたことから、分解速度が遅い、または細片化されない有機物が集積しやすい環境であることが示唆されたが、低い値を示した原因がわからない地点もあった。

左右岸別にみると、 $^{13}\text{C}$  に有意な差はなかったが、 $^{15}\text{N}$  は右岸の方が有意に高かった ( $t(26)=2.247, p<0.05$ )。灌漑期に土水路の流速が増大し攪乱され嫌氣的条件が起きにくいいため脱窒量が減少することが知られている(駒田・竹内, 1998)。左岸の流速は右岸より大きいため、右岸に比べて脱窒量が小さく、 $^{15}\text{N}$  の上昇が抑えられた可能性がある。

第6図に A~G 地点における落葉、土壤および堆積物の  $^{13}\text{C}$  -  $^{15}\text{N}$  マップを示す。土壤の  $^{13}\text{C}$  は落葉と堆積物の差の  $88.7\%$  に、 $^{15}\text{N}$  は  $67.7\%$  に位置しており、水路堆積物の  $^{13}\text{C}$  および  $^{15}\text{N}$  は陸域における分解過程でほとんど決定されることが示された。また、落葉 - 水路堆積物の  $^{13}\text{C}$  -  $^{15}\text{N}$  を結ぶ直線



第6図 落葉から堆積物の  $^{13}\text{C}$  変化

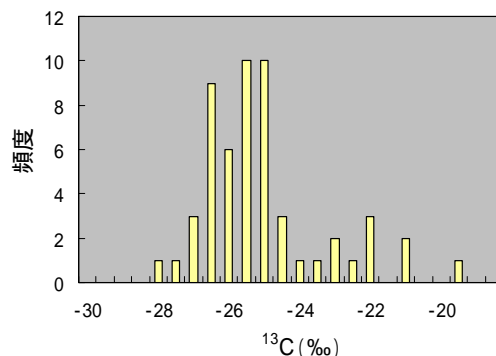
の勾配の方が、落葉 - 土壌の勾配よりも大きい。陸域で有機物分解により上昇した  $^{13}\text{C}$  は水域では分解速度が小さくなるためあまり上昇せず、一方水域に流入してから促進される脱窒に伴って  $^{15}\text{N}$  が上昇すると解釈できる。

#### 1.4. クモ類の $^{13}\text{C}$ と炭素移動

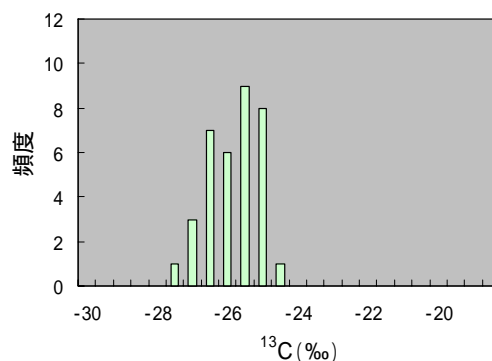
クモ類採取の結果、水路上部の植物群落では造網性のヤサガタアシナガグモ、オオシロカネグモおよび徘徊性であるイオウイロハシリグモ、ハエトリグモ類、カニグモ類などが採捕された。ここでは植物体で採取された徘徊性種を、地上で生活するウズキコモリグモと区別するために樹上徘徊性種とする。以下、クモ類の  $^{13}\text{C}$  をサンプル全体（第7図）、造網性種（第8図）、樹上徘徊性種（第9図）、地上徘徊性種（ウズキコモリグモ、第10図）のヒストグラムを示す。ただし第7図のヒストグラムには異なる採捕方法で採取されたデータが含まれているので、2つのピークの大小を比較することは出来ない。

造網性クモ類の平均  $^{13}\text{C}$  は  $-26.0\text{‰}$ （標準偏差： $0.72$ ）となった。このうち個体数の多かったヤサガタアシナガグモとオオシロカネグモの平均  $^{13}\text{C}$  は、それぞれ  $26.1\text{‰}$ （同： $0.74$ ）、 $26.0\text{‰}$ （同： $0.78$ ）と非常に近い値を示したことから、両種は同じ餌資源を利用していることが強く示唆された。これらの値は前述の水路堆積物の  $^{13}\text{C}$  に近く、造網性種は幼虫期を里山由来有機物に依存した昆虫類を主要な餌としていると考えられる。

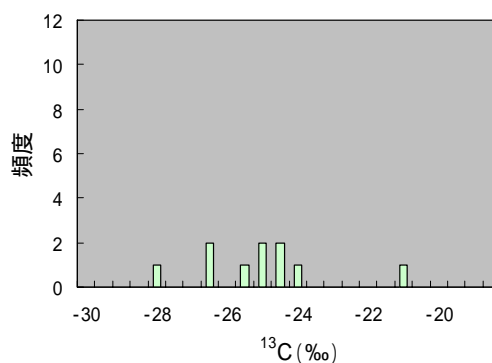
一方、ウズキコモリグモの平均  $^{13}\text{C}$  は  $-22.2\text{‰}$ （標準偏差： $1.15$ ）となり、 $\text{C}_3$  植物やこれに由来する食物網の属する造網性種とくらべてかなり高い値を示した。一次消費者の  $^{13}\text{C}$  を計測すると  $-27\text{‰}$ 付近に集中する種や  $-10\text{‰}$ 付近に集中する種が見られる。このような  $^{13}\text{C}$  の差は、一次消費者が  $\text{C}_3$  植物の特定種を好んで餌とするか、 $\text{C}_4$  植物の特定種を選ぶか、つまり、草食動物にしばしば見られる狭食性に起因していると考えられる。クモ類は広食性なので、一次消費者の  $^{13}\text{C}$  差はある程度相殺されているだろう。このように考えると、ウズキコモリグモの  $^{13}\text{C}$  の平均値は、畦畔における植物生産の平均的な



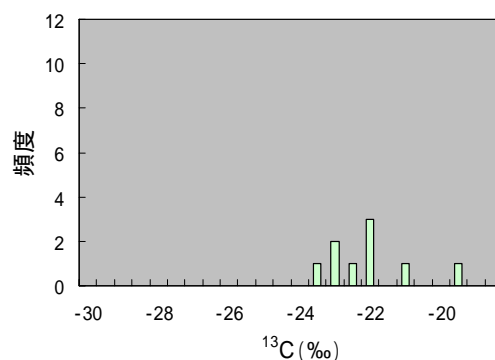
第7図 クモ類の  $^{13}\text{C}$  分布



第8図 造網性クモ類の  $^{13}\text{C}$  分布



第9図 樹上徘徊性クモ類の  $^{13}\text{C}$  分布



第10図 地上徘徊性クモ類の  $^{13}\text{C}$  分布

$^{13}\text{C}$  に近いと思われる。地上匍匐性クモ類の  $^{13}\text{C}$  が高かったことから畦畔の植物群落にはかなり  $\text{C}_4$  植物が含まれていると考えられる。

以上をまとめると、水路の上で巣を張っていたクモ類は里山で生産された有機物由来の食物網に属し、一方畦畔で生息している匍匐性クモ類は、畦畔で生産された有機物由来の食物網に属する。このような生物界における資源の使い分けは、イネ、畦畔雑草、里山など様々な種類の有機物が生産される農業生態系ではよく見られるのかも知れない。

## 2. 谷津田地域における窒素循環

杉山入の谷津田では第 11 図に示すように、土壌堆積物、ユスリカ類、ヤゴ類およびドジョウの  $^{15}\text{N}$  は上流ほど高く、流下とともに低下した後再び高くなっていることが明らかになった。上流部では畜産排水の影響により高い  $^{15}\text{N}$  を示し、山林および水田からの流入によって  $^{15}\text{N}$  が低下した後に集落からの生活雑排水が混入したため再び上昇したと考えられる。

これは源流部で  $^{15}\text{N}$  が低く流下とともに漸増する、一般的な溪流の動態とは異なっている。農業生態系では、本調査地のように比較的標高の高い丘陵部に畜産施設が立地していることがある。このような環境では、畜産由来の窒素が環境に排出され、食

物網に取り込まれている。

ドジョウの  $^{15}\text{N}$  はユスリカ類よりほぼ 3%程度高く、ユスリカ類がドジョウの主要な餌資源であることが確かめられた。

## おわりに

本調査地では、里山、畜舎などで発生する有機物が食物網に取り込まれ、上位消費者へと移動していることが明らかになった。これらは多くの谷津田地域に共通する点源・面源であり、今後調査が進むに従って同様の解析結果が得られるものと推察される。

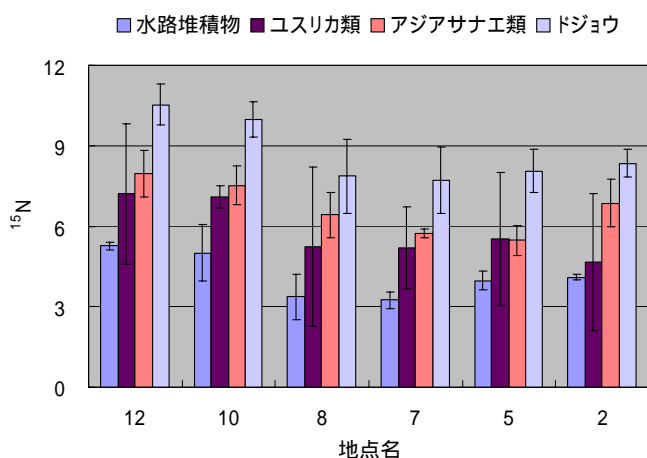
一方、谷津田以外における調査結果でもわずかな立地条件の違いにより炭素・窒素安定同位体比が変化することが確かめられており（森, 2006）、本調査で得られた解析結果は谷津田の特殊性にのみに起因するのではないと考えられる。農業生態系には比較的狭小な空間の内部に多様な有機物の発生源が存在することが多いため、物質循環が複雑化するのだろう。

この複雑性を、水田生態系における動物の生態の把握に還元できると期待される。なぜなら、水田生態系の生物の生活史は営農による攪乱をうまく利用・回避しており、特に水域の状態に合わせて移動していることが多いからである。たとえば、ドジョウは水田に水が入る田植え期に遡上を開始し、産卵場である水田に侵入する。 $^{13}\text{C}$  は水域内における動物の移動追跡にも有効だと思われる。

このように考えると、安定同位体比は農業生態系の食物網のみならず物質循環と動物生態の解析に威力を発揮するものと期待される。

## 引用文献

Hiradate S, Nakadai T, Shindo H and Yoneyama T (2004) : Carbon source of humic substances in some Japanese volcanic ash soils determined by carbon stable isotopic ratio of  $\delta^{13}\text{C}$ . Geoderma 119.



第 11 図 谷津における土壌・生物の  $^{15}\text{N}$  の変遷 (松澤, 2005) をもとに作成

pp.133-141.

駒田充生,竹内誠 (1998) : 農業域の小水路における脱窒速度の測定と窒素浄化機能の評価, 日本土壤肥料学雑誌,69(2), pp.162-169.

松澤真一 (2005) : 安定同位体比法の谷津内食物網への適用,宇都宮大学大学院修士論文

森 淳 (2004) : 農業用排水路と溜池における生物を媒介とした物質循環, 農村計画学会誌, 23(3), pp.203-210.

森 淳 (2006) : いさわ南部地区原川排水路における付着物の炭素・窒素安定同位体比特性,農業土木学会誌 (印刷中)

米山忠克 (1991) : 安定同位体比 ( $^{15}\text{N}$ 、 $^{13}\text{C}$ ) を用いた植物の栄養構造の研究,日本土壤肥料学雑誌,62(3),pp211-214