

## B-6 陸上生態系の二酸化炭素動態の評価と予測・モデリングに関する研究

### (4) グローバル・カーボン・サイクルモデルの開発

#### ① 農林業地域のカーボン・サイクルモデルの開発

研究代表者 農業環境技術研究所 地球環境研究チーム 袴田共之

農林水産省農業環境技術研究所

企画調整部 地球環境研究チーム 袴田共之

環境管理部 生態管理研究室 松本成夫 (現、国際農林水産業研究センター)

三島慎一郎・織田健次郎

(委託先) 茨城大学理学部 塩見正衛・大久保忠旦

平成8-10年度合計予算額 9,005千円

(平成10年度予算額 3,005千円)

「要旨」 農林地域のカーボン・サイクル・モデルの開発と二酸化炭素動態の評価について、有機物フローモデルを利用して、牛久沼集水域(関東地方の代表的平地農村)、取手市(都市近郊農村)、川越市福原地区(都市近郊野菜栽培農村)、茨城県里美村(畜産の比重が高い)の有機物フローにともなってその地域で発生する平均的土壌呼吸を推定したところ、それぞれ、1.71、2.81、1.87、3.00Mg/ha/yrであった。これら値は、既知の温帯地域の有機質耕地土壌の呼吸量に比べ、やや低い結果であった。農耕地の炭素収支に直接影響する農地還元有機物は里美村が他の地域に比べ多かった。これは、畜産に由来する多量の有機物が農地還元されているためであるが、その主要な源は地域外から購入される飼料や敷料であった。取手市の場合、やはり地域外からの有機物が多く、その多くが環境負荷となっているが、それらは主として食生活に由来しており、両地域は好対照をなしている。里美村では、有機物の農地投入の多いことにより土壌呼吸量が他地域に比べて多いだけでなく、窒素の環境負荷も多いことが認められ、有機物を周辺地域へ搬出する方策などを検討する必要性が示唆された。このように、本モデルによる解析は、単に農地や環境に投入される有機物の多寡のみでなく、どのような経路でそれが持ち来たらされるかの解明に有効であり、対策のための指針を得るために効果的と考えられる。

「キーワード」 農村地域、有機物フロー、土壌呼吸、土壌有機物分解モデル

#### 1. 序

1997年12月のCOP3において、CO<sub>2</sub>の吸収源に関する定量的評価の必要性が提起され、農林業セクターにおけるCO<sub>2</sub>動態の解明は一層重要性を増している(京都議定書、第3条第3,4項)。農林業の形態ないし土地利用の違いにより炭素収支は大きく異なることは知られているが、定量的な検討は必ずしも多くない。そこで、本研究では、グローバルなスケールにおける炭素収支・循環をより正確に理解する一助とするため、地域レベルにおける生態系をめぐる収支を推定する手法を確立し、もって、土地利用形態ないし農業形態の違いと炭素収支の関係を明らかにす

ることに資する。より具体的には、土地利用ないし農業形態等の異なる代表的農業地域を取り上げ、必要なデータベースの構築とモデルの開発・改訂を行い、その地域における炭素収支を推定しようとする。

## 2. 調査方法

我々は、わが国の農村地域における有機物の動態に関するデータを収集しデータベース及び解析システムを作成してきた(松本・袴田, 1993)。本研究では、それらをもとに、農業セクターの有機物フローを計算し土壌に添加される炭素量を明らかにし、土壌炭素の蓄積・分解モデル(岩元・三輪, 1985)により土壌をめぐる炭素収支の評価を行う。平地農村としての牛久沼集水域、都市近郊農村としての取手市と川越市福原地区、有機物の搬入、搬出の多い畜産が盛んな地域として茨城県里美村を対象に、下記有機物フローモデルを使用して年間の有機物フローの検討を行った。

農村地域における有機物は、農作物主産物、農作物副産物、食生活、畜産、耕地、環境、購入食料・飼料・敷料、出荷農畜産物の8つのコンパートメントを通じて流動しているととらえることができる(図1)。政府統計、研究論文、調査結果等から必要なデータベースを構築し、次のように各コンパートメントの炭素の蓄積量と流量とを乾物重として求める：農作物主産物、同副産物の生産量、食生活および畜産の有機物消費量と生産量は統計資料を用いて求める。食生活、畜産、耕地については有機物現存量を統計資料より求める。食生活と畜産の消費量より農産物主産物と農作物副産物の自給量および食料・飼料・敷料の購入量を求める。畜産および

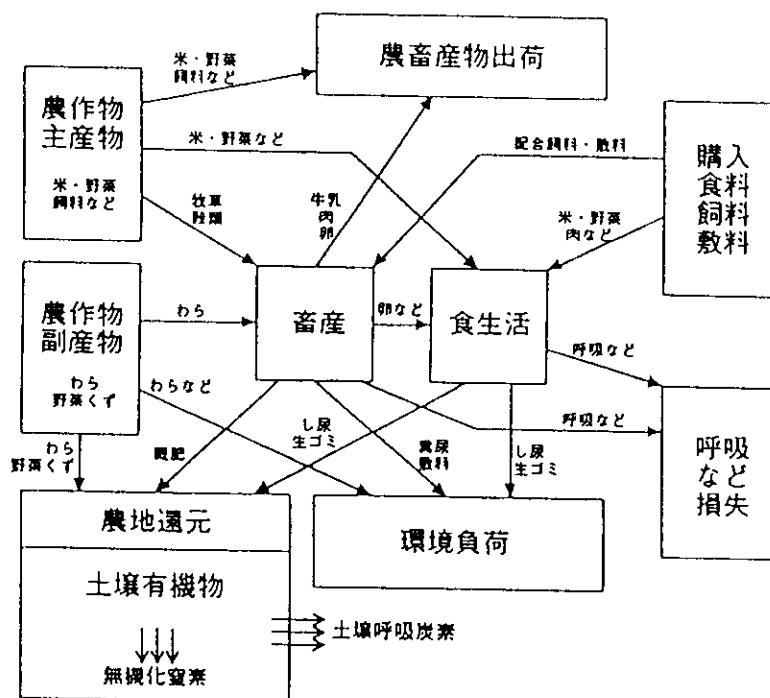


図1 農村地域における有機物フローと土壌有機物の無機化プロセスのシステム概要  
(松本・袴田, 1993)

農作物主産物の出荷量を求める。食生活と畜産から出る廃棄物および農作物副産物の一部は耕地へ投入され、残りが環境負荷となる。耕地に還元された有機物は分解され、炭素は土壤呼吸により大気中へ放出される。この分解量(炭素量)＝土壤呼吸量は有機物分解モデルを用いて推定する。

### 3. 調査地

牛久沼集水域：関東地方の代表的平地農村。筑波研究学園都市の西側にひろがる一帯で、南端部を中心に新興住宅地として変化しつつある。集水域面積は約160km<sup>2</sup>、内、農耕地は約3分の1。総人口は、約83千人、内、農家人口は約26千人。農耕地の内、58%が畑、39%が水田に利用されている。

取手市：都市化が進んだ平地農村の典型例。総面積は37km<sup>2</sup>、内、農耕地は約4分の1。総人口は79千人、内、農家人口は約4.3千人。農耕地の内、73%が水田、26%が畑である。

川越市福原地区：園芸が盛んな都市近郊農村の典型例。川越市の南部に位置し、平地林を堆肥原料等の供給地として利用している。面積は12km<sup>2</sup>、内、農耕地は44%、平地林が18%である。総人口は18千人、農家人口は2.4千人で、専業農家率が46%である。農耕地の内、90%が野菜類で、畜産農家が19戸である。

茨城県里美村：茨城県北部に位置し、総面積120km<sup>2</sup>、森林面積が約90%、農地面積は8%で約10km<sup>2</sup>、総人口4870人、牛の飼養頭数が多く農地ha当り205頭は牛久沼集水域の約13倍、取手市の約23倍である。

### 4. 結果

得られた有機物フローの概要を図2に示した。また、集計結果の概要を表に掲げた。牛久沼集水域（関東地域の代表的平地農村地域）では、土壤に還元される炭素の給源として、農業由来の有機物が食生活由来の有機物より多いことを反映して前者が全還元有機物の92%を占めていた。取手市（都市近郊農村地域）は、非農家人口の比率が高いことを反映して食生活からの有機物投入量が多い。他方、川越市福原地区（都市近郊野菜主体生産地域）は、平地林からの落葉や購入による堆肥の投入量が多いという特徴がある。投入された有機物が関与する土壤呼吸の場となる作土層の平均的深さは、それぞれの農業形態を反映して、水田中心の取手市で約40cmと浅く、根菜類の栽培の多い川越市で約90cmと深く、牛久沼集水域ではそれらの中間であった。

里美村につき、得られた有機物フローの概要および土壤呼吸量を図3に示した。また、図3は、図2に比べ、有機物が環境に排出された後、利用不可能となる部分を「呼吸等の損失」として分離算定した結果を示したものである。比較のため、牛久沼集水域及び取手市の結果をもあわせ示した。農耕地の炭素収支に対し直接影響する農地還元有機物は里美村が多い。これは、畜産に由来する多量の有機物が農地還元されているためであるが、その主要な源は地域外から購入される飼料や敷料である。家畜ふん尿は、その約60%が地域内に還元され、約30%が他の地域に搬出されていた。藁や茎葉などの農作物副産物はほとんどが地域内農地に還元されていた。取手市の場合、やはり地域外からの有機物が多く、その多くが環境負荷となっているが、それらは主として食生活に由来する特徴があり、里美村の場合と好対照をなしていた。

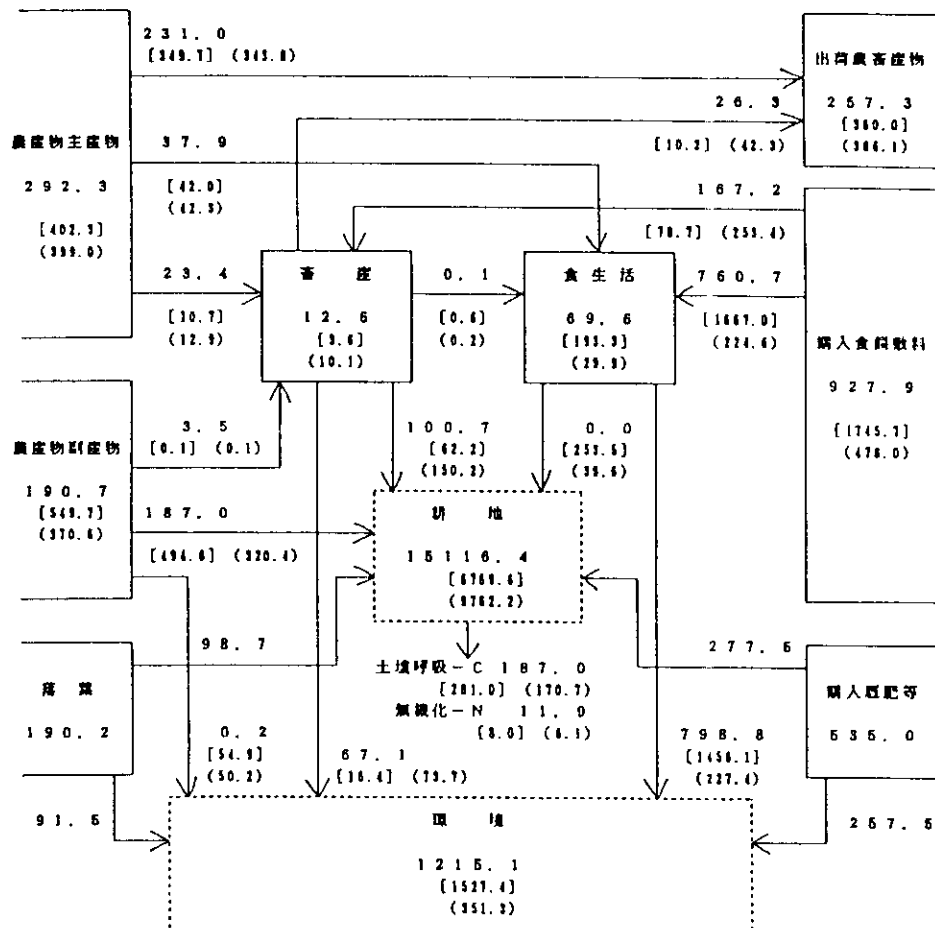


図2 牛久沼集水域、取手市、川越市福原地区の有機物フローと土壌呼吸の概要  
裸の数値が川越、( )内が牛久沼、[ ]内が取手の結果(g/m<sup>2</sup>/yr)

表 農村地域(牛久沼集水域、取手市、川越市福原地区、里美村)における有機物の投入と土壌呼吸量の推定(Mg/ha/yr)

| 地域  | 土壌呼吸 |       | 耕地土壌に添加される有機物の給源(乾物重) |       |       |       |       | 計      |
|-----|------|-------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|--------|
|     | 炭素量  | 炭素量   | 食生活                   | 畜産    | 農産副産物 | 落葉    | 購入堆肥  |        |
| 牛久沼 | 1.71 | 56.63 | 0.396                 | 1.502 | 3.204 | -     | -     | 5.102  |
| 取手市 | 2.81 | 39.38 | 2.535                 | 0.622 | 4.946 | -     | -     | 8.103  |
| 川越市 | 1.87 | 87.68 | 0                     | 1.007 | 1.870 | 0.987 | 2.775 | 6.639  |
| 里美村 | 3.08 | 96.13 | 0.149                 | 5.786 | 4.075 | -     | -     | 10.010 |

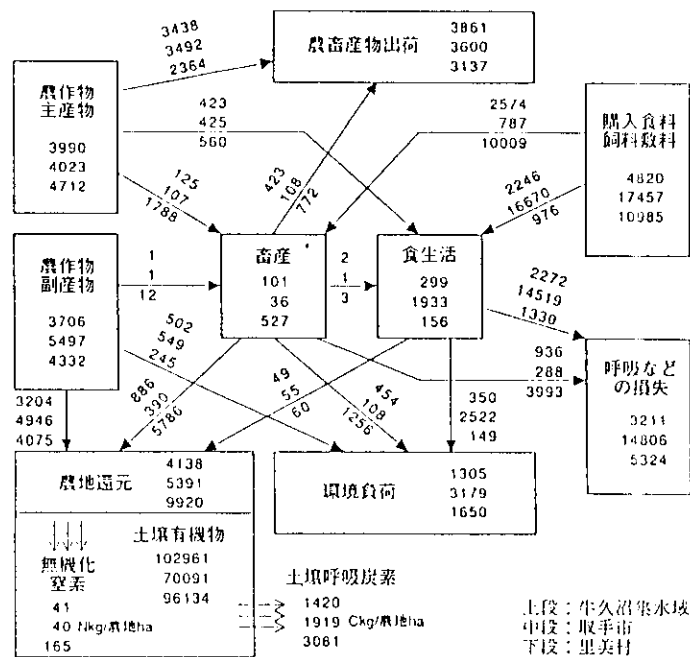


図3 牛久沼集水域，取手市，里美村の農耕地生態系における有機物フロー（乾物 kg/ha）

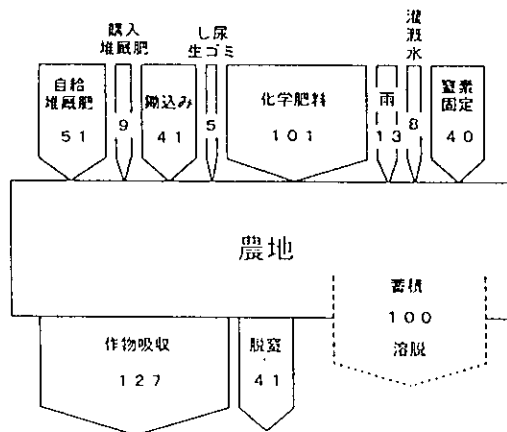


図4 茨城県里美村の農耕地生態系の窒素収支(t N/年)

それらの結果として、それぞれの地域において土壌呼吸により発生した炭素量を岩元・三輪モデルを使って推定した（表）ところ、各地域の平均値として、牛久沼集水域で1.71Mg/ha/yr、取手市で2.81Mg/ha/yr、川越市福原地区で1.87Mg/ha/yrであった。里美村の農耕地生態系から最終的に土壌呼吸として発生する炭素量は3Mg/ha/yrにのぼり、4地域のうちで最も多く、牛久沼集水域の約1.8倍、取手市の約10%増、福原の約60%増に相当する。

### 5. 考察

わが国は、たいへん多くの食料を輸入しており、その量は、国内で生産される食料に含まれる量を上回る。食料自給率が42%であることと符合する。それらの多くは身体に入り、消化さ

れずに終わった部分はやがて排泄される。それらはその後、昔のように田畑に施されることなく下水処理場に行って下水汚泥になる。そのまた多くが焼却された後、埋め立て地に埋められる。焼却された時、二酸化炭素等として大気中に逃げて温暖化に貢献し、時には酸性雨の原因物質ともなる。

ところで、農業は、産業のなかでは比較的自然界とうまく付き合ってきたということが出来る。環境問題を起こさないような技術を作りつつ食料生産を伸ばしてきた。農業の環境保全機能といわれる側面がそれである。肥料についてだけ取り上げて考える。狩猟・採集の社会が徐々に生産力を拡大し人口も増えると、農耕や畜産を行う社会が成立する。農耕においては、早晚、地力の維持が問題となり、肥料が考案される。いろいろなものを使ったと考えられるが、画期的なものは、第一がし尿の肥料化であった。し尿を肥料として利用することで、農産物は以前に比べいっそう容易に多くを生産できるようになった。し尿のほかに、多くの作物残さ、雑草、森林の下草や落葉、木灰等々の多くの有機物資源が堆肥として、あるいは現物のままで農耕地に還元された。それらは土壌肥沃度を増進すると同時に、土壌有機物の含量を確実に増やしていった。このようにして、ゆっくりと循環型食料生産システムができあがった。ごく最近まで、わが国の都会と田舎はし尿や残飯等廃棄物の資源としての利用を通じて循環の輪でつながれ、農地は肥沃に都会は清潔に維持されていた。その物質循環システムが崩壊するのは、高度経済成長の時代である。

個々の地域における物質循環は、昔に比べるとずいぶん崩壊したように見える。しかし、崩壊したとはいえ物質循環はこのような時空間的変化の中で自然法則として依然として展開されている。その循環プロセスを地球規模から地域の規模まで、あるいは個々の農耕地等において的確に評価して、その問題点を摘出し改善の方向を指し示すことは炭素循環をはじめとして物質循環システムを管理する上できわめて重要な課題である。そのような課題の中で、農業地域を対象として炭素循環を土壌における分解・蓄積において評価しようとするのが本課題の特徴である。

本課題の対象地域の土壌は、火山灰土壌ないしそれを母材とする有機物含量の高い土壌が多い。そこで、最近、報告されている文献値から有機質土壌に関する土壌呼吸量を亜寒帯から亜熱帯に関し例示すると以下の通りである：

- 1) 亜寒帯 (フィンランド、ロシア) 2.2 Mg/ha/yr, (ロシア) 0.4-1.2Mg/ha/yr, (Armentano & Menges, 1986),
- 2) 温帯 (アメリカ、ヨーロッパ、中国、日本) 7.9-11.3 Mg/ha/yr, (Armentano & Menges, 1986)、収支では、恋瀬川流域で、畑 1.51 Mg/ha/yr, 水田 0.028 Mg/ha/yr, (H. Ikeda et al., 1994), 中国で、1.61-1.82 Mg/ha/yr, (Lin Erda, 1995)
- 3) 亜熱帯 (フロリダ) 21.9 Mg/ha/yr, (Armentano & Menges, 1986)

まとめると、土壌呼吸量は、亜寒帯では0.4-2.2 t/ha/yr, 温帯で7.9-11.3 t/ha/yr、亜熱帯で 21.9 t/ha/yrである。

本課題において得られた結果は、温帯地域の有機質耕地土壌の呼吸量に比べやや低く、亜寒帯と同程度の結果であった。上記文献値の推定条件は、本研究と必ずしも同一ではないが、さらに多くの事例を抽出するなどして比較検討する必要性が認められた。

また、土壌呼吸量は、4地域の検討から分かるとおり、土壌に添加される有機物量に依存す

るところが大きい。それら有機物には、多くの場合、他の元素も含まれ、とりわけ窒素は、亜酸化窒素等の温暖化関連物質を構成したり、家畜ふん尿に由来するアンモニアが酸性雨の原因物質となったり、地下水等の硝酸汚染や水域の富栄養化をもたらしたりする。そこで、本解析システムにより里美村の農地に対する窒素の収支を算出すると、図4の通りとなり、里見村の農地全体に1年間に投入される合計量が268 tNに対し、排出量が168 tNであり、100 tの窒素が過剰に供給されていた。この過剰分の行方を特定するためには、さらに詳細な検討が必要であるが、試算によると地下浸透水の硝酸態窒素濃度が15 mg/Lに上る可能性があり、有機物投入量が環境保全上からも過剰である可能性が示唆されている(松本ほか、1999)。すなわち、土壌呼吸量がそれほど高くない場合であっても、別の観点から有機物投入量を制限する必要のある場合も認められ、炭素循環の管理にあたっては窒素循環を同時に考慮することが必要と考えられる(Hakamata et.al., 1998)。

このように、本システムによる解析では、単に農地や環境に投入される有機物の多寡のみでなく、どのような経路でそれが持ち来たらされ、炭素循環の観点だけでなく窒素など他の元素の循環をも含めた一層多角的な評価が可能となり、対策を検討するための指針を得るため効果的であることがわかる。

なお、本システム(モデルとデータベース)を応用して日本全国の有機物フローを推定することもできる。その一例を単位農耕地面積あたりの有機物量により図5に示した。この結果か

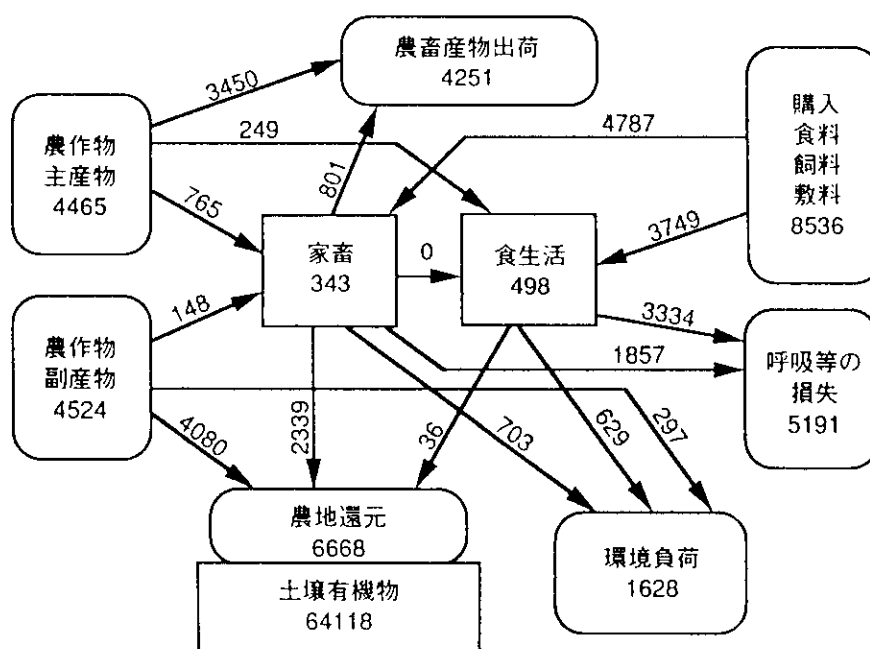


図5 我が国における有機物フローの概要(乾物 kg/ha/yr)

角形四角形がストックを、丸角形四角形がインプットまたはアウトプットを表す。

ら、農地還元された有機物量も結構多いほかに、環境負荷となっている量(これは潜在的な資源量を示す)、呼吸等の損失(これは資源として再利用が難しい部分を示す)などへ大量に回っていることが分かる。これらは、我が国の食料生産・流通・消費・廃棄にいたるシステムに

関して二酸化炭素の排出源・吸収源を推定するにあたって有益な情報となりうる。しかし、そのためには、農耕地に還元された有機物を土壌が分解・蓄積する過程を的確にシミュレートすることが必要である。農耕地等からの有機物の土壌への添加に伴う有機物蓄積・分解プロセスについては、岩元・三輪モデルに限らず、世界的にしばしば利用されている CENTURY モデル(Partonら、1987)や RothC モデル(Jenkinson & Rayner, 1977)などを適用して検討を加えることも考えられ、現在準備中である。

以上の検討結果から、次のような問題点を指摘することができる。

1) 農林地域のカーボン・サイクル・モデルに使用する分解・蓄積モデルに関し検討を加える必要があるかも知れない。それは、土壌毎、地域ごと(温度等気象条件の違い)のパラメータの検討を含むと考えられる。CENTURYモデル(Parton et al., 1987)、RothCモデル(Jenkinson & Rayner, 1977; Coleman & Jenkinson, 1996)などを応用してその結果と比較することも有効と考えられる。

2) 畜産や園芸の盛んな地域の検討を全国的に集中して行う必要がある。

3) それらを踏まえ、土地利用形態、営農形態、有機物の利用法、有機物の流通の実現などにより、有機物のフローないし二酸化炭素発生量にどのような違いが現れるかを検討することが可能となる。

## 6. 引用文献

- Armentano, T. V. & E. S. Menges (1986) Patterns of change in the carbon balance of organic soil-wet-lands of the temperate zone. *Ecology*, 74, 755-774.
- Coleman, K. & D. S. Jenkinson (1996) RothC-26.3. A model for the turnover of carbon in soil. In "Evaluation of Soil Organic Matter Models Using Existing, Long-Term Datasets" (D. S. Powlson, P. Smith & J. U. Smith, Eds.) pp. 237-246. NATO ASI Series 1, Vol. 38, Springer-Verlag, Heidelberg.
- Erda, Lin (1995) International Symposium on Soil Source and Sink of Greenhouse Gasses, Program and Abstracts
- Hakamata, T., N. Matsumoto, K. Sato, K. Kanazawa and E. Miwa (1998) Carbon and nitrogen cycling in food and feed systems. Proc. 16th World Congress of Soil Science (CD-ROM), Montpellier
- Ikeda, H. K. Okamoto & M. Hukuhara (1994) Estimation of carbon budgets in croplands using Landsat TM data. Proceeding of the 7th IUAPPA Regional Conference on Air Pollution and Waste Issues, 1, 139-146.
- 岩元明久・三輪睿太郎 (1985) 我が国の有機物動態と地力、圃場と土壌、196&197、148-157
- Jenkinson, D. S. & J. H. Rayner (1977) The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Sci.* 123, 298-305.
- 松本成夫・袴田共之 (1993) 農村地域における農地還元有機物の分解量推定プログラムの使用方法、農業環境技術研究所資源生態管理科研究集録第9号、95-143
- Parton, W. J., D. S. Schimel, C. V. Cole & D. S. Ojima (1987) Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51.



1173-1179.

松本成夫・三島慎一郎・織田健次郎・袴田共之(1999)茨城県里美村における堆厩肥の供給にかかわる窒素フローの評価. システム農学(投稿中).

## 7. 研究発表の状況

(学会等の口頭発表)

Hakamata, T., N. Matsumoto & J. Shindo(1996) Material cycling through soil pollution, global warming and acid rain. -Experiences from research projects in Japan--, Japan-China symposium on environmental science. The 11th Japan-China symposium of JCSTEA series, Nov. 22-24, 1996. Chiba, Japan.

Hakamata, T., N. Matsumoto, H. Ikeda & K. Nakane (1996) Land Use/Cover Change and Carbon Dioxide Budgets, - Experiences from research projects in Japan - Proceedings of IGBP/BAHC-LUCC Joint-Core Projects Symposium, 1996, 11. Kyoto, Japan.

Hakamata, T., N. Matsumoto, K. Sato, K. Kanazawa & E. Miwa(1998) Carbon and nitrogen cycling in food and feed systems. Proc. 16th World Congress of Soil Science (CD-ROM), Montpellier

Mishima, S., T. Nakatsubo & T. Horikoshi(1998) Microbial Biomass and Organic Matter Decomposition Rates in the A<sub>0</sub> Layer of soils from Three Forests in Eastern Japan. Proc. of VII International Congress of Ecology, Italy, 294.

三島慎一郎, 松本成夫, 池田浩明, 織田健次郎(1998)第14回日本微生物生態学会講演要旨集, 28.

三島慎一郎, 松本成夫, 池田浩明, 織田健次郎(1998)冷温帯林における土壌微生物バイオマス及び呼吸活性の季節変動. 第46回日本生態学会講演要旨集, 98.

三島慎一郎, 織田健次郎 (1998)農耕地における窒素収支について. 1998年度システム農学会春季シンポジウム研究発表会要旨集, システム農学, 14, 16-17.

(論文発表)

○Hakamata, T., H. Ikeda, S. Yamamoto & K. Nakane(1998)How do terrestrial ecosystem contribute to global carbon cycling as a sink of CO<sub>2</sub>? Some findings from research projects on carbon dioxide and carbon cycle related to the global warming. Global Environmental Research, 2: 79-86.

○Hakamata, T., N. Matsumoto, H. Ikeda & K. Nakane(1997)Do plant and soil systems contribute to global carbon cycling as a sink of CO<sub>2</sub>? Experiences from research projects in Japan. Nutrient Cycling in Agro-ecosystems, 49: 287-293.

○松本成夫・三島慎一郎・織田健次郎・袴田共之(1999)茨城県里美村における堆厩肥の供給にかかわる窒素フローの評価. システム農学(投稿中).

織田健次郎, 三島慎一郎 (1998)有機物および化学肥料の農地施用量のデータベース…近年における窒素養分の農地施用量の推移… 資源・生態管理科研究集録, 15.

三島慎一郎, 織田健次郎 (1998)農業統計情報を用いた地域レベルの窒素収支算定システ

△. 農業環境研究成果情報, 14.