

B-1 地球温暖化に係る二酸化炭素・炭素循環に関する研究

(4) 温帯地域生態系における炭素収支の定量的解析

研究代表者 農業環境技術研究所 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 池田浩明・岡本勝男・袴田共之

平成5年度～7年度合計予算額 11,362千円
(平成7年度予算額 4,048千円)

[要旨] 温室効果ガスである二酸化炭素の挙動や炭素循環機構の解明が急務となっているが、土地利用の地理的配分を考慮した、面的な炭素循環を解明した研究は少ない。本研究は、リモートセンシング技術を用い、地域生態系の炭素収支を広域的に推定する手法開発を目的とした。テストエリアを茨城県恋瀬川流域とその周辺域とし、ランドサットTMデータを用いた土地被覆分類を行った結果、この地域には、畑地・広葉樹林（広葉果樹を含む）・針葉樹林・水田生態系が卓越していた。次に、TMデータを利用して、植生および土壌の炭素現存量を推定した。さらに、生態系ごとに炭素動態モデルを開発し、対象地域の炭素収支を算出した。対象地域の炭素収支の平均値は、畑地で $-151 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 、広葉樹林で $-60 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ と赤字の収支を示したが、水田で $2.8 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 、針葉樹林で $543 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ と黒字の収支を示した。また、どの生態系でも、炭素収支の分布には著しい空間的バリエーションが認められた。対象地域の炭素収支を積算した結果、畑地・広葉樹林は赤字の収支を示したが、水田ではわずかに黒字、針葉樹林では大きな黒字の収支を示し、地域全体としては炭素のシンクとして機能していると見積られた。

[キーワード] 炭素動態モデル・炭素収支・地域生態系・リモートセンシング・ランドサットTMデータ

1. 序

人間活動にともなう地球温暖化が危惧され、温室効果ガスである二酸化炭素の挙動や炭素循環機構の解明が急務となっている。これまでの陸上生態系における炭素循環機構の研究は、植生の均質な場所を対象とし、植生タイプごとに炭素循環量を測定・モデル化することを中心に行われてきた。しかし、実際の地域は、耕地・草地および農用林地などから構成される農業生態系から自然生態系までさまざまな生態系が混在している。したがって、広域的な炭素循環を議論するには、個々の生態系の地理的配分を考慮した、面的な炭素循環量の解明が必須であると考えられる。しかし、多様な土地利用が混在した地域生態系レベルの面的な炭素循環量を推定する手法は、ほとんど確立されていない。

地域生態系に係わる情報を広域的に把握するには、人工衛星リモートセンシングを用いるのが、最も効率的な方法である。そこで本研究は、多様な土地利用形態を持つ農業

生態系のテストエリアを設定し、衛星リモートセンシング技術を用いて対象地域の炭素収支の空間分布を推定する手法の開発を行った。

2. 研究方法

(1) テストエリア

テストエリアは、土地利用が多様な農業生態系を主体とすること、現地データの入手しやすさを考慮し、筑波山を含む茨城県恋瀬川流域の周辺部(30km×30km)とした(図1)。

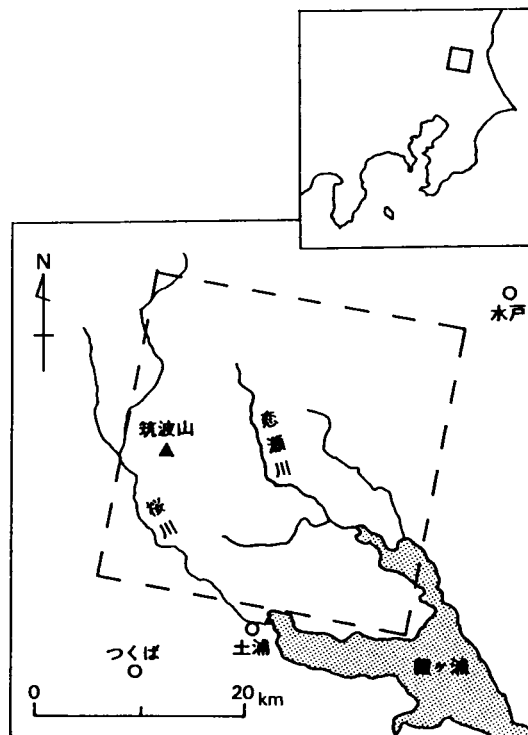


図1. テストエリア(破線の枠内が対象地域)

(2) 炭素収支推定手法

本研究の炭素収支推定手法を図2に示す。人工衛星データはランドサット TMデータ(パス107-ロウ35)を用い、まず土地被覆分類によってテストエリアの生態系を判別する。次に、TMデータを利用して、植物・土壌の炭素現存量を解析し、炭素動態モデルに組み込む。炭素動態モデルはコンパートメントモデルであり、各コンパートメントの炭素現存量(初期値)はTMデータから推定された値をとり、このモデルから衛星画像の画素ごとに炭素収支が計算される。

(3) 土地被覆分類

1987年7月24日のバンド1, 3, 4, 5(それぞれ青, 赤, 近赤外, 中間赤外の波長域; 以下ではTM1, 3, 4, 5と省略)のTMデータを用いたテストエリアのクラスター分類を行ない、均質に分類された地域を現地調査し、テストエリアの土地被覆クラスを検討した。さらに、TM1, 3, 4, 5を用いた最尤法による土地被覆分類を行った。分類にあたっては、

調査地点の半分を教師とし、残りで分類結果の検証を行った。なお、以下の炭素収支の推定は、ここで分類された生態系ごとに解析を行った。

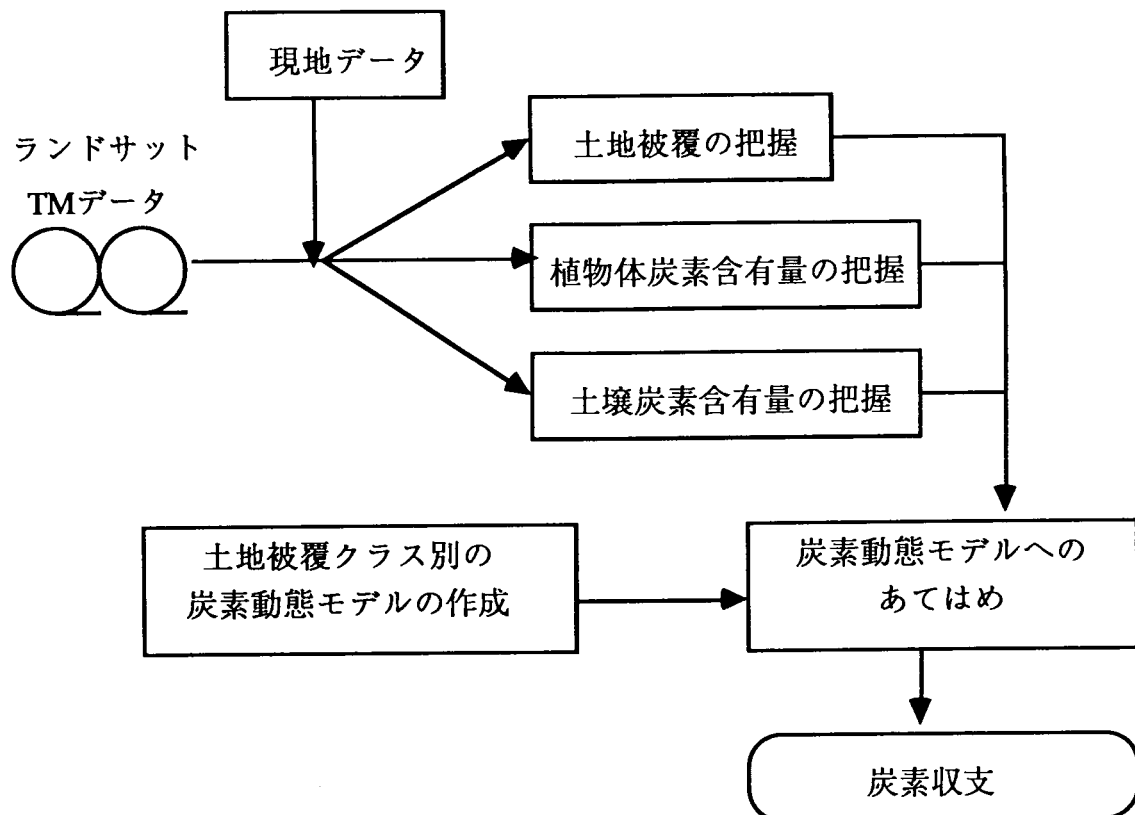


図2. 炭素収支推定手法

(4) 畑地の炭素収支の推定

1987年の茨城農林水産統計年報¹⁾の農産物収量データから換算した作物の地上部炭素現存量（植物の炭素率は0.44と仮定）を1987年7月24日の畑地の正規化植生指数 [NDVI = (TM4-TM3)/(TM4+TM3)] から推定する式を検討し、得られた推定式を使ってテストエリアの植物地上部炭素現存量を計算し、さらに、植物の地上部炭素現存量から土壌への還元炭素量を推定した。また、土壌の炭素現存量は、真行寺ら (1990)²⁾ が1985年1月23日のTMデータから求めた土壌炭素含有率の推定式 $\log_{10}(\text{土壌炭素}\%) = -0.0268\text{TM3} + 1.47$ を用いて算出し、容積重を 700 kg m^{-3} として、畑地の作土層を対象とした深さ0~30cmの土壌炭素現存量を計算した。次に、TMデータから推定した土壌への還元炭素量と土壌炭素現存量を変数とする炭素動態モデルを考案し、炭素収支を算出した。

(5) 水田の炭素収支の推定

畑地と同様にして、水田の地上部炭素現存量を正規化植生指数 (NDVI) から推定する式を検討し、得られた推定式を使って、1987年7月24日と1984年11月4日のTMデータから収穫前の水稻と収穫後のひこばえの地上部炭素現存量を算出し、さらに、植物の地上部炭素現存量から土壌への還元炭素量を推定した。また、土壌の炭素現存量は、やはり真行寺ら(1990)²⁾の式を用い、容積重を 525 kg m^{-3} として、水田の作土層を対象とし

た深さ0~30cmの土壤炭素現存量を計算した。次に、TMデータから推定した土壤への還元炭素量と土壤炭素現存量を変数とする炭素動態モデルを考案し、炭素収支を算出した。

(6) 森林の地上部炭素収支の推定

1987年7月24日のランドサットTMデータ (TM1, 3, 4, 5) を用いて最尤法による土地被覆分類を行い、針葉樹林および広葉樹林 (広葉果樹園を含む) に区分された地点を四分角法 (30m間隔で5~9地点サンプリング) によって立木密度・胸高直径・樹高を調査し、各林分の地上部現存量 (乾重) を各々の相対成長式を用いて推定した。相対成長式は、スギが四大学・信大合同調査班 (1966)³⁾、ヒノキが山倉ら (1972)⁴⁾、アカマツがNakane et al. (1983)⁵⁾、ブナ林域の広葉樹が小見山ら (1992)⁶⁾、コナラ林域の広葉樹が草地試・生態部 (1980)⁷⁾ の推定式をそれぞれ使用した。次に、林分を針葉樹林・広葉樹林と日向域・日陰域で4カテゴリーに分け、調査林分の1987年7月24日のTMデータ (4画素) を平均し、変数増減法による重回帰分析を行って地上部現存量の推定式を作成した。なお、推定式の独立変数には、地形の影響を考慮し、隣接する2バンド (TM6を除く) の比演算値と正規化植生指数 $NDVI = (TM4 - TM3) / (TM4 + TM3)$ を使用した。得られた推定式を用いて、2時期 (1986年8月6日, 1987年7月24日) の地上部現存量を計算し、2時期の現存量を差分して森林域の地上部炭素収支を推定した。なお、衰退現象の見られた広葉樹林は枯死木の年分解率を0.25としてその炭素収支を補正し、樹木の炭素含有率は0.5とした。

3. 結果および考察

(1) 土地被覆分類

現地調査の結果、テストエリアには土地被覆クラスとして針葉樹林、広葉樹林 (広葉果樹園を含む)、水田、畑地、人工草地、荒地 (雑草群落)、裸地、開放水域、市街地の9クラスが認められ、最尤法による土地被覆分類を行った。その結果、この地域には、畑地・広葉樹林 (広葉果樹を含む)・針葉樹林・水田生態系が卓越していることが判明したので、以下の炭素収支の推定はこれらの4生態系について解析した。また、分類結果を検証したところ、88%という高い正解率が得られたので、上記の方法で信頼性の高い土地被覆分類図が得られるものと考えられた。

(2) 畑地の炭素収支

行政区別の収量データから主要作物の地上部炭素含有量 $B(gC m^{-2})$ を求め、NDVIと地上部炭素含有量の関係を検討した結果、推定式 $B^{1/2} = 110.4(NDVI+1)^{1/2} - 120.4$ が得られた。この式を用いて、植物の地上部炭素現存量を計算した。植物から土壤へ還元される (すきこまれる) 炭素量 $S(gC m^{-2})$ と植物の地上部炭素現存量 $B(gC m^{-2})$ の関係を検討した結果、推定式 $S = 0.56B - 0.17$ が得られたので、この式を用いて、植物から土壤への還元炭素量を計算した。

農耕地は、年に1回は必ず裸地化され、収穫によって作物が系外に持ち出される点に大きな特徴があり、森林と違って、植物体中に蓄積される炭素を考慮しなくてよい。したがって、農耕地の炭素収支は、植物から土壤に還元される炭素量 $S(gC m^{-2})$ から土壤

呼吸によって分解・放出される炭素量を差し引くことによって求まる。この考えにしたがって、土壤炭素現存量 C (gC m^{-2}) の炭素動態モデルを検討し、本プロジェクト研究の成果⁸⁻⁹⁾と既存の文献¹⁰⁻¹³⁾を基にして $dC/dt = 0.3S - 0.02C$ を導いた (図3)。このモデルでは、土壤有機物の分解過程を二つに分け、土壤に還元された有機物のうち易分解性のものが急速に分解し、残された有機物は腐植の分解と同じ速度でゆっくりと分解すると仮定した。また、根からの分泌物は易分解性の糖や有機酸からなるため、一年で急速に分解されると仮定した。

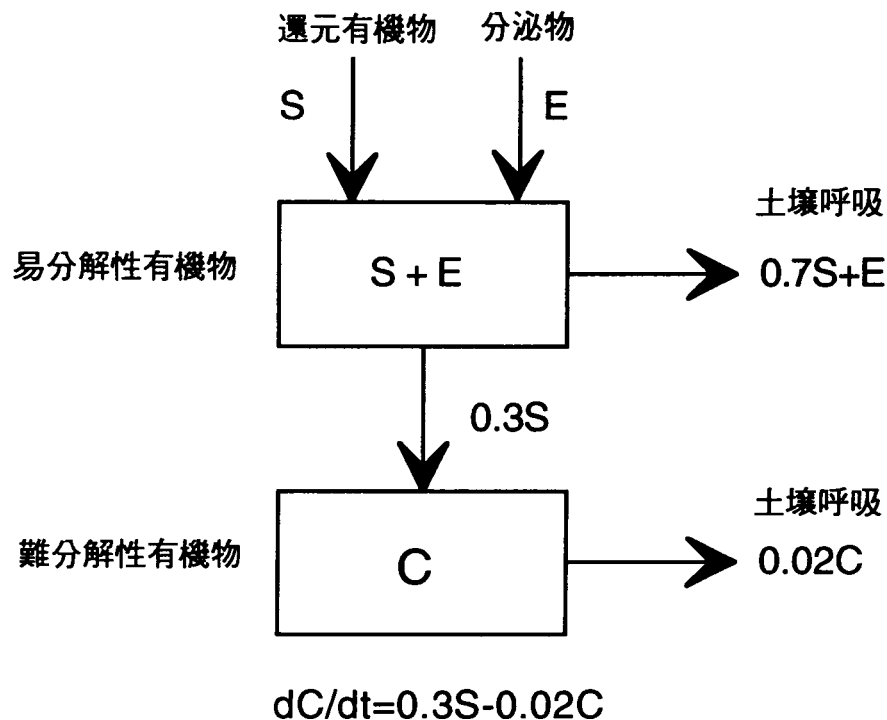


図3. 畑地の炭素動態モデル

得られた炭素動態モデルを用いて、炭素現存量を算出した。年間の炭素収支量の頻度分布を図4に示す。テストエリアの1年間の炭素収支量は、 $-493 \sim +40 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ の範囲にあり、平均で $-151 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ と赤字の炭素収支を示した。したがって、一言に畑と言っても、その炭素収支は空間的バリエーションに富み、炭素収支を実測した場合でも、実測点の代表性などを良く吟味する必要があると考えられる。

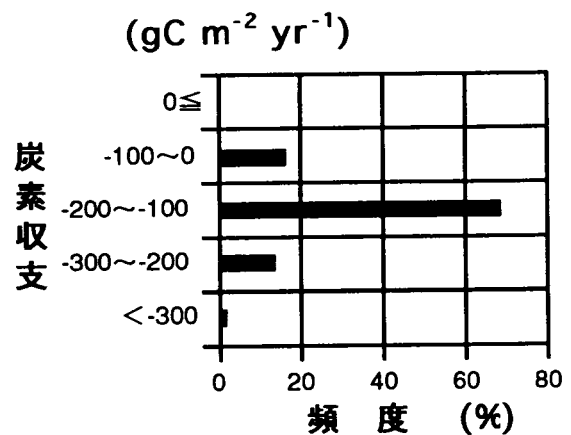


図4. 畑地の炭素収支の頻度分布

(3) 水田の炭素収支

水田のNDVIと水稻の地上部炭素現存量 (B ; gC m^{-2}) との間には $B = 739.8 \text{NDVI}$ という

関係が認められた。この式を使って、収穫前（7月24日）の水稻と収穫後（11月4日）のひこばえの地上部炭素現存量を算出し、さらに水稻の還元量/地上部現存量を 0.57, 総現存量/地上部現存量を 1.04として、収穫時にすきこまれる作物の炭素現存量 S_s (gC m^{-2}) と収穫後にすきこまれるひこばえの炭素現存量 S_w (gC m^{-2}) を算出した。

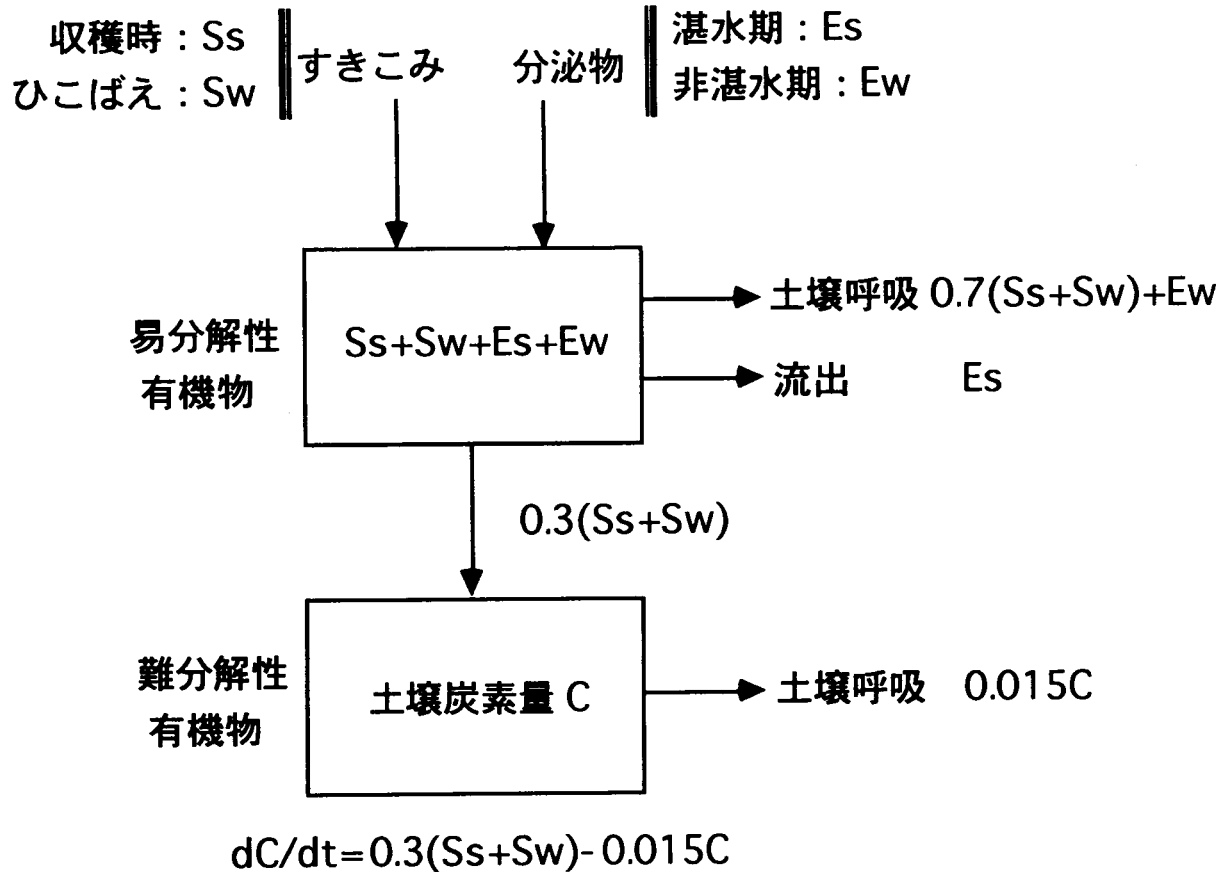


図5. 水田の炭素動態モデル

畑地と同様な考え方で土壤炭素現存量 C (gC m^{-2}) の炭素動態モデルを検討し、既存の文献^{1,4)}を基にして $dC/dt = 0.3(S_s + S_w) - 0.015C$ を導いた (図5)。この炭素動態モデルを用いて、炭素現存量を算出した。年間の炭素収支量の頻度分布を図6に示す。テストエリアの炭素収支は、畑地に比べて空間分布の変動が小さく、平均で $2.8 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ とほぼバランスのとれた収支を示し、この地域の水田が炭素のシンクでもソースでもないことが示唆された。

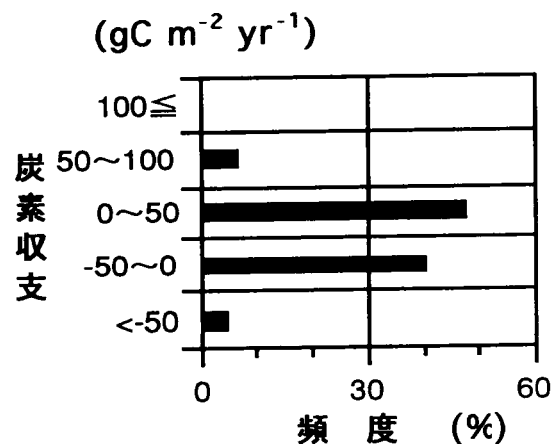


図6. 水田の炭素収支の頻度分布

(4) 森林の炭素収支

調査林分の植生タイプは、針葉樹林がスギ・ヒノキ・アカマツ植林で、広葉樹林は、

筑波山々頂部のブナ林，山腹のクヌギ・コナラ二次林，平地のクリ・ナシ果樹園を含む林分である。

多時期データ用の針葉樹林 (N) と広葉樹林 (B) の地上部現存量 (kg d.w. m^{-2}) の推定式として，次式が選択された。

$$\text{日向域：N} = 5207 - 136.1(\text{TM1}/\text{TM2}) - 6789(\text{TM3}/\text{TM4}) - 5183\text{NDVI} \quad (R^2 = 0.97)$$

$$\text{B} = 141.5 - 197.3(\text{TM2}/\text{TM3}) + 26.56(\text{TM4}/\text{TM3}) \quad (R^2 = 0.97)$$

$$\text{日陰域：N} = -502.1 - 297.9(\text{TM4}/\text{TM3}) + 2856\text{NDVI} \quad (R^2 = 0.98)$$

$$\text{B} = -527.2 + 110.8(\text{TM2}/\text{TM1}) - 133.7(\text{TM4}/\text{TM3}) + 1733\text{NDVI} \quad (R^2 = 0.96)$$

得られた推定式の寄与率 (R^2) はいずれも極めて高く，森林域の地上部バイオマスを TM データから高い精度で推定できることがわかる。そこで，これらの推定式を用いて，1986，1987年の森林地上部炭素現存量を計算し，年間の収支を求めた。

図7に，森林域の地上部炭素収支の頻度分布を，森林タイプ別に示す。森林域の地上部炭素収支は，森林タイプで大きく異なり，平均値で赤字の収支を示した広葉樹林 ($-115\text{gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$) より黒字の収支を示した針葉樹林 ($893\text{gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$) で著しく変動した。また，針・広葉樹ともに赤字の収支を示す林分がかなり見られた。針葉樹林では，間伐による炭素の持ち出しがかなり影響していると考えられるが，広葉樹林の負の収支は，森林が衰退していることを示すものと考えられる。しかし，森林全体では黒字の収支 ($320\text{gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$) を示した。

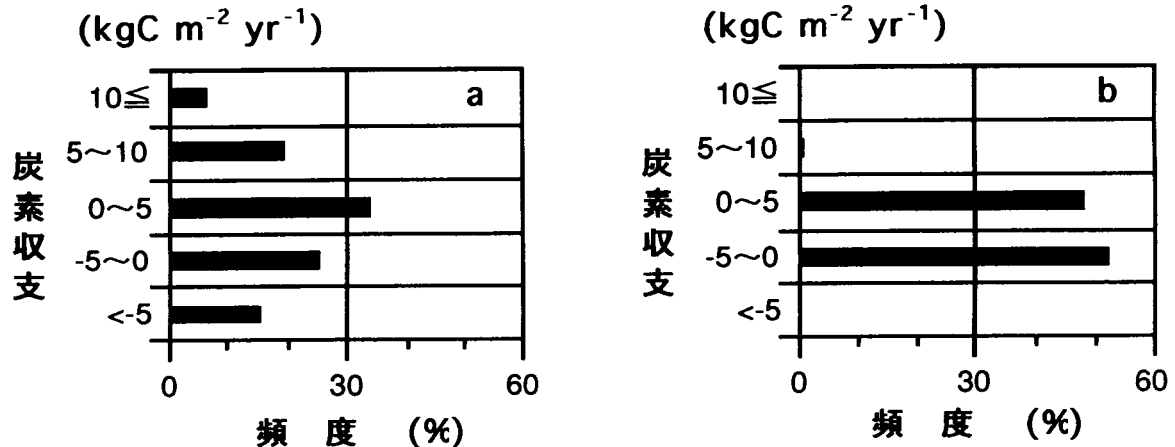


図7. 針葉樹林 (a) と広葉樹林 (b) の地上部炭素収支の頻度分布

(5) テストエリアの炭素収支の推定

テストエリアに卓越する生態系のうち，畑地と水田については生態系レベルの炭素収支を推定できたが，森林については地上部のみの収支推定に留まっている。森林の生態系レベルの炭素収支を推定するには，リターの炭素現存量・地下部（根）の現存量・土壌炭素現存量を知る必要がある。しかしながら，現在のところ衛星情報でわかるのは森林の地上部のみの情報なので，生態系レベルまでカバーするには今後の衛星リモートセンシング技術の発展を待たなければならない。そこで，本研究では本プロジェクト研究の成果（松本ら；(3)-③）と既存の文献¹⁵⁾を基にして，広葉樹林の地下部炭素収支を

+55 gC m⁻² yr⁻¹, 針葉樹林の地下部炭素収支を-350 gC m⁻² yr⁻¹と仮定して生態系レベルの炭素収支に補正した。さらに、対象地域の炭素収支を積算した結果、畑地・広葉樹林は赤字の収支を示したが、水田ではわずかながら黒字、針葉樹林では大きな黒字の収支を示し、地域全体としては炭素のシンクとして機能していると思われた（表1）。

表1. 茨城県恋瀬川流域における生態系別の面積と炭素収支

生態系	面積 (km ²)	平均炭素フラックス (gC m ⁻² yr ⁻¹)	炭素収支 (10 ³ tC yr ⁻¹)
畑地	205	-151	-31.0
広葉樹林	196	-60	-11.7
針葉樹林	151	543	82.0
水田	141	3	0.4
その他	207	-	-
計	900		39.7

現在、炭素収支を空間的にスケールアップする手法の開発が重要課題になっている。本研究のテストエリアは、農業生態系から自然生態系まで他種の生態系が混在しているが、その炭素フラックスは生態系によって全く異なることが明らかになった（表1）。したがって、このような地域で広域の炭素収支を推定する際に、卓越する土地被覆のフラックスで収支を代表させてしまえば、大きく誤評価してしまう可能性がある。特に、高人口密度地域では、本研究のテストエリアと同様に多様な生態系が混在していることが予想されるので、本研究のように、空間的バリエーションと土地利用形態を考慮した手法を用いる必要があると推察される。

4. 本研究により得られた成果

- (1) 衛星リモートセンシング技術を用いて、地域生態系の炭素収支を推定する手法を開発した。
- (2) TMデータを用いた最尤法による土地被覆分類を行い、対象地域の生態系の判別を行った。
- (3) 主な生態系ごとに炭素動態モデルを開発し、対象地域の炭素収支を TMデータから画素ごとに求めた。
- (4) 対象地域の炭素収支を積算した結果、畑地・広葉樹林は赤字の収支を示したが、水田ではわずかながら黒字、針葉樹林では大きな黒字の収支を示し、地域全体としては炭素のシンクとして機能していると思われた。
- (5) どの生態系でも、炭素収支の分布には著しい空間的バリエーションが認められた。また、生態系によっても収支は大きく異なることが明らかになった。したがって、地域レベルの面的な炭素収支を推定する際には、本研究のように、空間的バリエーションと土地利用形態を考慮した手法を用いる必要があると推察された。

5. 引用文献

- 1) 関東農政局茨城統計情報事務所 (1988) : 茨城農林水産統計年報 (1987~1988) . 茨城農林水産統計協会.
- 2) 真行寺孝・渡辺春朗・福原道一 (1990) : ランドサットTMデータを用いた混層深耕による黒ボク表土の腐食含量低下の実態解析. 千葉農試研報31: 1-8.
- 3) 四大学 (北大, 東大, 京大, 大阪市大) ・信大合同調査班 (1966) : 森林の生産力に関する研究. 第1報. スギ人工林の物質生産について. P.2-29. 日本林業技術協会育林技術研究会.
- 4) 山倉拓夫・斎藤秀樹・四手井綱英 (1972) : ヒノキ人工林の物質生産の検討. 京都大学演習林報告, 43: 106-123.
- 5) Nakane, K., Yamamoto, M. and Tsubota, H. (1983): Estimation of root respiration rate in a mature forest ecosystem. Jpn. J. Ecol. 33: 397-408.
- 6) 小見山章・肥後陸輝・二宮生夫 (1992) : 荘川村六厩における落葉広葉樹の相対成長関係. 平成3年度科学研究費補助金 (一般研究C) 研究成果報告書「落葉広葉樹の資源量推定方法に関する研究」 P.1-10. 岐阜大学農学部.
- 7) 草地試験場・生態部 (1980) : 藤荷田山の生物相に関する基礎資料. 草地試・生態部資料, No. 7, PP.24.
- 8) 塩見正衛・池田浩明・小泉博・別宮有紀子・佐藤光政 (1992) : 農耕地における炭素循環—コマツナ畑で(10月~3月). 日本生態学会関東地区大会講演要旨集, p.17.
- 9) 池田浩明・塩見正衛・小泉博・別宮有紀子 (1992) : 農耕地における炭素循環—サツマイモ畑で(6月~10月). 日本生態学会関東地区大会講演要旨集, p.18.
- 10) 別宮有紀子・中台利枝・小泉博・木村允 (1993) : 一毛作および二毛作耕地における土壌呼吸速度と炭素収支. 日本生態学会講演要旨集第40集. p. 259.
- 11) Janssen, B.H. (1984): A simple method for calculating decomposition and accumulation of young soil organic matter. Pl. Soil 76: 297-304.
- 12) Jenkinson, D.S. (1990): The turnover of organic carbon and nitrogen in soil. Phil. Trans. R. Soc. Lond. B 329: 361-368.
- 13) Jenkinson, D.S., Adams, D.E. and Wild, A. (1991): Model estimates of CO₂ emissions from soil in response to global warming. Nature 351: 304-306.
- 14) 小泉博・中台利枝・別宮有紀子・西村誠一・唐艶鴻 (1995) : 田面水表面とそれに接する気相間のCO₂フラックス. 日本生態学会講演要旨集第42集. p. 87.
- 15) Nakane, K., Tsubota, H. and Yamamoto, M. (1984): Cycling of soil carbon in a Japanese red pine forest: I. before a clear-felling. Bot. Mag. Tokyo 97: 39-60.

6. 国際共同研究等の状況

特になし

7. 研究発表の状況

- 1) 池田浩明・岡本勝男・福原道一 (1993) ランドサットTMデータを用いた農耕地の炭素収支の推定. 日本生態学会講演要旨集第40集. P. 258.
- 2) 池田浩明・福原道一 (1994) ランドサットTMデータを用いた森林バイオマスの推定. 日本生態学会講演要旨集第41集. P. 74.
- 3) Ikeda, H., Okamoto, K. and Fukuhara, M. (1994) Estimation of carbon budgets in croplands using Landsat TM data. Proceedings of the 7th IUAPPA Regional Conference on Air Pollution and Waste Issues, I: 139-146.
- 4) 池田浩明 (1995) 炭素循環系のリモートセンシングと GIS. 日本生態学会講演要旨集第42集. P. 14.
- 5) 池田浩明 (1996) 炭素循環. 農業リモートセンシング, 95-99, 養賢堂.
- 6) 池田浩明・岡本勝男・袴田共之 (1996) ランドサットTMデータを用いた水田の炭素収支の推定. 日本生態学会講演要旨集第43集. P. 182.