

C-6 流域の物質循環調査に基づいた酸性雨による生態系の酸性化および富栄養化の評価手法に関する研究

(3) 植生-土壌プロセスに基づく流域スケールの物質循環モデルの開発

独立行政法人農業県境技術研究所

地球環境部 生態システム研究グループ 物質循環ユニット

新藤純子

地球環境部 食料予測チーム

岡本勝男

東京大学大学院農学生命科学研究科

川島博之

<研究協力者> 独立行政法人農業県境技術研究所

地球環境部 生体システム研究グループ リモートセンシングユニット 坂本利弘

平成14~16年度合計予算額 18,099千円

(うち、平成16年度予算額 5,829千円)

[要旨] 我が国の森林生態系における窒素負荷とその影響の現状を広域的に評価するモデルの作成を目的に研究を行った。このため、窒素肥料の使用量、農作物生産量、肉類生産量などの統計データと土地利用データを用いて、農業活動からのアンモニア発生量分布を推定し、これと既存の窒素酸化物発生量分布とに基づいて窒素負荷量全国分布を作成した。モデルでは、大気、植物、土壌有機物の炭素のフローとこれと連動した窒素の内部循環を考慮した。日本の平均的な条件をパラメータ値として用いてモデル特性を検討したところ、既存の研究結果から得られた窒素流出の特徴を定性的に表現することができた。モデルにより窒素流出は土壌有機物としての蓄積・分解の速度に加えて森林の成育ステージ（バイオマス賦存量）に強く依存していることが推定された。全国スケールでの適用のため、基本モデルを基に、広域モデルを作成した。衛星リモートセンシングデータの解析から、森林のバイオマス賦存量を広域的に推定するための適切なデータ合成法を検討した。一ヶ月合成NDVIをバイオマス賦存量の指標として用い、窒素負荷量分布をインプットデータとしてモデルを実行したところ、渓流水中窒素濃度の推定値は、サブテーマ1で実施した全国渓流水調査による、渓流水中硝酸イオン濃度の全国分布と比較的良く対応した ($r=0.65$)。窒素負荷による生態系影響は、中国や東南アジア諸国でも問題とされているので、アジアにおいて窒素負荷への寄与が大きい農業活動の変化を統計データに基づいて解析し、東アジア13カ国を対象に、窒素負荷量及びアンモニア発生量の変化を推定した。中国における負荷が対象地域の全負荷量の70%以上を占めること、単位面積当たりの負荷は韓国で日本の2倍程度あり、またベトナムなど東南アジアの国で近年の負荷の増大が著しいことが示された。

[キーワード] 窒素負荷、窒素流出、生態系プロセスモデル、広域評価、衛星リモートセンシング

1. はじめに

人間活動により、陸上生態系に負荷される窒素は最近の約100年の間に倍増した¹⁾。特に経済成

長と人口増加の著しい東アジアでは今後も増大し、窒素酸化物の排出量は今世紀末までに現在の5倍弱に増加し²⁾、農業由来のアンモニアも発展途上国を中心に急増すると予測されている。またエネルギー需要の増大により当分の間、SO₂排出の増加傾向も続くと考えられる。

人工的な窒素肥料の使用が農作物の生産量を飛躍的に上昇させるなど、窒素は非常に大きな効用をもたらすが、一方、これまで窒素が制限要因であった陸上生態系において、直接或いは大気を介して間接的に窒素負荷が増大することにより、地下水の硝酸汚染や河川・湖沼の富栄養化を引き起こすなど環境悪化の原因ともなっている。欧米では過剰な窒素の負荷により、本来窒素が制限要因であった森林生態系において、窒素供給が植物や微生物の必要量を上回る窒素飽和現象が報告され^{3,4)}、このような生態系では、窒素の無機化の促進、硝酸の流出、亜酸化窒素の発生増大と共に、森林バイオマスの減少が起こるとの仮説³⁾のもとに大規模な調査、実験が行われた^{5,6)}。窒素飽和の指標である根圏や流域からの窒素流出と生態系の特性の関係など多くの結果が示されたが、そのメカニズムについて解明には至っていない。

アジアにおける窒素負荷の増大が予測される中、我が国および東アジアにおける窒素負荷の増大が、溪流・河川への窒素の流出を大規模に引き起こす可能性があるのか、またどのような生態系が影響を受けやすいのかを広域的に予測することが重要と考えられる。このような目的のために生態系における物質循環をモデル化する試みも広く行われている⁷⁾が、一般に様々なプロセスの反応速度や平衡定数など多数の未知パラメータをあたえる必要があるため、特に広域を対象とした推定を行う場合にパラメータの妥当な値をいかにして取得するかが難しく、また影響プロセスの全体像を把握しにくい。本研究では出来るだけ簡易なモデルを用いて、ラフではあるが全国を統一した手法で推定することを試みる。本課題のサブテーマ1で、全国の溪流水の濃度を測定しマップを作成したが、我が国の森林域における負荷量のデータは限られており、溪流水濃度の空間分布の要因を検討することが困難であった。そこで、農業を起源とするアンモニアの発生量を推定し、上記のモデルを適用する。

東アジアでは、特に中国及び東南アジアのいくつかの国で最も変化が激しいと予想されるので、東アジアスケールでの影響評価が必要である。本研究では、これらの国で今後窒素負荷量がどのように変化するかを予測するための基礎として、これまでの東アジアの発展の経緯とそれによる窒素負荷の変化を特に食料生産に視点を当てて議論する。

2. 研究目的

我が国および東アジアにおける窒素負荷増大に伴う生態系内の物質循環の変化を推定するための広域モデルの作成を目的とする。このため欧米やわが国で蓄積されている窒素飽和に関する既存の研究結果、また本研究の他のサブテーマによる観測結果や実験結果など、現在明らかとなっている知見に基づいて、生態系内での窒素動態を記述する基本モデルを作成する。また、基本モデルをより簡易にした広域モデルを作成し、窒素負荷が生態系の窒素循環へ与える影響を全国スケールで推定する。

このため、まずインプットデータとしての窒素負荷量分布を推定する。また、モデルによる広域推定のためには、リモート・センシングデータやGISデータに基づいた空間分布データから、森林域の抽出や、モデルへインプットするパラメータの推定等が必要であり、そのための基礎的な検討を行う。特に森林の窒素循環を推定するために不可欠な、バイオマスの広域推定の可能性を

示す。

最後に、東アジアへの拡張のために、排出量に影響を与える食料生産、エネルギー消費のこれまでの動向について解析し、排出量の変化を推定することを目的とする。

3. 研究方法

(1) 窒素負荷量の推定

肥料と畜産からのアンモニア発生量を既存の統計データに基づいて以下の方法により推定した。施肥した肥料からアンモニアとして揮散する窒素の割合が、Bouwmanらによって肥料の種類毎に示されている⁸⁾。この値と我が国の種類別窒素肥料使用量に関するFAOの統計⁹⁾(2002における値)に基づいて、アンモニア発生量を見積もった。また、我が国の窒素肥料総消費量(2002年データ)と三島らによる養分収支算定システム¹⁰⁾のデータベースから抽出した市区町村別の施肥量(1997年データ)を用いて、市区町村別の2002年のアンモニア発生量を求めた。三島らによる市区町村別施肥量は、70種類の作物に関して市区町村別の作付面積と各々の単位面積当たりの施肥量に基づいて作成されたものである¹⁰⁾。さらに市区町村内では農地面積に比例して施肥が行われていると仮定して、1km×1kmグリッドのアンモニア発生量を見積もった。

畜産からのアンモニア発生量は、肉類生産量に関する統計値に基づいて推定した。即ち、家畜が飼料として摂取した窒素から肉類(肉、ミルク、卵)生産物に含まれる窒素を差し引いたものが全て排出されると仮定して窒素排出量を求め、排出量にアンモニア揮散率を掛けて発生総量を求めた。家畜の体に蓄積される量は考慮していない。アンモニア揮散率はBouwmanら⁸⁾による家畜種類毎の値を用いた。FAO統計には国毎に飼料の使用量が掲載されているが、統計に表れる飼料以外に、作物や食物の残渣、牧草などが飼料として使われているため、この量はほとんどの国で肉類生産量と比較して過小である。スミル¹¹⁾によると、現在のアメリカの畜産では、肉製品1kgを生産するのに必要な飼料は、牛肉で約13kg、豚肉で6kg、鶏肉で3kg、ミルクで1kg、卵で3kgとされている。これらの飼料効率と、アメリカの各肉製品及び飼料の窒素含有量とから種類別の窒素変換率を求め、日本の肉類生産に必要な窒素量を推計した。この値を用いて、畜産からの窒素排出量及びアンモニア発生量の全国合計を求め、また市区町村別の各家畜の頭数データ¹⁰⁾を用いて発生量を割り振って市区町村毎の値を求めた。更に市区町村内の農地と草地分布に基づいて、1km×1kmグリッド毎の発生量を見積もった。各グリッドから揮散する肥料及び畜産起源のアンモニアは、半径50km内に等方的に拡散し、距離により指数関数的に減衰して沈着すると仮定した。

窒素酸化物は、アイオワ大学のGGREER(Center of Global and Regional Environmental Research)から1度×1度グリッドの排出量と大きな点源の緯度経度と排出量のデータが提供されており¹²⁾、これを各1km×1kmグリッドからの排出量に変換して用いた。窒素酸化物はアンモニアより長距離を輸送されると考え、半径100km内に沈着すると仮定した。しかし、大陸からの移流は考慮していない。

(2) 窒素循環モデルの作成

① 窒素循環プロセスのモデル化

既存の文献等および本研究のサブテーマ1, 2の研究結果に基づいて、森林生態系における窒素動態に関する知見を整理し、考慮すべき少数の過程を抽出し、窒素の負荷、内部循環、流出

を記述する基本モデルを作成した。即ち、大気からの窒素負荷は植物の成長を促し、窒素のリターとしての林床への還元量の増加、土壌中の窒素蓄積量の増加により流出量の増加が引き起こされるというプロセスを仮定し、STELLAR 7.03を用いて炭素・窒素フローをモデル化した(図1)。図1において四角は炭素および窒素のストックを表し、単位は炭素は $t\ C\ ha^{-1}$ 、窒素は $t\ N\ ha^{-1}$ である。また太い矢印は炭素と窒素のフローを表す(単位は $t\ C\ ha^{-1}\ y^{-1}$ または $t\ N\ ha^{-1}\ y^{-1}$)。光合成により固定された炭素は、枯死により土壌有機物となり分解されて CO_2 として大気に戻る。窒素は、大気からの沈着と窒素固定により供給され、植物、土壌有機物、土壌中無機物の間の内部循環を繰り返し、その一部が地下水・溪流への流出および脱窒により系外へ去る。各フローの速度は細い矢印で結ばれたストックおよびフローの関数として、次の様な仮定に基づいて定式化した。

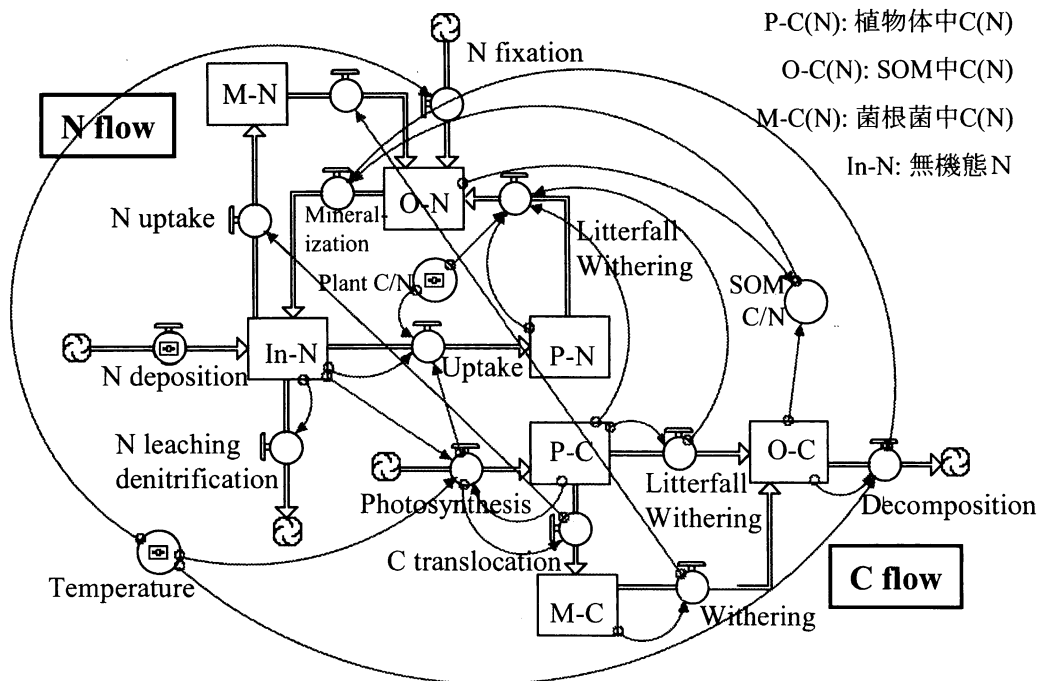


図1 窒素循環基本モデルの概要

仮定1：森林は式(1)のロジスティック成長曲線に従って成長する。 P はバイオマス量で右辺第1項が純生産量($NPP: t\ ha^{-1}\ y^{-1}$)、2項が枯死・落葉に相当する。極相におけるバイオマス P_{max} と純生産量 NPP_{max} が各々 $f(T, inN)/r$ と $f(T, inN)P_{max}$ であるので、内的自然増加率 f は(2)式で表される。極相に達したときの純生産量(NPP_{max})はマイアミモデルに基づいた(2)式の気温 T と利用可能な窒素量(図1の $In-N$)の関数であるとして、(3)式により求めた。

$$\frac{dP}{dt} = f(T, inN)P - rP^2 \quad (1)$$

$$f(T, N) = \sqrt{r \cdot NPP_{max}} \quad (2)$$

$$NPP_{max} = A \left\{ \frac{inN}{N_0 + inN} \right\} / \{1 + \exp(1.315 - 0.119T)\} \quad (3)$$

パラメータ r 、式(3)の定数 A 、 N_0 は我が国の森林の平均的なバイオマス量を参考に値を設定した。

仮定2：窒素固定、有機物分解など微生物による反応の速度は温度に依存する($Q_{10}=3$ と仮定した)。

仮定3：窒素は、植物、土壌有機物など各要素のCN比に従って炭素のフローに伴って移動する。

仮定4：植物による吸収を経ずに土壌有機物へ蓄積されるフローが存在する。

②広域モデルの作成と我が国の渓流水濃度の推定

(2) ①で作成した基本モデルを基に、現時点での窒素収支を広域的に推定する簡易モデルを作成し、(1)で作成した窒素負荷量分布、(3)で作成するGISデータを用いて我が国の渓流水窒素濃度を1 km×1 kmグリッドスケールで推定し、サブテーマ1で実施した全国渓流水調査結果と比較した。

広域化モデルでは、森林の生長に関して(2) ①で作成した基本モデルと同様に、(1)~(3)式に基づいて各パラメータと、グリッド毎の極相のバイオマス等を設定した。但し利用可能な窒素は、経時的に変化するIn-Nではなく、大気からの窒素負荷量と窒素固定量の合計とした。また、現在($t=y$)のバイオマス量 P_y が、正規化差分植生指数(NDVI)に比例するとして、(4)式を仮定した。

$$P_y = q \times NDVI \quad (4)$$

$P_y \leq P_{max}$ であるので、比例定数 q は、 $q = \min(P_{max}/NDVI)$ とした。窒素固定速度(N_{fix} : $\text{kg N ha}^{-1} \text{y}^{-1}$)は気温に依存すると仮定した($Q_{10}=3$)。平均的な森林の窒素固定速度は $10 \text{ kg N ha}^{-1} \text{y}^{-1}$ 程度と考えられているので¹³⁾、 10°C における固定速度を $10 \text{ kg N ha}^{-1} \text{y}^{-1}$ とした。

土壌へ浸透する窒素量(N_L : $\text{kg N ha}^{-1} \text{y}^{-1}$)は、大気からの負荷と窒素固定および落葉としての還元量の合計から樹木による吸収を差し引いたものとして、(5)式により求めた。ここで、バイオマス中の炭素の割合を1/2、樹体のC/N比(CN_p)を150と仮定した。 N_{dep} ($\text{kg N ha}^{-1} \text{y}^{-1}$)は大気からの負荷量を表す。

$$N_L = N_{dep} + N_{fix} + \frac{\{rP_y^2 - f(T, N)P_y\} \cdot 1000 / 2}{CN_p} \quad (5)$$

浸透した窒素は土壌中で、脱窒による大気中への放出や、有機物として固定されることにより浸透水から除去されるとした。これらの過程に対して、反応速度係数 k が温度 T にのみ依存($Q_{10}=3$)する1次反応を仮定した。即ち、浸透水量(降水量-実蒸発散量)を $u \text{ m y}^{-1}$ とすると、1 ha当たりの浸透水量は $10^4 \times u \text{ m}^3$ であるので、土壌表面での濃度 C_0 (mgN L^{-1})および深さ $z \text{ m}$ の土壌を通過した後の濃度 C_z は各々次式となる。実際の計算においては、(6)式において $k_{20} \cdot z$ の値が地域によらず一定と仮定し、採取地点における窒素濃度の全国平均が実測値とほぼ一致する様に $k_{20} \cdot z$ の値を決めた。

$$C_0 = N_L / (10u) \quad (6)$$

$$C_z = C_0 \cdot \exp(-k_T \cdot z/u), \quad k_T = 3^{(T-20)/10} k_{20}$$

全国渓流水調査における採取地点の各々の上流域を標高データに基づいて特定し、上流域の窒

素が全て採取地点に集まると仮定して、各地点における窒素濃度を計算した。

(3) 広域推定のためのリモート・センシングデータとGISデータの解析

① 土地被覆分類の経年的変化の解析

共同調査地である乗鞍岳東斜面前川流域を含む1:50,000地形図「乗鞍岳」図幅(36° - 36°10'N、137°30' - 137°45'E)の範囲を対象に衛星データに基づいた土被覆分類の方法を検討した。解析には、1988年6月15日と2001年6月3日に観測したPath-Row: 108-35のLandsat TMデータ、数値地図25,000、自然環境情報GISデータ(自然環境保全基礎調査、現存植生図)を使用した。従来、異なる時期のデータに基づく土地被覆分類は、各時期で各々教師なし分類を行って、生成されたクラスをお互いに対応づけて変化を調べる方法が使われているが、本研究では共通の基準で分類する手法を開発した(図2)。異なる時期のデータで共通のトレーニングデータ(分類の元になる教師データ)を使用するために、両時期のTMデータを濃度値(DN:相対的な値)から輝度値(物理量)に変換し、地理補正(ジオコーディング)した後、2001年のTMデータのBand 1、3、4、5、7を用いて教師なし分類(ISODATA法)を行い、30クラスに分類した。さらに、現存植生図を参考にして、植生機能分類に基づく常緑針葉樹(Evergreen Conifer)、落葉針葉樹(Deciduous Conifer)、落葉広葉樹(Deciduous Broadleaf)、草地(Grassland)、牧草地・放牧地(Pasture、Meadow)、畑地(Upland)、水田(Paddy Field)、植生のある雪域(Snow & Vegetation)、雪域(Snow)、水域(Water)の10クラスに統合した。このクラスをトレーニング・データとして、1988年のTMデータのBand 1、3、4、5、7に、教師付き分類法(最短距離法:教師データの各クラス中心から当該画素までのユークリッド距離を計算し、最も距離の短いクラスに分類していく手法)を適用して、上記の10クラスに分類した。以上の処理で得られた2時期の土地被覆分類図を比較して、13年間の土地被覆変化を調べた。

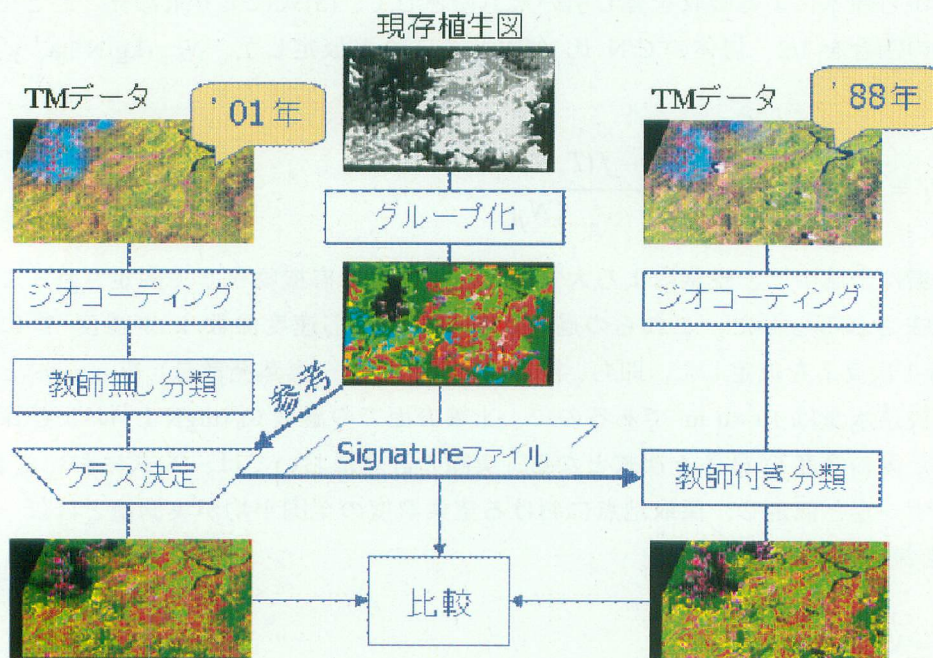


図2 土地被覆変化の解析手順

②リモート・センシングデータに基づくバイオマス推定に関する検討

長野県全域を対象に、森林のバイオマスおよび窒素吸収量推定のための基礎データとなる正規化差分植生指数（NDVI）の変化特性について検討した。2001年4月1日から2003年9月30日に観測した毎日のMODIS（Moderate Resolution Imaging Spectrometer）データ（欠測値を含む）を地理補正した後、NDVIを計算した。長野県森林施行計画図に記載された樹種と林齢に基づいて地域を分類し、1 km四方以上に同一樹種（カラマツとヒノキおよび広葉樹）の広がりがある地点で、MODIS画像から対応するピクセルのNDVI値を取り出した。毎日のNDVIから10日合成NDVI（ピクセルごとに当該期間の最大NDVIを抽出）および1ヶ月合成のNDVIを作成し、これらの時間変化の樹種、林齢による特徴を比較した。

更に、日本全域を対象としたバイオマス賦存量に対応する指標として、NOAAのAVHRR（改良型超高解像度放射計）の観測値に基づき、以下の方法で積算NDVIを求めた。即ち、2004年1月1日から12月31日の月別NDVI（各月の最大NDVI）を-1~1に正規化し、土地利用・被覆図と、NDVIの年間変動パターンを参考にして、 $NDVI \geq 0.25$ が地表面が植生に覆われている状態であると定義し、ピクセルごとに1~12月の月別NDVIから $NDVI \geq 0.25$ のレイヤを積算した。常緑樹と落葉樹、および、広葉樹と針葉樹の区別、畑地と草地の区別ができ、それぞれの土地利用・被覆に対応した処理が行えるように、積算NDVIデータと土地利用・被覆図を重ね合わせた。

（4）東アジアの窒素負荷量変化の解析

FAO（国際連合食料農業機関）の統計に基づいて、アジアの食料生産の変化を示し、食料生産の変化が東アジアの窒素環境に与えてきた影響を検討した。特に東アジア13カ国（ASEAN+3：日本、中国、韓国、ブルネイ、カンボジア、インドネシア、ラオス、マレーシア、ミャンマー、フィリピン、シンガポール、タイ、ベトナム）を対象として、窒素肥料使用量、作物生産量、肉類生産量などに基づいて、主として食料生産に起因する窒素の負荷の1961年から2002年の変化を推計した。推定は窒素の収支に基づき、作物生産による窒素負荷（＝肥料＋窒素固定－収穫）、畜産からの負荷（＝飼料－肉類生産）、人から（＝食料消費）として推計した。更に（1）節と同様の方法で、各国の肥料及び畜産からのアンモニア発生量を試算した。また、森林と草地の面積に基づいて自然生態系における窒素固定による負荷を見積もった。窒素酸化物の負荷の変化は、CGRERによる各国の2000年の排出量とエネルギー消費量の経年変化¹⁴⁾とから推計した。

4. 結果・考察

（1）窒素負荷量の推定

表1に肥料からのアンモニア発生量の推定結果を示した。2002年に $464 \times 10^3 \text{ t N y}^{-1}$ の窒素肥料を使用しているが、そのうち8.4%に当たる $39 \times 10^3 \text{ t N y}^{-1}$ がアンモニアとして揮散している結果となった。図3に示したように、日本の肥料使用量は1970年代から減少傾向にあり、アンモニア発生量も1980年代は $50 \times 10^3 \text{ t N y}^{-1}$ 程度、90年代以降 $40 \times 10^3 \text{ t N y}^{-1}$ 程度で推移していると推定された（肥料構成の経年的変動が大きく、アンモニア発生量は肥料使用量と必ずしも対応していない）。また、表2に畜産からのアンモニア発生量の推定結果を示した。飼料中の窒素が動物性タンパク質に変換される比率は、鶏肉、卵、ミルクで大きく、牛肉で小さい。日本の2002年の平均変換率は約19%となり、 $641 \times 10^3 \text{ t N y}^{-1}$ の窒素が排出され、そのうちの29%の $185 \times 10^3 \text{ t N y}^{-1}$ がアンモニアとし

表1 肥料からのアンモニア発生量推定結果

	Ammonium sulphate	Ammonium nitrate	Ammonium phosphate	Urea	Other complex fertilizers	Other nitrogenous fertilizers	Ammonium emission	NH3 emission rate (%)
窒素肥料使用量 (10 ³ t N)	142	2	0	109	181	29	39.0	0.084
アンモニア発生率	0.08	0.02	0.035	0.15	0.03	0.20		

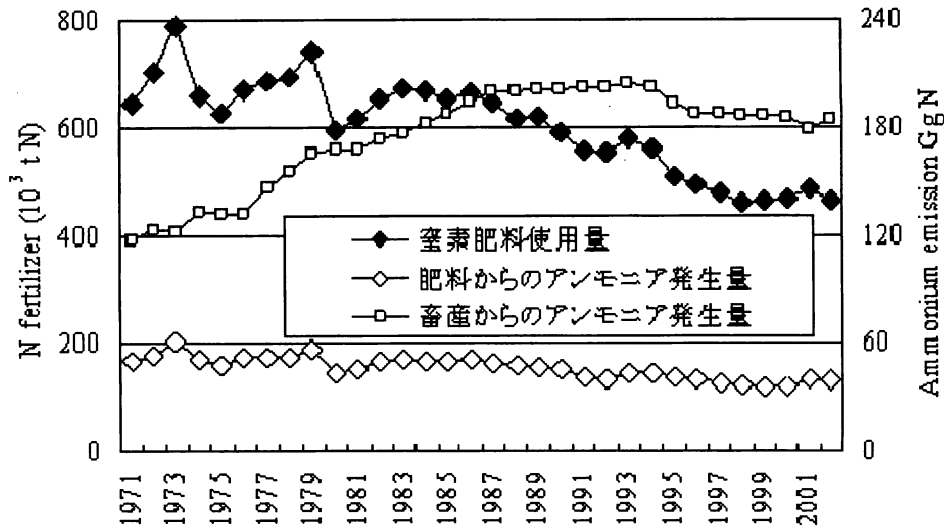


図3 我が国の肥料使用量、アンモニア発生量の変化

て揮散していると推定された。図3を見ると、家畜からのアンモニア発生量は1980年代後半まで急激に増加し、90年代はじめ以降減少の傾向にある。この減少は、1993年以降肉類生産量が減少しつつあることに加えて、動物性タンパク質に占める鶏肉、卵、ミルクの割合が増大し、窒素変換率が大きくなってきていることによる。

表3に、既存の推定値^{12,15,16)}との比較を示した。既報の肥料からのアンモニア発生量の推定は本報と同様、肥料使用量に発生原単位を掛けて求めている。肥料毎のアンモニア揮散率は、文献によってかなりの違いがあり、また日本の条件下での値も知られていないので、推定値には大きな不確実性があると考えられるが、神成らの値が小さい以外は、ほぼ同程度の推定結果であった。家畜からのアンモニア発生量は、著者により大きな違いがある。Murano et al.¹⁵⁾と神成ら¹⁶⁾は、種類毎の家畜頭数と排出原単位からアンモニア発生量を求めており、ここで用いた手法と異なる。

表2 畜産からのアンモニア発生量推定結果

	牛肉	豚肉	鶏肉	マトン	その他肉	ミルク	卵	合計
生産量 (10 ³ t)	535	1244	1229	0.2	9	8385	2514	13916
生産量中N (10 ³ t)	12	20	25	0.006	0.3	49	46	152
N変換率*	0.07	0.12	0.33	0.15	0.23	0.24	0.27	0.19
N排出量 (10 ³ t)	162	143	52	0	1	157	127	641
アンモニア揮散率 ⁸⁾	0.255	0.360	0.360	0.360	0.360	0.173	0.360	0.29
アンモニア揮散量 (10 ³ t)	41	51	19	0	0	27	46	185

* N変換率は、スミル¹¹⁾による飼料効率と、肉類、飼料の窒素含有率とから求めた。

表3 アンモニア発生量の文献値との比較

	年	肥料から (10^3 t N y^{-1})	畜産から	その他
Murano et al. ¹⁵⁾	1991	41.2	123.5	
神成ら ¹⁶⁾	1994	23.3	259.2	147.6
CGRER ¹²⁾	2000	37.3	181.6	70.8
本研究	2002	39.0	184.6	

なお、Murano et al.¹⁵⁾ は家畜として牛と豚のみを対象として推定しているため小さい推定値となっているが、表2で鶏肉と卵を除いた発生量は約 $120 \times 10^3 \text{ t N y}^{-1}$ であるので、本報とほぼ一致する結果であると考えられる。CGRERの手法は不明であるが、本報の推定値と同程度であった。神成らやCGRERによると、農業起源以外のアンモニアの寄与も全発生量の25-35%あることが示されている(表3)。本報では、農業起源のもののみを考慮しているため、アンモニア発生量は過小評価となっていると考えられる。

アンモニア発生量を各グリッドに割り振り、更に50 km内への沈着量を計算した結果、日本の陸域への総沈着量は、約 $161 \times 10^3 \text{ t N y}^{-1}$ ($4.6 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$)となった。図4にアンモニアの負荷量分布を示した。単位面積当たりの沈着量が多いのは、茨城県、埼玉県、千葉県などの関東近郊、佐賀、福岡、宮崎、鹿児島などの九州であり、また畜産の盛んな北海道東部、東北地方東部も比較的高

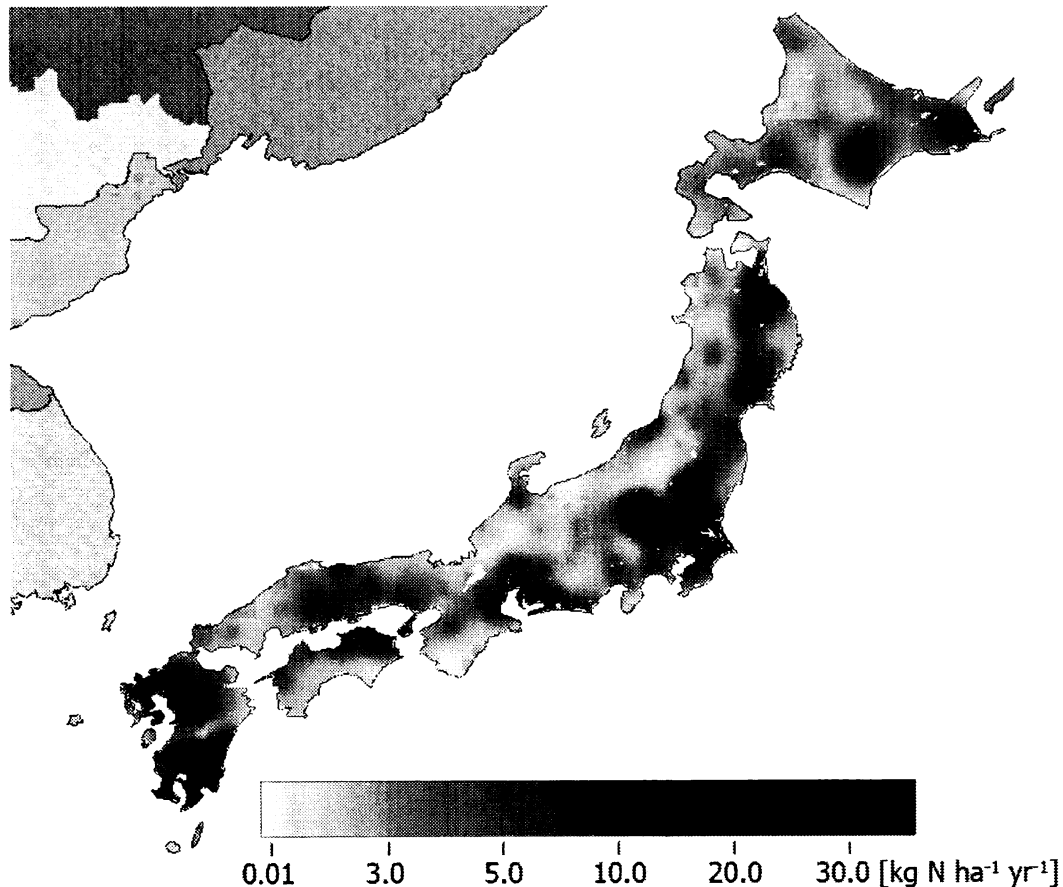


図4 アンモニア負荷量分布

負荷であった。一方、窒素酸化物の沈着量は、約 $399 \times 10^3 \text{ t N y}^{-1}$ ($11.4 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$)であり、東京、大阪を中心とする大都市圏で高負荷となった。わが国で観測される大気からの硝酸態窒素の負荷量と比較すると、推定された窒素酸化物の沈着量は過大であると考えられるが、ここで推定したアンモニアと窒素酸化物の合計沈着量がサブテーマ1の図18で用いた窒素負荷量である。

(2) 窒素循環モデルの作成

① 窒素循環プロセスのモデル化

図1のモデルを用いて、3種類の年平均気温 (5°C 、 10°C 、 20°C) と3種類の大気からの窒素負荷量 ($5 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 、 $20 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 、 $50 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$) を仮定して200年間の変化を推定し、窒素流出を支配する要因と特性に関して検討した。本研究の調査対象地である乗鞍は気温 5°C 、窒素負荷量 $5 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ に、また観音台、八郷は 20°C 、 $20 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ にほぼ相当する。図5aに窒素の系外への流出速度（溪流、河川への流出と脱窒による大気への放出の合計）の変化を示した。ここでは有機物分解率を 0.1 y^{-1} 、菌根菌への分配率を0.1、植物C/Nを50と設定している。供給された窒素の一部は植物による吸収、落葉を経ずに直接土壌有機物として固定されることが知られているが、その過程としては、菌根菌による吸収、バクテリアによる同化の他、非生物学的な化学反応によるなど、様々な仮説が出されているが解明には至っていない。本モデルでは便宜上、樹木が固定した炭素の一部を菌根菌に分配して土壌有機物が生成される過程として記述しているが、単に一定割合の窒素が直接有機物になると仮定し

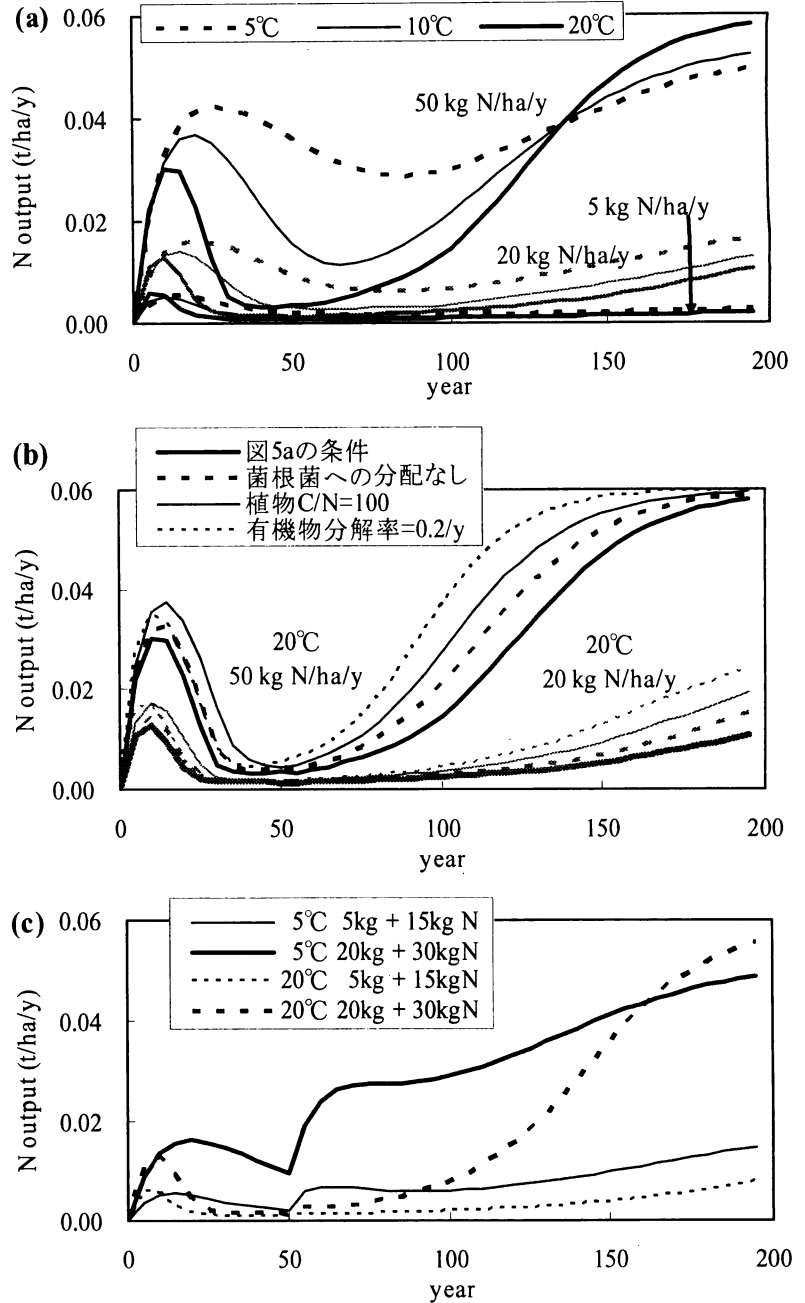


図5 基本モデルによる窒素流出予測結果

た場合とモデル上本質的な違いはない。負荷量が5 kg N ha⁻¹ y⁻¹の時には気温によらず流出量は僅かであるが、大きな負荷量の場合には初期段階では低温ほど大きな流出量となった。流出量の時間変化は森林の成長速度に支配され、極相林となった後は負荷された窒素がほとんど全量流出する。このとき、窒素固定速度が高温ほど大きいと仮定しているため、流出量も高温ほど多い結果となった。

図5bに、気温が20℃で、負荷量が5 kg N ha⁻¹ y⁻¹と20 kg N ha⁻¹ y⁻¹の各々の場合に関して、菌根菌への分配率（直接有機物となる割合）を0.0、植物C/Nを100、有機物分解速度を0.2 y⁻¹とした場合の変化を示した。有機物分解が早く、植物体のC/Nが大きいほど窒素流出が始まる時期が早くなる。また窒素が有機物へ直接固定されることは、窒素流出を抑制する結果となった。窒素負荷の変化による窒素流出の予測のためには、これらのパラメータに関する妥当な値を得ることに加えて、現在森林成長のどの過程にあるのかを知ることが重要であることが分かる。このためには、森林の樹齢、バイオマス量、バイオマス増加率などのデータの広域の推定が必要となる。

図5cには窒素負荷量が急激に変化したときの流出応答を示した。50年目に負荷量が5 kg N ha⁻¹ y⁻¹から20 kg N ha⁻¹ y⁻¹へ変化した場合と20 kg N ha⁻¹ y⁻¹から50 kg N ha⁻¹ y⁻¹へ変化した場合が示してある。気温5℃では負荷量変化に応じて流出量も急激に増加しているが20℃では負荷量の急増による急激な変化が見られない。これらの結果は、八郷、観音台及び高山で実施した窒素添加実験において、温暖な八郷、観音台では3年間の窒素添加は有意な流出量の変化を引き起こさなかったのに対して、寒冷な高山では2年目から流出量の明らかな増加が見られたこと、特に針葉樹林で顕著であったことなどのこれまでの知見¹⁷⁾と定性的に符合する。

②広域モデルの作成と我が国の渓流水濃度の推定

全国調査を実施した1270流域について、アンモニアと窒素酸化物の沈着、および窒素固定による窒素負荷量、また、窒素収支にかかる各パラメータの統計値を表4に示した（1278サンプルのうち、硝酸イオンの測定濃度が300 μMを超える3つのサンプルははずれ値として除いた。また5つの流域がGISの地図上で特定できなかった。従って1270流域を対象とした）。「C in NPPmax」、「C in Pmax」は、極相における炭素同化速度（NPP中の炭素）と極相におけるバイオマス中の炭素を表す。NDVIは対象とした1270流域では1.3~4.6の間に分布した。図6に示したように、NDVIとPmax中の炭素量との間には正の有意な相関が存在する(r=0.58、P<0.01)。また、現在のバイオマス量Pyを、式(4)に示した様にNDVIに比例すると仮定して、図中に実線で示した（比例定数qは、NDVIに比してPmaxが特に小さいはずれ値を除いた後のPmax/NDVIの最小値とした。はずれ値を除かない場合のPyは図中の点線となる）。Py中の炭素量と対応する炭素同化速度(C in NPPy)の統計値も表4に示した。植物体のC/N比を150と仮定したので、これらの150分の1の量が現在の窒素の吸収速

表4 広域モデルにおける各パラメータの統計値

	Nitrogen load (kgN ha ⁻¹ y ⁻¹)			Temper- ature	Average NDVI	C in P _{max}	C in NPP _{max}	C in Py	C in NPPy	Accumulated N in plants kgN ha ⁻¹ y ⁻¹	N leaching kgN ha ⁻¹ y ⁻¹
	NH ₃	NO _x	N _{fix}			t C ha ⁻¹	t C ha ⁻¹ y ⁻¹	t C ha ⁻¹	t C ha ⁻¹ y ⁻¹		
Average	3.8	12.7	3.4	9.8	3.0	106.5	5.7	71.1	3.8	8.1	6.4
Minimum	0.1	0.1	0.2	0.1	1.3	54.1	1.5	29.7	1.0	0.0	0.4
Maximum	24.1	52.8	18.7	15.7	4.6	130.3	8.5	107.9	6.5	13.5	19.9

度及び蓄積量に相当する。また、表4の最右欄には、窒素の樹木への正味の年間蓄積量および溪流からの流出量に関する推定値の統計値を示した。平均値で比較すると、大気からの窒素沈着と窒素固定の合計で約20 kg ha⁻¹y⁻¹の窒素負荷があり、このうち約8 kg ha⁻¹y⁻¹が樹木へ蓄積され、約5.5 kg ha⁻¹y⁻¹が土壌中で脱窒や有機物固定に用いられ、約6.5 kg ha⁻¹y⁻¹が溪流から系外へ流出しているの見積もられた。本計算においては窒素の正味の収支が重要であるので、植物への蓄積量を見積もるために、植物体のC/N比として樹体(幹)に相当する大きな値を用いている。枝葉のCN比はより小さいことが知られており、従って、実際にはここで推定した値より多量の窒素が植物による吸収と落葉により内部循環していると考えられる。

図7に、植物の吸収、落葉による内部循環および土壌中での窒素除去を経た後の渓流水窒素の推定濃度と硝酸イオン濃度測定値との関係を示した。両者の間の相関係数は0.65 (P<0.001)であり、誤差は大きいですが、渓流水窒素濃度がある程度推定されていると言えよう。推定誤差には地域的な傾向が見られ、測定値に比べて推定値が大きかったのは、関東と近畿周辺地域であり、これらの地域で窒素酸化物の負荷量が特に過大であることに起因していると考えられた。一方、北九州地域、静岡県、愛媛県に、測定値が推定値を大きく上回る地点が多いが、この理由はよくわからない。北陸での測定値が推定値と比べて大きい傾向があることから、北九州を含む日本海側の地域で、現在は考慮していない大陸起源の窒素負荷が渓流水濃度へ影響を与えている可能性があるが、更に検討が必要であろう。

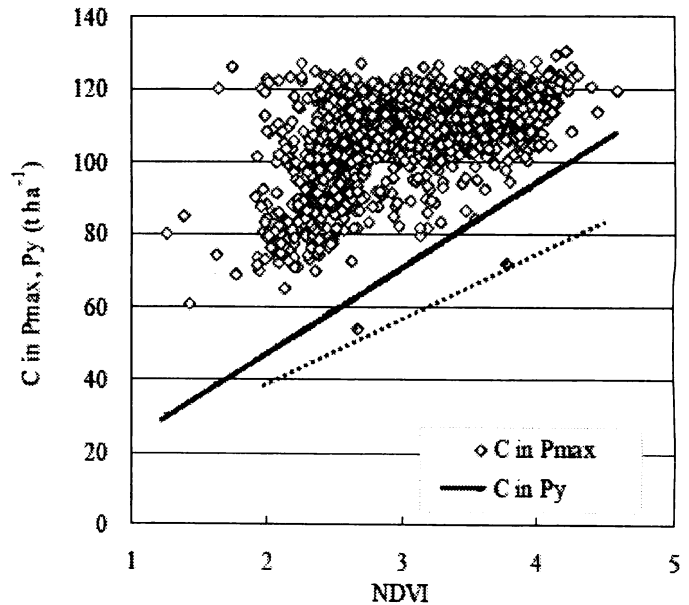


図6 マイアミモデルに基づいて推定した極相でのバイオマス量とNDVIの関係

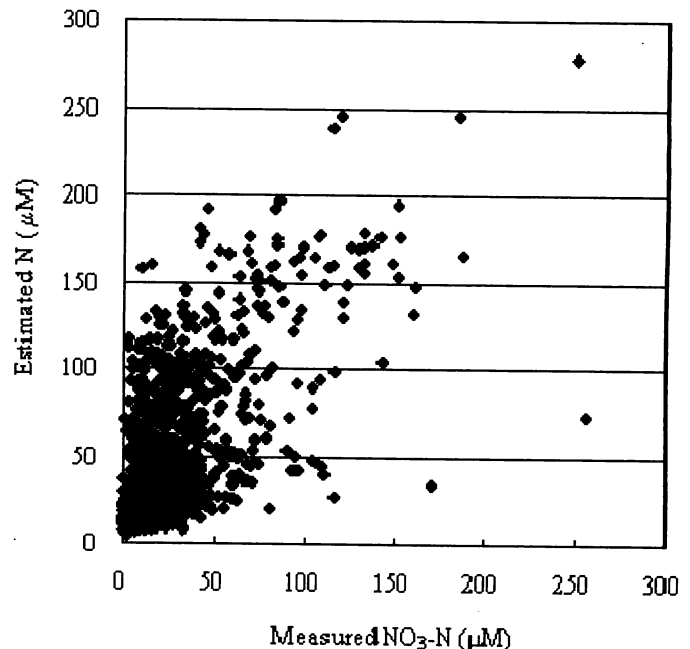


図7 全国渓流水の窒素濃度の実測値と予測値の比較

(3) 広域推定のためのリモート・センシングデータとGISデータの解析

① 土地被覆分類の経年的変化の解析－乗鞍岳東斜面の土地被覆変化

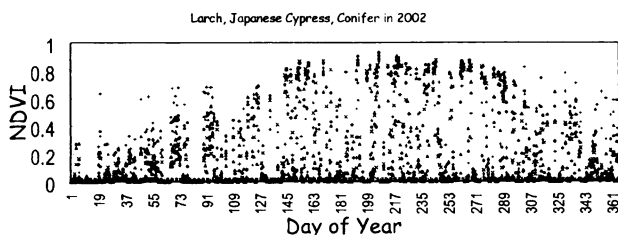
1988年度と2001年の土地被覆分類結果が現存植生図と一致した割合は、1988年分類で42.5%、2001年分類で39.4%であった。現存植生図の「伐採後」が被覆分類では草地或いは牧草・放牧地に分類され、また、分類結果が畑地、水田であるピクセルが現存植生図では森林であるケースも多かった。現存植生図の作成方法(1 kmメッシュの中心より250mの円内における優占群落を、そのメッシュの代表としている)を考慮すると、山間地で一塊の面積の小さい畑地や水田は、現存植生図において過小評価されている可能性がある。

1988年と2001年の土地被覆分類図を比較したところ、2時期の間に土地被覆が変化した領域の面積は、全体の約50%を占めた。そのうち、一塊の面積が4 km²を超える土地被覆変化領域は、変化領域全体の7%であり、それ以外は、塊の面積が小さく、ノイズ状に(対象地域全体に一様に)分布していた。

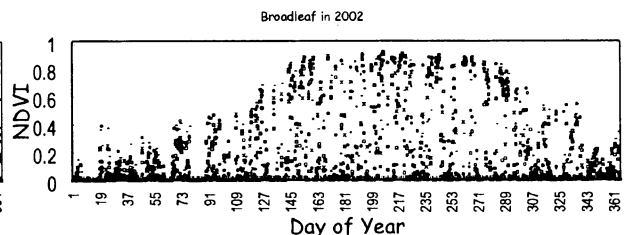
大規模な土地被覆変化個所(面積が4 km²を超える領域)におけるNDVIを比較した。1988年のNDVIより2001年のNDVIが大きい画素は、57.0%を占めた。このうちの43.8%が草地、牧草地から林分クラスへの変化であり、TMデータの目視判読により森林伐採個所を確認したところ、この変化は、1988年以前の伐採地において植生の回復過程にあると推定できた。6.8%が林分クラスから草地や牧草地へ変化(1988年のNDVIより2001年のNDVIが小さい画素)で、1988-2001年の間に伐採された領域を示していると推定できる。5.9%は、牧草地から草地への変化で、植生タイプが実際に変化したか、あるいは、同じ植生タイプでも両年で観測時点での生育量が異なるために別クラスに分類されたと推察された。

ノイズ状土地被覆変化個所では、66.0%が林分クラスから林分クラスへの変化であり、Evergreen Conifer、Deciduous Broadleafクラスの大部分がDeciduous Coniferクラスに変化していた。この植生タイプの遷移の

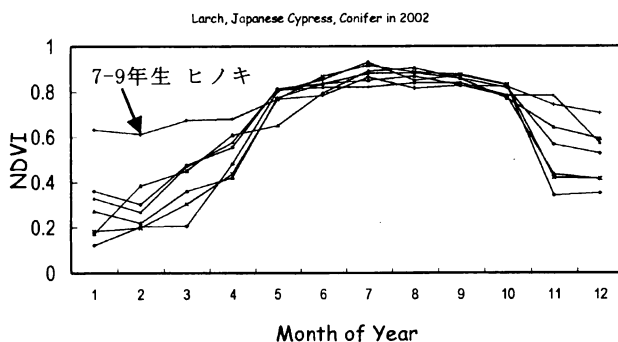
(a) 2002年 針葉樹



(b) 2002年 広葉樹



(a) 2002年 針葉樹 1ヶ月合成



(b) 2002年 広葉樹 1ヶ月合成

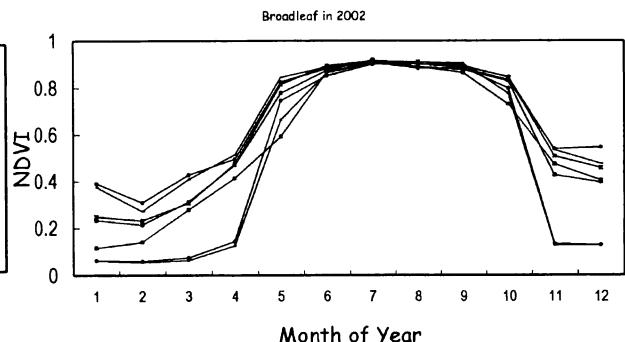


図8 2001年4月1日から2003年9月30日までの毎日NDVIと1ヶ月合成NDVIの変化。

欠測値や雲によって地上が観測できなかった日のデータも含まれる。針葉樹は1-2年生から240年生、広葉樹は8年生から214年生の林分に対応するピクセルが含まれている。

すべてが、13年間という短い間では起こりがたい。ノイズ状土地被覆変化個所での1988年から2001年間のNDVIの変化は土地被覆変化の無かった個所のNDVI変化と比べて大きかった。NDVI変化の原因としては、大規模変化領域と同様に伐採後地の植生回復や、実際に植生が変化した可能性がある。また、2時期のTMデータ間での位置合わせのずれや、2時期の生育ステージの違い、つまり、葉の展開具合や密集度の違いによって、分光反射特性が変化し、誤分類されてしまった可能性もある¹⁸⁾。このようなフェノロジーを考慮した被覆分類については、今後の課題であるが、植生繁茂程度や生育ステージの違いによる誤分類は、生育ステージが安定している時期の衛星データを用いることで、回避可能と考えられた。

② リモート・センシングデータに基づくバイオマス推定に関する検討

図8a、bに針葉樹(カラマツ、ヒノキ)と広葉樹の2002年の毎日NDVIのグラフを示す。毎日NDVIでは、欠測値や雲によって地上が観測できない日がノイズとなり、値が大きく振動する。10日合成画像では、値の振動は少なくなるが、まだノイズが残る。1ヶ月の合成画像では、欠測値や雲によって地上が観測できない日はほとんど除かれた(図8c、d)ので、解析には1ヶ月合成NDVIを用いることが適当であると考えられた。月合成NDVIは、春から夏にかけて増加し、その後秋から冬にかけて減少する。図9に長野県周辺の2003年5月6日のNDVI画像を、図10に月合成NDVIから計算した1年積算NDVIの全国の画像を示した。千葉県以西の常緑樹林帯、特に、太平洋岸の照葉樹林帯では、他に比べて積算NDVIが大きかった。東京、名古屋、大阪の大都市圏では、積算NDVIは0であった。

衛星データから計算されるNDVIは、葉面積指数(LAI: Leaf Area Index)と相関関係にあることが、知られており、LAIは、葉面積および葉重と相関がある。葉重と胸高直径は相関関係にあり、胸高直径からバイオマス(乾物重)を推定できる。つまり、バイオマス*Biomass*は、以下の式で表すことができるかとされている:

$$Biomass = a * f(NDVI) + b \quad (7)$$

(ただし、aとbは、樹種によって決まる係数)

針葉樹(カラマツ、ヒノキ)と広葉樹の2002年5~9月の月毎NDVIと林齢との関係を図11に示す。6~9月の針葉樹(カラマツ、ヒノキ)では、林齢が大きくなるにつれ、NDVI値も増加した。林齢が30~45年付近でNDVI値は極大値に達し、その後はなだらかに減少した。林齢120~240年の間にはサンプルがないが、250年付近では、NDVI値は再び大きくなっていった。一方、5月のNDVI値は、極大値が林齢50~70年付近にあり、その後は単調減少した。広葉樹の場合は、林齢によるNDVIの顕著な変化は見られない。広葉樹は、

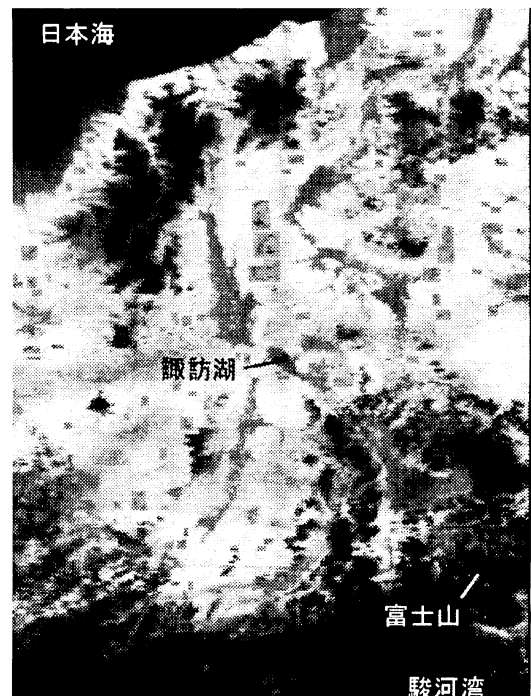


図9 2003年5月6日観測のMODISデータから計算したNDVI画像。白い部分はNDVI値が高い(植物バイオマスが大きい)ところで、黒くなるほどNDVI値は低くなり、裸地(高い山の山頂付近)や水面は黒で表される。

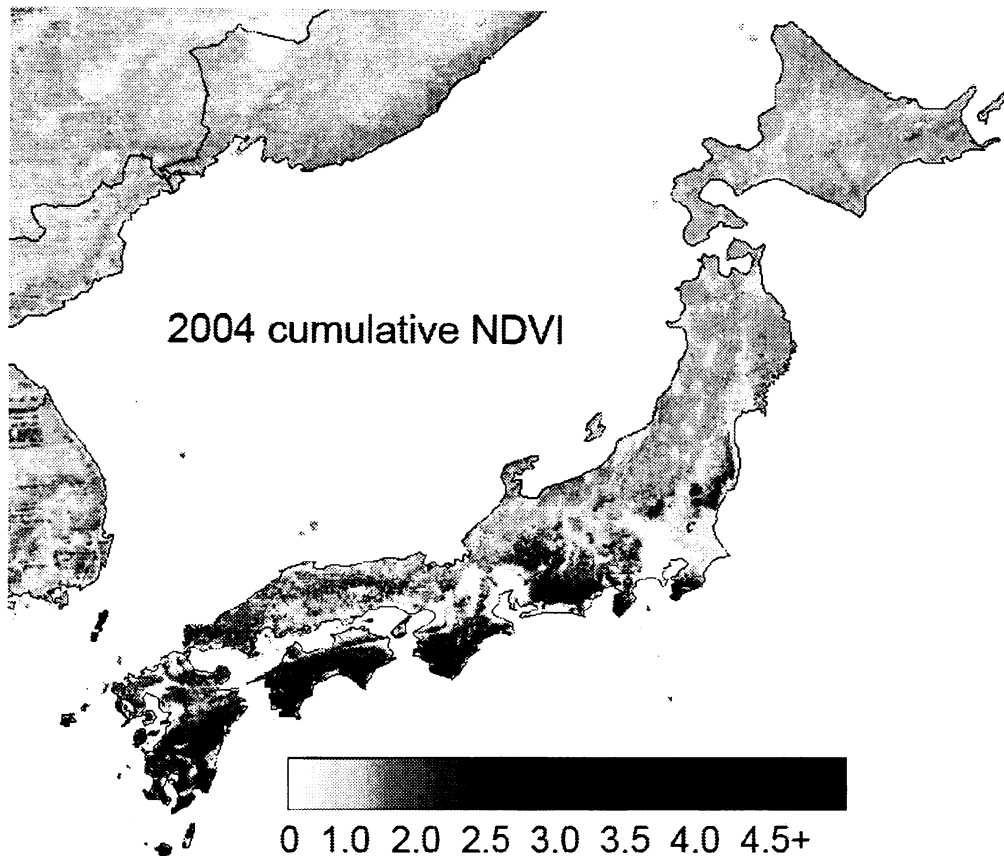


図10 積算月合成NDVI

(a) 2002年 針葉樹

(b) 2002年 広葉樹

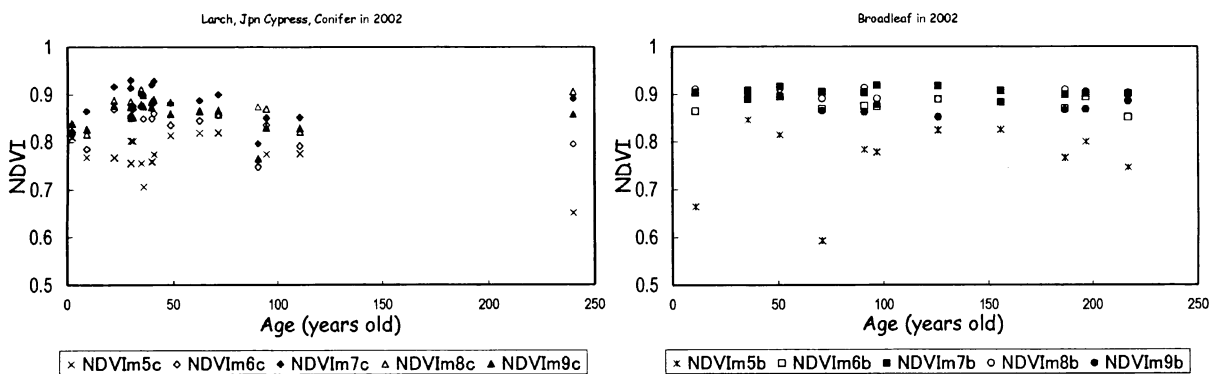


図11 2002年の5～9月の月毎NDVIと林齢の関係(凡例のNDVI_{mxc}(またはb)のxが月を表す)

葉型が幅広のため、樹木が生長すると葉が樹冠を覆い尽くし、光が樹冠の下に通りにくくなる。そのため、一定の林齢に達すると、反射光量は飽和状態になると考えられる。針葉樹は、葉型が針状のため、木が生長しても光を樹冠の下まで多く通す。そのため、樹木の生長に応じて影の影響も大きくなり、一定の林齢以降はNDVI値が減少すると考えられる。

これらの図は、林齢とNDVIとの関係を見たもので、必ずしもバイオマス賦存量と対応しているわけではな

い。樹種は区別をしているが、地形や土壌条件等の違いによる地位指数の異なる地域のNDVIを比較している可能性も高い。NDVIに明らかな季節変化が見られること、(2)②でNDVIとマイアミモデルによるNPPの推定値との間に有意な相関があることを考えると、また、図10の全国地図の分布からも、NDVIからバイオマス量を推定出来ることは明らかであるが、上述の植生の3次元構造の違いから、葉型の(針葉樹と広葉樹)の区別の他に、常緑樹と落葉樹の区別、林床植生の繁茂の程度なども考慮すべきであろう。従って、(2)②で、現存のバイオマスをNDVIに比例すると仮定してモデルによる推定を行ったが、それにはかなり大きな誤差が伴っていることになる。より精度の高い推定のためには、土地被覆分類の多時期のデータから推定される土地被覆分類の変化に基づいて、また特定された地域に関しては森林計画図などを用いて、伐採の行われた面積と時期の情報等を用いることが必要となろう。

(4) 東アジアの窒素負荷量変化の解析

①東アジアの食料生産の変遷

図12に1961年の値を1とした時の、人口と穀物生産量の変遷を示す。図中には、参考として穀物収穫面積の変化も示す。これより人口はほぼ直線的に増加し、2002年における値は1961年の約2倍になっていることが解る。これに対し、穀物の生産量は同時期、2.4倍程度に増加している。20世紀後半において、世界の穀物生産量の増加は人口の増加を上回っている。世界全体で見れば、20世紀の後半において食料事情は大きく改善したと言っても良い。この間、穀物収穫面積はほぼ一定である。穀物を作付する面積が増えなくても生産量が増大したことは、反収が増えたことによる。いわゆる「緑の革命」である。

図13に一人当たりの穀物生産量を示す。この図には示されていないが、EU諸国は、1960年ころには世界平均と同程度、現在は約600kg/人/年であり、アメリカは、現在1200kg/人/年と、遙かに多い。東アジア(中国とASEAN)では、この間順調に穀物生産量が増加し現在は世界平均と同じレベルにある(日本は、1961年に214 kg/人/年、2002年は96 kg/人/年と半減している)。穀物生産量の約70%が可食部で

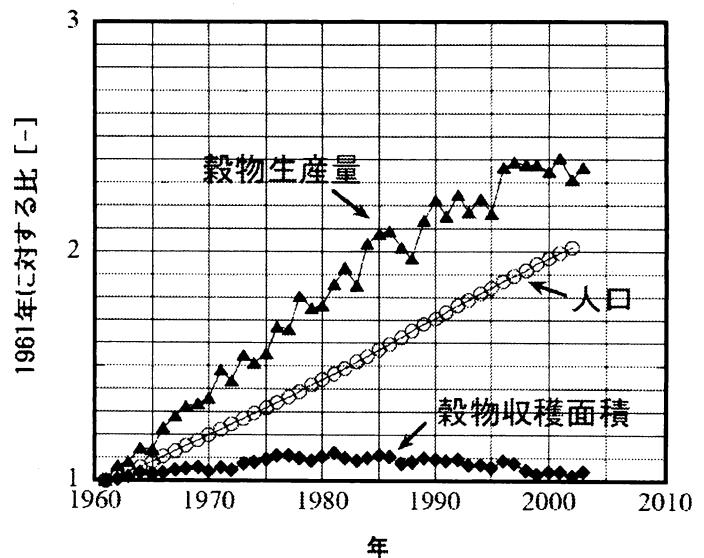


図12 世界の人口と穀物生産量の変化

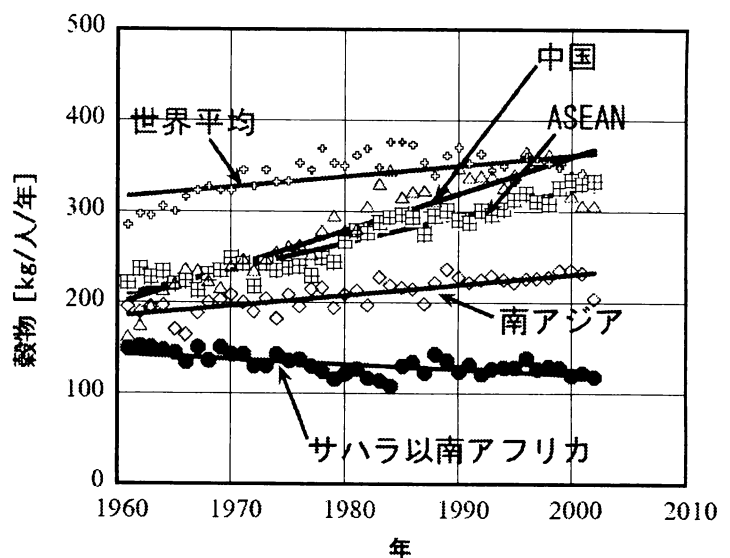


図13 一人当たりの穀物生産量の変化

あるとすると、2002年における世界平均の一人当たり生産量は326kgであるから、可食部重量は228kg、全ての穀物の熱量を米と同様(1kg当り3,560kcal)と仮定すると、穀物から一人が一日に摂取する熱量は2,220 kcal/人/日となる。摂取熱量一日2,220 kcalで人間は十分生存可能であり、また他の食物からも熱量を摂取しているので、世界平均で見れば、また東アジアでも十分な食料を生産していることになる。

図14に19世紀初頭よりのフランスの小麦反収と、明治中期よりの日本における水稲反収の変遷を示す。フランスにおける小麦反収は、19世紀から20世紀中頃までそれほど変わっていない。1820年代の平均が0.81 t ha⁻¹であるのに対し、100年経過した1920年代においても1.36 t ha⁻¹と微増に留まっている。しかしながら1950年以降は、ほぼ直線的に増加している。2002年における反収は7.6 t ha⁻¹である。100年で1.7倍にしか増えなかった反収は、その後約50年間で5.6倍にも増加した。「緑の革命」は開発途上国での出来事と思いがちであるが、実際には途上国よりも、むしろ先進国で著しかった。日本でも水稲の反収は1950年から1970年頃まで、フランスとほぼ同様に急増している。現在穀物の平均反収は西欧諸国、東アジアで5-6 t ha⁻¹、東南アジア、南米で3.5 t ha⁻¹程度となっている。

「緑の革命」は多収量品種の開発と窒素肥料の大量投入により実現した。図15に世界の主要59カ国における、1961年から2001年までの単位面積当りの肥料の使用量と反収の関係を示す。窒素肥料(化学肥料)の投入と反収の間には、強い相関があることが解る。この図は縦軸、横軸共に対数で示している。反収Y (t ha⁻¹) と肥料投入量N (kg ha⁻¹) の関係は次式で表される。

$$Y = 0.83 \times N^{0.32} \quad (8)$$

この関数の形式は、反収を上げようとすると急に多くの肥料が必要になることを示している。結果として図16に示すように窒素肥料消費量の著しい増加となった。現在東アジアで世界の37%の窒素肥料を使っている。

生産された穀物の内、現在42%は飼料として利用されている。肉1kgを生産するのにその数倍の重量の飼料を必要とする。従って肉消費量の増加は穀物需要

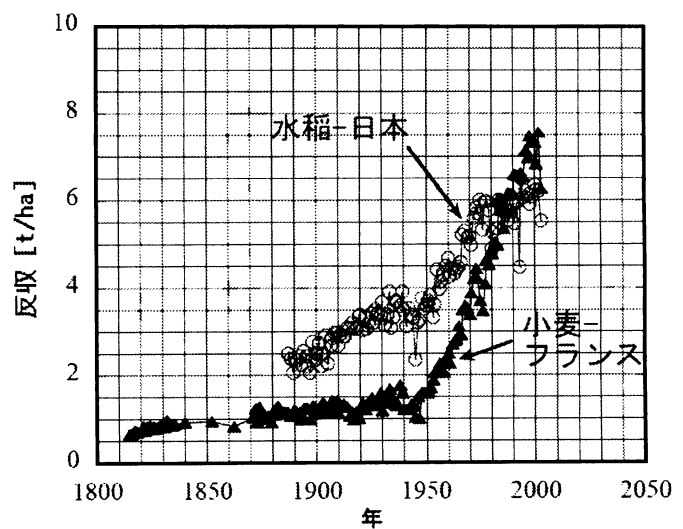


図14 フランスの小麦と日本の水稲の反収

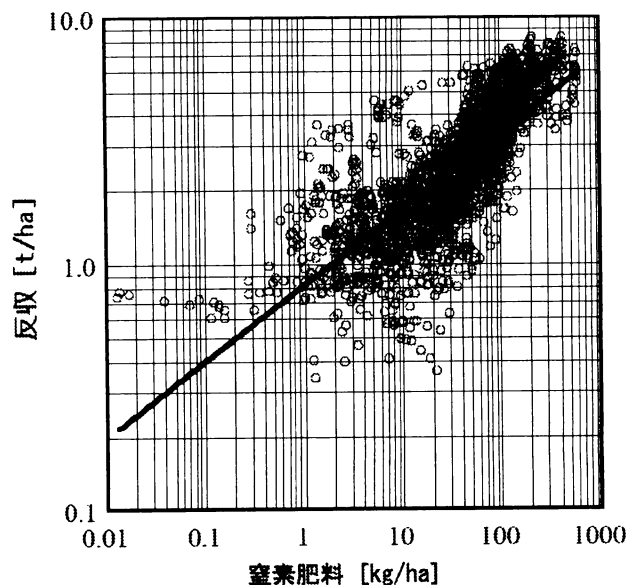


図15 窒素肥料と反収

の増加、そして窒素肥料の消費量の増加を招く。図17に中国における一人当り肉と魚の合計消費量を示す。中国では肉と魚の輸出入量は生産量に比べて遥かに少ないので、図17に示される値は、ほぼ国内で生産されていると考えて良い。開放改革路線をとった1978年以降、肉と魚の生産量は共に急増している。日本の現在の一人当たり肉消費量は44 kg/人と中国より少ない（魚は66 kg/人）。中国の淡水魚養殖の増加が著しく、肉消費量は頭打ちの様にも見える。今後東アジアでどの程度肉消費量が増加するかが窒素環境に大きな影響を与える。

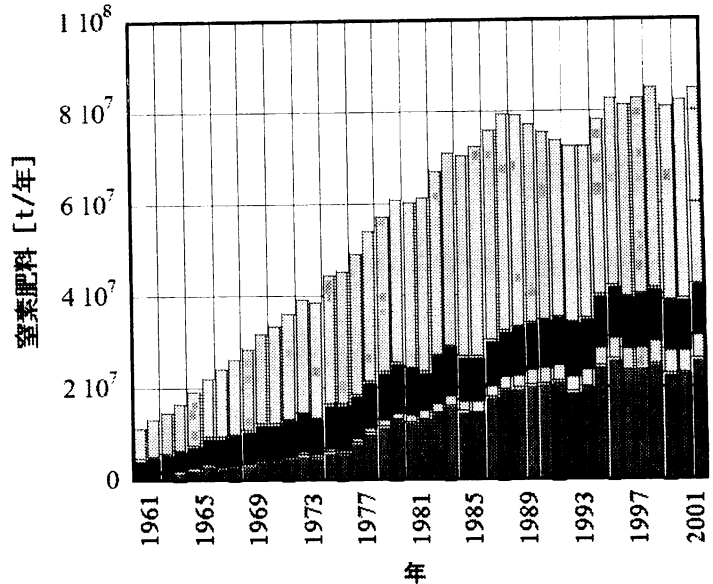


図16 窒素肥料使用量の変化

③ 東アジアの窒素負荷の経年変化

前項で述べた東アジア諸国の食料生産の変化が、窒素負荷をどのように変えてきたのかを見積もった。図18に中国、日本、韓国及びベトナムについて各発生源からの単位国土面積当たりの窒素負荷量の経年変化を示した。国毎に大きな違いが見られる。現在東アジア13カ国の総負荷量のうち73%は中国における負荷であり、13カ国の面積当たり負荷量は中国より10%程度小さいが、変化パターンはほとんど同じであった。中国は西部に負荷の小さな広大な国土を有しているため、単位面積当たりの負荷量は比較的小さいが、

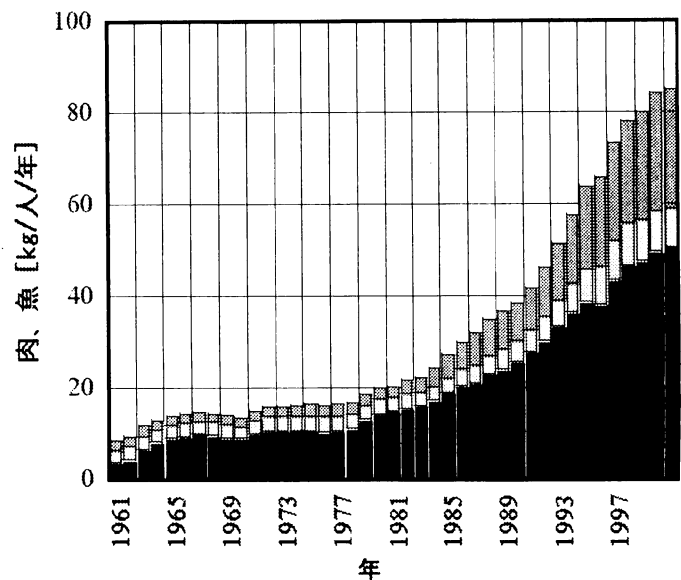


図17 中国における一人当たりの肉、魚消費量

東部の諸省は非常に大きな負荷となっていた。人口の密集した都市国家であるシンガポールを除くと、最も単位面積当たりの負荷が大きいのは韓国で、

日本と共に早い時期から窒素肥料を投入していることがわかる。現在、単位面積当たりの総負荷量も大気からの負荷量（窒素酸化物+アンモニア）も日本の2倍近い。両国とも窒素酸化物の寄与が大きく、しかし、最近では負荷量が減少傾向にある。一方、その他の国では1980年以降に急激に負荷が増大した。ベトナムの上昇率は大きく、現在日本と同程度の単位面積当たりの負荷であり、作物生産とそこから発生するアンモニアの負荷の寄与が大きい。大気からの窒素負荷量を考えると、東アジア諸国では、日本と韓国では二酸化窒素の寄与の方が大きい、他の国では農業

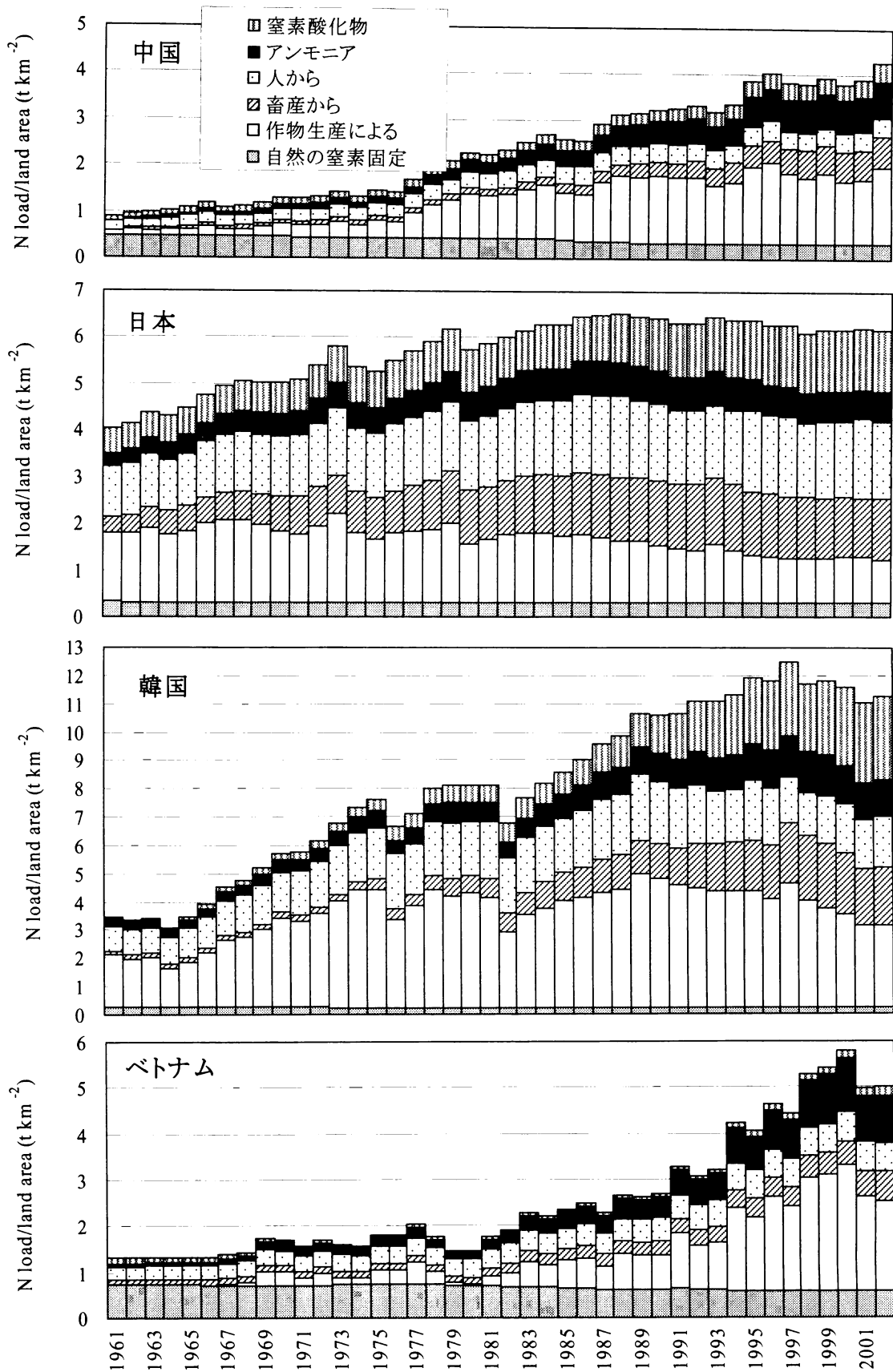


図18 東アジア諸国の窒素負荷量の変化

を起源とするアンモニアの寄与が圧倒的に大きかった。本研究で推定したアンモニア発生量は、(1)節で示した様に、日本の場合には既存の文献値と良く一致したが、他の国では本研究の値の方が小さい。どちらの推定値も不確定性が大きく、どちらが正しいとも言えないが、ここで示した値よりもアンモニアの負荷量が多い可能性は高い。

5. 本研究により得られた成果

- (1) 窒素循環モデルのインプットとして必要な窒素負荷量分布を得るために、農業起源のアンモニアの発生量を見積もった。畜産からの発生量は従来家畜1頭当たりの排出原単位に基づいて推定されているが、本研究では肉類生産量を用いて物質収支に基づいて推定した。日本における発生量は、肥料から 39×10^3 t N、畜産から 185×10^3 t Nとなり既存の推定結果と同程度であった。また市区町村別統計データや土地利用データに基づいてアンモニア発生量の全国マップを作成した。
- (2) 森林生態系を対象として、大気、植物、土壌有機物及び土壌中無機態窒素間の炭素のフローと窒素の内部循環を考慮した基本モデルを作成した。モデルは既存の研究結果から得られた窒素流出の特徴を定性的に表現することができ、窒素流出は土壌有機物としての蓄積・分解の速度に加えて森林の育成ステージ（バイオマス賦存量）に強く依存していることが推定された。
- (3) 全国スケールの評価のために基本モデルを簡易化して、森林植生による内部循環を考慮して現時点の窒素流出量分布を推定する広域モデルを作成した。リモート・センシングデータ（Landsat TM）に基づく土地被服分類手法の改良、NDVIの合成期間の検討をおこない、森林バイオマス賦存量の指標として一ヶ月合成NDVIを用いた。
- (4) 本研究で推定した窒素負荷量分布を用いた推定結果は、大きな誤差があるものの、サブテーマ1で実施した全国渓流水調査による硝酸イオン濃度分布が概ね再現された。このことから大気からの長期的な窒素負荷が我が国の自然流域の硝酸イオン濃度を決定する最も重要な要因であると考えられた。
- (5) アジアにおいては現在の窒素負荷の大部分は農業起源である。過去40年の穀物生産の増加は人口増加を上回り、それは窒素肥料の多用に依った。単位面積あたりの窒素負荷量は現在韓国が日本の2倍であり、東南アジアの多くの国も1980年以降急激に負荷量が増加していることが示された。

6. 引用文献

- 1) Galloway J. N., W. H. Schlesinger, H. I. Levy, A. Michaels and J. L. Schnoor (1995) Nitrogen fixation: Anthropogenic enhancement-environmental response, *Global Biogeochemical Cycles*. 9(2), 235-252.
- 2) IPCC (2001) CLIMATE CHANGE 2001, The Scientific Basis, p.260, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, Cambridge.

- 3) Aber, J.D., Nadelhoffer, K. J., Steudler, P., and Melillo, J. M. (1989) Nitrogen saturation in northern forest ecosystems. *BioScience*, **39**, 378-386.
- 4) Skeffington, R. A. (1990) Accelerated nitrogen input - A new problem or new perspective? *Plant and Soil*, **128**, 1-11.
- 5) Wright, R.F. and Rasmussen, L. (1998) Introduction to the NITREX and EXMAN projects. *Forest Ecology and Management* **101**, 1-7.
- 6) Magill, A.H., Aber, J.D., Hendricks, J.J., Bowden, R.D., Melillo, J.M. and Steudler, P. (1997) Biogeochemical response of forest ecosystems to simulated chronic nitrogen deposition. *Ecological applications* **7**, 402-415.
- 7) Ball, J and Trudgill, S. (1995) Overview of solute modelling. In "Solute Modelling in Catchment Systems" (S. T. Trudgill, eds.) pp. 3-56. John Wiley & Sons Ltd.
- 8) Bouwman, A.F., Lee, D.S., Asman, W.A.H., Dentener, F.J., Van Der Hoek, K.W. and Olivier, J.G.J. (1997) *Global Biogeochemical Cycles* **11**, 561-587.
- 9) FAO, 2002. FAO Statistical Databases, <http://apps.fao.org/page/collections>
- 10) 三島慎一郎・松森信・井上恒久 (2004) 都道府県・市区町村単位での窒素収支算定を行うデータベースの構築. *日本土壌肥料学雑誌* **75**, 275-281.
- 11) スミル, パーツラフ (Smil, Vaclav) ・逸見 謙三・柳沢 和夫【訳】・食料・農業政策研究センター【編】世界を養う.(2003)、食料・農業政策研究センター国際部会；農山漁村文化協会、389p.
- 12) Center for Global and Regional Environmental Research (2002) Emission data, In <http://www.cgrer.iowa.edu/ACCESS/access-index.htm>, ACCESS, University of Iowa.
- 13) Lieth, H. (1975) Modeling the primary productivity of the world. In Lieth, H and Whittaker, R.H. (eds.) , *Primary Productivity of the Biosphere*, *Ecological Studies* **14**, 237-263, Springer-Verlag, New York pp.339.
- 14) Energy Information Administration, 2004. *International Energy Annual 2002*, <http://www.eia.doe.gov/emeu/iea/contents.html>
- 15) Murano, K., Hatakeyama, S., Mizoguchi, T. and Kuba, N. (1995) Gridded ammonia emission fluxes in Japan. *Water, Air and Soil Pollution* **85**, 1915-1920.
- 16) 神成陽容・馬場剛・速水洋 (2001) 日本におけるアンモニア排出の推計. *大気環境学会誌* **36**, 29-38.
- 17) 新藤純子・麓多門・大浦典子・波多野隆介・永田修・戸田任重 (2002) C-4 酸性・酸化性物質に係る陸域生態系の衰退現象の定量的解析に関する研究、(5)キャッチメント・モデル解析手法の開発と総合評価、環境省地球環境総合推進費終了研究報告書 106-126.
- 18) 蒲生稔・三枝信子 (2000) フェノロジー(植生季節)の気候変化(展葉前線について). *日本気象学会 2000 年度秋季大会予稿集* In <http://www.aist.go.jp/NIRE/~fgamo/phenology/phetop.htm>.

7. 国際共同研究等の状況

中国における窒素化合物の環境への排出と窒素汚染に関する情報交換、共同調査を実施
(カウンターパート：青島建築工程学院の郭一令教授)

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- ① 川島博之、新藤純子：環境科学会誌，15, pp.281-286 (2002)
「酸性雨と地球規模の窒素循環」
- ② 川島博之：環境科学会誌，15, 299-303 (2002)
「21世紀における水環境問題と窒素」
- ③ K. Okamoto and H. Kawashima : *RISK ANALYSIS III*, edited by C. A. Brebbia, (Southampton: WIT Press, U.K., ISBN: 1-85312-915-1), 551-560 (2002)
“Role of satellite remote sensing in monitoring system for environmental disasters related to water resources”
- ④ H.Toda, Y.Uemura, T.Okino, T.Kawanishi and H.Kawashima: *Water Science and Technology* 46, 431-435 (2002)
“Use of nitrogen stable isotope ratio of periphyton for monitoring nitrogen sources in a river system”
- ⑤ H.Kawashima, J.Shindo, K.Okamoto and K.Ohga : *APHW2003: Proceedings of the First International Conference on Hydrology and Water Resources in Asia Pacific Region*, edited by K. Takara and T. Kojima, held in Kyoto on 13-15 March 2003 (Tokyo: The Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources (APHW)), 473-475 (2003)
“Food Production and Environment in Major River Basins in Asia”
- ⑥ K.Okamoto, J.Shindo and H.Kawashima : *River Basin Management II*, edited by C. A. Brebbia, (Southampton: WIT Press, U.K., ISBN: 1-85312-966-6), 423-429 (2003)
“Land-use, water resources and nitrogen load in major river basins in Asia”
- ⑦ K.Okamoto, J.Shindo and H.Kawashima : *Water Resources Management II*, edited by C. A. Brebbia, (Southampton: WIT Press, U.K., ISBN: 1-85312-967-4), 279-287 (2003)
“Estimation of available water resources and potential irrigation land area in Asia”
- ⑧ K.Okamoto and H.Kawashima : *Proceedings of SPIE: Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology IV*, edited by M. Owe, G. D’Urso and L. Toullos, (Bellingham: SPIE-The International Society for Optical Engineering, WA, U.S.A., ISBN: 0-8194-4661-0), 4879, 391-399 (2003)
“Evaluation of change in rice cropping in the marginal zone”
- ⑨ J.Shindo, K.Okamoto, H.Toda and H.Kawashima : *Ecosystems and Sustainable Development, Advances in Ecological Sciences* 18, 49-58 (2003)
“Estimation of the environmental effects of excess nitrogen caused by intensive agriculture in East Asia based on global nitrogen balance”
- ⑩ K.Okamoto, J.Shindo, and H.Kawashima: *River Basin Management II*, edited by C. A. Brebbia, (Southampton: WIT Press, U.K., ISBN: 1-85312-966-6), 423-429 (2003)
“Land-use, water resources and nitrogen load in major river basins in Asia”

- ⑪ J.Shindo, K.Okamoto and H.Kawashima: *Ecological Modelling* 169, 197-212 (2003)
 “A model based estimation of nitrogen flow in the food production-supply system and its environmental effects in East Asia”
- ⑫ K.Okamoto, J.Shindo, and H.Kawashima : *Ecological Sciences 19: Ecosystems and Sustainable Development IV*, edited by E. Tiezzi, C. A. Brebbia and J-L. Usó, (Southampton: WIT Press, U.K., ISBN: 1-85312-974-X), 2, 1057-1065 (2003)
 “Sustainable rice cropping and water resources in Asia”
- ⑬ K.Okamoto, T.Sakamoto, J.Shindo, H.Toda, and H.Kawashima : *Scales and Dynamics in Observing the Environment*, edited by P. Aplin and P. M. Mather, (Nottingham: Remote Sensing and Photogrammetry Society, ISBN: 0 946226 32 6), CD-ROM (2003)
 “Detecting land-cover change using standardized multitemporal Landsat TM data”
- ⑭ 岡本勝男、川島博之 : システム農学, 19, 3, 46-52 (2003).
 「衛星リモート・センシングを用いたアジアの食料生産予測の現状と将来」
- ⑮ 石塚直樹、斎藤元也、村上拓彦、小川茂男、岡本勝男 : 日本リモートセンシング学会誌, 23, 5, 458-472 (2003)
 「RADARSATデータによる水稲作付面積算出手法の開発」
- ⑯ 小島千穂、川島博之、新藤純子、岡本勝男、戸田任重、茅原一之 : 環境科学会誌 17, 15-24 (2004)
 「ベトナムにおける食料生産と窒素フロー」
- ⑰ 新藤純子 : 地球環境, 9, 3-10 (2004)
 「人間活動に伴う窒素負荷の増大と生態系影響」
- ⑱ 新藤純子、岡本勝男、郭一令、戸田任重、川西琢也、田中恒夫、川島博之 : 地球環境, 9, 93-99 (2004)
 「東アジアの流域窒素循環モデル」
- ⑲ J. Shindo, K. Okamoto and H. Kawashima: *Ecosystems and Sustainable Development* (edited by Tiezzi, E. et al.) , WIT Transactions on Ecology and the Environment, Vol. 81, 2005 WIT press, ISBN: 1-84564-013-6, 115-123 (2005)
 “A model based estimation of the effect of population concentration of the urban areas in eastern Asia in terms of nitrogen pollution”
- ⑳ K.Okamoto, J. Shindo and H. Kawashima: *Ecosystems and Sustainable Development* (edited by Tiezzi, E. et al.) , WIT Transactions on Ecology and the Environment, Vol. 81, 2005 WIT press, ISBN: 1-84564-013-6, 553-561 (2005)
 “Analysis of rapid land-use/land-cover change in Northeastern China using Landsat TM/ETM+ data”
- ㉑ 新藤純子、木平英一、吉岡崇仁、岡本勝男、川島博之 : 環境科学会誌, 18, 455-463 (2005)
 「我が国の窒素負荷量分布と全国溪流水水質の推定」
- <その他誌上発表 (査読なし) >
- ① 不破敬一郎、森田昌敏編 : 地球環境ハンドブック、朝倉書店, 447-452 (2002)
 「6. 24 土壌影響モデル (執筆担当 : 新藤純子)」

- ② (社) 日本化学会・酸性雨問題研究会編：続身近な地球環境問題－酸性雨を考える－、コロナ社, 175-184(2002)
「4.4 酸性雨による生態系影響評価－臨界負荷量推定の意義と問題点－(執筆担当：新藤純子)」
- ③ K. Okamoto, J. Shindo, H. Toda, and H. Kawashima : *JIRCAS International Symposium Series No. 12: Prospects for Food Security and Agricultural Sustainability in Developing Regions: New Roles of International Collaborative Research*, (Tsukuba: Japan International Research Center for Agricultural Sciences (JIRCAS), ISSN: 1340-6108), 55-62 (2004)
“Environmental changes and food production in Asia”
- ④ 石井龍一他編：環境保全型農業辞典、丸善, 820-823(2005)
「10.5 地球の窒素循環と農業(執筆担当：新藤純子)」

(2) 口頭発表(学会)

- ① 岡本勝男、新藤純子、戸田任重、川島博之：システム農学会2002年度春季シンポジウム・個別研究発表会(2002)
「環境への窒素放出量と流域の土地利用」
- ② 森直樹、川島博之、岡本勝男、大賀圭治：システム農学会2002年度春季シンポジウム・個別研究発表会(2002)
「植生指数から見たアジアの土地利用変化」
- ③ 新藤純子、岡本勝男、戸田任重、川島博之：日本化学会第18回酸性雨研究会(2002)
「東アジアの窒素負荷と河川水質の推定」
- ④ 川島博之、新藤純子、岡本勝男、戸田任重：日本学術会議水資源に関するシンポジウム委員会第26回水の週間第6回水資源に関するシンポジウム(2002)
「アジアの主要河川流域における食糧生産と環境」
- ⑤ J. Shindo, K.Okamoto, H.Toda and H.Kawashima : BIOGEOMON 2002: The 4th International Symposium on Ecosystem Behaviour (2002)
” Nitrogen load and its flows in the major river basins in East Asia”
- ⑥ H.Kawashima, J. Shindo, K.Okamoto and H.Toda : VIII INTECOL 2002: The VIII International Congress of Ecology (2002)
“Rice production and water resources in Asia”
- ⑦ 川島博之、新藤純子、岡本勝男、大賀圭治：2002年度環境経済政策学会(2002)
「アジアの経済発展と水質・水量に関する統合モデルの開発」
- ⑧ 岡本勝男、川島博之：システム農学会2002年度秋季シンポジウム・個別研究発表会(2002)
「アジア稲作地帯の農用水資源評価：天水による栽培可能面積の推定」
- ⑨ 坂本利弘、岡本勝男、戸田任重、新藤純子、川島博之：システム農学会2002年度秋季シンポジウム・個別研究発表会(2002)
「乗鞍岳東斜面の土地被覆変化」
- ⑩ J.Shindo, K.Okamoto, H.Kawashima : The 10 th U.S. – Japan Workshop on Global Climate Change (2003)

“Nitrogen flow in the food production-supply system and its environmental effects in East Asia.”

- ⑪ 岡本勝男:システム農学会2003年度春季シンポジウム・個別研究発表会 (2003)
「アジアの食料生産予測」
 - ⑫ 川島博之、新藤純子、岡本勝男:システム農学会2003年度春季シンポジウム・個別研究発表会 (2003)
「アジアの水資源の過去・現在・未来」
 - ⑬ J.Kaewthip, H.Kawashima, J.Shindo, K.Okamoto, H.Toda, and K.Ohga : システム農学会2003年度春季シンポジウム・個別研究発表会 (2003)
“Water pollution relating to agriculture in Thailand”
 - ⑭ 岡本勝男、烏云娜、川島博之:システム農学会2003年度秋季シンポジウム・個別研究発表会 (2003)
「衛星データを用いた中国内モンゴル半乾燥地域の土地利用・土地被覆変化解析」
 - ⑮ 坂本利弘、大野宏之、石塚直樹、鳥谷均、岡本勝男、横沢正幸:システム農学会2003年度秋季シンポジウム・個別研究発表会 (2003)
「多次期衛星画像と気象観測データを用いた水稲の単収推定」
 - ⑯ K.Okamoto, J. Shindo, H.Toda and H.Kawashima : International Symposium Marking the 10th Anniversary of Japan International Research Center for Agricultural Sciences (JIRCAS) (2003)
“Environmental changes and food production in Asia”
 - ⑰ K.Okamoto and M. Yokozawa : International Workshop on Prediction of Food Production Variation in East Asia under Global Warming (2004)
“Impacts of environmental change to food production in Asia”
 - ⑱ 烏云娜・岡本勝男・川島博之 : 2004年度春季シンポジウム・一般研究発表会 (2004)
「衛星データを用いた中国内モンゴル半乾燥地域のバイオマス変動解析」
 - ⑲ 岡本勝男・川島博之 : システム農学会2004年度秋季シンポジウム・一般研究発表会 (2004)
「中国黒龍江省東部の水田の急激な増加」
 - ⑳ 新藤純子、岡本勝男、川島博之: 土壌肥料学会2004年度福岡大会 (2004)
「東アジアにおける食料生産・供給による窒素フローとその水環境への影響評価モデル」
 - ㉑ 新藤純子、木平英一、岡本勝男、戸田任重、川島博之:環境科学会2004年会 (2004)
「我が国の窒素負荷量分布と全国渓流水水質の推定」
 - ㉒ J. Shindo, K. Okamoto, H. Toda and H. Kawashima.: The 3rd International Nitrogen Conference Nanjing, China (2004)
“Estimation of nitrogen load to the terrestrial ecosystems and its effects on the regional water quality based on a nitrogen balance model for watersheds in East Asia”
- (3) 出願特許
特に記載すべき事項はない。
- (4) シンポジウム、セミナーの開催 (主催のもの)
- ① 森林と溪流・河川の生物地球化学 (2003年9月11日、東京大学、観客50名、C-2と共同主催)
 - ② 森林と溪流・河川の生物地球化学 (2004年10月1日、関西学院大学、観客20名、C-2と共同主催)

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

環境省の「土壌・植生タスクフォース国内支援グループ」会合において、本研究成果である、我が国の森林生態系の窒素影響の実態と広域モデルによる試算結果を提示し、同グループが、東アジア酸性雨もモニタリングネットワークにおいて土壌・植生モニタリングの拡充・発展の検討に貢献した。