

C-052 酸性物質の負荷が東アジア集水域の生態系に与える影響の総合的評価に関する研究
 (5) 東アジア集水域の酸性物質による生態系影響総合評価モデルの開発

独立行政法人農業環境技術研究所

物質循環研究領域

新藤純子

生態系計測研究領域

岡本勝男

平成17～19年度合計予算額 22,627千円
 (うち、平成19年度予算額 6,302千円)
 ※上記の合計予算額には、間接経費 5,221千円を含む

[要旨] 東アジアは化石燃料の燃焼や農業起源のアンモニア発生による窒素負荷の増加が著しいと考えられている。東アジア9カ国を対象に、FAO統計や中国統計年鑑などのデータ、将来の食料需給予測（中国に関しては一部サブテーマ4の結果）に基づいて、家畜ふん尿と肥料からのアンモニア発生量を見積もり、1980年から2030年までの経年変化を推定した。畜産品生産量に基づいて推定した家畜からの発生量は従来の家畜一頭当たりの発生量に基づいた方法と比較して、中国、カンボジアなどの発展途上国で違いが大きく、前者は過小評価、後者は過大評価である可能性が高いと考えられた。農業由来のアンモニア発生量は特に中国とベトナムでの増加が顕著であり、対象領域では2000年現在のアンモニア発生量が約667万tNと推定された。これは化石燃料由来の窒素酸化物の1.5倍の発生量であり、また2030年の発生量は2000年の約2.0倍となると予測された（家畜飼料を自国生産する場合）。また、大気からの窒素負荷の森林生態系内での循環を広域的に推定するモデルを作成し、前述の発生量から推定した、アンモニアと窒素酸化物の沈着量分布に基づいて、我が国および東アジアの森林流域からの窒素流出濃度の変化を推定した。モデルは主として大気からの窒素沈着、衛星データ（Terra/MODIS）ベースの純生産量に基づく樹木による吸収とリターの分解過程、土壌、地下水中的の脱窒などによる窒素除去過程を考慮した。モデルにより我が国の渓流水濃度の全国的な傾向が概ね推定できることを確認し、東アジアに適用した。大気からの窒素負荷の上昇は、最近の20年間に主として中国の東岸諸省、長江下流域、また東南アジアではベトナムにおいて、森林流域からの窒素濃度の上昇を招き、今後もこれらの地域で上昇が続く可能性が示された。

[キーワード] 東アジア、アンモニア発生、窒素循環モデル、森林流域、窒素流出

1. はじめに

東アジアは、急激な経済発展や人口増加に伴う食料増産などにより、近年エネルギーや肥料の消費量が急激に増加しており、酸性・酸性物質の負荷による環境影響が最も懸念される地域である。国連などのデータに基づくと、東アジア9カ国^{注1)}では、1980年から2005年の最近の25年間に、人口が13.1億人から17.4億人へ1.33倍に¹⁾、一人当たりの実質GDP（1990年基準）が1846ドル

から3675ドルへ1.99倍（総GDPは2.64倍）²⁾に増加し、また、エネルギー消費量は9.1億toe（石油換算t）から25.3億toeへ2.78倍に増大した³⁾。Ohara et al. は、1980年から2003年にアジアの窒素酸化物（NO_x）排出量は、10.7 Mtから29.5 Mtへ（2.76倍）増加し、この増加率は硫黄酸化物（2.19倍）より大きく、また特に中国での増加が顕著である（3.84倍）ことを示した^{4)注2)}。2020には人口は22.5億人（国連による中位推計）と推定され¹⁾、また窒素酸化物排出量は、31.5-46.0 Mt（リファレンスシナリオの場合、36.1Mt）まで増加すると予測されている（二酸化硫黄の2020年排出量はリファレンスシナリオの場合2003年よりもわずかに減少する）⁴⁾。

一方、人口の増加と経済発展に伴う食生活の変化によって、FAO統計によると同地域（東アジア9カ国）において1980年に1361万tNであった窒素肥料使用量は2005年には3393万tNへと2.5倍に、肉の生産量は、2046万tから6750万tへと3.3倍に増加した⁵⁾。窒素肥料や家畜ふん尿の窒素の一部はアンモニアとして大気中に揮散し、大気からの窒素負荷の主要な原因となっていると考えられている⁶⁾。アンモニアの発生量の今後の変化の推定は本研究の目的の一つであるが、現在までの動向を見ると今後も発生量の増大が予想される。従って今後の東アジアにおける大気からの酸性物質負荷を考える場合、窒素酸化物とアンモニア、すなわち窒素の負荷の変化に注目することが重要である。

このような人為活動の活発化は、グローバルな窒素循環の変化を引き起こし、地下水汚染や湖沼、沿岸域の富栄養化など様々な環境汚染の原因となっている^{7), 8)}。増加した反応性の高い窒素は、大気を経由して自然生態系の物質循環にも影響を与える。欧米では、大気降下物としての慢性的な窒素負荷により、窒素が溪流などを通して系外へ流出する現象が窒素飽和として問題になり⁹⁾、我が国の森林流域の全国調査に於いても溪流水中硝酸イオンの高濃度が大都市域周辺で集中的に見られるなど、人為的な原因を示唆する結果が得られている^{10), 11)}。前述の通り、近年の窒素負荷の増大が著しく今後も増大の傾向が続くと予想される東アジアにおいても、自然生態系における窒素循環の変化と、それに伴う酸性化などが懸念されているが、観測データなどが限られているためその実態は明らかでない。

注1) 本研究では、日本および東アジアの大陸部（カンボジア、中国、日本、韓国、ラオス、マレーシア、ミャンマー、タイ、ベトナムの9カ国）を推定の対象とし、これらの地域を東アジアと呼ぶことにする。

注2) Ohara et al. の推計は、アフガニスタン以東の地域を対象としている。

2. 研究目的

本研究では、第一に、東アジアを対象に農業生産、消費に関する各国・地域の統計データに基づいて、農業起源のアンモニア発生量と沈着量分布を経年的に見積もる。第二に、生態系における窒素の循環・流出プロセスを広域的に推定するための簡易なモデルを作成し、衛星データやGISデータを利用して、自然生態系における窒素の負荷、蓄積、流出を東アジアスケールで推定する。更に、サブテーマ1～3やその他の既存の観測で得られたデータを検証データとして用い、妥当性を検討し、またサブテーマ4で得られた主として中国における食料（畜産品）需給の変化シナリオの下で、将来の窒素の負荷と生態系内での動態を予測する。

3. 研究方法

(1) アンモニア発生量分布の推定

東アジアを対象にFAOによる国別統計⁵⁾、中国の省市区別統計¹²⁾に基づいて家畜と化学肥料からのアンモニア発生量の1980年から2020年までの変化と空間的な分布を見積もった。推定の対象は前述の東アジア9カ国とした。家畜からのアンモニア発生量の推定は畜産からの窒素排出量に依存する。この窒素排出量は中国に関してサブテーマ4で詳細に検討したが、本サブテーマでは他の対象国も含めて以下の1)および4)に示した、より簡易な方法により推定し、更にサブテーマ4の結果を用いて、畜産品（肉、卵、ミルク）の生産量および窒素排出量を修正して、アンモニア発生量の推定に用いた。

1) 家畜からの発生量の推定

家畜からのアンモニア発生量は、肉などの畜産品の生産量統計を用いて、畜産品の種類ごとに図1の手順で求めた。対象とした畜産品は、牛肉、豚肉、鶏肉、羊・ヤギ肉、その他の肉、卵、ミルクで、各々の生産量はFAO統計による国別のデータおよび中国統計年鑑による中国の省市区別の統計データ（1981年から2005年データ）を用い、窒素変換率（生産畜産品中の窒素/飼料中の窒素）は、スミルによる典型的な値¹³⁾を用いた。また、アンモニア揮散係数は、Bouwman et al.⁶⁾の値を用いた。畜産品ごとの窒素変換率(%)とアンモニア発生率(%)を表1に示した。なお、FAO統計には国別に各食品（穀物などの食品に加えて、大豆ミール等の加工品を含む）の飼料としての使用量が掲載されており、これらの値から求めた飼料窒素の総量が上記の方法により推定した飼料窒素必要量よりも大きい場合は、FAOの値を用いた（多くの場合FAOによる飼料の量は過小）。

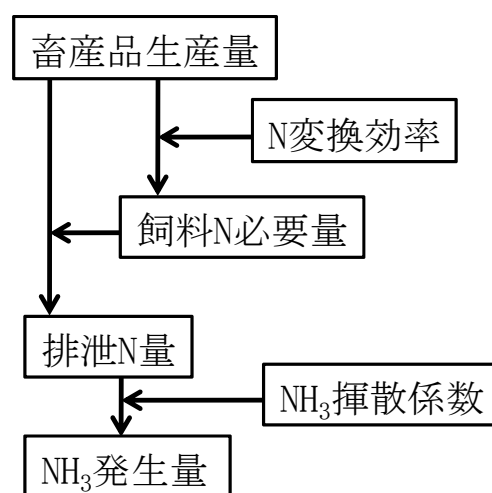


図1 家畜ふん尿からのアンモニア発生量の推定方法

表1 畜産品の窒素変換率と家畜ふん尿からのアンモニア発生率

	牛肉	豚肉	鶏肉	マトン*	その他肉*	ミルク	卵
窒素変換率%	5.0	10.0	20.0	5.0	5.0	30.0	30.0
NH3発生率 (%)							
先進国	17.3	36.0	36.0	6.4	19.3	25.5	36.0
発展途上国	20.3	36.0	36.0	10.0	19.3	29.0	36.0

* マトン（ヤギ肉も含む）、その他の肉（ウマ、ラクダなど）の窒素変換率のデータは入手できなかったため、牛肉と同じ値を用いた。

2) 肥料からの発生量の推定

肥料からのアンモニア発生量は種類毎の肥料使用量と発生係数に基づいて推定した。発生係数は、Bouwman et al.¹⁴⁾の推定式に基づいて、著者らが水田・畑の別、温帯・熱帯の別ごとにまと

めたもの(表2)を用いた。肥料使用量は、FAO統計による国別の種類毎の肥料使用量、及び中国統計年鑑による省別の総使用量(1981年～2005年)を用いた。種類別の肥料使用量データが入手できない年は、データのある最も近い年と同じ肥料構成であると仮定し、また、中国の各省の肥料構成は全国同一であると仮定した。また、東南アジアの国々は熱帯とし、中国は年平均気温に基づいて、広東省、広西チワン族自治区、海南省、福建省、江西省は熱帯、その他は温帯のパラメータを用いた。また各国、各省の水田と畑地の面積比は、FAOおよび中国統計年鑑データに基づいて、米とその他の作物(大豆を除く)の各々の収穫面積データから求めた。

表2 肥料からのアンモニア発生係数*

	硫酸 アンモニウ	硝酸 アンモニウム	リン酸 アンモニウム	尿素	複合 肥料	炭酸 アンモニウム
温帯水田	0.11	0.05	0.08	0.14	0.05	0.11
温帯畑地	0.11	0.05	0.07	0.13	0.05	0.10
熱帯水田	0.17	0.08	0.12	0.21	0.08	0.16
熱帯畑地	0.16	0.07	0.11	0.20	0.08	0.15

*Bouwman et al. (2002)による回帰式に基づいてpHとCECは中位クラスの値を用い、表面散布を仮定した場合の発生係数

3) アンモニア発生量の空間分布と沈着量分布の推定

国ごと、中国の省市自治区ごとに推定したアンモニア発生量を8km×8kmの各グリッドに割り振って空間分布を求めた。すなわち、家畜からの発生量は、国ごと、中国の省市自治区ごとに各グリッド内の農地と草地の合計面積割合に比例してグリッドごとの発生量を見積もった。日本の場合は県別の家畜頭数に基づいて、国全体の発生量を県に割り振った後、同様に農地と草地の面積に基づいてグリッドに分配した。肥料からの発生量は、(日本は県ごとに割り振った後)農地面積割合に基づいてグリッドに割り振り、空間分布を求めた。

さらに、各グリッドから発生したアンモニアが空間的に一様に拡散しつつ50km半径内に沈着する(沈着量が距離によって指数関数的に減衰する)と仮定して各グリッドのアンモニア沈着量を推定し、サブテーマ1～3の調査地における沈着量および東アジア酸性雨ネットワーク(EANET)観測地点における測定値と比較した。

4) 2030年までの将来推計

1970年から2002年までの各国の実質GDPデータ²⁾と各種食料消費量データ⁵⁾に基づいて、経済成長と食料需要との関係を解析し、(1)式の回帰係数a、bを国毎、食品ごとに決定し、これらの関係から国連の人口推計¹⁾、およびOECDによるGDP成長率の予測¹⁵⁾に基づいて必要とされる食料・飼料の量を求めた。更に各国の単収と窒素肥料使用量の関係から肥料使用量を予測し、これらに基づいて、前記の1)～3)の方法によりアンモニア発生量の2030年までの変化を予測した。

$$\text{Food/capita} = a \cdot \log_{10}(\text{GDP/capita}) + b \quad (1)$$

(2) 生態系窒素循環モデルによる自然流域からの窒素流出の推定

1) 生態系窒素循環モデルの作成

著者らが作成した窒素循環モデル^{10), 16)} (旧モデルと呼ぶ) をもとに改良を行った。図2にモデルの模式図を示した。窒素のインプットは大気からの窒素負荷と窒素固定とし、植生による吸収 (N_{UP})、リターの林床への還元 (N_{LF})、有機物分解に伴う窒素の無機化 (N_{MIN})、脱窒などによる窒素の除去 (N_{DEN}) の後に流域から流出する (N_L) 過程である。旧モデルでは植物の正味の成長による樹体への蓄積 (ΔN_{plant}) と N_{DEN} のみを考慮していた。本研究ではリターの還元 (N_{LF}) とその有機物分解過程 (N_{MIN}) の導入を行った。系からの窒素流出量 (N_L) は(2)式で求め、各プロセスによる窒素フローは以下の様に求めた。

$$N_L(T) = N_{DEP}(T) + N_{FIX}(T) - N_{UP}(T) + N_{MIN}(T) - N_{DEN}(T) \quad (2)$$

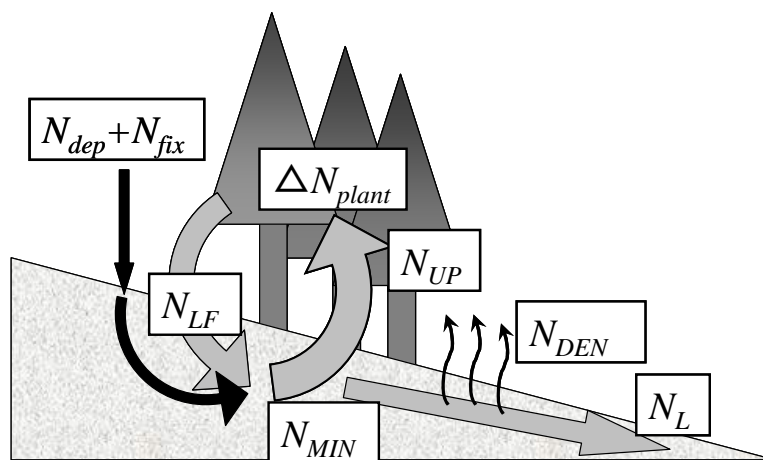


図2 窒素循環モデルの概要

①窒素固定 (N_{FIX})

生態系の窒素固定 (N_{FIX}) の正確な推定は困難であるが、Cleveland et al. が多数の文献の測定データに基づいて推定した、蒸発散量 (ET) を説明変数とする直線回帰式のうち Conservative N fixation の推定式 ((3)式)²⁵⁾ を用いた。

$$N_{FIX} = 0.102 ET + 0.524, \quad R^2 = 0.60 \quad (3)$$

②植生による内部循環 (N_{UP} 、 N_{LF})

森林は式(4)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(単位:tC)で右辺第1項が純生産量 (NPP:tC ha⁻¹ y⁻¹)、2項が枯死・落葉に相当する。各地点の極相における最大純生産量 (NPPmax) を、マイアミモデルに基づいた純生産量推定式に利用可能な窒素量の効果を加えたものとして定式化した(式(5))。従ってロジスティックモデルの内的自然増加率 a が気温と利用可能な窒素量の関数となる。また各地点の現在の純生産量として、次の 2)c. で述べる Terra/MODIS ベースの純一次生産量 (NPP) (tC ha⁻¹ y⁻¹) を用いた。

$$\frac{dP}{dt} = aP - rP^2$$

(4)

$$NPP_{\max} = A \left\{ \ln N / (N_0 + \ln N) \right\} / \{ 1 + \exp(1.315 - 0.119T) \} \quad (5)$$

③リターの分解過程 (N_{MIN})

土壌炭素の動態の予測モデルとして代表的なモデルの一つであるロザムステッドカーボンモデル (RothC) で用いられているプロセスを用いた。RothCでは、有機物としてリター (RPM: 難分解性とDPM: 易分解性)、微生物 (BIO)、腐植 (HUM) および事実上分解しない不活性画分 (IOM) の5つのコンパートメントを想定し、各コンパートメントに固有の分解速度と温度、水分、被覆条件への依存性関数が与えられており、各画分は分解によってCO₂、BIO、HUMへ変化すると仮定されている。また、有機物分解に伴う窒素の無機化の推定のために、Parton et al.²⁶⁾による、分解過程における炭素と窒素の残存率の「普遍的な」関係をRothCモデルに導入した。

④脱窒

脱窒 (N_{DEN}) は、旧モデルと同様に、反応速度係数が温度のみに依存する1次反応を仮定した。

$$C_z = C_0 \cdot \exp(-k_T \cdot z/u), \quad k_T = Q_{10}^{(T-20)/10} k_{20} \quad (6)$$

上式で、 z は土壌層の厚さ(m)、 u は浸透水量(降水量-実蒸発散量: m y^{-1})、 k_T 、 k_{20} は気温 $T^\circ\text{C}$ および 20°C の時の反応速度定数を表す。推定に当たっては、 z は地点によらず一定と仮定し、 $k_{20}z$ の積の値をチューニングパラメータとして、3)に述べるようにわが国のデータに基づいて設定した。

2) グリッドデータの収集・整備

東アジアを対象にモデルによる推定を行うために、対象地域の衛星リモート・センシング・データや地理情報を収集し、土地利用・被覆データ、純一次生産力データを始めとする広域の窒素循環モデルの入力データを8km×8kmグリッドデータとして制作した。

①窒素沈着量分布

アンモニアの沈着量分布は(1)節で述べた方法により推定したが、窒素酸化物沈着量は、国立環境研究所の大原利真氏より提供していただいた1980年から2000年の各年における $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ グリッドごとの発生量推定値⁴⁾を用いて、8km×8kmグリッドごとの発生量データを作成し、アンモニアと同様の方法によって沈着量分布を求めた(ただし、沈着半径を100kmとした)。

②土地利用・土地被覆・土壌

土地利用・土地被覆図はDISCover¹⁷⁾と中国土地利用データ^{18,19)}を用いた。また、国境界にはWorld Boundary Databank; PC ARC/INFO 'EXPORT' Version²⁰⁾、中国省界と市・県界データには中国数値地図²¹⁾を用いた。これらのデータとFAO世界土壌図を用いて、土地利用別、行政界別の土壌種ごとの面積を集計し、本課題のサブテーマ1~3の調査地の土壌代表性を検討した。

③気象データ・純一次生産量データ

CRU (Climatic Research Unit) の1961年から1990年までの平均月平均気温、降水量(0.5°×0.5°グリッド)²²⁾、Ahn and Tateishiによる実蒸発散量データ(0.5°×0.5°グリッド)²³⁾、および樹木の成長の指標としてTerra/MODISベースの純一次生産量(NPP)データ(2000年、1km×1kmグリッドデータ)²⁴⁾を入手し、8km×8kmグリッドに変換した(図3)。従って、窒素循環の推定に当たっては年々の気象の変化や将来の気候変動の影響については考慮していない。

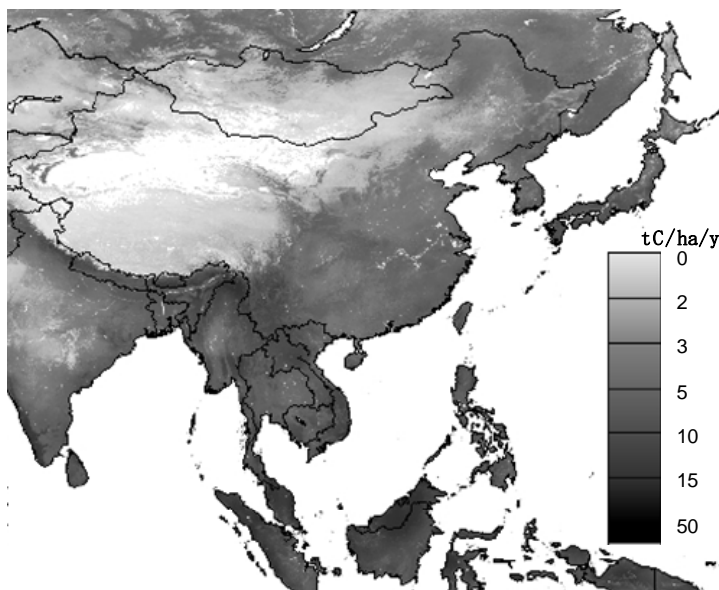


図3 Terra/MODIS NPPの分布(tC/ha/y)

3) 大気からの窒素負荷が森林流域からの窒素流出に与える影響の広域評価

これらのデータに基づいて、まず日本の自然流域(森林流域)を対象としてモデルにより窒素循環をシミュレートし、結果を全国1278地点の渓流水中硝酸態窒素濃度測定値¹⁰⁾と比較することにより、モデルパラメータ(土壌中および河川水中における窒素除去速度)を決定し、これらのパラメータを用いて東アジア全域の窒素流出濃度分布を求めた。

4. 結果・考察

(1) アンモニア発生量・沈着量分布の推定

図4に家畜からと肥料からのアンモニア発生量の変化の1980年から2005年までの推定値および2030年までの予測値を国ごとに示した。また表3に東アジアと中国のアンモニア発生量の推定結果

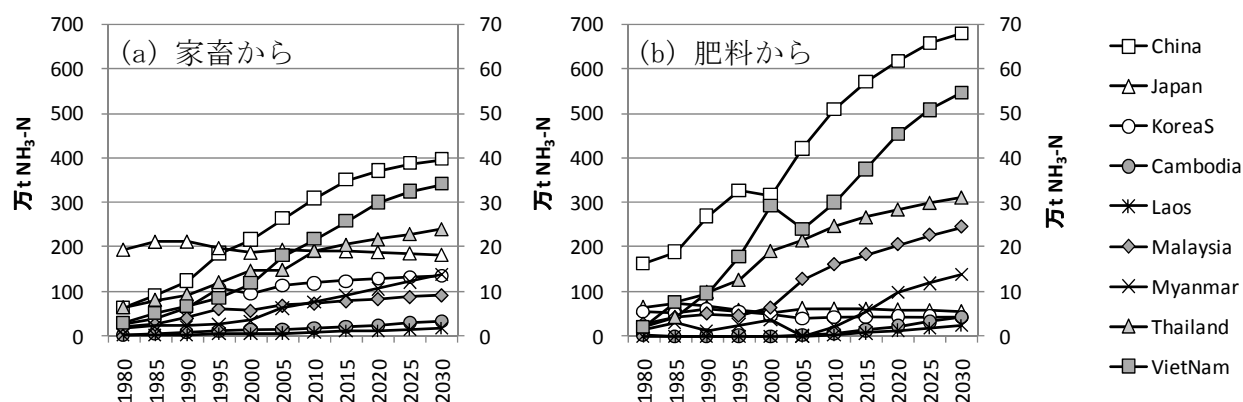


図4 各国のアンモニア発生量の変化(中国が左軸、その他の国は右軸)

を示した。これらの2010年以降の予測は、国連による人口の中位推計に基づき、飼料も含めて需要に対する輸入の割合が現在とほぼ同じと仮定して求めた。以下、この予測結果に基づいて議論を進めるが、表3の最下行にサブテーマ4での仮定（中国で新たに必要となる飼料は輸入大豆でまかなう）を用いた場合の2030年の予測結果も示した。この場合合計アンモニア発生量は中国で84%東アジアでは87%程度となる。

表3 東アジアと中国のアンモニア発生量の推定結果(万tN)

	東アジア			中国		
	家畜から	肥料から	合計	家畜から	肥料から	合計
1980	100	184	285	65	164	229
2000	283	385	667	217	316	533
2005	343	491	834	264	422	686
2020	477	737	1214	371	618	990
2030	514	820	1334	396	679	1076
2030*	514	647	1161	396	507	903

1) 家畜からの発生量

日本と韓国を除く地域では畜産物の生産量が経年的にほぼ一貫して増加してきた。また今後も増加を続けると予測されるためアンモニア発生量も増加傾向を示し、中国の畜産品生産量の補正値を用いているにもかかわらず、特に中国とベトナムの増加が顕著である。日本は畜産物によるタンパク質生産量が1993年をピークに減少傾向にあり、これに伴って家畜からのアンモニア発生量もそれ以降減少の傾向にある。また、韓国は2000年以降ほぼ横ばいの発生量となると予測された。東南アジアの中ではベトナムとタイの寄与が大きい。対象とした領域でのアンモニアの総発生量は、1980年には100万tNであったが、2005年には343万tNと約3.5倍に増加したと推定され、2030年には514万tN（2005年の約1.5倍）に増加すると予測された。2005年現在、中国からの発生が264万tNと全体の77%を占める。中国国内での発生量は地域的な偏りが大きく、1980年には、四川省、広東省、江蘇省、山東省の順に寄与が大きくこれら4省で全体の34%を占める。2005年には、山東省、河南省、河北省、四川省の順でこれらの省から35%のアンモニアが発生していると推定された。

家畜からのアンモニア発生量の推定値には大きな不確定性があると認識されており、全球での発生量は1000万～3000万tN（±50%程度の誤差、1990年の発生量の推定値）とかなり大きな誤差を含んだ数値で推定されている⁶⁾。従来、家畜からのアンモニア発生量は、乳牛、肉牛、豚、家禽、ヤギ・ヒツジなど各々の一頭当たりの排出原単位に基づい

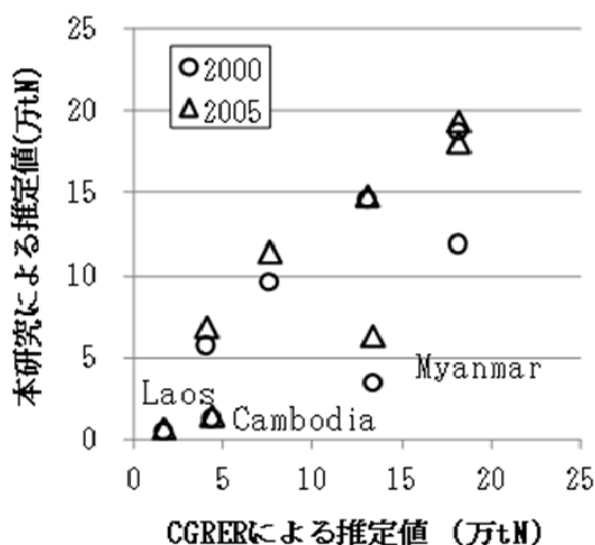


図5 家畜からのアンモニア発生量推定値の既存研究との比較

て推定値されている。アイオワ大学のCenter for Global and Regional Environmental Research (CGERE)による2002年の中国の発生量の推定値は、415万tNであり、本研究による推定値（2000年：217万tN、2005年：264万tN）と比べてかなり大きい。他の国の推定値を比較すると、カンボジア、ラオス、ミャンマーが中国と同様に本研究による推定値がCGERによる推定値よりかなり小さいが、その他の国ではおおむね一致していた(図5)。主として発展途上国において畜産物生産に基づいた推定値が一頭当たり排出量に基づいた手法による値より小さい理由として、発展途上国の家畜の生体重が先進国の家畜と比較して小さく、また飼料の窒素含有量もおそらく低いため、仮定された1頭あたりの排出原単位が過大である可能性が考えられる。一方、畜産物生産による手法は、市場を通ることなく個人的に消費されている畜産物の量の把握が統計上充分反映されていないこと、役畜からの発生が考慮できないことなどの要因により過小評価であると思われる。いずれの手法による推定値も大きな誤差を含むと考えられるが、いくつかの国を除いて両者は±50%の範囲では充分一致しており、比較的良く相関していると言える。

2) 料からのアンモニア発生量

肥料からのアンモニア発生も中国の寄与が大きく、2005年の対象領域からの発生量491万tNのうち422万tN、86%が中国から、12%が東南アジア6カ国から発生しており、日本と韓国の寄与はわずかである。単位面積当たりの発生量でも中国と東南アジアが日本+韓国を超えている。2005年にはこの地域で用いた窒素肥料3393万tNの内約14.5%がアンモニアとして揮散したことになる（東南アジアは20.5%、日本+韓国は11.3%）。東アジアでは窒素肥料に占める尿素の割合が60%（日本は24%）、炭酸アンモニウムの割合が21%程度（ほとんど中国で使用）と見積もられており、この地域はこれらアンモニア発生係数の高い肥料の使用割合が高いという特徴がある。また熱帯である東南アジアでの発生率が大きい。中国国内では、山東省、江蘇省の寄与が大きい、近年は河北省、河南省の寄与が増加しつつある。

2030年までの将来の増加傾向も、中国とベトナム、タイ、マレーシアの増加率が高く、日本と韓国はほとんど変化しないと予測された。

3) 大気からの窒素沈着へのアンモニアの寄与

アンモニア発生量をOhara et al.⁴⁾による窒素酸化物の2000年および2020年の発生量と比較することにより農業起源のアンモニアの寄与を検討した。東アジア9カ国における家畜と肥料からの2000年のアンモニア発生量は各々283万tNと385万tN、合計667万tNと推定された(表3)。全球では、家畜糞尿からの発生量が肥料からの発生量の2倍以上と見積もられている⁶⁾。前述の家畜からの発生量に関する検討の通り、今回推定した家畜らの発生量の値は過小である可能性が高いが、それを考慮してもアジアでは肥料からの発生の寄与が相対的に大きいといえる。中国からの発生量は、家畜からが217万tN、肥料からが316万tN、合計533万tNと見積もられた。一方、大気から窒素負荷となる反応性窒素としてアンモニアと並んで重要である、化石燃料およびバイオマス燃焼起源の窒素酸化物の発生量は東アジア9カ国は492万tN、中国は340万tNと推計されている（2000年の排出量）⁴⁾。農業起源のアンモニア態窒素は窒素酸化物の窒素の1.4倍、中国では1.6倍である。サブテマ1におけるアンモニア態窒素と硝酸態窒素の沈着量の比ほど大きくはないが、中国、東南アジアではアンモニアの寄与が相対的に大きいという同様の結果であった。

東アジア9カ国および中国のアンモニア発生量は2020年には2000年の約1.8倍に増加すると推測されたため、Ohara et al.⁴⁾による中国の2020年のNO_x排出量予測値（レファレンスシナリオの場合）を用いると、2020年のこの比の値は2.0となる。東アジアにおいて大気環境の変化や生態系への窒素負荷の現在および将来の影響を考える場合に、農業、食料生産活動の変化がますます重要な要因となると考えられる。

4) アンモニア沈着量分布

図6にEANETサイトおよび本研究の調査地（長春、長白山、北京郊外、ハイラル、鼎湖山、黒石頂、サケラート）における沈着量測定値とモデルでの推定値を比較した。EANETによる湿性沈着量の測定値は年変動が非常に大きいので、2000～2005年の6年平均を用いた。本研究の対象調査地点の測定値は林外雨と林外雨を含めた平均沈着量としてプロットしてある。アンモニア沈着量の場合、両者の間の相関係数は0.54で、高濃度部分の推定には大きなばらつきがあるが、ある程度濃度分布を推定できていると考えられる。本研究における調査対象地に関しては黒石頂以外は測定値とよく一致している。図6bには窒素酸化物の沈着量推定値と硝酸態窒素の湿性沈着量を比較した。両者にも有意な正の相関（ $r=0.7$ ）がみられるが、かなり過大推定となっている。

図7に1980年、2000年および2020年の単位面積当たりのアンモニア沈着量の空間分布を示したが、中国東部：山東省、江蘇省付近が著しく沈着量が多く、経年的に高負荷の領域が拡大している。

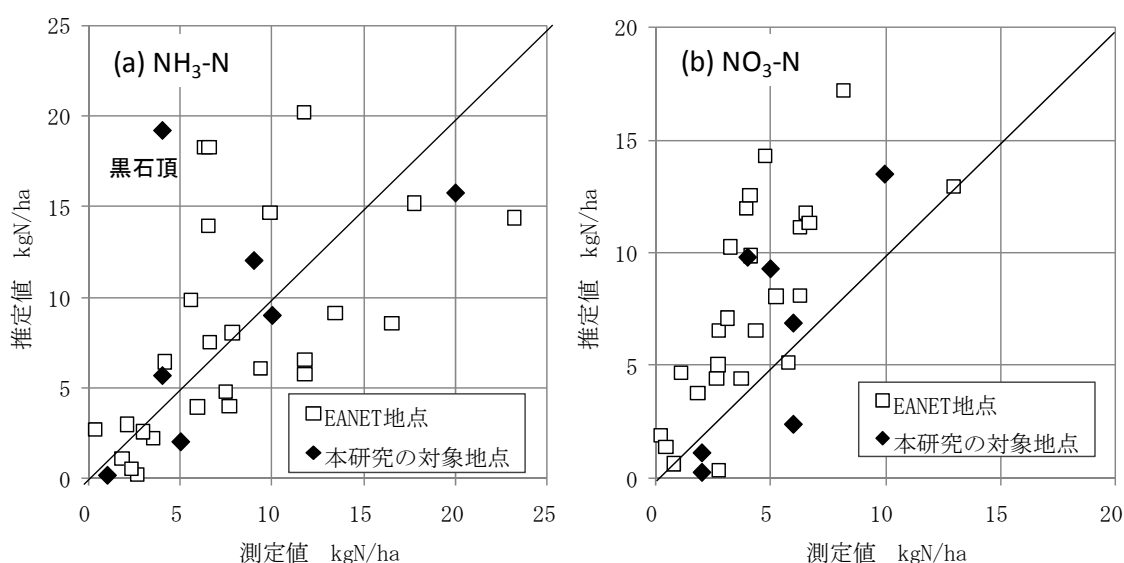


図6 窒素沈着量推定値と測定値との比較

サブテーマ1～3の調査地であるの広東省は比較的負荷が大きいのにに対して、タイは中程度、吉林省の長白山付近は小さい。図8に国別の平均沈着量の変化の推定（2005年まで）および予測（2010年以降）を示した。中国吉林省と広東省の平均沈着量の変化も併せて示した。2005年における国平均のアンモニア沈着量は韓国が15kgN/ha近くと最も高く、これにベトナムが続く。中国は国平均で比較すると日本と同程度であるが、地域差が非常に大きく、黄河、長江の下流域で極度に沈着量が多い。広東省も20kgN/haと高く韓国平均を凌ぐ。一方、吉林省は中国平均とほぼ同程度である。

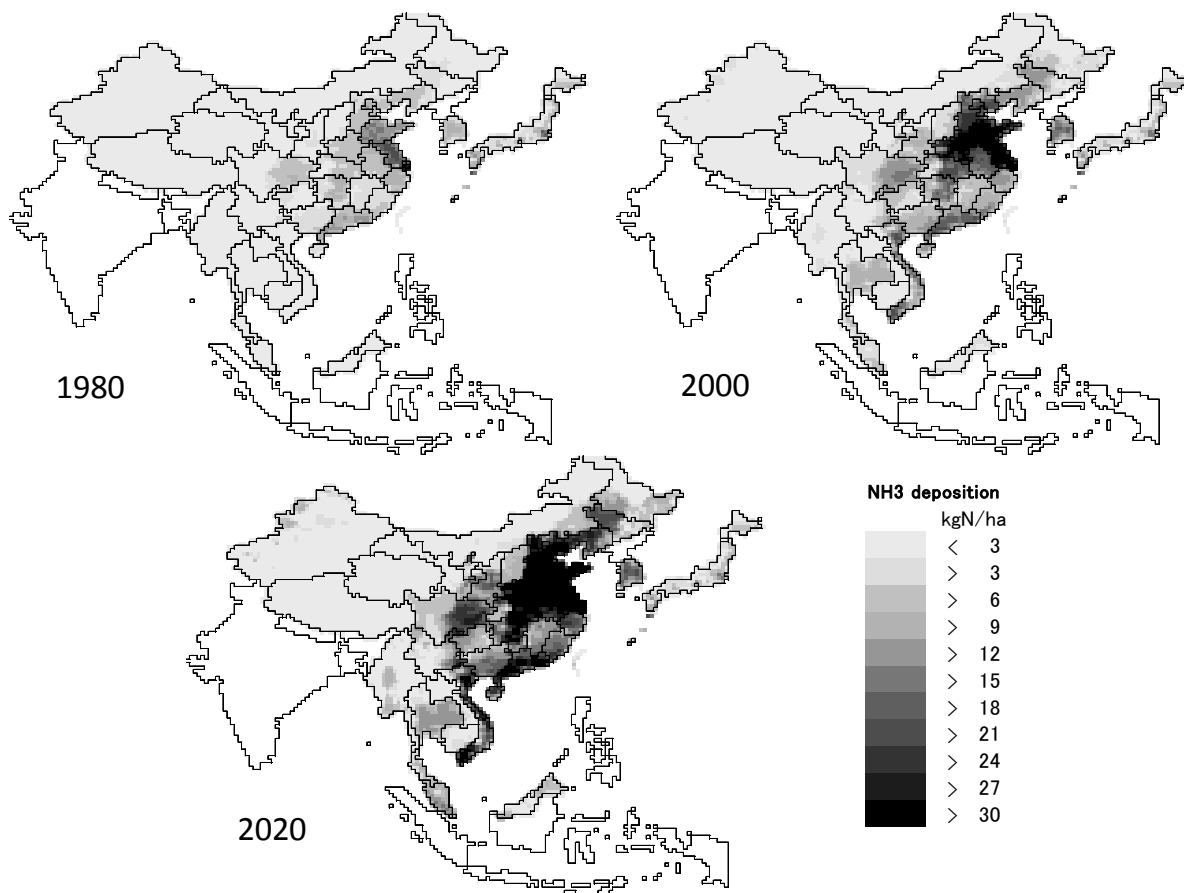


図7 アンモニア沈着の1980年、2000年の推定分布と2020の予測分布
(インドなど白い部分は推定の対象外)

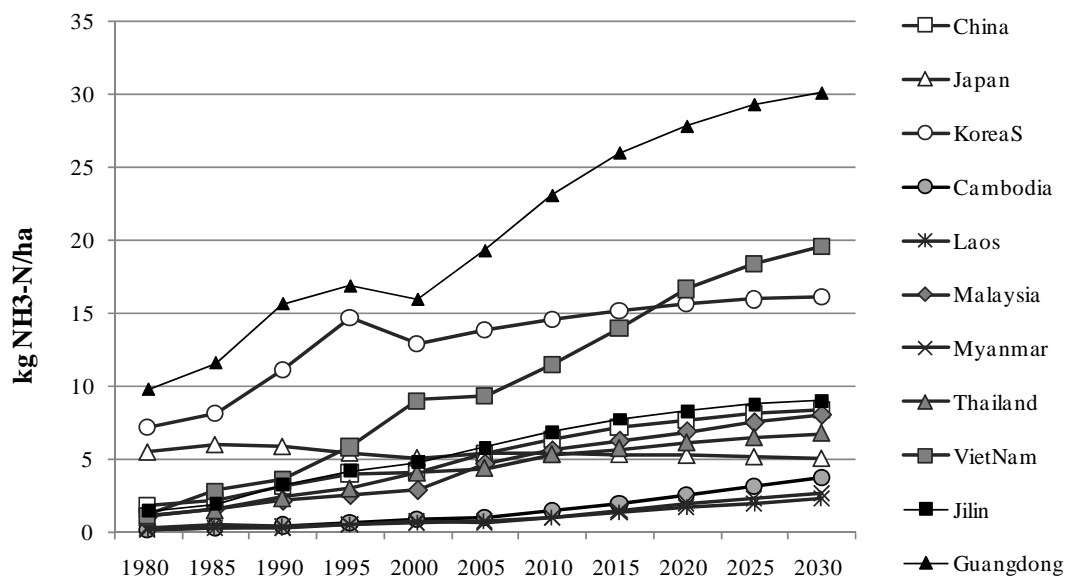


図8 国ごとおよび中国吉林省と広東省の平均アンモニア沈着量の変化 (kgN/ha)

(2) 生態系窒素循環モデルによる自然流域からの窒素流出の推定

1) リターの分解・窒素無機化過程のモデル

リターの分解過程に関しては様々なモデルが作成されている。窒素の無機化は有機炭素の分解に伴って起こるが、基質の窒素含有率が低い初期に於いては微生物が無機態窒素プールから窒素を取り込むことにより窒素は有機化される。既存のモデルでは両方向の反応速度係数や様々なパラメータを用いて有機化と無機化のバランス（あるいは正味で有機化から無機化へ転じるタイミング）をモデル化している。Parton et al.²⁶⁾は熱帯から寒帯までの21の異なる生態系において10年間のリター分解実験に基づいて、有機態窒素量の変化は生態系によらず、リターの初期窒素含有率と有機物（有機炭素）の残存量に支配されることを示した。この関係を用いて、図9に、ある時に供給されたリターの分解過程の推定結果、図10にそれが毎年蓄積した結果の土壤有機窒素と無機化量を示した。これらは、気温20°C、毎年1tCのリターが供給されると仮定した場合である。図9は、リターの初期窒素含有量が0.4%、0.8%および1.6%のケースについて示してある。窒素含有量が高い場合は初期から窒素無機化が生じるが、低い場合には最初に有機窒素が上昇する過程が

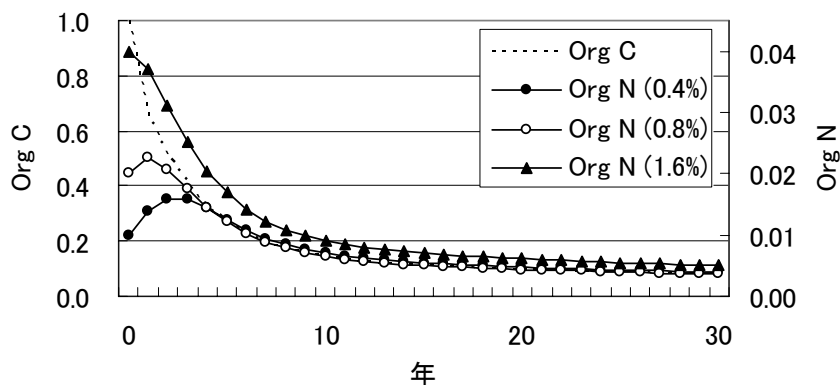


図9 RothCで推定した有機炭素の変化と残留有機窒素量の変化
(気温：15°C、DPM/RPM=0.25)

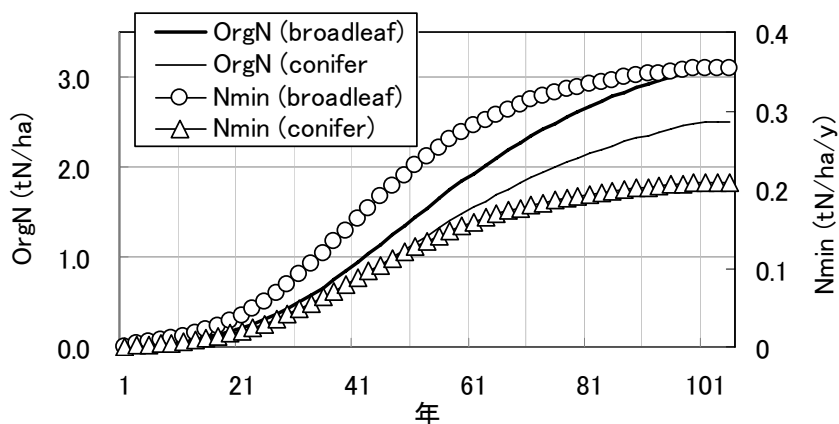


図10 生態系窒素循環モデルによる有機窒素の蓄積と無機化量の変化

示されている。図10ではリターの窒素含有量を文献値を参考に、広葉樹では1.3% (CN=30)、針葉樹では0.8% (CN=50) と仮定し²⁷⁾、またリターのDPM/RPM比は各々0.25と0.2と仮定した²⁸⁾。次節の日本、東アジアに対する推定においてもリターのCN、DPM/RPM比は同様の値を用い、また樹体へ蓄積されるバイオマスのCNは広葉樹150、針葉樹300と仮定した²⁷⁾。

2) 日本の渓流水窒素濃度の推定

窒素循環モデルの検証のために、我が国の森林流域を対象に窒素流出濃度を推定した。渓流調査は2003年の夏期に千葉県と沖縄県を除く全国1278地点の渓流水濃度を測定したものであり、既に旧モデルにより渓流水濃度の測定値と推定値の間には有意な相関 ($r=0.65$) が見られることが示されている¹¹⁾。しかし旧モデルでは北海道、東北地方など寒冷地域で濃度が過大推定される傾向があった。改良したモデルによる測定地点における測定値と推定値の比較 (散布図) を図11に、また渓流水窒素濃度マップを測定濃度マップと共に図12に示した。推定値と測定値の間には旧モデルと同程度の相関が見られ、関東地方周辺、東海地方から大阪周辺、四国北東部、北九州に高濃度地域が分布するなど、濃度分布の全国的な傾向は再現されている。非常に高濃度である地点への当てはまりが良くないが(図10)、有機物分解の過程を導入したことにより、

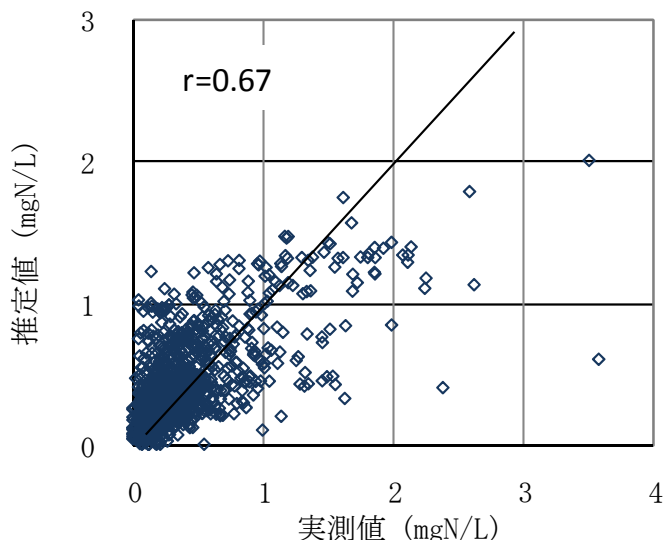


図11 渓流窒素濃度の実測値と推定値の比較

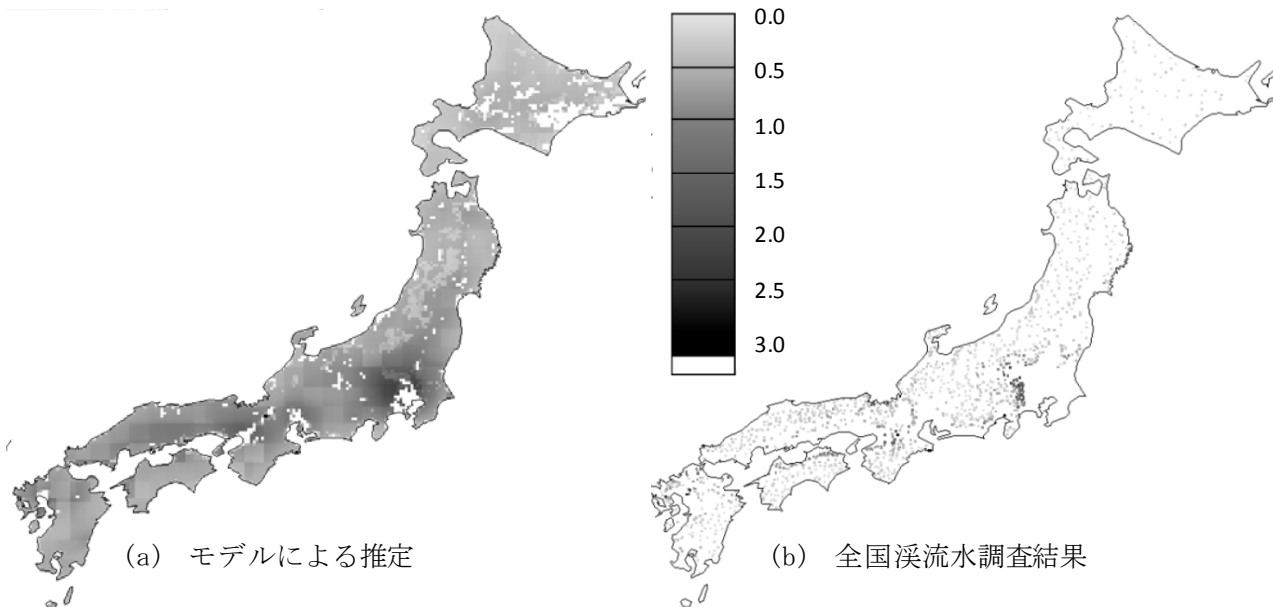


図12 わが国の森林流域から流出する窒素濃度分布 (mgN/L) (白は対象領域外)

寒冷地域における小さい分解速度が考慮され、北海道などにおける過大評価の問題は解消された。なお、全測定地点における測定濃度の平均値と各地点に対応するグリッドにおけるモデルによる推定値の平均がほぼ一致するように決定したモデルパラメータ k_{20z} の値(0.3)を用いている。

しかしながら、図11によれば推定誤差はかなり大きく、個々の地点、地域の濃度の正確な推定は困難であり、本モデルで推定が可能なのは、窒素濃度の全国的な傾向を把握することであろう。

3) 東アジア流域への適用

日本の森林流域へ適用したときに設定した土壌中での脱窒などによる窒素の除去速度に関するパラメータを用いて、モデルを東アジア領域に適用した。森林面積が5%以下であるグリッドは推定の対象から除いた。図13に森林流域からの窒素流出濃度の国別平均および吉林省と広東省の平均濃度の変化を示した(各グリッドの森林面積には関わらずグリッドの単純平均をとった)。また図14に、1980年、2000年の推定濃度分布および2020年の沈着量予測に基づいた分布を示した。

窒素濃度は韓国が極端に高い結果となった。本推定に用いた窒素酸化物の沈着量が1980年から2000年にかけて、発生量の増大に伴って急激に増加したためである。3. (1) 3)に述べた方法で推定した韓国の平均窒素酸化物沈着量は、1980年に量4.7 kgNO_x-N/haであったのが2000年には29.4 kgNO_x-N/haとなった(日本の2000年の沈着量は約10 kgNO_x-N/ha)。Ohara et al.⁴⁾によると韓国の単位面積当たりの窒素酸化物排出量は日本の3倍程度であるが、実際の沈着量がこのように高いかどうかについては更なる調査が必要である。前述の様に、個別地点での濃度に関する推定はできないが、全体の傾向を見ると、1980年には窒素濃度が1mg/Lを超えるような地域はほぼ日本のみであり、多くの国は極低濃度であった。日本は、それ以降、また今後も横ばい～低下傾向であるが、その他の国は沈着量の増大に伴って濃度も上昇している。特に中国の東部諸省、長江中・下流域、ベトナムでの濃度上昇が大きいことが予測された。その他の東南アジアの国でも、緩やかではあるが徐々に濃度が上昇する可能性が示された。

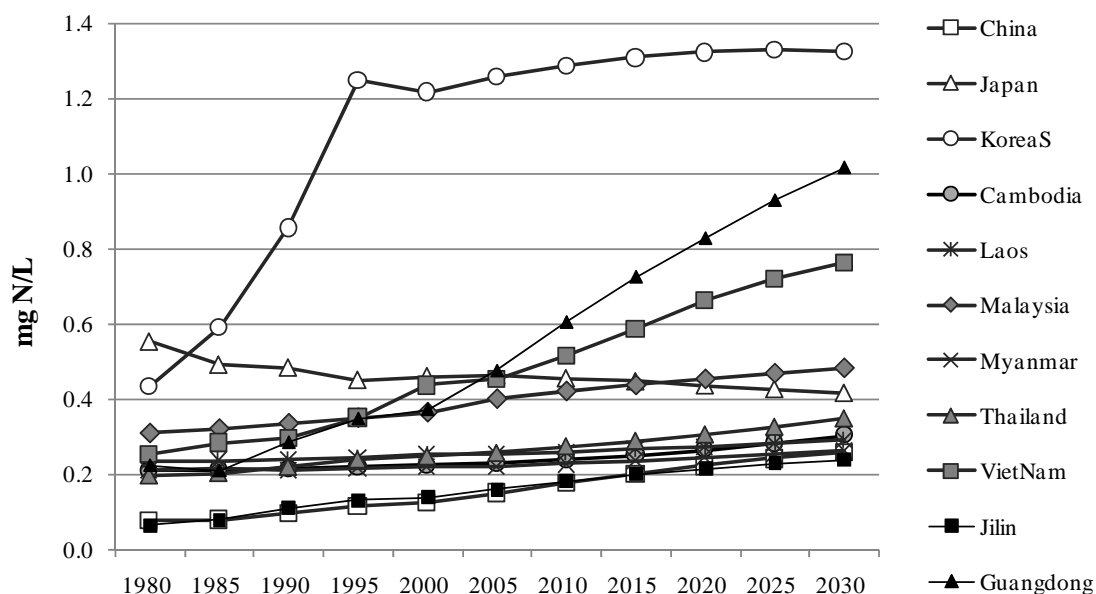


図13 東アジア各国の森林流域からの窒素流出平均濃度

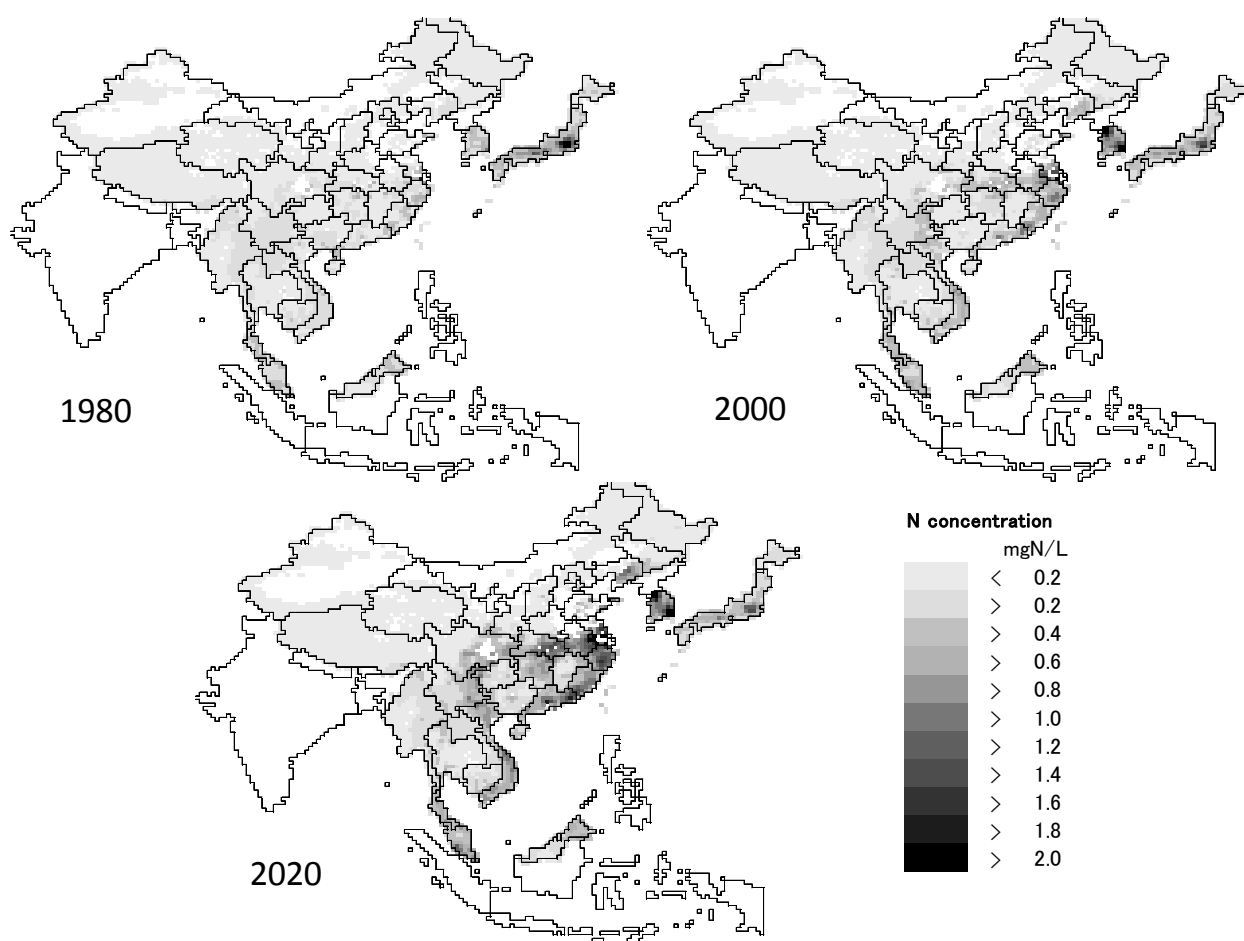


図14 森林流域からの流出窒素濃度の推定分布
(インドなど白い部分は推定の対象外)

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本研究では窒素の負荷による自然生態系における窒素循環の変化を広域的に推定することを目的にして、第一に、公開されている統計データに基づいて農業起源のアンモニア発生量を推定する手法を開発した。ここで用いた方法は日本・韓国、東南アジアの比較的経済発展が進んでいる国に関しては、原単位に基づく従来法による推定値と良く一致するが、中国、東南アジアの一部の国では異なることを示し、その要因を検討した。本手法は発展途上国に関しては過小推定であるが、一方、従来法は過大推定である可能性が高い。また、東アジアでは大気からの窒素負荷に対するアンモニアの寄与が大きく、この寄与は将来更に大きくなることが予測された。従って、より妥当な原単位や推定法の確立など発生量推定の信頼性向上のための研究が必要であることを示した。これらの推定に基づいて推定した沈着量分布は、非常に簡易な方法を用いているにもかかわらず、本研究のサブテーマ1の調査地やEANETサイトにおける沈着量測定値の分布をある程度再現することが可能であった。

第二に、広域的に入手可能なデータに基づいた流域窒素循環モデルを作成した。既存の生態系

内の窒素循環モデルではリターや土壌有機物分解に伴う窒素無機化を有機化と無機化の反応速度に基づいて推定するものが多いが、本研究では、Parton et al. による最新の測定結果に基づいて、炭素循環と連動した簡易なモデルを提案した。今後更にその妥当性に関する検討が必要であるが、モデルによってわが国の渓流水窒素濃度の全国分布の傾向が概ね再現され、大気からの窒素沈着が自然流域の窒素循環に影響を与えていることを明らかにした。また東アジアへの適用により、森林流域からの窒素流出の広域分布と今後の変化の傾向を示した。

(2) 地球環境政策への貢献

東アジアの窒素負荷と流域からの流出に関して、統計データと地理情報、気象データなど広く入手可能な情報に基づいて推定する手法を準備した。これによる推定結果は東アジアの酸性雨影響の評価、対策検討の基礎資料となると考えられる。

1) EANET科学諮問委員会で、今後のEANETの方向性や東アジアにおける越境大気汚染に関する地域協定化への議論に資するために作成された”The Periodic Report on the State of Acid Deposition in East Asia (PRSAD) “に、本課題の窒素循環に関する研究成果が東アジア地域における研究事例として紹介された。

2) EANETのThe Eighth Senior Technical Managers’ Meeting (STM8; 2007年8月開催)において本研究で作成しているモデルおよび東アジアに関する推定について紹介した。

6. 引用文献

- 1) United Nations (2005) World Population Prospects: The 2005 Revision.
<http://esa.un.org/unpp/index.asp?panel=2>.
- 2) United Nations Statistics Division (2008) National Accounts Main Aggregates Database.
<http://unstats.un.org/unsd/snaama/introduction.asp>.
- 3) Energy Information Administration (2007) International Total Primary Energy Consumption and Energy Intensity.
<http://www.eia.doe.gov/emeu/international/energyconsumption.html>.
- 4) Ohara, T., Akimoto, H., Kurokawa, J., Horii, N., Yamaji, K., Yan, X. and Hayasaka, T. (2007) An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980– 2020. *Atmos. Chem. Phys.*, **7**, 4419– 4444.
- 5) FAO (2008) FAO Statistical Databases. <http://faostat.fao.org/site/291/default.aspx>.
- 6) Bouwman, A.F., Lee, D.S., Asman, W.A.H, Dentener, F.J., Van der Hoek, K.W., Olivier, G.J. (1997) A global high-resolution emission inventory for ammonia. *Global Biogeochemical Cycles* **11**, 561–587.
- 7) Galloway, J.N. and Cowling, E.B. (2002) Reactive nitrogen and the world: 200 years of change. *AMBIO*, **31**, 64– 71.
- 8) van Egmond, K., Bresser, T. and Bouwman, L. (2002) The European nitrogen case. *AMBIO*, **31**, 72– 78.
- 9) Aber, J., McDowell, W., Nadelhoffer, K., Magill, A., Berntson, G., Kamakea, M., McNulty, S., Currie, W., Rustad, L. and Fernandez, I. (1998) Nitrogen Saturation in Temperate

- Forest Ecosystems Hypotheses revisited. *BioScience* **48**, 921-934
- 10) 木平英一・新藤純子・吉岡崇仁・戸田任重 (2006) わが国の渓流水質の広域調査. *日本水文学会誌* **36**, 145-150.
 - 11) 新藤純子・木平英一・吉岡崇仁・岡本勝男・川島博之 (2005) 我が国の窒素負荷量分布と全国渓流水水質の推定. *環境科学会誌* **18**, 455-463
 - 12) 中国人民共和国国家統計局編 (1982-2003) 中国統計年
 - 13) パーツラフ・スミル (2003) 世界を養う. 食料・農業政策研究センター ISBN:4540022067.
 - 14) Bouwman, A. F., Boumans, L. J. M., Batjes, N. H. (2002) Estimation of global NH₃ volatilization loss from synthetic fertilizers and animal manure applied to arable lands and grasslands. *Global Biogeochemical Cycles* **16**(2), 8-1-8-15
 - 15) OECD (1997) *The World in 2020: Towards a New Global Age*, 141pp.
 - 16) 新藤純子・岡本勝男・川島博之 (2006) 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. 環境省地球環境研究総合推進費終了研究成果報告書 「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及び富栄養化の評価手法に関する研究」 63-88.
 - 17) Belward, A. S., Estes, J. E., and Kline, K. D., 1999, The IGBP-DIS global 1-km land-cover data set DISCover: a project overview. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **65**(9), 1013-1020.
 - 18) 資源環境科学データセンター, 2005a, 土地利用データ 1980年代末版. 中国科学院, CD-ROM.
 - 19) 資源環境科学データセンター, 2005b, 土地利用データ 2000年代末版. 中国科学院, CD-ROM.
 - 20) CGER (Center for Global Environmental Research), 1994b, World Boundary Databank; PC ARC/INFO 'EXPORT' Version. In *GRID Global Data Sets: Documentation Summaries*, edited by H. Harasawa, National Institute for Environmental Studies, Tsukuba.
 - 21) 国家測繪局, 1998, 中国数字地図 1:1,000,000国際版. 中国地図出版社, CD-ROM.
 - 22) New, M., Hulme M. and Jones P, 1999. Representing 20th century space-time climate variability, Part: I Development of 1961- 90 mean monthly terrestrial climatology. *Journal of Climate*, **12**: 829- 856.
 - 23) Ahn, C.H. and Tateishi, R., 1994. Development of global 30-minute grid potential evapotranspiration data set. *Journal of the Japan Society Photogrammetry and Remote Sensing*, **33**: 12- 21.
 - 24) Running, S.W., Nemani, R., Glassy J.M. and Thornton, P.E., (1999) MODIS daily photosynthesis (PSN) and annual net primary production (NPP) product (MOD17) Algorithm Theoretical Basis Document. <http://lpdaac.usgs.gov/modis/mod17a2v4.asp>.
 - 25) Cleveland, C.C., Townsend, A.R., Schinel, D.S., Fisher, H., Howarth, R.W., Hedin, L.O., Perakis, S.S., Latty, E.F., Von Fischer, J.C., Elseroad, A. and Wasson, M.F., Global patterns of terrestrial biological nitrogen (N₂) fixation in natural ecosystems. *Global Biogeochemical Cycles* **13**, 623-645 (1999)
 - 26) Parton, W., Silver, W.L., Burke, I.C., Grassens, L., Harmon, M.E., Currie, W.S., King, J.Y., Adair, E.C., Brandt, L.A., Hart, S.C. and Fasth, B., Global-Scale Similarities in Nitrogen Release Patterns During Long-Term Decomposition. *Science* **315**, 361-364 (2007)

27) Vitousek, P.M., Fahey, T. Johnson, D.W. and Swift M. J., Element interactions in forest ecosystems: succession, allometry and input-output budgets, *Biogeochemistry* **5**, 7-34 (1988)

28) 石川眞知子・横沢正幸・白戸康人・鞠子茂、二次遷移に伴う土壌炭素動態変化のモデルシミュレーション。第53回日本生態学会 大会講演要旨集、p271 (2006)

7. 国際共同研究等の状況

本研究は、中国清華大学、中国環境科学研究院、タイ環境保護局の研究者、専門家から情報提供を受けるなどの協力の下に実施している。他のサブテーマで中国とタイの協力を得て現地観測を実施しており、2005年度と2007年度には、これら研究協力者との情報交換のためにワークショップを開催した。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) J. Shindo, K. Okamoto, and H. Kawashima : Ecological Modelling, 193, 703-720 (2006)
“Prediction of the environmental effects of excess nitrogen caused by increasing food demand with rapid economic growth in eastern Asian countries, 1961- 2020”
- 2) 新藤純子・岡本勝男・川島博之：日本水文学会誌, 36(3), 95-104 (2006)
「東アジアにおける大気経由の窒素負荷への農業起源アンモニアの寄与の推定」
- 3) 岡本勝男・新藤純子・川島博之：日本水文学会誌, 36(3), 137-144 (2006)
「物質循環モデル解析におけるリモート・センシングとGISの役割」
- 4) 川島博之、新藤純子、堀雅文：環境科学会誌、20、4、279-289(2007)
「東南アジアにおける余剰水田を利用したエネルギー作物生産」
- 5) Wuyunna, Okamoto, K., and Kawashima, H., : *International Journal of Ecodynamics*, **2**(2), 97-107 (2007)
“Analysis of vegetation biomass changes in steppes of Inner Mongolia, China, using multitemporal LANDSAT, Climatic, and socioeconomic data”
- 6) 浜口航、新藤純子、岡本勝男、川島博之：環境科学会誌、21、2、143-152(2008)
「アジア型経済発展による環境汚染の長期化（中国雲南省・滇池）」
- 7) 本田学、新藤純子、岡本勝男、川島博之：システム農学
「2030年までの中国31省市自治区の食料需要予測」印刷中

<査読付論文に準ずる成果発表>（社会科学系の課題のみ記載可）

なし

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) K. Okamoto : Geographical Review of Japan (GRJ), 78, 12, 888-889 (2005)
“Changes in Land Use and Environment at a Continental Scale”
- 2) 波多野隆介・犬伏和之編：続環境負荷を予測する、博友社、15-28(2005)

「第1-I章 東アジアの食料生産・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（執筆担当：新藤純子、岡本勝男、川島博之）」

(2) 口頭発表（学会）

- 1) 岡本勝男、川島博之：生研フォーラム（2005）
「中国黒龍江省東部の急激な土地利用変化」
- 2) 岡本勝男：日本地理学会（2005）
「大陸規模の土地利用と環境の変動」
- 3) 岡本勝男、川島博之：システム農学会2005年度春季シンポジウム・一般研究発表会（2005）
「中国黒龍江省東部の水田と温度条件」
- 4) 新藤純子、岡本勝男、川島博之：環境科学学会年会（2005）
「東アジアの食料生産に伴う窒素負荷量の経年変化－窒素収支モデルに基づく1961年~2030年の推定－」
- 5) 新藤純子、岡本勝男、川島博之：2005年度日本水文科学学会学術大会（2005）
「流域の窒素循環モデルによる渓流水水質の推定」
- 6) 岡本勝男、新藤純子、川島博之者：2005年度日本水文科学学会学術大会（2005）
「リモート・センシング、GISとモデルを組合せた物質循環解析」
- 7) 岡本勝男、銭小平、川島博之：システム農学会2005年度秋季シンポジウム・一般研究発表会（2005）
「アジア東部のコメ供給力における気候変動の影響の可能性」
- 8) K. Okamoto, J. Shindo, and H. Kawashima：The 11th CEReS International Symposium on Remote Sensing（2005）
“Agricultural land-use in northeastern Asia and climate change”
- 9) J. Shindo, K. Okamoto, and H. Kawashima：Bioenergy-I From Concept to Commercial Processes（2006）
“Prediction of the environmental effect of increasing nitrogen by bioenergy production in East Asia”
- 11) K. Okamoto and H. Kawashima：ECI：Engineering Conference International, Bioenergy-I（2006）
“Impacts of climate change to potential areas for energy crops: A case study of rice family crop”
- 12) 岡本勝男・新藤純子・小原洋・川島博之：システム農学会 2006 年度秋季シンポジウム・一般研究発表会（2006）
「アジア東部の地域別，土地利用・被覆別土壌」
- 13) 新藤純子・岡本勝男・川島博之：環境科学学会（2006）
「東アジアにおけるエネルギー作物生産の可能性とその環境影響」
- 14) 大浦典子・新藤純子：環境科学学会（2006）
「窒素負荷量が異なる森林における N₂O 発生量の広域推定」
- 15) 岡本勝男・新藤純子・小原洋・川島博之：システム農学会 2006 年度秋季シンポジウム・一般研究発表会（2006）

「アジア東部の地域別，土地利用・被覆別土壌」

- 16) 岡本勝男・川島博之・新藤純子：システム農学会 2007 年度秋季シンポジウム・一般研究発表会 (2007)

「長期にわたる土地利用変化の把握への航空写真と衛星画像の利用」

- 17) 岡本勝男・川島博之：システム農学会 2007 年度 春季シンポジウム・一般研究発表会 (2007)

「Landsat データを用いた北朝鮮の土地被覆変化の推定：東部と西部における 1990-2000 年の解析事例」

- 18) J. Shindo, K. Okamoto and H. Kawashima: NITROGEN 4th CONFERENCE, Brazil, 2007

“Future Prediction of Cereal Production and Environmental Effects Caused by Increasing Nitrogen Load in East Asia”

- 19) 岡本勝男・川島博之・新藤純子：日本写真測量学会 平成 19 年度年次学術講演会 (2007)

「航空写真と衛星画像を用いた長期土地利用変化解析」

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

- 1) Workshop on Synthetic Evaluation of the Effect of Acidic Load on Material Flows in East Asian Catchments Areas (2006年2月20日、つくば、農業環境技術研究所会議室、観客20名)
- 2) Workshop on Atmospheric Deposition of Acidic Substances and its Effect on Material Flows in East Asian Catchments Areas (2008年2月21日、つくば、農業環境技術研究所会議室、観客20名)

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし

(6) その他

なし