

日本全域における窒素負荷の長期広域推定

A MACRO-SCALE AND LONG-PERIOD ESTIMATION OF NITROGEN LOAD OVER JAPAN

鼎信次郎¹・児玉健²・守利悟朗³・He Bin⁴・沖大幹⁵
Shinjiro KANAE, Ken KODAMA, Goro MOURI, Bin HE, and Taikan OKI

¹正会員 工博 東京大学生産技術研究所准教授 (〒153-8505東京都目黒区駒場4-6-1)

²非会員 工修 三菱商事 (〒100-8086 東京都千代田区丸の内2-3-1)

³正会員 工博 東京大学生産技術研究所研究員 (〒153-8505東京都目黒区駒場4-6-1)

⁴正会員 工博 東京大学生産技術研究所研究員 (〒153-8505東京都目黒区駒場4-6-1)

⁵正会員 工博 東京大学生産技術研究所教授 (〒153-8505東京都目黒区駒場4-6-1)

Nitrogen load into terrestrial hydrosphere over Japan for these three decades was estimated on a 0.1 degree grid. Detailed information on nitrogen load from domestic wastewater, industrial wastewater and agricultural activities was surveyed and summarized into gridded datasets on a 0.1 degree grid. A land surface nitrogen cycle model was applied for computing non-point nitrogen load originated from agricultural fertilizer. The estimated nitrogen load was accumulated at each river basin in Japan; hence, the time series of nitrogen load for these three decades can be displayed for each river basin. In addition, this paper intends to demonstrate the importance and possibility of developing new grid-dataset, which is necessary but currently not available, for macro-scale hydrological and water-environmental studies.

Key Words : Nitrogen load, nitrogen cycle model, fertilizer, Japan, J-TRIP

1. はじめに

窒素は人類の生存に必要な不可欠な物質であるが、それ故、その循環は人為的な攪乱を受けている。近年、人間活動による窒素固定量は自然の固定量を超えたと推測されており、その結果、水圏環境にも大きな変化が生じつつあると考えられている。その実態を把握し将来を予測するため、水圏への硝酸態窒素の流出を分布型数値モデルによって広域的に推定する研究が進められてきた¹⁾²⁾。

広域を対象としたそのような研究では、いかにして陸域への窒素負荷量—すなわち硝酸態窒素流出モデルへの面的入力データを適切に整備するかということが重要な課題となる。しかし、実際には高質の窒素負荷量データを面的整備することは困難であり、カタログ値的な単位負荷量を与えることが多い。

一方で、様々な資料が利用可能な日本を対象とする場合には、これまでにない質の高い窒素負荷データを整備することが、決して容易ではないものの、可能であると考えられる。また、ある程度の長期にわたる（ここでは30年程度の）窒素負荷データを整備することも可能であろう。このように広域・長期かつ

比較的高質の窒素負荷データを揃えることによって、1) これまでにない高精度での日本全域の硝酸態窒素流出の推定、2) その経年変化の把握、が可能になるだけでなく、3) 複数の窒素循環モデルの相互比較のための共通入力データの整備とも成る。

これらの背景の下に本研究では、1976年から2006年について、日本全域0.1度グリッドでの窒素負荷の推定を負荷源別に行った。0.1度の流域マップとしてはJ-TRIP³⁾を用いた。窒素負荷推定のために、例えば農業による窒素負荷を推定するためには、作物別の施肥量とその時期についての詳細なデータを整備し、下水道普及の過程を再現するためには、全国の下水处理場の位置データ及び供用開始時期についてのデータを独自に整備した。詳細は次章以降に記す。最後に、推定した窒素負荷データから計算される日本の各流域における窒素流出量変遷の例を示す。

2. 生活排水からの窒素負荷推定

(1) 推定手法

広範囲を対象に生活排水による窒素負荷を推定す

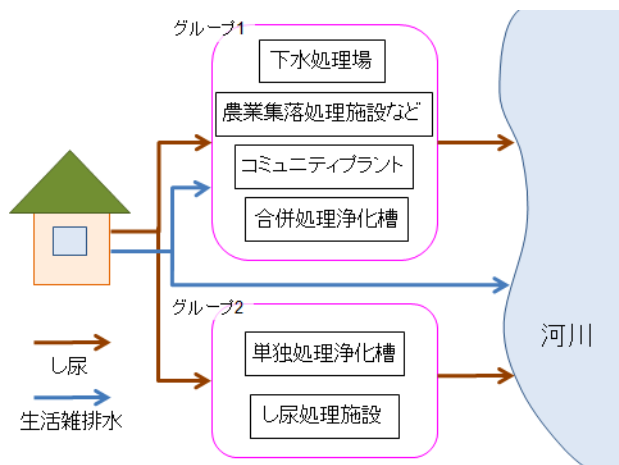


図-1 し尿・生活雑排水の処理過程のフロー

表-1 2000年度末の汚水処理人口の内訳⁴

処理設備	処理人口(万人)
下水処理場	7803
農業集落排水施設など	259
合併処理浄化槽	914
コミュニティプラント	42
汚水処理人口	9018
非汚水処理人口	3610

場合には、生活排水を面源負荷として扱い、人口分布と原単位によって推定するという手法が一般的である。また、この際、生活排水の処理経路も単一の経路を想定することが多い。これらは入手可能な情報で効率的に結果を得るためには有効であろう。

しかし、日本においては、社会基盤が整備されているとともに、様々なデータ・資料が利用可能である。ここでは、生活排水が河川に与える窒素負荷についてプロセスベースで推定を行なった。

生活排水は大きくし尿と生活雑排水の二種類に大別できる。本研究で対象としている1976年以降の日本では、基本的にし尿が直接河川に放出されることはなく、何かしらの処理過程を経ることと仮定した。しかし、生活雑排水は処理設備の種類に応じて処理された後に河川に放出される場合と、処理されずに河川に放出される場合がある（図-1）。

日本ではこれまで、グループ1では下水処理場が、グループ2では単独処理浄化槽・し尿処理施設が生活排水処理の中核を担ってきた。1990年代よりグループ1では下水処理場が大幅に普及率を伸ばすとともに、農業集落排水施設・コミュニティプラント・合併処理浄化槽などが急速に普及してきた。一方で、グループ2では生活雑排水による河川・湖沼の水質悪化に対する社会的意識の高まりを受け、2001年4月浄化槽法が改正・施行されて単独処理浄化槽が原則新設禁止となるなど、今後、利用者の割合は減少していく見通しである。グループ1の人口は汚水処

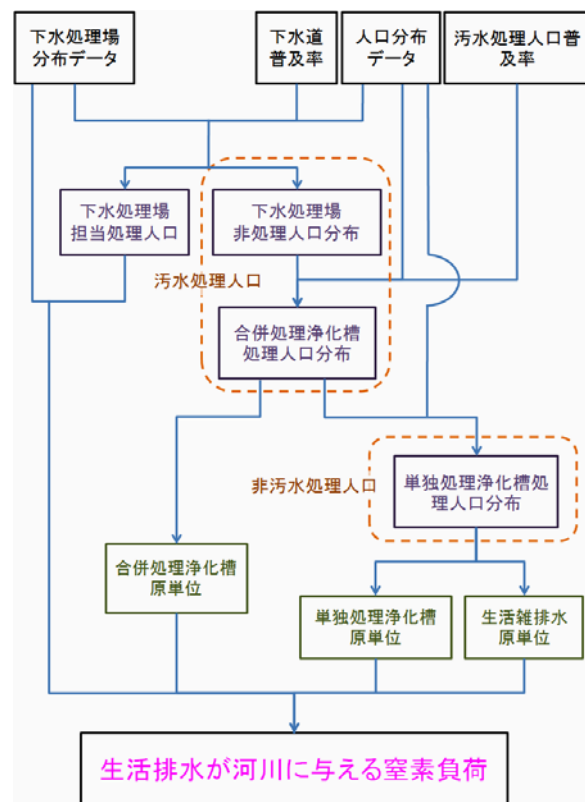


図-2 生活排水による窒素負荷の推定フロー

理人口として定義され、その統計値がある（表-1）。

グループ1については、処理人口の割合を考慮すると、処理設備としては下水処理場と合併処理槽で代表できると考えられる。下水処理場数は2004年度末で計1995基、合併処理浄化槽が2000年度で計155万基であった。よって下水処理場の排水による窒素負荷は点源負荷、合併処理浄化槽の処理水による窒素負荷は面源負荷として扱うこととした。それぞれの処理人口については、下水処理場の処理人口は下水道普及率から算出し、合併処理浄化槽の処理人口は汚水処理人口から下水処理場の処理人口を差し引いた人口とした。これは農業集落排水施設・コミュニティプラントの処理人口を合併処理浄化槽に組み込んで面源負荷として考えることを意味する。

グループ2については単独処理浄化槽のみを考慮し、し尿処理施設による処理人口は単独処理浄化槽による処理人口に組み込んだ。単独処理浄化槽は2000年度で計723万基であり、合併処理浄化槽の数のおよそ5倍である。表-1の非汚水処理人口を考慮すると、単独処理浄化槽による処理人口が非汚水処理人口の中で支配的な割合を占めていると推測される。なお、単独処理浄化槽の処理水および生活雑排水による窒素負荷は面源負荷として扱った。

これら生活排水による窒素負荷の推定フローを図-2に示す。

(2) 下水処理場位置のデータベース化

下水処理場に関する基礎統計データは各年分、社

団法人日本下水道協会発行の下水道統計にまとめられている。このデータについては2003年度版よりデジタル版も発行されている。

しかしながら、下水処理場の住所をまとめた統計書やデータアーカイブは、本研究では確認することができなかった（一部の都道府県の下水道担当部局のweb pageでその都道府県内にある全下水処理場の住所を公開しているものなどは存在した）。ここでは、下水処理場を点源負荷として扱うために、各下水処理場の住所を手作業で調べ、データベース化した。本研究では、①全ての下水処理場をリストアップする、②インターネットを用いて各下水処理場の住所を調べる、③住所から対応する緯度経度を求める、という手順で各下水処理場の緯度経度を調べ、J-TRIP上にマッピングした。

まず、2004年度の下水処理場の分布データを作成し、次にこの分布データと各下水処理場の供用開始時期を基に2004年度以外の年の分布データを作成した。これは2004年度以前に統廃合された下水処理場を考慮しないことを意味する。実際、この手法で作成した1976年3月末時点の下水処理場は総数249基であり、当時実存した下水処理場の総数349基よりかなり少ない。ここで、下水道普及は不可逆的過程であり、1976年3月末に下水道にアクセスしていた地域は、仮に下水処理場は変わろうとも、2004年度にも下水道にアクセスしていると仮定した。また、日本の下水処理場の処理面積は0.1度グリッド面積に比して十分に小さい場合がほとんどであり、1976年3月末に利用していた下水処理場と2004年度に利用している下水処理場が距離的に大きく離れていることは少ないと考えられる。よって、この推定結果は、0.1度グリッドとしての点源負荷の分布の精度には大きな問題はないと解釈できる。2005年度および2006年度の分布は2004年度と同等であるとした。

(3) 下水道普及率と汚水処理人口普及率

下水道普及率は各年度の下水道統計に記載の値、および各都道府県の下水道担当部局がweb pageで公表している値を基に、1976年から2006年の都道府県別データを作成した。また、1985年度以前のデータについては、1975年度および1980年度について下水道統計と国勢調査をもとに下水道普及率を実際に算出し、時間軸に対して線形に内挿した。

汚水処理人口普及率は環境庁などから毎年発表される都道府県別の値を用いた。ただし、1994年度以前のデータは入手できなかったため、1995年度以前は下水道普及率と汚水処理人口普及率の割合が都道府県ごとに一定であると仮定し、1996年度時の割合と各年の下水道普及率を用いて推定した。

(4) 処理人口分布の推定

続いて、下水処理場・合併処理浄化槽・単独処理浄化槽、それぞれの処理設備の担う処理人口の分布データを作成した。

下水道統計に処理面積の記載のある1979基の下水

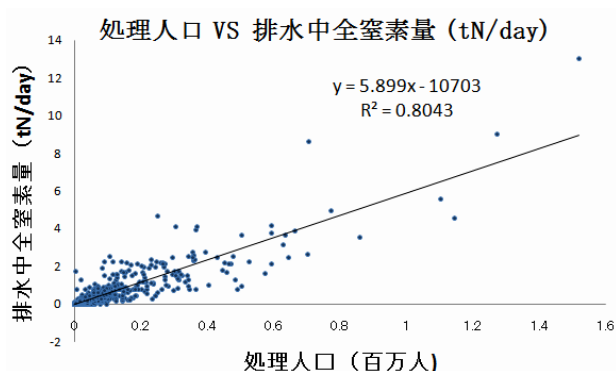


図-3 下水処理人口と排水中全窒素量との関係

処理場について、処理面積をヒストグラムで調べた結果、下水処理場の処理面積の中央値は1.58km²処理面積が64km²以下の下水処理場の累積は98.33%である。これは、(0.1×0.1°)の格子面積が約100km²であることを考慮すると、ほとんどの下水処理場が各グリッドに比して小さい処理面積を担っていることを示している。これを踏まえ、下記の手順に従って、下水処理場の非処理人口分布と各グリッドの担当処理人口を推定した。

1. 各都道府県の非下水処理場利用者数 (A) を算出し、これを都道府県別に下水処理場のないグリッドの人口を集計したもの (B) と比較する。
2. A>Bの場合
A-Bを、グリッド内の人口を上限に、下水処理場のあるグリッドに割り当て、非処理人口に加えるとともに、担当処理人口から減ずる。
3. A<Bの場合
B-Aを、グリッド内人口を上限に、下水処理場のないグリッドに割り当て非処理人口から減ずるとともに、下水処理場のあるグリッドに割り当て担当処理人口に加える。

(5) 生活排水による経路別窒素負荷の推定

a) 下水処理場排水からの窒素負荷

下水道統計に記載されている年間総排水量と水質試験成績から各下水処理場の排水中全窒素量を計算し、各下水処理場の処理人口との分布図を作成すると図-3となる。この回帰関係を用いて、下水処理場からの窒素負荷量を推定した。

b) 合併処理浄化槽処理水からの窒素負荷

合併処理浄化槽の処理水放流による河川水への窒素負荷は、合併処理浄化槽の処理人口と原単位を用いて推定した。「流域別下水道整備総合計画調査指針と解説」⁵を参照して6.5 g/人・日とした。

c) 単独処理浄化槽処理水および生活雑排水からの窒素負荷

単独処理浄化槽の処理水および生活雑排水放流による河川水への窒素負荷は、当該処理人口分布と原単位から推定した。「流域別下水道整備総合計画調

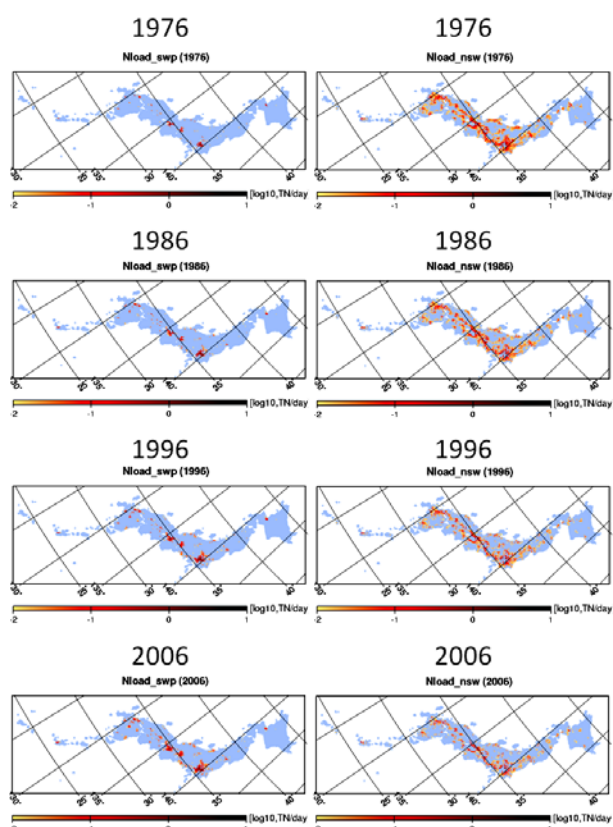


図-4 生活排水からの窒素負荷分布推定の例。
左が下水道起源。右が下水道以外起源。
(詳細な数字が目視できない点は紙幅の都合上ご了承ください)

査指針と解説」に基づき5.9 g/人・日および2g/人・日とした。

これら全ての結果として得られた下水処理場排水からの点源窒素負荷とその他の面源負荷（合併処理浄化槽処理水・単独処理浄化槽処理水・生活雑排水からの窒素負荷の合計）の分布図を図-4に示す。

3. 工業排水からの窒素負荷推定

工業排水による窒素負荷の推定は一般的に困難であることが多い。その主たる理由の一つに、工業排水による窒素負荷は産業間の差が大きく、画一的に扱うことが難しいということがある。特に負荷量が大きい産業として食品、繊維、紙・パルプ、化学、石油、皮革といった産業が挙げられるが、これら以外の産業であっても、大規模工場や工場密集地からの排水の窒素負荷量は相応に大きいため、無視することはできない。

そのため工業排水による窒素負荷をある程度の精度で推定するためには、各種産業の空間分布のデータを入手する必要がある。また、個々の工場の排水量や排水中の窒素濃度などのデータは入手困難であることが多いので、各種産業に関する基本的な情報から窒素負荷量を算出するための原単位を用意することも必要となる。対象領域が広域になれば、あら

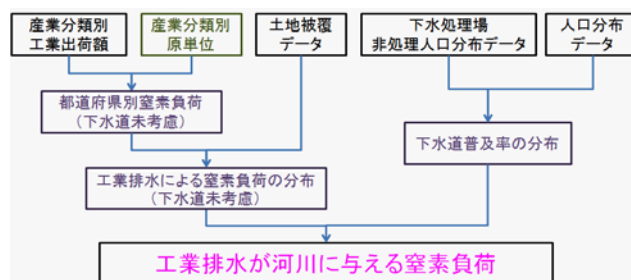


図-5 工業排水による窒素負荷の推定フロー

かじめこれらのデータが整備されていないかぎり、自ら用意することは容易ではない。

しかし、日本では、経済産業省により工業統計という統計が整備されており、さらにこの工業統計に合わせて環境省（当時、環境庁）が作成した原単位が存在する。以下、上記データを基に工業排水による窒素負荷の推定を行う。工業統計では、日本全国の産業が細分類で568分類、最小単位では市町村単位で事業所数や製品出荷額などがまとめられている。ただし、産業細分類のデータは最小単位が都道府県単位である。また環境省（当時、環境庁）作成の産業分類別原単位は、平成3年から5年にかけて行ったサンプル調査を基に、工業統計の産業細分類ごとに工業出荷額に合わせた形でまとめられている。

本研究では、各産業からの窒素負荷は都道府県ごとに分布させ、面源負荷として扱うこととする。これは、特に近年盛んである市町村の統廃合に対応し、各々の年代の市町村界データを入手することが困難であるためでもある。また工業統計では、数年置きに産業中分類の分類区分の見直しを行っている。本研究では統合分類区分として20分類を定め、産業分類別原単位の分類区分をこの統合分類区分に合わせて集計するとともに、各工業統計の分類区分と統合分類区分との対応付けを行った。

図-5に工業排水による窒素負荷の推定モデルのフローを示す。原則的に下水道の整備されている地域内の工業排水は下水処理場で処理されているとし、一方、下水道の整備されていない地域については、工業排水は排水基準内まで除害施設等で処理され河川へと放流されるとした。よって本研究では、まず下水道を考慮せずに工業排水による窒素負荷の分布を推定し、次に下水道普及率の分布を用いて下水処理場による処理分を減じ、最終的な工業排水による窒素負荷を推定した。

4. 農業・畜産排水からの窒素負荷推定

(1) 農業からの窒素負荷推定手法

農業からの窒素負荷の推定手法としては、従来、農業用地に対して原単位を定めて推定するという手法が一般的であった。これに対し、本研究では生物地球化学的な数値窒素循環モデルを用いて、農業および陸面一般からの窒素負荷の推定を行った。具体的には、Lin et al. (2000)⁶⁾ による陸面での炭素と窒

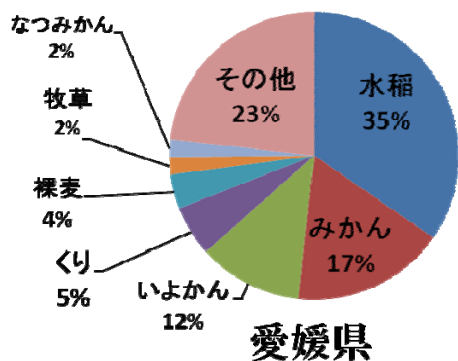


図-6 作物別作付面積の例

素の挙動を扱うモデルに須賀ら(2005)⁷⁾が改良を加えたモデルを用いて、陸面での窒素動態のシミュレーションを行い、農業用地から河川への硝酸態窒素溶脱量の推定を行った。ここでは特に窒素負荷入力データ、つまり、施肥データの作成について詳しく述べる。

一般に、窒素循環において農業で行われる施肥の影響は極めて大きく、施肥の量・時期や農作物の収穫時期は窒素循環を考える上で重要な要素である。

しかし、日本全国の施肥の量・時期や農作物の収穫時期をまとめた統計データは存在しない。そこで、各都道府県の出している農業マニュアルおよび各都道府県の作物別作付面積を基に、日本全域の施肥パターン、収穫パターンを作成した。

なお、施肥パターンとは土壌に散布される窒素肥料の1年間の時間分布を、窒素成分をアンモニア態、硝酸態、腐植土態（堆肥）の3形態に分類してまとめたものである。収穫パターンとは、農作物の収穫によって農地から持ち出される植物態窒素の割合を表している。収穫は、窒素動態モデル中では植物態窒素の貯留（storage）から、収穫パターンで推定された割合分が減算されるという形で表現される。

(2) 各都道府県の作物別作付面積の作成

農林水産省の「農林水産関係市町村別統計」⁸⁾より計97種の作物について市町村別の作付面積を入手し、この市町村別のデータを都道府県ごとに再集計し、各都道府県について作物別作付面積を求めた。例を図6に示す。さらに全63種の作物に関して、さらに各都道府県の各作物について施肥パターン・収穫パターンを適用した。

(3) 施肥総量の補正

本推定手法では、各都道府県の出している農業マニュアルを参考に行っている。そのため上記で作成した施肥パターンは、時間的な分布についてはある程度信頼できると考えられるが、量的にはやや過小評価することが考えられる。これは、農業ではしばしば過剰な施肥が行われるのに対し、農業マニュアルは環境に配慮した施肥量を推奨して記載しているた

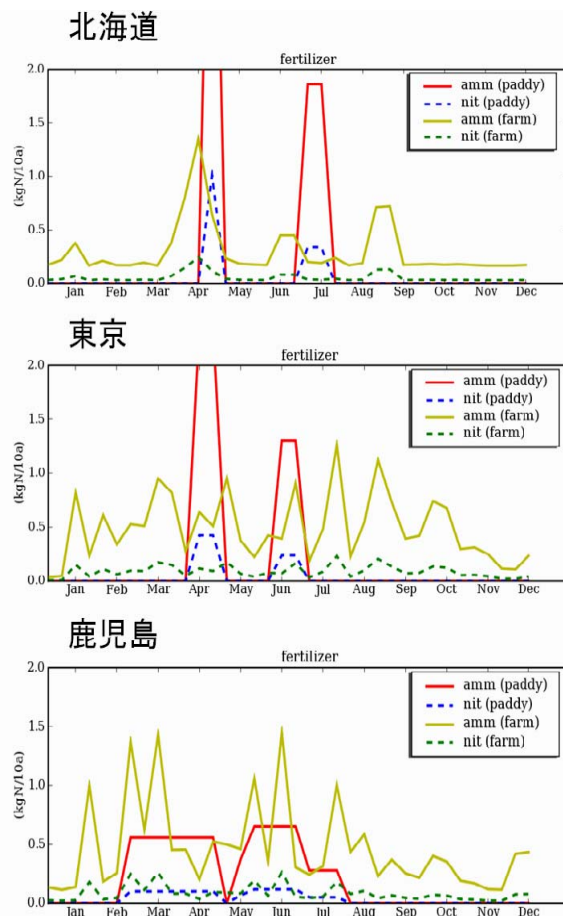


図-7 各都道府県における施肥起源の窒素量の季節変化の例。凡例は上から順に水田へのアンモニア態、水田への硝酸態、水田以外へのアンモニア態、水田以外への硝酸態を示す。

めである。そこで、本研究ではFAOSTAT⁹⁾で公開している年総施肥量と比較することで、作成した施肥パターンのバイアスを補正することとした。作成された施肥パターンは全て単位面積当たりの施肥量 kg/10a である。速効性肥料と混合肥料の和に2005年度の各都道府県の作物別作付面積をかけて集計し、本手法によって推定された施肥量の年総量を算出した。

結果として得られた施肥起源の硝酸態窒素、アンモニア態窒素それぞれの陸面への投入量の季節変化の一例を図-7に示す。これが全都道府県について作成された。

最後に、上述のように、これらの施肥起源の窒素量を、時間ステップを一日とした数値窒素循環モデルへ入力し、農業および陸面一般から水圏への窒素負荷の推定を行なった。図-4の農業版が得られることになるが、紙幅の都合上、省略する。数値窒素循環モデルの詳細(図-8)は須賀ら(2005)⁷⁾を参照のこと。

(4) 畜産からの窒素負荷推定手法

畜産による窒素負荷は一般に、放牧先での糞尿、畜舎を水洗する際の畜産排水に分けられる。本研究

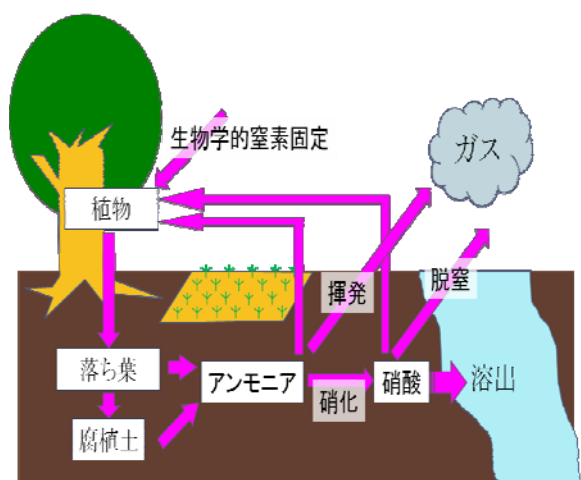


図-8 数値窒素循環モデルで扱われている要素の概要。

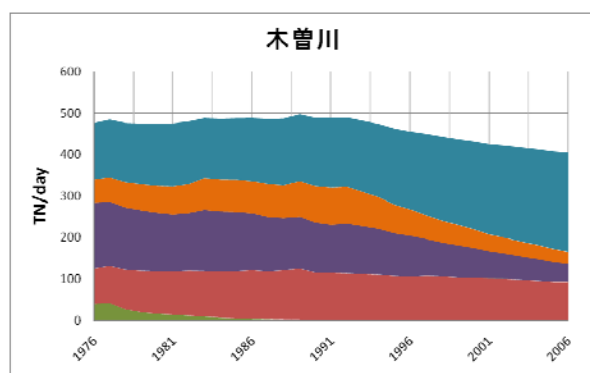


図-9 木曽川流域における1976年から2006年の負荷源別の窒素負荷推定量。各色は上から順に下水処理水、工業排水、生活排水、畜産排水、農地排水を示す。

では放牧先での糞尿については原単位を陸面の窒素循環モデルに入力し、畜舎からの畜舎排水については原単位を用いて、それぞれによる窒素負荷量を推定した。牛や豚の畜頭数および放牧率については、畜産統計を用いて、1976年から2006年の都道府県別の値を整備した。

牛と豚の窒素負荷原単位として290gN/頭・日、40（単位は同左）という値で代表され、また、豚の飼育形態別の負荷量については、全豚舎水洗化で54、一部豚舎水洗化で29、未水洗豚舎で24とされている。そこで本研究では、牛と豚からの原単位をそれぞれ290、40とした。これらの窒素負荷量は都道府県別に「その他の農地」に配分した。

5. 流域毎の全窒素負荷推定

ここまで述べた各負荷を日本全域0.1度河道網J-TRIP上で統合することによって、日本の各流域毎に1976年から2006年までの負荷源別の窒素負荷量を図示することができる。その一例として木曽川についての結果を図-9に示す。

検証に使える観測値は限られたものしか存在しな

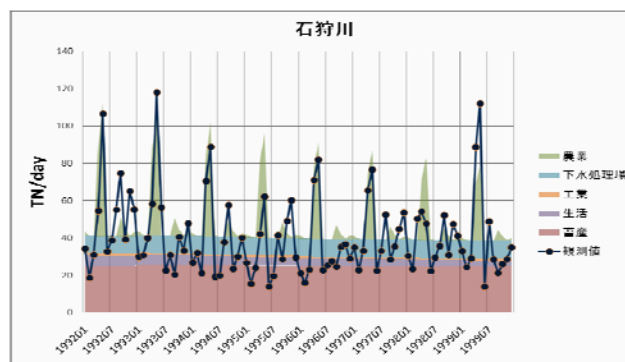


図-10 石狩川流域における総窒素流出量の検証(1992年から1997年)。実線が観測値。色による塗りつぶしが本研究による負荷源別の推定値。

いが、そのような観測値と推定値を比較すると、まずまず良好な対応が得られている（例として図-10）。

これら各流域の推定値から得られる解釈については、異なった論文上に記す予定である。本論文の主眼は、日本全域という広域を対象として、これまでにない質の高い窒素負荷データを整備したことの記述にある。推定された面的データが最大の成果物であると同時に、既存の一般的な面的データセットに頼らずに、自力で工夫して面的データセットを作成することの可能性を示したことも成果と考えている。

謝辞：本研究は科研費研究課題(19106008)「世界の水資源の持続可能性評価のための統合型水循環モデルの構築」（代表：沖大幹）の成果の一部である

参考文献

- 1) Zobrist, J., and Reichert, P.: Bayesian estimation of export coefficients from diffuse and point sources in Swiss watersheds, *J. Hydrology*, Vol.329, pp.207-223, 2006.
- 2) 吉村千洋, 竹内邦良: 分布型流出モデルによるメコン川流域の栄養塩流出仮定の推定, *水文・水資源学会誌*, Vol.20, pp.493-504, 2007.
- 3) Yoshimura, K., Sakimura, T., Oki, T., Kanae, S., and Seto, S.: Toward flood risk prediction: a statistical approach using a 29-year river discharge simulation over Japan, *Hydrological Research Letters* Vol.2, pp.22-26, 2008.
- 4) 国土交通省: 平成12年度末の汚水処理施設整備状況, <http://www.mlit.go.jp/crd/city/sewage/info/fukyu/h12/osui2.pdf>, 2001.
- 5) 建設省都市局下水道部: 流域別下水道整備総合計画調査指針と解説, 日本下水道協会, 1999.
- 6) Lin, B., Sakoda, A., Shibasaki, R., Goto, N., and Suzuki, M.: Modelling a global biogeochemical nitrogen cycle in terrestrial ecosystems, *Ecological Modelling*, Vol.135, 89-110, 2000.
- 7) 須賀可人, 平林由希子, 鼎信次郎, 沖大幹: 施肥料の増加に伴う全球河川の硝酸輸送量変化, *水工学論文集*, Vol.49, pp.1495-1500, 2005.
- 8) 農林水産省大臣官房: 農林水産関係市町村別統計.
- 9) FAO: FAOSTAT, <http://faostat.fao.org>.

(2008.9.30受付)