

積の約半分を占めている。また、人口はおよそ13万人（平成7年国勢調査結果）である。流域およびその周辺地域では、東京とつくばを結ぶつくばエクスプレス（常磐新線、2005年8月開通）の沿線開発が進行しており、今後の急激な都市化により流域の水循環や物質循環、牛久沼の水質への影響が懸念される。そのため、開発以前から流域内の水循環・物質循環に関する様々なデータを蓄積しながら、流域条件の変化による影響をモニタリングとモデリングにより評価することが求められている⁴⁾。

なお、谷田川流域の水循環については、既に実態調査に基づいて、流域内の水利用や排水系統の状況、灌漑期と非灌漑期における平常時流量の特徴、浅層地下水や深層地下水の時空間分布の特徴が明らかにされている⁵⁾。また、これらの実態調査と平行して、土木研究所において開発された分布物理型水循環モデルであるWEPモデル⁶⁾の適用を試み、流量、地下水位等の時空間分布の再現性が確認されている^{5),7)}。

3. 農地における窒素負荷量の算出手法

農地における施肥や固定、収穫や脱窒に伴う窒素の流入・流出量を流域内の市町村別に算出するプログラムを作成し、農地表面層土壌にこれらの差し引きとして残る窒素量を計算した。水文チームでは、窒素投入量、吸収量を月別・地域別に求めるプログラムを開発し、牛久沼流域に適用した。計算は、2001年および2002年を対象として行った。なお、当該流域はかつての旧町村が合併して新市町村を形成していることから、2000年世界農林業センサス⁸⁾に記載された旧町村を最小の単位とした。

3.1. 算出方法

牛久沼の流域面積と水田および畑地面積は、細密数値地図（第五期、1994年）⁹⁾より求めた。旧町村ごとの農地（水田、畑地）面積に対する各作物の作付け比率は、2000年世界農林業センサス第1巻茨城県統計書（農業編）⁸⁾の数値より求めた。なお、二毛作や多毛作は行わないものと仮定した。

また、茎崎町は2002年11月1日につくば市に合併したため、2001年は茎崎町として、2002年はつくば市の一部として取り扱った。

これらにより求めた農地面積と各作物の作付比率を掛けて、それぞれの作物の作付面積を算出した。この時、きのご類、花き類・花木、種苗・苗木類は栽培実績がない、あるいは栽培量が少なく流域へのインパクトが把握しにくいいため、除外した。また、センサスの「その他作物」とは主に芝（ソッド）であり、「その他野菜」は農林水産関係市町村別データ（年産）¹⁰⁾に掲載されており、センサスに掲載されていない野菜とした。

3.1.1 月別の窒素肥料投入量分布の算出

図-2のフローに従い、月別窒素肥料投入量分布を算出した。作物別（約30品目）の窒素肥料投入量は茨城県の栽培基準¹¹⁾を参考にした。同一作物に複数の作型がある場合は、施肥量の平均を算出した。また、果樹など樹齢により施肥量が異なる場合は、最大施肥量を用いた。栽培基準¹¹⁾から作物の平均生育期間を求め、流通量（青果物産地別卸売統計¹²⁾）の月変動傾向から播種（定植）時期を推定し、月ごとの施肥投入量を算出した。月毎の流通量が不明な農作物については、全ての作型の施肥期間に均等に割り付けるものとした。流域内の市町村別窒素投入量算定のため、2000年世界農林業センサスデータと細密数値情報から作物別市町村別作付面積を算出した。

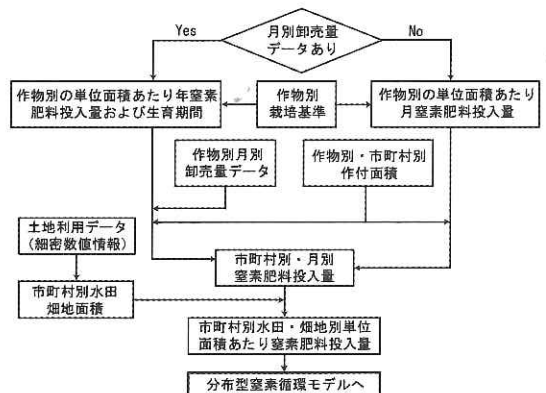


図-2 月別の窒素肥料投入量分布の算出フロー

3.1.2 作物による窒素吸収量

作物別に、現市町村ごとの単位面積あたりの年収穫量を農林水産関係市町村別データ（年産）¹⁰⁾から求めた。この値を(1)で求めた作付面積と掛けあわせて旧町村ごとの年収穫量(kg)を算出した。収穫された作物に含まれる窒素量は、五訂日本食品標準成分表¹³⁾に記載されているたんぱく質を係数で除して算出した。なお、芝は作付面積の90%が毎年出荷されるものと仮定し、窒素含有量を19.18 kg N/10aとして計算した。

さらに、青果物産地別卸売統計¹²⁾より、収穫量を月ごとに割り付けた。青果物産地別卸売統計にデータのない作物は、農業栽培基準に基づいて収穫量を各作型の収穫時期に均等に振り分けた。播種、あるいは定植から収穫までの期間、窒素が土壌から植物体に吸収される（土壌から除去される）速度を線形として、収穫窒素量を月毎に割りつけ算出した。

3.1.3 窒素固定量

Yatazawa (1978) より下記のように設定した¹⁴⁾。

- ・大豆：170 kg/ha/yr
- ・小豆：50 kg/ha/yr
- ・らっかせい：90 kg/ha/yr
- ・マメ科牧草：180 kg/ha/yr
- ・マメ科以外の作物：20 kg/ha/yr

3.1.4 脱窒量

水田における脱窒量を40kg/ha/yr¹⁵⁾とし、畑地の脱窒量を30kg/ha/yr¹⁴⁾と設定した。

3.2 算出結果

計算結果を図-3に示す。年間の施肥量は上流域で比較的多く、図-4に示す地下水の硝酸態窒素濃度の高い地点で施肥量も多い傾向があった。また、流域全体では投入した窒素の約44%が作物に吸収されず、地下水や河川水に流出する可能性のあることが示された。

本プログラムは、対話式で流域面積や作付面積、作物項目、施肥量等を変更することができ、他流域へ容易に適用可能なことが特徴である。

4. 分布型窒素循環モデルの作成と適用

4.1 窒素循環モデルの概要

流域スケールの水循環に伴う無機態窒素と有機態窒素の移動と消長の解析を行う数値モデルを作成し、牛久沼流域に適用した。水循環はWEPモデルを用いて計算し、物質循環はWEPモデルにより計算された水の移動と物質の移流拡散方程式から計算した。無機態窒素にはアンモニア態窒素、亜硝酸態窒素、硝酸態窒素があるが、これらの区別はせず無機態窒素として一括して扱った。WEPモデルでは、計算上の土地利用を水域、水田、背の高い植生（森林、樹木）、背の低い植生（草地、農地）、裸地、都市建物面、都市地表面の7分類にしている。そこで、それぞれの土地利用面において有機態窒素、無機態窒素の反応と輸送のプロセスをモデル化した。農地における窒素循環のモデ

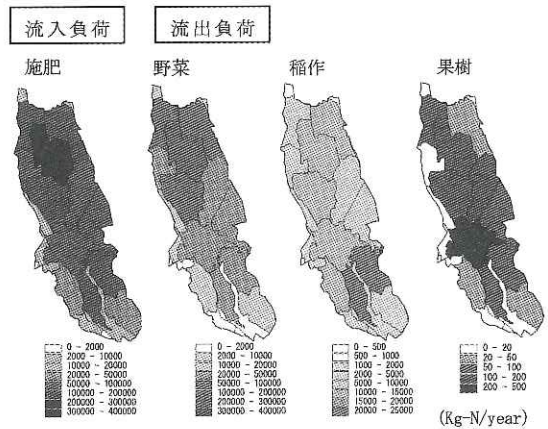


図-3 農地の窒素流入・流出負荷量（年間）

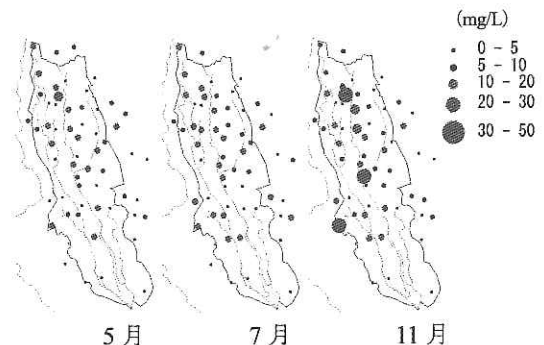


図-4 浅層地下水の硝酸態窒素濃度（2000年）

ルとして、窒素を有機態窒素3プール（植物の残滓と微生物バイオマスからなる有機態窒素(fresh)、腐植土中の易分解性 (active) の有機態窒素、難分解性 (stable) の有機態窒素の3種類）と無機態窒素1プールで表現・定式化した。不圧・被圧地下帯水層中においては、濃度的に卓越する硝酸態窒素のみを対象とした。

4.2 モデルの構造

4.2.1 表層土壌

表層土壌の層厚を平均2mと仮定し、地表より3層に分割して各層における水分と窒素の移動を図-5のように表した。裸地、植生地ともに降雨による窒素の流入があり、加えて、水田、農地では灌漑水や施肥により窒素が流入する。また、水田や植生地では腐植層中の有機態窒素の無機化により、無機態窒素が増加する。アンモニア性窒素の揮発は量的に非常に少ない¹⁶⁾ ことから、初期モデルでは考慮しないものとした。

4.2.2 水域

降雨が水域へ直接流出することによる無機態窒素の負荷は、雨中の窒素濃度と降雨量から求めた。

4.2.3 不浸透域

不浸透域では降雨の表面流出による無機態窒素の流出に加えて、地表面に堆積する有機態窒素や土粒子に付着する無機態窒素の流出が想定される。初期モデルでは降雨中の無機態窒素の流出のみを考え、降雨中の窒素濃度と降雨量から求めた。

4.2.4 地下帯水層中における挙動

地下帯水層（不圧地下水、被圧地下水）中にお

いては、濃度的に卓越する硝酸態窒素のみを対象とし、その挙動は水平2次元の移流方程式に従うものとした。なお、難透水層を経由する際に窒素の除去はないと仮定した。

4.2.5 河川への流出

基底流出、中間流出、表面流出に伴って硝酸態窒素も河川に流出する。基底流出、中間流出により地下帯水層および不飽和土壌層から除去される硝酸態窒素量は水平2次元の移流方程式で計算した。また、河床や河岸を通過する際に生物学的作用を受けて硝酸態窒素濃度が変化すると考えられる。中間流出に伴う脱窒は既に表層土壌内の脱窒現象として考慮していることから、不圧地下水の河川流出においてのみ、係数を掛け合わせて、河川へ流出する硝酸態窒素量を表現した。

4.2.6 河道内における挙動

河道内における無機態窒素の挙動は、水平1次元の移流拡散方程式により表した。河道へ無機態窒素が流入する経路として、表面流出や雑排水、灌漑用水の導水、地下水流出・中間流出を考慮し、河道から無機態窒素が流出する経路として、灌漑用水の取水を考慮した。

4.2.7 表面流出に伴う物質移動

雨天時の表面流出等による無機態窒素の挙動は水平1次元の移流方程式により表した。

4.2.8 窒素の初期条件

水田では地力窒素の指標である可給態窒素（易分解性有機態窒素に微生物中に含まれる窒素（バイオマス窒素）を加えたもの）が高く、畑地では低い（茨城県農業研究所）。このデータに基づき、可給態窒素量の初期条件として、水田作土層で13mg/100g、畑（普通畑、露地野菜畑）の土壌で6mg/100gと設定した。

4.3. モデル解析結果

4.3.1. 地下水中の無機態窒素濃度

(1) 初期条件を定数として与えた場合

図-6は、不圧帯水層の無機態窒素濃度の初期条件を10mg/Lとして、前述の3. の項で求めた窒素負荷を毎年同じパターンと量で与えた場合の、それぞれ3年、6年、9年経過時の地下水中の無機

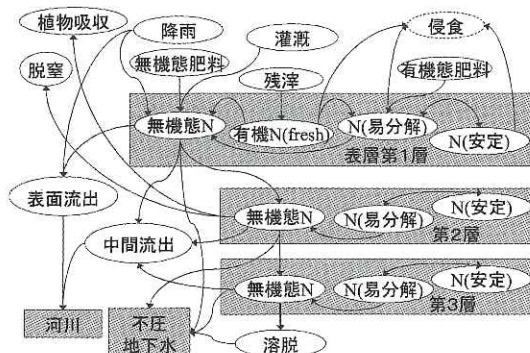


図-5 土壌表層における窒素の挙動模式図

態窒素濃度を示している（これらの結果は、2000年1月～2002年12月までの水文・気象条件を3回繰り返して与えることにより得られた）。これにより、初期濃度が流域全体で一定であっても、経年的に濃度の空間分布が変化し、窒素負荷の相対的に多い上流域では10mg/Lを越える濃度域が広がることになる。

(2) 実測値を初期条件として与えた場合

2000年11月の調査結果を2000年1月1日の不圧帯水層の無機態窒素濃度の初期条件として与え、2002年12月31日の地下水中の無機態窒素濃度を計算した（図-7）。上流域では無機態窒素の高濃度域が見られ、前述（1）の初期条件を定数として与えて計算した場合と類似の空間分布を示した。また、中流域にある実測の高濃度域は消滅した。初期条件を定数として与えた場合（図-6）にも中流域の高濃度は計算されないことから、実測の高濃度の由来は、畜産排水によるものか、あるいは放棄された農地に残存する窒素によるものではな

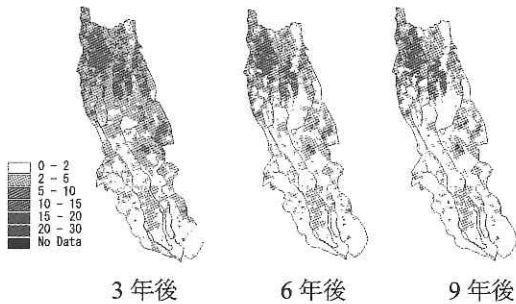


図-6 不圧帯水層における無機態窒素濃度

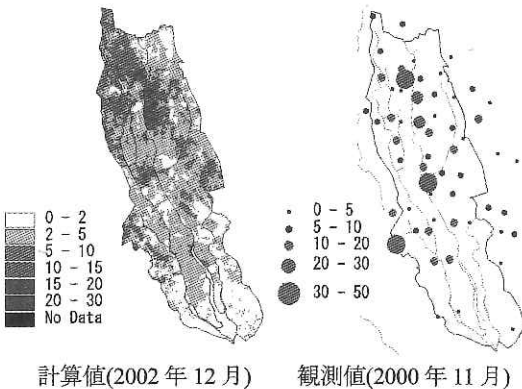


図-7 不圧帯水層における無機態窒素濃度の空間分布（非灌漑期）

いかと推察される。

4.3.2. 河川水中の無機態窒素濃度

図-8に河川の流量と水質評価の基準地点である東谷田川・小白碓橋地点および西谷田川・境松堰地点における無機態窒素濃度の実測値（10日に1回の採水分析結果）と計算値（実測と同日、同時刻での結果）を示す。灌漑期に濃度が低減して非灌漑期に上昇するという傾向はうまく再現されているが、灌漑期の後半で計算値が実測より過大で、非灌漑期では実測値と1mg/L程度のずれが見られた。河川近傍の地下水流動に伴う物質輸送や水田における浄化過程のモデル化に改良の余地がある。

5. まとめ

特に河川経由での窒素汚濁負荷軽減に着目した流域管理の観点から、統計情報にもとづいた農地における汚濁負荷発生量の時空間分布の定量化手

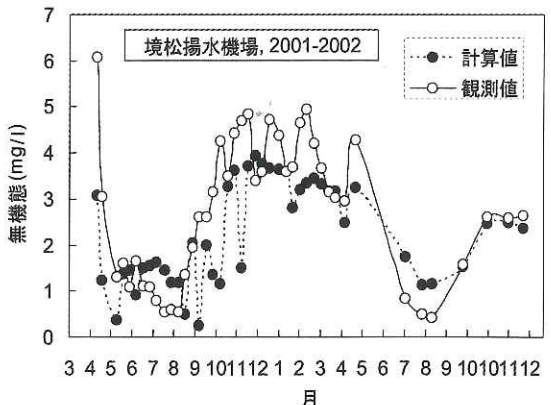
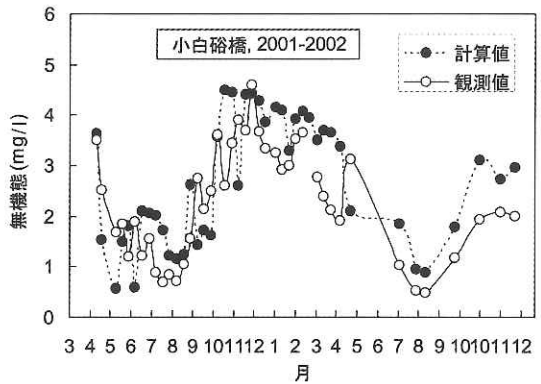


図-8 河川水中の無機態窒素濃度の計算値と実測値

法と、農地流域に適用可能な分布型物質循環モデルについて紹介した。

牛久沼流域を対象にした検討の結果から、農地に投入した窒素の約44%が作物に吸収されず、地下水や河川水に流出する可能性のあることを示した。また、分布型窒素循環モデルを適用し、不圧地下水中の無機態窒素濃度の空間分布をおおよそ再現し、河川水中の無機態窒素濃度が灌漑期に低減して非灌漑期に上昇するという傾向を再現した。今後、地下水ならびに河川水の水質改善施策の立案に役立つモデルとして性能を向上させるために、他の水質項目の追加を含め、汎用性と精度を向上させることが必要と考えている。

参考文献

- 1) 井上 京、山本忠男、長澤徹明：北海道東部浜中地区における流域の土地利用と河川水質、農業土木学会論文集, 200, 85-92, 1999.
- 2) 環境庁水質保全局水質管理課監修：硝酸性窒素による地下水汚染対策ハンドブック、公害研究対策センター, 1993.
- 3) 川西琢也、川島博之、尾崎保夫：地下水の硝酸態窒素濃度の上昇と農業生産—諸外国の研究事例のとりまとめと今後の課題—、用水と廃水, 33, 725-736, 1991.
- 4) 茨城県、つくば市、住宅・都市整備公団茨城地域支社、(財)リバーフロント整備センター：常磐新線沿線地区水環境システム整備計画調査概要版, p.35, 1997.
- 5) 吉谷純一、木内豪、賈仰 文、倪广 恒、戸嶋光映：谷田川流域における水循環に関する研究 (1)、土木研究所資料第3782号, 2001.
- 6) Jia, Y., Ni, G., Kawahara, Y., and Suetsugi, T.: Development of WEP model and its application to an urban watershed, Hydrological Processes, 15, 2175-2194, 2001.
- 7) 木内 豪、賈仰 文、戸嶋光映、吉谷純一、倪广 恒：農地と都市が混在する流域における WEP

- MODELを用いた水循環解析, 水工学論文集, 46, 283-288, 2002.
- 8) 農林水産省統計情報部編：2000年世界農林業センサス第1巻茨城県統計書(農業編), 2001.
- 9) 建設省国土地理院：細密数値地図(第五期, 1994年), 1998.
- 10) 農林水産省統計情報部編：農林水産関係市町村別データ(年産), 2002; 2003; 2004.
- 11) 茨城県農業総合センター：茨城県栽培基準, 2004.
- 12) 農林水産省統計情報部編：青果物産地別卸売統計, 2002; 2003; 2004.
- 13) 科学技術庁資源調査会編：五訂日本食品標準成分表, 2000.
- 14) Yatazawa, M.: Agro-ecosystems in Japan. In: M. J. Frissel eds., Cycling of mineral nutrients in agricultural ecosystems, p.167-179, 1978.
- 15) 農山漁村文化協会：農業技術大系土壌施肥編, 2002.
- 16) Birkinshaw, S. J. and Ewen, J.: Nitrogen transformation component for SHETRAN catchment nitrate transport modeling, Journal of Hydrology, 230, 1-17, 2000.

飯泉佳子*



独立行政法人土木研究所ユネスコセンター設立推進本部水文チーム専門研究員、農博
Dr. Yoshiko IIZUMI

木内 豪**



国立大学法人福島大学共生システム理工学類(前 水理水文チーム主任研究員)、工博
Dr. Tsuyoshi KINOUCI

深見和彦***



独立行政法人土木研究所ユネスコセンター設立推進本部水文チーム上席研究員
Kazuhiko FUKAMI