

分布物理型モデルを用いた霞ヶ浦における 水循環と溶存態窒素の挙動解析

ANALYSIS ON BEHAVIORS OF WATER CYCLE AND DISSOLVED NITROGEN
IN KASUMIGAURA WATERSHED BY DISTRIBUTED PHYSICAL MODEL

リーブーンホン¹・木内 豪²・石川 忠晴³・黎嘉韻⁴

Boon-hon LEE, Tsuyoshi KINOCHI, Tadaharu ISHIKAWA and Jia-yun LI

¹学生会員 学士 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 (〒226-8852 横浜市緑区長津田町4259)

²正会員 工博 東京工業大学大学院准教授 総合理工学研究科 (〒226-8852 横浜市緑区長津田町4259)

³正会員 工博 東京工業大学大学院教授 総合理工学研究科 (〒226-8852 横浜市緑区長津田町4259)

⁴学生会員 修士 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 (〒226-8852 横浜市緑区長津田町4259)

There is a need to study water and nutrient transport system of a watershed in order to find effective measurements to reduce amount of non point source pollutant loads. Our research uses WEP model to simulate water and nutrient transport system of Koise watershed. Data of land covers, meteorology, rivers' properties, fertilizer input, nitrate concentration in rainfall and others of Koise watershed was processed as inputs to WEP model. Hydrograph and inorganic nitrogen cycle of year 2007 were simulated. Simulation result pattern of year 2007 agrees well with occasional observed data and estimation from ANN model. Year 2008 hydrograph was simulated by the same set of parameter for verification purpose. High reproducibility rate of 0.98 and 0.91 is achieved. Sensitivity of uncertain parameters was analyzed in search of better parameter set to reduce simulation error. Discharge amount of pollutant loads is found to be hugely influenced by fertilizer input, nitrate concentration in rainfall and underground water.

Key Words: WEP model; Hydrograph; nutrient transport cycle; ANN model; parameter sensitivity

1. はじめに

霞ヶ浦の水質は高度経済成長時代に次第に悪化し、その後の様々な対策で一旦改善の兆しを見せたが、近年はCOD・全窒素が緩やかな上昇傾向、全リンは高止まっている。湖の流入河川では、北浦に流入する銚田川・巴川の窒素濃度の上昇が顕著である他、西浦に流入する恋瀬川等でも上昇傾向が見られる。

流域での点源汚濁負荷対策は下水道整備等により進展してきたが、大きく影響すると言われる農地等面源¹⁾からの汚濁負荷は様々な経路(表流水, 地下水等)を經由して流出するため、その実態把握に基づく効果的な対策が必要とされる。例えば、農地では生産性向上のため人工的な窒素肥料が大量に使用され、流域における地下水の硝酸汚染や水系の窒素富化の一因だとされている。他方、筑波山の窒素飽和現象に垣間見られるように大気由来の沈着物による栄養塩負荷の増大が危惧される²⁾。そこで、本研究では窒素に着目し、流域の水循環と溶存態窒素の挙動を分布物理型モデルにより定量化し、流域の多様な窒素負荷源が河川水質に及ぼす影響を評価することを最

終的な目的とする。これまでもモデルによる解析事例はあるが^{3) 4)}、本研究では可能な限り物理現象に基づいた解析を試みるとともに、モデルの検証に窒素濃度の時系列情報を作成し用いている点に特徴がある。

2. 研究対象の概要

霞ヶ浦の流入河川の一つである恋瀬川流域(面積: 222.2 km², 人口: 69,279人)を対象にモデルを適用した。比較に用いた水質は過去数年間にわたり恋瀬川府中橋地点で測定されてきた観測値に基づく(図-1)。

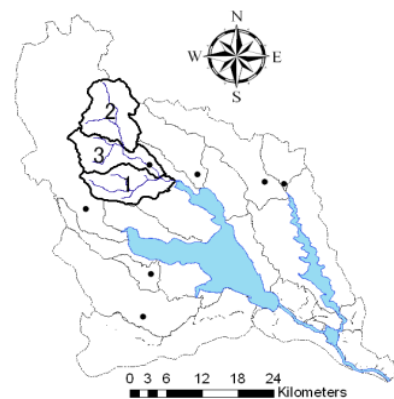


図-1 霞ヶ浦流域の恋瀬川(実線)。黒点は水質観測地点。

国土数値情報によると本流域の土地利用は水田19.9%、畑地23.4%、森林39.3%、荒地1.7%、建物用地9.7%、幹線交通地0.6%、その他の用地2.1%、河川1.3%とゴルフ場2.0%となっている(図-2)。水田と畑地・樹園地が4割を超え、農業が主産業のため面源負荷が多いと考えられる。流域内における水の流下方向(図-3)は250mメッシュ標高データから算出した。

3. WEPモデルの適用

(1) 水循環解析

本研究では分布物理型の水循環モデル(WEPモデル: Water and Energy transfer Process Model⁵⁾)を用いて解析した。このモデルは流域を多数の格子に分割し、格子間の水・物質・エネルギーの循環・輸送を素過程に基づき計算する(図-4)。また、水田における人為的灌漑排水や水管理も考慮している⁶⁾。他のモデルと比べて、土地利用の不均質性や地表面過程を詳細に解析できる。任意の地点の解析結果を出力できる利点もある。

対象流域に関する主な入力データは表-1に示した。これらの情報は、必要に応じてArcGISを用いてメッシュデータに変換し、WEPモデルに入力した。各格子のメッシュサイズは500m×500mに設定した。解析期間内の時間ごとの降雨、風速、日照時間、気温と相対湿度の空間分布はティーンセン分割により定めた。土地利用情報を水域、裸地、丈の低い草地、農耕地と不透透層に再分類し、解析メッシュ内に占める割合を算出してモデルに適応した。水田では、代掻き、田植えや中干しの期間における灌漑量変化の実績データを用いた。表層土壌は関東ローム、沖積土、水田土壌及び基盤岩類に分類し、既往研究の土壌パラメータに基づき透水係数、間隙率と層厚を設定した⁷⁾。流域内の河川は合計65ノードに分割した。河川の断面は全て台形と仮定し、川幅を衛星写真から算出した。マンニングの粗度係数と河床の透水係数・厚さはそれぞれ0.0035、1.00E-06m/s、1.0mを与えた。

(2) 溶存態窒素の解析

ここで用いる溶存態窒素モデルは茨城県の牛久沼流域における溶存態窒素循環解析を行うために開発されたもの⁸⁾を用いたが、変更された解析条件は表-2にまとめた。溶存態窒素にはアンモニア態窒素、亜硝酸態窒素、硝酸態窒素があり、酸化状態では硝化によってアンモニア態窒素が亜硝酸態窒素を経て硝酸態窒素へと変化するが、本モデルではこれらの区別は行わず溶存態窒素として一括して扱っている。農地や果樹地では、施肥及び作物吸収の結果として、栄養塩が表層土壌中に一部残留するとともに、溶脱による土壌から地下水への移動や表面流による河川への流出が発生することからモデルではこれらの過程を考慮している(図-5)⁹⁾。

表-1 主な入力データ

データ項目	データソース
流域界・河道	国土数値情報
土地利用	国土数値情報(1/10細分区画,2006)
人口	地域メッシュ統計(12年国勢調査)
利水情報	水資源機構・霞ヶ浦用水管理所
気温・風速・日照時間	AMeDAS(計3地点)
雨量	国土交通省, AMeDAS(計7地点)
相対湿度	管区气象台(計3地点)
下水道整備域	茨城県霞ヶ浦流域下水道事務所

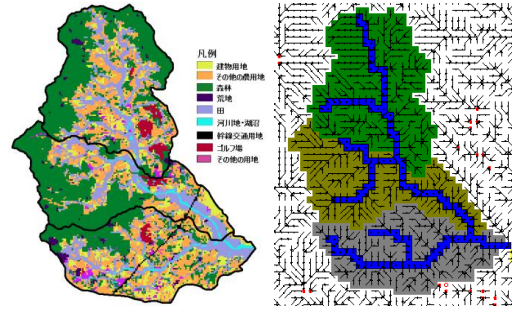


図-2 土地利用図

図-3 落水線マップ

表-2 水質モデルにおける各種条件の設定内容

項目	内容
地下水質の初期条件	地下水の溶存態窒素濃度は全域で一定値3.0mgN/lを与えた。
降水の水質	環境省の酸性雨対策調査における公開情報に基づき、月別の湿性沈着量と降水量から月別の降水中のNO3-NとNH4-Nの平均濃度を求め、用いた。
雑排水の水質	下水道未整備地域においては、雑排水の溶存態窒素濃度を5.0mgN/lの一定値と与えた。
霞ヶ浦用水の水質	霞ヶ浦用水を利用した灌漑水質は、霞ヶ浦用水管理所の公開資料に基づく概算値として、1.0mgN/lの一定値と与えた。
施肥及び作物吸収	飯泉ら(2005)の方法に基づき、恋瀬川流域内の旧市町村別施肥による窒素投入量及び作物による窒素吸収量を求めてモデルに入力した。

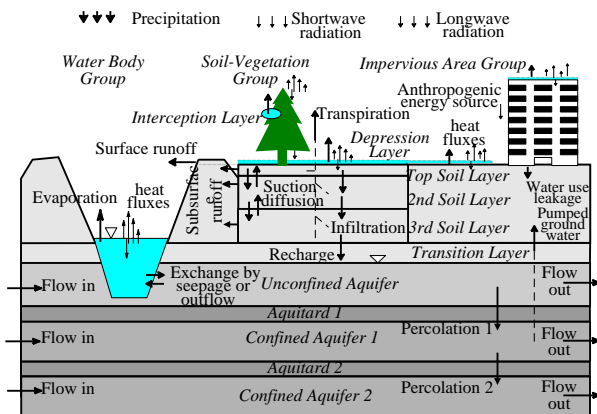


図-4 河川流域における水・熱輸送現象

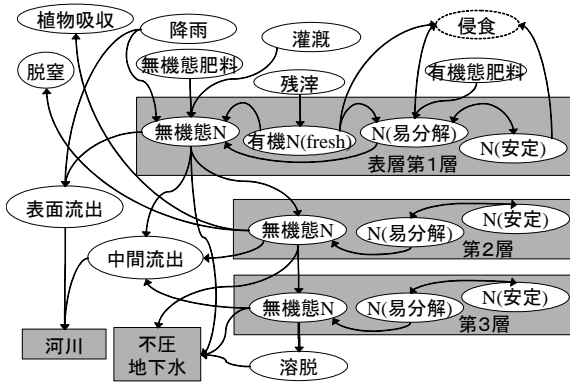


図-5 農地における窒素循環のモデル化

4. 解析結果

(1) 水循環解析結果

2007/1/1 01:00から2007/12/31 24:00までの水循環解析を行い、年間を通じて実測値を再現できるようにパラメータのキャリブレーションを行った。解析結果を図-6に示す。2007年の流量でキャリブレーションしたパラメータセットを用いて、2008年におけるモデルの再現性を確認した(図-9)。それぞれの年の洪水時ハイドグラフを図-7, 8, 10, 11に示す。洪水時のピーク流量もそれぞれの年で実測値と0.98, 0.91の高い相関係数であった(図-12)。土地利用が不均一で、灌漑や排水における人為的影響も大きいと考えられるが、以上により本モデルを恋瀬川流域にも良好に適用できることが確認できた。また、水収支で整理して見ると、地下水流出と中間流出が流出量の80.8%を占めており、これらが年間の河川流量に大きな影響を及ぼしていることがわかる(図-13)。

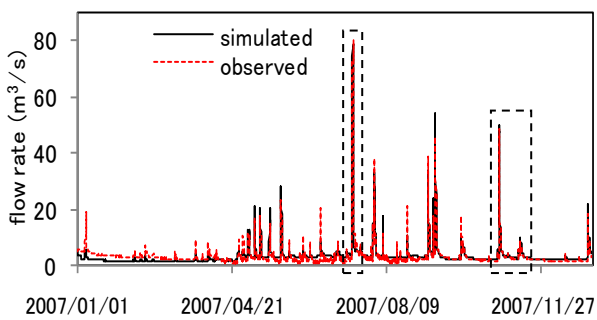


図-6 2007年の水循環解析結果

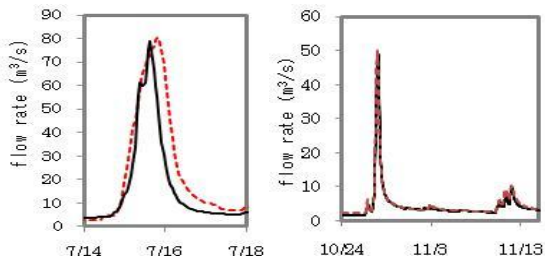


図-7 洪水時のグラフ① 図-8 洪水時のグラフ②

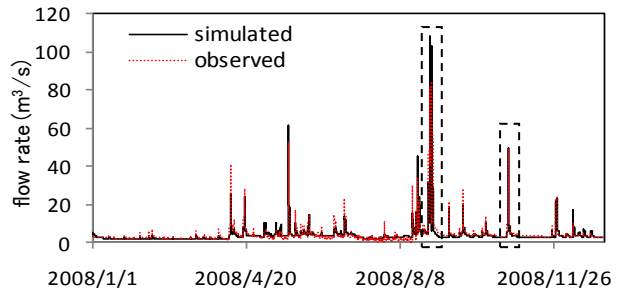


図-9 2008年の水循環解析結果

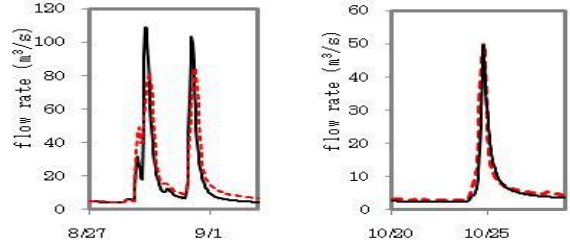


図-10 洪水時のグラフ③ 図-11 洪水時のグラフ④

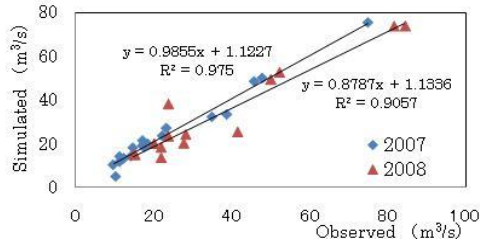


図-12 洪水時における実測値と再現値との比較

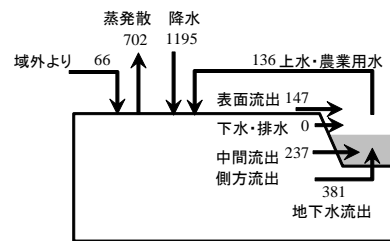


図-13 恋瀬川における2007年の水収支

(2) 溶存態窒素の解析結果

水循環の再現性を確認した上で、WEPモデルと組み合わせた水質モデルを用いて溶存態窒素の循環解析を行った。非灌漑期には溶存態窒素の濃度が高く、灌漑期には低下するという挙動がうまく再現できているとともに、洪水時の濃度変化ではイベントごとに異なる特徴を示した(図-14)。また、恋瀬川府中橋より上流の集水域を対象に年間の窒素収支を整理したところ、降雨からの窒素流入量が施肥による正味の投入量(=投入-吸収)よりも大きいことがわかった(図-15)。

この時系列の解析結果は平常時・洪水時の実測結果及びニューラルネットワークモデル(ANN)¹⁰⁾を用いて別途推定された溶存態窒素の時系列情報とも類似であった(図-14)。ただし、ANNモデルではNH₄-Nを考慮していないが、実測では考慮している。実測のNH₄-N濃度は溶存態窒素に対して灌漑期7.6%と非灌漑期4.6%であった。

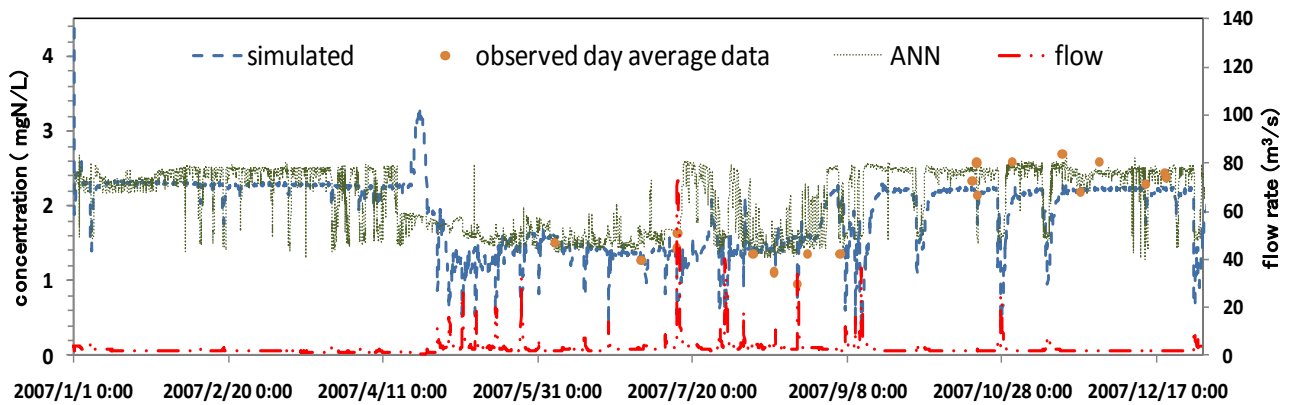


図-14 恋瀬川における2007年の溶存態窒素の循環解析結果

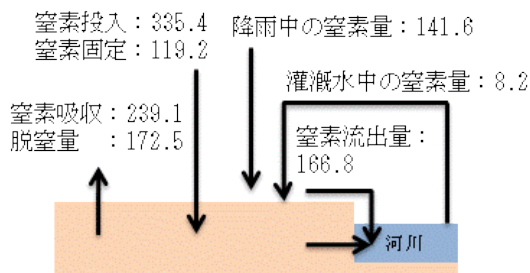


図-15 恋瀬川における2007年の窒素収支 (単位はt-N/year)

流域からの溶存態窒素の負荷流出量の大小には、施肥量の他に地下水濃度や降雨中の窒素濃度の影響、田面水位の管理も大きく影響する一方、これらの値や計算上の設定には不確実な要素も含まれている（例えば、流域内1地点の降雨水質情報を用いている）ことから、より良い解析結果を得るために、いくつかのパラメータの感度に関する分析を以下で行った。

5. 不確実なパラメータの感度分析

本モデルには多数のパラメータ^{7), 11)}が用いられているため、それらの内で5つのパラメータ（以下の(1)～(5)）を対象に感度分析を行った。感度分析では、複数個のパラメータのうち、ただ1つのパラメータの値を変えさせ、その影響を把握した。

(1) 地下水中の溶存態窒素濃度（地下水濃度）

不確実で複雑な地下水中の濃度状況に加え、現地観測データも不足している。しかし、前節での計算では地下水濃度を恋瀬川流域全体で3.0mg/1と仮定していることから、この地下水濃度の初期値が与える影響を評価するため、値を1.0mg/1 (-66.7%) から5.0mg/1 (+66.7%) まで変動させて、その感度を確認した。

(2) 脱窒係数

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。本モデルでは、不圧地下水の河川流出において、式1のように表現する⁹⁾。

$$NO3_{GW} = K \times RNO3_{GW} \quad (1)$$

ここで、 $RNO3_{GW}$ ：流出する硝酸態窒素量、 $NO3_{GW}$ ：実際に流出する硝酸態窒素量、 K ：脱窒係数である。

脱窒係数の値は実測等に基づいているわけではなく、初期解析では全流域一様で0.8と仮定していた。そこで、脱窒係数 K を0.2から1.0まで変動させ、解析結果に与える影響を検討した。

(3) 降雨中の溶存態窒素濃度

前節では降雨中の溶存態窒素濃度（降雨中濃度）を月別の平均データに基づいて解析したが、実際には雨ごとに濃度が異なる。また、筑波山気象観測ステーションで観測した値が流域全体にも適用できると仮定していた。

このような降雨中濃度の不確実性が汚濁負荷の流出量にどの程度の影響を与えるのかを理解するため、元のデータに対して-50%から+80%の範囲で変化させ、降雨中濃度の感度分析を行った。

(4) 灌漑用水の溶存態窒素濃度（灌漑水濃度）

本解析では、農業用地に配分される灌漑用水の溶存態窒素濃度が霞ヶ浦の全窒素濃度に等しく、1.0mg/1と仮定した（灌漑期間は4月15日～8月31日と設定）。

しかしながら、これは頻度の低い分析結果に基づく設定であるとともに有機態窒素濃度も含むことから、灌漑用水の溶存態窒素濃度にも不確実性が内在する。そこで、本検討では濃度を1.0mg/1から0.2mg/1まで減少させて、感度を確認した。

(5) 表面流出水中の溶存態窒素濃度

降水中に含まれる溶存態窒素が表層土壌水中の溶存態窒素と混合したり、吸着成分を溶存させて河川に流出したりする現象は、現状、本モデルでは次式により考慮している⁹⁾。

$$C1ROF = \alpha CRA + CIT(1 - \alpha) \quad (2)$$

ここで、 CRA : 降雨中の溶存態窒素濃度、 CIT : 土の第一層に含まれる窒素濃度、 $C1ROF$: 流出水中の窒素濃度である。 α は混合度を表し、小さければ第一層中に存在する窒素の流出の影響が強く現れること意味する。 α のデフォルト値は1.0で、それに対し-80%まで変動させて解析した。

(6) 不確実なパラメータの感度分析結果

不確実なパラメータの変動による影響を評価するため、前節で示した初期設定におけるパラメータとその時の解析濃度に対する変化率を用いて整理した。なお、月毎の最終日23時と洪水時における恋瀬川から霞ヶ浦に流出する溶存態窒素濃度を比較した。

図-16に示すように、月毎の最終日23時の比較では地下水濃度と脱窒係数が他の要素に比べて濃度に強く影響していることがわかる。地下水濃度と脱窒係数の単位変化は解析結果にそれぞれ0.86と0.78の変化をもたらしていた。このことは、地下水濃度と脱窒係数が平常時の溶存態窒素の排出量に大きな影響を与えていることを意味しており、現実にもこれらの影響が相対的に大きい可能性を示唆している。

一方、洪水時の比較では降雨中濃度と窒素混合度 α の変化率は濃度の変化率とそれぞれ強い比例と反比例の関係のみせた。2007年5月25日に起きた洪水を例にとって図-17に示した。降雨中濃度と窒素混合度における変化率の近似直線の傾きはそれぞれ0.84と-0.68であった。このことから、洪水時における汚濁負荷流出量の予測・評価にあたっては、降雨中濃度と表面流出の仕組みをよりよく理解してモデルに反映させることが重要であることを示唆する。灌漑水濃度の変動は平常時、洪水時のいずれの場合も影響が非常に小さいことがわかった。

(7) 誤差の分析

不確実なパラメータによって生じる解析誤差 (ε) を以下の式3で定義する。

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum(\beta - \bar{\beta})^2}{n}} \quad (3)$$

ここで、 β : 再現値、 $\bar{\beta}$: 観測値、 n : 観測データの数である。

5つの不確実なパラメータについて解析計算を行ったところ、地下水濃度、脱窒係数、灌漑用水、降雨中濃度が、それぞれ10%、10%、-50%、50%の変化率で最小の誤差をみせた (図-18参照)。一方、窒素混合度については初期設定値のときに誤差が一番小さくなる結果であった。また、上記で述べた各パラメータの最適な変化率を組み合わせると、初期設定時の誤差よりも0.01大きく、式3で得られる誤差の値が0.54であった。

個々の最適パラメータが必ずしも全体の最適パラメータとならないことから、様々なパラメータの組み合わせで再解析したところ、地下水濃度と降雨中濃度を10%ずつで増加した時に、誤差が最も小さくなる結果であった。この時のパラメータセットを用いて解析した年間の濃度変動結果を図-19に示す。非灌漑時の濃度が初期設定に対して高くなっていることが明らかである。また、降雨時の濃度変化を見ると (図-20)、降雨に伴い濃度が低減する特徴は捉えられているが、実測データが不足しており、洪水ピーク時の大きな濃度低減については検証できなかった。

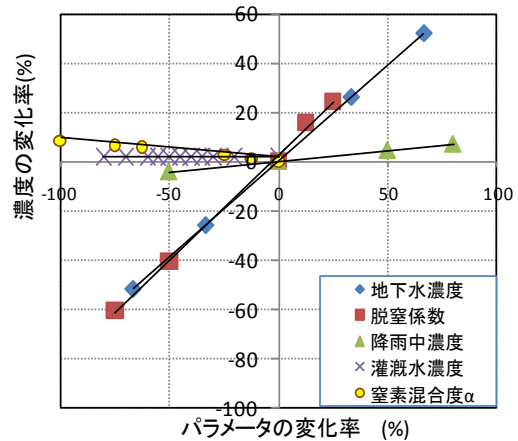


図-16 月毎の最終日における変化率の比較

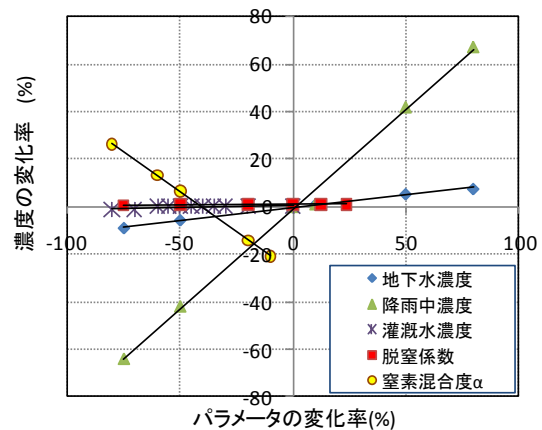


図-17 洪水時における変化率の比較

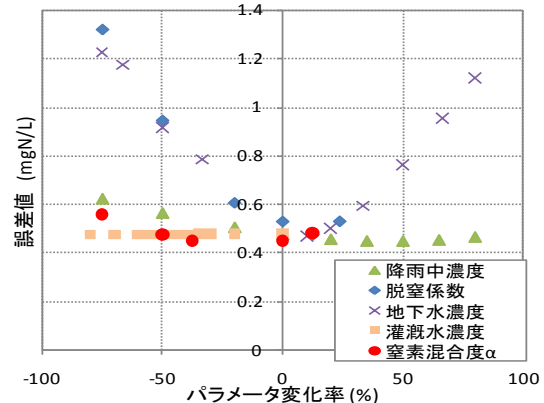


図-18 誤差値対パラメータ変化率

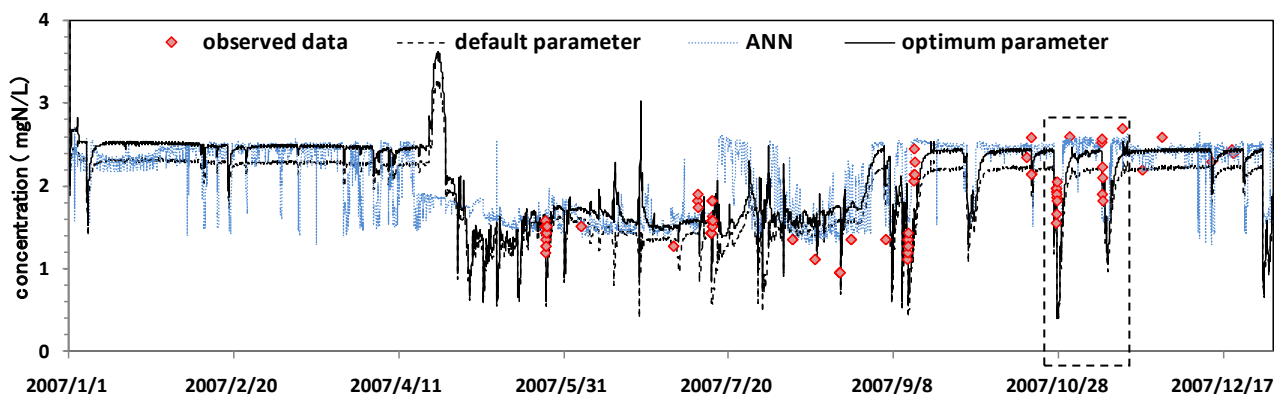


図-19 最適なパラメータセットで再現した恋瀬川における2007年の溶存態窒素の循環解析結果

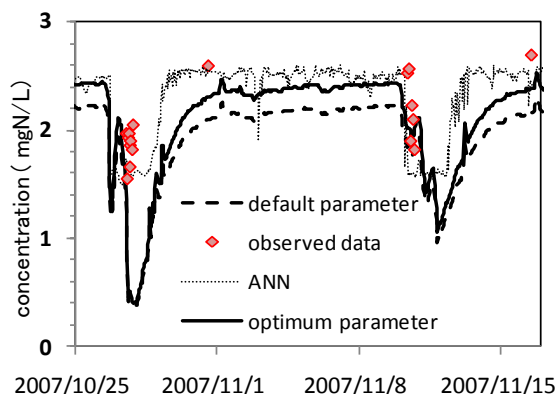


図-20 最適なパラメータセットで再現した洪水時の溶存態窒素の循環解析結果

々変動が大きな影響を及ぼすため、より現実的な設定条件を明らかにしていく必要がある。

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) 渡邊未来: 森林から窒素が流れ出す-筑波山の窒素飽和-, 国立環境研究所ニュースVol. 27 No. 5, 2008.
- 3) 辻倉裕喜, 安部和雄, 大八木豊, 田中伸治: 湖沼流域管理のための総合的な水循環・物質流動モデルの構築, 水工学論文集, 第47巻, 2003.
- 4) 北村立実: 霞ヶ浦流域モデルの構築と河川流域への適用, 茨城県霞ヶ浦環境科学センター年報 第3号 2007.
- 5) 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.
- 6) Jia, Y., Kinouchi, T. and Yoshitani, J.: Distributed hydrologic modeling in a partially urbanized agricultural watershed using water and energy transfer process model, *Journal of Hydrologic Eng., ASCE*, Vol. 10, No. 4, pp 253-263, 2005.
- 7) 建設技術研究所: 霞ヶ浦流出モデル構築検討業務報告書, H18.3.
- 8) 飯泉佳子・木内豪・深見和彦: 窒素を対象となる農地汚濁負荷量算出方法の提示と分布型モデルによる河川・地下水の水質解析, 土木技術資料 Vol. 47, No. 11, pp. 44-49, 2005.
- 9) 飯泉佳子・木内豪・深見和彦: 分布型モデルを用いた河川・地下水の水質解析, 河川技術論文集, 第12巻, 2006.
- 10) 善見憲二, 劉銘環, 石川忠晴: 光計測による河川汚濁負荷推定の効率化に関する基礎的研究, 河川技術論文集, Vol. 13, pp. 219-224, 2007.
- 11) Jia, Y., T. Kinouchi, J. Yoshitani, Distributed hydrologic modeling in a partially urbanized agricultural watershed using water and energy transfer process model, *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol.10, No.4, 253-263, 2005.

6. まとめ

不確実な要素の多い流域スケールにおける水・物質循環の特性解明と霞ヶ浦の水質改善に資することを目的として、分布物理型モデルを用いた恋瀬川流域の溶存態窒素の挙動解析を実施した。その結果、以下の点が明らかになった。

- (1) 恋瀬川流域の水循環解析にWEPモデルが有効であった。年間の水収支から、地下水流出と中間流出が河川流量に大きく影響していることを示した。
- (2) パラメータの感度分析結果より、地下水濃度が河川水中の溶存態窒素濃度に大きな影響を与えることがわかった。
- (3) 降雨中の溶存態窒素濃度は、通年では大した影響を及ぼさないが、洪水時の解析結果には非常に大きく影響する。降雨中濃度を50%増加させるとより実測に近い解析結果が得られた。このことは、乾性沈着も含めたより精度良い大気からの窒素供給を考慮しなければならないことを示唆する。
- (4) 不確実なパラメータによる組み合わせの感度分析結果から、地下水濃度と降雨中濃度を10%ずつ増加させた場合に、解析と観測の誤差が最小となった。
- (5) 地下水濃度、降雨中濃度と脱窒係数のパラメー

(2011. 5. 19受付)