

13.6 流域規模での水・物質循環支援モデルに関する研究（１）

研究予算：運営費交付金（治水勘定）

研究期間：平 18～平 22

担当チーム：水災害研究グループ（水文）

研究担当者：深見和彦、猪股広典、ラジャパク
セ ヘマンサ ラリト

【要旨】

本研究は、土木研究所で開発を進めてきた流域水循環解析モデルである WEP モデルを基盤として窒素、リンの物質循環モデルを導入することにより、流域内の窒素、リンの動態を定量的に把握する流域水・物質循環モデルを開発することを目的とする。平成 19 年度は、谷田川流域において平成 18 年度に行った窒素およびリンのプログラムコーディングの検証計算を行った。2001 年、2002 年を対象として計算を行った結果、窒素については良好な再現性が得られたが、リンについては良好な再現性が得られなかった。誤差の原因としては、リンの土壌吸着の過小評価や、SS とリンの関係がモデル化されていないことが原因と考えられ、今後改善する必要がある。

キーワード：WEP モデル、流域水・物質循環モデル、窒素・リン

1. はじめに

近年、河川や湖沼の水質浄化や栄養塩濃度の削減を目的として様々な対策が立案、実施されている。これらの対策は一定の効果を示すものの、さらなる水質改善へ向けての効率的な対策立案を行うにあたっては、流域からの汚濁負荷と対象水域の水質悪化との定量的な因果関係や土地利用・農業形態の変化等の影響を総合的に把握した上で適切な対策シナリオを検討する必要がある。

そこで本研究では、流域内の汚濁負荷の動態を土地利用や農業等の産業活動形態との関係を含めて定量的に把握することができる流域規模での水・物質循環モデルの開発を目的とした。ここでは、河川および河川が流入する湖沼や湾をはじめとする閉鎖性水域の富栄養化の判断基準となる重要な環境項目である窒素およびリンをモデル化の対象とした。流域規模の水・物質循環モデルとしては、ANSWERS^①、SHETRAN^②、LASCAM^③といったモデルが存在する。しかし、ANSWERSは短期の出水イベント単位の計算を目的としており、長期計算に適していない。また、SHETRANは詳細な窒素モデルを有しているがリンのモデル化が現時点で行われていない、LASCAMは時間単位での計算ができない、現時点で河川や地下水からの取水を評価することができないといった問題がある。

ここでは、土木研究所が開発してきた流域規模での物理的な水循環モデルである Water and Energy transfer

Process Model（WEPモデル）^④を基礎として、窒素、リンの流域規模モデリングモジュールをWEPモデルに組み込んで流域規模での水・物質循環モデルを開発することとした。これにより、長期での流域の物質収支および発生源ごとの汚濁負荷寄与度を定量的に把握できる。また、土地利用の影響をパラメータ値に反映させることができ、河川や地下水からの取水も考慮できるため、土地利用や営農形態の変化が流域の水質にどのような影響を与えるかを定量的に評価できるようになると期待される。

平成 19 年度は、平成 18 年度に開発した窒素およびリンの循環計算モジュールを組み込んだ新しい WEP モデルについて、谷田川流域における現地観測データを利用した検証を行った。

2. 物質循環モデルを組み込んだ WEP モデルについて

WEPモデル^④は土木研究所で開発されてきた流域水循環モデルであり、下記のような主な特徴を有している。

1. 流域をメッシュで表現するグリッド型の物理的分布定数型流域水循環モデル
2. 流域水循環の素過程の基礎方程式を解く物理的モデルであり、かつ、代表的な土地利用に特有な水循環素過程のモジュール（都市域・水田など）を準備していることから、複雑な土地利用・水利用のある流域に適用可能

3. 水循環に加え、鉛直一次元の熱輸送解析も可能
4. 土壌-植生-大気間での相互作用をモデル化しており、気象モデルとの連携が可能
5. 不飽和土壌水流れに対して一般化 **Green-Ampt** モデルを使用し、計算精度および計算の短縮化を図った。
6. 表面流出の追跡には、**Kinematic Wave** 法を用い、河道追跡には **Kinematic Wave** 法と **Dynamic Wave** 法の2種類から選択可能
7. 地下水帯水層は地質条件により多層に分け、各帯水層においては表層または上方帯水層からの涵養量、下方への浸透量、井戸の揚水量を考慮して、水平2次元 **Boussinesq** 方程式を用いて地下水流れを表現した。河川が存在するメッシュでは、地下水と河川水とのやり取りは両者の水位差に基づいて計算される。

1 メッシュの計算内では取り扱われる水・熱輸送過程、鉛直構造を図1に、平面構造を図2に示す。平成18年度は、この水循環計算モデルに対して、窒素及びリンの動態に関する計算モジュールを組み込んだ。窒素およびリンともに、それぞれ溶解態と懸濁態に分けてモデル化を行った。WEP モデルにおいては、土地利用は大きく水域、裸地・植生域、都市域等の不浸透域の3つに分けてモデル化が図られている。裸地・植生域はさらに丈の高い樹木と丈の低い草地および農地に分けられる。ここでは、土地利用に関しては、1)丈の高い樹木、2)丈の低い草地および農地、および3)不浸透域の3種類に分けて窒素とリンのモデル化をそれぞれ行った。地下への浸透や表面流出といった水の移動に関する物理現象については上述した通り物理的な式を用いて計算を行っているため、物質の移動についてもその水の移動に伴った移動をするように定式化を行った。河道における物質移動についても窒素、リンそれぞれについて定式化を行っており、1次元の移流分散方程式を用いて計算を行っている。

3. WEPモデルの谷田川流域への適用

3.1 谷田川流域について

谷田川流域（流域面積 166.7 km²、図 3）は茨城県の西部に位置し、本川である谷田川、蓮沼川、西谷田川、高岡川により形成されている。流域関係市町村としてつくば市、茎崎町、谷和原村、伊奈町、牛久市、龍ヶ崎市がある。このうち、つくば市は流域の約 70% を占め、次いで茎崎町が流域の 12% を占める。土地利用としては農地が中心であるが、国土数値情報（1976 年調査）と第五期細密数値情報（1994 年調査）

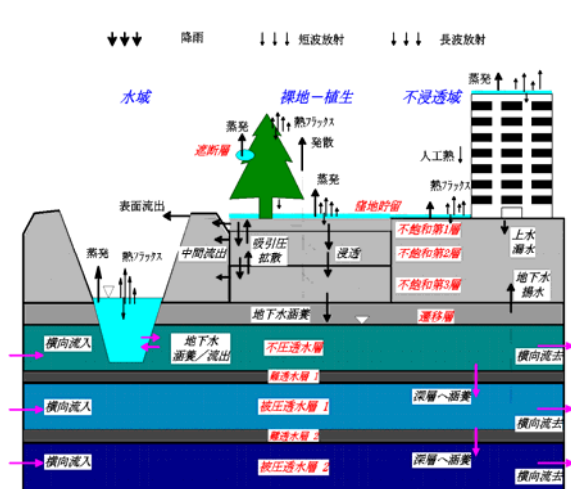


図1 水・熱輸送過程とモデルの鉛直構造

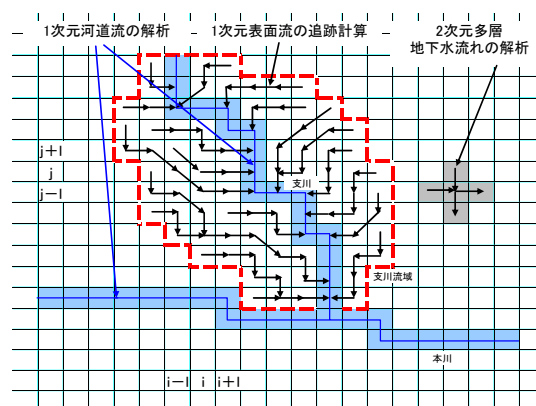


図2 モデルの平面構造

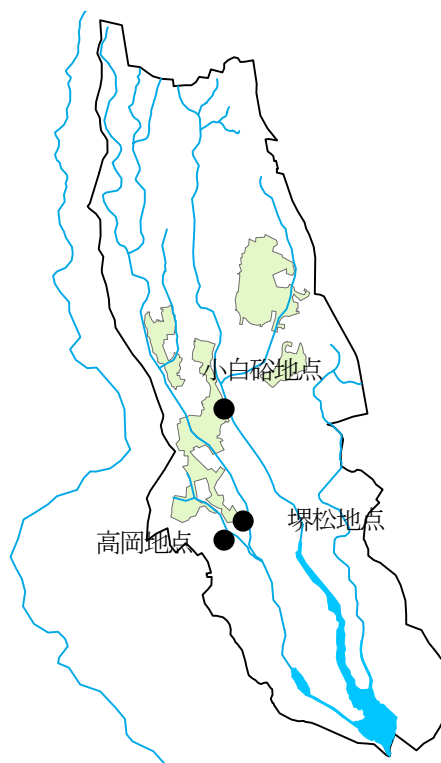


図3 谷田川流域

に基づく、1976年の市街地の流域内面積率は9%であったが1994年には30%になり、急激に市街化が進んでいる。さらに、つくばエクスプレスの沿線開発に伴って流域内の市街地率が今後も引き続いて増加することが予想される流域である。図3に示す谷田川の小白碓地点、西谷田川の堺松地点、高岡川の高岡地点において2001年より水位、流量観測および水質（水温、濁度、電気伝導度、pH、TN、TP、NH₄、NO₃、NO₂、PO₄、SS）の観測を行っている。

3.2 入力データについて

3.2.1 水循環計算モジュールの入力データ

窒素・リンの物質循環モデルを組み合わせたWEPモデルの水循環計算モジュールに必要な主な入力データおよび入力データ作成に用いたものを表1に示す。

表1 WEPモデルの水循環計算モジュールに必要な入力データおよび用いたデータ

	入力データ	用いたデータ
1	土地利用	細密数値情報（1994年版） ⁵⁾
2	標高	国土数値情報
3	降雨およびその他気象データ	アメダス（下妻地点、長峰地点）

3.2.2 物質循環計算モジュールの入力データ

谷田川流域の中で最も特徴的な土地利用は、都市化が進行する現在でも農地にあると言える。農地での施肥は河川水質に大きな影響を与えていると想定される。よって、物質循環部分の計算に必要な入力データとして農地における施肥による窒素およびリンの入力負荷量をIizumi et.al.⁶⁾の手法に基づいて計算した。計算手法について下で述べる。なお、谷田川流域内で使用された生活用水および工業用水は全て流域外において排出されるため、ここでは考慮しなかった。

農地における窒素、リン投入量の算出方法概要

a) 検討の概要

谷田川流域では流域50%程度を農地が占めていることから、施肥や窒素固定、収穫や脱窒といった農地における窒素の流入・流出を把握することが重要である（図4）。そこで、2001年および2002年を対象として農地における窒素およびリンの投入量（施肥、窒素固定によるもの）および消費量（作物吸収、脱窒）の時間的・空間的分布を算出した。ここで計算される投入量から消費

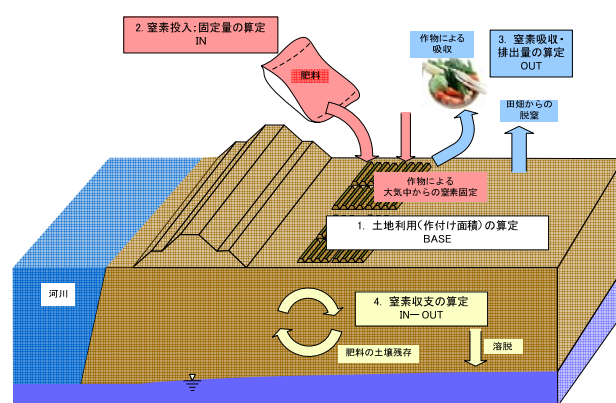


図4 農地における窒素収支概念図

量を引いたものがWEPモデルへの入力データとなる。

なお、当該地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⁷⁾に記載された旧町村を最小の単位とした。

b) 方法

①作付面積の算出

最初に、谷田川流域の流域面積と水田および畑地面積を細密数値地図（第五期、1994年）⁵⁾より求める。次に、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）⁷⁾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け比率を掛けて、それぞれの作物の作付面積を算出した。この時、きのこと類、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と、除外した。また、その他作物とは主に芝であった。その他野菜は農林水産関係市町村別データ（年産）⁸⁾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。

②施肥量の算出

作物ごとの窒素およびリン肥料投入量は茨城県の栽培基準⁹⁾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⁹⁾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¹⁰⁾）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。

③作物による窒素およびリン吸収量

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）⁸⁾ から求めた。この値を②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、リン量は、五訂日本食品標準成分表¹¹⁾に記載されているたんばく質量を係数で除して算出した。さらに、青果物産地別卸売統計¹⁰⁾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。

④窒素固定量（リンについては考慮しない。）

Yatazawa (1978) より、下記のように設定した。¹²⁾

- ・ 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

⑤脱窒量（リンについては考慮しない。）

水田における脱窒量を 40 kg/ha/yr¹³⁾ とし、畑地の脱窒量を 30 kg/ha/yr¹³⁾ と設定した。

c) 結果

図5および図6に各行政区で投入および消費された窒素およびリンの合計値を示す。図5および図6の計算から、窒素投入量の68%、リン投入量の46%が作物によって吸収されるが、残りの32%および54%については地下に溶脱または土壌に蓄積されることが分かった。この残りの量がWEPモデルへの入力値となる。

3.2.3 WEP モデルシミュレーション結果

水循環シミュレーションについては、木内ら¹⁴⁾によって既に行われており、十分な再現性が得られている。本検討では水循環部分の計算については木内らが設定したパラメータをそのまま用いた上で、平成18年度に開発した窒素・リン動態モジュールを追加した新しいWEPモデルによる水・物質循環のシミュレーションを谷田川流域を対象として行った。対象期間は、2001年から2002

年で時間ステップは1時間である。谷田川の小白裕地点（図3）における全窒素、溶存態窒素、全リンおよび溶存態リンの計算結果を図7から図11に示す。全窒素および溶存態窒素のシミュレーション結果については、概ね観測値と計算値は計算期間内の変動について良い一致を示した。その一方で、リンについては計算期間内の変動傾向についてあまり高い再現性を得られていないことがわかる。

3.2.4 考察

窒素に関しては、洪水期間の再現性等の確認が必要ではあるが、全窒素、溶存態窒素のモデル化を適切に行うことができたと考えられる。但し、本研究プロジェクトでは、発生源ごとに窒素・リンの栄養塩類の流出過程を追跡する手法と、土地利用や営農形態の変化等の定量的影響やそれらの相互関係を含めて総合的に把握・分析できるツールを開発することを目的としているため、本来的には、人工排水に多く含まれるアンモニア性窒素や亜硝酸性窒素、硝酸性窒素も適切にモデル化を行う必要が

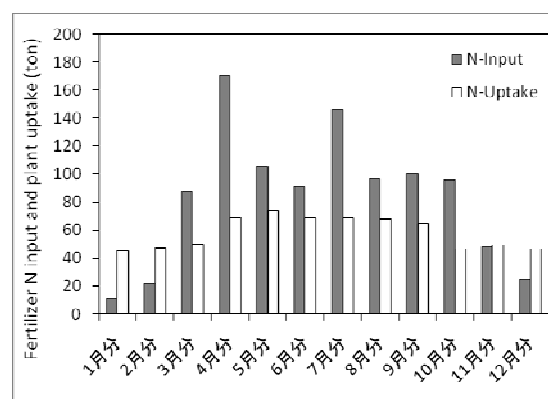


図5 各行政区で投入された窒素量と消費された窒素量の月別合計値（2001年）

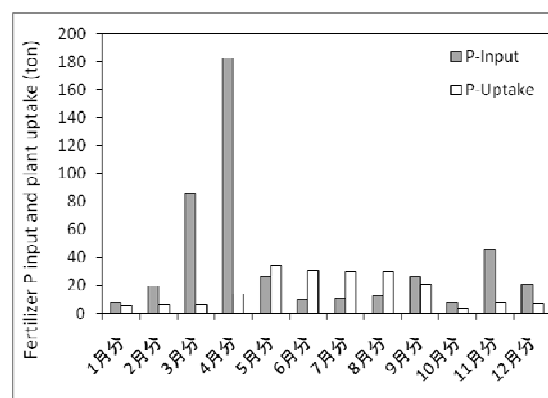


図6 各行政区で投入されたリン量と消費されたリン量の月別合計値（2001年）

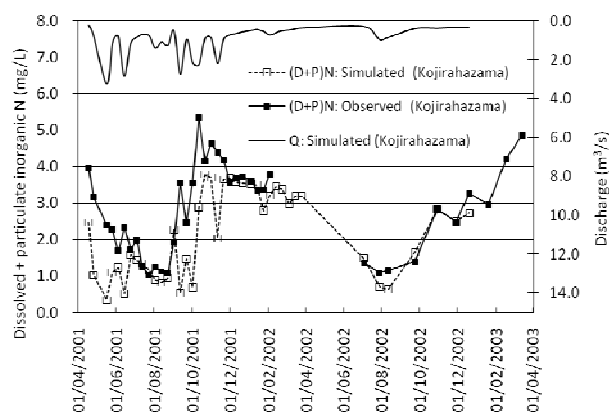


図7 全窒素シミュレーション結果

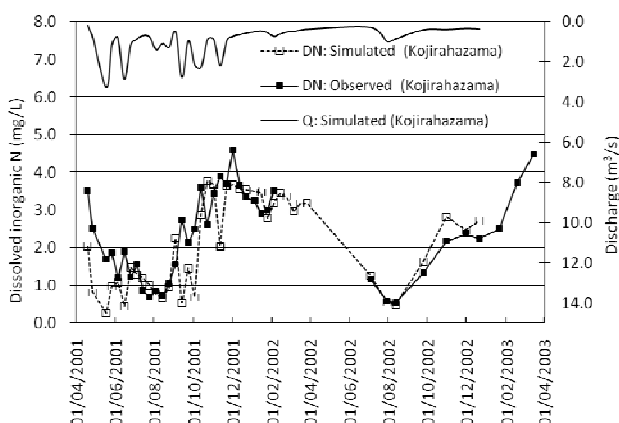


図8 溶存態窒素シミュレーション結果

あると考えており、その点については今後の課題である。

一方、リンについては、現時点で観測値との再現性が確保されていないため、出水時や水文素過程毎の計算結果を確認しながら不整合を引き起こす主因となったプロセスを明確化し、モジュールの改良を図る必要がある。具体的には、リンの土壌吸着を過小評価することによる溶存態リンの低水時の過大評価、SSと吸着したリンの流出をモデル化していないことによる全リンの計算結果の不整合、等の可能性を考慮して、リン動態モデルの改良を行う必要がある。

また、流域への負荷量として、農地の施肥による窒素およびリンのみを考慮したが、この農地への入力負荷量の再精査に加えて、市街地からの雨水排水や雨水の水質が河川水質に与える影響も考慮する必要がある。

参考文献

- 1) F. Bouraoui, et.al., ANSWERS: A nonpoint source pollution model for water, sediment, pollutant and nutrient losses, Mathematical Models of Small

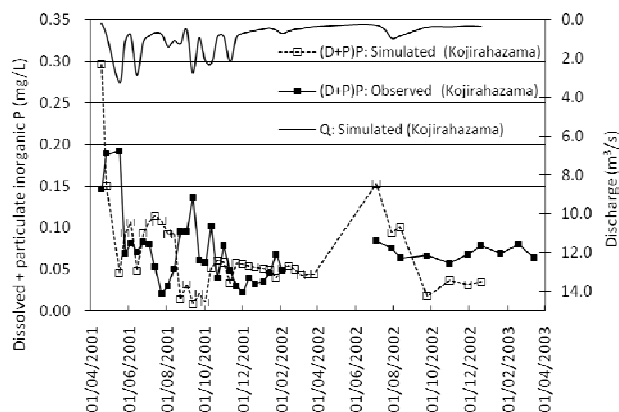


図9 全リンシミュレーション結果

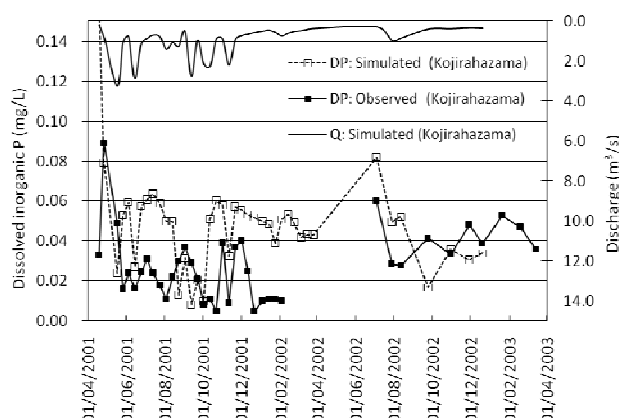


図10 溶存態リンシミュレーション結果

Watershed Hydrology and Applications, pp.833-882, Water Resources Publications, LLC, 2002.

- 2) S. J. Birkinshaw and J. Ewen, Nitrogen transformation component for SHETRAN catchment nitrate transport modeling, Journal of Hydrology, pp.1-17, 230, 2000.
- 3) N.R. Viney, M. Sivapalan, D. Deeley, A conceptual model of nutrient mobilisation and transport applicable at large catchment scales, Journal of Hydrology, pp.23-44, 240, 2000.
- 4) Yangwen Jia, et.al., Development of WEP model and its application to an urban watershed, Hydrological Processes, pp.2175-2194, 15, 2001.
- 5) 建設省国土地理院: 細密数値地図 (第五期, 1994 年), 1998
- 6) Iizumi, Y., Kinouchi, T. and Fukami, K.: Calculation program for estimation of nitrogen in agricultural land. Spring Meeting of The Korean Society of Limnology, Korea, March 2007.
- 7) 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
- 8) 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

- 9) 茨城県農業総合センター：茨城県栽培基準、2004
- 10) 農林水産省統計情報部編：青果物山地別卸売統計、2002, 2003, 2004
- 11) 科学技術庁資源調査会編：五訂日本食品標準成分表、2000
- 12) Yatazawa, M.: Agro-ecosystems in Japan, In: M. J. Frissel eds, Cycling of mineral nutrients in agricultural ecosystems, pp.167-179, 1978
- 13) 農山漁村文化協会：農業技術大系 土壌施肥編、2002
- 14) 木内、賈、戸嶋、吉谷、倪：農地と年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、第 46 巻、pp.283-288, 2002

STUDY ON WATER AND NUTRIENT CIRCULATION MODEL ON BASIN SCALE (1)

Abstract:

The purpose of this study is to incorporate nitrogen and phosphorus models to WEP model which is a physically-based basin-wide hydrologic model. In FY2007, verification of the model with observed data was done. The simulation result of total and dissolved nitrogen showed good agreement with the observation. However, that of total and dissolved phosphorous didn't show good agreement. It seems that absorption of phosphorous by soil and relationship between phosphorous and SS should be modeled properly to improve the accuracy.

Key Words: WEP model, Water and nutrient model, Nitrate, Phosphorus