

13.5 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、宮本守、

Lalith Hemanthe Rajapakse

【要旨】

本研究の目的は、流域内の栄養塩（窒素、リン）の動態を定量的に明らかにする流域水・物質循環モデルを開発することである。本研究では、これまで土木研究所で開発を進めてきた WEP モデルを基盤として、窒素、リンの物質循環過程をそれぞれ溶存態と懸濁態に分類して新たに導入した。その中で懸濁態（特にリン）の動態のシミュレーション精度の向上を目的として、流域規模の土砂動態モデルも WEP モデルに導入した。開発したモデルは、茨城県谷田川流域と千葉県印旛沼・高崎川流域に適用した。なお、高崎川流域では、水質を含む水環境・水生生態系の保全・再生が社会的課題となっており、より詳細な汚濁負荷流出の挙動を明らかにするため、出水イベントスケールで再現性の検証を行った。さらに、開発したモデルに対するガイドラインとなる「WEP モデル解説書(案)」を作成した。

キーワード：WEP モデル、流域規模水・物質循環モデル、リン、窒素、土砂動態モデル

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や汚濁物質の供給源に対する抜本的な対策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・営農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。

本研究では、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）¹⁾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ようになる。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。

さらに、雨天時に窒素・リンといった栄養塩類が特に大量に流出することが水質チームにおける検討をはじめとして明らかになってきたことから、晴天時に重要な溶存態だけではなく、雨天時に多くが流出する懸濁態についても分けてモデル化を行うこととした。その懸濁態（特にリン）モデルのシミュレーション精度の向上を目的として土砂動態モデルについても併せて WEP モデルに導入し、谷田川流域と印旛沼・高崎川流域に対して適用した。特に高崎川流域においては、出水イベントスケールでの詳細な汚濁負荷流出の挙動に着目し、降雨出水時の再現性を検証した。

また、これらの WEP モデルの改良に対し、WEP モデルの汎用性を高めるガイドラインとなる「WEP モデル解説書(案)」を作成した。

2. WEP モデルの改良

WEP モデルに物質循環過程を導入し、土砂動態モデルを付加することでリン動態モデルのシミュレーション結果の向上に努めた。本研究で行った WEP モデルの改良内容を以下に記す。詳細については参考文献 1)から 4)に記されている。

2.1 窒素およびリンの動態モジュールの開発

本研究を開始する前段階の旧 WEP モデルでは、Jia et al.¹⁾によって開発された水循環モデルを基盤として、農地におけるアンモニア態窒素(NH₄-N)、亜硝酸態窒素(NO₂-N)、硝酸態窒素(NO₃-N)をまとめて無機態窒素として考慮していた。本研究では、懸濁態成分の負荷流出が大きな影響を及ぼす出水時も含めて再現することを目標とし、図-1 に示したように窒素を溶存態と懸濁態に区別して考慮した。一方、リン動態の解析モデルに関しても、窒素と同様に溶存態と懸濁態を区別した上で図-2 に示した形態で WEP モデルに導入した。これらの定式化の詳細については、平成 18 年度の重点プロジェクト研究報告書を参照いただきたい。負荷供給源については、家庭排水、工業系排水、事業所系排水、畜産系排水、観光排水、下水処理場をポイントソースからの供給として境界条件で与え、ノンポイントソースからの供給は降雨、山林、農地、市街地に分けて考慮した。市街地と農地からの地表面堆積物質の流出に関しては、無降雨時の表面堆積負荷増加量 ΔS と限界掃流量 Q_c および降雨濃度 C を与えて、限界掃流量を超えた時点で無降雨時に堆積した懸濁態物質の流出が発生すると仮定して次式により算出した。

$$L = (L_u + L_r) \cdot A \cdot r \quad (1)$$

$$L_u = k \cdot S^m \cdot q^{n-1} \cdot (q - q_c) \quad (2)$$

$$L_r = C \cdot q \quad (3)$$

$$\frac{dS}{dt} = \Delta S - \int L_u \quad (4) \text{ここに、} L :$$

発生負荷量(g/s)、 L_u ：表面流出量(g/m²/s)、 L_r ：降雨による負荷量(g/m²/s)、 A ：メッシュ面積(m²)、 r ：市街地および農地面積の割合(%)、 S ：表面堆積負荷量(g/s)、 q ：単位面積当たりの表面流出量(m/s)、 q_c ：限界掃流量(m/s)、 k, m, n ：係数、 C ：降雨中の物質濃度(mg/L)である。

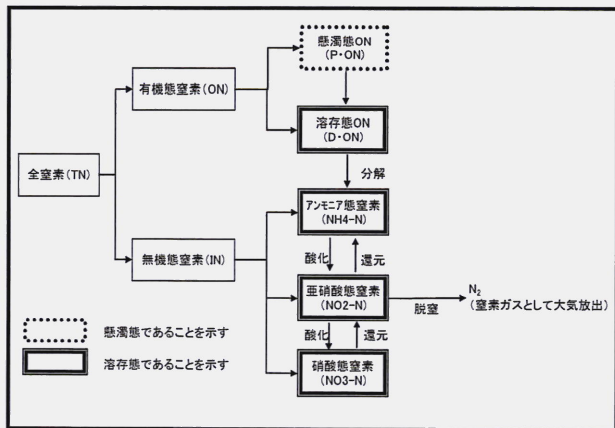


図-1 モデル化した窒素の形態

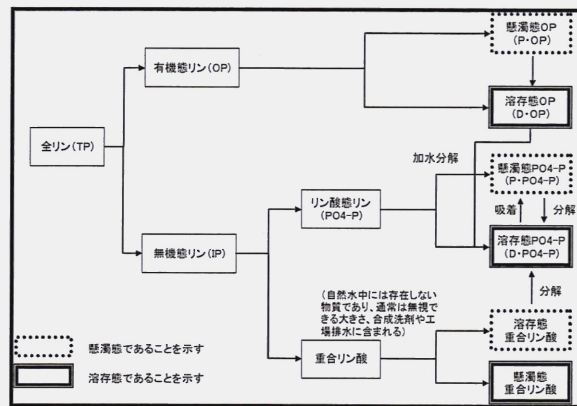


図-2 モデル化したリンの形態

2.2 土砂動態モデルの開発

窒素、リンの溶存態成分はいずれも WEP モデルの内部の水循環に従って動くようにモデル化されている。一方、懸濁態成分については、土砂への吸着および流出を考慮する必要がある。したがって、本研究では WEP モデルに土砂動態モデルを導入した。図-3 は窒素およびリンの土砂結合を考慮した汚濁負荷流出の解析過程である。土砂動態モデルでは、一つの要素(グリッドセル)からの堆積物移動は、地表面流における雨裂・インターリルの寄与、雨滴浸食分離、輸送能力およびせん断能力、次の堆積の流量依存性を各セルで推定している。各要素(グリッドセル)からの土砂の輸送は、表層の乾燥期に堆積した栄養塩が集まり、地表面流を経由して河道に運ばれる。定式化の詳細については、平成 20 年度の重点プロジェクト研究報告書を参照いただきたい。

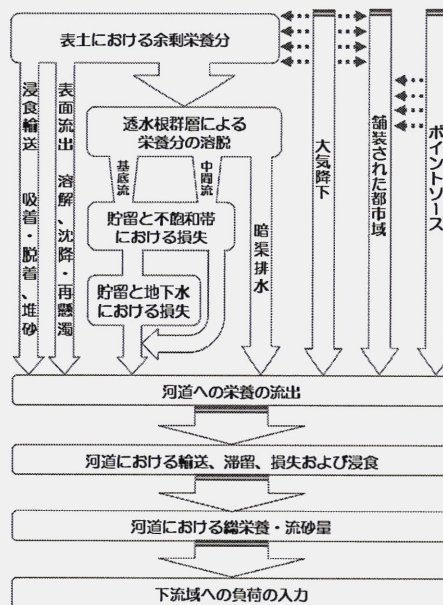


図-3 土砂結合を考慮した窒素・リンの汚濁負荷流出の解析過程

3. 谷田川流域における適用・検証

2.で述べた WEP モデルを、茨城県にある谷田川流域(図-1、流域面積:166.7 km²)に対して適用した。

3.1 計算諸条件

計算の諸条件を以下に示す。

1. 計算期間:2001-2002年
2. 計算時間ステップ:1時間
3. メッシュサイズ:100m
4. リンおよび窒素の投入量:農作物の市町村別作付面積、農業センサス等の農業統計データに基づいて施肥量を推定し、そこから農地へのリンおよび窒素の投入量を推定した⁴⁾。
5. 検証データ:小白碓地点および堺松地点において2001年および2002年に2週間に一回程度、低水時に採水および分析を行った。分析項目はSS、全リン(TP)、全窒素(TN)、リン酸イオン(PO₄)、アンモニア(NH₄)、二酸化窒素(NO₂)、硝酸塩(NO₃)である。また、2年間の間に2回の出水時観測も行った。計算期間内で2度出水時調査を行っている(2001年8月22日および2002年10月1日、毎正時に採水)。

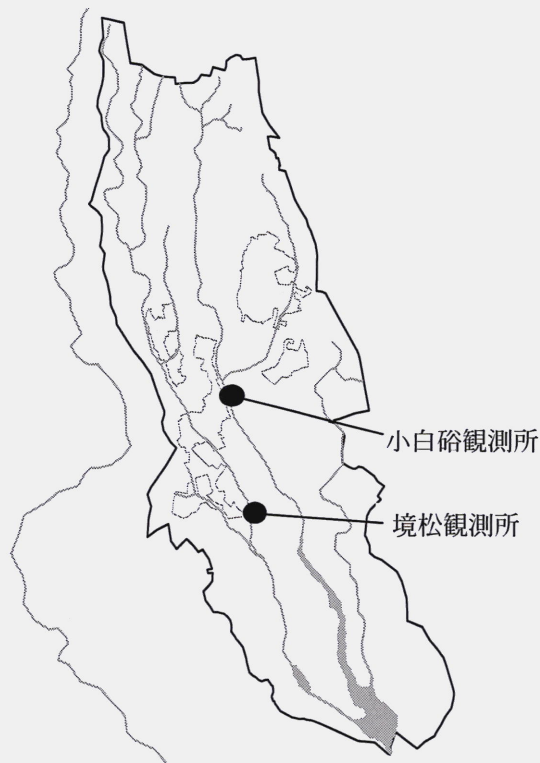


図-1 谷田川流域およびモデル検証地点

3.2 パラメータの同定について

谷田川の WEP モデルにおける水循環の計算については、Jia et al.¹¹⁾により既に検証されており、そのモ

デルパラメータ値をそのまま採用している。窒素、リン動態モデルで用いるパラメータについては、SS、リン、窒素のシミュレーション結果と観測値の差が小さくなるように設定した。

3.3 計算結果および考察

図-2にSS、懸濁態窒素(PN)および懸濁態リン(PP)のシミュレーション結果を示す。前述したとおり、計算期間内には2回の出水時観測のデータを含んでいる。SSのシミュレーション結果は、図-2上段で示すように、観測値が示す全体的な傾向を再現できている。特に、2度の出水期間についても、観測値が示す出水によるSSの時間変化を表現できている。決定係数で評価すると、境松観測所で0.64、小白碓観測所で0.72であり、SSの動態は概ね再現できていると考えられる。PNおよびPPについては、一般的に出水時に濃度が増加することが知られており、今回の谷田川の観測結果についても出水時に濃度が増加する傾向が確認されている。昨年度までの結果では、SSの計算モデルは既に追加されていたが、PNおよびPPのシミュレーション結果は観測値の傾向を再現していなかった。原因として施肥に含まれる窒素およびリンがSSに吸着する割合に関するパラメータの調整が十分に行われていなかったことが挙げられ、今年度はこのパラメータを調整することで観測値と同様の挙動を概ね再現することができた。

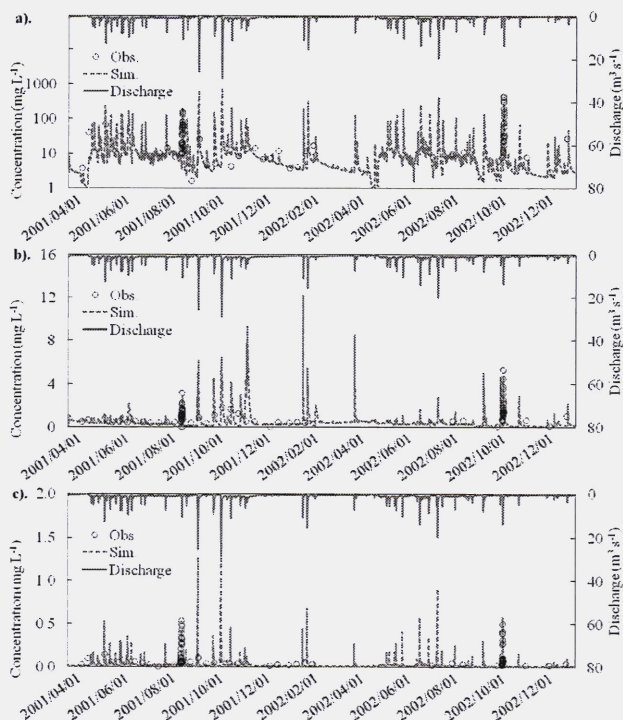


図-2 小白碓地点でのSS、PNおよびPPのシミュレーション結果(上:SS、中段:PN、下段:PP)

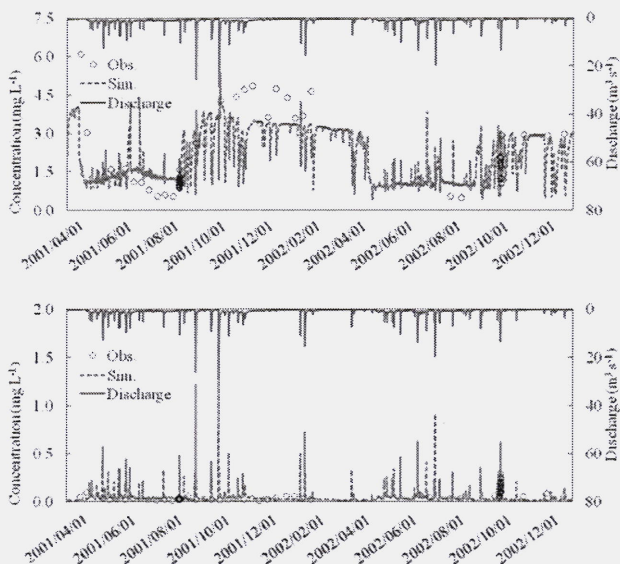


図-3 小臼裕地点でのDNおよびDPのシミュレーション結果

一方、溶存態窒素(DN)および溶存態リン(DP)のシミュレーション結果を図-3に示す。DPの観測値については明確な季節的な変化が特に見られないが、DNの観測値については、雨期の流量の増加及び谷田川流域外からの灌漑用水の導水による希釈効果があることから乾期と比較して雨期の濃度が低い傾向が見られる。これは、雨期の流量の増加および谷田川流域外からの灌漑用水の導水による希釈効果があることの影響などが考えられる。シミュレーションでは谷田川流域外からの灌漑導水量および灌漑用水の水質を考慮しており、シミュレーション結果についても、観測値が示す季節的な変化を概ね再現できていることが分かる。

これらの結果より、シミュレーション結果は谷田川流域のSS、PN、DN、PP、DPの観測値が示す傾向を全体的に表現できていることが分かった。

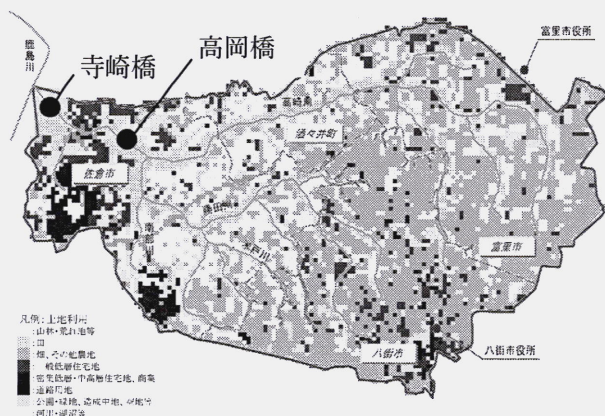


図-4 高崎川流域図

4. 高崎川流域への適用

2.で述べた WEP モデルを、印旛沼の流入河川の一つである高崎川流域(図-4、流域面積: 85.6 km²)に対して適用した。印旛沼に流入する高崎川流域は、水質を含む水環境・水生生態系の保全・再生が社会的問題となっている。また、谷田川流域だけでなく複数の河川流域に適用することで、改良 WEP モデルの妥当性をよりの確に分析・評価することを目標とした。

4.1 計算条件

1. 計算期間: 2002-2003年
2. 計算時間ステップ: 1時間
3. メッシュサイズ: 100m
4. リンおよび窒素の投入量: 谷田川流域の解析と同様に、農作物の市町村別作付面積、農業センサス等の農業統計データに基づいて施肥量を推定し、そこから農地へのリンおよび窒素の投入量を推定した。
5. 検証データ: 高崎川流域には高岡橋と寺崎橋の2箇所の観測地点が存在する。高岡橋では、HQ式が作成されており、流量の時系列連続値が利用できる。また、2002年に2度出水時の水質観測が行われており、毎正時のTN、TPのデータが取得され、2005年、2008年の各年にも2度の出水時水質観測によりTN、TPに加えDN、TP、PPが観測されている。また寺崎橋においてはおよそ月1回の頻度で公共用水域の定期観測が行われており、SS、TN、DN、TP、PPが取得されている。

4.2 パラメータの同定について

水循環の計算については、既に当該流域で実績(飯泉ら、2007)があるため、そのときに設定したパラメータ値を用いる。水質シミュレーションに関するパラメータについては、入力パラメータの感度分析に基づき、計算結果と観測値を比較して設定した。

4.3 シミュレーション結果および考察

4.3.1 流量シミュレーションの結果

高岡橋における2005年の河川流量シミュレーション結果を図-5に示す。平常時および中小規模の出水時では、実測値に比べて計算値の方が低いケースもあるが全体として高い精度で再現できている。一方で、大規模な出水の場合には、ピーク値が若干ずれていることが確認された。しかしながら、全体として当該流域の水循環過程の再現としては必要な精度を確保できていると考えられることから、本計算条件でイベントスケールの検討を進めた。

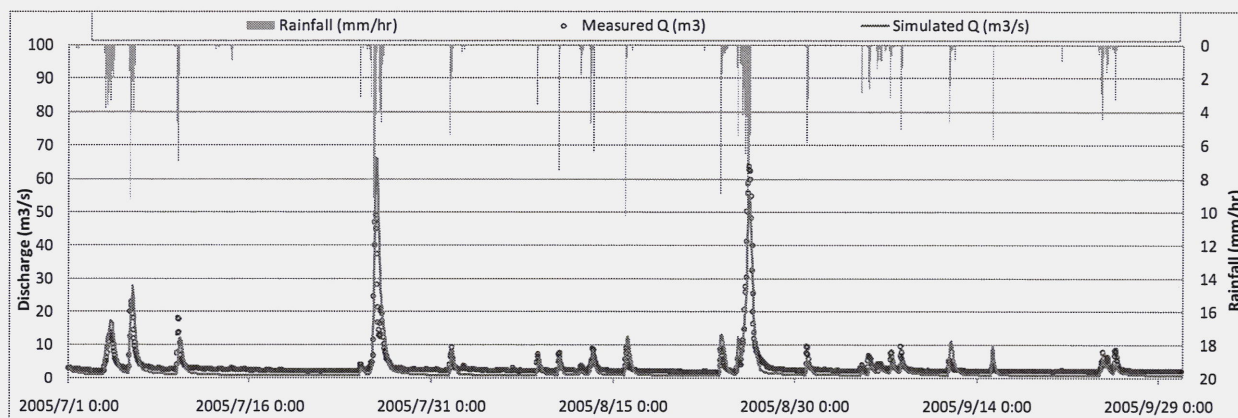


図-5 高岡橋における流量シミュレーション結果

4.3.2 イベントスケールでのシミュレーションの再現性

イベントスケールでの再現性の検証として 2005 年 8 月 26 日の出水を対象とした。図-6、図-7a、図-7b、図-8a、図-8b に高岡橋における出水時の流量、TN、DN・PN、TP、DP・PP、の出水時のシミュレーション結果を示す。

ただし、計算結果は、実測値に比べピーク到達時間が遅く、逓減部の負荷量が多くなっている。一方、図-7b は DN と PN の計算結果であるが、出水時に増加する負荷流出量をとともに再現できている。特に PN は出水時に大きく増加するが、この負荷流出量の計算値は実測値より遅く流出している。

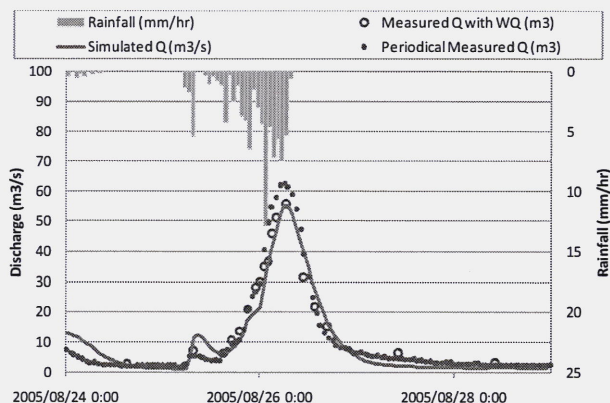


図-6 高岡橋における出水時の流量の計算結果

(1) 流量

流量の実測値は自動観測と水質項目測定時の流量値の 2 つを図-6 に示した。塗りつぶしのプロットは自動観測の値であり、白抜きのプロットは水質項目測定時の値である。計算値は水質項目測定時の流量のピーク、波形ともに非常に精度よく再現している。

(2) TN

流域からの汚濁負荷流出は一般的に平水時に比べ雨天時に非常に大きな値をとる。2005 年 8 月 26 日の高崎川流域においては、図-7a からピークで約 300g/s の TN が流出しており、平水時は 20g/s 程度であることから、雨天時に非常に多くの窒素が印旛沼に流入していることがわかる。計算値もほぼ同程度の負荷流出量を再現しており TN の挙動を概ね再現できている。

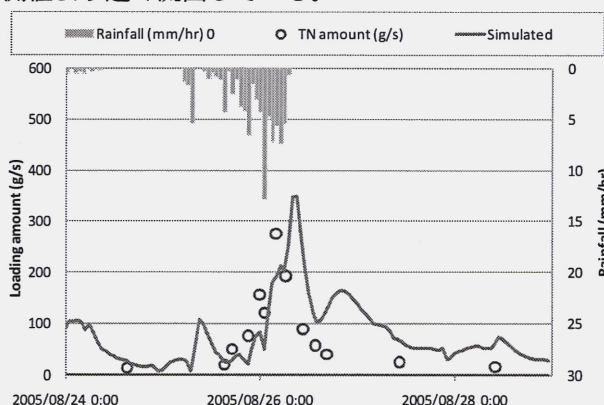


図-7a 出水時の全窒素の計算結果

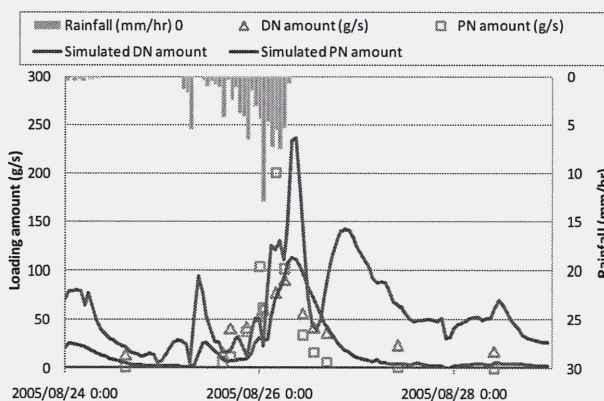


図-7b 出水時の溶存態・懸濁態窒素の計算結果

(3) TP

TP も TN と同様に雨天時に発生する汚濁負荷流出が下流河川もしくは水域に大きな影響を及ぼす。2005 年 8 月 26 日の高崎川流域においては、図-8a よりピー

ク時に 30g/s 程度の TP が流出していることがわかる。計算結果は、このピーク値を精度よく再現しているが、全体として流出波形が遅れている。図-8b は DP と PP の計算結果である。DP の負荷流出量は計算値が低くなっているが、PP の負荷流出量は定量的には実測値とよく一致している。しかしながら立ち上がり部と逓減部のともに実測値より遅く流出する結果となった。これらは窒素と同様の結果であり、流出波形についてもさらに再現精度向上を図るためには面源負荷流出過程の改善が必要と考えられる。これらは WEP モデルのさらなる改良に向けての今後の課題と位置づけられるが、その方向性をより明確化するため、以下、再現精度向上へ向けて取り組むべき課題の考察を行う。

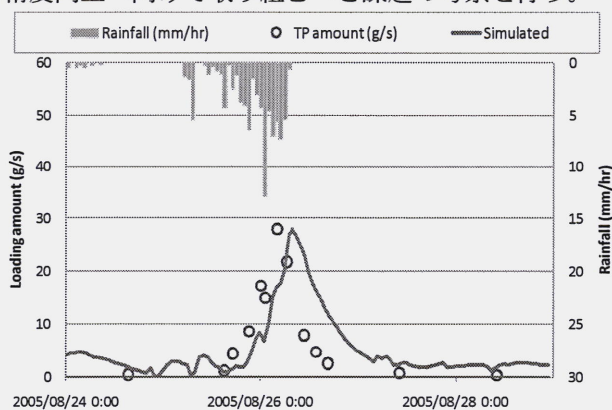


図-8a 出水時の全リンの計算結果

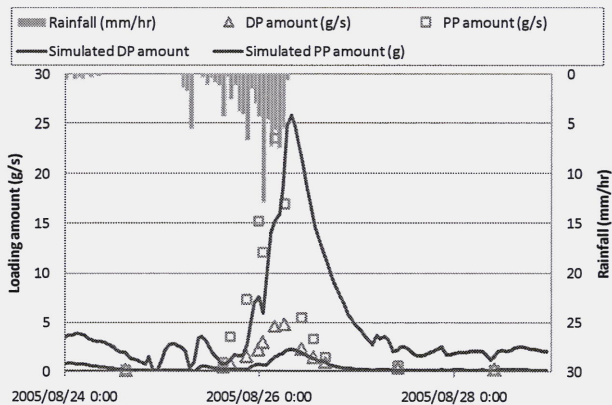


図-8b 出水時の溶存態・懸濁態リンの計算結果

4.3.2 面源負荷流出の再現性に関する考察

窒素およびリンの再現性の結果を通して、定量的には精度よく再現されていたが、流出波形としては実測値より遅く流出する結果であった。これは、無降雨時に都市域もしくは農地に堆積した物質が降雨の降り始めにファーストフラッシュ型で流出する特性の再現が十分でないことを示唆している。例えば、2山以上の降雨イベント時では、計算結果の再現性はより低下する怖れがある。この問題を解決するためには、降雨の

降り始め、つまり流量のハイドログラフの立ち上がり部分で高濃度の汚濁負荷流出が発生しなければならず、面源からの負荷流出をより詳細に解析する必要がある。

5. モデル構築のためのガイドラインの作成

本研究で開発した水・物質循環モデルを有効に活用することで、現実の問題に対処するための施策立案等に役立ててもらうためには、ユーザーのためのモデル構築ガイドラインが必要となる。したがって、本研究では、モデル構築手法と適用事例を示す資料として「WEP モデル解説書(案)」を作成した。その構成は下表の章立てに基づいているが、モデルを俯瞰的に理解するために「既往の水・物質循環モデルとの比較」を整理し、モデル利用の実用性を高めるために、サンプルデータセット、実流域適用事例も記載した。

表-1 WEP モデル解説書(案)の構成

第1章	第1章 WEP モデルの概要
第2章	解析モデルのコンセプトとコンポーネント
第3章	解析モデルのフローチャートと各モジュールの機能
第4章	入力データセットおよび出力データセットの仕様
第5章	計算の実行方法と解析事例
巻末資料	入力データ書式一覧

6. まとめ

本研究では溶存態と懸濁態を区別した栄養塩類の流出過程モデルと土砂動態モデルを新たに付加した WEP モデルを開発し、谷田川流域および印旛沼・高崎川流域に対して適用した。その結果、谷田川流域では窒素、リン共に出水時や季節的な変動について定量的に観測値を再現することができた。一方、高崎川流域においては、イベントスケールでの汚濁負荷流出現象に着目し、季節的な変動のみならず、出水時の再現性についても検証した。その結果、長期的な季節の変動特性だけではなく、雨天時の出水時のピーク値および総量についても概ね良好に再現することができた。これらにより、雨天時の汚濁負荷流出特性を含めて、流域スケールでの水量・水質の定量的な動態情報を関係者で共有するための基盤ツールを開発することができたと評価できる。

しかしながら、今回の検証事例では、汚濁負荷流出波形の立ち上がりが遅れ、逓減部においては計算値が

実測値より大きな値をとる結果となっており、水質管理において重要なファーストフラッシュ特性の再現に課題を残した。市街地および農地からの面源負荷流出過程のさらなる改良が必要と考えられる。また、本研究では、農地を主体とした河川流域を対象として開発を行ってきた。下水道整備が進む市街地や林地を含めた汚濁負荷流出特性のモデル化が必要とされている。

改良された WEP モデルは、表面流出・浸透・中間流出・地下水流出・河道流出といった水循環プロセスはもとより、溶存態・懸濁態の栄養塩輸送をそれぞれの水循環プロセスに一体として組み込んだ、複雑なシステム系となっており、その改良は十分な検証作業を踏まえて行う必要がある。

謝辞

本研究で用いた印旛沼・高崎川流域の水文、水質データは千葉県および印旛沼流域水循環健全化会議により収集されたものです。本研究に対して、その貴重なデータを提供していただいた両者に対し、ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Jia Yangwen, et al.: Development of WEP model and its application to an urban watershed, Hydrological Processes, 15, pp.2175-2194, 2001
- 2) 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, Vol. 12, 335-340, 2006
- 3) 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
- 4) 飯泉佳子, 深見和彦, 木内豪: WEP モデルを用いた印旛沼・高崎川における雨水浸透対策効果のシミュレーション, 土木技術資料, vol.49, No.6, pp.64-69, 2007.
- 5) Hemantha Rajapakse et al.: Diffuse-source Particulate Nitrogen and Phosphorus Pollution Modeling in Yata River Basin in Japan using Process based WEP model coupled with a Sediment Erosion-transport Model, Proceedings of 2009 Annual Conference, Japan Society of Hydrology and Water Resources, pp.274-275, 2009
- 6) Hemantha Rajapakse et al.: Diffuse Source Particulate-matter Pollution Modeling in a Semi-Urbanized Agricultural Basin in Japan using Process-based WEP and and Erosion-transport Model. Proceedings of the 13th International Conference on Diffuse Pollution and Integrated Watershed Management, pp.194-195, Seoul, Korea, Oct. 2009

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

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2006-2010

Research Team : Hydrologic Engineering Research
Team, Water-Related Hazard
Research Group, ICHARM

Author : FUKAMI Kazuhiko

INOMATA Hironori

MIYAMOTO Mamoru

Lalith Hemanthe Rajapakse

Abstract : A physically-based basin-wide hydrologic model with nutrients runoff sub-models, a new version of WEP model, has been developed. The applicability of the WEP model to the Yata River and the Takasaki River Basins was tested and improved through parameter fitting on river quality simulation modules (SS, PN, DN, PP, DP). It was verified that the WEP model could reproduce runoff characteristics of nitrogen and phosphorous in terms of both their seasonal change and the total discharges in rainfall-runoff events, and that the WEP model could explain the significant role of rainfall-runoff processes for estimating total discharge of such nutrients. To improve the accuracy of temporal variation of nutrient discharges during such flood events should be a future subject.

Key words : WEP model, Basin-wide water and material cycle model, Nitrogen, Phosphorus, Sediment transport