

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。昨年度は、窒素のモデル化では一定の精度を示すことができた一方でリンモデルの精度が十分ではなかった。そこで、今年度は、特にリン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を WEP モデルに導入した。その結果、谷田川流域を対象としたリンのシミュレーション結果について精度の向上が確認された。

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。

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）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。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、窒素のモデル化では一定の精度を示すことができた一方でリンモデルの精度について十分な結果を示すことができなかった。今年度は、特にリン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を WEP モデルに導入し、谷田川流域を対象としてシミュレーションを実施した。その結果、リンのシミュレーション結果について精度の向上が確認された。

2. 土砂動態モデル

昨年度の WEP モデルにおいては、リンのシミュレーション結果について十分な結果を示すことができなかった。窒素は大部分が水に溶け込んで溶存態となって移動するのに対し、リンはそのほとんどが土砂に吸着して移動することが一般的に知られている。しかし昨年度のモデルではリンも窒素同様に水の移動に伴って移動を行うようにモデル化されており、そのことが原因で十分なシミュレーションを得ることができなかった。今年度は、WEPP (Water Erosion Prediction Project)モデル²⁾、EPIC モデル³⁾、ANSWERS⁴⁾⁵⁾等で用いられている土砂に吸着して移動する栄養塩動態モデルを WEP モデルに組み込んでシミュレーション精度の向上を図った。

2.1 土砂侵食および輸送モデル

WEP モデルの水循環部分の計算手法および昨年度までに開発を行った窒素、リンモデルについては、参考文献⁶⁾⁷⁾を参考にさせていただきたい。グリッド毎の土

砂の発生および輸送は主に降雨および表面流によって生じる。そのことを勘案した土砂量保存式は Benett et al.⁸⁾により以下のように示される。

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} + \frac{\partial(Ch)}{\partial t} = D_r + D_i \quad (1)$$

ここで、 Q_s : 土砂量(kg/m/s)、 h : 水深(m)、 C : 土砂濃度(kg/m³)、 D_r : 降雨による土砂剥離速度(kg/m²/s)、 D_i : 表面流による土砂剥離速度(kg/m²/s)、 x : 区間間隔(m)、 t : 時間(s)である。

式(1)において流れを定常と仮定すると以下のよう簡略化される。

$$\frac{dq_x}{dx} = D_r + D_i \quad (2)$$

降雨による土砂剥離速度 D_r については、Foster ら⁹⁾と Laflen et al.²⁾によって下記の式が提案されている。

$$D_r = \alpha(T_c - q_s) \quad (3)$$

ここで、 α : 定数であり、 D_c を限界剥離量と定義し、 $D_c = \alpha T_c$ とすると、式(2)は以下のようになる。

$$\frac{dq_x}{dx} = D_c \left(1 - \frac{q_s}{T_c} \right) + D_i \quad (4)$$

限界剥離量はせん断応力の関数として以下のように表わされる。

$$D_c = K_r(\tau - \tau_c) \quad (5)$$

ここで、 K_r : 侵食能、 τ : 掃流力、 τ_c : 限界掃流力(N/m²)である。式(4)と式(5)より次の式(6)が得られる。

$$\frac{dq_x}{dx} = K_r(\tau - \tau_c) \left(1 - \frac{q_s}{T_c} \right) + D_i \quad (6)$$

せん断応力 τ は以下の式で求められる。

$$\tau = \rho_w g S R \frac{f_s}{f_{tot}} \quad (7)$$

ここで、 ρ_w : 水の密度(kg/m³)、 g : 重力加速度(m/s²)、 S : グリッドの勾配、 R : 径深(m)、 f_s および f_{tot} : ダルシー・ワイズバッハの摩擦係数である。

グリッド内に発生する表面流は矩形断面を流れていると仮定し、WEPP モデルではその幅を次式で示す。

$$w = 1.13 Q_a^{0.303} \quad (8)$$

ここで w : グリッド内に発生する表面流の幅(m)、 Q_a : 表面流量(m³/s)である。

流れを定常と仮定して D_i は降雨強度に比例するとして以下の式で表わされる。

$$D_i = K_{iadj} I q_i R_s \quad (9)$$

ここで、 K_{iadj} : 土地利用毎の侵食能、 I : 降雨強度(m/s)、 q_i : 流出量(m/s)、 R_s : グリッド内で降雨が当たる幅(m)である。

これらの式を用いて計算された土砂は、表面流または河川流によって河道網に沿って隣のグリッドに輸送される。

2. 2 土砂に吸着するリン量の定式化

今までの WEP モデルではリンの土粒子への吸着および脱着が考慮されていなかった。ここでは以下のようにリンの土砂への吸着・脱着を定式化した。まず、リンを4つのプール(活性有機態、不安定態、活性無機態および有機態)に分ける。無機態の有機態に対する比率は窒素と同様と仮定し、Leonard et al.¹⁰⁾によりリンの無機化速度は以下のように求められる。

$$P_{MIN} = C_{MIN} P_{SORG} \frac{N_{POTMIN}}{N_{POTMIN} + N_{SOIL}} F_{SW} \gamma_{TEMP} \quad (10)$$

ここで、 C_{MIN} : リンの無機化係数(day⁻¹)、 P_{MIN} : 土粒子に吸着するリンの無機化速度(kg/ha/day)、 P_{SORG} : 土粒子に吸着する有機態リン(kg/ha)、 N_{POTMIN} : 土粒子中の活性有機態窒素(kg/ha)、 N_{SOIL} : 土粒子中の安定有機態窒素(kg/ha)、 F_{SW} : 土壌・水係数、 γ_{TEMP} : 窒素の無機化温度である。

不安定リンは土砂に吸着するリンと溶解性リンに分けられる。不安定溶解性リンは以下の式で与えられる。

$$P_{SOL} = \frac{P_{LAB}}{1 + \frac{K_{PHOS} VOL_{WATER}}{M_{SOIL}}} \quad (11)$$

ここで P_{LAB} : 土壌中の不安定リン(kg/ha)、 K_{PHOS} : 土壌種類により決まる溶解性リンの含有率、 VOL_{WATER} : 土壌中の水の体積(kg/ha)、 M_{SOIL} : 土壌質量(kg/ha)である。土砂に吸着する不安定リン(P_{SED})は以下の式で計算される。

$$P_{SED} = P_{LAB} - P_{SOL} \quad (12)$$

土砂粒子はいくつかの粒径が含まれているが、その

粒径分布については混合の作用を受けるため、均等であると仮定する。各粒径毎のリン濃度については次式で表現する。

$$P_{SEDi} = SSA_i P_{SED} \quad (13)$$

ここで SSA_i : 粒径 i のクラスについての定数である。

3. 谷田川流域への適用

前節で示した土砂動態およびリンモデルを WEP モデルに組み込んで、茨城県にある谷田川流域 (図-1、流域面積: 166.7 km²) を対象としてリンおよび窒素のシミュレーションを行った。

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年、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: 昨年度行ったように、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¹⁾。図-2が施肥によって農地に投入されるリンおよび窒素の投入負荷量と、農作物の吸収量を示したものである。両者の差が WEP モデルで入力される負荷量となる。
5. 検証データ: 小白裕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、TP、TN、PO₄、NH₄、NO₂、NO₃ である。また、2年間の間に2回の出水時観測も行った。出水時は時間単位での採水および分析を行った。

3.2 パラメータ調整について

水循環の計算については、Jia et al.¹⁾により実施されており、そのモデルパラメータ値をそのまま採用している。その他2.で挙げられて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調整した。

3.3 計算結果および考察

図-3に小白裕地点および堺松地点 (図-1参照) における SS のシミュレーション結果を示す。小白裕地点での精度は平均誤差率: -28.1%、R²: 0.43 であり、堺松地点では平均誤差率: 18.5%、R²: 0.52 であった。また図-4および図-5に懸濁態窒素濃度および懸濁態リン濃度の時系列のシミュレーション結果を示す。図-4、図-5より、堺松地点および小白裕地点の両地点で

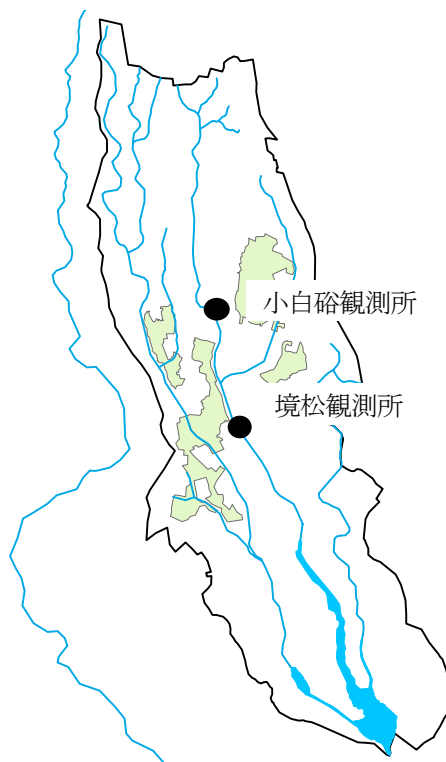


図-1 谷田川流域およびモデル検証地点

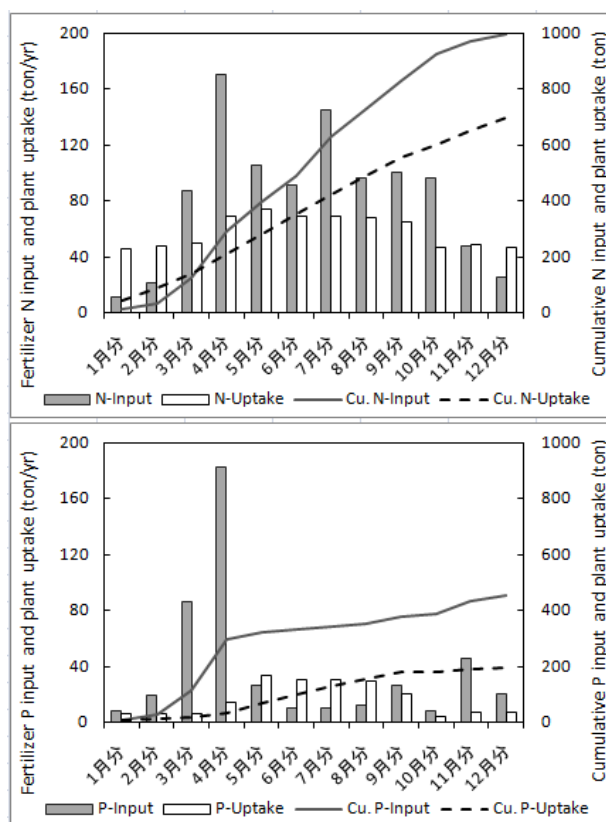


図-2 谷田川流域内のリンおよび窒素の月別投入量および農作物による吸収量

シミュレーション結果は観測値と比較して懸濁態窒素およびリン共に振動が大きいことが分かる。懸濁態窒素 (図-4) については、観測値は堺松地点および小白礮地点共に細かい変動はあるが大きな季節的は示さない。その一方でシミュレーション結果は灌漑期に小さい値、非灌漑期に大きい値を示す。これは、シミュレーションへの入力データである灌漑期の域外導水の濃度を低く設定していることが原因であると考えられる。図-5の懸濁態リンについては、シミュレーション結果は無降雨期に計算結果が上昇する傾向がある。これは、2.2 節で述べたリンの土粒子への吸着量が実際よりも大きく設定されていることが原因と推察される。また懸濁態リン濃度の観測値についても季節的変動および降雨との対応等詳細な検討を行い、より精度の高いシミュレーションに向けてフィードバックを行う必要がある。図-6は堺松地点と小白礮地点のシミュレーション結果と観測値の相関 (溶存態窒素、懸濁態窒素、溶存態リン、懸濁態リン、SS) を示したものである。昨年度は懸濁態リンについて観測値とシミュレーション結果の間に正の相関が見られなかったが、今年度は堺松地点、小白礮地点の両方で正の相関が見られるようになった (図-6 の下から 2 列目)。また表-1 は堺松地点と小白礮地点の懸濁態リン濃度に関する昨年度のシ

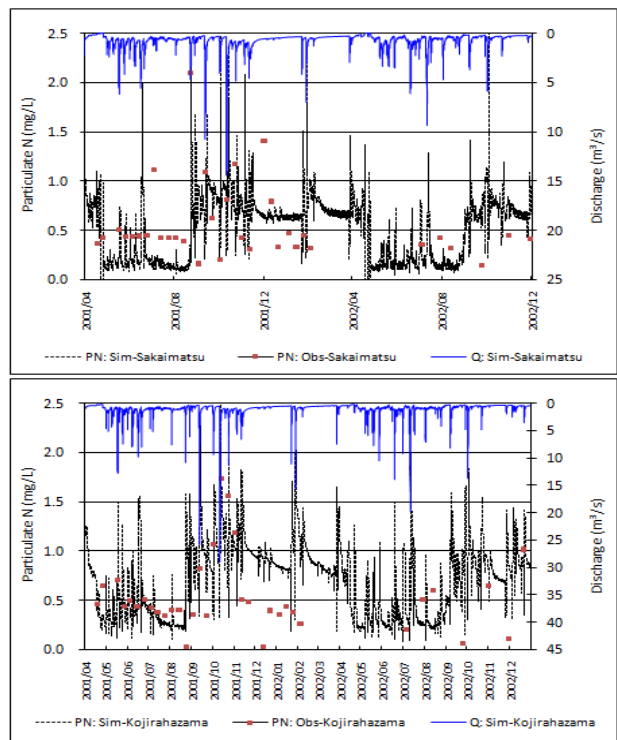


図-4 堺松地点および小白礮地点での懸濁態窒素濃度シミュレーション結果 (上: 堺松地点、下: 小白礮地点)

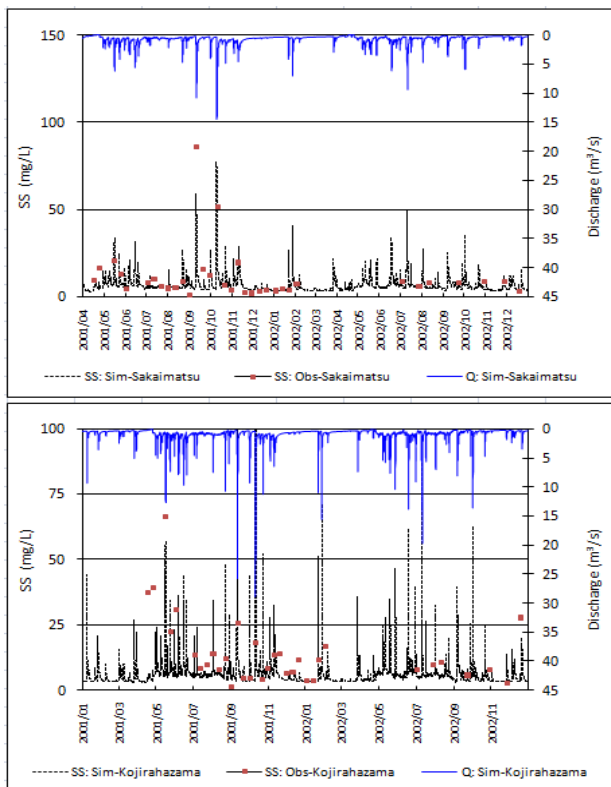


図-3 堺松地点および小白礮地点での SS シミュレーション結果 (上: 堺松地点、下: 小白礮地点)

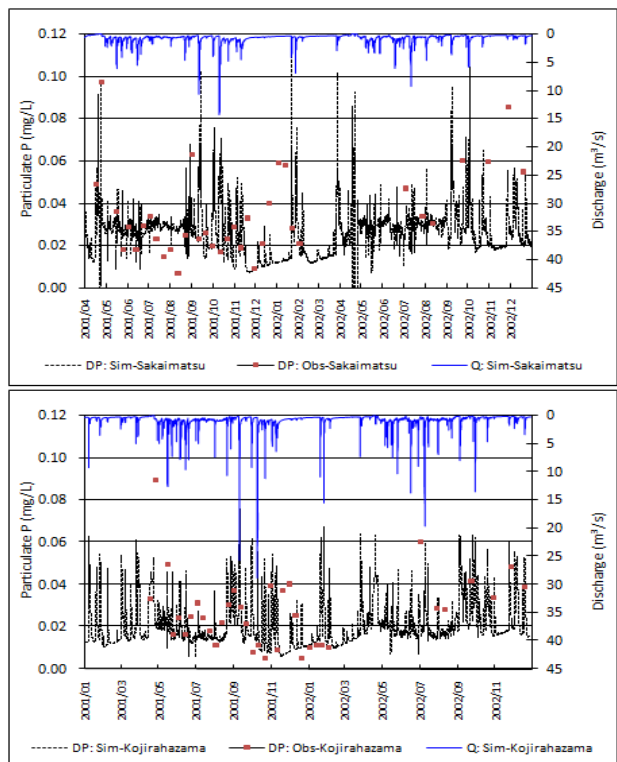


図-5 堺松地点および小白礮地点での懸濁態リン濃度シミュレーション結果 (上: 堺松地点、下: 小白礮地点)

表-1 堺松地点および小白碓地点での昨年度と今年度の懸濁態リン濃度に関するシミュレーション結果の精度比較

	平均誤差率		R ²	
	昨年度	今年度	昨年度	今年度
堺松	-86.1	41.4	0.02	0.38
小白碓	-83.1	-31.6	0.08	0.33

シミュレーションと今年度のシミュレーション結果の精度を平均誤差率と相関係数について比較したものである。今年度、土砂動態モデルを導入したことで精度が向上したことが分かる。しかし、観測値とシミュレーション結果の整合性は昨年度のモデルと比較して改善されたものの、まだ改善の余地がある。以下に課題を列挙する。

1. SS 濃度および懸濁態リン濃度について

懸濁態の栄養塩濃度（特にリン濃度）は、土砂に吸着しているため、土砂濃度を正確にシミュレーションすることがまず大事である。今回のシミュレーション結果では、一定の精度が得られはしたが、より一層の精度改善が必要である。ここでモデルの検証として用いたデータは2週間に一度採水して計測したSS濃度である。このデータは川の表面の水を採水したものである。現在のモデルでは、河道では混合が十分に行われていることを前提として鉛直方向に均一化された流れを想定しているため、この表面で採水したSS濃度が検証データとして適切かどうかを最初に判断する必要がある。また懸濁態リン濃度についても、シミュレーション側からの精度向上を図るだけでなく、観測値からも降雨との対応や季節的変動等について流出のメカニズムを検討することでシミュレーションにフィードバックすることが必要である。

2. 市街地でのモデル化およびパラメータの設定

現在、土地利用が市街地であるメッシュについては、和田のモデル¹²⁾に基づいて、「無降雨日に市街地表面に汚濁負荷が堆積し、降雨日に雨によって川に流される。」という考えを基本にしたモデルを利用している。ここで、無降雨日に堆積していく汚濁負荷量の速度についてのパラメータは現在任意で調整している。市街地からの汚濁負荷排出量の観測を行っているのでそのデータを用いた検討を行う必要がある。

N. まとめ

今年度は、昨年度のリン濃度のシミュレーション精度改善を目的として土砂動態モデルを導入した。谷田

川流域を対象としたシミュレーションの結果、昨年度のモデルよりも特に懸濁態リン濃度についてシミュレーション精度が改善された。

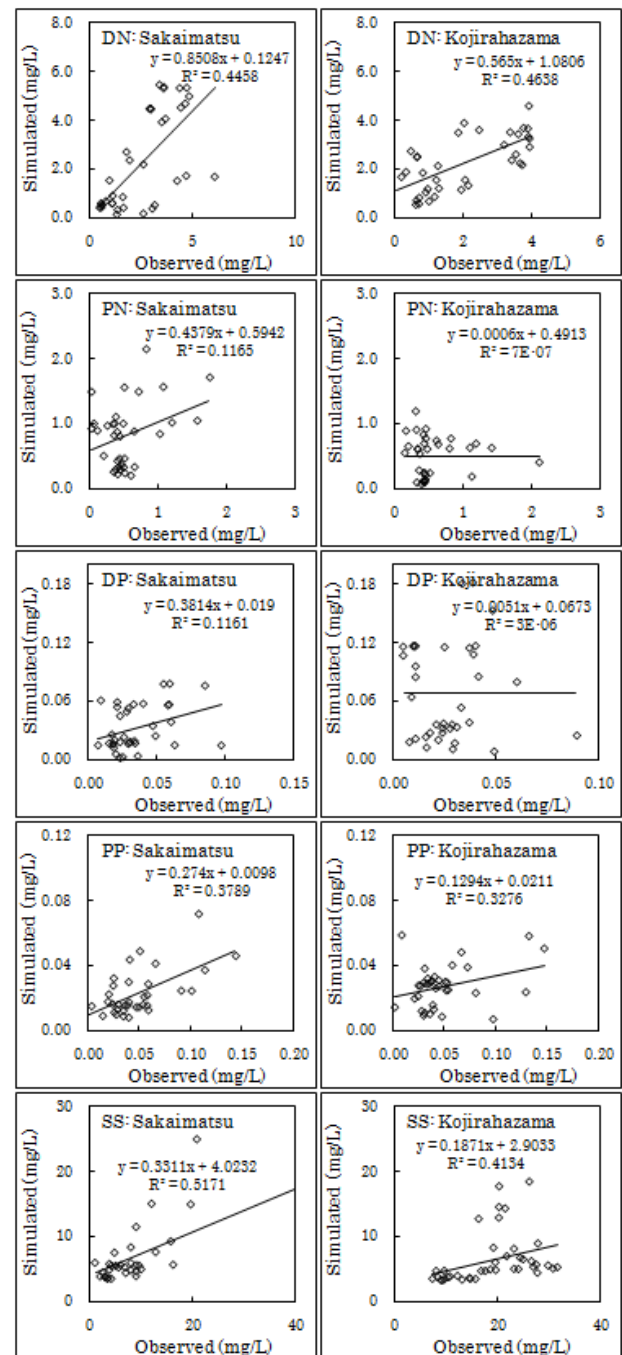


図-6 堺松地点（左列）と小白碓地点（右列）のシミュレーション結果と観測値の相関図（DN：溶存態窒素、PN：懸濁態窒素、DP：溶存態リン、PP：懸濁態リン、SS）

参考文献

- 1) Yangwen Jia, et.al., Development of WEP model and its application to an urban watershed, Hydrological Processes, pp.2175-2194, 15, 2001.

- 2) Laflen, J.M., Elliot, W.J., Flanagan, D.C., Meyer, C.R., Nearing, M.A.: WEPP-predicting water erosion using a process-based model. *Journal of Soil and Water Conservation*, 96–102, 1997
- 3) Williams, J.R., C.A. Jones, and P.T. Dyke: A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity, *Transaction of the American Society of Agricultural Engineers*, 27, 129-144, 1984
- 4) Beasley, D.B., Huggins, L.F. and Monke, E.J.: ANSWERS: A model for watershed planning. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 23, 938-944, 1980
- 5) Beasley, D. B., L. F. Huggins, and E. J. Monke: Modeling sediment yield from agricultural watersheds, *Journal of Soil and Water Conservation* 37, 113-117, 1982
- 6) Rajapakse, H., Inomata, H., Fukami, K., Iizumi, Y. & Kinouchi, T.: The impact of nitrogen and phosphorus fertilizer loading on river and subsurface water quality in Yata River Basin: An integrated, basin-wide modeling approach. *Proceedings of the 20th Annual Conference of the Japan Society of Hydrology and Water Resources*, 26-28 August 2008, Tokyo, Japan.
- 7) Rajapakse, H., Inomata, H., & Fukami, K.: Effects of surplus fertilizer loading on stream and subsurface water quality in Yata River Basin, Japan: An integrated, basin-wide modeling approach. *Proceedings of the 4th Annual Conference of the Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources*, 03-05 November 2008, Beijing, China.
- 8) Bennett, J. P.: Concepts of mathematical modeling of sediment yield, *Water Resource Research*, 10, 485-492, 1974
- 9) Foster, G.R. and L.D. Meyer: A closed-form soil erosion equation for upland areas. In H.W. Shen (ed.) *Sedimentation*, Colorado State University, Fort Collins Co., 1972
- 10) Leonard, R. A., W. G. Knisel, and D. A. Still: GLEAMS: ground-water loading effects of agricultural management systems, *Trans. of the ASAE*, 30, 1403-1418, 1987
- 11) 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.*
- 12) 和田安彦: ノンポイント汚染源のモデル解析、技報堂出版、1990

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

Abstract : Sediment erosion and transport model were added to previous WEP model which had been developed until last fiscal year to improve simulation accuracy especially for particulate phosphorus. The improved WEP model was applied to the Yata River Basin and the simulation result was improved compared with that of last year's result especially for particulate phosphorus. However, the simulation accuracy is not still enough. The non point source emission from urbanized area and the validation data of SS should be examined in detail

Key words : WEP model, Water and nutrient model, Nitrate, Phosphorus, Sediment transport