

グリッドベースの分布型汚濁負荷流出モデルの開発と適用

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF GRID-BASED POLLUTANT LOAD RUNOFF MODEL

野原昭雄¹・羽田野琢磨²・高木康行¹・内山雄介³・中嶋規行³・中村 茂¹
Akio NOHARA, Takuma HADANO, Yasuyuki TAKAGI, Yusuke UCHIYAMA, Noriyuki
NAKASHIMA and Shigeru NAMAMURA

¹正会員 日本工営(株) 中央研究所 総合技術開発部(〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原2304)

²正会員 日本工営(株) 首都圏事業部 河川・水工部(〒330-0801 埼玉県さいたま市土手町1-2)

³非会員 日本工営(株) 首都圏事業部 河川・水工部(〒330-0801 埼玉県さいたま市土手町1-2)

A grid-based pollutant load runoff model was developed and applied to the basin of Turumigawa river. This model based on physical based hydrological cycle analysis model, and as a result reproducibility of calculations about water quantity is reasonably good. In this model, pollutant load source account for point source and non-point source. Calculated river water quality, using this model, have been verified for sunny and rainy condition. These calculations are consistent with the observations. This model is useful for basin water management because of it is used to assess water quality influence of land use change and effect of tactics.

Key Words : Grid-based pollutant load runoff model, non-point source, Turumigawa river

1. はじめに

現在,わが国の大部分の河川においては治水・利水・環境に関する問題が顕在化している。これらは流域の無秩序な都市化等に起因するものであり,解決の方向性として流域における健全な水循環系の構築が提唱されている。その実現にあたっては,流域の土地利用や水利用に関係する利害関係者が連携・協働し,様々な対策を立案・実施していく必要がある。このような観点から,各河川流域においてマスタープランの策定が行われつつある。

マスタープランの策定においては,流域の水循環系の現状把握,将来予測,対策効果予測を定量的に行うことができるモデルが必要となる。このようなモデルとしては,浮田ら¹⁾や安陪ら²⁾によるものがこれまでに提案されている。これらのモデルは,水量モデルとしてタンクモデルを用いて,地表面,表層土壌,帯水層に堆積(蓄積)した点源及び非点源由来の汚濁負荷が水の移動に伴って流出するとして概略的なモデル化を行ったものである。流域における物質の挙動については,様々な要因の影響を受けることに加え,定量的な調査の実施が困難であるため,概略的なモデルの適用が妥当であると考えられる。一方,汚濁

負荷量とともに水質の決定要因である水量については,水循環構成要素の観測結果に基づき,物理現象を反映した分布型の流出モデルが構築されてきている。著者らも同モデルの開発・実流域への適用を行い,河川水量及び地下水位について良好な再現結果を得ている^{3)~8)}。

本研究では,水循環系評価モデルの内,水質評価部分の精度と汎用性の向上を目的として,グリッドベースの分布型流出モデルをベースに,分布型汚濁負荷流出モデルを構築した。モデルは流域をグリッド状に分割し,各メッシュから排出される点源・非点源負荷の河川までの流出及び河川での流下プロセスにおける挙動を追跡するものである。モデルの特徴としては,①非点源負荷流出を評価できる,②無降雨時に降雨時を加えた365日の河川水質を評価できる,③任意の河川地点の水質を評価できる点が挙げられる。

構築したモデルを都市化の著しく進んだ鶴見川流域へ適用した結果,無降雨時に加えて降雨時の河川水質についても良好な再現性を得ることができた。以下に,その概要を述べる。

2. 流域の概要

鶴見川は、東京都町田市を発し、神奈川県の一部を流下し、東京湾に注ぐ、幹線流路延長42.5km、流域面積235km²の都市河川である。市街地率は平成11年で85%に達している。昭和40年代後半から水害が頻発し、全国に先駆けて総合治水対策に着手した。河川水質は下水道整備によって徐々に改善されてきているものの、平成13年においても全国ワースト3(BOD75%値で6.6mg/L)にランクされている。

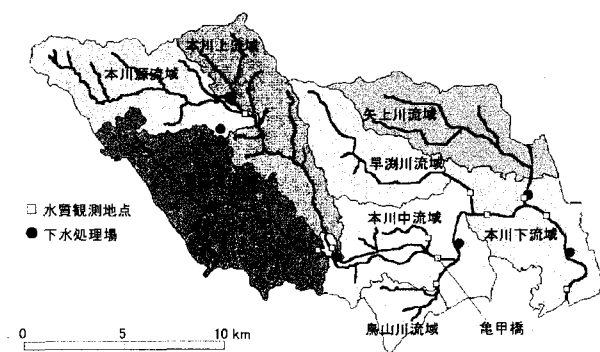


図-1 鶴見川流域の概略。

3. モデルの概要

構築した水循環系評価モデルを水量モデルと水質モデルに大別して以下に概要を述べる。

(1) 水量モデル

水量モデルは、水循環系を解析する手法の中で最も精緻な分布型物理モデルである。分布型物理モデルとは、流域を一定間隔のグリッド状に分割し、各メッシュ間の水分移動を追跡することで流域の水循環系を表現するモデルである(図-2)。モデルは、「地表+表層土壌」、「河川」、「帯水層」サブモデルから構成される。各サブモデルの概要を表-1に示す。

(2) 水質モデル

水質モデルの概要を図-3に示す。水質モデルは「発生/排出源」、「流出経路」、「河川」サブモデルから構成される。各サブモデルの概要は次のとおりである。

a) 発生/排出源サブモデル

点源は家庭、工場、事業所、畜舎に分類して、それぞれ原単位法を用いてメッシュ毎に排出負荷量を定量化した。下水処理場も点源として扱い、実績の水量・水質データを用いて定量化した。

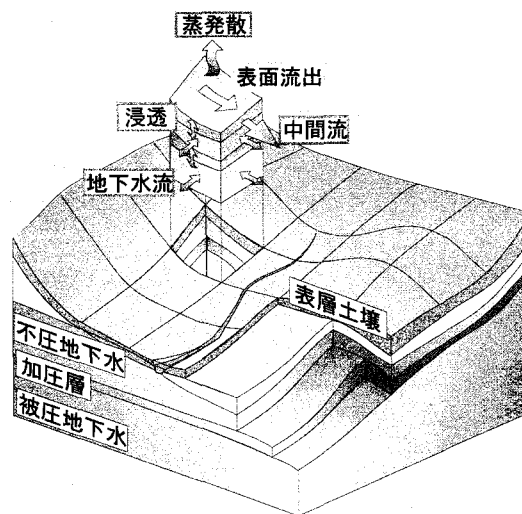


図-2 水量モデルの概要。

表-1 水量サブモデルの概要。

サブモデル名		概要
地表 + 表層土壌	表層土壌	地表面下数mまでの土壌を解析領域とし、土中への浸透、側方浸透、地下水への降下浸透を飽和・不飽和浸透流解析で追跡する。
	地表面流れ	メッシュ毎に設定した等価斜面を流路網に従って連結して、そのモデル水路をkinematic wave近似による不定流計算を行う。
	人工系	生活雑排水、貯留浸透施設などの人工系の要因をモデル化。
河川		kinematic waveによる不定流計算を行う。
帯水層		平面二次元の地下水解析

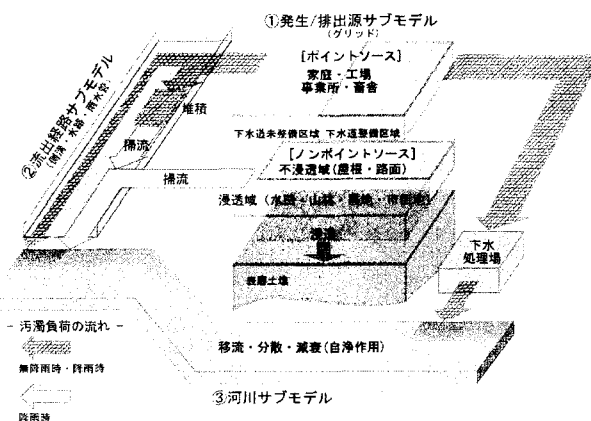


図-3 水質モデルの概要。

非点源は市街地の不透透域(屋根、路面)を対象としたモデルを作成した。これは、高度に市街化された対象流域においては、非点源排出負荷量全体に占める市街地の不透透域由来の負荷量の割合が高いと考えられること等のためである。農地、山林を含めた浸透域モデルの詳細な検討は今後の課題とした。

市街地の不透透域では、図-4に示すように、無降雨時に降下煤塵・排気ガス由来の汚濁負荷が堆積し、降雨時の

表面流出によって掃流されて流出する。堆積負荷量は、無降雨期間が続くと際限なく増加するのではなく、極限堆積負荷量と呼ばれる量に漸近していくことが既往の調査で明らかになっている⁹⁾。これらのプロセスを無降雨時の堆積と降雨時の掃流の2つのプロセスに分けて次式のようにモデル化した(以下、堆積・掃流モデルと略記する)。モデルにおいては、脇岡らの研究¹⁰⁾を参考に、路面からの負荷流出の再現性を高めるために、路面からの堆積負荷流出を発生させる限界の掃流流量という概念を導入した。

$$\frac{dS}{dt} = a - kS - L \quad (1)$$

$$L = \begin{cases} -KS(q - q_c) & q > q_c \\ 0 & q \leq q_c \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 S : 単位面積当たりの堆積負荷量、 a : 負荷堆積速度、 k : 減衰係数、 L : 排出負荷量、 K : 負荷流出(掃流)係数、 q : 単位面積当たりの表面流出量、 q_c : 限界掃流流量である。

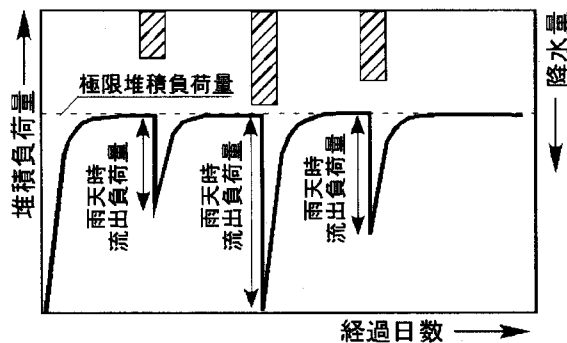


図-4 堆積・掃流モデル概念図。

b) 流出経路サブモデル

下水道未整備地域のメッシュから排出された汚濁負荷は、側溝や水路などの流出経路を通して河川へ流達するとして、その流達過程における変化をモデル化した。

点源負荷については、無降雨時に排出負荷量の一部が流出経路へ沈殿・堆積する過程と降雨時のこの沈殿・堆積した負荷が掃流される過程を、メッシュ毎に次式のようにモデル化し、河川へ流達する負荷量を求めた。

(無降雨時)

$$\frac{dS_r}{dt} = (1 - f) \cdot L_r \quad (3)$$

$$L'_r = f \cdot L_r \quad (4)$$

(降雨時)

$$\frac{dS_r}{dt} = -K_r S_r (q_r - q_{rc}) \quad (5)$$

$$L'_r = L_r + K_r S_r (q_r - q_{rc}) \quad (6)$$

ここで、 S_r : 側溝等への沈降・堆積負荷量、 f : 流達率、 L_r : 排出負荷量、 L'_r : 河川へ流達する負荷量、 K_r : 掃

流係数、 q_r : 表面流出量、 q_{rc} : 限界掃流流量である。

なお、非点源負荷については、降雨時に排出されるため、全量が河川まで流達するものとして扱った。

c) 河川サブモデル

河川における水質変化は、次式のように一次元の移流・分散方程式でモデル化した。

$$\frac{\partial AC}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(VAC) = \frac{\partial}{\partial x} \left(AE \frac{\partial C}{\partial x} \right) - k_{riv} AC + L_{lat} \quad (7)$$

ここで、 C : 水質濃度、 A : 流水断面積、 V : 断面平均流速、 E : 縦分散係数、 k_{riv} : 減衰係数、 L_{lat} : 横流入負荷量である。

4. 対象流域のモデル化

対象流域のモデル化に必要となるデータの内、汚濁負荷流出に関するものを整理して表-2に示す。なお、モデル化対象水質項目は、対象河川において環境基準未達区間の残るBODに加えて、最終的な流出先である東京湾への影響も評価するために海域の水質基準項目であるCOD、T-N、T-Pとした。

表-2 モデル入力データの概要。

サブモデル名		入力データ
発生 / 排出源	点源	発生/排出負荷量原単位、下水処理処分形態別人口、工業製品出荷額、従業員数、家畜飼育頭数、浄化槽排出率、下水処理場放流負荷量
	非点源	屋根・道路面積率、負荷堆積速度、堆積負荷減衰係数、掃流係数、限界掃流流量
流出経路	側溝・水路	無降雨時流達率、掃流係数、限界掃流流量
河川		分散係数、総括減衰係数(分解+沈降)

発生/排出源のモデル化にあたって、メッシュサイズは100mとした。これは、メッシュサイズを50, 100, 250mに設定した場合の地形断面図を描いて比較した結果、50mと100mの地形断面がほぼ一致したことから、計算時間と出力ファイルのサイズを考慮して選定したものである。

点源排出負荷量の定量化では、人口など面的な分布データの整理にはGISを活用した。点源排出負荷量の定量化に用いたデータの取得方法を整理して表-3に示す。

点源の内、下水処理場からの放流水質については、図-5に示すように年間変動が見られるので、水質については月別、水量については日別の実績データを入手し、排出負荷量を定量化した。

非点源負荷に関するパラメータの設定値を表-4に示す。パラメータは、限界掃流流量を除いて、土研モデルの標準値¹¹⁾などを参考に設定した。限界掃流流量はキャリブレーション対象とした。

表-3 データ取得方法(点源).

データ項目	取得方法
発生/排出負荷量原単位	東京湾流域別下水道整備総合計画等から取得.
人口	町丁字人口を取得して、町丁目界と重ねて流域人口を算出.
下水道整備状況	下水道計画平面図及び各自治体から取得.
し尿処理形態別人口	清掃事業年報などから取得.
工業製品出荷額	工業統計調査結果から取得.
従業員数	事業所・企業統計調査結果から取得.
家畜飼育頭数	農業センサス等から取得.
処理処分形態別排出率	東京湾流域別下水道整備総合計画等から取得.
下水処理場放流水量・水質	下水処理場の台帳から取得.
土地利用	細密数値情報を利用.

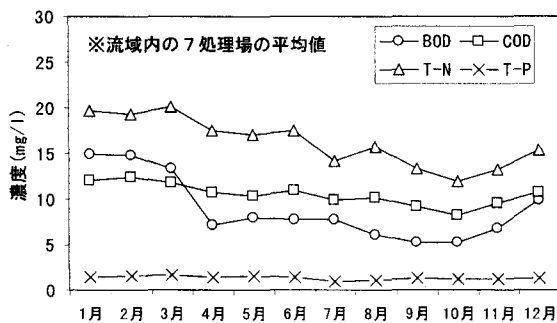


図-5 下水処理場からの放流水質.

表-4 非点源負荷に関するパラメータ設定値.

パラメータ名	単位	BOD	COD	T-N	T-P
a : 負荷堆積速度	路面 $\text{g}/\text{m}^2/\text{day}$	0.530	0.830	0.120	0.0160
	屋根 $\text{g}/\text{m}^2/\text{day}$	0.016	0.024	0.003	0.0005
k : 減衰係数	1/day	0.8	0.8	0.8	0.8
K : 掃流係数	路面 1/mm	0.12	0.1	0.12	0.12
	屋根 1/mm	0.28	0.28	0.28	0.28
q_c : 限界掃流流量	路面 mm/hr	1.5	1.5	1.5	1.5
	屋根 mm/hr	0	0	0	0

流出経路サブモデルのパラメータである流達率などは、キャリブレーション対象項目として、表-5に示す値に設定した。

表-5 流出経路サブモデルのパラメータ設定値.

パラメータ名	単位	BOD	COD	T-N	T-P
f : 流達率	-	0.2	0.4	0.4	0.1
K_r : 掃流係数	1/mm	0.005	0.020	0.005	0.005
q_{rc} : 限界掃流流量	mm/hr	2.0	2.0	2.0	2.0

河川サブモデルのパラメータである減衰係数は沈降と分解による減衰を総括的に扱った値として、水温の関数として次式で与えた。

$$k_{riv} = k_0 \theta^{T-20} \quad (8)$$

ここで、 T : 水温($^{\circ}\text{C}$)、 θ : 温度補正係数($=1.047$)であり、 k_0 は文献値^{12),13)}などを参考に表-6に示すように与えた。

表-6 河川サブモデルのパラメータ設定値.

パラメータ名	単位	BOD	COD	T-N	T-P
k_0 : 減衰係数	1/day	0.23	0.23	0.01	0.01

5. 現況再現シミュレーション結果

(1) 年間汚濁負荷流出シミュレーション結果

平成8年(平成5~9年における平水年)を対象年として、年間の汚濁負荷流出シミュレーションを実施した。

モデルの検証は、図-1に示した水質観測地点において行った。本川中流域の主要な観測地点である亀甲橋における日流量及び水質の観測値と計算値の比較を図-6、図-7に示す。流量については、観測値と計算値はよく一致しており、十分な再現性を有していると言える。

水質については、BOD、CODの計算値が降雨時にピークを生じているのは、非点源負荷の影響である。T-N、T-Pについては、降雨時に水質濃度が低下している。この原因については、後述する降雨時に関する検証の項で述べる。

図中の観測値は無降雨時のものである。計算値はBOD以外の水質項目について観測値とよく一致している。都市河川の多くでは、河川流量に占める下水処理水の割合が高い。本河川でも亀甲橋地点において平水時で約5割、低水時で約6割を下水処理水が占めている¹⁴⁾。都市河川では下水処理水由来の負荷の影響が大きいのので、本モデルのように表面流出負荷のみを考慮したモデルにおいても比較的高い再現性が得られると考えられる。

BODについては、観測値が水温の低下する冬期に高くなる傾向が見られる。同じ有機物の指標であるCODについては、同様な傾向が見られないので、N-BODの影響を受けていると考えられる。水温の低下する冬期には、処理場におけるアンモニア性窒素の硝化率が低下するため、河川におけるN-BODの値が上昇すると考えられる。

モデルにおいては、これらの影響を反映するために、下水処理場からの放流水質は、硝化反応を抑制したBOD値(C-BOD)でなく、N-BODを含むデータを用いたものの、冬の河川におけるBODの上昇を再現することができなかった。この点については、再度調査を行い、実現象を分析し、モデルに反映する必要がある。

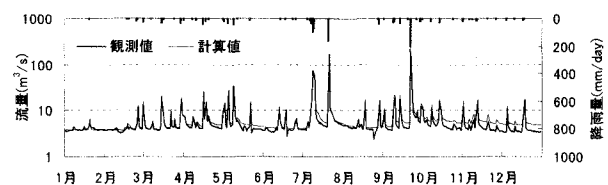


図-6 流量観測値と計算値の比較(亀甲橋).

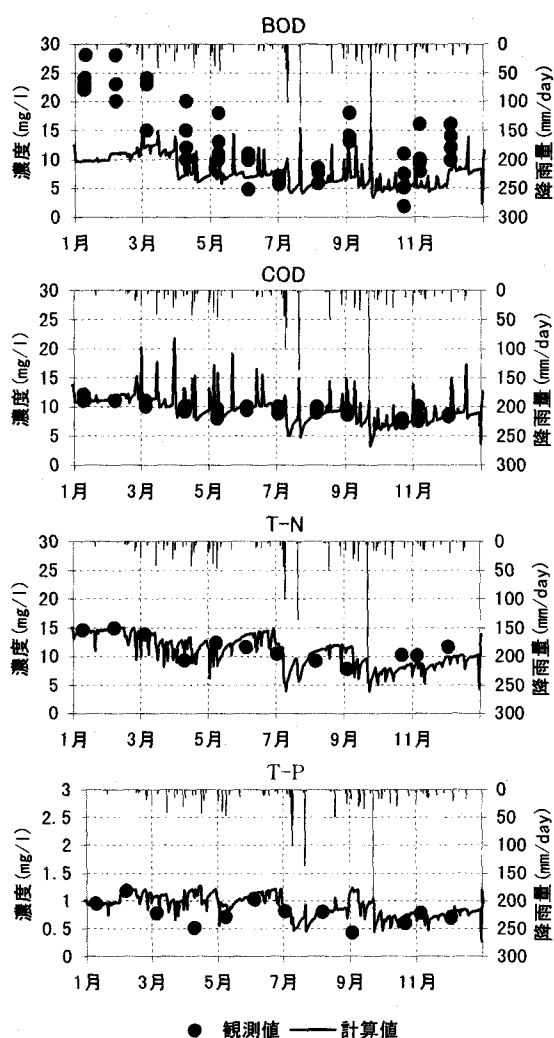


図-7 水質観測値と計算値の比較(亀甲橋)。

(2) 雨天時汚濁負荷流出シミュレーション結果

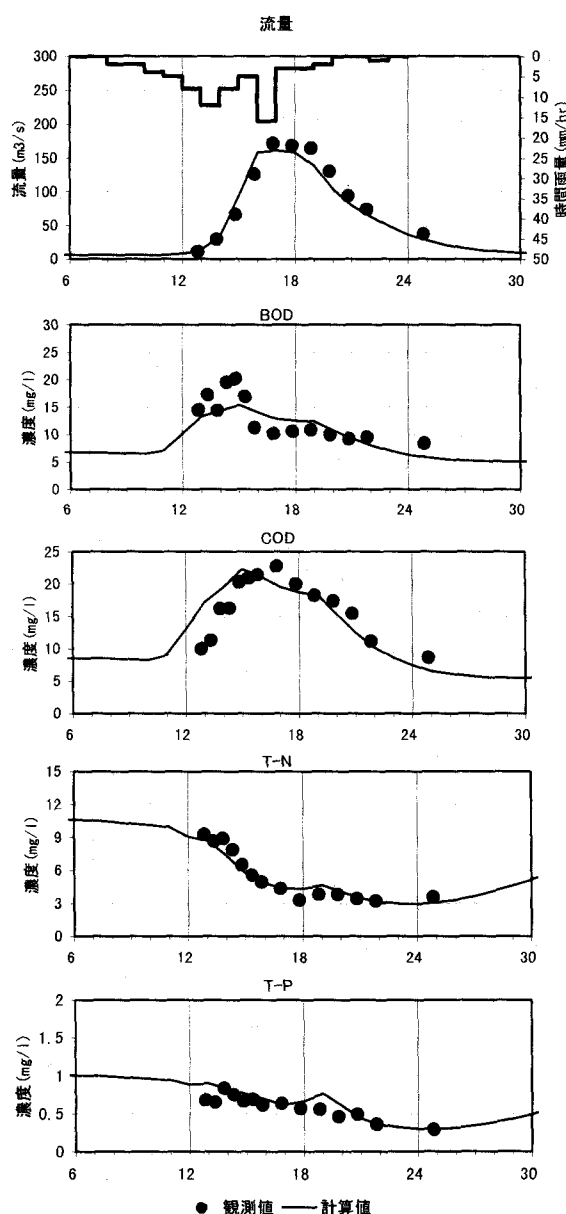
亀甲橋地点における雨天時水質観測データが得られたので、雨天時における汚濁負荷流出についてモデルの検証を行った。観測値と計算値の比較を図-8に示す。雨天時についても、流量については観測値と計算値がよく一致している。水質の内、BODについては計算値が観測値より緩やかな変化傾向を示しているものの、全体的に計算値は観測をよく再現していると言える。

また、BOD、CODの経時変化傾向は、流量と同様に上に凸型であるのに対し、T-N、T-Pは流量増加に伴って濃度が低下する傾向が観測されている。これは、前述したように亀甲橋地点の河川平常流量に占める下水処理水の割合が高いことに起因している。高度処理施設を導入していない下水処理場では、二次処理によって有機物や懸濁物のほとんどが除去されるのに対し、窒素・リンはほとんど未処理のまま放流される。そのため、T-N、T-Pについては下水処理場から放流される負荷量が大きく、降雨時に流域から流出する非点源負荷量は相対的に小さいので、降雨時は水量増加による希釈効果で濃度が低下する結果になる。本検討で構築したモデルは、このような水質項目によ

る水質変化傾向の違いを良好に再現することができた。

(3) 年間流出負荷量

対象流域を8つのブロックに分割し、シミュレーション結果を用いて各流域毎の年間BOD流出負荷量を整理した結果を図-9に示す。本川中流域及び下流域では、下水処理場からの放流による負荷量の全体に占める割合が高い結果となっている。また、いずれの分割流域においても、市街地の屋根や路面から雨天時に排出される非点源負荷量より、下水道未整備地域において河川への流出経路である側溝などに無降雨時に堆積した点源負荷が降雨時に流出した量の方が大きい結果となった。



平成11年10月27日 0:00からの経過時間(hr)

図-8 雨天時水質計算結果(亀甲橋)。

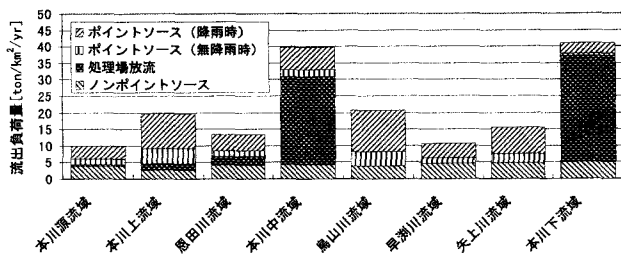


図-9 年間BOD流出負荷量の比較。

6. 結論

本検討では、河川流域のマスタープラン策定において流域の水循環系を定量的に評価するモデルとして、グリッドベースの分布型汚濁負荷流出モデルを構築し、著しく都市化の進んだ鶴見川流域へ適用し、モデルの検証を行った。モデルは、点源に加え非点源として市街地の不透透域(屋根・路面)からの汚濁負荷排出を堆積・掃流モデルとして組み込んだものとした。モデルの検証によって得られた結果は次のとおりである。

- 1) 無降雨時の河川水質の年間変動はBODを除いて良好に再現することができた。BODについては、検証地点の亀甲橋地点の観測水質が冬期に上昇する現象を再現することができなかった。この地点は、河川流量に占める下水処理水の割合が高いことから、水温の低下する冬期に処理水の水質が悪化したためと考えられる。
- 2) 検証地点における降雨時の水質時系列変化は、BOD、CODが流量の変動に対応した挙動を示すのに対し、T-N、T-Pは流量が増加すると濃度が低下する傾向を示した。T-N、T-Pについては、処理場由来の負荷量が大いなので、降雨時には流量の増加による希釈効果によって、水質濃度が低下する。このような水質項目による水質変化パターンの違いをモデルは良く再現することができた。
- 3) モデルによって流域からのBOD年間流出負荷量を求めたところ、市街地不透透域から排出される非点源負荷量より、下水道未整備地域の側溝などに堆積した点源負荷の一部が降雨時に流出する量の方が大きい結果となった。

本検討の対象流域は、都市化の著しく進んだ流域であったので、非点源負荷として市街地不透透域のみを対象とした。山林や農地面積の大きい流域へもモデルを適用するために、これらの非点源からの排出負荷量評価モデル及び表層土壌中の物質挙動を評価するモデルの開発が今後の課題であるものの、都市河川の場合、非点源負荷として市街地不透透域のみのモデル化でも妥当な水質評価が可能であると言える。

謝辞： 本検討にあたり種々のご指導を頂いた東京大学生産技術研究所由明功臣教授、香川大学河原能久教授の各位に深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 浮田正夫, 関根雅彦, 中西弘: 土地利用別タンクモデルによるボルートグラフシミュレーション, 河川汚濁のモデル解析, pp.166-171, 1989
- 2) 安陪和雄, 和田一斗, 杉森啓明, 寺川陽: 湖沼流域環境管理シミュレーションシステム, 土木技術資料, Vol.40, No.8, pp.20-25, 1998
- 3) Ni G., Musiak K., Herath S.: A distributed catchment model and its application to simulate urbanization effect, Proc. 9th APD-IAHR, pp.254-261, 1994.
- 4) Herath, S., Musiak, K., and Hironaka S.: Development and Application of a GIS based Distributed Catchment Model for Urban Areas, Proc. 7th International Conference on Urban Storm Drainage, 1695-1700, 1996.
- 5) Herath, S., Jha, R., and Musiak, K.: Application of IISDHM in Northern Chao Phraya, Thailand, The Third Intl. Study Conference on GEWEX in Asia and GAME, GAME International Science Panel, pp.125-133, 1997.
- 6) Jha, R., Herath, S. and Musiak, K.: Development of IIS Distributed Hydrological Model (IISDHM) and its Application in Chao Phraya river basin: Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, pp. 227-232., 1997.
- 7) S.Nakamura, M.Saito, S.Herath.: Development and applications of a physically based distributed catchment model in urban area, International Conference on Urban Engineering in Asian Cities in the 21st Century, proc. vol. II, pp.F.128-223, 1996.
- 8) 中村茂, 中嶋規行, 忌部正博, Srikantha Herath: グリッド型水循環系解析モデルの開発 海老川流域を対象として, 水工学論文集, 第45巻, pp.103-108, 2001.
- 9) 中部 淳, 松本賢一, 山田 淳, 梅原龍哉: 路面堆積物挙動のモデル化と清掃効果の検討, 土木学会第49回年次学術講演会概要集2-B, pp.950-951, 1994.
- 10) 脇岡靖明, 古米弘明: 都市ノンポイント汚染源負荷流出調査に基づく不透透面堆積負荷流出モデルの検討, 土木学会論文集, No.685/VII-20, pp.123-134, 2001.
- 11) 土木研究所資料第1704号 下水道管路施設設計の合理化に関する調査報告書(IV) 一合流式下水道の改良に関する調査一, 1981.
- 12) 宗宮 功: 自然の浄化機構, 技報堂出版, 1990.
- 13) 松尾友矩, 田中修三, 安田正志, 田中和博, 長岡裕: 水環境工学, オーム社, pp.56-59, 1999.
- 14) 鶴見川とその流域の再生～流域水マスタープラン策定に向けた提言～, (財)リバーフロント整備センター, p.199, 2002.

(2002. 9. 30受付)