

GIS データを用いた非点源汚濁負荷流出量の 予測と評価

EVALUATION OF THE NON-POINT POLLUTANT RUNOFF RATES BASED ON GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM

野村佐和美¹・野口正人²・西田 渉³・水野良宣⁴

Sawami NOMURA, Masato NOGUCHI, Wataru NISHIDA and Yoshinobu MIZUNO

¹ 学生会員 長崎大学大学院 生産科学研究科博士前期課程 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

² フェロー会員 工博 長崎大学教授 工学部社会開発工学科 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

³ 正会員 博(工) 長崎大学助教授 工学部社会開発工学科 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

⁴ 非会員 修(工) 東京設計事務所関西支社 (〒532-0004 大阪市淀川区西宮原 1-8-29)

Recently, eutrophication becomes serious in the enclosed water bodies. In order to attain the sound and sustainable water environment, reduction of pollutant runoff from the watershed should be pursued as well as purification of water at the water bodies themselves. From the viewpoint mentioned above, pollutants from not only the point source but also the non-point one must preferably be reduced. For this purpose, detachment rates of pollutants from the non-point source were discussed related to the condition of watershed and a series of rainfall. Discussing the effects of several factors on the detachment coefficient, the following equation has been derived.

$$k = a \times R^b \times L^c$$

Here, k is the detachment coefficient, R the antecedent rainfall, L the class of land use, and a to c the parameters. Here, parameters included in the equation have been identified, referred to the data of the Honmyo River basin. This kind of equation is surely expected to be available for an estimation of pollutant runoff rates from the non-point sources.

Key Words : non-point source, detachment rates, detachment coefficient,
antecedent rainfall, the class of land use

1. はじめに

近年, 閉鎖性水域での富栄養化現象は深刻な問題になっている. 好ましい水環境を達成するためには, 水域内での水質保全管理対策と同様に, 流域から放出される汚濁負荷の抑制を積極的に行わなければならない. また, 最近では都市化に伴い, 汚濁負荷流出量に対する非点源汚濁負荷流出量の占める割合が増大している. そこで, 非点源汚濁負荷流出機構を明らかにし, 定量的に評価する必要がある.

上述されたことから, 本論では, 非点源汚濁負荷流出機構における剥離量を流域の状態や降雨時系列に関連づけて検討した. 汚濁物質の剥離量を地表面に作用するせん断応力に比例すると考え, その比例定数を流域の状態や降雨時系列の影響を考慮して表すことを試みた. 汚濁負荷流出量を適切に予測

するためには剥離量の見積もりを正確に行う必要がある.

2. 非点源汚濁負荷流出

好ましい水環境を効果的に達成するためには汚濁負荷流出を抑制すべきである. とりわけ, 非点源汚濁負荷流出を制御することが重要になり, 多くの研究がこれまでに行われてきた. しかしながら汚濁負荷流出量を評価するための系統的な手法が必ずしも確立されているわけではない.

非点源汚濁負荷流出が流域の状態や降雨時系列に影響していることは容易に推察される. したがって, たとえ汚濁流出割合と流量との間に一意的な関係を求めようとしても, この種の関係を正確に求めることはできない¹⁾.

そこで、本明川流域の5つの小流域である境川、深海川、本明川、千鳥川、山田川を取り上げて汚濁負荷流出量の検討を行った。(図-1、図-2) 検討に用いられた観測データは地方自治体の公共水域で得られたものである。

汚濁負荷流出量を正確に予測するためには、剥離量を蓄積量や輸送量と同様に合理的に評価しなければならない。次節では、剥離量を精度良く評価する方法を試みた。この手法の提示を通して、水質の観測は晴天時だけではなく雨天時のもとでも行うべきであることが示される。

3. 汚濁負荷流出モデルと剥離係数

一般に、流れの基礎方程式は以下の式によって表される。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\theta u_j) = Source \quad (1)$$

($j=1\sim3$)

ここで、 θ は物理量、 u_j は速度、 t と x_j はそれぞれ時間と空間座標、 $Source$ は単位時間、単位体積あたりの質量、運動量、エネルギー量などの生成量である。通常、上述された方程式はコントロールボリュームに対して積分された形に変形される。

流域からの非点源汚濁負荷流出の問題を考えれば、流域に面的に分布している汚濁が雨水流によって運ばれるものとして、連続方程式、運動方程式、そして、汚濁物質の保存式を解析せねばならない。従来の研究によれば、非点源汚濁の多くが降雨時に流域から受水域に流出していることは確かなことに思われるが、雨水流出の現象がそうであるように、降雨のない時に直ちに非点源汚濁負荷流出量が零になるという訳ではない。ともあれ、降雨時ならびに無降雨時の非点源汚濁負荷流出量を定量的に評価することは、流域水質管理を行っていく上で重要なことである。

上述されたことから、本論において具体的な適用例を考える際には、対象流域を落水線網で覆い²⁾、汚濁物質の濃度変化は次式を解くことにより求めることとした。

$$\frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\xi CUh) = q^{(s)} + q^{(b)} \quad (2)$$

この方程式において、 C は汚濁濃度、 U は平均流速、 h は水深、 ξ は汚濁の移流量に対する補正係数、 $q^{(s)}$ 、 $q^{(b)}$ はそれぞれ表面と底面を通して流入する単位面積、単位時間あたりの汚濁量である。

上式を用いて現象把握を行うためには、表面ならびに底面からの汚濁量を正確に求める必要がある。ここに、雨水流出の場合と同様、常時、表面流出が

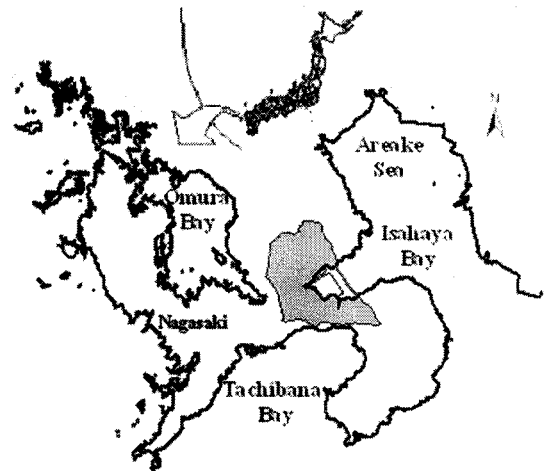


図-1 諫早湾調整池流域の概要図

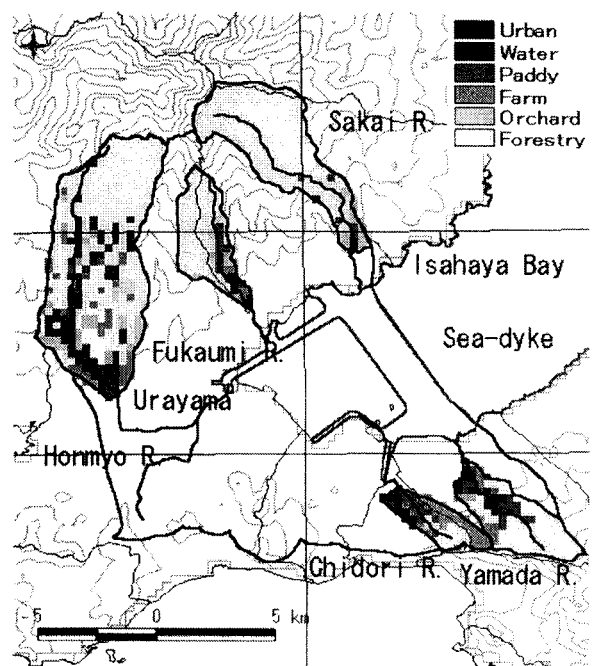


図-2 本明川の5つの小流域における土地利用分類

見られる訳ではないが、流域からの汚濁補給量の見積りを、雨水流量に伴い底面に作用するせん断応力と関連づけて評価することを試みた。当然のことながら、このような考えでは、汚濁の蓄積に伴う補給量の評価も同様の扱いになるといった問題を有しているが、この点については今後、大気中からの汚濁補給量について評価せねばならない。

流域からの汚濁補給量を、上述のような考えで、剥離量として評価するものとして、汚濁の剥離量を地表面に作用するせん断応力に比例させて算定した。

$$q^{(b)} = k\tau = k2\mu(V/h) \quad (3)$$

ここに、 $q^{(b)}$ は汚濁物質の剥離量、 τ はせん断応力、 μ は粘性係数、 V は平均流速、 h は水深、 k は流域の

表-1 土地利用(L), 土壌特性(S), 水分含有量(R)の分類

Land Use	Meadow	Forests	Overall-Site-Farm	Roads/Paving
L	53	60	67	76
Soil Type	well drained	moderate	moderate	poorly drained
S(mm/h)	10	6	2.5	0.5
Rain Condition	scarce	moderate	frequent	
R(mm)	6	20	40	

表-2 本明川の5つの小流域における土地利用分類

/River	Sakai R.	Fukaumi R.	Honmyo R.	Chidori R.	Yamada R.
Area (km ²)	18.6	9.3	36.6	5.0	10.0
High (m)	862.0	742.0	832.0	191.0	592.0
Low (m)	26.0	21.0	16.0	3.0	13.0
Distance (m)	8869.92	6128.92	10986.44	4206.81	5846.16
Slope	0.094	0.118	0.074	0.045	0.099
Land Use					
Urban (km ²)	0.1	0.1	1.6	0.7	0.8
Water (km ²)	0.1	0	0	0	0
Paddy (km ²)	0.3	1.2	5.2	0.9	1.8
Field (km ²)	0.1	0.3	3.1	2.1	0.9
Orchard (km ²)	1.1	0.8	3.0	0	0.3
Forestry (km ²)	16.8	6.9	23.7	1.3	6.1

状態や降雨と関連づけて評価されるべき係数であり、ここでは、剥離係数と称する。剥離係数の評価は次節で詳しく検討される。なお、沈降速度: w_0 、汚濁濃度: C を用いて沈降量を $w_0 \cdot C$ として算定し、(2)式右辺の剥離量を計算する際に考慮した。

4. 汚濁負荷の剥離係数：結果と考察

本明川は諫早湾に流れ込んでおり、ここでは現在、諫早湾干拓事業が進行中である。そのため、流域からの汚濁負荷流出量を抑制することが重要になっている。図-1、図-2 は諫早湾調整池流域、ならびに対象とされた5つの小流域を示している。なお、2002年の6月の事業計画変更のため、現在の干拓予定地は図-2のものより縮小されている。

汚濁物質の剥離量は地表面に作用するせん断応力に比例すると考えられる。しかしながら、汚濁負荷流出機構を考えると剥離の現象は降雨時系列や流域の特性等に影響され、変化するものと思われる。そのため剥離係数は絶対的な定数にはならない。

Universal Soil Loss Equation (USLE) は流域からの土砂量を評価するのによく知られた方程式のひとつである³⁾。この方程式は流域からの土砂損失量を流域の特性を示した物質質量で評価したものである。上で述べた剥離係数をこのような物質質量と関連づけて評価することを試みた。また、アメリカ合衆国土壤保全局によって開発された雨水の表面流出の経験的手法に従うと、降雨に対する土壤の貯留能: S_r は土地被覆分類、土壌特性、土中に含まれる初期含水量に基づいて決定される流出曲線指標: CN と相互に関係している³⁾。これらの結果を汚濁負荷流出量の評価の参考にした。上に述べた物質質量の回帰曲線を得るために、土地利用(L)、土壌特性(S)、水分含有量(R)の分類を表-1に示した。なお、土地利用(L)の値は大きくなればなるほど、水は土中へ浸透し難くなることを示し、土壌特性(S)は、浸透割合を示し、水分含有量(R)は前5日間の降雨量を示している。

上述されたことより雨水流出量は土地利用、土壌特性、水分含有量と関係があることが推察される。このことから雨水流出量は土地利用、土壌特性、水

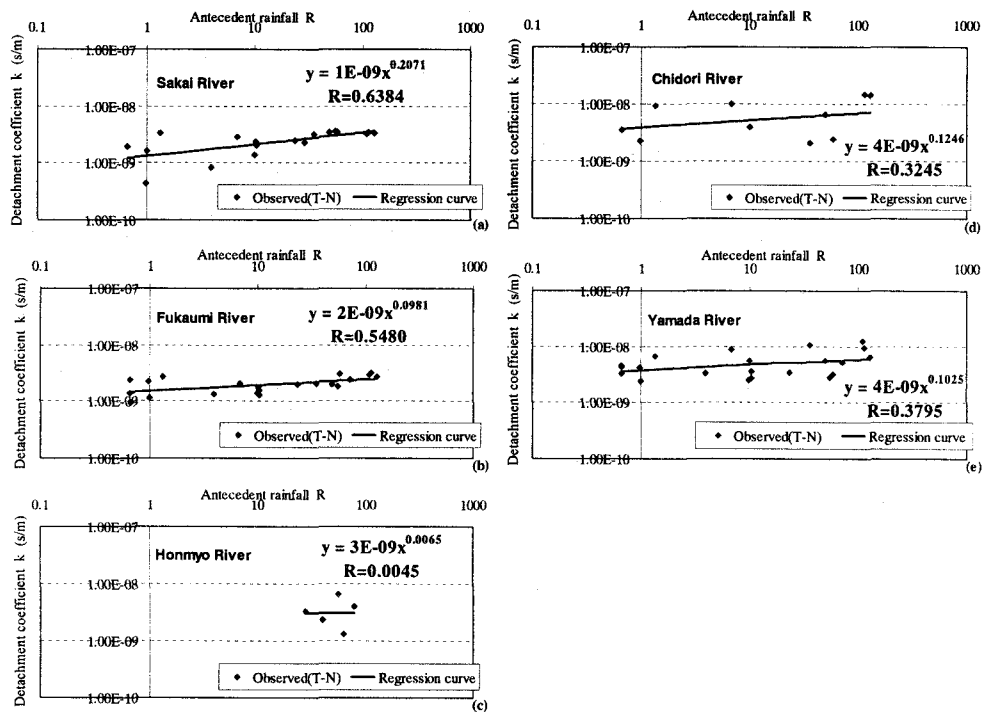


図-3 先行降雨における評価

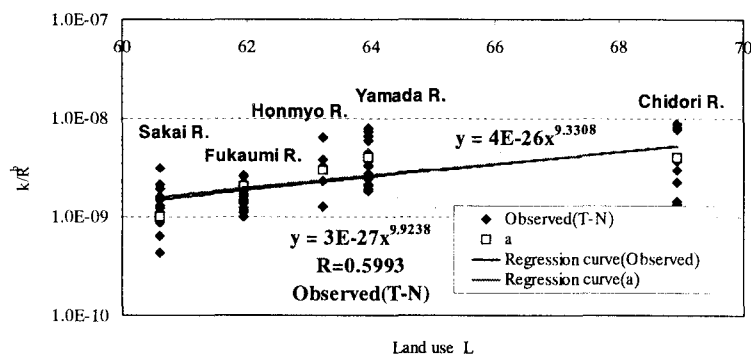


図-4 土地利用における評価

表-3 先行降雨におけるパラメータ

Regression/River	Sakai R.	Fukuami R.	Honmyo R.	Chidori R.	Yamada R.
Proportionality const.	1.00E-09	2.00E-09	3.00E-09	4.00E-09	4.00E-09
Power	0.2071	0.0981	0.0065	0.1246	0.1025

分含有量の諸量で予測することができる。

全窒素の剥離係数を同定するにあたり、先に述べた本明川流域の 5 つの小流域の観測データを用いた。本来は、それぞれの土地利用ごとに汚濁負荷流出量を求めなければならないが、現在、非点源汚濁負荷に関するデータがほとんどないため、今回は、公共用水域の水質結果の全窒素のデータを用いて行った。図-2 はこれらの 5 つの小流域の土地利用分類図であり、その値は表-2 にまとめられている。

(3) 式に示されたように、剥離係数はせん断応力の比例定数として定義されているため、降雨強度や流出量などの現行降雨の影響はすでに考慮されていると考えられる。そのため、剥離係数は主として流域の特性との関連で考察されなければならない。

図-3(a)-(e)にそれぞれの小流域において全窒素の剥離係数と先行降雨との関係を示した。ここで、先行降雨は観測前 7 日間の降雨量にそれぞれ重みをつけて考慮した。また、公共用水域の水質結果には

表-4 パラメータ値

/river	Sakai R.	Fukaumi R.	Chidori R.	Yamada R.
a	3.00E-27			
b	0.2071	0.0981	0.1246	0.1025
c	9.924			

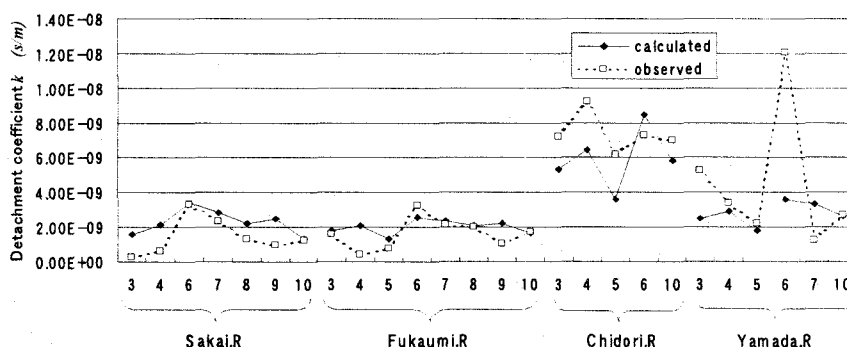


図-5 2000年(3月～10月)における剥離係数

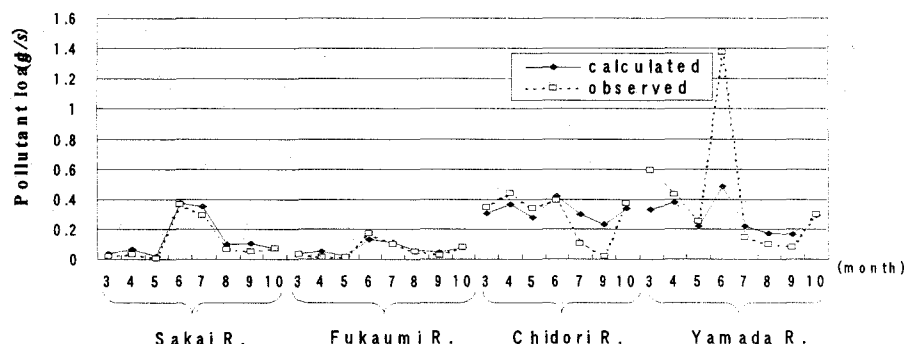


図-6 2000年(3月～10月)における全窒素の汚濁負荷量

点源・非点源汚濁負荷の両方が含まれているため、今回は原単位を使って求められた点源汚濁負荷を差し引いて非点源汚濁負荷量を求めた。これらの図から、ほかの要因から生じたと考えられる小さなばらつきがあるものの剥離係数と先行降雨には高い相関がみられた。本明川（裏山橋）においては全窒素の観測データが3ヶ月ごとしかないので、データの数が他と比べて少ない。本明川の場合を除いて式のべき乗は0.1～0.2の範囲であることが示された。

図-4 に剥離係数から先行降雨の影響を取り除いたものと土地利用の関係を示した。土地利用の値は表-1 に示された値を用いて計算を行った。図-4 で横軸の値は土地利用の比率を考慮したものであり、一方、縦軸の値は剥離係数から先行降雨の影響を取り除いたものとして評価された。横軸と縦軸の値はお互いに独立に得られたが、相互に高い相関が見られた。図-3 に書かれている式の係数は表-3 に示されている。また、これらの値は図-4 に(a)として示されている。

非点源汚濁負荷流出量を適切に求めるため、流水のせん断応力に比例定数を定義し、その値を流域の特性や降雨時系列との関連で検討し、次式を求めた。

$$k = a \times R^b \times L^c \quad (5)$$

ここに、 k は剥離係数、 R は先行降雨量、 L は土地利用の程度を表す値、 $a \sim c$ はパラメータであり、各パラメータの値に関してはこれまでの図表に示されたとおりであり、表-4 にまとめて示した。

前節では、全窒素の剥離量を公共用水域の水質結果のデータから求めた。このことから基準点での水質は汚濁負荷流出機構を踏まえて系統的に管理されることが望ましい。そこで、全窒素の剥離係数を上述した式を用いて計算した。図-5 は剥離係数の計算値と観測値を比較したものである。両方の値は一部分を除いて、かなり良く一致している。図-6 は全窒素の汚濁負荷量の計算値と観測値を比較したものである。山田川での6月や千鳥川での9月の場合を除くと、両者の値はほとんど一致している。このことより提案されたモデルが非点源汚濁負荷

からの剥離量を評価するのに有効であることが理解できる。

上述された数値シミュレーションは主として、晴天時での非点源汚濁負荷流出量を評価したものである。一方、多くの汚濁負荷は主に雨天時に流出するものと考えられる。そこで、雨天時においても非点源汚濁負荷流出量の数値シミュレーションを実行し、汚濁負荷流出量を求めることが必要である。この種の数値シミュレーションについても、落水線上で基礎方程式を解くことにより行える²⁾。表-4に示されているパラメータ値を用いて、雨天時における汚濁負荷流出量を求めることとした。ここでは、紙面の関係でその結果のみを図-7、図-8に示す。ここに、図-7は対象流域での落水線の様子を示しており、図-8は、雨天時の汚濁負荷流出量の時間的变化を示している。本論で示されたことより明らかのように、対象流域の標高や土地利用などのGISデータを用いることにより、汚濁負荷流出解析が系統的行える。図-8には、計算値が観測値と対比して示されており、両者がほぼ同様に変化していることがわかる。ただし、周知の“first flush”が計算結果に示されていない。これは、その現象を十分に表現する段階で、基礎方程式の解析、とりわけ、汚濁負荷の生成項の評価がされていないためと思われる。雨天時での剥離係数の評価についても、今後さらに検討していきたい。

5. 結論

上述されたことから本論では以下のことが結論として上げられる。

- (1) 汚濁負荷流出における剥離量を精度良く評価するために、(3)式によって定義された剥離係数を本明川流域の流域特性を考慮して検討した。
- (2) 剥離係数に係る要因を検討し、次式が導き出された。

$$k = a \times R^b \times L^c$$

ここに、 k は剥離係数、 R は先行降雨量、 L は土地利用の程度を表す値、 $a \sim c$ はパラメータであり、パラメータの値は表-4に示されている。

- (3) 本論で示されたモデルにより、流域からの汚濁負荷流出量を精度良く評価することができる。対象とされた地域は、諫早湾締切堤内の閉鎖性水域の水質を良好に保つ上で適切な「流域水質管理」が望まれている地域であり、本論で得られた手法が有効であることは間違いない。

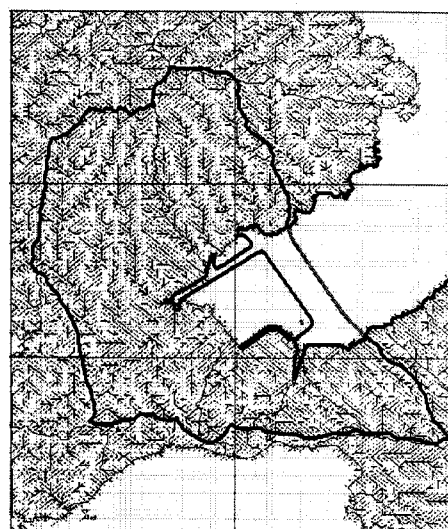


図-7 本明川流域における落水線図

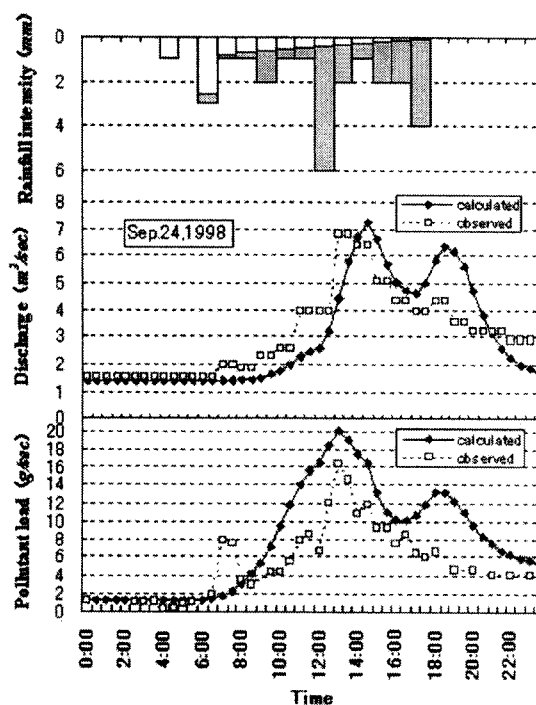


図-8 汚濁負荷流出量の時間的变化

参考文献

- 1) Noguchi, M., W. Nishida and W.B. Park (1999): Pollutant Runoff and Its Effect on the Newly Constructed Regulatory Pond in a Bay, Proc. 8th International Conference on Urban Storm Drainage, Vol.4, pp.1631-1638.
- 2) Noguchi, M., W. Nishida and T.Hiwatashi (2001): Prediction of Nitrogenous Pollutant Runoff due to Rainfall from the Watershed, Urban Drainage Modeling, EWRI, ASCE, pp.866-873.
- 3) Reible, D. D. (1998): Fundamentals of Environmental Engineering, Lewis Publishers.

(2002. 9. 30受付)