

# 流域からの非点源汚濁負荷流出機構の解明と そのモデル化に関する研究

野口 正人\*・西田 渉\*  
水野 良宣\*\*・峰松 睦\*

## Pollutant Runoff Mechanism from Watershed under the Rain Condition and Its Modeling

by

Masato NOGUCHI\*, Wataru NISHIDA\*  
Yoshinobu MIZUNO\*\* and Mutsumi MINEMATSU\*

In order to effectively carry out the water environmental management, it becomes necessary to know the pollutant runoff mechanism from the non-point sources, especially under the rain condition, and also to estimate the runoff rate about not only the stormwater but pollutant loads distributed over the watershed, considering the rainfall-runoff relationship.

In this paper, field data about the nitrogenous pollutant runoff have firstly been introduced, executing at the Honmyo river, A-class river in Nagasaki. Afterward, above data have been discussed from several kinds of viewpoints, including those through a mathematical model. Finally, developed model has been proven to be available for estimating the diffuse pollution from the watershed.

**Key Words :** Pollutant runoff, non-point source, diffuse pollution, mathematical modeling, wet condition field observation

### 1. はじめに

最近益々、水環境を含む自然環境の質を高めることの重要性が認識されるようになってきた。通常、「水環境」の問題を論じる場合、ともすれば「水域」の状態だけが取り上げられがちである。しかし、容易に察せられるように、「水域」の状態は水循環、物質循環の一面にしか過ぎない。そのため、水域での水質を清澄に保つためには、水域の後背地である流域からの汚濁負荷流出機構を明らかにし、未処理のままに水域に放出される汚濁負荷量を極力抑制する必要がある。

上述されたことから本論では、流域に分布する汚濁負荷について簡単に取り上げた後、主として降雨時における非点源汚濁負荷流出の状況を窒素系汚濁を例にして考察する。そのため、降雨時において実河川で窒素系汚濁の水質観測を行い、観測結果を数種の汚濁負荷流出モデルによる計算結果と比較し、考察する。

### 2. 流域からの汚濁負荷流出量と流量との関係

通常、汚濁負荷流出量(L)と流量(Q)の間には、しば

しば、以下に示す比例関係式が存在するものとされる。

$$L = aQ^b \quad (1)$$

ここに、 $a$ 、 $b$ は個々の流域の特性より決定される定数である。

図-1には長崎県と本明川の裏山橋を基準点とする流域を示しており、長崎県諫早市を流れる本明川の裏山橋から約500m上流にある鉄道橋地点で、公的機関により昭和58年度～平成7年度に測定されたT-Nの汚濁負荷量と流量との関係を図-2に示した。

本論で示されるように、非点源汚濁負荷の形成機構の複雑さや、それらが水域に輸送され始める剥離が土地利用等により一様でないことから、凡例に示されたような簡単なパラメータだけを用いて回帰曲線からはずれている様子を正確に表すことはかなり困難である。この種の観測が降雨の影響を避けて、たとえば1ヶ月に1回というような測られ方がされており、主に雨天時に流出する非点源汚濁負荷を考えた場合、回帰曲線上に高

平成12年10月27日受理

\* 社会開発工学科 (Department of Civil Engineering)

\*\* 大学院生産科学研究科博士前期課程環境システム工学専攻 (Graduate student, Department of Environmental System Engineering)

い相関関係で乗らないであろうことは容易に推察できる。このようなことから、汚濁負荷流出量と流量との関係を正確に予測するためには、汚濁負荷流出機構に係る諸因子を考慮した流出解析が必要になることがわかる。

3. 降雨時における窒素系汚濁負荷の流出機構

受水域の水質汚濁を避けるためには、流域からの有機物や、窒素や燐の栄養塩類が未処理で水域に放出されることを防ぐ必要がある。そのため本論では、その対策が有効にされるためにも汚濁負荷流出量が正確に予測される必要があるとの観点で、代表的な雨水流出解析法を非点源汚濁負荷流出量の算定に役立てることが目論まれた。

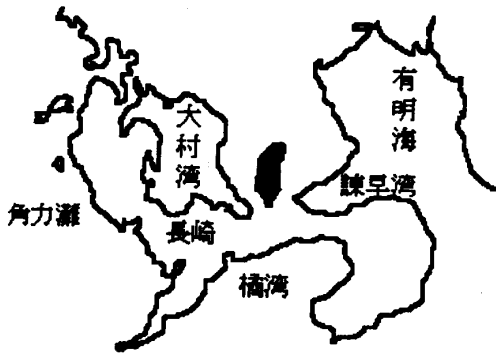


図-1. 本明川流域 (裏山橋)

凡例の説明 観測日の前日から1週間遡る期間に降雨があったか否かを調べ最も強い降雨強度とそれが出現したときまでの経過時間との比を求めることとする。	実験1	実験2
	◇ A 0<a≤5 □ B 5<a≤10 △ C 10<a≤15 ○ D 15<a	b=0 b=0 b=0 b=0
実験1(a) 降雨強度/降雨があった時から現在までの経過時間	◆ A 0<a≤5 ■ B 5<a≤10 ▲ C 10<a≤15 ● D 15<a	b=1 b=1 b=1 b=1
実験2(b) 観測日の降雨: 有(b=1)、無(b=0)		

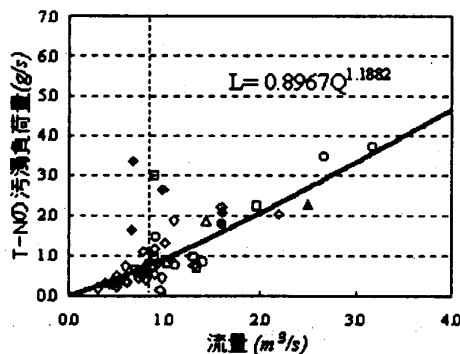


図-2. T-Nの負荷量と流量との関係 (本明川、鉄道橋)

(1) 各種の非点源汚濁負荷流出モデル

上述されたことから、最初に汚濁負荷流出タンクを

用いた解析が試みられた。そのため、一定の降雨強度 ( $r_0$ ) の雨が一定時間 (T) 降り続いた時の汚濁負荷流出量が、雨水流出量の関数として求められた<sup>1)</sup>。この方法は、1段線形タンクを用いて解析解との対比で雨水と汚濁の流出孔乗数 (それぞれ、 $\lambda$ ,  $a$  と置かれた) を決定し、対象流域の汚濁負荷流出に関係した特徴を明らかにしようとしたものである。

一方、実際の流域を対象にして具体的な非点源汚濁負荷流出量を求めるためには、図-3に示されたように、対象流域をいくつかの小流域に分割し、個々の小流域からの流出量ならびに汚濁負荷流出量を基準点まで追跡計算せねばならない。ただし、ここでは計算を簡略化するため、個々の流出量を遅れ時間を考慮して基準点で総和することにした。この解法の特徴は、図中(b)に太線で示されたように、個別の3小流域の流出量を求める基本的な操作が、一般的な操作として全流域に拡張されることである。したがって、ハイドログラフやポリユートグラフを求める基本となるプログラムを、それぞれ独立した実行形式のプログラムとして作成しておけば、今後さらに流出量の予測精度を向上させていくような場合にも柔軟に対処することができる。なお、以下の流出量計算では2段式タンクモデルが用いられているが、その他の流出解析法で代替させることも容易であり、非点源汚濁負荷流出量が雨水流出量と共に求められる特徴を有している。

ところで、流域に分布する非点源汚濁の流出の問題を取り上げれば、開発されるべきモデルの普遍的な利用を考慮すれば、モデルの構造が "physically based" であることが望まれる。このようなことから、雨水流出解析法として良く知られたKW法 (Kinematic Wave 法) を用いて、汚濁負荷流出量の算定が試みられた。すなわち、この場合には、図-3に示された小流域をさらに河道と左右の斜面に分割し、次式により計算することとした。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r \tag{2}$$

$$h = kq^p \tag{3}$$

$$\frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\zeta Cq) = q^{(s)} + q^{(h)} \tag{4}$$

ただし、基礎式の表示は斜面に対して行われており、 $h$ :水深,  $q$ :単位幅流量,  $r$ :降雨強度であり、 $p$ ,  $k$ は、 $p=3/5=0.6$ ,  $k=(n/i)^p$  と表された。ここに、 $n$ :マンングの粗度係数,  $i$ :斜面勾配である。また、 $C$ :汚濁物

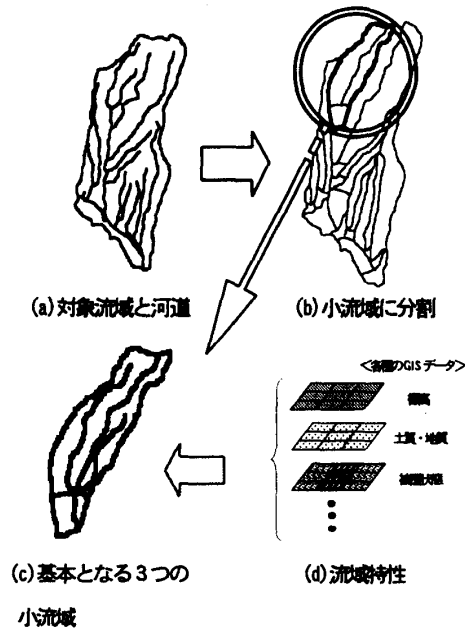


図-3 対象流域の小流域分割

質の濃度,  $q^{(s)}, q^{(b)}$ :それぞれ, 表面と底面とで流れに取り込まれる汚濁流束であり,  $\zeta$ :補正係数である。

この方法は上述された汚濁負荷流出タンクを用いて汚濁量を計算する方法と比較して, 非点源汚濁の剥離, 輸送の機構を "physically based" に表現することができる利点を有している。しかしながら, 流域の各々の土地利用に対応させて剥離量等を定量的に評価することは, かなり困難である。このようなことから, 降雨時において汚濁負荷流出量の経時変化を現地で観測することの重要性がわかる。

また, 非点源汚濁の流出は, 流域の各種の状態により大きく影響されるため, 対象地域の地形, 地質・土質, 植生や, 降雨時系列といった流域情報をいかに評価するかが重要な問題になってくる。これらの流域情報を適切に把握し, 流域水質管理に不可欠な信頼性の高い情報を得るため, 流域のデータを共通の基盤で利用できるように標準メッシュを基にしたデータの蓄積が望まれる。このようなことから, 国土数値情報の標高データにより流域の幾何形状を表現し, 作成された落水線図を用いて雨水流出量や, 汚濁負荷流出量を算定することを試みた<sup>2)</sup>。なお, データの整備は, 国土地理院刊行の地形図(1/25,000)により土地利用状況を分類し, それぞれ3次メッシュのサイズ(緯度方向:231m, 経度方向:292m)で行われた。図-4, 図-5に, 得られたデータをもとに諫早市本明川の裏山橋を基準とした流域の標高と作成された落水線図を示した。因みに, 図の太線は基準点に対して描かれた流域界である。本方法では, 流域がメッシュで覆われることにより, GIS等で得られた流域データの取り扱いが容易になり, 数値標高データに

より落水線図を作成することにより, 流域情報を詳しく考慮しながら降雨-流出解析が実行できる利点を有している。

## (2) 降雨時における水質観測

本節では, 諫早湾に流入する代表的な河川である本明川で流域からの窒素系汚濁の流出を評価するために, 当該河川で実施された降雨時の水質観測について述べる。水質観測が実施された本明川の基準地点は河口から6.0 kmに存在する裏山橋である。本明川の代表的な諸元として, 流域面積:87km<sup>2</sup>, 幹川流路延長:21kmが上げられる。また, 裏山橋地点での流域面積は37.6km<sup>2</sup>である。本論で取り上げられた観測は, 1998年9月23日~24日に実施され, 具体的な測定は9月23日の23時30分から開始された。対象降雨は24日の3:00時過ぎから始まり, 総降雨量は27mm, 1時間の最大降雨量は6mmであった。水質観測のための採水は, 降雨開始の直前から30分ないしは1時間の間隔で24時間にわたって行われた。今回の測定項目としては, 窒素系汚濁の成分が取り上げられた。以下に示された観測データのうち, 降雨量は河川情報センター(略称:FRICS)の端末より得られた。また, 流量は建設省長崎工事事務所より提供された。図-6には, 今回の観測で求められたハイドログラフ, ポリユートグラフ, ポリユートグラフがまとめて示されている。とくに, ポリユートグラフに関しては, 全窒素(T-N), 無機態窒素(Inor-N), 有機態窒素(Org-N)の濃度ならびに汚濁負荷量の両者に対して時間的変化が示されている。なお, 本観測が行われる以前には, 30日間無降雨日が続いており, 上のハイドログラフから明らかなように, 降雨直後の初期損失が大きくなっている。また, 容易に察せられるように, 無降雨日が長く続いたために "first flush"により降雨開始直後の流出水の濃度は他に比べて非常に大きくなっている。しかし, 汚濁を含んだ流出水の濃度ではなく, 汚濁負荷流出量と比較すれば, 降雨に伴う流出水が本格化してから流出量が大きくなっている。このように汚濁負荷流出機構を明らかにしようとする立場で図-5を眺めれば, 非点源汚濁負荷が流域から水域に流出してくる様子が窺える。前述されたモデルを用いた定量的な評価については, 次章で述べられる。

## 4. 結果と考察

### (1) 降雨時における有機態窒素の流出

上述された野外観測結果を用いて, 2. で示されたT-Nと流量との回帰曲線の位置づけを検討するため, 窒素系汚濁を無機態と有機態のそれぞれに分割して図-7

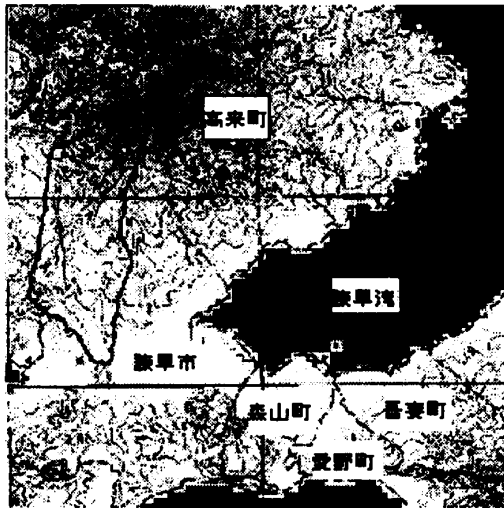


図-4 裏山橋を基準とした流域の標高

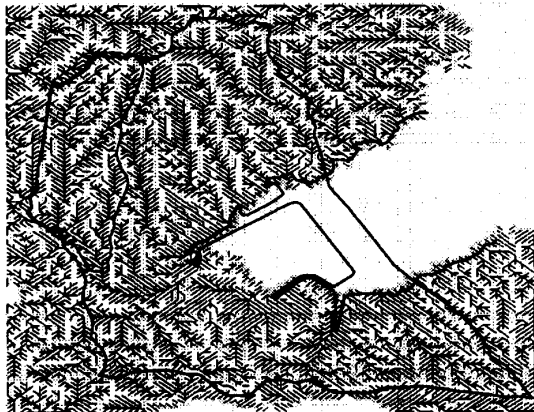


図-5 作成された落水線図

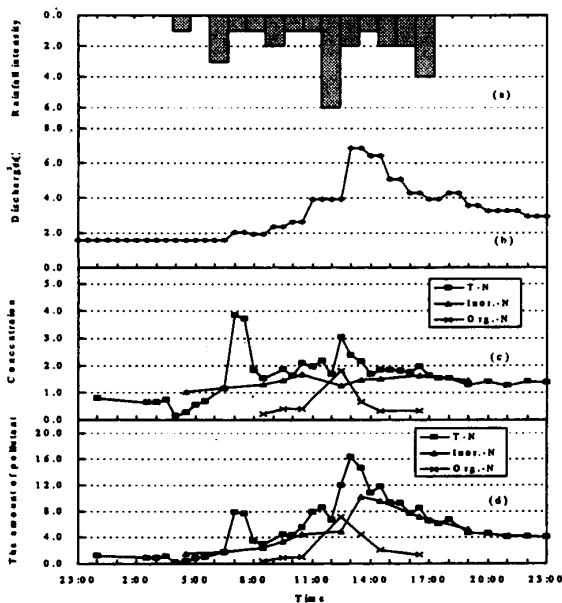


図-6 ハイエトグラフ、ハイドログラフ、ポリュートグラフ (本明川、裏山橋)

に示した。ここに、図は上から、T-N、Inor.-N、Org.-Nを汚濁負荷量で表したものである。上から2番目の図から明らかなように、汚濁負荷量は流量とほぼ比例して変化しており、Inor.-Nの濃度には大きな変化がないことがわかる。また、同図中には、図-1に示された回帰曲線で用いられた式( $a=0.8967$ ,  $b=1.1882$ )も併記されている。既述のように、降雨時の汚濁負荷流出量は図-7の最初の図からも明らかなように、観測値は回帰曲線の周りに散らばっている。したがって、流域からの汚濁負荷流出量を予測する際にはその中身が問題になる。それに対する一つの答えが図-7の2番目の図として現れており、Inor.-Nは降雨の如何に拘わらずほぼ一定の割合で流出していることが推察できる。著者らが行った降下粉塵の観測結果や、一連の浅層地下水の水質の観測結果においても降雨時にOrg.-Nが大きく輸送されていることが示されており<sup>3)</sup>、上述された結果と良く符合している。

(2) タンクモデルによる室案系汚濁負荷流出量の算定

汚濁負荷流出タンクを用いて計算された汚濁負荷量を示せば、図-8のようになる。計算方法は既に述べられたとおりであり、基準点での流出量を求めるためには、それぞれの小流域毎に流域特性を考慮して求められた雨水流出量ならびに汚濁負荷流出量を基準点までの遅れ時間を考慮して加え合わせる必要がある。ここに、遅れ時間の計算は、河川水が流下していく河道の河床勾配を考慮して土研の式により行われた。

$$T_{rg} = a(L/S)^{0.7} \tag{5}$$

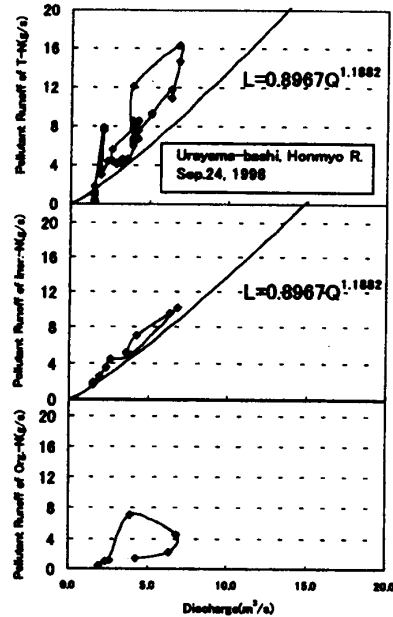


図-7 T-N, Inor.-N, Org.-Nならびに負荷量と流量との関係

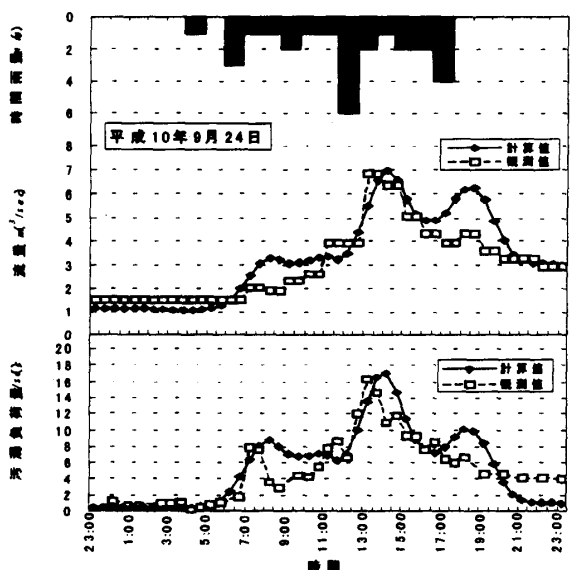


図-8 タンクモデルによる計算結果

ここに、 $T_{lag}$ :遅れ時間(hr),  $L$ :流路長(m),  $S$ :河床勾配,  $a$ :流域の状態より与えられる係数である。  $a$ の値は都市化流域の $2.40 \times 10^{-4}$ から自然流域の $1.67 \times 10^{-3}$ まで、値が変化することが示されている<sup>5)</sup>。ここでは観測値と計算値との対比より $a=3.8 \times 10^{-4}$ とされたが、本明川流域の開発状況を考えれば妥当な値と言える。

図-8には、雨水流出量のハイドログラフと全窒素の流出量のポリユートグラフがハイトグラフと共に示されている。図中に示された観測値は、前述された1998年の観測による裏山橋地点でのものである。計算値と観測値とを比較すれば、その時間的変化は全体的に似かよっているが、同時に両者の違いも見受けられる。とくに、6時頃の最初の降雨による流出量の予測では、観測値と計算値との間のずれが大きい。これは、降雨の初期損失の見積りに係る有効降雨の評価等に問題があるためではないかと考えられる。さらには、使用されたタンクモデルに含まれているモデルパラメータの同定が十分でないためでもある。とりわけ、汚濁負荷流出量の予測に関しては流域に分布した非点源汚濁負荷の剥離や輸送の表現を如何に物理的に正しく行い、用いられたモデルパラメータの定量的評価に結びつけていくかが予測精度に大きく影響を及ぼしているものと思われる。

### (3) KW法による窒素系汚濁負荷流出量の算定

これまでに述べられたことから明らかなように、汚濁負荷流出量の予測精度を向上させるためには、流域情報を十分に把握すると共に、汚濁が輸送される過程をより適切に表すことが必要になる。この種の目的を

果たし、且つ、実際の現象を表現する上で同定すべきモデルのパラメータが多くない流出解析法の一つとしてKW法が選ばれた。この方法を用いて前節と同様にしてまとめられた結果が、図-9に示されている。目下、パラメータが十分には同定されていないため、求められた結果の詳細な検討はできないが、図-9を図-8と対比させれば、両者の結果は比較的類似していることがわかる。勿論、細部においては、雨水流出量と汚濁負荷流出量の両者において絶対値の開きは歴然としている。しかしながら、図-9のポリユートグラフにおいて、非点源汚濁負荷流出の時間的変化は計算値と観測値とで比較的、似通っていることがわかる。これは、計算に用いられた剥離の評価に関する係数の有用性を示唆するものであり、流域からの非点源汚濁負荷流出を一般的に定量的評価を行っていくことを可能にするもの

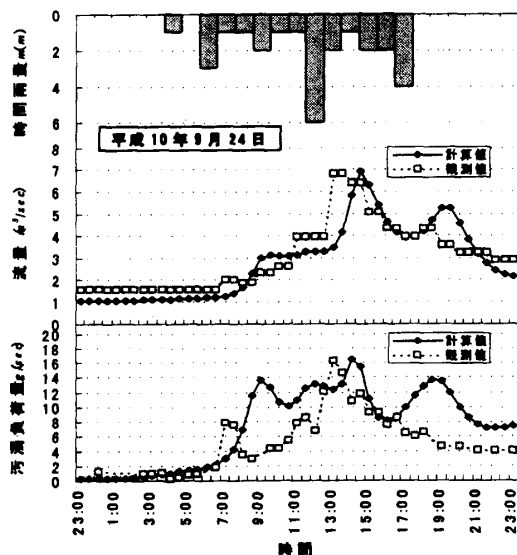


図-9 KW法による計算結果水

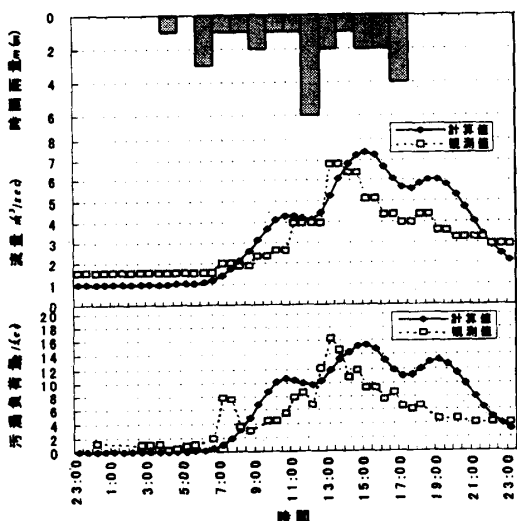


図-10 落線図を用いた計算結果水

である。

#### (4) 落水線図を用いた窒素系汚濁負荷流出量の算定

落水線図を用いて計算された結果を図-10に示す。前で示された2つの汚濁負荷流出モデルの結果と比較すると全体的に似かよっている。しかし、観測値とのずれは顕著であり、これはメッシュごとに雨水を移動させる際の移動時間の評価や前で述べた汚濁の剥離・沈降といったモデルに含まれるパラメータの同定が十分でないためである。また、17時頃の降雨による流出量の予測では、観測値と計算値との間の大きなずれは、これまでのモデルすべてにあてはまるため、降雨観測値の信頼性等に問題があるためではないかと考えられる。今後、より妥当な汚濁負荷流出量の算定のためには、現地観測を行いモデルに含まれたパラメータを適切に同定し、流出機構を更に実現象に近づけなければならない。

#### 5. おわりに

降雨時における流域からの非点源汚濁負荷流出の機構を明らかにし、汚濁の剥離と輸送を物理的に表現する汚濁負荷流出解析モデルを作成し、汚濁負荷流出量の予測方法について検討した。ごく簡単に、得られた結果のまとめをすれば以下のようなものである。

- 1) 二三の流出解析モデルを汚濁負荷流出予測のモデルに発展させ、基準点での雨水ならびに汚濁の流出量を求めた。それぞれのモデルの適用において、詳細なパラメータの同定は今後とも引き続き行っていかねばならないが、計算値と観測値との比較を行ったところ、今後の一般的な定量的評価に有効であることが示された。
- 2) 降雨時の窒素系汚濁負荷流出量の観測結果が示され、公共水域で測定された汚濁負荷流出量と流量との関係とも関連して結果の考察が行われた。その結果、降雨時には主として有機態窒素が水域に持ち込まれていることが定量的に示された。

#### 謝辞

本論は最近数年間、我々の研究室で精力的に取り組んできた流域からの汚濁負荷流出解析の結果を基にして、最近の成果をとりまとめたものである。その間に、観測の遂行やデータの収集・整理などで協力して戴いた建設省（現在の国土交通省）長崎工事事務所の皆様や、長崎大学河川工学研究室の同窓生諸氏に感謝の意を表します。併せて、樋渡智則氏らの研究室諸氏に感謝致します。

#### 参考文献

- 1) 野口正人,西田渉,朴元培,矢代まゆみ:雨天時における流域からの窒素系汚濁負荷流出量の評価に関する研究,長崎大学工学部研究報告,第29巻,第53号,pp.321-328,1999.
- 2) 野口正人,樋渡智則,大石真伸,脇坂辰也,朴元培:落水線図を用いた非点源汚濁負荷流出量の予測と受水域に及ぼす影響の評価,長崎大学工学部研究報告,第31巻,第56号,2001.
- 3) W.B.Park, M.Noguchi, W.Nishida, M.Yashiro: Study on Pollutant Runoff through on and under the Ground of Watershed, Proc. 5th Joint Sym. Nagasaki Univ. & Cheju Nat. Univ., pp.61-64,1998.
- 4) 1)に同じ.
- 5) 水野良宣,野口正人,西田渉,姜相赫:物理モデルを用いた非点源汚濁負荷流出量の評価,土木学会西部支部年講,pp.190-191,2000.