

降雨時における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

POLLUTANT RUNOFF MECHANISM FROM WATERSHED UNDER THE RAIN CONDITION AND
ITS MODELING

野口正人¹・西田 渉²・姜 相赫³・水野良宣⁴・矢代まゆみ⁵

Masato NOGUCHI, Wataru NISHIDA, Sang Hyeok KANG, Yoshinobu MIZUNO and Mayumi YASHIRO

¹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)

²正会員 工博 長崎大学講師 工学部社会開発工学科 (現在, IHE-DELFT に滞在中)

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

⁴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)

⁵正会員 工修 (株)ニュージェック 九州支店技術部 (〒812-0013 福岡市博多区博多駅東 2-14-1 スフィックスセンター 9 F)

For effective water environmental management, knowledge on the pollutant runoff mechanism from non-point sources is very important especially under the rain condition. The runoff rate of not only the stormwater but pollutant loads distributed over the watershed should be dealt with physically-based rainfall-runoff relationship.

This paper has conducted field observation about the nitrogenous pollutant runoff in the Honmyo river, an A-class river in Nagasaki. The observation results have been discussed from several viewpoints, based on 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, nitrogenous pollutant

1. はじめに

最近、水環境を含む自然環境の質を高めることの重要性が益々、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、物質循環の一側面にしか過ぎない。そのため、水域での水質を清澄に保つためには、後背地の流域からの汚濁負荷流出機構を明らかにし、未処理で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。

流域内の物質輸送が、対象降雨を含む過去の一連の降雨事象や流域の各種の状態により大きく影響されることは当然である。そのため、受水域の水質変化を正確に把握するためには、それらの影響を評価せねばならない。このよう

なことから、“physically based”な考察が可能で、同時に、同定すべきパラメータを差ほど多く含まない汚濁負荷流出モデルの確立が望まれている。併せて、モデルに含まれるパラメータの同定を行い、面的な流域情報の蓄積により、適切な汚濁負荷流出量の評価を可能にしようと試みた。

2. 流域からの汚濁負荷流出量と流量との関係

流域に分布した非点源汚濁負荷が受水域に及ぼす影響を評価しようとすれば、それらの分布とそれぞれの汚濁の剥離ならびに輸送の機構が明らかにされねばならない。通常、汚濁負荷流出量(L)と流量(Q)との間には、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。ここでは、長崎県の一級河川である本明川を取り上げて、上式の妥当性について検討する。そのため、まず、公的機関により十数年間に渡って蓄積されてきた公共用水域での水質観測結果を用いて、汚濁負荷量－流量の係数に

ついて検討した。

図-1 には、長崎県諫早市を流れる本明川の鉄道橋地点で、昭和58年度～平成7年度に測定された T-N の汚濁負荷量が流量との関係で示されている。なお、図中のプロットに用いられた記号が異なるのは、凡例に示されたように、先行降雨の影響の度合いや観測当日の降雨の有無等の違いを明らかにしようとしたものである。ただ、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がかなり難しいことは容易にわかる。したがって、図-1 のような形で前述の方法で求められた観測値を整理しようとしても、図中の回帰曲線で測定値が厳密に表されるとは言えない。

本明川は平水流量が約 $1\text{ m}^3/\text{s}$ というところであり、その付近で回帰曲線からの散らばりが大きくなっていることは、本論の後半で説明される流域からの非点源汚濁負荷流出を考えれば自然でもある。ただ、それらの散らばりの一番大きな原因は、ここで資料整理に用いている水質が、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、非点源汚濁負荷の形成とその流出機構を考えれば、そのような整理の仕方そのものに、ある種の無理があることは否めない。いずれにしても、汚濁負荷流出量を流量との関係で表そうとする試みは、雨天時の流出量の主要な部分を占めている成分としての非点源汚濁負荷流出量を考えれば、それらの両者が一意的な関係で示されないことは容易に理解できる。ここでは、汚濁負荷流出量と流量との関係にこれ以上は言及しないが、流域に分布する非点源汚濁負荷を少しでも合理的に評価する目的からは、公共用水域での水質観測は降雨の影響を避けるよりはむしろ、その影響を評価する観点から今後なされるべきことは明らかである。

凡例の説明
当該日の前日から翌日までの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。

変数1(a)
降雨強度/降雨があった時から現在までの経過時間
変数2(b)
当日の降雨：有(b=1)、無(b=0)

	変数1	変数2
◇ A	$0 < a \leq 5$	$b=0$
□ B	$5 < a \leq 10$	$b=0$
△ C	$10 < a \leq 15$	$b=0$
○ D	$15 < a$	$b=0$
◆ A	$0 < a \leq 5$	$b=1$
■ B	$5 < a \leq 10$	$b=1$
▲ C	$10 < a \leq 15$	$b=1$
● D	$15 < a$	$b=1$

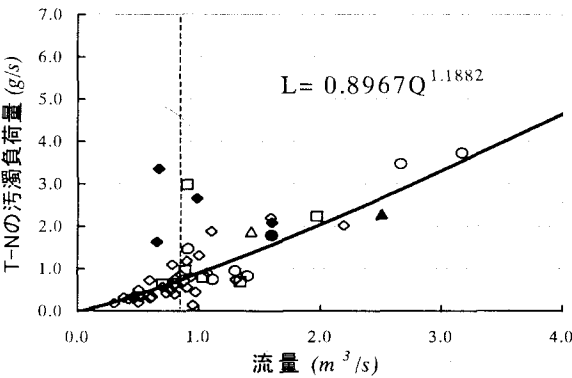


図-1 T-N の負荷量と流量との関係(本明川、鉄道橋)

3. 流域に分布する非点源汚濁負荷の評価

流域に分布する非点源汚濁負荷を評価するためには、対象とされた時点までの降雨の状態や流域の状態を考慮せねばならない。また、流域に分布する汚濁負荷量を評価するにあたって、しばしば原単位概念が使われるが、その概念が非点源汚濁負荷を評価する場合にも適用されるか否かとなると、なかなか難しい問題である。非点源汚濁負荷の規制がしっかりと大きな社会問題となっているアメリカにおいて、環境保護庁 (US EPA) は非点源汚濁負荷 (NPS) として幾つかの要因を上げている¹⁾。それらの代表的なものとしては、たとえば、農耕地等からの余分な肥料・除草剤・殺虫剤や、大気中の浮遊物質を起源とする降下粉塵、その他、汚濁源が面的に広がっているものは、すべてが非点源汚濁負荷を構成している。これらの要因は、それぞれの地域や時期でその分布が変化するのとは当然であり、その機構を検討することなしに原単位ということでひと括りに論じようとするのは、明らかに無理があると思われる。ここでは、その一例として降下粉塵の問題を取り上げ、若干の検討を行う。

前述されたように、降下粉塵の基はもともとは自然現象や様々な人間活動に起因しており、地表に降下する直前には大気中に浮遊している。これらは、地域性を強く帯びており、その時点までの降雨時系列に大きく影響されていることは当然である。流域からの流出解析をする際などに多用されるタンクモデルを大気中に考えれば、浮遊粉塵量の変化は簡単には次式で表される。

$$\frac{dS_a}{dt} = -\beta S_a + a \tag{2}$$

ここに、 S_a : 大気中の浮遊粉塵量、 β : 降下の割合 (流出タンクの浸透孔乗数に相当する)、 a : 浮遊粉塵の補給割合、である。浮遊粉塵の形成機構やその降下の機構を考えれば明らかのように、 β や a は前述されたことより一般的には、地域性や先行降雨の状態等により変化する。ここでは、上述された基礎式で得られる解の特性を示すために、これらの割合が一定値で表されるとき浮遊粉塵量を示す。

$$S_a = (S_{a,0} - \frac{a}{\beta})e^{-\beta t} + \frac{a}{\beta} \tag{3}$$

上式は大気中の浮遊粉塵量が、初期条件に始まって、指数関数的に増加もしくは減少することを表している。明らかに、無降雨状態では β の値は小さく、 $S_{a,0} - \frac{a}{\beta} < 0$ となり、

浮遊粉塵量は増加傾向にある。一方、降雨時には降雨強度にもよるが、通常、 β の値は著しく大きくなり、上とは逆に浮遊粉塵はたちまち地上に降下することとなる。上述の基礎式で降下粉塵量を正しく評価するためには、前述された β や a を適切に見積もることが必要になる。

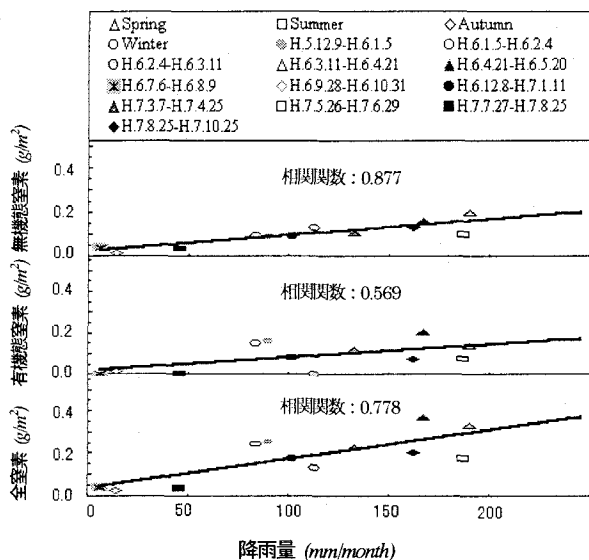


図-2 降下粉塵と月間降雨量との関係

この種の割合を評価する目的もあって、著者らは数年間に渡って長崎県諫早市役所の屋上に降下粉塵の計測器を設置し、非点源汚濁負荷の観測を行った。既に述べられたように、無降雨状態での降下粉塵量は大きいものではなく、降下量の大部分は降雨によって地上に落とされる。なお、そのときの観測方法は、一般に降下粉塵を計測するのものと同じであるので²⁾、説明を省略する。

図-2 には、諫早市役所の屋上で観測された全窒素(T-N)成分を形成する無機態窒素(Inor.-N)と有機態窒素(Org.-N)とが、降雨量との関係で示されている。この図から明らかなように、T-Nを初めとする窒素系の汚濁は降雨量と強い相関を有している。また、T-Nの降下量の回帰直線からの変動幅はOrg.-Nの降下量に大きく影響されていることが分かる。なお、季節的に見ても春から夏にかけて降下量が大きくなっていることが理解される。これらの観測結果が、前述された浮遊粉塵の形成と降下に係る諸量を評価する際に役立てられることは言うまでもない。本節の最初に述べられたように、非点源汚濁負荷は降下粉塵のみで形成される訳ではない。そのため、非点源汚濁負荷を一般的に評価することはなかなか難しいが、降下粉塵量を評価しようとした試みは、たとえば、都市域の屋根負荷や道路負荷として計測されたりしている³⁾。ここでは、T-Nの汚濁負荷発生量として14.5g/ha/dayが示されていることのみを記す。これらは具体的な数値として有用なものである。

しかし一方では、前述されたような問題を含んでいることも当然のことであろう。ここに示されたことを考慮して、後述される本明川での汚濁負荷流出の観測前の降雨・無降雨時系列に対して浮遊粉塵ならびにその降下量を示せば、図-3 のようになる。なお、計算を行うにあたっては、 $\beta = \beta_c = 0.008 \text{ day}^{-1}$ (無降雨日)、 $\beta = \beta_r = kr$ (降雨日)とされた。ただし、 r は日雨量(mm/day)であり、変換係数の k は、 $k = 30 \text{ m}^1$ と置かれた。上述されたことは、勿論、降雨日でも日雨量が小さく、その限界値が $10^3 \times \beta_c / k \text{ mm/day}$ に達しない場合

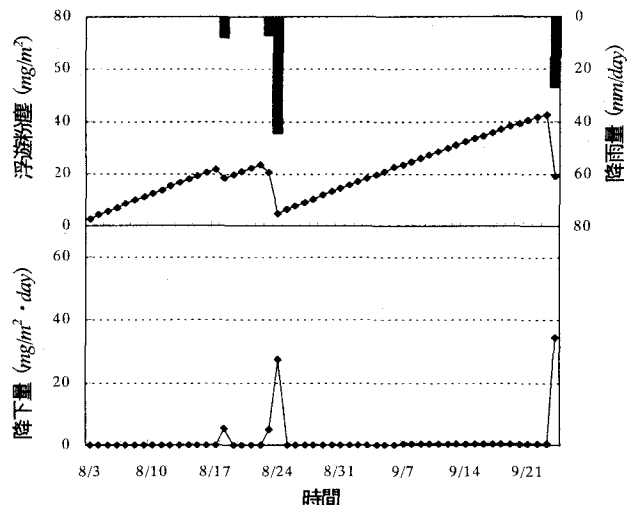


図-3 ハイエトグラフならびに浮遊粉塵と降下粉塵のポリュートグラフ

には、 $\beta = \beta_c$ とされることは当然である。一方、浮遊粉塵の補給割合の a は地域性を強く有しているが、今回の計算では、前述の論文に示された値をそのまま使用することとして、 $a = 1.45 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ とされた。図-3の結果は、降下粉塵の多寡が降雨の有無に大きく左右され、1ヶ月間の平均量を求めようとする際には、月間の降雨量や降雨の頻度に影響されることを示している。

4. 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、窒素や磷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。

(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⁴⁾。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、 λ 、 α 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-4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ュ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段階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。

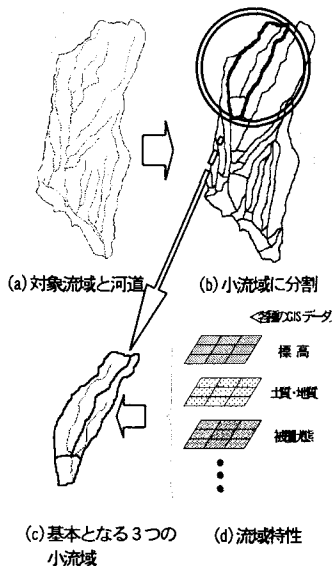


図-4 対象流域の小流域分割

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して、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-4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。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r \quad (4)$$

$$h = kq^p \quad (5)$$

$$\frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\zeta Cq) = q^{(s)} + q^{(b)} \quad (6)$$

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、 $p = 3/5 = 0.6$ 、 $k = (n/\sqrt{i})^p$ である。ここに、 n :マンニングの粗度係数、 i :斜面勾配である。また、 C :汚濁物質の濃度、 $q^{(s)}$ 、 $q^{(b)}$: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、 ζ :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に比較して、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的变化を現地で観測することの重要性がわかる。

(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6.0km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:87km²、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37.6km²である。なお、図-1の作成に用いられた公共用水域の観測地点である鉄道橋は、裏山橋の約500m上流にある。

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-5には、今回の観測で求められたハイドログラフ、ハイドログラフ、ポリュートグラフがまとめて示されている。とくに、ポリュートグラフに関しては、T-N、Inor-N、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、汚濁負荷流出量で比較すれば、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

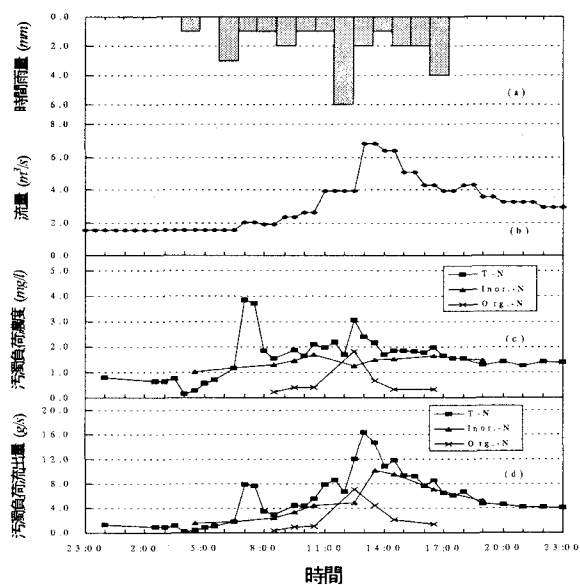


図-5 ハイエトグラフ、ハイドログラフ、ポリュートグラフ(本明川、裏山橋)

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。

5. 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-6 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のように、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-6 の最初の図からも明らかのように、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-6 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⁵⁾、上述された結果と良く符合している。

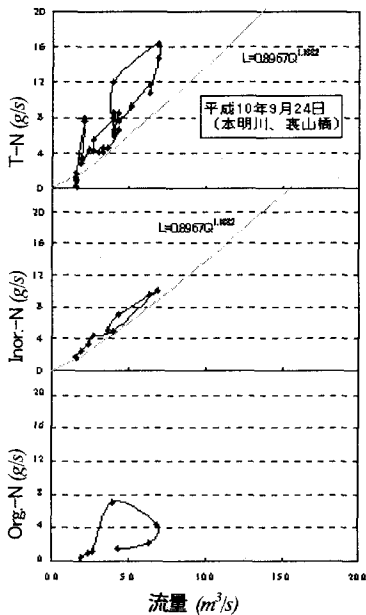


図-6 T-N、Inor.-N、Org.-N の濃度ならびに負荷量と流量との関係

(2) タンクモデルによる窒素系汚濁負荷流出量の算定

前章で述べられたように、今回、取り上げられた降雨時の雨水流出量と汚濁負荷流出量の時間的変化を片対数紙上に表せば、図-7 のようである。減衰期の流量ならびに汚濁負荷流出量の低減傾向から、今回の降雨流出に対して流量ならびに汚濁負荷量の減衰定数を求めれば、それぞれ、 $\lambda=0.138$ (hr^{-1})、 $\alpha=0.232$ (hr^{-1})であった。上述されたことより、今回の降雨に対する汚濁負荷流出に関しては、 $\alpha/\lambda=1.68$ となった。他方、前述されたように、「一定強度の降雨がT時間続いた」ものとして、12時から13時の1時間に降った6mm/hrの雨に着目すれば、解析解との対比で、 $\alpha/\lambda=1.5$ が求められた⁴⁾。両者の値が一致していないのは、降雨波形の仮定が必ずしも満足されて

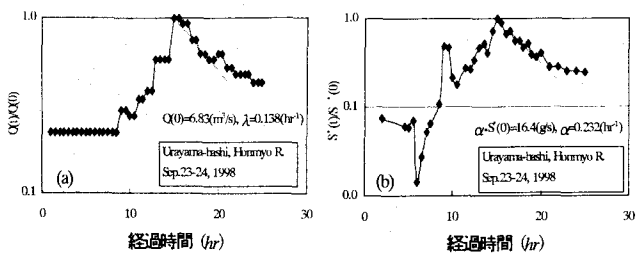


図-7 無次元化された流量と汚濁負荷量の時間的変化

いないためであるが、現象の複雑さを考えれば許容誤差の範囲とも言える。なお、 $\alpha/\lambda>1.0$ より、割合的には雨水より汚濁負荷の方がより激しく流出していることになる。これは、とくに今回のような場合には、流域の汚濁負荷が“first flush”等により激しく流出するためではないかと推察されるが、詳しい流出機構は、後述される汚濁負荷流出モデルを用いて剥離や輸送の機構を検討していく過程で明らかにしたい。

一方、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。

$$T_{lag} = a(L/S)^{0.7} \tag{7}$$

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 2.40×10^{-4} から自然流域の 1.67×10^{-3} まで、値が変化することが示されている。ここでは観測値と計算値との対比より $a=3.8 \times 10^{-4}$ としたが⁶⁾、市街化が諫早市の中心部に限られる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

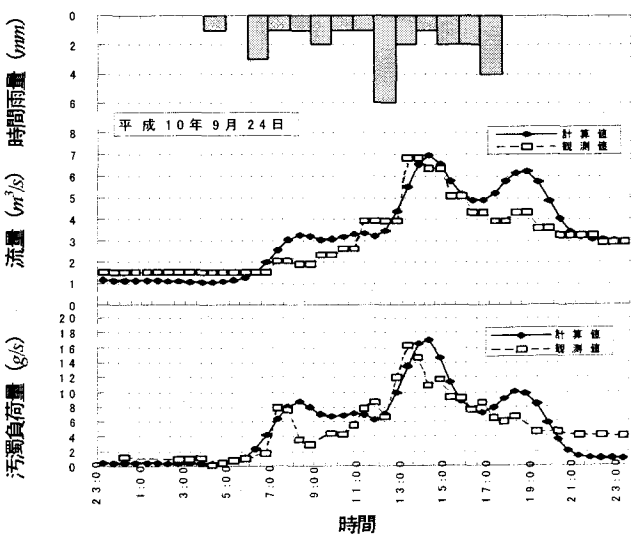


図-8 タンクモデルによる計算結果

量のポリュ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時頃の最初の降雨や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や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。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、両者の結果は比較的に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のポリュートグラフにおいて、非点源汚濁負荷流出の時間的变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である。

6. 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。得られた結果は以下のものである。

- 1) 非点源汚濁負荷流出量を求める場合に重要となる降下粉塵の評価に関連して、観測結果を参照しつつその評価法が示された。
- 2) 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く必要があるが、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。
- 3) 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、我々の研究室で取り組んできた流域からの汚濁負荷流出解析の結果に、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、峰松 睦さんらの研究室諸氏に感謝致します。

参考文献

- 1) U.S. Environmental Protection Agency: Nonpoint Source Pollution Control Program; (<http://www.epa.gov/OWOW/NPS>), 1998.
- 2) 野口正人, 西田渉, 喜井克浩, 碇慎一: 都市域における点源・非点源汚濁負荷の水域への影響, 長崎大学工学部研究報告, 第24巻, 第43号, pp. 225-229, 1994.
- 3) 和田安彦, 三浦浩之: 都市化した中小河川の水質に及ぼす下水道等整備効果のモデル解析, 土木学会論文集, No. 429/II-15, pp. 97-105, 1991.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 水野良直, 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. (2000.10.2 受付)

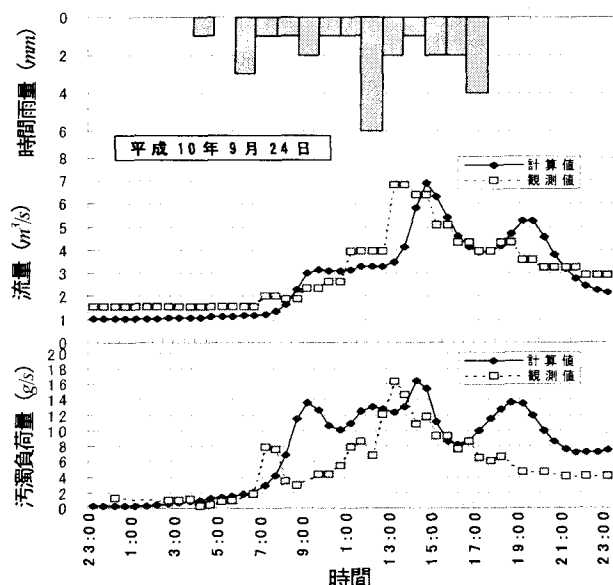


図-9 KW 法による計算結果