

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

野口 正人*・西田 渉*
朴 元培**・矢代 まゆみ***

Estimation of Nitrogenous Runoff from Non-Point Pollutant Sources under the Wet Conditions

by

Masato NOGUCHI*, Wataru NISHIDA*
Won Bae PARK** and Mayumi YASHIRO***

Degradation of water quality in the closed water bodies becomes serious nowadays. In order to prevent the above tendency and to attain the sound and sustainable water environment, integrated management of river and watershed becomes more and more important.

In this paper, mechanism of runoff from the pollutant source, especially the non-point pollutant one, is studied for estimating the causes of degradation in the closed water bodies. Through this study, it becomes apparent that organic nitrogen drastically runoff under the wet condition, even though inorganic nitrogen exceeds the organic one in the total amounts.

1. はじめに

好ましい水環境を達成するためには、様々な対策が必要とされる。とくに、最近では外因性内分泌攪乱化学物質（通称、環境ホルモン）による人間を含めた生物への影響が危惧されているが、好ましい水環境の達成に向けては水域のみに注意を払っていても不十分であることは言うまでもない。このようなことから、十全な「流域水質管理」が避けられないことは当然のことである。そのため、流域からの汚濁負荷流出について量的・質的な両側面での検討が必要であり、同時に、流域から水域へ未処理で放出される汚濁負荷量を少しでも多く軽減するための有効な施策が展開されねばならない。

長崎県の諫早湾では、現在、締切干拓事業が進めら

れており、その事業が水環境に及ぼす影響について大いに関心が持たれている。本事業では、諫早湾の一部を延長7kmに及ぶ潮受け堤防で締め切り、囲まれた水域にさらに内部堤防を建設することにより、干拓地と調整池とを作ろうとしている。このようなことから、新たに作られる調整池では、主として夏季に、富栄養化が発生することが懸念されている。この種の問題に対応するためには、流域から不必要な栄養塩類を放出してはならないことは明らかである。

上述されたことから、本論では、流域からの窒素系汚濁負荷流出の問題を取り上げ、諫早湾に流入する代表的な河川である本明川での水質観測結果に基づき、その流出特性を評価しようと試みた。

平成11年4月23日受理

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

**済州発展研究院 (Cheju Institute of Development, Korea)

***ニュージェック (NEWJEC Inc.)

2. 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だけ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える。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。

$$\frac{dS_a}{dt} = -\beta S_a + a \quad (1)$$

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なように、 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。

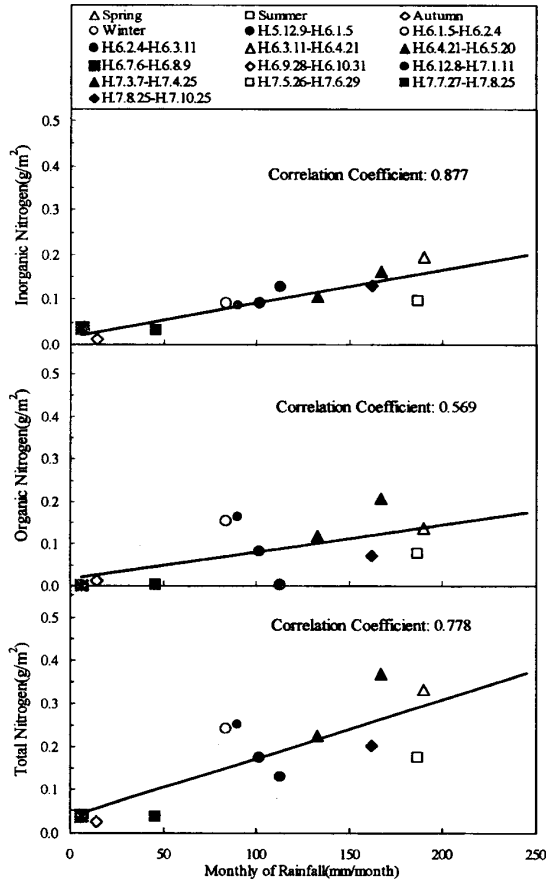
$$S_a = (S_{a,0} - \frac{a}{\beta}) e^{-\beta t} + \frac{a}{\beta} \quad (2)$$

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、

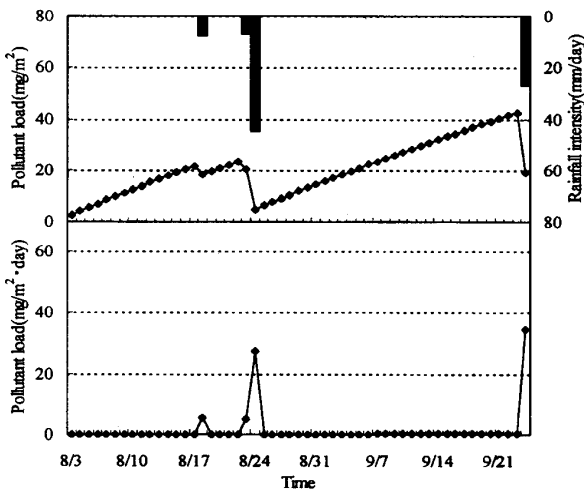
降雨時には降雨強度にもよるが、通常、 β の値は著しく大きくなり、上とは逆に浮遊粉塵はたちまち地上に降下することとなる。上述の基礎式で降下粉塵量を正しく評価するためには、前述された β や a を適切に見積もることが必要になる。

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際のもと同じであるので²⁾、説明を省略する。ここではそれらの観測により得られた結果のみを示す。【図-1】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貴重なものである。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-2】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 $10^3 * \beta_c / k \text{mm/day}$ に達しない場合には、 $\beta = \beta_c$ 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、 $a = 1.45$

mg/m²/day とされた。【図-2】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。



【図-1】降下粉塵と月間降雨量との関係



【図-2】ハイトグラフならびに浮遊粉塵と降下粉塵のポリユートグラフ

3. 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るれば、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。

$$L = aQ^b \quad (3)$$

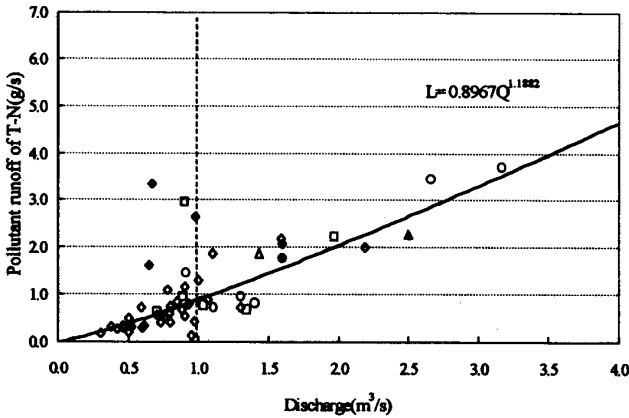
ここに、 a 、 b は個々の流域の特性より決められる定数である。本論では、冒頭に述べられたことから長崎県の一級河川である本明川を取り上げて、上式の妥当性について検討する。そのため、まず、公的機関により十数年間に渡って蓄積されてきた公共用水域での水質観測結果を用いて、汚濁負荷量-流量の関係について検討した。

【図-3】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はかなり難しいことも察せられる。したがって、【図-3】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を厳密に表されるとは言えない。本明川は平水流量が約1 m³/s 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、これまでに何回か述べてこられたような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。本節では、汚濁負荷流出量と流量との関係をこれ以上に言及しないが、流域に分布する非点

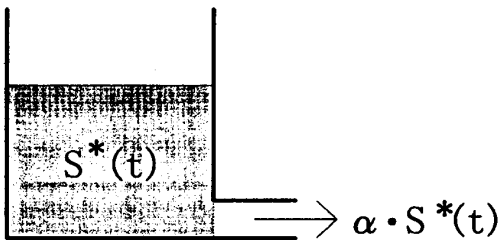
凡例の説明
 当該日の前日から1週間遡る期間に降雨があったか否かを調べ最も強い降雨強度とそれが出現したときまでの経過時間との比を求めることとする。

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-3】T-N の負荷量と流量との関係 (本明川, 鉄道橋)



【図-4】汚濁負荷流出タンク

源汚濁負荷を少しでも合理的に評価する目的から、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であることを指摘しておく。

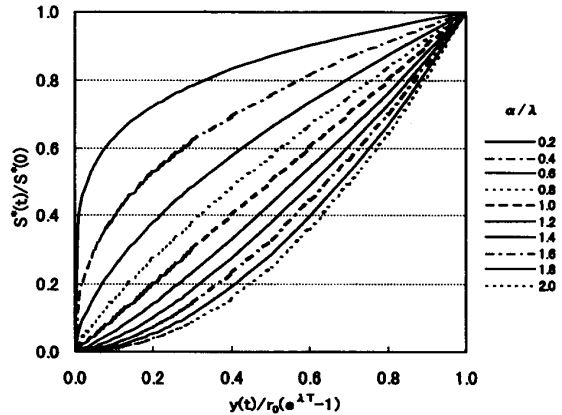
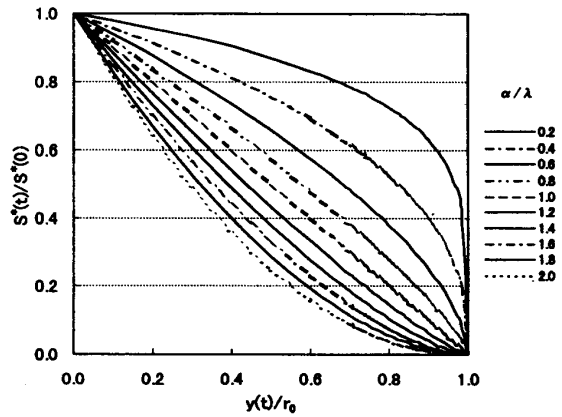
4. 汚濁負荷流出機構の検討⁴⁾

ここでは、流域からの非点源汚濁負荷流出量の評価に関連して、汚濁負荷流出タンクを用いて検討する。

すなわち、【図-4】に示された線形の汚濁流出タンクを取り上げ、汚濁負荷量と流量との関係を求めれば以下のようなものである。

$$\frac{dS^*(t)}{dt} = -aS^*(t) \tag{4}$$

ここに、 $S^*(t)$: t 時刻の汚濁負荷 (貯留量), α : 汚濁負荷の流出孔乗数である。一方、強度が一定である降雨 ($r=r_0$) が T 時間だけ継続した場合、汚濁負荷量は雨水の流出量を用いて以下の式で表される。



【図-5】タンクモデルによる汚濁負荷量と流量との関係

・ $0 \leq t < T$ の時

$$\frac{S^*(t)}{S^*(0)} = \left\{ 1 - \frac{y(t)}{r_0} \right\}^{\alpha/\lambda} \tag{5}$$

・ $T \leq t$ の時

$$\frac{S^*(t)}{S^*(0)} = \left\{ \frac{y(t)}{r_0 (e^{\lambda T} - 1)} \right\}^{\alpha/\lambda} \tag{6}$$

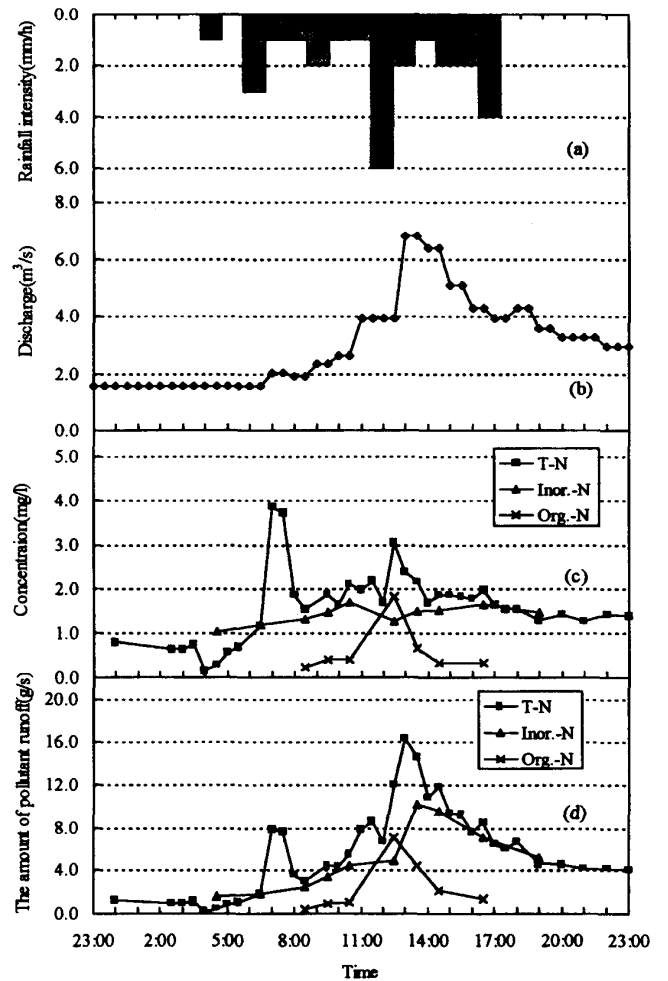
ただし、 $S^*(0)$: 初期時刻 ($t=0$) の汚濁負荷 (貯留量), r_0 : 降雨強度, $y(t)$: 流出強度, λ : 流出孔

乗数である。これらの式を用いれば、 α/λ の値を変化させることにより、無次元化された汚濁負荷量： $S^*(t)/S^*(0)$ と流出量： $y(t)/r_0$ との関係が【図-5】のように表される。この図を参照すれば、降雨期間中（ $0 \leq t < T$ ）に汚濁負荷量が減少しているが、その正確な評価のためには、'first flush'の影響が十分に考慮されなければならない。他方、降雨終了後（ $T \leq t$ ）には、汚濁負荷流出量は流量の低下と共に減少しており、予想される結果になっている。以上の諸式を用いて汚濁負荷流出量を評価した結果は、前述された汚濁負荷流出量と流量の関係についての考察と共に次節で示される。

5. 流域からの非点源汚濁負荷流出量の評価

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、当該河川での降雨時の水質観測が実施された。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に存在する裏山橋にとられている。ここで本明川の代表的な諸元を記せば、流域面積87km²、幹川流路延長21kmであり、裏山橋地点での流域面積は37.6km²である。なお、【図-3】の観測地点の鉄道橋は、裏山橋の約500 m上流にある。

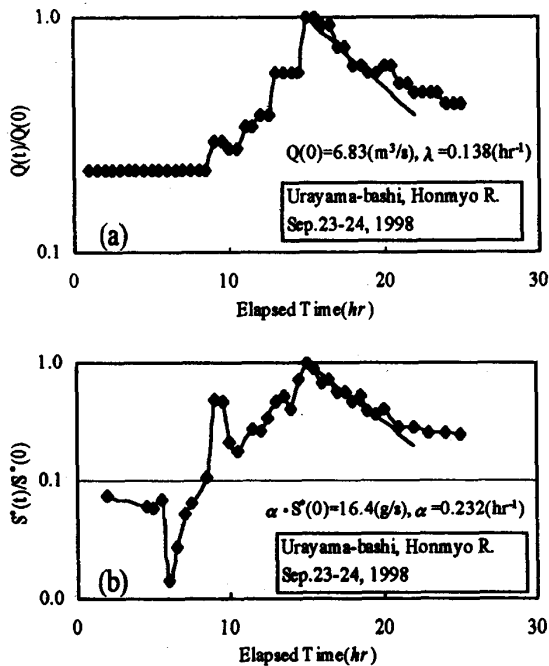
本論で取り上げられた観測は、1998年9月23日～24日に実施され、具体的な測定は9月23日の23時30分から開始された。対象降雨は24日の3時00分過ぎから始まり、総降雨量は27mm、1時間の最大降雨量は6 mmであった。水質観測のための採水は、降雨開始の直前から30分ないしは1時間の間隔で24時間にわたって行われた。今回の測定項目としては、窒素系汚濁の成分が取り上げられた。以下に示された観測データのうち、降雨量は河川情報センター（略称：FRICS）の端末より得られた。また、流量は建設省長崎工事事務所より提供された。【図-6】には、今回の観測で求められたハイトグラフ、ハイドログラフ、ポリュー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な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のように、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



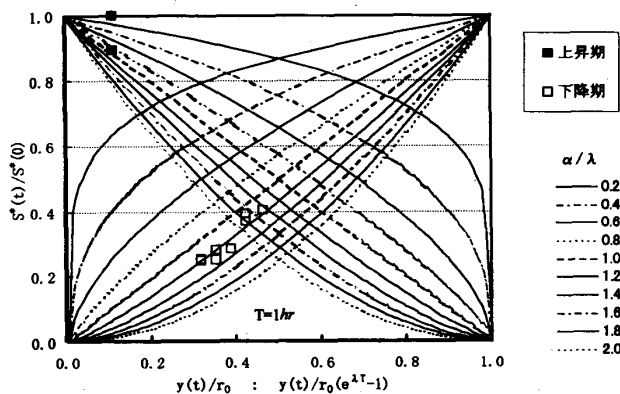
【図-6】ハイトグラフ、ハイドログラフ、ポリュートグラフ（本明川、裏山橋）

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の観点で【図-6】を注意深く検討すれば、非点源汚濁負荷が流域から水域へ流出してくる様子を窺うことができる。このような目的を果たすために、減衰期の流量ならびに汚濁負荷流出量の低減傾向を調べ、タンクの流出孔乗数が求められた（【図-7】、参照）。すなわち、今回の降雨流出に対しては、 $\lambda=0.138(\text{hr}^{-1})$ 、 $\alpha=0.232(\text{hr}^{-1})$ の値が求められた。

以上に述べられたことより、今回の降雨に対する汚濁負荷流出量を前節で示された(5)、(6)式を用いて整理すれば、【図-8】のようになる。この種の当てはめの事例は、平成9年度の日本水環境学会九州支部大会の席でも紹介された⁵⁾。その際の適用河川は長崎市内の浦上川の支川である大井手川と昭和川であったが、 α/λ として、それぞれ、0.3～0.4ならびに0.7～0.8の結果を得ている。これに対して、今回の本明川の観測では、【図-8】に示されるように α/λ の値はおおよそ、1.1～1.3である。実際、【図-7】に示された



【図-7】無次元化された流量と汚濁負荷量の時間的変化



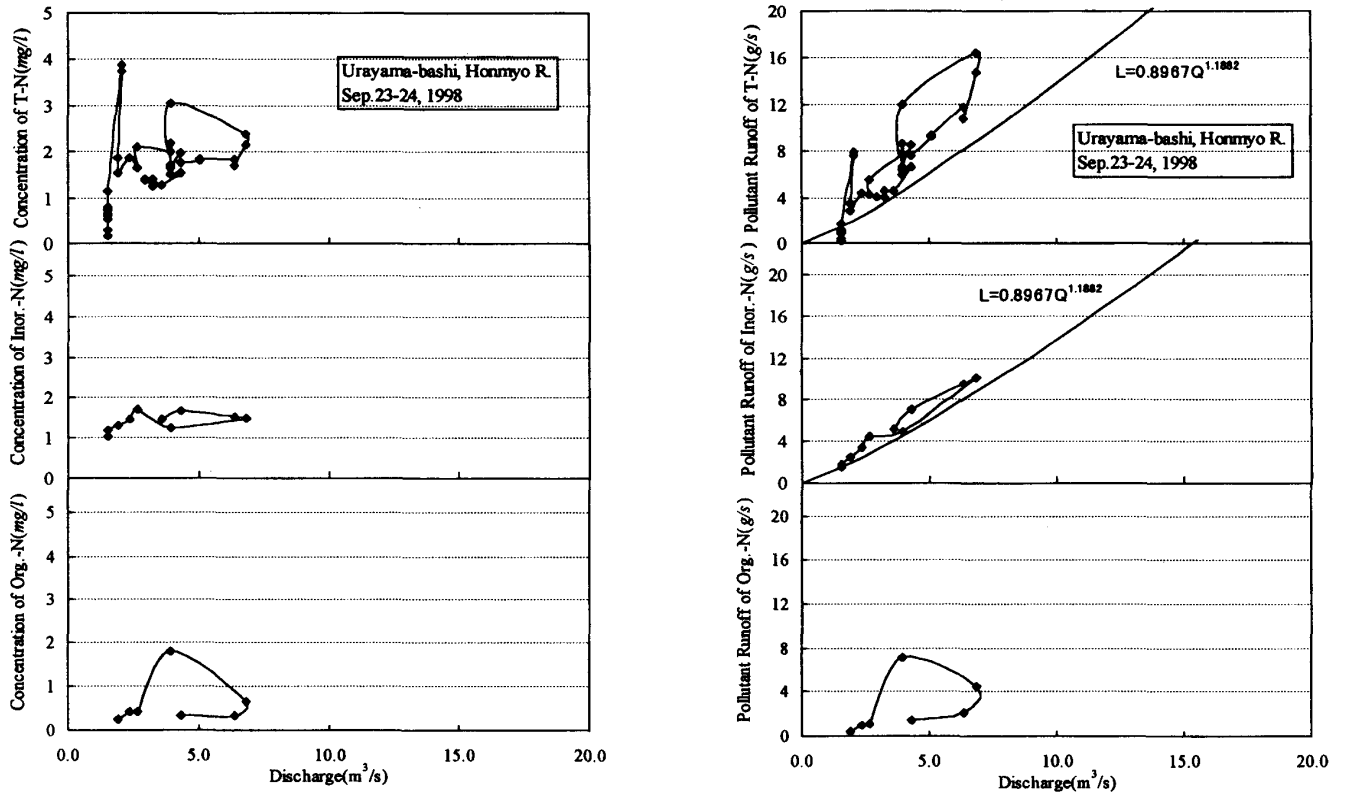
【図-8】観測と計算による T-N の負荷量と流量との関係 (本明川, 裏山橋)

λ と α の値を用いて α/λ を計算すれば、 $\alpha/\lambda=1.68$ となった。この値が、【図-8】の計算値と観測値との対比で求められた値と異なっているのは、第4節で展開されたモデルの前提になっている、一定の降雨強度の降雨が T 時間続いたといった仮定が完全には満たされていないためである。【図-8】の結果をまとめる際には、【図-6】のハイエトグラフで示された今回の降雨に対して、とくに12時から13時の1時間に降った 6 mm/hr の雨に着目した。ここでは、 $\alpha/\lambda \approx 1.5$ とすることにすれば、浦上川の支川で観測されたときの値と大きく異なっていることが注目される。このように、雨水より汚濁負荷の方がより激しく流出するという結果は、時として理解しにくいところもある。

しかし両者の流出機構の違いを考慮し、流域の汚濁負荷が 'first flush' 等により激しく流出することを考えれば、その様子が推察できない訳ではない。これらの機構は、今後さらに非点源汚濁負荷の形成機構や剥離・輸送の機構を検討していく中で明らかにされる。

つぎに今回、本明川で観測された窒素系汚濁負荷流出の濃度ならびに汚濁負荷量を流量との関係で整理すれば、【図-9】のようになる。ここに、図 (a) は T-N, Inor.-N, Org.-N の濃度を示したものである。これらの図において特に注目されることは、Inor.-N の濃度に大きな変化がないことである。図 (b) は同じく、T-N, Inor.-N, Org.-N の流出量を示したものである。図 (b) の最初の図は、T-N を流量との関係でまとめたものである。後の考察のために、図中には、【図-3】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。既に【図-3】の考察で述べられたように、降雨時の非点源汚濁負荷流出を詳細に検討すれば、【図-9】(b) の最初の図に明らかなように、観測値は前述の回帰曲線よりはずれることは明白である。それでは一体前述の回帰曲線は何を表しているのかが問題になるが、それに対する答えが同じく【図-9】(b) の2番目の図として現れている。とくに窒素系汚濁負荷流出では、Inor.-N の濃度がほぼ一定であることに対応して、それらは大体のところ、前述された回帰曲線に乗っている。すなわち、最初の図に示された T-N の回帰曲線からの散らばりは、その多くが Org.-N によるものであることは、ほぼ間違いがない。【図-1】に示された降雨粉塵の大小の違い、あるいは、一連の浅層地下水における水質観測の結果は⁶⁾、ここで示された結果と類似のものであり、主として降雨時に、Org.-N が大きく輸送されていることが推測できる。

以上に示されたように、水域を清澄に保つ上で益々制御の必要性が認識され始めた非点源汚濁負荷に関しては、その形成機構を解明する問題や剥離・輸送の問題を正しく定量化していく必要があるが、その全体的な整理と定量化に向けた試みがされた。既に何回も、その必要性が繰り返して述べられているように、好ましい水環境を達成するためには、流域に分布する点源・非点源汚濁負荷の評価が適切にされねばならない。最近、国の内外を問わず良好な水環境を実現するため、真剣に「流域水質管理」の取り組みが始まっている。これは、量的な側面で「総合治水」が必要とされたと同様、質的な側面でも総合的な流域水質管理が必要であることによっている。このような事例の一つとして、たとえば、米国のエルムハースト・クォリーを上げる



【図-9】T-N, Inor.-N, Org.-Nの濃度ならびに負荷量と流量との関係

ことができる。中米にあるアメリカの第3番目の大都市であるシカゴは、五大湖の一つであるミシガン湖に面している。そのため、水環境の整備は重要な課題になっている。ここでは、廃鉱を有効に利用しようとしたクォリーなどが実際に流域の非点源汚濁負荷を削減する方策の一つとして使われている。すなわち、雨水の流出水を廃鉱などに溜めて、河川の流量が下がってから水を放流しようとするものである。最初は下流域における洪水の制御を目的としてクォリーの建設がされたが、近年、雨水流出水を一旦貯留することで水質処理を行う施設としても注目されている。今後はこの種の施設の整備・充実を図り、流域からの未処理の汚濁負荷流出を極力削減することが望まれる。

6. おわりに

好ましい水環境を実現するためには、多面的な配慮が必要である。水域での自浄作用を促進するために各種の方策が欠かせないことは当然のことであり、同時に、流域からの汚濁負荷流出を抑制することにも大いなる努力が払われなければならない。

本研究では上述されたことから、流域の非点源汚濁負荷が如何に形成されるかを、降下粉塵との関係で考察した。また、通常、水域での水質観測は降雨の影響を避けて行われるが、今後は、その影響を明らかにす

る観点からも実施されるべきことが指摘された。同時に、この種の観測が長崎県の本明川で行われ、窒素系汚濁負荷流出の特性が、一般的に示される汚濁負荷流出量と流量との関係式との関連で検討されることが示された。すなわち、窒素系汚濁負荷流出量のうち、この種の関係式で示されているものは多くが、無機態窒素であり、有機態窒素は主として降雨の影響で流出していることが示された。このような結果は、降雨の影響がある地下水水質の窒素系汚濁濃度についても同様に得られており⁶⁾、浅層地下水や表面流出水では、流域に分布する非点源汚濁負荷の影響を強く受けていることが示唆された。併せて、このような流出に対して適切な対応策を講じて、好ましい水環境に配慮することの重要性が述べられた。

謝辞

本研究は河川環境管理財団から、河川整備基金（平成9, 10年度）の助成を受けて実施された。ここに記して、関係各位に深甚の謝意を表します。また、流量データの取得等では、建設省長崎工事事務所の方々にお世話になった。さらに、水質観測の実施等では、長崎大学工学部の卒業研究生であった伊藤嘉徳・許聡子の両氏を初めとする河川工学研究室の学生諸氏にご協力戴いた。これらの方々に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) U. S. Environmental Protection Agency(1998) : Nonpoint Source Pollution Control Program; (<http://www.epa.gov/OWOW/NPS>), last updated.
- 2) 野口正人, 西田渉, 喜井克浩, 碓慎一 (1994) : 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.
- 3) 和田安彦, 三浦浩之 (1991) : 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.
- 4) 野口正人, 朴元培, 矢代まゆみ (1998) : 発生源対策を基本にした汚濁処理と河川環境整備, 第4回河道の水理と河川環境シンポジウム論文集, 土木学会水理委員会河川部会, pp. 237-242.
- 5) 矢代まゆみ, 野口正人, 西田渉, 朴元培 (1998) : 流域からの非点源汚濁負荷流出の評価に関する研究, 平成9年度日本水環境学会九州支部研究発表会講演要旨集, A-3, pp. 16-21.
- 6) 朴元培 (1998) : 流域に分布する非点源汚濁負荷の流出機構の解明に関する研究, 長崎大学大学院工学博士学位論文。