

発生源対策を基本にした汚濁処理と河川環境整備

River environmental management based on local treatment of pollutants distributing over a watershed

野口正人*、 朴 元培**、 矢代まゆみ***

Masato NOGUCHI, Won-Bae PARK, and Mayumi YASHIRO

1. 結論

長崎県唯一の一級河川である本明川では、現在、下流の諫早湾で締切干拓事業が行われているため、水環境（水質）の整備が急務になっている。この種の問題の対策としては、ともすれば、水域での水質浄化のみに関心が向けられがちであるが、それらと並行して十分な流域水質管理がされねばならないことは言うまでもない。

以上の観点から好ましい河川環境の実現を目指せば、流域における点源・非点源汚濁負荷の時空間構造を明らかにし、その実態に十分に対応した形で汚濁負荷削減対策が講じられなければならない。したがって、本研究では、本明川流域での汚濁負荷の空間分布について調べ、公共用水域である鉄道橋での水質観測結果を整理することにより流出汚濁負荷量と流量との関係について考察した。その結果、降雨時には非点源汚濁負荷流出が顕著であり、主として点源汚濁負荷の対策を目的とした下水処理場と共に、これらの非点源汚濁負荷を発生源、もしくはその近傍で処理することの重要性が改めて認められた。このようなことから本研究では、汚濁流出用のタンクモデルにより汚濁負荷流出の機構を検討した。その結果、洪水調整池の富栄養化を引き起こすおそれのある栄養塩について、例えば窒素を取り上げれば、有機態窒素と無機態窒素とでは雨天時の流出形態に大きな差があることが野外観測により示された。

上述された理由から本明川では、流域に分布する汚濁負荷が未処理のままに水域に放出されることを極力抑制する各種の方法が検討されている。著者らは、好ましい流域水質管理が清澄なる河川環境を達成するうえで不可欠であるとの認識のもとに、汚濁負荷流出機構について考察し、それらの結果を踏まえた汚濁処理対策を提案すると共に、河川環境整備の在り方について検討を行った。

2. 流域に分布する点源・非点源汚濁負荷の評価

真に河川環境を整備しようとするれば、流域に分布する点源・非点源汚濁負荷を適正に評価せねばならないことは当然のことである。そのため、これまでも、それらの時空間構造を明らかにしようとする試みが多くなされてきた。特に最近では、非点源汚濁負荷が河川を初めとした水域を汚していることが大きく問題視されるようになってきた¹⁾。このようなことから、十全な流域水質管理を行う上では、流域に分布する非点源汚濁負荷の状況とその輸送過程について実態を明らかにする必要がある。

ここでは、本論で主として取り上げようとしている本明川(長崎県)の鉄道橋地点(Fig.1)で測られたBOD(生物化学的酸素要求量)の濃度をもとにして計算された汚濁負荷量を流量の関数として表すことを試みた(Fig.2)。一般に流域内の汚濁負荷の時間的変化は、次式で表される。²⁾

キーワード：河川環境整備，流域水質管理，非点源汚濁負荷

* 長崎大学工学部 教授 (〒852-8521長崎市文教町1-14,noguchi@civil.nagasaki-u.ac.jp)

** 長崎大学大学院(博士課程) 学生 (〒852-8521長崎市文教町1-14,park@civil.nagasaki-u.ac.jp)

*** (株)ニュージェック 九州支店 技師 (〒812-0013福岡市博多区博多駅東2-14-1スフィクス・センター)

$$\frac{dL}{dt} = C - kL \quad (1)$$

上式は容易に解くことができ、次式が求められる。

$$L_0 - L = (\text{流出汚濁負荷量}) = \left(L_0 - \frac{C}{k} \right) (1 - e^{-kt}) \quad (2)$$

ここに、L：流域内の汚濁負荷の総量、C：汚濁負荷の生成割合、k：汚濁負荷の流出率、であり、添字の0は初期時刻の値を表している。なお、初期時刻としては、大きな降雨があった時刻、または、大がかりな道路の清掃が実施された時刻等が選ばれる。(2)式は、流域からの流出汚濁負荷量の時間的変化を表しているが、次節で取り上げられるような一定の強度の雨がT時間だけ降った

場合を考えれば、流出汚濁負荷量は流量に対して1に近い値の巾乗の変化をすることが示される。このような考察を行ってFig.2の結果を見れば、その結果は予想された範囲のものであると言える。しかし一方では、流出汚濁負荷量は流域に分布する汚濁負荷の状況と、それらを水域へ輸送する因子により決定されることを考えれば、Fig.2の縦軸と横軸に取られた流出汚濁負荷量と流量との間に一義的関係が存在しないことも容易に推察される。

本明川の場合、平水流量が約1 m³/sであり、流出汚濁負荷量が降雨に大きく影響される領域で回帰曲線からの散らばりが大きくなっている。その影響因子を明らかにする目的から、降雨強度と降雨があった時から現在までの経過時間との比、ならびに、観測日の降雨の有無を、それぞれ変数1ならびに変数2として、それらをパラメータに取ることにより結果の整理が行われた。このようにして整理されたFig.2の結果を見れば、変数1の値が小さいところで散らばりが顕著である。これは、散らばりの要因として主に、降雨初期の流出('first flush')の影響が考えられるためであろう。いずれにしても、詳細な検討は汚濁負荷流出モデルを用いてされなければならない。

3. 汚濁負荷流出機構のモデル化

前節で取り上げられた流域からの非点源汚濁負荷の流出に関して検討するため、Fig.3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た。まず、Fig.3を参照すれば、次式が成立する。

$$\frac{dS^*(t)}{dt} = -\alpha S^*(t) \quad (3)$$

したがって、上式より次式が求められる。

$$S^*(t) = S^*(0) \cdot e^{-\alpha t} \quad (4)$$

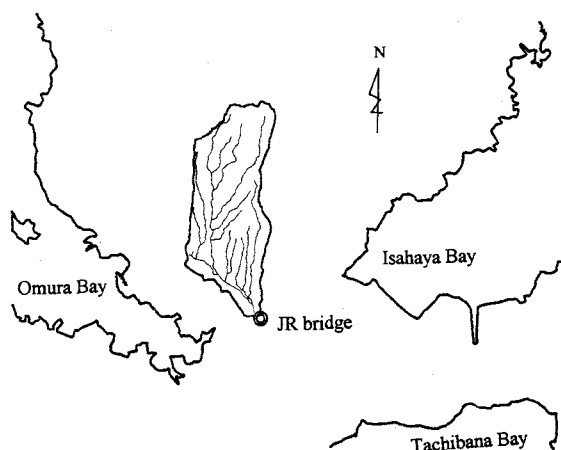


Fig.1 Outline of the Honmyo river basin.

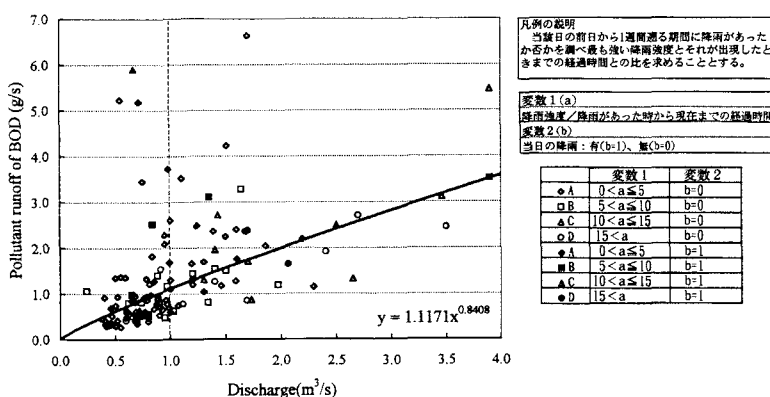


Fig.2 Relationship between pollutant runoff of BOD and discharge at JR bridge.

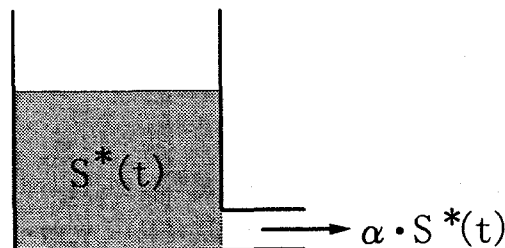


Fig.3 Storage type model for pollutant runoff.

ここに、 $S^*(t)$ ： t 時刻の汚濁負荷（貯留量）、 $S^*(0)$ ：初期時刻（ $t=0$ ）の汚濁負荷（貯留量）、 α ：汚濁負荷の流出孔乗数であり、汚濁負荷量は時間と共に指数関数的に減少していることが分かる。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、流出量： $y(t)$ は以下の式で表される。

$$\bullet 0 \leq t < T \text{ の時} \quad y(t) = r_0(1 - e^{-\lambda t}) \quad (5)$$

$$\bullet T \leq t \text{ の時} \quad y(t) = r_0 e^{-\lambda T} (e^{\lambda T} - 1) \quad (6)$$

ここに、 $x(t)$ ：降雨強度、 $y(t)$ ：流出強度、 λ ：流出孔乗数である。したがって、(4)～(6)式より以下の関係が求められる。

$$\bullet 0 \leq t < T \text{ の時} \quad \frac{S^*(t)}{S^*(0)} = \left\{ 1 - \frac{y(t)}{r_0} \right\}^{\alpha/\lambda} \quad (7)$$

$$\bullet T \leq t \text{ の時} \quad \frac{S^*(t)}{S^*(0)} = \left\{ \frac{y(t)}{r_0(e^{\lambda T} - 1)} \right\}^{\alpha/\lambda} \quad (8)$$

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Fig.4のように表される。この図を参照すれば、降雨期間中（ $0 \leq t < T$ ）は汚濁負荷量が減少している。これは前述された‘first flush’の影響が詳細にモデル化されることなく、流量の増加の割合に比して流出汚濁負荷量が減少することを示しているものと考えられる。一方、降雨終了後（ $T \leq t$ ）は、汚濁負荷流出量は流量の低下と共に減少していることが分かる。

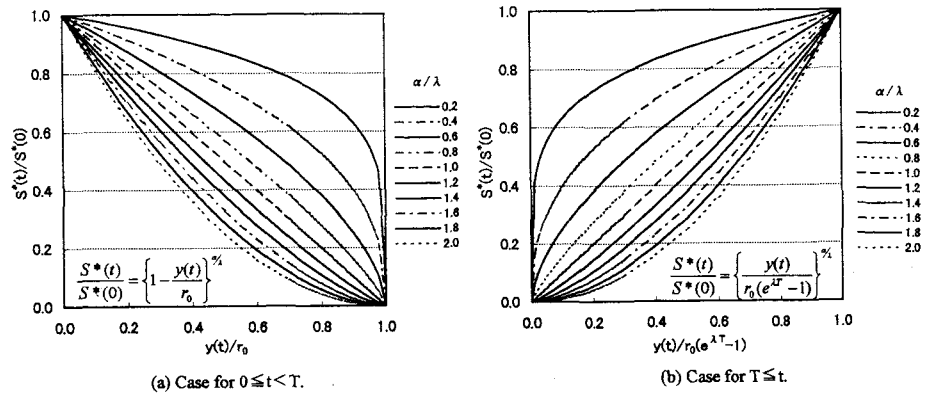


Fig.4 Relationship between pollutant runoff and discharge.

ところで、実際の汚濁負荷流出を考えた場合、表面流出、中間流出、地下水流出というように雨水の流出形態に応じて汚濁負荷流出量は変化するものと思われる。以下では、降雨後（ $T \leq t$ ）に中間・地下水流出が卓越し、汚濁負荷流出量の時間的変化が一定と考えられる場合について検討する。

$$\frac{dS^*(t)}{dt} = -\beta \quad (9)$$

ここに、 $S^*(t)$ ： t 時刻の汚濁負荷（貯留量）、 β ：汚濁負荷流出量（ただし、 $\beta = \text{Const.}$ ）である。したがって、(6)式と(9)式より次の関係式が求められる。

$$\bullet T \leq t \text{ の時} \quad \frac{S^*(t)}{S^*(0)} = 1 + K \ln \left\{ \frac{y(t)}{r_0(e^{\lambda T} - 1)} \right\} \quad (10)$$

ただし、 K は次式で表される。

$$K = \frac{\beta}{\lambda S^*(0)} \quad (11)$$

Fig.5はFig.4(b)に対応するものであり、パラメータとしては α/λ の代わりに K が取られている。汚濁負荷量： $S^*(t)/S^*(0)$ と流出量： $y(t)/r_0$ との関係は基本的には前のものと同じであるが、汚濁負荷の流出量の評価を変化させたために、汚濁負荷流出量が無視できる際の流量が必ずしも0にはなっていないことが分かる。なお、以上の諸式を用いて汚濁負荷流出量を評価した場合の妥当性については、次節で検討される。

4. 河川に流出する汚濁負荷量の評価

前述されたように、好ましい河川環境を整備するためには流域水質管理が不可欠となる。とくに、本明川に見られるように下流端を閉鎖的にすれば、流域からの汚濁負荷流出に対して余程の制御を行わないと水域の水質悪化が懸念される。このようなことから、T-N(全窒素)やT-P(全リン)といった栄養塩類の流域内での動きを正確に把握しておくことが重要になる。本論では本明川で河川環境整備について主として取り上げており、そこでの観測が流域水質管理の観点からも実施されていることが望ましい。しかし、野外観測の都合上、以下では長崎市内の浦上川流域で観測された諸量を用いて上述の問題について検討する。

今回、水量・水質観測が実施された浦上川流域の大井手川と昭和川は、流域面積がそれぞれ4.08、0.66km²というように、非常に小規模な河川である(Fig.6)。もっとも、これらの両河川は長崎市の水瓶である浦上水源池に流入するために、両河川で良好な水質を維持せねばならぬことには変わりがない。なお、本地域では、最近とみに下水道整備が進められ、公共下水道の整備率は85%になっているが、交通量の多い市街地でもあり、非点源汚濁負荷流出の影響も少なくないものと考えられる。

以下では1997年9月25日に実施された野外観測結果を用いて、上述の問題に関して検討することとする。観測は14時から開始されたが、対象とした雨は17時過ぎから降り始めた。当該降雨は総降雨量が4mmと非常に小規模なものであったが、10分間の最大降雨量が3mmというように短時間の集中的な降雨であった。Fig.7には、この観測で求められたハイトグラフ、ハイドログラフ、ポリユー

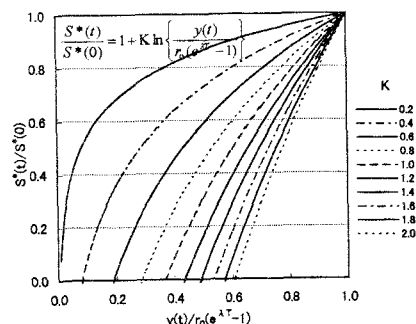


Fig.5 Relationship between pollutant runoff and discharge.

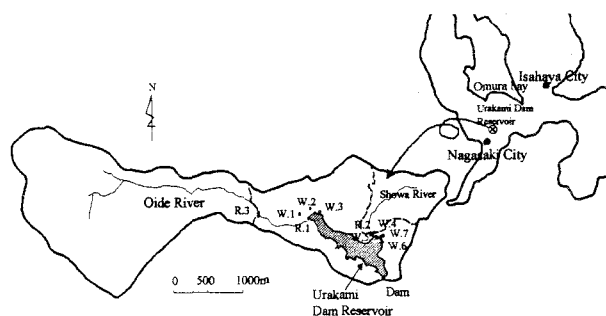


Fig.6 Schematic view of the Urakami reservoir and its watershed.

トグラフが記されている。同図中には観測値と共に、汚濁負荷流出タンクを用いて求められた計算値も併記されている。大井手川、昭和川の両流域共、比較的に類似した土地利用がされているが、両者で比流量に大きな違いが見られる。これは、両流域の大きさの違いにより今回の降雨継続時間が雨水の到達時間を超えていたか否かに依っている。また、両河川で比流量、T-N、T-Pに関して観測値と計算値とを比較すれば、両者は概ね一致していることが分かる。ただし、昭和川で比流量に関する両者の一致が必ずしも良くないのは、採水時間間隔に起因するものであると考えられる。なお、計算には2段の非線形直列タンクが用いられた。

つぎに、大井手川と昭和川とで求められた汚濁負荷量を流量との関係で表せばFig.8のようである。この図を見る際には、ハイドログラフの上昇期と下降期で横軸の変数が異なっていて取られていることに注意を要する。なお、前述されたように、対象とした降雨が非常に短時間のものであったために、上昇期に関して観測値と計算値との

比較は殆どできない。一方、下降期においては両河川の実測値は共に、 K の値が0.2~0.3程度であることを示している。これは、流域の汚濁負荷の流出割合と雨水の流出割合との違いを示すものである。また、ここには、下降期の汚濁負荷流出量の計算値を(8)式により求められたものと観測値とを比較した図を載せていないが、 α/λ の値は広範囲に変化することが示された。

最後に、Fig.6で示されたW.1~W.7の井戸で観測されたT-Nの時間的、空間的な変化の様子を示せばFig.9のようである。この図より明らかなように、窒素系の汚濁負荷流出に関しては、浦上水源池の東側に位置するW.4~W.7の井戸の方が北側に位置するW.1~W.3の井戸よりも汚染されていることが分かる。ここでは紙面の都合上、観測の対象とされた期間のハイトグラフが示されていないが、7月の観測日前には大雨が降っている。他方、10月は無降雨日が記録的に長く続いた。これらの降雨状況の違いは、地下水のT-Nの違いとして顕著に現れている。ただし、その違いの殆どが有機態窒素の違いに依るものであり、無機態窒素は殆ど一定であることは注目すべきことである。これは、無機態窒素が主として点源汚濁負荷に依っているのに対して、有機態窒素は非点源汚濁負荷流出に大きく依存していることを示唆している。このことから、流域の汚濁負荷流出に伴う水域への悪影響を防ぐ意味からも、流域水質管理の重要性が認識される。なお、雨水流出の形態の違いに関連して汚濁負荷流出量の評価を精度良く行うためには、今後とも観測を実施して、モデルに含まれるパラメータを同定する必要がある。

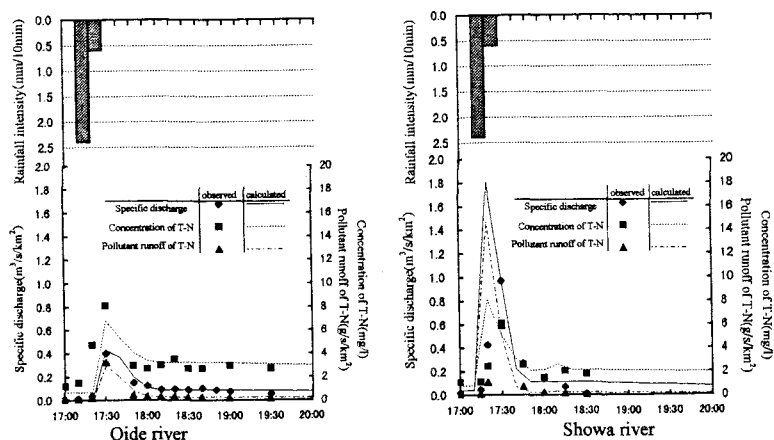


Fig.7 Quantitative and Qualitative Runoff observed both in Oide and Showa rivers.

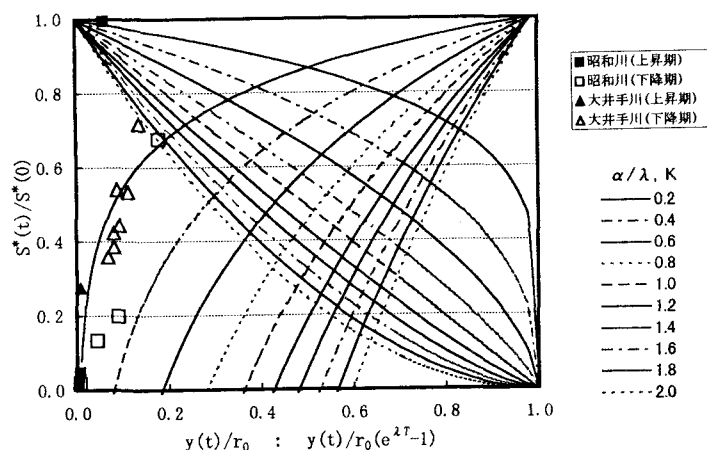


Fig.8 Comparison between the measured and calculated values of pollutant runoff.

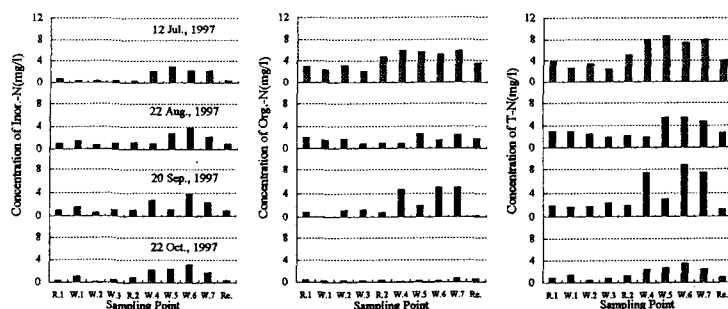


Fig.9 Temporal and spatial distributions of Inor.-N, Org.-N and T-N

5. 流域水質管理の立場での河川環境整備

本論では、河川環境整備を行う上で発生源対策を基本にした汚濁処理の重要性が述べられようとした。そのため、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。とくに、今後は下水道整備の進展

と共に、点源汚濁負荷の水域への未処理での放出は抑制され、好ましい河川環境を整備するにあたって、益々、非点源汚濁負荷流出への対応を余儀なくされることになる。一方では、長崎県の本明川においても頻繁に指摘されることであるが、河川維持流量の確保の問題がある。この問題を解決しようとするれば、自らが汚染した貴重な水資源は発生源で処理することを真剣に考えなければならない。前述されたように、本明川の下流では諫早湾干拓事業が進められているために、発生源対策を基本にした汚濁処理は非常に重要になっている。その具体的な方策については、目下、多くの機関により、鋭意検討がなされている。我々の研究室においても数年前から木炭浄化法の効率の検討を行っているが、ここでは、それらの紹介を省く。

最近では、標題に示された対応の必要性は各所で認識されるようになってきた。昨年(1997年)、第一著者はイリノイ大学(U.S.A.)を訪問し、Photo 1に示されるようなシカゴのエルクハースト・クォリーを見学する機会を有した。ここでその詳しい説明をすることを省略するが、非点源汚濁負荷が水域へ未処理で放出されることを種々の工夫をして防ごうとする意気込みが感じられた。併せて、それらの施設がアメリカの土木学会(ASCE)の“Outstanding Civil Engineering Achievement of the Year”を受賞していることも印象的である³⁾。我々の周りにおいても、水環境整備の重要性が十分に認識され、流域水質管理の立場で河川環境整備が進められることを強く望んでいる。



Photo 1 Elmhurst Quarry Flood Control Facility.

6. 結論

本論では、発生源対策を基本にした汚濁処理の必要性和河川環境整備の重要性が述べられた。とくに、長崎県の本明川では、その下流域で諫早湾干拓事業が進められていることもあって、この種の問題に十分に対処せねばならない。このようなことから、非点源汚濁負荷流出の機構を明らかにし、目的達成の一助とすることが試みられた。

謝辞：本研究は平成9，10年度の河川環境管理財団の河川整備基金の助成を受けて実施されている。ここに記して、関係各位に深甚の謝意を表します。また、研究を進めるにあたって、観測や資料整理等で、西田渉助手を初めとする本学社会開発工学科の河川工学研究室の教職員・学生諸氏にご協力戴いた。併せて感謝致します。

参考文献

- 1) 野口正人, 西田渉, 矢代まゆみ, 星野公秀, 前原良: 流域における点源・非点源汚濁負荷の評価と流出予測に関する研究, 長崎大学工学部研究報告, Vol. 27, No. 49, pp. 341-346, 1997.
- 2) Overton, D.E. and Meadows, M.E.: Stormwater Modeling, Academic Press, p. 305, 1976.
- 3) Article, ASCE Civil Eng. Magazine (Jul.), p. 49, 1997.