流域における点源・非点源汚濁負荷の評価に関する研究

野口正人*・西田　渉*
星野公秀**・矢代まゆみ**

Estimation of Point and Nonpoint Pollutant Sources Distributed over the Watershed

by
Masato NOGUCHI*, Wataru NISHIDA*
Kimihide HOSHINO** and Mayumi YASHIRO**

In order to attain a sound and sustainable water environment, integrated management of river and watershed becomes important. Then, we must make a data base for estimating the point and non-point pollutant sources distributed over the watershed. At the same time, we have to make a highly sophisticated physically-based model, which enables us to estimate their effects on a receiving water.

In this paper, observed data of fallout will firstly be reported with some kind of discussion. Nextly, proposed physically-based model will be shown, and some results denoted. Finally, several discussions will be done, regarding how to attain the final goal of desirable water environment.

1．緒　　論

河川・湖沼や海域といった水域を清澄に保つことは今後益々重要になってくるものと思われるが，その目的を果たすためには十分な流域水管理が不可欠であることは言うまでもない．とくに，流域における点源・非点源汚濁負荷の時間的，空間的な分布を知ることは，受水域の水環境管理に必要となるばかりではなく，流域からの汚濁負荷流出量を制御していくうえで欠かすことができない．

以上のことから，既に著者らは都市域における点源・非点源汚濁負荷の水域への影響を評価する試みを始めており[1]，非点源汚濁負荷の評価を行う際に重要になると思われる降下粉塵の計測を数年間にわたって行ってきた．また，流域に分布した汚濁負荷が水域に及ぼす影響を評価するためには，その空間分布をリアルタイムに管理することが重要であり，同時に量的・質的な流出予測モデルを整備する必要がある．都市域におけるこの種のモデルとして著者らは，NUMEROUSおよびNUMEROUS-EXTENDEDを提案しているが[2,3]，それらのモデルを高精度で実行するためにも，都市域だけに限らずに，全流域を対象にしたphysically-basedモデルの構築が望まれるところである．

上述されたことから本論では，流域に分布する点源・非点源汚濁負荷の評価法について述べると共に，流域総合水管理を実施していく上で必要になるphysically-basedモデルを構築する際の問題点について検討する．

2．降下粉塵の計測とその結果

流域の非点源汚濁負荷を評価する手法の一つとして，長崎県の諫早市役所，ならびに，川棚町役場の屋上に降下粉塵の計測器を設置して観測を行っている．観測の概要については既に報告されているので[1]，ここではそれらの結果についてのみ説明する．Fig. 1には，

平成8年10月28日受理
* 社会開発工学科（Department of Civil Engineering）
** 大学院修士課程社会開発工学専攻（Graduate Student, Department of Civil Engineering）

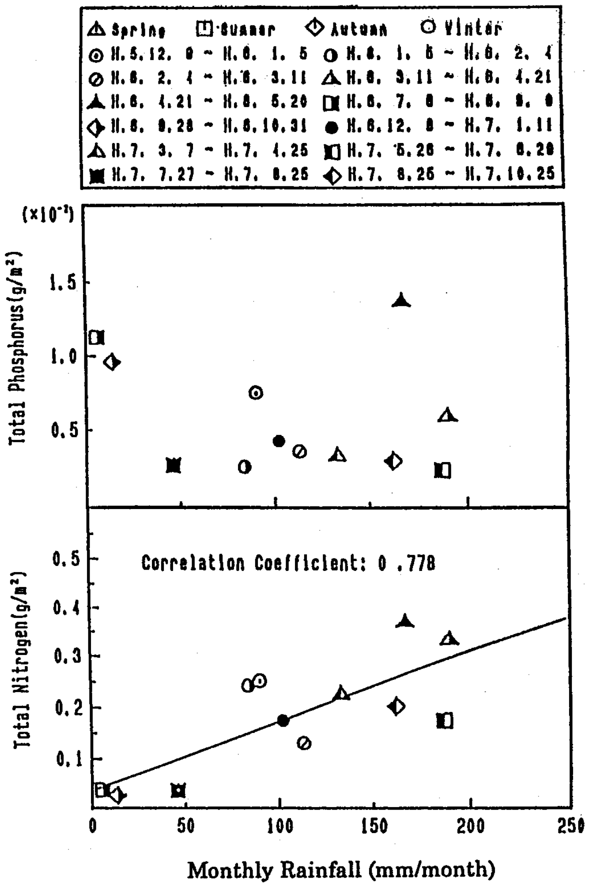

Fig. 1 Relationships between pollutant loads such as T-N or T-P and monthly rainfall.

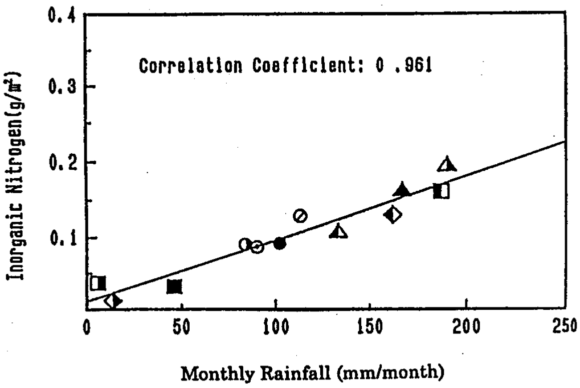

Fig. 2 Relationship between inorganic nitrogen and monthly rainfall.

諫早市役所の屋上で観測された全窒素(T-N)，全リン(T-P)と降雨量との関係が示されている．この図より明らかなように，全窒素は降雨量と強い相関関係を有しているが，全リンについてはそのような関係は見られない．とくに前者の関係は，全窒素の代わりに三態窒素の総和で表される無機態窒素を取り上げればさらに歴然としており，相関係数が0.961で次式が得られた(Fig. 2)．

無機態窒素(g/m2/mon.)
＝0.0009＊月降雨量(mm/mon.)＋0.0108　　(1)

ここに，Fig. 2 に用いられた記号は Fig. 1 のものと同じである．これらの図から明らかなように，窒素降下物は降雨量と強い相関を有しているために，季節的には概して，春から夏にかけて降下量が大きくなる．通常，降下粉塵は，直接水域に降下したものだけが非点源汚濁負荷として考慮されるようであるが，勿論その他についても多くが，最終的に受水域に流出するものと思われる．川棚町役場で観測された降下粉塵については目下のところ，データを整理中であり，データの集積と共に降下粉塵の空間的分布についても有益な知見が得られるものと考えられる．

3．流域における点源・非点源汚濁負荷の評価法

受水域の水質に多大な影響を及ぼす流域の汚濁負荷としては，点源・非点源の二通りのものがあることは良く知られている．すなわち，前者の例としては，家庭排水，工場排水，畜産排水等が上げられる．一般に，これらの値は原単位を用いて評価されるが，その実態を正確に把握することは非常に難しい．例えば，家庭排水について言えば，流域内の人口の動態や世帯数の分布が関係してくることは当然のことであり，さらには，住民の環境意識レベルもその多寡に関与してくる．また，それらの排水が受水域に到達するまでの経路を考えれば，下水道等の普及状況も関係してくる．したがって，流域に分布する汚濁負荷が受水域に及ぼす影響を評価しようとすれば，これらの全貌を明らかにして，汚濁が未処理で受水域に放出されることを極力防がねばならない．好ましい水環境を達成していく際にとりわけ重要になる因子の一つは，住民が環境保全・創造に対して健全な意識を有することであることは良く知られている．このような状況を現実のものとしていく上で有効な情報の発信は欠かせないが，そのためにも，流域に分布する点源・非点源汚濁負荷を種々の方法で評価し，それらを利用が容易な形でデータベース化し，後述されるような量的・質的な流出予測モデルにより受水域への影響評価を行うことが重要である．

Fig. 3 には，長崎県の大村湾流域を対象にして，国土数値情報の標準 3 次メッシュを基本とした人口の分布が示されている．この種の分布図は世帯数の分布に対しても作成されているが，点源・非点源汚濁負荷の評価に不可欠な各因子を同様にデータベースとして構

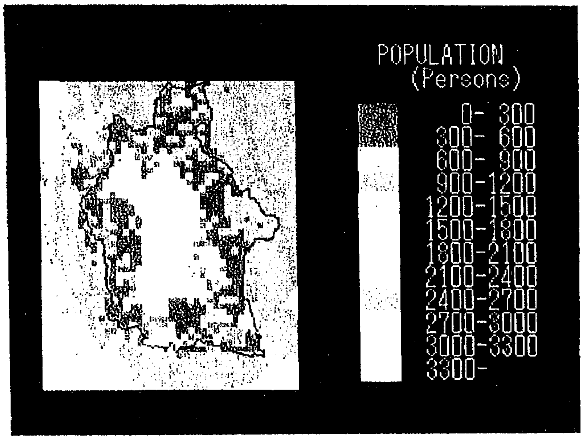

Fig. 3 Spatial distribution of population over the watershed of Ohmura bay.

築すれば，これらの数値を用いて汚濁負荷の定量的評価が可能になる．なお，標準3次メッシュは，国土地理院発行の1/25,000の地形図に相当する標準2次メッシュをさらに経緯度方向にそれぞれ10等分にしたものであり，凡そ1.17km×0.92kmの範囲に対応している．この範囲が上述の目的を果たすための基準として適切であるか否かは議論の要するところであるが，データベース構築のベースを細分化すればデータ数が膨大になり，データ処理に多大な時間が必要になることは自明のことである．いずれにしても，流域に分布する汚濁負荷を適切に把握し，その削減に努めることが好ましい水環境の達成に向けて重要になることは間違いない．

4．流域総合水管理の必要性とその手法

これまでに述べられたことより，流域総合水管理が水量・水質両側面から重要になることは明らかであろう．「総合治水」を例示するまでもなく，流域総合水管理を十全な形で実施するためには種々の施策が必要になることは言うまでもない．ここでは前節で取り上げられたこととの関連で，流域に分布した点源・非点源汚濁負荷が受水域に及ぼす影響を評価する方法を示し，所期の目的を果たす上での問題点について検討する．

ここで改めて，降雨－流出解析について詳しく述べることは省くが，汚濁負荷流出を考える際にその輸送を助ける流水の挙動について十全な把握が必要になることは当然である．十分に合理的な手法で流域からの汚濁負荷流出量を予測するためには，物理的な観点に立った手法が必要とされる．以下に示される(2)～(5)式は表面流を2次元流として扱う際の連続方程式，運動方程式であり，また，不飽和帯の土中浸透流に対して体積含水率の変化を表す方程式である．これらの方程式は，流れを物理的に表示する上で欠かすことができない．

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial M_\nu}{\partial x_\nu}=r-i(\nu=1,\ 2) \tag{2}$$

$$\frac{\partial M_\mu}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_\nu}\left(\frac{M_\mu M_\nu}{h}\right)=-gh\frac{\partial H}{\partial x_\mu}-\frac{\tau_{\mu b}}{\rho}$$
$$(\mu,\ \nu=1,\ 2) \tag{3}$$

ここに，h：水深，M_μ：x_μ軸方向の単位幅あたりの流量，r：有効降雨強度，i：浸透量，H：水位，$\tau_{\mu b}$：底面摩擦のx_μ軸方向の成分，g：重力加速度，ρ：流体密度，x_μ：空間変数，t：時間変数，である．

$$\frac{\partial \theta}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x_\nu}\left(D_\nu\frac{\partial \theta}{\partial x_\nu}\right)+\frac{\partial K_3}{\partial x_3} \tag{4}$$

上式中のDνは次式で表される．

$$D_\nu=\frac{K_\nu}{\gamma}\frac{\partial P}{\partial \theta}=K_{\nu(\theta)}\frac{\partial \psi}{\partial \theta}(\nu=1\sim3) \tag{5}$$

また，式中のθは$\theta=ns$と表される体積含水率である．ここに，n：間隙率，s：飽和度，K_ν：不飽和透水係数のx_ν方向成分，P：圧力，$\gamma(=\rho g)$：水の単位体積重量，$\psi(=P/\gamma)$：水分ポテンシャル，D_ν：拡散係数のx_ν方向成分，であり，x_3軸は鉛直上方に取られている．

上述された諸式を用いたphysically-basedモデルについては，著者らも種々の側面からの検討を行っており，最近の結果については論文[4]として発表しているので，ここでは詳しくは述べない．ただ，この種のモデルを用いて流出量の予測を精度良く行うためには，式中に含まれた各種のパラメータを如何に合理的に同定するかや，最新の流域情報(up-to-dated data of watershed)を如何に適切に求めるか，等が要求される．これらの問題では表面流と中間流・地下水流の分離は重要な問題であり，その目的達成のために浸透能をも含めた浸透量評価が必要となる．この意味からも，土地被覆状態，地質・土質の違いとその状態，等の情報が必要となる．

Fig. 4は長崎県諫早市の本明川の裏山橋地点に対する流域と水系網を示したものであり，前述の国土数値情報の3次メッシュ($dx\times dy=292\times231$m)で覆われている．計算の詳細な説明は省略するが，得られたハイエトグラフ－ハイドログラフをFig. 5に示す．前述されたメッシュ幅は流域地形の表現能力とも関係し，より一般的に使用される3次メッシュでは狭い川幅の河道が十分には表されない難点がある．このような問

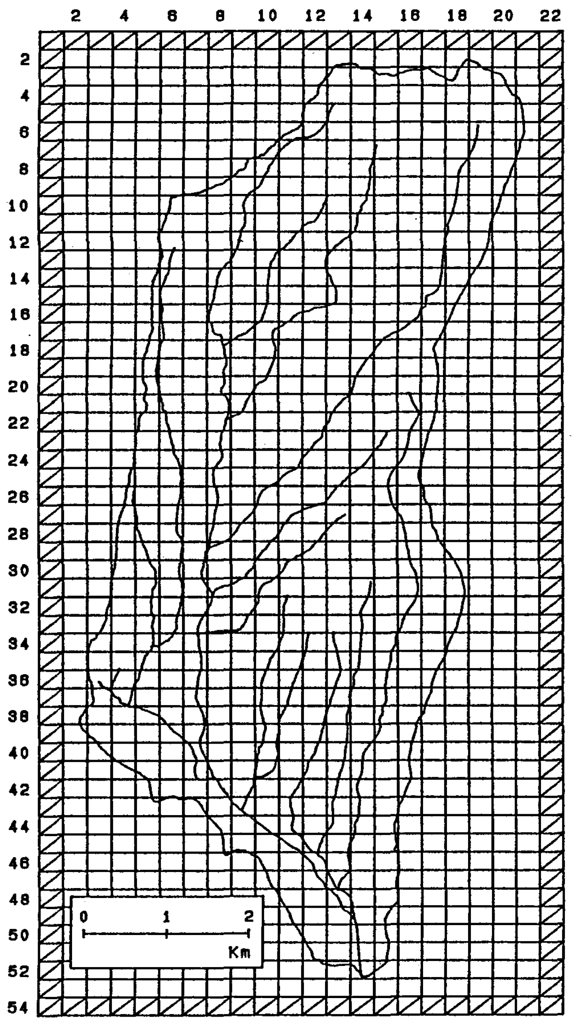

Fig. 4　Watershed of the Honmyo river covered with the orthogonal grid.

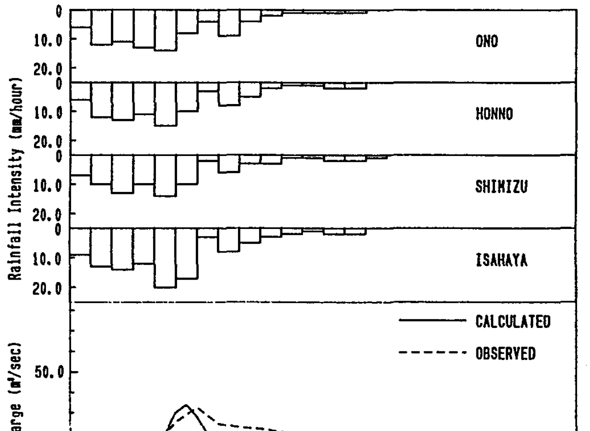

Fig. 5　The calculated and observed hydrographs for a practical case.

題を打開するために，著者らは河道流を1次元流として扱い，流域内の雨水を全体として 1-，2-，3-次元の流れとして表現する physically-based モデルを提案している．Fig. 5のハイドログラフは本モデルにより求められたものであるが，計算値と実測値を対比させた場合，両者は必ずしも十分には一致しているとは言えない．これは前述された各種のパラメータが未だ十分に物理的観点から決められていないことによるものであり，土中浸透量の評価をより精度良く行う必要性を示している．本論で取り上げられた汚濁負荷流出の問題を検討するためには，流れの量的な検討で前述された諸式が用いられたと同様に，以下の式が解かれなければならない．

$$\frac{\partial}{\partial t}(Ch)+\frac{\partial}{\partial x_\nu}(CM_\nu)=\frac{\partial}{\partial x_\nu}\left(h\phi_{(\nu)}\frac{\partial c}{\partial x_\nu}\right)+S_c \quad (\nu=1,2) \qquad (6)$$

ここに，Cは対象とする汚濁負荷の流水中の濃度であり，S_cは単位時間，単位面積あたりの汚濁生成量である．また，$\phi_{(\nu)}$は汚濁負荷の流水中での拡散係数であり，その他の記号は前と同様である．この式を用いて汚濁負荷流出量を予測する際にも，上述されたと類似の問題が生起することは容易に予想される．汚濁負荷流出量を適切に予想するために，その輸送を助ける雨水流の流出予測が重要なことは言うまでもない．今後は，点源・非点源汚濁負荷の空間分布の評価と共に，受水域への流達過程に関係した水理機構についても明らかにしていかねばならない．

5．結　　論

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・非点源汚濁負荷に関与した種々の因子を共通の基準でデータベース化し，流域の総合的水管理について役立てる手だてについて検討した．そのため，点源・非点源汚濁負荷の空間分布の評価に関しては降下粉塵の計測を数年間にわたって実施してきた．これらの結果に関しては，窒素酸化物の流域への降下量の絶対値が標準的な値として示された．

一方，これらの点源・非点源汚濁負荷の受水域への流達過程を明らかにするため，physically－based モデルの作成が試みられた．実際の降雨-流出関係を正確に同定することは，最新の流域情報を収集し，数値モデルをより複雑なものとしても必ずしも容易には達成されないことが示された．流域の水管理が今後益々，水量・水質両側面から期待されていることを考えれば，物理的観点からモデル中に含まれる各種のパラメータ

を同定せねばならず，その方法について若干の検討がなされた．なお，本論文で取り上げられた最終目標の達成のためには，引き続きパラメータの同定と共に，流出水の汚濁濃度の時空間的変化を調べていく必要がある．

最後に，降下粉塵の計測にあたっては諫早市役所，川棚町役場の職員の方々にお世話戴いた．ここに記して深謝致します．また，観測の実施，水質分析等では，本学環境開発工学講座の平山康志技官，ならびに，同講座河川工学研究室の朴元培，柳本諭，村上邦人(現，㈱日水コン)，前原良の諸君を初めとする大学院生，卒研生の助力を得た．併せて，感謝致します．なお，本研究は平成７，８年度の文部省科学研究費基盤研究(代表者：野口正人，No．07558059)の助成を受けて行われたことを記し，関係各位に謝意を表します．

参考文献

1）野口・西田・喜井・碇(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.

2）M. Noguchi, S. Takanishi, T. Nakashima and Y. Ikezaki (1991): The interaction of flows between on lands and in sewers, Environmental Hydraulics, Vol. 2, Balkema, pp. 1397-1402.

3）M. Noguchi, W. Nishida and K. Kii (1993): A mathematical simulation of pollutant runoff from urban areas, Proc. 6th Intn'l Conf. on Urban Storm Drainage, Vol. 1, pp. 903-908.

4）M. Noguchi, H. M. Tahat, W. Nishida and K. Hoshino (1996): Sensitivity of the physiographic factors of the basin in a physically-based rainfall-runoff modelling, Proc. Intn'l Conf. on Water Resources & Environmental Research: Towards the 21st Century, pp. 21-28.

5）H. M. Tahat, M. Noguchi, W. Nishida and H. Hanada (1995): The sensitivity of a physically-based rainfall-runoff model to the physiographic factors of real basin, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol. 39, pp. 37-42.