

都市域における点源・非点源汚濁負荷の水域への影響

野口 正人* ・ 西田 渉*
喜井 克浩** ・ 碓 慎一***

The Influence of Pollutant Runoff on the Receiving Water

by

Masato NOGUCHI*, Wataru NISHIDA*, Katsuhiro KII**
and Shin-ichi IKARI***

To attain a pleasant environment, several kinds of problems should be solved in relation to the quantity and quality of the water.

In this paper, the extended model of NUMEROUS has firstly been proposed for prediction of the pollutant runoff from urban areas. This model has been proven through the estimation of the point and the non-point pollutant sources at Isahaya city in Nagasaki. Results of the installed collector in Isahaya city for the non-point source have been influenced by the eruption of Mt. Unzen which is near by the area. Finally, the predicted values of pollutant runoff have been compared with the observed one in order to evaluate the appropriateness of the proposed model.

1. 緒 論

都市における人間活動は、受水域に様々な形で影響を及ぼしている。その一つとして、都市の不浸透域の増加や下水道の整備により洪水時の出水形態が変化してきていることが上げられる。これらの影響評価を行うために、既に著者らは都市域での雨水排除モデルとしてNUMEROUS (Nagasaki University Model for Estimating the Rates Of Urban Stormwater) を提案している^{1)~3)}。一方、潤いと安らぎが感じられる快適な水環境を整備する上では、上述された水量面での影響評価と共に、水質面での影響を十分に評価することが重要である。

ところで水質予測に関しても、これまでに多くのモデルが提案されてきたが、これらのほとんどのモデルは流域からの汚濁流出の物理機構を十分に考慮しない概念的なものであった。また、たとえ物理モデルでも、

実際の雨水流が2次元流であるにも拘らず、1次元流的取り扱いをしたりして、都市域の点源・非点源汚濁負荷の流出機構を十分に表現し得ないものが多かった。このようなことを考えれば、NUMEROUSは元々都市域の2次元流を物理的考察のもとに表現することが可能であり、汚濁負荷流送を正確に予測することができる。

本論文においては、都市域からの放流水の水質が受水域に及ぼす影響を評価することが試みられた。そのため、NUMEROUSを汚濁負荷流出の予測に関しても可能なモデルに拡張し、都市域から排出される点源・非点源汚濁物質を取り上げ、雨水排水渠の放水口から排出される汚濁負荷量の流出予測を行った。併せて、非点源汚濁負荷の実態を明らかにするために現地観測を実施した。

平成6年4月28日受理

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

** 清水建設 (Shimizu Corporation)

*** 佐賀県庁 (Saga Prefectural Office)

2. NUMEROUS の概要¹⁻³⁾

都市域雨水排除モデルの NUMEROUS は、河道流、下水道流、地表面流からなる都市域での複雑な洪水流を数値解析することができる。とくに、地表面流のシミュレーションは 2 次元流れの計算によって行われており、次の基礎方程式を解くことによって計算された。

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

$$\frac{\partial M_\mu}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_\nu} (M_\mu M_\nu / h_L) = -gh \frac{\partial H}{\partial x_\mu} - \frac{\tau_{\mu b}}{\rho} \quad (\mu, \nu=1, 2) \quad (2)$$

一方、下水道流の計算は、以下のように離散化された St. Venant 方程式により行われた。

$$\Sigma Q_i = A_{m,j} \frac{\Delta H_j}{\Delta t} - Q_{m,j} \quad (3)$$

$$H_j - H_{j+1} = \frac{1}{g} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} l + \left(\alpha \frac{V^2}{2g} \right)_{j+1} - \left(\alpha \frac{V^2}{2g} \right)_j + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{n^2 V |V|}{R^{4/3}} \right)_{j+1} + \left(\frac{n^2 V |V|}{R^{4/3}} \right)_j \right\} \cdot l \quad (4)$$

なお、表面流と下水道流の相互作用については、閉管路ではマンホール、開水路では計算節点のそれぞれで評価された。

3. NUMEROUS の拡張モデル (NUMEROUS-EXTENDED)⁴⁾

前節で述べられた NUMEROUS は、都市域雨水排除モデルとして開発された。ところで、都市域のように地表面の大部分が不透透面で覆われている場合には、僅かな降雨でも表面流が発生する。したがって、このような場合にも、NUMEROUS は汚濁流出予測モデルとして適当なモデルであると考えられる。

よく知られているように、受水域を良好に保つためには流域の点源、非点源からの汚濁負荷流出が水環境に及ぼす影響を評価しなければならない。通常、点源からの汚濁負荷流出は、非点源からのものとは対照的に比較的容易に見積ることができるが、非点源汚濁負荷はその形成機構の複雑さから評価が難しい。しかしながら、NUMEROUS は物理モデルの性格を有しているために、非点源からの汚濁負荷流出に対しても点源からのものと同様に合理的に評価することができる。すなわち、汚濁流送の基礎方程式として、次の 1 次元、2 次元流れに対する拡散方程式が取り上げられた。

$$\frac{\partial}{\partial t} (CA) + \frac{\partial}{\partial x} (CQ) = \frac{\partial}{\partial x} (A\psi(x) \frac{\partial C}{\partial x}) + S \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (Ch_L) + \frac{\partial}{\partial x_\nu} (CM_\nu) = -\frac{\partial}{\partial x_\nu} (h_L \psi_{(\nu)} \frac{\partial C}{\partial x_\nu}) + S_c \quad (\nu=1, 2) \quad (6)$$

以上のことから NUMEROUS-EXTENDED では、都市域からの汚濁流出予測をするために (1)~(6) 式を連立して数値解析を実行している。なお、点源、非点源汚濁負荷は平面流に対する入力として取り扱われた。

4. 降下粉塵の観測の概要

非点源汚濁負荷の大部分は、自然現象や人間活動に起因する各種粉塵が天空から降下してくると考えられている⁵⁾。それゆえ、市街部に降下する各種粉塵の実態を把握するためには、Figure 1 に示された降下物捕集器を用いて、降下粉塵ならびに雨水を採取する必要がある。捕集器の設置場所は、諫早市街部のほぼ中心に位置する諫早市役所屋上としたが、ここでは、雨量計も据え付けられている。計測期間は、平成 5 年 12 月 3 日~平成 6 年 1 月 5 日 (1 月観測) と平成 6 年 1 月 5 日~2 月 4 日 (2 月観測) の 2 回のそれぞれ約 1 ヶ月間である。計測は捕集器内に溜った雨水を取り出し、水質計測と同様な方法で行われた。汚濁指標には富栄養化の主要な原因物質である栄養塩類を取り上げた。

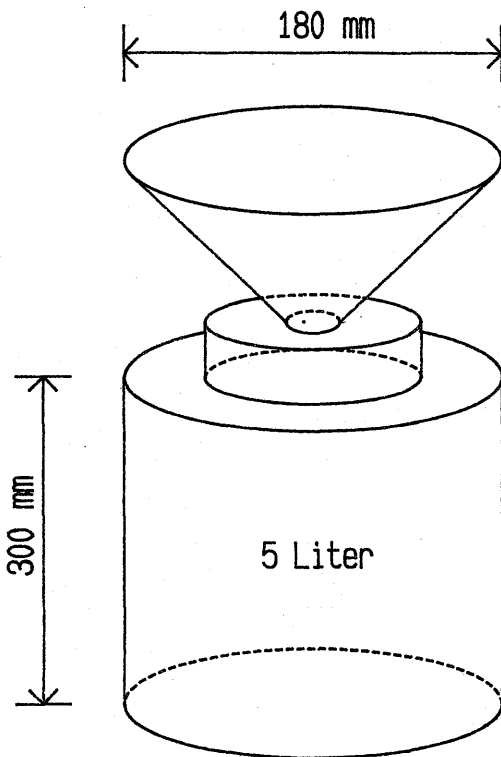


Figure 1. Collector.

今回のように比較的長期にわたって捕集器を設置する場合には、回収するまでに測定対象の汚濁物質が変質する恐れがある。このことを防ぐために、降下物捕集器を2つ用意し、亜硝酸性窒素(NO₂-N)、硝酸性窒素(NO₃-N)を測定する捕集器には若干の水酸化ナトリウム溶液を、アンモニア性窒素(NH₃-N)、全リン(T-P)を測定する他方の捕集器には若干の希硫酸を予め加えておいた⁶⁾。また捕集器内の雨水が蒸発することをなるべく避けるために捕集器をアルミニウム箔で包んだ。更に捕集器を回収する際には、ロート表面に付着している粉塵をも回収するようにした。

通常、晴天時の降下粉塵量は微小であり、降下粉塵の大部分は降雨により洗い落とされて地上に到達するものと考えられる。このようなことから、まず観測が実施された期間の降雨に関するデータを Table 1 に示す。この表より分かるように、1月観測時の方が2月観測時に比して僅かではあるが短期間に多量の降雨があったことが確認できる。また、観測結果は、その地域を取り巻く大気の状態など、現地環境にも大きく影響されることは当然である。そのため、雲仙普賢岳の火山活動に伴う火山灰等の噴出物が、今回の観測結果になんらかの影響を及ぼしているのではないかと推察し、観測期間の普賢岳上空の平均風向を調べた結果、北西の風がほとんどであることが分かった。しかし、これが直ちに周囲の風向そのものを表している訳ではなく、1月観測では6日間、2月観測では3日間、それぞれ降雨前に南東絡みの風が吹いていたことが判明した。

観測結果を Table 2 の左欄に示す。ここで全窒素(T-N)に着目すれば、両観測結果とも Table 3 に示されたように一般の観測値に比して高い値になっていることが分かった。これは現在の諫早地域が雲仙普賢岳の噴火の影響を受けているためであると思われる。また、観測値より算出された降下粉塵量を同表の右欄に示す。ここに、1月観測より算出された T-N は、2月観測の

ものと比べて高い値が示されている。これは南東絡みの風が1月観測時に多く吹いたことから、普賢岳の火山噴出物の影響をより強く受けたためと考えられる。さらには、松尾らも指摘しているように⁷⁾、降雨量が少ない時に T-N 濃度が高くなる効果を有していたためと考えられる。

5. 汚濁流出予測の結果と考察

都市域からの汚濁負荷流出予測が NUMEROUS-EXTENDED を用いて行われることを示すために、Figure 2 のような人口が約9万人である都市の排水系統を対象にして数値シミュレーションを実施した。ここに、汚濁指標としては T-N が取り上げられたが、一軒に4人が住んでいる標準家庭に対する汚濁負荷の

Table 2 The amounts and the intensities of the observed pollutant loads

	(mg/l)		(g/m ²)	
	Jan.	Feb.	Jan.	Feb.
SS		8.000		0.7340
NH ₃ -H	0.457	0.412	0.0522	0.0378
NO ₂ -N	0.012	0.011	0.0014	0.0010
NO ₃ -N	0.430	0.567	0.0491	0.0522
T-N	2.585	2.650	0.2951	0.2443
PO ₄ -P	0.037	0.023	0.0042	0.0022
T-P	0.078	0.028	0.0089	0.0026

Table 3 The observed values of the total nitrogen and the total phosphorus in Kasumigaura and in Fukuoka city

	KASUMIGAURA	FUKUOKA
T-N	1.02	1.74
T-P	0.023	0.067

Table 1 Characteristics of the observed rainfall

	1993.12.3~1994.1.5	1994.1.5~2.4
Accumulated rainfall (mm)	106	92
Rainfall period (hr)	28	33
Mean average of rainfall period (hr)	4.0	4.12
Mean average of the intensities (mm/hr)	3.785	2.787
Mean average of dry period (day)	5.12	3.75

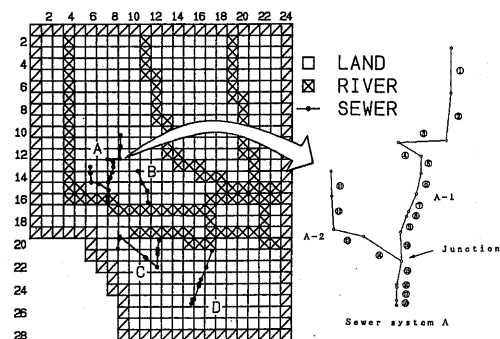


Figure 2. The computational region and the sewer system.

値は30g/人/日であると仮定された。他の場合の汚濁負荷は次式によって評価された。

$$PL = PL_0 - \frac{b-a}{a} \Delta \quad (7)$$

ここに、PL：1人の1日あたりの汚濁負荷量、 PL_0 ：標準家庭における1人の1日あたりの汚濁負荷量、 a ：平均家族数、 b ：家族数、 Δ ：家族数が平均値を超えて多いために減じられる汚濁負荷量、である。

今回、数値シミュレーションを行うにあたり排水量は190ℓ/人/日とし、これらが朝昼晩の3回の食事時にそれぞれ1時間にわたって排出されるものと仮定した。排水量は平面流への入力データとして取り扱った。また、降雨により大気中から洗い落とされる非点源汚濁負荷は、降下粉塵の1月観測より得られたデータをもとにして算出した。すなわち、天空の浮遊粉塵が降雨開始後1時間で降下するものと仮定して計算すれば、非点源汚濁負荷原単位は0.0456g/m²となった。

晴天時における汚濁負荷流出量の計算結果を現況に対して求めれば、Figure 3のようになる。Figure 3の上図はT-N 負荷量を、下図はT-N 濃度をそれぞれ示している。また、同図中には、従来観測を行ってきた放水口でのT-N も示されている。ここに負荷量、濃度

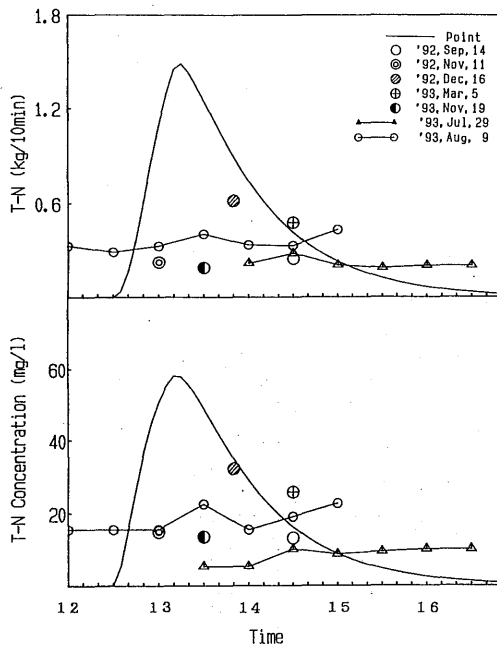


Figure 3. Comparison between the calculated and the observed values of the total nitrogen.

それぞれの計算値と観測値とを比較すれば、両者は必ずしも一致しているとは言えないが、計算に用いられた仮定を考えれば当然のことである。何故ならば、住民が如何なる生活様式をしているかを一義的に決定することなどは不可能であり、そのようなことを考慮すれば本シミュレーション結果はオーダー的な見積りと理解されねばならない。これらのことを勘案すれば、数値解析に用いられたT-N原単位は比較的妥当なものであるとみなされる。

次に、分流式下水道の敷設前後における水域への影響の変化について考察する。Figure 4は、分流式下水道の敷設前後における水域への影響評価を行った結果が示されている。ここに、実線は点源・非点源汚濁負荷を考慮した場合の計算結果であり、現在の降雨時における汚濁流出量に相当している。一方、破線は非点源汚濁負荷のみを考慮した場合の計算結果であり、分流式下水道敷設後における汚濁流出量に相当している。分流式下水道敷設後における雨水管からの放流水は、現在のものと比較して、濃度的には約1/4に、また、10分あたりの汚濁負荷量は約1/5に減少している。しかしながら、下水道敷設後も依然として放水口から汚濁負荷流出があり、ピーク時の量は0.3kg/10min.となっている。これを累積汚濁負荷量の観点から考察す

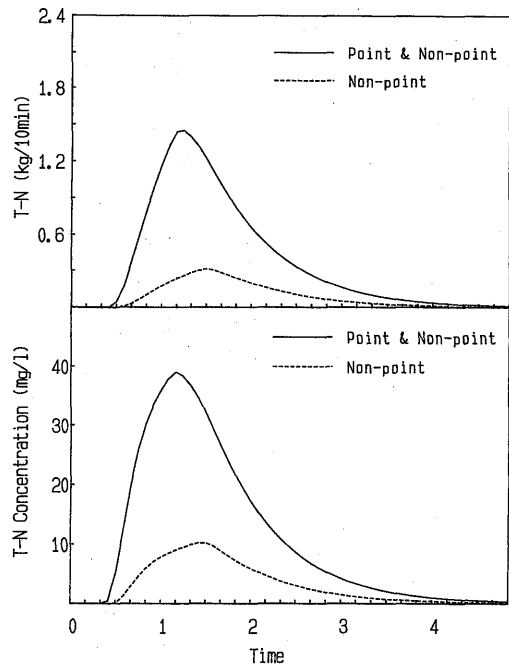


Figure 4. Predicted values of total nitrogen before and after completeness of the sewer system.

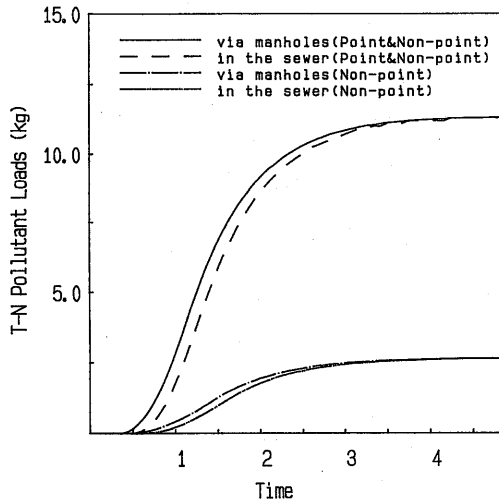


Figure 5. Accumulated values of total nitrogen before and after completeness of the sewer system.

れば、1降雨あたりについて下水道敷設前の値の約1/4に相当する2.5kgの汚濁負荷が水域へ流出することになる (Figure 5)。

6. 結 論

都市域から放出される点源・非点源汚濁物質が水域に及ぼす影響を評価するために、汚濁流出予測を行った。そのため、最初に、都市域から排出される汚濁負荷の流送過程を予測する数値解析モデル：NUMEROUS-EXTENDEDを提案した。

次に、諫早市役所屋上で降雨時に大気中から洗い落とされる降下粉塵量を観測し、非点源汚濁負荷を評価した。これらの観測で求められた値を検討した結果、諫早市（長崎県）の降下粉塵は雲仙普賢岳の噴火の影響を少なからず受けていることが認められた。

最後に、数値解析モデル：NUMEROUS-EXTENDEDを現地に適用し、雨水排水渠からの汚濁流出解析を行った。計算値を放水口での観測値と比較することにより、本モデルが流出汚濁負荷量の概略値を算出する上で有効なことが示された。また、降下粉塵の観測値を用いて分流式下水道敷設後の雨水管からの放流水水質を予測したところ、現時点での水質よりは改善されるものの、依然として汚濁負荷流出はなくなることが示された。

今回の研究を進めるにあたって研究フィールドに選ばれた諫早市は、本明川下流で諫早湾干拓事業が進展する等、快適な水環境を実現していく上で多くの問題を抱えている。また、1957年7月25日の諫早水害の経

験に鑑みれば、治水対策も疎かにできない。総合的な水管理を行い、好ましい環境を創っていくためにも⁸⁾、本論で示された観測を系統的に実施し、流域から水域に流出する汚濁負荷を極力抑制することが重要である。

最後に、降下物捕集器の設置などでは、田川久幸諫早市助役を初めとする諫早市職員の方々に種々ご高配を賜った。ここに記して深謝致します。また、本論で取り上げられた現地観測を実施するにあたっては、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大学院生、卒研生の助力を得た。併せて、感謝致します。

参考文献

- 1) S. Takanishi, M. Noguchi and T. Nakamura: Simulation of Urban Stormwater by NUMEROUS, Proc. 24th IAHR Congress MADRID, Vol. A, pp. 99-108, 1991.
- 2) M. Noguchi, S. Takanishi, T. Nakashima and Y. Ikezaki: The interaction of flows between on lands and in sewers, Environmental Hydraulics, Vol. 2, Balkema, pp. 1397-1402, 1991.
- 3) M. Noguchi, T. Nakamura, S. Takanishi and T. Nakashima: Estimation of Sewer Flows Under Inundated Conditions, Int. Symp. on Urban Stormwater Management, Sydney, pp. 372-377, 1992.
- 4) M. Noguchi, W. Nishida and K. Kii: A MATHEMATICAL SIMULATION OF POLLUTANT RUNOFF FROM URBAN AREAS, Proc. 6th ICUSD, Niagara Falls, Vol. I, pp. 903-908, 1993.
- 5) 國松孝男・村岡浩爾：河川汚濁のモデル解析，技報堂出版，pp. 24-34, 1989.
- 6) 栗城 稔：雨水浸透施設に流入する汚濁調査，雨水技術資料，Vol. 7, pp. 39-48, 1992.
- 7) 松尾・桜木・永淵・田上・永淵・佐々木：福岡県における降下物汚濁負荷量の変動特性とその評価，日本水環境学会九州支部セミナー講演要旨集，pp. 21-26, 1994.
- 8) 野口正人：都市水害の防災・減災に向けて，NDIC NEWS，西部地区自然災害資料センターニュース，No. 10, pp. 5-9, 1994.