

半造川における降雨流入に伴う 水質変化の予測に関する研究

西田 渉* ・ 鈴木誠二*
岩尾良太郎** ・ 池永雄太**

Numerical Prediction of Water Quality Change under Wet Weather Condition in Hanzo River

by

Wataru NISHIDA*, Seiji SUZUKI*
Ryotaro IWAO** and Yuta IKENAGA**

In order to improve the river water environment, it is necessary to properly understand the mechanism on water quality changes. Hanzo River is one of tributaries of Honmyo River which is flowing into Isahaya regulation pond. Concentrations of nutrients of Hanzou River are 1.5 to 2 times higher than water at main river. Purification of water quality in this river is important issue for water environmental management. In this study, numerical simulation model composed by two sub-model, basin model and river model, was developed and applied to Hanzo River to predict the water quality changes under wet weather condition in this river.

Key words : *water quality, nutrients, Hanzu River, basin model, river model, numerical simulation*

1. はじめに

河川の水環境を改善するためには、水域内での水質の現状と変化機構を把握し、汚濁の要因に対して適切な対策を取る必要がある。ここで取り上げる半造川は、諫早市内を流れる一級河川本明川の支川の一つであり、大臣管理区間の延長は 3.1km とされる¹⁾。この河道区間は諫早市内の平野部に位置することから、河床勾配は比較的緩やかである。半造川をはじめとした本明川水系では、治水安全度の向上を目指して段階的に各種の河道整備がなされると共に^{2, 3)}、水辺の環境改善のための努力も続けられている。半造川に関しては、近年、本川との合流部付近や河道区間内において、自然環境の回復や市民の水辺利用を促進させることを目的とした整備事業が行われている。ただその一方で、半

造川の水質に関しては、全窒素や全リンといった物質の濃度が本川の濃度よりも 1.5~2 倍程度高い状態にあるため⁴⁾、水質の汚濁機構の解明と改善対策が必要とされている。

本研究では、半造川を対象として、河道内の物質循環と流域からの流出負荷とを考慮した栄養塩予測モデルを作成した。また 2010(平成 22)年 12 月 13 日に行った観測結果に基づいてモデルの物理的予測結果の妥当性を検討し、栄養塩の変化機構を考察した。

2. 栄養塩の数値予測モデル

2.1 モデルの構成

河川の水質は、水域内での物理学的・化学的等作用を受けて変化すると共に、流域からの流出水の水質に

平成 23 年 6 月 14 日受理

* 大学院工学研究科 (Graduate school of Engineering)

** 大学院工学研究科博士前期課程社会環境デザイン工学専攻 (Graduate Student, Course of Civil and Environmental Engineering)

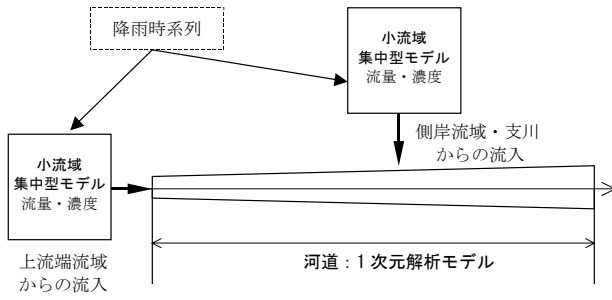


Fig. 1 モデルの構成

も影響を受けるため、河道と流域とを一体的に取り扱えるモデルの構築が望まれる。ここで採用したモデルの構成は Fig. 1 に示されるとおりである。河道については、1次元解析手法に基づく物理モデルとして解析することにした。流域からの流出水の評価に関しては、点源や非点源といった汚濁物質の発生源を詳細に取り扱える手法の採用が好ましいが、モデルパラメータが増えることを避けて集中型モデルとして取り扱うことにした。

2.2 河道モデル

水の流動を表現する基礎方程式として、以下に示される連続方程式と運動方程式が用いられた⁵⁾。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_{in} \quad (1)$$

$$\frac{\beta}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\alpha v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \lambda \cos \theta \frac{\partial h}{\partial x} = s_0 - s_f \quad (2)$$

ここに、 A : 流水断面積、 Q : 流量、 q_{in} : 横流入量、 α : エネルギー補正係数、 β : 運動量補正係数、 λ : 圧力分布補正係数、 g : 重力加速度、 v : 流速、 θ : 水平勾配、 h : 水深、 s_0 : 水路床勾配、 s_f : 摩擦勾配、である。また、後述の流水中の物質の輸送は、生成項を有する移流拡散型の方程式で表現された。

$$\frac{\partial(CA)}{\partial t} + \frac{\partial(CQ)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(EA \frac{\partial C}{\partial x} \right) + (src)A + C_{in}q_{in} \quad (3)$$

ここに、 C : 各成分の濃度、 E : 分散係数、 (src) : 各成分の生成項、 C_{in} : 横流入水の濃度、である。

水質に関わる物質としては、流水中での栄養塩の窒素とリンの循環に着目している。これらの水域内での物質循環の概念図を示すと Fig. 2 のとおりである。

このモデルでは、窒素成分として、アンモニア態窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$)、亜硝酸態窒素 ($\text{NO}_2\text{-N}$)、硝酸態窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$) を取り上げ、これらの硝化過程と植物プランクトン (PP) による摂取を考慮している。リンに関しては、オルトリン酸態リン ($\text{PO}_4\text{-P}$) とし、窒素と同様に植物プランクトンによる摂取をモデル化している。溶存酸素

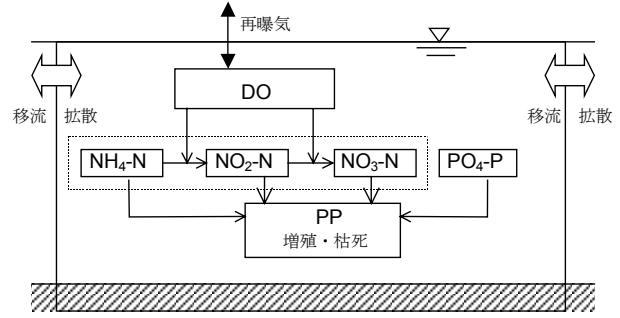


Fig. 2 物質循環の概念図

(DO)については、硝化過程での消費と大気からの再曝気を取り上げている。植物プランクトンの変化として増殖活動と枯死を考慮した。ここで、各成分の生成項の評価式を示すと次のとおりである。

・アンモニア態窒素

$$(src) = -k_{\text{NH}_4} C_{\text{NH}_4} - \gamma_{\text{NH}_4} \mu C_{\text{PP}} \quad (4)$$

・亜硝酸態窒素

$$(src) = k_{\text{NH}_4} C_{\text{NH}_4} - k_{\text{NO}_2} C_{\text{NO}_2} - \gamma_{\text{NO}_2} \mu C_{\text{PP}} \quad (5)$$

・硝酸態窒素

$$(src) = k_{\text{NO}_2} C_{\text{NO}_2} - \gamma_{\text{NO}_3} \mu C_{\text{PP}} \quad (6)$$

・オルトリン酸態リン

$$(src) = -\gamma_{\text{PO}_4} \mu C_{\text{PP}} \quad (7)$$

・溶存酸素

$$(src) = k_a (C_{\text{DOmax}} - C_{\text{DO}}) - \gamma_{\text{NH}_4\text{-DO}} k_{\text{N1}} C_{\text{NH}_4} - \gamma_{\text{NO}_2\text{-DO}} k_{\text{N2}} C_{\text{NO}_2} \quad (8)$$

・植物プランクトン

$$(src) = (\mu - d) C_{\text{PP}} \quad (9)$$

ここに、 C_{NH_4} , C_{NO_2} , C_{PP} , C_{DO} : $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_2\text{-N}$, PP, DO の濃度、 k_{NH_4} , k_{NO_2} : $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_2\text{-N}$ の硝化速度、 γ_{NH_4} , γ_{NO_2} , γ_{NO_3} , γ_{PO_4} : PP の増殖に伴う摂取割合、 μ : PP の増殖速度、 k_a : 再曝気速度、 C_{DOmax} : 飽和溶存酸素濃度、 d : PP の枯死速度、である。

各基礎方程式は陽形式の有限差分法を用いて、離散化されており、この差分には、空間方向に Doner-Cell 法を、時間方向には Leap-Frog 法を適用している。

2.3 流域モデル

河道モデルの計算では、上流端と支川の合流地点で流域からの流出水量と栄養塩濃度を与える。この内、流量については、流出関数法⁶⁾を用いて降雨による流量の増加を計算し、これに基底流量を加えて算定することにした。流出関数の応答核は指数型としており、具体的には次の式で計算した。

$$Q_n = S \int_0^t r_n a^2 t e^{-at} dt \quad (10)$$

ここに、 Q_n : 第 n 番目の降雨による流域からの流出流

量, S : 小流域の流域面積, r_n : 降雨強度, t : 第 n 番目の降雨からの経過時刻, a : 係数, である.

一方, 流出水の栄養塩の濃度は, 面積負荷速度として表現し, 式(10)から算定される比流量に依存して変化するものとして取り扱うこととした.

$$C_{in} = B_1 q^{B_2} \quad (11)$$

ここに, C_{in} : 窒素やリンの各形態での流出濃度, q : 比流量, B_1, B_2 : 係数, である. これらの評価式に含まれる係数値は, 流域の土地利用状態で変化することが予想されることから, GIS で半造川流域の土地利用の状況を解析し, モデルによる計算結果と観測結果との比較から推定することにした.

3. 水質観測

3.1 水質観測の概要

半造川での水質の動態を検討するにあたり, 栄養塩類の水質観測を行った. なお, この観測では, 流域モデルの降雨流出に関わるモデル係数の推定も行う目的から, 降雨開始直後から行われている. 観測は2010(平成22)年12月13日に行った.

採水地点は Fig. 3 に示されるとおりであり, 半造川河道区間で3地点(St.1~3)としている. また, 半造川の支川である川床川の下流部と St. 2 の直後にある排水路でも採水を行った. 水質計測項目は, DO, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ である. 現地では, 水深と川幅, さらに電磁流速計で流速を計測している.

3.2 観測結果

Table. 1 に各測定結果を示す. また観測前後の埋津と半造橋における水位の時間変化と夫婦木観測所での雨量を Fig. 4 に示す. なお, 水位と降水量は国土交通省による報告値⁴⁾である.

現地での採水は, 降雨の降り始めから行っており, 水質の結果には流域からの流出水の影響を含むものと判断される. 窒素に関連する各項目については, $\text{NH}_4\text{-N}$ の濃度が全体的に低く, ついで $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ の順で高くなる. こうした傾向は硝化の進行の結果と考えられると共に, 各物質の報告値⁴⁾を考慮すると, 降雨による希釈や流域からの流出といった変化要因があることも推察される. $\text{NO}_2\text{-N}$ や $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ は, 多少の増減はあるものの, 下流側で高濃度になっており, 最下流部に位置する St.3 での濃度は, 横流入水と同程度の値になっている. 今回の観測は比較的短い河道区間を対象にしているが, この区間内に設置されている放水口や支川からの横流入によって増加したものと思われ, 点

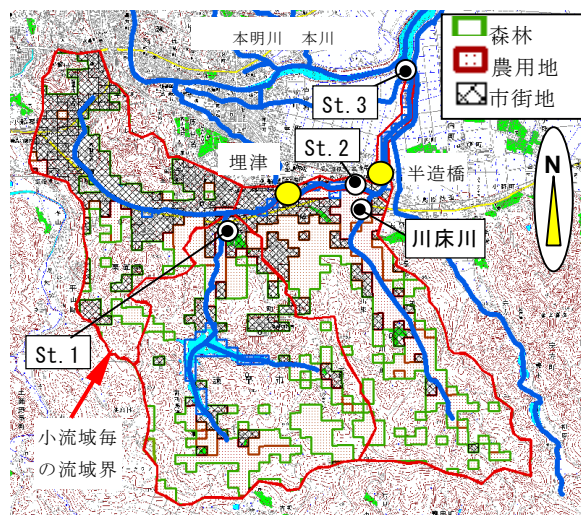


Fig. 3 半造川流域と土地利用分類図

Table. 1 水質の観測結果

| 採水地点 | 流量 (m^3/s) | 水温 ($^{\circ}\text{C}$) | DO (mgO/l) | $\text{NH}_4\text{-N}$ (mgN/l) | $\text{NO}_2\text{-N}$ (mgN/l) | $\text{NO}_3\text{-N}$ (mgN/l) | $\text{PO}_4\text{-P}$ (mgP/l) |
|-------|---------------------------------|------------------------------|---------------------------------|---|---|---|---|
| St. 1 | 1.97 | 13.7 | 6.21 | 0.02 | 0.006 | 1.5 | 0.47 |
| St. 2 | — | — | — | 0.01 | 0.037 | 2.8 | 0.36 |
| St. 3 | 1.30 | 12.4 | 6.10 | 0.01 | 0.041 | 3.5 | 1.96 |
| 横流入 | 0.03 | 12.6 | 5.14 | 0.00 | 0.043 | 3.0 | 1.10 |
| 川床川 | 3.95 | 14.2 | 2.22 | 0.01 | 0.006 | 2.1 | 0.98 |

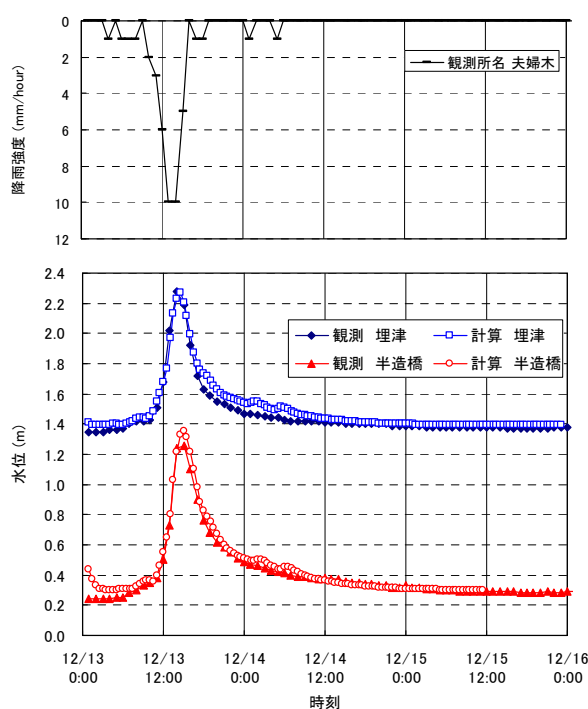


Fig. 4 ハイエットグラフと水位ハイドログラフ
(計算値は数値モデルによる結果である)

源と見なされる排水の影響と共に、降雨の流出の際に流域で生じた非点源からの汚濁物質の発生の影響が現れた結果であると考えられる。

4. 水質予測モデルの現地適用

4.1 計算条件

モデルの適用にあたって、半造川流域の土地利用情報を GIS を用いて解析した。利用したデータは、国土交通省国土計画局から提供される土地利用情報と河川網データを基本としている⁷⁾。流域界に関しては、半造川の小流域の流域界の判定には地形図からの読み取りが必要であったために、国土数値情報と地図をソフトウェア上で合成させて判読している。その結果、半造川流域は三つの小流域に分割されており、各領域に対して流域モデルを適用して降雨の流出量と物質の濃度を算定している。なお、当流域における土地利用種は、田：12.1%、畑等：13.4%、森林：51.3%、荒地：2.6%、建物用地：10.9%、幹線交通用地：1.2%、運動競技上・学校など：6.5%、河川及び湖沼：1.8%、ゴルフ場：0.2%となっている。

つぎに、河道に関しては、空間差分間隔を $dx=100m$ とし、現地観測での測定結果や航空写真からの読み取りによって形状データを作成した。前記の水質変化モデルに含まれる反応速度等の係数値は、計算結果と観測結果とを比較から試行錯誤的に決定している。最終的に採用したモデル係数の値は Table. 2 のとおりである。

Table. 2 反応速度

| | | | |
|-----------|------------|-------|------------|
| k_a | 2.0(1/day) | μ | 1.5(1/day) |
| k_{NH4} | 0.1(1/day) | d | 1.0(1/day) |
| k_{NO2} | 0.5(1/day) | | |

Table. 3 初期濃度

| | | | |
|----------|-------------|----------|-----------------|
| NH_4-N | 0.76(mgN/l) | PO_4-P | 0.32(mgP/l) |
| NO_2-N | 0.14(mgN/l) | D0 | 5.0(mgO/l) |
| NO_3-N | 1.41(mgN/l) | PP | 0.5(μ g/l) |

る。河道内の初期濃度については、国土交通省の過去の冬季における報告値を参考にして、Table. 3 のとおりに与えた。植物プランクトンの増殖による各栄養塩類の摂取は、Redfield 比に従うものとしている。時間差分間隔は $dt=1.0sec$ とした。

4.2 計算結果と考察

モデルで計算された河道内での水位の時間変化は、Fig. 4 に示されたとおりである。計算結果では、洪水後の水位の低減が若干速くなるようであるが、埋津と半造橋で計測された降雨の流出による水位の急激な上昇と最高水位を良好に再現していると判断できる。半造橋の水位変化には、この地点より上流側で合流する支川の川床川からの出水の影響も受けることになるが、最高水位の発生時刻は埋津と半造橋でほぼ同時であり、今回の降雨の場合、川床川からの洪水の流入は大きな

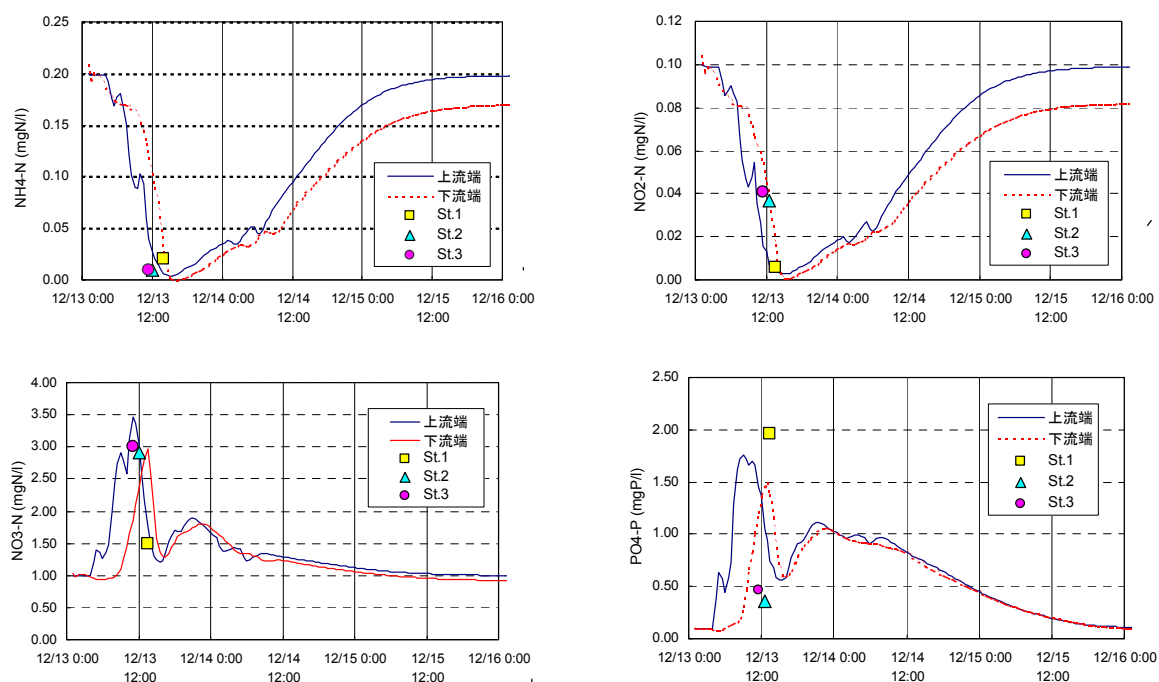


Fig. 5 物質濃度の時間変化

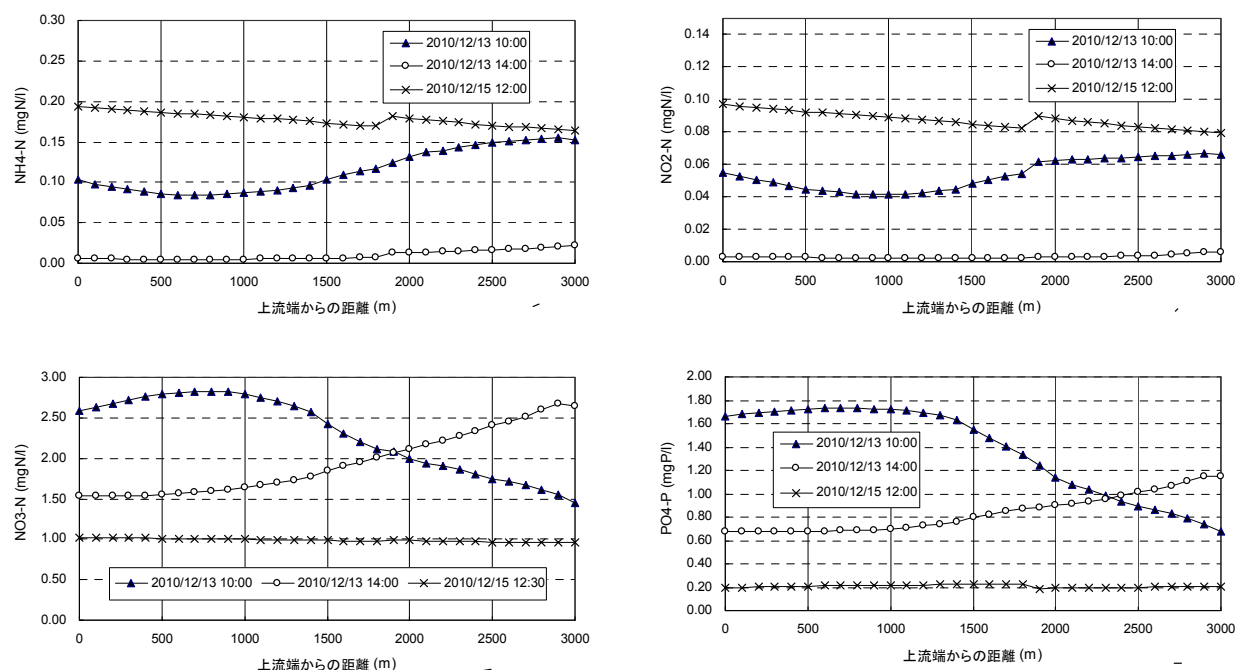


Fig. 6 物質濃度の空間分布

違いを与えなかったようである。

まず、モデルに取り上げた物質の濃度の時間変化を示すと Fig. 5 のとおりである。

流域から洪水期間中に流出する $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 D_0 、 PP の濃度は減少し、それらとは逆に、 $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{PO}_4\text{-P}$ については増加する。こうした変化は、都市域などの流域表面に堆積した有機態物質の酸化が降雨までの期間に十分に進行していたものと思われる。窒素系物質については、硝化の最終生成物質である硝酸態窒素になり、それらの物質が降雨によって流域から洗い出されたためと考えられる。 $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{PO}_4\text{-P}$ の濃度は、13日の夜間に再び上昇するが、これらは、洪水の到達時間が都市域からは30分と算定されたのに対して、森林地域からは5時間となっており、森林を発生源とした物質が流達してきているためである。また上流端と下流端の濃度変化を比較すると、洪水期間中には、河道内の流速が速まるために上流端や川床川からの流入水の濃度に依存した分布となる。一方で、洪水が低減するにつれて河道内での物質の滞留時間が長くなり、硝化や植物プランクトンによる取り込みに影響された濃度変化が現れるようになった。

つぎに、物質濃度の空間分布を示すと Fig. 6 のとおりである。なお、図示された結果は、12月13日10:00と14:00、15日12:00の分布であり、それぞれ、降雨開始時と降雨強度最大時、また、洪水が低減した時刻

に相当する。

各物質の空間分布には、河道の1,800～1,900m区間で不連続な濃度分布が現れることがあるが、これは、同区間が川床川と半造川の合流地点に相当しており、川床川からの流出水の影響である。ここで、先に降雨が流入する時間帯の濃度分布を見ると、 $\text{NO}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_2\text{-N}$ には同傾向の分布が現れており、降雨開始時に下流側での濃度が高い。これは、取り上げた河道区間が比較的短いとは言え、流出水が下流まで達していないためである。時間が経過して洪水が全区間を流下するようになると、河道内での物質の反応によって下流方向に濃度の増減が現れる分布となる。 $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{PO}_4\text{-P}$ については、先に述べたように、降雨の流出開始時に流域表面から栄養塩が流出するために、洪水流入初期に濃度が高くなる。洪水が低減した15日12:00には、 $\text{NO}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_2\text{-N}$ は流下方向に減少する傾向にあり、モデルに考慮した硝化と植物プランクトンの活動の影響が出ている。 $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{PO}_4\text{-P}$ については、空間方向の濃度分布があまり見られない。これは、 $\text{NO}_3\text{-N}$ については硝化による生成量と植物プランクトンによる消費量がほぼ同量となったことが原因の一つと考えられる。また、雨が止んだことによって流域からの負荷が減少したことも別の原因であると考えられる。

なお、各物質の計算結果と実測結果を比較すると、窒素に関連した各物質の結果は概ね同程度の数値とな

っており、流域からの流出に伴った変化を再現していると思われる。一方で、 $\text{PO}_4\text{-P}$ については、窒素系の物質に比べると差が大きい。今回は、限られた観測結果に基づいてモデルに含まれる水域内での反応速度や流域からの流出に関わる係数等を推定したが、観測値を増やすなどして、比較検討を続ける必要があると考えている。

5. おわりに

本研究では、半造川における水質変化機構を明らかにするために、富栄養化に関連深い窒素やリンを取り上げて、流域モデルと河道モデルとで構成される水質変化の予測モデルを構築した。また、実測結果との比較をとおしてモデルの妥当性と半造川における栄養塩の変化機構を検討した。

その結果、洪水期間中の濃度の時間変化については、流域からの流出負荷の影響を受けることが改めて示された。計算された物質濃度の空間分布の結果からは、洪水期間には流下速度が速いために、河道内での物質の反応に加えて、上流側流域や川床川からの流入水の濃度に依存した分布となることが示された。また、洪水が低減すると、硝化や植物プランクトンの活動などの河道内での物質循環機構による濃度変化が見られるようになることが示された。

構築した予測モデルに関しては、実測結果との比較から、降雨の流出過程や水質の変化について概ね妥当なモデル化がなされているものと考えている。ただし、予測精度の向上と妥当性のさらなる検証のためには、今回のモデルで考慮されなかった河道内の化学的・生物学的な生産機構や、流域からの流出負荷の取り扱いなどをより詳しく取り扱うことが必要になると思われる。

る。そのためには、水質や流れに関する現地観測を継続的に行い、データを蓄積する必要がある。今後、検討していきたい。

謝辞：本研究を遂行するにあたって、国土交通省長崎河川国道事務所から河道の地形データ等をご提供いただいた。深く感謝申し上げます。また、現地観測や水質の室内計測などで御協力頂いた当時学部4年生の赤嶺 太郎氏、刀根 宏和氏、藤瀬 多郎氏、山口 慶直氏、若山 光太氏に感謝致します。

参考文献

- 1)国土交通省九州地方整備局，長崎県：本明川水系河川整備計画,p.32, 2005.
- 2)牧野浩志，太田信也，光武久修：諫早大洪水から 50 年 新たな本明川への第一歩，(社)九州地方計画協会，九州技報，第 45 号, 2009.
(URL <http://www.k-keikaku.or.jp>)
- 3)国土交通省九州地方整備局長崎河川国道事務所：川の通信簿 本明川水系.
(URL <http://www.qsr.mlit.go.jp/n-kawa>)
- 4)国土交通省：水文水質データベース.
(URL <http://www1.river.go.jp/>)
- 5)岩佐義朗，金丸昭治編：水理学Ⅱ，朝倉書店，pp.26-31, 1993.
- 6)高瀬信忠：河川水文学，森北出版，pp.78-96, 2000.
- 7)国土交通省国土計画局：GIS ページ
(URL <http://www.mlit.go.jp/kokudokeikaku/gis/index.html>)