

(46) 塩水中での浮遊物質の挙動を考慮した都市感潮河川網の水質解析

Water Quality Analysis in Tidal Urban Rivers

Considering the Behavior of Suspended Solids in a Salt Water

中野 晋*・渡辺章弘**・中川紀雄***・細井由彦****・三井 宏*

Susumu Nakano, Akihiro Watanabe, Norio Nakagawa, Yoshihiko Hosoi and Hiroshi Mitsui

ABSTRACT: A numerical simulation model is suggested for estimating the water quality in tidal urban rivers. The model is composed of two submodels, which calculate unsteady flow and diffusive process of SS and BOD. In the second model, BOD was further divided into dissolved and particulate matter, while SS was divided into organic and inorganic matter. Taking the strong relationship between organic SS and particulate BOD into consideration, water quality was estimated. Some important coefficients in the second model such as self-purification factor and the conversion factor of SS into particulate BOD were determined by field data in a tidal urban river. Introducing these determined parameters into this simulation model, BOD and SS were estimated. Estimated ones well coincided with the observed ones in the Shinmachi river.

Keywords: water quality, urban tidal river, particulate BOD, SS

1. はじめに

徳島市内中心部を網目状に流れる新町川水系（新町川、田宮川、助任川、沖洲川、住吉島川、大岡川、園瀬川）は洪水時を除くと上流からの供給流量は少なく、河口と吉野川下流（塩水部）から潮汐作用により、海水が流出入を繰り返す緩混合から強混合の感潮河川である。昭和40年代前半には一部でBOD濃度が40mg/lを越える死の川となっていたが、その後の各種対策の結果、現在では大岡川、田宮川の一部を除くと河川C類型を満たすまでになっている。しかし、徳島市内の下水道整備率は約25%と低く、多量の雑排水が河道の側面から、多いところでは数mごとに河川に流入している状況が将来にわたって続くことが予想され、下水道整備、底泥浚渫、その他による水環境維持・改善は依然として重要な問題の1つである。

本研究は下水道整備や底泥浚渫など、この水系での各種水質対策の効果を評価するための数値予測モデルの構築を目的としている。この水系の特徴はほぼ全域が感潮部であること、新町川河口と上流端（吉野川との合流部）からほぼ同時に海水の侵入があり、流況が複雑であることが挙げられる。したがって感潮河川網を対象とした不定流モデルに基づく解析が必要である。一方、感潮部では塩分の増加に伴い、沈降や生物分解特性などが変化し、水質に大きな影響を及ぼすため、計算モデルには塩分の影響下での有機物質の挙動を考慮するべきである。

河川水質予測のためには河川に流入する汚濁負荷量と河道内での汚濁物質の挙動（移流拡散、生産、消費）の両方を明確にする必要がある。特に水質の時間や日のオーダーの変動を知るためには両者の時間変動モデルの構築が不可避である。この内、後者は時間的な変動のモデル化は比較的容易であるが、前者は水系内で発生したすべての汚濁の時間変動や発生量、発生から河道に流達するまでの経路や所要時間のある程度モデル化する必要があるが、対象とする水域が広がるとそうした作業を行うことは容易でない。実際、範

*徳島大学工学部建設工学科 Univ. of Tokushima, **（株）フジタ建設コンサルタント Fujita C.C., ***阪神高速道路公団 Hanshin Expressway Public Corp., ****鳥取大学工学部社会開発システム工学科 Univ. of Totori

困の広い水系を対象とする水質予測モデルでは流入する汚濁負荷量を原単位法に基づいて、日平均的、年平均的に求めるのが一般的で、この場合には後者に関していくら精緻な水質変化モデルが構築されても、前者の精度に制約されて、日平均的または年平均的な結果とならざるを得ない。

本研究では感潮河川網全体を包括する各種水質対策事業の効果の評価モデルの構築を念頭に置いている。そのため、年平均値といった水質の平均量ではあるが、対象水域の各場所ごとの変化を正確に把握できる必要がある、このためにも流れの特性、塩分と有機物質の挙動が正確に反映できる水質モデルの構築について検討した。

2. SSの塩水中での挙動を考慮した水質変化モデル

SSは水中に存在する浮遊物質の量を表す指標であり、浮遊物質は無機性のものと有機性のものに分類される。後者は生物活動に関与するため、水中の酸素消費量に影響を与えることとなり、BODなどの有機汚濁物質と深く関わりを持つ。このため、これまでもSSの挙動を考慮した水質モデルがいくつか検討されている。

川島・鈴木¹⁾は水質変数としてSS、DOC、 NH_4 、 NO_x 、DOを考えている。DOCは付着生物による取り込みと付着生物膜下層の嫌気性分解による増加を考慮し、SSは好気性有機物の減少を考慮している。しかし、溶存性有機物の減少は付着性微生物によるもののみ考えており、浮遊性微生物による減少は考慮できない。土屋・岡田²⁾の研究では水質変数としてBODとSSを取り上げている。しかし、両者を独立して扱っており、

相互関係については考慮されていない。岩田ら³⁾は粒子態の有機物の重要性から、BODを粒子態(BOD_p)と溶存態(BOD_d)に分離して考え、底質からの巻き上げ、粒子態から溶存態への遷移や形態別の分解速度などを考慮している。しか

し、SSとBODの相互の関係は明確にされていないことやSSの巻き上げが無視されていることなど、不十分な点も残されている。また、二渡ら⁴⁾は感潮河川である六角川を対象にして水質再現計算を行っており、潮汐特有の水塊の輸送特性や塩分の沈降過程への影響などを考慮した数値モデルの開発を行っている。この

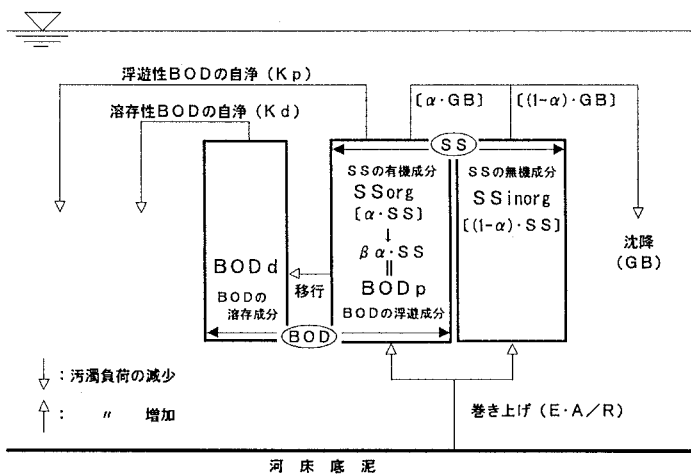


Fig.1 水質変化モデル

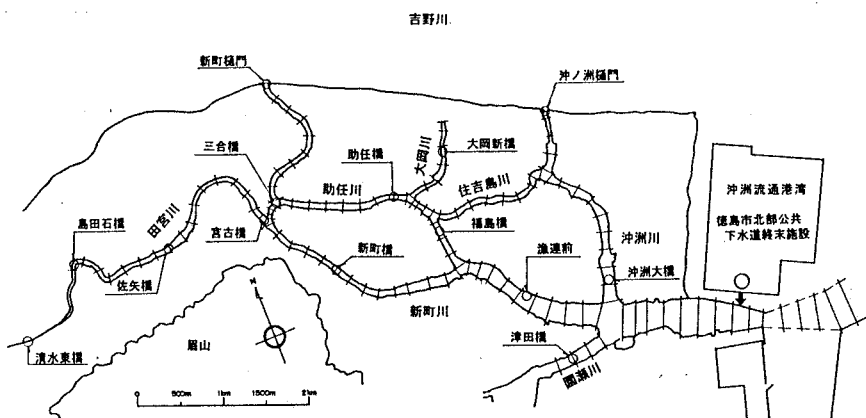


Fig.2 対象感潮河川網（新町川水系）

研究の中では河口からの累加水量に基づいた解析が感潮河川の水質計算で有効であることが明らかにされたが、網目状になった本水系での適用は困難である。感潮河川の場合、河口からの交換水量の影響により塩分が変化し、浮遊物質の凝集・沈降過程や生物活動に影響を及ぼす。また、その他、多くの地域固有の因子が複雑に関連している。これら全ての因子を含めた解析は不可能であるため、本研究では塩分が変化する場合でのSSと有機汚濁物質の挙動とその関係に注目した水質モデルの構築を目指し、次のようなモデル化を図った。

岩田らと同様にBODをBODdとBODpの2つに分けるとともに、新たにSSを有機性の酸素消費物質SSorgと無機性の非酸素消費物質SSinorgに分離する。有機性のSSはBODpに対応すると考えられ、両者の関係を考えることにより、SS濃度変化の影響がBOD濃度に取り込まれることになる。水質モデルの概要を示すとFig.1のようになる。SSとBODの関係を次式で示す。

$$\text{SSorg} = \alpha \text{ SS} \tag{1}$$

$$\text{BODp} = \beta \text{ SSorg} = \beta \alpha \text{ SS} \tag{2}$$

ここで、 α はSS中に含まれる有機性物質の割合であり、SSの測定の際に濾紙に残留する微粒物質を燃焼させて有機物を取り除く方法で得られる強熱減率に等しいと考えられる。 β はSSorg 1mgが分解する際の酸素消費量(mg)である。

3. 感潮河川でのSSと有機汚濁物質の挙動

(1) SSと有機汚濁物質の挙動

現地での採水分析を通して、BODの挙動に及ぼすSSの影響、およびこれら水質に及ぼす塩分の影響を調べた。採水はFig.2中に示す5地点(清水東橋、島田石橋、佐矢橋、宮古橋、漁連前)である。1994年10月～12月にかけて、週1回正午頃に表面より0.5m下から採水した。分析項目はBOD、BODd、COD、CODd、SS、塩分である。BOD分析はJIS K 0101 19、CODはアルカリ性過マンガン酸カリウム法、SSは環境庁告示第64号に準じ行なった。塩分は電気伝導度計(東亜電波工業製)を用いて電気伝導度を測定し、塩分に換算した。また、BODd、CODdは1 μ mガラス繊維濾紙を用いて濾過した濾紙通過試料から測定した。粒子態のBODp、CODpは直接分析することが困難であり、

$$\text{BODp} = \text{BOD} - \text{BODd}$$

$$\text{CODp} = \text{COD} - \text{CODd}$$

として求めた。

Fig.3は塩分の影響の少ない島田石橋、河口部にあたる漁連前の試料のBODp/BOD、BODとSSの関係である。なお、観測期間中のBOD、塩分の範囲は島田石橋ではそれぞれ4.47～13.35mg/l、1.16～6.02‰、漁連前では0.62～3.14mg/l、22.0～40.5‰である。特に11月中は漁連前の塩分は潟水の影響で33.1～40.5‰と異常に高くなっている。

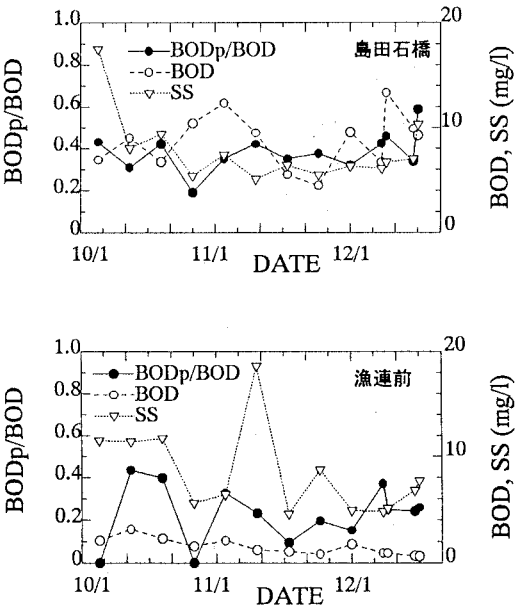


Fig.3 BODp/BODの変動

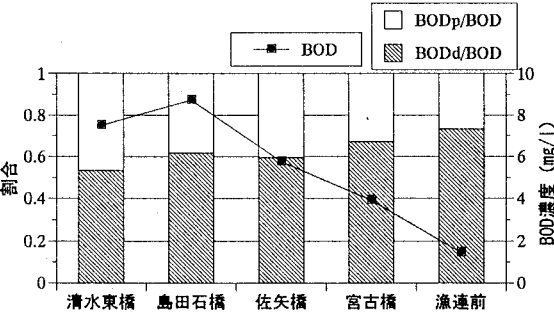


Fig.4 地点別 BODp/BOD, BODd/BOD

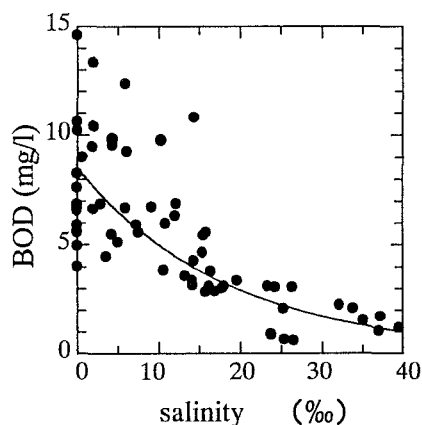


Fig.5 BOD と塩分の関係

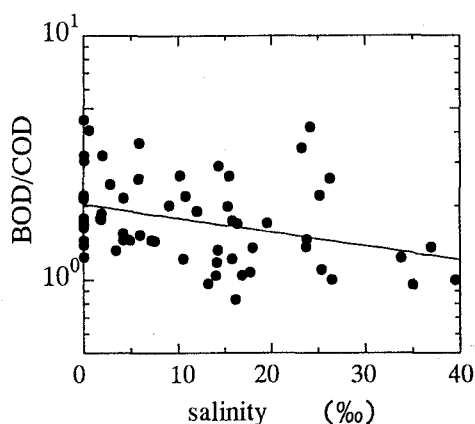


Fig.6 BOD/COD と塩分の関係

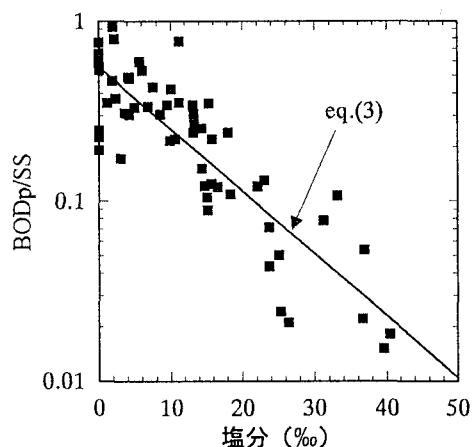


Fig.7 BODp/SS の塩分による変化

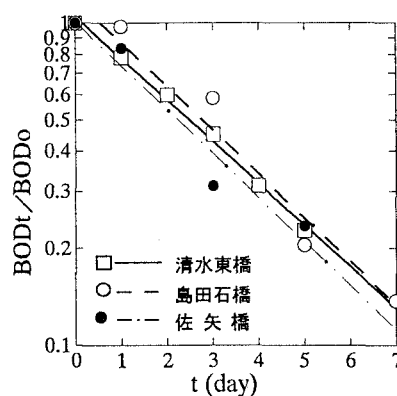


Fig.8 BOD の経日変化の例 (濾紙通過試料)

島田石橋では SS と BODp/BOD は対応して変動していること、粒子態の BOD が一部を除いて BOD 全体の 30~40% であることがわかる。一方、河口部ではもともと BOD が小さいため、BODp/BOD の精度が低く、明確な関係は見いだせないが、BODp/BOD の値は小さくなっている。

Fig.4 は各地点別に BODd/BOD、BODp/BOD と BOD の平均値を求め、整理したものである。この図からは島田石橋で BOD と BODd が大きくなっているが、それを除くと河口に近づくほど BOD が減少するとともに粒子態 BOD の割合も減少することがわかる。Fig.5 は測定された全データにより塩分と BOD の関係を調べたもので、塩分が大きくなるに従い、BOD がほぼ単調に減少することがわかる。

Fig.6 は BOD の COD に対する比を塩分に対して示したもので、BOD/COD が塩分の増加に対して減少していることがわかる。BOD/COD の塩分による変化の原因は流下に伴い、易分解性有機物が減少し、難分解性有機物の割合が増加したことに加え、塩分の増加に伴い、有機物分解細菌の種類や活性が変化し、BOD を測定する 5 日間の生物分解量が減少することも考えられる。本研究で対象とする BOD では河口に近づくにつれ、生物による可能分解量が減少した結果、BOD が有機物量を十分反映しなくなったために現れる見かけの自浄効果も含まれるが、これらの諸因子を分離して解析することはなかなか困難である。

Fig.7 は式(2)の中に現れる $\beta\alpha$ を求めるために、BODp/SS を塩分に対し、プロットしたものである。BODp

はSSに対して、塩分（S(%)）の増加に伴って、急激に減少している。図より次式の関係が得られる

$$\beta\alpha = 0.556 \exp(-0.0795 S) \quad (3)$$

(2) 自浄係数

自浄係数は実河川の一定区間で24時間以上の水質連続観測から測定する方法と河川水を採取後、攪拌しながらDOびん等に入れ、その中のDO濃度や有機物量の減少速度から測定する方法が一般的である。ここで

はBODを粒子態と溶存態に分離し、それぞれの自浄係数を求めるために後者の方法を用いた。しかし、BOD_pの分解速度定数の直接測定は困難であり、ここでもBOD全体とBOD_dの自浄係数についてのみ測定した。

実験に用いた試料はFig.2中に示す田宮川の3地点（清水東橋、島田石橋、佐矢橋）の河川水で、1995年1月18、27日、2月3日の正午に採水した。採水後、原水と濾紙通過試料をビーカーに取り、20℃の恒温器の中でスターラーを用いて緩やかに攪拌保存する。その後、0～7日後に試料を順次ビーカーから取り出し、BODを測定した。BODの経日変化から、Streeter-Phelpsの1次反応式を用いて

$$k = -t^{-1} \ln(BOD_t/BOD_0) \quad (\text{単位: 1/day}) \quad (4)$$

より、自浄係数 $k (= k_d + k_p)$ および k_d を求めた。ここで、BOD_tは t 日目試料、BOD₀は採水当日についてのBODである。Fig.8に濾紙通過試料についての実験結果の1例を示す。いずれの測定からもほぼ式(4)を満たす関係が得られ、これより求められた結果をTable.1に示す。なお、BOD_pについての自浄係数 k_p は $k - k_d$ として求めている。

これより自浄係数は3カ所で顕著な相違はない。測定数が少なく、十分な結論は得られないが、測定の範囲では塩分の影響をあまり見られなかった。

4. 水質数値解析

(1) 計算手法

a. 流れの計算手法

流れの計算の基本式を次に示す。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (5)$$

$$\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{gA^2} \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{Q^2}{gA^3} \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{Q|Q|}{K^2} = 0 \quad (6)$$

ここに g は重力加速度、 A は流水断面積、 t は時間、 Q は流量、 x は下流向きを正とする距離、 q は単位幅当たりの横流入量であり、流入の場合に正、流出の場合には負をとる。 H は水位、 K は通水能で、 n はManningの粗度係数、 R は径深である。

上記に示した一次元流れの不定流の計算手法は陽形式差分法、陰形式差分法、有限要素法等多数考えられる。いずれの方法も利点・欠点を有するが、ここでは計算量が多くなる欠点があるものの、計算が安定で、境界条件の扱いが容易な須賀ら⁹⁾の陰形式差分法を用いた。

b. 水質の計算手法

水質の移流拡散計算には次の物質収支式を基本とする。

$$\frac{\partial (AC)}{\partial t} + \frac{\partial (QC)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(AD_L \frac{\partial C}{\partial x} \right) + q' \quad (7)$$

ここで、 A は断面積、 C は断面平均濃度であり、 D_L は流速や濃度の断面非一様の影響を考慮した移流分散係数、 q' は横流入負荷、内部生産、分解、沈降などによる付加項で、対象となる水質別に与えられる。なお、

Table.1 BODの自浄係数測定結果

単位: 1/day				
	地点名	BOD 自浄係数 (kp+kd)	BODd 自浄係数 (kd)	BODp 自浄係数 (kp)
各地点 における 平均値	清水東橋	0.288	0.266	0.022
	島田石橋	0.391	0.306	0.085
	佐矢橋	0.268	0.286	—
	平均値	0.316	0.286	0.054

ここでは式(9)の差分表示を簡単に示すために、横流入負荷の他、河道内部での生産や消費を含む項として表現したが、BOD、SSについては後述する。移流分散係数は摩擦速度と断面積の平方根に比例する下記のElder型の式を用いて求める。

$$D_L = \kappa u_* \sqrt{A}, \quad u_* = \frac{g^{1/2} n Q}{AR^{1/6}} \quad (8)$$

ここで、 κ は河川固有の定数であり、塩分などの保存性物質の再現計算などから与えられる。

近年、6-point scheme (小松ら⁹⁾) などの高精度な移流拡散計算手法が開発されているが、実際の河川網の計算では分合流部や上下流部での境界条件の処理が煩雑となることや河川断面の不均一性から生じる誤差が結構大きいと、高精度計算手法の利点が生かしくいのが実状である。そこで、2次の精度を持ち、安定度も高いCrank-Nicholson schemeを移流項および拡散項の差分に用いた。Fig.9のようにx軸を下流から上流に向かう差分格子を考えると、式(7)の差分式は次式で示される。

$$\begin{aligned} & \frac{A_j^{n+1} C_j^{n+1} - A_j^n C_j^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} \left(\frac{Q_{j-1}^{n+1} C_{j-1}^{n+1} - Q_{j+1}^{n+1} C_{j+1}^{n+1}}{\Delta x_j + \Delta x_{j+1}} + \frac{Q_{j-1}^n C_{j-1}^n - Q_{j+1}^n C_{j+1}^n}{\Delta x_j + \Delta x_{j+1}} \right) \\ &= \frac{1}{\Delta x_j + \Delta x_{j+1}} \left\{ \left(A_{j-1/2}^{n+1} D_{L,j-1/2}^{n+1} \frac{C_{j-1}^{n+1} - C_j^{n+1}}{\Delta x_j} - A_{j+1/2}^{n+1} D_{L,j+1/2}^{n+1} \frac{C_j^{n+1} - C_{j+1}^{n+1}}{\Delta x_{j+1}} \right) \right. \\ & \quad \left. + \left(A_{j-1/2}^n D_{L,j-1/2}^n \frac{C_{j-1}^n - C_j^n}{\Delta x_j} - A_{j+1/2}^n D_{L,j+1/2}^n \frac{C_j^n - C_{j+1}^n}{\Delta x_{j+1}} \right) \right\} + \frac{1}{2} (q^{n+1} + q^n) \end{aligned} \quad (9)$$

c. 水質計算における分合流処理

本水系では網の目状に河川が流れており、7地点の分合流点がある。分合流点をFig.10のように考え、次の条件が成立するものとして扱った。

$$Q_i = Q_j + Q_k, \quad C_i = C_j = C_k \quad (10)$$

図のように*i*から*j*へ分流する場合を考える。分流条件より $C_i = C_j$ であるので、 C_{i+l} 、 C_j 、 C_{j-l} の3点の差分を考える。次に点で河道側へ配分される水量を次式で与える。

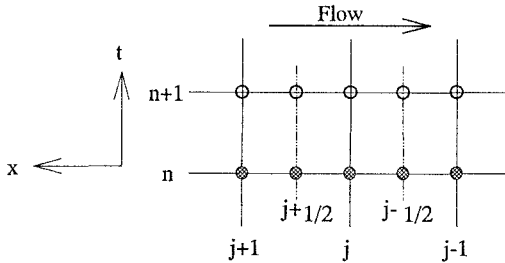


Fig.9 差分格子図

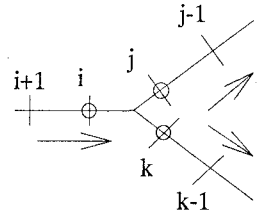


Fig.10 分合流点の処理

$$Q_{i+l,j} = \frac{Q_j}{Q_i} Q_{i+l}, \quad A_{i+l,j} = \frac{Q_j}{Q_i} A_{i+l}, \quad C_{i+l,j} = C_{i+l} \quad (11)$$

*i*から*k*へ分流する場合も同様に考えて、

$$Q_{i+l,k} = \frac{Q_k}{Q_i} Q_{i+l}, \quad A_{i+l,k} = \frac{Q_k}{Q_i} A_{i+l}, \quad C_{i+l,k} = C_{i+l} \quad (12)$$

式(11),(12)の水量を式(9)に代入し、得られた差分を加えて分流部の差分式とする。なお、合流点も分流点と同様に扱い、合流部の差分式を求めた。

d. SS と BOD の物質収支式

SS は式(7)に、沈降、河床からの巻き上げ、SSorg の自浄作用を考慮する。BOD は BODd, BODp ごとに物質収支式が次のように与えられる。

SS の基礎式

$$\frac{\partial(AC_{SS})}{\partial t} + \frac{\partial(QC_{SS})}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(AD_L \frac{\partial C_{SS}}{\partial x} \right) + E \frac{A}{R} + GB - k_p AC_{BODp} + q_{SS}' \quad (13)$$

BOD の基礎式

$$\frac{\partial(AC_{BODd})}{\partial t} + \frac{\partial(QC_{BODd})}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(AD_L \frac{\partial C_{BODd}}{\partial x} \right) - k_d AC_{BODd} + q_d' \quad (14)$$

$$\frac{\partial(AC_{BODp})}{\partial t} + \frac{\partial(QC_{BODp})}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(AD_L \frac{\partial C_{BODp}}{\partial x} \right) + \beta \alpha E \frac{A}{R} + \beta \alpha GB - k_p AC_{BODp} + q_p' \quad (15)$$

ここで、 E は巻き上げフラックス ($\text{gf/m}^2 \text{ s}$)、 G は沈降フラックス ($\text{gf/m}^2 \text{ s}$)、 q_{SS}' 、 q_d' 、 q_p' は SS、BODd、BODp についての単位長さ当たりの横流入負荷量 (gf/ms)、 B は河川幅 (m)、 R は径深 (m) である。巻き上げフラックス、沈降フラックスは一般に

$$E = \varepsilon \left(\frac{u_*^2}{u_{*c}^2} - 1 \right)^m \quad (u_* \geq u_{*c}), \quad \text{または、} \quad E = 0 \quad (u_* < u_{*c}) \quad (16)$$

$$G = -wC_{SS} \quad (17)$$

で表される。ここで u_{*c} は巻き上げ限界摩擦速度である。流れによる底泥の巻き上げ速度を表すモデルの中には野正ら⁷⁾のように、巻き上げ限界に加えて、沈降限界を考慮し、掃流力のレベルに応じて沈降のみが生じる場合、巻き上げも沈降も生じない場合、巻き上げのみが生じる場合の3段階に分けて考えるモデルも提案されているが、現地底泥の沈降限界を決定することも1つの大きな問題であるので、ここでは式(16)、(17)に示すように簡単化して表した。また、 ε は沈降速度、係数および指数 m は底泥の種類や掃流力の大きさに関係する定数である。

さらに、式(13)に、 $C_{BODp} = \beta \alpha C_{SS}$ 、 $G = -wC_{SS}$ の関係を代入すると、

$$\frac{\partial(AC_{SS})}{\partial t} + \frac{\partial(QC_{SS})}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(AD_L \frac{\partial C_{SS}}{\partial x} \right) + E \frac{A}{R} - (wB + k_p A \beta \alpha) C_{SS} + q_{SS}' \quad (18)$$

結局、式(14)と(18)より BODd、SS の濃度が計算され、SS の計算値に $\beta \alpha$ を乗じることにより、BODp が計算される。

(2) 計算条件

a. 水理条件

水位境界となる新町川河口、沖ノ洲樋門、新町樋門では周期 0.5 日で正弦波の水位変動を与えた。その際、潮位差はほぼ大潮にあたる 1.2m の一定値とした。田宮川、園瀬川、大岡川の上流端は流量境界とした。田宮川、園瀬川、大岡川では 24 時間の流量観測結果から、各流量を 0.377、2.56 および $0.064 \text{ m}^3/\text{s}$ の一定とした。また水質浄化事業の一貫として、昭和 55 年度より新町樋門において 1 週間に 5 日、1 日 6 時間程度、下げ潮時に $4.0 \text{ m}^3/\text{s}$ の割合で吉野川からの導水を実施している。計算でもその効果を考慮するため、1 日 2 潮汐の内、1 潮汐目の下げ潮時に 6 時間、流量 $2.86 \text{ m}^3/\text{s}$ で流入させた。なおこの流量は 1 週間あたりの流入量をあわせるために、実際の導水量の 5/7 とした。また Manning の粗度係数は $n=0.035$ を用いた。

b. 流達汚濁負荷量

著者ら⁸⁾は平成 2 年度に原単位法に基づいて本水系流域を対象に排出汚濁負荷量調査を実施している。今回、その後の人口増加や規制事業場の変更などを考慮し、入手可能であった徳島市の統計資料^{9)~13)}、徳島保健所の浄化槽設置基數台帳をもとに常住人口、規制事業場からの排出汚濁負荷、田宮川流域における処理処分割合などを修正して排出汚濁負荷量を推計した。流達汚濁負荷量は排出汚濁負荷量に流達率を乗じたもの

であり、流達率の適切な設定が特に重要である。流達汚濁負荷量の絶対値は地域による特性値で一般性がほとんどないため、ここではその結果については省略する。

下流からの上げ潮の影響のない清水東橋で BOD と SS について 24 時間連続観測を 2 回実施し、流達率の検討を行っている。この結果によると BOD で 31.7 および 36.5%，SS では 45.8 および 29.2% であった。これより、水系全体に対し、BOD では 34.1%，SS では 37.5% とした。なお、本水系では対象地区内の地盤が低いため、下水路のほとんどが高潮位や地下水面より低い位置にあるため、河川からの逆流や地下水の混入により流達率を測定できる地点が限られており、この 1 点の測定値を全域での流達率の代表値に用いた。

c.モデル定数

分散係数の補正值 (κ)

河川水質計算を行う上、まず分散係数の評価が必要である。数値モデルでは分散係数を式(8)の Elder 型で与えたため、補正值 κ を保存性物質である塩化物イオン濃度を用いた計算から同定した。検証計算の結果より、新町川本川では $\kappa=200$ 、助任川や大岡川などの新町川支川では $\kappa=100$ 、田宮川では $\kappa=600$ とした時に水系全体として最も適合度が高かった。これらの補正值を用いて行った計算値と観測値（3 カ年の観測資料^{14)~16)}の平均値を用いた）の比較を Fig.11 に示す。

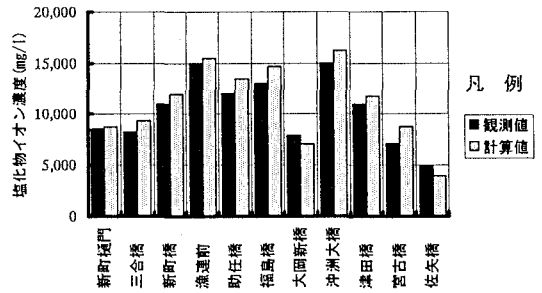


Fig.11 塩化物イオン濃度の再現結果

自浄係数

実験結果より、 $k_d = 0.316$ (1/day), $k_p = 0.054$ (1/day) とした。

沈降速度¹⁷⁾

島田石橋で採取した現地泥を用いて、室内沈降試験を実施した。その結果、初期の SS 濃度 1000mg/l の場合に沈降速度の 50% 値 W_{50} (mm/s) と塩分 S (%) についての次の関係を得た。これは実際の河川水よりも高濃度であり、実際より大きめの値となっている可能性がある。しかし、同時に実施した降雨時の河川水で得られた沈降速度もほぼ同程度であったため、数値計算では次の W_{50} で沈降速度 w を表現することにした。

$$\left. \begin{aligned} W_{50} &= 0.0163S + 0.0251 & 0.0 \leq S < 0.5 \\ W_{50} &= 0.00463S + 0.0333 & 0.5 \leq S < 5 \\ W_{50} &= 0.00021S + 0.0545 & 5 \leq S \leq 30 \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

巻き上げフラックスの係数

式(16)の係数 ϵ 、指数 m は底泥の種類や掃流力によっても異なり、対象水系での実測値を用いるべきである。しかし測定されていないため、従来の成果を参考に仮定して与えた。まず、指数 m は多くの報告で 1~2 をとる。移動限界掃流力に近いような所では指数に比べ、係数 ϵ の影響が大きいため、 m は野正ら⁷⁾が六角川について用いた値と同じように 1.7 と仮定し、 ϵ は後で述べる SS の再現計算の際に ϵ を数段階に変化させて、全観測地点での SS の計算値と年平均値の平均自乗誤差が最小になるように $\epsilon=0.0001(\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s})$ と仮定した。

また、現地泥の降伏値 (τ_y) は回転粘度計による測定によると、5~15Pa である。著者の一人ら¹⁸⁾がカオリナイト泥について求めた巻き上げ限界式

$$\tau_c = 0.11 \tau_y^{1/2} \quad (\text{単位は } \tau_c, \tau_y \text{ もともに Pa}) \quad (20)$$

が新町川の底泥にも適用できると仮定する。底泥の降伏値を 10 Pa とすると、 $u_{*c} = 1.87 \text{ cm/s}$ が得られた。なお、 $\tau_c (= \rho u_{*c}^2)$ は巻き上げ限界せん断応力である。

d.濃度の境界条件

SS, BOD とともに平成3年度の徳島市の調査結果¹⁹⁾より年平均値を新町川河口, 新町樋門, 沖ノ洲樋門, 田宮川上流, 園瀬川の各境界部で一定値として与えた。SS の場合, それぞれ 9.1, 5.9, 7.3, 9.8, 6.2 mg/l であり, BOD の場合, 1.0, 1.5, 2.4, 14.0, 3.8 mg/l である。なお, 徳島市の調査では BODd は測定されていない。BOD と BODd の測定結果の全体の平均から $BODd/BOD = 0.63$ を得たので, これを BOD の境界濃度に乘じて, BODd の境界濃度を与えた。

f.助走計算

計算のタイムステップは 120 秒で行い, 34 潮汐分の計算を実施した。この内, はじめの 30 潮汐は助走計算であり, 31~34 の 4 潮汐間の平均値を代表計算値とした。30 潮汐を助走計算時間を選んだのは塩化物イオン濃度の再現計算の際に日変動の大きい田宮川下流部で 21~25 潮汐で収束解が得られたことを参考に, 若干の余裕をみて決定した。

(4) 計算結果と考察

以上のように, 実河川水を用いての実験や現地観測, 塩化物イオン濃度の再現計算などから得られた結果を今回の数値モデルに導入した再現計算を行い, SS および BOD の観測値(平成3年度年平均値)と比較した。BOD の計算値は BODd と BODp を別々に求めて加えたものである。Fig.12 と Fig.13 に SS と BOD についての結果を示す。

SS についての Fig.12 では大岡新橋や助任橋など計算値が観測値より大きい値を示す場所もあるが, 全体的には本水系の SS 濃度の現況をよく再現できていると考えられる。田宮川上流から中流にかけて淡水から塩水へ移る場所では SS の計算値には沈降速度が重要な影響を及ぼす。しかし佐矢橋などでも比較的良好一致しており, 現地泥から測定した沈降速度がある程度有効であったことがわかる。また大岡新橋や助任橋で精度が良くない理由の 1 つに流達率を全域で一様に与えている影響が考えられる。大岡川上流端では大岡川, 助任川, 新町川上流部に囲まれる助任地区の排水をまとめて貯留し, 定期的に排水するポンプ施設が存在している。このため一部の SS 成分は貯留時に沈降するため, 流達率は清水東橋での測定値に比べて小さくなっていることが考えられる。このように各地区の下水路の状況や都市環境が異なっており, きめ細かなデータの蓄積により, 正確な流達負荷量の推定が必要であると思われる。

一方, BOD についての Fig.13 では SS

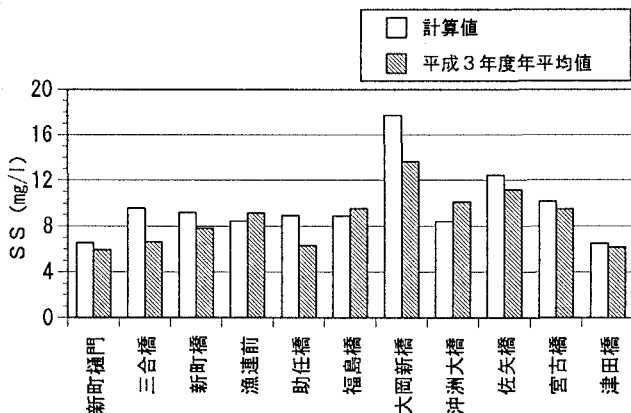


Fig.12 SS について再現計算結果

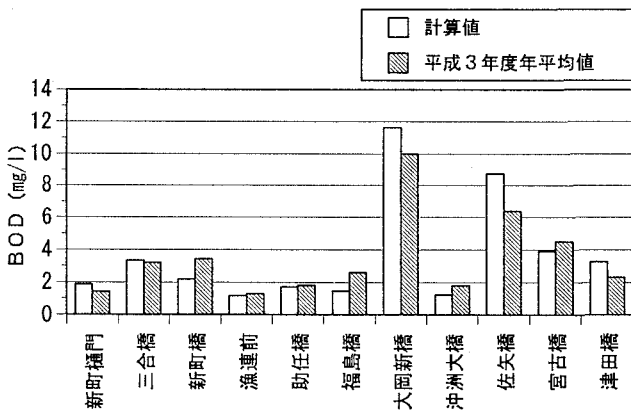


Fig.13 BOD について再現計算結果

と同様、大岡新橋や佐矢橋では観測値に比べて計算値が大きくなっている。これとは反対に新町橋、福島橋などでは計算値は観測値より大きい値を示している。しかし水系全体ではよく再現しており、年平均の水質特性を水系全体で表現するという当初の目的は満たしていると考えられる。

5. まとめ

本研究では溶存態の BOD と粒子態の BOD に分離するとともに、粒子態の BOD と有機性の SS の関係を用いて、感潮河川における水質変化のモデル化を図った。この水質変化モデルに必要な未知変数の多くを実験や観測を通して明らかにした後、新町川水系における水質再現計算を行い、その適用性について検討した。SS、BOD の計算値は観測結果をよく再現し、モデルの有用性が示された。

謝辞：本研究を実施するにあたり、徳島市保健環境部環境保全課、徳島保健所のご協力を得た。また著者の一人は文部省科学研究費総合研究 A（代表：東北大学教授・澤本正樹）の補助を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1)川島博之・鈴木基之（1986）：負荷解析のための河川水質シミュレーションモデル，水質汚濁研究，9-11，pp.707-715.
- 2)土屋光圀・岡田光正（1992）：都市河川の感潮域における水質と汚濁堆積物の挙動，水環境学会誌，15-7，pp.443-449.
- 3)岩田浩一・中村由行・早川典生（1988）：都市河川水質モデルの開発に関する研究，長岡技科大研究報告，10，pp.31-40.
- 4)二渡了・楠田哲也（1992）：強混合河川感潮部における懸濁物質輸送過程のシミュレーション，土木学会論文集，No.452/Ⅱ-20，pp.61-70.
- 5)須賀堯三・葛西敏彦（1982）：陰形式差分法による不定流計算法，土木技術資料，24(2)，pp.27-32.
- 6)小松利光（1990）：環境水理学における拡散計算，第 26 回水工学に関する夏期研修会講義集，A-3，pp.1-25.
- 7)野正博之・二渡了・楠田哲也・粟谷陽一（1985）：感潮河川における懸濁汚濁物質の挙動に関する研究，九大工学集報，58-1，pp.183-190.
- 8)中野 晋・山下 智・小津慶久・三井 宏（1992）：徳島市内感潮河川網の水質将来予測，第 29 回環境工学フォーラム，pp.70-72.
- 9)～13)徳島市（1991,1993,1994）：統計徳島，57，61，63，64，1994 年夏季増刊号
- 14)～16)徳島県：公共用水域及び地下水の水質測定結果，平成元年度版，2 年度版，3 年度版
- 17)中川紀雄・中野 晋・三井 宏・三橋伸也（1994）：新町川水系における現地底泥の沈降特性，第 46 回中四支部研究発表会講演概要集，pp.186-187.
- 18)中野 晋・藤平依彦（1991）：Jeffreys 理論の底泥の移動限界・2 層界面波の発生限界への適用性，土木学会第 46 回年次講演会，pp.1028-1029.
- 19)徳島市：徳島市における公害の現況，平成 4 年度版