

河川感潮部における水量・水質評価モデルの検討

STUDY ON A FLOW AND WATER QUALITY SIMULATION MODEL FOR TIDAL RIVERS

羽田野琢磨¹・高木康行²・野原昭雄³

Takuma HADANO, Yasuyuki TAKAGI and Akio NOHARA

¹正会員 工修 日本工営(株) 中央研究所(〒300-1259 茨城県稲敷郡基崎町稲荷原 2304)² 工修 日本工営(株) 中央研究所(〒300-1259 茨城県稲敷郡基崎町稲荷原 2304)³正会員 工博 日本工営(株) 中央研究所(〒300-1259 茨城県稲敷郡基崎町稲荷原 2304)

In this study, a numerical simulation of flow and water quality in tidal rivers was presented. Flow in tidal rivers was simulated by solving the governing equation of one-dimensional unsteady flow. Then, water quality (BOD) was simulated by solving advection and dispersion equation with source and sink terms which account for change in BOD due to the erosion and deposition of sediment. The simulation model was applied to the actual tidal river network, and verification was carried out by comparing with the observation data which were continuously measured for 72hrs. The simulated results show satisfactory agreement with the observation. The erosion and deposition of sediment were found to be the determining factor of water quality in this river.

Key Words: tidal river, water quality, river network, numerical simulation, field observation, water management

1. はじめに

河川流域の計画・管理には、土地利用等の流域の変化や対策工が水量・水質に及ぼす影響を評価できるモデルが必要となる。著者らは、流域全体を対象に分布型の流出解析モデルならびに汚濁負荷流出モデルの構築を行い、実流域への適用を行ってきた¹⁾。

一方、これらのモデルの適用対象となる市街地を流れる河川の多くは、潮汐の影響を受ける感潮部を有する。河川感潮部においては、順流、逆流によって滞留時間が長いことに加えて、底泥の巻き上げ・沈降が生じるなど、河川順流部に比べて複雑な水質変化が生じている。

本検討は、河川流域の計画・管理ツールとして、分布型の汚濁負荷流出モデルの内、感潮部に対応できる河川水質サブモデルを構築したものである。モデルは、一次元非定常流の支配方程式を用いた水量計算モデル、水質項目をBODとし、移流と分散による物質輸送に加え、底質の巻き上げ・沈降によるBOD変化を考慮した水質計算モデルより構成される。

本モデルを実河川に適用し、現地観測結果を用いて、モデルの検証を行い、比較的良好に感潮部におけるBODの変化が再現できることを確認した。また、計算結果より、底質の巻き上げ・沈降が対象河川における重要な水質の決定要因であると推測された。

2. 現地観測及び計算手法

(1) 対象河川の概要

対象河川の概要を図-1に示す。本検討では市街地を流れるA川の感潮部である河口から約37km区間を対象とした。A川は河口から約8kmと20km地点に位置する2つの連絡水路を通じてB川と水交換を行っており、流れやそれに伴う物質輸送は複雑である。

(2) 現地観測の概要

対象河川における水質特性の把握、計算モデルの境界条件、検証データの取得を目的として、2時間間隔で72時間連続の現地観測を平成11年10月10～12日に行った。観測時の潮の状態は、大潮～中潮であり、観測期間中の降水量はゼロであった。

観測は、A川、B川ならびに主要な流入支川における流量、水質について行った。観測項目、観測地点を図-1に併せて示した。また、観測期間中の既設観測所における水位の自動観測記録、処理場からの放流量と水質に関する資料についても収集した。観測対象の水質項目は、水温、pH、導電率、DO、BODとした。水質分析用の採水は、水深の2割の位置で行うことを基本としたが、水深の大きい地点については、5割、8割水深についても行った。

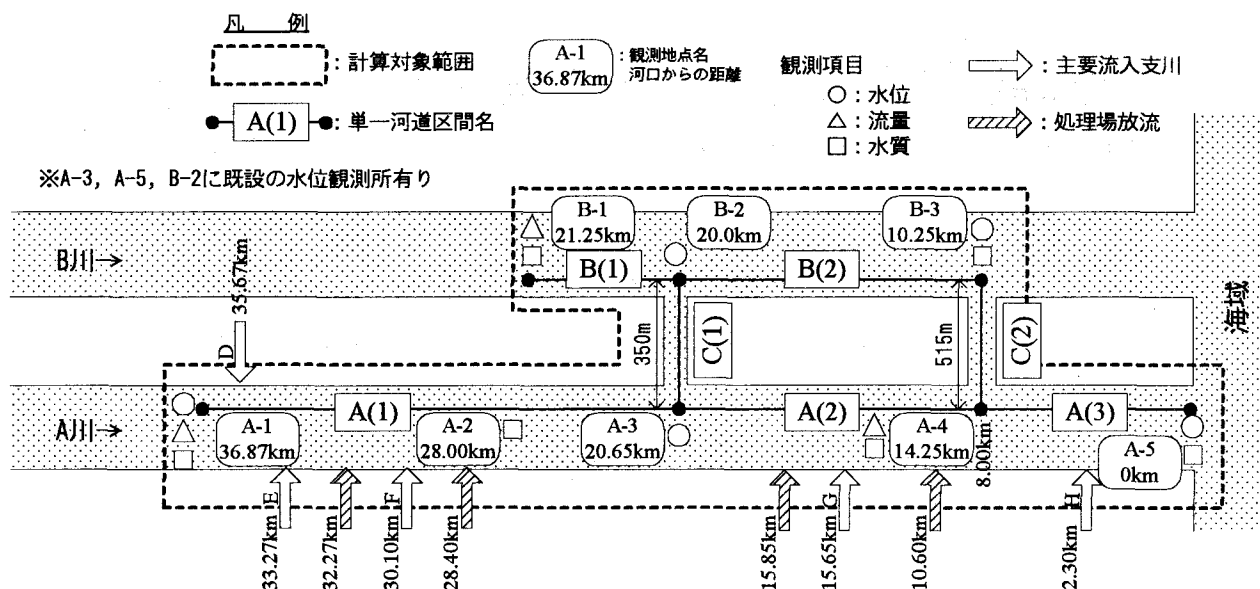


図-1 対象河川の概要と現地観測地点。

(3) 水量計算モデル

a) 流れの支配方程式

河川感潮部の流れは、潮汐の影響を受け水位、流量が時間と共に変動するため、開水路一次元非定常流の連続式(1)と運動方程式(2)に基づいて流れを計算する。

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

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) = -gA \frac{\partial H}{\partial x} - gA \frac{Q|Q|}{K^2} \quad (2)$$

ここで、 A は流水断面積、 Q は流量、 H は水位、 $K (= AR^{2/3}/n)$ は通水能、 R は径深、 n は Manning の粗度係数、 q_l は流路単位長さあたりの横流入量（流入の時 $q_l > 0$ 、流出の時 $q_l < 0$ ）である。

b) 単一河道区間における流れの数値計算法

対象とする河道網について、境界端あるいは分合流点に挟まれる区間を単一河道区間と呼ぶこととする。

単一河道区間の流れの数値計算は、未知量を流量、水位とし、上流端で流量、下流端で水位の境界条件を与え、Preissmann 法²⁾を用いて行った。Preissmann 法では、偏微分及び係数を式(3)のように差分近似する。

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial t} &= \frac{\Delta f_i + \Delta f_{i+1}}{2\Delta t} \\ \frac{\partial f}{\partial x} &= \frac{1}{\Delta x} \{ \theta(\Delta f_{i+1} - \Delta f_i) + f_{i+1}^n - f_i^n \} \\ f &= \frac{1}{2} \{ \theta(\Delta f_{i+1} + \Delta f_i) + f_{i+1}^n + f_i^n \} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 Δt は計算時間間隔、 Δx は計算断面間隔、 $\theta (0.5 < \theta \leq 1)$ は重み係数、上付き文字の n は時刻を、下付き文字の i は計算断面の位置を、 $\Delta f_i (= f_{i+1}^{n+1} - f_i^n)$ は Δt 間における f_i の変化量を示す。Preissmann 法を用いて、連続式および運動方程式を差分化すると、非線形の連立方程式が得られる。

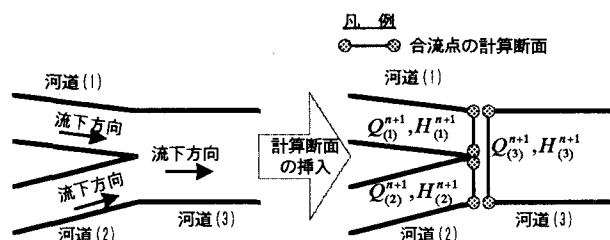


図-2 流れ計算における合流点での計算断面と未知量。

これらの方程式を式(4)のように、Taylor 展開を用いて線形化すると最終的な差分式を得る。

$$\Delta f_i = \left(\frac{\partial f}{\partial Q} \right)_i (Q_i^{n+1} - Q_i^n) + \left(\frac{\partial f}{\partial H} \right)_i (H_i^{n+1} - H_i^n) \quad (4)$$

この線形化により単一河道区間の差分式は、線形の連立方程式となるため、Newton-Raphson 法などによる繰り返し計算の必要がなくなり、計算時間の短縮が図れる。

c) 分合流点の流量及び水位の計算方法

分合流点では、流量、水位の連続条件を与えた。合流点を例に取れば、図-2に示すような計算断面と未知量を設定した上で、流量、水位の連続条件は次式である。

$$Q_{(1)}^{n+1} + Q_{(2)}^{n+1} = Q_{(3)}^{n+1}, H_{(1)}^{n+1} = H_{(2)}^{n+1}, H_{(2)}^{n+1} = H_{(3)}^{n+1} \quad (5)$$

ただし、 $Q_{(1)}$ 、 $H_{(1)}$ は河道(1)の合流点に接する計算断面の流量、水位を示す。 $Q_{(2)}$ 、 $H_{(2)}$ 及び $Q_{(3)}$ 、 $H_{(3)}$ についても同様である。また、流量の符号は事前に定めた流下方向を正としている。

式(5)の未知量は6個、条件式は3個であり条件式が不足するが、各単一河道での差分式、河道網上下流端の境界条件と合わせ、河道網全体で未知量と条件式の数を一致させることができる。しかし、この方法で得られる連立方程式は、係数マトリックスのバンド幅が大きく、連立方程式の解法に時間を要するため、以下の繰り返し計算により分合流点及び各単一河道での未知量を求めた。

まず、各単一河道の差分式について、合流点と反対の境界端から未知量を掃き出すことで、合流点に接する計算断面で水位～流量関係式(6)を3個導く³⁾。これにより、合流点での未知量と条件式の数は一一致し、合流点の流量、水位を求めることができる。

$$\begin{aligned} Q_{(1)}^{n+1} &= \alpha_{(1)} H_{(1)}^{n+1} + \beta_{(1)} \\ Q_{(2)}^{n+1} &= \alpha_{(2)} H_{(2)}^{n+1} + \beta_{(2)} \\ Q_{(3)}^{n+1} &= \alpha_{(3)} H_{(3)}^{n+1} + \beta_{(3)} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 α, β は単一河道の差分式により決定される係数である。

次に、これにより得た、合流点の流量、水位を境界条件として単一河道の差分式を解き、式(6)の水位～流量関係式を更新し、合流点での流量、水位を改めて求める。

これらの手続きを、合流点での流量、水位が変化しなくなるまで繰り返すことで、 $(n+1)\Delta t$ 時刻における河道網全体の流量、水位を求める。なお、ここでは、合流点を例としたが、分岐点についても全く同様の取り扱いが可能である。

(4) 水質計算モデル

a) 水質方程式

対象とする水質項目 (BOD) の濃度が横断面内でほぼ一様であると仮定し、式(7)の水質方程式を用いた。

$$\frac{\partial CA}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(VCA - EA \frac{\partial C}{\partial x} \right) = -LA + F_e S + C_i q_i \quad (7)$$

ここで、 C は物質の濃度、 V は断面平均流速、 A は流水断面積、 S は河床底面部分の潤辺長、 E は分散係数、 L は微生物等による分解や SS の沈殿による単位体積あたりの物質の減少量、 F_e は単位潤辺長さ当たりの河床底泥の巻き上げによる物質の増加量、 C_i は流入支川の物質濃度、 q_i は支川の単位幅あたりの横流入量である。

分散係数は、流下方向の乱流拡散、水深方向および横断方向の流速分布の非一様性による分散効果に基づいて提案されている式(8)により算定することとした⁴⁾。

$$\frac{E}{hu_*} = 2.0 \left(\frac{B}{h} \right)^{1.5} \quad (8)$$

ここで、 B は水面幅、 h は水深、 u_* は摩擦速度である。物質の減少量 L は、減衰係数 k を用いて式(9)により与えた。

$$L = -kC \quad (9)$$

巻き上げフラックス F_e は、BOD と SS の間に一定の相関があるとして、SS の巻き上げフラックスと同型の算定式(10)を用いた⁵⁾。

$$\begin{aligned} u_* < u_{*c} \text{ のとき } & Fe = 0 \\ u_* \geq u_{*c} \text{ のとき } & Fe = \beta_e (u_*^2 / u_{*c}^2 - 1)^m \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、 u_{*c} は限界摩擦速度、 β_e は巻き上げ速度係数、 $m (=1.7)$ は指数である。

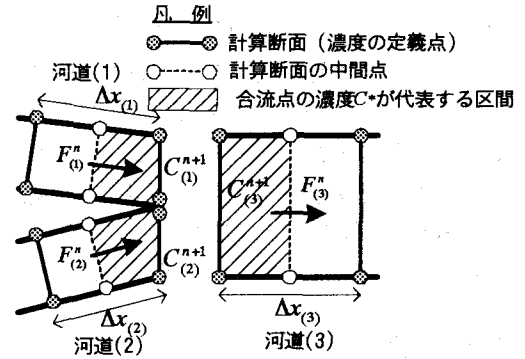


図-3 水質計算における合流点での計算断面と未知量

b) 単一河道区間での水質方程式の数値計算法

水質方程式の数値計算法は、有限差分法を用い、移流項には大域的に時間、空間ともに二次精度を維持でき、さらに濃度が急激に変化する断面で数値的な振動を生じない方法として TVD-LaxWendroff 法を用いた⁶⁾。また、分散項は中心差分的に離散化した。差分式を以下に示す。

$$\begin{aligned} \frac{(CA)_i^{n+1} - (CA)_i^n}{\Delta t} + \frac{1}{\Delta x} (F_{i+1/2}^n - F_{i-1/2}^n) &= -kC_i^n A_i^n + F_e S_i^n + C_i q_i \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、 $F_{i+1/2}^n$ は計算断面 i と $i+1$ の中間点における移流と分散によるフラックスで、式(12)のように表される。

$$\begin{aligned} F_{i+1/2}^n &= \left(VCA - EA \frac{\partial C}{\partial x} \right)_{i+1/2}^n \\ &= \frac{1}{2} \left[(VCA)_{i+1}^n + (VCA)_i^n \right] - \tilde{V}_{i+1/2} \left[(CA)_{i+1}^n - (CA)_i^n \right] \\ &\quad - \frac{(EA)_{i+1}^n + (EA)_i^n}{2} \frac{C_{i+1}^n - C_i^n}{\Delta x} \end{aligned} \quad (12)$$

また、 $\tilde{V}_{i+1/2}$ は次式の通りである。

$$\tilde{V}_{i+1/2} = \varphi(r_i) \frac{\Delta t}{\Delta x} (V_{i+1/2})^2 + [1 - \varphi(r_i)] V_{i+1/2} \quad (13)$$

$$V_{i+1/2} = (V_i^n + V_{i+1}^n) / 2 \quad (14)$$

$$r_i = \begin{cases} (C_i^n - C_{i-1}^n) / (C_{i+1}^n - C_i^n) & V_{i+1/2} \geq 0 \\ (C_{i+2}^n - C_{i+1}^n) / (C_i^n - C_{i-1}^n) & V_{i+1/2} < 0 \end{cases} \quad (15)$$

ここで、 $\varphi(r_i)$ は流束制限関数であり、式(16)に示す superbee limiter を用いた。

$$\varphi(r_i) = \max \{ 0, \min(2r_i, 1), \min(r_i, 2) \} \quad (16)$$

c) 分合流点における濃度の計算方法

分合流点で物質は十分に混合されると仮定し、以下の方法で分合流点の濃度を求めた。合流点を例にとれば、流れの計算と同様に、図-3に示す計算断面と未知量等を設定した上で、式(17)～(19)により合流点の濃度を求めた。

$$\frac{(V.C.)^{n+1} - (V.C.)^n}{\Delta t} = F_{(1)}^n + F_{(2)}^n - F_{(3)}^n \quad (17)$$

$$C_{(1)}^{n+1} = C_{(2)}^{n+1} = C_{(3)}^{n+1} = C_*^{n+1} \quad (18)$$

$$V_i^n = A_{(1)}^n \Delta x_{(1)} / 2 + A_{(2)}^n \Delta x_{(2)} / 2 + A_{(3)}^n \Delta x_{(3)} / 2 \quad (19)$$

ここで、 C_i は合流点の濃度、 V_i は合流点の水の体積を示し、 $C_{(1)}$ は河道(1)の合流点に接する計算断面での濃度、 $F_{(1)}^n$ は河道(1)の図-3に示す位置で式(12)を用いて計算される移流と分散によるフラックス、 $\Delta x_{(1)}$ は河道(1)の計算断面間隔を示す。また、 $C_{(2)}$ 、 $C_{(3)}$ 、 $F_{(2)}^n$ 、 $F_{(3)}^n$ 、 $\Delta x_{(2)}$ 、 $\Delta x_{(3)}$ についても同様である。

3. 観測結果及び計算結果

(1) 現地観測結果

観測期間中における水温、pH、導電率の観測結果によれば鉛直方向の分布は見られなかった。同期間中の河口部の潮差は約 1.6m であり、河床勾配が小さい(約 1/10000)ことから、わが国の主要な感潮河川の塩水遡上型についての三井の分類⁷⁾によれば、大潮時については強混合型であるといえる。A 川について小潮時の観測結果はないものの、B 川についての既往調査によれば、小潮・長潮時は塩水楔が出現し、弱混合状態となっていることが明らかとなっている。A 川においても同様に小潮時には弱混合状態になっていると推測される。

図-4にA-4地点における観測結果を示す。この地点は潮汐の影響を強く受け、水温以外の測定項目は水深変動と連動して変化している。

BOD は、順流、逆流のピーク流量時に極大値となっており、逆流ピーク時に比べ順流時のピークの方が、高い値を示す傾向にある。この地点は、塩分濃度が高く、懸濁物質の凝集、沈降により堆積した河床底泥が、順流、逆流のピーク流量時に巻き上げられることで、このような BOD の変動が生じていると推測される。

(2) 計算条件

現地観測期間中の水量、水質に関する再現計算の対象範囲は、図-1の単一河道区間 A(1)~A(3)、B(1)~B(2)、及び C(1)、C(2)からなる河道網とした。また、計算断面の設定法、初期条件、境界条件、粗度条件は以下とした。

計算断面は、既存の横断測量資料を用い一般断面として設定した。計算断面間隔は、単一河道区間毎の横断測量ピッチに合わせ、単一河道区間 A(1)で 200m、A(2)及び A(3)で 50m、B(1)及び B(2)で 250m、C(1)及び C(2)で約 50m とした。

初期条件は、まず、全ての計算断面で流量、水位、濃度を仮定して、一定期間の予備計算を行い、予備計算終了時の状態を初期条件とした。予備計算の期間は、A 川の上流端(観測点 A-1)に投入された物質が、A 川の下流端(観測点 A-3)まで移流により輸送される期間とした。この期間は、あらかじめ水量計算で求めて 9 日間とした。

境界条件は、河道網の上流端(観測点 A-1、B-1)で流量と濃度の観測値、下流端(観測点 A-5、B-3)で水位と

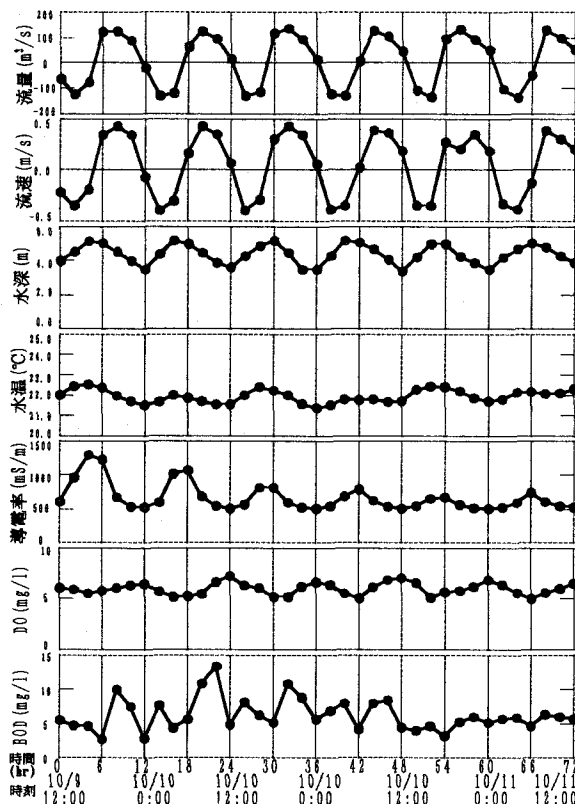


図-4 A-4 地点における観測結果の時系列。

表-1 粗度係数の設定値。

河川名	設定区間	順流時	逆流時
A 川	0.00~20.65km	0.030	0.035
	20.65~36.87km	0.025	
B 川	10.25~21.25km	0.020	0.030

濃度の観測値を与えた。また、主要な支川、処理場からの流入量と濃度の観測値を与えた。

粗度係数は、感潮河川における流れの計算事例^{5), 8)}に従って順流時と逆流時で変化させ、その値は観測地点 A-3、B-2 における水位の計算値と観測値が一致するように設定した。設定した粗度係数の値を表-1に示した。

(3) 水量計算結果

図-5にA-4地点における流量の計算値と観測値の比較を、図-6にA-3、B-2地点における水位の計算値と観測値の比較を示した。流量、水位ともに計算値と観測値はよく一致している。

なお、粗度係数を一定とし、順流時と逆流時の平均値を与えた場合も、計算値は、A-4 地点の流量の観測値、A-3、B-2 地点の水位の観測値を概ね再現する結果となった。しかし、A-3、B-2 地点における水位の計算値と観測値の間に 5cm 程度の誤差を生じ、これが原因で連絡水路 C(1)において、非現実的な流量が計算される場合があった。感潮河川の河道網を対象とした流れの計算では、計算水位の僅かな誤差が、計算流量に致命的な影響を与え

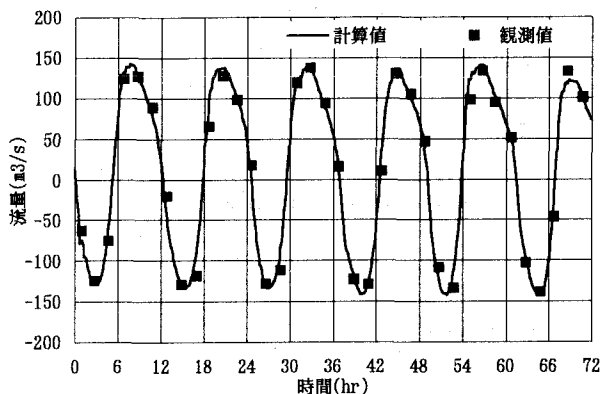


図-5 A-4 地点における流量の計算値と観測値の比較。

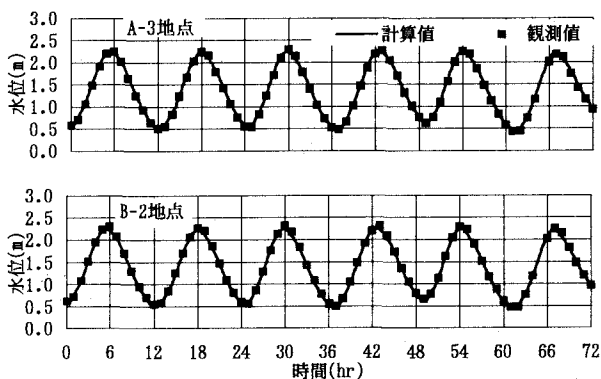


図-6 A-3 及び B-2 地点における水位の計算値と観測値の比較。

る場合があり、粗度係数の設定には十分に注意する必要があると考えられる。

(4) 水質計算結果

a) 河床底泥の巻き上げパラメータと減衰係数

巻き上げ式(10)は、本来 SS を対象とする式であるが、図-7 に示す A 川における過去の SS と BOD の観測結果より、両者に一定の相関が認められるため、そのままの式形を用いることとした。

式(10)の巻き上げ速度係数 β_e は、塩化物イオン濃度により変化することが指摘されている⁹⁾。本検討における現地観測では導電率を観測しており、A 川における過去の観測記録より、導電率と塩化物イオン濃度に高い相関が認められるため、導電率の観測値を基に β_e を以下のように設定することとした。

まず、A 川における導電率の縦断分布を推定した。本検討では A 川 0km 及び 14.25km の地点で導電率の現地観測を行っている。図-8 は、過去の観測で取得された導電率と、本検討の現地観測で取得した導電率の縦断分布を比較したものである。両者の比較より、導電率は河口から 14.25km までは直線的に減少し、それより上流では一定値として与えることとした。

次に、導電率と β_e の関係を推定した。図-9 は、過去に観測された A 川における導電率と SS の関係を示したも

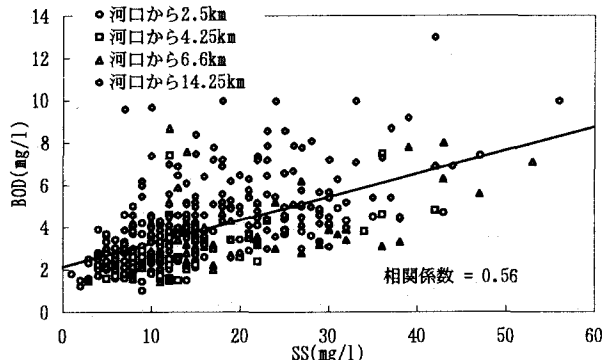


図-7 A 川における SS と BOD の関係。

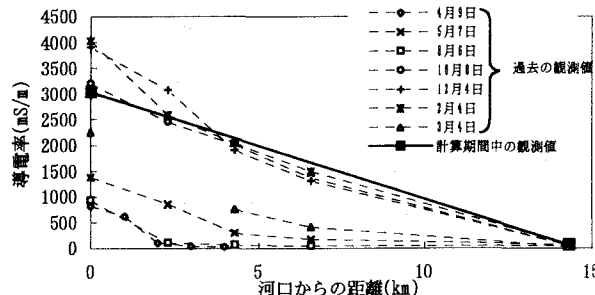


図-8 A 川における導電率の縦断分布。

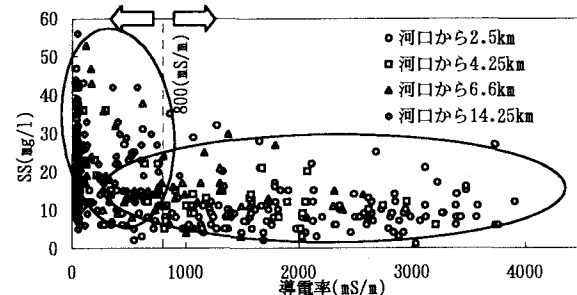


図-9 A 川における導電率と SS の関係。

表-2 河床底泥の巻き上げパラメータの設定値。

β_e (g/m ² s)	$-9.56 \times 10^{-6} EC + 7.65 \times 10^{-3}$ ($EC \leq 800$) 0 ($EC > 800$)		
u_{*c} (m/s)	0.02	k (1/s)	3.0×10^{-5}

のである。導電率 800(mS/m) 以上では、SS の値は導電率によらず約 10(mg/l) を平均に分布している。一方、導電率が 800(mS/m) 以下では、0(mS/m) 付近を除き、導電率の増加に従って、SS が減少していることが見て取れる。これより、巻き上げ速度係数 β_e は、導電率が 800(mS/m) 以下では直線的に減少し、800(mS/m) 以上では、一定値になると仮定し、検証地点 A-4 (A 川 14.25km) で観測された、BOD の極大値と、計算値が一致するように、導電率と β_e の関数形を設定した。

また、限界摩擦速度 u_{*c} 、減衰係数 k は、導電率と β_e 関数形を定めた後、検証地点 A-4 での BOD の観測値と、計算値の時系列が全体的に一致するように設定した。設定した巻き上げ速度係数、限界摩擦速度、減衰係数の設定値について表-2 に示した。

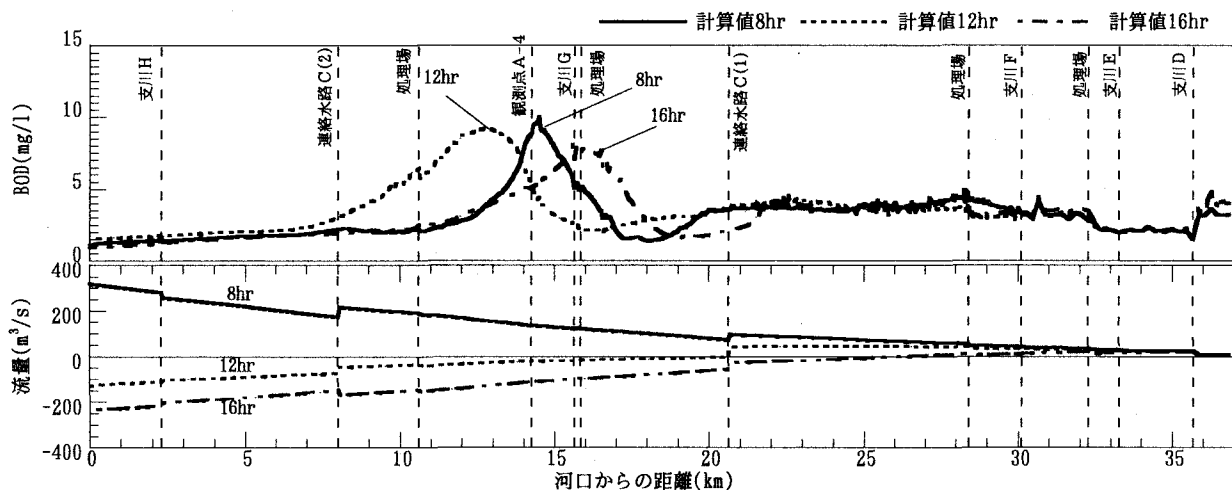


図-10 A川におけるBODと流量の縦断分布の計算値。

b) 計算結果

図-11に検証地点A-4におけるBODの計算値と観測値の比較を示した。BODの計算値は、順流、逆流のピーク時に極大値を取り、順流ピーク時の方が、逆流ピーク時に比べ大きな値となっている。観測値も同様の変動パターンを示している。図-11には、巻き上げを考慮しない場合の計算結果も併せて示している。この場合、計算値は観測値の変動パターンを再現できず、河床底泥の巻き上げが、A-4地点付近におけるBODの重要な決定要因になっていると推測される。

図-10には、A川における順流ピーク時(8hr)、逆流ピーク時(16hr)、ならびに両者の中間の時間(12hr)について、BODと流量の計算結果の縦断分布を示した。順流ピーク時(8hr)のBODは、河床底泥の巻き上げにより、A-4地点付近で最大値を持つ縦断分布となる。この分布が、移流と分散により8hrから12hrの間は下流に向けて、12hrから16hrの間は上流に向けて移動している。また、塩化物イオン濃度が高い下流部では、巻き上げ速度係数 β_e が小さく設定されているため、BODは対象期間を通じて低い値となっている。

ただし、今回は、A-4地点のみの水質観測であったため、この縦断分布の検証を行うことはできなかった。

4. 結論

感潮河川の河道網を対象に水量・水質の評価モデルの作成と適用を行った。水量計算モデルでは、順流時と逆流時に異なる粗度係数を用いることで、水位、流量ともに計算値と観測値を一致させることができた。水質計算モデルでは、河床底泥の巻き上げを考慮することで、検証地点のBODの時系列について、計算値と観測値を概ね一致させることができた。しかし、その他の地点で観測値を得ることができなかったため、縦断的なBODの変化を検証するには至らなかった。

巻き上げ速度係数 β_e の合理的な設定手法の検討とBODの縦断分布に関する検証が、今後の課題である。

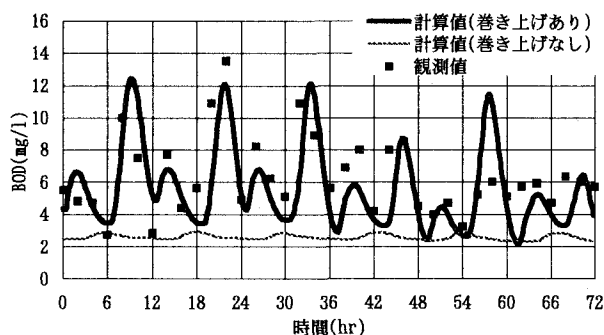


図-11 A-4地点におけるBODの計算値と観測値の比較。

なお、本論文は、建設省荒川下流工事事務所発注の業務成果の一部を取りまとめたものである。

参考文献

- 1) 野原昭雄, 高木康行: 分布型流出モデルをベースにした水系の水質評価手法に関する研究, 土木学会第54回年次学術講演会 VII-6, pp. 12-13, 1999.
- 2) 鮎川登, 片山能輔, 秋元賢吾, 根本浩史: 特性曲線法に基づく河川水質の数値計算法, 土木学会論文集, No. 521/II-32, pp. 59-68, 1995.
- 3) 建設省土木研究所: 河川における不定流計算法(IV), 土木研究所資料2080号, pp. 17-23, 1984.
- 4) 土木学会: 水理公式集, pp. 629-630, 1999.
- 5) 二渡了, 楠田哲也: 強混合河川感潮部における懸濁物質輸送のシミュレーション, 土木学会論文集, No. 452/II-20, pp. 61-70, 1992.
- 6) 朝位孝二, 細田尚: 移流方程式の数値解析, 水工学における計算機利用の講習会講義集, 土木学会水理委員会基礎水理部会, pp. 15-16, 1999.
- 7) 西條八束, 奥田節夫編: 河川感潮域, 名古屋大学出版会, p. 47-83, 1996.
- 8) Wallis S.G et al: Calibration studies concerning a one-dimensional numerical tidal model with particular reference to resistance coefficient, Estuarine, Coastal and Science 19, pp. 541-562, 1984.

(2000.10.2 受付)