

鉛直二次元モデルによる相模川感潮域の 塩水流動解析

A NUMERICAL SIMULATION OF SALT WATER BEHAVIOR IN THE
DOWNSTREAM REACH OF SAGAMI RIVER WITH A VERTICAL 2-D MODEL

工藤健太郎¹・鈴木伴征²・石川忠晴³

Kentaro KUDO, Tomoyuki SUZUKI and Tadaharu ISHIKAWA

¹学生会員 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 環境理工学創造専攻
(〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町4259)

²学生会員 工修 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 環境理工学創造専攻

³フェロー会員 工博 東京工業大学教授 大学院総合理工学研究科 環境理工学創造専攻

Sagami River is one of major rivers in Japan and river water has been utilized over the last few decades, so the flow rate passing river mouth had been decreasing considerably. Therefore, there is a great concern that the water quality becomes worse and bad effect on the ecosystem is caused.

In this study, numerical simulation was done according to the two-dimensional $k-\epsilon$ turbulent model with the inflow being applied in the cross-sectional direction. In general, results agreed well with the measurement results, namely, for transitions between weak and moderate mixed type were in good agreement. Next, the numerical experiment was done by varying the upstream flow rate. As a result, it was shown that the salt water tended to go further in the downstream when the flow rate was increased, and the exchange of the water was promoted.

Key Words : Salt water intrusion, 2-D $k-\epsilon$ turbulent model, numerical experiment, residence time

1. はじめに

産業活動の拡大や生活レベルの向上による水需要量の増加に伴い、渇水及び低水流量時に自流量の極度に不足する河川が増え、水環境悪化の一因となっている。特に、最下流の取水堰から河口までの感潮域では、河口から侵入する海水の停滞性が強まり、渇水時には河川というより細長い入り江に近い状況が出現し、濁質の沈殿や水質の悪化及び生態系への影響が懸念される。このため、渇水期においてもある一定の流量を環境維持用水として確保することが考えられている。

河川感潮域では河川水と海水が混合するが、その混合形態は、河川の地形や流況及び潮位変動によって様々に変化し、河川ごとにより異なっている。また細粒土砂が沈積するため干潟または湿地が形成され、生物の生息環境としても貴重である場合が多い。それゆえ、環境維持流量の決定においては、通常の河道に比べて詳細な事前検討が河川ごとに行われる必要がある。その際、維持

流量の妥当性をチェックするために、何らかの数値シミュレーションが実施されることになると考えられるが、この流量決定が行政的手続きであるがゆえに、ある程度汎用的なモデルが用意されることが望ましいと言える。

本研究で対象とする相模川は、河口より7kmに設置されている寒川堰からの放流量が渇水期には $2\text{ m}^3/\text{s}$ と極めて少なく、下流の水環境の劣化が懸念されていたが、右支川中津川に建設中の宮が瀬貯水池が1999年に一部供用開始されてから水量に余裕が生じている。このため、現在は暫定的に $8\text{ m}^3/\text{s}$ の放流がなされており、同貯水池の全面供用開始を控えて環境維持用水量の本格的検討が行われようとしている。そこで本研究では、筆者らが開発している鉛直二次元塩水流動モデルを部分的に改造して寒川堰下流部に適用し、維持流量検討のためのモデルとしての実用性を検討した。

2. 対象水域の概要

相模川は、富士山麓に発し、相模湖、津久井湖を経て相模平野北辺に出た後、中津川などを合流して神奈川県中央部を南下し相模湾に注ぐ、流域面積1680km²、幹川流路延長109kmの河川である¹⁾。上流域はほとんど山林であるが、中下流域は東京のベッドタウンが発達しており、また京浜工業地帯に連なる湘南の工業団地が多く存在する。このため、相模川には都市水源としての機能が求められ、相模湖、津久井湖、奥相模湖及び宮ヶ瀬湖の4ダム湖が建設され、各所に取水堰が設けられている。取水量は、農業用水約29m³/s、工業用水約7m³/s、水道用水約45m³/sの合計約81m³/s(比流量で約4.8m³/s/100km²)に達している。

最も下流の取水堰は河口より7kmに建設されている寒川堰である。上述した大量の取水のために、寒川堰以降の流量は、平水流量で約6.2m³/s、渇水流量で約1.3m³/sまで減少していたが、前述のように、現在は宮ヶ瀬貯水池が一部供用開始されたことにより渇水時でも8m³/sの放流量が暫定的に確保されている。また、河口から5kmの右岸からは下水処理水が約2～3m³/s放流されている。

寒川堰下流の河道の平面形を図-1に示す。堤防法線間距離は約500mで、かなり広い河道となっており、低水路は河道内を屈曲して流れ、滞筋における常時の水深は2m程度となっている。この区間の河床勾配は約1/4000であり、寒川堰直下流の最深河床高はT.P. 0m程度である。このため寒川堰直下流は淡水であることが多い。

塩水遡上の観測例を図-2に示す。この時の寒川堰放流量は2～3m³/s程度であった。Cl⁻濃度が10000mg/l程度の濃い塩水が河口から4,5km辺りまで遡上するが、その上流部では急激に薄くなっている。混合形態は、小潮時には弱混合、大潮時には緩混合に近くなる。なお、この観測データは後の数値シミュレーションモデルの検証にも用いるので、その際に詳しく説明する。

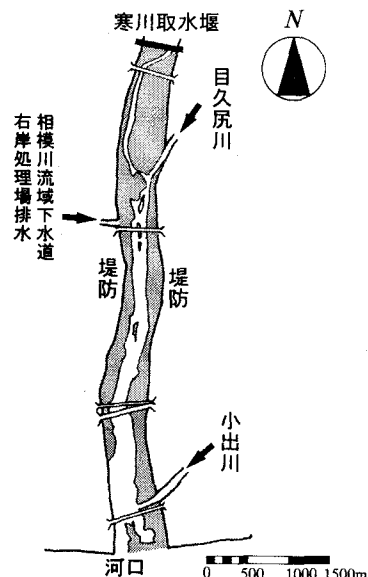


図-1 相模川下流部の河道形状

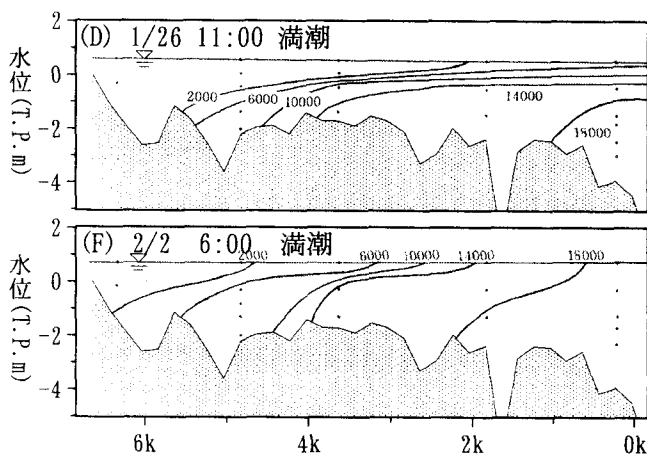


図-2 相模川における塩分分布の一例
(上：小潮時，下：大潮時)

3. 塩水流動モデル

(1) 本モデルの特徴と現地への適用性について

本研究では $k-\epsilon$ 乱流モデルをベースとした鉛直二次元モデルを用いている。 $k-\epsilon$ モデルは、近年、自然水域へ適用されてきているが^{2),3),4)}、河口密度流に適用している例は少ない。一方、河口密度流の計算モデルとしては岩佐らの二次元モデル⁵⁾や、それを三次元に拡張した井上らのモデル⁶⁾が挙げられる。これらのモデルでは塩分の縦断分布だけでなく、弱～緩混合の形態変化もある程度再現されている。しかし、混合形態に大きく影響を及ぼすと考えられる鉛直方向の渦動粘性係数がリチャードソンの関数として経験的に与えられているため汎用性に問題が残ると考えられる。

このような背景のもと、筆者らは $k-\epsilon$ モデルをベースとした鉛直二次元モデルを開発し、利根川⁷⁾や旧北上川

下流部⁸⁾への適用を試みている。その結果、本モデルは現地の塩水流動を比較よく再現しており、相模川においても十分適用可能であると考えられる。

しかし、利根川や旧北上川の塩水遡上は潮位変動に関わらず概ね弱混合型の形態をとっているため、相模川に見られるような弱～緩混合の変化については本モデルの再現性は確認されていない。また、相模川下流部は水深が浅く、河道形状も縦横断的に変化に富んでいるため、低水路が比較的単純な利根川・旧北上川と比較するとモデルの適用性に問題が残る。加えて、対象水域には堰放流量と同程度の下処理水の途中流入があるため、この影響を本モデルに組み込む必要がある。

そこで本章では、まず途中流入を組み込んだ定式化を行う。次に、主として混合形態の再現性に着目しつつ、観測結果と計算結果の比較を行い、本モデルの有効性を検証する。

表-1 計算中で用いた生産項とフラックス項

	Φ	S_ϕ	F_ϕ	パラメータ
連続式	1	0	0	
運動方程式 (x方向)	u	$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}$	$f_b u u $	$f_b=0.040$
運動方程式 (z方向)	w	$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \delta g$	$f_b w w $	$\gamma=0.1$
輸送方程式 (乱流エネルギー) k		$P_r - g \frac{v_i}{\sigma_i} \frac{\partial \delta}{\partial z} - \varepsilon$	$\gamma f_b (u^2 + w^2)^{3/2}$	
輸送方程式 (散逸率)	ε	$C_1 \frac{\varepsilon}{k} P_r - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}$	0	$C_1=1.44, C_2=1.92,$ $C_\mu=0.09, \sigma_k=1.0,$
輸送方程式 (塩分)	δ	0	0	$\sigma_\varepsilon=1.3, \sigma_\delta=0.8$

$$v_H=0.01(\Delta x)^{4/3}, v_i=v_0+C_\mu k^2/\varepsilon, P_r=v_i \left[2 \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right\} + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right]$$

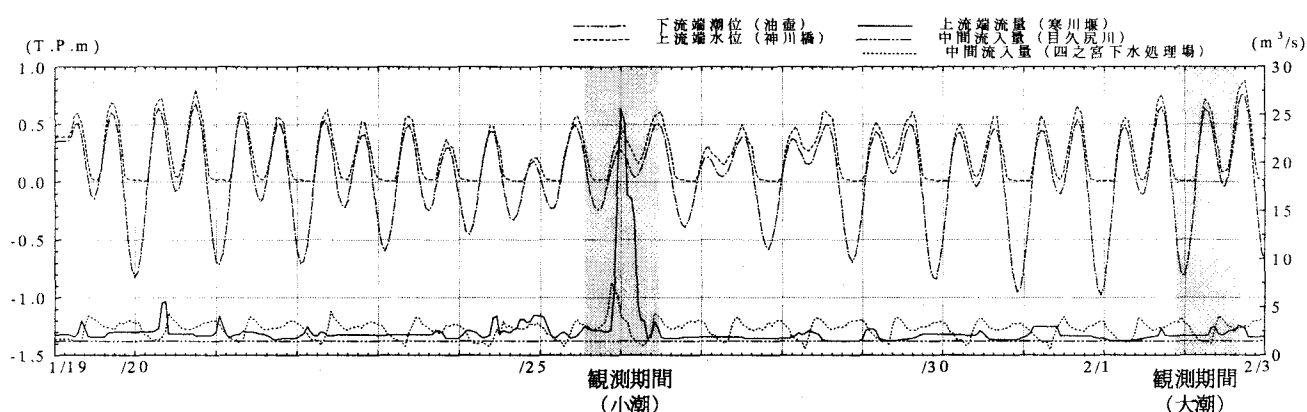


図-3 観測期間中の潮位・堰放流量・途中流入量

(2) 支配方程式

基礎方程式は、ブシネスク近似した運動方程式、連続式、標準型の k 、 ε の輸送方程式および塩分 δ の輸送方程式からなる。これらの方程式を有限体積法を用いて離散化し、SIMPLE解法により解いた⁹⁾。以下に基礎方程式を示す。

$$\frac{\partial}{\partial x}(uB) + \frac{\partial}{\partial z}(wB) = \begin{cases} 0 & (\text{横流入なし}) \\ Q_m & (\text{横流入あり}) \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{D(B\Phi)}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x} \left(v_i B \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(v_H B \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) = BS_\phi + \frac{F_\phi}{(n_s \cdot n_y)} \quad (2)$$

ここで、 x 軸は河道方向、 z 軸は鉛直方向を示し、 u 、 w はそれぞれ x 、 z 軸方向の流速、 Φ は輸送される物理量(u 、 w 、 k 、 ε 、 δ)、 B は各深度における川幅で、 x と z の関数である。 v_i 、 v_H はそれぞれ鉛直方向および水平方向の渦動粘性係数である。本計算では、 v_i は $k-\varepsilon$ モデルによって導かれる渦動粘性係数を、 v_H はリチャードソンの4/3乗則により与えた。 F_ϕ は側岸におけるフラックス項、 $(n_s \cdot n_y)$ は、各深度における側岸に垂直な単位ベクトルと横断方向の単位ベクトルとの内積である。表-1に、それぞれの Φ に対応する

S_ϕ 、 F_ϕ をまとめて示す。また、連続式(1)の右辺の項 Q_m は途中流入量の項である。

潮汐による水面変動を考慮するために、表層メッシュを水面変動に合わせて変化する可変メッシュとした。単位時間あたりの水面変動分は、水面の位置における圧力一定条件および運動学的条件から計算した。また、可変メッシュの厚さが一定値を越えた場合には直下の通常メッシュと合体または分割するようにした。

(3) 計算条件

計算領域は、寒川取水堰(河口より7km)から河口より外側2km地点までの計9kmとした。河口より外側の領域は、下流端の境界条件が河道領域に及ぼす影響を少なくするためのもので、河口より約45°の角度で川幅を広げている。メッシュ間隔は Δx を200m、 Δz を0.1mとし、時間ステップ Δt は計算の安定性を考慮して15秒とした。なお、水面に接するメッシュのみ Δz は可変である。

境界条件は、上流端では寒川堰の放流量、下流端では油壺における実測潮位を与えた。塩分の境界条件は、流出する場合は自然境界条件、流入する場合は水深方向に一樣に上流端で0‰、下流端では33‰(塩化物イオン濃度で約18,280mg/l)を与えた。

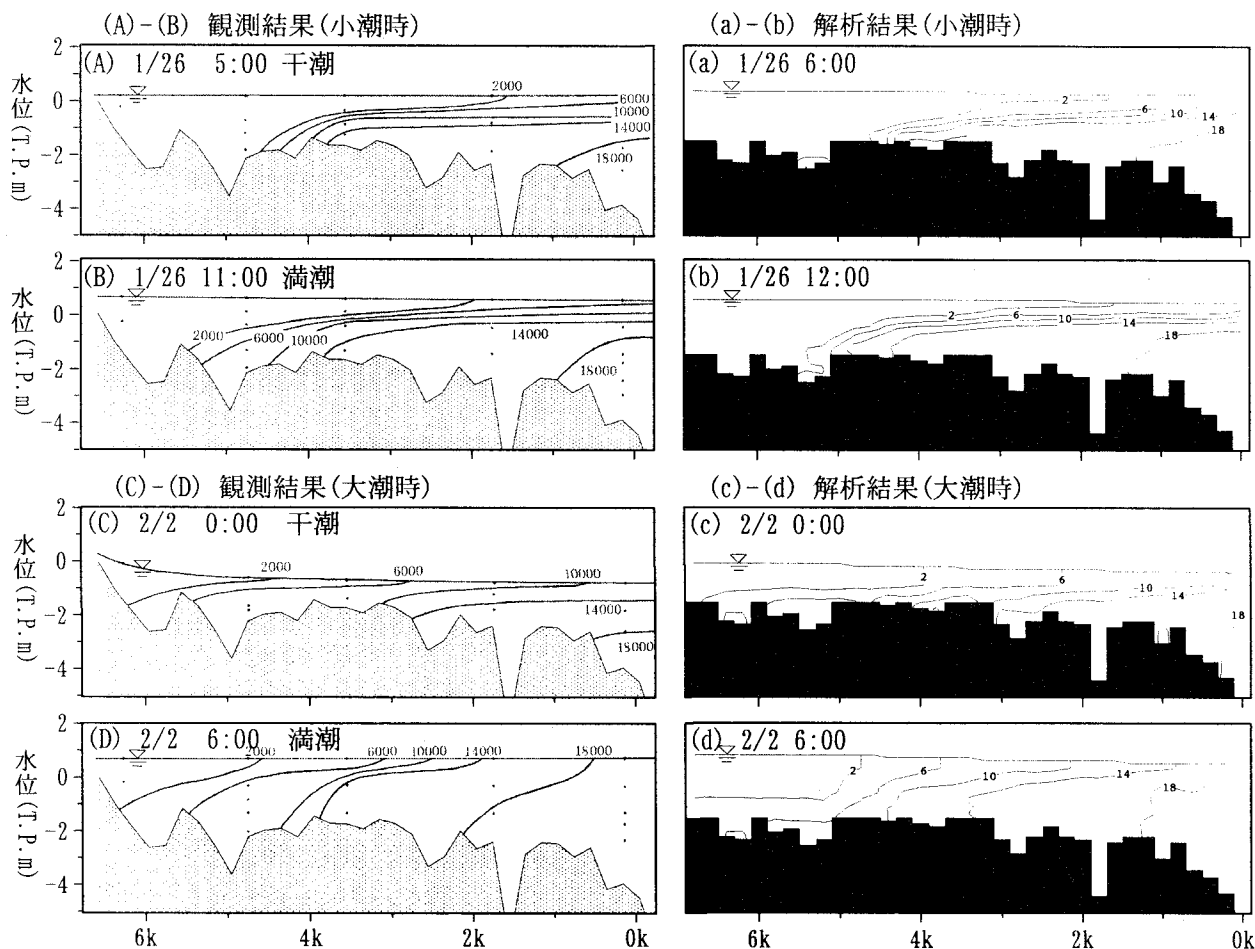


図-4 塩分濃度の縦断分布 (左：観測結果(単位 Clmg/l), 右：検証計算(単位 $\times 1000\text{mg/l}$))

途中流入は、目久尻川（平均流入量 $1.46\text{m}^3/\text{s}$ ）および下水処理場（平均流入量 $2.7\text{m}^3/\text{s}$ ）の2つを考慮し、それぞれ河口より5kmおよび4.6km地点の上層部に流入するものとした。

以上の条件で、図-3に示す期間について計算を行った。

(4) 計算結果と観測結果の比較

図-4において塩分の縦断観測結果と計算結果の比較を行う。

まず、図-4の左半分(A-D)は観測された塩化物イオン濃度のコンター図である。縦軸が水位、横軸が河口からの距離を表している。観測は1月25、26日(小潮時)および2月2日、3日(大潮時)において、河口から約1.5km間隔で5地点、2時間おきに合計12回実施されているが、ここでは満潮・干潮時の観測結果のみ示す。なお、塩分計測は鉛直方向に0.5～1m間隔で行われている。小潮時には途中、 $25\text{m}^3/\text{s}$ 程度の小出水があり、塩水楔は約1kmほど後退したが、混合形態は弱混合のままであった。一方、大潮時の堰放流量は $2\text{m}^3/\text{s}$ 程度と少なく、塩水は堰付近まで遡上していた。また、満潮時(D)には緩混合気味になっている様子も見られた。

次に、図の右半分(a-d)は観測結果とほぼ同じ時間帯

の塩化物イオン濃度の計算結果(コンター図)である。図の見方は観測結果と同様である。観測結果と比較すると、小潮時は塩水楔の挙動や塩分分布など全体的によく再現されている。大潮時は、上げ潮時(d)における堰付近の塩分分布の再現性が不十分ではあるものの、高濃度の塩水部分の遡上距離は概ね再現されている。また、(d)において混合形態が緩混合気味になっている様子も再現されている。

以上から、大潮満潮時において一部再現性が不十分な点もあるが、相模川の基本的な塩水流動特性は本モデルによって概ね再現された。また、本モデルによって混合形態の変化も定性的ではあるが再現できることが明らかとなった。

4. 塩水の滞留特性に関する数値実験

観測結果からわかるように、相模川では堰からの放流量が少ないため、干潮時でも塩水が河道内部に留まっている。この状態が長期間続いた場合、河道に残り続けている塩水の内部では酸素消費が進むため、貧酸素水塊の形成される可能性がある。その発生条件を規定する要素

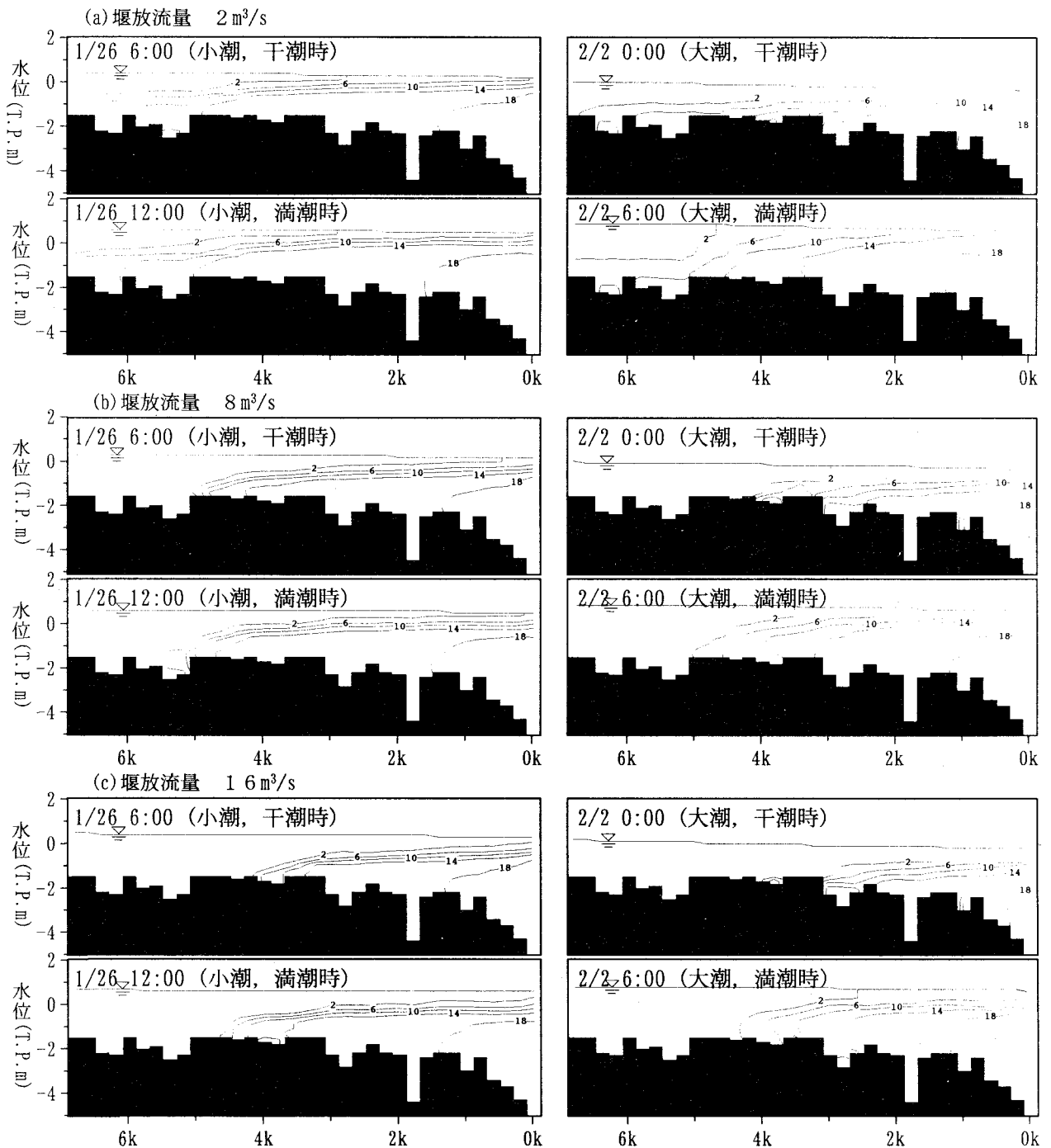


図-5 数値実験による塩分濃度の縦断分布 (単位 $\text{Cl} \times 1000 \text{mg/l}$)

の一つとして塩水の滞留時間が考えられる。そこで、本モデルを用いた維持流量検討の一例として、塩水の滞留時間が堰放流量によってどう変わるか試算を行った。

(1) 計算方法

滞留時間の計算は、河口から流入してくる海水に仮想的な中立浮遊物質を分布させて塩水楔内部における海水の移動状況を可視化することによって行った。具体的には、初期条件として計算領域一様に中立物質濃度をゼロとした上で、河口部において1日間隔で濃度をステップ的に増加させた。この方法により、下流から流入した海水は

1日ごとに異なる中立物質濃度の水塊となり、その濃度分布から塩水楔の滞留時間を把握することが出来る。

以上のような方法により、図-3に示した計算期間において堰放流量を $2 \text{m}^3/\text{s}$ 、 $8 \text{m}^3/\text{s}$ 、 $16 \text{m}^3/\text{s}$ の3ケースに設定して塩水流動計算を行い、滞留時間の変動特性を調べた。なお、目久尻川及び下水処理水の途中流入はそれぞれ観測期間中の平均値を与えた。

(2) 堰放流量の違いによる塩水流動特性の変化

図-5に各設定流量における塩分分布の計算結果を示す。計算結果は図-4-a, b, c, dとほぼ同じ時間帯のものであり、

それぞれ小潮時の干潮、満潮、大潮時の干潮、満潮に相当する。

3つのケースを比較すると、 $2\text{m}^3/\text{s}$ と $8\text{m}^3/\text{s}$ 以上で傾向が異なることがわかる。すなわち、 $2\text{m}^3/\text{s}$ の場合、堰付近に $2000\sim 10000\text{mg/l}$ の薄い塩水が滞留しているのに対し、 $8\text{m}^3/\text{s}$ 以上になると塩水楔先端部の薄い塩水はほとんどフラッシュされ、堰付近に塩水はほとんど残っていない。また、塩水楔は大潮・小潮に関係なく堰放流量に比例して後退する傾向が示唆された。

(3) 河道内における海水の滞留時間

図-6に各設定流量における小潮時の滞留時間の計算結果を示す。塩水楔先端部付近は濃度ゼロの水と混合して希釈されるため正確に滞留時間を把握することは出来ない。しかし、滞留時間のオーダーとしては、 $2\text{m}^3/\text{s}$ の場合は4～6日程度、 $8\text{m}^3/\text{s}$ の場合は4～5日程度、 $16\text{m}^3/\text{s}$ の場合は3～5日程度であると考えられる。したがって、数値実験の結果、放流量を $8\text{m}^3/\text{s}$ あるいは $16\text{m}^3/\text{s}$ に増やすことで、滞留時間は1～3日程度短縮されると試算された。

河川維持流量の検討を行う場合、実際には、滞留時間だけでなくその他にも多面的な検討が必要になる。しかし前述の通り、滞留時間は、生物の生息に影響を及ぼす貧酸素水塊発生指標となり得る。例えば、Suzuki et al.⁷⁾は利根川下流部における現地観測と数値実験から、貧酸素水塊が発生する滞留時間は4～6日程度と見積もっている。仮にこの値を相模川にあてはめてみた場合、滞留時間が1～3日程度短縮されることは、貧酸素水塊の発生をある程度抑制する効果があると思われる。

5. おわりに

本研究では相模川下流部に鉛直二次元モデルを適用し、維持流量検討のためのモデルとしての実用性を検討した。その結果、得られた知見は以下の通りである。

(1) 本モデルにより、水深が比較的浅く河道形状が大きく変化する水域の塩水流動特性が比較的よく再現された。また、潮位変動に伴う弱～緩混合の形態変化についても再現された。

(2) 塩水楔内部における海水の滞留時間を計算したところ、堰放流量を $2\text{m}^3/\text{s}$ から $8\text{m}^3/\text{s}$ または $16\text{m}^3/\text{s}$ に増加した場合、小潮時において滞留時間は1～3日程度短縮されると試算された。

さらに詳細な検討が必要な場合は三次元計算を行う必要があると思われるが、概略的な検討を行う場合にはこのような鉛直二次元モデルも有用であると思われる。

謝辞：本研究を行うにあたり、建設省関東地方建設局京浜工事事務所より観測データを貸与していただいた。記して謝意を表する。

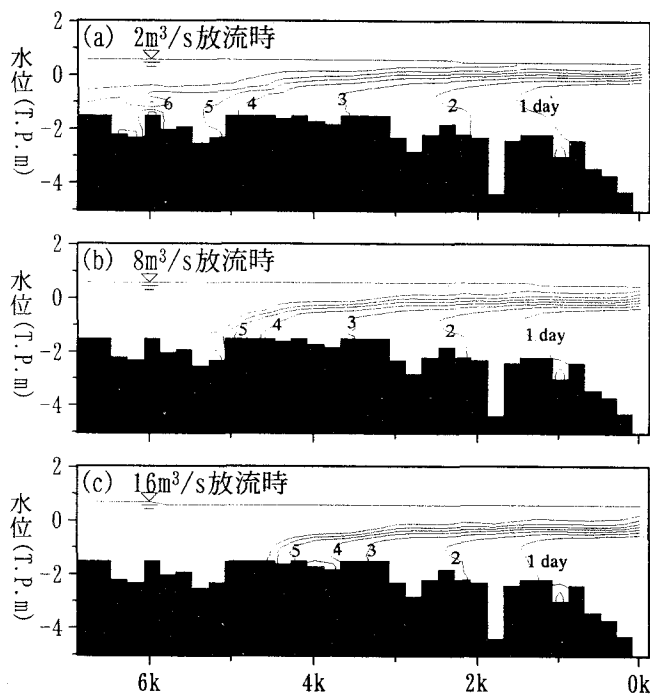


図-6 塩水楔内部における海水の滞留時間(1/26 12:00)

参考文献

- 1) 日本河川協会編：1997 日本河川水質年鑑，山海堂，2000。
- 2) 道奥康治，藤川佳宏，不二秀人：貯水池内に流入する浮力水解の挙動解析，水工学論文集，第40巻，pp.561～566，1996。
- 3) 坂井伸一，松梨史郎，仲敷憲和，坪野考樹，丸山康樹：3次元 $k-\epsilon$ モデルによる沿岸域における水平重力噴流の計算，水工学論文集，第41巻，pp.303～310，1997。
- 4) 銭新，石川忠晴，西部隆宏：霞ヶ浦高浜入りにおける日成層形成時の湾水交換の数値シミュレーション，海岸工学論文集，第44巻，pp.1051～1055，1997。
- 5) 井上和也，田中正博：3次元モデルによる塩水遡上の解析，水工学論文集，第37巻，pp.319～324，1993。
- 6) 岩佐義朗，井上和也，吉村義郎：大川における塩分遡上の解析について，京都大学防災研究所年報，第29号，pp.1～10，1986。
- 7) T.Suzuki, X.Qian and T.Ishikawa: Behavior of anaerobic water growing in the estuary of Tone River, Japan, New Trends in Water and Environmental Engineering for Safety and Life, July 2000.
- 8) 工藤健太郎，鈴木伴征，石川忠晴：瀬と淵が交互に形成された河道における塩水遡上と底質の縦断的特性，水工学論文集，第44巻，pp.1023-1028，2000。
- 9) 荒川忠一：数値流体力学，東京大学出版会，1994。

(2000. 10. 2受付)