

3次元塩水遡上解析モデルの開発と 紀の川汽水域環境への適用

Development of 3-D Salt Intrusion Numerical Model
and Its Application to Kino River Estuary

北山 和典¹・中西 太²・荒川 英誠³・中辻 啓二⁴・白波瀬 卓哉⁵・劉 炳義⁶

Kazunori KITAYAMA, Futoshi NAKANISHI, Hidenobu ARAKAWA,
Keiji NAKATSUJI, Takuya SHIRAHASE and Bingyi LIU

¹正会員 株式会社 ニュージェック 大阪本社河川海岸部 (〒542-0082 大阪市中央区島之内 1-20-19)

²正会員 株式会社 ニュージェック 大阪本社河川海岸部 (〒542-0082 大阪市中央区島之内 1-20-19)

³正会員 株式会社 ニュージェック 中部支店技術部 (〒461-0005 名古屋市東区東桜 1-4-13)

⁴正会員 工博 大阪大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

⁵正会員 国土交通省近畿地方整備局和歌山工事事務所調査第一課 (〒640-8272 和歌山市砂山南 3-1-15)

⁶正会員 工博 株式会社 ハイドロソフト技術研究所 (〒542-0082 大阪市中央区島之内 1-17-16)

Kinokawa Barrier is now under construction, which divides the estuary into river water zone and sea water zone. Such barrier may have potential for some effects on the lives of crustacean, shellfish, fish and other things living in the estuary. It is considered that the change of salinity distribution will be one of the most significant effects.

In the present paper, a three-dimension numerical model is developed to estimate salinity distributions quantitatively. The proposal model is characterized by the introduction of the two coordinate systems. One is σ coordinate in the upper layer, while the other is orthogonal Cartesian coordinate in the lower layer. The verification of the model is confirmed through comparing with the observed data. Furthermore, the distributions of salinity in this estuary with and without a barrier are calculated and those results are compared.

Key Words : Salt wedge, Estuary tidal land, Sigma coordinate, Three-dimension numerical model

1. はじめに

奈良県・和歌山県を流れる紀の川では、現在河口から6.2km 地点に紀の川大堰（以下、大堰と呼ぶ）の建設が進められている。現状の汽水域には干潟等が存在し、30種の貴重種を含めた100種以上の底生動物が確認されている。本研究では、紀の川汽水域を対象にし、大堰からの放流量によって、汽水域の生物生息にとって重要な物理環境がどのように変化するかを数値解析モデルによって検討した。

紀の川汽水域においては、干潟部に多数の生物が生息しているため、とくに干潟部に注目した。干潟部に生息する生物に影響を与える要因としては、a)塩分、b)干潟の底質、c)水質等が考えられるが、b)、c)については河岸の整備、出水時の土砂流動、汚濁負荷の削減などが課題になるといえる。本研究では、大堰からの放流量に

強く影響を受けると考えられる塩分に着目し、数値モデルによって解析することを考えた。モデルの適用に際しては、干潟部の解析精度を確保する必要があることから、横断方向の塩分が一様とする鉛直2次元モデルではなく、横断方向の塩分分布も得られる3次元モデルを適用する。鉛直方向については、上層にはメッシュ厚が潮位変動に応じて変化する σ 座標を、また下層には従来のデカルト座標を組み合わせた。また、横断方向には、河道形状を的確に表現できる一般曲線座標を採用し、3次元塩水遡上解析モデルを構築した。

構築したモデルの再現性を検証するために、平成12年8,9月に河口から新六ヶ井堰の範囲で実測を行った。この結果、モデルの再現性が確認できたので、大堰の建設や運用によって、汽水域の塩分がどのような影響を受けるかについて検討した。

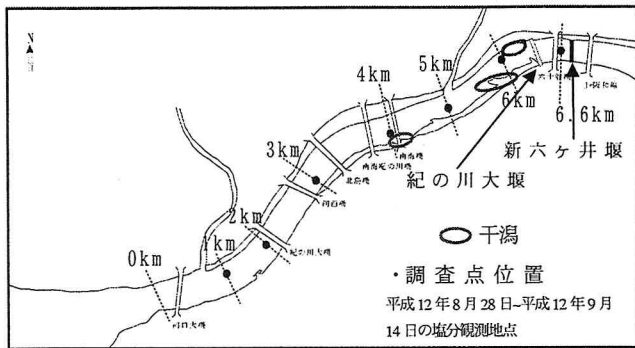


図-1 紀の川汽水域平面図

2. 紀の川汽水域における塩水遡上の現況

(1) 塩水遡上の観測結果

紀の川河口は、図-1 に示すように、現在新六ヶ井堰まで汽水域であるが、その下流 500m に紀の川大堰が建設中である。この建設によって物理環境が変わることが予想されることから、現況の塩分分布を把握するための現地観測が平成12年8月30日（大潮）と9月7日（小潮）に実施された。8月30日は満潮時、下げ潮時、干潮時、9月7日は干潮時、上げ潮時、満潮時の計6回、1km 間隔の河道中央で鉛直方向に 50cm 間隔で観測された。その結果を図-2 に示す。図より、紀伊水道からの塩水遡上によって、小潮時には、弱混合形態、大潮時には緩混合形態を呈することがわかる。

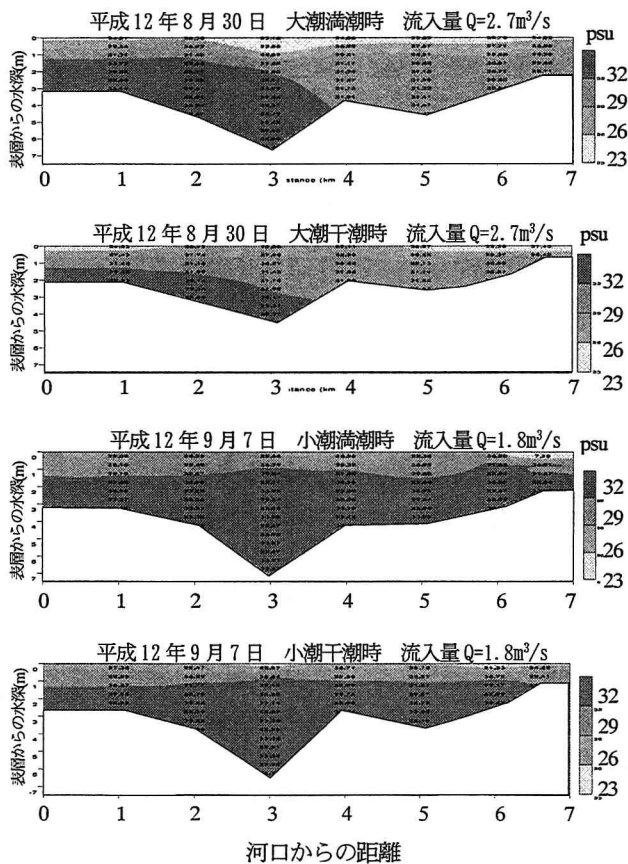


図-2 塩水遡上の観測結果

3. シミュレーションモデルの特徴

(1) 基礎方程式

本研究では、複雑な境界地形を有する水域を精度よく解析するために、デカルト座標系 (x, y, z) に代わる新しい座標系 (ξ, η, θ) を用いて物理的に不規則な区域を規則的な計算区域に変換する。

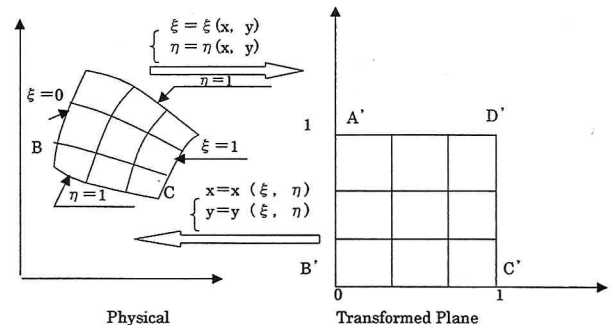


図-3 水平面の座標変換概念図

新しい座標系 (ξ, η, θ) は、水平面内では、直交曲線座標 (Boundary-fitted orthogonal curvilinear coordinates) を用い、鉛直方向では相対座標 (σ -座標) を用いる。

ここに、 g_{11} 、 g_{22} は座標変換係数であり、それぞれ次式で表される。

$$\begin{cases} g_{11} = \sqrt{x_{\xi}^2 + y_{\xi}^2} \\ g_{22} = \sqrt{x_{\eta}^2 + y_{\eta}^2} \end{cases} \quad (1)$$

ここに、

$$x_{\xi} = \partial x / \partial \xi, \quad x_{\eta} = \partial x / \partial \eta, \quad y_{\xi} = \partial y / \partial \xi, \quad y_{\eta} = \partial y / \partial \eta$$

一方、水域底面の形状および時間的に変動する自由水面に適合するために導入した鉛直方向の相対座標は

$$\theta = \frac{z - Z_b}{h} \quad (2)$$

と表される。ここに、 θ は鉛直相対座標、 z はデカルト系の鉛直座標、 h は水深、 Z_b は底面の高さ、 $h = \xi - Z_b$ 、 ξ は水位である。

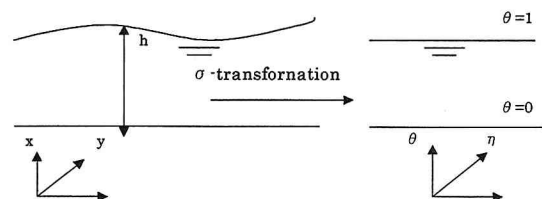


図-4 鉛直方向の σ -座標変換

以上を示す座標系 (ξ, η, θ) において、対象となる水域の三次元的な流れの支配方程式¹⁾はつぎのように表される。

◆ 連続式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left[\frac{\partial(u' h g_{22})}{\partial \xi} + \frac{\partial(v' h g_{11})}{\partial \eta} \right] + \frac{\partial w'}{\partial \theta} = 0 \quad (3)$$

◆ ξ 方向の運動量方程式

$$\begin{aligned} \frac{1}{h} \frac{\partial u'}{\partial t} + \frac{1}{h g_{11}g_{22}} \left[\frac{\partial(g_{22} h u' v')}{\partial \xi} + \frac{\partial(g_{11} h v' v')}{\partial \eta} \right] + \frac{\partial u' w'}{h \partial \theta} + \frac{u' v'}{g_{11}g_{22}} \frac{\partial g_{11}}{\partial \eta} \\ - \frac{v'^2}{g_{11}g_{22}} \frac{\partial g_{22}}{\partial \xi} = - \frac{1}{\rho_0 g_{11}} \frac{\partial p}{\partial \xi} - \frac{1}{\rho_0 g_{11} h} \left[(\theta - 1) \frac{\partial Z_b}{\partial \xi} - \theta \frac{\partial \xi}{\partial \xi} \right] \frac{\partial p}{\partial \theta} \\ + \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left[\frac{\partial(g_{22} \tau_{11})}{\partial \xi} + \frac{\partial(g_{11} \tau_{21})}{\partial \eta} \right] + \frac{\partial \tau_{31}}{h \partial \theta} + \frac{\tau_{12}}{g_{11}g_{22}} \frac{\partial g_{11}}{\partial \eta} - \frac{\sigma_2}{g_{11}g_{22}} \frac{\partial g_{22}}{\partial \xi} + f v' \end{aligned} \quad (4)$$

◆ η 方向の運動量方程式

$$\begin{aligned} \frac{1}{h} \frac{\partial v'}{\partial t} + \frac{1}{h g_{11}g_{22}} \left[\frac{\partial(g_{22} h u' v')}{\partial \xi} + \frac{\partial(g_{11} h v' v')}{\partial \eta} \right] + \frac{\partial v' w'}{h \partial \theta} + \frac{u' v'}{g_{11}g_{22}} \frac{\partial g_{22}}{\partial \xi} \\ - \frac{u'^2}{g_{11}g_{22}} \frac{\partial g_{11}}{\partial \eta} = - \frac{1}{\rho_0 g_{22}} \frac{\partial p}{\partial \eta} - \frac{1}{\rho_0 g_{22} h} \left[(\theta - 1) \frac{\partial Z_b}{\partial \eta} - \theta \frac{\partial \xi}{\partial \eta} \right] \frac{\partial p}{\partial \theta} \\ + \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left[\frac{\partial(g_{22} \tau_{12})}{\partial \xi} + \frac{\partial(g_{11} \tau_{22})}{\partial \eta} \right] + \frac{\partial \tau_{32}}{h \partial \theta} + \frac{\tau_{21}}{g_{11}g_{22}} \frac{\partial g_{22}}{\partial \xi} - \frac{\sigma_1}{g_{11}g_{22}} \frac{\partial g_{11}}{\partial \eta} - f u' \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、 u', v', w' はそれぞれ流速の ξ, η, θ 成分であり、

$$u' = (u x_\xi + v y_\xi) / g_{11}, \quad v' = (u x_\eta + v y_\eta) / g_{22} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} w' = h \frac{d\theta}{dt} = h \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{u'}{g_{11}} \frac{\partial \theta}{\partial \xi} + \frac{v'}{g_{22}} \frac{\partial \theta}{\partial \eta} + w' \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \\ = w - \frac{\partial Z_b}{\partial t} - \frac{u'}{g_{11}} \frac{\partial Z_b}{\partial \xi} - \frac{v'}{g_{22}} \frac{\partial Z_b}{\partial \eta} - \theta \left(\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{u'}{g_{11}} \frac{\partial h}{\partial \xi} + \frac{v'}{g_{22}} \frac{\partial h}{\partial \eta} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

u, v, w はそれぞれデカルト座標系における流速の x, y, z 成分、乱流応力 σ_{ij} 、 τ_{ij} は、渦動粘性の概念を適用し、水深 h とせん断流速 u_s を用いて、 $\nu_t \sim hu_s$ と表現した。 $f (= 2\Omega \sin \gamma)$ はコリオリ係数、 Ω は地球自転の角速度、 γ は緯度である。

水温、および塩分に関しても上記座標変換を行った拡散方程式を解いた。

◆ 温度拡散方程式

$$\begin{aligned} \frac{1}{h} \frac{\partial h T}{\partial t} + \frac{1}{h g_{11}g_{22}} \left[\frac{\partial(g_{22} h u' T)}{\partial \xi} + \frac{\partial(g_{11} h v' T)}{\partial \eta} \right] + \frac{\partial w' T}{h \partial \theta} = \\ \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{g_{22}}{g_{11}} \Gamma_n \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{g_{11}}{g_{22}} \Gamma_n \frac{\partial T}{\partial \eta} \right) \right] + \frac{\partial}{h \partial \theta} \left(\Gamma_n \frac{\partial T}{h \partial \theta} \right) \\ + \frac{1}{\rho_0 c_p} \frac{\partial H_{sz}}{h \partial \theta} + S_T \end{aligned} \quad (8)$$

ここに S_T は、熱源による放射量、 Γ_n 、 Γ_z はそれぞれ水平と鉛直方向の温度の拡散係数であり、 H_{sz} は水面吸熱および太陽短波放射量である。

◆ 塩分拡散方程式

$$\begin{aligned} \frac{1}{h} \frac{\partial h C}{\partial t} + \frac{1}{h g_{11}g_{22}} \left[\frac{\partial(g_{22} h u' C)}{\partial \xi} + \frac{\partial(g_{11} h v' C)}{\partial \eta} \right] + \frac{\partial w' C}{h \partial \theta} = \\ \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{g_{22}}{g_{11}} \Gamma_{C_h} \frac{\partial C}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{g_{11}}{g_{22}} \Gamma_{C_h} \frac{\partial C}{\partial \eta} \right) \right] + \frac{\partial}{h \partial \theta} \left(\Gamma_{C_z} \frac{\partial C}{h \partial \theta} \right) + S_C \end{aligned} \quad (9)$$

ここに S_C は塩分の源濃度であり、 Γ_{C_h} 、 Γ_{C_z} はそれぞれ水平と鉛直方向の塩分の拡散係数である。

(2) σ 座標とデカルト座標を組み合わせた座標系の導入

紀の川汽水域には、貴重種が生息する干潟が点在しているため、干潟部分の塩分を精度良く再現する必要がある。一般的に用いられる直交座標系では、表層の1層位で最大潮位偏差を含めた層厚を必要とするが、このような差分系では、淡水が表層に薄く分布する現象を十分表現できない欠点を有している²⁾。そこで、鉛直方向には、潮位変動する部分については層厚が変化するシグマ座標の導入を考えた。しかしながら、表面から水底までの全てをシグマ座標にすると、河床形状の急変部で数値誤差の発生が指摘されている^{3), 4)}。

そこで、下層にはデカルト座標系と組み合わせて計算精度を向上させた。また、水平方向には、一般曲線座標を導入し、河道形状を忠実に再現した。

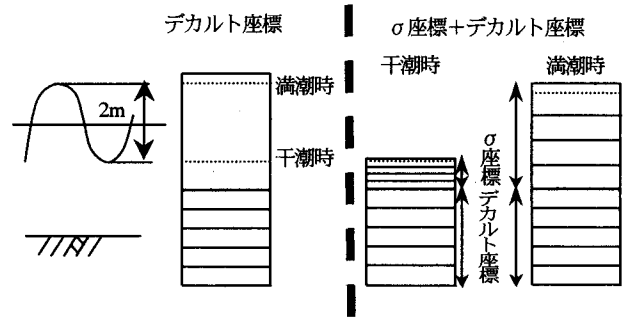


図-5 座標系によるメッシュ厚の違い

4. 再現計算

構築した数値モデルの再現性について、図-2 に示す現地観測との比較により検証を行った。

(1) 計算条件

- ①対象範囲：河口～新六ヶ井堰の6.6 km区間
- ②対象日時：平成12年8月28日～平成12年9月14日
- ③格子数：約14万格子（平面方向に7890格子、鉛直方向に、図-6のように格子分割し、最大18層）

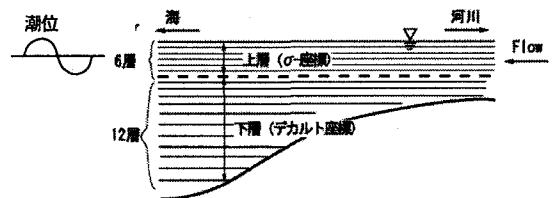


図-6 鉛直方向の格子分割図

④下流端条件：潮位は和歌山港観測潮位（図-7）を与えた。水温、塩分は、海へ流下する場合には変化しないと仮定し、

$$\frac{\partial T}{\partial n} = \frac{\partial Cl}{\partial n} = 0$$

とした。一方、海から汽水域へ流入する場合は、海側の境界条件として、水温、塩分ともに、鉛直方向に一様分布すると仮定し、水温は28℃（大阪湾の9月期の平均水温）、塩分は33を与えた。

⑤上流端条件：流量は、流量観測がなされている六十谷（新六ヶ井堰の直上流）の流量データを用いた。流入水温は、時系列的に観測されていないので、塩分観測時に測定された2個のデータ（新六ヶ井堰直下流、8/30と9/7の二回）と、気温の3日間平均値から作成した相関式によって流入水温の時系列を算出した。流入塩分は終始ゼロとした。

以上のデータを、左右岸の魚道部分の最上層のみに流入させた。（図-8、9）

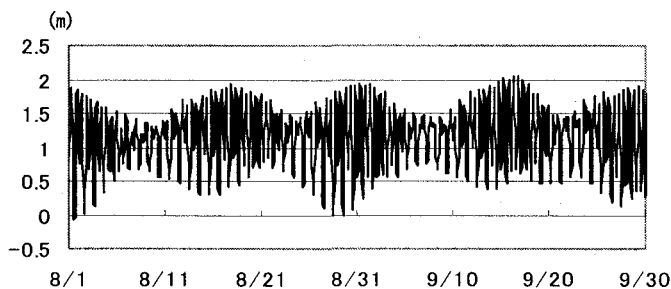


図-7 下流端境界条件 潮位（観測値）

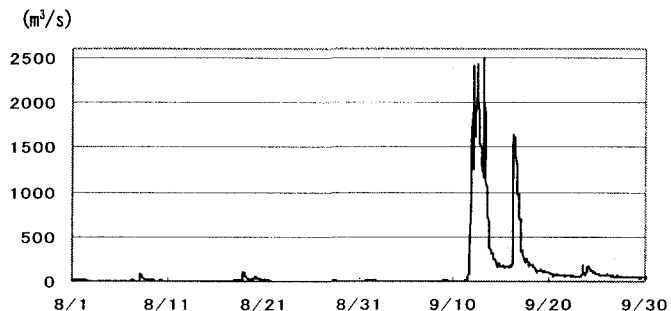


図-8 上流端境界条件 流入流量

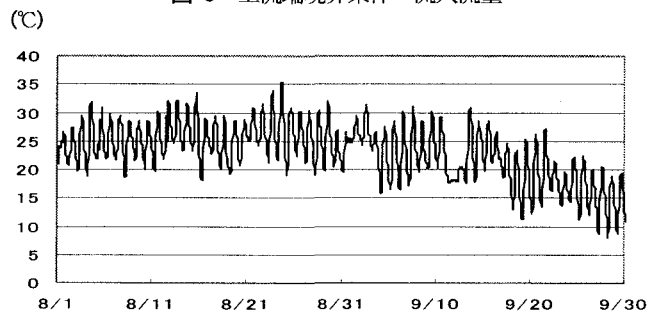


図-9 上流端境界条件 流入水温

(2) 再現計算の結果

観測結果と計算値との比較を図-10, 11 に示す。図から、提案した数値モデルは、塩分の鉛直分布、及び躍層位置を概ね再現しているといえよう。

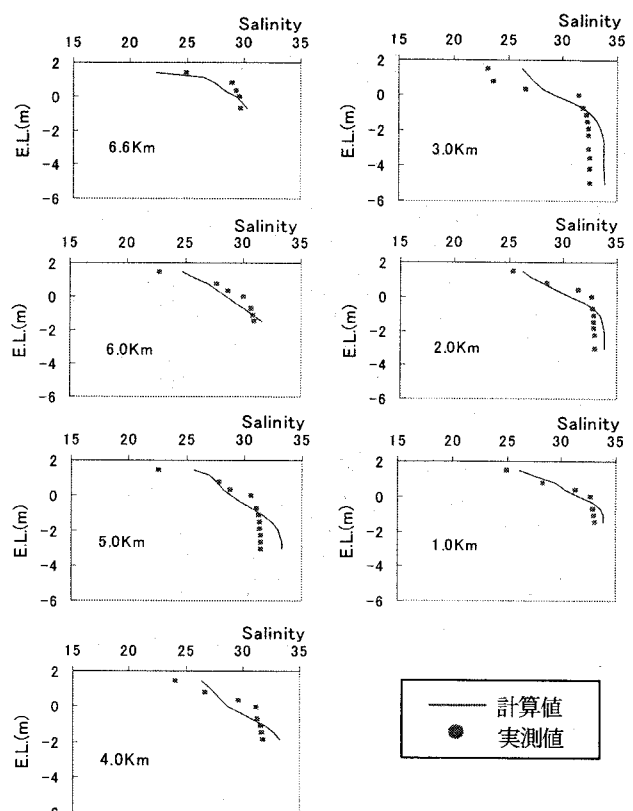


図-10 各調査点における塩分濃度の鉛直分布の比較
（平成12年8月30日8:00、満潮時）

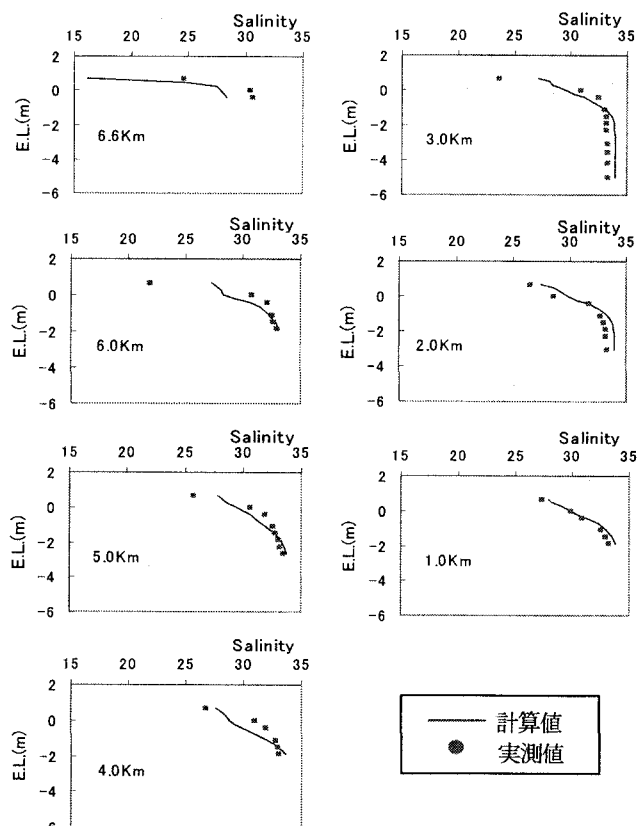


図-11 各調査点における塩分濃度の鉛直分布の比較
（平成12年9月7日8:00、干潮時）

5. 紀の川大堰が汽水域の物理環境へ及ぼす影響

(1) 計算条件

大堰の建設による汽水域への放流量の変化が、塩分に応じたどのような影響を及ぼすかについて検討した。計算期間は、汽水域の生物にとって過酷な高塩分が継続する時期に着目し、近年で最も渇水規模が大きかった平成6年7月の1ヶ月間とした。この平成6年7月を対象に、当時の再現計算と大堰完成後の計算を行い、両者を比較した。

入力した下流端条件の潮位変動を図-12に、上流端からの流入量の比較図を図-13に示す。平成6年当時の汽水域への流入量は、当時の実績取水データをもとに算定し、大堰完成後の流入量は、利水計算結果を用いた。

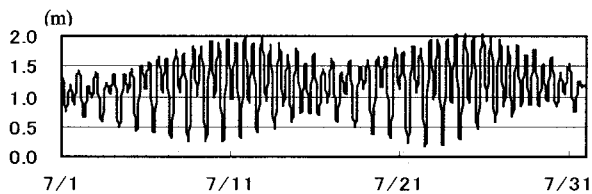


図-12 平成6年7月 下流端潮位

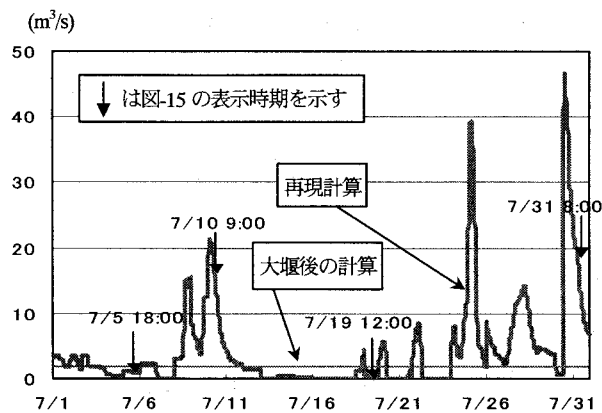


図-13 平成6年7月 上流からの流入量

(2) 計算結果及び考察

図-14は河口から0.0, 3.0, 6.0km地点の左岸における表層塩分の経時変化について、また、図-15は表層塩分の平面分布について、それぞれ再現計算と大堰後の計算結果を比較したものである。両者の計算結果を比較したものである。図から、再現計算では、流入量がゼロになる期間があるが、7月10日および7月25日前後の小規模出水によって、塩分が一時的に低減する傾向が見られる。一方、大堰後の計算では、流量がゼロになる期間はないが、常時2m³/s程度の流入量に対して、汽水域の塩分はほとんど変化せず、高塩分のまま時間的に推移していく傾向がうかがえる。

以上の計算結果から、大堰完成後の放流パターンによっては、塩分の変動幅が小さくなるため、汽水域の自然環境に何らかの影響を及ぼす可能性のあることが推察される。

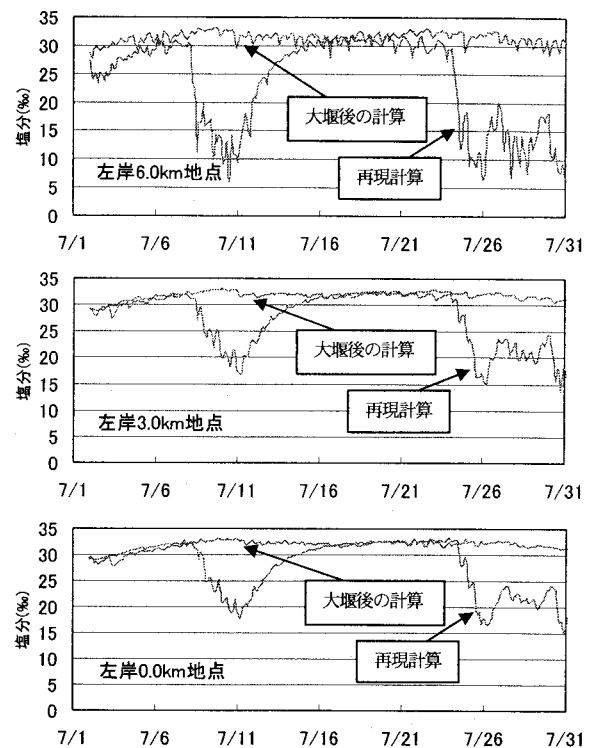


図-14 表層塩分の比較計算結果

6. まとめ

(1) 本研究では、生物の貴重な生息場となっている干潟の塩分を精度良く評価することを目的に、鉛直方向にσ座標、水平方向に一般曲線座標を導入した3次元塩水遡上解析モデルを開発した。観測データの再現計算によって、モデルの妥当性を検証した結果、表層の低塩分域を含めた鉛直分布、躍層位置が概ね再現できた。

(2) 単純な大堰からの放流パターンでは、汽水域における現況の塩分環境が大きく変化する可能性があることを明らかにした。現況の塩分環境を維持するためには、大堰の運用方法について留意する必要がある。

7. 今後の課題

汽水域の自然環境に対して適切な評価を行うためには、汽水域に生息する生物の塩分耐性を把握し、シミュレーション結果に対する評価基準を設定する必要があると考えられる。しかしながら、現状における生物の塩分耐性に関する知見は、シジミ等の有用種に限定されていると思われる。

今後、合理的な評価基準を設定するために、汽水域に生息する生物を広く対象にし、これら生物の塩分耐性について、塩分と生息可能時間、生活史等、多角的に知見を集積していく必要がある。

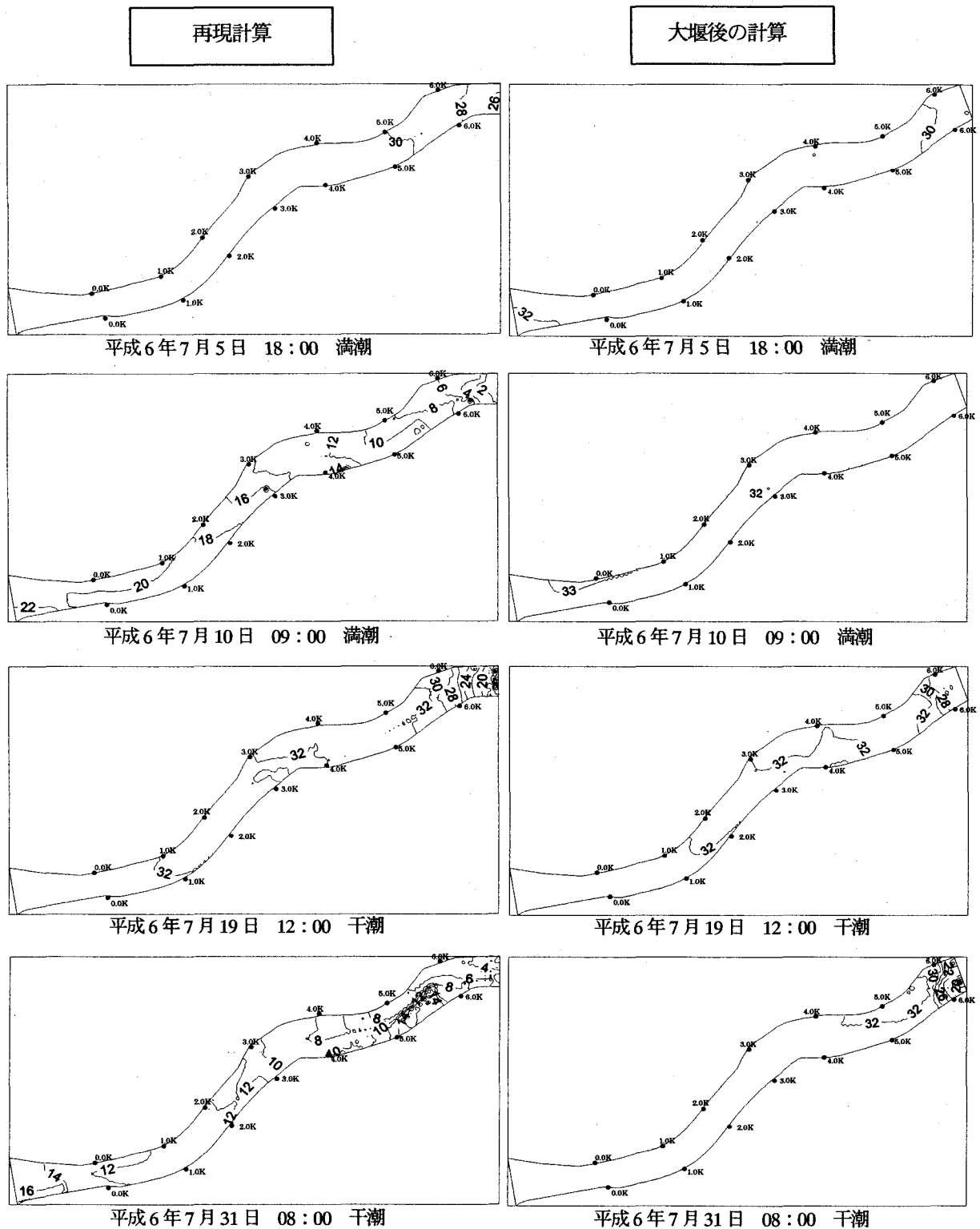


図-15 平成6年7月の表層塩分の平面分布

参考文献

- 1) H.S.JIN, S.EGASHIRA and B.Y.LIU : 3-D NUMERICAL SOLUTION OF FLOW IN SINE-GENERATED MEANDRING COMPOUND CHANNEL、The 27th Congress Engineering Division/ASCE、1997
- 2) 国土交通省 近畿地方整備局 和歌山工事事務所：平成11年度紀の川水系低水計画業務報告書

- 3) H.S.JIN, S.EGASHIRA and B.Y.LIU : MODIFICATION OF $k-\epsilon$ TURBULENCE CLOSURE AND ITS APPLICATION TO MEANDRING COMPOUND CHANNEL FLOW、Annual Journal of Hydraulic Engineering、JSCE、VOL.42、1998
- 4) 灘岡和夫、吉野忠和、二瓶泰雄：沿岸海水流動数値計算法の高度化のための Dual- σ 座標系の提案、土木学会論文集 No.656/II-52、2000.8

(2002. 9. 30受付)