

## 季節風および地形変動が 吉野川河口域での塩分環境に及ぼす影響

宇野 宏司<sup>1</sup>・中野 晋<sup>2</sup>・伊澤 誠一<sup>3</sup>・片岡 孝一<sup>3</sup>・岡部 健士<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生会員 徳島大学大学院 工学研究科博士後期課程 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

<sup>2</sup>正会員 博(工) 徳島大学助教授 工学部建設工学科 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

<sup>3</sup>学生会員 徳島大学大学院 工学研究科博士前期課程 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

<sup>4</sup>正会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

季節風および地形変動が吉野川河口域での塩分環境に及ぼす影響について現地観測及び数値シミュレーションから考察した。現地観測の結果、年間を通じて北西方向の風の出現が卓越し流動に大きく寄与していること、底層は夏季と冬季で変動が少なく安定した塩分環境にあることが確認された。また、シミュレーションの結果、河口周辺の地形変動により塩分の回復過程に違いがみられ、特に河口周辺に広がる砂州には、河道内の塩分流出抑制効果や外海水の直接の侵入を抑える効果があることが明らかにされた。

**Key words:** Yoshino river mouth, salinity distribution, harmonic analysis, numerical simulation, EOF analysis

### 1. はじめに

吉野川河口域には、現在、複数の干潟や砂州が点在し、こうした空間がシオマネキやイセウキヤガラなど絶滅が危惧されている動植物をはじめ多くの生物にとってかけがえのない生態環境を提供している。また、この流域はスジアオノリの養殖やシラスウナギの良好な漁場としても有名である。その一方で、治水・利水、生活の利便性の面から第十堰改築をはじめとする複数の公共事業が提案されており、このような自然環境、社会環境が、河口域に対する流域住民の関心を非常に高いものになっている。このため、治水・利水・自然環境保全を融合させる高度な河口空間管理計画の策定が急務とされている。

中野・岡部<sup>1)</sup>が実施した下流域の長期地形変動解析によると、1985年以降では第十堰下流部、特に河口砂州周辺部では河床上昇が顕著になっており、河口域の流れや塩分環境への影響が懸念される。河口域における水環境は、汽水域生態系のみならず、内面漁業の成果にも大きな影響を及ぼすと考えられる。たとえば、スジアオノリの生育や品質には水温や塩分が重要であり、長雨や台風による種場の淡水化が凶作をもたらすといわれている。このため、河口域での水質モニタリングは、環境管理や持続可能な漁業をおこなっていく上で必要不可欠なものになっている。こうした水質モニタリングの重要性が、

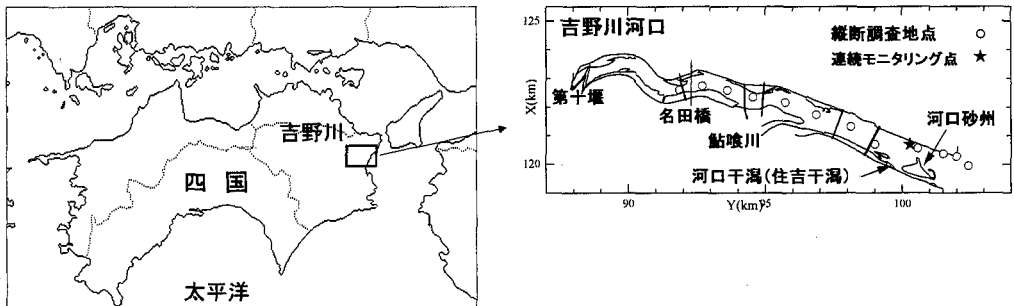


図-1 吉野川と河口調査地点

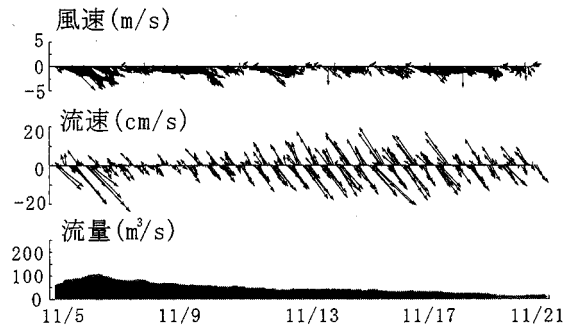
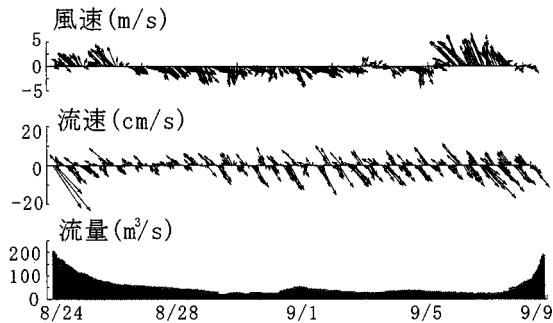
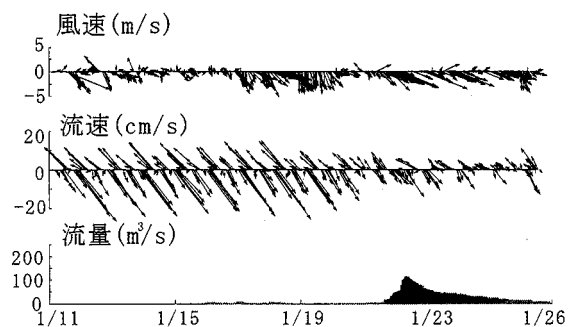


図-2 (a) 連続モニタリング結果 (風速・流速・流量)  
(左上段: 夏季, 右上段: 秋季, 右下段: 冬季)

表-1 連続モニタリング期間

|    | 観測期間       | 最大流量<br>(平均流量)<br>[単位: m³/s] | 最頻出風向<br>(平均風速)<br>[単位: m/s] |
|----|------------|------------------------------|------------------------------|
| 夏季 | 8/24-9/8   | 201.8<br>(51.6)              | WNW<br>(2.97)                |
| 秋季 | 11/5-11/20 | 107.4<br>(49.3)              | WNW<br>(3.60)                |
| 冬季 | 1/11-1/26  | 115.3<br>(15.1)              | WNW<br>(4.00)                |



有明海や長良川などの閉鎖性水域で実証されつつあるにもかかわらず、吉野川河口域では詳細なデータがほとんど得られていないのが現状である。そこで、塩分環境の現況把握と塩分変動予測計算のための基礎データを取得することを目的として2001年6月～2002年1月に塩分・水温・流動の現地観測を実施した。本論文では、まず、全観測期間の中から出水後に観測された塩分回復過程や季節別の流れ・塩分・水温構造について考察する。ついで、中野・宇野<sup>2)</sup>の開発した準3次元流れ解析の概要ならびに再現性について述べた後、本モデルを用いて、季節風の流れへの影響や、将来の河口部周辺の地形変動が塩分回復過程に与える影響について検討する。

## 2. 吉野川河口における流動・塩分変動の現地観測

### (1) 現地観測の概要

吉野川流域ならびに現地調査地点である河口域の概略図を図-1に示す。吉野川は四国中部の瓶ヶ森にその源をなし、ほぼ中央構造線に沿って東に流下し、紀伊水道に注いでいる。河口では砂州が右岸から河道の半分を塞ぐように発達しているため、河川水ならびに海水は平水時にはおもに左岸側の滞筋を経て流出入する。

吉野川河口の流れ・塩分・水温構造を把握することを目的として、定点での連続モニタリングを実施した。夏季(6～9月)と秋冬季(11～1月)に、河口2km、左岸

から15mの地点(図-1左★印)にブイを設置し、水面下0.5mと3mに小型メモリー水温塩分計(COMPACT-CT, アレック電子株式会社)、水面下2mに小型メモリー流速計(COMPACT-EM, 同)、さらに水面下1mに水温計(StowAway Tidbit, onset社)を係留して連続観測をおこなった。ただし、洪水時には観測ブイを引き上げたため、概ね洪水1日後からの観測となっている。また観測された流速データより潮流調和分解(10分潮)を行ない、徳島沿岸潮位の季節変動や季節風の影響などを調べた。さらに塩分の空間分布を把握するため、河口より2km沖合から上流12km地点の区間で、小型船舶による縦断調査を行ない、水温・塩分の鉛直分布を計測した(図-1右○印)。

### (2) 結果と考察

いずれの観測でも出水(夏季: 台風; 秋季: 秋雨)後の塩分回復過程が観測された。表-1、図-2(a), (b)に観測結果を示す。なお、流量は国土交通省の水位データから第十堰を通過する流量であり、水位一時間流量曲線より求めた。気象データは、気象庁地上気象観測データ(観測点: 徳島)によった。吉野川河口域付近での風の特性についてみると、夏季では台風(0111号8月21日紀伊半島上陸)や低気圧の通過の影響を受けて、南寄りの風の出現が見られるが、年間を通じて北西からの風の出現が卓越しており、その出現頻度は秋季から冬季にかけて

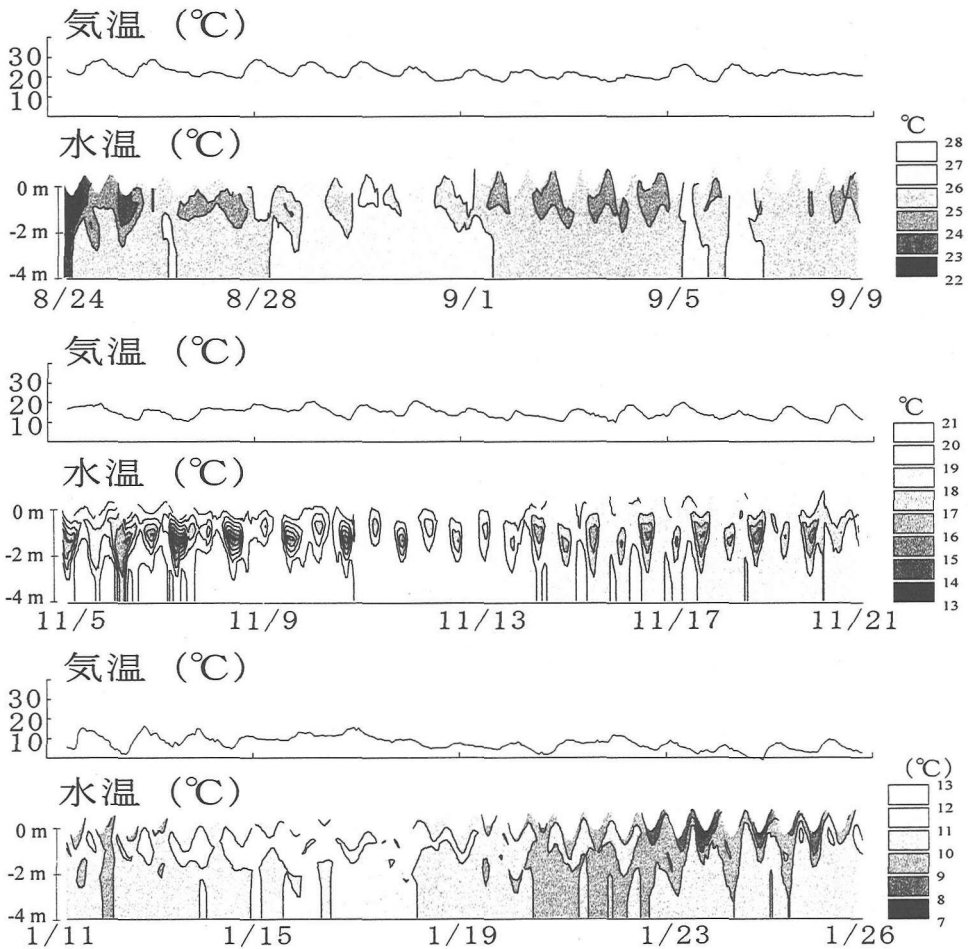


図-2 (b) 連続モニタリング結果 (気温・水温)

顕著となっている。一方、流量については台風や秋雨前線の影響をうける夏季から秋季にかけて継続時間の長い流出がみられるが、冬季ではこうしたイベントがないため平均流量で比較すると夏季の3割程度にまで落ち込んでいる。次に流速についてみると、北西風が弱く平均流量の大きい夏季に比べて、北西風が発達し平均流量の小さい冬季に流速が大きくなる傾向がうかがえる。これらのことから吉野川河口域での流動には季節風の寄与が大きいことが予想される。

さらに水温変動についてみると、夏季で河川流量の大きい時期には表層を流れる河川水と底層水間で安定な境界面が形成されている。日中の表面加熱と高温の外洋水の侵入のため、干潮時に淡塩境界面付近で水温が極小となる水塊が生じている。鉛直日射と放射冷却が同等となる秋季では、天候の影響のため日によって異なるが、下げ潮時に表層から低温の河川水が流出することによって

水温成層が発達しやすく、上げ潮時には底層から高温の外洋水が遡上するため鉛直混合が生じやすい傾向がみられる。冬季には表面冷却のため、表層ほど低温・低塩分の成層構造が発達する。また、河川水と外洋水間の水温差が小さいため、秋季に見られるような鉛直混合が生じないことが特徴である。

図-3に流速データをもとに村上<sup>3)</sup>の方法によって算出した潮流調和分解の結果 ( $M_2$  潮) を示す。河岸に沿う方向にほぼ直線の潮流楕円が抽出された。 $M_2$  潮流成分について比較すると、夏季 (8~9月) に比べて、冬季 (12~1月) の振幅が70%以上大きくなった。この原因は冬季には日中強い北西風 (河口向き) が卓越することや水温・塩分構造の違いにより、入退潮時の流動機構が異なることに起因すると考えられる。これに対し、恒流成分の流速ベクトルは、潮流楕円の向きと必ずしも一致しない。この理由としては、観測地点が左岸寄りにあり

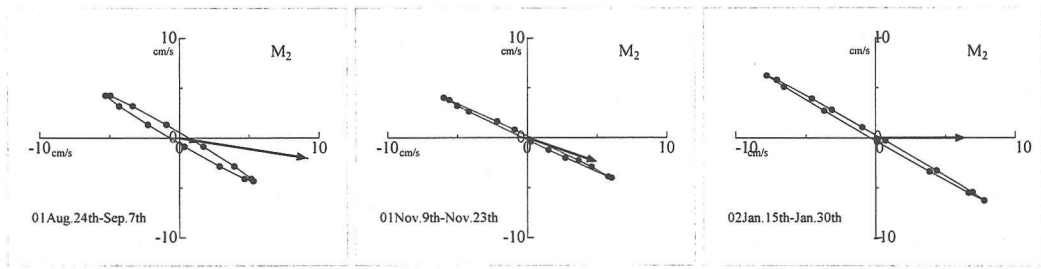


図-3 潮流調和分解の結果 (M2 潮) 注) 矢印は恒流成分の流速ベクトル

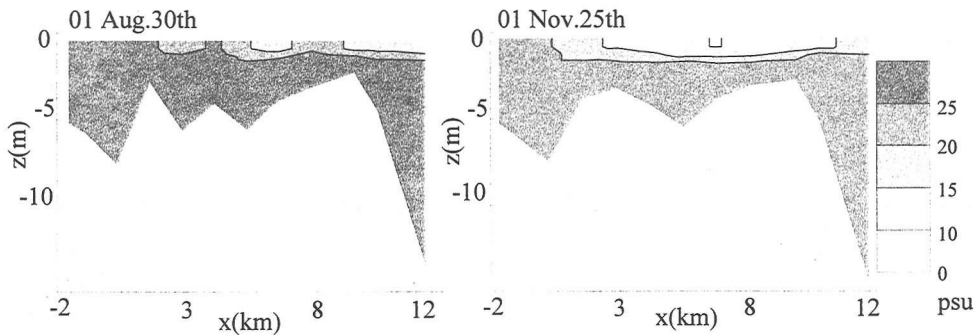


図-4 河口～名田橋間の塩分コンター図

2 次流の影響を受けているためではないかと考えられる。なお、 $M_2$ 以外の主要分潮 ( $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ ) についても  $M_2$  潮流成分と同様の傾向が確認されている。

次に吉野川河口域の塩分の空間分布状況を把握することを目的として、小型船舶による河口縦断調査をおこない塩分・水温の鉛直分布を計測した。図-4は河口より 2km 沖合から上流 12km 地点の区間での塩分の鉛直分布を示している。これによると吉野川は季節を問わず河口から上流約 10km にわたって底層に高濃度の塩分が存在する。台風等による大規模な出水では塩水楔がフラッシュされることもあるが、中規模程度以下の出水であれば塩水楔は解消されることなく、表層から河川水が流出する。このため、底層の塩分環境は年間を通じて変化が小さく、こうした塩分変動の少ない空間を幅広く有することが吉野川河口の大きな特徴のひとつになっている。

### 3. FEM 準3次元マルチレベルモデルによる 河口部流動特性の考察

#### (1) シミュレーションの概要

本研究では、干潟領域の干出・水没を考慮した三角柱要素の FEM マルチレベルモデルを構築した。連続式、ブシネス近似を用いた運動方程式、塩分拡散方程式のそれぞれを各層内で鉛直方向に積分した式をガラキン法で離散化した。また時間積分は lumping factor による数

値粘性の最小化が図られる修正 2 段階陽解法を用いた。水平渦動粘性・渦動拡散係数はリチャードソンの 4/3 乗則、鉛直粘性・拡散係数は Munk-Anderson 式に従う成層化関数で表現した。なお、計算層数は 4 層で、各層厚は表層から順に 1.0m, 1.0m, 2.0m, それで深とした。また、解析対象領域は、河口から上流に向かって約 8km、沖合方向に約 3km の区間であり、計算節点は 3870、要素数は 7383、タイムステップは 0.3s である。これら潮流計算の条件を表-2 にまとめて記す。

#### (2) モデルの検証

2001 年 8 月 21～23 日に来襲した 0111 台風では日流量  $1870\text{m}^3/\text{s}$  (概算値) の出水があったが、その出水後に塩分の回復過程が観測された。この塩分回復過程について本モデルによる再現計算を実施した。図-5 に計算値と観測値の比較を示す。実際の観測では、潮汐により観測ブイが上下方向に移動し各測定器のレベルが変化するため、計算値と観測値の単純な比較は検証として妥当ではない。そこで、水位の計算値から塩分計と T.P.基準面との相対的な距離を求め、これを用いて、表層については第 1 層と第 2 層の値で、底層については第 3 層と第 4 層の値で線形補間して計算塩分とした。塩分の回復過程について、表層ではおおむね再現されているものの、弱混合の状態では底層から塩分の侵入がみられる場合の再現性が不十分である。観測では 24 日午前 0 時過ぎから午前 4 時ごろにかけて底層の塩分が約 30psu 程度変動している

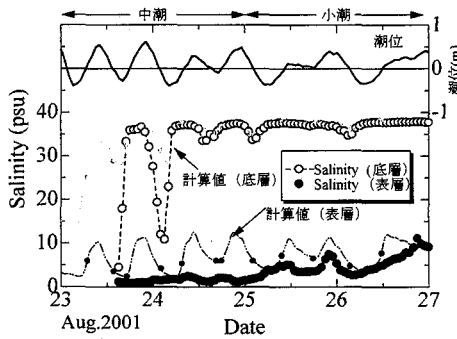
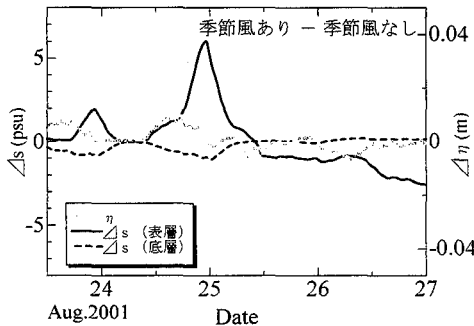


図-5 塩分回復過程に対する再現計算



| 表-2 計算条件  |                          |
|-----------|--------------------------|
| 項目        | 内容説明                     |
| 計算領域      | 沖3km 河口から上流8km付近         |
| 要素ならびに節点数 | 要素数 7383 節点数 3870        |
| 水深        | 海域 1995年度深浅測量データ(徳島県)    |
|           | 河口砂州 2000年度深浅測量データ(徳島県)  |
| 層分割       | 河道 2000年度定期横断測量データ(国交省)  |
|           | 4層(表層から1m, 1m, 2m, 2m以深) |
| タイムステップ   | 0.3s                     |
| 使用潮汐      | 小松島港での実測潮位               |
| 計算時間      | 8日間                      |
| 境界面摩擦係数   | 0.0013                   |
| 海底摩擦係数    | 0.0026                   |
| 鉛直拡散係数    | Munk-Anderson式より算出       |
| 水平拡散係数    | Richardsonの4/3乗則より算出     |
| 境界条件      | 海境界で潮位振動                 |
| 河川流入量     | 第十堰越流量を水位データから計算         |
| 塩分濃度      | 海境界38‰(実測最大値) 河川上流0‰     |

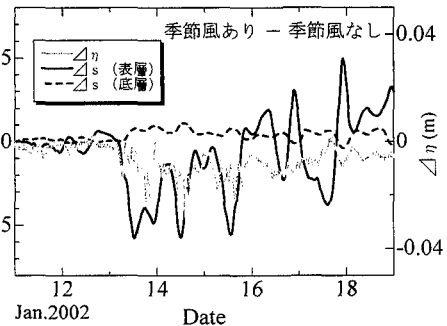


図-6 塩分回復に対する風の影響

が、シミュレーションの結果ではこの現象を再現できていない。この理由としては、レベルモデルでは層内の塩分は平均濃度で一様に表現されるため、塩分濃度が急激に変化する淡塩境界面を十分に表現する分解能を有していないことが主な理由と考えられる。より再現性の高い計算を行なうためにもデカルト座標から $\sigma$ 座標系への移行等、モデル改善の余地がある。

### (3) 結果と考察

現地観測の結果から、吉野川河口では北西方向の風が流動に影響を及ぼしていることが示唆された。そこで、数値シミュレーションにより季節風が塩分回復過程に及ぼす影響を夏季と冬季のそれぞれで調べた。図-6は塩分と水位について季節風を考慮した場合の計算値から季節風を考慮しない場合の計算値の差をとったものである。いま、季節風を考慮した場合の塩分、水位の計算値を $s_w$ 、 $\eta_w$ 、季節風を考慮しない場合の塩分、水位の計算値を $s_0$ 、 $\eta_0$ とすると、季節風を考慮した場合の計算値から季節風

を考慮しない場合の塩分の計算値差 $\Delta s$  (psu)、水位の計算値差 $\Delta \eta$  (m)は次式で表される。

$$\Delta s = s_w - s_0 \quad (1)$$

$$\Delta \eta = \eta_w - \eta_0 \quad (2)$$

$\Delta s$  が正の値をとる場合、風の効果によって塩分が高くなることを意味している。夏季には台風通過の影響を受けて南寄りの風の出現があるため、吹送効果によって表層に外洋の高濃度の海水が持ち込まれる。したがって、河道内の表層塩分は高くなり表層の $\Delta s$ は正の値をとる。一方、冬季には強い北西風が発達するため、吹送効果によって表層からの河川水の流出が促進される。このため、河道内の表層塩分は低くなり表層の $\Delta s$ は負の値をとる。変動は夏季に比べて冬季の方が大きく、表層では土約 5 psu の変動が見られたが、水位や底層への連行の影響は小さかった。

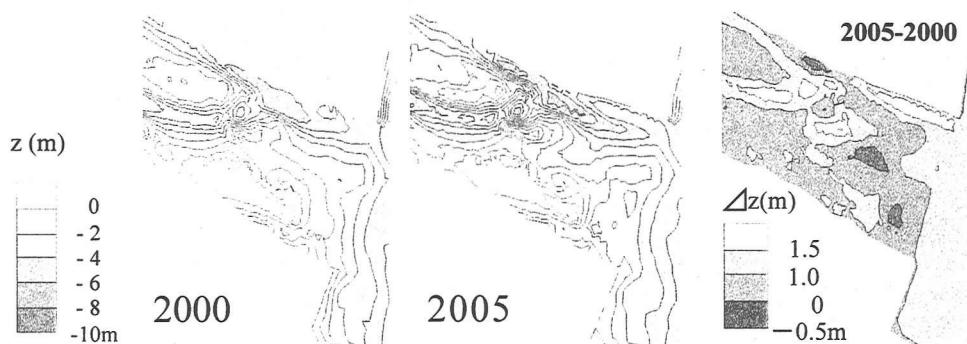
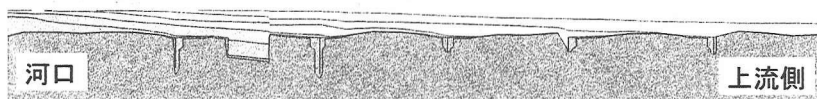


図-7 河口周辺の等深線図

( $z(m)$ はTP基準での河床位  $\Delta z(m)$ は2005年の河床位から2000年の河床位を差し引いたもの)

### 2000年 現況



### 2005年 予測地形



### 砂州流出

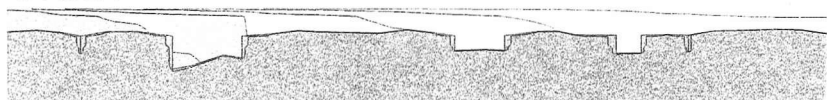


図-8 シミュレーションによる河口付近の塩分コンター図 (40 時間後)

次に地形変動に伴う塩分回復過程の違いを調べるために、① 2000 年現況地形 ② 2005 年予測地形 ③河口砂州が流出した地形、の3 ケースについて検討した。ここで②については、中野・岡部<sup>1)</sup>が旧建設省が実施した定期横断データをもとに EOF 解析を用いた短期将来予測により得られた地形である(図-7 中)。ここで EOF 解析とは経験的固有関数法と呼ばれる主成分分析法の一種で、この統計手法により地形変化の要因を抽出することが可能である。この報告によると、2005 年には現況地形と比較して河口砂州周辺のみお筋を中心に河床上昇がある可能性が指摘されている(図-7右)。塩分の遡上効果を調べるため、解析は大規模な出水後を想定し、初期塩分濃度は河川・海領域ともに 0psu とした。図-8は計算開始 40 時間後の河口付近の塩分の縦断分布を示している。ここで、X 軸の基点は河口 0km としている。現況地形では、成層が保たれたまま、塩分が底層から河道内に侵入して

いる。2005 年の地形では、みお筋を中心とした河床上昇のため、塩分の侵入が最も弱く、河口付近で潮汐の侵入が妨げられて鉛直流が生じるため成層が解消されている。一方、砂州の流出は塩分の遡上を容易にし、塩水楔の侵入が検証ケースのなかで最も大きかった。図-9 には、河口 4km の地点での水位、塩分(表層・底層)の時系列変化を示した。この図から、河床上昇が懸念される 2005 年予測地形では水位の上昇、塩分回復の遅延がみられた。これに対して、砂州流出の影響は、若干の水位低下と塩分の早期回復としてあらわれる。以上のことをまとめると、河口付近の地形変動が塩分環境に与える影響は大きく、特に河口砂州の存在は、河道内の急激な塩分変動を緩和する緩衝的な役割を果たしており、安定した汽水域生態系を維持する上でも重要な働きを担っていると考えられる。

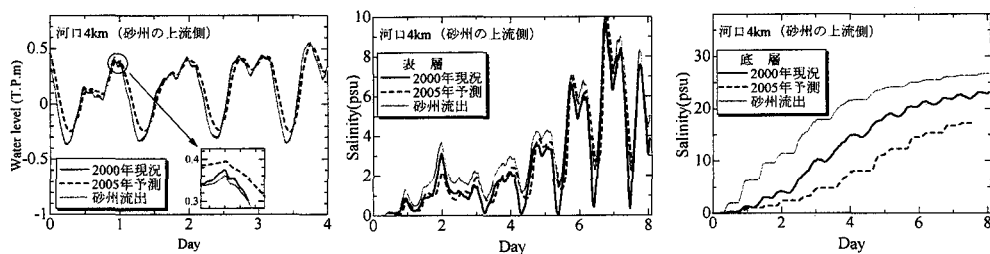


図-9 河口4kmにおける水位・塩分の時系列変化

#### 4. まとめ

本研究では、吉野川河口域の塩分環境特性と地形変動がそれと与える影響について、現地観測ならびに数値シミュレーションの両面から検討をおこなった。その結果、吉野川河口域の塩分環境を考える上では、北西方向の季節風、河床形状が無視できないことが明らかにされた。

また河口周辺に広がる砂州は、河道内の塩分流出抑止効果や外海水の直接の侵入を抑える効果があり、吉野川河口域の生態系を考える上で重要な役割を担っている。しかし、一方では洪水時通水の障害となる恐れもあるため、防災、環境管理両面からの適切な河道管理が必要である。

謝辞：小松島港潮位データは徳島地方気象台から、吉野川水位データは国土交通省四国地方整備局徳島工事事務所から提供いただいた。ここに記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 中野晋，岡部健士：統計的手法による吉野川下流部の長期地形変動解析，徳島大学工学部研究報告，第47号，pp.45-54，2002.
- 2) 中野晋，宇野宏司：底生動物「シオマネキ」の浮遊幼生分散と塩分環境，海岸工学論文集，第48巻，pp.1181-1185，2001.
- 3) 村上和男：最小自乗法による潮汐・潮流の調和分解とその精度，港湾技研資料，No.369，39p.，1981.

## EFFECT OF SEASONAL WINDS AND TOPOGRAPHY CHANGES ON SALINITY DISTRIBUTION IN YOSHINO RIVER MOUTH

Koji UNO, Susumu NAKANO, Seichi ISAWA, Koichi KATAOKA and Takeshi OKABE

The influence of winds and topography changes on the salinity environment in Yoshino River mouth was examined. As results of field observations, it was confirmed that the winds in the northwest greatly contributed to the recovery of salinity. The variation of salinity at the bottom layer was small both in summer and in winter was also clarified. As results of the numerical simulations, it was clarified that the topography changes at the river mouth influenced on the process of salinity recovering. In particular, the river-mouth bar greatly affects the salinity environment around Yoshino River mouth.