

改良型POMによる干潟域を含む 三次元流動モデルの検討

THE EXAMINATION OF THE 3-D FLOW MODEL INCLUDING THE TIDAL FLAT BY ADVANCED POM

末益潤¹・矢北孝一²・滝川清³・森本剣太郎⁴・青山千春⁵

Jun SUEMASU, Kouichi YAKITA, Kiyoshi TAKIKAWA,
Kentaro MORIMOTO and Chiharu AOYAMA

¹学生会員 熊本大学大学院 自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)

²正会員 熊本大学 工学部技術部 (〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)

³フェロー 工博 熊本大学教授 沿岸域環境科学教育研究センター (〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)

⁴正会員 博(工) 国土交通省国土技術政策総合研究所 沿岸海洋研究部沿岸域システム研究室
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

⁵正会員 博(水産学) 株式会社 独立総合研究所 (〒105-0004 東京都港区新橋3-1-10)

The consideration of the characteristic of three dimensional flow in Ariake and Yatsushiro Bay developed tidal flat demand on the precise calculation considering tidal flats, for there are many variable factors, such as the complex bottom topography and the wetting and drying tidal flats. To simulate and understand these phenomena, a three-dimensional flow analysis in Ariake and Yatsushiro Bay is carried out by the Princeton Ocean Model (POM) with a wetting and drying scheme which the vertical grid space is non-regular and thick around its surface and bottom. The result indicates that this model accord approximately with the survey data of current and tide in shallow region by comparison with the conventional model even if the density field and climatic condition aren't considered this model.

Key Words : Ariake and Yatsushiro Sea, Current Field, Hyperbolic type Function, POM
Three-dimensional tidal flow

1. 緒 言

近年、有明・八代海の沿岸域において、底質の泥化、貧酸素水塊や赤潮発生の増加・大規模化等の環境変動に関する諸問題が顕在化し、現地調査に基づく底生生物、水質、潮流、物質循環等の研究や水質及び底質改善対策等が進められている。これらの環境変動は、物理的・生物化学的要因等が指摘されているが、干潟を含めた沿岸域は気圏、水圏、地圏、生物圏の4圏にまたがる複雑系であることから、諸問題の要因と干潟環境との明確な因果関係が十分に解明されていない現状にある。

流動場の特性は海域の物理環境を支配する大きな要因であり、特に、干潟域が発達した有明・八代海等での流動場の三次元流動特性を検討する場合、複雑な海底地形の変化、潮汐に伴う干潟の冠水・干出、さらに河川流入等に起因する密度成層の形成等、多くの変動要因が複雑に影響しており、高精度の計算が要求される。

このような干潟域での計算精度を上げるための手

法として、 σ 座標系を用い、冠水・干出の計算過程を組み込んだ三次元流動モデル (ROMS, GETM, FVCOM等) が開発され、同じく σ 座標系を用いた三次元流動モデルであるPOM (Princeton Ocean Model) を改良し、冠水・干出水域の計算を可能とした事例が報告されている¹⁾。 σ 座標系は、海底地形をより実際形状に近く表現可能で、沿岸に近づくほど鉛直分解能が高まるという利点がある反面、座標変換によって運動方程式中の水平圧力勾配項で誤差が生じるという問題が指摘されている²⁾。この数値誤差は、海底勾配の大きさ、密度成層の強さ、計算格子の粗さ等が原因で増幅される。そのため、誤差軽減手法として、細かい格子を用いる、表層と海底付近の格子間隔を対数分布とする、圧力項に高精度差分を用いる等の提案が示されている。

そこで本研究では、海洋シミュレーションにおいて頻繁に使用されているPOMに、表層及び底層付近の格子間隔を密にし、鉛直方向の格子間隔を不等間隔とした手法を組み込み、干潟の冠水・干出を再現可能とした三次元流動解析をおこなった。この解

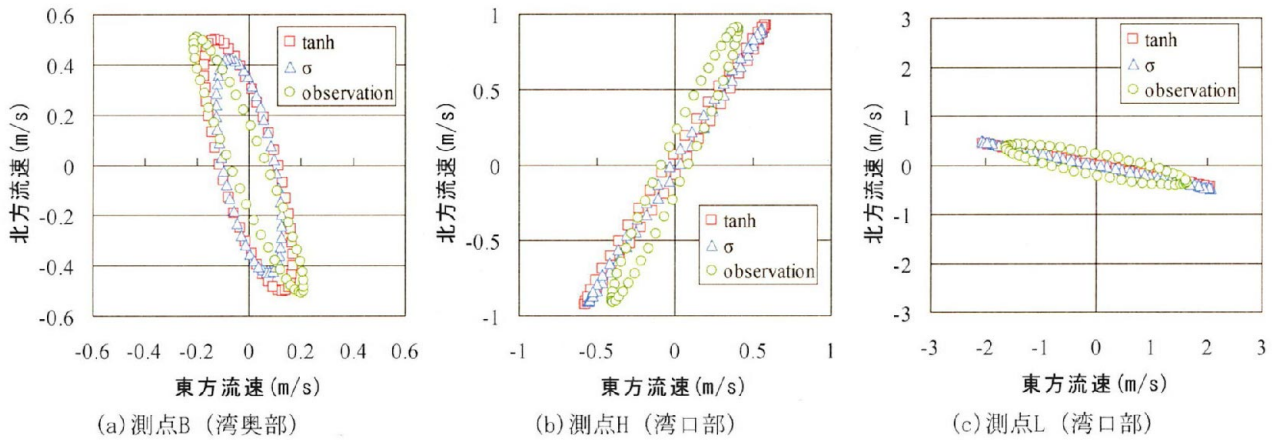


図-4 双曲型座標系と σ 座標系の計算結果の比較

モデルに反映させることが再現性向上に必要であると考えられる。

田中ほか⁶⁾の研究によれば、八代海を考慮した場合の有明海湾奥に位置する住之江における M_2 潮振幅の計算値と実測値の差は約0.02mであった。一方、考慮しない場合の差は0.1mと、考慮した場合の方が計算精度は良く、八代海との海水交換が有明海の潮汐変動特性を考える上で重要であると指摘している。また滝川ほか⁷⁾も同様に、有明海の固有周期が八代海の流況に変化をもたらし、有明海の潮汐変動を検討する場合は、相互の海域の影響を考慮する必要があると指摘している。

一方、干潟域を考慮した計算については、現在では様々な干潟の冠水・干出スキームが開発され、流動モデルに組み込まれている。内山⁸⁾は冠水・干出によって生じる流動構造の変化について考察をおこなっている。それによれば、干出を考慮する場合には、沿岸近くの流れは岸に直交する形となり、潮流楕円は直線的となる。一方で浅海域地形を考慮しない場合は、沿岸近くの流れは岸にほぼ平行となり、潮流楕円は円形に近い形となる。汀線近傍の浅海域は、リンや窒素といった栄養塩の循環、河川流入に伴う密度成層の形成、そして多種多様な生物の生息による海水浄化の場となり得るため、海水の流れの大きさだけではなく流向も正確に評価し、流動構造を把握することが非常に重要である。よって、潮間帯を考慮した計算が不可欠であると考えられる。

本研究では、以上の研究成果を参考に、計算領域に干潟域を考慮した有明・八代海として計算をおこなっていく。

3. 従来モデルとの比較計算

本研究では、 σ 座標系をベースとした海洋モデルPOMに双曲型関数を用いた座標系（以下では双曲型座標系とよぶ）を適用するが、ここでは従来モデ

表-1 計算条件

格子幅	400m×400m
格子数	225×350
鉛直分割数	13層(不等間隔)
タイムステップ	外部モード：1秒 内部モード：10秒
計算時間	20日
干潟判定水深	0.3m
最低水深	0.01m

ル(σ 座標系)との比較計算をおこない、計算結果を検討した。計算条件は表-1に示す。潮汐の境界条件として南・西境界面より振幅2m、周期12時間の正弦波に位相差をもたせて与え、助走期間の24時間までに振幅を徐々に増幅させた。なお解析は、流速の実測データ⁹⁾が確認されている2001年を対象とする。諫早湾は閉めきった状態であり、水温・塩分濃度に起因する密度場の計算、気象条件、河川流入の影響は省略している。ここで、格子幅を400mと設定しているが、有明海と八代海をつなぐ三角ノ瀬戸（湾口幅：250m）、八代海と外海をつなぐ黒ノ瀬戸（湾口幅：300m）をうまく表現しきれていない可能性がある。しかし、同様に格子幅400mで八代海の流動解析をおこなった村上ほか¹⁰⁾の計算結果より、八代海及び有明海沿岸の代表点における潮位増幅率の精度が比較的良好なものであったことから、本研究においても格子幅400mでの計算で瀬戸の表現が可能であるものとする。また、干潟判定水深を0.3mと設定しているため計算領域の質量バランス（質量保存則）が保たれていない恐れがあるが、この質量保存則に関しては過去に研究がなされており、例えば内山⁸⁾によれば干潟判定水深を0.2mで設定し開境界を流入出する体積フラックスと計算領域内の体積変化速度の比較、そして干出域面積当たりの質量変化誤差の検討をおこない、実用上は問題ない結果となっていることから、本研究でも影響は少ないものとして解析及び検討をおこなっていく。

図-3に示す測点L（湾口部）、測点H（湾央部）、測点B（湾奥部）の大浦、三角、口之津の3点にお

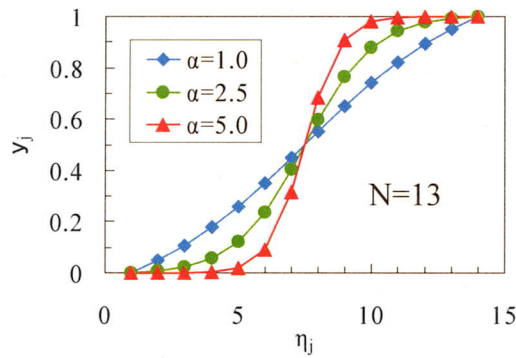
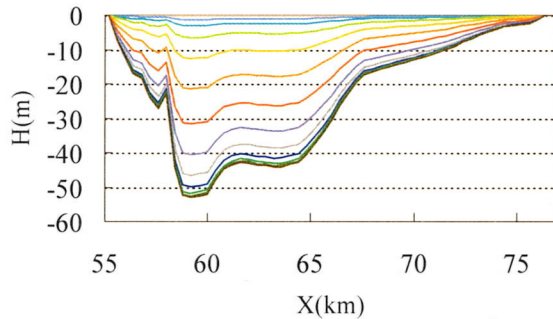
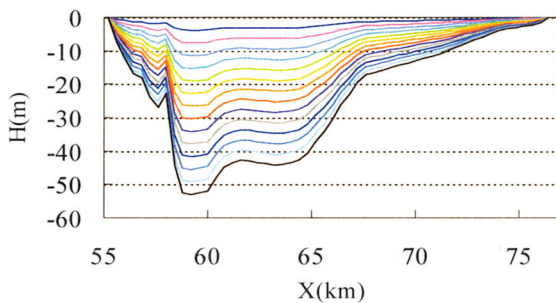


図-1 双曲型関数による座標変換



(a) 双曲型座標系



(b) σ座標系

図-2 鉛直格子の一例

析結果を検証するために、潮流・潮位の実測値と比較検討を実施した。

2. 数値モデルと解析領域

(1) 双曲型関数の導入

本研究で使用する基本数値モデルは、POMの中でも2001年に公開されたPOM2kを用いた。渡邊ほか¹⁾は、干潟域の冠水・干出を再現するために水深の閾値や底面摩擦係数の臨界値を設定し、プログラムを改良した。本研究では、浅海域における数値誤差要因の影響を軽減することを目的とし、表層及び底層で格子配置が密となる不等間隔格子を形成するために、式(1)に示す双曲型関数(tanh関数)を用いた関係式に利用して座標変換をおこなった³⁾。

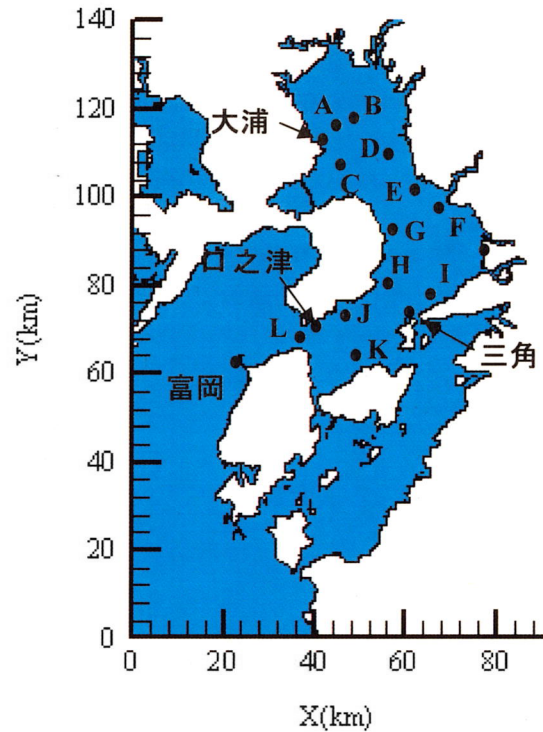


図-3 解析領域

$$y_j = 1 - \frac{\tanh \left[\alpha \left\{ 1 - \frac{2(\eta_j - 1)}{N} \right\} \right]}{\tanh(\alpha)} \quad (1)$$

ここで、 y_j ：変換後の層厚の比率、 η_j ：変換前の層厚の比率、 N ：層数を示す。 α を調整することで境界付近での格子を密に設定することができる(図-1)。本研究では、表層及び底層で総格子数の1/4が集まるように $\alpha=2.5$ を採用した。双曲型座標系と σ 座標系の鉛直格子の様子は、図-2に示す通りである。不等間隔格子への座標変換は、中心差分を用いて近似すると、変数変換は式(2)のように格子点における x_i の値が与えられていればよいことが知られている⁴⁾。

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} &= \frac{1}{dx/dX} \frac{\partial u}{\partial X} \\ &= \frac{1}{(x_{i+1} - x_{i-1})/2\Delta X} \frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{2\Delta X} = \frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{x_{i+1} - x_{i-1}} \end{aligned} \quad (2)$$

(2) 計算領域について

図-3に、本研究における計算領域と検討していく流速観測点12地点と検潮所3地点(大浦、三角、口之津)を示している。有明海の特徴として、干潟面積が日本総干潟面積の約40%を占めていることや閉鎖度指数が12.89⁵⁾と高く、同じ閉鎖性海域である八代海と数箇所の瀬戸を通じて海水交換がなされている等が挙げられるが、これらの特徴を正確に流動

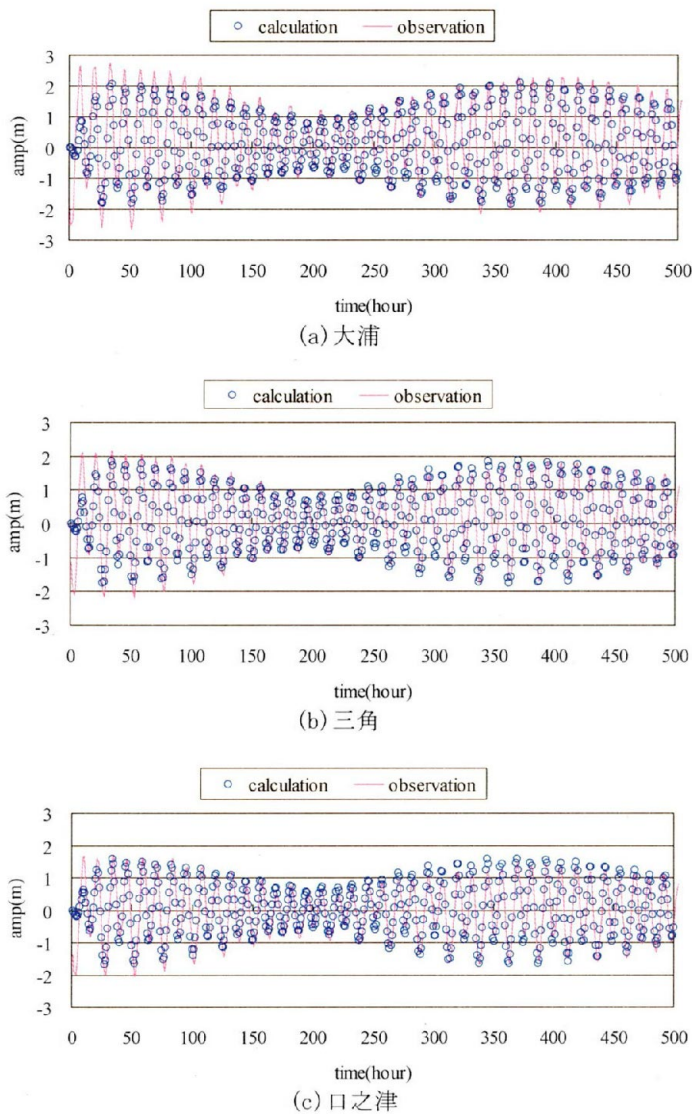


図-5 潮位変動

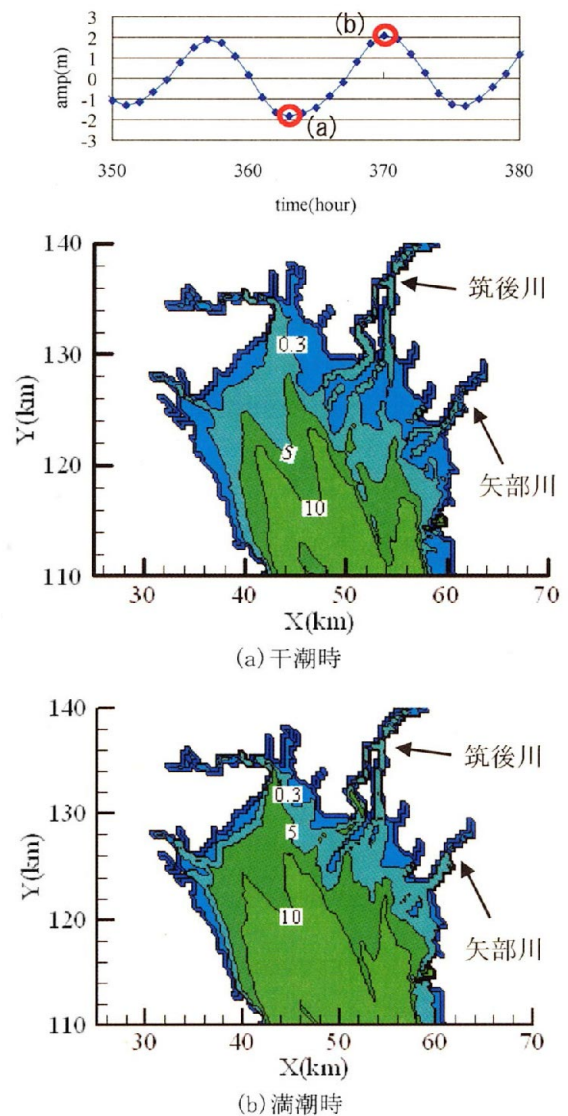


図-6 水深分布 (m)

ける潮流楕円の比較をおこなう。図-4に、測点3点における双曲型座標系、 σ 座標系、実測値の潮流楕円を示す。流速の計算値は断面平均の値であり、実測値は、2001年5月に実施された水深3m観測結果⁹⁾を用い、実測値を指標として双曲型座標系と σ 座標系との計算結果との傾向の比較をする。測点Lに関して、双曲型座標系と σ 座標系では、ほとんど差は見られなかった。実測値と比較すると、流向は同じ傾向を示しているが、長軸は大きく、短軸は小さく評価されている。測点Hに関して、双曲型座標系の方が長軸、短軸ともに若干であるが大きく評価されている。実測値とは、流速は測点Lの場合よりも近い値を示しているが、流向が時計回りにわずかにずれる形となった。そして測点Bに関して、流速、流向ともに相違が見られた。流速については、実測値の長軸との差に注目すると、双曲型座標系の方が σ 座標系に比べて実測値に近い傾向を示していることが図より確認できる。流向についても同様のことが言える。3測点の結果より、有明海灣口、灣央のよ

うな水深がある程度保たれる海域においては、座標系の違いによる流速の変化は見られないが、有明海灣奥のような水深が浅い海域においては、座標系により計算結果に違いが生じ、表層及び底層の格子幅を密にとった双曲型座標系の方が実測値に近い値を示すことが分かった。これは、底面摩擦の影響を受けやすい浅海域において、境界付近で急激に変化する流速をより正確に評価しているからであると考えられる。これらのことから双曲型座標系（不等間隔格子）を採用することで計算精度が良くなったと判断される。

4. 有明海への適用と解析結果

前章では南・西境界面より振幅2m、周期12時間の正弦波を与えて計算をおこなったが、再現をより実現に近づけるために、振幅に関する境界条件を変更して計算をおこなった。ここでは富岡における

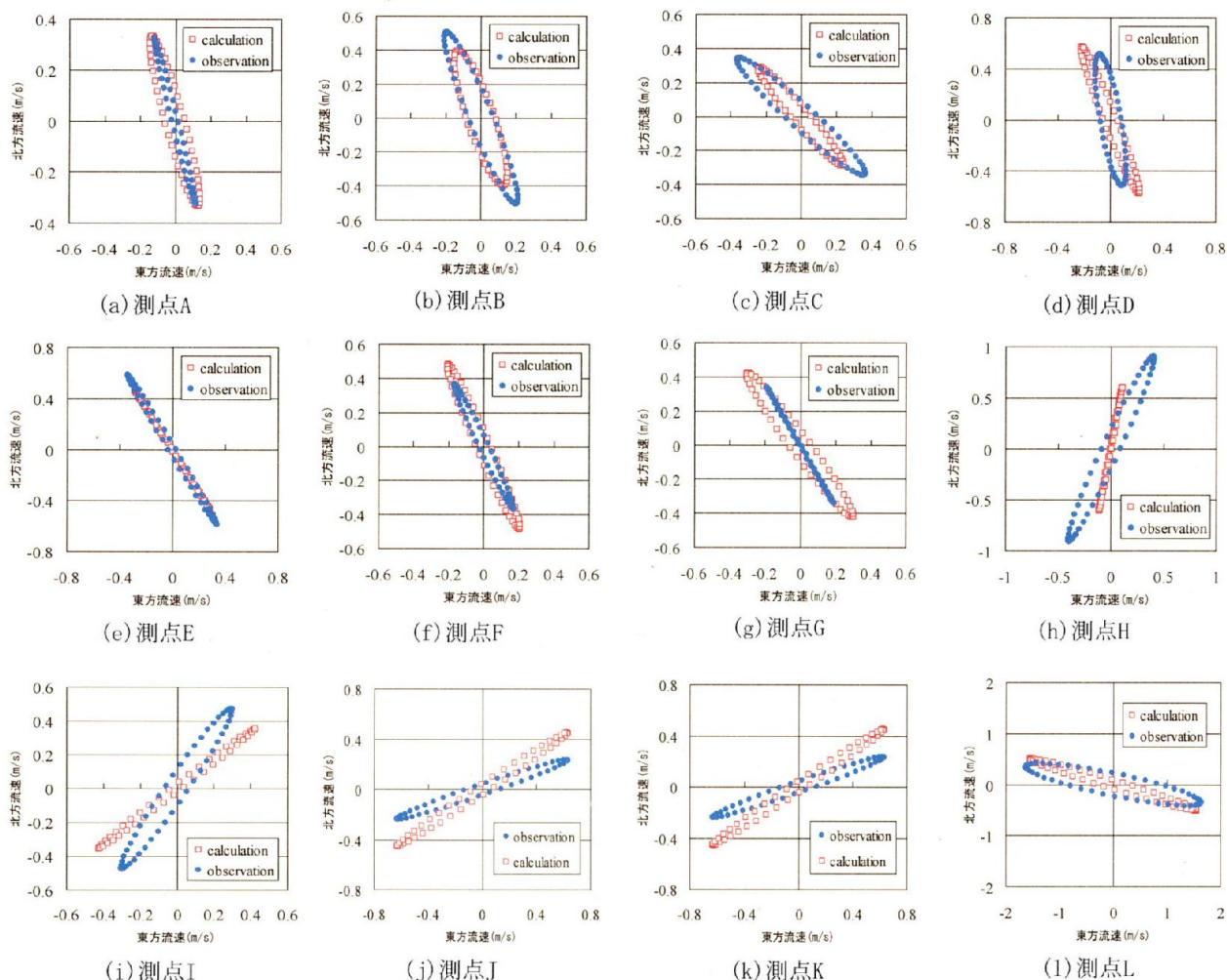


図-7 計算値と実測値の比較（潮流楕円）

潮位変動を参考に、主要4分潮（ M_2 , S_2 , K_1 , O_1 ）を与え、助走期間の24時間までに振幅を徐々に増幅させた。解析領域は図-3に示す有明・八代海で、解析条件は表-1に示すとおりである。以下で、潮位変動、水深変化、流速について検討していく。

図-5に、大浦、三角、口之津の各検潮所の実測潮位（2001年）¹¹⁾と計算潮位の計時変化を示す。助走期間の24時間までに振幅が徐々に大きくなっていることが確認でき、その後は実測値に近い傾向で潮位は変化している。有明海の湾奥における潮位変化を代表する大浦について見てみると、計算開始24～150時間までの間は振幅について計算値と実測値に最大1m以上もの差異があるが、それ以降は大きな差異は見られない。三角、口之津についても同様のことが確認できる。また、実測値では大潮時の振幅は時期によって異なっている（例えば大浦の計算開始50時間後あたりは振幅が約5mだが、計算開始400時間後あたりの振幅は約4m）が、計算値は同じ振幅で変化している。これに関しては、実現象をより精度良く再現するには計算時間が20日間では短かったということが要因のひとつとして考えられる。これに

対応するために計算時間を長くすることが必要となるが、大幅な差異は見られず、周期も実測値と同じように変化していることから、良好な結果が得られたと考えられる。

図-6に、大浦における大潮時の、干潮（計算開始363時間後）と満潮（計算開始370時間後）における水深分布を示す。水深5mラインに注目すると、満潮時における水深5mラインは干潮時には沖側に移動しており、水平移動距離が約8kmに達していることから、有明海湾奥では水位変動が大きいことを示している。また水深0.3mラインに注目する。本研究では水深閾値を0.3mと設定しており、0.3m以下は干出部分（干潟域）と判断している。この結果は実際の有明海の特徴とも一致していることから、干潟域の冠水・干出の再現が可能となっていることが確認できた。

図-7に、図-3で示した測点A～Lにおける計算値と実測値の M_2 分潮流楕円を示す。図より、測点によって一致の度合いに違いが出ていることが確認できる。水深が比較的小さい湾奥部から湾中央部の測点A～Fに関しては、流速の大きさ、向きに若干の

ずれが現れているが、計算値と実測値の傾向は近い。一方、水深が大きくなる湾央部から湾口部の測点G～Lに関しては、測点A～Fほどの精度は得られず、特に流向に差異が見られる。本計算では水温・塩分濃度に起因する密度場の計算、気象条件、河川流入の影響は省略しているため、事前に計算値と実測値が不一致となると予測していたが、湾奥部に位置する測点では両者は近い傾向を示した。これについては、これらの測点が位置する海域では、激しい鉛直混合のため成層化の形成がないため、また本プログラムで境界付近の流速を精度よく評価できたことがこのような結果につながったと考えられる。一方、測点G, H, Jが位置する湾央部から湾口部の島原半島沿岸域では、半島沖に沿って水深の深い底谷部で成層が形成されることが指摘される。そのため、密度場や気象条件等の影響を受けやすい海域だと考えられる。誤差が生じた要因のひとつとして、それらの条件を考慮していなかったことが示唆される。測点Hについては、密度場や気象条件等に加えて、八代海からの流出入の影響が要因として挙げられる。つまり、水温・塩分濃度に起因する密度場の計算、気象条件、河川流入の影響を含めた解析をおこない、計算結果を実現象に近づけることが今後の課題となり得る。また本研究では、浅海部である測点A, B以北の湾奥部の実測データが得られなかったため、比較検討ができなかったが、湾奥部は底面摩擦の影響を受けやすいと考えられるため、今後、湾奥部の計算結果の検討もおこなっていく必要がある。

5. 結 言

本研究では、 σ 座標系三次元流動モデルであるPOMに、表層及び底層付近で格子間隔を密にし、鉛直方向の格子配置を不等間隔とした手法を組み込み、干潟の冠水・干出を再現可能とした三次元流動解析をおこなった。以下にその主要な結果を示す。

- (1) 等間隔格子である σ 座標系と不等間隔格子である双曲型座標系を適用した場合と計算の比較をおこなった結果、有明海湾口部及び湾央部における潮流楕円に形状に大きな違いは現れなかったが、水深が低下する湾奥部においては、双曲型座標系の方が実測値に近い結果が得られた。
- (2) 振幅の境界条件として主要4分潮を与えた場合、潮位変動の計算結果は実測値を精度よ

く再現できた。また、本プログラムにおいても干潟の冠水・干出の再現が可能となった。

- (3) 計算値と実測値の潮流楕円を比較した場合、場所によって一致の度合いに違いがあるが、密度場、気象条件等を考慮せずとも実測値に違い傾向を示す箇所があった。このことは、海底地形や複雑な海岸線の形状及び瀬戸等の地形条件が深く関わるため、計算格子の分割数増大等を含め、今後ともより高精度の計算手法の進展を図っていく必要がある。

参考文献

- 1) 渡辺枢, 田中健路, 滝川清: 干潟を有する閉鎖性海域における σ 座標系三次元流動解析, 平成14年度～17年度科学研究費補助金(基盤研究(A))「有明海干潟環境の回復・維持方策に関する研究」研究成果報告書, pp. 47-66.
- 2) 入江政安, 中辻啓二, 西田修三: 密度差の大きい流動場への改良 σ 座標系モデルの適用, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 361-365, 2003.
- 3) 林俊一郎, 大本照憲, 矢北孝一, 平川隆一: 一般座標系regular格子による開水路乱流のDNS, 水工学論文集, 第44巻, pp. 593-598, 2002.
- 4) 数値流体力学編集委員会編: 非圧縮性流体解析, 東京大学出版会, 1995.
- 5) 環境省ホームページ <http://www.env.go.jp/>, 参照 2009-5-1
- 6) 田中昌宏, 稲垣聡, 山本克則: 有明海の潮流及び三次元流動シミュレーション, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 406-410, 2002.
- 7) 滝川清, 田中健路, 森英次, 渡邊枢, 外村隆臣, 青山千春: 八代海の環境変動の要因分析に関する研究, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 916-920, 2004.
- 8) 内山雄介: 海底面の力学過程を考慮した冠水・干出スキームの開発と三次元 σ 座標海洋流動モデルへの適用, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 351-355, 2004.
- 9) 日本水産資源保護協会 <http://ay.fish-jfrca.jp/ariake/>, 参照 2009-1-20
- 10) 村上啓介, 上久保祐志, 古松琢美, 上原功: 三次元流動モデルによる八代海の流動特性の解析, 海洋開発論文集, 第20巻, pp. 1031-1036, 2004.
- 11) 日本海洋データセンター <http://www.jodc.go.jp/>, 参照 2008-12-5