

干潟を考慮した流動モデルの構築と 有明海への適用

DEVELOPMENT OF 3D FLOW MODEL FOR TIDAL FLAT AND APPLICATION OF THE MODEL TO THE ARIAKE SEA

西田修三¹・入江政安²・橋本基³・海江田洋平⁴

Shuzo NISHIDA, Masayasu IRIE, Motoi HASHIMOTO and Yohei KAIEDA

¹正会員 工博 大阪大学大学院助教授 工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

²正会員 博(工) 大阪大学大学院助手 工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

³学生会員 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

⁴修(工) 九州電力株式会社 川内調査所土木課 (〒895-0132 薩摩川内市久見崎町1753-2)

Tidal flats are important for the ecosystem in estuaries. Some researches using three-dimensional flow (hereafter 3D flow) and water quality model are conducted, but treatment of tidal flats is neglected because it is difficult to use a scheme for the flow of tidal flats in 3D flow analysis. In this paper, a scheme for the dry-to-wet and wet-to-dry dynamics of the tidal flat is applied to three idealized topographies and the Ariake Sea. This scheme represents the movement of shoreline very well. In the flow analysis of the Ariake Sea, three topographies are used: A) the tidal flat is treated as it is by the contribution of the scheme, B) it is changed to the water area with a certain water depth, C) it is reclaimed to be excluded from the computation area. The analysis with third one does not have good results because flow becomes weak. The result of the analyses with the first and second one represents the observed results very well. The 3D flow model with the dry-wet scheme works well in the flow simulation and becomes foundations of the 3D flow and water quality model for the tidal flats.

Key Words : 3 dimensional flow model, dry-wet scheme, tidal flat, water quality, Ariake Sea

1. はじめに

有明海の湾奥では6mを超える潮差が発生し、干潮時には広大な干潟が出現する。その面積は日本の現存干潟の40%にもなると言われている。この干潟域は、物理的には干出・冠水現象、または、移動水際境界として捉えられるが、干潟には多様な生態系が育まれ、複雑な物質循環系を形成している。これまで、有明海の流動構造に関する現地調査^{1)・2)}が実施されるとともに、干潟を考慮した数値解析^{3)・4)}も行われ、その特性が明らかになりつつある。

本研究では、干潟域を含む閉鎖性海域に適用可能な流動・水質・底質モデルを構築し、有明海に適用するとともに、湾内の物質循環を明らかにすることを最終目標としている。その第1ステップとして、水際線の移動と干出冠水を繰り返す干潟域において、連続計算が可能なように流動モデルを改良し、改良された流動モデルを用い

て干潟域の流動特性について解析を行う。次いで、有明海の実地形に適用し、現地観測データによる検証も含め有明海の流動特性を明らかにする。また、湾奥部の干潟の存在が有明海北部海域の流動と物質輸送にどのような影響を及ぼしているかについても解析を行う。

2. 3次元流動モデルの概要

沿岸域の流動シミュレーションに用いられる流動モデルは多種あるが、主な違いとして鉛直座標系が挙げられる。鉛直方向の座標系にはデカルト座標系、 σ 座標系、一般鉛直座標系などがある。本研究で対象とする有明海は、潮差が大きいためデカルト座標系では第1層を非常に厚くする必要があり、表層の再現性に劣る。さらに有明海は浅海域が多いため、層数も多く取ることができない。そのため、本研究では、 σ 座標系を用いた流動モデルであるPOM(Princeton Ocean Model)を使用すること

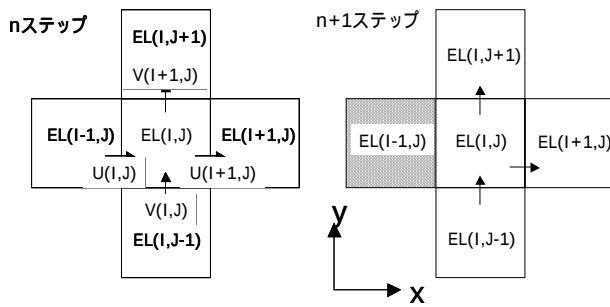


図-1 水域部が陸域部になる場合の扱い

とし、干潟域へ適用できるように改良を行う。

POMは水域部が水域部のまま、陸域部が陸域部のままであれば計算に支障はない。一方、水域部が干出したり、陸域部が冠水したりすると計算が不能になる。つまり、そのままでは水際境界が移動する流れ場は取り扱いえない。そこで、POMにおいても干出・冠水(Wetting and Drying)現象が扱えるように、新たなアルゴリズムの開発が進められている⁵⁾。

また、POMの他にEFDC、ADCIRC、MEC等の流動モデルにおいても、干出・冠水のアルゴリズムの提案がなされている^{6), 7), 8)}。このように種々のモデルにおいて、いまだにアルゴリズムの改良が続けられているのは、干潟域の計算の安定性と精度の問題、さらには物質収支の問題が残されているためである。ここでは、物質収支が保たれるように以下の方法により干出・冠水のモデル化を行った。

まず、平均海面を基準面とした潮位を EL 、その基準面から海底までを水深 H 、 $D(=EL+H)$ を全水深とする。潮位が低下し、水域部が干上がっていく場合を考える。全水深 D が任意の基準値 ε より小さくなった時、陸域部であると判定する。本研究では ε を0.1mとした。その時、そのメッシュの流速を0m/s、潮位を0mと設定した。

逆に、潮位の上昇により陸域部が水域部に戻る時は、周囲4つのメッシュにおける潮位の平均値をそのメッシュの潮位とし、その潮位とそのメッシュの基準面からの水深 H の和、つまり全水深 D が ε より大きくなった時、水域部であると判定する。水域部になったステップの流速は0m/sとした。

しかし、このままでは収支がとれなくなる。例として、 $(I-1, J)$ の格子が n ステップに水域部から陸域部になる場合を考える(図-1)。 $(I-1, J)$ の格子が水域部のままならば、連続式である式(1)を満たしている。しかし、 $(I-1, J)$ の格子が水域部から陸域部になる場合は、速度 $U(I, J)$ が0m/sになるために連続式は式(2)になり、 $n+1$ ステップの潮位 EL が急激に変化してしまい、連続式を満たさなくなり、計算が発散する。そこで、 $\Delta x / \Delta t$ を波速 $(gD)^{1/2}$ に置き換えた式(3)を導入した。その結果、連続式が満たされ、発散することなく潮位 EL もなめらかに変化するようになる。陸域部から水域部になる場合も同様に考える。

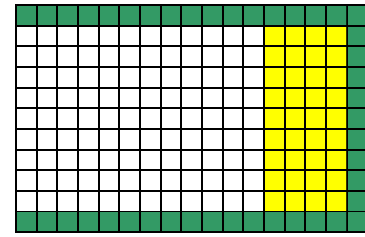


図-2 モデル地形(平面図: 緑色の領域は陸域, 黄色の領域は干出する領域)

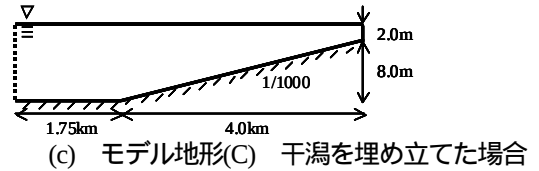
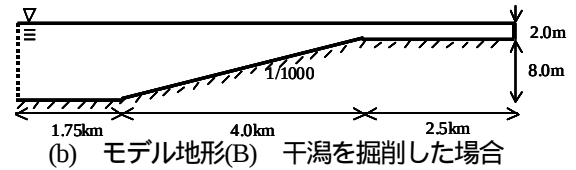
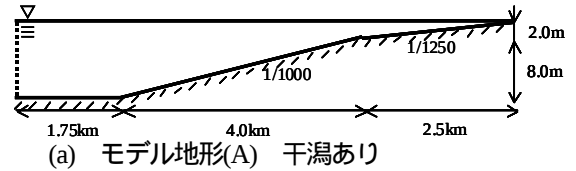


図-3 モデル地形(縦断面図)

$$\frac{EL_i^{n+1} - EL_i^n}{\Delta t} + \frac{D \times U_{i+1}^n - D \times U_i^n}{\Delta x} + \frac{D \times V_{j+1}^n - D \times V_j^n}{\Delta y} = 0 \quad \dots(1)$$

$$\frac{EL_i^{n+1} - EL_i^n}{\Delta t} + \frac{D \times U_{i+1}^n}{\Delta x} + \frac{D \times V_{j+1}^n - D \times V_j^n}{\Delta y} = 0 \quad \dots(2)$$

$$\begin{aligned} EL_i^{n+1} &= EL_i^{n+1} - \frac{\Delta t}{\Delta x} \times D \times U_i^n \\ &= EL_i^{n+1} - \sqrt{\frac{D}{g}} \times U_i^n \end{aligned} \quad \dots(3)$$

3. 干潟域のモデル計算

この手法を組み込んだ3次元流動モデルの検証を行うために、2ケースの簡単なモデル計算を行った。

(1) 流況への影響

これまでの干潟域の流動解析では、簡単のため、干出しないように、ある程度の水深を与えたり、陸域と見なして、計算領域から除外して扱われることも多かった。そこで、図-2および図-3に示す3つのモデル地形、(A)干潟を考慮したもの、(B)干潟を掘削したもの、(C)干潟を埋め立てたもの、を用いて、流況の違いについて調べてみる。地形(A)においては今回提案したスキームを用いての計算となり、地形(B)及び地形(C)においては従来のPOMでも計算が可能である。計算領域は8km × 4.5km、

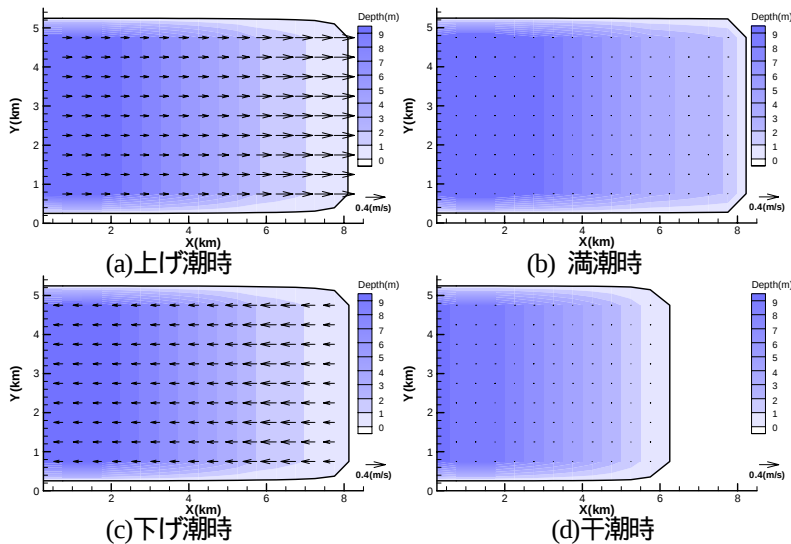


図-4 モデル地形(A)による計算結果

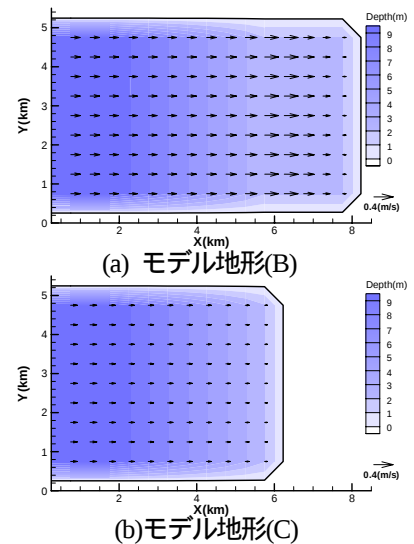
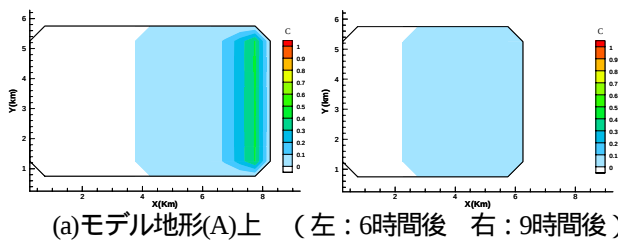
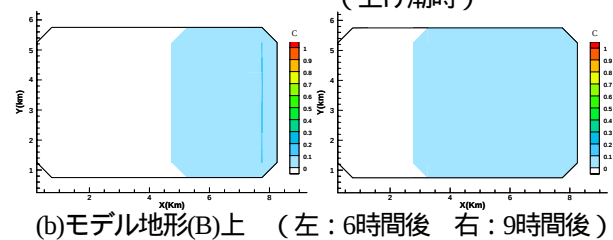


図-5 モデル地形(B),(C)による計算結果
(上げ潮時)



(a)モデル地形(A)上 (左:6時間後 右:9時間後)



(b)モデル地形(B)上 (左:6時間後 右:9時間後)

図-6 表層濃度の水平分布

水平方向の格子間隔は500mの等間隔で分割し、鉛直方向には10層に分割した。図に示した左側断面は水深10mの開境界である。底面勾配は図に示すとおりである。差分時間間隔12sで、振幅1.5m、周期12時間の正弦波の潮位変動を開境界に与え、90日間の計算を行った。

計算結果を図-4に示す。ベクトルは表層流速を表し、コンターは水深を表している。着色領域が水域、その周囲境界が水際線となっている。図-4(b)が満潮時、図-4(d)が干潮時の結果である。これらの図より明らかなように、水際線の移動が、下げ潮時、上げ潮時ともに良好に再現されている。水深が浅くなる水際付近でも異常な流速値は現れていない。また、地形(B)及び地形(C)における上げ潮時の流速分布と水深を図-5に示す。干潟を掘削したモデル地形(B)の場合、その流速場はモデル地形(A)の流速場とほぼ同じであることがわかる。しかし、干潟上の流速は上げ潮時で、モデル地形(A)の場合30～40cm/s、モデル地形(B)の場合10～30cm/sを示し、モデル地形(B)の流速の方が小さくなった。

干潟を埋めたモデル地形(C)の場合、開口部付近から汀線にかけて、全ての領域で流速が少なく見積もられているのがわかる。これは水表面積の減少により、同じ潮位変化に対しても開境界断面を通過する流量が減少するためである。開口部付近の最大流速は、地形(A)の場合、19cm/s、地形(B)の場合、18cm/s、地形(C)の場合、12cm/s、となっている。干潟を排除して流動解析を行った場合、干潟前面だけではなく領域全体において、この

ような流速低下が現れてしてしまうことが予想される。

(2)物質拡散の変化

流速場に大きな差異がみられなかったモデル地形(A)およびモデル地形(B)において、干潟域の物質拡散について、その違いを検討する。

濃度が0の様な初期条件の下、20日間の予備計算の後、最奥部(右端)の格子列に濃度を1として与え、その後2日間の物質拡散を調べた。与える物質量をほぼ同じにするために、地形(A)では全層に、地形(B)では水面から40cmまでの層に与えた。

干出に際し、計算スキーム上僅かに残る水塊の物質量の収支を保つため、干出格子のスカラ量を保存し、再び冠水するときに、保存した値を読み出すようにした。このようなスキームを用いることで、広大な干潟がある場合でも、干出・冠水の際にスカラ量が保存されることが確認できた。将来、生化学的作用を考慮した干潟内の底質モデルを組み込むことにより、干潟に残存・浸透する水塊の水質変化も容易に計算できるようになる。

図-6に濃度の水平分布を示す。地形(A)の場合、干潟上で、濃度の高いまま残存している。これは干出時にスカラ量を保存したためで、再度冠水されると、スカラ量が元のメッシュに戻り、再び移流拡散される。また、地形(A)の方が沖合いへの拡散が早いこともわかる。

上記の2種類の計算結果に基づけば、本研究で提案したモデルにより干潟の干出を伴う計算が可能であるとい

える．有明海のように干潟が出現する海域でもこのモデルを用いることにより，干潟を考慮した流動計算が十分な精度で可能であるものと考えられる．

4．有明海における3次元流動シミュレーション

ここでは干潟が存在する有明海の流動解析に，このモデル適用を試みる．現地観測データによる検証を行うために，計算期間は堤ら¹⁾による水質調査が実施された2001年9月20日から有明プロジェクト¹⁾による一斉観測が行われた10月16日までの27日間とした．

(1)計算の概要

有明海の流動計算をするにあたり，潮汐調和定数の得られている網場，富岡を海側境界とした．この2地点を結ぶ断面を開境界とするとともに，設定を簡単にするため，実際の地形を回転させて，図-7に示す領域で計算を行った．計算領域は59.5km×73kmで，水平方向格子間隔は有明海の湾内では500m×500m，湾外では1km×500mとした．水深はJODC(Japan Oceanographic Data Center)で公開されている500mメッシュ水深データを用いた．鉛直方向は10層に分割した．

開境界における境界条件は，海上保安庁発行の日本沿岸潮汐調和定数表に掲載されている各分潮成分を網場，富岡間で線形補間して与えた．河川については，有明海に流入する主要な7河川を考慮した．河川流量は平成2年から平成8年の9，10月平均流量(日本河川水質年鑑)を与え，河口水温は観測値をもとに23とし，河口塩分は0psuとした．また，干拓調整池からの排水量¹⁾を干潮時から3時間流入させた．排水の水温は23，塩分は0psuとした．

初期密度場として，2001年9月20日に堤ら¹⁾により行われた水質調査の結果に基づき，熊本県側の浅海域で塩分および水温が低くなることを考慮して，初期の水温および塩分を設定した．また，差分時間間隔は，外部モードで1秒，内部モードで12秒とした．

(2)計算結果

計算期間中の大潮期にあたる10月16日の干潮時(14時)と満潮時(0時)の水深分布を図-8に示す．コンターは水深を表し，着色域が水域を，無着色域が陸域を表している．満潮時には，有明海の湾奥部および諫早湾を中心に干潟が出現している様子がわかる．後述の図-9(右)などに示されている現地地形図の干潟(灰色着色部)と比較してもよく一致している．

図-9に下げ潮最強時(10月16日12時)における計算結果とほぼ同時刻の観測結果を示す．ベクトルは水面下2.5mの流速を表しており，コンターは水深を表している．計算結果は観測結果とよく一致している．諫早湾湾口のE-Lineでは南岸側で東向き約50cm/sの流れになってお

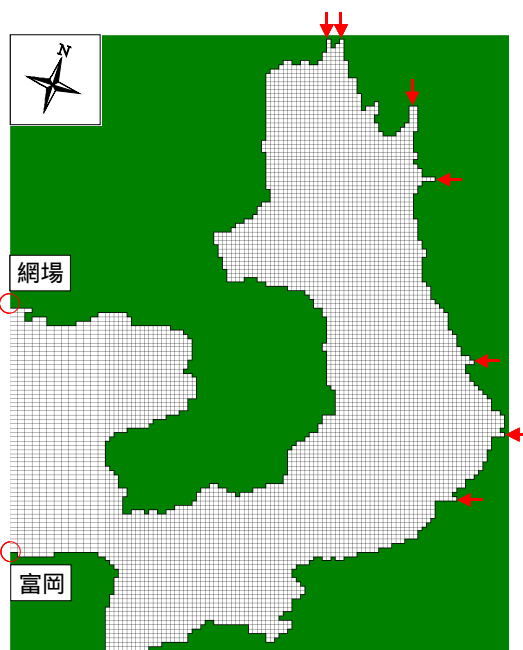


図-7 計算対象領域(矢印は流入河川)

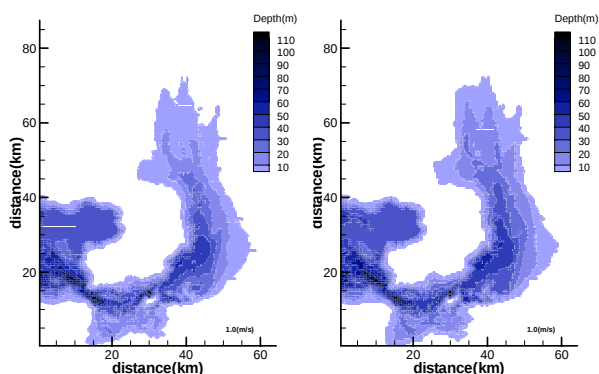


図-8 水深分布(左:干潮時 右:満潮時)

り，北岸側は弱い南東向きの流れとなっている．D-Lineは測線中央部付近で流れが強くなっており，C，H，B-Lineでは島原半島沿いに大きな流速が出現している．図-10に上げ潮最強時(10月16日18時)における計算結果と観測結果を示す．E-Lineでは計算結果，観測結果とも南岸から少し沖合いで西向きの強い流れになっており，北岸近くでは北西向きの弱い流れになっている．C，B-Lineの島原半島沿いの速い流れ，有明海湾口における東向きの非常に強い流れも良好に再現できている．

図-11は下げ潮最強時(10月16日12時)におけるA-Lineの断面流速の計算結果と，ほぼ同時刻に行われた観測結果を示す．A-Lineは湾口部を横断する測線である．右岸(北岸)より沖へ1.5kmから1.8kmの海域の33m以深の空白部は，流速データの欠測を表している．計算結果を見ると，測線の中央部付近で流速が最大で，西向きの流れになっている．鉛直方向には，流速はあまり変化していない．南北両岸付近はやや中央に向かう流れを示している

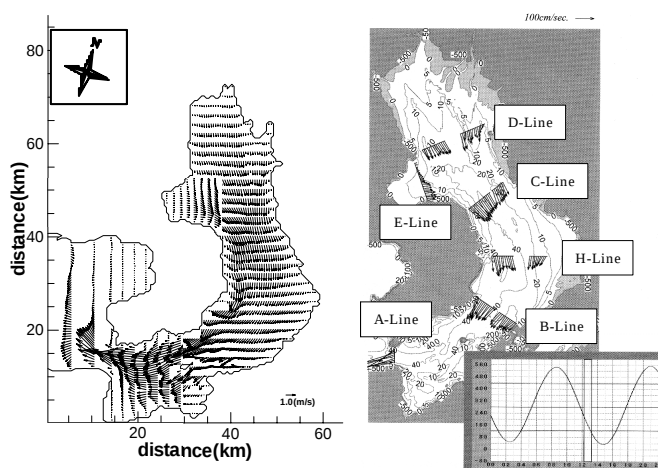


図-9 下げ潮最強時の計算結果(左)と観測結果(右)¹⁾

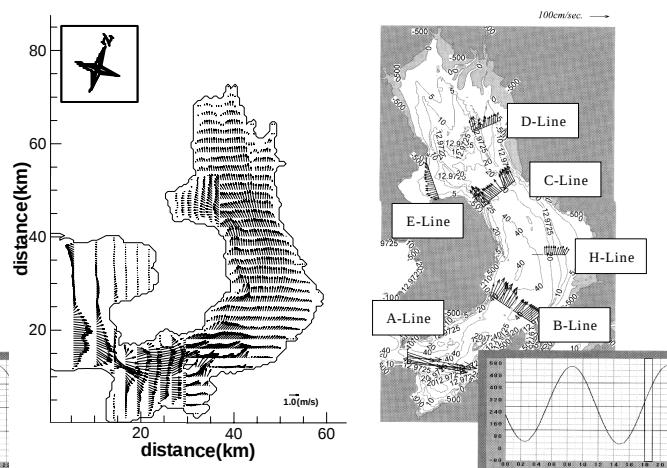
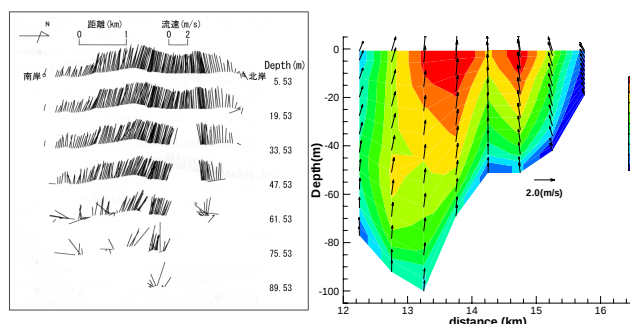
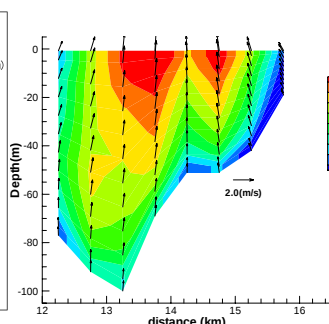


図-10 上げ潮最強時の計算結果(左)と観測結果(右)¹⁾

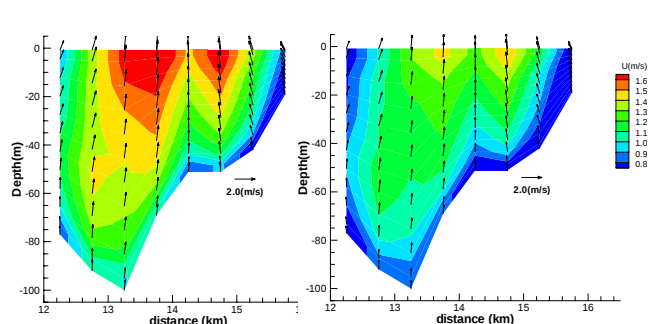


(a) 観測結果¹⁾

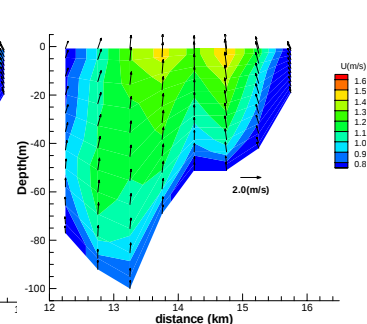


(b) 計算結果

図-11 下げ潮最強時のA-Lineにおける断面流速分布

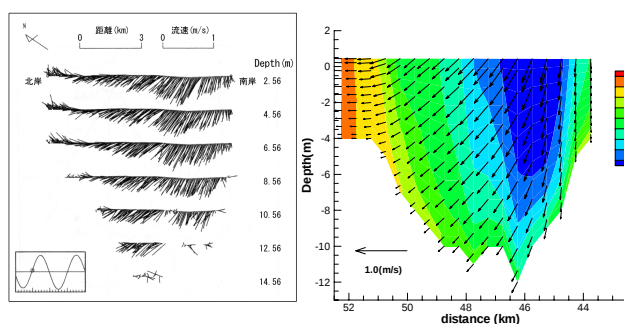


(a) 干潟掘削

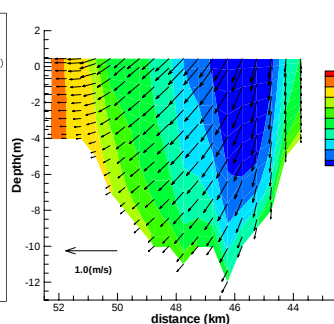


(b) 干潟陸地化

図-13 下げ潮最強時のA-Lineにおける断面流速分布

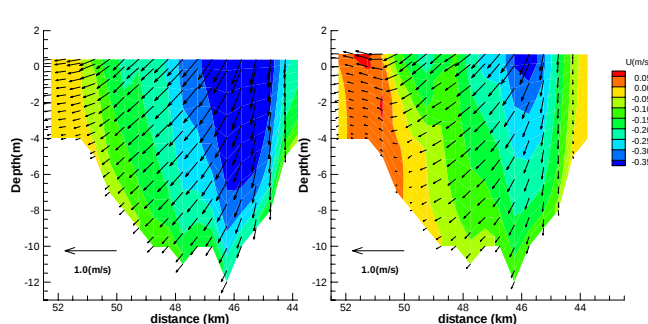


(a) 観測結果¹⁾

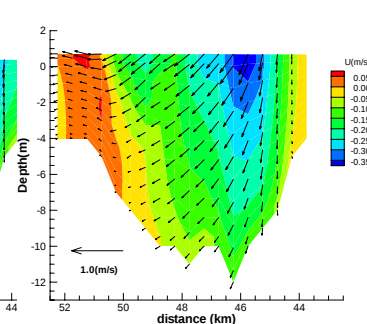


(b) 計算結果

図-12 上げ潮最強時のE-Lineにおける断面流速分布



(a) 干潟掘削



(b) 干潟陸地化

図-14 上げ潮最強時のE-Lineにおける断面流速分布

が、流速は小さい。観測結果と比較すると、流向に関してはほぼ一致しているが、流速は中央部付近で計算結果のほうが若干小さくなっている。

諫早湾内のE-Lineにおける上げ潮最強時(10月16日6時)の水平流速の計算結果と観測結果を図-12に示す。計算結果では、南岸より2km沖に離れた所で最大流速(約0.5m/s)が出現している。流向は北岸付近以外では西向き(流入方向)の流れとなっており、北岸付近は北西向き(流出方向)の流れとなっている。観測結果と比較すると、測線南側から湾内に流入し、北岸付近でのみ流出していく構造を良く再現している。(図-12(b)のオレンジ色は流出を表している。)

紙面の都合で他の断面・潮時については省略するが、計算結果は観測された流況を良好に再現しており、本モ

デルにより十分な精度で、干潟を含む海域の流動計算が可能であると考えられる。

(3)有明海の流動に及ぼす干潟の影響

上述のように、干潟を考慮したモデルによって良好な流動の再現性が得られた。ここでは、干潟の存在が流況に及ぼす影響について検討する。

図-13に下げ潮最強時のA-Lineにおける断面流速分布を示す。湾口部の流況においては、干潟を掘削した場合は、干潟を考慮した場合(図-11(b))とほぼ同じ流況を示し、差異はほとんど認められない。一方、干潟を陸地化した場合は、考慮した場合に比べて、流速が大きく低下している。最大流速を示す北岸寄りの表層において、流速は干潟を考慮した場合が179cm/s、埋め立てた場合は

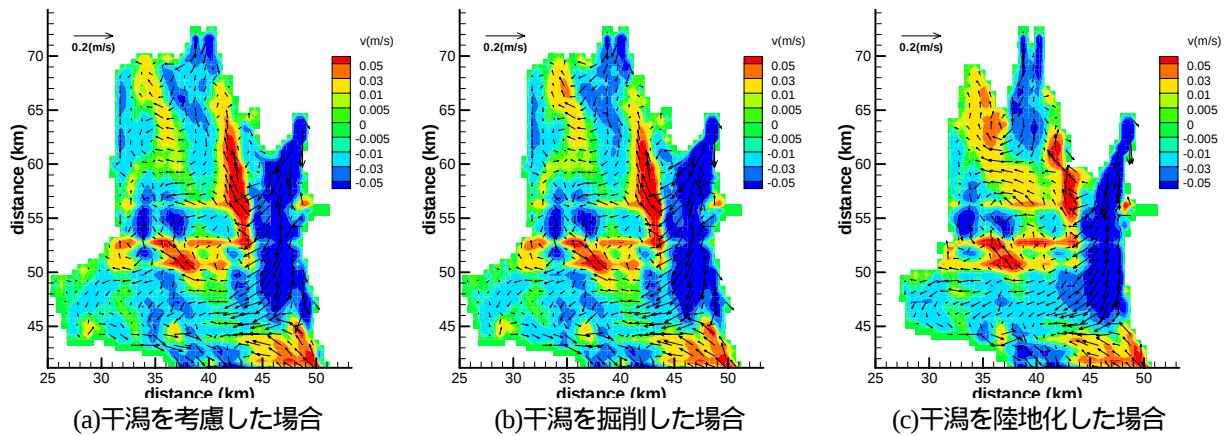


図-15 湾奥部表層における残差流分布

150cm/sであった。また、上げ潮最強時のE-Lineにおける断面流速分布を図-14に示す。このときはほぼ全断面で諫早湾へ流入している。現地観測結果に認められる北岸近傍の湾外への流出を明確に再現できている点で、干潟を陸地化した場合の計算結果が優れているように判断される。しかし、流速値が現地観測に比べて小さく(最速流速：現地観測で75cm/s，陸地化の場合43cm/s)，精度の良い計算結果とはなっていない。

有明海の湾奥部表層における残差流の計算結果を図-15に示す。干潟を考慮した場合、六角川・嘉瀬川(河口位置は図-7の)からの河川水は干潟領域を緩やかな流速で北西岸寄りに流出している。一方、干潟を陸地化した場合は、河川水が南に流出し、流出断面が狭められるために、流速も大きくなっている。

したがって、干潟を考慮した場合、これまでの干潟を掘削してシミュレーションを実施した場合と比べて、少なくとも同程度以上の精度を持っている。干潟を陸地化して無視した場合は、湾全域の流速が小さくなるとともに、干潟近傍の流況はかなり異なり、物質輸送の解析には大きな誤差を生じるものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、干潟域を有する海域において、流動・水質・底質を一体的に解く3次元流動水質モデルの構築に向けて、干潟の干出・冠水をモデル化した。そして、モデル地形による計算を行い、その妥当性を検討するとともに、有明海に適用して、その検討も行った。本研究の主たる結論は以下のとおりである。

干潟が干出・冠水するスキームを構築した。干出時にはスカラー量を保存しておくことで、その保存性を確保することができた。

干潟を考慮した場合、モデル地形および有明海の両者において、連続的に汀線の移動が実現できた。

干潟を考慮せず、干潟を陸地化して簡易計算を行った場合、流速精度の顕著な低下がみられた。

干潟が広がる有明海の流況解析への適用において、

十分な精度をもつことが確認された。

本研究により、干潟での物質交換や生化学的作用を考慮した流動水質モデルの構築に向けて、十分な素地を得ることができた。今後、さらに底質を考慮した水質モデルを組み込み、干潟域の物質循環の解明に向けたモデル化を行っていく予定である。

本研究の一部は、科学研究費補助金・基盤研究(A)(1) (課題番号14205075, 代表者 小松利光) により行われたことを付記する。

参考文献

- 1) 有明プロジェクト研究チーム：有明プロジェクト中間報告書(その1), 160pp., 2002.
- 2) 磯部雅彦, 鯉淵幸生：連続観測による有明海の現状把握, 沿岸海洋研究, 第42巻, 第1号, pp.27-33, 2004.
- 3) 田中昌宏, 稲垣聡, 山本克則：有明海の潮汐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.
- 4) 千葉賢, 武本行正：諫早湾潮受け堤防設置に伴う有明海の流況変化に関する研究, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.376-380, 2003.
- 5) L. Y. Oey : A wetting and drying scheme for POM, Ocean Modelling 9, pp.133-150, 2005.
- 6) Z. G. Ji, M. R. Morton and J. M. Hamrick : Wetting and Drying Simulation of Estuarine Processes, Estuarine, Coastal and Shelf Science 53, pp.683-700, 2001.
- 7) 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.
- 8) Z. Yu and Y. Kyojuka : A Simplified Moving Boundary Treatment in the MEC Model, International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol.14, No.4, 2004.

(2005.9.30受付)