

有明海の潮汐及び三次元流動シミュレーション

田中昌宏*・稲垣 聡**・山本克則***

有明海の環境の基本である流動構造を明らかにするため、潮汐及び三次元流動の数値シミュレーションを実施した。有明海の特徴である潮汐の増幅現象を正確に再現すると共にそのために必要な条件として、計算領域の広さと八代海を含んだ計算が必要であることを示した。三次元計算では、1973年夏季の実測データを対象としたナウキャストを行い、モデルが実現現象を再現できることを確認した上で、数値実験を併用して、残差流系の力学構造を明らかにした。有明海には東京湾などに見られる湾奥の時計回りの環流が無く、反時計回りの流れが形成される原因が、浅海部の潮汐による強い鉛直混合にあることを示した。

1. はじめに

有明海は、日本最大の潮位差を持つ潮汐作用と筑後川をはじめとする大河川を通じた陸からの多量の物質（土砂と栄養塩）の流入によって広大な干潟が形成され、豊かな生態系が創られている。しかし、アサリ、タイラギ等の二枚貝は1970年代半ばから減少の一途をたどり、また最近では2000年秋に新種の赤潮（リゾソレニア）が発生し、それが原因と考えられるノリの不作が起こる等、有明海全体の環境悪化が顕著になってきている。日本海洋学会（2001）は、環境悪化の根本的な原因は、潮汐振幅の減少にあり、それに伴う流動の減少と干潟の干出面積の減少が海域の自己浄化能力を低下させたのではないかとのコメントを出した。潮汐振幅の変化の原因については、有明海の面積の減少、平均水位の上昇、外海潮汐振幅の減少、の3つの要因が考えられているが、それぞれの要因の寄与率ははっきりしていない（灘岡, 2002）。また環境悪化は有明海全体の現象であり、その原因を探るためには、水質環境のベースとなる物質輸送の変化を知る必要があるが、流れの定性的特性についてはある程度明らかにされているものの（井上, 1980）、力学的な内部構造については十分検討されていない。

本研究では、有明海の環境の基本である流動構造を明らかにするため、潮汐及び三次元流動場の高精度な数値シミュレーションを試みた。有明海の潮位差が大きい理由は、有明海の大きさ（水深と水平距離）によって決まる長波の固有周期が半日周潮（ M_2 潮）に近い事によって、共振を起こすためであり、その再現には計算領域及び境界条件の適切な設定必要となる（滝川・田淵, 2002）。本研究ではこの点をまず詳細に検討した。次に物質輸送を支配する三次元流動場の再現には、潮流、密度流、吹送流すべてを考慮し、しかも干潟部の干出（汀線の移動計算）を含めた計算が必要となる。我国の内湾流動モデル

の多くが採用している鉛直座標を固定したレベルモデルは、大潮位差下では密度場を十分再現できない根本的な問題を抱えている。著者らのモデルは、密度場を高精度に再現できる σ 座標を用いたモデルであり、汀線の移動計算も可能である。本研究ではこのモデルにより有明海の三次元流動を再現し、その内部構造を明らかにした。

2. 計算の方法

(1) 計算モデル

モデルはDELFT3D・鹿島モデル（Delft Hydraulics, 1999）を使用した。本モデルは鉛直方向に静水圧近似を仮定した三次元流動モデルで、水平方向に直交曲線座標、鉛直方向に σ 座標を用いている。ただし、潮汐計算では鉛直1層つまり平面二次元計算とし、三次元計算では鉛直多層で計算した。いずれも汀線の移動計算を行った。

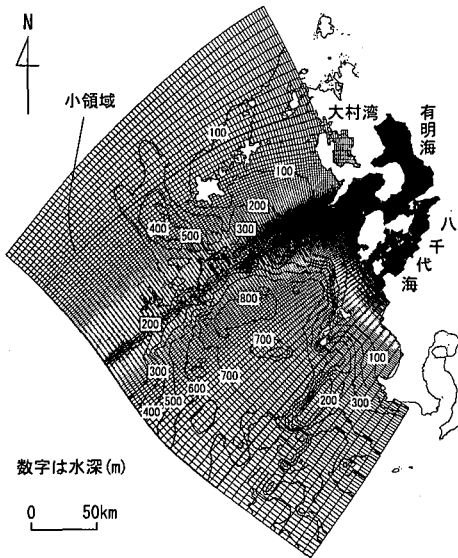
(2) 潮汐シミュレーション

上記した様に有明海の潮汐計算は、共振現象の再現計算であり、正確な水深データの入力、計算範囲及び開境界での潮汐の振幅・位相の適切な設定が必要である。

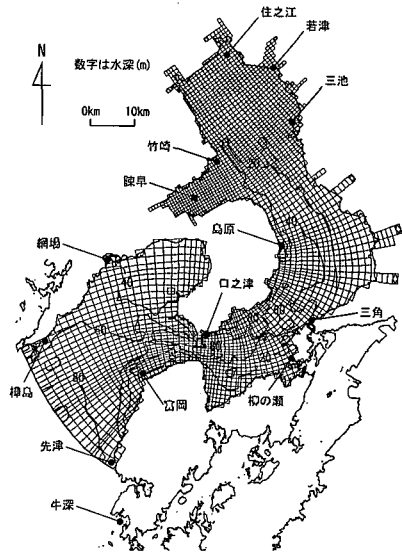
水深データについては、基本的にはJODCが販売している電子海図データを使用した。下記の二つの点を考慮した。第一は干潟部の水深データである。海図は基本的に船の航行用を目的としているため、浅海部のデータはほとんどない。ただし、古い紙ベースの海図には部分的に干潟部のデータが記載されている。本研究では、このデータを丹念にデジタル化し、計算の水深データとした。第二は、有明海は潮位差が大きいため、潮位の基準面が9つのブロックに分割され、それぞれ異なっている。したがって、購入したデジタルデータそのままでは基準の違いにより計算用の水深としては正確ではない。計算ではこの補正を行ったデータを用いた。（潮位基準面は湾口部と湾奥部では90 cm異なっている。

計算領域については、その大きさと水深によって決まる長波の固有周期が半日周潮からできる限り離れるようにするため、領域をできる限り大きくとる必要がある。さらにその開境界上の潮汐の振幅、位相を正確に与える

* 正会員 工博 鹿島建設技術研究所 グループ長
** 正会員 工修 鹿島建設技術研究所 主任研究員
*** 正会員 工修 鹿島建設技術研究所 主任研究員



図一1 潮汐計算（二次元計算）の領域及び格子



図一2 三次元計算の領域及び格子と検潮所位置

必要がある。当然東シナ海の海上には検潮所はないため、ここでは、全球を対象とした国立天文台の潮汐予測システム (<http://b50a.miz.nao.ac.jp/staffs/nao99/>) のデータを使用した。

図一1に計算領域及び計算格子を示す。九州沿岸の東シナ海では潮汐は南北方向に伝播するため、計算格子はできる限り同位相線に沿うようにした。

(3) 三次元シミュレーション

三次元計算の検証は、湾全体をカバーする長期観測の公表データとしては唯一である海上保安庁水路部(1974)の1973年8～9月のデータを対象とした。さらに、季節変化及び力学構造を詳しく検討するために、1998年を対象に、淡水流入の多い6月と淡水流入が少なく季節風が卓越する12月を対象に計算を実施した。三次元計算では、潮汐の他に河川からの淡水流入、風、大気との熱収支など、流れの外力はすべて考慮し、それぞれの条件を実測データに基づいて時系列で与えるシミュレーション(ナウキャスト)を行った。計算条件を表一に示す。

なお、3次元の計算は計算時間が膨大となるため、計算領域は図二のように狭くし、開境界の水位条件は両端の検潮所の先津と樺島の調和定数を与え、八代海は考慮しなかった。鉛直方向の層数は、事前検討計算で5層から20層まで行い、計算結果に大きな違いが無かったため、5層とした。

3. 計算結果

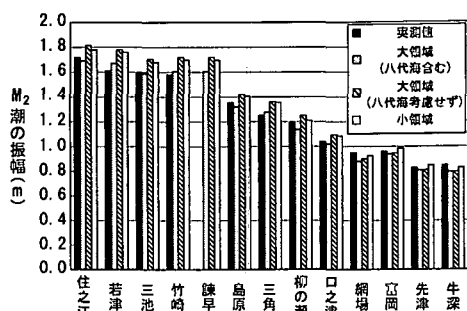
(1) 二次元計算結果

a) 潮汐振幅

図一3に有明海周辺の主な検潮所の M_2 潮の振幅を実測値と共に示す。図中には、図一1に示す小領域での計算結果及び八代海を考慮しない計算結果も示されている。八代海を含む大領域の計算結果は、橘湾から有明海にかけて潮汐振幅の増幅をよく再現している。一方、領域が狭い場合には振幅が大きくなり、また八代海を考慮しない場合も振幅が実測より大きくなっている。したがって、

表一 三次元計算の計算条件

Run	Run-1 (検証計算)	Run-2	Run-3
計算期間	1973年8月1日～9月11日	1998年5月1日～6月30日	1998年11月1日～12月31日
対象期間	8月28日～9月11日	6月16日～6月30日	12月17日～12月31日
初期条件	塩分	31.50	34.00
	水温	25.00	18.67
河口条件	流量	流量年表(日変化)	流量年表(日変化)
	塩分	0.00	0.00
	水温	28.60	13.00
協会条件	潮汐	主要4分潮 (M_2, S_2, K_1, O_1)	主要4分潮 (M_2, S_2, K_1, O_1)
	塩分	8/1 表層 30.75 底層 34.37 9/18 表層 34.16 底層 34.54	34.00
	水温	8/1 表層 28.60 底層 24.00 9/18 表層 24.30 底層 23.50	21.78
			18.67
風	長崎海洋気象台 (3時間変化) 風速 1.5 倍	島原市 (時間変化) 風速 1.5 倍	島原市 (時間変化) 風速 1.5 倍
気象条件	長崎海洋気象台 (3時間変化, 日射は日平均)	長崎, 佐賀, 熊本気象台平均 (日変化)	長崎, 佐賀, 熊本気象台平均 (日変化)
水平渦動粘性・拡散係数	20.00 (m^2/s)	20.00 (m^2/s)	20.00 (m^2/s)
鉛直渦動粘性・拡散係数	$k-\epsilon$ モデル	$k-\epsilon$ モデル	$k-\epsilon$ モデル

図-3 各検潮所での M_2 の振幅 (m)

八代海との海水交換も有明海の潮汐変動特性を考える上で重要であると言える。

以上より、有明海の潮汐を再現するためには、計算領域を本研究程度に広く取ることと、八代海を考慮することが必要である。

b) 潮汐残差流

流動特性については三次元計算で詳しく検討するが、残差流の内部構造を考えるために、ここでは潮汐残差流を調べ、残差流全体への潮流の寄与を整理しておく。図-4に潮汐残差流を示す。潮流は波動であるため、その残差すなわちネットの流れは主に渦度の発生する場所で生じる。まず最も幅が狭くなる湾口部（早崎瀬戸）では、流速が最大になると同時に回転方向の異なるペアーの渦が湾口の内外に見られる。八代海につながる三角ノ瀬戸にも、渦度の発生に伴って強い流れが存在する。その他にも湾口部では地形の水平的特性によって幾つかの渦が見られる。一方島原半島に沿っては、浅い地形の起伏に起因すると考えられる幾つかの渦の存在が特徴的である。

(2) 三次元計算結果（検証計算）

a) 水温、塩分

まず水温、塩分について、計算値（表層）の実測値との関係を図-5に示す（大潮時）。水温は、計算結果の方が1～2℃高くなっているが、全体的に高い方にシフトしており、湾口一湾奥方向の水温の変化特性はおおむね再現されている。一方塩分については、計算結果と実測値はほぼ一致していると言える。

b) 残差流

次に、残差流の計算結果を、実測の表示に合わせて図-6に示す。流れは、全体的には湾奥部では筑後川河口付近から西に向かい、西岸に沿って南下し、東シナ海へ流出する。細かく見ると、諫早湾湾口北側で時計回りの渦があり、島原半島北部に沿っては、全体的な流れとは逆の北向きの流れも部分的に見られる。また湾口部（早崎瀬戸）では、潮汐残差流に見られた渦が卓越して見られる。このような特徴的な流動パターンを含め、流向・

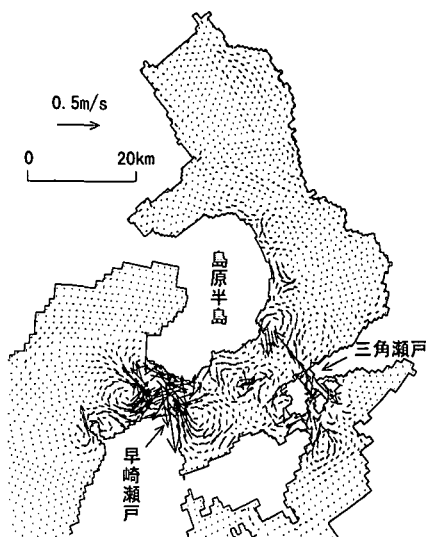


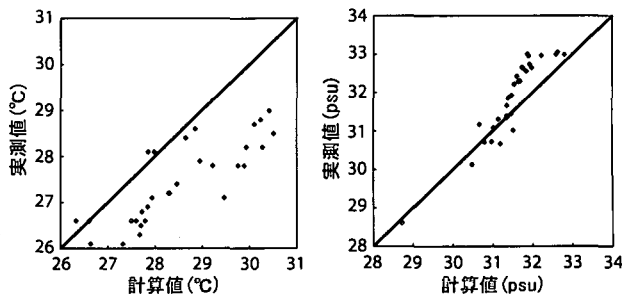
図-4 潮汐残差流（計算結果）

流速共にシミュレーションは良く再現している。

(3) 残差流の季節変化

残差流の季節変化を明らかにするために、河川流量の多い6月と少ない12月について検討する。図-7(a)に6月の表層、(b)に底層の残差流を塩分と共に示す。表層残差流は検証計算と比較すると、河川流量が多いため、流速が大きくなっているが、パターンはほぼ同じである。底層は湾外から湾奥へ向かう流れがあり、特に底谷部に沿って強くなっている。塩分の分布から、湾奥の浅海部と湾口部は鉛直に良く混合しているが、島原半島に沿う20 mより深い領域は成層しており、流れも二層流となっている。一方図-7(c)の12月の表層の分布を見ると、淡水流入が少ないために密度流成分が小さく、潮汐残差流による渦が相対的に卓越している。ただし、ここに示す残差流は15日間の平均であるため明確に現れていないが、冬季の流れは風による吹送流が重要である。

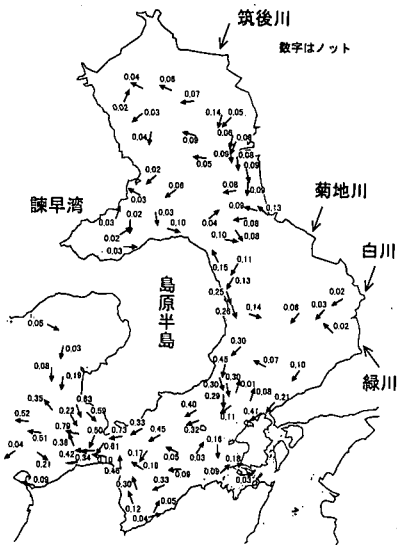
以上のように有明海の残差流系は、夏季は密度流と潮汐残差流が、冬季は潮汐残差流と吹送流が卓越する。



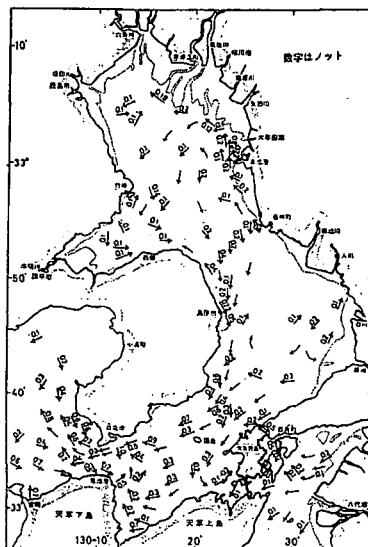
(a) 水温（表層）

(b) 塩分（表層）

図-5 検証結果の結果（大潮時の実測との比較）

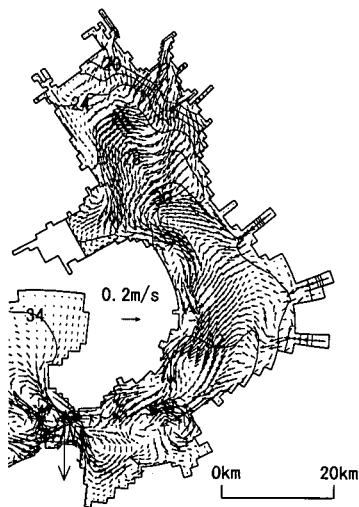


(a) 計算結果

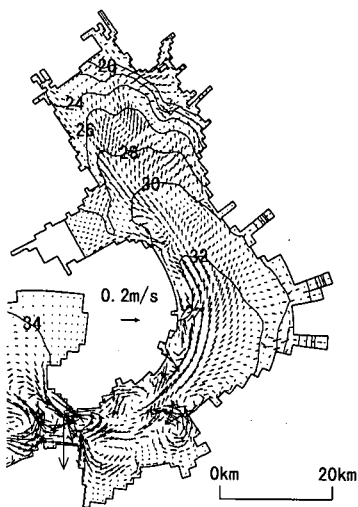


(b) 実測値 (井上, 1980)

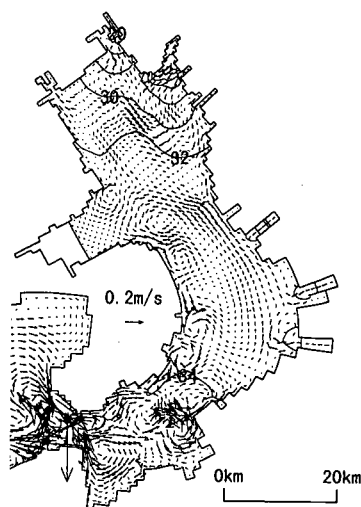
図-6 1973年8月28日～9月11日の残差流 (表層)



(a) Run 2 表層



(b) Run 2 底層



(c) Run 3 表層

図-7 残差流及び塩分の水平分布 (1998年6月及び12月)

4. 残差流の力学構造の検討

以上の有明海の残差流を東京湾など他の湾と比較すると、有明海では湾奥に高気圧性の渦による時計回りの環流が見られない。逆に筑後川を始め東岸に位置する大河川からの淡水は、流量の大小に関わらず、流出後湾奥に向かっており、反時計回りの流れを形成している。

そこで、この原因を探るために、数値実験を行った。問題を単純化するために、Run 2と同じ期間で熱収支と風は考慮せず、密度は塩分のみの関数として、表-2に示

すように、有明海の特徴である潮汐作用と水平環流の特性を考える上で重要なコリオリ力の影響を検討した。

計算結果を図-8, 9に示す。潮汐を与えない場合には浅海部での鉛直混合が生じないために強い成層が形成され (図-9(b)), 残差流はかなり異なったパターンとなる。特に白川、緑川沖の流れは大きく異なり、淡水は湾奥に向かわず、湾口方向に流れる。また湾奥では、時計回りの環流

表-2 数値実験の条件

No.	潮汐	コリオリ力
Ex-1	有	有
Ex-2	無	有
Ex-3	有	無

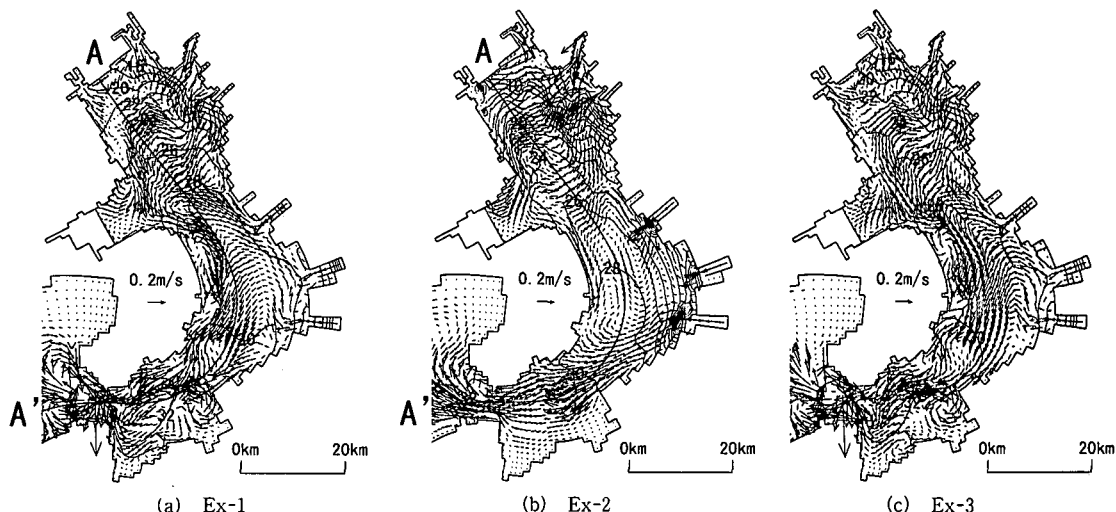
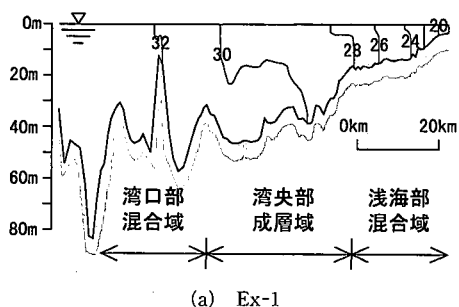
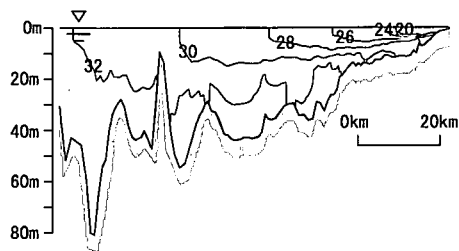


図-8 数値実験の結果 (表層残差流及び塩分)



(a) Ex-1



(b) Ex-2

図-9 数値実験結果 (塩分断面図 (A-A'))

な潮汐作用により浅海部では激しい鉛直混合が生じ河口部の成層は維持できない。このため、軽密度水は表層から流出できず、一旦湾奥に流れる。一方、島原半島沖に沿っては水深の深い底谷部があるため、この部分では成層が形成される。このため湾奥に溜まった軽密度水は、この島原半島の成層域の表層から流出することになる。この流れはコリオリ力の影響を受け、沿岸ジェットとなって幅の狭い強い流れを形成する。

5. おわりに

本研究では、有明海の環境悪化の原因を探るため、その基本となる潮汐及び三次元シミュレーションを実施し、実現象を再現できることを確認すると共に、再現計算に必要な条件を明らかにした。さらに数値実験を通して三次元流動の力学構造を明らかにした。

謝辞：本研究を進めるに当たり、沿岸環境関連学会連絡協議会（代表：灘岡和夫東工大教授）主催のシンポジウム等の情報が役立った。また（株）CTIの田口浩一氏よりデータ及び情報を頂いた。記して謝意を表します。

参考文献

- 井上尚文(1980)：有明海の物理環境，月刊海洋科学，Vol. 12, pp. 116-126.
- 海上保安庁水路部(1974)：有明海，八代海海象調査報告書，p. 39.
- 滝川 清・田淵幹修 (2002)：有明海の潮汐変動特性について，第51回理論応用力学講演会論文集，pp. 19-22.
- 灘岡和夫 (2002)：有明海の潮汐・流動・水質変化と陳早湾締め切りの影響，第51回理論応用力学講演会論文集，pp. 27-30.
- 日本海洋学会海洋環境問題委員会 (2001)：有明海環境悪化機構究明と回復のための提言，海の研究，Vol. 10, pp. 241-246.
- Delft Hydraulics (1999)：DELFT 3D-FLOW, A simulation program for hydrodynamic flows and transport in 2 and 3 dimensions; release 3.05.

が重なったパターンとなっている。一方、コリオリ力を考慮しない場合は、東岸の河口沖から湾奥に向かう流れの傾向には大きな変化がないが、湾中央の南下流の特性に違いが見られる。つまり、コリオリ力の影響は、島原半島に沿う南下流を沿岸ジェットにして流れを集中・加速する効果として顕著に表れている。

以上から、有明海の湾奥の残差流系の特徴である反時計回りの流れの力学機構は以下のように考えられる。他の内湾では潮汐混合が弱いために河口部で成層が維持され、湾外からの高密度水の流入を補償する流出流は表層から生じる(エスチャリー循環)。一方有明海では、大き