

# 大出水時における伊勢湾の海水流動の 再現計算とその流動構造について

NUMERICAL SIMULATION OF COASTAL CURRENTS IN ISE BAY  
AT LARGE FLOODS AND ANALYSIS OF FLOW STRUCTURES

村上智一<sup>1</sup>・川崎浩司<sup>2</sup>・山口将人<sup>3</sup>・水谷法美<sup>4</sup>

Tomokazu MURAKAMI, Koji KAWASAKI, Masato YAMAGUCHI and Norimi MIZUTANI

<sup>1</sup>正会員 博(工) 名古屋大学助手 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

<sup>2</sup>正会員 博(工) 名古屋大学助教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

<sup>3</sup>正会員 修(工) (株)中電シーティーアイ 環境情報部 (〒450-0003 名古屋市中村区名駅南一丁目27番2号)

<sup>4</sup>正会員 工博 名古屋大学教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

Coastal currents in Ise Bay are closely related to river inflow as well as meteorological disturbances. Particularly, large floods have a great effect on coastal currents and density structures. It is, therefore, of importance to examine flow and density structures at large floods.

This study is aimed at discussing the flow and density structures in Ise Bay at large floods from a perspective of numerical analysis. A hindcasting based on an Atmosphere-Ocean-Wave coupled model is performed using the observation data including river discharge at large floods. The validity of the coupled model is verified by comparing between the observation and computation results of coastal currents. Furthermore, the estuarine circulation and density distribution in Ise Bay at large floods are examined based on the numerical results.

**Key Words :** Ise Bay, large floods, river inflow, Atmosphere-Ocean-Wave coupled model

## 1. 緒言

伊勢湾は、木曾三川からの淡水流入の影響が大きく、特に出水時においては、河川流量の増加に伴ってエスチュアリー循環が卓越し、湾内の流動や水質を大きく変化させる(山尾ら, 1996)<sup>1)</sup>。とりわけ夏季の大出水は、河川プリュームの発達に伴う成層化や陸上からの大量の有機物の流入のために貧酸素水塊が形成され、社会的問題となっている<sup>2)</sup>。よって、これらの環境問題に対する予測や対策を講じるためには、大出水時の海水流動を精度良く計算し、それに基づいて流動・密度構造を明らかにする必要がある。

大出水時の海水流動を精度良く計算するためには、河川流量の適切な取扱いに加えて、河川プリュームの移動や破壊等の挙動に大きな影響を与える風などの気象場の評価が重要である。さらに、定量的な解析を行うためには、河川流量や気象場の評価のみならず、内湾の流動・密度構造に大きく関わる内湾と外洋との海水交換の影響

や気象場と海洋場のインターフェースとなる海面境界過程において働いている大気・海洋・波浪場の間の相互作用も含めて評価を行い、伊勢湾の海水流動を支配する様々な物理過程をより多く再現する必要がある。しかしながら、これまでの出水時の海水流動計算では、海面境界過程の取り扱いの難しさや計算機環境の問題から、そうした扱いはほとんどなされていない。

そこで本研究では、外洋との海水交換を適切に扱うことのできる多重 $\sigma$ 座標系沿岸海洋モデルCCM<sup>3)</sup>に、気象モデルMM5<sup>4)</sup>および波浪モデルSWAN<sup>5)</sup>を結合させた大気-海洋-波浪結合モデルを用い、大気、海洋、波浪場を1つの系として一体的に取り扱うことで、より現実に近い伊勢湾の海水流動を再現する。そして、年平均流量の10倍以上の大出水時が含まれる2001年6月14日~27日を計算期間とし、結合モデルに観測された河川流量を与えることで大出水時の海水流動計算を行う。次いで精度検証を行い、結合モデルが大出水時の海水流動の解析を可能とする精度を有していることを示す。その後、この計算結果を解析し、流動・密度構造について検討を行う。

## 2. 計算方法

本研究で使用した大気-海洋-波浪結合モデルは、気象モデルにMM5、海洋モデルにCCM、波浪モデルにSWANを用いている。

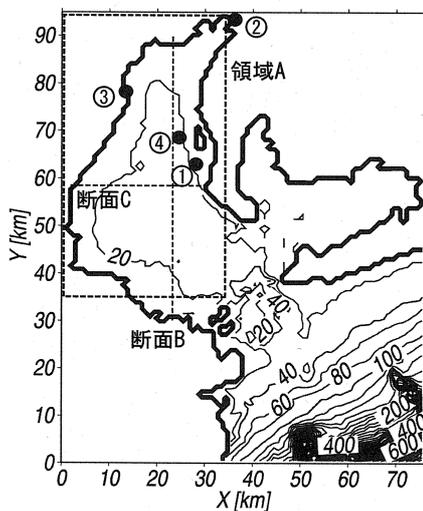
海洋モデルの計算領域は、伊勢湾の流動・密度構造と密接な関わりのある外洋水の進入を精度良く扱うために、伊勢湾のみならず太平洋を含めて広く計算領域(水平格子間隔30秒, タイムステップ10秒)を設けた(図-1)。このため、計算領域内の水深は約1000m~数mとなり、内湾と外洋では水深差が極めて大きくなる。従来、このような条件に対して複雑な海底地形を正確に表すことができる $\sigma$ 座標系の海洋モデル(POMなど)が用いられてきた。しかしながら、 $\sigma$ 座標系は、鉛直格子間隔が水深に連動して増減するので大水深の外洋において鉛直差分精度が極めて悪くなる。そのため、内湾に外洋から海水が進入する場合、そこでの海水流動計算にも大きな数値誤差が生じることになる。特に、気象場との結合計算を行い、その影響を取り扱う場合、流速・水温・塩分などの鉛直変化が大きくなるため、この問題の影響も大きくなる。これは、従来、 $\sigma$ 座標系の問題点として盛んに議論されてきた地形が急峻な場所で生じる水平圧力勾配項や水平拡散項の数値誤差に比べて影響が大きく本質的である。筆者らはこの問題を解決するために、計算領域を鉛直方向に多数に分割した上で各領域に対してそれぞれ $\sigma$ 座標を適用する多重 $\sigma$ 座標を提案し、これを用いた多重 $\sigma$ 座標系沿岸海洋モデルCCM (Coastal ocean Current Model)<sup>3)</sup>を開発した。そこで本研究では、このモデルを用いて海洋場を計算することにした。CCMの基礎方程式はプリミティブ方程式系、乱流モデルはMellor-Yamada Level2.5乱流クロージャモデル<sup>6)</sup>であり、これらは有限差分法で離散化されている。そして、境界条件として潮位、風による運動量輸送、日射による熱交換、降水蒸

発による水収支、大気圧、河川流入を扱うことができる。また、多重 $\sigma$ 座標の適用領域数は、夏季伊勢湾において1領域の $\sigma$ 座標(従来の $\sigma$ 座標)から6領域の多重 $\sigma$ 座標まで精度検証を行った村上ら(2004)<sup>3)</sup>の結果を基に、5領域(各領域の層数は海面に近い領域から順に7, 5, 5, 5, 5層)とした。CCMの初期値は、中部国際空港株式会社・愛知県企業庁による観測データ、気候値(関根, 1996)<sup>7)</sup>およびNOAA海面温度データを基にして作成した。境界値は、国立天文台で開発された日本周辺潮汐モデルNAO99.Jb<sup>8)</sup>を用いて潮位を計算し、それを開境界条件として与えた。さらに、国土交通省中部地方整備局による伊勢湾の主要10河川(木曾川, 長良川, 揖斐川, 庄内川, 鈴鹿川, 雲出川, 榑田川, 宮川, 矢作川, 豊川)の毎時観測データを河川の境界値として与えた。

気象場の計算に用いたMM5(5th generation Mesoscale Model)は、ペンシルベニア州立大と米国大気研究センターで開発された非静力学平衡・完全圧縮・非膨張系の領域気象モデルである<sup>4)</sup>。このモデルでは、雲微物理過程(Reisner graupel scheme)、積雲対流過程(Reisner scheme)、大気放射過程(Cloud radiation scheme)、大気境界層過程(Mellor-Yamada Eta scheme)、地表面過程(5-layer soil scheme)など、内湾の海水流動に大きな影響を及ぼす大気の物理過程が考慮されている。MM5の計算領域は、本州を覆う大領域I(水平格子間隔18km, 鉛直層数20層, タイムステップ54秒)、中部地方を覆う領域II(水平格子間隔6km, 鉛直層数20層, タイムステップ18秒)および伊勢湾を覆う領域III(水平格子間隔2km, 鉛直層数20層, タイムステップ6秒)とし、これらのネスティング計算を行った。また、MM5の初期値・境界値には、気象庁メソ客観解析値(6時間間隔, 10km格子, 20層)を使用した。

波浪場の計算に用いたSWAN (Simulating Waves Nearshore)は、デルフト工科大学で開発された沿岸浅海域に対応した第3世代波浪推算モデルである<sup>9)</sup>。このモデルの前身である波浪推算モデルWAM (Wave Model)で考慮されていた、風から波へのエネルギー輸送項、4波共鳴非線形相互作用による成分波間でのエネルギー輸送項、白波砕波によるエネルギー散逸項、海底面摩擦によるエネルギー散逸項に加えて、浅水砕波によるエネルギー散逸項、浅水領域で顕著となる3波共鳴非線形相互作用による成分波間でのエネルギー輸送項が追加され、深海域の外洋から極浅海域の内海・内湾まで対応できるようになっている。計算領域は、海洋モデルと同様、図-1に示すとおりである。なお、水平格子間隔は30秒, タイムステップは5分とした。また、初期場は、MM5で計算された初期海上風速場を元に定常解を診断し、これを用いた。

そして、これらのモデルは、PC-Linux上のシェルスクリプトで結合され、MM5から出力される風速、摩擦速度、潜熱・顕熱フラックス、短波・長波放射、蒸発・降水量、気圧、CCMから出力される海面水温、流速、水面変位、SWANから出力される波浪による粗度高さ、波齢を10分毎に各モデル間で交換している。



①: MT局, ②: 名古屋, ③: 四日市, ④: SB4

図-1 計算領域および観測点; コンターは水深で20m間隔

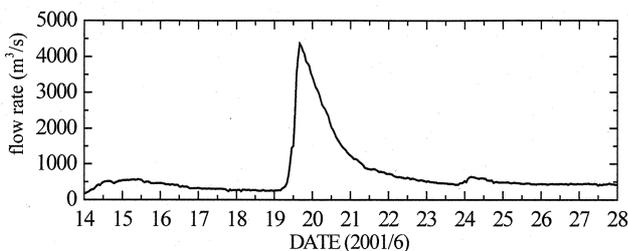


図-2 観測された木曾三川(揖斐川・長良川・木曾川)の河川流量

計算期間は、出水時の前後の期間を含めて2001年6月14日～27日と設定した。図-2は、この期間において観測された木曾三川(揖斐川・長良川・木曾川)の河川流量を合計して示したものである。19日12時頃から流量が急激に増加し、19日16時に2001年の平均流量277m<sup>3</sup>/sを大きく上回る4300m<sup>3</sup>/sを記録し、大出水となっていることがわかる。

### 3. 精度検証

ここでは、大出水時の伊勢湾に対する結合モデルの精度検証を行い、大出水時の伊勢湾の流動・密度構造の解析を行う際に前提となる結合モデルの精度およびその適用性を示す。

図-3は、MT局(図-1)における海面上10mの風速の観測値と計算値の比較を示したものである。これより、計算値は、観測された風速の大きさおよび時間的な変動の傾向を良く再現していることがわかる。そして、MM5で計算された風速は、海洋場の吹送流の計算に用いることが可能であると判断できる。

図-4は、名古屋(図-1)における降水量の観測値と計算値の比較を示したものである。観測値は、14、15、19日付近にのみ降雨が見られる一方で、計算値では、15、18～20、25日付近に降雨が見られ、その降水量も観測値との差が大きい。特に25日付近では、計算値の降水量は1時間に20mm超え、強い降雨となっているが、実際には雨が降っておらず、MM5の降水量の計算精度が悪いことがわかる。この結果は、伊勢湾地域においてMM5の精度検証を行った大澤ら(2002)<sup>9)</sup>の結果と同様であり、MM5において降雨を取り扱う雲微物理過程や積雲対流過程を詳細に検討していく必要がある。また、降雨は河川流量と密接な関係があるが、本研究で行った計算では、観測された河川流量を用いており、河川から伊勢湾へ流入する流量の評価には、降水量の計算精度の影響は及ばない。しかしながら、海面での降水、蒸発による水収支の計算には、MM5で求められた降水量が使用されている。そのため、特に塩分濃度の計算精度に悪影響が及ぶものと予測されるが、これについては、次節において検証する。

図-5は、四日市(図-1)における潮位の観測値と計算値の比較を示したものである。この図から、計算値と観測

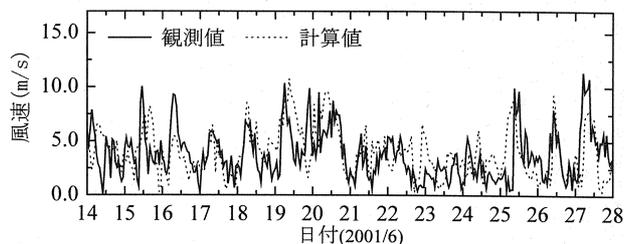


図-3 MT局における海面上10mの風速の観測値と計算値

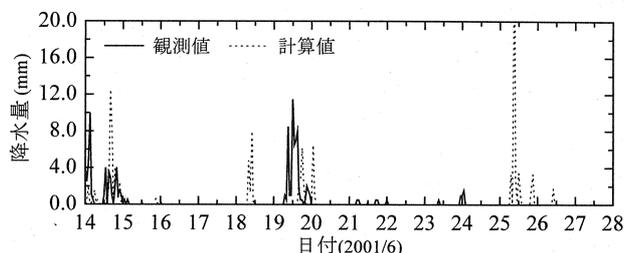


図-4 名古屋における降水量の観測値と計算値

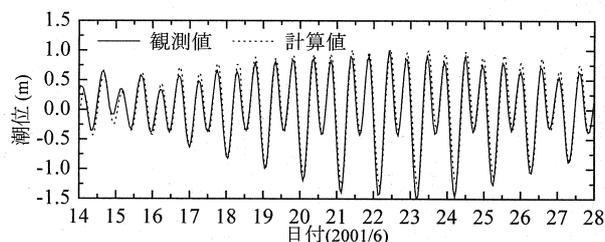
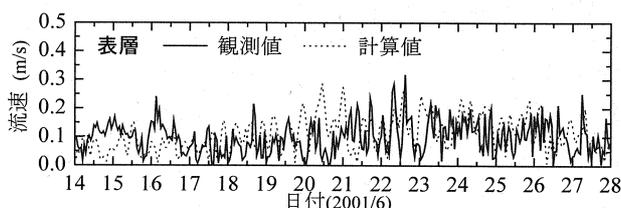
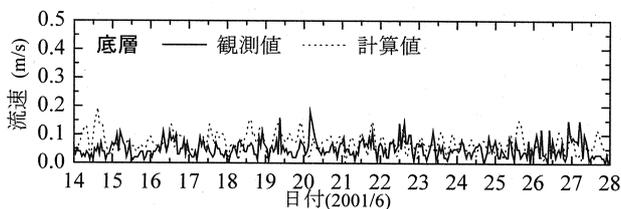


図-5 四日市における潮位の観測値と計算値



(a) 表層(水深2m)

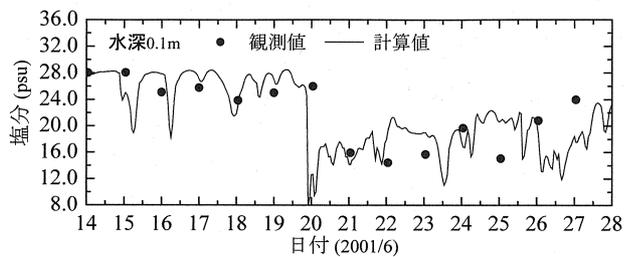


(b) 底層(水深11m)

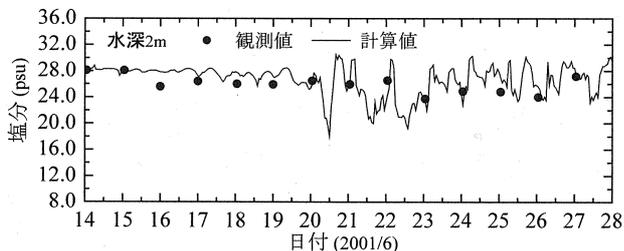
図-6 MT局における表層(水深2m)および底層(水深11m)の流速の観測値と計算値；(上図)表層，(下図)底層

値は、ほぼ一致していることがわかり、実用レベルの良い精度で潮位を計算できることが示された。

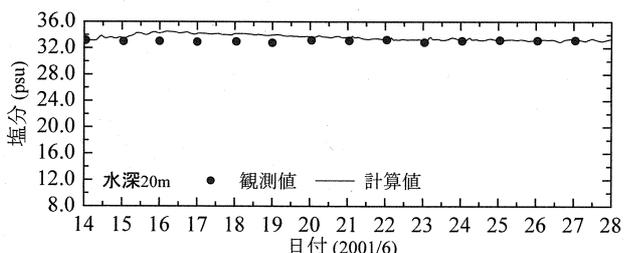
図-6は、MT局(図-1)における表層(水深2m)および底層(水深11m；海底面上2m)の流速の観測値と計算値の比較をそれぞれ示したものである。表層の14～15日付近の過小評価および20～21日付近の過大評価を除けば、表層の



(a) 水深 0.1m



(b) 水深 2m



(c) 水深 20m

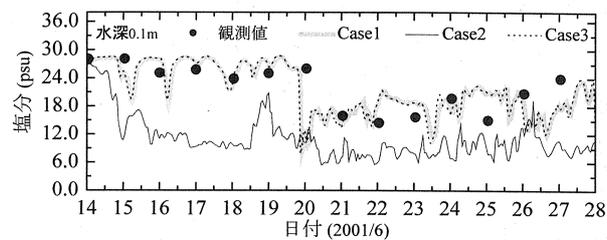
図-7 SB4における水深0.1m, 2mおよび20mの塩分の観測値と計算値；(上)水深0.1m, (中)水深2m, (下)水深20m

強い流速から底層の弱い流速まで、精度良く再現されていることがわかる。

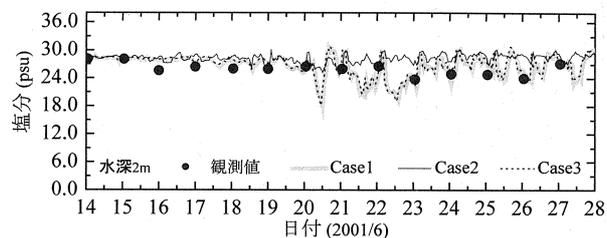
図-7は、SB4(図-1)における水深0.1m, 2mおよび20mの塩分の観測値と計算値の比較をそれぞれ示したものである。海面下0.1mの観測値は、河川流量の増加による影響のため20日に塩分が急激に低下している。計算値においても、この急激な塩分低下を精度良く再現できている。一方、海面下2mの計算値は、出水後で日変化が大きくなっている。これに対して観測値は、出水時の20日前後においても大きな変化は見られない。しかしながら、観測値と計算値は良く一致しており、計算値の日変化は正しいものであると示唆される。また、底層の水深20mでは、計算開始時から終了時まで約34psuとなっており、計算においてもこれが再現されている。以上の結果から、結合モデルを用いることで出水時の急激な塩分低下のみならず、表層のみに限られる淡水流入の影響を精度良く計算できることが示された。

#### 4. 流動・密度構造

ここでは、前節の計算結果に基づき、大出水時の伊勢湾の海水流動を解析し、その流動・密度構造について検



(a) 水深 0.1m



(b) 水深 2m

図-8 SB4における水深0.1mおよび2mの塩分の観測値と数値実験による計算値；(上)水深0.1m, (下)水深2m

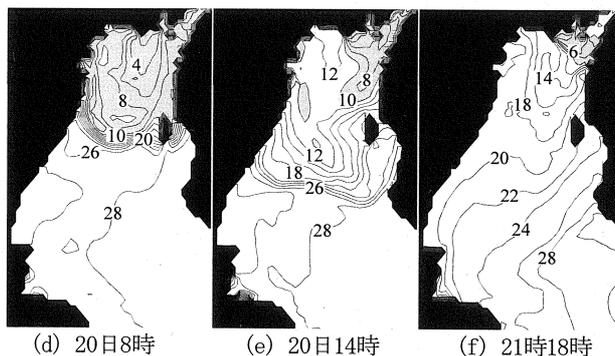
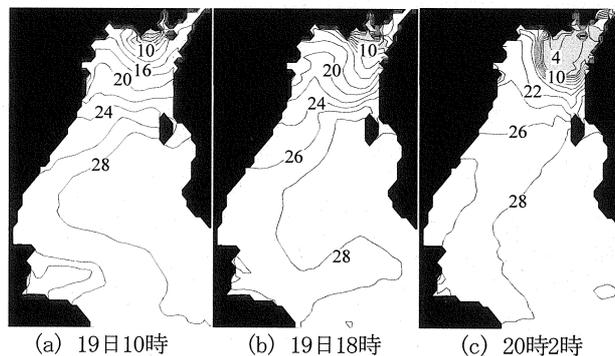


図-9 計算された領域Aにおける海面の塩分の空間分布；コンターは2psu間隔、灰色トーンは10psu以下の低塩分を示す。

討する。

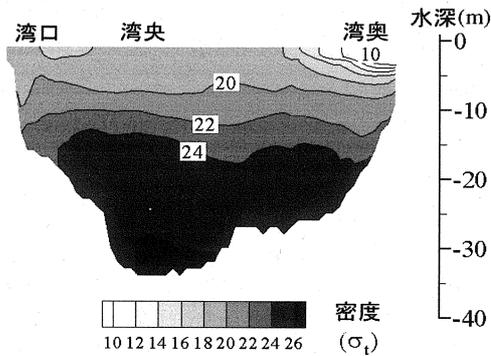
気象場が大出水時の伊勢湾の海水流動に与える影響を検討するために、次のような数値実験を行った。

Case1：前節で述べた結合モデル

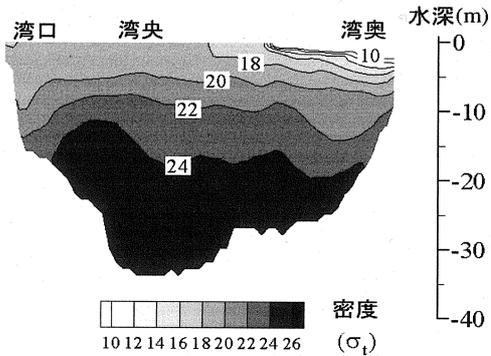
Case2：Case1に対して風速を常に0m/sとした計算

Case3：Case1に対して降水量を常に0mmとした計算

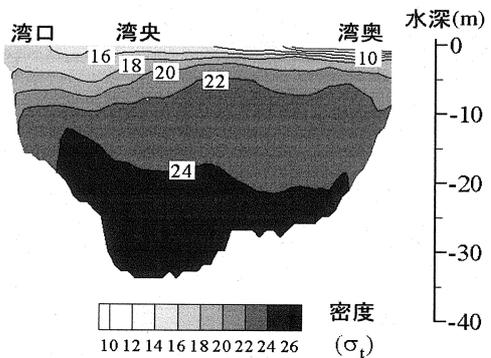
図-8に、SB4(図-1)における水深0.1mおよび2mの塩分の観測値と数値実験であるCase1~3の計算値をそれぞれ示



(a) 19日10時



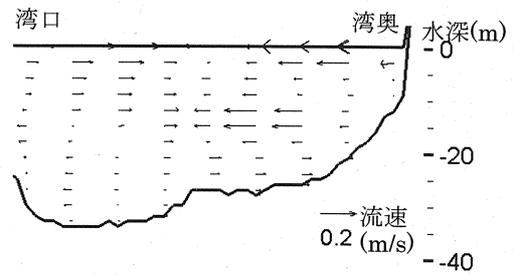
(b) 20日8時



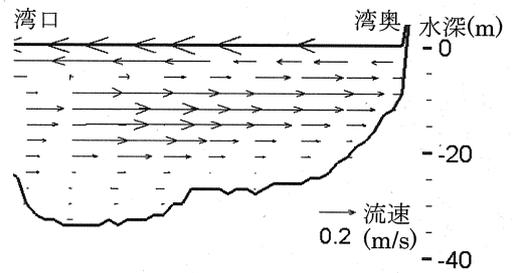
(c) 23日18時

図-10 断面Bにおける密度分布

した。これより、Case2の水深0.1mの塩分は、計算開始直後から低下し、計算精度が悪いことがわかる。また、Case2の水深2mの塩分は、計算開始時から終了時までほとんど変化せず、Case1のように出水後において日変化が大きくなることもない。これは、風速を常に0m/sとしたために、海面直下の鉛直混合が弱まり、河川プリュームがほとんど破壊されず、極く表層の水深0.1mの塩分のみが低下したものと考えられる。そして、この結果から、伊勢湾湾奥の塩分分布には、河川から流入した淡水と風が密接に関わっていることが明らかとなり、特に河川プリュームの挙動が大きくなる出水時では、風が塩分分布に及ぼす効果も大きくなると考えられる。そして、風が塩分分布に及ぼす効果を精度良く計算するためには、河川流量および気象場の適切な評価が必要であるが、それと同時に風による海水の鉛直混合を特徴付ける乱流モデルも非常に重要となる。また、Case3とCase1は、水深



(a) 出水前(6月14日~18日)



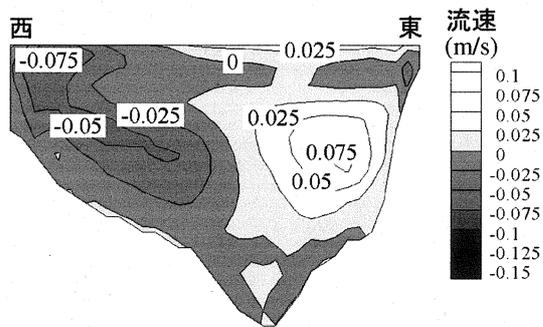
(b) 出水後(6月19日~23日)

図-11 断面Bにおける出水前(6月14日~18日)と出水後(6月19日~23日)の時間平均流速分布

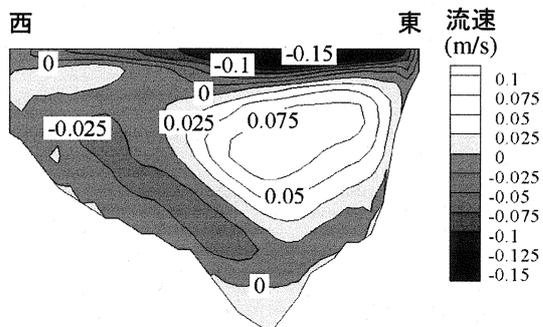
0.1m, 2m共に良く一致していることがわかる。これは、降水が伊勢湾の塩分濃度にほとんど関係していないことを示しており、表層の塩分の変化を特徴付けるのは河川からの淡水流入および外洋との海水交換の影響が主なものであると考えられる。そして、前節で述べた結合モデルの降水量の大きな誤差は、本研究での計算結果にほとんど影響を及ぼさないものと判断される。

図-9は、計算された領域A(図-1)における海面の塩分の空間分布を示したものである。ここでは代表的な特徴が表れた時間のみを示す。19日10時は出水前であり、低塩分水塊は木曾三川の河口付近のみに限られていることがわかる。19日18時は出水直後であるが、河口付近の塩分が19日10時に比べて低下しているのみであり、水平方向への広がり認められない。20日2時は、図-5に示すように満ち潮時であり、低塩分水塊は北上して名古屋港周辺に分布している。20日8時は引き潮時であり、低塩分水塊は南下し、出水時の木曾三川からの淡水流入の影響は、湾奥のみならず湾央付近まで及ぶことがわかる。その後の20日14時および18時の時点では、風や潮汐の干満によって河川プリュームが拡散し、10psu以下の低塩分水塊は、ほとんど見られなくなるものの、湾央付近の塩分濃度は出水前の19日10時に比べて大きく低下し、伊勢湾全体の塩分分布が出水前と出水後では、大きく変化することが判明した。

図-10は、断面B(図-1)における密度分布を示したものである。ここでは代表的な特徴が表れた時間のみを示す。出水直後の19日10時では、湾奥部のみに低密度水塊が見られ、湾央部には河川からの淡水流入の影響が及んでいない。また、この時点の湾央部の表層と底層の密度差は、



(a) 出水前(6月14日~18日)



(b) 出水後(6月19日~23日)

図-12 断面Cにおける出水前(6月14日~18日)と出水後(6月19日~23日)の時間平均流速分布；正の値は北に向かう流れ、負の値は南に向かう流れを示す。

4( $\sigma_t$ )となっている。20日8時は、河川プリュームが湾中央付近に向かって発達している様子が見て取れる。そして、23日18時では、図-9でも示したように河川からの淡水流入の影響は湾全体に広がり、表層の密度が低下している。特に湾中央部の表層と底層の密度差は、8( $\sigma_t$ )にもなり、成層が卓越していることがわかる。

図-11は、断面B(図-1)における出水前(6月14日~18日)と出水後(6月19日~23日)の時間平均流速分布の計算結果をそれぞれ示したものである。これらの図から、出水後の表層5m以浅では、湾奥から湾口に向かう大きな流速が見られ、海水が流出していることがわかる。一方、5m以深の下層では、流向が逆転し海水が流入していることがわかり、出水前に比べて出水後ではエスチュアリー循環が卓越している様子が認められた。

図-12は、断面C(図-1)における出水前(6月14日~18日)と出水後(6月19日~23日)の時間平均流速分布の計算結果をそれぞれ示したものである。出水前では、東側流入、西側流出の傾向が見られる。これは、筧ら(2002)<sup>10</sup>が示した夏場の伊勢湾の流動パターンと同様である。出水後では、東側でエスチュアリー循環が卓越し、表層で流出、下層で進入の傾向が見られる。しかし、西側では上層において僅かながら進入が認められ、この結果から大出水時の淡水流入に起因した水平循環流の存在が示唆される。

## 5. 結語

本研究では、年平均の10倍以上となる大出水時における伊勢湾の流動・密度構造を明らかにするために、大気-海洋-波浪結合モデルを用い、これに観測された河川流量を与えて海水流動計算を行った。そして、観測値との定量的な比較を行い、出水時の急激な塩分低下などを精度良く再現できることを明らかにし、結合モデルが大出水時の海水流動の解析を可能とする精度を有していることを示した。その後、この計算結果に基づき風と河川プリュームの関係やエスチュアリー循環流の挙動特性などを明らかにした。

謝辞：伊勢湾主要10河川の流量データは国土交通省中部地方整備局より、海洋観測データは中部国際空港株式会社・愛知県企業庁より、潮汐データは四日市港管理組合よりそれぞれご提供頂いた。また、本研究を行うにあたり、大久保陽介君(名古屋大学大学院生)のご協力を頂いた。ここに併せて謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 山尾 理, 笠井亮秀, 藤原建紀, 杉山陽一, 原田一利: 河川流量の変動にともなう伊勢湾のエスチュアリー循環流量・栄養塩輸送量の変化, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.961-965, 2002.
- 2) 赤石正廣, 大島 巖, 鶴飼亮行, 青井浩二, 黒田伸朗: 現地観測による伊勢湾・三河湾の貧酸素水塊の挙動の把握, 海洋開発論文集, 第21巻, pp.391-396, 2005.
- 3) 村上智一, 安田孝志, 大澤輝夫: 気象場と結合させた湾内海水流動計算のための多重 $\sigma$ 座標モデルの開発, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.366-370, 2004.
- 4) MMM-NCAR: PSU/NCAR Mesoscale Modeling System Tutorial Class Notes and User's Guide, MM5 Modeling System Version 3, 2001.
- 5) Holthuijsen, L.H., Booij, N., Ris, R.C., Haagsma, I.J.G., Kieftenburg, ATMM, Kriez, E.E., Zijlema, M. and van der A.J.: SWAN Cycle III Ver.40.31 USER MANUAL, 2004.
- 6) Mellor, G.L. and Yamada, T.: Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, *Rev. Geophys. Space Phys.*, Vol.20, No.4, pp.851-875, 1982.
- 7) 関根義彦: 伊勢湾, 沿岸海洋研究, 第34巻, pp.20-33, 1996.
- 8) Matsumoto, K., Takanezawa, T. and Ooe, M.: Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: A global model and a regional around Japan, *J. Oceanography*, 56, pp.567-581, 2000.
- 9) 大澤輝夫, 深尾一仁, 安田孝志: 伊勢湾地域における高解像度気象場の再現計算とその精度検証, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.181-185, 2002.
- 10) 筧 茂穂, 藤原建紀, 山田浩且: 伊勢湾における密度・流動構造の季節変化, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.386-390, 2002.