

台風0423号下における伊勢湾の海水流動・ 密度構造の変化過程

CHANGING PROCESS OF COASTAL CURRENT AND DENSITY STRUCTURES IN ISE BAY UNDER TYPHOON 0423

村上智一¹・川崎浩司²
Tomokazu MURAKAMI and Koji KAWASAKI

¹正会員 博(工) 豊橋技術科学大学 建設工学系 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

²正会員 博(工) 名古屋大学 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)

A numerical simulation using an Atmosphere-Ocean-Wave coupled model was performed to reproduce current and density structures in Ise Bay under Typhoon 0423 and discuss the changing processes of the current and density structures. The validity and utility of the coupled model was verified by comparing the observation results with the computation ones regarding typhoon track, wind speed, wind direction, tide level, significant wave height and so on. The changing processes of the current and density structures under Typhoon 0423 were, furthermore, examined based on the numerical results. As a result, it was demonstrated that the distribution of the density stratification was changed by strong wind-driven currents and large floods caused by Typhoon 0423.

Key Words : Current structure, density structure, typhoon, Ise Bay, numerical analysis

1. はじめに

伊勢湾の海水流動・密度・水質構造は、風による吹送流や日射による成層化など気象場からの影響を強く受けることが知られている^{1), 2), 3), 4), 5)}。特に強い気象擾乱を伴う台風の通過後では、海水の密度構造が台風通過前から一変し、それまで発生していた貧酸素水塊が大きく減衰することが観測的研究^{6), 7)}から示され、台風が伊勢湾の海水流動・密度・水質構造に強い影響を及ぼすことが明らかとなった。

しかしながら、これらの観測的研究では、台風の通過前および通過後の流動・密度・水質構造についてのみ議論しており、台風下においてどのような過程で流動・密度・水質構造が変化していくのかは、台風時の海洋観測の困難さに伴うデータ不足から十分に明らかにされていない。

このような台風時の海洋観測のデータ不足を補うには、数値シミュレーションが有効である。しかし、台風時の伊勢湾の海水流動・密度構造を再現するには、複雑な物理過程を持つ台風を含めた気象場の正確な評価が要求される。そして、従来の台風計算で多用されてきた Myers の式や Mitsuta and Fujii の式⁸⁾を組み合わせた経験的台風モデルでは、気象場の熱力学過程、雲の3次元構造、降水、沿岸地域の地面起伏・粗度変化および広域気象場の影響などが考慮されないため、この要求に応じることができない。

また、経験的台風モデルの代わりにアメダスなどの気象観測データを用いたとしても、空間・時間解像度の粗さのために台風によるシャープな変化を持つ気象場の正確な評価は難しい。そのため、台風下における伊勢湾の流動・密度・水質構造の変化過程は、これまでの観測的研究と同様に十分に解明されていない。

そこで本研究では、台風下における伊勢湾の流動・密度構造の変化過程を明らかにするために、気象場の各素過程をより忠実に再現できる気象モデル MM5⁹⁾を組み込んだ大気-海洋-波浪結合モデル¹⁰⁾を用い、伊勢湾に接近した台風 0423 号下の海水流動・密度構造を再現する。そして、精度検証を行い、結合モデルが台風 0423 号下の気象・海象現象を精度良く再現できることを示す。その後、この計算結果を解析し、台風 0423 号下の伊勢湾の流動・密度構造の変化過程について検討を行う。

2. 計算方法

本研究で用いる大気-海洋-波浪結合モデルは、気象モデル MM5、海洋モデル CCM¹¹⁾および波浪モデル SWAN¹²⁾によって構成されている。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

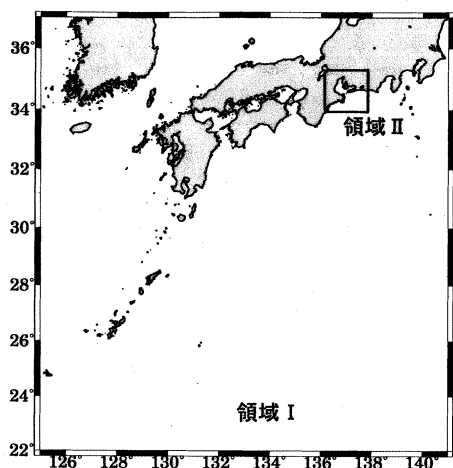


図-1 気象モデルMM5の計算領域。

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¹⁰⁾。以下に MM5、CCM、SWAN の概要および計算条件を述べる。

気象場の計算に用いる 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⁹⁾。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) および地表面過程 (5-layer soil scheme) などに取り扱われるため、従来の経験的台風モデルでは考慮できない沿岸地域の地面起伏・粗度変化の効果、台風のライフサイクル (発生期、最盛期、減衰期、温帯低気圧化期) に応じた内部構造の変化や広域気象場などの再現が可能である。

MM5 の計算領域は、台風の進路を支配する気団を含めて計算を行うための領域 I (格子間隔 9 km) と計算対象となる伊勢湾を高解像度で計算するための領域 II (格子間隔 3 km) を設け (図-1)、これらのネスティング計算を行う。初期値・境界値には、気象庁メソ客観解析値 (6 時間間隔、10 km 格子、20 層) を使用する。また、台風の中心付近に見られるシャープな気圧低下や強風を正しく再現するには、台風ボーガス (ランキン渦) の導入が必須である。MM5 には、台風ボーガスを導入できるツール¹³⁾が実装されているものの、このツールは、中心気圧を陽に設定できず、最大風速や最大風速半径等のパラメータに問題が生じることが指摘されている¹⁴⁾。そこで本研究では、この問題を解決した大澤の台風ボーガス¹⁴⁾を用いて台風初期場を作成する。

海洋場の計算に用いる CCM (Coastal ocean Current Model) は、筆者ら¹¹⁾が開発した多重 σ 座標系沿岸海洋モデルである。CCM の最大の特徴で

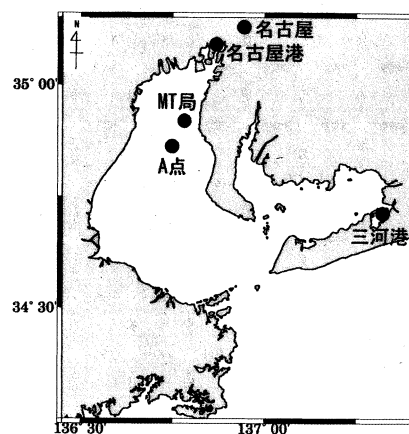


図-2 海洋モデルCCMおよび波浪モデルSWANの計算領域と観測点。

ある多重 σ 座標系は、計算領域を鉛直方向に多数に分割し、各領域に対してそれぞれ σ 座標を適用するものである。これによって、従来の σ 座標系で適切に取り扱うことのできなかった台風時の外洋から内湾への海水流入の正しい評価が可能となり、その結果、内湾での高潮の計算精度が向上する¹⁵⁾。また、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 乱流クロージャーモデル¹⁶⁾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、河川流入を取り扱うことができる。

CCM の計算領域 (図-2) は、内湾で発生する高潮に大きな影響を及ぼす外洋からの海水流入を精度良く取り扱うために、太平洋を含めて広く設ける (格子間隔 30 秒)。水温・塩分・密度の初期値は、中部国際空港沖で取得された観測データ、気候値¹⁾および NOAA 海面温度データを水平および鉛直方向に補間して作成する。境界値は、国立天文台で開発された日本周辺潮汐モデル NAO99Jb¹⁷⁾を用いて潮位を計算し、それを開境界条件として与える。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 (木曽川、長良川、揖斐川、庄内川、鈴鹿川、雲出川、櫛田川、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る。

波浪場の計算に用いる 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¹²⁾。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湾まで対応できるようになっている。

SWAN の計算領域は、海洋モデルと同様、図-2

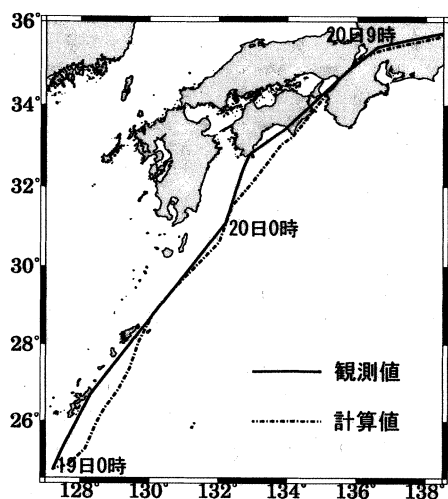


図-3 台風0423号の進路の観測値と計算値の比較。

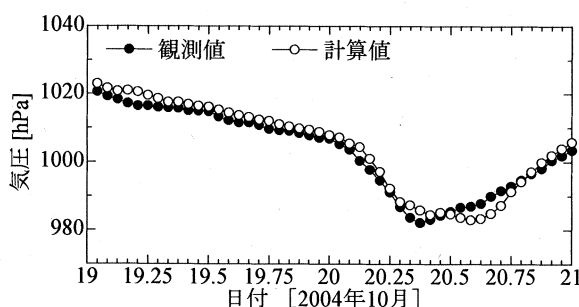


図-4 名古屋における気圧の観測値と計算値の比較。

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 120 秒とする。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、それを用いる。

それぞれのモデルの計算期間は、台風 0423 号が伊勢湾に接近した 2004 年 10 月 19 日 0 時～21 日 0 時 (UTC) とする。

3. 精度検証

ここでは、台風 0423 号下において取得できた観測値と前述の結合モデルによる計算値を比較し、数値解析を行う際に前提となるモデルの精度および適用性を明らかにする。

図-3 は、台風 0423 号の進路の観測値（気象庁ベストトラック）と計算値を比較したものである。観測値に比べて計算値は、南太平洋上において僅かに南よりの進路を取っているものの、伊勢湾接近時では良く一致した進路となっている。このことから、結合モデルに組み込まれた気象モデル MM5 は、台風 0423 号の進路を高精度に再現していると判断できる。

図-4 は、名古屋（図-2 参照）における気圧の観測値と計算値を比較したものである。これより、計算値は、台風通過時の気圧の低下を精度良く再現していることが示される。

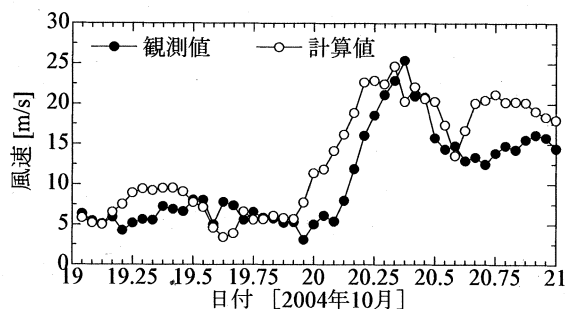


図-5 MT局における海面上10mの風速の観測値と計算値の比較。

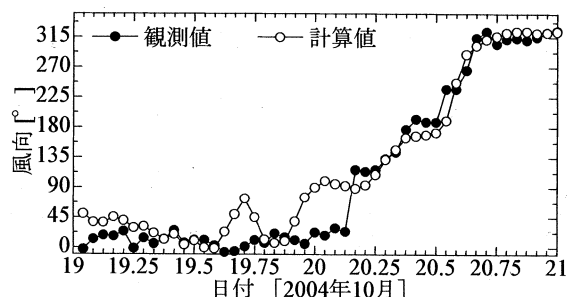


図-6 MT局における海面上10mの風向の観測値と計算値の比較；0° は北風，90° は東風を示す。

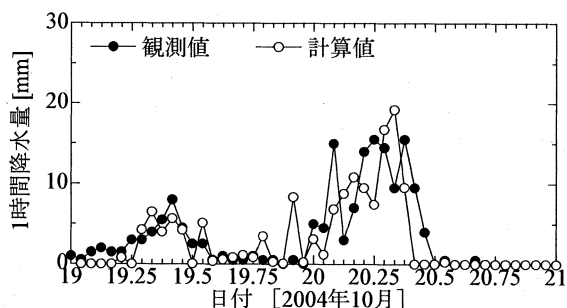


図-7 名古屋における降水量の観測値と計算値の比較。

図-5 および図-6 は、MT 局（図-2 参照）における海面上 10m の風速および風向の観測値と計算値をそれぞれ比較したものである。風速の計算値は、20 日 0 時～6 時および 20 日 16 時～22 時において観測値に対して過大評価傾向となっている。しかしながら、最大風速やその発生時間は、観測値と良く一致した傾向を示している。また、風向の観測値と計算値の比較から、台風接近時から通過時までの風向の変化が高い精度で計算されていることがわかる。

図-7 は、名古屋（図-2 参照）における降水量の観測値と計算値を比較したものである。20 日 0 時～12 時頃までの観測値の強い降雨は、台風の接近および停滞前線の活動によって生じたものであり、計算値でもこの強い降雨が正しく再現されていることがわかる。

図-8 は、名古屋港（図-2 参照）における潮位の観測値と計算値を比較したものである。また、比較のために天文潮位も併せて示した。潮位の観測値は、

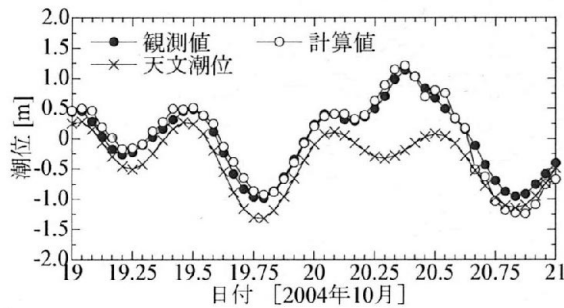


図-8 名古屋港における潮位の観測値、計算値および天文潮位の比較。

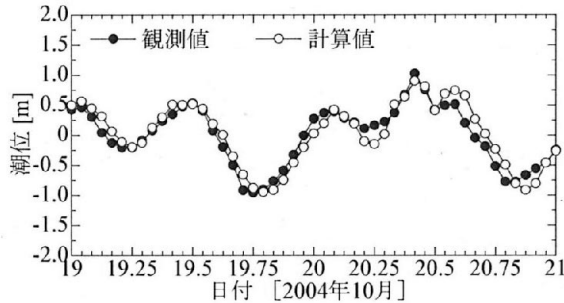


図-9 三河港における潮位の観測値と計算値の比較。

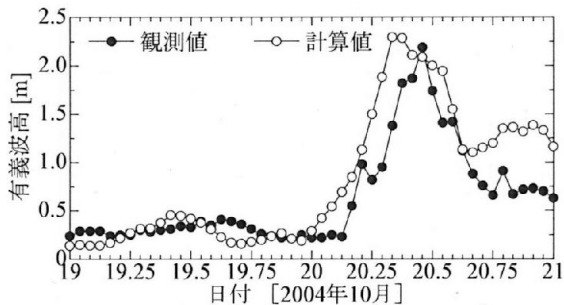


図-10 MT局における有義波高の観測値と計算値の比較。

20 日 9 時に最大潮位を示し、その時の潮位偏差（実測潮位と天文潮位の差）は 132 cm であった。そして、その時の計算誤差は、+3 cm に留まっており、これを精度良く再現できる結合モデルは、台風下の伊勢湾の海水流動の構造を正しく記述しているものと判断できる。

図-9 は、三河港における潮位の観測値と計算値を比較したものである。この図より、前述の図-8 の名古屋港での比較結果と同様に最高潮位の大きさおよびその発生時間を精度良く再現していることがわかる。これらのことから、結合モデルは広い範囲で台風下の海水流動を正しく記述しているものと推察される。

図-10 は、MT 局（図-2 参照）における有義波高の観測値と計算値を比較したものである。これより、計算値は、有義波高の観測値の変動の傾向を良く表していることがわかる。

以上より、大気－海洋－波浪結合モデルは、台風 0423 号接近時の伊勢湾の高潮や高波などを精度良

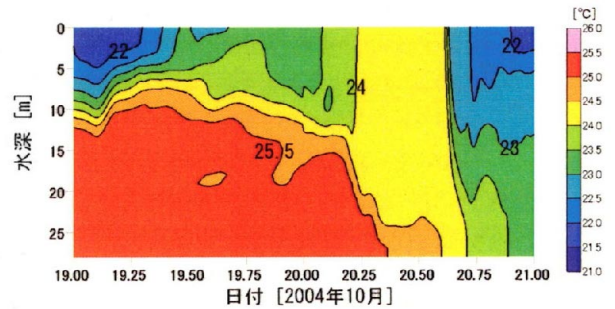


図-11 湾中央部のA点（前述の図-2参照）における水温の時間変化；コンターは0.5°C間隔。

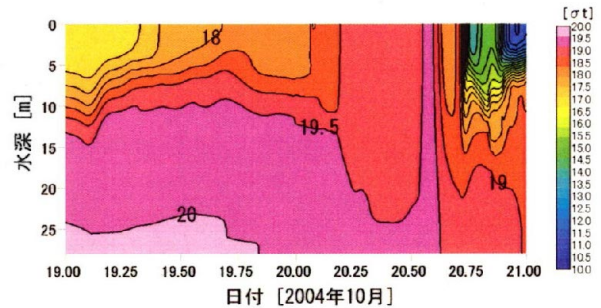


図-12 湾中央部のA点（前述の図-2参照）における密度の時間変化；コンターは0.5 σ_t 間隔。

く計算できることが示された。また、台風 0423 号下での水温、塩分、密度の観測データが存在しないために、これらの精度検証を行うことができなかった。しかしながら、筆者らは冬季強風時の伊勢湾において結合モデルが水温、塩分、密度を精度良く計算できることを過去の研究で示しており¹⁰⁾、本研究のような台風下強風時でも同様の良い精度で水温、塩分、密度構造を再現できるものと推察される。

4. 海水流動・密度構造の変化過程

ここでは、前章の計算結果に基づき、台風 0423 号下の伊勢湾の流動・密度構造の変化過程について検討する。

図-11 は、湾中央部の A 点（図-2 参照）における水温の時間変化を示したものである。この図より 19 日では、表層の水温は約 22°C、底層の水温は約 25°C となっており、水温の鉛直逆転の様子が見て取れる。これは、関根¹⁾が観測的研究より示した 10 月の平均的な水温の鉛直分布のパターンと同様であり、北寄りの風のために表層から海水が流出し、下層から高温・高塩分の外洋水（黒潮）が流入するためである。また、台風通過中の 21 日 4 時～15 時頃では、鉛直一様の水温分布を示している。そして、台風通過後の 21 日 0 時頃では、表層の水温は、台風通過前と同じく約 22°C であるものの、底層の水温は約 23°C となり、台風通過前に比べて水温成層が弱くなっている様子が認められる。

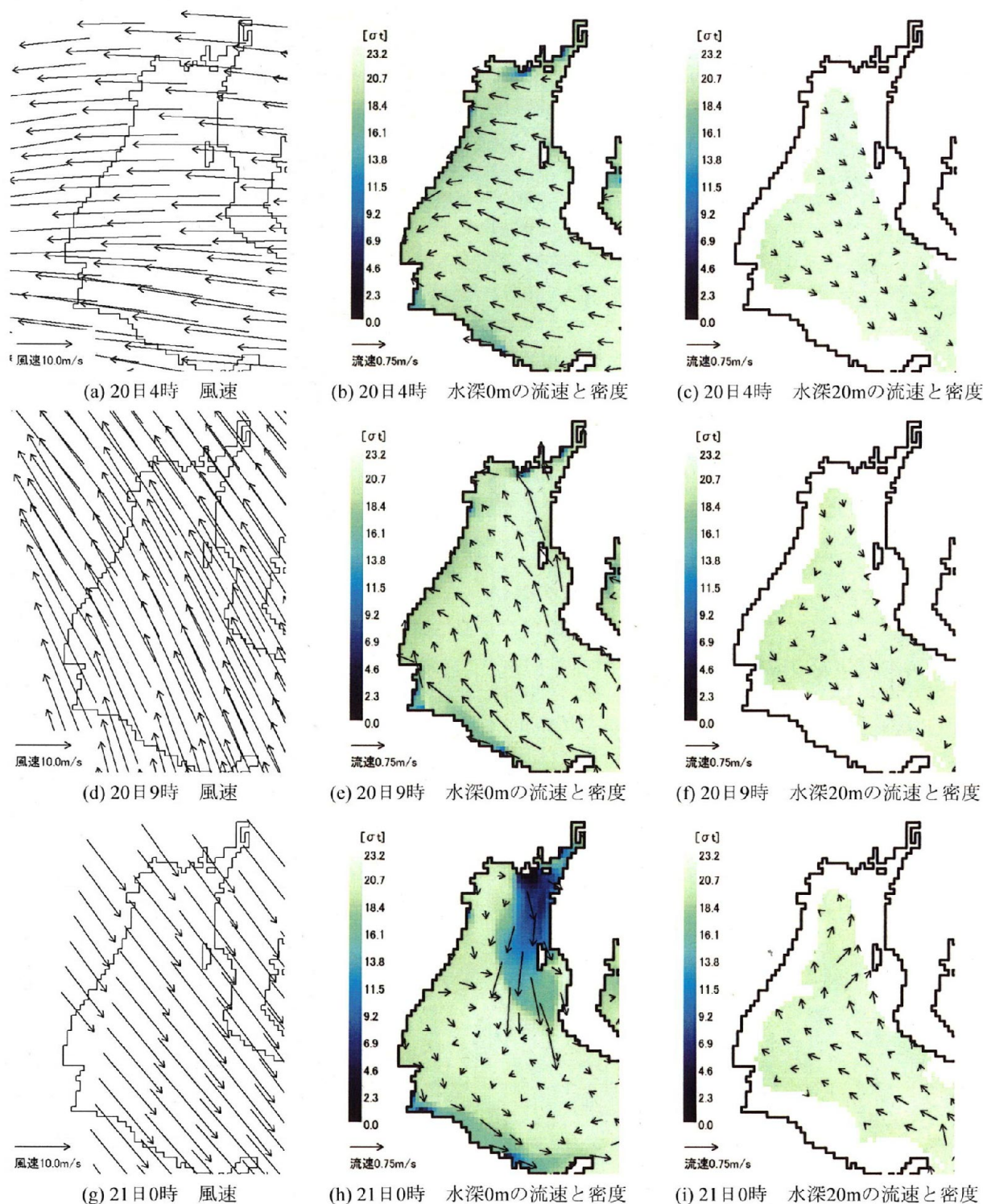


図-13 風速、水深0mの流速・密度および水深20mの流速・密度の空間分布。

図-12 は、湾中央部の A 点（図-2 参照）における密度の時間変化を示したものである。ここでは、密度を σ_t （実際の密度から 1000 kg/m^3 を減じたものとして定義）として表した。この図より、台風通過前である 20 日 0 時頃までは、表層と下層の密度差は、約 $2 \sigma_t$ となっており、密度成層が形成されている様子が見て取れる。そして、台風通過後の 21 日 0 時頃では、表層と下層の密度差は約 $8 \sigma_t$ となり、前述の図-11 で示した水温成層の分布とは逆に台風通過

前に比べて密度成層が強くなっていることがわかる。このことは、台風通過前および通過後の観測値を解析した過去の研究でも示されている⁷⁾。また、台風が伊勢湾に接近した 20 日 4 時頃から 15 時頃の密度は、ほぼ鉛直一様になっている。

この密度構造の変化過程を明らかにするために、図-13 に風速、水深 0m の流速・密度および水深 20m の流速・密度の空間分布を示した。ここでは、20 日 4 時、20 日 9 時および 21 日 0 時のものを示し

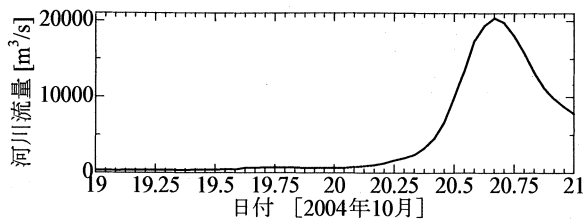


図-14 木曽三川（揖斐・長良・木曽川）の河川流量。

た。20日4時の風速および表層の流速を示す図-13(a), (b)より、強い東風に起因した西向きの吹送流が卓越している様子が見て取れる。そして、下層（図-13(c)）では、この吹送流を補う東向きの流れが生じており、吹送流に起因して東西方向で海水の鉛直循環が発生していることが認められる。また、図-13(d)~(f)より、20日9時では、強い南風に起因して南北方向で海水の鉛直循環が発生していることがわかる。これらのことから、台風時の強風下における吹送流によって湾全体で海水の鉛直循環が発生し、表層と下層の海水が混合した結果、図-12に示すように、密度が鉛直一様になったものと判断される。また、台風通過に伴う降雨（前述の図-7）によって木曽三川からの淡水流入量（図-14）が増大しており、21日0時の表層の密度（図-13(h)）は、その河川プリュームによって低下している。気象場が平常時であれば、この河川プリュームは、コリオリ力の影響を受けて湾西部に分布するが^{2), 3), 4)}、台風通過後では図-13(g)に示される北西風の影響を受け、湾奥部に分布している。そして、これによって鉛直一様であった密度構造から密度成層が再形成したものと判断される。

5. おわりに

本研究では、観測データが不足しているために不明であった台風下における伊勢湾の海水流動・密度構造の変化過程を明らかにすることを目的とし、大気-海洋-波浪結合モデルを用いて台風0423号下の伊勢湾を対象に再現計算を行った。そして、計算値と台風0423号下で取得可能であった観測値を比較し、結合モデルが台風下の流動・密度の数値解析が可能となる精度を有していることを明らかにした。次いで計算結果の解析を行い、台風下では、強風に起因した吹送流によって湾全体で海水の鉛直循環が卓越し、密度が鉛直一様になるものの、その後の台風通過に伴う河川流量の増加によって、鉛直一様であった密度構造から密度成層が再形成することを示した。

謝辞：観測データは、中部国際空港株式会社・愛知県企業庁および国土交通省中部地方整備局よりそれぞれご提供頂いた。また、本研究の一部は、科学研究費補助金・若手研究(A)（研究代表者：名古屋大

学・川崎浩司、課題番号：21686046、研究課題名：異常気象が及ぼす沿岸海域物理環境場への影響を軸とした水防災環境評価システムの開発）による成果である。ここに併せて謝意を表する。

参考文献

- 1) 関根義彦：伊勢湾，沿岸海洋研究，第34巻，pp.20-33, 1996.
- 2) 藤原建紀，福井真吾，杉山陽一：伊勢湾の成層とエスチュアリー循環の季節変動，海の研究，5巻4号，pp.235-244, 1996.
- 3) 杉山陽一，中辻啓二，藤原建紀，高木不折：伊勢湾湾央部の残差流系に関する一考察，海岸工学論文集，第45巻，pp.401-405, 1998.
- 4) 笈 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.
- 5) 坂井伸一，水鳥雅文，服部孝之，杉山陽一：VHFレーダによる伊勢湾湾奥の表層流動観測，海岸工学論文集，第45巻，pp.1266-1270, 1998.
- 6) 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.
- 7) 鶴飼亮行：伊勢湾・三河湾における貧酸素水塊の挙動への気象場の影響に関する研究，岐阜大学学位論文，pp.27-44, 2007.
- 8) Mitsuta, Y. and Fujii, T. : Analysis and synthesis of typhoon wind pattern over Japan, *Bulletin Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, Vol. 37, Part 4, No. 329, pp.169-185, 1987.
- 9) Dudhia, J. : A nonhydrostatic version of the Penn State-NCAR mesoscale model: Validation test and simulation of an Atlantic cyclone and cold front, *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 121, pp.1493-1513, 1993.
- 10) 村上智一，川崎浩司，山口将人，水谷法美：気象場に支配される伊勢湾を対象とした大気-海洋-波浪結合モデルの精度検証，海洋開発論文集，第22巻，pp.103-108, 2006.
- 11) 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 σ 座標モデルの開発，海岸工学論文集，第51巻，pp.366-370, 2004.
- 12) Booij, N., Holthuijsen, L. H. and Ris, R. C. : The SWAN wave model for shallow water, *Proc. 25th Int. Conf. Coastal Engng.*, Vol. 1, pp. 668-676, 1996.
- 13) Davis, C. and Low-nam, S. : The NCAR-AFWA tropical cyclone bogussing scheme, *A report prepared for the Air Force Weather Agency*, p.12, 2001.
- 14) 大澤輝夫：MM5 用台風ボーガス導入ツールの作成と2004年の5つの台風を対象とした動作検証，月刊海洋，第42巻，pp.178-185, 2005.
- 15) 村上智一，安田孝志，吉野 純：気象モデルおよび多重 σ 座標系海洋モデルを用いた台風0416号による広域高潮の再現，土木学会論文集 B, Vol. 63, No. 4, pp.282-290, 2007.
- 16) 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.
- 17) 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*, Vol. 56, pp.567-581, 2000.