

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

VALIDATION OF ATMOSPHERE-OCEAN-WAVE COUPLED MODEL FOR ISE BAY AFFECTED BY METEOROLOGICAL DISTURBANCES

村上智一¹・川崎浩司²・山口将人³・水谷法美⁴

Tomokazu MURAKAMI, Koji KAWASAKI, Masato YAMAGUCHI and Norimi MIZUTANI

¹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)

²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)

³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)

⁴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)

Flow and density structures in Ise Bay are strongly affected by meteorological disturbances because Ise Bay is a typical shallow and semi-enclosed bay. Therefore, it is necessary to take into account the influence of the meteorological disturbances appropriately in a numerical simulation.

In this study, an Atmosphere-Ocean-Wave coupled model that can estimate coastal currents under the influence of meteorological disturbances is used to simulate flow and density structures in Ise Bay under various meteorological conditions. The comparison between the numerical and in-situ observation results was performed to verify the coupled model. As a result, it was demonstrated that the coupled model can appropriately simulate the oceanographic and meteorologic phenomena in Ise Bay, such as wind speed, tide level, water temperature, and so on.

Key Words : Ise Bay, meteorological model, ocean model, wave model, coupled model

1. 緒言

伊勢湾の流動・密度構造の解明のためには、関根(1996)¹⁾などが行った観測的研究に加えて、数値シミュレーションを用いた数値的研究が有効である。この数値的研究は、時間・空間的に詳細なデータを活用できるという利点があるものの、高精度な海水流動計算が前提であり、それを示す精度検証が必要である。

伊勢湾においてメソスケール(数日・数十～数百km規模)の海水流動計算を高精度で行うには、風による吹送流、風波砕波による海水混合、日射による成層化、降水・蒸発等の気象場からの影響が支配的となるため、これらを適切に評価することが重要となる。そのためには、風、日射、降水等の気象情報が必要であり、従来、アメダスなどの観測データが用いられてきた。しかし、観測はコストがかかるため、得られるデータは面的・時間的に情報量が少ないのが現状である。そして、大阪湾において海上風の平面分布特性を明らかにした山口ら

(1981)²⁾の研究や毎日の海陸風の時間変化などを考えれば、気象場の面的・時間的变化が沿岸域のメソスケールの数値計算にとって重要であることは明らかである。そのため、観測データでは、気象場からの影響を適切に評価することができない。さらに観測データからは、予測情報が得られない問題もある。

近年、これらの問題を解決するために気象モデルが用いられるようになってきた。これは、気象モデルが実用レベルの精度になってきたことが背景にあり、特に内湾や沿岸域において、これらの気象モデルの計算精度を示した大澤ら(2002)³⁾、山下ら(2002)⁴⁾、鈴木ら(2003)⁵⁾などの研究成果を見れば、観測データの代わりに気象モデルを用いることが十分可能であることがわかる。そして、灘岡ら(1999)⁶⁾は、東京湾の海水流動計算において気象モデルで求めた海上風と観測データをそれぞれ海洋モデルに与えて比較計算を行い、気象モデルを用いたケースの方が海水流動の再現性が良いことを示し、観測データに対して気象モデルが有用であることを実証した。

また、内湾などの浅海域の海水流動に大きな影響を及

ぼす摩擦速度、潜熱、顕熱などの海面フラックスは、大気安定度(海面水温と気温に依存)や波浪による粗度などが互いに影響し合っており、より高精度に気象場からの影響を評価するには、大気・海洋・波浪場を結合系として一体的に扱う必要があるのは当然である。そして、筆者らは、この要求に応じるために気象モデルMM5、海洋モデルCCMおよび波浪モデルSWANを結合させた大気-海洋-波浪結合モデルの開発を行ってきた。しかしながら、伊勢湾の流動・密度構造の解析を行うために必要な精度検証は、まだ十分に行われていない。

そこで本研究では、大気-海洋-波浪結合モデルを用いて、成層の発達期、強成層期、強風期などの多様な条件下における伊勢湾の海水流動を計算し、大気・海洋・波浪場の各種観測データと計算値を定量的に比較する。そして、その精度について検討を行い、結合モデルが伊勢湾の流動・密度構造の解析を可能とする精度を有していることを明らかにする。

2. 大気-海洋-波浪結合モデル

本研究で用いた大気-海洋-波浪結合モデルの概要を図-1に示す。気象場の計算にはペンシルベニア州立大学と米国大気研究センターで開発されたメソ気象モデルMM5、海洋場の計算には筆者ら⁷⁾が開発した多重 σ 座標系沿岸海洋モデルCCM、波浪場の計算にはデルフト工科大学で開発された波浪モデルSWANが用いられている。

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、気象モデルMM5から出力される風速、摩擦速度、潜熱・顕熱フラックス、短波放射、下向き長波放射、蒸発、降水量、気圧と、海洋モデルCCMから出力される海面温度を用いて、海面での運動量フラックス、熱・水蒸気・塩分フラックスを計算している。さらに、波浪モデルSWANでは、MM5およびCCMで求められた風速、摩擦速度、流速、潮位が入力値として用いられ、これらを基にして計算された波浪による粗度高さをMM5の大気境界層スキームへ、波齢をCCMのMellor・Yamada Level 2.5 乱流モデルの海面境界条件式(Mellorら, 2004)⁸⁾へ、それぞれ出力し、各モデルの精度向上を図っている。

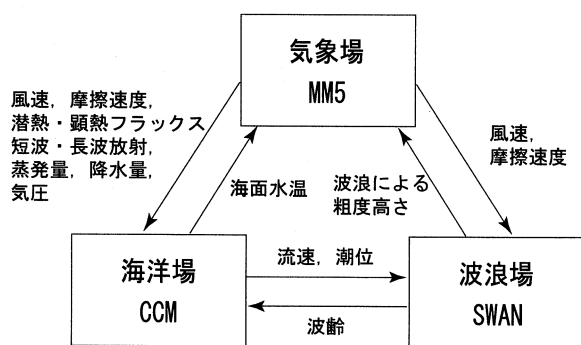


図-1 大気-海洋-波浪結合モデルの概要

3. 計算条件

気象場の計算領域は、高精度計算のために本州を覆う大領域Ⅰ(格子間隔18km)、中部地方を覆う領域Ⅱ(格子間隔6km)および伊勢湾を覆う領域Ⅲ(格子間隔2km)を設け、これらのネスティング計算を行った。CCMでは、内湾の流動・密度構造と密接な関係のある外洋水の進入を精度良く扱うために、太平洋を含めて広く計算領域(格子間隔30秒)を設けた(図-2)。このため、CCMの計算領域内の水深は約1000m~数mとなるが、多重 σ 座標系を用いたCCMでは、海底地形変化を正確に表した上で、気象場との結合計算において本質的に重要となる最上層での鉛直差分を水深に依らず常に高精度で行うことが可能である⁷⁾。また、SWANの計算領域もCCMと同様とし、これらと気象場の領域Ⅲを結合させた。

計算期間は、非成層期から成層期に移行する春季(2001年4月1日~14日)、強成層期の夏季(2001年7月24日~8月6日)、成層期から非成層期に移行する秋季(2001年9月15日~28日)、および強風期の冬季(2002年2月1日~14日)とし、計算条件は表-1とした。また、国立天文台で開発された日本周辺潮汐モデルNAO99Jb⁹⁾を用いて潮位を計算し、それを海洋モデルの開境界条件として与えた。さらに、河川の影響を考慮するために、国土交通省中部地方整備局による伊勢湾の主要10河川の流量データを、境界値として海洋モデルに与えた。

また、海洋モデルの初期値は、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)¹⁾およびNOAA海面温度データを基にして作成した。この時、3次元的な初期値を求めるには余りにもデータが少な過ぎるため、やや主観的な推測が入ることは否めない。しかしながら、例えば冬季であれば外洋は黒潮による高温・高塩分、内湾は海面冷却および塩分による成層のために表層で低温、底層で高温であるなど各季節の特徴は表している。

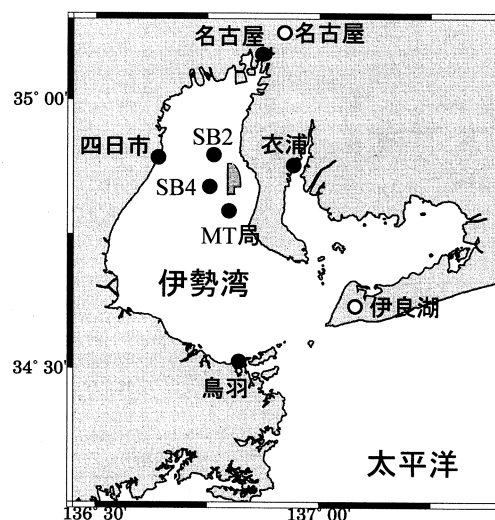


図-2 計算領域と観測点；●は海上観測点、○は陸上観測点を示す。

表-1 計算条件

気象モデル MM5	水平格子数	領域Ⅰ:79×79 領域Ⅱ:31×31 領域Ⅲ:52×55
	鉛直層数	20層
	タイムステップ	領域Ⅰ:54秒, 領域Ⅱ:18秒, 領域Ⅲ:6秒
	水平解像度	領域Ⅰ:18km, 領域Ⅱ:6km, 領域Ⅲ:2km
	大気境界層スキーム	Eta scheme
	初期値・境界値	気象庁メソ客観解析値 (6 時間間隔, 10km格子, 20層)
海洋モデル CCM	水平格子数	99×97
	タイムステップ	10秒
	水平解像度	30秒
	σ 座標の適用領域数	5
	各領域の層数	領域Ⅰ:7, 領域Ⅱ:5, 領域Ⅲ:5, 領域Ⅳ:5, 領域Ⅴ:5
	初期値・境界値	・潮汐モデルNAO99Jb ・気候値(関根, 1996) ・中部国際空港株式会社・ 愛知県企業庁による観測 データ ・NOAA海面温度データ ・河川流量データ(国土交 通省中部地方整備局)
波浪モデル SWAN	水平格子数	99×97
	タイムステップ	5分
	水平解像度	30秒
結合モデル	交換時間間隔	10分

4. 精度検証

(1) 気象場の精度検証

図-3は、夏季および冬季のMT局(図-2)における海面上10mの風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。これらの図より、計算値は観測値の変動の傾向を良く表していることがわかる。今回の計算ではMM5の解像度を2kmとしているため、風速の計算精度は1km計算値(大澤ら, 2002)³⁾ほど良くはないが、海洋場を計算するには十分な精度であると考えられる。ただし、夏季では、やや過小評価の傾向が見られ、接地境界層内の風を取り扱うMM5の大気境界層スキームを詳細に検討していく必要がある。

図-4は、夏季および冬季の名古屋(図-2)における日射量の観測値と計算値の比較をそれぞれ示したものである。海上での日射量の観測データが入手できなかったため、陸上ではあるが図-1の領域内で唯一日射量の観測が行われている名古屋において比較を行った。これらの図より、計算値は、夏季の強い日射や冬季の弱い日射を良く表していることがわかる。また、2月3日や2月5日などの雨天時には、厚い雲の影響により日射量が減少しており、このことから雲の再現性も概ね良いと判断できる。MM5では、側面境界において雲を直接取り扱わず水蒸気量とし

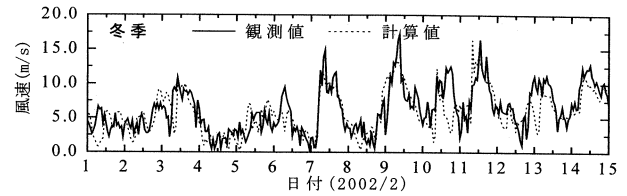
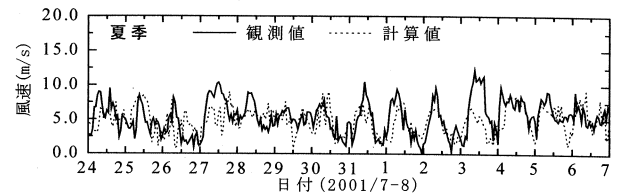


図-3 夏季および冬季のMT局における海面上10mの風速の観測値と計算値；(上図)夏季, (下図)冬季。

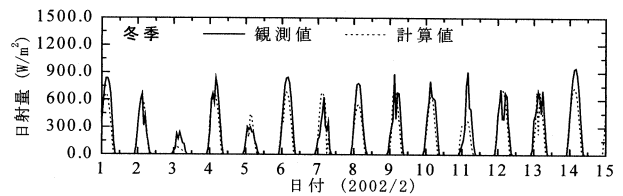
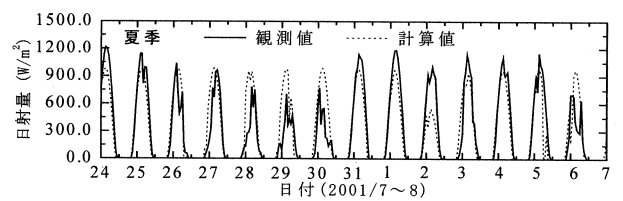


図-4 夏季および冬季の名古屋における日射量の観測値と計算値；(上図)夏季, (下図)冬季。

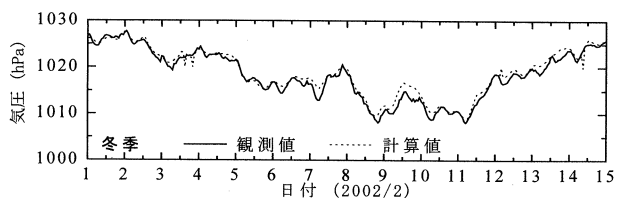
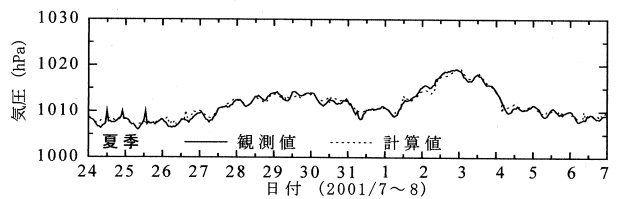


図-5 夏季および冬季の伊良湖における気圧の観測値と計算値；(上図)夏季, (下図)冬季。

て扱っているため、側面境界から十分に離れなければ雲が発生しないという問題が発生する¹⁰⁾。しかし、本研究では、本州を覆う大領域からのネスティング計算を行っており、側面境界と計算対象となる伊勢湾の間に十分な距離を確保できたために、伊勢湾において雲が適切に再現され、日射量が高精度で計算できたものと考えられる。

図-5は、夏季および冬季の伊良湖(図-2)における気圧の観測値と計算値の比較をそれぞれ示したものである。

海上での気圧の観測データが入手できなかったため、陸上観測の伊良湖において比較を行った。これらの図より、観測値と計算値は、ほぼ一致していることがわかる。これは、本研究の計算期間に台風などのイベント時が含まれていないこともあるが、8月3日の高気圧や2月9日付近の低気圧なども精度良く再現されており、MM5において気圧を適切に計算しているものと判断できる。

また、ここでは、風速、日射、気圧について夏季および冬季の精度検証の結果を示したが、春季および秋季においても同様の結果が得られることを確認している。

(2) 海洋場の精度検証

図-6は、春季の名古屋(図-2)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。この図より、計算値と観測値がほぼ一致していることがわかり、実用レベルの良好な精度で潮位を計算できることが明らかとなった。この結果は、CCMの潮位の開境界条件を与える日本周辺潮汐モデルNAO99Jb、および潮位に影響を及ぼす気圧や風などの気象場を計算するMM5の計算精度の高さに加えて、CCMの潮位の計算が適切なものであることを示している。また、表-2に各季節の名古屋、四日市、鳥羽、衣浦(図-2)における潮位の統計値を示した。これより、相関係数は0.92以上、RMS誤差は0.05m以下の良好な精度であることがわかる。ただし、三河湾に位置する衣浦では、他の3地点に比べて計算精度がやや悪く、今後、三河湾について詳細に検討を行っていく必要がある。

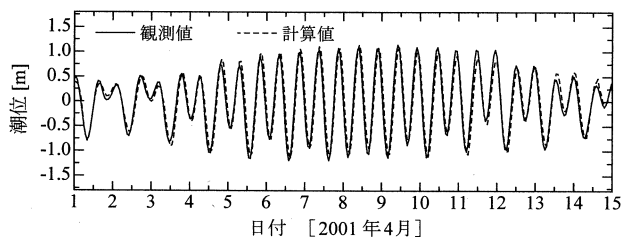


図-6 春季の名古屋における潮位の観測値と計算値

表-2 各季節の名古屋、四日市、鳥羽、衣浦における潮位の統計値

季節	観測点	相関係数	RMS誤差(m)
春季	名古屋	0.96	0.03
	四日市	0.96	0.03
	鳥羽	0.96	0.02
	衣浦	0.92	0.05
夏季	名古屋	0.95	0.03
	四日市	0.98	0.02
	鳥羽	0.95	0.02
	衣浦	0.98	0.02
秋季	名古屋	0.96	0.03
	四日市	0.96	0.03
	鳥羽	0.97	0.02
	衣浦	0.92	0.05
冬季	名古屋	0.98	0.01
	四日市	0.97	0.02
	鳥羽	0.98	0.01
	衣浦	0.94	0.04

図-7は、夏季および冬季のSB2(図-2)における水深2mおよび7m(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。これらの図より、水深2mの表層において計算値は、観測値の変動の傾向を良く表していることがわかる。ただし、8月4~7日の計算値は、過大評価となっている。一方、水深7mの底層では、流速が弱くなっている様子が見られ、計算においてもこの傾向が再現されている。また、図示しないが春季および秋季においても同様の結果が得られた。

図-8は、各季節のSB4(図-2)における水深0.1mおよび20mの水温の観測値と計算値の比較をそれぞれ示したものである。春季の計算開始時の観測値の水温は、表層の水深0.1mより底層の水深20mの方が水温が高く、水温の鉛直逆転が見て取れる。その後、表層の水温は上昇するが、底層の水温はほとんど変化せず、4月11日では底層より表層の水温が高くなり、水温成層が発達していく過程がわかる。そして、計算値と観測値は良く一致しており、結合モデルによって成層の発達過程が精度良く再現できることが示された。夏季は、強成層期であり表層と底層で大きな温度差が見られる。計算値においても、この傾向を良く再現している。秋季の観測値の水温は、9月15日~21日では底層より表層の方が水温が高く、9月22日~29日では底層より表層の方が水温が低くなっており、水温成層が逆転していく過程が確認できる。計算値でも、9月22日付近の表層の水温の急激な低下など水温成層の逆転の過程が精度良く計算されている。冬季は、表層より底層の方が水温が高く、水温の鉛直逆転が見て取れる。これは、冬季伊勢湾で卓越する北西風のために

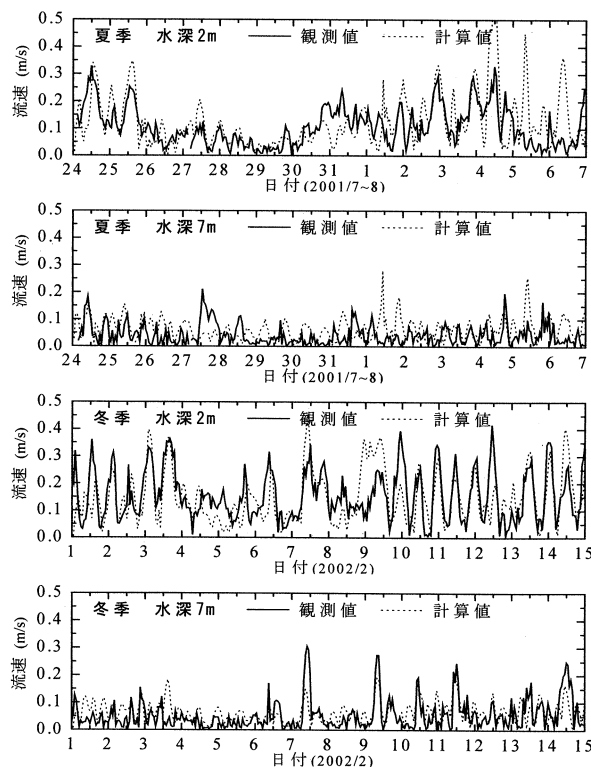


図-7 夏季および冬季のSB2における水深2mおよび7mの流速の観測値と計算値

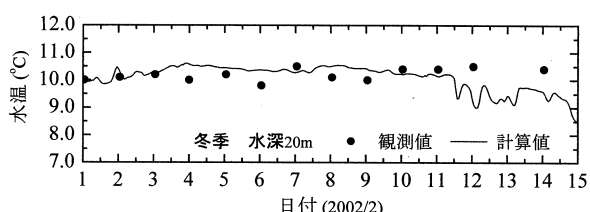
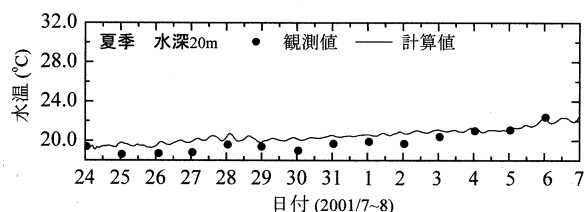
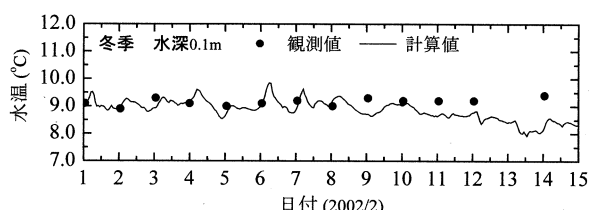
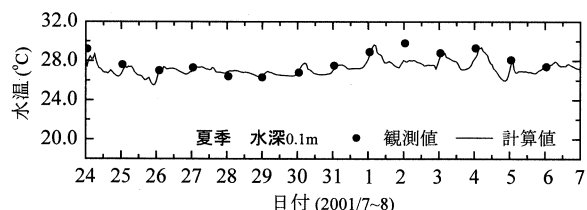
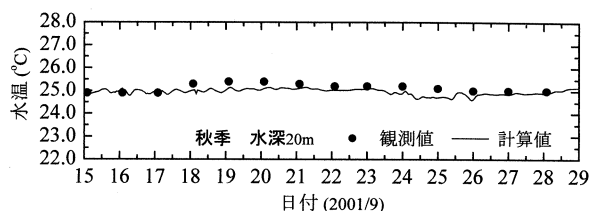
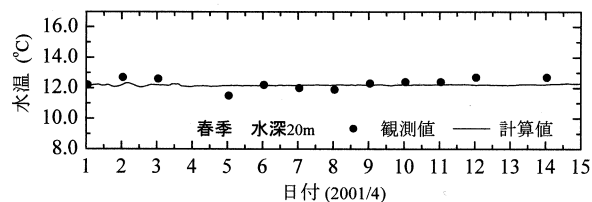
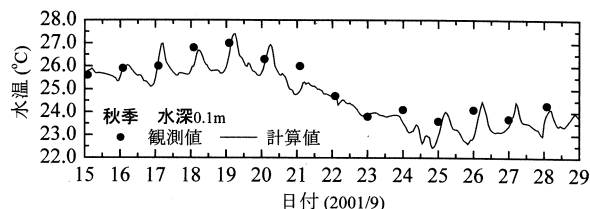
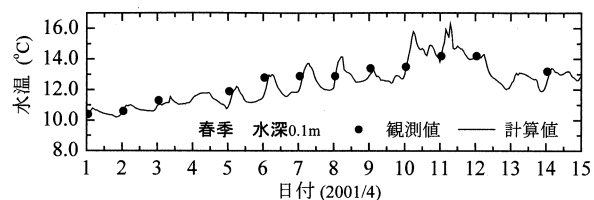


図-8 各季節のSB4における水深0.1mおよび20mの水温の観測値と計算値

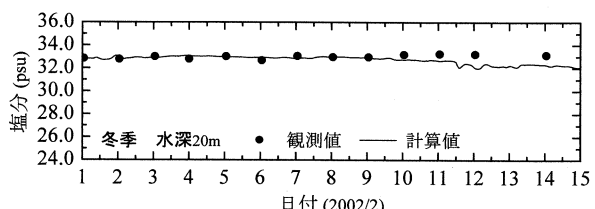
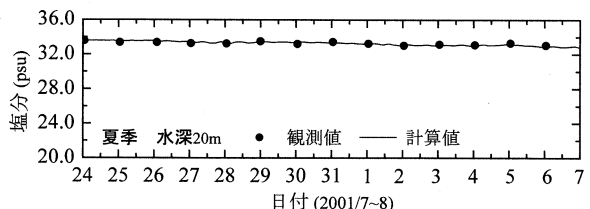
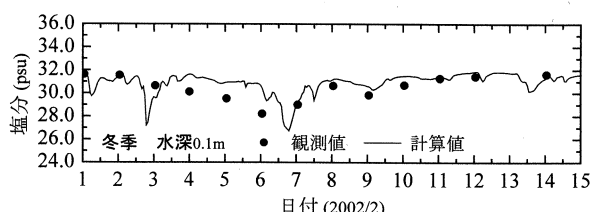
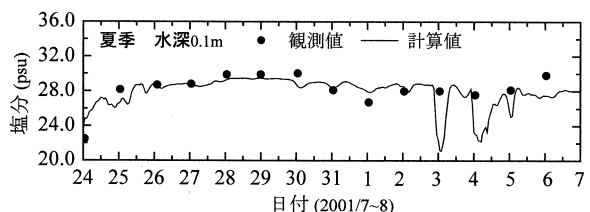
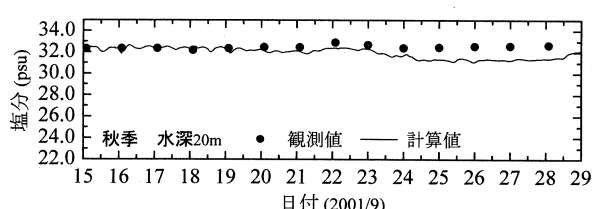
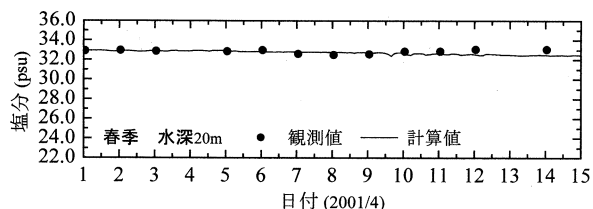
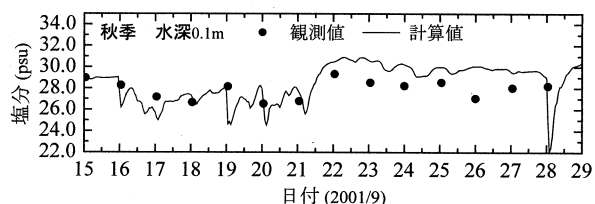
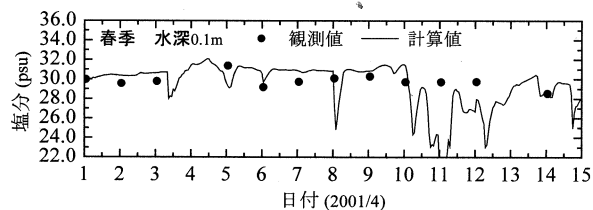


図-9 各季節のSB4における水深0.1mおよび20mの塩分の観測値と計算値

表層で湾内から外洋へ海水が流出し、高温・高塩分の黒潮が外洋から湾内の底層に進入してくるためである。そして計算では、2月12～15日の表層および底層の水温がやや過小評価となっているが、水温の鉛直逆転は再現されており、卓越する北西風および外洋水の進入が概ね精度良く計算できていると考えられる。

図-9は、各季節のSB4(図-2)における水深0.1m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。これらの図より、春季および冬季の30psuを上回る表層の高い塩分濃度から夏季および秋季の低い塩分濃度を良く再現していることがわかる。この観測点SB4は、木曾三川からの河川プリュームの影響を強く受ける場所であり、河川流量の適切な取り扱い、および河川プリュームの移動や破壊などの挙動に大きな影響を与える風の評価が重要である。今回の計算では、観測された河川流量を与えており、風の計算精度も図-3に示されたように良好であったことから、塩分を高精度に再現できたものと考えられる。

(3) 波浪場の精度検証

図-10は、各季節のMT局(図-2)における有義波高の観測値と計算値の比較をそれぞれ示したものである。4月9日、4月11日の計算値は、過大評価となっているが、これを除けば全ての季節において計算値は観測値の変動の傾向を良く表していることがわかる。ただし、有義波高が0.1m以下の時では、その波浪が再現できず、有義波高の値が0に近傍まで低下していることがわかる。これは、SWANの風から波へのエネルギー輸送項にquasi-linear理論を用いているためであり(小林ら, 2003)¹¹⁾、今後、詳細に検討していく必要がある。

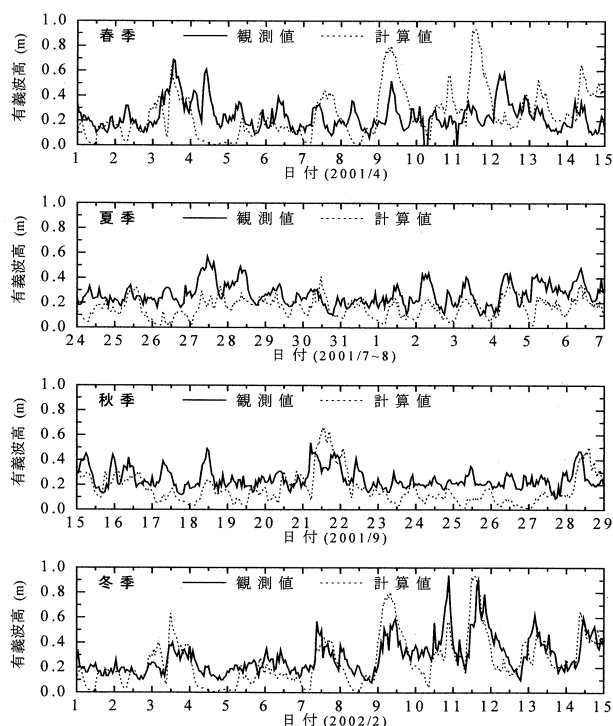


図-10 各季節のMT局における有義波高の観測値と計算値

5. 結語

本研究では、大気・海洋・波浪場を結合系として一体的に扱うことのできる大気-海洋-波浪結合モデルを用いて、より現実に近い伊勢湾の海水流動を多様な気象条件下で再現し、観測値と定量的な比較を行った。その結果、多様な条件下における伊勢湾の海象・気象特性を精度良く計算できることが明らかとなった。そして、結合モデルは、伊勢湾の流動・密度構造の解析を可能とする精度を有していると判断でき、伊勢湾の流動・密度構造のみならず物質輸送の解明につながると期待できる。

謝辞：観測データは中部国際空港株式会社、愛知県企業庁、国土交通省中部地方整備局、愛知県衣浦港務所および四日市港管理組合よりそれぞれご提供頂いた。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) 山口正隆，渡辺 健，畑田佳男：大阪湾における海上風の平面分布特性について，海岸工学論文集，第28巻，pp.168-172，1981.
- 3) 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.
- 4) 山下隆男，加藤 茂，大澤輝夫，筆保弘徳，西口英利：MM5による冬季季節風時の沿岸域海上風場の再現性について，海岸工学論文集，第50巻，pp.361-365，2003.
- 5) 鈴木 靖，宇都宮好博，三嶋宣明，橋本典明，永井紀彦：局所的風況予測モデルLAWEPSによる海上風推定，海洋開発論文集，第19巻，pp.49-52，2003.
- 6) 灘岡和夫，吉野忠和，二瓶泰雄：高度化した沿岸流動数値計算法を用いた原油流出シミュレーション，海岸工学論文集，第46巻，pp.461-465，1999.
- 7) 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.
- 8) Mellor, G.L. and Blumberg, A.F.: Wave breaking and ocean surface layer thermal response, *J. Phys. Oceanogr.*, 34, pp.693-698, 2004.
- 9) 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.
- 10) Ohsawa, T., Mizutani, H., Murakami, T., Kobayashi, T., Yasuda, T., and Fujiwara, T.: Development and verification of the coupled atmosphere-ocean model for Ise Bay, *Proc. of 29th International Conference on Coastal Engineering*, pp.690-700, 2004.
- 11) 小林智尚，樋口喬士，大澤輝夫，安田孝志：波浪推算モデルによる中部国際空港人工島の波浪場への影響，海岸工学論文集，第50巻，pp.196-200，2003.