

流体力学－生態系結合モデルCOHERENSを用いた伊勢湾の流動・密度構造の数値計算

NUMERICAL CALCULATION OF FLOW AND DENSITY STRUCTURES IN ISE BAY USING COUPLED HYDRODYNAMICAL-ECOLOGICAL MODEL “COHERENS”

川崎浩司¹・鈴木一輝²・金 昌勲³・水谷法美⁴

Koji KAWASAKI, Kazuki SUZUKI, Chang-Hoon KIM and Norimi MIZUTANI

¹正会員 博(工) 名古屋大学准教授 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C1-3 (651))

²学生会員 学(工) 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (同上)

³修(工) 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (同上)

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 (同上)

Water quality environmental problems in Ise Bay, which is one of the semi-enclosed bays in Japan, closely relate to flow and density structures. Therefore, it is necessary to reproduce and understand the flow and density structures for solving the water environmental problems. This paper examines the seasonal variations of the flow and density structures in Ise Bay using a COHERENS, which is a three-dimensional coupled hydrodynamical-ecological model. The validity and utility of the COHERENS were verified by comparing the observation data with the numerical results. Furthermore, the simulated results were in good agreement with the seasonal characteristics of the flow and density structures in the field observation. As a result, the COHERENS was found to be capable of reproducing the flow and density structures.

Key Words : COHERENS, flow structure, density structure, Ise Bay, numerical simulation

1. はじめに

伊勢湾をはじめ、半閉鎖性内湾では、赤潮や青潮、貧酸素水塊の発生が度々確認されており、水環境が深刻な問題となっている。水環境問題を解決するためには、赤潮と青潮の発生に密接に関係する湾内の流動・密度・水質構造を詳細に把握する必要がある。

内湾の水環境に関するこれまでの研究は、主に現地観測に基づいて行われてきた。しかし、現地観測によって取得できるデータは、空間的・時間的に限られていた。近年、計算技術の発展とともに、空間的・時間的に詳細なデータを取得可能な海洋モデルに基づく研究が積極的に実施されている。既往の研究で用いられてきた海洋モデルの一例として、CCM(Coastal Current Model)¹⁾やPOM(Princeton Ocean Model)²⁾が挙げられる。CCMは、鉛直座標系に多重 σ 座標を採用し、高次精度の差分を使用しているため、高精度な解析が可能である。しかし、流動構造を3次元的に解くため、計算負荷が非常に大きく、数か月にわたる期間を対象とした計算への適用は難しい。一方、POMは、鉛直座標系に σ 座

標を用いており、さらに、Mode-Splitting Methodを導入することで計算負荷の軽減を図っている。そのため、長期計算への適用性は高い。ただし、POM単体では、湾内の流動・密度・水質構造を同時に解析することはできない。そこで、本研究では、流動・密度計算だけでなく、水質計算も可能な流体力学－生態系結合モデルCOHERENS(Coupled Hydrodynamical Ecological model for REgional Shelf seas)³⁾に着目した。COHERENSは、POMと同様に、Mode-Splitting Methodを導入しているため、長期計算を行うことができる。また、湾内の流動・密度・水質構造を体系的に取り扱うことが可能なため、赤潮や青潮などの現象の解明に有用であると考えられる。ただし、海外での適用実績はあるものの、日本における適用事例は皆無であるため、日本の内湾を対象とした計算の精度検証が必要不可欠である。

上述の背景から、本研究では、流体力学－生態系結合モデルCOHERENSを半閉鎖性内湾である伊勢湾に適用し、計算値と観測値の比較により、モデルの有用性と妥当性を検証する。また、COHERENSによる計算結果を用いて、各季節における伊勢湾の流動・密度構造について検討を行う。

2. 流体力学－生態系結合モデル COHERENS

流体力学－生態系結合モデルCOHERENSは、3次元多目的数値モデルであり、1990年から1999年にかけて、EU(European Union)でのMAST(Marine Science and Technology Programme)プロジェクトの一環として開発された。

COHERENSの最大の特徴は、従来の海洋モデルと異なり、流動・密度計算と水質計算などとの結合計算を前提に開発された点である。図-1に示すように、物理モデルのみならず、水質モデルや物質輸送モデルなどが一つのパッケージに含まれており、物理モデルをベースに、目的に応じて他のモデルとの結合が可能である。

流動・密度計算を行う物理モデルの基礎方程式は、連続式、運動方程式、温度・塩分の移流拡散方程式からなり、静水圧近似、ブジネスク近似を適用している。基礎方程式を解く際には、Mode-Splitting Methodを用いており、3次元流動場を鉛直方向に積分した平面2次元流動場(External Mode)と鉛直方向の構造を維持した3次元流動場(Internal Mode)に分離して計算している。基礎方程式を3次元計算と2次元計算に分離して計算することで、計算負荷の大きい3次元流動場の計算間隔を大きくすることができ、全体として計算負荷を軽減させることを可能としている。さらに、External ModeとInternal Modeを整合させるため、Predictor-Corrector法が用いられている。また、Arakawa-C型スタッガード格子および σ 座標を用いて空間的な離散化を行っている。運動方程式や移流拡散方程式における移流項の離散化には、複雑なTVD(Total Variation Diminishing)スキームから単純な1次精度の風上差分法まで、目的に応じて選択できる。さらに、COHERENSには、渦粘性係数、渦拡散係数を求める乱流モデルについても複数のモデルが実装されている。例えば、単純な0方程式モデルから複雑である2方程式($k-l$ 型、 $k-\varepsilon$ 型)を選ぶことができる。

以上のように、COHERENSには、離散化手法、移流項の取り扱い、乱流モデル、境界条件の設定など数多くのオプションが実装されている。したがって、計算目的に応じて計算手法・設定条件などをユーザが適宜選択することが可能であり、ユーザビリティの高い数値モデルとなっている。

3. 計算条件

本研究では、図-2に示す伊勢湾と三河湾からなる伊勢湾海域を計算領域として設定した。計算条件は、表-1に示すとおりである。計算期間は2週間とし、非成層期から成層期へ移行する春季(2001年4月1日～14日)、強成層期である夏季(2001年7月24日～8月6日)、成層期から混合期へ移行する秋季(2001

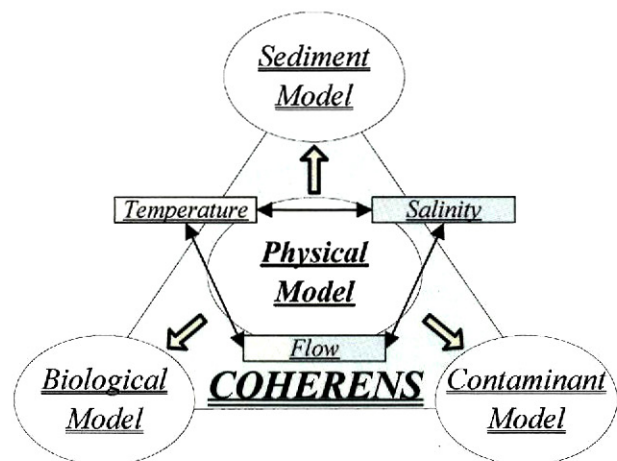


図-1 COHERENSの概念図

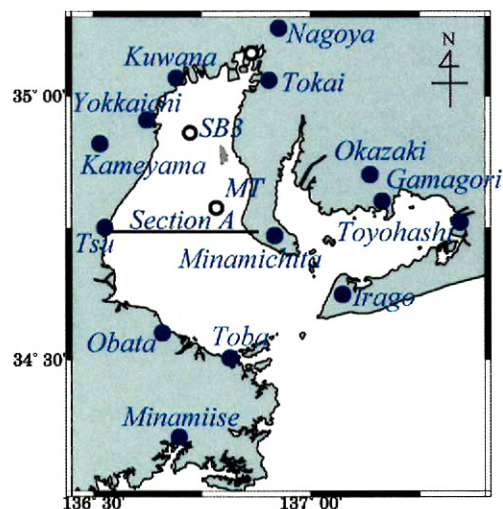


図-2 計算領域および気象観測点

表-1 計算条件

計算領域	北緯34度17分～35度5分 東経136度31分30秒 ～137度20分30秒
水平格子数	99×97
水平解像度	30秒×30秒(0.76km×0.92km)
時間ステップ	External-mode 4秒 Internal-mode 80秒
鉛直層数	20層
初期値・境界値	日本周辺潮汐モデルNAO.99jb 水温・塩分の観測値 主要10河川の流量データ

年9月15日～28日)、混合期である冬季(2002年2月1日～14日)を取り上げた。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を基に作成した。また、国立天文台で開発された日本周辺潮汐モデルNAO.99jb⁴⁾を用いて潮位を計算し、開境界の境界値として与えた。河川の境界値には、国土交通省中部地方整備局による伊勢湾に流入する主要10河川の毎時流量値を与えた。また、乱流モデルには、 $k-\varepsilon$ 型2方程式モデルを採用した。

さらに、気象場からの影響を考慮するため、海面境界条件として、風速、日射、降水量、湿度、雲

量を入力した。入力値は各データともに、図-2の気象観測点（名古屋、東海、南知多、岡崎、蒲郡、豊橋、伊良湖、桑名、四日市、亀山、津、小俣、鳥羽、南伊勢、MT局）で得られた観測値を用いた。ただし、観測データは空間的に不連続なものであるため、クレスマン補間によって内挿補間を行った。なお、気象観測点のうち、MT局は海上観測、その他の地点は陸上観測である。

4. モデルの精度検証

(1) 海表面境界値の検証

内湾や浅海域の水質環境は、気象場からの影響を強く受けるため、海表面境界過程は大変重要である。本計算では、3章で述べたように、気象場の影響を考慮するため、海表面境界値として気象観測値に基づく補間値を用いることとした。しかしながら、内挿補間で用いた観測点のうち、MT局以外の観測値は陸上観測により得られたデータである。一般的に、海上では陸上に比べて摩擦が少ないため、海上風速は陸上風と比べて1.5～2倍程度の値を示すといわれている。そのため、今回行った補間による風速値は、実際の風速よりも過小評価されていると推測される。本研究と同様に、入力値として気象観測値を採用したKobayashi and Fujiwara⁵⁾は、2倍にした風速値を採用している。そこで、本計算の前段階として、MT局における観測値と補間値、さらに、補間値を2倍した値について比較を行った。図-3は、秋季における風速の観測値と補間値、補間値を2倍した場合の比較である。図-3から、補間値は観測値の変動傾向を再現しているものの、観測値の半分程度となっている。一方、同図から、補間値を2倍した場合は観測値の時間変動をよく再現していることがわかる。

そこで、湾内の密度構造におよぼす風の影響を検討するため、風速に補間値を直接入力した場合（Case 1）と、補間値の2倍を入力した場合（Case 2）を対象に計算を行った。図-4に、観測点SB3（図-2参照）における各季節の表層水温（水深0.1m）の時系列変化を示す。同図から、全ての季節で風速を2倍にし、海上風速に近い値としたCase 2の方が、Case 1よりも水温の時間変動をよく再現していると判断される。また、図-4(a)、図-4(b)および図-4(c)から、春季、夏季および秋季におけるCase 2の水温は、Case 1に比べ全体的に低下している。さらに、成層状態にある夏季と秋季では、他の季節に比べて、Case 1とCase 2の計算結果の差が著しく大きいことがわかる。この理由として、風によって表層部の水塊と表層下の水塊が強く混合したことが考えられ、鉛直混合へおよぼす風の影響が大きいと推察される。一方、図-4(d)に示すように、混合期である冬季では、両者の計算結果の差はあまりみ

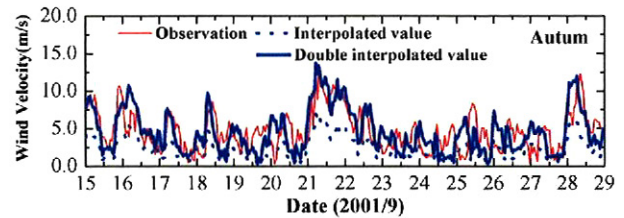
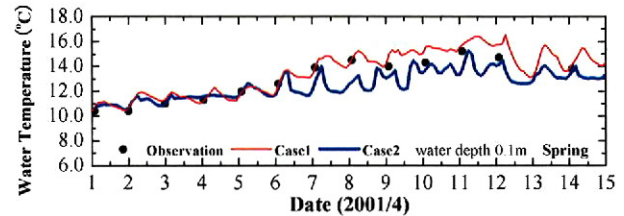
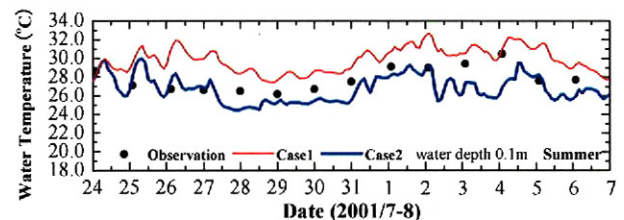


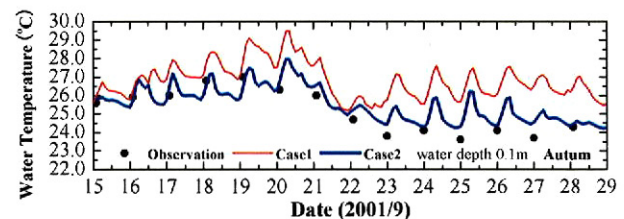
図-3 秋季における風速の観測値と補間値の時間分布



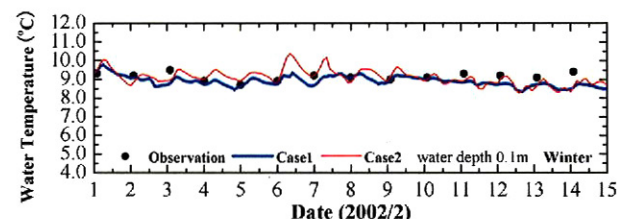
(a) 春季



(b) 夏季



(c) 秋季



(d) 冬季

図-4 風速の違いによる水温の時間変化の比較

れない。したがって、風速値による水温の時系列変化の違いは、成層状態であるときに大きくみられることがわかる。また、海表面の蒸発量は風の影響を強く受けるため、海表面から放出される熱量が変化したことも、Case 1とCase 2の結果に差異が生じた要因の一つとして考えられる。このことは、湾内の密度構造におよぼす風の影響が大きいことを示唆している。上述の結果を踏まえ、以降の解析では、Case 2の結果を用いることとした。

(2) 海洋場の精度検証

図-5に、春季の名古屋における潮位の観測値と計算値の比較を示す。同図から、計算値と観測値が

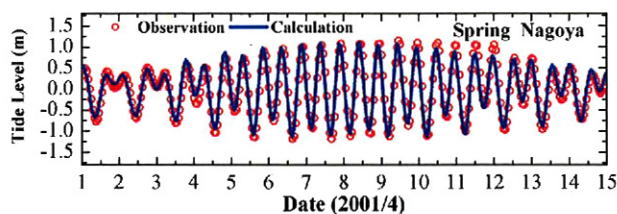
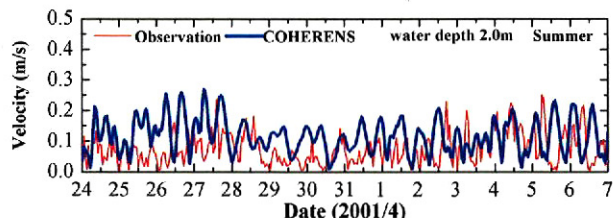
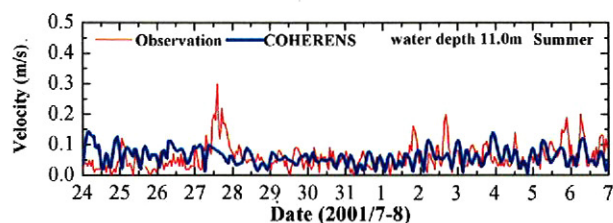


図-5 春季のMT局における流速の時間分布



(a) 表層



(b) 底層

図-6 夏季のMT局における流速の時間分布

よく一致しており、潮位に関して精度良く計算できていることがわかる。図-6は夏季の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の比較を示したものである。同図より、計算値は、過大評価しているなど観測値との誤差が認められるものの、全体的に表層の時間的変動をある程度表現していると考えている。また、底層についても、一部の期間で計算値と観測値に差がみられるが、計算値はおおよそ観測値の時間的変動を捉えているといえる。ここでは、紙面の都合上、図面を割愛したが、他の季節においても、同様の結果が得られることを確認している。

5. 伊勢湾の流動・密度構造

本研究で対象とする伊勢湾は、日本の中央に位置し、海域面積は 1738km²、平均水深は 19.5m である。伊勢湾の海底地形は湾中央部で盆状となっており、最大水深は 38m である。湾奥部には木曽三川をはじめとする主要河川を有するため、伊勢湾の水質は河川から供給される淡水の影響を強く受けている。

本章では、前節の試行計算結果に基づき、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討する。

春夏秋冬について、表層（水深 0.1m）における時間平均した塩分および平均流速の空間分布を図-7

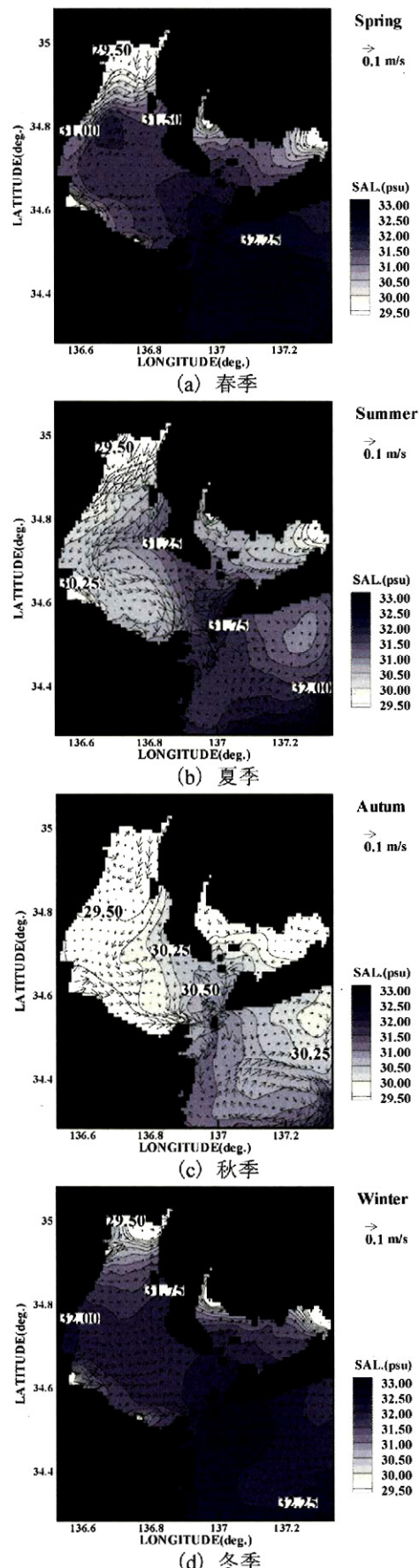
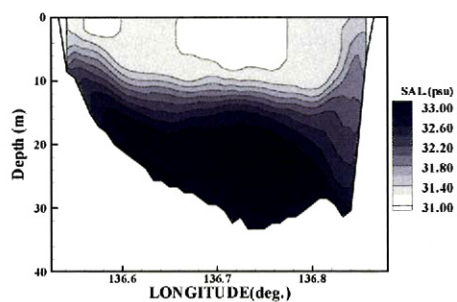
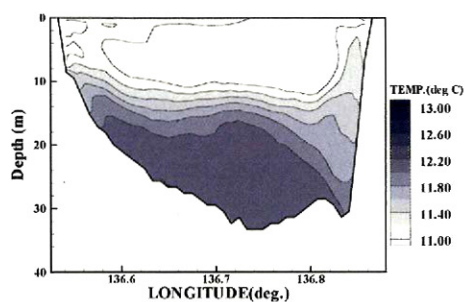
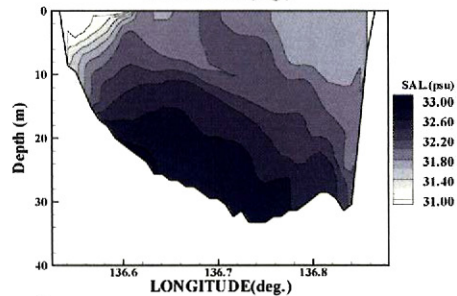
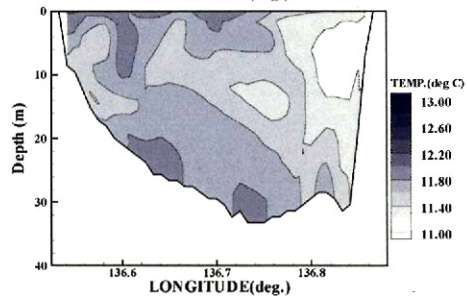


図-7 各季節における表層の平均塩分および平均流の空間分布

(a) 4月3日
0:00



(b) 4月7日
0:00



(c) 4月12日
0:00

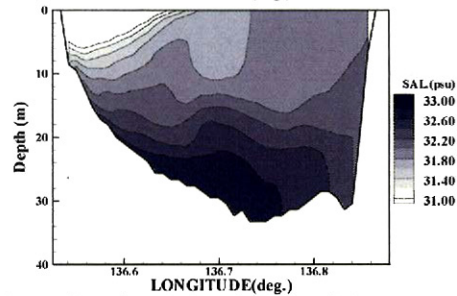
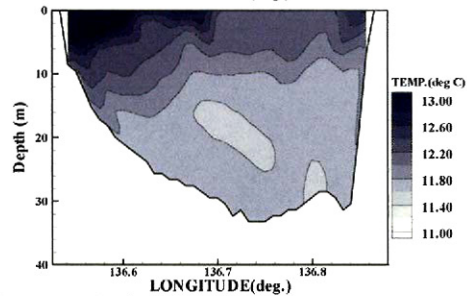
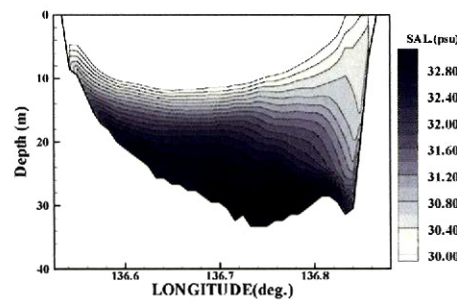
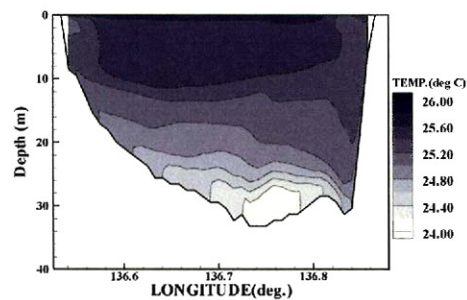
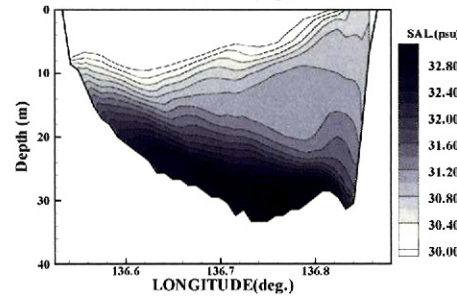
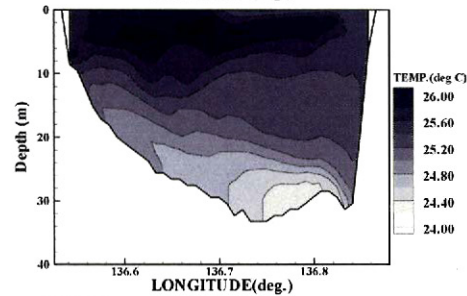


図-8 春季の伊勢湾横断面における水温・塩分の時空間分布；（左図）水温 （右図）塩分

(a) 9月17日
0:00



(b) 9月21日
0:00



(d) 9月26日
0:00

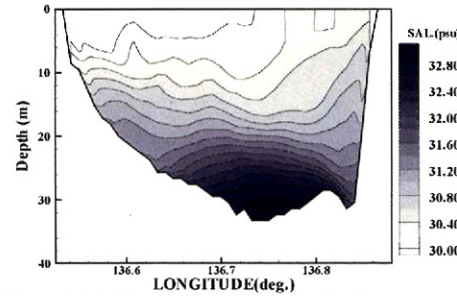
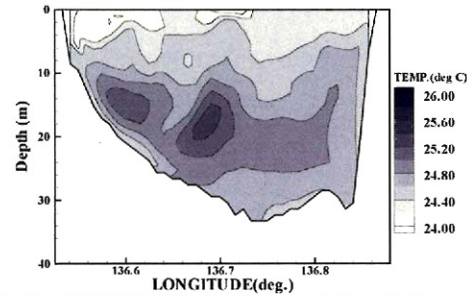


図-9 秋季の伊勢湾横断面における水温・塩分の時空間分布；（左図）水温 （右図）塩分

に示す。同図から、湾口部では、どの季節においても、外洋から流入する高塩分の水塊により、塩分が高い値を示している。また、各季節ともに、湾奥部では塩分が低くなっており、湾奥部に位置する河川からの淡水流入による影響であると考えられる。特に、図-7(b)および図-7(c)に示す夏季や秋季では、河川起源による表層の塩分低下が湾内に広がっていることがわかる。一方、図-7(a)と図-7(d)から、春季や冬季においては、表層塩分は伊勢湾内でほぼ一様に分布している。

次に、平均流について考察する。図-7に示す平均流の空間分布から、各季節において、共通して河口域から湾内方向への流れが認められる。また、特に、秋季でみられた湾奥部の時計回りの還流は、海上保安庁による伊勢湾潮流図⁶⁾と一致していることを確認した。春季には、湾奥部から西岸に沿うように流れる反時計回りの循環流が存在していることがわかる。そして、循環流に沿うようにして塩分フロントが形成されていることも確認できる。この結果は、杉山⁷⁾による観測結果とよく一致している。また、夏季においては、塩分フロントが春季に比べて東側に移動しており、春季と同様に塩分の等値線に対応する流れが存在していることがわかる。

図-8は、伊勢湾横断面(図-2の断面A)における春季の水温および塩分の分布変化を示したものである。図-8(a)から、4月3日においては、底層の水温が表層の水温よりも高く、水温の逆転成層の発生が認められる。その後、図-8(b)に示す4月7日では、4月3日にみられた成層状態が弱まり、徐々に混合している。さらに、図-8(c)から、4月12日になると、表層の水温が高いのに対し、底層の水温は低いことから、水温成層が発達しているといえる。これは、表層が日射の影響であたためられることにより生じる現象であり、成層が発達し始める春季の水温分布の特徴をよく表している。また、塩分は、4月3日においては、水温分布と同様に成層状態にある。その後、4月7日には徐々に混合しており、4月12日になると、再び成層状態が発達している。

図-9に伊勢湾横断面における秋季の水温・塩分分布の変化を示す。図-9(a)および図-9(b)から、9月17日から21日にかけて、水温の成層が認められる。しかし、図-9(c)に示すように、9月26日では全体的に水温が下がり、特に、表層では水温の低下が著しい。これは、気温が大きく低下し、さらに、風による鉛直混合効果により、表層水温が低くなったためと考えられる。一方、塩分については、9月17日では、底層に高塩分水塊が存在しており、強い成層状態にあることがわかる。9月21日の断面東側では、表層においても高い塩分を示している。これは、湾口部から流入した高塩分の外洋系水塊が湾東側に沿って湾内に流入したためと推察される。その後、9月26日では、9月17日に比べ、断面東側、西側で混合されている様子を確認することができる。

6. 結語

本研究では、半閉鎖性内湾である伊勢湾海域に、流体力学-生態系結合モデル COHERENS を適用し、流動・密度構造の再現計算を行った。そして、計算値と観測値の定量的な比較から、同モデルの妥当性を検証した。その結果、海表面の境界条件として気象観測値の補間値を用いる際には、陸上で観測された風速値を2倍にすることで、観測値を精度良く再現できることを示した。さらに、COHERENS は、伊勢湾における春夏秋冬の流動・密度構造の特徴をよく再現しており、本モデルはこれらを検討するにあたり有用であることを明示した。

今後は、流動・密度構造のみならず、水質モデル、物質輸送モデルを用いて、伊勢湾海域における流動・密度・水質構造の解析を行っていく予定である。

謝辞：中部国際空港株式会社、愛知県企業庁、国土交通中部地方整備局より観測データをご提供いただいた。ここに併せて謝意を表する。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)であることをここに付記し、感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 村上智一、安田孝志、大澤輝夫：気象場と結合させた湾内の海水流動計算のための多重座標モデルの開発、海岸工学論文集、第51巻、pp.366-370、2004。
- 2) Mellor, G.L.: Users guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model. <http://www.aos.princeton.edu/WWPUBLIC/htdocs.pom>, 2004.
- 3) Luyten, P.J., Jones, J.E., Proctor, R., Tabor, A., Tett, P. and Wild-Allen K.: COHERENS—a coupled hydrodynamical ecological model for regional shelf seas: user documentation. MUMM report, *Management Unit of the Mathematical Models of the North Sea*, 911p, 1999.
- 4) 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.
- 5) Kobayashi, S. and Fujiwara, K.: Modeling the long-term variability of shelf water intrusion into the SetoInland Sea, Japan, *Journal of Marine Systems*, 77, pp.341-349, 2009.
- 6) 海上保安庁：伊勢湾潮流図、海図第6215号、1995。
- 7) 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。