

# 閉鎖性内湾における海洋データ同化システム 情報の有用性について

## UTILITY OF OCEAN VARIATIONAL ESTIMATION SYSTEM DATA IN ENCLOSED BAY

川崎浩司<sup>1</sup>・戸田圭亮<sup>2</sup>・藤原建紀<sup>3</sup>・吉岡典哉<sup>4</sup>  
Koji KAWASAKI, Keisuke TODA, Tateki FUJIWARA and Noriya YOSHIOKA

<sup>1</sup>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))

<sup>2</sup>正会員 修(工) 東海旅客鉄道株式会社 (〒450-6101 名古屋市中村区名駅1-1-4)

<sup>3</sup>正会員 農博 京都大学教授 大学院農学研究科応用生物科学専攻  
(〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

<sup>4</sup>学(理) 気象庁予報官 地球環境・海洋部 (〒100-8122 東京都千代田区大手町1-3-4)

Flow, density and water quality structures in an enclosed bay are affected by not only meteorological disturbances and river discharges but also the intrusion of open sea water. The hydrodynamic information of open sea is, therefore, of importance to numerically understand or forecast physical process in the bay. This study is aimed at discussing the utility of an ocean variational estimation system data in enclosed bay by applying MOVE-WNP data, which includes the grid point values of ocean current, water temperature, salinity and sea surface height in Northwest Pacific Ocean, to Ise Bay. As a result, the MOVE-WNP data was found to be in good agreement with the observation one in terms of water temperature. That indicates that the effect of outer sea on physical structure in an enclosed bay can be elucidated by making use of the MOVE-WNP data.

**Key Words :** Ocean variational estimation system data, enclosed bay, open sea, Ise Bay

### 1. はじめに

内湾における流動・密度・水質構造は、気象場や河川流入による影響のみならず、外洋からの影響を強く受ける。このことは、我が国を代表する閉鎖性内湾の一つである伊勢湾においても、既往の研究から示唆されている。例えば、伊勢湾において外洋水が進入する深度と湾内における溶存酸素濃度DOの季節変動がよく対応していることが明らかになっている<sup>1)</sup>。よって、湾内の流動計算や水質予測を行うためには、外洋情報を適切に導入する必要があるといえる。しかし、現状では、外洋における現地観測データが時空間的に不足しており、大きな課題となっている。

一方、外洋情報として、気象庁・気象研究所による北西太平洋における海洋データ同化システムMOVE/MRI.COM-WNP (Multivariate Ocean Variational Estimation system / Meteorological Research Institute Community Ocean Model - Western North Pacific)<sup>2), 3)</sup>の長期再解析データ(MOVE-WNPデータ)が注目されている。同データは、高解像度かつ長期間にわたる海洋情報が集約されており、日本周辺の海洋における海象現象の解析にとどまらず、前

述した内湾における流動・密度・水質構造に関する数値解析に対しても大変有用であると考えられる。しかしながら、閉鎖性内湾における同データの有用性を検討した研究例はこれまでに皆無である。

本研究では、伊勢湾を対象にMOVE-WNPデータの特徴を示すとともに、観測値との比較から内湾における同データの有用性を検証することを目的としている。さらに、同データを利用した内湾での流動・密度・水質計算への展開についても言及する。

### 2. 海洋データ同化システム MOVE/MRI.COM

気象庁では、太平洋など日本周辺海域における海況予測や海洋現象の分析を目的として、海洋データ同化システムを以前より開発・運用してきた。そして、2008年には、気象研究所海洋研究部が中心となって開発した、新たな海洋データ同化システムMOVE/MRI.COMの運用を開始した。以下に、同システムの概要を述べる。

#### (1) MOVE/MRI.COMの構成

MOVE/MRI.COMは、図-1に示すように、大きく分けて数値海洋モデルと客観解析システム(データ

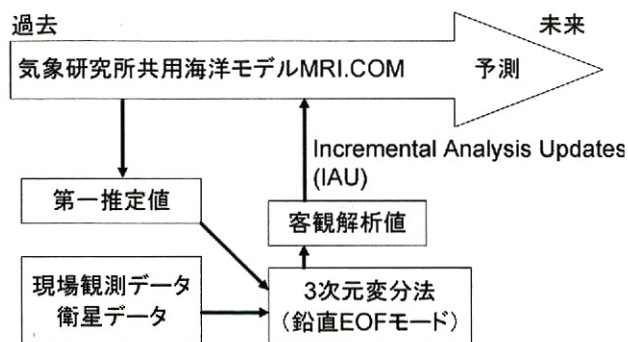


図-1 MOVEシステムの構成

同化システム)で構成される。数値海洋モデルには、気象研究所共用海洋モデルMRI.COM<sup>4)</sup>を用いている。

MOVE/MRI.COMでは、つぎの手順により、海洋の状態を再現している。まずMRI.COMにより第一推定値を算出する。そして、第一推定値と観測データによる客観解析を行ったのち、その結果に基づきMRI.COMを修正することで客観解析結果を反映させる。これらの計算手法については、それぞれ次節で概説する。なお、MOVE/MRI.COMには、空間解像度が低いが、全球を対象としたMOVE/MRI.COM-G (MOVE-G)、高解像度で計算領域を北太平洋に限定したMOVE/MRI.COM-WNP (MOVE-WNP)の2つがある。MOVE-GとMOVE-WNPは、以前運用されていたODAS (Ocean Data Assimilation System)とCOMPASS-K (Comprehensive Ocean Modeling, Prediction, Analysis and Synthesis System in the Kuroshio region)がそれぞれ別のシステムであったことに対して、基本的には同じ同化システムとなっている。以下では、本研究で使用するMOVE-WNPに関連した事項について述べる。

## (2) 気象研究所共用海洋モデルMRI.COM

### a) MRI.COMの特徴

MRI.COMは、気象研究所で開発・運用されてきた海洋大循環モデルである。海洋大循環モデルは、海洋で生じる現象の中でも、比較的大スケールの現象を主に扱うことを想定している。例えば、世界規模の熱塩循環、大洋スケールの水平循環および中規模渦などが相当する。空間スケールでは数十kmから数千km、時間スケールでは月や年単位である。

MRI.COMは、鉛直 $z$ 座標を用いたプリミティブ方程式系を、ブシネスク近似のもとで有限差分法を用いて数値的に解いている。また、自由表面を求める際に、表層に $\sigma$ -layerモデルを導入している。さらに、MRI.COMの特徴の一つとして、混合層や海水など付加的な物理過程を加えられること、積分のスキームや物理過程のパラメータ化にいくつかの選択肢があることが挙げられる。

### b) MRI.COMの設定条件

MOVE-WNPにおける計算領域は、図-2に示すように、 $117^{\circ}\text{E} \sim 160^{\circ}\text{W}$ 、 $15^{\circ}\text{N} \sim 65^{\circ}\text{N}$ の北西太平洋で

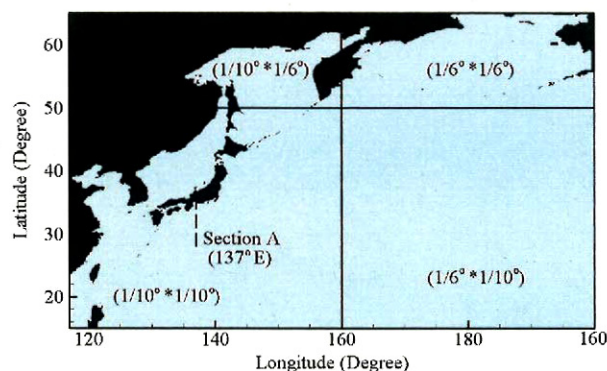


図-2 MOVE-WNPの計算領域と水平解像度  
(数字は東西方向\*南北方向の解像度を表す)

ある。日本近海の水平格子間隔は東西・南北方向とも $1/10^{\circ}$ であり、 $160^{\circ}\text{E}$ 以東で東西 $1/6^{\circ}$ 、 $50^{\circ}\text{N}$ 以北で南北 $1/6^{\circ}$ となる可変格子を採用している。鉛直方向には6000mまでに54層を有している。また、側面境界値を取得するために、 $100^{\circ}\text{E} \sim 75^{\circ}\text{W}$ 、 $15^{\circ}\text{S} \sim 65^{\circ}\text{N}$ を計算領域とする水平解像度 $1/2^{\circ}$ の北太平洋モデルをあわせて実行している。

MRI.COMの駆動には、長期大気再解析および気候データ同化システムのデータ (JRA-25/JCDAS)を用いている。与える大気データは、運動量 (風応力)、淡水 (降水)、熱 (短波・長波放射)の各フラックスおよび海上気象要素 (海上気温や風など)である。ただし、潜熱・顕熱フラックスはMRI.COMの海面水温と与えられた海上気象要素からKondoのバルク式<sup>5)</sup>を用いて計算している。また、海面での蒸発についてもMRI.COMの中で計算している。なお、モデル固有の誤差を軽減するために、海面塩分気候値を用いて復元型の海面フラックスを同時に与えている。

### (3) 客観解析システム

MOVE-WNPでは、客観解析手法としてFujii and Kamachiによる3次元変分法<sup>6)</sup>を用いている。その解析手法は、制御変数として水温と塩分の2つの変数を採用した多変量解析システムであり、水温と塩分の互いの相関も、水温と塩分の鉛直結合EOF (Empirical Orthogonal Function)モードにおける卓越モードの振幅を制御変数とすることで考慮されている。さらに、鉛直結合EOFモードには、鉛直方向の水温と塩分の分布を関係づける情報が含まれている。そのため、鉛直EOFモードを用いて客観解析を行うことにより、例えば、水温のみの観測しかない場合においても塩分の修正が可能となる。特に、塩分の観測は水温の観測に比べてその数が格段に少なく、従来の方法では塩分場の推定が困難であったが、本システムの導入により現実的な3次元塩分場の解析が可能となっている。

作成した客観解析値によりMRI.COMを修正する方法としては、Bloom et al.が提案したIAU<sup>7)</sup> (Incremental Analysis Update)と呼ばれる手法を用

いている。これは、客観解析値と数値海洋モデルMRI.COMの差を一定の期間（同化期間）に割り振って徐々に挿入する手法である。MOVE-WNPでは、一連の同化サイクルを5日間かけて行っている。

#### (4) MOVE-WNPデータについて

MOVE-WNPは、近い将来の海況を予測するために、2008年より気象庁で運用されている。それに加えて、過去における海洋現象の分析を行うことも、MOVE-WNPの開発・運用目的の一つである。そこで、気象庁・気象研究所では、MOVE-WNPを用いた長期再解析（再現計算）を実施した。本研究においては、この長期再解析データ（MOVE-WNPデータ）を活用することとした。長期再解析の期間は、1985年から2007年までの23年間である。水温、塩分、東西・南北方向流速、海面高度の各項目について、同化期間と同じ5日間毎の値（5日間の平均値）が保存されている。空間解像度および鉛直方向間隔はMOVE-WNPと同様である（図-2参照）。ここで、MOVE-WNPデータの一例として、図-3に2007年1月3日の表層における水温、塩分の分布を示す。同図をみることで、両項目の北西太平洋における詳細な分布が理解できる。

以上のように、MOVE-WNPデータは、日本近海における、長期間かつ高解像度の海洋データセットといえる。

### 3. 日本近海の外洋における MOVE-WNP データの有用性

#### (1) MOVE-WNPデータの妥当性

日本近海におけるMOVE-WNPの精度検証はこれまで行われてきた。楳田ら<sup>9)</sup>は、以前の同化システムCOMPASS-KとMOVE-WNPを比較し、空間格子の高解像度化により中規模渦などの現象が明瞭に表現可能となったことを示した。そして、2002年から2007年までの現場観測データとの相関関係から、水温、塩分、流速構造の妥当性を確認するとともに、特に塩分についてCOMPASS-Kよりも再現性が大幅に向上したことを明らかにした。さらに、海面高度については、1993年から2006年までの衛星海面高度計データとの比較によって妥当性を検証し、十分な相関を有していることを明らかにした。また、大崎ら<sup>9)</sup>は、MOVE-WNPによる日本南方における黒潮流路の再現性を検証するために、漁礁ブイと潮位の実測データとの比較を行った。その結果、黒潮流路の離岸・接岸の時間変化が精度よく再現されていることが判明した。このように、日本近海の外洋におけるMOVE-WNPの妥当性・有用性については、十分に検討されている。

#### (2) 外洋におけるMOVE-WNPデータの活用

ここでは、外洋におけるMOVE-WNPデータの活用方法の一例を紹介する。はじめに、137°Eの縦断

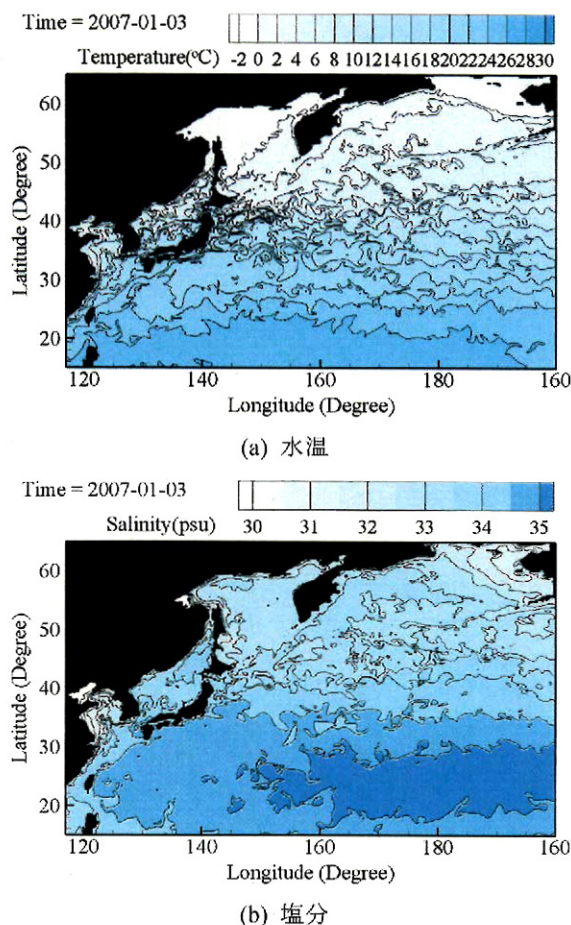
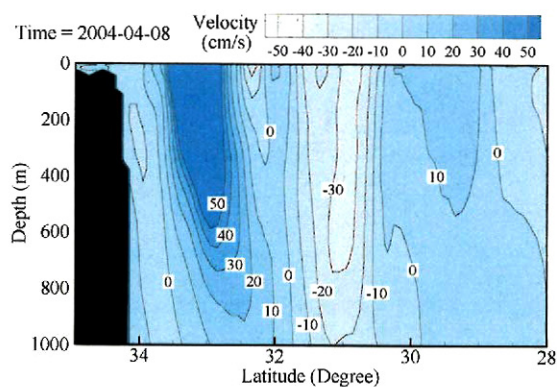


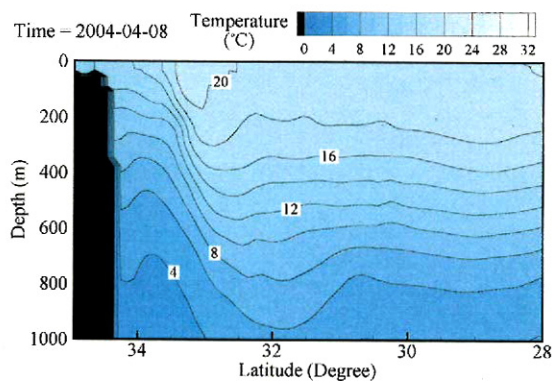
図-3 MOVE-WNPデータによる海況情報  
(2007年1月3日)

面（図-2中のSection A）における東西方向流速、水温、塩分について、2004年4月8日の鉛直分布を図-4に、2004年10月10日の鉛直分布を図-5にそれぞれ示す。図-4(a)に示す4月の流速分布をみると、33°N付近で東向きの流速が50cm/s以上となっていることがわかる。同様に、図-5(a)に示す10月の流速分布においても、31°Nから32°N付近で東向きの流速が最大となっている。これらはともに、日本の南海上を西から東へ流れる黒潮の流路であり、4月と10月では位置が大きく異なることがみてとれる。さらに、図-6には、伊勢湾南方の太平洋における表層流速の分布を示す。同図より、黒潮の流路の差異が明瞭に理解できる。4月には、本州南岸に沿って流れる「非大蛇行流路」、10月になると、日本南方で大きく蛇行する「大蛇行流路」と呼ばれる流路パターン<sup>10)</sup>となっている。加えて、10月には、蛇行に伴い伊勢湾南方で反時計回り循環流の発生が認められる。

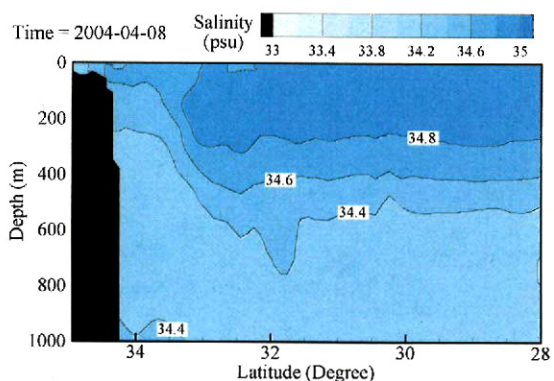
さらに、黒潮の流路の違いは、水温・塩分分布にも影響をもたらす<sup>10)</sup>。図-4(b)と図-5(b)の水温分布を比較すると、4月には4°Cの等温線が水深800m付近に存在するものの、10月になると、水深500m付近まで張り出していることがわかる。黒潮と本州の間の下層における冷たい水が湧き上がり、冷水塊となるこの現象は、漁場の位置に影響を与えることが



(a) 流速（東向きが正）

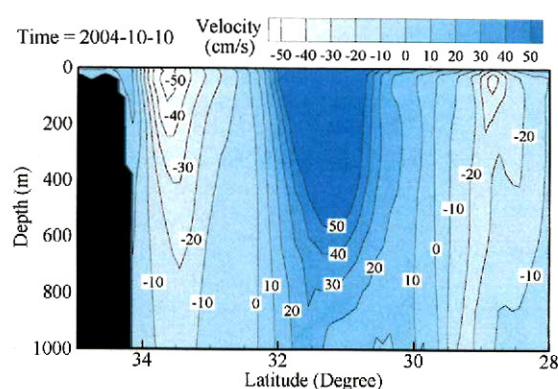


(b) 水温

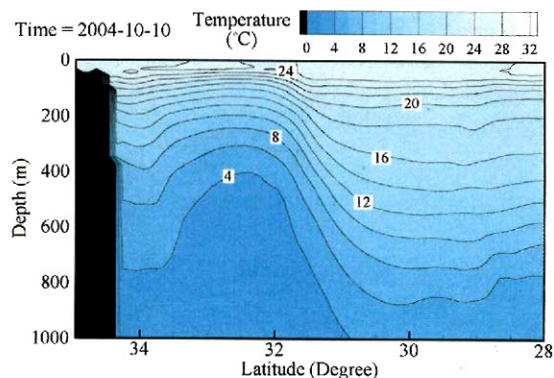


(c) 塩分

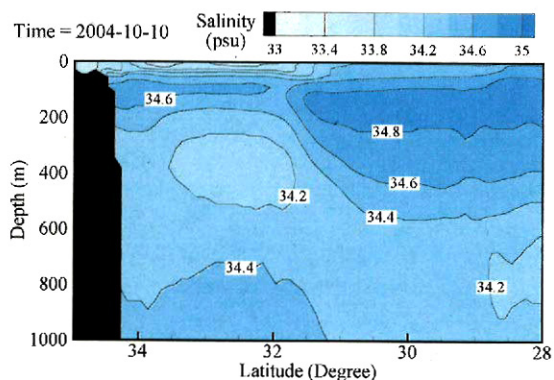
図-4 137° Eの縦断面における流速・水温・塩分の鉛直分布（2004年4月8日）



(a) 流速（東向きが正）



(b) 水温



(c) 塩分

図-5 137° Eの縦断面における流速・水温・塩分の鉛直分布（2004年10月10日）

知られている。また、図-4(c)と図-5(c)に示す塩分分布をみると、10月には表層で低塩分となっていることが確認できる。さらに、図-5(c)に示す10月の分布においては、2か所に34.2psu以下の低塩分水塊が存在している。中でも、28°Nの水深800m付近に見られる低塩分水塊は、北太平洋中層水と呼ばれる塩分極小層と推定される。これは、本州東方で親潮（低温・低塩分）と黒潮が表層で混合し、海洋内部に入り込んで輸送されたものと考えられている<sup>11)</sup>。

このような伊勢湾南方の外洋における海洋現象は、湾内の流動・密度構造や貧酸素水塊の消長など水質特性に影響を与えるものと考えられる。よって、外洋におけるMOVE-WNPデータの情報は、内湾の環境を考える上でも有益であるといえる。

#### 4. 伊勢湾における MOVE-WNP データの有用性

##### (1) MOVE-WNPデータの妥当性

日本近海の外洋におけるMOVE-WNPデータの有用性は前述したとおりであるが、伊勢湾など内湾における妥当性についてはこれまで未検討である。そこで、MOVE-WNPデータと観測値の比較を行った。比較地点は、図-7に示す伊勢湾湾奥部（St. 2）、湾中央部（St. 11）、湾口部（St. 18）の3点である。比較の結果については、紙面の関係上、湾中央部と湾口部のみをそれぞれ図-8、図-9に示す。両図は、1994年から2003年までの表層・底層における水温と塩分の時系列である。図-8(a)、図-9(a)に示す表層水温をみると、MOVE-WNPデータは、湾口部における

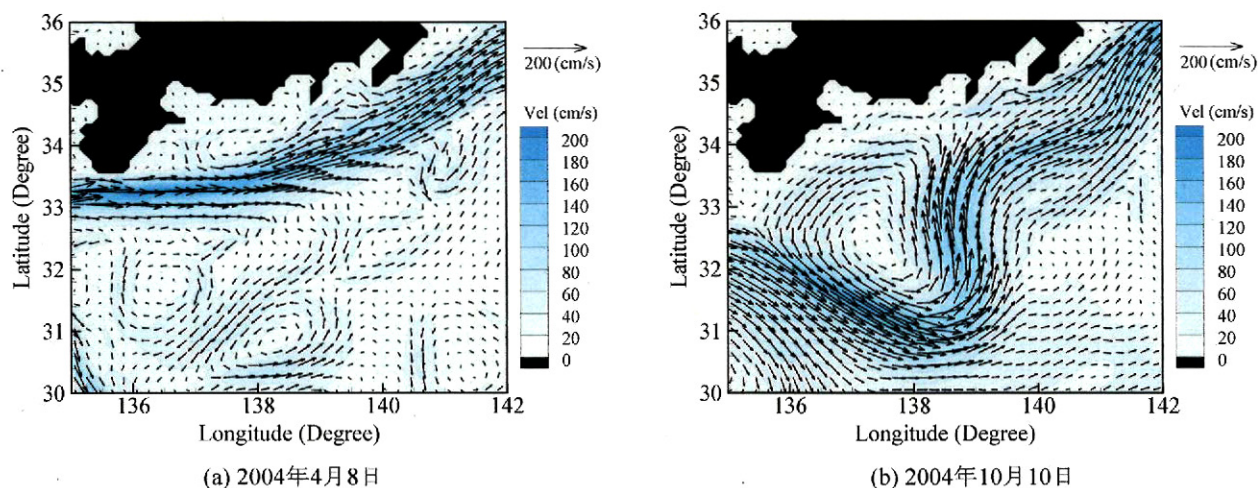


図-6 伊勢湾南方における表層流速分布

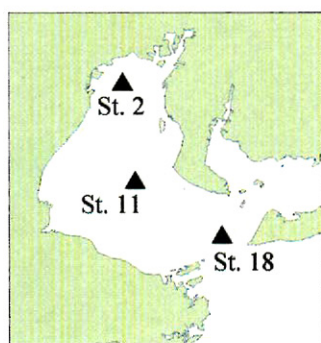


図-7 観測点の位置

冬季の表層水温を若干過大評価しているものの、観測値の変動を捉えているといえる。また、図-8(b)、図-9(b)からわかるように、MOVE-WNPデータによる底層水温は、観測値を良好に再現している。一方、塩分について考察すると、図-8(d)、図-9(d)に示す底層塩分は、期間を通して変動が小さく、ほぼ一定値を示すが、若干MOVE-WNPデータが過大評価している。また、図-8(c)、図-9(c)に示す表層塩分に関しては、MOVE-WNPデータは、観測値が示す塩分低下を再現できず、常に過大評価となっている。これについては、MOVE-WNPデータの空間スケールの観点から、伊勢湾に流入する河川の影響が考慮されていないことに起因していると考えられる。

## (2) 伊勢湾の流動・水質計算に対するMOVE-WNPデータの活用方法の検討

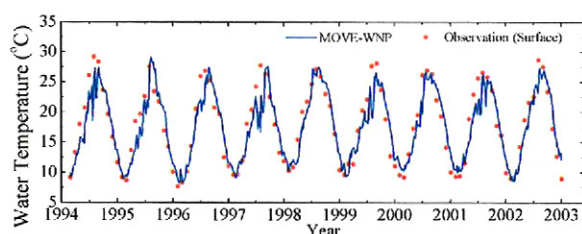
前述のように、MOVE-WNPは、伊勢湾における塩分低下が再現できないものの、水温については良好な再現性を有していることが判明した。また、内湾における流動・密度構造や水質特性など内部構造について議論するためには、詳細な空間解像度を有するデータが必要となる。MOVE-WNPデータの日本近海における空間解像度は $1/10^\circ$  (約10km)であり、太平洋など海洋スケールの現象に対しては高解像度といえる。しかし、南北約60km、東西約30kmの伊勢湾における内部構造について検討するために

は、十分な解像度とはいえない。しかし、これまでに述べたMOVE-WNPデータの有用性を踏まえると、外洋の影響を考慮するために、内湾の計算にMOVE-WNPデータを用いることは十分可能であると考えられる。ここで、伊勢湾を計算対象領域とした流動・密度・水質計算を実施することを考えてみる。このとき、外洋との開境界において、水温・塩分などの境界条件が必要となる。この境界値として、MOVE-WNPデータを導入することが、同データの活用方法の一つとして提案できる。さらには、外洋に近い領域 (例えば、図-7の南東部) において、データ同化を行うこともできる。以上のような手法を用いることで、外洋が内湾に与える影響を適切に考慮した数値計算ができると考えられる。

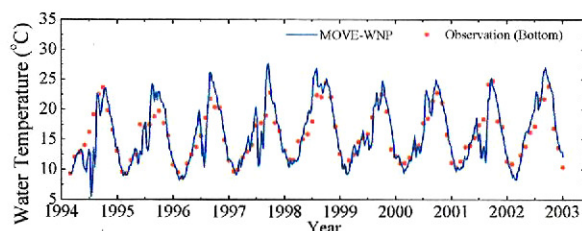
## 5. おわりに

本研究では、伊勢湾を対象にMOVE-WNPデータの特徴を示すとともに、観測値との比較から内湾における同データの有用性を検証した。その結果、同データを活用することにより、伊勢湾の流動・密度・水質構造に対して影響を及ぼすと考えられる外洋の海象現象を明示することができた。さらに、湾内においては、河川の影響による塩分低下を表現できないものの、水温については良好な再現性を有していることが判明した。また、本研究では、MOVE-WNPデータを利用した伊勢湾の流動・密度・水質計算への展開について検討し、開境界条件やデータ同化手法の導入により同データを活用した内湾の数値計算が可能となることを示唆した。今後、上述の方法を用いて実際に伊勢湾の流動・密度・水質計算を実施し、外洋が伊勢湾の内部構造に与える影響について検討する予定である。

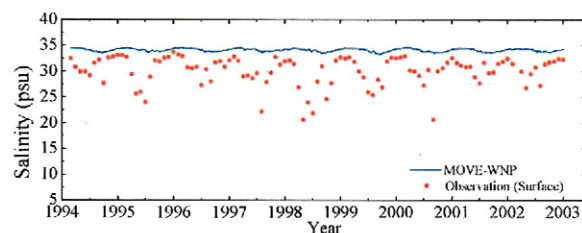
謝辞：本研究の一部は、科学研究費補助金・若手研究(A) (研究代表者：名古屋大学・川崎浩司、課題番号：21686046) であることをここに付記し、感謝の意を表す。



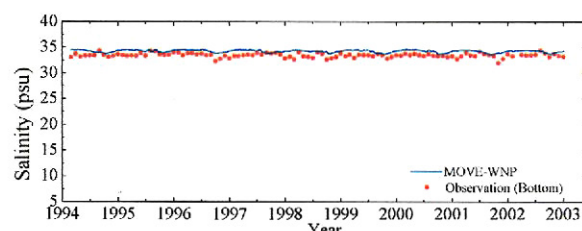
(a) 表層水温



(b) 底層水温

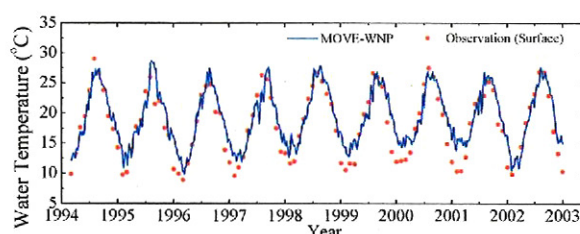


(c) 表層塩分

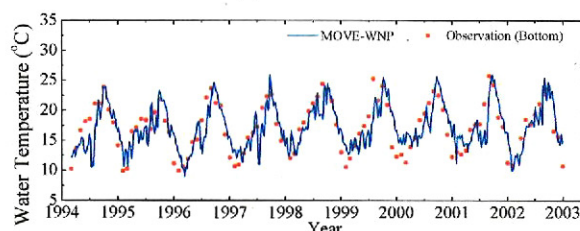


(d) 底層塩分

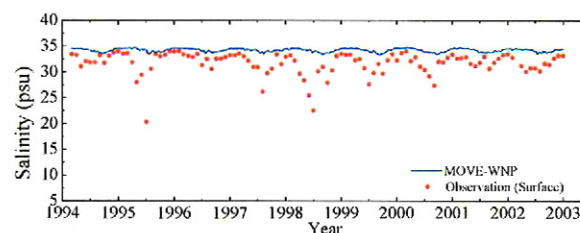
図-8 湾中央部 (St. 11) におけるMOVE-WNPデータと観測値の比較



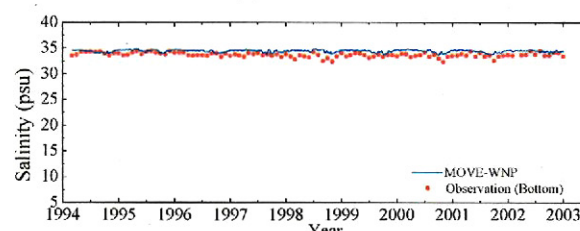
(a) 表層水温



(b) 底層水温



(c) 表層塩分



(d) 底層塩分

図-9 湾口部 (St. 18) におけるMOVE-WNPデータと観測値の比較

## 参考文献

- 1) 高橋鉄哉, 藤原建紀, 久野正博, 杉山陽一: 伊勢湾における外洋系水の進入進捗と貧酸素水塊の季節変動, 海の研究, Vol.9, No.5, pp.265-271, 2000.
- 2) 石崎士郎, 曾我太三, 碓氷典久, 藤井陽介, 辻野博之, 石川一郎, 吉岡典哉, 倉賀野連, 蒲地政文: MOVE/MRI.COM の概要と現業システムの構築, 測候時報, 第76巻, 特別号, pp.S1-S15, 2009.
- 3) Usui, N., Ishizaki, S., Fujii, Y., Tsujino, H., Yasuda, T. and Kamachi, M.: Meteorological Research Institute multivariate ocean variational estimation (MOVE) system: Some early results, *Advances in Space Research*, Vol.37, pp.806-822, 2006.
- 4) 石川一郎, 辻野博之, 平原幹俊, 中野英之, 安田珠幾, 石崎 廣: 気象研究所共用モデル (MRI.COM) 解説, 気象研究所技術報告, 第47号, 189p, 2005.
- 5) Kondo, J.: Air-sea bulk transfer coefficients in diabatic conditions, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol.9, pp.91-112, 1975.
- 6) Fujii, Y. and Kamachi, M.: Three-dimensional analysis of temperature and salinity in the equatorial Pacific using a variational method with vertical coupled temperature-

salinity empirical orthogonal function modes, *Journal of Geophysical Research*, Vol.108, No.C9, pp.13-1-13-19, 2003.

- 7) Bloom, S. C., Takacs, L. L., daSilva, A. M. and Ledvina D.: Data assimilation using incremental analysis updates, *Monthly Weather Review*, Vol.124, pp.1256-1271, 1996.
- 8) 榎田貴郁, 菅野能明, 今泉孝男, 石崎士郎, 木村未夏, 大森正雄, 吉岡典哉, 服部宏之, 齋藤幸太郎, 倉賀野連: 日本近海における MOVE/MRI.COM-WNP の検証, 測候時報, 第76巻, 特別号, pp.S17-S36, 2009.
- 9) 大崎晋太郎, 有吉正幸, 志賀 達, 岩尾尊徳: MOVE/MRI.COM-WNP を用いた日本南方における黒潮流路変動の解析, 測候時報, 第76巻, 特別号, pp.S37-S54, 2009.
- 10) 気象庁: 海水温・海流の知識, 海流, 黒潮 (オンライン), <http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/db/kaikyoku/knowledge/kuroshio.html>, 2010.
- 11) Yasuda, I.: The origin of the North Pacific Intermediate Water, *Journal of Geophysical Research*, Vol.102, No.C1, pp.893-909, 1997.