

# 領域海洋モデルを用いた黒潮・親潮混合水域 における水塊分布に関する研究

池田 雅<sup>1</sup>・増永 英治<sup>2</sup>・鈴江 洋太<sup>3</sup>・伊藤 幸彦<sup>4</sup>・内山 雄介<sup>5</sup>

<sup>1</sup>茨城大学 理工学研究科都市システム工学専攻 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1)

E-mail: 20nm8041@vc.ibaraki.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 茨城大学助教 地球環境共創機構 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1)

E-mail: eiji.masunaga.office@vc.ibaraki.ac.jp (Corresponding Author)

<sup>3</sup>建設技術研究所 中部支社 河川部 水工室 (〒460-0003 愛知県名古屋市中区錦1-5-13)

E-mail: yta-suzue@ctie.co.jp

<sup>4</sup>東京大学准教授 大気海洋研究所地球表層圏変動研究センター (〒277-8564 千葉県柏の葉5-1-5)

E-mail: itohsach@aori.u-tokyo.ac.jp

<sup>5</sup>正会員 神戸大学教授 大学院工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail: uchiyama@harbor.kobe-u.ac.jp

本州東岸の沿岸海域は黒潮や親潮、津軽暖流等の多様な水塊で形成される混合水域と呼ばれ、北太平洋の海洋環境および生態系に影響を及ぼしていると言われている。そこで、本研究では領域海洋モデルROMSを用いて本州東岸の混合水域における水塊構造の詳細な分布や季節変動を明らかにすることを目的として解析を行った。従来までの方法では困難であった沿岸域や表層における水塊分析を、標準化したTSダイアグラムの座標上の距離をもとに行う方法を開発した。その結果、津軽暖流は季節によって流速が変化し、親潮水塊の流入に強く影響を及ぼしていた。その影響によって親潮の南限緯度が変化することが確認された。また、冬季から春季には、鹿島灘沖で津軽暖流と黒潮が渦を伴いながら混合する様子が顕著に現れていた。

**Key Words :** Water mass classification, Oyashio, Kuroshio, Tsugaru warm current, Sanriku Coast

## 1. はじめに

海洋は異なる海域に起源を持つ多様な水塊で形成され、水塊が輸送、混合されることで地球規模の海洋環境が形成されている。特に本州東岸の沿岸海域は黒潮や親潮、津軽暖流等の多様な水塊で形成されている混合水域と呼ばれ、北太平洋の海洋環境及び生態系に強い影響を及ぼしていると言われている。本海域に属する三陸沖はカムチャッカ半島の近くを南下し流入する親潮と南から北上する黒潮が三陸沖から鹿島灘沖にかけて混在し<sup>1)</sup>、世界でも有数の漁場となっている<sup>2)</sup>。親潮に含まれる豊富な栄養が黒潮と混合し温められることによって植物プランクトンが爆発的に増え<sup>3)</sup>、多くの魚類が集まってくることから豊かで多様な生態系の形成に至っている<sup>4)</sup>。そのため、海洋環境や生態系を解明する上で水塊構造を把握することは非常に重要であると言える。

水塊とは、水温、塩分、溶存酸素、栄養塩類などが一様な海水の塊と定義されている。この水塊の分類には水

温、塩分、密度を基にしたTSダイアグラムが有用なツールとして広く利用されている。三陸沖についてはHanawa and Mitsudera<sup>5)</sup> (以後HM87) によって、岩手県水産技術センターの1977～1981年までの5年間の毎月の観測データを基にした水塊特性や分布が報告されている。HM87による水塊分析では、三陸沿岸海域に存在する水系をTSダイアグラムに基づき、黒潮、親潮、津軽暖流、冷水層、沿岸付近の親潮、表層水の6つの水系に分類した。最近では、津軽暖流の範囲において密度の値が26を上回ったところを親潮黒潮混合水と分類し、水塊を7つに分類している<sup>6)</sup>。しかしながら、HM87による単純な水塊分析では、沿岸域や表層などの水塊を表層水という単一の区分で分類しているため、詳細な分類ができないという欠点がある。特に夏季においては表層の水系が全て表層水と分類されてしまう傾向がある。そこで本稿では、領域海洋モデルROMS (Regional Ocean Model System) を用いて、本州東岸の混合水域における水塊構造の詳細な分布や季節変動を明らかにすることを目的とした。

## 2. 水塊分析手法の開発

### (1) 領域海洋モデルの検証

黒潮・親潮混合水域の水塊構造を解明するために、JCOPE-2再解析気候値からダウンスケーリングした領域海洋モデルROMS（水平解像度：3 km, 図-1）を用いて解析を実施した。本研究で対象とする海域は黒枠内（E: 140~145°, N: 34~42°）の海域である。本領域海洋モデルの精度は過去の研究により十分に検証されている<sup>7)</sup>。

まずROMSの解析データの水塊再現の妥当性を検討するために、岩手県水産技術センターが毎月実施しているCTD観測のデータとの比較を行った。観測領域は図-1における対象海域の黒埼（黒点, E: 141.98~143.05°, N: 40°）、トドヶ埼（赤点, E: 142.1~143.18°, N: 39.53°）、尾埼（黄点, E: 141.98~143.05°, N: 39.25°）、椿島（青点, E: 141.73~142.8°, N: 38.93°）の4測線である。比較には2000年~2019年の20年分の水温と塩分のデータを使用した。また、表層から水深10mにかけては、船の動きによるセンサーの揺れや波などの影響による測定値の誤差がある可能性が高いため<sup>8)</sup>、解析からは除外し水深11mを表層として解析を実施した。

岩手県水産技術センターとROMSの水温及び塩分のデータから確率密度関数（PDF）を算出し、データの出現確率をTSダイアグラム上に割合でそれぞれ示した（図-2）。また、岩手県水産技術センターとROMSの月平均した水温と塩分のプロットを図-3に示す。これらの結果から、観測データの塩分の変動には多少ばらつきがあるが、ROMSの塩分の変動（標準偏差）が観測データの変動内に収まっていた。水温の月平均値の季節変動は概ね類似していた（相関係数 $r=0.92$ ）。よって水温と塩分はモデル内で適切に再現されていることが示された。塩分に関しては、気候値のモデルで再現がされていない河川からの大量出水イベント等の影響により、観測とモデル間の差が大きくなってしまったと考えられる。

### (2) Hanawa and Mitsuderaの手法を用いた水塊分析

HM87によって提案されたTSダイアグラムを元にした

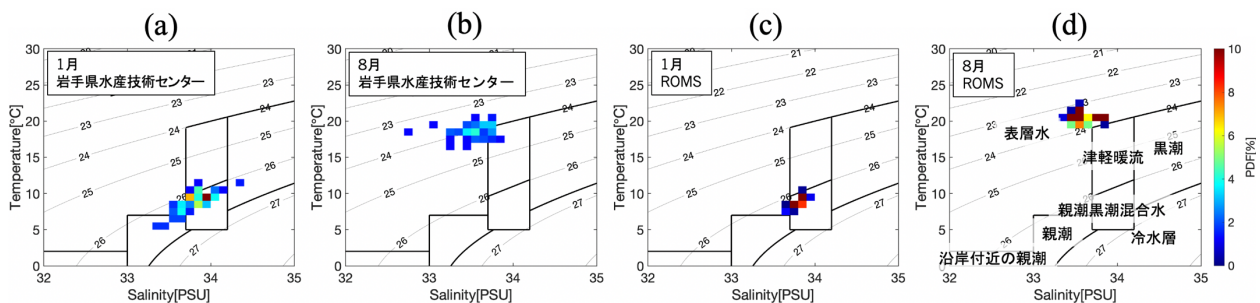


図-2 岩手県水産技術センターの観測領域（図-1）における水温および塩分の確率密度関数（1%未満は切り捨て）。

(a)1月, (b)8月の岩手県水産技術センター, (c)1月, (d)8月のROMSの解析値

単純な水塊分析を使用して、ROMSのデータで行った1月と8月の表層における水温と塩分データのプロットを図-4に示す。TSダイアグラム上にデータのプロットを行うと、海面水温が低い1月（青点）に関してはそれぞれのデータが黒潮（KW）、親潮（OW）、津軽暖流（TWC）に分類された。一方、海面水温が上昇する8月（赤点）には、HM87の手法では全てのデータが表層水（SW）と区分される位置に分類された。よってHM87の手法を用いて夏季を対象として水塊分析を行うと、対象海域の水塊が全て表層水と分類されてしまう傾向がある。

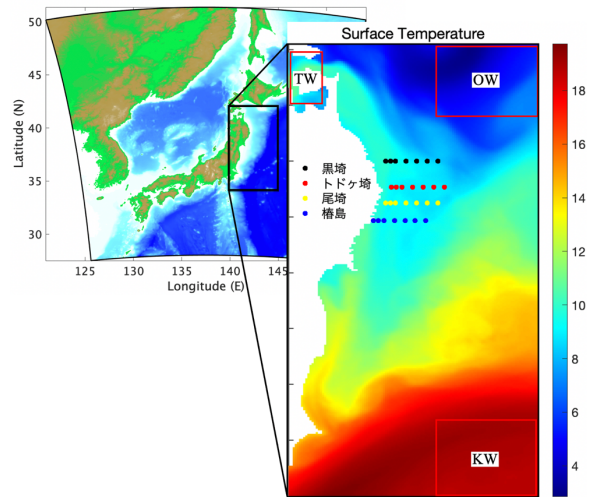


図-3 岩手県沖の水温と塩分の月平均値  
エラーバーは標準偏差を表す

図-4 領域海洋モデルROMSの解析範囲

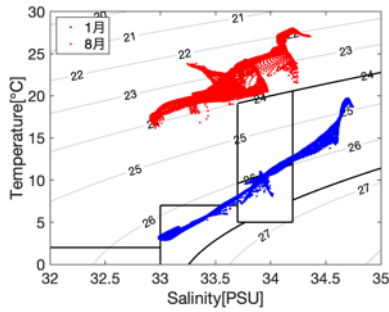


図4 HM87によるTSダイアグラム上でのプロット  
青：1月，赤：8月

このような季節変動による海面水温の上昇に伴う水塊分析の誤分類を改善するための手法を本研究では提案する。

### (3) 水塊分析手法

本研究では水温と塩分の分布（ばらつき）を平等に評価するために、水温・塩分それぞれのデータの標準偏差を1とする標準化した上で解析を実施した。標準化には式(1)を使用し、それぞれ $T_n$ は水温、 $S_n$ は塩分の標準化した値、 $T_{avg}$ は水温、 $S_{avg}$ は塩分の対象海域の1年間のデータの平均値、 $\sigma_T$ は水温、 $\sigma_S$ は塩分の対象海域の1年間のデータの標準偏差をそれぞれ表す。

$$T_n = \frac{(T - T_{avg})}{\sigma_T}, \quad S_n = \frac{(S - S_{avg})}{\sigma_S} \quad (1)$$

黒潮・親潮混合水域に影響を及ぼす主要な3つの水塊、黒潮、親潮、津軽暖流を図-1における赤枠内でそれぞれ区切り教師値として求め、これら3つの水塊の教師値と標準化した水温と塩分の座標上の距離から、本州東岸海域の水塊を推定した。3つの水塊の教師値を求める海域は、黒潮はROMSの表層の流速から算出した流速の速い黒潮流軸上、津軽暖流は津軽海峡を横断する領域、親潮は高緯度かつ水温が全体と比較して常に低水温の領域と

した。元となる教師水塊からの距離の推定は式(2)を使用し、それぞれ $D$ は距離、 $T_w$ と $S_w$ は水塊の教師値となる海域（黒潮、親潮、津軽暖流）から求めた水温と塩分の平均である。

$$D = \sqrt{(T_n - T_w)^2 + (S_n - S_w)^2} \quad (2)$$

図-5のように標準化した座標上に、標準化した水温と塩分のデータ（8月）のプロットを行い、黒潮、親潮、津軽暖流の教師値からの距離を算出し、水塊を推定する。

図-6(a), (b), (c)に8月の表層における3つの水塊からの座標上の距離を示す。この図は色が濃くなるほど、その水塊の性質が強いということが示されている。それぞれ、親潮は高緯度の位置、黒潮は黒潮流軸上、津軽暖流は津軽海峡から流出し、対象海域の中央を東西に横断するような位置で性質が強く、本州東岸の沿岸域を覆うように分布していた。また黒潮と親潮に関して、それぞれ対極となるような性質であるということが示されたが、どちらの水塊も津軽暖流に近い性質を持っていることがわかった。これは津軽暖流が黒潮と親潮の中間の位置に教師値を持っているためであると考えられる。

次に標準化した座標上で3つの元となる水塊に最も距

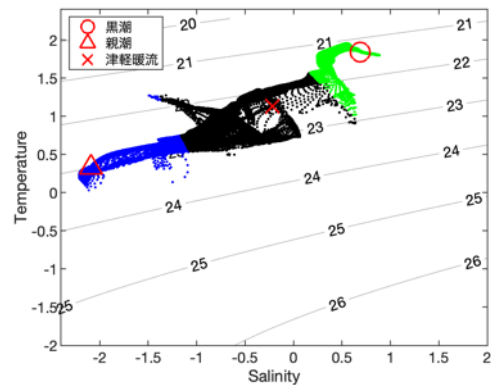


図5 標準化した8月のTSダイアグラム

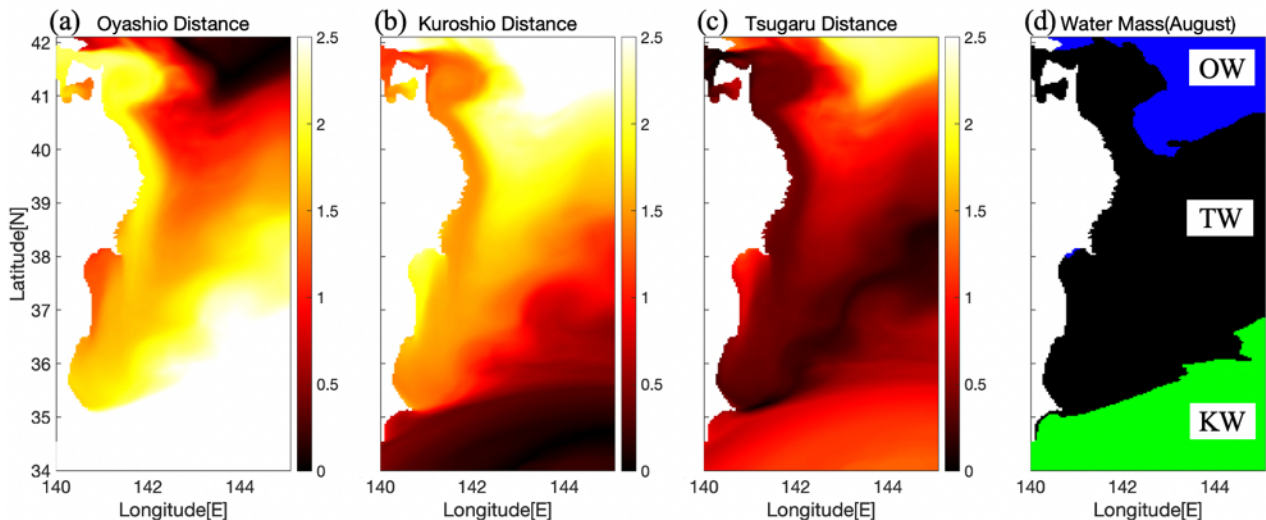


図6 (a)親潮, (b)黒潮, (c)津軽暖流からの標準化した座標上における距離, (d)水塊分析結果

離が近くなる水塊を当てはめ、グリッド毎の水塊を推定した(図-6(d)). 推定した水塊から津軽暖流は、黒潮と親潮に挟まれるように黒潮・親潮混合水域に広く分布していた。また、推定した津軽暖流水塊の分布は、沿岸域を下北半島から鹿島灘付近まで覆うように分布しており、これは表層流速とも整合していた(図-7)。この新たな水塊分析手法により、季節変動の影響にも対応した表層の水塊の推定を可能とした。

### 3. 水塊の変動

#### (1) 津軽暖流

津軽海峡を通過する津軽暖流の1年間の表層の流速の時系列を図-8に示す。津軽暖流は夏季、特に8月に流速が速くなる傾向にあることが示された。流速が遅い2月と比べると平均して約1.5倍8月の方が流速が強かった。また表層の流速の水平分布から、流速が遅くなる傾向にある冬季及び春季には沿岸沿いを南下するように鹿島灘付近まで流れ、流速が速くなる夏季から秋季には、下北半島東側に時計回りの渦を発生させていた(図-7(b)赤枠内)。この津軽暖流の流速の季節変動は、対象海域に占める各水塊の割合を変動させていると考え、解析領域を占める3つの水塊の分布量に着目した。

図-9に黒潮、親潮、津軽暖流の1年間の解析領域を占める分布割合の変動を示す。対象海域表層における津軽暖流と親潮の分布量には負の相関があり(相関係数 $r = -0.90$ )、津軽暖流の流入が親潮水塊の流入に強く影響を及ぼしていると言える。図-7の津軽海峡の流速と比較すると、津軽暖流の流速が速くなる傾向にある夏季には分布量が増加傾向にあり、それに伴い親潮の分布量が減少した。これは津軽暖流の流速が速くなることで、下北半島東側に渦を発生させることで、流速が遅い親潮の流入を津軽暖流が妨げる働きをしたためであると考えられる。一方、春季には津軽暖流の流速が速い夏季と比べると流速が遅くなることや、流向が南になるため、親潮の流入が活発になり分布量が増加したと言える。

#### (2) 親潮

季節によって流量が変化する津軽暖流と親潮の分布量に相関関係があることが示されたため、親潮の季節変動に着目した。図-10にROMSの解析データを用いた水塊分析結果より取得した親潮の南限緯度の一年間の変動を示す。親潮は津軽暖流の流向が沿岸沿いになる冬季及び春季に $38^{\circ}$  N付近まで南下する。一方、津軽暖流が下北半島東側で渦を発生させる夏季から秋季には、 $40^{\circ}$  N付近まで北上するという明瞭な親潮の南限緯度の季節変動が生じていた。このことは津軽暖流の流入量が親潮の流

入に影響を及ぼしているためであると考えられる。

親潮は黒潮続流から切り離されて北上する暖水や津軽暖流の影響による暖水との境界に顕著な潮境を形成し、漁場形成に影響を及ぼす。過去には1981年及び1984年に $36^{\circ}$  N(犬吠埼付近)に達するほど南下した影響により、太平洋沿岸部においてアワビの大量死やイワシやサバなどの暖流系の回遊魚の不漁やオキアミの漁場変化が発生した報告がなされている<sup>9)</sup>。本州東岸海域はこの親潮の影響により漁場の形成が変化するため、親潮の南限緯度を把握しておくことは海洋環境の把握や水産資源の管理をする上で非常に重要であると言える。しかし、親潮の南限緯度の変動に関する数値モデルを利用した再現実験などは未解明な点が多い。そこで、本研究により提

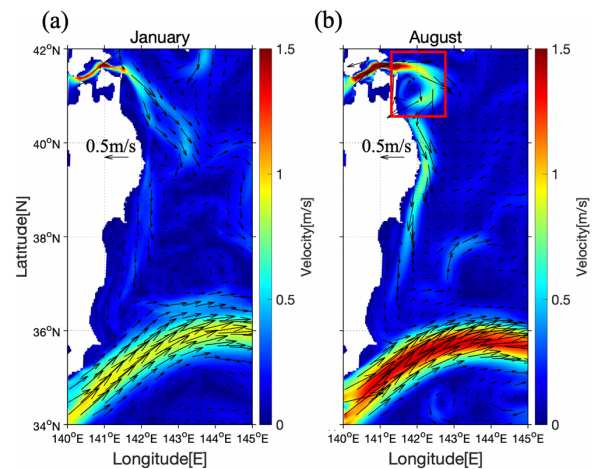


図-7 (a)1月と(b)8月の表層の平均流速

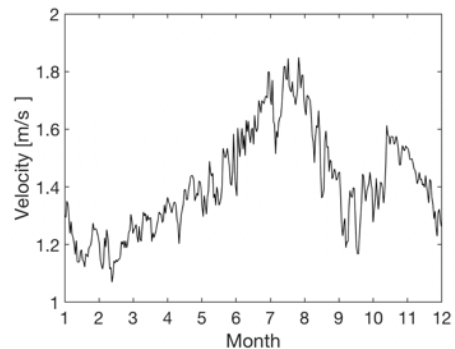


図-8 津軽暖流の流速

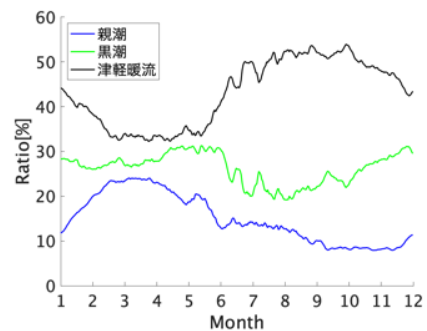


図-9 3つの水塊の月ごとの分布量

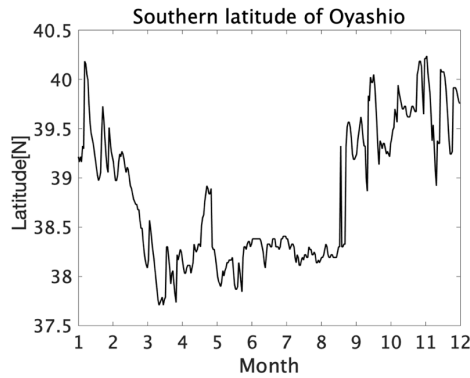


図-10 親潮の南限緯度の変動

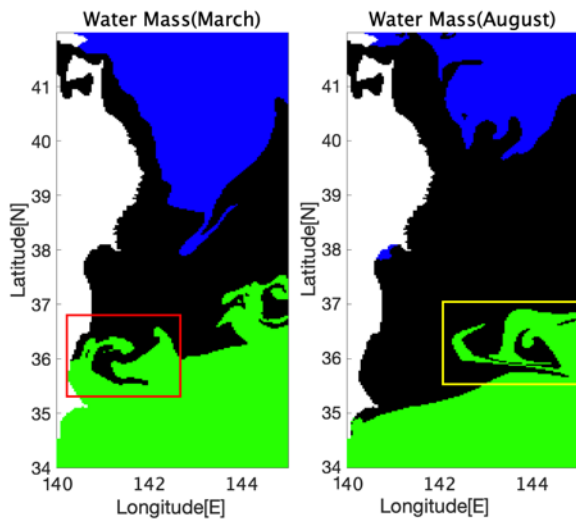


図-11 3月と8月の表層の水塊分析結果

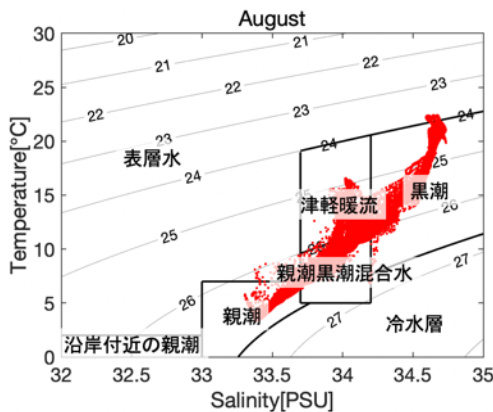


図-12 HM87による8月の水深100mのTSダイアグラム

案した手法により水塊分布をより明らかにすることができれば、親潮の南限緯度の変動を再現することができると考えられる。

### (3) 黒潮

対象海域の低緯度帯の黒潮統流域において津軽暖流と渦を伴いながら混合する様子が見られた。特に図-11の黄枠内においては季節変動と関係なく、渦を伴いながら

混合している様子が顕著に現れていた。この混合域に関しては、図-6(b), (c)において黒潮と津軽暖流のどちらの水塊とも性質に近い領域であり、渦の発生により黒潮と津軽暖流の混合が活発になっていると考えられる。

また、冬季から春季には津軽暖流が沿岸沿いに流れ、36°Nの鹿島灘沖(図-11赤枠内)で渦を伴いながら黒潮と混合している様子が沿岸域においても顕著に現れていた。この冬季から春季に強化される渦は、海面冷却の効果により強化されるサブメソスケール渦によるものだと考えられる<sup>7)</sup>。

## 4. 水深100mでの水塊分析

### (1) HM87による水塊分析

表層以外の水深帯におけるHM87による水塊分析の精度を確かめるため、HM87によるTSダイアグラム上にROMSデータの水深100mにおける8月の水温と塩分データのプロットを行った(図-12)。この結果より、季節変動による海面水温の上昇の影響を受けやすい8月においてほとんどの水塊が黒潮、親潮、津軽暖流水塊の区分内に分類されている。そのため、水深100mでは表層ほどの季節変動の影響を受けていない事がわかる。

### (2) 水塊分析手法の適用

続いて表層の解析と同様の解析を水深100mでも行った。主要な3つの水塊(黒潮・親潮・津軽暖流)の教師値はそれぞれ、表層と同様の範囲から算出した。水温、塩分データの標準化や距離の算出も表層と同様に式(1)、(2)を使用した。標準化した座標上で3つの元となる水塊に最も距離が近くなる水塊を当てはめ、グリッド毎の水塊を推定した(図-13)。

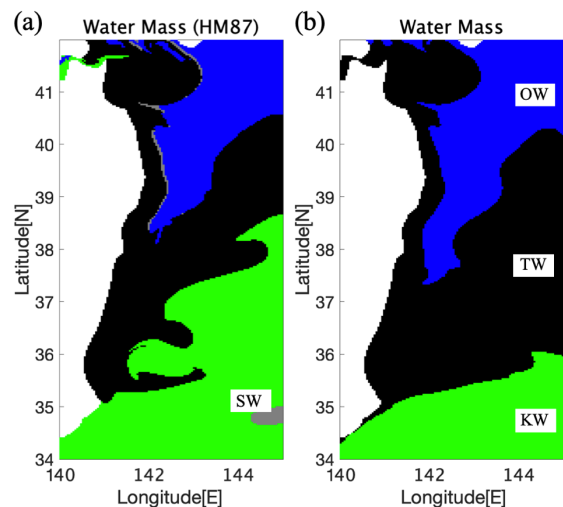


図-13 8月の水深100mの水塊分析結果  
(a)HM87, (b)距離を基にした水塊分析

本研究が開発した手法を用いて水塊分析を行った結果、水深100mにおいても津軽暖流は沿岸域を下北半島から鹿島灘付近まで覆うように分布していることがわかった(図-13)。また水深100mでは津軽暖流に挟まれるように親潮が舌状に南下していた。この水塊分析結果をHM87の手法によるものと本研究の手法と比較すると、黒潮の占める割合が増加している以外は傾向が類似していた。したがって季節変動の影響をあまり受けない水深100mでは本稿で提案する手法とHM87の手法では大きな相違ないということが示された。

## 5. 結論

領域海洋モデルROMSを用いて、従来までの方法では困難であった水塊分析を標準化したTSダイアグラム上の座標上の距離をもとにすることで可能とした。本研究によって示された結果を以下に記す。

- (1) これまで用いられてきた一般的な水塊分析手法に対し、表層での水塊分析の精度を向上させた。
- (2) 表層において津軽暖流の流速には季節変動があり、流速が速くなることで、下北半島東岸に時計回りの渦を発生させた。
- (3) 親潮と津軽暖流の分布量には相関が見られ、津軽暖流の流速が増加傾向にある時期に親潮の南限緯度が北上することが示され、津軽暖流の影響で親潮の南限緯度が変化していた。
- (4) 黒潮と津軽暖流は常に渦を伴いながら混合し、季節によって発生する渦の位置に変化が見られた。

今後の課題として、それぞれの水塊毎の混合水の教師値を求めることが困難であり、親潮黒潮混合水をはじめとする混合水を定義することが本手法ではできなかった。混合水を定義するための新たな手法を確立する事が今後の課題と言える。

**謝辞:** 本研究は科学研究費助成事業(18H03798, 19K20432)及び造船学術研究推進機構(REDAS)の助成を受けた。岩手県水産技術センターより2000年から2019年の20年分のCTD観測データの提供を受けた。

## 参考文献

- 1) Kawai: Hydrography of the Kuroshio Extension, In Kuroshio, It's physical aspects, University of Tokyo Press, pp.235-352, 1972.
- 2) 山根雅之, 大場忠道: 三陸沖海底コア(KH 94-3, LM-8)の解析に基づく過去9万年間の海洋環境変遷, 第四紀研究, 38(1), pp.606-610, 2007.
- 3) Isada, Kuwate, Saito, Ono, Ishii, Yoshikawa, Inoue, Suzuki: Photosynthetic features and primary productivity of phytoplankton in the Oyashio and Kuroshio-Oyashio transition regions of the northwest Pacific, *Journal of Plankton Research*, Vol.31, pp.1009-1025, 2009.
- 4) Longhurst. A. R.: Ecological geography of the sea, Academic Press, London, pp.560, 2006.
- 5) Hanawa, K. and H. Mitsudera: Variation of Water System Distribution in the Sanriku Coastal area. *J. Oceanogr.*, 54, 493-501, 1987.
- 6) Yoshihiro Shimizu, Akihisa Inoue, Yukihide Tomari, Tomohiko Suzuki: Cell free translation reconstituted with purified components, *Nature Biotechnology*, 19(8) pp.751-755, 2001.
- 7) Yusuke Uchiyama, Yota Suzue, Hidekatsu Yamazaki : Eddy-driven nutrient transport and associated upper-ocean primary production along the Kuroshio, *J. Geophys. Res. Oceans*, 122, 5046-5062., 2017.
- 8) Ann Garret, Teresa Garner : Determining Thorpe Scales from Shio-Lowered CTD Density Profiles, pp.1657-1670., 2008.
- 9) 気象庁: 海洋の健康診断表 第2章気候に関連する海洋の変動, <http://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/shindan/sou-gou/indin.html>

(Received March 17, 2021)

(Accepted July 22, 2021)

## WATER MASS CLASSIFICATION OFF THE EAST COAST OF JAPAN MAINLAND USING A REGIONAL OCEANIC SIMULATOR

Masashi IKEDA, Eiji MASUNAGA, Yusuke UCHIYAMA,  
Yota SUZUE and Sachihiko ITOH

Off the east coast of Japan mainland is called as the mixed water region formed by various water masses, such as the Kuroshio Water(KW), Oyashio Water(OW), and Tsugaru Warm Current(TWC). The mixed water region is known to largely influence marine environments and ecosystems in the North Pacific Ocean. This study investigated seasonal variations of water masses off the east coast of Japan mainland using the Regional Ocean Modeling System (ROMS). We developed a water mass classification method based on the standardized TS-diagram. The newly developed method allowed us to detect water masses in surface layers and coastal oceans, which are not simply detected by a conventional TS analysis. The seasonal variation of TWC influences the distribution and southern boundary of OW. TWC and KW are mixed off Kashima-nada accompanied by eddies in winter and spring season.