

機関番号：82708

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2007～2010

課題番号：19684016

研究課題名（和文）

複数トレーサー解析による混合水域中層の起源水成分の分布と変動の解明

研究課題名（英文） Distribution and variation of source water components in intermediate layer in the mixed water region revealed by multiple tracer analysis

研究代表者 清水 勇吾（SHIMIZU YUGO）

独立行政法人水産総合研究センター東北区水産研究所・混合域海洋環境部・主任研究員

研究者番号：10371791

研究成果の概要（和文）：親潮域～混合水域中層で観測された水を構成する起源水（オホーツク海水，東カムチャツカ海流水，黒潮水）の混合割合を推定する方法を開発し，調査船とフロートの水温，塩分，溶存酸素観測資料等に適用した後，流速観測資料も用いて起源水流量も調べた．その結果，亜寒帯域から混合水域には，相対的に中層上部(26.7-27.0 σ_θ)ではオホーツク海起源の水が多く流入し，中層下部(27.0-27.3 σ_θ)では北太平洋の西部亜寒帯循環起源の水が多く流入していることなどが定量的に明らかとなった．

研究成果の概要（英文）：In order to reveal the water mass distribution and circulation in the intermediate layer in the Oyashio and mixed water regions, a new method to estimate the mixing ratio among the source waters which form the observed water there was developed and applied to the temperature, salinity, and dissolved oxygen data observed there by our research vessel and profiling floats. Also, the volume transports of the source waters were examined using the observed ocean current data etc. As a result, it is quantitatively revealed that the water originated from the Okhotsk Sea flows into mixed water region with relatively more volume transport in the upper intermediate layer (26.7-27.0 σ_θ) whereas the water originated from the subarctic gyre in the northwestern Pacific flows there in the lower layer (27.0-27.3 σ_θ) with relatively more volume transport in contrast.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	15,100,000	4,530,000	19,630,000
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
総計	20,200,000	6,060,000	26,260,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：(分科) 地球惑星科学 (細目) 気象・海洋物理・陸水学

キーワード：混合水域・親潮・黒潮続流・複数トレーサー解析・水塊混合比・北太平洋中層水・中層フロート・溶存酸素解析

1. 研究開始当初の背景

三陸～常磐沖合には亜寒帯循環と亜熱帯循環に挟まれた混合水域と呼ばれる海域が広がる．混合水域は親潮系の冷水と黒潮系の

暖水が複雑に入り混じり，その混合水が両循環に戻されるため，北太平洋の亜熱帯～亜寒帯循環間の水・熱・物質交換に重要な役割を果たしている．混合水域の形成と循環には，

オホーツク海から親潮を通じて流入してくるオホーツク海中層水が力学的に強く関与していることが数値モデルを用いた過去の研究で明らかにされている。

2. 研究の目的

本研究課題では、観測資料に基づいて、オホーツク海中層水の北太平洋への流出量と変動、広がり方を定量的に調べつつ、混合水域の海洋構造と循環、変動を明らかにする。そのために、温度・塩分・溶存酸素値を用いて、混合水域中層の3つの起源水であるオホーツク海水、東カムチャツカ海流水、黒潮水の各成分（混合比）を求める新しい手法（複数トレーサー解析による混合比推定法）を実用化し、周辺域の観測資料に適用することで、これら3成分の時空間分布と変動を定量的に把握する。解析には、調査船の観測資料のほか、溶存酸素センサーを取り付けた中層フロートを複数台、親潮域に投入して、親潮～混合水域を漂流中に得られる観測資料を用いる。

3. 研究の方法

(1) 用いた資料

本研究では親潮域・混合水域・黒潮続流域にかけて広い範囲の水温、塩分、溶存酸素資料が必要となる。このため、以下に述べるオプトードと呼ばれる溶存酸素センサーを取り付けた等密度面追従型フロートの観測資料、および、調査船観測資料を活用した。

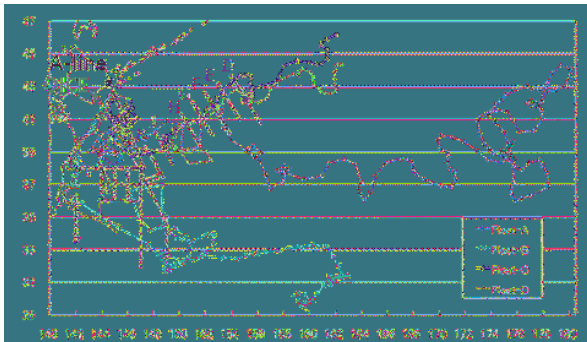


図1 本研究で収集・解析に用いた2007年～2013年の観測資料の分布（オプトードによる等密度面追従型フロート、船・調査船観測によるもの）

① 等密度面追従型フロート資料：

2007年度に、米国 WEBB Research 社製の等密度面追従型 APEX フロートを4台購入した。本課題では、オホーツク海中層水の北太平洋への広がりを調べるため、その中心密度である $26.8\sigma_\theta$ 等密度面を漂流するように設定した。また、溶存酸素観測資料が必要なため、ノルウェー AADI 社製光学式溶存酸素センサー「オプトード」をフロートに取り付けた。さらに、このフロートは、プロファイリングフロートでもあり、1週間に一度、1500m 深まで潜水して、1500m 深～表層までの水温、塩分、溶存酸素の観測を行って、海面に浮上、

観測資料を衛星経由で陸上に送信する。

このフロートを2008年3月に3台、9月に1台、図1の赤字で示した北海道厚岸沖観測定線 A ライン上の親潮南下流に投入し、その後、本課題終了まで追跡を行い、フロートの漂流軌跡に沿って水温・塩分・溶存酸素の資料を得た（図1）。オプトードの耐久性と精度は本研究の遂行に支障がないことも確かめた（清水ら2011）。

② 調査船観測資料：

過去に東北区水産研究所調査船若鷹丸などによって当該海域で実施されたCTDO（水温、塩分、溶存酸素観測）・ADCP（超音波による流速観測）資料を整理・解析したほか、2008～2009年には親潮域から混合水域に南下し、再度北上して亜寒帯前線に沿って東に流れ去ったフロートの追跡観測を実施し、これらの観測資料を解析した（図1）：Aラインは東北区水産研究所の観測定線であるため、フロートを投入した2008年3月、9月のほか、毎年数回の観測を行っている。また、2008年3月の観測では 38°N 線も観測を行い、2008年4-5月には 38°N 以南の混合水域～黒潮続流域および図中青字で示した北海道襟裳沖親潮集中観測線 OICE（2002年までは観測定線として反復観測を実施）において、また、2008年9月には図1のD線、2009年9月には図1のD～K線上で海洋観測を実施した。

(2) 解析法

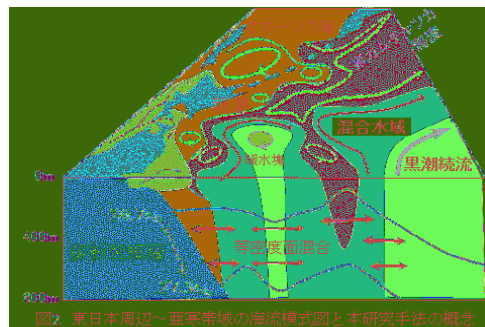


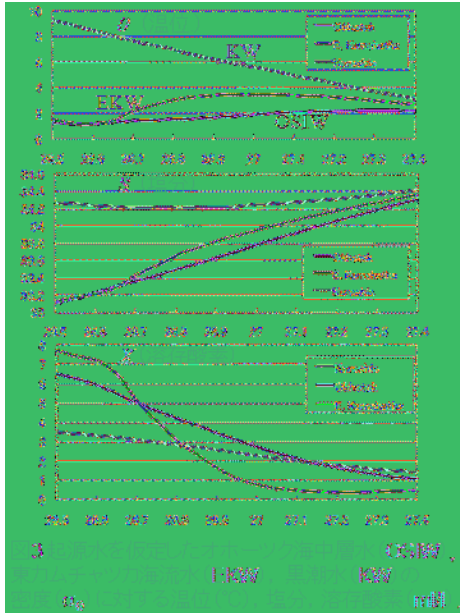
図2 東日本周辺～亜寒帯域の海流模式図と本研究手法の概念

図2に示す通り、混合水域中層の起源となる水はオホーツク海水、東カムチャツカ海流水、黒潮水の3つと考えられた。これら3つの起源水の混合比を求めるため、等密度面混合を仮定して、近似的に保存量（トレーサー）として扱える水温、塩分、溶存酸素の混合に関する連立方程式を立てて解く。ある密度面での温位、塩分、溶存酸素の観測値をそれぞれ θ , S , X 、オホーツク海水、東カムチャツカ海水、黒潮水の混合比を R_i ($i=1, 2, 3$)、それぞれの温位、塩分、酸素を θ_i , S_i , X_i とすると、各トレーサーについての混合の式は以下のように表せる： $\sum \theta_i * R_i = \theta$ （水温）、 $\sum S_i * R_i = S$ （塩分）、 $\sum X_i * R_i = X$ （酸素）；ただし混合比の和は1なので、 $\sum R_i = 1$ であり、

かつ、混合比は負にならないので $R_i \geq 0$ である。この連立方程式の最適解 (R_1, R_2, R_3) を数値的に求める方法が複数トレーサー解析による混合比推定法である。この解は、混合した水を構成する起原水の割合を示すものであるため、以降、 R_1, R_2, R_3 をそれぞれオホーツク成分、東カムチャツカ成分、黒潮水成分と呼ぶ。

観測資料にこの方法を適用し、親潮域・混合水域・黒潮続流域にかけての (R_1, R_2, R_3) の分布を調べた。ただし、等密度面混合の仮定と観測資料の深さの制限などから、解析密度層は $26.7 \sim 27.3 \sigma_\theta$ とした。なお、仮定した3つの起原水のプロファイルは図3に示す。

あわせて、親潮域、混合水域、黒潮続流域の判別などを行うため、通常の水温、塩分による水塊解析も行ったほか、親潮域における海流（親潮、親潮貫入、親潮反転流）の流量と流速構造を明らかにするため、無流面を仮定した地衡流および ADCP 基準の地衡流を計算した。



4. 研究成果

(1) 観測点の海洋学的位置の把握

本課題を進めるためには、フロートや調査船の観測点が親潮域、混合水域、黒潮続流域のどこに位置していたかをまず判別する必要がある。黒潮続流域と混合水域の境界は 200m 深水温 14°C で表わされることは先行研究によって知られていたが、親潮域と混合水域の境界である親潮前線を定義する指標がなかったため、北海道襟裳沖親潮集中観測線 OICE で過去に得られた観測資料を用いてこれを調べた。その結果、親潮前線は 100m 深塩分 33.6 の前線帯で定義できることが分かった (Shimizu et al. 2009)。これら指標水温、塩分を用いて、親潮域、黒潮続流域、混合水域を定義し、本課題で解析した観測点が

どの領域に入るかを示すと図 4(a) のようになった。

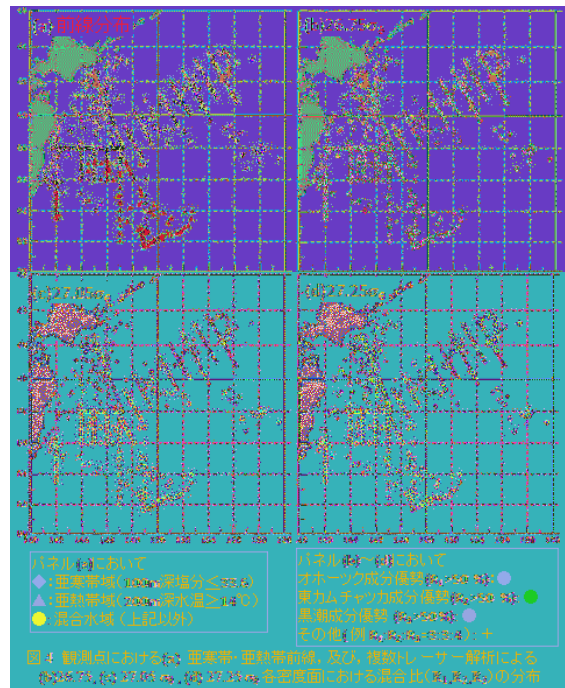


図 1 と図 4(a) を比較すると、4 台のフロートは親潮に乗って南下、約 1~2 か月かけて混合水域に到達し (清水ら, 2009)、1 台はそのまま南下を続け、黒潮続流域に取り込まれたことが分かる (図 1 の桃色の軌跡)。また残りの 3 台は、北東へ向きを変え、そのうちの 2 台が亜寒帯前線に沿って北東へ流れ (図 1 の橙色、緑色の軌跡)、1 台は $37\text{--}38^\circ\text{N}$ を東に進んで行った (図 1 の青色の軌跡)。

(2) 複数トレーサー解析の適用結果

図 1 で示した観測資料に複数トレーサー解析を適用した。 $R_1 > 50\%$ のオホーツク成分が優勢の水は、 $26.75 \sigma_\theta$ 密度面においては、北海道南東沖、三陸~常磐沿岸、および、沖合の亜寒帯前線沿いに分布していたが (図 4b)、 $27.05 \sigma_\theta$ 密度面ではその分布域が北海道沖に少し見られる程度となり (図 4c)、 $27.25 \sigma_\theta$ 密度面では、オホーツク成分優勢の水に代わって、東カムチャツカ成分が優勢の水 ($R_3 > 50\%$) が多く見られた (図 4d)。そこで、以下のように、親潮域、三陸~常磐沿岸、亜寒帯前線周辺それぞれについて、以下に詳しく水塊分布と流量を調べた。

① 親潮域周辺：

フロート 3 台を投入した 2008 年 3 月において、時計回り循環する暖水塊 1 が A ライン上 40°N 付近を中心に見られ、その北側に広がる親潮域と暖水塊との間、 $40^\circ 30' \text{N}$ 付近に親潮前線が形成されていた (図 5)。図 6 に 2008 年 3 月の A ラインにおける水温、塩分、溶存酸素、および、複数トレーサー解析で見

積もられた各成分の断面図を示す。親潮前線以北では、そのごく北側、鉛直的には下層を中心に比較的東カムチャツカ成分が高い領域が見られ(図 6e, 40°45' N~41°30' N の緑色の領域)、北海道沿岸部、上層を中心にオホーツク成分が高い領域(図 6d, 41°30' N ~42°30' N の緑色~橙色の領域)が見られた。

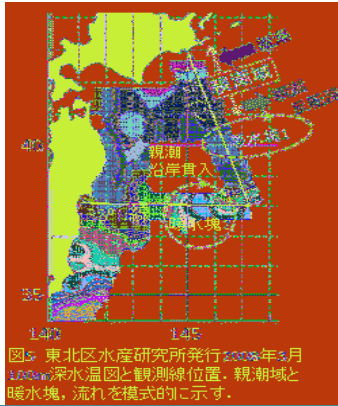


図5 東北区水産研究所発行2008年3月14日水深水温図と観測線位置、親潮域と暖水塊、流れを模式的に示す。

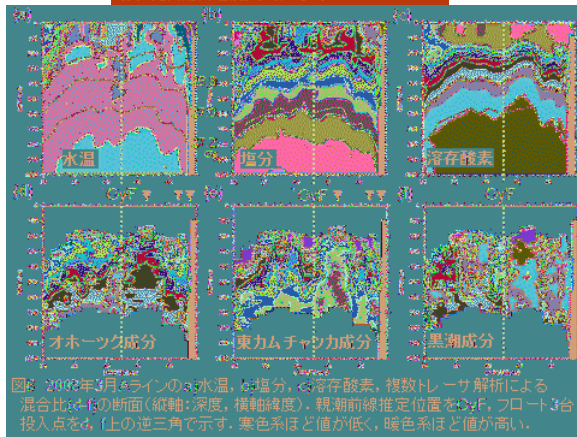


図6 2008年3月Aラインの水温、塩分、溶存酸素、複数トレーサ解析による混合比(θ)の断面(縦軸:深度、横軸:経度)。親潮前線推定位置を○で、フロート3台投入点を◇(上の逆三角)で示す。寒色ほど値が低く、暖色ほど値が高い。

親潮域内の流れは、図5に示されるように南西向きの親潮と、北東向きの親潮反転流があるが、Aライン上で沿岸から親潮前線まで流量を積算することによって、親潮と親潮反転流との差、すなわち親潮前線を横切って南下し、混合水域に流入する水の流量が求まると考えられる。その ADCP 基準地衡流量計算結果を表1に示した。前述のオホーツク成分、東カムチャツカ成分の空間分布を反映し、オホーツク成分の南西向き流量は中層上部(26.7-27.0σ_θ)で1.6 Sv (1 Sv=10⁶ m³s⁻¹)であり、中層下部(27.0-27.3σ_θ)の0.5 Svを大きく上回った。一方、東カムチャツカ成分の南西向き流量は中層上部で0.8 Sv、中層下部で1.0 Svであり、下層のほうが大きかった。

表1 2008年3月Aライン親潮域積算のオホーツク成分、東カムチャツカ成分(EK)、黒潮成分流量(単位Sv, 1 Sv=10⁶m³/s, 南西向きを正, ADCP基準値)。

Layer (σ _θ)	Okhotsk	EK	Kuroshio
26.7-27.0	1.6	0.8	0.5
27.0-27.3	0.5	1.0	0.6
Total	2.1	1.8	1.1

すべては示さないが、Aラインの他の観測においても、前述の傾向は共通して見られた。

②三陸~常磐沿岸

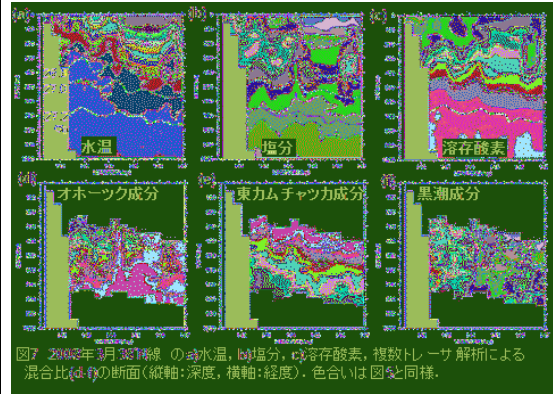


図7 2008年3月38°N線の水温、塩分、溶存酸素、複数トレーサ解析による混合比(θ)の断面(縦軸:深度、横軸:経度)。色合いは図6と同様。

2008年3月観測の38°N線の水温、塩分、溶存酸素、および、複数トレーサ解析で見積もられた各成分の断面図を図7に示す。この観測線上には、100m深で塩分33.6以下の領域はなく(図7b)、親潮前線より南、すなわち混合水域に位置している。また、図5に示すように、この観測線上には145°30'Eを中心に暖水塊2があり、この影響で144°E以東では黒潮成分が高い(図7f)。一方で、暖水塊2の西側、つまり、沿岸から144°Eまでは、上層部にオホーツク成分が比較的高く(図7d)、下層では東カムチャツカ成分が比較的高い領域が見られる(図7e)。図1で示される通り、親潮に投入したフロート3台が三陸~常磐沿岸に流れていったことから、この領域が親潮水の通り道、すなわち先行研究で知られている「親潮沿岸貫入」と考えられる。

表2 2008年3月38°N線の沿岸-144°E積算のオホーツク成分、東カムチャツカ成分(EK)、黒潮成分流量(単位Sv, 南向きを正, ADCP基準値)。

Layer (σ _θ)	Okhotsk	EK	Kuroshio
26.7-27.0	0.9	0.3	0.8
27.0-27.3	0.6	1.3	1.2
Total	1.5	1.5	1.9

この親潮沿岸貫入での各成分の ADCP 基準地衡流量を表2に示した。オホーツク成分の南向き流量は中層上部で0.9 Svであり、中層下部の0.6 Svを上回った。一方、東カムチャツカ成分の南向き流量は中層上部で0.3 Sv、中層下部で1.3 Svであり、下層のほうが大きかった。この傾向は、前述の通り、親潮域のものと共通である。また、表1と表2を比較すると、Aラインと38°N線では、オホーツク成分と東カムチャツカ成分の流量はほぼ同程度であるが、黒潮成分流量は明らかに高くなっており、親潮~親潮沿岸貫入の下流に行くに従い、黒潮水が混合によって付加されていると推測される。

③ 亜寒帯前線周辺

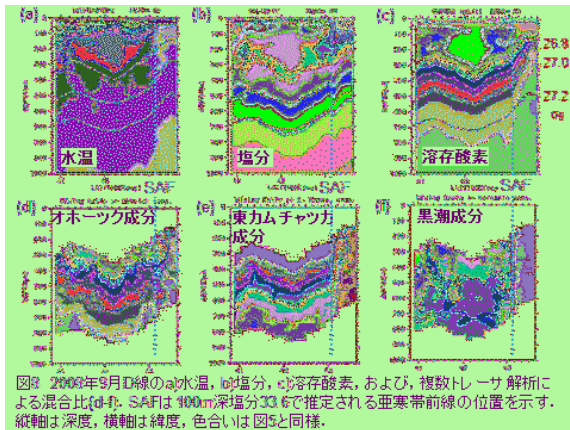


図8 2008年9月D線のa)水温, b)塩分, c)溶存酸素, および, 複数トレーサー解析による混合比(d-f): SAFは100m深塩分33.6で推定される亜寒帯前線の位置を示す. 縦軸は深度, 横軸は緯度, 色合いは図5と同様.

2008年9月観測のD線における, 水温, 塩分, 溶存酸素, および, 複数トレーサー解析で見積もられた各成分の断面図を図8に示す. 亜寒帯前線 (Sub-arctic Front; SAF) は, 表層~亜表層 (200m深付近) において, 亜寒帯循環域と混合水域との境界を示すものであるが, D線においては親潮前線の東への延長と考えて, 本課題で得られた100m深塩分33.6の指標塩分に基づけば, SAFは43°15' Nに位置していると判断される (図8の紫色の太破線). ここを境に, 表層~亜表層では水温, 塩分が大きく変化し (図8a, 8b), その北側には黒潮成分はほとんど見られないため (図8fの青色領域, 0-20%), この指標塩分が妥当であると判断できる. SAFの北側 (図8ではSAF破線の右側) の構造を詳しくみると, 解析密度層全層にわたり, SAFのごく北側である43°15' N~43°30' Nではオホーツク成分が比較的高く (40-60%, 図8dの若草色~緑色の領域), 43°30' N以北では東カムチャツカ成分がかなり高いことが分かる (80%以上, 図8eの橙色の領域). 東カムチャツカ海流は, 亜寒帯循環の西岸境界流であるため, 43°30' N以北の水塊特性は亜寒帯循環の内部領域のものに似ていると考えられるが, 43°15' N~43°30' Nにはオホーツク成分の高い領域が分布していたため, 等密度追従型フロートの漂流結果も考え合わせると, 亜寒帯循環の南縁に沿って, 北太平洋に流出したオホーツク海中層水が混合によって変質を受けながら運ばれていると考えられた.

次に, 混合水域 (SAFの南側) においては, SAFの北側でほとんど見られなかった黒潮成分が40-60%程で広く分布していた (図8f, SAF以南の若草色~緑色の領域). また, オホーツク成分は27.0σ_θより上の密度層で (図5d), 東カムチャツカ成分は27.0σ_θより下の密度層で比較的高い値を示している (図8e). 図4の等密度追従型フロートの観測結果, および, 図7の親潮沿岸貫入域の成分分布からも推測されていたように, 混合水域においては, オホーツク海中層水は主として中層上部

(26.7-27.0σ_θ) に広がる一方, 東カムチャツカ海流水, あるいは北太平洋西部亜寒帯循環水は, 中層下部 (27.0-27.3σ_θ) に広がることが示された.

表3. 2008年4月に線亜寒帯前線以南のオホーツク成分, 東カムチャツカ成分 (EK), 黒潮成分流量 (単位: Sv; 1 Sv = 10⁶ m³/s, 南西向きを正, 1500dbar基準値).

Layer (σ _θ)	Ohtsuki	EK	Kuroshio
26.7-27.0	0.4	0.1	0.6
27.0-27.3	0.2	0.5	0.5
Total	0.6	0.6	1.1

D線の南端部 (41°N以南) には, 41°N~SAFに分布する水よりもさらに温かく (100m深10度以上, 図8a), 塩分も高い (100m深塩分34.2以上, 図8b) 水塊が見られ, 前線が形成されている. そこで, 41°N~SAFの領域に輸送される各起原水成分の流量を求めた (表3). 1500dbar基準地衡流量であるため, ADCP基準地衡流量に比べ, 流量が低い可能性もあるが, 26.7-27.3σ_θ密度層でオホーツク成分, 東カムチャツカ成分はともに0.6 Svであった. 表1に比べると, 親潮域を横切って混合水域に到達したオホーツク海中層水, 東カムチャツカ海流水のそれぞれ約3割程度がこの海域に運ばれていることが推測された.

(3) その他の研究

溶存酸素資料不足などによって, 複数トレーサー解析を用いることはできなかったが, 2006年~2008年のAライン12航海において, 表層-26.7σ_θ, 26.7-27.0σ_θ, 27.0-27.3σ_θの各密度層について, 親潮と親潮反転流, さらに両者の差で定義できる親潮貫入それぞれのADCP基準地衡流量を求め, 時間変動を調べた. その結果, 表層-26.7σ_θでは, 1月に親潮南下流量が最大となる季節変動が見られた一方, 下2層では明瞭な季節変動が見られなかったこと, 親潮貫入の流量変動が三陸~常磐沿岸域に現れる冷水域の南北偏に影響することなどが分かった.

また, 親潮および親潮貫入が混合水域の生態系に与える影響を定量的に見積もるため, 親潮域に大量に分布する大型カイアシ類の親潮沿岸貫入による混合水域への輸送量を見積もり, サンマによる推定被食量を上回ることを示した (Shimizu et al. 2009).

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- ① Itoh S., Shimizu Y., Ito S. and Yasuda I. (2011): Evolution and decay of a warm-core ring within the western subarctic gyre of the north Pacific, as

- observed by profiling floats. *Journal of Oceanography*, in press. (査読有)
- ② 清水勇吾・伊藤進一・笥 茂穂・和川 拓 (2011): 中層フロートに取り付けた「オプトード」の溶存観測精度と観測例. 東北ブロック水産海洋連絡会報, **41**, 41-43. (査読無)
- ③ Tatebe H., Yasuda I., Saito H. and Shimizu Y. (2010): Horizontal transport of the calanoid copepod *Neocalanus* in the North Pacific: The influences of the current system and the life history. *Deep Sea Research part I*, **57**, 409-419. (査読有)
- ④ Ito S., Yoshie N., Okunishi T., Ono T., Okazaki Y., Kuwata A., Hashioka T., Rose K. A., Megrey B. A., Kishi M. J., Nakamachi M., Shimizu Y., Kakehi S., Saito H., Takahashi K., Tadokoro K., Kusaka A. and Kasai H. (2010): Application of an automatic approach for calibrating the NEMURO nutrient-phytoplanktonzooplankton food web model in the Oyashio region. *Progressive Oceanography*, **87**, 186-200. (査読有)
- ⑤ Shimizu Y., Takahashi K., Ito S., Yasuda I., Tatebe H., Kusaka A. and Nakayama T. (2009): Transport of subarctic large copepods from the Oyashio area to the mixed water region by the coastal Oyashio intrusion. *Fisheries Oceanography*, **18**, 312-327. (査読有)
- ⑥ 清水勇吾・日下 彰・伊藤進一・笥 茂穂 (2009): フロート観測で得られた親潮域から混合域にかけての輸送時間と水塊分布. 東北底魚研究, **29**, 63-65. (査読無)

[学会発表] (計8件)

- ① Shimizu, Y., Talley L. D., Ito S., Kakehi S. and Wagawa T., Spreading pattern and transport of the Okhotsk Sea Intermediate Water to the northwest Pacific revealed by profiling floats with optode and hydrographic observations. PICES 2010 meeting, 2010年10月29日, 米国オレゴン州ポートランド.
- ② Shimizu, Y., Wagawa T., Ito S., Kakehi S. and Kusaka A., Velocity structure and transport of Oyashio measured by vessel-mounted acoustic Doppler profiler along repeat hydrographic section A-line, PICES 2010 meeting, 2010年10月29日, 米国オレゴン州ポー

ポートランド.

- ③ 清水勇吾・伊藤進一・笥茂穂・和川拓, 中層フロートに取り付けたオプトードによる溶存酸素観測の精度と安定性, 2010年度日本海洋学会春季研究発表大会, 2010年3月28日, 東京海洋大学品川キャンパス.
- ④ 清水勇吾・日下彰・伊藤進一・笥 茂穂, フロート観測で得られた親潮域から混合域にかけての輸送時間と水塊分布, 2009年度水産海洋学会研究発表大会, 2009年11月18日, 長崎大学.
- ⑤ 清水勇吾・L. D. Talley・伊藤進一・笥茂穂, オプトード付中層フロートおよび船舶観測によって得られたオホーツク海中層水の日本東方沖への広がり, 2009年度日本海洋学会秋季研究発表大会, 2009年9月28日, 京都市.
- ⑥ Shimizu, Y., K. Takahashi, S-I. Ito, S. Kakehi, H. Tatebe, I. Yasuda, A. Kusaka and T. Nakayama, Transport of subarctic large copepods from the Oyashio area to the mixed water region by the coastal Oyashio intrusion, ESSAS 2009 Meeting, 2009年6月18日, 米国ワシントン州シアトル.
- ⑦ 清水勇吾・L. D. Talley・伊藤進一・笥茂穂, 親潮を構成するオホーツク海水・東カムチャツカ海流水成分の分布と変動, 2008年度日本海洋学会秋季大会, 2008年9月25日, 広島国際大学呉キャンパス.
- ⑧ 清水勇吾・L. D. Talley・伊藤進一・笥茂穂, 複数トレーサー解析による親潮域～混合水域中層の起源水成分の推定の試み, 2008年度日本海洋学会春季研究発表大会, 2008年3月27日, 東京海洋大学品川キャンパス.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

清水 勇吾 (SHIMIZU YUGO)

独立行政法人水産総合研究センター東北
区水産研究所・混合域海洋環境部・海洋動
態研究室・主任研究員

研究者番号: 10371791