

— 2011年度 日本海洋学会 岡田賞受賞記念論文 —

海洋生態系に関わる親潮・黒潮海域の水塊と変動に関する研究*

伊藤 幸彦†

要 旨

黒潮・親潮域は亜熱帯・亜寒帯域起源の水塊や物質、生物相が近接し、豊かで多様な生態系を成している。筆者は、黒潮・親潮域生態系の理解を進めるため、連鎖の起点である海洋物理過程と、高次栄養段階に位置する海洋生物資源の動態の両面から研究に取り組んできた。対象としてきた物理現象は、中規模渦、前線波動、潮汐による乱流鉛直混合で、数値実験、現場観測、および既往データ解析によって現象の構造や動態を調べてきた。これらの研究により、(1) 黒潮系暖水塊を中心とする中規模渦の挙動、構造と水塊特性、移動機構、熱および物質輸送、(2) 黒潮前線波動の構造、伝播・エネルギー特性、(3) 千島海峡域の乱流鉛直混合強度、強乱流励起過程、および中層水塊形成への影響が解明されてきた。海洋生物資源に関しては、黒潮・親潮域生態系の鍵種であるマイワシ・カタクチワシに焦点を当て研究を行ってきた。粒子追跡実験および現場での調査、仔魚の耳石日輪分析により、両種の輸送環境、経験水温と再生産成功率の関係を明らかにしたほか、仔魚の経験環境履歴を推定する手法を開発した。本稿ではこれらの研究内容について概説する。

キーワード：黒潮・親潮域、中規模渦、前線波動、乱流鉛直混合、仔魚輸送

1. はじめに

西部北太平洋の黒潮・親潮域は、亜熱帯・亜寒帯域起源の水塊や物質、生物相が近接し（宇田，1935；Sverdrup, 1942；Kawai, 1972）、豊かで多様な生態系を成している（Longhurst, 2006）。黒潮は亜熱帯循環の西岸境界流として膨大な熱や塩類を極向きに運ぶと同時に、日本の南岸域に産卵場を有する浮魚類の卵稚仔を

黒潮続流域へと輸送する（杉本，2004）。亜寒帯循環の西岸境界流である親潮は、東カムチャツカ海流とオホーツク海系水を起源に持ち（Kitani, 1973；大谷，1989）、栄養塩類に富む海水を北海道・本州の東方海域にもたらす。黒潮・親潮が離岸した後の下流部である黒潮続流・親潮続流は、南北に大きく蛇行し、しばしば渦状の水塊を切離する（Ichiye, 1955；Kawai, 1972）。これらの蛇行や渦、派生するストリーマはサンマやカツオ、イワシ、サバ類の南北回遊経路であり、異なる水塊間に形成される前線にはしばしば濃密な魚群が見られる（宇田，1960；Sugimoto and Tameishi, 1992）。

黒潮・親潮域の生態系は様々な生物・物質により構成されている。その構造や特性は水塊間で明瞭な差異を呈し、また生物相・生産性は物理環境の変化に応答して季節的・経年的に劇的な遷移・変動が生じる。筆者はこの

* 2012年1月30日受理；2012年2月15日受理

著作権：日本海洋学会，2012

† 東京大学大気海洋研究所

〒277-8564 千葉県柏市柏の葉5-1-5

TEL: 04-7136-6326

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

ように高度な複雑系である黒潮・親潮域の生態系の理解を進めるために、基本的な駆動力である海洋物理過程、人類が直接的にその恵みを享受している海洋生物資源の動態の両面から研究に取り組んできた。

海洋物理過程は連鎖する生態系諸過程の起点、言わば上流部に相当する。この上流部で筆者らがこれまでに実施してきた研究は、中規模渦や前線波動等、中規模擾乱に関する研究と、乱流鉛直混合の直接観測等、微細構造の研究に分けられる。これらの研究の概要について、第2, 3節でそれぞれ紹介する。一方、魚類等の海洋生物資源は、物理過程から始まる連鎖過程、人類が受ける生態系サービスという観点からすれば下流に位置すると言える。筆者らはこの下流部からのアプローチとして、マイワシ・カタクチイワシを中心とする浮魚類卵稚仔の輸送と成長・生残について研究を行ってきた。これらの研究結果は第4節で紹介する。最後に、第5節ではこれまでの研究の全体を総括し、今後の展望について述べる。

2. 黒潮・親潮統流域の中規模擾乱

黒潮・親潮統流の流動とその相互作用は、流域に多くの中規模擾乱を励起している。黒潮統流から北側に切離する高気圧性の暖水渦、黒潮暖水塊はこの海域で最も特徴的な中規模現象の1つであり、東北・北海道太平洋岸の漁海況形成に大きな影響を及ぼす。2.1節では、この黒潮暖水塊の挙動を調べるために行った数値実験の結果 (Itoh and Sugimoto, 2001; Itoh and Sugimoto, 2002a) を概観する。黒潮・親潮統流域の中規模渦は、黒潮統流だけではなく親潮、オホーツク海水、津軽暖水に起源を持つものが広い範囲に分布しており、またそれらが渦同士、黒潮や親潮、さらには大気と相互作用することで力学的な構造や包含する水塊を変質させていることが知られている。2.2節では、これらを明らかにするために、衛星海面高度、船舶およびフロート観測結果を解析した研究を紹介する (Itoh and Yasuda, 2010a; Itoh and Yasuda, 2010b; Itoh *et al.*, 2011b)。

黒潮およびその統流域では、中規模渦のほかにも前線に沿って下流に伝播する蛇行、前線波動が生物生産や海水交換に大きな影響を与えている。筆者らは房総沖での係留観測によって、この前線波動の特性を明らかにした

(Itoh and Sugimoto, 2008)。この成果の概要は2.3節で述べる。

2.1 黒潮暖水塊の挙動に関する数値実験

黒潮暖水塊の挙動の大きな特徴は、その極向き移動 (北半球なので北向き) 傾向である (Kitano, 1975; 秦, 1974; 安田ら, 1986; Yasuda *et al.* 1992)。例えば、1986年秋に黒潮統流北縁の38°N付近で発生した黒潮暖水塊86Bは、1988年秋には41°30'N付近に達している (Yasuda *et al.*, 1992)。このような高気圧渦の長期的な極向き移動は、他海域の同様の渦と比しても特異的である。北大西洋亜熱帯循環の西岸境界流である湾流から発生する暖水塊のほとんどは、切離後に南西へ移動して湾流に再吸収される (Brown *et al.*, 1986)。

孤立高気圧渦は、惑星 β 効果によって西へ、惑星 β 効果に起因する二次流の効果で赤道向きに移動する (McWilliams and Flierl, 1979)。従って、惑星 β 効果のみで黒潮暖水塊の北上を説明することはできない。惑星 β 効果による西進指向はしかし、黒潮暖水塊と東北・北海道沖の海底斜面との相互作用を媒介する。良く知られているように、非粘着の側壁に近接する渦糸は、壁を挟んで対称な位置にある反対符号の渦糸と渦対を成すかのように振る舞う (鏡像効果)。西岸付近の高気圧渦は、この鏡像効果により極向きに移動することが、 β 面上での数値実験においても示されている (安田ら, 1986; Shi and Nof, 1994)。

しかし、この移動指向だけで黒潮暖水塊の北上機構を鏡像効果に求めるのは適当ではない。鏡像効果は非粘着側壁の効果であり、西岸の海底斜面は地形性 β 効果により高気圧渦を南へ (二次流の効果により東へ) 移動させ得るからである。また、西岸付近で高気圧渦を極向きに移動させる効果としては、鏡像効果の他にもロケット効果 (渦が壁面に衝突して壊れ一部を南へ放出することによって本体が北へ移動する効果; Shi and Nof, 1994) も挙げられる。

このような背景のもと、筆者らは黒潮暖水塊の海底斜面付近での挙動を明らかにするための数値実験を行った (Itoh and Sugimoto, 2001; 伊藤, 2004)。使用したモデルは Princeton Ocean Model (Blumberg and Mellor,

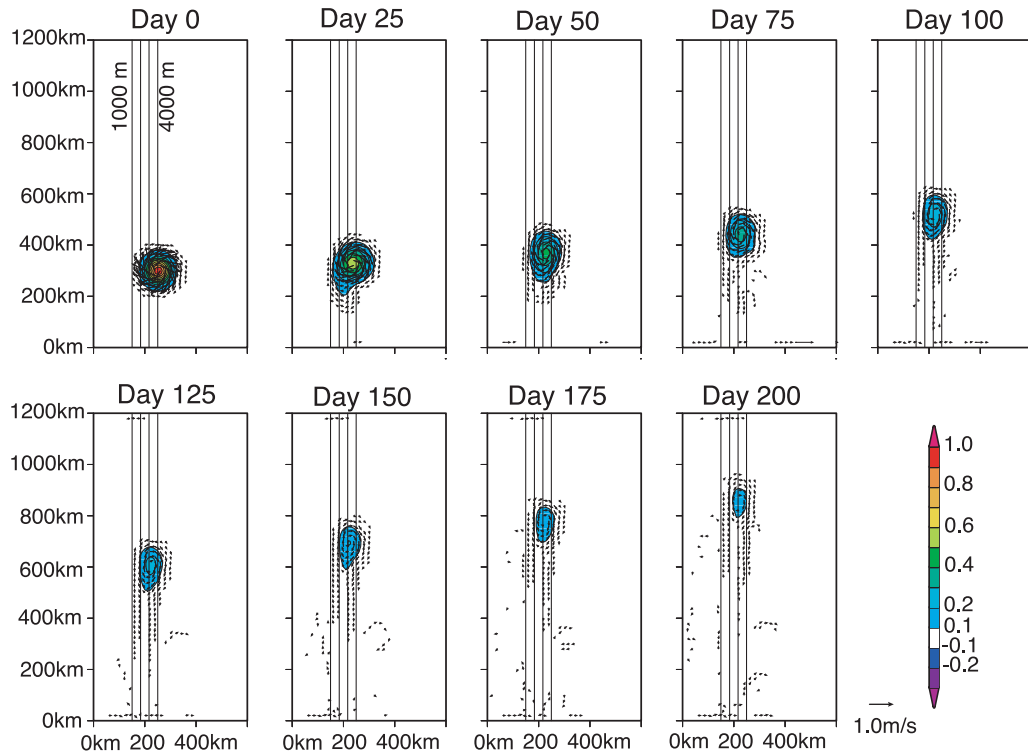


Fig. 1. Temporal variations in surface elevation (colored contours) and velocity (vectors) predicted by a numerical experiment on the movement of a warm-core ring near a steep bottom slope (after Itoh and Sugimoto, 2001).

1987) で、西岸境界斜面を有する矩形海域を設定した。日本海溝の海底斜面勾配は 1000 m 以深の平均値で 0.05 を超えるが、計算上の誤差を低減するため基本ケースでは 0.03 とした。海底斜面との相互作用は渦の構造に依存することが考えられたため、現場観測データを元に暖水塊の基本構造を決定した。実験では、海底斜面の縁辺 (深さ 4000 m) に配置した暖水塊の 200 日間の挙動を追った。渦構造、渦強度、海底斜面勾配、海底摩擦を変化させた感度実験も行った。

初期に斜面領域の縁辺にあった暖水塊は、最初の 50 日間にわずかに西へ移動して斜面に沿った形状に変化し、北上を開始した (Fig. 1)。暖水塊はその後減衰しつつも 200 日目まで北上を続けた。

暖水塊は、斜面の勾配が強いほど、海底摩擦が弱いほど、また渦流の強度が強いほど北上傾向が強かった。また、基本ケースでは暖水塊内部深層の観測事例に基づき密度構造を伴った傾圧的な深い流速構造を与えていたが、

斜面上に順圧流を与えたケースでは、渦流構造は直ちに散逸し北上は再現されなかった。地形性 β 効果に対する鏡像効果の重要性は、渦流の斜面昇降に伴う渦管伸縮に対する相対渦度の水平移流の比で評価できる (伊藤, 2004)。スケール解析の結果、北上が再現された実験では鏡像効果が地形性 β 効果に対して卓越しており、その傾向は斜面を昇降する流れが弱く (順圧流ではこれが強い)、斜面勾配が大きいほど強まることがわかった。これらのことから、黒潮暖水塊の深い渦流動が急勾配の海底斜面による鏡像効果が、長期的な北上の素過程となっていることが示された。

上述の数値実験は単独の暖水塊を対象としたものであったが、現実の東北・北海道沖には多数の暖・冷水塊が存在している。絶え間なく生じる渦同士や、黒潮・親潮との相互作用は、上記の鏡像効果に加え、暖水塊の移動や勢力の維持に関わっている可能性がある。そこで、Itoh and Sugimoto (2002a) では、亜熱帯・亜寒帯循環系を

模した2.5層風成二重循環系モデルにより、中規模渦を逐次的に発生させ、それらの挙動と風レジームの変化に対する応答の様子を調べた。亜熱帯循環からの高気圧渦の発生は、亜熱帯循環系を駆動する風応力が強ければ強いほど多く、高気圧渦は亜寒帯循環の西岸境界流の南下に抗して西岸を北上する傾向があった。一方、亜熱帯循環が弱い場合は高気圧渦の発生頻度は低く、西岸に沿った北上は亜寒帯循環の西岸境界流によりブロックされやすくなった。しかし、発生した高気圧渦の一部は、亜寒帯循環の西岸境界流の蛇行に沿って長期的に北東方向に移流された。このことは、親潮域での暖水塊の北東方向への移動が、地形との相互作用だけでなく親潮の移流の影響を受けていることを示唆する。

東北・北海道沖の黒潮暖水塊の配置は、秋季に南下するサンマの漁場形成に直接的な影響がある。孤立暖水塊の北上機構に関する知見は、特に大型の暖水塊が魚群の動態に及ぼす影響について予測の基礎情報を与えるものであり(伊藤・杉本, 2001), また広域的な風応力が暖水塊の移動傾向に関係し得ることは、気候変動が漁場形成にも影響する可能性を示している(Itoh and Sugimoto, 2002a)。本小節の最後に、これまでに紹介した数値実験結果を動機として実施した係留観測により三陸沖の2500 mまでの流動特性(当初目的の暖水塊は捉えられず)を記述した(Itoh and Sugimoto, 2002b)ことも付記しておく。

2.2 黒潮・親潮続流域の中規模渦動態解析

前節では、黒潮暖水塊の動態を主に数値実験によって調べた研究成果について紹介した。では、観測事実はどうなっているのだろうか。黒潮・親潮続流域では、多くの現場観測とデータの解析が精力的に行われてきた。これらは、亜表層水塊マップによる海況動態の記述(Kawai, 1972; Mizuno and White, 1983; Sainz-Trápaga and Sugimoto, 1998; Iwao *et al.*, 2003)や、大型暖水塊の追跡観測(秦, 1974; Yasuda *et al.*, 1992)という形で成果となってきた。しかし、複雑に移動する中規模渦の動態を定量的かつ包括的に記述するには、時空間的なカバレッジが十分ではなかった。

この問題を解決しつつあるのが、1992年以来運用さ

れている衛星海面高度計である。Chelton *et al.* (2007)は、格子化された10年間分の海面高度偏差データを用いて解析を行い、全球の中規模渦を検出・追跡した。これは、海洋中規模渦の観測的研究の1つのブレイクスルーであったが、黒潮・親潮続流域では渦の検出力が低かった。この1つの原因として、複雑に前線が入り組むこの海域で単純なフィルターを用いたことにより渦の回転成分が過度に平滑化されてしまったことが考えられた。そこで、まずItoh and Yasuda (2010a)ではこの点を改良し、衛星海面高度データを精査した。

使用したデータは複数の衛星海面高度計データに基づいてSsalto/Duacsが作成、AVISOが提供する格子化された海面高度偏差で、黒潮・親潮続流域をカバーする25~55°N, 130°E-180°のデータを使用した。中規模渦の検出方法は、基本的にはChelton *et al.* (2007)と同様で、海面高度偏差から変形に対する回転の効果の重要性を指標するOkubo-Weissパラメータ(Okubo, 1970; Weiss, 1991)に基づく。彼らとの手法の違いは、海面高度偏差やOkubo-Weissパラメータに対して明示的な空間フィルターを用いることはせず、連続的に追跡できる渦だけを抽出したこと(Itoh and Yasuda, 2010aでは4週以上)である。この方法により、黒潮・親潮続流域における中規模渦の濃密な分布を捉えることができた。

Itoh and Yasuda (2010a)では、渦の出現頻度、振幅(相対渦度の最大・最小値)、半径、移動速度等、様々な特性を定量的に示したが、本節では紙面の関係で平均伝播速度のみ示す(Fig. 2)。まず、黒潮続流の南北で中規模渦が明瞭に西に向かっていることが見て取れる。北側では高気圧渦が、南側では低気圧渦の移動が顕著である。また、千島・カムチャツカ海溝や亜寒帯前線に沿っても渦が移動している。高気圧渦・低気圧渦の振幅はそれぞれ黒潮続流の北縁・南縁で大きかったが、高気圧渦に関してはこの振幅の強い海域が日本海溝から千島カムチャツカ海溝に沿って北~北東へ伸びていた。これはすなわち、振幅の大きい黒潮暖水塊が海溝域を北上していることを示している。黒潮暖水塊の北上傾向は良く知られてはいたが既往研究では断片的な事例の記述に留まっており、本研究によって初めて定量的かつ包括的に示すことができた。

上述したように、Itoh and Yasuda (2010a)では黒

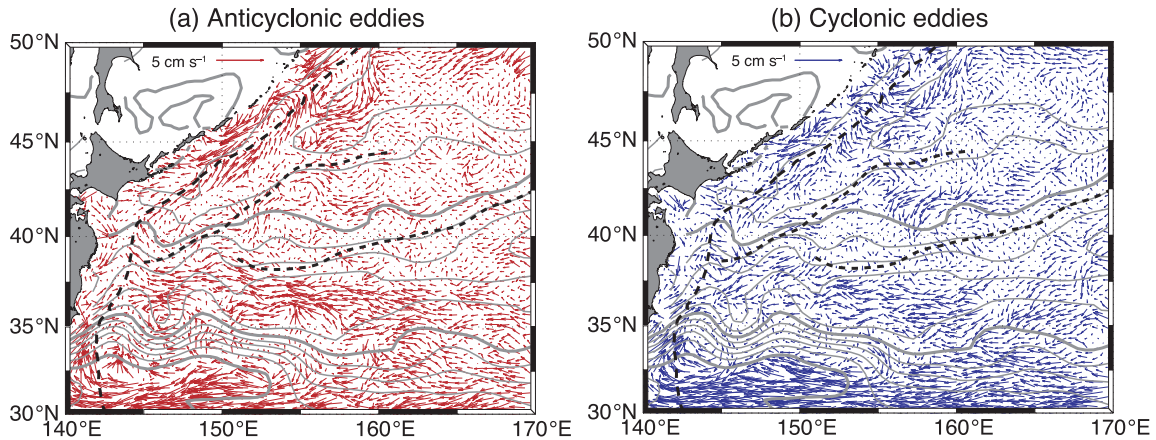


Fig. 2. Mean propagation speed of mesoscale eddies detected from the distribution of the sea surface height anomaly, for (a) anticyclonic eddies and (b) cyclonic eddies. Thick gray contours are mean dynamic height, and black dashed lines indicate the Japan and Kuril-Kamchatka trenches, the Subarctic Front, and the Subarctic Boundary (after Itoh and Yasuda, 2010a).

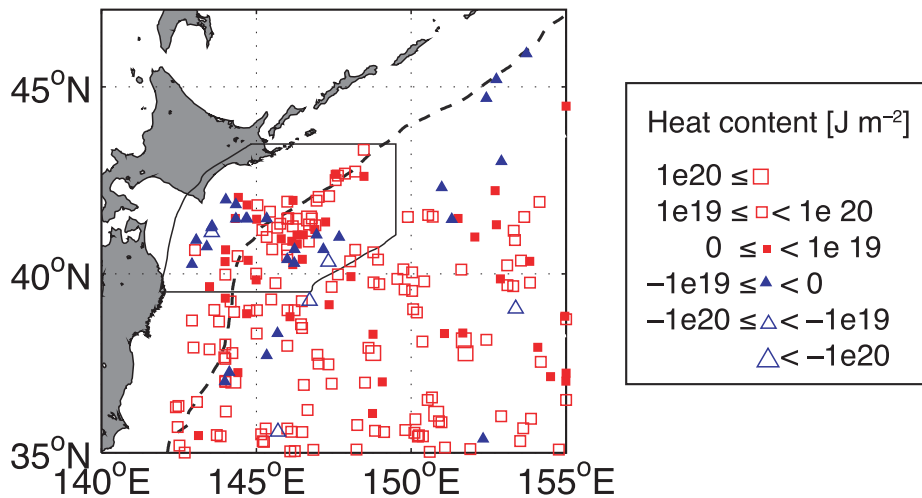


Fig. 3. Distribution of warm and cold anticyclonic eddies distinguished by heat content (calculated for the 50–200 dBar layer) anomalies from climatological values. Thick black dashed lines indicate the Japan and Kuril-Kamchatka trenches. The thin black line indicates an area off Hokkaido where both warm and cold anticyclonic eddies occurred in large numbers (after Itoh and Yasuda, 2010b).

潮・親潮続流域に分布する中規模渦の様々な特性を明らかにしたが、これらは全て海面高度偏差に基づく解析から得られたものであり、渦の構造や水塊の特性がどのようになっているかという点を示すことはできない。そこで、Itoh and Yasuda (2010b) では、衛星データから検出した渦のうち黒潮暖水塊を含む高気圧渦について、水温・塩分プロファイルデータと照合することでその構

造を調べた。

黒潮・親潮続流域の海面高度偏差マップ上に12週以上存続していた高気圧渦約12000個に対し、船舶(CTD, XCTD)とArgoフロートにより取得された約15000のプロファイルから渦中心付近のものを探索し、海面高度と力学高度が整合的な対応関係を有する227のプロファイルを得た。ここでは、この海域の高気圧渦の

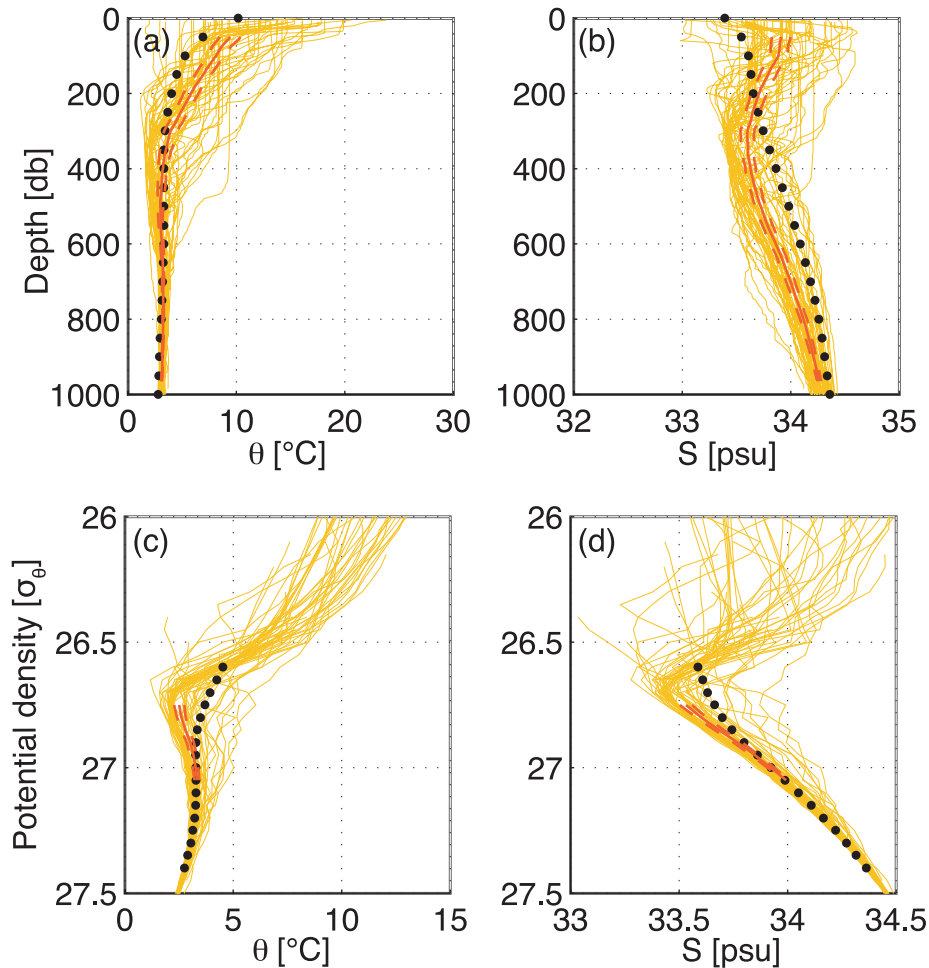


Fig. 4. Vertical profiles of warm eddies in the area off Hokkaido (thin black lines in Fig. 3), showing (a) potential temperature and (b) salinity with respect to depth, and (c) potential temperature and (d) salinity with respect to potential density. Thin yellow lines indicate the measured individual profiles. Red solid (dashed) lines are the mean (standard error) of eddy profiles, and black dotted lines indicate the mean of climatological profiles (as obtained at the locations of eddy profiles) (after Itoh and Yasuda, 2010b).

多くが上層に暖水、中層に冷水という二重核構造をしているという点に焦点を絞った結果の概要を示す。

海洋の上層に存在する高気圧渦は海面が盛り上がり、圧力が高くなっており、これを補償するように軽い水をコアに持つ。西岸境界流域では、暖水が密度の負偏差を作ることが多いので高気圧渦には暖水塊が多いが、密度の負偏差は低塩分水によっても作られる。上層の水温や塩分を見れば、この特性を特定することができる。

Itoh and Yasuda (2010b) では、上層 (50~200 dBar) 熱容量の気候値からの偏差で暖水性・冷水性の

高気圧を区分した。暖水性の高気圧渦、暖水塊は北海道から南側、海溝域を中心に全体的に分布しているが、冷水渦は 44°N 以北の海域と、海溝の最深部の両側、親潮分枝流の平均的な位置の近辺に見られた (Fig. 3)。冷水性の高気圧渦は世界的にも暖水性高気圧渦に比べて数が少ないが、西部北太平洋では 1990 年代から主にロシアの研究者によって記述があり (Lobanov and Bulatov, 1993), 2000 年には日本の研究グループからも Yasuda *et al.* (2000) が千島沖のブッソル渦についてのその動態を発表している。この渦はオホーツク海の

低温・低塩分水を核に持つが、その平均的な分布は本研究によって明らかとなった。

前述のように、この海域には上層が暖水性でも中層に冷水の核を持つ渦が存在する。Fig. 4には暖水性高気圧渦が多く出現する北海道沖の海溝付近における水温・鉛直分布を示した。まず、圧力に対するプロファイル (Fig. 4a, b) を見ると、暖水性の定義の通り 200dBar より浅い所に高温偏差があってここでは塩分も高くなっている。200dBar より深いところでは同じ深さで見ると低塩分になっているが、これ自体は中層核そのものではなく、ここで見えているものの多くは背景が塩分成層している中で、密度面が押し下げられたことによるものである。

二重核構造は圧力よりも密度面で見ると明快となる (Fig. 4c, d)。密度 $26.6\sim 26.8\sigma_\theta$ の範囲を見ると、観測された個々のプロファイルが気候値よりも低温・低塩分側にきている。つまり、暖水塊であっても、中層 $26.6\sim 26.8\sigma_\theta$ では低温・低塩分なのである。実はこの中層低温・低塩分偏差は、冷水性の高気圧渦にも共通で、さらに南側の黒潮・親潮移行域に分布する暖水性高気圧渦にも見られた。

紙面の関係で上記以外の結果紹介は割愛するが、Itoh and Yasuda (2010b) では高気圧渦の挙動について明らかとなったことを以下のようにまとめた (Fig. 5)。二重核構造の高気圧渦を形成する主要因となるのは、高温・高塩分の黒潮続流、低温・低塩分の親潮、極低温のオホーツク系水である (Fig. 5a)。黒潮続流から暖水渦が切り離され、北へ移動すると、オホーツク海系の冷水性高気圧渦と相互作用し (Fig. 5b)、上層に暖水、中層に冷水という二重核構造になる (Fig. 5c)。この構造は、異なる層にある同符号渦 (この場合は高気圧渦同士) 結合である Alignment (Polvani, 1991) の発現であると解釈された。

Itoh *et al.* (2011b) では、親潮域を北上する暖水塊の1年以上にわたって捕捉された2つのプロファイリングフロートデータを用い、この暖水塊の構造・水塊の発展・変質・減衰過程について調べた。観測された暖水塊には Itoh and Yasuda (2010b) で示されたように $26.6\sim 26.8\sigma_\theta$ に低温・低塩分層があり、短期的にはオホーツク海系水の影響と見られる層厚の増大を伴う低温化が

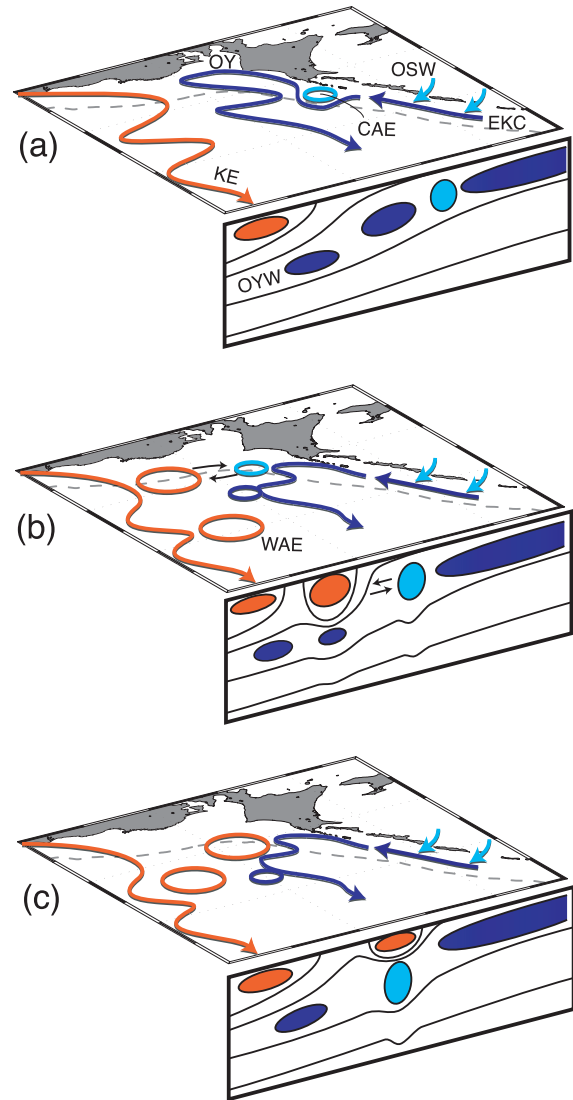


Fig. 5. Schematic diagram showing the formation and evolution of warm anticyclonic eddies (WAE) and cold anticyclonic eddies (CAE): (a) basic state, (b) formation of WAE and CAE, and (c) interaction and alignment of the eddies (after Itoh and Yasuda, 2010b).

生じていた。一方、 $26.6\sigma_\theta$ 以浅では冬季に300 dBarを超える混合層が発達して上層を冷却・一様化しており、移行域モード水 (Saito *et al.*, 2007; Oka *et al.*, 2011) の形成・分布に寄与していることが示唆された。

2.3 黒潮前線波動

黒潮や湾流等ジェット流の縁辺には、前線波動と呼ばれる波長数十から数百 km で下流に伝播する蛇行が生じ、流域の生物生産や沿岸・沖合、亜熱帯・亜寒帯の海水交換に重要な役割を果たしている。黒潮および続流域の前

線波動に関しては多くの観測が行われており、推定された周期、波長、位相速度の範囲は 5~20 日、100~400 km、14~30 日であった (Sugimoto *et al.*, 1988 ; Qiu *et al.*, 1990 ; Kimura and Sugimoto, 1993 ; James *et al.*, 1999 ; Kouketsu *et al.*, 2007)。

湾流系では大陸棚から離岸するハッテラス岬の上流・

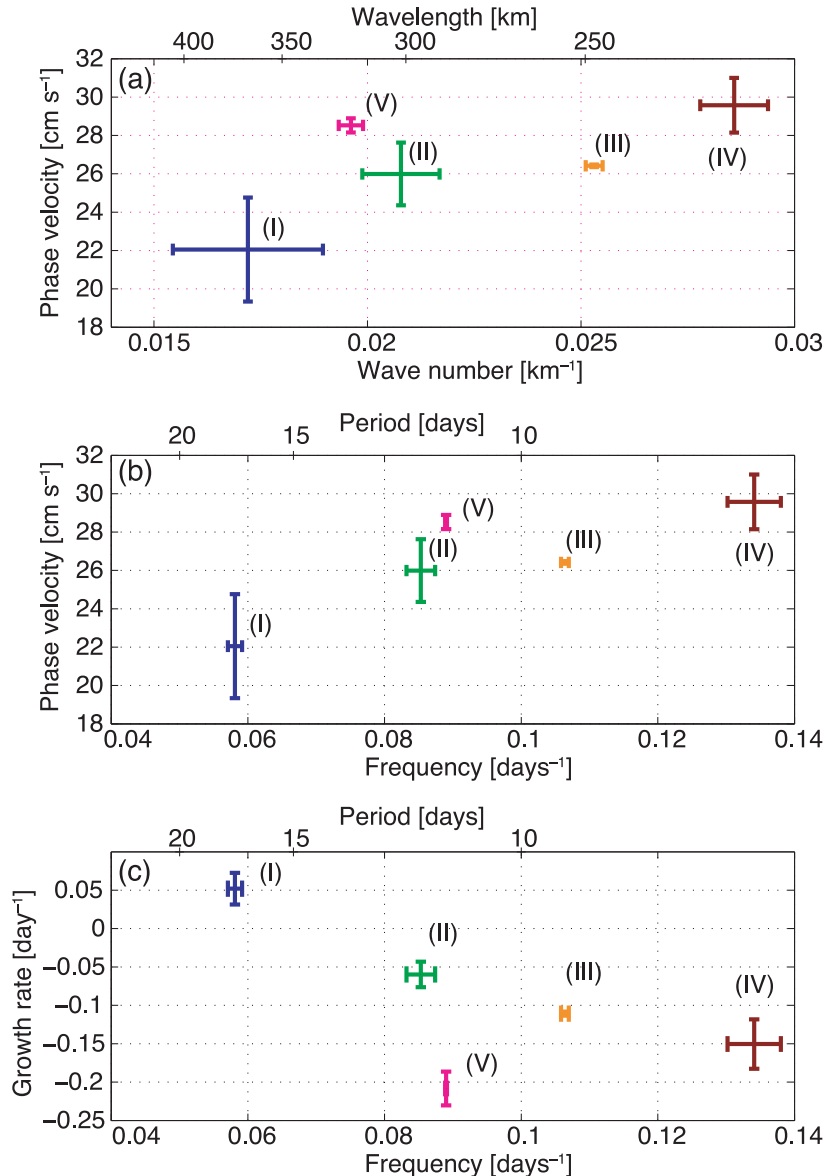


Fig. 6. Dispersion diagrams and growth rates for the five wave groups detected by EEOF analyses of current meter records collected in the area off Boso Peninsula (I-V, in order of decreasing contribution to the total variance): (a) wavenumber (wavelength) and phase velocity, (b) frequency (period) and phase velocity, and (c) frequency and growth rate (after Itoh and Sugimoto, 2008).

下流域ともに前線波動が観測されているが、その振幅は下流域で大きく増大し、位相速度は低下することが知られている (Tracey and Watts, 1986; Savidge, 2004)。黒潮系でも、170°E 以西の黒潮統流域で水平スケール 1000 km の変動が卓越すること (Bernstein and White, 1977) から陸棚を離岸後に変動が大きくなると考えられるが、これに関わると考えられる前線波動の力学的特性には未解明の点が多かった。

そこで Itoh and Sugimoto (2008) では、黒潮が離岸する房総沖海域に係留系を設置し黒潮前線波動の特性を調べた。2003 年に東京大学海洋研究所の淡青丸によって合計 10 台の流速計を備えた 4 系の係留系を水深 1200~2000 m の地点に設置し、2004 年 3 月に同白鳳丸にて回収した。

観測された流速と水温からは、渦場から平均場への運動エネルギー変換、平均場から渦場へのポテンシャルエネルギー変換が生じていたことが明らかとなった。50 日以下の流速変動に対する Extended EOF 解析から、周期 7~18 日、波長 220~380 km、位相速度 22~30 cm s⁻¹ の 5 つの波動群が検出された (Fig. 6)。これらの波動は、周期が長く波長が大きいほど位相速度が小さかった。擾乱の成長速度は波長と周期の最も大きいグループ (平均波長 380 km、平均周期 17 日) のみ正 (擾乱が成長) で、残りの 4 つのグループは減衰する傾向があった。成長速度、鉛直的な位相差、位相速度から、エネルギー変換の特性から、これらの波動は傾圧不安定的であり、これにより生じた渦の相互作用が運動エネルギーを大きいスケールに輸送していることが示唆された。

3. 千島海峡域の乱流鉛直混合

乱流鉛直混合は海洋の 3 次元的な循環の主要な駆動過程の 1 つであり、中・総観的規模では水塊形成や栄養塩供給等を介した生態系の変動に重要な影響を及ぼし得る。これまでに実施されてきた観測によると、外洋域中深層における乱流鉛直混合の強度は鉛直拡散係数で 10⁻⁵ m² s⁻¹ のオーダーであり (例えば Moum and Osborn, 1986)、黒潮・親潮域中深層において総観規模の水塊形成に対するローカルな作用は小さいと考えられる。しかし、一般に乱流鉛直混合の強度は空間的に著しく非一様

で、局所的な強混合が広域的な水塊分布や生物生産を決定づけている可能性もある。

東京大学海洋研究所 (現大気海洋研究所) の安田一郎教授を中心としたグループは、乱流鉛直混合が北太平洋の水塊形成・物質循環・生態系・気候変動過程に及ぼす影響を明らかにするため、黒潮・親潮域および、親潮の水塊源の 1 つであるオホーツク海・千島列島域、ベーリング海・アリューシャン列島域において、鉛直微細構造観測装置 (乱流計) を用いた乱流強度観測を行ってきた (安田, 2008; 安田, 2011)。本節ではこれらの研究のうち、筆者が特に深く関わってきた千島列島中部のウルップ海峡における乱流鉛直混合の観測とオホーツク海・北太平洋中層の水塊形成に与える影響に関する研究 (Itoh *et al.*, 2010; Itoh *et al.*, 2011c) について紹介する。

ウルップ海峡 (南ウルップ水道) は千島列島中部のウルップ島の北側に位置し、最浅部は千島海嶺の一端を成すシル上で 200 m 以下となる浅い水路である。このような浅い海峡は、最大水深約 2200 m のブッソル海峡 (北ウルップ水道) と比較して流量が小さく、また深い密度帯の水塊変動には寄与し得ないものの、相対的に流速が大きいことに関連して鉛直混合に伴うエネルギー散逸は大きいと考えられる (Tanaka *et al.*, 2007)。しかし、ウルップ海峡を含めた千島海峡はロシア管轄域内にあるため観測は制限されており、後述する 2006 年の観測以前には乱流観測は行われたことがなかった。

筆者は、安田教授のグループの一員として、北海道大学低温科学研究所を始めとする各機関との連携のもと実施されたロシア船プロフェッサー・クロモフ号の 2006, 2007, 2010 年千島海峡・オホーツク海観測航海に参加し、このウルップ海峡において水塊・流速・乱流強度の連続調査を行った。

2007 年 8 月の大潮期に実施したウルップ海峡太平洋側の 1 日観測結果を Fig. 7 に示す。流速および密度面深度、乱流強度は千島海峡域で卓越することが知られている約 1 日周期の潮汐に伴って大きく変動していた。水深約 600 m のシルの中腹では、潮流が斜面を下る太平洋向き (Fig. 7a, f)、および太平洋向きからオホーツク海向きに遷移する時に (Fig. 7b)、極めて強い乱流を観測した。乱流強度はオホーツク海および北太平洋中層水の上層密度帯であるポテンシャル密度 26.6~26.7 σ_{θ} 層

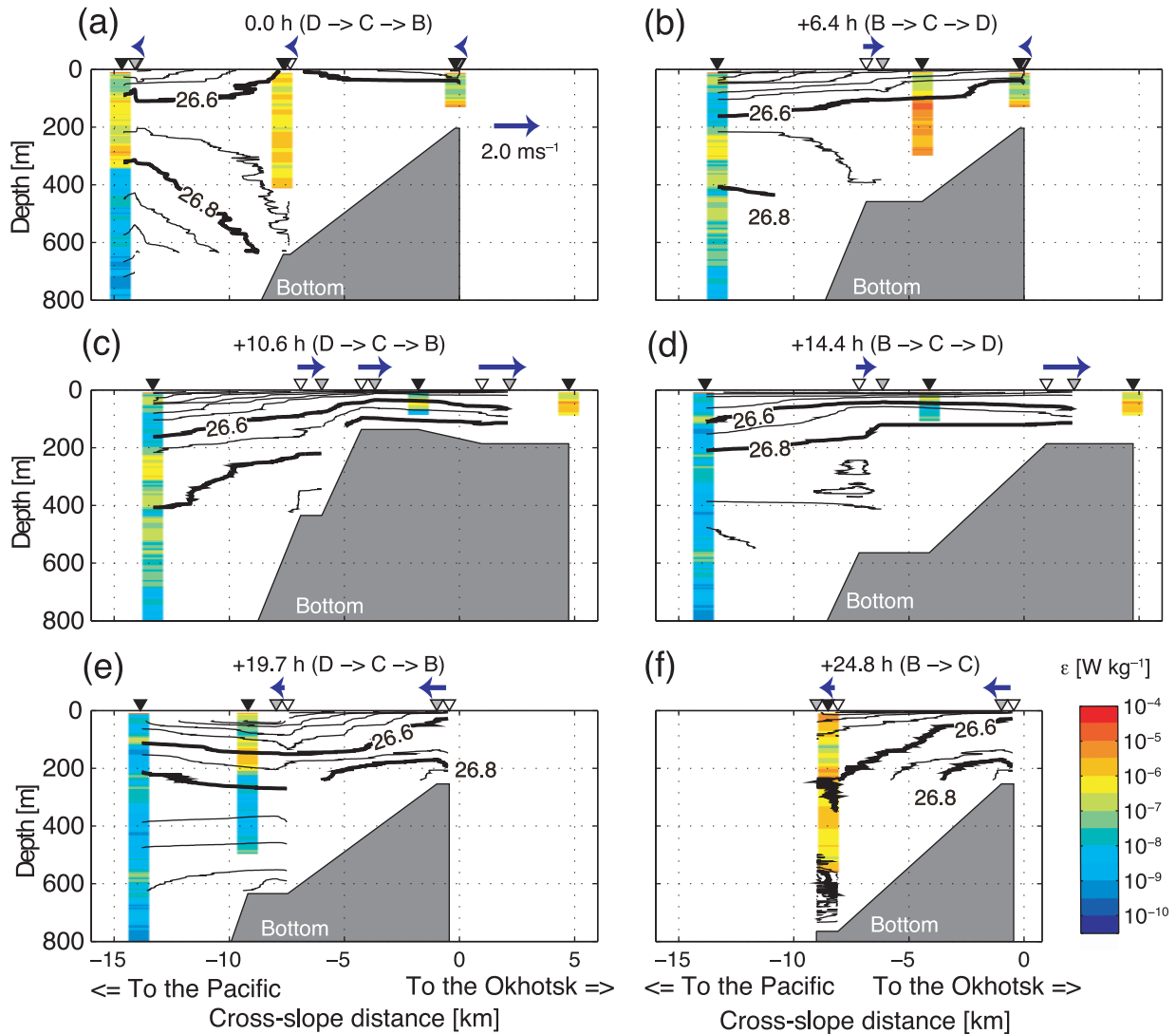


Fig. 7. (a-f) Profiles of potential density (contour lines) and turbulent energy dissipation rate (colored bars) for six transects during 1-day observations within the Urup Strait in 2007. Arrows indicate the cross-slope velocity at the surface, as inferred from ship drift (after Itoh *et al.*, 2011c).

で強く (例えば Fig. 7a, b), 乱流エネルギー散逸率 ε が 10^{-6} から $10^{-5} \text{ W kg}^{-1}$, 鉛直拡散係数 (図はなし) にして 10^{-1} から $5 \times 10^{-1} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ におよんだ。強乱流時には水柱が 300 m 以上にわたり, うち 1 回はほぼ海面から海底までに相当する 600 m が一様化していた (Fig. 7a)。

この 2007 年の観測と小潮期のオホーツク海側で実施された 2006 年の観測結果を合わせ平均すると, エネルギー散逸率はポテンシャル密度 $26.6 \sim 26.7 \sigma_\theta$ で最大 $1 \times 10^{-6} \text{ W kg}^{-1}$ となった (Fig. 8a)。密度面座標で考える

と, 外部からの密度フラックスが無視できる場合, 鉛直混合は密度面を横切る鉛直流によって補償される (McDougall, 1984)。これは, エネルギー散逸率のピークを与える等密度層に上下から海水が注入されることを意味する (Fig. 8b)。すなわちウルップ海峡では $26.6 \sim 26.7 \sigma_\theta$ 層の厚さが増大していることが示唆された。

Tatebe and Yasuda (2004) の解析モデルによると, 千島海峡域での鉛直混合に伴う中層への海水注入量は,

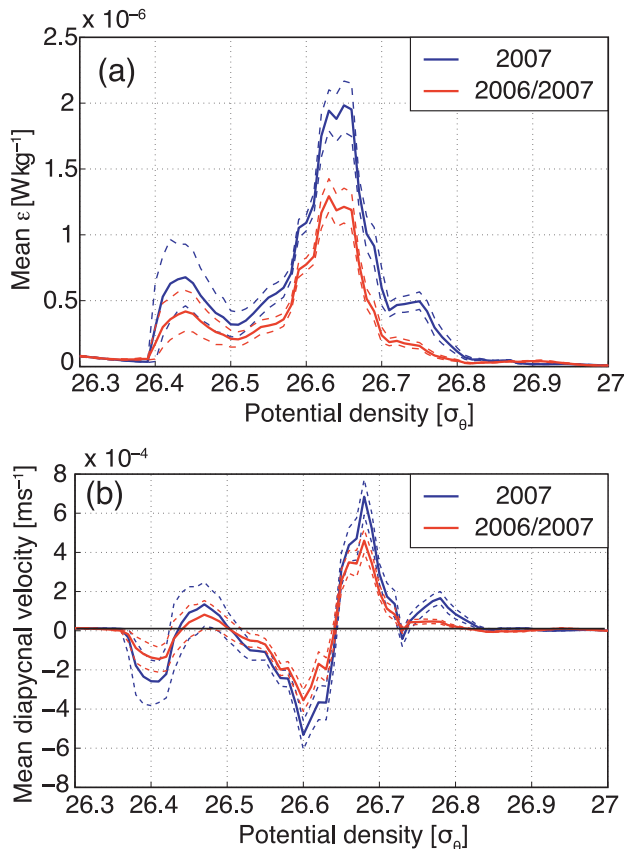


Fig. 8. (a) Mean turbulent energy dissipation rate and (b) diapycnal velocity with respect to potential density. Thin dashed lines indicate 95% confidence intervals (after Itoh *et al.*, 2011c)

中層水が風成循環境界を越えて亜熱帯循環内に入る正味の流量に等しい。筆者らの観測はウルップ海峡内の限られた観測によるものであるが、同様の強度の混合がウルップ海峡と同様の浅い海峡で生じていると仮定し、衛星海面高度と潮汐モデル計算結果から推定されたウルップ海峡域および千島海峡全体のエネルギー散逸を用いて浅い海峡全域の海水注入量を概算すると、0.9~3.6 Svとなった。これは、オホーツク海北部陸棚域の冬季冷却により生じる Dense Shelf Water の推定生成量 0.67 Sv (Itoh *et al.*, 2003) と同等かそれ以上であり、浅い海峡での混合がオホーツク海および北太平洋の中層水形成に極めて重要な役割を果たしていることを示唆している。

4. イワシ類卵稚仔の輸送と成長・生残

本稿の冒頭では、物理過程と魚の動態をそれぞれ海洋生態系の上流、下流と想定して研究に取り組むという筆者の考えを述べた。上流と下流の間には多くのプロセスがあるため、その間をつなぐことは容易ではないように思えるが、不思議なことにこの上流と下流に直接的な関係が見えることがある。その1つが、気候変動とマイワシ・カタクチイワシの関係である。

マイワシ・カタクチイワシ資源量は、数十年スケールで大振幅かつ逆位相で変動している (Fig. 9)。このサイクルは太平洋数十年規模振動 (PDO) 等の気候変動に同期的で (Chavez *et al.*, 2003)、太平洋では北西部だけでなく、カリフォルニアやチリでも見られる (Kawasaki, 1983; Kawasaki and Omori, 1988)。北西部の黒潮・親潮域では暖かい時にカタクチイワシ、寒い時にマイワシが増える傾向がある。

では、この変動がどうして生じるのか。気候から魚に至るには多くの過程の連鎖を考える必要があり、当然全容は解明されていない。しかし、イワシが増える、増えないは、最初の1年、仔稚魚期にどのくらい生き残るかでほぼ決まることが知られている。従って、気候変動の影響があるのなら、この仔稚魚期にどう影響しているか調べることが問題解決への糸口となる。

本節では、イワシ類卵稚仔の輸送とその間の成長・生残過程に関する取り組みを示す。2.1節では、表層漂流ブイおよび高解像度海洋大循環モデルの出力を用いた仔魚輸送解析の結果 (Itoh and Kimura, 2007; Itoh *et al.*, 2009) を、2.2節では、数値的な仔魚輸送実験と仔魚の日齢と成長速度を内的に記録している耳石の輪紋解析を組み合わせた成果とその応用可能性 (Itoh *et al.*, 2011a) について紹介する。

4.1 イワシ類卵稚仔輸送環境の検討

マイワシ・カタクチイワシ太平洋系群は日本の南岸域に主産卵場を持ち、多くの卵稚仔は黒潮の影響を受けて輸送される。前述のように、マイワシ・カタクチイワシ資源量が気候変動の影響を受けているのであれば、それ

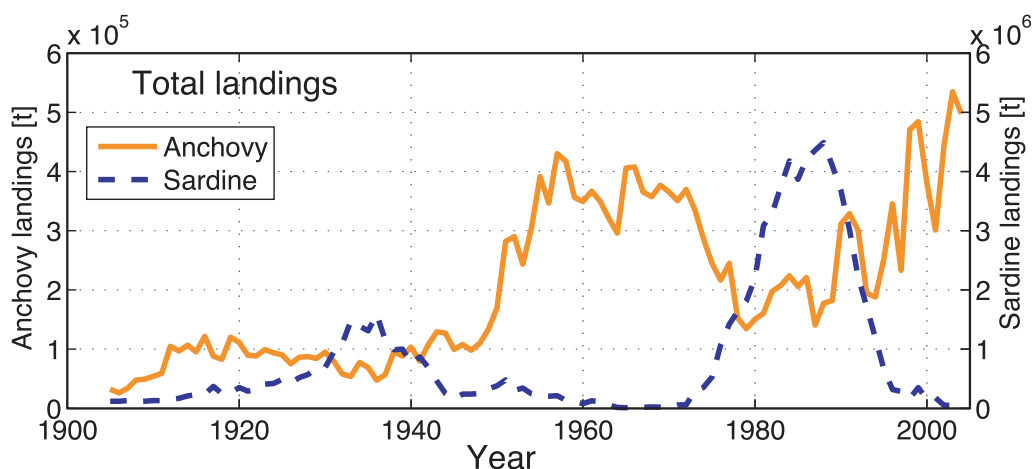


Fig. 9. Interannual variations in total landings of Japanese anchovy and Japanese sardine in Japanese waters from historical data (data are based on those updated from Yatsu *et al.*, 2005; the figure is after Itoh *et al.*, 2009).

は仔稚魚期の生残率が気候変動に起因する何らかの環境の影響を受けていることを意味する。

イワシ類の資源量変動に対する卵稚仔輸送や仔稚魚期の環境の重要性は広く認識されており、それまでも研究がなされてきた。例えば Heath *et al.* (1998) は、観測データから合成した平均流動場を用いた粒子追跡実験から、マイワシ卵稚仔の黒潮統流への輸送量が経年的に大きく変化していた可能性を指摘した。また、Noto and Yasuda (1999) はマイワシの仔稚魚期の死亡係数が冬季の黒潮統流南側再循環域における表面水温と有意な正の相関があることを見出した。しかし、平均流動場によりイワシ類の仔稚魚期を通した輸送を記述することは困難であること、空間的に固定された海域の情報は海流により Lagrange 的に輸送される仔稚魚の環境を十分には代表できないということ等、課題も残されていた。

そこで筆者らははまず、卵稚仔がどのように輸送されるかという点を観測資料から検討した。Itoh and Kimura (2007) では、WOCE の表層漂流ブイ資料を用い、マイワシ等が産卵する冬～春季の日本南岸からの Lagrange 的な輸送環境、水温の変化およびその要因を詳述した。

これに引き続き、Itoh *et al.* (2009) ではマイワシ・カタクチイワシ太平洋系群の卵稚仔を対象に数値的な粒子追跡実験を行った。高解像度海洋大循環モデル OFES

(Masumoto *et al.*, 1994) の流動場と卵生産分布の観測値を用い、卵稚仔の輸送先と経験水温の変動を調べた。実験の結果、カタクチイワシ卵稚仔は沿岸に滞留するか黒潮・親潮移行域に輸送される傾向が強かったのに対して、マイワシ卵稚仔の大部分は黒潮統流域に輸送されていたことがわかった。

卵密度で重み付けした平均の経験水温は、経年的および魚種間で明瞭なコントラストを示した (Fig. 10)。これは、産卵場および産卵季の差異および変動、海洋環境の経年変動で説明された。再生産成功率指数 (産卵親魚重量あたりの加入尾数の対数値) に対する経験水温の回帰分析を行った結果、両種とも初期生活段階である産卵後 30 日までの水温の有意な寄与が示された。マイワシは水温と再生産成功率指数が負の関係、カタクチイワシは最適水温を 21～22°C に持つ 2 次式で表される関係であった。以上のことから、マイワシ、カタクチイワシの資源変動に影響する要因として、気候変動および生息域変動に伴う環境水温の変化が有意に寄与していることが示された。

4.2 粒子追跡実験と耳石輪紋解析の組み合わせ

Itoh *et al.* (2009) では仔魚の経験水温と再生産成功率指数の関係を調べたが、生き残りそのものがどう決ま

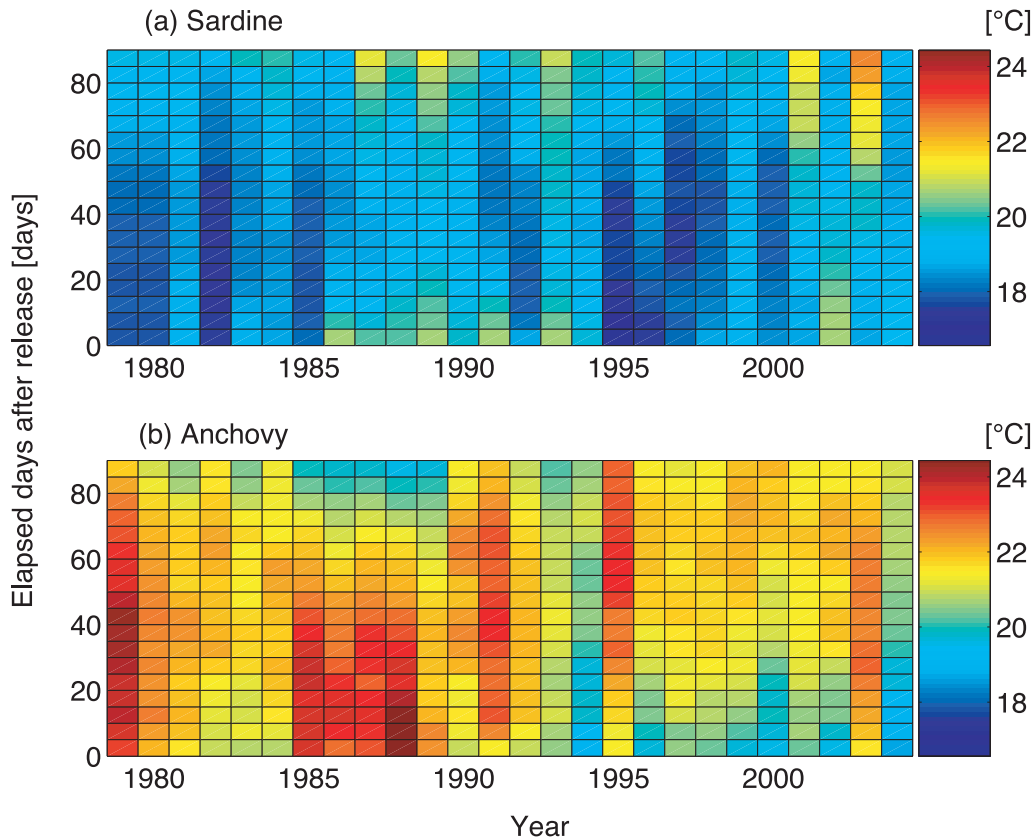


Fig. 10. Variations in mean environmental temperature experienced by (a) sardine and (b) anchovy larvae (color shading), based on data obtained from numerical particle-tracking experiments. The data are presented with respect to year (x-axis) and days elapsed (within each year) since release (y-axis) (after Itoh *et al.*, 2009).

るかという点は研究の範囲外であった。最近のフィールドでの調査結果では、水温が好適な時に仔稚魚の成長が早くその結果生き残りが多くなる、という可能性が示唆されている (Takasuka *et al.*, 2007; Takahashi *et al.*, 2009)。

仔魚がふ化してからの日数と成長速度は、耳石に毎日1本形成される輪紋の数と輪紋間隔を調べることで推定できる。これまでのフィールドでの調査結果では、この耳石から得られる成長速度の情報のうち、一番最近のものと現場での環境を比べることにより得られてきた。しかし、過去の成長履歴については参照する環境情報が得られなかったため比較することはできなかった。そこで筆者らは、成長履歴と経験環境の関係を過去に遡及して調べるため、耳石日輪分析と、モデルの結果を用いた粒

子逆追跡実験を組み合わせるという着想に至った。そして、房総沖で採集したマイワシ、カタクチイワシ仔魚を対象に、この組み合わせ解析を実施した (Itoh *et al.*, 2011a)。

仔魚採集と環境調査は、2007年4月学術研究船淡青丸により房総沖の黒潮を横断する観測点において行った。粒子逆追跡実験のためのデータとしては、水産総合研究センターによる渦解像度データ同化システム FRA-JCOPE (Komatsu *et al.*, 2005) の水温と流速を用いた。

房総沖の観測点で採集されたマイワシ・カタクチイワシ仔魚の輸送経路を、太平洋岸全域の産卵場分布を考慮 (推定された仔魚の起源地を、実際に産卵場が存在した海域のみに絞り込み) した上で調べた。ここでは、マイワシについて示す (Fig. 11)。マイワシ仔魚のうち沿岸

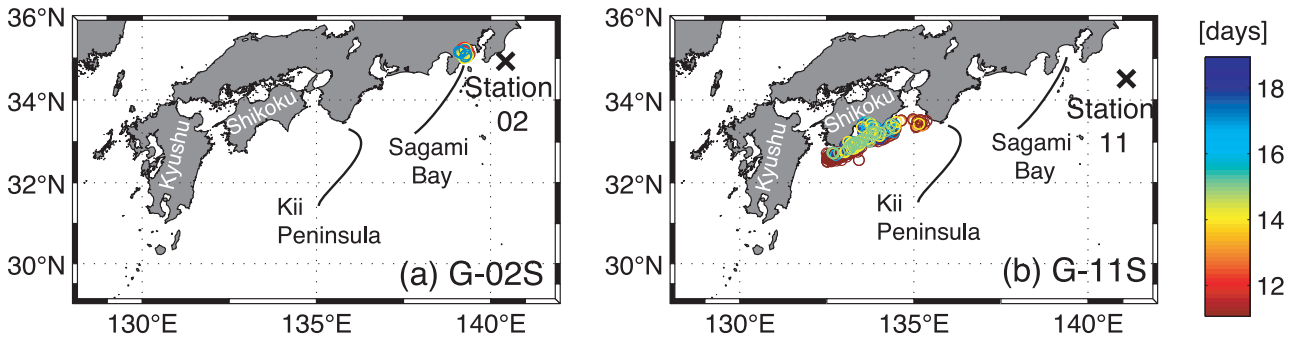


Fig. 11. Possible spawning grounds of sardine, as estimated by particle back-tracking experiments for the groups captured at (a) St. 02 (inshore of the Kuroshio) and (b) St. 11 (offshore of the Kuroshio). Crosses show the locations of sampling stations, and circles indicate the back-tracked positions of particles that reached the observed spawning grounds (based on surveys by the Fisheries Agency of Japan). Colors indicate the number of days of back-tracking (1 day + age in days of the sample, considering hatching time) (after Itoh *et al.* 2011a).

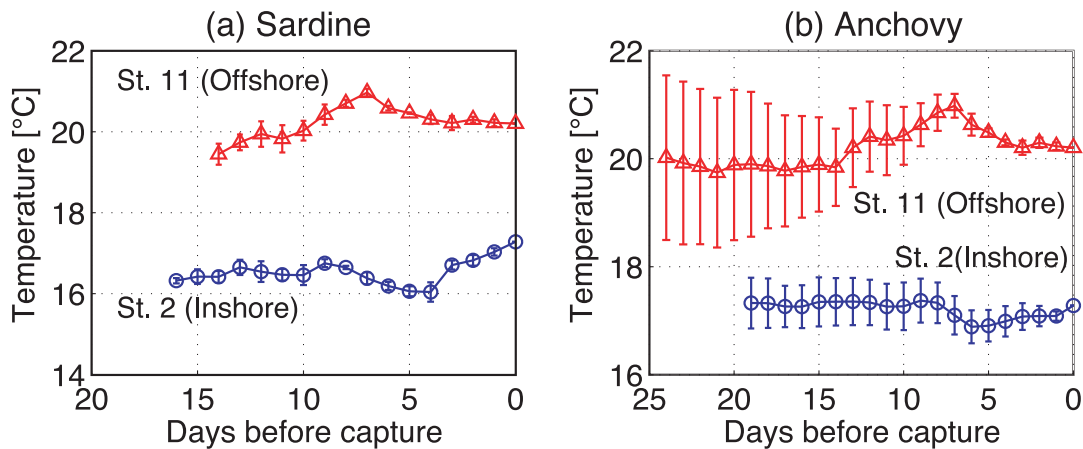


Fig. 12. Temperature histories of (a) a sardine larva and (b) an anchovy larva captured at St. 2 (inshore of the Kuroshio) and St. 11 (offshore), as estimated by numerical back-tracking experiments. Error bars are standard deviations of the probability distribution (after Itoh *et al.* 2011a).

で採集された群は全てが相模湾内に起源をもっていたのに対し、沖合で採集された群は土佐湾を中心とした海域で産卵されていたということが、この結果からわかる。

復元した経験水温（特定個体の例）を Fig. 12 に示す。経験水温は、マイワシ・カタクチイワシとも沖合で採集された群の方が沿岸再集群より高かった。沖合群と沿岸群で成長速度の差異は明瞭ではなかったが、同じ復元日齢で比較すると、マイワシは 13~14 日齢時、カタクチイワシは 19~20 日齢時に沖合群の平均成長速度が沿岸

群よりも高かった。マイワシ・カタクチイワシともに高水温環境を経験した群の方が成長速度が高いという傾向は、これまでの研究 (Takasuka *et al.*, 2007 ; Takahashi *et al.*, 2009) とは必ずしも一致しない。この理由として、水温が本海域・季節では両種ともに成長に対して正の影響を及ぼしていた可能性のほか、沖合域では淘汰圧が強く、成長速度が高い個体のみが生き残った、すなわち見かけ上平均成長速度が高くなっているという可能性が指摘された。

5. おわりに

黒潮・親潮域は、力学的にも生物活動的にも多様でかつエネルギーに満ちている。筆者はこの海域の生態系を対象に、「上流」側（基本的な駆動力）である海洋物理過程に関しては中規模渦、前線波動の動態、乱流現象の研究、（上流からの連鎖を経た）「下流」側の海洋生物資源動態に関してはイワシ類の卵稚仔輸送と成長・生残に関する研究を行い、各過程の理解進展に寄与してきたと考えている。しかし、システム全体を俯瞰し変動を理解・予測するためには、上流と下流をリンクするキープロセスの抽出・メカニズム解明と、個々の過程のさらなる精査が必要である。

海洋物理過程と生態系のリンケージ研究の展開に関しては、「解像度」をキーワードに挙げたい。仔稚魚の成長・生残に影響する環境要因は、筆者らの研究も含め主に観測および数値実験から得られる物理・餌環境を説明変数として検討されてきた。しかし、仔稚魚および餌料となるプランクトン類の高密度パッチ（例えば大久保, 1975）は一般的には黒潮・親潮域の「渦解像」スケールである水平数 km、鉛直数 m よりも小さく、環境と仔稚魚動態の関係は多くの場合、明示的／暗黙的な平均化処理の上で解析がなされている。高時間・空間解像度の観測や海洋循環・生態系モデルを用いて、個々のパッチ内の環境に対する個体の応答、個体レベルでの被食者-捕食者間相互作用 (Kjørboe, 2008) を陽に表現することが、マクロな生態系機能評価のさらなる高精度化を可能にすると考える。また、鉛直微細構造観測とそのモデル化による鉛直混合強度の定量化、水平高解像度観測・モデリングによるサブメソスケール現象の再現が、水塊や生物生産変動の評価に決定的に重要であることは言を俟たない。

謝 辞

このたびは栄誉ある日本海洋学会岡田賞をいただき、大変光栄に思っております。学会発表をはじめ、さまざまな機会でご指導いただいた海洋学会員の皆様、学会の運営に携わる役員の皆様、特に、岡田賞選考の労

をいただいた先生方に深く感謝致します。

指導教官であった杉本隆成教授には、大学院入学から学位取得、助手としてのキャリアの前半までご指導いただきました。先生の地球や人間社会に対する考え方が私の現在の取り組みの礎になっております。先輩であり、上司であった木村伸吾教授には、研究だけでなく、研究所や船での生活のいろはまでご指導いただきました。安田一郎教授には、教授が東京大学海洋研究所に着任されてから現在までの約7年間、多くの観測航海を始めとして公私ともにあらゆる面で大変お世話になりました。東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻日比谷紀之教授、川辺正樹教授、新野宏教授ほか多くの先生方には、大学院時代の授業やセミナー、学位審査でご指導いただきました。大学院、研究所、学会の同期、先輩、後輩の皆様、特に同期の上野洋路博士、永野憲博士、セミナーから飲み会まで、1つ1つが私の血となり肉となっています。旧海洋研、資源環境部門の先生、先輩方、小松幸生准教授、永江英雄元技術専門員、松本町子技術専門員はじめ環境動態分野の研究員・スタッフ・学生・卒業生の皆様、大変お世話になりました。皆様に厚く御礼申し上げます。

これまでに、35名の方々と共著で論文を執筆し、また、論文の共著以外でも多くの共同研究者の方々にお助力いただきました。淡青丸・白鳳丸・クロモフ航海の乗船研究者・船長・士官・船員・航海関係者の皆様には、データの取得で大変お世話になりました。どうもありがとうございました。最後に、いつも支え、励ましてくれた家族にもこの場を借りて感謝を述べさせていただきます。

References

- Bernstein, R. L. and W. B. White (1977) : Zonal Variability in Distribution of Eddy Energy in Mid-Latitude North Pacific Ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, **7**, 123–126.
- Blumberg, A. F. and G. L. Mellor, Eds., 1987 : *A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. Three-Dimensional Coastal ocean Models*, American Geophysical Union, 208 pp.
- Brown, O. B., P. C. Cornillon, S. R. Emmerson, and H. M. Carle (1986) : Gulf-Stream Warm Rings - a Statistical Study of Their Behavior. *Deep-Sea Res.*, **33**, 1459–1473.
- Chavez, F. P., J. Ryan, S. E. Lluch-Cota, and M. Niquen (2003) : From

- anchovies to sardines and back : Multidecadal change in the Pacific Ocean. *Science*, **299**, 217–221.
- Chelton, D. B., M. G. Schlax, R. M. Samelson, and R. A. de Szoeke (2007) : Global observations of large oceanic eddies. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, doi : 10.1029/2007GL030812.
- 秦克己 (1974) : 黒潮から分離した暖水塊の変動について. 研究時報, **26**, 295–321.
- Heath, M., H. Zenitani, Y. Watanabe, R. Kimura, and M. Ishida (1998) : Modelling the dispersal of larval Japanese sardine, *Sardinops melanostictus*, by the Kuroshio Current in 1993 and 1994. *Fish Oceanogr.*, **7**, 335–346.
- Ichiye, T. (1955) : On the behavior of the vortex in the polar front region. *Oceanogr. Mag.*, **7**, 115–32.
- Itoh, M., K. I. Ohshima, and M. Wakatsuchi (2003) : Distribution and formation of okhotsk sea intermediate water : an analysis of isopycnal climatological data. *J. Geophys. Res.*, **108**, doi : 10.1029/2002JC001590.
- 伊藤幸彦 (2004) : 黒潮暖水塊の移動機構に関する研究. 海流と生物資源, 杉本隆成 (編), 成山堂書店, 東京, 153–163.
- Itoh, S. and S. Kimura (2007) : Transport and survival of larvae of pelagic fishes in Kuroshio system region estimated with Lagrangian drifters. *Fish. Sci.*, **73**, 1295–1308.
- Itoh, S., T. Saruwatari, H. Nishikawa, I. Yasuda, K. Komatsu, A. Tsuda, T. Setou, and M. Shimizu (2011a) : Environmental variability and growth histories of larval Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*) and Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) near the frontal area of the Kuroshio. *Fish. Oceanogr.*, **20**, 114–124.
- Itoh, S., Y. Shimizu, S. Ito, and I. Yasuda (2011b) : Evolution and decay of a warm-core ring within the western subarctic gyre of the North Pacific, as observed by profiling floats. *J. Oceanogr.*, **67**, 281–293.
- 伊藤幸彦, 杉本隆成 (2001) : 長期的に見た東北海区の暖水塊の北上機構と漁場形成への影響. 水産海洋研究, **65**, 15–21.
- Itoh, S. and T. Sugimoto (2001) : Numerical experiments on the movement of a warm-core ring with the bottom slope of a western boundary. *J. Geophys. Res.*, **106**, 26851–26862.
- Itoh, S. and T. Sugimoto (2002a) : Behavior of warm-core rings in a double-gyre wind-driven ocean circulation model. *J. Oceanogr.*, **58**, 651–660.
- Itoh, S. and T. Sugimoto (2002b) : Direct current measurements off Sanriku, east of Japan. *J. Oceanogr.*, **58**, 877–882.
- Itoh, S. and T. Sugimoto (2008) : Current variability of the Kuroshio near the separation point from the western boundary. *J. Geophys. Res.*, **113**, doi : 10.1029/2007JC004682.
- Itoh, S. and I. Yasuda (2010a) : Characteristics of Mesoscale Eddies in the Kuroshio-Oyashio Extension Region Detected from the Distribution of the Sea Surface Height Anomaly. *J. Phys. Oceanogr.*, **40**, 1018–1034.
- Itoh, S. and I. Yasuda (2010b) : Water Mass Structure of Warm and Cold Anticyclonic Eddies in the Western Boundary Region of the Subarctic North Pacific. *J. Phys. Oceanogr.*, **40**, 2624–2642.
- Itoh, S., I. Yasuda, T. Nakatsuka, J. Nishioka, and Y. N. Volkov (2010) : Fine- and microstructure observations in the Urup Strait, Kuril Islands, during August 2006. *J. Geophys. Res.*, **115**, doi : 10.1029/2009JC005629.
- Itoh, S., I. Yasuda, H. Nishikawa, H. Sasaki, and Y. Sasai (2009) : Transport and environmental temperature variability of eggs and larvae of the Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) and Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*) in the western North Pacific estimated via numerical particle-tracking experiments. *Fish. Oceanogr.*, **18**, 118–133.
- Itoh, S., I. Yasuda, M. Yagi, S. Osafune, H. Kaneko, J. Nishioka, T. Nakatsuka, and Y. N. Volkov (2011c) : Strong vertical mixing in the Urup Strait. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, doi : 10.1029/2011GL048507.
- Iwao, T., M. Endoh, N. Shikama, and T. Nakano (2003) : Intermediate circulation in the northwestern North Pacific derived from subsurface floats. *J. Oceanogr.*, **59**, 893–904.
- James, C., M. Wimbush, and H. Ichikawa (1999) : Kuroshio meanders in the East China Sea. *J. Phys. Oceanogr.*, **29**, 259–272.
- Kawai, H. (1972) : Hydrography of the Kuroshio Extension, In *Kuroshio, Its physical aspects*, edited by H. Stommel and K. Yoshida, pp. 235–352, University of Tokyo Press, Tokyo.
- Kawasaki, T. (1983) : Why do some pelagic fishes have wide fluctuations in their numbers? Biological basis of fluctuation from the viewpoint of evolutionary ecology. Proceedings of *the expert consultation to examine changes in abundance and species composition of neritic fish resources*, San Jose, Costa Rica, FAO Fisheries Report, 1065–1080.
- Kawasaki, T. and M. Omori (1988) : Fluctuations in the three major sardine stocks in the Pacific and the global trend in temperature. In *Long-term changes in marine fish populations.*, edited by T. Wyatt and M.G. Larrañeta, Vigo, Spain, 37–53.
- Kimura, S. and T. Sugimoto (1993) : Short-Period Fluctuations in Meander of the Kuroshio Path Off Cape Shiono-Misaki. *J. Geophys. Res.*, **98**, 2407–2418.
- Kjørboe, T. (2008) : *A Mechanistic Approach to Plankton Ecology*. Princeton University Press, Princeton, NJ, 209 pp.
- Kitani, K. (1973) : An Oceanographic study of the Sea of Okhotsk, particularly in regard to cold waters. *Bull. Far Seas Fish. Res. Lab.*, **9**, 45–47.
- Kitano, K. (1975) : Some Properties of Warm Eddies Generated in Confluence Zone of Kuroshio and Oyashio Currents. *J. Phys. Oceanogr.*, **5**, 245–252.
- Komatsu, K., T. Setou, Y. Miyazawa, H. Akiyama, H. Shimizu, A. Watanabe, Y. Hiroe, T. Saito, K. Uehara, S. Ito, and M. Hirai (2005) : Development of an ocean prediction model at Fisheries Research Agency. *Fisheries Biology and Oceanography in the Kuroshio*, **6**, 21–40.
- Kouketsu, S., I. Yasuda, and Y. Hiroe (2007) : Three-dimensional structure of frontal waves and associated salinity minimum formation along the Kuroshio Extension. *J. Phys. Oceanogr.*, **37**, 644–656.
- Lobanov, V. B. and N. V. Bulatov, 1993 : Physical structure and behavior of the Kuril eddies. *Proc Nemuro Workshop on Western Subarctic Circulation*, Nemuro, Japan, North Pacific Marine Science Organization, 27–30.
- Longhurst, A. R. (2006) : *Ecological geography of the sea*. 2nd ed. Academic Press, London, 560 pp.
- Masumoto, M., H. Sasaki, N. Kagimoto, A. Komori, Y. Sasai, T. Miyama, T. Motoi, H. Mitsudera, K. Takahashi, H. Sakuma, and T. Yamagata (2004) : A fifty-year eddy-resolving simulation

- of the world ocean : Preliminary outcomes of OFES (OGCM for the Earth Simulator). *J. Earth Simulator*, **1**, 35–56.
- Mcdougall, T. J. (1984) : The Relative Roles of Diapycnal and Isopycnal Mixing on Subsurface Water Mass Conversion. *J. Phys. Oceanogr.*, **14**, 1577–1589.
- Mewilliams, J. C. and G. R. Flierl (1979) : Evolution of Isolated, Non-Linear Vortices. *J. Phys. Oceanogr.*, **9**, 1155–1182.
- Mizuno, K. and W. B. White (1983) : Annual and Interannual Variability in the Kuroshio Current System. *J. Phys. Oceanogr.*, **13**, 1847–1867.
- Moum, J. N. and T. R. Osborn (1986) : Mixing in the Main Thermocline. *J. Phys. Oceanogr.*, **16**, 1250–1259.
- Noto, M. and I. Yasuda (1999) : Population decline of the Japanese sardine, *Sardinops melanostictus*, in relation to sea surface temperature in the Kuroshio Extension. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **56**, 973–983.
- 大谷清隆 (1989) : 親潮水形成に関わるオホーツク海の役割. 海と空, **65**, 63–83.
- Oka, E., S. Kouketsu, K. Toyama, K. Uehara, T. Kobayashi, S. Hosoda, and T. Suga (2011) : Formation and subduction of Central Mode Water based on profiling float data. *J. Phys. Oceanogr.*, **41**, 113–129.
- Okubo, A. (1970) : Horizontal Dispersion of Floatable Particles in Vicinity of Velocity Singularities Such as Convergences. *Deep-Sea Res.*, **17**, 445–&.
- 大久保明 (1975) : 生態学と拡散. 築地書館, 東京, 217 pp.
- Polvani, L. M. (1991) : 2-Layer Geostrophic Vortex Dynamics. 2. Alignment and 2-Layer V-States. *J. Fluid Mech.*, **225**, 241–270.
- Qiu, B., T. Toda, and N. Imasato (1990) : On Kuroshio Front Fluctuations in the East-China-Sea Using Satellite and Insitu Observational Data. *J. Geophys. Res.*, **95**, 18191–18204.
- Sainz-Trápaga, S. M. and T. Sugimoto (1998) : Spreading of Warm Water from the Kuroshio Extension into the Perturbed Area. *J. Oceanogr.*, **54**, 257–271.
- Saito, H., T. Suga, K. Hanawa, and T. Watanabe (2007) : New type of pycnostad in the western subtropical-subarctic transition region of the North Pacific : Transition region mode water. *J. Oceanogr.*, **63**, 589–600.
- Savidge, D. K. (2004) : Gulf Stream meander propagation past Cape Hatteras. *J. Phys. Oceanogr.*, **34**, 2073–2085.
- Shi, C. and D. Nof (1994) : The Destruction of Lenses and Generation of Wodons. *J. Phys. Oceanogr.*, **24**, 1120–1136.
- 杉本隆成 (2004) : 海流と生物資源. 成山堂書店, 東京, 268 pp.
- Sugimoto, T., S. Kimura, and K. Miyaji (1988) : Meander of the Kuroshio front and current variability in the East China Sea. *J. Oceanogr. Soc. Jpn.*, **44**, 125–135.
- Sugimoto, T. and H. Tameishi (1992) : Warm-Core Rings, Streamers and Their Role on the Fishing Ground Formation around Japan. *Deep-Sea Res.*, **39**, S183–S201.
- Sverdrup, H., M. W. Johnson, and R. H. Fleming (1942) : *The Oceans, Their Physics, Chemistry, and Biology*. Prentice-Hall, New York, 1087 pp.
- Takahashi, M., Y. Watanabe, A. Yatsu, and H. Nishida (2009) : Contrasting responses in larval and juvenile growth to a climate-ocean regime shift between anchovy and sardine. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **66**, 972–982.
- Takasuka, A., Y. Oozeki, and I. Aoki (2007) : Optimal growth temperature hypothesis : Why do anchovy flourish and sardine collapse or vice versa under the same ocean regime? *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **64**, 768–776.
- Tanaka, Y., T. Hibiya, and Y. Niwa (2007) : Estimates of tidal energy dissipation and diapycnal diffusivity in the Kuril Straits using TOPEX/POSEIDON altimeter data. *J. Geophys. Res.*, **112**, C10021, doi : 10.1029/2007JC004172.
- Tatebe, H. and I. Yasuda (2004) : Oyashio southward intrusion and cross-gyre transport related to diapycnal upwelling in the Okhotsk Sea. *J. Phys. Oceanogr.*, **34**, 2327–2341.
- Tracey, K. L. and D. R. Watts (1986) : On Gulf-Stream Meander Characteristics near Cape-Hatteras. *J. Geophys. Res.*, **91**, 7587–7602.
- 宇田道隆 (1935) : 昭和八年盛夏に於ける北太平洋の海況. 水産試験場報告, **6**, 1–130.
- 宇田道隆 (1960) : 海洋漁場学. 水産学全集第 16 卷, 恒星社厚生閣, 東京, 347 pp.
- Weiss, J. (1991) : The Dynamics of Enstrophy Transfer in 2-Dimensional Hydrodynamics. *Physica D*, **48**, 273–294.
- 安田一郎 (2008) : 総論 : 潮汐混合とオホーツク海・ベーリング海の物理・化学・生物過程. 月刊海洋号外, **50**, 5–15.
- 安田一郎 (2011) : 潮汐混合とオホーツク海・ベーリング海の物理・化学・生物過程－白鳳丸 KH-09-4 航海・おしよろ丸・クロモフ 2006/2007 シンセシス－総論－. 月刊海洋, **43**, 629–640.
- Yasuda, I. Y., S. Ito, Y. Shimizu, K. Ichikawa, K. Ueda, T. Honma, M. Uchiyama, K. Watanabe, N. Sunou, K. Tanaka, and K. Koizumi (2000) : Cold-core anticyclonic eddies south of the Bussol' Strait in the northwestern subarctic Pacific. *J. Phys. Oceanogr.*, **30**, 1137–1157.
- Yasuda, I., K. Okuda, and M. Hirai (1992) : Evolution of a Kuroshio Warm-Core Ring - Variability of the Hydrographic Structure. *Deep-Sea Res.*, **39**, S131–S161.
- 安田一郎, 奥田邦明, 水野恵介 (1986) : 境界付近の渦についての数値実験－東北海区の暖水塊についての考察－. 東北水研研報, **48**, 67–86.
- Yatsu, A., T. Watanabe, M. Ishida, H. Sugisaki, and L. D. Jacobson (2005) : Environmental effects on recruitment and productivity of Japanese sardine *Sardinops melanostictus* and chub mackerel *Scomber japonicus* with recommendations for management. *Fish. Oceanogr.*, **14**, 263–278.

Studies on water mass variability related to dynamics of ecosystems in the Oyashio/Kuroshio region

Sachihiko Itoh [†]

Abstract

In the Kuroshi/Oyashio region, water masses, materials, and biota that originated from subtropical and subarctic regions come together, giving rise to a rich and diverse ecosystem. To understand the dynamics of the Kuroshio/Oyashio ecosystem, the author has studied processes of both physical oceanography and fisheries oceanography in the region. Physical oceanographic phenomena, such as mesoscale eddies, frontal waves, and tidal mixing, were investigated by various approaches, including field observations, numerical simulations, and analysis of existing datasets, including satellite data. These studies revealed (1) the behavior, structure and water mass characteristics, movement mechanism, and heat and material transport properties of mesoscale eddies in the Kuroshio-Oyashio extension region; (2) the structure, propagation, and energetics of Kuroshio frontal waves ; and (3) turbulent mixing intensity in the Kuril Straits, the mechanism of mixing, and its impact on the formation of intermediate waters. In terms of fisheries oceanographic issues, the author has focused on the sardine and anchovy, which are key species of the Kuroshio/Oyashio ecosystem. These studies quantify larval transport processes, clarify the relationship between temperature and recruitment rate, and propose a method of estimating the environmental history of larvae sampled in the field. The results of these analyses are reviewed in this article.

Key words: Kuroshio/Oyashio region, mesoscale eddies, frontal waves, turbulent mixing, sardine and anchovy, larval transport

(Corresponding author's e-mail address: itohsach@aori.u-tokyo.ac.jp)

(Received 30 January 2012; accepted 15 February 2012)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2012)

[†] Atmosphere and Ocean Research Institute
5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba, 277-8564, Japan