

— 2011 年度 日本海洋学会賞受賞記念論文 —

北太平洋中層水の形成・輸送・変質過程に関する研究*

安田 一郎†

要 旨

北太平洋中層水の形成・輸送・変質過程について受賞者の研究を総括した。厚い低温低塩分水塊が、海水形成に伴う陸棚高密度水沈降や千島列島付近の強い乱流鉛直混合に影響されて形成される。このオホーツク海モード水が太平洋へ流出し、薄い太平洋水と混合して親潮水が形成される。厚い性質を保持した親潮水の一部は、北海道・東北沿岸を南下し、黒潮続流と合流・混合して、北太平洋中層水を更新する。黒潮水と親潮水の等密度面混合は、厚い中層親潮水に起因する不安定によって促進される。北太平洋中層水は、亜熱帯循環に沿って輸送され北太平洋亜熱帯循環域に広く分布する。その北端部分は、移行領域と呼ばれる海域で低塩分亜寒帯水が表層に層重し、塩分極小が消失した海水が、アラスカ湾に流れ込み、北太平洋亜寒帯海域での中暖構造を作る。北太平洋亜寒帯中層は、この高温高塩分水の流入とオホーツク海での低温低塩分水の流入ではほぼバランスしている。千島列島付近やアリューシャン列島付近の潮汐に起因する乱流鉛直混合は、水塊変質と変動に大きな影響を与える。潮汐 18.6 年周期変調は水塊変動の一因であり、海洋を通じて気候にも影響を与えている。

キーワード：北太平洋中層水，オホーツク海，親潮，混合水域，黒潮，黒潮続流，塩分極小，乱流混合，18.6 年周期潮汐変調，20 年周期変動

1. はじめに

誉れ高い日本海洋学会賞を受賞することになり、大変光栄であるとともに、身の引き締まる思いである。何かと足りない私が、受賞できたことは、ご指導，導いていただいた先生方，諸先輩，研究や仕事を一緒にさせてい

ただいた同僚，研究者，学生，調査船乗組員の方々，に恵まれたためとしか言いようがなく，この場を借りて深く感謝したい。

受賞課題となった「北太平洋中層水」は，北太平洋亜熱帯海域の北緯 20 度から 45 度にかけて広く分布する，中層塩分極小で特徴付けられる海水である (Sverdrup *et al.*, 1942)。塩分極小はポテンシャル密度 $26.8\sigma_\theta$ 付近に存在し (Reid, 1965)，北太平洋で形成される最も重い水塊であることから，海洋・気候の長期変動や，温室効果気体や栄養塩などの物質循環，生物生産へ影響することが示唆されてきた。

北太平洋中層水の元となる低塩分水の起源は，蒸発に比べて降水が過剰な亜寒帯海域にあることは明白である

* 2012 年 3 月 15 日受領；2012 年 4 月 10 日受理
著作権：日本海洋学会，2012

† 東京大学大気海洋研究所海洋生命システム研究系
海洋生物資源部門環境動態分野
〒277-8564 千葉県柏市柏の葉 5-1-5
TEL: 04-7136-6240 FAX: 04-7136-6247
e-mail: ichiro@aori.u-tokyo.ac.jp

が、亜寒帯海域のどの海域で形成され、どのような経路で亜熱帯海域へ流入し、どのような変質過程を経て亜熱帯海域に広く分布する北太平洋中層水となるのかについては、必ずしも明らかではなかった。また、これらの諸過程がどのような物理機構で生じるのか、については今でも不明な点が多く残されており、数値モデルによる北太平洋中層水の再現については、現在でも多く課題がある。

この小論では、私が海洋学を始めてから、最近までの研究を振り返りながら、受賞課題となった北太平洋中層水の研究について述べさせていただくことにする。

2. 黒潮大蛇行の研究

私は、中学・高校時代に天体観測を趣味にしており、天文台で星の観測を仕事にすることを夢見ていた。しかし、教養の数学が解らず、天文学がイメージと違って難解な数学と物理学を必要とする学問であることを知り、進学振り分けもあって、比較的近い学問分野である地球物理学科に進学した。学部時代に、杉ノ原伸夫先生の海洋大循環の講義を聞き、単純な物理法則で、海の大きな構造が決まることを知り海洋学に興味をもった。また、宮田元靖先生の演習で Leblond・Mysak の *Waves in the Ocean* を読んだり、尹宗煥先生の演習で、黒潮大蛇行の数値計算を学んだこともあり、修士課程で海洋物理研究室に進学した。海洋を選んだのは、幼少の頃夏休みに母方の田舎の佐渡で、海藻や魚を採って遊んだことや、食べ過ぎて腹を壊すまで寿司屋になりたいと思っていたくらい魚好きだったことも関係があるかもしれない。

大学院修士課程では、杉ノ原先生を指導教官として、尹先生に直々の指導をしていただいた。黒潮流路が大蛇行路と直進流路の2つの流路をとる現象が非線形力学の解の分岐・多重性で理解できることが増田章先生 (Masuda, 1982) の理想化された流路方程式モデルによって示唆されていたが、この問題に数値モデルを用いて取り組んだ。解の分岐現象を理解するために、尹先生と同期の保坂直紀氏とランダウの力学の教科書を丁寧に読んだことが、物理学の単純明快さや奥深さ、面白さを知る機会になった。杉ノ原先生は、広く浅い知識よりも、深く考えることの大切さを説かれ、先生が納得するまで何時間も議論に付き合っていた。

九州・南西諸島と伊豆海嶺を東西の境界及び日本南岸を北の境界、南は仮想的な境界とする四角い海に、トカラ海峡を流入口、及び、三宅島と八丈島間の深い部分を流出口、と単純化した順圧準地衡流モデルを作り、流入・流出流速や水平渦粘性係数、境界条件を変化させる数値実験を行い、流速のある範囲で大蛇行と直進路が両方存在し、履歴によって流路が選択されること、直進流路では水平渦粘性による渦位の消失が大きいこと (Yasuda, *et al.*, 1985)、日本南岸を傾けると水平渦粘性による渦位消失が促進され直進路が全ての流速で存在し、多重解として蛇行流路がある流速範囲で存在すること (Yoon and Yasuda, 1987) などがわかった。この研究を通じて、単純化することによって本質が見えることを学んだ。修士課程では、東京水産大の大塚先生のお取り図りで、吉田次郎先輩や田中祐志氏と一緒に神鷹丸に乗船し、黒潮でのナンセン観測を経験した。

3. 東北海域暖水塊・津軽暖流・マサバ・サンマ漁場の研究

研究で飯が食べられるようになりたいと考えていた時に、教授の永田豊先生から、水産庁水産工学研究所で研究員を公務員試験物理職で採用する予定があると紹介され、幸いにも3度目の公務員試験に合格したこともあり、応募することにした。茨城県波崎への赴任を間近にした3月に、水工研に宿舎があるか電話したところ、宿舎はあるが、私は研究所でなく1年間霞ヶ関で修行してもらおう、と告げられた。職業研究者として張り切っていた時だったので当時本当に残念であった。霞ヶ関の1年の間に、水工研と一緒に研究する予定だった当時理研にいた長島秀樹先生の赴任がキャンセルになり、紆余曲折を経て、東北区水産研究所に赴任することになった。霞ヶ関では、大蔵省との予算折衝や国会待機など、中央官庁の実態を垣間見、また、行政官と知り合いになることもでき、また東北水研に行けたことを考えると、今は有益だったと思っている。

東北水研に赴任した当時、福島信一部長の下、海洋第1研究室には工藤英郎室長、奥田邦明・水野恵介主任研究官、第2研究室には私と、翌年留学から帰国した平井光行さん、半年遅れで赴任した小川嘉彦室長、と個性

溢れる強力なメンバが揃っていた。東北大花輪先生、川村先生、久保川先生、東大海洋研杉本先生・川崎先生、東海水研友定さん・稲掛さんが参加する「暖水漁場」という津軽暖水と暖水塊の周辺に形成されるマサバ漁場予測を目的としたプロジェクト研究が進められ、大変賑やかだった。

マサバ漁場が形成される秋季には、津軽暖水は渦モードと呼ばれる下北半島東方に突出した形状をとる。この形状は約1ヶ月周期で変動し、その間南北に分裂し、南側の突出部は前線波動として発達しながら南へ伝播する(安田他, 1988)。これら突出部の南端にマサバ漁場が形成され、前線波動の伝播と共に南下する(平井他, 1988)ことを用いて、衛星画像を用いた漁場予測手法が開発された(奥田他, 1988)。津軽暖水突出の形状変化は水槽実験で再現され(川崎・杉本, 1988)、渦モード形成や前線波動の発達は久保川さんによる理論化がなされた(Kubokawa, 1988; 1991)。

水野さんとは、赴任直後にわかたか丸に乗船し、黒潮続流と暖水塊の観測を行なった。頻繁に止まるグランディ STD (水温塩分深度計) を使い、船上局の基板を磨きながら何とか水温塩分のデータを得(水野他, 1986)、船員さんからは沈みそうな船で沖合の黒潮観測はやめろと責められながらの観測だった。親潮水と黒潮水が入り組む複雑な東北海域の海洋構造を目の当たりにし、興奮を抑えられなかった。同時に、東北沖の海洋構造と変動はあまりに複雑で、それまでに学んだことでは到底理解できなかった。水野さんはどんな時でも楽しい雰囲気を作れる方で、観測の重要性とともに人生の楽しみ方を教えていただいた。

この頃、黒潮から切り離された時計回り渦である暖水塊が日本海溝に沿って北上する現象を、急峻な海底傾斜を壁とみなした鏡像効果で説明し、スリップ境界と粘着境界とで移動方向が反対になることを数値実験で示した(安田他, 1986)。その後、北上過程についてモドンを用いた考察(Yano and Yasuda, 1992)、千島沖まで北上した渦について、日本海溝に沿った深層流が作る擬似ベータ効果による可能性(Yasuda *et al.*, 2000a)を指摘した。

1986年春季に黒潮から切離した大型の暖水塊 86B は、北上すると共に、翌年沖から移動してきた大型の暖水塊

から大量の海水を剥ぐように巻き付け大型化した。これらの現象を、奥田さん・平井さん・横内さんらと、数ヶ月おきにわかたか丸・北光丸、俊鷹丸などで連続して観測し、構造の変化を明らかにした(Yasuda *et al.*, 1992; 横内他, 1992)。奥田さんからは、処理されたデータだけでなく、生データにこそ本当に新しいことが潜んでいることを、小川さんからは、魚と海とをどう結びつけるかについて教えを受けた。

米国 MIT の Flierl 教授の下で、渦の研究をする機会を得て、順圧渦の融合条件(Yasuda and Flierl, 1995)、順圧渦の融合機構(Yasuda and Flierl, 1997)、暖水塊同士の相互作用再現と融合・ストリーマの発生条件(Yasuda, 1995)を明らかにした。これらの研究をまとめて、学位論文を提出した。米国での1年間は、言葉やコミュニケーションの問題や思っていたよりも研究が進まず悶々とした。半年経ち、諦めて、家内とあちこち旅行するようになってからリラックスして、何とかいくつか研究をまとめることができた。諦めること、焦点を絞ることの大切さを学んだ一年だった。米国留学の前には、東海大の久保田雅久先生と杉森康弘先生の研究室に2ヶ月お世話になり、数値計算と海面高度計について勉強した。暖水塊の研究は、最近では伊藤幸彦さんが進めている(Itoh and Yasuda, 2010a; 2010b; Itoh *et al.*, 2011a)。

米国から帰国し、サンマ漁海況予報の担当となった1991年は、それまで千島沖ロシア200海里経済水域でサンマの漁期前調査をしていた県水試の調査船が入域できず、初期漁場がどこに形成されるかわからない事態となっていた。当時サンマ研究室の室長をされていた渡邊良朗さんと、サンマ漁場分布と海洋環境の関係を調べたところ、沖合の親潮前線の南北変動と漁場の距岸距離との間に関係を見つけた(Yasuda and Watanabe 1994)。次のサンマ研究室の北川大二室長とは、大型サンマは回遊が早いことを用いて距岸距離と東西位置で代表されるサンマ初期漁場位置を、沖合親潮前線南北変動と大型サンマの割合を用いて推定する手法を作った(Yasuda and Kitagawa 1996)。これらの研究以上に重要だったのは、各県水試の調査船のCTD(電気伝導度水温深度計)を採水塩分で校正し、サンマ調査時の海洋観測データを海洋研究にも活かす道筋を作ることができたことだった。

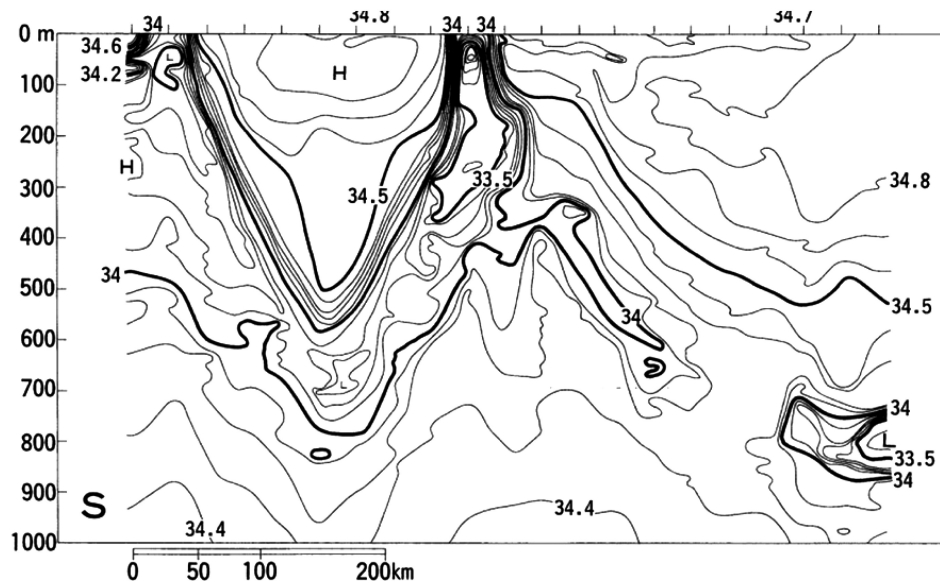


Fig. 1. Salinity vertical cross-section of the Kuroshio Extension and a warm-core ring in May 1988 in the cruise of Wakataka-maru.

4. 北太平洋中層水の起源水追跡

暖水塊の観測を行う中で、黒潮流軸の南側中層に、低温低塩分高酸素の親潮水が潜り込んでいる様子が捉えられていた (Fig. 1)。この激しい現象がどのようにして生じるのか明らかにしたい、ということが北太平洋中層水に興味をもった直接の端緒である。また、学生時代の恩師である永田豊先生・杉ノ原先生が主導して世界海洋循環実験計画 (WOCE) のプロジェクトを日本で立ち上げるということで、東北水研は東北沖の中層水の分布を課題とする担当として加わるようになった。

北太平洋中層水が、北大西洋深層水や南極中層水などと同様に、海面で高密度化した海水が沈み込んで作られた水塊であると仮定する (Wüst, 1930; Sverdrup *et al.*, 1949) と、北太平洋中層水の塩分極小は、密度鉛直一様になるはずである。この密度一様水の欠如を発見した Hasunuma (1973) は、北太平洋中層水は水塊ではなく、塩分が表面にゆくほど低くなる亜寒帯水の上に高塩分の亜熱帯水が層重することで形成される、とした。広域の観測データをまとめた Talley (1993) は、亜寒帯水と亜熱帯水が隣接し、上下にも両水塊が交差する東北沖の

混合水域で北太平洋中層水が形成され、その後はほとんど変質せずに亜熱帯循環の時計回り循環に沿って輸送されることを示した。東北沖での形成過程として、親潮水が暖水塊の中層に取り込まれることが一例として示された (Talley, *et al.* 1995)。

中央水研に異動していた奥田さんと、1992年5月に東北水研のわかたか丸、中央水研の蒼鷹丸の共同観測を企画した。当時採用されたばかりの清水勇吾氏が加わり ADCP (船底超音波流速計) の解析を始め (清水・安田, 1992), 黒潮続流を南北に横切る CTD 断面観測を房総付近から東経 151 度までの 12 の南北観測線で行なった。当時のわかたか丸は代船建造直前の老朽船であり、黒潮を横切るこれだけの観測が出来たのは長谷川峯清船長を初めとする乗組員の方々の協力無くしてはできなかった。また、これら 2 船の観測の他に、東北沖合のサンマ調査を目的として取得された CTD 観測データを使わせていただいた。これらサンマ調査時の観測データは、東北水研のサンマ研究室の渡邊・大関・北川室長、高橋技官、サンマ研究を通じた県水産試験場との協力関係によって得られたものである。

この CTD 一斉観測から、様々な興味深いことが明らかになった (Yasuda *et al.*, 1996)。北太平洋中層水の

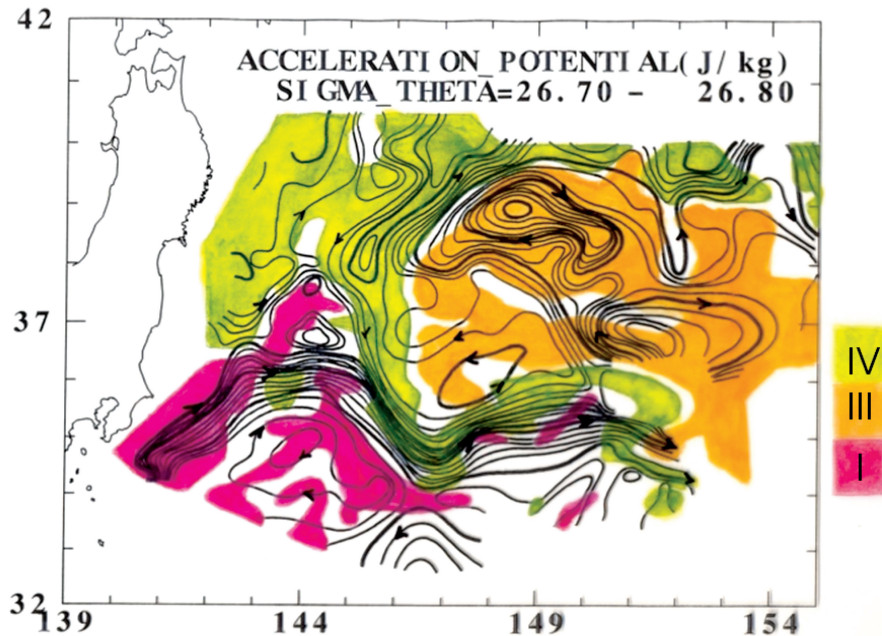


Fig. 2. Isopycnal salinity (color) and geostrophic streamlines (acceleration potential: contour) at 26.7–26.8 σ_θ . Green represents Oyashio Type-IV water with the salinity less than 33.8, red Kuroshio Type-I water with $S > 34.2$ and orange new NPIW (Type-III) with $33.9 < S < 34.0$. Type-II water was distributed south of the Kuroshio Extension east of 147°E. CI is 0.2 J kg⁻¹. Modified from Yasuda *et al.* (2006).

塩分極小の中心密度であるポテンシャル密度 26.7–26.8 σ_θ での塩分分布と等密度面上での地衡流を近似的に表す加速度ポテンシャル（モンゴメリポテンシャル）を重ねた Fig. 2 から、本州東岸に沿って南下した親潮系の低塩分水（IV）が房総沖で黒潮統流と合流し、そのまま東経 150 度付近まで黒潮統流に沿って細く帯状に分布していた。この東向きの流線上の帯状低塩分水は、その南北での西向きの流線上には見られず、黒潮統流付近で南西からの黒潮系の高塩分水（I）と等密度面混合して中間の塩分を持ち広域に分布する新しい中層水 II と III になると推測された。合流する I と IV の東向き流量をポテンシャル密度 0.1 σ_θ 毎に見積もると、密度 26.4 σ_θ より低密度側では黒潮系水の流量が圧倒的に大きく、一方密度 26.6–27 σ_θ では黒潮と親潮の流量は同程度であった。密度毎に、流量と塩分を掛算して加え、流量の積算で割り算して求めた塩分は、密度 26.6 σ_θ 付近で極小値をとり新しい中層水の塩分よりも低いことから、黒潮統流に北から流れ込む親潮水によって北太平洋中層水が低塩分化され更新される、という描像が支持された。

この観測から得られたもう一つの重要なことは、密度 26.7 σ_θ 付近で、黒潮統流に流れ込む親潮水 IV の等密度面間の厚みが、黒潮水 I や新しい中層水 II・III に比べて厚い、ということである。緯度の関数であるコリオリパラメータ ($f=2\Omega \sin \theta$, Ω は地球の自転角速度, θ は緯度) を等密度面間の厚みで割り算した量は渦位と呼ばれ、水平方向に大きなスケールの現象では保存される。

黒潮統流や本州近海に見られたこの厚い水塊を、渦位を用いて元を辿ると、オホーツク海にたどりついた (Yasuda, 1997)。この論文で用いた観測データは、1993 年夏季に実施されたサンマ漁期前調査に北水研調査 (Kono, 1997; Kono and Kawasaki, 1997a; 1997b) のオホーツク海部分を加えたものである。密度 26.7–26.8 σ_θ では、西部亜寒帯循環と呼ばれる反時計回りの循環域で厚みが小さく高渦位、オホーツク海で厚みが大きく最も低渦位と、近接する 2 つの海域の渦位は明確な違いがあった (Fig. 3)。オホーツク海からの流出水が分布する千島列島に沿った部分の親潮水は低渦位となっており、その一部は、日本沿岸から黒潮統流に到達していた。オホー

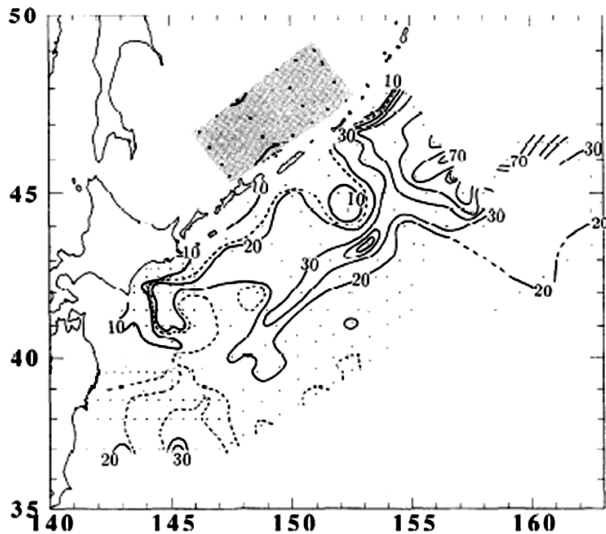


Fig. 3. Isopycnal potential vorticity (in $10^{-11} \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$) at $26.7-26.8\sigma_\theta$. Adapted from Yasuda (1997). Shaded denote $PV < 15 \cdot 10^{-11} \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$.

ック海では、北太平洋中層水の塩分極小の中心密度である $26.8\sigma_\theta$ で渦位が極小となっていた。この渦位極小水は、Kitani (1973) で Transitional Water と呼ばれた海水であり、この研究ではオホーツク海モード水と呼んだ。渦位極小はオホーツク海水の影響を受けた日本沿岸の親潮でも弱まりながらも存在していた。黒潮に沿って輸送される比較的高渦位高塩分水と合流した後は、高塩分化とともに渦位が上昇し渦位極小が失われた。渦位極小は鉛直密度一様と同義であり、北太平洋中層水の起源水是水塊としての性質を持っていたが、勢力の強い黒潮水と接することで水塊の性質を失ったと解釈された。

WOCE プロジェクトでは、熱・淡水・物質の南北輸送量を見積もるために、海盆を横切り、岸から岸、海面から海底までの観測を行うことになっていた。奥田邦明主席の水産庁開洋丸航海（1994年1-2月の40日間）の北緯30度P2の観測に物理担当として参加した。初めの10日間は荒れる海で毎回ケーブルがキンクし、ボトル漏れも続き、8時間もかかるキャストもあり、塩分測定のアウトサルも故障を繰り返すなど大変な航海だった。海洋化学の渡辺豊さんや小埜恒夫さんと知り合った有益な航海であったが、You *et al.* (2001) 以外論文にすることができなかった。

5. 北太平洋中層水流量の定量化

北大の若土正暁先生、竹内謙介先生のお取り図りにより、10年過ごした東北水研から、1994年の10月に北大地球環境科学研究科大気海洋科学専攻に異動した。松野太郎先生をはじめとして、池田元美先生、山崎孝治先生、角皆先生、乗木先生、久保川さん、林さん、謝さん、塩谷さん、向川さん、大島さん、深町さん等、そうそうたるメンバが集結しており大いに刺激を受けた。広く海洋物理から化学・生物、海水や気象・気候まで広く本格的な大気海洋科学を学んだ。

転動した翌年から3年間マイワシの資源変動の解明を目的としたバイオコスモスというプロジェクト（渡邊良朗中央水研室長代表）に参加した。過去300年の日本マイワシの豊凶と樹木年輪から再構成された北米西岸の気温との関係を論文（Yasuda *et al.* 1999）にした。黒潮統流域の冬季水温の変動がマイワシの生き残り変動と関係があることが見出された（Noto and Yasuda, 1999; 2003）。マイワシ資源やサンマ漁場が海洋・気候の長期変動に連動することを目の当たりにして、黒潮や気候の長期変動を明らかにしたいと思うようになった。黒潮統流域の熱収支と水温と混合層深度の長期変動について熱移流の重要性を指摘した（Yasuda *et al.*, 2000b）。

東北水研の杉崎宏哉さんと、マイワシの稚魚採集と黒潮統流・混合水域での中層水の分布把握を目的とした、新船若鷹丸による観測航海を1996年5月に行なった。化学の小埜恒夫さん、成田尚志さんも乗船し、無機溶存酸素や栄養塩分布についての論文（Ono *et al.*, 1998）が出た他、吉成浩志君の修論となった。

1997年4月に山形俊男先生のお取り図りで、東大理学部へ転任した。杉ノ原先生・深澤理郎先生が主導して科学技術振興調整費「北太平洋亜寒帯循環（SAGE）」プロジェクトが始まり、黒潮統流域での北太平洋中層水の定量化に関する課題を中央水研と担当するとともに、中層循環についての一連の課題の取りまとめ役をつとめることになった。1998年5月に、ウズホール海洋研究所のJoyce博士らと蒼鷹丸の航海（川崎清主席）を行った。Frank Bahr氏が乗船し、LADCP（垂下式超音波流速計）や船底ADCPの流速データを準リアルタ

(a) NPIW circulation diagram

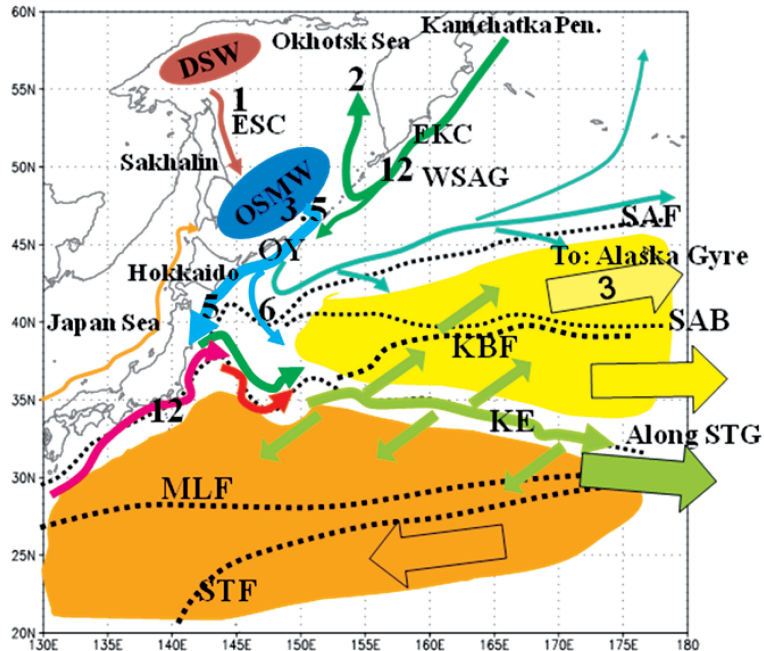


Fig. 4. Schematic illustration of water mass distribution, transformation and transport related to North Pacific Intermediate Water (NPIW). The transport values are in Sv ($=10^6 \text{ m}^3/\text{s}$) in the density range between $26.7-27.4$. EKC: East Kamchatka Current, WSAG: Western Subarctic Gyre, ESC: East Sakhalin Current, OY: Oyashio, KE: Kuroshio Extension, DSW: Dense Shelf Water, OSMW: Okhotsk Sea Mode Water. Broken curves represent the Subarctic Front (SAF), Subarctic Boundary (SAB), Kuroshio Bifurcation Front (KBF), and Mixed Layer Front (MLF) Subtropical Front (STF) from north to south. Adapted from Yasuda (2004).

イムで示してくれ、船上で親潮系低塩分中層水が実際に黒潮続流に沿って東に流れるという実証データを得て興奮を抑えられなかった。船上で海洋構造と流速の対応関係のメモを作り、共同研究者に配布し、海域毎に論文を執筆した (Joyce *et al.*, 2001; Yasuda *et al.*, 2001; Hiroe *et al.*, 2002; Inoue *et al.*, 2003; Komatsu *et al.*, 2004)。東北水研の伊藤進一さんを通じて、LADCP 観測データの扱いを教えてもらった。

北海道沿岸から亜寒帯前線間の親潮海域には、南西向き成分と北東に戻る成分があるが、多くの場合南西向き流量が北東向きを上回る。この南西向きの過剰流量は、亜寒帯前線以南に取り込まれて北太平洋中層水を作る風成循環を横切る流量となると考えられる。LADCPの直接流速観測から順圧潮流成分を引いた流速に相対地衡流を併せて、絶対地衡流を推定し、この風成循環を

横切る親潮流量を密度 $26.7-27.5\sigma_\theta$ の範囲で約 5Sv ($=10^6 \text{ m}^3/\text{s}$) と見積もった (Yasuda *et al.*, 2001; Shimizu *et al.*, 2001;2003;2004; Hiroe *et al.*, 2002; Ito *et al.*, 2004; Uehara *et al.*, 2004)。この親潮水は、南で黒潮続流に沿って東向きに流れる成分とほぼ一致しており (Hiroe *et al.*, 2002)、黒潮に沿って黒潮続流域に達する比較的高温高塩の古い中層水流量約 12Sv (Hiroe *et al.*, 2002; Komatsu *et al.*, 2004) と合流して、両者が混合することにより新しい北太平洋中層水が作られる、という描像を、絶対地衡流を用いた定量的な観測により検証することができた (Fig. 4)。

これら新しい北太平洋中層水が作られる描像は、他の期間に行われた親潮・混合水域・黒潮続流での LADCP・CTD 観測に、流量と熱塩の収支が合うという制限の元に絶対地衡流を求めた結果でも確認され (Masujima *et*

al., 2003), その結果を用いて北太平洋中層水による人為起源炭素の輸送量を見積もった (Ono *et al.*, 2003)。加えて、東経 147–150 度での亜寒帯前線付近における中規模渦活動に伴い亜寒帯前線以南に取り込まれる親潮水流量が 5Sv 程度存在し、また、秋季は岸付近で南西向きの親潮が弱まることに伴って、循環を横切る流量が少なくなっていた (Masujima *et al.* 2003)。また、北緯 37 度を横切る観測から、黒潮統流に沿って流れ込んだ親潮水によってできた新しい北太平洋中層水 12.5sv (うち親潮成分 5sv) が北緯 37 度を北上していた (Yoshinari *et al.*, 2001; 2004)。

黒潮統流に流れ込んだ親潮水は、黒潮に沿って輸送された高温高塩の亜熱帯水と東経 150 度付近までの間に急速に混合し新しい北太平洋中層水が形成される (Yasuda *et al.*, 1996; Masujima *et al.*, 2003; Kouketsu *et al.*, 2005)。この急速な等密度面水平混合は、中層層厚が大きい低渦位親潮水が黒潮統流域に流れ込むことによって中層に渦位傾度が作られ、表層での反対向きの渦位傾度との間で、波長約 200 km の中層で大きな振幅を持つ不安定波動を伴う黒潮の蛇行によって促進されることが、航走しながら CTD を曳航して観測する Moving Vessel Profiler (MVP) を用いた観測 (Kouketsu *et al.*, 2005; 2007) と理論 (Kouketsu and Yasuda, 2008) によって明らかにされた。黒潮統流周辺に頻繁に出現する顕著な塩分極小や小スケールの低塩分渦 (Okuda *et al.*, 2001) は、この不安定波動によって説明され、小さいスケールの蛇行により大きな鉛直流が生じることが示された。

北太平洋亜寒帯海域には、中冷・中暖という水温逆転構造 (Uda, 1963) が恒久的に存在する。中暖構造の維持のためには、水平的な高温高塩水の輸送が必要である。本州東方の亜寒帯前線と亜寒帯境界で挟まれた移行領域と呼ばれる海域の海水が太平洋を横切り約 3Sv がアラスカ湾に流入し、塩分躍層を維持していることが明らかにされた (Ueno and Yasuda, 2000; 2001; 2003; 2005)。

この移行領域のうち北緯 40–45 度、東経 155–165 度の海域には、北緯 37–40 度、東経 150 度付近の亜寒帯境界以南の塩分極小の存在する海域からの海水が春から秋にかけて到達する。冬季には、北西から低塩分水が表層に添加されながら 300 m 深、密度 $26.7\sigma_\theta$ 近くまで深

い混合層が発達し、塩分極小構造が消失する (Masujima and Yasuda, 2009)。この水塊が東方へ輸送されて、アラスカ湾に流入して水温極大を形成する。

1999 年夏季には、北水研北光丸のロシア海域の調査 (川崎康寛主席) に乗船し、千島周辺の親潮・オホーツク海・千島ムシル海峡・ブッソル海峡の CTD/LADCP 観測を行い、オホーツク海水の太平洋側への流出流量などの評価を通じて熱・淡水・塩分・酸素・人為起源炭素の変質量を見積もられた (Yasuda *et al.*, 2002)。本州東方移行領域からアラスカ湾に供給される熱・塩分は、オホーツク海での冷却・低塩分化とほぼバランスする (Yasuda, 2004)。1 日連続観測によってムシル海峡での流速場と海水交換が見積もられた (Kastumata *et al.*, 2001)。1993 年から 1997 年の夏季の千島列島太平洋側の海洋構造の変化とブッソル海峡南に出現する巨大冷水核高気圧性渦について、サンマ漁期前調査の結果を元にまとめた (Yasuda *et al.*, 2000a)。

6. 千島列島海峡付近の潮汐混合と水塊・気候長期変動

SAGE プロジェクトにおいて、数値モデリングにより、千島列島付近で日周潮流流が強く (Nakamura *et al.*, 2000a)、強い鉛直混合が起きている可能性が示され (Nakamura *et al.*, 2000b)、大きな鉛直混合を千島列島付近に与えるとオホーツク海水や北太平洋中層水の再現性が向上することが示唆された (Nakamura *et al.*, 2004)。強い日周潮流が存在することは、北大低温研のブッソル海峡全体での潮流を分解できる観測で明らかとなっていた (Katsumata *et al.*, 2004; Katsumata and Yasuda, 2010)。一般に中深層の鉛直混合は小さく、中深層の水塊変質に大きな影響を与えることは無い、と思っていたため、衝撃を受けると同時に、現実には起きているかどうか検証する必要性を強く感じた。

オホーツク海の厚い水塊の性質をある程度保持した約 5Sv の親潮水が、風成循環境界を横切り、本州沿岸を南下して黒潮統流に流れ込み、新しい北太平洋中層水を作る、という観測から得られた確かな事実のうち、何故 5Sv もの大量の親潮水が亜寒帯循環から亜熱帯循環に流れ込むか、という問題に当時大学院生の建部君と取り組

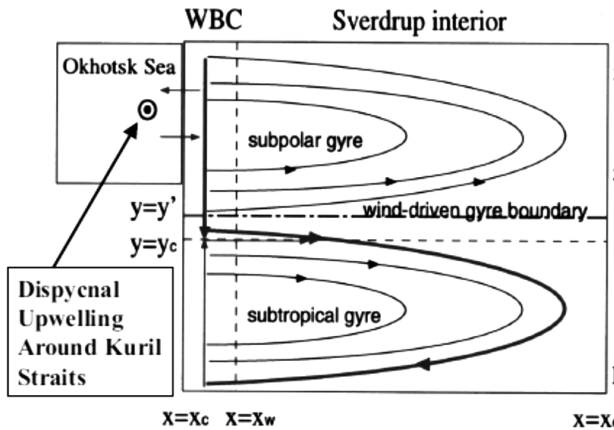


Fig. 5. Possible explanation for the cross-wind-driven gyre transport through the western boundary current (WBC) of the Oyashio (modified from Tatebe and Yasuda (2004)).

んだ。強い鉛直混合により生じる等密度面を横切る湧昇流が深層から中層に向かって存在するならば、その湧昇した海水は中層西岸境界流として南向きに流れ、風成循環境界を横切って亜寒帯から亜熱帯へ流れ込むこと (Fig. 5) が3層モデルとして定式化され、風応力と深層から中層への等密度面を横切る鉛直流 w_2 を与えたモデルで確認され、亜寒帯海域での w_2 を大きくするほど循環境界を横切る流量が増加し、沿岸付近の親潮の南下が強まった (Tatebe and Yasuda, 2004)。

$$T_{WBC} = -\frac{1}{\rho_0 \beta} \int_{x_c}^{x_w} \mathbf{k} \cdot \nabla \times \boldsymbol{\tau} dx + \frac{f}{\beta} \int_{x_c}^{x_w} w_2 dx - W_2$$

$$W_2 = \int_y^y \int_y^y w_2 dS$$

北海道沖の親潮の分布は、千島列島付近である程度の大きさの w_2 を与えると現実的となり、その上で風が季節変動すると、冬から春にかけて親潮沿岸分枝が南下し、春から秋にかけて北退する (小川他, 1987) という季節変動が再現される (Tatebe and Yasuda, 2005a)。この季節変動の原因は、過去の研究で想定されていた順圧の西進ロスビー波ではなく、風の季節変動に起因する沿岸を伝播する地形性波動であった。一方、親潮沿岸分枝の南限緯度の経年変動は、東から伝播してくる傾圧ロスビー波で説明される (Tatebe and Yasuda, 2005b)。この中

層水の南下を再現する3層モデルの流速場を用いて、季節鉛直移動するカイアシ類プランクトン *Neocalanus* の輸送や炭素輸送量 (Shimizu *et al.*, 2009) について推定した (Tatebe *et al.*, 2010)。これらの一連の研究は、東北水研斎藤宏明さんの深層生態系プロジェクトの中で行なった。

2005年に東京大学海洋研究所に移り、研究所の観測に対するバックアップ体制や、小松幸生准教授、伊藤幸彦助教や永江・松本技官などスタッフに恵まれたこともあり、千島列島付近のロシア船を備船した乱流直接観測やイワシ類の資源変動や黒潮の栄養塩供給機構解明を目的とした冬春季の黒潮観測を行なった。乱流については、東大理の日比谷さんに教えていただいた。

黒潮・黒潮続流の冬の観測は、中央水研の渡邊朝生さん・大関芳沖さん、海洋研の津田敦さんらに大変お世話になり、2003年から2006年にかけて、水産庁照洋丸・開洋丸・白鳳丸・淡青丸での観測を行なった。冬の観測では、マイワシ仔稚魚は2006年3月の黒潮続流前線付近で数10匹採れるに留まったが、ゾンデ観測は大きな成果を挙げた (Tokinaga *et al.*, 2006) 他、冬季の生物・混合層分布について貴重な観測データ (Nonomura *et al.*, 2011; Takeuchi and Yasuda, 2003) となった。これらの中で、鶴見精機のNINJAフロートにクロロフィルセンサを取り付けて5日間隔で40m深を漂流し1.5年黒潮続流域の混合層を観測した時系列観測によって、冬季に最も積算生物量が多くなるという興味深い結果が得られている (Yasuda and Watanabe, 2007)。イワシ類の卵仔魚輸送や生残との関係については (Nishikawa and Yasuda, 2008; Itoh *et al.*, 2009; 2010; Nishikawa *et al.*, 2011; 2012) があり、黒潮流軸付近の冬季混合層深度と水温がマイワシの生き残りに関係することが示され、その変動が黒潮の流速と冷却の変動で主に説明されることが示された (Nishikawa and Yasuda, 2011; 黒潮続流の季節変動は Tatebe and Yasuda, 2001)。最近のイワシ関連の研究は、斎藤宏明さん代表の農林水産技術会議魚種交代プロジェクト SUPRFISH の援助を受けた。

SAGEプロジェクトで小笠恒夫さんや渡辺豊さんが、親潮の中層の酸素濃度に綺麗な20年周期変動を報告しており (Ono *et al.*, 2001; Watanabe *et al.*, 2001)、何故そのような変動が生じるのかについて大変興味をもっ

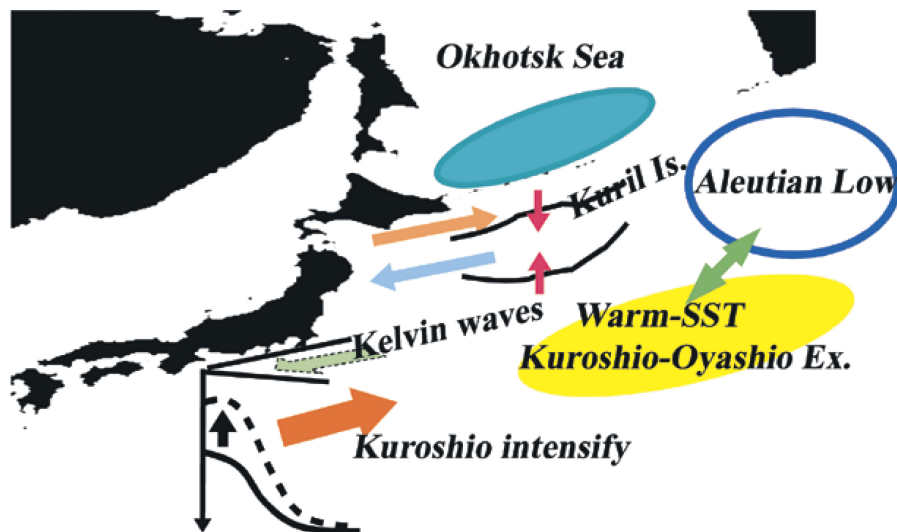


Fig. 6. Schematic representation depicting the thermohaline circulation and the changes of the western boundary current and air-sea interaction. Adapted from Yasuda *et al.* (2006).

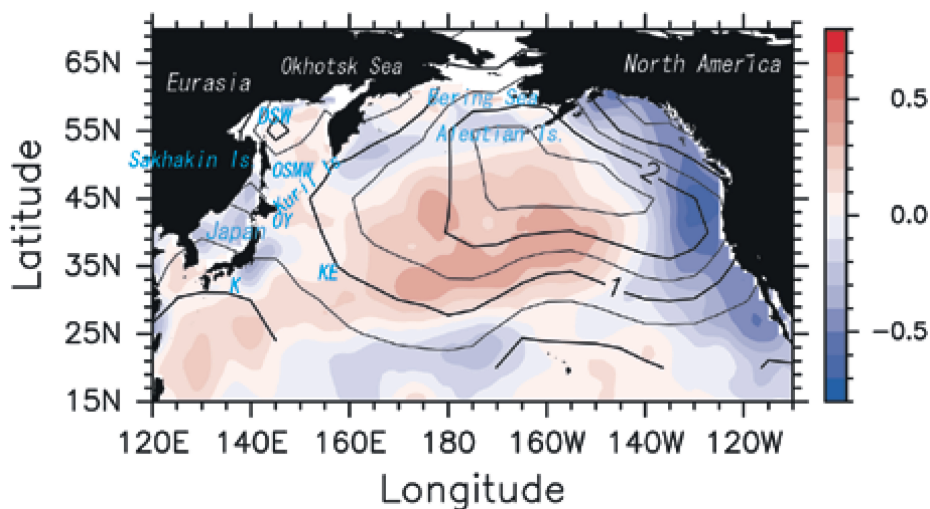


Fig. 7. Differences in winter- SST (color in $^{\circ}\text{C}$) and SLP (Sea-Level Pressure: contours in hPa) distributions between the periods of strong and weak diurnal tides on the basis of bi-decadal components that are bandpass-filtered in 11.6–25.6-year period. OY: Oyashio, OSMW: Okhotsk Sea Mode Water, K: Kuroshio, KE: Kuroshio Extension, DSW: Dense Shelf Water. Adapted from Yasuda *et al.* (2006).

た。北水研の川崎康寛さんも長期の観測データから亜寒帯海域の水塊が大きく変動していることを示していた。アリューシャン低気圧の指標である北太平洋指数 NPI (North Pacific Index) や太平洋 10 年振動指数 PDOI (Pacific Decadal Oscillation Index) にも 20 年程度の

変動があることが報告されており (Minobe, 1999; Minobe *et al.*, 2002; Ishi and Hanawa, 2005), 親潮の酸素の変動も大気の変動に影響であると考えられていた。PICES で小笠さんの研究を含む黒潮親潮移行域のレビュー (Yasuda, 2003) をした際、事務局の Skip McKinnel

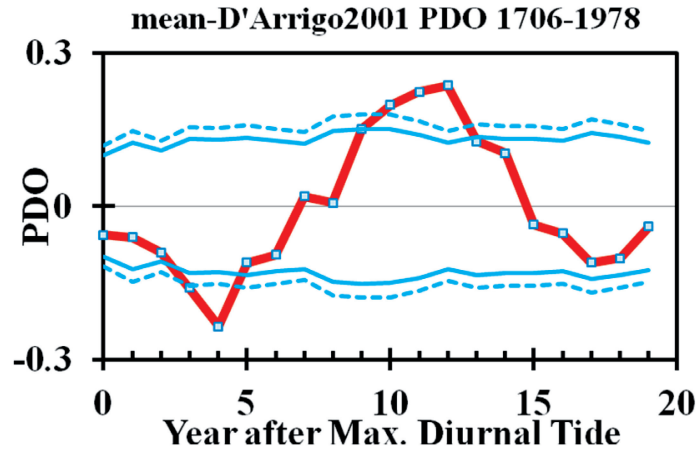


Fig. 8. Mean-PDO on the 18.6-year period moon cycle for D'Arrigo-PDO records. The red curve is the mean and the solid and dashed sky-blue curves the 90% and 95% significance. Modified from Yasuda (2009).

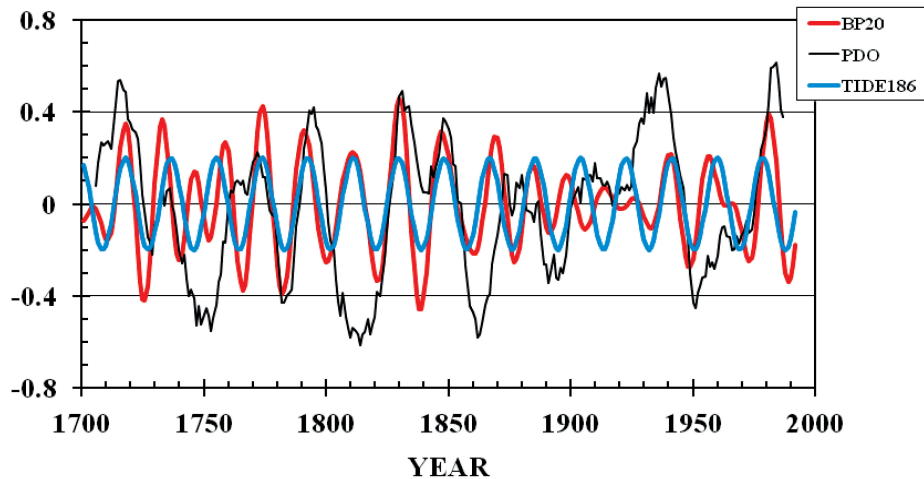


Fig. 9. Time-series of 5-year running mean PDO (PDO5: thin black curve), bi-decadal (BP20: 15.5–23.3 year) component of the PDO (red) and inverted-18.6-year period moon cycle (TIDE186: blue) where the maximum corresponds to the minimum diurnal tide. Modified from Yasuda (2009).

さんから月軌道面の 18.6 年周期変動に伴う潮汐変動 (Loder and Garrett, 1978) のことを聞き、調べてみると変動の周期や位相が良く合っていたことから、当時学部 4 年だった長船哲史君と詳しく調べ始めた。

親潮水と、その上流のオホーツク海や千島列島太平洋側、ベーリング海、に酸素だけでなく、表層塩分、栄養塩、動物プランクトン密度、水温極小や極大、等密度面深度や水塊の厚みにも潮汐 18.6 年振動に同期した変動が現れており、オホーツク海・ベーリング海の水塊形成・

循環像に千島・アリューシャンでの強い鉛直混合が 18.6 年周期で変動すると仮定した場合と整合的な変動を示していた (Osafune and Yasuda, 2006; 2010; 2012; Tadokoro *et al.*, 2009)。アリューシャン低気圧 NPI や北太平洋 SST 変動パターン PDO も 18.6 年振動と同期する変動がみられたことを報告し、Tatebe and Yasuda (2004) のモデルを改変して、千島列島付近の鉛直混合変動に伴う、海洋の子午面-鉛直と熱輸送変動で説明を試みた (Fig. 6, 7, Yasuda *et al.*, 2006)。羽角博康さ

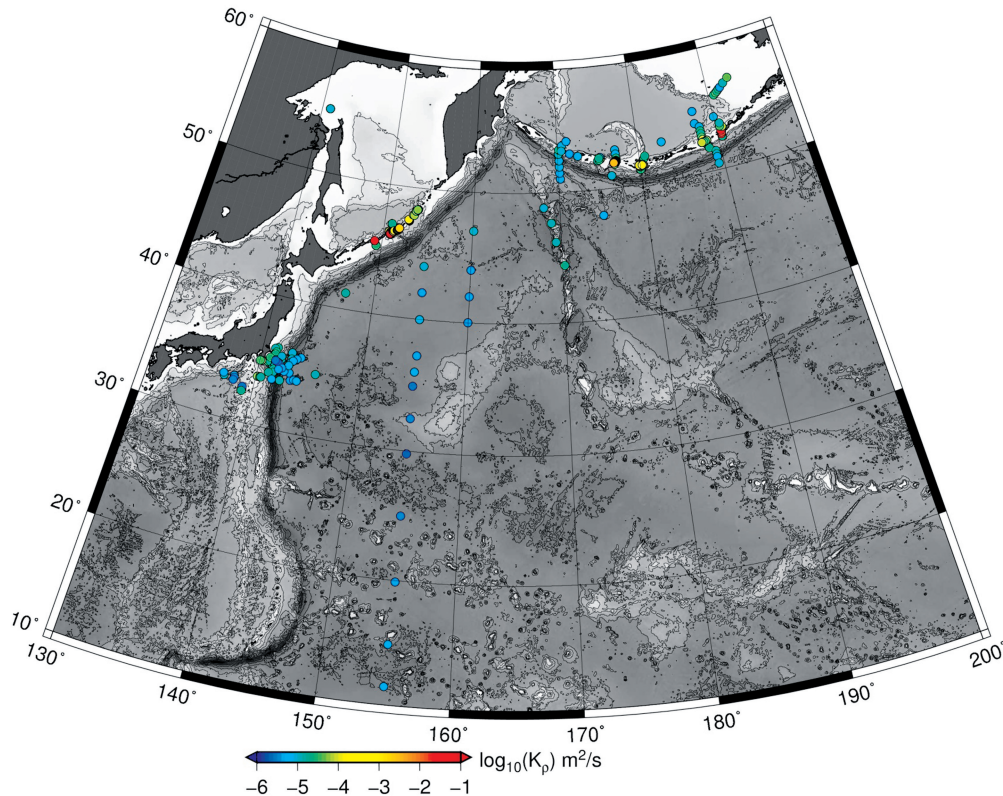


Fig. 10. Column averaged vertical diffusivity (in m^2s^{-1}) directly measured during 2006–2009 in the cruises of R/Vs Hakuho-maru, Tansei-maru and Khromov.

んが千島付近で強めた鉛直混合を 18.6 年振動させた機構モデル実験を行い、千島で生じた変動が赤道付近に達して ENSO に影響することで日周潮汐極大（極小）から 6 年後にラニーニャ（エルニーニョ）傾向になるという変動をもたらす可能性を示した（Hasumi *et al.*, 2008）。樹木年輪等から再構成された約 300 年の PDO 時系列から、スペクトルに統計的に有意な 18.6 年周期ピークが存在し、日周潮汐極大から 3–5 年後に負 PDO, 10–13 年後に正 PDO（Yasuda, 2009）と、気候モデルと類似の変動が存在することが明らかになった（Fig. 8, 9）。全球で潮汐混合とその変動を与えた気候モデル実験から、千島での変動が黒潮親潮統流域の水温偏差を作り、アリューシャン低気圧も連動して変動するという、やや弱いながらも観測と整合的な気候変動をもたらすことを示した（Tanaka *et al.*, 2012b）。

千島列島付近やアリューシャン付近で、数値モデルで

示唆されているような強い鉛直混合が存在するのを実証するために、2000 m 深まで観測できるケーブル付き乱流計を科研費で導入し、中塚武さん・西岡純さんが率いた北大低温研のアムールオホーツクプロジェクトと連携して、ロシア極東水文気象研究所のクロモフ号を用いた千島付近の直接乱流観測を 2006/2007/2010 に行なった（Fig. 10）。乱流計は Rolf Lueck 氏が作ったものであり、大変安定した機器であるが、ケーブルを掃き出す装置やウインチ・モータ・ケーブルが度々トラブルに見舞われ、順調に観測できるまで約 3 年かかった。潮汐混合とオホーツク海・ベーリング海の関係については、月刊海洋（2008 年 11 月号外 50, 2011 年 11・12 月号）で特集を組んだ。

浅いウルフ海峡では、潮流が海底傾斜をかけ下る時に、鉛直混合係数にして $0.5 \text{ m}^2/\text{s}$ に達する極めて強い鉛直混合が発生し、海面から海底水深 600 m 付近まで

一様にしてしまうことが明らかになった (Itoh *et al.*, 2011b)。日周潮汐の小潮では混合は弱く、比較的強い混合は、潮流が海底傾斜をかけ下るように転流する際、及び、短周期の流速変動が通過する際に生じていた (Itoh *et al.*, 2010)。1500 m でも 1.5 m/s もの潮流が存在するブッソル海峡西水道では、中層 1000 m 深付近で $0.1 \text{ m}^2/\text{s}$ を超える大きな鉛直混合が、平均流と日周潮汐流の両方の鉛直勾配が重なり強調される際に、発生することが明らかになった (Yagi and Yasuda, 2012)。

親潮海域の生物生産を支える鉄の供給に、アムール川を通じてオホーツク海中層に運び込まれた鉄が、千島列島での強い潮汐混合によって表層にもたらされることが観測によって明らかにされつつある (中塚他 2008, 西岡他 2011)。アリューシャン列島付近においても、直接観測により、強い乱流の存在が確認されており、ベーリング海の陸棚縁辺に夏季でも生物生産が持続されるグリーンベルトの維持に、強い鉛直混合を通じた鉄の鉛直輸送が重要な役割を果たす (Tanaka *et al.*, 2012a) など、これまでブラックボックスとして扱われていた乱流による栄養塩鉛直輸送が実証的に示されるようになってきた。

7. まとめにかえて

私が海洋学を始めてから約 30 年、新しい観測手段と数値モデリングの進展によって、多くの新しい情報が得られるようになった。海洋学の革新は、新しい観測によってもたらされることを改めて実感している。私の場合は、ナンセン採水器から始まり、STD, 衛星 SST 画像, CTD, ADCP, LADCP, 衛星海面高度計, MVP, 等密度面アルゴフロート, 混合層クロロフィルフロート, 乱流計, 硝酸計, 乱流計グライダーなどを通じて、新しい海を見てきた。今後、数値モデリングの精緻化や衛星・レーダ観測の高精度化・普及とともに、乱流, 深海, 海底付近, 生化学パラメータを精密かつ高頻度で観測できる手法によって、乱流や小規模渦が海洋大循環や気候変動に果たす役割が定量的に明らかにされてゆくと期待する。

研究を始めた当初、複雑で全ての過程が含まれた魅力あふれる東北の海に出会ったことが、海への興味を今まで持続できた要因だと感じている。複雑でとても自分には手に負えないと思っていた東北の海であるが、30 年

の間の様々な研究努力や技術革新で、随分いろいろなことがわかるようになってきた。東北三陸海域は、受賞講演をすることになっていた大気海洋研での大会の直前に、大震災と大津波に襲われ、多くの方々が犠牲となり、漁業に甚大な被害が出た。世界でも有数の漁業生産を支える海の物理特性と生物生産過程・変動を明らかにし、漁業の再生につなげることが、東北の海に対する恩返しと考えている。

References

- Hasumi, H., I. Yasuda, H. Tatebe, and M. Kimoto (2008): Pacific bidecadal variability regulated by tidal mixing around the Kuril Islands. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L14601, doi : 10.1029/2008GL034406.
- Hasunuma, K. (1978): Formation of the intermediate salinity minimum in the northwestern Pacific Ocean. *Bull. Ocean Res. Inst., Univ. of Tokyo*, **9**, 47 pp.
- 平井光行, 小川嘉彦, 奥田邦明, 安田一郎, 山口ひろ常 (1988) : 三陸近海におけるマサバまき網漁場の形成・移動・消滅に係わる海況変動, 東北区水産研究所研究報告 **50**, 133–151.
- Hiroe, Y., I. Yasuda, K. Komatsu, K. Kawasaki, T.M. Joyce and F. Bahr (2002): Transport of the North Pacific Intermediate Water in the Kuroshio-Oyashio Interfrontal zone. *Deep-Sea Res. II*, **49**, 5,353–5,364.
- Inoue, R., J. Yoshida, Y. Hiroe, K. Komatsu, K. Kawasaki and I. Yasuda (2003): Modification of North Pacific Intermediate Water around Mixed Water Region. *J. Oceanogr.*, **59**, 211–224.
- Ishi, Y., and K. Hanawa (2005): Large-scale variabilities of wintertime wind stress curl field in the North Pacific and their relation to atmosphere teleconnection patterns, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L10607, doi : 10.1029/2004GL022330.
- Ito, S., K. Uehara, T. Miyao, H. Miyake, I. Yasuda, T. Watanabe and Y. Shimizu (2004): Characteristics of altimetry SSH anomaly of TOPEX/POSEIDON on the OICE line and its relation for mesareed velocity and transport in the Oyashio region. *J. Oceanogr.*, **60** (2), 411–424.
- 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** (2), 118–133.
- Itoh, S. and I. Yasuda (2010a): Characteristics of mesoscale eddies in the Kuroshio-Oyashio Extension regions detected from the distribution of the sea surface height anomaly. *J. Phys. Oceanogr.*, **40**, 1,018–1,034.
- 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 of 2006. *J. Geophys. Res. Oceans*, **115**, C08004, doi : 10.1029/2009JC005629.

- 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**, 2,624–2,642.
- Itoh, S., T. Saruwatari, H. Nishikawa, I. Yasuda, K. Komatsu, A. Tsuda, T. Setou, and M. Shimizu (2010): 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** (2), 114–124.
- Itoh, S., Y. Shimizu, S-I Ito, and I. Yasuda (2011a): Evolution and Decay of a Warm-Core Ring within the Western Subarctic Gyre of the North Pacific, as Observed by Profiling Floats. *J. Oceanogr.*, DOI 10.1007/s10872-011-0027-2.
- Itoh, S., I. Yasuda, M. Yagi, H. Kaneko, S. Osafune, T. Nakatsuka, J. Nishioka, and Y. N. Volkov (2011b): Strong vertical mixing in the Urup Strait. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L16607, doi : 10.1029/2011GL048507.
- Joyce, T.M., I. Yasuda, Y. Hiroe, K. Komatsu, K. Kawasaki and F. Bahr, 2001, Mixing in the meandering Kuroshio Extension & the formation of NPIW. *J. Geophys. Res.* **106** (C3), 4,397–4,407.
- Katsumata, K., I. Yasuda, and Y. Kawasaki (2001), Direct current measurements in Krusensterna Strait in summer. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 319–322.
- Katsumata, K., K.-I. Ohshima, T. Kono, M. Itoh, I. Yasuda, Y. Volkov, and M. Wakatsuchi (2004): Water exchange and tidal currents through the Bussol Strait revealed by direct current measurements. *J. Geophys. Res.*, **109**, doi : 10.1029/2003JC001864.
- Katsumata, K. and I. Yasuda (2010) Estimate of non-tidal exchange transport between the Sea of Okhotsk and the North Pacific. *J. Oceanogr.*, **66**, 489–504.
- 川崎康寛・杉本隆成 (1988): 流量変動に伴う津軽暖水流出形態の短期変動. 東北区水産研究所報告, **50**, 203–215.
- Kitani, K. (1973): An oceanographic study of the Okhotsk Sea particularly in regard to cold waters. *Bull. Far Seas Fish. Res. Lab.*, **9**, 45–76.
- Komatsu, K., Y. Hiroe, I. Yasuda, K. Kawasaki, T.M. Joyce, F. Bahr and Y. Kawasaki (2004): Hydrographic structure and transport of intermediate water south of Japan. *J. Oceanogr.*, **60** (2), 487–504.
- Kono, T. (1997): Modification of the Oyashio Water in the Hokkaido and Tohoku Area. *Deep-Sea Res. I*, **44**, 669–688.
- Kono, T. and Y. Kawasaki (1997a): Modification of the western subarctic water by exchange with the Okhotsk Sea. *Deep-Sea Res.*, **44**, 689–711.
- Kono, T. and Y. Kawasaki (1997b): Results of CTD and mooring observations southeast of Hokkaido I. Annual velocity and transport variations in the Oyashio. *Bull. Hokkaido Natl.Fish. Res. Inst.*, **61**, 65–81.
- Kouketsu S., I. Yasuda and Y. Hiroe (2005): Observation of frontal waves and associated salinity minimum formation along the Kuroshio Extension. *J. Geophys. Res.* **110**, C08011, doi : 10.1029/2004JC002862.
- 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.
- Kouketsu, S. and I. Yasuda (2008): Unstable frontal waves along the Kuroshio Extension with low-potential vorticity intermediate Oyashio water. *J. Phys. Oceanogr.* **38**, 2,308–2,321. DOI : 10.1175/2008JPO3814.1
- Kubokawa, A. (1988): Instability and nonlinear evolution of a density-driven coastal current with a surface front in a two-layer ocean. *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.*, **40**, 195–223.
- Kubokawa, A. (1991): On the behavior of outflows with low potential vorticity from a sea strait. *Tellus* **43** A, 168–176.
- Loder, J. W. and C. Garrett (1978): The 18.6-year cycle of sea surface temperature in shallow seas due to variations in tidal mixing. *J. Geophys. Res.*, **83** (C4), 1,967–1,970.
- Masuda, A. (1982): An interpretation of the bimodal character of the stable Kuroshio path. *Deep-Sea Res.*, **29**, 471–484.
- Masujima, M., I. Yasuda, Y. Hiroe and T. Watanabe (2003): Transport of Oyashio water across the Subarctic Front into the Mixed Water Region and formation of NPIW. *J. Oceanogr.*, **59**, 855–869.
- Masujima, M. and I. Yasuda (2009): Distribution and modification of North Pacific Intermediate Water around the Subarctic frontal zone east of 150°E. *J. Phys. Oceanogr.*, **39**, 1,462–1,474.
- Minobe, S. (1999): Resonance in biennial and pentadecadal climate oscillations over the North Pacific: Role in climate regime shifts. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 855–858.
- Minobe, S., T. Manabe, and A. Shouji (2002): Maximal wavelet filter and its application to biennial oscillation over the Northern Hemisphere through the twentieth century. *J. Clim.*, **15**, 1,064–1,075.
- 水野 恵介, 安田 一郎, 奥田 邦明 (1986): パーソナルコンピュータを用いた海洋観測データロガー. 東北区水産研究所研究報告, **48**, 13–29.
- Nakamura, T., T. Awaji, T. Hatayama, K. Akitomo and T. Takizawa (2000a): Tidal exchange through the Kuril Straits. *J. Phys. Oceanogr.*, **30**, 1,622–1,644.
- Nakamura, T., T. Awaji, T. Hatayama, K. Akitomo, T. Takizawa, T. Kono and M. Fukazawa (2000b): The generation of large-amplitude unsteady lee waves by subinertial K1 tidal flow: A possible vertical mixing mechanism in the Kuril Straits. *J. Phys. Oceanogr.*, **30**, 1,601–1,621.
- Nakamura, T., T. Toyoda, Y. Ishikawa and T. Awaji (2004): Tidal mixing in the Kuril Straits and its impact on ventilation in the North Pacific Ocean. *J. Oceanogr.*, **60**, 411–423.
- 中塚武・西岡純・白岩孝行 (2008): 内陸と外洋の生態系の河川・陸棚・中層を介した物質輸送による結びつき. 月刊海洋号外 **50**, 68–76.
- Nishikawa, H. and I. Yasuda (2008): Variation of Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*) mortality in relation to the winter mixed layer in the Kuroshio Extension. *Fish. Oceanogr.* **17** (5), 411–420.
- Nishikawa, H., I. Yasuda, and S. Itoh (2011): Impact of winter-to-spring environmental variability along the Kuroshio jet on the recruitment of Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*). *Fish. Oceanogr.*, **20** (6), 570–582.
- Nishikawa, H. and I. Yasuda (2011): Long-term variability of winter mixed layer depth and temperature along the Kuroshio jet in a high-resolution ocean general circulation model. *J. Oceanogr.* **67** (4), 503–518.
- Nishikawa, H., I. Yasuda, S. Itoh, K. Komatsu, H. Sasaki, Y. Sasai and Y. Oozeki (2012): Transport and distribution of Japanese sardine

- (*Sardinops melanostictus*) eggs and larvae via particle tracking experiments. *Fish. Oceanogr.*, submitted
- 西岡純・的場澄人・小埜恒夫・斎藤宏明・坂岡桂一郎 (2011) 親潮域・混合域の鉄濃度の季節的変動を支配するプロセス. 月刊海洋, **43** (11), 648–654.
- Nonomura, T., S. Nishida, A. Tsuda and I. Yasuda (2011): Morphological characters for practical identification of copepodite stages of three sympatric *Calanus* species in the western North Pacific. *J. Plankton Res.*, **33** (10), 1,496–1,509.
- Noto, M. and I. Yasuda (1999): Population decline of the Japanese sardine with relation to the sea-surface temperature in the Kuroshio Extension. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **56**, 973–983.
- Noto, M. and I. Yasuda (2003): Empirical biomass model for the Japanese sardine with sea surface temperature in the Kuroshio Extension. *Fish. Oceanogr.*, **12**, 1–9.
- 小川 嘉彦, 平井 光行, 安田 一郎 (1987): 親潮第一貫入の変動とその水産生物への影響, 東北区水産研究所研究報告 **49**, 1–15
- 奥田邦明, 平井光行, 安田一郎, 小川嘉彦, 工藤英郎, 福島信一, 山口ひろ常, 水野恵介 (1988): 三陸近海に形成される南下期マサバ漁場の短期予測手法, 東北区水産研究所研究報告, **50**, 193–202.
- Okuda, K., I. Yasuda, Y. Hiroe and Y. Shimizu (2001) Structure of subsurface intrusion of the Oyashio water into the Kuroshio Extension and formation process of the North Pacific Intermediate Water. *J. Oceanogr.*, **57**, 121–140.
- Ono, T., I. Yasuda, H. Narita and S. Tsunogai (1998): Chemical alteration of waters in the Kuroshio-Oyashio interfrontal zone. *J. Oceanogr.*, **54**, 681–694.
- Ono, T., T. Midorikawa, Y. W. Watanabe, K. Tadokoro and T. Saino (2001): Temporal increase of phosphate and apparent oxygen utilization in the subsurface waters of western subarctic Pacific from 1968 to 1998. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 3,285–3,288.
- Ono, T., K. Sasaki and I. Yasuda (2003): Re-estimation of annual anthropogenic carbon input from Oyashio into North Pacific Intermediate Water. *J. Oceanogr.*, **59**, 883–891.
- Osafune, S. and I. Yasuda (2006): Bidecadal variability in the intermediate waters of the northwestern subarctic Pacific and the Okhotsk Sea in relation to 18.6-year period nodal tidal cycle. *J. Geophys. Res.*, **111**, C05007, doi : 10.1029/2005JC003277.
- Osafune, S., and I. Yasuda (2010): Bidecadal variability in the Bering Sea and the relation with 18.6-year period nodal tidal cycle. *J. Geophys. Res.*, **115**, DOI: 10.1029/2008JC005110.
- Osafune, S. and I. Yasuda (2012): Numerical study on the impact of the 18.6-year period nodal tidal cycle on water-masses in the subarctic North Pacific. *J. Geophys. Res.* in press
- Reid, J. L., Jr. (1965): Intermediate waters of the Pacific Ocean. *The Johns Hopkins Oceanographic Studies*, **5**, 96 pp.
- 清水勇吾, 安田一郎 (1995): わかたか丸 ADCP により得られる流速誤差の評価. 東北区水産研究所研究報告, **57**, 15–24.
- Shimizu, Y., I. Yasuda and S. Ito (2001): Distribution and circulation of the coastal Oyashio intrusion. *J. Phys. Oceanogr.*, **31** (6), 1,561–1,578.
- Shimizu, Y., I. Yasuda, S. Ito and K. Hanawa (2003): ADCP-referenced Kuroshio and Oyashio water transports for the North Pacific Intermediate Water formation. *J. Phys. Oceanogr.*, **33**, 220–233.
- Shimizu, Y., T. Iwao, I. Yasuda, S. Ito, T. Watanabe, K. Uehara, N. Shikama and T. Nakano (2004): Formation process of North Pacific Intermediate Water revealed by profiling floats set to drift on 26.7-sigma-theta isopycnal surface. *J. Oceanogr.*, **60** (2), 439–452.
- Shimizu, Y., K. Takahashi, S.-I. Ito, S. Takehi, H. Tatebe, I. Yasuda, A. Kusaka, T. Nakamura (2009): Transport of subarctic large copepods from the Oyashio area to the mixed water region by Oyashio intrusions. *Fish. Oceanogr.* **18** (5), 312–327.
- Sverdrup, H., M. W. Johnson and R. H. Fleming (1942): *The Oceans, Their Physics, Chemistry, and Biology*. Prentice-Hall, 1087 pp.
- Tadokoro, K., T. Ono, I. Yasuda, S. Osafune, A. Shiimoto and H. Sugisaki (2009): Possible mechanisms of decadal scale variations in PO4 concentration in the Oyashio and Kuroshio-Oyashio Transition waters, western North Pacific. *Geophys. Res. Lett.* **36**, L08606, doi : 10.1029/2009GL037327.
- Takeuchi, E. and I. Yasuda (2003): Wintertime shoaling of oceanic surface mixed layer. *Geophys. Res. Lett.*, **30** (22), art-no. – 2152, NOV21.
- Talley, L. D. (1993): Distribution and formation of North Pacific Intermediate Water. *J. Phys. Oceanogr.*, **23**, 517–537.
- Talley, L. D., Y. Nagata, M. Fujimura, T. Kono, D. Inagake, M. Hirai and K. Okuda (1995): North Pacific Intermediate Water in the Kuroshio/Oyashio mixed water region. *J. Phys. Oceanogr.*, **25**, 475–501.
- Tanaka, T., I. Yasuda, K. Kuma and J. Nishioka (2012a): Vertical turbulent iron flux sustains Green Belt along the shelf break in the southeastern Bering Sea. *Geophys. Res. Lett.*, in press
- Tanaka, Y., I. Yasuda, H. Hasumi, H. Tatebe, S. Osafune (2012b): Effects of 18.6-year modulation of tidal mixing on bidecadal climate variability in the North Pacific. *J. Climate*, submitted
- Tatebe, H. and I. Yasuda (2001): Seasonal axis migration of the upstream Kuroshio Extension associated with standing oscillations. *J. Geophys. Res.*, **106** (C8), 16,685–16,692.
- 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**, 2,327–2,341.
- Tatebe, H. and I. Yasuda (2005a): Numerical experiments on the seasonal variation of the Oyashio southward intrusion. *J. Phys. Oceanogr.* **35**, 2,309–2,326.
- Tatebe, H. and I. Yasuda (2005b): Interdecadal variations of the coastal Oyashio from the 1970s to the early 1990s. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L10613, doi : 10.1029/2005GL022605.
- Tatebe, H., I. Yasuda, H. Saito and Y. Shimizu (2010): Horizontal transport of the calanoid copepod *Neocalanus* in the North Pacific: The influences of the current system and the life history. *Deep-Sea Res. I*, **57**, 409–419.
- Tokinaga, H., Y. Tanimoto, M. Nonaka, B. Taguchi, T. Fukamachi, S.-P. Xie, H. Nakamura, T. Watanabe and I. Yasuda (2006): Atmospheric sounding over the winter Kuroshio Extension: Effect of surface stability on atmospheric boundary layer structure. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L04703, doi : 10.1029/2005GL025102.
- Uehara, K., S. Ito, H. Miyake, I. Yasuda, Y. Shimizu and T. Watanabe, 2004: Absolute volume transport of the Oyashio referred to moored current meter data crossing the OICE. *J. Oceanogr.*, **60** (2), 397–410.
- Uda, M. (1963): Oceanography of the subarctic Pacific Ocean. *J. Fish.*

- Res. Board Canada*, **20**, 119–179.
- Ueno, H. and I. Yasuda (2000): Distribution and formation of the mesothermal structures (temperature inversions) in the North Pacific Subarctic Regions. *J. Geophys. Res.*, **105** (C7), 16,885–16,898.
- Ueno, H. and I. Yasuda (2001): Warm and saline water transport to the North Pacific Subarctic region: WOCE and SAGE data analysis. *J. Geophys. Res.* **106** (C10), 22,131–22,141.
- Ueno, H. and I. Yasuda (2003): Intermediate water circulation in the North Pacific subarctic and northern subtropical regions. *J. Geophys. Res.*, **108** (C11), 3348, doi : 10.1029/2002JC001372.
- Ueno, H. and I. Yasuda (2005): Temperature inversions in the North Pacific subarctic region. *J. Phys. Oceanogr.* **35**, 2,444–2,456.
- Watanabe, Y. W., T. Ono, A. Shimamoto, T. Sugimoto, M. Wakita and S. Watanabe (2001): Probability of a reduction in the formation rate of the subsurface water in the North Pacific during 1980s and 1990s. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 3,289–3,292.
- Wüst, G. (1930): Meridionale Schichtung und Tiefenzirkulation in den Westhalften der drei Ozeane. *J. du Cons. Int'l. pour l'Expl. de la Mer*, **5** (1), 21 pp.
- Yagi, M. and I. Yasuda (2012): Deep intense vertical mixing in the Bussol' Strait. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L01602, doi : 10.1029/2011GL050349.
- Yano, J.-I. and I. Yasuda (1992): Note on the isolated vortices over the topographic- β . *J. Oceanogr.*, **48**, 231–237.
- Yasuda, I., J.-H. Yoon and N. Suginoara (1985): Dynamics of the Kuroshio Large Meander.-Barotropic Model-, *J. Oceanogra. Soc. Jpn*, **48**, 259–273.
- 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, 東北区水産研究所研究報告, **48**, 67–86.
- 安田一郎, 奥田邦明, 平井光行, 小川嘉彦, 工藤英郎, 福島信一, 水野恵介 (1988) : 秋季津軽暖流の短期変動, 東北区水産研究所研究報告, **50**, 153–191.
- Yasuda, I., K. Okuda and M. Hirai (1992): Evolution of a Kuroshio Warm-Core Ring.- Variability of the Hydrographic Structure, *Deep-Sea Res.*, **39** (Suppl.), S131–S161.
- Yasuda, I. and Y. Watanabe (1994): On the relationship between the Oyashio front and saury fishing grounds in the north-western Pacific, *Fish. Oceanogr.*, **3**, 172–181.
- Yasuda, I. and G.R. Flierl (1995): Two dimensional asymmetric vortex merger: Contour dynamics experiment. *J. Oceanogr.*, **51**, 145–170.
- Yasuda, I. (1995): Geostrophic vortex merger and streamer development in the ocean with special reference to the merger of Kuroshio warm-core rings, *J. Phys. Oceanogr.*, **25**, 979–996.
- Yasuda, I. and D. Kitagawa (1996): Locations of early fishing grounds of saury in the North-western Pacific, *Fish. Oceanogr.*, **5**, 63–69.
- Yasuda, I., K. Okuda and Y. Shimizu (1996): Distribution and modification of the North Pacific Intermediate Water in the Kuroshio-Oyashio Interfrontal zone., *J. Phys. Oceanogr.*, **26**, 448–465.
- Yasuda, I. (1997): The origin of the North Pacific Intermediate Water, *J. Geophys. Res.*, **102** (C1), 893–909.
- Yasuda, I. and G.R. Flierl (1997): Two dimensional asymmetric vortex merger: merger dynamics and critical merger distance, *Dyn. Atmos. Oceans*, **26**, 159–181.
- Yasuda, I., H. Sugisaki, Y. Watanabe, S. Minobe and Y. Oozeki (1999): Interdecadal variations in Japanese sardine and ocean/climate. *Fish. Oceanogr.*, **8**, 18–24.
- Yasuda, I., S. Ito, Y. Shimizu, K. Ichikawa, K. Ueda, T. Honma, M. Uchiyama, K. Watanabe, T. Suno, K. Tanaka and K. Koizumi (2000a): Cold-core anti-cyclonic eddies south of the Bussol' Strait in the north-western Subarctic Pacific. *J. Phys. Oceanogr.*, **30**, 1,137–1,157.
- Yasuda, I., T. Tozuka, M. Noto and S. Kouketsu (2000b): Heat balance and regime shifts of the mixed layer in the Kuroshio Extension. *Progress in Oceanogr.*, **47**, 257–278.
- Yasuda, I., Y. Hiroe, K. Komatsu, K. Kawasaki, T.M. Joyce, F. Bahr and Y. Kawasaki (2001): Hydrographic structure and transport of the Oyashio south of Hokkaido and the formation of the North Pacific Intermediate Water. *J. Geophys. Res.*, **106** (C4), 6,931–6,942.
- Yasuda, I., S. Kouketsu, K. Katsumata, M. Ohiwa, Y. Kawasaki and A. Kusaka (2002): Influence of intermediate Okhotsk Sea water on the Oyashio and North Pacific Intermediate Water. *J. Geophys. Res.*, **107** (C12), 3237, doi : 10.1029/2001JC001037.
- Yasuda, I. (2003): Hydrographic structure and variability of the Kuroshio-Oyashio Transition Area. *J. Oceanogr.*, **59**, 389–402.
- Yasuda, I. (2004): North Pacific Intermediate Water: Progress in SAGE and related projects. *J. Oceanogr.*, **60** (2), 385–396.
- Yasuda, I., S. Osafune and H. Tatebe (2006): Possible explanation linking 18.6-year period nodal tidal cycle with bi-decadal variations of ocean and climate in the North Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L08606, doi : 10.1029/2005GL025237.
- Yasuda, I. and T. Watanabe (2007): Chlorophyll a variation in the Kuroshio Extension revealed with a mixed layer tracking float: implication on long-term change of Pacific saury. *Fish. Oceanogr.*, **16** (5), 482–488.
- Yasuda, I. (2009): The 18.6-year period moon-tidal cycle in Pacific Decadal Oscillation reconstructed from tree-rings in western North America, *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L05605, doi : 10.1029/2008GL036880.
- 横内克巳, 安田一郎, 前川秀則, 上野俊士郎 (1992): 春季三陸沖暖水塊前線域におけるクロロフィル a と栄養塩類の深層分布. 東北区水産研究所研究報告, **54**, 193–202.
- Yoon, J.-H. and I. Yasuda (1987): Dynamics of the Kuroshio Large Meander : Two-layer model, *J. Phys. Oceanogr.*, **17**, 66–81.
- Yoshinari, H., I. Yasuda, S. Ito, E. Firing, Y. Matsuo, O. Kato, and Y. Shimizu (2001): Meridional transport of the North Pacific Intermediate Water in the Kuroshio-Oyashio interfrontal zone. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 3,445–3,448.
- Yoshinari, H., Yasuda I. and Ikeda M. (2004): Meridional transport of North Pacific Intermediate Water across 37N based on the objective analysis of lowered acoustic doppler current profiler data. *J. Geophys. Res.*, **109**, C02023, doi : 10.1029/2003JC001815.
- You, Y., N. Suginoara, M. Fukasawa, I. Yasuda, I. Kaneko, H. Yoritaka and M. Kawamiya (2000): Roles of the Okhotsk Sea and Gulf of Alaska in forming the North Pacific Intermediate Water. *J. Geophys. Res.*, **105** (C2), 3253–3280.

Studies on the formation, transport and modification of North Pacific Intermediate Water

Ichiro Yasuda[†]

Abstract

Studies on North Pacific Intermediate Water (NPIW) by the author were reviewed as a lecture of 2011 JOS-prize. Thick, cold and low-salinity intermediate water-mass (Okhotsk Sea Mode Water) is formed through dense shelf water sinking in the Okhotsk Sea, largely influenced from strong turbulent vertical mixing around the Kuril Straits. This thick water-mass flows out to the Pacific and is mixed with thin Pacific water to form Oyashio water. Significant amount of Oyashio water which retains the thick water mass flows along the east coast of Hokkaido and Honshu, and merge and mix with the Kuroshio Extension, to form new NPIW. The isopycnal mixing near the Kuroshio Extension is enhanced by instability caused by the intermediate thick Oyashio water. The new NPIW flows along the large-scale subtropical gyre circulation, and a part loses its intermediate salinity minimum structure in the Transition Domain by overlying low-salinity subarctic water and developed deep mixed layer. This water flows into the Alaskan Gyre and feed the mesothermal (temperature vertical maximum) structure in the subarctic North Pacific. In the intermediate layer in the north Pacific subarctic gyre, supply of this warm and saline water is mostly balanced with cold and low salinity dense water supply in the Okhotsk Sea. The strong turbulent mixing around the Kuril and Aleutian Straits etc. has strong impact on modification and long-term variations of water masses. 18.6-year period tidal cycle is a cause of water-mass variability, and eventually possibly leads to bidecadal variations of ocean and climate.

Key words: North Pacific Intermediate Water, Okhotsk Sea, Oyashio, Mixed Water Region, Kuroshio, Kuroshio Extension, salinity minimum, turbulent mixing, 18.6-year period tidal modulation, bi-decadal variability

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

(Received 15 March 2012; accepted 10 April 2012)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2012)

[†] Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo
Kashiwanoha 5-1-5, Kashiwa-shi Chiba, 277-8564 Japan
TEL +81-4-7136-6240 FAX +81-4-7136-6247