

# 黒潮・親潮混合域の環境変動のメカニズムと

## 魚類資源に及ぼす影響に関する研究

伊藤進一

(独) 水産総合研究センター・東北区水産研究所

### 1. はじめに

これまで、「混合水域が存在することで地球システムにどのような役割を果たしているのか」という観点で研究を進めてきました。まずは、混合水域の実態を知りたいという強い思いから、観測船を用いた観測を主体に研究を続けてきました。まだ答えを見出すに至っていない私ですが、調査船を用いて大規模な観測を展開され数々の大発見をされた宇田道隆先生のお名前が冠された水産海洋学会宇田賞を受賞させて頂くことは、身の引き締まる思いであります。これもひとえに、これまでご指導頂いた諸先輩方、一緒に研究を進めてきて頂いた共同研究者の方々のおかげと深く感謝しております。また、今回推薦、承認頂いた水産海洋学会員の方々に深く感謝致します。これまでの研究を振り返り、主要な研究テーマの概略とその経緯を説明させていただきます。

### 2. 海洋学との出会いと決意

私が海洋学を志したのは、ある1冊の本との出会いでした。日高孝次先生の「海流」をたまたま図書館で手にし、Stommel博士の西岸境界流理論を読んだ際に、地球規模の現象をこんなに簡単に説明できるとはと驚愕し、海洋学に進むことを決意しました。

その後、北海道大学に進み、当初、陸棚域の沿岸密度流の研究をレビューし、熱塩効果による循環形成に興味を抱きました。大学院では、指導教官であった竹内謙介先生の勧めもあって、混合境界条件下の熱塩循環の振る舞いについての研究に着手しました。海洋は大気と熱や水のやり取りをしていますが、熱の場合は比較的短い時間スケールで大気温に馴染むように交換が行われます。それに対し、水の交換は降水、蒸発によって行われるため、比較的長時間スケールが長くなります。この二つの時間スケールが違う大気強制力を海洋大循環モデルに与えると、亜寒帯循環域で数十年スケールの自励振動が起きることが問題視されてきました(Weaver and Sarachik, 1991)。この現象が起きる原因を海洋大循環モデルをいろいろな条件で駆動し調べた結果、亜熱帯循環と亜寒帯循環の間の熱塩交換が重要であることに気づきました。そこで、亜寒帯循環の上層と下層、亜熱帯循環という3-boxモデルを構築して、理論的な解析を行った結果、蒸発よりも降水が多い亜寒帯循環域で安定成層が形成され、その安定成層が数十年の時間スケールをかけて起こる亜熱帯循環から亜寒帯循環への塩分供給によって壊され振動

が起きることを示しました(Ito, 1995)。しかし、この結論を発表すると、Stommel(1961)において2-boxモデルを用いて同じような理論が展開されていると指摘され、Stommel博士の偉大さを痛感することになりました。

大学院時代は、このように数値計算と理論解析を展開しつつ、冬は石狩平野で降雪の観測、その他の季節は調査船に乗船し、赤道域を中心とする大気海洋相互作用の観測に人足として参加していました。その時にTOGA-COARE(Tropical Ocean Global Atmosphere - Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment)に白鳳丸に乗船して参加し、西部熱帯太平洋暖水プールでの熱収支定点観測(Suzuki et al., 1995)を行ないました。その観測後に、比較観測のためにハワイ大学MoanaWave、オーストラリア連邦科学産業研究機構のFranklin、フランス開発研究所のAlisと並んで4隻大気観測を行ない、その上を3機の航空機が大気観測を行いました。この光景を目の当たりにし、海洋学者であるならば、多船同時観測を行うべしと決意しました。この頃、日本海でCREAMS(Circulation Research of East Asian Marginal Seas)が計画され、宇田道隆先生が日本海で行った一斉観測(宇田, 1934)が再び脚光を浴びていました。そして、千島列島沿いのサンマ漁期前一斉調査の解析結果(Yasuda, 1997)に関する講演を聞いて、水産研究所であれば多船同時観測が可能と思ひ、水産研究所へ入ることを決意しました。

### 3. 親潮域の観測研究

水産庁東北区水産研究所に採用されるとすぐに、千島列島沿いのサンマ漁期前一斉調査データと衛星海面高度計データを用いた千島渦の研究に取り掛かりました(伊藤ほか, 1999; Yasuda et al., 2000)。また、東北区水産研究所に採用された1995年は、若鷹丸が竣工した年であり、692トンに大型化された若鷹丸で観測を展開しようという機運が高まっていました。そうした中、文部科学省科学技術振興調整費総合研究「北太平洋亜寒帯循環と気候変動に関する国際共同研究」(SAGE: SubArctic Gyre Experiment)が、1997年から開始されました。この中で、海面高度計衛星の軌道線上に観測定線(OICE: Oyashio Intensive observation line off Cape Erimo)を設定し、親潮の流量を観測を開始しました。これも若鷹丸が大型化し、冬季の親潮域での観測が可能になったおかげでした。OICE上では、親潮流量を船舶観測から求めるとともに、係留流速計データからも算出し、衛星海面高度計データ

と比較することで、海面高度から親潮流量を算出する方法を確立しました (Ito et al., 2004a)。この研究によって、親潮域では 80~100 km のスケールの現象が卓越していること、海面高度計データには様々なスケールの変動が含まれているが、流れとの対応を調べるためには 30 km 程度の平滑化が必要なこと、親潮流量が年平均で 9.5 Sv あることなどを示すことができました。また、親潮の流量は、太平洋の風応力場に対する順圧応答と、傾圧応答が同程度重要であることを示しました。一方で、係留流速計による解析から親潮流量が最大 31 Sv に達することを示しました (Uehara et al., 2004)。

SAGE 期間中は、若鷹丸を中心に、様々な観測船で OICE 観測を実施し、期間後半は、プロジェクト事務局の任を担ったため、文部科学省との往復や、データや報告書の取りまとめなど苦勞が多い日々が続きましたが、SAGE の際に行った観測やデータ解析から、共同研究者であった清水勇吾氏が、北太平洋中層水起源水の分布と循環に関する研究 (Shimizu et al., 2001; 2003; 2007) を勢力的に進め、学位を取得し、さらには日本海洋学会岡田賞を受賞されたことで、努力が報われた思いがしました。また、OICE を立ち上げたことによって、多くの研究者が観測に参加することとなり、生物学者、物理学者と一緒に乗船して観測する素地 (Ito, 2001) が東北区水産研究所内でできたことが大きな収穫となりました。

SAGE が終了すると同時に農林水産省の温暖化プロジェクトに携わることとなり、今度は A-line (厚岸沖定線) モニタリングに加わりました。A-line モニタリングは、親潮域における海洋学的、水産学的諸過程の変動機構を明らかにするために、1988 年に当時の北海道区水産研究所の研究者が中心となって開始したのですが、このモニタリングに東北区水産研究所の研究者も加わり、年 6 回程度の観測を継続しました。この中で、係留系の設置・回収と海洋物理観測を担当することとなりましたが、係留系ロープの選択、ロープの接続方法、フロートの付け方などについて、若鷹丸の乗組員の方々に教わりながら、試行錯誤した結果、40 系以上の回収に連続成功するに至りました。また、A-line における冬季混合層の変動解析から、親潮域の混合層が長期的には浅化傾向を持っており、その原因は表層の低塩化にあるが、親潮反転流域の方が低塩化傾向が強いことを示しました (伊藤ほか, 2006)。これは、親潮の南下する季節が変化しており、そのために混合水域との熱塩交換が減少し、塩分が供給されないために起きていることが推測されました。今後、これらの一連の成果を論文化していくことが課題となっています。

#### 4. 海洋環境が魚類成長に及ぼす影響に関する研究

若鷹丸を中心とした観測船での海洋観測を展開する一方、東北区水産研究所の一員として、混合水域における

海洋学的そして水産海洋学的な理解がどの程度進んでいるのかを知るために、動態研コロキウムというセミナーを企画しました。このセミナーが現在の海洋環境コロキウムへと繋がっており、東北区水産研究所での研究情報交換の一つの手段として活かされており、私の最大の貢献と思っています。この海洋環境コロキウムの中で、カツオの回遊に関する勉強をし、カツオ大回遊モデルを開発し、カツオの回遊経路の特徴が、低水温に向かう回遊アルゴリズムで説明可能なことを示しました (伊藤ほか, 1998a)。1997 年春の水産海洋シンポジウムで行ったカツオの回遊経路に関する研究発表が、私の水産海洋学会への初めての参加となりました。

そうした中、農林水産技術会議一般別枠研究「太平洋沖合域における環境変動が漁業資源に及ぼす影響の解明」(VENFISH: Comprehensive Study of the Variation of the Oceanic ENvironment and FISH Populations in the northwestern Pacific) が、1997 年から開始され、黒潮続流を横切る cross frontal flow の観測研究 (伊藤ほか, 2000) を展開するとともに、低次栄養段階生態系モデルの開発に取り組みました。VENFISH によって、サンマの生態学的な理解が深まり (Ito et al., 2004b)、PICES (North Pacific Marine Science Organization) のモデルタスクチームの協力を得て、サンマの成長モデル NEMURO.FISH (North Pacific Ecosystem Model for Understanding Regional Oceanography for Including Saury and Herring) の開発へと発展しました (Ito et al., 2004c)。NEMURO.FISH の画期的な点は、低次栄養段階生態系モデルと魚類の成長が結合されている部分です。このことによって、環境変動に伴い餌が変化し、その影響で魚の成長が変化し、産卵量等に影響するという、環境から資源までの流れを表現することが可能となりました。NEMURO.FISH を用いた研究で、秋・冬生まれと春生まれのサンマの産卵様式に差異があること (Mukai et al., 2007)、太平洋西部と東部では西部の方がサンマが受ける環境変動が複雑であること (Megrey et al., 2007)、サンマの成長の経年変動にはマイワシ資源の増減が影響していること (Ito et al., 2007) などが示されました。

NEMURO.FISH は、サンマおよびニシンを対象に作成されたモデルですが、プランクトン捕食者であれば適用することが可能な構成となっており、マイワシ (Okunishi et al, 2009) やヨーロッパカタクチイワシ (Politikos et al., 2011) に適用され、マイワシの回遊モデルへと発展し、回遊経路上での水温変動と餌料プランクトン変動がマイワシの成長・生残に及ぼす影響の解明 (Okunishi et al., 2012a) に貢献しました。また、サンマやマイワシなどが地球温暖化の進行によって受ける影響の定量的評価 (Ito et al., 2010a, Okunishi et al., 2012b) へと結びつきました。

#### 5. 混合水域の変動機構に関する研究

話は少し前後しますが、東北区水産研究所に配属となった後、私費で IAPSO (XXI General Assembly of the International Association for the Physical Science of the Oceans) に参加し、前述の自励振動について研究発表を行いました。この研究発表がこれまでの生涯の中で、一番自信のある発表でしたが、発表終了後に当時 TOGA の牽引者であった方から、「水産庁に入ったのだから大学がやるような研究をするのではなく、東北の水産に役に立つ研究をなさい」とご指導頂きました。この言葉は、北海道大学低温科学研究所に席をおいた私にとっては、寺田寅彦先生が北海道に向かう中谷宇吉郎先生に贈った「その地に根ざした科学をなさい。どこの地にも科学はある。」という言葉、そして「一番大切なことは、役に立つことだよ」という言葉を連想させました。

「役に立つ」ことを考え、それまで白地図の上に手書きで描いていた東北海区概報水温図を、客観解析に近い方法で描き、ホームページ上で公開することにしました (清水・伊藤, 1996; 伊藤・清水, 1997; <http://tnfri.fra.affrc.go.jp/kaiyo/temp/temp.html>)。また、それまで東北区水産研究所で取得していたフェリー水温データから表層の水温変動特性を解析し (伊藤ほか, 1998b)、沿岸域の係留データから大槌湾での逆潮現象が津軽暖流の前線波動に伴って起こることを示しました (伊藤ほか, 1998c)。そして、1997 年からは、東北ブロック各県海況担当者と協力して、沿岸定線データ等を用いた混合水域の変動特性解析に取り組みました。この活動の中で、各県海況担当者の方々にクラスター解析、主成分分析、自己回帰予測などの解析方法を学んで頂き、各県地先の海況変動特性の解明に取り組んで頂きました。そして、この活動が、統計的な手法を用いた水温予測手法の開発に及びました。東北ブロック海況解析グループが、「統計的水温予測手法の開発と漁海況情報の高度化」の功績によって、全国水産試験場長会賞を受賞したことは、東北ブロックの大きな財産になったと思います。これらブロックとしての強い絆が、東日本大震災の緊急時に活かされたと思っています。また、データ同化・海況予測システム FRA-JCOPE、FRA-ROMS の開発を後押ししたとも考えています。

「その地に根ざした科学」を考えたとき、自分が研究してきた熱塩循環に関する知識を生かすことも併せて考え、「混合水域が存在することで地球システムにどのような役割を果たしているのか」を解くことを大目標に掲げました。しかし、この問いに答える前に、まず混合水域の両端を定義している親潮と黒潮についても理解していく必要がありました。このため、SAGE のもと親潮の観測に着手しました。また、混合水域に接している親潮分枝の実態を把握するために、MVP (Moving Vessel Profiler) を用いた観測に挑戦しました。また、黒潮続流から波及する暖水の流路を特定するために、L-ADCP (Lowered

Acoustic Doppler Current Profiler) を導入して観測を実施しました (Yoshinari et al., 2001)。黒潮続流からは親潮前線にかけて、準定常的な暖水の流れ (準定常ジェット) が存在することが、Isoguchi et al. (2006) によって指摘されると、準定常ジェットの実態と変動の把握 (Wagawa et al., submitted)、小型浮魚稚魚の加入過程への影響 (Okunishi et al., 2012a) について研究を進めることにしました。この準定常ジェットは、黒潮続流から高塩な暖水を高緯度に運ぶため、冬季に効率的に冷却され深い混合層を形成することによって、栄養塩を表層に供給します。また準定常ジェットは、亜寒帯海流 (親潮反転流) と並走することで親潮側の栄養塩を取り込みます。このため、栄養塩が高くかつ水温が比較的高い環境が生み出され、沖合域に生物生産のさかんな hot spot を形成している可能性があります (伊藤, 2010)。今後は準定常ジェットに注目しながら、混合水域の役割について研究していきたいと考えています。

また、混合水域の大きな特徴は、環境の南北勾配が大きく (Ito et al., 2004b)、そのエネルギーの解消のために小中規模現象が発生し、小中規模現象に伴う湧昇によって供給される栄養塩が生物生産に寄与している点だと考えています (Ito et al., 2004b, Ito et al., 2010b)。これら混合水域の小中規模現象の実態を把握するためには、これまでの船舶観測の時空間分解能では不十分で、MVP や水中グライダー (これまた Stommel 博士考案の機器) のような新しい測器の導入が不可欠と考え、新測器の導入に取り組んで頂きました (伊藤ほか, 2010)。今年、70 日間に渡る水中グライダーの連続観測に成功しましたが、今後はこのような新測器を用いて、新たな視点から混合水域の役割について考察していきたいと考えています。

## 謝辞

学生時代にご指導頂いた金成誠一先生には公私に渡り、お世話になりました。同じくご指導頂いた竹内謙介先生には、海洋学の醍醐味を教わるとともに、どんなに邪魔されても研究を続ける忍耐力を授けて頂きました。先輩にあたる大島慶一郎さん、見延庄士郎さん、柏野祐二さん、深町康さん、立花義裕さん、佐藤晋介さん、渡邊達郎さん、同期の中村啓彦さん、菊池隆さん、後輩にあたる野中正見さん、乾朋子さん、細田滋毅さん、鈴木立郎さんをはじめ多くの同窓の方にお世話になりました。同窓の方々と学生時代に行った輪読で得た知識が、今でもすべての基本となっています。また、日比谷紀之さん、久保川厚さん、若土正暁さんはじめ北海道大学のたくさんの方から研究面でいろいろな助言を頂きました。水産研究所に入ることやその後の研究方針について、安田一郎さんからたくさんのご助言を頂きました。水産研究所に入って右も左もわからないときに、友定彰さん、稲掛伝三さん、清水勇吾さん、松尾豊さん、横内克己さん、

杉崎宏哉さん、山下洋さん、河村知彦さんを初め多くの方にご指導頂きました。その後も、奥田邦明さん、平井光行さん、山田陽巳さん、加藤修さん、渡邊朝生さんらに直接ご指導頂くとともに、和田時夫さん、石田行正さん、谷津明彦さんら水産総合研究センターの諸先輩にご指導いただきました。そのほかにも、プロジェクト研究を中心に、中田薫さん、大関芳沖さんらに牽引して頂き、感謝しております。笈茂穂さん、奥西武さん、和川拓さん、植原量行さん、鹿島基彦さん、館澤みゆきさん、志藤文武さん、佐藤政俊さん、大野創介さんをはじめとする海洋動態グループ（研究室）の方々には、研究そして種々の業務の遂行から公私に渡り助けて頂いたことに感謝しております。そして歴代の海洋動態グループの臨時職員の方々には、いつも無理難題をこなして頂き、心より感謝しております。齊藤宏明さん、桑田晃さん、田所和明さん、岡崎雄二さん、神山孝史さん、高橋一生さん、吉江直樹さん、岡本誠さん、李雅利さん、井出恵一郎さん、内川和久さん、一宮睦夫さん、中町美和さん、西部裕一郎さん、谷内由貴子さん、渡辺剛さん、佐々木裕愛さん、をはじめとする旧海洋環境部の中で研究を推進してくださった方々に感謝致します。そして、栗田豊さん、成松庸二さん、上野康弘さん、巢山哲さん、中神正康さん、坂見知子さん、玉手剛さん、伊藤正木さん、服部努さん、稲川亮さん、矢野寿和さんをはじめとする東北区水産研究所の共同研究者の方々に感謝します。東日本大震災後は、観測を一緒に展開して頂き感謝しています。

PICES モデルタスクチームでは、岸道郎さん、Bernard A. Megrey さん、Francisco E. Werner さん、Kenny A. Rose さん、Salvador E. Lluch-Cota さん、Enrique N. Curchitser さん、Dag Hay さん、Rob A. Klumb さん、Vera Agostini さん、Larry Jacobson さんをはじめ、たくさんの方々に公私に渡りお世話になりました。

学会発表まで含めると項数制限を超えてしまうので、論文もしくは紀要で共著者となって頂いた方々に絞らざるをませんが、以下の方々に共同研究して頂きました。亀田卓彦さん、日下彰さん、小松幸生さん、瀬藤聡さん、黒田寛さん、奥野章さん、安倍大介さん、小埜恒夫さん、川崎康寛さん、葛西広海さん、高須賀明典さん、森岡泰三さん、八木宏さん、杉松宏一さん、上原伸二さん、田中博之さん、藤井一則さん、板倉茂さん、藤本賢さん、帰山秀樹さん、山村織生さん、小倉末基さん、田邊智唯さん、村上眞裕美さん、清水学さん、秋山秀樹さん、斉藤勉さん、田永軍さん、森康輔さん、増島雅親さん、川崎清さん、廣江豊さん、久保田洋さん、川端淳さん、市川忠史さん、吉村拓さん、村岡大祐さん、西敬和さん、中山哲巖さん、藤井良昭さん、佐々木克之さん、清水大輔さん、高柳和史さんをはじめとする水産総合研究センターの方々。永木利幸さん、早乙女忠弘さん、武士和良

さん、佐藤晋一さん、小日向寿夫さん、田中淳也さん、横澤祐司さん、佐伯光広さん、小野寺恵一さん、上野山大輔さん、佐藤利幸さん、高杉知さん、松本育夫さん、吉田哲也さん、白石一成さん、本間隆之さん、上田賢一さん、内山雅史さん、岡部勤さん、伊藤寛さん、蝦名浩さん、田中一志さん、須能紀之さん、野澤清志さん、渡野邊雅道さん、黒田敬子さん、米沢純爾さん、橋本浩さん、立石章治さん、小泉康二さん、森訓由さん、渡辺謙太郎さん、菊谷尚久さんをはじめとする水産試験研究関係機関の皆様。伊藤幸彦さん、吉成浩志さん、向井大樹さん、津田敦さん、桜井泰憲さん、岩橋雅行さん、木津昭一さん、磯田豊さん、市川香さん、高山智美さん、乙部弘隆さん、三宅秀男さん、花輪高雄さん、山中康裕さん、藤井賢彦さん、広瀬直毅さん、早川真紀さん、鈴木光次さん、今脇資郎さん、馬谷紳一郎さん、内田裕さん、古谷研さん、帰山雅秀さん、塩本明弘さん、照井健志さん、青木久美子さん、尹宗煥さん、宮尾孝さん、石川孝一さん、神谷ひとみさん、倉賀野連さん、岩尾尊徳さん、中野俊也さん、蒲地政文さん、四竈信行さん、野尻幸宏さん、相田真希さん、橋岡豪人さん、宮澤泰正さん、角田智彦さん、中山智治さん、千葉早苗さん、平譚亨さん、建部洋晶さん、坂本天さん、須股浩さん、岡田直資さん、屋良由美子さん、佐々木良さん、橘田隆史さん、渡部敏昭さん、白井慎太郎さん、佐藤博さんをはじめとする国内の皆様。Kyung-Il Chang さん、Skip McKinnell さん、Lynne D. Talley さん、Harold Batchelder さん、Anne B. Hollowed さん、Mannuel Barange さん、Suam Kim さん、Harald Loeng さん、Myron A. Peck さん、Muyin Wang さん、Eric Firing さん、Christopher Moore さん、Franklin B. Schwing さん、Roy Mendelssohn さん、Steven J. Bograd さん、James E. Overland さん、Arthur J. Miller さん、Ken Drinkwaer さん、Keith Brander さん、Svein Sundby さん、James Hurrell さん、Dimitris V. Politikos さん、George Triantafyllou さん、George Petihakis さん、Kostas Tsiaras さん、Stylianios Somarakis さん、Baris Salihoglu さん、Susanne Neuer さん、Suzanne J. Painting さん、Raghu Murtugudde さん、Eileen E. Hofmann さん、John H. Steele さん、Raleigh R. Hood さん、Louis Legendre さん、Michael W. Lomas さん、Jerry D. Wiggert さん、Zouhair Lachkar さん、George Hunt さん、Christopher L. Sabine さんをはじめとする海外研究者の皆様。

そして、海の上で苦楽をともにした若鷹丸をはじめとする各調査船の乗組員の皆様に厚く御礼を申し上げます。ここには書ききれない多くの方々のおかげで、今回の受賞があったことに改めて深くお礼申し上げます。参考文献については、項数の関係上、省かせて頂きました。<http://cse.fra.affrc.go.jp/goito/pub/Bibliography.htm> を参照頂ければ幸いです。