

## 2. 気候変動に伴う水産資源・海況変動予測技術の革新と実利用化

五十嵐 弘道<sup>1\*</sup>・淡路 敏之<sup>1,2</sup>・蒲地 政文<sup>1,3</sup>・石川 洋一<sup>1,2</sup>・  
杉浦 望実<sup>1</sup>・増田 周平<sup>1</sup>・土居 知将<sup>1</sup>・碓水 典久<sup>3</sup>・  
藤井 陽介<sup>3</sup>・豊田 隆寛<sup>3</sup>・日吉 善久<sup>1</sup>・佐々木 祐二<sup>1</sup>・  
齊藤 誠一<sup>4</sup>・酒井 光夫<sup>5</sup>・加藤 慶樹<sup>5</sup>・佐藤 晋一<sup>6</sup>

<sup>1</sup>海洋研究開発機構 (〒236-0001神奈川県横浜市金沢区昭和町3173-25)

<sup>2</sup>京都大学理学研究科 (〒606-8502 京都府京都市左京区北白川追分町)

<sup>3</sup>気象庁気象研究所 (〒305-0052 茨城県つくば市長峰1-1)

<sup>4</sup>北海道大学水産科学研究所 (〒041-8611 北海道函館市港町3-1-1)

<sup>5</sup>水産総合研究センター遠洋水産研究所 (〒236-8648 神奈川県横浜市金沢区福浦2-12-4)

<sup>6</sup>青森県産業技術センター水産総合研究所 (〒039-3381 青森県東津軽郡平内町大字茂浦字月泊10)

\* E-mail: [higarashi@jamstec.go.jp](mailto:higarashi@jamstec.go.jp)

文部科学省「気候変動適応戦略イニシアチブ」では、最先端のデータ同化技術を駆使して、地球温暖化等の気候変動に伴い激変の恐れのある海洋循環・生態系統合環境の状態推定ならびに中期水産資源変動の予測とピンポイント漁場探索技術の一体的開発を、北太平洋に棲息するアカイカを対象として2010年度より行っている。その結果、これまでの研究で未開発であった実利用レベルのアカイカHSIモデルの開発に成功し、アカイカの好適棲息環境の評価にもとづく漁場探索が可能となった。この結果は、燃油消費を削減し、収益の確保と資源管理の両立による持続可能な新漁業モデルの構築に資するものである。

**Key Words :** *climate change adaptation, ocean data assimilation, fishery stock management*

### 1. はじめに

漁業資源の空間分布や時間的変動に、気候や海洋環境の変動が強く影響を及ぼしていることは既に多くの研究で明らかにされている<sup>1)</sup>。しかし、顕在化しつつある地球温暖化等の気候変動に伴って激変する恐れのある水産資源変動や漁場の予測及び適応策の策定を実用レベルにまで高めるには、気候変動や海洋物理・生態系環境の状態推定を整合的・統一的に行い、海洋循環予測に関する不確定性を低減する技術が必要となる。

データ同化は気候変動に大きな影響を受ける統合的な海洋環境変動の再現性を高め、予測精度を向上させる有効な手法として、世界的に注目を集めている。この技法は最適化理論に基づき、観測データと数値モデルの双方の利点を組み合わせて現実的なデータセットを作成する

手法である。データ同化により作成された再解析データセットは、断片的にしか得られない観測データに比べ、未欠測かつ全格子点で過去の現実的な海洋環境場をアーカイブしているため、定量的な解析を行う上で有効である。さらに、高度なデータ同化手法を用いれば、力学的バランスを保持したモデル予測の初期値を得ることができるので、気候変動予測の精度向上や最近では資源変動や漁場形成などの水産分野への応用が期待されている。

このような事情から、平成22年度より開始された文部科学省プロジェクト「気候変動適応戦略イニシアチブ」の「気候変動に伴う水産資源・海況変動予測技術の革新と実利用化」研究開発では、北太平洋に棲息し、青森県の主要な漁獲対象魚種の一つである外洋性のアカイカを突破口に、海の天気予報結果を利用して漁場探索技術の高度化をはかる「ピンポイント短期漁場探索」と、長期

間の海洋再解析や大気海洋結合モデルを用いて季節から経年スケールの海洋環境変動の予測を行い、資源量変動を予測する「中期水産資源推定技術開発」という、2つの研究開発を開始した。気候変動下での持続可能な漁業には、水産資源管理技術と漁場探索技術の一体的活用が重要である。

本稿では、このプロジェクトで実施中のデータ同化システムを用いた気候変動予測技術の水産分野への応用に関する現状の成果を示すとともに、その将来展望について議論する。

## 2. ピンポイント短期漁場探索

このサブテーマでは、海の天気予報で得られた海況予測結果をもとに、アカイカの好適棲息域を数日～1週程度のスケールで推定することが目標である。アカイカの主な漁場である北太平洋の三陸沖では、メソスケールの渦やストリーマーといった数日スケールで変動する現象が卓越しており、これに伴いアカイカの漁場分布も日々変化している。従って、これらの現象を精度よく予測すれば、アカイカの好適棲息域の推定に有利である。先行研究では、海面水温、海面高度などの衛星リモートセンシングデータを用いた試みはなされているが<sup>2)</sup>、海洋環境の予測やアカイカの生態に重要な100-150m付近の垂表層水温などの環境要素の推定はなされていない。餌環境をあらわすクロロフィル量は衛星から観測されるが、雲域では計測不可能のため、その出現頻度が比較的高い三陸沖では欠損が多くなる。このような場合、海況予測システムに低次生態系モデルを組み込めば、基礎生産量などを再現し予測できるため、漁場形成における餌環境の影響を直接評価することが可能となる。

本研究では、超高分解能多重海洋ダウンスケーリングシミュレーションによる高精度な海洋環境場の予測値を用いて、対象魚種の適性環境を定量化して資源分布を推定するHSI (Habitat Suitability Index: 好適棲息域) モデルにより、効率的なピンポイント漁場予測手法の開発を目標としている。

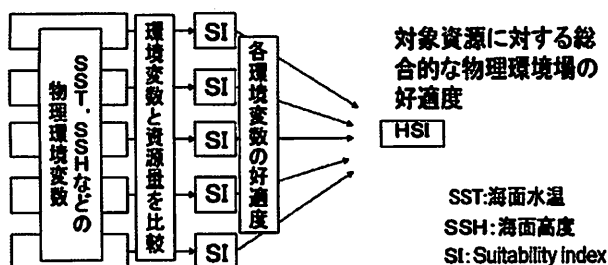


図-1 HSIモデルの概念図

### (1) HSIモデル

HSIモデルは、対象魚種の資源量とその海域の環境変数を用いて、各環境変数と資源量を統計的に比較し、環境変数の値ごとに、対象魚種の棲息程度を数値化した suitability index (SI) を求め、それらを統合して、環境場がどの程度好適であるかを示す総合的な指標である HSI 値を求めるというものである (図-1)。

本研究の対象魚種であるアカイカは、寿命が1年であるため、数年以上の寿命を持つ魚種に比べて卓越年級の影響が小さく、餌環境である低次生態系や適正水温などの環境の変化に対する資源変動へのレスポンスが顕著であろうと考えられる<sup>3)</sup>。先行研究では、アカイカ秋生れ群を対象魚種として北太平洋の日付変更線付近における HSI モデルを作成し、好適物理環境を推定する研究を行っている<sup>4)</sup>。その結果を見ると、物理環境場の変動を反映したアカイカの好適棲息域がある程度推定できていることから、アカイカの資源量や空間分布が海洋物理環境変動の影響を少なからず受けていることが推察される。しかしながら、推定された HSI 分布と、漁船による実測値である CPUE (単位努力量当たり漁獲量: Catch per unit effort) の分布を詳細に比較すると、必ずしも HSI が CPUE の結果と符合していない。また、これまでの研究で作成されたアカイカの HSI モデルは、海洋物理環境データとして月平均値しか使用されておらず、日々変化するアカイカの漁場を高い精度で予測するには大幅な改良が必要である。

そこで本研究では、まず、実利用に耐えうる時間スケールのデータからアカイカ漁場を推定することができるかを明らかにするために、中規模渦が解像可能な数日スケールの海面水温、海面高度といった海洋物理環境データを HSI モデルに適用することで、三陸沖におけるアカイカ冬・春生れ群の好適棲息域の推定がどの程度を可能かを調べた。具体的には、青森県所属の標本船によるアカイカ漁獲量データ、東北大学が作成・公開している海面水温データ、及び AVISO (Archivage, Validation et Interpretation des donnees des Satellites Oceanographiques) が公開している NRT-MADT (Near Real Time-Merged Absolute Dynamic Topography) 海面高度データの2種類である。2000-2006年の各年1-2月の期間における、それぞれの日平均データを HSI モデルに適用し推定した2007年の HSI 分布と、実際の2007年の観測値の比較を行い、性能を評価した。なお、本研究では、海面高度の値そのものに加えて、新たに海面高度の勾配を環境変数として採用した。まず、海面水温、海面高度、海面高度の勾配の3変数に対し、規格化したアカイカ CPUE との関係から SI 曲線を求め (図-2)、式(1)で定義する HSI 値を求めた。

$$HSI = \sqrt[3]{SI_{SST} SI_{SSH} SI_{\nabla SSH}} \quad (1)$$

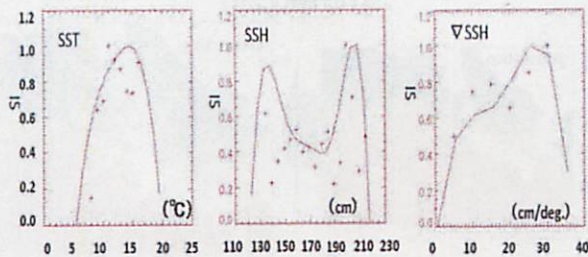


図2 海面水温(SST)・海面高度(SSH)・海面高度の勾配(∇SSH)についてのSI曲線

ここで $SI_{SST}$ ,  $SI_{SSH}$ ,  $SI_{\nabla SSH}$ は、それぞれ海面水温、海面高度、海面高度の勾配に関するSIである。

次に、HSIモデルを用いて、アカイカ漁獲量が特に多かった2007年2月15日を対象に、好適棲息度を推定して、その分布図を作成した。図-3は色表示でHSI分布を示しており、青から赤にかけてHSI値が大きくなる。また、図中の□印は観測されたCPUEの位置と大きさを示しており、大きいほどCPUEの値は大きい。

モデル結果を見ると、高気圧性渦の中心部分に相当する濃い青色部分の領域はアカイカにとって好適ではないと判定される。これに対し、濃い赤色が集中している流れの速い渦の縁部分は好適棲息域と推定できる。アカイカの操業結果では、有効な漁獲は渦の北縁のみで、ここでは渦活動により下層からの栄養塩の供給が期待できるとともに、親潮と黒潮の境界でもあり、栄養塩の豊富な冷たい親潮の水が暖かい黒潮の水に取り込まれ、栄養塩の更なる供給がもたらされると考えられる。これらの2つの効果により、この領域は周囲に比べて光合成活動が活発化して、プランクトン量が豊富となり、好適な生息域が形成されたと推定できる。

以上のHSIモデルでは、アカイカの摂餌環境を直接的に表現する生態系変量を使用していないが、図-3に見られるように、海面高度とその勾配を変数として用いることで、渦の北縁にHSI値の高い領域が集中するという特徴をよく表現できていると言える。この結果は、日々のデータから漁場推定に効果的な生態系データを抽出し

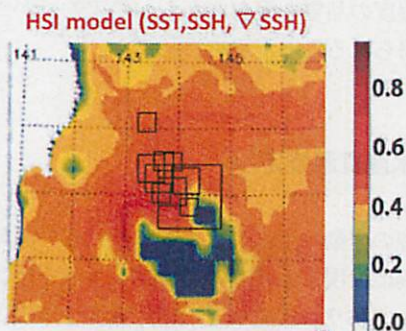


図3 HSIモデルにより推定された2007年2月15日のアカイカ好適棲息域分布 (三陸沖)

てHSIモデルに導入すれば、実利用に耐える漁場推定を行うことができることを示唆している。

ここで示したHSIモデルは、衛星観測による海表面のデータのみを用いて構築したものである。一方、海洋物理環境変数を水平・鉛直の3方向に拡張できるよう開発された気象研究所の海洋大循環データ同化システムMOVE (MRI Multivariate Ocean Variational Estimation)<sup>5)</sup>では、船舶等の観測による水温・塩分プロファイル、AVISOによる海面高度、気象庁作成の海面水温データ<sup>7)</sup>をモデルに同化して、水平解像度 $1/10^\circ$ でメソスケールの渦を解像するとともに、水温・塩分結合鉛直EOFモードを用いることにより、海洋表層だけでなく亜表層の水温・塩分場や流速場の解析値を求めるポテンシャルを有している。その1例として、2003年4月10日の東北沖周辺の海面水温分布を図-4に示す。渦解像モデルを用いることにより、東北沖のシャープな水温フロントが再現されている。また、同化に未使用の衛星画像との比較により、親潮の沿岸分枝の南下位置やその東の暖水渦、さらに、津軽暖水の張り出しの様子など、現実の状況が精度よく再現されていることが分かる。このように、渦の構造を精度よく再現したMOVEを好適棲息域推定に用いることで、高精度の漁場予測につながるものが、図-3の結果から示唆される。

さらにまた、次節で紹介するインクリメンタル4次元変分法(4DVAR)を用いて超高分解能の海洋ダウンスケーリング技術を開発し、海洋環境場の診断と予測を一層時空間的に高分解能化すれば、ピンポイント漁場探索用HSIモデルのさらなる高度化が行えると推察されるが、そのような顕著事例研究は今後の課題として残っている。

## (2) 超高分解能多重海洋ダウンスケーリング

従前のネスティング技法を用いて高分解能内部ターゲット領域の初期値及び境界値のデータを求めると、一般にはそれらの力学的整合性は保証されないためにノイズが発生して予測場は汚染され、良好な予測精度が得られない可能性がある。このような問題を緩和できる新たな

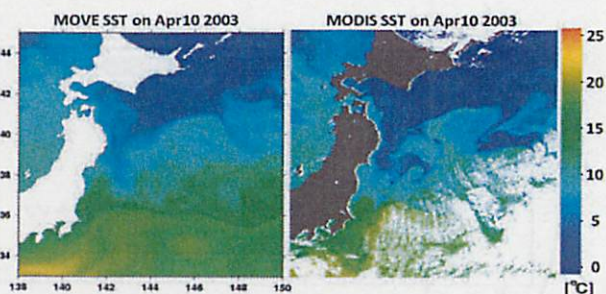


図4 2003年4月10日の海面水温の比較 (左) MOVEの結果 (右) 衛星画像

ダウンスケーリング手法として4次元変分法を用いた新たなダウンスケーリング法であるインクリメンタル4DVAR<sup>®</sup>が注目を集めている。

インクリメンタル4DVARは当初、計算負荷が大きい高分解能のフォワードモデルを用いて4次元データ同化を行う際に、対となるアジョイントモデルとしては低分解能のものを近似的に用いることにより、計算コストを下げる手法として開発された。この手法は、以下に示すように定式化すれば、高精度の高分解能ダウンスケーリングデータセットを作成する手段として用いることができる。

インクリメンタル4DVARの評価関数は、通常の4DVARにおける制御変数 $x$ を解析インクリメント $\Delta x = x - x^b$ で置き換えることにより、次式のように表わされる。

$$J = \Delta x^T B^{-1} \Delta x + (M(x^b) + M \Delta x - y)^T R^{-1} (M(x^b) + M \Delta x - y) \quad (2)$$

ここで、制御変数  $x$  の初期推定値を  $x^b$ 、観測データを  $y$ 、数値モデルを  $M$  で表わしている。  $B$  は背景誤差、  $R$  は観測誤差を表す。また  $M$  は  $M$  の接線形モデルである。評価関数を(2)式のように定義すれば、もともとの非線形モデルではなく、接線形モデルとそのアジョイントモデルを用いて最適化が行える。

図-5に、インクリメンタル4DVARの解析手順を模式的に示す。高分解能のフォワードモデルの計算で得られた結果と観測データとの偏差から制御変数の修正量を求める際に、フォワードモデルと同じ解像度のアジョイントモデルではなく、低分解能の接線形モデルとアジョイントモデル（内側のループ）によって最適化計算を行い、その結果を高分解能モデル（外側のループ）に戻して計算を行うという一連の操作を、観測データとの差を最小化するまで繰り返すことにより、高分解能ネスティング場の現実的な解析値を得ることが理論上可能となり、誤差評価も行える。

図-6に、インクリメンタル4DVARの有効性の評価対象とした京都大学海洋大循環モデルによるネスティング

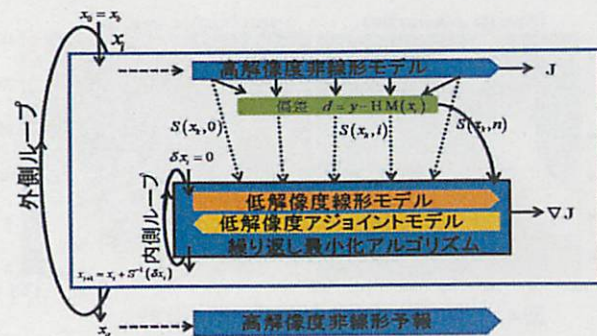


図-5 インクリメンタル4DVARの模式図

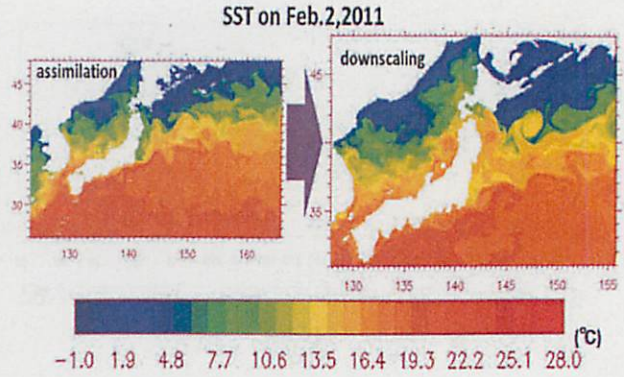


図-6 4DVAR で得られた海面水温分布  
(左)再解析データ (右)ネスティング結果

の現状を示す。左図は4DVARを用いて得られた空間分解能 $1/6^\circ \times 1/8^\circ$ の再解析データである。右図はこの再解析データの結果を初期・境界条件として与えたネスティング計算の結果で、空間分解能は $1/18^\circ \times 1/24^\circ$ である。

ネスティング結果を再解析データと比較すると、黒潮続流域や亜寒帯フロントなどの強流帯がよりシャープになっており、二つのフロント間の混合水域に出現する中規模変動の再現性が改善されるなどの効果が確認できる。しかしながら、日本海及び太平洋の日本沿岸や亜熱帯循環のいくつかの海域において、ネスティングの結果には高温バイアスが見られる。再解析データでは観測データが同化されているので、これらの海域でも現実的な水温場となっていることを考えると、ネスティング法によるダウンスケーリングによって、現実から離れた場となったと理解できる。原因としては、分解能が高まり強流の再現が可能となったが、それに伴い黒潮続流や対馬暖流による下流側への熱流量が増加して高温バイアスが生じたためだと考えられる。現状のネスティングのアプローチでは、モデル間バランスの不整合により、このような高温バイアスの防止は難しいが、インクリメンタル4DVARを用いれば、対象領域全体で観測結果に適合するバランスのとれた場を得ることは理論上可能なので、ダウンスケーリングにより生じたバイアスを抑制し、同化時と同程度の品質を保ちながら、現実的かつ高分解能の場が得られることが示唆される。

### 3. 中期水産資源推定

水産資源の変動は主に加入期と呼ばれる、成長した稚仔魚が漁場に出現する時期の環境場が大きく影響していると言われており、水温などの物理環境や基礎生産量などの生物・化学環境の経年変動が資源変動の支配要因として重要である。このサブテーマでは、季節スケール以

上の物理環境場および生物・化学環境場を再現・予測するための大気・海洋物理・海洋低次生態系結合データ同化システムを構築し、海洋環境場から水産資源変動を復元できる統計モデルを開発・改良することで、半年から数年先の資源量変動を予測することを目標としている。海洋研究開発機構地球情報研究センターではこれまで大気海洋結合データ同化システムを用いた半年から数年の気候変動予測実験を行ってきており、ENSOの1.5年先行予測に成功する<sup>9)</sup>など十分な実績をもつ予測システムである。このシステムに低次生態系モデルを組み込むことにより、基礎生産量の空間分布や経年変動についても中期予測が可能なシステムに拡張する。これによって、これまでの資源量推定では、物理環境との統計的な関連をもとに見積もられてきた基礎生産量を、湧昇流による栄養塩の供給などの物理過程から光合成といった生物過程までを総合的・整合的に推定することが可能となる。こうして得られた物理、生物環境場の経年変動とアカイカの資源変動との関連をもとに資源変動モデルを作成すると、不確定性の低減や予測精度の向上、予測期間の延長に役立つと考えられる。

### (1) 3圏結合同化システム

海洋研究開発機構地球情報研究センターでは、中期水産資源推定のベースとなる大気・海洋・低次生態系多圏統合データ同化システムの骨格部分である大気海洋結合データ同化システムを、4DVARを用いて開発している<sup>9)</sup>。これにより、季節から経年スケールの気候変動を対象に、1990-2006年の大気海洋陸域の状態を統合的に表現したデータセットを作成した。さらに、結合同化によって再現された大気海洋結合場から予測をスタートさせることにより、エルニーニョやインド洋ダイポールモードといった季節経年変動スケールの予測スキルが格段に向上させることに成功した。本研究の対象魚種であるアカイカが棲息している北太平洋域では、北太平洋十年規模振動(Pacific Decadal Oscillation: PDO)<sup>10)</sup>と呼ばれる現象が卓越している事がわかっているが、PDOについても結合同化により現実の状態をよく再現できたデータセット(図-7)が作成できていると共に、経年変動予測についてもある程度成功している。図-7(下)は、1993年1月の結合再解析データを初期値に用いて行ったPDOの予測実験の結果で、大気海洋結合系が持つ長周期変動のメモリー機能を活用できるようチューンアップしてモデルの時間積分を行えば、実験開始5年後の1998年に起こったレジームシフトと呼ばれるPDOの急変を再現できることがわかる。

このシステムに、NPZDモデルと呼ばれる、栄養塩(Nutrient)・植物プランクトン(Phytoplankton)・動物プラン

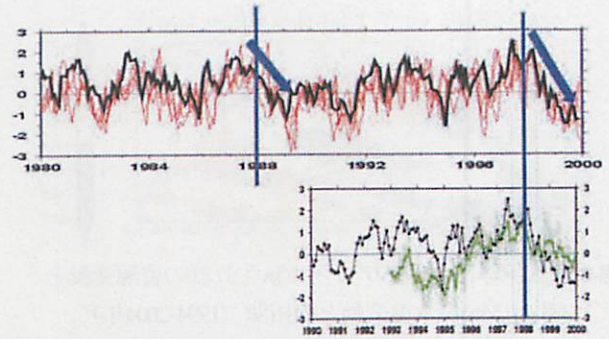


図-7 結合同化によるPDO indexの時系列

(上) 再解析値, (下) 1993年からの予測  
黒線が観測値, 赤線が再解析値, 緑線が予測値  
青矢印はレジームシフトと呼ばれる変動の急変

クトン(Zooplankton)・デトリタス(Detritus)の各量を診断できる低次生態系モデルを組み込み、大気・海洋環境場の中期変動を統合的・整合的に求めれば、海洋生態系プロセスを介した海洋環境変動と水産資源変動との関連を直接的に診断・予測できることが示唆される。実際、海洋データ同化システムで得られた現実的な海洋物理場を用いたNPZDモデル実験の結果を図-8に示す。北太平洋循環域の主な湧昇域である赤道付近(0-10°N)と亜寒帯域(30°N以北)では下層から栄養塩が供給され、それに対応して植物及び動物プランクトン量が多い領域が出現しており、プランクトン量の現実的な空間分布がよく再現されている。特に30°N付近にはdeep chlorophyll maximumと呼ばれる、混合層内の生態系鉛直微細構造を特徴づけるクロロフィル極大現象が再現されている。このように、4DVAR海洋同化プロダクトを用いて、現実を精緻に再現できる海洋物理環境場に低次生態系モデルを適用すれば、良好な生態系環境場を求めることができる。また、この同化プロダクトは、物理量と熱量が保存しているため、17年間という長期にわたるオンラインでの積分が可

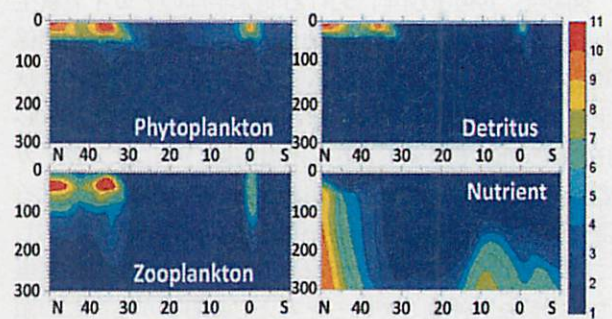


図-8 海洋同化プロダクトを用いたNPZDモデル実験により得られた日付変更線における南北鉛直断面。値は1990-2006年の気候値。横軸は北緯(度)、縦軸は深さ(m)。(左上)植物プランクトン量、(左下)動物プランクトン量、(右上)デトリタス量、(右下)栄養塩量。

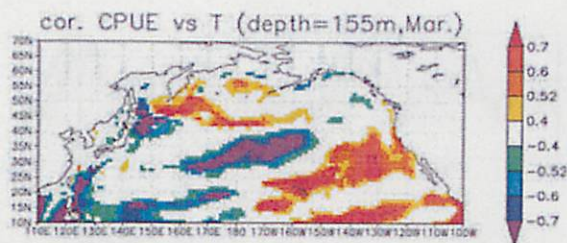


図9 北太平洋におけるアカイカ秋生れ群の資源変動と3月の155m深水温変動との相関（1994-2004年）。暖色は正相関、寒色は負相関を示す。

能である。

開発した3圏同化システムを用いて、海洋物理・低次生態系の現場観測データや最新の衛星観測データ等、多種多数のデータを融合すれば、中期水産資源変動予測の不確実性低減へのチャレンジは可能となるが、検証も含め今後の課題である。

## (2) 水産資源推定モデル

3圏結合同化再解析データセットをベースに、過去に観測されたアカイカの資源変動と北太平洋における海洋環境変動との相関解析を行い、アカイカの中長期的な資源予測に用いる資源推定統計モデルを開発する。先行研究<sup>11)</sup>において、国際的なモラトリアムによって流し網漁が行われなくなった1994年以降の北太平洋におけるアカイカ秋生れ群の資源変動と、27°N・160°W付近の躍層に相当する深度における水温・塩分との間に有意な相関があり、海面水温を用いるよりも躍層付近のデータを用いた方がより精度よくアカイカ秋生れ群資源変動を再現できることが示されている。本研究ではこの結果を踏まえ、さらに詳細な解析を行い、アカイカ資源変動統計予測モデルの構築及びその将来予測の精度向上を図った。

図-9は、1994-2004年における北太平洋のアカイカ秋生れ群の資源変動と同年3月の155m深水温変動との相関係数分布を示したものである。この結果から、アカイカ秋生れ群の生育域<sup>12)</sup>であるとされている30-35°N、160E-160°Wの領域で、平年よりも水温が低い年にはアカイカ資源量が多くなっている事がわかる。この領域における混合層の水温変動は、下層からの湧昇流の強弱に対応しているが、この変動はプランクトン生産に必要な栄養塩の供給量とも連動していると考えられる事から、この領域におけるプランクトン生産量の変動がアカイカ資源量に影響を及ぼしていると推察される。また、相関係数の空間パターンはPDOのパターンと類似しており、アカイカの資源変動にPDOが深く関与している事が示唆される。従って、3圏統合データ同化システムによるプロダクト

を用いて確度の高いPDO予測を行い、さらに低次生態系プロダクトから栄養塩輸送の正確な見積もりを行うことができれば、より不確実性を低減した形でのアカイカ秋生れ群の資源変動予測を行うことが可能になると期待できる。

## 4. まとめと今後の展開

ここまで述べてきたように、「気候変動に伴う水産資源・海況変動予測技術の革新と実利用化」研究開発プロジェクトでは、データ同化システムとそれから得られるプロダクトを有効に水産分野へ応用できるよう取り組み、その結果、これまでの研究で未開発であった、数日スケールの海洋環境変動を取り込んだ実利用レベルのアカイカHSIモデルの開発に成功し、アカイカの好適棲息環境の評価にもとづく漁場探索が初めて可能となった。さらに、餌環境を通じてPDOと密接に関係しているアカイカ秋生れ群の資源変動は、3圏同化システムを用いると、資源変動予測が可能になる事を示すなどの新成果が得られた。加えて、ピンポイント漁場探索の更なる精度向上に向けたアプローチとして、インクリメンタル4DVARの理論的骨組みとその有効性を示した。

海洋観測データなどを用いた同様の研究開発はこれまでも行われてきたが、例えば表層の海洋環境場と垂表層の環境場の関連や物理環境場と生物環境場を統計的に結びつけて推定することがほとんどであったのに対し、本研究で示したデータ同化を用いた推定では、物理法則や生物化学過程のより基本的な関係に基づいているので、気候変動状況下においても高精度の推定・予測に資するものと考えられる。

本研究ではアカイカを取り上げて、データ同化の水産への応用を試みた。データ同化の有効性は他の魚種に対しても同様であると予期されるので、地球観測データを一層活用して、他の魚種への拡張についても検討を行っていききたい。

謝辞：本研究は文部科学省の委託業務「気候変動適応戦略イニシアチブ・気候変動適応研究推進プログラム」のうちの「気候変動に伴う水産資源・海況変動予測技術の革新と実利用化」による成果である。

## 参考文献

- 1) 杉本隆成：海流と生物資源, pp.9-23, 成山堂書店, 2004.
- 2) Zainuddin M., Saitoh K. and Saitoh S.: Albacore (*Thunnus alalunga*) fishing ground in relation to oceanographic conditions in the western North Pacific

- Ocean using remotely sensed satellite data, *Fisheries Oceanography*, Vol.17, pp.61-73, 2008.
- 3) Ichii T., Mahapatra K., Okamura H. and Okada Y.: Stock assessment of the autumn cohort in the North Pacific based on past large-scale high sea driftnet fishery data. *Fisheries Research*, Vol.78, pp.286-297, 2006.
- 4) Tian S., Chen X.J., Chen Y., Xu L. and Dai X.: Evaluating habitat suitability indices derived from CPUE and fishing effort data for *Ommastrephes bartramii* in the northwestern Pacific Ocean, *Fisheries Research*, Vol.95, pp.181-188, 2009.
- 5) Usui N., Tsujino H., Fujii Y. and Kamachi M.: Short-range prediction experiments of the Kuroshio path variabilities south of Japan, *Ocean Dynamics*, Vol.56, pp.607-623, DOI 10.1007/s10236-006-0084-z, 2006.
- 6) Fujii Y. and Kamachi M.: A reconstruction of observed profiles in the sea east of Japan using vertical coupled temperature-salinity EOF modes, *J. Oceanogr.*, Vol.59, pp.173-186, 2003.
- 7) 栗原幸雄, 桜井敏之, 倉賀野連: 衛星マイクロ波放射計, 衛星赤外放射計及び現場観測データを用いた全球日別海面水温解析, 測候時報, Vol.73, pp.S1-S18, 2006.
- 8) Laroche S. and Gauthier P.: A validation of the incremental formulation of 4D variational data assimilation in nonlinear barotropic flow, *Tellus*, Vol.50A, pp.557-572, 1998.
- 9) Sugjara N., Awaji T., Masuda S., Mochizuki T., Toyoda T., Miyama T., Igarashi H. and Ishikawa Y.: Development of a four-dimensional variational coupled data assimilation system for enhanced analysis and prediction of seasonal to interannual climate variations, *J. Geophys. Res.*, Vol.113, C10017, doi:10.1029/2008JC004741, 2008.
- 10) Mantua N.J., Hare S.R., Zhang Y., Wallace J.M. and Francis R.C.: A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol.78, pp.1069-1079, 1997.
- 11) 五十嵐弘道, 淡路敏之, 豊田隆寛, 増田周平, 杉浦望実, 佐々木祐二, 一井太郎, 秋山秀樹, 畠山清: 海洋環境変動の把握技術と水産資源変動解析に果たす役割—水産海洋シンポジウム広域性水産資源と海洋環境の関係解明をめぐる課題と展望—, 水産海洋研究, Vol.73(1), pp.22-43, 2009.
- 12) Ichii T., Mahapatra K., Sakai M. and Okada Y.: Life history of the neon flying squid: effect of the oceanographic regime in the North Pacific Ocean. *Marine Ecology Progress Series*, Vol.378, pp.1-11, 2009.

(2011. 3. 31 受付)

(2011. 8. 14 受理)

## An Innovative Method of Forecasting Ocean Circulation and Fishery-resource Variabilities linked to Climate Change for Operational Use

Hikomichi IGARASHI<sup>1</sup>, Toshiyuki AWAJI<sup>1,2</sup>, Masafumi KAMACHI<sup>1,3</sup>,  
Yoichi ISHIKAWA<sup>1,2</sup>, Nozomi SUGIURA<sup>1</sup>, Shuhei MASUDA<sup>1</sup>, Toshimasa DOI<sup>1</sup>,  
Nori-hisa USUI<sup>3</sup>, Yosuke FUJII<sup>3</sup>, Takahiro TOYODA<sup>3</sup>, Yoshi-hisa HIYOSHI<sup>1</sup>,  
Yuji SASAKI<sup>1</sup>, Sei-ichi SAITOH<sup>4</sup>, Mitsuo SAKAI<sup>5</sup>, Yoshi-ki KATO<sup>5</sup>  
and Shin-ichi SATO<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

<sup>2</sup>Dept. of Geophysics, Kyoto University

<sup>3</sup>Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

<sup>4</sup>Graduate School of Fisheries Sciences, Hokkaido University

<sup>5</sup>National Research Institute of Far Seas Fisheries, Fisheries Research Agency

<sup>6</sup>Fisheries Research Institute, Aomori Prefectural Industrial Technology Research Center

An interactive platform toward the clarification and forecast of new links between ocean/climate process and both biogeochemical and fishery environments under the global warming is currently developed as a component of the on-going national research program "Research Program on Climate Change Adaptation" (RECCA). The major goal is to develop a leading-edge 4D-VAR data assimilation system to the level sufficient to provide high-impact information to the stock assessment of neon flying squid in the North Pacific and the accurate diagnosis of the fishing grounds. The technical know-how obtained here can offer a future vision for an optimal fishery stock management and adaptive fishery operation with low cost and low CO<sub>2</sub> emission, and thereby leads to a sustainable social system through the enhanced Japanese fishery activity and multi-disciplinary decision making that adapts policy to ocean and climate variations.