

東京大学大学院 新領域創成科学研究科
自然環境学専攻 海洋環境学コース 海洋生物圏環境学分野

平成 19 年度 修士論文

地球温暖化が
クロマグロおよびウナギの
初期生活史に与える影響

Effects of global warming
on the early life stages of
the bluefin tuna and the Japanese eel

2008 年 3 月提出

指導教員 木村伸吾 教授

66734 山岡直樹

目次

第1章. 緒論

1-1. クロマグロ

1-1-1. クロマグロを取り巻く現状

1-1-2. クロマグロの産卵場と産卵時期

1-1-3. クロマグロの初期生活史における卵・仔魚輸送過程

1-2. ウナギ

1-2-1. ウナギを取り巻く現状

1-2-2. ウナギの産卵場と産卵時期

1-2-3. ウナギの初期生活史における卵・仔魚輸送過程

1-3. 地球温暖化

1-3-1. 地球温暖化について

1-3-2. 地球温暖化と海洋環境

1-3-3. 地球温暖化予測

1-4. 本研究の目的

第2章. データ

2-1. 地球温暖化予測データ

2-2. 超高解像度海洋大循環モデル (OFES) データ

2-3. 解析に際してのデータの扱い

第3章. クロマグロへの影響

3-1. 解析方法

3-1-1. 粒子追跡実験による卵・仔魚輸送過程の検証

3-1-1-1. 条件設定

3-1-1-2. 粒子追跡実験

3-1-2. 適水温帯からの逸脱の検証

3-2. 結果

3-2-1. 台湾東方海域主産卵場における 2000 年現在の卵・仔魚輸送環境

3-2-2. シナリオ 1: 産卵時期が変化すると仮定した場合

3-2-3. シナリオ 2: 産卵時期が変化しないと仮定した場合

3-2-4. シナリオ 3: 産卵時期、主産卵海域が変化しないと仮定した場合

3-2-5. シナリオ 4: 地球温暖化が日本海産卵場に及ぼす影響の検討

3-3. 考察

第4章. ウナギへの影響

4-1. 解析方法

4-1-1. 粒子追跡実験による卵・仔魚輸送過程の検証

4-1-1-1. 条件設定

4-1-1-2. 粒子追跡実験

4-1-2. 適水温帯からの逸脱の検証

4-2. 結果

4-3. 考察

第5章. 総合考察

5-1. 環境変動と海洋生物資源

5-2. 海洋生物資源と地球温暖化予測研究

5-3. 海洋における地球温暖化予測研究と今後の課題

謝辞

参考文献

第1章. 緒 論

1-1. クロマグロ

1-1-1. クロマグロを取り巻く現状

2006 年の春から夏にかけて、それまで安定していたマグロ輸入価格が上昇した。我が国のマグロ輸入量の 4 割を占める台湾の乱獲是正（減産）措置が講じられたこともあり、一時は「マグロが食卓から消える」といった報道もあった。このような価格の動きの背景には、魚食のグローバル化の波に乗って世界的にマグロの需要が拡大し、それに伴う供給量減少の懸念が広がったことがある（水産庁 2007）。

われわれ日本人にとって最も馴染み深い魚のひとつであるクロマグロは、“黒いダイヤ”とよばれるほどの高級食材としての価値の高さゆえに、マグロ類の中でも一番の乱獲の対象となっている。クロマグロ *Thunnus orientalis* はスズキ目サバ亜目サバ科に属し、日本近海を中心として太平洋の温帯海域に幅広く分布する（山中 1982; Bayliff 1994, Fig. 1）。クロマグロをはじめとして、マグロ類は代表的な高度回遊性魚類、すなわち分布が一国の経済水域内に限定されず、公海や複数国の経済水域間を回遊する魚であるため、5 つの国際漁業機関の下で海域および魚種ごとに資源評価および管理が行われている。現在、クロマグロの資源評価および管理を行っているのは WCPFC（Commission for the Conservation and Management of Highly Migratory Fish Stocks in the Western and Central Pacific Ocean：中西部太平洋まぐろ類委員会）である。クロマグロの漁獲量の大半が日本の 200 海里内で獲られている（鈴木 1995）こと、また、依然として日本がクロマグロの最大消費国であることを考えると、適切な資源評価および管理に向けて努力することは我が国に課せられた国際的な責務であるといっても過言ではない。

クロマグロの適切な資源管理を行う上で必要なのが資源量の的確な把握である。本種の資源量の特徴として、加入量が経年的に変動することに加えて、数年毎に明瞭な卓越年級群が出現し、この卓越年級群によって資源量が支えられていることが挙げられる（辻 2002）。また、新規加入量の強度が生活史の初期段階で決まる（Tsuji and Itoh 1998）ことから、初期生活史に関する知見を深めることがクロマグロの資源評価および管理に不可欠であると考えられる。

1-1-2. クロマグロの産卵場と産卵時期

クロマグロの産卵に関して特筆されるのは、他のマグロ属魚類に比べて産卵場が極めて限られた水域にあり、産卵回帰の性格が強いということである。主な産卵場は 30°N 以南、日本列島南方から台湾東方にかけての南西諸島付近の黒潮流域である。産卵時期は 4 月下旬から始まり 6 月半ばを盛期として 7 月上旬に終息すると考えられている（山中 1982）。

また、日本海佐渡沖合海域において後期仔魚の採集報告があり、これらの個体は日本海で行われた産卵に起源を有するものと推測されている（沖山 1974）。水産庁の委託事業であるマリーナランディング計画の一環として 1980 年から 1988 年に行われたクロマグロ仔魚分布調査によると、クロマグロの産卵は日本海においても毎年かなりの規模で行われており、その産卵時期は南西諸島の主産卵場における産卵時期よりも 2 ヶ月遅い 8 月であるとみられている（米盛 1989）。

1-1-3. クロマグロの初期生活史における卵・仔魚輸送過程

クロマグロの主産卵場がある日本列島南方から台湾東方にかけての南西諸島付近の黒潮流域では中規模渦が発生することが多い（木村・加藤 2005）。アルゴスブイ追跡データの解析結果から、沖縄本島大東島間海域には周期およそ 15 日、200km スケールの、台湾東方海域には周期およそ 2 週間の高気圧性の中規模渦が存在することが分かっている。このアルゴスブイの結果と、前述したマリーナランディング計画でのクロマグロ仔魚分布調査の

結果から、クロマグロの仔魚がこのような渦の中に高密度で分布している傾向が確認された（加藤 2004）。ブイの渦内での滞留時間は 2 週間程度であることから、クロマグロの卵および仔魚もアルゴスブイ追跡で確認されたのと同様の滞留過程をとるものと考えられる（木村・加藤 2005）。一方で、この滞留機構に取り込まれず早期に日本沿岸の冷水海域に輸送される仔魚は早期に低水温に曝されることになるので、生残率あるいは成長速度が低下することが予測される。したがって、クロマグロの初期輸送過程において、南西諸島での中規模渦による滞留が非常に重要な要素となる（加藤 2004）。このように中規模渦によって温暖な産卵海域で数日間滞留した仔魚は、その後、黒潮に取り込まれることによって成育場である本州沿岸まで少ないエネルギーコストで輸送される（木村・加藤 2005）。

1-2. ウナギ

1-2-1. ウナギを取り巻く現状

ウナギ *Anguilla japonica* は世界中に 15 種現存するウナギ属魚類（渡邊 2001）のひとつであり、東アジア一帯に分布域を持つ。古くは万葉集の中で大伴家持が「石磨る 吾物申 夏瘦る 吉跡云物曾 武奈伎取食 売世反也（石麻呂に 吾物申す 夏瘦せに よしと云う物ぞ うなぎ取り召せ）」と詠んだように、ウナギと日本人の関わりは実に 1000 年以上にわたる。“土用の丑の日”と銘打って夏バテ防止に食される鰻の蒲焼は、今や夏の風物詩として無くてはならないものであり、日本人なら誰もが一度は口にした経験があるはずである。日本では年間 10 万トン以上のウナギが消費されており、我が国の淡水魚市場において最重要魚種のひとつとなっている。にもかかわらず、商業ベースでのウナギの完全養殖技術はいまだ確立されていないため、市場に出回るウナギのほぼすべて（99%以上）が、天然のシラスウナギを種苗とした養殖魚である（篠田 2005）。ウナギの完全養殖技術の確立を困難なものにしている要因のひとつに、生態的知見の欠如が挙げられる。降河回遊魚であり、成育場を東アジアの淡水域に、産卵場を海域に持つウナギの生態の中でも、その生活史はとくに謎に包まれた部分が多い。ウナギの生活史を解明すべく、その産卵場探索の試みが始まったのは 1930 年代に入ってからである。当初は日本沿岸を中心に日本沿岸を中心に行われた海洋調査も、より小型のウナギ仔魚（レプトセファルスさらにはプレレプトセファルス）を求めて調査回数を重ねた結果、ついにマリアナ諸島西方海域（14°N - 17°N、142°E - 143°E）において孵化後 2 - 5 日のプレレプトセファルスが採集された（Tsukamoto 2006）。これによって、この海域がウナギの産卵場であることが裏付けられた。

日本からマリアナ諸島西方海域に向かって産卵回遊する親魚、あるいは卵や産卵中の親魚が未だ発見されていないことを考えると、ウナギの生態解明にはさらなる調査を要すると考えられるが、孵化後間もないプレレプトセファルスの発見で、ウナギの初期生活史の解明はひとつの節目を迎えた。

1-2-2. ウナギの産卵場と産卵時期

ウナギはマリアナ諸島西方海域の極めて限定的な場所で産卵を行う（Tsukamoto 2006）。これまでの研究から、ウナギの産卵場を地理的に限定する要因が明らかになりつつある。このうち、緯度方向を限定するのはマリアナ諸島西方の北赤道海流域の 15°N 付近に形成される南北の水塊の境界であると考えられる。15°N 付近を境界として北赤道海流域の南側には 34.2psu よりも低塩分の水塊が、北側には 34.8psu よりも高塩分の水塊が存在する（Kimura et al. 2001）。両水塊の境界付近は表層塩分濃度が極端に変化する塩分フロントが存在しており（Kimura 2005）、ウナギはこの塩分フロントを指標として産卵回遊を行い、その南側で産卵するとされる（Kimura and Tsukamoto 2006）。また、経度方向を限定するのは南北に長く連なる海山列であると考えられる。142°E - 143°E には日本列島から伊豆・小笠原海嶺を経て西マリアナ海嶺へと 3000m 級の海山が列を成しており、西マリアナ

海嶺南端部の 15°N 付近には 3 つの海山（北から順にパスファインダー、アラカネ、スルガ）がある（Tsukamoto et al. 2003）。これらの海山列に沿って生じた磁気や重力の異常をたどって親魚は正確な産卵回遊を行うことが考えられている。それだけでなく、単独で産卵回遊を行うウナギのい集場所や隠れ家として、海山はウナギの産卵に重要な役割を果たしていると考えられる（Tsukamoto et al. 2003；篠田 2005）。すなわちウナギは東アジア一帯からマリアナ諸島西方への産卵回遊の過程で、緯度方向は 15°N 付近に形成される塩分フロントを、経度方向は 142°E - 143°E の海山列を指標とすることによって、限定的な産卵場を形成していると考えられる。

耳石の解析結果から、ウナギの産卵時期は 5 月初旬から 12 月中旬までの半年以上にわたり、そのピークは 7 - 9 月と考えられている（篠田 2004）。またウナギはその長い産卵期間を通じて連続的に産卵を行うのではなく、新月と同期してひと月に一度、周期的に産卵を行うと推測されている（Tsukamoto et al. 2003）。

1 - 2 - 3. ウナギの初期生活史における卵・仔魚輸送過程

ウナギは北赤道海流域の 15°N、142°E - 143°E 付近を産卵場としており、孵化した幼生は北赤道海流によって西方に輸送される。フィリピン東部海域において北赤道海流は南北に分岐し、南へ向かう流れはミンダナオ海流へ、北へ向かう流れは黒潮へと続く（Fig. 2(a)）。分岐位置で北へ輸送されたウナギ仔魚はそのまま黒潮に取り込まれ、東アジア一帯の沿岸に到達する（Kimura et al. 1999）。日本におけるシラスウナギの接岸は 10 月から翌年の 5 月にかけておこり、その盛期は 1 月中旬から 3 月初旬である（篠田 2004）。北赤道海流の南部（10°N - 15°N）における平均流速は 18cm/s であるのに対して、北部（15°N - 20°N）ではおよそ 1/4 の 5cm/s である（Fig. 2(b)）。したがって、適切な期間内に輸送されるためには北赤道海流域南部を輸送されることが不可欠となる。その一方で、北赤道海流域南部における輸送はミンダナオ海流への輸送の可能性を高める。これを回避するように作用するのが、北東貿易風による北向きのエクマン輸送である（Kimura et al. 1994）。フィリピン東方海域への輸送過程においてウナギの仔魚は日周鉛直運動を行い、成長に伴って夜間の分布水深は浅くなる（Otake et al. 1998）。これによって表層のエクマン輸送の効果を強く受けるようになり、分岐位置で北へ輸送されやすくなると考えられる。

1 - 3. 地球温暖化

1 - 3 - 1. 地球温暖化について

2005 年に京都議定書が採択されたことを機に、地球温暖化問題に関する社会的な関心がますます高まりつつある。2007 年 10 月 12 日、ノルウェーのノーベル賞委員会は 2007 年度のノーベル平和賞を米国のアル・ゴア元副大統領と国連の「気候変動に関する政府間パネル（IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change）」に授与することを発表した。人為起源による気候変動に関しての優れた知識を確立・普及させるとともに、気候変動に対して求められる対応策の基盤を築いた努力に対しての授与であり、地球温暖化に警鐘を鳴らすなどの功績が評価された形となった。

地球温暖化とは、人間の活動が活発になるにつれて、二酸化炭素（CO₂）やメタン（CH₄）、亜酸化窒素（N₂O）やフロン（CFCs）といった、いわゆる「温室効果ガス」が大気中に放出され、地球全体の平均気温が急激に上がり始めている現象のことをいう。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第 27 回総会（2007 年 11 月 12 - 17 日、於 スペイン・バレンシア）において承認された IPCC 第 4 次評価報告書統合報告書の政策決定者向け要約（SPM）には、気候システムに温暖化が起っており、さらにそれが人為起源の温室効果ガスの増加が原因であるとほぼ断定する旨の結論が盛り込まれた。

気候変動が自然環境および人間環境に及ぼす影響のうち既に生じている主要な影響とし

ては、氷河湖の増加と拡大、永久凍土地域における地盤の不安定化、春季現象（植物の発芽、鳥の渡り、産卵行動など）の早期化、動植物の生息域の高緯度・高地方向への移動、熱波による死亡、媒介生物による感染症リスク増加、といった現象が挙げられる。また今後、地球温暖化に伴って全休平均気温の上昇が 1.5 - 2.5℃を超えた場合、動植物の約 20 - 30%にとって、絶滅のリスクが高くなることが懸念されている（環境省 2007）。

1 - 3 - 2. 地球温暖化と海洋環境

海洋は地球表面のおよそ 70%を占めており、大気との熱や水の交換によって、地球上の気温や降水量などの分布に大きな影響を及ぼしているほか、大気との二酸化炭素交換によって、大気中の二酸化炭素濃度の変化にも深く関わっている（石井 2006）。海面から 700 m深までの世界の海水温は 1961 年から 2003 年にかけて 0.10℃上昇したことが観測によって明らかになった。また亜寒帯緯度帯での低塩分化と熱帯・亜熱帯域表層の高塩分化を特徴とする、大規模で一貫した塩分の長期変化が 1955 年から 1998 年にかけて観測された。太平洋では低塩分化がみられた一方で、大西洋やインド洋ではほぼ全域にわたって塩分の増加がみられた。これらの長期変動傾向は、降水量の変化と整合していた。地球全体の平均海面水位は上昇を続けており、1961 年から 2003 年にかけての海面水位の平均上昇率は $1.8 \pm 0.5 \text{ mm/年}$ だった（気象庁 2007a）。

今後、地球温暖化が進んだ場合、さらに顕著な影響が表れることが考えられる。温暖化は南半球よりも北半球で大きく、北極では海水の減少が加速することが予測される。21 世紀後半に夏の海水の完全な消滅を予測する報告もある。海水の融解、あるいは海水の熱膨張に起因する海面水位上昇も深刻な問題である。また、地球システム（陸域と海洋）が人為起源の二酸化炭素を吸収する効率が低下することによって、大気中に残存する二酸化炭素濃度が増加すると同時に、大気中の二酸化炭素濃度と平衡状態にある海洋の二酸化炭素濃度も増加し、海洋表層の酸性化が起こる。いくつかの報告によると、pH は産業革命期以前から現在までの 0.1 の低下に加えて、さらに 21 世紀中に 0.14 - 0.35 低下することが予測される（気象庁 2007a）。このような海洋環境の変化は特に島嶼国や沿岸域に深刻な影響を及ぼしており、海面上昇に伴う海岸侵食および低地の水没あるいは淡水資源への塩水進入が死活問題となり始めている地域もある。また、海洋環境の変化は人間社会だけでなく、海洋生物にも影響を及ぼすと考えられる。とくに、水温、塩分、流動構造といった海洋環境要因の変化は海洋生物の分布域や種組成そして現存量に変化をもたらし、ひいては海洋生態系に大きな影響を与えることが懸念される。

1 - 3 - 3. 地球温暖化予測

地球温暖化が社会経済あるいは自然環境に及ぼす影響を評価し、有効な対策を立てるためには、地球温暖化の見通しについての具体的な情報が必要である。地球温暖化がどの程度進むかは、自然変動を別にすれば、人間社会がどのような方向に発展するか大きく左右される。将来の社会の発展方向の描き方によって、エネルギー利用や土地利用変化の予測が大きく変わるため、温室効果ガスなどの排出シナリオが大きく違ってくる（気象庁 2005）。そこで、IPCC によって 2000 年にとりまとめられたのが SRES (Special Report on Emissions Scenarios) シナリオである。この温室効果ガス排出シナリオは「ストーリー・ライン」と呼ばれる 4 つのシナリオをベースにしており、それらは A1, A2, B1, B2 と記号で表される。A, B は経済志向か環境志向かを、1, 2 は地球主義志向か地域主義志向かを表しており、これらのシナリオには 1990 年から 2100 年までの温室効果ガス排出量などの想定値が定量的に示されている。例えば A2 シナリオは「多元化社会的」なシナリオであり、世界の各地域が固有の文化を尊重し、多様な社会構造や政治構造を構築していくことによって、世界の経済や政治がブロック化していくことを仮定している。このような社会

では、国や地域の間常に緊張関係が生じ、国際的な貿易や人の移動、技術の移転が制限されるため、経済発展は遅れる。地域間の格差が広がりながら、2100年の時点で人口は約150億人に達する。環境への関心が低いことに加えて技術革新も遅く、結果として温室効果ガス排出は高水準となる（環境省 2001）。このような SRES シナリオをうけて、コンピュータによるモデリングに基づく地球温暖化予測が様々な研究機関で行われている。モデルシミュレーションでは、仮想的な温室効果ガス排出量や濃度に関する仮定についての検証が行われている。その多くは、大気海洋結合気候モデルを用いて将来の気候予測を行うことで地球温暖化の影響を明らかにする、というものである。大気海洋結合気候モデルとは、気候変動に関するさまざまな要素の相互作用を表現することを目的に、大気大循環モデルと海洋大循環モデルを結合させたモデルのことである。近年の地球温暖化予測研究においては、モデル技術の飛躍的な向上に伴って、地球温暖化が進んだ場合の環境変動予測の信頼性が格段に向上し、日々進化を続けている。

1-4. 本研究の目的

本研究で対象としたクロマグロおよびウナギはともに我が国の水産業上重要な魚種である。両種に共通する特徴として、限定的な海域で産卵を行うことが挙げられる。前述したように、クロマグロでは台湾東方海域、ウナギではマリアナ諸島西方海域における産卵がそれぞれ北太平洋と東アジア一帯の資源量をまかなっている。したがって、産卵場が非限定的な魚種の資源量に比べて、これらの資源量は産卵場の環境変動の影響を受けやすいと考えられる。一般に、魚類の資源変動に関する自然環境変動の中でも、産卵から加入にいたる発生初期の生き残りという再生産機構に関連する環境要因が、その鍵を握っていると考えられている。環境要因の中で主要なものは仔稚魚期における餌料環境と、卵・仔稚魚を産卵場から生育場に輸送する機構の問題（とくに、流動場の変化による輸送・拡散）、すなわち物理環境であると言われている（平野 1978）。卵や仔稚魚は遊泳力に乏しいため、その水平方向の移動・分散には産卵海域周辺の流れの状況が大きな影響を及ぼす。流れによって産卵海域から成育に適した場所へ適切な時間内に到達できるかどうか、卵や仔稚魚の生き残りを左右する条件の一つとなる。言い換えれば、各種の魚類はそれぞれその初期生活期において、流れに対して何らかの適応をしながら、生残や繁殖に適した海域への移動を実現している。したがって、環境変動に伴いそれまで適応していた流れのパターンが変化すれば、それは資源への加入量の著しい変動を引き起こす可能性がある（中田 2004）。

これまで、エルニーニョやラニーニャ、あるいはレジームシフトといった数年、数十年スケールの短、中期的な環境変動と海洋生物の資源量との関係については、様々な研究が行われてきた（Minobe 2000 ; Kimura et al. 2001 ; Sugimoto et al. 2001 ; Chavez et al. 2003 ; Kim et al. 2007）。しかしながら、より長期的な環境変動に関しては、その予測に伴う不確実性ゆえに、これまであまり議論されてこなかった。地球温暖化もそのような長期的な環境変動のひとつであるが、前述したようなコンピュータ技術の飛躍的な向上に伴って、地球温暖化が進んだ場合の環境変動予測の信頼性は格段に向上した。最新の地球温暖化予測研究によると、地球温暖化が進むにつれてクロマグロおよびウナギの産卵海域や輸送過程においては、水温上昇、塩分の変化、風成循環の変化、熱塩循環の変化などの長期的かつ急激な海洋環境変動が生じることが予測されており、それが資源量に大きな影響を及ぼすことが危惧されている。

そこで本研究では、地球温暖化が有用な海洋生物の資源量にどのような影響を及ぼすのかを具体的に明らかにするための研究の一環として、地球温暖化予測研究から得られたデータに基づき、地球温暖化に伴う海洋環境変動がクロマグロおよびウナギの初期生活史に与える影響を解明することを目的とする。とくに両種の卵・仔魚輸送過程における水温、塩分、流動構造の変動に重点を置き、数値シミュレーションを用いて定量的な解析を行う。

第2章. データ

2-1. 地球温暖化予測データ

2007年11月、IPCC第27回総会においてIPCC第4次評価報告書総合報告書が受諾され、一連のIPCC第4次評価報告書が出揃った形となった。このIPCC第4次評価報告書作成に当たり、日本からも多くの研究結果が提供された。その中でも、世界最大規模のスーパーコンピュータである地球シミュレータを用いて得られた地球温暖化予測結果は多大な貢献をしたと言える。この地球温暖化予測は、文部科学省「人・自然・地球共生プロジェクト（共生プロジェクト 2002年 - 2006年）」において、東京大学気候システム研究センター（CCSR：Center for Climate System Research, University of Tokyo）、国立環境研究所（NIES：National Institute for Environmental Studies）および海洋研究開発機構（JAMSTEC：Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology）の地球環境フロンティア研究センター（FRCGC：Frontier Research for Global Change）が合同研究として行ったものである。

地球温暖化予測に先立って、合同チームは大気海洋結合気候モデル“MIROC”（Model for Interdisciplinary Research on Climate）を開発した。共生プロジェクトでは、解像度の異なる2つのモデル仕様のMIROCを用いて温暖化予測が行われた。ひとつは高い水平解像度を持ち（高解像度版）、もうひとつは標準的な水平解像度を持つ（中解像度版）。本研究で用いた予測水温、塩分、流速値は、中解像度版モデルを用いた温暖化予測から得られたものである。中解像度版のモデル仕様の概略は次のようなものである。大気大循環モデルにはCCSR/NIES/FRCGC AGCM version5.7を用いており、水平解像度はT42（2.8度に相当）、鉛直方向は20層から成る。海洋大循環モデルにはCOCO（CCSR Ocean Component Model）version3.4を用いている。緯度方向の解像度は、8°より低緯度では0.56度、65°よりも高緯度では1.4度で一定とし、その間の緯度では線形補間を行っている。経度方向の解像度は1.4度で一定である。鉛直方向は海底境界線を除いて43層から成る（K-1 Model Developers 2004）。水温、塩分、流速値の算出のためのモデルシミュレーションには、先に述べたSRESシナリオのうちA2シナリオ（多元的な世界を想定。基本テーマは独立独行と地域の独自性の保持（気象庁 2007b））が使われている。

MIROCの中解像度版モデルは、高解像度版モデルと同じように現在気候をよく再現しており、温暖化予測を行う上で信頼のおけるモデルであると言える。中解像度版モデルの大きな特徴は、海陸の生態系・炭素循環モデルが組み込まれた版が存在するという点である（河宮ほか 2007）。また、高解像度版モデルと比べてはるかに少ない計算資源しか必要としないので、多数のアンサンブル実験（不確実性の範囲を示すために、ほぼ同じ条件で何度か計算を繰り返し、その平均と幅を検証する実験）を行うことができ、より信頼性の高い結果を導き出すことができるのが、中解像度版を使う利点である。中解像度版モデルでは、表層水温上昇の大まかなパターンは高解像度版モデルと似たものになっている（羽角ほか 2007）ものの、黒潮の動態を論じるには解像度が不十分である（河宮ほか 2007）。

2-2. 超高解像度海洋大循環モデル（OFES）データ

超高解像度海洋大循環モデル（OFES：Ocean General Circulation Model for the Earth Simulator）とは、地球シミュレータを用いて海流や渦、地球規模の大循環を研究するために、地球シミュレータセンターと地球フロンティア研究センター（ESC：The Earth Simulator Center）とFRCGC：Frontier Research for Global Change、ともに海洋研究開発機構）が共同で開発した海洋大循環モデルのことである。米国海洋大気局（NOAA：National Oceanic and Atmospheric Administration）の地球流体力学研究所（GFDL：Geophysical Fluid Dynamics Laboratory）で開発され、今や世界標準的なモデルとなっている海洋大循環モデルMOM3（Modular Ocean Model）をベースにして、地球シミュレー

タ用に開発されたモデルである。モデル領域は両極を除く全球（75°S - 75°N、180°W - 180°E）である。水平解像度は、緯度方向経度方向ともに 0.1 度である。また、鉛直方向は層厚 5 - 300m の 54 層から成り、最大水深は 6065m である。

超高解像度海洋大循環モデル (OFES) の大きな特徴として、水平方向の解像度が約 10km と非常に細かいため、黒潮に代表されるような 10km - 100km の海流の流路や 100km のオーダーの渦といった比較的小さなスケールの海洋現象まで正確に再現されていることが挙げられる。地球シミュレータを用いたハインドキャストによって、1950 年から 2004 年まで 50 年分を超える信頼性の高い海洋季節変動のシミュレーションデータが算出されているため、海流や渦、地球規模の大循環の研究や海況予測の信頼性向上に大きく寄与している。

2-3. 解析に際してのデータの扱い

地球温暖化予測データからは、予測水温、塩分、流速値を使用した。データ期間は 2000 年、2050 年、2100 年の 3 年分で、月平均データである。ただし、流速値に関しては、絶対値の信頼性に問題があると判断し、2000 年からの差分のみを用いることとした。水温、塩分、流速値ともに、地球温暖化モデルから得られた 1.0 度間隔の格子状データを 0.1 度間隔に線形補間して使用した。水平方向のデータ領域は 10°S - 44.5°N、110.5°E - 179.5°E で、クロマグロおよびウナギの産卵場から卵稚仔輸送過程そして成育場となる日本近海を含む領域を包括するものである。鉛直方向は、クロマグロでは水深 20m、ウナギでは水深 100m の基準層における一層のデータをそれぞれ用いた。超高解像度海洋大循環モデル (OFES) によって算出された海洋データのうち、流速値を使用した。データ期間は 2000 年で、月平均データを用いた。水平方向のデータ領域は地球温暖化予測データ同様 10°S - 44.5°N、110.5°E - 179.5°E である。鉛直方向は、クロマグロでは水深 18.351240m（第 4 層）、ウナギでは水深 95.561740m（第 13 層）の基準層における一層のデータを用いた。

本研究においては、水温、塩分、流速いずれも、2000 年の値を地球温暖化前、2100 年の値を地球温暖化後の代表値とみなした。地球温暖化予測モデルによる予測流速値の信頼性の問題から、超高解像度海洋大循環モデル (OFES) から算出された 2000 年の流速値を基準値とし、それに地球温暖化予測モデルから得られた予測流速値の 2050 年 - 2000 年の差分および 2100 年 - 2000 年の差分を加えることによって、流速値データの補正を行い、それぞれ 2050 年および 2100 年の予測流速値として移流・拡散に基づく粒子追跡実験に用いた。

第3章. クロマグロへの影響

3-1. 解析方法

3-1-1. 粒子追跡実験による卵・仔魚輸送過程の検証

3-1-1-1. 条件設定

クロマグロの産卵適水温帯は $26.0 \pm 2.0^{\circ}\text{C}$ であり、この水温帯から大きく外れると親魚による産卵自体が行われないうか、産卵があったとしても卵の孵化率および仔魚の生残率は低下する (木村ほか 2007)。したがって、クロマグロの主産卵場は、卵および仔魚の孵化・生残にとっての適水温帯である $26.0 \pm 2.0^{\circ}\text{C}$ の水温帯付近に存在する必要があると考えられる。そこで本研究では、クロマグロの主産卵場がこの水温帯に形成されることを前提条件として、粒子追跡実験の条件設定を行った。

クロマグロは多回性産卵を行うが (Masuma 2006)、どのような要因が産卵を誘発するか、すなわち産卵時期を決める要因に関しては明らかではない。そこで、本研究ではクロマグロの産卵時期の違いに関する以下のような3つのシナリオを想定し、検討を行った。

<シナリオ1: 産卵時期が変化すると仮定した場合>

産卵時期が水温に依存しているとするもので、産卵適水温帯によって産卵が誘発されると想定したシナリオである。2000年の主産卵場における産卵時期は4月から6月であるが、このとき、主産卵場が産卵適水温帯に含まれるような水温構造になっていた。一方で2100年には2月から5月にかけて同じ海域に同様の水温構造が現れることが予測されている (Fig. 3)。このことから、地球温暖化に伴って2000年の主産卵場付近の水温構造がおおよそ1ヵ月の時期的な前倒しで同じ海域に現れるようになる。よって、産卵時期は変化するものの、主産卵海域は地球温暖化前後で変化しないと想定することとした。

2000年の初期位置は、1980年 - 1988年に行われたマリーナランディング計画の仔魚分布調査データに基づいた。前述したように、クロマグロの仔魚は、台湾東方海域に存在する中規模渦内で数日間滞留した後、黒潮に取り込まれて本州沿岸に輸送され则认为されており (木村・加藤 2005)、適切な生残および成長速度維持のためには渦内での滞留が非常に重要な要素となる (加藤 2004)。仔魚分布調査において仔魚が採取された $22^{\circ}\text{N} - 24^{\circ}\text{N} \cdot 122^{\circ}\text{E} - 124^{\circ}\text{E}$ の台湾東方海域は、黒潮反流域あるいは渦流域であった (米盛 1989)。また、2000年4 - 6月の水温データから、この海域が産卵適水温帯に含まれる水温構造が確認され、主産卵場に適した海域であると判断した。さらに、2100年2 - 5月の水温データにおいても同様の水温構造が確認された。これを受けて、本研究では $22^{\circ}\text{N} - 24^{\circ}\text{N} \cdot 122^{\circ}\text{E} - 124^{\circ}\text{E}$ の海域を2000年4 - 6月および2100年2 - 5月における主産卵場と設定した。2000年4 - 6月および2100年2 - 5月からの粒子追跡実験では、主産卵場内の25ヵ所にそれぞれ100個ずつ粒子を投入した (Fig. 4(a))。

<シナリオ2: 産卵時期が変化しないと仮定した場合>

産卵時期が水温以外の要因 (例えば光周期の長日化など) に依存しているとするものである。すなわち産卵時期は地球温暖化前後で変化せず、2000年と同様の4月から6月であると想定したシナリオである。このとき、2100年の4月および5月には、産卵適水温帯が2000年の主産卵場を含むような水温構造が現れる。その一方で、2100年の6月になると産卵適水温帯が大きく北上するために2000年の主産卵海域は産卵適水温帯から大きく逸脱すると予測されている。したがって、主産卵場は、4月および5月には地球温暖化前後で地理的に変化しないが、6月には産卵適水温帯の移動に伴って地理的に変化すると想定することとした。

2000年4 - 6月および2100年4, 5月からの粒子追跡実験の設定はシナリオ1で行ったとおりである。一方で、水温のデータから2100年6月には産卵適水温帯が大きく北上することが確認されたため、新たな主産卵場の設定を行った。産卵適水温帯の位置に基づき、主産卵場候補を東シナ海および日本列島東部の太平洋の2海域に絞った。東シナ海の主産

卵場候補の南限は、台湾北端部から陸棚斜面（水深 1000m 以浅）に沿って五島列島付近に至る 28.0℃ の等温線である。北限は台湾北西部から大陸棚上を通過し対馬海峡に至る。東シナ海の主産卵場候補の特徴として、いずれの場所も水深が 1000m 以浅であることが挙げられる。クロマグロ成魚の産卵場付近での鉛直分布に関する知見は乏しいが、タイセイヨウクロマグロは、主産卵場であるメキシコ湾において 1000m 以深、とくに水深 2800 - 3400 m の深度に分布する傾向がある (Teo et al. 2007)。同様のことがクロマグロにも当てはまり、親魚が生息するためには 1000m 以深の水深が必要であると推測される。このことから、東シナ海の主産卵場候補はクロマグロの親魚の生息には不適切な海域であると考えられ、この海域は主産卵場に適さないと判断した。

太平洋の主産卵場候補の南限は 27°N 付近にある 28.0℃ の等温線であり、北限となる 24.0℃ の等温線は 40°N 付近に確認された。本研究では 28.0℃ の等温線と日本列島の位置関係から太平洋の主産卵場候補の西端は 135°E とした。また、150°E 以東で産卵が行われた場合、黒潮続流域の流動構造から卵および仔魚は東方に輸送され、成育場である日本沿岸への適切な輸送からの逸脱が予測されるため、主産卵場候補の東端を 150°E に設定した。さらに、伊豆・小笠原海嶺付近では、東シナ海の主産卵場候補の場合と同様に、水深の問題からクロマグロ親魚が生息できないと考え、主産卵場候補から部分的に除外した。このようにして主産卵場候補に選んだ太平洋の 27°N - 40°N・135°E - 150°E の海域（以降、太平洋新産卵場と呼ぶ）の 9 ヲ所に 100 個ずつ粒子を投入した (Fig. 4(b))

<シナリオ 3：産卵時期、主産卵海域が変化しないと仮定した場合>

水温構造がわずか 100 年の間に前述したような挙動を示したことからも、地球温暖化は、急激な海洋環境変動をもたらす環境変動の一例であると言える。シナリオ 1 および 2 はそれぞれ、水温構造の変動に対してクロマグロが産卵時期あるいは産卵場所を変化させるという適応応答をとると想定したものである。しかしながら、100 年程度で産卵時期が 1 ヲ月ずれたり、産卵場所がわずかひと月足らずで地理的に大きく移動したりするというシナリオは、一般的な生物の適応進化の概念からすると、再考の余地が残る。そこで、シナリオ 1 および 2 いずれの適応応答も示さないシナリオ、言い換えれば地球温暖化に伴う環境変動に適応応答できなかった場合を想定した。この場合、産卵時期は地球温暖化前後を通して 4 月から 6 月であり、主産卵場は地理的に変化しないものとする。2000 年 4 - 6 月および 2100 年 4 - 6 月からの粒子追跡実験の設定はシナリオ 1 と同様とする (Fig. 4(a))。

<シナリオ 4：地球温暖化が日本海産卵場に及ぼす影響の検討>

前述したように、クロマグロは日本海においても規模の大きな産卵を行うことが分かっており、その産卵時期は南西諸島付近の黒潮流域の主産卵場での産卵時期よりも遅い。日本海における仔稚魚の出現は山陰沖から能登半島沖で確認されており、秋田沖でも出現記録がある (米盛 1989)。本研究では、地球温暖化後の日本海の水温構造の変化に着目し、産卵適水温帯の重要性を念頭に置きながら、日本海におけるクロマグロ産卵場の地球温暖化前後での変化について、シナリオ 4 として検討を行った。

日本海におけるクロマグロの産卵時期は 8 月であるとされている (米盛 1989)。2000 年 7 月の水温構造を見ると日本海における産卵適水温帯は極めて狭い範囲でしか見られなかった。また、2000 年 8 月と 9 月では、日本海における産卵適水温帯の位置および水温構造は類似していた。このことから、日本海における産卵は、水温構造の変化に伴う産卵適水温帯の出現を誘因として開始され、その期間は 1 ヲ月程度であると考えられる。2000 年 8 月と同様の水温構造が日本海に現れるのは、2100 年では 7 月であると予測される。そこで、2000 年 8 月と 2100 年 7 月の日本海の産卵適水温帯内に産卵場候補を設定して比較を行うことで、日本海における産卵に地球温暖化が及ぼす影響の検討を行った。

日本海の平均水深は 1350m である。その海底地形の特徴は、中央部に大和堆と呼ばれる水深 1000m 以浅の浅瀬があり、その北側には日本海盆、南東側に大和海盆、南西側に対馬

海盆が存在することである。対馬海盆と大和海盆は大和堆から南へ連なる隠岐海脚によって分かれている。シナリオ 2 と同様に、水深 1000m 以浅は産卵場候補から除外した。水温構造から、2000 年 8 月では対馬海盆と大和海盆が、2100 年 7 月では対馬海盆と大和海盆に加えて日本海盆の一部が $26.0 \pm 2.0^\circ\text{C}$ の産卵適水温帯に含まれることが確認された。そこで、2000 年 8 月および 2100 年 7 月いずれにおいても産卵場候補となっている 10 ヶ所（以降、旧産卵場と呼ぶ）と、2100 年 7 月のみ産卵場候補となる 7 ヶ所の計 17 ヶ所（以降、日本海新産卵場と呼ぶ）から 100 個ずつ粒子を投入した（Fig. 5）。

3-1-1-2. 粒子追跡実験

本研究ではクロマグロの卵および仔魚を受動的な粒子と想定し、次式（Kim et al. 2007）に基づいてタイムステップ $t + \delta t$ における粒子の位置 $[X_p(t + \delta t)]$ を計算した。

$$X_p(t + \delta t) = [X_p(t) + u(t) * \delta t] + \delta l_{\text{diff}} * X_p(t) \quad (1)$$

ここで $X_p(t)$ はタイムステップ t における粒子の x , y , z 方向の位置 (x_{pt} , y_{pt} , z_{pt}) である。 δt は時間、 $u(t)$ は流速を表す。また、 δl_{diff} によって粒子の水平拡散係数を考慮し、 $500\text{m}^2/\text{s}$ を使用した。粒子に近接する 4 つの格子それぞれの流速を距離に応じて重み付けすることで得られた流速 $u(x_p, y_p, z_p, t)$ を用いて粒子の移動を計算した。

クロマグロの産卵は表層で行われ（Masuma 2006）、卵は海面を浮遊しながら発生が進み、およそ 30 時間で孵化が始まる（山中 1982；升間 2006）。仔稚魚は鉛直移動を行い、昼間は 20 - 30m に分布し、夜になると表層に移動する（山中 1982）ことから、本研究では、水深 20m に粒子を投入し追跡を行った ($z_p = 20\text{m}$)。クロマグロは孵化後およそ 30 日で稚魚に変態し高い遊泳能力を持つので（Kaji 2000；升間 2006）、仔魚が受動的に輸送される期間を 30 日間とした。そして、日本列島から延びる水深 200m 以浅の大陸棚上部海域をクロマグロの成育場とみなし、粒子投入後 30 日経過した時点で ($29^\circ\text{N} \cdot 129^\circ\text{E}$) ($35^\circ\text{N} \cdot 129^\circ\text{E}$) ($36^\circ\text{N} \cdot 142.5^\circ\text{E}$) ($42^\circ\text{N} \cdot 142.5^\circ\text{E}$) の 4 点で囲まれた海域内（Fig. 6）に位置する粒子を適切な期間内に成育場に到達した粒子と定義した。

3-1-2. 適水温帯からの逸脱の検証

魚類にとって、水温は成長や生残に直接影響を及ぼす最も重要な環境要因のひとつである（Martinez-Palacios et al. 1996；Aune et al. 1997；Ridha et al. 1998）。一般的に魚類は水温が低いと成長が遅く、高いと成長が早くなる。また、ある程度以上の水温になると死亡率が高くなる（益田 2005）。したがって、卵・仔魚輸送過程で経験する水温が適水温帯から逸脱する度合いが大きければ、成長率の低下や死亡率の上昇につながる。クロマグロには、卵・仔魚の孵化および生残に最適な水温帯が存在することが分かっている。

そこで本研究では、粒子追跡実験における粒子の経験水温を基に、適水温帯からの逸脱度合いの検証を行った。輸送過程における最適水温からの逸脱を定量化するために、1 日毎の粒子の経験水温が最適水温からどれだけ逸脱したかに注目し、以下の方法でクロマグロの卵・仔魚輸送過程での逸脱指数 $L(I)$ を求めた。

クロマグロの孵化率は水温 28.0°C を境に著しく低下することが確認されている。また、水温と孵化後の生残率の関係から、 $26.0 \pm 2.0^\circ\text{C}$ の適水温帯を逸脱すると生残率が悪化する（Kimura et al. 2007；加藤 未発表）。そこで、 26.0°C がクロマグロ仔魚の生残および成長に最適な水温であるとして、次のような手順で輸送過程における最適水温からの逸脱を定量化した。

- 1) 孵化率の定量化：孵化実験（加藤 未発表）の結果に基づき、産卵場の水温 x におけ

る孵化指数 $F(x)$ を Table 1 のように定めた。 $F(x)$ は $24.0^{\circ}\text{C} \leq x \leq 28.0^{\circ}\text{C}$ で最も高い値をとることとした。

- 2) 生残率の定量化：最適水温である 26.0°C に確率のピークをとり、 24.0°C および 28.0°C における確率が 26.0°C の $3/4$ となるような正規分布を仮定し、輸送過程での経験水温 x における生残指数 $G(x)$ を定めた。(Fig. 7, Table 2)。孵化実験（加藤 未発表）の結果から、クロマグロ仔魚の生残にとって 29.5°C 以上の水温は不適切であると考え、本研究ではそれらの水温を経験した粒子は死亡することとした。
- 3) 逸脱割合 I の計算：次式に基づいて、30 日経過後の、最適水温からの逸脱割合 I を求めた。

$$I = [F(x)/F(26.0)] * \left[\prod_{i=1}^{30} G_i(x)/G(26.0) \right] \quad (2)$$

ここで、 $G_i(x)$ は i 日目の生残指数、 $F(26.0)$ および $G(26.0)$ はそれぞれ最適水温 $x=26.0^{\circ}\text{C}$ における $F(x)$ ($=0.95$) および $G(x)$ ($=0.1508$) とする。

- 4) 逸脱指数 $L(I)$ の計算： I の自然対数を取り、最終的に、逸脱指数 $L(I)$ を求めた。

3-2. 結果

3-2-1. 台湾東方海域主産卵場における 2000 年現在の卵・仔魚輸送環境

2000 年に台湾東方海域から行った粒子追跡実験の結果を Fig. 8 および Table 3(a) に示す。それぞれの月に投入した 2500 粒子のうち、4 月産卵では 77 粒子、5 月産卵では 78 粒子、6 月産卵では 55 粒子が成育場に輸送された。輸送過程で生残に不適切な水温 (29.5°C 以上) を経験した粒子はなく、成育場に輸送された粒子はすべて生残していた。このことから輸送過程で死亡した粒子を除いた到達率（以降、生残到達率と呼ぶ）は輸送期間内に成育場に到達したすべての粒子の到達率（以降、総到達率と呼ぶ）に等しく、ともに 2.80% であった。

3-2-2. シナリオ 1：産卵時期が変化すると仮定した場合

Fig. 9 および Table 3(b) に粒子追跡実験の結果を示す。それぞれの月に投入した 2500 粒子のうち、2 月産卵では 37 粒子、3 月産卵では 109 粒子、4 月産卵では 73 粒子、5 月産卵では 36 粒子が成育場に輸送された。このうち 2 月産卵の 36 粒子、3 月産卵の 109 粒子、4 月産卵の 73 粒子および 5 月産卵の 3 粒子が生残しており、総到達率は 2.55%、生残到達率は 2.21% であった。産卵場に輸送された 5 月産卵の粒子の大部分が輸送過程で死亡したことに起因し、総到達率に比べて生残到達率は 0.34 ポイント低下した。2000 年およびシナリオ 1 における逸脱指数 $L(I)$ を Fig. 12(a) に示す。産卵時期間を通しての 2100 年の $L(I)$ は 2000 年の $L(I)$ に比べて有意に小さい値をとった (Mann-Whitney's U test, $p < 0.05$)。一方で、2000 年 4 - 6 月と 2100 年 3 - 5 月では $L(I)$ に有意な差が見られなかった (Mann-Whitney's U test, $p > 0.05$)。地球温暖化前後での $L(I)$ の違いは、2100 年 2 月の $L(I)$ が総じて小さい値となったことに起因する。このことは、地球温暖化によって粒子の水温による生残が悪化することを示している。適切な期間内に成育場に輸送され、なおかつ生残していた個体の割合に、地球温暖化前後で顕著な差はみられなかった。しかしながら、2100 年の 5 月に産卵された個体の大部分が輸送過程で死亡したことから、実質的には 2 - 4 月に産卵された個体とその後の資源に寄与すると考えられる。地球温暖化前後で、 $L(I)$ の値に有意な差が見られ、地球温暖化前のほうが、より最適水温に近い水温を経験したことが示された。これは、産卵時期の前倒しに伴う産卵時期間の長期化によって 2 月に産卵を行うようになった結果、輸送過程で粒子の多くが適水温帯よりも低い温度を経験したことに起因する。

以上のことから、地球温暖化に伴って初期生残は悪化し、資源量にマイナスの影響を及ぼすことが予測される。

3-2-3. シナリオ 2 : 産卵時期が変化しないと仮定した場合

Fig. 10 および Table 3(c)に粒子追跡実験の結果を示す。台湾東方海域で 4 月および 5 月に投入した粒子のうち、成育場に輸送されたのは 2500 粒子中それぞれ 73 粒子、36 粒子であった。太平洋新産卵場で 6 月に投入した 900 粒子のうち、20 粒子が成育場に輸送された。このうち、73 粒子、3 粒子、5 粒子がそれぞれ生残しており、総到達率は 2.19%、生残到達率は 1.37%であった。また、太平洋新産卵場のみの総到達率は 2.2%、生残到達率は 0.56%であった。5 月産卵および太平洋新産卵場の粒子の生残率の低さに起因して、2100 年の総到達率と生残到達率の間には 0.82 ポイントの開きが生じた。2000 年およびシナリオ 2 における逸脱指数 $L(I)$ を Fig. 12(b)に示す。産卵時期間を通しての 2100 年の $L(I)$ は 2000 年の $L(I)$ に比べて有意に大きな値をとった (Mann-Whitney's U test, $p < 0.05$)。このことは、地球温暖化によって粒子の水温による生残が良化することを示している。適切な期間内に成育場に輸送され、なおかつ生残していた個体の割合は、地球温暖化前後でおよそ 1/2 になった。5 月産卵の個体および太平洋新産卵場からの個体は、その大部分が輸送過程で死亡したことから、実質的には 4 月に産卵された個体がその後の資源に寄与すると考えられる。地球温暖化前後で、 $L(I)$ の値に有意な差が見られ、地球温暖化後のほうが、より最適水温に近い水温を経験したことが示された。

以上のことから、地球温暖化に伴って初期生残率は大幅に悪化するものの、生残した個体の状態に関しては地球温暖化後のほうが良好であることが予測される。地球温暖化後の初期生残は地球温暖化前の 1/2 を下限として悪化し、資源量にマイナスの影響を及ぼすことが予測される。

3-2-4. シナリオ 3 : 産卵時期、主産卵海域が変化しないと仮定した場合

Fig. 11 および Table 3(d)に粒子追跡実験の結果を示す。それぞれの月に投入した 2500 粒子のうち、4 月では 73 粒子、5 月では 36 粒子、6 月では 54 粒子が成育場に輸送された。このうち、4 月産卵の 73 粒子および 5 月産卵の 3 粒子が生残し、6 月産卵では輸送過程で全ての粒子が死亡した。総到達率は 2.17%、生残到達率は 1.01%となり、総到達率と生残到達率には倍以上の差が生じた。これは 5 月産卵および 6 月産卵における生残率の低さに起因するものである。2000 年およびシナリオ 3 における逸脱指数 $L(I)$ を Fig. 12(c)に示す。産卵時期間を通しての 2100 年の $L(I)$ は 2000 年の $L(I)$ に比べて有意に大きな値をとった (Mann-Whitney's U test, $p < 0.05$)。このことは、地球温暖化によって粒子の水温による生残が良化することを示している。適切な期間内に成育場に輸送され、なおかつ生残していた個体の割合は、地球温暖化前後でおよそ 1/3 になった。前述したように、2100 年の 5 月および 6 月はクロマグロ卵・仔魚の生残に不適切であるため、その後の資源に実質的に寄与するのは 4 月に産卵された個体であると考えられる。地球温暖化前後で、 $L(I)$ の値に有意な差が見られ、地球温暖化後のほうが、より最適水温に近い水温を経験したことが示された。

以上のことから、地球温暖化に伴って初期生残率は劇的に悪化するものの、生残した個体の状態に関しては地球温暖化後のほうが良好であることが予測される。地球温暖化後の初期生残は地球温暖化前の 1/3 を下限として悪化し、資源量にマイナスの影響を及ぼすことが予測される。このことはすなわち、地球温暖化に伴う海洋環境の変化に対してクロマグロが全く適応応答を行わない場合、資源量が劇的に悪化することを予測するものである。

3-2-5. シナリオ4：地球温暖化が日本海産卵場に及ぼす影響の検討

Fig. 13(a)およびTable 4に2000年の粒子追跡実験の結果を示す。投入した1000粒子のうち291粒子が成育場に輸送されたことから、総到達率は29.1%であった。輸送過程で生残に不適切な水温を経験した粒子を除くと、267粒子が生残しており、生残到達率は26.7%であった。Fig. 13(b)およびTable 4に2100年の粒子追跡実験の結果を示す。旧産卵場に投入した1000粒子のうち239粒子が成育場に輸送され、また、日本海新産卵場に投入した700粒子のうち31粒子が成育場に輸送された。旧産卵場のみの総到達率は23.9%、日本海新産卵場のみでは4.43%であり、両産卵場を合わせると15.9%であった。旧産卵場に投入した粒子のうち206粒子、日本海新産卵場に投入した粒子のうち13粒子が生残しており、生残到達率は、旧産卵場で20.6%、日本海新産卵場では1.86%であり、両産卵場を合わせると13.9%であった。2000年および2100年における逸脱指数 $L(I)$ をFig. 14に示す。旧産卵場から輸送された粒子は2000年と2100年で有意な差がなかった(Mann-Whitney's U test, $p > 0.05$)。また、日本海新産卵場から輸送された粒子は大部分が同じ $L(I)$ をとり、その値が小さかった。このことは、これらの粒子が概して最適水温から大きく逸脱しながら輸送されたことを示している。2000年および2100年の旧産卵場から適切な期間内に成育場に輸送され、なおかつ生残していた個体の割合に大きな差は見られなかった。一方、日本海新産卵場から輸送された個体のうち、生残していたものは2%に満たなかった。このことから、日本海においては、実質的な産卵場は地球温暖化前後で変化せず、新たに生じた産卵場の重要性は極めて低いことが考えられる。地球温暖化前後で2000年および2100年の旧産卵場から輸送された個体の $L(I)$ の値に有意な差は見られなかった。また、旧産卵場から輸送された個体の $L(I)$ に比べて、日本海新産卵場から輸送された個体の大部分の $L(I)$ は大幅に小さな値を示したことから、地球温暖化後に資源に寄与するのは旧産卵場から輸送された個体であると考えられる。

したがって、地球温暖化が進んだ場合でも、日本海においてはクロマグロ卵・仔魚輸送過程および初期生残に影響を及ぼすような流動構造や水温構造の変化は生じず、その結果、資源に大きな影響はないことが予測される

3-3. 考察

2000年および2100年の各シナリオにおける主産卵場からの卵・仔魚の総到達率には顕著な差が認められなかった。このことから、地球温暖化前後で、クロマグロ卵・仔魚輸送過程に影響を及ぼすような流動構造の変化は生じないと考えられる。しかし、輸送過程における経験水温の影響を考慮すると、2100年には輸送過程で死亡する個体が生じることが予測された。とくに2100年の5月と6月に台湾東方海域から輸送された個体および2100年6月に太平洋新産卵場から輸送された個体ではその大部分が、生残に不適切な水温(29.5℃以上)を経験し、死亡することが示された。2000年にはいずれの月においてもすべての個体が死亡することなく成育場に輸送されたことを考え合わせると、地球温暖化に伴う水温の上昇によって、2100年の5月および6月の水温構造はクロマグロ卵・仔魚の生残に不適切になると考えられる。2100年における粒子の $L(I)$ の値は、シナリオ1では0から-11の範囲であったのに対してシナリオ2およびシナリオ3では0から-8の範囲に留まった。これは2100年の2月における $L(I)$ の値が小さいことに起因するものである。このことから、2100年にクロマグロの卵・仔魚に最も適した水温構造となるのは3月および4月であることを示している。

本研究の結果から、地球温暖化に伴う海洋環境変動のうち、クロマグロの初期生残に最も大きな影響を及ぼすのは水温上昇であると考えられる。前述したような産卵適水温帯をもつクロマグロにとって、水温構造の変化は、生物生産の根本である産卵に影響が生じることを意味する。地球温暖化に際して、クロマグロが産卵に関してどのような適応応答を

行うかは、様々な要因との兼ね合いも考えられるため一概には断定できない。しかしながら、いくつかのシナリオとして推測することは可能である。本研究で想定したシナリオ 1 およびシナリオ 2 は、クロマグロが行う可能性のある適応応答のうち極端な 2 例である。すなわち、産卵時期を変化させることで適応するのか、あるいは産卵場を変化させることで適応するのかに焦点を当てたシナリオである。それに対してシナリオ 3 は何の適応応答も行わない場合を想定したシナリオである。本研究で想定したシナリオ 1 - 3 は総じて、地球温暖化に伴ってクロマグロの資源が悪化することを示す結果となった。シナリオ 1、シナリオ 2、シナリオ 3 の順に予測資源量は悪化した。このような結果になった一番大きな理由として、前述したように地球温暖化後の 5 月および 6 月の水温上昇によって、これらの月の水温構造がクロマグロの卵および仔魚の生残に適さなくなったことが挙げられる。本研究において最も地球温暖化の影響が少なかったのは産卵時期が早期化することを想定したシナリオ 1 であった。地球温暖化に伴う環境変動への生物の一般的な適応応答現象として、春季現象（植物の発芽・鳥の渡り・産卵行動など）の早期化が既に報告されている（環境省 2007）。したがって、クロマグロについても本研究のシナリオ 1 で示したような産卵時期の早期化現象が最も現実的な適応応答として考えられる。その場合、地球温暖化後にクロマグロの資源量はやや悪化することが予測される。以上の結果から、クロマグロが地球温暖化に対して適応応答を行わなければ、初期生残は地球温暖化前の 1/3 を下限として減少し、その後の資源量は大幅に悪化すると予測される。その一方で、地球温暖化に対する応答を行い、その産卵時期が早期化すれば、初期生残は現在と比べてやや悪化するものの、資源量に及ぼす温暖化の影響は最小限に留まることが予測される。

また、本研究ではシナリオ 4 として日本海における輸送過程を取り上げ、地球温暖化が日本海産卵場に及ぼす影響を検討するとともに、産卵場としての日本海に重要性が地球温暖化前後で変化するかどうか検証を行った。地球温暖化後には日本海における産卵適水温帯が広がり、新たな産卵場（日本海新産卵場）が形成される可能性が生じた。しかしながら、本研究の結果からは、日本海における初期生残に地球温暖化前後で大きな変化は見られず、それに加えて、日本海新産卵場の重要性は確認されなかった。このことは同時に、地球温暖化が日本海の海洋環境に大きな変化を及ぼさないことを示す結果と言える。また、シナリオ 4 における $L(I)$ は、シナリオ 1 - 3 における逸脱指数 $L(I)$ の分散幅（0 から -11）に比べて地球温暖化前後とも大きな分散幅（0 から -35）をとった（Fig. 12, 14）。これは台湾東方海域および日本列島東方海域における輸送過程に比べて、日本海における輸送過程では最適水温からの逸脱の変動幅が大きいこと、すなわち卵・仔魚が経験する水温の変動幅が大きいことを示しており、台湾東方海域での産卵と比べて日本海での産卵は卵・仔魚に対する水温環境変動のリスクが高いことが推測される。以上の結果から、日本海の産卵場としての重要性は変化せず、日本海産卵のクロマグロの資源への寄与は地球温暖化前後で変化しないと予測される。

第4章. ウナギへの影響

4-1. 解析方法

4-1-1. 粒子追跡実験による卵・仔魚輸送過程の検証

4-1-1-1. 条件設定

ウナギは北赤道海流域の15°N付近に形成される南北の水塊の境界を緯度方向の指標として、親魚が産卵回遊を行うと考えられている (Kimura and Tsukamoto 2006)。また、経度方向は142°E付近の海山列が指標となっているとされ (Tsukamoto et al. 2003)、これによって限定的な産卵場が形成される。地球温暖化に伴う海洋環境変動のうち、ウナギの産卵場形成に影響を与える要因は塩分構造の変化である。したがって、地球温暖化前後で産卵時期は変化せず、産卵場が緯度方向に変化する可能性が考えられる。

北赤道海流域に形成される南北の水塊の境界が地球温暖化に伴って北上することが、地球温暖化予測データの塩分構造から確認された (Fig. 15)。このことからウナギの産卵場も北上することが予測される。本研究では、南北両水塊の境界付近に存在し、表層塩分濃度が極端に変化する塩分フロントの緯度に重点を置いて初期位置 (主産卵場所) の設定を行った。塩分フロントを34.5psuと定義し、142°Eにおける塩分フロント上に主産卵場が形成されるとして、粒子投入の初期位置と定めた。2000年、2100年ともに、ウナギの産卵時期のピークである7-9月 (篠田 2004) を含む6-10月からそれぞれ500個ずつの粒子をピンポイントで投入した。

4-1-1-2. 粒子追跡実験

クロマグロの場合と同様に、ウナギの卵と仔魚 (プレレプトセファルス, レプトセファルス) を受動的な粒子と想定し、(1) 式 (Kim et al. 2007) に基づいて計算を行った。ウナギのレプトセファルスは日周鉛直移動を行うと考えられ、観測結果から昼間は水深100-150m、夜間は水深50-100mに分布することが示唆されている (Otake et al. 1998)。本研究では、日収鉛直移動を考慮する代わりに、昼間と夜間の推定分布水深の平均である水深100mで粒子追跡を行った。水平拡散係数 δl_{diff} として $100\text{m}^2/\text{s}$ を使用した ($z_p=100\text{m}$)。粒子投入後200日経過した時点で (29°N・129°E) (35°N・129°E) (36°N・142.5°E) (42°N・142.5°E) の4点で囲まれた海域内 (Fig. 6) に存在する粒子について、適切な期間内に成育場である日本沿岸に到達した粒子であると定義した。

4-1-2. 適水温帯からの逸脱の検証

ウナギ卵・仔魚には孵化および生残に適した水温帯が存在し、その温度は25.0-28.0°Cである (Okamura et al. 2007)。本研究では25-28°Cをウナギ卵・仔魚の適水温帯として、次のような手順で輸送過程における適水温帯からの逸脱を定量化した。25.0-28.0°Cの適水温帯の存在確率、および31.0°Cにおける孵化率は0%であった (Okamura et al. 2007) ことを受けて、ウナギ卵・仔魚の孵化および生残にとって31.0°C以上の水温は不適切であると考え、30.5°C以上の水温を経験した粒子は死亡することとした。

- 1) 生残率の定量化: 正規分布に基づき、輸送過程での経験水温 x における生残指数 $G(x)$ を定めた。参考値として、飼育実験における孵化率・生残率・奇形発生率 (Okamura et al. 2007) を用いた。本研究においては、2000年および2100年のウナギ産卵場の水温はいずれも適水温帯に含まれていたことから、全ての粒子が正常に孵化したとみなした。摂餌開始時の生残率 S_r ならびに奇形発生率 D_r (Table 5) から、19.0, 22.0, 25.0, 28.0°Cにおける正常個体の生残率 S を次式のように求めた。

$$S=S_r \times (1-D_r) \quad (3)$$

25.0 および 28.0℃における S は同様の値をとった。また、25.0, 28.0℃における S に対する 22.0℃における S の比はおよそ 0.28 であった。このことから、25.0, 28.0℃の確率が等しくなり、かつ 22.0℃における確率と 25.0, 28.0℃における確率の比がおよそ 0.28 になるように正規分布をとった (Fig. 16, Table 6)。また、適水温帯である 25.0 - 28.0℃における $G(x)$ は一様とした。

- 2) 逸脱割合 I の計算：次式に基づいて、200 日経過後の、適水温帯からの逸脱割合 I の計算を行った。

$$I = \prod_{i=1}^{200} G_i(x) / G(\text{opt}) \quad (4)$$

ここで、 $G_i(x)$ は i 日目の生残指数、 $G(\text{opt})$ は適水温帯 ($25.0^\circ\text{C} \leq x \leq 28.0^\circ\text{C}$) における $G(x)$ ($=0.1284$) とした。

- 3) 逸脱指数 $L(I)$ の計算：I の自然対数を取り、逸脱指数 $L(I)$ とした。

4-2. 結果

Fig. 17 および Table 7(a) に 2000 年の粒子追跡実験の結果を示す。それぞれの月に投入した 500 粒子のうちで成育場に輸送されたのは、6 月産卵では 35 粒子、7 月産卵では 17 粒子、8 月産卵では 3 粒子、9 月産卵では 4 粒子、10 月産卵では 1 粒子であり、産卵期間を通じての総到達率は 2.40% であった。また、輸送過程で生残に不適切な水温 (30.5°C 以上) を経験した粒子を除くと、6 月産卵では 31 粒子、7 月産卵では 11 粒子、8 月産卵では 3 粒子、9 月産卵では 3 粒子、10 月産卵では 1 粒子が生残しており、生残到達率は 1.96% であった。Fig. 18 および Table 7(b) に 2100 年の粒子追跡の結果を示す。投入した 500 粒子のうち、6 月産卵では 55 粒子、7 月産卵では 6 粒子、9 月産卵では 18 粒子、10 月産卵では 2 粒子が成育場に輸送されたが、8 月産卵では粒子は成育場に輸送されなかった。成育場到達時に生残していたのは、6 月産卵では 37 粒子、7 月産卵では 4 粒子、9 月産卵では 14 粒子、10 月産卵では 2 粒子であった。総到達率は 3.24%、生残到達率は 2.28% だった。また、2000 年と比べて 2100 年はミンダナオ海流に取り込まれて南下する粒子が減少したことから、黒潮に取り込まれて北上する粒子が増加した。2000 年および 2100 年における逸脱指数 $L(I)$ を Fig. 19 に示す。産卵時期間を通しての 2100 年の $L(I)$ は 2000 年の $L(I)$ に比べて有意に大きな値をとった (Mann-Whitney's U test, $p < 0.05$)。このことは、2000 年に比べて 2100 年の水温構造がウナギの卵および仔魚の生残に、より適していることを示すものである。

4-3. 考察

本研究の結果から、地球温暖化に伴う海洋環境変動のうち、ウナギの初期生残に最も大きな影響を及ぼすのは塩分構造の変化であると考えられる。地球温暖化に伴って赤道付近の降水量が増加することから北赤道海流域の低塩分の水塊の範囲が広がることが示唆された。これに伴い塩分フロントが北上することから、ウナギの産卵場も北上すると予測された。その結果、地球温暖化後のウナギの卵・仔魚は北赤道海流の北部を輸送されることになり、フィリピン沖で黒潮に取り込まれる割合が相対的に増加し、産卵場到達率が上昇したと考えられる。また、北赤道海流の流動構造が地球温暖化前後で変化しなければ、ウナギの卵・仔魚は地球温暖化前のおよそ 1/4 の流速で産卵場から輸送されることとなり、適切な期間に日本沿岸に輸送される割合は減少する、という当初の予測に反して、適切な期間内に成育場に輸送され、なおかつ生残していた個体の割合に地球温暖化前後で顕著な差は見られなかった。それどころか地球温暖化後のほうがやや高い到達率を示した。地球温暖化前後で適切な期間に日本沿岸に輸送される割合に顕著な差が認められなかった理由とし

て、地球温暖化に伴って流動構造が変化し、北赤道海流北部および黒潮源流の流れが強化されたことが考えられる。さらに、逸脱指数 $L(I)$ の値から、地球温暖化に伴ってウナギの卵および仔魚の生残に適した水温構造に近づくことが示唆された。以上のことから、地球温暖化に伴う水温、塩分、流動構造の変化がウナギの初期生残に有利に作用することが予測される。

塩分フロントの北上に伴う産卵場の北上は、卵・仔魚輸送に有利に作用すると考えられる一方で、新魚の産卵回遊の指標となる海山の遷移をもたらし、親魚の産卵回帰行動に影響を及ぼすと考えられる。現在、産卵場の緯度は 15°N 付近であり、前述したように、3つの海山（北から順にパスファインダー、アラカネ、スルガ）がその指標の候補であるとされている。これらの海山は水深 3000 - 4000m の海底から頂上が海面下およそ 10m までそびえ立つ海山である (Tsukamoto et al. 2003)。このため、他の海山と比べてとくにこの3つの海山は、ピンポイントでの親魚のい集場所や隠れ家として限定的な産卵場形成に適しており、再生産の効率化に寄与していると考えられる。しかしながら、これら3つの海山と同様の明確な指標となりうる海山がそれよりも高緯度では乏しいことから、地球温暖化に伴って産卵場の緯度がさらに北上した場合、親魚の産卵回遊および再生産行動に変化をもたらす、ひいては再生産の効率を低下させることが懸念される。したがって、地球温暖化後のウナギの生残は、卵・仔魚の輸送過程よりも親魚の産卵回帰行動に大きく依存するものと考えられる。

第5章. 総合考察

5-1. 環境変動と海洋生物資源

海洋生物資源は自然的な要因によって大きな変動を繰り返している。20世紀後半から、海洋生物資源の増減傾向が地球上の各海域において同期的に変動していることが認識され始め、それが地球規模の気象変動、大洋規模の海象変動といった環境変動と同期していることが分かってきた（渡邊 2005）。風系や気圧配置などの気象現象が全球規模である状態から別の状態へ変化するに伴い、水温・海流系・鉛直混合などの海象現象が大洋規模で変化し、それが海洋生態系における生物生産の構造的枠組を不連続に転換させる（渡邊 2005）。

海洋環境変動と海洋生物資源の同期的変動に関しては、これまで多くの研究がなされてきた。海洋生物資源に大きな影響を及ぼす数年、数十年周期の短、中期的な環境変動の代表的なものとして、エルニーニョ（El Niño）やラニーニャ（La Niña）、そしてレジームシフトが挙げられる。エルニーニョは、3-7年に一度、ペルー沖を中心とした東部赤道域の海水温が2-3℃上昇する現象であり、ラニーニャは、同じ海域にエルニーニョとは逆の水温偏差が生じる現象である。エルニーニョと、大気の数年周期の変動である南方振動（Southern Oscillation）と密接な関係があることから、エルニーニョと南方振動をまとめてエンソ（ENSO : El Niño - Southern Oscillation）と呼ばれている（升本 2001）。エルニーニョが発生すると、ペルー沖の水温が上昇して湧昇が弱まり、下層から表層生態系への栄養塩の供給量が減るため、一次生産量が低下する。これに加えて、水温構造の変化に伴いプランクトンの組成が変化するため、ペルー沖のカタクチイワシ *Engraulis japonica* 資源量が減少する（Kawasaki and Omori 1988 ; 田所 2001）。西部太平洋では、貿易風が弱まるために赤道域の暖水が南下・東偏する。その結果、亜熱帯水と暖水の境界が南下し、ウナギの産卵場が南下するために、黒潮に輸送される仔魚が減少し、日本への回帰量の減少につながる（Kimura et al. 2001 ; Kim et al. 2007）。アラスカ湾沿岸では水温が上昇するため、高温下で生息できないサケマス類の沿岸への来遊・遡上が妨げられ、資源量の減少につながる（田所 2001）。中部北太平洋亜熱帯水域では水温が低下するために、比較的高い水温帯を好むビンナガ *Thunnus alalunga* の分布域は太平洋の縁辺部に移動する（Kimura et al. 1997 ; Lehodey et al. 1997）。

レジームシフトとは、十から数十年に一度太平洋の気候・海洋システムが急激に変わる現象のことである。レジームシフトが発生するとアリューシャン低気圧の勢力、表面水温、海面高度といった気象・海洋環境が急変する（田所 2004）。アリューシャン低気圧の勢力が増加すると、北太平洋亜熱帯水域の海上風が強まり鉛直混合を促進する。その結果、下層からの栄養塩供給量が増えて一次生産量が増加し、ひいては黒潮続流域でのイワシ類の資源量増加をもたらすとされている。また、アラスカ湾では、南風の強化に伴ってカリフォルニア沿岸からの断水の供給量が増加するため水温が上昇し、成層が強まる。その結果、鉛直混合深度が浅くなり、植物プランクトンが太陽光を効率的に利用できるようになるために、一次生産量が増加し、サケの資源量増加をもたらすとされている。親潮を含む西部北太平洋亜寒帯水域では、北風の強化に伴って極域から流れ込む親潮の流量が増加し、水温が低下した結果、一次生産量も低下する（見延 2001 ; 田所 2001, 2004）。

このように、環境変動が海洋生物資源に及ぼす影響のメカニズムは、水温、塩分、流動構造といった海洋環境の変動と密接な関係にある。したがって、これらの個々の海洋環境の特異的な変動に対する海洋生物資源の応答を明らかにすることで、前述したような短、中期的な環境変動だけでなく、温暖化のような長期にわたる海洋環境変動が海洋生物資源に及ぼす影響を解明することができるのである。

5-2. 海洋生物資源と地球温暖化予測研究

我が国は、欧米諸国と比べて多くのタンパク源を海洋生物資源に依存している（水産庁

2007) ことから、海洋国・消費国としてその適切な資源管理を行う義務を負っている。海洋生物資源の持続可能な利用と資源管理を行う上で、短・中期的な環境変動はもちろんのこと、長期的な環境変動との関連性を解明することは、自国の食糧安全保障の観点における至上命題であると考えられる。

これまで、地球温暖化と海洋生物資源との関係があまり議論されてこなかったのは、もちろん、地球温暖化そのものに関する議論が活発になってきたのが比較的最近であることも一因であるが、最も大きな理由として、地球温暖化に伴う環境変動予測の不確実性にあると考えられる。しかし、近年のコンピュータ技術の飛躍的な向上に伴って、地球温暖化が進んだ場合の環境変動の将来予測の信頼性は格段に向上しつつある。そこで、最新のコンピュータシミュレーションによって得られた地球温暖化後の水温、塩分、流動構造の予測データを生物の応答予測に適用したのが本研究である。

本研究は、地球温暖化が海洋環境変動を通じて海洋生物の資源量にどのような影響を及ぼすのかを具体的に明らかにするための研究の一環と位置づけて、我が国の水産業上重要な魚種であるクロマグロおよびウナギを対象に、その卵・仔魚輸送過程に重点を置いて検討を行った。本研究の結果は、地球温暖化に伴う海洋環境変動が、クロマグロの初期生活史においては負の影響を、ウナギの初期生活史においては正の影響を及ぼすことを示唆するものであり、地球温暖化は海洋生物資源にとって一概に負の影響を及ぼすわけではないことを示すものとなった。これは、対象とした両種がいずれも亜熱帯から熱帯に産卵場を有し、卵・仔魚の適水温帯が高い魚種であったために、地球温暖化に伴う水温の上昇が必ずしも不利に作用しないことを示唆するものである。しかしながら、温帯から亜寒帯そして寒帯に産卵場を有するような海洋生物資源は、クロマグロやウナギに比べて卵・仔魚の適水温帯が低いと考えられることから、水温上昇が有利に作用するとは考えにくく、むしろ負の影響が顕著に表れることが推測される。したがって今後は、さらに多くの海洋生物資源を対象にして地球温暖化とその資源量の関係を明らかにし、将来的な安定供給の確保を行うべく、海洋における地球温暖化予測研究が進められるべきであると考ええる。また、社会生活の身近な部分での地球温暖化の影響を具体的に明らかにすることは、一般社会が環境問題への当事者意識を持つことにつながることから、本研究のような地球温暖化予測研究は、地球温暖化という人為起源の社会問題に対する警鐘としての意義を持つと考えられる。

5-3. 海洋における地球温暖化予測研究と今後の課題

コンピュータ技術の飛躍的な向上に伴って、地球温暖化予測の信頼性は格段に向上したとはいえ、モデルによる予測結果には、まだ少なくない不確実性が付与されている（木本2007）。本研究では技術的な問題から、MIROCの中解像度版モデルから算出された水温、塩分、流速値データを用いた。しかしながら、黒潮の動態を論じるには解像度が不十分であることに加えて、流速値の絶対値の信頼性に問題があったことから、超高解像度海洋大循環モデル（OFES）データと組み合わせて用いざるをえなかった。今後、より解像度の高いモデルを用いることで黒潮や中規模渦の再現が可能になり、とくに卵・仔魚輸送過程に関してより詳細な議論ができると考えられる。また同時に、海洋環境変動予測がさらに信頼性の高いものとなることが期待される。

地球温暖化のような長期的な環境変動に関わらず、海洋生物資源と海洋環境変動との関係を解明する上で必要不可欠なのが、海洋生物資源の生理・生態学的知見である。とくに水産国家である我が国にとって、海洋生物資源あるいは海洋生態系に関する知見の解明は重要な課題である。本研究で対象としたクロマグロおよびウナギは重要魚種であるにも関わらず、ともに生理・生態学的知見が不十分である。このことが両種の適切な資源管理の難しさの要因でもある。したがって今後、この両種をはじめとする海洋生物資源そして海洋生態系のさらなる知見の解明が必要とされる。

地球温暖化問題に関する社会的な関心がますます高まる中で、地球温暖化に伴う海洋環境変動が海洋生物資源に与える影響を解明することは、国際社会の一員としての責務であると考えられる。海洋における地球温暖化研究は初期段階であり、その成熟のためには様々な分野における研究の発展を要する。しかしながら重要なことは、現時点で実行可能なことをとにかくやってみることであるとする。地球温暖化という新しい概念の下に、様々な研究分野が複合的に結びつくことによって、海洋における地球温暖化研究は飛躍的に発展していくと考えられる。

謝辞

本研究を行うにあたり、終始にわたってご指導、ご鞭撻いただいた東京大学大学院新領域創成科学研究科／海洋研究所の木村伸吾教授に深く感謝の意を表す。また、同じく北川貴士助教には研究の発端から多大なるご指導、ご配慮をいただき、心から感謝の意を表す。東京大学海洋研究所 環境動態分野 伊藤幸彦助教にはモデルおよび数値解析に関して懇切丁寧なご指導をいただいた。

最後に、修士課程での学生生活を支えていただいた、環境動態学分野および海洋研究連携分野の先輩諸氏および同期・後輩の学生諸氏に厚く御礼申し上げる。とくに、加藤慶樹氏、三宅陽一氏の両先輩には、モデルや数値解析そして専門的な知見の教示にいたるまで、研究開始段階から幅広くご指導を賜った。改めて深く感謝の意を表す。また、同期学生である銭本慧氏と宮崎幸恵氏には、修士課程入学当初から様々な場面で多大な支援をいただいたことに重ね重ね感謝申し上げます。

参考文献

- Aune, A., Imsland, A.K., Pittman, K. (1997) : Growth of juvenile habitat, *Hippoglossus hippoglossus* (L.) , under a constant and switched temperature regime. *Aquaculture Research*, 28, 931 - 939.
- Bayliff, W.H. (1994) : A review of biology and fisheries for northern bluefin tuna, *Thunnus thynnus*, in the Pacific Ocean. *FAO Fisheries Technical Paper*, 336, 224 - 295.
- Chavez, F.P., Ryan, J., Lluch-Cota, S.E., Niquen, C.M. (2003) From anchovies to sardines and back : Multidecadal change in the Pacific Ocean. *Science*, 299, 217 - 221.
- 羽角博康・坂本天・鈴木立郎 (2007) : 温暖化予測実験における黒潮・親潮の変化. 水産海洋シンポジウム－黒潮親潮生態系の動態メカニズムとモニタリング指標－講演要旨, 水産海洋学会.
- 平野敏行 (1978) : 水産海洋学の課題. 号外海洋科学, 1 (1), 119 - 127.
- 石井雅男 (2006) : 2. 地球温暖化にかかわる地球観測. 小池勲夫編. 地球温暖化はどこまで解明されたか, 丸善, 27 - 36.
- K-1 Model Developers (2004) : K-1 Coupled GCM (MIROC) Description. K-1 Technical Report No.1.
- Kaji, T. (2000) : Studies on the Early Development of Bluefin and Yellowfin Tuna. Ph.D. Thesis, Kyoto University.
- 環境省 (2001) : 4 つの社会・経済シナリオについて－温室効果ガス排出削減シナリオ策定調査報告書－.
- 環境省 (2007) : IPCC 第 4 次評価報告書第 2 作業部会報告書政策決定者向け要約.
- 加藤慶樹 (2004) : 海洋乱流および水温変動がクロマグロ仔魚に及ぼす影響. 修士論文, 東京大学.
- 河宮未知生・羽角博康・坂本天・吉川知里 (2007) : 気候モデルによる地球温暖化時の海洋環境予測. 月刊 海洋, 海洋出版株式会社, 39 (5), 285 - 290.
- Kawasaki, T., Omori, M. (1988) : Fluctuations in the three major sardine stocks in the Pacific and the global trend in temperature. eds. Wyatt, T. and Larraneta, G.. *Long Term Changes in Marine Fish Populations*, 37 - 53.
- Kim, H., Kimura, S., Shinoda, A., Kitagawa, T., Sasai, Y., Sasaki, H. (2007) : Effect of *El Niño* on migration and larval transport of the Japanese eel (*Anguilla japonica*). *ICES Journal of Marine Science*, 64, 1387 - 1395.
- 木本昌秀 (2007) : 将来の気候変化に関する予測. 科学, 岩波書店, 77 (7), 696 - 701.

- Kimura,S., Tsukamoto,K., Sugimoto,T. (1994) : A model for the larval migration of the Japanese eel: roles of the trade winds and salinity front. *Marine Biology*, 119, 185 - 190.
- Kimura,S., Nakai,M., Sugimoto,T. (1997) : Migration of albacore, *Thunnus alalunga*, in the North Pacific Ocean in relation to large oceanic phenomena. *Fisheries Oceanography*, 6, 51 - 57.
- Kimura,S., Döös,K., Coward,A.C. (1999) : Numerical simulation to resolve the issue of downstream migration of the Japanese eel. *Marine Ecology Progress Series*, 186, 303 - 306.
- Kimura,S., Inoue,T., Sugimoto,T. (2001) : Fluctuation in the distribution of low-salinity water in the North Equatorial Current and its effect on the larval transport of the Japanese eel. *Fisheries Oceanography*, 10, 51 - 60.
- 木村伸吾 (2005) : 第 13 章 仔魚の輸送と加入量変動. 渡邊良朗編. 海洋生命系のダイナミクス 海の生物資源, 東海大学出版会, 241 - 258.
- 木村伸吾・加藤慶樹 (2005) : 産卵海域における輸送環境がクロマグロ仔魚に及ぼす影響. 月刊 海洋, 海洋出版株式会社, 37 (8), 568 - 571.
- Kimura,S., Tsukamoto,K. (2006) : The salinity front in the North Equatorial Current : A landmark for the spawning migration of the Japanese eel (*Anguilla japonica*) related to the stock recruitment. *Deep-Sea Research II*, 53, 315 - 325.
- Kimura,S., Kato,Y., Kitagawa,T. (2007) : Fluctuation in spawning environment of Pacific bluefin tuna with global warming and their ecological response. *Climate impacts on oceanic TOP predators*, CS1 - OP1.
- 木村伸吾・北川貴士・加藤慶樹・山岡直樹 (2007) : 地球温暖化に伴うクロマグロおよびニホンウナギの産卵環境の変化とその生態的応答. 月刊 海洋, 海洋出版株式会社, 39 (5), 317 - 322.
- 気象庁 (2005) : 地球温暖化予測情報 第 6 巻.
- 気象庁 (2007a) : IPCC 第 4 次評価報告書第 1 作業部会報告書.
- 気象庁 (2007b) : IPCC 第 4 次評価報告書第 1 作業部会報告書政策決定者向け要約.
- Lehodey,P., Bertignac,M., Hampton,J., Lewis,A., Picaut,J. (1997) : El Niño Southern Oscillation and tuna in the western Pacific. *Nature*, 389, 715 - 717.
- Martinez-Palacios,C.A., Chavez-Sanchez,M.C., Ross,L.G. (1996) : The effects of the water temperature on food intake, growth and body composition of *Cichasoma urophthalmus* (Günther) juveniles. *Aquaculture Research*, 2, 455 - 461.
- 益田玲爾 (2005) : 第 5 章 仔稚魚の行動特性と生き残り. 渡邊良朗編. 海洋生命系のダイナミクス 海の生物資源, 東海大学出版会, 88 - 101.
- 升間主計 (2006) : クロマグロ・キハダの親魚養成と産卵生態に関する研究. 博士論文, 九州大学.
- Masuma,S. (2006) : Maturation and Spawning of Bluefin Tuna in Captivity. *Ecology and Aquaculture of Bluefin Tuna*, Kinki University Press, 15 - 19.
- 升本順夫 (2001) : 2・2 エル・ニーニョーその理解と予測. 日本海洋学会編. 海と環境, 講談社, 78 - 87.
- Minobe,S. (2000) : Spatio-temporal structure of the pentadecadal variability over the North Pacific : Progress in Oceanography, 47, 381 - 408.
- 見延庄士郎 (2001) : 2・3 長期気候変動と中高緯度の大気・海洋変動. 日本海洋学会編. 海と環境, 講談社, 88 - 98.
- 文部科学省, 経済産業省, 気象庁, 環境省 (2007) : IPCC 第 4 次評価報告書統合報告書政

策決定者向け要約.

- 中田英昭 (2004) : 第 2 部 I 卵・稚仔輸送と初期生残. 杉本隆成編. 海流と生物資源, 恒星社厚生閣, 95 - 100.
- Okamura,A., Yamada,Y., Horie,N., Utoh,T., Mikawa,N., Tanaka,S., Tsukamoto,K. (2007) : Effects of water temperature on early development of Japanese eel *Anguilla japonica*, Fisheries Science, 73, 1241 - 1248.
- 沖山宗雄 (1974) : 日本海におけるクロマグロ後期仔魚の出現. 日水研報告, (25), 89 - 97.
- Otake,T., Inagaki,T., Hasumoto,H., Mochioka,N., Tsukamoto,K. (1998) : Diel vertical distribution of *Anguilla japonica* leptocephali. Ichthyological Research, 45, 208 - 211.
- Ridha,M.T., Cruz,E.M., Al-Ameeri,A.A., Al-Ahmed,A.A. (1998) : Effects of controlling temperature and light duration on seed production in tilapia, *Oreochromis spilurus* (Günther). Aquaculture Research, 29, 403 - 410.
- 篠田章 (2004) : ウナギの接岸回遊生態に関する研究. 博士論文, 東京大学.
- 篠田章 (2005) : 第 8 章 ウナギの接岸回遊メカニズム. 渡邊良朗編. 海洋生命系のダイナミクス 海の生物資源, 東海大学出版会, 144 - 167.
- Suigimoto,T., Kimura,S., Tadokoro,K. (2001) : Impact of El Niño events and climate regime shift on living resources in the North Pacific. Progress in Oceanography, 49, 113 - 127.
- 水産庁 (2007) : 水産白書 平成 18 年度 水産の動向.
- 鈴木治郎 (1995) : マグロは絶滅するか. 谷内透・平野禮次郎編. 海と生産力と魚, 恒星社厚生閣, 59 - 71.
- 田所和明 (2001) : 4・2 海洋環境の変化と海洋生態系. 日本海洋学会編. 海と環境, 講談社, 192 - 202.
- 田所和明 (2004) : 第 4 部 IV レジームシフトと親潮域の海洋生態系変動. 杉本隆成編. 海流と生物資源, 恒星社厚生閣, 208 - 216.
- Teo,S., Boustany,A., Block,B. (2007) : Oceanographic Preference of Atlantic bluefin tuna, *Thunnus thynnus*, on the Gulf of Mexico breeding grounds. Marine Biology, 152, 1105 - 1119.
- 辻祥子 (2002) : クロマグロの初期生残戦略. 平成 14 年度日本水産学会講演要旨集, 日本水産学会.
- Tsuji,S., Itoh,T. (1998) : Ecology and Recruitment Fluctuation of Northern Bluefin Tuna. Proceedings of Japan-China Joint Symposium on CSSCS, 321 - 330.
- Tsukamoto,K., Otake,T., Mochioka,N., Lee,T., Fricke,H., Inagaki,T., Aoyama,J., Ishikawa,S., Kimura,S., Miller,M., Hasumoto,H., Oya,M., Suzuki,Y. (2003) : Seamounts, new moon and eel spawning : The search for the spawning site of the Japanese eel. Environmental Biology of Fishes, 66, 221 - 229.
- Tsukamoto,K. (2006) : Spawning of eels near a seamount. Nature, 439, 929.
- 渡邊俊 (2001) : ウナギの分類学. 海洋と生物, 生物研究社, 133, 115 - 122.
- 渡邊良朗 (2005) : 序章 自然変動する生物資源. 渡邊良朗編. 海洋生命系のダイナミクス 海の生物資源, 東海大学出版会, 1 - 18.
- 山中一 (1982) : 太平洋におけるクロマグロの生態と資源. 水産研究行書, 水産資源保護協会, 7 - 37.
- 米盛保 (1989) : 第 1 章 IV 太平洋クロマグロの資源の現状. 農林水産技術会議事務局編集. 海洋牧場 マリーナランディング計画, 恒星社厚生閣, 37 - 57.

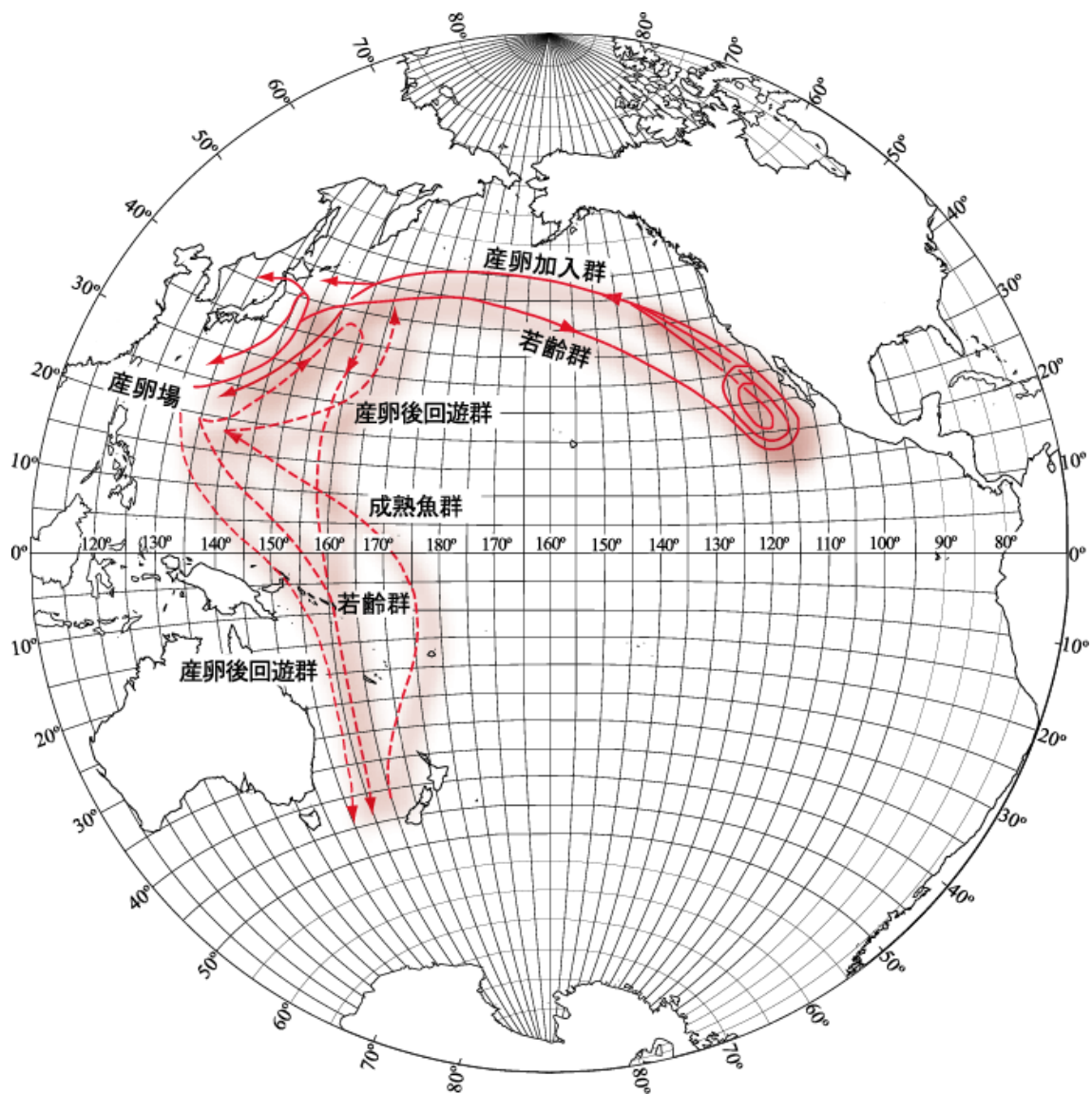


Fig. 1 太平洋におけるクロマグロの回遊経路モデル
(Bayliff (1980) より)

実線で示した回遊経路に比べて、破線は推測に近い回遊経路を表す。

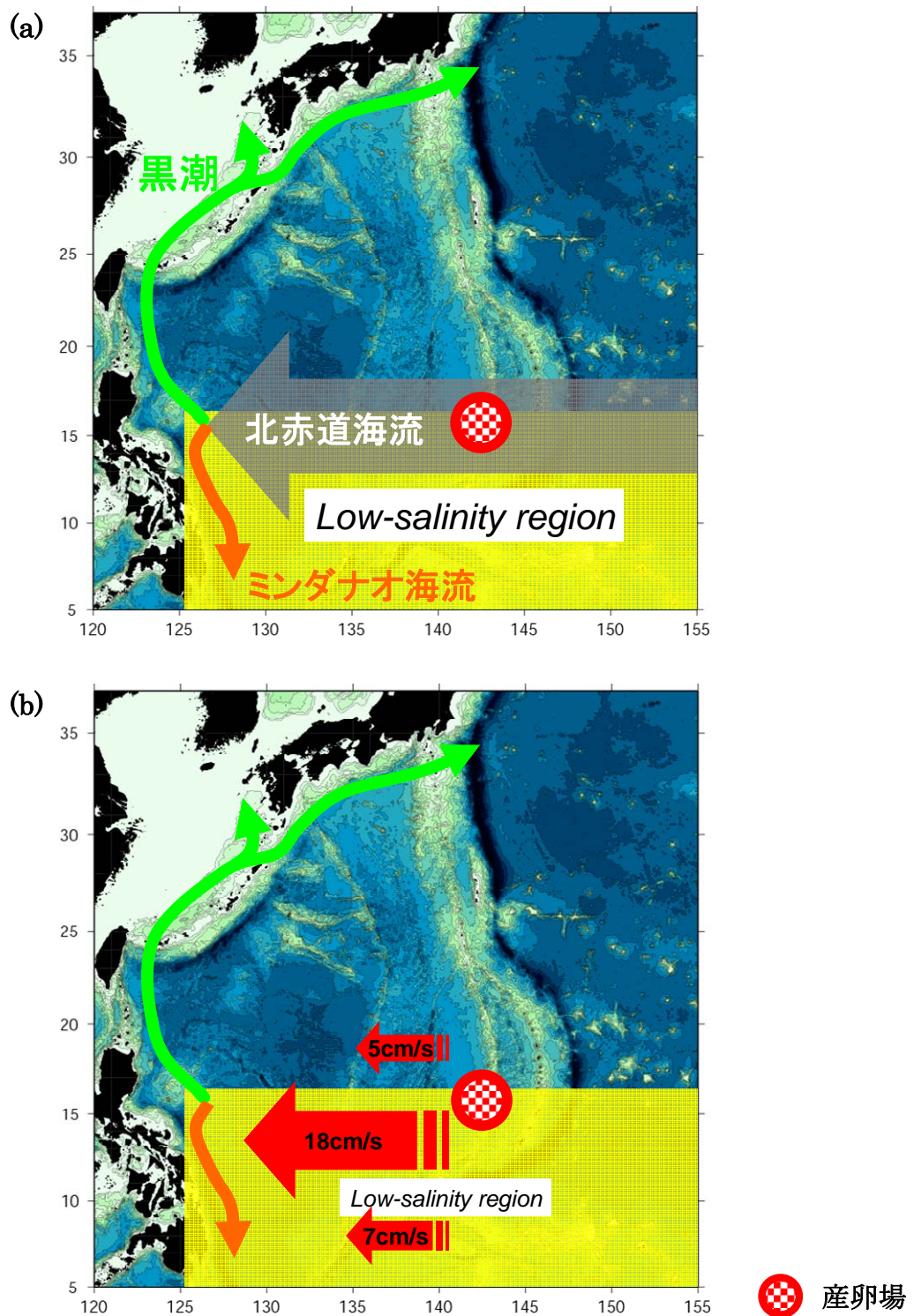


Fig. 2(a), (b) ウナギの卵・仔魚輸送に関わる北太平洋の海洋構造

(a) : 海流と水塊配置

(卵・仔魚輸送に影響を与える海流として、北赤道海流、黒潮、ミンダナオ海流が挙げられる。)

(b) : 平均流速の分布

(北赤道海流域では、緯度によって流速が大きく異なる。)

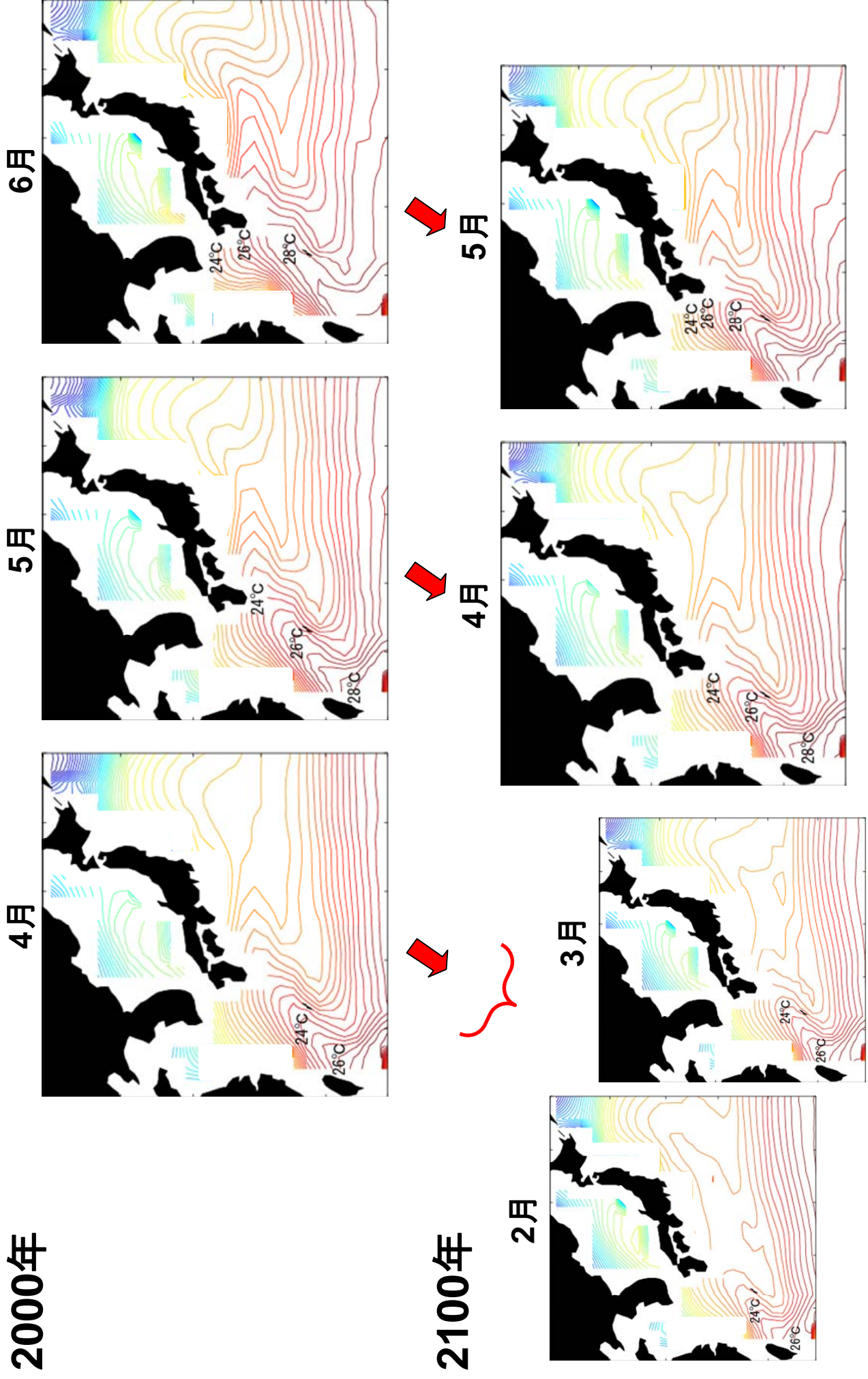


Fig. 3 地球温暖化前後での水温構造の遷移

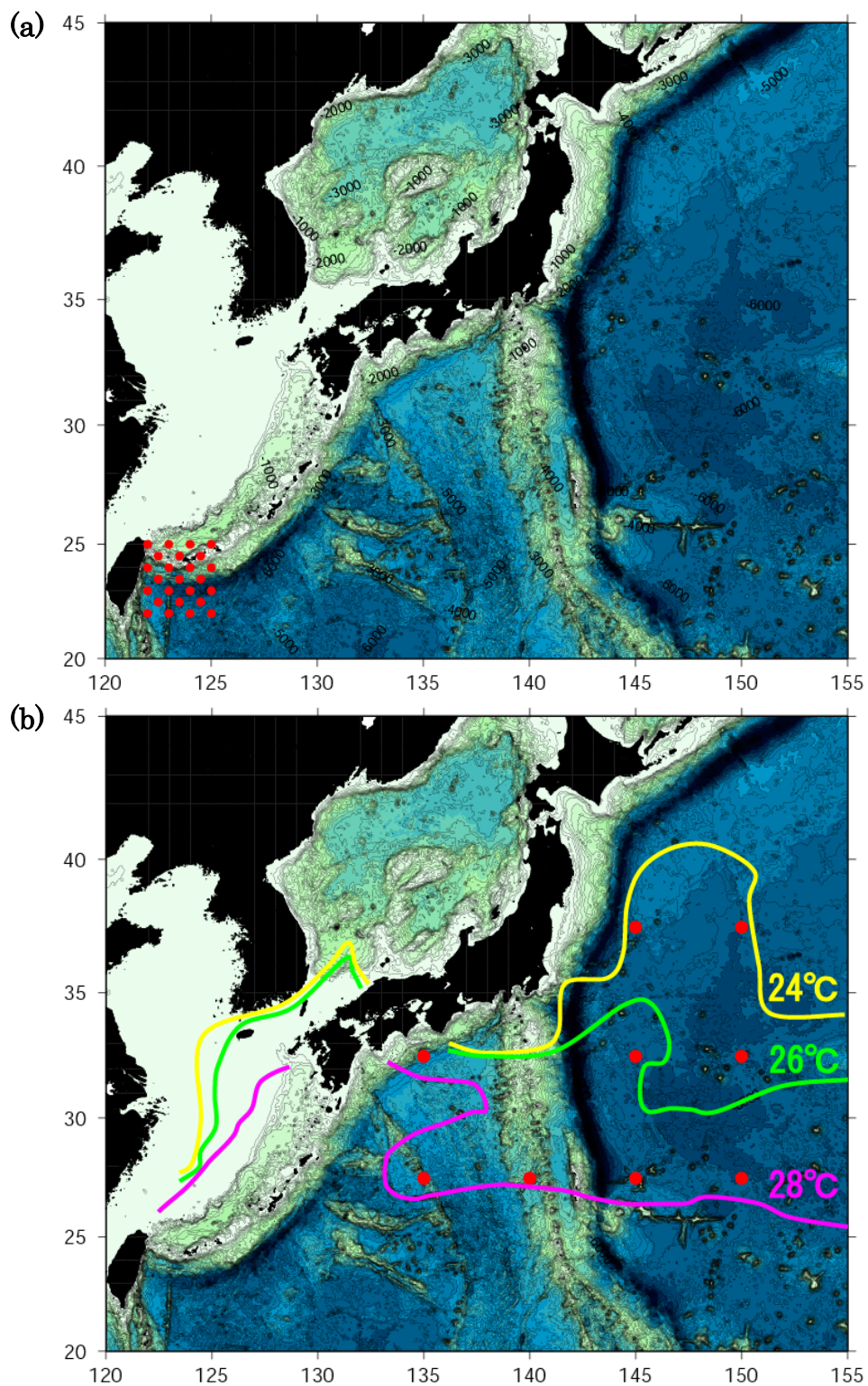


Fig. 4 粒子追跡実験で設定した黒潮流域での産卵場

(a): 台湾東方海域主産卵場 (2000年4-6月, シナリオ1 (2100年2-5月), シナリオ2 (2100年4, 5月), シナリオ3 (2100年4-6月))
 (b): 太平洋新産卵場 (シナリオ2 (2100年6月))

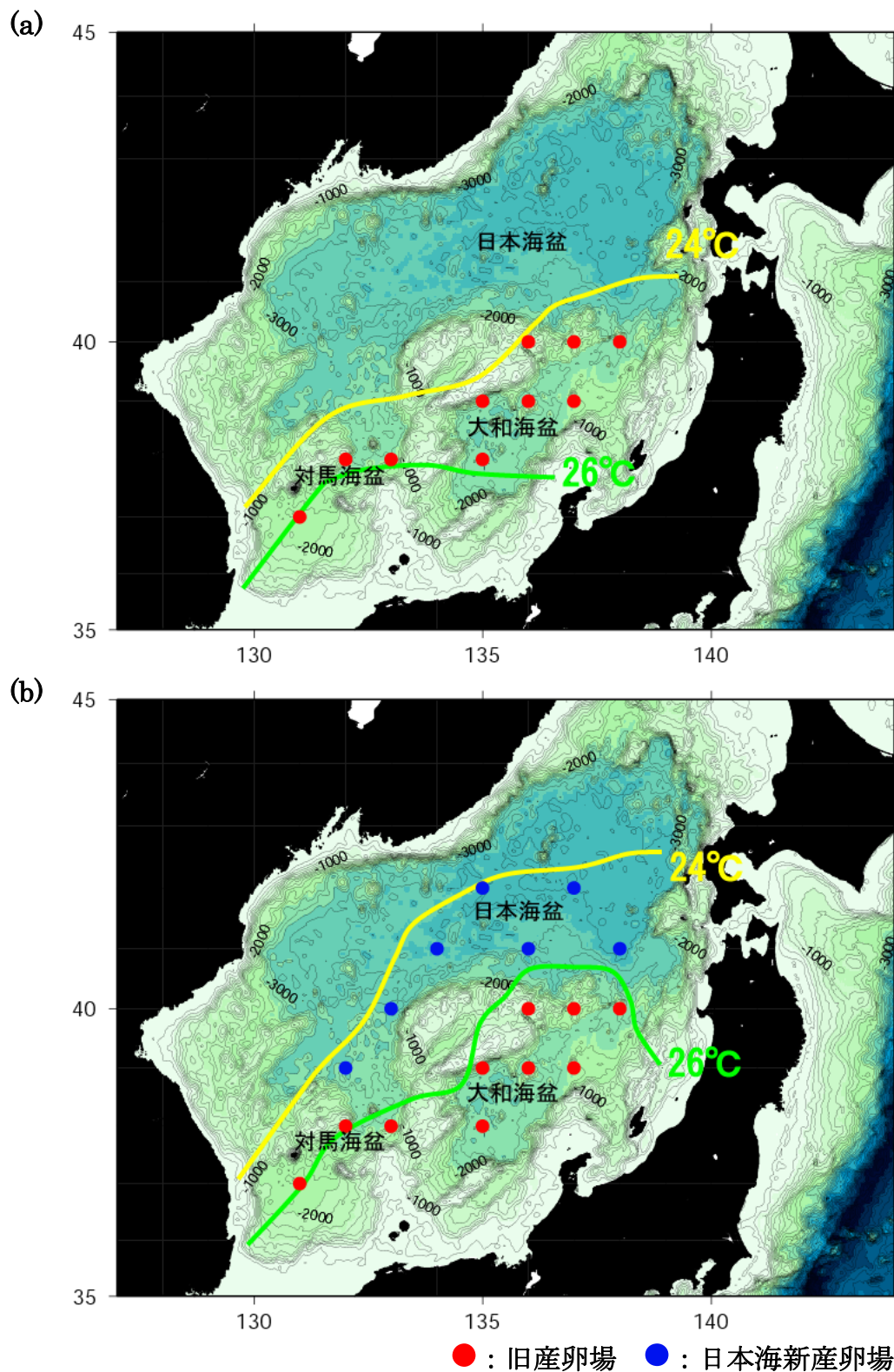


Fig. 5 粒子追跡実験で設定した日本海での産卵場（シナリオ 4）
 (a) : 2000 年における産卵場 (b) : 2100 年における産卵場

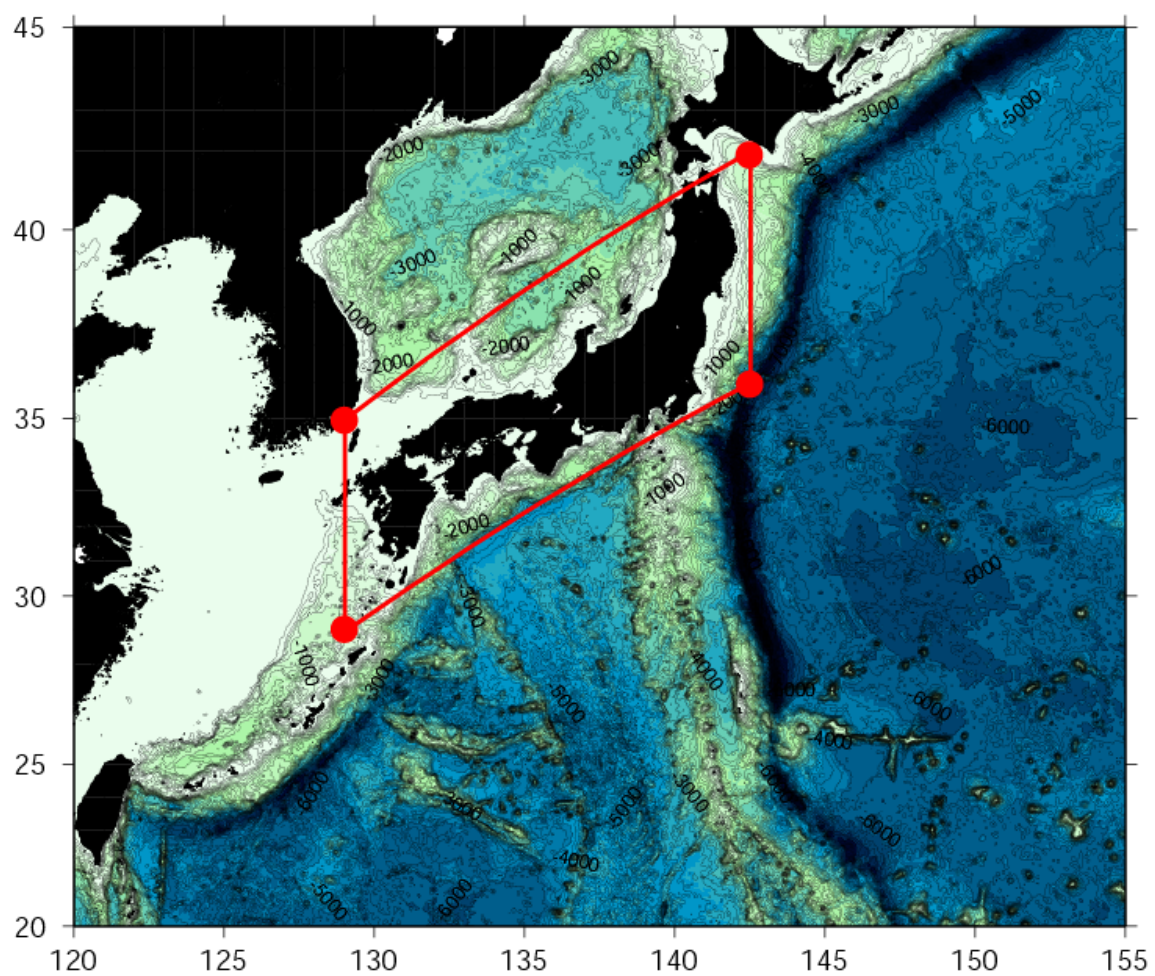
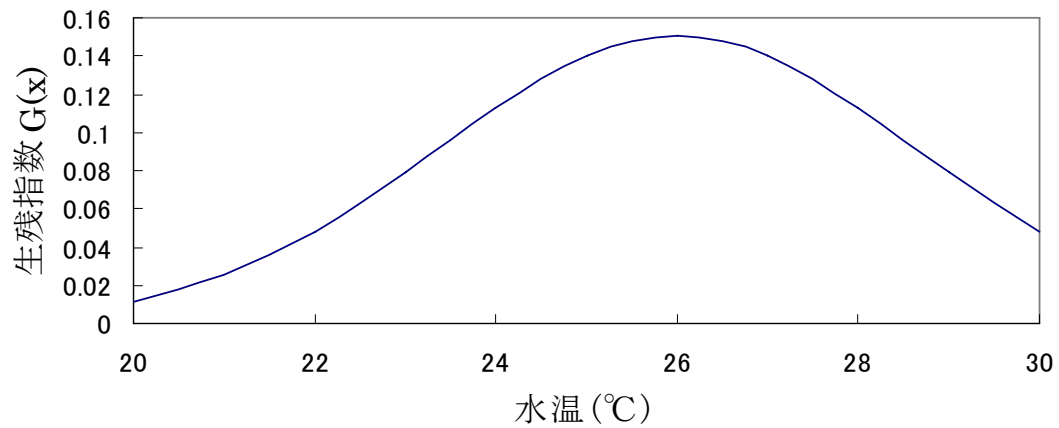


Fig. 6 粒子追跡実験で設定したクロマグロおよびウナギの成育可能海域

粒子追跡実験においては、それぞれの輸送期間（クロマグロ：30日，ウナギ：200日）内に成育可能海域に輸送されたものを到達とみなした。

Table 1 水温毎のクロマグロ孵化指数 $F(x)$

| 水温(°C) | 孵化指数 $F(x)$ |
|-------------------------|-------------|
| $x < 23.0$ | 0.75 |
| $23.0 \leq x < 24.0$ | 0.85 |
| $24.0 \leq x \leq 28.0$ | 0.95 |
| $28.0 < x \leq 29.0$ | 0.85 |
| $29.5 < x$ | 0.75 |

**Fig. 7** クロマグロ生存指数 $G(x)$ 設定に用いた
水温毎の生存指数の正規分布**Table 2** 水温毎のクロマグロ生存指数 $G(x)$

| 水温(°C) | 生存指数 $G(x)$ |
|----------------------|-------------|
| $x < 20.5$ | 0.0115 |
| $20.5 \leq x < 21.5$ | 0.0253 |
| $21.5 \leq x < 22.5$ | 0.0481 |
| $22.5 \leq x < 23.5$ | 0.0793 |
| $23.5 \leq x < 24.5$ | 0.1133 |
| $24.5 \leq x < 25.5$ | 0.1404 |
| $25.5 \leq x < 26.5$ | 0.1508 |
| $26.5 \leq x < 27.5$ | 0.1404 |
| $27.5 \leq x < 28.5$ | 0.1133 |
| $28.5 \leq x < 29.5$ | 0.0793 |
| $29.5 \leq x$ | 0 |

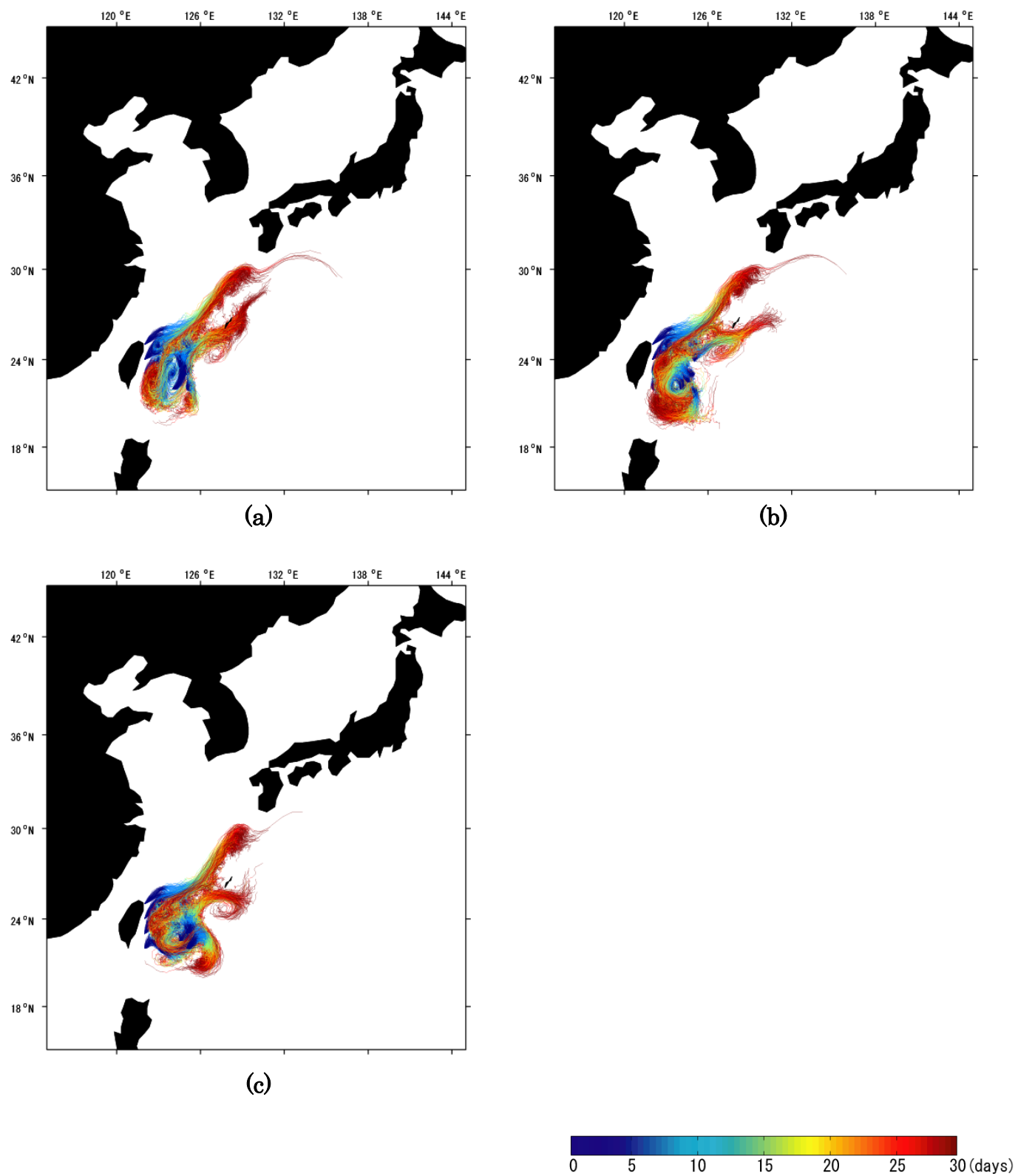


Fig. 8(a) - (c) 2000 年におけるクロマグロの粒子追跡実験の結果
 (4 - 6 月 : 台湾東方海域)
 (a) : 2000 年 4 月 (b) : 2000 年 5 月 (c) : 2000 年 6 月

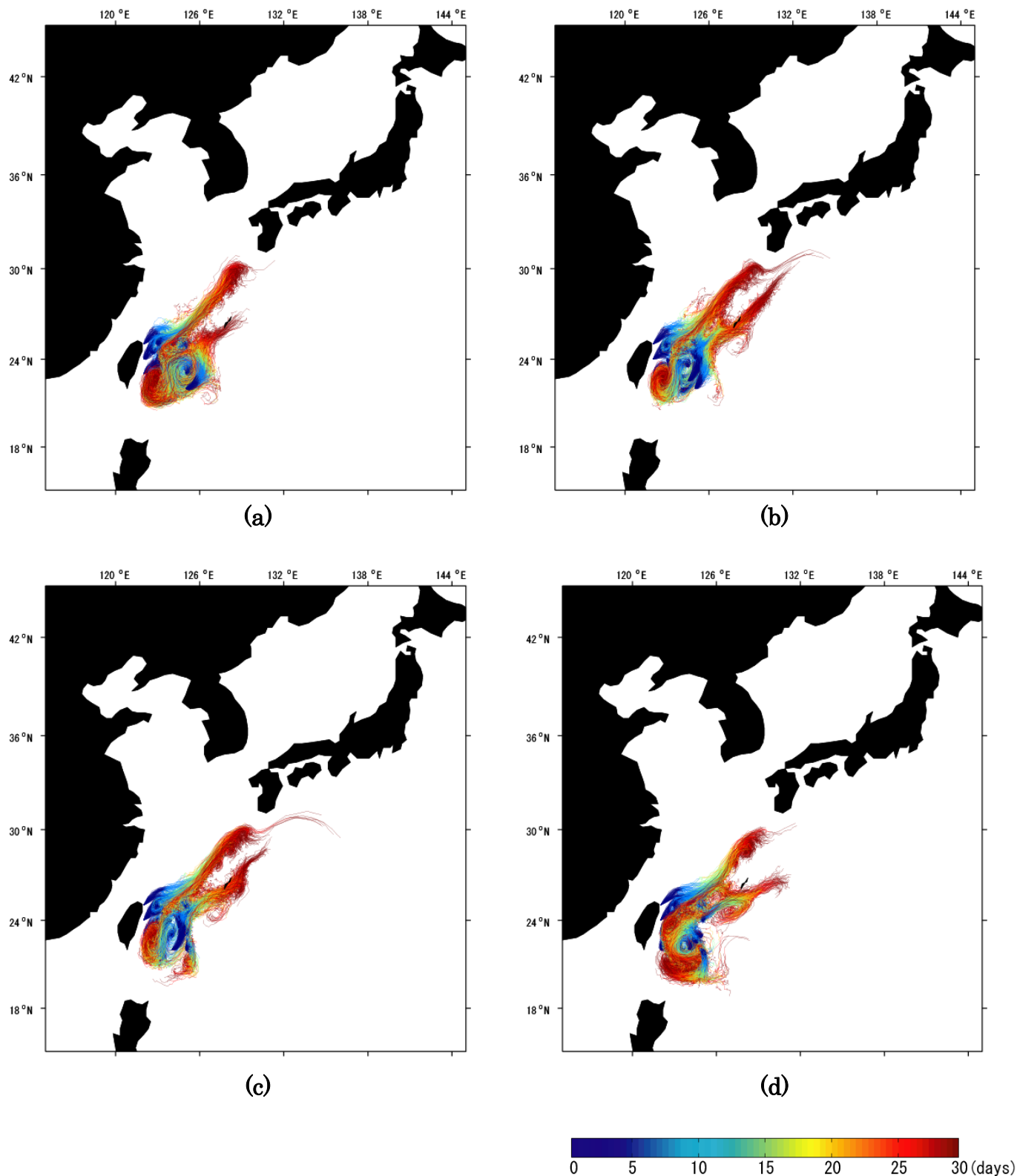


Fig. 9(a) - (d) シナリオ 1 におけるクロマグロの粒子追跡実験の結果
 (2100 年 2 - 5 月 : 台湾東方海域)
 (a) : 2100 年 2 月 (b)2100 年 3 月 (c)2100 年 4 月 (d)2100 年 5 月

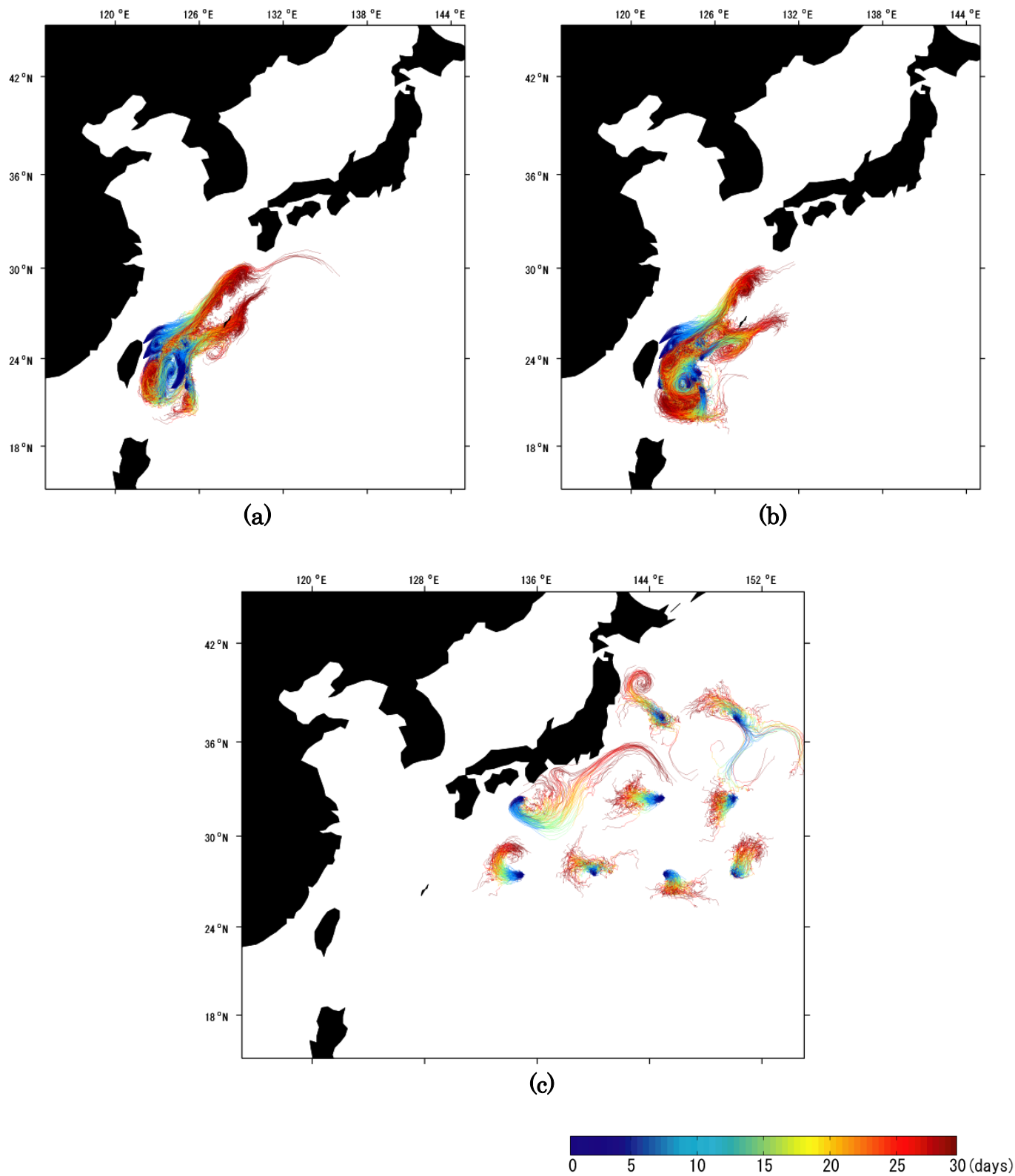
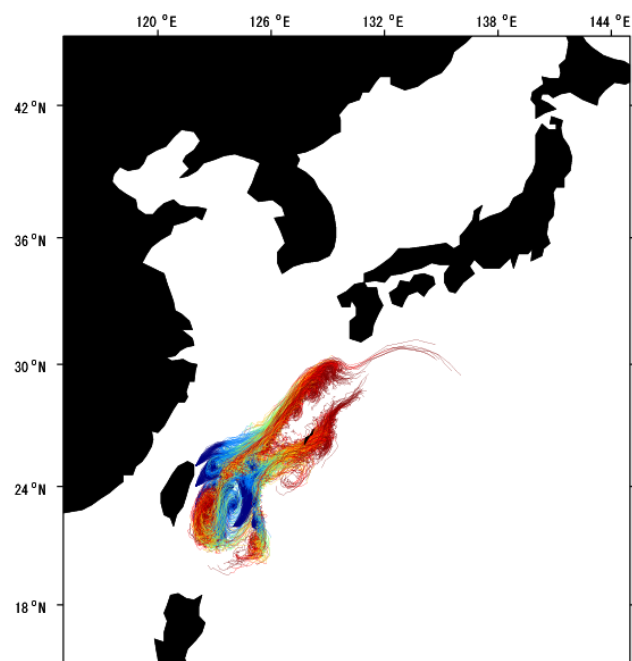
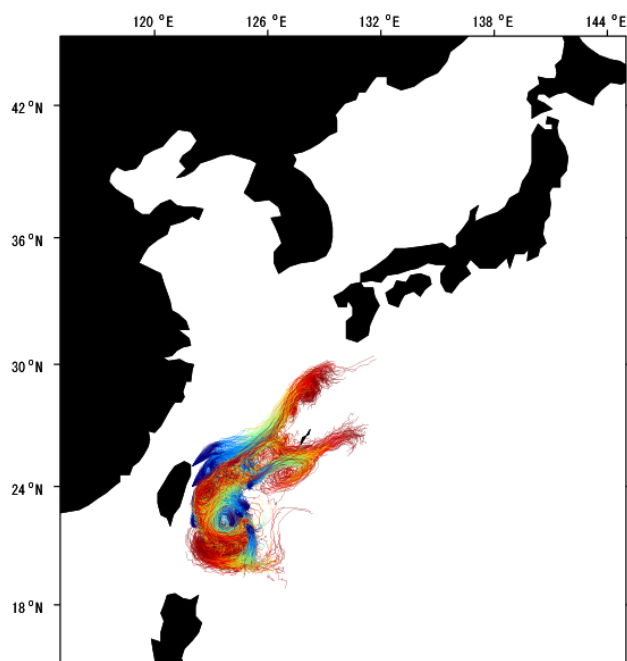


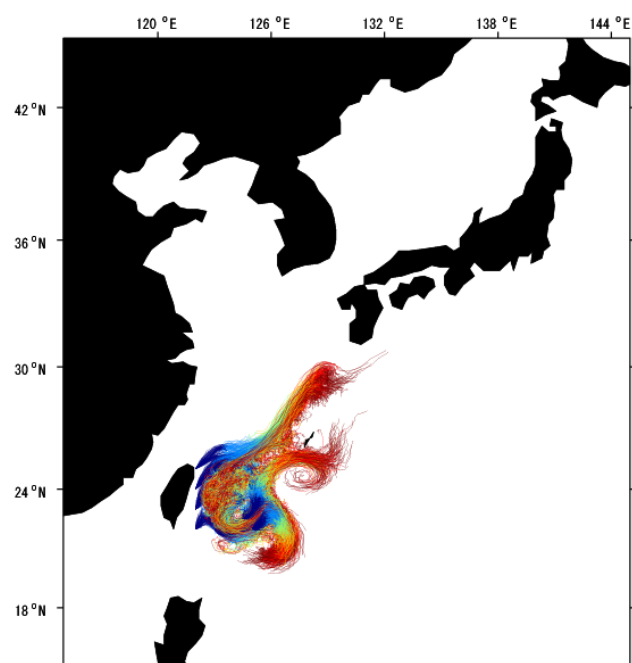
Fig. 10(a) - (c) シナリオ 2 におけるクロマグロの粒子追跡実験の結果
 (2100 年 4, 5 月 : 台湾東方海域 2100 年 6 月 : 太平洋新産卵場)
 (a) : 2100 年 4 月 (b)2100 年 5 月 (c)2100 年 6 月



(a)



(b)



(c)

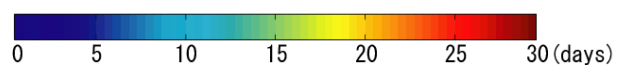


Fig. 11(a) - (c) シナリオ 3 におけるクロマグロの粒子追跡実験の結果
(2100 年 2 - 6 月 : 台湾東方海域)

(a) : 2100 年 4 月 (b) 2100 年 5 月 (c) 2100 年 6 月

**Table 3(a) - (d) クロマグロ粒子追跡実験から得られた
2000 年および 2100 年の各シナリオにおける粒子の到達数，生残数**

到達数とは、輸送期間（30 日）内に成育場に到達した全ての粒子数を指す。生残数とは、到達数から輸送過程で生残に不適切な水温（29.5℃以上）を経験した粒子を除いた粒子数を指す。総到達率とは、総投入粒子数に対する到達数の割合である。生残到達率とは、総投入粒子数に対する生残数の割合である。

(a) 2000 年（4 - 6 月：台湾東方海域）

| | | | 2000 年 4 月 | 2000 年 5 月 | 2000 年 6 月 |
|-------|--|--|------------|------------|------------|
| 投入粒子数 | | | 2500 | 2500 | 2500 |
| 到達数 | | | 77 | 78 | 55 |
| 生残数 | | | 77 | 78 | 55 |
| 総到達率 | | | 2.80% | | |
| 生残到達率 | | | 2.80% | | |

(b) シナリオ 1（2100 年 2 - 5 月：台湾東方海域）

| | 2100 年 2 月 | 2100 年 3 月 | 2100 年 4 月 | 2100 年 5 月 | |
|-------|------------|------------|------------|------------|--|
| 投入粒子数 | 2500 | 2500 | 2500 | 2500 | |
| 到達数 | 37 | 109 | 73 | 36 | |
| 生残数 | 36 | 109 | 73 | 3 | |
| 総到達率 | 2.55% | | | | |
| 生残到達率 | 2.21% | | | | |

(c) シナリオ 2（2100 年 4 - 5 月：台湾東方海域 6 月：太平洋新産卵場）

| | | | 2100 年 4 月 | 2100 年 5 月 | 2100 年 6 月 |
|-------|--|--|--------------------|------------|------------|
| 投入粒子数 | | | 2500 | 2500 | 900 |
| 到達数 | | | 73 | 36 | 20 |
| 生残数 | | | 73 | 3 | 5 |
| 総到達率 | | | 2.19%（6 月のみ：2.2%） | | |
| 生残到達率 | | | 1.37%（6 月のみ：0.56%） | | |

(d) シナリオ 3（2100 年 4 - 6 月：台湾東方海域）

| | | | 2100 年 4 月 | 2100 年 5 月 | 2100 年 6 月 |
|-------|--|--|------------|------------|------------|
| 投入粒子数 | | | 2500 | 2500 | 2500 |
| 到達数 | | | 73 | 36 | 54 |
| 生残数 | | | 73 | 3 | 0 |
| 総到達率 | | | 2.17% | | |
| 生残到達率 | | | 1.01% | | |

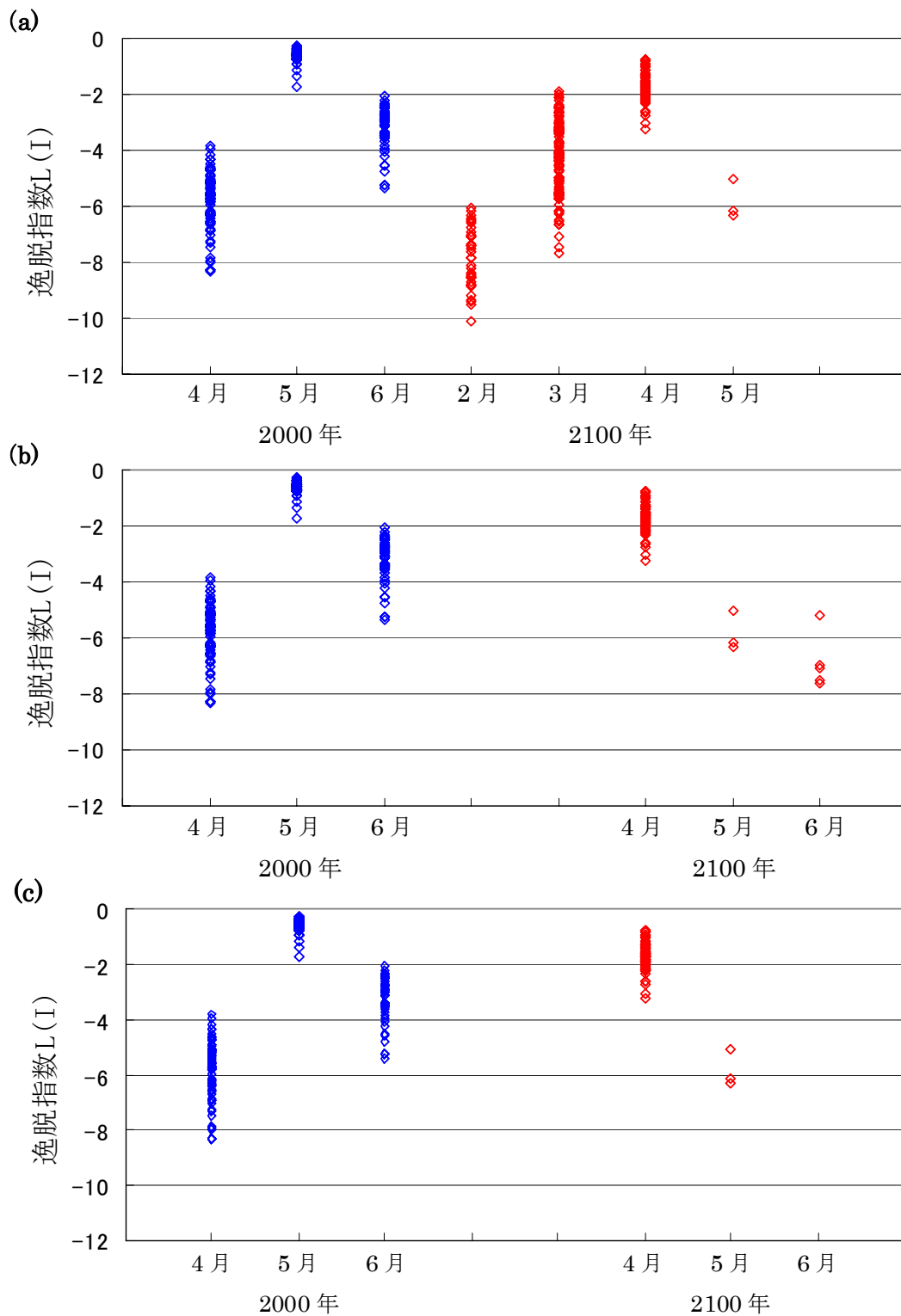
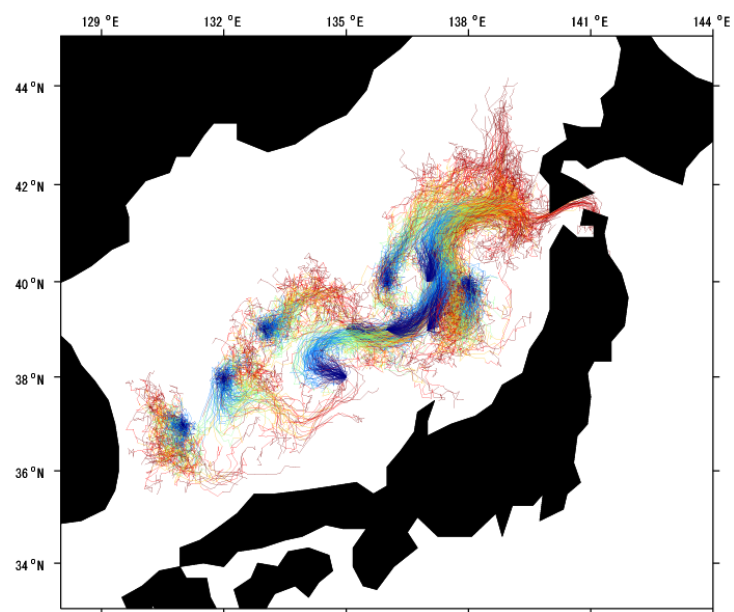
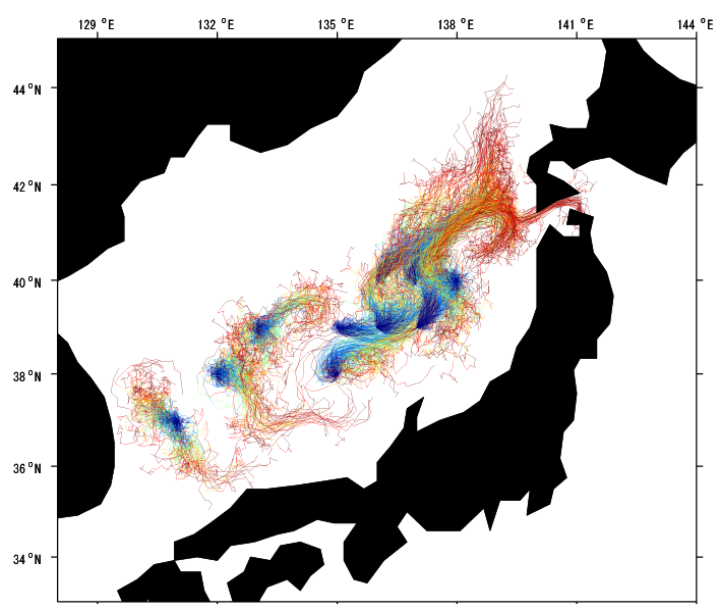


Fig. 12(a) - (c) 2000 年および各シナリオにおけるクロマグロの逸脱指数 $L(I)$
(a) : 2000 年, シナリオ 1 (b) : 2000 年, シナリオ 2 (c) 2000 年, シナリオ 3

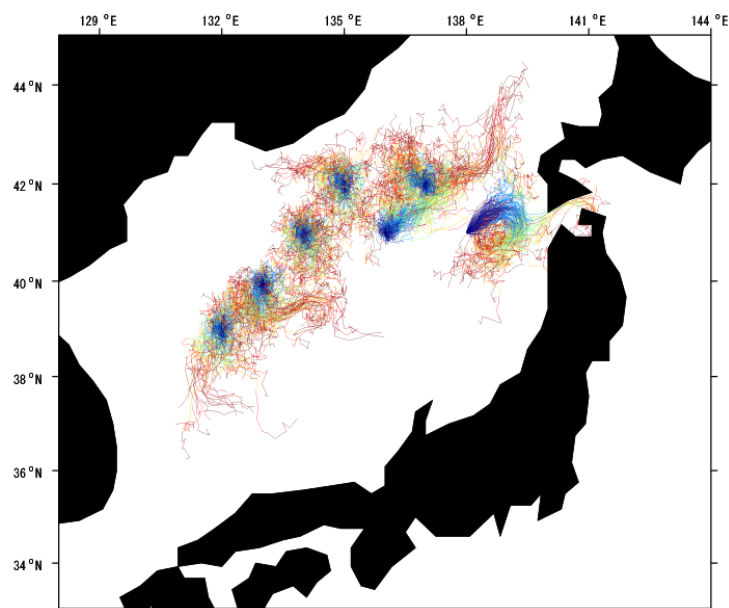
輸送過程で生残した全粒子の逸脱指数 $L(I)$ を産卵月ごとに示す。ただし、シナリオ 3 の 6 月では、粒子の生残は無い。逸脱指数 $L(I)$ が 0 に近いほど、粒子が最適水温に近い水温で輸送されたことを、また、分散の幅が大きいほど、輸送過程での水温構造の変動幅が大きいことを表す。



(a)



(b)



(c)

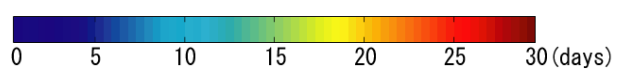


Fig. 13(a) - (c) 日本海におけるクロマグロの粒子追跡実験の結果
(a) : 2000 年 (b)2100 年 旧産卵場 (c) : 2100 年新産卵場

Table 4 日本海産卵場からのクロマグロ粒子追跡実験によって得られた
2000 年および 2100 年における粒子の到達数，生残数

到達数とは、輸送期間（30 日）内に成育場に到達した全ての粒子数を指す。生残数とは、到達数から輸送過程で生残に不適切な水温（29.5℃以上）を経験した粒子を除いた粒子数を指す。総到達率とは、総投入粒子数に対する到達数の割合である。生残到達率とは、総投入粒子数に対する生残数の割合である。

| | 2000 年 8 月 | 2100 年 7 月 | |
|-------|------------|------------|-------|
| | | 旧産卵場 | 新産卵場 |
| 投入粒子数 | 1000 | 1000 | 700 |
| 到達数 | 291 | 239 | 31 |
| 生残数 | 267 | 206 | 13 |
| 総到達率 | 29.1% | 23.9% | 4.43% |
| 生残到達率 | 26.7% | 20.6% | 1.86% |

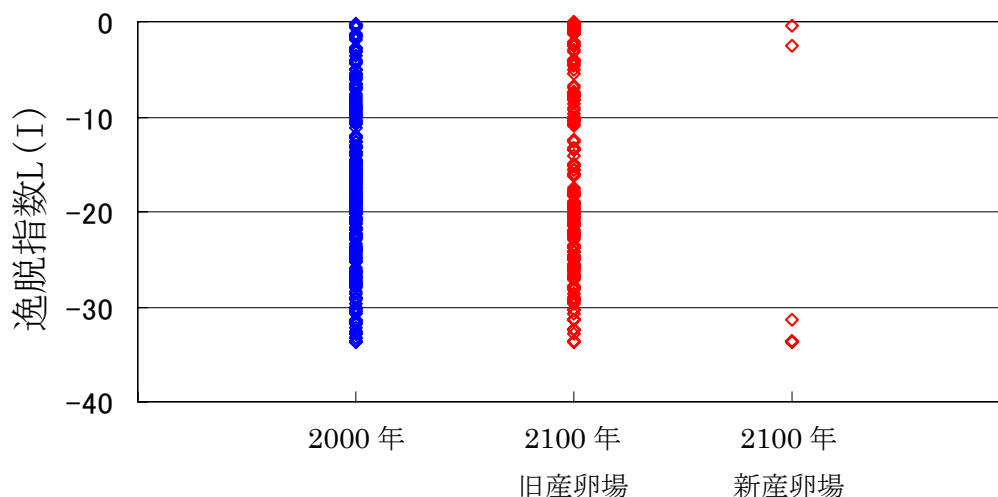
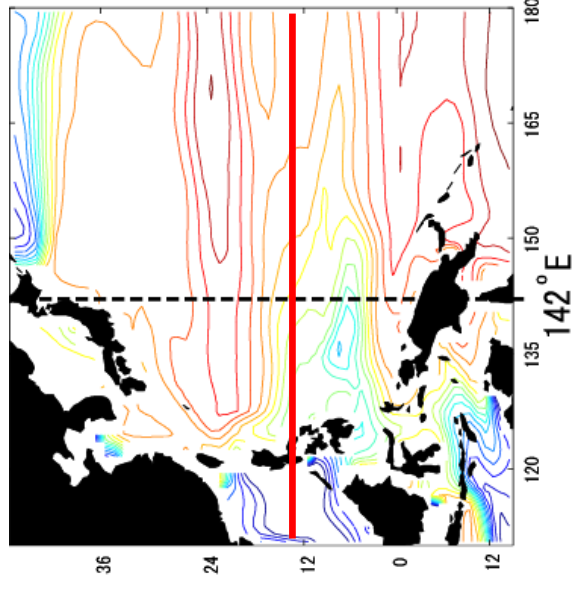


Fig. 14 日本海におけるクロマグロの逸脱指数 $L(I)$

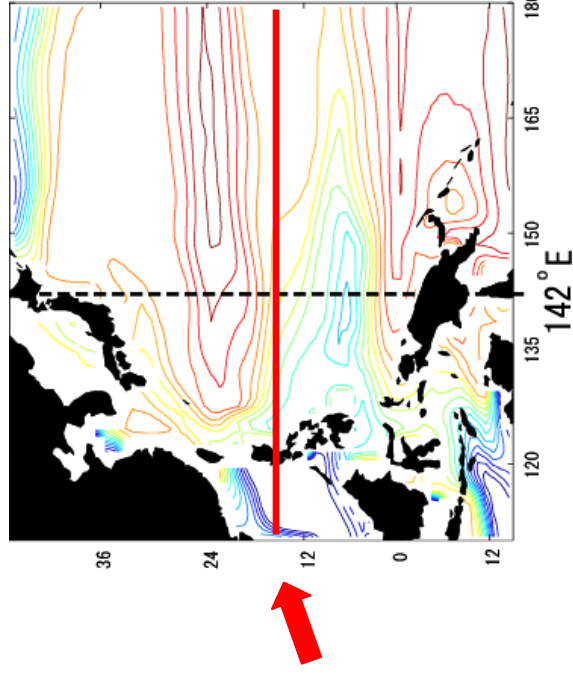
輸送過程で生残した全粒子の逸脱指数 $L(I)$ を示す。逸脱指数 $L(I)$ が 0 に近いほど、粒子が最適水温に近い水温で輸送されたことを表す。

2000年



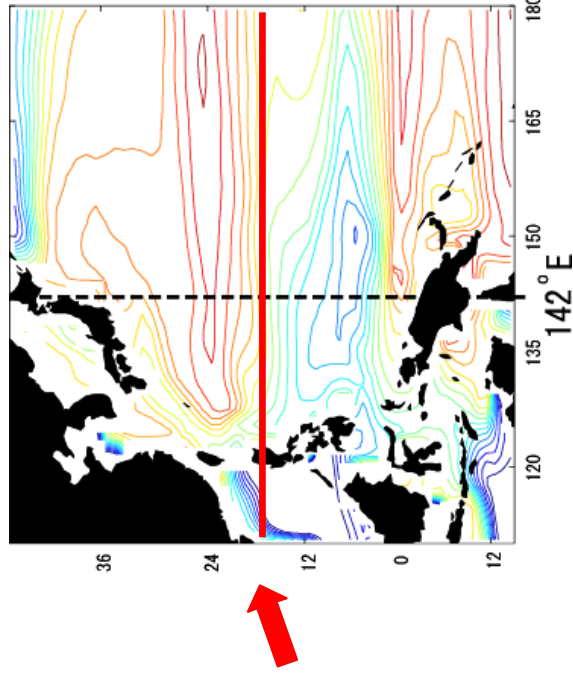
13.9°N

2050年



14.8°N

2100年



17.1°N

Fig. 15 地球温暖化に伴う塩分フロントの北上

Table 5 19.0 - 31.0℃におけるウナギ *Anguilla japonica* の孵化率、摂餌開始時の生残率および奇形率 (Okamura et al. (2007) より)

| Temperature (℃) | Hatched larvae (%) | Survived larvae (%) | Deformed larvae (%) |
|-----------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| | (n=5) | (n=5) | (n=5) |
| 19.0 | 62.0±31.2 | 45.3±42.6 | 98.1±2.6 |
| 22.0 | 76.3±25.3 | 60.9±37.6 | 77.3±18.7 |
| 25.0 | 35.8±18.1 | 85.6±12.7 | 42.9±21.5 |
| 28.0 | 86.3±10.0 | 72.7±28.1 | 22.6±17.5 |
| 31.0 | 0.0 | — | — |

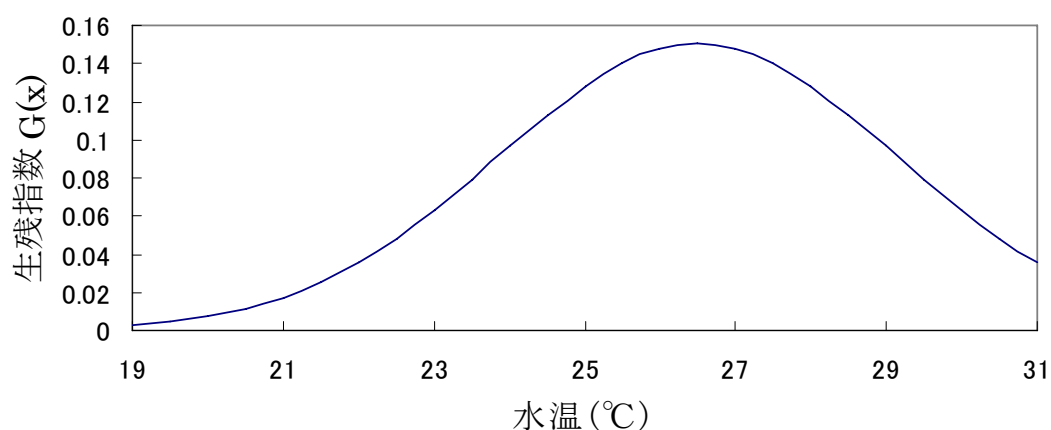


Fig. 16 ウナギ生残指数 $G(x)$ 設定に用いた水温毎の生残指数の正規分布

Table 6 水温毎のウナギ生残指数 $G(x)$

| 水温(℃) | 生残指数 $G(x)$ |
|----------------------|-------------|
| $x < 19.5$ | 0.0027 |
| $19.5 \leq x < 20.5$ | 0.0074 |
| $20.5 \leq x < 21.5$ | 0.0174 |
| $21.5 \leq x < 22.5$ | 0.0355 |
| $22.5 \leq x < 23.5$ | 0.0629 |
| $23.5 \leq x < 24.5$ | 0.0965 |
| $24.5 \leq x < 28.5$ | 0.1284 * |
| $28.5 \leq x < 29.5$ | 0.0965 |
| $29.5 \leq x < 30.5$ | 0.0629 |
| $30.5 \leq x$ | 0 |

* $G(\text{opt})$ (=0.1284)

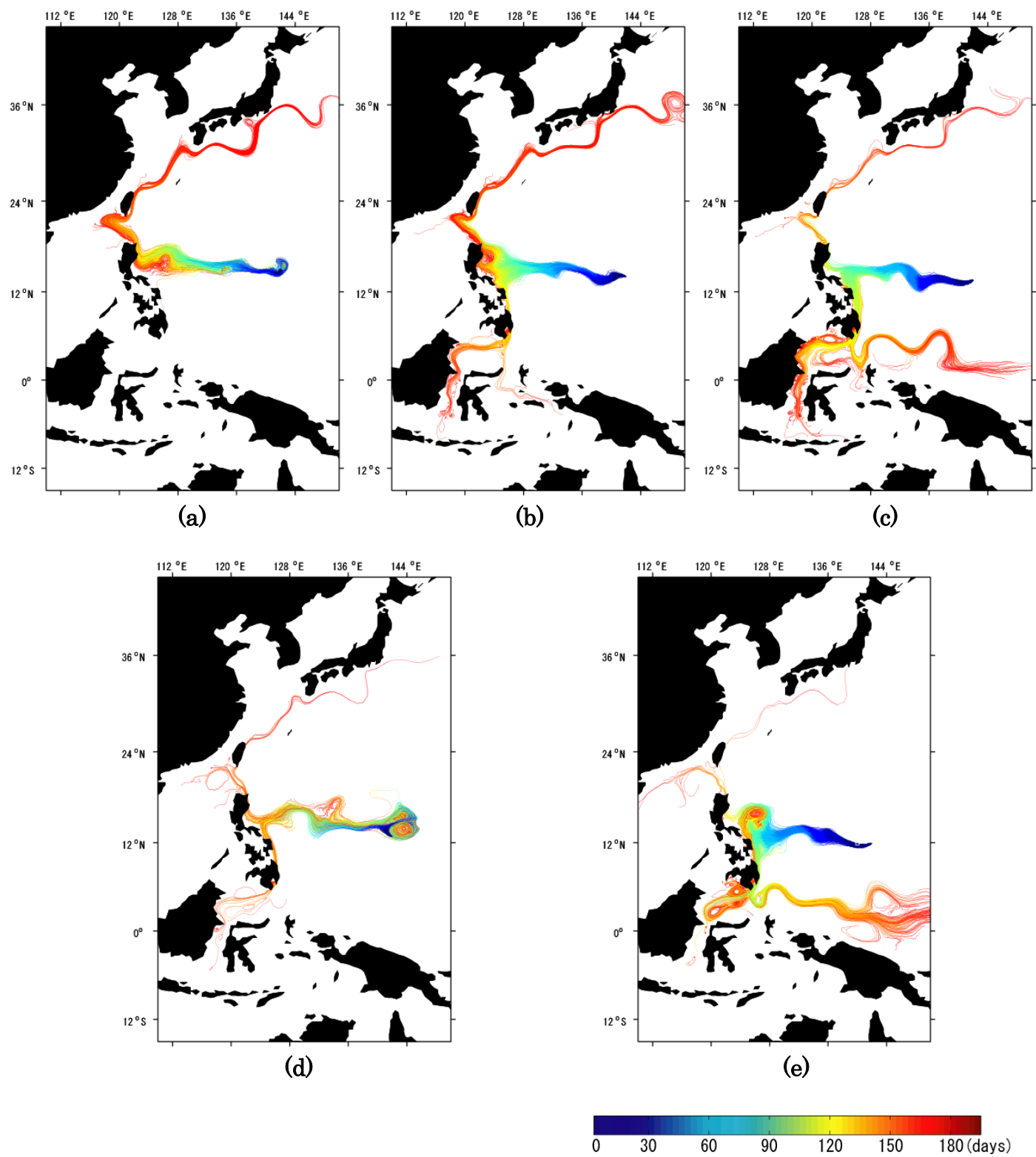


Fig. 17(a) - (e) 2000 年におけるウナギの粒子追跡実験の結果 (6 - 10 月)
 (a) : 2000 年 6 月 (b)2000 年 7 月 (c)2000 年 8 月
 (d)2000 年 9 月 (e)2000 年 10 月

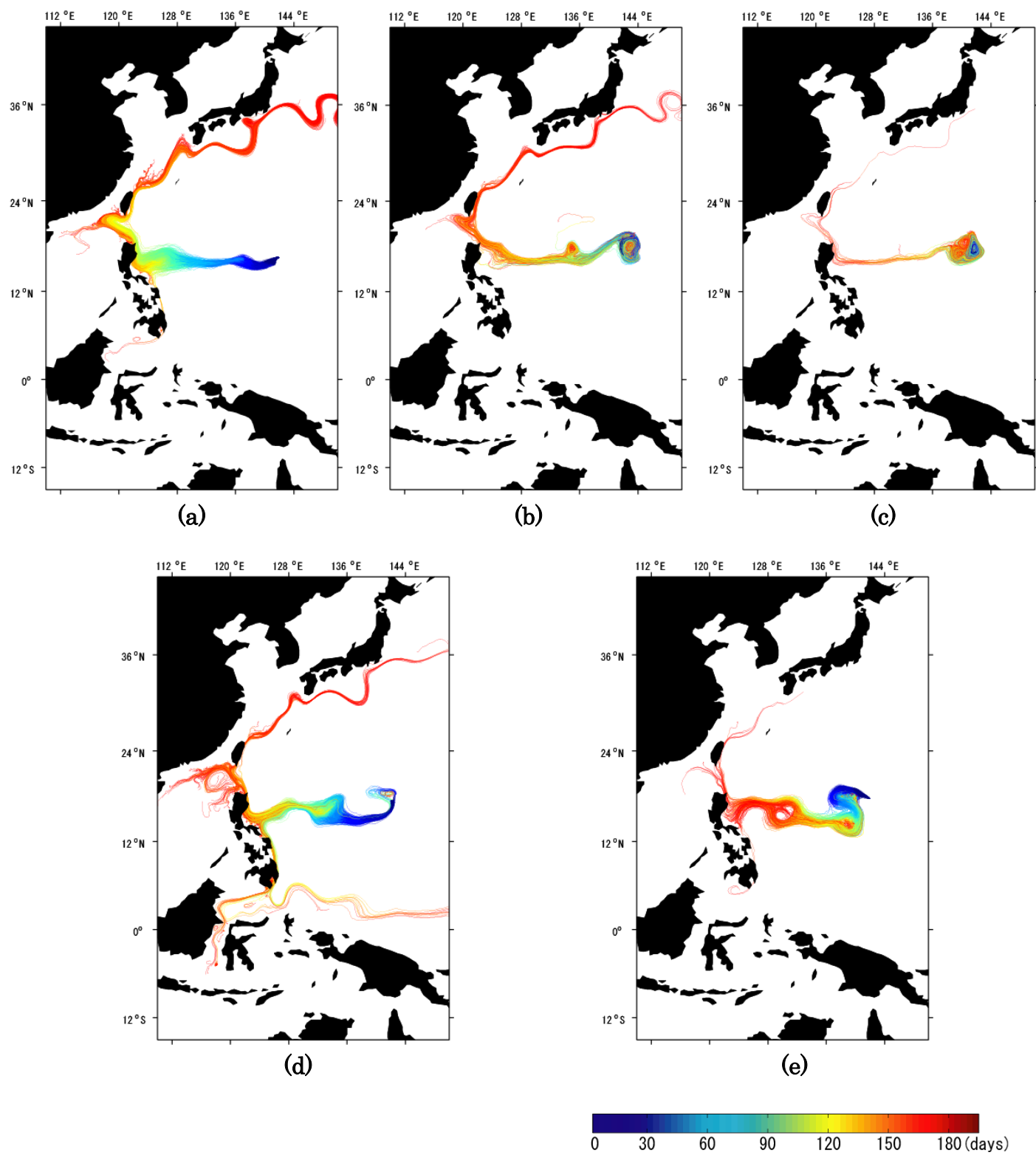


Fig. 18(a) - (e) 2100 年におけるウナギの粒子追跡実験の結果 (6 - 10 月)
 (a) : 2100 年 6 月 (b)2100 年 7 月 (c)2100 年 8 月
 (d)2100 年 9 月 (e)2100 年 10 月

**Table 7(a), (b) ウナギ粒子追跡実験によって得られた
2000 年および 2100 年における粒子の到達数, 生残数**

到達数とは、輸送期間（30 日）内に成育場に到達した全ての粒子数を指す。生残数とは、到達数から輸送過程で生残に不適切な水温（29.5℃以上）を経験した粒子を除いた粒子数を指す。総到達率とは、総投入粒子数に対する到達数の割合である。生残到達率とは、総投入粒子数に対する生残数の割合である。

(a) 2000 年

| | 2000 年 6 月 | 2000 年 7 月 | 2000 年 8 月 | 2000 年 9 月 | 2000 年 10 月 |
|-------|------------|------------|------------|------------|-------------|
| 投入粒子数 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 |
| 到達数 | 35 | 17 | 3 | 4 | 1 |
| 生残数 | 31 | 11 | 3 | 3 | 1 |
| 総到達率 | 2.40% | | | | |
| 生残到達率 | 1.96% | | | | |

(b) 2100 年

| | 2100 年 6 月 | 2100 年 7 月 | 2100 年 8 月 | 2100 年 9 月 | 2100 年 10 月 |
|-------|------------|------------|------------|------------|-------------|
| 投入粒子数 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 |
| 到達数 | 55 | 6 | 0 | 18 | 2 |
| 生残数 | 37 | 4 | 0 | 14 | 2 |
| 総到達率 | 3.24% | | | | |
| 生残到達率 | 2.28% | | | | |

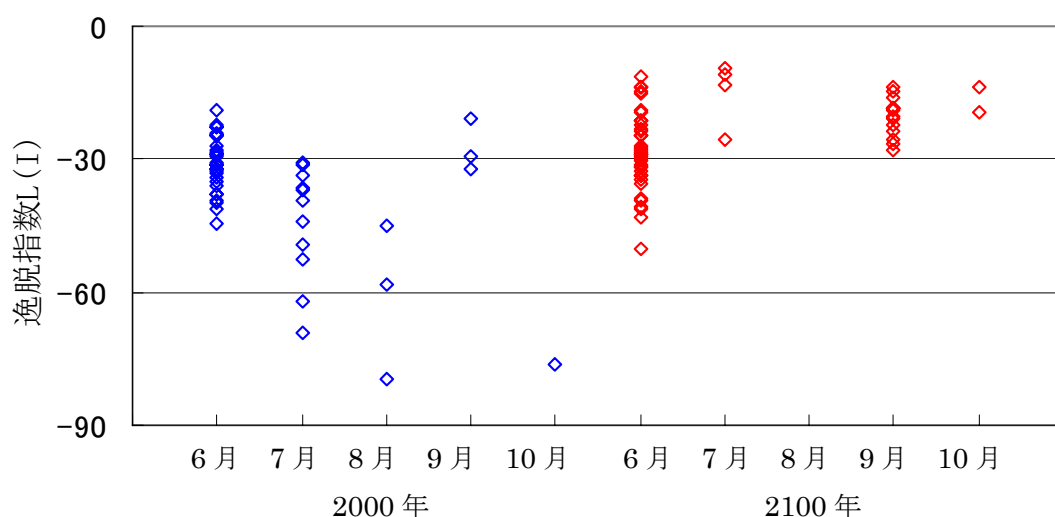


Fig. 19 2000 年および 2100 年におけるウナギの逸脱指数 L(I)

輸送過程で生残した全粒子の逸脱指数 $L(I)$ を産卵月毎に示す。逸脱指数 $L(I)$ が 0 に近いほど、粒子が最適水温に近い水温で輸送されたことを表す。また、分散の幅が大きいほど、輸送過程での水温構造の変動幅が大きいことを表す。

地球温暖化がクロマグロおよびウナギの初期生活史に与える影響

2008 年 3 月 自然環境学専攻 66734 山岡直樹
指導教員；木村伸吾 教授

キーワード；地球温暖化，クロマグロ，ウナギ，卵・仔魚輸送，数値シミュレーション

1. 緒 論

クロマグロ (*Thunnus orientalis*) およびウナギ (*Anguilla japonica*) はともに我が国の水産業上重要な魚種である。両種に共通する特徴として、限定的な海域で産卵を行うことが挙げられる。したがって、産卵場が非限定的な魚種の資源量に比べて、これらの資源量は産卵場の環境変動の影響を受けやすいと考えられる。一般に、魚類の資源変動の鍵を握っているのは、仔稚魚期における餌料環境と、卵・仔稚魚を産卵場から生育場に輸送する物理環境であると言われている。卵や仔稚魚は遊泳力に乏しいため、流れによって産卵海域から成育に適した場所へ適切な時間内に到達できるかどうか、卵や仔稚魚の生き残りを左右する条件の一つとなる。したがって、環境変動に伴い流動構造が変化すれば、資源への加入量の著しい変動を引き起こす可能性が生じる。これまで、エルニーニョやラニーニャ、あるいはレジームシフトといった数年、数十年スケールの短、中期的な海洋環境変動と海洋生物の資源量との関係については、様々な研究が行われてきた。しかしながら、より長期的な環境変動に関しては、その予測に伴う不確実性ゆえに、これまであまり議論されてこなかった。地球温暖化もそのような長期的な環境変動のひとつである。コンピュータ技術の飛躍的な向上に伴って、地球温暖化が進んだ場合の環境変動予測の信頼性は格段に向上した。最新の地球温暖化予測研究によると、地球温暖化が進むにつれてクロマグロおよびウナギの産卵海域や輸送過程においては、水温上昇、塩分の変化、風成循環の変化、熱塩循環の変化などの長期的かつ急激な海洋環境変動が生じることが予測されており、それが資源量に大きな影響を及ぼすことが危惧されている。

そこで本研究では、地球温暖化が有用な海洋生物の資源量に及ぼす影響を具体的に明らかにするための研究の一環として、地球温暖化予測研究から得られたデータに基づき、地球温暖化に伴う海洋環境変動がクロマグロおよびウナギの初期生活史に与える影響を予測することを目的とした。とくに両種の卵・仔魚輸送過程における水温・塩分・流動構造の変動に重点を置き、数値シミュレーションを用いて定量的な解析を行った。

2. データおよび解析方法

本研究では、地球温暖化予測データおよび超高解像度海洋大循環モデル (OFES) データを用いた。地球温暖化予測データは大気海洋結合気候モデル (MIROC) の中解像度版から得られた、2000 年、2050 年、2100 年における水温・塩分・流速の予測データである。データ領域は 10°S - 44.5°N、110.5°E - 179.5°E、水平解像度 1.0 度であるが、本研究では 0.1 度間隔でデータ補間して用いた。OFES データのモデル領域は両極を除く全球 (75°S - 75°N、180°W - 180°E) で、水平解像度は 0.1 度である。本研究では、地球温暖化予測データの流速値の信頼性を補うために、2000 年の OFES の流速データを用いて補正を行った。

地球温暖化に伴う流動構造の変化の影響を明らかにするために、本研究では、移流拡散モデルを用いて粒子追跡実験を行った。流動場として、地球温暖化予測データおよび OFES データの流速値を用い、地球温暖化前 (2000 年) と地球温暖化後 (2100 年) でのクロマグロおよびウナギの卵・仔魚輸送過程を予測した。クロマグロの粒子追跡実験に先立って、水温データから産卵時期および主産卵場の変化を予測し、3 つのシナリオを想定した。シナリオ 1 では産卵時期が変化し主産卵場は変化しない場合、シナリオ 2 では産卵時期は変化せず主産卵場が地理的に変化する場合、シナリオ 3 では産卵時期および主産卵場ともに変

化しない場合をそれぞれ設定した。卵・仔魚期間を 30 日間とし、各シナリオに沿って粒子追跡を行った。また、日本海での輸送過程についても粒子追跡を行い、日本海の産卵場に及ぼす地球温暖化の影響についても検討した。ウナギの粒子追跡実験においては、北赤道海流域の水塊の境界に形成される 34.5psu の塩分フロントと 142°E の経線の交点を産卵場とし、塩分データからその位置を予測した。また、産卵場から成育場である日本沿岸までの卵・仔魚期間を 200 日とした。地球温暖化前後（2000 年および 2100 年）の推定産卵場から産卵期間である 6 - 10 月に 200 日間の粒子追跡を行った。

地球温暖化に伴う水温構造の変化の影響を検討するために、両種の卵・仔魚の経験水温と最適水温との差を一日ごとに算出し、輸送期間を通して乗じたものを最適水温からの逸脱指数として表した。

3. 結果および考察

3-1. クロマグロへの影響

卵・仔魚期間内に成育場に輸送され、なおかつ生残した個体数は、シナリオ 1 では地球温暖化前後で顕著な差はみられなかった。一方シナリオ 2 および 3 ではいずれも地球温暖化前後で減少し、それぞれ 1/2 と 1/3 になった。これは地球温暖化に伴う水温上昇のために、産卵時期によっては輸送過程で死亡する個体が増加したことに起因する。逸脱指数から、シナリオ 1 では、地球温暖化前の方が、卵・仔魚がより最適水温に近い水温を経験したことが示された。一方でシナリオ 2、3 では、地球温暖化後の方が、卵・仔魚がより最適水温に近い水温を経験したことが示された。以上の結果から、地球温暖化に伴って主産卵場からの輸送環境が高温化することによりクロマグロの初期生残は減少し、最悪の場合、すなわち親魚が地球温暖化に対して応答を行わない場合には、現在の 1/3 になる可能性があることがわかった。

日本海においては、適切な期間内に成育場に輸送され、なおかつ生残した個体数と、卵・仔魚輸送過程における最適水温からの逸脱指数に、地球温暖化前後で顕著な差が認められなかった。このことから、クロマグロ卵・仔魚輸送過程および初期生残に影響を及ぼすような流動構造および水温構造の変化は生じないものと考えられる。

3-2. ウナギへの影響

卵・仔魚期間内に成育場に輸送され、なおかつ生残した個体数は、地球温暖化前後でわずかに増加した。これは、地球温暖化に伴う流動構造の変化によって北赤道海流北側および黒潮源流域の流速が強化されたことによって産卵場の地理的変化に有利に作用したこと、さらに、塩分構造の変化に伴う産卵場の北上によってミンダナオ海流ではなく黒潮に取り込まれる個体数が増えたことに起因する。逸脱指数から、地球温暖化後の方が、輸送過程において卵・仔魚がより最適水温に近い水温を経験したことが示された。これらの結果より、地球温暖化に伴う産卵場および輸送過程での塩分と流動構造の変化ならびに水温上昇は、ウナギの初期生残に有利に作用する可能性が示された。

その一方で、塩分フロントの北上に伴う産卵場の北上は、新魚の産卵回遊の指標となる海山の遷移をもたらし、親魚の産卵行動に影響を及ぼすと考えられる。現在、産卵場の緯度は 15°N 付近であり、3 つの海山がその指標の候補であるとされている。これらの海山はその形状から、他の海山と比べて、ピンポイントでの親魚の集場所や隠れ家として限定的な産卵場形成に適しており、再生産の効率化に寄与していると考えられる。しかしながら、これら 3 つの海山と同様の明確な指標となりうる海山がそれよりも高緯度では乏しいことから、地球温暖化に伴って産卵場の緯度がさらに北上した場合、親魚の産卵回遊および再生産行動に変化をもたらし、ひいては再生産の効率を低下させることが懸念される。

以上のことから、地球温暖化後のウナギの生残は、卵・仔魚の輸送過程よりも親魚の産卵回帰行動に大きく依存するものと考えられる。

Effects of global warming on the early life stages of the bluefin tuna and the Japanese eel

Mar. 2008, Department of Natural Environmental Studies, 66734, Naoki Yamaoka
Supervisor ; Professor, Shingo Kimura

Keywords : Global warming, bluefin tuna, Japanese eel, larval transport, numerical simulation

1. Introduction

The bluefin tuna (*Thunnus orientalis*) and the Japanese eel (*Anguilla japonica*) are important fisheries resources. Since they have limited spawning grounds, it is considered that environmental changes in the spawning area probably effect larger impacts on their stock abundance. Major physical environmental factors such as temperature, salinity and flow structure affect survival and growth of the fisheries resources. A great numbers of studies about the effect of short and middle-term environmental fluctuations such as El Niño, La Niña and regime shift on fisheries resources have been conducted, while studies regarding of global warming were sparse because of difficulty of predictions. Recent years, studies about global warming are exponentially progressing together with the advance of computer technology, and its predictions have become more reliable. It is considered that global warming caused by the elevation of temperature, the long-term and rapid change of salinity, wind-driven and thermohaline circulation largely impacts on the stock abundance of the bluefin tuna and the Japanese eel.

This study was conducted to clarify how changes of physical factors caused by global warming affect early life stages of the bluefin tuna and the Japanese eel. By using numerical simulation, this study focused on changes of temperature, salinity and flow structure during their larval transport in particular.

2. Data and Methods

For numerical simulation, predicted values of temperature, salinity and current velocity data in 2000, 2050 and 2100 of MIROC (Model for Interdisciplinary Research on Climate) were used. Current velocity data in 2000 of OFES (Ocean General Circulation Model for the Earth Simulator) was also used.

To clarify effects of changes of flow structures, Lagrangian model was used to simulate larval transports in this study. Three scenarios about the bluefin tuna, based on the prediction about changes of the spawning season and the location of the main spawning ground, were assumed. Scenario 1 : spawning season begins earlier, while the main spawning ground will not shift geographically. Scenario 2 : spawning season does not change, while location of the main spawning ground shifts. Scenario 3 : both spawning season and location of the main spawning ground do not change. The numerical simulation was conducted according to these scenarios. The larval transport

in the Japan Sea was also simulated. For the Japanese eel, the location of the spawning ground was prescribed by the salinity data. The larval transport for 200 days from the predicted spawning grounds before and after global warming to nursery the ground was simulated.

To clarify effects of changes of the temperature, an index of deviation from optimal temperature (henceforth L(I)) was calculated. The L(I) was defined as values multiplied differences between optimal temperature and experienced temperature of eggs and larvae day by day during larval transport.

3. Results and Discussion

3 – 1. Effects of global warming on the bluefin tuna

In scenario 1, there was little difference in the number of survived larvae (henceforth SL) which transported to the nursery ground within larval period between before and after global warming. In scenario 2 and 3, SL became 1/2 and 1/3 after global warming, respectively as larval mortality increased with temperature increase. The L(I) indicated that larvae experienced less optimal temperature during larval migration after global warming in scenario 1. In scenario 2 and 3, L(I) indicated that larvae experienced more optimal temperature after global warming than before. These suggest that, result from the elevation of temperature by the effect of global warming, survival of the bluefin tuna in the early life stage will get worse after global warming. For the worst case, if the bluefin tuna makes no behavioral response to any changes caused by global warming, the survival will become 1/3 of those before global warming.

In the Japan Sea, there was not so remarkably difference in SL and L(I) between before and after global warming. It is probably because temperature and flow structure will not substantially change after global warming.

3 – 2. Effects of global warming on the Japanese eel

The SL became slightly larger than those before global warming. This reason is not only the current velocity of the north part of the North Equatorial Current and the Kuroshio became higher, but also the northward shift of spawning ground allowed more larvae to be transported into the Kuroshio. The L(I) indicated that larvae experienced more optimal temperature after global warming. These results show that the survival in the early life stage of the Japanese eel will increase in number by the effect of changes of salinity and flow structure and the elevation of temperature during the larval transport. These changes caused by global warming will affect positively survival of the Japanese eel in the early life stage. Since it seems that the Japanese eel uses three sea mounts near 15°N as a milestone of the spawning migration, the northward shift of the spawning ground will probably make it difficult for them to seek the milestone which affects their spawning migration and causes inefficient reproduction.

These suggest that the survival of the Japanese eel in the early life stage depend larger on the adult spawning migration rather than the larval transport.