

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「マルチスケール・マルチフィジックス
現象の統合シミュレーション」
研究課題「海洋生態系将来予測のための海洋環境
シミュレーション研究」

研究終了報告書

研究期間 平成18年10月～平成23年4月

研究代表者：山中 康裕
(北海道大学大学院地球環境科学研究院、教授)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

本研究課題は、地球温暖化による海洋生態系の応答、水産資源への影響を調べるために、中規模渦を表現できる高解像度海洋生態系モデルを開発した。オフライン手法(海洋大循環モデルによって海流や水温・塩分分布を一旦求めておき、それらを利用して、海洋生態系の数値実験を行う)を確立し、水平解像度 $1/4 \times 1/6$ 度の海洋生態系モデル西部北太平洋領域版・全球領域版を開発した。

まず、組み込む個別モデルの改良を通じて、様々な研究成果を得た。特に、植物プランクトンの成長速度の定式化は、古くから広く用いられている経験式の問題点を指摘し、地球温暖化への影響も定量的に評価した(Smith and Yamanaka, 2007, Smith *et al.*, 2009, Smith *et al.*, 2010, Smith, 2010, Smith *et al.*, 2011)。これは、細胞レベルの改良が、数十年後の全球規模の地球温暖化に影響するという、マルチスケール・マルチフィジックスの実例である。また、産卵回遊に人工ニューラルネットワークと遺伝的アルゴリズムを適応し、小型浮魚類回遊モデルを開発した(Okunishi *et al.*, 2009)。これを用いて、日本近海の小型浮魚類の回遊の再現に成功した。このモデルは、独立行政法人水産総合研究センターにて、さらなる改良が進んでいる(Okunishi *et al.*, 2012a)。

これらの個別モデルを統合した形で、高解像度海洋生態系モデル MEM を開発した(Sumata *et al.*, 2010; Shigemitsu *et al.*, *in minor revision*)。その結果、サケなどの水産資源に重要な海域である北太平洋亜寒帯域の気候値のみならず、経年変動に対しても観測された振る舞いを再現できた。その結果、現在行っている温暖化に伴う将来予測実験の結果においても再現性が良くなることが十分に期待される。

“中規模渦を表現した海洋生態系モデルによる温暖化実験”は世界初の試みとして、温暖化に伴って、経年変動および中規模渦による自然変動よりも有意に春季ブルームが 10~20 日程度早期化することを示した(Hashioka *et al.*, 2009)。温暖化シグナルが自然変動に比べて有意かどうかの検討は、この研究のセールスポイントである。さらに、その温暖化実験の結果を用いて、マイワシの初期の個体サイズ変化を明らかにし、産卵海域が北上する可能性を示した(Okunishi *et al.*, 2012b)。この研究においても、高解像度統合モデルの利点を活かした経年変動を考慮している。

さらに、衛星観測ではモデルで扱うプランクトングループを表現した手法を開発し(Hirata *et al.*, 2011)、中解像度海洋生態系モデルの評価を行った(Hirata *et al.*, 2012)。また、これらの実績を背景にして、世界をリードしている日英米仏の四つのグループによる海洋生態系モデル相互比較研究計画 MAREMIP を 2008 年に IGBP コアプロジェクト AIMES の公式プロジェクトとして立ち上げた。

本研究課題を通じて行われた成果は、世界的にも高い評価を受け、IGBP コアプロジェクト GLOBEC から、2007 年に Scientific Highlight に選ばれ、2009 年に総会での基調講演を行い、IGBP コアプロジェクト SOLAS からは 2011 年に招待講演を依頼されている。CREST に採択されたのをキッカケとして、多くの研究プロジェクトを立ち上げることが出来て、それらの研究プロジェクトと連携して実施できたことで、より良い成果を上げることが出来た。特に、オフライン手法は計算機資源を上手に使うことで、海洋循環力学に興味のある研究グループと海洋物質循環・生態系に興味があるグループをつなぐ役割を果たした点は興味深い。

もともと、山中グループと石田グループは、一体化して研究をしていたため、実際に両グループを移動したメンバーやグループを超えた研究や開発の協力を実施した。そのため、上記の成果は、両グループに共有したものである。

(2) 顕著な成果

1. 地球温暖化による海洋生態系への影響(Hashioka *et al.*, 2009; Okunishi *et al.*, 2012b)

概要：世界に先駆けて、高解像度温暖化実験により、経年変動や中規模渦等の自然変動に対して有意に地球温暖化の影響により春季ブルームが 10~20 日早まることを示し、国際学会等で高い評価を得た。また、日本南岸で孵化したマイワシの生後 120 日目の個体サイズが小型化することを示した。

2. 植物プランクトンの成長速度に関する定式化(Smith and Yamanaka, 2009, Smith *et al.*,

2009, Smith *et al.*, 2010, Smith, 2010, Smith *et al.*, 2011)

概要：数多くの数値モデルで採用されていたミカエリスメンテン経験式を、生理機構に基づいた OU kinetics による定式化に置き換えた。栄養塩間の栄養塩取り込み比、成長速度の温度依存性など、様々な観測値を理論的に説明し、まさにマルチスケールとして、細胞レベルのマイクロスケールの改良が地球温暖化に対するグローバルスケールの応答に影響することを示した。

3. 小型浮魚類の回遊モデルの開発(Okunishi *et al.*, 2009, Okunishi *et al.*, 2012a)

概要：ニューラルネットワークと遺伝的アルゴリズムを産卵回遊に対して用いることで、小型浮魚類マイワシの回遊モデルを開発した。この回遊モデルを提供した(独)水産総合研究センターでは、策餌回遊を含め、実用化を目指した改良が続けられている(一部共同研究を実施)。

§ 2. 研究構想

(1) 当初の研究構想

地球温暖化などに伴う気候変動による水産資源への影響評価のために、気候モデルから水産資源モデルまでを統合したモデリングを実施する必要がある(図 1)。気候変動に関しては、文部科学省「人・自然共生プロジェクト」(平成 14~18 年度)[本グループは不参加]によって、地球シミュレータを用いた世界に先駆けた高解像度気候モデルによって将来予測がなされた。また、環北太平洋6ヶ国が参加した北太平洋海洋科学機関PICESのものとモデリンググループによって、動植物プランクトンを中心とした NEMURO や小型浮魚類モデル NEMURO.FISH を開発し、気候変動に伴う水産資源変動を明らかにする試みがなされてきた(本グループも中心的メンバーとして参加)。それらは、それぞれのモデルの結果をバケツリレーの形で渡していき、結果を得るというものであり、用いられたモデルも、北太平洋に限定した低解像度モデル(水平解像度 100km)もしくは、特定の海域を表現したボックスモデルであった。なお、それらの試みは、世界的にも先駆的なものである。

そこで、当初の研究構想として、これらの統合を目指したモデル開発を目標とした。それらを統合した計算は膨大な計算機資源を必要とするために、個々のモデルを統合して計算したことと同じような結果が原理的には得られるように、「気候モデルを計算してその結果を利用して、海洋生態系モデルを計算する」といった[A]オフライン手法の開発が重要となる。オフライン手法は、海洋物理モデルと海洋生態系モデルに対する比較的柔軟な組み合わせを可能にする利点もある。本計画では、東大気候センター/環境研/JAMSTEC で開発された気候モデル(海洋部分は COCO)およ

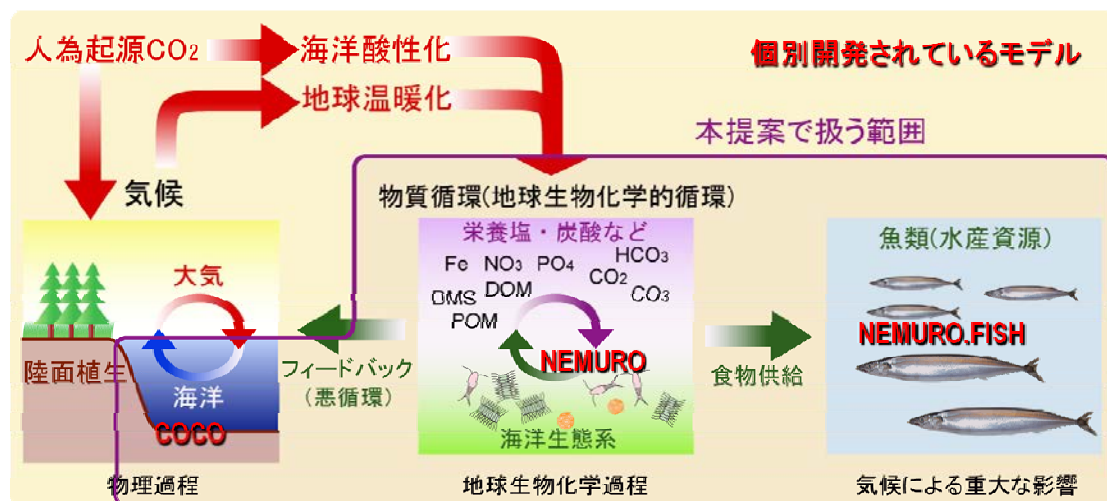


図 1: 本研究課題を俯瞰する概念図。個別開発されているモデルを利用した、動植物プランクトンを表現した海洋生態系と栄養塩などの物質循環を中心とする統合モデリングを実施することにより、気候変動から水産資源変動までの予測を行えるモデル開発を実施する。

び JAMSTEC で開発された海洋物理モデル OFES と、NEMURO および新規開発するモデル (MEM)との、COCO-NEMURO、COCO-MEM、OFES-NEMURO、OFES-MEM といった自由な組み合わせを目指した。

統合モデルを開発するためには、[B]個別モデルの改良も必要である。NEMURO は高次生態系への食物連鎖網を意識した海洋生態系モデルであり、気候変動との関係では、物質循環の改良 (特に鉄循環過程の導入)が必要であった。また、NEMURO.FISH はボックスモデルとして空間分布が表現できていなかったため、空間方向に移動できるように回遊モデルを開発も必要であった。個別モデルの改良と並行して[C]統合モデルの開発を実施した。統合モデルの開発は、モデルが良いパフォーマンスを示して(すなわち実証試験を経て)、初めて完了する。実証試験として、[D]過去の気候変動に対する海洋生態系の応答、および、地球温暖化に伴う将来予測について実施した。なお、海洋酸性化の将来予測も当初の研究には含まれていた。

略語については、§ 4 研究実施内容及び成果の最後にリストの形で示す。

(2)新たに追加・修正など変更した研究構想

同研究領域の羽角博康チームと連携して、気候モデルの計算結果(特に、過去約 50 年間の経年変動の計算結果)を提供してもらうなどの連携を実施した。また、当初オフライン手法の開発対象として考えていた OFES は、OFES 自身の開発が終わってしまったため、実施しなかった。その代わりに、海洋生態系モデルとして、英国イーストアングリア大学で開発された PlankTOM5 の組み合わせを実施することにより、COCO-NEMURO、COCO-MEM、COCO-PlankTOM5 を実現した。

なお、海洋生態系モデルの開発競争が国際的にも早まり、本研究課題でも集中投資するために、当初の研究構想には含まれていた海洋酸性化については、長期時間積分など計算機資源を大きく投資する必要もあり、中間報告の段階で断念し、評価結果として了承を得ている。その修正もあり、同じく計算機資源を投資する必要があった将来予測を 1 年前倒し実施することが実現し、2009 年には IGBP コアプロジェクト GLOBEC の総会では、GLOBEC の成果の一つとして、モデリングの基調講演を務めるなど、国際的に有意な立場で研究を進めることが出来た。また、その実績をもとにして、2009 年から、海洋生態系モデル開発で世界をリードしている日英米仏4グループによる海洋生態系モデル相互比較研究計画 MAREMIP を立ち上げられ、IGBP コアプロジェクト AIMES の公式プロジェクトとして採用されている。

小型浮魚類の回遊モデルの開発は研究期間の早い段階で行われ、そのモデルを独立行政法人水産総合研究センターに提供することで、より実用的なモデルの開発が続けられている。水産総合研究センターで行った温暖化実験等は、共同研究として、本課題の成果とした。

§ 3 研究実施体制

(1)山中グループ

① 研究者名

氏名	所属	役職	参加時期
山中 康裕	北海道大学大学院地球環境科学研究院 統合環境科学部門	教授	H18.10～
平田 貴文	同上	特任助教	H21.12～
岡田 直資	同上	特任助教	H19.4～
橋岡 豪人	同上	博士研究員	H18.10～H19.3, H23.4～
増田 良帆	同上	博士研究員	H18.10～H21.3, H22.10～
重光 雅仁	同上	博士研究員	H20.4～
須貝 英乃	同上	技術補佐員	H21.4～
渡辺 保史	同上	特定専門職員	H23.4～
奥西 武	北海道大学大学院地球環境科学研究院地	博士研究員	H19.4～H19.10

	球科学部門(離脱時)	(離脱時)	
照井 健志	北海道大学大学院環境科学院 生物圏科学専攻	D3	H21.4～
柴野 良太	北海道大学大学院環境科学院 環境起学専攻	D3	H19.4～
山本 彬友	北海道大学大学院環境科学院 地球圏科学起学専攻(離脱時)	D3(離脱時)	H20.4～H21.9
志藤 文武	北海道大学大学院 環境科学院 環境起学専攻(離脱時)	D3(離脱時)	H18.10～ H22.3
干場 康博	北海道大学大学院環境科学院 地球圏科学起学専攻	D3	H20.4～
熊 炫睿	北海道大学大学院環境科学院 環境起学専攻	D2	H23.4～

② 研究項目

以下を主担当した。

- [1] 海洋-水産科学統合モデル開発の基礎技術の整備
 - [1-1] オフライン手法の技術開発
 - [1-2] 個別モデルの改良
 - [1-2b] 海洋物質循環モデルの改良
 - [1-2c] 小型浮魚類回遊モデル
- [2] 海洋-水産科学統合モデルの開発
 - [2-1]・COCO-MEM の開発
- [3] 海洋生態系変動再現・将来予測シミュレーションの実施
 - [3-1] 高解像度生態系モデル全球版による海洋生態系変動再現
 - [3-2] 中解像度生態系モデルと衛星観測との比較
 - [3-4] 小型浮魚類に対する地球温暖化実験
 - [3-5] 高解像度全球温暖化実験
- [4] 国際対応
 - [4-1] 国際プロジェクト MAREMIP の推進[山中 G]

(2) 石田グループ

① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
石田 明生	富士常葉大学社会環境学部	研究員	H18.10～
笹井 義一	(独)海洋研究開発機構 地球環境変動 領域 物質循環研究プログラム	研究員	H18.10～
橋岡 豪人	同上	特任研究員	H19.4～H22.3
相田 真希	同上	技術研究副主任	H18.10～
S. Lan Smith	同上	ポスドク研究員	H18.10～

② 研究項目

以下を主担当した。

- [1] 海洋-水産科学統合モデル開発の基礎技術の整備
 - [1-2] 個別モデルの改良
 - [1-2a] 光合成過程(栄養塩取り込み過程)の改良
- [2] 海洋-水産科学統合モデルの開発

- [2-2] COCO-PlankTOM5 の開発
- [3] 海洋生態系変動再現・将来予測シミュレーションの実施
 - [3-3] 西部北太平洋における地球温暖化実験
- [4] 国際対応
 - [4-2] その他[石田 G]

§ 4 研究実施内容及び成果

開始時に提出した全体研究計画書で説明したように、山中グループ(以下[山中 G]と記す)と石田グループ(以下[石田 G]と記す)は、一体化して研究をしている。そのため、下の項目のように主たるグループごとに割り振って記述するが、基本的にはほぼ一体化して実施している。

- [1] 海洋-水産科学統合モデル開発の基礎技術の整備
 - [1-1] オフライン手法の技術開発 [山中 G]
 - [1-2] 個別モデルの改良
 - [1-2a] 光合成過程(栄養塩取り込み過程)の改良[石田 G]
 - [1-2b] 海洋物質循環モデルの改良[山中 G]
 - [1-2c] 小型浮魚類回遊モデル[山中 G]
- [2] 海洋-水産科学統合モデルの開発
 - [2-1] COCO-MEM の開発[山中 G]
 - [2-2] COCO-PlankTOM5 の開発[石田 G]
- [3] 海洋生態系変動再現・将来予測シミュレーションの実施
 - [3-1] 高解像度生態系モデル全球版による海洋生態系変動再現 [山中 G]
 - [3-2] 中解像度生態系モデルと衛星観測との比較[山中 G]
 - [3-3] 西部北太平洋における地球温暖化実験[石田 G]
 - [3-4] 小型浮魚類に対する地球温暖化実験[山中 G]
 - [3-5] 高解像度全球温暖化実験[山中 G]
- [4] 国際対応[山中 G・石田 G]
 - [4-1] 国際プロジェクト MAREMIP の推進[山中 G]
 - [4-2] その他[石田 G]

例えば、橋岡研究員は研究対象・コンピューター資源が使いやすい環境により初年度・最終年度北大[山中 G]、2-5 年度 JAMSTEC[石田 G]に所属し、Smith 研究員[JAMSTEC]は、主として石田ではなく山中と主として共同研究を実施した。

4. 1 本研究課題:主としてモデル開発の実施(北海道大学 山中グループ)

(1)研究実施内容及び成果

[1] 海洋-水産科学統合モデル開発の基礎技術の整備

[1-1] オフライン手法の技術開発

オフライン手法は、§ 2.研究構想で述べたように本研究課題の基礎となる技術開発である。オフライン手法の技術は、H18～19 年度、COCO(CCSR Ocean Component Model)ベースの水平解像度 1/4x1/6 度の COCO-NEMURO 西部北太平洋領域版が橋岡[山中 G(平成 18 年度)、石田 G(平成 19 年度)]により開発され、平成 20 年度、全球領域版が須股・岡田[山中 G]により開発された。

オフラインの計算手法により海洋生態系のシミュレーションを行うには、モデルの駆動力となる物理環境(温度・流速場・鉛直拡散の強さ・光環境など)を境界条件として用意する必要がある。特に、気候変動に対する生態系の応答予測研究においては、長期間の積分やアンサンブル計算を行うために膨大な計算資源が必要となる。一方、再現の対象とする現象によって、必要となる境界条件の時間スケールは異なる。数年から数十年スケールの海洋物理学の研究では、これまで主に月平均の物理環境を境界条件とした実験が行われてきた。一方、生態系変

動の研究においては、現象の時間スケールが短いため、より高頻度のデータセットが必要となる。例えば、西部北太平洋の典型的な植物プランクトンの季節変動パターンである春期ブルームは、数日から数週間のスケールで起こる。そのため月平均のデータで現象を解像することは難しい。境界条件のデータ頻度(必要となる計算資源の量)と生態系の再現性はトレードオフの関係にある。そこで、オフライン計算による高解像度海洋生態系シミュレーションにおいて、海域的・季節的に重要となる物理要素を同定するとともに、現実的な生態系の再現性を得るために必要となる境界条件の時間頻度について西部北太平洋を例に調べた。具体的には、オフライン計算に使用する入力物理環境の時間平均間隔を変えた実験(1日、3日、7日、30日)を行い、境界条件のデータ頻度と再現される生態系の応答の違いについて調べた。

年平均量に注目した場合、境界条件の時間頻度の違いによる影響はそれほど大きくなかった。亜寒帯域においては、年平均のクロロフィル量における標準実験(日平均)からの違いは数パーセントの過小評価であった(図 2)。一方、亜熱帯域においては、月平均の境界条件を使うことで、20から30%の過大評価となった。この実験から、注目する現象が年平均の時間スケールの場合、7日平均よりも高頻度な時間解像度が必要であることが分かった。

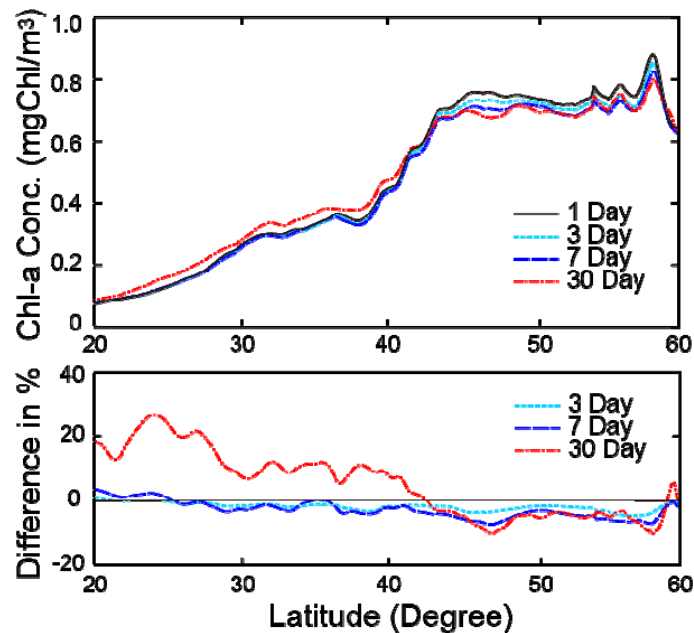


図 2: 境界条件の時間頻度の違いが年平均したクロロフィル量に与える影響の緯度による違いを示す。上図はクロロフィル濃度の違いを、下図は、日平均の標準実験からのずれの割合(%)を示す。

次に、海洋生態系の季節変動に注目した場合、データ頻度の違いは亜寒帯域において、春季ブルーム時の最大濃度やタイミングに大きな影響を与えることが分かった。月平均の境界条件を用いた場合、冬期の混合は弱くなる一方、春期の成層化のタイミングに遅れが生じていた(図 3 左)。その結果、生態系の応答も緩やかなものとなり、植物プランクトン(クロロフィル濃度)の最大濃度は減少し、最大となるタイミングにも遅れが生じていた。一方、亜熱帯域では、月平均の境界条件を用いることで、冬期から春期の海洋の中規模現象など短周期の変動に伴う混合層およびクロロフィル濃度の変動が再現できず過小評価となった(図 3 右)。逆に、月平均の境界条件では、夏期には緩やかに混合が起こり続けることで、中深層から定常的に栄養塩が供され、植物プランクトンの濃度は過大評価となった。

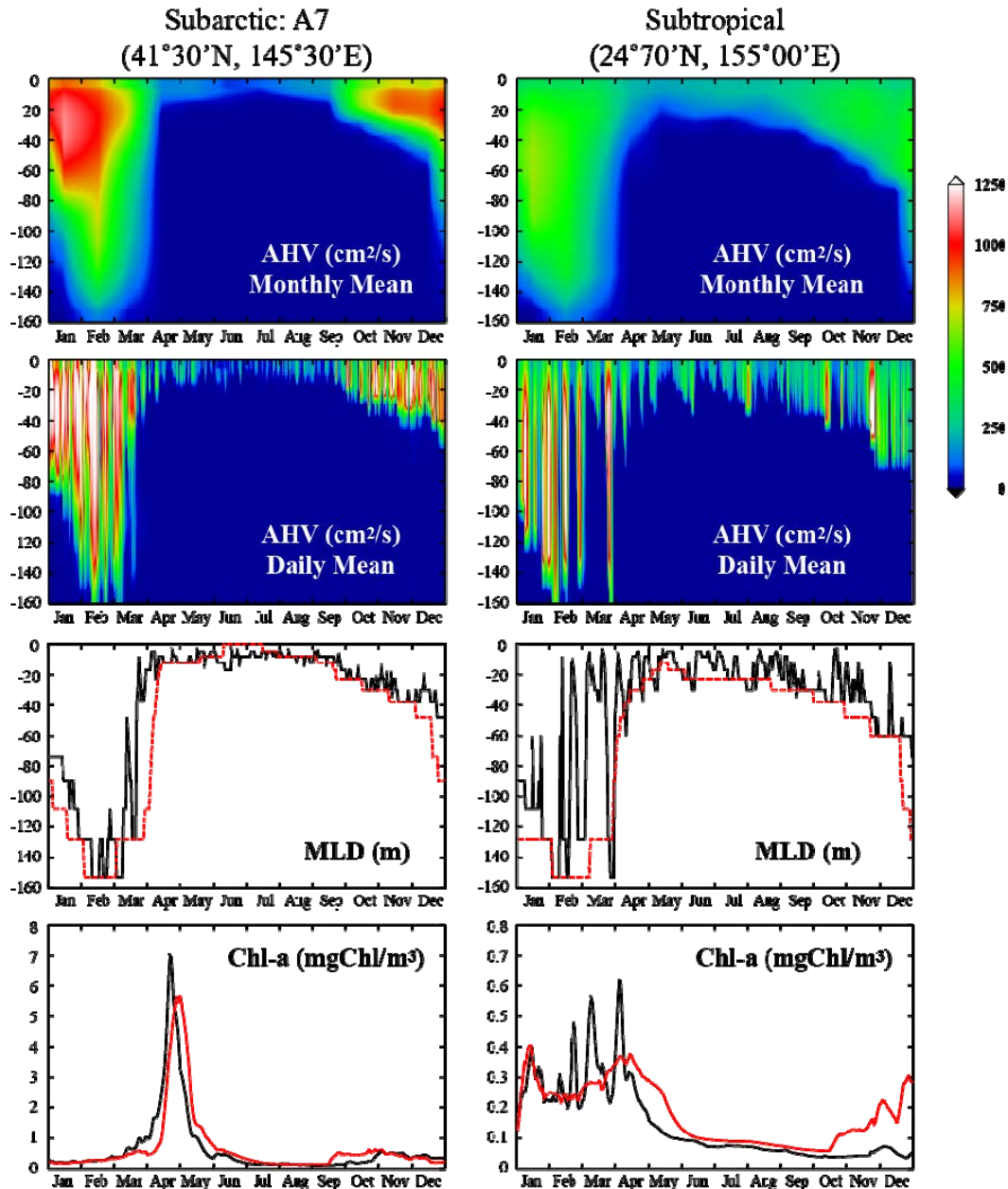


図3: 鉛直拡散係数と混合層深度およびクロロフィル濃度の季節変化の関係について、月平均値と日平均値の結果の比較。左図は亜寒帯域の観測地点 A7 での結果、右図は亜熱帯域の代表的な場所における季節変化を示す。1 段目の図は、月平均の鉛直拡散係数を、2 段目は日平均の結果を示す。3 段目は黒線が日平均、赤線が月平均の混合層深度を示す。4 段目も同様に黒線が月平均のクロロフィル濃度を、赤線が日平均の結果を示す。

春期ブルームの規模やタイミングは地球温暖化など気候変動の影響を大きく受けることが示唆されており(Hashioka and Yamanaka., 2007a)、春期ブルームの再現性は生態系に対する気候変動研究を行う上で重要なポイントとなる。そこで、境界条件の時間頻度の違いが、春期ブルームの規模とタイミングに与える影響を評価した。その結果、30 日平均のデータでは最大濃度で 30 から 40%の過小評価となり、最大となるタイミングに 20 日から 30 日の遅れが生じていた(図4)。7 日平均よりも高頻度のデータでは、中規模現象に対する応答は鈍くなるものの、植物プランクトンの増殖のタイミングや生物量は1日平均のデータに近い形で再現することができた。

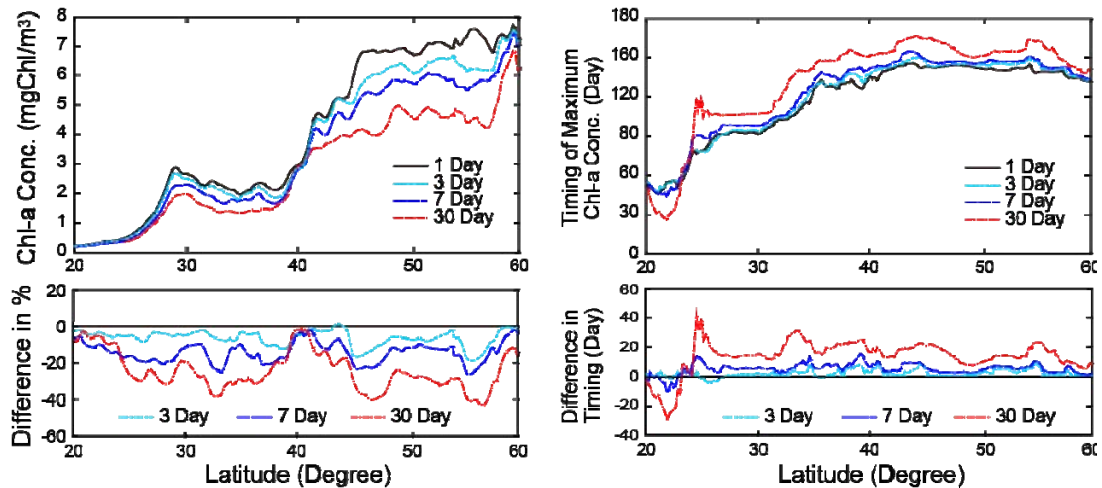


図4: 境界条件の時間頻度の違いが春期ブルームの最大濃度と最大となるタイミングに与える影響の緯度による違いを示す。左上図は最大濃度の違いを、左下図は、日平均の標準実験からのずれの割合(%)を示す。右上図はクロロフィル濃度が最大となるタイミング(1月1日からの日数)、右下図は標準実験からのずれ(日数)を示す。

最後に、個別に物理環境(温度・流速場・鉛直拡散・光環境など)の時間頻度を変える感度実験を行った結果、すべての海域において鉛直拡散の時間頻度が、オフラインの海洋生態系シミュレーションにおいて最も重要であることが明らかになった。流速場の長期平均は鉛直流の弱体化を引き起こすため、湧昇域での栄養塩の減少と、下降流域での栄養塩の増加につながった。また、流速場の平均化により渦活動に伴う湧昇・下降流の変化は過小評価された。ただ、これらの栄養塩供給量の変化はその他の要因に比べて小さく、ブルームの振る舞いにも大きな影響を与えなかった。また、数日から1週間程度の時間的変動がそれほど大きくない温度や光のデータ間隔は生態系の再現性に大きな影響を与えなかった。

以上より、高解像度のオフライン生態系シミュレーションにおいて、適切な季節変動および年間の生産を得るためには3日から5日平均のデータが望まれることが明らかになった。また、3日もしくは5日平均のデータを用いることで、境界条件となるデータ量を1/3から1/5に削減することに成功した。

[1-2] 個別モデルの改良

[1-2b] 海洋物質循環モデルの改良

MEMの開発のために、海洋生態系モデルNEMUROに関する海洋物質循環過程を改良する必要があった。そのため、平成20年度～21年度において、MEM開発以前に、沈降粒子に関する観測データを再現する物質循環過程を開発した。

海洋における粒子状窒素化合物の安定同位体比($d^{15}N$)は、海洋表層の環境評価や古海洋環境復元のための代替指標として利用されている。特に、古海洋環境復元における利用は、かなりの成功を収めてきたといえる。一方、現世海洋における沈降粒子中の $d^{15}N$ の季節変動も、海洋表層の一時的な現象(例えばブルーム等)を調査するのに利用可能であり、Shigemitsu et al. (2010a)では、窒素安定同位体の物質循環過程を組み込むのに必要なパラメータをその季節変動を利用して決定した。北緯44度、東経155度の観測地点KNOTにセジメントラップを約770mの水深に設置し採取した観測結果と比較した。元々のNEMUROの窒素循環に関係するコンパートメントを、 $d^{15}N$ 変動を調べるため、 $N(=^{14}N + ^{15}N)$ 濃度と ^{15}N 濃度の2変数で表し、各同位体分別を考慮した。モデルパラメータ(各プロセスにおける同位体効果を含む)は既往の文献値から設定した。

モデルの結果は、沈降粒子中の $d^{15}N$ 観測値は、春季ブルーム時に低くなり、冬季に高くなるという一般的な傾向を再現した。春季ブルーム時に沈降粒子中の $d^{15}N$ が低くなるのは、ケイ

藻類(PL)による NO₃ 取り込み時の同位体分別によるものであった。その後 NO₃ の PL 及びその他の植物プランクトン(PS)による取り込みが続くにつれ、NO₃ の d¹⁵N が高くなり、その影響を受けて沈降粒子中の d¹⁵N も高くなっていた。冬季には、植物プランクトンより d¹⁵N が高い動物プランクトンの死骸や糞粒の沈降粒子への寄与が大きくなるため、沈降粒子中の d¹⁵N が高くなる影響がみられた。しかし、最も影響しているのは、再生された NH₄ が硝化の際の同位体分別を受け、その d¹⁵N が高くなり、d¹⁵N が高くなった NH₄ を PL 及び PS が取り込んでいることであった。このため、ほとんど観測データのない、モデルの硝化速度のパラメータを使用する際、NH₄ の d¹⁵N が測定されていると、観測データを利用してパラメータを上手く制約できた。

同じセジメントトラップから得られた海洋沈降粒子中の有機炭素安定同位体比 (d¹³C_{POC}) の季節変化を利用して、洋表層の炭酸系変動や沈降粒子中 d¹³C_{POC} の観測結果を再現して、炭素安定同位体の物質循環過程を組み込むのに必要なパラメータを決定した。Shigemitsu et al. (2010b)では、d¹³C 変動を調べるため、一定の窒素:炭素の化学量論比を仮定し、炭素に係るコンパートメントを、C (= ¹³C + ¹²C)濃度と ¹³C 濃度の 2 変数で表し、同位体分別を考慮することで、d¹³C の動態モデルを構築した。また、沈降粒子の沈降プロセスについては、観測値を上手く再現するために、粒子のサイズスペクトルを考慮し、シアーと差動沈降による凝集過程を表現できる Kriest(2002)のパラメタリゼーションを使用した。植物プランクトンの炭素摂取時の同位体分別については、Keller and Morel (1999)の「拡散によるプランクトン細胞内部への CO_{2(aq)}の取り込み」と「能動的な輸送による細胞内部への HCO₃⁻の取り込み」の両方を考慮できるパラメタリゼーションを用いた。それに係るパラメータについて、「セジメントトラップの d¹³C_{POC}」と「海洋表層の d¹³C_{DIC}」の時系列データを遺伝的アルゴリズムによる同化することにより、最適値を求めた。その他のモデルパラメータ(各プロセスにおける同位体効果を含む)は既往の文献値から設定した。

沈降粒子の d¹³C_{POC} の季節変動の観測値は、概ね各年、春季ブルーム時に低くなり(約 -26.5‰)、秋季に高くなる(約 -24.0‰)という傾向を示した。この変動は、海洋表層全炭酸の d¹³C (d¹³C_{DIC})と同期するものの、その季節的な振幅は d¹³C_{DIC} と比べると約 1‰程度大きかった。モデル結果の解析によると、この振幅の違いは主に、(1)季節的にあまり変動しない炭素固定の際の同位体分別係数(ε)、(2)植物プランクトンのサイズの違いによる ε の差によって引き起こされるプランクトン種毎の d¹³C の違い、で起こっていた。(1)については、d¹³C_{co2(aq)}より約 10‰程度同位体比の高い HCO₃⁻を能動的に取り込むためであった。本研究は、炭素同位体比を組み込んだ生態系モデルは観測値を同化することで、植物プランクトンの炭素取り込みに関する生理的なパラメータを決定できる可能性を示した。

[1-2c] 小型浮魚類回遊モデル

マイワシの時空間的な分布変動と成長を再現可能な生物エネルギーモデル(成長モデル)を含む小型浮魚類回遊モデルの開発した(図 5; Okunishi et al., 2009)。生物エネルギーモデルは、既に開発されていた NEMURO.FISH(Ito et al, 2004, Megrey et al., 2007)の基本式を用いた。マイワシの移動は、マイワシの集団を粒子として扱う粒子追跡法によるが、海流による受動的な輸送と最適な生息環境を探索する索餌回遊、または産卵域に回帰する産卵回遊に支配されるとした。索餌回遊は成長速度が最大となる方向を遊泳方向とした。産卵回遊は人工ニューラルネットワーク(ANN)を用いて遊泳の方位決定を行った。マイワシは海面水温(SST)、経験水温差、流速、日長、離岸距離を認識して方位決定を行うと仮定し、ANN の入力データとした。入力データと ANN の重みによって産卵回遊の方位決定が実施される。

このモデルにおける ANN の最適な重みを決定するに当り、3 ケースの実験を行った。ケース 1として、ANN の標準的な学習方法である誤差伝播法(BP)・最急降法を使用し、理想的な回遊経路の学習により、ANN の重みを決定した。ケース 2として、遺伝的アルゴリズム(GA)を用いて ANN の重みの決定を行った(図 6)。ケース 3として、ケース 1とケース 2の方法を組み合わせた方法で、ANN の重みの決定を行った。この重み係数を用いて、回遊モデルの中で各個体が認識する環境因子を入力とし、ANN によって遊泳方位を決定し、回遊行動のシミュレーションを行った。モデル解析により、索餌回遊である南北回遊は適水温のみでは説明できず、餌量環

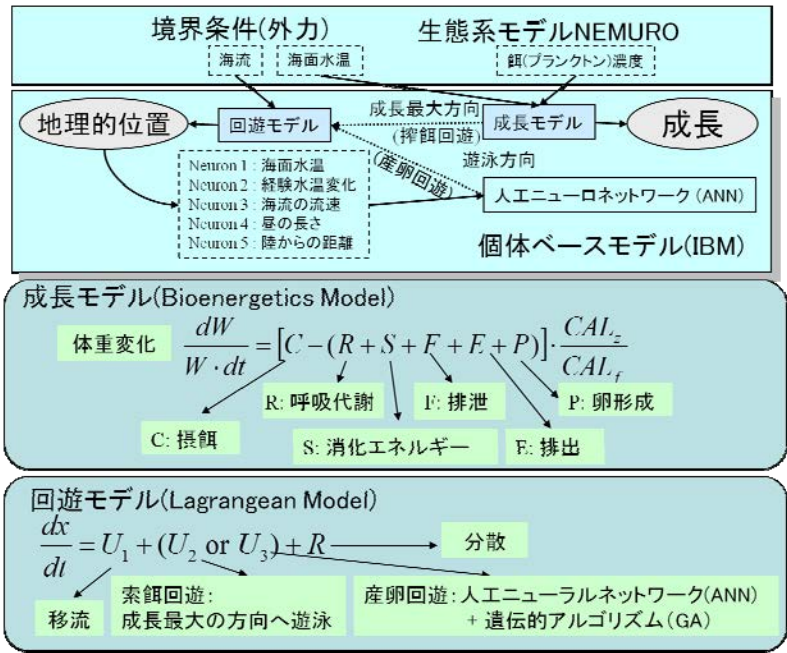


図5: 小型浮魚類回遊モデル。個体サイズを計算する成長モデルと位置を計算する回遊モデルからなる。

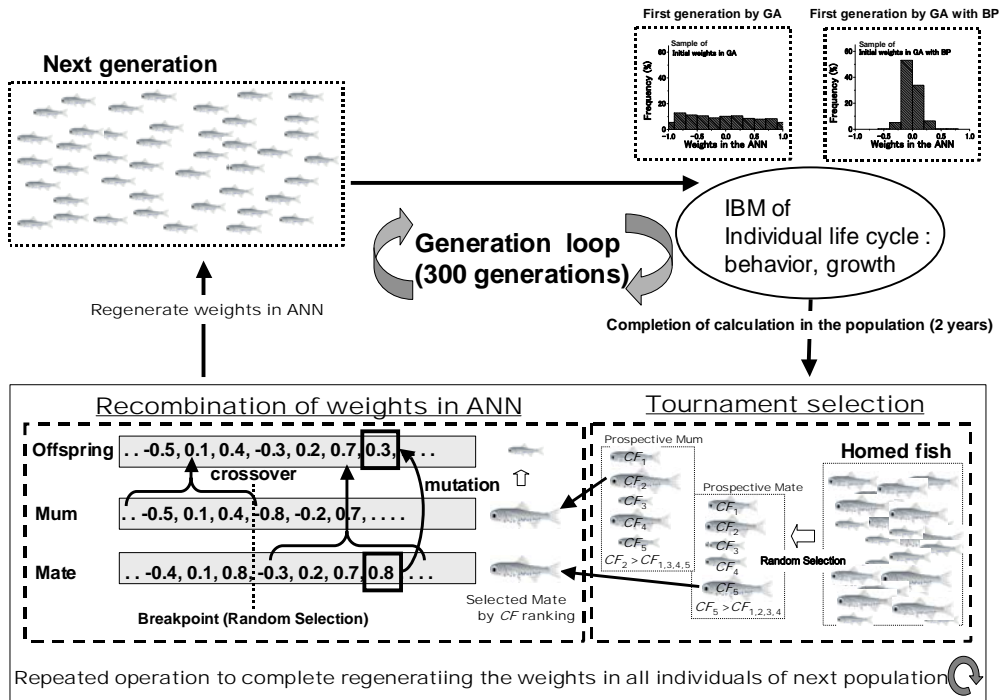


図6: ANNのパラメータの重みを決めるに当たって、遺伝的アルゴリズム(GA)を用いた。産卵域に戻ってきたサイズの良い両親からパラメータを組み合わせて次世代のパラメータを決め、それを300世代繰り返すことで、最適パラメータを得た。

境が重要な因子であることが分かった。産卵回遊を表現する ANN の重みを決定する3ケースの実験のうち、ケース3の方法で求めた重みを使用して産卵回遊の方位決定を行った場合、現実的な産卵回遊経路の再現が可能であった。ANN は産卵回遊時の方位決定を表現する有用なツールであることが示された。ANN を利用して浮魚の産卵回遊を表現する場合、学習データ

となる回遊経路のデータが少ない現状では、ANN の最適な重みを求める方法として、GA と BP の融合がよいと思われる。ANN における入力データと出力データの因果関係を乱数と主成分分析を用いて解析したところ、日長が短い場合に西北西に方位決定、水温が低い場合、または経緯水温差が大きくなる場合に南南西に方位決定するシグナルが強いことが分かった。以上の結果により、マイワシは、水温変化、流速変化、日長変化などの環境因子を方位決定に利用して、産卵回遊を成功させている可能性が示された(図 7)。特に、水温と日長は方位決定に重要な因子と考えられる。

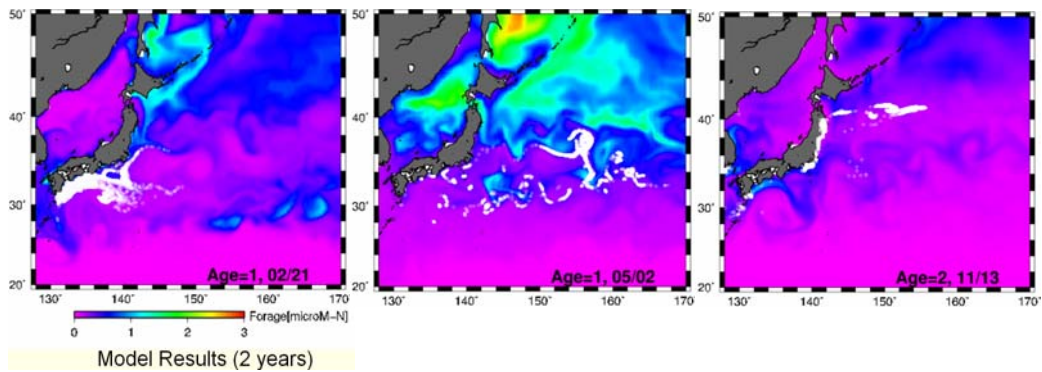


図 7: 小型浮魚類回遊モデルによる、2 月 1 日生まれマイワシの位置(白丸)の(左から)2 月 21 日、5 月 2 日(策餌回遊期間)、および、2 年目の 11 月 13 日(産卵回遊期間)。背景のは、餌となる高解像度海洋生態系モデル西部北太平洋版によるプランクトン濃度を示す。

[2] 海洋-水産科学統合モデルの開発

[2-1] COCO-MEM の開発

NEMURO は、北太平洋における小型浮魚類に対するモデリングを意識した、食物連鎖網を比較的表現し、物質循環に関しては比較的簡略化された海洋生態系モデルである。統合モデリングによる地球温暖化に伴う将来予測を行う際には、物質循環について改良を行う必要がある。特に、後で述べるように、鉄循環を考慮することで、北太平洋亜寒帯域の HNLC 海域の再現性が良くなり、気候変動に対する海洋生態系の応答も改善された。具体的には、以下の修正を行った新しい海洋生態系モデル MEM を開発した(Shigemitsu *et al.*, *in minro revision*)。

- 鉄循環過程として、溶存鉄(Fe_d)・粒子状鉄(Fe_p)を予報変数として組み込み、供給として、大気からのダストおよび大陸棚海底堆積層からの供給を Moore *et al.* (2004)および Moore & Braucher(2008)を参考にした。また、植物プランクトン成長速度に鉄制限を陽に表現した。
- 栄養塩取り込みについて、世界中のほとんどのモデルが用いている Michaelis-Menten 経験式から、(本研究課題の成果である)個別モデルの改良(Smith and Yamanaka 2007; Smith *et al.*, 2009; Smith *et al.*, 2010)に基づいた、最適栄養塩取り込み過程(Optimal Uptake Kinetics)を採用し、栄養塩濃度の異なる海域毎に順化しうると考えられる植物プランクトンの生理特性を表現した。
- 2 種類の有機物に関する沈降粒子として、沈降速度の速い大きな粒子(PON_L)と沈降速度の遅い小さな粒子(PON_S)を導入し、粒状有機物及び溶存有機物の凝集過程を陽に表現した(Aumont and Bopp, 2006)。
- アンモニウム塩による硝酸塩の取り込み抑制の式を Wroblewski 式から変更した(Vallina and Le Quere, 2008)。
- 光合成における光制限の式を Steele タイプ(Steele, 1962)から、Platt タイプに変更した(Platt *et al.*, 1980)。

- 北太平洋亜寒帯域を想定した NEMURO のカイアシの季節鉛直移動を、全球に対応するために、止めることにした(Sumata et al., 2010)。

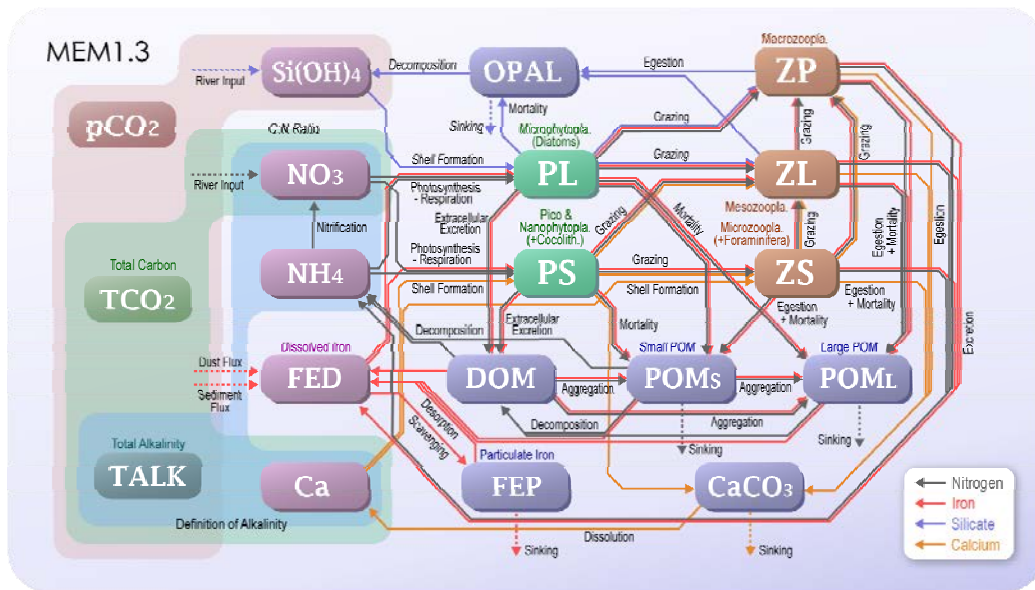


図8: 新しく開発した海洋生態系 MEM(Marine Ecosystem Model with optimal uptake kinetics)。各ボックスが予報変数、矢印が、窒素(黒)、鉄(赤)、ケイ素(青)、カルシウム(オレンジ)の物質フローを表す。炭酸系の生態系による収支は、窒素収支などから元素組成比を掛けることで求めている。

本生態系モデルの予報変数は、小型植物プランクトン (PS)、珪藻 (PL)、小型動物プランクトン (ZS)、大型動物プランクトン (ZL)、肉食性高次動物プランクトン (ZP)、硝酸塩 (NO_3^-)、アンモニウム塩 (NH_4^+)、小型/大型の粒子状有機窒素 (PON_s , PON_l)、溶存有機窒素(DON)、ケイ酸塩(Si(OH)_4)、生物起源オパール (Opal)、溶存鉄 (Fe_d) 粒子状鉄 (Fe_p) の計 14 種類である。炭酸系を計算する場合には、カルシウム(Ca)、全炭酸(TCO_2)、全アルカリ度が予報変数として、海面における二酸化炭素分圧(pCO_2)が診断定数として加わる。なお、炭酸系は、海水から生態系(無機物から有機物)へおよびその逆の収支に生態系の組成比(C:N 比)を掛けることで、炭素循環を見積もっている。

このモデルで再現された植物プランクトンの全球分布は、これまでのモデルに比べて、現実的なものとなっている(図 9)。北太平洋・北大西洋の亜寒帯域において、強いブルームが起きており、幅 100km スケールのカルフォルニア沖・ペルー沖・アフリカ西岸の沿岸湧昇、および、赤道湧昇に伴う生物生産も再現されている。水平格子サイズ 1/4x1/6 度で細かいスケールが表現できることは不可欠であるが、沿岸湧昇で下からの鉄に富んだ栄養塩供給が行われることも一因である。すなわち、沿岸に沿ったブルームは、沿岸部のみ鉄制限が緩和され、生物生産速度が高くなり、一方、沿岸より沖合の外洋では、鉄制限により生物生産が抑えられることも効いている。

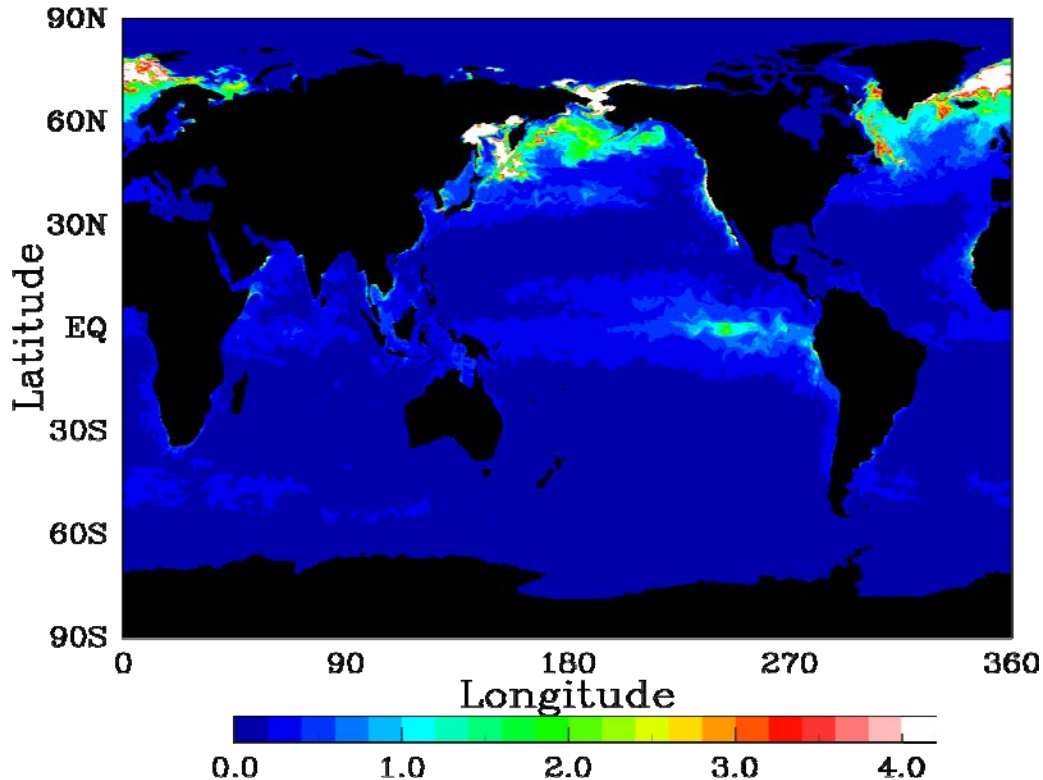


図9: 高解像度海洋生態系モデルで再現された1962年6月17日の5日間平均された植物プランクトン分布。単位は mgC/m^3 。

[3] 海洋生態系変動再現・将来予測シミュレーションの実施

[3-1] 高解像度生態系モデル全球版による海洋生態系変動再現

NEMURO では、鉄制限を考慮していなかったために、硝酸塩制限によって、北太平洋や南極海などの高緯度海域(HNLC 海域)では、観測された生物生産よりも高くなり、結果として、硝酸塩は、観測に比べて低い濃度だった(図 10)。改良された MEM では、鉄制限のために、生物生産は鉄制限によって抑えられており、観測された生物生産と同じレベルとなり、栄養塩濃度も観測されたものに近づいた。

羽角チームから、観測データで駆動された西暦 1958 年～2004 年までの経年変動の流速場、水温・塩分分布の提供を受け、高解像度生態系モデル全球版による海洋生態系変動再現シミュレーションを実施した。物理に興味があるチームと海洋生態系に興味があるチームが、オフライン手法により、ともに最小限の計算機資源を使って協力できるようになったことは興味深い。

HNLC 海域の栄養塩の海面濃度は、気候値としての改善は、経年変動においても改善をもたらすことが分かった。多くの海域では、海面水温が上昇すると成層が強化され、下からの栄養塩供給が弱まるため、クロロフィル濃度は減少する。すなわち、海面水温とクロロフィル濃度は負の相関を持つと期待される。他方、HNLC 海域では、成層化により栄養塩供給が弱まったとしても、海面における栄養塩濃度は元々高いので、成層化により光制限が緩和される(混合層が有光層よりも深くなる時期は光によって生物生産は制限されている)ので、クロロフィル濃度は高くなる。すなわち、海面水温とクロロフィル濃度は正の相関があることが期待される。NEMURO では、北太平洋亜寒帯域において負の相関を持つ海域が多かったが、MEM では、負の相関を持つ海域が見られなくなった(図 11)。

この改良は、地球温暖化に伴う将来予測に決定的に重要な意味を持つ。すなわち、地球温暖化では、水温上昇に伴う成層化の強化により、栄養塩供給が低下することが最も確からしいことである(例えば Hashioka and Yamanaka, 2007a)。そのとき、HNLC 海域においては、NEMURO では生物生産の低下、MEM では生物生産の低下が起こりにくい(上記の相関が明

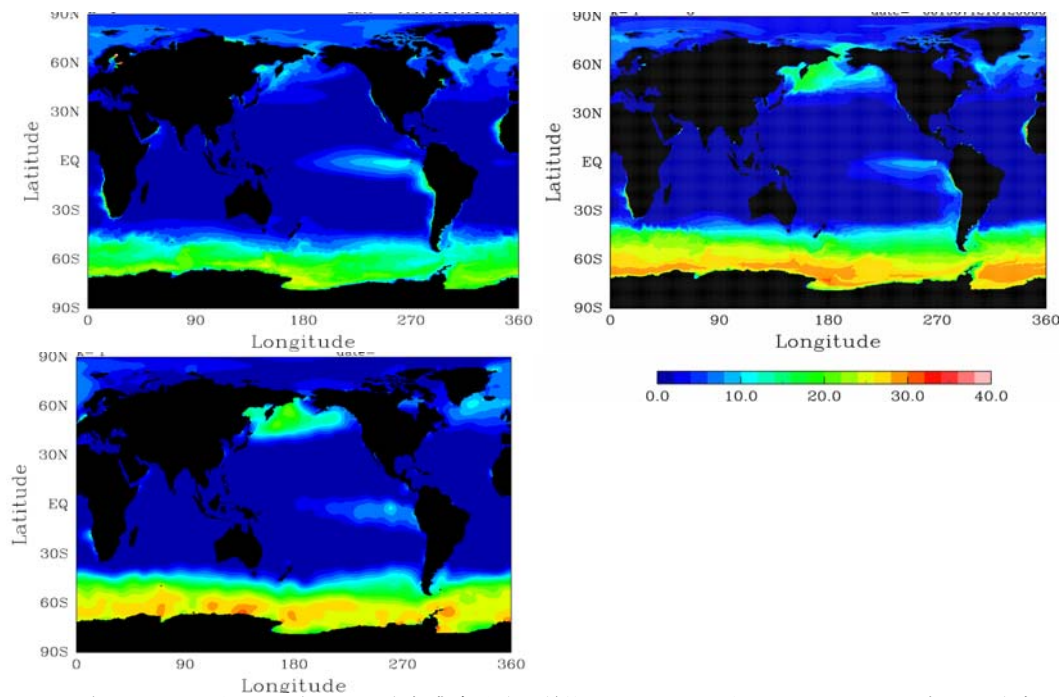


図 10: 海面における年間平均した硝酸塩濃度分布。単位は $\mu\text{mol/l}$ 。左上が NEMURO。右上が改良した MEM、左下が観測データ。

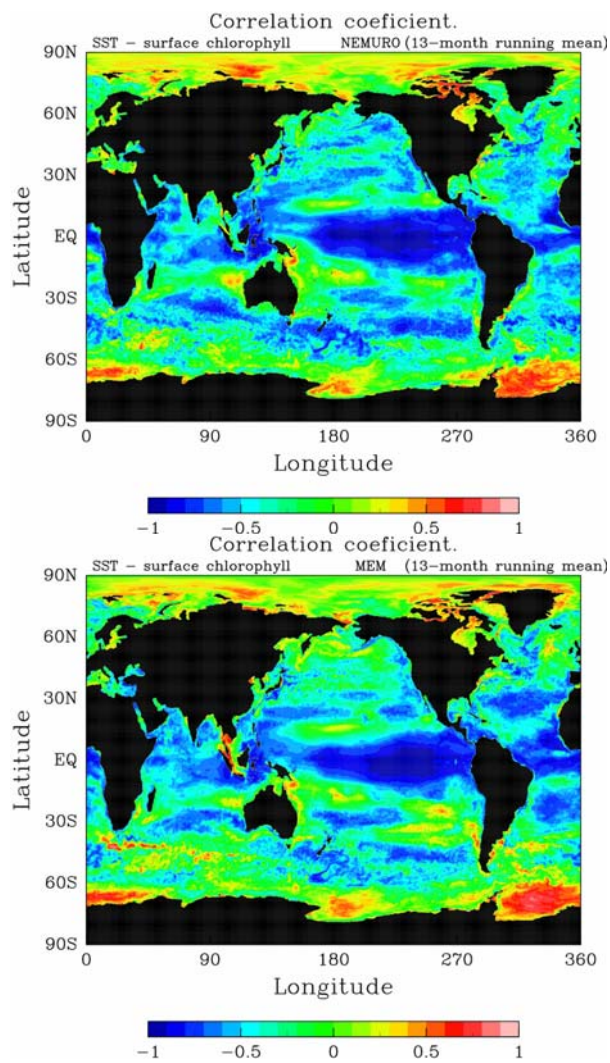


図 11: 経年変動における海面水温とクロロフィル濃度の相関係数。正の相関は、海面水温上昇とクロロフィル濃度が共に上昇することを意味する。(左)従来の NEMURO、(右)MEM の結果。

瞭な正ならば増加)ことが期待されるからである。

従来の概念的説明は、鉛直方向の成層と栄養塩供給との関係をもとにしたものであった。我々は、海面水温とクロロフィル濃度との相関が弱い海域のひとつ、亜熱帯海域の周辺分野では、海面高度とクロロフィル濃度との相関が高いことを見出した。これは、偏西風と貿易風の弱化に伴って亜熱帯循環系が弱まり、亜熱帯水塊が水平的に拡大した際に、クロロフィル濃度が減少する機構が働いているためである。

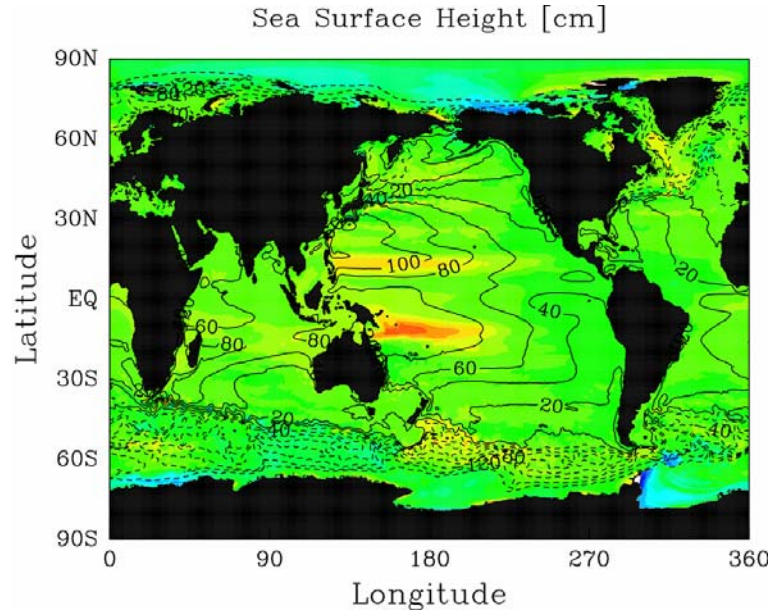


図 12: 海面高度とクロロフィル濃度との相関。黄色(>0.2)から赤い部分(>0.4)が正の相関がある海域。

[3-2] 中解像度生態系モデルと衛星観測との比較

開発した生態系モデル COCO-MEM によって表現される機能別植物プランクトン群集構造 (Phytoplankton Functional Types, PFTs) の空間分布の確からしさを検討するために、衛星観測によって得られた PFT (Hirata *et al.*, 2011) と比較を行った。

PFT は(1)生物地球化学物質循環における機能による分類と、(2)生態系において栄養エネルギーの伝達経路に影響する生物体の大きさによる分類による定義がある。両者は暗示的には関連している場合があるが、便宜上、今回は PFT を(2)として定義して解析を行った。モデルは今回、開発した COCO-MEM において、Optimum Nutrient Uptake-Kinetics (Smith and Yamanaka, 2007) を導入し、空間解像度を 1 度 x 1 度とした全球領域版のものを利用し (Shigemitsu *et al.*, *in minor revision*)、1982 年から 2009 年までの期間に対しての生態系の気候値実験および経年変動再現実験を行った。衛星観測は、海洋のごく表層の PFT のみ観測できるため、モデルと観測との比較においては、表層における PFT の分布を対象とした。比較方法には、モデルが再現すべき主要空間変動を明らかにした上で、客観性のある比較解析を行うために、空間主成分分析を用いた。さらに、定量的な空間分布の比較をするために、2 次元ウェーブレット解析も利用した。

空間主成分分析によれば、モデルと衛星観測の両方において、定常状態にあるべき PFT の空間分布が最も重要であることが示された(図 13)。定常状態にある PFT の空間分布に、季節変動する PFT 空間分布が重なっているような構造変化が衛星観測値に対する空間主成分分析で示され、モデルで再現された PFT も同様な構造を再現していることがわかった。ただし、季節変動する空間分布には 2 種類あり、各季節変動が全体の空間分布に及ぼす重要性の順位において、モデル結果と衛星観測結果の間で不一致があることが明らかになった。一方、この結果はモデルが表現すべき数々の複雑な現象群のうち、どの現象の再現に改良の余地がある

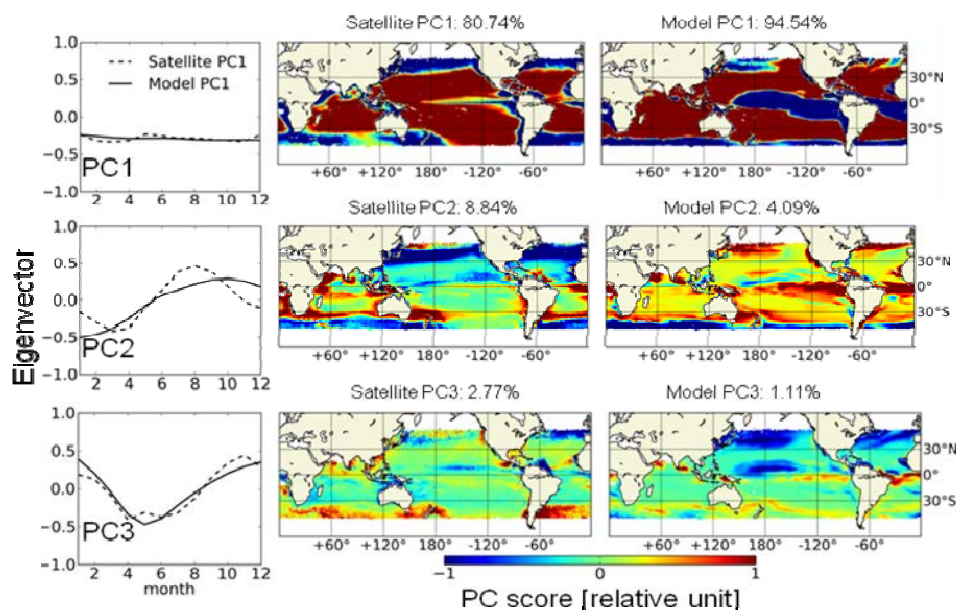


図 13: 小型藻類に対する衛星観測結果とモデル出力をそれぞれ主成分分析した結果。(左)固有ベクトル、(中)衛星観測に対する主成分得点、(右)モデルに対する主成分得点、(上段)第一主成分、(中段)第二主成分、(下段)第三主成分。空間主成分分析であるために、固有ベクトルは時間の関数として、主成分得点は空間分布として得られる。第一主成分の固有ベクトルが時間的変化を示さないことから、第一主成分で得られた空間分布は定常状態にあることが分かる。第二、第三主成分の固有ベクトルは、モデルと衛星観測の双方で季節変動を示しているという点で一致している。ただし、衛星観測で得られた第二主成分はモデルで得られた第三主成分に相当し、モデルで得られた第二主成分は衛星観測で得られた第三主成分と考えられる。しかし、第二主成分と第三主成分が占める全変動への寄与率は、それぞれ数パーセントである。

かということをつらやかしにしたという点で成果である。なぜなら、今回の結果を用いず、手さぐりで行うモデルの開発・改良努力と比較して、モデル性能を向上させる努力投資において、大幅な時間節約ができるからである。

本研究で開発されたモデルにより再現された、全クロロフィル、大型藻類、小型藻類の年間最大値および年間最小値を示す時期は、北半球(北大西洋および太平洋)において衛星観測と極めてよい一致を示すことが明らかになった(図 14)。インド洋を除いた南半球(南大西洋、南太平洋)でも、全クロロフィルおよび小型藻類の年間最大値を示す時期において、モデルと衛星観測はよく一致している一方、大型藻類の年間最大値を示す時期では、モデルと衛星観測の間でズレが生じていることが分かった。インド洋においては年間最小値を示す時期にズレは少ないものの、年間最大値を示す時期において違いが見られることがわかった。

二次元ウェーブレット解析によると、モデルと衛星観測で示された全クロロフィル、大型藻類、小型藻類は、1800km を超える空間分布(例:海盆スケール)に対して良い一致を示すことが明らかになった(図 15)。全クロロフィル、大型藻類、小型藻類のそれぞれに対し、生物量(正確には標準化色素生物量)が小さいときには、200km 以上の空間スケール(メソスケール)を持つ分布においても、モデルと衛星観測の結果は一致することが示された。メソスケールでの両者の一致は、生物量が多くなるにつれて小さくなるが、生物量がさらに大きくなると回復する傾向になることも示された。つまり、メソスケールにおいては、生物量の大小のコントラストがある場合に対し、モデルが再現性をもつことが明らかになった。PFT 分布の空間分布を、客観的かつ定量的に比較評価した今回の解析は、画期的で世界でも初めての試みである(Hirata *et al.*, 2012)。

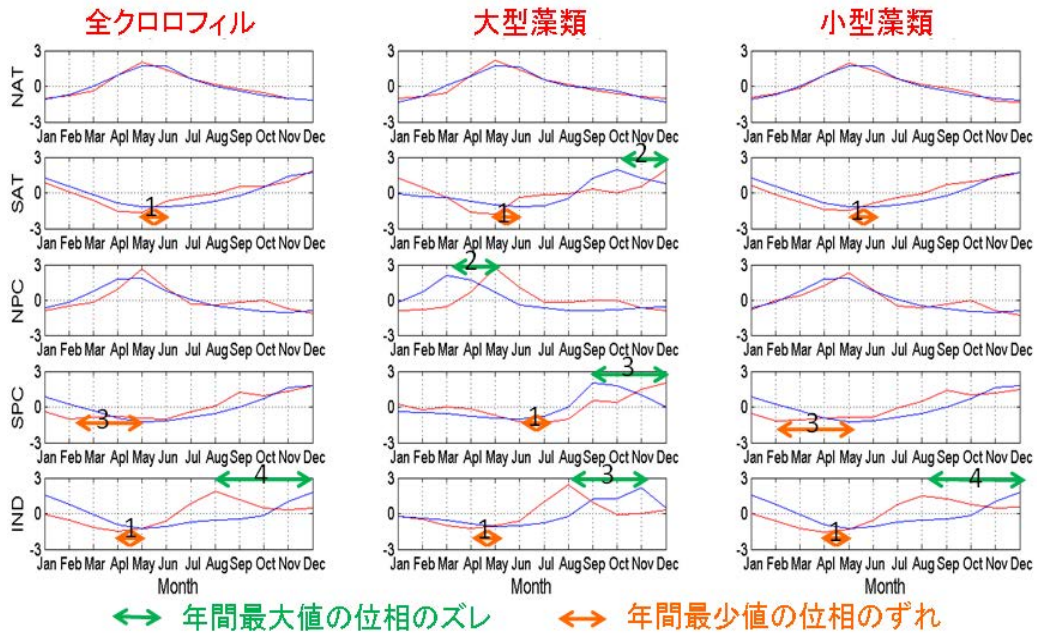


図 14: 衛星観測とモデルにおける(左)全クロロフィル、(中)大型藻類、および(右)小型藻類の海域別季節変動の比較。上から順に、北大西洋: NAT、南大西洋: SAT、北太平洋: NPC、南太平洋: SPC、およびインド洋: IND。比較に使用したモデルおよび衛星データは標準化(= [実際の値 - 平均] / 標準偏差)してある。

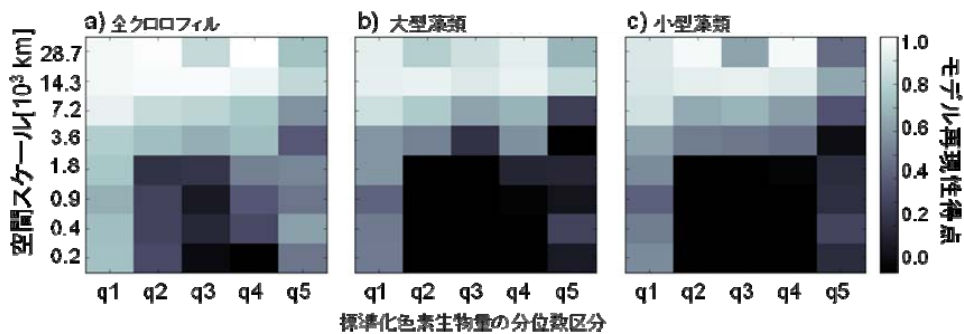


図 15: モデルと衛星観測によって得られた全クロロフィル、大型藻類、小型藻類の空間分布の一致・不一致を、標準化色素生物量と空間スケールの関数として表した、モデルの再現性得点。淡いほどモデルと衛星観測でよい一致を示し、濃いほど不一致を示す。Y 軸は空間スケールを示し、X 軸が標準化した標準化色素生物量の分位数区分を示す。分位数区分に対する分位数は、標準化色素生物量のダイナミックレンジを 5 つに等分割した時の値であり、モデルと衛星観測ではそれぞれ異なる。

[3-4] 小型浮魚類に対する地球温暖化実験

[3-3]西部北太平洋における地球温暖化実験の結果を利用して、[1-2c]で開発した小型浮魚類回遊モデルによって、小型浮魚類の温暖化に対する影響を評価した(図 16)。現在の条件と大気中 CO₂ 濃度の年 1% 漸増実験における 21 世紀後半を想定した大気中 CO₂ 濃度が 1900 年の約 2 倍となる 80 年目前後の 10 年間の海流・水温条件、動物プランクトンの状況などを境界条件として与えて、計算を行った。現在の主な産卵海域である土佐湾で 2 月 1 日に孵化したマイワシの経験水温は、9 年間の経年変動の範囲と成長が最も良い適水温の範囲と重なった好条件にある(それゆえ、主たる産卵海域とも考えられる)。孵化 120 日目の個体重量も 4g 以上が半分占めている。それに対して、温暖化の状態では、年によって適水温範囲になる場合もあるが、適水温の範囲よりも高温となり、孵化 120 日目の個体重量も 4g 以上少ない状況になる。

同様に解析して、房総半島付近で孵化したマイワシの方の成長が良くなることから、温暖化によって産卵域が北上されることが示された(Okunishi *et al.*, 2012b)。

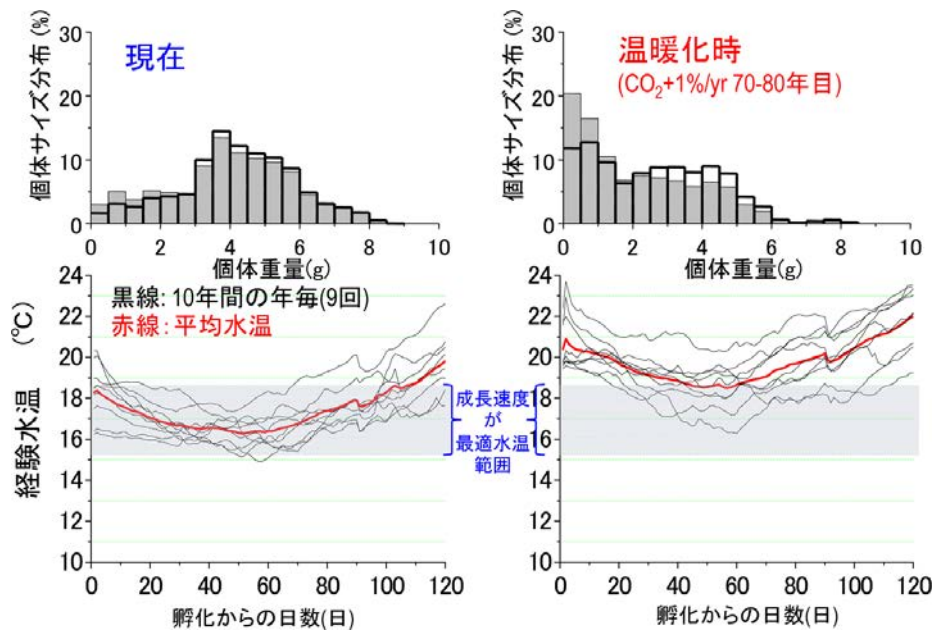


図 16: 現在、主な産卵海域である土佐湾から 2 月 1 日に孵化したマイワシの 120 日目まで経験した水温 (マイワシが位置していた地点の水温)、および、120 目の個体重量。個体重量は、死亡率を考慮したケース(白抜き)としなかったケース(グレー)の分布割合(%)を示した。また、経験水温には、各年での平均水温と 9 年間全ての平均水温(赤線)を書いた。

[3-5] 高解像度全球温暖化実験

高解像度生態系モデル全球版による温暖化実験は、開始が遅れて、現在実行中である。これは、文部科学省「21 世紀気候変動予測革新プログラム」(21 世紀革新)と共同研究(モデルの開発は本研究課題、実行は 21 世紀革新、解析は共同実施)として実施しているが、気候モデルの結果が昨年度後半に遅れたこと、また、東日本大震災による地球シミュレータの稼働率の低下、北海道大学情報基盤センターの計算機のリプレイスなどの影響により、半年程度実施が遅れている状況にある。本年度の終了時点までに、これまでの解析手法を用い、複数の実験を実施するアンサンブルによって、2030 年時点における CO₂ 倍増実験の温暖化影響に対して約 1/3 程度と期待される影響を、中規模渦や経年変動等の自然変動と分離して検出することが可能と考えている。

[4] 国際対応

[4-1] 国際プロジェクト MAREMIP の推進

本研究計画による海洋生態系モデルは国際的にも高く評価されていることを利用して、山中が 2007 年 11 月～2008 年 2 月に英国 East Anglia 大学に滞在したのを機会にして、同じく世界で海洋生態系モデルを開発しているメンバーに呼びかけて、日(山中康裕:北海道大学/JAMSTEC)・英(Corinne Le Quéré 教授:East Anglia 大学)・米(Scott C. Doney 博士:WHOI)・仏(Laurent Bopp 博士:IPSL)の四つの研究グループが参加した形で、国際的な海洋生態系モデルの相互比較プロジェクト MAREMIP を立ち上げた(図 17)。MAREMIP では、共通の境界条件(NCEP/NCAR の再解析データ:大気)で各生態系モデルを駆動し相互に比較することで、モデルによる現在の生態系の再現性の評価と将来的な気候変動に対する生態系の変動予測を目的としている。本 CREST では、個別のモデルおよびシミュレーション技術の開発と、MAREMIP における国際的な相互比較を両輪とし、海洋生態系の将来予測研究を進めた。

生態系モデル	Fe-NEMURO (北大/JAMSTEC, 日本)	PlankTOM5 (UEA, イギリス)	PISCES (IPSL, フランス)	CCSM-BEC (WHOI, アメリカ)
栄養塩	N, Si, Fe	P, Si, Fe	N, P, Si, Fe	P, Si, Fe
植物プランクトン	2 グループ Diatoms, Nanophy.	3 グループ Diatoms, Nanophy, Coccolith.	2 グループ Diatoms, Nanophy.	3 グループ Diatoms, Nanophy, Diazotrophs.
動物プランクトン	3 グループ Microzoo, Mesozoo, Macrozoo.	2 グループ Microzoo, Mesozoo.	2 グループ Microzoo, Mesozoo.	1 グループ Generic zoo.
物理モデル	COCO	NEMO	NEMO	CCSM

図 17: MAREMIP の初期フェーズに参加したモデル。それぞれにプランクトングループや栄養塩の種類など生態系の構造が異なるが、いずれのモデルも海洋の基礎生産に大きな役割を果たす大型の植物プランクトン珪藻類(Diatoms)は明示的に表現されている。

MAREMIP の初期フェーズ(2009 年-2011 年に実施)では、1996 年から 2007 年の 12 年間をターゲットとし、生態系変動の過去再現実験を行った。初期フェーズでは、日・英・米の 3 グループがそれぞれ解析を担当し、日本のグループでは、本 CREST の枠組みの中で橋岡が生態系の季節変動についての解析を行った(Hashioka *et al.*, *submitted*)。

解析の結果、いずれのモデルも亜寒帯域での高い Chl-a 濃度と亜熱帯域での低濃度など、衛星観測から得られた Chl-a 濃度の大局的な分布の再現に成功していた(図 18)。一方、本 CREST の将来予測実験を始めとして、近年の研究では気候変動が春季ブルームの規模やタイミング(Hashioka *et al.*, 2007, 2009, 2010)、さらに植物プランクトンの優占率に影響を与える(Boyd and Doney, 2002, Bopp *et al.*, 2005)ことが示唆されている。そのため、現在の各モデルにおけるブルームの再現性の評価と、変動をコントロールするメカニズムの理解に取り組んだ。

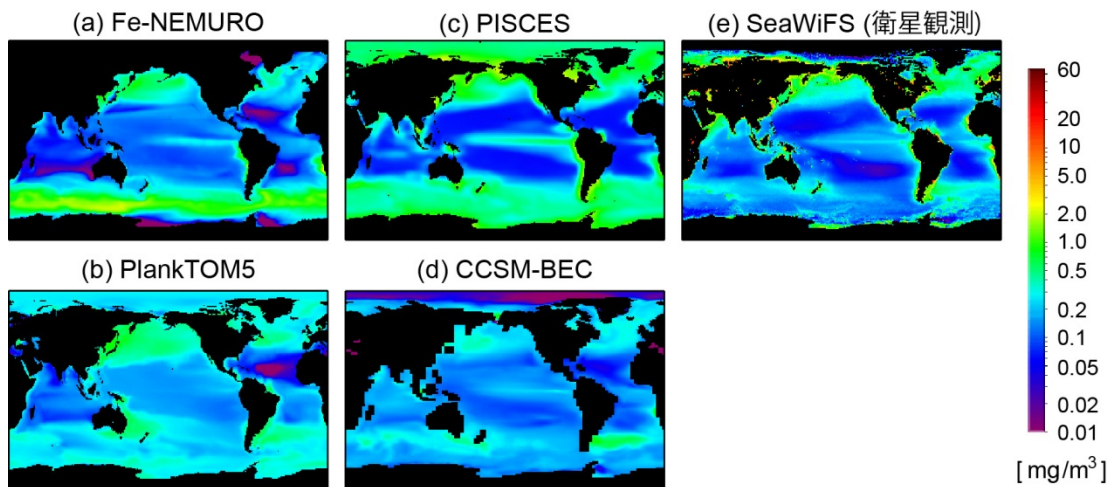


図 18: (a)から(d)は各モデルで得られた年平均の Chl-a 濃度。(e)衛星観測の結果。

一例として、図 19 は春季ブルーム時の珪藻類の優占率をモデル別・海域別に比較したものである。NEMURO と PISCES では、ブルーム時に珪藻類が 50%以上の高い割合で優占し、Chl-a 濃度が高い海域ほど優占率が高くなるという関係が得られた。これらの結果は、衛星からプランクトングループを見積もった研究の一つ Hirata *et al.*(2011)の結果と良い一致を示した。CCSM-BEC と PlankTOM5 においても標準偏差は大きいものの同様の関係が見られる。一方、PlankTOM5 では、珪藻類の優占率自体は多くの場所で 50%以下と低い値を示している。この結果は、別の手法で見積もられた衛星観測の結果 Alvain *et al.*, 2008 に近いものである。以上のように、衛星からの見積もりにおいても大きな隔りがある中、モデルを通じたメカニズムの理解が、将来的な気候変動に対する応答予測の大きな改善につながることを期待されている。こ

れら初期フェーズの結果については、他の 2 グループの研究結果とともに、12 月に論文として投稿予定である。

2011 年からは、英国の Corinne Le Quere 博士から山中が共同議長を引き継ぎ(平田が事務局長を務める)、IPCC の第 5 次報告書に貢献するため次期フェーズの実験準備を進めている。2011 年 6 月に英国 Plymouth で開催したキックオフミーティングでは、新たに複数のモデルグループが参加し、1950 年代から 2011 年までの過去再現実験および 2100 年までの将来予測実験を行うことが決定された。

なお、成果の位置づけや類似研究との比較、および、(2)研究成果の今後期待される効果については、山中グループと石田グループは一体化して行っているため、石田グループの後の箇所に、まとめて記述する。

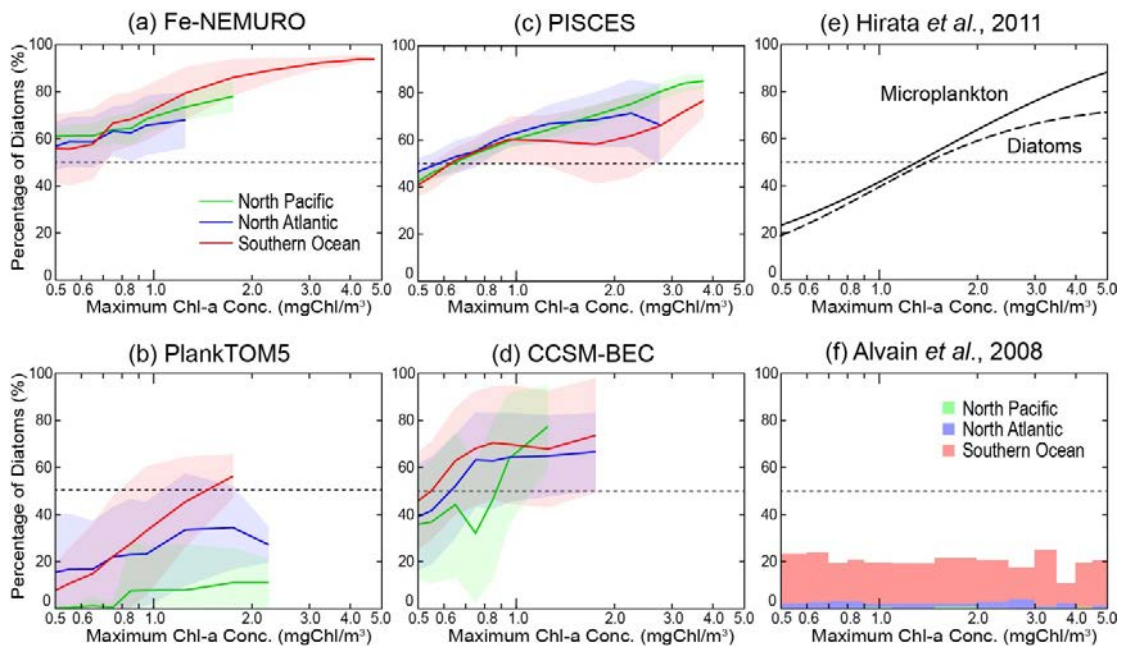


図 19: 春季ブルーム時の最大 Chl-a 濃度と大型の植物プランクトン珪藻類の海域ごとの優占率。(a)から(d)は、各モデルの結果、(e)と(f)はそれぞれ別の手法で計算された衛星からの見積もり。各色陰影は標準偏差を示す。

4. 2 本研究課題: 主としてシミュレーションの実施 ((独)海洋研究開発機構 石田グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

[1] 海洋-水産科学統合モデル開発の基礎技術の整備

[1-2] 個別モデルの改良

[1-2a] 光合成過程(栄養塩取り込み過程)の改良

海洋生態系の食物連鎖の始点は、植物プランクトンの光合成である。栄養塩に対する光合成、すなわち、生物生産(成長速度)は、下の Michaelis-Menten (MM) 経験式によって記述されてきた。

$$V_{MM} = \frac{V_{max} S}{K_s + S}$$

ここで、 S は栄養塩濃度、 K_s は半飽和定数、 V_{max} は最大成長、 V_{MM} である。MM 式は、特定の化学反応に対する定式化、すなわち、反応する物質の濃度に対する依存性としては理論的に正しい式である。しかし、細胞の光合成のような、いくつもの化学反応が関わる複雑な系で、 K_s や V_{max} を定数とした MM によって定式化することは、あくまでも経験式に過ぎず、この問題点は 30 年前以前から認識されていた。しかしながら、この経験式を用いて、ほぼ全ての海洋生

態系モデルの栄養塩取り込みの式として用いられてきた。むしろ、低濃度での栄養塩に対する栄養塩取り込み比の立ち上げアフィニティー(affinity) $A = V_{\max} / K_s$ を用いた方がより生理に基づいた定式化である(図 20; Aksnes and Egge 1991)。 K_s や A 、 V_{\max} が定数ならば、上式を

$$V_A = \frac{V_{\max} S}{\frac{V_{\max}}{A} + S}$$

のように A と V_{\max} に書き換えたに過ぎない(区別するために V_A と記述する)。しかしながら、生理的に意味があるパラメータは K_s ではなく A であり、生理に基づいたパラメータセットは、 K_s と V_{\max} ではなく、 A と V_{\max} である。栄養塩濃度が高い環境と低い環境では、細胞はイオンチャネルと酵素の配置を換えることにより、成長速度を最大にしようとする(図 21)。そこで、 A_0 と V_0 を定数として、生物生産で得られたエネルギーをイオンチャネルと酵素に振り分けるアロケーション f_A を $A = A_0 f_A$ と $V_{\max} = V_0 (1 - f_A)$ のように定義し、 V_A が最大になるように f_A を最適化するように成長速度が決まるようにする(OU kinetics, Pahlow, 2005)。

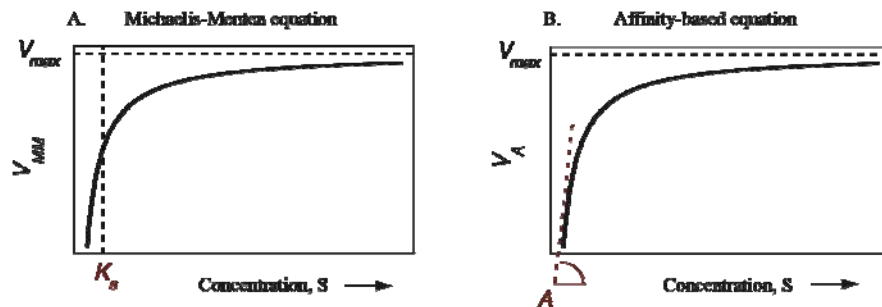


図 20: 本文中の(左)Michaelis-Menten (MM)経験式と(右)書き換えた式による、栄養塩取り込み速度の栄養塩濃度依存性。affinity A の意味するところは、低濃度での立ち上がり率(角度)で表される。

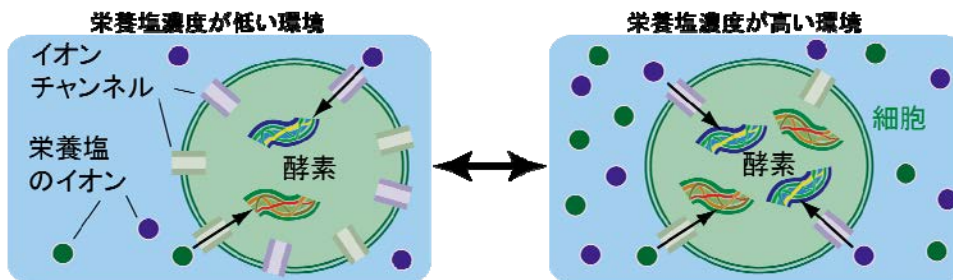


図 21: 複数の栄養塩を取り込むためのチャネル(細胞壁の通路)および利用するための酵素が必要であり、成長速度と上げるためには、栄養塩が少ない環境では、チャネルを多くすることが効率的であり、多い環境では酵素を多くすることが効率的である。

さらに、複数の栄養が必要な場合、鉄や窒素など、 f_A は、元素毎に決まっているのではなく(その可能性もあり得たが測定事実によって否定された)、成長速度を制限する栄養塩が最大成長速度となるように $f_{A_{lim}}$ が決まり、 $f_{A_{lim}}$ を制限されていない栄養塩でも用いられることになる(Smith and Yamanaka, 2007)。

$$f_{A_{lim}} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{A_{0lim} S_{lim}}{V_{0lim}}}}$$

制限する栄養塩 S_{lim} に対する栄養塩取り込み速度 V_{lim} と、制限していない栄養塩 S_{non} に対する栄養塩取り込み速度 V_{non} は、それぞれ

$$V_{lim} = \frac{V_{0lim} S_{lim}}{\frac{V_{0lim}}{A_{0lim}} + 2\sqrt{\frac{V_{0lim} S_{lim}}{A_{0lim}} + S_{lim}}}, \quad V_{non} = \frac{(1-f_{A_{lim}})V_{0non} f_{A_{lim}} A_{0non} S_{non}}{(1-f_{A_{lim}})V_{0non} + f_{A_{lim}} A_{0non} S_{non}}$$

のように記述できる。この考えが正しいかどうかは、測定との比較となる。これまでの研究では、半飽和定数 K_s は、定数ではなく、栄養塩の関数として、栄養塩濃度が高いところでは大きな値、低いところでは低い値という経験式が求められてきた(例えば、Collos *et al.*, 2005)。それらの文献を利用して、OU kinetics から導き出される見かけ上の半飽和定数

$$K_{apparent} = \frac{V_{0lim}}{A_{0lim}} + 2\sqrt{\frac{V_{0lim} S_{lim}}{A_{0lim}}}$$

を比較すると、これまで経験的關係で求められてきたものが非常にうまく説明できることが分かった(図 22; Smith *et al.*, 2009)。

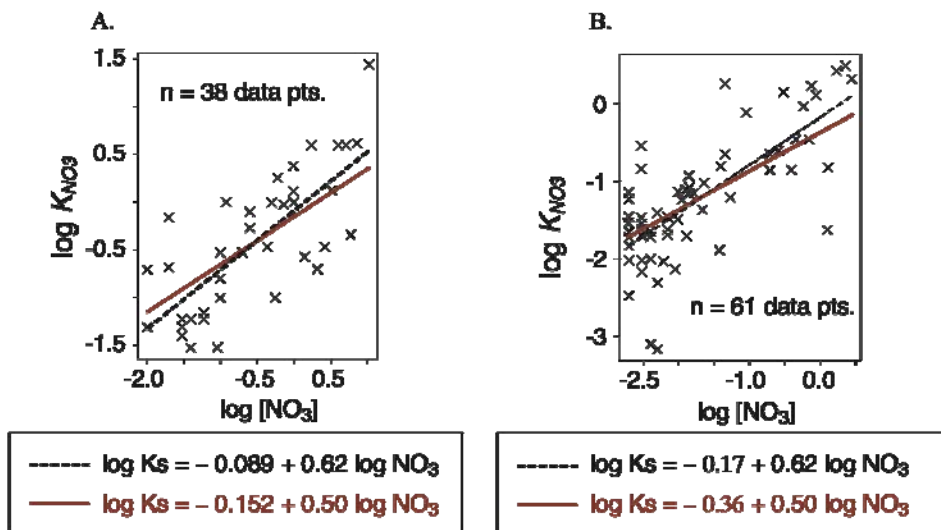


図 22: ×は、観測から得た MM の半飽和定数。点線は、これまでの研究のように、最小自乗法で得たもの。茶実線は OU kinetics から推定される 0.5 乗を用いて得たもの。両者の誤差に有意な差は無い。A) Collos *et al.* (2005) が集めてきた観測データ、B) Smith *et al.* (2009) によって集めてきた観測データ、両者は独立したデータセットである。

この結果、栄養塩依存は、従来の MM 経験式に比べて、低濃度環境でより大きな成長速度、高濃度環境でより小さな成長速度となる(図 23 左)。この定式は、本研究課題で開発した高解像度生態系モデル MEM に組み込まれたものの、地球温暖化に対して科学的に興味がある結果を素早く得るために、キール大学グループと協力して、従来の MM 経験式と OU kinetics 式では、地球温暖化に対してどう応答するかを見てみた(図 23 右; Smith *et al.*, 2009)。その結果、亜熱帯海域では、地球温暖化の成層化に伴い、海面の栄養塩濃度が低下し、MM 経験式を用いた場合には生物生産が大きく減少するのに対して、OU kinetics を用いた場合にはその程度が半分程度となることが示された。すなわち、植物プランクトンが、栄養塩低下にともない、ア

ロケーション f_A を変化させた「馴化」することで、地球温暖化に対して、緩やかな応答をするようになったことを示している。これは、細胞レベルの 30 年間用いられてきた古典的な経験式を改良することで、地球温暖化に対する応答の結果の違いを導き出した、マルチスケールの優れた研究と考えている。さらに、最適化された栄養塩取り込みを仮定して、様々な海域で行われた測定値から温度依存性の効果を見積もる試み(Smith, 2010)や、最適化に関する拡張の試みが行われている(Smith *et al.*, 2011)。

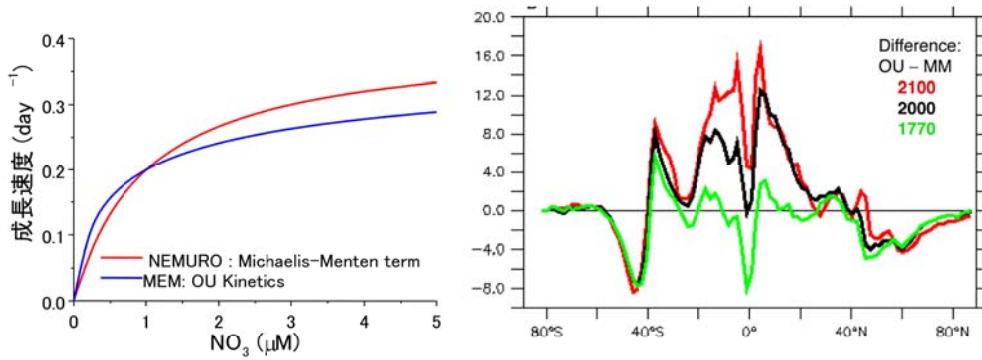


図 23: (左)栄養塩に対する成長速度。MM で半飽和定数を固定値とした依存性と OU kinetics で得られた依存性。ともに二つの定数パラメータで記述される。ピクテリア大学中解像度地球システムモデルに組み込んで、地球温暖化に伴う年間生物生産量(mgC/m²)による差の変化を東西平均して示したもの(Smith *et al.*, 2009)。なお、全海洋平均した現在の生物生産は 300mg/m² 程度。

[2] 海洋-水産科学統合モデルの開発

[2-2] COCO-PlankTOM5 の開発

海洋生態系モデルの相互比較を行うため、橋岡[石田 G]は 2008 年に英国 East Anglia 大学の Corinne Le Quéré 博士の研究グループを訪問し、同グループで開発される生態系モデル PlankTOM5(Le Quéré *et al.*, 2005)の海洋大循環モデル COCO への組み込みに取り組んだ。PlankTOM5 は NEMURO と同じくプランクトン機能グループを明示的に表現したモデルである。NEMURO では、2 種の物質循環と、植物プランクトン 2 グループ、動物プランクトン 3 グループが表現され、高次生態系の再現に優れたモデルである(図 24)。一方で、PlankTOM5 は 3 種の

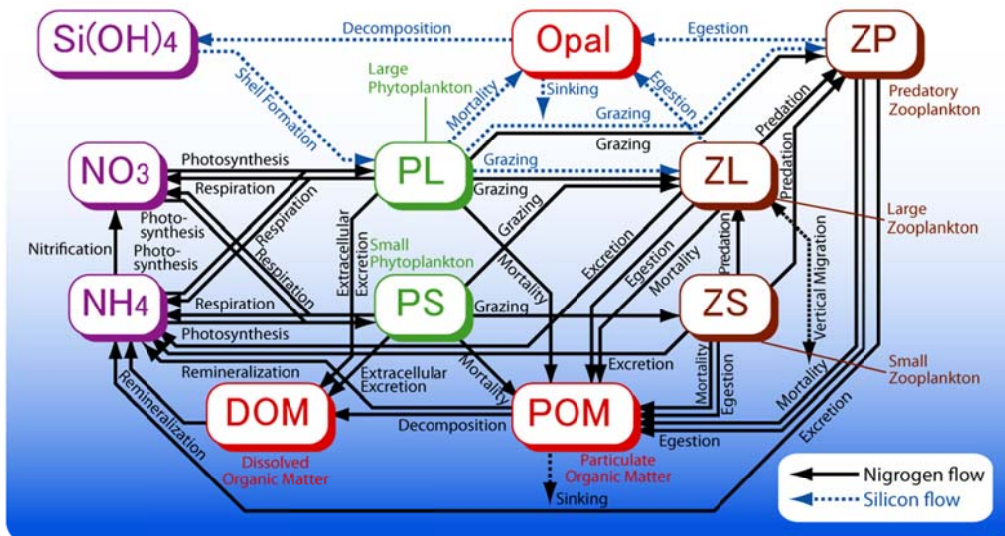


図 24: 生態系モデル NEMURO の概念図。紫色が栄養塩を、緑色が植物プランクトン、茶色が動物プランクトン、赤色が沈降粒子等を示す。各矢印が生物地球化学過程を示し、NEMURO では窒素と珪素の循環を取り扱う。

物質循環と、植物プランクトン 3 グループ、動物プランクトン 2 グループが表現され、低次生態系と物質循環の再現に優れたモデルある(図 25)。これらを相互に比較することで、両者のメリットを取り入れたモデルの開発につなげる。

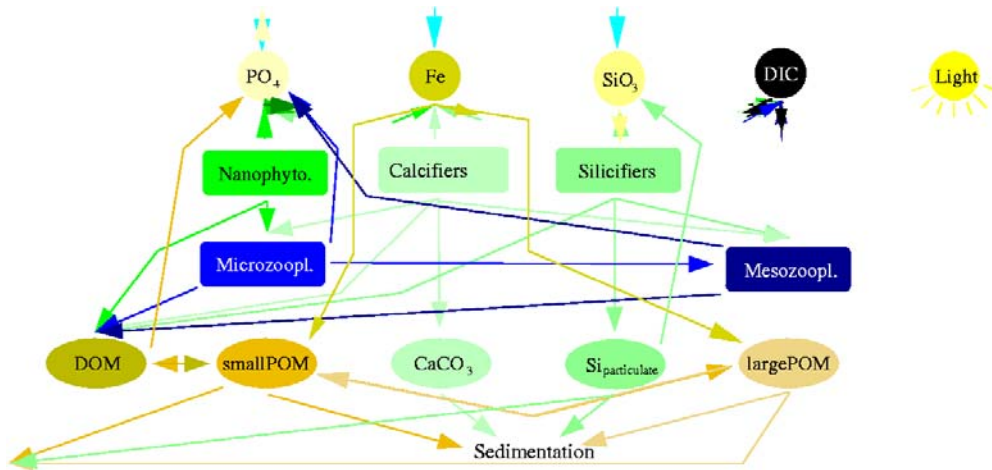


図 25: 生態系モデル PlankTOM5 の概念図。1 段目左三つが栄養塩を示し、2 段目が植物プランクトンを、3 段目が動物プランクトン、4 段目が沈降粒子等を示す。PlankTOM5 ではリン、珪素、鉄の循環を取り扱う。

一般に、各グループの生態系モデルは主要な生態系の方程式系は公開されているものの、モデルのソースコードは非公開で、具体的な海洋大循環モデルへの組み込みの方法や生態系パラメータ等の詳細な比較は困難である。今回、本 CREST で共同研究を行うことで、ソースコードレベルでの詳細な比較が可能となった。その結果、NEMURO と PlankTOM5 の大まかな構造は近いものであるが、PlankTOM5 の生物地球化学過程はより植物生理に基づいた過程が使われていることが分かった(例:植物プランクトンの C/Chl 比の変化など)。物質循環に関する PlankTOM5 におけるいくつかの先進的なプロセスのうち、粒状有機物のサイズ別の表現や鉄循環などは、本 CREST で新たに開発された生態系モデル MEM で組み込まれた。これにより物質循環・低次生態系から高次生態系までの表現に優れたモデルの開発につながった。なお、当初の計画では、COCO-NEMURO と COCO-PlankTOM5 での相互比較を行う予定であったが、同時期に MAREMIP による相互比較が開始されたため、その枠組みの中で比較を行うこととなった(NEMO-PlankTOM5 との比較、NEMO はフランス IPSL の海洋大循環モデル)。

[3] 海洋生態系変動再現・将来予測シミュレーションの実施

[3-3] 西部北太平洋における地球温暖化実験

渦許容の高解像海洋生態系モデル COCO-NEMURO 西部北太平洋版(水平解像度 1/4×1/6 度)を用いて西部北太平洋における低次生態系の温暖化応答を予測した。開発したオフライン計算の手法により、気候モデル MIROC hi-res. (the Model for Interdisciplinary Research on Climate 高解像度版)による温暖化実験の結果を、生態系モデルを駆動する境界条件として直接用いることで、物理環境の変化から生態系変動までを連続的に予測することが可能となった。温暖化の際の物理環境には、大気中 CO₂ 濃度の年1%漸増実験の結果を用い、比較となる標準実験には、産業革命前の 1900 年の設定の実験結果を用いた。解析では、21 世紀後半を想定した大気中 CO₂ 濃度が 1900 年の約 2 倍となる 80 年目前後の 10 年間の生態系変動に注目した。

実験の結果、年平均での低次生態系の温暖化応答は一般的な仮説や、中解像度モデルによる予測(Bopp *et al.*, 2005, Hashioka and Yamanaka., 2007a)を支持する結果であった、すなわち、2~3度の温度上昇に伴い、海洋表層の成層が強化され、深層からの栄養塩供給が減少し、植物プランクトン、動物プランクトンともに減少するというもの。本研究では、新たな取り組み

として、予測の不確定性を評価するため、温暖化に伴う変動を年々の自然変動(エルニーニョ・ラニーニャや Pacific Decadal Oscillation, PDOなどの経年変動、渦活動など)と比較し、統計的に有意な温暖化シグナルを抽出した。その結果、Chl-a 濃度の変化は自然変動が大きい黒潮続流域(流軸の年々変動や渦活動など)を除き西部北太平洋のほぼ全域で統計的に有意であった(図 26)。

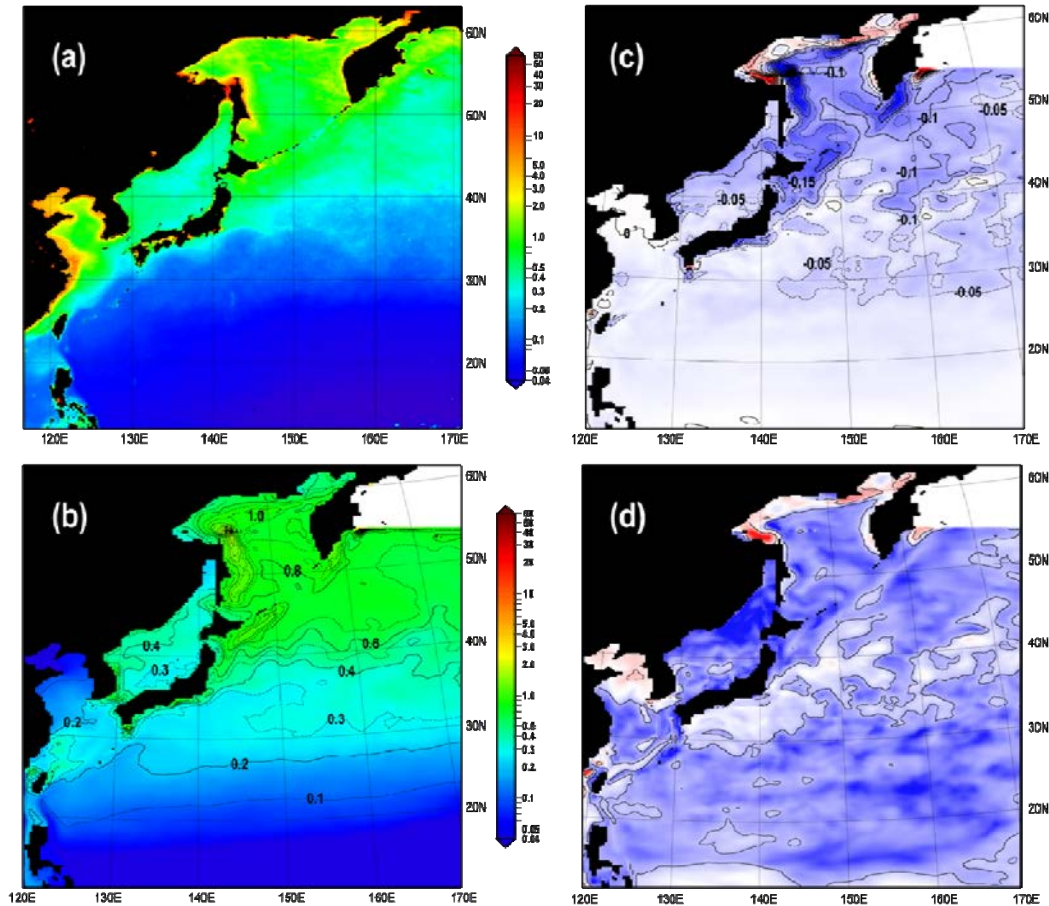


図 26:(a) 衛星(SeaWiFS)から求められた 1997 年から 2003 年の期間の年平均 Chl-a 濃度 (mgChl/m³)。 (b) モデルの標準実験における年平均 Chl-a 濃度。 (c) 予温暖化に伴う Chl-a 濃度の変化(温暖化-標準実験)。 (d) 平均値の差の有意検定。濃い色の領域が、t 検定において $p \leq 0.05$ で有意な領域を示す。青色と赤色の領域がそれぞれ、温暖化に伴う増加と減少を示す。

また、生態系の季節変動への影響として、西部北太平洋亜寒帯域の生態系変動の鍵となる春季ブルームに注目し、解析を行った。モデルは標準実験において、観測された春季ブルームの季節的な移り変わりを良く再現している(図 27: すなわち、ブルームが亜熱帯から亜寒帯域へ北上する様子や、外洋のブルームは周囲の沿岸域に比べて遅れて始まる様子など)。またブルーム時の最大濃度についても大局的な空間パターンをモデルは再現している。温暖化に対する応答としては、西部北太平洋の多くの海域で、春季ブルームの 10~20 日程度の早期化が予測され、自然変動に対してこの応答は統計的に有意であった。

他方、春季ブルームの最大濃度の変化は、海域ごとに異なった応答を示した。黒潮続流の南から亜熱帯域にかけて、最大濃度は温暖化に伴う成層の強化と表層栄養塩の減少により 20~40%減少している。また、春季に動物プランクトンのトップダウンコントロールが重要な役割を果たす亜寒帯域では(Hashioka and Yamanaka, 2007b)、最大濃度は温度上昇に伴う動物プランクトンの補食圧の増加に伴い 20~40%減少した。一方、今回の高解像度モデルにより物理環

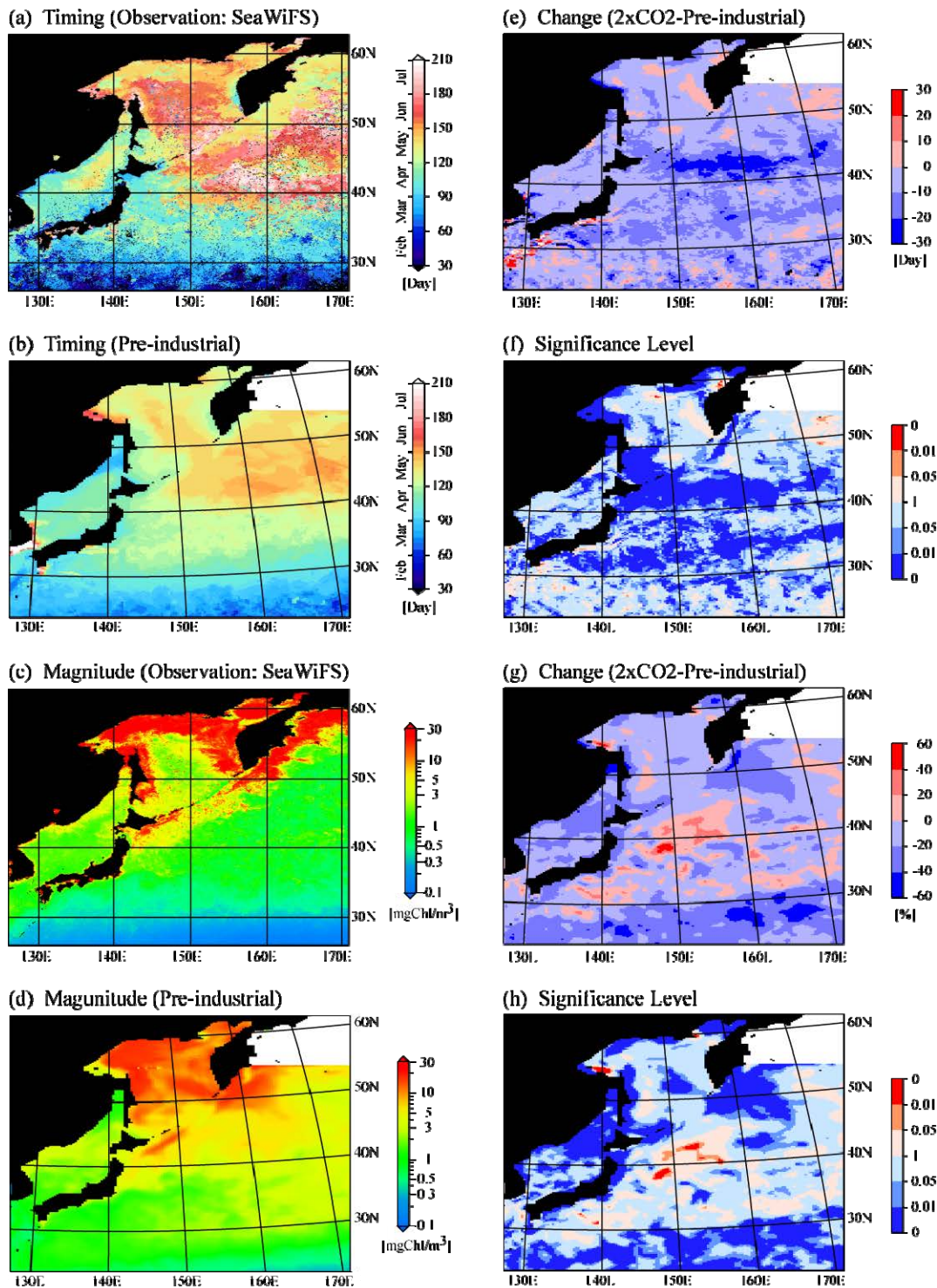


図 27: (a) SeaWiFS の衛星データから見積もった春季ブルーム時の最大濃度のタイミング、(b)モデルの標準実験で得られたタイミング。(c)SeaWiFS から見積もった春季ブルーム時の最大 Chl-a 濃度、(d)モデルの標準実験から得られた最大濃度。(e)温暖化に伴う春季ブルームの最大濃度のタイミングの変化(温暖化実験-標準実験)、(f)タイミングの変化について、t 検定による平均値の差の有意検定で、p 値が 0.05 および 0.01 以下の有意な領域を示す。(g)温暖化に伴うブルームの最大濃度の変化(温暖化実験-標準実験)、(h) 最大濃度の変化について、t 検定による平均値の差の有意検定で、p 値が 0.05 および 0.01 以下の海域を示す。(f, h)において、赤色と青色は温暖化に伴う増加と減少を示す。

境が大幅に改善された黒潮続流域の北側では、年平均の植物プランクトン濃度が減少しているにもかかわらず温暖化に伴い 20~40%の最大濃度の増加がみられることは興味深い。これは黒潮続流域の北側では春季に栄養濃度はそれほど低くないので、栄養塩制限よりも温度環境の改善が生産の増加に寄与したためである。

これら春季ブルームにおける規模や期間の変化は物質循環の観点からは炭素循環における生物ポンプの強さに影響を与えるため重要である。また、生物・水産学の観点からは、ブルームの規模やタイミングが高次栄養段階の生産に影響を与えることが重要である。例えば、マイワシや、カタクチイワシ、サンマなど日本近海の小型浮き魚類の成長は、春季の黒潮-親潮混合域の成長・生残過程に強く影響されることが示唆されている (Watanabe *et al.*, 1988, 1989, 1996 and 1998, Takahashi *et al.*, 2001, Oozeki *et al.*, 2004)。したがって、春季ブルームのような季節的・海域的に特異な現象に対する温暖化の影響を予測することが重要となる。本研究の結果は、たとえ年平均場でみた温暖化応答が小さくとも、季節的に特異なイベントに特化した生物や地球化学過程には、温暖化が重大な影響を与える可能性を示唆している。これらの結果は、Hashioka *et al.* (2009, 2010)にまとめられた。

[4] 国際対応

[4-2] その他

当初の研究構想では、海洋酸性化を行うこともあり、我々が参加していた OCMIP の議長だった、海洋酸性化を含めた海洋物質循環の世界的権威の一人である James Orr(モナコ)に、笹井研究員を2ヶ月間2回滞在させて共同研究を実施した。しかし、笹井研究員が担当していた OFES の開発が終了し、オフライン技術開発の物理モデルを COCO に絞ったこと、海洋生態系の開発、特に地球温暖化に伴う将来予測に対する国際的競争が激しくなったことから、James Orr との共同研究は平成 20 年に打ち切った。他方、S. Lan Smith 研究員の OU kinetics 研究は、独創的であり、同様な研究を進めていたキール大学を中心とする北ドイツの研究グループとの共同研究は、Smith *et al.*(2009)や Smith *et al.*(2011)に代表されるように、大きく前進した。[1-2a]で述べたように、彼らとの議論を通じて、細胞レベルの改良が地球温暖化への応答の差を生じるマルチスケールの科学的知見として興味深い結果につながった。

また、PICES のモデリングや将来予測に対しては、山中とともに、橋岡研究員・野口研究員が参加して積極的に貢献するとともに、MAREMIP に提出された中解像度モデルの計算は野口研究員が主として担当した。

(2)研究成果の今後期待される効果

以下、山中グループと石田グループは一体化して行っているため、山中グループも併せて、成果の位置づけや類似研究との比較を含め、(2)研究成果の今後期待される効果については、まとめて記述する。

本研究課題が開始される以前、気候モデルにより予測された物理環境を用いて生態系モデルを駆動し、物理過程から生物-地球化学過程まで統合的に取り扱い、温暖化に対する応答を予測する研究は、表 1 に示すような四つの研究例のみであった。Hashioka and Yamanaka(2007a)は、本研究課題開始後に公表されているが、基本的に CREST の提案のもととなった研究であり、本研究課題の研究成果には含まれていない。本研究課題が実施した、中規模渦や経年変動を含めた高解像度生態系モデルによる温暖化予測は、現在においても他に例を見ない。そのことは、この研究課題で得た結果を背景にして、国際プロジェクト MAREMIP の実施や、IGBP のコアプロジェクト GLOBEC では 2007 年 Scientific Highlight に選ばれ、2009 年総会では基調講演を務め、コアプロジェクト SOLAS の 2012 年総会でも招待講演が依頼されていること、などの極めて高い国際的な評価を得ていることから明らかである。

Smith 研究員が開発した OU kinetics は、何十年間“何となく”使われてきた Michaelis-Menten 経験式、および、それを用いた観測結果の解釈を根本から変更するものであり、モデリングに留まらず、観測においても、世界中の研究者に普及するものと確信している。さらに、栄養塩依存性が明らかになったことから、温度依存性を推定することが出来るようになった。その

表1:生態系モデルを用いて海洋低次生態系の温暖化応答を予測した研究例

論文	研究内容と用いたモデル	水平解像度
Boyd and Doney (2002)	Box タイプの生態系モデルを全球に並べ、温暖化に伴う窒素固定量の変化を予測。	2~4 度
Sarmiento <i>et al.</i> (2004)	IPCC 第3次報告書の六つの気候モデルの結果で、簡易生態系モデル(生物生産のアルゴリズム)をそれぞれ駆動し、温暖化に伴う生物生産の変化を予測。	1.25~5.6 度
Bopp <i>et al.</i> (2005)	全球生態系モデルで温暖化に伴う植物プランクトングループの変化を予測。	1 度
Hashioka and Yamanaka (2007a)	西部北太平洋の領域生態系モデルで温暖化が植物プランクトンの季節変化に与える影響を予測。	1 度

結果、従来考えられていた温度依存性(温度が 10 度上がると生物生産速度が約 2 倍になる)よりも大きいこと(約 3 倍)が示されつつあり、これらを含めると、地球温暖化に伴う海洋生態系の応答が、これまでの研究と定量的に異なる結果となる可能性が高い。

また、奥西研究員が開発した小型浮き魚類回遊モデルは、平成 20 年度から(独)水産総合研究センターとの共同研究となった。本研究課題との共同研究として(山中等が共著として参画し、JST の所属も付けている)、春から夏にかけての策餌回遊においては、本研究課題で開発した成長速度が最適な方向に向けて遊泳するアルゴリズムよりも、一つ前の時間ステップに比べて成長速度が悪い場合に遊泳方向をランダムに決めるアルゴリズム(Kinesis)の方が観測分布の再現性良くなることが示された(Okunishi *et al.*, 2012a)。また、小型浮き魚類回遊モデルの高度化については、奥西研究員が CREST「シミュレーション技術の革新と実用化基盤の構築」研究領域の研究代表者である樋口知之(統計数理研究所)の共同利用を行った。

本研究課題から始まった海洋生態系モデルの開発は、地球温暖化に伴う気候変動の将来影響として注目され、文部科学省「21 世紀気候変動予測革新プログラム」と共同研究を実施するなど、シナジー効果が上がっている。また、2010 年名古屋にて生物多様性条約締結国会議が開かれた。海洋における生物多様性を考える際に、本研究課題で開発された海洋生態系モデルは、今後重要な貢献をすることが期待される(この成果などをもとに、現在、CREST「海洋資源等の持続可能な利用に必要な海洋生物多様性の保全・再生のための高効率な海洋生態系の把握やモデルを用いた海洋生物の変動予測等に向けた基盤技術の創出」の書類選考通過)。すなわち、動植物プランクトンの多様性は、中規模渦や季節変化、経年変動などの自然変動に伴う不均質な環境が大きく貢献していると考えられるが、本研究課題で開発した高解像度生態系モデルは、このような環境を再現出来るためである。

用語説明

IGBP: International Geosphere - Biosphere Programme (地球圏-生物圏国際協同研究計画)の略。ICSU(International Council for Science, 国際科学会議)のもとにある研究プログラム。日本学術会議においても対応する委員会が設置されている。

GLOBEC: Global Ocean Ecosystem Dynamics (全球海洋生態系動態研究計画)の略。IGBP のコアプロジェクトの一つ。総会は世界中の優れた科学者 300 名程度が集まる場である。

SOLAS: Surface Ocean-Lower Atmosphere Study (海洋・大気間の物質相互作用計画)の略。IGBP のコアプロジェクトの一つ。総会は世界中の優れた科学者 300 名程度が集まる場である。

IMBER: Integrated Marine Biogeochemistry and Ecosystem Research (海洋生物地球化学と生態系の統合研究)の略。IGBP のコアプロジェクトの一つ。総会は世界中の優れた科学者 300 名程度が集まる場である。

AIMES: Analysis, Integration and Modeling of the Earth System (地球システムの解析・統合・モデ

- リング)の略。IGBP のコアプロジェクトの一つであり、山中が SSC(科学運営委員)を務める。
- PICES: North Pacific Marine Science Organization (北太平洋海洋科学機構)の略。環北太平洋 6ヶ国が参加する政府間組織。年次総会は、科学者を中心とした研究成果を発表する場でもある。
- MAREMIP: MARine Ecosystem Model Intercomparison Project (海洋生態系モデル相互比較研究計画)の略。海洋生態系モデルの相互比較計画。日英米仏の 4 グループが参加する AIMES の公式国際プロジェクト。山中が共同議長を務める。
- JAMSTEC: Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology ((独)海洋研究開発機構)の略。
- WHOI: Woods Hole Oceanographic Institution の略。米国東海岸にある海洋に関する大きな研究所。
- IPSL: Institut Pierre Simon Laplace des sciences de l'environnement の略。フランスにある気候などに関する大きな研究所。
- NEMURO: North pacific Ecosystem Model for Understanding Regional Oceanography の略。PICES モデリンググループで開発された海洋(低次)生態系モデル。本研究課題で改良した個別モデルの一つ。
- MEM: Marine Ecosystem Model coupled with optimal uptake kinetics の略。本研究課題で 21 年度開発した海洋生態系モデル(仮称として nNEMURO という仮称を用いた時期もある)
- NEMURO.FISH: NEMURO For Including Saury and Herring の略。PICES モデリンググループで開発された小型浮魚類の成長モデル。
- COCO: CCSR Ocean Component Model の略。東京大学気候システム研究センター(現 東京大学大気海洋研究所)が開発した海洋大循環モデル。
- OFES: OGCM for the Earth Simulator の略。(独)海洋研究開発機構地球シミュレータセンターが開発した海洋大循環モデル。
- PlankTOM5: 英国・East Anglia 大学が開発した海洋生態系モデル。
- CCSM-BEC: 米国・NCAR および WHOI が開発した海洋生態系モデル。
- PISCES: 仏国・IPSL が開発した海洋生態系モデル。
- ANN: Artificial Neural Networks(人工ニューラルネットワーク)の略。
- SST: Sea Surface Temperature(海面水温)の略。
- BP: Back Propagation(誤差伝播法)の略。学習アルゴリズムの一つ。
- GA: Genetic Algorithm(遺伝的アルゴリズム) の略。学習アルゴリズムの一つ。
- HNLC: High Nutrient Low Chlorophyll の略。硝酸塩やケイ酸塩などの栄養塩が存在するにもかかわらず、生物生産が期待されるよりも低い海域。通常は、生物生産は鉄制限となっている。
- PFTs: Phytoplankton Functional Types(機能別グループ)の略。プランクトンの役割に注目した大まかな分類。ケイ藻とその他などの分け方をする。

§ 5 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 1 件、国際(欧文)誌 25 件)

1. Okunishi, T., Ito, S., Hashioka, T., Sakamoto, T. T., Yoshie, N., Sumata, H., Yara, Y., Okada, N., Yamanaka Y.: Impacts of climate change on growth, migration and recruitment success of Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*) in the western North Pacific, *Climatic Change*, (**accepted**), 2012b.
2. Okunishi, T., S. Ito, D. Ambe, A. Takasuka, T. Kameda, K. Tadokoro, T. Setou, K. Komatsu, A. Kawabata, H. Kubota, T. Ichikawa, H. Sugisaki, T. Hashioka, Y. Yamanaka, N. Yoshie, T. Watanabe: A modeling approach to evaluate growth and movement for recruitment success of Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*) in the western Pacific. *Fisheries Oceanography*, **21**, 44-57,

- 2012a.
3. Hirata, T., S., Saux-Picart, T., Hashioka, M., Aita-Noguchi, H., Sumata, M., Shigemitsu, I. Allen, Y. Yamanaka, A comparison between phytoplankton community structure derived from a global 3D ecosystem model and satellite observation, *Journal of Marine Systems*, (published on line), 2012. (doi:10.1016/j.jmarsys.2012.01.009)
 4. Smith, S. L., M. Pahlow, A. Merico, K. Wirtz: Optimality-based modeling of planktonic organisms, *Limnology and Oceanography*, **56**, 2080-2094, 2011. (doi: 10.4319/lo.2011.56.6.2080)
 5. Shibano, R., Y. Yamanaka, N. Okada, T. Chuda, S. Suzuki, H. Niino, and M. Toratani: Responses of marine ecosystem to typhoon passages in the western subtropical North Pacific. *Geophysical Research Letter*, **38**, L18608, 2011. (doi:10.1029/2011GL048717)
 6. Hirata, T., N. Hardman-Mountford, R. Brewin, J. Aiken, R. Barlow, K. Suzuki, T. Isada, E. Howell, T. Hashioka, M. Noguchi-Aita, Y. Yamanka: Synoptic relationships quantified between surface Chlorophyll-a and diagnostic pigments specific to phytoplankton functional types. *Biogeosciences*, **8**, 311-327, 2011. (doi:10.1016/j.jmarsys.2006.03.013)
 7. Sumata, H, T. Hashioka, T. Suzuki, N. Yoshie, T. Okunishi, M. N. Aita, T. T. Sakamoto, A. Ishida, N. Okada and Y. Ymanaka: Effect of eddy transport on the nutrient supply into the euphotic zone simulated in an eddy-permitting ocean ecosystem model. *Journal of Marine Systems*, vol. 83, pp. 67-87, 2010. (doi:10.1016/j.ecolmodel.2006.09.016)
 8. Shigemitsu, M., Y. W. Watanabe, Y. Yamanaka, M. C. Honda, H. Kwakami: A model for the relationship between sinking organic matter and minerals in the shallow zone of the western subarctic Pacific. *Journal of Oceanography*, vol. 66, pp. 697-708, 2010.
 9. Rose, K. A., J. I. Allen, Y. Artioli, M. Barange, J. Blackford, F. Carlotti, R. Cropp, U. Daewel, K. Edwards, K. Flynn, S. L. Hill, R. HilleRisLambers, G. Huse, S. Mackinson, B. Megrey, A. Moll, R. Rivkin, B. Salihoglu, C. Schrum, L. Shannon, Y.-J. Shinne, S. L. Smith, C. Smith, C. Solidoro, M. St. John, M. Zhou: End-To-End Models for the Analysis of Marine Ecosystems: Challenges, Issues, and Next Steps. *Marine and Coastal Fisheries: Dynamics, Management, and Ecosystem Science*, vol. 2, pp. 115-130, 2010. (doi:10.1016/j.ecolmodel.2006.09.016)
 10. Smith, S. L.: Untangling the Uncertainties About Combined Effects of Temperature and Concentration on Nutrient Uptake Rates in the Ocean. *Geophysical Research Letters*, **37**, L11603, 2010. (doi:10.1016/j.ecolmodel.2006.09.016)
 11. Ito, S., N. Yoshie, T. Okunishi, T. Ono, Y. Okazak, A. Kuwata, T. Hashioka, K. A. Rose, B. A. Megrey, M. J. Kishi, M. Nakamachi, Y. Shimizu, S. Kakehi, H. Saito, K. Takahashi, K. Tadokoro, A. Kusaka, H. Kasa: Application of an automated approach for calibrating the NEMURO nutrient-phytoplankton-zooplankton food web model in the Oyashio region. *Progress in Oceanography*, **87**, 186-200, 2010. (doi:10.1016/ j.ecolmodel.2006.09.016)
 12. Shigemitsu, M., Y. Yamanaka, Y. W. Watanabe, N. Maeda, S. Noriki: Seasonal characteristics of the nitrogen isotope biogeochemistry of settling particles in the western subarctic Pacific: a model study. *Earth Planet. Science Letters*, vol. 293, pp. 180-190, 2010. (doi:10.1016/j.ecolmodel.2006.09.016)
 13. Ito S., K. A. Rose, A. J. Miller, K. Drinkwater, K. M. Brander, J. E. Overland, S. Sundby, E. Curchitser, J. W. Hurrell, Y. Yamanaka: Chapter 10 Ocean ecosystem responses to future global change scenarios: A way forward, *In: M. Barange, J.G. Field, R.H. Harris, E. Hofmann, R. I. Perry, F. Werner* (Eds)

- Global Change and Marine Ecosystems. Oxford University Press, Oxford, 287-322, 2010.
14. Sasai, Y., K. J. Richards, A. Ishida, and H. Sasaki: Effects of mesoscale eddies on the marine ecosystem in the Kuroshio Extension region using an eddy-resolving coupled physical-biological model. *Ocean Dynamics*, doi: 10.1007/s10236-010-0264-8, **60**, 693–704.
 15. Smith, S. L., N. Yoshie, Y. Yamanaka: Physiological acclimation by phytoplankton explains observed changes in Si and N uptake rates during the SERIES iron-enrichment experiment. *Deep Sea Research I*, **57**, 394-408, doi:10.1016/j.ecolmodel.2006.09.016, 2010.
 16. Hashioka, T., T. T. Sakamoto, Y. Yamanaka: Potential impact of global warming on spring bloom projected by an eddy-permitting 3-D ecosystem model. *Geophysical Research Letter*, **36**, L20604, doi:10.1029/2009GL038912, 2009.
 17. Kishi, M. J., K. Nakajima, M. Fujii and T. Hashioka: Environmental factors which affect growth of Japanese Common Squid, *Todarodes pacificus*, analyzed by a bioenergetics model coupled with a lower trophic ecosystem model. *Journal of Marine Systems*, **78**, 278-287, doi:10.1016/j.jmarsys.2009.02.012, 2009.
 18. Rodgers, K.B., R.M. Key, A. Gnanadesikan, J.L. Sarmiento, O. Aumont, L. Bopp, S.C. Doney, J.P. Dunne, D.M. Glover, A. Ishida, M. Ishii, A.R. Jacobson, C. Lo Monaco, E. Maier-Reimer, N. Metzl, F. F. Perez, A.F. Rios, R. Wanninkhof, P. Wetzel, C.D. Winn, Y. Yamanaka: Altimetry helps to explain patchy changes in hydrographic carbon measurements. *Journal of Geophysical Research - Oceans*, **114**, C09013, doi: 10.1016/j.ecolmodel.2006.09.016, 2009.
 19. Smith, S. L., Y. Yamanaka, M. Pahlow, A. Oschlie: Optimal uptake kinetics: physiological acclimation explains the pattern of nitrate uptake by phytoplankton in the ocean. *Marine Ecology Progress Series*, **384**, 1-12, doi:10.1016/j.ecolmodel.2006.09.016, 2009.
 20. Cao, L., M. Eby, A. Ridgwell, K. Caldeira, D. Archer, A. Ishida, F. Joos, K. Matsumoto, U. Mikolajewicz, A. Mouchet, J. C. Orr, G.-K. Plattner, R. Schlitzer, K. Tokos, I. Totterdell, T. Tschumi, Y. Yamanaka, A. Yool: The importance of ocean transport in the fate of anthropogenic CO₂. *Biogeosciences*, **6**, 375-390, 2009.
 21. Okunishi, T., Y. Yamanaka, S. Ito: A simulation model for Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*) migrations in the western North Pacific. *Ecological Modeling*, **220**, 462-479, 2009.
 22. Masuda, Y., Y. Yamanaka, Y. Sasai, M. Magi, T. Ohsumi: Site selection in CO₂ ocean sequestration: dependence of CO₂ injection flux on eddy activity distribution. *International J. Greenhouse Gas Control*, **3**, 2009. (doi:10.1016/j.ecolmodel.2006.09.016)
 23. 増田良帆, 山中康裕, 笹井義一, 藤井賢彦: 海洋大循環モデルによる年間5000万トン注入ケースのシミュレーション. *海洋理工学会誌*, **14**, 81-87, 2008.
 24. Ishida, A., Y. Yamanaka, Y. Sasai: Role of eddies in chlorofluorocarbon transport in wind-driven oceanic layers. *Journal of Physical Oceanography*, **37**, 2491-2508, doi:10.1016/j.ecolmodel.2006.09.016, 2007.
 25. Sasai, Y., H. Sasaki, K. Sasaoka, A. Ishida, Y. Yamanaka: Marine ecosystem simulation in the eastern tropical Pacific with a global eddy resolving coupled physical-biological model. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L23601, doi:10.1029/2007GL031507, 2007.
 26. Smith, S. L., Y. Yamanaka: Optimization-based model of multi-nutrient uptake kinetics. *Limnology and Oceanography*, **52**: 1545-1558, 2007

(2)その他の著作物(総説、書籍など)

1. Y. Yamanaka, M. Fujii: Effects of climate change and global warming on marine ecosystems and fishery resources. *In: A. Sumi, N. Mimura, T. Masui (eds.), Climmate Change and global sustainability: a holistic approach*, 95-110, UN Unversity Press, Tokyo, New York, Paris, pp.316, 2011.
2. T. Hashioka, T. T. Sakamoto A. Ishida and Y. Yamanaka: Future changes in seasonality of marine ecosystems projected by an eddy-permitting 3-D ecosystem model. *IMBER Newsletter*, 16, 2010.
3. 橋岡豪人, 坂本天, 山中康裕: 海洋低次生態系の温暖化に対する応答～NEMUROによる予測～. 水産資源管理談話会報, vol. 44, 21-36, 2010.
4. Ito, S., K. A. Rose, A. J. Miller, K. Drinkwater, K. M. Brander, J. E. Overland, S. Sundby, E. Curchitser, J. W. Hurrell, Y. Yamanaka: Ocean ecosystem responses to future global change scenarios: A way forward. *In: M. Barange, J.G. Field, R.H. Harris, E. Hofmann, R. I. Perry, F. Werner (Eds) Global Change and Marine Ecosystems.*, 287-322, 2010. (doi:10.1016/j.ecolmodel.2006.09.016)

(3)国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 (国内会議 6 件、国際会議 13 件)

1. 山中康裕: 学会を通じた研究活動と今後の学会への期待:海洋生態系モデリングの視点より. 我が国における海洋学の歩みと日本海洋学会－日本海洋学会創立 70 周年記念シンポジウム, 福岡, 2011 年 9 月 26 日.
2. 山中康裕: 私たちと地球温暖化. 日本交通学会総会特別講演, 札幌, 2010 年 6 月 12 日.
3. Yamanaka, Y., T. Okunishi, T. Hashioka, H. Sumata and S. Ito: Predicting marine ecosystem responses to climate change by a 3-D high-resolution ecosystem model. PICES 18th Annual Meeting, Portland, US, October 22-31, 2010.
4. Ito, S., T. Okunishi, A. Kawabata, H. Kubota, A. Takasuka, T. Hashioka, H. Sumata and Y. Yamanaka: Multi-trophic level ecosystem modeling for understanding the mechanism of small pelagic fish species alternation associated with climate regime shifts. PICES 18th Annual Meeting, Portland, US, October 22-31, 2010.
5. Yamanaka, Y., S. Lan Smith, H. Sumata, N. Yoshie, T. Hashioka, T. Okunishi, M. Shigemitsu, M. N. Aita, N. Okada: New NEMURO-based model incorporating the iron cycle. PICES 18th Annual Meeting, Jeju, Korea, Oct 23-Nov 1, 2009.
6. Okunishi, T., S. Ito, A. Kawabata, H. Kubota, T. Hashioka, H. Sumata, Y. Yamanaka: A multi-trophic level ecosystem modeling for understanding mechanism of the small pelagic fish species alternation. PICES 18th Annual Meeting, Jeju, Korea, Oct 23-Nov 1, 2009.
7. Yoshie, N., S. Ito, K. Komatsu, T. Kameda, T. Ono, K. Hidaka, T. Hasegawa, A. Kuwata, M. Nakamachi, Y. Okazaki, T. Okunishi, K. Tadokoro, H. Saito, Yasuhiro Yamanaka: Comparison of two marine ecosystem models NEMRUO and eNEMURO in the western North Pacific. PICES 18th Annual Meeting, Jeju, Korea, Oct 23-Nov 1, 2009.
8. 橋岡豪人, 屋良由美子, 坂本天, 山中康裕: 地球温暖化が海洋の低次生態系へ与える影響 ～気候モデルと生態系モデルによる予測から～. 日本応用藻類学会シンポジウム, 東京, 2009 年 6 月 27 日.
9. Yamanaka, Y.: Forecasting and predicting marine ecosystem responses to climate change. 3rd GLOBEC Open Science Meeting, Victoria, Canada, June 22-26, 2009.
10. Vogt, M., M. Racault, S. Vallina, C. Le Quere, E. Buitenhuis, S. Alvain, O.

- Aumont, L. Bopp, S. Doney, T. Hashioka, I. Lima, M. N. Aita, Y. Yamanaka: Marine ecosystems and their role for biogeochemical cycling in a changing world. International Symposium on Simulation Science for Safety, Tokyo, Japan, Jun 19, 2009.
11. Yamanaka, Y.: Predicting marine ecosystem responses to climate change. International Symposium on Simulation Science for Safety, Tokyo, Japan, Jun 19, 2009.
 12. 山中康裕: 気候変動から水産資源までを表現した統合海洋生態系モデルによる将来予測. 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 千葉, 2009 年 5 月 16-21 日.
 13. Y. Yamanaka, Y. Naoki, M. N. Aita, T. Hashioka, H. Sumata, N. Okada, T. Okunishi, S. Ito: Observational data for determining physiological parameters and validating model simulations: Suggestions by NEMURO developers. PICES 17th Annual Meeting, Dalian, China, Oct 24-Nov 2, 2008.
 14. Ito, S., T. Okunishi, S. Fumitake, T. Hashioka, M. N. Aita, K. A. Rose, M. J. Kishi, B. A. Megrey, Y. Yamanaka and F. E. Werner: Modeling multi-trophic level marine ecosystems using the NEMURO family of Models: Scientific potential for Eastern Boundary Current Upwelling Ecosystems. *Eastern Boundary Upwelling Ecosystems Symposium*, Gran Canaria, Spain, Jun 2-Jun 6, 2008.
 15. 山中康裕: 地球温暖化や海洋酸性化の海洋生態系および海洋物質循環に対する影響. 日本地球惑星科学連合2008年大会, 千葉, 2008年5月25-30日.
 16. Hashioka, T., T. T. Sakamoto, T. Okunishi and Y. Yamanaka: Future ecosystem changes projected by a 3-D high-resolution ecosystem model. *Effects of climate changes on the world oceans*, Gijon, Spain, May 19-May 23, 2008.
 17. Taketo Hashioka, Yasuhiro Yamanaka, Takashi T. Sakamoto, and Maki N. Aita: Future projection with a 3-D high-resolution ecosystem model. PICES 16th Annual Meeting, Victoria, Canada, Oct 26-Nov 5, 2007.
 18. 山中康裕: 地球温暖化のモデル研究について. 日本微生物生態学会松山大会シンポジウム「気候変動と微生物生態学」, 愛媛大学, 愛媛県松山市, 2007 年 9 月 18 日.
 19. Y. Yamanaka: 3-D NEMURO & NEMURO.FISH linking climate and fish resources in the western North Pacific. Workshop “*Forecasting Climate Impacts on Future Production of Commercially Exploited Fish and Shellfish*”, Seattle, USA, Jul 19-Jul 20, 2007.
- ② 口頭発表 (国内会議 23 件、国際会議 59 件)
1. Hirata, T., Saux-Picart, S., Allen, I., Yamanaka, Y., Butenschon, M., Hashioka, T., N. Aita, M., Stromberg, P., Smyth, T., Hardman-Mountford, N., Barange, M. A comparison between biomass distributions of zooplankton estimated from satellite and marine ecosystem models: assessment of spatial applicability of the models, *Advances in Marine Ecosystem Modeling and Research*, Plymouth, 27-30 June, 2011
 2. Hashioka, T., M. Vogt, M.N. Aita, S. Alvain, L. Bopp, E. Buitenhuis, S. Doney, I. Lima, C. Le Que'ere, Y. Yamanaka: Results of MAREMIP Phase0: Overview & Seasonal Variation. *MARine Ecosystem Model Intercomparison Project Phase1 Workshop*, Plymouth, UK, June 26, 2011.
 3. Hashioka, T.: Future projections: Information from experience in our simulations. *MARine Ecosystem Model Intercomparison Project Phase1 Workshop*, Plymouth, UK, June 26, 2011.
 4. Shigemitsu, M., T. Okunishi, J. Nishioka, H. Sumata, T. Hashioka, N. M. Aita, S. L. Smith, N. Yoshie, Y. Yamanaka: Development of a one-dimensional ecosystem model including iron cycle. The 43rd international Liege colloquium, Liege, Belgium, May 2011.

5. Hirata, T., Dynamics of phytoplankton community structure derived from a 3D ecosystem model and satellite ocean colour algorithm, Xiamen, China, 4th Apr. 2011
6. 重光雅仁, 奥西武, 西岡純, 須股浩, 橋岡豪人, 相田真希, S. L. Smith, 吉江直樹, 山中康: 低次生態系モデルを用いた親潮域における海洋表層鉄循環の解析. 海洋学会, 網走, 2010年9月6-10日.
7. Hirata, T., T. Hashioka, H. Sumata, Y. Masuda, Y. Yamanaka: Marine Ecosystem Model Intercomparison Project (MAREMIP) activities. Workshop for ocean colour data collection, distribution and utilization for east asian coastal waters, Tsukuba, Mar 9-11, 2011.
8. Hirata, T., Y. Yamanaka, A. Ishida, N. Hardman-Mountford, T. Smyth, S. Sathyendranath, T. Platt: Development of GCOM-C ocean algorithms to derive Ecosystem Indicators for a satellite-model integrated analysis of marine ecosystem function and global biogeochemical cycles. JAXA GCOM/GPM/EarthCare Joint PI Workshop, Tokyo, December 6-9, 2010.
9. Hirata, T., T. Hashioka, M. Noguchi-Aita, H. Sumata, A. Ishida, Y. Yamanaka: A comparison between a 3D ecosystem model and satellite observations of phytoplankton community structure in the global oceans. IMBER/IGBP IMBIZO II "Integrating biogeochemistry and ecosystems in a changing ocean: Regional comparisons", Crete, Greece, October 10-14, 2010.
10. Hirata, T., N. Hardman-Mountford, B. Brewin, J. Aiken, T. Hashioka, Y. Yamanaka, A. Ishida, K. Suzuki, R. Barlow, E. Howell, J. Polovina: Temporal and spatial variations of phytoplankton photosynthetic physiology during the spring diatom bloom. International Symposium "Climate Change Effects on Fish and Fisheries", Sendai, April 26-29, 2010.
11. Komatsu, K., N. Yoshie, S. Ito, T. Kameda, T. Ono, K. Hidaka, T. Hasegawa, A. Kuwata, M. Nakamachi, Y. Okazaki, T. Okunishi, K. Tadokoro, H. Saito, Y. Yamanaka: Interannual variations of 3D structures of lower-trophic-level ecosystems in the western North Pacific using a new marine ecosystem model based on an eddy-resolving data-assimilative OGCM. International Symposium "Climate Change Effects on Fish and Fisheries", Sendai, April 26-29, 2010.
12. Sumata, H., T. Hashioka, T. Okunishi, M. Shigemitsu, M. N. Aita, N. Yoshie, N. Okada, T. T. Sakamoto, T. Suzuki, Y. Yamanaka: Effects of climate forcing on the marine ecosystem in the North Pacific Ocean simulated in an eddy-permitting ocean ecosystem model. International Symposium "Climate Change Effects on Fish and Fisheries", Sendai, April 26-29, 2010.
13. Megrey, B. A., K. A. Rose, J. F. Schweigert, D. Hay, F. E. Werner, Y. Yamanaka, S. Ito: Geographic variation in Pacific herring growth and population responses to regime shifts in the North Pacific basin. International Symposium "Climate Change Effects on Fish and Fisheries", Sendai, April 26-29, 2010.
14. Ito, S., T. Okunishi, A. Kawabata, H. Kubota, A. Takasuka, T. Hashioka, H. Sumata, Y. Yamanaka: A multi multi-trophic level ecosystem modeling for understanding mechanism of the small pelagic fish species alternation. International Symposium "Climate Change Effects on Fish and Fisheries", Sendai, April 26-29, 2010.
15. 須股浩, 奥西武, 橋岡豪人, 岡田直資, 重光雅仁, 坂本天, 鈴木立郎, 山中康裕: 海洋低次生態系モデルの改良と経年変動実験. 2010年度日本海洋学会春季大会, 東京, 2010年3月26-30日.
16. Hashioka, T., M. N. Aita, Y. Yamanaka, M. Vogt, C. Le Quere, S. Alvain, L. Bopp, E. Buitenhuis, S. Doney, I. Lim: Spatio-temporal differences in plankton compositions among models from the first results of MARine Ecosystem Model

- Inter-comparison Project (MAREMIP). 2010 Ocean Sciences Meeting, Portland, U.S.A., Feb 22-26, 2010.
17. Vogt, M., C. Le Quere, S. Alvain, L. Bopp, E. Buitenhuis, S. Doney, T. Hashioka, I. Lima, M. N. Aita, Y. Yamanak: First results from the MARine Ecosystem Model Inter-comparison Project (MAREMIP). 2010 Ocean Sciences Meeting, Portland, U.S.A., Feb 22-26, 2010.
 18. Ishida, A., Y. Sasai, Y. Masuda, Y. Yamanaka, H. Sasaki: Transport and mixing of the intermediate water in the Arabian Sea: An idealized tracer study. 2010 Ocean Sciences Meeting, Portland, U.S.A., Feb 22-26, 2010.
 19. H. Sumata, T. Okunishi, T. Hashioka, M. Shigemitsu, N. Okada and Y. Yamanak: Interannual to decadal variations of marine ecosystem simulated in eddy-permitting marine ecosystem models. 2010 Ocean Sciences Meeting, Portland, U.S.A., Feb 22-26, 2010.
 20. 平田貴文: クロロフィルを超えた海色のリモートセンシング: 植物プランクトン群集構造の推定. 東京大学海洋研究所共同利用研究集会「新しい海洋区分の創設に向けた地球生物化学と生態学の統合研究」, 東京, Dec 21-Dec 22, 2010.
 21. 須股浩: 生態系モデル~高解像度化と今後の展開. 東大海洋研シンポジウム「新しい海洋区分の創設に向けた生物地球化学と生態学の統合研究」, 東京, 2009年12月21-22日.
 22. Ishida, A., Y. Sasai, Y. Yamanaka, H. Sasaki: Water mass transport in the Arabian Sea: an idealized tracer study using OFES. Second OFES International Workshop and ESC-IPRC Joint Workshop on Computationally-Intensive Modeling of the Climate System, Honolulu, U.S.A., Dec 9-10, 2009.
 23. Shigemitsu, M., Y. Yamanaka, Y.W.Watanabe, I. Kriest, A. Oschlies, N. Okada, N. Maeda, S. Noriki: Seasonal characteristics of the carbon isotope biogeochemistry of settling particles in the western subarctic Pacific: a model study. GEOTRACES Data-Model Synergy Workshop, Paris, France, Dec 7-10, 2009.
 24. Ishida, A., Y. Sasai, Y. Yamanaka and H. Sasaki: Water mass transport in the Arabian Sea: an idealized tracer study using OFES, Second OFES International Workshop and ESC-IPRC Joint Workshop, Honolulu, Hawaii, USA, Dec 9-10, 2009.
 25. Sasai, Y., A. Ishida, K. J. Richards, and H. Sasaki: Seasonal and interannual variability of marine ecosystem in the Eastern Tropical Pacific with an eddy-resolving physical-biological model, Second OFES International Workshop and ESC-IPRC Joint Workshop, Honolulu, Hawaii, USA, Dec 9-10, 2009.
 26. Hashioka, T., M. Vogt, M.N. Aita, S. Alvain, L. Bopp, E. Buitenhuis, S. Doney, I. Lima, C. Le Quéré, Y. Yamanaka: Preliminary results of MAREMIP: Seasonal Distribution of PFTs. MARine Ecosystem Model Intercomparison Project Kickoff workshop, Cambridge, UK, Oct 28-30, 2009.
 27. Vogt, M., C. Le Quéré, S. Alvain, L. Bopp, E. Buitenhuis, S. Doney, T. Hashioka, I. Lima, M. Aita, Y. Yamanaka: PFT niches in the global ocean: First results from the MARine Ecosystem Model Inter-comparison Project (MAREMIP). MARine Ecosystem Model Intercomparison Project Kickoff workshop, Cambridge, UK, Oct 28-30, 2009.
 28. Yamanaka, Y.: Introduction to NEMURO family. MARine Ecosystem Model Intercomparison Project Kickoff workshop, Cambridge, UK, Oct 28-30, 2009.
 29. Yatsu, A., S. Chiba, Y. Yamanaka, S. Ito, Y. Shimizu, M. Kaeriyama, Y. Watanabe: Future of Kuroshio/Oyashio ecosystems: an outcome of the CFAME Task Team and WG20. PICES 18th Annual Meeting, Jeju, Korea, Oct 23-Nov 1,

- 2009.
30. Yara, Y., M. Fujii, Y. Yamanaka, N. Okada, H. Yamano, K. Oshima: Projected effects of global warming on coral reefs in seas close to Japan. PICES 18th Annual Meeting, Jeju, Korea, Oct 23-Nov 1, 2009.
 31. Shido, F., S. Ito, T. Morioka, N. Murakami, T. Ichikawa, N. Shirafuji, T. Andoh, Y. Ueno, Y. Yamanaka: Influence of temperature on cruising speed of Pacific saury: laboratory experiments with simple video techniques. PICES 18th Annual Meeting, Jeju, Korea, Oct 23-Nov 1, 2009.
 32. Sumata, H., T. Hashioka, M. N. Aita, N. Yoshie, T. Suzuki, T. T. Sakamoto, N. Okada, Y. Yamanaka: Effects of eddy transport on the nutrient supply into the euphotic zone simulated in an ocean ecosystem model. PICES 18th Annual Meeting, Jeju, Korea, Oct 23-Nov 1, 2009.
 33. 須股浩, 橋岡豪人, 岡田直資, 相田真希, 吉江直樹, 坂本天, 鈴木立郎, 山中康裕: 海洋表層の栄養塩収支に対する渦輸送の効果. 2009年, 京都, 2009年9月25-29日.
 34. 石田明生, 笹井義一, 増田良帆, 山中康裕, 佐々木英治: 仮想トレーサーを用いたアラビア海における水塊輸送の研究(II). 2009年度日本海洋学会秋季大会, 京都, 2009年9月25-29日.
 35. 橋岡豪人, 相田真希, 山中康裕, M. Vogt, E. Buitenhuis, C. Le Quere, S. Alvain, O. Aumont, L. Bopp, S. Doney, I. Lima: 海洋生態系モデルの国際的な相互比較研究. 2009年度日本海洋学会秋季大会, 京都, 2009年9月25-29日.
 36. 奥西武, 吉江直樹, 須股浩, 重光雅仁, 橋岡豪人, 山中康裕, 伊藤進一: 複数観測地点データを用いた低次生態系モデルの最適パラメータ推定. 2009年度日本海洋学会秋季大会, 京都, 2009年9月25-29日.
 37. 照井健志, 岸道: 北太平洋西部亜寒帯域における大型カイアシ類 (*Neocalanus cristatus*)のLagrangian Ensemble Model. 2009年度日本海洋学会秋季大会, 京都, 2009年9月25-29日.
 38. 重光雅仁, 山中康裕, 渡辺豊, 岡田直資, 前田亘宏, 乗木新一郎: 海洋沈降粒子中の有機炭素安定同位体比の季節変動要因解析. 2009年度地球化学学会年会, 広島, 2009年9月25-29日.
 39. Masuda, Y., Y. Yamanaka: High CO₂ retained fraction in ocean sequestration estimated by a high resolution model. 8th International Carbon Dioxide Conference, Jena, Germany, Sep 13-19, 2009.
 40. Yoshie, N., K. Komatsu, S. Ito, T. Kameda, T. Ono, K. Hidaka, T. Hasegawa, A. Kuwata, M. Nakamachi, Y. Okazaki, T. Okunishi, K. Tadokoro, H. Saito, Y. Yamanaka: Dynamics of lower-trophic-level ecosystems in five ecological regions in the western North Pacific simulated by an ecosystem model eNEMURO simulated by an ecosystem model eNEMURO. 3rd GLOBEC Open Science Meeting, Victoria, Canada, June 22-26, 2009.
 41. Sumata, H., T. Hashioka, N. Okada, M. N. Aita, N. Yoshie, T. T. Sakamoto, T. Suzuki, Y. Yamanaka: Eddy permitting simulations of 3D-NEMURO in the global ocean. 3rd GLOBEC Open Science Meeting, Victoria, Canada, June 22-26, 2009.
 42. 須股浩, 橋岡豪人, 岡田直資, 相田真希, 吉江直樹, 坂本天, 鈴木立郎, 山中康裕: 渦許容全球モデルによる低次生態系の経年変動実験. 2009年度日本海洋学会春季大会, 東京, 2009年4月5-9日.
 43. 吉江直樹, 伊藤進一, 小松幸生, 奥西武, 小埜恒夫, 田所和明, 日高清隆, 長谷川徹, 齊藤宏明, 山中康裕: 生態系モデル eNEMURO による日本周辺五海域の低次生態系群集構造の再現. 2009年度日本海洋学会春季大会, 東京, 2009年4月5-9日.
 44. 志藤文武, 伊藤進一, 奥西武, 安倍大介, 亀田卓彦, 上野康弘, 巢山哲, 中神正康, 岸道郎, 山中康裕: 衛星データを用いたサンマの回遊モデル. 2009年度日本海洋学会春季大会, 東京, 2009年4月5-9日.

45. 石田明生, 笹井義一, 増田良帆, 山中康裕, 佐々木英治: 仮想トレーサーを用いたアラビア海における水塊輸送の研究. 2009年度日本海洋学会春季大会, 東京, 2009年4月5-9日.
46. Smith, S. L., Y. Yamanaka, M. Pahlow, A. Oschlies: Optimal uptake kinetics: physiological acclimation explains the pattern of nitrate uptake by phytoplankton in the ocean. ASLO, Nice, France, Jan 25-Jan 30, 2009.
47. Shigemitsu, M., Y. Yamanaka, Y. W. Watanabe, N. Maeda, S. Norik: Interpretation of the carbon isotopic signal variations of settling particles in the western subarctic Pacific using a one-dimensional ecosystem model including carbon isotopes. ASLO, Nice, France, Jan 25-Jan 30, 2009.
48. Shigemitsu, M., Y. Yamanaka, Y. W. Watanabe, N. Maeda, S. Noriki: Interpretation of the seasonal variations in nitrogen isotopic signals of settling particles in the western subarctic Pacific with an ecosystem model including nitrogen isotopes. AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, Dec 15-Dec 19, 2008.
49. Hashioka, T., T. Sakamoto, Y. Yamanak: Predicted Impacts of Global Warming on Marine Ecosystem with a 3-D High-Resolution Ecosystem Model. Japan-France Workshop on Responses of Marine Ecosystems to Ocean Acidification and Changes in Environmental Conditions, Tokyo, Japan, Dec 17-Dec 18, 2008.
50. 奥西武, 伊藤進一, 吉江直樹, 山中康裕, 須股浩, 橋岡豪人: 個体群密度効果がマイワシの成長および分布に与える影響. 2008年度水産海洋学会研究発表大会, 東京, 2008年11月11-13日.
51. 志藤文武, 森岡泰三, 福永恭平, 村上直人, 市川卓, 白藤徳夫, 小林圭介, 関谷幸生, 伊藤進一, 上野康弘, 山中康裕: サンマ飼育魚の遊泳速度. 2008年度水産海洋学会研究発表大会, 東京, 2008年11月11-13日.
52. Sumata, H., Hashioka, T. T. Sakamoto, T. Suzuki and Y. Yamanaka: Application of 3D NEMURO to an eddy-permitting general circulation model for the gloal domain. PICES 17th Annual Meeting, Dalian, China, Oct 24-Nov 2, 2008.
53. Okunishi, T., S. Ito, N. Yoshie, T. Hashioka, H. Sumata, Y. Yamanaka: The impact of density-dependent processes on growth of Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*). PICES 17th Annual Meeting, Dalian, China, Oct 24-Nov 2, 2008.
54. Aita, M. N., S. L. Smith, M. J. Kishi, Y. Yamanaka: Effects of iron on spatial and temporal phytoplankton distribution using a global 3-D ecosystem model (Fe-NEMURO). PICES 17th Annual Meeting, Dalian, PR China, Oct 23-Nov 2, 2008.
55. Yamanaka, Y., T. Hashioka, T. Okunishi, H. Sumata, T. Sakamoto, M. N. Aita, Y. Naoki, N. Okada, S. Ito: Recent results connecting climate change to fish resources using the high resolution model, COCO-NEMURO. PICES 17th Annual Meeting, Dalian, China, Oct 24-Nov 2, 2008.
56. 重光雅仁, 山中康裕, 渡辺豊, 前田亘宏, 乗木新一郎: 生態系モデルを用いた沈降粒子中窒素安定同位体比の季節変動の解析. 2008年度日本地球化学会年会, 東京, 2008年9月17-19日.
57. Okunishi, T., T. Hashioka, H. Sumata, S. Ito, Y. Yamanaka: Simulation of the impact of climate change on migration pattern and growth of Japanese sardine. ICES 2008 Annual Science Conference, Halifax, Canada, Sep 22-Sep 26, 2008.
58. Ishida, A., M. N. Aita, Y. Yamanaka: Tracer transport variability in the Arabian Sea in OFES. OFES International Workshop, Yokohama, Japan, Aug 25-Aug 26, 2008.
59. Sasai, Y., K. Sasaoka, H. Sasaki, A. Ishida, K. Richards: Effects of mesoscale

- eddies on marine ecosystem in the Kuroshio Extension region using an eddy-resolving coupled physical-biological model. OFES International Workshop, Yokohama, Japan, Aug 25-Aug 26, 2008.
60. Smith, S. L., N. Yoshie, Y. Yamanaka: Multi-element ecosystem dynamics in the series iron-enrichment experiment: comparing optimal uptake kinetics to Michaelis-Menten. Advances in Marine Ecosystem Modelling Research Symposium 2008 Symposium, Plymouth, UK, Jun 23-Jun 26, 2008.
 61. Hashioka, T., Y. Yamanaka and T. T. Sakamoto: Predicted impacts of global warming on marine ecosystem, Advances in Marine Ecosystem Modelling Research Symposium 2008 Symposium, Plymouth, UK, 23-26, June, 2008.
 62. Ito, S., T. Okunishi, A. Takasuka, Y. Oozeki, A. Yatsu, T. Hashioka, Y. Yamanaka: Physical and biological coupled modeling for Japanese sardine, Asia Oceania Geoscience Society 2008, Busan, Korea, 16-20, June, 2008.
 63. Hashioka, T., T. T. Sakamoto, and Y. Yamanaka: Impacts of global warming on lower-trophic level ecosystem projected by a 3-D high-resolution ecosystem model, Effects of climate changes on the world oceans, Gijon, Spain, 19-23, May, 2008.
 64. 橋岡豪人, 坂本天, 山中康裕: 地球温暖化に対する海洋生態系の応答 ~高解像度海洋生態系モデルによる予測~. 日本海洋学会2008年度春季大会, 東京海洋大学, 東京都港区, 2008年3月26~30日.
 65. 伊藤進一, 志藤文武, 山中康裕, 橋岡豪人, 高須賀明典, 奥西武: 沖合小型浮魚類への温暖化影響. 2008年水産海洋学会・日本海洋学会春季大会 シンポジウム「地球温暖化とその沿岸・沖合海洋生態系への影響ー検知と予測ー」, 東京海洋大学, 東京都港区, 2008年3月26日.
 66. 山中康裕, 岡田直資, 橋岡豪人: 温暖化シナリオ下において予期される低次生態系変動と酸性化. 2008年水産海洋学会・日本海洋学会春季大会 シンポジウム「地球温暖化とその沿岸・沖合海洋生態系への影響ー検知と予測ー」, 東京海洋大学, 東京都港区 Mar 26-Mar 26, 2008.
 67. Ishida, A., Y. Sasai, Y. Yamanaka, and H. Sasaka: Tracer transport and meridional overturn in eddy-permitting and eddy-resolving ocean general circulation models. 2008 Southern Hemisphere Ocean Tracer Studies Workshop, Tokyo, Japan, Jan 30-Feb 1, 2008.
 68. Sasai, Y., A. Ishida, and Y. Yamanaka: CFC-11 and 137Cs simulation using ocean circulation model. 2008 Southern Hemisphere Ocean Tracer Studies Workshop, Tokyo, Japan, Jan 30-Feb 1, 2008.
 69. 奥西武, 伊藤進一, 山中康裕: 2次元マイワシ回遊モデルの開発. 水産海洋学会2007年度研究発表大会, 静岡県産業経済会館, 静岡市, 2007年11月22~24日.
 70. Werner, F. E., B. A. Megrey, M. J. Kishi, K. A. Rose, S. Ito, Y. Yamanaka, M. N. Aita, T. Hashioka: Extensions of the NEMURO models for use in studies of future climate scenarios. PICES 16th Annual Meeting, Victoria, Canada, Oct 26-Nov 5, 2007.
 71. Okunishi, T., Y. Yamanaka, S. Ito: A migration model of Japanese sardine using artificial neural network. PICES 16th Annual Meeting, Victoria, Canada, Oct 26-Nov 5, 2007.
 72. Kishi, M. J., K. A. Rose, B. A. Megrey, F. E. Werner, M. N. Aita, T. Hashioka, Y. Yamanaka, Y. Kamezawa, K. Nakajima, D. Mukai: Two-species population dynamics model for Japanese sardine and chub mackerel using object oriented modelling. PICES 16th Annual Meeting, Victoria, Canada, Oct 26-Nov 5, 2007.
 73. Megrey, B. A., K. A. Rose, S. Ito, D. E. Hay, F. E. Werner, M. J. Kishi, Y. Yamanaka, M. N. Aita, J. F. Schweigert, M. B. Foster: Using model experiments to explore the impact of basin-scale climate forcing on localized upper-trophic-level marine ecosystem production. PICES 16th Annual Meeting,

- Victoria, Canada, Oct 26-Nov 5, 2007.
74. Smith, S. L., Y. Yamanaka: Optimal uptake kinetics and the SPONGE. 6th Workshop of the Dynamic Green Ocean Project, Villefranche-sur-mer, France, May 30-Jun 1, 2007.
 75. Yamanaka, Y., T. Hashioka: Overview of results from NEMURO (North Pacific Ecosystem Model Used for Regional Oceanography). 6th Workshop of the Dynamic Green Ocean Project, Villefranche-sur-mer, France, May 30-Jun 1, 2007.
 76. 笹岡晃征, 笹井義一, 佐々木英治, 石田明生: 海色衛星と高解像度モデルを用いた黒潮続流域における植物プランクトンの季節変動解析, 日本海洋学会2007年度春季大会, 2007年度日本海洋学会春季大会, 東京, 2007年03月22日-26日.
 77. Smith, S. L., Y. Yamanaka: New Optimality-based Model for Uptake Kinetics of Multiple Nutrients by Phytoplankton, 2007年度日本海洋学会春季大会, 東京, 2007年03月22日-26日.
 78. 増田良帆, 山中康裕, 笹井義一: 広域モデルによるCO₂の拡散挙動予測. 平成18年度船舶海洋工学会秋季講演会 オーガナイズドセッション CO₂海洋隔離の最新動向-海洋隔離は是か非か-, 神戸, 平成18年11月16~17日.
 79. Oka, A., Gamo, H. T. Obata, Y. Yamanaka, H. Hasumi: Study on distribution of rare earth elements by using an OGCM. SHOTS Workshop (Southern Hemisphere Ocean Tracer Studies), Tsukuba, Japan, November 14-16, 2006.
 80. Sasai, Y., A. Ishida, H. Sasaki, S. Kawahara, H. Uehara, and Y. Yamanaka: Deep circulation in the Southern Ocean using a simulated CFC-11 distribution SHOTS Workshop (Southern Hemisphere Ocean Tracer Studies), Meteorological Research Institute, Tsukuba, Japan, November 14-16, 2006.
 81. Ishida, A., Y. Sasai, Y. Yamanaka and H. Sasaki: Tracer transport and meridional overturning circulation in the high-resolution OGCMs. SHOTS Workshop (Southern Hemisphere Ocean Tracer Studies), Tsukuba, Japan, November 14-16, 2006.
 82. Hashioka, T. and Y. Yamanaka: Future projection of ecosystem change in the western North Pacific. Global Environmental Change: Regional Challenges An Earth System Science Partnership Global Environmental Change Open Science Conference, Beijing, China. 9-12 November 2006.
- ③ ポスター発表 (国内会議 11 件、国際会議 31 件)
1. Shibano, R., Y. Yamanaka, N. Okada, T. Chuda, S. Suzuki, H. Niino, M. Toratani: Responses of marine ecosystem to typhoon passages in the western subtropical north Pacific. *Ocean Sciences Meeting*, Salt Lake City, USA, Feb. 20-24, 2012.
 2. Masuda, Y., Yamanaka, Y., Sumata, H.: Development of an eddy-permitting marine ecosystem model (MEM). *Ocean Sciences Meeting*, Salt Lake City, USA, Feb. 20-24, 2012.
 3. Hirata, T., Saux-Picart, S., Hashioka, T., Aita, M. N., Ishida, A., Smith, L., Holmes, R., Yamanaka, Y., Allen, I., Hardman-Mountford, N., Brewin, R. A comparison between global phytoplankton types estimated by model and Satellite, *Advances in Marine Ecosystem Modeling and Research*, Plymouth, 27-30 June, 2011
 4. 照井健志, 三輪剛士, 岸道郎: 表計算ソフトで動作する NEMURO の開発. 水産海洋学会 2010 年度研究発表大会, 東京, 2010 年 11 月 19-21 日.
 5. Hashioka, T., T. T. Sakamoto, A. Ishida, Y. Yamanaka: Potential impact of global warming on North Pacific spring blooms projected by an eddy-permitting 3-D ecosystem model. IMBER/IGBP IMBIZO II "Integrating biogeochemistry and ecosystems in a changing ocean: Regional comparisons", Crete, Greece, October

- 10-14, 2010.
6. Hirata, T., R. Brewin, T. Hirawake, J. Ishizaka, M. Toratani, S. Saitoh, N. Hardman-Mountford, T. Smyth, Y. Yamanaka, H. Murakami: New challenges in satellite retrievals of marine products under global climate observation mission (GCOM). Ocean Optics 20, Alaska, US, September 27-October 1, 2010.
 7. 重光雅仁、奥西武、西岡純、須股浩、橋岡豪人、相田真希、S.L.Smith、吉江直樹、山中康裕「低次生態系モデルを用いた親潮域における海洋表層鉄循環の解析」2010 年度日本海洋学会秋季大会、網走、2010 年 9 月
 8. Terui, T., M. J Kish: A Lagrangian ensemble model of Copepoda (*Neocalanus cristatus*) in the Northwestern subarctic Pacific. ClimECO2, Brest, France, August 23- 27, 2010.
 9. Okunishi, T., S. Ito, N. Yoshie, T. Hashioka, H. Sumata, Y. Yamanaka: The impact of density-dependent processes on geographical distribution of Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*). International Symposium "Climate Change Effects on Fish and Fisheries", Sendai, April 26-29, 2010.
 10. Hashioka, T., T. T. Sakamoto, H. Sumata, T. Okunishi, M. Shigemitsu, M. N. Aita, N. Yoshie, N. Okada, A. Ishida, Y. Yamanaka: Potential impact of global warming on North Pacific spring blooms projected by an eddy-permitting 3-D ocean ecosystem model. International Symposium "Climate Change Effects on Fish and Fisheries", Sendai, Apr il26-29, 2010.
 11. 志藤文武, 伊藤進一, 奥西武, 安倍大介, 亀田卓彦, 上野康弘, 巢山哲, 中神正康, 岸道郎, 山中康裕: サンマの漁期前調査結果と衛星データを用いた回遊シミュレーション. 2009 年度水産海洋学会研究発表大会, 長崎, 2009 年 11 月 17-19 日.
 12. Terui, T., M. J Kish: A Lagrangian ensemble model of Copepoda (*Neocalanus cristatus*) in the Northwestern subarctic Pacific. PICES 18th Annual Meeting, Jeju, Korea, Oct 23-Nov 1, 2009.
 13. 笹井義一, 石田明生, 佐々木英治: 東部赤道太平洋における海洋生態系経年変動シミュレーション, 2009 年度日本海洋学会秋季大会, 京都, 2009 年 9 月 25-29 日.
 14. Okunishi, T., T. Hashioka, T. Sakamoto, N. Yoshie, H. Sumata, S. Ito, Y. Yara, Y. Yamanaka: Impacts of climate change on growth and migration of Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*) in the western North Pacific. 3rd GLOBEC Open Science Meeting, Victoria, Canada, June 22-26, 2009.
 15. Ito, S., N. Yoshie, T. Okunishi, T. Ono, Y. Okazaki, A. Kuwata, T. Hashioka, K. A. Rose, B. A. Megrey, M. J. Kishi, M. Nakamachi, Y. Shimizu, S. Kakehi, H. Saito, K. Takahashi, K. Tadokoro, A. Kusaka, H. Kasa: Lower-trophic-ecosystem monitoring in the Oyashio region and application of an automated approach for calibrating the NEMURO nutrient-phytoplankton-zooplankton food web model in the Oyashio region. 3rd GLOBEC Open Science Meeting, Victoria, Canada, Jun 22-26, 2009.
 16. Sumata, H., T. Hashioka, N. Okada, M. N. Aita, Takashi T. Sakamoto, T. Suzuki, Y. Yamanaka: Nutrient supply in the surface euphotic layer simulated in an eddy-permitting ocean ecosystem model. IGBP Symposium "Frontier of integrated research activities on east Asian and global environment", Otaru, Japan, Apr 14-17, 2009.
 17. Shigemitsu, M.: Which ballast minerals control the flux of organic matter to the bathypelagic zone in the western subarctic Pacific, opal or CaCO₃?. IGBP Symposium "Frontier of integrated research activities on east Asian and global environment", Otaru, Japan, Apr 14-17, 2009.
 18. Masuda, Y.: A numerical study with eddy-resolving model to minimize biological impacts in CO₂ ocean sequestration.. IGBP Symposium "Frontier of integrated research activities on east Asian and global environment", Otaru, Japan, Apr 14-17, 2009.

19. 奥西武, 伊藤進一, 吉江直樹, 山中康裕, 須股浩, 屋良由美子, 橋岡豪人, 坂本天: 海洋生態系-水産資源モデルによる地球温暖化の影響予測. 2009 年度日本海洋学会春季大会, 東京, 2009 年 4 月 5-9 日.
20. 笹井義一, 石田明生, 山中康裕, 佐々木英治: 渦解像海洋大循環モデル(OFES)を用いた SAMW と AAIW の形成と分布. 2009 年度日本海洋学会春季大会, 東京, 2009 年 4 月 5-9 日.
21. Sumata, H., T. Hashioka, T. T. Sakamoto, T. Suzuki, Y. Yamanaka: Eddy Permitting Simulations of Biogeochemical Cycles in the Global Ocean. AGU Fall meeting, San Francisco, U.S.A., Dec 15-Dec 19, 2008.
22. Shigemitsu, M., Y. Yamanaka, Y. W. Watanabe, N. Maeda and S. Noriki: Interpretation of the seasonal variations in nitrogen isotopic signals of settling particles in the western subarctic Pacific with an ecosystem model including nitrogen isotopes. 2008AGU fall meeting, San Francisco, USA, December 2008.
23. Masuda Y., Y. Yamanaka: High CO₂ retained fraction in ocean sequestration estimated by a high resolution model. AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, Dec 15-Dec 19, 2008.
24. Masuda Y., Y. Yamanaka: High CO₂ retained fraction in ocean sequestration estimated by a high resolution model. Second Symposium on The Ocean in a High-CO₂ World, Monaco, Oct 6-Oct 9, 2008.
25. Sasai, Y., A. Ishida, Y. Yamanaka, H. Sasaki: Formation and spreading of SAMW and AAIW in the Southern Ocean from CFC-11 simulation. Second Symposium on The Ocean in a High-CO₂ World, Monaco, Oct 6-Oct 9, 2008.
26. 須股浩, 橋岡豪人, 坂本天, 鈴木立郎, 山中康裕: 渦許容全球モデルによる低次生態系再現実験. 2008年度日本海洋学会秋季大会, 広島県呉市, 2008年9月24-28日.
27. 橋岡豪人, 奥西武, 坂本天, 伊藤進一, 山中康裕: 高解像度海洋生態系-水産資源モデルによる地球温暖化の影響予測. 次世代スーパーコンピューティング・シンポジウム 2008, 東京, 2008年9月17日.
28. Vogt, M., C. Le Quéré, E. Buitenhuis, S. Alvain, L. Bopp, Y. Yamanaka, T. Hashioka: First results from a MARine Ecosystem Model Inter-comparison Project (MAREMIP), Advances in Marine Ecosystem Modelling Research Symposium 2008 Symposium, Plymouth, UK, 23-26, June, 2008.
29. Yoshie, N., K. Komatsu, S. Ito, T. Ono, K. Tadokoro, H. Saito and Y. Yamanaka: Seasonal and interannual variation of marine ecosystem in the western subarctic Pacific simulated by a 3D marine ecosystem model. Effects of climate changes on the world oceans, Gijon, Spain, May 19-May 23, 2008.
30. Ishida, A., M. N. Aita, Y. Yamanaka: Interannual to Decadal Variability of Carbon Cycle in the Pacific simulated in a 3-dimensional Model. Effects of climate changes on the world oceans, Gijon, Spain, May 19-May 23, 2008.
31. Aita, M. N., S. L. Smith, A. Ishida, M. J. Kishi, Y. Yamanaka: Effects of iron on spatial and temporal phytoplankton distribution using a global 3-D ecosystem model (NEMURO). Effects of climate changes on the world oceans, Gijon, Spain, May 19-May 23, 2008.
32. 奥西武, 伊藤進一, 山中康裕, 橋岡豪人, 須股浩: マイワシ北太平洋群の回遊行動モデリング. 日本海洋学会2008年度春季大会, 東京海洋大学, 東京都港区, 2008年3月26~30日.
33. Hashioka, T., Y. Yamanaka, and T. T. Sakamoto: Predicted impacts of global warming on marine ecosystem with a 3-D high-resolution ecosystem model. Ocean Science Meeting 2008, Orlando, USA, Mar 2-Mar 7, 2007.
34. Smith, S. L., Naoki Yoshie, and Yasuhiro Yamanaka: Multi-element ecosystem dynamics in the series iron-enrichment experiment: comparing fixed- and variable- composition versions of the NEMURO ecosystem model. Ocean Science Meeting 2008, Orlando, USA, Mar 2-Mar 7, 2008.

35. Aita, M. N., S. Lan Smith, Akio Ishida, Michio J. Kishi, and Yasuhiro Yamanaka: Effects of iron on spacial and temporal phytoplankton distribution using an ecosystem model (NEMURO) embedded in a 3-D global model. Ocean Science Meeting 2008, Orlando, USA, Mar 2-Mar 7, 2008.
36. Sasai, Y., K. Sasaoka, H. Sasaki, A. Ishida, and Y. Yamanaka: Seasonal and intra-seasonal variability of marine biology in the kuroshio extension with an eddy resolving coupled physical-biological model. Ocean Science Meeting 2008, Orlando, USA, Mar 2-Mar 7, 2008.
37. 志藤文武, 山中康裕, 伊藤進一, 橋岡豪人: 北太平洋のサンマの成長と個体数に関するモデリング. 水産海洋学会2007年度研究発表大会, 静岡県産業経済会館, 静岡市, 2007年11月22~24日.
38. Shido, F., Y. Yamanaka, S. Ito, T. Hashioka, D. Mukai, M. J. Kishi: A two-dimensional fish model simulating biomass and population of Pacific saury. PICES 16th Annual Meeting, Victoria, Canada, Oct 26-Nov 5, 2007.
39. 石田明生, 相田(野口)真希, 山中康裕: 3次元海洋生態系-炭素循環モデルにおける熱帯・北太平洋炭素循環の経年・10年規模変動. 日本海洋学会2007年度秋季大会, 琉球大学, 沖縄県西原町, 2007年9月26~30日.
40. Yamanaka, Y., T. Hashioka, M. N. Aita, and F. Shido: Toward seamless simulations from climate changes to variations of fisheries resources: studies of marine ecosystem including pelagic fish dynamics. "Second International Conference on Earth System Modelling", Hamburg, Germany, Aug 27-Aug 31, 2007.
41. Aita, M. N., A. Ishida, Y. Yamanaka: Interannual to interdecadal variations of Primary Production and Air-Sea CO₂ flux in the North Pacific using a 3-D NEMURO MODEL. IUGG XXIV General Assembly, Perugia, Italy, Jul 2-Jul 13, 2007.
42. Yamanaka, Y., T. Hashioka, M. N. Aita, F. Shido, N. Yoshie: An integrated physical-biogeochemical-ecosystem model including pelagic fish dynamics, to study changes in ecosystem and pelagic fish in the western North Pacific associated with global warming, International Symposium on 'Parameterisation of Trophic Interactions in Ecosystem Modelling', Cadiz, Spain, March 20-24, 2007.

(4)知財出願

- ①国内出願 (0 件)
該当なし
- ②海外出願 (0 件)
該当なし
- ③その他の知的財産権
なし

(5)受賞・報道等

- ①受賞
 1. Hashioka and Yamanaka (2007)が IGBP コアプロジェクト GLOBEC の 2007 年 Scientific Highlight を受賞
 2. 橋岡豪人特任研究員: 国際シンポジウム「気候変化の魚類及び漁業への影響」(主催 PICES (北太平洋の海洋科学に関する機関)、ICES (国際海洋探査委員会)、FAO (国際連合食糧農業機関))にて、Best Poster Award を受賞
 3. 橋岡豪人特任研究員: 国際シンポジウムワークショップ IMBIZO2(主催 IGBP コアプロジェクト IMBER)にて、Best Young Scientist Presentation Award を受賞。

②マスコミ(新聞・TV等)報道

1. 朝日新聞 2007年1月23日、3面総合欄、「海の酸性化、サンゴ危機 原因はCO₂、影響解明へ 北大など研究」

③その他

なし

(6)成果展開事例

①実用化に向けての展開

なし

②社会還元的な展開活動

- 日本未来館「つながり」プロジェクトに、高解像度海洋生態系モデル全球版の1年間のアニメーションを提供 (<http://www.miraikan.jst.go.jp/sp/tsunagari/about.html>) のデータ等協力機関の北海道大学に該当)

§ 6 研究期間中の主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

年月日	名称	場所	参加人数	概要
2006年 9月30日	環境システム学部公開フォーラム「地球温暖化問題－自然科学と社会科学のインターフェースで－」	北海道江別市酪農学園大学	120名	地球温暖化に関する一般市民講演会の講師
2006年 10月7日	気候講演会 気象庁	札幌市生涯学習センター	250名	地球温暖化による海洋環境の将来についての講師
2006年 12月5日	環境省北海道地方環境事務所「地球温暖化対策市民セミナー 地球温暖化で生活はどう変わる!？」	札幌グランドホテル	50名	地球温暖化と海洋の酸性化による海洋環境の将来についてについての講師
2006年 12月25日	道新キャンパス特別講座「どうなる地球－温暖化を考える」	道新文化センター	40名	地球温暖化に関するカルチャースクールの講師
2007年 1月15日	北広島市省エネルギー推進協議会	ほっかいどうきた広島市市民センター	60名	地球温暖化に関する一般市民講演会の講師
2007年 6月20日	伊達市「だて市民カレッジ」	北海道伊達市市民センター	40名	地球温暖化に関する一般市民講演会の講師
2007年 6月22日	日本環境アセスメント協会北海道支部第1回技術セミナー	札幌グランドホテル	60名	地球温暖化と海洋の酸性化による海洋環境の将来についてについての講師
2007年 6月29日	第1回海洋生態系モデリングモニタリング研究会(国内ワークショップ)	(独)水産総合研究センター 東北区水産研究所	12名	観測を行う研究者と海洋生態系モデルの将来的な発展の方向性を議論
2007年 7月12日	第16回環境道民会議セミナー「今そこにある危機・地球温暖化～未来を変えるのはあなた!」	札幌全日空ホテル	200名	地球温暖化の海に関する一般市民講演会の講師
2007年 7月25日	地球大学第58回シリーズ「海洋」	東京大手町三菱ビル	40名	海の炭素循環－地球のCO ₂ の吸収源としての海

				洋についての講師
2007年 7月30日	放射線教育フォーラム北海道地区「エネルギー・環境・放射線セミナー」	ホテル札幌ニューオータニ	80名	地球温暖化に関する中学・高校教師の研修での講師
2007年 10月 11, 12日	第7回海洋生態系モデリング研究会 (国内ワークショップ)	北海道大学大学院地球環境科学研究院	22名	海洋生態系モデリングに関する研究発表会を主催した。
2007年 10月21日	北海道大学 G8 洞爺湖サミット対応市民向け講演会「地球温暖化で北海道の環境はどう変わるか？」	札幌市内田洋行イベントスペース U-Cala	60名	地球温暖化に関する一般市民講演会の講師
2008年 2月15日	月形町「月形」地球環境シンポジウム	北海道月形町	50名	一般市民講演会の講師
2008年 3月24日	北海道循環資源利用促進協議会:循環資源を活用した漁場造成に関する講演会	札幌グランドホテル	100名	地球温暖化と海洋の酸性化による海洋環境の将来についてについての講師
2008年 4月24日	北海道大学公開講座「持続可能な低炭素社会」	北海道大学公共政策大学院	80名	地球温暖化を中心とする環境劣化要因の自然科学的メカニズムについての講師
2008年 5月30日	財団法人ライフ・プランニング・センター 新老人の会	札幌グランドホテル	40名	地球温暖化についての身近な話題についての一般市民講演会の講師
2008年 5月31日	北海道保険医会総会記念講演	札幌ホテルオークラ	50名	一般市民講演会の講師
2008年 6月21日	環境総合展 2008 伊藤忠商事主催一般講演	札幌ドーム	100名	市民講演会の講師
2008年 6月23日	日本学術会議「地球温暖化等、地球環境問題に関する国際環境専門者会議」	札幌シャトレゼ	20名	日本学術会議推薦委員として会議に参加、提言をまとめる
2008年 6月26日	第32回サイエンス・カフェ札幌「ここまでわかった！ 地球温暖化による劇変」	札幌紀伊國屋書店ロビー	70名	温暖化に関する市民対話の講師
2008年 7月3日	北海道大学公開講座「持続可能な社会と北海道発見」	北海道大学公共政策大学院	100名	地球温暖化に関する一般講演
2008年 8月8日	幌延深地層研究計画 札幌報告会 2008	札幌後楽園ホテル	100名	特別講演「二酸化炭素を出すのをどのくらい減らしたら温暖化は防げるのか？」講師
2008年 8月28日	水産油脂協会主催一般講演会	東京青山大学講堂	50名	地球温暖化が魚類に及ぼす影響
2008年 9月29日	Antarctic and Southern Ocean Coalition (ASOC)主催 地球温暖化と南極の生物多様性～生態系を支えるオキアミ保全の視点から～	東京文京区民センター	50名	地球温暖化と南極海の生態系への影響に関する一般講演
2008年 12月2日	北海道議会温暖化問題議員連盟発足基調講演	北海道議会	60名	北海道議会の議員を対象に温暖化に関する講演

2008年 12月 1, 2日	第8回海洋生態系モデリング 研究会 (国内ワークショップ)	北海道大学大 学院地球環境 科学研究院	28名	海洋生態系モデリングに 関する研究発表会を主催 した。
2008年 12月14日	Japan-France Workshop Responses of Marine Ecosystems to Ocean Acidification and Changes in Environmental Conditions (国際ワークショップ)	国立極地研究 所	27名	ワークショップを主催し、 海洋酸性化に関する日- 仏および観測-モデル間 の研究協力を構築するた めの成果発表と議論
2009年 4月23日	北海道大学公開講座「持続 可能な社会と北海道発見」	北海道大学公 共政策大学院	80名	地球温暖化に関する公開 講座講師
2010年 11月9日	北海道旭丘高校特別授業	北海道旭丘高 校	80名	高校2年生40名を2回 ほど、地球温暖化の影響 に関して講義
2010年 11月20日	札幌市民講座	札幌市生涯学 習センター	30名	市民講座講師として、地 球温暖化に関する講義を 実施
2011年 2月 23~25日	第9回海洋生態系モデリング 研究会 (国内ワークショップ)	北海道大学大 学院地球環境 科学研究院	30名	研究会を主催し、海洋生 態系モデリングに関する 研究成果発表、および、 海洋生態系モデリングに 関する将来方向性に関す る議論
2011年 5月24日	海色リモートセンシングの最 近の傾向、新たな宇宙からの 地球観測を考えるワークショ ップ	東京大学	30名	ワークショップを共催し、 レモ-とセンシングとモデ リングの協力などについ て議論した。
2011年 6月26日	2 nd MAREMIP meeting (国際ワークショップ)	英国プリマス海 洋研究所	30名	主催して、海洋生態系モ デリング相互比較研究計 画 MAREMIP に関する現 状と次期研究プランを議 論した。
2011年 8月19日	「海洋生態系研究と科学技術 コミュニケーション」セミナー	北海道大学大 学院地球環境 科学研究院	15名	海洋生態系モデリング、 および、それを用いた科 学技術コミュニケーション について
2011年 9月9日	北海道札幌藻岩高校特別授 業	北海道大学大 学院地球環境 科学研究院	10名	藻岩高校1年生10名に 対して、数値計算の基礎 を指導

§7 結び

現在では、グローバル COE の拠点リーダーを務め、特任教員・博士研究員・専門職員からなる大所帯に発展してきたが、CREST に採択された時点では、博士研究員1名を雇用する程度であったことを考えると、夢のような展開であった。

本研究課題に参加したメンバーが、それぞれの立場でキャリアアップした点は、特筆すべきことである。期間中に、(1) 研究代表者の山中康裕が准教授から教授、(2) 主たる共同研究者である石田明生が JAMSTEC 研究員から富士常葉大学教授となり、また、研究協力者であった、(3)(任期付きの)藤井賢彦特任准教授が(定年まで雇用出来る)准教授に、(4, 5)日本学術振興会特別研究

員だった吉江直樹・吉川知里が、それぞれ、日本海洋学会岡田賞、日本地球化学会奨励賞という若手研究者に対する賞(年間 1~3 名受賞)を受賞し、それぞれ愛媛大学講師・東工大特任助教となった。また、(6) 全期間を通じて雇用されていた橋岡豪人は、まだ常勤職は得ていないものの、数々の国際的な若手賞や2ヶ月間2回の海外滞在の経験を経て、現在1年間英国に滞在中である(CREST 雇用から現在外れている)。彼は、国際的に活躍する若手研究者に育ったと思う。また、後半から加わってくれた、(7) 平田貴文特任助教は、海外大学で博士号を取った海外で働いていた若手研究者であり、日本では人材が得られない衛星観測スペシャリストであり、彼がグループに加わってくれたのは、本チームが CREST でサポートされていたからこそと思う。また、(8) Lan Smith が北ドイツのグループとの共同研究が出来たのも、CREST のサポートがあっただからこそ考える。また、JST-RA として雇用された、(9) 山本彬友は博士号を取得し、現在、JAMSTEC 河宮未知生氏のもとで地球システムモデル開発を担当し、(10) 柴野良太も博士号を申請中、(11) 照井健志は、国際共同研究のため、米国東海岸マサチューセッツ大学に約 10 ヶ月間滞在中であり、12 月に博士号を申請する予定である。これら 3 名の博士後期課程学生が研究に専念できる環境を提供してくれたことに感謝している。

国際評価は、既に報告したが、本研究課題の研究成果があっただけその高い評価となった。

CREST の研究費の柔軟な運用(年度を超えた繰越し、および、流用率の高さ、それを超えたとしても研究総括に相談しての変更など)は、運営上非常に有り難かった。若手研究員の雇用は、すぐに出来るものではなく、また本人の希望による他研究期間の移籍など、数百万円単位の変更となるのが年度途中に起こる、また、1、2 ヶ月後の国際会議などへの対応なども、数十万円単位で発生する。このような状況に柔軟に対応出来たと思う。

当初の研究構想であった海洋酸性化に対する成果は出さなかったものの、地球温暖化に対する成果は、高精度海洋生態系モデルを用いて、プランクトンの応答、小型浮魚類の応答などで出せたと考えている。小型浮魚類回遊モデルの開発は、CREST 以前にはなかったもので、まさに CREST から開発された技術と考えている。また、OU kinetics も世界的に普及するものと確信している。コンパクトな研究チームとしては、24 報の論文(投稿中の論文は 5 報ぐらいある)や国際学会での数多くの発表など、十分な成果が上がっていると考えている。

生物多様性が注目されると同時に、観測を主体とするプロジェクトにおいても、その中でのモデリングの役割が大きくなってきており、本研究課題で開発された海洋生態系モデルが活躍する機会がたくさんあり、さらに発展することを確信している。

それらを踏まえ、自己評価としては、高いレベルでの及第点と考えている。そのような研究環境を与えて下さった、先賢の目を持っていた CREST に対して非常に感謝しています。ありがとうございました。