

「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」
平成 18 年度採択研究代表者

山中 康裕

北海道大学大学院地球環境科学研究院・准教授

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

1. 研究実施の概要

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・水産資源統合モデルを開発する。他の国内研究計画と協力して個別に開発されてきたモデルを統合し、国際研究協力を行いながら、将来予測の技術を確認する。本年度は、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。“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”は世界初の試みであり、温暖化に伴って、春季ブルームが 10～20 日程度早期化することを示した。さらに、マイワシ産卵回遊モデルを用いて、温暖化に伴う回遊経路の北上や、マイワシ動物プランクトン相互作用によるマイワシ魚群分布の変化を世界に先駆けて示した。

2. 研究実施内容(文中にある参照番号は 4.(1)に対応する)

海洋生態系と海洋物質循環を結合させた海洋物質循環-生態系モデル開発の全体計画は以下の3つの項目からなる。

- [1] 海洋-水産科学統合モデル開発の基礎技術の整備
- [2] 海洋-水産科学統合モデルの開発
- [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

当該年度は研究計画の第3年度であり、[3]として、H19年度に開発したオフライン手法の技術開発を用いた全球領域の海洋生態系変動再現実験に着手、および、世界の研究情勢を判断して、当初の予定にはなかった水平解像度 $1/4 \times 1/6$ 度の西部北太平洋領域の将来予測実験に関する予備実験を実施した。また、引き続き、[1]海洋-水産科学統合モデルに向けた基礎技術の整備、個別モデルの改良、[2]海洋-水産科学統合モデルの開発を行った。

なお、COCO は海洋大循環モデル(CCSR Ocean Component Model, 東京大学気候システム研究センター開発)、NEMURO、および、eNEMURO は、海洋生態系モデル(North Pacific Ecosystem Model Used for Regional Oceanography, extended NEMURO)の略称である。また、OFES は海洋大循環モデル(OGCM for the Earth Simulator, (独)海洋研究開発機構地球シミュレ

ータセンター開発)、NEMURO.FISH は小型浮魚類モデル(NEMURO For Including Saury and Herring)、PlankTOM5 は海洋生態系モデル(イギリス・East Anglia 大学開発)、NPZD は海洋生態系モデル(Nutrient- Phytoplankton-Zooplankton-Detritus)の略称である。

[1-1] オフライン手法の技術開発

この手法は、ベースとなる海洋大循環モデルから生態系に関わる予報変数の移流・拡散過程のソースコードを切り出すことにより、得られるものである。

須股(研究協力者)・岡田(山中グループ)が、COCO ベースの水平解像度 1/4x1/6 度の全球領域モデルのオフライン手法を利用した、海洋生態系モデル NEMURO および高解像度海洋生態系オフラインモデル COCO-NEMURO 全球領域版を開発した。橋岡(石田グループ)は、COCO-NEMURO および COCO-eNEMURO に加えて、Corinne Le Quere (イギリス・East Anglia 大学)から得た生態系モデル PlankTOM5 に COCO ベースのオフライン手法を適用し、COCO-PlankTOM5 の開発を行った。また、増田(山中グループ)は OFES をベースに、数百年程度の長期積分を行い、北太平洋領域版のオフライン手法の実証実験を行った(原著論文[5],[6])。

[1-2] 個別モデルの改良(H18 から開始)

簡単なプロセスモデルからより現実に近い複雑なプロセスを含むモデルへと、複雑さのレベルの異なる複数の生態系モデルを相互比較することにより、生態系の特定のプロセスの役割を評価することや、このような統合モデルに対する海洋生態系の研究目的に沿った適切な複雑さを評価することである。

H19 年度に引き続き、相田(石田グループ)や重光(山中グループ)は、鉄循環や炭素循環などを NEMURO や eNEMURO に組み込む改良を行った。相田は、鉄循環を組み込んだ場合とそうでない場合の違いによる相互比較を、国際学会で発表した。また、経験的に広く用いられてきたミカエリス・メンテン型を Smith(協力者)が開発した最適化動的栄養塩取り込み過程を NEMURO および eNEMURO に組み込み作業に着手し、予備的結果を発表した(原著論文[1])。奥西(山中グループ)は、H19 年度に開発したニューラルネットワークと遺伝的アルゴリズムを用いたマイワシの産卵回遊モデルを用いて、経年変動など実際の条件の下で産卵回遊が行われるかを検証し、論文として発表した(原著論文[4])。また、橋岡は、高解像度海洋生態系オフラインモデル COCO-NEMURO 西武北太平洋版の結果を提供し、イカの回遊に関する結果を論文化した(原著論文[2])。石田は、NEMURO を用いた実験を提供し物質循環に注目した論文を発表した(原著論文[3])。

[2&3] 海洋-水産科学統合モデルの開発および海洋生態系変動再現実験・将来予測実験の実施

CREST におけるシミュレーション技術開発としては中心的な項目であり、これによって技術開発するモデルは、H20~H22 年度にかけて、項目[3]の生態系変動再現実験と将来予測という実証実験を行いながら、問題点を明らかにすることにより改良を進めていく。

CREST「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」研究領域羽角チームの支援のもと、1958年から2004年までの経年変動実験の海洋循環場や水温・塩分分布の5日間隔のデータの提供を受けて、須股(協力者)・岡田(山中グループ)は予備的実験を実施した。例え

ば、亜寒帯海域(オホーツク海・ベーリング海など)とともに、カリフォルニア沖・ペルー沖・モロッコ沖などの沿岸湧昇に伴うブルームが再現した。これは沿岸湧昇域から外洋域までのプランクトン全球分布を”プランクトングループを明示的に表現した高解像度モデル”で再現した世界初の試みである。

また、橋岡は、将来予測実験の予備的実験として、IPCC 第 4 次報告書に貢献している CCSR/NIES/FRCGC 気候モデルの高解像度版による、大気中 CO_2 濃度一定実験と年 1% 漸増実験の 75-85 年目(ほぼ濃度 2 倍)を用いたシミュレーションを行った。中規模渦を表現した高解像度海洋生態系モデルによる温暖化実験は、世界初の試みである。図 1 は春季ブルームの年始からの日数を示しており、温暖化に伴って、経年変動および中規模渦による変動よりも有意に 10~20 日程度早期化することを示している。その結果を用いて、奥西は、温暖化に伴い、外洋におけるマイワシの回遊経路が北上することを世界に先駆けて示した。また、小型浮魚類回遊モデルと海洋生態系モデル(COCO-NEMURO)との結合モデルを開発し、マイワシの捕食によって動物プランクトン量の変化を通じて、マイワシ自身の分布が変化することも世界に先駆けて示した(図 2)。

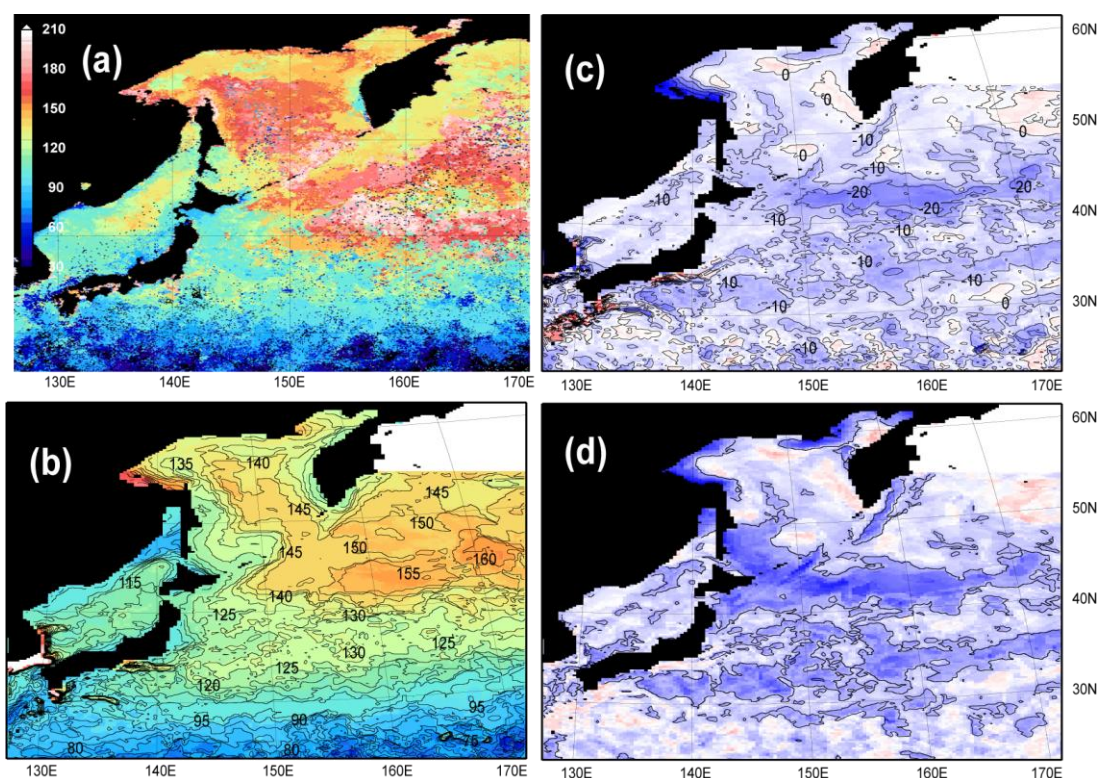
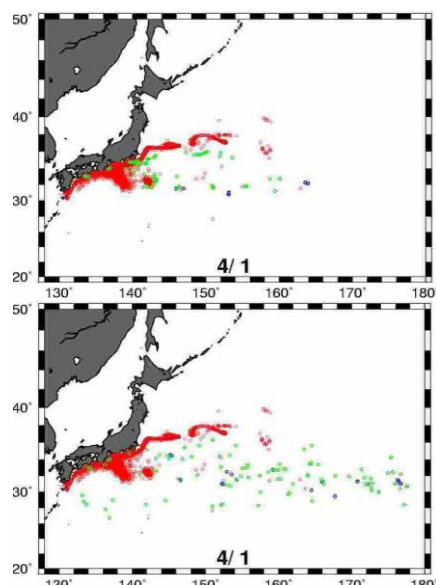


図 1: (a) 衛星データ、および、(b)モデルで見積もられたブルームのピークの時期(年始からの日数)。(c)温暖化の際(年+1% CO_2 漸増の75-85年目)と現在(濃度一定のコントロール実験)との日数差。(d)中規模渦による変動を含む経年変動(10年間2回から得られた偏差を利用して求めた)に対する有意水準。実線で囲まれた青色領域が5%有意水準で温暖化に伴って早期化が起こっている領域を表す。

図 2: マイワシの資源拡大期と資源減少期におけるマイワシ分布(上, 資源減少期; 下, 資源拡大期)。一粒子が代表するマイワシ数のみを変えて実験を行った(他の物理条件は同一であり、プランクトン濃度・マイワシ個体体長・個数・遊泳速度などはモデル内で予報している)。稚魚・幼魚(赤粒子)以外の 1 歳魚(青粒子)・2 歳魚以上(緑粒子)の魚群分布が、模式図に見られる拡大期には東方へ拡大、減少期にはその半分程度となる様子が再現されている。



他研究グループとの研究協力体制:

IGBP のコアプロジェクトである GLOBEC (Global Ocean Ecosystem Dynamics, 全球海洋生態系動態研究計画) の研究成果のハイライトに選ばれ、2009 年 6 月に行われる GLOBEC Open Science Meeting (Victoria, カナダ) など山中が基調講演で招待されるなど、世界的に注目されている。

CREST 「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」研究領域羽角チームとの協力により、経年変動データの提供を受け、経年変動実験を実施した。また、奥西は、小型浮魚類回遊モデルに関して、CREST 「シミュレーション技術の革新と実用化基盤の構築」研究領域に参加している樋口知之との協力を開始した。

また、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)における「高解像度気候モデルによる近未来気候変動予測に関する研究」(申請代表者木本昌秀(東大気候センター))のサブテーマ「温暖化・自然変動による海洋環境・水産資源に関する複合的影響」と協力して、本 CREST で開発された海洋生態系モデルを利用して、将来予測実験を開始した。すなわち、海洋生態系-水産資源統合モデル開発は CREST の成果であり、そのモデルの実証としての温暖化将来予測実験は、CREST および21世紀革新の共同実施の成果、実験結果の解釈に関しては、21世紀革新の成果という形で実施する予定である。その具体的な実施の形として、須股(協力者)には CREST の研究に協力してもらった。

また、H19 年度より農林水産省委託プロジェクト研究「環境変動に伴う海洋生物大発生予測・制御技術の開発」(山中は関係せず)の元で、奥西は、CREST での研究成果であるマイワシ回遊モデルを元に、小型浮魚類の水産資源モデルを発展させることとなり、開発したモデルの提供を受け、本 CREST で開発する海洋-水産科学統合モデルに組み込む。

3. 研究実施体制

(1) 山中グループ

①研究分担グループ長: 山中 康裕(北海道大学大学院、准教授)

②研究項目

[1] 海洋-水産科学統合モデルに向けた基礎技術の整備

[1-1] OFES ベースのオフライン手法の技術開発

[1-2] 個別モデルの改良(小型浮魚類モデル)

[2] 海洋-水産科学統合モデルの開発

[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(生態系変動再現実験)

(2) 石田グループ

①研究分担グループ長: 石田 明生(海洋研究開発機構、研究員)

②研究項目

[1] 海洋-水産科学統合モデルに向けた基礎技術の整備

[1-1] COCO ベースのオフライン手法の技術開発

[1-2] 個別モデルの改良(物質循環モデル)

[2] 海洋-水産科学統合モデルの開発

[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(将来予測実験)

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表(原著論文)

1. S. L. Smith, Yasuhiro Yamanaka, Markus Pahlow, Andreas Oschlie: Optimal uptake kinetics: physiological acclimation explains the pattern of nitrate uptake by phytoplankton in the ocean. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, (*Accepted*).
2. 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. *J. Marine Sys.*, (*in press*).
3. L. Cao, 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.
4. 3. T. Okunishi, Y. Yamanaka, S. Ito: A simulation model for Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*) migrations in the western North Pacific. *Ecological Modeling*, **220**, 462-479, 2009.
5. Y. Masuda, 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**, doi:10.1016/j.ecolmodel.2006.09.016, 2009.

6. 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.

(2) 特許出願

平成 20 年度 国内特許出願件数 : 0 件 (CREST 研究期間累積件数 : 0 件)