

海洋低次生態系モデリングの現状と将来展望
Current states and future prospects of modeling studies for lower trophic level marine ecosystem.

橋岡 豪人^{1*}
HASHIOKA, Taketo^{1*}

¹ 独立行政法人 海洋研究開発機構

¹ Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Historically large scale ecosystem models for lower trophic level have been developed for understanding of global biogeochemical cycles such as global carbon budget. For this purpose, a concept of Plankton Functional Types (PFT), in which plankton are categorized into several types depending on their roles on biogeochemical cycles, have been employed as one of effective representations of marine ecosystem. Even now this approach of PFT modeling is the main force for a large scale modeling represented by earth system model. On the other hand, the demand on ecosystem modeling have been expanding and diversifying. Namely interest in understanding of ecosystem itself being heightened (e.g., future impact of climate change on ecosystem roles and diversity). As a results, modeling approach for explicit representations of plankton physiological response and ecological interaction have been attracting attention in recent years. Large scale ecosystem modeling also being in transition. In this presentation, based on internal activities of CMIP (Coupled Model Inter Comparison Project) and MAREMIP (MARine Ecosystem Model Intercomparison Project), we review the current state of PFT modeling and discuss future prospects of lower trophic level modeling.

気候値データおよびCMIP5実験結果を用いた海洋生物ポンプの診断
Vector digram analysis of ocean carbon pumps: application to the climatological data and
CMIP5 simulations

岡 顕^{1*}

OKA, Akira^{1*}

¹ 東京大学大気海洋研究所

¹ Atmosphere and Ocean Research Institute, University of Tokyo

The ocean stores 60 times more carbon than the atmosphere and therefore the ocean carbon cycle has a critical role in controlling the atmospheric CO₂ concentration. By using the three dimensional distribution of dissolved carbon concentration (DIC), total alkalinity (ALK), phosphate, and salinity, four types of ocean carbon pumps (organic matter, calcium carbonate, gas exchange, and freshwater flux pumps) are defined here and I propose a method with which individual effects of four carbon pumps on atmospheric CO₂ concentration can be quantitatively evaluated. By applying this method to the climatology, the contributions of four carbon pump components to atmospheric CO₂ are clearly evaluated in one figure (the vector diagram); each carbon pump component is represented by one vector and its contribution to pCO₂ can be measured from the difference in the contour values between the beginning and the end of the vector. The same analysis is also applied to the CMIP5 earth system model simulations. Although all models reproduce the same level of the atmospheric CO₂ concentration as the climatology, it is shown that contributions from four carbon pumps are not the same among models. This study demonstrates that the vector diagram analysis introduced here is a powerful tool for quantifying the individual contributions of the ocean carbon pumps on atmospheric CO₂ concentration and also a useful tool for evaluating the reproducibility of ocean carbon cycle models.

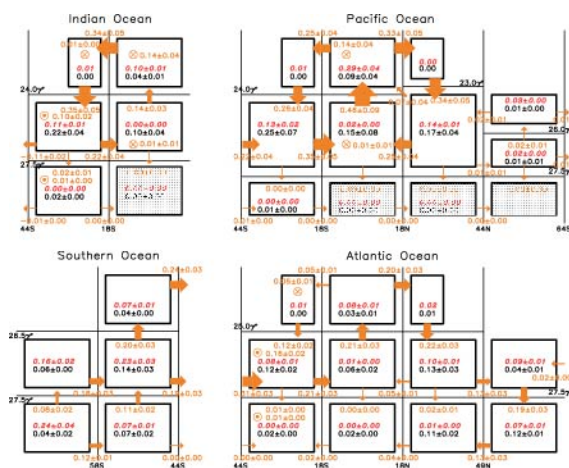
OGCMによる人為起原炭素の3次元輸送の見積もり Anthropogenic CO₂ uptake, transport, storage, and dynamical controls in the ocean: a modeling study

中野 英之^{1*}; 石井 雅男¹; Rodgers Keeth²; 辻野 博之¹; 山中 吾郎¹
 NAKANO, Hideyuki^{1*}; ISHII, Masao¹; RODGERS, Keeth²; TSUJINO, Hiroyuki¹; YAMANAKA, Goro¹

¹ 気象研究所, ² プリンストン大学
¹ Meteorological Research Institute, ² Princeton University

Using an ocean carbon cycle model embedded in an ocean general circulation model, we examine how the budget of anthropogenic CO₂ is dynamically controlled. The budget is composed of transport, storage rate, uptake from the atmosphere, and density conversion. We estimate (1) vertically integrated budget, (2) three-layer budget, and (3) eleven-layer budget for the eleven sub-domain of the global ocean. This work is the first attempt to conduct the budget analyses in the density framework. The vertically integrated budget is appropriate for examining the inter-basin transport of the anthropogenic CO₂. The estimated budget is largely consistent with the previous studies. The three-layer budget allows us to identify how the meridional overturning circulation related transport determines the thermocline inventories for anthropogenic CO₂. It is found that Subtropical Cells and the thermohaline circulation play a fundamental role for the budget in the Pacific and Atlantic Oceans, respectively. Along with a inventory map in each isopycnal layer, the eleven-layer budget is suitable for examining how anthropogenic CO₂ is stored and transported in various water masses. For the mode waters, which serve as reservoirs of anthropogenic CO₂ accumulated in the ocean interior, it is found that uptake via gas exchange is important but much of the uptake via gas exchange occurs non-locally to the mode water formation regions through the Subtropical Cells

キーワード: 人為起原炭素, OGCM, 輸送
 Keywords: anthropogenic carbon, OGCM, transport



溶存有機物循環とその生物生産性への影響に関する全球海洋モデリング Modeling the global cycle of marine dissolved organic matter and its influence on marine productivity

羽角 博康^{1*}; 永田 俊¹
HASUMI, Hiroyasu^{1*}; NAGATA, Toshi¹

¹ 東京大学大気海洋研究所
¹ AORI, UTokyo

プランクトンと微生物を陽に表現した上で海洋物質循環を研究するための3次元数値モデルを開発した。両者の結合は溶存有機物の生成と消費を表現することでなされる。このモデルを用いて溶存有機物の全球的循環が生物生産性に及ぼす影響について調べた。溶存有機物については、生物分解性と難分解性の2種類を考慮する。生物分解性溶存有機物は植物プランクトンからの滲出・動物プランクトンからの排泄・碎屑物の分解・難分解性溶存有機物の光解離で生じる。バクテリアは生物分解性溶存有機物を消費し、難分解性溶存有機物を生成する。栄養塩とプランクトンが一様に分布する初期状態から開始して、長時間のモデル積分により、観測と整合する溶存有機物存在量を再現することができた。バクテリア存在量の空間分布は最近行われた広領域観測と整合していた。モデル感度実験により以下のことがわかった。1. 数十年の時間スケールにおいては、難分解性溶存有機物が海洋物質循環におよぼす影響は無視できる。2. 溶存有機物の存在は海洋の全球的生物生産性を有意に減少させる。3. 植物プランクトンからの滲出に起因する生物分解性溶存有機物は亜熱帯域に輸送され、その再無機化による栄養塩供給の結果として亜熱帯域の生物生産性を高める。

キーワード: 海洋物質循環, 溶存有機物, 微生物過程, 海洋生産性, 数値モデリング

Keywords: marine biogeochemical cycles, dissolved organic matter, microbial loop, marine productivity, numerical modeling

鉄安定同位体を用いた海洋生物の鉄代謝評価 Stable isotope study using Fe: implication to understand the Fe-biocyclus in marine environment

山方 優子^{1*}; 田中 佑樹¹; 田辺 信介²; 板井 啓明²; 磯部 友彦³; 山田 格⁴; 田島 木綿子⁴;
平田 岳史¹
YAMAGATA, Yuko^{1*}; TANAKA, Yuki¹; TANABE, Shinsuke²; ITAI, Takaaki²; ISOBE, Tomohiko³;
YAMADA K., Tadasu⁴; TAJIMA, Yuko⁴; HIRATA, Takafumi¹

¹ 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻, ² 愛媛大学沿岸環境科学研究センター, ³ 国立環境研究所, ⁴ 国立科学博物館

¹Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, ²Center for Marine Environmental Studies, Ehime University, ³National Institute for Environmental Studies, ⁴National Museum of Nature and Science

Iron is one of the most important inorganic nutrients for almost all plants and animals. For marine organisms, because of very low concentration range of Fe ($<10^{-7}$ wt%) in the seawater, intake efficiency of Fe could become very high to avoid possible loss of many biochemical functions associated with Fe. This is well demonstrated by the small changes in the Fe isotope ratios ($^{56}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$ and $^{57}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$) among the marine organisms of various trophic levels (TL) (e.g., plankton, shrimp, tuna : Jong et al., 2007; Bergquist and Boyle, 2006). This lack in the changes in the Fe isotope ratios can be explained by the high-intake efficiency of Fe from the dietary foods. This is contrasting with those for the land organisms. For land organisms, the $^{56}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$ and $^{57}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$ ratios vary significantly with the increase of the trophic level (Walczyk and Blankenburg, 2002, 2005). This could be explained as reflecting the large isotope effects on Fe isotopes, mainly due to the low intake-efficiency of Fe. In fact, availability of Fe for land organisms would be much higher than that for marine organisms, because Fe concentrations in the most rocks, minerals or soils would be much greater than that in the seawater. However, the intake efficiency would not be a major source of the changes in the Fe isotope ratios. Chemical form or oxidation status of Fe would also affect the magnitude of isotope effect on Fe. Moreover, it should be noted that the Fe bio-cycle can not be evaluated only by the traditional trophic level, defined by the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ and $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ratios, which should reflect the food chain of the organic substances, such as amino acids or proteins. This suggests that the conventional trophic level did not reflect the food chain of Fe. To investigate this, we have measured the $^{56}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$ and $^{57}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$ for series of marine organisms, especially for higher trophic level animals.

In this presentation, *Peponocephala electra* (n=23; TL=4.3), *Thunnus alalunga* (n=7; TL=4.0), *Thunnus obesus* (n=1; TL=4.0), *Kajikia audax* (n=1; TL=4.0), *Berryteuthis magister* (n=5; TL=3.4), and *Octopus longispadiceus* (n=2; TL=3.3) were subsitized to the Fe isotope ratio analysis. After the chemical decomposition and chemical separation procedures, the $^{56}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$ and $^{57}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$ ratios were measured by the multiple collector-ICP-mass spectrometer (MC-ICP-MS). The measured $^{56}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$ and $^{57}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$ ratios varied significantly from those for lower trophic level organisms. Several important features of the Fe isotopes for marine organisms could be derived from the present results. The changes in the $^{56}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$ isotopes could be explained either by the poor intake efficiency of Fe from the dietary foods, or by the changing chemical form of Fe in the dietary foods for the marine organisms of higher trophic levels. If in the case that the Fe was adsorbed as a heme-Fe (Fe(II)) from the dietary foods, the magnitude of the isotope fractionation would be smaller than that found in adsorption of non-heme Fe (e.g., Fe (III)). This suggests that the major source of Fe for higher trophic animals would be non-heme Fe. Another possible cause of changes in the $^{56}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$ ratio would be originating from the definition of the trophic level of the marine organisms. This suggests that the food-chain for the inorganic nutrients should be defined by the separate definitions. The details of the mechanism in the variation of the $^{56}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$ ratios for the marine organisms will be discussed in this presentation.

キーワード: 鉄安定同位体, 鉄代謝, 海洋生物, 多重検出器型誘導結合プラズマ質量分析法 (MC-ICP-MS), 栄養段階
Keywords: stable isotope of iron, iron biocycle, marine organisms, multiple collector-ICP-mass spectrometry, trophic level

New Models of the Flexible Response of Plankton Ecosystems: from Theory to Practical Implementation

New Models of the Flexible Response of Plankton Ecosystems: from Theory to Practical Implementation

SMITH, S. Ian^{1*}; YOSHIKAWA, Chisato²; SASAI, Yoshikazu³; CHEN, Bingzhang³; GARCIA-COMAS, Carmen³
SMITH, S. Ian^{1*}; YOSHIKAWA, Chisato²; SASAI, Yoshikazu³; CHEN, Bingzhang³; GARCIA-COMAS, Carmen³

¹Marine Ecosystem Dynamics Research Group, RCGC, JAMSTEC & CREST, JST, ²Institute of Biogeosciences, JAMSTEC,

³Marine Ecosystem Dynamics Research Group, RCGC, JAMSTEC

¹Marine Ecosystem Dynamics Research Group, RCGC, JAMSTEC & CREST, JST, ²Institute of Biogeosciences, JAMSTEC,

³Marine Ecosystem Dynamics Research Group, RCGC, JAMSTEC

For over two decades, detailed models have been developed to reproduce the flexible response of phytoplankton, and to a lesser extent of zooplankton, as well known from laboratory experiments. This research has yielded scientific insights, and some of those detailed models have been applied in coupled physical-biological ocean models. However, such detailed models are in general too complex for practical applications in large-scale and long-term ocean modeling studies. Therefore, most current marine ecosystem models do not account for the flexible physiological response of plankton. Nevertheless, large-scale and long-term ocean modeling studies are necessary in order to test the theoretical ideas embodied in these detailed models against oceanic observations and to explore the impact of flexibility on the response of plankton ecosystems to environmental change. In order to advance scientific understanding of plankton ecosystems in the ocean, we aim to reconcile the results of laboratory experiments, theoretical modeling, and oceanic observations. For this purpose, we are developing new, relatively simple models of the flexible response of interacting phytoplankton and zooplankton communities, which can be applied in practical ocean modeling. Recent results will be presented from one-dimensional (vertical) coupled physical-biological models of the ocean compared to oceanic observations. These results include: 1) the impact of the process of photo-acclimation on the vertical distributions of phytoplankton biomass, particulate organic nitrogen, and chlorophyll, and 2) the potential role of the hypothesised *Kill-the-Winner* grazing effect for sustaining plankton biodiversity.

キーワード: plankton, ecosystem modelling, ocean, observation, validation, trade-off

Keywords: plankton, ecosystem modelling, ocean, observation, validation, trade-off

ニッチ分割に基づく植物プランクトン多様性の考察 Phytoplankton coexistence based on niche differentiation studied by an OGCM

増田 良帆^{1*}; 山中 康裕¹
MASUDA, Yoshio^{1*}; YAMANAKA, Yasuhiro¹

¹ 北海道大学 地球環境科学研究所
¹Hokkaido Univ.

海洋の植物プランクトンは多様性に富んでおり、数万種が存在すると見積もられている (Guiry, 2012)。海洋が比較的単調な環境であるにもかかわらず、このような多様性があるのは驚きであり、共存を可能とする様々なメカニズムが提案されている。本研究では特にニッチ分割に着目し、このメカニズムによってどこまで植物プランクトンの種数を説明できるか研究した。研究手法としては海洋大循環モデル (OGCM) を用いた。海洋では移流・拡散による空間間の相互作用が多様性に重要な影響を及ぼしていると考えられ、この影響についても研究した。

海洋低次生態系モデル NEMURO、MEM を基に開発した植物プランクトン多様性モデルを、気象研究所共用海洋モデル (MRI.COM) に組み込んだ。物理場は理想化した亜熱帯循環と亜寒帯循環を再現しており、計算領域は東西 30 度×南北 30 度の矩形領域である。移流・拡散の影響を考察する為にオフラインモデル (以下、0D モデル) も開発した。このモデルでは温度・栄養塩・光は MRI.COM で計算されたものを用い、植物・動物プランクトン濃度のみを計算する。格子間の植物・動物プランクトンの移流・拡散は 0 にしてあるので、MRI.COM の結果と比較することで移流・拡散の影響を同定できる。

MRI.COM で温度・栄養塩・光特性の異なる 240 種の植物プランクトンを競争させた結果 31 種が生き残った。一方、同じ 240 種を 0D モデルで競争させると 85 種が生き残った。0D モデルでは基本的に 1 格子には 1 種しか生き残れなかった。よって移流・拡散は α 多様性を増加させるが、 γ 多様性を減少させる。個々のケースを詳しく調べると移流・拡散によって、ある種が競争力の高い海域から競争力の低い海域へと輸送されてしまい、最終的に絶滅するケースが見出された。

生き残った 31 種を最適温度 (ニッチ) の僅かに異なる 8 種に分裂させ、248 種を競争させる実験を行った。生き残ったのは 125 種であったが、これは上限の種数では無く、更なるニッチ分割が状況によっては可能であると考えられる。共存可能な種について調べると、最適温度が 0.1 度程度の違いしかないケースが存在することが判った。ニッチの僅かな違いがあるだけで共存可能という事は海洋の莫大な植物プランクトン数を説明するのに重要な一歩であると考えられる。

キーワード: 植物プランクトン多様性, 海洋生態系モデル, 海洋大循環モデル
Keywords: Phytoplankton diversity, marine ecosystem model, OGCM

北極海アイスアルジーモデリング： 陸棚海盆間輸送に対する応答 Arctic sea ice algae modeling: Response to shelf-basin water transport

渡邊 英嗣^{1*}
WATANABE, Eiji^{1*}

¹ 海洋研究開発機構
¹JAMSTEC

Seasonal and interannual variability in biogenic particle flux was captured by the multi-year bottom-tethered sediment trap moorings in the Northwind Abyssal Plain (Station NAP: 75N, 162W, 1975 m water depth) of Chukchi Borderland. The trapped sinking flux of biogenic particles had an obvious peak and the major component of diatom valve flux was sea ice-related species *Fossula arctica* in August 2011. On the other hand, the observed summer particle flux was considerably smaller in 2012 than those in 2011. The suppression of sinking materials would attribute to the extension of oligotrophic Beaufort Gyre water toward the Station NAP. In this study, to address an impact of water mass condition on biogenic particle flux during the summer season, sea ice algae component was newly incorporated into the lower-trophic marine ecosystem model NEMURO. The original NEMURO coupled to the pan-Arctic sea ice-ocean physical model COCO represented pelagic plankton species (i.e., diatom, flagellate, and copepod) and reproduced the early-winter peak of sinking flux of Particulate Organic Nitrogen (PON) [Watanabe et al., 2014]*. Whereas the mesoscale shelf-break eddies played a great role in the early-winter peak, the simulated summertime peak was significantly delayed behind the trap data partly owing to lack of sea ice algae component in the previous experiment.

In the developed model, the major habitat of sea ice algae was assumed to be a 2 cm-thick skeletal layer at sea ice-ocean boundary. Since sea ice bottom temperature was always kept at the freezing point of underlying sea water, the growth rate of sea ice algae was calculated following light availability and nutrient uptake terms. Light transmission through snow and sea ice column was given using empirical extinction rates. Sea ice-ocean nutrient exchange was formulated in the different manner for sea ice freezing and melting periods. We assume that sea ice algae can utilize nutrients (nitrate, ammonium, and silicate) both in the skeletal layer and in the ocean surface layer, according to nutrient availability in each layer. This hybrid-type nutrient uptake formulation is considered to represent more realistic characteristics of sea ice algae biology. In addition, the modeled PON was divided into two components with different sinking speeds so that sea ice assemblage could sink faster than other particles derived from pelagic plankton. The one-year experiment from October 2010 to September 2011 demonstrated reasonable spatial distribution and seasonal transition in sea ice algae biomass and the related sinking particle flux during the summer season. The interannual variability and possible background mechanisms (e.g., influence of Beaufort Gyre variation) will also be discussed.

*Watanabe, E., J. Onodera, N. Harada, M. C. Honda, K. Kimoto, T. Kikuchi, S. Nishino, K. Matsuno, A. Yamaguchi, A. Ishida, and M. J. Kishi (2014) Enhanced role of eddies in the Arctic marine biological pump Nature Communications, 5:3950, doi:10.1038/ncomms4950.

キーワード: 北極海低次海洋生態系モデル, アイスアルジー, ボーフォート循環, 沈降粒子フラックス
Keywords: Arctic marine ecosystem model, ice algae, Beaufort Gyre, particle flux

黒潮フロント域の渦、乱流、内部波、混合と栄養塩供給 Mesoscale eddies, 3D turbulence, internal waves and associated nutrient flux in the Kuroshio Front

長井 健容^{1*}
NAGAI, Takeyoshi^{1*}

¹ 東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科

¹ Graduate School of Marine Science and Technology, Tokyo University of Marine Science and Technology

日本太平洋側沿岸域を北上する黒潮は、水平・鉛直方向の熱・物質輸送や、海域の物理、化学、生物環境に多大な影響を及ぼす。貧栄養として特徴づけられる黒潮の上流域である薩南、南西諸島海域では、多くの浮魚類が産卵を行い、黒潮はそれらの稚仔魚を下流方向に輸送するため、輸送経路である黒潮フロント域における基礎生産は、稚仔魚の生残に重要であると推察できる。しかしながら、黒潮フロント域で基礎生産を支える栄養塩を供給する機構については明らかではない。従って、季節的・経年的に起こる黒潮の変動に対して、栄養塩供給に依存する海域の生態系が如何に応答するかは、不明である。本研究では、黒潮に栄養塩を供給する主要な物理メカニズムを検証し、それらを定量して相対的な重要性を明らかにすること、また黒潮の変動に伴った栄養塩供給や生態系の応答の把握・予測に役立てることを目的とする。

本研究においては、黒潮で栄養塩を供給する機構を等密度面に沿った (i) 等密度面輸送とそれを横切る (ii) 等密度面を横切る輸送とに分けて研究を遂行している。「(i) 等密度面輸送」には、中規模の渦が黒潮から切離すること、黒潮の蛇行に伴う鉛直流等をその成因として挙げる事が出来る。一方「(ii) 等密度面を横切る輸送」は、乱流混合や、二重拡散対流を挙げる事が出来る。本研究プロジェクトで「栄養塩供給機構の解明」を分担する著者、長井(東京海洋大学)は、2009年10月に取得した現場観測データに、3次元 ω 方程式を適用して、準地衡近似を満たすバランスした鉛直流を $O(10 \text{ m/day})$ と推定し、黒潮の蛇行に同調する低塩分水の舌状分布を説明した (Nagai et al. 2012)。Clayton et al. (2014) は、同航海で得た栄養塩の断面データを用いて、バランスした鉛直流が引き起こす、等密度面に沿った硝酸塩の鉛直フラックスが水深 60 m で $O(100 \text{ mMol m}^{-2} \text{ day}^{-1})$ に及ぶと推定した。しかしながら、蛇行するフロントに沿って湧昇や下降流が繰り返して発生する事を考えると、推定した大きな栄養塩の鉛直上向きフラックスは、その前後で発生するであろう下向きフラックスと打ち消し合うため、正味の輸送を生じ難いと考える事ができる。正味の栄養塩供給に至るためには、等密度面に沿った輸送に加えて等密度面を横切るフラックスが必要である。Nagai et al. (2009) が行った 2008 年 8 月図 1 黒潮流軸に沿って投入した EM-APEX フロートで取得したの黒潮フロント域の現場観測データをはじめとし、2009 年 10 月、2011 年 8 月、2012 年 8 月に取得した観測データは、黒潮流軸の躍層内で $O(10^{-8}-10^{-6} \text{ W/kg})$ と典型的な外洋域の躍層の散逸率の 10-1000 倍大きい乱流運動エネルギー散逸率を示した。この時、同時に観測した ADCP による水平流速の鉛直シアは、黒潮流軸直下で帯状の構造を示したことから、内部波の碎波がそこで発生している事が推察できる。このような黒潮流軸直下における著しい乱流運動エネルギー散逸率の観測結果は、Kunze (1985) や Whitt and Thomas (2013) らの、近慣性内部波の捕捉と碎波がフロントの流れの水平・鉛直シアに伴って発生し得るとした理論的研究結果を支持するものである。Nagai et al. (査読中) は、この様なフロントにおける近慣性内部波が、黒潮が蛇行する事で自発的に発生するという仮説を検証するために、水平高解像度 (1 km) の非静水圧モデルに観測した黒潮断面を初期条件として用いて数値実験を実施した。その結果、風や冷却等の海面強制力無しで黒潮の発達した蛇行の谷と峰から近慣性内部波が $O(10 \text{ mW m}^{-2})$ で生成されることが判った。従って、黒潮流軸直下で直接観測した著しい乱流運動エネルギー散逸率や、それに伴った等密度面を横切る栄養塩フラックスは、風が生成した近慣性波のみならず、黒潮から自発的に発生した近慣性内部波が流軸直下で碎波する事で発生していると考えられる事が出来る。また、2013 年 7 月に実施したフロートをを用いた黒潮流軸に沿った微細構造観測結果から、流軸直下に沿った約 900 km に渡って低塩分水が帯状構造をとりつつ数日及び近慣性周期で変動している事が判った。さらに、その塩分極小層 (100-300 m 深) 付近では、乱流運動エネルギー散逸率は小さいもの、水温の散逸率が流軸直下 300 km に亘って著しく大きい事が判った。この結果は、黒潮流軸直下且つ有光層直下において二重拡散対流に伴う混合が無視できない栄養塩供給経路である可能性を示すものであると考える。発表では、これらに加えて渦解像モデルを用いた渦の切離に伴う栄養塩の等密度面輸送解析結果について紹介させて頂く予定である。

キーワード: 黒潮, 乱流, 渦, 内部波, 二重拡散, 栄養塩

Keywords: Kuroshio, Turbulence, Mesoscale eddies, Internal waves, Double diffusion, Nutrients

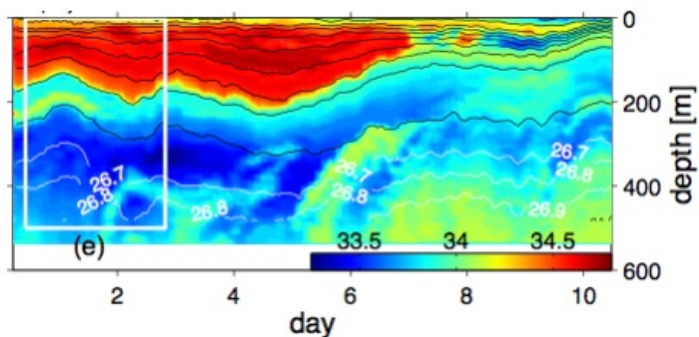


Fig. 1: Salinity measured along the Kuroshio main stream using an EM-APEX Float. White box is measurement range of the microstructure profiling float.

水産関連データと Ecopath with Ecosim を用いた生態系モデリングとその応用 Ecosystem modeling using Ecopath with Ecosim and fishery related data for practical application

清田 雅史^{1*}
KIYOTA, Masashi^{1*}

¹ 水産総合研究センター国際水産資源研究所

¹ National Research Institute of Far Seas Fisheries, Fisheries Research Agency

気候変動や漁業の影響を考慮して海洋生物資源を持続的に利用するため、生態系に基づく漁業管理の必要性が唱われている。日本ではその基本概念や必要性が十分浸透しておらず、データを収集する体制が整っていない。しかし日本周辺では水産資源調査や海洋モニタリングが長年にわたり実施されており、既存のデータを活用して生態系の状態や漁業との関係を理解することは有効であろう。そのような観点から水産総合研究センターでは、漁業関連データの Ecopath with Ecosim (EwE) への適用可能性とモデルの実践的利用について検討を重ねている。

EwE (Christensen & Walters 2004, *Ecol. Model.* 172: 109-139) は基礎生産から高次捕食者まで、生態系を構成する機能群間の捕食被食関係を生物量の収支として表現する end-to-end モデルである。機能群 i の摂取量 Q_i から呼吸量 R_i 、同化されない排泄量 U_i を差し引いたものが生産量 P_i になる単純な関係、

$$Q_i = P_i + R_i + U_i \cdots (1)$$

を想定し、さらに生産量と漁獲量 Y_i 、被食量 $M2_i$ 、その他死亡量 $P_i(1 - EE_i)$ 、移出入 EX_i 、生物蓄積量 BA_i が釣り合ったマスバランス状態にあるという仮定、

$$P_i - Y_i - M2_i - P_i(1 - EE_i) - EX_i - BA_i = 0 \cdots (2)$$

を置く。(2) 式の被食量 $M2_i$ を、

$$M2_i = \sum_j Q_j DC_{ji} \cdots (3)$$

として機能群 i と機能群 j の捕食被食関係として表すことにより、連立一次方程式の形で各機能群が相互関係を持つ (DC_{ji} は機能群 j の食物組成に占める機能群 i の割合である)。この連立方程式を解くことにより物質の流量を推定し、その値から各機能群の栄養段階、機能群間の相互関係、キーストーン種、食物網のネットワーク特性や漁獲の利用特性を計算できる。しかしネットワーク特性値はモデル構造に依存するため、モデル間比較には有効ではなく、むしろ流量を栄養段階別に集約して生産性や転送特性を比較することに向いている。

漁業が生態系に与えるインパクトの指標として漁獲物平均栄養段階 MTL_c (Pauly et al. 1998, *Science* 296: 860-863) が有名だが、その他に漁獲物の生産に必要な基礎生産量 PPR (Pauly & Christensen 1995, *Nature* 374: 255-257) や高次生物に対する負荷量としての L -index (Libralato et al. 2008, *Ecol. Model.* 195: 153-171) なども計算できる。日本周辺の Ecopath モデルを論文発表された世界のモデルと比較した結果、日本周辺の漁業のインパクトは中程度であり、比較的低い栄養段階を幅広く利用していることが明らかになってきた。

Ecosim はマスバランス方程式 (2) を現存量 B_i の時間微分方程式とすることで、経時変化を予想する前方シミュレーターである。Ecopath のマスバランスを崩した後の変化を予想する点、餌生物の密度変化に対する捕食者の機能的応答を表す vulnerability パラメータによって変動特性が大きく変化する点は留意が必要である。ただし機能群豊度の時系列データがあれば、vulnerability パラメータをチューニングできる。近年 EwE に様々な機能が追加され、年齢構造モデルの導入、空間的不均一性の考慮 (Ecospace) や経済価値計算 (Value chain)、管理戦略評価 (MSE) などにも対応している。Ecospace は時空間動態をシミュレーションするもので、海洋保護区の効果予測等に用いられるが、ここでもバランスの取れた均一な状態が開始点となる。

Ecopath は各機能群間の物質の流量をそのまま入力するのではなく、現存量に対する比 (P/B , Q/B) や食性比率 (DC) の形でパラメータ設定することにより、調査や資源解析から得られた既往の情報を取り込みやすく、生態系の構造や漁業との関係を検討する最初のモデルとして使いやすい。vulnerability や Q/B や P/B をパラメータとする単純な物質循環モデルと見なすこともできる。平衡状態の仮定については、ある時点で平衡状態が達成されると考えるより、平均的な状態でバランスが取れていると考える方が受け入れやすく、一旦バランスをとった上で季節変動等をフォーシングにより表現することも可能である。適切な時間空間スケールで情報を取り込めるよう既存のデータを整備すること、他のモデルと比較して妥当性を検証すること、動的なモデルとのカップリングを試みることで、これらを通じて次のステップに向けギャップを探ることは有効なアプローチであろう。

キーワード: エコシステムマネジメント, 海洋モニタリング, 漁業の影響評価, 食物網, マスバランスモデル, 物質循環
Keywords: ecosystem-based fisheries management, fishery impacts, marine food web, mass balance model, monitoring data

日本周辺海域におけるスルメイカの経年変動要因に関する数値モデル解析 Numerical analysis of controlling factors of the interannual variations of Japanese common squid around Japan

吉江 直樹^{1*}; 郭 新宇¹; 王 玉成¹; 久保田 泰士¹
YOSHIE, Naoki^{1*}; GUO, Xinyu¹; WANG, Yucheng¹; KUBOTA, Taishi¹

¹ 愛媛大学沿岸環境科学研究センター

¹ Center for Marine Environmental Studies, Ehime University

日本周辺海域で漁獲されるスルメイカ（学名：*Todarodes pacificus*）は、日本だけでなく韓国、中国など周辺諸国において最も重要な水産資源の1つである。これまでの研究から、スルメイカ的生活史や回遊経路については次のようなことが明らかになっている。スルメイカは、東シナ海大陸斜面から日本海南西部において産卵され、幼生は日本海もしくは太平洋日本周辺域を索餌回遊しながら成長し、成体は産卵のために再び東シナ海に戻り産卵する。この日本周辺海域におけるスルメイカの資源量は、過去数十年間の間に大きな経年変動を繰り返してきた。これまで、海水温などの環境要因が産卵場に及ぼす影響については研究されてきたが、この経年変動を左右する要因については定量的な議論がなされていない。そこで本研究では、1992年から2002年にかけて、粒子追跡モデルを用いて日本周辺海域におけるスルメイカ幼生の索餌回遊をシミュレーションし、経年変動を引き起こす要因について定量的解析を行った。モデル中では、水深と水温による産卵域推定、幼生輸送時のランダムウォーク過程、不適水温による幼生の死亡過程、親魚資源量変化による産卵数変化を考慮した。モデルの結果から、スルメイカ資源量の経年変動要因としては、親魚資源量の変動が最も重要であることが示唆された。

キーワード: スルメイカ, 粒子追跡モデル, 経年変動

Keywords: Japanese common squid, particle tracking model, interannual variation

温暖化による北太平洋域の水産資源に対する影響評価 Impacts of global warming on fish resources in North Pacific

柴野 良太^{1*}; 山中 康裕¹; 重光 雅仁¹
SHIBANO, Ryota^{1*}; YAMANAKA, Yasuhiro¹; SHIGEMITSU, Masahito¹

¹ 北海道大学地球環境科学研究所

¹ Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University

近年の研究報告より、地球温暖化に伴う海洋生物への影響が指摘されている。Cheung et al. (2013) はハビタットモデルを用いて地球温暖化に伴う全球規模の資源量変動を推定した。この解析に使用したモデルは魚種別の好適環境とロジスティック関数を用いて簡易的に将来の資源量分布を推定する方法であるが、評価シナリオが少なく、また水産資源の飼料指標となる一次生産などの生態系変数は考慮していなかった。本研究は、Cheung et al. (2008; 2013) を参考にハビタットモデルを開発し、2100年までの温暖化シミュレーションの結果を用いて解析を行う。評価に用いる変数について一次生産を加えると共に、複数の気候シナリオについても評価する。本発表では気候モデル：MIROC-ESMを用いた結果について発表を行う。

キーワード: 水産資源, 地球温暖化, 気候モデル, ハビタットモデル

Keywords: fishery resources, global warming, climate model, habitat model

大変動する資源の加入過程モデリング Modeling large-amplitude recruitment variability of marine fish

伊藤 幸彦^{1*}; 羽角 博康¹
ITO, Sachihiko^{1*}; HASUMI, Hiroyasu¹

¹ 東京大学大気海洋研究所

¹ Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

Marine ecosystem modeling has advanced considerably in the past few decades, enabling quantitative evaluation of biogeochemical cycles in the ocean. Some models are incorporated into the earth system model and applied for projecting future climate change. However, many of these models consider trophic levels up to zooplankton and do not include fish and other nekton. Although abundances of some marine fish species show large interannual fluctuations synchronous to environmental variations, few model frameworks had capability of explicit analyses on their linkage. A recently developed approach for fish modeling takes both biomass and number of individuals into consideration, which is one of necessary factors of fish community structure; however, even with this approach, present fish models do not usually reproduce drastic variation in the abundances of some small pelagic fishes such as sardine and anchovy. In the present study, we step into recruitment processes of marine fish, which has been suggested by field studies to be determinants of the population size. A food-web model for planktivorous and piscivorous fishes was developed, which will be coupled with a lower trophic ecosystem model and a hydrodynamic model. We focus on the environmental variability in the western North Pacific and the accompanied responses of sardine and anchovy, and test several growth and survival models during early life stages of these fishes. In the presentation, possible amplification processes from plankton to fish will also be discussed.

海洋低次生態系モデル開発に資する植物プランクトン群集別光合成量子収率の衛星データ解析 Satellite remote sensing data analysis of the quantum yield of photosynthesis for marine ecosystem model development

平田 貴文^{1*}
HIRATA, Takafumi^{1*}

¹ 北海道大学大学院地球環境科学研究院

¹ Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University

海洋生態系モデルは、時空間的に局所性が伴う現場海洋観測で得られる生物学的・生態学的知見（例えば、生物量分布など）を時空間的に内外挿する効果を有し、現場観測では得難い総観的解析を可能にする。また、生態系モデルは、各生物分類群に対する数々の生理作用と外部環境間での相互作用や生物分類群間の相互作用の結果を出力する。このような生態系モデルの実行には、数々の生理・生態作用を規定するパラメータ値を予め決定しておく必要がある。一般にパラメータ値は固定値とされることが多いが、現実には時空間的に変動することが考えられ、結果としてモデル結果の不確実性の原因の一つとなっていると考えられる。そこで本研究では、より良い海洋生態系のパラメタリゼーションのために、地球観測衛星より得られた海色データを利用して、時空間的に密な生物関連パラメータの時空間分布を明らかにし、その衛星データセットを作成することを目的とする。本研究では、生物関連パラメータとして、とりわけ海洋生態系内の基礎生産者である珪藻・ハプト藻・藍藻の光合成量子収率を対象とする。光合成量子収率は、モデル内で植物プランクトンの光制限を規定する要素の一つである光合成-光曲線の初期勾配パラメータと密接に関係している。本研究で対象とする海域は、黒潮本流・続流・準定常 jet を含む日本周辺海域で、対象期間は 1998 年から 2007 年の 10 年間とした。利用する衛星データは、NASA SeaWiFS より観測された海色データを基に算出された、a) 植物プランクトン全群集の基礎生産速度 (Behrenfeld et al., 2005)、b) 植物プランクトン群集別クロロフィル-a (Hirata et al., 2011) ならびに、c) 植物プランクトン全群集光吸収係数 (Smyth et al. 2006) であり、空間解像度は約 9km である。全群集の基礎生産速度と群集別クロロフィル-a は全球現場データセットを用いて経験的に導かれている一方、全群集光吸収係数は、インバージョンモデルを用いて導出した。植物プランクトン群集別光合成量子収率の算出には、アルゴリズムの設計上の問題である入力データの自由度の向上のために、リモートセンシングの分野で通常行われているグリッド毎の演算とは異なる方法を採用した：すなわち、本研究では、対象海域内に複数グリッド (本研究では、5x5 グリッド) からなる多数の小領域を設定し、各小領域内の衛星データの全てを入力値として用いて、各小領域に対して群集別光合成量子収率を出力する方法である。このようにして得られる群集別光合成量子収率の空間解像度は、入力データの解像度の 1/5 となるが、世界初となる群集別光合成量子収率の時系列衛星データの取得が可能となる。この方法で算出された植物プランクトン群集別の光合成量子収率をみると、珪藻の光合成量子収率では黒潮以北と以南で明確な違いが見られ、ほぼ通年、珪藻生物量の分布に対応していた。一方、ハプト藻の光合成量子収率はハプト藻生物量の分布との明確な対応が見られる時期（主に、5?10 月）と見られない時期（11 月?4 月）があった。藍藻の光合成量子収率は、通年、ほぼ藍藻生物量と対応していなかった。また、光合成量子収率と光合成有効放射と間での時間変動の関係をみると、珪藻では黒潮および続流域以外の日本近海で負の相関がえられた。ハプト藻では黒潮および続流以南で負の相関が見られた。藍藻では特に強い負の相関が見られた。このように、光合成量子収率は群集間、季節、海域で変動することが示された。光合成量子収率は、一次生産者の光制限を規定する上で重要なパラメータであるが、これまで植物プランクトン群集別の光合成量子収率の総観的な時空間変化は明らかになっていなかった。植物プランクトン群集構造を多様に表現する生態系モデルが増加する中で、本研究の成果は、植物プランクトンの群集構造を明示的に表現する生態系モデルにとって、群集別パラメータ設定のための重要なデータ資源となり、モデル結果の不確実性の軽減へ貢献すると期待される。

キーワード: 植物プランクトン, 衛星, 光合成量子収率

Keywords: Phytoplankton, Satellite Remote Sensing, Quantum yield of photosynthesis

東シナ海におけるカタクチイワシの温暖化影響評価の試み A challenge to evaluate effect of climate change on Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) in the East China Sea.

伊藤 進一^{1*}; 小松 幸生¹; 高須賀 明典²; 吉江 直樹³; 奥西 武²; 北島 聡²; 高橋 素光²; 長谷川 徹²; 瀬藤 聡²

ITO, Shin-ichi^{1*}; KOMATSU, Kosei¹; TAKASUKA, Akinori²; YOSHIE, Naoki³; OKUNISHI, Takeshi²; KITAJIMA, Satoshi²; TAKAHASHI, Motomitsu²; HASEGAWA, Toru²; SETOU, Takashi²

¹ 東京大学大気海洋研究所, ² (独) 水産総合研究センター, ³ 愛媛大学

¹The University of Tokyo, AORI, ²Fisheries Research Agency, ³Ehime University

地球温暖化が東シナ海のカタクチイワシに与える影響を評価するために、海洋大循環モデル C-HOPE (Max-Planck-Institute Ocean Model) と海洋低次栄養段階生態系モデル NEMURO (North Pacific Ecosystem Model for Understanding Regional Oceanography) の拡張版である eNEMURO を結合させた、CHOPE-eNEMURO を現在気候外力と将来気候外力を用いて駆動し、現在と将来の水温、流向・流速、餌料プランクトン場を得、その場を用いてカタクチイワシの成長一回遊モデル (CHOPE-eNEMURO.FISH) を積分した。カタクチイワシの成長は、生物エネルギーモデルを用いて、摂餌によるエネルギー獲得と代謝、排泄、排出、消化エネルギーなどによる消費の差分が成長に利用されると仮定した。NEMURO.FISH (NEMURO for Including Saury and Herring) は元来、サンマとニシンの成長を調べるために構築されたが、プランクトン捕食者であれば比較的容易に適応することができる。初期産卵場は、深度が 1000 m よりも浅い海域で且つ水温が 15.6~27.8 °C の海域に形成されると仮定し、産卵後から 1 年間の計算を行った。現在気候下では、九州西岸域に加入するシラスの 78 % が九州南部に加入するが、将来気候下では南部への加入は 0.5 倍と減少するのに対し、北部への加入が 2.7 倍と増加し、南部加入率は 40 % に減少した。九州西岸に加入するシラスの総量は、現在気候下でも将来気候下でも変化しなかった。これは産卵場が北上したためと考えられる。また、加入するシラスの体長は南部では変化がないが、北部では将来気候下の方が体長が増加する結果となった。

キーワード: 海洋生態系モデル, 魚類成長一回遊モデル, カタクチイワシ, 地球温暖化

Keywords: ecosystem model, fish growth-migration model, Japanese anchovy, climate change