

日本における海洋物質循環・海洋生態系モデリング: 最近20年間レビューおよび今後の発展性 Modeling of marine biogeochemical and ecosystem in Japan: future perspective and review during the last 20 years

山中 康裕^{1*}
YAMANAKA, Yasuhiro^{1*}

¹ 北海道大学大学院地球環境科学研究院

¹ Faculty of Earth Environmental Science, Hokkaido University

大循環を考慮した海洋物質循環モデルの開発は Bacastow and Maier-Reimer(1990)、海洋生態系モデルでは、Fasham(1993)により行われた(国内では、例えば Yamanaka and Tajika(1996)、Kawamiya et al.(2000))。2000年頃、海洋物質循環モデルも、より短い時間スケールに注目するにつれて、亜寒帯海域での春季ブルームに伴う栄養塩や二酸化炭素分圧の低下など、明示的に生態系を表現することが多くなり、海洋生態系モデルと同程度の生物過程を表現したものが主流となった。その頃、微量栄養塩である鉄循環の表現は、両者にとって重要な課題であり、気候と炭素循環を同時に扱うことも行われ、ほぼ現在の研究の枠組みが完成した。

誰しもが、数十、数百、数千、数万種といったプランクトンやネクトンからなる海洋生態系をより詳しく取り扱ったモデルを開発したいと思う。その第一歩として、生態系に対して、栄養塩やプランクトンを明示的に比較的少数の予報変数で取り扱う、機能別プランクトングループ (Plankton Functional Types, PFTs) が導入された(例えば Le Quere, 2005; Kishi et al., 2007)。PFTs モデルには2つの方向性、物質循環のため、あるいは、生態系のためが存在する。前者は物質フローが大きい植物プランクトンに注目し、後者は魚などの高次捕食者への食物連鎖の役割をもつ動物プランクトンに注目して区分する。PFTs モデルの2つの方向性を同時に満たすには、プランクトン数×元素組成数(さらに食物連鎖網の捕食関係はプランクトン数の二乗に比例)という膨大な予報変数が必要するため、それぞれの方向へ分化するだろう。モデルの複雑さを議論する際には、予報変数の数に単に注目することが多かった(e.g., Friedrichs et al., 2007)。しかし、個別の素過程やパラメータのトレードオフの研究が重要な改良を促すことも事実である。例えば、Smith らは、栄養塩取り組みの最適化の考え(Pahlow, 2005)に基づき、古典的なミカエリスメンテンにおける半飽和定数ではなく、立ち上がり定数(Affinity)による定式化、また、非制限栄養塩の取り込みは制限栄養塩のパラメータ最適化によること、温暖化への影響などを論じている(Smith and Yamanaka, 2007; Smith et al., 2009)。また、最近、生物多様性を意識した、多数の植物プランクトンを競合させるモデルの開発が注目されている(Follows, 2007)。

もう一つの視点は、海洋生態系・物質循環モデルを開発する研究者コミュニティの発展である。海洋物質循環モデリングの先駆者たちは、海洋炭素循環モデル相互比較研究計画(Ocean Carbon cycle Model Intercomparison Project, OCMIP)を立ち上げた。議論のリードは、OCMIPの初期では先駆者たちにより行われたが、Phase 2の終わり頃(2002年)にはそのプロジェクトに関わる若手研究者によって行われた。彼らこそ、現在、この分野で世界をリードしている研究者であることは言うまでもない(Le Quere, Follows, Gruber 等)。現在行われている海洋生態系相互比較研究計画(MARine Ecosystem Model Intercomparison Project, MAREMIP)も、OCMIPの経験に基づいて設計され、次の世代がまさにいま頭角を露わさんとしている。また、いくつかの研究グループが注目される。北太平洋海洋科学機関 PICES における海洋生態系モデル NEMURO の開発は、もう一つの国際共同研究として特筆される。トレードオフなどの個別の素過程の改良に関しては北ドイツのグループのリードがある。日本の若手研究者が、海洋物質循環・生態系モデリングの国際共同研究計画の一翼を担うことを目指して欲しいと切に願う。なお本講演は昨年度行えなかった内容に基づくものである。

キーワード: 海洋物質循環, 海洋生態系, モデリング, 国際共同研究計画, 海洋炭素循環モデル相互比較研究計画, 海洋生態系相互比較研究計画

Keywords: marine biogeochemical cycles, marine ecosystem, modeling, international research project, OCMIP, MAREMIP

魚類生産モデリング: 物質循環への影響と生態系サービス評価 Modeling fish production in the ocean: impacts on biogeochemical cycles and ecosystem service evaluation

伊藤 幸彦^{1*}; 伊藤 進一²

ITOH, Sachihiko^{1*}; ITO, Shin-ichi²

¹ 東京大学大気海洋研究所, ² 水産総合研究センター東北区水産研究所

¹ Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, ² Tohoku National Fisheries Research Institute, Fisheries Research Agency

Marine organisms play fundamental roles in biogeochemical cycles in the ocean. Ecosystem models formulating chemical and biological processes relevant to these organisms and materials have been developed in the past few decades, enabling quantitative evaluation of biological production, carbon and nutrient cycles, and their impact on the climate system. However, many of these models consider trophic levels up to zooplankton. Although much of storage and flux of carbon and nutrients are observed in the lower trophic levels, which is a good reason to focus on this level, importance of higher trophic levels has been increasingly recognized. Here, we review modeling studies incorporating higher trophic levels than zooplankton, especially focusing on fish production models. There are two major motivations developing the fish production model. The first one is that lower trophic level models with zooplankton as the highest trophic level are sometimes controlled too strongly by parameterized zooplankton mortality terms. Although parameterization of mortality terms is needed unless the model contains the apex predator (trophic closure), inclusion of planktivorous fish components does decrease the arbitrariness of the biogeochemical cycle in the model. The second reason to develop fish production models, the more classical reason than the first one, is based on the fact that fish stocks themselves have been major food resources for human societies. In this context, some recent models do not only include commercially important large piscivorous fishes but also consider fishing fleets. Increasing concern for the conservations of marine mammals and sea birds also enhances the model development. There are two different streams of the fish modeling at present: size-based and species-based approaches. We review their advantages and limitations and discuss future improvements of preferable frameworks of the higher trophic models.

キーワード: 魚類生産モデル, trophic closure, 水産資源

Keywords: fish production model, trophic closure, fisheries resources

温暖化時の海洋の鉄循環変化の予測計算

The iron budget in ocean surface waters in the 20th and 21st centuries: projections by the Community Earth System Model

三角 和弘^{1*}; Lindsay Keith²; Moore Keith³; Doney Scott⁴; Bryan Frank²; 津旨 大輔¹; 吉田 義勝¹
MISUMI, Kazuhiro^{1*}; LINDSAY, Keith²; MOORE, Keith³; DONEY, Scott⁴; BRYAN, Frank²; TSUMUNE, Daisuke¹;
YOSHIDA, Yoshikatsu¹

¹ 電力中央研究所, ² 米国大気研究センター, ³ カリフォルニア大学アーバイン校, ⁴ ウッズホール海洋研究所

¹Central Research Institute of Electric Power Industry, ²National Center for Atmospheric Research, ³University of California at Irvine, ⁴Woods Hole Oceanographic Institution

We investigated the simulated iron budget in ocean surface waters in the 1990s and 2090s using the Community Earth System Model version 1 and the Representative Concentration Pathway 8.5 future CO₂ emission scenario. We assumed that exogenous iron inputs did not change during the whole simulation period; thus, iron budget changes were attributed solely to changes in ocean circulation and mixing in response to projected global warming, and the resulting impacts on marine biogeochemistry. The model simulated the major features of ocean circulation and dissolved iron distribution for the present climate. Detailed iron budget analysis revealed that roughly 70 % of the iron supplied to surface waters in high-nutrient, low-chlorophyll (HNLC) regions is contributed by ocean circulation and mixing processes, but the dominant supply mechanism differed by region: upwelling in the eastern equatorial Pacific and vertical mixing in the Southern Ocean. For the 2090s, our model projected an increased iron supply to HNLC waters, even though enhanced stratification was predicted to reduce iron entrainment from deeper waters. This unexpected result is attributed largely to changes in gyre-scale circulations that intensified the advective supply of iron to HNLC waters. The simulated primary and export production in the 2090s decreased globally by 6 and 13 %, respectively, whereas in the HNLC regions, they increased by 11 and 6 %, respectively. Roughly half of the elevated production could be attributed to the intensified iron supply. The projected ocean circulation and mixing changes are consistent with recent observations of responses to the warming climate and with other Coupled Model Intercomparison Project model projections. We conclude that future ocean circulation has the potential to increase iron supply to HNLC waters and will potentially buffer future reductions in ocean productivity.

植物プランクトン群集構造の温暖化応答 Response of phytoplankton community structure to global warming

橋岡 豪人^{1*}; 平田 貴文²; 千葉 早苗¹; 山中 康裕²
HASHIOKA, Taketo^{1*}; HIRATA, Takafumi²; CHIBA, Sanae¹; YAMANAKA, Yasuhiro²

¹JAMSTEC, ²北海道大学

¹JAMSTEC, ²Hokkaido Univ.

In recent studies using high-performance liquid chromatography (HPLC) pigment data, empirical relationships between total chl-a concentration and a phytoplankton size/PFT fraction on a global scale are shown. For example, a fraction of diatoms increases with total chl-a concentration. The same tendencies can be seen in the most of the hindcast experiments by current PFT models of MARine Ecosystem Model Intercomparison Project (MAREMIP) and Coupled Model Intercomparison Project Phase5 (CMIP5) although the reproduced absolute values of a phytoplankton fraction still has large uncertainties. Then, two different mechanisms can be expected as potential responses of phytoplankton community to global warming. One is a possibility that the phytoplankton community structure (i.e., relationships between a phytoplankton fraction and total chl-a concentration) can be significantly changed by changes in ecosystem dynamics under global warming condition (e.g., changes in grazing pass/strength, decomposition/mortality/respiration rate and phytoplankton stoichiometry). Another possibility is that the plankton community shifts to the other stable states associated with changes in total chl-a concentration (e.g., by decrease/increase in nutrient supply to the surface ocean by changes in stratification) while maintaining the current relationship between a phytoplankton fraction and total chl-a concentration. To clarify impacts of both effects, we analyzed model results of future simulation, which was conducted by CMIP5 and MAREMIP under the RCP8.5 emission scenario. PFT model more than half showed that relationships between phytoplankton composition and total chl-a concentration are stable against environmental changes associated with global warming. In these model results, changes in phytoplankton composition are mainly caused by plankton community shifts associated with changes in total chl-a concentration. This result suggests the possibility that current empirical relationships obtained by HPLC would be maintained in a future environment. Based on this hypothesis, we project a potential future community structure of phytoplankton using a multi-model ensemble mean of future changes in total chl-a concentration with the empirical relationship of HPLC. Some other models projected large changes in the community structure in specific regions and seasons. These results also suggest potentially important mechanisms, regions and seasons.

キーワード: 植物プランクトン, 群集構造, 地球温暖化

Keywords: Phytoplankton, Community structure, Global warming

Introduction to our on-going development of an adaptive model for plankton communities in the North Pacific

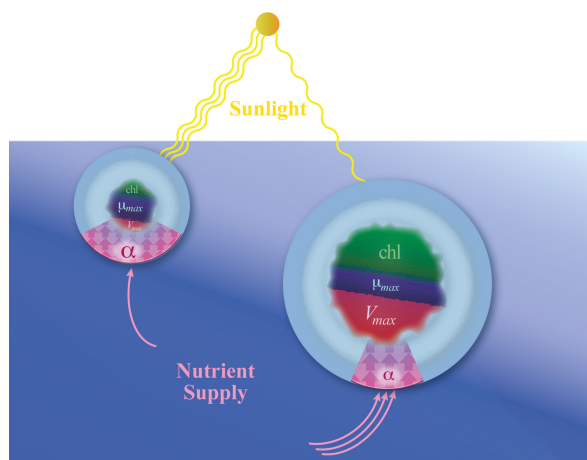
SMITH, S. Ian^{1*} ; YOSHIKAWA, Chisato¹ ; SASAI, Yoshikazu¹
SMITH, S. Ian^{1*} ; YOSHIKAWA, Chisato¹ ; SASAI, Yoshikazu¹

¹RIGC, JAMSTEC, ²CREST, JST
¹RIGC, JAMSTEC, ²CREST, JST

This presentation will introduce our on-going efforts, as part of a CREST project funded by JST, to develop a new prototype model to represent the biodiversity and adaptive capacity of lower-trophic ecosystems in the North Pacific. The ultimate goal is to develop a computationally efficient representation of the community-level interactions of the producers (phytoplankton) and consumers (zooplankton) with each other and with the marine environment. This of course includes the adaptive response of plankton communities to changing environmental conditions, and later potential feedbacks, including for example the impact of plankton communities on controlling nutrient concentrations. We will present the size-based model of phytoplankton communities that is already under development and one scientific result already obtained, regarding the size-scaling of growth parameters, as commonly applied in large-scale models, in terms of the more commonly measured parameters for nutrient uptake kinetics. This scaling relationship provides a basis for consistently incorporating observed allometries into models based on Monod growth kinetics. This new simplified model of phytoplankton communities accounts for biodiversity via size-scaling of phytoplankton traits and for flexibility of the C:N ratio of biomass.

Fig. 1. Traits, which define how organisms respond to environmental conditions, have evolved subject to inescapable biophysical constraints. Thus have arisen trade-offs in competitive ability under different conditions, here illustrated for typical small phytoplankton adapted to low-nutrient, high-light conditions, which have high affinity (α), low maximum uptake rates (V_{max}) and relatively less allocation to chlorophyll/light harvesting ability, vs. large phytoplankton adapted to high-nutrient, low-light conditions, which have low α , high V_{max} , and relatively more allocation to chlorophyll/light harvesting ability. Maximum growth rate (μ_{max}) is constrained by the opportunity cost of allocating resources to the various processes necessary to support growth.

キーワード: plankton, ecosystem, model, traits, trade-offs, adaptive
Keywords: plankton, ecosystem, model, traits, trade-offs, adaptive



渦解像生態系モデルを用いた植物プランクトン多様性の形成メカニズム、種数の検討 Exploring mechanisms of phytoplankton coexistence using a marine ecosystem model with eddy-resolving resolution

増田 良帆^{1*}; 山中 康裕¹; 中野 英之²
MASUDA, Yoshio^{1*}; YAMANAKA, Yasuhiro¹; NAKANO, Hideyuki²

¹北海道大学 地球環境科学研究所, ²気象研究所
¹Hokkaido University, ²Meteorological Research Institute, Japan

海洋の植物プランクトンは多様性に富んでおり、総計で約7万種以上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に見えるにも関わらず、これほどの多様性があるのは驚きであり、このような多様性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説、中立説 (Hubbell, 2001) に着目し、数値モデルを用いて検証を行った。また、同時に共存可能な植物プランクトンの種数を定めるものは何かという問題にも取り組んだ。本研究では、数値モデルを用いた多様性の研究にいち早く取り組んだ Follows グループのモデル (Follows et al., 2007) とは異なり、棲み分けを先験的に可能にしているプランクトンファンクショナルグループを設けない方針を取った。また、海洋の中規模渦によって作られる物理環境の多様性が植物プランクトン多様性に大きな影響を及ぼしていると考え、渦解像モデル (水平解像度 0.1 度) を用いた。

海洋低次生態系モデル NEMURO、MEM を基に植物プランクトン多様性モデルを新たに開発し、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。標準実験では温度・栄養塩・光特性の異なる 240 の植物プランクトングループを設けた。栄養塩についてはアンモニアを含む窒素循環のみを再現しており、異なる栄養塩の利用による共生は考えない。動物プランクトン 1 グループによる捕食は植物プランクトン全体に比例し、数が少ないグループを有利にはしない。

240 グループのうち、31 グループが 10 年後に生き残った。亜寒帯では高栄養塩環境下で成長が早いグループ、亜熱帯では低栄養塩環境下で成長が早いグループが生き残る傾向があった。生き残りと絶滅を分けるメカニズムを調べるために、成長率 (光合成速度-呼吸速度) を植物プランクトングループ毎に調べた。成長率で一位を取れる海洋の体積が大きくなるほど生き残る確率が高かった。成長率で一位を取れる海洋の体積が 0 だった 118 グループは全て絶滅した。

陸上植生では性能が劣る種でも生態的浮動によって系に長期間存在する可能性があり、このことは中立説をサポートすると考えられている。海洋植物プランクトンで中立説を検証する為、生き残った 31 種に最大光合成速度が 98% となる 31 種を加えた実験を行った。性能の劣る 31 種は全て数年の時間スケールで絶滅へと向かった。よって、海洋植物プランクトンでは陸上生態系に比べると中立説が成立しづらいと推定される。

次にニッチ分割によって共存出来る種数の上限を調べる為、最も卓越する 1 グループをニッチが僅かに異なる 200 グループに分割する実験を行った。結果、200 グループは長期間共存可能であった。このような分割を他のグループについても行えば、1000 グループがこのモデル内で共存出来ると推定される。分割したグループが生き残るには成長率で一位を取れる海洋の体積がある値以上である必要があるが、この値はこれまでの実験から推定可能である。

キーワード: 植物プランクトンの多様性, 海洋生態系モデル, 中規模渦
Keywords: Phytoplankton diversity, Marine ecosystem model, Mesoscale eddy

メソ動物プランクトンの死亡特性が低次生態系に及ぼす影響 Numerical analysis of the influences of the meso-zooplankton mortality

吉江 直樹^{1*}; 富田 和之¹; 奥西 武²; 伊藤 進一²
YOSHIE, Naoki^{1*}; TOMITA, Kazuyuki¹; OKUNISHI, Takeshi²; ITO, Shin-ichi²

¹ 愛媛大 CMES, ² 水研セ 東北水研

¹Center for Marine Environmental Studies, Ehime University, ²Tohoku National Fisheries Research Institute, Fisheries Research Agency

近年、海洋低次生態系（遊泳能力のないプランクトンを主要構成生物とする生態系）は、気候変動に起因する環境変化や人類活動に伴う様々なストレスにより多大な影響を受け続けている。このような様々な環境変化が低次生態系に及ぼす影響を定量的に評価することが世界的にも重要視されている。それは、この低次生態系の変化が私たちの生活にも関連深い水産資源量の変動や炭素循環などの物質循環と密接にリンクしているからである。例えば、メソ動物プランクトンのカイアシ類は、おなじみのサンマやカタクチイワシなどの多獲性浮魚類の主要な餌生物であると共に、彼らの水深 1000m にも及ぶ季節的な鉛直移動や沈降速度の速いカプセル状の糞粒は大量の有機炭素を効率よく海洋表層から深層へと輸送しており、それらへの環境変化の影響を定量的に評価することは極めて重要である。これまでに、我々は、先に挙げたカイアシ類のような生態系内で重要な機能を持つ生物群を機能毎にまとめて取り扱うことができる数値モデル、プランクトン機能群 (PFTs) モデルの開発を推進してきた。具体的には、PICES（北太平洋海洋科学機構）の標準 PFTs モデル「NEMURO」を拡張した「eNEMURO」（4 種の栄養塩、4 種の植物プランクトン、4 種の動物プランクトン、4 種のデトリタスを取り扱う）の開発を行い、日本周辺海域の低次生態系の時空間変化を現実に近い形で再現してきた。本研究では、日本周辺の 5 海域（親潮域、親潮－黒潮移行域、黒潮内側域、黒潮外側域、東シナ海）において、現場観測や室内実験からの知見が極めて乏しいカイアシ類の死亡特性について、eNEMURO 中のカイアシ類の死亡に関わる二つの生理パラメータの感度解析を行い、それらの変化が生態系に及ぼす影響を調べた。その結果、水温上昇に伴うカイアシ類の死亡速度の増加が、栄養塩濃度・植物プランクトン現存量・動物プランクトン現存量に及ぼす影響が大きく、特に、高水温海域でその影響が大きいことが明らかとなった。講演では、この感度解析から得られた知見の他に、遺伝的アルゴリズムを用いた生理パラメータ最適値の推定に関する知見も報告したい。

キーワード: 低次生態系, プランクトン, 生理パラメータ, 生態系モデル

底泥系を考慮した沿岸域の海洋生態系モデルによる物質循環の解明 A benthic-pelagic coupled ecosystem model to clarify nutrient cycles in coastal areas

舘野 聡^{1*}; 畑 恭子¹; 永尾 謙太郎¹
TATENNO, Satoshi^{1*}; HATA, Kyoko¹; NAGAO, Kentaro¹

¹ いであ株式会社
¹IDEA Consultants, Inc.

我が国の多くの閉鎖性海域においては、高度経済成長以降、流入負荷の増加や埋め立て等の開発等によって海域環境が変化した。これにより、海中の栄養塩類の循環バランスが崩れ、赤潮や貧酸素水塊、硫化水素が発生し、生態系に大きな影響が生じた。環境基準や水質総量削減等の取り組みにより水質は改善したものの、循環バランスは損なわれたままの海域がみられる。これは陸域からの負荷の変化、底泥への影響の蓄積、外海の状況の変化、生物量の変化など、様々な要因が絡み合っているためである。

そこで、それらを総合的に把握し、評価・改善できるよう、水中の栄養塩類や低次生態系に加えて沿岸域の環境に重要な底質、底生生物、カキ等の高次捕食者、藻類、溶存酸素を同時に解析できるモデルを開発した。このモデルを広島県中部に位置し、カキの養殖が盛んな三津湾に適用し、物質循環の状況を調べた。その結果、三津湾の物質循環においては外海からの栄養塩の流入が支配的で、陸域からの負荷の影響は相対的に小さいことがわかった。また、貧酸素水塊はみられなかったが、カキの養殖によって底泥に有機物が堆積し、底泥内で硫化水素が発生していることがわかった。この硫化水素の抑制が、三津湾の生態系の改善と持続的な利用に重要であることが示唆された。

キーワード: 海洋生態系モデル, 海洋物質循環
Keywords: Marine Ecosystem Model, Marine Material Cycles

魚類の産卵回遊を制御する環境要因の解明に向けてーサンマを例に A challenge to investigate environmental factors which determine spawning migration variability of small pelagic.

伊藤 進一^{1*}; 大野 創介¹; 奥西 武¹; 巢山 哲¹; 中神 正康¹; 安倍 大介¹; 亀田 卓彦¹; 箕 茂穂¹
ITO, Shin-ichi^{1*}; OHNO, Sohsuke¹; OKUNISHI, Takeshi¹; SUYAMA, Satoshi¹; NAKAGAMI, Masayasu¹; AMBE,
Daisuke¹; KAMEDA, Takahiko¹; KAKEHI, Shigeho¹

¹ (独) 水産総合研究センター

¹ Fisheries Research Agency

近年、植物および動物プランクトンを対象とした低次栄養段階生態系モデルと魚類の成長一回遊モデルを結合させ、海洋環境変動に対する魚類の成長や回遊の応答をモデルを用いて研究することが可能となってきた。しかしながら、魚類の回遊のメカニズム、殊に海洋中を大回遊する回遊性魚類が、自らの産卵場へと回帰する産卵回遊がどのような環境要因によって制御されているか未知な部分が多く、そのモデル化には多くの課題が残されている。本研究では、現場観測による初夏のサンマの分布を初期値に、観測衛星から得られた流速場、水温場、餌環境を外力として、できる限り現実的な条件のもとサンマの水平2次元成長一回遊モデルを駆動し、産卵回遊メカニズムとして不足している項目について検討を行った。サンマの成長はNEMURO.FISHと呼ばれる生物エネルギーモデルを用いて計算し、策餌回遊は最大成長できる方向に、産卵回遊は仔魚の成長が最大となる方向に向かうと仮定して計算した。その結果、現実的な初期値、境界値を用いても、日本近海への産卵期の来遊が少ないことが判明した。日本近海への来遊を再現するには、産卵期の西向き能動遊泳が必要であり、近年の来遊量の変動を再現するためには、この産卵期の西向き能動遊泳も大きく変化する必要があることが示された。日本近海への来有量の経年変動を再現するために必要とされた西向き能動遊泳速度の変動は、北太平洋規模の夏季から秋季にかけての水温場と高い相関を示し、北太平洋規模の気候変動と関連する現象によって産卵期の回遊が決定されている可能性が示唆された。

キーワード: 海洋生態系モデル, 魚類成長一回遊モデル, サンマ, 海洋環境

Keywords: ecosystem model, fish growth-migration model, Pacific saury, ocean environment