学際連携研究報告書

平成２６年度

東京大学　大気海洋研究所

はじめに

学際連携研究は、平成２３年度より開始した公募型の共同研究事業である。本共同研究では、全国の個人またはグループの研究者と本研究所の教員が協力して、海洋や大気に関わる基礎的研究および地球表層圏の統合的理解の深化につながる研究を実施する。特に、複数の学問分野の連携による学際的な共同研究の推進を目指すことから、「学際連携研究」と名付けられた。本共同研究には以下の二つの形態がある。

（１）特定共同研究
本研究所が提案し、地球表層圏変動研究センターが中心となって計画的に推進する特定共同研究課題について、所内の研究グループと所外の研究者が協力して進める共同研究。

（２）一般共同研究
全国の個人またはグループが提案する研究テーマについて、所外と所内の研究者が協力して進める共同研究で、本所の研究目的に貢献が期待できるもの。新しい研究の展開のきっかけとなるポテンシャルを秘めた萌芽的あるいは試行的研究を歓迎する。また、新規プロジェクトの立案にむけてのフィージビリティ研究（打ち合わせ会議や予備調査の実施などを含む）も審査の対象とする。

平成２６年度の実績は、特定共同研究の応募数が３件（同採択数３件)、一般共同研究の応募数が７件（同採択数７件）であった。

本冊子は、平成２６年度採択課題の成果報告をまとめたものである。関連分野の研究者の皆様に有効にご活用いただけると幸いである。

東京大学大気海洋研究所
共同利用運営委員会
学際連携研究部会

平成26年度学際連携研究　一覧

【特定共同研究】

番号	申込者氏名	所属機関	役職	研究課題	大気海洋研究所共同研究教員
1	田所　和明	水産総合研究センター東北区水産研究所	主幹研究員	親潮・黒潮移行域における海洋プランクトン相の広域的な分布・動態の実態解明とモデル化	伊藤　幸彦
2	上野　洋路	北海道大学大学院水産科学研究院	助教	海洋中規模渦の相互作用に関する研究	伊藤　幸彦
3	関口　美保	東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科	准教授	放射コードの海面・地表面過程の改良についての研究	中島　映至

【一般共同研究】

番号	申込者氏名	所属機関	役職	研究課題	大気海洋研究所共同研究教員
1	北野　潤	国立遺伝学研究所	特任准教授	イトヨにおける環境応答ホルモンの機能解析	日下部　誠
2	柳本　卓	水産総合研究センター中央水産研究所	主任研究員	ニギスをモデルとした小型底魚類の生活史の解明に向けた生態学的研究	猿渡　敏郎
3	大木　淳之	北海道大学大学院水産科学研究院	准教授	北海道噴火湾および沿岸親潮域での無機ー有機ヨウ素の時系列観測	小畑　元
4	小糸　智子	日本大学生物資源科学部	助手	シンカイヒバリガイ類の集団構造と分散に関する研究	北川　貴士
5	田中　義幸	海洋研究開発機構むつ研究所	研究員	種間相互作用の酸性化応答解明を目標とした新規実験技術の開発―海草藻場群集を例として	宮島　利宏
6	山形　俊男	海洋研究開発機構アプリケーションラボ	アプリケーションラボ所長	先端科学技術に基づく海洋・地球情報の学際的、超学際的展開	植松　光夫
7	豊田　岐聡	大阪大学大学院理学研究科附属基礎理学プロジェクト研究センター	教授	超高分解能質量分析計「MULTUM-S Ⅱ」を用いた海水中化学トレーサー溶存ガスの多成分同時直接測定法の確立	中山　典子

目次

学際連携研究報告書

【特定共同研究】

１．親潮・黒潮移行域における海洋プランクトン相の広域的な分布・動態の実態解明とモデル化

２．海洋中規模渦の相互作用に関する研究

３．放射コードの海面・地表面過程の改良についての研究

【一般共同研究】

１．イトヨにおける環境応答ホルモンの機能解析

２．ニギスをモデルとした小型底魚類の生活史の解明に向けた生態学的研究

３．北海道噴火湾および沿岸親潮域での無機－有機ヨウ素の時系列観測

４．シンカイヒバリガイ類の集団構造と分散に関する研究

５．種間相互作用の酸性化応答解明を目標とした新規実験技術の開発―海草藻場群集を例として

６．先端科学技術に基づく海洋・地球情報の学際的、超学際的展開

７．超高分解能質量分析計「MULTUM-S Ⅱ」を用いた海水中化学トレーサー溶存ガスの多成分同時直接測定法の確立

親潮・黒潮移行域における海洋プランクトン相の広域的な分布・動態の実態解明とモデル化

The study of analysis and modeling of distribution and eco-dynamics of marine plankton community in the Oyashio and Kuroshio-Oyashio Transition waters

田所 和明，水産総合研究センター東北区水産研究所，E-mail: den@affrc.go.jp
岡崎 雄二，水産総合研究センター東北区水産研究所，E-mail: okazakiy@affrc.go.jp
伊藤 幸彦，東京大学大気海洋研究所，E-mail: itohsach@aori.u-tokyo.ac.jp
Kazuaki Tadokoro, Tohoku National Fisheries Research Institute, Fisheries Research Agency
Yuji Okazaki, Tohoku National Fisheries Research Institute, Fisheries Research Agency
Sachihiko Itoh, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

Abstract

The biodiversity of copepod community represented significant geographical changes in the western North Pacific Ocean. The highest biodiversity was appeared in the offshore water of the Tohoku region. However it was low in the central North Pacific. The change of the biodiversity was considered to relate the oceanographic environment. The biodiversity of copepod also represented the Latitudinal changes. The species level analysis also suggested the distribution of the dominant copepod such as *Paracalanus parvus* also related to the advection of the Kuroshio current. Our prototype numerical model including the functions such as life cycle could simulate the geographical change of the zooplankton community.

1．はじめに

海洋の水産資源は局地的な一次生産で決まっているのではなく、個体、回遊、様々な環境のもとで必要な餌を選択し、成長、生残、再生産に至るプロセスが重要である。このように対象生物の生活史を通して水産資源研究を完遂させる上で、海洋物理場の複雑さと生態系の多様性が高いハードルとなっており、これらの問題に取り組む研究の必要性が高まっている。親潮・黒潮移行域は、我が国の重要な水産資源であるイワシ類やサンマ、サバ類の稚仔魚が回遊する水域であり、そこでの生残が資源量変動に大きく関わっていると考えられている(Watanabe et al., 1995)。プランクトンはそれら水産資源にとって重要な餌料生物であり生残にも関係していると推測されていることから、本研究の取り組みは我が国の社会・経済にとって非常に意義が大きい。また生物多様性を扱うことのできる自然選択モデルは、現在国際的にも非常に注目されており、各国で開発が進んでいるが、我が国では未だ少数にとどまっている。また現場データと比較する応用的研究は世界的にもまだ少ない。

2．問題設定・方法

フィールドおよび実験データの解析から、親潮・黒潮移行域の動物プランクトンを中心としたプランクトン相の分布や生態特性を明らかにし、これらの知見をもとに環境に応じたプランクトン相の自然選択性および生活史をモデル化する。そのために東北区水産研究所で収集・管理している動物プランクトンデータの解析および動物プランクトン試料の分析を行う。分析は検鏡および卓上型ビデオプランクトンレコーダーを用いる。これらを環境データと併せて解析することで分布、成長および死亡に関わる特性をより詳細に明らかにし、環境との関係について種毎の特性を調べる。さらに過去に行われた研究を調査することによって、親潮・黒潮移行域に隣接する水域におけるプランクトンの分布について整理し、環境要因との関係について種毎の特性について必要な知見を取得する。

さらに、プランクトン相の自然選択性と生活史のモデルを開発するために、メタ特性としてサイズと食性特異性を考慮することにより、黒潮親潮移行域のカイアシ類分布を再現する１次元モデルの開発を行う。

3．結果と考察

親潮・黒潮移行域の動物プランクトンデータ、試料を解析することで動物プランクトンについて種レベルで群集構造の解析を進めた。カイアシ類の出現種数は海域によって大きな差異が見られた。東北沖から中部北太平洋(北緯 30 度～45 度、西経 140 度～東経 165 度）の海域で出現種数は、三陸沖で最も多く 140 種以上が出現したが、東へ行くに従って減少し 経度 180 度以東では 20 種未満となった (図１)。三陸沖の海域は親潮の影響が及ぶだけでなく黒潮系の暖水塊がしばしば出現する。従ってこの水域では複雑な海洋物理環境が形成されることに関連して出現種数が多くなると推測された。一方、海洋環境が比較的安定している西経 160 度以東でも、北緯 40 度以南では比較的出現種数が多く、以北では少なくなる傾向が見られた。北緯 40 度付近には亜寒帯境界が存在することから、物理的な領域の変化に関連して群集構造が変化することが出現種数の差異を引き起こしたと推測された。代表種に着目した季節毎、成長段階毎、解析からは、海域間の輸送と再生産特性が分布に影響する主要因であることが示唆された。低水温の亜寒帯域外洋で出現頻度の高かった *Neocalanus* 属など大型のカイアシ類では異なる成長段階の個体が同じ海域で採集される傾向が強かった事から、同じ海域内での再生産が重要であることが示唆された。

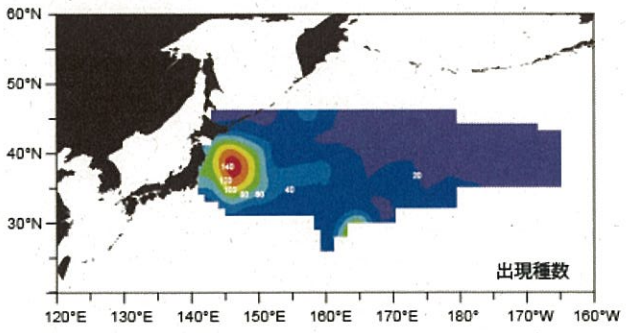

図１ カイアシ類の出現種数。採集はノルパックネット(目合い 0.330-0.335mm)による鉛直曳き(0-150m)にて行った。期間は 1960 年～2010 年で経年・季節変動の影響は考慮していない。

一方、沿岸域で出現頻度の高い *Parcalanus parvus* や *Pseudocalanus newmani* などの個体数は沿岸で極大を示す一方で、沖合に行くに従って減少した。このことは、これらの種は沿岸に主に分布するが、黒潮等の海流を利用して沖合域に分布を広げていることが示唆された。

動物プランクトンのサイズをメタ特性として、動物プランクトンの出現様式の再現をターゲットとした自然選択モデルの構築を開始した。植食性の動物プランクトンに対しては、餌要求水準や代謝過程、寿命をサイズ依存の関数で与えることで、亜熱帯／亜寒帯、沿岸／沖合のコントラストを再現可能であることがテストモデルにより示唆された。しかし、無機栄養塩類の要求が共通する植物プランクトンと異なり、動物プランクトンはカイアシ類内であっても食性の異なる多様な種が存在する。このような食性の多様性を評価するため、従来のモデルにもある栄養段階区分型のモデリングをベンチーマークとし、食性特異性への投資を考える資源配分モデルの構築を開始し、パラメータ依存性を検討している。

4．まとめと今後の展望

これまでの研究で、三陸沖のカイアシ類の生物多様性は水域によって大きく異なる事が明らかとなった。即ち東北沖から中部北太平洋では非常に生物多様性が高い一方で、東へ行くに従って低くなるといった東西での勾配が見られた。また生物多様性は南で高く北で低いと言った南北勾配も見られた。また、主要種に着目した解析においても水平分布が海流などの海洋環境と密接に関係していることが示唆された。さらに自然選択のテストモデルによって、植食性の動物プランクトンに対しては、餌要求水準や代謝過程、寿命をサイズ依存の関数で与えることで、亜熱帯／亜寒帯、沿岸／沖合のコントラストを再現可能であることが示唆された。

今後は、海洋プランクトン相の広域的な分布・動態の実態解明としてはPCA、GLM、GAM等の統計的な手法を用いることで解析を続け、さらに自然選択モデルの開発としては、東大大気海洋研究所で開発した太平洋渦解像３次元海洋循環＋低次生産（NPZD）モデルの出力を用いて、海域を固定した１次元モデル結果が物理的な移流・混合によりどう変質するか、また出現種数等の分析結果とどのように整合するか調べモデルコードとしての確立を検討する。

参考文献

(1) Wantanabe, Y., H. Zenitani and R. Kimura (1995) Population decline of the Japanese sardine *Sardinops melanostictus* owing to recruitment failures. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 52: 1609-1616.

海洋中規模渦の相互作用に関する研究

Global distribution of mergers and splits of oceanic mesoscale eddies

上野　洋路，北大・水産，E-mail: ueno(at)fish.hokudai.ac.jp
石山　宙夢，北大院・環境，E-mail: ishiyamazzz(at)ees.hokudai.ac.jp
伊藤　幸彦，東大・大気海洋研，E-mail: itohsach(at)aori.u-tokyo.ac.jp
Hiromichi Ueno, Faculty of Fisheries Science, Hokkaido University
Hiromu Ishiyama, Graduate school of Environmental Science, Hokkaido University
Sachihiko Itoh, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

Abstract

We investigated the mesoscale eddies in detail from the view point of eddy-eddy interaction. This is because eddy-eddy interactions are scarcely observed in the ocean and are still open question. In particular in this study, we investigated global distribution of mergers and splits of mesoscale eddy through analysis of 20-year time series of satellite altimeter data distributed by AVISO. Neighbor enclosed area tracking algorithm, which is able to detect merger and splits of mesoscale eddies, was applied to track each eddy identified using Okubo-Weiss parameter. The frequency of mergers and splits of mesoscale eddies varied from area to area: both mergers and splits frequently occurred in the areas of western boundary currents and their extensions, subtropical counter currents, and Antarctic Circumpolar Current regions. In addition, we investigated that eddy trapping process affect Chlorophyll a distribution in the North Pacific.

１．はじめに

海洋中規模渦は，熱や物質等を輸送し，生物生産を誘発したり，局所的な気象に影響を与えたりすることが指摘されている（例えば，McGillicuddy et al., 2007; Sigel et al., 2011; Frenger et al., 2013）。したがって，海洋中規模渦の特性を明らかにすることは，大気海洋相互作用や海洋の生物生産を考える上で重要である。

近年の衛星データを用いた全球渦追跡によって，海洋中規模渦の様々な特性が明らかになっている（例えば，Chelton et al., 2007, 2011）。しかしながら，これらの先行研究に考慮されてこなかった海洋中規模渦の特性として，渦−渦相互作用による合併と，島との衝突などによる分裂が挙げられる（例えば，Cresswell 1982; Yasuda et al., 1992; Richardson and Tychensky 1998）。これらの特性も，海洋のエネルギー輸送や生物生産に影響を与えることが指摘されている（例えば，Yoshimori and Kishi 1993）。先行研究では，水槽実験や数値実験から主にアプローチされてきたが，現場観測例が少なく，海洋において不明な点が未だ多く残されている。

海洋中規模渦が海洋の生態系に与える影響の一つとして、一次生産を誘発することが挙げられる。先行研究では、そのメカニズムとして、渦アップリフト過程や渦エクマンポンプ過程など、いくつかの指摘がなされている（Sigel et al., 2011）。しかしながら、どの海域にどのメカニズムが効いているかといった情報は十分ではない。

そこで，本研究では海洋中規模渦の合併・分裂を考慮した全球渦追跡を行い，これらが起きやすい海域を明らかにすることを目的として研究を行った。さらに，海洋の生態系に対する合併・分裂の影響を調べる前段階として，先行研究をもとに北太平洋における海洋中規模渦の海面クロロフィル a 分布への影響およびメカニズムに関して検討した。

２．問題設定・方法

1993〜2012 年の AVISO 海面高度偏差を用いて Okubo-Weiss パラメータを計算し，海洋中規模渦を識別した。北太平洋において，面積 ＞ 5000cm^2，寿命 ＞ 4 週間の海洋中規模渦と対象に，隣接閉領域追跡アルゴリズム(Inatsu 2009)を用いて，海洋中規模渦の合併・分裂を考慮した追跡を行った。また，北太平洋における海洋中規模渦の海面クロロフィル a 分布への影響およびメカニズムに関して議論するために，渦追跡データ（Chelton et al., 2011: http://cioss.coas.oregonstate.edu/eddies/）および MODIS-Aqua の月平均クロロフィル a データを用いて解析を行った。

３．結果と考察

海洋中規模渦の合併・分裂を考慮した全球追跡の結果，高気圧性渦と低気圧性渦ともに合併・分裂の頻度が高い海域が，黒潮・黒潮続流，湾流，亜熱帯反流，赤道付近，ブラジル海流，南極周極流に見られた（図１：合併の図のみ掲載）。合併回数の合計は，高気圧性渦と低気圧性渦それぞれ 59,175 と 58,007 であり，分裂回数の合計はそれぞれ 61,154, 60,391 であった。

先行研究では，合併が起こるとき，渦同士が互いの半径の約 3 倍以内に近づくことが指摘されている。また，合併が起きると渦は合併前よりも大きくなることも指摘されている（例えば，Griffiths and Hopfinger 1987; Yasuda and Flierl 1995, 1997）。したがって，スケールの大きい渦が存在する海域では合併が多く起きると考えられ，本研究においても，渦の半径と合併回数とに相関がみられた。

本研究では，合併と分裂の分布が概ね一致する結果が得られた。その要因の一つとして，本研究で使用したアルゴリズムが，部分的な合併(partial merger)を合併に続く分裂として捉えたことが考えられる。

北太平洋において、渦追跡データ（Chelton et al., 2011）と海面クロロフィル a データとを合わせて解析したところ、渦内部でクロロフィル a 濃度が高い海域は、主に渦トラップ過程で説明できることが示唆された。渦トラップ過程とは、例えば沿岸域で海流が蛇行して渦が形成され、渦内部に沿岸水がトラップされた場合、渦内部の Chlorophyll a 濃度が高くなることである。本研究では、渦の内部と外部の Chlorophyll a 濃度の比率が特徴的だった海域として（図２）、北太平洋を６つの海域に分けて解析を行い（アラスカ湾沿岸、カムチャッカ半島沖、カリフォルニア海流域、日本沿岸域、黒潮続流の南側、北側）、全ての海域で渦トラップ課程との整合性が示唆された。

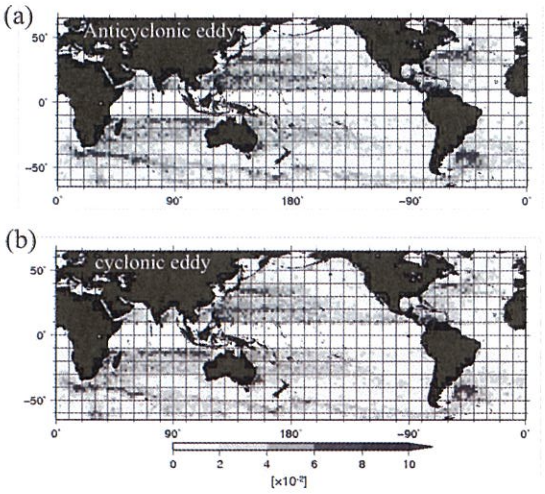

図１　2°×2°毎での合併頻度(合併の回数／渦の存在数)。(a)高気圧性渦、(b)低気圧性渦。

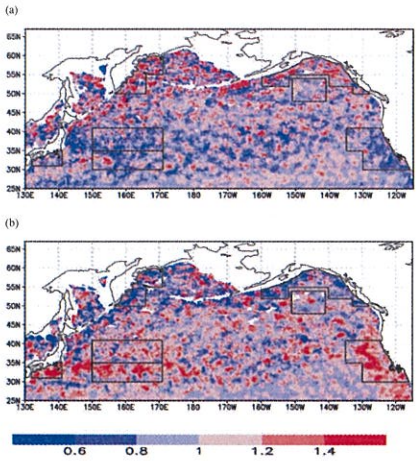

図２　(a)高気圧性渦の内部のクロロフィルａ濃度を渦の外部のクロロフィルａ濃度で割ったもの。(b)低気圧性渦内部のクロロフィルａ濃度を渦外部のクロロフィルａ濃度で割ったもの。黒枠は、渦の符号によって比率の値が異なる特徴的な海域。

４．まとめと今後の展望

本研究では、海洋中規模渦の合併・分裂を考慮した全球追跡を行い、それらが起きやすい海域を初めて明らかにし、その要因についても議論した。合併・分裂は、強い海流が存在する海流で起きやすいことを明らかにした。また、その要因として渦の半径が一つの要因であることを示唆した。

また、合併・分裂が生態系に与える影響について議論するための前段階として、北太平洋における Chlorophyll a 分布に対する海洋中規模渦の影響について先行研究をもとに検討した。渦内外の Chlorophyll a 濃度の比率が特徴的だった海域ごとに比較した結果、先行研究で指摘されているメカニズムのうち、渦トラップ過程がどの海域にも共通するメカニズムであることを示唆した。

海洋中規模渦が海洋の Chlorophyll a 分布に与える影響について、先行研究で指摘されている観測に基づいた様々なメカニズムの中に、渦の合併・分裂が考慮されているものはあまりみられない。しかしながら、数値モデルでのシミュレーションでは、渦の合併によってその周囲で一次生産が増加することが指摘されている (Yoshimori and Kishi 1994)。本研究で得られた知見をもとに、海洋中規模渦の合併・分裂と海面 Chlorophyll a 分布や基礎生産量などとの関係を検討することで、渦の合併・分裂が海洋の生物生産に影響を与えるメカニズムに関して新たな知見を得られることが期待される。

参考文献

(1) Chelton, D. B.,M. G. Schlax, R. M. Samelson, and R. A. de Szoeke, 2007: “Global observations of large oceanic eddies”, Geophys. Res. Lett., 34, 15

(2) Chelton, D. B., M. G. Schlax, and R. M. Samelson, 2011: “Global observations of nonlinear mesoscale eddies”, Prog. Oceanogr., 91, 2

(3) Cresswell, G. R., 1982: “The coalescence of two East Australian Current warm-core eddies”, Science, 215, 4529

(4) Frenger, I., N. Gruber, R. Knutti, and M. Münnich, 2013: “Imprint of Southern Ocean eddies on winds, clouds and rainfall”, Nat. Geosci., 6, 8

(5) Griffiths, R. W., and E. J. Hopfinger, 1987: “Coalescing of geostrophic vortices”, J. Fluid. Mech., 178

(6) Inatsu, M., 2009: “The neighbor enclosed area tracking algorithm for extratropical wintertime cyclones”, Atmos. Sci. Lett, 10, 4

(7) McGillicudy D. J., and Coauthors, 2007: “Eddy/wind interactions stimulate extraordinary mid-ocean plankton blooms”, Science, 316, 5827

(8) Richardson, P. L., and A. Tychensky, 1998: “Meddy trajectories in the Canary Basin measured during the SEMAPHORE experiment 1993-1995”, J. Geophys. Res., 103, 25

(9) Sigel, D. A., P. Peterson, D. J. McGillicuddy, S. Maritorena, and N. B. Nelson, 2011: “Bio-optical footprints created by mesoscale eddies in the Sargasso Sea”, Geophys. Res. Lett, 38, 13

(10) Yasuda, I., and G. R. Flierl, 1995: “Two-dimensional asymmetric vortex merger: contour dynamics experiment”, J. Oceanogr., 51, 2

(11) Yasuda, I., and G. R. Flierl, 1997: “Two-dimensional asymmetric vortex merger: merger dynamics and critical merger distance”, Dyn. Atmos. Oceans, 26, 3

(12) Yoshimori, A., and M. J. Kishi, 1994: “Effects of interaction between two warm-core rings on phytoplankton distribution”, Deep. Sea. Res., Part I, 41, 7

放射コードの海面・地表面過程の改良についての研究

A study of improvement of ground and ocean surface processes in radiation codes

関口 美保，海洋大・工，E-mail: miho@kaiyodai.ac.jp
近藤 歩，海洋大・院，E-mail: m123043@kaiyodai.ac.jp
亀高 遼平，海洋大・院，E-mail:m133008@kaiyodai.ac.jp
中島 映至，東大・大気海洋研，E-mail: teruyuki.nakajima@aori.u-tokyo.ac.jp

Miho Sekiguchi, Tokyo University of Marine Science and Technology
Ayumu Kondo, Tokyo University of Marine Science and Technology
Ryohei Kametaka, Tokyo University of Marine Science and Technology
Teruyuki Nakajima, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

Abstract

We introduce a radiative transfer process in ocean into atmospheric radiation models. At ocean surface, part of incident ray from atmosphere is reflected to atmosphere, residual ray is refracted in the ocean. By the Fresnel's law, zenith angle of refracted ray is smaller than incident angle so that we need more streams in ocean than atmosphere to solve a radiative transfer in ocean. We use the bi-direction reflection and transmission functions [Nakajima and Tanaka, 1983]. We also increase the number of ground types, which are dependent on wavelength and improve sea-ice albedo from fixed value to one dependent to snow depth. We need to consider several terrestrial factors affecting albedo, and introduce bi-direction functions as ocean surface.

1．はじめに

地球温暖化問題は長年議論されているが、温暖化によって増加した気候システムのエネルギーは海洋へ大きな影響を与えている。気候変動に関する政府間パネル (International Panel on Climate Change; IPCC)の第５次報告書 (Fifth Assessment Report; AR5)では、気候変動によるエネルギー変化の大部分は海洋が吸収しており、1971 年から 2010 年の期間では 90%以上を占めていることが高い信頼度で確からしいことが明らかになった[IPCC AR5 SPM, 2013]。海洋上層(0 – 700 m)に 60%以上のエネルギーが、水深 700m 以下に約 30%のエネルギーが蓄積されたと推定されている。

また、近年の地球温暖化の『停滞』が話題となっている[e.g., Kosaka and Xie, 2013]。20 世紀後半以降、地球全体の平均地表気温は上昇傾向にあり、2001 年以降の 10 年間の平均気温は 1961～1990 年の平均に比べ約 0.5°C 高くなっていたが、21 世紀に入ってからの気温上昇率は 10 年あたり約 0.03°C とほぼ横ばいになっている。こうした停滞状態は気候の hiatus 状態と呼ばれており、原因は未だ解明されていない。*Watanabe et al.* [2013]では、2000 年以降の hiatus 現象に伴い 700m 以下の深層での熱の取り込みが強まっていることが示された。また、第３期及び第５期結合モデル相互比較計画(CMIP3, CMIP5)に提出された 46 の気候モデルによる予測シミュレーション結果によると、大部分の気候モデルが最近 10 年ほどの hiatus を再現できておらず、海洋の熱吸収効率が観測からの推定値より低くなっていることが示された。一方、大気上端での放射エネルギー収支はモデルと観測で大きな差はなく、気候システム全体では適切に予測されていることが示された。これにより、hiatus 状態の再現の鍵を握っているのは海洋の熱吸収過程であると推測される。

このように、気候変動における海洋の役割は重要であり、気候モデルにおける海洋の熱吸収過程の取り扱いが温暖化の見積もりを大きく左右する可能性がある。地表面（陸面および海面）での熱収支は太陽放射、地球放射、顕熱、潜熱の差し引きで求められる。これらの全球平均の残差は 0.2～1.0W/m^2 と見積もられている[Wild et al, 2013]が、正味の地表面での太陽放射フラックスは 154～166 W/m^2 と見積もられており、残差の範囲を大きく超えている。その他の各項も大気上端における放射収支よりも不確定性の幅が大きい。このことから、地表面の放射収支の精度を向上させることで、気候モデル計算の信頼性を高めることができると考えられる。

地表面に到達するまでの放射フラックスの精度も重要であるが、太陽放射は海ではある程度の深さまで到達するため、海洋中の放射伝達についても考慮する必要がある。モデル化にあたってはパラメタリゼーションが一般的に用いられており、Rosati and Miyakoda [1998]のパラメタリゼーションは東京大学大気海洋研究所・国立環境研究所・海洋研究開発機構が共同で開発している大気海洋結合モデル(AORI/NIES/FRCGC CGCM)や米国大気研究所(National Center of Atmospheric Research; NCAR)で開発された海洋モデル Modular Ocean Model(MOM4)などで用いられている。一方、衛星解析用放射モデルでは、海洋中放射伝達の陽的な解法を実現するべく開発が進められている [e.g., Ota et al., 2010]。衛星センサの波長分解能の向上、および偏光センサなどの新型のセンサに対応する必要性があるためである。

本研究では、地上観測及び衛星観測との比較などを用いて地表面に到達する大気放射の精度を向上させ、衛星解析に用いられている放射伝達モデルを拡張し、海洋中の放射伝達を陽に解くことで、大気海洋間の熱エネルギー交換の見積もりの不確定性を減少させ、大気と海洋が密接に関係する現象の予測精度を向上させることを目的とする。

2．問題設定・方法

本研究は、応募者が開発を担当している広帯域放射伝達モデル *mstrnX* をベースにして行う。放射伝達過程に用いられている Discrete-Ordinate 法[Nakajima and Tanaka, 1986, 1988]を海洋層へ拡張を行った。この手法は大気及び海洋中での放射束を離散化して、放射伝達方程式をの行列で解く解法であるが、スネルの法則のため海洋中での放射束の方が多くなり、長方行列となるので注意が必要である[Nakajima and Takana 1983]。また、この手法は衛星解析用放射伝達モデル *Pstar* に用いら

れているが、波長領域を衛星のセンサ幅から太陽放射領域全体を 14 バンドに分割した *mstrnX* 向けに拡張し、なおかつ高速化する必要がある。また、地表面反射率についてもデータを更新し、これまで 7 種類の分類だったものを 18 種類に拡張した。

3．結果と考察

海洋層への拡張については、まず、海洋層と大気層の境界について、以下の双方向反射関数と透過関数を導入した。

$$R_w(\mu,\mu';\varphi-\varphi')=\frac{1}{4\mu\mu_n}G(v,v')p(\mu_n)r(\cos\omega,\tilde{m}) \quad (1)$$

$$T_w(\mu,\mu';\phi-\phi')=\frac{\tilde{m}^2\cos^2\omega_t}{\mu\mu_n(\cos\omega-\tilde{m}\cos\omega_t)^2}G(v,v')p(\mu_n)t(\cos\omega,\tilde{m}) \times H((\tilde{m}-1)(\tilde{m}\mu-\mu'))H(\partial-1/m) \quad (2)$$

次に、海洋中ではクロロフィルが海洋中の光学特性を支配的に決定するため、純水とクロロフィルの光学特性テーブルを作成した。本来ならば純水ではなく海水であるべきだが、屈折率で比較すると純水が 1.333 のところ海水が 1.343 程度の違いであり、波長依存性も不明であるため、純水のデータを用いている。この純水の複素屈折率は、気体吸収データベース HITRAN2012[Rothman et al., 2013]に含まれている複素屈折率のデータ[Hale and Querry 1973; Kou et al., 1993; Smith and Barker 1981; Pope and Fry 1997]を用いた。また、位相関数については *mstrnX* で考慮する波長に対し水分子は非常に小さいため、レイリー散乱の式を用いた。クロロフィルの複素屈折率は Bricaud et al.[1995]と Morel and Maritorena [2001]を用い、位相関数は Henyey-Greenshtein の位相関数の式を用いた。

これによって得られた海中から射出される放射輝度を *Pstar3* の結果と比較したところ、結果の差は 1%以下となり、整合性が取れていると考えられる。

さらに、陸上における様々な地表面状態について、放射過程では主に地表面反射率が関係している。これについて現在の 7 種類（海、裸地、乾燥地、低草地、森林、雪、氷）を 18 種類[Baldridge et al., 2009]に増加させた。また、海氷に関しては、4 種類の反射率（冷たい雪、溶けている雪、裸氷、溶けている氷）を導入した。これは近年開発された新海氷アルベドパラメタリゼーション [Pedersen et al., 2009; Holland et al., 2012] に準じたものであり、いくつかの海氷モデルで採用され、温暖化実験の結果の改善に寄与している。今回は ECHAM5 で用いられている Pedersen et al. [2009]の方式を導入した。本方式では、裸氷の場合、氷の厚さの対数に比例するようになっている。また、可視域と近赤外域で比例式が異なり、近赤外域では直達光と散乱光でも比例式が異なっている。雪に覆われた海氷については、Roesch et al.[2001]の式に従い、地表面気温によって線形内挿する形となっている。

4．まとめと今後の展望

今回の開発に寄って *mstrnX* の地表面過程は大きく改良を遂げた。本変更に寄って気候モデルの結果がどのように変化したか、数値実験を行い結果を比較する予定である。今後の課題として、地表面の反射率は波長に依存するデータを用いたが、地表面水分量や粗度等に依存するようなスキームの導入も検討する。また、今回海氷の反射率については ECHAM4 の方式を採用したが、CCSM4 の方式も導入し比較を行う予定である。

参考文献

Baldridge A.M., S.J. Hook, C.I.Grove, G. Rivera (2009). The ASTER spectral library version 2.0, *Rem. Sens. Env.,* 113, 711-715.

Bricaud, A., Babin, M., Morel, A., and Claustre, H. (1995). Variability in the chlorophyll - specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization. *J. Geophys. Res. Oceans*, 100(C7), 13321-13332.

Hale, G. M., and Querry, M. R. (1973). Optical constants of water in the 200-nm to 200-μm wavelength region. *Appl. Opt.*, 12(3), 555-563.

Holland, M., D. Bailey, B. Briegleb, B. Light, and E. Hunke, 2012: Improved sea ice shortwave radiation physics in CCSM4: The impact of melt ponds and aerosols on arctic aea ice. *J. Clim.*, **25**, 1413-1430.

IPCC (2013), Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, 996pp.

Kosaka, Y., and Xie, S. P. (2013). Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling. *Nature*, 501(7467), 403-407.

Kou, L., Labrie, D., and Chylek, P. (1993). Refractive indices of water and ice in the 0.65-to 2.5-μm spectral range. *Appl. Opt.*, 32(19), 3531-3540.

Morel, A., and Maritorena, S. (2001). Bio - optical properties of oceanic waters: A reappraisal. *J. Geophys. Res. Oceans*, 106(C4), 7163-7180.

Nakajima, T. and Tanaka, M. (1988). Algorithms for radiative intensity calculations in moderately thick atmospheres using a truncation approximation. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 40(1), 51-69.

Nakajima, T. and Tanaka, M. (1983). Effect of wind-generated waves on the transfer of solar radiation in the atmosphere-ocean system. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 29(6), 521-537.

Nakajima, T. and Tanaka, M. (1986). Matrix formulations for the transfer of solar radiation in a plane-parallel scattering atmosphere. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 35(1), 13-21.

Ota, Y., Higurashi, A., Nakajima, T., and Yokota, T. (2010). Matrix formulations of radiative transfer including the polarization effect in a coupled atmosphere–ocean system. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 111(6), 878-894.

Pedersen, C. A., E. Roeckner, M. Lu¨thje, and J.-G. Winther (2009), A new sea ice albedo scheme including melt ponds for ECHAM5 general circulation model, *J. Geophys. Res.*, 114, D08101, doi:10.1029/2008JD010440.

Pope, R. M., and Fry, E. S. (1997). Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements. Applied optics, 36(33), 8710-8723.

Roesch, A., M. Wild, H. Gilgen, and A. Ohmura (2001), A new snow cover fraction parameterisation for the ECHAM4 GCM, *Clim. Dyn.*, 17, 933–946.

Rosati, A., and Miyakoda, K. (1988). A general circulation model for upper ocean simulation. *J. Phys. Ocean.*, 18(11), 1601-1626.

Rothman L.S., I.E. Gordon, … and G. Wagner (2013), The HITRAN2012 molecular spectroscopic database, *J. Quant. Spec. Radiat. Trans.,* 130, 4–50.

Smith, R. C., and Baker, K. S. (1981). Optical properties of the clearest natural waters (200–800 nm). *Appl. Opt.*, 20(2), 177-184.

Watanabe, M., Kamae, Y., Yoshimori, M., Oka, A., Sato, M., Ishii, M., ... and Kimoto, M. (2013). Strengthening of ocean heat uptake efficiency associated with the recent climate hiatus. *Geophys. Res. Lett.*, 40(12), 3175-3179.

Wild, M., Folini, D., Schär, C., Loeb, N., Dutton, E. G., and König-Langlo, G. (2013). The global energy balance from a surface perspective. *Clim. Dyn.* 40(11-12), 3107-3134.

イトヨにおける環境応答ホルモンの機能解析

A functional study on stickleback hormones

北野　潤, 遺伝研・生態遺伝,　E-mail: jkitano(at)nig.ac.jp
石川麻乃, 遺伝研・生態遺伝,　E-mail: asishika(at)nig.ac.jp
日下部誠,　東大・大気海洋研,　E-mail: kusakabe(at)aori.u-tokyo.ac.jp
Jun Kitano, Ecological Genetics Lab, National Institute of Genetics
Asano Ishikawa, Ecological Genetics Lab, National Institute of Genetics
Makoto Kusakabe, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

Abstract (Times New Roman 10pt)

Fishes exhibit great diversity in migration patterns. For example, there are migratory and resident ecotypes within the threespine stickleback species (*Gasterosteus aculeatus*). It has been known that divergence in hormone signals may underlie such differences in migratory behavior and physiology, but little is known about the genetic basis for the variation in migratory behaviors. Here, we utilized knockout sticklebacks that lack hormone genes possibly involved in traits related to seasonal migration. We have sampled many tissues and plasma samples from both a hormone knockout fish and control fish. Our preliminary analysis revealed that the hormone knockout fish showed smaller testis, suggesting that that that hormone may be involved in reproduction.

1．はじめに (節の表題：MS ゴシック 9pt)

魚類は海洋と河川を遡河回遊するものから河川に残留するものまで、実に多様な回遊生活史を示す。回遊型は回遊の過程で様々な環境に出会うが、この際の回遊形質の変化や環境適応において多数のホルモンや神経ペプチドが関与することが明らかになっている。一方、残留型は比較的一定の環境に生息するが、残留型におけるホルモン応答の喪失やその機能的意義については不明である。トゲウオ科魚類（イトヨやトミヨなど）は、遡河回遊型や河川残留型など種内変異が多く存在すること (eg. Kitano *et al.* 2007; Kitano *et al.* 2012)、ゲノム配列が解読され遺伝解析方法が確立されていること（eg. Kitano *et al.* 2009; Kitano *et al.* 2010; Kitano *et al.* 2011）から、回遊多型間のホルモン進化遺伝機構を解明するのに最適のモデル系である。申請者はこれまでに、回遊するイトヨ集団では、塩分変動や日長変化に応じて変化を示すホルモンや神経ペプチドの応答が、淡水に残留するイトヨ集団で失われている例を同定してきた（Kitano *et al.* 2010; Ishikawa *et al.* 未発表)。

2．問題設定・方法

これらの遺伝子を TALEN や CRISPR を利用して破壊し、その生理機能を明らかにする。具体的には、北野・石川（国立遺伝研）が遺伝子操作イトヨを作出し、その生理的表現型を日下部（海洋研•生理部門）と共同解析するという学際研究を行った。申請者らの研究によって、回遊イトヨにおいて日長変化に応じて甲状腺刺激ホルモンβ鎖（TSHβ）の発現量が、残留イトヨではこの応答が見られないことが明らかになっていた。そこで平成 26 年度は、これらの遺伝子を破壊し、生殖の開始に異常が見られるかどうか解析した。また、申請者らの研究によって、塩分変化によって発現量の変化することが明らかになっていたリラキシンについて、回遊型と淡水型での違いを解析した。

3．結果と考察

甲状腺刺激ホルモンの遺伝子を操作したイトヨにおいて精巣の萎縮が観察された。この結果は、TSH が生殖に関与することを示唆するが、さらなる詳細な遺伝、生理解析を必要とする。特に完全なノックアウトよりも微細な遺伝子操作を行うことが必要であろう。また、回遊型と淡水型の間で、リラキシンとその受容体の遺伝子発現量の違いを明らかにし、その成果は論文として発表した（Kusakabe et al. 2014)。

4．まとめと今後の展望

採取した血漿についてホルモン濃度の定量、種々の組織について RNA シークエンスを実施し TSHb のノックアウトイトヨにおける異常をさらに解析する。また、上流配列のみを破壊するなど詳細な遺伝子操作を進める。リラキシンの作用について、さらに生理学と遺伝学の双方から解明していく。

参考文献

(1) Kitano, J., S. Mori, and C. L. Peichel (2007). Phenotypic divergence and reproductive isolation between sympatric forms of Japanese threespine stickleback. Biological Journal of the Linnean Society 91: 671-685.

(2) Kitano, J., Ishikawa, A., Kume, M., and Mori, S. (2012) Physiological and genetic basis for variation in migratory behavior in the three-spined stickleback, *Gasterosteus aculeatus*. Ichthyological Research 59: 293-303

(3) Kitano, J., J.A. Ross, S. Mori, M. Kume, F.C. Jones, Y.F. Chan, D.M. Absher, J. Grimwood, J. Schmutz, R.M. Myers, D.M. Kingsley, and C.L. Peichel (2009). A role for a neo-sex chromosome in stickleback speciation. Nature (Article) 461: 1079-1083

(4) Kitano, J., S.C. Lema, J.A. Luckenbach, S. Mori, Y. Kawagishi, M. Kusakabe, P. Swanson, and C.L. Peichel (2010). Adaptive divergence in the thyroid hormone signaling pathway in the stickleback radiation. Current Biology 20: 2124-2130.

(5) Kitano, J., Y. Kawagishi, S. Mori, C. L. Peichel, T. Makino, M. Kawata, and M. Kusakabe (2011) Divergence in sex steroid hormone signaling between sympatric species of Japanese threespine stickleback. PLoS ONE 6(12): e29253

(6) Kusakabe, M., Ishikawa, A., and Kitano, J. (2014) Relaxin-related gene expression differs between anadromous and stream-resident stickleback (*Gasterosteus aculeatus*) following seawater transfer. *General and Comparative Endocrinology* 205: 197-20

ニギスをモデルとした小型底魚類の生活史の解明に向けた生態学的研究

Ecological study for the elucidation of the life cycle of the small bottom fish which assumed *Glossanodon semifasciatus* a model

柳本　卓, 水研セ中央水研, E-mail: yanagimo@affrc.go.jp
梨田一也, 水研セ中央水研, E-mail: knashi@affrc.go.jp
岩田恵理, いわき明星大学, E-mail: asealion@iwakimu.ac.jp
猿渡敏郎, 東大・大気海洋研, E-mail: tsaruwat@aori.u-tokyo.ac.jp
Takashi Yanagimoto, National Research Institute of Fisheries Science, Yokohama, FRA
Kazuya Nashida, National Research Institute of Fisheries Science, Yokohama, FRA
Eri Iwata, Iwaki Meisei University
Toshiro Saruwatari, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

Abstract

The genetic population structures of *Glossandon semifasciatus* and *Argentina kagoshimae* around Japan were investigated using nucleotide sequences of the mitochondrial control region. No genetic variations on both species among sampling sites were observed. Therefore, it was considered that each species form one pandemic population around Japan. For elucidating the reproductive cycle of *G. semifascianths*, in Suruga Bay, histological observation of gonads and two reproductive steroids (E2 and 11-KT) were monitored from April to December. There were no clear differences in the steroid levels between the sexes. E2 density was the highest in May and 11-KT density was the highest in October. There was negative relationship between 11-KT density and development of testis. There was no peak month of GSI of male and female. Several histological developmental stages of ovarian and testis were observed during 9 month. From these results, it was considered that *G. semifasciatus* is spawning throughout the year.

1．はじめに

ニギス（*Glossanodon semifasciatus*、 Argentinidae、Teleostei）は日本周辺における水深 100-300m に分布する小型底魚で、年間 4000-5000 トン漁獲されている。沖ギスなどと呼ばれ、干物や練り製品などに利用される重要魚種である。現在、沖合底曳き網漁船や小型底曳き網漁船などで漁獲されているが、資源生物学的な情報は少ない。ニギスの資源量の大きさから、プランクトンの捕食者として、また大型底魚類の餌生物として、生態学的に重要な魚種でもある。そのため、資源生物学的、群集生態学的、かつ保全生態学的な知見に基づきニギス資源を管理する必要がある。本研究では、ニギスの集団構造や繁殖生理を明らかにし、駿河湾におけるニギスの底魚群集における位置を明らかにして、資源管理に有益な情報を提供することを目的とする。また、小型底魚類の生態学的な研究のモデルケースになることを目的とする。

全国からニギス類を収集し、集団解析を行う。駿河湾におけるニギスの繁殖生態と分布生態を調べるため、駿河湾で操業するトロール漁船、日之出丸に月に一度乗船して漁獲されたニギスや底魚類を網羅的に採集し、魚類相目録、月別、深度別分布様式の解析、証拠標本コレクションの構築、DNA 分析用組織片コレクションの構築と解析を通して、底魚群集の多様性維持機構の解明を行う。

2．問題設定・方法

(1) ニギス類の集団解析

秋田県沖、新潟県沖、土佐湾、駿河湾で漁獲されたニギスを用いた。また、延岡沖、駿河湾で漁獲されたカゴシマニギスを用いた。ニギス類の筋肉組織を約 10mg 摘出し、粗 DNA を抽出した。D-Loop 領域を含む領域を PCR 法で増幅し、サンガー法で塩基配列を決定した。得られた塩基配列からハプロタイプを求め、海域ごとのハプロタイプ頻度を元に集団解析を行った。

(2) ニギスの繁殖生態の解明

駿河湾に生息するニギスの繁殖生態を明らかにするために、夏季の禁漁期を除く 2014 年 4 月から 12 月に漁獲されたニギスの雄 22 個体、雌 31 個体から船上で採血を行った。採血個体を冷蔵して研究室に持ち帰った（Fig1）。研究室にて、血液から血漿を回収し、酵素抗体法により血中エストラジオール（E2）および 11-ケトテストステロン（11-KT）濃度を測定した。採血個体の体長・体重・生殖腺重量・肝臓重量を測定した。生殖腺重量を体重で割ることにより生殖腺重量指数（GSI）を、肝臓重量を体重で割ることにより肝臓重量指数（HSI）を算出した。生殖腺をブアン固定し、パラフィン包埋し、4μm の連続切片を作成した。デラフィールドのヘマトキシリン－エオシン染色を行った。得られた組織切片を光学顕微鏡で検鏡して細胞の発達過程を観察した。得られた組織像を成熟度ごとに分類して、他のパラメーターとの比較を行った。

Fig. 1 Picture of *Glossanodon semifasciatus* collected in the Suruga Bay.

3．結果と考察

(1) ニギス類の集団構造

ニギス113個体についてmtDNA D-Loop領域の約979塩基を、カゴシマニギス67個体についてmtDNA D-Loop領域の約949塩基を決定した。ニギスとカゴシマニギスのハプロタイプ多様度は0.903と0.771で、カゴシマニギスの多様性が小さかった。集団特有の塩基置換はなかった。ニギスのペアワイズ F_{ST} 分析の結果、集団間の F_{ST} 値は-0.01607～0.13321 (P=0.041～0.911) であり、集団間に遺伝的な異質性はなかった。AMOVA分析を行ったところ、集団間の変異の割合小さく、一つの大きな集団であると考えられた。ニギスの集団間のNJ系統樹では、物理的な距離に関係なくクラスターを形成していた。ニギス集団間の遺伝的な距離は小さいが、駿河湾が僅かに他の集団から離れることが分かった。カゴシマニギスについてAMOVA分析を行ったところ、集団間の変異の割合が小さく、一つの大きな集団であると考えられた(Fig.2)。

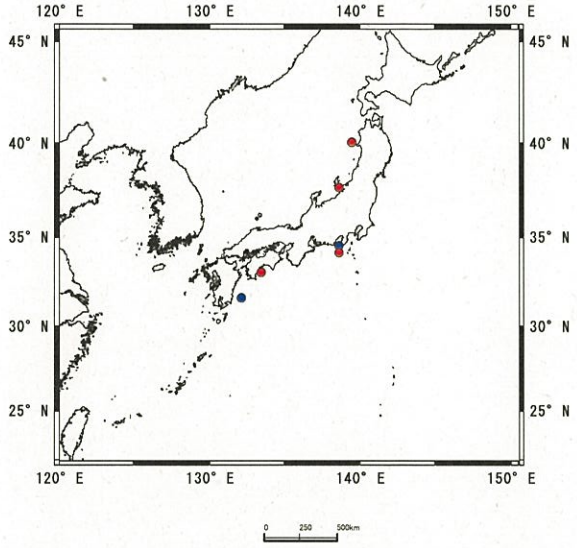

Fig 2. Sampling sites of *G. semifasciatus* and *Argentina kagoshimae*. Red and blue circles indicates sampling sites of *G. semifasciatus* and *A. kagoshimae*、 respectively

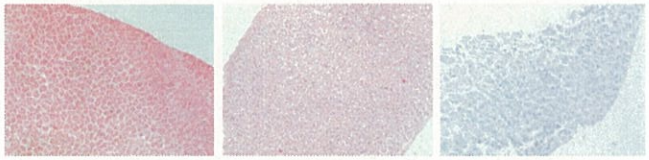

Fig. 3. Histological sections of testis of *G. semifasciatus*.

(2) ニギスの繁殖生態

血中E2および11-KT濃度に性差は認められず、雌雄ともに血中E2は10月に、血中11-KTは5月に、他の月と比較して高値を示す傾向が認められた。雄の血中11-KT濃度と生殖腺の成熟度との間に負の相関が認められた。雌雄ともにGSIには大きなばらつきが認められ、個体の体長・体重・HSIに関わらず様々な成熟度を示す生殖腺の組織像が得られた(Fig.3,4)。また、この現象は、調査期間を通して認められたため、ニギスの産卵期は従来言われていたほど明瞭な季節性を示さず、長期にわたる可能性が示された。

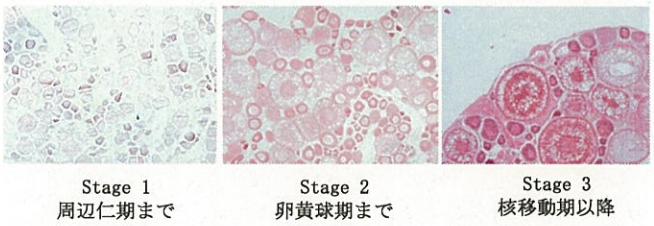

Fig. 4 Histological sections of ovary of *G. semifasciatus*.

4．まとめと今後の展望

1）本研究結果から、日本周辺に分布するニギス類の集団間に遺伝的な差はなく、一つの大きな集団を形成している可能性が考えられた。

2）ニギスは東シナ海にも分布しており、浮遊期の卵稚魚が対馬暖流によって日本海側へ、黒潮によって太平洋側へと輸送されることが考えられた。

3）今後、本研究で用いなかった東シナ海などの海域から標本を収集し、同様に解析を行う予定である。また、同所的に複数のニギス類が分布している海域があるが、外部形態からの種判別が難しい場合があり、今後、種判別法を確立する必要がある。

4）以上の結果を踏まえ、ニギスは日本周辺海域において大きな集団を形成している可能性があることを念頭に、資源管理をしていく必要がある。

5)駿河湾におけるニギスの血中E2と11-KT濃度は10月と5月に高かった。11-KTと精巣の発達には負の相関があった。しかしGSIや組織学的な観察結果には季節的に差はなく、主産卵時期はなく、1年中産卵を行っていると考えられた。

参考文献

(1) 梨田一也、2014：平成24年度ニギス太平洋系群の資源評価、我が国沿岸資源評価、水産庁、東京、818-832.

(2) Nashida、 K.、 H.、 Sakaji、 and H.、 Honda、2007: Spawning seasons of adult and growth of 0-year-old deepsea smelt Glossanodon semifasciatus in Tosa Bay、 Pacific coast of Shikoku. Bull. Jpn. Soc. Oceanogr、 71、 270-278.

(3) 梨田一也、2010：土佐湾におけるニギス幼魚の耳石日周輪．黒潮の資源海洋研究、11、89-94.

(4) 原田和弘、海野徹也、大谷徹也、2007:日本海西部で漁獲されたニギスの体成分の季節変動.日水誌、73、891-896.

北海道噴火湾および沿岸親潮域での無機 - 有機ヨウ素の時系列観測

Time-series observation of organic and inorganic iodine compounds in coastal water of the Funka Bay, Hokkaido.

大木 淳之，北大院・水産，E-mail: ooki(at)fish.hokudai.ac.jp
小畑 元，東大・大気海洋研，E-mail: obata(at)aori.u-tokyo.ac.jp
清水 悠作，北大院・水産，E-mail: shimizumansaku(at)ec.hokudai.ac.jp

Atsushi Ooki, and Yusaku Shimizu, Faculty of Fisheries Sciences, Hokkaido University
Hajime Obata, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

Abstract

Most of iodine species are dissolved in seawater as inorganic iodine (IO_3^- and I^-). Marine plants take dissolved inorganic iodine species as a trace nutrient, and synthesize organic iodine compounds. The production of volatile organic iodine compounds (VOIs) by marine biota drive iodine cycles in the surface layer of the earth. Recent studies implied that the total flux of very short-lived VOIs, such as diiodomethane (CH_2I_2) and chloroiodomethane (CH_2ClI) has the dominant iodine flux to the atmosphere. In the Funka-Bay, an inner bay of Hokkaido, Japan, we conducted shipboard observations every two months from 2012 to 2014. The CH_2I_2 concentrations were sharply increased from April to June after algal bloom every year, and the I^- concentration increased from June to August. We speculated that the iodine speciation was dramatically changed in the early phase of organic matter decompositions on the bottom sediment.

1．はじめに

地球表層で動的なヨウ素の大部分は海水中に存在し、海洋植物が無機ヨウ素を摂取することにより海洋生態系に取り込まれる。そして、海洋植物由来の有機ヨウ素ガスが大気へ揮散することで、大気や陸域にもヨウ素が供給される。我々の事前調査(2012 年実施)により、北海道噴火湾では有機物の分解が進行する 5 月以降に、有機ヨウ素ガスの一種であるジヨードメタンの濃度が 4 千倍にも増える現象を捉えた。このような有機ヨウ素の劇的な変化の前兆として、無機ヨウ素の動態も大きく変化していたことが推測される。この事象を解明することが沿岸域におけるヨウ素循環の理解につながると考えた。海洋のヨウ素動態を扱った従来研究では、ある限られた時期に行われたスナップショット的な観測がほとんどであった。また、時系列的に同じ場所で観測したとしても、海水は海流により常に移動してしまうので、ある海水の質の変化を数カ月間追うのは困難であった。いっぽう、半閉鎖的な噴火湾には年 2 回外洋水が流入して水塊が入れ替わることが知られており、湾内に海水が停滞する数カ月間(3～8 月、10～2 月)は時系列で同一水塊を追うことができる(大木ら，2013)。噴火湾は半閉鎖的といっても、生物生産性は外海に面した一般的な沿岸域と同じくらいである。したがって、沿岸域におけるヨウ素の化学形態変化を時系列で追うには、噴火湾をモデル海域とするのが最適といえる。

2．方法

噴火湾で 2 ヶ月毎に海洋観測を実施して、表面から底層まで海水を鉛直的に採取した。試料海水中の無機ヨウ素(I^-とIO_3^-)と有機ヨウ素(org-I とガス態)の濃度を測定した。有機ヨウ素ガスについては、各観測後の 1 ヶ月以内に分析を終了し、無機ヨウ素と有機ヨウ素については 2013 年度の試料について分析を完了した。以下に観測実施月と分析法を記す。

観測年月：2013 年 2，4，6，8，10，12 月、2014 年 2，4，5，6，7，8，10，12 月、2015 年 2 月

有機ヨウ素ガス分析：　試料海水を褐色ガラスバイアルに採取後、その全量(120mL)をパージ管に送液して海水中のガス成分をN_2バブリングで追い出し、TenaX TA 樹脂を充填したトラップに有機ガス成分を冷却濃縮(－100℃)した。その冷却トラップを加熱して有機ガス成分を脱離しガスクロマトグラフ質量分析計(GC-MS)に導入した。GC-MS の SIM モードで有機ヨウ素ガス成分を定量した。

無機ヨウ素と全有機ヨウ素(org-I)分析：　試料海水を低密度ポリエチレンボトル（容量 125mL，HCl 洗浄）に採取したのち冷凍保管した。分析直前に解凍して、試料水中のヨウ化物イオン(I^-)を電気化学的手法（カソーディック・ストリッピング・ボルタンメトリー法）を用いて測定した。

3．結果と考察

北海道噴火湾の湾央付近のステーションにおける鉛直方向（表面から海底直上水深 90m）のジヨードメタン(CH_2I_2)とヨウ化物イオン(I^-)の平均濃度を時系列で示す(Figure 1)。噴火湾には２月～３月に沿岸親潮水が流入して、３～８月にかけてその水が滞留することが知られている。また例年２月下旬から４月上旬にかけて植物プランクトンブルームが発生する。海水中のジヨードメタンは５月から濃度が急激に上昇して６～７月に濃度ピークを迎えた。これは、ブルームにより生産された有機物の分解が進行する時期である。その後８月に海水中のヨウ化物イオン濃度が上昇した。

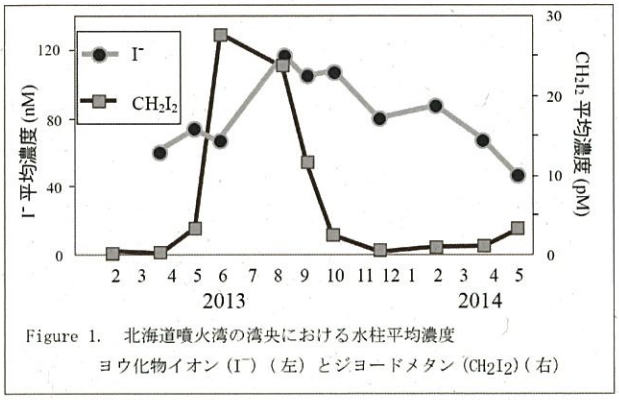

Figure 1. 北海道噴火湾の湾央における水柱平均濃度
ヨウ化物イオン(I^-)（左）とジヨードメタン(CH_2I_2)（右）

海水中でジヨードメタンが発生する際には、遊離ヨウ素(I_2)と溶存有機物の反応が先立って起こっていると考えられる。海水中の遊離ヨウ素の濃度は極めて低く、その発生を直接的に調べることはできないが、ヨウ化物イオン(I^-)が酸化される過程で遊離ヨウ素が発生することが推測されている。

ジヨードメタンの急激な増加が有機物分解に起因すると考えるならば、有機物が堆積する底層付近でジヨードメタン濃度が増えることが推測される。したがって、ヨウ化物イオンの酸化および遊離ヨウ素の発生が堆積物中で起こり、堆積物中の有機物と遊離ヨウ素が反応してジヨードメタンが発生することが考えられた。しかし、ジヨードメタンの鉛直分布の時系列変化をみると(Figure 2)、水深 40m 付近で濃度が著しく上昇することがわかった。いっぽうヨウ化物イオンの鉛直分布は深度方向にばらつきが大きく、一様な時系列変化の様子は捉えられなかった。

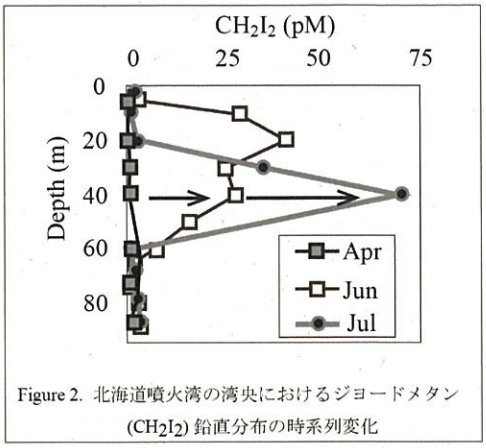

Figure 2. 北海道噴火湾の湾央におけるジヨードメタン
(CH_2I_2) 鉛直分布の時系列変化

噴火湾は碗状の海底地形を有しており、海岸から数キロ離れたところに水深 40m の海底深を持つ場所がある。その付近の海底堆積物の性状は有機物がかなり懸濁している。そのような場所が遊離ヨウ素およびジヨードメタン発生のホットスポットになっている可能性がある。その深度の密度の海水が湾内を水平方向に移流することにより、６月に湾央付近でジヨードメタンの濃度極大が水深 40m に見られたと考えられた。いっぽう、溶存有機物にたくわえられた有機ヨウ素の無機化（ヨウ化物イオンの発生）はいたる深度で起こることが考えられるので、鉛直分布に大きなばらつきが生じたと考えられた。

4．まとめと今後の展望

半閉鎖的な噴火湾内でヨウ素の化学形態の変化を時系列で調べたところ、ジヨードメタンの高濃度現象は水深 40m 付近で起こることが明らかとなった。ジヨードメタンの発生が、ヨウ化物イオンの酸化（遊離ヨウ素の発生）に起因すると考えれば、それが 40m の海底深の堆積物中で起こっていると推測される。その深度の堆積物の特徴は、有機物が懸濁しているような性状である。そのような場所で遊離ヨウ素とジヨードメタンがホットスポット的に発生していると考えられる。今後、そのホットスポットを探索することが、海洋のヨウ素循環を明らかにする鍵となるだろう。2015 年の海洋観測では、深度 40m の海底深の海底直上水を採取してヨウ素動態を調べる予定である。

シンカイヒバリガイ類の集団構造と分散に関する研究

A study on population structure and larval transport process of deep-sea *Bathymodiolus* mussels

小糸　智子，日大・生物資源，E-mail: koito.tomoko(at)nihon-u.ac.jp
北川　貴士，東大・大気海洋研，E-mail: takashik(at)aori.u-tokyo.ac.jp
Tomoko Koito, College of Bioresource Sciences, Nihon University
Takashi Kitagawa, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

Abstract

Deep-sea mussel, *Bathymodiolus septemdierum*, *B. brevior* and *B. marisindicus* dominantly inhabit deep-sea hydrothermal vents. It has been reported that these three species are conspecific because of low genetic diversification. In this study, we estimated divergence time, gene flow and simulated dispersal process among three species to reveal the speciation and larval transport of these species. Our result suggested that *B. septemdierum* diverged from *B. marisindicus* and then *B. brevior* and *B. septemdierum* diverged. Moreover, dispersal simulation also suggested that three species could not disperse each other. Thus, we considered that three species have been isolated genetically and physically. We also found that *B. platifrons* and *B. japonicus* disperse from Okinawa Trough to Sagami Bay.

.

1．はじめに

シンカイヒバリガイ類は深海熱水噴出域や冷水湧出域に優占するイガイ科の二枚貝類である。熱水噴出域や冷水湧出域は深海底にパッチ状に存在しているが、1000 ㎞以上離れた地点に同種が存在することがしばしば報告されてきた。一方、形態的に別種とされている種間の遺伝的差異が小さいことも報告されており、シンカイヒバリガイ類の種分化について詳細は明らかになっていない。本研究では、日本近海に生息する下記のシンカイヒバリガイ類について輸送拡散シミュレーションと集団遺伝学的解析によりその幼生分散過程と集団構造について考察した。

Bathymodiolus septemdierum（シチヨウシンカイヒバリガイ）は、伊豆小笠原海域明神海丘、水曜海山、木曜海山で生息が確認されているが、これまで北フィジー海盆やラウ海盆に生息する *B. brevior*、インド洋に生息する *B. marisindicus* と分子系統学的に近縁であり、頻度は低いものの 3 種の遺伝的交流の存在が示唆されてきた（Kyuno et al. 2009）。しかしながら、*B. septemdierum* が日本近海でしか発見されていないこと、*B. marisindicus* が地理的に著しく離れていることから、この 3 種が分化し、地理的に隔離されてからは遺伝的交流が生じていないと推察できるが、具体的な検証はなされていない。

相模湾初島沖と沖縄トラフには *B. platifrons*（ヘイトウシンカイヒバリガイ）と *B. japonicus*（シンカイヒバリガイ）が生息しており、2 地点間の遺伝的交流が示唆されている。しかしながら、物理的に 2 地点間を移動できるのかは明らかにされていない。

2．問題設定・方法

B. septemdierum は海洋研究開発機構の海洋調査船『なつしま』研究航海 NT10-08、NT11-09、NT13-05 において、伊豆小笠原海域明神海丘および水曜海山から無人探査機“ハイパードルフィン”により 35 個体を採集した。鰓から DNeasy Blood & Tissue Kit により全 DNA を抽出したのち、PCR 法によりミトコンドリア DNA ND4 領域を増幅し、塩基配列を決定した。*B. brevior*（16 個体）、*B. marisindicus*（14 個体）は EMBL/GenBank/DDBJ に登録されている塩基配列を引用した。集団の θ、世代あたりの移入率（N_em）、分岐時間（T）、TMRCA の算出はフリープログラム MDIV（Nielsen and Wakeley 2001）によって行った。パラメータは Mmax=10、Tmax=10 とし、2000000 世代のサンプリングを行なった。得られた結果から分岐年代および有効集団サイズ N を算出した。突然変異率 μ は既往研究（Faure et al. 2009）から 0.63×10^{-6}（ミトコンドリア DNA と核 DNA7 座位の平均）および 2.07×10^{-6}（ミトコンドリア DNA COI 領域）とした。

シンカイヒバリガイ5種の幼生輸送分散シミュレーションを以下の条件で実施した。流動場には、0.1度の水平解像度を持つ超解像度海洋大循環モデル（Ocean General Circulation model for Earth Simulator : OFES, Masumoto et al. 2004）を用い、4種計10地点の水深345 mから幼生に見立てた粒子を1,000粒子ずつ投入した。水平拡散係数は100 $cm^2 s^{-1}$に設定し、2000年6月から1年間、日毎の粒子位置を計算し、追跡した。

3．結果と考察

3種のシンカイヒバリガイ類のうち、最も移入率が低いのは *B. septemdierum* と *B. marisindicus* であった（表1）。一般的に N_em が2以下かつ F_{st} が0.25以上の2集団は分化の程度が高いことが知られている。したがって、この条件を満たす *B. marisindicus* と *B. brevior* は集団として分化していることが示唆された。一方、N_em が2以下かつ F_{st} が0.05以下である *B. septemdierum* と *B. brevior* は分化の程度が低いことが示唆された。したがって、*B. marisindicus* と他の2種間には遺伝的交流が存在しない可能性がある。分岐年代推定の結果、3種のシンカイヒバリガイ類は約170万年前から4万年前までの間に分化したと推定された。順序としては *B. marisindicus* と *B. septemdierum* が分化し、その後 *B. septemdierum* と *B. brevior* が分化したと考えられる。分子系統解析では130万年前から50万年前までに分化したと推定されているため（Miyazaki et al. 2010）、本研究の結果は概ね妥当であると考えられる。しかし、インド洋から太平洋までどのようにして分散したのか、詳細は不明である。

シミュレーションによって得られたシンカイヒバリガイ幼生の輸送分散経路を図1に示した。インド洋に分布する *B. marisindicus* は、他の3種と分布が重なる可能性が極めて低いことが示唆された。一方で、*B. brevior* のうち北西永福海山に分布する個体は輸送分散過程において北西太平洋に分布する *B. septemdierum* や *B. platifrons*、*B. japonicus* と分布が重なる可能性

が示唆された。また、*B. platifrons*と*B. japonicus*は沖縄トラフから相模湾初島沖にかけて分散するが、逆方向への分散は生じないことが示唆された。

4．まとめと今後の展望

本研究では、集団遺伝学的解析と幼生輸送分散シミュレーションによりシンカイヒバリガイ類の分散過程について明らかにした。

本研究の結果より、*B. marisindicus*と他の2種は分化してから遺伝的交流がなく、現在の海洋環境では物理的にも分散できないことが明らかとなった。一方、*B. septemdierum*と*B. brevior*は遺伝的・物理的交流の可能性が示唆された。*B. platifrons*と*B. japonicus*は沖縄トラフから相模湾への分散が生じることにより、集団間の遺伝的多様性が低くなっていることが考えられた。

本研究ではミトコンドリアDNAの1座位のみで解析を行なったが、今後は核DNAの塩基配列やマイクロサテライトなどの座位を増やすことにより、詳細な分岐年代推定ができるものと考えられる。さらに、本研究では集団の大きさ、移出入を一定と仮定したが、シミュレーションで得られた結果を加味して条件設定をする必要がある。また、日本近海のシンカイヒバリガイ類の幼生については情報が乏しいため、幼生期の生理生態を把握することができれば、シミュレーションの精度を向上させることができると考えられる.

参考文献

(1) Kyuno A, Shintaku M, Fujita Y, Matsumoto H, Utsumi M, Watanabe H, Fujiwara Y and Miyazaki J-I. (2009) Dispersal and differentiation of deep-sea mussels of the genus *Bathymodiolus* (Mytilidae, Bathymodiolinae). J. Mar. Biol. Vol., 2009 doi:10.1155/2009/625672

(2) Nielsen R and Wakeley J. (2001) Distinguishing migration from isolation: a markov chain monte carlo approach. Genetics, Vol.158,885-896

(3) Faure B., Jollivet D., Tanguy A., Bonhomme F. and Bierne N. (2009) Speciation in the deep sea: multi-locus analysis of divergence and gene flow between two hybridizing species of hydrothermal vent mussels. PLosOne, Vol. 4 (8): e6485. doi: 10.1371/journal.pone.0006485

(4) Masumoto Y, Sasaki H, Kagimoto T, Komori N, Ishida A, et al. (2004) A fifty-year eddy-resolving simulation of the world ocean –preliminary outcomes of OFES (OGCM for the Earth Simulator)–. Earth Simulator 1: 35–56.

(5) Miyazaki J-I, Martins L. O., Fujita Y., Matsumoto, H. and Fujiwara, Y. (2010) Evolutionary process of deep-sea *Bathymodiolus* mussels. PLosOne, Vol. 5(4):e10363. doi:10.1371/journal.pone.0010363

表 1.シンカイヒバリガイ類集団間の集団サイズ、分岐時間. F_{st} 値は Kyuno et al. (2009)から引用した(MYA＝million years ago).

	Theta	N_em	T	TMRCA	N	T (MYA)	TMRCA (MYA)	F_{st}^*
B. marisindicus vs. *B. brevior*	10.27	0.81	0.24	0.779	4075.397	0.116-0.381	0.377-1.238	0.25701
B. septemdierum vs. *B. brevior*	6.19	1.26	0.08	1.043	2456.349	0.040-0.127	0.520-1.651	0.0166
B. septemdierum vs. *B. marisindicus*	6.37	0.26	0.40	1.092	2527.778	0.193-0.635	0.526-1.730	0.25173

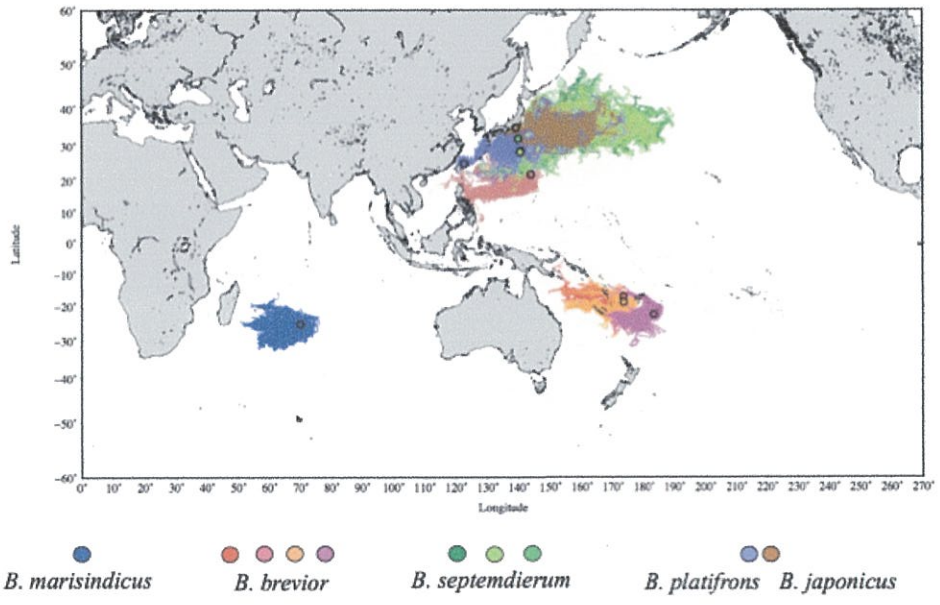

図1.　粒子投入から1年間の輸送分散経路．投入点別に色分けし，丸印はそれぞれの計算開始位置を示す.

種間相互作用の酸性化応答解明を目標とした新規実験技術の開発
——海草藻場群集を例として——

Development of novel experimental technique to elucidate Interspecific interaction against Ocean Acidification — a case study in seagrass bed community —

田中義幸，海洋研究開発機構・むつ研究所，E-mail: y-tanaka(at)jamstec.go.jp
栗原晴子，琉球大学・理学部，E-mail: harukoku(at)sci.u-ryukyu.ac.jp
宮島利宏，東京大学・大気海洋研，E-mail: miyajima(at)aori.u-tokyo.ac.jp

Yoshiyuki Tanaka, Mutsu Institute for Oceanography, JAMSTEC
Haruko Kurihara, Faculty of Science, University of the Ryukyus
Toshihiro Miyajima, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

Abstract

Ocean acidification is one of the most influencing events for the oceanic ecosystems. Most experiments to evaluate effects of ocean acidification have been targeted to single species. To comprehend phenomena *in situ*, this study focused and designed to analyze interspecific interaction. Seagrass bed community have one of the highest net production among the ecosystems on the earth, and have plenty of ecosystem functions. In the experiment (A), we compared the growth of two temperate seagrass species against ocean acidification at Aomori, JAPAN. In the experiment (B), we evaluate the possible alleviation of ocean acidification impact on corals by tropical seagrass, and check the seagrass growth under ocean acidification at Bolonao, the Philippines. Apparent difference was not detected in seagrass growth among the treatments with/without ocean acidification. This study detected the alleviation of ocean acidification impact on corals by tropical seagrass. It is suggested that there is an optimal shoot density of seagrass, when it is more than the optimal, the calcification rate decrease possibly because of the species competition for CO_2 .

1．はじめに

海洋酸性化は近年その影響の大きさが盛んに取り上げられるようになってきた（IPCC 2007, 諏訪ほか 2010）。これまでの酸性化応答実験は、多くの場合、単一種（または単一個体）を実験系に入れて酸性化に対する応答をモニターしている。しかし、このような実験からは、種特異的な応答の違いに起因する競争関係の変化や、食物網や物質循環のような種間相互作用レベルの変化に関する実証的な情報をほとんど得ることができない。このことがこれまでの豊富な実験結果を実際の群集や生態系に還元させることを著しく困難にしている。群集・生態系レベルでの酸性化応答を適切に予測するために必要となる実証的な情報を得るためには、競争関係や種間相互作用をシミュレートできる、複数種が併存する実験系を確立する必要がある。そこで本研究では、単位面積あたりの純一次生産量が地球上で最も高い生態系のひとつであり、他の動植物の付着基盤、隠れ家や産卵場所などとして漁業生産上も重要な役割を担っている海草類と海草藻場群集を材料として複数種併存実験系を開発し、解明すべき現象に応じて実験技術を最適化することを目標とする。

2．問題設定・方法

本研究においては、酸性化に対する種間相互作用について解明すべき具体的な群集・生態系レベルの現象のうち、次の 2 点に取り組む。

（A）．海草種ごとの酸性化への応答性の違いが、酸性化の進展にともなう種間競争関係の変化をもたらし、結果的に海草種組成が酸性化とともに変化すること。

（B）．海草が酸性化に伴って一次生産を増大させることが、海草藻場周辺の pCO_2 の局所的低下をもたらして、本来なら酸性化によって打撃を受けると予想されていた生物（貝類、棘皮動物、サンゴ等）に refuge を提供する結果になること。

まず、温帯において（A）を検証した。日本各地で海草の分布面積減少が報告されている。しかしながら、青森県陸奥湾では 48km^2 のアマモ場が比較的健全に維持されている。本研究では、陸奥湾で卓越するアマモ *Zostera marina* ならびにスゲアマモ *Z. caespitosa* を対象として，海洋研究開発機構むつ研究所において二酸化炭素濃度を 3 段階（400, 700, 1000ppm）、水温を 2 段階（20℃, 30℃）に同時に操作した培養実験を 10 日間にわたり実施した。実験に供する海草は丁寧に堆積物を除いた。また付随する地下茎の長さはおよそ 5 cm に統一した。

次に、熱帯において（B）を検証した。フィリピン北西部ボリナオのサンチアゴ島周辺海域では、魚類の養殖施設の増加による栄養塩の過剰供給に起因して 17 年間で海草の種構成や株密度が大きく変化したことが報告されている（Tanaka et al. 2014）。フィリピン大学ボリナオ臨海実験場においては、広い範囲に分布する熱帯性海草リュウキュウスガモ *Thalassia hemprichii* を対象として、pH を 7.9 に制御した酸性化状態と、pH 8.2 のコントロールとの間で 7 日間培養し、生長量を比較した（Fig. 1）。また、海草あり（酸性化：pH7.9・コントロール：pH8.2）と海草なし（酸性化・コントロール）の 4 つの組み合わせに制御された水槽の下流にそれぞれ造礁サンゴ *Porites cylindrica* の枝を配置し、その石灰化速度を比較することにより、海草による海洋酸性化の緩和効果について検討した。海草は、地下茎や根の周辺に付着した堆積物を丁寧に取り除いた上、1 つのタンクに 25 から 29 株の密度に調整して配置した。海草ありの処置には、タンク 1 つだけ

の「低密度」と、タンク２つを直列に配置した「高密度」とを設定した。

３．結果と考察

温帯における操作実験の結果、酸性化に対する海草種間の生長に明確な差は見出せなかった。同時に操作した水温に関しては、スゲアマモのほうが、アマモと比較してより生長量が低下する傾向が認められた。

熱帯における操作実験の結果、海草の生長量には、酸性化処理の有無による差は認められなかった。一方、サンゴの石灰化は酸性化処理によって阻害された。「低密度」のトリートメントでは、海草の下流に位置するサンゴの方が、海草がないもの比較して石灰化速度は高かった。しかしながら、「高密度」では、海草なしのトリートメント以下の石灰化速度しか認められなかった。

Fig. 1 Experimental Setting at Bolinao Marine Laboratory, University of the Phillipines. Seagrasses in cylindrical tanks, corals in small cuboid containers, and large cuboid containers are control as no seagrass.

４．まとめと今後の展望

本研究においては、Ａ．であげた「海草種ごとの酸性化への応答性の違い」を検証することはできなかった。これには、海草の地下茎を切断することや、堆積物を取り除いたことによる草体へのダメージなど、種間の応答の差以上に海草の生長に大きな影響を与える要因があった可能性が考えられる。また、酸性化の影響が海草に顕著に表れるには、本研究の実験期間が短かった可能性も検討する必要がある。今後実生から発芽させた株を実験に供したり、実験期間を長くしたりするなどの改善を行う余地がある。

Ｂ．であげた海草の「refuge」としての機能については、その可能性が明示された。「高密度」トリートメントにおいて、その効果が最も低くなった原因としては、本研究が対象とした酸性化緩和効果だけでなく CO_2 をめぐる海草とサンゴの競合の影響が出た可能性も考えられる。酸性化緩和効果を考慮する際、サンゴにとって最適な海草密度が存在する可能性が本研究によって示唆された。

参考文献

(1) IPCC :Cliate Change (2007)The physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, 997pp

(2) 諏訪僚太・中村崇・井口亮・中村雅子・守田昌哉・加藤亜記・藤田和彦・井上麻夕里・酒井一彦・鈴木淳・小池勲夫・白山義久・野尻幸宏（2010）海洋酸性化がサンゴ礁域の石灰化生物に及ぼす影響.海の研究 19:21-40

(3) Tnaka Y, G A Go, Watanabe A, Miyajima T, Nakaoka M, W H Uy, Nadaoka K, Watanabe S, M D Fortes (2014) 17-year change in species composition of mixed seagrass beds around Santiago Island, Bolinao, the northwestern Philippines. Marine Pollution Bulletin. 88: 81-85

先端科学技術に基づく海洋･地球情報の学際的、超学際的展開

Interdisciplinary and Transdisciplinary Development of Marine and Earth Science Information Based on Cutting-Edge Science and Technology

山形俊男，海洋研究開発機構・アプリケーションラボ, E-mail：yamagata@jamstec.go.jp
植松光夫，東大・大気海洋研, E-mail：uematsu@aori.u-tokyo.ac.jp
Toshio Yamagata, Application Laboratory, JAMSTEC
Mitsuo Uematsu, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

Abstract

To meet the increasing demand for sustainable management of marginal seas of South and East Asia, the regional research program called SIMSEA (Sustainability Initiative in the Marginal Seas of South and East Asia) was introduced under the framework of Future Earth program by ICSU ROAP in 2014. To support the international SIMSEA program from Japan's viewpoint, two domestic workshops were held to discuss transdisciplinary as well as interdisciplinary approaches for sustainable use of the marginal seas based on integrated perspectives of both natural and social sciences.

1. 背景と目的

アジアの縁辺海は豊かな恵みを沿岸諸国に与えてきましたが、海洋環境の劣化と資源をめぐる政治的な荒波にもまれています。関係諸国のみならず国際的にも「利害を共有する大切な海」を科学的知見に基づき調和的に守る必要性が急速に高まっています。そこで、国際科学会議アジア太平洋地域事務所（ICSU ROAP）は2014年2月に、アジアの縁辺海とその沿岸域について、国際科学会議（ICSU）が主導する「未来の地球」（Future Earth）の視点から、学際、超学際的に捉える国際プログラムSIMSEAを発足させました。

その後、国際科学会議アジア太平洋地域委員会（ICSU RCAP）は、研究プログラムの構築をめざしてプロポーザルをまとめ、2014年7月から2年間のプログラム準備資金を得ました。現在、フィリピン大学ディリマンキャンパスの海洋研究所に国際プログラム事務局が置かれています。

このSIMSEA計画をさらに推進するため、わが国の研究者がSIMSEA計画に貢献できる研究課題について、自然科学分野と社会科学分野の視点から、どのようなアプローチで取り組んでいくべきか、その具体的な方策を議論し意見交換する国内ワークショップを開催することにしました。

2. SIMSEA国内ワークショップの開催報告

上記の視点から2014年10月と2015年3月の2回に分けて、SIMSEAに関する国内ワークショップを東京大学大気海洋研究所および東京大学小柴ホールにおいて開催しました。まず始めに、海外および国内の研究代表者から、Future EarthおよびSIMSEAの概念と取り組みについて説明をしていただき、関係諸国の沿岸域に見られる環境問題について紹介をしていただきました。次に、日本側の研究者から、沿岸域の環境問題に対して、海洋物理、化学、生物、水産学の視点で、どのような研究がなされているか、また、どのような方法で新しいプログラムに対応していくべきか、具体的な対応策について提案がなされました。また、すでに行われている東南アジアの沿岸域の国際プロジェクト（例えばPEMSEA）を参考に、SIMSEAが今後進めていくべき研究課題、人材育成、社会への発信方法などについて、様々な議論が行われました。社会科学的な視点から、自然科学で得られた研究成果を社会にどのように伝えていくべきかについても具体的な方法について紹介していただきました。特に、研究課題を選択する段階で、沿岸域を利用する地方自治体や漁業関係者などが、海洋科学分野の研究者と一緒に問題解決に取り組む超学際的アプローチが重要であるとの報告がありました。

図 1. 東京大学小柴ホールにおいて開催された第２回 SIMSEA 国内ワークショップの集合写真

3. 今後の課題と展望

２回にわたる国内ワークショップを踏まえて、地方自治体や漁業関係者など沿岸域を利用する立場からの意見が少なかったことが課題となりました。今後は、地域のステークホルダーを交えた国内ワークショップを開催し、海洋科学分野の研究者と一緒に沿岸域の環境問題を取捨選択し、具体的な対応策を検討していく予定です。今回の貴重な研究成果をもとに政策面での考察を発展させて日本海洋政策学会誌などへの投稿も考えていきたいと思います。

関連研究発表

(1) Yamagata, T., L. J. Cruz, and N. M. Hasan, On Sustainability Initiative for Marginal Seas in East Asia (JPGU, Pacifico Yokohama, May 1, 2014)

(2) Yamagata, T., For Sustainability Initiative in the Marginal Seas in South and East Asia（宇宙技術・地理空間情報技術を用いた ASEAN 防災能力化に関する研究会合, 内閣府宇宙戦略室, 2014 11/25）

(3) Yamagata, T., For Sustainability Initiative in the Marginal Seas in South and East Asia (東京財団、中国社会科学院共催第３回東シナ海問題研究会, 中国浙江省舟山, 2014 11/29）

(4) Yamagata, T., Importance of satellite-based oceanography in services for human security under the global change (C-SIGMA V, 霞が関ビル 2014 12/8）

(5) 山形俊男, 気候変動・変化の予測 (気候変動・変化と OPK（Ocean Peace Keeping）：変化する海洋の安全保障環境の安定化への取組み, 海洋政策研究財団, 2015 1/29）

(6) 山形俊男, 衛星データを活用した気候・季節予測とその応用（第三回新興国への宇宙インフラを活用した海外防災システムの戦略策定検討会、内閣府宇宙戦略室、2015 2/12）

超高分解能質量分析計「MULTUM-S II」を用いた海水中化学トレーサー溶存ガスの多成分同時直接測定法の確立

Development of a direct measurement technique for dissolved gases as chemical tracers using a portable ultra-high resolution mass spectrometer MULTUM

豊田　岐聡, 阪大・院・理学研究科, E-mail: toyodam(at)phys.sci.osaka-u.ac.jp
古谷　浩志, 阪大・院・理学研究科, E-mail: hiroshif(at)mass.phys.sci.osaka-u.ac.jp
石原　盛男, 阪大・院・理学研究科, E-mail: ishihar(at)phys.sci.osaka-u.ac.jp
青木　順, 阪大・院・理学研究科, E-mail: ajunmail(at)mass.phys.sci.osaka-u.ac.jp
中山　典子, 東大・大気海洋研, E-mail: noriko(at)aori.u-tokyo.ac.jp

Michisato Toyoda, Hiroshi Furutani, Morio Ishihara and Jun Aoki, Project Research Center for Fundamental Sciences, Graduate School of Science, Osaka University
Noriko Nakamyama, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

Abstract

Combining an ultra-high resolution mass spectrometer (MULTUM) and a simple on-line cryo-gas trap, a new method for the direct measurement of atmospheric neon concentration without cumbersome pretreatment was developed. The ultra-high mass resolution allowed Ne^+ ion measurement to be free from interference ions, such as Ar^{2+}, $H_2{}^{18}O^+$, and HF^+, which have quite similar m/z with Ne^+ and cannot be detected separately from Ne^+ with commonly used quadruple mass spectrometer. The removal of atmospheric gases (*e.g.*, N_2, O_2, CO_2) except for Ne and He by the simple cryo-gas trapping also enabled us to avoid the saturation problem during ionization in the mass spectrometer and further optimize the mass spectrometer only for trace Ne^+ ion detection. Atmospheric Ne was successfully measured within 10 minutes for each sample by simply injecting atmospheric air into the developed system. The preliminary result shows that the developed method can be applicable for the continuous and direct measurement of dissolved and atmospheric Ne, and other noble gases with further modification.

1．はじめに

海水中の主要溶存気体(N_2, O_2, Ar, CO_2)や微量溶存気体 (希ガス(He, Ne, Kr, Xe), CH_4, N_2O など)は、それぞれ物理的性質や生物･化学プロセスにおける利用･生成過程が異なるため、互いの濃度変動の違いや濃度比の変動の測定を通して、物理・生物地球化学的プロセスを追跡する“トレーサー”として活用されている。例えば、気圧・気温変動や表層での気体交換過程（気泡・拡散混合)、生物活動（光合成・呼吸や有機物分解)、異なる水塊の移流・混合過程、貧酸素水塊や海底/堆積物中などの還元的環境下での脱窒素過程等の追跡に用いられている。特に海水中に溶存する希ガスは生物・化学的に不活性であり、気圧や水温などの物理的変化にのみ応答するため、物理プロセスを探るトレーサーとして非常に有効である。

海水中の溶存希ガスの濃度測定には、これまで真空システムを用いた海水中溶存ガスの脱気・精製処理と四重極質量分析計を組み合わせた手法が用いられてきた (例えば Sano and Takahata, 2005)。しかし四重極質量分析計の質量分解能は100~500 程度と低く、微量な希ガス由来のイオンピークに、他の大気・残留ガス由来のイオンピークが重畳してしまうという問題があった。そのため希ガス濃度の測定には、質量分析測定の前に、これらの妨害ガスを完全に除去する特殊な前処理を行う必要があった。この前処理は非常に煩雑で、しかも前処理装置自体のサイズも大きいため、これまで溶存希ガスは、海水サンプルを陸上の実験室に持ち帰り前処理･測定していた。大気中にも希ガスは存在するため、海水サンプルは容易に大気の混入で汚染されてしまう。この汚染を防ぐために、海水サンプルは銅管に封入し、両端を厳重に封じ切って保存して陸上に持ち帰ることが必須である。このような現場での海水サンプリングの手間ひまや、その後のラボでの煩雑な前処理のために測定できるサンプル数が限られるため、海水中の溶存希ガスの観測データは非常に少ないのが現状である。

そこで本連携研究では、海水中の溶存希ガス濃度の観測船上で連続・直接分析する最終目的の第一段階として、可搬型超高分解能質量分析計 MULTUM を用いた大気中 Ne の直接分析法の開発を行った。

従来の四重極質量分析計に替えて用いた超高分解能質量分析計「MULTUM」(質量分解能 > 30000、豊田グループが開発･所有)は、イオンを同一飛行空間で複数回周回（マルチターン）させることで長大な飛行距離を稼ぎ、小型でありながら超高分解能を得ており、飛行時間型としては世界最高の質量分解能 35 万を達成している (Toyoda, 2010, 豊田ら、2012 等)。また排気系、質量分析部、検出器、電源全てを含めてのサイズが 50.4cm × 58.4cm × 27.3cm、重量は 35kg と持ち運び可能なサイズであるため、緊急現場医療や宇宙探査機への搭載など、さまざまな研究分野への応用が期待されている。MULTUM の海洋学への応用は、本研究が初めてである。

2．問題設定・方法

四重極質量分析計によって10～20 ppmv 程度の Ne 濃度を測定しようとすると、その分解能の低さのため Ne^+イオンピーク (*m/z* 19.99189, 大気中濃度 = 18 ppmv) に Ar^{2+} (*m/z* 19.98270) や $H_2{}^{18}O^+$ (*m/z* 20.01510)、HF^+ (*m/z* 20.00568)といった大気成分ガスのイオンピークが重畳してしまい、Ne^+測定の大きな妨害となる(図１)。これらの妨害ガスや夾雑物となる大気主要ガスを完全に除去することなしに、四重極質量分析計で Ne を直接測定することは不可能である。妨害・夾雑ガスである N_2 や O_2、H_2O や有機ガスをほぼ完全に除去し、希ガスだけを精製するためには、チタンゲッターポンプによる活性ガスの除去が必須となる。この前処理は非常に煩雑で手間と時間がかかるだけでなく、前処理システム自体も大きく、現場（船上）で行う事は事実上不可能である。そこで本連携研究では、超高分解能 MULTUM 質量分析計が持つ高い物質分離能力を活用し、大まかな分離・精製だけで Ne (Ne^+, *m/z* 19.99189)を直接測定する手法の開発を目指し、まずは前処理/ガス導入ラインを構築し大気のテスト測定を行った。この前処理/ガス導入ラインは、海水をバブリングして抽出した溶存

ガスを、MULTUM に直接導入し Ne 濃度を測定することを想定したものである。

On-line での簡単な Ne 精製のために、液体窒素で冷却したショートカラム（Molecular sieve 5A, 60/80 mesh を充填、1/8 inch O.D., ステンレス製）を用いた。このクライオトラップで、試料ガス中の Ne と He 以外のガスを on-line で大まかに捕獲して取り除き、Ne だけを選択的に精製した。クライオトラップと MULTUM の間には、キャピラリーカラム(長さ 20 m)を挿入した。このカラムは MULTUM へのガス導入量の制限とクライオトラップ飽和時に溶出する主要ガス(N_2, O_2, CO_2 等)と Ne を大まかに時間的に分離し、過大ガス導入によるイオン源の異常放電を防ぐ目的で用いた。クライオトラップとカラムにはキャリアーガスとして He を常時流した(1 cm^3/min @std cond.)。サンプルガス(20 μL – 5 mL)は、ショートカラムの上流からガスタイトシリンジで注入した。また、電子イオン化の電子エネルギーは、キャリアーガスである He のイオン化を抑制しながら、Ne（イオン化エネルギー：21.6 eV）のイオン化効率を高めるために He のイオン化エネルギー(24.6 eV)よりも僅かに低い 24 eV とした。

3．結果と考察

ショートカラムを液体窒素で冷却をせず室温条件下で、Ne を添加した大気（Ne 濃度 40%）を測定した結果が図 2 である（ただし低分解能モードで測定）。カラムは室温状態のため、N_2 や O_2、Ar などの主要大気組成は除去されていないが、キャピラリーカラムによって、Ne とわずかな時間差で分離されて MULTUM に導入されていることが分かる。しかし、40% の Ne 濃度でも、Ne^+イオンは、N_2 や O_2 のイオンピークよりも強度が微弱である（これは電子イオン化の電子エネルギー24 eV が、Ne のイオン化エネルギー21.6 eV よりも僅かに高いだけであるのに対し、N_2 や O_2 にとっては十分に高く（それぞれ 15.6 eV と 12.1 eV）、イオン化の効率が大きく異なるため）。Ne を高感度に検出するためには N_2 や O_2 を除去して、MULTUM の検出感度を大きく上げる必要がある。そこで、ショートカラムを液体窒素温度で冷却し、実験室空気（0.5 – 5 mL）を注入したところ、Ne は室温条件下よりも遅い注入後約 2.5 min で検出されたが、N_2 および O_2 といった主要ガスはクライオトラップに吸着されて全く溶出してこなかった。そこで Ne^+イオンの検出に特化して MULTUM の検出感度を大幅に上げ、Ne^+イオン付近の *m/z* 19.19~21.19 の質量範囲を高分解能モードで測定して得られた質量スペクトルが図 3 である（分解能～3500。Ne が溶出する保持時間 1.8~3.5 min を平均化）。Ne^+が、僅かに質量の異なる $H_2{}^{18}O^+$や HF^+と完全に分離され検出できていることが分かる。質量分解能の低い四重極質量分析計ではこれらのイオンピークを分離して検出することはできず、超高分解能を持つ MULTUM の優位性を示している。この高い強度で検出された水の同位体イオンピーク（$H_2{}^{18}O^+$, *m/z* 20.01510）は、クライオトラップで水を殆ど除去しているにも関わらず現れており、質量分析計の内部に吸着した水分子由来であると考えられる。質量分析において、水分子の混入を完全に除去することは難しく、水分子由来のイオンピークが必ず現れると考えられる。超高分解能を持つ MULTUM は海水採水の現場で連続・直接観測する上でも非常に有効であるといえる。大気試料 0.5 – 5 mL を測定して得られた検量線を図 4 に示す。大気注入量と Ne^+ピークエリアには良好な比例関係が得られた (r^2 = 0.956)。現時点ではクライオトラップやキャピラリーカラムなどの最適化についての検討を行っていないが、すでに大気 0.5 mL の注入量で大気中 Ne 濃度(約 18 ppmv)を測定するには十分なイオン強度とピークエリアが得られている。現時点でも、海水試料 200 mL 程度から溶存ガスを抽出すれば、海水の溶存 Ne の濃度変動(6.5 – 8.5 nmol/kg 程度、Hamme and Emerson, 2002)を十分に測定可能な検出感度が達成されている。今後、クライオトラップやキャピラリーカラムなどの最適化や改良を行うことで、測定感度や精度は更に向上することが期待される。また 1 サンプルあたりの測定時間は、最適化が行われていない現時点でも試料ガス注入後から 10 分以内であり、クライオトラップの夾雑物保持能力も 20 – 30 mL 程度（大気）である。クライオトラップを 2 系統用い、交互に液体窒素冷却による夾雑ガスの吸着と昇温による吸着物の放出・トラップ再生を繰り返すシステムを構築すれば、観測船上での船上連続直接海水測定への適用も十分可能である。

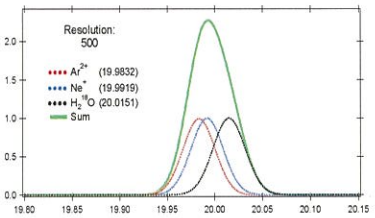

図 1. 四重極質量分析計（分解能: 500)による微量Ne測定時の質量スペクトル（モデル計算）. Ne^+と非常に似通った質量電荷比を持つ Ar^{2+}や $H_2{}^{18}O^+$といった夾雑イオンが干渉するため，これらの夾雑物の除去なしに直接測定は不可能.

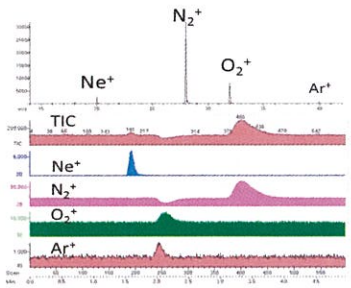

図 2. MULTUM（低分解能モード. 分解能~300）で測定した Ne 添加大気（Ne 濃度：約 40%）の質量スペクトル(上)と各イオンピークのクロマトグラム.ただしクライオトラップは液体窒素冷却しておらず夾雑物の除去を行っていない. Ne のイオンピークは弱く，N_2や O_2，Ar といった夾雑ガスのイオンが高い強度で現れている.

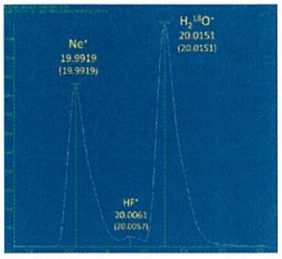

図 3. 高分解能モード(分解能～3500)で測定した Ne+イオン付近の *m/z* 19.19~21.19 の質量スペクトル.Ne^+イオンを $H_2{}^{18}O^+$や HF^+といった夾雑イオンと完全に分離して検出できている.

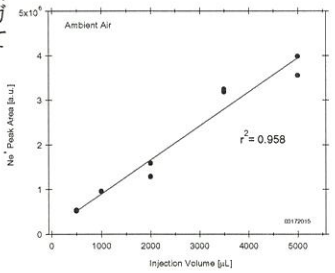

図 4. 構築した測定システムへの大気試料の注入量を変えて（0.5~5 mL）得られた Ne^+イオンピークのエリアと注入量との関係. 良好な比例関係が得られた(r^2 = 0.917).

4．まとめと今後の展望

クライオトラップと超高分解能質量分析計 MULTUM を組み合わせることで、簡単な on-line での処理だけで微量 Ne の濃度を測定することが初めて可能となった。最適化などを殆ど行っていない現時点でも、測定時間は 1 回当たり 10 分以内であり、0.5 mL の大気注入で大気中 Ne (約 18 ppmv)の測定に十分に行うことが可能な検出感度を達成している。本手法を発展させ、測定の自動化などを進めることで、これまで事実上不可能であった観測船上での微量希ガス成分の直接同時連続測定が可能になると大きく期待できる。引き続き Ne 以外の希ガス成分についても測定方法を検討し、実際の海水中の溶存希ガスの濃度測定の確立を進めてゆく予定である。

参考文献

(1) Sano and Takahata, 2005: “Measurement of noble gas solubility in seawater using a quadrupole mass spectrometer”. *J. Oceanogr .*, 61, 465–473.

(2) Toyoda, M., 2010: “Development of multi-turn time-of-flight mass spectrometers and their applications”, *Eur. J. Mass Spectrom.*, 16, 397-406.

(3) 豊田岐聡, 新間秀一, 青木順, 石原 盛男 2012: “[総説] マルチターン飛行時間型質量分析計” *J. Mass Spectrom. Soc. Jpn.*, 60 (6), 87-102.

(4) Hamme and Emerson, 2002: “Mechanisms controlling the global oceanic distribution of the inert gases argon, nitrogen and neon”. *Geophys. Res. Lett.*, 29, 23, doi:10.1029/2002GL015273.