

学際連携研究報告書

2019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。

2019年度の実績は、特定共同研究の応募数が3件（同採択数1件）、一般共同研究の応募数が9件（同採択数7件）であった。

本冊子は、2019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

2019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	神川 龍馬	京都大学大学院人 間・環境学研究所	助教	海洋性植物プランクトンの新規光エネルギー利 用機構の生理的役割の解明	吉澤 晋

【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	鶴 哲郎	東京海洋大学学術 研究院海洋資源エ ネルギー学部門	教授	同時発振方式による海上三次元反射法地震探 査のための振源開発	朴 進午
2	和川 拓	国立研究開発法人 水産研究・教育機構 日本海区水産研究 所	主任研究員	日本海を中心とした大気-海洋間の力学エネル ギー循環:短期気象イベントへのメソ+海洋渦の 応答	川口 悠介
3	近藤 能子	長崎大学大学院水 産・環境科学総合研 究科	准教授	海洋表層の鉄の酸化還元状態と生物利用能に 関する研究	小畑 元
4	山口 陽子	島根大学学術研究 院農生命科学系	助教	円口類ヌタウナギから俯瞰する体液調整能力の 起源と進化	高木 互
5	佐藤 成祥	東海大学海洋学部	特任講師	コウイカの雌による受精時の精子量調整	岩田 容子
6	岩田 雅光	公益財団法人ふくし ま海洋科学館	統括学芸員	現生シーラカンスの分類学的再検討	猿渡 敏郎
7	松田 純佳	北海道大学大学院 水産科学研究院	特別研究員 (PD)	炭素14を用いた大型鯨類の回遊経路の推定の 試み	横山 祐典

目次

学際連携研究報告書

【特定共同研究】

1. 海洋性植物プランクトンの新規光エネルギー利用機構の生理的役割の解明

【一般共同研究】

1. 同時発振方式による海上三次元反射法地震探査のための振源開発
2. 日本海を中心とした大気-海洋間の力学エネルギー循環：短期気象イベントへのメソ+海洋渦の応答
3. 海洋表層の鉄の酸化還元状態と生物利用能に関する研究
4. 円口類ヌタウナギから俯瞰する体液調整能力の起源と進化
5. コウイカの雌による受精時の精子量調整
6. 現生シーラカンスの分類学的再検討
7. 炭素 14 を用いた大型鯨類の回遊経路の推定の試み

海洋性植物プランクトンの新規光エネルギー利用機構の生理的役割の解明

Physiological roles of marine algal, novel light energy utilization systems

神川 龍馬, 京大・人環, E-mail: kamikawa.ryoma.7v(at)kyoto-u.ac.jp

吉澤 晋, 東大・大気海洋研, E-mail: Yoshizawa(at)aori.u-tokyo.ac.jp

Ryoma kamikawa, Graduate School of Human and Environmental Studies, Kyoto University

Susumu Yoshizawa, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

Abstract (Times New Roman 10pt)

Elucidation of physiological roles of proton-pumping Rhodopsin in eukaryotic phytoplankton would change our view on diversity and history of light-utilization systems on the earth, given importance of phytoplankton as primary producers. In this study, we unveiled the intracellular localization of a proton-pumping Rhodopsin of the diatom *Pseudonitzschia granii*, with the heterologous expression system in the model diatom *Phaeodactylum tricornutum*. In line of localization in the outermost membrane of the complex plastid, we hypothesize the Rhodopsin of *Ps. granii* might facilitate dissolved carbon dioxide to be effectively localized in the diatom plastid.

1. はじめに

光合成は、光エネルギーを細胞内の様々な代謝で利用可能な化学エネルギーである ATP や NADPH に変換するメカニズムである。変換された化学エネルギーは、糖やアミノ酸、脂肪酸などの種々の生合成系に利用される。光合成を行うためには光エネルギーを吸収する必要があるが、植物や単細胞光合成生物（植物プランクトン）はクロロフィルを始めとして非常に多様な光吸収物質（色素）をもつことが知られている。クロロフィル a は、すべての酸素発生型光合成を行う生物がもつ中心的な光合成色素であるが、その他のクロロフィル組成は、植物プランクトンの種によって異なる。例えばシアノバクテリアではクロロフィル a に加え、クロロフィル b、クロロフィル d、クロロフィル f を合成する種が存在する。また、真核藻類ではクロロフィル a に加え、クロロフィル b、クロロフィル c を合成する種が存在する。ところがこれまでに、クロロフィル以外の光受容体として、微生物型ロドプシンも植物プランクトンから見つかっている。微生物型ロドプシンとは、レチナールを発色団として持つ 7 回膜貫通型の光受容体タンパク質で、機能の面から 2 つのタイプに大別される。一つは光を化学エネルギーに変換する“イオン輸送型ロドプシン”であり、もう一方は光センサーとして働く“センサー型ロドプシン”である。これらのうち、前者は光でイオンを能動的に輸送し膜電位に変換することでエネルギーを産生することができる点で非常に重要である。センサー型ロドプシンは多くの真核微生物の眼点に存在することが知られており機能解析も行われているが、イオン輸送型ロドプシンは、これまで植物プランクトンから見つかっていないため、植物や海洋生態系を支える重要な一次生産者である植物プランクトンにおいて、クロロフィルが光エネルギー変換機構に関わる唯一の色素であると考えられている。

これまでの共同研究で、海洋真核微生物トランスクリプトームプロジェクト (MMETSP; 1) のデータから見出した微生物型ロドプシンの機能解析を行った結果、光で細胞内からプロトン（水素イオン）を輸送するロドプシンが複数見つかった。つまり、物質循環を駆動する主要生物である植物プランクトンが、クロロフィル以外の光受容体を用いて光エネルギーを受け取っている可能性が考えられる。プロトンポンプ型ロドプシンはバクテリア細胞内では光を用いてプロトンを汲み出し、そのエネルギーで ATP を合成すると考えられている。一方で、真核藻類ではバクテリアと異なり、細胞内が様々な

膜で区画化されており、ロドプシンの局在とその役割については知見が皆無である。すなわち、ロドプシンによる光を用いたプロトンのくみ出しがもつ生理学的役割は不明である。

2. 問題設定・方法

本共同研究では、これまでの研究で機能を明らかにしたプロトン輸送型ロドプシンの植物プランクトン細胞内における局在を突き止め、その生理的役割の解明を最大の目的とした。本研究で対象とした植物プランクトンは、プロトンポンプ型ロドプシンをもつ真核藻類である珪藻 *Pseudonitzschia granii* である。

本藻のロドプシンと緑色蛍光タンパク質と結合させたりコンビナント遺伝子を、モデル珪藻 *Phaeodactylum tricornutum* のタンパク質発現ベクターに組み込んだ。本ベクターをエレクトロポレーション (2, 3) により、*P. tricornutum* に形質転換した。抗生物質ゼオシンを含むプレート培養により、形質転換に成功した細胞の選抜を行った。形質転換体のクローン培養株を作成し、緑色蛍光の局在を蛍光顕微鏡下で観察した。その際、核の位置を確認するため、DAPI による染色と DAPI 蛍光の観察も同時に行った。

3. 結果と考察

P. tricornutum 形質転換体 (Fig. 1A; DIC) の緑色蛍光は、細胞内に均一に観察されることなく、細胞内の一部からのみ観察された (Fig. 1A; GFP)。このことは、細胞質や細胞膜に局在しているのではなく、オルガネラに局在していることを示している。特に、緑色蛍光の局在は、クロロフィル自家蛍光および DAPI 蛍光 (Fig. 1A; DAPI+Chl) と共局在した (Fig. 1A; Merge)。すなわち、クロロフィルを含む葉緑体と DNA を含む核に局在していることを強く示唆している。

二次共生藻類である珪藻の葉緑体は、4 重膜に囲まれたコンプレックスプラスチドと呼ばれている。4 重膜のうち、内側 2 枚は陸上植物や紅藻類における 2 重膜の葉緑体のそれと相同であると考えられている。一方、最外膜は、小胞体膜由来であると考えられており、核膜と結合している。一般に、緑色蛍光が、葉緑体と核に同時に局在した場合、それは核膜と結合した葉緑体最外膜に局在していると解釈される (2, 3)。

今回実験に使用した *Ps. granii* ロドプシンも、葉緑体と核

に局在していることから、葉緑体の最外膜に局在していると考えられる (Fig. 1B)。最外膜にプロトンポンプ型ロドプシンが局在すると、光を受容した場合、葉緑体最外膜と外側から2枚目の膜の間は酸性になる。このことは、細胞質に均一に存在する二酸化炭素がより効率的に葉緑体内に局在するために役立ち、結果的に炭酸固定が効率化されると考えられる。

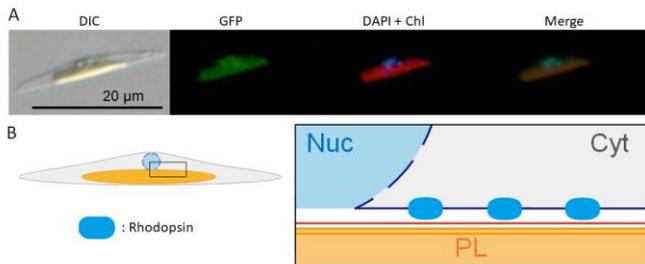


Fig. 1 Localization of *Ps. granii* Rhodopsin C-terminally fused with GFP in *Phaeodactylum tricornutum*. A. DIC, GFP fluorescence, chlorophyll a fluorescence and merged pictures are shown. B. A possible model of Rhodopsin localization in a diatom. *Ps. granii* Rhodopsin is likely localized in the outermost membrane of the complex plastid. Nuc: Nucleus, Cyt: Cytosol, PL: Plastid.

4. まとめと今後の展望

植物プランクトンのうち、真核藻類がもつプロトンポンプ型ロドプシンの局在と生理学的役割は不明であった。しかしながら、本学際連携研究で実施した局在解析から真核藻類である珪藻 *Ps. granii* のもつロドプシンが葉緑体の最外膜に局在している可能性が示された。今後、様々な植物プランクトンの局在解析を行うことで、真核微生物が持つイオン輸送型ロドプシンの生理学的役割が細菌のものとはどのような違いがあり、どのような多様性があるのかを調べ、真核微生物ロドプシンの進化・多様性を機能と役割の面からを明らかにする。これらを調べることで、これまで光合成機構のみを使い光エネルギーを利用すると考えられてきた植物プランクトン

の新奇光エネルギー利用機構の提案を行いたいと考えている。

参考文献

- (1) Keeling PJ, Burki F, Wilcox HM, Allam B, Allen EE, Amaral-Zettler LA, Armbrust EV, Archibald JM, Bharti AK, Bell CJ, Beszteri B, Bidle KD, Cameron CT, Campbell L, Caron DA, Cattolico RA, Collier JL, Coyne K, Davy SK, Deschamps P, Dyhrman ST, Edvardsen B, Gates RD, Gobler CJ, Greenwood SJ, Guida SM, Jacobi JL, Jakobsen KS, James ER, Jenkins B, John U, Johnson MD, Juhl AR, Kamp A, Katz LA, Kiene R, Kudryavtsev A, Leander BS, Lin S, Lovejoy C, Lynn D, Marchetti A, McManus G, Nedelcu AM, Menden-Deuer S, Miceli C, Mock T, Montresor M, Moran MA, Murray S, Nadathur G, Nagai S, Ngam PB, Palenik B, Pawlowski J, Petroni G, Piganeau G, Posewitz MC, Rengefors K, Romano G, Rumpho ME, Rynearson T, Schilling KB, Schroeder DC, Simpson AG, Slamovits CH, Smith DR, Smith GJ, Smith SR, Sosik HM, Stief P, Theriot E, Twary SN, Umale PE, Vaultot D, Wawrik B, Wheeler GL, Wilson WH, Xu Y, Zingone A, Worden AZ, 2014: "The Marine Microbial Eukaryote Transcriptome Sequencing Project (MMETSP): illuminating the functional diversity of eukaryotic life in the oceans through transcriptome sequencing", *PLoS Biol.*, 12, e1001889
- (2) Kamikawa R, Moog D, Zauner S, Tanifuji G, Ishida KI, Miyashita H, Mayama S, Hashimoto T, Maier UG, Archibald JM, Inagaki Y, 2017: "A non-photosynthetic diatom reveals early steps of reductive evolution in plastids", *Mol. Biol. Evol.*, 34, 2355-66
- (3) Moog D, Nozawa A, Tozawa Y, Kamikawa R, 2020: "Substrate specificity of plastid phosphate transporters in a non-photosynthetic diatom and its implication in evolution of red alga-derived complex plastids.", *Sci. Rep.*, 10, 1167

同時発振方式による海上三次元反射法地震探査のための振源開発

Development of energy source for 3D multi-channel seismic reflection survey with simultaneous shooting

鶴 哲郎, 海洋大, E-mail: ttsuru0(at)kaiyodai.ac.jp
朴 進午, 東大・大気海洋研, E-mail: jopark(at)aori.u-tokyo.ac.jp
甘糟 和男, 海洋大, E-mail: amakasu(at)kaiyodai.ac.jp
Tetsuro Tsuru, Tokyo University of Marine Science & Technology
Jin-Oh Park, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo
Kazuo Amakasu, Tokyo University of Marine Science & Technology

Abstract (Times New Roman 10pt)

To understand fault behaviors near the seafloor by using 3D multi-channel seismic data, we are developing an energy source system using underwater speakers for simultaneous shooting. In 2019, we have conducted numerical simulations of wave-field separation and a field experiment of seismic survey in the northern part of the Tokyo Bay. To evaluate accuracy of wave-field separation in simultaneous shooting using pseudo-random source waves, we compared pseudo-random numbers by Mersenne Twister, which is presently the most used pseudo-random number generator, with physical random numbers. As a result, the former provided nearly the same accuracy in wave-field separation as the latter, showing that the pseudo-random numbers are available as source waves in simultaneous shooting with high accuracy. Regarding the seismic survey in the Tokyo Bay, shallow geological structures below the seafloor were successfully imaged. Interestingly, a gas-bearing layer was detected as a low velocity zone with P-wave velocity of 1200 m/s.

1. はじめに

近年、マルチチャンネル反射法地震探査（以下、地震探査）は著しく三次元化が進み、資源開発のみならず地震防災分野でも多くの成果をあげてきた（e. g., 朴ほか, 2008）。一方、三次元データを取得するためには複数本の受振ケーブル（ストリーマーカーケーブル）を船尾から曳航する必要があり、調査船は大型化してきた。現在では、作業の効率化から1万トン超の船が主流である。そのため、作業単価が高く、資源開発や一部の大規模学術調査以外では、三次元データを取得することが困難になってきた。

そこで、筆者らは、一本のストリーマーカーケーブルのみを用いて三次元地震探査データを取得する同時発振方式による海上三次元地震探査システムの開発に取り組んでいる。本研究

では、そのシステムの中核をなす同時発振用振源の開発を目的とする。図1は、従来型の三次元地震探査データ取得システムと同時発振方式によるシステムとを比較したものである。前者は複数の受振ケーブルを曳航するのに対し、後者は1本の受振ケーブルしか曳航しない。曳航ケーブルの数を1本にすることにより、調査船の小型化が可能になり、作業コストを低減できる。振源としては、市販の水中スピーカーを用いることで観測機器のコスト削減を目指している。

同時発振方式では、振源波形として非パルス波を発振する。パルス波を発振するエアガンと比べて発振時の音圧レベルが非常に小さいという特徴があり、生態系への影響が小さいため、環境保全の観点からも将来の振源として適切であると考えられる。しかしながら、データ観測後に、各々の振源に対する波動場に分離しなければならないため、波動場分離の精度がデータ品質に大きく影響する。令和元年度は、高精度な波動場分離を可能にする振源波形の最適化のための検討およびフィールド実験を実施した。以下に、これらの研究成果について報告する。

2. 問題設定・方法

(1) 波動場分離における精度の検討

従来方式による三次元地震探査データと遜色ない品質のデータを同時発振方式によって取得するためには、波動場分離を高精度に実施する必要がある。波動場分離の精度は、同時発振で使用する振源波形に依存する。平成30年度までに実施した数値シミュレーションおよび水槽実験により、スイープ波よりランダム波の方が有効であることが示された。ランダム波としては、まず理論的に最も乱数性が高い物理乱数が最適であると考えられるが、一方で乱数性にバラツキがあるという欠点がある。それに対し、疑似乱数は乱数性では物理乱数に及ばないが、漸化式で作成できることから様な乱数性を有する。従って、令和元年度は、両者による波動場分離精度の比較を数値シミュレーションにより実施した。ここで、物理乱数は情報・システム研究機構統計数理研究所から取り寄せ、疑似乱数は汎用数値解析ソフトウェア MATLAB で作成し

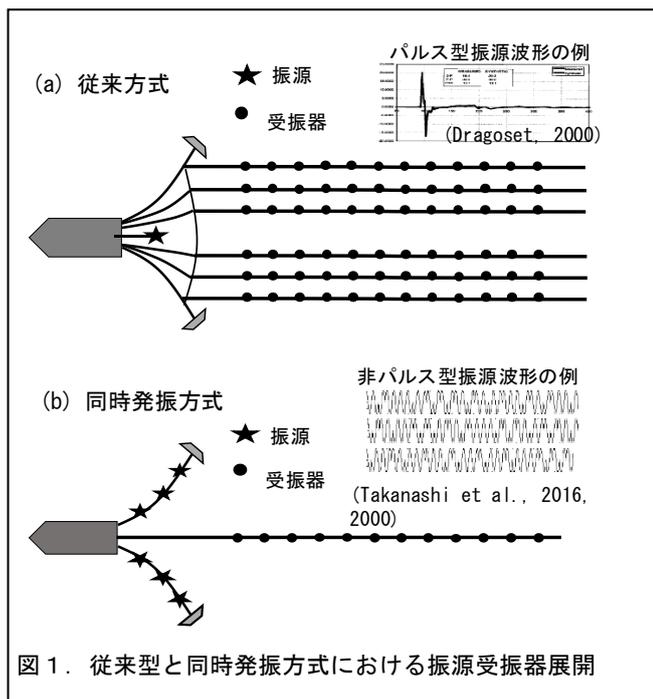


図1. 従来型と同時発振方式における振源受振器展開

た。

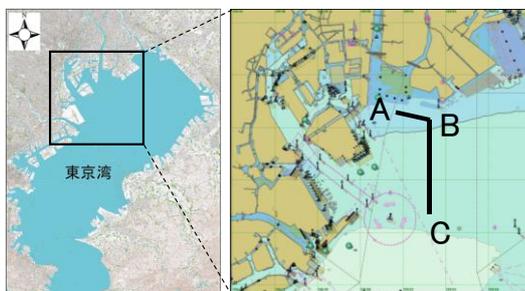
(2) フィールド実験

同時発振方式の実用化のためには、漁船や商船などの船舶が輻輳する海域においても探査可能であることが望ましい。そのような海域での探査を可能にするため、まず音圧が低く海洋生態系への影響が小さい振源であること、次に受振ケーブルが短く航行船舶の障害にならない必要がある。そのため、本研究では、振源として水中スピーカー、受振ケーブルとして受振部 10m のストリーマケーブルで観測システムを製作した。令和元年度は、この観測システムを用いて、国内でも有数の船舶輻輳海域である東京湾北部で地震探査実験を行った。

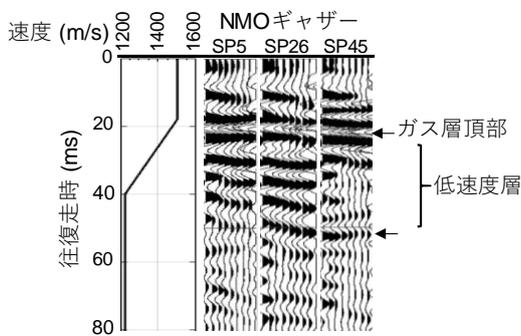
3. 結果と考察

波動場分離精度に関する検討として、波動場分離後の S/N 比を比較した。現在最も良く用いられている疑似乱数であるメルセンヌツイスターによって作成した疑似乱数と物理乱数とを比較した結果、両者の S/N 比に大きな違いは見られなかった。ただし、物理乱数が外部からの取り寄せであるため、サンプル数 5 個で比較した。前者と後者の S/N 比の平均は、それぞれ 192.2 および 175.9 であった (高中, 2020)。

東京湾北部におけるフィールド実験結果の一例を図 2 および 3 に示す。図 2(a) に示した測線は、浦安沖から羽田沖に掛けての 2 測線を連結したものである。水深 10m~20m の沿岸域で船舶の往来が激しく、観測中には調査船の近傍を漁船や商船が多く航行した。しかしながら、作業を中断することなく、継続的にデータを収録できた。取得されたデータの速度解析を実施した結果、図 2(b) に示すとおり、海底下約 10ms (約 7m) 以深に低速度層の存在が明らかになった。速度解析の結果によれば、P 波速度が 1200 m/s でありガス層と解釈できる (Tsuru et al., 2019)。



(a) 測線位置図



(b) 速度解析結果

図 2. 東京湾北部フィールド実験測線図および速度解析結果。(a) 測線は浦安沖 AB から羽田沖 BC に掛けての 2 測線を連結して表示した。(b) 速度解析の結果、海底下約 10ms に低速度

層が検出された。

図 3 に、フィールド実験で得られた地震探査断面図を示す。この図から、ガス層と考えられる低速度層は浦安沖から羽田沖に掛けて分布していると推定される。

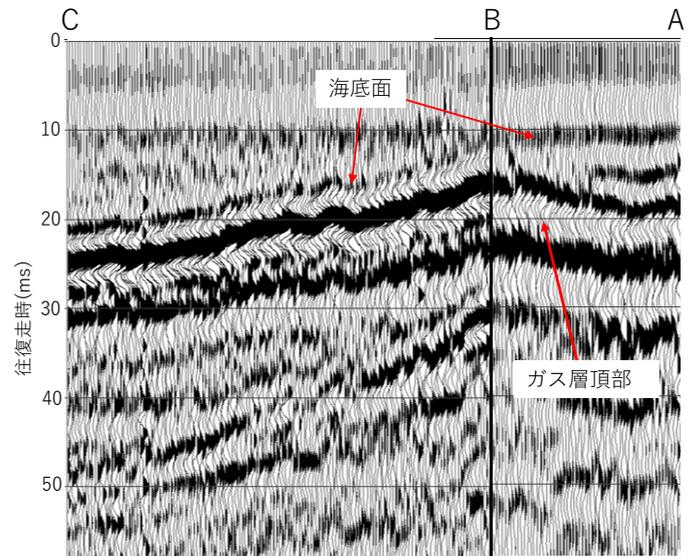


図 3. 東京湾北部フィールド実験で取得された地震探査断面図。図中の A、B および C は、図 2(a) の A、B および C 地点を表す。

4. まとめと今後の展望

令和元年度は、高精度な波動場分離を可能にするための (1) 振源波形の最適化に関する検討、および、(2) 東京湾北部におけるフィールド実験を実施した。その結果、

- (1) 波動場分離の精度の観点から、メルセンヌツイスターによる疑似乱数が物理乱数と同程度の S/N 比を有することが明らかになった。
- (2) 船舶が輻輳する海域でのフィールド実験において、作業を中断することなく観測を実施できた。また、得られた記録からは、浅部の地下構造イメージングが可能であることが実証された。

以上により、今後は、疑似乱数で作成した振源波形を用いた同時発振方式の三次元地震探査により、東京湾北部の浅部地質構造、断層の発達およびガス層の分布域を明らかにする研究を実施したい。

参考文献

- (1) 朴進午, 鶴哲郎, 野徹雄, 瀧澤薫, 佐藤壮, 金田義行, 2008: “紀伊半島南東沖南海トラフでの高分解能 3 次元反射法地震探査と重合前深度マイグレーション処理”, 物理探査, 61, 231-241.
- (2) 高中一希, 2020: “同時発振式反射法地震探査における最適発振波形の検討” 令和元年度卒業論文, 東京海洋大学.
- (3) Tsuru, T., K. Amakasu, J.-O. Park, J. Sakakibara, M. Takanashi, 2019: “A new seismic survey technology using underwater speaker detected a low-velocity zone near the seafloor: an implication of methane gas accumulation in Tokyo Bay”, Earth, Planets and Space, 71-31, 2019.

日本海を中心とした大気-海洋間の力学エネルギー循環：短期気象イベントへの メソ+海洋渦の応答

Global/Local Energy Circulation between Atmospheric Turbulence and Mesoscale Oceanic structures in Neighboring Seas around the Japan Islands

和川 拓, 水研機構・日水研, E-mail: wagawa(at)affrc.go.jp

川口 悠介, 東大・大気海洋研, E-mail: ykawaguchi(at)aori.u-tokyo.ac.jp

矢部 いつか, 東大・新領域, E-mail: yabe.itsuka(at)s.nenv.k.u-tokyo.ac.jp

井桁 庸介, 水研機構・日水研, E-mail: igeta(at)affrc.go.jp

磯田 豊, 北大・水産, E-mail: isoda(at)fish.hokudai.ac.jp

藤尾 伸三, 東大・大気海洋研, E-mail: fujiio(at)aori.u-tokyo.ac.jp

伊藤 幸彦, 東大・大気海洋研, E-mail: itohsach(at)aori.u-tokyo.ac.jp

豊田 威信, 北大・低温研, E-mail: toyota(at)lowtem.hokudai.ac.jp

Taku Wagawa, Japan Sea National Fisheries Research Institute, Japan Fisheries Research and
Education Agency

Yusuke Kawaguchi, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

Itsuka Yabe, Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

Yosuke Igeta, Japan Sea National Fisheries Research Institute, Japan Fisheries Research and
Education Agency

Yutaka Isoda, Graduate School of Fisheries Sciences, Hokkaido University

Shinzou Fujio, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

Sachihiko Itoh, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

Takenobu Toyota, Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

Abstract

Hydrography, current and microstructure have been repeatedly examined downstream of the Tsushima Warm Current in the Japan Sea. A fixed station, designated as FRA-AORI Tsushima Warm Current Observatory (FATO) and located off the Sado Island, was inter-seasonally revisited by ships to take nearly day-long observations, in June, July, and October. During the June and July surveys when anticyclones were present, the internal wave was amplified near the critical depth of anticyclones' bottom. In contrast, during October, it was apparently stabilized in terms of microstructure perturbations because of a mesoscale cyclone.

1. はじめに

日本海では対馬暖流主軸の分岐、ジェット構造の先鋭化、沖合分枝流の蛇行、暖水渦の発達・主流軸からの剥離など、非常に複雑で不可測的な振る舞いが多くみられる。このような海洋表層の流動場における非線形的な現象は、次にサブメソ規模のフィラメント状構造を作り出すことで相対渦度を空間的により複雑な分布にシフトさせる。

負の渦度をもつメソ・サブメソ現象（メソ+）が、大気擾乱に起因する近慣性内部重力波（Near-inertial Internal Wave = NIW）エネルギーをその内部に取り込むことで海洋中・深層に激しい乱流混合を引き起こす。負の渦度に取り込まれたNIWは、エネルギーフラックスを保存するよう振幅と振動数を刻々と変化させる。この変化は、NIWがメソ・サブメソ構造に捕捉され下方伝播する過程においてキーとなる部分でもある。本申請課題では、日本海の力学エネルギーの“終着点”となり得るポイント（蛇行する対馬暖流フロントやメソ・サブメソ渦内部）での乱流観測を実施し、周辺に投影される波動伝播の痕跡および乱流混合の履歴を検出することを目指し、共同研究を行った。

2. 問題設定・方法

複数の船舶観測を異なる季節に実施することで、大気擾乱の頻度や経路の違い、および対馬暖流の流入量との関連に注目した日本海における乱流エネルギー分布地図の季節性を現場観測の立場から追求することを目的としている。

北大水産のおしよろ丸（OS-07）とJAMSTEC・東大海研の新青丸（SS-10）を用いた海洋調査では、対馬暖流フロント周辺に現れるジェット流軸や暖水渦に対して複数経路の断面観測を敢行し、メソ+渦度周辺の波動伝播の痕跡および乱流混合の履歴について面的情報の抽出を試みた。OS-07では、渦の移動・変形を連続的にモニタリングするために漂流ブイを用いた追跡観測も並行して実施した。水産研究・教育機構の天鷹丸を用いた航海（TY-06）では、佐渡島沖合域に1年間の係留系装置（FRA-AORI Tsushima Warm Current Observatory; FATO）を設置した。ここでは、中・深層に流速計・水温・塩分計を搭載し、大気由来のNIWエネルギーの海洋最深部での伝播状況を明らかにすることを目的とした。

3. 結果と考察

本年度は、計画書の通りに3つの航海を全て成功裏に収めることができた。また、全ての航海において、係留系の設置位置上でVMPの定点連続観測を実施した。また、OS-07とSS-10では、CTD・VMP鉛直断面観測と、漂流ブイを計12基投入することに成功した。TY-06では、上層にADCPを2台、中・深層に単層流速計を7台と水温・塩分計を2台搭載したFATOの設置に成功した（Fig. 1）。

観測データの解析結果の一部として、Fig. 2に各航海における乱流運動エネルギー散逸率（ ϵ ）について時間軸上の鉛直断面を图示する。

本観測では、背景の流速場による相対渦度が負となる状況

下で実施された、TY-06 と OS-07 での密度成層の鉛直構造は互いに類似した結果であった。特に、水深 30 m と 200 m 付近に強い成層が見られた。一方、 ϵ の鉛直構造は両航海とは構造上の違いが見られた。TY-06 において、 ϵ は 200–230 m の強成層帯直下で極大となり、その値は $10^{-8} \text{ W kg}^{-1}$ を超えていた。これに対して OS-07 では、同水深帯における ϵ は概して低い値であった。同水深帯にわずかに分布していた高い ϵ の値は 1ヶ月前 (TY-06) の構造が減衰した結果であると考えられる。TY-06 の直前には移動性の強い低気圧が FATO 上を通過していったのに対し、OS-07 の際には顕著な気象擾乱がなかった。このような NIW を励起する気象擾乱の違いが、両航海における ϵ の鉛直構造の差異の要因の一つと考えられる。

一方、正の渦度の環境下で実施された SS-10 での結果は、TY-06 や OS-07 のそれとは顕著に異なっていた。まず、表層混合層が約 40 m まで深化し、強い成層帯はその下端のみであった。これにより、大きな ϵ は空気に曝される表層混合層内にほとんど制限されて分布していた。これは正の渦度が故に、その内部で NIW の捕捉が起こらなかったためであると考えられる。

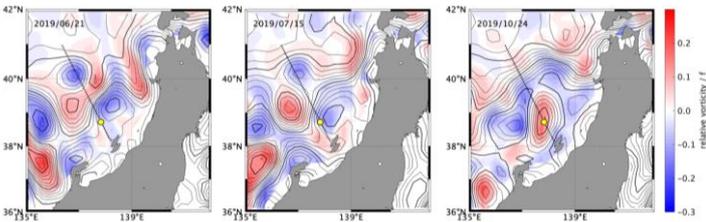


Fig. 1: Relative vorticity normalized by local f for periods of (left) TY-06, (middle) OS-07, and (right) SS-10. Dotted lines and yellow circles denote our observation lines and mooring, respectively.

4. まとめと今後の展望

高気圧性渦の影響下における TY-06 と OS-07 の観測では、内部波がメソスケール背景流の渦度偏差が消失する、高気圧性渦の臨界深度付近の内部波の増幅とそれに伴う乱流混合のシグナルが捉えられた。一方、SS-10 では低気圧性渦の影響下にあったためか乱流運動エネルギーの活性度は低調であった。

今後の展開としては、係留系による観測では鉛直および時間方向に連続的な資料を取得できるアドバンテージがある。逆に、船舶観測では、機動的かつ水平・鉛直方向に高分解能という空間的な優位性がある。2020年6月に予定の係留系の回収後には、この二種類の観測を組み合わせることにより、時空間的に連続な内部波の実像を浮かび上がらせることが可能となる。

本研究により定量化される乱流混合は、海洋物理学だけでなく水産学上の学術的価値も併せ持つ。対馬暖流が流れる本申請課題の対象海域はスルメイカやブリなど水産資源の主要な産卵・成育場であり、日本の水産業において重要な海域と言える。これらの水産資源の成長・生残の制御要因として餌環境が重要であり、特に栄養塩が基礎生産の制限要因となる場合、乱流混合による表層への栄養塩供給が生態系にインパクトを与えている可能性がある。実際、本研究における3航海では、各断面や連続観測前後において、採水による各種生

化学パラメータの測定も実施した。それらのパラメータと本研究が提示する乱流混合に関する定量的な情報を組み合わせた今後の研究は水産業の運営の高度化にも貢献するものと考えられる。

本研究では、当初は気象・海氷に関わる観測やそれらのデータ解析も計画していたが、人的・資金的な資源の制約により、十分に行うことができなかった。大気の短期気象イベントや周辺の海水変動の役割は、日本海内部のエネルギー循環において重要な役割を持つと考えられるため、今後の研究で実施を目指したい。

本研究は前年度の学際連携研究から継続課題である。気象擾乱の去来に対する海洋の応答については、前年度から継続して研究をしてきた。その中で、最新の係留系観測やグライダー観測のデータを解析した内容をまとめた論文が、国際学術雑誌に2編受理されて出版されたことは特筆すべき成果と言える (Wagawa et al., 2020, Kawaguchi et al., 2020)。

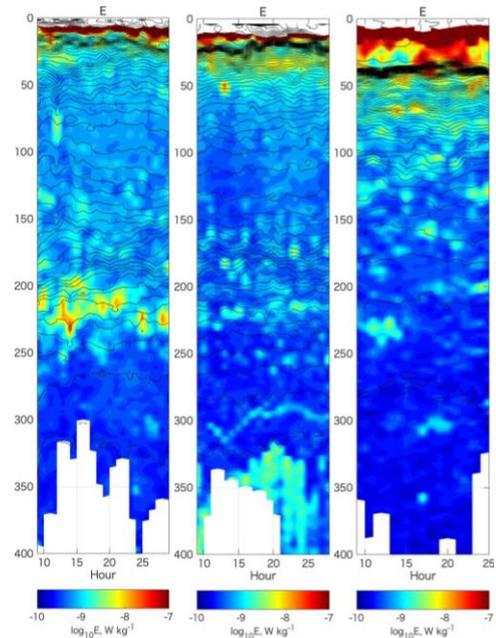


Fig. 2: Temporal evolutions of dissipation rate of turbulent kinetic energy at the FATO site during the (left) TY-06, (middle) OS-07, and (right) SS-10. Contours show the Brunt-Vaisala frequency.

参考文献

- (1) Kawaguchi, Y., T. Wagawa, Y. Igeta, "Near-inertial internal waves and multiple-inertial oscillations trapped by negative vorticity anomaly in the central Sea of Japan", *Prog. Oceanogr.*, 181 (2020), 102240, <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2019.102240>, 2020.
- (2) Wagawa, T., Y. Kawaguchi, Y. Igeta, N. Honda, T. Okunishi, I. Yabe, "Observations of oceanic fronts and water-mass properties in the central Japan Sea: Repeated surveys from a glider", *J. Marine System*, 201(2020), 103242, <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2019.103242>, 2020.

海洋表層の鉄の酸化還元状態と生物利用能に関する研究

Fe redox status and bioavailability in the surface ocean

近藤 能子, 長大院・水産・環境科学総合研究科, E-mail: yoshikondo@nagasaki-u.ac.jp

山中 紘輝, 長大・水産, E-mail: bb45116104@ms.nagasaki-u.ac.jp

藤田 夏穂, 長大・水産, E-mail: bb45116090@ms.nagasaki-u.ac.jp

小畑 元, 東大・大気海洋研, E-mail: obata@aori.u-tokyo.ac.jp

Yoshiko Kondo, Graduate School of Fisheries and Environmental Sciences, Nagasaki University

Koki Yamanaka, Faculty of Fisheries, Nagasaki University

Natsuho Fujita, Faculty of Fisheries, Nagasaki University

Hajime Obata, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

Abstract

The bioavailability of Fe is controlled by its chemical speciation in seawater. Since the reduced form of Fe, Fe(II), is more bioavailable than Fe(III)-ligand complexes, the existence of Fe(II) has important implication on Fe biogeochemical cycles. In this study, the distributions of Fe(II) and its half-life were investigated in the upper 500-m of the East China Sea shelf/shelf break area in July 2019. The maxima of Fe(II) were observed in the surface layer (13 - 15 m), comprising 3 - 21% of dissolved Fe; these high Fe(II) in the surface water could be derived from photochemical reaction. The Fe(II) minima around chlorophyll *a* maximum suggested an aggressive uptake of Fe(II) by in-situ phytoplankton communities. In this study area, the Fe(II) half-life ranged from 3 to 22 minutes within the euphotic layers, relatively longer than that in the oceanic region in the subtropical South Pacific. These results suggested that bioavailability of Fe was high in the East China Sea shelf/shelf break area.

1. はじめに

微量金属元素の「鉄」は植物プランクトンの生長に不可欠な元素であるが、表層海洋における溶存鉄濃度はピコ・ナノモルレベルと極めて低い。海水中の溶存鉄は、溶存有機物と錯形成した有機錯体鉄、無機イオン、水酸化鉄およびそれが凝集した無機コロイド鉄など様々な形態で存在する。このうち、表層海水中の溶存鉄の99%以上は有機錯体鉄として存在することが示されているが、珪藻など多くの真核植物プランクトンは有機錯体鉄を直接細胞内に取り込むことができず、海洋表層で起こる光化学反応や生物細胞表面での還元反応により生じた二価鉄(Fe(II))を取り込んでいると考えられている(e.g., Shaked et al., 2005)。一方で表層海水など好気的環境下におけるFe(II)の半減期は数分~数時間と極めて短い(e.g., Santana-Casiano et al., 2005)。従って、現場海洋における植物プランクトンによる鉄利用効率を知るためには、溶存鉄濃度を調べることに加え、海水中のFe(II)の生成・消失機構を解明することが重要になると考えられる。本研究では、黒潮・台湾暖流といった表面海流や大陸棚の影響により溶存鉄濃度やその化学形態が変化することが予想される東シナ海大陸棚斜面周辺域をフィールドとし、現場海洋における鉄の化学的存在形態の把握、特に生物利用能の高いFe(II)の挙動やその半減期と海洋環境特性の関係を理解することを目的とした。

2. 問題設定・方法

海水試料は、2019年7月10日~18日に実施された長崎丸NS33次航海中、東シナ海陸棚域(M1, M3)、陸棚斜面域(M7)、海盆域(M9)の4測点において、微量金属汚染防止に注意を払いケブラーロープに直付けした酸洗浄ニスキンXボトルにより、最大6層から採取した(13・506 m)(Fig. 1)。ニスキンXボトルは回収後、長崎丸採水器室内に設置したブース内に運び込み、孔径0.2 μmのAcropackフィルターを用いた重力濾過によりFe(II)濃度およびその半減期測定、溶存鉄分析用の濾過海水試料を採取した(ただし、現場のFe(II)濃度測定についてはM3, M7, M9のみ実施)。現場のFe(II)濃度は海水

試料の採取直後、フローインジェクション-ルミノール化学発光法(Bolster et al., 2018)にて船上分析した(検出限界: 0.005 - 0.019 nM)。Fe(II)の半減期を求めるための海水濾過試料は-20°Cで冷凍保存し、陸上研究室へ持ち帰った。溶存鉄分析用の試料は高純度塩酸でpH<1.7に調整後、研究室にて1ヶ月以上室温で静置した後、カソーディックストリッピングボルタンメトリーによる標準添加法(Croot and Johansson, 2000)にて溶存鉄濃度を決定した(検出限界: 0.041 nM)。Fe(II)半減期は、凍結保存した海水試料を解凍後、暗所室温で静置して試料中のFe(II)を全て酸化させた後、既知濃度のFe(II)標準液を添加し、現場水温・暗条件下でのFe(II)シグナルの消失(酸化)速度から見積もった。

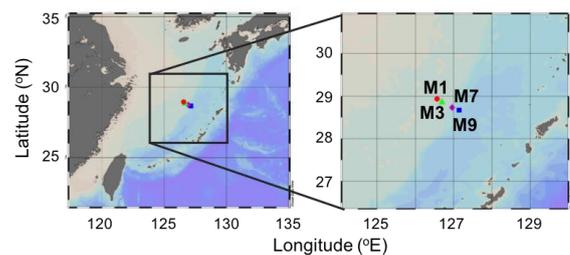


Fig. 1 Sampling stations during T/S *Nagasaki-maru* NS33 cruise.

3. 結果と考察

東シナ海陸棚斜面周辺域における現場のFe(II)濃度と溶存鉄濃度はそれぞれ0.006・0.150 nM、0.39・2.1 nMの範囲で分布しており、Fe(II)濃度は日中の表層(13・15 m層)で極大を示した(Fig. 2)。有光層内では溶存鉄濃度に対して最大21%がFe(II)として存在しており、植物プランクトン細胞に取り込まれやすい形態であるFe(II)のみでも高栄養塩低クロロフィル海域など外洋域表層の全溶存鉄の濃度レベル(<0.1 nM)に比べ高くなるケースも見られた。PARとFe(II)の関係

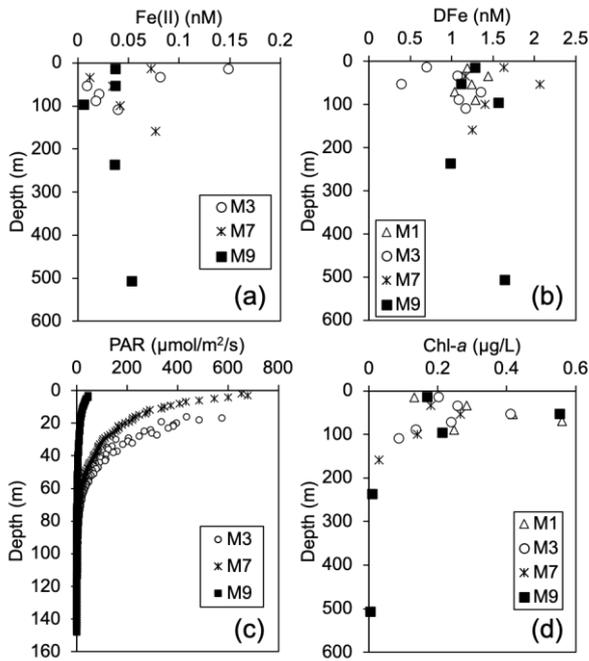


Fig. 2 Vertical distributions of (a) Fe(II), (b) dissolved Fe, (c) PAR and (d) chlorophyll *a*.

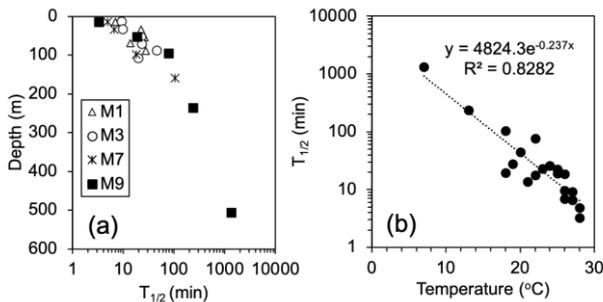


Fig. 3 (a) Vertical distribution of Fe(II) half-life ($T_{1/2}$) and (b) relationship between temperature and Fe(II) half-life in this study area.

から、日中の表層水で観察された Fe(II)濃度極大は光化学反応に起因すると考えられ、溶存鉄が十分に存在する東シナ海陸棚域周辺表層では光強度が現場の鉄の生物利用能に強い影響を与えると考えられた。実際に、クロロフィル極大層付近では Fe(II)濃度極小も確認された。一方で調査海域は好気的環境であるにも関わらず、有光層以深においても最大 0.052 nM の Fe(II)が観測された。

Fe(II)の半減期($T_{1/2}$)は、測点 M3 最深層を除き深度とともに対数的に増加する傾向を示した (Fig. 3 a)。有光層内の Fe(II)半減期は 3 - 22 min の範囲であり ($n=10$)、日中に生成された Fe(II)は日没後数時間で消失すると考えられたが、東部南太平洋亜熱帯外洋表層水の半減期 (~1 min, Kondo and Moffett, 2015) に比べてやや長めであったことから、同海域に比べ生成された Fe(II)が残存しやすい環境である可能性が示唆された。一般的に Fe(II)半減期は低水温で長くなることが知られており、本研究でもその傾向が認められ、黒潮中層水(水温: 5 - 15°C, 塩分: 33 - 34) (Zhang et al., 2007) では 22 時間を越えるものもあった (Fig. 3b)。よって、無光層で観察された Fe(II)は、中深層における有機物分解や還元環境下の堆積物より供給された Fe(II)の長期保存の影響と考えられた。一方で、M3

最深層含め陸棚底層付近に張り出していた黒潮亜表層水(水温: 15 - 25°C, 塩分: 34 - 35)では回帰直線から外れやすい点もあり、水温以外の要因が Fe(II)半減期に影響していることが示唆された。これまで、水温以外の Fe(II)半減期変動要因には有機物との錯形成、pH、活性酸素などが挙げられており、今後は鉄と錯形成する溶存有機物(有機配位子)やその他の要因についても Fe(II)半減期に与える影響を把握することが求められる。

4. まとめと今後の展望

本研究により、2019 年 7 月の東シナ海陸棚斜面周辺域表層では、Fe(II)濃度の光強度の上昇に伴う増加、加えて亜熱帯外洋域に比べ Fe(II)半減期が長めである可能性が示され、植物プランクトンなど光合成生物にとって溶存鉄の生物利用能は高いことが明らかとなった。加えて、無光層でも Fe(II)の存在が認められ、水柱全体で鉄の生物利用能は高い可能性も考えられた。一方、Fe(II)半減期は概ね水温の変化で説明することができたが、陸棚上測点下層部に存在した黒潮亜表層水の一部では、水温から推定される酸化速度よりも早く酸化する場合もあり、有機物との錯形成など水温以外の要因が鉄の酸化還元状態に影響を与えていると考えられた。東シナ海周辺域は腐植物質など堆積物由来の溶存有機物が多く分布すると考えられるため、今後は他海域との比較とともに、鉄と錯形成する溶存有機物(有機配位子)が Fe(II)半減期に与える影響を現場濃度レベルで評価することが求められる。

謝辞

本研究を実施するにあたり、長崎大学水産学部練習船長崎丸 NNS33 次航海の船長、主席研究者の九州大学応用力学研究所遠藤貴洋准教授には試料採取の機会について便宜を図っていただきました。また、長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科の武田重信教授には観測機材の貸与を、船乗組員・乗船研究者の皆様には船上作業について援助していただきました。この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- (1) Bolster, K. M., M. I. Heller, and J. W. Moffett, 2018: "Determination of iron(II) by chemiluminescence using masking ligands to distinguish interference", *Limnol. Oceanogr.: Methods*, 16, 750-759
- (2) Croot, P. L., and M. Johansson, 2000: "Determination of iron speciation by cathodic stripping voltammetry in seawater using the competing ligand 2-(2-thiazolylazo)-*p*-cresol (TAC)", 12, 565-576
- (3) Kondo, Y., and J. W. Moffett, 2015: "Iron redox cycling and subsurface offshore transport in the eastern tropical South Pacific oxygen minimum zone", *Mar. Chem.*, 168, 95-103
- (4) Santana-Casiano, J. M., M. González-Dávila, and F. J. Millero, 2005: "Oxidation of nanomolar levels of Fe(II) with oxygen in natural waters", *Environ. Sci. Technol.*, 39, 2073-2079
- (5) Shaked, Y., A. B. Kustka, and F. M. M. Morel 2005: "A general kinetic model for iron acquisition by eukaryotic phytoplankton", *Limnol. Oceanogr.*, 50, 872-882
- (6) Zhang, J., S. M. Liu, J. L. Ren, and G. L. Zhang, 2007: "Nutrient gradients from the eutrophic Chengjiang (Yangtze River) estuary to the oligotrophic Kuroshio waters and re-evaluation of budgets for the East China Sea Shelf", *Prog. Oceanogr.*, 74, 449-478

円口類ヌタウナギから俯瞰する体液調節能力の起源と進化

Body fluid homeostasis of hagfish: origin and evolution of osmoregulation

山口 陽子, 島大・学術研究院・農生命, E-mail: yyamaguchi(at)life.shimane-u.ac.jp

加治佐 直子, 島大・生物資源, E-mail: a161006 (at)matsu.shimane-u.ac.jp

横田 智弘, 島大・生物資源, E-mail: a161031 (at)matsu.shimane-u.ac.jp

高木 互, 東大・大気海洋研, E-mail: watarutakagi(at)aori.u-tokyo.ac.jp

小川 駿太郎, 東大・大気海洋研, E-mail: ogawa(at)aori.u-tokyo.ac.jp

Yoko Yamaguchi, Institute of Agricultural and Life Sciences, Academic Assembly, Shimane University

Naoko Kajisa, Faculty of Life and Environmental Sciences, Shimane University

Tomohiro Yokota, Faculty of Life and Environmental Sciences, Shimane University

Wataru Takagi, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

Shuntaro Ogawa, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

Abstract

In marine teleosts, as well as other gnathostomes, the gill and kidney work together to maintain body fluid homeostasis. We investigated the physiology of hagfish, the only extant osmo-ionoconforming vertebrates, aiming to explore the origin of our osmoregulatory ability. The analysis of free amino acids in the muscle suggested hagfish conducts amino acid-based osmoregulation at the single-cell level, rather than the whole-animal level, in response to changes in environmental salinity. The amino acid transporters belonging to the solute carrier family 6 may contribute to this process by promoting amino acid reabsorption in the kidney. Although the neurohypophysial hormone is a classical endocrine regulator of renal function, its receptors were detected in the hagfish brain, pituitary and atrium; the result implies that the hagfish neurohypophysial hormone has both shared and unique functions relative to that of other vertebrates.

1. はじめに

我々ヒトを含む脊椎動物の大半は、血漿浸透圧とイオン組成を海水の約 1/3 に維持する「調節型」動物である。これは鰓や腎臓などの体液調節器官と、それらを制御する内分泌系（ホルモン系）の働きによる。これに対して海産無脊椎動物は、体液組成が海水とほぼ等しい「順応型」であり、外環境の変化がそのまま体内に反映される。体内環境を高度に制御する「調節型」のしくみは、一体いつ、どのように獲得されたのだろうか？本研究は、現生脊椎動物で唯一「順応型」である円口類のヌタウナギをモデルとし、鰓や腎臓の機能とその内分泌制御を検証することにより、脊椎動物における体液調節能力の進化的起源に迫ることを目指すものである。

初年度はヌタウナギの鰓と腎臓に発現する遺伝子群を網羅的に同定した。その結果、ヌタウナギは「調節型」生物と共通する体液調節関連分子レパートリーを持つにも関わらず、環境塩分濃度が変化しても、鰓や腎臓の NaCl 輸送能は変動しないことがわかった。しかし同時に、腎臓がアミノ酸再吸収に関与する可能性を見出した。こうした成果に基づき、今年度は特にアミノ酸の輸送系ならびに既知体液調節ホルモンである下垂体後葉ホルモンの受容体（VTR）に着目し、機能分子群の局在解析を中心に研究を進めた。

2. 問題設定・方法

これまでに、①ヌタウナギの腎臓にアミノ酸輸送体が発現し、外環境塩分濃度に応じて発現レベルが変動すること、ならびに②同様のアミノ酸輸送系が筋肉にも存在することを見出した。アミノ酸は「順応型」生物において細胞内浸透圧調節に用いられる。ヌタウナギも細胞内にアミノ酸を蓄積することが報告されているが（Currie and Edwards, 2010）、体組織のアミノ酸プロファイルとその変動に関する研究は極めて少ない。腎臓のアミノ酸再吸収機構については四肢動物で研究が進んでおり、近位尿細管に複数のアミノ酸輸送体が発現することが知られている（Gonska et al., 2000）。これに対してヌ

タウナギの原腎管は分節のない単純な構造であり、機能分子の空間的な発現パターンに関する報告は皆無である。以上を踏まえ、本研究では筋肉中の遊離アミノ酸の種類とその変動を詳細に調べるとともに、腎臓におけるアミノ酸輸送体の局在を解析した。また初年度は体液調節器官を制御する内分泌系にも着目し、代表的な腎機能制御因子である後葉ホルモンについて、2種類の受容体を同定した。各受容体の mRNA 発現は脳・下垂体と心臓で特に高く、これら器官が主要なターゲットであると推測された。そこで本研究では、ヌタウナギ後葉ホルモン系の機能を理解することを目的とし、上記器官における受容体の局在を検証した。

実験に使用するヌタウナギ（*Eptatretus burgeri*）は、島根大学隠岐臨海実験所の協力を得て捕獲した。ヌタウナギを通常海水・高濃度海水・低濃度海水に1週間馴致し（各 $n = 5-6$ ）、組織を採取した。遊離アミノ酸解析では、筋肉組織に4倍量（v/w）の3%スルホサリチル酸を加えてホモジナイズし、得られた上清 10 μL を高速液体クロマトグラフィー（HPLC）に供した。HPLC は島根県産業技術センターの機器を利用した。また、通常海水に馴致した個体から脳と下垂体、心臓ならびに腎臓の組織を採取し、Bouin 液で固定した。厚さ 5 μm のパラフィン切片を作成し、DIG 標識 cRNA プローブを用いて in situ hybridization（ISH）を実施した（Takabe et al., 2012）。

3. 結果と考察

ヌタウナギ筋肉中の遊離アミノ酸の定量

通常海水で飼育したヌタウナギの筋肉において、最も多く含まれる遊離アミノ酸はプロリン（ $28.01 \pm 5.24 \text{ mM}$ ）であり、グリシン（ $23.06 \pm 6.33 \text{ mM}$ ）がこれに続いた。その他の遊離アミノ酸濃度は 6 mM を下回った。筋肉中の遊離アミノ酸濃度は外環境塩分濃度に比例し、上記のプロリン、グリシンに加え、トレオニン、セリン、グルタミン、アラニン、バリン、イソロイシン、ロイシンの変動が顕著であった（Fig. 1）。

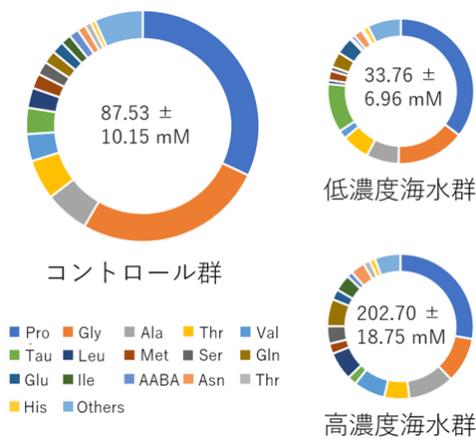


Fig. 1 スタウナギ筋肉中の遊離アミノ酸濃度の変動. HPLC による定量結果と筋肉の水分含有量から算出. 円の中心の値はすべての遊離アミノ酸濃度の合計値. 全処理群で濃度が 2 mM を下回る遊離アミノ酸は Others として示す.

腎臓におけるアミノ酸輸送体の局在

腎臓で発現するアミノ酸輸送体 solute carrier family (SLC) 6a6, 6a18 および 7a8 の局在を ISH で検証した. このうち SLC7a8 を除く 2 種類についてシグナルが得られ, SLC6a6 は糸球体と原腎管内腔上皮細胞に, SLC6a18 は原腎管内腔上皮細胞のみに局在した (Fig. 2).

後葉ホルモン受容体の局在

2 種類の後葉ホルモン受容体 (DN7735 ならびに DN20708) について, それぞれ脳・下垂体と心臓における局在を ISH で調べた. DN7735 の発現は脳の広範囲で見られたが, 特に手綱核 (Fig. 3B, C), 視床下部ならびに腺性下垂体にシグナルが集中していた (Fig. 3D, E). DN20708 のシグナルは心房内腔の細胞に散在した (Fig. 3F-H).

4. まとめと今後の展望

本研究により, これまで存在意義が不明だったスタウナギの腎臓が「アミノ酸を再吸収して細胞レベルでの体液調節に寄与する」ことが強く示唆された. 「調節型」生物の腎臓は, 強力な塩分・水分再吸収機構によって個体レベルの体液調節に貢献する. 今後は同じ円口類でありながら「調節型」のヤツメウナギとの比較研究を行い, 腎機能の変遷を検証したい.

VTR の解析からは, 四肢動物との共通点・相違点の両方が浮き彫りになった. DN7735 の構造と局在パターンは四肢動物の V1 型受容体に類似する. 一方, DN20708 は四肢動物の腎臓で働く V2 型受容体に近縁であるが, 心臓に局限して発現する例は他にない. これに関連して, 後葉ホルモンが昇圧作用も持つこと, スタウナギの血圧が現生脊椎動物で最も低いことは特筆に値する (Forster, 1998). スタウナギ後葉ホルモン系の機能を検証することで「後葉ホルモン系はいつから体液調節を司るようになったのか」を解明できると考えている.

参考文献

(1) Currie, S., Edwards, S.L., 2010: "The curious case of the chemical composition of hagfish tissues--50 years on". *Comp. Biochem. Physiol. A Mol. Integr. Physiol.*, 157, 111-115.
 (2) Gonska, T., Hirsch, J.R., Schlatter, E., 2000: "Amino acid transport in the renal proximal tubule." *Amino Acids*, 19, 395-

407.

(3) Takabe, S., Teranishi, K., Takaki, S., Kusakabe, M., Hirose, S., Kaneko, T., Hyodo, S., 2012: "Morphological and functional characterization of a novel Na⁺/K⁺-ATPase-immunoreactive, follicle-like structure on the gill septum of Japanese banded houndshark, *Triakis scyllium*." *Cell Tissue Res.*, 348, 141-153.
 (4) Forster, M.E., 1998: "Cardiovascular function in hagfishes." in: Jørgensen, J.M., Lomholt, J.P., Weber R.E., Malte H. (eds.), *The biology of hagfishes*. Chapman and Hall, London, pp. 237-258.

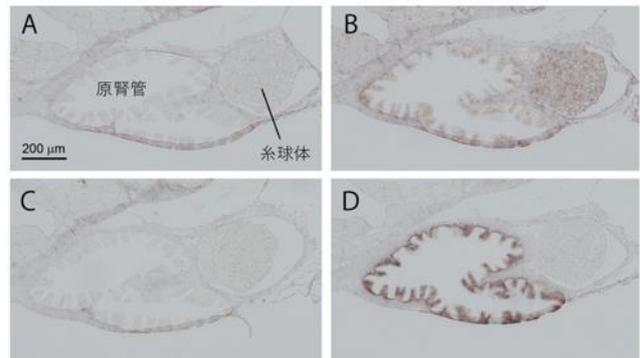


Fig. 2 腎臓におけるアミノ酸輸送体の局在. (A, B) SLC6a6. (C, D) SLC6a18. (A, C) センスプローブ. (B, D) アンチセンスプローブ.

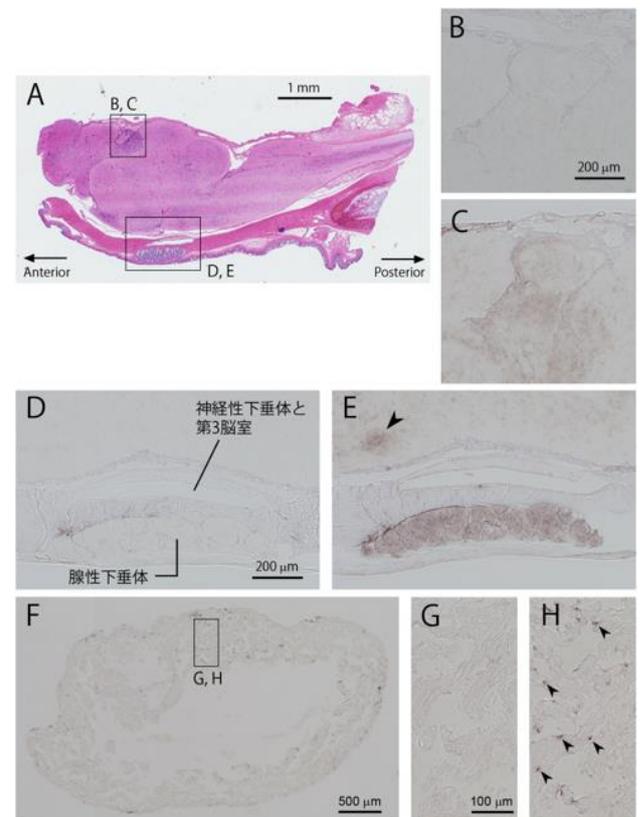


Fig. 3 後葉ホルモン受容体の局在. (A) 脳と下垂体の HE 染色像. (B-E) 脳と下垂体における DN7735. HE 染色像とは別の個体. (F-H) 心房内腔における DN20708. (B, D, G) センスプローブ. (C, E, F, H) アンチセンスプローブ. 視床下部における DN7735 のシグナル (E) ならびに心房内腔に散在する DN20708 のシグナルを矢尻で示す (H).

コウイカの雌による受精時の精子量調整

Sperm allocation at fertilization by female cuttlefish

佐藤 成祥, 東海大・海洋学部, E-mail: norico3000@tsc.u-tokai.ac.jp
岩田 容子, 東大・大気海洋研, E-mail: iwayou@aori.u-tokyo.ac.jp

Abstract

Sexual selection continues after copulation. In promiscuous species, females copulate more than one male, and some females control sperm usage and fertilization after copulation. Such post-copulatory sexual selection is called as “Cryptic Female Choice” and has significant influence on evolution of reproductive systems, however, it is very difficult to analyze as it usually occurs inside female body. Females of squid and cuttlefish copulate with multiple males, store sperm in their body, but fertilize eggs externally, therefore it can be ideal species to analyze the CFC. In this study, first, we analyzed detailed morphology of egg jelly layers, and examined how to estimate sperm usage pattern in two cuttlefish species *Sepia esculenta* and *S. japonica*. Second, we conducted behavioral study in Australian pygmy squid *Ideosepius hallami*. Two types of copulative behaviors, two sperm storage patterns, and female’s sperm removal behavior associating with male’s mating tactic were firstly revealed. These results suggest that reproductive systems in cephalopods would be excellent models for sexual selection studies.

1. はじめに

性選択は、配偶相手をめぐる同性間の競争や、配偶者選択だけでなく、交尾後にも生じることが知られている。雄間では交尾後に卵の受精をめぐって“精子間競争（精子競争）”が生じる。一方、雌は受精に使用する精子の選択を複数雄との交尾後に行う事が示唆されており、そのような現象は“隠れた配偶者選択（Cryptic Female Choice: CFC）”と呼ばれている。交尾を行う動物において、一般にCFCは体内で生じる過程であることや、精子競争と同時に生じ分離することが難しいことから、直接的な検証は非常に困難で、ほとんどされていないのが現状である。

多くの沿岸性イカ類は、雌雄ともに複数の配偶相手と交尾を行う乱婚である。イカ類の雌は交尾後に特定の器官に受け取った精子を貯蔵し、それを用いて産卵の際に卵を受精させるが、受精過程は体外で生じることから、CFCの検証に適した動物であると言える。中でもヒメイカ *Ideosepius pygmaeus* は最もCFCの研究が進んでいる種のひとつである。ヒメイカの雌は、体の大きな雄、交尾時間が長い雄と交尾した後は、体の表面に渡された精子塊を口でつばんで捨てること (Sato et al. 2013)、その精子塊除去行動は実際にその後産卵された卵の父性に影響している事が確認された (Sato et al. 2017)。さらに、近年貯精嚢に蓄えられた精子を用いた受精プロセスが初めて明らかになり、媒精は雌によって能動的に行われていること、産卵時に雌が受精に用いる一卵あたりの精子量は極めて少ないこと、卵ごとに使用された精子量が異なる事が確認されている (Iwata et al. 2019)。このことから、雌は産卵時に受精に使用する精子量をコントロールする事でも、CFCを行っている事が考えられる。しかし、このような貯蔵精子を使った受精様式や、精子塊除去・精子量調節によるCFCは、これまでのところごく一部の限られた種のみでしか研究されておらず、頭足類において一般的な現象なのかは明らかになっていない。

2. 問題設定・方法

ヒメイカで初めて明らかとなった、貯蔵精子を用いた体外受精のプロセスでは、雌がゼリーに包まれた状態の卵を腕の中に抱え、その後腕の付け根にある貯精嚢から一つ一つの卵に精子を注入する、というものである (Iwata et al. 2019)。その際、何重にも層になったゼリー層の、中央にできるトンネル状の卵の通り道に精子を注入することにより、ごく少量の

精子で効率的に受精することを可能にしている。イカ類の卵はどの種もゼリー層に包まれており、多数の卵で1本の房状になるもの、巨大な卵塊を形成するものなども見られるが、コウイカ類の卵は一つ一つがゼリーに包まれ、付着基質に産み付けられる。そこで、1) コウイカ類でも、ヒメイカで観察されたものと同様の受精様式をとるのかを検討するため、コウイカ類の卵とゼリー層の構造を明らかにすることを目的とした。

また、雌による付着精子塊除去によるCFCは、これまで日本に生息するヒメイカと、ダンゴイカ的一种 *Sepiadarium austrinum* (Wegner et al. 2013) でのみ報告されていた。ヒメイカ属には世界的に8種知られているが、ヒメイカを除く種では2種で交尾行動が記載されているだけであり、CFCを行うかどうかは不明である。そこで、2) ヒメイカと最も近縁であるオーストラリアに生息する *I. hallami* (Reid and Strugnell 2018) の繁殖行動を詳細に観察し、CFCの有無を明らかにすることを目的とした。

3. 結果と考察

1) コウイカ類の受精様式

岡山大学理学部附属牛窓臨界実験所より、海藻に自然産卵されたコウイカ *Sepia esculenta* とシリヤケイカ *S. japonica* の卵を、大気海洋研究所に輸送し、卵の観察および孵化まで飼育を行った。

卵の受精過程に重要と考えられる、卵を包むゼリー層の観察を行った結果、卵は6-7重の薄いゼリーの膜に層状に覆われており、その中央が、煙突状に突き抜けた構造になっていることが明らかとなった。このようなゼリー層の構造は、ヒメイカと同様であり、貯蔵精子を用いた受精様式も、同様であると考えられた。しかし、卵のサイズが大きく、精子とのサイズ比が大きいため、卵ゼリー層全体で精子の分布を観察することは困難であった。そこで、受精に用いた精子数を計数層状のゼリーを一枚ずつ剥がし、スライドガラスに貼り付けプレパラートにし、ヘキスト染色・観察する手法が有効であると考えられた。

また、コウイカ類で受精戦略を明らかにする上で、卵の父性判定を行うためのマイクロサテライトプライマーの作成が必要となる。そこで、次世代シーケンサーを用いた各ゲノムシーケンスを行い、マイクロサテライト領域を探索した。

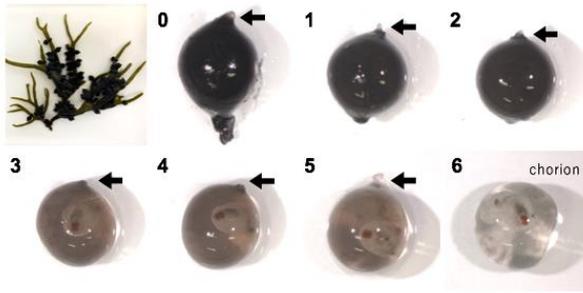


図1：海藻に産み付けられたシリヤケイカの卵塊（左上）と卵（左上2番目から右下へ、ゼリー層を剥く前、1～5層剥いたもの、6層剥き卵膜が見えているもの）

2) *I. hallami* におけるCFC

オーストラリア・クイーンズランド大学ノーストラブローク島の Moreton Bay Research Station にて、実験所前のアマモ場でハンドネットにより採集した個体を用い、雄1個体・雌1個体を組み合わせ、交接前・交接・交接後の行動を観察した。

交接前に雌が示す行動として、外套膜に存在する色素胞の大きさを変化させ、生殖腺部分を黒く覆い隠すような模様を示すボディパターンと、雄の方を向いて腕を開くポーズが見られた。また、雄が雌に近づいた際に、雌が付着基質から離れ逃げる様子が頻繁に観察された。

交接方法は2通り存在した。一つ目は、雄が雌の腕の付け根内側のポケットのような器官に精莢を入れ込んで完了するもので、交接時間は約1秒であった。二つ目は、雄が雌の腕の外側に精莢を付けることで完了するもので、交接時間はわずか1/100秒未満であった。以下、前者を“内側の交接”、後者を“外側の交接”と呼ぶ。雌雄ともに、同じ個体が両方の交接を行うことが観察されたことから、どちらの交接を行うかは個体によって決まっていなかった。雌が先述のボディパターンを示したとき、および雌が逃げて基質に付着していないときは、雄は外側の交接をし、雌が腕を開くポーズをしたときは、雄は内側の交接をしていた。このように、*I. hallami* では交接前の雌の行動により、雄が行う交接方法を変えていた。他のヒメイカ属の種において、このように雄が2通りの交接方法を使い分ける例は報告されていない。さらに、雄が雌に向かって墨を吐いた後に、奇襲するような形で外側の交接を行う例が見られた。

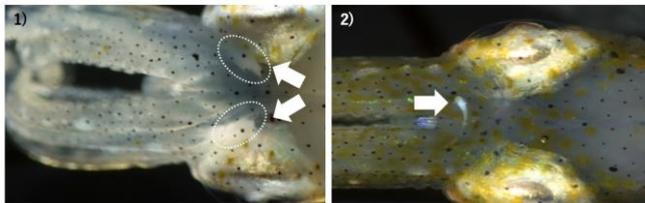


図2：交接後に精子塊が付着した雌。1) 内側の交接後、2) 外側の交接後

I. hallami の雌において、外側の交接を行った後に、しばしば腕全体を揺らす行動が観察された。この揺動行動が観察された場合は、交接を行ったにもかかわらず、雌の体に付着した精子塊の数が交接前後で増えていない事例がほとんどであった。つまり、*I. hallami* で観察された揺動行動は、ヒメイカ

の雌で観察されるつばみ行動と同様に、雄から受け取った精子塊を交接後に除去する行動であり、CFCを行っていると考えられる。以上の結果から、雌が示す生殖腺を隠すボディパターンおよび基質から離れる行動は交接の拒否を、腕を広げるポーズは交接の受け入れを示す配偶者選択を表していると考えられた。*I. hallami* が行う内側の交接は、雌が雄を受け入れた時に行うもので、雄は確実に精莢を渡すことができると考えられる。一方で、外側の交接は雌が雄を拒否した時に行うもので、渡した精莢を除去されるリスクがあると考えられる。

4. まとめと今後の展望

コウイカの卵の形態と受精様式は、先行研究であるヒメイカと同様であり、受精に使用される精子数の計数方法を検討することができた。また、次世代シーケンスによる各ゲノムシーケンスを行い、父性判定に用いるマイクロサテライト領域を探索した。今後水槽での交配実験や行動観察後に生まれた卵の観察、さらにマイクロサテライトDNA多型を用いた父性判定を行うことにより、コウイカ類の雌の受精戦略を明らかにすることが期待される。

ヒメイカでは、これまでの研究により、雄が一方向的に交接を行い、雌が交接後にCFCを行う、という繁殖生態が知られている。一方、本研究により、*I. hallami* では、交接前の雌の配偶者選択が雄のとの交接方法を決定し、さらに雌は雄の交接方法に応じてCFCも行っていることが明らかになった。しかし、配偶者選択、交接方法、および隠れた雌の選択と外套長は関連していなかったため、雌が雄のどのような形質を選択しているかは不明である。両種は同属内の近縁種であるのにも関わらず、このように大きく行動生態が異なった要因として、捕食リスク等、生息環境の違いによるものである可能性が考えられる。

参考文献

- (1) N. Sato, N., Kasugai, T., and H. Munchara, 2013: “Sperm transfer or spermatangia removal: postcopulatory behaviour of picking up spermatangium by female Japanese pygmy squid”, *Mar. Biol.*, 160, 553–561
- (2) Sato, N., Yoshida, M., and T. Kasugai, 2017: “Impact of cryptic female choice on insemination success: larger sized and longer copulating male squid ejaculate more, but females influence insemination success by removing spermatangia”, *Evolution*, 71, 111–120
- (3) Iwata, Y., Sato, N., Hirohashi, N., Kasugai, T., Yoshiro, Watanabe, Y., and E. Fujiwara, 2019: “How female squid inseminate their eggs with stored sperm”, *Cur. Biol.*, 29(2), R48–R49
- (4) Wegner, B. J., Stuart-Fox, D., Norman, M. D., and B. B. Wong, 2013: “Spermatophore consumption in a cephalopod”, *Biol. Lett.*, 9, 20130192
- (5) Reid, M., and J. M. Strugnell, 2018: “A new pygmy squid, *Idiosepius hallami* n. sp. (Cephalopoda: Idiosepiidae) from eastern Australia and elevation of the southern endemic ‘*notoides*’ clade to a new genus, *Xipholeptos* n. gen.”, *J. Phys. Soc. Japan*, 88, 63–7

現生シーラカンスの分類学的再検討

A taxonomic revision of extant Coelacanths.

岩田雅光, ふくしま海洋科学館, E-mail: m-iwata(at)aquamarine.or.jp
安部義孝, ふくしま海洋科学館, E-mail: abc(at)aquamarine.or.jp
藪本美孝, 北九州市立自然史・歴史博物館, E-mail: yabumoto(at)kmnh.jp
Teguh Peristiwady, インドネシア LIPI・Bitung 海洋生物保全施設, E-mail:
teguh.peristiwady(at)lipi.go.id
猿渡敏郎, 東京大学大気海洋研究所, E-mail: tsaruwat(at)aori.u-tokyo.ac.jp

Abstract

Discoveries of two extant Coelacanths, *Latimeria chalumnae* from Africa and *L. menadoensis* from Indonesia were epoch-making events in biology of the twentieth century. A multi-disciplinary team of researchers from Japan and Indonesia is currently working on a taxonomic revision of extant Coelacanths. Observations made on internal morphology based on CT scan imagery have revealed possible diagnostic characters distinguishing the two species. Presence of lung and spiral valve of *L. menadoensis* was confirmed through the first ever dissection of this species.

1. 研究の背景

現生シーラカンス二種の発見は、20世紀を代表する生物学上の大事件であった。シーラカンス (*Latimeria chalumnae* Smith 1939) はアフリカ大陸西岸から、インドネシアシーラカンス (*L. menadoensis* Pouyaud et al. 1999) (図1) はインドネシア沿岸域から報告されている。ふくしま海洋科学館は、2000年の開館当初からシーラカンスの研究に取り組んでいる。シーラカンスの生態解明に向けアフリカ、インドネシア海域へ自走式水中カメラ (ROV) を持ち込み、シーラカンスの生息環境に関する情報を集積し、さらには世界で初めてインドネシアシーラカンス幼魚の撮影に成功した。その研究成果は世界的にも注目されている (Iwata et al., 2019a, 2019b)。



図1: 解剖を行ったインドネシアシーラカンス (*L. menadoensis*), CCC No. 299. 130cmTL.

現生シーラカンスの研究と保全活動を進めるうえで問題となっているのが、二種を形態学的に識別する有効な分類形質が定義されていない点が挙げられる。これは、Smith (1939) による *L. chalumnae* の記載に比べ、Pouyaud et al. (1999) による *L. menadoensis* の記載論文が十分な形態学的情報を提供していないためである。そこで、ふくしま海洋科学館、東京大学大気海洋研究所、北九州市立自然史・歴史博物館、インドネシア LIPI の研究者が参加し、昨年度より東京大学大気海洋研究所共同利用学際連携研究として、「現生シーラカンスの分類学的再検討」に取り組んだ。昨年度は、今までに蓄積された生態データの解析と、外部形態の精密測定などを実施し論文を投稿した (Iwata et al., 2019a, 2019b, Saruwatari et al., 2019)。さらに、ふくしま海洋科学館で展示中の化石シーラカンスが新種であることが判明し、記載論文を投稿した (Yabumoto et al., 2019)。今年度は、内部形態に着目し、世界で初となる *L. menadoensis* の内臓を解剖し、研究を進めた。

2. 研究結果

2-1. CT スキャン画像による骨格系の観察: CT スキャン画像をもとに、*L. menadoensis* (CCC no. 299) (図1) の骨格を観察し、*L. chalumnae* ならびに化石ラティメリア科と比較した。その結果、背鰭の基板や腹鰭基底骨などに違いが認められた。しかし、*L. menadoensis* の骨格の観察は1個体に基づくものであり、これらの相違が個体変異の可能性も考慮すべきである。今後観察個体数を増やす必要がある。
2-2. 内臓の解剖と観察: ふくしま海洋科学館で冷凍保存中であった *L. menadoensis* の内臓を解凍し、解剖を行った。特筆すべき点は、世界で初めて *L. menadoensis* の腸のらせん弁の構造と、肺の存在を確認した点である。
2-3. *L. menadoensis* の個体識別と計測: ROV 観察によって得られた映像をもとに、生息海域における *L. menadoensis* の個体識別と体長の計測を試みた。世界初の観察となる全長 (TL) 31.5cm の幼魚のほか、90-137cmTL の個体を観察し、30尾の個体識別に成功した。



図2: 生息地で観察されたインドネシアシーラカンス (*L. menadoensis*)。

2-1~3 の研究成果は、2019年度日本魚類学会年会において発表した。
2-4. インドネシア LIPI との研究打ち合わせ: 2020年1月22日にインドネシア、ジャカルタにある LIPI 海洋研究所を訪問し、Augy SYAHAILATUA 所長らと今後の共同研究の進め方について打ち合わせを行った。インドネシア訪問中に *L. menadoensis* の完模式標本 (Holotype) の精密計測を予定していたが実現に至らなかった。SeaWorld 水族館にて展示中の *L. menadoensis* 標本 (図3) を確認し、観察を行った。



図3：ジャカルタ、SeaWorld 水族館で展示中のインドネシアシーラカンス，CCC No. 225. 110cmTL.

1月23,24日には、ジャカルタ日本人学校において、小2-5年、中1,2年生を対象とした「シーラカンス特別授業」を実施した(図4)。



図4：ジャカルタ日本人学校でのシーラカンス特別授業の様子。

2-5. 大型放射光施設 SPring-8 における X 線トモグラフィーを用いた内部構造の観察：2020年2月17-20日に、シーラカンスを含む脊椎動物の肺の進化過程を探る目的で、肺魚、硬骨魚類のシシヤモ (*Spirinchus lanceolatus*) の発育段階シリーズの内部形態を X 線トモグラフィーを用いて観察した。本研究はブラジルのリオデジャネイロ州立大学の Paulo Brito 教授と Camila Cupello 博士研究員との共同研究である。現在得られたデータを解析中である。

3. 今後の展望

平成30年度と令和元年度の東京大学大気海洋研究所共同利用学際連携研究の研究課題「現生シーラカンスの分類学的再検討」は、当初の目的である現生シーラカンス二種を識別する分類形質となりうる形態形質を見出すことに成功した。しかし、骨格系に認められた分類形質の有効性の検証には、複数個体の比較を待たざるを得ない。化石シーラカンス研究を精力的に行っているブラジル人研究者の参加により、本研究は日本、インドネシア、ブラジル三か国による国際的かつ学際的研究へと発展した。シーラカンス類の、ひいては脊椎動物の陸上への進出過程も含めた進化過程の解明に向けたスケールの大きな研究へと発展する可能性がある。

ジャカルタ日本人学校にてシーラカンス特別授業を行ったことにより、在インドネシア日本人社会において我々の研究に対する認知度が向上した。これは、今後現地で調査研究を行う上で、情報収集などに大いに貢献すると期待される。

4. 研究成果

4-1. 学会発表

1、岩田雅光・猿渡敏郎・藪本美孝・Teguh Peristiwady・Frensly D. Hukom・Dirhamsyah・Augy Syahailatua・Kawilarang W. A. Masengi・山内信弥・松崎浩二・藤井健

一・森俊彰・安部義孝. 水中映像によるインドネシアシーラカンス *Latimeria menadoensis* の個体識別と計測. 2019年度日本魚類学会年会, 高知大学, 2019年9月20~23日.

2、藪本美孝・岩田雅光・猿渡敏郎・鯉江洋・Teguh Peristiwady・Frensly D. Hukom・Kawilarang W. A. MASENGI・安部義孝. インドネシアシーラカンス *Latimeria menadoensis* の骨学的研究. 2019年度日本魚類学会年会, 高知大学, 2019年9月20~23日.

3、猿渡敏郎・岩田雅光・藪本美孝・鯉江洋・Teguh Peristiwady・Frensly D. Hukom・安部義孝. 現生シーラカンスの肺. 生きた化石の中のレリック? 2019年度日本魚類学会年会, 高知大学, 2019年9月20~23日.

4、藪本美孝・廣瀬浩司・黒須弘美・パウロ M. プリトー. 新標本の発見によるイクチオデクテス目魚類 *Amakusaichthys goshouraensis* の新たな大きささと特徴. 日本古生物学会第169回例会, 東京大学 駒場キャンパス, 2020年2月7~9日.

5、宮田真也・藪本美孝. レバノン上部白亜系サニー層産 Halecomorph 魚類とその意義. 日本古生物学会第169回例会, 東京大学 駒場キャンパス, 2020年2月7~9日.

4-2. アウトリーチ活動など

1、藪本美孝. 展示標本は新種だった! -ふくしま海洋科学館との共同研究-. 第60回日本動物園水族館教育研究会柏大会, ミニシンポジウム「水族館との共同研究. 魅力的なバーター」, 2019年12月15日.

2、岩田雅光・猿渡敏郎・松崎浩二. シーラカンス特別授業. ジャカルタ日本人学校. 2020年1月22,23日.

4-3. 論文

1, IWATA, M., Y. YABUMOTO, T. SARUWATARI, S. YAMAUCHI, K. FUJII, R. ISHII, T. MORI, F. D. HUKOM, DIRHAMSIAH, T. PERISTIWADY, A. SYAHAILATUA, K. W. A. MASENGI, I. F. MANDAGI, F. PANGALILA and Y. ABE. 2019a. Field surveys on the Indonesian coelacanth, *Latimeria menadoensis* using remotely operated vehicles from 2005 to 2015. Bull. Kitakyushu Mus. Nat. Hist. Hum. Hist., Ser. A, 17: 49-56.

2, IWATA, M., Y. YABUMOTO, T. SARUWATARI, S. YAMAUCHI, K. FUJII, R. ISHII, T. MORI, F. D. HUKOM, DIRHAMSIAH, T. PERISTIWADY, A. SYAHAILATUA, K. W. A. MASENGI, I. F. MANDAGI, F. PANGALILA and Y. ABE. 2019b. Observation of the first juvenile Indonesian coelacanth, *Latimeria menadoensis* from Indonesian waters with a comparison to embryos of *Latimeria chalumnae*. Bull. Kitakyushu Mus. Nat. Hist. Hum. Hist., Ser. A, 17: 57-65.

3, SARUWATARI, T., M. IWATA, Y. YABUMOTO, F. D. HUKOM, T. PERISTIWADY and Y. ABE. 2019. A detailed morphological measurement of the seventh specimen of the Indonesian coelacanth, *Latimeria menadoensis*, with a compilation of current morphological data of the species. Bull. Kitakyushu Mus. Nat. Hist. Hum. Hist., Ser. A, 17: 67-80.

4, YABUMOTO, Y., P. M. BRITO, M. IWATA and Y. ABE. 2019. A new Triassic coelacanth, *Whiteia uyenoteruyai* (Sarcopterygii, Actinistia) from Madagascar and paleobiogeography of the family Whiteiidae. Bull. Kitakyushu Mus. Nat. Hist. Hum. Hist., Ser. A, 17: 15-27.

炭素 14 を用いた大型鯨類の回遊経路推定の試み

Estimation of migration routes of baleen whales by using carbon-14

松田 純佳, 北大・水産, E-mail: matsuda(at)fish.hokudai.ac.jp
永田 俊, 東大・大気海洋研, E-mail: nagata(at)aori.u-tokyo.ac.jp
宮入 陽介, 東大・大気海洋研, E-mail: miyairi(at)aori.u-tokyo.ac.jp
横山 祐典, 東大・大気海洋研, E-mail: yokoyama(at)aori.u-tokyo.ac.jp
松石 隆, 北大・水産, E-mail: catm(at)fish.hokudai.ac.jp

Ayaka Matsuda, Faculty of Fisheries Sciences, Hokkaido University
Toshi Nagata, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo
Yosuke Miyairi, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo
Yusuke Yokoyama, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo
Takashi Matsuiishi, Faculty of Fisheries Sciences, Hokkaido University

Abstract

We investigated the use of radiocarbon isotope, carbon-14, in the baleen plate for reconstructing the migration history and foraging area of baleen whale in the western North Pacific Ocean. This approach relies on the prominent latitudinal gradient of dissolved inorganic carbon $\Delta^{14}\text{C}$ values in surface seawater, which is characterized by low values in the subarctic area (influenced by Oyashio Current) and high values in the subtropical area (influenced by Kuroshio). Because $\Delta^{14}\text{C}$ -DIC signatures are transferred to higher trophic level organisms via food chain, the position-dependent change in $\Delta^{14}\text{C}$ of a baleen plate, from its root to tip, reflects the shift in the baleen whale's foraging area, serving as a useful recorder of its migration history. $\Delta^{14}\text{C}$ -baleen values of stranded Right whale were measured and the low $\Delta^{14}\text{C}$ value suggested that the right whale inhabited waters in the Oyashio current that originates in the Arctic Ocean and flows southward into the northern Pacific.

1. はじめに

鯨類は海中でその一生を過ごす。広大な海を移動するため、どのようなルートを利用して回遊しているかを知ることは容易ではない。ヒゲクジラ類と呼ばれる分類群の鯨種は、口内にヒゲ板と呼ばれる非代謝組織を持つ。ヒゲ板は摂餌に使用される器官であり、髪の毛や爪のように根本から先端へむかって伸長する。このような非代謝組織の安定同位体比を分析することで大將動物の回遊履歴が推定されてきた⁽¹⁾⁽²⁾。しかしながら、安定同位体の地域による変化量は非常にわずかで、多くの場合、餌の変化を安定同位体比のみから議論することが困難である。そこで、本研究では、大型鯨類の回遊経路推定のために、放射性炭素同位体 (^{14}C) を新たな手法として導入した。 ^{14}C 濃度は、親潮系の海流と黒潮系の海流で最大 200% もの大きな開きがある⁽³⁾⁽⁴⁾ことから、親潮と黒潮がぶつかる日本近海ではこの差を利用することで回遊履歴の推定に制約を与えることができる。そこで本研究では、ヒゲクジラ類のヒゲ板における $\Delta^{14}\text{C}$ を時系列に沿って分析することで、大型鯨類の回遊ルートの推定を試みた。

2. 問題設定・方法

本研究には、2018 年 7 月に北海道根室地方に漂着したセミクジラ *Eubalaena japonica* (SNH18022; メス 約 17m) のヒゲ板 (約 2m) を用いた。セミクジラ *Eubalaena japonica* は北太平洋に広く分布するヒゲクジラであり、IUCN レッドリストにおいて絶滅危惧 (EN) に指定されているが、日本近海における回遊ルートなどの生態情報は乏しい。漂着した個体のヒゲ板を採取し、分析に用いた。ヒゲ板は先端から 4 cm 間隔で切断し、5~10mg ずつ分析に供した。分析には東京大学大気海洋研究所におけるシングルステージ加速器質量分析装置を用いた。

3. 結果と考察

$\Delta^{14}\text{C}$ は最小で -58.93‰, 最大で -47.58‰ であり、一貫して親潮湧昇域周辺の低い値を示した (図 1)。本研究では、2m あるヒゲ板のうち先端から 80 cm までしか分析できていないが、この期間において本個体は、主に北太平洋北部のみを利用していただと考えられ、日本周辺海域では、北海道までしか来遊していないことが明らかになった。近縁種であるタイセイヨウセミクジラのヒゲ板の伸長速度は、60 日で 4 cm と推定されており⁽⁶⁾、本研究においては約 40 か月分の回遊を記録していると考えられる。

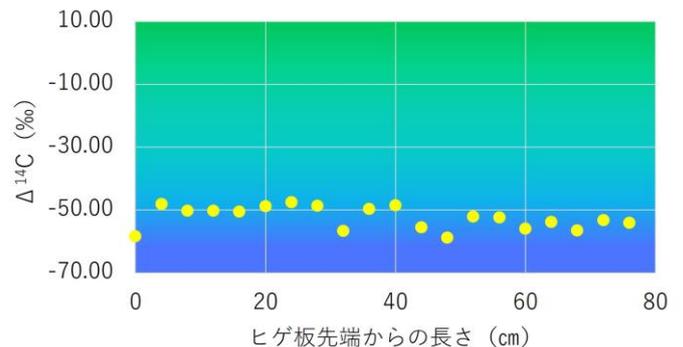


図 1. セミクジラヒゲ板の $\Delta^{14}\text{C}$ 分析結果

本研究により、日本周辺海域におけるセミクジラの回遊に関する知見を得ることができた。今後更なる分析を加え、本種を含む、日本周辺海域におけるヒゲクジラ類の回遊経路の解明を目指したい。

参考文献

(1) D. M. Schell, S. M. Saipé, and N. Haubenstock, 1989: Bowhead

- whale (*Balaena mysticetus*) growth and feeding as estimated by $\delta^{13}\text{C}$ techniques, *Mar. Biol.*, 103, 433-443
- (2) Y. Mitani, T. Bando, N. Takai, and W. Sakamoto, 2006: Patterns of stable carbon and nitrogen isotopes in the baleen of common minke whale *Balaenoptera acutorostrata* from the western North Pacific. *Fisheries Sci.*, 72(1), 69-76.
- (3) 横山祐典, 大河内直彦, 2017: “放射性炭素-14 を使った海洋生物の動態・生態系理解”(特集 同位体の化学と食の安全) 現代化学 *Chemistry today*, 552, 44-46.
- (4) T. Larsen, Y. Yokoyama, and R. Fernandes, 2018: Radiocarbon in ecology: Insights and perspectives from aquatic and terrestrial studies. *Methods Ecol. Evol.*, 9(1), 181-190.
- (5) K. E. Hunt, S. N. Lysiak, M. Moore, and M. R. Rolland, 2017: Multi-year longitudinal profiles of cortisol and corticosterone recovered from baleen of North Atlantic right whales (*Eubalaena glacialis*). *General and comparative endocrinology*, 254, 50-59.