# 学際連携研究報告書

## 平成30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30年度の実績は、特定共同研究の応募数が4件(同採択数2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、平成30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30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	後藤 和久	東北大学災害科学 国際研究所	准教授	高精度放射性炭素年代測定に基づく仙台平野 における古津波履歴の再評価	横山 祐典
2	神川 龍馬	京都大学地球環境 学堂•人間環境学研 究科	助教	海洋性植物プランクトンの新規な光エネルギー利 用機構の探索	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	筧 茂穂	国立研究開発法人 水産研究・教育機構 東北区水産研究所	主任研究員	サンマ耳石の酸素安定同位体比の高精度分析 による産卵回遊時の水温履歴の推定	伊藤 進一 白井 厚太朗
2	塩崎 拓平	国立研究開発法人 海洋研究開発機構	特任研究員	生物ポンプにおける真菌類の役割	濵崎 恒二
3	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	任期付研究員	爆弾低気圧に励起された日本海の近慣性内部 重力波の伝播とそれによる乱流混合についての 研究	川口 悠介
4	山口 陽子	島根大学学術研究 院農生命科学系	助教	円ロ類ヌタウナギから俯瞰する体液調整能力の 起源と進化	髙木 亙
5	鶴 哲郎	東京海洋大学	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
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	岩本 洋子	広島大学大学院統 合生命科学研究科	准教授	海水飛沫起源エアロゾルの化学組成と雲凝結核 に関する研究	濵崎 恒二

学際連携研究報告書

### 【特定共同研究】

- 1. 高精度放射性炭素年代測定に基づく仙台平野における古津波履歴の再評価
- 2. 海洋性植物プランクトンの新規な光エネルギー利用機構の探索

【一般共同研究】

- 1. サンマ耳石の酸素安定同位体比の高精度分析による産卵回遊時の水温履歴の推定
- 2. 生物ポンプにおける真菌類の役割
- 3. 爆弾低気圧に励起された日本海の近慣性内部重力波の伝播とそれによる乱流混合についての研究
- 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. 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
- 6. 現生シーラカンスの分類学的再検討
- 7. 海水飛沫起源エアロゾルの化学組成と雲凝結核に関する研究

### 高精度放射性炭素年代測定に基づく仙台平野における古津波履歴の再評価 Re-examination of paleo tsunami history along the Sendai plain

後藤 和久, 東北大・災害研, E-mail: goto(at)irides.tohoku.ac.jp 石澤 尭史, 東北大・地学, E-mail: ishizawa.takashi.r8(at)dc.tohoku.ac.jp 手塚 寛, 東北大・地学, E-mail: hiroshi.tetsuka.s1(at)dc.tohoku.ac.jp 横山 祐典, 東大・大気海洋研, E-mail: yokoyama(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 Kazuhisa Goto, IRIDeS, Tohoku University Takashi Ishizawa, Department of Earth Science, Tohoku University

Hiroshi Tetsuka, Department of Earth Science, Tohoku University Yusuke Yokoyama, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo Yosuke Miyairi, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

### Abstract

Tsunami deposits are useful for reconstructing pre-historic and historical tsunami events. Although many paleotsunami researches were conducted on the Sendai Plain, tsunami history is still controversial. Our dating results with using total organic carbon constrained the age of four event deposits before the 9th century. However, there is still discrepancy in the tsunami history from the 6th century BC to the 6th century AD among studies. That may be caused by the difference of materials for dating. Further study is required to check the validity of sample selection and to compare with the tsunami history in the surrounding regions.

### 1. はじめに

津波堆積物は、「津波またはそれから派生した水流によっ て海底や沿岸の砂泥や礫などが侵食され、それらが別の場所 へ運搬されて再堆積したものの総称」(澤井, 2012)と定義さ れている。津波堆積物を形成したイベントの年代を明らかに することは、特に歴史・先史時代における地震や津波の発生 時期や、発生頻度を評価するのに有益である。津波堆積物は 地震や津波の長期評価や防災政策においても重要視されてい る。実際に、地震調査研究推進本部地震調査委員会(2019) は、『日本海溝沿いの地震活動の長期評価』において、発生間 隔の評価に仙台平野の津波堆積物(Sawai et al., 2012)の 情報を活用している。

Sawai et al. (2012) に基づくと、仙台平野の津波堆積物 は、2011 年東北地方太平洋沖地震、1611 年慶長奥州地震、1454 年享徳地震、869 年貞観地震による津波と対比可能であり、そ れ以前のイベントとして西暦 500 年頃、紀元前 500 年頃の津 波の存在が示唆される。一方で、沓形遺跡での発掘調査にお いて発見された津波堆積物の年代は紀元前 1 世紀頃であり (松本ほか, 2013)、Sawai et al. (2012) とは年代が整合的 でない。津波堆積物の年代を再検証することは、大規模な津 波の再来間隔を推定する際に重要であり、本研究では、仙台 平野の古津波履歴を再評価することを目的とした。

### 2. 問題設定·方法

本研究では、仙台市若林区での掘削調査(図1)において得 られた津波堆積物の可能性がある砂層について、砂層上下の 泥炭および有機質泥層において層序関係を用いて放射性年代 測定を実施することで、高精度に年代を制約することを目指 した。

測定対象としたのは、近接する地点で得られた1 m長の試料(Wak-1) と 20cm 長の試料(Wak-2) の 2 点である。それぞれ、Wak-1 では To-a テフラの下位に4 層、Wak2 では To-a テフラの下位に1 層の砂層が確認された。

昨年度は、Wak-1の試料中に見られる上位3層の砂層の年 代を制約することができた。本年度は、最下位の砂層の年代 を制約することに加えて、4層の砂層の間で地層が連続して いるかどうかを検証するため、砂層間で5点の年代測定を実施した。更に、、大型植物を除去したバルク試料を用いることの妥当性を評価するため、測定対象の違いによる年代値への影響を確認した。具体的には、Wak-1の泥炭層および有機質泥層から葦を抽出し、大型植物を除去した試料と比較した。また、Wak-2の砂層の直上2 cmの泥炭層(SND1)、直下2 cmの泥炭層(SND2)、更にその下位2 cmの泥炭層(SND3)の中から炭質物、種子、植物を抽出し、それぞれの層準においてふるいで細粒分(200  $\mu$  m 以下)を抽出したものと比較した。

測定結果はソフトウェア OxCal Ver. 4.3.2 (Bronk Ramsey, 2009) を使用して、IntCall3 に基づいて較正し、層序関係を 用いて制約した (Bronk Ramsey, 2008)。



Fig. 1 A location map of study area. Elevation and bathymetry data were provided by the Geospatial Information Authority of Japan and Amante and Eakins (2009).

### 3. 結果と考察

Wak-1 の測定結果によれば、葦の年代は同層準の大型植物 を除去後の有機質試料よりも 500 年から 1000 年程度も若い 年代を示した。一方で、Wak-2 の測定結果によれば、細粒な有 機質試料は同層準から得られた炭質物、種子、植物と調和的 な年代を示した(図 2)。また、SND1 と SND2 の間には貞観地 震津波(1081 BP)と対比される津波堆積物が存在するが、こ の年代とも整合的である。以上のことから、木の根や葦など の植物を除去した細粒な有機質試料の年代値は、十分な信頼 性を有していると考えられる。

そこで、14点の細粒な有機質試料を用いて Wak-1 中に見ら れる4層の砂層のイベント年代を制約したところ、上位から 順に9世紀頃、紀元前4~紀元4世紀頃、紀元前8~紀元前2 世紀、紀元前11~紀元前8世紀頃の値が得られた(以下、こ れらを E1-E4 とする)。

E1は、貞観地震津波によって堆積した可能性が高い。To-a テフラの直下に存在し貞観地震津波に対比される津波堆積物 は仙台平野で広く見つかっており(例えば Sawai et al., 2012)、対比の信頼度は高い。E2は、年代の制約が十分でなく、 仙台平野で Sawai et al. (2012)、松本ほか(2013)により報 告されている 3~6世紀や紀元前 4~紀元前 1世紀頃の津波堆 積物と対比可能である。E3 は、Sawai et al. (2012)が仙台 平野で報告している貞観地震津波の 2 つ前のイベント(紀元 前 8~紀元前 4 世紀)と調和的な年代を示す。E4 は、澤井ほ か(2008)が若林で報告している貞観地震津波の 3 つ前のイ ベント(紀元前 9 世紀以前)などと対比できる可能性がある。

E1 と E2 のイベント年代には開きがあるが、その間の砂質 シルト層で測定した 6 点の年代は連続的な年代値を示した。 したがって、調査地点において E1 と E2 イベントの間には砂 質津波堆積物は形成されなかったか、形成されたとしてもご く小規模であり、すぐに消失した可能性が高い。

SND1 R Date bulk R\_Date charcoal SND2 R\_Date bulk SND3 R\_Date bulk R\_Date charcoal R\_Date seed R Date plant 1400 1300 1200 1100 Calibrated date (calBP) \_\_\_\_\_ 2σ range

Fig. 2 Dating results of bulk (gray), charcoal (brown), seed (yellow), and plant (green) obtained from Wak-2 sample.

### 4. まとめと今後の展望

Cal v4.3.2 Bronk R

本研究では、概ね先行研究と調和的なイベント年代が得ら れた。また、E4の砂層の年代は、先行研究と比較してよく制 約されたと言える。しかしながら、貞観地震津波の1つ前の 津波堆積物の年代は制約が十分でなく、その正確な年代につ いて結論を得ることができなかった。 この期間の津波堆積物はいくつかの研究が報告しているも のの、それぞれ異なる試料を対象に年代測定を実施しており、 求められたイベント年代の違いは、試料に起因している可能 性もある。今後、測定対象の妥当性や石巻平野などの近接し た領域との対比も含めて、さらなる検討が必要である。また、 本研究が示したように、地層の連続性を確認することで、イ ベント堆積物の欠落がないかを明らかにすることも望まれる。

- Amante, C. and Eakins, B.W., 2009: "ETOPO1 1 arcminute global relief model: procedures, data sources and analysis".
- (2) Bronk Ramsey, C., 2008: "Deposition models for chronological records", Quat. Sci. Rev., 27, 42-60.
- (3) Bronk Ramsey, C., 2009: "Bayesian analysis of radiocarbon dates", Radiocarbon, 51, 337-360.
- (4) 地震調査研究推進本部地震調査委員会、2019: "日本海 溝沿いの地震活動の長期評価", 144p.
- (5) 松本秀明、熊谷真樹、吉田真幸,2013: "仙台平野中部 にみられる弥生時代の津波堆積物",人間情報学研究, 18,79-94.
- (6) 澤井祐紀、2012: "地層中に存在する古津波堆積物の調査",地質学雑誌、118、535-558.
- (7) 澤井祐紀, 宍倉正展, 小松原純子, 2008: "ハンドコア ラーを用いた宮城県仙台平野(仙台市・名取市・岩沼市・ 亘理町・山元町)における古津波痕跡調査"、活断層・古 地震研究報告, 8, 17-70.
- (8) Sawai, Y., Namegaya, Y., Okamura, Y., Satake, K. and Shishikura, M., 2012: "Challenges of anticipating the 2011 Tohoku earthquake and tsunami using coastal geology", Geophys. Res. Lett., 39, L21309.

### 海洋性植物プランクトンの新規な光エネルギー利用機構の探索

### Search for novel light energy utilization systems of marine phytoplankton

神川龍馬, 京大・地球環境学堂・人間環境学研究科, E-mail: kamikawa.ryoma.7v(at)kyotou.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 Global Environmental Studies, Graduate School of Human and Environmental Studies, Kyoto University

and Environmental Studies, Kyoto Univers

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

### Abstract

Phytoplankton is important primary producers who convert light into energy stored in organic compounds by photosynthesis. Although they produce various pigments, photosynthesis is a reaction mainly performed using chlorophyll pigment. However, a large number of rhodopsin genes, which encode seventransmembrane photoreceptors, have recently been found in the phytoplankton. Therefore, it is indicated that phytoplankton may capture light energy by using a rhodopsin system. This study aims to analyze the function of their rhodopsins and propose a new light energy utilization mechanism of phytoplankton.

### 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(有機物)に変換するメカニズムである。 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お らず、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。

非常に興味深いことに、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)のデータを解析したところ、 微生物型ロドプシンが1000配列以上存在し、その内の半数は イオン輸送型ロドプシンと推定された。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いる可能性が高いことが示唆される。 また、ロドプシン配列の詳細な *in silico*解析を行ったとこ ろ、細胞小器官に局在する可能性が高い配列が見出された。 これら予備解析の結果を統合すると、ある植物プランクトン では、ロドプシンがミトコンドリアなどの細胞小器官に運ば れ ATP 合成酵素とリンクすることで太陽光を化学エネルギー に変換していることを強く示唆している。

### 2. 問題設定·方法

本研究では、"光をエネルギーに変換するイオン輸送型ロド プシンが、細胞小器官で機能する"と仮説を立て、以下の2 つの課題を遂行することで海洋性植物プランクトンの新規な 光エネルギー利用機構を探索することを目的とした。

- (1) 情報解析: 真核微生物トランスクリプトームデータから オルガネラ局在型イオン輸送型ロドプシンを探索する。
- (2) 機能解析:目的配列を人工的に合成し、大腸菌を用いた 異種発現系で機能を解明する

具体的には以下の解析を行った。

**情報解析**: 生物遺伝子変動分野が得意とする"大規模遺伝子情 報からバイオインフォマティクスを用いた微生物型ロドプシ ンを探索する技術"および"未知ロドプシンの機能解析技術" ならびに神川が有する *in silico*細胞内局在解析技術を応用 し、MMETSP データ(1)中からエネルギー生産に関わるイオ ン輸送型ロドプシン様配列を探索した。また、N末端にコード される標的配列の解析も行うことで、目的配列の細胞内局在 の推定までを行った。

機能解析:情報解析で検出された未知ロドプシン遺伝子配列 を人工的に合成し、大腸菌を用いた異種発現システムを用い て機能解析を行った。また異種発現タンパク質の精製を行っ た。精製タンパク質は、詳細な分光解析や免疫染色に用いる ための抗体作成に使用する予定である。

### 3. 結果と考察

NCBI データベースおよび MMETSP(1) でゲノムが公開され ている褐虫藻 Symbiodinium minutum のゲノム(2) 上に存在 するロドプシン遺伝子を探索した結果、合計で8 配列のロド プシン遺伝子が存在することが明らかとなった。これまでに 報告されている微生物型ロドプシンと今回見つかった配列を 用いて分子系統樹を作成し網羅的解析を行った結果、新たに 見つかったロドプシンは、その配列特徴から2 つのグループ に大別された(図1)。一つは、光で細胞内から細胞外へ水素 イオンを輸送すると考えられるイオン輸送型ロドプシンを含 むグループ(図1①) と、光で陽イオンを輸送するイオン輸送 型ロドプシンに近縁なグループ(図1②) であった。

褐虫藻の持つロドプシン遺伝子のうち、系統樹上(図1)に 示した3配列を人工的に合成し、機能解析を行った。その結 果、Symbioロドプシングループ①は緑色光で細胞内から細胞 外へ水素イオンを排出することが明らかになった。また、 Symbioロドプシングループ②は緑色光で水素イオンを輸送す る挙動が観察された。今後詳細な解析が必要であるが、配列 類似性、イオン輸送の特徴から陽イオンチャネルであること が推察される。これまで褐虫藻からイオン輸送ロドプシンお よびチャネルロドプシンの報告はなく、今後さらなる解析を 行うことで、今回見出したロドプシンが褐虫藻細胞内でどの ように働くのかを明らかにすることが重要であると考えられ る。



### 4. まとめと今後の展望

植物プランクトンがクロロフィルとは異なる光エネルギー 変換機構を持つ可能性は無いと永らく、そして漠然と信じら れてきた。しかしながら、学際連携研究で実施した解析から 真核微生物のゲノム上にイオン輸送型ロドプシンが複数存在 する可能性が示された。今後、詳細な分光解析を行うことで、 真核微生物が持つイオン輸送型ロドプシンが細菌のものとは どのような違いがあるのかを調べ、真核微生物ロドプシンの 特徴を明らかにする。また、遺伝子情報解析から細胞小器官 に運ばれる可能性が示唆されており、今回見出したロドプシ ンの細胞内局在を明らかにすることで、真核微生物ロドプシンが細胞内生理に与える影響を解明する。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。

- (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, Vaulot D, Wawrik B, Wheeler GL, Wilson WH, Xu Y, Zingone A, Worden "The Marine Microbial AZ, 2014: Eukaryote Transcriptome Sequencing Project (MMETSP): illuminating the functional diversity of eukaryotic life in the oceans through transcriptome sequencing", PLoS Biol., 12, e1001889
- (2) Shoguchi E, Shinzato C, Kawashima T, Gyoja F, Mungpakdee S, Koyanagi R, Takeuchi T, Hisata K, Tanaka M, Fujiwara M, Hamada M, Seidi A, Fujie M, Usami T, Goto H, Yamasaki S, Arakaki N, Suzuki Y, Sugano S, Toyoda A, Kuroki Y, Fujiyama A, Medina M, Coffroth MA, Bhattacharya D, Satoh N, 2013: "Draft assembly of the Symbiodinium minutum nuclear genome reveals dinoflagellate gene structure", Curr. Biol., 23, 1399-408.

### 産卵回遊時の水温履歴の推定

### Estimation of temperature histories of Pacific saury in spawning migration using otolith oxygen stable isotope analysis

筧 茂穂,水産機構・東北水研, E-mail: kakehi(at)affrc.go.jp
伊藤 進一,東大・大気海洋研, E-mail: goito(at)aori.u-tokyo.ac.jp
石村 豊穂,茨城高専, E-mail: toyoho.ishimura(at)gmail.com
巣山 哲,水産機構・東北水研, E-mail: suyama(at)affrc.go.jp
富士 泰期,水産機構・国際水研, E-mail: tfuji114(at)affrc.go.jp
白井 厚太朗,東大・大気海洋研, E-mail: kshirai(at)aori.u-tokyo.ac.jp
Shigeho Kakehi, Tohoku National Fisheries Research Institute, Japan Fisheries Research and Education Agency
Shin-ichi Ito, Atmosphere and Ocean Research Institute, Japan Fisheries Research and Education Agency
Taiki Fuji, National Research Institute of Far Seas Fisheries, Japan Fisheries Research and Education Agency
Kotaro Shirai, Atmosphere and Ocean Research Institute, Japan Fisheries Research and Education Agency

### Abstract (Times New Roman 10pt)

Otolith oxygen stable isotope ( $\delta^{18}$ O) was analyzed to estimate the temperature histories of Pacific saury (*Cololabis saira*) in spawning migration. Four and six samples of otolith provided from saury caught in September 2013 and October 2017, respectively, were analyzed. The otoliths were milled parallel to the growth increments and obtained otolith powders were analyzed for  $\delta^{18}$ O using MICAL3c. We estimated the distribution area of saury corresponding to the measured otolith  $\delta^{18}$ O using the horizontal distributions of temperature and salinity obtained from an assimilated ocean circulation model (FRA-ROMS). The distribution latitude of saury moved northward from spring to summer and southward from summer to autumn. These migration patterns were consistent with the seasonal movement of isotherm of 13°C at the sea surface. This result suggests that saury migrate along a certain range of temperature.

### 1. はじめに

東北区水産研究所が実施しているサンマ漁期前調査によっ て,漁期前(6~7月)にはサンマは主に東経155°以東に分 布し,これ以西の海域には少ないことがわかっている.秋に なるとサンマは産卵のため日本近海に来遊し,このときに漁 獲が行われる.日本近海における漁場の形成時期,形成場所 を予測する上では漁期前調査以降のサンマの産卵回遊経路を 明らかにする必要がある.しかしながら,サンマは小型であ るとともに鱗がはがれやすい特徴を持っており,記録計装着 はもとより,標識放流-再捕法の適用が難しく,回遊経路はよ くわかっていない.為石(2000)は漁場データから25m深8℃ の等温線に沿ってサンマ群が分布していることを報告してお り,サンマが等温線に沿った回遊を行っている可能性がある. しかし,漁場データでは同一群を追跡していないため,等温 線に沿って回遊している確証はない.

魚類の経験水温は耳石の酸素安定同位体比 $\delta^{18}$ Oを用いて 復元が行われている(e.g. Kitagawa et al., 2013; Sakamoto et al., 2018).前述の可能性を検証するために、本研究では微量炭酸 塩安定同位体分析(IMICAL3c)を用い、これまで実施例のな いサンマ耳石の酸素安定同位体比( $\delta^{18}$ O)の高解像度測定を 行い,経験水温履歴の復元を試みる.

### サンマの経験水温履歴を明らかにするためには、δ<sup>8</sup>O 分析 用に切削した箇所の日齢を正確にあわせる必要がある.2017 年度に本連携研究で使用した切削済みの耳石を用いて、日周 輪を読むことができるか、また、切削面が日周輪の成長軸に 沿っているかについて検証した.

2018 年度は、2017 年度に本連携研究で分析した 2013 年 に採取された 4 個体の $\delta^{8}$ Oの値を用いて、回遊経路推定を行 うとともに、2017 年に採取された 6 個体の $\delta^{8}$ Oの分析を行 った.

回遊経路の推定には、水産機構が運用している海洋モデル (FRA-ROMS. Kuroda et al., 2017)の海表面における水 温・塩分の1日ごとのデータを用いた.水温・塩分分布から 現場条件下で生成されるアラゴナイトの*δ*<sup>8</sup>O分布を求めた. 分析で得られたサンマ耳石の*δ*<sup>18</sup>O値に対応するアラゴナイ トの*δ*<sup>8</sup>O分布位置をサンマ分布位置とした.

### 3. 結果と考察

切削済みの耳石の日周輪を観察したところ,透明帯より核 側では日周輪と平行に切削できていない部分も存在したが, 縁辺部から透明帯付近までは切削面が日周輪に平行になって いることが確かめられた.このことから,透明帯〜縁辺部で は $\delta^{18}$ O値と日齢を正確にあわせることができることがわか った.

### 2. 問題設定·方法

2017年に採取されたサンマの $\delta^{18}$ **O**は、2013年に採取され、 昨年度分析したサンマの $\delta^{18}$ **O**と同様に、核から0才の透明帯 付近までほぼ一定で、透明帯付近から増加し、低水温側に移 動していることを示した.2017年に採取された個体は2013 年に採取された個体よりも $\delta^{18}$ **O**値が大きく、低水温側を回遊 していたことを示した.

現場条件下で生成されるアラゴナイトの**δ<sup>18</sup>0**分布から推 定したサンマ分布位置は東西方向に広くひろがりを持った (図 1). 最縁辺部の <sup>318</sup>O 分析値から推定した分布位置は漁獲 位置とほぼ同じ緯度帯であった. 分布位置の時系列は南北に 移動し、サンマが季節的に南北移動をしていることが明らか となった. 推定した分布位置のうち、オホーツク海と日本海 を除いた海域(北西太平洋)における平均緯度を求めた. 求 めた平均緯度は、春~夏にかけて北上し、夏~秋にかけて南 下していた (図 2). この移動は表面水温 13℃の等温線の季節 的な南北移動(FRA-ROMS より算出)とよく一致していた.ま た, 2007~2015 年の 5~7 月に行われたサンマ漁船の情報か ら, CPUE で重みづけした漁場の中心を求めたところ,漁場中 心の緯度が北上する速度と表面水温13℃の等温線の季節的な 北上速度がよく一致することも明らかになった. これらの結 果から、サンマが等温線に沿った回遊をしているのではない かという仮説が検証された.

アラゴナイトの $\delta^{8O}$ 分布から推定したサンマの分布は東西に広がっており、南北の移動についてはわかるものの、どの経度にいたのかはこの研究では明らかにすることができない、サンマ回遊モデルと $\delta^{8O}$ 分布から推定したサンマの分布とを組み合わせた解析が不可欠である.



Fig. 1 Distribution of aragonite  $\delta^{18}$ O in water estimated from temperature and salinity obtained by an assimilated ocean circulation model (FRA-ROMS). Red area indicates distribution area of Pacific saury estimated by measured otolith  $\delta^{18}$ O corresponding to 26 July 2013 (most end part of otolith, reflecting the environment when the saury was caught). Circle indicates the station that the saury sample was caught in 25 August 2013.

### 4. まとめと今後の展望

以上のように、サンマ耳石を高分解能で切削し、その♂<sup>8</sup>O を測定することに成功した.核付近では分析値と日周輪の対 応が悪いものの、縁辺部付近では分析値の日齢を正確に決め ることが可能であり、1 才以降は等水温帯の南北移動にあわ せて南北移動していることが明らかとなり、本研究で掲げた サンマが等温線に沿った回遊をしているのではないかという 仮説を実証した.これは世界で初の成果である.

本連携研究により、サンマ耳石のる<sup>18</sup>O 分析が可能であり、 縁辺部付近の値から等温線の南北移動とともに南北回遊して いることが明らかとなった.サンマの一生を通じた水温履歴 の復元・回遊経路の推定を行うために、H31 年度科学研究費 助成事業基盤研究Aに応募してH31年度以降の予算獲得と研 究の進展を目指している.



Fig. 2 Estimated latitude of distribution area of Pacific saury ( $\bigcirc$ ) and seasonal variation of latitude of SST=13°C ( $\times$ ).

- (1) 為石日出生 (2000). サンマの回遊と漁場形成. 日本水 産学会誌, 66, 304-305.
- (2) Kim, S. T., O' Neil, J. R., Hillaire-Marcel, C., and Mucci, A. (2007). Oxygen isotope fractionation between synthetic aragonite and water: influence of temperature and Mg2+ concentration. Geochimica et Cosmochimica Acta, 71(19), 4704-4715.
- (3) Kitagawa, T., Ishimura, T., Uozato, R., Shirai, K., Amano, Y., Shinoda, A., Otake, T., Tsunogai, U., and Kimura, S. (2013). Otolith  $\delta^{48}$ O of Pacific bluefin tuna Thunnus orientalis as an indicator of ambient water temperature. Marine Ecology Progress Series, 481, 199-209.
- (4) Sakamoto, T., Komatsu, K., Shirai, K., Higuchi, T., Ishimura, T., Setou, T., Kamimura Y., Watanabe, C., and Kawabata, A. (2018). Combining microvolume isotope analysis and numerical simulation to reproduce fish migration history. Methods in Ecology and Evolution, 10, 59-69.
- (5) Kuroda H, Setou T, Kakehi S, Ito SI, Taneda T, Azumaya T, Inagake D, Hiroe Y, Morinaga K, Okazaki M, Yokota T, Okunishi T, Aoki K, Shimizu Y, Hasegawa D, Watanabe T (2017) Recent advances in Japanese fisheries science in the Kuroshio-Oyashio region through development of the FRA-ROMS Ocean Forecast System: overview of the reproducibility of reanalysis products. Open J Mar Sci 7:62-91

### 生物ポンプにおける真菌類の役割 A role of Fungi in the biological pump

塩崎 拓平,海洋研究開発機構, E-mail: takuhei.shiozaki(at)jamstec.go.jp 原田 尚美,海洋研究開発機構, E-mail: haradan(at)jamstec.go.jp 濵崎 恒二,東大·大気海洋研, E-mail: hamasaki(at)aori.u-tokyo.ac.jp 小野寺 丈尚太郎,海洋研究開発機構, E-mail: onoderaj(at)jamstec.go.jp Takuhei Shiozaki, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology Naomi Harada, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology Koji Hamasaki, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo Jonaotaro Onodera, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

### Abstract

Fungi has been known to be a minor member of marine eukaryotic community, but our recent study shows that Fungus genes become abundant in sediment particles collected by sediment traps in the subtropical region. Here we examined size-fractionated ( $\geq 3 \mu m$  and  $< 3 \mu m$ ) eukaryotic plankton communities by a 18S rRNA gene sequencing analysis from surface to abyssopelagic zone throughout a year at station S1 and K2 located in the northwestern North Pacific subtropical and subarctic region, respectively. In the both oceanographic regions, the 18S rRNA genes of Fungi was observed mostly in the  $\geq 3 \mu m$  fraction, and the sequence reads increased with depths throughout a year. There were common fungal phylotypes in the subtropical and subarctic region. The maximum fraction of Fungi in total eukaryotic community (29%) was found in an abyssopelagic water. Our results suggest that Fungi could significantly contribute to the biogeochemical cycles in the subtropical and subarctic ocean.

### 1. はじめに

生物ポンプは海洋の二酸化炭素吸収量や深層への有機物供 給量を知る上で要となるプロセスである。生物ポンプに直接 的に寄与する生物を把握することは、環境変動の生物ポンプ への影響を予測する上で不可欠であるが、これまでは顕微鏡 観察による研究が主であり、情報に限りがあった。

本研究では分子生物学的手法を用いて生物ポンプに寄与す る真核生物を網羅的に明らかにすることを目指した。昨年度、 亜熱帯海域の定点観測点 S1 に設置されたセジメントトラッ プで採取された沈降粒子サンプルの分析を行ったところ、真 菌類の18SrRNA 遺伝子が多く検出された。真菌類は海洋の真 核生物群集の中では稀な存在であると考えられていたが (Richards et al., 2012)、本発見は真菌類の海洋物質循環におけ る役割を再検討する必要があることを示していた。本研究で は同海域でニスキン採水器によって得た 3µm以下の懸濁態粒 子中の真核生物の群集組成も同時に調査したが、サンプル中 にはほとんど真菌類の18SrRNA 遺伝子は検出されなかった。 このことから、真菌類が沈降粒子のようなサイズの大きい粒 子もしくは凝集物に生息しやすいと仮説できた。

本年度はこの仮説の検証のため、サイズの異なる粒子の真 核生物群集を明らかにすることを目的とした。ここでは亜熱 帯域と亜寒帯域のそれぞれで4つの異なる季節に得られた表 層から深層までの懸濁態粒子を対象とした。セジメントトラ ップで得られた沈降粒子については、現在我々はホルマリン 保存サンプルからの DNA 抽出手法の開発を行っているが、 ホルマリンの長期保存が群集組成に与える影響を十分に検討 できていないことが明らかになった。そのため今年度初めか ら長期保存実験を開始したところであるが、トラップ設置期 間を考えると、一年以上の長期保存を検討する必要があり、 実験は完了に至っていない。そのため手法の開発が途上であ ることから、本年度はトラップ試料の分析は行わず、懸濁態 粒子中の真核生物群集を調べるにとどめた。

### 2. 材料と方法

サンプルは西部北太平洋亜熱帯と亜寒帯の定点観測点 S1(30°N, 145°E)と K2 (47°N, 161°E)において、2010-2011 年の 春、夏、秋、冬のそれぞれ4つの異なる季節において採取さ れた。サンプルはバケツ及びニスキン採水器によって0,5/10, 50, 100, 150, 200, 300, 500, 1000, 2000, 5000 mから採取し、≥3 μm 画分と<3 μm 画分に分けた。DNA の抽出には ChargeSwitch Forensic DNA purification kit (Invitrogen, Carlsbad, CA, USA)を 用いた(Kaneko et al., 2016)。その後、真核生物の 18SrRNA V7,V8 領域(Hadziavdic et al., 2014)を対象に MiSeq 300bp ペア エンドシーケンスにより配列を得た。データ解析は QIIME2 (https://qiime2.org)上で行った。クラスタリングとノイズ処理 は OIIME2 のプラグインの Deblur (Amir et al., 2017)を用いた。 Deblur では一塩基の違いから OTU(以下 s-OTU)を分けること が可能である。このとき、原生生物の18SrRNA データベース である PR<sup>2</sup>(Guillou et al., 2013)を参照することにより、原生生 物由来以外の配列は排除した。その後、SILVA 123 99% OTUs reference (Quast et al., 2013)を用いて各 s-OTU の同定を行った。

### 3. 結果と考察

St. S1 は観測期間中、表面のクロロフィルが冬期と春期に 顕著に増加していた。また St. K2 では春期と秋期に増加して いた。このクロロフィルの増加に伴い、St. S1 では両画分で Archaeplastida の全群集における割合が増加していた。また K2 では≥3 μm 画分のみで Archaeplastida の割合の増加が見ら れた。Archaeplastida 以外の群集は St. S1 と K2 共に顕著な季 節変化は見られなかった(図 1 には秋期の結果のみ示す)。

St. S1 と K2 共に≥3 µm 画分と<3 µm 画分とで群集組成に顕 著な違いが見られ、また鉛直的な群集組成の変化に一定の傾 向が見られた。≥3 µm 画分は両測点共に<3 µm 画分に比べて Metazoa の割合が顕著に増加していた。また真菌類も≥3 µm 画 分に出現し、<3 µm 画分はほとんど検出されなかった。両画 分共に Cryptophyceae と Haptophyta は表面で多く、深層で少 なくなった。一方、Rhizaria は表層で少なく、深層で多くなっ た。≥3 µm 画分では Metazoa は表層付近で全群集における割 合が高く深層に向かうにつれ割合が減少する傾向があった。 一方、真菌類は表層ではあまり見られず、深層に向かうにつ れリード数が増加した。全群集中の真菌類の割合は深層で数 パーセント程度であったが、St. S1 の秋期の 6074 m では≥3 µm 画分の全群集の 29%に達した。堆積物表面からは真菌類が多 く検出されることが明らかになっている (Edgcomb et al., 2011)。6074m は海底から 10m 上部の水深であったため、その 真核生物群集は堆積物の再懸濁の影響を受けていたかもしれ ない。

真菌類の s-OTU 数は St. S1 と K2 でそれぞれ 35 と 13 であ り、一深度の s-OTU の出現数は最大で 6 であった。真菌類の s-OTU のうちうち St. K2 で最もリード数が多かった上位 3 s-OTU は St. S1 においても検出され、St. S1 秋期の 6074m で はそれらの s-OTU は全体の 54%に達していた。これらの結果 は、研究海域の真菌類の構成種が極めて限られていること、 また海域を問わず優占する種が存在することを示していた。

### 4. まとめと今後の展望

真菌類は亜熱帯及び亜寒帯海域共に≥3 μm 画分に主に出現 した。この結果は真菌類のサイズが大きい、もしくは凝集物 に付着して生息していることを示唆しており、仮説の一部が 確からしいことが明らかになった。真菌類は一年を通して、 表層にはほとんど存在せず、深層で多く見られた。このこと は深層が真菌類の主な生息域であることを示唆する一方で、 昨年度のトラップ試料の解析から示唆されたように表層で凝 集物に付着した後、沈降過程でその現存量を増加させている 可能性も考えられた。この沈降過程での真菌類の重要性につ いては、各深度における沈降粒子中の種組成を明らかにする ことが肝要である。今後はホルマリン固定されたトラップ試 料からの DNA 抽出法が確立次第、解析を進め、真菌類の海 洋物質循環における役割を明らかにする。

### 参考文献

- Richards, T.A., M.D.M. Jones, G Leonard, D. Boss, 2012: "Marine fungi: Their ecology and molecular diversity", Annu. Rev. Mar. Sci., 4, 495-522.
- (2) Kaneko, R., T. Nagata, S. Suzuki, K. Hamasaki, 2016: "Depth-dependent and seasonal variability in archaeal community structure in the subarctic and subtropical western North Pacific", J. Oceanogr., 72, 427-438.
- (3) Hadziavdic, K., K. Lekang, A. Lanzen, I. Jonassen, E.M. Thompson, C. Troedsson, 2014: "Characterization of the 18SrRNA gene for designing universal eukaryote specific primers", PLoS ONE, 9(2), e87624.
- (4) Amir, A. D. McDonald, J.A. Navas-Molina, E. Kopylova, J.T. Morton, Z.Z. Xu, E.P. Kightley, L.R. Thompson, E.R. Hyde, A. Gonzalez, R. Knight, 2017: "Deblur rapidly resolves single-nucleotide community sequence patterns", mSystems, 2, e00191-16.
- (5) Guillou, L., D. Bachar, S. Audic, D. Bass, C. Berney, L. Bittner, C. Boutte, G. Burgaud, C. de Vargas, J. Decelle, J. del Campo, J.R. Dolan, M. Dunthorn, B. Edvardsen, M. Holzmann, W.H.C.F. Kooistra, E. Lara, N. Le Bescot, R. Logares, F. Mahé, R. Massana, M. Monstresor, R. Morard, F. Not, J. Pawlowski, I. Probert, A.-L. Sauvadet, R. Siano, T. Stoeck, D. Vaulot, P. Zimmermann, R. Christen, 2013: "The protist ribosomal reference database (PR<sup>2</sup>): a catalog of unicellular eukaryote small sub-unit rRNA sequences with curated taxonomy", Nucleic Acid Res., 41, D597-D604.
- (6) Quast, C., E. Preusse, P. Yilmaz, J. Gerken, T. Schweer, P. Yarza, J. Peplies, F.O. Glöckner, 2013: "The SILVA ribosomal RNA gene database project: improved data processing and web-based tools", Nucleic Acid Res., 41, D590-D596.
- (7) Edgcomb, V.P., D. Beaudoin, R. Gast, J.F. Biddle, A. Teske, 2011: "Marine subsurface eukaryotes: the fungal majority", Environ. Microbiol., 13, 172-183.



図1 St. S1とK2における秋期の各サイズ画分の真核生物群集の鉛直分布(縦軸は水深[m])

### とそれによる乱流混合についての研究

Wind-driven near-inertial waves propagation and turbulent mixing in the Japan Sea

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・大気海洋研, E-mail: yabe.itsuka(at)s.nenv.k.u-tokyo.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, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

### Abstract

This study was conducted to reveal the interaction between wind-induced internal waves and mesoscale features in a frontal region of the central Sea of Japan. A mooring system with an upward-looking acoustic doppler current profiler was deployed over a meandering pathway of the Tsushima Warm Current. Analysis of the annual record of the horizontal current showed that, in a mesoscale warm-core ring with negative vorticity, profoundly strong near-inertial internal waves (NIWs) propagate in the upper part of water column (< 300 m). Near the critical depth, where background vorticity diminishes nearly to zero, the amplitude of downward-travelling NIW reached > 50 cm s<sup>-1</sup> in root-mean-square current magnitude. The amplified NIWs were concurrent with the emergence of super-inertial oscillations, peaking at multiple inertial (MI) frequencies. Local surface winds suggest that a fast-moving cyclone passing over the site can generate NIW and MI oscillations. The internal waves in turn yield turbulent mixing near the critical depth within the vorticity structure, and eventually dissipated due to viscosity of seawater. The series of kinetic energy circulation is validated with a diagnose model simulation that is designed for NIW, based on its liner dispersion property.

### 1. はじめに

近年、負の相対渦度(渦や背景流の蛇行など)による内部 波の捕捉機構(例えば、Kawaguchi et al., 2016)の重要性 が指摘されてきている。申請者の所属する日本海区水産研究 所(以下、日水研)では、日本海の佐渡沖合の対馬暖流域に おいて係留 ADCP 流速観測とグライダーCTD 観測の同時観測を 実施している。特に、2015-2016年の流速資料の予備解析よ り、秋口に北方沖合域を爆弾低気圧が通過し、その際に海洋 上層に強い近慣性内部重力波(Near-inertial Internal Wave = NIW)が伝播する様子が捉えられた。このNIWは、表層から 水深 300 m以深にまで伝播し、特に背景流の傾圧性が消失す る深度(臨界深度)において非線形的な増幅のシグナルを示 した。本申請課題では、係留 ADCP とグライダーCTD 観測の資 料解析を行い、メソスケールの傾圧構造と NIW の相互作用が 生み出す海洋中層の乱流混合について、海洋物理学的な全容 解明を目指し、共同研究を行った。

### 2. 問題設定·方法

はじめに、人工衛星の海面高度資料(CMEMS)を用いて、日本海において、メソスケールの海洋構造がつくり出す相対渦度の空間分布を得る。これにより、係留点周辺海域における相対渦度の基本場とその時間変動が明らかとなる。

次に、係留 ADCP 流速を用いて水平流速シアの鉛直波数-周 波数スペクトル解析を行い、NIW の鉛直伝播特性や特徴的な 鉛直波長などの情報を特定する。

最後に、係留 ADCP 流速とグライダーCTD のデータを用いて、 Kunze et al. (2006)のファインスケールパラメタリゼーションの計算を行う。これにより、鉛直方向の水平流速シアを 基準に得られた定式 (Garrett and Munk, 1975)から現場で の乱流エネルギー消散率 ( $\epsilon$  [W kg<sup>-1</sup>])と乱流拡散係数 ( $K_{\rho}$ [m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>])を得る。このような手法により、日本海における爆 弾低気圧および台風の通過に伴う NIW の検出と、それが海洋 混合に与えるインパクトを定量的に評価する(Kawaguchi et al. 2019)。

これらの資料解析と平行して、Kunze(1985)による、暴風 により励起される内部波パケット(波群)に対するラグラン ジアン的な追跡実験(Ray-tracing method)を執り行う。実 験条件として必要な密度場には、グライダーによる観測結果 を用いる。爆弾低気圧により励起されたNIWが、メソスケー ルの海洋構造に対する挙動を特定し、特に係留点付近の中層 で捕捉・増幅する力学機構について追求する。

#### 3.結果と考察

係留流速観測資料より、負の相対渦度が支配的であった 2015年の秋に、振幅が> 50 cm s-1 におよぶ NIW のシグナル が検出された。海上風速の再解析資料の解析より、NIW は日本 海上を通過した爆弾低気圧に起源を持つと示唆された。NIWは 負の渦度構造内部に捕捉され、海洋上層を伝搬する様子が捉 えられた。特筆すべき結果として、NIW が渦の基底にあたる深 度において慣性振動の倍数(2、3、4倍)の周波数帯に強いピ ークを伴っていた (Fig. 1)。ここで、倍音振動の発生は、渦 基底において増幅した NIW (Kunze, 1995) が非線形共鳴を起 こした結果と考えられる (Danioux et al., 2008) (Fig. 2)。 係留系とグライダー観測により水平流速の鉛直シアと海水密 度のストレイン値を算出し、ファインスケールの乱流変数を パラメタライズした。その結果、乱流拡散係数 K MDCP は O(10-4 m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>)に達することがわかり、強い乱流混合を引き起こす 様子が捉えられた。本研究の結果から、日本海における力学 エネルギーの循環像の一例が示された:(1)低気圧による海洋 上層へのエネルギー注入、(2)負渦度領域での波の捕捉(+ 渦基底での増幅)、(3)非線形共鳴による倍音振動へのエネル ギー遷移、(4)乱流スケールでの散逸。



Fig. 1 Rotary frequency spectrum for horizontal current at 300 m depth for the October MI event (October 1–21, 2015) (bold curves) and for the annual mean (November, 1, 2015 to September 30, 2016) (light-colored curves). Black and red curves respectively denote components of CW and CCW rotation with time. Note: the annual mean spectral profiles are lowered by two decades for display. Vertical dashed lines in blue indicate MI frequencies of *f*, *2f*, *3f*, *4f*, *5f*, and *6f*. The 30-day FFT segment is Hanning windowed before taking the spectra. The degrees of freedom (DoF) are 4 and 80 respectively for the October and annual profiles. Vertical bars denote 90% confidence intervals. A right-angled triangle shows an approximate slope connecting peaks of MI oscillations, being -4 in the spectral space.

### 4. まとめと今後の展望

日本海で急成長した爆弾低気圧による大気強制とそれに 対する海洋内部の応答について、最新の係留系観測やグライ ダー観測の資料を解析して調べた。爆弾低気圧は、フィリピ ン海の高い海面水温により発生した熱帯低気圧が、台風くず れとして日本海内部で再発達し、上層の渦度アノマリーを持 った気団との干渉を通してわずか数日のうちに爆弾低気圧に 成長した。爆弾低気圧が日本海上を進みながら発達し、海面 で注入された運動エネルギーが NIW を介して日本海の中・深 層に到達し、海水中で乱流スケールの渦として粘性に絡め取 られ消滅するという、海洋内部への力学エネルギーの再分配 の一連の道筋を明らかにした。大気と海洋をまたいだエネル ギーの循環像およびその経路を観測資料から提示できた点は 特筆すべき成果と言える。

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。今後の展望としては、 負の渦度をもつメソ・サブメソ現象が、大気擾乱に起因する 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という現象である。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。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していきたいと考えて いる。



Fig. 8: Vertical profiles of squared shear contributed from frequencies near f (blue), 2f (orange) and 3f (yellow) during the post-storm MI event that occurred in Oct. 1— Oct. 21, 2015. Shear variance is integrated over the frequency band of 0.8–1.2, multiplied by each integer frequency. Note that the WKB scaling is applied to vertical direction. Horizontal bars indicate 95% bootstrap confidence intervals with a 10000 replicate subsampling. Horizontal dashed lines indicate approximate levels of the critical layer for NIW of  $\omega = 0.96f$  and 0.98f.

- Danioux, E., P. Klein, P. Riviére, 2008b: A resonance mechanism leading to wind-forced motions with a 2f frequency, *J. Phys. Oceanogr.*, 38, 2322-2329, doi:10.1175/2008JP03822.1.
- (2) Garrett, C., and W. Munk, 1975: Space-time scales of internal waves: A progress report. J. Geophys. Res., 80, 291–297, doi:10.1029/JC080i003p00291.
- (3) Kawaguchi, Y., S. Nishino, J. Inoue, K. Maeno, H. Takeda, K. Oshima, 2016: Enhanced diapycnal mixing due to near-inertial waves propagating through an anticyclonic eddy in the ice-free Chukchi Plateau, *J. Phys. Oceanogr.*, 46, 8, 2457-2481, doi:10.1175/JPO-D-15-0150.1.
- (4) Kawaguchi, Y., M. Itoh, Y, Fukamachi, J. Onodera, E. Moriya, T. Kukuchi, N. Harada, Year-round observations of sea-ice drift and near-inertial internal waves in the Northwind Abyssal Plain, Arctic Ocean, Polar Sicence, in press, <u>https://doi.org/10.1016/j.polar.2019.01.004</u>, 2019.
- (5) Kunze, E., 1985: Near-inertial wave propagation in geostrophic shear, J. Phys. Oceanogr., 15, 544-565.
- (6) Kunze, E., R. Schmitt, J. M. Toole, 1995: The energy balance in a warm-core ring's near-inertial critical layer, J. Phys. Oceanogr., 25, 942-957.

### 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

松岡 沙希, 島大・生物資源, E-mail: a151024(at)life.shimane-u.ac.jp

齋藤 花野, 島大・生物資源, E-mail: a151014(at)life.shimane-u.ac.jp

高木 亙, 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 Saki Matsuoka, Faculty of Life and Environmental Sciences, Shimane University

Hanano Saito, Faculty of Life and Environmental Sciences, Academic Assembly, 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

Internal salt and water balance critically affects the stability and efficiency of biological processes. In marine teleosts, as well as other gnathostomes, the gill and kidney work together to maintain body fluid homeostasis. However, the origin of this remarkable osmoregulatory ability remains unclear. In the present study, we examined the molecular basis of renal and branchial function in hagfish, the only extant omso-ionoconforming vertebrates. Combining transcriptome analysis with in vivo salinity transfer experiment, renal and branchial genes differentially expressed in distinct salinities were identified. Our results suggest that, unlike teleosts,  $Na^+$  and  $Cl^-$  transport is not the primary function of hagfish gill and kidney, while some of the effectors of ion and water transport and endocrine signaling are shared between hagfish and osmoregulating vertebrates.

### 1. はじめに

硬骨魚真骨類は、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。真骨類の鰓や腎臓は、内 分泌系(ホルモン系)によって制御され、協調して体液調節 に働く。このしくみを獲得したことで脊椎動物は生息域を広 げ、陸上にも進出した。これに対して海産無脊椎動物は、体 液が海水とほぼ同組成の「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?現生脊椎動物の中で最も早くに分岐した円口類のヌタ ウナギは、真骨類と同様に鰓や腎臓を持ちながら、「順応型」 の体液調節を行う。「調節型」と「順応型」の中間に位置する ヌタウナギの生理機構を解明することは、脊椎動物の海洋環 境における適応進化の歴史を理解することにつながる。しか し現生ヌタウナギ類の大半が深海性で捕獲・飼育が困難なた め、生理学研究はきわめて遅れている。本研究は、国内随一 のヌタウナギ漁獲地である島根県の地の利を活かし、in vivo 実験と大規模遺伝子発現解析により、ヌタウナギの鰓および 腎臓の機能とその内分泌制御を理解することを目的とする。

#### 2. 問題設定·方法

ヌタウナギの鰓や腎臓、内分泌器官である脳下垂体の形態・ 構造は、真骨類とは大きく異なるため、体液調節に関する先 行研究での知見が通用しない可能性が高い。そこで①ヌタウ ナギを異なる塩分環境に移行する生理学実験を行い、②鰓と 腎臓で発現が変動する遺伝子を網羅的に同定した。同時に③ 既知の体液調節関連分子に的を絞り、組織分布と発現変動を qPCR で解析した。

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* = 6)、鰓と腎臓の組織を採取した。Strand-specific mRNA-Seq (paired-ended 150bp, 20.8-30.3M reads) により得られた リードを用い、Ensembl cDNA をレファレンスとして kallisto/sleuth (Bray etal., 2016; Pimentel et al., 2017) による発現変動解析を実施した。抽出した発現変動遺伝子の ゼブラフィッシュ (*Danio rerio*) ホモログ情報を Ensembl よ り取得し、DAVID (Huang et al, 2009a, b) で遺伝子オント ロジーエンリッチメント解析 (G0 解析) を行った。qPCR によ る解析では、NaCl 輸送に重要な SLC12 ファミリー分子、水輸 送体アクアポリン (AQP)、ならびに代表的な体液調節ホルモ ンである脳下垂体後葉ホルモンの受容体に着目した。

### 3. 結果と考察

### 大規模遺伝子発現解析

鰓では 963 遺伝子(全発現遺伝子の 6.0%)で有意な発現変 動が見られた。(Fig. 1A)。高濃度海水群では、糖脂質や糖タ ンパク質の輸送ならびに合成に関与する分子群の発現変動が 示唆された。一方、低濃度海水群ではエクソサイトーシスに 関与する遺伝子が検出された。魚類の鰓上皮は、多数の粘液 細胞が産生する粘液により保護されている。糖タンパク質は 粘液の主成分であることから、検出された遺伝子群が最終的 に粘液産生に寄与する可能性が考えられる。真骨類の鰓では、 イオン輸送に機能特化した塩類細胞が存在し、Na<sup>+</sup>や Cl<sup>-</sup>の輸 送を担う。先行研究でヌタウナギの鰓にも塩類細胞様の細胞 が存在することが報告されているが(Bartels, 1998)、60 解 析では NaCl 輸送能の変動は検出されなかった。

腎臓では、1222 遺伝子(全発現遺伝子の7.5%)で有意な発 現変動が見られた。(Fig. 1B)。60 解析から、高濃度海水群で は、神経伝達物質として知られるアミノ酸・GABAの輸送体が 検出された。GABA 輸送体は、アミノ酸輸送体 SLC6 ファミリ ーに属する。対して低濃度海水群では、上記 GABA 輸送体以外 の SLC6 ファミリー分子や、同じくアミノ酸輸送体である SLC7 ファミリー、プロトンポンプが検出された。このことから、 ヌタウナギ腎臓が積極的なアミノ酸輸送ならびに酸塩基調節 を行うと考えられる。低濃度海水群ではナトリウム利尿ペプ チド (NP) 受容体の発現変動が確認されており、腎機能制御 にNP が関与する可能性が示唆される。



Fig. 1 鰓(A) および腎臓(B)における発現変動遺伝子の内 訳をベン図で示す。赤が高濃度海水群、青が低濃度海水群で 変動した遺伝子。

### 既知体液調節関連分子の発現と動態

・NaCl および水分子の輸送体

調節型生物における主要な浸透圧調節物質は NaCl であり、 その輸送に欠かせないのが SLC12 ファミリーに属する Na<sup>+</sup>-Cl<sup>-</sup> 共輸送体(NCC) ならびに 2 種類の Na<sup>+</sup>-K<sup>+</sup>-Cl<sup>-</sup>共輸送体(鰓に 発現する NKCC1 と腎臓に発現する NKCC 2) である。NCC はイ オンの取り込みに働くことから、淡水環境への適応に重要と される。本研究で、ヌタウナギが NCC を持たないことが分か った。NKCC は 1 種類のみが鰓と腎臓の両方に発現し、鰓での 発現量は高濃度海水中で減少した。

水チャネル AQP は、ヌタウナギ類で2種類(AQP3 および4) が報告されている(Nishimoto et al., 2007; Herr et al., 2014)。本研究で、既知 AQP3 は主として脳下垂体に発現し、 次いで鰓と腎臓で同程度に発現することが分かった。腎臓で の発現量は高濃度海水中で増加、低濃度海水中で減少する傾 向が見られた。対して AQP4 の主要な発現器官は鰓であった。 先行研究で AQP4 が鰓粘液細胞に局在することが報告されて いるが、その発現量は高濃度海水移行により発現量が減少し た。これらに加え、肝臓や消化管で発現が高い2種類の新規 AQP を同定した。

### ・体液調節ホルモン受容体

脳下垂体後葉ホルモンは複数の受容体を介して体液バラン スを制御する。脊椎動物では5種類(サブタイプを含めると 7 種類)の受容体が同定されている (Hara et al., 2018)。こ れらは分子系統樹上で、V1 型受容体/0T 受容体のグループと V2 型受容体のグループに大別される。後葉ホルモン受容体フ アミリーは、脊椎動物の進化の早い段階で、祖先型受容体遺 伝子の重複により生じたとされる。同じ円口類のヤツメウナ ギでは5種類の受容体が報告されているが[7]、ヌタウナギで の報告は無い。本研究では、ヌタウナギで2種類の後葉ホル モン受容体 (DN7735 および DN20708) を同定した。このうち DN7735 は V1 型受容体/OT 受容体のクレードに、DN20708 は V2 型受容体のクレードに属した。2 種類の受容体は鰓と腎臓で 発現し、DN7735 は高濃度・低濃度海水個体の鰓で有意に減少 した。このことから、祖先型後葉ホルモン受容体遺伝子の最 初の重複は現生円口類の共通祖先で完了したこと、また、後 葉ホルモン受容体の体液調節器官における発現は、「調節型」

戦略を獲得するより前に確立されたことが示唆される。 4. まとめと今後の展望

本研究により、ヌタウナギの鰓および腎機能の分子基盤に ついて網羅的なデータを得た。特に腎臓についてはこれまで 形態学的な観察しか行われておらず、今回分子生物学的解析 を実施した意義は大きい。得られたデータからは、「調節型」 の真骨類とは異なり、ヌタウナギの鰓および腎臓がアミノ酸 輸送や粘液分泌にエネルギーを費やす様子が浮かび上がった。 一方で、同定された機能分子レパートリーの一部は真骨類と 共通する。つまり「調節型」の元となるしくみがヌタウナギ に存在すると考えられる。ならば、一体何が「順応型」と「調 節型」を分けるのか?今後は免疫組織化学的手法で各機能分 子の発現細胞や共局在を検証し、この謎に挑む。

- Bray N.L., Pimentel H., Melsted P., Pachter L., 2016: "Near-optimal probabilistic RNA-seq quantification", Nat. Biotechnol., 34, 525-527
- (2) Pimentel H., Bray N.L., Puente S., Melsted P., Pachter L., 2017: Differential analysis of RNA-seq incorporating quantification uncertainty. Nat. Methods, 14, 687-690.
- Huang D.W., Sherman B.T., Lempicki R.A., 2009a: "Systematic and integrative analysis of large gene lists using DAVID Bioinformatics Resources", Nat. Protoc., 4, 44-57
- (4) Huang D.W., Sherman B.T., Lempicki R.A., 2009b: "Bioinformatics enrichment tools: paths toward the comprehensive functional analysis of large gene lists", Nucleic Acids Res., 37, 1-13
- (5) Bartels H., 1998: "The gills of hagfishes", In: Jorgensen J., Lomholt J., Weber R., Malte H., eds. *The Biology of Hagfishes*. Chapman and Hall, London, 205-222.
- (6) Nishimoto G., Sasaki G., Yaoita E., Nameta M., Li H., Furuse K., Fujinaka H., Yoshida Y., Mitsudome A., Yamamoto T., 2007: "Molecular characterization of water-selective AQP (EbAQP4) in hagfish: insight into ancestral origin of AQP4", Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol., 292, R644-R651
- Herr J.E., Clifford A.M., Goss G.G., Fudge D.S., 2014: "Defensive slime formation in Pacific hagfish requires Ca<sup>2+</sup>- and aquaporin-mediated swelling of released mucin vesicles", J. Exp. Biol., 217, 2288-2296
- (8) Hara Y., Yamaguchi K., Onimaru K., Kadota M., Koyanagi M., Keeley S.D., Tatsumi K., Tanaka K., Motone F., Kageyama Y., Nozu R., Adachi N., Nishimura O., Nakagawa R., Tanegashima C., Kiyatake I., Matsumoto R., Murakumo K., Nishida K., Terakita A., Kuratani S., Sato K., Hyodo S., Kuraku S., 2018: "Shark genomes provide insights into elasmobranch evolution and the origin of vertebrates", Nat. Ecol. Evol., 2, 1761-1771

### 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

、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, Academic assembly, Tokyo University of Marine Science and Technology

Jin-Oh Park, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

Kazuo Amakasu, Academic assembly, Tokyo University of Marine Science and Technology

### Abstract

For understanding of fault behaviors near the seafloor by using multi-channel seismic data, we are developing an energy source system using underwater speakers for simultaneous shooting in 3D seismic survey. In 2018, we have conducted field experiments for optimization of source wavelets in Tokyo Bay and acquisition of 3D data in Suruga Bay. As a result, we obtained successful results in wavefield separation using sweep waves as source wavelets, which shows that the underwater speakers can be used for simultaneous shooting in 3D seismic survey. However, we failed to observe 3D seismic data with high quality in the experiment in Suruga Bay because of insufficient survey design studies including selection of appropriate source wavelets. In 2019, we would like to continue the studies in the optimization of source wavelets for 3D seismic survey by simultaneous shooting.

### 1. はじめに

近年、マルチチャンネル反射法地震探査は三次元化が著し く進み、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い る。現時点では、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は困難であ る。

そこで、筆者らは、一本のストリーマ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も目指している。

また、同時発振方式では非パルス波を発振することから、 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る(後述)。すなわち、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。以下に、平成 30 年度に実施し た研究について報告する。

#### 2. 問題設定·方法

本研究では、低コストで三次元地震探査を実施可能にする ための同時発振用振源として、非パルス波を発振する水中ス ピーカーを採用している。図2に、2種類の水中スピーカー とパルス波振源の代表であるエアガンとの周波数特性を比較 した(鶴, 2018)。



周波数 100Hz で両者の音圧レベルを比較すると、水中スピ ーカーは 125~130dB、エアガンは 180dB であり、データ取得 時には後者は前者に比べて約 50dB(約 300 倍)の音圧で波を 発振していることが分かる。ただし、水中スピーカーの場合、 相互相関処理によってパルス波に変換すると S/N 比が約 30dB 向上する。これを考慮すれば、音圧レベルの差は 20dB(10 倍) となる。さらに、500Hz 以上の周波数帯では、相互相関後の水 中スピーカーの音圧レベルの方がエアガンのそれより大きく なることが分かる。すなわち、海底近傍を探査対象とする浅 層反射法地震探査のように、500Hz 以上の周波数帯域を主に 使う地震探査では、水中スピーカーの方がデータ処理後の音 圧レベルが大きいことが分かる。

#### 3. 結果と考察

H30 年 4 月、東京湾館山沖において、同時発振海上試験を 実施した。ここでは、2 種類のスイープ波形を用いて同時に発 振し、観測された波(観測波)と個々の振源波形との相互相 関を計算した。その結果を図3に示す。左図は周波数を50Hz から500Hz まで上昇させながら発振したスイープ波に対する 観測波のみを取り出した重合記録である。右図は、逆に500Hz から 50Hz に下降させながら発振したスイープ波に対する観 測波である。両者を比較すると、ほぼ同等の品質の記録が得 られており、問題なく波動場分離が行われたことを示してい る。これにより、2 個の振源ではあるものの、実フィールドに おいても同時発振方式による地震探査が可能であることが実 証された。



次に、H30年8月、駿河湾沼津沖において3つの水中スピ ーカーを用いて三次元データ取得試験を実施した。本試験で



は、3つの異なる疑似乱数を発振波形として使用したが、波 動場分離の精度が低く、館山沖ほど高い分解能の記録は得ら れなかった。相互相関後のデータを見るとサイドローブが大 きいため、海底面の特定が困難であった(図4)。

疑似乱数は相互相関後の S/N 比がスイープ波のそれより著 しく高いことから、本海上試験での発振波形として試用した が、予測した高分解能の結果は得られなかった。事前の水槽 実験などによる振源波形の比較に関する検討、および、測定 仕様の詳細な検討が不十分であった。

4. まとめと今後の展望

H30 年度は、発振波形の最適化と三次元データ取得試験を 実施した。その結果、スイープ波を使用した場合、問題なく 波動場分離が出来ることが実フィールドでも実証された。一 方、三次元データの取得試験については、発振波形も含め、 事前の測定仕様の検討が不十分であり、高分解能の三次元デ ータの取得までには至らなかった。

今後は、海上試験を実施するに当たり、水槽実験などによる振源波形の更なる最適化のための検討および測定仕様を検 討するための詳細なシミュレーションを行う必要がある。それにより高分解能の三次元データの取得を目指す。

- (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) 鶴哲郎, 2019:海洋音響探查,海洋音響学会誌,46,14-20

### 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,公益財団法人ふくしま海洋科学館, E-mail: m-iwata(at)aquamarine.or.jp 安部義孝,公益財団法人ふくしま海洋科学館, E-mail:abe(at)aquamarine.or.jp 籔本美孝,北九州市立自然史・歴史博物館, E-mail: yabumoto(at)kmnh.jp Teguh Peristivady, LIPI, Indonesia, E-mail: ikan\_teguh(at)yahoo.com 猿渡敏郎,東京大学大気海洋研究所, E-mail: tsaruwat(at)aori.u-tokyo.ac.jp

Masamitsu Iwata, Aquamarine Fukushima Yoshitaka Abe, Aquamarine Fukushima Yoshitaka Yabumoto, Kitakyushu Museum of Natural History and Human History Teguh Peristivady, Indonesian Institute of Sciences (LIPI), Indonesia Toshiro Saruwatari, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

### Abstract

The discovery of extant coelacanth, *Latimeria chalumnae* Smith, 1939 from Africa in 1939 was a major milestone in biology. This was followed by yet another discovery, that of a second species, *L. menadoensis* Pouyaud *et al.*, 1999 from Indonesia. A truly reliable diagnostic character to distinguish the two species are currently not available. As part of an ongoing research on extant coelacanth biology, the authors conducted detailed measurements on specimens of the two species currently on display at Aquamarine Fukushima. Differences were found in the cephalic region both externally and internally. However, in order to ascertain their validity as diagnostic characters, a detailed observation and measurements of the holotype of *L. menadoensis* is necessary.

### 1. はじめに

1938年にアフリカのマダガスカル島周辺からの生きたシー ラカンス(*Latimeria chalumnae* Smith, 1939)の発見は、 世界を驚かす生物学上の大発見であった(Smith, 1939a, b) (Fig. 1)。以後、本種に関しては非常に詳細な形態学的研 究が多数なされている(例: Millot, 1954. Forey, 1998)。



Fig.1. シーラカンス(Latimeria chalumnae, Smith, 1939.)

続いて 1998 年にインドネシアでもシーラカンスが発見さ れ、のちに別種,インドネシアシーラカンス(*L. menadoensis* Pouyaud *et al.*, 1999)として記載された(Erdmann, 1998, 1999, Pouyaud *et al.*, 1999)(Fig. 2)。

現生シーラカンス二種の形態は非常に似ており、外部形態 からの識別は困難である。Pouyaud et al., (1999)の原記 載論文は、二種を識別する有効な分類形質(diagnostic character)を提示していない。このため、現生シーラカンス の種を確実に同定するには、DNA分析に頼るしかない。これ は、魚類学、系統分類学、発生学、古生物学をはじめ、保全生 物学上も問題である。両種を識別する有効な分類形質の発見 と記載は急務である。



Fig.2. インドネシアシーラカンス(*Latimeria menadoensis*, Pouyaud *et al.*, 1999.) 7個体目の標本。

ふくしま海洋科学館(アクアマリンふくしま)は2005年から インドネシアにおいて ROV を用いたインドネシアシーラカ ンスの生態調査を実施している。現在、同館にはインドネシ アシーラカンスの7個体目の標本がインドネシアより貸与 され、アフリカ産のシーラカンスとともに展示されている。 そこで本研究では、両種の外部形態の比較と、CTスキャン データによる骨格系など内部形態の比較を行い、現生シー ラカンスの分類学的再検討に着手した。

### 2. 材料と方法

### 計測標本

シーラカンス: CCC213 番。2007 年 3 月 26 日 コモロ島水深 400m で漁獲。標準体長 118 cm。雄。

インドネシアシーラカンス: CCC299 番。2014 年 11 月 5 日ガ ンガ島にて刺し網で漁獲。標準体長 130 cm。雌。

### 計測方法

### 外部形態:

吻端と尾鰭(Supplementary lobe of caudal fin)を基準と して計測を行った。Forey (1998)の計測方法も一部取り入れ た。計数形質はシーラカンス 13、インドネシアシーラカンス 15箇所、計測形質はシーラカンス 48、インドネシアシーラカ



Fig.3. 計測の様子。

### 3. 結果

本研究でインドネシアシーラカンスに実施した形態計測は、 これまで行われた本種の計測の中では最も詳細なものである。 鰭条数など、計数形質に両種の間で差は認められなかった。 標準体長や頭長に対する比率では、頭部で差が認められた。 CT スキャンで得られた画像から、頭部骨格系で定性的な差が 認められた。

### 4. 今後の展望

現生シーラカンスの二種の比較から、形態学的にも識別可 能であることが示唆された。しかし、一個体ずつの比較であ ることから、これらの差異は種による違いではなく、個体変 異の可能性もある。本研究で行われた計測と比較すると、イ ンドネシアシーラカンスの完模式標本(holotype)の既存の 形態計測データは甚だ不十分である。現生シーラカンスの分 類を整理するには、完模式標本と既存の他の標本の詳細な観 察と計測が必要である。また、インドネシアで実施された ROV を用いた調査によって 30 個体のインドネシアシーラカンス が個体識別され、映像が記録されている。これらの映像には 多くの生態学的情報が記録されている。タンザニアのシーラ カンスの映像も記録されている。これら映像を詳細に分析し、 インドネシアシーラカンスとタンザニアのシーラカンスを比 較することによって、両種の形態だけでなく生態や行動の違 いについても明らかにする必要があろう。

### 5. 学会発表

1、猿渡敏郎・籔本美孝・岩田雅光・Frensly D. Hukom・ Dirhamsyah・Teguh Peristiwady・Augy Syahailatua・安部 部義孝. Latimeria 属の分類学的再検討に向けた第一歩 イ ンドネシアシーラカンス Latimeria menadoensisの精密計測. A first step toward a taxonomic revision of Latimeria. A detailed measurement of Indonesian Coelacanth, Latimeria menadoensis. 日本古生物学会第 168 回例会,神 奈川県立生命の星・地球博物館、2019年1月26日(土) 2、籔本美孝・岩田雅光・猿渡敏郎・Frensly D. Hukom・ Dirhamsyah・Teguh Peristiwady・Augy Syahailatua・Zainal Arifin・安部部義孝. インドネシアシーラカンス Latimeria menadoensis の骨学的研究ならびに現生シーラカンスの起源 について. Osteology of Indonesian coelacanth, Latimeria menadoensis with a comment on the origin of extant coelacanths. 日本古生物学会第 168 回例会,神奈川県立生命 の星・地球博物館、2019年1月26日(土)

### 6. 発表論文

1, IWATA, M., Y. YABUMOTO, T. SARUWATARI, S YAMAUCHI, K. FUJII, R. ISHII, T. MORI, F. D. HUKOM, DIRHAMSYAH, T. PERISTIWADY, A. SYAHAILATUA, K. W. A. MASENGI, I. F. MANDAGI, F. PANGALILA, and Y. ABE. 2019. 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, I, S. YAMAUCHI, K. FUJII, R. ISHII, T. MORI, F. D. HUKOM, DIRHAMSYAH, T. PERISTIWADY, A. SYAHAILATUA, K. W. A. MASENGI, I. F. MANDAGI, F. PANGALILA and Y. ABE. 2019. 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: 67-79.

- ERDMANN, M. V., CALDWELL, R. L. and MOOSA, M. K. 1998. Indonesian 'king of the sea' discovered. Nature, 395: 335.
- (2) ERDMANN, M. V., 1999. An account of the first living coelacanth known to science from Indonesian waters. Environmental Biology of Fishes, 54: 439-443.
- (3) FOREY, P. L. 1998. History of the Coelacanth Fishes. Chapman and Hall, London, xiii+419pp.
- (4) MILLOT, J. 1954. Le troisième cœlacanthe -Historique, éléments d'ecologie, morphologie externe, documents divers. Le naturaliste Malgache, Premier supplément, 26 p. + L Pls.
- (5) POUYAUD, L., WIRJOATMODJO, S., RACHMATIKA, I., TJAKRAWIDJAJA, A., HADIATY, R. and HADIE, W. 1999. Une nouvelle espèce de coelacanthe. Preuves génétiques et morphologiques. A new species of coelacanth. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series III - de la Vie, 322: 257-352.
- (6) SMITH J. L. B. 1939a. A living fish of Mesozoic type. Nature, 143: 455-456.
- (7) SMITH, J. L. B. 1939b. The living coelacanthid fish from South Africa. Nature, 143: 748. [Reprinted in Ichthyological papers of J. L. B. SMITH 1931-1943. Vol. 2. 403-408.

### 海水飛沫起源エアロゾルの化学組成と雲凝結核に関する研究

### Chemical composition and cloud condensation nucleus activity of bubble bursting aerosols derived from seawater

岩本 洋子,広島大院・統合生命科学研究科,E-mail: y-iwamoto(at)hiroshima-u.ac.jp 上野 祐尉子,東京理科大学・理学部第一部,E-mail: j1213013@ed.tus.ac.jp 古家 正規,金沢大・自然科学研究科,E-mail: fmasa1104(at)gmail.com 松木 篤,金沢大・環日本海域環境研究センター,E-mail: matsuki(at)staff.kanazawa-u.ac.jp Wong Shu Kuan,東大・大気海洋研,E-mail: skwong(at)aori.u-tokyo.ac.jp

濵﨑 恒二, 東大・大気海洋研, E-mail: hamasaki(at)aori.u-tokyo.ac.jp

Yoko Iwamoto, Graduate School of Integrated Sciences for Life, Hiroshima University Yuiko Ueno, Faculty of Science Division I, Tokyo University of Science Masaki Furuya, Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University Atsushi Matsuki, Institute of Nature and Environmental Technology, Kanazawa University Wong Shu Kuan, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo Koji Hamasaki, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

### Abstract

Cloud condensation nucleus activity of atmospheric aerosols depends strongly on the chemical composition and surface tension of the particles. Organic substances can be a variable factor in the number and size of cloud droplets because their hygroscopicity and surface activity are more diverse than inorganic salts. In particular, if the aerosols contain surfactants, it is expected that the surface tension will be reduced and growth of cloud droplets will be promoted. In this study, the effects of surface tension reduction on cloud condensation nucleus activity of aerosols generated by bubble bursting processes at the air-sea interface are evaluated. Preliminary results suggest that the bubble bursting aerosols, which is naturally rich in organics and has low hygroscopicity, has an "apparent" CCN activity comparable to the inorganic salts due to the effect of surface tension reduction.

### 1. はじめに

大気エアロゾルは雲凝結核 (Cloud condensation nuclei; CCN) として働き、雲の放射特性や寿命を変化させることで地球の 気候に影響を及ぼす。海洋は地球表面の約7割を占めるエア ロゾルの主要な発生源である。海洋起源のエアロゾルのうち、 波浪により力学的に生成されるエアロゾルは Bubble bursting aerosol (BBA) と呼ばれる。BBAは、水中の気泡が海水中の 様々な物質を吸着しながら上昇し海面上で破裂することによ り生成するため、無機の海塩に加えて有機物を含む。さらに、 大気と海洋の境界には有機物や微生物を濃集したマイクロレ イヤーと呼ばれる薄い層が存在する。BBAの組成は、マイク ロレイヤーに濃集した有機物の影響を強く受けると考えられ るが、有機物の量や種類については不明な点が多い。また、 微生物群集はこれらの有機物を分解するため、その活性や種 組成の変動が生成するエアロゾルの有機物組成を変えること が報告されている (e.g., Prather et al. 2013)。

エアロゾルの CCN 能は、粒子の化学組成と粒子表面の表 面張力に強く依存する。有機物は、無機塩と比べて吸湿性や 界面活性が多岐に及ぶため、雲粒の数や大きさの変動要因と なる。特に、エアロゾルが界面活性物質を含むと、表面張力 が低下し雲粒成長が促されることが予想されるが、雲凝結核 として働くサブミクロンサイズの粒子の表面張力を直接計測 する方法は未だない。このため、エアロゾルの CCN 能を推定 する際には純水の表面張力を仮定することが慣例化していた。 しかしながら、最近は、エアロゾル-雲相互作用を理解する上 で界面活性物質による粒子の表面張力低下を考慮する必要性 が提唱されている (e.g., Ovadnevaite et al., 2017)。

### 2. 方法

本申請課題では、共同研究者らと実施した石川県九十九湾 での集中観測(2016.10.20-11.20)で得られた BBA 試料につい て解析した。BBA の生成には、名古屋大学の持田陸宏教授と 申請者が共同で製作した現場型海水起源エアロゾル生成装置 を用いた。生成させた BBA に関して、全個数粒径分布とある 水蒸気過飽和度(Super saturation; SS)条件下での CCN の個数 粒径分布を同時に計測した。計測結果からエアロゾルの CCN 能の指標となる CCN 活性化粒径(dact)をもとめた。κ-Köhler 理論式(Eq.1)の乾燥粒径(dary)に dactを代入し、目的の SS で液滴粒径(darop)が極大となるようなκを得た。

$$S = \frac{d_{\rm drop}^3 - d_{\rm dry}^3}{d_{\rm drop}^3 - d_{\rm dry}^3 (1 - \kappa)} \exp\left(\frac{4\sigma_{\rm drop}M_{\rm w}}{RT\rho_{\rm w}d_{\rm drop}}\right)$$
(1)

ここで、Sは飽和比(=1+0.01×SS)、 σtrop は雲粒の表面張力、 Mw は水のモル質量、pw は水の密度、R は気体定数、T は温度 である。Kは吸湿成長パラメータと呼ばれ、粒子の化学組成に 依存する。Kは吸湿性が高いほど大きい値を取り、海水の組成 に近い NaClのK値として1.28、有機物のK値として0~0.3が 報告されている(Petters and Kreidenweis, 2007)。また、集中観 測期間中に採取したバルク海水試料を実験室内でバブリング し、基盤上に捕集した液滴試料について、原子間力顕微鏡を 用いた単一粒子レベルでの表面張力計測を行った(古家、 2019)。直接測定で得られた表面張力の値を Eq.1 に代入した 場合と、純水の表面張力を仮定した場合とで、BBA の化学組 成の推定に及ぼす影響について調査した。

### 3. 結果と考察

Fig.1 に BBA の個数粒径分布(平均値)と各 SS 条件下での dact を示す。BBA は 100 nm 付近に主要なモード径を持つ粒 径分布を示した。dact は、SS が 0.14%、0.26%、0.57%、0.95% でそれぞれ 69~98 nm、51~61 nm、26~37 nm、22~32 nm で あった。BBA 生成実験は、桟橋(Pier)と湾央(Bay)でそれ ぞれ実施したが、BBA の粒径分布や dact に関して場所による 明白な差異はみられなかった。



Fig. 1. Number size distribution (upper panel), and  $d_{act}$  under each *SS* condition (lower panel). The gray lines show values of  $\kappa$  in log scale from 0.001 to 1.0 (right to left).

純水の表面張力(温度 300K のとき 71.5 mN m<sup>-1</sup>)を仮定 し、Eq.1を用いてもとめた BBA の $\kappa$ 値( $\kappa_{BBA,PW}$ )は0.87~1.19 であった。 $\kappa_{BBA,PW}$ は、SS0.14%における結果を除けば、NaCl よりも優位に小さく、BBA は無機塩の他に吸湿性の低い有機 物を含むと考えられた。また、SS が大きいほど、すなわち、  $d_{act}$ が小さいほど $\kappa_{BBA,PW}$ 値は小さい傾向があった。これは、 BBA の化学組成が粒径によって異なり、微小粒径の粒子ほど 有機物を多く含んでいることを示唆している。

原子間力顕微鏡による分析から、桟橋で採取したバルク海 水試料について、液滴の表面張力が 51 mN m<sup>-1</sup>ともとめられ た。この値は Ovadonevite et al. (2017)が数値計算によってもと めた 49 mN m<sup>-1</sup>に近い値であった。表面張力の直接測定値を 用いて算出した BBAのx値( $\kappa_{BBA,AFM}$ )は0.31~0.43であった。 これらの結果から、本来は有機物を豊富に含み、低い吸湿性 を持つBBAが、表面張力の低下により、「みかけ上」無機塩に 匹敵する CCN 能を持っていたと解釈できる。

また、BBAが無機の海塩と有機物から構成されると仮定し、 混合則(Eq.2)により有機物の体積割合(*ε*om)を算出した。 Kseasah およびKorg はそれぞれ海塩と有機物のK値を示し、ここで は文献値を用いた。混合則により有機物のK値を示し、ここで は文献値を用いる。混合則により有機物の体積割合を導出す る場合、「みかけの」K値ではなく、化学組成のみに依存した 「真の」K値を用いる必要がある。本研究で得られたKBBA\_PWと KBBA\_AFM は、それぞれ「みかけの」K値と「真の」K値を示し ていると考えられる。BBAのK値としてKBBA\_PWを用いた場合 に、2007)や58~73%(Facchini et al., 2008)と比べ同程度か 小さかった。一方、BBAのK値としてKBBA\_AFMを用いた場合で は、200472~86%と見積もられた。表面張力を低下させる界 面活性物質は、粒子表面に濃集するため、単純な混合則(Eq.2) では表現できない可能性がある。このことは、有機物の割合 の見積に影響するため、今後検討する必要がある。

### 4. まとめと今後の展望

大気エアロゾルの CCN 特性は粒子の化学組成と表面張力 に強く依存する。本研究では、海水飛沫から生じたエアロゾ ルの物理計測から、理論式を用いてエアロゾルの化学組成に 依存する吸湿特性パラメータと粒子に含まれる有機物の割合 を見積もった。粒子の表面張力の値として実測値を用いたと き、純水の表面張力を仮定した場合と比べて吸湿成長パラメ ータの値は小さくなり、表面張力の低下により、BBAが「み かけ上」無機塩に匹敵する CCN 能を持っていたことが示唆さ れた。今後は、BBA に含まれる有機化合物の特性を解析し、 界面活性物質の有無を把握する予定である。また、海洋には 界面活性剤を生産するバクテリアが存在することが知られて おり、微生物群集組成と BBA の有機物組成の関係についても 調査を進める。

### 謝辞

野外実験では、金沢大学環日本海域環境研究センター臨海 実験施設の関ロ俊雄助教、小木曽正造氏、曽良美智子氏に協 力を得ました。ここに謝意を表します。

- (1) Facchini, M. C. et al., 2008: "Primary submicron marine aerosol dominated by insoluble organic colloids and aggregates", Geophys. Res. Lett. 35, L17814.
- (2) 古家正規, 2019: "原子間力顕微鏡を用いた個別雲凝結核の吸湿特性評価",金沢大学大学院自然科学研究科自然システム学専攻博士前期課程課題研究論文, pp. 57.
- (3) Keene, W. C. et al., 2007: "Chemical and physical characteristics of nascent aerosols produced by bursting bubbles at a model air-sea interface", J. Geophys. Res. 112. D21202.
- (4) Ovadnevaite, J. et al., 2017: "Surface tension prevails over solute effect in organic-influenced cloud droplet activation", Nature, 546, 637-641.
- (5) Petters, M. D. and S. M. Kreidenweis: "A single parameter representation of hygroscopic growth and cloud condensation nucleus activity", Atmos. Chem. Phys., 7, 1961-1971.
- (6) Prather, K. et al., 2013: "Bringing the ocean into the laboratory to probe the chemical complexity of sea spray aerosol", Proc. Natl. Acad. Sci. 110, 7550-7555.