

学際連携研究報告書

令和4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。令和2年度からは琉球大学熱帯生物圏研究センターとの連携協定に基づく沿岸生態系比較研究、令和3年度からは大気海洋研究所で実施する全所的プロジェクトに関する共同研究も実施している。

(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。

令和4年度の実績は、特定共同研究の実施数が10件（同応募数10件、採択数10件）、一般共同研究の実施数が8件（同応募数8件、採択数8件）であった。

本冊子は、令和4年度実施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も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
共同研究運営委員会
学際連携研究部会

令和4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	井上 圭一	東京大学物性研究所	准教授	海洋性細菌 <i>Rubrivirga marina</i> の光駆動Cl ⁻ ポンプ型ロドプシンの分子論的研究	吉澤 晋
2	笠井 亮秀	北海道大学水産科学研究院	教授	環境DNA分析による外洋域における海洋構造に対応した魚類群集構造解析	兵藤 晋
3	井之村 啓介	ロードアイランド大学	助教	珪藻ロドプシンの局在が炭酸固定および微生物生態系に及ぼす影響評価	吉澤 晋
4	和川 拓	水産研究・教育機構 水産資源研究所	主任研究員	対馬暖流域のマルチスケールな海洋物理現象に対する低次生態系の応答	乙坂 重嘉 川口 悠介 伊藤 幸彦
5	吉川 知里	海洋研究開発機構	副主任研究員	眼球の同位体分析による、回遊魚の移動履歴復元手法の開発	伊藤 進一 横山 祐典
6	菅 浩伸	九州大学大学院比較社会文化研究院	教授	浅海用マルチビームソナーを用いた大島海峡沿岸海域の海底地形探査	横山 祐典 平林 頌子 宮入 陽介
7	石澤 堯史	東北大学災害科学国際研究所	助教	花粉化石の14C年代測定に基づくタービダイトの高確度編年手法の開発	横山 祐典
8	金子 仁	海洋研究開発機構	研究員	秋季の下北北岸沖ジャイアー変動に伴う水塊波及と乱流過程	伊藤 幸彦 堤 英輔
9	宮地 鼓	国立アイヌ民族博物館	研究主査	考古遺跡から出土した二枚貝貝殻を用いた北海道周辺海域における高時間解像度環境復元	横山 祐典
10	藤田 和彦	琉球大学理学部	教授	海洋の温暖化・酸性化に伴う亜熱帯島棚棲石灰化生物の分布と現存量の変化	横山 祐典

【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	教授	海中海底下統合イメージング解析技術の開発	朴 進午
2	増永 英治	茨城大学地球・地域 環境共創機構	助教	乱流混合と酸素輸送プロセスに関する渦相関技 術の構築:浅水境界層への応用	川口 悠介
3	檜崎 友子	名城大学農学部	助教	自然環境下における産卵期アカウミガメの心拍モ ニタリング	坂本 健太郎
4	芳賀 拓真	国立科学博物館	研究主幹	化石および現生試料に基づく漸深海性貝類の進 化史研究	狩野 泰則
5	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	北西太平洋における微量栄養物質による共制限 メカニズム	小畑 元 塩崎 拓平
6	三浦 夏子	大阪公立大学	助教	共生関係の実験的再構築による細菌－サンゴ間 相互作用の解明	高木 俊幸
7	中村 知裕	北海道大学低温科 学研究所	講師	オホーツク海南西部の潮汐混合とポストブルーム 期の物質循環・生態系の研究	藤尾 伸三 柳本 大吾
8	鈴木 一平	北海道大学北方生 物圏フィールド科学 センター	特任助教	ハクジラ亜目におけるエネルギー消費量の推定 法の確立	青木 かがり

目次

学際連携研究報告書

【特定共同研究】

1. 海洋性細菌 *Rubrivirga marina* の光駆動 Cl⁻-ポンプ型ロドプシンの分子論的研究
2. 環境 DNA 分析による外洋域における海洋構造に対応した魚類群集構造解析
3. 珪藻ロドプシンの局在が炭酸固定および微生物生態系に及ぼす影響評価
4. 対馬暖流域のマルチスケールな海洋物理現象に対する低次生態系の応答
5. 眼球の同位体分析による、回遊魚の移動履歴復元手法の開発
6. 浅海用マルチビームソナーを用いた大島海峡沿岸海域の海底地形探査
7. 花粉化石の 14C 年代測定に基づくタービダイトの高確度編年手法の開発
8. 秋季の下北北岸沖ジャイアー変動に伴う水塊波及と乱流過程
9. 考古遺跡から出土した二枚貝貝殻を用いた北海道周辺海域における高時間解像度環境復元（準備中）
10. 海洋の温暖化・酸性化に伴う亜熱帯島棚棲石灰化生物の分布と現存量の変化

【一般共同研究】

1. 海中海底下統合イメージング解析技術の開発
2. 乱流混合と酸素輸送プロセスに関する渦相関技術の構築：浅水境界層への応用
3. 自然環境下における産卵期アカウミガメの心拍モニタリング
4. 化石および現生試料に基づく漸深海性貝類の進化史研究
5. 北西太平洋における微量栄養物質による共制限メカニズム
6. 共生関係の実験的再構築による細菌－サンゴ間相互作用の解明
7. オホーツク海南西部の潮汐混合とポストブルーム期の物質循環・生態系の研究
8. ハクジラ亜目におけるエネルギー消費量の推定法の確立

海洋性細菌 *Rubrivirga marina* の光駆動 Cl⁻ポンプ型ロドプシンの分子論的研究 Molecular study on light-driven Cl⁻ pumping rhodopsins of marine bacteria, *Rubrivirga marina*

井上 圭一, 東大・物性研, E-mail: inoue@issp.u-tokyo.ac.jp
吉澤 晋, 東大・大気海洋研, E-mail: yoshizawa@aori.u-tokyo.ac.jp
永田 崇, 東大・物性研, E-mail: nagata@issp.u-tokyo.ac.jp
Keiichi Inoue, The Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo
Susumu Yoshizawa, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo
Takashi Nagata, The Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo

Abstract

Microbial rhodopsins are a superfamily of photoreceptive membrane proteins. They mostly function as light-driven ion pumps to convert sunlight energy to chemical energy. Here, we investigated the color tuning mechanism between two inward Cl⁻ pumping rhodopsins, R28HR1 and 2, from *Rubrivirga marina* SAORIC-28^T with different absorption wavelengths by 29 nm. We found that five out of twenty-five residues around the retinal chromophore are different between R28HR1 and 2. By mutational experiments in which these four residues were swapped between R28HR1 and 2, three residues at 52nd, 89th, and 138th positions were revealed to be responsible for the difference in the absorption wavelength of these two rhodopsins.

1. はじめに

微生物ロドプシンは主に細菌やアーキア、単細胞真核微生物、巨大ウイルスなど幅広い生物種が持つ、7回膜貫通型の光受容タンパク質である。全ての微生物ロドプシンはタンパク質の中央にレチナール色素（発色団）を結合し、これを用いて可視光を吸収することで、多様な分子機能を光によって発現させる（図1）。2000年以降ゲノム・メタゲノム解析技術の進展と共に、有光層に棲む海洋性の細菌やアーキアの多くが、光駆動型のH⁺ポンプとしてはたらく微生物ロドプシンを有しており、光エネルギーからATPを合成していることが明らかとなってきている。このことから、微生物ロドプシンの光受容機構の詳細な理解は海洋の炭素循環を把握する上で必要不可欠であると考えられている。また近年では、イオンポンプ型やイオンチャネル型の微生物ロドプシンは、光依存的に膜電位を操作し、動物の神経発火をコントロールするための分子ツールとして、オプトジェネティクス（光遺伝学）分野において、神経科学研究に幅広く用いられている。

微生物ロドプシンの基本構造

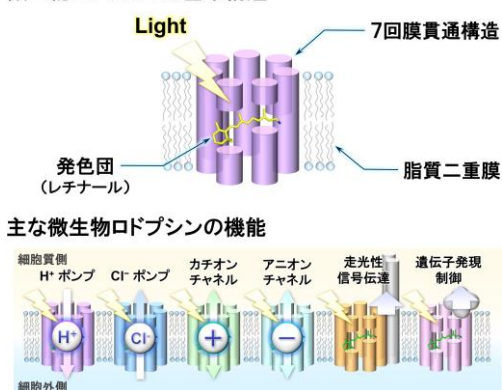


Fig. 1 Structure (top) and functional diversity (bottom) of microbial rhodopsin, the subject of this research project.

本申請の共同研究教員である吉澤らは、新種の海洋性細菌である *Rubrivirga marina* SAORIC-28^T のゲノム上に、2種類の内向き Cl⁻ポンプ型ロドプシン (R28HR1、R28HR2) の遺伝子が存在することを見出した (Nakajima *et al.* *Microbes*

Environ 2018)。これら2つのタンパク質は極めて高いアミノ酸配列の相同性を示すが、最近になり大腸菌によって異種発現したタンパク質の吸収が 29 nm と大きく異なることが明らかとなった (図2) (Inoue *et al.* *Commun. Biol.* 2021)。一つの種がこれほどまでに大きく異なる吸収波長の Cl⁻ポンプを持つのはこの例が初めてであるが、*R. marina* における2つの Cl⁻ポンプの役割とどの様に吸収波長の多様化を達成しているか、その分子論的メカニズムはいまだ不明である。そこで本研究では R28HR1、R28HR2 の吸収波長の違いを生み出す分子的要因を明らかにすることを目指した。

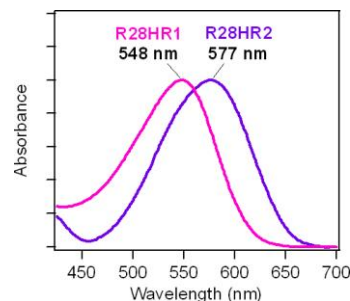


Fig. 2 Visible absorption spectra of two Cl⁻ pumping rhodopsins (R28HR1 and R28HR2) from *R. marina* SAORIC-28^T

2. 問題設定・方法

一般にロドプシンの吸収波長は発色団レチナールとその近傍にあるアミノ酸との相互作用によって決まるため、R28HR1と2の吸収波長の違いもレチナール近傍のアミノ酸の違いによって生み出されているという作業仮説を立てた。そしてR28HR1および2の持つアミノ酸の中で、レチナール周辺にあると考えられる残基について比較を行ったところ、4残基の違いが見られた (図3)

#BR	20	49	52	53	83	85	86	89	90	93	118	119	122	138	141	142	145	182	185	186	189	208	212	215	216
BR	M	V	I	A	Y	D	W	T	L	M	I	G	W	S	T	M	W	Y	P	W	F	D	A	K	
R28HR1	M	I	I	A	Y	T	W	S	T	L	M	I	G	W	S	T	Y	W	Y	P	W	Y	D	A	K
R28HR2	M	I	V	A	Y	T	W	T	L	M	I	G	Y	S	C	Y	W	Y	P	W	F	D	A	K	

Fig. 3 Amino acid residues around retinal of R28HR1 and 2 compared with those of prototypical H⁺ pumping bacteriorhodopsin (BR). The residues different between R28HR1 and 2 were indicated by stars.

R28HR1 と 2 の吸収波長の違いは、これら 4 残基のいずれかの残基の違いで生み出されている可能性が高いと考えられる。そこでそれぞれの残基について R28HR1 と 2 の間でアミノ酸のタイプを互いに入れ替えるアミノ酸改変体を作製し、その吸収スペクトルを測定することで、2 つのタンパク質の吸収波長の違いを生み出すアミノ酸を同定することとした。

3. 結果と考察

井上グループで R28HR1 と R28HR2 の間で違いが見られる 5 残基のアミノ酸について、互いのアミノ酸を入れ替える変異体遺伝子を計 64 種作製し、大腸菌に発現させたところ、全ての変異体において十分なタンパク質の発現が見られた。

そして次に、井上らが過去に確立した、ヒドロキシルアミン (HA) によって、タンパク質とレチナールの間のシッフ塩基結合を加水分解反応で開裂させ、その反応前後での吸収スペクトル変化を測定する方法 (Inoue *et al.* *Commun. Biol.* 2021) を用いることで、各タンパク質の吸収波長測定をタンパク質を精製することなく決定した。

その結果、主に 3 つのアミノ酸の違いが 2 つのロドプシンの波長の違いを生み出していることを明らかとなった (図 3)。

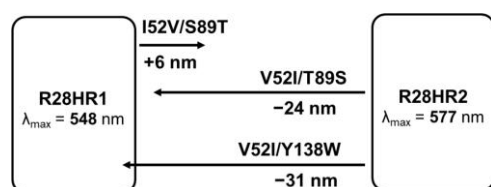


Fig. 4 The shift of the absorption wavelengths of R28HR1 and 2 upon the amino-acid mutation responsible for the color tuning between these anion pumping rhodopsins.

4. まとめと今後の展望

本研究では R28HR1 と R28HR2 のレチナール周辺の網羅的アミノ酸変異実験を行い、主に 3 つのアミノ酸の違いが 2 つのロドプシンの波長の違いを生み出していることを明らかとした (図 4)。このうち R28HR2 は V51I/T89S および V52I/Y138W の変異によって、ほぼ R28HR1 の波長を再現できたのに対し、R28HR1 は最大でも 6 nm しか長波長化されず、レチナール周辺以外の残基が波長制御に関わっている可能性が示唆された (図 4)。

また本年度、本共同研究をきっかけとした、吉澤グループが新たに発見したカロテノイド結合型のロドプシンに関する共同研究の成果を論文として報告した (Chazan *et al.* *Nature* 2023)。

今後は波長シフトの物理化学的な要因を調べるため、共鳴 Raman 分光法を用いることで、タンパク質中のレチナールの異性化状態やポリエン鎖のねじれ角、 π 電子の非局在性、水素結合強度など多様な情報を得ることを目指す。これによりレチナール周辺のアミノ酸残基の違いが、どの様にレチナールの構造を変化させ、吸収波長の違いを生み出しているのか、より詳細なメカニズムが明らかになると期待される。

またこれら 2 つのロドプシンの生理的役割を明らかにするため、新たに吉澤グループで培養時に塩分濃度や光条件を変化させた *R. marina* SAORIC-28^T の菌体試料を作製したものを井上グループに提供済みであり、それぞれのロドプシンの発現解析を井上グループで実施中である。

参考文献

- (1) Nakajima Y., T. Tsukamoto, Y. Kumagai, Y. Ogura, T. Hayashi, J. Song, T. Kikukawa, M. Demura, K. Kogure, Y. Sudo, and S. Yoshizawa. 2018: "Presence of a haloarchaeal halorhodopsin-like Cl^- pump in marine bacteria" *Microbes Environ* 33, 89-97.
- (2) Inoue K., M. Karasuyama, R. Nakamura, M. Konno, D. Yamada, K. Mannen, T. Nagata, Y. Inatsu, H. Yawo, K. Yura, O. Bějá, H. Kandori, and I. Takeuchi. 2021: "Exploration of natural red-shifted rhodopsins using a machine learning-based bayesian experimental design" *Commun. Biol.* 4, 362.
- (3) Chazan A., I. Das, T. Fujiwara, S. Murakoshi, A. Rozenberg, A. Molina-Márquez, F. K. Sano, T. Tanaka, P. Gómez-Villegas, S. Larom, A. Pushkarev, P. Malakar, M. Hasegawa, Y. Tsukamoto, T. Ishizuka, M. Konno, T. Nagata, Y. Mizuno, K. Katayama, R. Abe-Yoshizumi, S. Ruhman, K. Inoue, H. Kandori, R. León, W. Shihoya, S. Yoshizawa, M. Sheves, O. Nureki, and O. Bějá. 2023: "Phototrophy by antenna-containing rhodopsin pumps in aquatic environments" *Nature* 615, 535-540.

環境 DNA 分析による外洋域における海洋構造に対応した魚類群集構造解析

Analysis of fish community structure in the open ocean revealed by environmental DNA analysis

笠井亮秀, 北大・水産, E-mail: akihide(at)fish.hokudai.ac.jp
川上達也, 北大・水産, E-mail: kawakami(at)fish.hokudai.ac.jp
山崎 彩, 海洋研究開発機構, yamazaki.usujiri(at)gmail.com
Akihide Kasai, Faculty of Fisheries Sciences, Hokkaido University
Tatsuya Kawakami, Faculty of Fisheries Sciences, Hokkaido University
Aya Yamazaki, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Abstract

To reveal the compositional differences in fish communities among marine regions, the fish community structure in pelagic water was analyzed using eDNA metabarcoding, which can comprehensively identify species in a sample. Fish eDNA was detected at all 45 sites and assigned to 170 taxa. The results showed a clear latitudinal cline in taxonomic richness (2–48 taxa per site), with a notable boundary in the Kuroshio–Oyashio transition zone. Successive clustering and ordination analysis indicated that the fish communities in each region were distinguishable from one another and closely matched the conventional biogeographic classification of pelagic waters. This result demonstrated that eDNA can depict latitudinal transitions in fish communities in the open ocean.

1. はじめに

海洋生物多様性、特に指標種の分布を地球規模でモニタリングすることは、海洋生態系の変化を明らかにするために不可欠なベースラインデータである。近年、様々な環境試料から抽出された生物外 DNA である環境 DNA (eDNA) の解析が進み、水圏生態系における魚類の多様性に関する情報を得ることができるようになった。しかし、eDNA 研究の大半は淡水や沿岸の環境で行われており、外洋での応用はまだ少ない。本研究では、複数の生物地理区をカバーする外洋において eDNA を用いた調査を行い、海洋構造に対応した魚類群集構造の解析を行った。

2. 方法

2020 年の 9 月から 10 月にかけて行われたみらい北極航海で、日本近海から北極海まで 45 地点で表層水を採水した(図 1)。同時に、海面水温と塩分を測定した。採水サンプルはステリベクスフィルター(孔径 0.45 μm)を用いてろ過し、DNA をろ紙上に捕捉した。ろ紙は、分析まで -20°C で保管した。

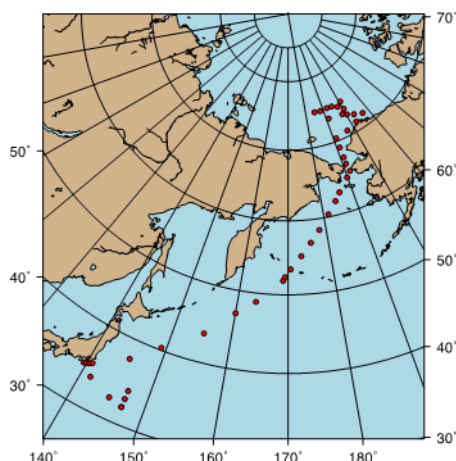


Fig. 1 Sampling points.

実験室において DNeasy Blood and Tissue Kit (Qiagen, Hilden, Germany)を用いてろ紙から DNA を抽出し、PCR で増幅後、メタバーコーディング分析により生息魚類を推定した。

3. 結果と考察

45 地点から 170 種(属)、地点あたり 2–48 分類群の魚類が検出された。検出された魚類数は、日本の沿岸域で 74 種、亜熱帯域 107 種、亜寒帯域 28 種、ベーリング海 35 種、北極海 30 種と、海域によって大きく異なった(図 2)。特に三陸沖の黒潮-親潮遷移帯を顕著な境界として、検出魚種数が大きく変化した。また、クラスタリングと順序解析の結果、eDNA メタバーコーディングから得られた魚類群集組成は、従来の海域の生物地理学的分類とよく一致していた(図 3)。

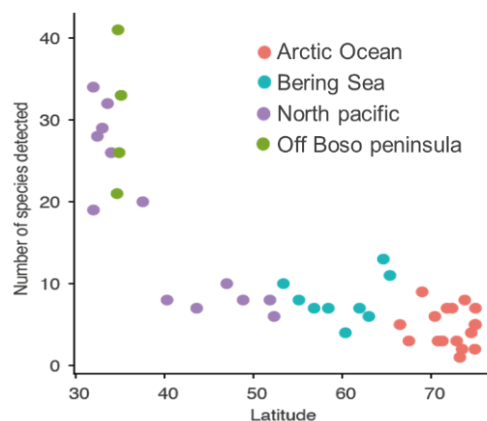


Fig. 2 Relation between the number of detected fish and latitude.

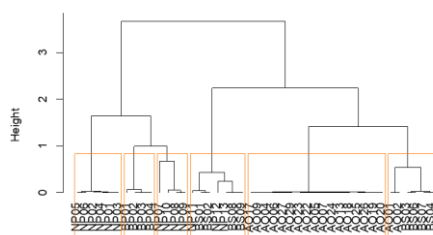


Fig. 3 Clustering results based on the detected fish species. NP: North Pacific, BP: Off Boso Peninsula, AO: Arctic Sea, BS: Bering Sea.

4. まとめと今後の展望

本研究で亜熱帯循環域, 亜寒帯循環域, そして極域に至る環境 DNA サンプルを得ることができた。この様に大きな空間スケールで, 統一した手法で魚類群集を調査した研究は, 過去に例を見ない。そして推定された魚類群集構造は, 海洋構造によく一致しており, 生物の分布や多様性の解析に環境 DNA が有効であることが示された。今後このような調査を積

み重ねることで地球規模でのビッグデータ解析が可能となり, 生物資源の保全や多様性の評価等に大きく貢献できる。さらに本研究の成果は, 今後地球温暖化が進行し海水温が上昇した場合に, どのように魚類の分布が変化するのかといった予想を行う上で, 貴重な知見となった。

珪藻ロドプシンの局在が炭酸固定および微生物生態系に及ぼす影響評価 Evaluating the effect of localized diatom rhodopsins on carbon fixation and microbial ecosystems

井之村 啓介, ロードアイランド大学・海洋学大学院, E-mail: inomura@uri.edu
吉澤 晋, 東大・大気海洋研,

Keisuke Inomura, Graduate School of Oceanography, University of Rhode Island
Susumu Yoshizawa, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

Abstract

Diatoms are globally important phytoplankton, accounting for about 40% of marine photosynthesis. The success of their niche acquisition is underpinned by the high photosynthesis rates, yet the mechanisms behind it have been obscure. In this study, we propose that rhodopsins in diatoms facilitate their carbon fixation. Yoshizawa's team discovered that rhodopsins are located at the outermost layer of the thylakoid membranes. Given this information, Inomura's group developed a quantitative model of diatoms representing the transport of carbon dioxide and carbon fixation. The model shows that the rate of carbon fixation is highly dependent on the pH in the 'middle space', the outermost membrane space of the thylakoid membrane. The increase in carbon fixation is highly dependent on the ratio of the maximum carbon fixation rate and diffusion constant, yet in any case, the decreased pH in the middle space favors carbon fixation. To test the effect of rhodopsin on the global ecosystem, as a starter, we implemented a model of prokaryotes with rhodopsin. Our model quantitatively shows strong light dependencies of rhodopsin abundance. In addition, homology searches for the MMETSP database revealed that the rhodopsin gene is distributed in eukaryotic microorganisms other than diatoms. This study suggests that decreased pH by proton pumping by rhodopsin may increase the rate of carbon fixation in diatoms and other algae.

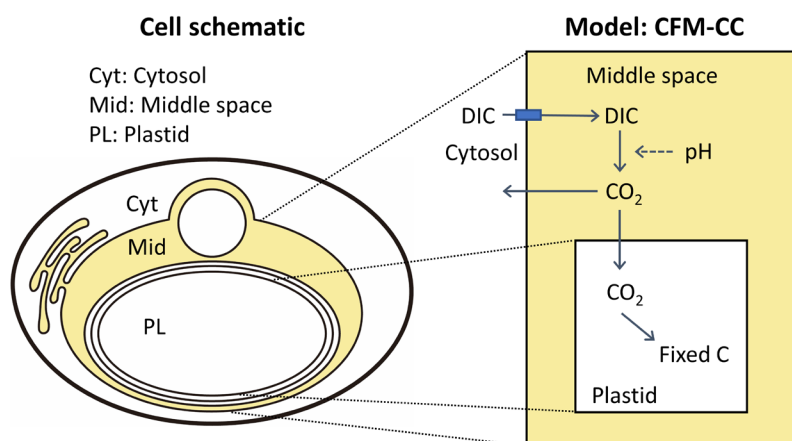


Fig. 1 Schematic of Cell Flux Model of C concentration (CFM-CC). The left panel represents the actual cell and the right panel represents the model. Solid arrows show net flux of C and dashed arrow indicates the influence of pH.

1. はじめに

珪藻は海洋において最も優先する植物プランクトンの1つであり、海洋で行われる光合成のおよそ40%を担っている (Tréguer *et al.*, 2017). 全球規模においても20%以上の光合成を担っていると試算されているが (Mann, 1999), なぜこれほどまでに珪藻は海洋において成功しているのかはいまだに謎である。実際に珪藻の高い光合成力は実験等によって確かめられている (Marañón *et al.*, 2013). しかし、どのような機構で高い光合成能力を維持しているのかは明らかになっていない。共同研究者である吉澤博士のチームは光でプロトン (H⁺) を輸送するロドプシンが珪藻の色素体に存在することを示すデータを得ている。特にチラコイド膜の最外膜から内側に向かってプロトンを輸送する方向にロドプシンが配置されており、それによってチラコイド膜内のpHが下がる可能性

を示している。しかし、仮に膜内のpHが変化した場合それがどのように光合成や炭酸固定に影響を及ぼすか、数値的な解析はこれまでになされていない。

2. 問題設定・方法

本研究ではチラコイド膜内の最外部のスペース (middle space) のpHの変化が炭素固定にどのような影響を与えるかを数値評価するために膜輸送および炭素固定を組み合わせたモデル (CFM-CC: Cell Flux Model of C Concentration) を開発した (Fig. 1). 本モデルはチラコイド膜内の最外部のスペースから光合成が行われるPlastidへの二酸化炭素の浸透による輸送およびPlastidにおける炭素固定への炭素の流れを計算する。middle spaceに様々なpHを与え、その変化に応じて相対的にどの程度炭素固定速度が変化するかを推定した

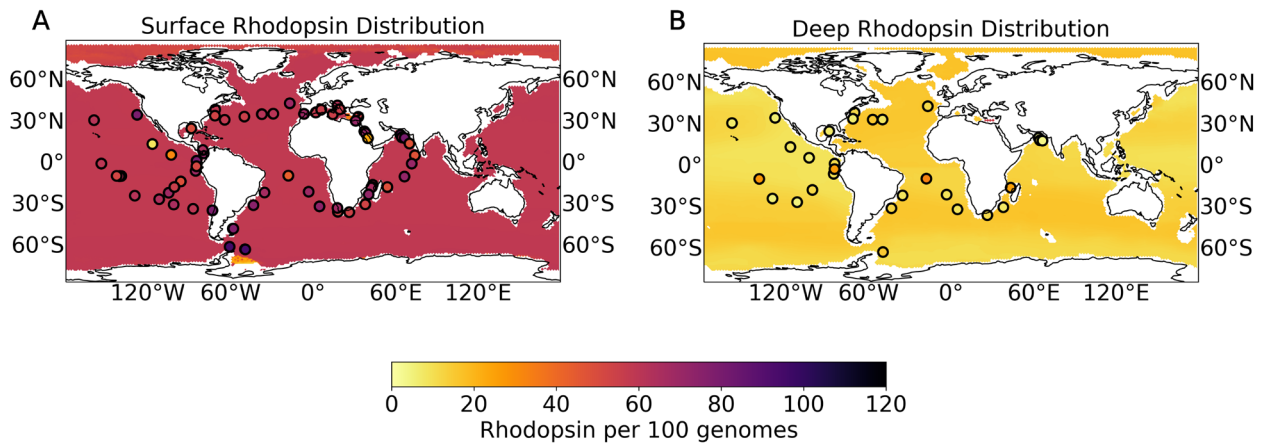


Fig. 2 The Global rhodopsin distributions. (A) surface layer (0 m - 114.1 m). (B) The deep ocean (below 214.6 m). Circles are data (Tara Oceans, provided by Yosuke Nishimura) and colored backgrounds are model results with annually averaged light (publication in preparation).

設定できるパラメーターは膜浸透係数(D)および最大炭素固定速度である(V_{max})であるが、本モデルはこれらの比(V_{max}/D)に応じてのみ結果が変わるため、それぞれの比に応じた結果を表示した。

3. 結果と考察

本年度は開発したモデルがどの程度の真核微生物分類群に適応可能かを調べるため、モデル開発の他に海洋真核微生物のトランスクリプトームデータを対象にH⁺ポンプ型ロドプシン遺伝子の探索も行った。具体的には、600種以上の海洋真核微生物のmRNAデータベースであるThe Marine Microbial Eukaryote Transcriptome Sequencing Project (MMETSP)のデータを対象として探索を行った。その結果、ロドプシン遺伝子は200配列以上見つかり、その中の162配列がH⁺ポンプ型ロドプシンであることが分かった。またロドプシン遺伝子は、珪藻だけでなく、渦鞭毛藻やハプト藻などの分類群にも分布することが分かった。今回の解析およびモデルから、ロドプシンによるH⁺輸送が炭素固定を補助する可能性は、珪藻以外の藻類にも適応できる可能性が示唆された。本モデルはmiddle spaceのpH(pH_m)と炭素固定は負の相関関係にあることを示している。特に、 pH_m が下がった場合炭素固定速度が増加することを示している。具体的には pH_m が下がった場合middle spaceの炭素化学のバランスが二酸化炭素側に偏り、二酸化炭素の濃度が増加することで膜を通過する二酸化炭素量も増える。その増加の割合は V_{max}/D によって異なるため、炭素固定速度も V_{max}/D によって変化する。 V_{max}/D が大きい場合の方が小さい場合よりも炭素固定速度の変化が大きいという結果になった。

本研究の重要な点は、新たな炭素固定促進メカニズムの解明に寄与することである。これまで炭素濃縮は重炭酸イオン(HCO_3^-)を輸送することによって行われていると考えられてきた。それを行うためには重炭酸イオンのトランスポーターが必要であるが、これまでそのようなトランスポーターは見つかっていない。また、そのようなトランスポーターの発現および配置には多大なエネルギーを必要とする。特に4重膜があるため、エネルギーコストは高いと考えられる。またそのような重炭酸イオンの輸送にはATPの消費が伴い、非効率的である。にもかかわらず進化の過程で4重膜構造が選ばれたのは謎に満ちている。本研究で示すような重炭酸イオンで

はなく二酸化炭素を用いた輸送であれば、浸透によって輸送が進むため、先に述べたようなエネルギー消費は不必要であり、また、ロドプシンを用いているため光エネルギーを利用して効率的に炭素固定を促進できる。特にトランスポーターを介さないため、4重膜であってもディスアドバンテージがなく進化においても、重炭酸イオンおよびそのトランスポーターを用いた輸送よりも論理的に受け入れやすい。本モデルによると V_{max}/D が重要な役割を果たしている。特に V_{max}/D が高い場合の方が pH_m の変化による炭素固定速度への影響が高くなる。これはより多くのRuBisCoをplasticに配置することによって達成されるため、珪藻および植物プランクトン内における高いRuBisCoの濃度も説明がつく。

次なるステップとして本モデルを全球モデルに組み込む作業を行う。これまでロドプシンと炭素循環を結びつけるモデルが存在しなかったため、ロドプシンの光利用は全球モデルには組み込まれていなかった。ロドプシンの効果を全球モデルで試すために、まずはロドプシンをもつ原核生物のモデルを構築し全球上でロドプシンの影響を確かめた(Fig 2)。

4. まとめと今後の展望

本モデルはロドプシンを持つことにより、微生物の競争力が増し、海洋表層におけるロドプシンをもつ微生物の生態的地位に貢献していることが示された。本研究はロドプシンを持つ珪藻を全球モデルに組み込む足がかりとなる。本研究成果は珪藻の炭素固定に新たな視点見出すことにつながると期待している。近々これらの成果を論文掲載することに尽力する。

参考文献

- Mann DG. (1999). The species concept in diatoms. *Phycologia* 38: 437-495.
- Marañón E, Cermeño P, López-Sandoval DC, Rodríguez-Ramos T, Sobrino C, Huete-Ortega M, *et al.* (2013). Unimodal size scaling of phytoplankton growth and the size dependence of nutrient uptake and use. *Ecology Letters* 16: 371-379.
- Tréguer P, Bowler C, Moriceau B, Dutkiewicz S, Gehlen M, Aumont O, *et al.* (2017). Influence of diatom diversity on the ocean biological carbon pump. *Nature Geoscience* 11: 27-37.

対馬暖流域のマルチスケールな海洋物理現象に対する低次生態系の応答

Responses of lower trophic-level ecosystem to multi-scale hydrographic events in the Japan Sea

和川 拓、水産機構資源研、E-mail: wagawa_taku51@fra.go.jp
井桁庸介、水産機構資源研、E-mail: igeta_yosuke60@fra.go.jp
永井 平、水産機構資源研、E-mail: nagai_taira57@fra.go.jp
乙坂重嘉、東大大海研、E-mail: otosaka@ecc.u-tokyo.ac.jp
川口悠介、東大大海研、E-mail: ykawaguchi@aori.u-tokyo.ac.jp
矢部いつか、東大大海研、E-mail: yabe.itsuka@aori.u-tokyo.ac.jp
伊藤幸彦、東大大海研、E-mail: itohsach@aori.u-tokyo.ac.jp
藤尾伸三、東大大海研、E-mail: fujio@aori.u-tokyo.ac.jp

Taku Wagawa, Fisheries Resources Institute, Japan Fisheries Research and Education Agency

Yosuke Igeta, Fisheries Resources Institute, Japan Fisheries Research and Education Agency

Taira Nagai, Fisheries Resources Institute, Japan Fisheries Research and Education Agency

Shigeyoshi Otosaka, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

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

Itsuka Yabe, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

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

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

Abstract

In order to predict the impact of global environmental change on chemical and biological processes in the ocean, the Tsushima Warm Current region of the Japan Sea was set as a model area and a mooring system with a sediment trap was successfully installed in the offshore area of Sado Island. By comparing and analysing backscatter intensity data from past ADCP observations of the mooring system and net sampling data using a research vessel, an algorithm was developed to estimate the diurnal vertical movement of zooplankton and the variability of present abundance optimised for the Japan Sea. Measurements of particle fluxes using natural radionuclides in the central part of the Yamato Basin and the eastern margin of the Yamato Basin around the Tsushima Warm Current indicate that particles resuspended in the basin margin are transported into the mid-depth layers of the central part of the basin with a time lag of about 200 days and are the main factor determining flux variations in the basin interior.

1. はじめに

日本海は独自の深層循環を持ち、地球規模の海洋環境の変化とその影響が表れやすい。IPCC 第四次評価報告書でも「日本海は地球温暖化に対して最も脆弱な海域のひとつ」として継続的な監視の重要性が指摘されている。日本海におけるこれまでの調査によって、全球的な温暖化に伴い、日本海表層水の深層への沈み込み速度が、最近 40 年でそれ以前の 15～40%程度にまで低下していることが明らかにされており (e. g., Gamo et al., 2014)、温暖化の進行が日本海の海洋システムを劇的に変化させたことを表している。これらの影響は生態系にも表れていると考えられ、日本海における多くの表層生息性魚種の資源量が 1990 年代を境に減少傾向にあること (水産庁, 2015) や、一部の深海底生魚類の分布水深が過去 20 年間に变化したこと (Kido et al., 2020; Kojima et al., 2001) などが報告されている。本課題に先だって申請者らが実施した新青丸 KS-21-12/13 次航海で得られた速報値からは、日本海南東部の大和海盆における沈降粒子のフラックスが、2000 年代に比べて 30%程度減少していることが示唆された。

2. 問題設定・方法

海洋表層の海水流動経路の変化や、それによって生じる数 10 km スケールでの中規模渦の発生頻度の変化は、日本海縁部から海盆内部への物質フラックスを制御すると考えられ (例えば, Boyd, 2019)、精緻な物理観測と化学成分のフラックス計測の統合的な観測が求められる。また、対馬暖流の流路変動によって内部重力波を通した大気擾乱エネルギーの中深層域での分配率や経路に変化が生じる可能性がある

(Kawaguchi et al. 2020; Senjyu et al. 2021)。すなわち、海洋中深層での混合や栄養塩の鉛直輸送に変化をもたらすことで、結果的に水柱単位での基礎生物生産の変動に影響を与える可能性が考えられる。

本研究は、全球的な環境変動が海洋における化学・生物過程に与える影響を予測するため、日本海対馬暖流域をモデル海域とした真に学際的な連携研究を展開する。2022 年 6 月に水産大学校練習船天鷹丸により、中規模渦の発生と生物生産・物質輸送との関係性を評価するため、佐渡島沖合域に係留系を設置した (1 年間の観測、2023 年 6 月に同船で回収予定)。

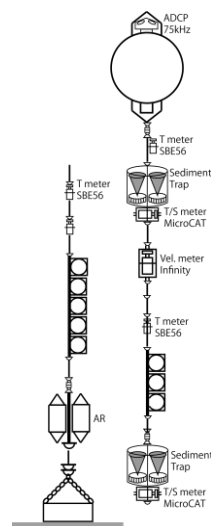


Fig. 1: Mooring design offshore of Sado Island in June 2022.

また、係留系の中・下層にはセジメントトラップも搭載することで、上層から沈降・移動する物質の鉛直輸送や、捕集される粒子の質の時間変化の情報を取得する。さらに、内部波の変動把握を強化するため、係留系には従来の 400 m 以浅の流速場の観測に加えて、中・深層に流速計と水温計、塩分計も搭載した。



Fig. 2: Photograph taken during the sediment trap deployment.

回収後には、搭載した ADCP から得られる後方散乱強度データを解析する。それに先立ち、本研究では過去の係留系観測で取得した後方散乱強度データを用いて、現場データを踏まえて、動物プランクトンの日周鉛直運動や現存量の変動を捉えられるアルゴリズムの開発・調整を行った。

また、係留系回収後の各種物理データ解析に先立ち、本研究では蓄積された CTD・沿岸水位観測データを解析し、沈降粒子フラックスに影響を及ぼす、メソスケールの対馬暖流・中規模渦の 3 次元構造とその変動特性を把握した。

3. 結果と考察

全球的な環境変動が海洋における化学・生物過程に与える影響を予測するため、日本海対馬暖流域をモデル海域に設定し、佐渡島沖合域にセジメントトラップを搭載した係留系を設置することに成功した。

過去の係留系 ADCP 観測による後方散乱強度データと調査船を用いたネットサンプリングデータを比較解析し、日本海に最適化した動物プランクトンの日周鉛直運動や現存量の変動を推定するアルゴリズムを開発した。

本課題に先立って申請者らが実施した新青丸 KS-21-12 次航海および同 13 次航海による係留系 ADCP・セジメントトラップ観測では、日本海南東部の大和海盆中央部における沈降粒子のフラックスが、2000 年代に比べて 30%程度減少していることが示唆された。さらに、本課題において実施した、大和海盆中央部及び大和海盆東部縁辺の対馬暖流域における天然放射性核種を用いた粒子フラックスを計測した。その結果、海盆中央部の中深層には海盆縁辺で再懸濁した粒子が 200 日程度の時間差で運び込まれており、海盆内部のフラックス変

動を決める主要因であることがわかった。この結果より、対馬暖流の流路や中規模渦の形成が、海盆内部への物質輸送量に影響を及ぼすことが示唆された（乙坂ら, 2023）。

沈降粒子フラックスに影響するメソスケール渦の形成・変動が上流における対馬暖流の勢力の影響を受けるという力学機構（Igeta et al., 2017）を、観測データに基づいて実証し、渦の変動予測性も提唱した（Wagawa et al., 2023）。この結果は物質循環や生物生産の変動機構を理解する上で重要な知見であり、高い応用性も併せ持つ。

4. 今後の展望

2023 年 6 月に係留系を回収する予定である。上記の物質循環機構を詳細に解析するため、1 年間に渡って時系列に採取した試料を分析し、沈降粒子フラックスの時系列データセットを構築する。また回収する際の航海では、渦の中央部および縁辺の複数の観測点において海水試料および懸濁粒子試料を採取する。この観測から、 ^{234}Th 等の天然放射性核種の海水柱内での非平衡量と炭素等の沈降フラックス（生物粒子・懸濁粒子の組成データを用いて）を計測することで、対馬暖流域の中・深層への輸送効率の分布に関する情報を、これまでに比べて高い空間分解能で取得する。さらに、沈降粒子フラックスの時系列データと係留系 ADCP の後方散乱強度データを詳細に比較することで、本研究で構築した動物プランクトン現存量の変動推定アルゴリズムを検証し、高精度化を目指す。

沈降粒子フラックスに影響を及ぼす、メソ-サブメソスケール現象や内部波・乱流混合の 3 次元構造とその時間変化を捉える。中層に数メートル間隔で設置した水温計を解析し、内部波の変動を詳細に把握する。

現場観測と複数の衛星センサーによる観測により、日本海の 10 年規模の対馬暖流や中規模渦、乱流混合などの変化と生物生産量との関係を明らかにするとともに、植物プランクトンの群集構造や基礎生産力の変化を明らかにする。さらに、これらの変化と表層-深層間での生物ポンプとの連動性を検出する。

参考文献

- (1) Gamo, T., et al. Monogr. Environ. Earth Planets 2, 1 (2014)
- (2) Kido et al. Zool. Sci. 37, 24 (2020)
- (3) Kojima et al., Mar. Ecol. Prog. Ser. 217, 135 (2001)
- (4) 水産庁, 国際漁業資源の現況 (2015)
- (5) Boyd, P. et al., Nature 368, 327 (2019)
- (6) Kawaguchi et al. Prog. Oceanogr. 181, 102240 (2020)
- (7) Senjyu, T. and Shin H.-R. J. Geophys. Res. Oceans 126 e2020JC016647 (2021)
- (8) Cisewski et al. Deep Sea Res. I 57, 78 (2010)
- (9) 乙坂重嘉, 川口悠介, 荒巻能史, 梶山秀樹, 長尾誠也, 小畑元, 矢部いつか, 和川拓, 井上睦夫. 天然放射性核種で紐解く海洋性粒子の動態. 月刊海洋, 55, 106-113 (2023)
- (10) Igeta et al. J. Phys. Oceanogr. 47, 2721-2739 (2017)
- (11) Wagawa, T., Y. Igeta, S. Ikeda, K. Fukudome, D. Hasegawa, and T. Tanaka, Variation of upper-layer flow structures and water masses observed around the Noto Peninsula and Sado Island, Japan. Cont. Shel. Res. 255, 104911 (2023)

眼球の同位体分析による回遊魚の移動履歴復元手法の開発

Developing a method for reconstructing movement histories of migratory fish by isotope analysis of eye lens

吉川 知里, JAMSTEC, E-mail: yoshikawac(at)jamstec.go.jp

原田 洋太, JAMSTEC, E-mail: yotaharada(at)hotmail.com

大河内 直彦, JAMSTEC, E-mail: nohkouchi(at)jamstec.go.jp

小川 奈々子, JAMSTEC, E-mail: nanaogawa(at)jamstec.go.jp

伊藤 進一, AORI, E-mail: goito(at)aori.u-tokyo.ac.jp

横山 祐典, AORI, E-mail: yokoyama(at)aori.u-tokyo.ac.jp

Abstract

Identifying the migration routes of marine animals is crucial for sustainable fisheries management and biodiversity conservation. Many methods, such as bio-logging, are used to study migration routes. Although tracking technologies have advanced tremendously, the migration routes over their entire life including the spawning sites or the larva and juvenile habitats are often unknown due to body-size limitations. Chemical signatures in otolith and other body parts become a promising tool for tracing the migration routes over their lives. Here we propose a new method capable of reconstructing the geographic and trophic histories of migratory fish by compound-specific isotope analysis of amino acids in eye lenses with modeled nitrogen isoscape of phytoplankton.

1. はじめに

気候変動の進行によって広域回遊魚の回遊経路が変化し、国際的な水産資源管理がより困難になることが予想される中、これらの生物の回遊経路を正確に知ることが強く求められている。アーカイバルタグなどの記録装置の装着が難しいサバやサンマなどの小型回遊魚の回遊経路を推定するために、近年、耳石や脊椎骨などの追加的に成長する硬組織を使って、過去に遡る時系列同位体比分析が実施されるようになった。例えば、海水温に強く依存する耳石の酸素同位体比からは対象の魚類が生活史を通して経験した水温を推定することが可能であり、この情報を使用して回遊経路を割り出すことができる。一方で、これらの硬組織は、有機物の含有量が少ないため、魚類が回遊中に摂餌した餌料の履歴を推定するための有機物の同位体比分析に適していない事が一つの問題となっている。そこで、近年、追加的に成長しかつ有機物の含有量が多い眼球の水晶体を使った時系列同位体比分析が試みられるようになった (e.g. Wallace et al., 2014)。本研究では、水晶体の同位体分析による、回遊魚の移動履歴復元手法を開発する。

2. 問題設定・方法

前年度は、マサバの水晶体のアミノ酸の窒素同位体比分析を行い論文化した (Harada et al., 2022)。本論文では、6層×3個体=18試料について分析し、水晶体から $\delta^{15}\text{N}_{\text{Base}}$ (摂餌した海域における食物連鎖の一番下 (植物プランクトン) の窒素同位体比) の時系列変化を復元する手法を確立した。今年度は、移動履歴の復元へ向けて、より高時間分解能でアミノ酸の窒素同位体比分析を行った。これまで生息海域の推定に用いられてきた窒素同位体比地図は、空間的にも時間的にもまばらな実測値を用いて作製されていた。このため、この不完全な地図が、しばしば移動履歴を復元する際の足かせとなっていた。そこで本研究では、海洋大循環モデル (オフライン版 COCO) へ窒素同位体比モデルを組み込んだモデルを用いて、シームレスな窒素同位体比地図を作成した。

3. 結果と考察

2020年8月18日に大槌湾の定地網で漁獲した3個体のマ

サバの水晶体8層について、アミノ酸の窒素同位体比を分析した。フェニルアラニンの窒素同位体比 (栄養段階が1つ上がると0.4‰高くなる) は-2.7~+4.6‰で、グルタミン酸の窒素同位体比 (栄養段階が1つ上がると8.0‰高くなる) は+10.4~+21.4‰だった。両者とも成長に伴い同位体比が上昇した。フェニルアラニンとグルタミン酸の窒素同位体比から推定した栄養段階は1.9~3.0で、成長に伴い上昇した。フェニルアラニンの窒素同位体比を栄養段階で補正して求めた $\delta^{15}\text{N}_{\text{Base}}$ は-3.3~+3.9‰で、成長に伴い上昇した (図1)。耳石による年齢査定の結果、漁獲時の masaba1, 3, 10 はそれぞれ 6, 8, 7 歳だった。

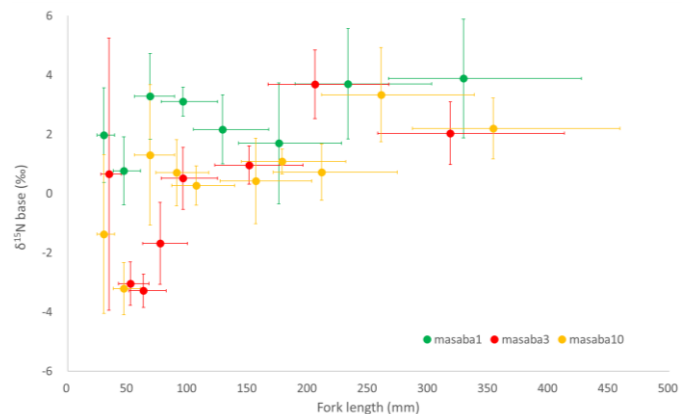


図1、マサバの水晶体から復元した $\delta^{15}\text{N}_{\text{Base}}$ の時系列変化。 $\delta^{15}\text{N}_{\text{Base}}$ は、アミノ酸の窒素同位体比から推定した。Fork length (FL) は、体長と水晶体半径の関係式を作製し、採取した層がどの成長段階であるかを推定した。

Yoshikawa et al. (2022) へ窒素固定と脱窒を導入した窒素同位体モデルを、大気海洋結合モデル (MIROC3.2) の産業革命前の海洋物理場で駆動し、植物プランクトンの窒素同位体比を予報した。北部北太平洋海域の植物プランクトンの窒素同位体比は、-4~+8‰の範囲で分布した (図2)。窒素固定が起こっている亜熱帯海域や、鉄律速のため栄養塩利用率の低い亜寒帯海域では、低い窒素同位体比を示した (図2 青

色)。一方、栄養塩の利用効率が高い混合水域や、堆積物中の脱窒と不完全な硝化が起こっているベーリング海峡周辺海域では高い窒素同位体比を示した（図2 赤色）。

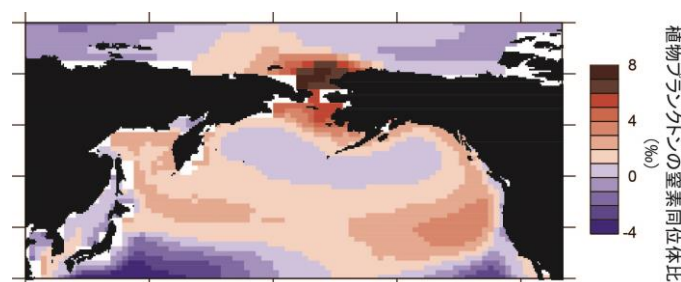


図2、窒素同位体モデルを用いて作製した北部北太平洋の窒素同位体比地図（‰）。有光層の植物プランクトンの窒素同位体比を加重鉛直平均した後、加重年平均した。

Masaba3 と 10 の $\delta^{15}\text{N}_{\text{Base}}$ は、FL<10cm の時期には 1‰以下の値を示し、その後成長に伴い 3‰を超えて上昇した。これらの個体は、孵化直後から仔稚魚期は亜熱帯海域に生息し、その後混合水域まで北上したと考えられる。Masaba1 にも同様の傾向は見られるが、FL=7 cm ですでに 3‰を超えていることから、Masaba3 と 10 よりも北側で孵化した可能性が考えられる。

4. まとめと今後の展望

本研究では、マサバの水晶体のアミノ酸の窒素同位体比分析と窒素同位体モデルによる窒素同位体比地図を組み合わせ、マサバの移動履歴を復元する手法を開発した。本手法に耳石の解析を組み合わせ、マアジやサンマの移動履歴を復元する研究も始まっている（石村（2023）、黒崎（2023））。今後は、

より詳細な移動履歴の復元を目指して、状態空間モデルの利用や窒素同位体モデルの高解像度化を予定している。

参考文献

- (1) Wallace AA, Hollander DJ, Peebles EB. Stable isotopes in fish eye lenses as potential recorders of trophic and geographic history. PLoS One. 2014; 9(10):e108935. Epub 2014/10/04. doi: 10.1371/journal.pone.0108935 PMID: 25279946; PubMed Central PMCID: PMC4184832.
- (2) Harada Y, Ito S, Ogawa NO, Yoshikawa C, Ishikawa NF, Yoneda M and Ohkouchi N (2022) Compound-Specific Nitrogen Isotope Analysis of Amino Acids in Eye Lenses as a New Tool to Reconstruct the Geographic and Trophic Histories of Fish. Front. Mar. Sci. 8:796532. doi: 10.3389/fmars.2021.796532
- (3) Yoshikawa, C., Ogawa, N.O., Chikaraishi, Y., Makabe, A., Matsui, Y., Sasai, Y., Wakita, M., Honda, M.C., Mino, Y., Aita, M.N., Fujiki, T., Nunoura, T., Harada, N., and Ohkouchi, N. (2022) Nitrogen Isotopes of Sinking Particles Reveal the Seasonal Transition of the Nitrogen Source for Phytoplankton. Geophysical Research Letters, 49(17), e2022GL098670. doi:10.1029/2022GL098670.
- (4) 石村拓未 (2023)、耳石及び眼球水晶体を用いたサンマ当歳魚の経験環境の推定方法の開発、令和4年度修士論文、東大大気海洋研。
- (5) 黒崎大生 (2023)、耳石および眼球水晶体の安定同位体比を用いたマアジの回遊特性に関する研究、令和4年度修士論文、東大大気海洋研。

浅海用マルチビームソナーを用いた大島海峡沿岸海域の海底地形探査

Bathymetric survey of Oshima Strait using multibeam echo-sounder

菅 浩伸, 九州大・比文・浅海底研, E-mail: kan(at)scs.kyushu-u.ac.jp
横山 祐典, 東大・大気海洋研, E-mail: yokoyama(at)aori.u-tokyo.ac.jp
平林 頌子, 東大・大気海洋研, E-mail: s-hirabayashi(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
三納 正美, 九州大・比文・浅海底研, E-mail: m_sannoh(at)scs.kyushu-u.ac.jp
神吉 隆行, 九州大・比文, E-mail: kanki(at)scs.kyushu-u.ac.jp
加藤 花月, 九州大・地球社会, E-mail: kato.hazuki.323(at)s.kyushu-u.ac.jp
渡久地 健, 元琉球大・国際地域創造, E-mail: kentoguchi2019(at)gmail.com

Hironobu Kan, Research Center for Coastal Seafloor, Kyushu University
Yusuke Yokoyama, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo
Shoko Hirabayashi, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo
Yosuke Miyairi, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo
Masami Sannoh, Research Center for Coastal Seafloor, Kyushu University
Takayuki Kanki, Faculty of Social and Cultural Studies, Kyushu University
Hazuki Kato, Graduate School of Integrated Sciences for Global Society, Kyushu University
Ken Toguchi, Ex. Faculty of Global and Regional Studies, University of the Ryukyus

Abstract

Scientific knowledge of coral reefs and coral communities within bays and straits is limited. The Oshima Strait, between Amami Oshima and Kakeroma Island, connects the East China Sea to the Pacific Ocean and has no other similar topography in the Ryukyu Islands. There are also many inner bays within the strait. In this study, we conducted multibeam bathymetric survey to produce high-resolution (0.5-m and 1-m grid) seafloor map at five areas in the straits. The seafloor geomorphology in the central part of Oshima Strait visualized in this study shows a drowned valley with steep slope along the coast, as well as a mound and a cauldron topography in the strait that may have been formed by tidal currents. In the inner bays, gently sloping seafloors with few undulations were found. We hope that the high-resolution bathymetric maps obtained in this study will promote future field research in Oshima Strait.

1. はじめに

湾内や海峡内のサンゴ礁地形やサンゴ群集に関する科学的知見は極めて限られており、新たな発見があることが多い (Kan et al. 2015)。亜熱帯 Kuroshio 拠点が立地する奄美大島の大島海峡は、造礁サンゴをはじめ多様な生物の貴重種が多く報告されている (藤井ほか 2018 など)。大島海峡のような海峡部や内湾に形成されるサンゴ礁は、海面付近に礁原をつくる裾礁型サンゴ礁とは異なり、上空から海底が視認できないため、地形や堆積物、生物分布に関する情報が得られにくい。本研究では海域の情報を収集する基礎となるとともに、それらの分布を解釈するために重要な海底地形情報を高解像度で取得し、地形学的な記載を行うことを目的とした。

2. 問題設定・方法

正確な海底地形図を整備することは、海域で観察される諸現象の位置関係を正確に捉え、現象が進行する過程を可視化し、そのメカニズムを推定するために重要な情報を提供する。しかし、沿岸域の極浅海域における科学研究を目的としたマルチビーム測深は未だ例が少なく、臨海実験場に隣接する沿岸域で高解像度海底地形図が整備された例はない。

筆頭著者は 2010 年に浅海用マルチビーム測深を導入し、主に琉球列島のサンゴ礁海域や西日本沿岸域を対象として 14 海域で測深調査を実施してきた。水深 1~400m までの海底地形を 1~2m グリッドで可視化する調査を開始し、現在は、海底地形図の解像度を 0.5m グリッドまで上げることに成功した (菅ほか 2022)。

大島海峡でのマルチビーム測深調査は 2022 年 8 月 17 日~28 日に海燕丸 (3.3 トン、船長：禰 泰司氏) を傭船して実施した。測深にはマルチビーム測深機 R2Sonic2022 と周辺センサ (GNSS、モーションセンサ等) を組み合わせた以下のシステムにて実施した。R2Sonic2022 は周波数 (170~450kHz) とスワップ幅 10~160° を任意に設定可能なマルチビーム測深機であり、256 本のビームを同時に海底に向けて発振する。それぞれのビームは、周波数 400kHz を使用した場合に 1×1° の分解能をもつ。船位の測定 (測位) および船の動揺 (ロール、ピッチなど) を補正するモーションセンサには、慣性 GNSS ジャイロ (Applanix POS/MV Surf Master) 方位・動揺計測システムを用いた。慣性 GNSS ジャイロ (POS MV) は制御システム (PCS)、IMU 慣性センサ、2 個の GNSS アンテナにより構成されており、後処理キネマティック後の水平精度±8mm、ロール・ピッチ 0.025 度、ヒープ 2cm (もしくは 2%) の精度を有する。測深データの収録および後処理には統合型水路測量ソフトウェア HYPACK を用いた。測量に用いた座標系は平面直角座標系 I 系である。測深時にはリアルタイムで表面音速度を計測するとともに、投下式音速度計 (Base X2 音速度・圧力センサ) を用いて深度方向の音速度プロファイルを計測し、後処理時の音速度補正を行った。潮位は気象庁奄美検潮所の実測潮位を用いた。測深結果から 0.5m および 1m グリッドの DEM (Digital Elevation Model) を作成し、QPS Fledermaus を用いて可視化した。水深は海図と同じく、潮高基準面を 0 として表した。

3. 結果と考察

大島海峡の5海域で測深を実施した (Fig. 1)。測深データ取得中の総航行距離は 349.73km であった。それぞれの海域の測深面積は以下の通りである。①安脚場ーヤドリ浜 3.86km²、②呑ノ浦ーKuroshio 研前 7.22km²、③知ノ浦ー阿鉄湾 3.99km²、④薩川湾南東部 2.82km²、⑤久慈泊地東部 0.87km²、合計 18.77km²。測深後のデータ解析および可視化は、②呑ノ浦ーKuroshio 研前で完成しており、他の海域は継続中である。

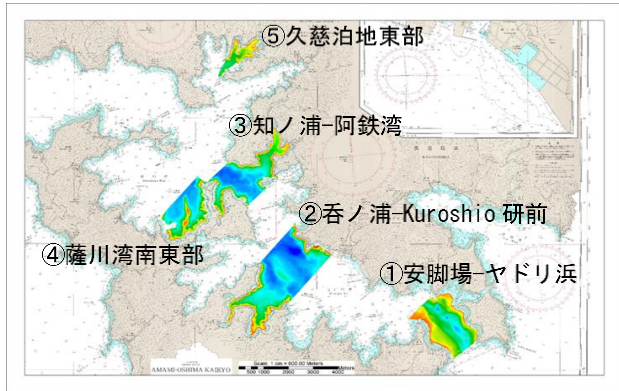


Fig. 1 Five areas in the Oshima Strait surveyed by multibeam echo-sounder

測深海域②呑ノ浦ーKuroshio 研前で明らかになった海底地形の特徴は以下の通りである。

亜熱帯 Kuroshio 研究所前では水深 6m までの緩斜面から急激に水深を増し、遷急点から 120m 沖で水深 30m に達する。同様に大島海峡中部の奄美大島側では海岸から水深 50m まで急激に水深を増す海底地形が特徴的である。瀬戸崎南西沖には最大水深約 74.6m に達する長径 1200m 短径 650m の海釜がみられる。海釜の長軸は海峡が延びる方向に形成されている。海峡中央部やや南側には北西ー南東方向に延びる高まり (頂部水深 45m) がみられる。この高まりも長軸の方向から、潮流が関与した地形であると予想される。ただし、水深 45m 以深は平坦な海底となり、湾口付近で、海峡中央部の高まりの南西側に形成された北北西ー南南東方向に切れ込む細長い凹

地 (最大水深 65m) へむかって水深を増す。この海域では、奄美大島側も加計呂麻島側も海岸から水深 45~50m に至る急峻な斜面が特徴的であるとともに、海峡部では潮流によって形成されたとみられる海釜や長軸を持った高まりが特徴的である。

4. まとめと今後の展望

大島海峡は東シナ海と太平洋をつなぐ海峡であり、琉球列島では他に類似の地形はみられない。本研究の高解像度マルチビーム測深によって可視化された大島海峡中央部の海底地形には、沿岸で急激に水深を増す溺れ谷地形とともに、海峡部では潮流によって形成されたとみられる高まりや海釜状地形が認められた。また、内湾部には緩傾斜で起伏の少ない海底が存在することが明らかになった。

本研究によって、亜熱帯 Kuroshio 研究教育拠点に隣接する海域で高解像度海底地形図を作成できたことから、今後、同研究教育拠点で実施される様々な分野のフィールド研究において、研究計画の立案に役立つとともに、調査結果の解釈や議論の精度・確度を向上させることが可能である。本研究による高解像度海底地形図を活用して、研究拠点の立地上の特徴を生かす研究につながるであろう。

本研究は令和 4 年度東京大学大気海洋研究所学際連携研究とともに、令和 3~6 年度科研費基盤研究(A) JP21H04379 (代表者: 菅 浩伸) を用いて実施した。

参考文献

- (1) Kan, H., Urata, K., Nagao, M., Hori, N., Fujita, K., Yokoyama, Y., Nakashima, Y., Ohashi, T., Goto, K., and Suzuki, A., 2015: Submerged karst landforms observed by multibeam bathymetric survey in Nagura Bay, Ishigaki Island, southwestern Japan. *Geomorphology*, 229, 112-124.
- (2) 藤井琢磨, 立川浩之, 横地洋之 2018: アミトリセンペイサンゴ *Leptoseris amitoriensis* (イシサンゴ目ヒラフキサンゴ科) の奄美大島からの記録. *タクサ 日本と動物分類学会誌*, 44, 52-57.
- (3) 菅 浩伸, 木村 颯, 佐野 亘, 三納正美 2022: 玄武岩海食崖沖の海食台. *地形*, 42, 69-81.

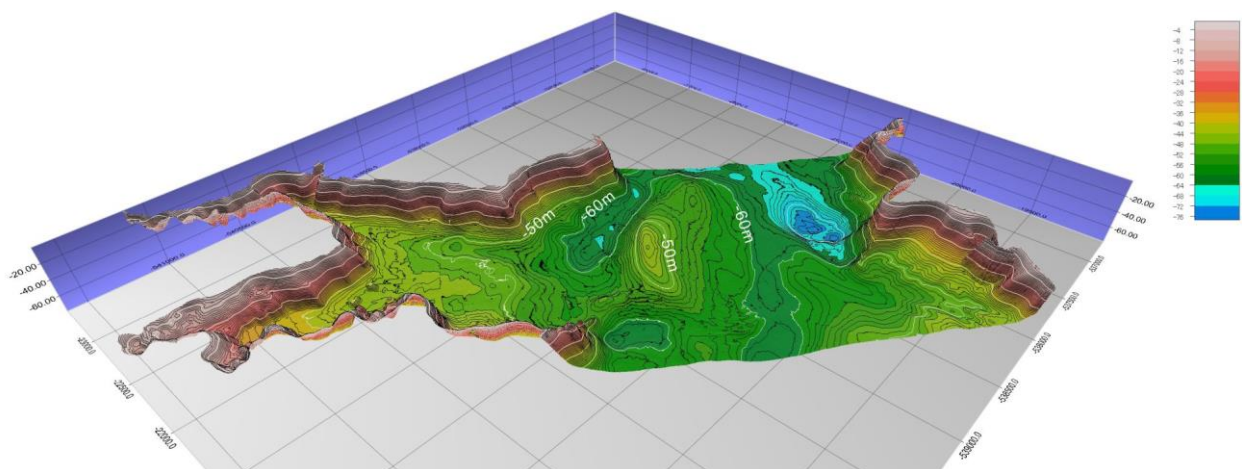


Fig. 2 Seafloor geomorphology between Nominoura and Kuroshio Research Center visualized by multibeam bathymetry The Digital Elevation Model (DEM) was created using 1-meter grid. The interval of the XY coordinate under the bathymetric map is 500m.

花粉化石の ^{14}C 年代測定に基づくタービダイトの高精度編年手法の開発

High-accuracy ^{14}C dating of turbidites using fossil pollen grains

石澤 堯史, 東北大・災害研, E-mail: ishizawa(at)irides.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
Takashi Ishizawa, International Research Institute of Disaster 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

Deep-sea turbidites have been used to estimate paleo earthquake history. Establishing robust chronology is important issue to understand the earthquake history. However, dating of deep-sea sediment is often difficult due to the lack of suitable materials for ^{14}C dating. We examined the applicability of fossil pollen grains for dating of deep-sea sediment. Our results revealed that suitable pretreatment is required to collect sufficient amount of pollen for ^{14}C dating. The method developed in this study enables ^{14}C dating of pollen for deep-sea sediments and improves the accuracy of dating of deep-sea sediment.

1. はじめに

タービダイトは混濁流により形成される堆積物の総称である。混濁流の発生要因は地震や洪水、海底火山の噴火などが挙げられるが、地震・津波が頻発する海溝沿いの地点では地震動や津波による海底表層堆積物の擾乱が混濁流の主たる発生要因であることが知られている（例えば, Arai et al., 2013; Ikehara et al., 2021）。そのため海溝沿いの海底を広域的に掘削し、タービダイトの分布調査と編年を行うことで過去の地震津波履歴の復元に貢献できる。このようなタービダイトを用いた地震津波履歴の研究は日本海溝やカスケード沈み込み帯など世界中の沈み込み帯で実施されており（例えば, Goldfinger et al., 2012）、陸域の堆積物記録からは復元できない長期間の地震津波履歴を復元する手法として重要視されている。

タービダイトの研究を実施する上での課題の一つが編年である。一般的に海洋コア試料については、炭酸塩微化石や堆積物の全有機炭素での ^{14}C 年代測定、年代既知の火山灰層や古地磁気層序を用いた編年が実施されてきたが（例えば, Bao et al., 2018; Kanamatsu et al., 2022）、精度と確度の面で信頼できるものは少なく、タービダイトの編年や年代対比を困難にしている。

2. 問題設定・方法

上記の問題を解決するため、本研究では海洋コア試料中の花粉化石に着目した。花粉化石は堆積物中に普遍的に存在するため層準を選ばずに年代測定できる。また、湖沼における先行研究では、花粉化石から得られる ^{14}C 年代は大型植物化石等から得られる ^{14}C 年代と整合的であり、その年代値の信頼性は高いと考えられる（例えば, Tennant et al., 2013）。近年、花粉の蛍光特性を利用して、セルソーターでの花粉の自動分離も可能となり（Yamada et al., 2021）、堆積物中から効率的に花粉化石のみを抽出できるようになった。しかし、セルソーターを用いた花粉分離の既往研究は、主に湖沼や陸上堆積物を対象としており、セルソーターを海洋コア試料に適用して花粉を分離した研究はない。

そこで本研究では、過去に日本海溝沿いで掘削された海洋コア試料を用いて海洋コア試料から花粉化石の分離を行った。

分離するには複数の前処理方法を比較し、花粉化石を効率的に収集する手法を検討した。

3. 結果と考察

本研究では、まず既往の湖沼・陸上堆積物に適応されている前処理手法をそのまま海洋コア試料に適用し、花粉の分離を試みた。その結果、海洋コア試料中から年代測定に十分な量の花粉を集めることができなかった。これは、湖沼・陸上堆積物に比べて、海洋コア試料中の花粉量が少ないためであり、前処理の過程で花粉が少しずつ減少するため、最終的に得られる花粉量が不足したと考えられる。そこで、本研究では陸上試料用の花粉の前処理手法の内、海洋コア試料には不要な手順を検討し、前処理を一部簡略化することで、前処理過程での花粉の損失を最小限にする手法を開発した。またセルソーターのパラメーターを調整しながら花粉の分離を繰り返すことで、日本海溝の海洋コア試料から花粉を分離するための適切なパラメーターを発見した。これらの手法の開発により、海洋コア試料中から年代測定に必要十分な量の花粉を収集できるようになった（図1）。

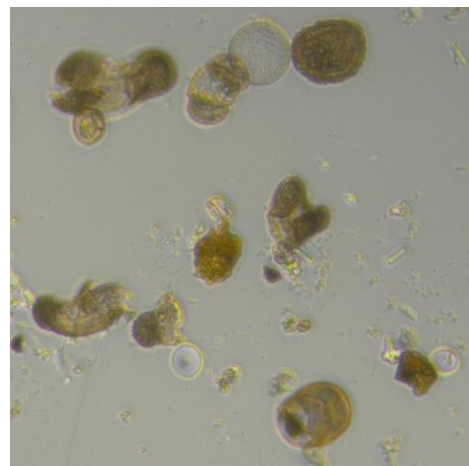


Fig. 1 Example of pollen isolated from deep-sea sediments.

4. まとめと今後の展望

本研究により、海洋コア試料中から年代測定に必要十分な花粉化石を収集する手法を開発できた。この手法を用いることで、海洋コア試料中のタービダイトについて、花粉化石による編年を実施できるようになる。今後は海洋コア試料について花粉を用いた年代測定を複数層準で実施し、その結果を既往の年代測定手法による結果と比較する。また、タービダイトから明らかにする古地震履歴と、海溝沿いの陸上に残された津波履歴を比較し、日本海溝沿いの古地震・古津波履歴の統合的な理解を目指す。

参考文献

- (1) Arai, K., Naruse, H., Miura, R., Kawamura, K., Hino, R., Ito, Y., Inazu, D., Yokoyama, M., Izumi, N., Murayama, M., Kasaya, T., 2013: “Tsunami-generated turbidity current of the 2011 Tohoku-Oki earthquake”, *Geology* 41, 1195-1198.
- (2) Bao, R., Strasser, M., McNichol, A.P., Haghipour, N., McIntyre, C., Wefer, G., Eglinton, T.I., 2018: “Tectonically-triggered sediment and carbon export to the hadal zone”, *Nat. Commun.* 9:121.
- (3) Goldfinger, C., Hans Nelson, C., Morey, A.E., Johnson, J.E., Patton, J.R., Karabanov, E., Gutierrez-Pastor, J., Eriksson, A.T., Gracia, E., Dunhill, G., Enkin, R.J., Dallimore, A., Vallier, T., 2012: “Turbidite event history-methods and implications for Holocene paleoseismicity of the Cascadia subduction zone”, *USGS Prof. Paper* 1661-F.
- (4) Ikehara, K., Usami, K., Irino, T., Omura, A., Jenkins, R.G., Ashi, J., 2021. “Characteristics and distribution of the event deposits induced by the 2011 Tohoku-oki earthquake and tsunami offshore of Sanriku and Sendai, Japan”, *Sed. Geol.* 411:105791.
- (5) Kanamastu, T., Ikehara, K., Hsiung K.H., 2022: “Stratigraphy of deep-sea marine sediment using paleomagnetic secular variation: Refined dating of turbidite relating to giant earthquake in Japan Trench”, *Mar. Geol.* 443, 106669.
- (6) Tennant, R.K., Jones, R.T., Brock, F., Cook, C., Turney, C.S.M., Love, J., Lee, R., 2013: “A new flow cytometry method enabling rapid purification of fossil pollen from terrestrial sediments for AMS radiocarbon dating”, *J. Quaternary Sci.* 28(3), 229-236.
- (7) Yamada, K., Omori, T., Kitaba, I., Hori, T., Nakagawa, T., 2021: “Extraction method for fossil pollen grains using a cell sorter suitable for routine ^{14}C dating”, *Quat. Sci. Rev.* 272, 107236.

秋季の下北北岸沖ジャイアー変動に伴う水塊波及と乱流過程

Water mass spreading and turbulent processes associated with the gyre fluctuations off the northern coast of the Shimokita Peninsula in autumn of 2022

金子 仁, JAMSTEC・むつ研, E-mail: h_kaneko@jamstec.go.jp

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

堤 英輔, 鹿児島大・水産学部, E-mail: tsutsumi@fish.kagoshima-u.ac.jp

Hitoshi Kaneko, Mutsu Institute for Oceanography, JAMSTEC

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

Eisuke Tsutsumi, Faculty of Fisheries, Kagoshima University

Abstract

The water mass distribution characteristics linked to the fluctuations in the offshore gyre of the northern Shimokita Peninsula in 2022 were discerned through ship-based observations and background analysis employing high-frequency radar and ocean data-assimilation model. Initially, on 13 October, the influx of offshore water and the associated enhancement of turbulent vertical mixing were captured. Furthermore, on the following day (14 October), the spread of surface low-salinity water was observed. This water exhibited elevated silicate concentrations. According to the radar data, the flow field immediately preceding the occurrence presented a feeble gyre and was conducive to the propagation of coastal water of terrestrial origin. The provenance of this water mass will be probed in the future by chemical analysis of the river water.

1. はじめに

津軽海峡東部は一般に「津軽暖流」と呼ばれる、海峡を通ってきた東向きの流れが存在する一方、太平洋からは亜寒帯系の水塊が流入する水塊合流域となっており、複雑な海洋構造を示す (例えば Rosa et al., 2007)。南北方向の平均的な構造としては、海峡の南側に「津軽暖流」によって運ばれてきた高温・高塩分・貧栄養の亜熱帯系水塊が、「津軽暖流」の北側に低温・低塩分・富栄養の亜寒帯系の水塊が分布する。夏季から秋季にかけては「津軽暖流」は下北半島沿岸を離れ海峡中央部を流れ、「津軽暖流」流軸と下北半島の間には時計回りのジャイアー (下北北岸沖ジャイアー) が形成されることが、近年の研究から明らかになった (Kaneko et al., 2021; 2022)。このジャイアーの南縁、下北半島沿岸では、夏季から秋季にかけて局所的に高い表面クロロフィル濃度が分布することが衛星観測から明らかになっている (Fig. 1)。このようなクロロフィル分布は、亜熱帯系水塊の影響が強い下北沿岸において何らかの栄養塩供給が存在することを示唆する。

2. 問題設定・方法

上記の栄養塩供給過程として大きく二つの起源が考えられる。一つは「津軽暖流」北側からの亜寒帯系水塊の流入、もう一つは陸域起源水の影響である。また、最終的な表層への栄養塩供給過程としての乱流鉛直混合過程が重要な鍵となる。そこで、下北半島沿岸の生物生産維持に関わる起源水の由来と、水塊波及過程と乱流鉛直混合の関係を明らかにすることを目的として、2022 年 10 月 13 日午後と 14 日午前にわたって下北半島沿岸で小型乱流計 VMP250 (Rockland Scientific International Inc.) による乱流強度観測および表層水の採水を実施し、栄養塩等の化学分析を行った。観測時の状況を JAMSTEC むつ研で運用する海洋短波レーダー (SeaSonde, CODAR Ocean Sensors) 流速場、水温モニタリングブイ時系列、さらに JAMSTEC の時空間高解像度海洋データ同化モデル (JCOPE-T DA) と比較し、検討を行った。

3. 結果と考察

10 月 13 日の午後に下北半島沿岸 野牛沖で実施した乱流観測では、開始から 1 時間程度の間に相対的に水温の高い水塊が亜表層に流入し、乱流エネルギー散逸率が 2 桁程度上昇したことが捉えられた (Fig. 2)。その直後に実施した南北断面観測では、41.38°N 付近で高水温水の分布が見られた (Fig. 3)。海洋短波レーダーおよび JCOPE-T DA から、下北北岸沖ジャイアーの縁辺に沿って暖水が海峡中央部から流入したことが示唆された (図は省略)。このような暖水流入はモニタリングブイによる時系列観測からも捉えられた (図は省略)。

翌 10 月 14 日の海況は大きく変化し、下北半島の沿岸表層は低塩分の水に覆われていた。この低塩分水は珪酸塩濃度が高く、また酸素同位体比が低かった (Fig. 4)。このような特徴は亜寒帯系水および陸域起源水の特徴と矛盾はしない。海洋短波レーダーの表層流速は、前日の夕方から下北北岸沖ジャイアーの勢力が一時的に弱まり、沿岸の流速場の変化が小さくなっていたことを示した (Fig. 5)。これは陸域起源水が表層に広がるのに適した環境になっていたことを示唆する。

4. まとめと今後の展望

以上の結果から、下北北岸沖ジャイアーの勢力変化に伴い、沖合水の下北半島沿岸への流入や沿岸水の広がりが生じていたことが示唆された。また水塊波及が乱流強化に結びつくことが観測により確かめられた。本研究は令和 5 年度 (2023 年度) も継続する予定である。今後、高い珪酸塩濃度の水塊の起源が沿岸と陸域のどちらにあるのかを確認するため、下北半島北岸の河川水の化学分析を実施する。また 2022 年と同様の乱流観測を継続して行い、さらに鉛直的な栄養塩分布を検討する事により、水塊波及に伴う乱流鉛直混合と栄養塩供給の定量評価を行う予定である。

参考文献

- (1) Kaneko, H., Sasaki, K., Abe, H., et al. 2021: The role of an intense jet in the Tsugaru Strait in the formation of the outflow

gyre revealed using high-frequency radar data. *Geophys. Res. Lett.*, 48, e2021GL092909. <https://doi.org/10.1029/2021GL092909>

- (2) Kaneko, H., Tanaka, T., Abe, H., et al. 2022: Subinertial frequency variations in the axis of the Tsugaru Warm Current east of the Tsugaru Strait. *Prog. Earth Planet. Sci.*, 9:53, <https://doi.org/10.1186/s40645-022-00509-z>

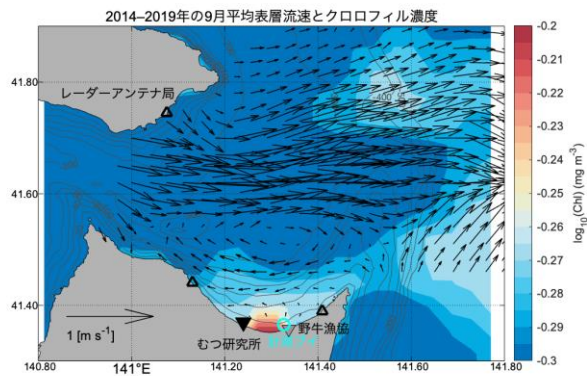


Fig. 1. Monthly mean surface velocity and chlorophyll concentration distribution in September (2014–2019).

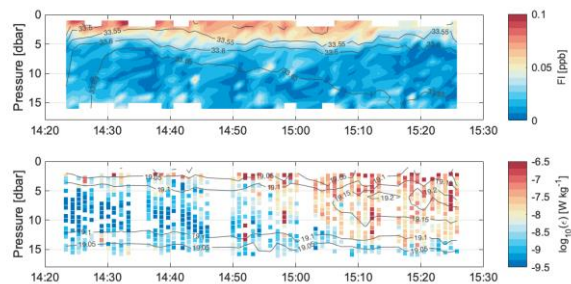


Fig. 2. Depth–time section of observations near the Noushi offshore buoy on 13 October 2022. Upper: fluorescence (color) and salinity (contours), and lower: turbulent energy dissipation rate (color) and temperature (contours).

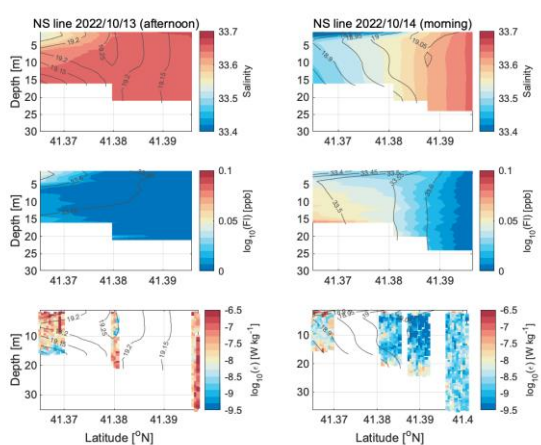


Fig. 3. Vertical transect off Noushi on 13 October 2022 (left),

- (3) Rosa, A. L., Isoda, Y., Uehara, K., and Aiki, T. 2007: Seasonal variations of water system distribution and flow patterns in the Southern Sea Area of Hokkaido, Japan. *J. Oceanogr.*, 63, 573–588. <https://doi.org/10.1007/s10872-007-0051-4>

and 14 October 2022 (right). The upper, middle, and lower row denote salinity, fluorescence, and turbulent energy dissipation rate, respectively. Contours indicate temperature.

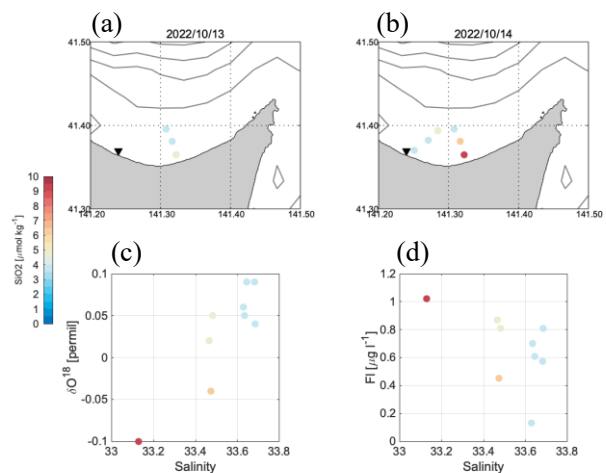


Fig. 4. Horizontal distribution of silicate on (a) 13 October 2022 and (b) 14 October 2022. Scatter plot between salinity and (c) δO^{18} , and (d) fluorescence. Color in (c) and (d) also denotes silicate.

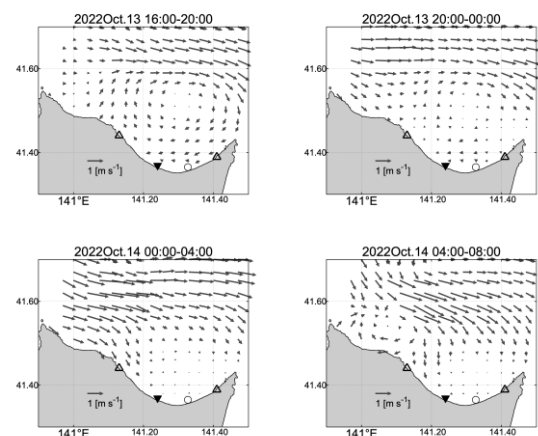


Fig. 5. Surface velocity distribution observed by the high-frequency radar from 13 to 14 October 2022.

準備中

特定共同研究

9. 考古遺跡から出土した二枚貝貝殻を用いた北海道周辺海域における高時間解像度環境復元

海洋の温暖化・酸性化に伴う亜熱帯島棚棲石灰化生物の分布と現存量の変化

Changes in distribution and abundance of calcifying organisms dwelling in subtropical island-shelf environments in response to ocean warming and acidification

藤田 和彦, 琉球大・理, E-mail: fujitaka(at)sci.u-ryukyu.ac.jp

千徳 明日香, 琉球大・理, E-mail: sentoku(at)sci.u-ryukyu.ac.jp

横山 祐典, 東大・大気海洋研, E-mail: yokoyama(at)aori.u-tokyo.ac.jp

Kazuhiko Fujita, Department of Physics and Earth Sciences, University of the Ryukyus

Asuka Sentoku, Department of Physics and Earth Sciences, University of the Ryukyus

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

Abstract

Ocean warming and acidification are ongoing and have been reported to adversely affect shallow-water coral-reef organisms and ecosystems. However, little is known about impacts of these threats to the survival and growth of calcifying organisms dwelling on subtropical mesophotic island shelf environments. To answer this question, we dredged surface sediments around island shelf environments off Sesoko Island. The dredging successfully collected living and dead specimens of shelf-dwelling calcifying organisms such as foraminifers and corals. At least seven genera of large benthic foraminifers were found from sediments collected at 60 m depth off northwest of Sesoko Island. A total of 22 solitary zooxanthellate scleractinian corals were collected, corresponding to 2 genera. These specimens will be used for taxonomical studies, culturing experiments, and growth rate measurements to understand if the physiology and ecology of these organisms have already suffered from increasing temperatures and decreasing pH.

1. はじめに

IPCC 第 6 次評価報告書が示すように、人間活動による温室効果ガス排出を主な原因とする地球温暖化は着実に進んでおり、2040 年までに産業革命前に比べて気温が 1.5℃上昇することは確実となっている。これに伴い、海洋の温暖化（水温の上昇）と酸性化（炭酸塩飽和度の低下）も進んでおり、サンゴの白化現象に代表されるように、熱帯～亜熱帯域のサンゴ礁生態系も既に影響を受けている。そして将来的にはサンゴ類が主体の生態系から、海藻類や従属栄養生物が主体の生態系へ遷移することが予測されている。しかしながら、既に海洋の温暖化と酸性化が進んでいる状況において石灰化生物がどのように生き延びているのかについて、浅海域（潮間帯・有光層上部）の石灰化生物については野外観測や飼育実験による研究が進んでいるが、より深い島棚域の石灰化生物への影響については実証研究が少ない。

2. 問題設定・方法

そこで亜熱帯島棚域において、海洋の酸性化・温暖化の進行により石灰化生物の現存量や成長への影響が及んでいるかを明らかにするために、亜熱帯島棚域の表層堆積物をドレッジにより採取し、島棚棲石灰化生物（有孔虫類、単体サンゴ類等）の生体・遺骸の分布と現存量、殻や骨格の成長履歴を調べることを目的とする。

本研究は熱帯生物圏研究センター瀬底研究施設を拠点とし、多くの研究データが蓄積されている瀬底島周辺海域を調査海域として実施した（図 1）。本年度は 8 月 29 日にドレッジにより異なる地点や水深の表層堆積物を採取した。採取後、堆積物試料から分類群ごとに生体と遺骸を選別し、分類学的研究・飼育実験研究・殻の成長履歴研究に用いた。

3. 結果と考察

瀬底島周辺の 6 地点の水深 10～85 m の範囲でドレッジした結果、瀬底島北西沖の水深 60 m 付近で大型有孔虫化石や単体サンゴ化石を含む石灰質砂礫質堆積物が採取された。黒潮の支流が瀬底島とその西の水納島の間を流れており透明度や

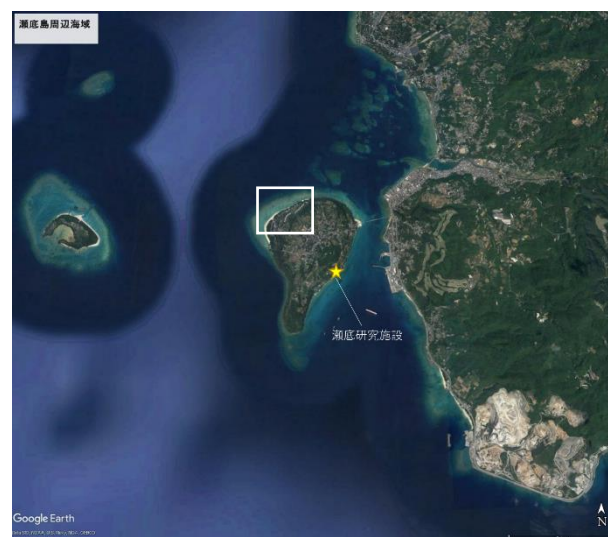


Fig. 1 Study area showing the location of Sesoko Research Station (star), Tropical Biosphere Research Center and dredged area (white frame)

潮通しがよいことや、比較的平坦な地形が広がっており適度な粗さの砂礫が堆積することが石灰化生物が多く分布する要因と考えられる。

有孔虫では少なくとも 7 種の大型底生有孔虫の生体と遺骸が採取された（図 2）。生体は多くはないが、各種につき 10 個体程度の状態の良い個体が採取された。仮足を伸ばす個体も確認された。

サンゴ類に関しては、瀬底島北西沖の水深 60 m 付近で、小型（長径 1 cm 程度）の単体イシサンゴ 2 属の生体（12 個体）および骨格（10 個体）が採集された（図 3）。この 2 属はホシムシと共生しており、堆積物の流入の多い場所においても、ホシムシがサンゴ個体を牽引することで堆積物での埋没を防ぐことが知られている。またいずれのサンゴ生体も褐虫藻を有しており、潮通しの良い有光層であると考えられる。

4. まとめと今後の展望

有孔虫研究では、今後放射性炭素年代測定により生息年代を推定した遺骸個体や過去（1970年代、1990年代）に同じ海域で採取された生体個体（Ujiie et al. 1980; Hohenegger, 1994）と比較することで、海洋の温暖化・酸性化により島棚域の石灰化生物の分布・群集組成・多様性・成長速度が変化した可能性を実証していきたい。特に海洋の温暖化に伴う透明度の上昇により石灰化底生生物がより深い深度へ進出していることや、海洋酸性化により石灰化生物の殻や骨格の密度が低下していることを microCT による殻の体積・密度計測によって実証していきたい。

サンゴ研究では、いままで注目されていなかった単体イシサンゴ類の多様性や分布を明らかにし、既存の有藻性イシサンゴのデータと比較することで、イシサンゴ全体の多様性や分布を明らかにしていきたい。さらに単体イシサンゴは同一種

においても深度によって褐虫藻の有無に違いがあることが明らかとなってきた。亜熱帯域の外側陸棚（島棚）は、無藻性イシサンゴと褐虫藻の生態学的コンタクトが可能かつ、共生関係が進化する場である可能性が示唆された。今後はこれらの多様性の変化について、水温、底質、水塊構造、栄養塩量など海域全体の構造との関係性を詳細に明らかにし、イシサンゴ類の分布の制限要因を明らかにする必要がある。

参考文献

- (1) Ujiie, H., F. Shioya, and A. Yamada., 1980: Sediment in the Bay of Nago and around the island of Sesoko, Okinawa. Sesoko Marine Science Laboratory Technical Report, 7, 1-17
- (2) Hohenegger, J., 1994: Distribution of living larger foraminifera NW of Sesoko-Jima, Okinawa, Japan. Marine ecology, 15, 291-334

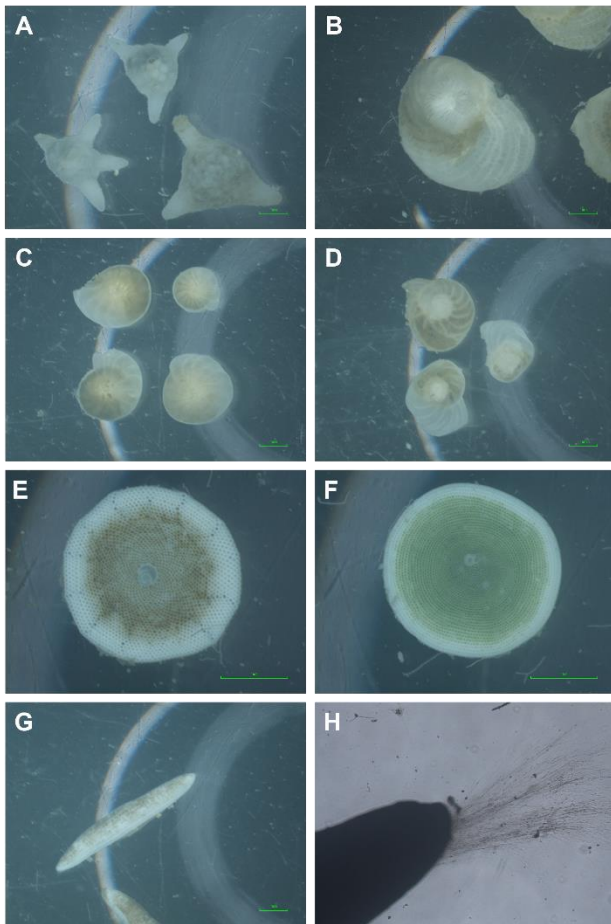


Fig. 2 Large benthic foraminifera from 60 m deep off northwest of Sesoko Island. A: *Baculogypsinoidea spinosus*, B: *Heterostegina depressa*, C: *Nummulites venosus*, D: *Operculina* sp., E: *Amphisorus* sp., F: *Parasorites orbitolitoides*, G: *Alveolinella quoyii*, H: Reticulopodia emerging from an *Alveolinella* individual. Scale bars = 1 mm.

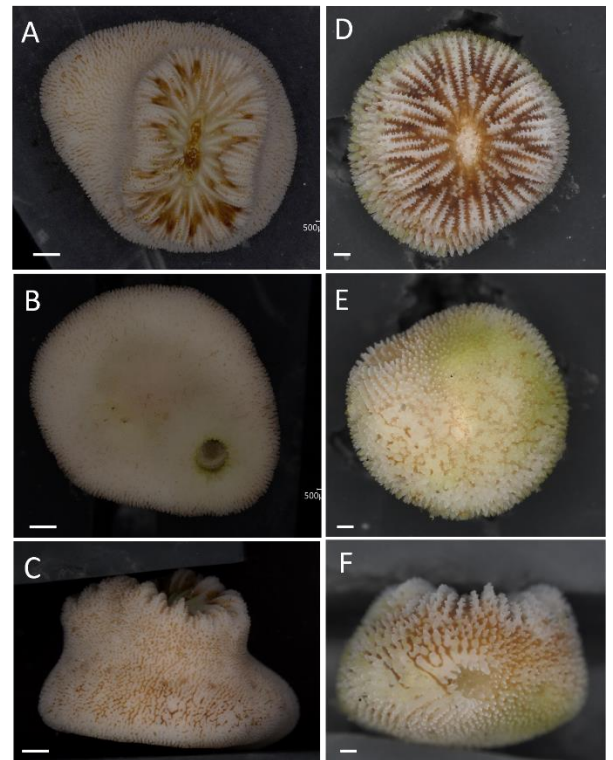


Fig. 3 Scleractinian corals. A-C: *Heteropsammia cochlea*, D-F: *Heterocyathus* sp., Scale bars = 1 mm.

海中海底下統合イメージング解析技術の開発

Development of integrated seismic imaging of water column and seafloor

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
熊谷 直音, 海洋大, E-mail: m213024(at)edu.kaiyodai.ac.jp
須藤 遼, 海洋大, E-mail: m213036(at)edu.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
Naoto Kumagai, Tokyo University of Marine Science & Technology
Ryo Sudo, Tokyo University of Marine Science & Technology

Abstract

For real-time observation of fluid discharge from fault near the seafloor, we are developing an integrated seismic imaging method by echo-sounder survey and multi-channel seismic (MCS) survey. The former is often used to image gas bubbles in water column and the latter is used to figure out geological structures including faults. On 6th October 2022, a field experiment for the integrated imaging was conducted in the Tokyo Bay, where gas bubbles have been observed in previous studies. The resulting integrated imaging profile shows three groups of anomalies suggesting gas bubbles as well as many fish schools within the water column. On the other hand, the profile shows several faults below the seafloor. Interestingly, the bubble anomalies are located immediately above the faults, implying that the gas bubbles are discharged from the faults. According to the previous gas-sampling study in the Tokyo Bay, main component of the gas bubbles should be methane. If origin of the gas is assumed to be dissolved gas in water, which exists in the Minami Kanto gas field that extends deep in the Kanto area, the relationship between the gas bubbles and the faults can be well explained by the theory of the petroleum system. Namely the gases were migrated up from the depths along the faults. Thus, the present integrated seismic imaging successfully figured out real-time fluid discharge from fault.

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、資源開発や地殻構造探査のみならず断層を介した流体移動における研究分野でも多くの成果をあげてきた（e.g., Park et al. 2021A）。また、海底表層堆積物中の間隙水のヘリウム同位体解析の結果から、断層を経由した地殻内流体循環の存在が明らかになりつつある（e.g., Park et al. 2021B）。このように、断層に沿った流体移動現象が地震探査データによって捉えられるようになってきた。

2018年8月に沼津沖内浦湾で実施した地震探査実験の結果、ある1つの測線（測線10）において、活断層から湧出する流体と推定される現象が観測された（Tsuru et al. 2020）。海水面から海底面までの水中のP波速度を解析すると、全体的には1520m/sであるのに対し、湧出部のP波速度は1580m/sと有意に大きな値を示した。この速度異常が温度に起因すると仮定すれば、水中音速の理論式（Mackenzie, 1981）から30℃以上になると推定された。

令和3年7月、この速度異常の原因を解明するため反射法地震探査および計量魚探のみならず曳航式温度計と水中カメラを用いて海底の温度と映像を取得した。しかしながら、上述した異常は見られなかった。このことより、この異常は間欠的に起こるもので、発生予測が難しいことが明らかになった。

令和4年度はフィールドを東京湾に移し、海底から湧出するガス（Tsuru et al., 2019）を対象とした海中海底下統合イメージングを試みた。以下に、その結果について報告する。

2. 問題設定・方法

令和4年10月6日、図1に示す測線で、海中および海底下の音波記録を同時に取得した。使用した船舶はフェスタシッピング社の作業船「ゆめとび」（19トン）である。海中記録はポータブル計量魚群探知機（発振周波数120kHz）を用いて取得した。海底下記録は、振源に水中スピーカー、受振に10チャンネルのハイドロフォンケーブルを用いて取得した。なお、測線は、既存の地震探査データの再解析に基づき、ガスの湧出現象と推定されるアノマリが見られた測線（令和3年度学際連携研究報告書）を選定した。

ここで、本実験における両者の分解能の違いは、垂直分解能で6倍、水平分解能では158倍前者の方が高い。そのため、統合イメージングでは、計量魚探記録を画像データと見做し、データを縦1/6、横1/158にデシメーションすることで、地震探査記録の分解能との整合を図った。また、デシメーション処理の際に、アノマリに関する二値化を行った。すなわち、適用エリア内にアノマリがあればそのエリアの値を1、なければ0とした。

3. 結果と考察

本実験の結果、図2に示す通り、計量魚群探知機データ上でガスの湧出現象と推定される3つのグループのアノマリが観察された。ここで、ガスのアノマリと魚群との分離は、共同研究者で魚群の解析に詳しい甘糟によって実施された。なぜならば、魚群とガスからの散乱波の振幅（体積散乱強度）に大きな違いがないことに加え、分布の方向も類似していることから、データ処理によって両者を分離することができなかったためである。



図 1. 観測測線図。

総合イメージングの結果を図3に示す。同図上では、各アノマリの位置が、断層あるいは音響散乱層の位置と一致しているように見える。アノマリ1は、天然ガスに起因すると考えられている音響散乱層（たとえば、

加藤，1984）の上で観察された。アノマリ2は、一対の断層の片方の真上で観察された。アノマリ3は、音響散乱層の北東側端部で観察された。ここで、音響散乱を起こす天然ガスの起源を、現生のヘドロ中の微生物であるよりも、地下深部の水溶性天然ガスであると考えの方が既存研究の結果と整合的であることから（Tsuru et al., 2019）、後者であると仮定する。そう仮定した場合、深部からのガスの移動経路としては、断層が最有力である。すなわち、東京湾の海中で観察される湧出ガスの起源を首都圏直下に分布する南関東ガス田の水溶性天然ガスであると仮定すれば、断層の上でそれらの湧出現象が起こることが予測される。今回の実験結果は、そのことを実証しているように見える。

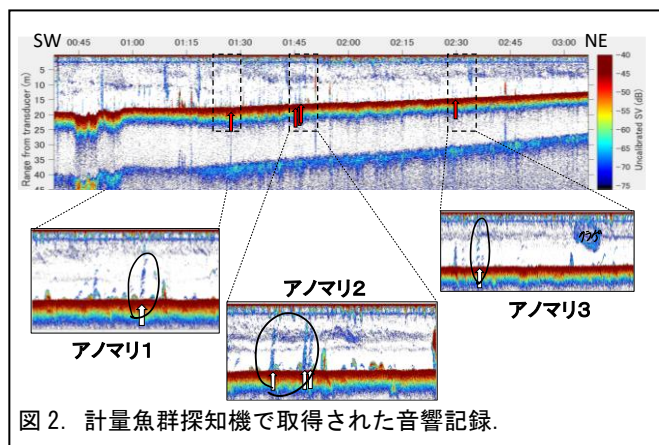


図 2. 計量魚群探知機で取得された音響記録。

4. まとめと今後の展望

令和4年度（2022年度）は、東京湾で過去に取得された反射法地震探査データ上でガスの湧出箇所を予測し、その場所で計量魚群探知機による海中探査と水中スピーカーによる海底地震探査を実施した。それら2つの記録を用いて統合イメージング解析を行った結果、3グループのガス湧出現象と推定されるアノマリが観測された。地震探査断面上では、それらのアノマリの下位には、いずれも断層が発達していると解釈できる。すなわち、海中海底下統合イメージングの結果、海底下からのガスの湧出経路として断層が寄与する可能性が示唆された。

一方、計量魚群探知機データの上でガスの湧出現象を特定する作業は、現時点ではデータ処理では困難であり、専門家の解釈に頼らざる負えないことも明らかになった。この点は本解析法の問題である。この問題の最も大きな原因は、ガスからの散乱波と魚群からの散乱波の強度および分布が似ていることであり、それが分離を難しくしている。そのため、海中海底下統合イメージングにおける今後の展開の一つとして、

魚群探知機より低周波を使用するサブボトムプロファイラーで海中データのイメージングを実施する案を検討している。

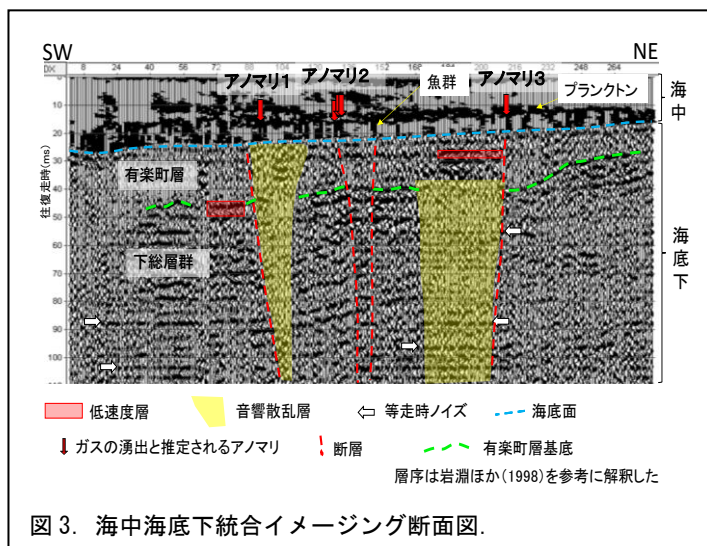


図 3. 海中海底下統合イメージング断面図。

参考文献

- (1) Park, J.-O., T. Tsuru, G. Fujie, E. J. Hondori, T. Kagoshima, N. Takahata, D. Zhao, and Y. Sano, Seismic Reflection Images of Possible Mantle-Fluid Conduits and Basal Erosion in the 2011 Tohoku Earthquake Rupture Area. *Frontiers in Earth Science*, 9:687382, doi: 10.3389/feart.2021.687382, 2021A.
- (2) Park, J.-O., N. Takahata, E. J. Hondori, A. Yamaguchi, T. Kagoshima, T. Tsuru, G. Fujie, Y. Sun, J. Ashi, M. Yamano, and Y. Sano, Mantle-derived helium released through the Japan trench bend-faults. *Scientific Reports*, 11, 12026, https://doi.org/10.1038/s41598-021-91523-6, 2021B
- (3) Tsuru, T., J.-O. Park, K. Amakasu, T. No, K. Arai, T. Inoue, S. Furuyama, K. Uchida, and Y. Nakamura, Possible fluid discharge associated with faults observed by a high-resolution dense-2D seismic reflection survey in Uchiura Bay off Numazu, Japan, *Earth, Planets and Space*, 72, 121, 2020.
- (4) K.V. Mackenzie, Nine-term equation for the sound speed in the oceans (1981) *J. Acoust. Soc. Am.* 70(3), pp 807-812.
- (5) Tsuru, T., K. Amakasu, J.-O. Park, J. Sakakibara, and M. Takanashi, 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, https://doi.org/10.1186/s40623-019-1011-0, 2019.
- (6) 加藤茂，東京湾の海底地質構造，*地学雑誌*，93，119-132. 1984.

乱流混合と酸素輸送プロセスに関する渦相関技術の構築：浅水境界層への応用

Development and application of the eddy-covariance technique to boundary-layer physics and turbulent flux of dissolved oxygen in shallow water environments

増永 英治, 茨城大学・地球・地域環境共創機構,

E-mail: ejji.masunaga.office@vc.ibaraki.ac.jp

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

大内 孝雄, 茨城県霞ヶ浦環境科学センター, E-mail: ta_ouchi@pref.ibaraki.lg.jp

北村 立実, 茨城県霞ヶ浦環境科学センター, E-mail: ta.kitamura@pref.ibaraki.lg.jp

Eiji Masunaga, Global and Local Environment Creation Institute, Ibaraki University

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

Takao Ouchi, Ibaraki Kasumigaura Water Environmental Science Center

Tatsumi Kitamura, Ibaraki Kasumigaura Water Environmental Science Center

Abstract

Energy and mass transport induced by turbulent mixing play a crucial role in ocean and atmospheric circulations. However, mixing processes in coastal oceans and shallow lakes have not been understood well due to lack of suitable observational techniques. We employed a new method to infer turbulent mixing and associated oxygen flux based on the eddy covariance method for a shallow lake, Lake Kasumigaura, to establish an observational approach of turbulent mixing on shallow water mixing. In addition, a high-resolution thermistor chain and acoustic Doppler current profiler were deployed to estimate vertical eddy diffusivity based on the Ellison scale (vertical turbulent overturning scale). Parameters associated with turbulent mixing, such as turbulent kinetic energy dissipation rate, eddy diffusivity and oxygen flux etc., were successfully estimated from the mooring system. Observed results show daily cycle variations of vertical mixing and oxygen transport owing to daily sea breezes and night-time cooling-induced convection.

1. はじめに

地球流体分野において、乱流混合による熱及び物質の輸送・拡散は、地球規模の物質循環や生態系ならびに自然環境の保全を考える上で重要な役割を担う。海洋中における乱流混合の測定技術は、1970～80年代にピエゾ素子を用いたシアープローブを搭載した曳航タイプの乱流微細構造観測装置が確立されたが、現在はシアープローブを搭載した自由落下式の乱流計測装置が主流である。VMP(Rockland Scientific)やTurboMAP(旧アレック電子)等として知られるこれらの装置は、乱流シア어를直接計測することで乱流エネルギー散逸率を直接求めることができる。更に近年では、微細な乱流構造を観測する自立式潜水機(AUV)が開発され、海洋中の乱流強度をより高い自由度で機動的に観測する技術や手法が確立されつつある。

しかしながら、自由落下式の乱流計測装置は船舶から計測する必要があり、長期間におよぶ継続的な調査を行うことが難しい。また、AUVを用いた調査は運用コストの高さが最大のネックであり、通信トラブルによる亡失のリスクが拭いきれない。加えて技術的に沿岸海域や湖沼でのAUV利用は難しく、湖底や海底境界近傍といった水底の境界層を攻めるような観測は事実上不可能である。しかしその一方で、海底・湖底近くは運動エネルギーがシンクする重要な領域であり、乱流混合に伴う物質輸送は海洋や湖沼の生態系に強く結びつくことが示唆されている(Masunaga et al., 2020)。また浅い沿岸海域は、乱流混合や物質輸送のホットスポットと言われており(Carter and Gregg, 2002)、地球規模の気候変動や生態系を把握する上で重要な情報を含んでいる可能性が高い。中でも乱流混合に伴う酸素輸送は海洋生態系や地球規模の物質循環に直接的な影響を及ぼすため(Couespel et al., 2019)、酸素循環過程の解明は特に重要な課題である。

したがって境界層における乱流混合の精密な計測技術は、

海洋科学をはじめとする多くの学際分野から求められる技術であると言える。

2. 問題設定・方法

境界層乱流についての理解を深めるために、本研究の代表者及び分担者が中心となって開発を進める湖沼において確立した鉛直混合の調査方法(Masunaga et al., 2023)と渦相関法を用いた鉛直フラックスの直接計測(Nomura et al., 2020)を統合し境界層乱流現象の解明に資する技術を開発することを目的として、係留観測装置を用いて実地調査を行った。調査水域としてこれまでに研究代表者が調査基盤を確立した茨城県霞ヶ浦・北浦の湖盆中央の釜谷沖に設定した。調査地点の水深はおおよそ6.5mである。同水域には水資源機構が運用する釜谷沖観測所が水温や溶存酸素(DO)といった水質情報や風向風速等の気象データを継続的に観測しているため、本研究が行うデータと比較検証する上でも適切な水域設定と言える。

係留観測装置は、湖底設置型超音波流速計2MHz Aquadopp Profiler(Nortek)、高速応答水温計SBE-56(Sea Bird)、Vector ADV(Nortek)及び高速応答DO計RINKO-EC(JFE Advantech)で構成した。水温計は0.6m間隔で水面から湖底付近まで設置し、1秒間隔でデータを取得した。Vector ADVとRINKO-ECは互いに直列に接続し、渦相関フラックス計(Eddy Covariance System, ECS)として同期観測を実施した。ECSは湖底から約1.2mの位置を計測点として2時間おきに16Hzの時間分解能でバースト観測を実施した。係留観測装置は、釜谷沖観測所から10m程度離れた地点に設置した。

3. 結果と考察

観測期間中水温は、5月の20℃程度から6月下旬までに

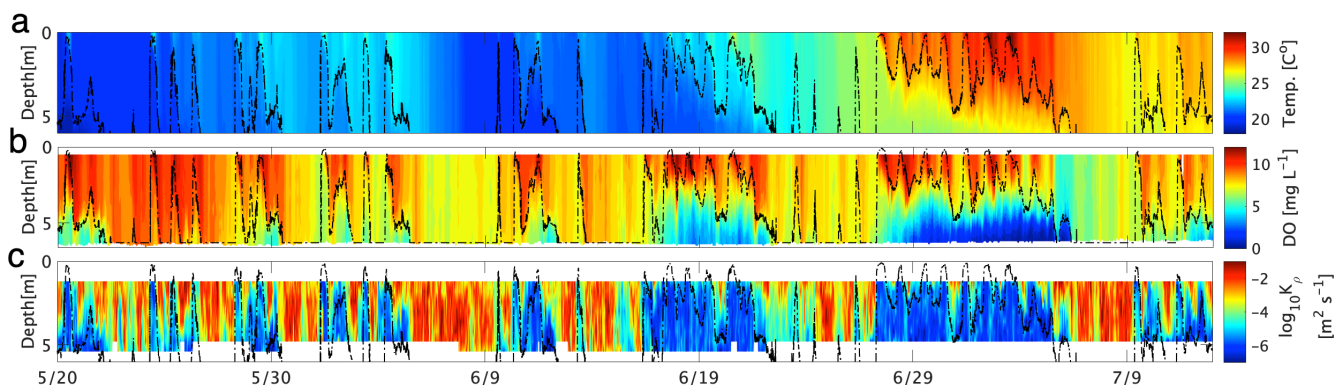


Fig. 1 Observed (a) temperature, (b) dissolved oxygen (DO) and (c) vertical eddy diffusivity obtained from the mooring system

30℃以上に達し 10℃以上の水温変化が見られた (Fig. 1a). また表層が温められることにより成層化が断続的に発生し、特に 6 月下旬から 7 月初旬には上下層で 5℃以上の水温差が見られた。またこの強い成層時期には、底層で DO が 0 mg L⁻¹ 程度にまで低下しており底層への酸素輸送が著しく阻害されていたことがわかる (Fig. 1b). また渦拡散係数も分子拡散係数程度の非常に小さな値を示し、鉛直フラックスが成層化により阻害されていると言える (Fig. 1c).

16Hz で計測した ECS の水温・酸素の摂動場に関して、同時に計測した鉛直流速の摂動との相互スペクトルを計算することで運動量、熱、溶存酸素量の鉛直フラックスを取得することに成功した。観測結果から成層化が顕著であった 6 月下旬から 7 月初頭にかけて溶存酸素および熱量が湖水の上層から下層に運ばれる様子が示された (Fig. 2b,c). これらの結果は、酸素や水温の鉛直勾配が最も急峻な時期に、乱流混合がそれを是正する動きとして解釈が可能である。ただし、レイノルズフラックスから示唆される比較的弱い乱流混合の発達度合いとは矛盾した結果とも言える。鉛直混合が卓越する 5 月下旬には酸素と水温ともに間欠的に上向きのフラックス値を示す期間が存在した。このことは湖底から湖面（大気）方向への熱及び酸素輸送を示しており、湖底からの熱や酸素の供給を意味しており予想とは異なる結果であった。

4. まとめと今後の展望

本研究の成果から浅い水域において酸素輸送を含めた境界層乱流の計測方法を確立した。確立した技術から、時間・空間ともに高解像度な境界層乱流の状態を計測することに成功した。渦相関法を用いた調査では ECS に搭載した 2 つのセンサー間の距離、スペクトル計算における積分範囲の設定や自然界における単振動（例えば、浮力振動や水面波）による疑似的なフラックス値の計上といった影響について定量的な評価を与える必要がある。今後様々な環境の中で計測を行うことで、データや知見を蓄積し、フラックス観測の精度向上を目指す。次年度は上述した懸念事項の評価を行うとともに確立した技術を実海域へ応用し、沿岸域における海面及び海底境界層乱流の調査を推進する予定である。

参考文献

- (1) Carter, G. S., and M. C. Gregg, 2002: "Intense, variable mixing near the head of Monterey Submarine Canyon", *Journal of Physical Oceanography*, 32(11),

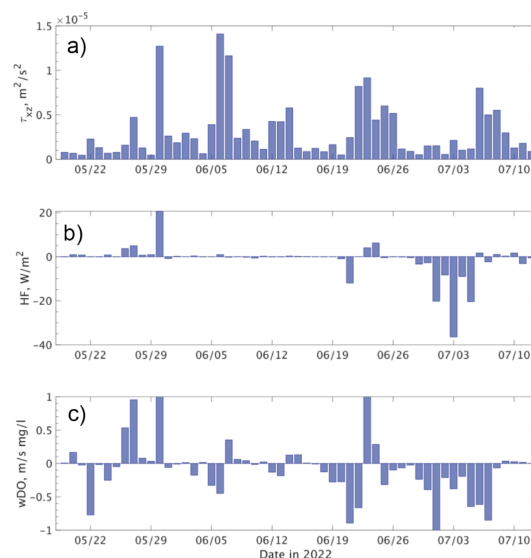


Fig. 2 Daily averages of (a) Reynolds stress, (b) vertical heat flux, and (c) vertical flux of dissolved oxygen, based on ECS.

3145-3165.

- (2) Couespel, D., M., Lévy, and L., Bopp, 2019: "Major contribution of reduced upper ocean oxygen mixing to global ocean deoxygenation in an earth system model", *Geophysical Research Letters*, 46(21), 12239-12249.
- (3) Nomura, D., et al., 2020: "Saroma-ko Lagoon Observations for sea ice Physico-chemistry and Ecosystems 2019 (SLOPE2019)", *Bulletin of Glaciological Research*, 38, 1-12.
- (4) Masunaga, E., and S., Komuro, 2020: "Stratification and mixing processes associated with hypoxia in a shallow lake (Lake Kasumigaura, Japan)", *Limnology* 21(2), 173-186.
- (5) Masunaga, E., S., Itoh, and T., Kitamura, 2023: "Vertical mixing and oxygen flux caused by daily sea breezes in a shallow stratified lake", *Limnology*, in press.

自然環境下における産卵期アカウミガメの心拍モニタリング

Heart rate monitoring of wild loggerhead turtles during nesting activity

檜崎 友子, 名城大・農, E-mail: narazaki(at)meijo-u.ac.jp

松沢 慶将, 日本ウミガメ協議会, E-mail: ymatsu(at)umigame.org

坂本 健太郎, 東大・大海研, E-mail: kqsakamoto(at)g.ecc.u-tokyo.ac.jp

Tomoko Narazaki, Faculty of Agriculture, Meijo University

Yoshimasa Matsuzawa, Sea turtle association of Japan

Kentaro Q Sakamoto, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

Abstract

Being adapted to marine life, nesting behaviours on land seems to be physically and physiologically demanding for sea turtles. Heart rate of free-ranging females nesting at Senri beach were monitored throughout their nesting activities (ascent, body-pitting, digging, egg laying, covering, camouflaging, descent). Heart rate increased when the turtle landed and were consistently high during ascent, body-pitting and digging (27–35 bpm). Heart rate decreased during egg laying up to 16 bpm with increased R-R interval as well as increased R-R interval variability, indicating the occurrence of arrhythmia. It might be possible that decreased heart rate during egg laying is a physiological reflex response controlled by parasympathetic nervous system as previously reported in spawning salmon.

1. はじめに

アカウミガメ (*Caretta caretta*) はその一生のほとんどを海洋で過ごす、産卵期を迎えた成体メスは夜間に砂浜に上陸して産卵を行う。海中生活に適応したウミガメにとって陸上で行われる一連の産卵行動(砂浜上陸、穴掘り、産卵、穴埋め、帰海)は生理的負荷が高いものである可能性がある。しかし最近では、砂浜に設置された消波ブロックなどの障害物の影響で、産卵上陸した成体メスが適切な産卵場所を求めて砂浜を長時間歩き回ったり、産卵を行わずに帰海してしまう事例が多数報告されており、産卵個体への負荷がより高まっている可能性が危惧されている。

動物の心拍数は、自律神経系のはたらきや活動量などによって増減するため、個体の内的状態やエネルギー代謝を把握する指標として有効である。従来ウミガメ類の心拍測定には、電極を体内に固定するための手術が必要であった (Williams et al. 2019)。しかし近年、心電ログの電極を甲羅に貼付する非侵襲的な心拍測定方法が開発され、野生個体を対象とした心拍モニタリングが可能となってきた (Sakamoto et al. 2021)。

2. 問題設定・方法

本研究では、産卵個体の内的状態および産卵行動に伴うエネルギー消費を把握することを目指し、近年開発された非侵襲的な心拍測定手法を用いて産卵上陸中の個体の心拍数変化を記録した。野外調査を日本有数のアカウミガメ産卵場である千里浜(和歌山県みなべ町)において、産卵期の最盛期にあたる2022年7月に実施した。夜間パトロールを行い、産卵のために砂浜に上陸した個体を一時的に捕獲し、データロガー(心電ログ ECG400-DT, 行動記録計 W2000-3MPD3GT, 共にリトルレオナルド社製)を装着した。心電ログの電極については、Sakamoto et al. (2021)に従い、導電布テープで作成した電極シートを甲羅に貼付したのち、防水加工を施した。ログ装着後に個体はそのまま放流した。これまでの調査により、産卵を開始する前に捕獲した個体は、産卵行動を中断して海に戻るが、数時間から数日のうちに再上陸して産卵を行うことがわかっている。ログ装着個体の再上陸を確認したら、離れた位置から個体を観察し、産卵完了後に再捕獲してログを回収した。

3. 結果と考察

野外調査の結果、産卵上陸したアカウミガメ3個体からデータを取得した。すべての個体は放流後1-2日のうちに砂浜に再上陸したが、2個体は産卵を行わずに帰海したため、産卵中の心拍データは得られなかった。産卵中の心拍データが得られた個体が砂浜に上陸してから、産卵を終えるまでの心拍数変化を図1に示す。産卵個体の心拍数は砂浜へ上陸すると同時に大きく上昇し、陸上にいる間は比較的高い値を保っていたが(27–35回/分)、産卵開始直後に心拍数は大きく減少し、産卵中の心拍数は16回/分まで減少した(図1)。産卵後は産卵開始前と同程度まで心拍数がすみやかに回復した。産卵中は心拍間隔が増加しただけでなく、心拍間隔のばらつきも増加していたことから不整脈が発生していたと考えられる(図2)。産卵時ないし分娩時に起こる不整脈による心拍数低下や一時的な心停止は、これまでにいくつかの種において報告がある(シロサケ, Makiguchi et al. 2009; ウマ, Nagel et al. 2014)。これらの不整脈の発生には副交感神経系が寄与していることが、自律神経系に作用する薬の投与実験により報告されている(Makiguchi et al. 2009; Nagel et al. 2014)。そのためアカウミガメにおいても、産卵中は副交感神経系が優位にはたらくている可能性が示唆された。

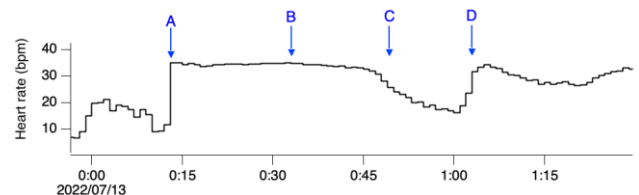


Fig. 1 Heart rate of a female loggerhead turtle during nesting behaviour. Each arrow indicates when the turtle landed on the beach (A), started burrowing the nest (B), started egg laying (C) and finished egg laying.

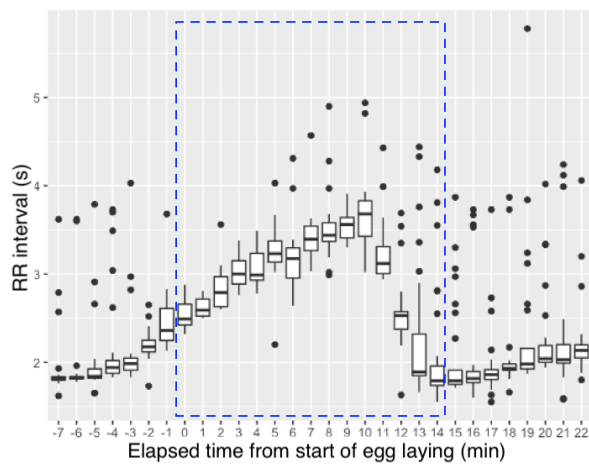


Fig. 2 RR interval before, during and after egg laying. Dashed box indicates the period of egg laying.

4. まとめと今後の展望

本研究により、自然環境下において産卵を行うアカウミガメの心拍数変化を初めて記録することに成功し、産卵中に副

交感神経系が寄与していると考えられる不整脈が起こることを発見した。今後は砂浜上陸中の様々な行動（産卵場所までの移動、穴掘り、穴埋めなど）や活動強度と心拍数との関係について解析を進めていくことで、産卵行動に伴うストレスや消費エネルギーについて明らかにしていきたい。

参考文献

- (1) Makiguchi, Y., Nagata, S., Kojima, T., Ichimura, M., Konno, Y., Murata, H. and Ueda, H., 2009: "Cardiac arrest during gamete release in chum salmon regulated by the parasympathetic nerve system", PLoS ONE, 4, e5993.
- (2) Nagel, C., Erber, R., Ille, N., von Lewinski, M., Aurich, J., Mostl, E. and Aurich, C., 2013: "Parturition in horses is dominated by parasympathetic activity of the autonomous nervous system", Theriogenology, 82, 160-168.
- (3) Sakamoto, K. Q., Miyayama, M., Kinoshita, C., Fukuoka, T., Ishihara, T., and Sato, K., 2021: "A non-invasive system to measure heart rate in hard-shelled sea turtles: potential for field applications", Phil. Trans. R. Soc. B, 376, 20200222.
- (4) Williams, C. L., Sato, K., and Ponganis, P. J., 2019: "Activity, not submergence, explains diving heart rates of captive loggerhead sea turtles", J. Exp. Biol., 222, jeb200824.

化石および現生試料に基づく漸深海性貝類の進化史研究

Tracking the history of the bathyal molluscan fauna based on Recent and fossil samples

芳賀 拓真, 国立科博・地学, E-mail: haga(at)kahaku.go.jp

延原 尊美, 静大・教育, E-mail: nobuhara.takami(at)shizuoka.ac.jp

狩野 泰則, 東大・大気海洋研, E-mail: kano@aori.u-tokyo.ac.jp

Takuma Haga, Dep. Geol. Paleont., National Museum of Nature and Science, Tokyo

Takami Nobuhara, Faculty of Education (Geology), Shizuoka University

Yasunori Kano, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

Abstract

This study challenges a comprehensive understanding of the adaptation processes of fossil and extant molluscs to the abyssal seafloor and speciation therein by exhaustive molecular phylogenies of living *Limopsis* bivalves and *Bathyancistrolepis* gastropods, scrutiny of revised morphological characters, and by critical revision of their geochronological occurrence. As a result, it was clearly shown that both fossil and extant abyssal “species” comprises multiple species, and both bivalves and gastropods first appeared in the lower Miocene deep-sea sediments, probably reflecting a change of marine environment rich in primary production in the NW Pacific. Intraspecific variations in extant *Bathyancistrolepis* have been accumulated slowly since the late Miocene and Pleistocene, reflecting dispersal by geographic isolation events. The newly defined extant species are valuable as more accurate indicators for estimating the paleoenvironment of sedimentary basins.

1. はじめに

分子系統学の発展により、現生種間・集団間の高精度な系統推定が可能となってきた。一方、深海底生動物の化石に関する知見は今日でも限られており、地質時代のいつ頃、どのようなイベントを背景に生態的・形態的・地理的放散が生じたかは、未だ不明なまま未解決である。本研究は、化石および現世の貝類を対象として、漸深海底（水深 300～3,500 m）への進出と適応、そして種分化過程を多角的に検討し、包括的に理解しようとする試みである。

2. 問題設定・方法

プレート境界に位置し地殻活動の活発な日本では、大規模な隆起により古水深 500 m を越える第四系の漸深海堆積物ですら陸上に露出し、本研究を実施する上で世界的な優位性がある。本研究の材料である貝類（二枚貝・巻貝類）は、殻が化石としてよく保存されるばかりでなく、殻から個体の成長履歴を復元できる点で、生態や行動を含めた多角的な解析が可能である。これらの利点を生かし、本研究では芳賀・延原の所管する化石・現生試料と、狩野が保管する大量の現生試料を古生物学・分子系統学・生態学的に解析し、深海底生動物種の時空的分布と進化プロセスに関する網羅的比較と統合的理解を目指した。

オオシラスナ類とチヂワバイ類の各形態種（計 10～15 種）について、地理的分布・深度分布を網羅する形で現生標本約 10～40 個体（総計 200～400 個体）を選出し、可能な限り多くの個体のミトコンドリア COI と核 ITS 領域の塩基配列を取得し、種間と集団間の系統関係を明らかにして、種を特徴づける形態形質を探索した。そして現生個体で評価された形態形質をもとに、日本各地の主に中新統～更新統（約 2,300 万～60 万年前）から得られた漸深海堆積物中の化石試料を検討して、各種の時空分布を精査した。チヂワバイ類については現生種間・集団間の分岐年代推定を実施して、進化プロセスの統合的理解を試みた。

3. 結果と考察

オオシラスナ類については、現生標本 31 個体の COI 領域および 28 個体の核 ITS 領域について塩基配列を決定した。老成大型個体や採集から長時間経過した標本は DNA の保存が思わしくなく、当初計画通りのデータ収集ができなかったものの、茨城県～岩手県にかけての東北沖太平洋岸においては、水深 144～2,300 m にかけての 20 地点をカバーすることができた。ITS 配列は現在アセブル中のため、COI に基づく結果のみ記述する。申請者による予察的な分子系統解析では、黒潮域（オオシラスナ）と親潮域（ミノシラスナ）がそれぞれ単系統群を形成すること、後者は東太平洋産の小型種と東北沖の浅海小型種により近縁であることが示唆されていた。本研究での新たな解析は、これらをさらに補強する結果となった。また、分子系統解析の結果を考慮しつつ、走査型電子顕微鏡も用いて現生・化石双方の殻表面彫刻、及び現生個体の殻皮などの形態を比較観察し、種を定義し得る形態形質の探索を行なった。

得られた重要な新知見は、1) 東北太平洋岸には 2 種のオオシラスナ類（ミノシラスナ及びトウカイシラスナ）が分布し、水深 190～260 m に分布重複域がみられるものの、およそ水深 200 m を境として棲み分けていること、2) 漸深海底ではミノシラスナだけが広く棲息し、遺伝的多様度が極めて低いこと、3) 浅所の種類は直達発生型であり、横浜市の下部更新統小柴層から記載され、更新世の絶滅種と考えられてきたトウカイシラスナに同定でき、「生き残り」の現生個体群の存在が明らかとなったこと、4) 殻表面彫刻は種ごとに明らかな違いがあり、種同定に有効であること、5) 殻皮の形状は 3 タイプに分類でき、棲息水深が深くなるにつれ「松葉状 → 柳葉状」となり、かつ厚みを増すことが明らかとなった（延原・池田・芳賀、日本古生物学会にて発表：2023 年 2 月）が、トウカイシラスナからミノシラスナにかけての殻皮については、こうした環境勾配による変化である可能性が高いこと、そして 6) 漸深海への進出は、シラスナガイ科の少なくとも 2 つの系統で独立になされ、大型化したことである（Fig. 1: 次頁）。

オオシラスナ類には複数の未解決の課題が残された。本研究により、殻表面彫刻の特徴の組み合わせは、化石個体が

具えていた殻皮の形状を推定する有用なツールであることが示唆された。これにより、例えば「柳葉状の殻皮型」が復元されたならば、漸深海棲であったと判断できるが、今後実際に化石標本に適用して検証しなくてはならない。黒潮域漸深海帯の現生試料は塩基配列が決定できなかったため、水塊構造などの違いが現生種の分布を規定する要因であるかは未検証である。

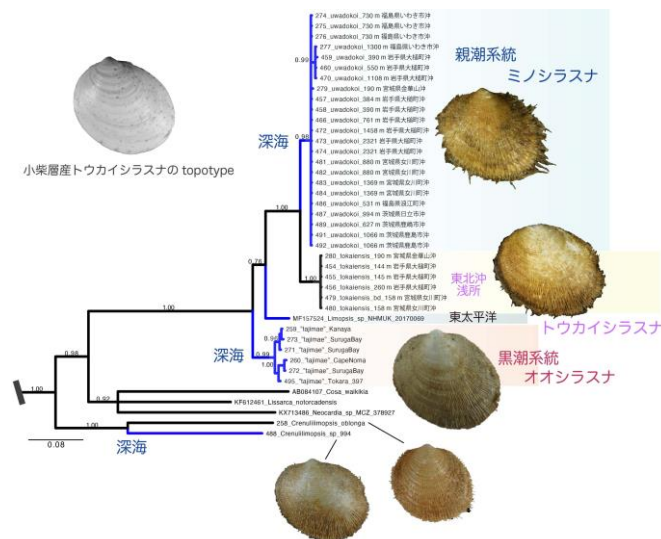


Fig. 1. A Bayesian phylogeny of limopsoidean bivalves based on partial mitochondrial cytochrome oxidase subunit I sequences. Upper left shows toptype of *Limopsis tokaiensis* from lower Pleistocene Koshiba Formation.

チヂワバイ類については、さまざまな範囲と水深をカバーする、総計 125 の産地から得られた標本に基づき分子系統解析を行うとともに、化石種の検討を進めた。その結果、1) 従来 1 種あるいは 2 種とされてきた本類は、7 つの未記載種を含む 9 種からなること、2) 漸深海に分布する種類においても、個体間の遺伝的距離は地理的距離と相関があること、3) 直達発生を行う本類では、分散能の低さが故に水深差よりも地理的隔離が種分化の契機として重要であること、4) 化石としては始新統以降に 6 種が認められ、うち 2 種が現生すること、5) 現生するチヂワバイとワタゾコチヂワバイは、それぞれ下部中新統と下部鮮新統に産出し (Fig. 2)、以後非常に遅いペースで種内変異が蓄積してきたことなどが示された。

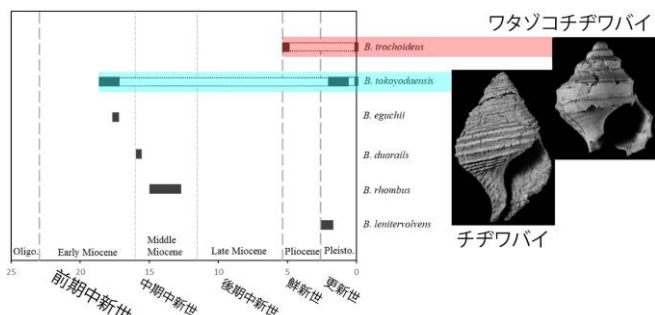


Fig. 2. Fossil record of *Bathyacistrolepis*. Oldest fossils of extant two species are depicted.

(石山ほか, World Congress of Malacology, Munich にて発表: 2022 年 8 月)。

オオシラスナ類・チヂワバイ類貝類化石の時空分布をまとめてみると、初出は等しく前期中新世にあることが明らかとなった。大型のオオシラスナ類ははじめて沖合堆積物に出現するのは Aquitanian であり、チヂワバイ類は Burdigalian の陸棚外側堆積物に初出し、既に深海へ進出していたことが確認できる。北太平洋西部では中新世の始まりの時期に、海洋プランクトンの基礎生産量が劇的に増加したこと、また中新世初期には嫌氣的であった底層水が酸化的へと変化したことが指摘されている。基礎生産量増加の原因としては、南アメリカ-南極間にあるドレーク海峡の開通に伴ない、南極及び大西洋の深層水が太平洋の深層水と混合するようになったことが挙げられている (小笠原, 2011)。中新世初期～中頃にかけての北太平洋における海洋環境の変化は、深海へ「適度な」有機物供給をもたらし、現在まで続く漸深海性貝類の深海進出の契機となった可能性が高い。

4. まとめと今後の展望

本研究によって、オオシラスナ類及びチヂワバイ類貝類は、今日まで広く受け入れられてきた見解とは異なり、化石種・現生種ともに、漸深海の「種」は複数種に分けるべきことが明確に示された。チヂワバイ類で明らかのように、深海生物の種分化は「水温・水圧・有機物供給量・溶存酸素量等の環境勾配に伴って生じる」とする一般説 (e.g. Wilson & Hessler, 1987) は適用できず、「水深差よりも分散能が低いことに依る地理的隔離」が分化の要因であると考ええると、合理的に説明できる。さらには、現生するミノシラスナとトウカイシラスナ、そしてチヂワバイとワタゾコチヂワバイの分類質と棲息環境・水深帯が明らかにできたことにより、堆積場の古環境復元に用いられる指標の精度が飛躍的に向上したほか、新たな指標自体を提供することともなった。関東地方南部に分布する上総層群など、堆積環境の変遷が明らかになりつつある地域での応用と実践が期待される。

貝類を対象として深海底生物の進化プロセスの全容を理解するためには、現生試料においては本州南岸黒潮域および道東以北のサンプルを多数入手して系統解析すること、化石試料では「なかなか化石として残らない」胎殻や蓋など有機質の形質を観察することが、必達の目標として炙り出された。これらの実現は相当に困難であると予想されるが、ショットガンシーケンシングによって古い採集標本の塩基配列を決定したり、micro-CT を用いて微細形状を復元したりするなどの解決策が考えられる。今後はこれらの手法も取り入れ、研究を継続、深化させる予定である。

参考文献

- (1) 小笠原憲四郎, 2011: “本邦新生代の地質・古環境事件とその原因” 石油技術協会誌, 76(4), 284-291.
- (2) Wilson, D. F., and R. R. Hessler, 1987: “Speciation in the Deep Sea”, Ann. Rev. Ecol. and Syst., 18, 185-207.

北西太平洋における微量栄養物質による共制限メカニズム Co-limitation mechanism by micronutrients in the western North Pacific

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
小畑 元, 東大・大気海洋研, E-mail: obata@aori.u-tokyo.ac.jp
塩崎 拓平, 東大・大気海洋研, E-mail: shiozaki@g.ecc.u-tokyo.ac.jp
川上 有希子, 長大院・水産・環境科学総合研究科, E-mail: bb53121011@ms.nagasaki-u.ac.jp
橋濱 史典, 東京海洋大, E-mail: f-hashi@kaiyodai.ac.jp
鈴木 光次, 北大院・地球環境科学研究院, E-mail: kojis@ees.hokudai.ac.jp

Yoshiko Kondo, Graduate School of Fisheries and Environmental Sciences, Nagasaki University
Hajime Obata, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo
Takuhei Shiozaki, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo
Yukiko Kawakami, Graduate School of Fisheries and Environmental Sciences, Nagasaki University
Fuminori Hashihama, Department of Ocean Sciences, Tokyo University of Marine Science and Technology
Koji Suzuki, Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University

Abstract

We conducted an on-board bottle incubation experiment to verify the possibility that the growth of the natural phytoplankton community in the subtropical mid-latitude region in the western North Pacific was co-limited by multiple nutrients including micronutrient such as Fe. Nutrients in the study area were almost depleted, probably due to the consumption by the diatom *Rhizosolenia hebetata*, which was dominant in this study area. After the incubation period, significant growth-promoting effects were found in the nitrogen, phosphorus, and iron added treatment, suggesting that the natural phytoplankton community was under co-limitation. Microscopic observation showed *R. hebetata* cells contained the nitrogen-fixing *Richelia intracellularis* trichomes. A further study is necessary to understand the relationship between co-limitation of marine primary production and the nitrogen-fixing ability.

1. はじめに

海洋植物プランクトンの増殖には、窒素やリンなどの主要栄養塩に加え、海水中に 10^{-9} モルレベル以下と極僅かにしか存在しない鉄やビタミン B₁₂ などの微量栄養物質が不可欠であり、南大西洋亜熱帯域の一部などでは窒素・鉄・ビタミン B₁₂ の同時的な不足による制限（共制限）を受けていることが指摘されている（Browning et al., 2017）。北西太平洋においても緯度方向に主要栄養塩濃度が増加し、HNLC 海域である亜寒帯域では鉄が、貧栄養海域である亜熱帯域では主要栄養塩がそれぞれ一次生産の制限要因となることが知られるが（例えば、橋濱ら, 2021）、微量栄養物質を含めた複数栄養物質の不足による共制限については生物生産性の高い中緯度域を含め十分に検証がなされていない。また、コバルト錯体であるビタミン B₁₂ についてはその分布に関する知見も僅かに北西太平洋での報告は無い。海洋真核植物プランクトンの約半数の種は生長にビタミン B₁₂ を必要とすることから（例えば、Tandon et al., 2017）、植物プランクトンのビタミン B₁₂ 要求性の相違が共制限のメカニズムに影響している可能性も考えられる。これらの背景から、本研究では、栄養塩濃度が大きく変化する北西太平洋亜熱帯域で植物プランクトン増殖が共制限を受けている可能性について評価することを目的とし、現場植物プランクトン群集への栄養物質添加に対する応答を調べた。

2. 問題設定・方法

培養実験に用いた海水試料は、2022 年 6～9 月に実施された白鳳丸 KH-22-7 次航海中、亜熱帯反流付近に位置する北西太平洋の測点 OP-8（北緯 25 度、東経 155 度）にて微量金属汚染防止に注意を払ったテフロンポンプを用いたクリーン採水により表層 4～5 m 層より採取した。試料は酸洗浄したポリカー

ボネートボトルに採取し、Table 1 に示す処理を行った。培養は各実験区につき 3 連で行い、甲板に設置した掛け流し水槽内で 3 日間行った。光量は水槽に黒色メッシュ布をかぶせ入射光の 30% になるよう調節した。培養開始から 1 日後及び 3 日後にボトルを回収し、サイズ分画クロロフィル *a* (Chl-*a*) 濃度 ($\geq 3 \mu\text{m}$, $< 3 \mu\text{m}$) (蛍光法)、主要栄養塩濃度（高感度比色分析法）、ピコ植物プランクトン細胞密度（フローサイトメトリ法）を測定した。培養開始時と終了時には、植物プランクトン群集組成（顕微鏡観察）についても調べた。また、栄養物質添加前の培養用海水については、上記項目に加え溶存ビタミン B₁₂ 濃度を固相抽出濃縮-液体クロマトグラフィー質量分析法(Heal et al., 2017)で測定した。

Table 1. Treatment of bottle incubation experiment.

Treatment	Added nutrient
Control	
N	1 μM NO ₃ , 1 μM NH ₄
P	200 nM PO ₄
Fe	2 nM Fe
NP	1 μM NO ₃ , 1 μM NH ₄ , 200 nM PO ₄
FeN	1 μM NO ₃ , 1 μM NH ₄ , 200 nM PO ₄
FeP	200 nM PO ₄ , 2 nM Fe
FeNP	1 μM NO ₃ , 1 μM NH ₄ , 200 nM PO ₄ , 2 nM Fe
All	1 μM NO ₃ , 1 μM NH ₄ , 200 nM PO ₄ , 2 nM Fe, 0.1 nM B ₁₂

3. 結果と考察

培養開始時の全 Chl-*a* 濃度は 0.1 $\mu\text{g/L}$ と低く、57%は $> 3 \mu\text{m}$ サイズ画分が占めていた (Fig. 1)。顕微鏡観察結果からは珪藻のみが観察され、その 70%は *Rhizosolenia hebetata* であり (Fig.

2)、細胞内には窒素固定を行うことで知られる *Richelia intracellularis* のトリコームのあるものが確認された。また、ピコ植物プランクトン細胞密度計測からは *Prochlorococcus* と *Synechococcus* が確認された。一方、培養開始時の現場の栄養塩濃度は DIN、PO₄、Si(OH)₄ でそれぞれ 16 nM、16 nM、70 nM で、ビタミン B₁₂ も <0.2 pM という低いレベルにあり、栄養物質はほぼ枯渇していたと推察された。

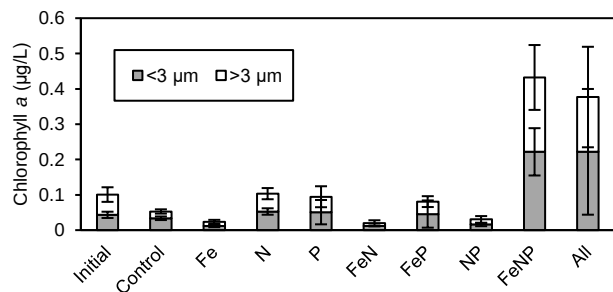


Fig. 1 Average concentration of size-fractionated Chl-*a* before and after the incubation experiment. Error bar represents the standard deviation of triplicate samples.

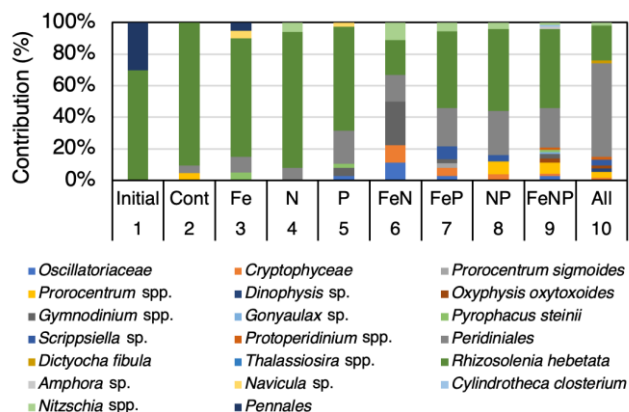


Fig. 2 Composition of phytoplankton abundance estimated from microscopic observation before and after the incubation experiment.

培養終了時における全 Chl-*a* は N 添加区と FeNP 添加区と All 添加区で Control に比べて増加し、特に FeNP 添加区は N 添加区と比較しても有意に高かった ($p < 0.05$) (Fig. 1)。All 添加区は 3 連中 1 本では FeNP 添加区と同等以上の Chl-*a* の上昇が認められたが、3 連ボトル間でのばらつきが大きく、ビタミン B₁₂ の有無が Chl-*a* で表される植物プランクトン現存量に及ぼす影響については判断できなかった。*Prochlorococcus* や *Synechococcus* の細胞密度は FeNP 添加区でのみ Control に比べ増加傾向を示したが、ピコ真核プランクトンはいずれの培養区でもほとんど確認されなかった。よって、<3 µm 画分の Chl-*a* 増加には *Prochlorococcus* や *Synechococcus* が寄与していたと推察された。加えて、FeNP 添加区では培養開始時に添加した栄養物質である NO₃、NH₄、PO₄ の減少も認められた。よって、現場海域の植物プランクトン群集は窒素による制限を第一に受けつつも、窒素のみならずリンと鉄も同時に不足する共制限を受けていたと考えられた。本培養実験の実施測点のやや南西 (北緯 17 度) に位置する測点で実施された最近の研究でも、北西太平洋亜熱帯域の天然植物プランクトン群集は窒素・リン・鉄の同時的な不足を受けていたことが示されており (Browning et al., 2022)、亜熱帯域の植物プランク

トン群集は共制限を受けやすい可能性が高い。一方、先行研究で実施された海域では、培養開始前は存在が確認されなかった珪藻 (種は不明) が増加したが、本研究では培養開始時から *R. hebetata* が主要種であり、比較的大きな Chl-*a* 増加が見られた実験区では渦鞭毛藻など珪藻以外の種も増加するという点で違いが見られた。特に All 添加区では *R. hebetata* の割合が低下し Peridinales 含めた渦鞭毛藻の割合が増加した。その理由としては、渦鞭毛藻にはビタミン B₁₂ 要求種の植物プランクトンの割合が多いこと (Tandon et al., 2017)、また現場のビタミン B₁₂ 濃度が枯渇していたことが影響したと考えられた。

4. まとめと今後の展望

本研究により、北西太平洋亜熱帯域北緯 25 度付近を流れる亜熱帯反流域の天然植物プランクトン群集の増殖は窒素に加えリンと鉄の同時的な不足による共制限を受けていたことが示された。また、更なるビタミン B₁₂ の添加により植物プランクトン群集組成はそのビタミン B₁₂ 要求性に応じて変化する可能性も示されたが、この点は Chl-*a* 含め他パラメーターではまだ不確実性が高いため、同様の実験を再度行い確認する必要がある。亜熱帯域と亜寒帯域の間の移行域では徐々に主要栄養塩濃度が変化するため (橋濱ら, 2021)、25 度以北で段階的に実験を重ねることで同海域の共制限の実態についてより理解が深まるだろう。本研究で見られた *R. hebetata* は上述の通り細胞内に窒素固定を行う *Richelia intracellularis* を含む。本研究を実施した海域に近い北緯 25 度東経 160 度付近における調査でも *Richelia intracellularis* が確認されており、その窒素固定能は鉄とリンによる制限を受けていたことが指摘されている (Tanita et al., 2021)。よって、本研究でも鉄やリンを添加した系列では窒素固定が促進されていた可能性も考えられるが、いずれの実験区でも Chl-*a* には有意な増加が見られていないこと、また本研究では窒素固定活性を調べていないためにその効果は評価できていない。海洋一次生産の共制限と窒素固定生物による窒素固定能の関わりについて今後はその活性や遺伝子解析などを加えて精査する必要がある。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、白鳳丸 KH-22-7 次航海にて培養実験試料の採取にご協力いただいた乗船研究者の皆様、FCM 測定に関する分析機器利用を援助いただいた水産資源研究所長谷川徹博士にこの場を借りて感謝申し上げます。

参考文献

- (1) Browning, T. J. et al., 2017: "Nutrient co-limitation at the boundary of an oceanic gyre", *Nature*, 551, 242-246.
- (2) Browning, T. J. et al., 2022: "Nutrient co-limitation in the subtropical Northwest Pacific", *Limnol. Oceanogr. Lett.*, 7, 52-61.
- (3) 橋濱史典ら, 2021: "海洋学の 10 年展望 2021: 中緯度", *海の研究*, 30, 131-158.
- (4) Heal, K. R. et al., 2017: "Two distinct pools of B₁₂ analogs reveal community interdependencies in the ocean", *PNAS*, 114, 364-369.
- (5) Tandon, P. et al., 2017: "A promising approach to enhance microalgae productivity by exogenous supply of vitamins", *Microb. Cell. Fact.*, 16, 219.
- (6) Tanita, I. et al., 2021: "Regionally variable responses of nitrogen fixation to iron and phosphorus enrichment in the Pacific Ocean", *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 126, e2021JG006542.

共生関係の実験的再構築による細菌—サンゴ間相互作用の解明

Elucidation of the mechanism of interaction between coral and its associated bacteria by reconstruction of coral holobiont

三浦 夏子, 大阪公立大・大学院農学研究科, E-mail: miuran@omu.ac.jp
中島 怜, 大阪公立大・大学院農学研究科, E-mail: scc02047@edu.osakafu-u.ac.jp
遠藤 英奈, 大阪公立大・大学院農学研究科, E-mail: scc02009@edu.osakafu-u.ac.jp
高木 俊幸, 東大・大気海洋研, E-mail: takagi@aori.u-tokyo.ac.jp
Natsuko Miura, Graduate School of Agriculture, Osaka Metropolitan University
Rei Nakashima, Graduate School of Agriculture, Osaka Metropolitan University
Funa Endo, Graduate School of Agriculture, Osaka Metropolitan University
Toshiyuki Takagi, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

Abstract

Coral, a cnidarian, symbiotically coexists with zooxanthellae and bacteria to form a complex "coral holobiont" that functions as a cohesive entity. Over the years, a multitude of coral-associated bacteria, present in the coral holobiont, have been identified to possess diverse coral protection mechanisms. Investigating the specific bacterial-coral interaction responsible for coral protection will provide valuable insights into the maintenance of homeostasis in coral reef ecosystems. In this study, we aim to experimentally reconstruct the interaction between coral and bacteria to verify the bacterial-coral interaction relationship in the coral holobiont. We evaluated the carotenoid-producing abilities and antioxidant activities of the isolated coral-associated bacteria, and determined the carotenoids produced by the bacteria. Moving forward, we intend to investigate the protective effects of these bacteria against light and heat stress on zooxanthellae and explore the conditions required for the colonization of coral-associated bacteria on the coral holobiont.

1. はじめに

刺胞動物であるサンゴは、褐虫藻と共生して光合成産物を提供させているが、体表・体内に細菌などの様々な微生物を共在させており、まるで一つの生物のように振る舞う様々な生命体は、まとめて「ホロビオン」と言い表される。近年、サンゴホロビオンを構成する多種多様なサンゴ共在細菌で、様々なサンゴ保護機能が報告されつつある。我々は2017年から独自に、サンゴの細菌性白化などの様々な病気を引き起こす日和見感染菌である *Vibrio coralliilyticus* に対して抗菌活性をもつ *Ruegeria* 属細菌をアザミサンゴから単離し (Miura and Motone et al. 2019)、抗菌物質の精製を試みてきた。サンゴの白化を抑制する細菌についてみると、サンゴを用いた実証実験では多様な菌のミックスが用いられており、有用な菌株の特定に至っていないのが現状である。*Ruegeria* 属細菌をはじめとした、特定の共在細菌によるサンゴ保護機能が明らかになれば、サンゴ礁生態系における恒常性維持機構の新たな知見が得られると期待できる。そこで本研究ではサンゴ保護に寄与する細菌とサンゴの相互作用を実験的に再構築することにより、サンゴホロビオンにおける細菌—サンゴ相互作用関係を検証することを目的とした。

前年度までの研究で、*Ruegeria* 属細菌を用いたサンゴとの共生関係再構築条件を検証するとともに、新たなサンゴ共在細菌を取得し、その機能について調べてきた。本研究では筆者らが単離した *Ruegeria* 属細菌に加えて、これまでに構築したサンゴ共在細菌ライブラリの中から、サンゴ保護に有用な機能を持つ細菌を選抜し、共生関係再構築に供することで、サンゴ共在細菌が担う多様なサンゴ保護機能を明らかにすることを旨とした。

2. 問題設定・方法

サンゴから抽出した共在細菌が有する機能について、さらに詳細に解析するとともに、実験水槽中でサンゴ—共在細菌間相互作用を再構築し、解析する準備を行った。具体的には前

年度まで東京大学大気海洋研究所で実施・試行していた水槽実験を大阪公立大学でも行うために、新たにアザミサンゴの飼育・実験環境の構築を行った。

3. 結果と考察

本年度は新たに大阪公立大学で水槽実験を立ち上げるにあたり、アザミサンゴの飼育を開始した (Fig. 1) が、LED ランプ等の不調によりサンゴの褐虫藻密度が低下し、生体を用いた実験を行うことができなかった。現在、適切な状態で実験を行うための飼育環境整備に努めているところである。

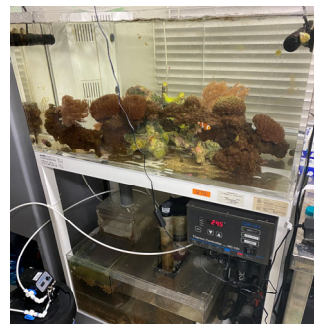


Fig. 1 Breeding tank for the reef-building coral *Galaxea fascicularis*.

前年度までの研究で新たに潜在的に有用なサンゴ共在細菌として選抜した *Muricauda* sp. ORYM1, ORYM2 (Kitamura et al. 2021, Endo et al. in preparation) については、以前に報告された *Muricauda* sp. GF1 (Motone et al. 2020) と同様にゼアキサンチン生合成遺伝子群を保有することがこれまでの解析で明らかになっている (Fig. 2)。そこで、各株において産生されるカロテノイドの分析を行うとともに、菌体が有する抗酸化力を評価した。

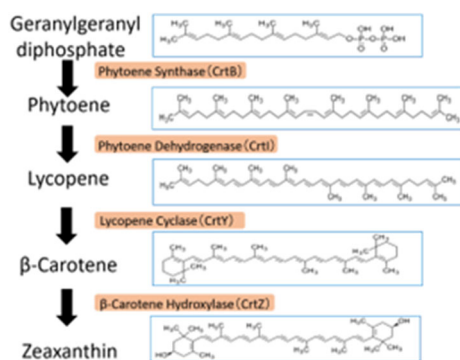


Fig. 2 Predicted zeaxanthin biosynthetic pathway of the *Muricauda* sp. ORYM1 and ORYM2

Muricauda spp. が産生するカロテノイドの分析

これまでに検討した抽出方法に従って調製した菌体からのカロテノイド粗抽出液について、マイクロプレートリーダーを用いて吸収スペクトル測定を行った (Fig. 3)。ORYM1, ORYM2 のカロテノイド粗抽出液はどちらも橙色を呈しており、470, 500 nm 付近に吸収極大を有していた。また、450 nm 付近にも吸収がみられた。ゼアキサンチン標準液の吸収極大は 450, 470 nm 付近であり、ORYM1, ORYM2 のカロテノイド粗抽出液とは一致しなかった。また、TLC 解析の結果から、主としてゼアキサンチン以外のカロテノイドが生産されていることが示唆された (Fig. 4) ことから、ORYM1, ORYM2 株では複数のカロテノイドが産生されている可能性が示唆された。

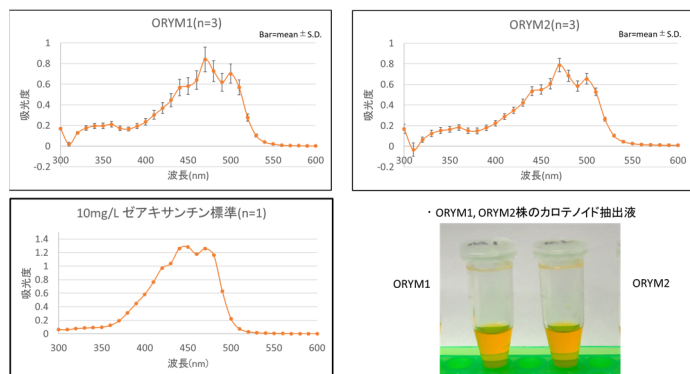


Fig. 3 Absorption spectrum measurement of crude extract of carotenoids.



Fig. 4 TLC analysis of crude extract of carotenoids.

Muricauda spp. が有する抗酸化力の評価

Muricauda spp. が産生するカロテノイドは、褐虫藻における酸化ストレスの低減に寄与することが示唆されている。そこで、ORYM1, ORYM2 株が以前に報告された GF1 株と比較して菌株重量当たり同等の抗酸化活性を示すのか検証した。具体的には、ORYM1, ORYM2, GF1 株 (湿重量 60 mg 当たり) の抗酸化力の比較を行った。抗酸化物質である Trolox とサンプルが安定ラジカルである DPPH (2, 2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl) を 50% 消去する濃度を基に、TEAC (抗酸化物質 Trolox を基準とした Trolox 等価活性、測定対象の抗酸化活性) を算出したところ、ORYM1, ORYM2 株は湿重量あたりで以前に報告された GF1 株と同等以上の抗酸化活性を示すことが示唆された (Fig. 5)。

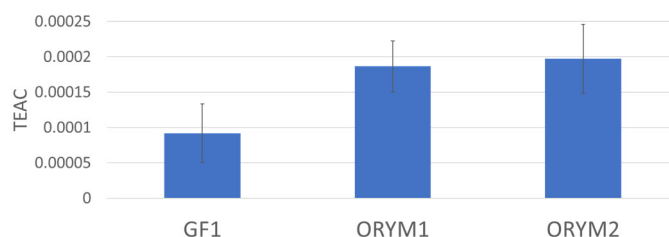


Fig. 5 Antioxidant activity of crude carotenoid extracts

4. まとめと今後の展望

本研究ではサンゴの共生細菌を単離し、性質決定を行うことで、将来的にサンゴのプロバイオティクスとして利用できる複数の細菌を獲得した。また、令和 3 年度から本支援を受けて、サンゴおよび褐虫藻におけるサンゴ共生細菌のプロバイオティクス効果を検証するための手法を検討した。これまでに得られた知見をもとに、今後はサンゴホロビオンにおける共生細菌の機能について検証を進める予定である。

特にサンゴを用いた実験については学際連携研究による支援なくしては進められなかったものであり、この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- (1) Miura N, Motone K, Takagi T, Aburaya S, Watanabe S, Aoki W, Ueda M. 2019 *Ruegeria* sp. Strains Isolated from the Reef-Building Coral *Galaxea fascicularis* Inhibit Growth of the Temperature-Dependent Pathogen *Vibrio coralliilyticus*. *Marine Biotechnology*, 21:1-8.
- (2) Kitamura R, Miura N, Ito M, Takagi T, Yamashiro H, Nishikawa Y, Nishimura Y, Kobayashi K, Kataoka M. 2021 Specific detection of coral-associated *Ruegeria*, a potential probiotic bacterium, in corals and subtropical seawater. *Marine Biotechnology*, 23(4):576-589.
- (3) Motone K, Takagi T, Aburaya S, Miura N, Aoki W, Ueda M. 2020 A zeaxanthin-producing bacterium isolated from the algal phycosphere protects coral endosymbionts from environmental stress. *mBio*, 11:e01019-19.

オホーツク海南西部の潮汐混合とポストブルーム期の物質循環・生態系の研究

Tidal mixing and post-bloom nutrient circulation/ecosystem in the southwestern Okhotsk Sea

中村 知裕, 北大・低温研, E-mail: nakamura(at)lowtem.hokudai.ac.jp
藤尾 伸三, 東大・大気海洋研, E-mail: fujio(at)aori.u-tokyo.ac.jp
柳本 大吾, 東大・大気海洋研, E-mail: daigo(at)aori.u-tokyo.ac.jp
西岡 純, 北大・低温研, E-mail: nishioka(at)lowtem.hokudai.ac.jp
鈴木 光次, 北大・院環境, E-mail: kojis(at)ees.hokudai.ac.jp
三寺 史夫, 北大・低温研, E-mail: humiom(at)lowtem.hokudai.ac.jp
Tomohiro Nakamura, Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University
Shinzou Fujio, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo
Daigo Yanagimoto, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo
Jun Nishioka, Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University
Koji Suzuki, Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University
Humio Mitsudera, Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

Abstract

The southwestern Okhotsk Sea is characterized by high biological productivity and biodiversity. However, in-situ observations are still scarce, and the mechanisms that cause high productivity have not been well understood. In this study, we aim to clarify the above mechanisms after spring phytoplankton bloom by focusing on (1) tidal mixing on the shelf slope and (2) primary production processes in the post-bloom period. To this end, we carried out mooring system retrieval and re-installation, internal wave observations, and ship observations of water mass structure and biogeochemical parameters.

1. はじめに

オホーツク海南西部は、季節海氷の到来と豊かな海洋生態系・生物多様性に特徴づけられ、中でも知床周辺海域は世界自然遺産に登録されている。この海域では、海氷融解直後に植物プランクトンの大ブルームが起これ、その後（ポストブルーム期）も比較的高い植物プランクトン現存量や基礎生産が維持される。海氷融解直後の春季ブルームについては、2021年4月の新青丸航海 KS-21-6 で観測することに成功したものの、ブルーム期後の高い基礎生産を維持する機構については観測も少なく、よく分かっていない。そこで、本研究ではその解明を目指し、

- (1) 陸棚斜面上の潮汐混合
 - (2) ポストブルーム期における高い基礎生産の維持機構
- に注目して、係留系観測と船舶観測を行った。

(1) 「陸棚斜面上の潮汐混合」

オホーツク海は潮汐混合が強いが、千島列島を除くと、内部波やそれによる鉛直混合の観測はほとんどない。しかし、オホーツク海南西部の陸棚斜面は、内部波（風下波）生成の条件一強い流れと凹凸のある海底地形(Nakamura et al. 2000a)一を満たす。流れは、潮流が強い上に東樺太海流が通る。陸棚斜面は幅数 km の尾根と谷により凸凹になっている。こうした高い尾根と深い谷の上を強い潮流や海流が流れると、比較的大振幅の内部波が生成される。海底で生成された内部波は上に伝播して、海面混合層で反射する際に擾乱ひいては混合を引き起こす。

つまり、オホーツク海南西部の陸棚斜面では、海底起源の内部波による混合が亜表層から表層へ栄養物質を供給し、物質循環や生態系にかかわっている可能性がある。そこで本研究では、係留系観測と船舶観測を組み合わせ、オホーツク海南西部における内部波生成および海面混合層に達した内部波が表層一亜表層間の混合に与える影響の解明を目指す。

(2) 「ポストブルーム期における高い基礎生産の維持機構」

ポストブルーム期の高い基礎生産は、どのように維持されるのだろうか？潮汐起源の内部波は一役買っているのだろうか？

か？ポストブルーム期も現場観測データはほとんどなく、基礎生産を維持する栄養物質供給メカニズムや植物プランクトン群集の生理代謝機構は明らかになっていない。

そこで、本研究では春季から夏季へ遷移する間のポストブルーム期における水塊分布と基礎生産を含む生物地球化学的パラメータを観測し、ポストブルーム期でなぜ高い基礎生産が維持されるのかを明らかにすることを目指す。

2. 問題設定・方法

本共同研究では、オホーツク海南西部における (1) 陸棚斜面上の潮汐混合、(2) ポストブルーム期における高い基礎生産の維持機構を明らかにすることを目指し、採択して戴いた新青丸航海 KS-22-6 (2022 年 4 月 26 日～5 月 15 日) において、以下を実施した。

- (i) オホーツク海南西部陸棚上に、白鳳丸航海 KH-20-12 で設置した、係留系の回収と再設置。ならびに、係留系を設置した陸棚斜面で 25 時間 CTD-LADCP 繰り返し観測および、XCTD と船搭載 ADCP を用いた準瞬間的な鉛直断面観測。
なお、係留系は、セジメントトラップ等で物質循環を調べるためにも用いる。
- (ii) オホーツク海南西部で、CTD-LADCP 観測と CTD-CMS (クリーン) 採水、および衛星観測と同期した大気水中光学観測。採水は以下のパラメータを測定・解析するためである：栄養物質の分布、酸素同位体・アルカリ度の測定（海氷融解水と河川水のトレーサ）、植物プランクトン群集の現存量、組成、光学的特性・光合成生理状態・基礎生産。

3. 結果と考察

Fig. 1 (黒×) に設置した係留系の回収と再設置に成功した。さらに XCTD 等を用いた内部は観測および、Fig. 1 に示した測点で CTD 観測を実施した。本報告書では、係留系データと係留系を設置した測線の CTD 断面の速報を紹介する。

3-1. 係留系と陸棚斜面上の潮汐混合

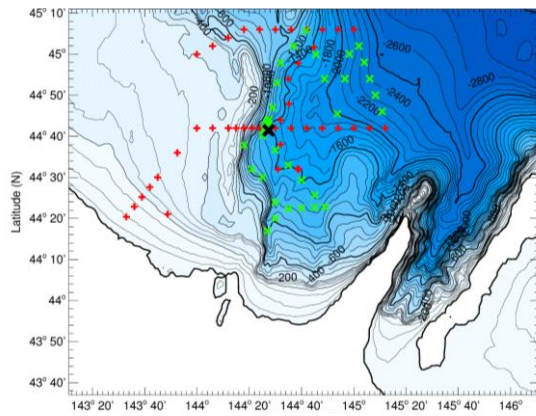


Fig. 1 Observation sites. Mooring and CTD sites are indicated by black and red crosses.

係留系を回収し再設置した。回収した系には、水温塩分計が水深約 65m と 200m に、ADCP（上向き）が約 110m に、流速計が約 220m, 530m, 1350m（海底直上）に、セジメントトラップが約 500m に取り付けられていた。再設置した係留系には、潮汐による水温塩分変動を海底から表層まで捉えるために、上に加えて水温塩分計を 300m, 510m, 1320m に追加した。さらに物質循環をよりよく調べるため、FDOM 計と DO 計をセジメントトラップと同じ 500m に追加している。回収予定時期は、2023 年秋である。

回収した係留系の流速の時系列の代表として、設置水深 217m の流速系について Fig. 2a に示す。設置期間は 2020/12/13~2022/5/1 であり、2 度の冬を含む季節変動を捉えられた。流れは、冬に東サハリン海流に伴って強くなる傾向がある。図は略すが、流れが強い時は系が傾いていた。

同じ流速系データのスペクトル (Fig. 2b) を見ると、日周潮と慣性周期が強く、半日周潮は弱い。これは過去の研究 (例えば、Nakamura et al. 2000b) と整合的である。東サハリン海流に加え日周潮流も強いことから、陸棚上の内部波（風下

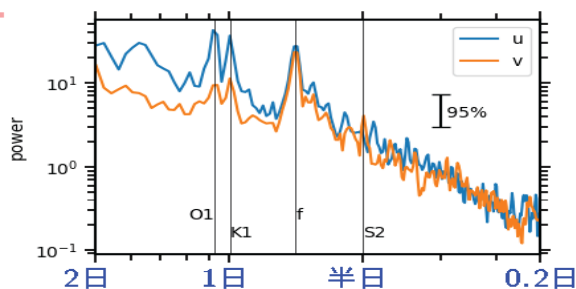


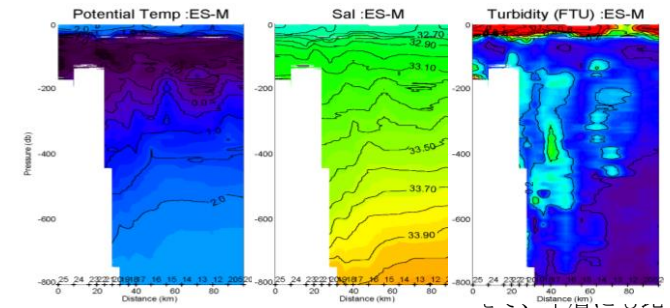
Fig. 2 Northward (red) and eastward (blue) velocity (217m) at mooring site. (a) Time series and (b) spectrum. Shade in (a) denotes the period with small depth changes.

波）生成が期待される。

この係留系を設置した陸棚斜面で、斜面沿い（斜面上の尾根や谷を横切る方向）に、XCTD を用いた準瞬間的な鉛直断面観測を、潮時をずらしつつ 4 回実施した。陸棚斜面上の尾根や谷に対応して、水温・塩分の山谷らしきものが捉えられており、今後、係留系データと合わせて解析を進めていく。

3-2. ポストブルーム期における高い基礎生産の維持機構
係留系を設置した測線の水温・塩分・濁度の鉛直断面 (800db

以浅) を Fig. 3 に示す。表層には季節温度躍層が形成され、その下には中冷水があった。表層の塩分がその下に比べて低い理由は、海氷融解水や河川水の影響と思われる。温度躍層以浅では濁度が高く、この時期にも植物プランクトンが高濃度で存在していたことを反映している。



較的高濁度の水があった。水温等からすると、これはオホー

Fig. 3 (Left) Potential temperature, (mid) salinity, and (right) turbidity along the longitudinal section passing the mooring site.

ツク海北西部で形成された高密度陸棚水ではなく、北海道オホーツク海沖の陸棚で形成された海底混合層水に由来すると推測される。実際、数値モデルで、北海道沖の海底混合層水は千島海盆に広がりうることが示された (植田 2023)。

4. まとめと今後の展望

新青丸航海 KS-22-6 で、オホーツク海南西部の係留系の回収・再設置、CTD 採水観測、および XCTD 観測を実施した。係留系による海水下の北海道沖合の東樺太海流観測はこれが最初の試みである。

本航海では荒天に加え出港前から度重なる予定変更がありましたが、船長をはじめ乗組員の方々、JAMSTEC と東大大海研の航海窓口担当者ほか様々な方に支援して戴いたおかげで、無事に上記観測を実施できました。深く感謝致します。

今後は、今回得られたデータの解析を進めるとともに、この後予定されている 2023 年新青丸航海での係留系回収を合わせることで、潮汐混合とポストブルーム期の基礎生産維持機構の解明、そしてそれを通して海洋生態系保全と持続的な海洋資源利用のための科学的知見に貢献し、知床世界遺産の維持・管理、さらには UN Decade of Ocean Science の A healthy and resilient Ocean, A sustainable Productive Ocean への貢献につなげていきたい。

参考文献

- (1) Nakamura, T. 他 7 名, 2000a: “The generation of large-amplitude unsteady lee waves by subinertial K1 tidal flow: a possible vertical mixing mechanism in the Kuril Straits”, J. Phys. Oceanogr., 30, 1601–1621
- (2) Nakamura, T. 他 4 名, 2000b: “Tidal exchange through the Kuril Straits”, J. Phys. Oceanogr., 30, 1622–1644
- (3) 植田純生, 2023: “北海道オホーツク海陸棚の海底混合層・高濁度水とその行方”, 北海道大学大学院環境科学院修士論文

ハクジラ亜目におけるエネルギー消費量の推定法の確立

Development of a new method to estimate
energy expenditure of swimming Odontoceti using an animal-borne activity recorder

鈴木 一平, 北海道大・北方セ, E-mail: is7(at)fsc.hokudai.ac.jp
青木 かがり, 東大・大気海洋研, E-mail: aokikagari(at)gmail.com
新妻 靖章, 名城大・農学部, E-mail: niizuma(at)meijo-u.ac.jp
Ippei Suzuki, Field Science Center for Northern Biosphere, Hokkaido University
Kagari Aoki, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo
Yasuaki Niizuma, Faculty of Agriculture, Meijo University

Abstract

Energy expenditures of captive Odontoceti were measured by a newly developed pneumotachometer. The measured activity stage of the animals was resting and their resting metabolic rate (RMR) was $7,620 \pm 4$ kcal/day for Risso's dolphin. The measured RMR was approximately 1.5 time higher than values estimated by the Kleiber's law. Marine mammals are known to have higher RMR than that of similar-sized terrestrial mammals, and the higher rate obtained in this experiment was reasonable which supported that our experimental condition was adequate to proceed further experiments using this system. In addition to measuring RMR, we examined a function of a newly developed heart rate logger as a preliminary experiment, and we confirmed that constant electrocardiograms can be recorded by the new device.

1. はじめに

ハクジラ亜目をはじめとした海棲哺乳類や海鳥は海洋生態系における高次捕食者であり、健全な生態系を維持するためには高次捕食者によるトップダウン効果や栄養塩の運搬が不可欠となる (Estes et al. 2011, Doughty et al. 2016)。ハクジラ亜目の多くは水産資源ともなる餌生物を生存のために必要とし、人類とは漁業において競合する関係となる。健全な海洋生態系を維持し持続可能な漁業を継続していくためには、ハクジラ亜目を含めた高次捕食者との共存が必要になるが、ハクジラ亜目が実際にどれだけのエネルギーを餌生物から獲得する必要があり、そのためにどれだけのエネルギーを消費しているのかはまだ分かっていない。本研究では、動物におけるエネルギー消費量のバランスを把握する上で不可欠となる休止代謝速度 (resting metabolic rate: RMR) の定量化を目的として、飼育下にあるハクジラ亜目を対象とした生理実験を実施した。

2. 問題設定・方法

動物の RMR を計測するためには、代謝時に変動する酸素濃度を定量化する必要がある。一般的には、体液中または呼吸中の酸素濃度を計測する 2 つの手法があるが、前者は既知量の安定同位体を含んだ高価な特殊な水を必要とし、体の大きなクジラ亜目が対象では不適切なため、本実験では後者の呼吸による計測法を選択した。また、動物の呼吸を計測するためには、閉鎖環境における空気中の酸素濃度を計測するか、呼吸口より呼吸を回収し、酸素濃度を計測する手法がある。クジラ亜目においては体サイズの大きさから閉鎖環境を作ることが困難なため、呼吸中の酸素濃度の変動を測定した。

従来、呼吸計測法においては 1 回に吐く呼吸を全てサンプル袋に回収し、呼吸量と酸素濃度を計測する手法が主であったが、体サイズの大きなクジラ亜目においては呼吸量も多くなり、複数の呼吸サンプルを回収することが困難となる。本研究では、連続した呼吸サンプルから RMR を計測することを目的として、海外の共同研究チームと作製した特別な呼吸回収用のマスクを使用した (図 1)。このマスクでは、圧力センサーから呼吸量を換算し、酸素センサーから酸素濃度の変動を計測できる。既往研究において、海棲哺乳類は同程度の体サイズの陸上哺乳類と比較して RMR が約 1.5 倍になると

されており、同様のマスクを使用したハンドウイルカを対象とした実験では、同じく陸上哺乳類よりも高い結果が示されている (Fahlman et al. 2018)。本研究では、呼吸口の形状が異なるハナゴンドウを対象として、改良を加えた新型マスクを用いて RMR を計測できるかの検証実験を行った。

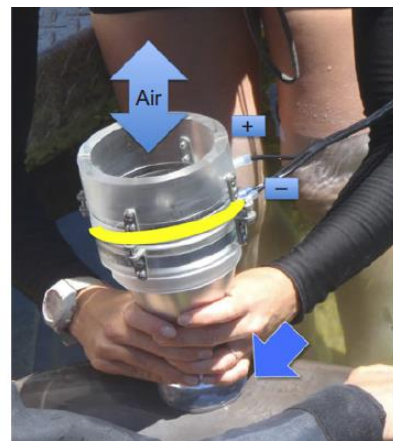


図 1. 新型マスクの構造写真。両方向の矢印は呼吸と外気が通過可能な方向を示し、特殊なフィルター (黄) を介することで呼吸を円滑に通過させながら外気との圧力差を維持し、プラスとマイナスに設置した圧力センサー間の差によって、呼吸量を計測する。下部の矢印は呼吸口と密着し呼吸を外部に逃がさない形状のシリコン製のマスク接着部を示す。

実験は、2021 年から 2022 年にかけて、太地町立くじらの博物館 (和歌山県) にて飼育されているハナゴンドウ (*Grampus griseus*, 推定体重 308-386 kg, $N=2$ 個体) とオキゴンドウ (*Pseudorca crassidens*, 推定体重 708 kg, $N=1$ 個体) を対象として実施した。なお、体重は体長と胴回りから Tobayama and Kirihata (1999) の式を用いて推定した。ハナゴンドウはいずれの個体も妊娠および授乳していない成熟メスで、オキゴンドウは成熟オスであった。12 時間以上の絶食後となる朝の給餌前に、水面で静止した状態で酸素消費速度を測定した。個体は飼育員によって生簀側面まで引き寄せられ、生簀側面に固定した担架に収容することで静止状態におかれた。アクリル製の筒状装置 (以下、フローカップ, adm+社、図 1) を噴気孔に被せ、タイゴン製のチューブを通

して呼気分析計 (ML206, AD INSTRUMENTS 社) に呼気を導入することで、呼気内の酸素濃度を測定した (Fahlman et al. 2015, Austin et al. 2022)。個体の呼気量は差圧計 (ML311, AD INSTRUMENTS 社) にて計測した。呼吸気量の校正は、実験前後に 7 リットルのシリンジを用い、出し入れした空気を差圧計で計測することで実施した。測定時間は静止状態で 15 分以上とし、担架に保定されている間に個体の様子を観察した。酸素 1ℓ を 4.2kcal とし、休止代謝速度を求めた。担架に保定されている間に個体の様子を観察、ビデオで撮影した。実験に先立ち、フローカップの装着訓練を実施した。

酸素消費速度 (mL/分) は、計測時の酸素消費量 (mL) の和を計測時間 (分) で除することにより求めた。なお、酸素消費速度は計測標準状態 (標準温度 0 °C、1 気圧、湿度 0%、Standard Temperature standard Pressure and Dry) の値に換算した。

新型マスクを用いた呼気計測によって RMR (kcal/日) を推定し、体サイズを指標とした既存の RMR の推定値と比較することで、本手法による計測値の妥当性の検証を行った。体サイズを指標とした理論予測値は体重 (M_b) (kg) を用いた次式によって算出した

$$RMR = 73.3 \cdot M_b^{0.74} \quad (\text{Kleiver 1947}).$$

3. 結果と考察

ハナゴンドウ 2 頭から計 5 回の静止時の呼気計測を実施し、このうち安定した呼気データを取得できた 2 回の計測から算出された酸素消費速度は 1260 ± 1 (mL/分) となり、RMR は 7620 (kcal/日) となった。体サイズを指標とした理論予測値は 5088~6014 (kcal/日) であり、本研究によって得られた実測値はその約 1.5 倍となることから、既往研究におけるハンドウイルカの計測値と同程度の比率となった。呼気を用いた実測値においても、理論予測値と同程度の RMR を定量化できたことから、呼気の回収時におけるマスクからの呼気漏れがなく、動物においても十分に馴致訓練がなされ正常な呼吸をしていたことを示唆し、本実験で用いた実験系にてハナゴンドウのエネルギー消費量を計測できる結果が得られた。なお、オキゴンドウにおいては、呼気速度の最大値が差圧計の計測範囲外であったため、酸素消費速度を測定することはできなかった。体重 700kg を超える大型個体の速い呼気速度に対応するためには、さらなる装置の改良が求められる。

4. まとめと今後の展望

本研究によって、新型マスクを用いて計測したハナゴンドウの RMR を従来の理論予測値に近い精度で計測する手法を確立した。野外で生息するハクジラ亜目のエネルギー消費量を定量化するためには、今後は 2 つのステップが必要となる。まずは、遊泳時のエネルギー消費量を同様の呼気計測システムを用いて計測し、RMR との差分を取ることで遊泳運動のみによるエネルギー量を算出する。次に、遊泳時の行動量の指標となるパラメータを定量化し、前述の差分によって得られた遊泳運動のみのエネルギー消費量との関係を明らかにする。本研究グループでは、行動量の指標として心拍数に着目しており、マクセル株式会社の松沼悟博士らが開発した動物搭載型心拍計測機を用いた予備実験によって、電極を刺すことなく安静時に安定した心電波形を計測できることを確認している (図 2)。今後はこれらの 2 つのステップを進めることで、ハクジラ亜目におけるエネルギー消費量の推定法に関する研究を進展させる。

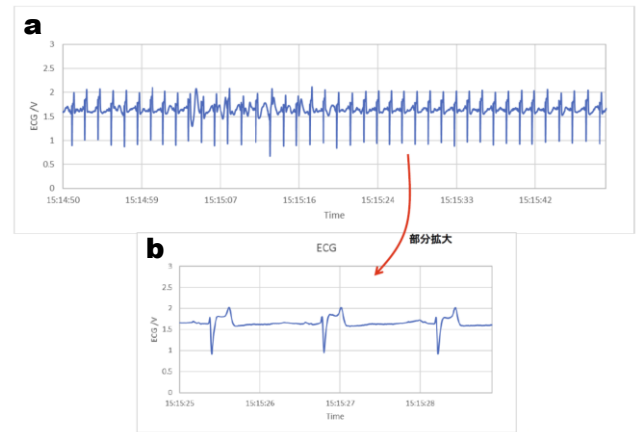


図 2. マクセル株式会社の開発による動物搭載型心拍計測器によって得られた心電波形のデータ。横軸は時刻を示し、縦軸は電位を示す。a) 1 分間の心電波形データ。b) 4 秒間の心電波形データ。

参考文献

- (1) Allen A.S., et al. 2022: “Dynamic body acceleration as a proxy to predict the cost of locomotion in bottlenose dolphins”, J. Exp. Biol., 225, jeb243121.
- (2) Doughty, C.E., et al. 2016: “Global nutrient transport in a world of giants”, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 113.4, 868-873.
- (3) Estes, J.A., et al. 2011: “Trophic downgrading of planet Earth”, Science, 333.6040, 301-306.
- (4) Fahlman, A., et al. 2015: “Lung mechanics and pulmonary function testing in cetaceans”, J. Exp. Biol., 218, 2030-2038.
- (5) Fahlman, A., et al. 2018: “Field energetics and lung function in wild bottlenose dolphins *Tursiops truncatus* in sarasota bay florida”, R. Soc. Open Sci., 5.1:171280
- (6) Kleiber, M. 1947: “Body size and metabolic rate”, Physiol. Rev., 27, 511-541.
- (7) Tobayama T, and Kirihata T. 1999: “An Attempt to estimate body weight of small cetaceans”, IBI Rep., 9, 135-147.