

2015年度日本海洋学会春季大会ナイトセッション報告 「南極海における Sea Ice Biota 研究の進展を目指して」

谷村 篤^{1,2*}・木村詞明^{1,3}・宮崎奈穂⁴・小島本葉²・茂木正人^{1,4}・小達恒夫^{1,2}

Report of the night session “Progress in Research into Sea Ice Biota of the Antarctic Ocean”
presented at the Spring Meeting of the Oceanographic Society of Japan, 2015

Atsushi Tanimura^{1,2*}, Noriaki Kimura^{1,3}, Naho Miyazaki⁴, Motoho Ojima²,
Masato Moteki^{1,4} and Tsuneo Odate^{1,2}

(2015年7月1日受付; 2015年7月14日受理)

Abstract: The workshop “Progress in Research into Sea Ice Biota of the Antarctic Ocean” was held on 24 March 2015 at Tokyo University of Marine Science and Technology (TUMSAT) as a night session under the joint sponsorship of the Oceanographic Society of Japan. The aim of the workshop was to share information regarding the physical processes of ice formation and melting, and the organisms associated with sea ice, and to discuss the ecological significance of sea ice biota. Five presentations were delivered on various topics related to Antarctic sea ice. The potential importance of sea ice biota in the Antarctic marine ecosystem was emphasized throughout the workshop. Also discussed was a future feasibility study of sea ice biota as biological indicators of the physical processes of sea ice formation. A total of 28 scientists and students attended the session.

要旨: 2015年度日本海洋学会春季大会開催期間中の2015年3月24日、東京海洋大学において、ナイトセッション「南極海における Sea Ice Biota 研究の進展を目指して」が開催された。本ナイトセッションでは、海水の生成と融解のプロセスなどの海洋物理学的情報と定着水域や浮水域における海水中の生物に関する情報を持ち寄り、南極海の生態系における海水生物群集の潜在的な生理・生態学的意義から、定着水域と浮水域の生物群集の関係、海水履歴の推定や気候変動の研究の指標生物としての海水生物の利用の可能性まで議論を展開し、それに基づき今後の研究の方向性や発展性について意見交換した。なお、参加者は28名であった。

¹ 情報・システム研究機構国立極地研究所. National Institute of Polar Research, Research Organization of Information and Systems, Midori-cho 10-3, Tachikawa, Tokyo 190-8518.

² 総合研究大学院大学複合科学研究科極域科学専攻. Department of Polar Science, School of Multidisciplinary Sciences, SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies), Midori-cho 10-3, Tachikawa, Tokyo 190-8518.

³ 東京大学大学院新領域創成科学研究科. Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8561.

⁴ 東京海洋大学大学院. Graduate School of Marine Science and Technology, Tokyo University of Marine Science and Technology, 4-5-7 Konan, Minato-ku, Tokyo 108-8477.

* Corresponding author. E-mail: tanimura.atsushi@nipr.ac.jp

1. はじめに

2015年度日本海洋学会春季大会開催期間中の2015年3月24日、東京海洋大学において、ナイトセッション「南極海における Sea Ice Biota 研究の進展を目指して」を開催した。本稿では、本ナイトセッション開催の背景と目的、集会経過を報告する。以下にプログラムを示す。参加者は28名であった。

2015年度日本海洋学会春季大会ナイトセッション「南極海における Sea Ice Biota 研究の進展を目指して」
コンピーナー：谷村 篤・茂木正人・小達恒夫；開催日時：2015年3月24日（火）16:30～18:30；会場：東京海洋大学講義棟3階33番教室

プログラム

趣旨説明 谷村 篤（国立極地研究所・総合研究大学院大学）

I. 話題提供

- 1) 海氷はどこで生まれてどこで融けるのか

木村詞明（国立極地研究所・東京大学大学院）

- 2) 海氷の中の藻類群集について

宮崎奈穂（東京海洋大学大学院）

- 3) 海氷の中の動物群集は語る

谷村 篤（国立極地研究所・総合研究大学院大学）

- 4) 海氷融解に伴う微小生物の放出

小島本葉（総合研究大学院大学）

- 5) 海氷起源の微小生物に始まる食物連鎖

茂木正人（東京海洋大学大学院・国立極地研究所）

II. 総合討論 小達恒夫（国立極地研究所・総合研究大学院大学）

2. 背景

極域の海洋生態系を特徴づけるのは海氷の存在である。毎年繰り返される海氷の形成と消失の過程が、大気と海洋の熱やガス交換への影響、深層水の形成過程への影響等、世界の気候を支配するうえで重要な役割を果たしていることについてはしばしば言及される (Dieckmann and Hellmer, 2010)。他方、海氷が多様な生物を育む基盤であり、南極海生態系に重要な役割を担っていることについては十分に理解されていない。

海氷中には特有の微小な生物群集 (Sea ice biota) が存在する。Sea ice biota とは、海氷とその直下の海水中に棲み、海氷と何らかの関係をもって生活し、食物連鎖を通じて互いに密接につながりを持った生活を営んでいる生物群集をさす (図1) (Gulliksen and Lønne, 1989)。特に、海水と接する海氷直下の領域 (Ice-sea water interface) には特有の生物群集がみられ、その下の水柱の生態系 (漂流生態系) とは異なった独特の生態系が形成されている (Horner

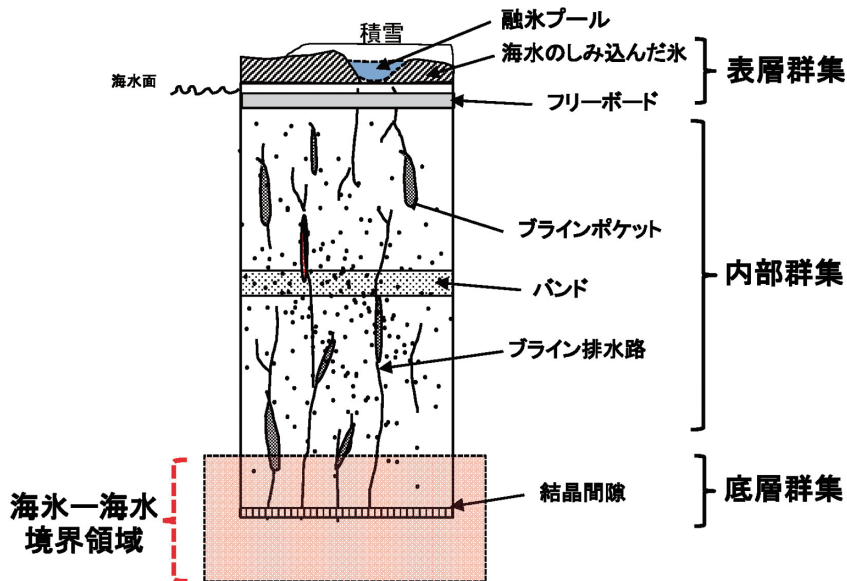


図 1 海水と海水生物群集 (Sea ice biota) の分布模式図
 Fig. 1. Schematic representation of the biological community found in sea ice.

et al., 1992).

海水を生活の場とする生物の生活史や生態が明らかとなっている種は極めて少ない (Tanimura *et al.*, 1996). 海水に生活する多くの生物種がいつどのようにして海水中を生息場所とするのか, あるいは海水中で生活する理由や海水が融解し海水中に放出されたあと, 彼らがどのような運命をたどるのか等, わかっていないことが多い (福地ほか, 2014). そのため, 極域海洋生態系の物質循環の重要な経路の一つとなっている可能性が指摘されているにもかかわらず, その海洋生態系への寄与や役割についてはほとんど解明が進んでいない。謎に満ちた生物群集である。

南極海では, 冬季およそ 2000 万 km² もの広大な領域が海水で覆われるが, 夏季にはその大部分が融けてなくなってしまう。すなわち, 「熱帯雨林」に匹敵するほど広大な面積に形成された Sea ice biota という一つの生物群系 (バイオーム) が夏季には跡形もなく消失してしまうというイベントが毎年繰り返されている。それにもかかわらず, 先に述べたように, Sea ice biota の生物学的・生態学的な意義や役割についてはほとんど理解されていないのが現状である。

3. 集会開催の目的

本ナイトセッションでは, 海洋物理学の立場からの海水の生成と融解のプロセスに関する情報と, 海洋生物・生態学の立場から定着氷域や浮氷域における海水中の微小生物に関する

情報を持ち寄り、海水中生物の生理・生態学的意義、定着氷域と浮氷域の生物群集の関係、海水履歴の研究や気候変動の研究の指標生物としての海水中生物の利用の可能性等について議論を深め、今後の研究の方向性や発展性などを自由に議論することを目的とした。

4. 集会の概要

開催に先立ち、コンピーナーより、前述の背景をふまえた本ナイトセッションの開催の趣旨について説明があったあと、5件の話題提供・ディスカッションがなされた。以下に話題の概要を紹介する。

1) 海水はどこで生まれてどこで融けるのか

木村詞明（国立極地研究所・東京大学大学院）

海水はその存在により海洋環境を変化させること、生成・融解と移動により物質や生物を取り込み、輸送し、放出することなどによって、海洋生物に影響を及ぼしている。海水の分布は人工衛星による観測でモニタリングされるようになってきたが、海水がどこでどれだけ生成され、どのように移動し、どこで融解しているかを把握することは簡単ではない。そこで、人工衛星搭載のマイクロ波放射計 AMSR-E および AMSR2 による観測画像から、毎日の海水密接度（分布）と漂流速度を算出し、それをもとに海水の移動経路と海水の生成・消滅面積分布を計算した。南極海の海水は、おおまかには沿岸付近で西向き、低緯度側では東向きに移流しているが、移流経路は気象条件によって変化する。また、海水は沿岸付近で集中的に生成され、多くが低緯度側に移流したのちに融解しており、ウェッデル海やロス海、アムンゼン海付近で融解面積が多い（図2）。さらに、これらのデータから、ある特定地点の海水の履歴を知ることも可能である。人工衛星による最新の海水データは、特定海域の海水の特徴把握や採集された生物サンプルの解釈、観測計画の立案等にも有効に利用できると考えられる。

2) 海水の中の藻類群集について

宮崎奈穂（東京海洋大学大学院）

海水中生物群集は、古細菌から魚類の多様な生物群で構成されるが、アイスアルジーと呼ばれる微細藻類群集は、光合成を行って有機物を産生する一次生産者として海水生態系の基盤を支えている（Arrigo, 2014）。しかし、アイスアルジーの構成種に関する研究は1960-80年代の知見にとどまり、それらの生理特性についてはほとんど報告がない。我々は、第17次東京海洋大学「海鷹丸」南極航海（The 17th *Kaiyodai* Antarctic Research Expedition, KARE-17）時に季節海水域において着色水を採集し、融解したサンプルを蛍光顕微鏡により観察した。その結果、細胞内の葉緑体はクロロフィル由来の自家蛍光を有しており、光を与えると再び細胞が増殖することを確認した。一般に、アイスアルジーの構成種は羽状目の珪藻が主体であるとされるが、本研究では中心目の珪藻が全体数の80%程度を占めたことや、4種類

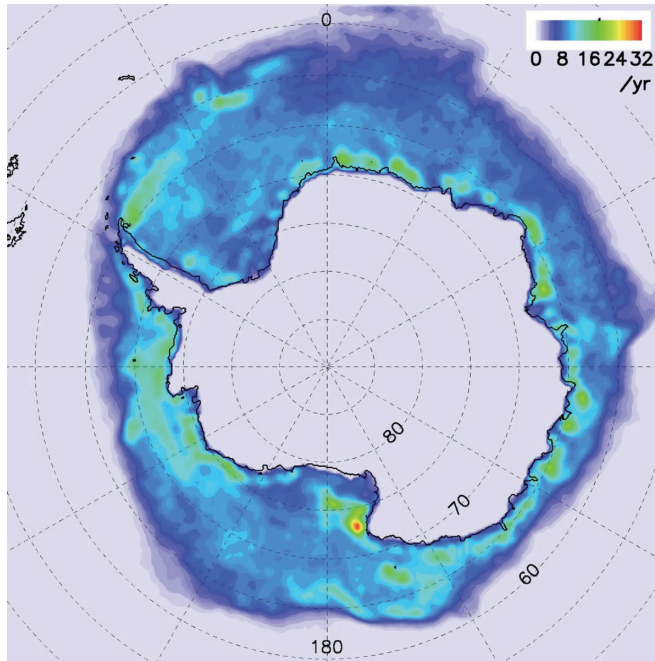


図 2 年間の海水融解面積（面積減少量）の分布

Fig. 2. Spatial distribution of annual sea-ice reduction per unit area averaged over 2003–2009.

のナノサイズの細胞が大量に見つかったことが新たな知見であった。これらのナノ細胞は、元素分析により珪酸質の殻をもつ黄金色藻のスタト孢子（Statospore）であることもわかった（図3）。今後は、各種の培養実験を行って生理学的な知見を蓄積し、海水域で周年的に繰り返すアイスエッジブルームの形成機構について明らかにしていきたい。

3) 海水の中の動物群集は語る

谷村 篤（国立極地研究所・総合研究大学院大学）

海水は様々な微小な生物の生息場所として機能していることが知られている。南極大陸沿岸の定着水域には海水の結晶間隙で一生涯を過ごす海水に適応した独特な生活史を持つカイアシ類の一種 *Paralabidocera antarctica* が分布し、大陸沿岸定着水域を指標する生物種となっている（図4）。最近の「海鷹丸」による夏季の氷縁域での調査において、南極大陸沿岸定着水域から 100 km 以上離れた場所で採集された浮氷塊のあるものからは本種のノープリウス幼生が大量に見出されたが、別の海水からは全く見出すことができなかった。こうした事実から、*P. antarctica* のノープリウス幼生の見出された海水は、沿岸域から運ばれてきたものである可能性があり、*P. antarctica* のノープリウス幼生の見出されなかった海水は、履歴の異なった海水である可能性が想像された。*P. antarctica* のほかにも沿岸の海水と密接に関

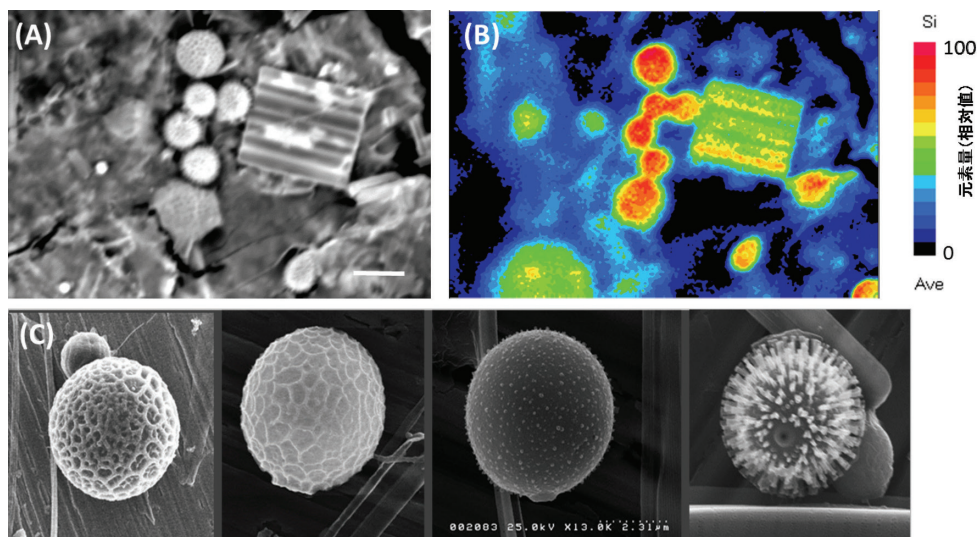


図 3 KARE-17 航海にて採集した海氷に出現したアイスアルジーの電子顕微鏡写真。(A) SEM の二次電子による像。スケールバーは $10\mu\text{m}$ 。(B) EPMA による珪素 (Si) を指標とした検出。中央のナノ細胞はスタト胞子。(C) 黄金色藻 *Archaeomonad* のスタト胞子 4 種の FE-SEM 像。

Fig. 3. Scanning Electron Microscope (SEM) photographs of ice algae found in sea ice during the KARE-17 cruise. (A) SEM secondary electron image. Scale bar: $10\mu\text{m}$. (B) Detection of silicon (Si) by Electron Probe MicroAnalyzer (EPMA). The central nano-sized cells are stator spores. (C) Four types of stator spore from *Archaeomonad* golden algae observed with Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM).

わって生活する甲殻類や有孔虫等の動物が複数種報告されている。こうした海氷中に見出される生物群集 (Sea ice biota) は、海氷の生成場所の特定や移動履歴に手がかりを与えられる指標生物として利用できる可能性があるかも知れない。

4) 海氷融解に伴う微小動物の放出

小島本葉 (総合研究大学院大学)

KARE-17 における氷縁付近での流水採集の結果、変動幅は大きいものの流水内には水中と比較して 2-3 桁高い密度で微小動物群集が存在していることが明らかになった。流水内の動物が海氷融解に伴い水中に放出されたあと、どのように拡散して水中の生態系に寄与していくのかについては現在に至るまでわかっていない。そこで私は、流水内でみられる動物相が海水中に放出されたあとどのように分布するのか明らかにすることを目的とし、研究に取り掛かった。研究の方法として、流水の採集および周辺水中からの動物プランクトンの採集を行い、両者の動物相の比較を試みた。流水中で卓越したカイアシ類のハルパクチクス目や *P. antarctica* の個体数密度は海水中では低く、一方で有孔虫が氷縁付近水中において卓越して分布していた。流水内と水中各層 (0-50, 50-100, 100-200, 200-500 m) 内での動物群集の積算個体数密度を比較した結果、有孔虫では大きな変化はないものの、流水内で卓越して

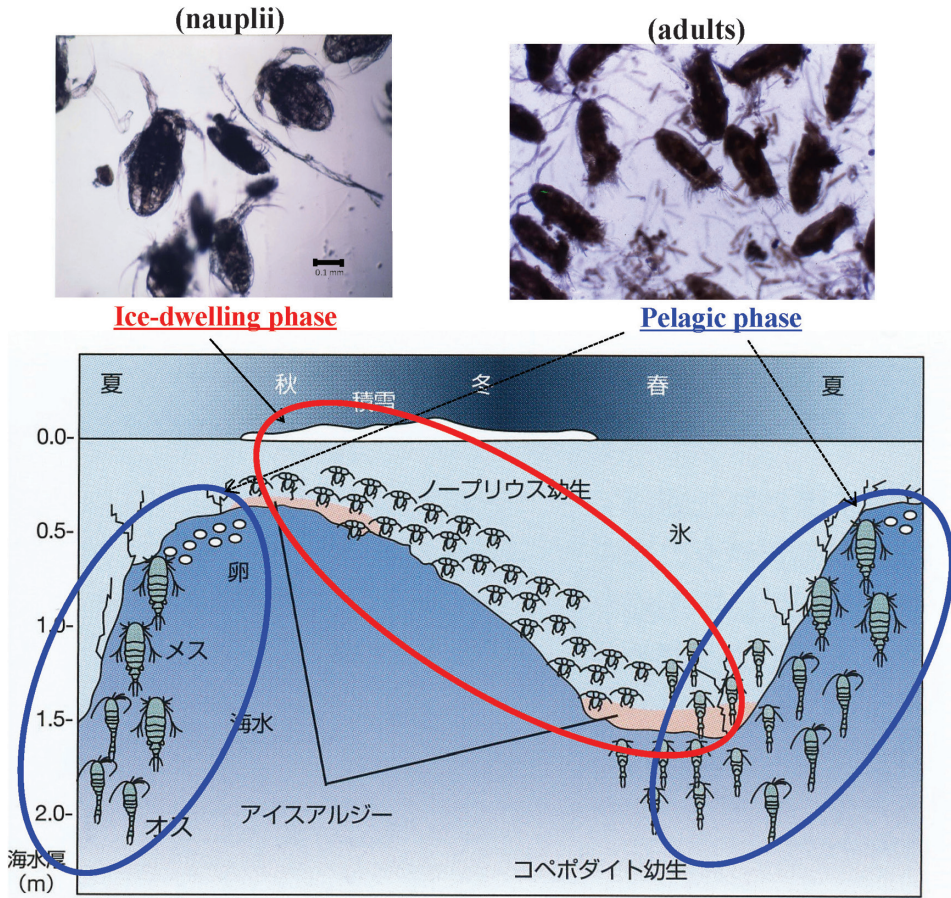


図 4 沿岸定着水域を生活の場とする *Paralabidocera antarctica* の生活史模式図
 Fig. 4. Schematic diagram of the life cycle of the Antarctic ice-associated copepod, *Paralabidocera antarctica*.
 Modified from Tanimura et al. (1996).

いたカイアシ類の個体数は海水中では極めて低いことがわかった。流氷内に出現したカイアシ類の水中の除去プロセスの一つとして、魚類（仔稚魚）などの栄養段階がより高次の消費者による捕食が考えられる。今後は魚類胃内容物調査やセジメントトラップによる沈降粒子の調査を行う必要があると考えている（図5）。

5) 海水起源の微小生物に始まる食物連鎖

茂木 正人（東京海洋大学大学院・国立極地研究所）

南大洋で秋季から冬季にかけて膨大な量が生成される海水中には、微小な植物や動物が取り込まれることが知られている。これらの微小生物はその老廃物などとともに、今度は春季から夏季の海水の融解とともに季節海水域の水柱に放出され、一部は海底へのフラックスや微生物ループに、また一部は漂流圏の食物網に取り込まれていくだろう。東京海洋大学と国

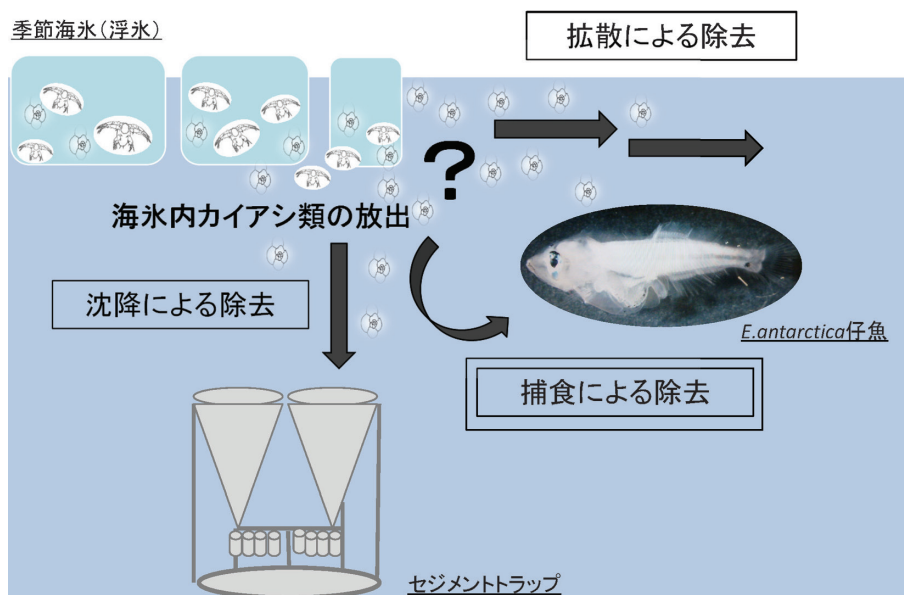


図 5 海水内動物群集（特にカイアシ類）が水柱に放出されたあとの行方

Fig. 5. Fate of fauna within pack ice in the water column.

立極地研究所の共同研究チームは、ハダカイワシ類を南大洋インド洋区食物網における重要な構成要素の一つと考え、研究対象としてきた。その過程で、*Electrona antarctica*（ハダカイワシ科）が海水下か海水縁近くで産卵していることが示唆された。このことは、海水下（あるいは海水縁）が、*E. antarctica* の孵化仔魚の生残にとって好適な餌料環境を提供していることを意味する。広大な分布域をもつ *E. antarctica* の成魚は、オットセイやペンギン類、飛翔性海鳥類などに捕食される。気候変動によってもたらされる海水変動は、海水中・海水下の微小生物やハダカイワシ類を介して高次の生態系や広範囲の物質循環にまで及ぶであろう（図6）。

5. ま と め

南極海においては、沿岸定着氷域の研究に比べ、広大な領域を占める季節海水域の研究は十分ではない(Garrison, 1991)。季節海水域に存在する比較的大きな氷盤では、氷盤に乗り移って研究観測が実施されることもあるが、融解が進んだ小型の浮氷そのものが生物学・生態学的観点からの研究の対象として取り上げられることはなかった。今回の集会で報告されたように、我々が最近始めた南極海における海水採集・生物組成調査から、断片的ながら浮氷中にも豊かな微小生物相があることがわかってきた。沖合の季節海水域や浮氷域と沿岸定着氷域の海水中生物群集の関係など研究すべき課題は多いが、今後、空白域となっている浮氷域

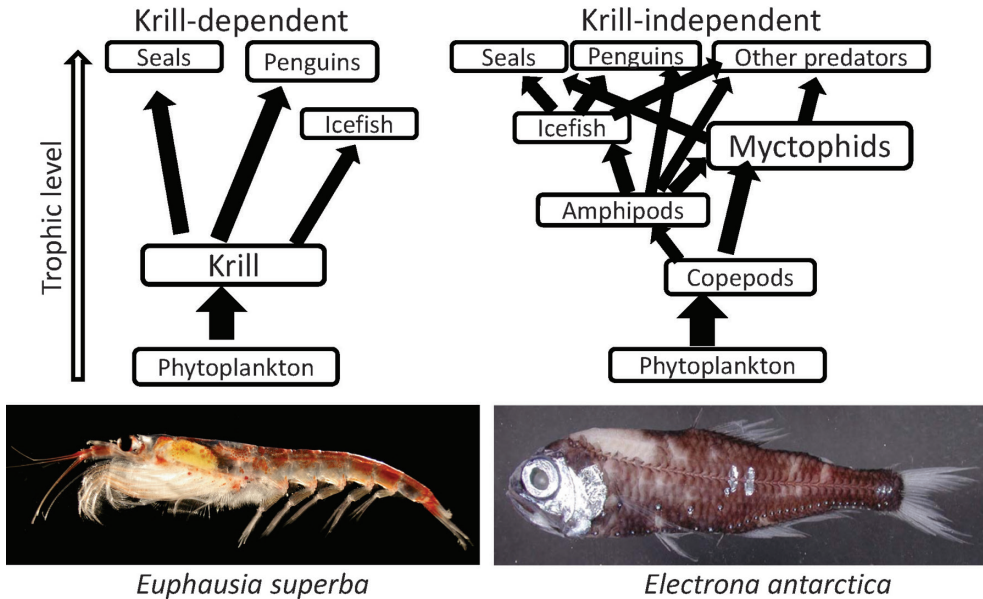


図 6 南大洋におけるナンキョクオキアミに依存した食物連鎖と依存しない食物連鎖の模式図. 南大洋インド洋区では右のハダカイワシ類 (Myctophids) を介した食物網が優位であると考えられる (Murphy *et al.*, 2007 を改変). 海水変動はハダカイワシを介して高次捕食者の個体群変動に及ぶ.

Fig. 6. Conceptual model of krill-dependent (left) and krill-independent (right) food webs (modified from Murphy *et al.*, 2007). The krill-independent food web, via myctophids, is likely to be predominant in the Indian Ocean sector. Changes in sea ice could impact the population dynamics of top predators via fluctuations in the myctophid biomass.

の海水中生物群集に関する知見が蓄積されれば、南極海氷生態系研究は大きく進展するはずである。

南極海の沿岸に形成されるポリニヤでは、冬季活発に海水が生産され、底層水の生成の原動力となっている。近年、東南極の複数の場所で、新たな底層水の形成場所や生成量が明らかにされつつある (Kitade *et al.*, 2014; Ohshima *et al.*, 2013)。底層水の生成量は、南極海の沿岸ポリニヤでの海水生成量と密接に関わっている。したがって、南極海の沿岸ポリニヤで生成される海水量とその履歴の把握は喫緊の課題となっている。しかし、冬季南極海を覆う海水のすべてが、沿岸ポリニヤで生成されているわけではなく、沖合や氷縁でも生成される (Morales Maqueda *et al.*, 2004)、その識別は従来の衛星情報に基づいた手法だけでは困難である。海水の生成履歴や輸送履歴の解明に、従来の手法に加えて、Sea ice biota を指標生物 (トレーサー) として利用するのはよいアイデアかもしれない。

今後とも浮氷中の Sea ice biota の多様性を調べるとともに、地域性や季節的な変動についても研究を進める必要がある。特に、海水生成初期の Sea ice biota が輸送過程とともにどのように遷移しているのか、Sea ice biota が海水に取り込まれたあとその全生物量はどの程度

増加するのか、そして、海水融解後に海洋表層へ放出された生物群集の行方を明らかにする必要がある。海水融解期には、増加した Sea ice biota の有機物が海洋表層に供給されることになり、従来から知られている氷縁ブルームによる一次生産に加えて、海水縁生態系の食物連鎖にとっては重要な有機物供給過程になると推察される。これまで看過されてきたこうした有機物の供給過程も、南極海の生物多様性や豊富な生物資源を有する南極海を支えているのかもしれない。

文 献

- Arrigo, K.R. (2014): Sea Ice Ecosystems. *Ann. Rev. Mar. Sci.*, **6**, 439–467, doi:10.1146/annurev-marine-010213-135103.
- Dieckmann, G.S. and Hellmer, H.H. (2010): The importance of sea ice: an overview. *Sea Ice*, ed. by D.N. Thomas and G.S. Dieckmann. 2nd ed., Wiley-Blackwell, 1–22, doi:10.1002/9781444317145.ch1.
- 福地光男・谷村 篤・高橋邦夫 (2014): 南極海に生きる動物プランクトン—地球環境の変動を探る—。東京、成山堂書店, 197 p. (極地研ライブラリー)。
- Garrison, D.L. (1991): Antarctic sea ice biota. *Amer. Zool.*, **31**, 17–34.
- Gulliksen, B. and Lønne, O.J. (1989): Distribution, abundance, and ecological importance of marine sympagic fauna in the Arctic. *Rapp. P.-v. Réun. Cons. int. Explor. Mer*, **188**, 133–138.
- Horner, R., Ackley, S.F., Dieckmann, G.S., Gulliksen, B., Hoshiai, T., Legendre, L., Melnikov, I.A., Reeburgh, W.S., Spindler, M. and Sullivan, C.W. (1992): Ecology of sea ice biota. *Polar Biol.*, **12**, 417–427, doi:10.1007/BF00243113.
- Kitade, Y., Shimada, K., Tamura, T., Williams, G.D., Aoki, S., Fukamachi, Y., Roquet, F., Hindell, M., Ushio, S. and Ohshima, K.I. (2014): Antarctic Bottom Water production from the Vincennes Bay Polynya, East Antarctica. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 3528–3534, doi:10.1002/2014GL059971.
- Morales Maqueda, M.A., Willmott, A.J. and Biggs, N.R.T. (2004): Polynya dynamics: a review of observations and modeling. *Rev. Geophys.*, **42**, RG1004, doi:10.1029/2002RG000116.
- Murphy, E.J., Watkins, J.L., Trathan, P.N., Reid, K., Meredith, M.P., Thorpe, S.E., Johnston, N.M., Clarke, A., Tarling, G.A., Collins, M.A., Forcada, J., Shreeve, R.S., Atkinson, A., Korb, R., Whitehouse, M.J., Ward, P., Rodhouse, P.G., Enderlein, P., Hirst, A.G., Martin, A.R., Hill, S.L., Staniland, I.J., Pond, D.W., Briggs, D.R., Cunningham, N.J. and Fleming, A.H. (2007): Spatial and temporal operation of the Scotia Sea ecosystem: a review of large-scale links in a krill centred food web. *Phil. Trans. R. Soc. B*, **362**, 113–148, doi:10.1098/rstb.2006.1957.
- Ohshima, K.I., Fukamachi, Y., Williams, G.D., Nishihashi, S., Roquet, F., Kitade, Y., Tamura, T., Hirano, D., Herraiz-Borreguero, L., Field, I., Hindell, M., Aoki, S. and Wakatsuchi, M. (2013): Antarctic Bottom Water production by intense sea-ice formation in the Cape Darnley polynya. *Nat. Geosci.*, **6**, 235–240, doi:10.1038/ngeo1738.
- Tanimura, A., Hoshiai, T. and Fukuchi, M. (1996): The life cycle strategy of the ice-associated copepod, *Paralabidocera antarctica* (Calanoida, Copepoda), at Syowa Station, Antarctica. *Antarct. Sci.*, **8**, 257–266, doi:10.1017/S0954102096000363.