

2016年夏季の北西太平洋海域の異なった酸性化海水環境下における有殻翼足類の分布

佐々木 洋*・熊澤 滉平^{*2}・木元 克典^{**}

Distribution of shelled pteropods under different acidified seawater conditions in the Northwest Pacific Ocean in summer 2016

Hiroshi SASAKI^{*}, Kohei KUMAZAWA^{*2} and Katsunori KIMOTO^{**}

^{*}, ^{*2}*Department of Biological Sciences, Faculty of Science and Engineering, Ishinomaki Senshu University, Miyagi, Japan*

^{**}*Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Yokosuka, Japan*

Abstract

Horizontal and vertical distribution patterns of shelled pteropods were studied in the North-western Pacific Ocean during 28 June to 4 July 2016. A NORPAC net was used to collect samples in the upper 150 m at 12 stations (from A1 to A5 and from B1 to B7, around 45–46°N, 165–170.5°E) in relatively well-mixed surface waters. A VMPS net was also used to collect samples in five depth ranges (0–50, 50–100, 100–150, 150–200, 200–300 m) at 4 stations (B2, B5, KNOT and K2, around 44–47°N, 155–166°E). Shelled pteropods were dominated by *Limacina helicina* in the present study areas. A less marked horizontal variation of *L. helicina* at relatively a short distance was found (25.3 ± 22.4 ind. m^{-3} in A area and 27.9 ± 38.6 ind. m^{-3} in B area). The vertical distributions at 4 stations showed that the abundance generally decreased with depth, and the maximum abundance of *L. helicina* was >400 ind. m^{-3} in the shallowest layer (<50 m) at St. B5. The abundance in each depth range was weakly related to the aragonite saturation index (Ω_{Ar}) of seawater of the same depth range ($r=0.397$), suggesting that the acidified seawater had a negative influence on the pteropod distribution.

1. 序論

海洋の酸性化が世界的な環境問題として注目を集めている。大気中の二酸化炭素 (CO₂) が海水中に過剰に溶けることで海洋の酸性化を進行させていると指摘されているからである⁽¹⁾。CO₂の溶解は、極地海洋のような冷たい海水ほどよく溶ける傾向にあり、北極海、南極海ばかりでなく、近年、北太平洋亜寒帯域においても表層水の pH の低下傾向が観測されている⁽²⁾。炭酸カルシウムの殻を形成する有殻翼足類は、酸性化の影響を受けやすいため海洋の生態系内で特に負の影響が懸念されている⁽³⁾⁽⁴⁾。酸性化が進行する海域の生態系への影響が懸念される中、特に炭酸カルシウム (CaCO₃) のアラゴナイト態の殻を形成する有

殻翼足類は、酸性化海水中で殻の形成が阻害される⁽⁵⁾⁽⁶⁾。そこで北西太平洋の複数測点において酸性化海水の水平分布、鉛直分布の異なる海域を選択して、有殻翼足類の水平分布、鉛直分布、またそれらのサイズ分布を比較することにより、酸性化による影響を調べた。

2. 材料と方法

研究用の試料は北海道大学所属の研究船「おしよろ丸」を用いた2016年度の第26次おしよろ丸航海レグ2 (OSO26-Leg2) において、6月28日から7月5日にかけて北西太平洋の北緯44度から47度、東経155度から170.3度に位置する海域で採集されたものである (Fig. 1, Table 1)。海

*石巻専修大学理工学部生物科学科

^{*2}平成29年度生物科学科卒業、現在海上保安庁海洋情報部

^{**}国立研究開発法人海洋研究開発機構、地球環境部門

2016年夏季の北西太平洋海域の異なった酸性化海水環境下における有殻翼足類の分布

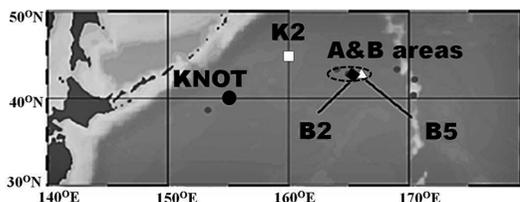


Fig. 1. Location of stations where horizontal samplings (A and B areas), and vertical samplings (KNOT, K2, B2 and B5) were made during the cruise OSO26 in 2016.

Table 1. Location of stations of horizontal sampling stations (A and B areas), and vertical sampling stations (KNOT, K2, B2 and B5).

Station	Plankton net used	Sampling depths	Date of sampling	Location
A1	NORPAC	0-150 M	3/7/2016	45 50'N, 168 30'E
A2	NORPAC	0-150 M	3/7/2016	46N, 169E
A3	NORPAC	0-150 M	3/7/2016	45 45'N 169 30'E
A4	NORPAC	0-150 M	4/7/2016	45 30'N, 170E
A5	NORPAC	0-150 M	4/7/2016	45 15'N, 170 30'E
B1	NORPAC	0-150 M	30/6/2016	45 40'N, 165E
B2	NORPAC	0-150 M	1/7/2016	45 40'N, 165 20'E
B3	NORPAC	0-150 M	1/7/2016	45 40'E, 165 40'E
B4	NORPAC	0-150 M	1/7/2016	45 40'E, 165 50'E
B5	NORPAC	0-150 M	2/7/2016	45 40'E, 166E
B6	NORPAC	0-150 M	2/7/2016	45 40'E, 166 20'E
B7	NORPAC	0-150 M	2/7/2016	45 40'E, 166 40'E
B2	VMPS	0-50 M	1/7/2016	45 40'N, 165 20'E
B2	VMPS	50-100 M	1/7/2016	45 40'N, 165 20'E
B2	VMPS	100-150 M	1/7/2016	45 40'N, 165 20'E
B2	VMPS	150-200 M	1/7/2016	45 40'N, 165 20'E
B2	VMPS	200-300 M	1/7/2016	45 40'N, 165 20'E
B5	VMPS	0-50 M	1/7/2016	45 40'E, 166E
B5	VMPS	50-100 M	1/7/2016	45 40'E, 166E
B5	VMPS	100-150 M	1/7/2016	45 40'E, 166E
B5	VMPS	150-200 M	1/7/2016	45 40'E, 166E
B5	VMPS	200-300 M	1/7/2016	45 40'E, 166E
KNOT	VMPS	0-50 M	9/7/2016	44N, 155E
KNOT	VMPS	50-100 M	9/7/2016	44N, 155E
KNOT	VMPS	100-150 M	9/7/2016	44N, 155E
KNOT	VMPS	150-200 M	9/7/2016	44N, 155E
KNOT	VMPS	200-300 M	9/7/2016	44N, 155E
K2	VMPS	0-50 M	28/6/2016	47N, 160E
K2	VMPS	50-100 M	28/6/2016	47N, 160E
K2	VMPS	100-150 M	28/6/2016	47N, 160E
K2	VMPS	150-200 M	28/6/2016	47N, 160E
K2	VMPS	200-300 M	28/6/2016	47N, 160E

域 A の 5 測点、および海域 B の 7 測点の相対的に狭範囲海域において、鉛直曳き用の NORPAC ネット（北西太平洋標準ネット、目合 100 μm ）を用いて 0-150 m 水柱から動物プランクトンが採集された。相対的に相互に離れた距離に位置する測点 B2、B5、K2、KNOT においては、鉛直区分採集が可能な閉鎖式ネット VMPS ネット（目合 100 μm ）を用いて 0-300 m 水柱の 5 層（0-50, 50-100, 100-150, 150-200, 200-300 m）から動物プランクトンが採集された。それらの動物プランクトン試料の中から有殻翼足類 *Limacina helicina* を抽出した後、99.5%エタノール (EtOH) で固定された。採取した翼足類個体のサンプルを駒込ピペット用いてシャーレに移し、種の同定、個体数の計数、サイズ測定（殻径）を行った。サンプル中の個体数が多い場合には、分割して計数された。*L. helicina* は北半球、南半球において寒帯・亜寒帯海域に優占的に生息する有殻翼足類である⁽⁷⁾。

観測海域の水温、塩分、蛍光強度を指標としたクロロフィル濃度（植物プランクトン濃度）、溶存酸素濃度（DO）などの海洋環境データは、2016年度おしよ丸航海（OSO26-Leg2）の「北太平洋西部亜寒帯域における海洋構造、物質循環および生物生産への影響の解明」クルーズレポート⁽⁸⁾から引用された。海水の炭酸カルシウム不飽和度（アラゴナイト飽和度 Ω_{Ar} ）のデータは JAMSTEC の脇田博士から提供された。

海洋酸性化の進行度の指標は、炭酸カルシウムの形態の 1 つであるアラゴナイトの飽和度 (Ω_{Ar}) が使用されている。アラゴナイト飽和度はカルシウムイオン濃度 $[\text{Ca}^{2+}]$ と炭酸イオン濃度 $[\text{CO}_3^{2-}]$ の積をアラゴナイト溶解度積 (Ksp) で割ったものである。 $\Omega_{Ar} > 1$ の場合は過飽和、 $\Omega_{Ar} < 1$ の場合は不飽和となるが、不飽和海水中においてはアラゴナイト殻の溶解が進行するとされている⁽⁹⁾。

3. 結果と考察

B、A 海域における塩分の断面図を Fig. 2 に示した。両海域の低塩分表層海水は周囲の水塊と比較して表層下部付近に流入している。図には水温を示していないがその水塊は周囲よりもやや暖か

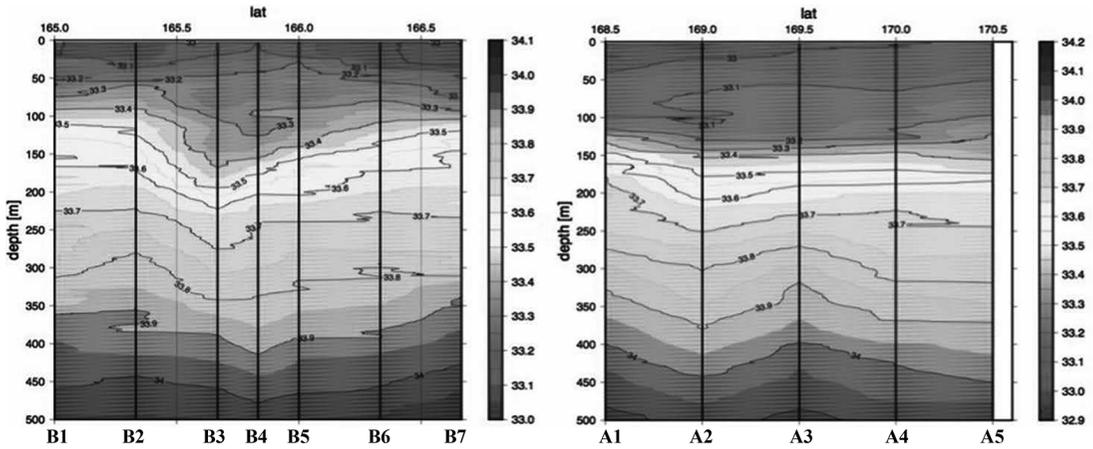


Fig. 2. Vertical cross sections of salinity in area B (left) and A (right). Numbers below indicate the locations of the stations. In B area, relatively high salinity water (ca. 33.4–33.5) seemed to convect downward to the depth of about 150 m around St. B3–B5. No marked downward convection of high salinity water was found in A area.

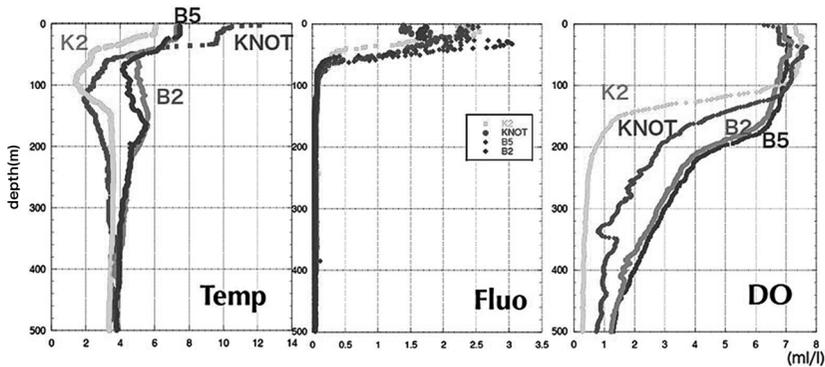


Fig. 3. Vertical profiles of water temperature (Temp), fluorescence (Fluo) and dissolved oxygen (DO) at B2, B5, K2, and KNOT stations. Relatively warm waters at the depth range of 60–300 m, and high DO waters at the depth range of 100–500 m were found at stations B2 and B5. Fluorescence (= phytoplankton) was most abundant at about 40 m of St. B2.

い。B 海域では St. B3、St. B4 付近で低塩分水の下方へ (100–150 m) の張り出しが認められるが、A 海域では表層下部の低塩分水の張り出しは顕著ではない。B 海域、A 海域は狭い範囲でありながらやや海面高度差が認められた (木元、私信)。海面高度差があるということはその内部に渦が形成されていることを意味し、北半球で海面高度が高い場合には周囲よりも水温がやや高く時計回りの渦が形成される。またそれにより鉛直混合が活発になるため、海水の化学成分の分布様式が周囲とはやや異なることが予想される。渦の範囲が 100 km 未満であるため中規模渦と呼ばれる。B 海域は海面高度が高く渦が顕著に観察されている

が、A 海域は海面高度が B 海域よりも相対的にやや低く、渦の形成が顕著ではない特徴がある。

測点 B2、B5、K2、KNOT における水温、クロロフィル濃度、アラゴナイト飽和度 (Ω_{Ar})、溶存酸素濃度 (DO) の鉛直分布を Fig. 3 に示した。St. B2、St. B5 においては、中規模渦によって発生した下降流によって表層の暖水が表層下部に供給されていた。植物プランクトン量は、渦海域 A、B においてやや高く、特に St. B2 が高かった。DO (溶存酸素濃度) は、表層由来の暖水中の高い DO が表層下部に滞留していた。アラゴナイト飽和度 (Ω_{Ar}) は、水深と共に低下していたが (Fig. 4)、渦海域の St. B2、St. B5 では、下降流の影響

2016年夏季の北西太平洋海域の異なった酸性化海水環境下における有殻翼足類の分布

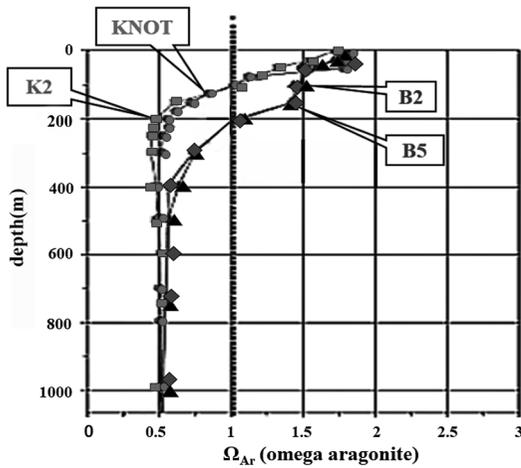


Fig. 4. Vertical profiles of Ω_{Ar} of seawater at B2, B5, K2, and KNOT stations. Higher Ω_{Ar} values at stations B2 and B5 than those at KNOT and K2 stations were observed in the depth range of 100–400 m. Seawaters below about 100 m at KNOT and K2 stations were undersaturated.

で高 Ω_{Ar} 海水が200 m付近まで下降しており、約200 m以深においてアラゴナイトは不飽和 ($\Omega_{Ar} < 1$) である。渦形成の見られない通常海域である St. K2, St. KNOT 付近では、100 m 以深においてアラゴナイトは不飽和であった。

B 海域、A 海域の0–150 m 水柱における *L. helicina* の現存量の水平分布を Table 2 に示し

た。B 海域では St. B3 (115 個体 (ind.) m^{-3})、A 海域では St. A2, A3 において現存量は高かったが (48–50 個体 m^{-3})、それらの測点には集中分布していたと思われる。また、B、A 海域の平均現存量、標準偏差においては顕著な差は見られなかった。しかし両海域において *L. helicina* のサイズ分布を見ると (Table 2)、B 海域では 200 μm 以下の小型個体が多く、A 海域は 301 μm 以上の個体が多かった。平均値においても B 海域と A 海域で採集された *L. helicina* のサイズの違いは顕著であった。A 海域の *L. helicina* は、St. B より早い時期に孵化し、成長し始めたと思われる。

St. B2, St. B5, St. KNOT, St. K2 の4測点の0–300 m 水柱の各水深における現存量の鉛直分布を Fig. 5 に示した。殻内の軟体部が失われた個体を死亡個体として、生存個体と区別して表示した。現存量の差異は著しく、最大現存量は St. B5 の0–50 m における約 400 個体 m^{-3} である。St. B2 の0–50 m, St. KNOT の50–100 m において100 個体 m^{-3} を超えているが、一方で St. K2 においては全層で30 個体 m^{-3} 以下であった。St. KNOT 以外は、表層0–50 m に現存量のピークがあり、深度とともに現存量は減少し、死亡個体の割合がやや多くなる傾向にあった。B 海域内の測点である St. B2, St. B5 における0–50 m の現存量

Table 2. Abundances in three size categories and the relative size compositions of *L. helicina* at stations of A and B areas. The mean abundance of B area was comparable with that of A area. Averaged sizes of *L. helicina* in A area were larger than those in B area.

Station	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	A1	A2	A3	A4	A5
size	Abundance of pteropods (ind. m^{-3})											
< 200 μm	11.4	5.5	96.8	5.3	11.2	13.7	10.3	3.7	15.6	27.4	0.6	6.5
201–300 μm	6.2	2.0	16.1	1.5	2.3	1.7	1.2	2.5	18.8	15.4	1.5	5.0
> 301 μm	1.5	1.2	2.1	0.8	2.5	0.5	1.4	1.6	14.3	7.6	2.8	3.3
total	19.1	8.7	115.0	7.6	16.0	15.9	12.9	7.8	48.7	50.4	4.9	14.8
Mean abundance \pm s.d.	27.9 \pm 38.6						25.3 \pm 22.4					
size	Relative compositions (%)											
< 200 μm	59.8	63.5	84.2	69.7	69.9	86.5	79.9	47.7	32.1	54.3	13.1	44.0
201–300 μm	32.4	22.7	14.0	19.9	14.6	10.6	9.4	32.2	38.6	30.5	31.0	34.0
> 301 μm	7.8	13.8	1.8	10.4	15.5	3.0	10.7	20.1	29.3	15.1	56.0	22.0
< 200 μm mean	73.4 \pm 10.3						38.2 \pm 16.2					
201–300 μm mean	17.6 \pm 8.0						33.3 \pm 3.3					
> 301 μm mean	9 \pm 5.2						28.5 \pm 16.2					

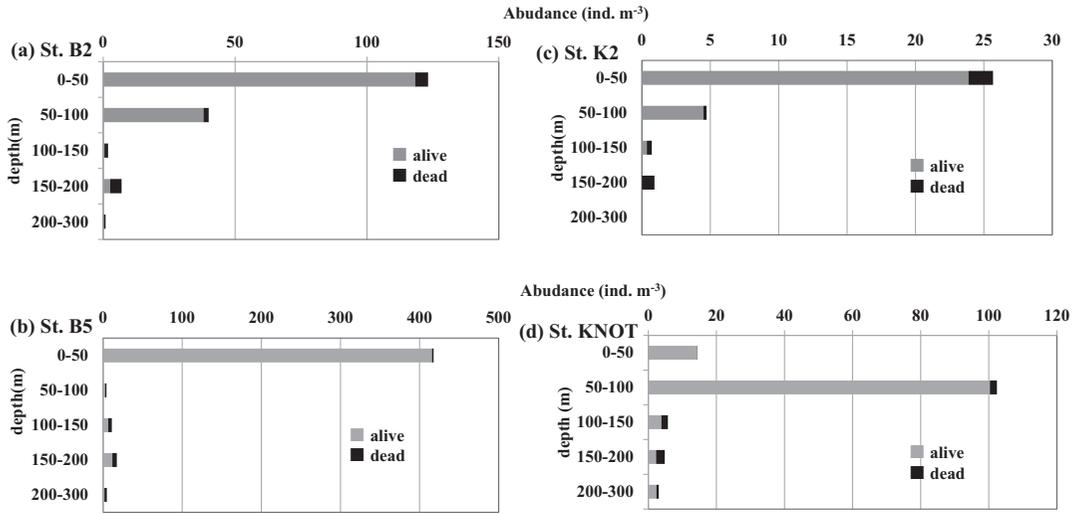


Fig. 5. Vertical distributions of *L. helicina* abundance at Sts. B2 (a), B5 (b), K2 (c) and KNOT (d). An alive and a dead indicate pteropods with the shell and without the shell, respectively.

Table 3. Relative compositions (%) in three size categories and in five depth ranges of *L. helicina* at stations of B2, B5, K2 and KNOT.

Station/ size	Depth range (m)					Station/ size	Depth range (m)				
	0-50	50-100	100-150	150-200	200-300		0-50	50-100	100-150	150-200	200-300
B2	0-50	50-100	100-150	150-200	200-300	K2	0-50	50-100	100-150	150-200	200-300
< 200 μm	65.4	22.7	0.9	3.7	0.4	< 200 μm	50.6	14.1	1.7	1.4	0.0
201-300 μm	4.9	0.4	0.1	0.1	0.1	201-300 μm	9.8	0.7	0.6	1.4	0.0
> 301 μm	1.0	0.0	0.0	0.1	0.1	> 301 μm	19.7	0.0	0.0	0.0	0.0
	%						%				
B5	0-50	50-100	100-150	150-200	200-300	KNOT	0-50	50-100	100-150	150-200	200-300
< 200 μm	59.1	0.9	1.7	3.4	0.9	< 200 μm	2.5	76.1	3.7	3.2	2.4
201-300 μm	24.1	0.0	0.6	0.3	0.1	201-300 μm	3.2	0.3	0.7	0.6	0.0
> 301 μm	8.5	0.1	0.1	0.1	0.1	> 301 μm	5.2	1.9	0.0	0.2	0.0
	%						%				

は、同測点の 0-150 m 現存量よりも著しく高いことを示しているが (Table 2, Fig. 5)、これはより表層付近に集中分布していることを反映していると思われる。

本研究海域における *L. helicina* の最大現存量は約 400 個体 m^{-3} であり、夏季の南極海の既報最大値 (約 2400 個体 m^{-3})⁽¹⁰⁾ よりも低い値だったが、表層付近に集中し、局所集中分布する特徴は共通であった。鉛直分布を調べた 4 測点における各水深のサイズ分布 (%) を Table 3 に示した。St. KNOT を除くすべての測点において、200 μm

以下の個体が 0-50 m の表層に集中していた (51-65%)。St. KNOT の表層 (< 50 m) は水温が 10°C 以上であり、冷水を好む *L. helicina* が分布を避けているように思われる。また、300 μm 以上の遊泳力の大きい個体は、ほぼ表層に集中していた。一般に大型個体の占める割合は低いが、St. K2 においてのみ、300 μm 以上の大型個体が 0-50 m において約 20% を占めていた。Lalli and Wells⁽¹¹⁾ によると、*Limacina* 属の個体サイズにおける成熟度合は、*L. helicina antarctica* を例にすれば、幼生 (veliger) が < 0.3 mm、未成熟個体

2016年夏季の北西太平洋海域の異なった酸性化海水環境下における有殻翼足類の分布

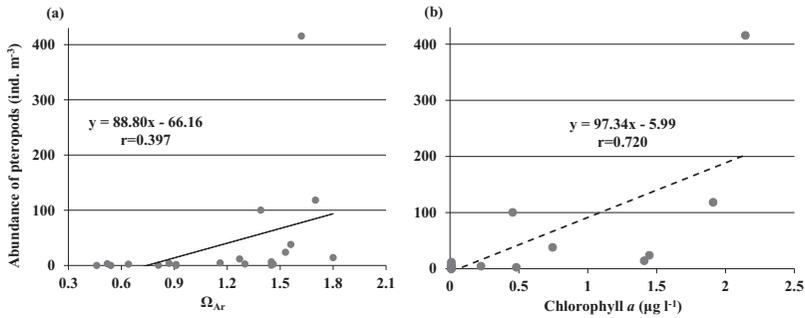


Fig. 6. Relationships between the pteropod abundance and Ω_{Ar} of seawater (a), and between the pteropod abundance and the chlorophyll concentration (b) estimated from the fluorescence of seawater. A relatively high regression coefficient was obtained in (b).

(juvenile) が 0.3–4.0 mm、成体 (adult) が > 4.0 mm であるとされている。本研究で採集された *L. helicina* の個体は、ほとんどが幼生であり、その一部が成長した未成熟個体である。*L. helicina* の産卵後、未成熟個体 (約 0.3–0.4 mm) に達するまでに要する時間は約 1 か月以内とされているので⁽⁷⁾⁽¹⁰⁾、ほとんどの個体は約 1 か月以前に同海域で産卵されたものであろう。

鉛直採集を行った 4 測点における、各層の *L. helicina* 現存量を同水深のアラゴナイト飽和度 Ω_{Ar} 、および蛍光強度から推定された平均クロロフィル濃度と比較した (Fig. 6)。 *L. helicina* の現存量とアラゴナイト飽和度の間に弱い相関関係 ($r = 0.397$) が見られたことから (Fig. 6a)、表層以深の *L. helicina* の生息に関して酸性化海水による負の影響はあると思われる。しかし不飽和海水が 200 m 付近まで存在する St. B2、St. B5、100 m 付近まで上昇している St. K2、St. KNOT においてもすべてのサイズの *L. helicina* がほぼ同程度の現存量が観察されており (Figs. 4 and 5、Table 3)、サイズに依存する酸性化海水の影響の強さを示唆してはいない。一方、*L. helicina* 現存量はクロロフィル現存量に対してより相関が高く ($r = 0.720$, Fig. 6b)、生息深度を決定する要因として表層の餌環境がより重要である可能性を示唆した。

海洋の酸性化は全海洋において進行していることは疑いがない。また酸性化が海洋生態系の様々な生物群に影響を与えていることも明らかになりつつある。本研究で取り上げた有殻翼足類は影響を受けやすい動物群の一つに過ぎないが、それら

の分布生態を正確に把握することは、海洋酸性化の影響を理解する上で必要な基礎的知見になるはずである。

4. 謝辞

本研究を進めるにあたり、研究試料の採集のために研究船「おしよ丸」の船長はじめ乗組員にご協力をいただいたことに感謝申し上げます。

5. 引用文献

- (1) Steinacher, M., F. Joos, T.L. Frolicher, G.-K. Plattner, and S.C. Doney. (2009): Imminent ocean acidification in the Arctic projected with the NCAR global climate carbon cycle-climate model. *Biogeosciences*, 6, 515–533.
- (2) Bednarsek, N., J. Mozina, M. Vogt, C. O'Brien and G.A. Tarling, 2012, The global distribution of pteropods and their contribution to carbonate and carbon biomass in the modern ocean. *Earth Syst. Sci. Data*, 4:167–186.
- (3) Orr, J.C., Fabry, V.J., Aumont, O., Bopp, L., Doney, S.C., Feely, R.A., Gnanadesikan, A., Gruber, N., Ishida, A., Joos, F., Key, R.M., Lindsay, K., Maier-Reimer, E., Matear, R., Monfray, P., Mouchet, A., Najjar, R.G., Plattner, G.-K., Rodgers, K.B., Sabine, C.L., Sarmiento, J.L., Schlitzer, R., Slater, R.D., Totterdell, I.J., Weirig, M.-F., Yamanaka, Y., Yool, A., 2005. Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature* 437, 681–686.
- (4) 佐々木洋、遠藤 寿、2014、海洋プランクトンに対する海洋酸性化の影響、*海洋と生物*、35: 323–331.
- (5) Lischka, S., Büdenbender, J., Boxhammer, T. and

- Riebesell, U. (2011): Impact of ocean acidification and elevated temperatures on early juveniles of the polar shelled pteropod *Limacina helicina*: mortality, shell degradation, and shell growth. *Biogeosciences*, 8 919-932.
- (6) Kimoto, K., Onodera, J., Ikenoue, T., Matsuno, K., Sasaki, O., Harada, N. (2016): Vulnerability of Pteropod shell in the Arctic Ocean: A result of culture experiment under natural seawater. The 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, February 2016, Mombetsu, Hokkaido.
- (7) Lalli, C. M. and Gilmer, R. W. (1989). Pelagic snails: the biology of holoplanktonic gastropod mollusks. *Stanford University Press, Palo Alto*.
- (8) 上野洋路、(2016)、「2016年度おしよろ丸 60日航海レグ2 (おしよろ丸 26次航海 OSO26-Leg2)、北太平洋西部亜寒帯域における海洋構造、物質循環および生物生産への影響の解明、洋上実習Ⅱ、クルーズレポート、P.5。
- (9) Betzer, P.R., Byrne, R.H., Acker, J.G., Lewis, C.S., Jolley, R.R., et al. (1984) The oceanic carbonate system-A reassessment of biogenic control. *Science*, 226: 1074-1077.
- (10) Akiha, F., G. Hashida, R. Makabe, H. Hattori, H. Sasaki, 2017, Distribution in the abundance and biomass of shelled pteropods in surface waters of the Indian sector of the Antarctic Ocean in mid-summer. *Polar Science*, 12: 12-18.
- (11) Lalli, C. M. and Wells, F. E. (1978) Reproduction in the genus *Limacina* (Opisthobranchia: Thecosomata). *J. Zool.* 186: 95-108.