

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：12614

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03970

研究課題名(和文) 過去18年間の北極海における海洋酸性化の進行と生物への影響

研究課題名(英文) Arctic ocean acidification and its impact on marine organism

研究代表者

川合 美千代 (Kawai, Michiyo)

東京海洋大学・学術研究院・准教授

研究者番号：50601382

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：人為起源二酸化炭素による海洋の酸性化が全球で進行しつつあるが、北極海は酸性化に対して特に脆弱な海域であるといわれている。本研究では、2003年以降毎年行われてきた化学観測データを用いて、過去18年間にわたる北極海の酸性化の状況を調べた。その結果、炭酸カルシウム未飽和に達した海水が表層と亜表層の両方で体積を拡大していることが分かった。一方、その中間には過飽和な層の厚みはあまり変化していないことも分かった。さらに、北極海上層に生息するミジンウキマイマイの殻の多くは有機膜に保護されていて損傷を受けていないが、一部の個体では殻が溶解していることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人為起源CO<sub>2</sub>による海洋の酸性化が全球で進行しつつあり、生物への影響が懸念されている。北極海カナダ海盆は、ほかの海に先駆けて酸性化の影響が深刻化していると考えられている。本研究は、過去18年の観測データを解析し、カナダ海盆表層および亜表層において、酸性化により炭酸カルシウム未飽和に達した海水が表層と亜表層の両方で体積を拡大していることを明らかにした。また、現場の動物プランクトンを調査したところ、多くの個体の殻は正常であったが、一部の個体は殻の表層が溶解していることが分かった。これらの結果は、今後各地で進行する海洋酸性化の影響を予測するうえで重要な知見を与えるものである。

研究成果の概要(英文)：The Arctic Ocean is particularly vulnerable to ocean acidification (OA). In this study, we examined the progress of OA in the Canada Basin of the Arctic Ocean over the past 18 years. The results show that aragonite unsaturated layer has thickened in both the surface and sub-surface layers. Interestingly, we also found that the thickness of oversaturated layer in the middle of the two layers did not change much. Furthermore, most of the shells *Limacina helicina* collected in the Canada Basin were intact, though some shells were partly dissolved.

研究分野：化学海洋学

キーワード：海洋酸性化 北極海

### 1. 研究開始当初の背景

大気中に放出された人為起源二酸化炭素の約 30% が海洋に取り込まれ、海洋酸性化という問題を引き起こしつつある。酸性化が進行すると、海水中の化学反応により炭酸イオンの濃度が減少し、炭酸カルシウム飽和度が低下することが知られている。このことはつまり、サンゴや貝類などの海洋生物にとって、炭酸カルシウムの殻や骨格を作りにくくなることを意味する。北極海のカナダ海盆では、2008 年には世界の海に先駆けてすでに表層海水がアラゴナイト(生物が作る炭酸カルシウムのうち、より溶けやすいタイプの結晶形)に対して未飽和(アラゴナイトが海水に溶け出すほどの状態)に達していることが明らかになった(Yamamoto-Kawai et al., Science, 2009)。カナダ海盆では、表層だけでなく、亜表層にも未飽和水が存在することは知られているが、カナダ海盆全体で未飽和水の体積がどのように経年変化しているのか、という点は不明であった。

さらに、未飽和水が継続的に存在するようになったカナダ海盆において、生物への影響が出始めているという報告例はなかったが、これは、生物が影響を受けていないということではなく、生物影響を評価するために必要な観測データが不足しているためではないかと考えた。

### 2. 研究の目的

2003 年以降毎年行われてきた化学観測データを解析し、過去 18 年間にわたるカナダ海盆の酸性化の進行について、表層だけでなく鉛直的に解析すること、現場に生息する動物プランクトンの殻の状態を調べて、酸性化の影響が表れているかどうかを明らかにすること、の 2 点を目的とした。

### 3. 研究の方法

2003 年以降毎年行われてきたカナダの砕氷船によるカナダ海盆広域観測のデータに加えて、2019 年に新たな調査観測を実施した。全炭酸・アルカリ度の測定値から炭酸カルシウム飽和度を算出し、 $< 1$  の未飽和水の分布がどのような経年変化をしているのかを調べた。また、過去 18 年間採取・保管されていた生物試料は、保存状態が悪く、酸性化影響の解析には不向きであることが判明したため、2019 年にプランクトンネットの多層曳きを多数の点で実施し、様々な海域や水深で動物プランクトンを採取した。採取した試料の中から調査対象生物である有殻翼足類 *Limacina helicina* (ミジンウキマイマイ) を拾いだして持ち帰り、個体数と MXCT による殻密度測定を行った。

### 4. 研究成果

1997 年ならびに 2003 年から 2016 年までのカナダ海盆表層の化学データを用いて、酸性化の指標である炭酸カルシウム飽和度( )を算出し、経年変化を調べた(図 1)。2003 年から 2007 年にかけて  $-0.09$  / 年という、ほかの海洋の 10 倍の速さで が低下しており、これが海水融解によって引き起こされたことが示された。一方、2007 年以降には、大気中  $\text{CO}_2$  増加や少ない海水面積が維持されていたにもかかわらず、平均 はさらなる低下はしていなかった。要因を定量的に解析した結果、海水融解水による希釈効果が減少したことや、大気海洋間の  $\text{CO}_2$  交換が一定の状況に達したことが原因であることが分かった。一方で、カナダ海盆表層には 10 年以上にわたって炭酸カルシウム未飽和な海域が広がっていることが分かった。

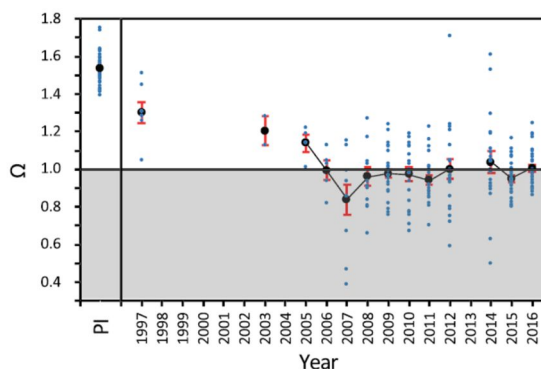


図 1. カナダ海盆表層の の経年変化。青色は観測値、黒丸とエラーバーは平均値と標準誤差。

2003 年から 2019 年にかけてのカナダ海盆における炭酸カルシウム未飽和水の分布とその経年変化を調べた(図 2)。表層では 2003 年には 0m であった未飽和水が 2019 年には 19m に拡大していた。2012 年までは海水融解水による大規模な希釈が主な要因であったが、2013 年以降は大気からの  $\text{CO}_2$  吸収によるものであることが分かった。このことは、近年のカナダ海盆では、大規模な淡水希釈がなくとも未飽和が当たり前という新たな状況に変化したことを示している。また、上流のチャクチ海での酸性化と有機物分解の影響で生成された未飽和水がカナダ海盆亜表

層に貫入しているが、その未飽和水の厚さは 2003 年の 87m から 2019 年の 129m へと大きく拡大していた。物理的な循環場の変化よりも、上流域での CO2 増加が厚み増加の主な原因であると推察された。一方で、物理的な変化(ポーフォート循環強化)により、亜表層の未飽和水の存在深度が深くなっていることも分かった。その結果、表層の未飽和水和亜表層の未飽和水の間の過飽和な層は、2003 年と 2019 年とで厚みがあまり変化していなかった。このことは、ポーフォート循環が弱化した際には過飽和な層が急速に薄くなり、ミジンウキマイマイの生息に適した環境が狭まる可能性を示唆している。

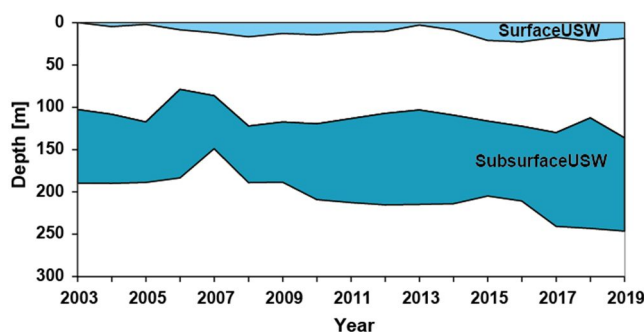


図 2. カナダ海盆における表層と亜表層の未飽和水の分布とその経年変化。

上記のような酸性化の進行状況が、現場に生息するミジンウキマイマイにどのような影響を及ぼすかを調べるため、まず、ミジンウキマイマイの生息深度を調べた。その結果、夏季/秋季には 0-50m に多く生息し、主に幼生であることが分かった。これは、1973 に報告された過去の研究結果と一致した。すなわち、亜表層よりも表層の酸性化がミジンウキマイマイに及ぼす影響がより重要であることを示している。0 - 50m で採取されたミジンウキマイマイの個体数と ならびに餌の指標となるクロロフィル a 濃度の関係を調べたところ、いずれも正の相関がみられた。海水の化学的状況(酸性化)と餌の両方がミジンウキマイマイの個体数を左右していると考えられる。

ミジンウキマイマイの殻密度ならびに殻の様子を、マイクロフォーカス X 線 CT スキャンと電子顕微鏡で調べたところ、炭酸カルシウム未飽和な深度で採取された場合でも、損傷のない正常な殻をもつ個体が多く存在していることが分かった(図 3 左)。このことは、先行研究で示唆されていた、有機質の膜による殻の保護が機能しているためだと考えられる。しかし、一方で、殻の中央部が溶解している個体も少数確認された(図 3 右)。これらは、有機質の膜に何らかの損傷を受けたため、酸性化の進んだ海水中で殻の溶解が起きたものと考えられる。酸性化がなければ、有機質の膜の損傷は溶解を引き起こすことはないことから、これらは酸性化によって、北極海に生息する翼足類に負の影響がすでに及んでいることを証拠づける結果である。



図 3. カナダ海盆で採取したミジンウキマイマイの殻の様子。左は損傷がなく、右は一部に溶解がみられる。

北極海全域における酸性化の進行の状況とそのプロセスを理解し、今後の予測につなげるため、数値モデルを用いた実験を行った。まず、観測データをもとに、北極海全域における全炭酸とアルカリ度の推定を行い、データセットを構築した。これを用いてシミュレーションを行った結果、カナダ海盆のような河川水が増加傾向にある海域では酸性化の速度が河川由来物質によって緩和されることが分かった。このことは、河川水由来の炭素ならびにアルカリ度が、海洋酸性化の進行速度を有意に変化させることを示している。温暖化の進行により、河川水の増加や物質流入量が増加すると見込まれている。従来、北極海酸性化予測では、河川水からの物質流入が無視される場合が多かったが、今後のより正確な酸性化将来予測のためには、陸からの河川水や炭素・アルカリ度の供給量変化を理解して考慮する必要があることが示された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 川合美千代・田村岳史・渡邊英嗣・西岡純・野村大樹・真壁竜介・溝端浩平・安中さやか	4. 巻 30
2. 論文標題 海洋海洋学の10年展望2021：極域	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 海の研究	6. 最初と最後の頁 159～178
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5928/kaiyou.30.5_159	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Kikuchi Takashi, Nishino Shigeto, Fujiwara Amane, Onodera Jonaotaro, Yamamoto-Kawai Michiyo, Mizobata Kohei, Fukamachi Yasushi, Watanabe Eiji	4. 巻 27
2. 論文標題 Status and trends of Arctic Ocean environmental change and its impacts on marine biogeochemistry: Findings from the ArCS project	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Polar Science	6. 最初と最後の頁 100639～100639
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.polar.2021.100639	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Yamamoto-Kawai Michiyo, Ito Soichiro, Kurihara Haruko, Kanda Jota	4. 巻 8
2. 論文標題 Ocean Acidification State in the Highly Eutrophic Tokyo Bay, Japan: Controls on Seasonal and Interannual Variability	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Marine Science	6. 最初と最後の頁 1～13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fmars.2021.642041	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Zhang Y., Yamamoto Kawai M., Williams W.J.	4. 巻 47
2. 論文標題 Two Decades of Ocean Acidification in the Surface Waters of the Beaufort Gyre, Arctic Ocean: Effects of Sea Ice Melt and Retreat From 1997?2016	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 1～11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2019GL086421	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Dainard P. G., Gueguen C., Yamamoto Kawai M., Williams W. J., Hutchings J. K.	4. 巻 124
2. 論文標題 Interannual Variability in the Absorption and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter in the Canada Basin Polar Mixed Waters	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Oceans	6. 最初と最後の頁 5258 ~ 5269
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2018JC014896	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Ji Brenda Y., Sandwith Zoe O., Williams William J., Diaconescu Oana, Ji Rubao, Li Yun, Van Scoy Emma, Yamamoto Kawai Michiyo, Zimmermann Sarah, Stanley Rachel H. R.	4. 巻 124
2. 論文標題 Variations in Rates of Biological Production in the Beaufort Gyre as the Arctic Changes: Rates From 2011 to 2016	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Oceans	6. 最初と最後の頁 3628 ~ 3644
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2018JC014805	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Proshutinsky A., Krishfield R., Toole J. M., Timmermans M. L., Williams W., Zimmermann S., Yamamoto Kawai M., Armitage T. W. K., Dukhovskoy D., Golubeva E., Manucharyan G. E., Platov G., Watanabe E., Kikuchi T., Nishino S., Itoh M., Kang S. H., Cho K. H., Tateyama K., Zhao J.	4. 巻 124
2. 論文標題 Analysis of the Beaufort Gyre Freshwater Content in 2003 2018	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Oceans	6. 最初と最後の頁 9658 ~ 9689
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019JC015281	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 川合 美千代、張 圓昕	4. 巻 53
2. 論文標題 北極海の海洋酸性化	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 地球化学	6. 最初と最後の頁 173 ~ 182
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14934/chi kyukagaku.53.173	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 Michiyo Yamamoto-Kawai, Haruka Tsujimoto and Yuanxin Zhang
2. 発表標題 Surface and subsurface progress of ocean acidification in the Canada Basin of the Arctic Ocean from 2003 to 2019
3. 学会等名 JpGU
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yamamoto-Kawai, M., H. Tsujimoto, Y. Zhang, S. Zimmermann and W. Williams
2. 発表標題 Changes in biogeochemical properties in halocline layers of the Canada Basin from 2003 to 2020
3. 学会等名 The Changing Beaufort Gyre workshop (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yamamoto-Kawai, M, and M. Itoh
2. 発表標題 Seasonal variation in nutrient concentration of the Pacific-origin water from the Chukchi Sea to the Canada Basin
3. 学会等名 International Symposium on Arctic Research-7 (ISAR-7) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tsujimoto, H., M. Yamamoto-Kawai, W. Williams
2. 発表標題 Temporal changes in physical and biogeochemical properties of halocline waters in the Canada Basin
3. 学会等名 International Symposium on Arctic Research-7 (ISAR-7) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Zhang, Y., M. Yamamoto-Kawai, E. Watanabe
2. 発表標題 How Much can Riverine Biogeochemical Fluxes Affect the Ocean Acidification in Arctic Seas
3. 学会等名 Arctic Science Summit Week2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuanxin Zhang, Michiyo Yamamoto-Kawai, Eiji Watanabe
2. 発表標題 Impacts of Riverine Carbon and Nutrient Delivery on Arctic Ocean Acidification
3. 学会等名 JpGU (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yamamoto-Kawai, M., M. Seo and K. Kimoto
2. 発表標題 Distribution and shell condition of <i>Limacina helicina</i> in aragonite unsaturated waters of the Canada Basin
3. 学会等名 ESSAS (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Impacts of riverine carbon and nutrient delivery on Arctic Ocean acidification
2. 発表標題 Zhang Yuanxin, Michiyo Yamamoto-Kawai, and Eiji Watanabe
3. 学会等名 ESSAS (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tsujimoto Haruka, Michiyo Yamamoto-Kawai, Yuanxin Zhang
2. 発表標題 Spreading of aragonite undersaturated water in the Canada Basin of the Arctic Ocean
3. 学会等名 JpGU (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Zhang, Y., M. Yamamoto-Kawai, E. Watanabe
2. 発表標題 How much can riverine biogeochemical fluxes affect the Arctic Ocean Acidification?
3. 学会等名 日本海洋学会秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yamamoto-Kawai, M
2. 発表標題 Changes in biogeochemical properties of the Canada Basin, Arctic Ocean
3. 学会等名 JpGU online (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kumakawa, S. and M. Yamamoto-Kawai
2. 発表標題 Changes in subsurface chlorophyll-a maximum in the Canada Basin, 2003-2019
3. 学会等名 The 10th Symposium on Polar Science (国際学会)
4. 発表年 2019年



〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	木元 克典  (KIMOTO KATSUNORI)  (40359162)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門(地球表層システム研究センター)・グループリーダー代理   (82706)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
カナダ	海洋科学研究所			
米国	ウッズホール海洋研究所			