

海洋熱波と赤潮を経験した厚岸町周辺の岩礁潮間帯生物群集の回復 過程の評価

石田 拳 (国立研究開発法人海洋研究開発機構 (JAMSTEC) 地球環境部門)
野田 隆史 (北海道大学大学院 地球環境科学研究院)

はじめに

北海道南東部沿岸では海水温が異常に高い状態が続く海洋熱波 (Hobday et al, 2016; Hobday et al., 2018) が 2010～2016 年毎年夏に発生した (Miyama et al., 2021a, b)。その後、2021 年には再び海洋熱波が発生した後 (Kuroda and Setou, 2021)、赤潮も発生した (Kuroda et al., 2021; Kuroda et al., 2022)。海洋熱波や赤潮を経験した厚岸町周辺の岩礁潮間帯生物群集の 2024 年の回復の状況を調べることは、海洋生物の回復力の理解や、今後再び海洋熱波や赤潮が発生した場合の応答の予測にも役立つと考えられる。

岩礁潮間帯には岩に固着して動かないフクロフノリなどの海藻やフジツボなどの動物といった固着生物と、岩上を移動する貝類やヒトデといった底生動物が生息しており、これらには食用として重要な種も含まれている (e.g., Nakaoka et al., 2006)。固着生物と底生動物では現存量 (生物の数) の定量方法が異なるため、本研究では固着生物群集と底生動物群集それぞれで回復を評価する。また、回復を評価する指標には、総現存量 (生物の数の合計) と種組成 (例えば、フジツボからフノリに置き換わる等の情報を含む指標) の側面があり (Hillebrand et al., 2018; White et al., 2020; Polazzo et al., 2023)、総現存量が回復していた場合でも種組成が回復していない状態やその逆の状況も考えられる (e.g., Ishida et al., 2024) ため、総現存量と種組成の両方の側面で回復を評価する。

本研究では、厚岸町周辺の固着生物群集と底生動物群集を対象に、2024 年の総現存量と種組成は (1) 2021 年の海洋熱波と赤潮の発生前の状態まで回復しているのか? と (2) 2010～2016 年の海洋熱波発生前の状態まで回復しているのか?を調べることで回復の状況や群集間の応答の違いを検証する。

方法

・野外調査

厚岸町周辺の 5 海岸 (厚岸町愛冠、厚岸町末広、厚岸町門静、釧路町入境学、浜中町藻散布) のそれぞれから無作為に選んだ 4~5 岩礁 (計 23 岩礁) で野外調査を行った (図 1)。各岩礁の縦 100cm (平均潮位から上 50cm、下 50cm の範囲)、横 50cm に調査区画を設置し、その区画内に出現する全生物とその現存量を記録する。海藻とフジツボ等の固着生物は 200 穴の点格子板を用いて点の中の生物が観察された数を現存量とし、巻貝やカサガイなどの底生動物は調査区画内の個体数を現存量として算出する。

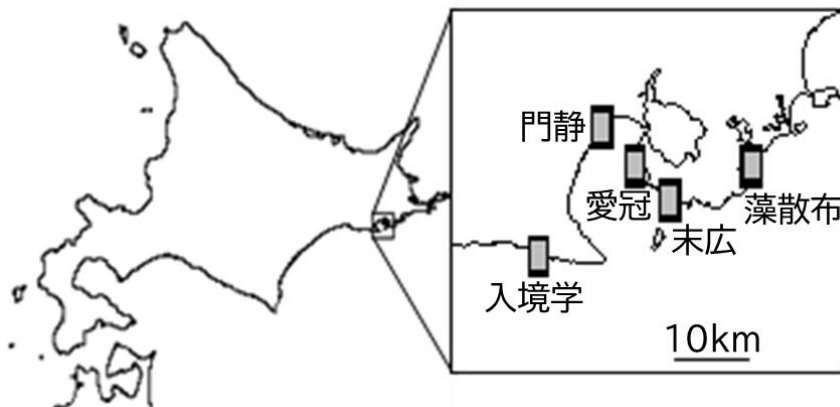


図 1. 本研究で調査を行った海岸。

・データ解析

調査地域では 2004 年から継続調査が行われているため、(1) 2021 年の海洋熱波と赤潮の発生前の状態まで回復しているのか? は今回の調査 (2024 年) と 2017~2020 年の赤潮前の期間を比較して評価する。(2) 2010~2016 年の海洋熱波発生前の状態まで回復しているのか? は今回の調査 (2024 年) と 2004~2009 年の海洋熱波発生前を比較して評価する。

総現存量の回復は効果量 (Noda et al., 2017; Ishida et al., 2023, 2024) という以下の式を用いて算出する。

$$\text{総現存量の回復} = \frac{\text{2024 年の総現存量} - \text{海洋熱波発生前の総現存量の平均}}{\text{海洋熱波発生前の総現存量の標準偏差}}$$

ここで、海洋熱波発生前の総現存量は (1) 2021 年の海洋熱波と赤潮の発生前の状態まで回復しているのか? の場合は 2017~2020 年の総現存量を参照し、(2) 2010~2016 年の海洋熱波発生前の状態まで回復しているのか? では 2004~2009 年の総現存量を参照する。効果量の値は絶対値 1.96 を上回らないと回復したと判断し、+1.96 を上回った場合は増加、-1.96 を下回った場合は減少と判断することができる (Noda et al., 2017; Ishida et al., 2023, 2024)。

種組成の回復は以下の式を用いて算出する。

$$\text{種組成の回復} = \min \left(1, 2 \times \frac{1}{1 + \left(\frac{\frac{1}{t} \times \sum_{i=1}^{i=t} d(y, x_i)^2 - \frac{1}{2} \times \left(\frac{\sum_{i=1}^{t-1} \sum_{j=i+1}^t d(x_i, x_j)^2}{t \times (t-1)} \right)}{\left(\frac{\sum_{i=1}^{t-1} \sum_{j=i+1}^t d(x_i, x_j)^2}{t \times (t-1)} \right)} \right)^{1/(m-1)}} \right)$$

ここで、 t は海洋熱波または赤潮発生前の時系列 (2017～2020 年または 2004～2009 年)、 d は群集の状態間の Bray-curtis 距離、 y は 2024 年の群集の状態、 x は海洋熱波または赤潮発生前 (2017～2020 年または 2004～2009 年) の群集の状態、 m は fuzzy 指数。この式で求めた値が 0.5 以上は回復したと判断し、0.5 より低いと不十分な回復と判断する。

結果

- ・ (1) 2021 年の海洋熱波と赤潮の発生前の状態まで回復しているのか?

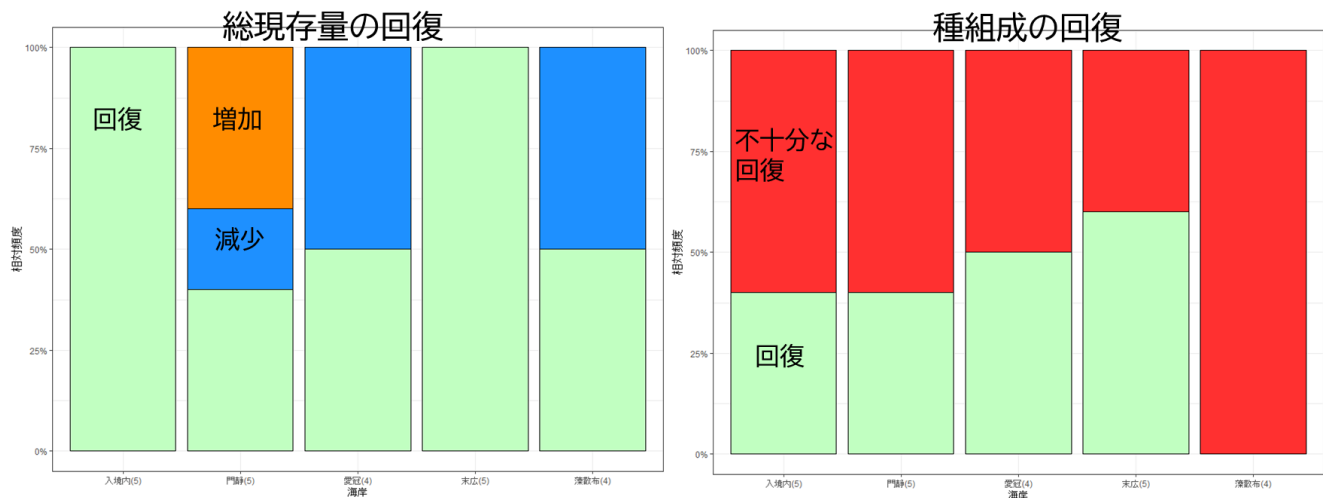


図 2. 固着生物群集の 2021 年の海洋熱波と赤潮の発生前の状態までの回復状況。x 軸は海岸で、()内は岩礁の数を、y 軸は回復した岩礁の相対頻度を表す。

総現存量では入境内と末広で回復している岩礁の割合が高かった。種組成は総現存量と比較すると低い回復を示し、藻散布で回復している割合は低かった。本調査地では、海洋熱波によって底生動物群集が減少した際に、海藻が増加したことが報告されている (Ishida et al., 2023)。そのため、底生動物群集が回復して固着生物をより多く食べるようになったことが回復していない岩礁では減少の割合が多い理由の 1 つであるかもしれない。

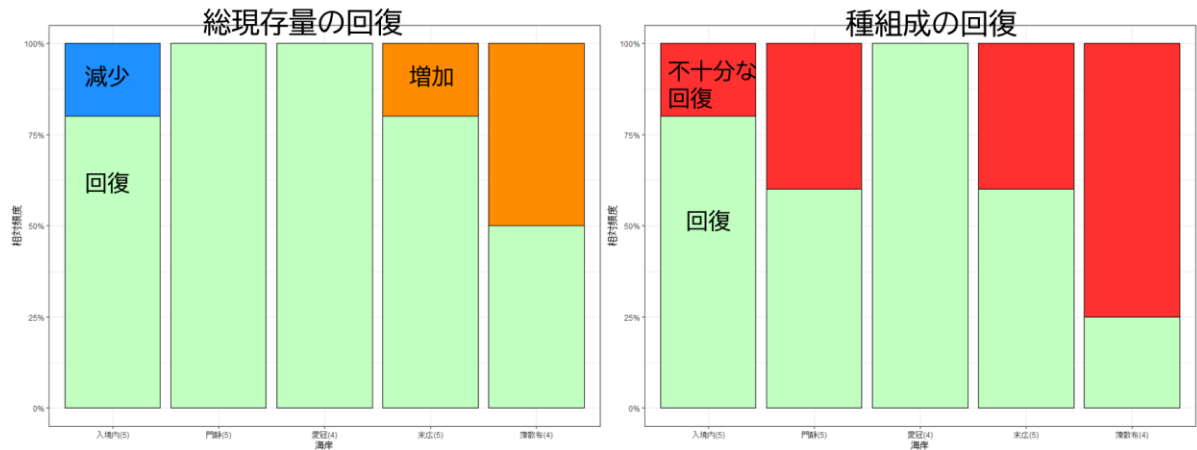


図 3. 底生動物群集の 2021 年の海洋熱波と赤潮の発生前の状態までの回復状況。x 軸は海岸で、()内は岩礁の数を、y 軸は回復した岩礁の相対頻度を表す。

総現存量では門静と愛冠で回復している岩礁の割合が高かった。種組成は総現存量と比較的似た回復の傾向を示し、愛冠で回復している割合が高かった。回復していない岩礁では増加の割合が多い理由として、比較的冷水種から構成されている底生動物群集の 2021 年の赤潮発生前の期間 (2017～2020 年) は底生動物群集が減少傾向にあったためと考えられる。実際に、2010～2016 年の海洋熱波後の 2017 と 2018 年は十分に海洋熱波から回復できていなかった (Ishida et al., 2023, 2024) ことが示唆されており、2019、2020 年は再び海水温が上昇していた (Miyama et al., 2021b)。

・ (2) 2010～2016 年の海洋熱波発生前の状態まで回復しているのか?

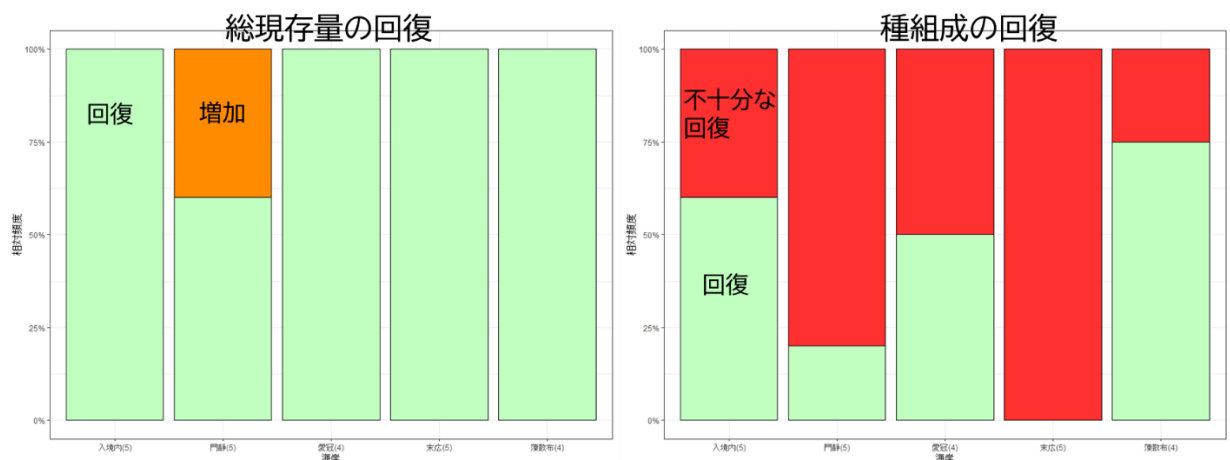


図 4. 固着生物群集の 2010～2016 年の海洋熱波発生前の状態までの回復状況。x 軸は海岸で、()内は岩礁の数を、y 軸は回復した岩礁の相対頻度を表す。

総現存量では全体として、回復している岩礁の割合が高く、2021 年の赤潮発生前の状態よりも 2010 年以前の状態と比較した方が回復の割合が高かった。これは、2017 と 2018 年は十分に海洋熱波発生前の状態に戻っていないこと (Ishida et al., 2023, 2024) および、2019、2020 年は再び水温が上昇していた (Miyama et al., 2021b) ことによって 2021 年の赤潮発生前の期間では十分に回復できていなかったためと推測される。種組成は総現存量と比較すると低い回復を示し、末広で回復している割合は低かった。種組成で回復の割合が低い理由として、海藻は比較的暖水種の割合が高い (Ishida et al., 2023) ため、近年の海水温の上昇傾向によってより暖水の種に置き換わっている可能性がある。

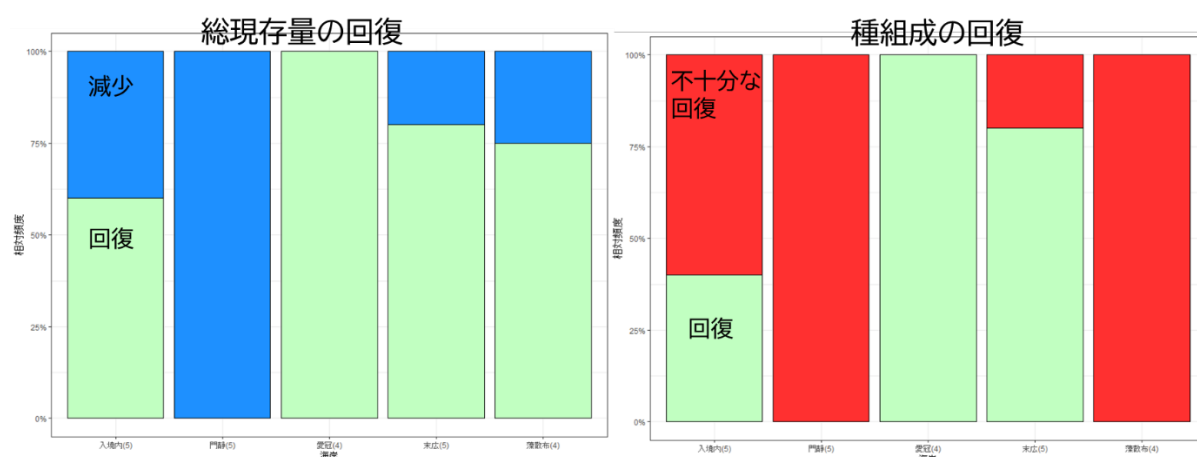


図 5. 底生動物群集の 2010～2016 年の海洋熱波発生前の状態までの回復状況。x 軸は海岸で、()内は岩礁の数を、y 軸は回復した岩礁の相対頻度を表す。

総現存量では愛冠で回復している岩礁の割合が高かった。

種組成は総現存量と比較的似た回復の傾向を示し、愛冠で回復している割合が高かった。

2010 年以前では回復していない岩礁の割合が多い理由として、比較的冷水種から構成されている底生動物群集 (Ishida et al., 2023) は近年の海水温の上昇傾向によって総現存量が減少し、一部の暖水種に種組成が置き換わっている可能性がある。

考察

2021 年の海洋熱波と赤潮の発生前の状態までの回復と 2010～2016 年の海洋熱波発生前の状態までの回復状況を比較したところ、固着生物群集の総現存量では回復傾向にある一方で、底生動物群集では回復の傾向は見られなかったことが明らかになった。固着生物群集と

底生動物群集の回復の状況は異なっていたが、どちらも群集を構成する暖水種や冷水種の割合によって海洋熱波に対する応答の解釈ができた。そのため、今後海水温の上昇によって冷水種が全て暖水種に置き換わる等が起こらなければ、暖水種や冷水種に注目することで、海水温の上昇に対する厚岸町周辺の岩礁潮間帯生物群集の応答の予測に役立つと考えられる。例えば、今後も海水温が上昇し続けた場合に、固着生物群集では総現存量は増加するまたは変化しないが、種組成は変化するという推測ができ、底生動物群集では総現存量は減少し、種組成も変化すると予想される。

赤潮の影響についてはほとんど考察することができなかった。その理由は、海洋熱波の後には赤潮が発生したため、赤潮単独の影響を分離することが困難であることおよび、大量発生した渦鞭毛藻類が生物に及ぼす影響の知見が少ないためである。赤潮の発生は海水温の上昇と関係している (León-Muñoz et al., 2018; Vandersea et al., 2018; Roberts et al., 2019; Bondur et al., 2021) ため、実験等による渦鞭毛藻類の影響を調べた報告から考察することが必要となるだろう。

海洋熱波は今後も増加すると予測されている (Frölicher et al., 2018; Oliver et al., 2019) ため、将来の岩礁潮間帯生物群集の応答や冷水種から暖水種への置き換え状況の把握のために厚岸町周辺の岩礁潮間帯生物群集の調査を継続することは重要であると考えられる。

引用文献

- Bondur V, Zamshin V, Chvertkova O, Matrosova E, Khodaeva V. Detection and analysis of the causes of intensive harmful algal bloom in Kamchatka based on satellite data. *J Mar Sci Eng*. 2021; 9: 1092. <https://doi.org/10.3390/jmse9101092>
- Frölicher TL, Fischer EM, Gruber N. Marine heatwaves under global warming. *Nature*. 2018; 560: 360–364. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0383-9>
- Hillebrand H, Langenheder S, Lebrecht K, Lindström E, Östman Ö, Striebel M. Decomposing multiple dimensions of stability in global change experiments. *Ecology letters*. 2018; 21: 21-30. <https://doi.org/10.1111/ele.12867>
- Hobday AJ, Alexander LV, Perkins SE, Smale DA, Straub SC, Oliver ECJ et al. A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Prog Oceanogr*. 2016; 141: 227–238. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.12.014>

Hobday AJ, Oliver EC, Gupta AS, Benthuisen JA, Burrows MT, Donat MG et al. Categorizing and naming marine heatwaves. *Oceanography*. 2018; 31: 162–173.

<https://doi.org/10.5670/oceanog.2018.205>

Ishida K, Tachibana M, Yao Y, Wada Y, Noda T. The impact of marine heatwaves on rocky intertidal communities: evidence of accumulative carryover effects of marine heatwaves. *Front Mar Sci*. 2023; 10: 1146148. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1146148>

Ishida K, Kanamori Y, Yao Y, Wada Y, Noda T. Assessing the impact of successive marine heat waves on the diversity of rocky intertidal communities. Available at SSRN:

<https://ssrn.com/abstract=5025798> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5025798>

Kuroda H, Azumaya T, Setou T, Hasegawa N. Unprecedented outbreak of harmful algae in Pacific coastal waters off southeast Hokkaido, Japan, during late summer 2021 after record-breaking marine heatwaves. *J Mar Sci Eng*. 2021; 9: 1335. <https://doi.org/10.3390/jmse9121335>

Kuroda H, Setou T. Extensive marine heatwaves at the sea surface in the northwestern Pacific Ocean in summer 2021. *Remote Sensing*. 2021; 13: 3989. <https://doi.org/10.3390/rs13193989>

Kuroda H, Taniuchi Y, Watanabe T, Azumaya T, Hasegawa N. Distribution of harmful algae (*Karenia* spp.) in October 2021 off southeast Hokkaido, Japan. *Front Mar Sci*. 2022; 9: 841364. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.841364>

León-Muñoz J, Urbina, MA, Garreaud, R, Iriarte, JL. Hydroclimatic conditions trigger record harmful algal bloom in western Patagonia (summer 2016). *Sci Rep*. 2018; 8: 1330.

<https://doi.org/10.1038/s41598-018-19461-4>

Miyama T, Minobe S, Goto H. Marine Heatwave of Sea Surface Temperature of the Oyashio Region in Summer in 2010–2016. *Front Mar Sci*. 2021a; 7: 576240.

<https://doi.org/10.3389/fmars.2020.576240>

Miyama T, Minobe S, Goto H. Frequent Marine Heat Waves Off the Coast of Hokkaido and Tohoku Revealed: Relationship between Marine Heat Waves and Yellowtail Catches. 2021b [cited 2024 August 23]. Available from: https://www.hokudai.ac.jp/news/pdf/210114_pr4.pdf.

- Nakaoka M, Ito N, Yamamoto T, Okuda T, Noda T. Similarity of rocky intertidal assemblages along the Pacific coast of Japan: effects of spatial scales and geographic distance. *Ecol Res.* 2006; 21: 425-435. <https://doi.org/10.1007/s11284-005-0138-6>
- Noda T, Sakaguchi M, Iwasaki A., Fukaya K. Influence of the 2011 Tohoku Earthquake on population dynamics of a rocky intertidal barnacle: cause and consequence of alteration in larval recruitment. *Coast Mar Sci.* 2017; 40: 35–43. <https://doi.org/10.15083/00074033>
- Oliver EC, Burrows, MT, Donat MG, Sen Gupta A, Alexander LV, Perkins-Kirkpatrick SE et al.. Projected marine heatwaves in the 21st century and the potential for ecological impact. *Front Mar Sci.* 2019; 6: 734. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00734>
- Polazzo F, Hermann M, Crettaz-Minaglia, M, Rico A. Impacts of extreme climatic events on trophic network complexity and multidimensional stability. *Ecology.* 2023; 104: e3951. <https://doi.org/10.1002/ecy.3951>
- Roberts SD, Van Ruth, PD, Wilkinson C, Bastianello, SS, Bansemer, MS. Marine heatwave, harmful algae blooms and an extensive fish kill event during 2013 in South Australia. *Front Mar Sci.* 2019; 6: 610. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00610>
- Vandersea MW, Kibler SR, Tester PA, Holderied K, Hondolero DE, Powell K., et al. Environmental factors influencing the distribution and abundance of *Alexandrium catenella* in Kachemak Bay and lower Cook Inlet, Alaska. *Harmful Algae.* 2018; 77: 81–92. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2018.06.008>
- White L, O'Connor NE, Yang Q, Emmerson MC, Donohue I. Individual species provide multifaceted contributions to the stability of ecosystems. *Nat Ecol Evol.* 2020; 4: 1594-1601. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-01315-w>