

和歌山以南の温帯域が準絶滅危惧種のサンゴの 避難場所として機能する？ 温帯サンゴの遺伝的多様性評価の結果から

安田 仁奈¹⁾・井口 亮²⁾・山北 剛久³⁾・中村 隆志⁴⁾

*本稿は 2019 年 2 月に、産業技術総合研究所、宮崎大学、東京工業大学、海洋研究開発機構が共同で行ったプレス発表および DNA 多型 Vol.27 (印刷中) を修正・加筆したものです。

1. はじめに

世界の海洋生物多様性の約 30% が集中するサンゴ礁生態系は、様々な人為的要因により壊滅の一途を辿っています。世界的にみても、2010 年 10 月に開催された生物多様性条約第 10 回締結国会議 (CBD・COP10) で愛知目標が提示されました。愛知目標とは地球規模で劣化が進んでいるとされる、生物多様性の損失を減少させるために設定された「2010 年目標」に代わり、生物多様性条約第 10 回締結国会議 (COP10) で合意された 20 項目の目標で 2011 年以降の戦略計画で、人類が自然と共生する世界を 2050 年までに実現することを目指しています (環境省, 2010)。

これに対し、生物多様性国家戦略 (環境省, 2012) では、気候変動に対して脆弱なサンゴ礁生態系などの重要海域を管理・保全してネットワーク化することが目標として掲げられており、保全の重要性が注目されています。ここでいうネットワーク化というのは、海洋生物に多く見られるような生活史初期の幼生分散による海域間移動 (ネットワーク) のことです。こうした幼生分散ネットワークを踏まえた上で、気候変動後も多様性を保持していけるような海洋保護区の設定が国際的な急務となっています。

このような中、有藻性イシサンゴ類 (以下、サンゴ) の分布の最北限に位置する日本沿岸では、近年の温暖化に伴い、沿岸生態系における海洋生物の北上が報告されています。特にサンゴ礁生物の北上は、文献・現地調査で 2011 年に明らかになって以来この数年で急速に知見を増やしています (Yamano *et al.* 2011)。北上が確認されたサンゴ種はどれも熱帯・亜熱帯域で世界規模の高水温による白化が原因で絶滅危惧種に登録されているという点がポイントで

す。これは、比較的低水温が保たれる高緯度海域はサンゴ礁生物のいわば逃げ場として機能している可能性を意味します。その一方、生物の分布境界に位置する集団は、低い遺伝的多様性を持つなど、環境変化に脆弱な可能性もあります。今後の沿岸生態系保全を考える際には、北上による分布拡大が予想される温帯域のサンゴ群集も含めた総括的な幼生分散ネットワーク解明と遺伝的多様性評価に基づく環境変化への脆弱性を明らかにする必要があります。遺伝的多様性というのは、生物多様性の基盤となる同種の異なる個体ごとにもつ遺伝子のバリエーションのことで、異なる遺伝子をもつ個体は、環境への脆弱性がそれぞれに異なります。

しかし、これまで特に温帯域を含めたサンゴ礁生物の幼生分散や北上集団の安定性の指標となる遺伝的多様性、熱帯性の遺伝子型を持つ生物の北上後の適応の可能性などに関する知見は、最も温暖化の急激に進んでいるはずの黒潮系統においてはありません。遺伝的多様性、適応の可能性、幼生分散のパターンを踏まえたサンゴ礁生物の分布拡大や北上予測に関する知見がありませんでした。さらには、造礁サンゴは普通種¹⁾や優占種²⁾であっても野外での形態識別が困難な上、隠蔽種³⁾等が普通種にも含まれることが近年次々と明らかになっており、正確な生物多様性評価のためには、そうした隠蔽系統を遺伝子解析で確かめる必要があるにも関わらず、やはり情報が欠落しているという状況でした。

2. プロジェクトの概要

そこで宮崎大学、東京工業大学、海洋研究開発機構、産業技術総合研究所を中心とするグループで、北上傾向が見

1) 宮崎大学農学部海洋生物環境学科

2) 産総研 地質調査総合センター地質情報研究部門

3) 海洋研究開発機構地球環境部門海洋生物環境影響研究センター海洋環境影響評価研究グループ

4) 東京工業大学 環境・社会理工学院 融合理工学系

キーワード：集団遺伝解析, 温暖化, マイクロサテライト, ミドリイシ, 北上, 海流モデル, 幼生分散, 遺伝的多様性

られた絶滅危惧種とされているサンゴ種および生態学的に重要であると考えられる優占種など複数種について、以下の3つを検討しました。

1) 遺伝的多様性を評価するため、適宜新規の遺伝子マーカーを作成し、亜熱帯の南西諸島から本州・九州の温帯高緯度海域における生物集団の種の境界を確認しながら、各種内における各集団の遺伝的多様性を調べる。さらに、黒潮流域の集団に対し、自然選択に対して中立な遺伝子マーカーを用いた遺伝子流動解析を行い、北上に関わる幼生分散の実態と北上する際の幼生が供給される海域を明らかにすること。

2) 空間的な環境情報に基づく種の分布適地推定を現在、将来に渡って実施すること。同時に、海水流動解析も含めて物理的なソースシンクの関係や連結性ネットワークにおける中心性の高い重要海域を絞り込むということ(山北, 2017)。

3) これらの結果を全て統合し、分布に重要な環境要因の特定と、変遷しうる新たな沿岸生態系を考慮した海域の相対的重要性についてEBSA (Ecologically or Biologically Significant marine Area = 生態学的、生物学的に重要な海域)の基準に照らし合わせながら提示することを試みました。さらには、現状の保護区とサンゴ海域のカバー率のgap解析を行い、保護区が不足している海域を提示する。

これらの情報に基づいて、生物多様性条約第10回締結国会議で愛知目標として掲げられた、既知の絶滅危惧種の

絶滅を防止すること、また、新たに海洋保護区を設定する際に重要となる科学的知見を提示することを目標としたプロジェクトを行いました。

3. 成果の概要

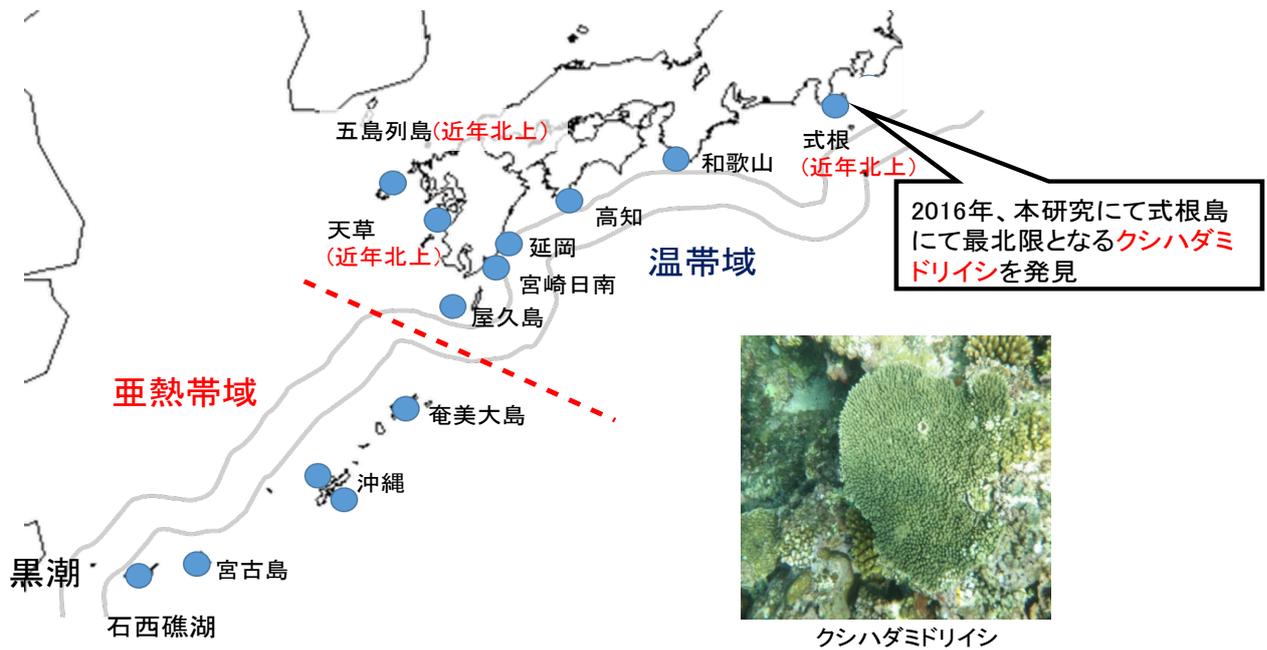
上記のプロジェクトの一部として、クシハダミドリイシ (*Acropora hyacinthus*) というサンゴについて遺伝構造と海流構造から、昔からサンゴの生息する温帯海域がクシハダミドリイシの避難所として機能するのではないか、という研究成果が得られました (Nakabayashi *et al.*, 2019)。

クシハダミドリイシは近年、温帯域の各所で増加していることが知られています(例えば写真1)。このサンゴは、80年以上前までには、九州西側では種子島までを北限とし、太平洋側も和歌山が最北限であったはずですが、過去40年以内に、九州西側では、天草、五島列島などで出現するようになりました。今回、我々の研究でサンプリングをする中で、和歌山よりも北にある伊豆諸島のひとつ、式根島で調査を行ったところ、クシハダミドリイシが生息していることが分かり、新たに北上した最北限集団を発見しました。

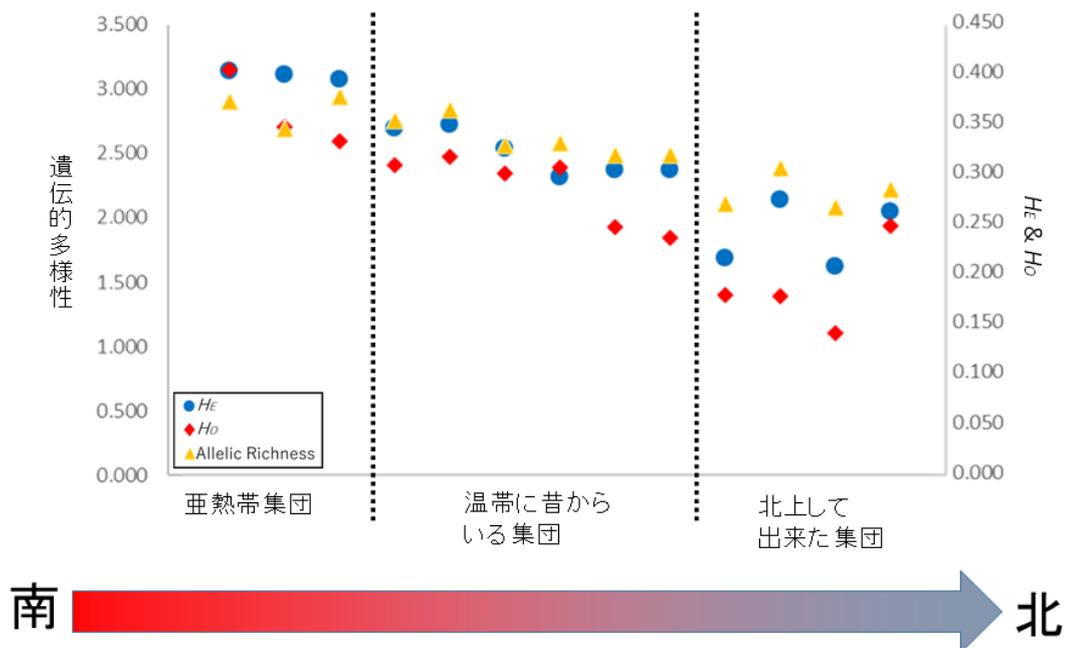
最北限の五島列島、式根、天草を含む13海域(第1図)から採集したクシハダミドリイシをマイクロサテライト遺伝子座と呼ばれる、核遺伝子の中でも多型性の非常に高い遺伝子マーカーを用いて、亜熱帯域と温帯域で集団遺伝解



写真1 20-30年前には海藻類が繁っていた場所が今は様々な種のサンゴで覆われている(宮崎県串間市)。左右の茶色のものがクシハダミドリイシ。撮影：グリートダイバーズ 福田道喜氏



第1図 クシハダミドリイシのサンプリング地点とクシハダミドリイシの写真。青丸がサンプリング地点。赤点線で記された海域付近で温帯域と亜熱帯域に分かれており、この赤点線を越える亜熱帯から温帯への海流による直接の幼生分散はやや制限される。灰色線は黒潮の流れを示す。



第2図 クシハダミドリイシにおける遺伝的多様性。もともと亜熱帯域や温帯域に生息するサンゴ集団は遺伝的多様性が高い。近年、北上したサンゴ集団は遺伝的多様性が低い。アリル多様度⁴ (Allelic Richness) やヘテロ接合度⁵ (H_E & H_O) は集団の遺伝的多様性の指標のひとつ。

析を行い、それぞれの集団の遺伝的多様性を調べました。その次に、海水流動モデルを用いた幼生分散シミュレーションにより、日本の亜熱帯域から温帯域にかけての幼生分散の過程を明らかにしました。

集団遺伝解析の結果、クシハダミドリイシでは、近年北上して新たに出現したような最北限の海域に近づくほど遺伝的多様性の低下がみられ(第2図)、環境変化が起きた際の地域絶滅のリスクが高いことを明らかにしました。一方、昔から温帯域に生息するクシハダミドリイシの集団では比較的高い遺伝的多様性を持っており、環境変化による地域絶滅のリスクが相対的に低いことが分かりました(第2図)。これらのことから、最北限で増えているサンゴの遺伝的多様性は低いため、環境変化によって絶滅するリスクもあり、避難場所として期待するにはあまり適さないと考えられました。一方、温帯域の中でも昔からサンゴがいる海域は、比較的高い遺伝的多様性を維持しており環境変化への脆弱性が最北限のものほど低くはないため、サンゴの避難場所として機能し得ると考えられました。

また、海水流動モデルを用いた幼生分散シミュレーションの結果として、亜熱帯域から温帯域へのサンゴ幼生の直接の分散が1世代で起きることは稀で、複数世代かかることが分かりました。特に、ちょうど黒潮が蛇行する種子島・屋久島を境にして、南北の幼生分散が少なくなってしまう黒潮バリアの存在が明らかになりました。そのため、水温が上がれば全てのサンゴ種が亜熱帯域から温帯域に簡単に移住できるわけではなく、亜熱帯域のサンゴの保全も依然として重要であることも分かりました。

今後はさらに、様々なサンゴおよびサンゴ群集生態系に生息する種についても同様に最北限集団を含む様々な海域の遺伝子解析を行い、気候変動にともなう生物集団の保全を検討する予定です。

脚注

- 1 普通種: サンゴが多く見られる場所に一般的に見られる種
- 2 優占種: ある地域において最も高い被度で見られる種
- 3 隠蔽種: 見かけ上よく似ているが遺伝的に異なる種
- 4 アリル多様度: 対立遺伝子の豊富さの指標
- 5 ヘテロ接合度: ホモではない組み合わせの指標

文 献

- Nakabayashi, A., Yamakita, T., Nakamura, T., Aizawa, H., Kitano, Y.F., Iguchi, A., Yamano, H., Nagai, S., Agostini S., Teshima, K.M. and Yasuda N. (2019) The potential role of temperate Japanese regions as refugia for the coral *Acropora hyacinthus* in the face of climate change. *Sci. Rep.*, no. 9, Article number: 1892. doi:10.1038/s41598-018-38333-5
- 環境省 (2010) 「生物多様性条約第 10 回締約国会議」の開催について (結果概要). <https://www.env.go.jp/press/files/jp/16459.pdf> (2019 年 10 月 8 日参照)
- 環境省 (2012) 「生物多様性国家戦略 2012-2020」の閣議決定について (お知らせ). <http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=15758> (2019 年 10 月 8 日参照)
- 山北剛久 (2017) アジアの海洋生物多様性 評価, 海の生態系サービス評価の現状. 農村計画学会誌, no. 36 (1), 25-28.
- Yamano, H., Sugihara, K. and Nomura, K. (2011) Rapid poleward range expansion of tropical reef corals in response to rising sea surface temperatures) *Geophys. Res. Lett.* no. 38 (4), L04601. doi:10.1029/2010GL046474

YASUDA Nina, IGUCHI Akira, YAMAKITA Takehisa and NAKAMURA Takashi (2019) Press release : The potential role of temperate Japanese regions as refugia for the coral *Acropora hyacinthus* in the face of climate change.

(受付: 2019 年 6 月 11 日)