

令和 4 年 5 月 31 日現在

機関番号：17601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K06423

研究課題名(和文) 日本の温帯域に生息する造礁サンゴの固有性と起源を探る

研究課題名(英文) The origin and endemism of the reef-building corals in the temperate region of Japan

研究代表者

深見 裕伸 (Fukami, Hironobu)

宮崎大学・農学部・教授

研究者番号：50402756

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：日本温帯域は造礁性イシサンゴ類が固有種5種を含め約150種が生息し、世界最北のサンゴ生息地である。その一方で台湾北部において日本固有種が生息している可能性も指摘されていた。そこで、本研究では、台湾と日本温帯域の交流の有無、日本固有種の新たな確認を確かめるため、日本温帯域と台湾北部のサンゴの種組成および系統分類学的を行った。その結果、台湾北部は日本温帯域とサンゴ相が極めて類似しており、さらに日本温帯固有種と考えられていた種を台湾北部で確認することができた。一方で、日本温帯域固有種も新たに発見することができた。以上のことから、台湾北部は日本温帯域のサンゴのソースである可能性が高まった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日本の温帯域のサンゴ相が実は台湾北部と非常に類似しており、さらに、これまで日本温帯固有種と考えられていた種が台湾北部で確認できたことから、台湾北部のサンゴ群集が、日本温帯域のサンゴ群集のソースとしての役割を果たしている可能性が高まった。このことは、日本温帯域のサンゴ群集を保全するには、台湾北部のサンゴ群集も同時に保全していく必要があることを示すものであり、その重要性は高い。その一方で、あらたに日本温帯域固有種も見つかったことから、未だ発見されていない固有種が存在する可能性も生じ、日本温帯域の独自性も引き続き調査が必要であることも明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：The temperate region of Japan is the northernmost coral habitat in the world, and about 150 species of reef-building corals, including five endemic species inhabit there. On the other hand, it has been pointed out that Japanese temperate endemic species may inhabit the northern part of Taiwan. In this study, we examined the species composition and phylogeny of corals in the temperate region of Japan and northern Taiwan to confirm the existence of exchange between Taiwan and the temperate region of Japan and to identify new Japanese temperate endemic species. The results showed that the coral fauna of northern Taiwan is very similar to that of the Japanese temperate region, and a few species thought to be endemic to the Japanese temperate region were identified in northern Taiwan. On the other hand, species endemic to the Japanese temperate region were also newly discovered. These results suggest that northern Taiwan may be a source of several corals from the Japanese temperate region.

研究分野：分類学

キーワード：サンゴ 分類 系統 生物地理

1. 研究開始当初の背景

黒潮流域にある日本の温帯域(種子島~千葉周辺:北緯30~35度)では、沖縄で見られるようなサンゴ礁地形は形成されないものの、温暖な海流の影響により造礁性イシサンゴ類(以下、造礁サンゴ)が多く生息している。この温帯域の造礁サンゴを基盤とする生態系を「サンゴ群集生態系」とよび、サンゴ礁生態系と同様に種多様性の高い場所となっている。特に、宮崎、高知、和歌山などでは大規模なサンゴ群集が知られており、観光および水産資源の提供の場としての役割も果たしている。その一方で、近年の海水温上昇により、造礁サンゴにおいても熱帯・亜熱帯に特化していた種が温帯域へと分布域を拡大し()、温帯固有種の地域的衰退及び絶滅も示唆され始めている()。そのため世界的に貴重な日本温帯域の生物相を維持するためには温帯域のサンゴ相の把握とそれらがどのように成り立ってきたかを早急に明らかにする必要がある。

日本温帯域のサンゴ群集では、造礁サンゴが12科45属約150種と、日本に分布する種の1/3以上の種が報告されている()。その多くは熱帯・亜熱帯域にまで広く分布している「広域分布種」とされており、沖縄など南西諸島以南から幼生が黒潮によって流されてきたものと長い間考えられてきた。しかしながら、これまでの研究により、広域分布種と考えられてきた種のうち温帯域に生息している3種は、熱帯・亜熱帯域の種(南方型)とは遺伝的に異なり(深見ら未発表)、わずかながら形態的な差異もみられることから隠蔽種(以下、「温帯型隠蔽種」)であると認識されている()。これら3種のうちタカクキクメイシでは、日本温帯域に南方型と温帯型隠蔽種の両方が同所的に生息していることも分かってきている()。さらに、これまでの申請者の調査から、温帯型隠蔽種の候補が20種以上見つかっており、数種については日本固有種である可能性もある。

日本固有種は、日本温帯域でのみ知られており、現在までに5種(ヒメエダミドリイシ・ニホンミドリイシ・ニホンアワサンゴ・ミダレカメノコキクメイシ・ハナサンゴモドキ)が知られている。種子島固有種ハナサンゴモドキ以外の4種は日本温帯域で広範囲にみられるが、奄美大島以南の熱帯・亜熱帯域ではこれまで確認されておらず、生息していないと考えられてきた。しかし、近年の台湾での調査の結果、台湾北部において日本固有種とみられる2種が生息しているのを発見した。そのため、日本固有種とされていた造礁サンゴは、南西諸島を経ずに台湾から日本温帯域に直接移入してきている、もしくは過去に移入してきた生き残りではないかという仮説を立てるに至った。

2. 研究の目的

本研究では、亜熱帯性の種の分布域拡大に伴って生息域衰退の危機に瀕している日本の温帯性のサンゴ種の実態解明のために、日本温帯域の種が何種存在し、いつ、どこから、どの様にして今ある場所に存在するのに至ったのかを推定することを目的とする。そのためにまずは、広域分布種と考えられてきた種の中に温帯型の隠蔽種がどの程度含まれているのかを明確にする。また、日本温帯域および台湾に共通して見られる種(日本固有種、温帯型隠蔽種)について、台湾から日本温帯域に直接移入してきているのか、もしくは過去に移入してきた生き残りであるのかという仮説の検証を行う。これらにより、台湾と日本温帯域の直接的な移入の程度を明らかにするとともに、真の日本固有の温帯種の存在についても突き止める。

3. 研究の方法

採集と同定

本研究では、「日本固有種」を発見した台湾の北部(鼻頭)さらに台湾内の比較として台湾の南部、および日本温帯域の拠点として宮崎県の北部(延岡市)と南部(日南市)を調査地とした。また比較地域としては、亜熱帯性の種の分布北限域である喜界島および沖縄とした。これらの地点において、造礁サンゴの日本固有種候補種および温帯隠蔽種候補であるミドリイシ科ミドリイシ属およびサザナミサンゴ科(特に日本温帯域と台湾北部で優占していたパリカメクメイシ属、ウネカメノコキクメイシ属、トゲキクメイシ属の3属)の採集を行った。さらに、宮崎県日南市では大群落を構成し日本温帯固有種候補であったソフトコーラルのウミアザミ属についても調査を行った。

採集後、試料は分子系統解析および形態解析に用いた。加えて、サンゴ生息地の水温の季節変化の比較のため、日本温帯域の宮崎2地点、台湾2地点に水温ロガー(5mおよび15m)を設置した。

分子系統解析

分子系統解析については、地域間の差異や隠蔽種探索に用いられているミトコンドリアの非翻訳領域と核リボソームRNA遺伝子のITS領域の塩基配列を用いた(以下では、ミトコンドリア非翻訳領域のデータのみを示す)。得られた塩基配列をもとにソフトウェアのMEGAver10を使用し、最尤法を用いて分子系統樹を作成した。加えて、サザナミサンゴ科のトゲキクメイシ属については台湾と日本温帯間で集団遺伝学的手法(Mig-seq法)を用いて遺伝的交流の程度を推定し

た。

形態解析

造礁性サンゴについては、試料を漂白し骨格標本にし、個体ごとの形質(個体サイズ(莖径)、隔壁数、杭状葉数、鋸歯数、鋸歯の形状等)の観察をデジタル顕微鏡を用いて行った。ソフトコーラルについては生体の個体の形態的特徴および骨片の形態特徴を同様に観察した。骨片の観察のみ電子顕微鏡を用いた。また、形態解析にはRパッケージ devtools と ggplot2 を用いて、主成分分析(PCA)で比較した。

4. 研究成果

水温は、一年を通して宮崎県延岡で 16 ~ 29、宮崎県日南市で 17 ~ 29、台湾北部で 18 ~ 28 とさほど変わらないことが明らかとなった。

台湾北部の鼻頭周辺では、種数は約 30 種とさほど多くはなかったものの、日本温帯域に固有と考えられているニホンミドリイシ(1 群体)とミダレカメノコキクメイシ(10 群体以上)を確認することができた。一方、台湾南部では日本固有種と考えられている種は確認できなかった。また、台湾北部では日本温帯域で優占している広域分布種のパリカメノコキクメイシ、トゲキクメイシ属、イボサンゴ属が多くみられた。

(1) ミダレカメノコキクメイシ(*Paragoniastrea deformis*)の比較

台湾北部と日本温帯域のミダレカメノコキクメイシの分子系統関係の比較を行ったところ、ミダレカメノコキクメイシが 2 系統(clade I と clade II)に明確に区別することが明らかとなり(図 1)、さらに、両方の系統に日本温帯域と台湾北部のサンプルが含まれていた。形態を詳細に調べたところ、一つの系統は典型的なミダレカメノコキクメイシの特徴である個体間の溝が発達していたが(図 2A)、もう一方の系統ではこの個体間の溝の発達が非常に弱く、溝が無いサンプルも見られた(図 2B)。ただし、それ以外の形態的差異は見つけれなかった。一方、台湾北部と日本温帯域のサンプル間で遺伝的な違いは見られなかった。以上のことから、台湾北部のサンプルがミダレカメノコキクメイシであることが明らかとなったものの、隠蔽種が両地域に生息することも判明した。ただし、これら両種は沖縄や奄美諸島では発見されなかったため、台湾からの移入を強く示唆するものであった。

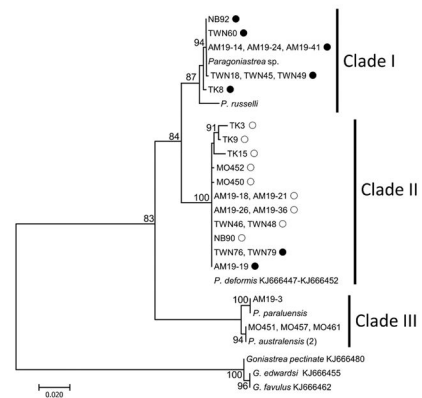


図 1. ミトコンドリア非翻訳領域を用いたミダレカメノコキクメイシの分子系統関係。ミダレカメノコキクメイシは clade I と clade II。Clade III は同属他種。TWN が台湾北部サンプル、他は日本温帯域。○は溝あり、●は溝なし。

(2) パリカメノコキクメイシ(*Coelastraea aspera*)の比較

日本の沖縄などの亜熱帯域から日本温帯域にかけて広く分布する広域分布種であるパリカメノコキクメイシについても台湾と日本での分子系統関係の比較を行った。特に、日本では沖縄と日本温帯域で産卵様式が異なることが知られており、日本温帯域のパリカメノコキクメイシが隠蔽種である可能性もあったため比較を行った。分子系統解析および形態解析の結果として、パリカメノコキクメイシには別種が含まれていることが判明し(図 3)、日本温帯域に生息している集団が別種(ヒュウガパリカメノコキクメイシ)となった(図 3 clade B)。ただし、この別種は沖縄および台湾でも生息していることが明らかとなった。その一方で、真のパリカメノコキクメイシは沖縄を中心とした日本亜熱帯域にのみ生息していることも判明した(図 3 clade A)。さらに、今回名前がつかなかったものの、もう 1 種の隠蔽種がいることも明らかとなった(図 3 clade C の M0321)。

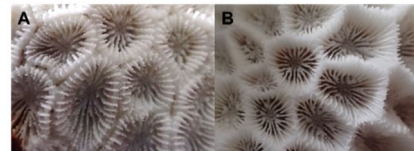


図 2. ミダレカメノコキクメイシ。台湾北部産の溝ありの群体の骨格(A)、日本温帯域産の溝なしの群体の骨格(B)。

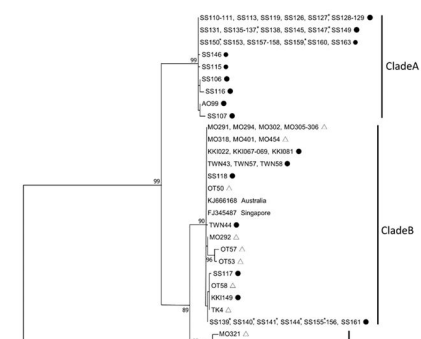


図 3. ミトコンドリア非翻訳領域を用いたパリカメノコキクメイシの分子系統関係。パリカメノコキクメイシ: clade A、ヒュウガパリカメノコキクメイシ: clade B、隠蔽種: clade C。TWN が台湾北部、他は日本産。●は奄美諸島以南、○は種子島以北。

ただし、この隠蔽種は 1 群体のみであり、さらに他属のキクメイシ属(*Dipsastraea*)と同じクレードになったため、別属の可能性もある。

真のパリカメノコキクメイシとヒュウガパリカメノコキクメイシの 2 種については骨格形態でも明確な違いが

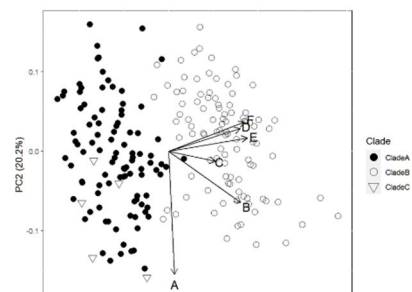


図 4. PCA の結果。Clade は図 3 を参照。成分は A: 最大莖径 B: 総隔壁数 C: 杭状葉数 D: 周長あたりの総隔壁数 E: 鋸歯数 F: 鋸歯の形

見られた(図4)。特に隔壁数、杭状葉数、鋸歯数、鋸歯の形態で違いが見つかった。

以上のことから、これまで広域分布種と考えられていたパリカメノコキクメイシには2種以上含まれることが判明した。さらに真のパリカメノコキクメイシが沖縄周辺の限定海域でのみ生息している可能性が出てきた一方で、ヒュウガパリカメノコキクメイシは台湾、沖縄、日本温帯域と広域分布種であることが判明した。

(3) トゲキクメイシ属の比較

トゲキクメイシ属の種については、日本周辺に広く分布しているが、種の境界が曖昧であった。そのため、種を確定せず、調査で見つけた群体をランダムに採集し(全120サンプル)分子系統解析を行った。形態をもとにした種同定の結果、日本温帯域で5種、台湾北部で4種を確認し、日本亜熱帯域では、温帯域と台湾北部で確認できた4種を含む9種を確認することができた。分子系統解析の結果、遺伝的には大きく4つのクレード(I~IV)に区別することが判明し、4クレードの内2クレード(IIとIV)については、各クレードにこれまで日本で報告されていない種が含まれ、それぞれ単独のクレードとして他のクレードから区別することができた。ただし、この2種については日本の亜熱帯域でのみ確認でき、台湾では見つけることができなかった。一方、残りの2クレード(IとIII)については、形態形質を用いた同定では、それぞれのクレードで4種以上が混在しており、台湾のサンプルを含め、日本の温帯域および亜熱帯域のサンプルも含まれた。さらに、遺伝的に地域間および種間での遺伝的な区別もできなかった。これらの結果はMig-seqによる集団解析でも同様の結果となった。そのため、クレードIとIIIに含まれた種については、形態的には異なる種であるが、同種である可能性も捨てきれず、より詳細な形態的な解析をする必要があることが分かってきた。

(4) 日本温帯域のソフトコーラルのウミアザミ属(*Xenia*)について

宮崎県日南市は温帯域では珍しくソフトコーラルの大群落がみられる。特に、ウミアザミ属が優占しており、事前調査では未記載種がいると推察されている()。また、これらが日本温帯固有種である可能性もあるため、その実態を調査した。分子系統解析および形態解析の結果、遺伝的に同属他種とは明確に区別でき、独自の骨片を持っている(図5)ことから新種(*Xenia konohana* コノハナウミアザミと命名)であることが判明した()。また、日本の亜熱帯域である沖縄や奄美諸島、さらには他の日本温帯域でも本種を見つけることができず、現状では宮崎県日南市でしか確認できないことが判明し、日本温帯域の固有種であることが強く示唆された。今後、この種が台湾北部で確認できた場合に台湾から日本温帯域への生物の移入の可能性が高まると思われる。

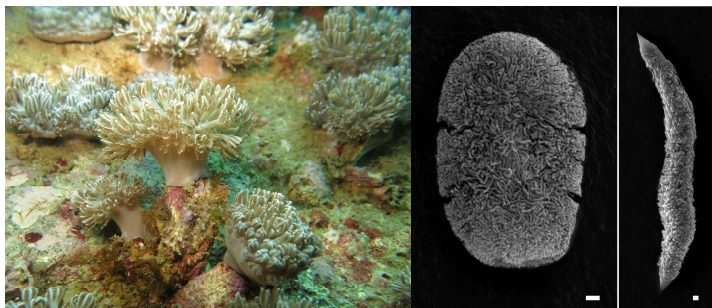


図5. コノハナウミアザミ(左)とその骨片(中央:ウミアザミ属に共通の骨片、右:本種に特異的な骨片)

まとめ

以上の結果から、本研究では日本温帯域固有種と呼ばれているもので、ニホンミドリイシおよびミダレカメノコキクメイシは台湾北部でも見つけることができ、日本温帯固有種ではないことが判明した。さらに遺伝的に違いが見られなかったことから台湾から移入している可能性が高いことを示した。また、ソフトコーラルで日本温帯域の宮崎県固有種が発見されたことから、今後台湾での調査により移入の有無が明らかになると考えられる。その一方で、今回調査した広域分布種では、温帯域で隠蔽種は見つからず、日本亜熱帯域や台湾と同じ種であることが確かめられた。その一方で、広域分布種だと想定していた種が逆に沖縄周辺に限定していることも発見された。このように調査を進めることで、日本温帯域の種の特徴が今後明らかになっていくものと考えられるが、そのためには、さらなる分類学的な研究を進めていく必要があるだろう。

引用文献

- Yamano H, Sugihara K, Nomura K (2011) Rapid poleward range expansion of tropical reef corals in response to rising sea surface temperatures. Geophysical Research Letters, 38.
- 西平守孝, Veron JEN (1995) 日本の造礁サンゴ類. 海游舎, 東京.

- 野村恵一 (2009) 和歌山県串本海域における近年のサンゴ群集変化. 日本サンゴ礁学会誌, 11: 39-49.
- Isomura N, Nozawa Y, Fukami H (2014) Distribution and reproduction of the temperate-specific morphotype of the coral *Favites flexuosa* in the subtropical region, Lyudao, Taiwan. *Invertebrate Reproduction & Development*, 58: 176-178.
- 深見裕伸・磯村尚子・岩尾研二・立川浩之(2013)ミドリイシ科ニオウミドリイシ属(新称) *Isopora* の分類および生態. 日本サンゴ礁学会誌, 15: 1-14.
- 深見裕伸, 野村恵一(2010)和歌山産タカクキクメイシ *Montastraea valenciennesi*(Milne Edwards and Haime, 1848) の隠蔽種の存在. 日本サンゴ礁学会誌, 11: 25-31.
- Mitsuki Y, Isomura N, Nozawa Y, Tachikawa H, Huang D, Fukami H (2021) Distinct species hidden in the widely distributed coral *Coelastrea aspera* (Cnidaria, Anthozoa, Scleractinia). *Invertebrate Systematics* 35: 876-891.
- Koido T, Imahara Y, Fukami H (2019) High species diversity of the soft coral family Xenidiidae (Octocorallia, Alcyonacea) in the temperate region of Japan revealed by morphological and molecular analyses. *ZooKeys* 862: 1-22.
- Koido T, Imahara Y, Fukami H (2022) *Xenia konohana* sp. nov. (Cnidaria, Octocorallia, Alcyonacea), a new soft coral species in the family Xenidiidae from Miyazaki, Japan. *ZooKeys* 1085: 29-49.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Oku, Yutaro, Iwao, Kenji, Hoeksema, Bert W., Dewa, Naoko, Tachikawa, Hiroyuki, Koido, Tatsuki, Fukami, Hironobu	4. 巻 89
2. 論文標題 Fungia fungites (Linnaeus, 1758) (Scleractinia, Fungiidae) is a species complex that conceals large phenotypic variation and a previously unrecognized genus	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Contributions to Zoology	6. 最初と最後の頁 188 - 209
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1163/18759866-20191421	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 Koido T, Imahara Y, Fukami H	4. 巻 862
2. 論文標題 High species diversity of the soft coral family Xenidae (Octocorallia, Alcyonacea) in the temperate region of Japan revealed by morphological and molecular analyses	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ZooKeys	6. 最初と最後の頁 1-22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3897/zookeys.862.31979	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 Mitsuki Yuta, Isomura Naoko, Nozawa Yoko, Tachikawa Hiroyuki, Huang Danwei, Fukami Hironobu	4. 巻 35
2. 論文標題 Distinct species hidden in the widely distributed coral <i>Coelastrea aspera</i> (Cnidaria, Anthozoa, Scleractinia)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Invertebrate Systematics	6. 最初と最後の頁 876-891
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1071/IS21025	査読の有無 無
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 Koido Tatsuki, Imahara Yukimitsu, Fukami Hironobu	4. 巻 1085
2. 論文標題 <i>Xenia konohana</i> sp. nov. (Cnidaria, Octocorallia, Alcyonacea), a new soft coral species in the family Xenidae from Miyazaki, Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ZooKeys	6. 最初と最後の頁 29 ~ 49
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3897/zookeys.1085.77924	査読の有無 無
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2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 深見 裕伸・野澤 洋耕
2. 発表標題 日本温帯域のサンゴの起源を探る
3. 学会等名 日本サンゴ礁学会第22回大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hironobu Fukami, Yoko Nozawa
2. 発表標題 Origin of the zooxanthellate scleractinian corals in the warm-temperate region of Japan
3. 学会等名 14th International Coral Reef Symposium (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 藤井琢磨, 北野裕子, 磯村尚子, 深見裕伸	4. 発行年 2020年
2. 出版社 喜界島サンゴ礁科学研究所	5. 総ページ数 70
3. 書名 喜界島の有藻性サンゴ類 ~ 生きているサンゴを見分けよう~	

〔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
研究協力者	野澤 洋耕 (Nozawa Yoko)		

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
---------	---------