

遺伝子流動解析に基づくサンゴ礁生物北上予測を踏まえた 海洋保護区の検討

課題番号: 4RF-1501

研究期間: H27-H29

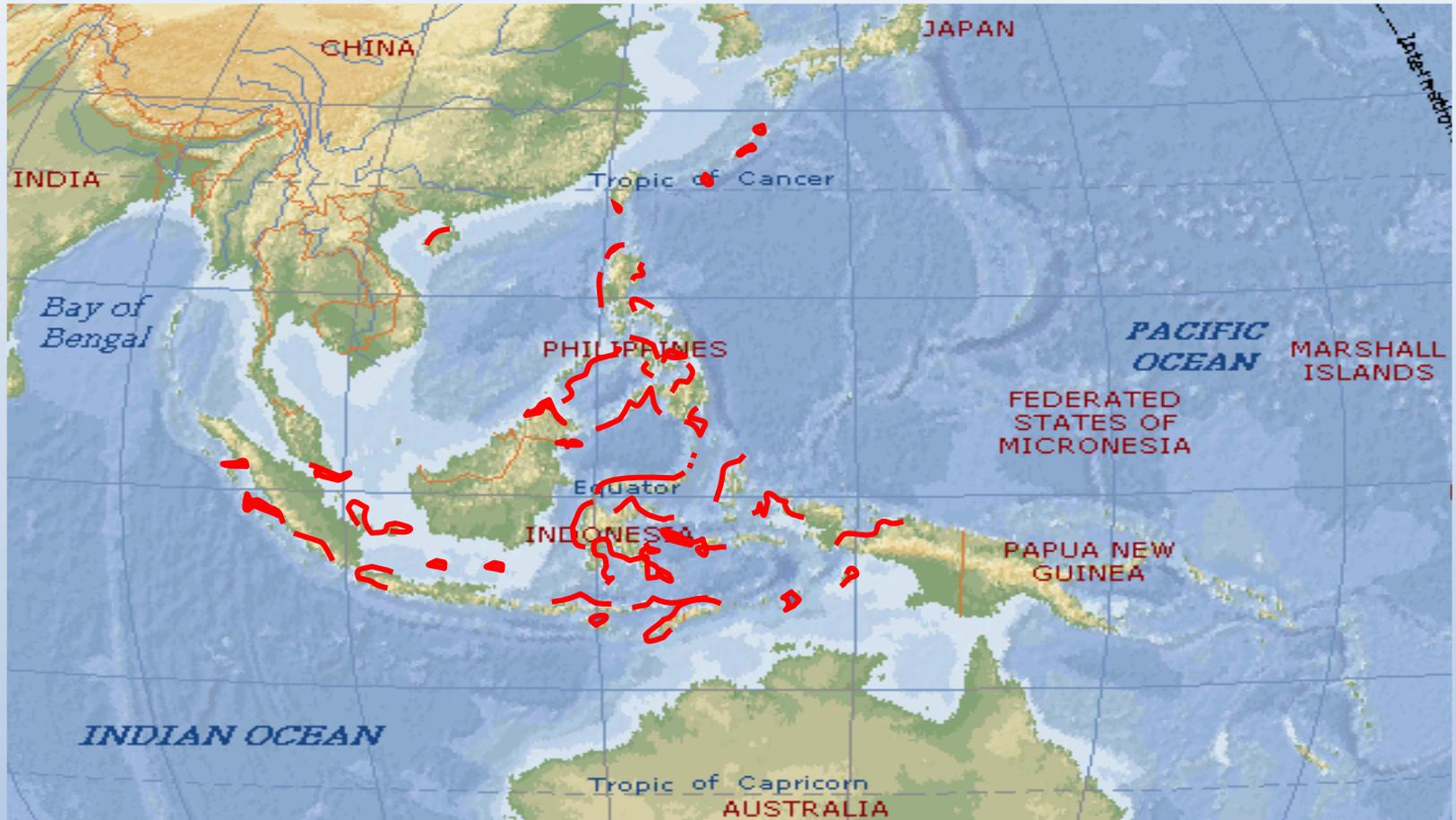
累積予算総額: 34,118千円

サブ1宮崎大学 安田仁奈(研究代表者)

サブ2沖縄高等専門学校 井口亮

サブ3海洋研究開発機構 山北剛久

温暖化によるサンゴ礁生態系の崩壊 ＝海洋の約30%の生物多様性が危機に



Pandolfi et al.(2003) Science

生物多様性が激減する海域(赤線)

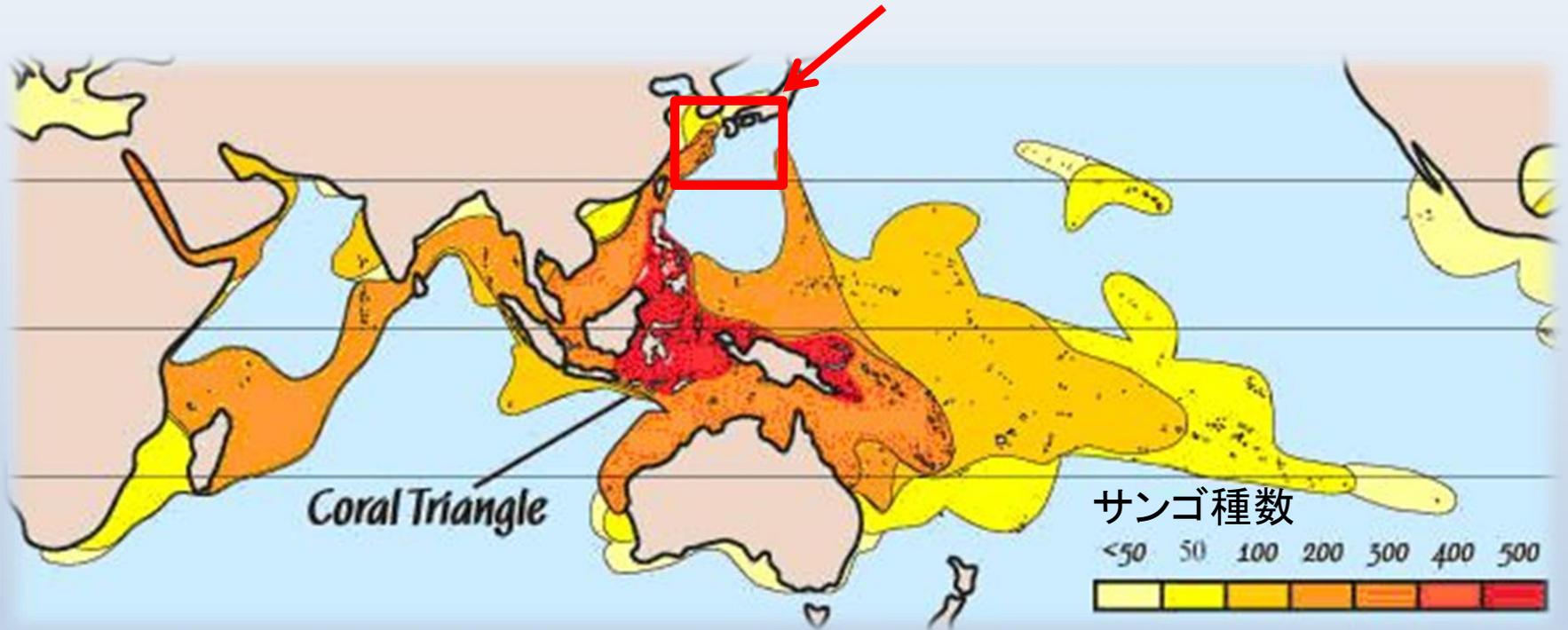
生物多様性条約第10会締結国会議(CBD・COP
10)生物多様性国家戦略(2012)

愛知目標10 サンゴ礁等の気候変動の影
響を受ける脆弱な生態系への人為的な圧力の
最小化

愛知目標11 沿岸域の重要海域10%を効果
的均平に管理・保全してネットワーク化する
こと

=サンゴ礁生態系の海洋保護区

日本のサンゴ礁生態系：分布北限



<http://ctatlas.reefbase.org/coraltriangle.aspx>

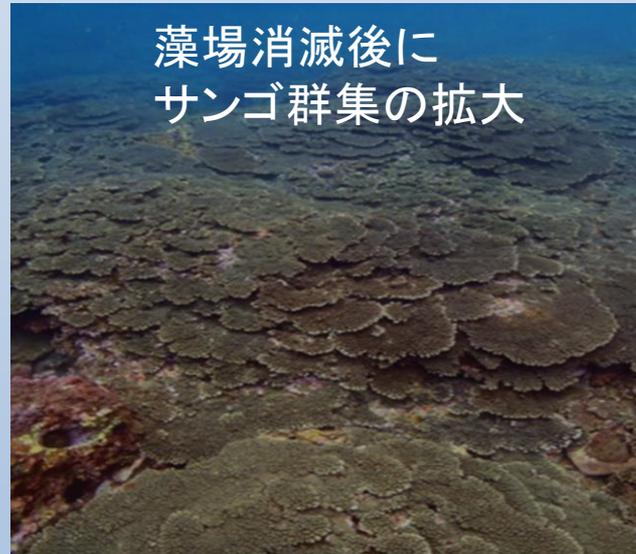
サンゴ礁生態系：海洋の約30%の生物多様性が集中

温帯域はレフュージア(避難所)として機能?!

熱帯域: 白化等でサンゴ礁生態系の消滅危機

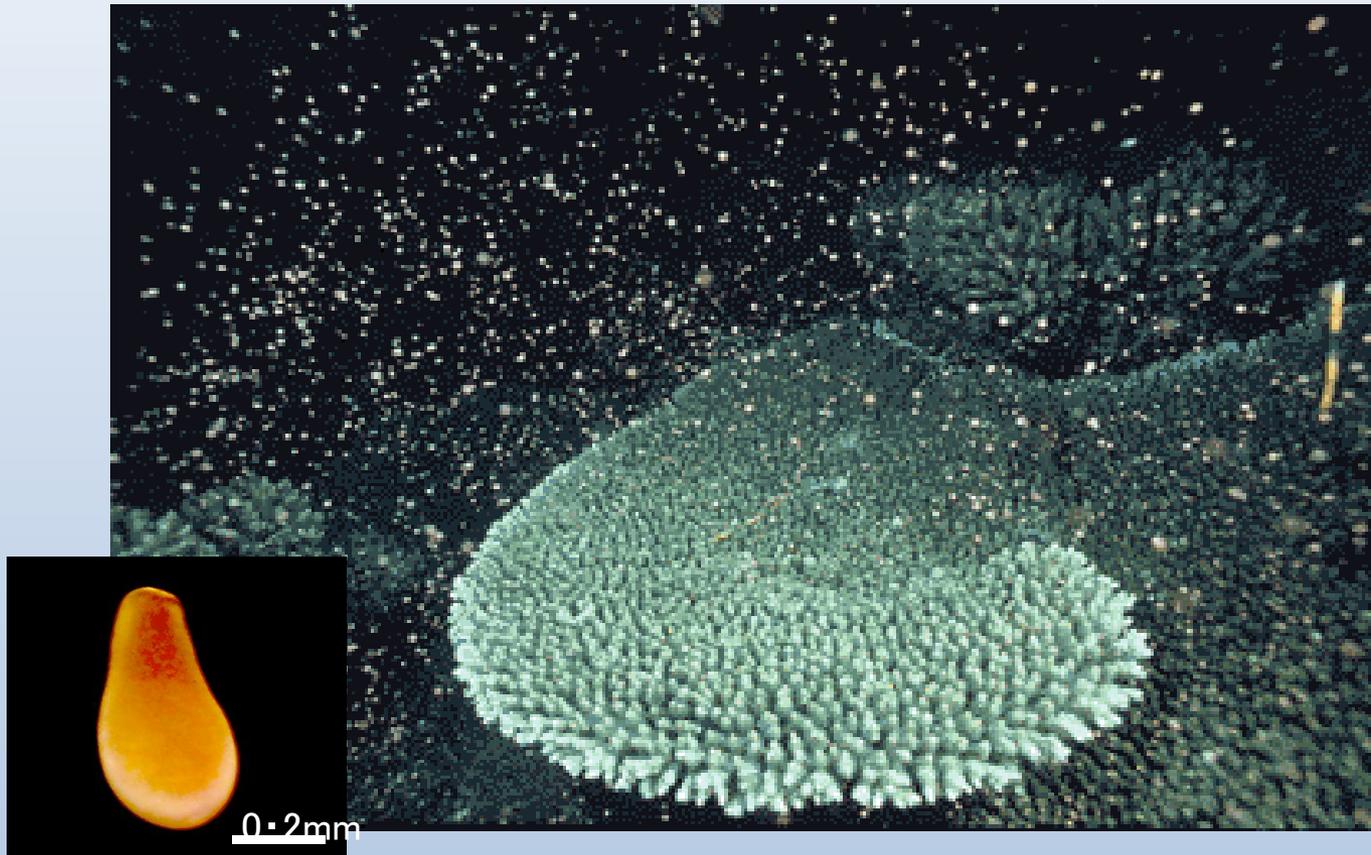


温帯域: サンゴが北上・増加



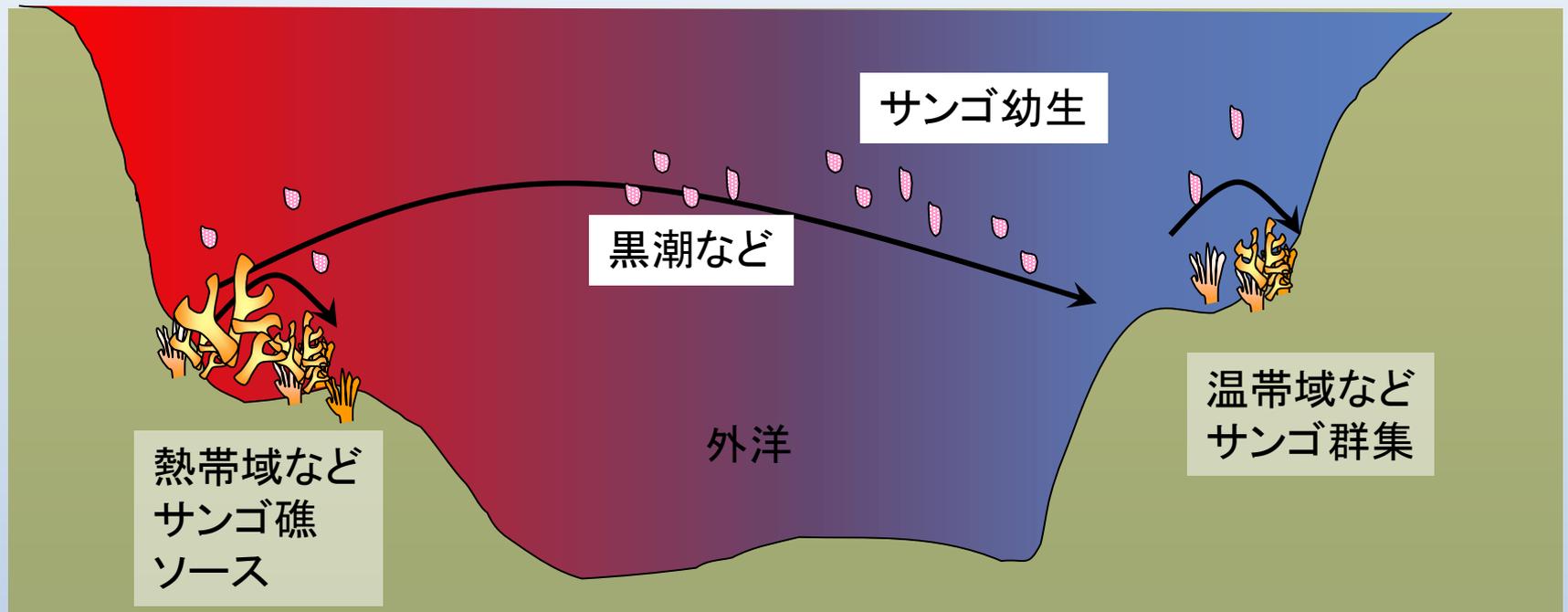
撮影: グリートダイバーズ
福田道喜氏

サンゴ北上のメカニズム＝幼生分散による分布拡大



サンゴの産卵と幼生分散(海流)
+ 分散先で安定して再生産できるか？

幼生分散による集団間の繋がり解明が 保護区設定で重要

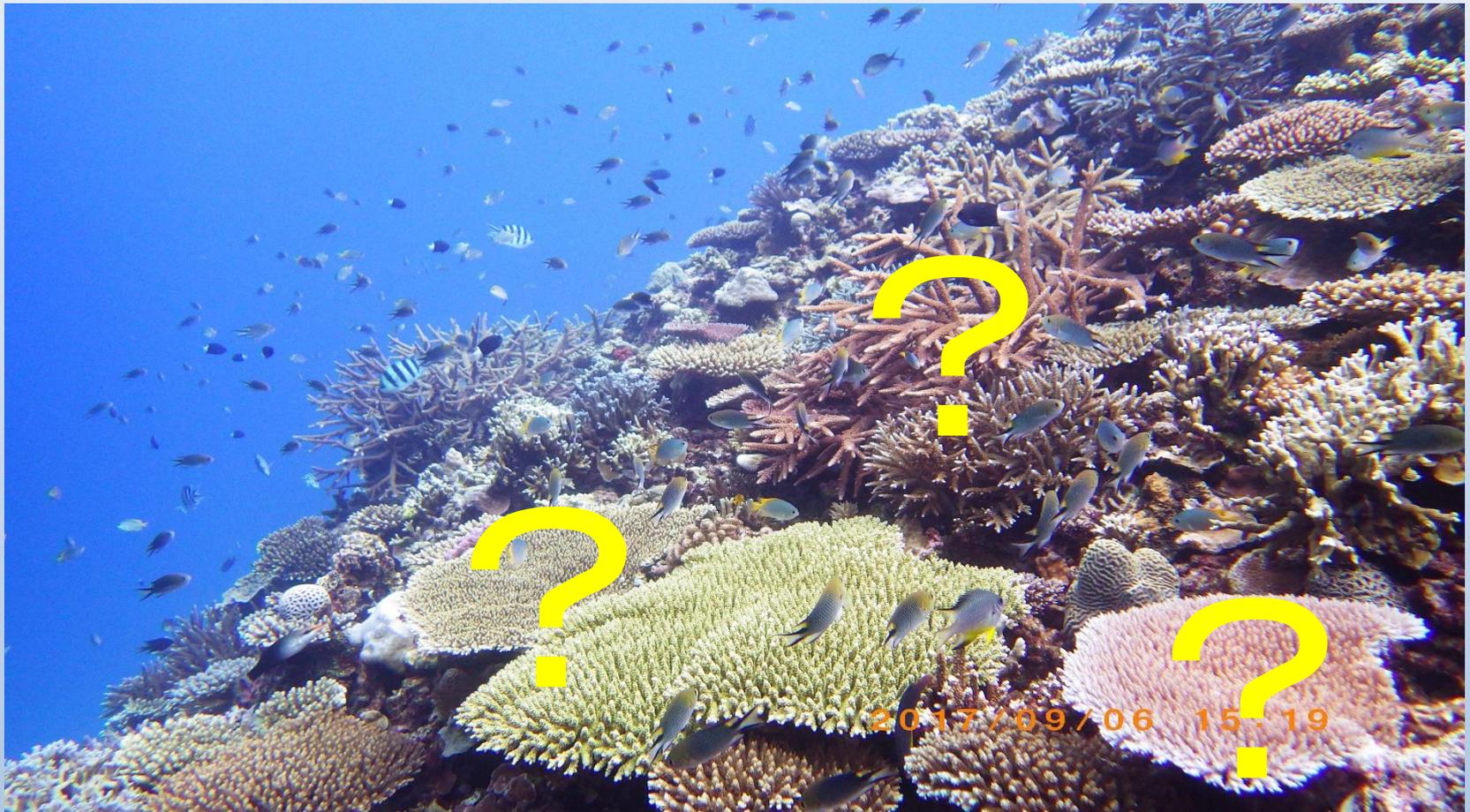


これまで温暖化で増加する温帯域のサンゴを含め
遺伝的多様性や遺伝子・海水流動から
重要海域を推定できて無い！

さらに！

- ・多くのサンゴは**形態判別が困難**

- クローン生殖や自家受精により**遺伝的多様性**が低い可能性
= 脆弱な集団の可能性？



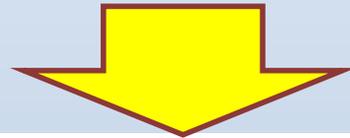
撮影：井口亮

本研究の目的

海洋保護区の現状

海洋面積の10%目標⇔現状8.3%

しかし多くは漁業・景観さまざまな管理区の総称



温暖化 & 遺伝構造 & 海水流動を踏まえ
生物多様性増加のための
サンゴ群集面積からみた保全優先海域
(EBSAの基準)を検討

～EBSAの基準とは～

生物多様性条約第9回締約国会議において定められた生態学的、生物学的に重要な海域を決める7つの基準のこと

生物多様性の観点から重要度の高い海域

～Ecologically or Biologically Significant marine Areas identified by Japan～

<https://www.env.go.jp/nature/biodic/kaiyo-hozen/ima.html>

1. 希少性
2. 生活史における重要性
3. 絶滅危惧種の生育・生息地
4. 脆弱性
5. 生物学的生産性
6. 生物学的多様性
7. 自然性

本研究の概略

サブテーマ1 宮大
遺伝子流動解析

- ・サンゴ隠蔽種分類
- ・幼生分散の遺伝的制約
- ・遺伝的多様性

サブテーマ2 沖縄工専
環境適応遺伝子

- ・温暖化や北上における適応可能性

東工大・共同研究者
海水流動モデルで
・幼生分散推定

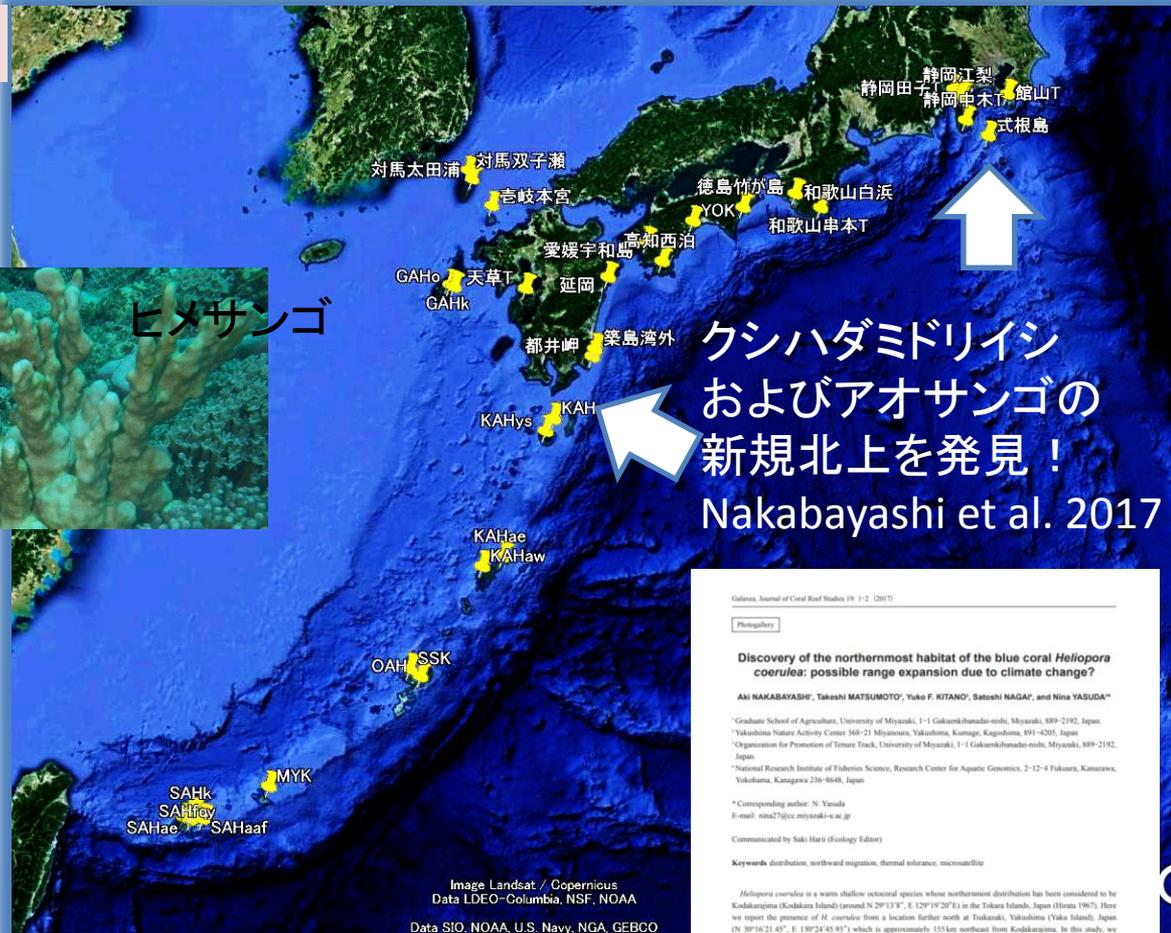
サブテーマ3 JAMSTEC
生物統計モデルで
将来の分布域/量を推定

サブテーマ3 JAMSTEC
遺伝子情報、海水流動、
分布量に基づき
保全優先海域を推定、
既存の保護区と比較

対象種のサンプリング: S1(宮大)・S2(沖縄工専)

優占種・絶滅危惧種を中心に合計10種
合計約4000サンプル採集・解析

Google earthより作成



Galathea, Journal of Coral Reef Studies 19: 1-2 (2017)

Photogallery

Discovery of the northernmost habitat of the blue coral *Heliopora coerulea*: possible range expansion due to climate change?

Aki NAKABAYASHI*, Takeshi MATSUMOTO*, Yuko F. KITANO*, Satoshi NAGAI*, and Nina YASUDA**

*Graduate School of Agriculture, University of Miyazaki, 1-1 Gakko-1 Honcho-1-1, Miyazaki, 889-2192, Japan.
**Yakushima Nature Activity Center 869-21 Miyayama, Yakushima, Kagushima, Kagoshima, 891-0205, Japan.
*Organization for Promotion of Island Tour, University of Miyazaki, 1-1 Gakko-1 Honcho-1-1, Miyazaki, 889-2192, Japan.
*National Research Institute of Fisheries Science, Research Center for Aquatic Genomics, 2-12-4 Fukura, Kanazawa, Yokkaichi, Kanagawa 230-8648, Japan

*Corresponding author: N. Yasuda
E-mail: nina27@cc.miyazaki-u.ac.jp

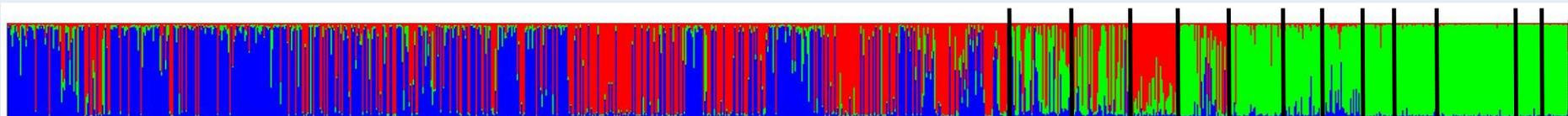
Communicated by Saki Hari (Ecology Editor)

Keywords distribution, northward migration, thermal tolerance, microsatellite

Heliopora coerulea is a warm shallow ectosymbiotic species whose northernmost distribution has been considered to be Kodakurajima (Kodakurajima Island) (around 30°20'N, 129°10'E) in the Yakushima Islands, Japan (Hirata 1967). Here we report the presence of *H. coerulea* from a location further north at Takasaki, Yakushima (Yaku Island), Japan (30°16'21.45" N, 130°24'43.93" E) which is approximately 155 km northeast from Kodakurajima. In this study, we

遺伝子流動解析 (S1)

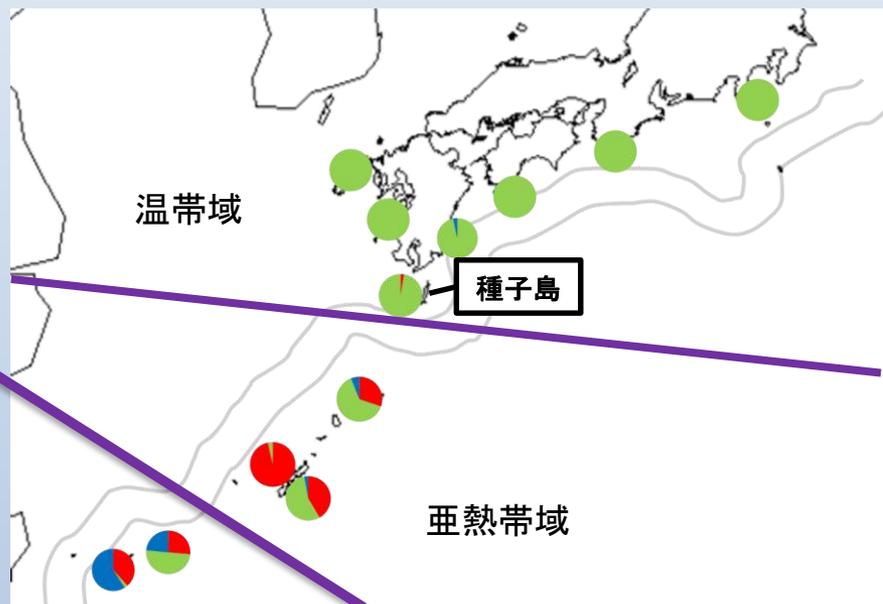
サンゴ隠蔽種分類・分布解明



亜熱帯域

屋久島

温帯域



クシハダミドリイシは3つの
隠蔽系統：うち1系統のみが
温帯で北上・分布拡大

Nakabayashi et al in prep

Photogallery

Most *Pocillopora damicornis* around Yaeyama Islands are *Pocillopora acuta* according to mitochondrial ORF sequences

Yuko F. KITANO*, Satoshi NAGAI, Mitsuihiro UENO*, and Nina YASUDA*

*Organization for Promotion of Tenure Track, University of Miyazaki, 1-1, Gakuseikanadai-nishi, Miyazaki, 889-2192, Japan
*National Research Institute of Fisheries Science, Research Centre for Aquatic Genomics, 2-12-4, Fukuura, Kanazawa-ku, Yokohama, Kanagawa, 230-8648, Japan
*Coral Reef Research in Sekisei Lagoon, 2-2-18, Hamasaki-cho, Ishigaki, Okinawa, 907-0013, Japan

* Corresponding author: Yuko F. Kitano, Nina Yasuda
E-mail: yuko.f.kitano@gmail.com, nima27@cc.miyazaki-u.ac.jp

Communicated by Masayuki Hatta (Editor-in-Chief)

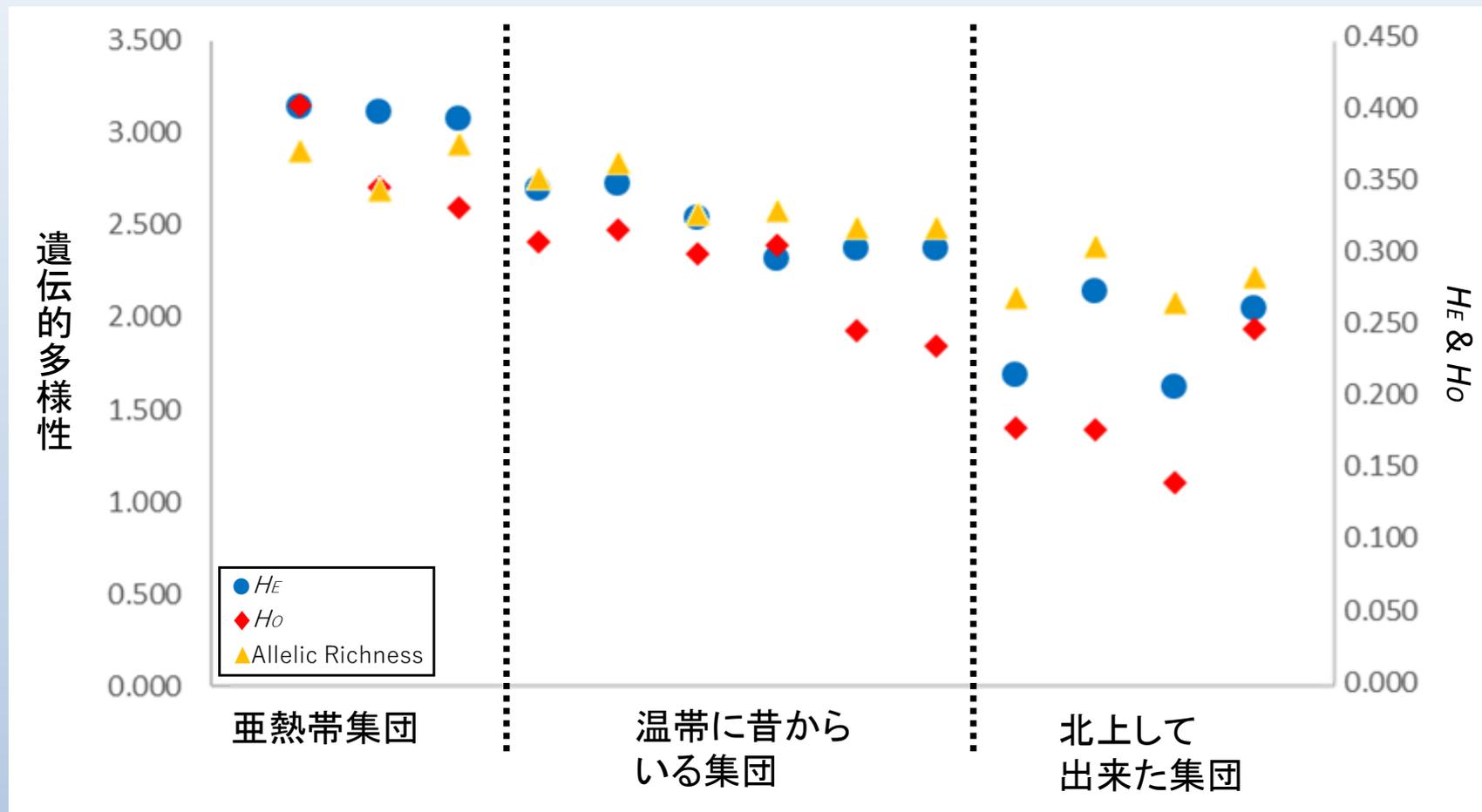
Keywords Coral, DNA typing, Mitochondria

Pocillopora acuta Lamarck, 1816, that had long been treated as a junior synonym of *Pocillopora damicornis* (Linnaeus, 1758), was resurrected in Australia based on differences in the mitochondrial open reading frame (ORF) sequences with 6-8 nucleotide differences in 840 bp (Schmidt-Roach et al. 2014). To investigate whether *P. acuta* exists in Japan, we collected 73 colonies with *P. damicornis*-like morph from eight locations that are a maximum of 41.4 km apart around Yaeyama Islands (24°13'–24°N, 123°41'–124°07' E), southwestern-most islands of Japan, and analyzed their mitochondrial ORF sequences. We found that the DNA sequences of 72 of the 73 samples were identical to those of Australian *P. acuta* (e.g. JX985592-6; they are still registered as *P. damicornis* "type beta SSR-2012"), while the remaining one gave

本邦初のホソエダハナヤサイ
発見・分布に関して Kitano et al. (2015)

遺伝子流動解析 (S1)

・ 遺伝的多様性の解明

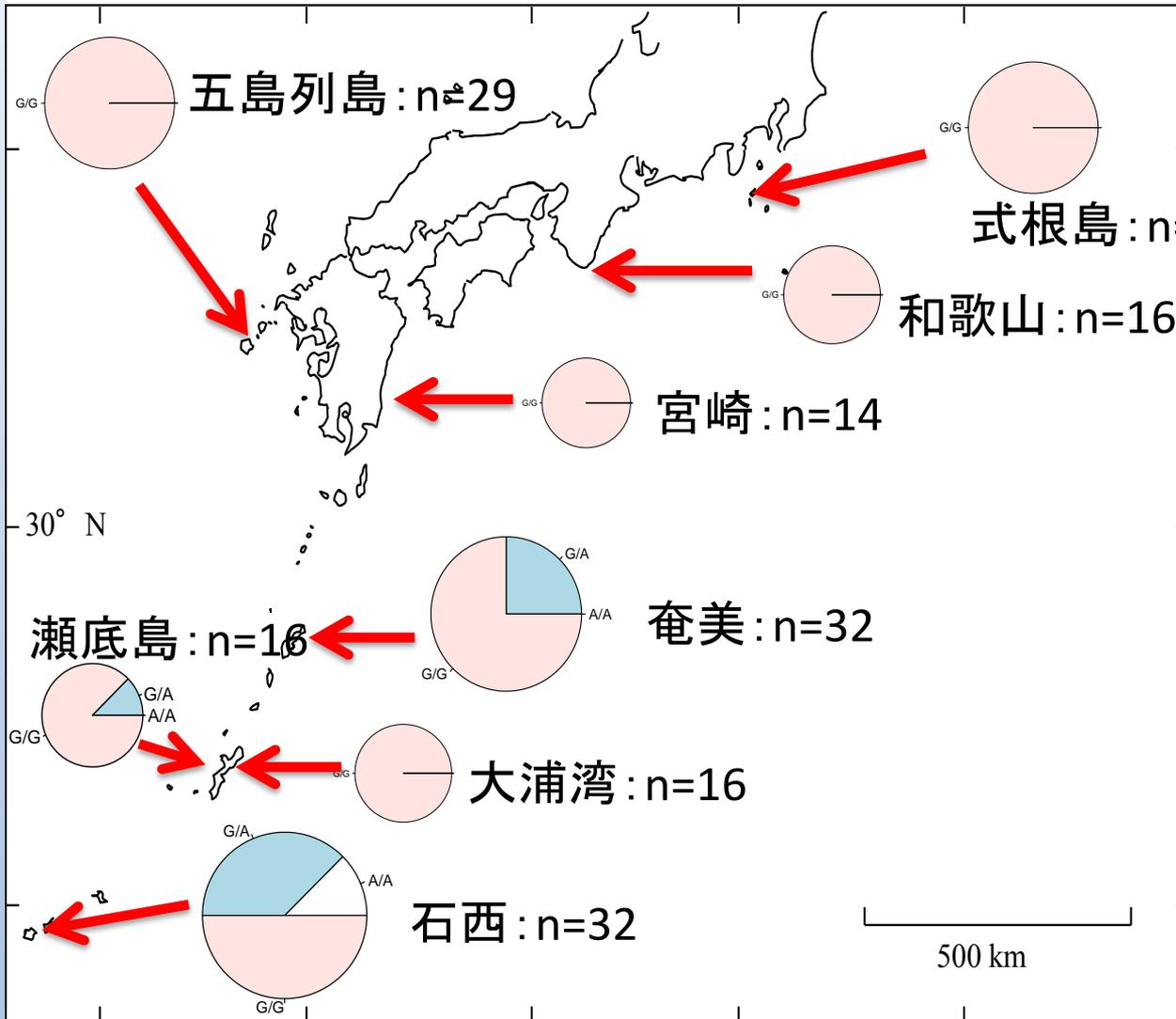


南

北

環境耐性遺伝子 (S2 沖縄工専)

高水温等に対するストレス耐性を持つ遺伝子頻度



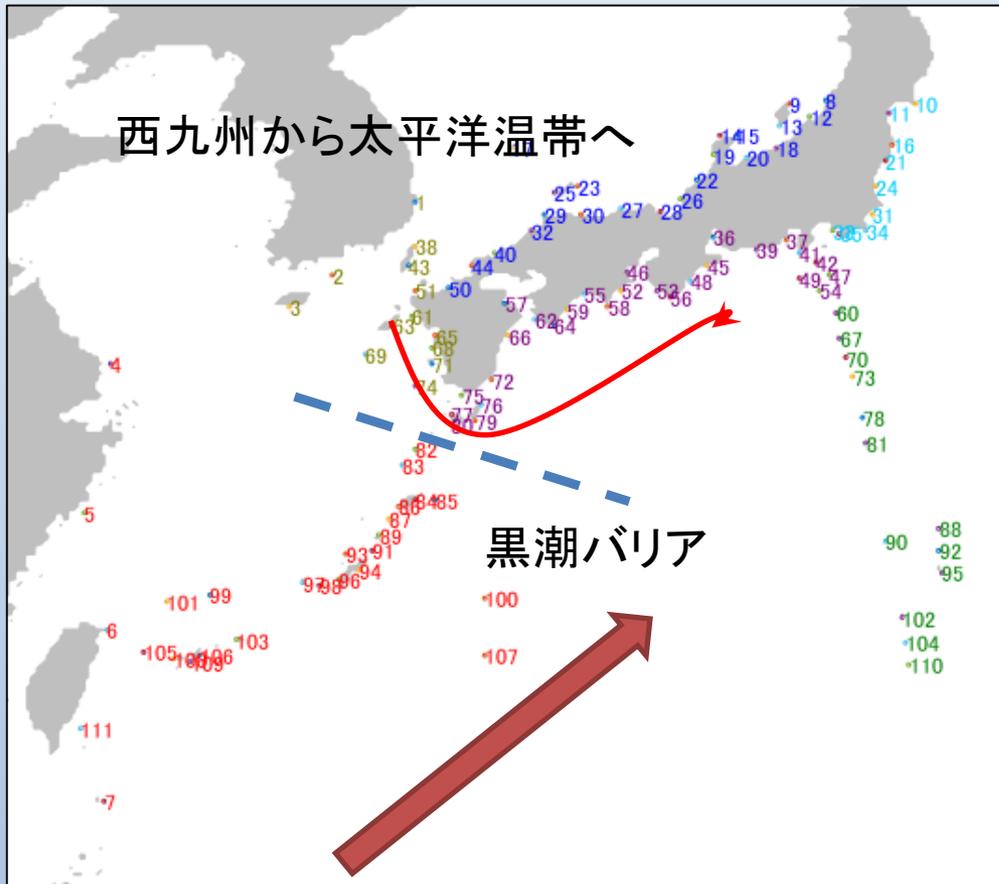
クシハダミドリイシ

海水流動モデル

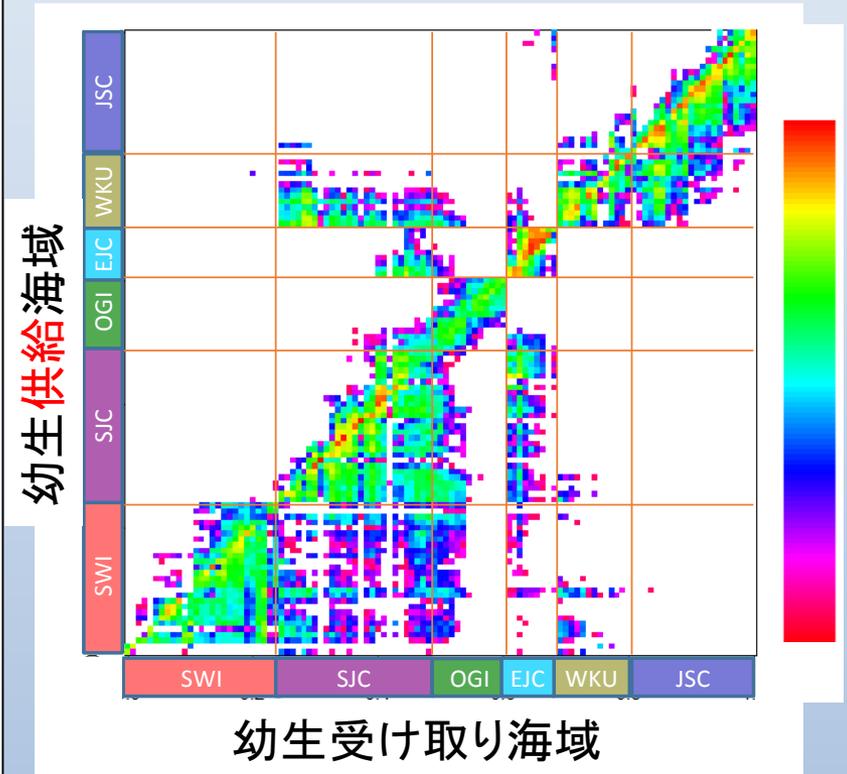
(共同研究者: 東工大・中村隆史博士・相澤浩明氏)

- ・サンゴ産卵期における海水流動計算による幼生分散推定 (27年間分)

日本沿岸111地点から模擬幼生を放出



黒潮に沿った流れ

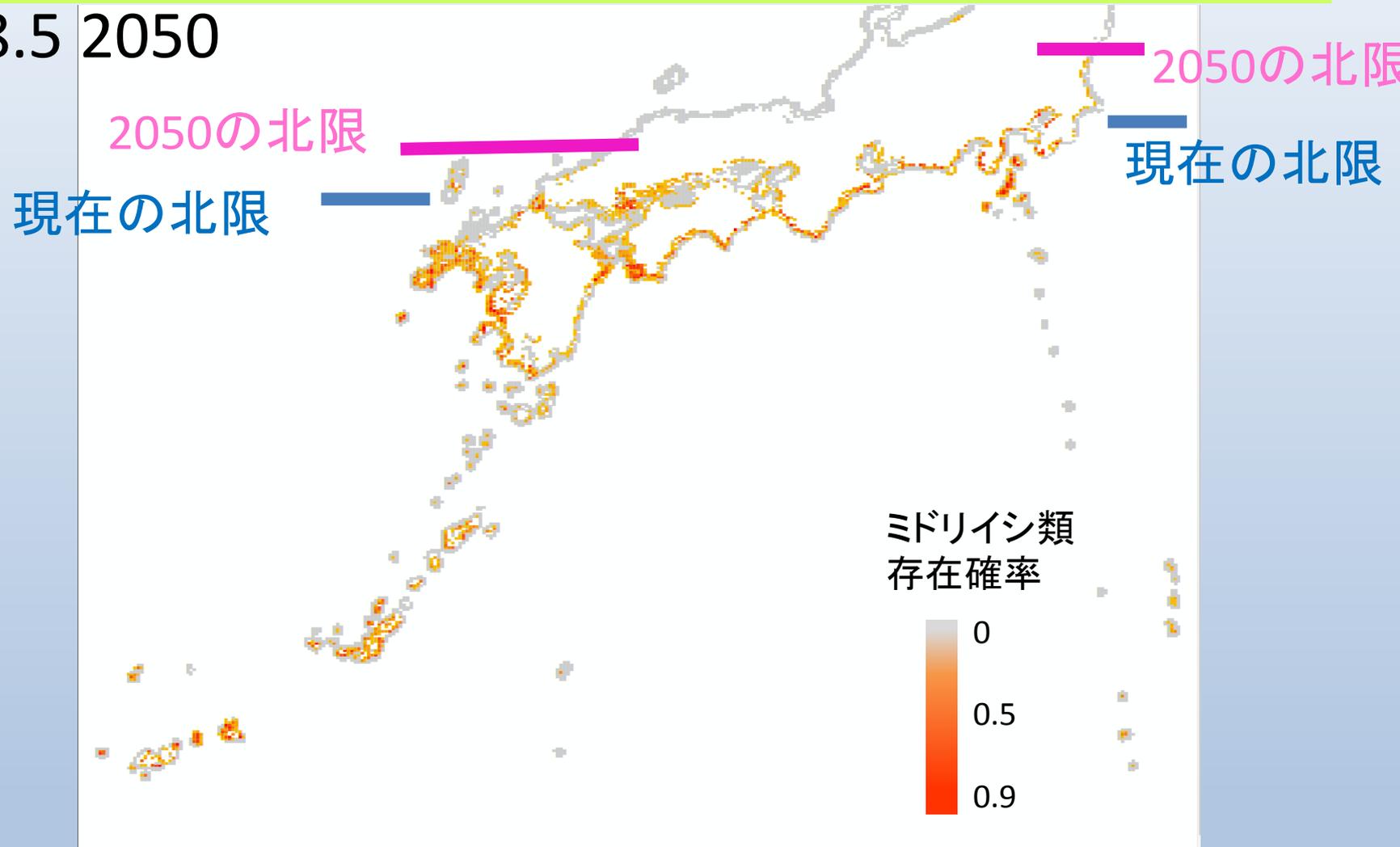


地点間の幼生分散量を推定

統計モデリングによる北上生物の空間分布推定 (S3 JAMSTEC)

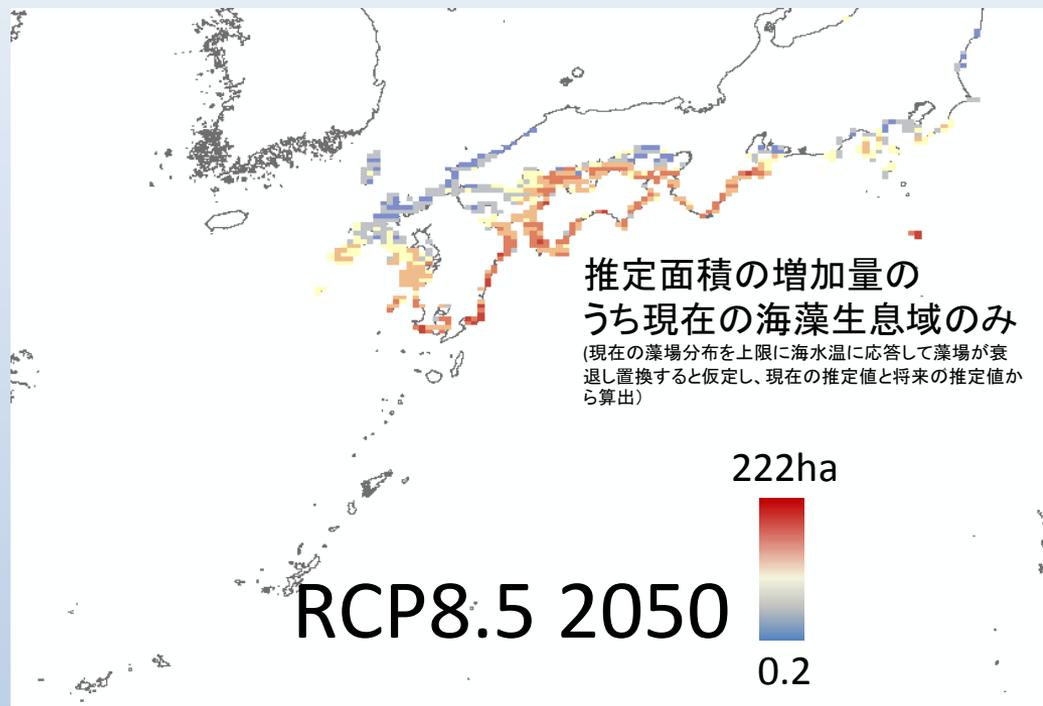
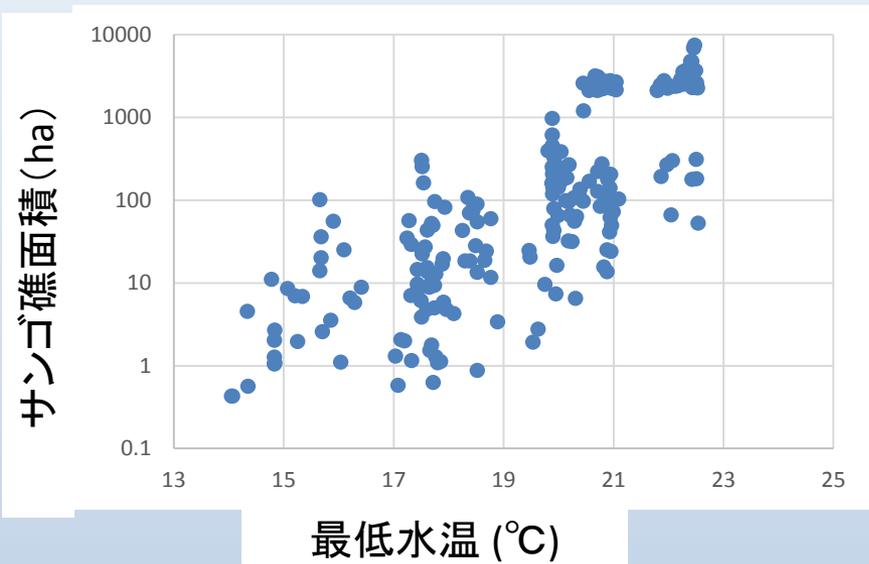
・温暖化によるサンゴ分布の変化

RCP8.5 2050



統計モデリングによる北上生物の空間分布推定 (S3 JAMSTEC)

・温暖化によるサンゴ面積の変化



サンゴ礁分布面積の推定

推定に用いた変数

クロロフィルa、水深、海岸線長、濁度、波の高さ、潮汐幅、最低水温
モデルと現在のサンゴ面積の相関係数は0.63

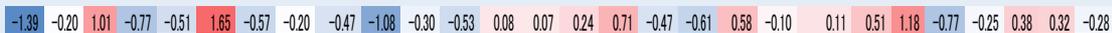
面積の絶対量は熱帯域が多いが (気候変動による減少要因は考慮していない)、
温帯域では相対的に高い増加率が推定された

遺伝データ・海流・将来推定をEBSAの基準へ適用し、 遺伝的・流動指標を用いた保全の優先順を検討

九州西 | 館山→和歌山→四国→宮崎 | 屋久→→石西

1. 唯一性、又は希少性

プライベートアレル(遺伝子)の存在 S1



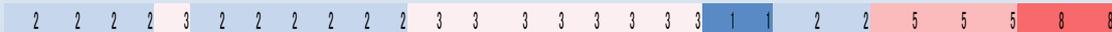
2. 生活史における重要性

海流連結の中心性が高い海域 S3



3. 絶滅危惧種の生育・生息地

絶滅危惧種の分布域



4. 脆弱性・感受性・低回復性

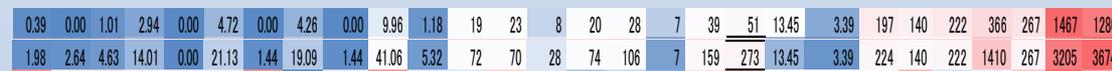
クローン率、環境適応遺伝子 S1,2



5. 生物学的生産性

サンゴ面積 S3

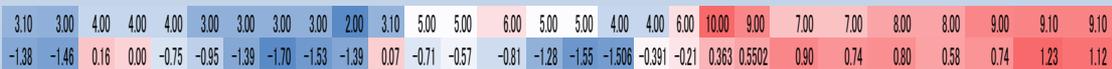
現在
将来



6. 生物学的多様性

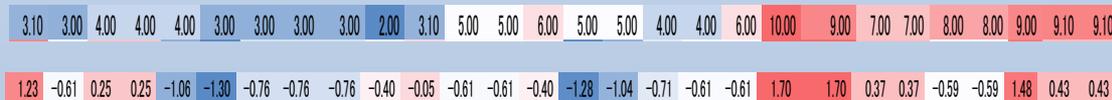
遺伝解析で発見した隠蔽種数 S1

生物多様性の基盤アレル多様性 S1



7. 自然性

自然海岸率

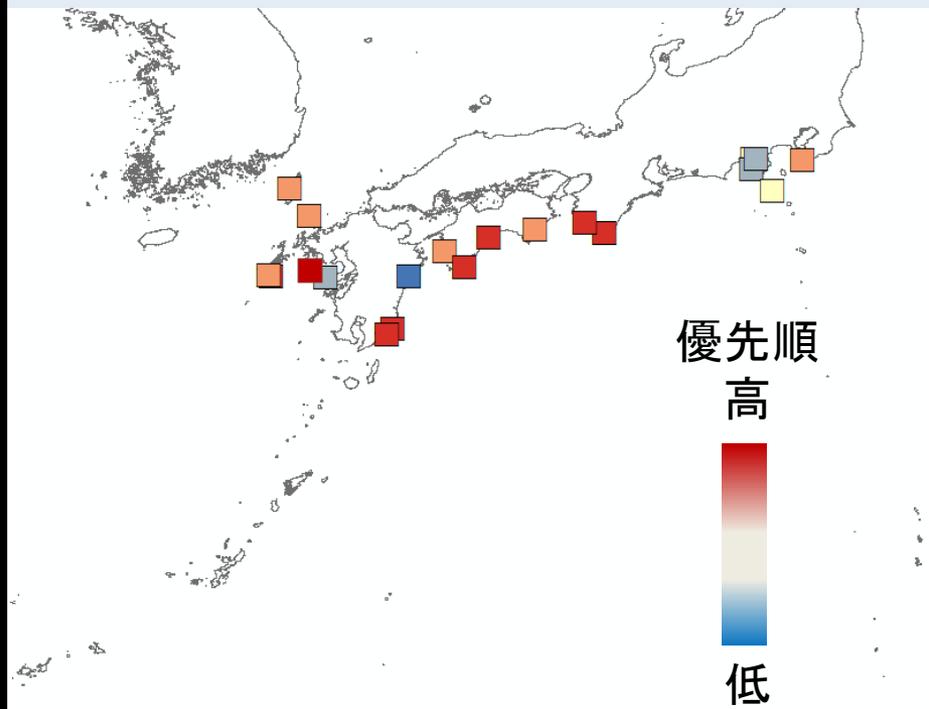
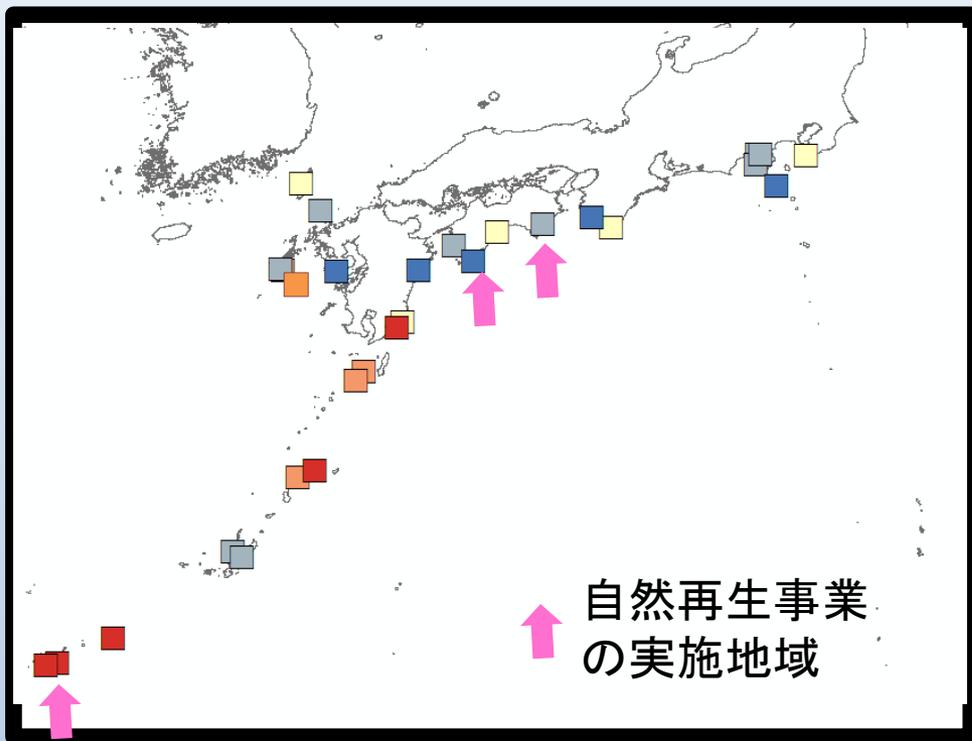


優先度が 青:低い—赤:高い

EBSA基準による海域の保全優先度

全海域で評価した優先度

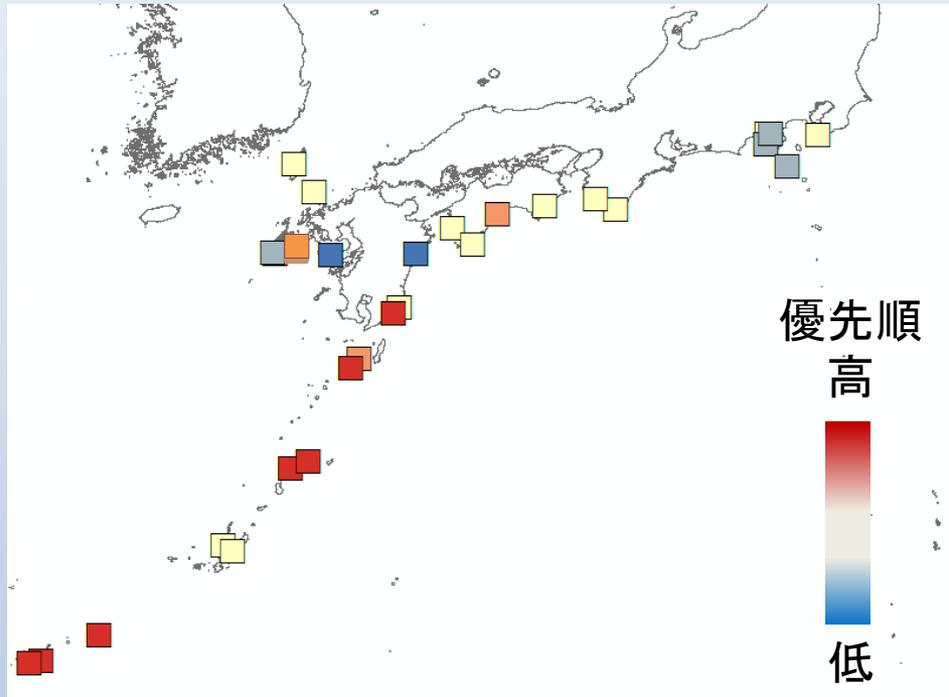
温帯のみで評価した優先度



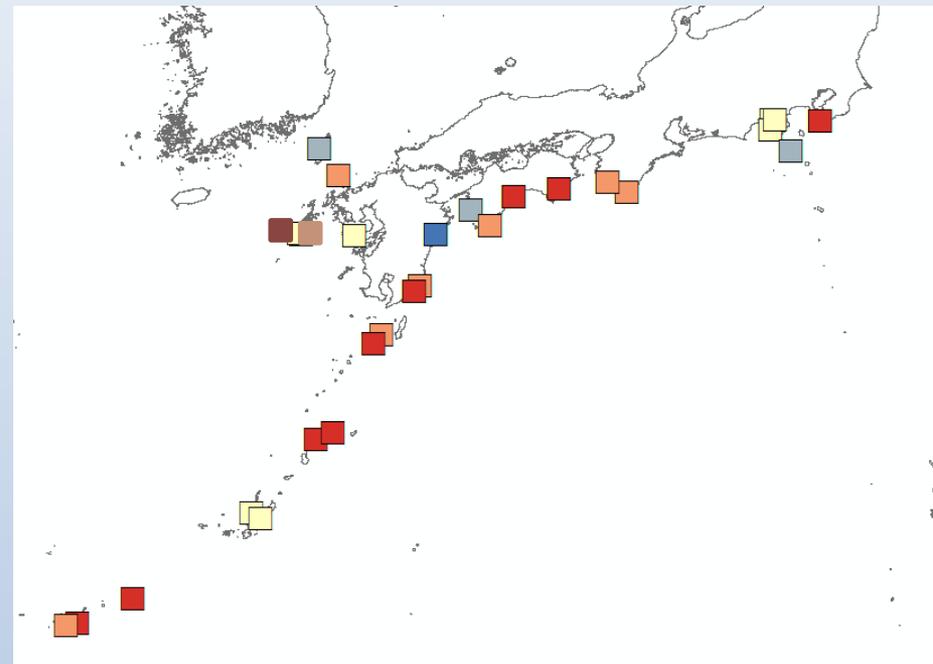
亜熱帯域は依然として保全の必要性
温帯域にも重要海域(宮崎・五島など)があることが明らかに

EBSA基準による海域の保全優先度

全基準を合計した優先度



遺伝情報のみによる優先度 (基準1,4,6のサブ指標)

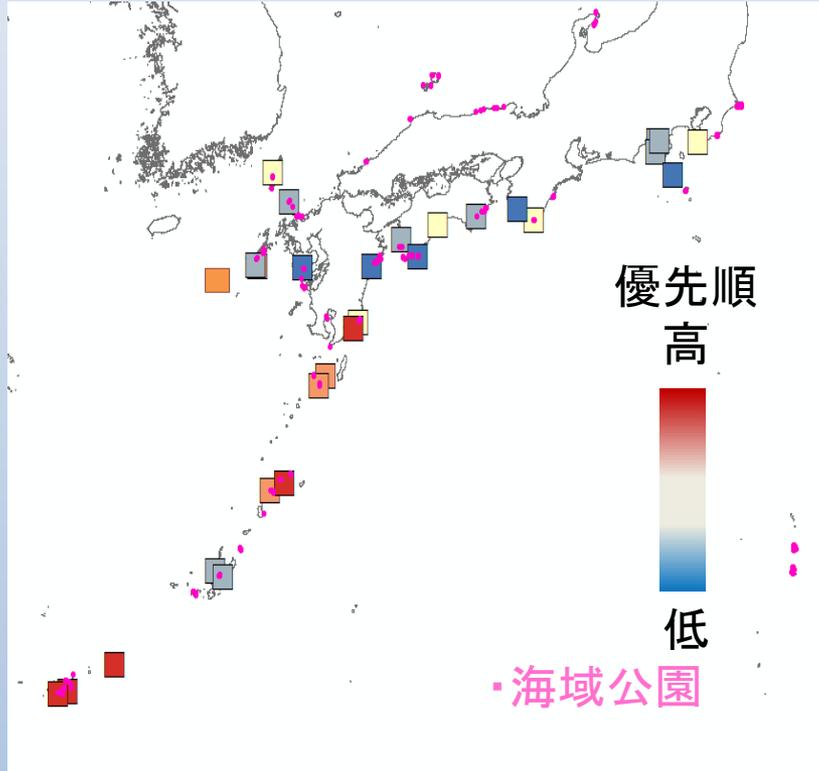


特に温帯域の一部の海域(五島・四国・和歌山など)の重要性が遺伝情報により新たに明らかになった！

サンゴ礁分布と現在の保護区の比較

サンゴは普通地域に多くカバーされているが海域公園では1割程度

- ・重要度が高いが保護割合が低い—沖縄・長崎・熊本
- ・将来増えてギャップが広がる可能性—千葉・静岡



	保護区カバー率		サンゴ礁の面積	推定面積 **の平均増加率
	普通地域含む	海域公園のみ		
千葉	1.00	0.00	0.2	3.5
東京	1.00	0.26	15.0	1.4
静岡	1.00	0.00	0.1	3.5
三重	0.40	0.26	0.0	3.1
和歌山	0.70	0.07	1.3	1.4
愛媛	1.00	0.13	1.5	2.9
高知	0.60	0.17	1.5	2.0
長崎	0.90	0.16	0.4	4.2
熊本	1.00	0.11	1.7	3.3
大分	1.00	0.83	2.0	3.4
宮崎	0.90	0.19	4.7	1.8
鹿児島	0.50	0.27	82.0	1.0
沖縄*	0.50	0.04	1798.5	0.0

*西表・石垣国立公園の新しいデータは未反映

**藻場のみが置換するシナリオによる

本研究の主な成果

- 1) 海流モデルと遺伝データにより、**亜熱帯と温帯の間・および亜熱帯集団間の幼生分散は想定されていたよりも小さい**ことが分かった。
- 2) 遺伝データはこれまで見えなかった各海域の重要性を明らかにできることが分かった。(特に軽視されていた**温帯サンゴ群集の重要性**)
- 3) 新規遺伝子マーカー開発・集団遺伝解析により、**複数サンゴ(絶滅危惧種を含む)の隠蔽種とその分布**を明らかに。
- 4) サンゴにおいて特定されている機能遺伝子の地理的分布を示し、日本国内の緯度勾配でストレス全般と対応している可能性を示した。
- 5) 生物分布推定モデルにより**北上する範囲と効果(面積)**を推定し、保護区との差を示した。
- 6) これまでになかった**遺伝子・海流・将来変化の情報**を加味した重要海域の指標により、保全の優先度を提示した。
- 7) NGSを用いた**共生藻遺伝系統同定技術**の改良・応用

環境政策への貢献

行政のニーズに即した環境政策への貢献(見込み)

- ・絶滅危惧種である造礁サンゴに関して、遺伝子によりさらなる隠蔽種を発見、リストを改良するための重要知見を得た。
- ・愛知目標を達成するための科学的基礎知見となる、海流構造や遺伝構造を踏まえた幼生分散ネットワークに基づく保全優先度の高いEBSA海域、特にこれまで注目されていなかった温帯域の重要海域の提示。

本課題による査読付き論文など

- 1) Yuko F. Kitano*, Satoshi Nagai, Mitsuhiro Ueno, and Nina Yasuda*. 2015. Most *Pocillopora damicornis* around Yaeyama Islands are ***Pocillopora acuta*** according to mitochondrial ORF sequences. *Galaxea, Journal of Coral Reef Studies*. 17, 21-22
- 2) Nina Yasuda*. Distribution expansion and historical population outbreak patterns of crown-of-thorns starfish, *Acanthaster cf. planci*, in Japan from 1912 to 2015 In "Coral reef studies in Japan", A Iguchi and C Hongo eds. Springer Book 2018.
- 3) Nakabayashi A., Matsumoto T., Kitano Y.F., Nagai S., Nina Yasuda*: 2017. Discovery of the northernmost habitat of the blue coral *Heliopora coerulea*: possible range expansion due to climate change? *Galaxea, Journal of Coral Reef Studies*. 18, 1-2
- 4) Yuasa H, Higashimura Y, Nomura K, **Nina Yasuda***: Diet of *Acanthaster brevispinus*, sibling species of the coral-eating crown-of-thorns starfish *Acanthaster planci* sensu lato. *Bulletin of Marine Science*, 93, 4:1009-1010 (2017)

他3報現在査読中および、2報投稿準備中(3月中に投稿予定)

全て謝辞に環境省・環境研究総合推進費・当課題番号を記載。

表彰: 日本サンゴ礁学会川口奨励賞

国民との対話

シンポジウム

- 沖縄とサンゴ礁～今、サンゴ礁が直面している問題について～ 2017年11月21日 桐蔭学園 130人高校3年生対象
講義
- シンポジウム「身近な海が温まったらどうなるの？魚は？サンゴは？」 2016年3月12日 TKP品川カンファレンスセンター カンファレンスルーム5C
- サンゴ礁生態系の不思議～大量発生するオニヒトデの謎 2015年10月05日, 東急ハンズ渋谷店 ハンズカフェ(東京)
口頭発表
- 大量発生するオニヒトデの生態 海を拓く 一般市民講座
2015年9月7日, 南延岡 口頭発表

新聞

- 宮崎日日新聞 3月8日 宮崎で北上したサンゴ群集と保全に関する紹介文を掲載

中間評価では有益なコメントありがとうございました。

分類が確定することを評価する。

→ありがとうございます。4種の中に隠蔽種発見・混合されていた2種が別種であることも遺伝子データで示せました。

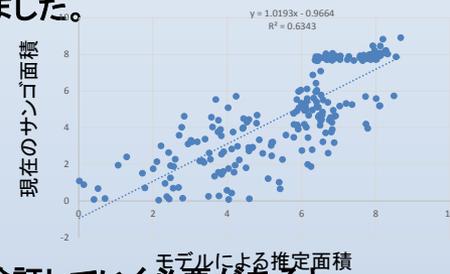
海水温上昇以外の環境変化(海洋酸性化、貧酸素水塊、陸域からの汚染、生物の異常増殖等)との関係もできれば解析してもらいたい。

→大変重要なご指摘ありがとうございます。本研究はまず50年後までの予測に限るためまだサンゴを減らすほどの影響が出てこない酸性化は入れられなかったこと、今S15で陸源負荷や汚染・赤土などによる全体的なサンゴの減少率などについては取り組まれているようなので、その値が出てきたら今後ぜひ入れたいと考えております。また、本格的な酸性化については今後、モデルの検証を行いながら、さらに長い時間スケールの予測の際に対応できるモデルを作りたいと考えています。

最終的に新たな保護区提案を期待したい。

→EBSAの基準を参考にしながら、温帯域を含む国内の新たな優先保護海域の提案につとめました。

モデルの推定精度



予測モデルの検証は可能なのだろうか。

→現在のデータから推定されたモデルをベースにしていますが、今後の増加の傾向をみて、検証していく必要があると考えています。現在のサンゴ面積とモデルで環境変数から推定して算出するサンゴ面積の相関が0.63となっています。

北上した場合の habitat はあるのか。

→これまでの調査・研究で、温帯域では、一度温暖化により藻場が枯れた後にサンゴが入るケースが圧倒的に多いので、藻場が消滅した場所にサンゴが置き換わることを将来のhabitatとして想定しました。

共生藻の機能や系統との関連をもっと押さえておく必要がある。

→いただいたアドバイスも踏まえ、温帯域と亜熱帯域で褐虫藻の遺伝子型が異なること、次世代シーケンサーでの遺伝系統検出技術の確立・解析まで行いました。今回の結果では、緯度傾斜による種内変異はほとんどみられず、別種間の違いの方が大きい結果となりました。時間とコストの関係上、まだ移植実験などでの各共生藻系統の性質把握が出来ていないため、今後より詳細に共生藻との関係性を明らかにしていきたいです。

サンゴ幼生分散に関して、種によっては精密なモデルが得られることが期待できる。今回の予算とマンパワーだと、網羅的というよりパイロットスタディになるのはやむを得ないだろう

→ご理解・ご考慮いただきありがとうございます。東工大の研究協力者に行ってもらった27年分の海水流動計算と実際の遺伝子流動解析も加えることで、生態学におけるサンゴの分散推定の基礎は出来たと思います。限られたマンパワーながら、本研究では過去に集めたものを含め、全国32地点以上の海域から10種類のサンゴの解析が出来ました。

謝辞

* 環境省総合研究推進費: お金の少ない地方大学の多くの学生の学術研究にも大きく役立ちました。心からお礼申し上げます。

* サンプル採集・データ解析

中村隆志博士、相澤浩明君(東工大)

ポスドク研究員: 北野裕子博士(現琉球大)

学生: 中林朗君、志村晶史君、松田太樹君、谷中絢貴君、東村幸浩君(宮崎大)、善岡祐輝君(沖縄工専)

Agostini Sylvain博士(筑波大学)、野村恵一様(串本海中公園)、中村洋平博士(高知大)

* 研究進行上、重要なアドバイスをいただきました。

アドバイザーの先生方: 山野博哉博士、竹中明夫博士(国環研)、手島康介博士(九大)、横溝裕行博士(国環研)

PO: 原島省様、井上雄三様(国際環境研究協会)

環境省: 藤田道男様、永野雄大様(研究調査室)、山崎麻里様(自然環境計画課)

環境再生保全機構: 角田洋子様

評価委員の先生方