

# 地球温暖化・海洋酸性化が 日本沿岸の海洋生態系に及ぼす影響

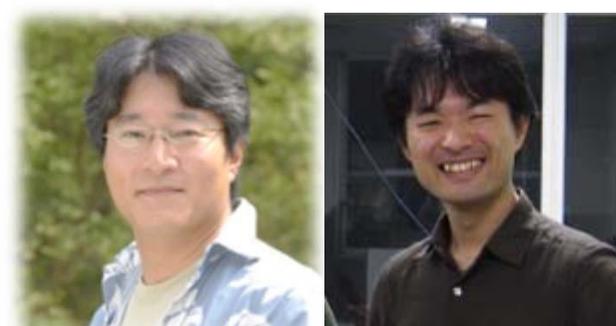
モデルのスペシャリスト  
海洋生態系・物質循環の  
将来予測データ



現場観測のスペシャリスト  
生物分布・多様性・機能に関する  
評価指標



山中康裕・藤井賢彦・高尾信太郎(北海道大学)



山野博哉・熊谷直喜(国立環境研)

分布・多様性・機能に対する  
地球温暖化や海洋酸性化による複合影響・その不確実性を定量的に評価

生物多様性や生態系サービスの維持/向上に向けて優先的に対策を  
講じるべき海域、及びその適切な範囲や時期に関するガイドラインを提示

# 気候変動と沿岸生態系



Millennium Ecosystem Assessment (2006)



生物多様性総合評価報告書(2010)

世界においても日本においても気候変動の影響が急速に増大中  
沿岸域において影響が大きい

# 対象：浅海域（サンゴ礁、藻場、干潟）

高い生態系サービスを持つが、気候変動、陸域負荷など  
環境変化の影響が大きい

全球での生態系サービス試算 [US\$/ha/yr]  
(Costanza et al., 1997)

サンゴ礁



合計： 6,075  
レクリエーション： 3,008  
防災： 2,750

参考 熱帯林：2,007(合計)

藻場  
(海藻・  
海草)



合計： 19,004  
窒素循環：19,002

干潟



合計： 22,832  
窒素循環：21,100

# 気候変動影響評価マトリックス

(d-iii-a,b班の表に対応)

| 対象                      | 手法        | 生態系サービス   | リスク  | 時間解像度   | モデル  | 適応策                                 |
|-------------------------|-----------|---|--|---|--|-------------------------------------|
| サンゴ礁                    | 分布<br>現存量 | 自然災害の緩和<br>地形形成、生物の生息場所の提供<br>遺伝子資源の供給<br>食料の供給<br>リクリエーションの場所の提供 | 白化の頻度・規模拡大<br>分布拡大にともなう生物相変化<br>石灰化阻害<br>(台風による破壊、土砂流入による斃死) | 週～月平均水温(最暖、偏差)<br>月平均水温(最寒)<br><br>月平均 $\Omega$ (最低)?<br>(イベント) | 気候モデル<br>領域海洋モデル<br>分布推定モデル<br>(数kmの空間解像度) | ストレス低減<br>避難地確保<br>保護区の設置・再配置<br>移植 |
| 藻場                      | 分布<br>現存量 | 栄養塩の循環<br>生物の生息場所の提供<br>食料の供給                                     | 分布変化にともなう生物相変化<br>植食魚(アイゴ・イスズミなど)による摂食                       | 月平均水温(最寒?)<br><br>月平均水温(最寒?)                                    | 気候モデル<br>領域海洋モデル<br>分布推定モデル<br>(同上)        | 植食魚除去<br>摂食防止<br>移植                 |
| 養殖対象種                   | 分布        | 食料の供給   | 食料生産の減退  | 月平均水温(最寒・最暖)  | 気候モデル<br>領域海洋モデル<br>(同上)                   | 環境変化に応じた対象種の再検討                     |
| 非食用生物                   | 分布        | 遺伝子資源の供給<br>リクリエーションの場所の提供  | 分布変化による多様性変化   | 月平均水温(最寒・最暖)  | 気候モデル<br>領域海洋モデル<br>(同上)                   | 避難地確保<br>保護区の設置・再配置                 |
| 危険生物<br>(ソウシハギ、シガテラ毒など) | 分布        |   | 刺傷<br>食中毒  | 月平均水温(最寒・最暖)  | 気候モデル<br>領域海洋モデル<br>(同上)                   | 事故を未然に防ぐための教育啓発                     |

# 今年度の主な成果

## 1. モデルの精緻化

- 分布変化と摂食活性変化を考慮した藻場の温暖化の影響評価 (Takao et al., 2015, Ecology and Evolution)
- 水温の年々変動を考慮したサンゴ分布北上予測の高度化 (Takao et al., 2015, Coral Reefs)
- 領域海洋モデルを用いたCoral connectivity分析 (Takao et al., 投稿準備中)

## 2. 生物指標の精緻化

- 大型海藻の分布変化の実証 (Kumagai et al., 投稿中; 投稿準備中)
- 亜寒帯沿岸域における海洋酸性化項目の高精度モニタリング (Takao et al., 投稿準備中)

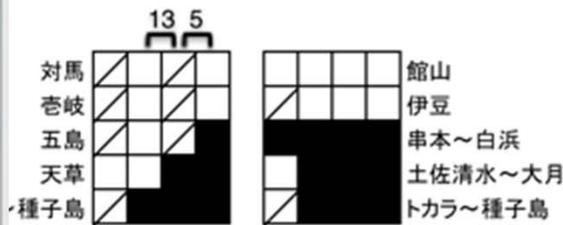
## 3. サンゴに対する温暖化と海洋酸性化の複合影響評価

(Yara et al., 2016)

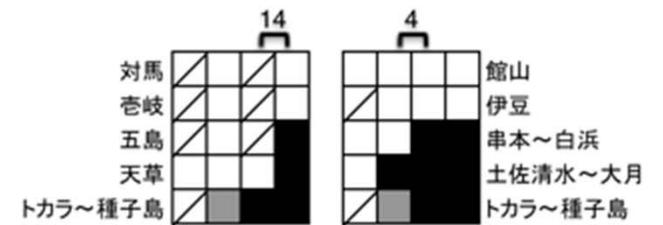
# サンゴの分布北上



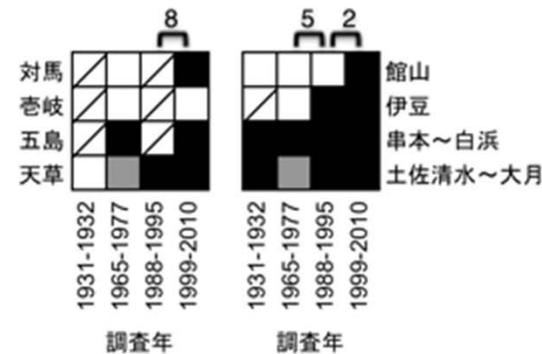
クシハダミドリイシ



スギノキミドリイシ



エンタクミドリイシ



シコロサンゴ



サンゴガニが共生  
(北限記録！)

4種が北上  
北上速度は最大14km/年  
(他の生物より2桁大きい)



スギノキミドリイシ@五島



エンタクミドリイシ@館山

Yamano et al. (2011, 2012)

# 水温の年々変動を考慮したサンゴ分布北上予測の高度化

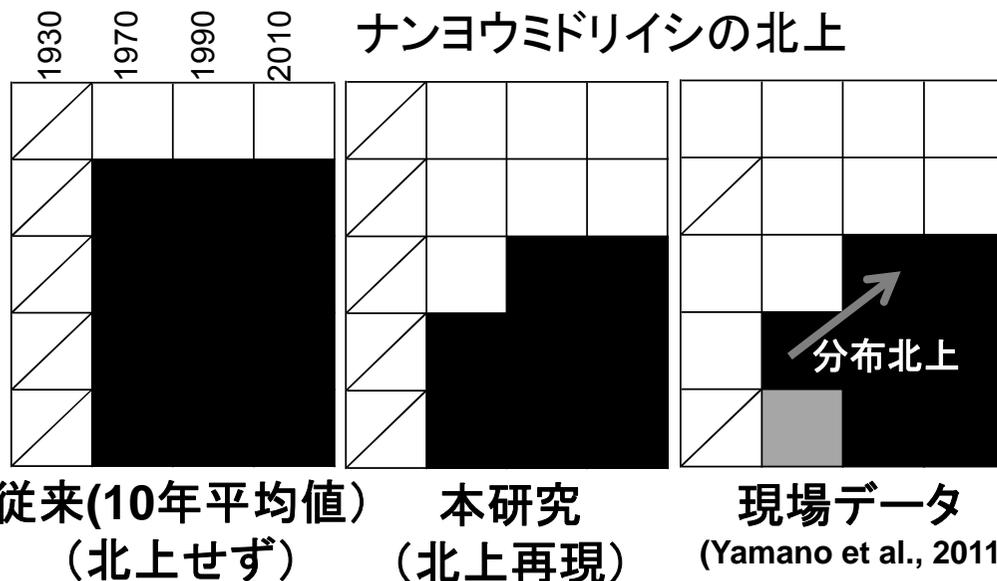
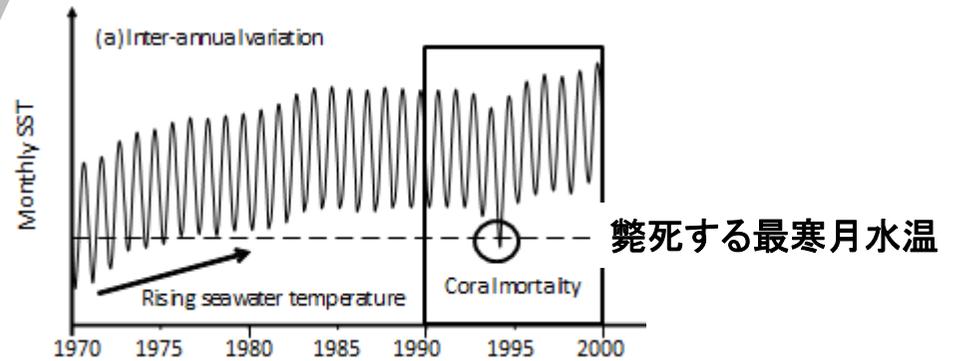


全国8海域でのサンゴのモニタリング  
(2010-継続中)



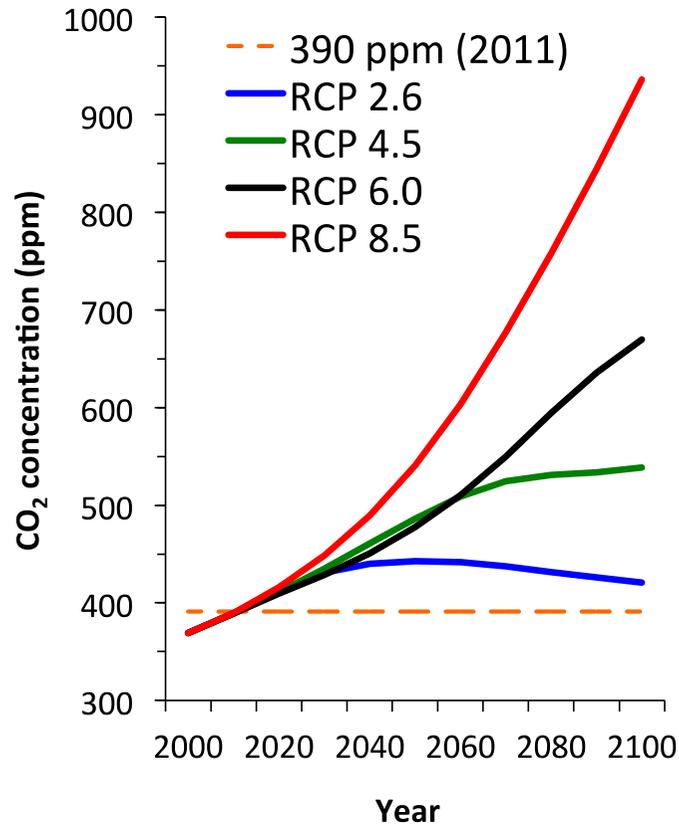
サンゴ斃死水温  
情報の蓄積

月単位での水温変動を予測できる  
気候モデルの出力結果と統合



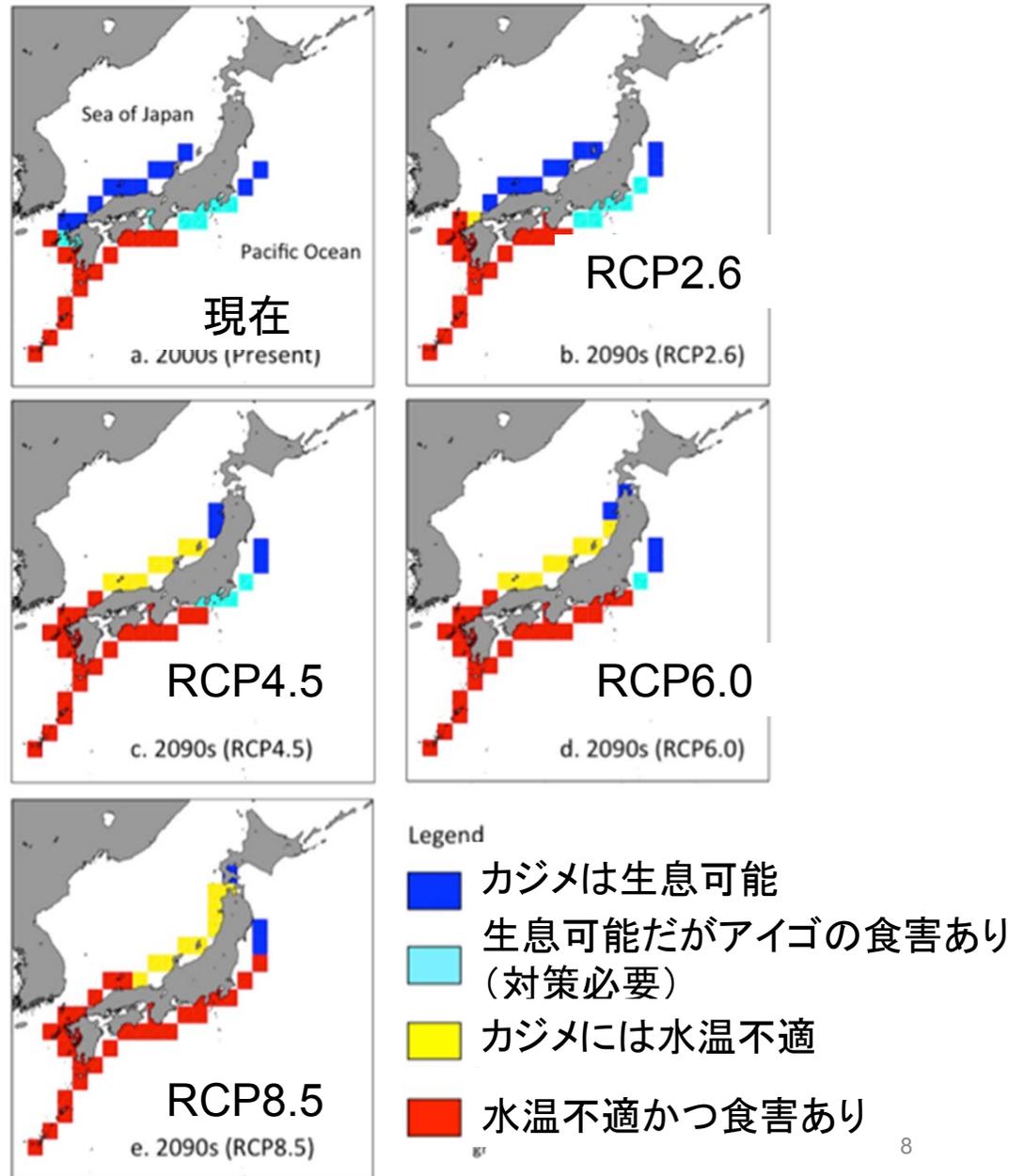
最寒月水温の年々変動とサンゴの斃死水温を考慮することでサンゴ種ごとの北上を再現 → 将来予測の高度化 (Takao et al., 2015, Coral Reefs)

# シナリオによる違い、海藻と植食魚の変化の考慮



排出シナリオに対応した、  
適応策が必要な地域を特定

Takao et al. (2015)



# 今年度の主な成果

## 1. モデルの精緻化

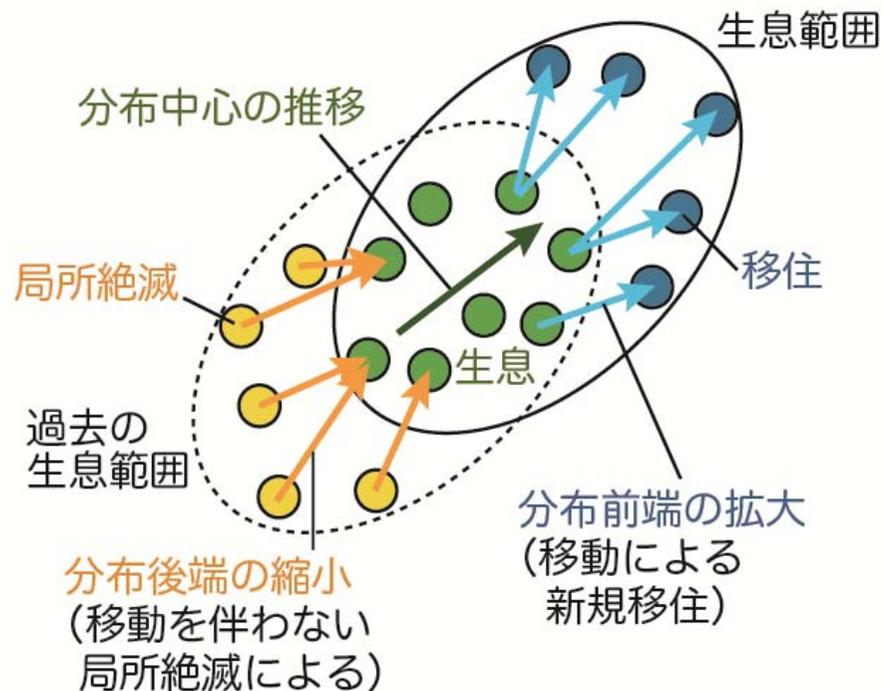
- 分布変化と摂食活性変化を考慮した藻場の温暖化の影響評価 (Takao et al., 2015, Ecology and Evolution)
- 水温の年々変動を考慮したサンゴ分布北上予測の高度化 (Takao et al., 2015, Coral Reefs)
- 領域海洋モデルを用いたCoral connectivity分析 (Takao et al., 投稿準備中)

## 2. 生物指標の精緻化

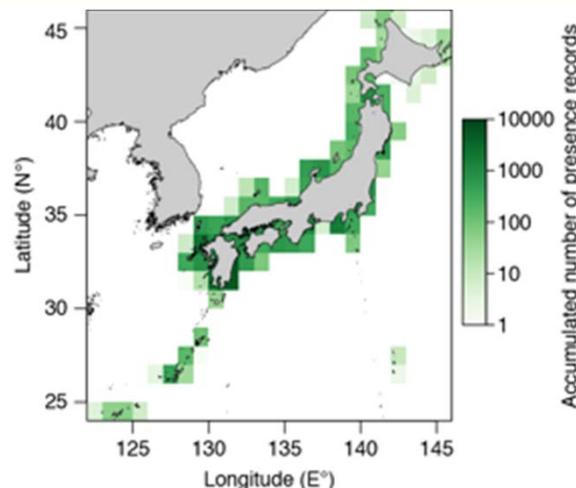
- 大型海藻の分布変化の実証 (Kumagai et al., 投稿中; 投稿準備中)
- 亜寒帯沿岸域における海洋酸性化項目の高精度測定 (Takao et al., 投稿準備中)

## 3. サンゴに対する温暖化と海洋酸性化の複合影響評価 (Yara et al., 2016)

# 大型海藻の生息域推移の予測



大型海藻  
(83種、  
約41,500  
データ)



Kumagai et al. (投稿中)

## ● 分布変化のデータ収集

- ・ 大型海藻 30 種の分布年代変化
- ・ 分布推移パターンの検出

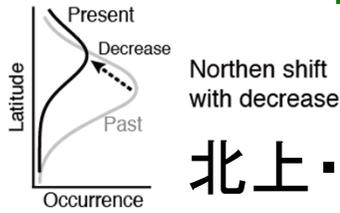
## ● 分布推移モデル

- ・ 分布範囲の変化を推定  
→ 変化の距離・速度など
- ・ 水温、海流など、分布の移動に関する要因
- ・ 地理空間モデル(グラフ理論)

## ● 生息適地モデル

- ・ 生息適・不適地の分布を推定  
→ 地理的分布、年代による変化
- ・ 水温、水質、地形など環境要因
- ・ 統計モデル・マシンラーニング

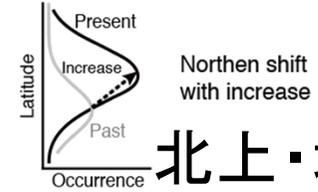
# 各海藻の生息範囲の変化パターン



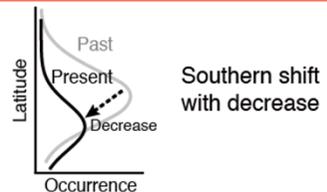
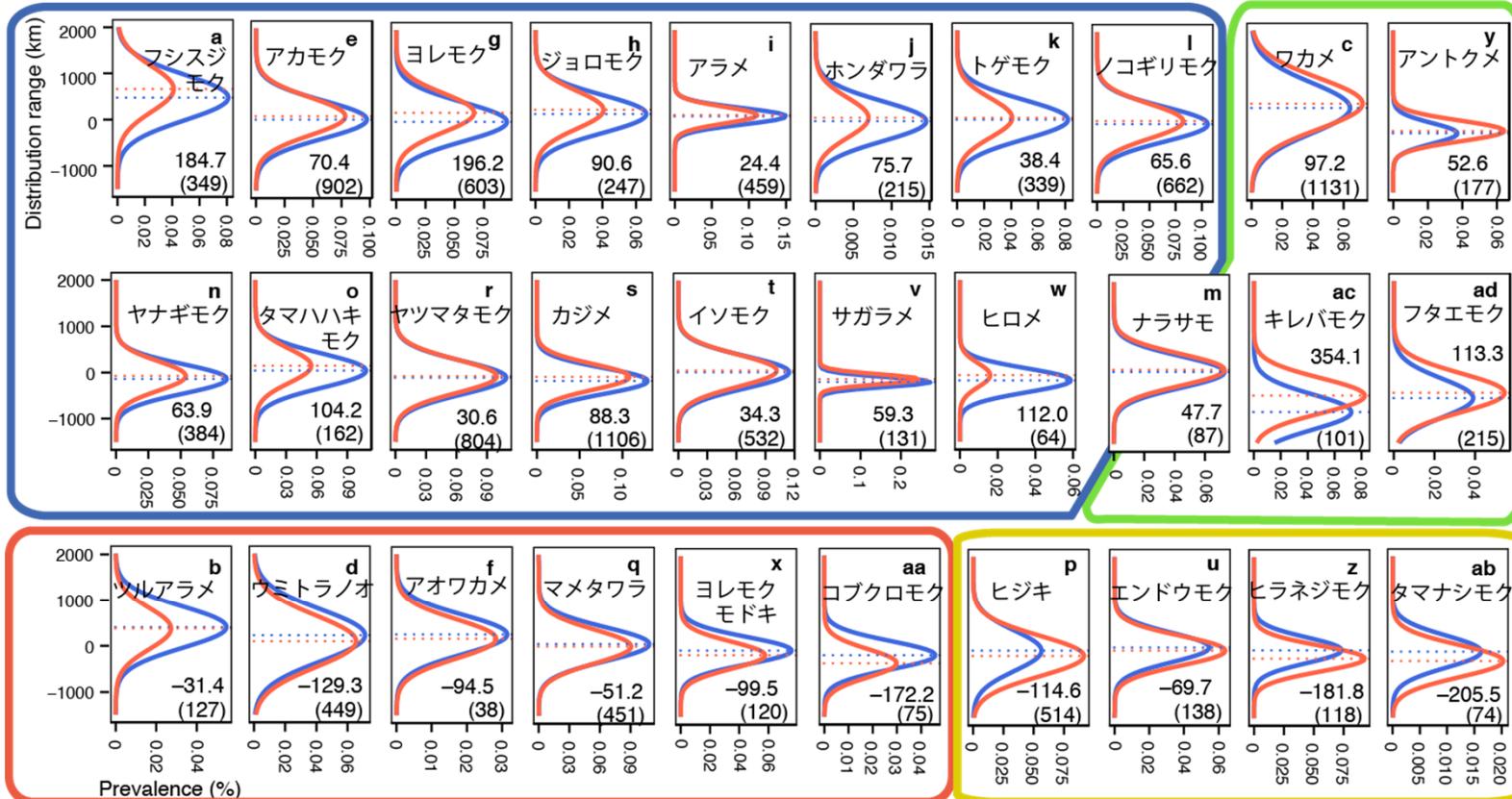
北上・減少

—1970s

—2000s



北上・増加



南下・減少

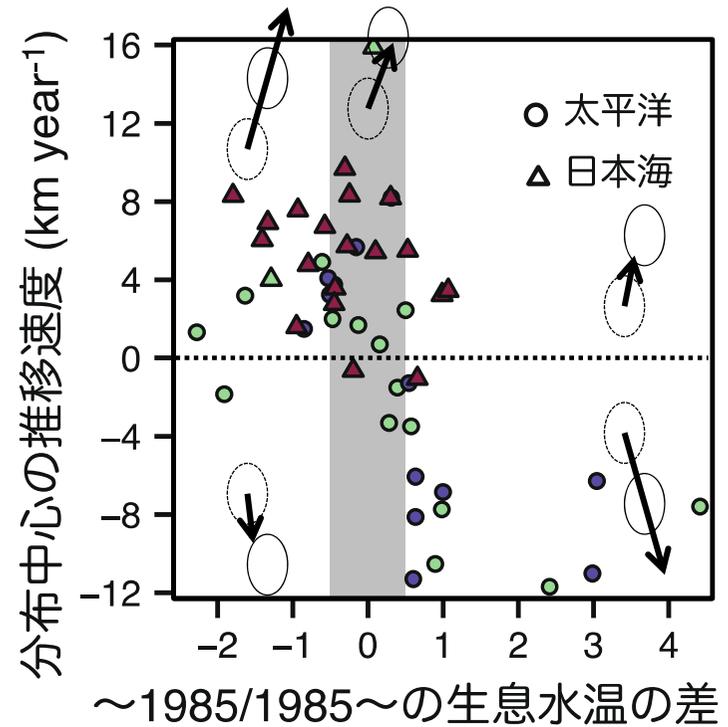
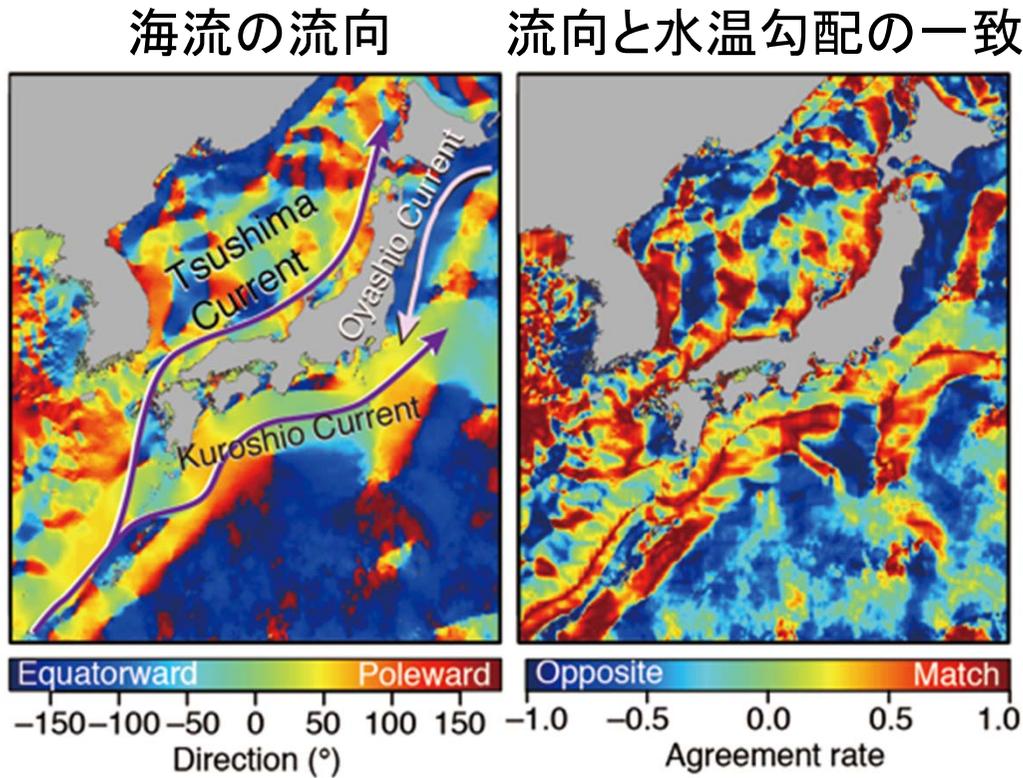


南下・増加

変化は多様。気候変動の予想通りに北上:20種、予想に反して南下:10種

# 大型海藻の生息分布推移と海流の関係

種による北上・南下の違いなど推移速度の違いを、海流の流向との関連で説明



日本海岸：流向と水温勾配の方向が一致(約1)  
 太平洋岸：一致しないことが多い(0～-1が多い)  
 → 日本海岸では低水温側へ北上・逃避できるが  
 太平洋岸では逆流なので困難

(水温：Miroc4h、海流：NEAR-GOOS)

Agreement rate  
 ● > 0.25  
 ● -0.25～0.25  
 ● < -0.25  
 ○ 太平洋岸  
 △ 日本海岸

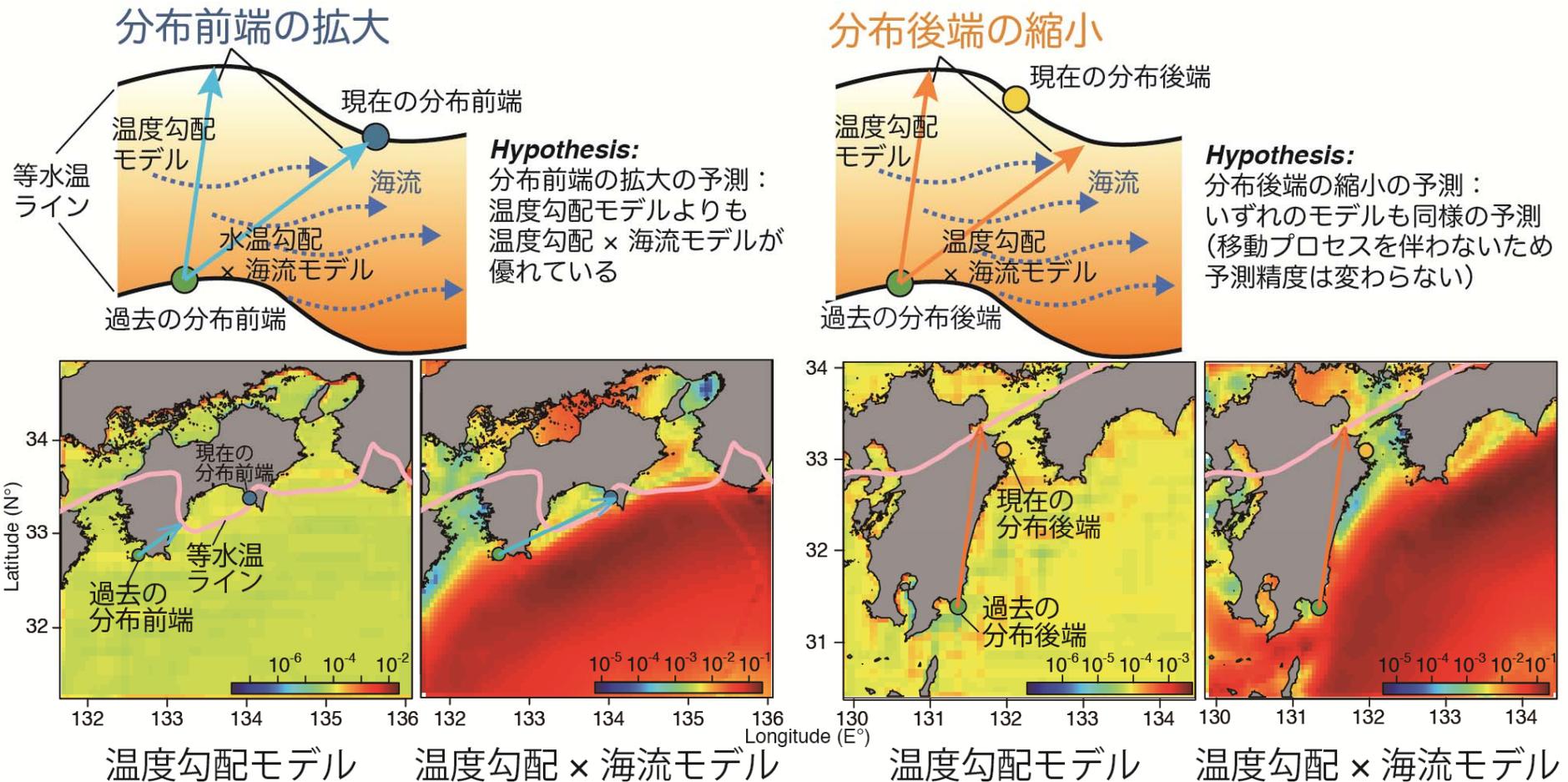
一致率 > 0.25: 水温に追随し分布北上  
 一致率 < 0.25: 弱い北上～南下  
 → 低一致率では種による違いが大きい

# 大型海藻の生息分布推移のモデル(方法)

Climate velocity: 等水温ラインを追いかけた場合の分布推移予測モデル

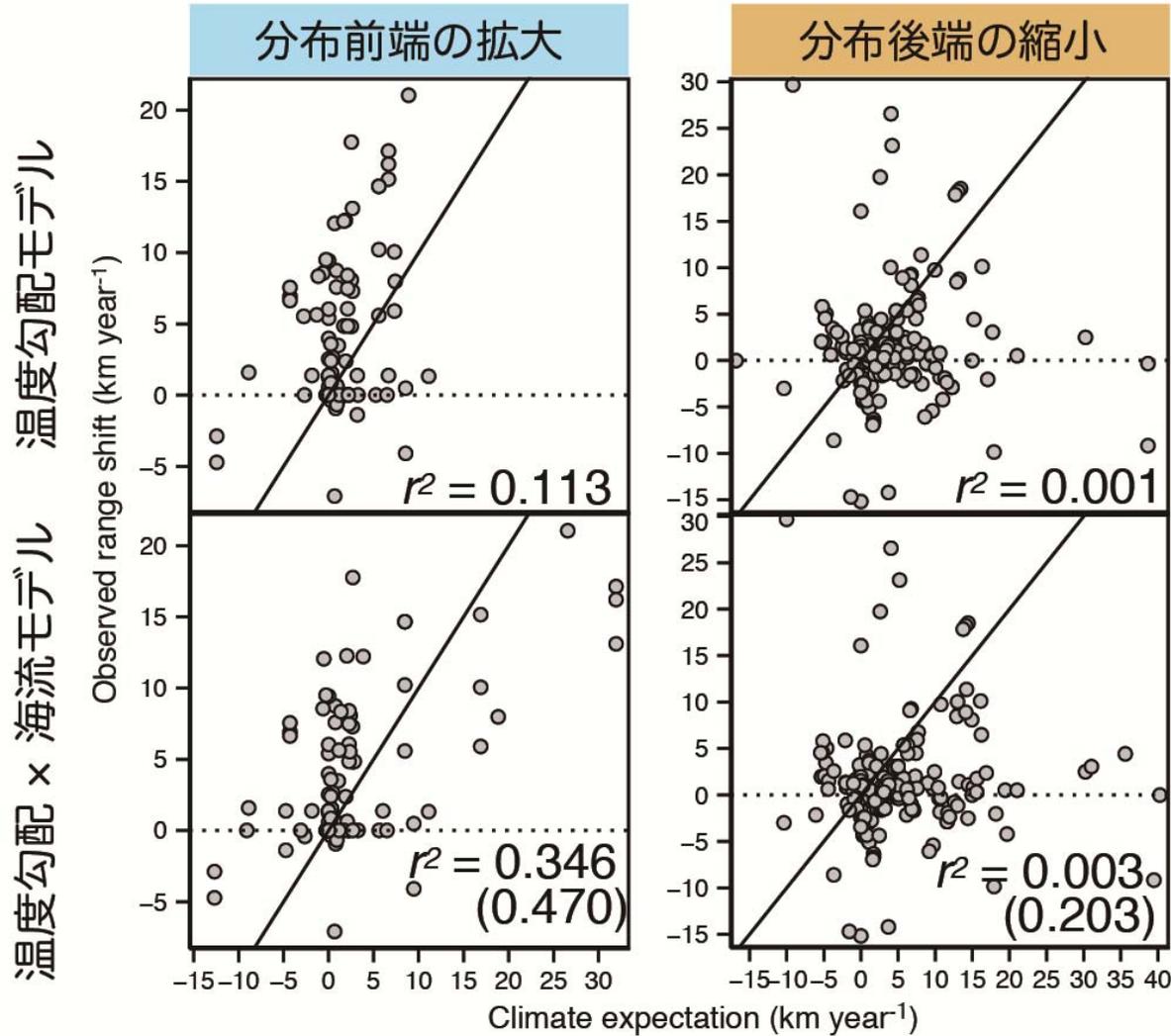
→モデルの拡張: 温度勾配、海流に基づく非対称な”移動しやすさ”の導入(1/抵抗)

→温度勾配モデル、温度勾配×海流モデルによる最小コストの移動先を求める



# 大型海藻の生息分布推移のモデル(結果)

Climate velocityによる分布推移の予測



$r^2$ : Climate velocityの決定係数(ベストモデル)

●分布前端の拡大:

温度勾配 × 海流モデル

> 温度勾配モデル

(移動プロセスの再現)

●分布後端の縮小:

温度勾配 × 海流モデル

= 温度勾配モデル

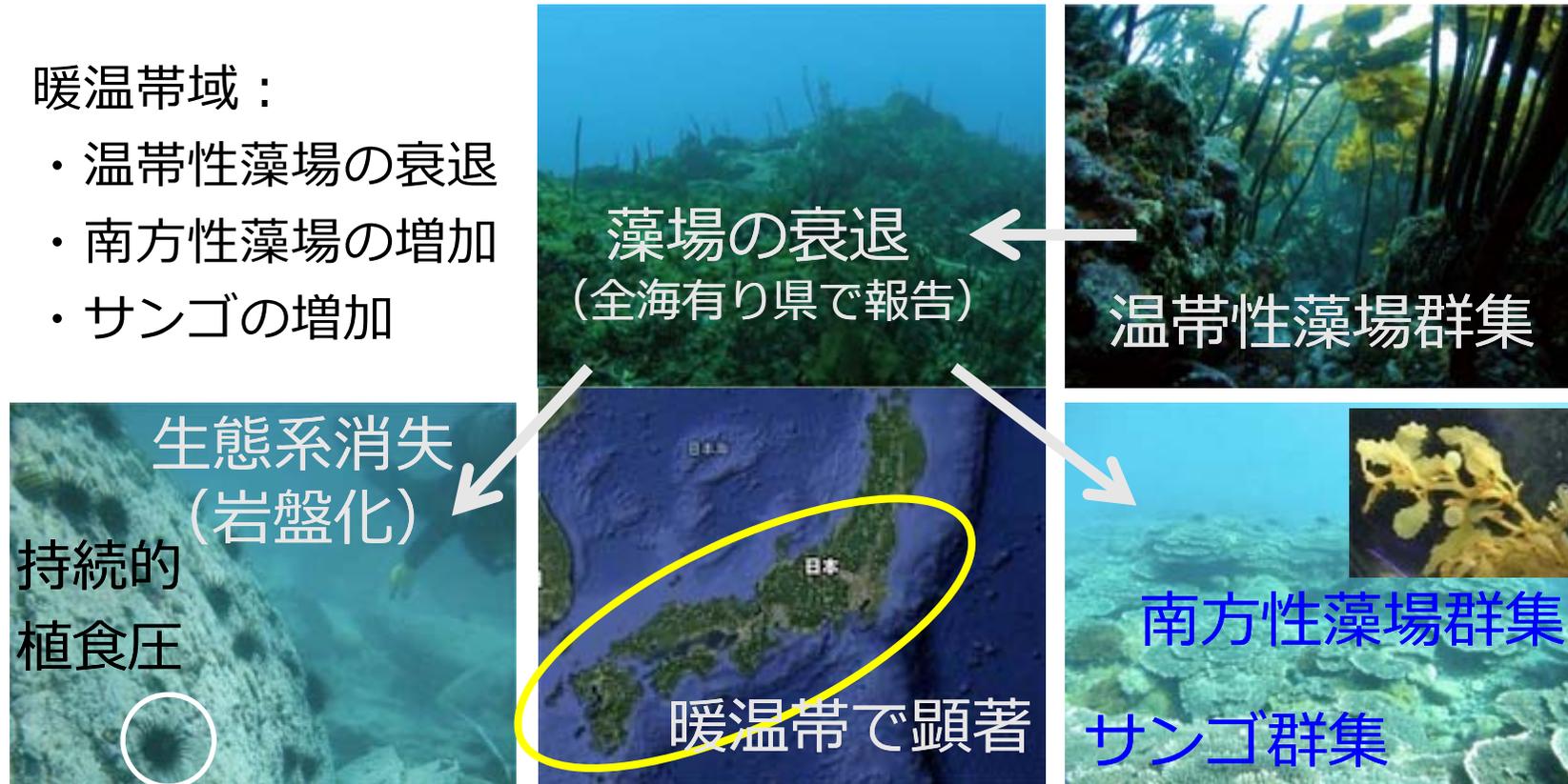
(移動を伴わないので、同

程度に予測力が低い結果)

# 大型海藻とサンゴの生息適地モデル

暖温帯域：

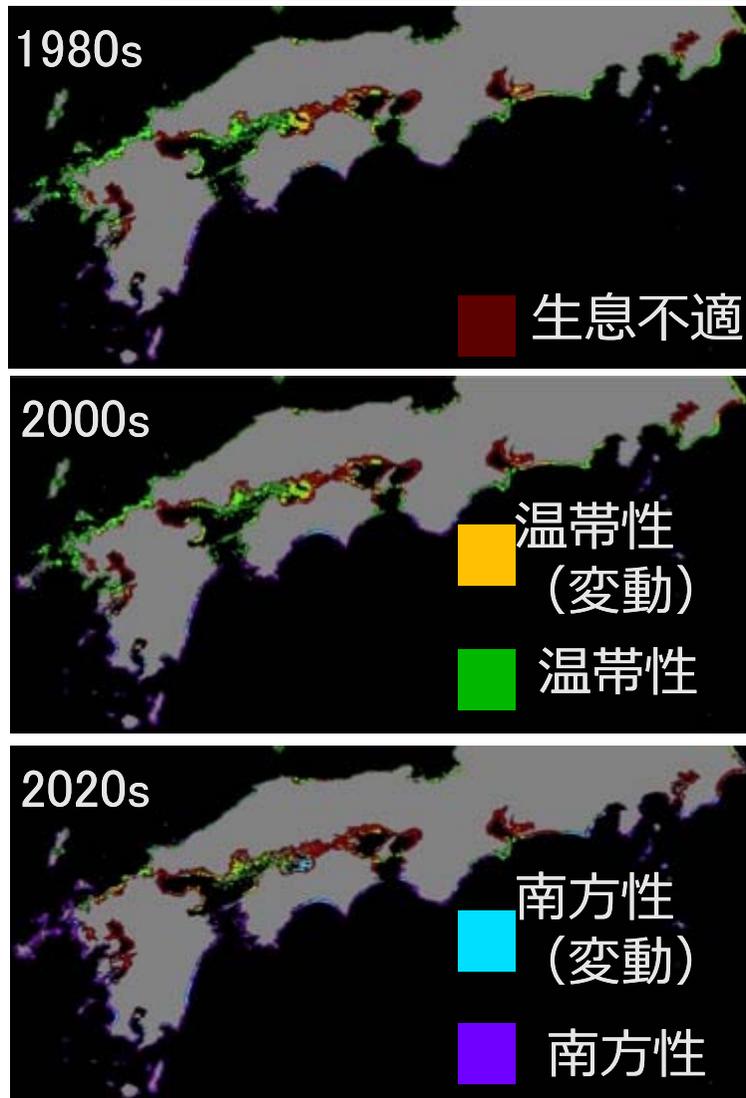
- ・ 温帯性藻場の衰退
- ・ 南方性藻場の増加
- ・ サンゴの増加



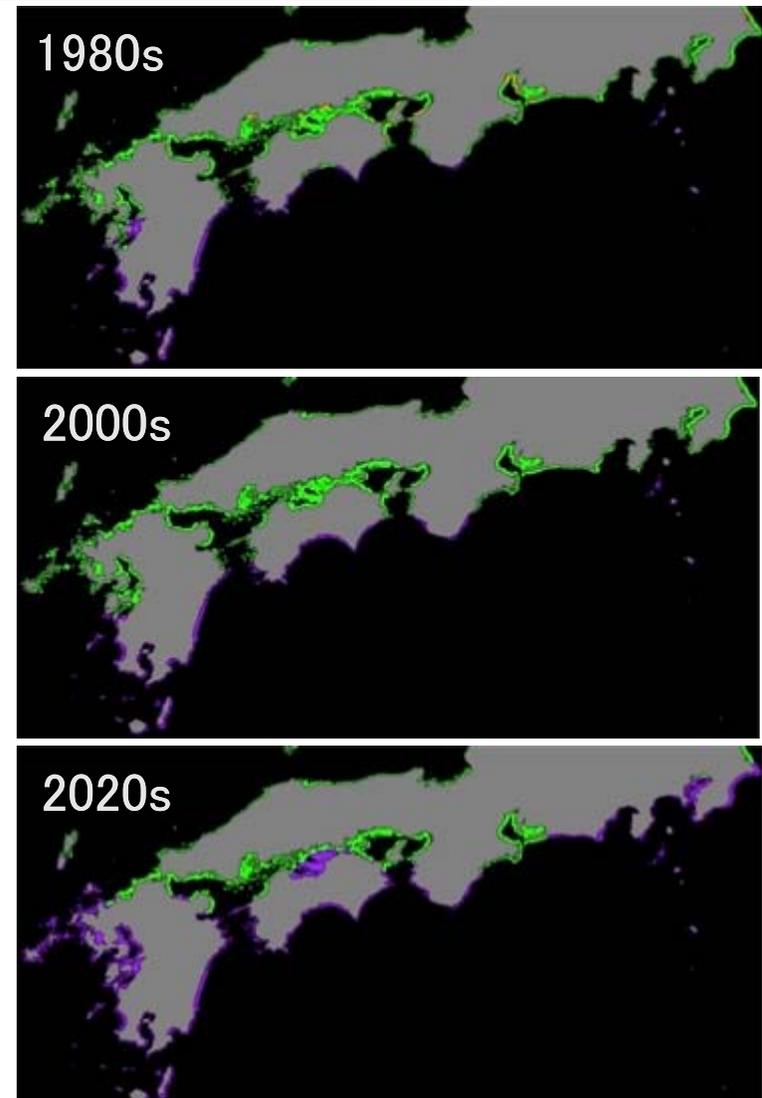
- 生息適・不適地の分布を推定→地理的分布、年代による変化を空間補間
- 統計モデル・機械学習 7 手法：水温、水質、地形など 9 環境要因を説明変数
- 水温を気候予測値に置換え、近将来予測 (Miroc4h)

## 温帯・南方性種の生息適地分布の推定・予測

海水温 + その他の環境要因



海水温のみ



- 他の環境要因を含めたモデルは、正答率が約 10% 向上
- 南方化は太平洋側ほど早く、2020s では全般に南方化
- 水温のみのモデルでは、変動や生息不適が再現不可（他要因も重要）
- 各地方に南方化の進行が遅めな場所が残る（保護区適地）

# まとめ

## 1. モデルの精緻化

- 分布変化と摂食活性変化を考慮した藻場の温暖化の影響評価  
(Takao et al., 2015, Ecology and Evolution)
- 水温の年々変動を考慮したサンゴ分布北上予測の高度化  
(Takao et al., 2015, Coral Reefs)
- 領域海洋モデルを用いたCoral connectivity分析  
(Takao et al., 投稿準備中)

## 2. 生物指標の精緻化

- 大型海藻の分布変化の実証  
(Kumagai et al., 投稿中; 投稿準備中)
- 亜寒帯沿岸域における海洋酸性化項目の高精度測定  
(Takao et al., 投稿準備中)

→ 海洋生物の分布は、気候変動の影響で現在急激に変化しつつあり、今後も変化を続けると予測される

## 3. サンゴに対する温暖化と海洋酸性化の複合影響評価

(Yara et al., 2016)

→ 将来のCO<sub>2</sub>排出抑制は影響緩和に有効

# 今後の予定

## 分布予測の高度化

- 領域海洋モデルを用いた予測
- 水温以外の環境要因、光透過度・地形等多変量での評価
- モニタリングの継続による閾値設定  
(海洋酸性化に関しては日周変化も考慮)



生物多様性のリスク評価・予測、海域の特徴づけ、保全への道筋  
海洋生態系・水産資源に依存する沿岸地域社会における  
適応策への貢献

(これまでの成果は環境省気候変動への適応計画策定の際の根拠  
資料として提出)