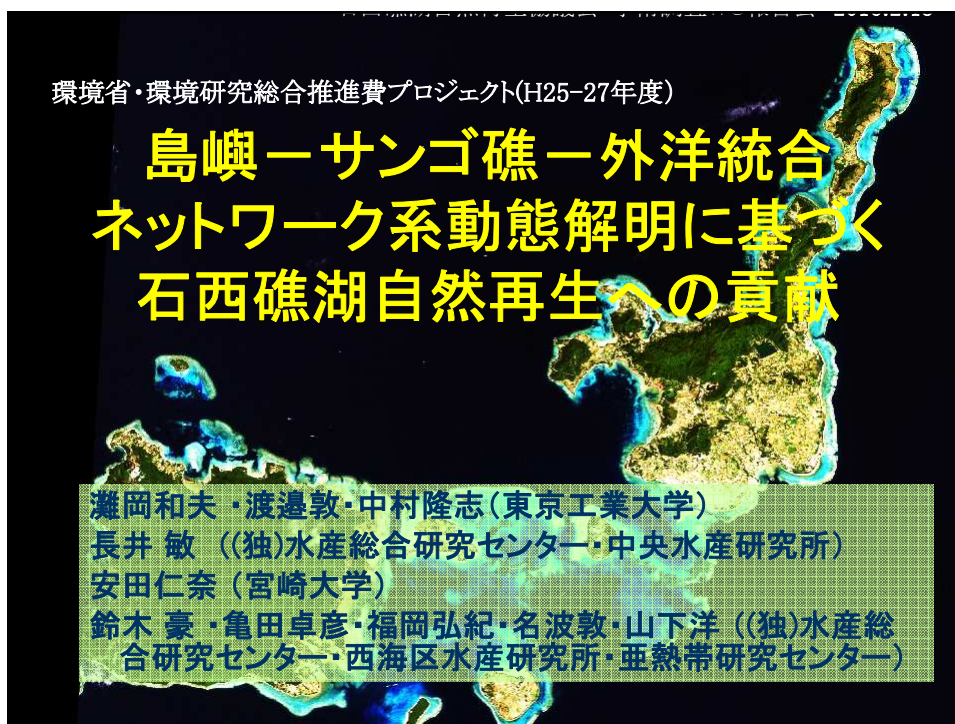




本研究の目的:

石西礁湖生態系のレジリエンス劣化をもたらしている原因やオニヒトデの大量発生の慢性化に関する機構を解明し、それらによって有効なサンゴ礁生態系再生方策につながる科学的知見をもたらす

主要テーマ:

「島嶼－サンゴ礁－外洋統合ネットワーク系」解析に基づく

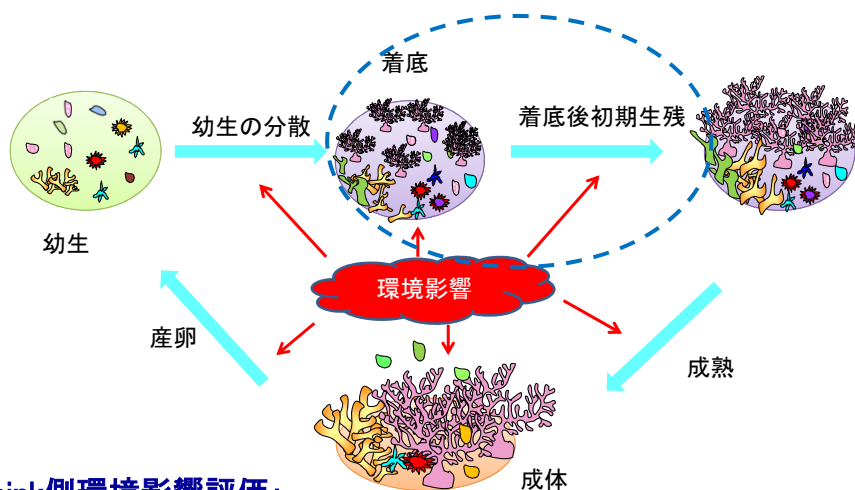
A) サンゴ礁生物の幼生分散・加入によるsource-sink多重連結構造の実態解明と環境影響評価、それによる”負の連鎖構造”の解明

B) 幼生分散過程での餌料環境や稚ヒトデの生残率制御要因の把握に基づくオニヒトデ大量発生・維持機構の解明

主要なアウトプット:

- 1) 石西礁湖及びその周辺沿岸域での重点的保全海域の同定
- 2) 生態系保全・再生のための陸源負荷削減目標等の定量化

A)サンゴ礁生物の幼生分散・加入によるsource-sink多重連結構造の実態解明と環境影響評価、それによる”負の連鎖構造”の解明



sink側環境影響評価:

重要性が高いにもかかわらず解明が遅れている
着底から初期生残過程への環境影響に着目

B)幼生分散過程での餌料環境や稚ヒトデの生残率制御要因の把握に基づくオニヒトデ大量発生・維持機構の解明

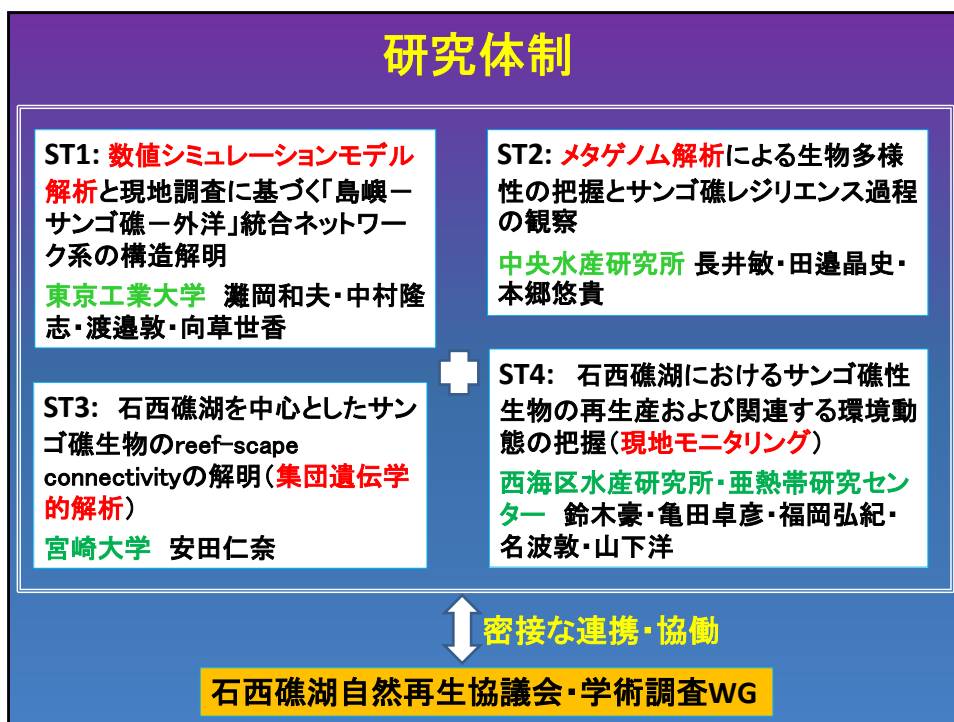
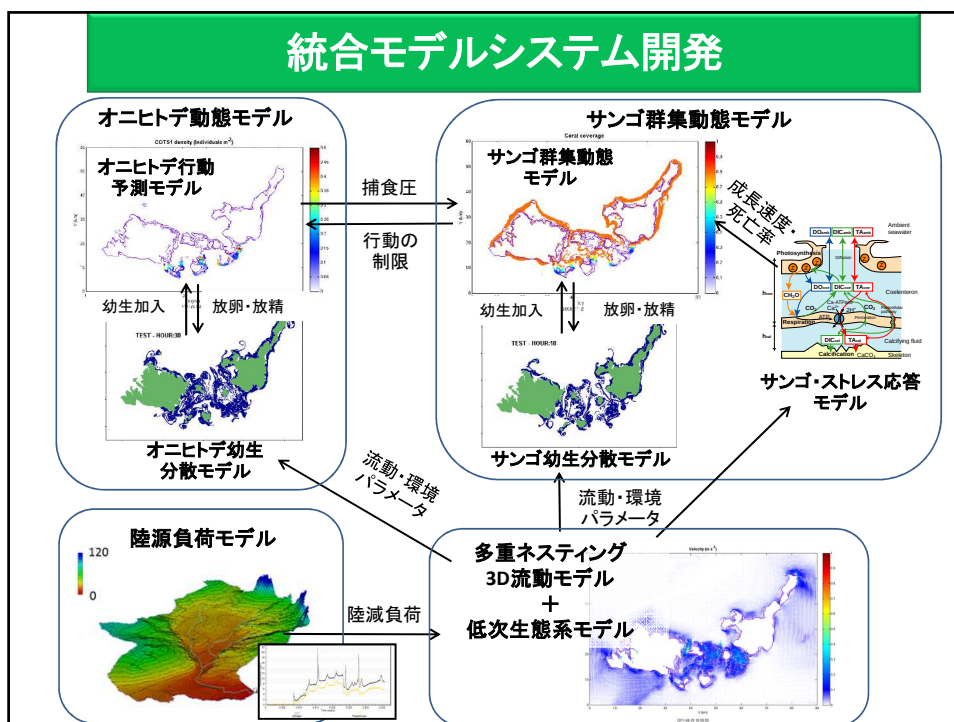
GBRIにおける大量発生の有力仮説:「栄養塩説」

陸域からの栄養塩流入→餌となる植物プランクトン増加
→オニヒトデ浮遊幼生の生残率up

石西礁湖でも富栄養化が大量発生の原因?

課題

- ①野外でのオニヒトデ幼生検出技術が未発達
→新たな幼生検出技術の開発
- ②オニヒトデ幼生の餌料内容が不明
→メタゲノム解析
- ③栄養塩環境が大きな時空間変動性を持つ
→広域多点一斉調査+長期定期的調査
- ④オニヒトデの各生活史段階への環境影響が不明
→オニヒトデ餌料環境・動態モデルの開発と解析



サブテーマ(1)数値シミュレーションモデル 解析と現地調査に基づく「島嶼-サンゴ礁-外 洋」統合ネットワーク系の構造解明

灘岡 和夫・中村 隆志・渡 邊敦・向 草世香
(東工大)

幼生分散過程における生化学的効果のモデルへの
取込み等によって、**数値モデル体系を進化**させる。ま
た陸源負荷物質の海域での広がりや、サンゴやオニヒ
トデの幼生のConnectivityを解明する為に必要な、**海水
流動や水質分布特性に関する現地観測**を実施する。
他のサブテーマの成果も含める形で、石西礁湖周辺海
域における島嶼からの環境負荷及びサンゴ礁生物の
分散・再生産過程を“島嶼-サンゴ礁-外洋統合ネット
ワーク系”の観点から包括的に解明する。

サブテーマ1の主要研究項目

- 1) 石西礁湖および周辺海域のサンゴ群集の長
期的変遷
- 2) 海水流動と水質分布特性に関する現地観測
- 3) 統合モデルシステム開発・・・**最後に説明**

1) 石西礁湖および周辺海域の サンゴ群集の長期的変遷

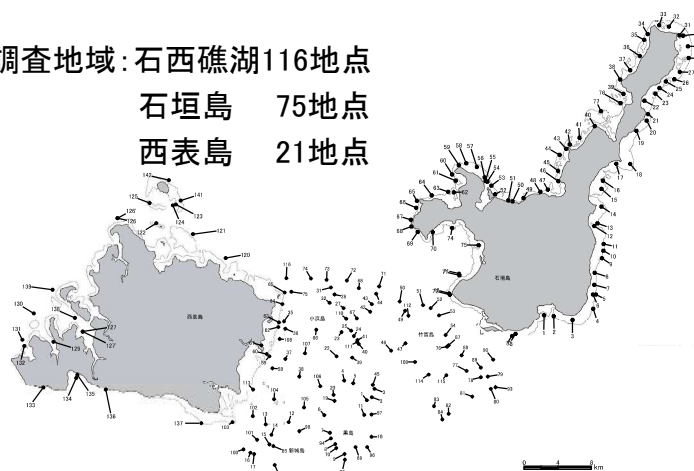
目的

1998年から2013年に行われたモニタリングサイト1000
定点観測データの解析から、石西礁湖および周辺海域の
サンゴ被度変遷の傾向を分類し、その要因を検討する。

調査地域：石西礁湖116地点

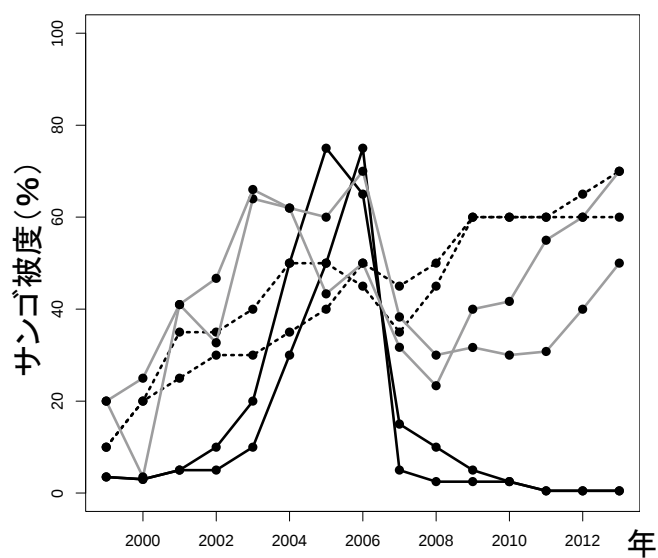
石垣島 75地点

西表島 21地点

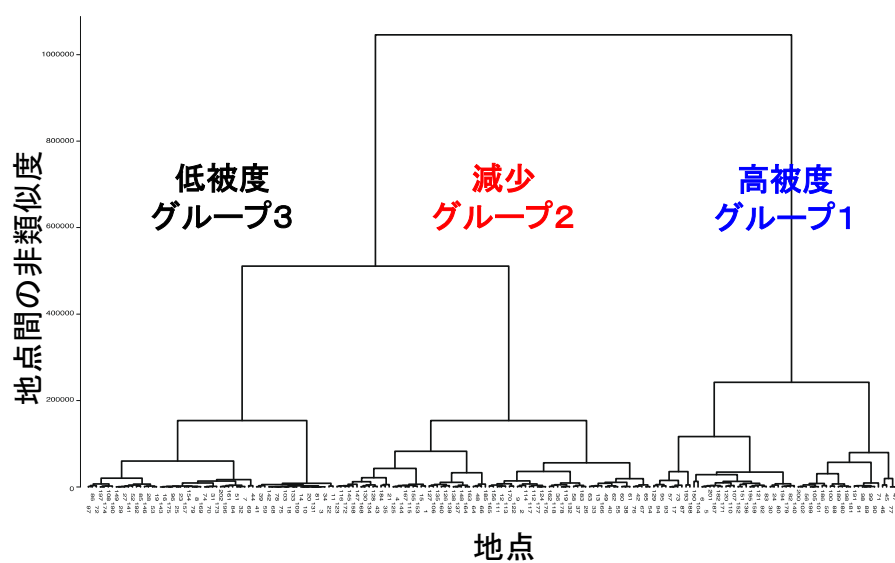


【方法】クラスター解析

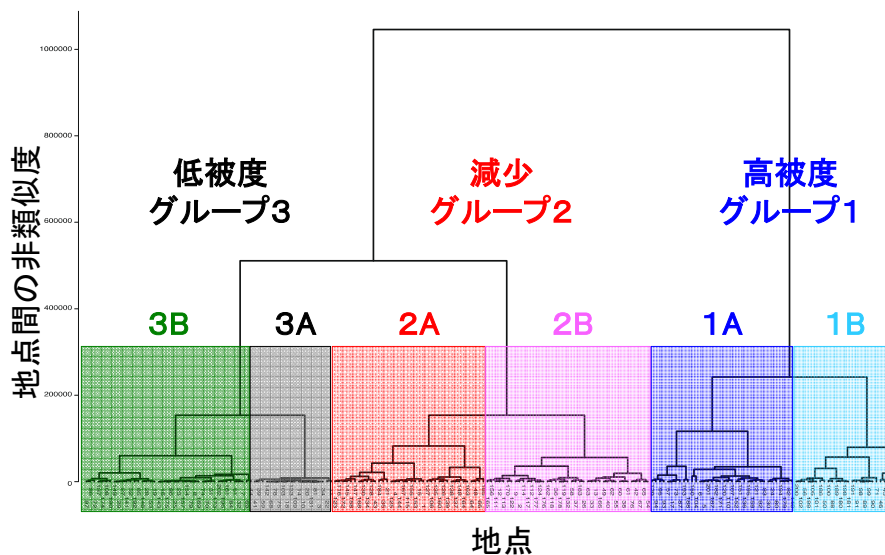
サンゴ被度の絶対値と年変化が似ている地点をグループ化



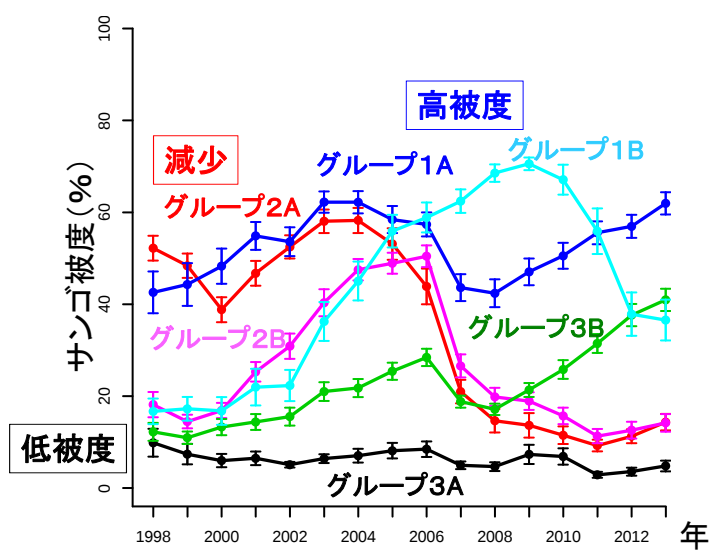
【結果】デンドログラム



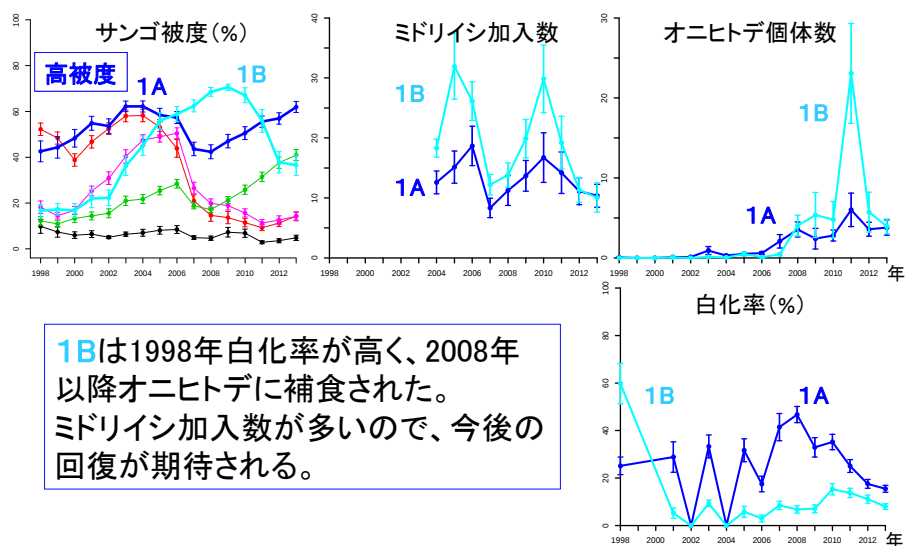
【結果】デンドログラム



【結果】6つのグループに分類



【結果】高被度1A・1B

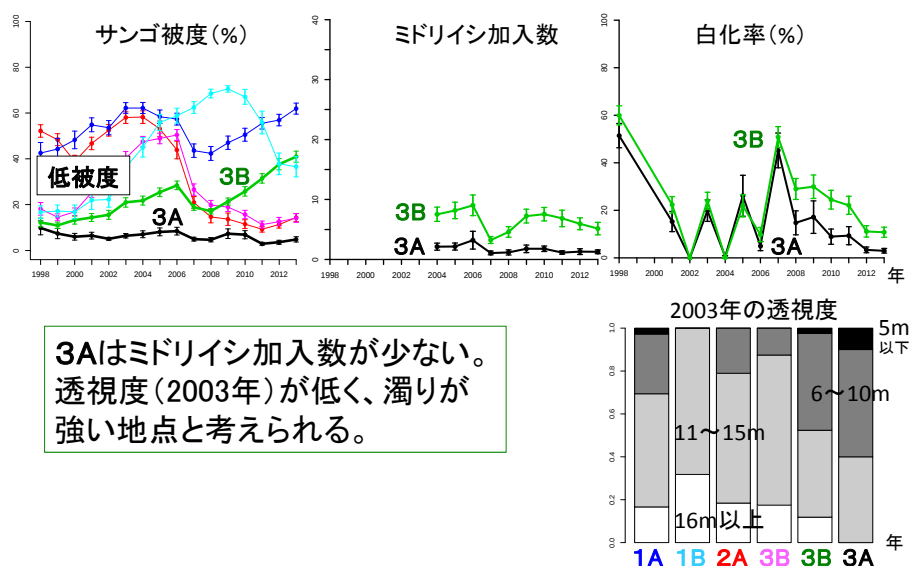


【結果】高被度1A・1Bの空間分布

1Aはヨナラ水道、石西礁湖の外縁部
1Bは石西礁湖・西表島北部、石垣島北西部



【結果】低被度3A・3B

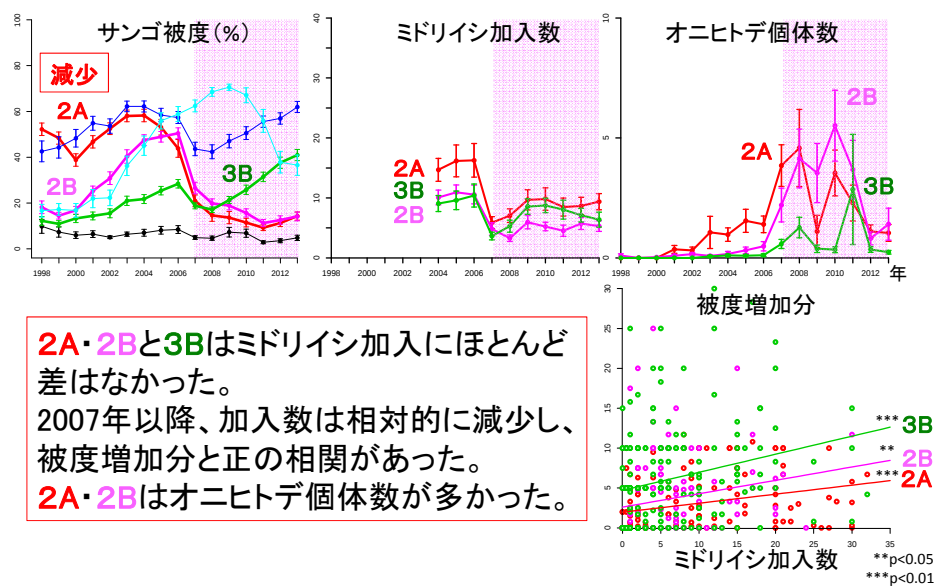


【結果】低被度3A・3Bの空間分布

3Aは小浜島東部、内湾
3Bは石垣島東部、高被度グループの内側



【結果】2007年同じ被度 **2A**・**2B**・**3B**

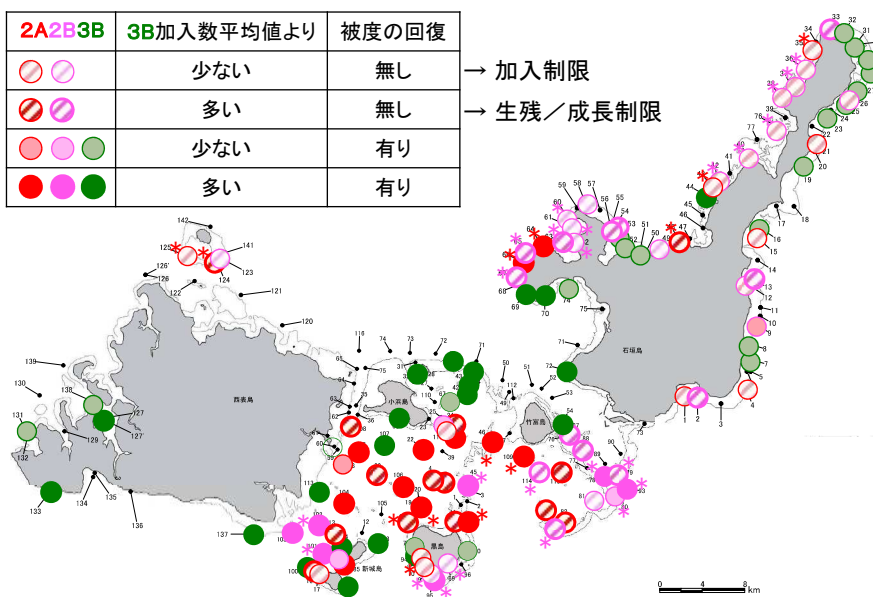


【結果】**2A**・**2B**・**3B**の現状

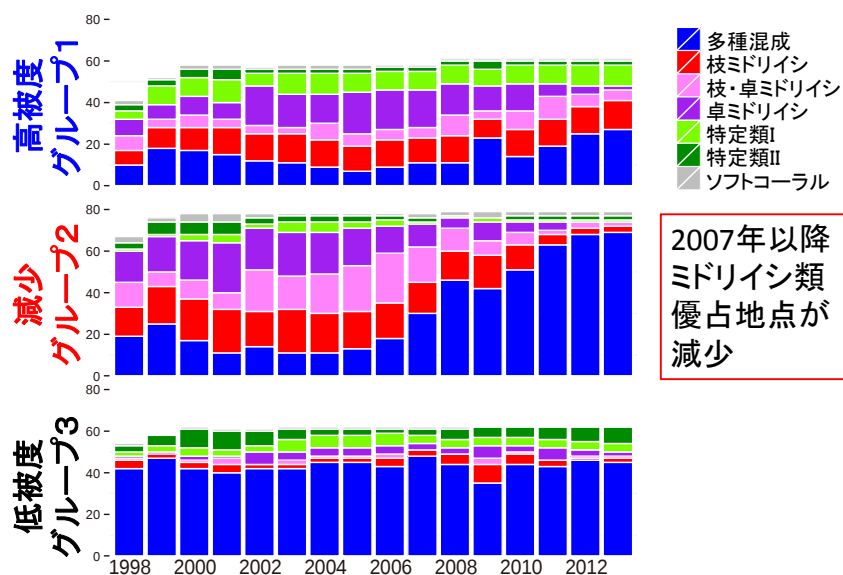
* オニヒトデ個体数>5

2A2B3B	3B加入数平均値より	被度の回復
 	少ない	無し
 	多い	無し
  	少ない	有り
  	多い	有り

→ 加入制限
→ 生残／成長制限



【結果】各グループのサンゴ型



【まとめ】

●高被度グループ

2010年以降オニヒトデ捕食によって被度が減少した地点があるが、ミドリイシ加入数が相対的に多いため回復が期待できる。

●低被度グループ

濁りが強くサンゴの生育に適さない地点と緩やかに被度が増加している地点がある。

●2007年以降減少グループ

2008年以降のオニヒトデ捕食でサンゴの回復が妨げられた。加入が少なく回復できない地点、加入は多いが生残／成長が悪く回復できない地点を特定することができた。今後は物理的環境条件との関係性を検討する予定。

サブテーマ1

2) 海水流動と水質分布特性に関する 現地観測

2016/3/13

2016年1月15日 アドバイザリーボード会合

23

Introduction: オニヒトデの大量発生の仮説

栄養塩仮説

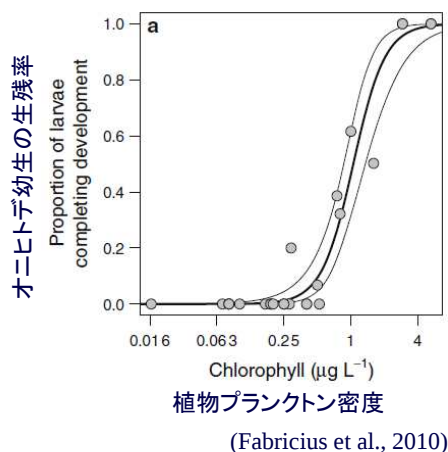
オニヒトデ幼生の生残率は餌となる植物プランクトンの増加に伴い、急激に上昇する。

植物プランクトンは主に陸域起源の硝酸やリン酸などの栄養塩を用いて増殖する



陸からの栄養塩の負荷が増えることでオニヒトデの大量発生が起きやすくなる??

人為的な影響の可能性！



水質分布特性に関する調査

広域多点一斉採水地点



2016/3/13

25

調査時期・地点

広域多点一斉採水

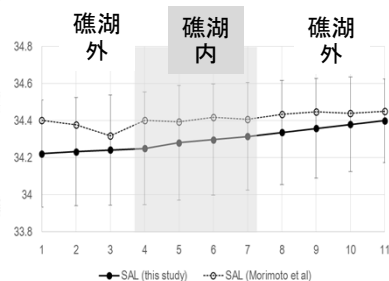
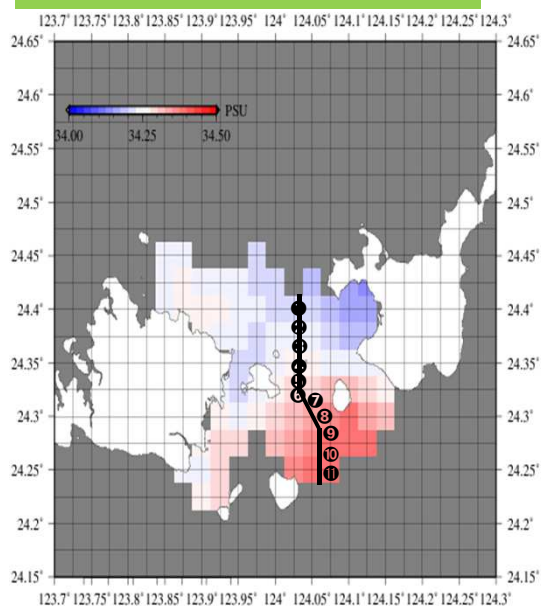
調査時期	調査地点(数)	潮	備考
2013年6月17日	SS01～30 (30)	小潮	
2013年6月18日	SS01～30 (30)	長潮	
2013年6月21日	SS08～36 (29)	中潮	台風直後
2013年8月27日	SS01～36 (36)	中潮	
2013年9月5日	SS01～36 (36)	大潮●	台風後
2014年6月7日	SS01～30 (30)	長潮	出水翌日
2014年6月13日	SS03～30 (28)	大潮●	
2015年6月25日	SS02～43* (30)	長潮	

*SS01,06,15,21,22,27,31～36の12点除く。

26

表層塩分・平均値

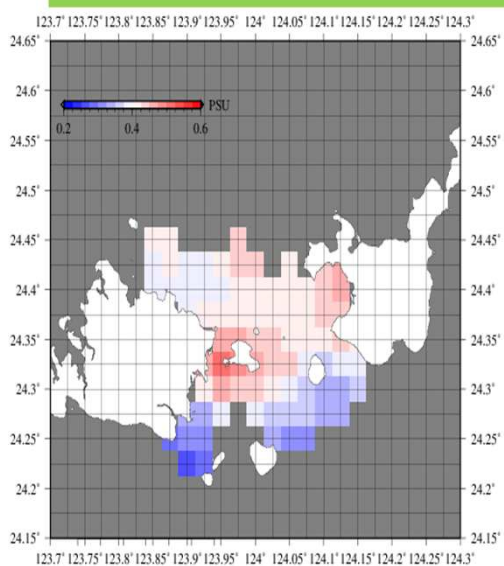
(8回分のデータを平均し空間補間)



測点①～⑪で観測された過去(2004-2005年)のデータとの比較。

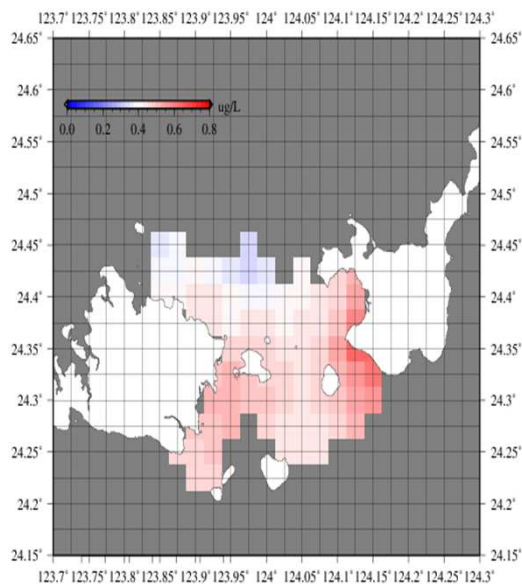
→塩分は石西礁湖の南で高く、北に行くにつれ低くなる傾向(“南高北低”) 27

表層塩分・標準偏差



塩分は小浜島周辺や名蔵湾で変動が大きいことが分かった。これは台風時等の出水の影響を受けやすいためと考えられる。

表層Chl-*a*・平均値

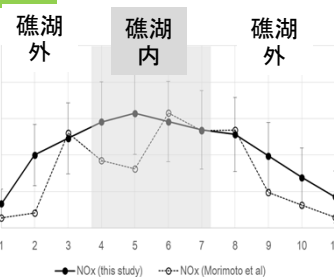
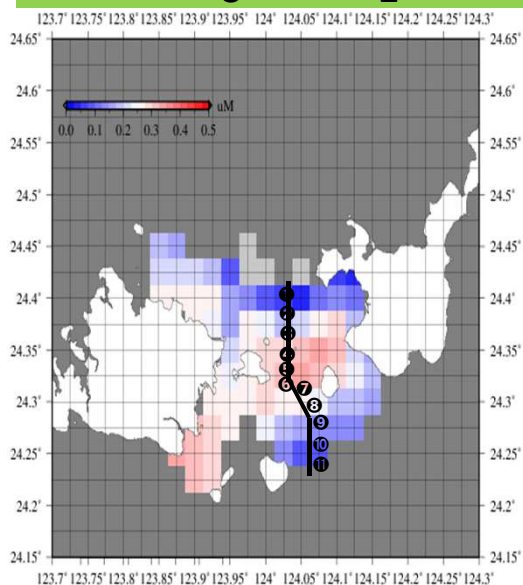


Chl-*a*は石垣沿岸や西表沿岸で高めになる傾向が認められた。

2µm以上の植物プランクトンについても、2013年では40%以上の海域でオニヒトデ幼生が餓死する水準(0.25µg/L)は超えていた(Suzuki, Yasuda, et al.準備中)。

29

表層NO₃+NO₂・平均値



測点①～⑪で観測された過去(2004-2005年)のデータとの比較。

→石西礁湖内から北礁に掛けて、NO₃+NO₂(NO_x)濃度が高い海域が認められた。

30

水質の空間分布構造まとめ

平均的にみて：

- 塩分は南高北低の傾向→全体として淡水が北に運ばれ易い。
 - Chl-*a*は石垣島および西表島沿岸でやや高い。
 - NO_xは石西礁湖内～北礁でやや高い。
- といった特徴が認められた。

→環境データの平均値や標準偏差と、他サブテーマで得られた生物データとの関係を現在解析中。

31

サブテーマ2：メタゲノム解析による生物多様性の把握とサンゴ礁レジリエンス過程の観察

水産総合研究センター 長井・田邊・本郷

目的：

- 1) 石西礁湖内外における島嶼からの陸源負荷が生物多様性・分布密度・種組成に及ぼす影響をメタゲノム解析により明らかにする。
- 2) サンゴの深刻な食害種であるオニヒトデ幼生およびその胃内容物をPCRベースの手法で検出し、餌生物特定を行う。
- 3) サンゴの着底板を設置し、サンゴ幼生の着底後の初期減耗に影響する要因を明らかにする。
- 4) 白化現象を解明するため、サンゴあるいは褐中藻のトランスクリプトーム解析を実施する。

珪藻出現量の推定(珪藻の配列数/全配列数)



サブテーマ2 成果の取りまとめ

海水のメタゲノム解析の結果、生物多様性の高い海域と低い海域があること、また、河川由来の栄養塩の供給起源を明らかにした。

→ 珪藻の出現量を把握することで、河川由来の栄養塩供給源は、ある程度、特定可能であった。

メタゲノム解析により、オニヒトデ幼生の餌生物を検出する手法の開発に成功した。

→ 渦鞭毛藻、繊毛虫、珪藻等の微細藻類、デトライタスも捕食している可能性が示唆された。

サンゴ着定板のメタゲノム解析の結果、海藻や微小なベントスを検出することに成功した。地点によりその組成が大きく異なった。

→ 稚サンゴの成長と着定板上の生物組成との因果関係は、未解明のまま課題として残った。

サンゴのトランスクリプトーム解析を実施し、高水温期と非高水温期間の遺伝子発現量に差のあることを明らかにした。

→ 現在、詳細について、解析中である。

サブテーマ3: 石西礁湖を中心としたサンゴ礁生物のreef-scape connectivityの解明

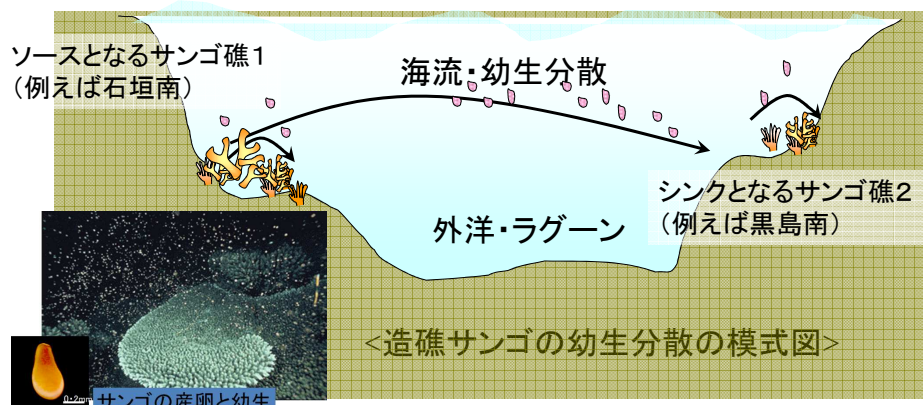
安田ほか(宮崎大)

長い時間スケールで蓄積された再生産過程を明らかにするべく、石西礁湖におけるfine-scaleでのconnectivityを集団遺伝構造から推定する。集団遺伝解析の結果は最終的に、数値モデルから得られた種々の環境要因の空間的なばらつきと比較してサンゴ礁生物の再生産に及ぼす要因を推定する。

サブテーマ3の研究課題

- 1) 対象種として調べた、ミドリイシの仲間(クシハダミドリイシ)、アオサンゴハナヤサイサンゴ類 における種ごとに**connectivityの強い空間の区切りを集団遺伝解析により明らかにする。**
- 2) 各種のコネクティビティにおける海流の果たす役割の大きさをサブ1で推定した幼生の物理と遺伝距離を比較することで推定(アオサンゴ)
- 3) 可能な限り、管理ユニット内の遺伝子流動の方向を推定し、特に重要なソースエリアを推定
- 4) 着定板についた幼生の遺伝子型を解析し、ソース海域を同定することで、1世代でどの程度分散しているかを明らかにする。
- 5) 近縁種ごとの遺伝子型分布(褐虫藻遺伝子型)を明らかにし、サブ1と生存を支配する環境要因Reef-Scape connectivity(サンゴ礁景観によるコネクティビティ)を明らかにしサンゴの保全のためにどの環境要因が最も大切であるかを把握する。
- 6) **オニヒトデ幼生の分布を調べ、遺伝子同定する**

幼生分散によるサンゴ礁間の繋がり の 解明



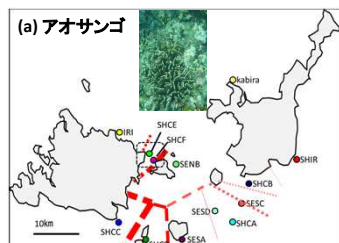
⇒サンゴ礁間の**幼生分散**を**遺伝的な繋がり**から**推定**

サンゴは幼生分散によって空間的に離れた群集間が繋がって支え合っているの
その空間構造を具体的に明らかにし、その中の重要なソース・シンク海域を海洋保
護区として保全することが重要

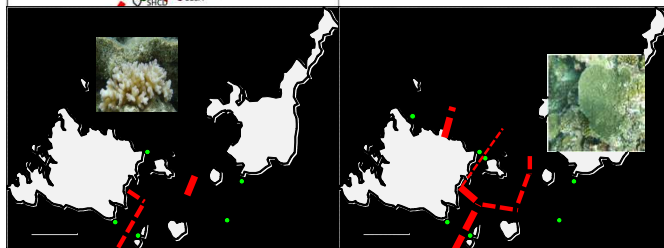
方法: 石西礁湖周辺でのサンプリングと解析



対象種3種から推定された幼生分散の障壁(赤線)



新城⇔西表南東
西表東の北⇔南
ヨナラ水道の東⇔西
など類似した遺伝構造が見られた
→海域間をつなぐ幼生分散は
限られている



赤線は遺伝的に以外のあった集団間を区切る線(太いほど違い大)
赤線内の空間→互いに幼生が行き来しやすい海域
幼生分散の障壁(赤線)で区分された海域ユニットごとに保全する必要

世界初の本格野外オニヒトデの広域密度分布調査の結果

プランクトンネットで採集



顕微鏡観察



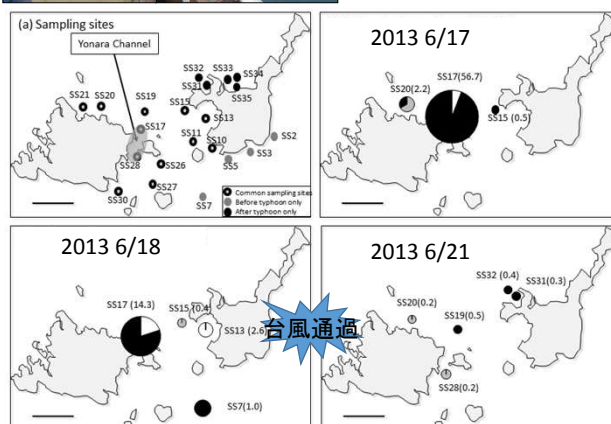
幼生単離



DNA抽出



種を同定



ヨナラ水道出口付近で、
56.7個体/m3のオニヒト
デ幼生集団を検出
⇒台風通過後の6/21に
は、高密度集団は消え
ていた。

サブテーマ4：石西礁湖におけるサンゴ礁性生物の再生産および関連する環境動態の把握

(独)水産総合研究センター西海区水産研究所

亜熱帯研究センター

鈴木 豪、亀田 卓彦、福岡 弘紀、名波 敦、山下 洋

年単位の短い時間スケールで起こっている、サンゴ礁生物の島嶼-サンゴ礁-外洋間のconnectivityを明らかにするために、衰退傾向にあるサンゴ礁生態系の主要生物に着目し、現地調査によりそれらの再生産変動を捉える。具体的には、造礁サンゴの初期加入、**オニヒトデ幼生の餌環境**、沿岸魚類の集合産卵に関する調査を実施する。また、それぞれの再生産に関わる環境要因を調査し、サンゴ礁の衰退をもたらす要因を推定する。

■植物プランクトン環境の季節変化

- これまで亜熱帯域は季節変化が小さいと考えられ、琉球諸島沿岸で季節変化に関する報告はない
- 季節変化を把握し、オニヒトデ産卵期の特徴を明らかにする

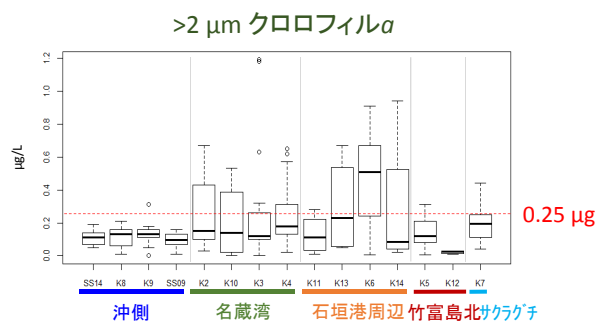
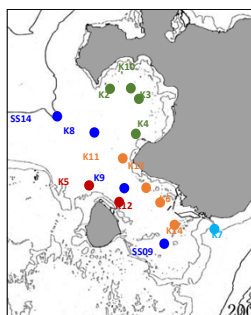
調査方法

- 2014年1月から2015年7月まで毎月
- 陸域の影響が大きい石垣島名蔵湾と、外洋水の影響が大きい石西礁湖南東で調査
- 陸域の影響が大きい水域での植物プランクトン群集の特性を明らかにする

オニヒトデ産卵期の植物プランクトン

各点におけるクロロフィル a 濃度(全期間の集計値)

- 幼生の餌料サイズはナノサイズ(>2 μm) 以上 (Okaji *et al.*, 1997)
- 幼生はクロロフィル a 濃度が<0.25 $\mu\text{g/L}$ では生残出来ない (Fabricius *et al.*, 2010)



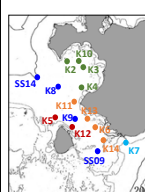
名蔵湾と石垣港周辺で高い

オニヒトデ産卵期の植物プランクトン

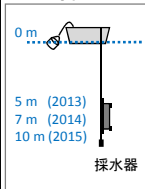
>2 μm クロロフィル a 濃度

2014年

2015年

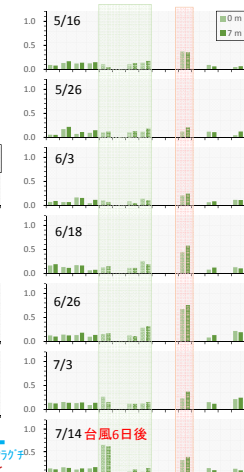
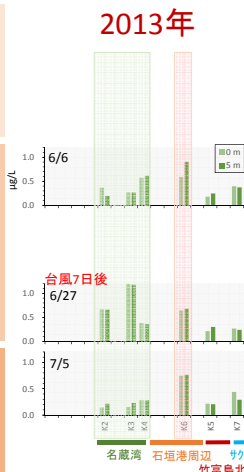


採水

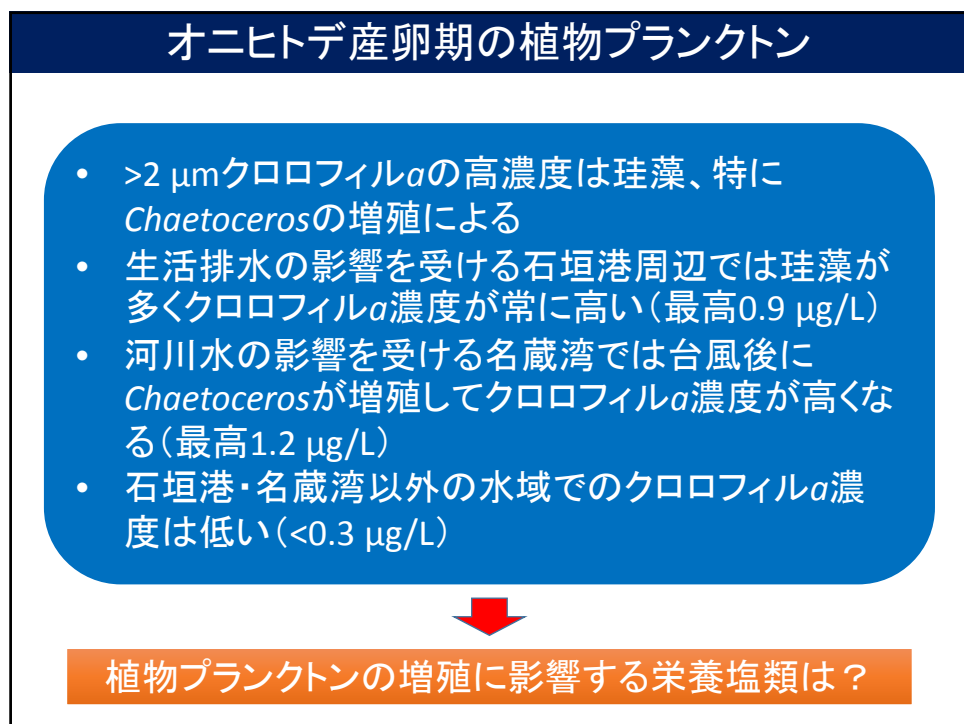
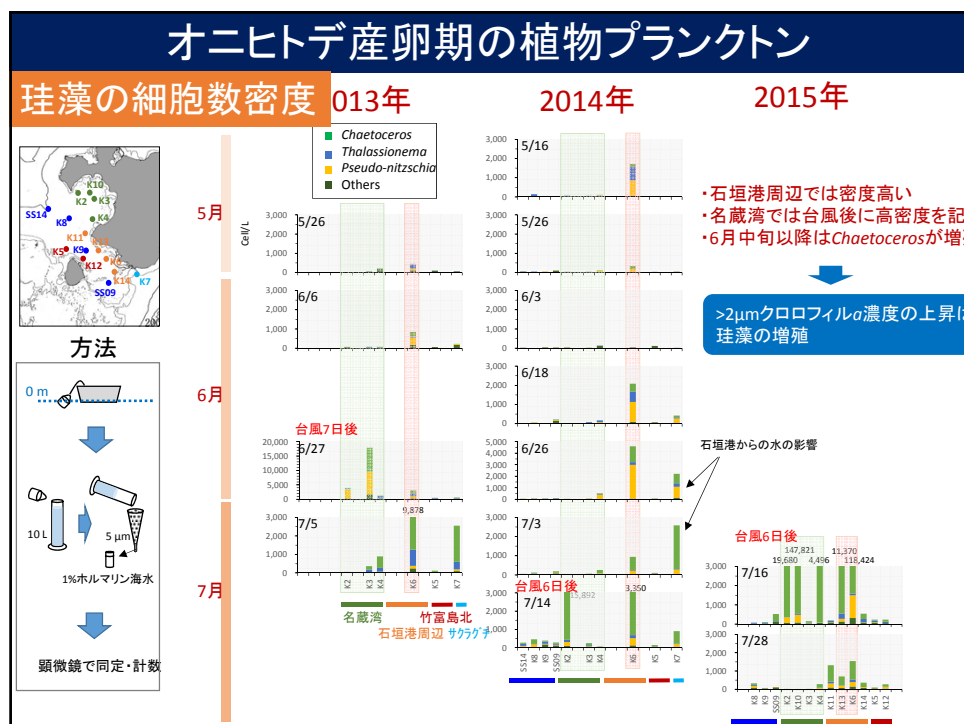


5月
6月
7月

2013年

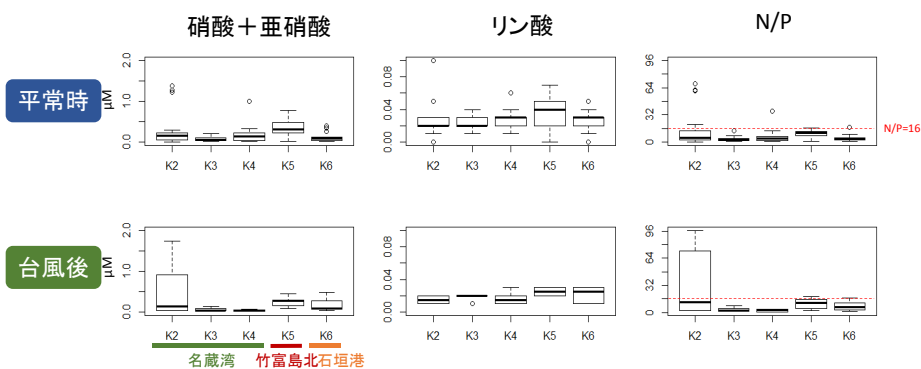


- 石垣港周辺では高い
- 名蔵湾では台風後に高い濃度を記録



オニヒトデ産卵期の栄養塩類

主要点における平常時と台風通過後の栄養塩類



名蔵湾

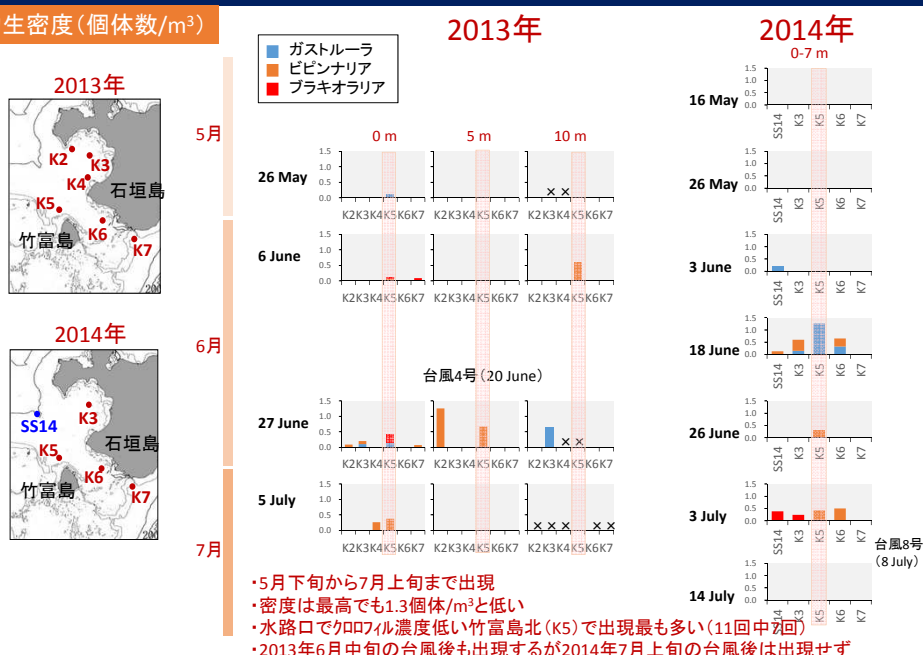
- ・K2では平常時、台風後とも硝酸＋亜硝酸の変動大きい ←河川水の影響
- ・台風後はリン酸が低下 ($P < 0.05$) ←植物プランクトンの増殖による

石垣港

- ・硝酸＋亜硝酸、リン酸の変動は小さい

オニヒトデ浮遊期幼生

幼生密度 (個体数/m³)



オニヒトデ浮遊期幼生

- 産卵1～2日後の発生段階であるガストルーラ幼生の出現から、5月下旬から6月下旬まで産卵は行われている
- 幼生の出現水域とクロロフィル a 濃度との関連はみられない
- 竹富島北で最も出現率高い(65%)
- 幼生はクロロフィル濃度の高い石垣港周辺にも出現することから多量の餌に遭遇する機会はある
- 台風による大きな攪乱は、産卵期の後半では幼生散逸による加入減少効果が大きい？

サブテーマ4でのオニヒトデ餌料環境調査のまとめ

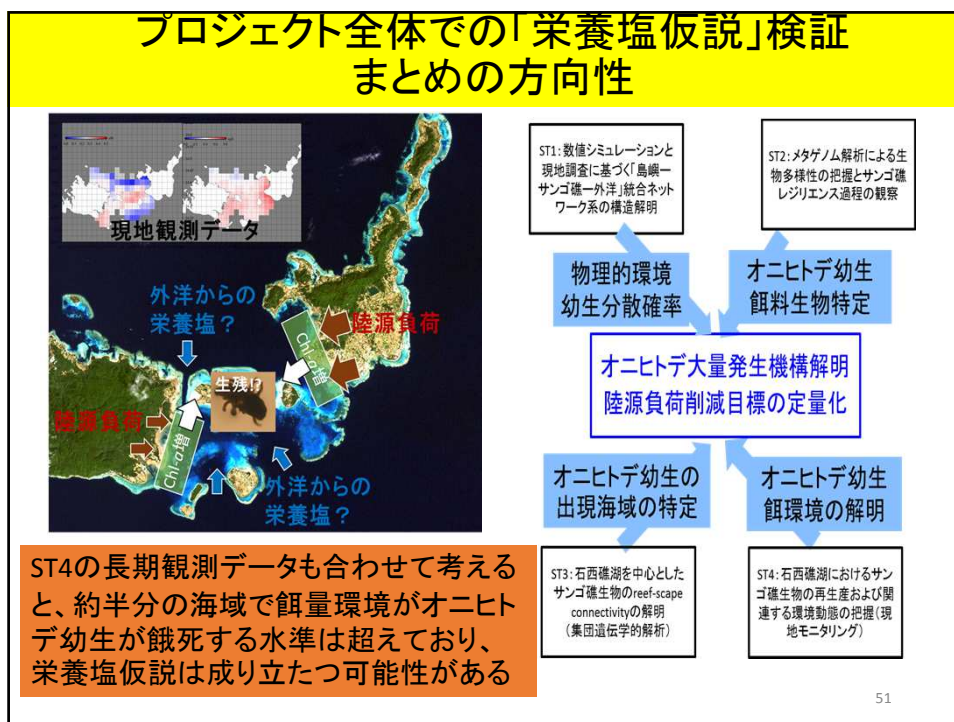
石垣港周辺では、他と比べて常に植物プランクトン濃度が高い⇒生活排水の影響か



名蔵湾では、台風通過後のみ高い⇒陸水の影響

(一方、栄養塩は植物プランクトンの増殖の結果を反映していることが多く、餌環境のモニタリング指標には適さないかもしれない)

オニヒトデ幼生が多く出現したのは、竹富島北(K5)であり、石垣港周辺ではない
⇒餌の供給源と幼生の出現場所は分けて考える必要あり



オニヒトデ大量発生のモデル化

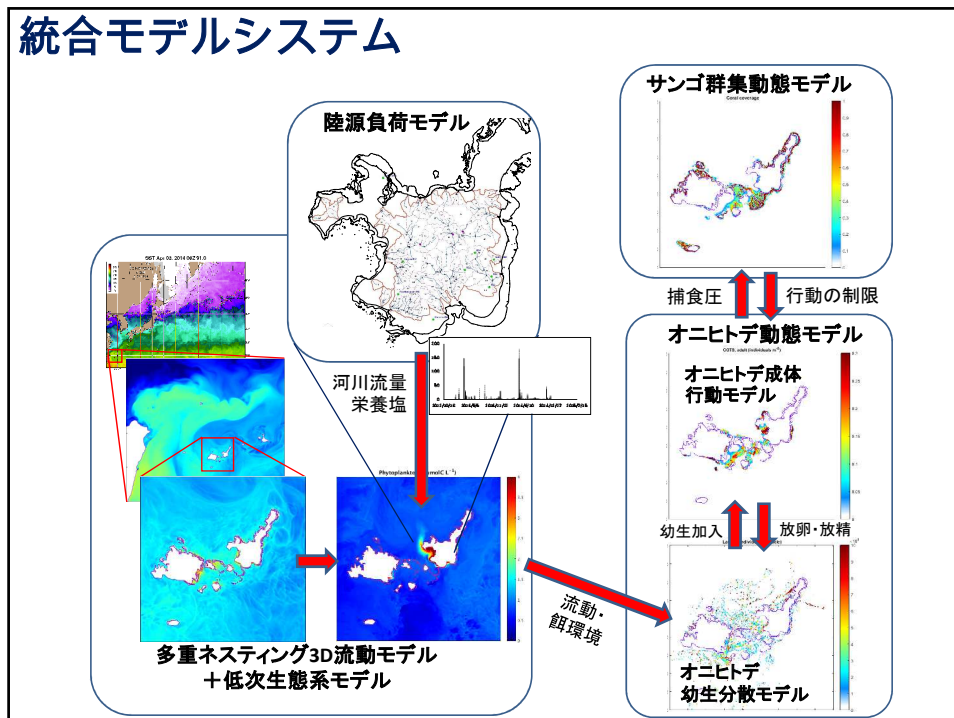
モデル化する上で重要となるプロセス

オニヒトデの発生を予測するためには、オニヒトデの全生活史における動態をモデル化する必要がある。そのためには、

- ①陸域でどのような質や量の負荷(栄養塩など)が発生し、海域へ流出するか？
- ②海域に流出した栄養塩はどのように海域に広がっていき、どのような場所でどのぐらいの規模で植物プランクトンの増殖するか？
- ③放出されたオニヒトデの幼生が海流に乗ってどこに運ばれ着底するか？その過程で、どのぐらい生き残るか？(どれぐらい餌となる植物プランクトンにありつけるか？)
- ④稚ヒトデが成長し、サンゴを食べながら、どのように移動し、どのぐらいの成体の密度でどこで産卵するか？

これらのポイントを押さえたモデル化が必要！

統合モデルシステム

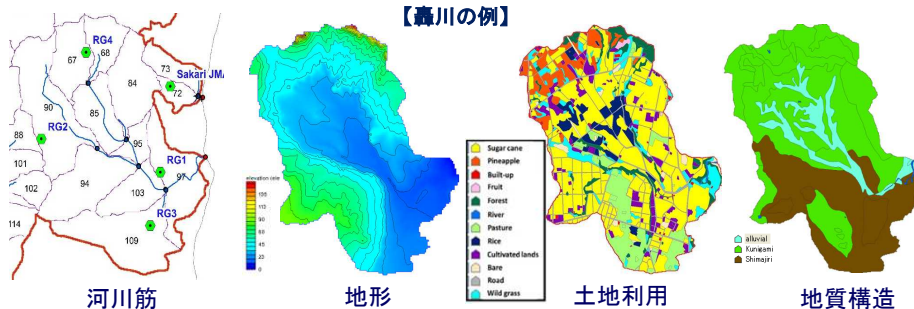


陸源負荷モデル

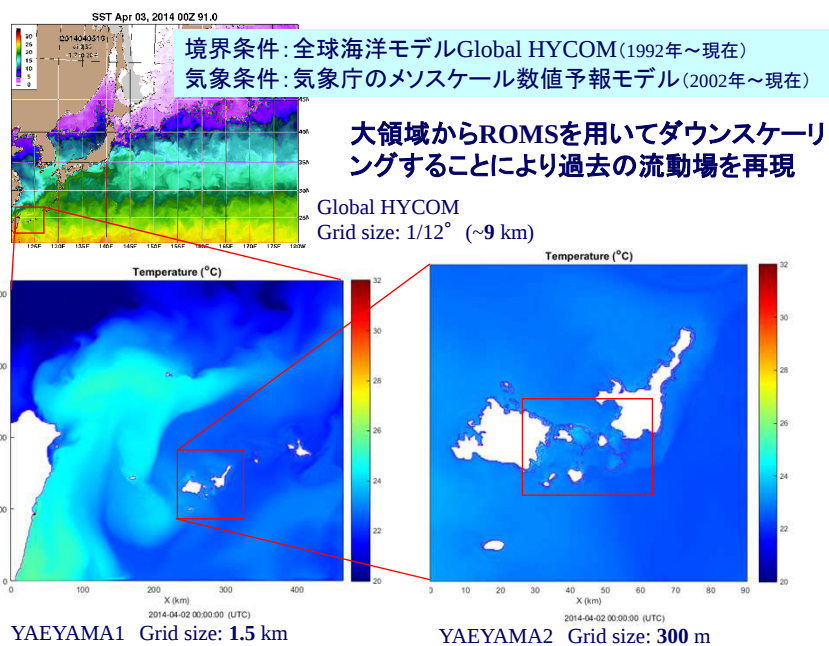
石西礁湖周辺海域に流入する主要5河川(仲間川、名蔵川、新川川、宮良川、轟川)の流量を、**SWAT (Soil & Water Assessment Tool)** を用いて計算。



【轟川の例】



多重ネスティング3次元海水流動モデル

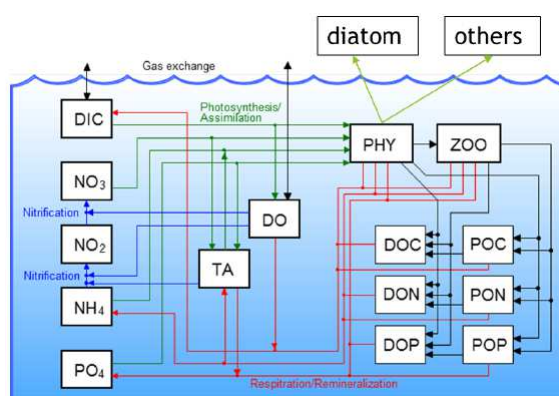


低次生態系モデル

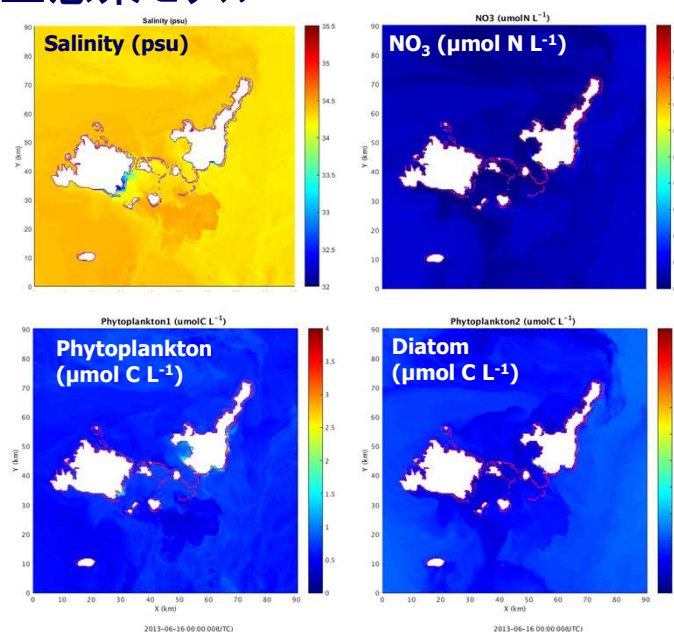
石西礁湖の植物プランクトンの栄養塩に対する応答(窒素律速、富栄養条件での珪藻の増殖など)を組み込んだ植物プランクトン動態を再現できる低次生態系モデルを開発。



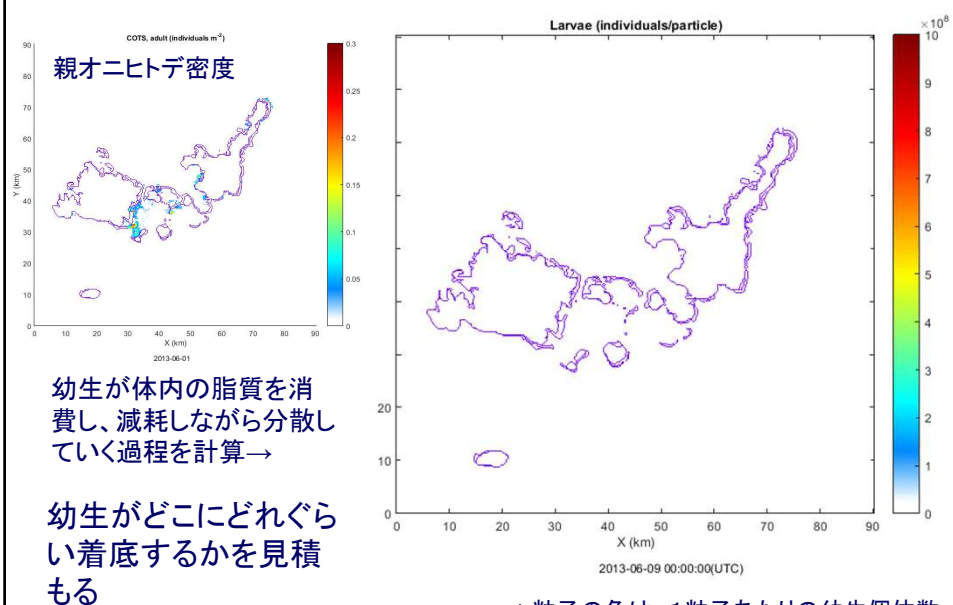
流動モデルとカップリングすることで、オニヒトデ幼生の餌環境の時空間変動を再現



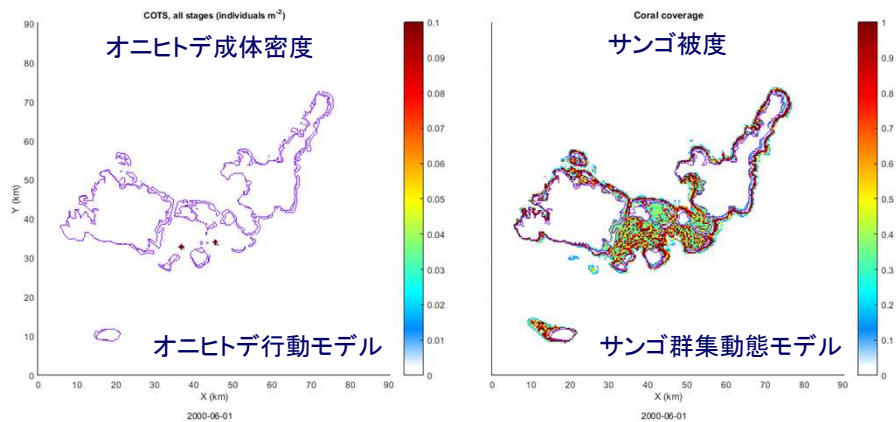
低次生態系モデル



個体ベースオニヒトデ幼生分散モデル

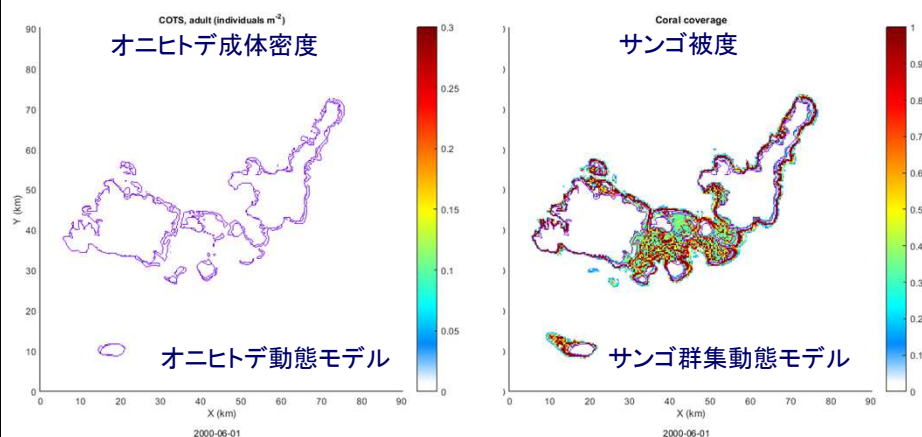


オニヒトデ行動モデル



オニヒトデ行動モデルは、オニヒトデの加入・死滅過程および、サンゴを捕食しながらサンゴ被度が低い方から高い方へと移動することを基本的な行動原理として組み込んだ。その行動は移流 - 拡散型の方程式で表現している。サンゴ群集動態モデルは、加入・増殖およびオニヒトデによる捕食といったプロセスを組み込んでいる。

統合モデルシステム



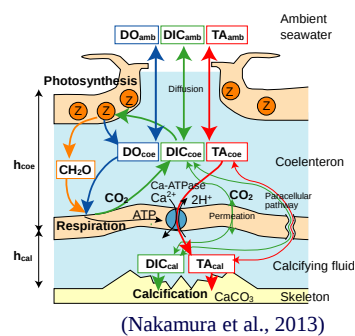
オニヒトデ行動モデルと幼生分散モデルをカップリングさせることで、オニヒトデのすべてのライフサイクルの動態をモデル化することに成功。

その他の要因についてのモデル化

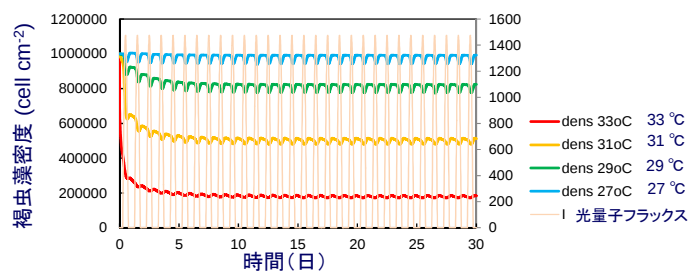
- (1) 白化現象
- (2) 幼生の加入

サンゴの白化現象のモデル化

サンゴの生体内の応答を記述したサンゴポリプモデル (Nakamura et al. 2013) を基に、褐虫藻の増殖・死亡過程や、褐虫藻からの活性酸素の発生(光・水温に依存)やサンゴの褐虫藻放出過程(サンゴは褐虫藻密度をコントロールすることで体内の活性酸素濃度をコントロールしていると仮定)を組み込んだサンゴ白化モデルを開発した。

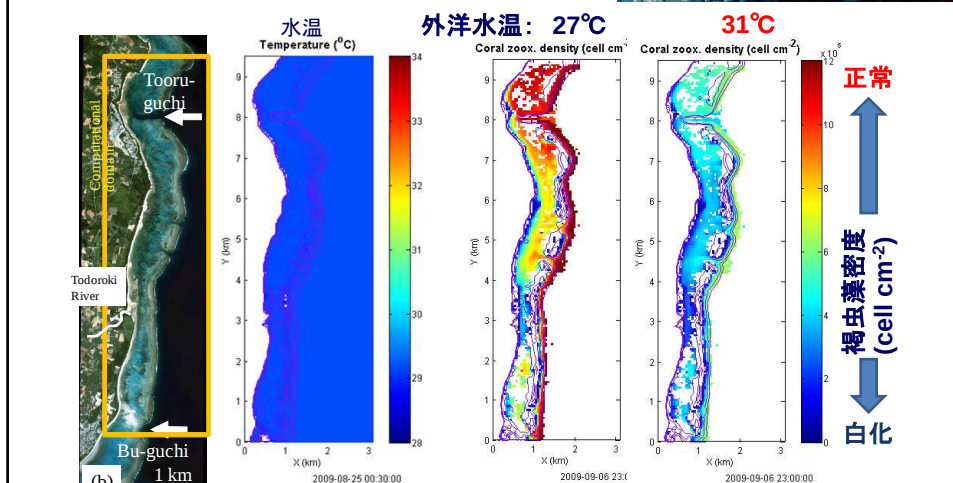
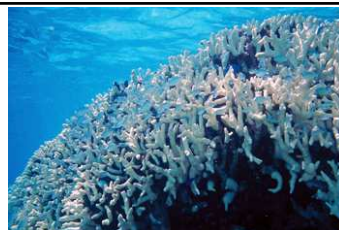


シミュレーション結果 (水温一定の下で飼育した状態を再現)



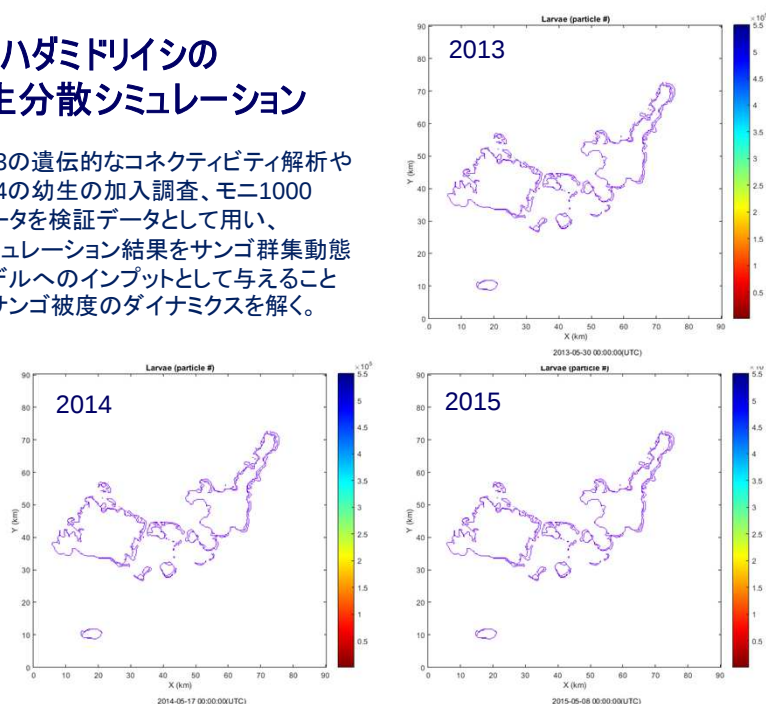
サンゴの白化現象のモデル化

今後、このモデルを石西礁湖スケールのモデルに適用し(動作は未検証だが、すでに組み込み済み)、石西礁湖のサンゴ群集動態モデルに白化の影響を組み込む。



クシハダミドリシの幼生分散シミュレーション

ST3の遺伝的なコネクティビティ解析やST4の幼生の加入調査、モニ1000データを検証データとして用い、シミュレーション結果をサンゴ群集動態モデルへのインプットとして与えることでサンゴ被度のダイナミクスを解く。



プロジェクト全体への貢献

陸域－海域の統合モデルの開発を行った。
これによって陸源負荷物質の発生やそれらの海域への広がりを推定することが可能となった。

サンゴ礁生態系の主要な劣化要因であるオニヒトデの発生やその広がりを再現するモデル体系が完成した。
このモデルの精度を高めていくことで、将来のオニヒトデ発生時期・場所の予測も不可能ではなくなった。

幼生分散シミュレーションによって、サンゴ幼生の供給源としての重要海域の選定も可能となる。

オニヒトデや白化、幼生加入など、主要なサンゴ群集の変動要因のモデル化に成功した。これらを結合させることによって、サンゴ群集被度の変遷履歴の再現やシナリオ解析が可能となる。