

沖ノ鳥島におけるサンゴ幼生追跡シミュレーション

白木喜章・山本秀一(株エコー), 片山悦治郎(国際航業株), 安藤 亘(一社 水産土木建設技術センター), 西崎孝之・小森健史(水産庁 漁港漁場整備部 整備課)

1. はじめに

近年、サンゴの保全・再生を図るための調査研究が国内外で行われている。水産庁は、2006年から日本最南端の島である沖ノ鳥島においてサンゴ増殖技術の開発に着手しており、有性生殖によるサンゴ増殖を試みている¹⁾。このサンゴ増殖技術は「点」的な整備であるものの、増殖したサンゴの産卵により生息域が拡大する「面」的な効果も期待している。しかしながら、絶海の孤島である沖ノ鳥島礁内で発生した幼生が礁内に戻ってきて再生産に寄与するかどうかは疑問であり、「面」的な効果に確証はない。

本研究は、サンゴ幼生を想定した粒子追跡シミュレーションにより、沖ノ鳥島礁内で発生したサンゴ幼生が礁内に着底する可能性について検討した。その際、礁外に流出した幼生が再び礁内に戻る可能性を考慮し、礁内だけでなく礁外の流動場や水位変動にも着目したシミュレーションを実施した。

2. 沖ノ鳥島海域の流動特性

: 礁外の流れと平均水位

サンゴ産卵時期(5~7月)の沖ノ鳥礁外の流れおよび水位の変動特性を JCOPE (Japan Coastal Predictability Experiment)²⁾データによって調べた。本研究で使用する JCOPE データは、図-1に示す範囲の1日毎の水位、流速、水温、塩分の日平均値である。

図-2に2007年5月7日の JCOPE による水位コンター・表層流速ベクトルならびに沖ノ鳥島地点における平均水位変動・流速時系列を示す。沖ノ鳥島地点の水位、流速は高気圧性或いは低気圧性の中規

模渦の一部であることがわかる。そして、この中規模渦の通過に伴い水位や流速が変動する。

JCOPE データの妥当性確認として、水産庁による過去の流速観測結果³⁾との比較を行った。その結果、流速の大きさに多少のずれがあるものの流向はほぼ一致していた。これにより、JCOPE の沖ノ鳥島地点の流速を礁外の流れとしてみなすことができる。

図-3は過去13年間(2000~2012年)の5~7月の JCOPE から算出した沖ノ鳥島地点の流向・流速頻度である。これによると、中規模渦に起因する沖ノ鳥島礁外の流れは変動が複雑であるものの、東向き成分を持つ流れの頻度が比較的高いことが明らかとなった。水位についても同様に調べたところ、一定の傾向はみられなかった。高気圧性或いは低気圧性の渦がランダムに通過していることが推測される。

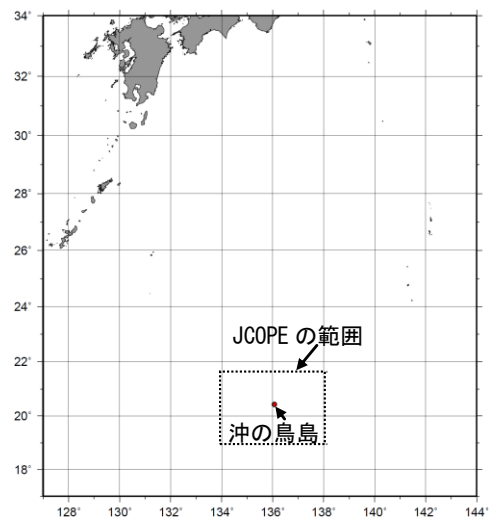


図-1 本研究で使用する JCOPE データの範囲と沖ノ鳥島の位置

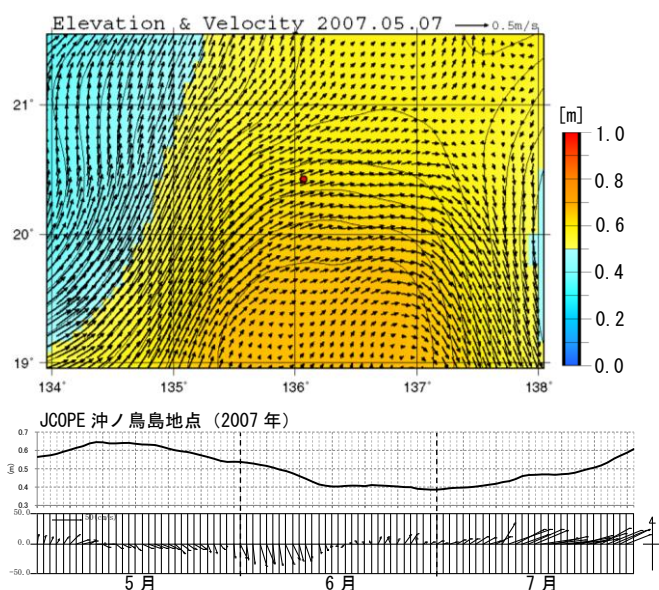


図-2 JCOPEによる(上)2007/5/7の水位・表層流速分布と(下)沖ノ鳥島地点の抽出データ

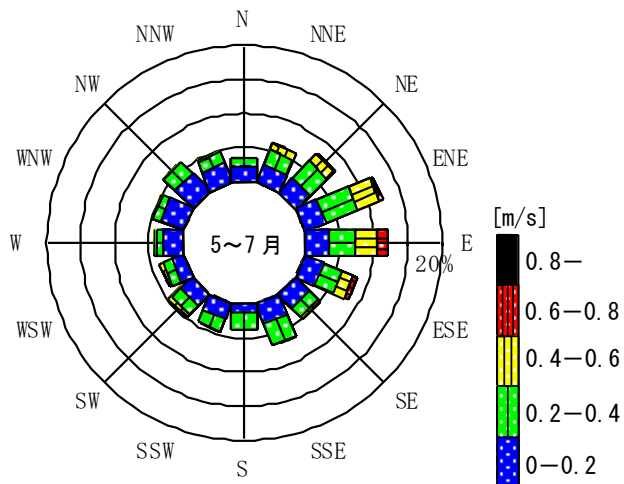


図-3 過去13年間のJCOPEデータから算出したサンゴ産卵時期の沖ノ鳥島地点の流向・流速頻度

3. 流動シミュレーション

1) 流動モデルの構築

粒子追跡シミュレーションに用いる流動場は、密度を考慮した鉛直10層のレベルモデルにより計算した。前述したように、沖ノ鳥島礁外の流れは中規模渦の変動に起因するため、流動シミュレーションを広範囲で行う必要がある。図-4に計算範囲および水平格子サイズを示す。沖ノ鳥島を包括する範囲を

20m格子領域とし、2-wayネスティングにより、100m-500m-2,000m-6,000m格子領域まで接続した。6,000m格子領域の範囲は図-1に示したJCOPEの範囲とほぼ同等とした。

また、沖ノ鳥島周辺は水深が大きく、タイムステップを極めて短くする必要があり計算効率が悪い。そこで、本研究では表層循環の再現性に着目する。米山ら(2002)³⁾によると沖ノ鳥島周辺の主密度躍層は水深100~150m付近にみられることから、礁外水深を最大200mに設定した。これにより表層循環を再現するとともにタイムステップを長くすることができる。

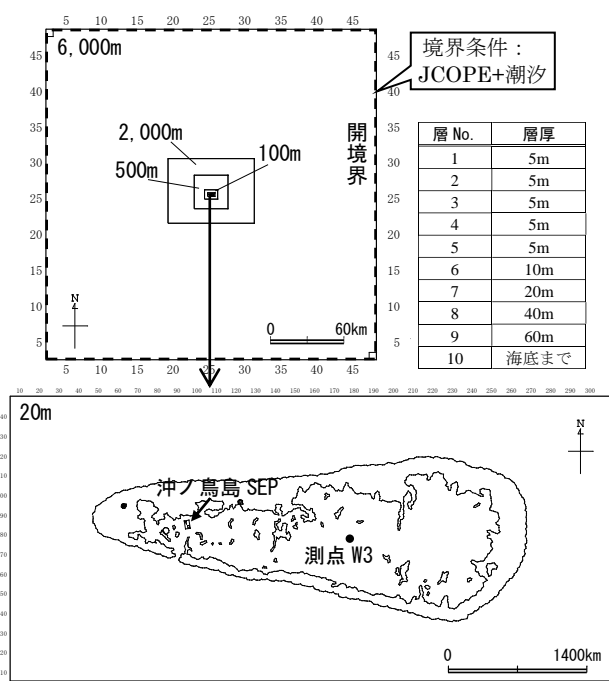


図-4 流動シミュレーションの計算範囲と水平格子サイズ、鉛直層分割

表-1に流動シミュレーションに考慮する主な外力を示す。中規模渦を表現するために、開境界においてJCOPEデータを設定した。

表-1 流動シミュレーションの主な外力

項目	設定方法
潮汐	Nao tideにより設定
波浪	波浪変形計算による波浪応力を設定
礁外流れ	開境界にJCOPEによる水位、流速、水温、塩分を設定

2) 再現検証

観測値にみられる水位変動流動モデルの妥当性を確認するために、2007年5～7月にかけて水産庁が実施した現地観測期間¹⁾を対象にした再現シミュレーションを行った。再現検証は礁内の礁内複数地点における流速観測結果に対して行った。代表として、図-5に沖ノ鳥島礁内中央部の測点(W3)における流速の比較結果を示す。流向流速は観測値と計算値は概ね一致しており、再現性を確認できる。礁外の流れについても、同日のJCOPEデータと比較することでその再現性を確認した。

以上により構築した流動モデルによって、粒子追跡シミュレーションに用いる流速データを計算した。

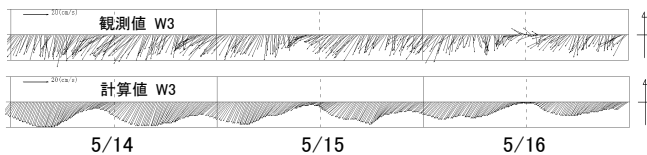


図-5 礁内における流況の再現検証

4. サンゴ幼生追跡シミュレーション

1) 粒子追跡計算手法、条件設定

粒子追跡計算は、オイラー・ラグランジュ法に乱数を用いた拡散の効果を検討した手法により行った。粒子は鉛直方向に移動しないこととし、流動シミュレーションによる第1層の水平流速データを用いた。

表-2に追跡条件について示す。検討は礁外流動場を変えた5ケースを考慮し、各ケースの礁外流向に見合う日のJCOPEデータを抽出し、一定条件として境界条件に設定した。ケース1～4は比較的頻度の高い東向き成分を持つ流れ、ケース5は北西向きの流れとした。また、平均水位による違いは、ケース3と4によって比較できる。

潮汐は、過去の沖ノ鳥島サンゴの現地観察において産卵頻度が比較的高いとされている小潮期とした。

粒子の初期位置は現地調査結果¹⁾によるサンゴ被度が5%以上の箇所とした(図-6)。

表-2 検討ケースと追跡条件

ケース	礁外流れ	平均水位	沖波	潮汐
1	南東向き	低	波向き:東 波高:60cm	小潮
2	北東向き	低		
3	東向き	高		
4	東向き	低		
5	北西向き	中		

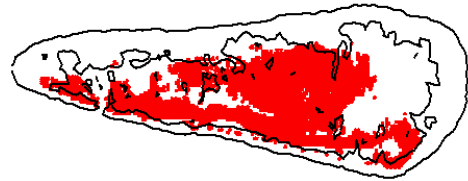


図-6 粒子の初期位置

2) 流動パターン

図-7にケース4、5の干潮時の表層流速を示す。両ケースとも礁内では西向きの流れが卓越している。これは他のケースについても同様であり、また、潮時が変わっても流向は変化しなかった。両ケースの違い点としては、礁内北東部・南東部の渦流の有無が挙げられる。この渦流はケース2～4において明瞭にみられた。

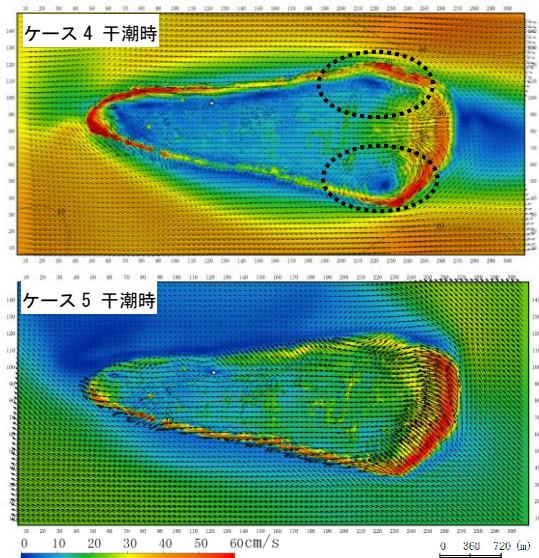


図-7 干潮時流速(上)ケース4、(下)ケース5

3) 粒子追跡計算結果

粒子追跡計算によると、いずれのケースも開始直後から礁内の西向きの流れによって西方に輸送され、1日以内で礁外に流出する粒子が多くみられた。

図-8に各ケースにおける追跡開始から4日後の粒子分布を示す。礁外の流れが東向き成分を持つケース1~4は、礁内西向きの流れによって礁外に流出した粒子が礁内に再び流入するパターンがみられた。これにより、礁外の流れが東向き成分を持つ場合、産卵直後に幼生が礁外に流出したとしても、再び礁内に流入する可能性が示唆された。また、ケース2~4は北東部・南東部の渦流に多くの粒子が捕捉され、礁内に留まりやすくなることがわかった。

さらに、平均水位の高低に着目すると、平均水位の低いケース2,4は平均水位の高いケース3よりも渦流の補足される粒子が多い。これは、平均水位が低く礁嶺部が干出しやすい条件では、捕捉された粒子が礁外に流出しにくいことを示唆している。

礁外の流れが北西向きであるケース5は、礁外に流出した粒子はそのまま遠方に輸送され礁内に留まる粒子はほぼゼロであった。

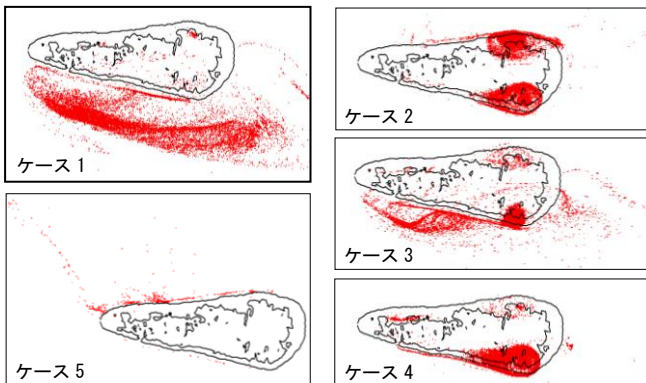


図-8 追跡開始から4日後の粒子分布

5. おわりに

沖ノ鳥島礁内起源のサンゴ幼生が礁内に戻ってきて再生産に寄与する可能性があることが明らかとなり、その確率は礁外の流動場に依存していることを示した。とくに、北東部・南東部の渦流に捕捉されることにより、幼生が礁内に留まる確率が高くなる。

本研究の追跡シミュレーションでは、流動場に考慮した外力は潮汐以外を一定値として設定しているが、実際の海域では波浪や礁外流れ等の外力は全て時々刻々変化する。そのため、東部に形成される渦流も生成・消滅や移動といった変化を示すはずであり、捕捉されるサンゴ幼生の数も大きく変化するものと考えられる。今後、サンゴ幼生の礁内に滞留する割合や礁外からの回帰率等を定量的に把握するには外力の時間変化についても考慮することが必要となる。

なお、本取り組みは、水産庁による「厳しい環境条件下におけるサンゴ増殖技術開発実証委託事業」の一環で行われたものである。

参考文献

- 1) 水産庁漁港漁場整備部：有性生殖によるサンゴ増殖の手引き，
http://www.jfa.maff.go.jp/j/gyoko_gyozoyo/g_hour_ei/pdf/sub7931.pdf, 2009
- 2) Miyazawa, Y., and T. Yamagata, 2003: The JCOPE ocean forecast system, First ARGO Science Workshop, November 12-14, 2003, Tokyo, Japan.
<http://www.jamstec.go.jp/frsgc/jcope/htdocs/topics/topics031112/poster031112.pdf>
- 3) 米山純夫, 小埜田明, 前田洋志: 沖ノ鳥島周辺の海洋環境, 東京都水産海洋研究報告 (1), p.3-20, 2006

沖ノ鳥島におけるサンゴ幼生追跡シミュレーション

- 白木喜章 ((株) エコー)
- 山本秀一 (//)
- 片山悦治郎 (国際航業 (株))
- 安藤 亘 (一社 水産土木建設技術センター)
- 西崎孝之 (水産庁漁港漁場整備部整備課)
- 小森健史 (//)

1. はじめに

●沖ノ鳥島におけるサンゴ増殖

水産庁を中心とした取り組み

「点」的な整備

→ サンゴ増殖技術の開発※1,2

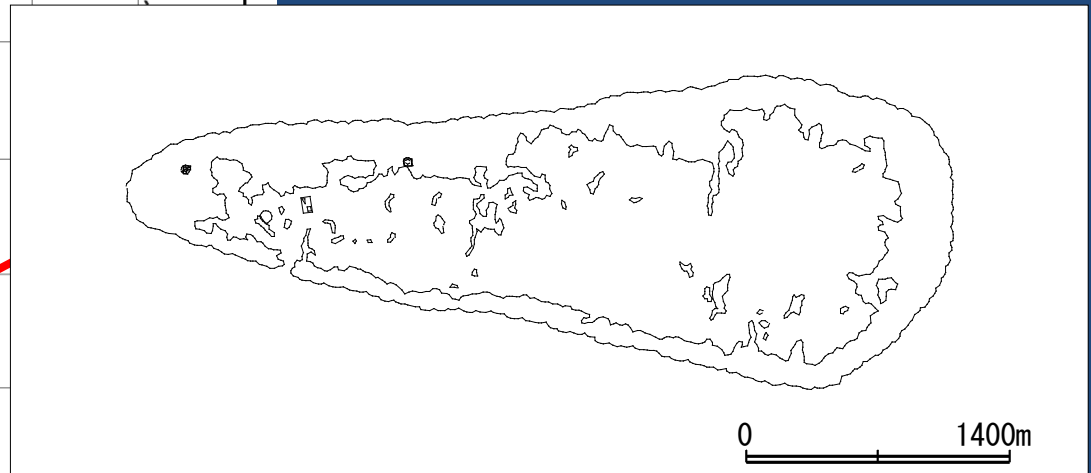
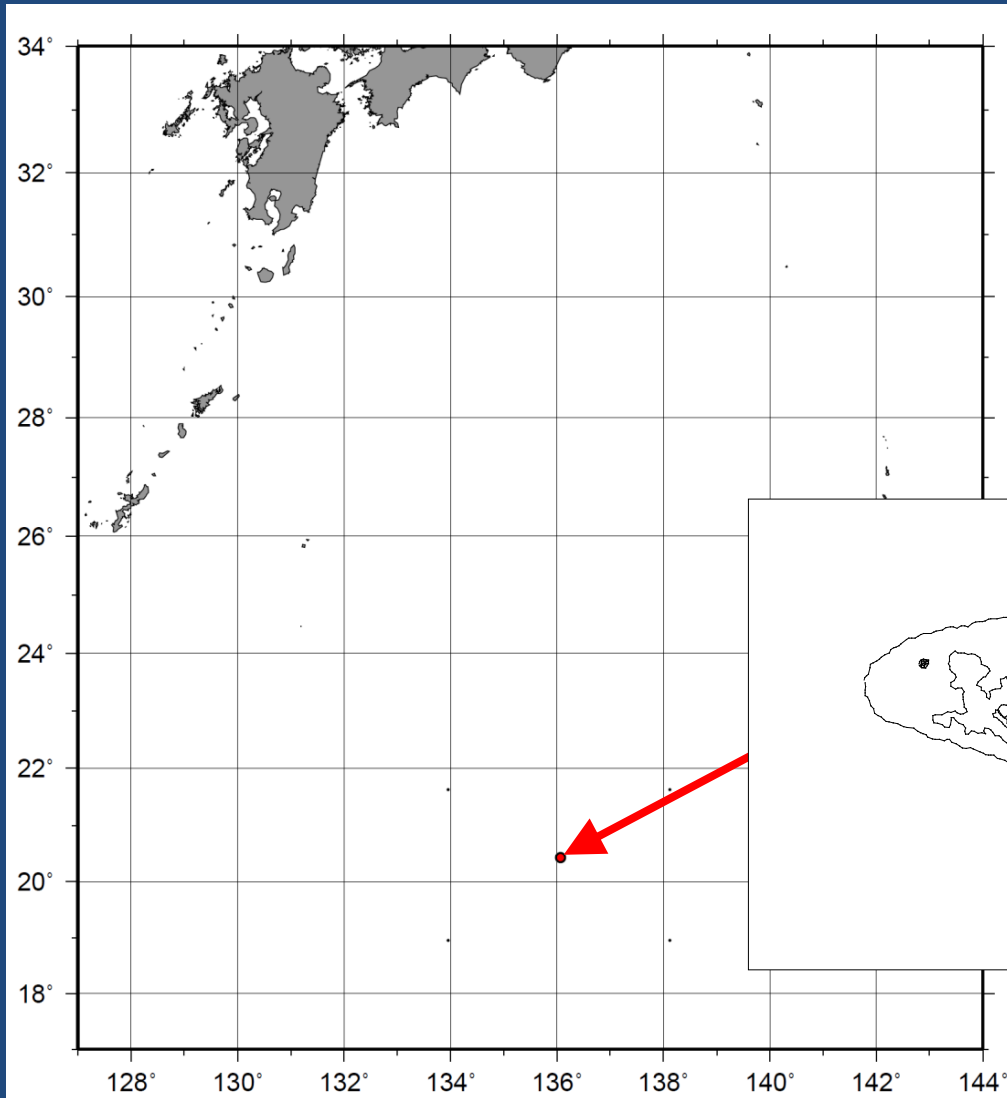
※1 有性生殖によるサンゴ増殖の手引き（水産庁漁港漁場整備部）

※2 安藤ら（2012）：人工サンゴ増殖礁の開発

「面」的な波及

→ 増殖したサンゴが産卵し，沖ノ鳥島で再生産することによる二次的効果を期待。

面積も小さく，絶海の孤島である沖の鳥島で再生産は行われるのか？
（面的な波及は期待できるのか？）



2. 本研究の目的

サンゴ幼生を想定した粒子追跡シミュレーションにより沖ノ鳥島礁内で発生したサンゴ幼生が礁内に着底する可能性を検討した。

礁外に流出した幼生が再び礁内に戻る可能性を考慮し、**礁内だけでなく礁外の流動場にも着目した。**

3. サンゴ産卵期の沖ノ鳥島礁外の流動場の把握

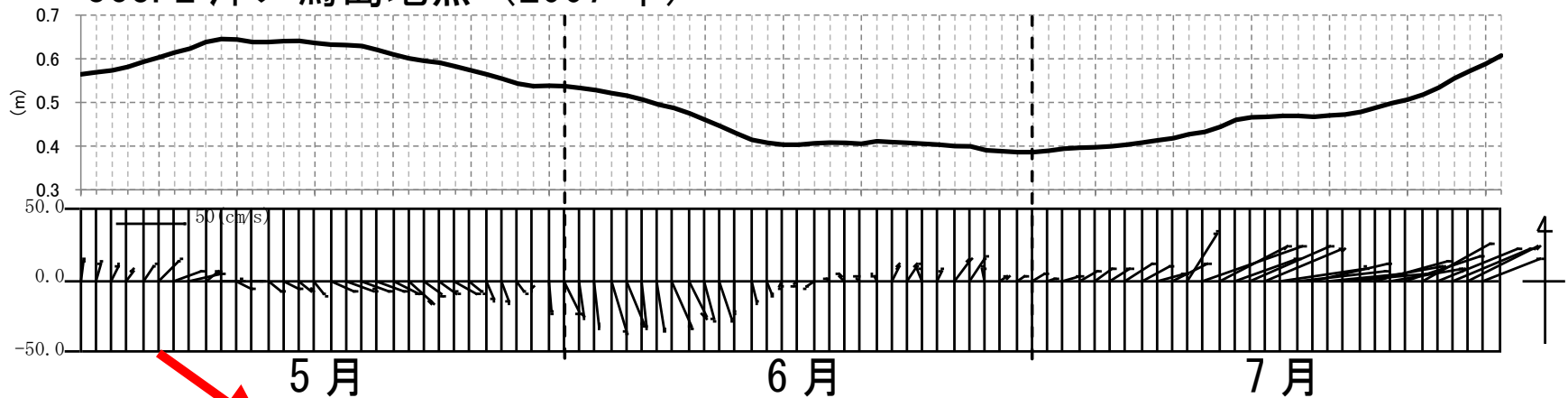
JCOPEデータを礁外の流動場として解析

JCOPE (Japan Coastal Predictability Experiment):
計算範囲を全球規模とする高解像度モデル
(Miyazawa and Yamagata, 2003)

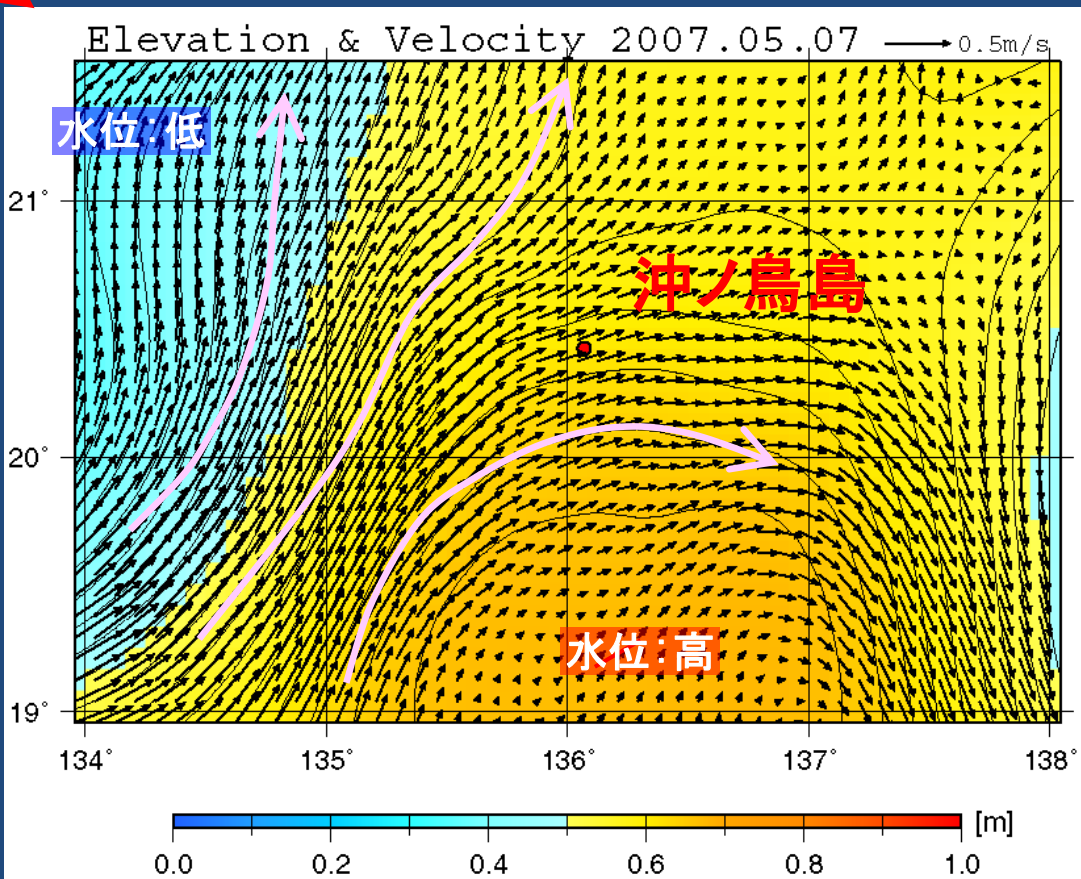
2000~2012年 5~7月のデータを収集

沖の鳥島

JCOPE 沖ノ鳥島地点 (2007 年)

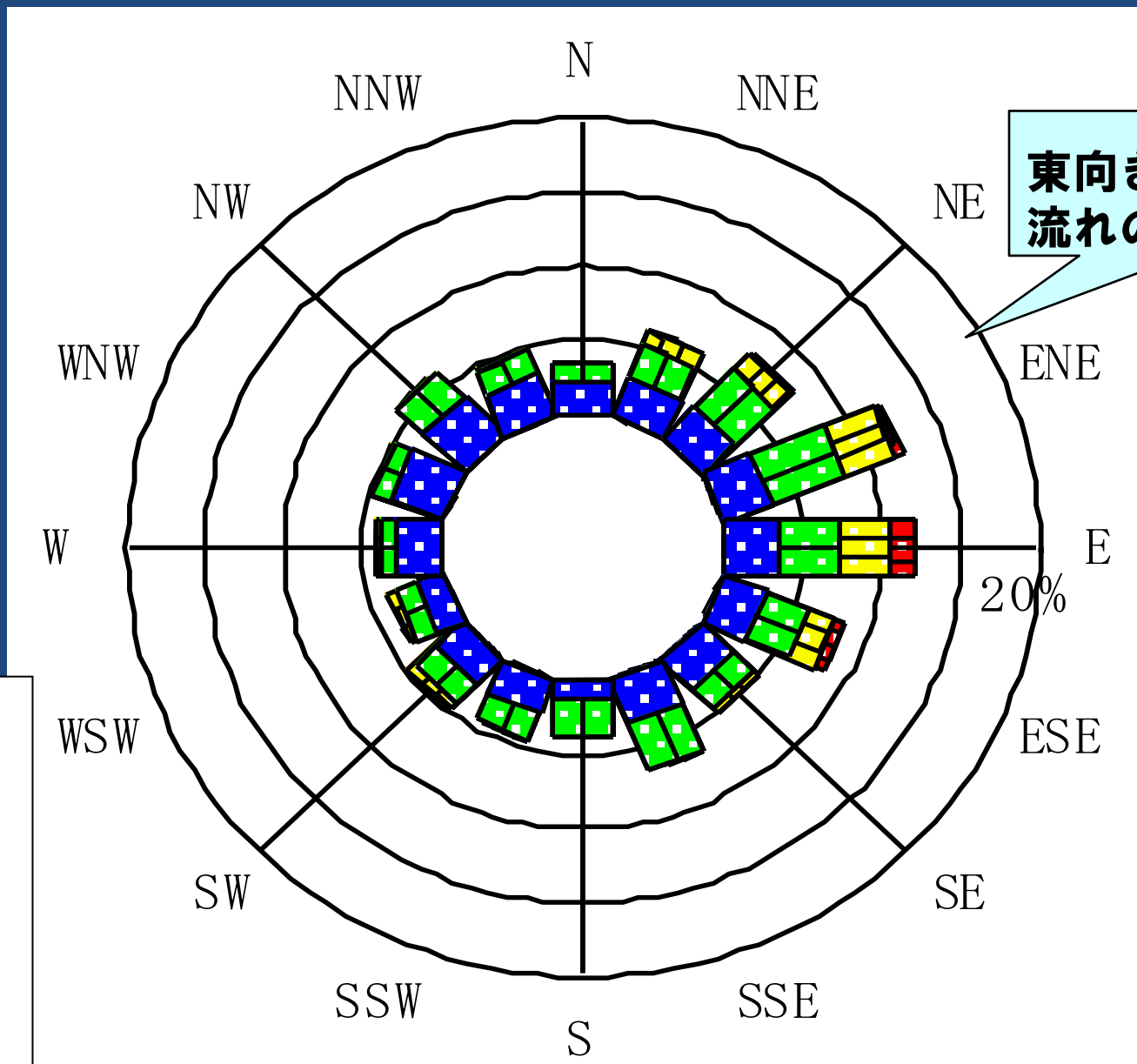


2007/5/7



空間スケールの大
きな渦の一部が礁
外流れとなる。

2000~2012年 5~7月の流速・流向頻度

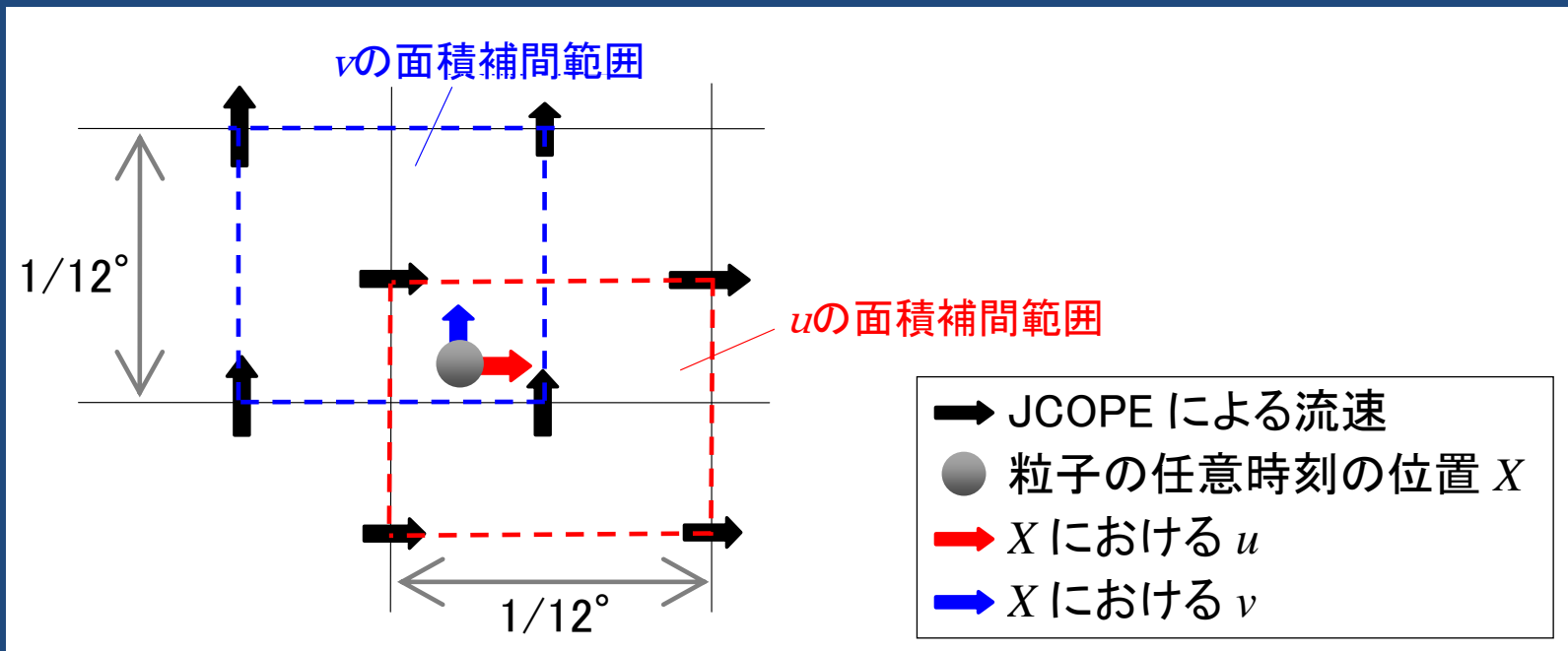


3. 3. 追跡手法：オイラーラグランジュ法

$$X_{t+\Delta t} = X_t + \vec{U}\Delta t + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + (\vec{U} \cdot \nabla) \vec{U} \right] \Delta t^2$$

$X_{t+\Delta t}$: 時刻 Δt 後における粒子の位置

\vec{U} : JCOPEの表層流速ベクトル (u, v)

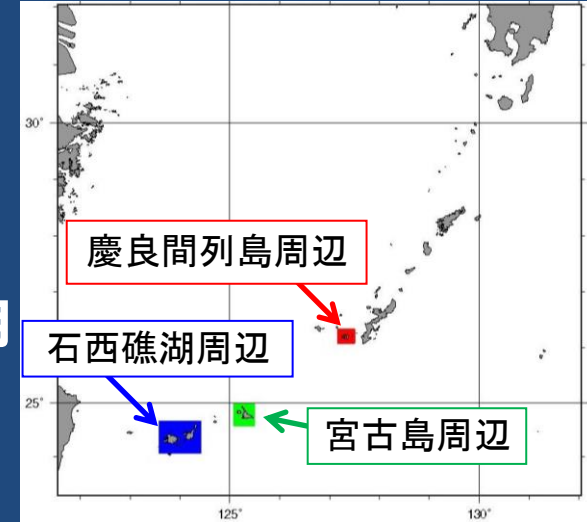


3. 4. 粒子投入時期（幼生発生時期）と追跡期間

阿嘉島臨海研究所 中村良太研究員（私信）

阿嘉島（慶良間列島）周辺のサンゴの産卵は

- ・ 5月，6月の満月3日前～7日後で**5日後が最も高頻度**
- ・ 水温によって産卵日が前後する
- ・ 石西礁湖は慶良間列島と同じ月の年もあれば，1カ月早い年もある。



追跡計算では，

- ・ **2001年～2011年の5月或いは6月の満月5日後 0:00に産卵（各年1回）**
- ・ **先島諸島～慶良間列島まで同時に産卵**
- ・ **1回あたりの追跡期間：3週間（幼生の生存可能期間）**

を仮定した。

追跡計算で設定した粒子投入時期

年次	投入日	年次	投入日
2001	5/11	2007	6/5
2002	5/30	2008	5/24
2003	5/20	2009	5/13
2004	6/7	2010	6/1
2005	5/28	2011	5/21
2006	5/17		

[動画ケース1](#)

[動画ケース2](#)

[動画ケース3](#)

[動画ケース4](#)

[動画ケース5](#)

4. 粒子追跡モデルの妥当性確認

粒子追跡モデルの妥当性確認として、過去に沖縄海域で実施された2種の漂流ブイモニタリング結果と追跡計算結果を照合した。

種類	ブイ投入海域	ブイ投入期日	ブイモニタリング期間
①	慶良間列島	2001年6月8日 16:00	数日
②	石西礁湖	2006年6月12日18:00	数週間～1カ月

①：灘岡ら(2002)

「小型漂流ブイ観測および幼生定着実験によるリーフ間広域サンゴ幼生供給過程の解明」, 海岸工学論文集

②：高橋ら(2011)

「漂流ブイ観測による石西礁湖から琉球諸島下流域に広がるサンゴ卵輸送の研究」, 日本サンゴ礁学会第14回大会

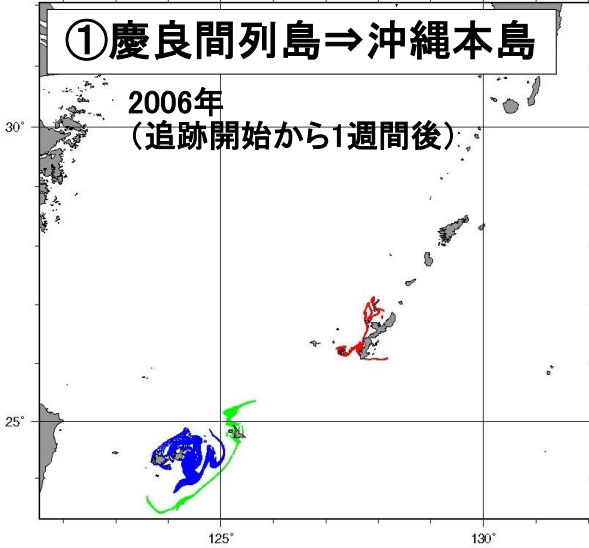
5.2. サンゴ幼生の供給パターン

2001年～2011年の粒子追跡計算によって、他海域への粒子輸送は以下の6パターンに分類できた。

Particle Position 2006.05.24 00:00

①慶良間列島⇒沖縄本島

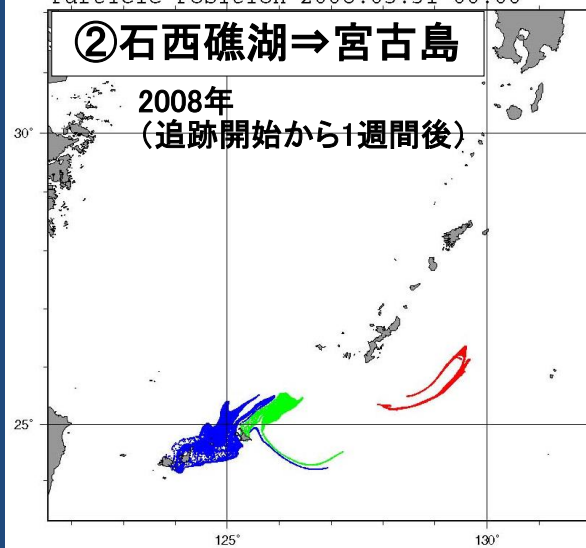
2006年
(追跡開始から1週間後)



Particle Position 2008.05.31 00:00

②石西礁湖⇒宮古島

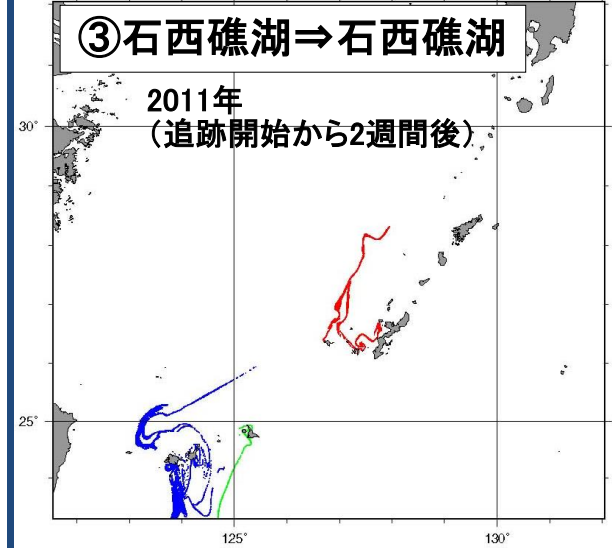
2008年
(追跡開始から1週間後)



Particle Position 2011.06.04 00:00

③石西礁湖⇒石西礁湖

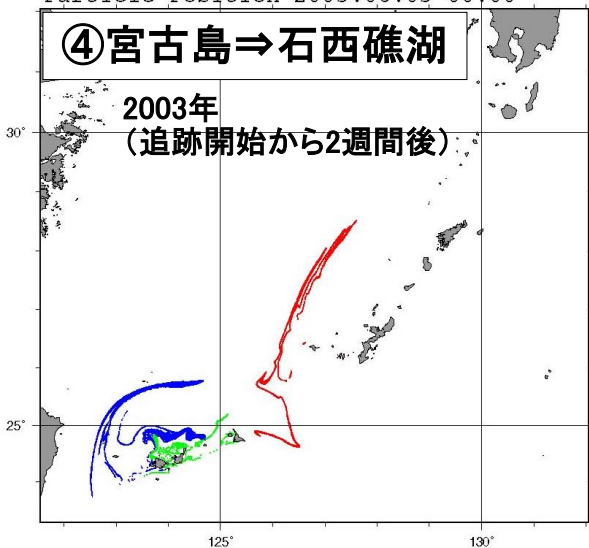
2011年
(追跡開始から2週間後)



Particle Position 2003.06.03 00:00

④宮古島⇒石西礁湖

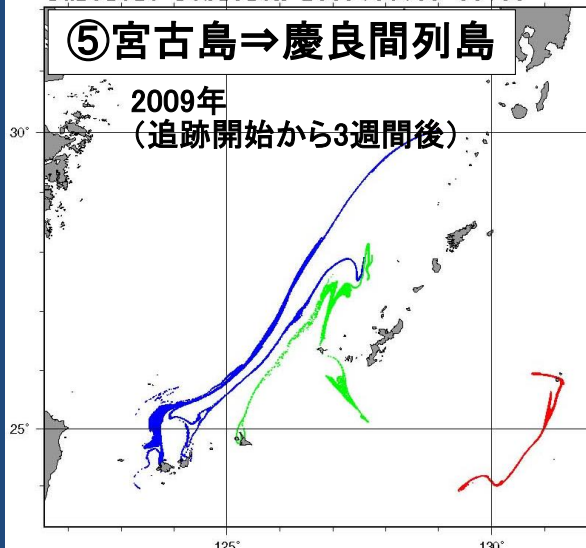
2003年
(追跡開始から2週間後)



Particle Position 2009.06.03 00:00

⑤宮古島⇒慶良間列島

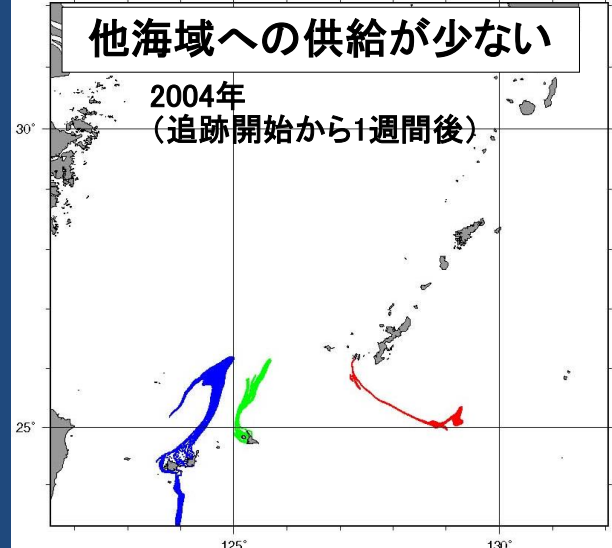
2009年
(追跡開始から3週間後)



Particle Position 2004.06.14 00:00

他海域への供給が少ない

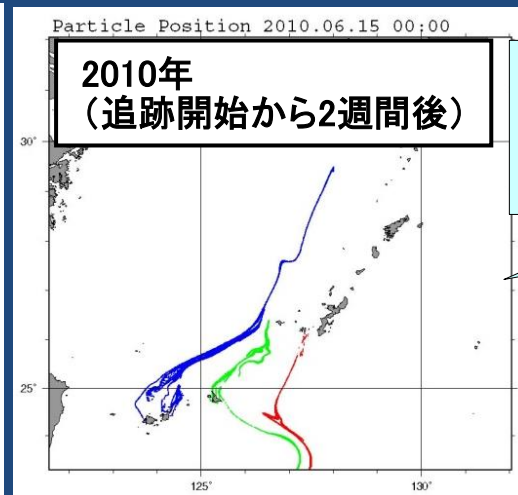
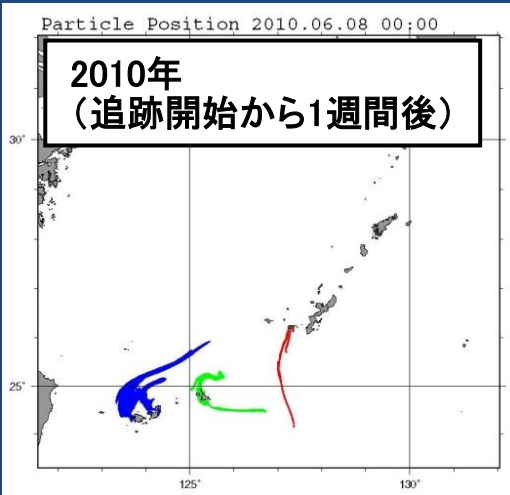
2004年
(追跡開始から1週間後)



5. 3. 実際のサンゴ幼生供給状況と追跡計算結果

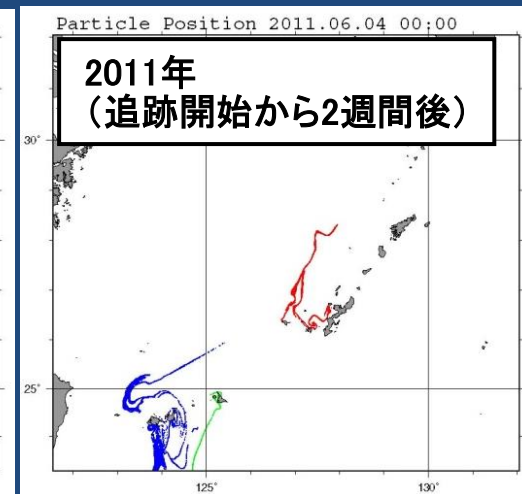
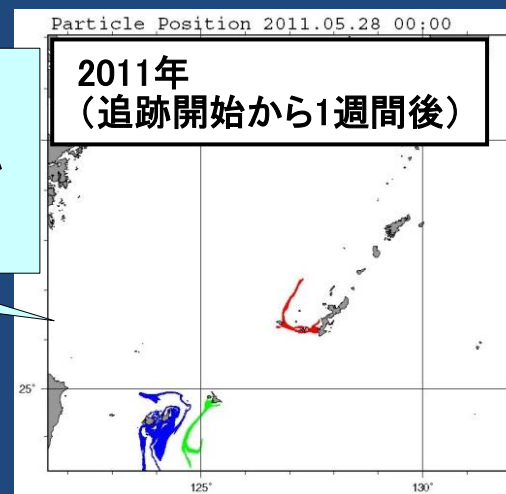
① 石垣島

水産庁が実施したサンゴ幼生加入量調査によると、石垣島では、2011年は2010年よりも加入量が顕著に多かった。



2010年は石西礁湖に投入した粒子はすぐに外洋に輸送されている。

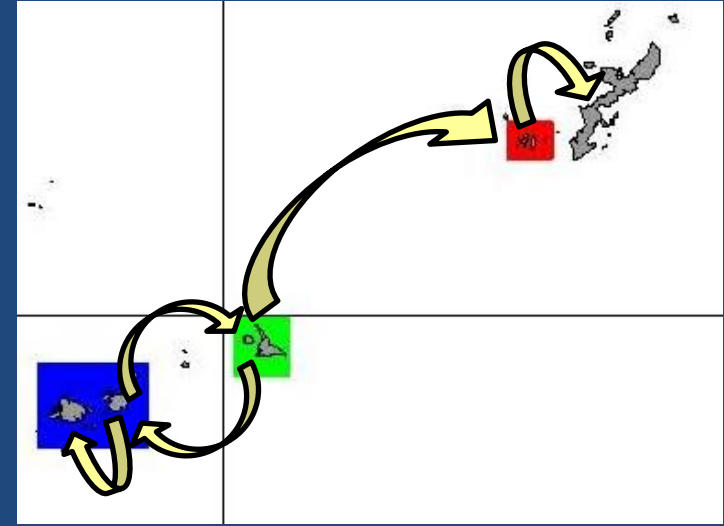
2011年は石西礁湖に投入した粒子がそのまま滞留する量が明らかに多い（渦に捕捉された）。



6. まとめ

・粒子追跡計算によってみられたサンゴ幼生の供給パターン

- ① 慶良間列島 ⇒ 沖縄本島
- ② 石西礁湖 ⇒ 宮古島
- ③ 石西礁湖 ⇒ 石西礁湖
(石西礁湖に留まる)
- ④ 宮古島 ⇒ 石西礁湖
- ⑤ 宮古島 ⇒ 慶良間列島



- ・産卵のタイミングと周辺の流動場によって経路が変わるため、上記の供給パターンが毎年みられるわけではない。
- ・石西礁湖や宮古島から沖縄本島に直接供給されるパターンは、追跡計算では明瞭にみられなかった。
- ・石西礁湖から沖縄本島へは、宮古島、慶良間列島を經由して複数年かけて供給されることが示唆される。

7. 課題

- 本研究の追跡計算では、サンゴ産卵日を満月5日後0:00に設定した。実際は、水温などの環境条件によって前後し、また、断続的に産卵がおこなわれることも考えられる。目撃情報などを収集し、幼生の発生時期をより詳細に設定することが望ましい。
- 流速データとして用いたJCOPEは、水平格子解像度が $1/12^\circ$ (約10km)であり、空間スケールの小さい沿岸部(例えば、慶良間列島の阿嘉島や沖縄本島の湾など)の地形解像度は低い。ネスティング手法を用いることで、より詳細な追跡計算が可能になる。

8. おわりに

本研究は水産庁の委託事業(平成23年度厳しい環境条件下におけるサンゴ増殖技術開発実証委託事業)の成果の一部をとりまとめたものである。