

F- 5 サンゴ礁生物多様性保全地区の選定に関する研究

(3) サンゴ礁の変遷

②水中画像時系列に基づいたサンゴ幼生輸送のトラジェクトリー解析

独立行政法人 国立環境研究所

水圏環境研究領域 海洋環境研究室

原島 省・中村泰男

<研究協力者> 独立行政法人海洋開発研究機構

古島靖夫

(株)串本海中公園センター 学術部

野村恵一・小寺昌彦

NPO 法人日本ウミガメ協議会 八重山海中公園研究所

島 達也

古島靖夫

平成 15～17 年度合計予算額 10,684 千円

(うち、平成 17 年度予算額 2,495 千円)

〔要旨〕サンゴ礁生物多様性保全地区の選定に関して、サンゴの卵が放出され数日の漂流期間の後に浅海域に着生・加入できるような放出領域(ソース領域)を重点的に保全することを中心に考える。このために、数値モデルによってサンゴ卵および幼生の軌跡を明らかにし、石西礁湖中のどの地域から放出された粒子が無効放散されず浅海域に着生しやすいかを推定した。風と潮汐を境界条件として与えて流動場を計算し、i)石西礁湖中央部のシモビシ、ii)同周辺部のカタグア、iii)黒島周囲からのサンゴ卵・幼生を想定した粒子群を放出し、放出後 15 日間にわたる粒子群の分布の動画を作成し、浅海域への残留確率を算出した。また、別途、石西礁湖全体の14地点からの粒子軌跡(静止画)を作成した。各粒子の軌跡は、a)潮汐による往復流、b)連吹風による定向流、および c)小スケールの水平渦動によるランダムな動きの3要素を反映していたが、数日の時間スパンの移動に関して最も支配的な要素は b)であった。風については、2001 年 5 月の観測風、および、基礎実験としての東、南、西、北の4方向の一樣風の5ケースの実験を行ったが、どれもが粒子が風下に輸送された。当該季節に風向が様々であることを考慮すると、石西礁湖中央部放出のケースにおいて粒子の残存確率をもっとも高いと考えられる。一方、サンゴ卵放出能力の評価として、黒島周囲の2本のトランセクトで継続取得してきた水中画像(国立環境研究所)、および石西礁湖サンゴ礁モニタリング調査(環境省)から現存サンゴの被度、属性を勘案すると、石西礁湖南側の礁ほど卵放出能力が高い。以上から得られた成果として、①風向がランダムな場合の粒子残存確率の観点からすれば、シモビシなどの比較的中心部の礁を、②サンゴ卵放出能力と南風の組み合わせを重視する観点からは、カタグア・黒島北側など比較的南側の礁を保全地域として選択することが効率的であることが結論される。

〔キーワード〕数値シミュレーションモデル、サンゴ卵・幼生、移流分散、軌跡、残存確率

1. はじめに

海域の生態系を保全するとき、全領域に同等なコストをかけることは得策ではないし不可能なことである。そこで、重点的な海域保護区(MPA: Marine Protected Area)を設定するための基準が必要になる。選択の基準として、Salm ら¹⁾がいくつかのキーワードをあげている。その中の大半は現況で生態系価値の高い部分の保全という論旨にのったものである。ただし、すでに部分的な変質が起きている領域にこの論旨を適用すると、本来、多様性維持の潜在的な鍵でありながらすでに人為影響で劣化している領域が、ますます劣化することを容認することになりかねない。したがって、現況の調査とは別に、このような鍵となる地域を明らかにする必要があるだろう。

このような問題にあたるときに、生物要因のほかに、流動・拡散・分散²⁾などの物理的要因も重要である。サンゴ礁生物多様性の維持機構の1つとして、サンゴの卵が放出される「ソース領域」から、流れによってサンゴ卵・幼生などの生物粒子が輸送され、「加入領域」に着生することがあげられる^{3),4)}。この過程を考慮すれば、生物的多様度が高い地域がソース領域として機能しやすいことはいうまでもないが、一方で、どの地域から放出した生物粒子が最も着生しやすいかという観点もソース領域の機能の大事な要素である。

この考えは、具体的に以下のようなポイントに整理される。

- i) 各礁のサンゴ卵放出能力はどうか？
- ii) 生物粒子の放出～着生日数内の残存確率(無効放散されない確率)は十分か？
- iii) 想定される粒子輸送の到達領域の中に、着生に適した礁(加入領域)が存在するか？

さらに、より広い海域を考慮した場合、

- iv) 粒子輸送がネットワーク型(礁 m→礁 n)かセルフシーディング型(同一礁内)か⁵⁾？
- v) サンゴの生存のための水通しが良好かどうか？

というポイントも重要である。特にv)は残留確率が高いことと相反する場合もあり、この点からも流動を明らかにすることは重要である。

石西礁湖についても上記 i)～iv)のポイントを考慮して保護地域を選定することが1つの基準になると考えられる。また、このための研究手法として、過去にグレートバリアリーフ等において、サンゴ卵・幼生の輸送に関する数値モデルによって ii)および iv)に関する数値シミュレーションが行われた例があげられる⁵⁾。

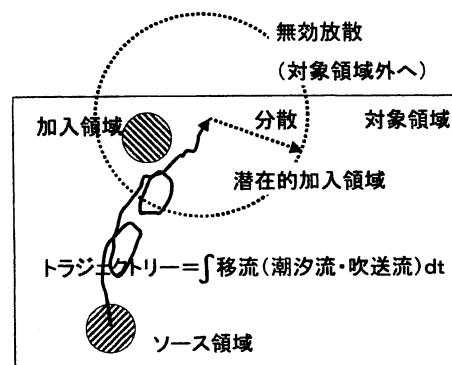


図 1 トラジェクトリー評価に基づいた保護領域選択の概

2. 研究目的

本プロジェクトにおいても、数値シミュレーションモデルにより粒子の軌跡(トラジェクトリー)を明らかにすることが有効であろう。一方、1970～1980年代にサンゴに甚大な食害を与えたオニヒトデが再度増加しつつあることも、現在火急な問題となっている。オニヒトデの卵・幼生(プランクトン期)についても同様な移流・分散過程をたどるので、このような研究はサンゴとオニヒトデの両面についての評価に有効である。さらに、生物粒子の移流・分散が動的であるため、シミュレーション結果を効果的に表示する手法も重要である。

石西礁湖は 30km×40km 程度の領域に複数の礁が散在している。したがって単一の礁から離れた生物粒子が、別の礁に加入することも考えられ、研究例⁵⁾が単一礁から離れた場合は無効分散としたのとは異なり、石西礁湖全体を取り扱って残留確率を評価する必要がある。

また計算結果を検証するための、流速の実測データとの比較による検証が必要になる。また、i)および iii)、すなわち、石西礁湖中の個別の礁の卵放出能力(サンゴ群体の被度およびサンゴ群体の大きさ、種類)や、現在までのサンゴ衰退や加入の実態に関する生物センサスデータ、特に長期時系列的に得られているデータに基づいた評価が必要になる。

このような必要性から、図2に示すように、数値モデルを中心とし、関連項目をも含んだ包括的なフローにしたがった研究を行う。

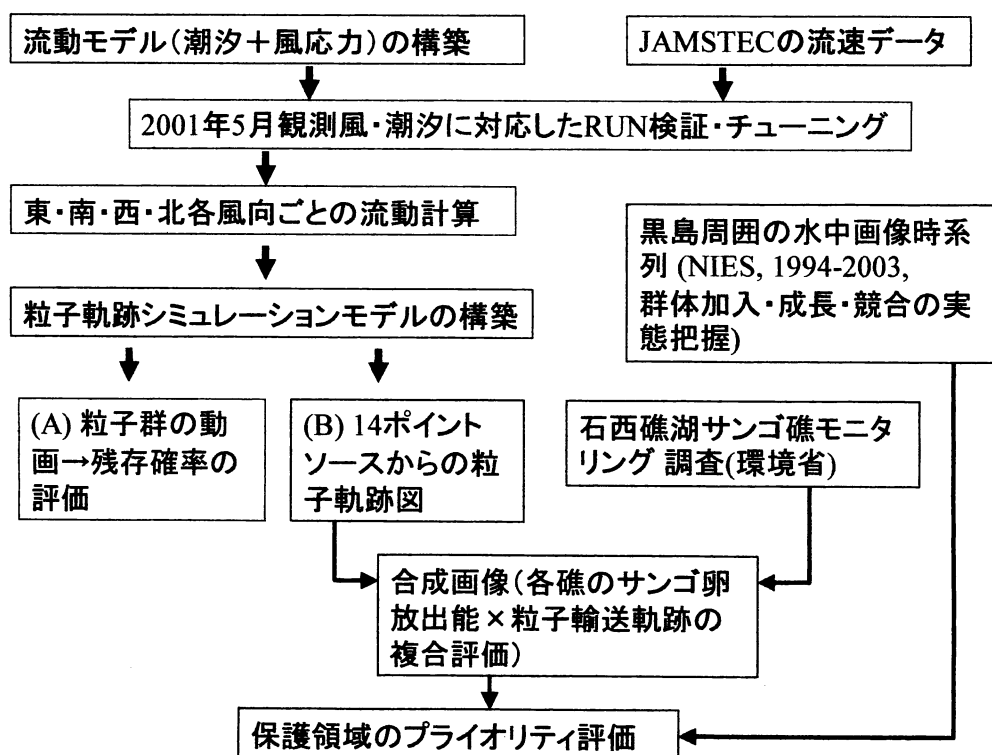


図2 本サブサブテーマにおける研究のフロー図

3. 研究方法

3.1 流動モデル

3次元の流体力学的モデルにより石西礁湖の海水流動のシミュレーションを行う。コンピュータコードは、デンマーク水力学研究所（DHI: Danish Hydraulics InstituteとVKIの統合によりできたデンマーク科学技術省傘下の機関）によって開発されたMIKE3と呼ばれる3次元数値シミュレーションプログラムである。対象領域としては、ネスティング手法により、図3に示すように、先島諸島全域を含む大領域(Nest-1)、その一部で石西礁湖を中心とした中領域(Nest-2)、その一部で黒島を中心とした小領域(Nest-3)という設定とする。格子点間隔は、それぞれ750m、250m、83.3mとする。

基礎方程式は、時間依存の u (水平東向流速), v (同北向流速), w (鉛直上向流速)に関する運動方程式、海面の昇降に関する海水の連続式を連立させ、時間積分を行う。駆動力として3つのケースを考え、CaseIでは風応力のみ、CaseIIでは潮汐のみ、CaseIIIでは風応力と潮汐の両者を与える。

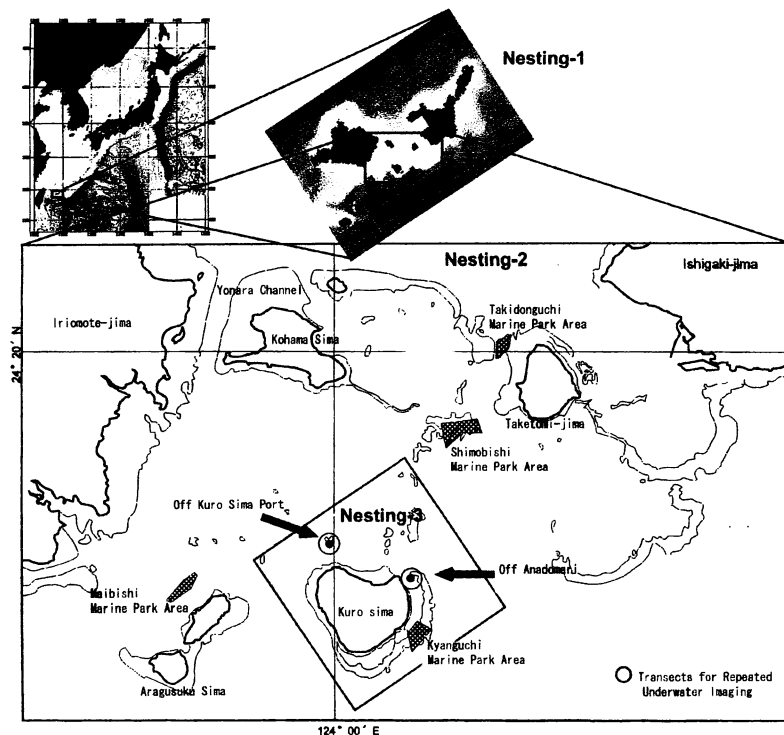


図3 計算対象領域は、ネスティングの手法により3段階の分解能で行う。潮位の進行方向が北から反時計廻りに30度傾いているため、Nest-1, 2, 3ともに同様に傾けた長方形とする。黒島周囲の2つの矢印は水中画像の経年取得地点を示す。

その他の計算条件は以下である。

- 1) 鉛直方向には、厚さ10mの3つの層位を考慮した3次元の設定とする(図4参照)。
- 2) 低潮時の干出の効果は考慮しない。
- 3) 静水圧近似、海水の密度は均一とする。

4) 水平粘性係数は Smagorinsky のモデル、鉛直粘性係数は二次のクロージャーモデルで表現する。

3 次元の計算格子と変数の配置を図 4 に示す。

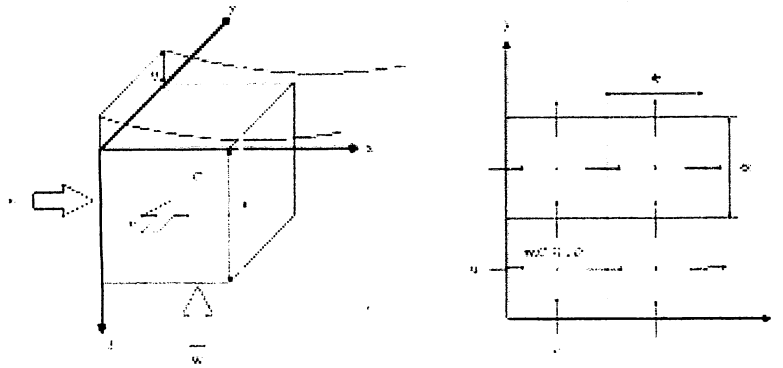


図 4 モデルの座標系
(左図)と変数配置
(右図)

流れの駆動力は海面への風応力と潮汐とし、密度不均一による流れ（密度流）は無視した。潮汐が流れを励起するメカニズムは、太平洋側（南側境界）のほう干満の位相が早いいため、満潮時には南→北の潮流が励起され、干潮時にはその逆となることによる。潮位変動の等位相線が緯線に対して半時計廻りに 30° 傾いているため^{6), 7)}、計算領域も 30° 傾けて設定した。

実際の風は変動しており、潮汐にも様々な成分が含まれているが、第一段階（平成 15 年度）でモデルの基礎構築を目的として、両駆動力を単純化した数値実験を実施した。すなわち、海面風応力としては、時空間的に均一な南風、潮汐力としては、Nest-1 領域における南北の境界で M_2 分潮成分のみの潮位変動を与えた。第二段階（平成 16 年度）では、現実の流速計測データと比較・検証のため、混合潮汐（松本らのモデル⁸⁾に基づいた NAO.99Jb ウェブサイト提供値⁹⁾）と観測風（気象庁ウェブサイト提供値¹⁰⁾）の条件で計算した。第三段階（平成 16・17 年度）では、シミュレーションの目的で、風を観測風、および、東・西・南・北の各方向、風速を 5ms^{-1} とした各場合について流動場を計算し、さらにこれに基づいて粒子輸送のシミュレーションを行った。

3.2 流速計実測データによる流動シミュレーション結果の検証

第一段階の基礎的な数値実験の検証に使える資料としては、潮流楕円（各観測地点につき、各潮時ごとに流速ベクトルをプロットすると楕円形となる）を計算と実測で比較する方法がある。このための実測として、灘岡らによる現場調査の研究報告¹¹⁾があり、そこで呈示されている潮流楕円とモデルで得られた潮流楕円を比較し、モデルの修正を行った。

第二段階のシミュレーション的な計算結果の検証については、古島らによる JAMSTEC の調査が行われており¹²⁾（データとしては未発表）そのうちの 2001 年の 5 月の流速計測値を参照・比較することとした。

3.3 生物粒子輸送のシミュレーションモデル

サンゴ卵を模したモデル粒子の追跡には、以下のようなオイラーラグランジュ法という手法を用いて、モデル粒子の移流を算定した。すなわち、数値シミュレーションから得られた各時間ステップ（10 分毎）の流速データ（オイラー流速場）を用いて、ある時刻 $t = t_i$ におけるある粒子の位置 $X_i(x_i, y_i, z_i)$ が、次の時間ステップ（時刻 $t = t_i + \Delta t$ ）に $X_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1})$ へ移動した時、水粒子の移動速度を $u_L(X_i, t)$ とすれば、粒子の移動距離の関係式が得られる。

u_L は原理的には、各粒子について定義される変数（ラグランジュ速度）であるが、流動シミュレーションで得られているのは、各格子点 (X_{i+1}, t) で空間的に定義されている流速（オイラー流速） $u_E(X_{i+1}, t)$ である。そこで $u_L(X_i, t)$ を、以下のようにテイラー展開によって $u_E(X_{i+1}, t)$ の級数であらわし、さらに、計算時間短縮のため、流速のシアーを表現している 2 次のオーダの項まで評価するものとした。

また、流動場の乱れによる分散効果は、乱れ速度の自乗平均 σ_u と渦拡散係数 K の関係に着目して評価し、シミュレーションに反映させた。すなわち、計算領域一様に $K = 10 \text{ m}^2/\text{s}$ として与えると σ_u が決まり、さらに正規乱数によって各時間ステップの乱れ速度が算出できる。これを各時間ステップの平均流流速に加えて移動のシミュレーションを行った。

3.4 サンゴ現存量のセンサスデータ解析

石西礁湖内の個別の礁のうち、黒島の北西側（黒島港北）・北東側（阿名泊）の 2 点のトランセクトでは、国立環境研究所と海中公園センターの協力で、1994 年から毎年時系列的に水中画像に取得しており^{13), 14), 15)}、本サブテーマにおいても 2004 年夏まで同じ方式で画像取得した^{16), 17)}。（位置については図 3 参照）そして、2003 年と 2004 年の比較を特に詳細に行い、サンゴの分布状況と新規加入等の見積りを行った。

また、環境省による調査¹⁸⁾においては、石西礁湖全域についてサンゴの被度や群体サイズのモニタリングが行われており、これらを各礁のサンゴ群体からの卵放出能の推定材料とした。

4. 結果・考察

4.1 流動シミュレーションの結果

3.1 で述べた風応力のみ (Case-I)、潮汐のみ (Case-II)、風応力 + 潮汐 (Case-II) の 3 つのケースの基礎的な数値実験の計算結果のうち、Case-I の Nesting-2 領域についての流速ベクトルの分布を図 5 に示す。この場合には 1 日程度でほぼ定常に達し、南 → 北の流れができる。より詳細には、ヨナラ水道（石西礁湖北東部、西表と小浜島の間）などでは流れが集中する傾向がある。

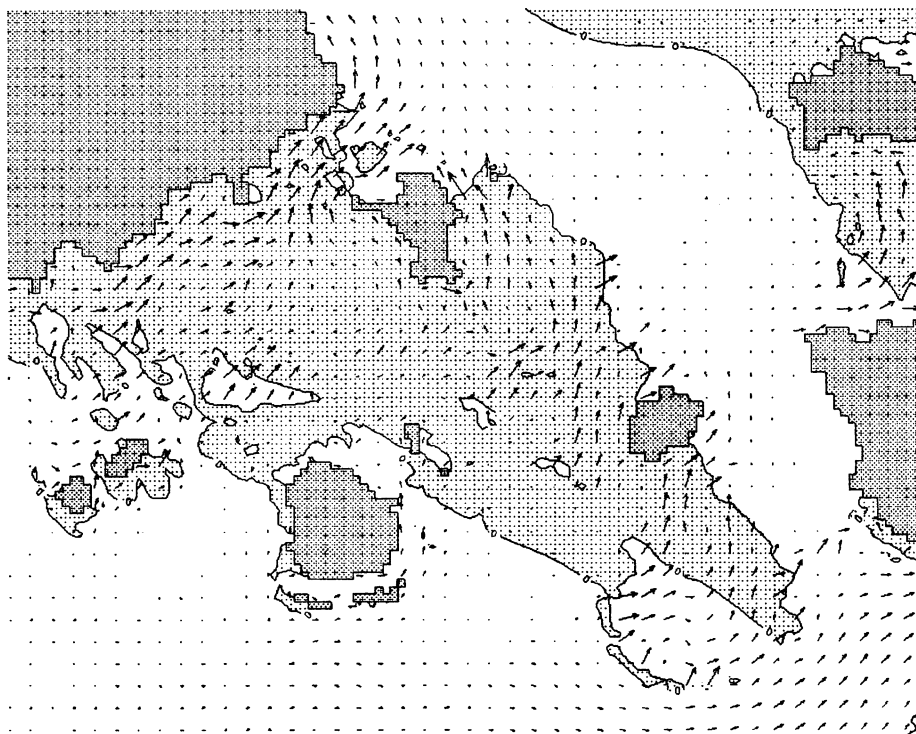


図5 Case I (南風による海面応力のみを与えた場合)の流速ベクトル。またベクトルは間引いて表示した。

CaseII(潮汐のみ)については、流れが周期的に変動しているため、潮流楕円(各潮時の流速ベクトルの先端をつなげると楕円状になる)の分布をそれぞれ図6に示す。東シナ海側の潮位変動が太平洋側に対して遅れるため、この差によって上げ潮時に北流、下げ潮時に南流ができた。

これらの潮流楕円は扁平で、潮流の主軸方向の成分が強いことがわかる。これらの潮流楕円は、灘岡らの流速実測によるものと概ね同様となっている。また、楕円の中心はほぼ流速の東西成分・南北成分ともにほぼ0、すなわち時間平均をとると、非常に小さな値となった。すなわち、潮汐による流れはほぼ往復流といえ、「潮汐残渣流」あるいは潮汐流から生じる恒流は比較的弱かった。

CaseIII(南風+潮汐)の結果の数日間の時間平均をとった結果(恒流)を図7に示した。この成分の分布はCaseI(南風のみ)の結果に近い。これらの結果から、潮汐によっては往復流が得られ、連吹した風応力からはほぼ風向方向の一方向流が形成されるといえる。また、Case-II(潮汐のみ)の時間平均値が小さいことからわかるように、恒流として寄与するのは風の連吹による吹送流であることが推定される。したがって、数日間の粒子の移動に効いているのも潮汐流よりも風による流れ(吹送流)であると推定される。

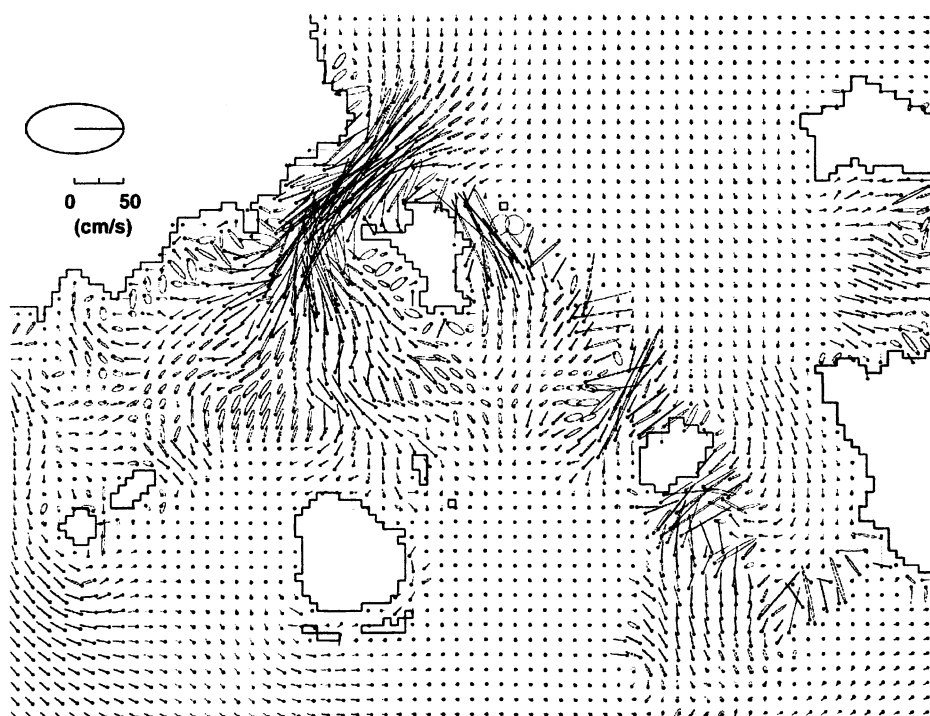


図 6 Case II (潮汐のみの場合) の潮流楕円分布。

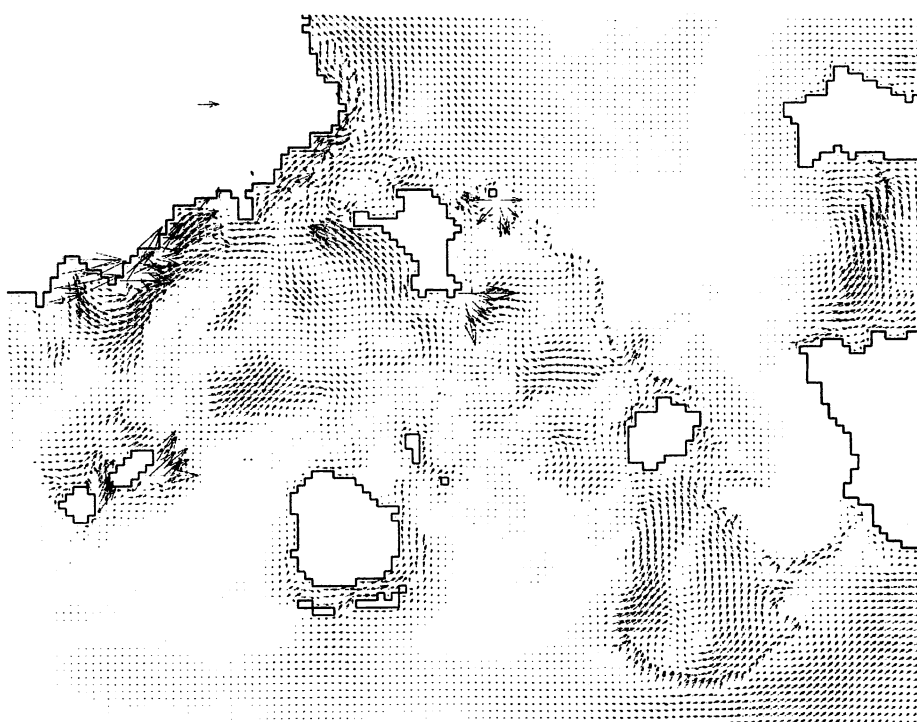


図 7 Case III (南風による海面応力のみ) の潮流楕円分布。

4.2 流速計実測データによる流動シミュレーションの検証

3.2 で示したように、2001 年 5 月の観測風+混合潮位の条件のもとに流動のシミュレーションを行い、同時期における JAMSTEC による実測結果と比較した(図 8)。これによれば、双方ともに、 M_2 分潮を反映した往復流がめだっており、両者が概ね類似していることから数時間の時間スケールでの粒子輸送に関わる流速については概ね現実の流れを再現していると判断できる。相違点は、実測流速のほうは短時間の変動成分(乱れ成分)が多く含まれているが、計算結果のほうでは時間変化が平滑化されていることである。これは、1)現実の風には短期的な変動が含まれることや、2)実測データは現場地形の影響でできる渦(乱流成分)が含まれるが、数値モデルの空間分解能(Nest-2 領域のグリッド間隔:250m)ではこのスケールの乱れまで再現できないこと、による。粒子移動のシミュレーションにおいては、数値モデルで生成できなかった乱流成分を、前述のように $K=10\text{m}^2\text{s}^{-1}$ の乱流拡散係数と同等な乱流成分として表現する。

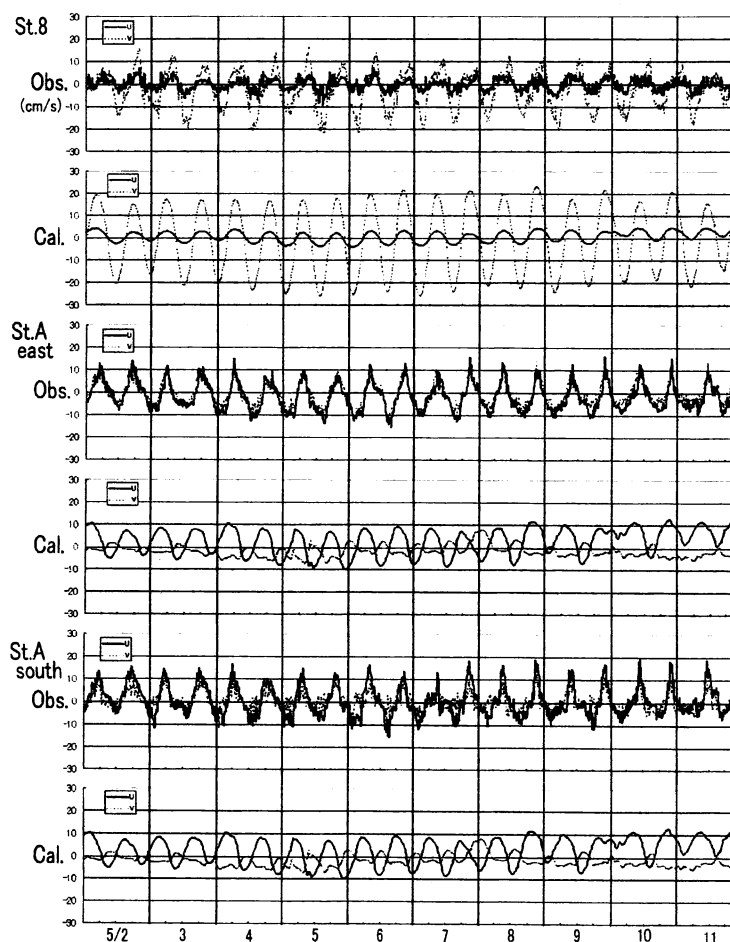


図8 流速計係留による実測結果¹²⁾(Obs.)と数値シミュレーション結果(Cal.)の流速の比較。東向成分(u)は点線で、北向成分(v)は実線で示す。

4.3 生物粒子輸送のシミュレーション結果

4.3.1 粒子群の分布の時間変化

造礁サンゴは海中で受精しプラヌラ幼生となって数日間浮遊し着床する（4日程の浮遊期間が通常考えられている）。したがって、サンゴ卵及び幼生が少なくともどのくらい流動場によって輸送あるいは分散させられるのかを調べるため、粒子群の放出地域として、i) 石西礁湖中央部のシモビシ、ii) 石西礁湖南側周辺部の黒島周囲、および iii) 石西礁湖南東周辺部のカタグアの3地域を想定し、仮想的な1000個の粒子群の分布の推移を10分ごとに画像データとして残した。その動態は別途作成した動画ファイルのほうが効率的に表示できるが、ここでは印刷物としての制約から0, 2, 4, 6, 8日のスナップショットを示す。

4.1の結果から、半日以下の時間スパンでは潮汐流が、数日くらいの時間スパンでは、吹送流の要素が粒子輸送に最も効いていることが推測される。そのため、基本的に外力条件を風+潮汐としたが、次ページ以降の図9.1～図9.3では、風としては観測風（2001年5月2日からの15日間）、潮汐としては現実に近い潮位変動を与えて得た結果を表示した。それ以降の図9.4～図9.6では、風の条件を単純化して東・西・南・北としたうちの、南風+潮汐のもとで得た結果を表示している。

2001年5月2日には、南西→北東の風が卓越し、しばらく弱まった後に、5月5日～7日には北→南の風が卓越した。シモビシ放出の場合（図9.1）では、粒子群が潮流に乗って往復運動をしつつ分散しながらも、全体としてははじめ北東に運ばれ、次に南にもどってくる様子が見える。より詳細には、同じ時点においては、浅海部のほうが粒子の輸送が速い。これは海面風応力が同じ場合、浅海部のほうが強い流れが励起されることによると考えられる。黒島周囲放出の場合（図9.2）およびカタグア放出の場合（図9.3）においても、同様に一度北東に移動した粒子群が南に戻ってくる。南風+潮汐の条件では、傾向がよりはっきりし、粒子群は往復運動と分散を行いながら南から北へ移動する（図9.4～図9.6）。

重要なことは、放出後4日ころに幼生が浮力を減らし、海面→中層→着底へとむかうことである。4日ころの時点で浅海部上に存在すれば着生のチャンスを得るのに対し、外海あるいは深度の大きい領域に存在すれば無効放散となってしまうと推測される。観測風と南風の双方の場合につき、それぞれ3地域から放出された粒子群のうち10m以浅の部分に存在している粒子の数を計数し、経過日数に対してプロットした（図10）。どの場合でも概ね指数関数的に減少してゆくが、放出後2～3日の減衰が顕著である。また、図10では表現されていないが、より短い時間間隔で見れば、下げ潮時に減り、上げ潮時で戻るような変動も含まれる。

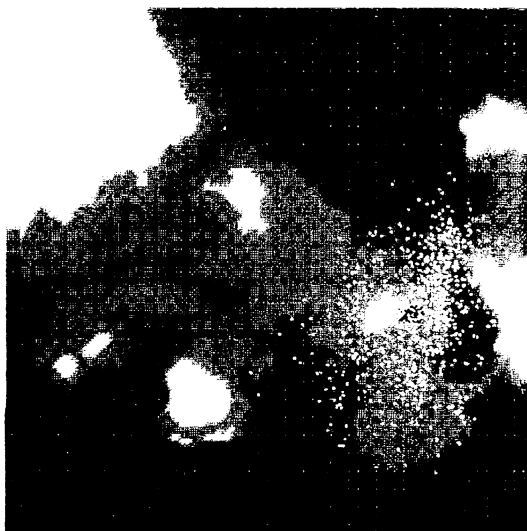
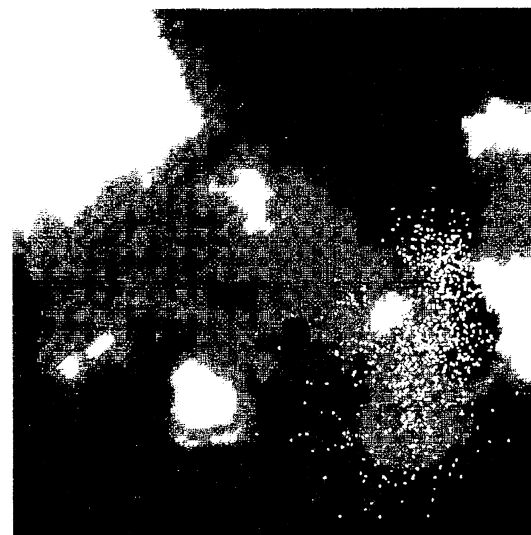
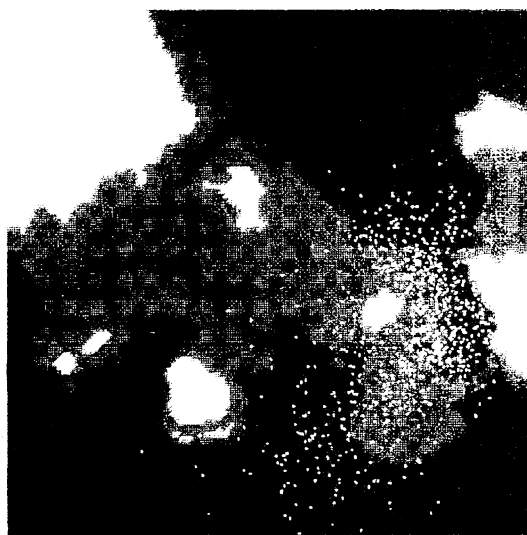
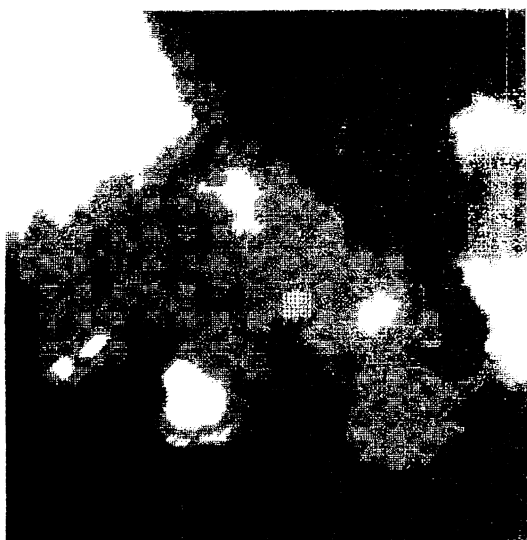


図 9.1 観測風のもとでの、シモ
ビシ放出粒子群分布の推移。各小
図は、上段左→右→中断左→右→
下段左→右の順に放出後 0, 2, 4,
6, 8 日を現す。紙面上方から時計
回りに 30 度ずれた方向が北であ

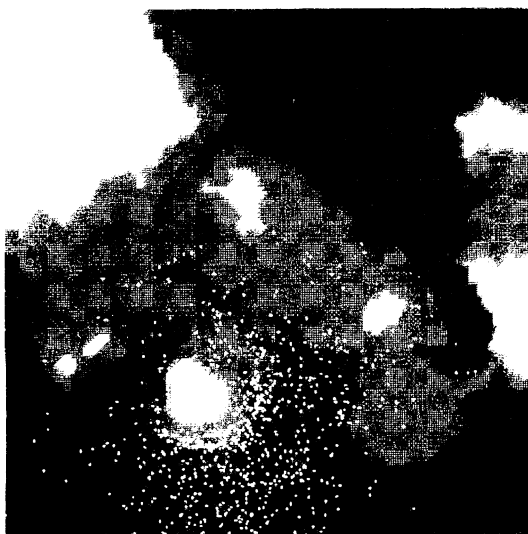
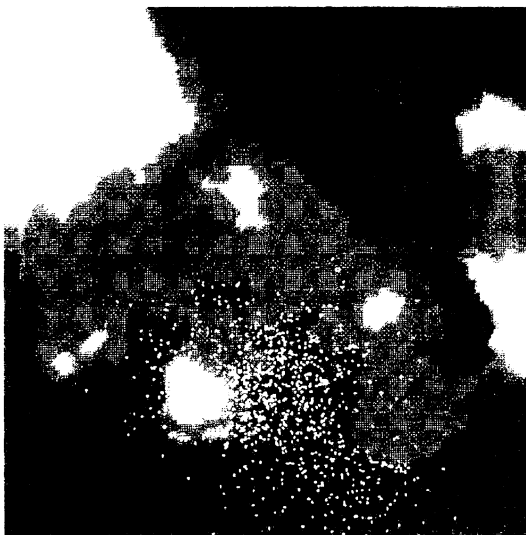


図 9.2 観測風条件のもとでの、
黒島放出粒子群分布の推移。形式
は図 9.1 と同様である。

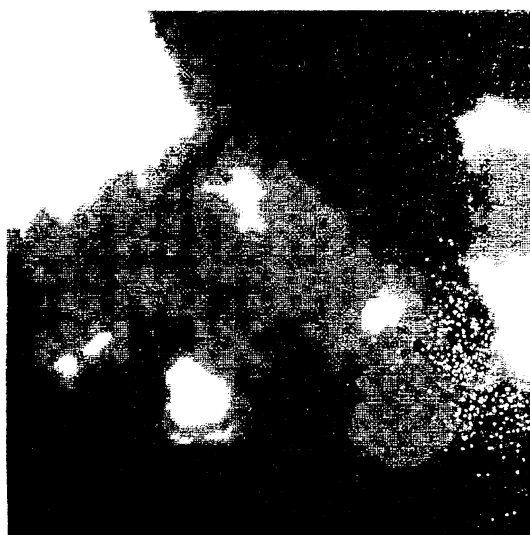


図 9.3 観測風条件のもとでの、カタグア放出粒子群分布の推移。形式は図 9.1 と同様である。

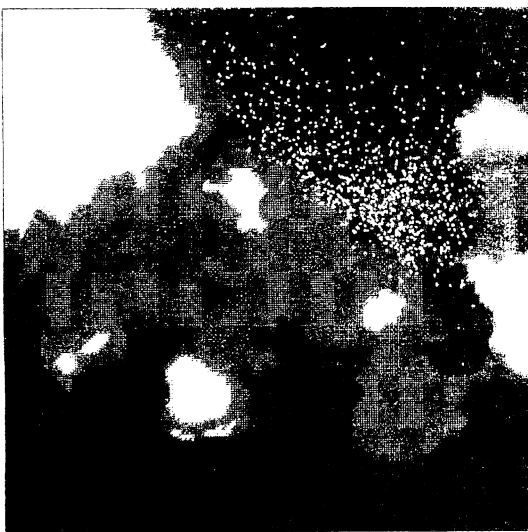
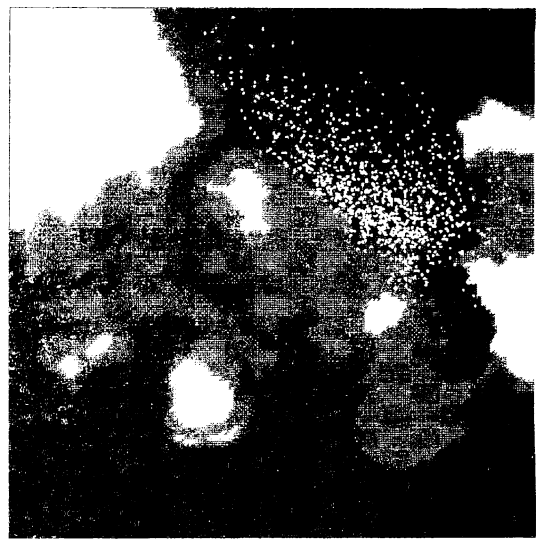


図 9.4 南風のもとでの
シモビシ放出粒子群分
布の推移。図の形式は図
9.1 と同様である。

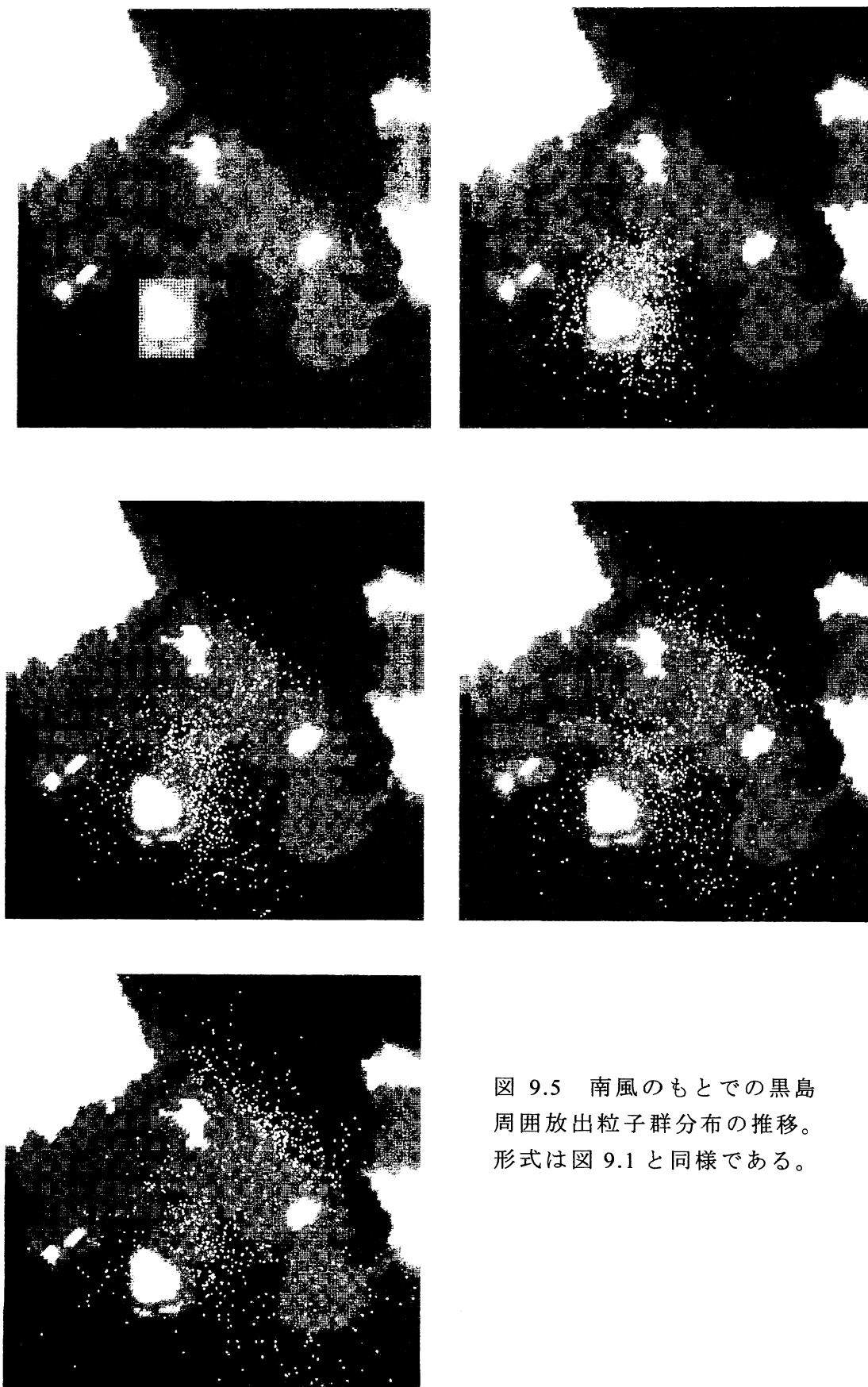


図 9.5 南風のもとでの黒島
周囲放出粒子群分布の推移。
形式は図 9.1 と同様である。

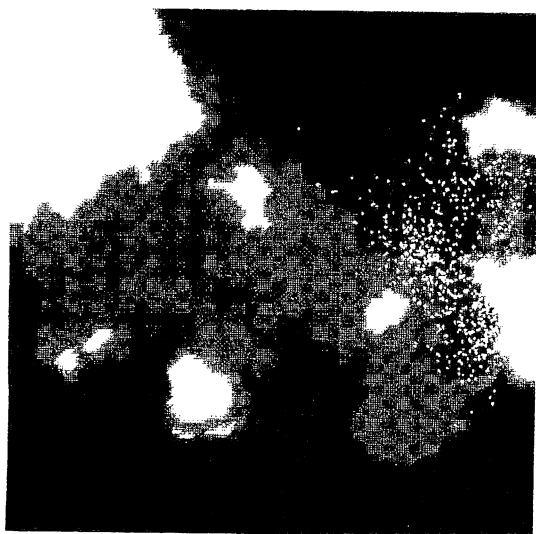
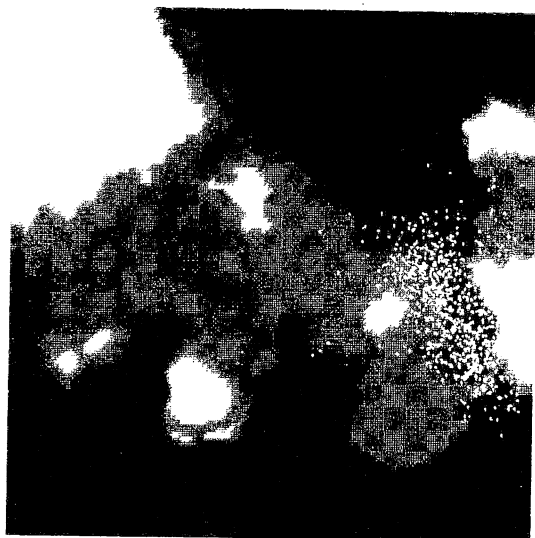
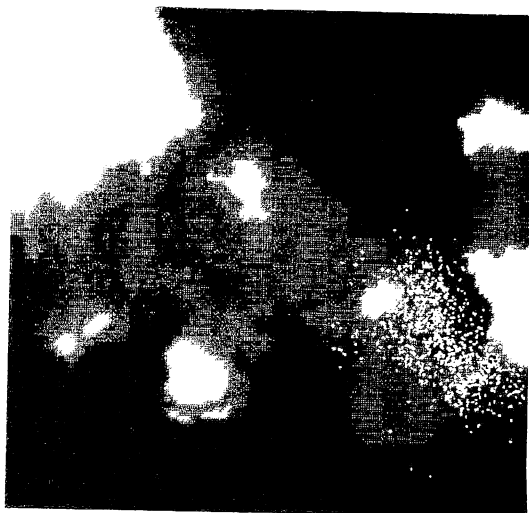
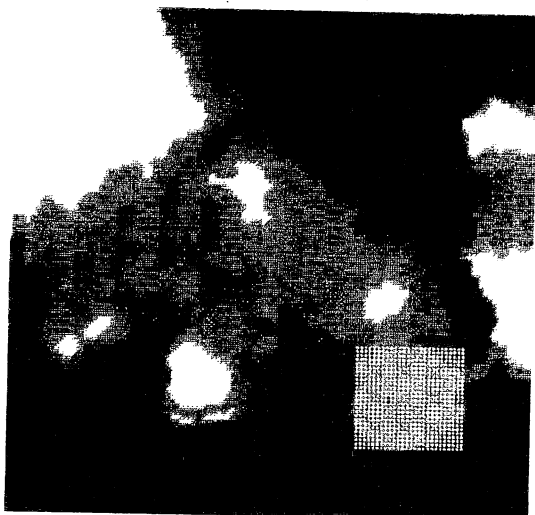


図 9.6 南風のもとでのカタ
グア放出粒子群分布の推移。
表示形式は図 9.1 と同様であ
る。

観測風の場合には、シモビシ放出の粒子群が一度北東方向に流されたが、風向の転換で戻ってくるため、4日経過しても半数近くが残っていた。カタグア放出のケースでは大半が外海に流出した。黒島放出の粒子群残存率は、はじめシモビシ放出のケースよりも早く減衰したが、1週間後にはシモビシ放出と同等であった。

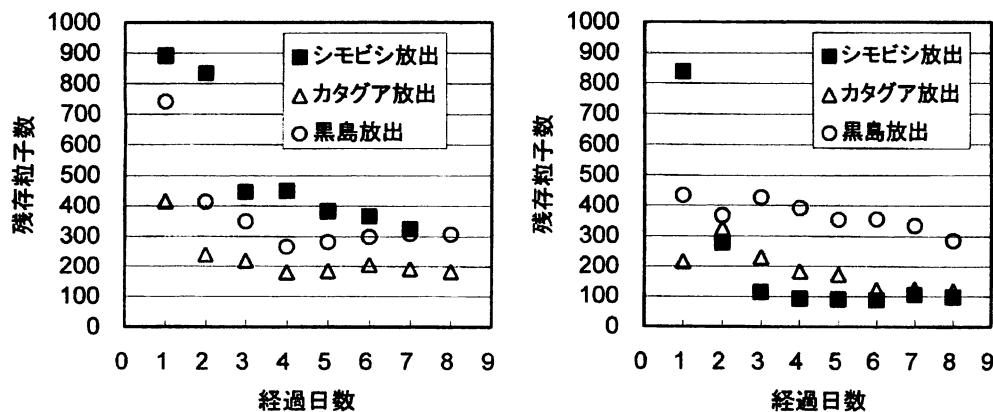


図10 粒子群を、シモビシから放出(■)、カタグアから放出(△)および黒島周囲から放出(○)させた後、日数の経過に対して、浅海部(10m以浅)上にある粒子数の時間的推移。左図は観測風、右図は南風のもとでのシミュレーション結果。

南風の場合には、シモビシ放出粒子は、南→北の定向流にフラッシュアウトされるため、1～3日で急速に減衰した。黒島放出の粒子群は、南→北の定向流に流されながらも、石西礁湖北端までの流程が長いため、1週間近くの間残存率が高く維持された。また、シモビシ、黒島、カタグアすべての場合について、定向流でフラッシュアウトされるだけでなく、分散すなわちランダムウォークにより浅海部に留まっている粒子も一部存在する。したがって、10日近く経過しても残存粒子が0にならない。

4.3.2 ポイント放出からの軌跡

同じ粒子輸送のシミュレーション結果に基づいて、別の表現、すなわちポイントソースからの軌跡の特性から考察を加える。以下の図は、石西礁湖で14箇所の個々の礁を選びそれをソースと考えて14日間の軌跡を描いたものである。

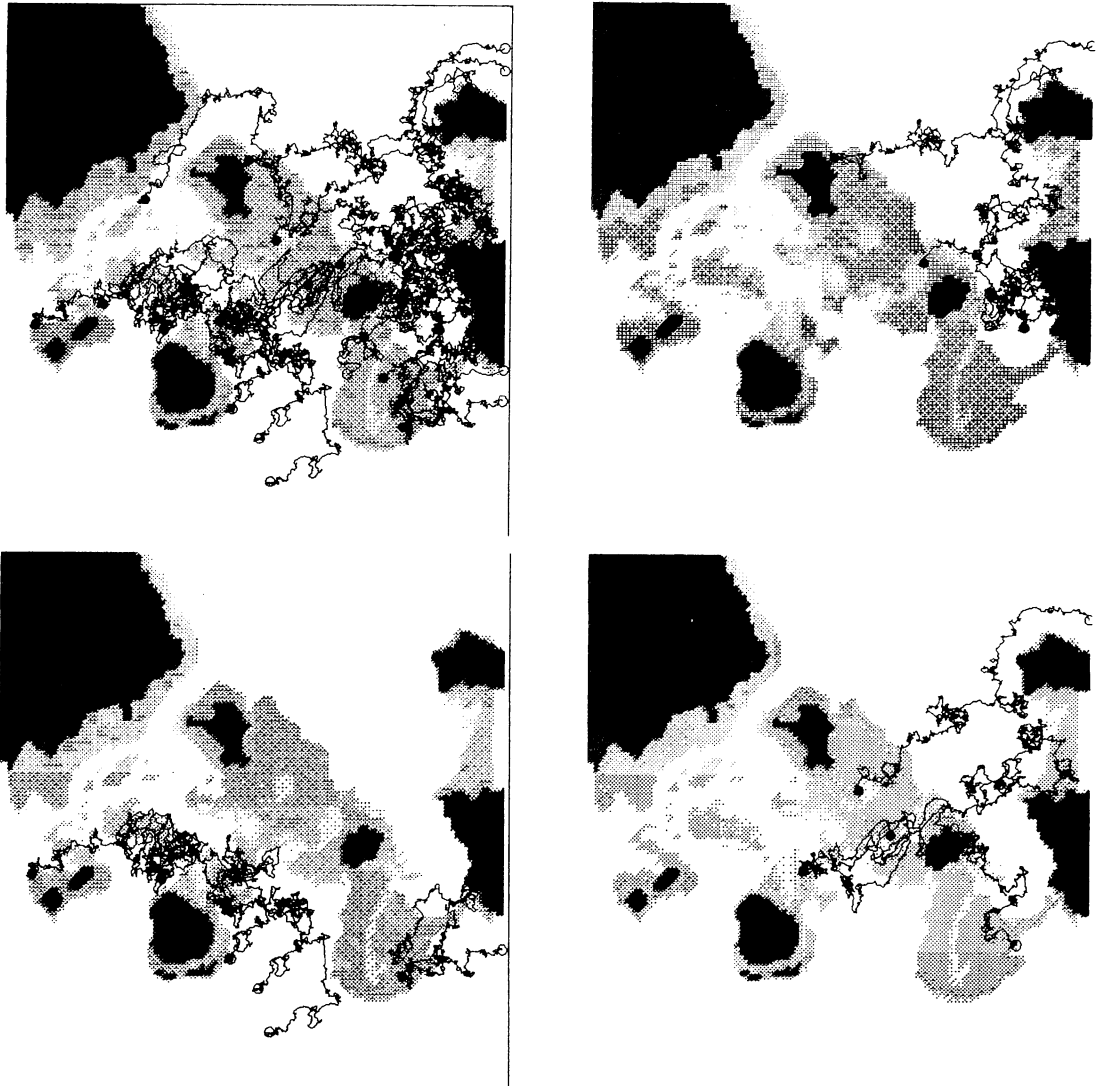


図 11.1 観測風＋潮汐のもとでの、ポイント放出点（●）からは 14 日後位置（○）の間の軌跡。左上図は全 14 地点からの軌跡。右上図はそのうち北側 3 地点から、左下図は南側 3 地点から、右下図は中央部 3 地点からの軌跡を分けて描いたもの。

図 11.1 は、観測風＋潮汐の条件下のシミュレーション結果の表示である。そのうち左上小図は、全 14 地点からの軌跡を表示し、より見やすくするために、右上小図では北側 3 地点（西からそれぞれ小浜島北、タキドングチ、石垣島西）、左下小図では南側 4 地点（西からそれぞれ、新城島西、黒島北西沖、黒島北東沖、カタグァ）、右下小図では中央部 3 地点（マルグ、シモビシ、竹富島西）を別々に表示した。また、図 11.2 は、同様の形式で南風＋潮汐の条件下の表示である。

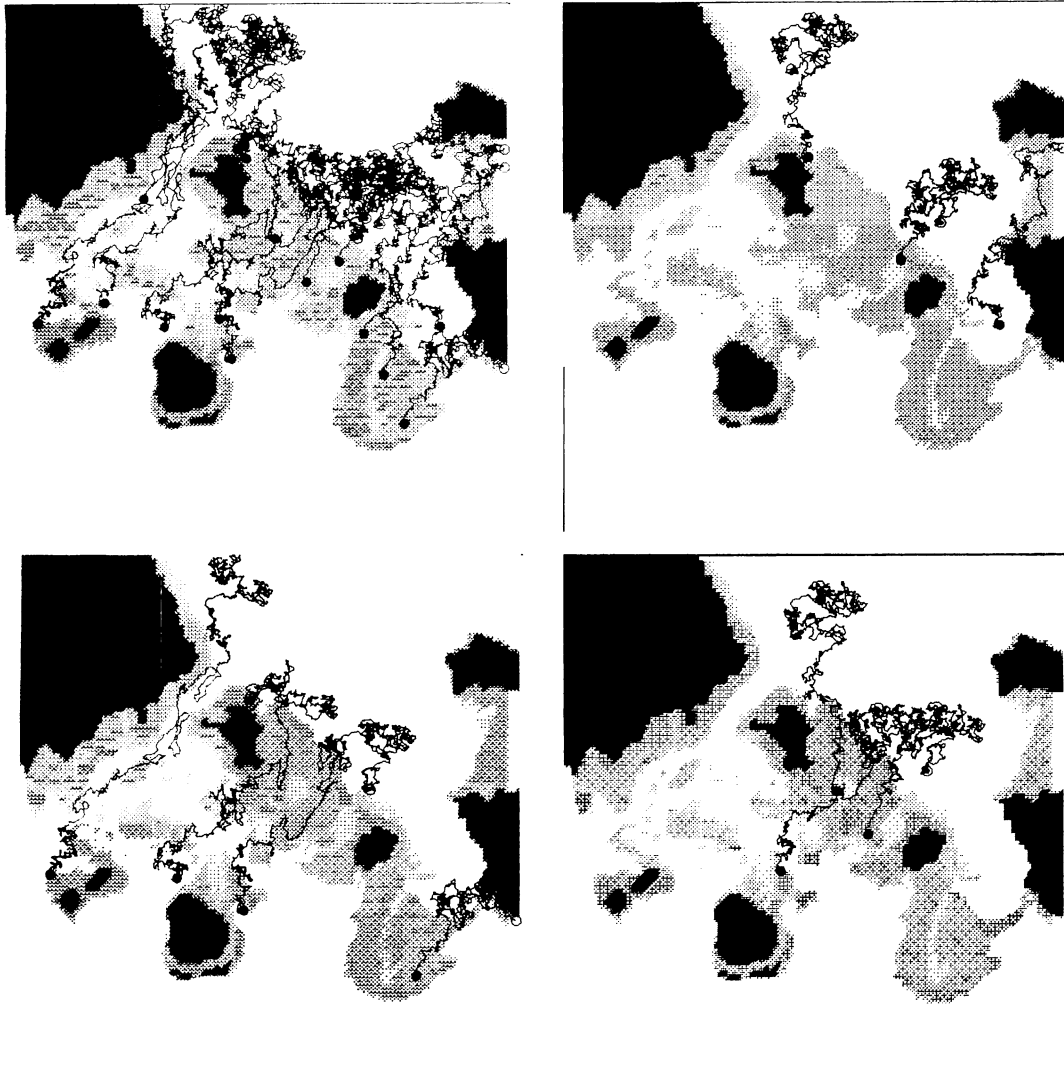


図 11.2 南風+潮汐の条件のもとでの、ポイント放出点からの粒子の軌跡。図の配置形式は前図と同様。

どの軌跡も、大局的には風向、すなわち吹送流に準じた流れを示し、それに潮汐による往復流と分散（ランダムウォーク）が重ねあわされた特性を示している。また、観測風のもとでは、風向が途中で変わったため、比較的中央部を基点とする軌跡が、戻りの影響もふくめて、浅海部に留まりやすかった。これに対し南風のもとでは、北側の3点からの粒子はすぐに東シナ海側にフラッシュアウトされてしまい、中央部からの粒子もそれについてフラッシュアウトされる傾向にあった。南側の4点からの軌跡は北に流されながらも石西礁湖内に留まっている時間が長かった。したがって着生に寄与する確率も大きいと推測される。

4.4 サンゴ現存量のセンサスデータ解析

本節では、3.4 で述べた黒島北東地点(a)および黒島北西地点(b)における長期画像取得調査に基づいたサンゴの加入の実態を表す。この調査では両地点の孤礁それぞれに 50m のラインを設け、5m おきに 1m×1m のコドラートを置いて毎年水中写真を撮影した。画像は電子ファイル化として系統的にアーカイブ化し、さらにウェブサイト¹⁷⁾において参照可能としたが、特に 2002 年夏と 2003 年夏については潜水しながら各コドラート内部の群体マップを作成し、両者を比較することによって 1 年間の間の群体加入・死亡を克明に記述した。下の表は、それに基づいて、各コドラートの加入群体数とトランセクトの合計を算出したものである。これによれば、1 平米あたりに(a)で 1 群体前後、(b)で 2.4 群体前後の加入がみられた。また、ともに大型の卓状ミドリイシの群体がみられ、サンゴ卵放出能力も十分であると判断できた。

表 (a)黒島北東トランセクト（アナドマリ前地点）および(b)黒島北西トランセクト（黒島港前地点）における 2002 夏-2003 年夏の間のサンゴの加入状況。両地点位置については図 3 参照。

(a)

地点	新加入種	加入数
アナドマリ前	カメノコキクメシ属の一種	1
	カメノコキクメシ属の一種	2
	ハイマツミドリイシ?	1
	トゲサンゴ	1
	ウスエダミドリイシ	2
	ミドリイシ属の一種	1
	15m なし	0
	20m なし	0
	25m なし	0
	30m ホソエダミドリイシ	1
	35m なし	0
	40m なし	0
	45m なし	0
	50m ミドリイシ属の一種	1
	コドラート内加入種数	7
	全コドラート加入群体数	10
	コドラート平均加入群体数	1.0

(b)

黒島港前	5m	なし	0
	10m	オヤユビミドリイシ	1
		ミドリイシ属の一種	1
	15m	ミドリイシ類	3
		被覆状コモンサンゴ属の一種	1
	20m	ミドリイシ属の一種	7
	25m	スゲミドリイシ	2
		ミドリイシ属の一種	1
	30m	なし	0
	35m	ミドリイシ属の一種	3
	40m	ミドリイシ属の一種	1
	45m	ミドリイシ属の一種	2
		トゲスギミドリイシ	1
	50m	トゲスギミドリイシ	1
	コドラート内加入種数		5
	全コドラート加入群体数		24
	コドラート平均加入群体数		2.4

また、次ページの図 12 は、環境省によって継続的に行われている石西礁湖におけるサンゴ礁モニタリング調査から、平成 15 年度報告書（調査は 2003 年秋の調査）中のサンゴ類被度・生育型（上図）、および卓状ミドリイシ群体の平均長径分布（下図）を抜粋転載したものである。

これによれば、黒島周囲など、石西礁湖の比較的南側の礁が被度、群体長径ともに良好で、サンゴ卵放出能力が良好であるといえよう。

4.5 研究全体を通じての考察

以上の研究の各結果を総合すると、サンゴ卵・幼生は潮汐流によって往復し、乱流によって分散しながらも、連吹する風による移流が主要因となって風下に運ばれる。分散による移動も無視できない。ただし、それは単位面積あたりの粒子数の減少を伴うので、捕食圧を大きく被ることとなり、着生の確率の点では不利になることも考えられる。したがって、まとまった個数の粒子が風下に移動し、フラッシュアウトされないうちに着生するというのがサンゴ群体の維持にとってもっとも主要であると考えられる。当然のことながら、南風の条件は南側の礁から放出された粒子にとって有利であり、その逆もいえる。

サンゴの産卵時期（5～6月）には風向が必ずしも安定していないため、この点でシモビシなど石西礁湖の比較的中心部の礁を重点的に保全することが有利になる。また、4.4の結果などから、黒島周囲など比較的南側の礁の群体が卵放出能力が高いと推測される。この点で、産卵時期に南風が基調になることを見込んで南側の礁（黒島周囲、カタグアなど）を重点的に保全するという考え方も可能である。

本研究においては、風向については4方向のケースの試行を行ったが、研究資源の制約のため風速については 5ms^{-1} のみの場合の計算結果のみから考察を行った。より大きな風速の場合には粒子がフラッシュアウトされる時間が短くなる傾向があることが推測されるが、定性的には現在の数値シミュレーション結果で議論を行えると考えられる。また、流速計係留による実測については係留地点をあまり多く取るとは困難であり、放出されたサンゴの卵・幼生のパッチを現場海域で数日間追跡して着生との関連を調べること、さらに物理条件を変えて結果の依存性を吟味することも困難である。この点で数値シミュレーションによる推測が唯一可能な手段であることも考慮する必要がある。

5. 本研究によって得られた成果

以上の結果から以下が結論される。

- 1) サンゴ卵・幼生の放出～着生期間（数日）の時間スパンについては、往復流である潮汐よりも連吹する風による吹送流が粒子輸送の主要因となると推定される。
- 2) 石西礁湖のサンゴ放出季（5～6月）の風向が年によって様々であることから、石西礁湖の比較的中央部（シモビシ等）を重点保護領域とすれば、そこから放出された粒子がどの風向に対しても残存できる確率が高いと考えられる。
- 3) ただし、サンゴの卵放出能をも考慮すると、現今では比較的南側の礁（カタグア、黒島北側等）がサンゴ被度、群体サイズ等の点で良好であり、各風向の確率に重みをつけた評価としては、比較的南側の礁を重点保護領域とすることが有効であると考えられる。

[謝辞]

数値シミュレーションの計算結果の検証のために、石西礁湖における流動の実測データを参照させていただいた海洋科学技術機構（JAMSTEC）の古島靖夫博士および

東京工業大学灘岡教授に感謝いたします。また、1994 年～2004 年の間、黒島周囲のサンゴ礁における長期的な水中画像の取得にご協力いただいた、(財)海中公園センターおよび NPO 法人日本ウミガメ協議会、石西礁湖のサンゴ礁モニタリング調査の資料を提供をいただいた環境省自然保護局ならびに(財)自然環境研究センターに感謝いたします。

6. 引用文献

- 1) Salm, R. and Price, A. 1995. Selection of marine protected areas, in Gabbay, S. (ed.) Marine Protected Areas, Principles and techniques for management, pp.15-31, Chapman & Hall, London.
- 2) 大久保明 1975. 生態学と拡散、築地書館.
- 3) Wolanski, E. 1994. Physical Oceanographic Processes of the Great Barrier, CRC Press.
- 4) Sammarco, P.W. *et al.*, (eds.) .1994. The Bio-Physics of Marine Larval Dispersion, AGU.
- 5) Black, K. P. 1991. Numerical models show coral reefs can be self-seeding, Mar. Ecol. Prog. Ser., 74: 1-11.
- 6) Schwiderski E. W., 1979. Detailed ocean tide models of N2,M2,S2,K2 and K1, P1, O1, Q1-including an atlas of tidal charts and maps. IUGG general assembly, Cambella., 20: 1-23.
- 7) Schwiderski E. W., 1979. Global ocean tides, PART II: The semidiurnal principal lunar tide /M2/, Atlas of tidal charts and maps. Naval surface weapons center, TR 79-414: 1-15.
- 8) Matsumoto, T. *et al.* 2000. Ocean Tide Models Developed by Assimilating TOPEX/POSEIDON Altimeter Data into Hydrodynamical Model: A Global Model and a Regional Model Around Japan, Journal of Oceanography, 56: 567-581.
- 9) NAO.99Jb ウェブサイト (<http://www.miz.nao.ac.jp/staffs/nao99/>)
- 10) 気象庁電子閲覧室ウェブサイト (<http://www.data.kishou.go.jp/>)
- 11) 灘岡和夫、三井順、濱崎克哉、波利井佐紀、田村仁、鈴木庸彦 .2003. 沖縄・石西礁湖における海水流動構造および濁質・淡水・熱輸送特性に関する現地観測. 海岸工学論文集、50: 1036-1040.
- 12) 古島靖夫、岡本峰雄 2002. 石西礁湖（沖縄県石垣島）におけるサンゴ分布と流動との関係. 日本沿岸域学会論文集、14: 107-113.
- 13) 環境庁地球環境研究総合推進費終了研究報告書 1997. サンゴ礁生態系の維持機構の解明とその保全に関する研究 平成 6～8 年度.
- 14) 環境庁地球環境研究総合推進費終了研究報告書 2000. サンゴ礁における生物多様性の解明とその保全に関する研究 平成 9～11 年度.
- 15) 環境省地球環境研究総合推進費終了成果報告書 2003. サンゴ礁生態系の攪乱と回復促進に関する研究 平成 12～14 年度.
- 16) 原島省、顔小洋、陶衛峰 2004. フェリーによる海水水質時系列と水中撮影によるサン

ゴの時系列画像の GIS 化、月刊海洋, 30: 370-375.

- 17) 国立環境研究所サンゴ礁水中画像アーカイブウェブサイト

(<http://web3.nies.go.jp/aquaterra/coral/>)

- 18) 環境省、(財)自然環境研究センター(各年刊) 西表国立公園石西礁湖及び近隣海域におけるサンゴ礁モニタリング報告書.

7. 国際共同研究等の状況

なし

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<学術誌(査読あり)>

- ① 中田聡史、石原靖文、原島 省：海洋理工学会誌, 10, 35-49 (2004)

「石西礁湖における流動数値シミュレーション」(謝辞に明示していないが、本予算のみで行った研究である)

- ② S. Nakada, Y. Ishihara and A. Harashima: Proc. 10th International Coral Reef Symposium, 871-878, (2005) (査読つきプロシーディングス)

"Numerical Simulation of Sea-surface Currents in the Sekisei Lagoon and the Coral Egg and Larval Transport"

<その他誌上発表(査読なし)>

- ① 原島省、顔小洋、陶衛峰：月刊海洋, 30, 370-375 (2004)

「フェリーによる海水水質時系列と水中撮影によるサンゴの時系列画像の GIS 化」

(2) 口頭発表(学会)

- ① 原島省、顔小洋、陶衛峰：東京大学海洋研究所共同利用シンポジウム「海洋 GIS と空間解析 ―そのサイエンスと未来―」(2003)

「フェリーによる栄養塩データと長期的反復撮影によるサンゴ礁水中画像の GIS 化」

- ② 原島省、中田聡史、石原靖文：日本海洋学会 (2004)

「石西礁湖の流動とサンゴ卵・幼生輸送の数値シミュレーション (1)」

- ③ 功刀正行、原島省、渋谷拓郎：日本分析化学会第 65 回分析化学討論会 (2004)

「蛍光 X 線分析法による珊瑚生育水温の推定」

- ④ S. Nakada, A. Harashima, and Y. Ishihara: 10th International Coral Reef Symposium, Naha, Japan, 2004

"Numerical Simulation of Sea-surface Currents in the Sekisei Lagoon and the Coral Egg and Larval Transport"

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催

なし

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

- 1) 環境省による石西礁湖自然再生マスタープランが呈示され、関連した活動が進行中である。本研究成果は、その中の第2章、第1節、1-2)-①サンゴ幼生の供給源としてサンゴ再生産に寄与する海域の項目に科学的知見を通じて寄与・貢献をするものである。
- 2) 基本的な流動の面的分布の情報によって、オニヒトデの幼生がどのような形で輸送・分散されるかという問題(具体的にはどの礁でオニヒトデ成体を重点的に駆除するべきかという問題)にも応用可能である。
- 3) 本テーマによる水中画像データアーカイブを、国立環境研究所のウェブサイトで公開しており (<http://www.nies.go.jp/aquaterra/coral>)、画像という客観的なデータにより環境省によるサンゴ被度の長期モニタリングを補完できると考えられる。