

D-0802 SEA-WP海域における広域沿岸生態系ネットワークと環境負荷評価に基づく保全戦略

(1) SEA-WP海域における幼生分散過程の解明と環境負荷影響評価

東京工業大学大学院情報理工学研究科 情報環境学専攻 灘岡和夫

〈研究協力者〉

東京工業大学 大学院情報理工学研究科情報環境学専攻 Coralie TAQUET

同 Aditya R. KARTADIKARIA

同 渡邊 敦

同 Tanuspong POKAVANICH

同 山本高大

同 Wei CUI (平成20年度)

同 芦川浩太 (平成21年度)

同 Eugene HERRERA (平成22年度)

同 土屋 匠 (平成22年度)

(独) 水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所 安田仁奈

(独) 海洋研究開発機構・地球環境変動領域 短期気候変動応用予測研究プログラム・ダウンスケール沿海変動予測研究チーム Li-Feng Lu (平成22年度)

フィリピン大学ディリマン校 測地学科 Ariel C. Blanco

平成20～22年度合計予算額：50,799千円（うち、平成22年度予算額：16,683千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 本研究プロジェクトは、SEA-WP (Southeast Asia and West Pacific) 海域における広域沿岸生態系ネットワーク (reef connectivity) の実態解明とそれに基づく合理的な海洋保護区 (MPA) 設定およびMPAの維持に重要となる環境負荷評価を行うことを全体的な目的としている。その中で、本サブテーマ1では、connectivity解明の基礎となる幼生分散過程の解析と環境影響負荷評価を主要な課題としている。まず、幼生分散シミュレーションのベースとなるSEA-WP海域での多段スケール海水流動モデル群と低次海洋生態系モデル群の開発と高度化を行い（サブテーマ2との共同開発部分を含む）、イリジウム衛星ブイの漂流実験により、高精度海水流動シミュレーションによって見いだされたロンボク渦の存在を実証すること等に成功した。また開発したモデル群に基づく幼生分散シミュレーション解析を、SEA-WP海域内のインドネシア海域中央部、フィリピン・Verde Island海峡周辺やLingayen湾海域、Guimaras海峡周辺海域、そして沖縄・八重山諸島周辺海域を対象としとして実施した。特に、インドネシア海域中央部のWallace line周辺海域や八重山周辺海域に関して行った幼生分散シミュレーションに基づく多地点間の幼生到達密度算定結果によるmatrix connectivity解析によって、source側から見た「他沿岸海域への広範な幼生供給能力」、およびsink側から見た「広範な他沿岸海域からの幼生加入ポテンシャル」を指標としてMPA候補サイトを同定するというスキームの有効性を示すことに成功した。これは、本研究の主要な最終的アウトプットの一つの基本形を提示するものである。また、環境負荷評価の

根幹をなす陸源負荷評価モデルの開発とそれによる解析を行うことに成功するとともに、その際に必要になる降雨量等の気象条件の設定に、地域気象モデルに基づく解析結果をリンクさせるスキームの開発も実現できた。これらは、今後、気象データが乏しいSEA-WP海域内の様々なエリアでの陸源負荷評価において強力な解析ツールになるものと期待される。

[キーワード] SEA-WP海域、reef connectivity、幼生分散、数値シミュレーション、MPA

1. はじめに

SEA-WP (Southeast Asia and West Pacific) 海域、すなわち東南アジアから西太平洋中部に至る海域は、沿岸生態系における生物多様性が世界中で最も高い地域として知られているが、様々な人為的環境負荷によって沿岸生態系の劣化が急速に進行している。さらに、海水温上昇による広域的なサンゴ白化の頻発化に代表される地球環境変動影響の懸念もますます高くなって来つつある。そのようなことから、生物多様性を維持した形での効果的な沿岸資源・生態系管理策を構築していくことが急務となっており、そのための学術的な知見の蓄積が重要な課題になっている。

これらの地域における様々な沿岸資源管理方策の中で、海洋保護区 (Marine Protected Area ; MPA) の設定が最近有望視されているが、現状のMPAによる沿岸資源管理は、必ずしも十分な科学的な調査に基づかない漁業者を主役としたローカルな水産資源管理によるものが中心であるため、ローカルな沿岸資源の維持管理に一定の効果が認められるとしても、より根元的・統合的なレベルでの沿岸生態系の保全・管理にはなかなか結びつきにくい、という大きな難点がある。このような、個別地域ごとの水産資源管理特化型MPAの設定・管理の限界を大きく乗り越える鍵は、上記海域の沿岸生態系が高い生物多様性を保った形で維持されているメカニズムを知る上で不可欠となる「広域的沿岸生態系ネットワーク (reef connectivity ; サンゴ礁間連結性)」の実態を、その成り立ちや地球環境変動下での将来的な変遷予測を含めて理解するとともに、広域的な幼生供給源の観点からネットワーク中のコアとなる沿岸海域を同定し、それを重要海洋保護区 (MPA) として適切に維持するための環境負荷評価・管理方策を科学的な裏付けに基づいて提示することにある。しかし、このような観点からの本格的な調査研究はまだ行われていないのが現状である。

2. 研究目的

本研究では、SEA-WP海域の広域的沿岸生態系ネットワークの実態を明らかにするとともに、広域的な幼生供給源の観点からネットワーク中のコアとなる沿岸海域を同定し、それを重要海洋保護区 (MPA) として適切に維持するための環境負荷評価・管理方策を科学的な裏付けに基づいて提示することを目的とする。そのために、本サブテーマ1では、以下の研究課題に具体的に取り組む。

- 1) サブテーマ2が主として担当する<太平洋-SEA-WP海域-インド洋>広域海洋循環モデル開発や、それをベースとしたSEA-WP海域高解像度nestingモデルと地域気象モデルをカプリングしたモデルの開発により超多島複雑海域としてのSEA-WP海域の高精度海水流動シミュレーションを可能にするという課題に関して、当研究室の大学院生を派遣する形で共同で取り組む。(サ

ブテーマ2と共同) さらに、湾・海峡スケールやサンゴ礁スケールといったローカルスケール海域を対象とした海流モデル開発を独自に取り組む。

- 2) 周辺陸域からの栄養塩等の陸源負荷の評価モデルを開発し、海域での低次生態系モデル開発に反映させる(低次生態系モデル開発についてはサブテーマ2と共同)。それと上記の海水流動モデルとをカプリングさせることにより、浮遊幼生の生物的挙動や生残率を評価する生物過程モデルを連結した海洋物理・生物過程統合モデルを構築する。さらに、湾・海峡スケールやサンゴ礁スケールといったローカルスケール海域を対象とした低次生態系モデル開発を独自に取り組む。
- 3) 海水流動モデルや低次生態系モデル、陸源負荷モデル等に関して、モデル開発・検証のための現地データ収集・調査を行う。
- 4) SEA-WP海域における典型的な沿岸海産生物を数種選定し、上記の海洋物理・生物過程統合モデルによって幼生分散数値シミュレーションを実施することにより、同海域におけるreef connectivityの実態を明らかにする。
- 5) サブテーマ3が主として担当する集団遺伝学的解析に基づくSEA-WP海域のconnectivity解析のためのマイクロサテライトマーカー開発等に関して、一部を共同で行う。また、これらの解析・開発作業に必要な沿岸海産生物対象種の野外サンプリングをSEA-WP海域内の様々な場所において現地共同研究者とともに実施することにより、それらの海域でのメタ個体群構造を明らかにする。(サブテーマ3と共同、ただし野外サンプリングについてはサブテーマ1単独)
- 6) 以上の結果を統合解析することにより、SEA-WP海域の広域沿岸生態系ネットワークを解明するとともに、環境負荷評価モデルにもとづく解析結果を組み合わせることによって、MPA候補サイトを選定し、環境負荷管理策を提示するための、新たな学術的スキームを開発する。(サブテーマ2、3と共同)

3. 研究方法

(1) モデル開発

1) 多段スケール海水流動モデル群と低次海洋生態系モデル群の開発と高度化

幼生分散シミュレーションの基礎となるのは、海水流動モデルおよび低次海洋生態系モデルであるが、本研究では、SEA-WP海域におけるregionalもしくはsub-regionalスケール、島スケール、海峡・内湾スケール、サンゴ礁スケールといった多段階的なスケールの対象海域において高精度計算が可能なモデル群の開発を目指した。このうち、regionalもしくはsub-regionalスケール、島スケール、海峡スケールに関しては、＜太平洋－SEA-WP海域－インド洋＞広域海洋循環モデル開発や、それをベースとしたSEA-WP海域高解像度nestingモデル開発により、超多島複雑海域としてのSEA-WP海域の高精度海水流動シミュレーションを可能にするとともに、それらとリンクした低次海洋生態系モデルを開発するべく、当研究室の大学院生を派遣する形でサブテーマ2と共同で取り組んだ。一方、海峡・内湾スケールやサンゴ礁スケールといったローカルスケール海域を対象とした海流モデルおよび低次生態系モデル群の開発をサブテーマ1独自で取り組んだ。前者については、サブテーマ2での報告書に詳しく記載されているので、ここでは詳細は割愛する。後者のうち海峡・内湾スケール海域の解析に対しては、汎用3次元流動モデルの一つである

Delft-3Dモデルを用い、それに国立天文台のNAOモデルによって開境界において潮汐条件を付加する形で流動計算及び水質計算を行った。サンゴ礁スケールの解析に関しては、POM (Princeton Ocean Model)をベースとしてすでに開発済みのサンゴ礁3次元密度流モデル等¹⁾を基盤モデルとして、サンゴ礁内熱負荷計算モデル、同微細土砂(赤土)負荷計算モデル、炭酸系を含む物質循環・低次生態系シミュレーションモデルを開発した。これらのモデル群は、後述する幼生分散シミュレーション解析に基づいて同定されるMPA候補海域が、環境負荷の観点から持続可能かどうかを評価することにも直接利用することができる。

2) 陸源負荷モデル

環境負荷影響評価において主要な役割を占める陸源負荷モデルの開発に関して、水文モデルによる流出解析を行った。解析のベースとなるモデルとして、本研究では、Soil and Water Assessment Tool (SWAT)を採用した。SWATは土地管理方法の違いによる流域の水文特性への影響評価を行うことを目的としてUnited States Department of Agriculture-Agricultural Research Service (USDA-ARS)によって開発された河川流域スケールの解析に適した分布型の生物圏水文モデルである²⁾。SWATでは、河川流域をより細かい複数の小流域に分けることで土地利用や土壌などの分布特性を反映させた流出解析を行うことができる。SWATはソースコードが公開されているため、必要に応じてモデルを改良することも可能である。またGISソフトウェア・ArcGIS上で動作するプラグインArcSWATが公開されており、GUIでの解析が可能である。本解析にはArcSWAT2005を使用した。解析には地形データ、土地利用、土壌分布、気象データ(日降雨量、日最高気温、日最低気温、日平均風速、日平均相対湿度、日平均日射量)が入力データとして必要である。ここでは、流出解析対象として、Guimaras海峡に面するPanay島の15河川、Negros島の20河川の合計35河川、またLingayen湾に注ぐ大河川であるAgno川流域を対象として設定した。Guimaras海峡周辺の解析対象流域を図1に示す。解析期間は1994年7月から1997年12月まで(期間1)と2000年1月から2003年11月まで(期間2)の2期間とした。以下に、Guimaras海峡周辺流域を対象とした解析でのデータ設定について示す。

<地形データ> SWATでは地形データに、リモートセンシングなどによって抽出された数値標高モデル(DEM; Digital Elevation Model)を用いる。DEMは様々な機関から異なる解像度でデータが公開されているが、本解析では水平解像度が30mのASTER-Global Digital Elevation(GDEM)と水平解像度が90mのShuttle Radar Topography Mission DEM(SRTM DEM)³⁾を使用した。GDEMは地球観測衛星センサASTERが撮影した衛星画像の解析から得られたDEMで日本の経済産業省(METI)と米国航空宇宙局(NASA)によって共同で公開されており、SRTMはスペースシャトルレーダーによって作成されたDEMでNASAから公開されている。一般にDEMの解像度が細かいほど、SWATの解析精度も良くなるが⁴⁾、GDEMを解析した結果、その標高データの一部にPanay島内の対象流域で不良な値が見られたため、Panay島での解析にはSRTM DEMを使用し、GDEMはNegros島での解析にのみ使用した。

<土地利用データ> 計算期間1(1994-1997)と期間2(2000-2003)では、土地利用に経年変化が生じていると考えられるため、それぞれの期間について土地利用の分布を求めた。土地利用の抽出には衛星画像解析による教師付き分類法(Supervised Classification)を用いた。教師付き分類は、画像からグラウンドトゥルースによって既知のカテゴリ(土地分類)を領域から抽出し対応付けを行ったのち、画像データの土地被覆分類を行う手法である。衛星画像データには、Landsat TM(1993)およびLandsat ETM+(2003)を使用した。雲などが原因で土地利用分類に欠損が生じた部分については、複数の画像を解析したのち分類結果を重ね合わせた。またグラウンドトゥルース

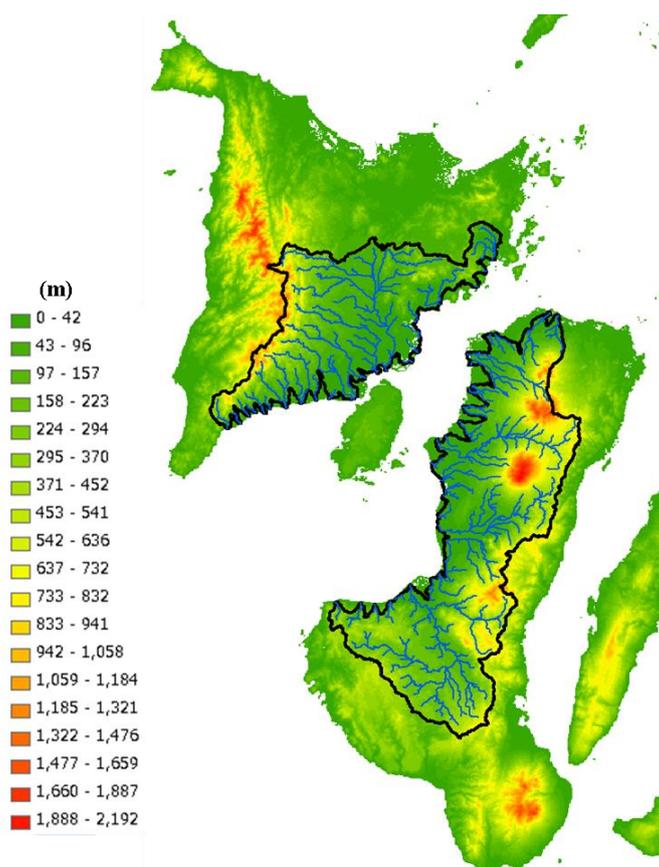


図1 SWATをベースとした陸源負荷モデル解析の対象流域(Guimaras海峡周辺)とDEM(SRTM DEM)

には、フィリピンのBureau of Soils & Water Managementが作成したLand Use Map(1990)を使用した。2003年の画像解析には参考となるグラウンドトゥルースがなかったため、土地分類数が1993年の解析に比べ少なくなっている。なお一連の衛星画像解析にはITT Visual Information Solutions社のENVIソフトウェア(Version 4.3)を使用した。

<土壌分布データ> 土壌分布はフィリピンのBureau of SoilsがPanay島およびNegros島の複数の行政区ごとに調査したSoil Mapを基にデジタルデータを作成した。使用したSoil MapはIloilo Provice(1966)、Aklan and Capiz Province(1948)、Antique Province(1948)、Negros Occidental Province(1978、1992)である。

<気象データ> 期間2(2000年1月-2003年11月)の解析に関しては、後述するWRFによるDomain3の気象解析結果をSWATの気象入力データ用に補完処理をして使用した。一方、期間1(1994年7月-1997年2月)に関しては、WRFの入力条件であるGlobal Forecast Systemの計算結果が公開されていないため、SWATの気象データには降雨量、気温、風速についてはNational Climatic Data Centerが公開しているGlobal Surface Summary of Day、相対湿度と平均日射量についてはNASAが公開しているSurface Meteorology and Solar Energyからデータを取得した。

3) 地域気象モデルとのカプリング

陸源負荷評価の主要入力パラメータである気象データについては、SEA-WP諸国ではデータが乏しいことから、地域気象モデルを陸域負荷モデルにカプリングさせることを試みた。具体的には、

風系場や降雨量、日射量など気象の計算に、メソスケール気候予測数値モデルである The Weather Research & Forecasting Model (WRF)⁵⁾をベースとしてモデリングを行った。WRFは、気象予測および研究利用目的のために開発されており、数mから数千kmの幅広い領域の計算に適した最先端の大気シミュレーションモデルである。WRFはソースコードが公開されているため、ユーザーの目的に応じたモデルの改良が可能である。また並列計算用にコードが組まれているため、近年発展が目覚ましいグリッドスーパーコンピュータの性能を効率的に発揮させる高速計算が可能である。本研究では、東京工業大学が所有している世界最速クラスのグリッドスーパーコンピュータシステムであTsubame 2.0を用いて高速計算を実現させている。

ここでは、計算対象領域として、フィリピンのGuimaras海峡を挟むPanay島とNegros島周辺域、ならびに同じくフィリピンのLingayen湾を中心としたLuzon島域、沖縄八重山諸島を中心とした領域の3領域を設定した。各対象領域での計算では3段階の多重nesting計算として、Domain1、Domain2、Domain3の順でより水平解像度が細くなるように3つの領域を設定し、2-Way Nesting手法を用いて計算の時間短縮と高解像度化を行った。例えば、Guimaras海峡を挟むPanay島とNegros島周辺域を対象とした計算では、Domain1は東南アジアと太平洋の一部を含む最も広域な領域とし、Domain2はちょうどフィリピン全土を囲う程度の大きさの範囲、そしてDomain3では対象海域であるGuimaras海峡とそれを挟むPanay島とNegros島を含めた領域を水平解像度9kmとなるように設定を行った。計算に用いた陸生条件には、University Corporation for Atmospheric Research (UCAR)が公開しているMODISの解析データを使用した。気象条件には、National Center for Atmospheric Research が公開しているFNL Operational Global Analysis dataを用いた。FNLデータはNOAAによって運用されている全球モデルであるGlobal Forecast Systemの解析データをもとにしており、水平解像度が1度で6時間ごとの3次元データである。パラメータには、大気圧、ジオポテンシャル高度、気温、氷冠、相対気温、水平鉛直風速、渦度などが含まれている。Domain1の気象条件にはFNLデータが直接与えられ、Domain2、3の気象条件にはそれぞれの親Domainの計算結果をnestingすることで計算を行った。海面水温(Sea Surface Temperature: SST)はNCEPが公開しているReal Time Global Sea Surface Temperature(RTG_SST)を24時間ごとに利用した。

(2) 幼生分散シミュレーションに基づくmatrix connectivity解析

SEA-WP海域を対象とした上記の多重スケール高精度nestingモデル群に基づいて、幼生分散シミュレーションを行った。幼生分散追跡の計算方法としては、通常用いられるLagrange particle tracking法をベースとして用いたが、本研究では、さらに、低次生態系モデルに組み込まれている動物プランクトン濃度の計算モジュールを利用して、幼生濃度の移流分散過程をEuler的に計算する手法を新たに考案し、それに基づく解析も試みた。幼生分散解析対象海域は、インドネシア海域中央部、フィリピン・Lingayen湾海域、同・Verde Island海峡海域、そして沖縄・八重山諸島周辺海域とした。沖縄・八重山諸島周辺海域、ならびに生物分布境界線として良く知られたWallace line周辺に位置するインドネシア海域中央部に関しては、matrix connectivity解析を実施した。具体的には、両海域においてサンゴ等の主要な生息域として、それぞれ108サイトおよび24サイトを設定し(図2および3)、各サイトからの幼生分散シミュレーション結果からsource-sink関係の強さを示す幼生到達確率を算出することによって、connectivity matrixを算出した。そして、同matrixの対角項を除く列および行の総和を計算することにより、source側から見た「他沿岸

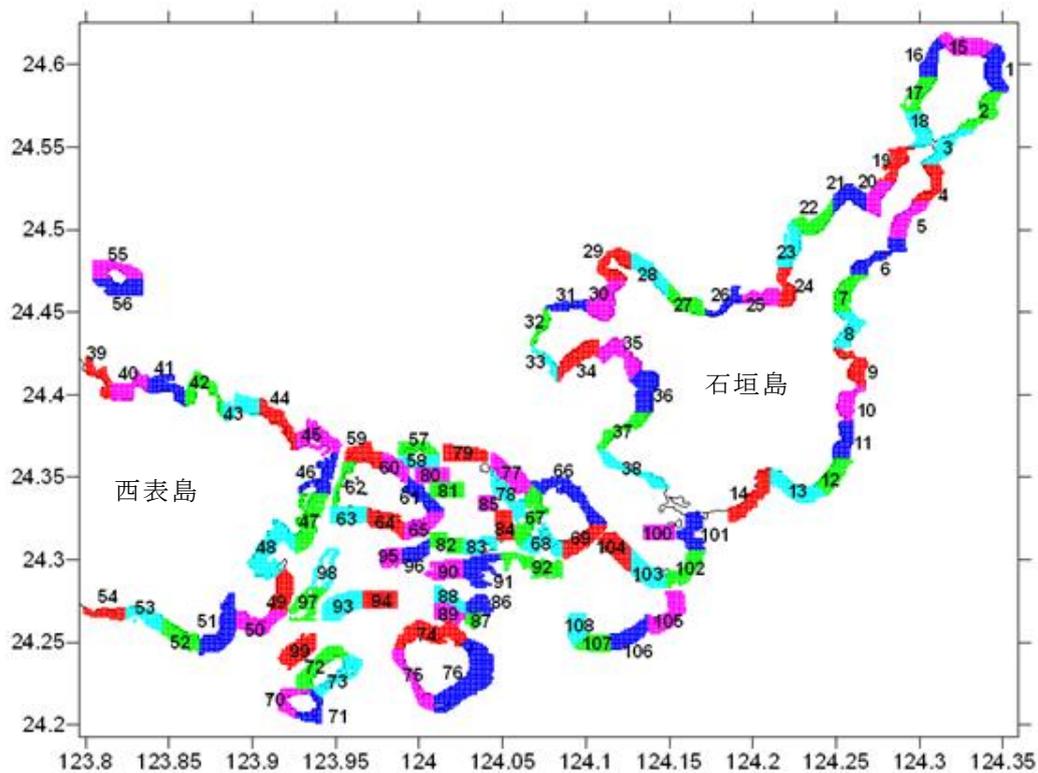


図2 八重山諸島周辺海域を対象としたMatrix connectivity解析のためのsegment設定図

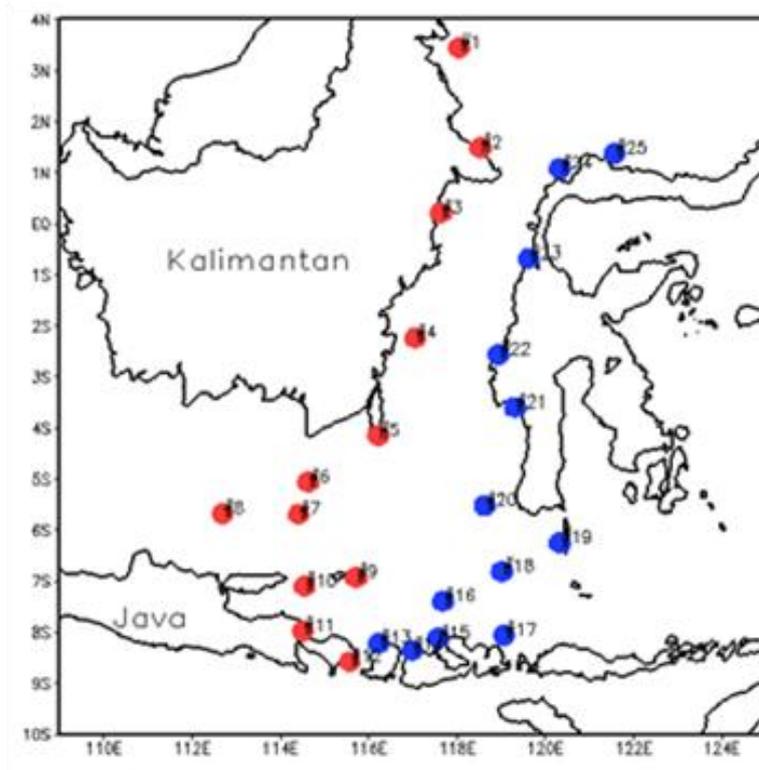


図3 インドネシア中央部海域を対象としたmatrix connectivity解析のためのMPA候補サイト設定図

海域への広範な幼生供給能力」、およびsink側から見た「広範な他沿岸海域からの幼生加入ポテンシャル」を評価し、それらの指標に基づいてMPA候補サイト同定の可能性を検討した。

(3) モデル開発・検証に必要となる現地データの収集

本プロジェクトで開発する海水流動・低次生態系モデルや幼生分散モデル、陸源負荷モデル等の現地検証データを蓄積するべく、インドネシア、フィリピン、沖縄・八重山沿岸海域で現地観測を実施した。インドネシアでは、海水流動モデル検証を主目的としたイリジウム漂流ブイの現地漂流観測を2010年2月にMakassar海峡南端からフローレス海に至る海域において行った。八重山沿岸海域でも、同様のイリジウム漂流ブイを用いた予備的な調査を2009年3月に実施している。フィリピンにおいては、主として、Lingayen湾とGuimaras海峡の2海域を対象とした総合的な調査を実施している。具体的には、それぞれの海域において、流速、水位、波高などの物理パラメータ、および、水温、塩分、濁度、クロロフィル-a濃度、光量子量、溶存酸素等の水質パラメータに関する多地点での定点連続計測を行うとともに、船舶での吊り下げ型多項目水質計測定やADCPによる流速鉛直分布観測、栄養塩等の分析を目的とした採水調査を、海域内の複数地点で実施した。さらに周辺流域の主要河川での採水調査を行った。図4に、例として、Lingayen湾とその湾口近く位置するBolinao海域を対象とした、調査測線・地点の配置を示す。八重山沿岸海域においては、主として、石垣島東海岸を対象としたサンゴ礁内の物理流動、水温分布、微細土砂（赤土）輸送、栄養塩・有機物等の物質循環等の調査を行い、サンゴ礁スケールの流動・低次生態系モデルの検証データを得た。また、同海域に流入する隣接流域からの赤土等の陸源環境負荷物質等の連続モニタリングを実施した。

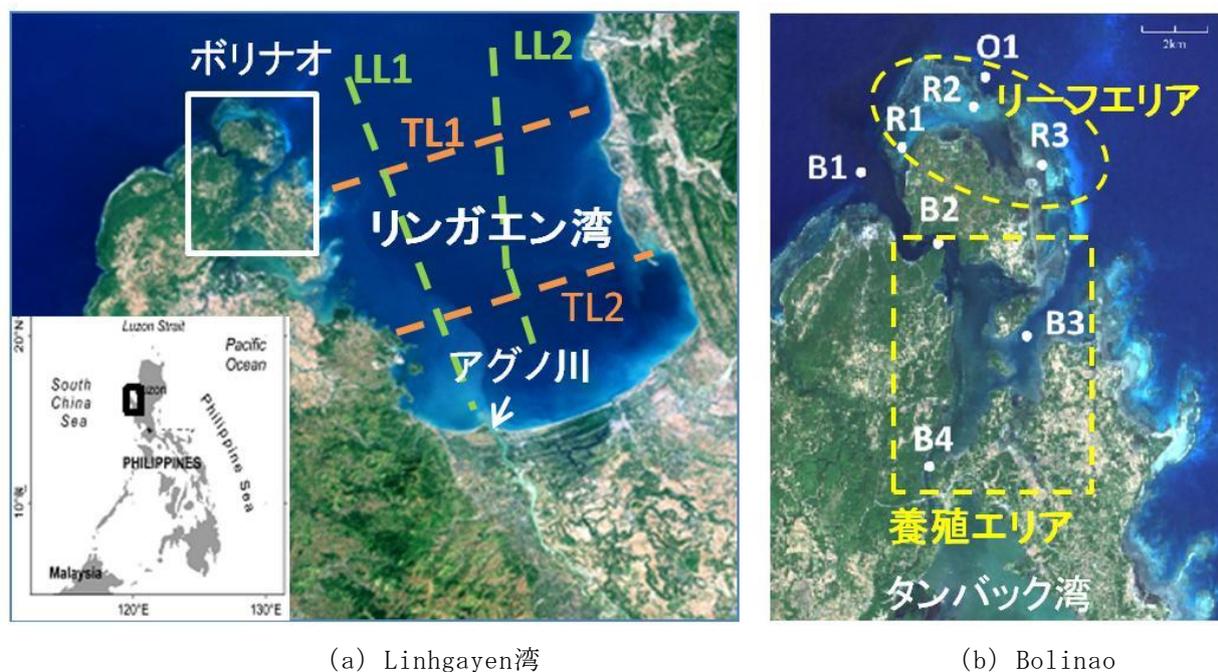


図4 Lingayen湾およびその湾口西側端に位置するBolinao海域での観測ライン（左図、破線）と観測点配置（右図）

(4) 遺伝子解析用サンプリング調査

集団遺伝学的解析に基づく東南アジア・西太平洋海域 (SEA-WP 海域) の reef connectivity の解明に向け、ターゲット種のサンプリングを各地で行った。サンプリングは、国内 5 地点 (宮古島、石垣島、奄美大島、沖縄本島、久米島)、フィリピン 8 地点 (Puerto Galera, Anilao, Maricaban, Caban, Lian, Lubang, Bolinao, Pacific side)、インドネシア 8 地点 (Pulau Pari, Palu, Bontang, Spermonde, Dearawan, Manado, Komodo, Bali)、フレンチポリネシア 2 地点 (Tahiti, Moorea)、台湾 6 地点 (全て台湾南端海域)、パラオ、タイ (Puhket) で行った。ターゲット種は、造礁サンゴ 1 種 (*Heliopora coerulea*)、ヒトデ 5 種 (*Linckia laevigata*, *Linckia multifora*, *Acanthaster planci*, *Protoreaster nodosus*, *Culcita novaeguineae*)、ナマコ 9 種類 (*Holothuria witmae*, *Bohadshia argus*, *Stichopus chloronotus*, *Stichopus herrmanni*, *Actinopyga echinites*, *Thelelenota ananas*, *Holothuria leucospilota*, *Actinopyga mauritiana*, *Holothuria edulis*) である。サンプリングに際しては、ヒトデは主に管足をピンセットで引き抜いて採集し、ナマコは白色の真皮を含む 1cm 角の組織を解剖ばさみで切断して採集し、アオサンゴは主に 1cm ほどの骨格を折って採集した。生物組織は 100%エタノールに保管した。生物へのダメージは極力最小限になるようにし、採集後の生物は生きているまま採集した海域に戻した。アオサンゴサンプリングに際しては、1~1.5 cm のサンゴ片を 100%エタノールに保存した。DNA 抽出は Qiagen 社の DNeasy 96 Blood & Tissue Kit を用いて行った。

上記のサンプリングに当たっては、7. の表2に示す各国の共同研究者から様々な形での協力を得たが、特に、フィリピンとインドネシアに関しては、遺伝子解析用サンゴ礁無脊椎動物サンプリングを可能とするべく、フィリピン大学海洋研究所ならびにインドネシア国立科学院海洋研究センターをそれぞれカウンターパートとする MOA (Memorandum of Agreement) もしくは MOU (Memorandum of Understanding) を締結するとともに、様々な許可申請手続きを実施した。また、パラオ、タイ、台湾においてもそれぞれの現地研究者らと共同研究を行い、対象種のサンプリングを実現させた。このうちインドネシアに関しては、MOA を締結するまでに現地カウンターパートであるインドネシア国立科学院海洋研究センターとの共同研究締結および許可のみでは不十分であり、政府機関の各省・各種公的機関・警察本部・サンプリングを行う海域のローカルなそれぞれの自治体の許可、さらには、サンプリング地点が海洋公園等であった場合には立ち入り許可とサンプリング許可の両方が必要になるなど、サンプリングを実際に行うまでに合計 13 ステップもの各種許可の取得を必要とした。そのため、カウンターパートであるインドネシア国立科学院海洋研究センターとの具体的な共同研究計画を立ち上げるのに半年、さらに MOA の締結までに 1 年半の年月が必要となり、さらにその後、インドネシアジャカルタに 1 か月滞在をして、各省庁や警察などを周り、現地での滞在許可・研究許可の申請の最終手続きを行うことが求められ、けっきょく、必要なサンプルが現実に取得可能になるまでに 2 年半の年月を要した。その意味で、本研究で得られた遺伝子解析用のサンプルはきわめて貴重な試料と言える。

4. 結果・考察

(1) モデル開発・応用と検証：

サブテーマ 2 と共同で行った海水流動モデルと低次海洋生態系モデルの高度化の内容の詳細に

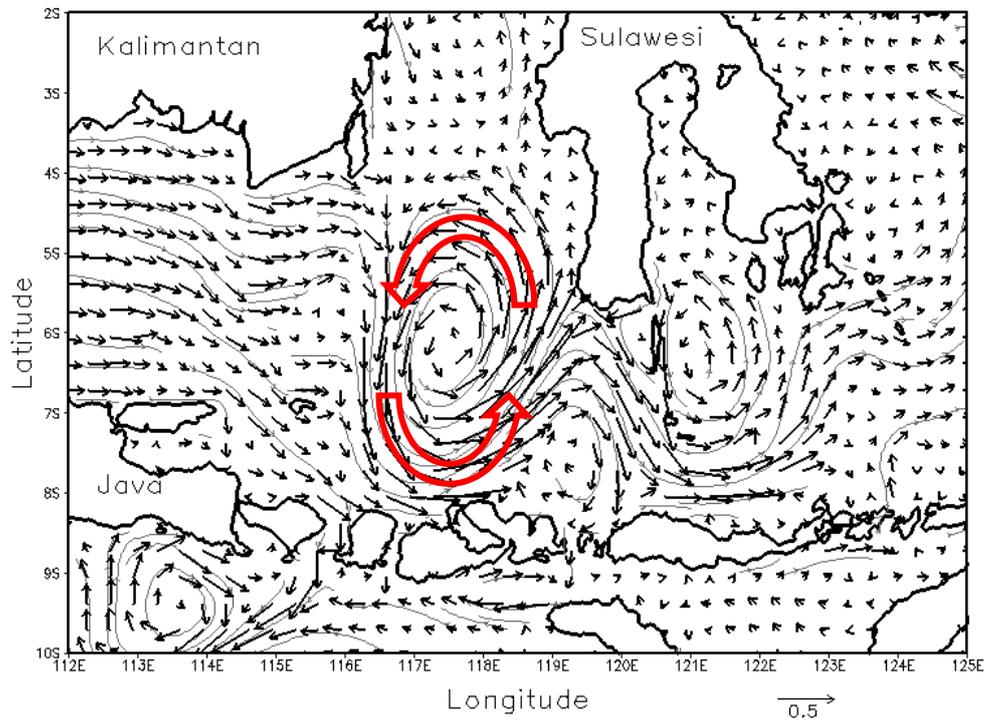


図5 ロンボク渦の存在を示す高精度海水流動シミュレーション結果

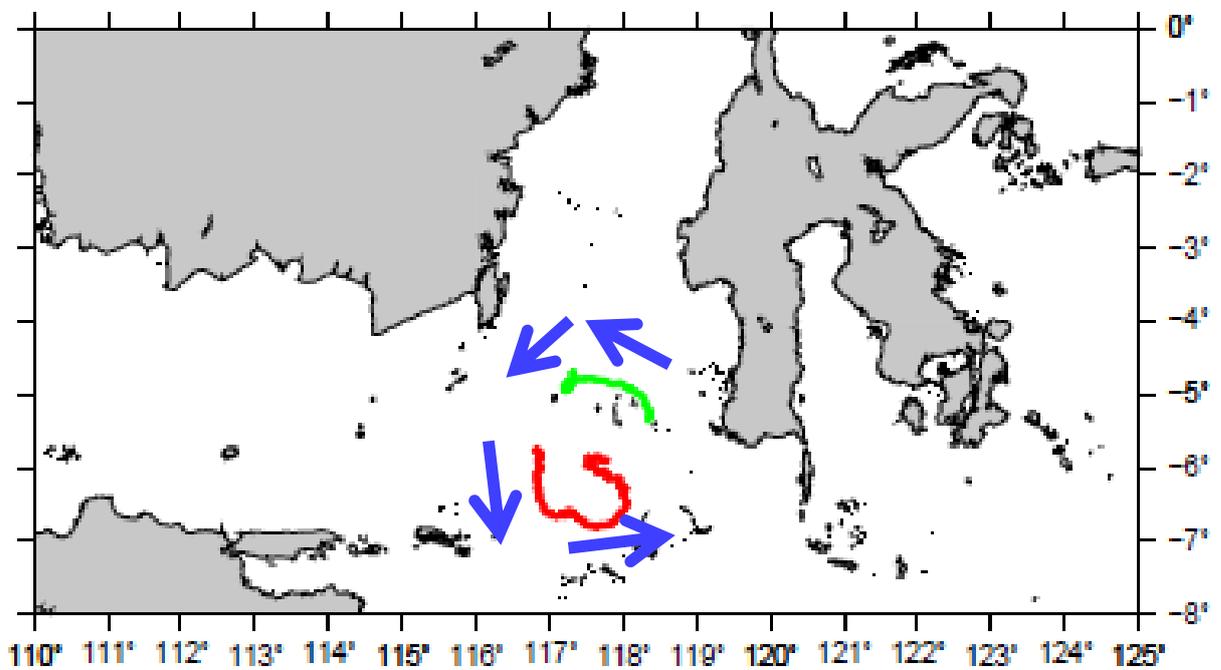


図6 2010年2月に投入した2個のイリジウム漂流ブイの軌跡。数値シミュレーション結果に対応した循環パターンが現れている。

についてはここでは省略するが、高精度海水流動シミュレーション解析によって新たに見いだされたロンボク渦（図5）に関して、2010年2月にインドネシアのMakassar海峡南端からFlores海に至る海域において実施したイリジウム漂流ブイの現地漂流実験の結果（図6）によって、ロンボク渦の存在を実証することが出来た。この渦構造の存在は、この海域での幼生分散特性を左右するものであると同時に、当該海域での海洋物理構造に重要な役割を演じているとされているITF（Indonesian Through Flow）の力学過程の解明においても重要な発見であると言える。また、サブテーマ1で独自に開発した海峡・湾スケールモデル等を用いて行った解析結果から、雨季と乾季で湾内の残差流パターンが逆転し、それによって湾内のreef connectivityの特性が大きく変化することや、陸源負荷が大きくなる雨季において湾内に残されているサンゴ礁海域への負荷がより多く作用する構造になっていることなどが明らかになった。なお、先に述べたように、海峡・湾スケールモデルとともに、サンゴ礁スケールを対象としたモデル群についてもサブテーマ1で独自に開発しているが、サンゴ礁内熱負荷計算モデル、同微細土砂（赤土）負荷計算モデル、炭酸系を含む物質循環・低次生態系シミュレーションモデルによる解析結果については紙面の制約から、各モデルとも、現地調査によって得られたデータとの良好な一致が得られていることを述べるにとどめる。

（2）地域気象モデルおよび陸源負荷モデルによるカプリング解析結果

WRFをベースとした地域気象モデルによる解析結果の例として、フィリピン・Guimaras海峡周辺の領域を対象として行った結果を図7に示す。また、この結果に基づいて、陸源負荷モデルへの入力となる気象入力条件の時系列データを算出した結果を図8に示す。そして、この時系列データ等に基づいて、陸源負荷モデルによって算出した流域からの河川流出解析結果を図9に示す。これから、簡潔性・非定常性が強い対象両流域における降雨－流出過程を本モデルによって比較的良好に再現できていることがわかる。さらに、図10は、Guimaras海峡に面するPanay島側とNegros島側の各流域（図1）からの一ヶ月の河川流出量の分布を示したもので、流域間の差がかなり大きいことが分かる。一般に、フィリピンのみならず、SEA-WP海域に属する国では気象データや河川流出量データを広範に得ることはかなり困難であることから、本モデルシステムによって、これらの高精度・高時空間分解能データを推定できるようになったことの意義はきわめて大きい。

図11は、このようにして得られた各流域からの河川流出量を組み込んだ形で実施したGuimaras海峡海域での海水流動・水質変動シミュレーションの結果の例である。特に表層塩分の計算結果（下段の図）から、周辺流域からの淡水流入の効果が空間的に高いコントラストを持つ形で現れている様子が見られる。このような事実は、ここで開発した「大気－陸域－海洋カプリングモデル」の有用性を示すものである。

（3）環境負荷評価解析結果－特に環境負荷の多重スケールconnectivityについて

沿岸海域で環境負荷の時空間的分布の評価は、後述する幼生分散シミュレーションによるreef connectivity解析に基づいて同定されたMPA候補海域が持続的に維持できるかどうかを評価する上で重要となる。ここでは、フィリピンのLingayen湾およびその湾口部に位置するBolinao海域を対象として、環境負荷の時空間分布の実態を本研究で開発したモデルと現地調査によって明らかにした例を示す。Bolinao沿岸では北端にあるSantiago島の湾側にサンゴ礁域があるが、その反対

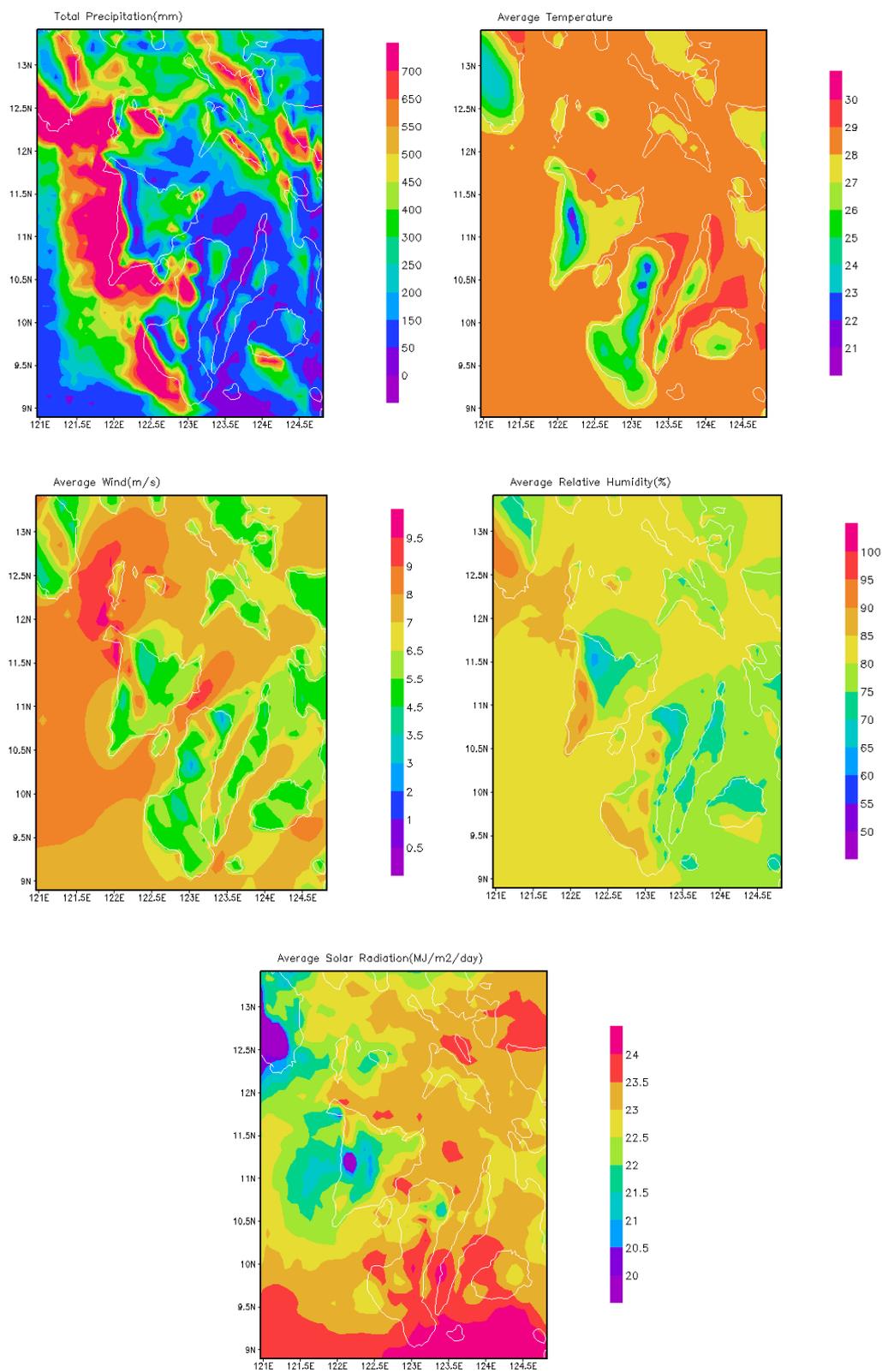


図 7 WRF をベースとした地域気象モデル解析により得られた 2002 年 9 月の降水量、平均気温、平均風速、平均相対湿度、平均日射量(Domain 3)

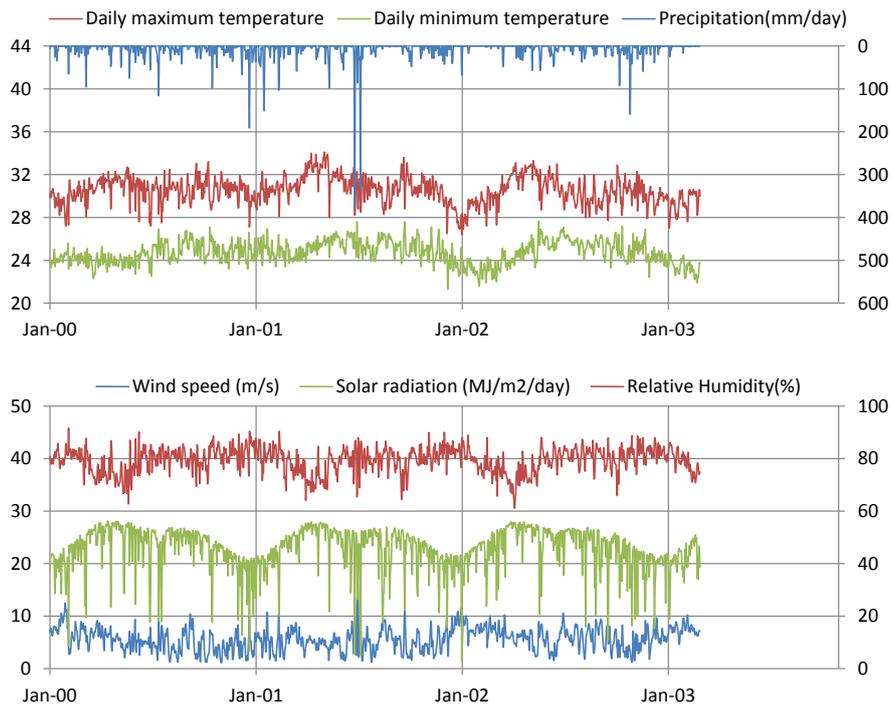


図 8 地域気象モデルによって計算された陸源負荷モデルへの気象入力条件の時系列データ

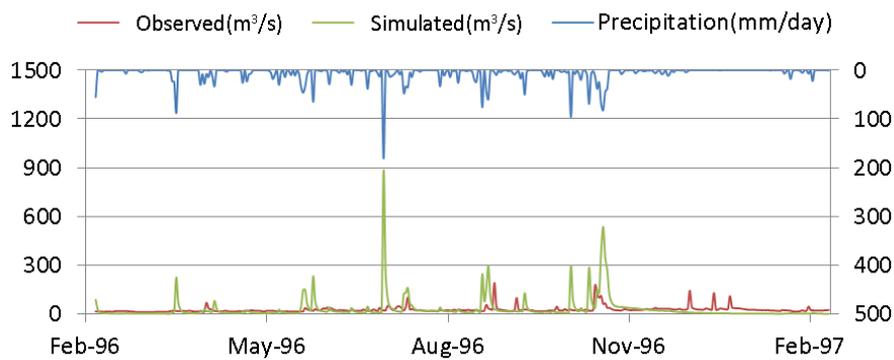


図 9 陸源負荷モデルによる河川流出解析結果 (Negros 島 Bago 川)

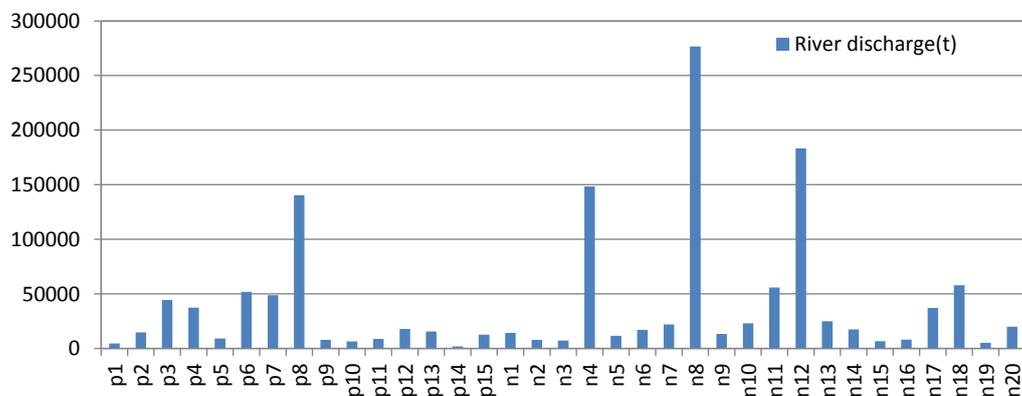


図 10 陸源負荷モデルによって計算された各流域における河川流出量 (1996 年 9 月)

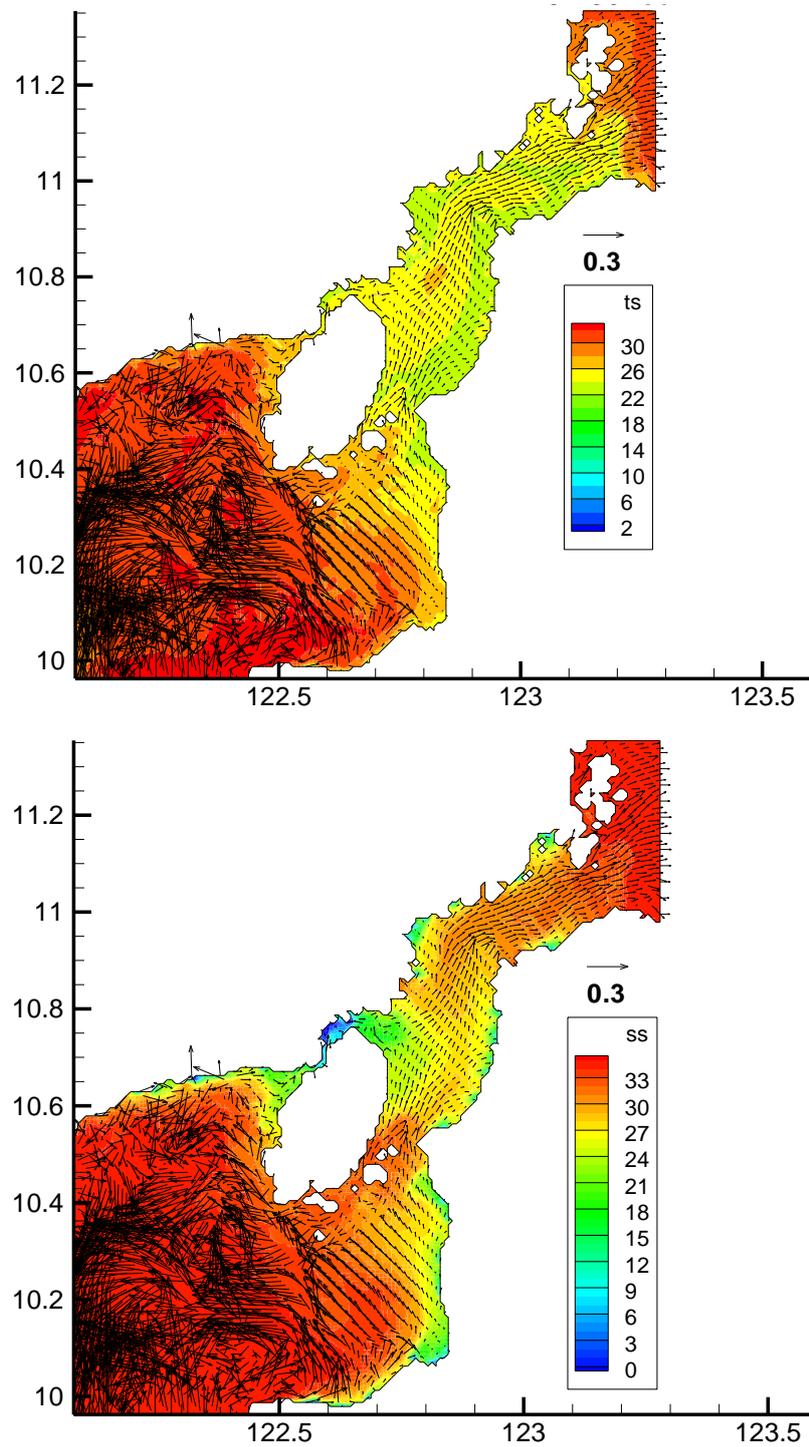


図 11 陸源負荷モデル解析結果からの河川流入を組み込んだ Guimaras 海峡海域を対象とした計算結果（上：表層水温、下：表層塩分）

側の海峡側にはミルクフィッシュなどの養殖が高密度で行われている（図4(b)参照）。そのため、そこでの環境負荷が上記のサンゴ礁域まで及ぶことが懸念されている。図12はこの海域を対象に海水流動シミュレーションを実施した結果に基づいて算出した表層部および底層部での潮汐残差流の分布を示したもので、底層部の空間パターンが収束型になっていることから高密度養殖エリアで形成された貧酸素水塊がなかなか解消されにくい構造があることがわかる。また、表層での潮汐残差流が発散パターンになっており、上記のサンゴ礁域に向かう構造になっていることから、高密度養殖海域での高環境負荷水がサンゴ礁域に波及しやすくなっていることがわかる。図13は、そのことを粒子追跡計算によって確認したもので、高密度養殖海域で放出された粒子が96時間後には周辺のサンゴ礁域に波及していることがわかる。これらの結果は、いわば、環境負荷についても沿岸海域間の連結性（connectivity）を考慮する必要があることを示すものである。一方、図14は、Lingayen湾奥に位置するAgno川河口から流出した陸源負荷物質が72時間後にはBolinao沿岸海域近くまで波及し得ることを示したシミュレーション結果である。このことから、上記の環境負荷のconnectivityは、localなconnectivityに加えてこのような湾スケールでのconnectivityも加わる形で多重性を有していることがわかる。また、図15は、沖縄・八重納屋諸島沿岸域を対象に行った海水流動の結果に基づいて、石垣島東海岸に位置する轟川からの赤土（微細表土粒子）の海域での輸送拡散シミュレーションを実施した結果を示したものである。これから、轟川からの赤土は海域へ流出後わずか1日程度で石西礁湖内へ流出することがわかる。このことから、石西礁湖での赤土ストレスを緩和するには、その上流に位置する石垣島での流域での赤土対策を十分に施すことが重要になることがわかる。

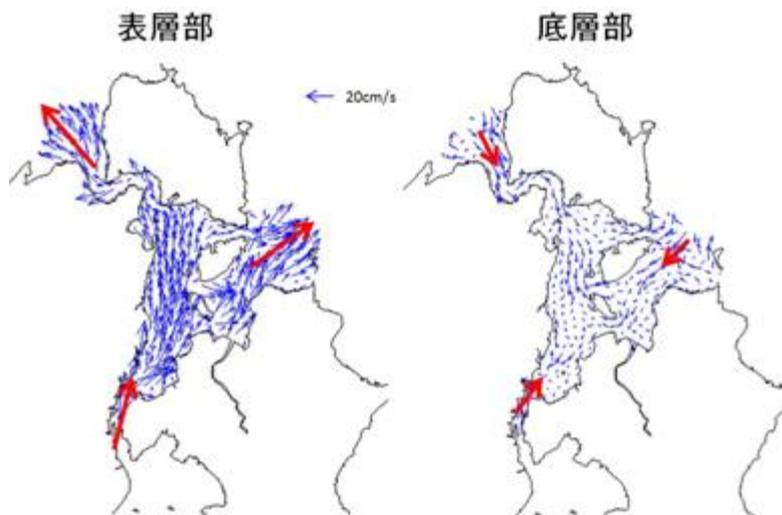


図12 ボリナオの高密度養殖海域周辺でのシミュレーションによる潮汐残差流

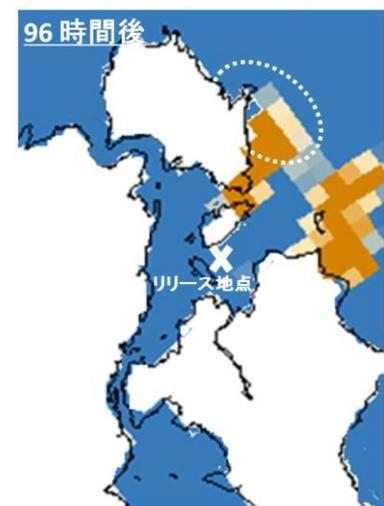


図13 高密度養殖海域からの粒子放出96時間後の様子。周辺のサンゴ礁・藻場海域高栄養塩水が波及している

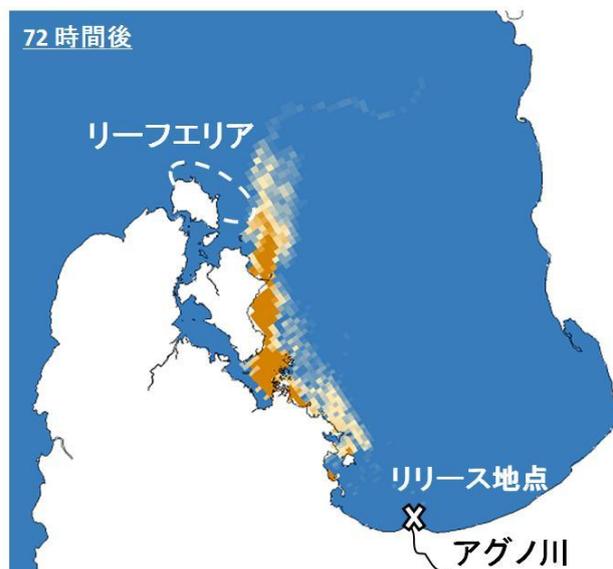


図14 Lingayen湾奥のAgno川から放出した粒子の72時間後の様子。Agno川からの陸源負荷物質がBolinaoのリーフ海域近くまで及んでいることを示している。

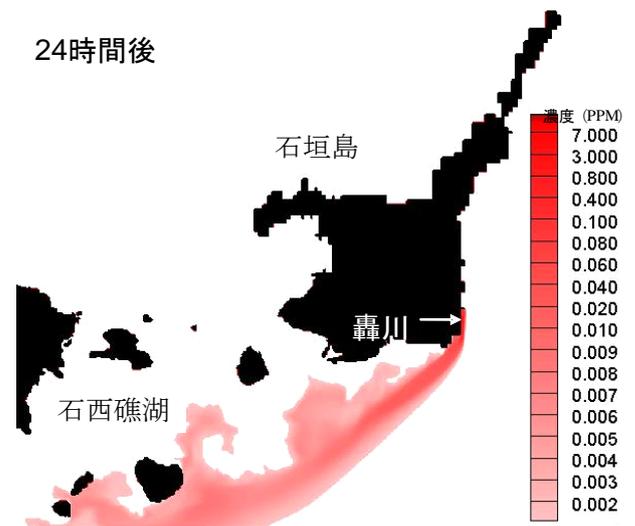


図15 赤土輸送に関するシミュレーション結果の例。石垣島東海岸の轟川から流出した赤土が石西礁湖に向けて広域的に輸送・拡散する様子が示されている。

(4) 幼生分散シミュレーションモデル解析

開発した幼生分散シミュレーションモデルを適用することによって、各解析対象海域での特徴的な幼生分散パターンの存在と海流構造特性との関連性について明らかにした。特に、インドネシア中央部海域に関しては、上記の「ロンボク渦群」によって、同海域での幼生分散パターンが大きく支配されることが明らかになった（図16）。また、高解像度海流モデルをベースとした沖縄・八重山諸島周辺海域の幼生分散計算により、石垣島東海岸から石西礁湖に向けての幼生輸送が有意に存在することが示された。このシミュレーション結果は、サブグループ3を中心に実施したアオサンゴに関する集団遺伝学的解析結果と整合的である。さらに、フィリピン・Verde Island海峡領域を対象とした幼生分散解析により、Puerto Galeraの岬地形周辺に潮流変動に伴って周期的に生成される剥離渦が、多量の幼生のキャリアとなり、渦群の海峡内での広域的な移動によって、渦に含まれる幼生が効率的に海峡内及びその周辺海域に輸送されることが明らかにされた。図17に計算例を示すが、同図では、Puerto Galeraの岬地形が存在しない仮想的な地形条件での結果も比較のために示している。これから分かるように、岬地形が存在しない場合には、海峡内での幼生分散の範囲がかなり狭くなる。Verde Island海峡海域は、生物多様性が全般的に高いCoral Triangle海域の中でも特に高い”Center of Center” (Carpenter & Springer, 2005)⁶⁾と呼ばれるが、なかでもPuerto Galeraは豊かな生物相を有する海域として知られている。今回の解析結果は、Puerto Galeraは単に生物相が豊かであるというだけでなく、その特徴的な岬上の地形によっ

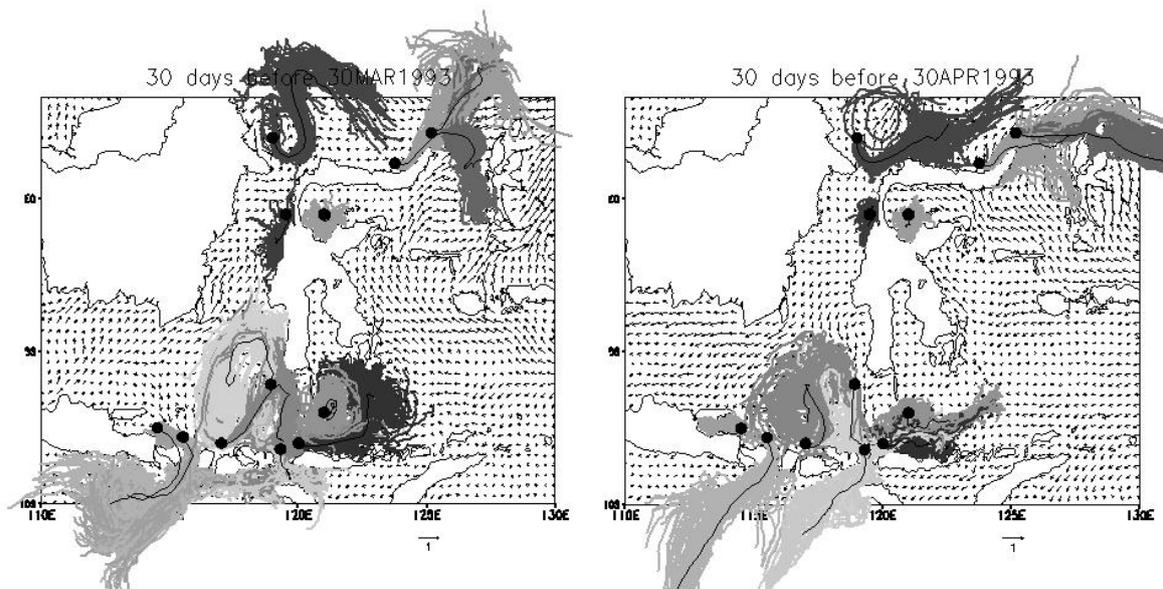
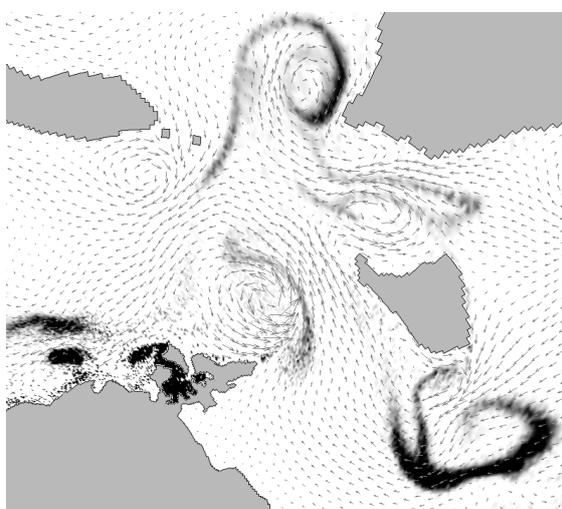
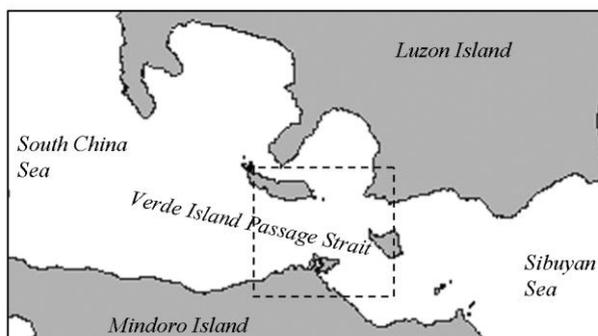
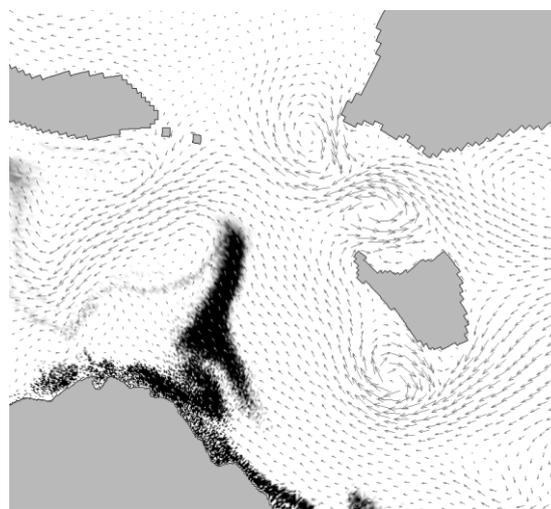


図16 インドネシア海域中央部における幼生分散解析結果の例。「ロンボク渦」によって幼生分散パターンが大きく規定されている様子が明瞭に現れている。

図17 フィリピン・Verde Island海峡内のPuerto Galera周辺海域（右図中の破線）での幼生分散シミュレーション結果（a）。
（b）はPuerto Galeraの岬状地形が存在しないとした仮想的な場合での幼生分散シミュレーション結果。



(a)



(b)

て、潮汐周期に対応して周辺に剥離渦を作り出し、その中に多量の幼生が取り込まれることによって、渦群の動き（移流）によって周辺の広い範囲に効率よく幼生を供給するソースエリアとしての機能が高いことが推察される。

（５）幼生分散シミュレーションに基づくmatrix connectivity解析：

図18は、沖縄・八重山諸島周辺海域を対象に行った幼生分散シミュレーション結果に基づくmatrix connectivityの解析結果を示したものである。図3に示す108のそれぞれのサイトからの幼生分散シミュレーション結果からsource-sink関係の強さを示す幼生到達確率を算出することによってconnectivity matrixを算出している。同図の右側には、同matrixの対角項を除く列および行の総和を計算した結果を上段と下段にそれぞれ示している。これらの値は、source側から見た「他沿岸海域への広範な幼生供給能力」、およびsink側から見た「広範な他沿岸海域からの幼生加入ポテンシャル」を表すものである。その観点から同図の結果を見ると、石西礁湖内はその中でlocalなconnectivityが輻輳する形で存在していることが分かり、その中には特にsourceないしはsink側から見た評価値が高いサイトが存在することがわかる（sink側でのNo. 63サイトなど）。また、石垣島東海岸のサンゴ礁域は、石西礁湖から比較的距離が離れているにもかかわらずある程度のconnectivityの値を示している。これは図19に示す平均的な海流パターンのシミュレーション結果からわかるように、石垣島東海岸海域から石西礁湖南側海域に向けて強い海流があることによるものである（その特徴は、3.（3）で述べたイリジウム漂流ブイによる同海域での漂流実験の結果にも顕著に現れている）。このことから、石西礁湖内のサンゴ礁生態系の保全・再生には、幼生輸送の上流側（供給側）に位置する石垣島東海岸のサンゴ礁域の保全が重要になることを示すもので、現在、さまざまな保全・再生策を模索している石西礁湖自然再生協議会の活動にも重要な示唆を与える結果となっている。

図20は、図3に示すインドネシア海域中央部での幼生分散シミュレーション結果から、同様にmatrix connectivity解析を行った結果を示したものである。この場合の幼生分散シミュレーションは、先に示した、低次生態系モデルに組み込まれている動物プランクトン濃度の計算モジュールを利用して幼生濃度の移流分散過程をEuler的に計算する、という新たな手法に基づいている。Connectivity matrixの上と右の図は、図18と同様にmatrixの対角項を除く列および行の総和を計算した結果を示している。これから、source側、sink側のいずれから見ても、特異的にこれらの総和値が高いサイトが存在することがわかる。このようなconnectivity matrixの特性には、この解析対象時期での海水流動パターンの解析結果（図21）に見られるいくつかの特徴的な渦状の流動パターンの存在が影響している。

以上のように、ここでは、幼生分散シミュレーションに基づく多地点間の幼生到達密度算定結果によるmatrix connectivity解析に基づいて、source側から見た「他沿岸海域への広範な幼生供給能力」、およびsink側から見た「広範な他沿岸海域からの幼生加入ポテンシャル」を指標としてMPA候補サイトを同定するというスキームの有効性を示すことに成功した。

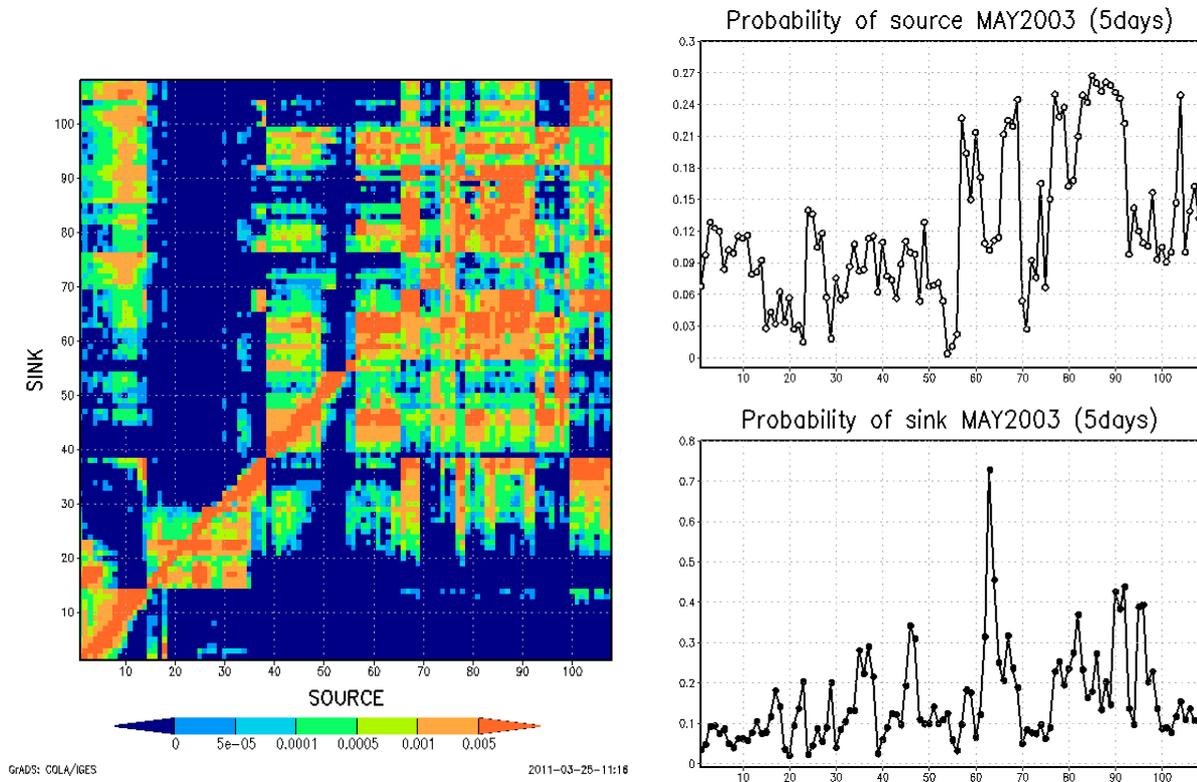


図18 八重山諸島周辺海域を対象とした幼生分散シミュレーションに基づくmatrix connectivity解析結果の例（幼生放出5日後の結果）

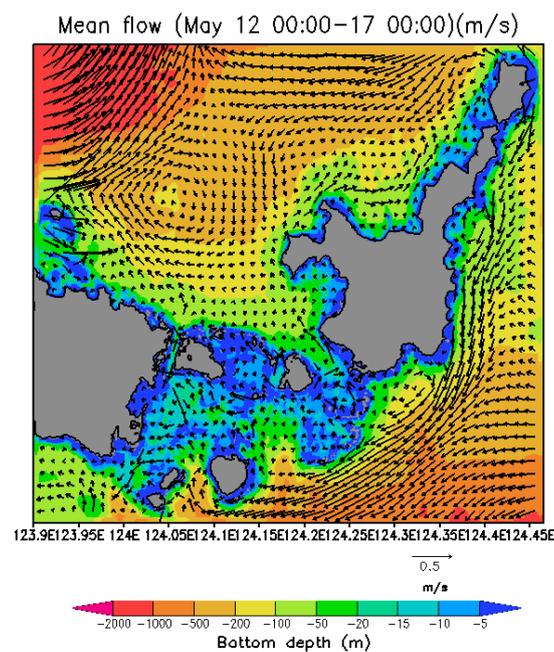


図19 解析対象期間中の平均海水流動パターン

PDF for APR2003 (7DAYS)*1e30

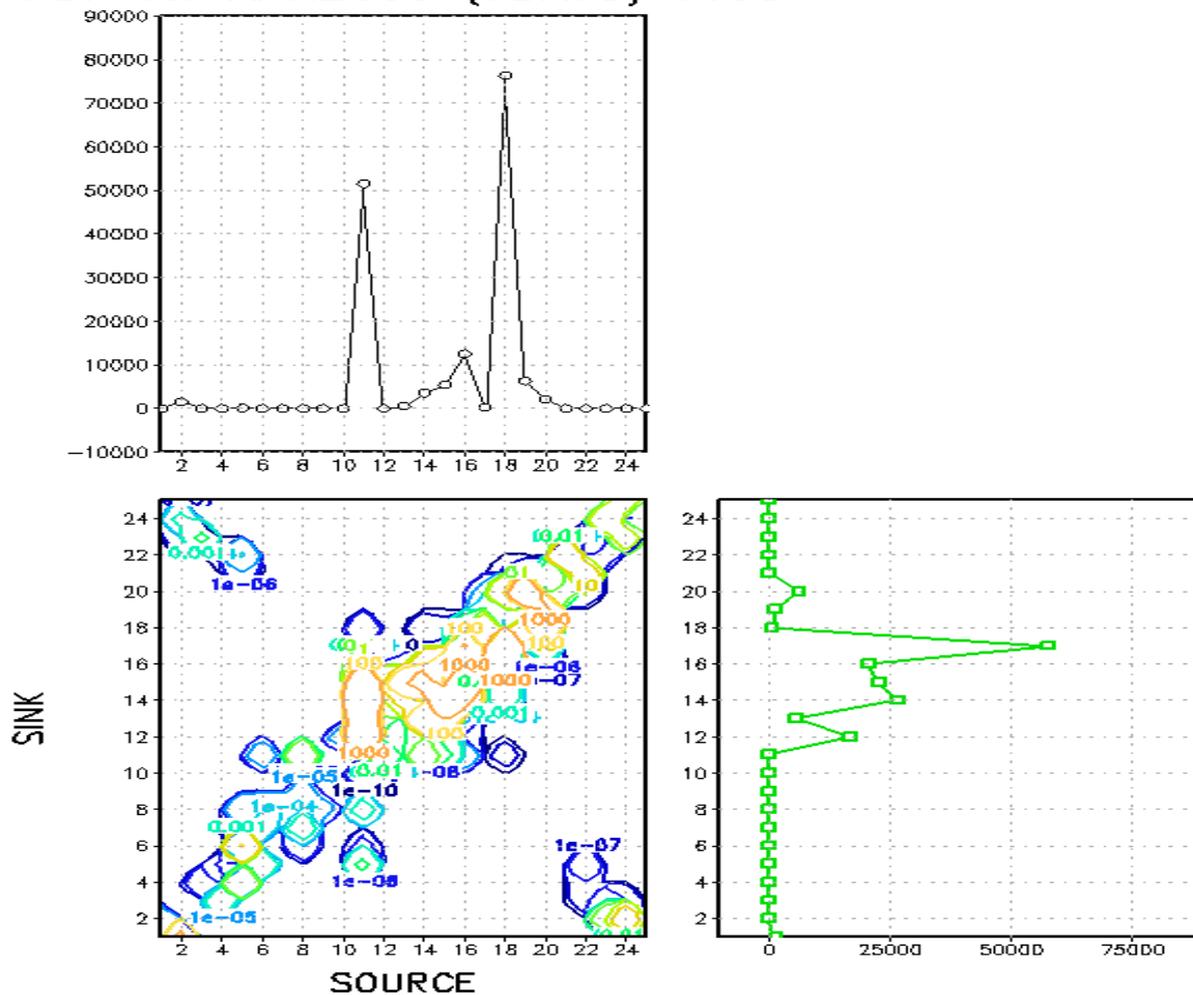
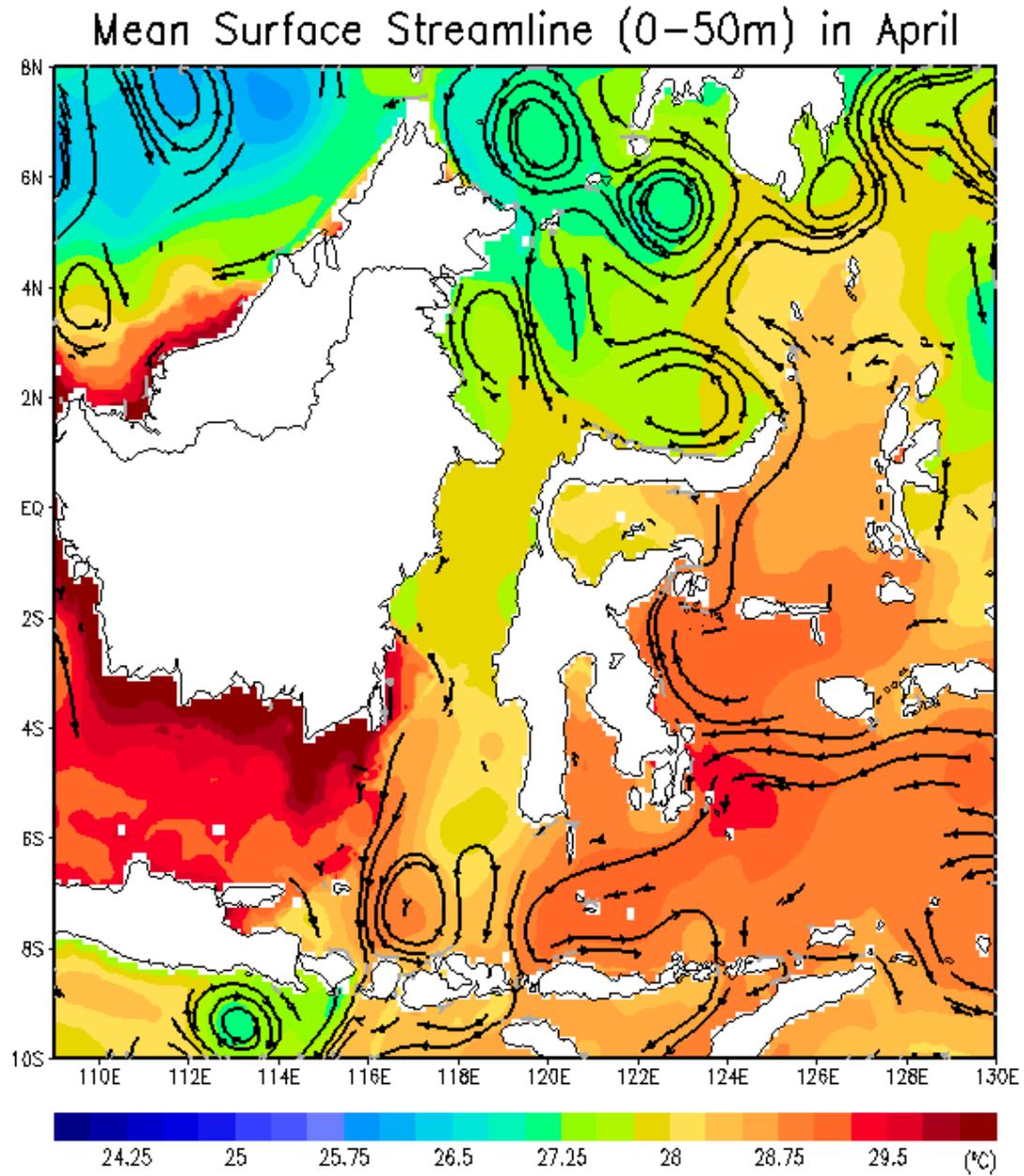


図20 インドネシア中央部海域（図3参照）での幼生分散シミュレーションに基づく matrix connectivity解析結果。左上はsource側から見た他サイトへの幼生到達確率の総和で、右図はsink側から見た他サイトからの幼生加入確率の総和。それぞれ、いくつかの地点でピークが見られる。



GrADS: COLA/IGES

図21 前ページの幼生分散解析期間での海水流動パターン

表1 サンプルング実績－日本・パラオ・インドネシア

		Total Species	日本 奄美	石垣	Okinawa Archipelago 沖縄 久米 宮古			Palau South part	La Réunion West coast	French Polynesia Tahiti Moorea		Divers
Total target		5294	363	145	80	65	178	190	106	137	32	0
ナマコ	Actinopyga echinites	152	23	18	26	4	3		29			
	Actinopyga mauritiana	136	3	1	43	14	7		17	4		
	Bohadschia argus	254	10	56	3		50	29		11	10	
	Bohadschia atra	0								21	22	
	Holothuria edulis	190	50			4	5	50				
	Holothuria leucospilota	502	84	2	8	4	50		30	50		
	Holothuria whitmaei	32	11				3	26		1		
	Stichopus chloronotus	658	176	56		37	60	17	30			
	Stichopus herrmanni	28	4	7				51				
Thelenota ananas	18	2	5		2		17		50			
ヒトデ	Linckia laevigata	1172	50	50	50	27	50	50				
	Acanthaster planci	500	50	50	50	50	50	22		90	90	60
	Linckia multifora	0						4				
	Culcita sp	94	5					15				
	Protoreaster sp.	300	15					30				
サンゴ	Heliopora coerulea	1258	20	230	100	50	90	23				

		Total Species	Puerto Galera	Anilao	Maricaban	Caban	Philippines Lian Bolinao Iloilo			Legazpi	Taiwan Kenting Park
Total target		5294	33	7	3	0	32	11	5	1	62
ナマコ	Actinopyga echinites	152							2		
	Actinopyga mauritiana	136									
	Bohadschia argus	254	2	3	3						
	Bohadschia atra	0									
	Holothuria edulis	190	28	4			4				
	Holothuria leucospilota	502					28	11	3	1	60
	Holothuria whitmaei	32									2
	Stichopus chloronotus	658									
	Stichopus herrmanni	28	3								
Thelenota ananas	18										
ヒトデ	Linckia laevigata	1172	50	50	50	50	50	40	37	30	2
	Acanthaster planci	500									
	Linckia multifora	0									
	Culcita sp	94	5	3			9	12	8	5	
	Protoreaster sp.	300	50					40	5	40	
サンゴ	Heliopora coerulea	1258	10	10	19	20	10				70

表1続き サンプルング実績ーパラオ・インドネシア・タイ

		Indonesia								Thai	
		Species	Pulau Pari	Manado	Derawan	Bontang	Palu	Spermonde	Bali	Labuan Bajo	Puhket
Total target			9	79	25	59	19	7	0	0	
ナマコ	Actinopyga echinites	16		15			1				
	Actinopyga mauritiana	7				4	1	2			
	Bohadschia argus	14		1		6	3	4			
	Bohadschia atra	0									
	Holothuria edulis	35	5	13		8	8	1			
	Holothuria leucospilota	73	2	50	14	7					
	Holothuria whitmaei	33				33					
	Stichopus chloronotus	1				1					
	Stichopus herrmanni	17	2		10		5				
Thelenota ananas	2			1		1					
ヒトデ	Linckia laevigata	359	50	41	38	50	50	50	30	50	
	Acanthaster planci	103	7		40	16	25	15			
	Linckia multifora	3	3								
	Culcita sp	260	50		45	33	50	50		30	2
	Protoreaster sp.	268		30	50	40	50	50	18	30	
サンゴ	Heliopora coerulea	23									23
			日本	台湾	フィリピン	インドネシア	タイ	パラオ	レユニオン		
		Species	5地点	6地点	8地点	8地点	1地点	1地点	1地点		
Total target		4302	1818	134	695	1190	25	334	106		
ナマコ	Actinopyga echinites	47	74		2	16				29	
	Actinopyga mauritiana	24	68		0	7				17	
	Bohadschia argus	51	119		8	14		29			
	Bohadschia atra	0	0		0	0					
	Holothuria edulis	121	59		36	35		50			
	Holothuria leucospilota	207	148	60	43	74				30	
	Holothuria whitmaei	61	14	2	0	33		26			
	Stichopus chloronotus	48	329		0	1		17		30	
	Stichopus herrmanni	71	11		3	17		51			
Thelenota ananas	19	9		0	2		17				
ヒトデ	Linckia laevigata	995	227	2	357	359		50			
	Acanthaster planci	375	250		0	103		22			
	Linckia multifora	7	0		0	3		4			
	Culcita sp	322	5		42	258	2	15			
	Protoreaster sp.	448	15		135	268		30			
サンゴ	Heliopora coerulea	675	490	70	69	0	23	23			

(6) 生物サンプリング結果の一覧とナマコ個体数分布の現状

採集した遺伝子解析用サンプルは、国内5地点（宮古島、石垣島、奄美大島、沖縄本島、久米島）、フィリピン8地点（Puerto Galera, Anilao, Maricaban, Caban, Lian, Lubang, Bolinao, Pacific side）、インドネシア8地点（Pulau Pari, Palu, Bontang, Spermonde, Dearawan, Manado, Komodo, Bali）、フレンチポリネシア2地点（Tahiti, Moorea）、台湾6地点（全て台湾南端海域）、パラオ、タイ（Puhket）から造礁サンゴ1種（*Heliopora coerulea*）合計約650サンプル、ヒトデ5種（*Linckia laevigata*, *Linckia multifora*, *Acanthaster planci*, *Protoreaster nodosus*, *Culcita novaeguineae*）合計約2100サンプル、ナマコ9種類（*Holothuria witmae*, *Bohadshia argus*, *Stichopus chloronotus*, *Stichopus herrmanni*, *Actinopyga echinites*, *Thelenota ananas*, *Holothuria leucospilota*, *Actinopyga mauritiana*, *Holothuria edulis*）合計1600サンプルである。詳細なサンプリング地点と各種のサンプル数を表1に示す。

このサンプリング調査の過程で、フィリピン、インドネシアにおいて、過剰漁業によりナマコが壊滅的に減少していることを明らかにしたほか、ニセクロナマコ、シカクナマコの幼体の自然界における生息域に関する情報を得ることができた。クリイロナマコ、マンジュウヒトデの産卵期にも遭遇し、生物学的・生態学的・また経済的に重要な情報を付加的に得ることができた。クリイロナマコは奄美大島のキセにおいて、小潮で流れが弱い時期での浅場（水深2m程度）の砂地で、3個体が同時に体を垂直に起こして産卵を行っていた。熱帯ナマコ種の産卵報告としては日本で初めての報告となった。一方同じく奄美大島において、7月にマンジュウヒトデの産卵が目撃されたが、これは比較的流れの弱い場所で10～20程度の個体が集まり、夕方から夜にかけて放精放卵を行っていた。同一地点で、2回産卵が目撃されたことから、同一の集団が、夏の産卵期に複数回にわたって産卵している可能性が示唆された。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本研究プロジェクトで対象とするSEA-WP海域は、太平洋とインド洋を繋ぐ海域であるとともに、超多島複雑海域としての特徴を持つ。同海域は沿岸生態系の多様性が世界で最も高い海域として知られ⁶⁾、しかも沿岸資源に依存する人口がきわめて多いことから、大変重要な役割を有している。しかし、同海域についての海洋物理・化学・生物過程に関する研究は、太平洋やインド洋などの外洋域に関する研究に比べて遅れていると言わざるを得ない。

SEA-WPの中心に位置するフィリピン、インドネシア、パプアニューギニア等を含む海域は、最近“Coral Triangle”と呼ばれ、WWFやTNC等が同海域の生物多様性の保全に向けた様々な活動を行っている。学術面では、各地の生物的なinventory調査に基づく従来の生物地理学的なアプローチによる生物多様性マッピングがほとんどで、最近ではかなり大規模な国際共同研究も企画されるようになってきている。一方、遺伝子解析に基づく集団遺伝学的解析ないしは分子系統学的解析も散見されるようになってきているが（例えばBarberら, 2002）⁷⁾、まだ端緒についた段階である。同海域に関する海洋学的研究に関しては、南シナ海などいくつかの個別海域に関する研究が盛んになりつつあるが、広域沿岸生態系ネットワーク（reef connectivity）解明に必要な同海域全体についての海洋物理・生物過程を本格的に取り扱った例はまだ見られない。

本研究プロジェクトは、これまで大きく立ち遅れていたCoral Triangle海域を中心としたSEA-WP領域における広域沿岸生態系ネットワーク解明のための海洋物理・化学・生物過程に関する知見を、数値シミュレーション、現地調査、集団遺伝学的解析からなる包括的なアプローチによって得ようとするものであって、従来にないチャレンジングなものである。

すでに、プロジェクト初年度にあたるH20年度において、＜太平洋－SEA-WP海域－インド洋＞広域海洋循環モデルをベースとした多重nesting高解像度海水流動モデルや、それに基づく幼生分散モデル、陸域から負荷された赤土等の環境負荷物質の沿岸輸送・拡散モデル、等のモデル開発に成功している。そして、その応用結果として、インドネシア中部海域でロンボク渦群やフィリピン・Verde Island海峡における特徴的な剥離渦群、さらには沖縄・八重山沿岸域での局所的に強い海流構造を発見することに成功し、これらの海水流動構造の特徴がそれぞれの海域での幼生分散過程を決定的に特徴づけていることを明らかにしている。

H21年度は、幼生分散シミュレーションに基づく多地点間の幼生到達密度算定結果によるmatrix connectivity解析に基づいて、source側から見た「他沿岸海域への広範な幼生供給能力」、およびsink側から見た「広範な他沿岸海域からの幼生加入ポテンシャル」を指標としてMPA候補サイトを同定するというスキームの有効性を示すことに成功した。これは、本研究の主要な最終的アウトプットの一つの基本形を提示するものである。また、環境負荷評価の根幹をなす陸源負荷評価モデルの開発とそれによる解析を行うことに成功するとともに、その際に必要になる降雨量等の気象条件の設定に、地域気象モデルに基づく解析結果をリンクさせるスキームの開発も実現できた。これらは、今後、気象データが乏しいSEA-WP海域内の様々なエリアでの陸源負荷評価や、今後の地球環境変動下での陸源負荷の将来的な変動傾向の解析において、強力な解析ツールになるものと期待される。

最終年度のH22年度では、解析対象海域を、SEA-WP海域におけるregionalもしくはsub-regionalスケール、島スケール、海峡・内湾スケール、サンゴ礁スケールといった多段階的なスケールの海域に広げて、それぞれに対応したモデル群の開発と高度化を行うとともに、陸源負荷モデルや地域気象モデルの開発をさらに進めた。そして、これらのモデル群によって幼生分散シミュレーションや環境負荷評価等の解析を実施した。特に、幼生分散シミュレーションにおいては、従来よく使われるLagrange particle tracking法だけでなく、低次生態系モデルに組み込まれている動物プランクトン濃度の計算モジュールを利用して幼生濃度の移流分散過程をEuler的に計算する、という形の手法を新たに考案し、それに基づく解析も試みている。

このような本研究課題における成果は、その重要性にもかかわらず従来研究が立ち遅れていたSEA-WP領域における物理・化学・生物過程に関して、その高精度解析を可能とする多段スケールモデル群、「海域－陸域－大気」カプリングモデル群、そして幼生分散シミュレーションモデル群といった、それぞれ従来にないモデル体系の開発を実現したもので、これらのモデル群は、生態系ネットワーク解析や環境負荷解析といった本研究課題のテーマに留まらず、今後様々な用途への応用可能性の道を拓くものである。

(2) 環境政策への貢献

MPAならびにそのネットワークに関連する国際的な取り組みの動向として、2002年にヨハネスブルグで開催された持続可能な開発に関する世界首脳会議（WSSD）や、2004年に開催された生物多

様性条約第7回締約国会議（CBD COP-7）では、2012年までに、科学的な情報に基づいて効果的に管理されたMPAネットワークを構築することが決議されている。2007年に東京で開催された国際サンゴ礁イニシアチブ（ICRI）総会でもMPAネットワークに関する提言が採択されている。2010年に名古屋で開催された生物多様性条約第10回締約国会議（CBD COP-10）では、上記の2012年目標に代わる「愛知ターゲット」が合意され、MPAに関して、2020年までに、各国が沿岸域および海域の少なくとも10%を保全するという目標が決議されている。

わが国では、環境省が、これらの様々な国際的な取り組みに関する目標設定に対応して、東南アジア・オセアニア重要サンゴ礁ネットワーク戦略を策定し、2010年の名古屋でのCBD COP-10で発表した。その発表のための準備会合的な位置づけとして、MPAネットワークをテーマとした第4回および第5回、第6回東アジア地域ワークショップが、それぞれ2008年11月に東京、2009年12月にベトナム、2010年6月にタイで開催されたが、その際、日本側facilitatorの一人として灘岡が参加するとともに、本研究課題による成果を随時発表している。

上記の「愛知ターゲット」の合意を受けて、わが国においても、その実現に向けての施策を関係各省庁が具体化することが求められている。その際に重要なことは、MPAの量的な確保のみならず、質的な面において「機能するMPA」の確保がポイントとなる。環境省においては、MPA候補海域としての重要海域の特定作業等を進めていく計画であるが、その際に、本研究課題で示した、幼生分散に基づく沿岸生態系ネットワークにおけるコア海域としてMPA候補サイトを同定する手法は、そのような要請に直接貢献するものとして注目されている。

以上のように、本研究課題の成果は、この後のわが国を含む東アジアにおけるMPAネットワークの展開・発展に向けての戦略提言に関して、学術面から大きく貢献することが期待されている。

6. 引用文献

- 1) Tamura, H., K. Nadaoka and E. C. Paringit (2007): Hydrodynamic characteristics of a fringing coral reef on the east coast of Ishigaki Island, southwest Japan, *Coral Reefs*, 26, 17-34.
- 2) Neitsch, S. L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry and J.R. Williams (2005): Soil and Water Assessment Tool - Theoretical Documentation, Version 2005. Texas, USA
- 3) Rodriguez, E., C.S. Morris, J.E. Belz, E.C. Chapin, J.M. Martin, W. Daffer and S. Hensley (2005): An assessment of the SRTM topographic products, Technical Report JPL D-31639, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, 143.
- 4) Cao, W., W.B. Bowden, T. Davie and A. Fenemor (2006): Multi-variable and multi-site calibration and validation of SWAT in a large mountainous catchment with high spatial variability, *Hydrological Processes*, 20, 1057- 1073.
- 5) Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang, and J. G. Powers (2005): A description of the Advanced Research WRF Version 2. NCAR Tech Notes-468+STR
- 6) Carpenter, K E. and V.G. Springer (2005): The center of the center of marine shore fish

biodiversity: the Philippine Islands, *Environmental Biology of Fishes*, 72: 467-480.
 7) Barber, P. H., S. R. Palumbi, M. V. Erdmann and M. K. Moosa (2000): A marine Wallace's line?,
Nature, 406:6797, 692-693.

7. 国際共同研究等の状況

SEA-WP海域の中心に位置するCoral Triangleでは、インドネシア、フィリピン、パプアニューギニア、マレーシア、ソロモン諸島、東チモールの6ヶ国からなる政府レベルの国際的イニシアチブ・プログラムとしてCoral triangle Initiative (CTI) が動いており、MPA候補地の合理的選定とネットワーク化のテーマが、同イニシアチブにおいても中心課題の一つとなっている。CTIにおいて中心的な役割を果たしているインドネシア、フィリピンとの国際共同研究実施体制を構築するべく、それぞれ、インドネシア国立科学研究所 (LIPI) 海洋研究センターとフィリピン大学海洋研究所をカウンターパートとするMOUもしくはMOAを締結した。特に集団遺伝解析のCoral Triangleエリアでの展開に関して、インドネシアやフィリピンなどでは、遺伝子解析用の現地サンプリングおよび採集試料の国外持ち出しのためにかなり煩雑な手続きが必要になるが（特にインドネシア、3. (4)参照）、上記のMOU/MOAの締結をベースとして、種々の許可申請を実施した。また、遺伝子解析用サンプリングのみならず、沿岸生態系への環境負荷調査解析や環境負荷のもとでの沿岸生態系の物理・化学・生物的な特性の変化のための国際共同研究に関しても、インドネシア・フィリピンを中心に上記カウンターパートを中心に共同研究を進めることができた。また両国以外でも、台湾においては既に共同調査を実施しており、比較サイトとしてのフレンチポリネシア等での共同サンプリング調査を進めた。さらに、最近では、タイとパラオの研究者との共同研究により、それぞれサンプルを採集した。表2にこれらの海外共同調査研究に関わっている相手国カウンターパート・メンバーの一覧を示す。

表2 本研究プロジェクトの海外共同研究者一覧表

Taiwan

- Dr. Tung-Yung Fan,
- Dr. Allen C. Chen, Associate Research Fellow, Coral Reef Evolutionary Ecology & Genetics Laboratory, Research Centre for Biodiversity, Academia Sinica, Taipei.

Philippines

Marine Science Institute - UPD:

- Dr Miguel Fortes, Professor, Marine Science Institute (MSI), University of Philippines, Dilliman
- Dr Porfirio Aliño, Professor, Marine Science Institute (MSI), University of Philippines, Dilliman
- Dr. Marie-Antonette Juinio-Menez, Professor, Marine Science Institute (MSI), University of Philippines, Dilliman

- Dr. Ariel, C. Blanco, Assistant Professor, Department of Geodetic Engineering, University of Philippines, Dilliman
- Dr. Wilfredo L. Campos, Professor, Taklong Marine Biological Station, University of Philippines, Visayas

Coral Triangle PIRE Project (US members):

- Dr. Paul H. Barber, Associate Professor, University of California, Los Angeles, California, United States.
- Dr. Kent E. Carpenter, Professor, Department of Biological Sciences, Old Dominion University, Norfolk, Virginia, United States.
- Dr. Eric Crandall, Post Doctoral Research Associate, Old Dominion University Research Foundation, Norfolk, Virginia, United States.

Indonesia

- Dr. Suharsono, Professor, Indonesian Institute of Sciences, Director of Center of Oceanography,
- Dr. Budi Sulistiyo, Ministry of Marine Affairs and Fisheries, Agency for Marine and Fisheries Research.
- Dr. Subandono Diposaptono, Ministry of Marine Affairs and Fisheries, Directorate General for Marine, Coast and Small Islands.
- Dr. Munasik, University of Diponegoro, Faculty of Fisheries and Marine Science. Jamaluddin Jompa, Professor, University of Hasanuddin, Department of Marine Science.
- Prof. Dr. Neviaty P Zamani, Department of Marine Science and Technology, Bogor Agricultural University
- Ketut Sarjana Putra, Marine Program Director, Conservation International Indonesia,
- Dr. Handoko and Rizya Ardiwijaya, Senior staff for Marine Program, Wildlife Conservation Society (WCS) - Indonesia.
- Naneng Setiawasih, M. Sc, Director, Yayasan Reef Check Indonesia (RC)/ The Reefcheck.

Thailand

- Dr. Niphon Phongsuwan, Coral reef specialist, Chief of Marine and Coastal Biology and Ecology Unit, Phuket Marine Biological Center

Palau

- Dr. Yimnang Golbuu, Chief Researcher, Palau International Coral Reef Center

France - French Polynesia

- Dr. René Galzin, Professor, Insular Research Center and Environment Observatory (CRIOBE), Moorea Island. (and “Ecosystèmes Aquatiques Tropicaux et Méditerranéens” Laboratory, University of Perpignan, France main land).

- Dr. Serge Planes, Researcher, Insular Research Center and Environment Observatory (CRIOBE), Moorea Island. ((and “Ecosystèmes Aquatiques Tropicaux et Méditerranéens” Laboratory, University of Perpignan, France main land).
- Dr. Mehdi Adjeroud, Researcher, Ecole Pratique de Hautes Etudes (EPHE), University of Perpignan, France main land.
- Dr. Marc Taquet, Director, “Centre Océanographique du Pacifique” (COP), French Research Institute for Exploitation of the Sea (Ifremer), Tahiti.

France (Reunion Island)

- Dr. Chantal Conand, Emerit Professor, University of Reunion Island, Reunion Island.

Germany

- Prof. Dr. Gert Wörheide, Molecular Geo- & Palaeobiology, Department of Earth and Environmental Sciences & GeoBio-CenterLMU, Ludwig-Maximilians-Universitaet Muenchen

United States

- Dr. Eric Crandall, Post Doctoral Research Associate, Old Dominion University Research Foundation

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文 (査読あり) >

- 1) Pokavanich, T., K. Nadaoka and A.C. Blanco (2009): Role of sporadic intrusion of outer sea water in water exchange and related water quality variations in the coastal lagoon of Puerto Galera, Philippines, 5th International Conference on Asian and Pacific Coasts (APAC2009), 2, 232-238
- 2) Blanco, A.C., K. Nadaoka, A. Watanabe, T. Yamamoto, S. Motooka, E.C. Herrera, K. Kinjo and M.C.R. Paringit (2009): A Comprehensive Assessment of Terrestrial Loadings and their Influence on a Fringing Reef in Ishigaki Island, Okinawa, Japan, 5th International Conference on Asian and Pacific Coasts (APAC2009).
- 3) Blanco, A.C., K. Nadaoka, T. Yamamoto and K. Kinjo (2010): Dynamic evolution of nutrient discharge under stormflow and baseflow conditions in a coastal agricultural watershed in Ishigaki Island, Okinawa, Japan, Hydrological Processes, 24 (18), 2601- 2616
- 4) Lu, L.-F., Y. Miyazawa, W. Cui and K. Nadaoka (2010): Numerical study of surface water circulation around Sekisei Lagoon, southwest of Japan, Ocean Dynamics, doi:10.1007/s10236-010-0270-x. 60, 359-375.
- 5) Taquet C., S. Nagai, N. Yasuda and K. Nadaoka (2010): First report of the development of microsatellite markers for a tropical sea cucumber (*Stichopus chloronotus*) , Conservation Genetics Resources, 3, 2, 201-203.
- 6) Sasai, Y., A.R. Kartadikaria, Y. Miyazawa and K. Nadaoka (2011): Marine ecosystem

- simulation in the Indonesian Seas, Interdisciplinary Studies on Environmental Chemistry - Marine Environmental Modeling & Analysis, Eds., K. Omori, X. Guo, N. Yoshie, N. Fujii, I. C. Handoh, A. Isobe and S. Tanabe, 11-17, TERRAPUB.
- 7) Blanco A., A. Watanabe, K. Nadaoka, S. Motooka, E.C. Herrera and T. Yamamoto (2011): Estimation of nearshore groundwater discharge and its potential effects on a fringing coral reef, *Marine Pollution Bulletin*, 62, 770-785 (doi:10.1016/j.marpolbul.2011.01.005)
 - 8) Takino T, A. Watanabe, S. Motooka, K. Nadaoka, N. Yasuda and M. Taira (2011): Discovery of a large population of *Heliopora coerulea* at Akaishi Reef, Ishigaki Island, southwest Japan, *GALAXEA, Journal of Coral Reef Studies*, 12 (2), 85-86.
 - 9) Yasuda N., C. Taquet, S. Nagai, Suharsono and K. Nadaoka (2011): Reef-connectivity of *Acanthaster* sp. in Coral Triangle region, *DNA Polymorphism*, 19: 134-138.
 - 10) Yasuda N, M. Abe, T. Takino, M. Kimura, C.L. Lian, S. Nagai, Y. Nakano and K. Nadaoka (2011): Did the large population of the reef-building coral *Heliopora coerulea* in Oocura Bay, Japan originate from a single larva, *Marine Genomics* (in press).
 - 11) Ohta K., N. Yasuda, S. Nagai, K. Oki, C. Taquet and K. Nadaoka (2011): Observation of *Culcita novaeguineae* spawning events, *Galaxea* (in press).
 - 12) Kartadikaria, A.R., Y. Miyazawa, S. Varlamov and K. Nadaoka (2011): Ocean Circulation for the Indonesian Seas Driven by Tides and Atmospheric Forcings: Comparison to Observational Data, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2011JC007196 (in press).
 - 13) Kartadikaria A.R., K. Nadaoka and Y. Miyazawa (2011): A numerical study on larval dispersal around the Southeast Asia and West Pacific (SEA-WP) regions using an Indo-Pacific ocean circulation model, *Proc. of International Session in Conference on Coastal Engineering, JSCE*, 2 (in press).

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) Nadaoka, K. (2009): Reef Connectivity-A key factor governing resilience of coastal ecosystems. 5th International Conference on Asian and Pacific Coasts (APAC2009), October 2009, Nanyang Tech. University, Singapore, 1, 35-44. (Keynote招待講演論文)
- 2) Blanco, A.C., K. Nadaoka, T. Yamamoto, A. Watanabe, M.C.R. Paringit and E.C. Herrera (2009): A Comprehensive Study on Terrestrial Threats and Related Impacts on a Fringing Reef, Paper on the 3rd JSPS-DOST International Symposium on Environmental Engineering (Harmonizing Infrastructure Development with the Environment 2009), Quezon City, Philippines (in CD).
- 3) Pokavanich, T., K. Nadaoka, A.C. Blanco and E.C. Herrera (2009): Integrated coastal water investigation at Puerto Galera: Toward the development of decision support system of water resource, *Proceeding of the (JSPS-DOST) 3rd International Symposium on Environmental Engineering*. March 2009, Manila, Philippines.
- 4) Taquet C., F. Setiawan, N. Yasuda, Suharsono and K. Nadaoka (2011): Observation of a wild juvenile of *Holothuria scabra*, *SPC Beche-de-mer Information Bulletin*, 31: 58

- 5) Taquet C., F. Setiawan, N. Yasuda, Suharsono and K. Nadaoka (2011): First observation of a large group of sea cucumber juveniles of *Holothuria leucospilota*: the nursery of Manado (North Sulawesi, Indonesia), SPC eche-de-mer Information Bulletin, 31: 30-34.

(2) 口頭発表 (学会)

- 1) Kartadikaria, A. R., K. Nadaoka Y. Miyazawa and N. Yasuda (2008): A numerical study on larval dispersal in the Southeast Asia and West Pacific (SEA-WP) regions using a new Indo-Pacific Ocean Circulation Model, 11th International Coral Reef Symposium, 2008, Florida.
- 2) Kartadikaria A. R., C. Taquet, K. Nadaoka, Y. Sasai, Y. Miyazawa, S. Nagai and N. Yasuda (2008): Introduction of a new project "Conservation strategies based on regional reef connectivity and environmental load assessment in the SEA-WP region", the 4th ICRI East Asia Regional Workshop.
- 3) Taquet C., A.R. Kartadikaria, K. Nadaoka, Y. Sasai, Y. Miyazawa, S. Nagai and N. Yasuda (2008): Introduction of a new project: "Conservation strategies based on regional reef connectivity and environmental load assessment in the SEA-WP region", 4th ICRI East Asia Regional Workshop.
- 4) Aditya. R. KARTADIKARIA, 宮澤泰正, 灘岡和夫 (2008): Development of a new Indo-Pacific Ocean circulation model and its application to reveal larval dispersal patterns in SEA-WP regions, 日本サンゴ礁学会第 11 回大会.
- 5) Takino T., N. Yasuda, K. Nadaoka, M. Kimura, C. Taquet, A. Watanabe, S. Motooka, M. Abe, C.L. Lian, M. Taira (2008) : 石垣島東海岸と本島大浦湾におけるアオサンゴ群集の地形的・遺伝的特性の把握, 日本サンゴ礁学会第 11 回大会.
- 6) Taquet C., K. Nadaoka, Y. Sasai, Y. Miyazawa, S. Nagai, N. Yasuda, A.R. Kartadikaria (2008) : Introduction of a new project "Conservation strategy based on regional reef connectivity and environmental load assessment in SEA-WP region", 日本サンゴ礁学会第 11 回大会.
- 7) Taquet C., K. Nadaoka, Y. Sasai, Y. Miyazawa, S. Nagai, N. Yasuda and A.R. Kartadikaria (2009): Introduction to the SEA-WP project: Biodiversity conservation strategies based on regional reef connectivity and environmental load assessment in the South-East Asia - Western Pacific (SEA-WP) region, 11th Pacific Science Inter-Congress.
- 8) Taquet, C., K., Nadaoka, Y., Sasai, Y., Miyazawa, S., Nagai, N., Yasuda and A.R., Kartadikaria. (2009): Genetic and ecological approaches of regional reef connectivity in the South-East Asia and West Pacific region: the SEA-WP project, Proc. of Australian Marine Science Association Conference 2009, GS2: Population connectivity in the ocean, July 5th - 9th, Adelaide, Australia.
- 9) Kartadikaria, A.R., Y. Miyazawa and K. Nadaoka (2009): Development of High Resolution Nutrient-Ocean Circulation to Asses Larval Survivorship inside Wallace Line regions, AMSA 2009, Adelaide.

- 10) Yasuda, N., S. Nagai, K. Okaji, K. Gerard and K. Nadaoka (2009): Evidence of strong gene flow of the crown of thorns starfish, *Acanthaster planci* (L.) from the Philippines to Japan via Kuroshio Current, Southeast Asia Gateway Evolution, 14-17 September 2009, London, U.K. (poster).
- 11) Yasuda, N., K. Nadaoka, Y. Miyazawa, Y. Sasai, S. Nagai, C. Taquet, A. Kartadikaria, C. Vogler and G. Woeheide (2009): Introducing a regional project on reef connectivity in the South-East Asia and Western Pacific region: The SEA-WP Project, Southeast Asia Gateway Evolution, 14-17 September 2009, London, U.K. (poster)
- 12) Nadaoka K., C. Taquet, A.R. Kartadikaria, Y. Sasai, Y. Miyazawa, S. Nagai and N. Yasuda (2009): Introducing a regional project on reef connectivity in the South-East Asia and Western Pacific region: the SEA-WP Connectivity Project, the 5th ICRI East Asia Regional Workshop.
- 13) 笹井義一, A. R. Kartadikaria, 宮澤泰正, 灘岡和夫 (2009): 海洋生態系モデル, 2009年度日本海洋学会秋季大会シンポジウム「陸域と海洋の相互作用-海から陸・陸から海へ-」, 9月25日, 2009, 京都.
- 14) Kartadikaria, A.R., K., Nadaoka, C., Taquet, N., Yasuda, Y., Miyazawa, Y., Sasai and S. Nagai (2009): Introducing a Regional Project on Reef Connectivity in the South-East Asia and Western Pacific Region: The SEA-WP Connectivity Project, Coral Reef Management Symposium on Coral Triangle, 12th October, Jakarta.
- 15) Lu, L.-F., Y. Miyazawa, K. Nadaoka, S. M. Varlamov and A. R. Kartadikaria (2009): Responses of surface current and temperature to the local wind and tidal forcing within Sekisei Lagoon, Japan and their application to the regional coral reef connectivity, PICES 19th Annual Meeting, 30 October, 2009, Jeju, Korea.
- 16) Kartadikaria, A.R, Y. Miyazawa, K. Nadaoka and Y. Sasai (2009): Preliminary results to determine MPAs sites by using high resolution nutrient-ocean circulation coupled model around 'Wallace line' regions, 12th Japan Coral Reef Society Annual Conference, 27-29 November 2009, Okinawa, Japan.
- 17) 安田仁奈, Coralie Taquet, 長井敏, Gert Wörheide, Catherine Vogler, 灘岡和夫 (2010) : SEA-WP海域におけるサンゴ礁海洋無脊椎動物の系統解析および集団遺伝構造, 東京大学海洋研究所共同利用研究集会 沿岸海洋生物の広域動態研究の最前線, 1月5-6日, 2010.
- 18) 灘岡和夫, Aditya R Kartadikaria, 宮澤泰正, 笹井義一, Li-Feng Lu (2010) : 幼生分散シミュレーションによるSEA-WP領域におけるreef connectivity解析, 東京大学海洋研究所共同利用研究集会 沿岸海洋生物の広域動態研究の最前線, 1月5-6日, 2010.
- 19) Lu, L.-F., Y. Miyazawa, H. Tamura and K. Nadaoka (2010): Kuroshio-tide-wave interaction around the Yaeyama Islands, Ocean Sciences Meeting, 27 February, 2010, Portland, USA.
- 20) Lu, L.-F., Y. Miyazawa, H. Tamura, S.M. Varlamov and K. Nadaoka (2010): An application of POM to wavecurrent interaction study around the Yaeyama Islands, Japan, 2nd International Workshop on Modeling the Ocean, May 24, 2010, Norfolk, USA.
- 21) Lu, L.-F., Y. Miyazawa, H. Tamura, S.M. Varlamov and K. Nadaoka (2010): Numerical

- modeling of wave-current interaction around Yaeyama Islands, The Oceanographic Society of Japan fall meeting in 2010, September 9, 2010., Abashiri, Japan.
- 22) Sasai, Y., A.R. Kartadikaria, Y. Miyazawa and K. Nadaoka (2010) : Marine ecosystem simulation in the Indonesian Seas, International Symposium on Modeling and Analysis of Marine Environmental Problems, September 22-23, 2010, Ehime University, Matsuyama, Japan [Invited].
- 23) Sasai, Y., A.R. Kartadikaria, Y. Miyazawa and K. Nadaoka (2010): The influence of river discharge on marine ecosystem in the South East Asia and West Pacific (SEA-WP) region、日本地球惑星科学連合2010年大会、2010/5/23-28、幕張。
- 24) Kartadikaria, A.R., K., Nadaoka, Y., Miyazawa, Y., Sasai and, A. Watanabe (2010): The Role of Eddy inside “Wallace line” regions using High Resolution Nutrient-Ocean Circulation Coupled Model, 2nd Asia Pacific Coral Reef Symposium, Phuket, Thailand.
- 25) Yasuda, N., S. Nagai, C. Taquet and K. Nadaoka (2010): Strong structuring in reef-building octocoral *Heliopora coerulea* along Southeast Asia and West Pacific region revealed by microsatellite analysis, 2nd Asia Pacific Coral Reef Symposium.
- 26) Yasuda N., S. Nagai, C. Taquet, K. Nadaoka, C. Vogler and G. Worheide (2010): Species boundary of *Linckia laevigata* and *L. multifora* across Indo-Pacific, 2nd Asia Pacific Coral Reef Symposium.
- 27) Taquet C., S. Nagai, N. Yasuda, T.-Y. Fan, M.D. Fortes and K. Nadaoka (2010): Study of phylogeny and population genetic structure of holothurian species in SEA-WP region using mitochondrial markers (SEA-WP Connectivity Project), the 2nd Asia Pacific Coral Reef Symposium.
- 28) Nadaoka K., Y. Miyazawa, Y. Sasai, S. Nagai, C. Taquet, N. Yasuda and A.R. Kartadikaria (2010): Introducing a regional project on reef connectivity in the South-East Asia and Western Pacific region: the SEA-WP Project, ICRI East Asia Regional Workshop.
- 29) 灘岡和夫, 安田仁奈 (2010) : サンゴ礁海産生物のリーフ・コネクティビティ, プランクトン・ベントス合同大会公開シンポジウム「プランクトンとして見るベントスの研究」, 招待講演
- 30) 安田仁奈, Coralie Taquet, 長井敏, 灘岡和夫, John Benzie, Catherine Vogler, Gert Worhide (2010) :サンゴ礁ヒトデ類の種分化と幼生分散, 日本ベントス・プランクトン学会合同大会

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

本プロジェクトはSEA-WP海域を対象としたものであることから、日本国内ではなく、もっぱらSEA-WP内の国々において講演会やセミナー等を開催している。

- 1) インドネシア海事水産省でのセミナー “Critical status of coral reef ecosystems in Japan and some research activities for their conservation and restoration” (2008年11月8日、出席者20名)

- 2) シンガポール国立大学でのセミナー” Introduction of a Project on Reef Connectivity in the South-East Asia and Western Pacific (SEA-WP) Regions” (2009年10月12日、参加者30名)
- 3) インドネシア・バンドン工科大学での講演会”Critical status of coral reef ecosystems in SEA-WP regions and some research activities for their conservation and adaptation management” (2011年4月27日、出席者50名)

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

- 1) 本研究課題プロジェクト紹介と成果公表のためのウェブサイト (英文) の開設と運用
<http://www.wv.mei.titech.ac.jp/seawp/index.htm>