

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 1日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2009～2011年度

課題番号：21254002

研究課題名（和文）多重・高負荷環境下にある Coral Triangle 沿岸生態系の評価と保全戦略

研究課題名（英文）Assessment and conservation strategy for coastal ecosystem of coral triangle areas under multiple and high environmental loads

研究代表者

灘岡 和夫（NADAOKA KAZUO）

東京工業大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：70164481

研究成果の概要（和文）：

高い生物多様性を有しているにもかかわらず、様々な環境負荷による衰退が深刻になっている Coral Triangle 海域の沿岸生態系を対象として、「大気-陸域-沿岸域-海洋」物理流動・水循環統合モデル開発や陸源負荷評価モデル、および炭酸系を含む低次生態系沿岸海洋モデルの開発を行った。また、reef connectivity 解明のための集団遺伝学的解析や幼生分散シミュレーションを実施した。これらにより、同海域の沿岸生態系保全・回復に学術面から寄与するスキームを示した。

研究成果の概要（英文）：

For reef ecosystems in coral triangle areas, which have high bio-diversity but have been heavily deteriorated due to various environmental loads, we have developed 'atmosphere-land-coastal-ocean' coupling model for physical and water cycle processes, land-based environmental load model and primary ecosystem ocean model including carbonate system dynamics model. We have also made population genetics analyses and larval dispersal simulations for clarifying reef connectivity. With all these models and analyses, we could provide a scientific scheme for contributing coastal ecosystem conservation and restoration in the coral triangle areas.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	14,600,000	4,380,000	18,980,000
2010年度	13,400,000	4,020,000	17,420,000
2011年度	7,600,000	2,280,000	9,880,000
総計	35,600,000	10,680,000	46,280,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：工学・水工学

キーワード：coral triangle, 沿岸生態系, 多重環境負荷, 保全戦略, CO₂ 吸収・放出, reef connectivity, 陸源負荷評価モデル, 低次生態系モデル

1. 研究開始当初の背景

フィリピンやインドネシア、パプアニューギニア等を中心とした東南アジアから西太平洋中部に至る熱帯・亜熱帯域に位置する海域は、最近 Coral Triangle 海域と呼ばれ、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注目されている。一方、

これらの地域では、高い人口圧力を背景として、マングローブ林や藻場の伐採・埋め立て、水産資源の乱獲やダイナマイト漁等の違法漁業、観光開発、隣接する陸域での森林伐採などによる表層土壌流出や農地等からの栄養塩の過剰流入といった様々な人為的環境負荷のため、沿岸生態系の劣化の進行がかなり深刻で

ある。さらに、近年深刻な被害が報告されるようになっているサンゴ白化をもたらす広域的な海水温上昇や、海面上昇、海水の酸性化、台風の巨大化、豪雨の増加といったグローバルな環境負荷要因が、上記のローカルな環境負荷要因に重畳する形で、これらの地域の沿岸生態系に今後さらに深刻な影響を与えるものと予想される。このようなことから、もし適切な対応策をとらなければ、今後 20 - 25 年以内にこれらの地域のサンゴ礁やマングローブ林、藻場等のほとんどが崩壊の危機にさらされると推測した報告もある (PEMSEA, 2003)。

しかも、同海域の沿岸生態系の劣化問題は、海域内だけの問題に留まらなくなる可能性が高い。というのも、グローバルな CO₂ 収支において、沿岸域はその小さな面積割合にもかかわらず外洋域に比べて無視できない寄与があって特に熱帯・亜熱帯の海域は CO₂ の放出源になりやすいことが示されており (Borges, et al., 2005)、沿岸生態系劣化の主因の一つである陸源負荷物質の沿岸海域への流入が今後さらに進んでいけば、同海域から多量の CO₂ が放出されることになりかねないからである。しかし、その定量的評価・予測に必要な知見は、まだほとんど得られていない。

学術面からこれらの問題に対処するには、Coral Triangle 海域を、生物多様性のみならず CO₂ 吸収・放出源の観点からも評価し、同海域の沿岸生態系に急速な劣化をもたらしている上記の多重・高負荷環境の包括的評価・予測を行うとともに、適切な負荷制御の枠組みや、沿岸生態系のダメージからの回復過程の促進策 (レジリアンス強化策) のあり方等を明らかにしていく必要がある。

研究代表者のグループでは、これまでいくつかの科研費や APN 研究助成金等を得て、東南アジア・太平洋における沿岸生態系の劣化とそれをもたらす様々な人為的環境負荷要因の実態について調査研究を数多く行ってきた。その過程で、急速に劣化しつつある Coral Triangle 海域沿岸生態系の適切な保全策のあり方を学術面から提示する必要性を痛感するに至った。そして、前回の科研費・海外学術調査 (H18 - 20) では、そこで開発した地域スケール土壌流出モデルと GCM による降雨変化予測データ (国環研提供) から、Coral Triangle 地域において将来的に表層土壌流出が 2 ~ 4 割程度増加する、という予測結果を得ている。本研究はこれらの成果をさらに発展させる形で行うものである。

2. 研究の目的

本研究では、上記の背景に基づいて、以下の課題に取り組む、

(1) 「大気 - 陸域 - 沿岸域 - 海洋」物理流動・

水循環統合モデルの開発: Coral Triangle 領域は、超多島複雑海域としての地形特性やモンスーン・台風域としての気象特性、太平洋 - インド洋結合域としての大局的海洋構造上の特性、等を有している。本研究の基幹となる同領域の物理流動・水循環モデルとして、太平洋 - インド洋広域海水流動モデル (ほぼ開発済み) をベースに、多島海域に対応した高分解能海水流動モデルをネスティングするとともに、地域スケール陸水動態モデルおよび地域気象モデルを連結することによって、上記の特性を高精度で表現可能な統合モデルを開発する。

(2) 陸源負荷評価および低次生態系沿岸海洋モデルの開発と衛星画像解析・現地調査による検証: 先述の土壌流出モデルをベースに栄養塩流出モデルを開発し上記の物理流動・水循環モデルに組み込む。得られたモデルに基づいて Coral Triangle 海域への陸源負荷分布を評価し、沿岸域での炭酸系パラメータを含む物質循環・低次生態系モデルを開発する。モデル検証を衛星画像解析・水質調査によって行う。

(3) 炭酸系動態解析に基づく CO₂ 吸収・放出源から見た Coral Triangle 海域の機能の定量的評価: かつての人口圧力がかなり低い時代での陸源負荷レベルを想定したときの炭酸系動態解析結果と比較することにより、Coral Triangle 海域の CO₂ 吸収・放出源としての機能が、過去の人為的負荷が低かった時代に比べて現在のどのように変化してきているかを定量的に評価する。

(4) 生物過程から見た Coral Triangle 海域における生物多様性 hot spot の維持機構の検討: Coral Triangle 海域のなかでも "Center of Center" (Carpenter & Springer, 2005) と呼ばれる生物多様性が特に高いフィリピン中北部に位置する Verde Island 海峡と Coral Triangle 海域中の主要な生物相区分線である Wallace 線が通る Lombok-Makassar 海峡の 2 つの海峡域に着目し、そこでの生物多様性の維持機構を、ローカルな幼生分散の観点から幼生分散数値解析及び集団遺伝学的解析によって明らかにする。

(5) 多重・高負荷環境の将来変動のもとでのダメージポテンシャルおよび CO₂ 放出量の増加予測: 上記の「大気 - 陸域 - 沿岸域 - 海洋」物理流動・水循環統合モデルならびに陸源負荷 + 低次生態系沿岸海洋モデルを GCM 地球規模気候変動予測データ (国環研) のもとで駆動することにより、台風や豪雨といった気象擾乱の規模・頻度や陸源負荷の変化を予測し、多重・高負荷環境の将来動向をダメージポテンシャルマップの形で包括的に統合表示する。さらに CO₂ 放出量の将来的な増加予測を行う。

(6) 負荷生成に関わる地域社会構造の把握と

負荷制御スキームの提示： 土壌流出等の陸源負荷，観光開発，過剰漁業・養殖といったローカルな環境負荷が典型的に現れているサイトを数カ所選定し，各サイトでの地域コミュニティ構造と環境負荷生成の関係やその後の沿岸生態系への波及・応答過程を様々な現地調査・数値シミュレーション解析等から明らかにすることを通じて環境容量を合理的に設定し，それに基づく環境負荷緩和・制御策を提示する。

(7) 多重・高負荷環境下での沿岸生態系のダメージからの回復過程の促進策(レジリアンス強化策): 沿岸生態系保全戦略のもう一つの柱である回復過程促進策に関して，4)の生物多様性 hot spot でのローカル幼生分散情報に基づいて，その中でノード的役割を担っている生態系を同定し，それを重点的に保全することによって周辺の沿岸生態系全体の回復過程を促進するスキームを具体化する。

3. 研究の方法

(1) 「大気 - 陸域 - 沿岸域 - 海洋」物理流動・水循環統合モデルの開発: Coral Triangle 領域が有する，超多島複雑海域としての地形的特性，モンスーン・台風域としての気象上の特性，太平洋 - インド洋結合域としての大局的海洋構造上の特性，等を高精度で表現可能な，本研究の基幹となる物理流動・水循環モデルの基本形を開発する。具体的には，太平洋 - インド洋広域海水流動モデル(ほぼ開発済み)をベースに，多島海域に対応した高分解能海水流動モデルをネスティングするとともに，地域スケール陸水動態モデルおよび地域気象モデルを連結した形の統合モデルを開発する。

(2) 陸源負荷評価および低次生態系沿岸海洋モデルの開発: 開発済みの土壌流出モデルをベースに，さらに栄養塩や有機物負荷量に関する地域スケール流出モデルを開発し，上記の物理流動・水循環モデルに組み込む。得られたモデルに基づく Coral Triangle 海域への陸源負荷分布評価結果を入力条件とする，沿岸域での炭酸系パラメータを含む物質循環・低次生態系モデルを開発する。

(3) 衛星画像解析と現地調査によるモデル検証: 沿岸域での炭酸系を含む物質循環・低次生態系モデルに関して，モデル検証のためのデータを衛星画像解析と現地調査によって得る。現地調査に関しては，フィリピンでは Luzon 島周辺沿岸域や Panay 等周辺沿岸域，インドネシアでは Lombok-Makassar 海峡域を調査候補海域として，それぞれフィリピン大学・海洋研究所，インドネシア科学研究所・海洋学研究センター等の協力を得て，調査船による採水と水質分析を行う。

(4) 炭酸系動態解析に基づく CO₂ 吸収・放出源から見た Coral Triangle 海域の機能の定量的

評価: 上記の，炭酸系を含む物質循環・低次生態系沿岸海洋モデルに基づいて，Coral Triangle 海域の炭酸系動態評価を行い，同海域の CO₂ 吸収・放出源としての機能を定量的に評価する。

(5) 生物過程から見た Coral Triangle 海域における生物多様性 hot spot の維持機構の検討: Coral Triangle 海域のもつ高い生物多様性やユニークな生物相分布を形成する上で特に重要な役割を演じている海域に注目し，その維持機構を，ローカルな幼生分散の観点から解明するための検討を行う。

(6) 環境負荷生成に関わる地域社会構造の把握のための現地調査と解析: ローカルな環境負荷が典型的に現れているサイトとして，フィリピン Luzon 島北西部の Bolinao 海岸(過剰養殖)，同 Mindoro 島北端部の Puerto Galera(観光開発)，同 Panay 島南東の Banate 湾(農地からの環境負荷)，インドネシア Kalimantan 島南東部海岸(森林伐採による土壌流出)を調査候補地とし，それぞれのサイトでの環境負荷や沿岸生態系劣化の実態と，環境負荷発生に関わる地域コミュニティ構造に関する調査を行う。そして，各サイトでの地域コミュニティ構造と環境負荷生成の関係を把握するとともに，環境負荷の沿岸生態系への波及・応答過程を，現地調査・数値シミュレーション解析等から明らかにする。

(7) 多重・高負荷環境下での沿岸生態系のダメージからの回復過程の促進策(レジリアンス強化策): 沿岸生態系保全戦略のもう一つの柱である回復過程促進策に関して，上記の生物多様性 hot spot でのローカル幼生分散情報に基づいて，その中でノード的役割を担っている生態系を同定し，それを重点的に保全することによって周辺の沿岸生態系全体の回復過程を促進するスキームを具体化する。

4. 研究成果

(1) Coral Triangle 領域を対象とした高精度「大気 - 陸域 - 沿岸域 - 海洋」物理流動・水循環統合モデルを開発するべく，太平洋 - インド洋広域海水流動モデルをベースに，多島海域に対応した高分解能海水流動モデルをネスティングする形の流動モデルを開発した。モデル検証データとして，インドネシア・フローレス海域において漂流ブイ放流実験を行いその軌跡データを得た。それにより，同海域において「ロンボク渦」と命名した特徴的な循環流構造が存在することを見いだした。上記モデルによる数値シミュレーションによっても同様の循環流構造が再現されていることを確認し，モデルの妥当性を検証した。さらに，同モデルに連結するための陸水動態モデルおよび地域気象モデルの開発を主としてフィリピンを対象に行った。

(2) 土壌流出ならびに栄養塩や有機物負荷量

に関する地域スケール流出モデルを開発し、上記の物理流動・水循環モデルに組み込んだ。また、それらの陸源負荷を入力条件とする形の、沿岸域での炭酸系パラメータを含む物質循環・低次生態系モデルを開発した。

(3) 上記の炭酸系を含む物質循環・低次生態系沿岸海洋モデルに基づいて Coral Triangle 海域の炭酸系動態評価を行うべく、モデル検証のための現地データを沖縄石垣島での現地調査によって得た。また、CO₂ 吸収・放出特性を把握するため、インドネシアの Bali 島～Lombok 間、Jakarta～Natuna 島間、Jakarta～Banggai 島間の海域で観測を実施した。さらに、多数の水温計・水位計をインドネシア各地の研究機関と共同で設置・運用するための体制を構築した。

(4) 生物過程から見た Coral Triangle 海域における生物多様性 hot spot の維持機構の検討に関して、フィリピン 6 地点、インドネシア 1 地、フレンチポリネシア 2 地点から造礁サンゴ 4 種、ヒトデ類 5 種ナマコ 9 種類を遺伝子解析用に採集した。アオヒトデとゴマフヒトデに関しては、Coral Triangle 海域の遺伝構造は非常に弱く遺伝的にほぼ均一であることが明らかになった。さらに、ミトコンドリア 16S rRNA を用いてシカクナマコを解析した結果、琉球列島内において強い遺伝構造が見られ、黒潮を通じた connectivity が限られていることがわかった。

(5) また、一次生産や物質循環等に重要な役割を担っていると考えられる海草類を対象に、フィリピン全域、中国・海南島と八重山諸島において海草の対象種 5 種のサンプリングを行い、そのうち、リュウキュウスガモとウミシヨウブに関して、マイクロサテライトマーカーを用いて集団遺伝学的解析を行った。その結果、いずれの種でも主に有性繁殖で藻場を維持していることが明らかとなった。遺伝的多様性については、フィリピンの集団が最も高く、八重山集団は低いことは分かった。また、集団間の遺伝構造を評価したところ、両種とも 2 グループに分けられたが、これはこの地域の海流パターンと関連するものと推定された。

(6) Coral Triangle 海域における種多様性、生態系機能、生態系サービスが、人間活動に由来する沿岸域の各種ストレスにどのように影響されているかを把握するため、Coral Triangle 海域内外の複数の海草藻場を対象に、現地調査を行った。また、環境負荷生成に関わる地域社会構造の把握のための現地調査を、フィリピンや比較サイトである沖縄・石垣島において実施した。

(7) 幼生分散シミュレーション解析から得られる connectivity matrix に基づいて、source サイドと sink サイドの両面から海洋保護区 (MPA) 候補地を同定する評価スキーム

を開発し、インドネシアの Lombok-Makassar 海峡域や、沖縄八重山海域に適用した。これから reef connectivity の解明に基づく重点的の海洋保護区の同定を可能にすることによって、広域沿岸生態系のレジリアンス強化策に貢献するスキームを具体化することが出来た。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 29 件)

Yasuda, N., M. Abe, T. Takino, M. Kimura, C. Lian, S. Nagai, Y. Nakano, K. Nadaoka (2012): Large-scale mono-clonal structure in the north peripheral population of blue coral, *Heliopora coerulea*, Marine Genomics, in press(査読有)

Nakajima, Y., Y. Matsuki, C. Lian, M. D. Fortes, W. H. Uy, W. L. Campos, M. Nakaoka, K. Nadaoka (2012): Development of novel microsatellite markers in a tropical seagrass, *Enhalus acoroides*. Conservation Genet Resour DOI 10.1007/s12686-012-9614-9(査読有)

Kartadikaria, A. R., Y. Miyazawa, K. Nadaoka, A. Watanabe (2012): Existence of eddies at crossroad of the Indonesian seas. Ocean Dynamics, Volume 62, Number 1, 31-44, DOI: 10.1007/s10236-011-0489-1(査読有)

Dadhich, A. P., K. Nadaoka, T. Yamamoto, and H. Kayanne (2011): Detecting coral bleaching using high-resolution satellite data analysis and 2-dimensional thermal model simulation in the Ishigaki fringing reef, Japan. Coral Reefs, 31, 10.1007/s00338-011-0860-1(査読有)

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 Sessions in Coastal Engineering, JSCE, 2, 46-50.(査読有)

Kartadikaria, A. R., Y. Miyazawa, S. M. Varlamov and K. Nadaoka (2011): Ocean circulation for the Indonesian seas driven by tides and atmospheric forcings: Comparison to observational data. Jour. of Geophysical Research, Vol. 116, C09009, 21 PP. 2011, doi:10.1029/2011JC007196(査読有)

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, pp. 11-17.(査読有)

Lu L.F., Y. Miyazawa, W. Cui and K. Nadaoka (2010): Numerical study of surface water circulation around Sekisei Lagoon, southwest Japan. Ocean Dynamics, Vol.60, 2, 359-375(査読有)

Yasuda, N., S. Nagai, M. Hamaguchi, K. Okaji, K. Gerard and K. Nadaoka (2009): Gene flow of *Acanthaster planci* (L.) in relation to ocean currents revealed by microsatellite analysis, Molecular Ecology, 18:8, 1574-1590.(査読有)

Iizuka, H., H. Tamura T. Pokavanich, M.C.D. Rubio-Paringit, K. Nadaoka, M.D., Fortes (2009): Highly skewed tidal circulation pattern and water quality in Puerto Galera Bay, Philippines, Coastal Engineering Journal, 51, 1-21.(査読有)

Nadaoka, K. (2009): Reef Connectivity-A key factor governing resilience of coastal ecosystems. 5th International Conference on Asian and Pacific Coasts (APAC2009), Vol. 1, 35-44.(査読有)

[学会発表](計50件)

安田仁奈, Coralie Taquet, 長井敏, Gert Wörheide, Catherine Vogler, 灘岡和夫: 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 (口頭)

灘岡和夫, Aditya R Kartadikaria, 宮澤泰正, 笹井義一, Li-Feng Lu: 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 (口頭)

Kartadikaria, A.R., K. Nadaoka, C. Taquet, N. Yasuda, Y. Miyazawa, Y. Sasai, S. Nagai (2009): Introducing a Regional Project on Reef Connectivity in the South-East Asia and Western Pacific Region: The SEA-WP Connectivity Project, The Coral Reef Management Symposium on Coral Triangle, 12th October, Jakarta

[図書](計2件)

灘岡和夫, 東海大学出版会, サンゴ礁学-未知なる世界への招待-, 第2章サンゴ礁環境のダイナミクス, 2011, 31-48

仲岡雅裕・松田裕之, 恒星社厚生閣, 地球環境変動と生態系サービス, 人間活動の関

連性の解明に向けて。(小路淳・堀正和・山下洋編)水産学シリーズ 169. 浅海域の生態系サービス: 海の恵みと持続的利用, 2011, 129-143

[その他]

ホームページ等;

<http://www.wv.mei.titech.ac.jp/wiki/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

灘岡 和夫 (NADAOKA KAZUO)

東京工業大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号: 70164481

(2) 研究分担者

仲岡 雅裕 (NAKAOKA MASAHIRO)

北海道大学・北方生物圏フィールド科学センター・教授

研究者番号: 90260520

練 春蘭 (LIAN CHUNLAN)

東京大学・アジア生物資源環境研究センター・准教授

研究者番号: 40376695

渡邊 敦 (WATANABE ATSUSHI)

東京工業大学・大学院情報理工学研究科・助教

研究者番号: 00378001