

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：2008～2011

課題番号：20246081

研究課題名（和文）動的統合系としての極浅海域生態系の維持・変遷機構解明と複合ストレス下での機能再生

研究課題名（英文）Clarifying maintenance and transition mechanism of ecosystems in very shallow coastal waters and restoration of their functions under multi stresses

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）：

サンゴ礁生態系の機能保全・再生のための有用な科学的知見を提供することを目指して、これまで評価が難しかった地下水経由栄養塩の評価法を確立すること等により複合ストレスの評価体系を一般化するとともに、その複合ストレス下でのサンゴ群集の維持・変遷に関わる繁殖戦略過程などを明らかにした。また、サンゴ礁物質循環・炭酸系動態・低次生態系モデルを開発するとともに、複合ストレス下での生態系応答評価の基盤となるサンゴ内部モデルを開発した。

研究成果の概要（英文）：

To provide useful scientific knowledge for conservation and restoration of coral reef ecosystems, we have established a numerical model system to evaluate various environmental stresses including nutrient loading through groundwater. We have clarified processes relating to reproductive strategy and others of corals, which may govern evolution of coral communities. We have developed numerical models on material cycles including CO₂ dynamics and a primary ecosystem model. We have further developed a coral internal system model, which may be a fundamental model for quantitatively describing dynamic response of coral reefs under multiple environmental stresses.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	12,000,000	3,600,000	15,600,000
2010年度	10,500,000	3,150,000	13,650,000
2011年度	8,700,000	2,610,000	11,310,000
2012年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
総計	35,800,000	10,740,000	46,540,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工学

キーワード：極浅海域，サンゴ礁生態系，複合ストレス，維持・変遷機構，機能再生，物質循環モデル，集団遺伝学的解析，connectivity

1. 研究開始当初の背景

沿岸域，特にサンゴ礁，藻場，干潟等の極浅海域生態系は，大きな基礎生産性と高い生物多様性によって特徴付けられ，しかも沿岸生態系全体での生物過程において，多くの海産生物の産卵・生育場所を提供するなど，きわめて重要

な基盤的役割を有している。しかし，これらの極浅海域生態系は，近年，表層土壌（赤土）や過剰栄養塩流入などの陸源ストレス，海水の温度上昇等の海域からのストレス等のさまざまなストレスによって急速に劣化が進んでいる。そのため，これらの極浅海域生態系を

適切に維持しその機能を保全・回復していくための方策を科学的な裏付けを持った形で提示していく必要に迫られている。

研究代表者の灘岡らのグループは、サンゴ礁生態系の保全・再生策の一つとして、サンゴ幼生の広域分散に基づく沿岸生態系ネットワーク (reef connectivity) の観点から、その中で特に重要なサンゴ幼生供給源としての役割を果たしているサンゴ礁を同定し、その海域を海洋保護区として重点的に保全していくことによって、海水温上昇等によって広範にダメージを受けた後のサンゴ礁生態系ネットワーク全体としての回復過程を促進させる、というスキームを提示している。しかし、最近では、その重要な幼生供給源としての基幹的サンゴ礁生態系も、様々な複合的ストレスによって維持することが困難な状況になりつつある。そのため、この基幹的サンゴ礁生態系の適切な保全策を早急に確立していく必要があるが、複合的ストレスについては地下水経路栄養塩負荷など一部を除いて実態解明が進んできているものの、サンゴ礁生態系の基本的な維持機構や複合ストレス下での変遷・応答過程には不明な点が多く、したがって、サンゴ礁生態系の機能保全・再生の上で重要となる複合ストレス要因制御のための具体的な指針が得られていない、というのが現状である。

2. 研究の目的

(1) サンゴ礁生態系に作用する複合ストレス評価法の体系化を目指して、これまで定量化がほとんど出来ていない地下水経路の栄養塩負荷量の評価を可能にするべく、²²²Rnトレーサー濃度計測法と地下水流出シミュレーションとを組み合わせた方法等を開発する。

(2) サンゴ礁生態系物質循環の根幹をなすサンゴ群集代謝に関して、サンゴ礁海水流動・炭酸系動態シミュレーションに多地点炭酸系計測データを同化させる新たな手法を開発することにより、サンゴ礁の複雑な地形・海底被覆空間構造の効果を陽に取り込んだ形の群集代謝評価法を確立する。

(3) 複合ストレス作用下でのサンゴ群集の維持・変遷過程を評価するため、さまざまなストレス作用下でのサンゴ群集の健全度を上記の群集代謝量や褐虫藻光合成活性の変化によって把握する。

(4) サンゴ礁生態系を、サンゴ群集を基幹とした「サンゴ・藻場・干潟・マングローブ」動的統合系としての極浅海域生態系として捉え、上記によるサンゴ群集代謝評価モデルおよび複合ストレス空間分布評価モデルを取り込んだ統合的な物質循環・低次生態系モデルを構築する。

(5) 短期的なサンゴ群集の維持・変遷機構だけでなく、何世代にもわたっての中・長期的

な群集維持・変遷機構を明らかにするため、サンゴ群集の自己加入 (self seeding) 過程など繁殖戦略から見た維持機構の基本プロセスの解明とその環境影響評価を行う。

(6) 新たに、景観生態学的手法に基づく fragmentation metrics 解析を多時点の衛星画像解析に適用して群集のパッチ性やその多層スケール構造等の変遷を明らかにすることにより群集の空間的分布構造の変遷を定量的に評価し、複合環境ストレスの変遷との対応関係を解明する。

(7) 群集間競合関係と環境変動応答過程のモデル化に基づいて極浅海域生態系を構成する群集構造の時空間変遷過程を表現する動的統合生態系モデルを構築し、環境ストレス増加に伴うサンゴ群集優占型から藻場優占型へのフェイズ・シフトといった強非線形過程の解析を可能にする。

(8) 以上に基ついて、複合ストレス中の制御可能要因についての合理的制御目標設定指針等を提示することにより、動的統合系としての浅海域生態系の機能保全・再生策構築に寄与する。

3. 研究の方法

(1) 地下水経路栄養塩負荷の評価手法開発等に基づく複合ストレス評価体系の一般化: ²²²Rn トレーサー濃度計測法等に基づく現地調査を実施するとともに、地下水流出ならびにそれに伴うサンゴ礁への栄養塩負荷の評価モデル開発を行う。そして、開発済みの熱輸送モデルや赤土輸送モデル、さらには下記の2)、4)で開発するサンゴ礁炭酸系動態・物質循環モデル等に基づいて、サンゴ礁生態系に作用する複合ストレスの統合的な評価モデル体系の開発を目指す。

(2) サンゴ群集代謝時空間分布構造を反映させたサンゴ礁海水流動・物質循環数値シミュレーションモデルの開発: 先に開発したサンゴ礁海水流動・物質輸送シミュレーションモデルをベースにサンゴ礁海水流動・炭酸系動態シミュレーションモデルを開発し、サンゴ礁内の流動特性と海底被覆状態を考慮した形での炭素収支の時空間動態を解析できるようにする。また、同モデル開発に必要な現地データ取得のための現地調査を実施する。そして、いくつかの地球温暖化シナリオのもとに想定される外洋水温やCO₂分圧条件、陸源負荷条件、様々なサンゴ礁内の海底被覆条件等の下でのCO₂吸収・放出のサンゴ礁内の時空間分布特性を明らかにする。また、サンゴ礁生態系全体としてCO₂吸収となる条件を明らかにする。

(3) 群集代謝特性等から見たサンゴ群集の健全度と環境ストレス応答の評価: 複合ストレス作用下でのサンゴ群集の維持・変遷過程を評価するため、茅根らのグループによって1998年および2007年のサンゴ白化イベントをばさんで15年間の長期にわたって継続的にデ

ータがとられている石垣島白保海域の定線において、サンゴ群集と群集代謝の継続的な変化特性を明らかにする。さらに、サンゴのストレス遺伝子特性から見たサンゴの環境ストレス応答評価を行うための基礎的検討を行う。

(4) 極浅海域生態系に関する物質循環・低次生態系モデルの開発：サンゴ礁生態系を、サンゴ群集を基幹とした「サンゴ・藻場・干潟・マングローブ」動的統合系としての極浅海域生態系として捉え、上記2)によるサンゴ群集代謝評価モデルおよび1)による複合ストレス空間分布評価モデルを取り込んだ統合的な物質循環・低次生態系モデルを構築する。

(5) 繁殖戦略からみたサンゴ群集の維持・変遷機構の解明と環境影響評価：中・長期的なサンゴ群集維持・変遷機構を明らかにするため、サンゴ群集の繁殖戦略から見た維持機構の基本プロセスの解明とその環境影響評価のための基本的検討を行う。幼生分散範囲が限られるため、局所的な環境ストレス影響を受けやすい保育型サンゴの中でも、特に、受精・幼生放出期に高海水温ストレスがかかりやすいアオサンゴ群集を主たる対象に調査を行う。放精・幼生放出・自己加入過程の解析を行うとともに、リーフ内外の群集間の局所的な connectivity と環境ストレスとの関係に着目した調査分析を実施する。

(6) 衛星画像の fragmentation metrics 解析による群集空間分布構造解析に関する基礎的検討：群集のパッチ性やその多層スケール構造等の変遷を明らかにすることにより群集の空間的分布構造の変遷を定量的に評価するため新たに、景観生態学的手法に基づく

fragmentation metrics 解析を多時点の衛星画像解析に適用する。それによって、サンゴ礁における群集空間分布構造の変遷を明らかにするとともに、それとサンゴ礁への複合環境ストレスとの関連性について検討する。

(7) 群集構造の時空間変遷過程を表現する動的統合生態系モデルの構築とストレス制御スキームの検討：サンゴ礁内群集間競合関係と環境変動応答過程等のモデル化を行うことによって、極浅海域生態系を構成する群集構造の時空間変遷過程を表現する動的統合生態系モデルの基本形の構築を目指す。同モデルに基づいて、複合ストレス中の制御可能要因についての合理的制御目標設定スキーム案を検討する。

4. 研究成果

(1) 地下水経路栄養塩負荷について、²²²Rn トレーサー濃度計測法と栄養塩自動分析法、塩分計測等に基づく地下水起源の栄養塩フラックス評価法を確立し、サンゴ礁内の多地点で地下水起源栄養塩フラックスを定量化した。また、地

下水流出モデルを調査対象地域に適用し、流出パターンを概ね再現することに成功した。

(2) 開発済みのサンゴ礁海水流動モデルをベースに、関連する現地計測データ等に基づいてサンゴ礁物質輸送モデルや炭酸系動態モデルを開発し、石垣島東海岸で得られた現地計測データを良好に再現することに成功した。また、この炭酸系動態モデルによって、同サンゴ礁海域での CO₂ 放出・吸収特性が時空間的に大きく変動する特徴を持つことや、夏期では同サンゴ礁全体として吸収側に働くことを示した。

(3) これらの海水流動、物質輸送、炭酸系動態モデルや、関連する現地データ解析の結果等に基づいて、サンゴ礁物質循環・低次生態系モデルの基本形を開発した。

(4) 造礁サンゴ群集の形成・維持・変遷機構の解明の上で重要となる遺伝構造分布特性に関して、八重山列島内でサンプリングを行い、集団遺伝特性を比較した。その結果、対象海域での局所的な connectivity の特性を明らかにすることができた。特に、サンゴ礁内と外洋側では遺伝的に分化しており、サンゴ礁内はサンゴ礁内同士で、外洋は外洋側同士で比較的遺伝的に近いことを明らかにした。そのことから、異なる環境下で幼生着定しないし着定後に selection が生じている可能性が示唆された。

(5) 景観生態学的手法に基づく fragmentation metrics 解析を多時点の衛星画像解析に適用し、群集のパッチ性やその多層スケール構造等の変遷を明らかにした。さらに、同解析手法を隣接流域での土地利用空間構造分析に適用し、土壌流出解析と組み合わせることにより、土地利用の空間構造特性と土壌流出特性の関連性について検討した。

(6) 研究期間内に、フェイズ・シフトに代表される非線形的な動的生態系モデルの構築までには至らなかったが、サンゴ内部の光合成と石灰化という基本的な素過程を数理モデルで記述することにより、環境変動に対するサンゴ内部の動的な応答過程を定量的に記述することが可能な新たな基盤モデルを構築することに成功した。これにより、様々な要素からなる複合環境ストレスのもとでのサンゴ礁生態系の動的応答を定量的に記述する道が拓かれた。

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 32 件)

Dadhich, A. P., Nadaoka, K., Yamamoto, T. and Kayanne, H. (2012): 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, 査読あり

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), 査読あり

Paringit E.C., K. Nadaoka(2011): Simultaneous estimation of benthic fractional cover and shallow water bathymetry in coral reef areas from high-resolution satellite images. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 1-22 Nov. 11, 査読あり

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 May 30 2011, 査読あり

Tanaka Y, Miyajima T, Watanabe A, Nadaoka K, Yamamoto T, Ogawa H (2011): Distribution of dissolved organic carbon and nitrogen in a coral reef. *Coral Reefs*, 30:533-541 Jun 2011, 査読あり

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*, doi:10.1016/j.marpolbul.2011.01.005 Apr 2011, 査読あり

Osawa, Y., Fujita, K., Umezawa, Y., Kayanne, H., Ide, Y., Nagaoka, T., Miyajima, T. and Yamano, H. (2010): Human impacts on large benthic foraminifers near a densely populated area of Majuro Atoll, Marshall Islands, *Marine Pollution Bull.*, 60, 1279-1287, 査読あり

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

Blanco A.C., K. Nadaoka, T. Yamamoto, 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 Aug 30 2010, 査読あり

Yasuda, N., T. Takino, M. Kimura, C.L. Lian, S. Nagai and K. Nadaoka (2010): Genetic structuring across the reef crest in the threatened blue coral,

Heliopora coerulea (Helioporidae, Octacorallia) in Shiraho Reef, southwest Japan, *Advance in Genetic research*, in press, 査読あり

Tokoro, T., H. Kayanne, A. Watanabe, K. Nadaoka, H. Tamura, K. Nozaki, K. Kato, A. Negishi (2008): High gas-transfer velocity in coastal regions with high energy-dissipation rates, *Journal of Geophysical*, Vol. 113, C11006, doi:10.1029/2007/C004528, 査読あり

[学会発表](計61件)

Nadaoka K, Watanabe A, 他4名, Toward comprehensive assessment and prediction of multiple environmental stresses on coral reef ecosystems and their responses based on numerical simulation models, 2nd Asia Pacific Coral Reef Symposium, 2010年6月21日, Phuket, Thailand

Yamamoto T., A. Watanabe, Y. Tanaka, K. Nadaoka, 他2名, Development of a nutrient dynamics model in coral reef ecosystem, 2nd Asia Pacific Coral Reef Symposium, 2010年6月21日, Phuket, Thailand

Watanabe A., Y. Maeda, K. Nadaoka, 他3名, Evaluation of CO₂ flux in Shiraho reef using a newly developed carbonate system dynamics model, 2nd Asia Pacific Coral Reef Symposium, 2010年6月21日, Phuket, Thailand

Blanco, A.C., Nadaoka, K., Watanabe, A., 他3名, Spatio-Temporal Variation of Groundwater Discharge and Related Water Quality in the Nearshore Shiraho Reef, Ishigaki Island, 日本地球惑星科学連合2009年大会, 2009年5月16日, 千葉県・幕張メッセ

[図書](計1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

[産業財産権]

出願状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況（計0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等
研究代表者の研究室 HP で、本科研費による
研究プロジェクトの活動状況や研究成果等
を随時公開している。

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

茅根 創 (KAYANE HAJIME)
東京大学・理学系研究科・教授
研究者番号：60192548

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

(3) 連携研究者

()

研究者番号：