

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25年 5月31日現在

機関番号：12608

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2008～2012

課題番号：20121007

研究課題名（和文） 複合ストレスの包括的評価・予測とサンゴ礁生態系応答モデル解析

研究課題名（英文） Comprehensive assessment and prediction of multiple stresses and model analysis of reef ecosystem response

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所・教授

研究者番号：70164481

研究成果の概要（和文）：

複合的な環境ストレスがサンゴ礁生態系に波及するプロセスを包括的に評価するモデル体系を開発するとともに、複合ストレスに対するサンゴ礁生態系の応答過程に関わるサンゴ礁内における炭酸系動態や有機物・栄養塩動態に関するモデルを開発し、関連するさまざまな現地調査を実施した。さらに、サンゴ礁生態系応答モデル開発のキーとなる複合ストレス下でのサンゴ群体内部の応答素過程を表すことが出来る「サンゴポリプモデル」の開発に成功した。また、適切な環境負荷制御スキームの提示に不可欠となる陸源負荷発生過程と地域の社会経済的な特性構造の関連性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

With the various associated field surveys, a comprehensive model system has been developed to evaluate the propagation processes of multiple environmental stresses onto a reef ecosystem and to quantitatively describe the carbonate system dynamics and organic matter & nutrient dynamics in the reef. Besides, as one of the most critical and novel model for the reef ecosystem response modeling under multiple environmental stresses, a “coral polyp model” has been successfully developed. The processes to yield the terrestrial environmental loads have been analyzed in relation to the socio-economic aspects of the local society, which is crucial for establishing an effective management scheme of man-made environmental stresses.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	13,700,000	4,110,000	17,810,000
2009年度	18,300,000	5,490,000	23,790,000
2010年度	20,400,000	6,120,000	26,520,000
2011年度	16,700,000	5,010,000	21,710,000
2012年度	13,400,000	4,020,000	17,420,000
総計	82,500,000	24,750,000	107,250,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境影響評価・環境政策

キーワード：サンゴ礁，複合ストレス，生態系モデル，物質循環，ストレス制御，炭酸系動態，数値シミュレーション，非線形応答過程

1. 研究開始当初の背景

サンゴ礁生態系には、海水温上昇や酸性化などの様々なグローバルストレス要因と、隣接する陸域からの赤土流入や過剰栄養塩流入といったローカルストレス要因が、様々な物理・生化学的プロセスに基づく相互作用過程を経由して複合的に作用している。したがって、サンゴ礁生態系に作用するストレスの定量的評価・予測においては、このような相互作用過程も考慮したグローバルローカル複合ストレスとしての包括的な評価・予測が必要になる。また、そのような複合ストレス環境下でのサンゴ礁生態系の保全策を検討していく上で、サンゴ礁生態系が維持可能な複合ストレスレベルの同定が不可欠になる。そのためには、サンゴ礁生態系の個々の基本構成要素のストレス応答過程のみならず、サンゴ礁生態系全体としての応答過程の定量的評価が可能なモデルを構築する必要がある。これによって、フェイズシフトに代表される生態系の強非線形応答過程を記述することが可能になり、様々な複合ストレス生成将来シナリオのもとでの生態系応答予測に基づいたストレス制御指針を提供することができるものと期待される。

2. 研究の目的

サンゴ礁生態系には、様々な地球規模ストレス要因に、隣接する陸域からの表層土壌や栄養塩流入等のローカルなストレス要因が重なる形で、様々な時空間スケールのストレス要因が複合的に作用している。本計画研究では、このようなグローバルローカル環境ストレス要因の相互影響プロセスも考慮した形で、海一陸統合系におけるサンゴ礁生態系への複合ストレスの包括的な評価と将来予測を可能とするスキームを構築する。そして、そのような複合ストレスに対するサンゴ礁生態系の非線形応答過程を記述するためのモデル開発を行い、ローカルな土地利用形態やグローバルな温暖化ガス排出等に関する様々な複合ストレス生成将来シナリオのもとでのサンゴ礁生態系の応答を定量的評価することにより、サンゴ礁生態系が維持可能な複合ストレスレベルを同定し、ストレス制御のための科学的指針を提供する。

3. 研究の方法

(1) 海一陸統合系におけるグローバルローカル環境ストレス要因の統合評価・予測手法の開発：陸域からの表層土壌・過剰栄養塩流入等のローカルなストレス要因の負荷構造や、外洋での水温・CO₂上昇、酸性化等のグローバルストレス要因のサンゴ礁生態系への生化学・熱的プロセスを介しての波及過程を解明することによって、それらの統合評価・予測システムを開発する。

(2) サンゴ礁物質循環・炭酸系動態モデル構築：サンゴ礁生態系の維持・変遷過程を定量的に評価する上で不可欠となる物質循環・炭酸系動態の解明を行い、それに基づいて、極浅海域複雑地形としてのサンゴ礁における流動構造を高精度評価可能な流動モデル（開発済み）をベースとしたサンゴ礁物質循環・炭酸系動態モデルを構築する。

(3) サンゴ礁生態系応答モデルの構築：A02班等と連携し、複合ストレス下におけるサンゴの生物学的・化学的応答素過程に関する基本応答モデルを構築し、それを2)のサンゴ礁スケールモデルに組み込むとともに、サンゴ以外の基本的な海底被覆要素である藻場、干潟といった要素も含んだ形で、サンゴ礁内の物理・化学・生物学的連成過程を統合することにより、生態系全体としての応答過程を定量的評価可能なモデルの開発を行う。

(4) サンゴ礁生態系応答予測に基づくストレス制御指針の検討：ローカルな土地利用形態やグローバルな温暖化ガス排出等に関する様々な将来シナリオのもとで、3)による生態系応答モデル評価を行うことでサンゴ礁生態系が維持可能なストレスレベルの同定を行い、ストレス制御のための科学的指針を提供する。

4. 研究成果

(1) 石垣島東海岸リーフ海域を対象とした長期連続観測ならびに短期集中多点連続観測を実施することにより、同リーフ海域への陸源負荷（河川・地下水経路での流量・赤土・栄養塩フラックス等）、高水温・pH等から見た外洋からの負荷のリーフ内波及過程、リーフ内物質循環過程（有機物・栄養塩動態、炭酸系動態等）などの定量的評価を行った。リーフ内物質循環過程に関わる具体的な分析項目として、群集代謝の時空間分布、懸濁態有機物と沈降粒子の炭素・窒素安定同位体比、溶存無機炭素の安定同位体比、大気降水由来の栄養塩と窒素安定同位体比、サンゴ生体のアミノ酸分子種別窒素安定同位体比、溶存有機物動態等について詳細な分析を行い、それらの実態を明らかにした。

(2) C01班やA02班と連携して新型チャンバーシステムの開発および運用を進め、サンゴ群集や海草藻場、海藻帯といったサンゴ礁生態系基本構成要素に関し観測を実施し、代謝特性等の定量的評価を可能にした。

(3) 流域からの環境負荷モデルとして、表面・地下水流出モデルならびに赤土流出モデルを開発するとともに、関連する現地調査を行うことによりモデル検証を行った。

(4) サンゴ礁3次元海水流動モデルをベースとして、複合ストレスのうちの赤土および高海水温について、サンゴ礁内でのそれらの波及過程を高精度で評価する数値モデル体系

を構築した。同モデルを用いた数値解析により、これらのストレス要因がサンゴ礁内で高い時空間変動性を示すことを明らかにした。

(5) さらに、サンゴ礁内での複合ストレスの時空間変動評価ならびに生態系応答評価の両面に関わるモジュールの一つとして、サンゴ礁炭酸系動態モデル動態モデルの構築を行い、沖縄・石垣島東海岸サンゴ礁域での現地調査データを良好に再現することに成功した。同モデルによる解析の結果、サンゴ礁内での炭酸系動態が、サンゴ礁内海底被覆分布や海水流動変動に基づく大きな時空間変動性を示し、特にCO₂吸収・放出特性がサンゴ礁内で大きなコントラスト分布を示すことを明らかにした。この成果は、サンゴ礁内のたかだか1、2点での定点観測データの解析に基づく従来の炭酸系動態研究の限界を打破するものである。

(6) また、サンゴ礁内での複合ストレスの時空間変動評価ならびに生態系応答評価の両面に関わるもう一つのモジュールとして、サンゴ礁における栄養塩や有機物の物質循環ならびに低次生態系の時空間応答過程を解析対象としたモデル開発をA02班と連携して行った。このモデルは、詳細な流動場モデルをベースとして、水柱の生食連鎖と微生物循環および底生生物群集の代謝を組み込むことで構成されている。このモデルによる解析の結果、リーフ内の有機態動態がサンゴ粘液の生成と流動による移流効果に大きく支配されていること等が明らかになった。

(7) サンゴ礁生態系短期応答モデルのキーとなる、複合ストレス下でのサンゴ群体内部の動的応答過程を表す、従来にない「サンゴ内部モデル(ポリプモデル)」の開発に成功した。このモデルは、サンゴの石灰化の概念モデルとして幅広く受け入れられているtrans-calcificationモデルを基に定式化を行ったもので、サンゴの石灰化に特徴的にみられる“光に促進された石灰化(light-enhanced calcification)”と呼ばれる現象や、石灰化や光合成の海洋酸性化応答や流速依存性などの基本応答が、このポリプモデルによっては良く再現することが示された。さらに、栄養塩や水温、赤土の影響などのストレス応答の素過程の解明をA02班と共同で行い、それらの素過程をこのモデルに組み込むことに成功した。得られたモデルにより、フィールドで観察されているサンゴ群体のストレス応答に近い応答特性が再現された。またこの内部モデルを上記のサンゴ礁スケールの物質循環・炭酸系動態モデルに組み込むことで、複合ストレスに対するサンゴ礁生態系応答を定量的に評価できるモデルを開発した。海洋酸性化に対する応答や海水準の上昇に対する応答、さらにはそれらが複合的に起こった場合の応答など、将来予測

に向けたいくつかシナリオ実験解析の結果を得ることに成功した。

(8) 陸源負荷の生成・制御過程のモデル化に必要な地域コミュニティの社会経済的な調査として、畜産に焦点を当てた調査を石垣島を中心に行い、同島での窒素ベースのマテリアルフロー構造を明らかにした。さらに同様の社会経済的な調査を、宮古島、与論島においても実施し、環境負荷発生に関わる畜産やサトウキビ等の農業セクターの構造特性の相対的な特徴を明らかにした。

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 26 件)

- ① Nakamura, T., K. Nadaoka and A. Watanabe (2013): A coral polyp model of photosynthesis, respiration and calcification incorporating a transcellular ion transport mechanism, *Coral Reefs*, in press, DOI:10.1007/s00338-013-1032-2 (査読有)
- ② Watanabe, A., T. Yamamoto, K. Nadaoka, Y. Maeda, T. Miyajima, Y. Tanaka and A. C. Blanco (2013): Spatiotemporal variations in CO₂ flux in a fringing reef simulated using a novel carbonate system dynamics model, *Coral Reefs*, 32:239-254, DOI: 10.1007/s00338-012-0964-2 (査読有)
- ③ Dadhich, A.P., K. Nadaoka, T. Yamamoto and H. Kayanne (2012) Detecting coral bleaching using high-resolution satellite data analysis and 2-dimensional thermal model simulation in the Ishigaki fringing reef, Japan. *Coral Reefs*, 31:425-439, DOI:10.1007/s00338-011-0860-1 (査読有)
- ④ Dadhich, A.P. and K. Nadaoka (2012): Analysis of Terrestrial Discharge from Agricultural Watersheds and Its Impact on Nearshore and Offshore Reefs in Fiji, *J. Coastal Research*, 28:1225-1235, DOI:10.2112/JCOASTRES-D-11-00149.1. (査読有)
- ⑤ Blanco, A. C., 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) (査読有)
- ⑥ 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 (査読有)
- ⑦ Tanaka Y., Ogawa H. and Miyajima T. (2011) Production and bacterial decomposition of

dissolved organic matter in a fringing coral reef. Journal of Oceanography 67: 427-437 (査読有)

- ⑧Blanco, 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. DOI:10.1002/hyp.7685 (査読有)
- ⑩Obuchi M, Fujita Y, Nakano Y, Uehara T, Motowaka T. (2010): Reproductive biology and early life history of the hermaphroditic feather star *Dorometra sesokonis* (Echinodermata: Crinoidea). Marine Biology, 157:1192-1201 (査読有)
- [学会発表] (計 84 件)
- ①中村隆志(2013): サンゴ骨格に記録される炭素同位体比の vital effect の実態解明に向けたサンゴポリプロモデルの開発, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 千葉県千葉市 (幕張メッセ), 2013 年 5 月 19 日~24 日 (口頭. 招待講演)
- ②宮島利宏(2013): サンゴ礁の炭素循環研究への溶存無機炭素安定同位体比の応用, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 千葉県千葉市 (幕張メッセ), 2013 年 5 月 19 日~24 日 (ポスター)
- ③中村隆志(2012): サンゴの内部素過程を考慮したストレス応答モデルの開発, 第 15 回日本サンゴ礁学会, 東京都文京区 (東京大学), 2012 年 11 月 23 日(口頭)
- ④Nakamura, T. (2012): A coral ecosystem model: short-term responses against the multiple stresses, 12th International Coral Reef Symposium (ICRS2012), 12th July, 2012, Cairns, Australia(口頭)
- ⑤Watanabe, A. (2012): Evidence of ocean acidification in seawater around Ishigaki Island, 12th International Coral Reef Symposium (ICRS2012), 9th July 2012, Cairns, Australia
- ⑥ Yamamoto, T. (2012): DOC dynamics analysis with a new biogeochemical reef ecosystem model, 12th International Coral Reef Symposium (ICRS2012), 11th July 2012, Cairns, Australia
- ⑦金城孝一(2011): 礁池内の栄養塩および濁りの現状とこれらがサンゴの生息状況に及ぼす影響, 第 14 回日本サンゴ礁学会, 沖縄県那覇市 (沖縄県男女共同参画センター・ている), 2011 年 11 月 4 日(口頭)
- ⑧中村隆志(2011): サンゴ礁生態系モデルの構築にむけて, 第 14 回日本サンゴ礁学会, 沖縄県那覇市 (沖縄県男女共同参画センター・ている), 2011 年 11 月 5 日(口頭)

- ⑨灘岡和夫: 流動付加制御機構付き新型チャンバーシステムの開発と応用, 第 14 回日本サンゴ礁学会, 沖縄県那覇市 (沖縄県男女共同参画センター・ている), 2011 年 11 月 5 日 (ポスター)
- ⑩山本高大(2011): 裾礁型サンゴ礁域を対象とした 3 次元物質循環・低次生態系モデルの開発と溶存有機物動態特性の解析, 第 14 回日本サンゴ礁学会, 沖縄県那覇市 (沖縄県男女共同参画センター・ている), 2011 年 11 月 4 日 (ポスター)

[図書] (計 3 件)

- ①灘岡和夫 (2011): サンゴ礁環境のダイナミクス, 土屋・大葉・鈴木 (編)「サンゴ礁学」, 第 2 章, 日本サンゴ礁学会監修, 東海大学出版会, pp. 31-48.
- ②ベアトリス・カサレト, 中野義勝(2011): サンゴの病気, 土屋・大葉・鈴木 (編)「サンゴ礁学」, 第 12 章, 日本サンゴ礁学会監修, 東海大学出版会, pp. 274-298.
- ③Miyajima T. and Umezawa Y. (2010) Stable isotope composition of nitrogen ($\delta^{15}\text{N}$) as a tool for investigating nitrogen cycling in coral reef ecosystems. p. 197-222. In: Ohkouch N et al. (eds.) Earth, Life, and Isotopes, Kyoto University Press.

[その他]

ホームページ等

<http://www.coralreefscience.jp/>

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

渡邊 敦 (WATANABE ATSUSHI)

東京工業大学・情報理工学 (系) 研究科・助教

研究者番号: 00378001

宮島 利宏 (MIYAJIMA TOSHIHIRO)

東京大学・大気海洋研究所・助教

研究者番号: 20311631

中野 義勝 (NAKANO YOSHIKATSU)

琉球大学・熱帯生物圏研究センター・技術専門職員

研究者番号: 40457669

(3) 連携研究者

なし