

令和元年6月26日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H02268

研究課題名(和文) サンゴ礁を対象とした生態系動態モデル体系の革新とレジリエンス強化策への貢献

研究課題名(英文) Innovating Ecosystem Dynamics Modeling System for Coral Reefs with Contribution for Enhancing Ecosystem Resilience

研究代表者

灘岡 和夫 (Nadaoka, Kazuo)

東京工業大学・環境・社会理工学院・教授

研究者番号：70164481

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,700,000円

研究成果の概要(和文)：機械学習アルゴリズム等に基づくサンゴ礁海域水深・海底被覆高精度RSマッピング技術を開発した。サンゴポリプモデルをコアとしたリーフスケール・ボトムアップ型モデルを完成させるとともに、オニヒトデによるトップダウン効果を取り込んだモデル、およびサンゴ白化モデルを開発した。また、各種基底資源から上位捕食者に至る食物網中のいくつかの重要なステップについて、その定量的な実証を目指し、新しい実験技術の開発や分析技術の適用を試みた。野外実験により藻類の除去効果をもつ潜在的な種を調べ、繁茂した大型藻類を摂食するグループとプレート表面に付着する微細藻類を摂食するグループの2タイプがいることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた様々なモデルやリモートセンシング技術の開発の成果や、関連する現地実験・室内分析の成果は、従来不可能であった様々な複合的なストレス環境の下でのサンゴ礁生態系の応答過程を定量的に評価・予測を可能とするものであるとともに、これまで取り組みが遅れていたトップダウン効果の評価やモデル化に道を開くものである。これらの成果は、様々な環境ストレスの複合的な影響を受けて急速に劣化が進行しつつあるサンゴ礁生態系に関して、その適切な保全策の立案等に学術面から貢献し得る。

研究成果の概要(英文)：We developed the following methods and models; 1) accurate remote sensing methods for bathymetry and benthic covers in coral reefs, 2) a reef-scale bottom-up model based on the coral polyp model (Nakamura et al., 2013), 3) a model system incorporating a top-down effect by *Acanthaster planci*, 4) coral bleaching model which may be used for predicting the reef-scale responses to higher thermal stresses due to global warming, 5) Runoff models for assessing terrestrial loads on coral reef ecosystems. We tried to apply innovative experimental and laboratory analysis methods for quantitatively demonstrating some important steps in the food web from basal resources to top level predators. By conducting field experiments using plates and others, we found two groups in the species having algal removal effects; one is the group grazing macroalgae and another is the group grazing microalgae on the plates.

研究分野：水圏環境学

キーワード：生態系動態モデル サンゴ礁 トップダウン効果 群集構造マッピング レジリエンス強化策

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

サンゴ礁生態系は、熱帯・亜熱帯沿岸の貧栄養海域において、主要な一次生産者である褐虫藻と造礁サンゴとの間の巧妙な共生関係のもとに高い生産性と豊かな生物相を実現させているユニークな生態系であるが、近年、様々な人為的活動に伴うローカルな環境負荷と海水温上昇などのグローバルな環境負荷からなる複合環境ストレスの影響を受けて、その劣化の進行が深刻になりつつある。サンゴ礁生態系の広範な劣化は、その生態系サービスに依拠している割合が大きい熱帯・亜熱帯沿岸域の地域社会にとって死活的な問題になってきている。しかしながら、そもそも現実のサンゴ礁生態系の変遷過程が具体的にどのようなメカニズムに規定されているのか、という基本的な問いに対して明確に答えられる状況には至っていない。このことは、サンゴ礁生態系の有効な保全策の立案、というきわめて重要な社会的な要請に対して学術面から十分に答えることが出来ていないことを意味する。

サンゴ礁生態系の劣化は、サンゴ群集の衰退だけでなく、サンゴ礁生態系全体としての群集構成の変化といった質的な変化(生物多様性の変化)をももたらしている。その典型的な例がいわゆるフェイズ・シフト現象である。よく引用されるのがカリブ海のサンゴ群集が優占する系から大型藻類が優占する系へのシフト事例(Hughes 1994)であるが、その後世界各地のデータを広範に整理したBruno(2009)によれば、カリブ海のような明確なフェイズ・シフトの例はかなり限られていることが示されている。すなわち、サンゴ礁生態系に関する現状でのフェイズ・シフト論(例えば、Scheffer et al. 2001)は多分に概念モデル的なレベルに留まっており、どのような場合に明確なフェイズ・シフトが生じるのか、生じるとしても、その具体的なメカニズムとして、栄養塩負荷等に起因するボトムアップ効果が効くのか、乱獲による藻食性魚類の減少や病気等によるウニの減少などによるトップダウン効果が効くのか、あるいは両方なのか、といった基本的なことが解明されていない。

現実のサンゴ礁生態系の変遷過程を理解し定量的に記述する上で重要になるのは、フェイズ・シフト論に代表される多重平衡状態間の遷移という枠組みでの現象理解のみならず、さまざまな時間スケールで変動する環境ストレスが複合的に作用し続ける状況の下に、サンゴ礁生態系がどのように動的に応答するのかを、その復元力(レジリエンス)も含めて定量的に評価することである。その要請に応えるには、これまで数多く行われてきている高水温負荷や酸性化負荷、栄養塩負荷といった個別の負荷条件の下でのサンゴ片の室内暴露実験では明らかに不十分である。というのも、実際の現地のサンゴ礁生態系では、これらの各ストレス要因がさまざまな時間スケールで常に変動をしていて室内暴露実験のような一定負荷条件ということはありません、しかもこれらの負荷要因が同時に作用していることが多いからである。最近、研究代表者のグループでは、この原理的な限界を克服することが出来る新たな方法論として、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。このモデル体系の開発の成功により、複合ストレス下でのサンゴ礁生態系の動的応答を定量的に記述する、という基本目標に向けての大きな突破口が開かれたが、それだけで現実の複雑なサンゴ礁生態系の動態を十分に記述できるわけではない。このモデル体系は、いわゆるボトムアップ型のモデル体系に分類されるが、実際には先述のカリブ海でのフェイズ・シフト現象における藻食性動物の grazer としての役割に端的に見られるような様々なトップダウン効果がサンゴ礁生態系の群集構成の量的・質的な変遷に有意に作用している効果を表現することができない。こうした問題点が、サンゴ礁生態系の複雑な構造と機能をモデル化する上での最大のボトルネックとなっている。

2. 研究の目的

様々な環境ストレスの複合的な影響を受けて急速に劣化が進行しつつあるサンゴ礁生態系に関して、その適切な保全策の立案等に学術面から貢献し得る強力なツールとして、「ボトムアップ・トップダウン 2way 連成型サンゴ礁生態系モデル」と名づけた新たなモデル体系を、関連するモニタリング・分析技術とともに開発する。具体的には、既に開発済みのサンゴ内部モデル(ポリプモデル)をコアモデルとしたボトムアップ型モデル体系をベースに、多様な trophic level の消費者ギルドからなるトップダウン効果の実態を解明し、モデル化することでモデル体系に取り込み、上記のボトムアップモデルと有機的に連成させる形のモデル構成とする。そのために、本研究では、以下の諸課題に取り組む。

1) 一次消費者・高次捕食者を含めた trophic network 全体の時空間動態と機能を明らか

にするための暗視水中ビデオ解析技術および化合物別同位体比分析・同位体分布シミュレーション技術の開発と現地計測への応用

- 2) Trophic network における基底資源（底生付着藻類、サンゴ粘液、外洋由来 POM）の動態解明
- 3) サンゴポリプ内部モデルと同様に、海草・藻類の内部過程をモデルすることにより、その基本的な代謝特性や環境ストレス応答過程を定量的に記述できる海草・藻類内部モデルを開発。
- 4) これらに基づく、食物網の中心的なチャンネルの同定とそのフラックス動態のモデル化や、主要な基底資源としてのサンゴ粘液の生成過程を含めたポリプモデルの高度化等に基づく、「ボトムアップ・トップダウン 2way 連成型サンゴ礁生態系モデル」の開発
- 5) モデルを実際に構成し駆動していく上で不可欠な情報となる、サンゴ礁内の種々の群集の 3 次元構造や種構成の空間分布を把握するための新たな高精細 3 次元マッピング技術の開発
- 6) 以上により、食物網構造を含む生物多様性が生態系の安定性と復元力に対して有する役割を表現可能な生態系モデル体系を確立し、レジリエンス強化策へ貢献するための応用解析を行う

3. 研究の方法

急速に劣化が進行しつつあるサンゴ礁生態系に関して、適切な保全策の立案等に学術面から貢献し得る強力なツールとして、サンゴ礁生態系の動態を定量的に評価可能な新たなモデル体系を開発する。特に、食物網構造を含む生物多様性が生態系の安定性と復元力に対して有する役割を定量的に記述し予測可能とするべく、開発済みのサンゴ内部モデルをコアとしたボトムアップ型モデル体系をベースに、多様な食物段階の消費者ギルドからなるトップダウン効果の実態を解明することでモデルに取り込み、ボトムアップモデルと有機的に連成させた従来にないモデル体系を構築する。そのために、高次捕食者を含めたネットワーク全体の構造と機能を、基底資源動態とともに解明しモデルに反映させる。また、主要一次生産者としてのサンゴや海草、大型藻類等の群集構造や消費者としての底生動物、魚類等の包括的高精度 3 次元マッピング技術を開発する。

4. 研究成果

- 1) 対象海域の生物群集の分布を精度良く推定するために、マルチスペクトル衛星画像を用いて、従来の spectral unmixing 法に加え、GLCM を用いたテクスチャの分類手法を組み込むことで分類精度を向上させることが可能であることを明らかにした。また、spectral unmixing 法等を基礎とした衛星画像解析による海底地形および海底被覆分類マッピング技術を高度化することにより、各種リモートセンシング画像に基づくサンゴ礁内のサンゴ、海草等の主要一次生産者の空間分布や水深のマッピング技法を石垣島の白保サンゴ礁や名蔵湾などの重点調査サイトに適用することにより、海底地形図および海底被覆分類マップを作成した。さらに、機械学習アルゴリズム等に基づく新たなサンゴ礁海域高精度水深マッピング・海底被覆分類技術を開発するとともに、drone による高解像度サンゴ礁マッピング技術の開発を行った。
- 2) 長期モニタリングデータ解析に基づくサンゴ礁生態系への陸源負荷の実態解明とモデル化を行った。
- 3) ボトムアップ型のサンゴ礁生態系モデルの開発にむけて、研究対象海域の海水を用いた植物プランクトンの飼育実験を行い、その結果をもとに、植物プランクトンを trophic network の起点とする低次生態系モデルを完成させた。この低次生態系モデルを流動モデルと結合させることで、陸域からの栄養塩負荷の程度により増殖する植物プランクトンの構成の違いなどが再現できるようになった。また、オニヒトデによるトップダウン効果を考慮するためのオニヒトデの群集動態モデルの開発も行った。サンゴや海草、海藻の飼育実験を行い、それぞれの基底資源に関するモデルの高度化を進めるとともに、サンゴポリプモデル (Nakamura et al., 2013) をコアとしリーフスケール流動モデルとカップリングさせたボトムアップ型モデルのフレームワークを完成させた (Nakamura et al., 2018)。そして、開発した高精度分類マッピング技術およびボトムアップ型モデルを白保サンゴ礁に適用し、観測値と数値シミュレーション結果とを比較することでモ

デルの精度検証を行った。さらに、サンゴポリプロモデルを白化現象を明示的に評価可能な形に高度化することによって、サンゴ礁スケールの高温ストレス応答過程を定量的に評価可能なモデル体系を構築し、将来的な温暖化シナリオに対するサンゴ礁生態系の応答予測を可能とした (Nakamura et al., in review)。炭素同位体データとの比較を行うために、このモデル体系に炭素同位体の動態を表現するためのモジュールの組み込みを行った。ただし、実際の同位体データと比較、検証するまでには至らなかった。

- 4) 各種基底資源から上位捕食者に至る食物網の中のいくつかの重要なステップについて、その定量的な実証を目指し、新しい実験技術の開発や分析技術の適用を試みた。まず底生微細藻類や海草類などの底生一次生産者から消費者群集への資源移行を定量化するための重水素トレーサー法を応用した実験法を開発した。各種底生動物群が主に依存する基底資源とそこからの食物段階を炭素・窒素安定同位体比で評価しつつ、同時に資源移行速度(回転時間)を重水素トレーサーによって定量するもので、サンゴ礁に隣接する海草藻場の底生動物群集に適用した場合、食物網を定量評価する有効な方法であることが立証された。同様の方法をサンゴ粘液を基底資源とする食物網の評価にも応用しようとしたが、サンゴ粘液を重水素ラベルする効率が上がらず、必ずしも良好な結果が得られなかった。第二に、プランクトンや沈降粒子を基底資源とする食物網を定量評価するために、プランクトンのサイズ分画及び季節別の沈降粒子試料について安定同位体比分析を実施した。並行して、サンゴの共生藻とサンゴ組織を分別して安定同位体比を評価するための技術改良を行った。予想されるように二枚貝などの懸濁物食性底生動物はプランクトン資源に強く依存していたが、これらの基底資源に対するサンゴの依存度は低いことが示唆された。第三に、各基底資源から高次捕食者まで流れる資源流量比がどのように規定されているかを解明するための手法として、高次捕食者(魚食性魚類のニジハタ)のバルク安定同位体比とアミノ酸窒素同位体比を測定した。しかし4箇所の異なるサンゴ群集で比較したところどちらのパラメータも有意な差がなく、高次捕食者の資源依存度がサンゴ群集によって異なるかどうかは確定できなかった。
- 5) 石垣島南西部の名蔵湾近辺で、2015年度から2018年度にかけて環境勾配に沿った複数の地点を設定し、潜水目視調査で造礁サンゴ類および魚類(チョウチョウウオ科・アイゴ科・キンチャクダイ科・ブダイ科・ニザダイ科・スズメダイ科)の分布調査を行った。2016年にサンゴの大規模白化が起き、ミドリイシ類やハマサンゴ類が白化により死亡したため、それに伴うスズメダイ科魚類の個体数と種数の変化を記録した。サンゴ礁生態系のレジリエンスに及ぼす藻食魚類の影響を調べるため、プレートを用いた野外実験を行った。ケージで囲ったプレートには数ヶ月で大型藻類が繁茂した。藻類が繁茂したプレートおよび水中ビデオカメラを用いて、藻類の除去効果をもつ潜在的な種を調べたところ、繁茂した大型藻類を摂食するグループ(アイゴ類、ニザダイ類のテングハギ属)とプレート表面に付着する微細藻類を摂食するグループ(ブダイ類、ニザダイ類のクロハギ属)の2タイプがいることがわかった。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計16件)

Muko, S., Suzuki, G., Saito, M., Nakamura, T., Nadaoka, K. (2019): Transitions in coral communities over 17 years in the Sekisei Lagoon and adjacent reef areas in Okinawa, Japan, *Ecological Research*, 2019.06. <https://doi.org/10.1111/1440-1703.12013> (査読有)

Mohamed, H. and Nadaoka, K. (2019): Assessment of a Hybrid-Based Approach with a Random Forest Ensemble for Determination of Shallow Water Depths from Multispectral Satellite Images, *Int. J. Geoinformatic.*(査読有)

Ratino Sith, Atsushi Watanabe, Takashi Nakamura, and Kazuo Nadaoka (2019): Assessment of water quality and evaluation of best management practices in a small agricultural watershed adjacent to Coral Reef area in Japan. *Agricultural Water Management*, 213, 659-673. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.11.014> (Published Online: 22 November 2018, 査読有);

Hassan Mohamed, Kazuo Nadaoka, and Takashi Nakamura (2018): Assessment of Machine Learning Algorithms for Automatic Benthic Cover Monitoring and

Mapping Using Towed Underwater Video Camera and High-Resolution Satellite Images. *Journal of Remote sensing*, 10, 773. <https://doi.org/10.3390/rs10050773> (Published Online: 17 May 2018, 査読有)

Takashi Nakamura, Kazuo Nadaoka, Atsushi Watanabe, Takahiro Yamamoto, Toshihiro Miyajima, Ariel C. Blanco (2018): Reef-scale modeling of coral calcification responses to ocean acidification and sea-level rise. *Coral Reefs* 37, 37-53. <https://doi.org/10.1007/s00338-017-1632-3> (Published Online: 30 October 2017, 査読有)

Atsushi Nanami (2018): Spatial distributions, feeding ecologies, and behavioral interactions of four rabbitfish species (*Siganus unimaculatus*, *S. virgatus*, *S. corallinus*, and *S. puellus*), *PeerJ*, 6, e6145, 10.7717/peerj.6145 (査読有)

Lawrence Patrick C. Bernardo, Kazuo Nadaoka, Takashi Nakamura, Atsushi Watanabe (2017): Island-enhanced cooling mechanism in typhoon events revealed by field observations and numerical simulations for a coral reef area, Sekisei Lagoon, Japan. *Ocean Dynamics*, 67(11), 1369-1384. <https://doi.org/10.1007/s10236-017-1096-6> (Published Online: 6 September 2017, 査読有)

Hassan Mohamed, and Kazuo Nadaoka (2017): Assessment of Machine Learning Approaches for Bathymetry Mapping in Shallow Water Environments using Multispectral Satellite Images, *International Journal of Geoinformatics*, 13(2) (査読有) <http://journals.sfu.ca/ijg/index.php/journal/article/view/1030/559>

Ratino Sith and Kazuo Nadaoka (2017): Comparison of SWAT and GSSHA for High Time Resolution Prediction of Stream Flow and Sediment Concentration in a Small Agricultural Watershed, *Hydrology*, 4(2), 27. <http://dx.doi.org/10.3390/hydrology4020027> (Published Online: 4 May 2017, 査読有)

Ankita P. Dadhich, Kazuo Nadaoka, Yuki Motomura, Atsushi Watanabe (2017): Potential impacts of land use change dynamics and submarine groundwater discharge on fringing reefs of Kuroshima Island, Japan, *J. Coast Conserv*, 21: 245-254. <http://dx.doi.org/10.1007/s11852-017-0495-7> (Published Online: 24 January 2017, 査読有)

Ratino Sith, Takahiro Yamamoto, Atsushi Watanabe, Takashi Nakamura, Kazuo Nadaoka (2017): Analysis of red soil sediment yield in a small agricultural watershed in Ishigaki Island, Japan, using long-term and high resolution monitoring data, *Environmental Processes*. <http://dx.doi.org/10.1007/s40710-017-0217-z> (Published Online: 2 March 2017, 査読有)

Charissa M. Ferrera, Toshihiro Miyajima, Atsushi Watanabe, Yu Umezawa, Naoko Morimoto, Maria Lourdes San Diego-McGlone, Kazuo Nadaoka (2016): Variation in oxygen isotope ratio of dissolved orthophosphate induced by uptake process in natural coral holobionts. *Coral Reefs*, 35(2), 655-668. <http://dx.doi.org/10.1007/s00338-015-1378-8> (Published online: 23 November 2015, 査読有)

Atsushi Nanami (2016) Parrotfish grazing ability: interspecific differences in relation to jaw-lever mechanics and relative weight of adductor mandibulae on an Okinawan coral reef. *PeerJ*, 4, e2425, DOI 10.7717/peerj.2425, (査読有)

[学会発表](計 26 件)

中村 隆志, 灘岡 和夫, 樋口 富彦, 宮島 利宏, 山本 高大, 渡邊 敦, Ariel C. Blanco (2018) : サンゴの生体内応答を基にした白化現象のモデル化と礁スケールへの拡張、日本サンゴ礁学会第21回大会

名波 敦 (2018) : サンゴ礁に生息するアイゴ科 4 種の空間分布・摂餌生態・行動特性、日本魚類学会

宮島 利宏, 森本 直子, 田中 泰章, 渡邊 敦, 中村 隆志, 山本 高大, 灘岡 和夫 (2016) : サンゴ礁生態系における懸濁粒子・沈降粒子の炭素・窒素安定同位体比時空間分布、日本地球惑星科学連合 2016 年大会

瀧戸健太郎, 中村隆志, 灘岡和夫 (2015) : WorldView-2 画像を用いたテクスチャ及びスペクトル解析によるサンゴ礁域の海底被覆分類と水深推定 . 日本サンゴ礁学会第 1 8 回大会

〔図書〕(計0件)

〔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：
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：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：宮島 利宏
ローマ字氏名：Toshihiro Miyajima
所属研究機関名：東京大学
部局名：大気海洋研究所
職名：助教
研究者番号(8桁)：20311631

研究分担者氏名：中村 隆志
ローマ字氏名：Takashi Nakamura
所属研究機関名：東京工業大学
部局名：環境・社会理工学院
職名：准教授
研究者番号(8桁)：20513641

研究分担者氏名：名波 敦
ローマ字氏名：Atsushi Nanami
所属研究機関名：国立研究開発法人水産研究・教育機構
部局名：西海区水産研究所
職名：主任研究員
研究者番号(8桁)：90372060

研究分担者氏名：渡邊 敦(H27-29年度)
ローマ字氏名：Atsushi Watanabe
所属研究機関名：東京工業大学
部局名：環境・社会理工学院
職名：助教
研究者番号(8桁)：00378001

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：
ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。