

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26610167

研究課題名（和文）サンゴのvital effect解明および補正のためのポリプスケールモデリング

研究課題名（英文）Coral polyp-scale modeling for elucidating vital effect of coral skeletal record

研究代表者

中村 隆志（Nakamura, Takashi）

東京工業大学・環境・社会理工学院・講師

研究者番号：20513641

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：サンゴ骨格に記録される炭素安定同位体比のvital effectを解明するために、Nakamura et al. (2013)によって開発済みのサンゴポリプモデルに組み込む炭素同位体の拡張モジュールの開発を行った。このモデルを用いた数値実験により、サンゴ骨格の炭素安定同位体比のvital effectは呼吸由来の無機炭素が石灰化に使用されることで引き起こされることが分かった。また、このモデルによってサンゴ年輪に記録される炭素同位体比の年周変動も再現された。この年周変動は、サンゴ組織の炭素同位体比の変動と連動しており、この変化は主に日射量の年周変動に起因する光合成速度の年周変動に起因する。

研究成果の概要（英文）：To elucidate the 'vital effect' of carbon stable isotope recorded in coral skeleton, carbon isotope module for incorporating to the coral polyp model which was already developed by Nakamura et al. (2013) was developed. The results of this model simulation were suggested that the vital effect of the carbon isotope is occurred by that the CO<sub>2</sub> derived from coral respiration was used calcification. Moreover similar annual patterns of <sup>13</sup>C in coral skeleton were reproduced by this model. This annual patterns are caused mainly by annual fluctuation of <sup>13</sup>C values in the coral tissue which are occurred by photosynthetic activity related to annual variation of the solar irradiance.

研究分野：生態系モデリング、沿岸生態学

キーワード：サンゴ 炭素同位体比 vital effect モデリング 数値シミュレーション

## 1. 研究開始当初の背景

ハマサンゴなどに代表される塊状の造礁サンゴは年間 1cm 程度の速さでアラゴナイト骨格を付加成長し、中には直径 5m 以上にまで成長した巨大群体も多数確認されている。これらのサンゴ骨格には明瞭な年輪が認められるため、骨格に含まれる様々な化学成分を分析することで数百年の時間スケールを数週間～ヶ月程度の時間分解能で古環境を記録していると考えられている。そのため、サンゴ骨格記録から古環境を復元する試みがこれまでも盛んに行われている。しかし、サンゴ骨格の各化学成分は生物作用(vital effect)を受けて同位体平衡や化学平衡状態から大きくずれてしまうことが知られている。これは、生物体内での酵素反応や物質移動に起因すると考えられるが、その詳しいメカニズムは良く分かっていない。さらに、その挙動は個々のサンゴによっては異なることが知られている。そのことは、有益な古環境データを抽出する上で大きな障害となっている。既存の研究では、この vital effect の問題はサンゴの生息域の環境データを用いて vital effect の補正を行い、より過去のデータへ適用していくという、いわば対症的な手法で回避してきた。しかし、この手法は環境データの乏しい海域や、化石のサンゴ骨格記録などでは限界がある。そのような状況下であるものの、いくつかの仮定を置くことで、酸素同位体比は水温や塩分のプロキシとして、また Sr/Ca は水温のプロキシとして、一定の成果を上げている(例えば Asami et al., 2005; Watanabe et al., 2011)。しかし、サンゴ骨格の炭素同位体比 ( $^{13}\text{C}$ ) については、明瞭な年周変動が認められるにも関わらず、その変動要因の解明に至っておらず、古環境プロキシとしての有用な情報が引き出せていないのが現状である。

## 2. 研究の目的

本研究では、特にサンゴ骨格に記録される  $^{13}\text{C}$  に着目し、vital effect のメカニズムをサンゴの生体内の物理・化学・生理過程を詳細に表現した数理モデルを構築することによって明らかにする。また、実際にサンゴ骨格の分析を行っている古気候・古環境学者が広く使用できるように、オープンソースのソフトウェアとして開発を行う。

## 3. 研究の方法

Nakamura et al. (2013)によって開発されたサンゴポリプモデルは、体内の物質のマスバランスや物質のパスが詳細に記述されていることが特徴である。そのため、炭素同位体のマスバランスを追加で記述することで、比較的容易に炭素同位体を含んだモデルを構築することができる。そこで、既存のモデル

(図 1a)に炭素同位体モジュール(図 1b)を組み込むことで炭素同位体の挙動を含んだサンゴポリプモデルを開発した。その際に、先行研究によるサンゴ骨格の炭素同位体比の vital effect を引き起こすメカニズムとして、1) 呼吸由来の軽い二酸化炭素を石灰化に使用している (e.g. Goreau 1977)、2) 二酸化炭素の水和および水酸化の際に引き起こされる動的な同位体効果 (e.g. McConnaughey et al. 1997) の二つが主な仮説として挙げられるため、それぞれのプロセスを組み込んだ炭素同位体モジュールを開発した。そして、これを用いて、どちらの仮説が尤もらしいかの検証を行った。

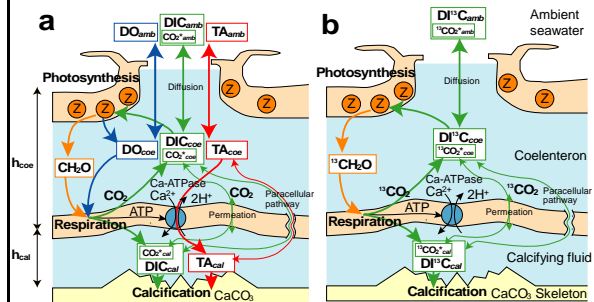


図 1. サンゴポリプモデルの概要。(a) 全炭酸、アルカリ度、溶存酸素のマスバランス (Nakamura et al. 2013 より改変)。(b)  $^{13}\text{C}$  のマスバランス。

サンゴ骨格の  $^{13}\text{C}$  の変動は環境の海水中の全炭酸の  $^{13}\text{C}$  の値にも影響することが示唆されている。しかし、サンゴ礁海域における環境水中の  $^{13}\text{C}$  の値は、サンゴ礁生態系による代謝の影響を受けて、大きく変動することが確認されている。そこで、そのような環境を再現し、環境水的全炭酸の  $^{13}\text{C}$  の影響を評価するために、炭素同位体の挙動を含んだサンゴ礁生態系の流動 - 物質循環モデルの開発も行った。このモデルはサンゴポリプモデルをカップリングさせたサンゴ礁流動 - 物質循環モデル (Nakamura et al., in review) に炭素同位体モジュールを付加する形で開発を行った。これによって、サンゴ礁海域の炭酸系の挙動やそれに伴う光合成速度の変化および全炭酸の  $^{13}\text{C}$  の時空間変動を同時に解き、サンゴの生体組織の有機炭素の  $^{13}\text{C}$  やサンゴ骨格の  $^{13}\text{C}$  がどのように応答するかを調べた。

## 4. 研究成果

### (1) Vital effect のメカニズムの検証

サンゴ骨格の  $^{13}\text{C}$  の vital effect を引き起こすメカニズムとして考えられている以下の二つの仮説：1) 呼吸由来の軽い二酸化炭素を石灰化に使用している (e.g. Goreau 1977)、2) 二酸化炭素の水和および水酸化の際に引き起こされる動的な同位体効果 (e.g. McConnaughey et al. 1997) の二通りのプロ

セスをモデルに組み込み、数値シミュレーションを行った結果、1) の仮説を組み込んだモデルは、-3~-4‰程度の同位体分別を十分再現できた。一方で、2)のみで-3~-4‰の同位体分別を再現しようとした場合、細胞間を流れる物質のパスをかなり制限した状態でしか引き起こすことができず、その場合、石灰化母液内の炭酸種が枯渇してしまい十分な石灰化が起こらなくなることが確認された。そのため、vital effect のメカニズムとして、1)が有力である可能性が高いことが分かった。そこで、以降の数値シミュレーションでは、1)のプロセスが組み込まれたモデルを用いた。

## (2) サンゴ骨格に記録される年周変動の再現

サンゴ骨格の  $^{13}\text{C}$  には明瞭な年周変動が記録される。そこで、このモデルを用いて骨格に記録されているこの年周変動を再現することができるかを検証した。この際に、毎日の日射量の変化をおよび日射量の年周変化をインプットデータとして与えて数値シミュレーションを行った(図 2a, オレンジ線)。モデルの数値シミュレーションの結果、計算されたサンゴ骨格のアラゴナイトの  $^{13}\text{C}$  は夏~秋にかけて低く冬~春に高くなる明瞭な年周変動が再現された(図 2a, 青線)。また、 $^{13}\text{C}$  の変動幅も、1~2‰程度であり実際の変動幅を良く再現できていると言える。サンゴの生体組織中に蓄積している有機物量(図 2b, 緑線)とサンゴ組織の有機炭素の  $^{13}\text{C}$  の年周変動パターン(図 2b, 赤線)から、日射量のピークを過ぎたあたりの積算の光合成量がピークを迎える夏~秋に有機炭素の蓄積量が増えるとともに、有機炭素の  $^{13}\text{C}$  の値が減少していき、蓄積量が減る冬~春に有機炭素の  $^{13}\text{C}$  の値が増加している様子が確認される。これは、高い光合成速度によって、同位体分別効果が大きく働いた結果と考えられる。サンゴ骨格のアラゴナイトの  $^{13}\text{C}$  に見られる vital effect のメカニズムとして、前述の 2)のプロセスを採用したことから、呼吸由来の炭素が石灰化に直接的に使用されている。呼吸によって放出される  $\text{CO}_2$  には、その炭素起源である生体組織からの同位体分別は起こらないとされているため、呼吸由来の  $\text{CO}_2$  の  $^{13}\text{C}$  の値は、サンゴ組織の  $^{13}\text{C}$  の値を反映する。そのため、骨格の  $^{13}\text{C}$  の変動は、主にサンゴ組織の  $^{13}\text{C}$  の変動に依存する。

実際のサンゴ骨格記録に見られる炭素同位体比の変動パターンは、骨格の酸素同位体比の変動パターンと正の相関がある場合が多い。酸素同位体比が低いことは水温が高いことを意味しているため、炭素同位体比と酸素同位体比が正の相関があることは、実際の炭素同位体比の記録においても、夏ごろに  $^{13}\text{C}$  の値が低く、冬ごろに  $^{13}\text{C}$  の値が高くなる傾向があることを示しており、これはシミュレーション結果と調和的である。

ユレーション結果と調和的である。一方で、実際の骨格記録には、これとは逆の変動をするものも確認されている(Omata et al., 2005)。また、サンゴ骨格に記録された炭素同位体比の年周変動変化幅は 3 ‰程度であるのに対し、モデルでは 1~2 ‰程度の変化幅しか再現できなかった。そのため、残りの 1~2‰程度の変化は他の原因を考える必要がある。本シミュレーションでは、環境水中の全炭酸の  $^{13}\text{C}$  の値は一定と仮定して計算を行っている。しかし、実際のサンゴ礁域では、全炭酸の  $^{13}\text{C}$  の値はサンゴ礁生態系の光合成や呼吸、石灰化といった代謝の影響を受け、2‰程度は日周変動することが知られている。また、外洋水の全炭酸の  $^{13}\text{C}$  の値も全球的な光合成生産の影響を受け、1‰程度の年周変動があることが知られている(例えば Tanaka et al., 2003)。そのため、サンゴ骨格の  $^{13}\text{C}$  記録がモデルと合わない原因として、環境水の全炭酸の  $^{13}\text{C}$  の変動が考えられる。

今後さらなる検討が必要であるが、このモデルを用いてサンゴ骨格の炭素同位体比の記録を解析することで、もし日射量が既知であれば、環境水中の全炭酸の  $^{13}\text{C}$  の値を復元できる可能性がある。実際、日射量は気象庁の観測所の観測値や、NCEP/NCAR もしくは JRA-55 等の再解析プロダクトによって推定が可能なので、今後、上記のような解析ができるようになる可能性は高い。

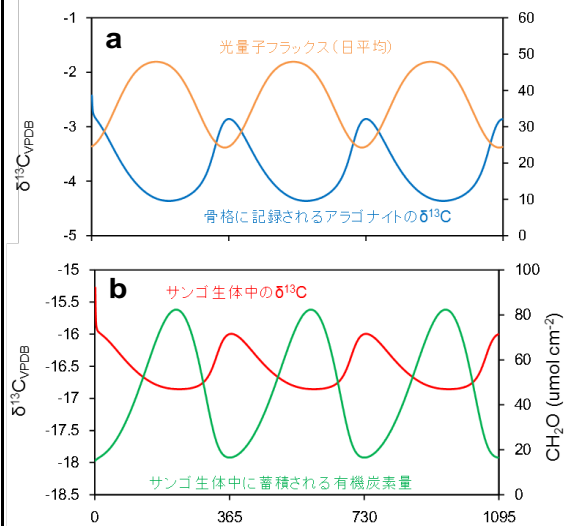


図 2. モデルへのインプットとして与えた光子フラックスの年周変動 (a; オレンジ線) および、モデルの数値シミュレーションによって計算された、骨格に記録されるアラゴナイト中の炭素同位体比の年周変動 (a; 青線)、サンゴ生体組織中に蓄積された有機炭素量 (b; 緑線) およびその炭素同位体比 (b; 赤線)。

## (3) 環境水の全炭酸の $^{13}\text{C}$ の代謝による影響とサンゴ骨格の $^{13}\text{C}$ への相互作用

前述のように、サンゴ骨格の  $^{13}\text{C}$  記録は、環境水の全炭酸の  $^{13}\text{C}$  影響も強く受けている可能性が高いことから、炭素同位体モジュールを組み込みサンゴポリプモデルとカップリングさせたサンゴ礁流動 - 物質循環モデル (Nakamura et al., in review) を石垣島白保サンゴ礁域へ適用し、その検証を行った。

モデルの数値シミュレーションによって海水中の全炭酸の  $^{13}\text{C}$  の時空間変動と、その変動下における、サンゴ組織の有機炭素の  $^{13}\text{C}$  の時空間分布について調べた結果、海水中の全炭酸の  $^{13}\text{C}$  の値は、大きく時空間変動する様子が見られた (図3)。その変化は主に光合成で軽い炭素が使われることによって、全

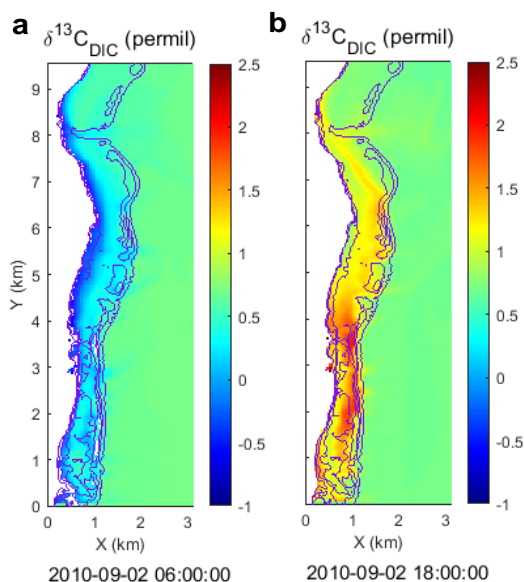


図3. 海水中の全炭酸の炭素同位体比の時空間分布。(左)明け方6:00 (右)夕方18:00。

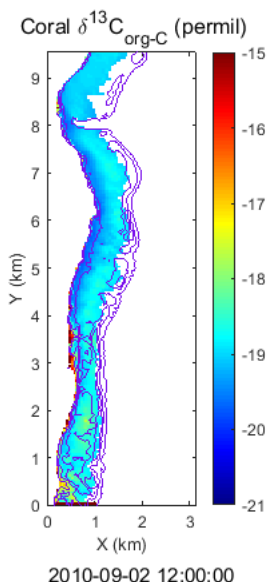


図4. サンゴ生体組織の有機炭素の炭素同位体比の時空間分布。

炭酸の  $^{13}\text{C}$  の値は昼に高くなり、逆に夜間は呼吸由来の軽い炭素が放出されることにより  $^{13}\text{C}$  の値は低くなる。しかし、生物の分布や流動環境、滞留時間等の違いによって、大きく空間的な変化も非常に大きいことが分かる。サンゴ生体組織の有機炭素の  $^{13}\text{C}$  の値は、このローカルな環境水の全炭酸の  $^{13}\text{C}$  の影響を受け、空間的に大きく不均質になっていることが分かる (図4)。

サンゴ骨格の  $^{13}\text{C}$  記録は、前述のようにサンゴ組織の  $^{13}\text{C}$  の値の影響を大きく受ける。そのため、このようなローカルな環境水の全炭酸の  $^{13}\text{C}$  の不均質性が、サンゴ骨格の  $^{13}\text{C}$  記録の解釈の難しさを増している可能性が高い。実際にローカルな環境水の全炭酸の  $^{13}\text{C}$  変動を観測し続けることは容易ではないが、このように数値シミュレーションを用いてローカルな環境水の全炭酸の  $^{13}\text{C}$  時空間変動を計算することによって、今後、サンゴ骨格の  $^{13}\text{C}$  記録の解釈が大きく進展するものと期待される。なお、本研究で開発したモデルのプログラムコードは、オープンソースとして以下の Web サイト (<https://github.com/NakamuraTakashi>) に公開している。

#### 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 1件)

Higuchi T, Yuyama I, Nakamura T (2015) The combined effects of nitrate with high temperature and high light intensity on coral bleaching and antioxidant enzyme activities. *Regional Studies in Marine Science*: 2:27-31. doi: 10.1016/j.rsma.2015.08.012. 査読有り

[学会発表](計 10件)

Takashi Nakamura, Kazuo Nadaoka, Tomihiko Higuchi, Toshihiro Miyajima, Takahiro Yamamoto, Atsushi Watanabe. Modeling coral bleaching based on dynamics of zooxanthellae population and reactive oxygen species inside a coral polyp, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 千葉県千葉市 (幕張メッセ) 2017年5月20日-25日。(口頭)

中村隆志. サンゴ礁生態系のモデリングと数値シミュレーション, 日本サンゴ礁学会第19回大会 自由集会、沖縄県那覇市 (沖縄タイムスビル), 2016年12月1日-4日。(口頭)

天野慎也, 出浦敬之, 中村隆志, 栗原晴子, 渡邊敦, 宮島利宏, 灘岡和夫. サンゴ、海藻および海草の代謝応答のモデル化, 日本サンゴ礁学会第19回大会、沖縄

県那覇市（沖縄タイムスビル），2016年12月1日-4日。（ポスター）

出浦敬之，天野慎也，中村隆志，渡邊敦，栗原晴子，宮島利宏，灘岡和夫．飼育実験によるサンゴ群体の有機物動態の解明，日本サンゴ礁学会第19回大会、沖縄県那覇市（沖縄タイムスビル），2016年12月1日-4日。（ポスター）

Takashi Nakamura，Kazuo Nadaoka，Atsushi Watanabe，Takahiro Yamamoto．Reef-scale model system for evaluating and predicting coral responses to ocean acidification and sea-level rise，13th International Coral Reef Symposium，Hawaii，USA，2016年6月19日-24日

中村隆志，灘岡和夫，渡邊敦，山本高大．サンゴの環境変化に対する応答を評価・予測するためのリーフスケールモデリングシステム，日本地球惑星科学連合2015年大会、千葉県千葉市（幕張メッセ）2015年5月24日-28日。（口頭）

Ferrera Charissa M，渡邊敦，灘岡和夫，梅澤有，森本直子，中村隆志，宮島利宏．造礁サンゴによるリンの取込が溶存態リン酸の酸素安定同位体比に与える効果，日本地球惑星科学連合2015年大会、千葉県千葉市（幕張メッセ）2015年5月24日-28日。（ポスター）

Nakamura T (2015) Circulation and coral polyp modelling, Moorea IDEA Physical Modelling Workshop, ETH Zurich, Switzerland, 2015年3月9日-11日（口頭）

中村隆志、灘岡和夫、山本高大、渡邊敦：サンゴポリプモデルの拡張に基づくリーフスケール白化シミュレーション．日本サンゴ礁学会第17回大会、高知県高知市（高知城ホール）2014年11月27日-12月1日（口頭）

Takashi Nakamura，Kazuo Nadaoka，Atsushi Watanabe Takihiro Yamamoto：Reef-scale modeling system for evaluating and predicting coral responses to future environmental changes．3rd Asia-Pacific Coral Reef Symposium，Pingtung Taiwan (Howard Hotel)，2014年6月23日-27日（口頭）

〔図書〕（計 0件）

〔その他〕

作成したプログラムの公開サイト

<https://github.com/NakamuraTakashi>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中村 隆志（NAKAMURA, TAKASHI）

東京工業大学・環境・社会理工学院・講師  
研究者番号：20513641

(2) 研究分担者  
なし

(3) 連携研究者  
なし

(4) 研究協力者  
なし