

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：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22740336

研究課題名（和文） 造礁サンゴ生体内における石灰化機構の解明

研究課題名（英文） Elucidation of the calcification mechanism inside the hermatypic corals

研究代表者

中村 隆志（NAKAMURA TAKASHI）

東京工業大学・大学院情報理工学研究科・東工大特別研究員

研究者番号：20513641

研究成果の概要(和文):造礁サンゴの石灰化機構を解明するために、サンゴの生体内の反応や物質移動を詳細に記述したサンゴポリプモデルを開発した。このモデル研究によって、サンゴの石灰化に見られる“光に促進された石灰化(light-enhanced calcification)”現象のメカニズムを明らかにし、数値シミュレーションの結果はこの現象を良く再現した。さらに、サンゴ骨格に記録される炭素同位体比の生物効果(vital effect)の実態を解明する目的で、このモデルに炭素同位体モジュールを組み込んだ新たなポリプモデルを開発した。このモデルによるシミュレーションの結果、サンゴ骨格の炭素同位体比記録に近い値や変動パターンが再現された。

研究成果の概要(英文):To clarify calcification mechanism of hermatypic corals, a coral polyp model under more realistic and comprehensive assumptions on physical, chemical and physiological processes was developed. The mechanism of “light-enhanced calcification” phenomenon was clarified by the model study, and the simulation result of the model well reconstructed the phenomenon. Moreover to shed light on the “vital effect” of the skeletal records of carbon stable isotope ratio, a carbon isotope module for the coral polyp model was developed and it was incorporated into the polyp model. The modified model reconstructed reasonable values and clear seasonal variations of skeletal carbon isotope ratio.

交付決定額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			0
年度			0
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野:数物系科学

科研費の分科・細目:地球惑星科学・層位・古生物学

キーワード:造礁サンゴ、古環境復元、石灰化、モデル、数値シミュレーション、炭素同位体比、vital effect

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 程度アラゴナイト骨格を付加成長し、明瞭な年輪が認められる。しかも、中には数百年は生息した巨大群体も見られる。そのため、数百年の時間スケールを数週間～一ヶ月程度の時間分解能で古環境を復元するためのツールとして、これまで盛んに研究がおこなわれてきた。特に骨格の酸素安定同位体比には海水の酸素同位体比や水温を反映していると考えられ、水温や塩分の指標として盛んに研究が行われている。

一方、サンゴ骨格中の炭素同位対比は酸素同位対比の分析を行う際に付随的に測定されるため、多くのデータの蓄積がある。しかも、炭素同位体比にも明瞭な年周期が認められるため、何かしらの環境を記録していると考えられる。しかし、炭素は骨格に固定されるまでにサンゴの体内で光合成や呼吸・石灰化など生物作用(vital effect)を受けるため、どのような要因で変動するのは良く分かっていない。そのため、有益な古環境指標を抽出出来ずにいるのが現状である。

このような状態であるのは、サンゴ生体内での化学反応や物質移動を定量的に評価するに至っておらず vital effect のメカニズムが十分に解明できていないことに原因がある。

2. 研究の目的

上述の問題を解決するためには、サンゴ生体内の化学反応や物質移動を詳細に表現したモデルを構築することが、有効な手段の一つである。そこで本研究では、まずサンゴの内部応答を忠実に再現したポリプスケールでの光合成・呼吸・石灰化のモデル(サンゴポリプモデル)の構築を目的とした。次に、そのサンゴポリプモデルに、炭素同位体のマスバランスを考慮した、炭素同位体モジュールを付加することで、骨格に記録される炭素同位体比の vital effect のメカニズムを明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1)サンゴポリプモデルの開発

サンゴの石灰化には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(McConnaughey and Falk 1991; McConnaughey and Whelan 1997; Allemand et al. 2004) を基に定式化を行った。これは、カルシウム ATP アーゼ(Ca-ATPase)が腔腸からCa²⁺を石灰化母液に能動輸送すると共に2H⁺を石灰化母液から除去して石灰化を促進させるとするメカニズムである。本研究で構築したポリプモデルでは、周囲の海水、腔腸内、石灰化母液の全炭酸やアルカリ度の収支を、物質移動や光合成、呼吸、石灰化、Ca-ATPase による能動輸送などによるフ

ラックスを計算することでモデル化を行っている(図1)。光合成速度は主に光と腔腸内のHCO₃⁻濃度に依存する関数として表現し、呼吸速度は光合成生産物の注入速度と貯蔵されている有機物の濃度に依存する関数で表現した。また、石灰化速度は石灰化母液のアラゴナイト過飽和度を用いて、無機沈殿/溶解実験で求められた関係式(Burton and Walter 1990; Walter and Morse 1985)により表現した。なお、腔腸内のHCO₃⁻濃度や石灰化母液のアラゴナイト飽和度はそれぞれの部位での全炭酸とアルカリ度から平衡計算で求められる。

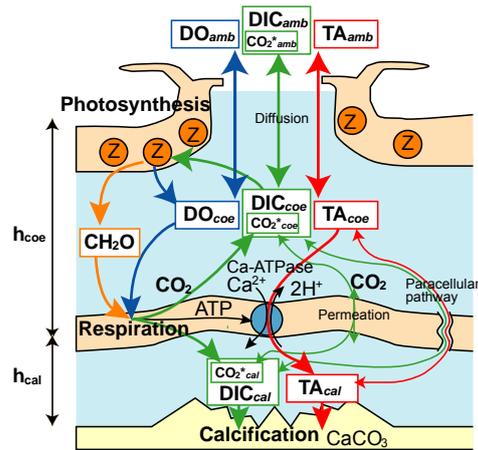


図1. サンゴポリプモデルの概念図。DOは溶存酸素濃度、DICは全炭酸濃度、TAはアルカリ度、CH₂Oは貯蓄された有機炭素濃度を示す。

(2)サンゴポリプモデルに組み込むための炭素同位体モジュールの開発

本研究で開発したサンゴポリプモデルはマスバランスが担保されているのが特徴である。そこで、サンゴの光合成や呼吸・石灰化に係る同位体分別や、膜透過の際のCO₂の同位体分別作用などを考慮した、炭素同位体モジュールを開発した(図2)。これにより、サンゴの生体組織や骨格などのδ¹³Cはマスバランス式によって計算された全炭酸と¹³Cの濃度から計算することができるようになった。

骨格に記録される炭素同位体のvital effectの主な要因としては、(1)呼吸由来の軽いCO₂を骨格の炭酸カルシウムの原料として使っている(e.g. Goreau 1977)、(2)CO₂が水合もしくは水酸化する際の反応速度が遅いため、この過程で動的同位体効果(kinetic isotope effect)を受ける(e.g. McConnaughey et al. 1997)、という二つの説が有力である。Vital effectの要因として、どちらの仮説がより正しいかを検討するため、これらのプロセスもモデルに組み込んだ。

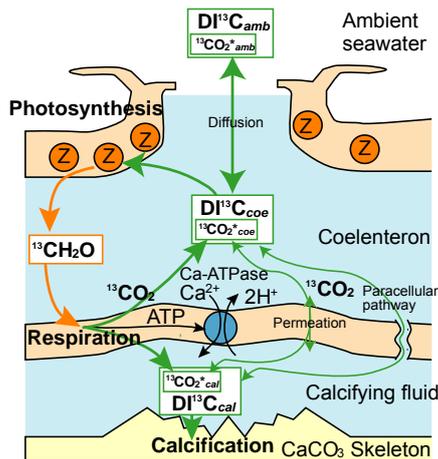


図 2. サンゴポリプモデルに組み込む炭素同位体モジュールの概念図。DI¹³C は ¹³C を含む全炭酸濃度、¹³CH₂O は貯蓄された ¹³C を含む有機炭素濃度を示す。

4. 研究成果

(1) サンゴポリプモデルの開発

サンゴの石灰化速度は日中に高く夜間に低くなるのが良く知られており、この現象は“光に促進された石灰化 (light-enhanced calcification)”と呼ばれている。サンゴの石灰化モデルでは、この現象が再現できるモデルであることが必須条件となる。本研究で開発したサンゴポリプモデルの数値シミュレーションの結果、この light-enhanced calcification が良く再現された。このモデル研究の結果、light-enhanced calcification は以下のメカニズムによって引き起こされると考えられる。(1) 夜間、サンゴの呼吸により腔腸内の溶存酸素濃度が非常に低くなる一方、日中は光合成によって腔腸内の溶存酸素濃度が高くなる。(2) 日中の高い溶存酸素濃度に促進され、昼間の呼吸速度が上がる(もしくは、夜間の低酸素濃度によって呼吸が制限される)。(3) 呼吸による ATP の生成によって、Ca-ATPase の働きが活発になり、石灰化が促進される。これまで、この light-enhanced calcification のメカニズムは良く分かっていなかったが (e.g. Allemand et al. 2004)、このモデル研究によって、そのメカニズムを提唱できたことは、本研究における大きな成果の一つである。

モデルの数値シミュレーションより計算された腔腸内や石灰化母液内の pH や腔腸内の溶存酸素濃度は、マイクロ pH 電極で計測された腔腸内や石灰化母液の pH や溶存酸素濃度の変動パターン (Al-Horani et al. 2003; Kühl et al. 1995; de Beer et al. 2000) を良く再現していることが確認された。このモデルで計算される石灰化速度のアラゴナイト飽和度に対する応答は、アラゴナイト飽和度に対して非線形で、ミカエリス・メンテン式に見られるような飽和関数に近い

応答であった。これは、Gattuso et al. (1999) や Marubini et al. (2008)、Anthony et al. (2011)、Inoue et al. (2011) らの飼育実験によって提示された関係性に非常に類似した結果となった。よって、これらの結果から、このモデルはサンゴの生体内の炭酸系の挙動を良く再現していると思われる。

(2) サンゴポリプモデルに組み込むための炭素同位体モジュールの開発

サンゴポリプモデルの開発の成功を受けて、本研究では、このサンゴポリプモデルに炭素同位体モジュールを組み込んだ、新たなポリプモデルの開発も試みた。この新たなモデルの数値シミュレーションによって見積もられたサンゴ骨格の炭素同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) は、昼の光合成や夜の呼吸などの影響を受けて非常に大きく日周変動することが認められた。しかし、このモデルのままでは、シミュレーションによるサンゴ骨格の $\delta^{13}\text{C}$ の値は、骨格記録よりずっと高く、vital effect を十分に再現できなかった。

そこで、前述の二つのメカニズム ((1) 呼吸由来の CO₂ の利用、(2) kinetic isotope effect) の二つの過程をモデルに組み込み、再度数値実験を試みた。その結果、(1) の場合では、計算によるサンゴ骨格の $\delta^{13}\text{C}$ の値は骨格記録に非常に近い値にまで下げることが成功した。一方、(2) の場合でも、パラメータの設定次第では骨格記録に近い値まで $\delta^{13}\text{C}$ の値を下げる事が出来たが、そのようなパラメータセッティングでは石灰化母液内の炭酸種が枯渇してしまい、十分な石灰化が行われないという結果となった。これらのモデル研究の結果から、サンゴ骨格の炭素同位体比の vital effect は呼吸による軽い CO₂ の流入がより重要な要因であると考えられる。ただし、(1) のケースでは、昼に骨格中の $\delta^{13}\text{C}$ が軽くなり、夜に重くなるという計算結果を得た。しかし、骨格の微小領域の $\delta^{13}\text{C}$ の分析結果によると、昼に形成されると考えられている骨格部位の $\delta^{13}\text{C}$ は高く、夜に形成される部位は低いという報告もあり (Meibom et al. 2006)、両者のパターンは一致していないという問題がある。ただし、昼と夜の骨格形成部位については、まだ決着がついているわけではないので、今後これらの問題を踏まえて、さらなる研究が必要である。

上記の問題があるものの、(1) のケースにおいてサンゴ骨格に記録されるような $\delta^{13}\text{C}$ の年周変動を再現できるかについても数値実験を行った。3年間分のシミュレーションを行った結果、シミュレーションによるサンゴ骨格の $\delta^{13}\text{C}$ の変動は実際のサンゴ骨格に記録された変動に近いパターンが再現された (図 3)。本研究のシミュレーションでは、骨格の $\delta^{13}\text{C}$ は夏に低く、冬に高くなるパターンを示した。この結果は、サンゴ骨格記録と調和的である場合もあれば、逆のパターンを示す場合も確認されている。

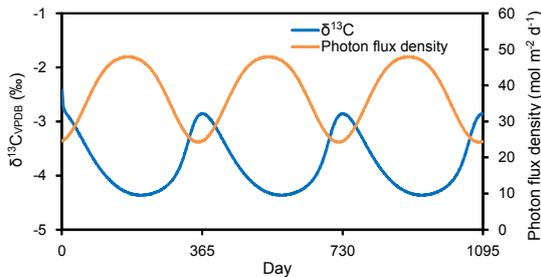


図 3. 炭素同位体モジュールを組み込んだサンゴポリプモデルによる骨格に記録される炭素同位体比変動のシミュレーション結果。青線が炭素同位体比、オレンジが光子フラックスを示す。

今回のシミュレーションでは、日射量の変動を与え、それ以外のパラメータ(海水中の全炭酸の $\delta^{13}\text{C}$ など)は一定の値で計算を行っている。そのため、実際の骨格記録では、海水中の全炭酸の $\delta^{13}\text{C}$ に影響されることで、多様なパターンが生成されている可能性がある。どのような条件で炭素同位体比のパターンが決定されるかを明らかにするためには、モデルのさらなる高度化を図るとともに実際の骨格記録や観測との比較など、多面的な視点からさらなる研究を進める必要がある。

現状ではまだ実際のサンゴ骨格記録への応用という段階まで達していないが、今後、研究を進めていくことで、酸素同位体比やストロンチウム/カルシウム比などでは知りえない、新たな環境プロキシ(例えば光量や海水中の全炭酸の $\delta^{13}\text{C}$ など)の確立につながることを期待される。

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 4 件)

- ① Nakamura T., Nadaoka K., Watanabe A. (2013) A coral polyp model of photosynthesis, respiration and calcification incorporating a transcellular ion transport mechanism. *Coral Reefs*. DOI: 10.1007/s00338-013-1032-2 査読有
- ② Sowa K., Watanabe T., Nakamura T., Sakai S., Sakamoto T. (2013) Estimation of uncertainty for massive *Porites* coral skeletal density. *JAMSTEC Report of Research and Development* 16:31-39 [http://www.godac.jamstec.go.jp/catalog/doc_catalog/gd_metaview_d.php?catalog_name=jamstec_r&data_name=JAM_RandD16_04&lang=en] 査読有
- ③ Shirai K., Sowa K., Watanabe T., Sano Y., Nakamura T., Clode P. (2012) Visualization of sub-daily skeletal growth patterns in

massive *Porites* corals grown in Sr-enriched seawater. *Journal of Structural Biology* 180:47-56. DOI: 10.1016/j.jsb.2012.05.017 査読有

- ④ 鹿島雄介, 南須原美恵, 中村隆志, 山内常生, 大槻憲四郎 (2011) 宮城県沖大地震の前兆を捉えるための深層地下水変動研究:2008年2月~2009年12月の観測結果. *地質学雑誌* 117 451-467. DOI: 10.5575/geosoc.117.451 査読有

[学会発表](計 24 件)

- ① 宮島利宏, 渡邊敦, 中村隆志, 森本直子, 灘岡和夫, 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, 2013 年 05 月 23 日, 幕張メッセ(千葉県)
- ② 中村隆志, 灘岡和夫, 渡邊敦, 宮島利宏, 渡邊剛, 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モデルの開発. 日本地球惑星科学連合 2013 年大会(招待講演), 2013 年 05 月 20 日, 幕張メッセ(千葉県)
- ③ 渡邊敦, 宮島利宏, 灘岡和夫, 梅澤有, 森本直子, 山本高大, 土屋匠, 中村隆志, R. Gonzales, G.L. Regino, C.M. Ferrera, M.L.S.D. McGlone, フィリピン国の沿岸生態系における地域的環境負荷と炭酸系動態. 第 15 回日本サンゴ礁学会, 2012 年 11 月 24 日, 東京大学(東京都)
- ④ 森尚大, 灘岡和夫, Blanco A., 渡邊敦, 中村隆志, 山本高大, 阿部友理子, 石垣島・吹通川河口沿岸部におけるサンゴ礁海域への地下水流入特性. 第 15 回日本サンゴ礁学会, 2012 年 11 月 24 日, 東京大学(東京都)
- ⑤ 中村隆志, 灘岡和夫, 渡邊敦, 宮島利宏, 中野義勝, 鈴木款, 樋口富彦, 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, 2012 年 11 月 23 日, 東京大学(東京都)
- ⑥ 樋口富彦, Casareto B.E., 中村隆志, Chumun P.K., 湯山育子, 石川義明, 藤村弘行, 鈴木款, 高水温・強光と硝酸塩による複合ストレスと活性酸素生成. 第 15 回日本サンゴ礁学会, 2012 年 11 月 23 日, 東京大学(東京都)
- ⑦ Watanabe A., Miyajima T., Nadaoka K., Umezawa Y., Morimoto N., Yamamoto T., Tsuchiya T., Nakamura T., McGlone M.L.S.D., Regino G.L., Ferrera C.M., Local stressors and CO_2 system dynamics in some coastal areas of the Philippines. 1st Asia-Pacific Regional Symposium "Coastal Ecosystems Conservation & Adaptive Management in Response to Change", November 7-8th 2012, Quezon City,

- Philippines
- ⑧ Miyajima T., McGlone M.L.S.D., Umezawa Y., Nakamura T., Watanabe A., Regino G.L., Ferrera C.M., Morimoto N., Albino R.G., Garcia M.V.A., Siringan F.P., Uy W.H., Nadaoka K., Fortes M.D., Seasonal and regional variability in nutrient inputs to sea surface by precipitation. 1st Asia-Pacific Regional Symposium "Coastal Ecosystems Conservation & Adaptive Management in Response to Change", November 7-8th 2012, Quezon City, Philippines
 - ⑨ 中村隆志, 灘岡和夫, 渡邊敦, 宮島利宏, サンゴ内部モデルを用いた骨格中の $\delta^{13}C$ 記録の再現と古環境指標としての有用性の検討. 日本地球化学会第 59 回年会, 2012 年 9 月 11 日, 九州大学(福岡県)
 - ⑩ Watanabe T., Yamazaki A., Kawamura T., Isasa J., Nakamura T., Sowa K., Iwase F., Nomura K., Sugihara K., Abe O., Sakamoto T., Murayama M., Yamano H., Effect of environmental change on Porites growth during the last 100 years. 12th International Coral Reef Symposium, July 13th 2012, Cairns, Australia.
 - ⑪ Nakamura T., Watanabe A., Nadaoka K., Nakano Y., Yamamoto S., Yamamoto T., Miyajima T., A coral ecosystem model: short-term responses against the multiple stresses. 12th International Coral Reef Symposium, July 12th 2012, Cairns, Australia
 - ⑫ Yamamoto T., Watanabe A., Nakamura T., Nadaoka K., Miyajima T., Tanaka Y., Suzuki Y., Casareto B., Blanco A., DOC dynamics analysis with a new biogeochemical reef ecosystem model. 12th International Coral Reef Symposium, July 11th 2012, Cairns, Australia
 - ⑬ Watanabe A., Nadaoka K., Kayanne H., Nakamura T., Evidence of ocean acidification in seawater around Ishigaki Island. 12th International Coral Reef Symposium, July 9th 2012, Cairns, Australia.
 - ⑭ Yamamoto S., Kayanne H., Tokoro T., Kuwae T., Nakamura T., Watanabe A., Nadaoka K., Mg-calcite dissolution rate determined by field observation and laboratory experiment. 12th International Coral Reef Symposium, July 9th 2012, Cairns, Australia
 - ⑮ 中村隆志, 灘岡和夫, 渡邊敦, Trans-calcification メカニズムを組み込んだ造礁サンゴの光合成・石灰化の内部モデル. 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 2012 年 5 月 9 日, 幕張メッセ(千葉県)
 - ⑯ 中村隆志, 渡邊敦, 灘岡和夫, 中野義勝, 山本将史, 山本高大, 宮島利宏, 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, 2011 年 11 月 5 日, 沖縄県男女共同参画センター(沖縄県)
 - ⑰ 山本将史, 茅根創, 所立樹, 桑江朝比呂, 中村隆志, 渡邊敦, 灘岡和夫, 石垣島白保サンゴ礁砂地における流動環境を考慮した Mg- Calcite の溶解メカニズム. 第 14 回日本サンゴ礁学会, 2011 年 11 月 5 日, 沖縄県男女共同参画センター(沖縄県)
 - ⑱ 灘岡和夫, 中村隆志, 渡邊敦, 中野義勝, 山本将史, 宮島利宏, 鈴木 款, B.E. Casareto, 茅根 創, 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, 2011 年 11 月 5 日, 沖縄県男女共同参画センター(沖縄県)
 - ⑲ 井笹純平, 渡邊剛, 中村隆志, 阿部理, 野村恵一, 和歌山県串本町における長寿サンゴ骨格の酸素・炭素安定同位体比からみた成長履歴と環境適応. 第 14 回日本サンゴ礁学会, 2011 年 11 月 4 日, 沖縄県男女共同参画センター(沖縄県)
 - ⑳ 山本高大, 渡邊敦, 中村隆志, 灘岡和夫, 宮島利宏, 田中泰章, 鈴木 款, B. E. Casareto, Ariel C. Blanco, 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, 2011 年 11 月 4 日, 沖縄県男女共同参画センター(沖縄県)
 - ㉑ 中村隆志, サンゴ礁形成のシミュレーションモデル: 海水準変動に呼応した様々な成長パターンの再現. 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 2011 年 5 月 24 日, 幕張メッセ(千葉県)
 - ㉒ 中村隆志, 渡邊敦, 渡邊剛, 灘岡和夫, サンゴ礁生物群集の帯状分布パターンの解析と環境応答モデルの構築. 日本サンゴ礁学会第 13 回大会, 2010 年 11 月 4 日, つくばカピオ(茨城県)
 - ㉓ 井笹純平, 渡邊剛, 中村隆志, 阿部理, 野村恵一, 和歌山県串本の温帯域造礁性サンゴ骨格の酸素・炭素安定同位体比の変動. 日本地球化学会第 57 回年会, 2010 年 9 月 7 日, 立正大学熊谷校舎(埼玉県)
 - ㉔ Sowa K., Sakamoto T., Nakamura T., Sakai S., Iijima K., Watanabe T. A new method for estimating calcification rate of coral skeletons using a transparent X-ray 2D-imaging scanner (TATSCAN-X1) in conjunction with geochemical analyses. 2nd International Sclerochronology Conference. July 24-28th 2010, Mainz, Germany

[図書](計1件)

- ① Nakamura T., Nakamori T. (2011) A simulation model for coral reef formation: reef topographies and growth patterns responding to relative sea-level histories. In: Wright LL (ed) Sea level rise, coastal engineering, shorelines and tides. Nova Science Publishers, Inc., pp 251-261

6. 研究組織

(1)研究代表者

中村 隆志(NAKAMURA TAKASHI)
東京工業大学・大学院情報理工学研究科・
東工大特別研究員
研究者番号:20513641

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし