

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26870246

研究課題名(和文)造礁サンゴのカルサイト骨格生成と骨格中元素の温度依存性

研究課題名(英文) Temperature dependence on elemental composition in the skeleton of scleractinian corals

研究代表者

樋口 富彦 (Higuchi, Tomihiko)

東京大学・大気海洋研究所・特任研究員

研究者番号：40570510

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)：過去の海洋ではMg/Caが大きく変動したと言われる。先行研究によりアラゴナイト骨格を持つサンゴが、低Mg/Ca海水でカルサイトの骨格を形成することが報告された。本課題では、水温変化がサンゴのカルサイト骨格生成に及ぼす影響について調べた。X線回折およびMeigen染色によりアラゴナイトおよびカルサイト含量を見積もったところ、Mg/Ca比が5.2の海水中では100%アラゴナイト、Mg/Ca比1.0および0.5でアラゴナイトとカルサイトの混合骨格およびカルサイトのみ骨格が確認された。各Mg/Ca比において、温度が高いほどアラゴナイトの含量が増加し、無機炭酸カルシウム沈殿と同様の傾向であった。

研究成果の概要(英文)：The molar Mg/Ca ratio fluctuated greatly throughout the Phanerozoic Eon, and seawater temperature was higher, with lower Mg/Ca levels, in the middle Cretaceous. We report the temperature dependence of aragonite and calcite formation by scleractinian corals in low-Mg/Ca seawater. Juveniles of scleractinian coral, *Acropora solitaryensis*, were incubated to monitor skeletal growth from the planula stage for 4 months with Mg/Ca = 5.2, 1.0, 0.5 at 19 to 28 °C. Our results clearly indicated that polymorphism of modern scleractinian corals with low-Mg/Ca seawater depends on seawater temperature. However, corals produced aragonite more than inorganic precipitation under each condition, except at 19 °C. Although the contents of aragonite were similar to the results of abiotic precipitation experiments at 19 °C, it is suggested that aragonitic scleractinian corals biologically controlled their skeletal formation under low-Mg/Ca conditions at higher temperature.

研究分野：海洋生物学

キーワード：バイオミネラリゼーション アラゴナイト カルサイト 造礁サンゴ

1. 研究開始当初の背景

造礁サンゴは様々な場所で地形を形作る。その骨格となる炭酸カルシウムの結晶型は主に2種類、あられ石(アラゴナイト)と方解石(カルサイト)である。生物によるカルサイト、アラゴナイト結晶型の選択は、マグネシウム(Mg)により制限されている可能性が高く、海水中のMgが少ない時に誕生した生物はカルサイト型、Mgが多い時に生まれた生物はアラゴナイト型の結晶を作ると言われる。つまり、アラゴナイト型結晶を持つ造礁サンゴは、海水中のMgが多いときに誕生したと予想されている。サンゴが誕生したのは、2億年とも4億年前とも言われるが、その間、過去の海洋では、カルシウム(Ca)に対するMgの割合は大きく変動していると推測されている(Ries 2010)。現在は海水中のMgが高く、サンゴはアラゴナイト型の骨格を容易に作っている。しかし一方で、例えば、1億年前のMg/Ca比が1を下回る海、よりカルサイトを作りやすいような環境では、どのような骨格を作ってきたのかあまりわかっていなかった。

Ries et al.(2006)は、海水成分調整により、現生のサンゴがカルサイト型の炭酸カルシウムを作る可能性を報告した。しかし、局所的にカルサイト結晶が見られただけであり、このカルサイトが無機的に生成した結晶である可能性も捨てきれなかった。Higuchi et al.(2014)では、幼サンゴを用いて実験を行い、顕微ラマン分光光度計やX線回折、EPMAを用いて炭酸カルシウムの結晶型を確認した。その結果、サンゴが純粋なカルサイトを作っている可能性を示した。様々なMg/Ca比の海水で実験を行ったところ、Mg/Ca比を1.5以下に調整した際にカルサイトの炭酸カルシウム骨格を有することがわかった。骨格内の隔壁など生物学的に利用される箇所にカルサイトが見られたことから、現生の造礁サンゴがカルサイトの生成能力を持つことが明らかになった。一方で、炭酸カルシウムの無機沈殿実験では、温度変化によりアラゴナイト、カルサイトの割合が変化し、同Mg/Ca比下において高温でアラゴナイトが優先することが報告され、(Balthasar et al. 2015)、造礁サンゴでは温度によってどのような影響があるか調べる必要が出てきた。

2. 研究の目的

本研究では、Mg/Ca比および温度変化が造礁サンゴのカルサイト生成に与える影響について調べることを目的に実験を行った。

3. 研究の方法

造礁サンゴを19~28のインキュベータ内において各Mg/Ca比(5.2, 1.0, 0.5)の海水で変態させ、(2 μM Hym-248を使用)、骨格成長を促した。材料には、高知県で採取したエンタクミドリイシを用いた。生成した骨格の炭酸カルシウム結晶型をX線回折法(XRD)

およびMeigen染色により確認し、アラゴナイト/カルサイトの比率も求めた。さらにレーザーアブレーション(LA)-ICP-MSを用いて、各個体の元素含有量を調べた。

4. 研究成果

Mg/Ca比5.2の海水中では100%アラゴナイト、Mg/Ca比1.0および0.5でアラゴナイトとカルサイトの混合骨格およびカルサイトのみ骨格が確認された(図1)。そして、各Mg/Ca比において、温度に依存してアラゴナイト/カルサイトの割合が変化することがわかった(表1)。温度が高くなるにつれ、アラゴナイトの割合が高くなっており、無機的に生成させた炭酸カルシウム沈殿の結果と整合的であった。つまり、造礁サンゴのカルサイト骨格生成は、海水組成や温度など、物理化学的な影響を顕著に受けることがわかった。

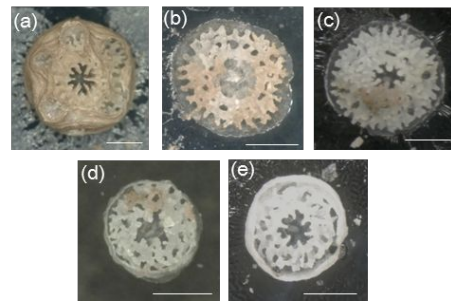


図1. Meigen染色後のAcropora solitaryensis骨格。ピンクに染まった場所がアラゴナイト骨格。(a) 28°C, Mg/Ca=5.2 (b) 28°C, Mg/Ca=0.5 (c) 25°C, Mg/Ca=0.5 (d) 22°C, Mg/Ca=0.5 (e) 19°C, Mg/Ca=0.5. スケールバーは0.5 mm.

表1

各温度・Mg/Caにおける生物学的(ミドリイシ:本研究)および非生物学的(無機沈殿:Balthasar et al. 2015)アラゴナイト・カルサイト生成量。A:100%アラゴナイト、C:100%カルサイト、A+C:アラゴナイト・カルサイトの混合骨格。カッコ内の数字が骨格中のアラゴナイト含量。

	Acropora solitaryensis エンタクミドリイシ (本研究)				無機沈殿の結果 (Balthasar et al. 2015)			
	19°C	22°C	25°C	28°C	15°C	20°C	25°C	30°C
mMg/Ca =5.2	A	A	A	A	A	A	A	A
mMg/Ca =1.0	A+C	A+C	A+C	A+C	A+C	A+C	A+C	A+C
	(<10)	(61.1 ± 0.5)	(80.4 ± 4.8)	(95.0 ± 2.8)	(5)	(13)	(39)	(33)
mMg/Ca =0.5	C	A+C	A+C	A+C	A+C	A+C	A+C	A+C
	(0)	(<10)	(<10)	(44.8 ± 4.8)	(<1)	(<1)	(2)	(8)

元素分析について、Sr/Ca, Mg/Ca比などに温度依存性は見られなかったが、カルサイトとアラゴナイトで顕著な元素分別が起こることがわかった。

図2では、無機的に生成した炭酸カルシウムのアラゴナイト含量と、サンゴが作成したアラゴナイトの含量を比較している。各プロットが直線より上部に位置すれば、理論的な無機沈殿よりもサンゴが高い割合でアラゴナイトを生成したことを意味する。つまり、造礁サンゴは、低Mg/Ca海水中であっても、無機的な理論値よりも多くアラゴナイトの骨格を生成することが明らかとなった。これは造礁サンゴがアラゴナイトを作るための骨格生成メカニズムを持っていることが予想される。

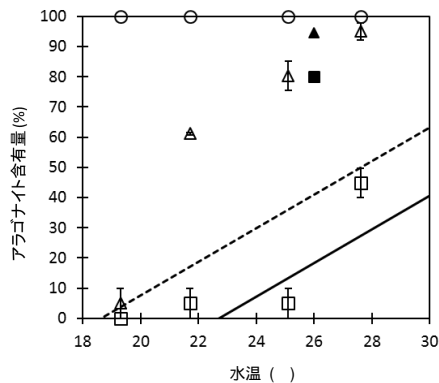


図2 異なる水温・Mg/Ca 下で成長したミドリイシ属 (*Acropora*) サンゴのアラゴナイト含量。
 ○ : Mg/Ca=5.2, □ : Mg/Ca=1.0, △ : Mg/Ca=0.5, 平均 ± 標準誤差 (エンタクミドリイシ本研究, n=3), □ : Mg/Ca=1.0, △ : Mg/Ca=0.5 (ウスエダミドリイシ, Higuchi et al. 2014)。直線はKiessling(2015)で提唱された無機的な沈殿の結果を基にした理論式 $A=(T+8.5 \times \text{Mg/Ca}-26.6)/0.18$ 。破線: Mg/Ca=1.0, 実線: Mg/Ca=0.5。

さらに、各温度、各Mg/Ca海水で飼育終了時の骨格重量を測定した結果が表2である。全ての温度で、Mg/Ca比が低いときに、骨格の成長速度が抑制されていた。Mg/Ca=5.2の成長と比較すると、各温度平均でMg/Ca=1.0で62.8% ± 14.7%、Mg/Ca=0.5で56.7% ± 6.7%低下した。このことから、アラゴナイトを作る造礁サンゴの成長は、低Mg/Ca海水中で大きく阻害されることが明らかとなった。このことは、低Mg/Ca海水であった白亜紀時代に造礁サンゴの化石が減少していることと密接に繋がりがあると考えられる。

今後の展開としては、通常アラゴナイトを生成する造礁サンゴが、どのようにカルサイトを形成しているのか、そのメカニズムを調べる必要がある。そして、サンゴが能動的にカルサイトを作るのか、受動的にカルサイト骨格を作られているのかが明らかとなることが期待される。

表2 各温度、各Mg/Caにおける月平均骨格成長速度(μg/月)

水温	19°C	22°C	25°C	28°C
mMg/Ca=5.2 (n=8)	39.0 ± 3.0 ^e	66.0 ± 3.2 ^e	135.9 ± 3.3 ^a	112.1 ± 6.1 ^b
mMg/Ca=1.0 (n=5)	9.9 ± 0.8 ^f	32.8 ± 2.5 ^e	52.1 ± 3.6 ^{cde}	39.9 ± 1.0 ^{de}
mMg/Ca=0.5 (n=5)	12.3 ± 1.4 ^f	41.0 ± 2.3 ^{de}	58.2 ± 5.0 ^{cd}	41.2 ± 1.3 ^{de}

注: 右上のアルファベットが重ならないもの通しが有意差有 Tukey-Kramer HSD test (P<0.05).

引用文献

Balthasar, U., and Cusack, M., 2015, Aragonite-calcite seas-Quantifying the gray area: *Geology*, v. 43, p. 99-102.
 Higuchi, T., et al., 2014, Biotic control of skeletal growth by scleractinian coral in aragonite-calcite seas. *Plos one* 9, e91021.
 Kiessling, W., 2015, Fuzzy Seas: *Geology*, v. 43, p. 191-192.
 Ries, J.B., 2010, Review: geological and experimental evidence for secular variation in seawater Mg/Ca (calcite-aragonite seas) and its effects on marine biological calcification, *Biogeosciences*: v. 7, p. 2795-2849.
 Ries, J.B., et al., 2006, Scleractinian corals produce calcite, and grow more slowly, in artificial Cretaceous seawater: *Geology*, v. 34, p. 525-528.

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 5件)
 I. Yuyama, T. Higuchi, Y. Takei, Sulfur utilization of corals is enhanced by endosymbiotic algae. *Biology Open* 5, 1299-1304 (2016), 査読有 DOI: 10.1242/bio.020164
 I. Yuyama, T. Nakamura, T. Higuchi, M. Hidaka, Different stress tolerances of juveniles of the coral *Acropora tenuis* associated with clades C1 and D *Symbiodinium*. *Zoological studies* 55, 19 (2016), 査読有 DOI: 10.6620/ZS.2016.55-19
T. Higuchi, S. Agostini, B.E. Casareto, Y. Suzuki, I. Yuyama, Northern limit of corals of the genus *Acropora* in temperate zones is determined by their resilience to cold bleaching. *Scientific Reports* 5, 18467 (2015), 査読有

DOI: 10.1038/srep18467

T. Higuchi, I. Yuyama, T. Nakamura, 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 (2015), 査読有
DOI: 10.1016/j.rsma.2015.08.012

I. Yuyama, T. Higuchi, Comparing the effects of symbiotic algae (*Symbiodinium*) clades C1 and D on early growth stages of *Acropora tenuis*. *Plos one* 9, e98999 (2014), 査読有
DOI: 10.1371/journal.pone.0098999

〔学会発表〕(計 7件)

樋口富彦、アラゴナイト カルサイト海における造礁サンゴの骨格形成～要請を用いた検討～、第9回バイオミネラリゼーション研究会、2014年12月13日、東京大学大気海洋研究所(千葉県・柏市)

樋口富彦 他、造礁サンゴによるカルサイト骨格生成と温度依存性、日本地球化学会第62回年会、2015年9月17日、横浜国立大学(神奈川県横浜市)

樋口富彦 他、低Mg/Ca環境下で生成するサンゴ骨格の温度依存性、第18回日本サンゴ礁学会、2015年11月27日、慶応義塾大学(東京都港区)

樋口富彦、造礁サンゴのストレス応答、日本地球惑星連合大会2016(招待講演)、2016年5月24日、幕張メッセ(千葉県千葉市)

Tomihiko Higuchi 他、Cold stress response of Temperate zone corals、13th International Coral Reef Symposium、2016年6月21日、ハワイ(USA)

樋口富彦 他、造礁サンゴによるカルサイト骨格生成と温度依存性、第11回バイオミネラリゼーションワークショップ、2016年11月11日、東京大学大気海洋研究所(千葉県柏市)

樋口富彦 他、NanoSIMSを用いたサンゴ骨格成長の可視化と褐虫藻による寄与の評価、日本サンゴ礁学会第19回大会、2016年12月3日、沖縄タイムスホール(沖縄県那覇市)

〔図書〕(計 1件)

Tomihiko Higuchi, 2017, Springer, *Studies on stress response of corals in Japan*.印刷中

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

<https://sites.google.com/site/tomihikohiguchi/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

樋口 富彦 (HIGUCHI, Tomihiko)

東京大学・大気海洋研究所・特任研究員

研究者番号: 40570510

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

目崎 拓真 (MEZAKI, Takuma)

白井 厚太郎 (SHIRAI, Kotaro)

湯山 育子 (YUYAMA, Ikuko)