

## 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：12601

研究種目：新学術領域研究

研究期間：2008～2012

課題番号：20121006

研究課題名（和文）地球温暖化に対するサンゴ礁の応答

研究課題名（英文）Response of Coral Reefs to Global Warming

研究代表者

茅根 創 (KAYANNE HAJIME)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号：60192548

研究成果の概要（和文）：

温暖化、酸性化、海面上昇に対するサンゴ礁の応答を、サンゴ群集・生態系スケールで明らかにした。この10年間で高水温による白化が数年に1回の頻度で起こり、サンゴ群集が白化から回復できず衰退がはじまっている。しかし、白化や酸性化に対する影響は、サンゴの種によって異なり、海面上昇に対して応答が期待される種はいくつかの鍵種に限られる。サンゴが衰退した後に優占する生物は、一般に大型藻類とされるが、酸性化によってソフトコーラルが優占する可能性が示された。

研究成果の概要（英文）：

Responses of coral reefs to warming, ocean acidification and sea level rise were investigated and evaluated with community and ecosystem scales in field. Bleaching induced by high temperature occurred every several years and degradation of coral reefs initiated. Effect of bleaching and acidification varied by species, and only a few species responded to sea level rise. Shift from hermatypic coral to macro-algae has been assumed, but an example of shift to soft coral by ocean acidification has been presented.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	16,200,000	4,860,000	21,060,000
2009年度	20,000,000	6,000,000	26,000,000
2010年度	16,700,000	5,010,000	21,710,000
2011年度	15,800,000	4,740,000	20,540,000
2012年度	11,800,000	3,540,000	15,340,000
総計	80,500,000	24,150,000	104,650,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：サンゴ礁、地球温暖化、酸性化、海面上昇、白化

## 1. 研究開始当初の背景

サンゴ礁は、温暖化による白化、二酸化炭素濃度上昇に伴う酸性化による石灰化抑制と溶解、海面上昇による水没と、地球温暖化シナリオのすべての要因と密接に関わり、も

っとも敏感に応答する生態系である。そうした点でサンゴ礁は、地球温暖化の生態系への影響を予測する上で、具体的な情報を提供してくれる指標生態系といえる。

しかしながら、それぞれの要因に対する応答は単純ではない。また、温暖化影響は、モデルや室内実験による予想が中心であった。これまですでに起こっている地球温暖化による影響はまだわずかであり、ローカルな人為影響から温暖化の影響を切り分けて、3つの温暖化要因に対してサンゴ礁が群集・生態系スケールでどのように応答しているかを評価することが必要である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、すでに現れた温暖化、酸性化、海面上昇の影響を、サンゴ群集や生態系スケールで検出して、地球温暖化に対するサンゴ礁の応答を評価することである。そのために、温暖化による白化、酸性化による群集シフトと溶解、海面上昇による水没と上方成長による応答を、現在と過去のサンゴ群集の変遷の調査と飼育実験によって明らかにした。

## 3. 研究の方法

琉球列島石垣島南東岸の白保サンゴ礁において、1998年の大規模白化以降継続している定測線におけるサンゴ群集調査を継続して、水温変化に対する白化イベントやサンゴ群集の変化を、群集スケールでまとめた。酸性化応答について、白保における夜間の石灰質砂の溶解メカニズムを、現場チャンバー実験と堆積物からのアルカリ度フラックスから見積もり、室内の溶解実験の結果と比較した。また、硫黄島島の火山性の酸性化海域において、造礁サンゴ群集からソフトコーラル群集へのシフトの実態を解明して、飼育実験の結果と比較した。

実際のサンゴ礁で起こっている温暖化応答を、CO<sub>2</sub> 班の応答モデルの検証に用いる。またフィールドスケールの応答を、A01、A02班で得られる生物・化学素過程との関係を明らかにする。温暖化応答の過去の変遷は、B01、B02班で得られたストレスとサンゴ礁変化の歴史の変遷の中で位置づける。

## 4. 研究成果

### (1) 温暖化応答

#### ① 白化によるサンゴ群集の衰退

石垣島白保サンゴ礁では、1998年の大規模白化以降、2003年に小規模な、2007年に中規模な白化が起こり、サンゴ群集が衰退している(図1)。高水温に対する応答は、サンゴの種によって異なる。こうした異なる応答の結果、サンゴの多様性は減少している。

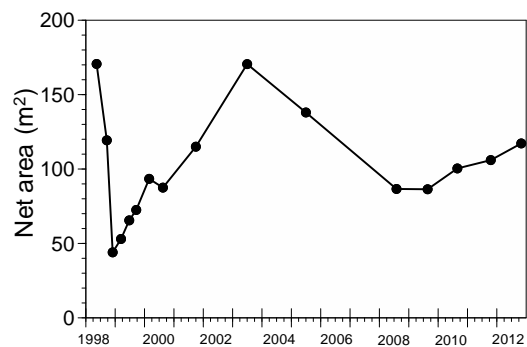


図1 白保サンゴ礁定測線における過去15年間のサンゴ被度変化

1998年白化後は、4年で白化前の被度に回復したにも関わらず、2007年白化後の回復はきわめてゆっくりとしている。白化だけでなく、台風やローカルなストレスがかかっていることと、サンゴの多様性が減少しているため回復力が低下しているためである。

#### ② 白化の閾水温

白化は、石垣海域の最暖月の水温(29.1度)を週平均水温が1度以上上回る積算が2度を越えた年に起こる。さらに、積算水温が8度を越えると大規模な白化が起こる。

この積算水温の閾値と白化との関係は、北西太平洋の他のサンゴ礁における白化年の水温記録からも確認された。1997年以前はまったくなかったが、1998年以降4回起こっている。水温と白化の関係を将来に敷衍すると、今世紀中に水温が2度上昇すると、毎年大規模な白化が起こることが予想される。

#### (2) 酸性化応答

##### ① サンゴ礁砂地の溶解

酸性化で最初に影響を受けるのは極域で、サンゴ礁の飽和度は1以下には下がらないから溶解までは至らないだろうとされていた。しかしながら、サンゴ礁に多く分布する有孔虫や石灰藻は、アラレ石や方解石より溶解しやすい高マグネシウム方解石である。しかし、その溶解の閾値や砂地の溶解メカニズムは不明であった。

本研究では、室内実験によって高マグネシウム方解石の溶解閾値が、アラレ石飽和で3.2-3.3であることを明らかにして、実際のフィールドで夜間に呼吸によってこれより飽和度が低下して、砂地の溶解が起こっていることを明らかにした。さらに、溶解は砂地の表面で起こっているのではなく、堆積物間隙水中で呼吸によって飽和度が低下し、それによって溶解が起こって、堆積物から水柱にアルカリ度フラックスとして現れていることが明らかになった。

##### ② ソフトコーラルへの群集シフト

硫黄島島のCO<sub>2</sub>が湧き出している海域にお

いて、造礁サンゴ群集が骨格をもたないソフトコーラル群集にシフトしていることを発見した(図2)。CO<sub>2</sub>濃度が800 μatmではソフトコーラルが優占するが、1500 μatmではソフトコーラルも造礁サンゴも見られない。飼育実験の結果、1000 μatmではソフトコーラルの光合成が促進されるが、2000 μatmでは夜間の溶解が増加することがわかり、硫黄鳥島の発見と整合的である。



図2 硫黄鳥島の高CO<sub>2</sub>海域のソフトコーラル

本研究結果は、自然の高CO<sub>2</sub>実験といえるものである。これまで酸性化によりサンゴ群集が藻場にシフトすることが予想されていたが、本研究は条件によってはソフトコーラルにシフトする可能性を示唆する。ソフトコーラルは、サンゴ礁を造礁する機能をもっていないので、群集シフトによってサンゴ礁生態系の衰退が予想される。

### ③種間・群体間の応答の差異

酸性化応答は、サンゴの種間だけでなく、同種内でも群体間で差違が現れることがわかった。影響の差違には、Ca-ATPaseの遺伝子発現量が関係している可能性が示唆された。

### (3)海面上昇応答

#### ①鍵種の応答

サンゴ礁の海面上昇に対する応答には、礁嶺の形成が重要である。過去の海面上昇と礁嶺の形成過程から、礁嶺の形成にはミドリイシ類など鍵となるサンゴ種が重要な役割を果たしていることが明らかになった。

完新世の最温暖期から、寒冷期を経て、鍵となるミドリイシ類の構成比が高くなった。一方、コユビミドリイシなど鍵種は、巨大台風によって生育が困難になることも明らかになった。将来の温暖化・海面上昇・台風の巨大化に対して、現在の群集は脆弱である。将来の海面上昇に対してサンゴ礁地形を維持するためには、礁嶺における鍵種の維持・

再生が重要である。

また、サンゴ礁の深部が高水温イベントに対する避難地になっている可能性も示唆された。

### 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42件:すべて査読有り)

- ① Inoue S, Kayanne H, Yamamoto S, Kurihara H: Spatial community shift from hard to soft corals in acidified water. *Nature Climate Change* 3, doi: 10.1038/NCLIMATE1855 (2013)
- ② Sinniger F, Morita M, Harii S: Locally extinct coral species *Seriatopora hystrix* found at upper mesophotic depths in Okinawa. *Coral Reefs* 32, 105 (2013)
- ③ Takahashi A, Kurihara H: Ocean acidification does not affect the physiology of the tropical coral *Acropora digitifera* during a 5-week experiment. *Coral Reefs*, 32, 305-314 (2013)
- ④ Hongo C, Yamano H: Species-specific responses of corals to bleaching events on anthropogenically turbid reefs on Okinawa Island, Japan, over a 15-year period (1995-2009) *PLoS ONE* 8, e60952 (2013)
- ⑤ Kayanne H, Hongo C, Okaji K, Ide Y, Hayashibara T, Yamamoto H, Mikami N, Onodera K, Ootsubo T, Takano H, Tonegawa M, Maruyama S: Low species diversity of hermatypic corals on an isolated reef, Okinotorishima, in the northwestern Pacific. *Galaxea, Journal of Coral Reef Studies* 14, 73-95 (2012)
- ⑥ Yamamoto S, Kayanne H, Terai M, Watanabe A, Kato K, Negishi A, Nozaki K: Threshold of carbonate saturation state determined by CO<sub>2</sub> control experiment. *Biogeoscience* 9, 1441-1450 (2012).
- ⑦ Dadhich AP, Nadaoka K, Yamamoto T, Kayanne H: 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 (2012).
- ⑧ Seki A, Yokoyama Y, Suzuki A, Kawakubo Y, Okai T, Miyairi Y, Matsuzaki Y, Namizaki N, Kan H: Mid-Holocene sea-surface temperature reconstruction using fossil corals from Kume Island, Ryukyu, Japan. *Geochemical Journal* 46, e27-e32 (2012)
- ⑨ Kurihara H, Takano Y, Kurokawa D, Akasaka K: Ocean acidification reduces

biomineralization-related gene expression in the sea urchin, *Hemicentrotus pulcherrimus*. *Marine Biology* 159, 2819-2826 (2012)

⑩ Hamanaka N, Kan H, Yokoyama Y, Okamoto T, Nakashima Y, Kawana T: Disturbances with hiatus in high-latitude coral reef growth during Holocene: Correlation with millennial-scale global climate change. *Global and Planetary Change* 80-81, 21-23 (2012)

⑪ Nesa B, Baird AH, Harii S, Yakovleva I, Hidaka M: Algal symbionts increase DNA damage in coral planulae exposed to sunlight. *Zoological Studies* 76, 41-47 (2012)

⑫ Nakamura N, Kayanne H, Iijima H, McClanahan TR, Behera SK, Yamagata T: Footprints of IOD and ENSO in the Kenyan coral record. *Geophysical Research Letters* 38, L24708 (2011)

⑬ Kayanne H, Yasukochi T, Yamaguchi T, Yamano H, Yoneda M: Rapid settlement of Majuro Atoll, central Pacific, following its emergence at 2000 years CalBP. *Geophysical Research Letters* 38, L20405 (2011)

⑭ Hongo C, Kayanne H: Key species of hermatypic coral for reef formation in the northwest Pacific during Holocene sea-level change. *Marine Geology* 279, 162-177 (2011)

⑮ Hongo C: Holocene key coral species in the Northwest Pacific: indicators of reef formation and reef ecosystem responses to global climate change and anthropogenic stresses in the near future. *Quaternary Science Reviews* 35, 82-99 (2011)

⑯ Harii S, Yamamoto M, Hoegh-Guldberg O.: The relative contribution of dinoflagellate photosynthesis and stored lipids to the survivorship of symbiotic larvae of the reef-building corals. *Marine Biology* 287, 1215-1224 (2010)

⑰ Hongo C, Kayanne H: Holocene sea-level record from corals: Reliability of paleodepth indicators at Ishigaki Island, Ryukyu Islands, Japan. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 287, 143-151 (2010)

⑱ Hongo C, Kayanne H: Relationship between species diversity and reef growth in the Holocene at Ishigaki Island, Pacific Ocean. *Sedimentary Geology* 233, 223 (2010)

⑲ Diaz-Pulido G, Harii S, McCook LJ, Hoegh-Guldberg O: The impact of benthic

algae on the settlement of a reef-building coral. *Coral Reefs* 29, 203-208 (2010)

⑳ Rodriguez-Lanetty M, Harii S, Hoegh-Guldberg O: Early molecular responses of coral larvae to hyperthermal stress. *Molecular Ecology* 18, 5101-5114 (2010)

[学会発表] (計 62 件)

- ① Harii S: Establishment of coral-algalsymbiosis: symbiont genetic diversity in juveniles of scleractinian corals. 1st Jambio International Symposium. 2013年2月26日筑波大(東京)
- ② 茅根 創: 地球温暖化で荒廃するサンゴ礁. 日本サンゴ礁学会第15回大会 公開シンポジウム「変化する環境と生態系」(招待講演) 2012年11月25日東大(東京)
- ③ Hongo C: Response of key coral species to Holocene sea-level change in the Western Indian Ocean. 12th International Coral Reef Symposium. 2012年8月20日, 21日 Cairns, Australia
- ④ Kan, H: Development of faro topography in the Indian Ocean atoll. 日本地球惑星科学連合2012年大会 H-GM02 Geomorphology セッション(国際セッション), HGM02-02 (招待講演) 2012年5月23日幕張メッセ国際会議場(千葉)
- ⑤ Kurihara H: The diverse response of marine organisms and ecosystems to the ocean acidification. Acidification in Aquatic Environment 2011 (招待講演) 2011年9月28日 Tronso, Norway

[図書] (計 4 件)

- ① Kayanne H, Hongo C: Sea level change and its effect on reef growth. In Hopley D ed. *Encyclopedia of Modern Coral Reefs*, 966-973, Springer (2011)
- ② Kan H: Ryukyu Islands. In Hopley D ed. *Encyclopedia of Modern Coral Reefs*, 940-945, Springer (2011)
- ③ 茅根 創: サンゴ礁と地球温暖化. 日本サンゴ礁学会編『サンゴ礁学』239-258, 東海大学出版会 (2011)
- ④ 菅 浩伸: モルディブ諸島にみる環礁立国崩壊の危険性-災害と開発の連鎖-. 平井幸弘・青木賢人編『温暖化と自然災害-世界の6つの現場から-』59-84 古今書院 (2009)

[その他]

ホームページ等  
サンゴ礁学ホームページ  
<http://www.coralreefscience.jp/index.html>

茅根研究室ホームページ

<http://www-sys.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~coral/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

茅根 創 (KAYANNE HAJIME)  
東京大学・大学院理学系研究科・教授  
研究者番号：60192548

### (2) 研究分担者

菅 浩伸 (KAN HIRONOBU)  
岡山大学・教育学研究科 (研究院)・教授  
研究者番号：20294390

波利井 佐紀 (HARII SAKI)  
琉球大学・熱帯生物圏研究センター  
・准教授  
研究者番号：30334535

杉原 薫 (SUGIHARA KAORU)  
(独) 国立環境研究所・生物、生態系環境  
研究センター・特別研究員  
研究者番号：90320275

### (3) 連携研究者

栗原 晴子 (KURIHARA HARUKO)  
琉球大学・亜熱帯島嶼科学超域研究推進機  
構・特命助教  
研究者番号：40397568

### (4) 研究協力者

本郷 宙軌 (HONGO CHUKI)  
琉球大学・理学部・日本学術振興会特別研  
究員