

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H03330

研究課題名(和文) 白化したサンゴが回復できずに死滅する真相の究明

研究課題名(英文) Identification of factors limiting the recovery from bleaching

研究代表者

高橋 俊一 (Takahashi, Shunichi)

琉球大学・熱帯生物圏研究センター・教授

研究者番号：80620153

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,200,000円

研究成果の概要(和文)：海水温が異常に高くなると、サンゴは共生する褐虫藻(共生性の渦鞭毛藻)を失い白化する。白化直後のサンゴはまだ生きており、褐虫藻を再共生させることで回復する。しかし、その回復が遅れると、褐虫藻からの栄養が不足し、サンゴは死滅する。大規模白化により多くのサンゴが死滅していることから、もわかるように、自然界では白化からの回復は容易ではない。しかし、その理由は不明であった。本研究課題では、高温ストレスを受けた褐虫藻は、一時的に共生能力を喪失すること、またその温度感受性が褐虫藻種(タイプ)により異なることを実験的に明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球温暖化によるサンゴ礁生態系の貧弱化が大きな社会問題となっており、その大きな理由の一つがサンゴの白化による死滅である。白化した直後のサンゴは生きており、褐虫藻を再獲得することで、サンゴは白化から回復することができる。しかし、自然界では、その回復が見られないことが度々あり、これが白化したサンゴの死滅を引き起こしている。本研究課題では、白化からの回復を困難にしている原因が、高温ストレスを受けた褐虫藻の共生能力の喪失であること、またその温度感受性が褐虫藻種(タイプ)間で異なることも明らかにした。これらの成果は、将来、「白化から回復促進」や「サンゴ礁保全」への応用が期待される。

研究成果の概要(英文)：Increases in seawater temperature causes coral bleaching through the loss of symbiotic algae, zooxanthellae. Just after bleaching, corals are still alive. Therefore, bleached corals have the potential to recover, if they can recover the required density of symbiotic algae. However, in nature, bleached corals often fail to recover, resulting in mortality. In this study, we found that symbiotic algae temporarily lose their infectivity after exposure to heat stress. Importantly, sensitivity to heat stress differed between species (types) of symbiotic algae. Our results demonstrated that recovery after bleaching can be induced by minimizing the loss of infectivity of symbiotic algae.

研究分野：生理生態学

キーワード：白化 地球温暖化 共生

1. 研究開始当初の背景

海水温が異常に高くなると、サンゴは共生する褐虫藻（共生性の渦鞭毛藻）を失い白化する。白化直後のサンゴはまだ生きており、褐虫藻を再共生させることで回復する（図1）。しかし、その回復が遅れると、褐虫藻からの栄養が不足し、サンゴは餓死する。大規模白化により多くのサンゴが死滅していることからわかるように、自然界では白化からの回復は容易ではない。

白化からの回復には、環境中から獲得した褐虫藻、もしくはサンゴ内に残り分裂して増えた褐虫藻が利用される。これまでの研究により、白化からの回復に影響を与える要因として、(1) 環境中の褐虫藻密度、(2) サンゴに残った褐虫藻の密度(白化の程度)、(3) サンゴの捕食力、(4) 共生可能な褐虫藻の多様性(種特異性)が考えられている。しかし、白化からの回復が難しい理由は不明である。

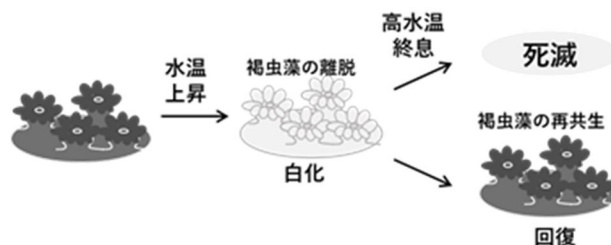


図1. 白化したサンゴのその後。白化したサンゴは、高水温が終息した後、褐虫藻を再共生させて回復するか、それができずに死滅する。

2. 研究の目的

サンゴの大規模白化により、生物多様性に富んだサンゴ礁生態系は危機的状況に陥っている。その主な原因は、異常な高水温によりサンゴが白化し、その後の回復(褐虫藻の再共生)が起これずに死滅したことにある。なぜ白化からの回復はこうも難しいのか? その答えを見つけるために、本研究課題では、褐虫藻の共生能力に着目して研究を行った。

3. 研究の方法

(1) 高温ストレスが褐虫藻と宿主の共生能力に与える影響

実験には、モデルのイソギンチャク(*Exaiptasia*)を宿主として用いた。褐虫藻(CS-164)とイソギンチャク(非共生状態:人工的に褐虫藻を除去した状態)をそれぞれ常温(25)もしくは高温(32)で3日間培養し、25で両者を出会わせた。共生した褐虫藻の確認は、蛍光顕微鏡を用い、褐虫藻のクロロフィル蛍光を指標に行った。同様の実験を異なる褐虫藻(CCMP2459)でも行った。

(2) サンゴを用いた検証実験

高温ストレスが褐虫藻の共生能力に与える影響をサンゴで検証した。実験にはココビミドリイシ(*Acropora digitifera*)の稚ポリプを用いた。サンゴの産卵の後、受精卵から稚ポリプまで、ろ過海水と人工海水を用いて飼育しており、持ち込みの褐虫藻はない。異なる3つの温度で3日間培養した褐虫藻(CS-164)を稚ポリプの入ったプラスチックカップに加え、25で共生過程を観察した。

(3) 高温ストレスが褐虫藻に与える影響

高温ストレスによる共生能力の低下の原因を探るために、高温ストレスが褐虫藻の成長速度、生存率、細胞サイズ、運動性に与える影響を調べた。実験には高温ストレス感受性の高い褐虫藻(CS-164)を用いた。

4. 研究成果

(1) 高温ストレスが褐虫藻の共生能力に与える影響

褐虫藻とイソギンチャクを25で培養し、25で出会わせた場合、共生が確認された(図2)。一方、両者とも32で培養した場合、共生は確認されなかった(図2)。次に、褐虫藻を32で、イソギンチャクを25で培養した場合、共生は確認されなかったが、褐虫藻を25で、イソギンチャクを32で培養した場合、共生が確認された(図2)。これらの結果より、褐虫藻は一度高温ストレスを経験すると、共生能力を喪失することが明らかとなった。また、その後の実験により、共生能力の喪失は一時的であることが示された(数日から数週間で回復する)。興味深いことに、同様の実験を異なる褐虫藻(CCMP2459)でも行ったが、高温ストレスによる共生能力の喪失は見られなかった(Kishimoto et al. 2020)。

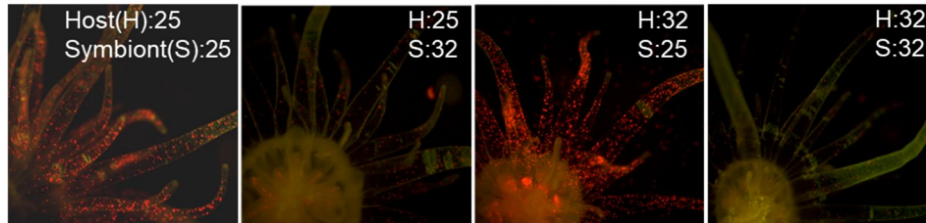


図 2 . 高温ストレスによる褐虫藻の共生能力の低下。 宿主のイソギンチャク (Host; H) と褐虫藻 (Symbiont; S) をそれぞれ 25 もしくは 32 で 3 日間培養し、両者を 25 で出会わせ、3 日後の蛍光写真。赤く見えるのが共生する褐虫藻のクロロフィル蛍光。

次に、宿主に共生している状態でも、高温ストレスにより褐虫藻の共生能力が失われるのかを調べた。実験では、褐虫藻 (CS-164) を共生させたイソギンチャクを用い、25 と 32 で培養時にポリプから排出された褐虫藻を用い、25 で共生実験を行った。その結果、宿主に共生している状態に高温ストレスを受けても、褐虫藻の共生能力が失われることが明らかとなった (Kishimoto et al. 2020)。

海水温の上昇により、サンゴの白化が起こる。その後、高水温が終息し、白化したサンゴは環境中の褐虫藻、もしくはサンゴ内に残り分裂して増えた褐虫藻を獲得し、白化から回復することができる。しかし、自然界ではその回復が難しい。今回の研究により、白化からの回復が難しい理由の一つが、高温ストレスによる褐虫藻の共生能力の喪失であることが示された。また、褐虫藻種 (タイプ) 間で、温度感受性が異なることも示された。この結果は、高温に適した褐虫藻が環境中の多く存在する場合、もしくはあらかじめ共生させている場合、白化からの回復が起こりやすくなることを示唆する。

(2) サンゴを用いた検証実験

イソギンチャクで見られた実験結果が、サンゴでも見られるか検証した。材料にはココビミドリイシの稚ポリプを用いた。褐虫藻 (CS-164) を 25、32、34 でそれぞれ 3 日間培養し、25 で稚ポリプと出会わせ、ポリプに共生する褐虫藻の密度を調べた。その結果、培養温度が高くなるにつれ、ポリプに共生する褐虫藻の密度が低下することが明らかとなった。この結果より、高温ストレスによる褐虫藻の共生能力の喪失が、サンゴの白化からの回復を抑制する要因となることが示された。

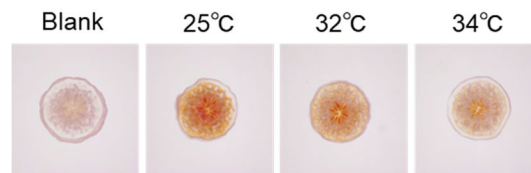


図 3 . サンゴ幼ポリプでの共生実験。 宿主としてココビミドリイシの幼ポリプを用いた。褐虫藻を 3 つの異なる温度で 3 日間培養し、幼ポリプに加えた。褐虫藻を加えて 3 日後の写真。褐虫藻を加えなかった幼ポリプ (Blank) では、褐虫藻 (褐色) は見られな

(3) 高温ストレスが褐虫藻に与える影響

高温ストレスを受けた褐虫藻 (CS-164) が共生能力を失う原因を調べた。その結果、25 と 32 とで褐虫藻の成長速度、生存率、細胞サイズ、クロロフィル蛍光に大きな差は見られなかった。しかし、褐虫藻の運動性に関しては、培養温度が高くなるにつれ、運動性 (鞭毛で動いている状態) の褐虫藻の割合が非運動性 (丸形の動きのない状態) に比べ、顕著に低下することが明らかとなった。そのため、高温ストレスによる褐虫藻の共生能力の低下の原因の一つとして、褐虫藻の運動性の低下が考えられる。しかし、高温で培養した褐虫藻を人工的にポリプ内に導入した場合でも、共生が抑制された。そのため、高温ストレスによる褐虫藻の共生能力の低下には、運動性以外の要因も関わっていると思われる。しかし、本研究ではその要因が何かは明らかにできなかった。最近の研究報告では、褐虫藻細胞表面の認識物質の変化が、高温ストレスによる共生能力の喪失に関わっている可能性が報告されている (Maruyama et al. 2022)。

< 引用文献 >

Kishimoto et al. (2020) Loss of symbiont infectivity following thermal stress can be a factor limiting recovery from bleaching in cnidarians. *The ISME Journal*, 14: 3149-3152.

Maruyama et al. (2022) Heat stress of algal partner hinders colonization success and alters the algal cell surface glycome in a cnidarian-Algal symbiosis. *Microbiology Spectrum*, 10, e01567-22.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Mariko Kishimoto, Andrew H Baird, Shinichiro Maruyama, Jun Minagawa, Shunichi Takahashi	4. 巻 14
2. 論文標題 Loss of symbiont infectivity following thermal stress can be a factor limiting recovery from bleaching in cnidarians	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The ISME Journal	6. 最初と最後の頁 3149-3152
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41396-020-00742-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 1件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高橋俊一
2. 発表標題 サンゴと藻類の共生：サンゴの高温環境適応
3. 学会等名 マリンバイオテクノロジー学会シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
研究分担者	丸山 真一郎 (Maruyama Sinichiro) (50712296)	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授 (12601)	
研究分担者	波利井 佐紀 (Harii Saki) (30334535)	琉球大学・熱帯生物圏研究センター・准教授 (18001)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
オーストラリア	James Cook University			