

サンゴの白化・絶滅を防御する天然の化合物を発見

—サンゴの共生細菌が放出する天然色素が褐虫藻のストレス耐性を上げる—

概要

京都大学大学院農学研究科応用生命科学専攻の植田充美 教授、元根啓祐 同博士課程学生（日本学術振興会特別研究員）らの研究グループは、サンゴの白化・絶滅を防ぐ天然の化合物を、サンゴに共生する細菌が生合成していることを発見しました。

近年、地球温暖化に伴う海水温上昇などによりサンゴが大量に白化・死滅し、サンゴ礁に生息する多様な生態系をも脅かしています。この白化現象は、熱や光といった環境ストレスのために、サンゴに共生する褐虫藻の光合成系が機能不全に陥り、活性酸素種が過剰に産生され、褐虫藻が離脱することによって起こります。

本研究は、白化現象の原因を分子レベルで解明するため、褐虫藻の熱ストレスおよび光ストレス耐性を向上させている共生細菌を単離し、ゲノム解析と代謝物分析を行いました。その結果、この共生細菌が、天然色素カロテノイドの一種で、強力な抗酸化性を持つゼアキササンチンを生合成していることを見出しました。このゼアキササンチンを褐虫藻に対して投与したところ、活性酸素種の生産量が減少したことから、白化現象をゼアキササンチンにより防御できることが判明しました。ゼアキササンチンは、陸上植物にも多く見られるカロテノイドであり、生合成と海洋散布が可能であるため、実地実験に移行すれば海洋資源の保護に大きく貢献できるものと期待されます。

本研究成果は、2020年1月22日（日本時間）に米国微生物学会の国際学術誌「mBio」のオンライン版に掲載されました。



健康なサンゴ



白化（絶滅前）のサンゴ

1. 背景

サンゴ礁は海洋面積のわずか 0.2%を占めるに過ぎませんが、全海洋生物種の約 25%が生息する、地球上で最も生物多様性の豊かな環境の一つです(図 1)。サンゴ礁を構成するサンゴは刺胞動物に分類され、プラヌラと呼ばれる幼生の時期を経て、親サンゴへと成長します。また、サンゴは微細藻類の褐虫藻をはじめとする様々な微生物と共生関係を築き、サンゴ共生体を形成しています(図 2)。しかし近年、地球温暖化に伴う海水温上昇などの影響でサンゴが死滅する観察例が世界中で多数報告されており、世界のサンゴの約 3 分の 1 の種が絶滅の危機にあると言われていています(図 3)。サンゴの死は、サンゴ礁に生息する多種多様な生物の消滅にもつながるため、早急な対応が求められています。

具体的には、海水温上昇は、サンゴ幼生の死滅や親サンゴの白化(褐虫藻を失うことで白くなる現象)を引き起こし、サンゴの崩壊や、サンゴ礁に生息する多種多様な生物の消滅につながります。そのため、サンゴが白化・死滅する原因を分子レベルで解析し、それを防御する保護技術を開発することが求められています。

2. 研究手法・成果

サンゴの死滅の原因として大きな問題になっているのが、サンゴが細胞内に共生している褐虫藻を失うことで白くなる「白化現象」です。サンゴの白化は、褐虫藻に熱ストレスや光ストレスがかかることで光化学系が機能不全に陥り、活性酸素種の過剰な産生が起こることで引き起こされると考えられています。そのため、白化現象を防ぐには、褐虫藻のストレス耐性を向上させることが重要です。本研究では、褐虫藻に共生している細菌に注目し(図 4)、細菌が褐虫藻のストレス耐性に与える影響を調べました。

まず、既にゲノム解読されているアザミサンゴ(*Galaxea fascicularis*)から単離した褐虫藻を培養して細菌叢解析を行ったところ、褐虫藻にはフラボバクテリアとアルファプロテオバクテリアが主に共生していることが分かりました。そこで、抗生物質を含む培地で褐虫藻を培養したところ、フラボバクテリアの相対存在量が減少しました(図 5)。この褐虫藻を熱ストレスおよび光ストレス条件下で培養し、光化学系 II の最大量子収率および活性酸素種の生産量を測定したところ、抗生物質処理をしなかった褐虫藻に比べて、有意に最大量子収率が減少し、活性酸素種の生産量が上昇していました。さらに、褐虫藻に共生していた細菌フラボバクテリアの単離を行い、GF1 株と命名しました(図 6)。そして、抗生物質処理をした褐虫藻に対して GF1 株の再接種を行ったところ、抗生物質処理をしなかった褐虫藻と同程度までフラボバクテリアの相対存在量が回復し、光化学系 II の最大量子収率および活性酸素種の生産量も改善しました(図 5)。これらの結果は GF1 株が褐虫藻のストレス耐性の向上に寄与していることを示しています。

次に、GF1 株が褐虫藻のストレス耐性の向上に寄与するメカニズムを明らかにするため、GF1 株のゲノム解析を行いました。その結果、GF1 株は、天然色素カロテノイドの一種で、目の網膜にも含まれる色素ゼアキサンチンの生合成経路を持つことが明らかになり、その生合成酵素をコードする遺伝子群の同定にも成功しました。また、LC-MS/MS(液体クロマトグラフィー質量分析法)による単離 GF1 株の代謝物分析を行い、ゼアキサンチンを生産していることを代謝物レベルでも実証しました(図 7、8)。ゼアキサンチンには抗酸化作用があり、活性酸素種を消去する効果があるため、これらの結果から GF1 株がゼアキサンチンを生産することで、褐虫藻のストレス耐性の向上に寄与していると仮説を立てました。この仮説を検証するため、熱ストレスおよび光ストレス条件下で培養した褐虫藻に対してゼアキサンチンを投与したところ、光化学系 II の最大量子収率が有意に上昇し、活性酸素種の生産量が有意に減少しました。したがって、GF1 株は、ゼアキサンチンの生産を通して、褐虫藻のストレス耐性の向上に寄与していると考えられます。

3. 波及効果、今後の予定

2016年には、世界最大のサンゴ礁、グレートバリアリーフにおいて約50%のサンゴが死滅するという史上最悪の白化現象が起き、今やサンゴは地球規模で絶滅の危機に瀕している。我々は、これまでに、最新のバイオテクノロジーとデータサイエンスを融合した研究により、その白化現象の防止に効果のある化学物質を発見し、その機能を明らかにしました。この化学物質は、活性酸素の発生を防ぐことにより、サンゴ本体の温暖化による白化絶滅を防止することができます（関連先行研究参照）。これにより、地球規模の資源保護に貢献できる方法が見えてきました。

本研究ではさらに、海洋散布でき、生態に悪影響を与えない物質の発見に努めた結果、網膜や網膜加齢黄斑変性症の治療に効果のあるゼアキサントンをサンゴに共生する細菌が放出していることを突き止めました。ゼアキサントンは、陸上植物にも多く見られるカロテノイドであり、生合成も可能で、実地実験に移行すれば海洋資源の保護に貢献できるものと考えられます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、京都大学大学院農学研究科応用生命科学専攻、京都市産業技術研究所・京都バイオ計測センターとの共同研究の成果です。

<用語解説>

光化学系II：光子を捕らえ、それで水を酸化する反応

量子収率：吸収した光子に対する反応分子の割合

<関連先行研究>

「サンゴの白化絶滅を防ぐ新物質を発見～海洋資源保護をめざした最新のバイオテクノロジーの成果」

http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2018/180428_2.html

<研究者のコメント>

地球上で最も生物多様性の豊かな環境の一つであるサンゴ礁が、近年、地球温暖化で破壊されてきており、サンゴの約3分の1の種が白化・絶滅の危機にあります。サンゴの死は、サンゴ礁に生息する多種多様な生物の消滅にもつながるため、私たちは先行研究において、活性酸素を除去する医用高分子の投与により、白化現象が改善されることを発見しました。

しかし、この高分子は環境では分解できないので、海洋散布できる天然の物質が必要でした。そこで私たちは、サンゴに共生する細菌が自然に作り出し、サンゴ内に共生する褐虫藻の熱ストレスおよび光ストレス耐性を向上させ、サンゴを保全している物質の存在を想定し、その分子を探索してきました。その結果、カロテノイドの一つである抗酸化物質を世界で初めて同定することに成功しました。この物質を生産してサンゴに投与すれば、地球温暖化によるサンゴの白化・絶滅防御に貢献できるのではないかと考えられます。



植田 教授

元根 特別研究員

<論文タイトルと著者>

タイトル：A zeaxanthin-producing bacterium isolated from the algal phycosphere protects coral endosymbionts from environmental stress (サンゴから単離したゼアキサントシン生産細菌が環境ストレスからサンゴの白化・絶滅を防御する)

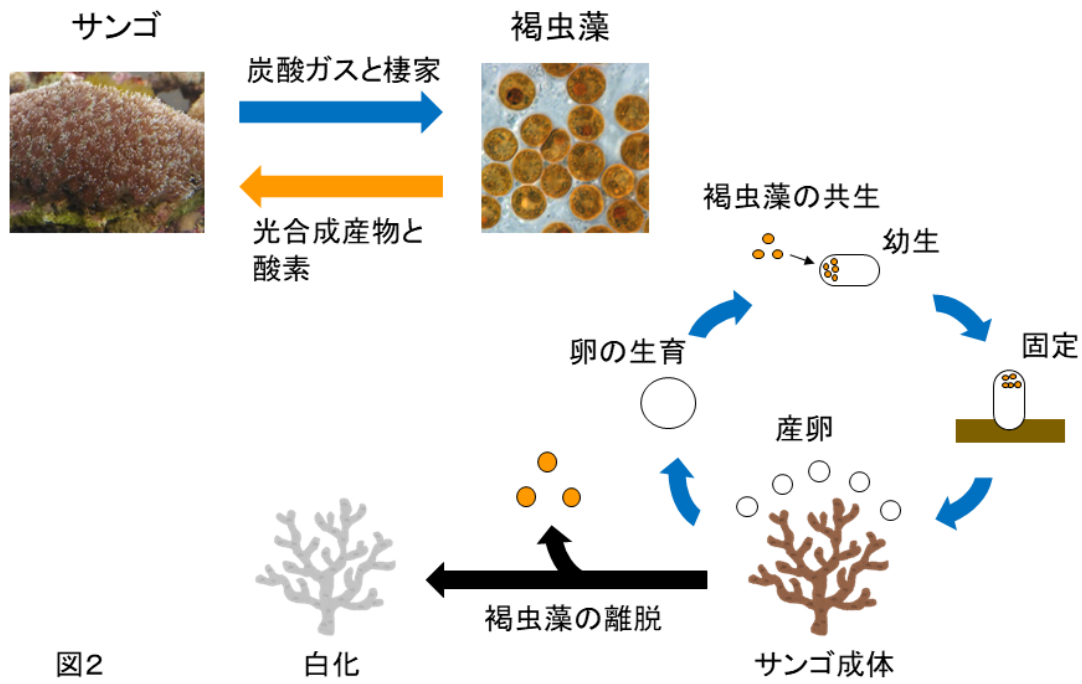
著者：Keisuke Motone, Toshiyuki Takagi, Shunsuke Aburaya, Natsuko Miura, Wataru Aoki, Mitsuyoshi Ueda

掲載誌：mBio DOI：未定

<参考図表>



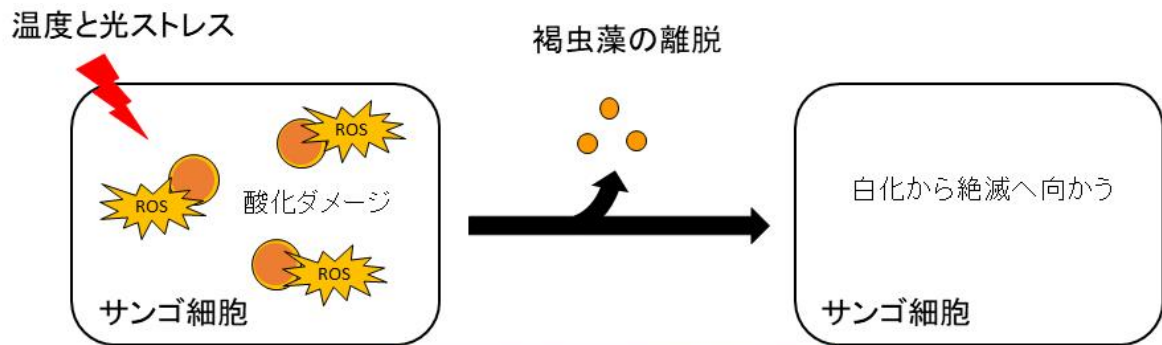
図1. 健康なサンゴ礁



Modified from <https://www.oist.jp/ja/news-center/photos/11319>

図2

図2. サンゴと褐虫藻など微生物との共生関係



絶滅前の白化サンゴ礁

図3

図3. サンゴの白化

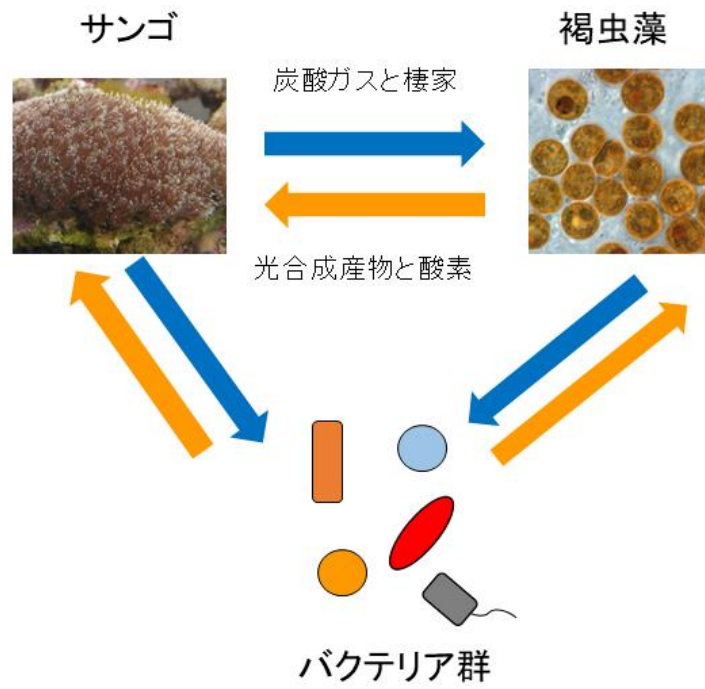


図4

図4. サンゴと細菌との共生

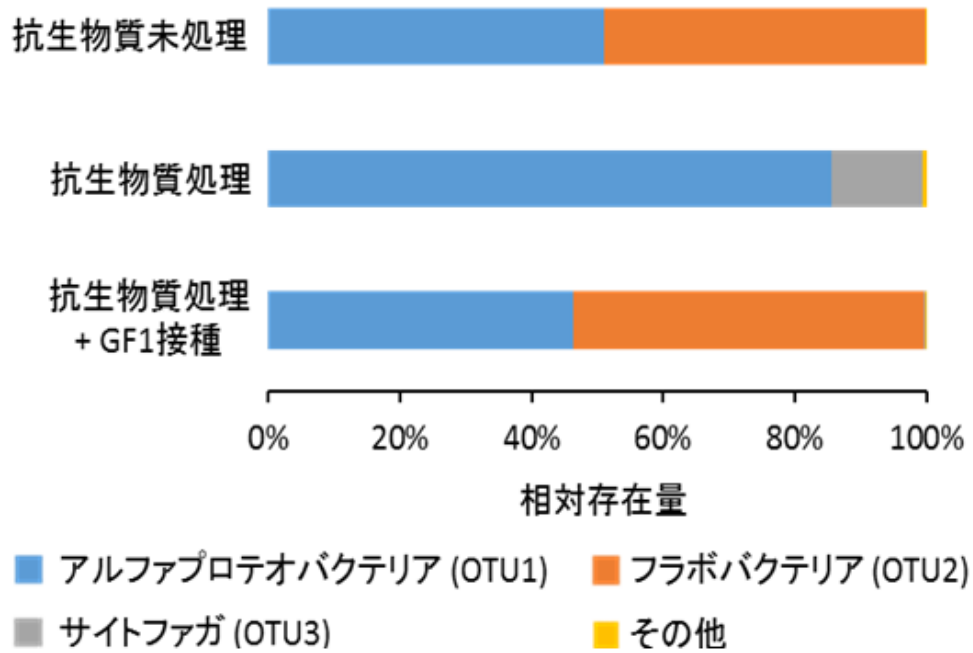


図5. 抗生物質を含む培地で褐虫藻を培養したところ、フラボバクテリアの相対存在量が減少した。

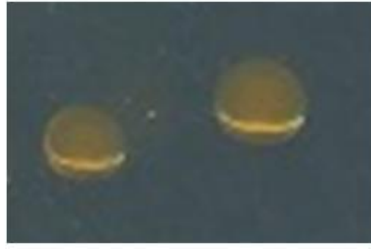


図 6. GF1 株

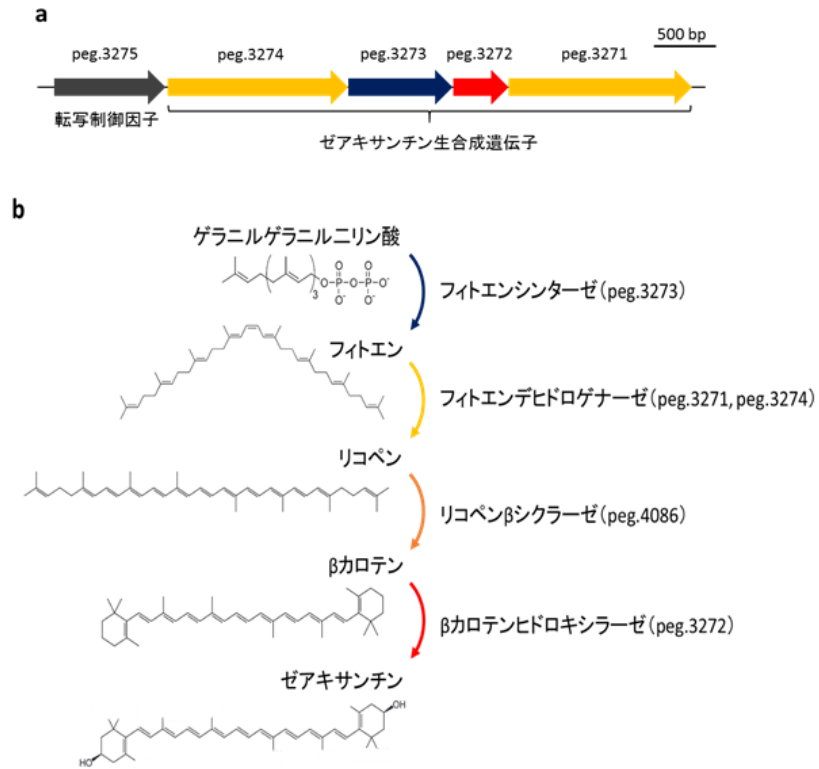
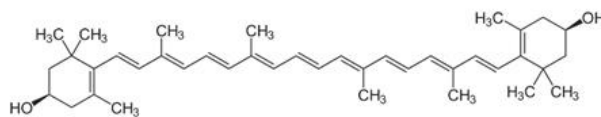


図 7. ゼアキサンチンの生合成経路



目の網膜や黄斑部で抗酸化効果を発揮し、活性酸素から目を守る効果がある成分
マリーゴールドにも含有

図 8. ゼアキサンチン