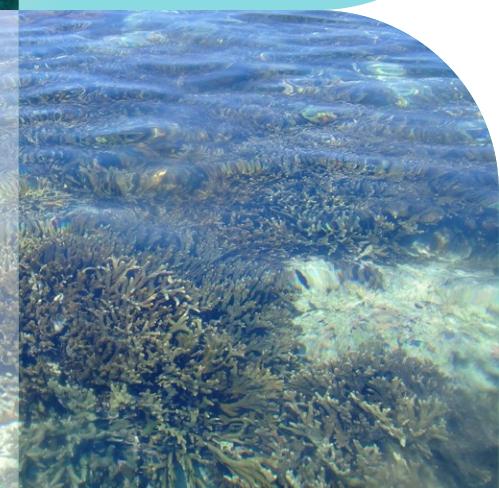


サンゴ礁保全プロジェクト

沖縄で探る白化のメカニズムと共生の科学



研究の軌跡と主な成果

科学的な発見（成果1～4）と、市民社会への波及（成果5）を両輪として発展してきました。その成果は、単に海の生態系を守る研究にとどまらず、人と自然の共生を実現する社会モデルの構築へと結実しています。



成果1
白化の発生要因と内部プロセスの解明

サンゴの白化を「不可避な現象」とみなす従来の見方に対し、サンゴ自身の回復力と防御能力の存在を示唆する成果です。

成果2
共生生物の複合体「ホロビオント」という新しい視点を認識

ホロビオントの考え方では、サンゴ礁を「生きた共生社会」として捉えるという新しい認識を社会にもたらしました。この知見は、サンゴ礁を単なる自然資源としてではなく、多様な生命が協働する生態システムとして保全していく必要性を示すものです。

成果3
防御と回復を支える細胞レベルの仕組みの解明

白化したサンゴが「完全に死滅する存在」ではなく、回復可能な生命体であることを示しました。この知見は、サンゴ礁保全の科学的根拠として重要であり、環境ストレスを受けた生態系がどのように再生しうるかを示す希望のデータとなっています。

成果4
栄養補給と抗酸化作用による回復プロセスの実証

サンゴの保全や養殖、移植などの応用研究にもつながる重要な成果です。ビタミンや藻類など自然由来の物質によってサンゴの再生力を高めるというアプローチは、持続可能な海洋生態系の回復に向けた科学的根拠となります。

市民科学の展開と社会への波及

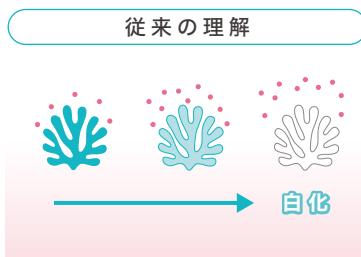
研究者・企業・NGO・市民が協働する市民科学の枠組みを確立し、多くの市民が調査や普及活動に参加しました。こうした取り組みは、科学的知見の社会への還元を進めるとともに、自然資本の保全を支える実践的なモデルとして広がりを見せています。

白化の発生要因と内部プロセスの解明

サンゴの白化現象とは

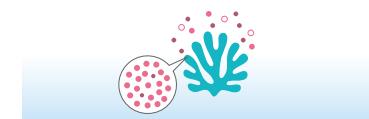
サンゴが白く見える「白化現象」は、海水温の上昇や強い紫外線など、環境からのストレスによって引き起こされます。これまで白化は「サンゴの体内に共生する褐虫藻（かっちゅうそう）が高温に耐えられず、体外へ逃げ出すため」と考えられてきました。しかし、本プロジェクトの研究により、白化の主な原因是褐虫藻の“逃散”ではなく、体内での“色素喪失”であることが明らかになりました。実験では、サンゴの中にいる褐虫藻のうち約70～80%が色素を失い、透明化や縮小を起こしていることが確認されました。一方、実際に体外へ放出される褐虫藻は1%未満に過ぎません。つまり、サンゴは褐虫藻を失うというよりも、体内で変化した褐虫藻の姿が透けて見えてることで白く見えているのです。この発見は、「白化=共生藻の喪失」という従来の理解を根本から見直すものであり、サンゴの内部で起こる生理的な応答や防御の仕組みを考える上で重要な一步となりました。

● 本プロジェクトで明らかになった白化メカニズム



高水温時に、サンゴと共生する褐虫藻が体外へ逃げ出することで白化が起こると考えられていた。水温が下がれば、褐虫藻は再びサンゴに戻るとされていた。

通常時



褐虫藻は活発に増殖し、サンゴは余分な褐虫藻を分解・排出して体内のバランスを保つ。

高温・強光ストレス下



高水温や強光により、サンゴ内部の褐虫藻が傷つき、色素を失い透明化や縮小を起こす。

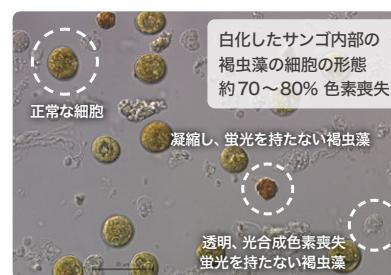
研究の意義

白化を“外的現象”としてではなく、サンゴ体内の生理・生化学的変化として捉える新しい視点をもたらしました。

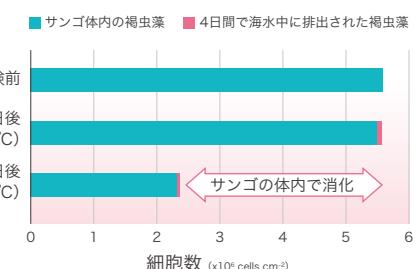
この知見により、白化の過程でサンゴがどのように内部環境を維持し、どこまで自己修復を行うのかを理解する道が開かれました。

今後のサンゴ礁保全や回復技術の開発に向けて、「サンゴ内部で何が起きているのか」を解き明かすことの重要性が、改めて認識されています。

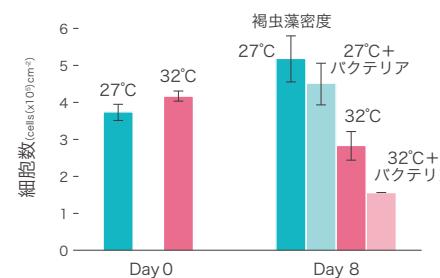
● 白化した内部の褐虫藻



● 高温水での褐虫藻の細胞数の変化



● 複合ストレスによる白化：温度+バクテリア感染



8日間の飼育後のサンゴの様子



共生生物の複合体(ホロビオント)という新しい視点を認識

サンゴは一つの生き物ではない



研究の意義

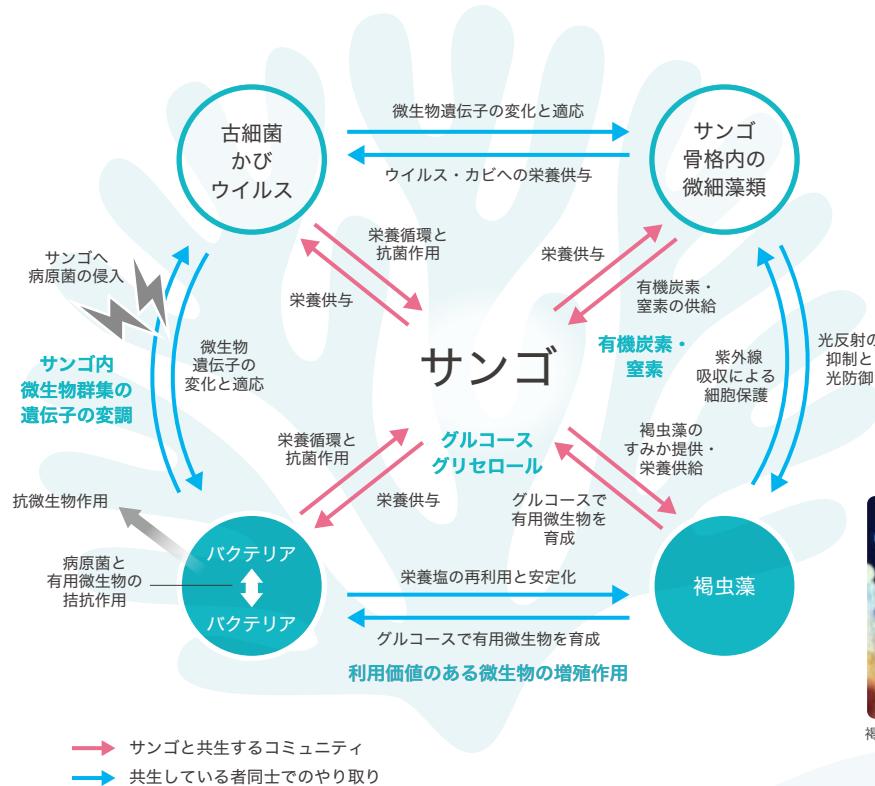
ホロビオントという視点は、サンゴの生命維持を「個体の現象」から「共生ネットワークの現象」へと拡張するものです。この概念を通じて、サンゴ体内の微生物群がどのようにサンゴの健康・免疫・再生を支えているかが理解され、環境ストレスに強いサンゴの育成や保全に向けた研究の新たな方向性を示しました。

ホロビオントという考え方

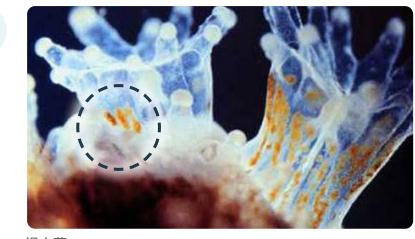
サンゴ・褐虫藻・バクテリア・ウイルスなどが一体となって機能する生物共同体を、科学の世界では「ホロビオント(Holobiont)」と呼びます。“holo”は「全体」、“biont”は「生命体」を意味し、サンゴを一つの独立した生き物としてではなく、多様な生命が連携する一つのシステムとして捉える概念です。本プロジェクトでは、このホロビオントの概念を取り入れ、サンゴ体内の褐虫藻やバクテリアの働き、栄養循環、物質交換の仕組みを解明しました。その結果、白化や病気などの環境ストレスに対しても、サンゴが単独で反応するのではなく、共生する微生物群と協調して防御・回復を行うことが明らかになりました。

一見すると「岩のような植物」に見えるサンゴですが、実はクラゲやイソギンチャクと同じ動物です。その体の中には、光合成を行う褐虫藻という植物プランクトンが多数すみついており、さらにその周囲には、多様なバクテリアや微生物、ウイルスが共に存在しています。このように、サンゴは単独の生物ではなく、多様な微生物たちと支え合う共生の集合体で成り立っています。

● サンゴを構成する生物たちの役割と相互作用



ホロビオントのメンバーと役割	
バクテリア :	有機物分解と栄養塩供給
ウイルス :	免疫・進化への関与
病原菌と抗菌微生物 :	病原菌抑制と体内バランス維持
褐虫藻 :	光合成で有機炭素を供給
微細藻類 :	骨格内で光合成し栄養補給
サンゴ自身の防御機能 :	病原菌排除と細胞防御
抗微生物作用 :	抗菌物質で体内環境を保護
微生物のすみかとしてのサンゴ :	微生物共生の場を提供



褐虫藻

Nguyen, Duc The, Casareto BE らによる
Research Journal of Microbiology, 2019を改変して作成

防御と再生を支える細胞レベルの仕組みの解明

サンゴは
「座して死を待つ存在」ではなかった

これまで、サンゴは高水温や強い紫外線などのストレスに弱く、白化すると回復できない「受け身の生物」と考えられてきました。しかし本プロジェクトの研究により、サンゴは環境変化に対して自らを守り、修復しようとする生理的な仕組みを備えていることが明らかになりました。つまり、サンゴは環境ストレスに対して“防御しながら再生する”積極的な生命活動を行っているのです。

サンゴ体内で起こる防御と修復の仕組み

サンゴが高温や強い光を受けると、体内では「活性酸素」と呼ばれる有害な物質が発生します。この活性酸素はサンゴや褐虫藻の細胞を傷つけ、白化や死滅の原因となります。しかしサンゴは、体内の細胞を守るためにいくつかの防御反応を作動させています。

① 損傷細胞を修復するHSP

サンゴはストレスを受けると、HSP（ヒートショックプロテイン）というタンパク質を生成します。これは、傷ついた細胞内の構造を再び正しい形に戻す働きを持ち、サンゴが回復するための基盤を支えます。HSPの働きは、サンゴの「自己修復システム」の中心的な要素です。

② グリセロール生成と活性酸素の制御

共生する褐虫藻は、ストレス環境下では光合成で得たグルコースをグリセロールへと変換します。グリセロールは、活性酸素を中和し、病原菌の増殖を抑える役割を果たします。また、サンゴは褐虫藻が持つ光毒性のあるクロロフィル a を、無害なシクロエノールに変換することで体内的な活性酸素の発生を抑制しています。これにより、細胞の損傷を最小限にとどめています。

■ 褐虫藻による活性酸素無害化のプロセス

褐虫藻の光合成系で増える活性酸素を、サンゴ体内の酵素反応で無害化。クロロフィル由来の光毒性も処理し、白化回復に働く防御機構を解明。



活性酸素が発生すると
サンゴは
防御システムを発揮

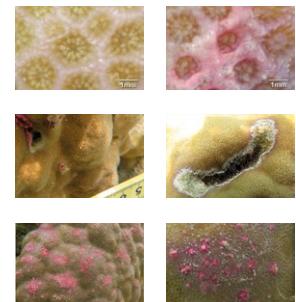
葉緑体が損傷したとき、クロロフィルをシクロエノールに分解することで
光毒性を抑えられる。

クロロフィル a 光毒性あり → シクロエノール 光毒性なし

③ 蛍光タンパク質による紫外線防御

サンゴの体内に存在する蛍光タンパク質は、紫外線を吸収し、光エネルギーを安全な形で放出します。この機能により、褐虫藻やサンゴ自身の細胞を紫外線のダメージから守ることができます。ピンクや緑に発光して見えるサンゴは、この防御機能が活性化している状態を示しています。

■ 沖縄 瀬底島のハマサンゴの様々なピンク斑点



これらの反応は、分子・細胞レベルで連携しながら働く**生体防御システム**として機能しており、サンゴの生存戦略の中核を担っています。

栄養補給と抗酸化作用による回復プロセスの実証

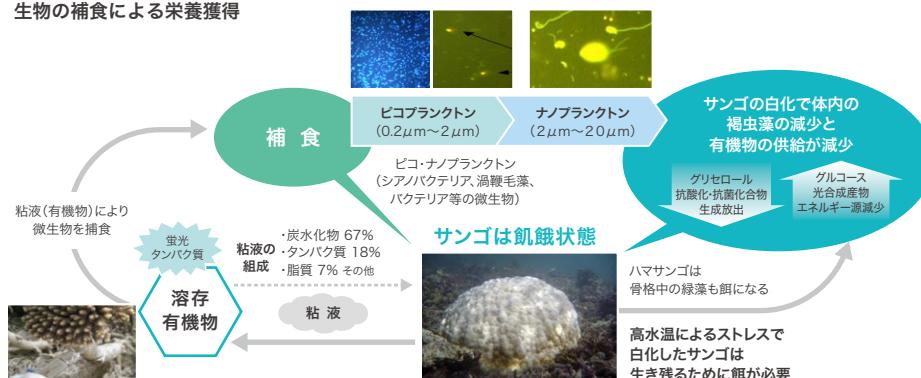
白化サンゴは「生きている」

海水中の微生物を“食べて”生き延びる

白化によって、褐虫藻からの栄養供給が70%以上減少すると、サンゴは飢餓状態に陥ります。その際、サンゴは海水中のピコ・ナノサイズのプランクトンやバクテリアを捕らえ、粘液を使って体内に取り込みます。これは、サンゴが自らの生命を維持するために行う“補食”であり、サンゴが能動的に環境から栄養を確保していることを示す重要な発見です。このような栄養補給の行動は、白化後のサンゴの回復速度や生存率に直結しており、従来「動かない存在」と見なされていたサンゴの生理的な適応力を裏付けています。

● 白化サンゴの飢餓状態からの回復：

生物の補食による栄養獲得



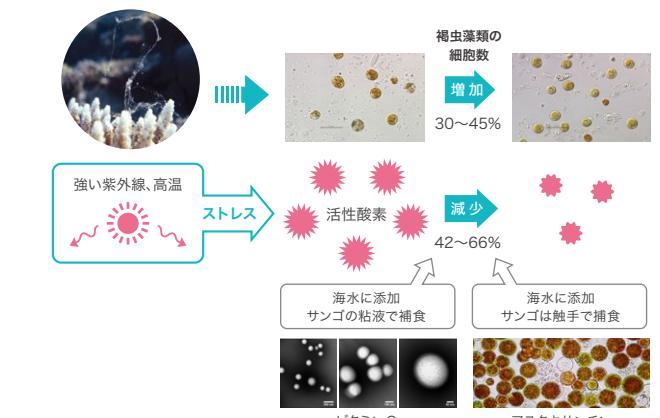
白化したサンゴは、一般的に「死んでしまった」と見なされがちです。しかし本プロジェクトの研究により、白化後もサンゴ体内には多くの褐虫藻が活動を続けていることが確認されました。白化はサンゴがすぐに死ぬことを意味せず、サンゴは光合成や捕食などの代謝活動を通じて回復を試みています。

抗酸化物質による細胞回復の促進

高水温や強い光のストレスを受けると、サンゴ体内では活性酸素が過剰に発生し、細胞や褐虫藻の損傷を引き起します。本研究では、これを軽減するための抗酸化物質(ビタミンCやアスタキサンチン)による回復効果の有効性を検証しました。

- 微細なビタミンCマイクロカプセルを開発し、海水中に添加。サンゴが自ら放出する粘液を通してこれを取り込み、体内の活性酸素を効果的に減少させることを確認しました。

- アスタキサンチン(赤い藻類由来の天然色素)はビタミンCの約6,000倍の抗酸化力を持ち、高水温下でも褐虫藻の光合成機能の回復を促しました。この結果、白化したサンゴの体内活性酸素は42~66%軽減し、褐虫藻の細胞数は30~45%に増加することが観測されました。



サンゴが環境ストレス下で「餌を得て、酸化ダメージを抑え、自己修復を図る」という複合的な生存戦略を持つことを実証したものです。栄養補給と抗酸化作用という二つのプロセスが相互に作用し、白化したサンゴの回復を支えるメカニズムを具体的に示しました。

成果
5

市民科学の展開と社会への波及

研究者・企業・市民が協働する新しい科学の形

本プロジェクトでは、サンゴ礁保全を「科学者だけの研究」ではなく、**研究者・企業・市民が協働して取り組む社会的プロジェクト**として推進しました。この取り組みは、学術研究と社会参加を融合させた「市民科学」の先進的な実践です。

三菱商事は2005年の開始以来、アースウォッチ・ジャパンや静岡大学、琉球大学と連携し、研究調査に企業ボランティアを派遣。フィールドでの観察・記録・試料採取などを通じ、一般の参加者が科学的理解を深めながら、サンゴ礁保全の一端を担う仕組みを構築しました。

社会への波及と持続可能な展開

市民科学の理念のもと、研究者・企業・市民が共通の目標を持って活動することで、科学的根拠に基づく環境保全活動の社会モデルが確立されました。このモデルは、国内外の研究ネットワークにも共有され、「サンゴ礁保全=科学と社会の協働」という新しい枠組みを生み出しました。

市民科学の構築・推進
調査ボランティアに
450名超
が参加

シンポジウム開催
2010年
日本サンゴ礁学会
2012年
国際サンゴ礁学会

科学的成果と社会的学びの両立

市民科学の導入によって、サンゴの白化メカニズムや回復過程に関するデータの収集効率が高まり、研究者の長期的モニタリングを支える実践的な体制が整いました。同時に、参加者が「自ら観察し、変化を実感する」体験を通じて、科学的知見が社会の理解に還元される仕組みが形成されました。

子ども向けの体験プログラムでは、顕微鏡観察や光実験などを通じて「見えない海の仕組み」を学ぶ機会を提供。

これにより、次世代の環境人材育成や海洋リテラシー向上にも寄与しました。



研究の意義と社会的インパクト

本成果は、サンゴ礁保全を通じた研究者・企業・市民の協働モデルを実証した点にあります。それは単なるCSR活動にとどまらず、社会全体が科学的知見を共有し、自然資本の価値を理解・支える新しい社会実践の形です。

学術貢献ハイライト

受賞 **6件**

(海洋立国内閣総理大臣賞・
国際サンゴ礁学会最優秀論文賞 等)

論文 **61編** 著書 **5編**

国際記事 **7編**

国内記事 **31編**

国際学会発表 **48回**

国内学会発表 **102回**

教育・セミナー開催
MCフォレストスクール・
国立科学博物館
「サンゴの不思議を探る」
小学生110名
参加

おわりに

サンゴ礁の未来と保全

近年の気候変動や人間活動により、サンゴ礁を含む沿岸の自然環境は大きなダメージを受けています。

特に2023～2024年の海水温上昇で、沖縄では約80%のサンゴが白化したと報告されています。

しかし、最新の研究では、サンゴが高水温などのストレスに対して自ら適応しようとする力があることが分かってきました。

たとえば、細胞内で有害な物質の発生を抑えたり、

傷ついた藻類を分解・再利用する仕組み（オートファジー）を使って生き延びようとしています。

こうしたミクロな視点からの研究は、サンゴの生命維持の仕組みを明らかにし、

保全や再生の新たな方法を見つける手がかりになります。

本プロジェクトは、ミクросケールの研究戦略と観察やフィールドワークによる

サンゴとサンゴ礁研究の新たな道を切り開いた先駆的な研究と市民科学という新たな社会貢献として

国際的にも評価されると確信しています。



研究リーダー
鈴木 欽
海の自然史研究所 顧問
静岡大学名誉教授
静岡大学防災総合センター
客員教授



共同研究者
CASARETO Beatriz
海の自然史研究所 上席研究員
静岡大学名誉教授
静岡県ふじのくに地球環境史
ミュージアム客員教授

参考文献

成果1：白化の発生要因と内部プロセスの解明

- Casareto, B. E., Suzuki, T., & Suzuki, Y. (2016): Chemical-biological characteristics of coral reef ecosystems at micro/nano scale: Effect of multiple and synergistic stresses. In H. Kayanne (Ed.), **Coral Reef Science: Strategy for Ecosystem Symbiosis and Coexistence with Humans under Multiple Stresses** (pp. 25–45). Springer.
- Suzuki, T., Casareto, B. E., Shioi, Y., Ishikawa, Y., & Suzuki, Y. (2015): Finding of 132, 173-cyclophophorbide a enol as a degradation product of chlorophyll in shrunk zooxanthellae of the coral *Montipora digitata*. **Journal of Phycology**, 51(1), 37–45. <https://doi.org/10.1111/jpy.12253>
- Higuchi, T., Agostini, S., Casareto, B. E., Yoshinaga, K., Suzuki, T., Nakano, Y., Fujimura, H., & Suzuki, Y. (2013): Bacterial enhancement of bleaching and physiological impacts on the coral *Montipora digitata*. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology**, 440, 54–60. DOI: 10.1016/j.jembe.2012.11.011

成果2：共生生物の複合体（ホロビオント）という新しい視点を認識

- Nguyen, D. T., Casareto, B. E., Ramphul, C., Toyoda, K., Suzuki, T., Fujiwara, T., & Suzuki, Y. (2019): Glycerol enhances growth and antimicrobial properties of two selected Vibrio bacteria associated with the coral *Montipora digitata*. **Research Journal of Microbiology**, 14, 127–137. <https://doi.org/10.3923/jm.2018.127.137>
- Nguyen, D. T., (2019): Coral holobiont functioning: interaction between coral bacterial community and zooxanthellae's photosynthetic production of glycerol. **Doctoral dissertation, Shizuoka University, Japan**. <https://shizuoka.repo.nii.ac.jp/records/11705>

成果3：防御と再生を支える細胞レベルの仕組みの解明

- Suzuki, T., Casareto, B. E., Yuchareon, M., Dhora, H., & Suzuki, Y. (2024): Coexistence of nonfluorescent chromoproteins and fluorescent proteins in massive *Porites* spp. corals manifesting a pink pigmentation response. **Frontiers in Physiology**, 15:1339907. <https://doi.org/10.3389/fphys.2024.1339907>

- Thummasan, M., Casareto, B. E., Ramphul, C., Suzuki, T., Toyoda, K., & Suzuki, Y. (2021): Physiological responses of the coral *Pocillopora damicornis* under thermal and high nitrate stresses. **Marine Pollution Bulletin**, 171, 112737. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112737>
- Nguyen, D. T., Casareto, B. E., Ramphul, C., Toyoda, K., Suzuki, T., Fujiwara, T., & Suzuki, Y. (2018): Glycerol enhances growth and antimicrobial properties of two Vibrio bacteria associated with the coral *Montipora digitata*. **Research Journal of Microbiology**, 14, 127–137. <https://doi.org/10.3923/jm.2018.127.13>
- Yuchareon, M. (2016): Pink pigmentation response during recovery period after coral bleaching. **Doctoral dissertation, Shizuoka University, Japan**. <https://doi.org/10.14945/00009914>
- Suzuki, T., Casareto, B. E., Shioi, Y., Ishikawa, Y., & Suzuki, Y. (2015): Finding of 132, 173-cyclophophorbide a enol as a degradation product of chlorophyll in shrunk zooxanthellae of the coral *Montipora digitata*. **Journal of Phycology**, 51(1), 37–45. <https://doi.org/10.1111/jpy.12253>

成果4：栄養補給と抗酸化作用による回復プロセスの実証

- Sangmanee, K., Casareto, B. E., Nguyen, D. T., Sangsawang, L., Toyoda, K., Suzuki, T., & Suzuki, Y. (2020): Influence of thermal stress and bleaching on heterotrophic feeding of two scleractinian corals on pico-nanoplankton. **Marine Pollution Bulletin**, 158, 111405. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111405>
- Sangmanee, K., (2020): Feeding on pico-and nanoplankton by scleractinian corals from Okinawa. **Doctoral Dissertation, Shizuoka University, Japan**. <https://doi.org/10.14945/00027762>
- Sangsawang, L., Casareto, B. E., Ohba, H., Vu, H. M., Meekaew, A., Suzuki, T., Yeemin, T., & Suzuki, Y. (2017): ^{13}C and ^{15}N assimilation and organic matter translocation by the endolithic community in the massive coral *Porites lutea*. **Royal Society Open Science**, 4, 171201. <https://doi.org/10.1098/rsos.171201>