

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K06786

研究課題名(和文) サンゴ共生藻による環境応答機構と共生能力との関係

研究課題名(英文) Relationship between environmental response mechanisms and symbiotic ability in coral symbiont algae

研究代表者

丸山 真一郎 (Maruyama, Shinichiro)

東北大学・生命科学研究科・助教

研究者番号：50712296

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：褐虫藻(Symbiodiniaceae科に属する単細胞の渦鞭毛藻)はサンゴ共生藻とも呼ばれ、造礁サンゴなどの刺胞動物と細胞内矯正を営み、熱帯から温帯にかけての貧栄養海域における一次生産者として重要な生態学的役割を果たしている。本研究では、この褐虫藻における環境ストレス応答を遺伝子発現レベルで明らかにし、これらの遺伝子群に着目した細胞生理学的解析により、これまで報告されていたものと異なる、糖分泌に関わる新たな経路の存在を示した。また、褐虫藻の生理作用が宿主に与える影響を多面的に解析し、宿主の生活環を通じた共生開始から成立と維持に関わる生態学的要因を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

褐虫藻と宿主刺胞動物との間での代謝産物を介した相互作用の重要性は古くから認識されてきたが、分子・細胞レベルでの知見は未だ十分ではない。本研究では、褐虫藻による宿主に対する応答を、広義での環境応答の一つと捉え直すことで、藻類の持っている環境ストレス応答機構が共生という状況でどのように活用されるのかを分子レベルで説明することを可能にした。これにより、共生に関わる分子機構の進化生態学的な理解が進んだだけでなく、サンゴの白化に見られるような生態系レベルでの環境問題に対しても、藻類による環境応答の頑健性という新たな視点からの対策が可能となった。

研究成果の概要(英文)：Dinoflagellate algae in the family Symbiodiniaceae, also known as coral-symbiotic algae, establish endosymbiotic relationships with host cnidarian animals such as reef-building corals and play an ecologically important role as primary producers in oligotrophic tropical and subtropical oceans. This study clarified environmental stress responses in the symbiotic algae at the gene expression level and, by focusing on these groups of genes, showed the presence of a novel pathway of the sugar secretion which is different from the one reported in previous studies. In addition, effects of the algal functions on the host physiology were examined via a multifaceted analysis, and ecological factors involved in the symbiosis initiation, formation, and maintenance through the life cycle of the host were characterized.

研究分野：細胞内共生

キーワード：細胞内共生 刺胞動物 褐虫藻

### 1. 研究開始当初の背景

造礁サンゴなど刺胞動物の中には、サンゴ共生藻とも呼ばれる褐虫藻 (Symbiodiniaceae 科に属する単細胞の渦鞭毛藻) と細胞内共生関係を営んでいる種が多く知られている。宿主が住みか  
と無機塩類を、共生体が光合成産物である糖を与え合う「相利共生」の好例として、また熱帯海  
域の生態系を支える重要な一次生産生物系として知られるが、その共生成立の仕組みや糖の供  
給に関わる分子機構は不明な点が多い。近年の、地球温暖化などによる海水温上昇により「サン  
ゴの白化」と呼ばれる共生崩壊現象が起こることが大きな問題となっており、宿主と褐虫藻との  
間での代謝産物のやりとりが温度などの環境ストレス要因によってどのように影響を受けるの  
かを解明する研究が必要とされていた。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、褐虫藻から宿主への糖の分泌、輸送、供給に関わる環境応答シグナル経路を  
分子・細胞レベルで明らかにすることである。特に、これまで共生において重要と考えられてい  
た過程について、褐虫藻による自律的な環境応答という視点から捉え直し、遺伝子レベルでの知  
見をもとに再解釈を行い、藻類の生存戦略としての「環境応答」「糖代謝」「共生」などの基礎的  
な素過程の関連を分子レベルで解析する共生研究を推進する。

### 3. 研究の方法

褐虫藻とミドリイシサンゴやセイタカイソギンチャクなど宿主刺胞動物との共生実験系、あ  
るいは褐虫藻の単独培養系を用いて、異なる環境・培養条件において遺伝子発現解析を行い、環  
境応答に関わる候補遺伝子を検出した。また、培養液中への代謝物質の分泌量の測定、宿主動物  
の生理状態や環境条件などの解析により、共生に関連する因子の多角的な解析を行なった。

### 4. 研究成果

(1) 本研究では、実験室での飼育や人為的な共生状態・非共生状態の誘導が容易なモデル刺胞  
動物セイタカイソギンチャクを用いることで、白化の要因と考えられる高温ストレスに対して  
遺伝子発現量の変化を比較解析した (図 1)。この結果、共生藻がいる状態といない状態のイソ  
ギンチャクとの間で、高温ストレスに対する遺伝子発現量の変動パターンが大きく異なること  
を発見した。

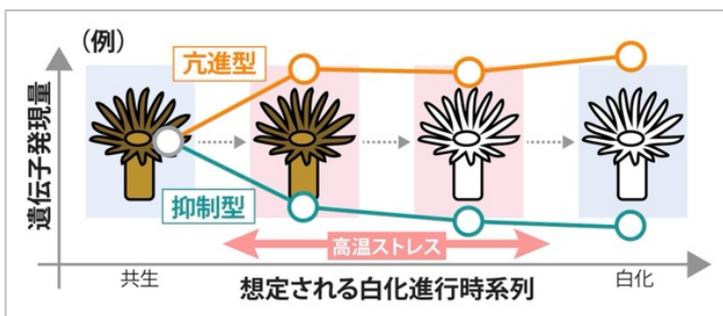


図 1. 本研究で同定された「白化関連遺伝子」の解析例。異なる共生状態・温度条件で遺伝子発現レベルを網羅的に調べることで、共生の崩壊に関わる候補遺伝子を同定した (発表論文 Ishii et al. より改変)。

また、共生体がいる状態の時に限り、刺胞動物細胞内のリソソームなどの細胞小器官で働く遺  
伝子などが重要な役割を果たす可能性を示した (図 2)。褐虫藻は刺胞動物の細胞内で「共生胞」  
と呼ばれる食胞由来の小胞内に局在するが、この共生胞がリソ  
ソームとも類似の性状を持つ小胞であることから、これらの遺  
伝子が直接的に共生胞において作用する可能性が考えられる。

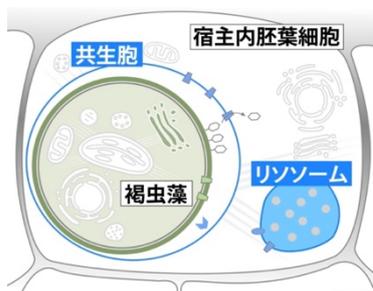


図 2. 本研究で白化現象との関連が示された宿主リソソームや共生胞に関わる細胞小器官と代謝機能 (発表論文 Ishii et al. より改変)。

(2) 共生体である褐虫藻は、高温以外にも様々な環境ストレスにさらされている。例えば、宿主刺胞動物と細胞内の共生胞は極端な酸性状態に保たれており、また刺胞動物だけでなく多くの海産動物の胃内腔も酸性環境にあると考えられている。様々な生物と共生することが知られる褐虫藻が、こうした酸性ストレスにどのような応答を示すのかについては、不明な点が多い。本研究では、異なる環境で培養した自由生活性の褐虫藻による酸性ストレス応答を、遺伝子から生理学・形態学など様々な視点で解析を行なった。その結果、酸性環境に置かれた褐虫藻はグルコースなどの単糖の環境中への分泌量を増大させることが示された。また、こうした糖分泌には細胞壁構造の改変を伴うことを見出した。

褐虫藻によるグルコースの分泌は、宿主刺胞動物への栄養供給という点で古くから重要視されてきたが、光合成活性に依存して素早く分泌が起こる経路の存在が示唆されていた程度で、分子機構は謎のままだった。本研究で示された糖分泌経路は光合成活性に依存しない新たな経路であり、褐虫藻から宿主への栄養供給という観点だけでなく、褐虫藻が海洋環境で生活する上での基本的な環境応答機構としての炭素循環という観点からも、重要な発見と言える。今後は、この新規糖分泌経路に関わる詳細な分子機構を明らかにすることで、これまで未知だった褐虫藻による糖代謝と生態系との関わりが解明されることが期待できる。

(3) 褐虫藻は、宿主刺胞動物への重要な栄養供給の役割を担っており、様々な宿主動物の生理現象に影響を与えると考えられる。例えば、造礁性イシサンゴ類の「一斉産卵」は毎年、初夏の満月に近い夜に起こることから、月齢周期に合わせた何らかのシグナルにより引き起こされると考えられているが、生殖細胞の成熟から産卵まで、海水温や日射量など、宿主だけでなく褐虫藻の生理活性も大きく変化させる環境要因に関わることが知られていた。また、産卵はある満月に近い夜に起こることは一般的に知られていたが、その間隔は一定ではなく毎年少しずつ異なるため、予測が難しいことでも知られていた。

本研究では褐虫藻による物質分泌に関する新たな知見が得られたため、褐虫藻と生態系との関わりをより広い視野で捉えるため、褐虫藻を共生させたミドリイシ属サンゴの産卵日の環境要因との関連を解析した。その結果、サンゴの産卵日が毎年満月からどれくらいずれるかが、海水表面温度などの環境要因によって説明できることを発見した。解析ではまず、日本とオーストラリアの複数のサンゴ礁においてミドリイシ属 (*Acropora*) の産卵日と産卵日決定に関わる可能性のある4つの環境要因(海水表面温度、風速、降雨量、日射量)をデータとしてまとめ、統計モデルを構築することで、地域間で共通して「産卵日と満月日とのずれ」に影響を与える環境要因を同定した。その結果、「海水表面温度」、「日射量」、「風速」が影響の大きい環境要因であることを特定した(図3)。産卵月の満月日から90日前までの海水表面温度および90日前から120日前までの区画の日射量が高いほど産卵日が早くなる一方で、満月日から60日前までの風速が強いほど産卵日は遅くなる傾向があった。これは、サンゴが環境変化に応じて産卵時期を微調整するように進化してきた可能性を示唆している。特に、生殖細胞の成熟期に当たる期間で日射量の影響が強く見られたことから、褐虫藻の光合成活性が直接的に産卵日決定という生理作用と相互作用している可能性も考えられる。今後は、本研究で影響が見られたこれらの環境要因とサンゴの繁殖生態との関係を、より詳細な分子レベルでの実験により検証していくことで、サンゴの一斉産卵の謎の解明につながると考えられる。

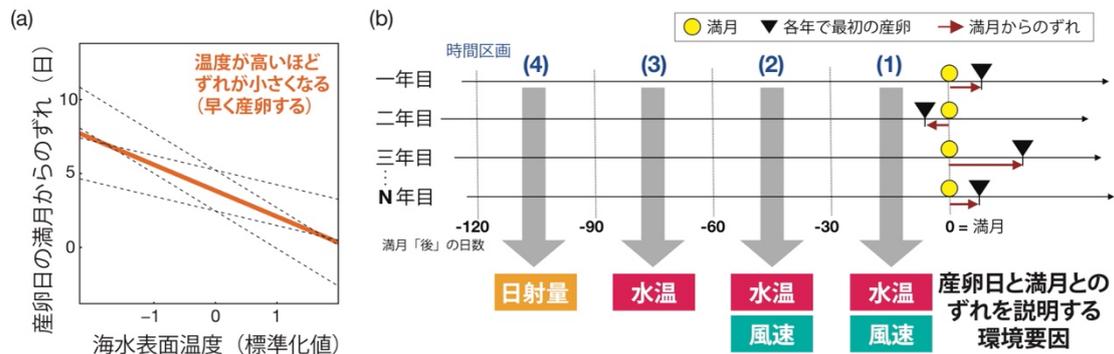


図3. 本研究で同定された「産卵日と満月日とのずれ」と環境要因との関係。

(a) 満月から30日前までの平均海水表面温度は、満月からのずれ(日数)をよく説明できる。(b) 満月から30日毎にさかのぼって区切られた各時間区画において、異なる環境要因が産卵日の満月からのずれをよく説明する因子として検出された。「水温」は海水表面温度を示す(発表論文 Sakai et al.より改変)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Sakai Y, Hatta M, Furukawa S, Kawata M, Ueno N, Maruyama S.	4. 巻 16
2. 論文標題 Environmental factors explain spawning day deviation from full moon in the scleractinian coral <i>Acropora</i>	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Biology Letters	6. 最初と最後の頁 20190760
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1098/rsbl.2019.0760	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 -

1. 著者名 Ishii Y, Maruyama S, Takahashi H, Aihara Y, Yamaguchi T, Yamaguchi K, Shigenobu S, Kawata M, Ueno N, Minagawa J.	4. 巻 9
2. 論文標題 Global shifts in gene expression profiles accompanied with environmental changes in cnidarian-dinoflagellate endosymbiosis.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 G3: Genes, Genomes, Genetics	6. 最初と最後の頁 2337-2347
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1534/g3.118.201012	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 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 石井悠、石井宏憲、高橋俊一、黒羽剛、篠原直貴、横山隆亮、出口竜作、西谷和彦、皆川純、河田雅圭、丸山真一朗
2. 発表標題 褐虫藻が低pH条件でグルコースを分泌するメカニズムと意義
3. 学会等名 日本藻類学会第45回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石井悠、丸山真一朗、高橋弘樹、相原悠介、山口剛史、山口勝司、重信秀治、河田雅圭、上野直人、皆川純
2. 発表標題 サンゴ共生藻と刺胞動物の高温ストレスによる共生崩壊メカニズムの解明
3. 学会等名 日本植物学会第83回大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

東北大学プレスリリース：サンゴは環境変化に合わせて産卵日を選ぶ  
<https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2020/01/press20200122-02-sango.html>  
東北大学プレスリリース：サンゴ共生藻と刺胞動物との共生崩壊に関わる遺伝子発現の変化を解明  
<https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2019/06/press20190603-01-sango.html>

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------