

サンゴ-共生藻におけるロバストネス・トレードオフと気候変動

リーダー： 北野宏明 特定非営利活動法人システム・バイオロジー研究機構

メンバー： Mónica Medina University of California, Merced School
of Natural Sciences
Roberto Iglesias-Prieto Universidad Nacional Autónoma
de Mexico



左から Roberto Iglesias-Prieto, Mónica Medina, 北野宏明

1. 背景および目標

気候変動などの影響で、サンゴ礁が危機に瀕している。本研究では、サンゴとその共生藻を一つのホロ生命体 (holo-organism) として捉え、リーダーが長年研究している生物学的ロバストネス理論の延長である自己拡張共生 (Self-extending symbiosis) ならびに遺伝的ポートフォリオ選択の理論を応用し、そのロバストネス・トレードオフのメカニズムを解明することで、最終的には、IPCC (気候変動に関する政府間パネル) で指摘されるような環境擾乱下において、サンゴの保護と再生に貢献する新たな知見を得ることを目指す。

生物をシステムとして捉えた場合、いろいろな外乱や内乱に対して頑健に (ロバストに) 対応できる側面があると同時に、ある種の擾乱に対しては、極めて脆弱であることが知られている。また、より環境変動に対してロバストに対応する個体は、成長率が低いなどの相反関係が観察される場合もある。このようなシステム生物学の考え方の枠組みに基づいて、地球環境変動に対してどのようにサンゴ礁を保全・再生して行くことができるかを探索する。IPCC の予測では、温暖化対策が順調に実行された場合でも、平均海水温は、2050年にピークを迎え、現在よりも2度高くなるとしている。これは、サンゴの生存に対して、大きな脅威となる。サンゴ礁の大量の死滅は、そこに依存する生物種に甚大な被害をもたらし、生物学的多様性を脅かし、さらには、地域漁業の壊滅といった経済コストにも跳ね返る問題である。

リーダーのこれまでの研究からの仮説では、より多様な共生藻との共生関係を維持するサンゴは、多様性に乏しい共生藻を有するサンゴより、環境擾乱に対してよりロバストに応答するが、より遅い増殖速度になることが予測されている。さらに、他のストレス要因を取り除くことで、温暖化に関するストレス要因に対する耐性が向上することも予測されている。本研究では、この作業仮説から出発し、実際に、カリブ海の主要な造礁サンゴである *Montastraea faveolata* を使い、共生藻の種類とストレスに対する脆弱性ならびに増殖速度の関係を、フィールド、タンク、実験室の各々の条件で測定し、遺伝子発現解析とその数理解析を行うことで、サンゴと共生藻が、いろいろな環境擾乱にどのような分子機構を用いて応答するのかを探求する。これらの解析の結果から、温暖化のピークにどのように対応するべきかの指針を得ることを目標とする。また、メンバーの Mónica Medina (UC Merced) が、サンゴの全ゲノム解析と遺伝子発現解析を、Roberto Iglesias-Prieto (Universidad Nacional Autónoma de Mexico) は、カンクンの南のプエルト・モレロスのフィールドにおいて生理学的実験を分担した。

2. 主な研究成果

(1) Bleaching and Recovery Experiment (BRE) を複数の季節で繰り返した結果、サンゴの成長速度と脆弱性のトレードオフが検証された。例えば、共生藻は、夏期においては非常に活発に光吸収を行い増殖に寄与しているが、同時に擾乱に対して脆弱な状態で活動しているために、温度や光などのストレス要因の擾乱で、容易に白化される。しかし、冬期においては、増殖速度が押さえられていると同時に、よりロバストな状態であり、環境の擾乱に対して極めてロバストに応答し、白化は見られない。また、春期に関しては、動的に共生藻の状態が、冬の状態から夏の状態へと変化する過程が、初めて確認された。

(2) *Montastraea faveolata* の全ゲノム解析を行った。これは、NOAA などとの共同で行い、この結果は、オープンアクセスとし、サンゴ研究の共有リソースとなっている。同時に、このゲノム解析の基となったサンゴは、マイアミで生体保存を行い、生理学的解析を行う際のリクエストに対応できる体制を整えている。さらに、これらのデータを解析し、遺伝子制御機構を明らかにするアルゴリズムの開発を行った。

3. 研究成果

ロバストネス・トレードオフの解析：2010年8月より数度に渡り、採取したサンプルを利用して、温度変化に対する耐性に関する実験を行った。これは、**Bleaching and Recovery Experiment (BRE)**と呼ばれ、プエルト・モレロスの実験場において、*Montastraea faverolata* の50平方センチのサンプルを採取し、これを5センチ平方に分割し、150Lの水槽に設置。水温28度で育成する。その後、32度にて10日間育成、さらに28度に戻すサイクルを実施。このプロセスで、光合成量、反射光量、共生藻個数などを計測した。昼の測定で、電荷分離の実効量子収量を、日没時の測定でPhotosystem-IIの最大量子収量を測定した。ロバストネス・トレードオフの理論では、光合成量と温度耐性の間にトレードオフが存在すると予測されている。つまり、光合成量の大きなサンゴは温度耐性が少なく、温度耐性が大きなサンゴは光合成量が少ないという予測である。これは、光合成量が大きな状態におかれている夏の間は、温度変化に対して脆弱であるが、光合成量が少ない冬の間は、温度変化により大きな抵抗性を有しているということを予測する。

この実験は、夏、冬、さらに春のサンゴを採取し行われた。量子収量 (Fv/Fm) の測定においては、冬に採取されたサンゴは、量子収量に変化は無く、夏に採取されたサンゴは、大幅な量子収量の低下とその後の回復が見られた(図1)。さらに、波長678nmの光の吸収は、夏のサンゴでは、大幅な変動が見られたが、冬のサンゴでは有為な変動は無かった(図2)。

次に、温度ストレスによるクロロフィルの数と散乱クロスセクションの比の変化を測定した(図3)。温度ストレスの上昇とともに、クロロフィルの数が減るとともに散乱クロスセクションが増大し、ある閾値をこえた段階から、劇的にクロスセクションが増大する。これは、白化の状態に入ったことを意味する。

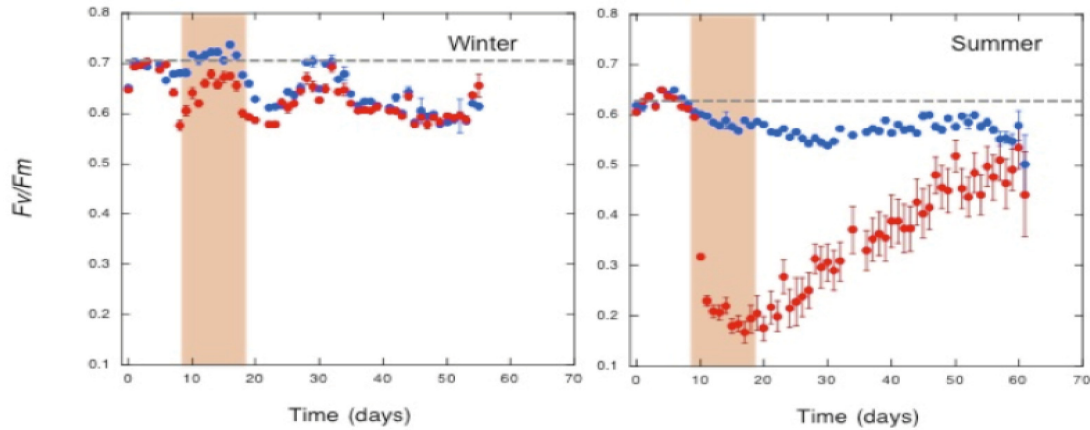


図 1 : 量子収量の変化

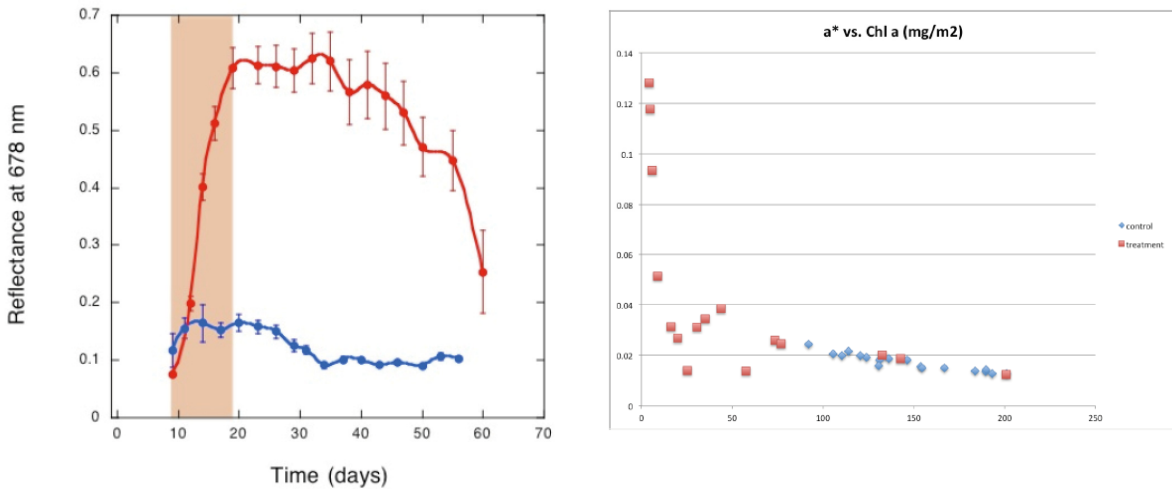


図 2 : 678nm 波長の反射係数の変化

図 3 : 散乱クロスセクションとクロロフィル比の変化

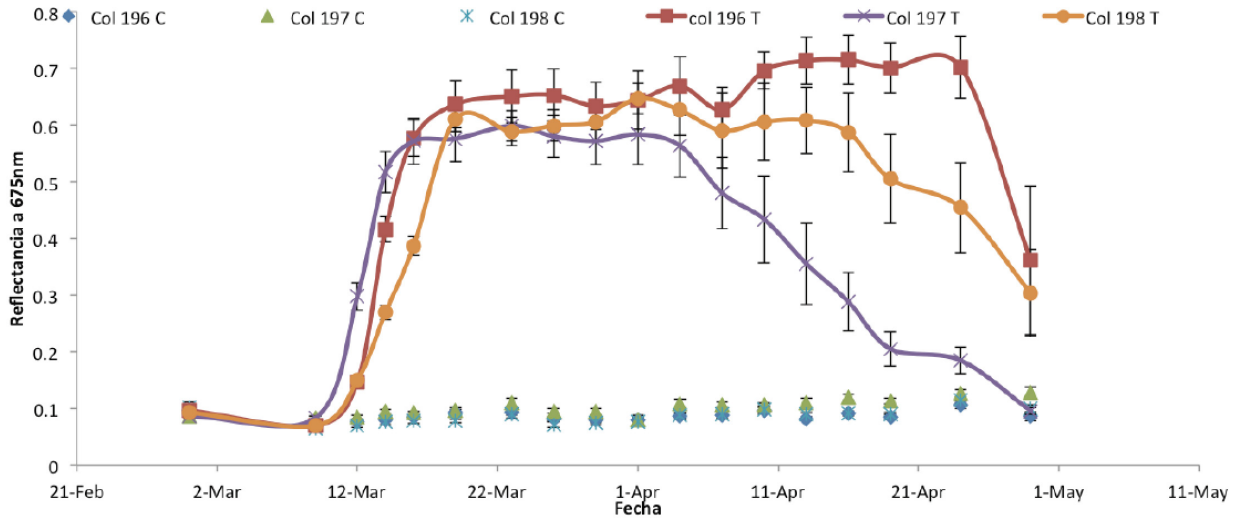


図 4：三つのサンプルにおける反射係数の変化の違い

さらに、複数のサンゴの BRE では、白化後に回復するか否か、回復する場合の速度に違いがある。これは、光吸収率の変化で定量化できる (図 4)。コロニー197は、白化しても急速に回復したが、コロニー196は、非常に回復が遅れた。この際に、コロニー毎に共生藻のクレード構成を測定した (図 5)。その結果、白化からの回復が遅いコロニー (コロニー196) では、クレード B の共生藻が多く、クレード C と D が存在し、白化からの回復が早いサンゴ (コロニー197) では、クレード D が主体でありクレード B が存在した。さらに、白化から回復したサンゴの共生藻は、ほとんどがクレード D であった。ただし、コロニー196では、ほとんどがクレード D になったのに対し、コロニー197では、クレード D の割合は変わらず、クレード B が、クレード C で、入れ替わっている。この理由は不明であり、今後の研究の課題である。

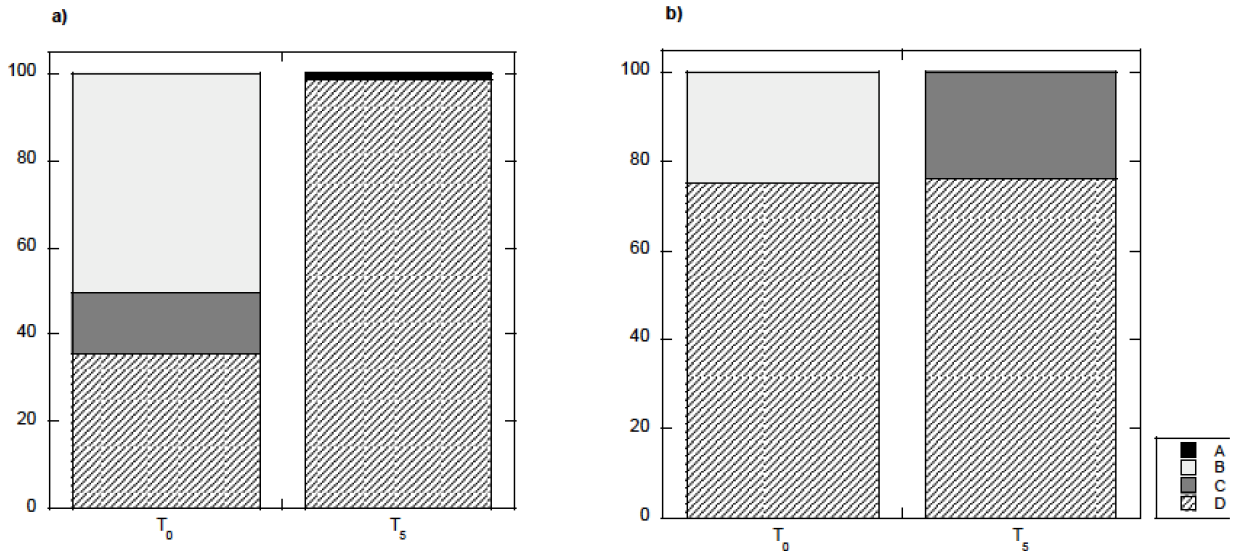


図 5：共生藻のクレード分布。左が、コロニー196、右が、コロニー197。各々において、左が白化前、右が白化後の構成を示す。

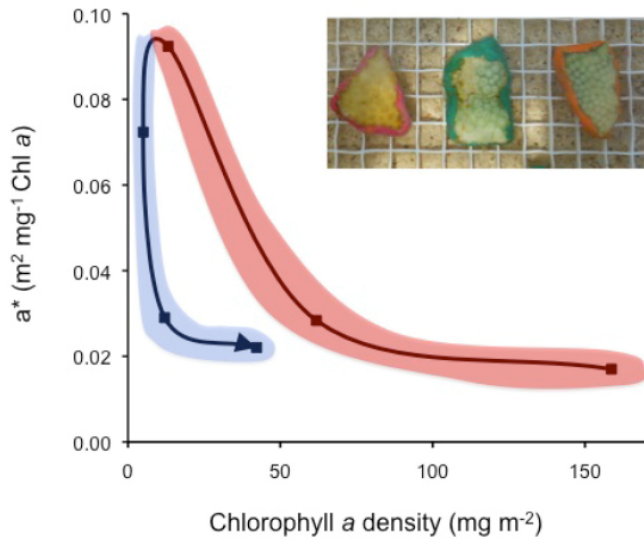


図6：散乱クロスセクションとクロロフィル比の変化経路

これらの実験の過程で、我々は、散乱クロスセクションとクロロフィルの比率が、白化の過程と回復の過程で違う経路をたどることを発見した(図6)。白化過程では、青の経路をたどるが、回復過程では、赤の経路をたどる。赤の経路は、自然に存在する algae と同等のパラメータであった。サンプルの解析の結果、endolithic algae が一時的に共生していたことが判明した。

この一つの解釈は、endolithic algae が、白化後のサンゴに共生し、サンゴを光ストレスから保護しているというものである。

サンゴ全ゲノム解析： カリブ海の代表的サンゴである *Montastraea faveolata* の全ゲノム解析を、当プロジェクトと NOAA (米国海洋大気庁)ならびに USGS(米国地質調査所)と共同で着手した。現在までに、サンゴの全ゲノム解析は、オーストラリアのチームと沖縄科学技術大学院大学(OIST)のチームによる2例が報告されているが、カリブ海のサンゴに関しては未着手であった。これは、Illumina 社の HiSeq を主に利用し (6 lanes)、補完的に Roche 社の 454 解析装置を利用した。解析されたゲノム配列は公開されている。(Coral Genome Project: <http://montastraea.ucmerced.edu/genome/>)

さらにこのゲノム解析に利用したサンゴのサンプルは、Univ. Miami, Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Sciences (RSMAS)において培養・保管され、このゲノムを有するサンゴの生理学的実験、分子生物学的実験に供される。

遺伝子発現データからのネットワーク推定： 大量の遺伝子発現解析データを利用して遺伝子制御関係ネットワークを推定することは、サンゴの適応メカニズムの解明に重要な技術的事項である。日本側が中心となり、このアルゴリズムを開発した。これは、複数の手法を組み合わせる方法で、従来型の単一手法の精緻化とは別のアプローチである。現在まで、この分野の標準的テストである DREAM ベンチマークで、従来手法の全てを上回る精度を達成している。

4. 今後の取り組み

ここまでの研究で、サンゴにおけるロバストネス・トレードオフは、ほぼ確認されたと考えてよい。また、サンゴと共生藻の組み合わせによるトレードオフの変化に関するデータも蓄積しつつある。また、白化よりの回復過程での endolithic algae の関与に関する発見がなされた。

同時に、全ゲノム解析を完了し、ゲノムワイドな発現解析を可能とする基盤が構築されつつある。また、時系列発現解析データから遺伝子制御ネットワークを再構築するアルゴリズムの構築も行われた。

今後は、これらの基盤をもとに、白化する場合、しない場合、回復途中、回復後などの網羅的な発現解析プロファイルを測定し、その際の遺伝子制御ネットワークの同定を行う。これは、2013-2014年度に行われる予定である。また、この研究を拡大発展させるために、システム・バイオロジー研究機構(SBI)は、オーストラリア・メルボルンにある Monash University, EMBL Australia, Australian Regenerative Medicine Institute をホストとして SBI Australia を設立、さらに Australian Institute of Marine Science とグレートバリアリーフをフィールドとした共同研究を開始した。

5. 発表実績

Invited conference seminars

1. Medina, M. King Abdullah University of Science and Technology. Jeddah, Saudi Arabia, October 2010.
2. Medina, M. Okinawa Institute of Science and Technology. Okinawa, Japan, November 2010.
3. Medina, M. Symposium Symbiotic Interactions. University of Vienna, Austria, November 2010.
4. Kitano, H. Coral Reef Systems Biology, Euro ISRS symposium 2010: Reefs in a changing environment, Hof van Wageningen, The Netherlands, December 2010.
5. Medina, M. American Society for Limnology and Oceanography. San Juan, Puerto Rico, February 2011.
6. Medina, M. Symbiofest. University of Georgia, Athens, GA, May 2011.
7. Medina, M. Simposio de Cnidarios. Universidad Nacional, Bogotá, Colombia, June 2011.
8. Kitano, H. Karles' Invitational Conference on Microbial Systems and Synthetic Biology, Naval Research Laboratory, USA, August 2011.
9. Medina, M. German Zoological Society. Saarbrücken, Germany, September 2011.
10. Medina, M. Plant and Animal Genome Conference XX. Ecological Genomics. San Diego, CA, USA, January 2012.
11. Medina, M. Indonesian-American Kavli Frontiers of Science Conference. Solo, Indonesia, June 2012.
12. Weber, M. Pan-Pacific Advanced Studies Institute. Dumaguette, Philippines, July 2012.
13. Medina, M. Pan-Pacific Advanced Studies Institute. Dumaguette, Philippines, July 2012.
14. Medina, M. Society for Developmental Biology – West Coast Meeting. Cambria, CA, USA, February 2013.

Conference

1. Weber, M. International Coral Reef Symposium. Cairns, Australia, July 2012.
2. Iglesias-Prieto, R. International Coral Reef Symposium. Cairns, Australia, July 2012.

Invited departmental seminars

1. Medina, M. California State University. Fresno, USA, December 2010.
2. Medina, M. Marine Biological Laboratory. Woods Hole, MA, USA, May 2011.
3. Medina, M. Smithsonian Tropical Research Institute. Panama City, Panama, June 2011.
4. Medina, M. University of Paris' Banyuls sur Mer Marine Laboratory. Banyuls, France, September 2011.
5. Medina, M. University of Perpignan. Perpignan, France, September 2011.
6. Medina, M. University of California Los Angeles. Department of Ecology and Evolution. USA, November 2011.
7. Medina, M. University of California Davis. Department of Microbiology. USA, November 2011.
8. Iglesias-Prieto, R. KAUST. Saudi Arabia, 2011.
9. Iglesias-Prieto, R. University of Bremen. Germany, 2011.
10. Iglesias-Prieto, R. Nova Southeastern University. USA, 2011.
11. Iglesias-Prieto, R. Institut of Ecology UNAM. Mexico, 2011.
12. Medina, M. Penn State University. Department of Biology. USA, January 2012.
13. Medina, M. University of California Los Angeles. Life Sciences Division. USA, March 2012.
14. Medina, M. Penn State University. Department of Biology. USA, March 2012.
15. Iglesias-Prieto, R. UC Riverside. USA, April 2012.
16. Medina, M. Joint Genome Institute. Walnut Creek, CA, USA, June 2012.
17. Iglesias-Prieto, R. Institute of Biology UNAM. Mexico, June 2012
18. Iglesias-Prieto, R. Cicese. Ensenada, Mexico, August 2012
19. Medina, M. University of Paris' Banyuls sur Mer Marine Laboratory. Banyuls, France, December 2012.
20. Medina, M. Institut de Biologia Evolutiva. Barcelona, Spain, December 2012.
21. Medina, M. Indicasat. Panama City, Panama, March 2013.