

サンゴ白化要因としての高水温ストレスの時空間分布に及ぼす局所的地形・気象効果

Effects of Local Topography and Meteorological Conditions on Spatio-temporal Variations of Thermal Stress Causing Coral Bleaching in a Fringing Reef

灘岡和夫¹・山本高大²・有坂和真³・前田勇司⁴・本岡俊介⁵・茅根創⁶・前川聡⁷

Kazuo NADAOKA, Takahiro YAMAMOTO, Kazuma ARISAKA, Yuji MAEDA, Shunsuke MOTOOKA, Hajime KAYANNE, Satoshi MAEKAWA

Significant coral bleaching was observed in summer in Shiraho reef, a fringing reef in the east coast of Ishigaki Island, Okinawa, Japan. To find relationship between coral bleaching and thermal stress in the reef and its governing factors, we have examined data obtained by field surveys in July 2003 and 2007 at Shiraho reef and the corresponding numerical simulation results for spatio-temporal variations of water temperature. The results of analysis showed that the spatial distribution of the degree of coral bleaching in the reef is closely related with that of the mean water temperature, which is strongly governed not only by local topography but also by meteorological conditions, especially latent heat flux.

1. はじめに

沖縄県石垣島南東部に位置する白保サンゴ礁海域はアオサンゴの大群落で世界的にも有名で、わが国における有数のサンゴ礁海域であるといわれている。しかし現在、サンゴ礁生態系は赤土流出・堆積、熱輸送等の様々な環境ストレスに晒されており、サンゴの劣化が進行しつつある。

八重山地域では、2007年7月から顕著なサンゴ白化現象が発生した。1998年に世界的に発生した大規模な白化と比較すると、比較的発生域が限られた地域的な現象であったがサンゴ白化の程度は極めて深刻であった。白化現象はサンゴが様々なストレスを受けて発生するが、白保海域における上記の2度の白化現象の主要因は高水温ストレスである。そのため、今後の適切なサンゴ礁保全・回復策を探っていくには高水温ストレスがサンゴ礁に及ぼす影響を評価することが重要となる。そしてサンゴ礁域において高水温ストレスがどのような分布構造を持って作用するのかをその形成過程とともに解明する必要がある。そこで本研究では、石垣島東海岸の白保海域を含

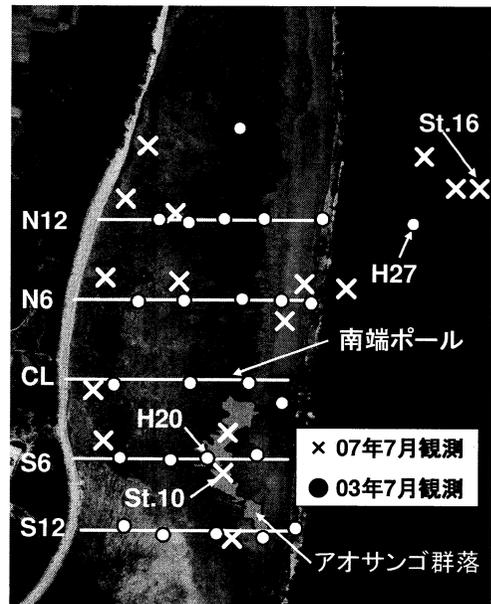


図-1 測器配置図

むリーフ海域における2007年夏季の白化状況について報告するとともに、水温多点連続計測結果や水温時空間変動数値シミュレーション結果から、同海域での高水温の時空間変動特性を明らかにし、白化発生状況との関連性について検討した。さらに、高水温の時空間変動特性の規定要因について考察を加えた。

2. 現地観測概要

(1) 観測地概要

沖縄県石垣島東海岸リーフ海域は東西に約1kmの幅を

- | | | | | |
|---|------|----|-----------------|-------------------------|
| 1 | フェロー | 工博 | 東京工業大学教授 | 大学院情報理工学研究科情報環境学専攻 |
| 2 | | | 東京工業大学 | 大学院情報理工学研究科情報環境学専攻 博士課程 |
| 3 | | | フューチャーアーキテクト(株) | |
| 4 | | | 東京工業大学 | 大学院情報理工学研究科情報環境学専攻 修士課程 |
| 5 | | | 東京工業大学 | 工学部土木工学科 |
| 6 | 理博 | | 東京大学教授 | 大学院理学系研究科地球惑星科学専攻 |
| 7 | | | | WWFサンゴ礁保護研究センター |

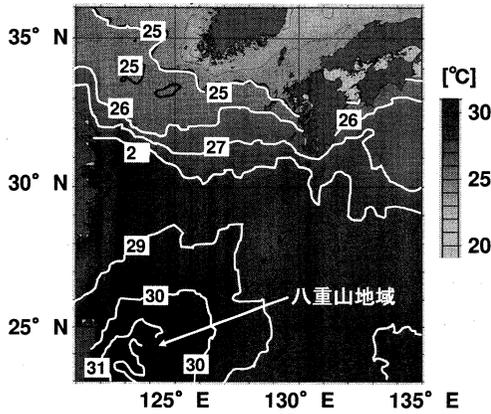


図-2 広域的SST分布(2007年7月下旬)

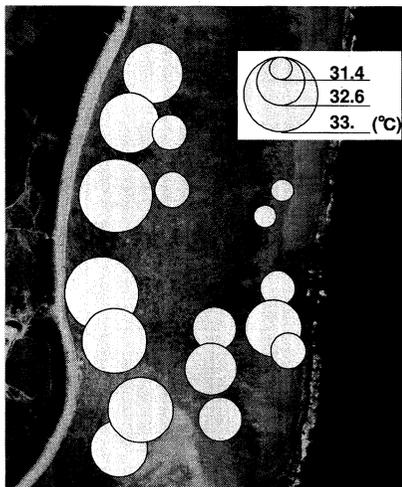


図-3 平均水温の観測結果

持つ典型的な裾礁型サンゴ礁である。また局所的に礁嶺が裂け礁池と外洋を繋ぐクチが発達しており、この中でも北側に位置しているトゥールグチは礁池に達する大規模なチャンネルであり、水路中央部で水深15-20m程度と急深となっている。このリーフ海域の南端には世界的に有名なアオサンゴの大群落が存在する白保海域がある。このリーフ海域にはいくつかの種類の造礁サンゴ群集が礁原上に広がっているが、近年、陸域からのストレスの増加や高水温による白化等サンゴ礁の衰退が危惧されている。

(2) 観測場所と期間

2007年7月11日から27日までの期間、図-1に示すように白保海域のリーフ内23地点、リーフ外1地点で小型水温ロガーによる連続水温計測を行った。また2003年7月5日から20日までの期間においても同海域において同様の調査を行っている(熊谷ら, 2003)。なお図中の5つの実線(北からN12, N6, CL, S6, S12)は、茅根ら(1999)が同海域において長期に渡って調査を実施している調査

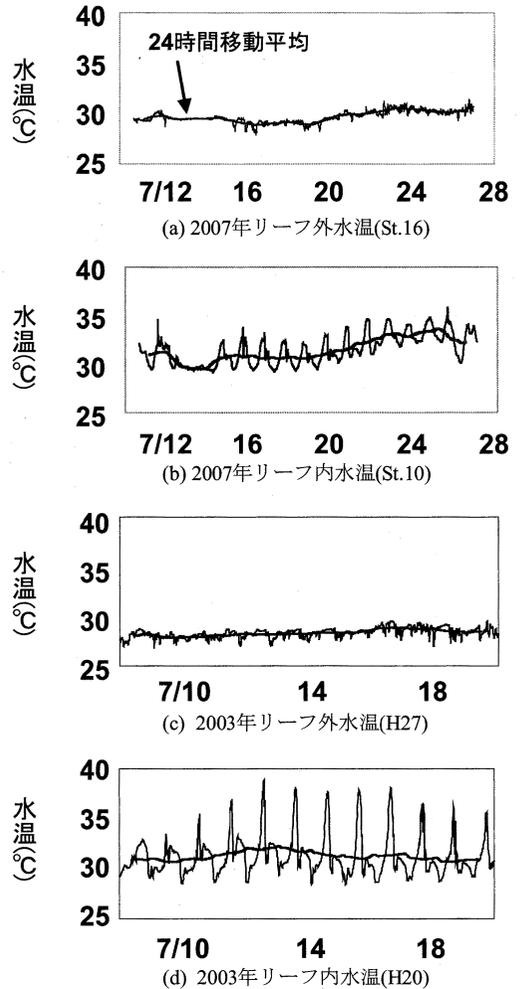


図-4 水温の時系列変化

用定測線である。7月下旬からサンゴ白化が顕著に発生したが、8月上旬と10月上旬に同海域の調査用測線に沿って潜水調査を実施し白化や死亡率の空間分布構造を調べ、海水温との関連性について検討を行った。

3. 結果と考察

(1) 水温の時空間変動

図-2は気象庁発表の2007年7月21日から31日までの九州・沖縄地方の広域的SST(海面水温)分布を示したものである。このSSTは気象庁が人工衛星とブイ・船舶による観測値から解析し求めたものである。九州以南では広い範囲に渡って水温が28°Cを越える高水温となっているが、特に八重山地域においてこの期間の平均水温が30°Cを超えていたことがわかる。気象庁発表のデータによると、八重山地域において日平均水温が30°Cを上回っていた状況は7月20日頃から8月10日頃まで続きこの期間は最大で日平均水温が31°Cを上回ることもあった。平年の

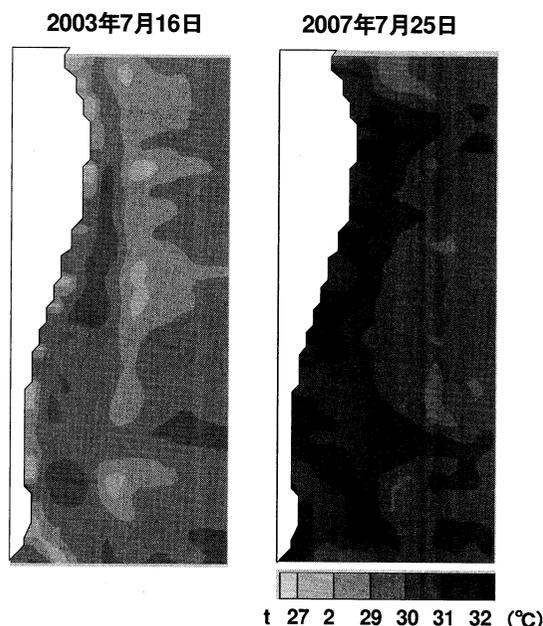


図-5 数値計算結果 (AM5時の水温)

水温と比較すると他の海域では平年と比べ同程度または低い場所が多数を占めているが、八重山地域では 1°C から 2°C 平年より高くなっていた。

2007年7月20日から27日までの期間、白保リーフ内の各地点に測器を設置し10分毎に水温を計測した。図-3は、期間中の各地点の平均水温の空間分布を示したものである。広域的なSST分布と比較すると、リーフ内で水温がさらに上昇しており、期間中の平均水温は最大で 33.6°C を越えた地点も存在した。この期間、外洋のSSTは最大でも 31°C 程度の水温であったことから、リーフ内ではそれから3度程度平均水温が上昇していたことがわかる。平均水温の空間分布を見ると、岸に沿う測点で総じて高く、南端ポール周辺の測点で低くなっていることがわかる。

リーフ内外での水温の時系列変化を比較するために、図-4に2007年7月11日から27日までと2003年7月8日から20日までのリーフ内外の代表的地点(図-1に示してあるリーフ内H20, St.10の2点, リーフ外H27, St.16の2点の計4点)における水温の時系列データを示す。まず図-4(a)(b)は2007年のリーフ内外の水温の時系列データを示したものである。リーフ外(a)では7月20日頃まで 29°C 前後で推移していたが、20日を過ぎる頃から 30°C を上回り、 30.5°C 程度まで上昇していることが確認できる。これは先述のSST分布の推移とほぼ一致している。一方、リーフ内(b)では同時期にさらに水温が上昇し、最高で 33.5°C 程度まで達している。この時期では、日出前時点でさえリーフ内のほとんどの測定点で 30°C を下回らなくなって

いる。一般的にサンゴの高水温耐性限界は水温 30°C 程度と言われていることから、この時期にはサンゴにかなり大きな高温ストレスが作用していたと考えられる。次に図-4(c)(d)は2003年のリーフ内外の水温時系列変化を示したものである。観測期間中、リーフ外水温(c)は 28°C 前後で推移している。リーフ内水温(d)についても平均水温が 31°C から 32°C のあたりで推移しており大きな変化は見られない。

リーフ内水温とリーフ外水温を比較すると、両年ともリーフ内平均水温がリーフ外に比べて 3°C 程度高くなっているが、これは、裾礁型サンゴ礁域は極めて浅い地形であることから外洋に比べて水域の熱容量がかなり小さいことが主因であると考えられる。しかしそれだけでは、2007年のケースで、期間後半のサンゴ白化が進行した時期でのリーフ内水温の顕著な上昇を説明することができない。後に示すように、2007年期間前半と後半で日射量や気温が大きく変わっていたという事実もない。このようなことから、リーフ内の水温上昇の支配要因としては、外洋の広域的な水温上昇とリーフ内の局所的地形効果の他にも要因が存在するものと考えられる。

(2) 数値解析の結果

2007年7月に発生したサンゴ白化をもたらした高水温環境の特性をより詳細に検討するとともに、その支配要因を明らかにするために、白保海域を対象とした水温変動数値シミュレーションを行った。使用した数値モデルは、田村ら(2004)によって開発されたものである。図-5は、2003年7月と2007年7月の条件に対して行った数値シミュレーション結果のうち、日出前(午前5時)の水温分布を示したものである。これから、2003年に対する計算結果では午前5時の段階で 29°C 程の水温であるのに対し、2007年の場合には夜間の放射冷却効果や外海水流入による冷却効果をより強く受ける礁嶺域の一部を除くリーフ内のほぼ全域において日出前時点ですでに水温が 30°C 以上あり、ところにより 32°C に達しているところあることが確かめられる。

2007年7月の白化発生時の高水温環境をもたらした原因についてより詳細に検討するため、2007年の海象条件に対して2007年と2003年の気象条件をそれぞれ用いて水温時空間変動数値シミュレーションを行った。両年の期間中の気象データ(日射量・気温・風速、すべて石垣気象台観測値)を図-6に示す。これから、両期間中の日射量・気温はほぼ同程度であったことがわかる。しかし風速に関しては2003年が期間中4-8m/s前後で安定していたのに対し、2007年は期間後半で風速レベルがかなり低く時折、無風状態に近いときもあったことがわかる。これらの気象条件を用いてシミュレーションを行った結果が図-7であり、これから2003年の気象条件を用いた場合に

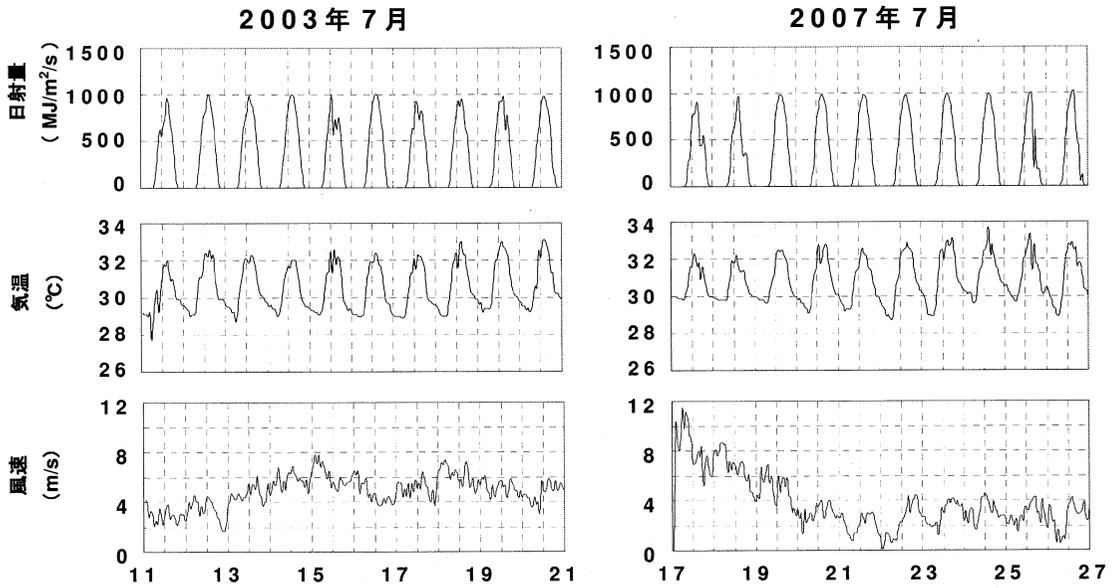


図-6 気象条件の比較

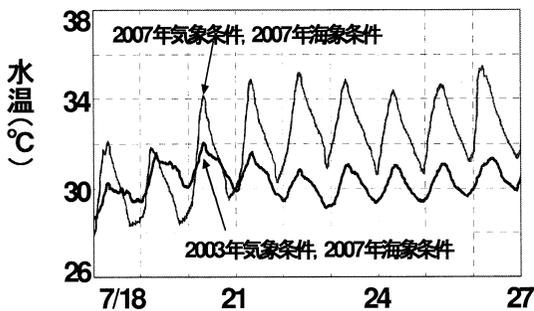


図-7 数値計算結果の比較

は、リーフ内水温が最大で4°C程度下がる事が確認される。2007年の場合にはほとんど無風状態であったため、大気への潜熱フラックスがかなり小さく、リーフ内水塊の加熱が促進されたことを示している。潜熱フラックスは海面から水分が蒸発する際に奪う熱であり、海面の風速が支配的である。2007年は風速が無風に近かった為、この潜熱フラックスが小さくなったと考えられる。

以上のことから、リーフ内に高水温をもたらす要因として、外海の広域的な高水温上昇に加えてリーフ内の局所的加熱効果が重要になること、そして、局所的な加熱効果としては、極浅海域としてのリーフの地形効果の他に、気象条件による効果、特に潜熱フラックスの影響が重要な役割を果たしていることが確かめられた。

(3) サンゴ白化状況の空間分布とリーフ内水温分布特性との対応関係

白保海域に生息している造礁サンゴは、主に枝状コモンサンゴ類、枝状ミドリイシ類、塊状ハマサンゴ類、枝状ハマサンゴ類、アオサンゴ類である。これらの造礁サ

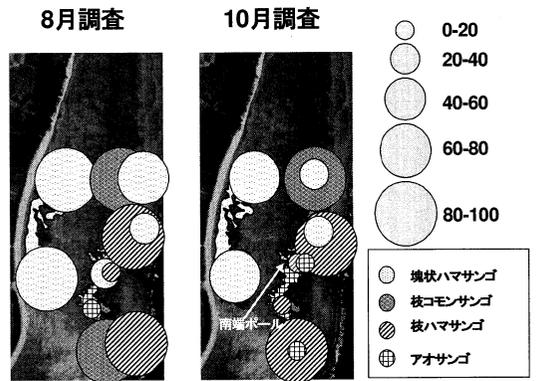


図-8 白化および白化により死亡したサンゴの割合(%)

ンゴは群集を形成し、礁原上に局所的に点在している。このうち枝状コモンサンゴは高水温ストレスに弱いこと、塊状ハマサンゴは高水温や赤土などの環境ストレスに比較的強いことが知られている。そのため枝状コモンサンゴは白保リーフ北側またはチャンネル入口の外洋影響を比較的受けやすく水温レベルが低い領域に生息している。

これらのサンゴの2007年の白化状況を空間的に把握するため、2007年8月2日から4日、10月1日から2日の2回にわたって図-1の測線に沿って潜水調査を行った。その結果を図-8に示す。8月調査では、塊状ハマサンゴ、枝状コモンサンゴ、枝ハマサンゴの50-100%が白化していた。アオサンゴはわずかに白化が認められたのみであった。しかし、南端ポール付近(CL)では他の地点で80%以上白化していた枝ハマサンゴが、10%以下の白化と軽微であった。10月調査では、塊状ハマサンゴに回復が見られたほかは、枝コモンサンゴ等一部地点を除きほぼ消失し

た。その結果、白化以前には最大60%の被度があつたが南端ポール付近で30%、アオサンゴ分布域で10%の被度がある以外は、すべて5%以下に減少した。

このようなサンゴ白化のリーフ内の分布状況と先に示した平均水温の空間分布の特性を比較すると、白化のダメージが相対的に低かった南端ポール付近では、-3に示すように平均水温も相対的に低く、両者の間にある程度の対応関係があることが分かる。

4. まとめ

本研究では、石垣島東海域の白保リーフ海域を対象に、多点水温連続計測や水温変動数値シミュレーションの結果に基づいて、サンゴ白化をもたらすリーフ内高水温の時空間分布の特徴を明らかにするとともに、その支配要因について検討した。以下に、主要な結論を述べる。

- a) リーフ内での平均水温分布には有意な非一様性が存在し、サンゴ白化状況とリーフ内高水温分布にある程度の対応関係があることが認められた。
- b) リーフ内水温の高温化の支配的要因として、外海の

広域的な水温上昇に加えて、リーフ内の局所的加熱効果が重要となる。

- c) リーフ内の局所的加熱効果には、極浅海域としてのリーフ地形効果に加えて気象条件の効果、中でも潜熱フラックスによる影響が重要な役割を果たしている。

謝辞：本研究の一部は、科研費基盤研究(A)(代表者：灘岡和夫、課題番号：17206052, 18254003)を受けて行ったものであることを付記する。

参考文献

- 茅根 創・波利井佐紀・山野博哉・田村正行・井手陽一・秋元不二雄(1999)：琉球列島石垣島白保・川平の定測線における1998年白化前後の造礁サンゴ群集被度変化、日本サンゴ礁学会, *Galaxea*, 1, pp.73-82.
- 熊谷 航・田村 仁・灘岡和夫・波利井佐紀・三井 順・鈴木庸彦・茅根 創(2004)：石垣島白保海域における水温環境特性と造礁サンゴ群集の分布、海岸工学論文集, 第51巻, pp.1066-1070.
- 田村 仁・灘岡和夫・熊谷 航(2004)：裾礁域におけるサンゴ群集周辺の流動・温熱環境特性に関する数値シミュレーション、海岸工学論文集, 第51巻, pp.1061-1065.