

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

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*****

石垣島白保海域における局所的な水温・物理環境特性とその分布を明らかにし造礁サンゴ群集分布との関係を検討するべく詳細な現地観測を行い、ここでは水温を中心に解析を行った。その結果、礁嶺付近では日較差が大きい低温状態が長い、汀線付近では高温状態が長く持続する、礁池では水深が相対的に深く貯熱量大いため水温変化が緩やか、など、岸沖方向の各ゾーンでそれぞれ特徴的な水温変動パターンが見いだされた。そこで、夏期の水温 30°C 以下となる継続時間で比較すると、礁嶺付近が最も長く、ついで礁池、汀線付近の順で短くなることがわかった。また、チャネル付近では暖水塊の滞留・移流の影響で水温の二次的な上昇があるため、礁原南側は外洋水流入の盛んな北側に比べ全体的に温暖な環境であった。このような夏期における礁原上の局所的な水温環境特性分布は造礁サンゴ群集の高水温耐性とよく一致することが判明した。

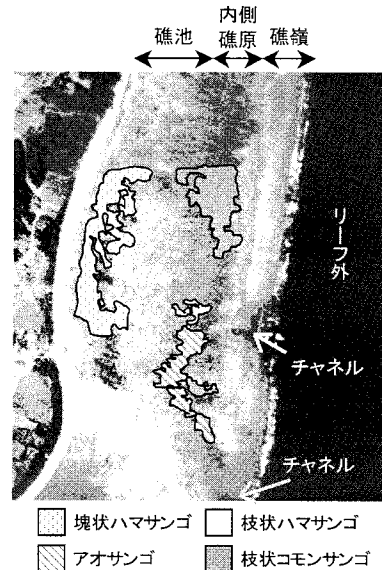
1. はじめに

沖縄県南西部に位置する石垣島周辺は非常に多くのサンゴ種が報告されており、日本における最も豊かなサンゴ生息海域であると言われている。中でも石垣島東岸白保海域にはアオサンゴの大群落をはじめ、いくつかの種類の造礁サンゴ群集が礁原上に存在している(図-1(a))。1998年に世界的な規模で起こった高水温ストレスが主因とされるサンゴ白化現象はこれら白保海域においても多大な影響を及ぼしたが、白化の程度やその後の回復過程がそれぞれのサンゴ群集によって異なっていたことが知られている(茅根ら, 1999; Kayanne ら, 2002)。このように、わずか数 km 四方の空間スケールの礁原上においても、生息場所の異なるサンゴ群集間で環境ストレスへの応答が異なる理由として、属による高水温耐性の違いや群集サイズによる回復力の差異などに関して議論がなされてきている。しかし、そもそも対象海域での局所的な水温環境特性、およびそれらとサンゴ群集分布との対応関係についての既往の知見は皆無に等しい。

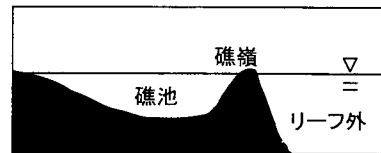
そこで、本研究では、白保海域における水温環境を中心とした物理環境の局所的な差異を明らかにすることを目的として多点係留系を用いた現地観測を行い、サンゴ礁における水温環境特性とサンゴ群集の生物的特性との対応関係を検討した。

2. 現地観測内容および気象・海象概況

図-1(a), (b) はそれぞれ白保海域の平面図と典型的なリーフ断面地形の模式図を示している。裾礁型サンゴ礁である白保海域の地形は、岸沖方向に汀線、礁原中央



(a) 白保海域の地形区分と造礁サンゴ群集分布



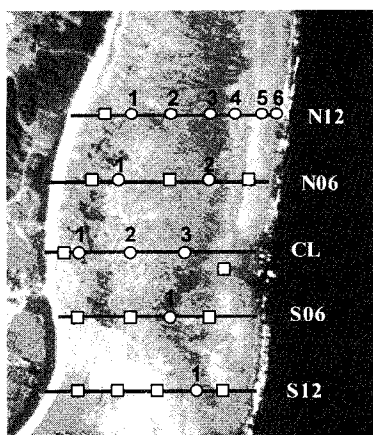
(b) 地形断面模式図

図-1 白保海域の特徴

部の比較的水深が深い礁池、最も沖側でごく水深の浅い礁嶺、さらにそこから急激に水深が深くなる礁斜面に区分される。主に造礁サンゴ類は礁池から礁嶺に至る領域(内側礁原)に生息しており、ここではサンゴキャノピーが発達しているために水深が極浅くなっている。また、リーフ南側には礁嶺の裂け目であるチャネルが存在する。

現地観測は、冬期(2002年12月12日-1月9日)と夏期(2003年7月5日-7月20日)に行っているが、こ

* 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
** 正会員 博(工) 日本学術振興会特別研究員
*** 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
**** 博(理) 東京工業大学助手 大学院情報理工学研究科情報環境学専攻
***** 修(工) テトラ(株) ブロック本部 技術部
***** 博(理) 東京大学助教授 大学院理学系研究科地球惑星科学専攻



□水温のみ
○水温計, 流速計, 波高計, 水位計など

図-2 測器配置図

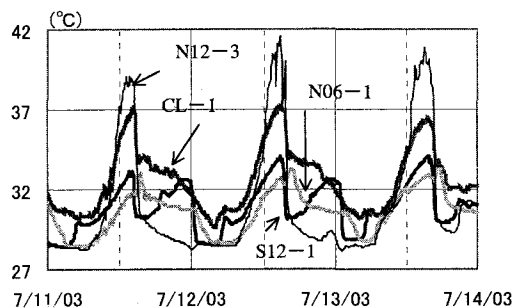
表-1 使用測器と測定モード

測定機器	名称	測定間隔	サンプル数	周波数
水温計	HOBO WaterPro (onset computer 社製)	10 min	1	
水位計	DIVER (Van Ennen 社製)	10 min	1	
波高計	Compact-WH (ALEC 電子社製)	120 min	2400	2 Hz
電磁流速計	Compact-EM (ALEC 電子社製)	240 min	1200	2 Hz

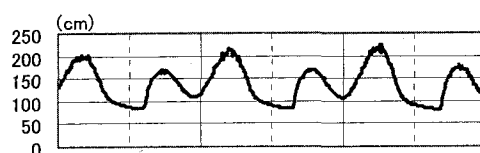
ここでは紙面の都合上、白保海域におけるサンゴ群集分布と関連が深いと考えられる夏期観測に関して議論を進める。

茅根ら (1999), Kayanne ら (2002) は、同海域において 5 測線 (北から N12, N06, CL, S06, S12) を設け、1998 年に発生した大規模白化現象の直前から長期に渡るサンゴ被度調査を行ってきている。今回の現地観測ではこの 5 測線上の 24 地点と、リーフ外の 1 地点に図-2 に示すように測器を配置した。また、表-1 は、使用した測定機器とそれらの測定モードを示している。リーフ内の観測点においては、全ポイントでメモリ式水温計を表層および底面設置し、うち 12 地点では電磁流速計、波高計、水位計を底面設置した。なおサンゴ群集帯での底面設置はサンゴキャノピー直上、それ以外では砂地上とした。

気象・海象概況に関しては、観測期間中は概ね快晴で全期間を通して降水がなく、平均気温はおよそ 30 度強、風向風速は 5 m/s 前後の南風が卓越していた。また、観測期間中リーフ外では有義波高がおよそ 20 cm と低波浪状態が続いていた。このように観測期間中は気象条件・海象条件ともに安定しており、台風などのイベント的な気象擾乱は発生していない。



(a) 水温時系列変動の主要な 4 パターン



(b) N06-2 における水位変動

図-3 夏期の水温・水位時系列変化

3. リーフ内温熱環境特性

(1) 水温の時間変動特性

図-3 (a) に、夏期水温時間変動の代表的な 4 パターンとして、N12-3; 礁嶺付近 (枝状コモンサンゴ帯)、N06-1; 礁池、CL-1; 汀線付近 (塊状ハマサンゴ帯)、S12-1; チャネル部 (ただし、平均水深は順に 0.64 m, 2.5 m, 0.72 m, 2.4 m) での水温時系列変動を示す。また、図-3 (b) に同期間におけるリーフ内の N06-2 地点での水位変動を示す。この図-3 に示した期間では、日中の日射のピーク時間帯と低潮位との位相がほぼ重なる形になっているために、日最大水温が極めて大きく現れており、特に水深の極浅い汀線付近 (CL-1) および礁嶺付近 (N12-3) ではそれが顕著になっている。また、時間変動特性においても、それぞれの領域で非常に特徴的なパターンとなっていることがわかる。まず、汀線付近 (CL-1) においては昼間の日射により加熱され水温が最大値に達し、その後、上げ潮時に対応して水温の低下が生じ、夜間にはそれが徐々に低下する形になっている。一方、礁嶺付近 (N12-3) では汀線付近と同様に日中に顕著な水温ピークが生じるが、それが上げ潮時に水温差で 10°C 程度にもおよぶ急激な水温低下を示している。また、礁池 (N06-1) においては、日中加熱されるものの、水深が相対的に深いために他の領域と比較し最大値はそれほど高くはなっていない。さらにチャネル (S12-1) においては、礁池と同様、昼間の水温ピークレベルはそれほど大きくないが、夜間において水温の 2 次的ピークが生じていることが確認される。これらの水温変動パターンは、日射量、水深

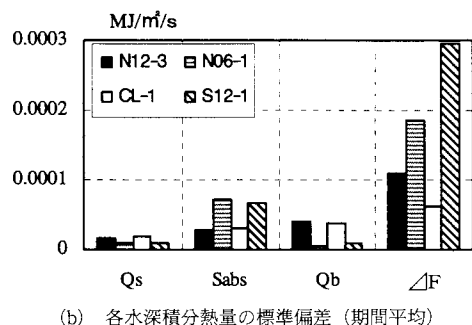
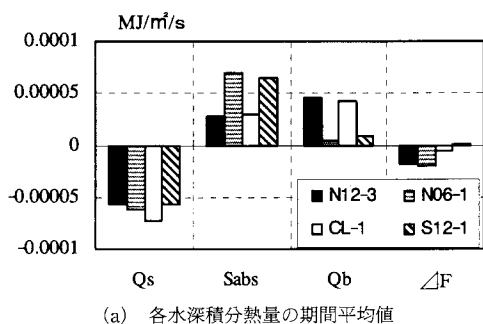
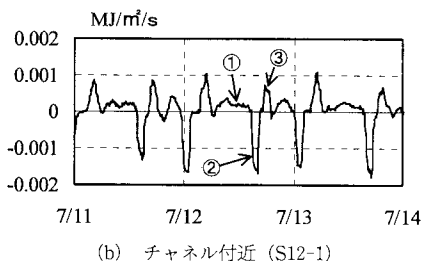
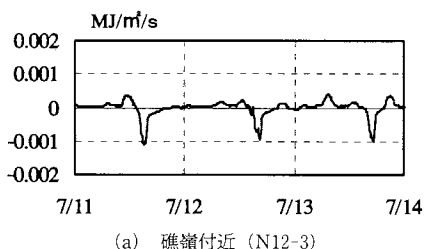


図-4 熱収支解析結果

図-5 移流による熱輸送量 ΔF の時系列変化

分布、潮位変動および礁嶺・チャネルを通じてのリーフ内外との海水交換に伴う熱輸送現象によると考えられるが、次節で熱収支解析を用いてこれらの水温変動現象を検討する。

(2) 熱収支解析

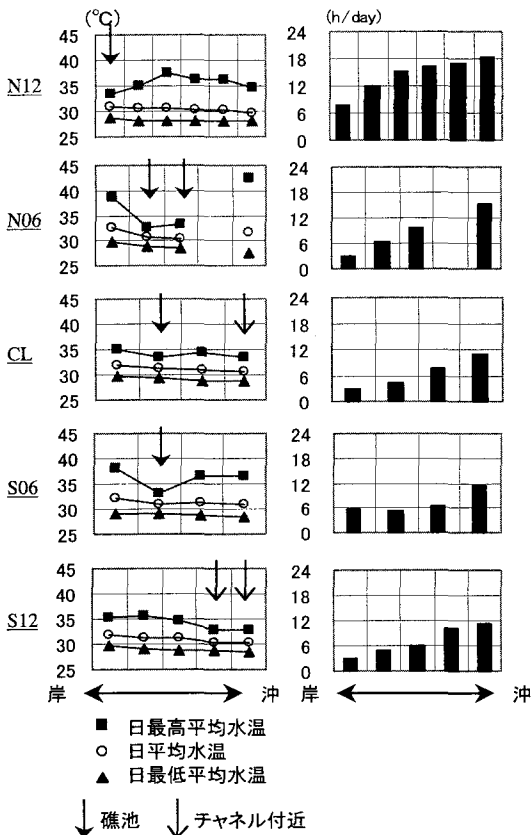
つぎに、前節で示した特徴的な水温変動特性が形成されるメカニズムをより定量的な観点から検討するために

熱収支解析を行った結果について述べる。サンゴ礁海域は水深が極浅く、透明度が高いために短波放射の水中透過や海底面を通じての熱輸送が重要となる。よってここでは小葉竹ら (1997)、松永ら (1998) をもとに二瓶ら (2001) によって提案されている熱収支解析手法を用いた。このモデルでは、短波放射の海中透過と海底面反射、および地中伝導熱を考慮してモデル化を行っている。詳細に関しては二瓶ら (2001)、田村ら (2004) を参照されたい。

図-4 は、07/08 00:00 から 07/19 00:00 までの 11 日間における熱収支解析の結果を示したものである。記号はそれぞれ、 Q_s : 大気から海中へ伝達される熱輸送量、 S_{abs} : 短波放射量の海中での吸収量、 Q_b : 海底面における顕熱輸送量、 ΔF : 水平移流拡散 (以下、単に「移流」) による熱輸送量を示しており、それらの (a) 期間平均値 (各項、加熱側を正) と、(b) 標準偏差を示している。ただし、貯熱変化量は期間平均でほぼゼロであったため、ここでは示していない。まず、 Q_s は海表面における長波放射量、潜熱・顕熱輸送量の合計として定義されているため、期間平均値では負値となることが図-4 (a) より確認されるとともに、高水温状態が長く持続される汀線付近 (CL-1) で相対的に大きな値を示すが、各測定点で概ね一樣な値を示している。 S_{abs} および Q_b に関しては平均水深の小さな内側礁原 (N12-3) および汀線付近 (CL-1) と、平均水深が相対的に大きい礁池 (N06-1) およびチャネル (S12-1) で顕著な違いが生じている。水深の浅い領域では S_{abs} が小さく Q_b が大きい傾向にあり、深い領域ではそれらが逆転していることから、水深レベルにより短波放射量の海中での吸収と海底面効果に違いが生じていることが確認できる。

一方、移流による熱輸送量 ΔF に関しては、空間的な特徴から見ると白保海域北部 (N12, N6) で大きく、それが冷却効果に寄与していることがわかる。さらに、礁池と比較して、水深レベルが 3 分の 1 程度であるにも関わらず礁嶺付近の N12-3 では ΔF が大きな値を示していることが確認できる。これに対し図-4 (b) での移流による熱輸送変動量 ΔF をみると S12-1, N06-1, N12-3, CL-1 の順でその値が大きいことがわかる。つまり、チャネル (S12-1) では熱の移流に伴う水温の日変動は大きい、期間平均値が小さいことから正味の熱輸送量としてはそれほど作用しておらず、一方、白保海域北部 (N06-1, N12-3) では移流に伴う水温の日変動幅が大きく、さらにそれらが正味の熱輸送量にも大きな影響を及ぼしていることがわかる。

図-5 (a), (b) はそれぞれ礁嶺付近 N12-3 およびチャネル部 S12-1 における移流効果による熱輸送量 ΔF の時系列変動を示したものである。これらから、N12-3 では



(a) 各測線ごとの水温日平均値 (b) 水温 30°C以下となる日積算時間

図-6 夏期水温特性

負の輸送が卓越し、S12-1では正負の変動が生じていることがわかる。このため図-4 (a) で示したように、礁嶺付近 (N12-3) では負の熱輸送量が卓越しているのに対し、チャンネル部 (S12-1) では正負の輸送量が相殺されて平均値すなわち正味の熱輸送量が小さくなる結果となっている。

また、図-5 (a) より、リーフ北部の礁嶺部 (N 12-3) を通じて外洋の低温水がリーフ内へ流入していることが確認できる。一方、図-5 (b) から、リーフ南に位置するチャンネル部においては、下げ潮から干潮にかけて若干の正の熱輸送があり (①)、その後、急速に $0.001 \text{ MJ/m}^2/\text{s}$ 強の負の熱輸送に転じ (②)、さらにそれが満潮時に $0.001 \text{ MJ/m}^2/\text{s}$ 弱程度の正の輸送となっており (③)、これら一連の急激な熱輸送現象が約 2, 3 時間の内に生じていることがわかる。チャンネル周辺部においては、大潮・中潮期の上げ潮時において急速な流向変動が生じるが (田村ら, 2003), このリーフ海域特有の流動構造と熱輸送現象が対応していることがわかる。また、このようなリーフ内流動特性に伴い、リーフ内で加熱された高水温

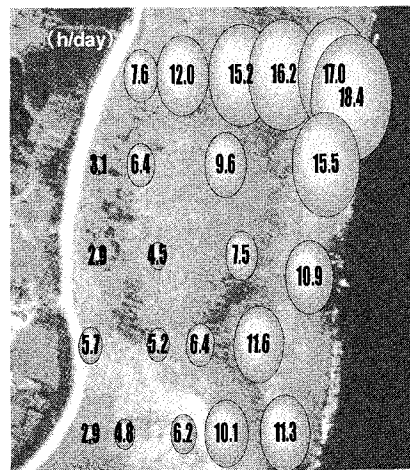


図-7 白保海域における夏期水温 30°C以下となる日積算時間の分布

水塊が、チャンネルを通じてリーフ外へ流出するために、夜間において水温の 2 次的ピークが生じる結果となっている。

4. 水温環境特性とサンゴ群集分布特性の対応関係

以上のことから、白保リーフ内での水温環境特性は、岸沖方向の地形的特徴 (礁嶺付近、礁池、汀線付近) と、チャンネル部の存在に代表される沿岸方向の地形的特徴の両面を反映する形で、その空間分布が特徴づけられていることが確認された。そこでここでは、このような水温環境特性の空間分布とサンゴ群集分布特性との対応関係について考察を加えた。

(1) 日平均、日較差の空間分布特性

各測定点における水温の時系列変動特性を評価するために、まず、日平均値、日較差を求めた。図-6 (a) で示している各測線ごとの平均水温の岸沖方向分布を見ると、礁嶺付近が低く汀線付近で高いといった若干の岸沖方向の勾配がついているものの、N06 ライン以外ではどれも 1°C 程度の差であり、それほど顕著な差とは言えず、また礁嶺付近と礁池との差も明瞭ではない。日較差は汀線付近と礁嶺付近で大きく、礁池で小さい。測線間と比べると、平均水温が N12 測線で全体的に若干低くなっている。このように、水温の日平均値では、その空間特性に明瞭な差が認められなかった。

(2) 高水温継続時間の空間特性

つぎに、サンゴの高水温耐性限界として一般的に言われている水温 30°C を下回る時間の積算値の比較を行った。水温 30°C 以下の継続時間で比較した結果を図-6 (b) に示す。各測線ごとに岸沖方向で比較すると、礁嶺付近で最も長く、汀線付近に向かって勾配がついている。特

に、平均水温では見分けられなかった礁嶺付近と礁池との差が明瞭に示されている。さらに沿岸方向で比較すると、N12ラインでは礁嶺を超える海水流入が盛んであり、低水温状態の積算時間が他ラインよりも長くて、しかもその傾向が見られる範囲が広がっている。またCL, S06ラインの礁嶺付近では高水温水塊が滞留する場所にあるために高温状態の時間が長くなり、N12, S12ラインに比べてかなり小さい値となっている。S12ライン礁嶺付近ではチャンネルを介しての海水交換が盛んだが、先述のように移流による水温の二次的な上昇が生じるためにN12ラインよりは短くなっている。

(3) 水温環境特性とサンゴ群集分布との比較

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。これらの造礁サンゴは群集を形成し、礁原上に局所的に点在している。図-1(a)に、茅根ら(1999)に基づいてその造礁サンゴ群集分布を示しているが、枝状コモンサンゴ類は礁原北側礁嶺付近(N12, N06ライン付近)と礁原南側礁嶺・チャンネル付近(S12ライン付近)に、枝状ミドリイシ類は礁原北側礁嶺付近(N12, N06ライン付近)に、塊状ハマサンゴ類は礁原北側から中央部汀線付近に、枝状ハマサンゴ類はチャンネル付近(CL, S12ライン付近)に、アオサンゴ類は礁原中央部礁嶺付近(CL, S06ライン付近)にそれぞれ分布している。また、サンゴは全般的に干出する場所には生息できないため、最も沖側の礁嶺上には生息していない。このうち、枝状コモンサンゴ類は高水温ストレスに非常に弱いこと、アオサンゴは本来なら低緯度の温暖な地域にしか生息していない造礁サンゴであって高緯度に位置する石垣島周辺に見られるのは珍しいこと、塊状ハマサンゴ類は高水温や赤土など環境ストレスに非常に強いことなどが知られている。夏期の水温30°C以下の継続時間の空間特性(図-7)で見ると、枝状コモンサンゴ類の分布するN12ライン礁嶺付近はこの海域で最も冷涼な環境である。また、塊状ハマサンゴ類の分布する汀線付近は高水温状態が非常に長く持続される最も過酷な環境で、アオサンゴの分布するCL, S06ライン礁嶺付近は他ラインの礁嶺付近よりも温暖である。

このように、白保海域に局所的に点在しているいくつかの造礁サンゴ群集の持つ高水温耐性は、そこでの夏期における局所的な水温環境特性とよく符合していることがわかる。

5. おわりに

沖縄県石垣島白保海域において礁原上での局所的な水温環境を明らかにするために現地観測を実施し、水温データの解析を行った。その結果、夏期の水温30°C以下の継続時間が礁嶺付近で最も長く、礁池、汀線付近では短い。また、チャンネルの効果により、礁原南側のほうが北側よりも全体的に短かった。このような継続時間のコントラストがそこに生息するいくつかの造礁サンゴ群集の高水温耐性とよく一致していることがわかった。

謝辞: 本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究A(1)(一般)(研究代表者: 灘岡和夫, 課題番号: 14205071)を得て行ったものであることを付記する。

参考文献

- 小葉竹重機・塩田孝久・河内信二郎(1997): 河川水温の掲載過程における光の吸収率の影響, 水工学論文集, 第41巻, pp. 599-604.
- 茅根 創・波利井佐紀・山野博哉・田村正行・井出陽一・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, Vol. 1, pp. 73-82.
- 田村 仁・灘岡和夫・Enrico Paringit・三井 順・波利井佐紀・鈴木庸孝(2003): リーフ地形効果に着目した石垣島東岸裾礁域の流動構造に関する研究, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 386-390.
- 田村 仁・灘岡和夫・熊谷 航(2004): 裾礁タイプサンゴ礁域における海水流動・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.
- 二瓶泰雄・灘岡和夫・網島康雄・丸田直美・青木康哲・若木研水(2001): サンゴ礁海域の温熱環境特性に関する多面的観測と解析, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 1146-1150.
- 松永信博・児玉真史・福田和代・杉原裕司(1998): 干潟における熱収支の観測, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 1056-1060.
- Kayanne, H., Harii, S., Ide, Y., and F. Akimoto. (2002): Recovery of coral populations after the 1998 bleaching on Shiraho Reef, in the southern Ryukyus, NW Pacific, Marine Ecology Progress Series, Vol. 239, pp. 93-103.