

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

田村 仁*・灘岡和夫**・熊谷 航***

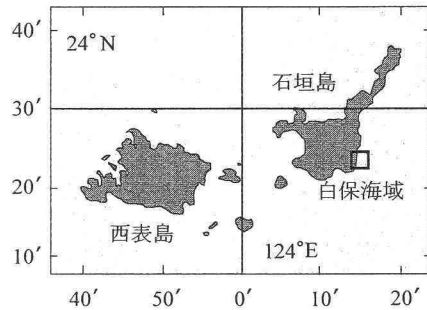
典型的な裾礁タイプのサンゴ礁域である白保海域を対象とし、そこにおける環境ストレスの分布構造解明を目的として流動・温熱環境特性に関する数値解析を行った。温熱輸送特性解析では海底面効果を考慮した熱収支解析手法を基にモデルの導出を行っている。数値解析の結果、白保海域における流動及び熱的な時空間変動パターンの特徴を高精度に再現できることが示されるとともに、リーフ地形効果によって規定される循環流パターンにより、リーフ内温熱特性が各領域で大きく異なることが確認された。

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(図一1)は生サンゴの被覆率が50%以上と石垣島サンゴ礁海域の中でも極めて高く(目崎, 1991), またアオサンゴの大群落で世界的にも有名であることから日本における有数のサンゴ礁海域であると言われてきている。しかし, 1997年から1998年にかけて起った世界的規模での高水温ストレスによるサンゴの白化現象は, この白保海域を含む琉球列島各地において多大な被害をもたらした。今後の適切なサンゴ礁保全・回復策を探っていくには, このような高水温に代表される環境擾乱に対するサンゴ被度変化の関係を明らかにしていくことが重要となるが, それにはサンゴ礁域内での環境ストレスの作用の仕方を定量的に評価することが不可欠となる。特に, 白化後のサンゴ被度回復の程度がサンゴ礁域内の場所ごとにかなり異なることが知られているので(茅根ら, 1999; Kayanne ら, 2002), サンゴ礁域内での環境ストレス(特に高水温ストレス)の分布構造を明らかにする必要がある。そこで本研究ではサンゴ礁域内での環境ストレスの分布構造解明を目的として, 典型的な裾礁タイプのサンゴ礁域である白保海域を対象とし, その流動・温熱環境特性に関する数値シミュレーションを行った。

2. 白保海域におけるリーフ地形の特徴

本研究で対象とする沖縄県八重山諸島の石垣島白保海域(図一2)は, リーフ幅はおよそ800mで, 汀線から350mまでが水深0-3m程度の礁池(moat), 350-550mまでが内側礁原(inner reef flat)でサンゴキャノピーが発達している。さらに550-750mまでが礁嶺(reef crest)で礁原の中で最も標高が高く, 低潮位時に干出する領域となっている。またワタンジと呼ばれる浅瀬がリーフ南に存在し礁嶺と同様に標高が高く干出するために, 低潮



図一1 石垣島白保海域



図一2 白保海域におけるリーフ地形

位時にはワタンジを境界としてリーフ内南北で水理的接続が断たれる。さらに礁嶺が局所的に切れて礁池と外洋とを接続する形のチャンネルが2つ存在する。

3. 数値解析手法

本研究では, 数値シミュレーションを基に, 白保海域を対象として, その温熱特性の構造を解明することを目的としている。一方, 著者らは, 同海域において2002年

* 学生会員 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

*** 東京工業大学 大学院情報理工学研究科情報環境学専攻

冬期及び2003年夏期に、多点係留系を用いた現地観測を実施しており、ここではそれらのデータの一部を用いて計算を行うとともに数値解析結果を検証している。現地観測およびそのデータ解析結果の詳細に関しては、熊谷ら(2004)を参照されたい。

(1) リーフ海域を対象とした数値流動モデルの概要

本数値シミュレーションにおいては、熱輸送を海水流動と同時に計算することで白保海域における温熱環境特性の解明を試みる。熱輸送の基礎となる流動場の計算には、田村ら(2003)により開発された裾礁リーフ海域に適用可能な準三次元浅水乱流モデル(SDS-Q3Dモデル)を用いている。このモデルではリーフ海域といった極浅水乱流場に適した乱流モデルとして灘岡・八木(1993)によって開発されたSDS乱流モデルを用いている。また、運動量方程式に関しては多成分連成法を用いて準三次元モデリングを行うことで流動場の三次元性を考慮でき、さらにリーフ海域特有の礁嶺の干出効果や波浪による海浜流計算が可能な数値解析モデルとなっている。ただし本論文では密度流効果に関しては流動計算に反映させていない。

(2) 熱輸送モデルの導出

一般的にサンゴ礁海域は水深が極浅く、また透明度が高いために海底面での熱輸送が顕著となる(灘岡ら, 1999; 二瓶ら, 2001)。よってここでは二瓶ら(2001)によって提案されている海底面効果を考慮した熱収支解析手法を基に、本数値シミュレーションに用いる熱輸送モデルを導出する。まず、水温の三次元輸送方程式は次式で表される。

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho_0 C_p} \frac{dq(z)}{dz} \dots (1)$$

ここに、 D/Dt : 実質微分、 x, y : 水平座標、 z : 鉛直座標(静水面: $z=0$)、 T : 海水温、 K : 水温拡散係数、 $q(z)$: 水中を透過する短波放射量、 ρ_0 : 海水密度、 C_p : 比熱である。ただし、水温拡散係数 K に関してはSDS乱流モデルより得られる渦動粘性係数と同一値を用いて評価している。まず、水中を透過する短波放射量 $q(z)$ は、以下の様に海表面から水中へ入射量する短波放射量 $q(z)\downarrow$ と海底面からの反射量 $q(z)\uparrow$ の和として表すことができる。

$$q(z) = q(z)\downarrow + q(z)\uparrow \dots (2)$$

ただし、

$$q(z)\downarrow = (1 - \text{ref}_s) \cdot S\downarrow \cdot \exp[(\alpha \cdot (z - \eta))] \dots (3)$$

$$q(z)\uparrow = (1 - \text{ref}_s) \cdot \text{ref}_b \cdot S\downarrow \cdot \exp[(\alpha \cdot (-z - \eta - 2h))] \dots (4)$$

ここに、 $S\downarrow$: 海表面における短波放射量(全天日射量)、 ref_s : 海表面アルベド、 ref_b : 海底面アルベド、 α : 吸収係数を表す。

水温輸送に関する数値解析においては、流動モデルと同様に多成分連成法を用いて鉛直分布を考慮することが可能であるが、ここでは簡単に式(1)を水深積分することで式(5)に示す水深平均水温に関してモデル化を行う。

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{1}{d} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{\eta} - \frac{1}{d} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{-h} + \frac{1}{d} \frac{q(\eta) - q(-h)}{\rho_0 C_p} \dots (5)$$

ここに、 u, v : 水深平均 x 方向、 y 方向流速、 h : 平均水深、 η : 海表面位置、 d : 全水深($=h+\eta$)である。

また、海表面及び海底面における境界条件は、二瓶ら(2001)と同様に以下の様に取り扱う。まず、海表面では長波放射量 $L\downarrow$ 、長波反射量 $L\uparrow$ 、顕熱輸送量 H 、潜熱輸送量 IE の残差が水中伝導熱となるとして以下のようになる。

$$K_z \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{\eta} = \frac{L\downarrow - L\uparrow - H - IE}{\rho_0 C_p} \dots (6)$$

ただし、長波放射量、長波反射量に関してはStefan-Boltzmann則より、また、顕熱輸送量、潜熱輸送量はバルク式から評価している。

一方、海底面では、海底面における正味の短波放射量 $q(-h)\downarrow - q(-h)\uparrow$ 、及び地中伝導熱 G_{soil} の収支が海底面から水中への顕熱輸送量となるとして次式を用いて評価した。

$$K_z \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{-h} = \frac{(1 - \text{ref}_s)(1 - \text{ref}_b) \cdot S\downarrow \exp(-\alpha \cdot d) - G_{\text{soil}}}{\rho_0 C_p} \dots (7)$$

ただし地中伝導熱の算出においては、地中温度 T_G に関する1次元熱伝導方程式の理論解(灘岡ら, 1999)は用いずに、完全陰解法により数値的に求めて次式で評価している(近藤, 1994)。

$$G_{\text{soil}} = \int_0^D c_G \rho_G \frac{\partial T_G}{\partial t} dz \dots (8)$$

ここに、 c_G : 地中比熱、 ρ_G : 地中密度、 D : 熱フラックスがゼロとなる地中深さである。

さらに、式(5)の右辺第5項中の $q(h) - q(-h)$ は短波放射量の水柱での吸収量 S_{abs} であり、式(2)-(4)より次式で表すことができる。

$$S_{\text{abs}} = (1 - \text{ref}_s) \cdot S\downarrow (1 - \exp(-\alpha \cdot d)) + (1 - \text{ref}_s) \cdot \text{ref}_b \cdot S\downarrow \cdot \exp(-\alpha \cdot d) (1 - \exp(-\alpha \cdot d)) \dots (9)$$

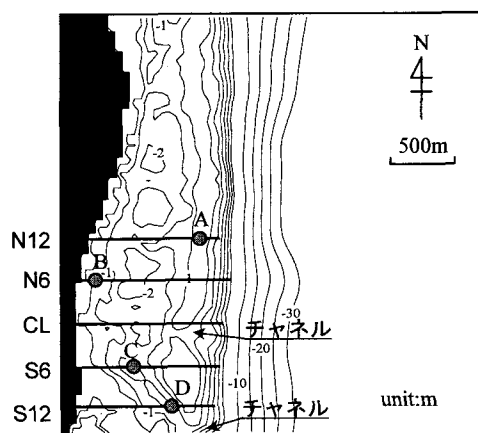


図-3 数値解析領域と水深分布

(3) 数値計算条件

数値解析領域は図-3 に示した東西方向 3.2 km × 南北方向 3.2 km の海域である。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きている調査用定測線であり、また地点 A-D は現地観測における測定点の一部を示している。現地観測結果 (熊谷ら, 2004) より、白保海域においては冬期の低水温ストレスと比べて夏期の高水温ストレスがサンゴ生態系に著しい影響を与えていると考えられるため、ここでは 2003 年 7 月 11 日 0:00 から 7 月 17 日 0:00 までの夏期観測期間を計算対象としている。観測期間中、降水量はほぼゼロで風速も数 m/s 程度、また台風などのイベント的な気象擾乱は生じていない。

流動計算の外力条件は潮汐及び波浪であり、潮流計算は現地観測によって得られたリーフ外水位データを主要 4 分潮に調和解析して沖合潮位変動として与えている。また、入射波条件に関しては、現地観測結果から有義波高、有義波周期ともに観測期間中ほぼ一定の値であったため期間平均値(有義波高: 0.22 m, 有義波周期: 9.3 s)を用い、エネルギー平衡方程式から計算領域内の波高分布、さらにそれに伴う radiation stress を求めた。

水温に関する計算条件としては、計算開始時刻である 2003 年 7 月 11 日 0:00 の水温分布が現地観測結果からおおよそ海域全体で 29°C 程度であったため、初期条件にはこの値を用いた。また、陸域、沖側、北側及び南側境界条件は水温の空間勾配をゼロとして与えており、さらに海表面境界条件に用いる短波放射量、風速、大気温、大気の水蒸気圧、海面気圧は石垣島気象台によって得られた 1 時間毎のデータを用いている。一方、地中温度 T_c に関しては、初期値は現地観測においてその値を測定しておらず未確認ではあるが、水温の初期条件と同様の

表-1 計算に用いたパラメータ

(a) 流動計算	
時刻刻み幅 Δt (s)	1
EW 方向空間解像度 Δx (m)	50
NS 方向空間解像度 Δy (m)	50
流速成分数 N	1
移動境界基準水深 δ_0 (cm)	2
底面摩擦係数 c_f	0.035
(b) 波浪計算	
周波数分割数 nf	10
方向分割数 $n\theta$	35
方向集中度パラメータ S_{max}	75
入射角 θ (deg.)	0
(c) 熱輸送計算	
海表面アルベド ref_s	0.06
海表面アルベド ref_b	0.25
吸収係数 a (1/m)	0.1
地中空間解像度 Δz (cm)	5
地中深さ D (cm)	50
地中熱拡散係数 a_c (m ² /s)	5.9×10^{-7}
地中熱容量 $c_{\rho c}$ (J/m ³ /K)	3×10^{-6}

29°C に設定した。また境界条件は、海底面 ($z = -h$) では $T_c = T$ 、海底面深さ ($z = -h - D$) ではその空間勾配をゼロとしている。その他計算に用いた主なパラメータを表-1 に示す。

4. 数値解析結果と考察

(1) 本数値解析モデルの妥当性の検証

図-4, 図-5 はそれぞれ数値解析によって得られた各測定点における水位及び主軸方向流速の時系列変動と観測値を比較したものである。白保海域は礁嶺が高く低潮位時には礁嶺の干出によりリーフ内外の水理的接続が遮断され、チャンネルを通じてのみリーフ内外の海水交換が行われる。その結果、リーフ内水位(測定点 C)はある一定レベルより低下しづらく、リーフ外水位と比較して歪みが生じる結果となる(田村ら, 2003)。本計算においてもこのような現象が生じており、現地観測結果と比較してかなりの精度で再現できていることが確認できる。さらに礁嶺部の測定点 A においては、干出から冠水に至る水位変動過程が再現できており、移動境界条件が数値的に問題なく適用されていることがわかる。一方、流速変動に関しては、礁嶺部(測定点 A)の干出及び冠水に伴う非対称な流速変動(田村ら, 投稿中)やチャンネル部(測定点 D)における数時間程度での急速な流向変化

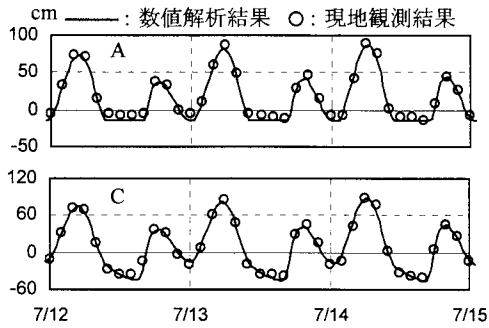


図-4 水位の時系列変動

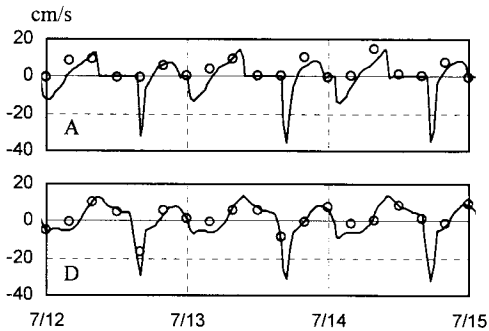


図-5 主軸方向流速の時系列変動

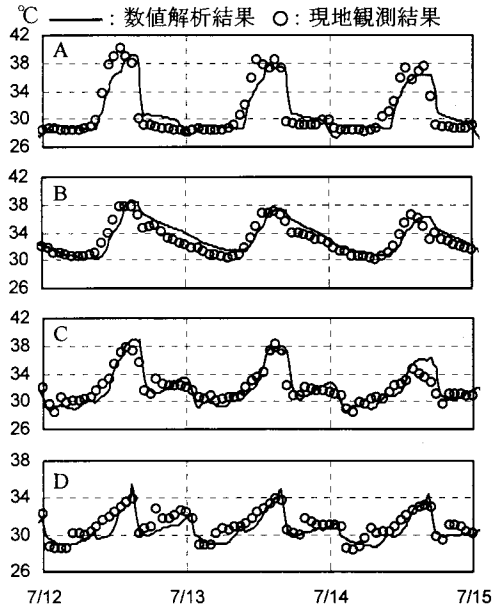


図-6 水温の時系列変動

を精度良く再現できている。

また、図-6 は水温の時系列変化に関して計算値および観測値を比較したものである。これらから、夏期現地観測で確認されている白保海域における典型的な水温変動パターン（礁嶺：測定点 A，汀線付近：測定点 B，礁池：測定点 C，チャンネル：測定点 D における変動パターン）を良好な精度で再現できていることが確認できる。

(2) 白保海域における流動および温熱環境特性

図-7 は 25 時間平均水平流速ベクトルを示している。平均流成分はリーフ内では南下流が生じ、白保海域北部 (N12, N6) の礁嶺の発達した領域からリーフ内へ流入し、また南部に位置する 2 つのチャンネルを通じてリーフ外へ流出していることが確認できる。このように白保海域においてはチャンネル及び礁嶺地形効果の空間的な非一様性により特徴的な循環流が生じることが確認できる。また、計算領域の北側では、礁嶺の一部を通じてリーフ外へ向けた平均流が生じている。

図-8 は数値解析によって得られた水温時系列に対応して、サンゴに対する高水温ストレスを 30°C 以上として、それを下回る水温の日平均積算時間を示したものである。これから、まずリーフ内では岸沖方向に明確な境界が存在する。さらに定測線 CL 以南においてもその積算時間が短いことが確認できる。つまり汀線から礁池に

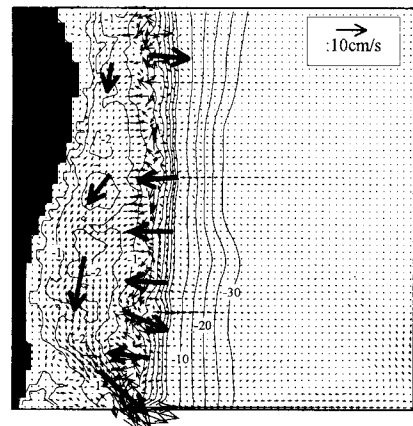


図-7 25 時間平均流速ベクトル

かけてと定測線 CL 以南の領域は高水温ストレスを受けやすいと言えるが、これは循環流パターンから考えられるように、夏期においては外洋からの低温水がリーフ北部 (N12, N6) 周辺から流入し、それらはリーフ内で加熱された後、チャンネルを通してリーフ外へ流出されるために高水温状態が維持されやすい領域となるためである。

さらに、図-9 は日平均干出時間を示しているが、礁嶺部、ワタンジにおいては干出時間が長くサンゴの干出耐性に大きな影響を与えている領域であり、茅根ら (1999) のサンゴ被度調査結果からも顕著なサンゴ群集が存在していないことが確認されている。

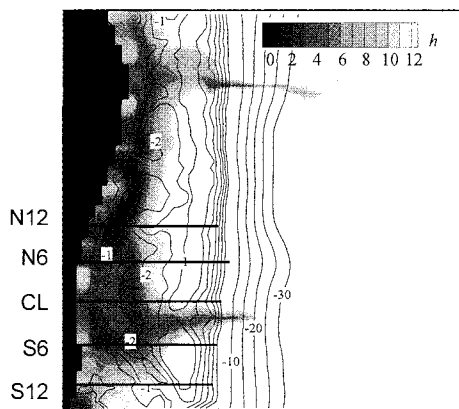


図-8 30°Cを下回る日平均積算時間

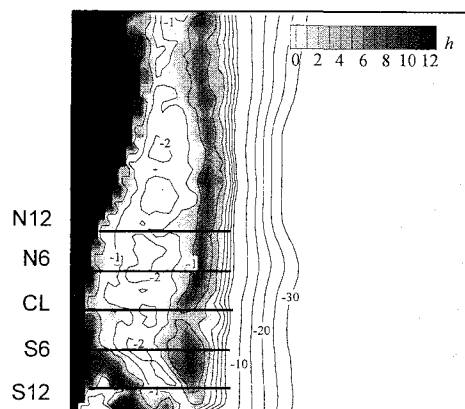


図-9 日平均干出時間

この様な循環流パターンに伴う温熱環境や干出時間と、サンゴのそれらに対する耐性特性に対応して白保海域における各領域には多様なサンゴ種が生息しているものと考えられる。また水温特性とサンゴ群集分布との対応関係の詳細に関しては熊谷ら (2004) を参照されたい。

5. おわりに

本研究では海底面効果を考慮した熱収支解析手法に基づいて温熱輸送モデルを導出し、それにより典型的な裾礁海域である白保海域を対象に、そこでの温熱環境特性の構造解明を目的とした数値シミュレーションを行った。その結果、現地観測結果と比較して高精度に流動および水温変動をシミュレートできることが確認された。さらに白保海域における夏期温熱環境特性として、外洋影響を強く受ける白保リーフ北部礁嶺付近は水温レベルが低く、またリーフ中央から南ではリーフ内で加熱された水塊がチャンネルを通じてリーフ外へ流出するために水温レベルが高くなる傾向にあり、白保海域における温熱環境特性が各領域で異なることが確認された。

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：瀬岡和夫、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

- 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・川平の定例線における 1998 年白化前後の造礁サンゴ群集被度調査, *Galaxea*, JCRS, 1, pp. 73-82.
- 熊谷 航・田村 仁・瀬岡和夫・波利井佐紀・三井 順・鈴木庸孝・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.
- 近藤純正 (1994)： 水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支—, 朝倉書店.
- 田村 仁・瀬岡和夫・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・瀬岡和夫・Enrico Paringit (2004)： 石垣島東岸裾礁域の流動特性に関する現地観測と数値解析, *土木学会論文集*, 投稿中.
- 瀬岡和夫・八木 宏 (1993)： SDS&2DH モデルを用いた開水路水平せん断乱流の数値シミュレーション, *土木学会論文集*, 473/II-24, pp. 35-44.
- 二瓶泰雄・瀬岡和夫・綱島康雄・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.
- 目崎茂和編 (1991)： 石垣島のサンゴ礁環境, 財団法人世界自然保護基金日本委員会.
- Kayanne, H., Harii, S., Ide, Y., Akimoto, F. (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.