

高解像度水深マップを用いたサンゴ礁海域の 流動シミュレーション

灘岡 和夫*・二瓶 泰雄**・熊野 良子***

1. はじめに

沖縄サンゴ礁海域では、陸域からの赤土流出問題のみならず、外洋水温の高温化に伴う白化現象といった深刻な環境問題が発生している。この種の問題に今後適切に対処していくためには、サンゴ礁海域の物理・生態環境の特性を明らかにすると同時に、陸水や外洋水のリーフ海域への流入・拡散過程を精度良く予測することが必要である。そのためには、現地観測によって実現象の解明を進めていくのと同時に、数値シミュレーションに基づくリーフ海域の流動場の解析を行うことが有効であることから、信頼性の高い数値シミュレーション技術確立していくことが是非とも必要となる。

一般に、サンゴ礁海域は、水深がごく浅い海域であるがゆえに、水理学的にも地形効果を受けやすい海域であるが、上述したサンゴの白化現象についても、同一海域内に存在するサンゴでも白化の度合いに場所的な違いが見られることが報告されており、地形効果がその一因として考えられる。このようなことから、リーフ海域の解析においては、地形の特徴を精度良く表現した形での取り扱いが不可欠であり、そのための詳細な地形データが必要となる。しかし、サンゴ礁海域に関する水深データはリーフ外と比べてごく粗い形でしか存在しないのが現状であり、地形効果を正確に反映させた形での流動シミュレーションは実際上不可能に近い。

そこで本研究では、1) 衛星画像データを用いた水深分布算定手法(灘岡・田村, 1993)によりサンゴ礁内の高解像度水深マップを作成し、2) それに基づいたサンゴ礁海域の潮流計算を行うことにより、上記の地形効果の現われ方や、それを的確に表現する上での高解像度地形データの重要性を明らかにすることを試みた。

2. 衛星画像解析に基づくサンゴ礁内水深マップの作成

2.1 衛星画像解析に基づく水深算出手法

まず、本研究のベースとなる、サンゴ礁内の高解像度水深データを作成する。ここで用いた手法は、灘岡・田村(1993)により開発されたもので、LANDSAT/TMデータ(空間解像度 30 m)を用いて水深を算出するものである。以下に、この手法の概要を述べる。

まず、近赤外波長域 BAND (LANDSAT では BAND 5) の輝度値を用いて、可視光波長域(同じく BAND 1 もしくは 2)の大気散乱光の影響を除去する。大気補正後の輝度データに対して、次式のような光学理論に基づいた演算を行い、水深 h を算出する。

$$h = -\frac{1}{(\sec \theta + \sec \phi) K_i} \ln \left(\frac{V_{*i} - V_{\infty *i}}{V_{0i} - V_{\infty *i}} \right) \dots (1)$$

ここで、添字 i : バンド数 (= 1, 2), K_i : バンド i における水中での光の消散係数, V_{*i} : 大気散乱補正後の輝度値, $V_{\infty *i}$: 大気散乱補正後の深海域の輝度値, V_{0i} : 水深がゼロのときの輝度値, θ, ϕ : 水中での屈折角, 反射角である。

今回の解析では、先に述べた赤土汚染や白化現象が問題となっている典型的な海域の一つである沖縄県石垣島



図一 解析対象とした石垣島白保海域の衛星画像 (LANDSAT/TM 1994.5.16 撮影)

* 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
** 正 会 員 博(工) 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
*** 学生会員 東京工業大学大学院情報理工学研究科情報環境学専攻

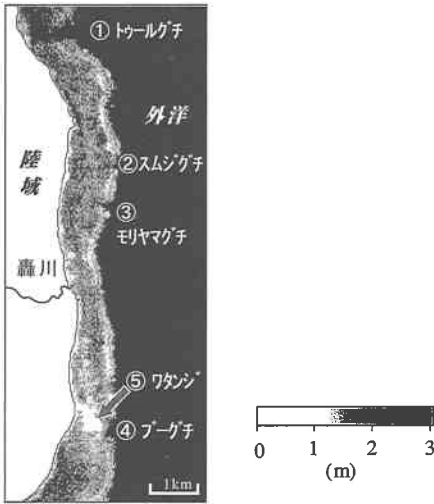


図-2 衛星画像解析による高解像度水深マップ

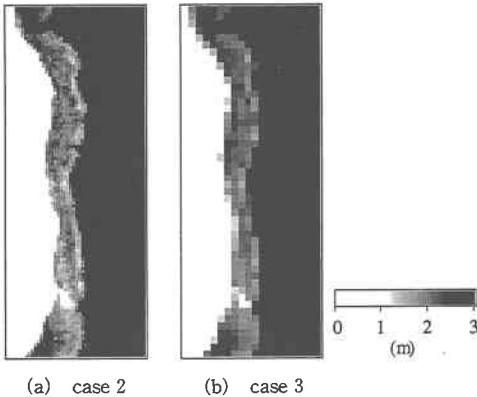


図-3 潮流計算に用いた水深マップ

東岸に位置する白保海域を対象とした。用いた衛星画像データは、1994年5月16日に撮影されたものである(図-1)。なお、式(1)を用いて水深を算出する際には、光の水中消散係数 K_t を与える必要があるが、ここでは BAND 1 を用いて解析を行うものとし、著者らが別途行った現地観測データを参考にして、 $K_t = 0.109 \text{ (m}^{-1}\text{)}$ とした。

2.2 サンゴ礁内水深分布算出結果

上記の手法によって作成した、白保海域サンゴ礁内の 30 m メッシュの水深マップを図-2 に示す。これを見ると、リーフ内の水深は凹凸が激しく非常に複雑であり、岸沖方向に見ると岸から数百 m の幅の礁池が続いた後、より浅くなったリーフエッジがあり外洋に向けて急傾斜する形になっている。リーフエッジには数カ所の大規模・小規模な切れ込み口(クチ)が存在している。また、領域の南側にはワタンジと呼ばれる浅瀬が存在してい

る。以上は、現地で見られる地形上の特徴と良好に一致しており、サンゴ礁内の水深分布が精度良く算出できていることが分かる。なお、今回は LANDSAT 衛星データを用いて解析を行ったため空間解像度は 30 m であったが、航空写真や今後利用可能になる予定の分解能 1~2 m 程度の衛星画像を用いれば、さらに詳細な地形データを算出することが原理的に可能である。

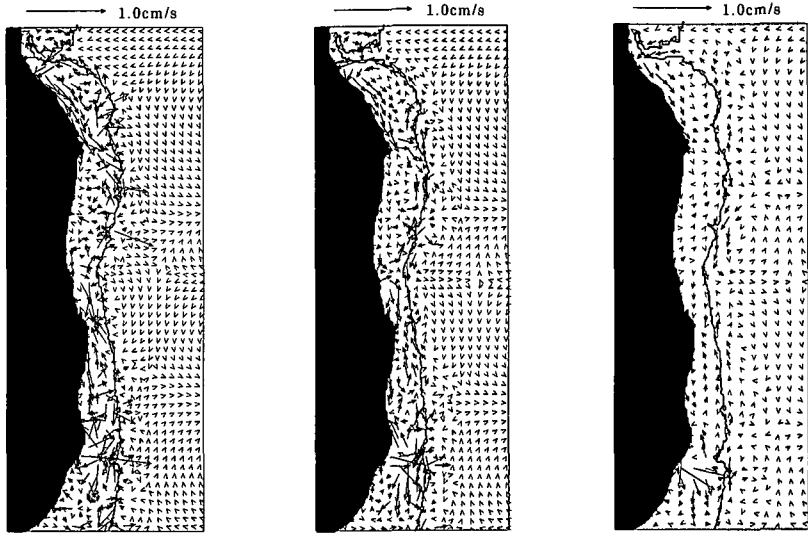
3. 高解像度水深マップに基づく潮流シミュレーション

3.1 数値シミュレーションの概要

地形効果がリーフ内の流動構造に及ぼす影響を明らかにするために、2. で求めた高解像度水深マップに基づいて、潮流シミュレーションを行った。基礎式には浅水流方程式と連続式を用い、乱流モデルとしては、サンゴ礁海域のような複雑浅水流動の解析に適した SDS-2 DH モデル(灘岡・八木, 1993)を用いた。このモデルは、卓越する水平スケールと比べて水深が十分に小さい浅水域における乱流現象を、平面二次元的な水平大規模渦運動と水深スケール以下の三次元的な乱流運動(SDS 乱れ)に分離して取り扱うものである。ここでの支配方程式系は灘岡・八木(1993)と同じものを用い、その中での底面摩擦係数は 1.0×10^{-2} とした。計算領域は図-2 に示す通りである。計算格子数は岸沖方向を x 、沿岸方向を y とすると、 x 、 y 方向にそれぞれ 138、348 であり、格子サイズは LANDSAT データの解像度と同じく 30 m とした。潮汐振幅は、大潮時に相当する 0.70 m を与え、周期は 12 時間とした。境界条件については、沖側については、潮汐に合わせて水位を変化させ、その他の変数に関しては開放条件を適用した。また、その他の 3 辺の境界に関しては slip 壁条件を与えた。

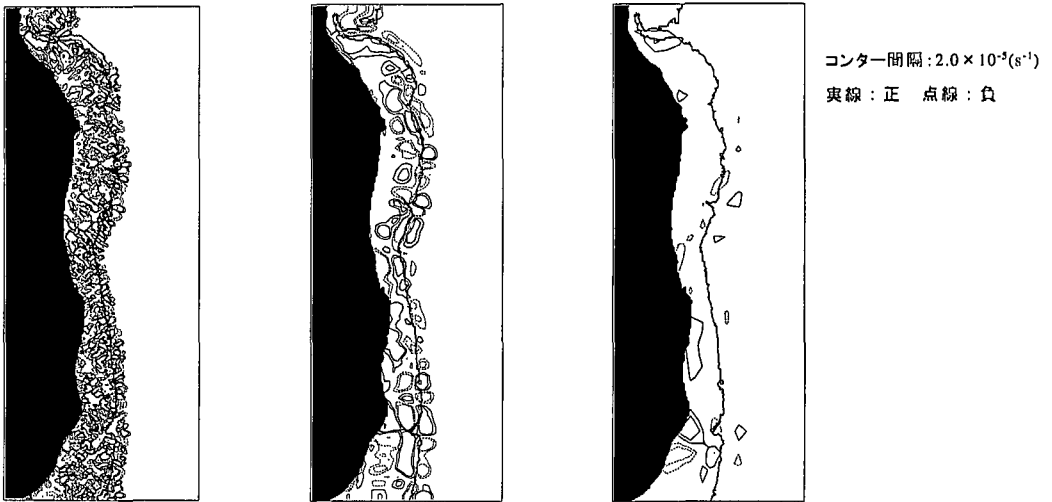
ここでは、用いる水深データの空間解像度による地形効果の現われ方の違いを明らかにするために、上記の 30 m \times 30 m の高解像度水深データを用いた場合(case 1)と、図-3 に示すように、元的水深データを 90 m \times 90 m で平均して水深データを空間的にならした場合(case 2)、同様に 210 m \times 210 m で空間平均した場合(case 3)、という解像度の異なる 3 ケースについて計算を行い、その結果を比較・検討した。

なお、この計算領域には、上述した図-2 ⑤のワタンジのように、水深が非常に小さく干潮時には干出する部分が存在する。このような領域の計算をスムーズに行うために、本計算では、1) 水深 0.1 m でしきい値を設けて陸域と海域の判定を行い、2) その境界においては、陸域との境界と同様に slip 壁条件を与えることによって、干出部の計算を実施した。



(a) case 1 (解像度 30 m) (b) case 2 (解像度 90 m) (c) case 3 (解像度 210 m)

図-4 潮汐残差流



(a) case 1 (解像度 30 m) (b) case 2 (解像度 90 m) (c) case 3 (解像度 210 m)

図-5 渦度分布

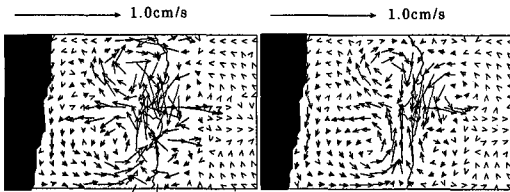
3.2 計算結果および考察

a) 平均流動パターン

図-4 は水深データの空間解像度が異なる各ケースにおける 3 周期目の潮汐残差流ベクトルを示したものである。まず最も解像度が高い水深データを用いた case 1 を見ると、外洋ではほとんど流れが生じていないのに対して、リーフ内では、比較的強い残差流が生じている。特に、切れ込み口付近での流れが特徴的であり、解析領域北側に位置するトゥールグチ(図-2①)ではクチに沿った流れがリーフ内に侵入し、強い南下流が形成されているのが確認できる。その他の切れ込み口では、リーフか

ら外洋に向かう残差流が卓越していることが分かる。次に、90 m メッシュを用いた case 2 では、case 1 と比較してその基本的な流動パターンは類似しているものの、水深データが空間的に平滑化されているため、地形効果が薄れ流速レベルが全体的に小さくなっている。最も解像度の低い case 3 では、流速レベルはさらに小さくなっており、地形効果が弱くなるとともに、残差流が生じにくくなっていることが分かる。

同様に、一潮汐間にわたって平均された渦度分布を図-5 に示す。case 1 ではリーフエッジや切れ込み口を中心に、多数の複雑な渦構造が見受けられる。それに対



(a) case 4 (解像度 30 m) (b) case 5 (解像度 90 m)

図-6 水深データの解像度による残差流の違い

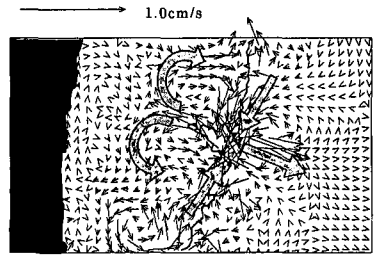
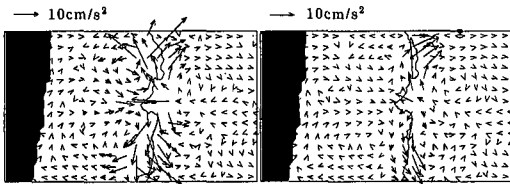
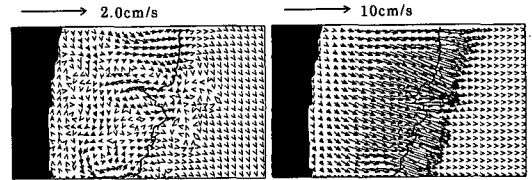


図-8 モリヤマグチにおける潮汐残差流



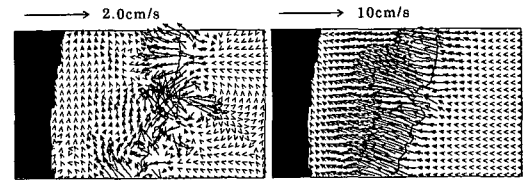
(a) case 4 (解像度 30 m) (b) case 5 (解像度 90 m)

図-7 水深解像度が底面摩擦項へ及ぼす影響



(a) 満潮時

(b) 下げ潮最大時



(c) 干潮時

(d) 上げ潮最大時

図-9 1/4周期ごとの流速ベクトル

して、case 2 では、case 1 と比較して渦度の強度は弱まり、特にリーフエッジにおける渦度は明らかに減少していることが分かる。さらに、case 3 では明確な渦構造はほとんど確認できなくなっている。

また、図-4 と図-5 で、case 1 の計算結果を case 2, case 3 に対応する格子サイズに平滑化した値も、case 2 や case 3 の計算結果とは異なることが確認されている。

このようなことから、水深データの空間解像度の違いにより、潮汐残差流の強度や渦度パターンが大きく異なることが明らかとなった。

b) 水深データの解像度の違いによる底面摩擦効果の現われ方

水深データの空間解像度の差が、サンゴ礁海域内の流動構造に及ぼす影響をより具体的に明らかにするために、中規模の切れ込み口の一つであるスムジグチ(図-2 ②)を含む領域を取り出して、それについて解像度 30 m の細かい格子で計算した場合(case 4)と解像度 90 m の粗い格子で計算した場合(case 5)の流況を比較するとともに、浅水流場の流動構造に多大な影響を及ぼす底面摩擦項との関連性について詳細な検討を行った。図-6 は各ケースにおける残差流を示している。ただし、case 4 については、計算結果を 3×3 メッシュで平均することにより case 5 の場合と表示上のメッシュ数をそろえてある。両者を比較すると、3.2a)と同様に、低解像度データを用いた case 5 では、高解像度データを用いた case 4 に比べて、切れ込み口から流入および流出する流れが小さく評価されていることが分かる。

次に底面摩擦項についても同様に比較をした。図-7

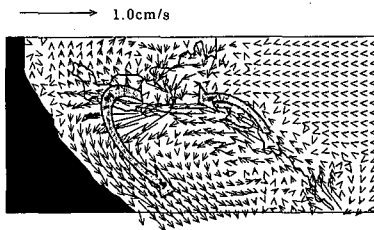


図-10 トゥールグチにおける潮汐残差流

(a), (b) に、それぞれ、case 4 の 30 m メッシュにおける底面摩擦項 $(\tau_b/h)_{30}$ を 90 m メッシュ領域、すなわち 3×3 メッシュで平均したものの $(\tau_b/h)_{30}$ と、case 5 の 90 m メッシュにおける底面摩擦項 $(\tau_b/h)_{90}$ を示す。30 m メッシュの残差流と 90 m メッシュの残差流との比較では、リーフエッジや特に切れ込み口において両者の差が顕著であったが、底面摩擦項を比較した場合においても、リーフエッジや切れ込み口において、両者の差が特に大きいことが確認された。具体的には、図-6 に示す残差流パターンに関して、切れ込み口における岸沖方向に発散する流れが、空間解像度 30 m よりも 90 m の方が弱まっていることと対応して、底面摩擦項(図-7)に関しても、切れ込み口での岸沖方向の底面摩擦項ベクトルの大きさ

が大きく異なっていることが分かる。このことは、水深の空間解像度の違いが、浅水流場で重要な力学的役割を果たす底面摩擦項の違いを介して、残差流パターンに多大な影響を及ぼしていることを示唆している。上記の結果は、水深分布の微細空間構造と底面摩擦項が強く関連していることを示しており、今後、サンゴ礁海域における流動シミュレーションを実施するためには、これらの効果を何らかの形で評価し、数値モデルに取り込む必要があるが、それは今後の課題とする。

c) 切れ込み口における流動特性

さらに、特徴的であった切れ込み口付近で生じる流動構造について、モリヤマグチ(図-2③)を例にとって詳しく検討してみた。モリヤマグチ近傍の残差流パターンを示している図-8を見ると、リーフエッジに沿って南北から切れ込み口に収束する流れと、切れ込み口に沿って発散する流れが見受けられ、切れ込み口を中心とした複数のセル構造が生じていることが分かる(図中矢印)。このような流動パターンの形成過程を理解するために、1/4周期ごとの瞬間流速ベクトルを図-9に示す。これらを見ると、下げ潮最大時(図-9(b))および上げ潮最大時(図-9(d))にはリーフエッジ全体から比較的一様に流出および流入しているのに対して、満潮時(図-9(a))には切れ込み口からリーフ内に侵入する流れが卓越し、干潮時(図-9(c))には切れ込み口に向かって流れが収束して外洋へ流出している。このような流れは図-8の残差流の特徴と一致していることから、一潮汐間の残差流は、満潮・干潮時のリーフ内の流れ、特に複雑な地形効果によって生じる流れに支配されているものと考えられる。このような残差流パターンはスムジグチおよびブーグチでも同様に見られるが、解析領域内で最も大規模な切れ込み口であるトゥールグチについては、図-10に示すように、切れ込み口に沿って、リーフ内に入り込む流れが卓越し、そこから南下流が顕著になるという、他の切れ込み口とは異なる流動構造が見られる。この原因としては、他の切れ込み口が比較的小規模で、その影響範囲が切れ込み口周辺のみにとどまっているのに対し、トゥールグチは相対的に大規模で、リーフエッジを越えて礁池まで達しているため、リーフ内の流動にまで十分に影響が及ぶものと考えられる。このように、サンゴ礁海域での流れは、領域内に存在する切れ込み口の具

体的な状況に強く影響を受けている。

4. おわりに

本研究で得られた主な結論は、以下の通りである。

1) サンゴ礁海域における流動シミュレーションを行う際に、極めて重要な要素の一つである地形的特徴を精度良く取り込むために、灘岡・田村(1993)により提案された衛星画像データを用いた水深分布算定手法に基づいて、サンゴ礁海域における高解像度水深マップを作成した。その結果、実際に観察されているような切れ込み口やワタンジといったサンゴ礁内における地形的特徴を概ね再現していることが確認された。

2) このような高解像度水深データを用いて、サンゴ礁海域内における潮流シミュレーションを実施した。水深データの空間解像度を変化させて数値解析を行ったところ、地形効果の現れ方の違いが、サンゴ礁海域内における残差流構造などに多大な影響を及ぼしていることとともに、それらが底面摩擦項の違いを介して形成されていることが示された。なお、本論文では、潮流のみを基本外力とした数値解析結果を示したが、今後は、風応力や波の効果を考慮した本格的なサンゴ礁海域における流動シミュレーションを実施するとともに、そこで得られた結果と現地観測結果(沖縄県環境科学センター, 1996; 灘岡ら, 1999)との比較・検討を行っていく予定である。

謝辞: 本研究の一部は、文部省科学研究費補助金基盤研究(B)(1)(課題番号: 10450181, 代表者: 灘岡和夫), 国際学術研究(課題番号: 09044144, 代表者: 灘岡和夫)によるものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 灘岡和夫・田村英寿(1993): 沖縄赤土流出問題に関する汎用衛星モニタリングシステム構築の試み, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 1106-1110.
- 灘岡和夫・八木 宏(1993): 浅い水域の乱流場に関する数値計算モデルの開発と沿岸流場への適用, 土木学会論文集, No. 473, pp. 25-34.
- 灘岡和夫・二瓶泰雄・横堀達也・熊野良子・大見謝辰男(1999): サンゴ礁海域の水環境に関する陸水・外洋水影響の検討, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 1181-1185.
- (財)沖縄県環境科学センター(1996): サンゴ礁生態系保全調査報告書.