

デジタル航空写真を用いた海底地形調査について

知念 正尚¹・田港 朝之¹

¹ 石垣港湾事務所 整備保全課（〒907-0012 沖縄県石垣市美崎町 1-10）

石垣島と西表島の上に位置する石西礁湖は、世界的にも有数のサンゴ礁海域であり、その礁湖内は暗礁・浅瀬が多数存在し、離島間を結ぶ海上交通に多大な支障を与えている。本調査は、浅海域の浅瀬・暗礁を把握できる海底地形図を広範囲に作成することを目的に、空中写真測量を応用し、新たな調査手法で実施した。この手法により、広範囲な浅海域の測量を従来手法に比べ安価に実施することが可能となった。

キーワード 海底地形、デジタル空中写真、空中写真測量、二媒質写真測量
ステレオマッチング、ナローマルチビーム、デジタルオルソ

1．はじめに

石垣市・竹富町などからなる八重山地域では、空港・病院などの主要施設は石垣市が所在する石垣島に集中しており、竹富町内の西表島・小浜島など離島の住民は頻繁に海上交通を利用している。

しかしながら、海上交通が主に利用している石西礁湖内はサンゴ礁海域特有の浅礁・浅瀬が多数点在する複雑な浅海地形となっているためその運行時間は、浅瀬・暗礁を海面上から目視できる昼間に限定され、早朝・夕方や夜間、強雨時などは危険であり運航されていない。そのため、日常生活の中で通勤・通学が出来ない、通院などの所用が長引くと宿泊が必要となる、離島で夜間に急患が発生するとヘリコプターの出動が必要になるなど、住民の負担が大きいとともに不安を抱えている所である。

今回、海上交通の航行箇所危険といわれている箇所の海底地形を把握することを目的に、石西礁湖内中央部海域の海底地形をデジタル航空写真のステレオマッチングと屈折補正を用いた新たな手法で調査を実施したことから、その内容について報告する。



写真 - 1 石西礁湖

2．調査の特徴

本調査の特徴としては、デジタル航空写真のステレオマッチングと屈折補正を用いて水面下の地形を調査する新たな手法を導入し、従来の深浅測量では計測できない浅瀬の水深が把握できる他、広範囲な海域を従来手法に比べ安価に計測できると同時にリーフ特有の複雑な地形を詳細に把握可能となる点にある。

3．調査範囲

調査範囲は石西礁湖内の南西部海域（小浜島以南、黒島・新城島以北、西表島大原港に至る範囲；青色）の数値地形モデル（90.0 k²）を作成した。

また、同海域北側（小浜島、嘉弥島を含む；黄色）を含む海域のデジタルオルソ（142.0 k²）作成を行った。



図 - 1 調査範囲

4. 測量方法

ステレオマッチングによる海底の数値地形データ作成作業は、ステレオマッチング処理と屈折率補正、補正後の精度向上プログラムから構成される。

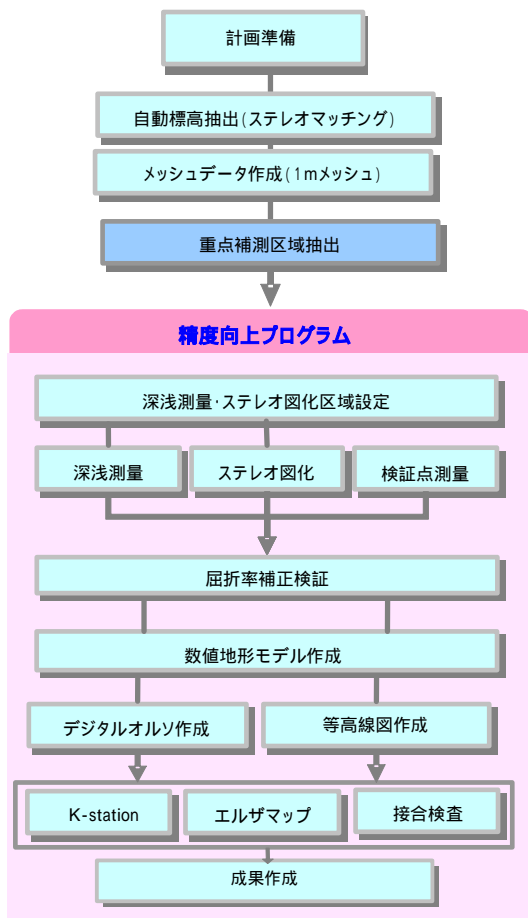


図-2 業務フロー

(1) 撮影

高解像度、高分解能のデジタルカメラであるDMC（デジタルマッピングカメラ；以下DMC）で撮影したデジタル空中写真データを採用した。

【撮影諸元】

撮影年月日：2007.4.20-26
 ：2007.7.2-3-4-5-6-8-20-21-24
 ：2008.7.12-14
 撮影縮尺：1/4000、1/8000
 撮影カメラ：DMC
 画質：12bit（4096階調）12μ/ピクセル

(2) ステレオマッチング

ステレオマッチングソフトを用いて業務対象範囲の全域について自動標高抽出（＝ステレオマッチング）を行った。ステレオマッチングはオーバーラップ60%・サイドラップ60%のデジタル空中写真データを用いて、1モデル単位で立体モデルを再現し、数値写真の同一点を

画像相関により検出することで、数値写真の視差差を算出して標高に変換する方法である。作成する数値地形モデルのグリッド間隔は0.5mの等高線を作成できるように1m間隔として作成した。

(3) 屈折率補正

ステレオマッチングで求めた1mグリッドの数値地形モデルデータに、グリッド1点ごとに屈折率補正値を計算し補正した。補正値計算には、潮位とステレオモデルの相対位置による屈折率補正（空気から海水の2媒体の変化¹⁾）を行い、屈折率補正を加味した1mグリッドデータとした。

【補正係数算出式】

$$h = F \times h'$$

$$F = (B / (H + h)) / \left(\left(\frac{s}{((n^2 - 1)D_1^2 + (H + h)^2 \cdot n^2)} \right) + \left(\frac{t}{((n^2 - 1)D_2^2 + (H + h)^2 \cdot n^2)} \right) \right)$$

h: 実際の水深

h' : 測得水深

H: 飛行高度

F: 補正係数

B: 基線長(s+t)

n: 屈折率²⁾ (1.334 ; 20℃の水の屈折率)

D1, D2: 各主点から測定点までの水平距離

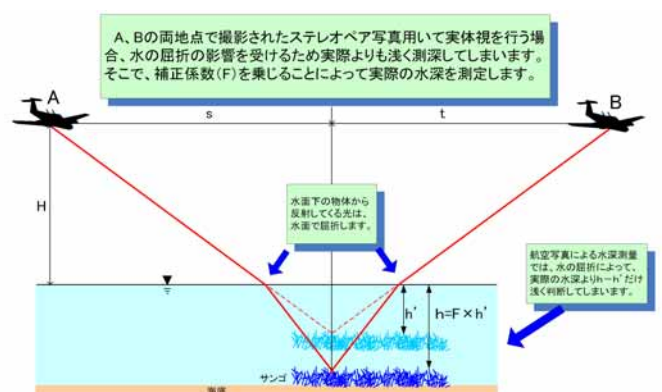


図-3 航空写真による測深の原理（屈折の影響）

(4) 精度向上プログラムによる品質確保

a) 重点補測区域の抽出

ステレオマッチング処理結果からマッチングしたメッシュ密度の粗い区域（以下；重点補測区域）を抽出して、空中写真判読が困難な区域は深浅測量（ナローマルチビーム音響探査）を実施し、判読可能な区域はステレオ図化により、数値地形モデルを作成する。

b) ステレオモデル間格差補正

重点補測区域以外の区域は、数値地形モデルの精度を向上するために、撮影コース間、撮影モデル間の組み合わせによるモデル間格差を計算し、比較検証を行い数値地形モデルの精査を行う。

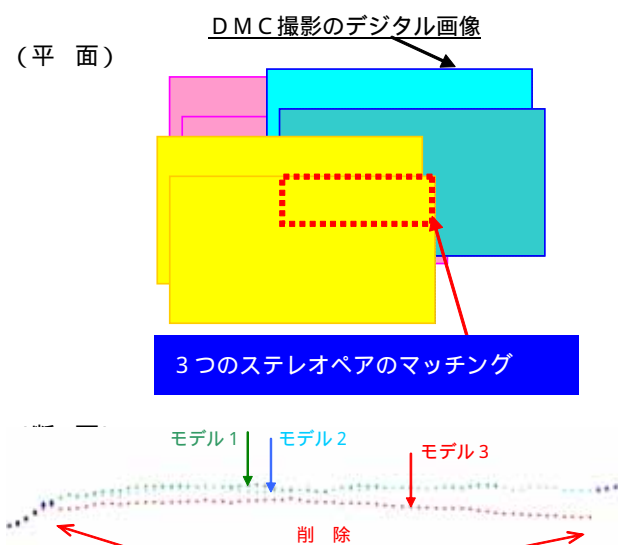


図 - 4 モデル間比較の概念

c) 数値地形モデルの作成

屈折率補正後の数値地形モデルおよびステレオ図化で作成した数値地形モデル、深浅測量モデルを合成し1つの数値地形モデルを作成した。

d) 地形モデルの品質検査

合成された数値地形モデルの品質検査は表 1 に示すように、等高線図(図 5)やオルソ等高線図、エルザマップ(図 - 7)を作成する。これらとデジタルオルソ(図 - 6)などを組み合わせて、地形モデルの検査を行う。検査結果に応じて、修正・データ確認方法を選択し、数値地形モデルの再作成を行う。

表 - 1 品質検査と検査資料

検査内容	検査資料	等高線図	オルソ等高線図	エルザマップ*
突出標高の有無				
地形変化の連続性				
位置正の正確度				
H19 範囲との連続性				

*エルザマップ；標高と傾斜を同時に表現した地形表現

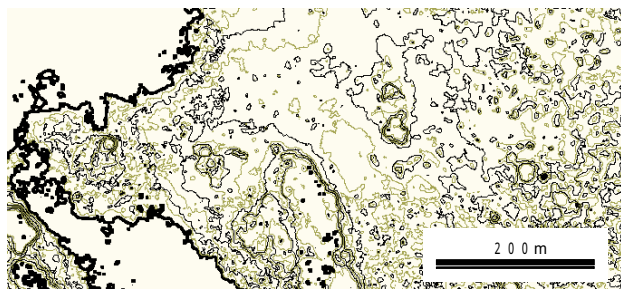


図 - 5 等高線図(検証地区付近)

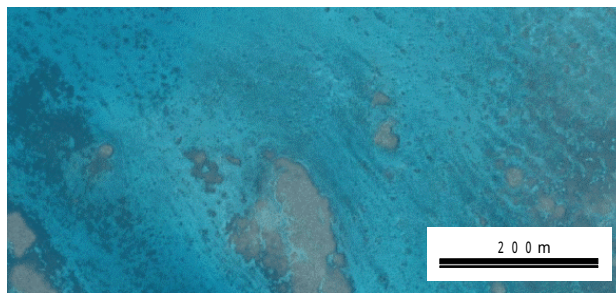


図 - 6 デジタルオルソ(検証地区付近)

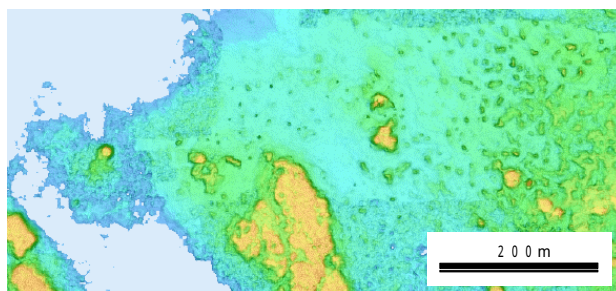


図 - 7 エルザマップ

(5) 精度検証

地形モデルの精度確認は黒島北側に検証地区(約0.08 K²)を設定し、ナローマルチビームによる深浅測量成果(図 - 8)で面的な検証を GPS 測量によりポイントで位置の検証を行った。

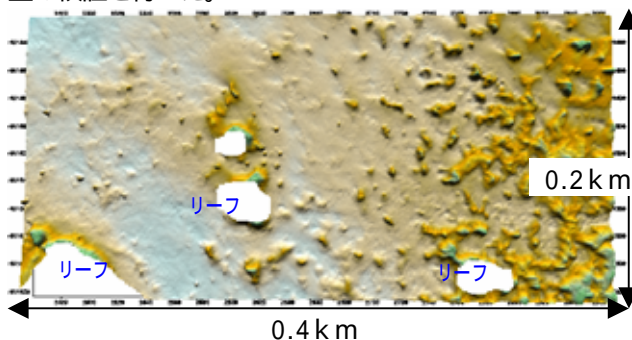


図 - 8 検証地区の鯨観図

5. 測量結果

(1) 標高の精度

海底標高は、水中での屈折率が大きく影響を受けるため、精度向上には、海域を最小エリアに区分し、その最小エリアごとの屈折率を算出し補正を実施した。

具体的には、1mグリッド毎に海域を区分し、深浅測量結果と比較したが、水深D.L - 4m以浅の精度は、標準偏差で0.25m前後とレベル1,000(国土地理院「作業規程の準則」)の標高点精度の0.33m、等高線精度0.5mを十分満たすものであった。(表 - 1)

表 - 1 検証地区の標高精度格差比較

深さ	測点数	深さ: TP標高 単位:m			標準偏差
		平均	最大	最小	
-1m ~ -2m	445	0.144	1.375	-0.365	0.252
-2m ~ -3m	7,439	0.109	2.150	-1.255	0.284
-3m ~ -4m	30,247	0.137	1.631	-1.237	0.247
-4m ~ -5m	46,742	0.132	1.442	-0.977	0.242
-5m ~ -6m	4,302	0.169	1.173	-1.091	0.293
-6m ~ -7m	363	0.065	0.745	-0.941	0.237

差 = NMB - ステレオマッチング 標高点精度の標準偏差0.33m (作業規程の準則より)

(2) 位置の精度

位置精度については、陸上の検証点 18 点および海上検証 4 地点において、RTK-GPS(VRS)測量により比較したが、陸上、海上共に標準偏差 10cm 未満となっていた。レベル 1,000 (国土地理院「作業規程の準則」)の等高線位置精度 (0.7m) 以内であった。

(3) 数値地形モデルの評価

デジタル成果の数値地形モデルとデジタルオルソは、鯨瞰図やカラー標高段彩図など視覚的な図面として活用でき、本調査エリアでは、水深が急激に変化する珊瑚礁特有の海域であり、暗礁が数多く存在するという、航路の選定には有効なデータ (図 - 9) を得ることができた。

6. 成果の評価

デジタル航空写真のステレオマッチングを用いた海底地形測量は、航路計画検討に必要な水深 D.L - 4m 以浅の水深、位置の精度を従来の深浅測量と比較して遜色ない上に、この新たな手法は、従来手法に比べ安価に調査することを可能にした。また、今回の調査では、撮影時の気象・海象影響を除去する撮影方法、屈折率補正や人

為的なミスを防止するためのワークフローを確立し、調査エリアを 1m メッシュという最小のデジタルデータで作成することが可能とした。

7. おわりに

今後、この高精度なデジタルデータを有効に活用していく必要がある。利活用方法について、以下に示す展開が考えられる。

(1) 数値シミュレーションへの活用

今回の調査結果から、浅海域限定ではあるが、海域の詳細な地形を把握することができ、従来の海図等の精度では再現できなかった、より詳細・高精度な海水流動の変化、物質輸送の変化等の数値シミュレーションを行うことが可能になると考えられる。

(2) サンゴ被度調査等の基礎資料としての活用

サンゴ被度調査等は、現在、ダイバーの努力により実施されているが、詳細な地形図がなかったことから、海水流動の多少など地形を含めた要因の分析が困難であった。今回取得された詳細な地形データ上で今までの調査結果を整理することでより具体的かつ広範囲な分析が可能となる。

謝辞: 本報告を遂行するにあたり、ご協力いただいた方々に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 佐藤一彦、内野孝雄: 海洋測量ハンドブック, 東海大学出版会, 1973.
- 2) 飯島徹徳, 佐々木孝之, 青山隆司: アビリティー物理 音の波・光の波, 共立出版(株), 2002.

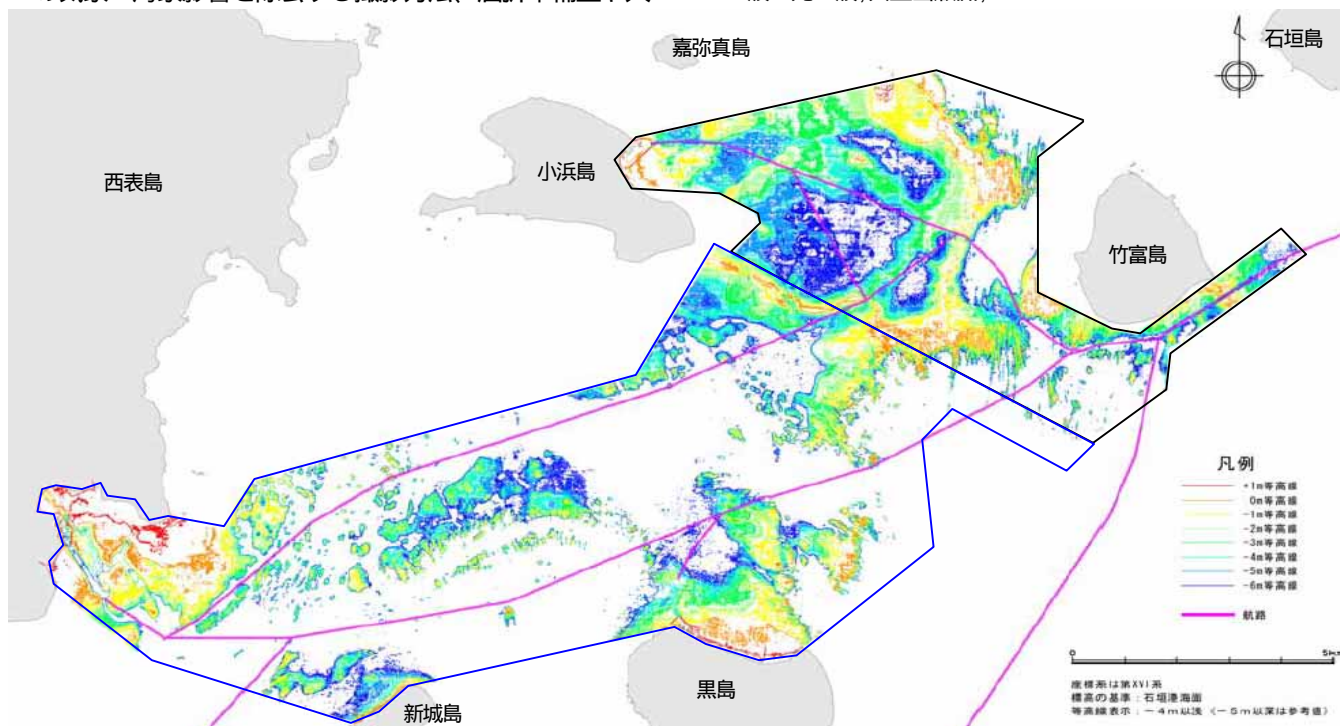


図 - 9 等高線図 (平成 19 年度と平成 20 年度成果の合成)