短 報

浅海域地形測量のための音響測深システムの評価： サンゴ礁における簡易高速測量の実施例

本郷宙軌^{*1, a}・後藤和久^{*2}・岡田浩二^{*3}・八木田康信^{*3}

本研究では、水深 0.2~20 m の極浅海域を測量することができる小型音響測深システム (HFD-1000) の能力を評価し、従来測量が困難であったサンゴ礁域において、簡易かつ高速に測定できることを示した。本システムは測定とデータ処理を一括して行えるものであり、測定した生データの出力やグリッドデータの作成も可能である。また、作成したグリッドデータを用いて、等深線が表示された 2 次元および 3 次元の画像を作成することもできる。本機器の性能上の深度分解能は 10 mm であるが、動揺センサーや方位センサー等を使用することで、より高精度の測量を行うことができる。本機器はサンゴ礁域のみならず、これまで水深測定が困難であった沿岸域や湖沼域において、今後の活用が期待できる。

キーワード：地形測量、音響測深器、小型船舶、沿岸域、サンゴ礁

I. は じ め に

沿岸域の海底地形は、しばしば台風や津波の影響を受けて大きく変化するため、水深データに基づいてその変化パターンを読み取ることは沿岸域の堆積学的・地形学的研究にとって非常に重要である。また、沿岸域の水深データは湖沼や沿岸域における堆積物採取の際に、堆積環境の推定や採取地点の選定に必要となる。さらに、取得が簡便かつ精度の高い沿岸域における詳細な水深データは、高潮や津波の伝搬および遡上についてのシミュレーションや浸水被害予測の高度化には必要不可欠である。

一方、水深データは生態学的研究にも必要不可欠である。例えば、底生生物は水深や地形の凹凸に応じた棲み分けをしていることが知られているため、地形測量を行うことで底生生物の生息分布を推定することが可能となる。代表例として、サンゴ礁を挙げることができる。サンゴ礁は水深 20 m 以浅に分布するが、そこでの海水の挙動は、サンゴの急速な成長による微地形の形成によっ

て大きく変化する。また、サンゴ礁生物の生息場を規定する水温、光環境および碎屑物流入についても、地形の凹凸が影響をおよぼすことが知られている (例えば、山本ほか, 2006)。

浅海域は大型船による音響測量等が困難であるため、これまで測量尺による直接測量 (Kayanne *et al.*, 2002) や、衛星や航空機を用いたリモートセンシングによる間接測量が行われてきた (Paringit・灘岡, 2002; Murase *et al.*, 2008)。しかしながら、測量尺で広範囲の地形データを得るには膨大な時間がかかる。また、リモートセンシングは広範囲の地形データを得るには適しているが、雲量や海面上での屈折率など、検討すべき課題が多い。そこで、水深数 m を航行できる小型船舶に搭載して、簡易かつ高速に計測できるとともに、取得したデータの処理まで一括して行うことができる地形計測システムが必要となる。

本研究では、水深 20 m 以浅の浅海域を計測できる小型音響測深システム (小型音響測深器とデータ処理シス

2012 年 6 月 29 日受付、2013 年 2 月 2 日受理。

*1 琉球大学理学部物質地球科学科 (日本学術振興会特別研究員 PD) 〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原 1。

*2 千葉工業大学惑星探査研究センター 〒275-0016 習志野市津田沼 2-17-1。

*3 本多電子株式会社 〒441-3193 豊橋市大岩町小山塚 20。

*a Corresponding author : g123001@sci.u-ryukyu.ac.jp

テム) の能力について紹介するとともに、サンゴ礁域において計測したデータを示す。最後に、精度向上のための課題について述べる。

II. 小型音響測深器およびデータ処理システム

本研究で使用した小型音響測深器(本多電子株式会社製: HFD-1000)は、(1) 機器本体(出力画面と記録装置)、(2) ソナー部、(3) GPS および、(4) ソナー部を船に固定する土台から構成され、12 V バッテリー(1 個)に

て駆動する(図1, 表1)。

測定可能な水深幅は0.2~10.0 m ないしは0.2~20.0 m の2段階であり、測定水深幅の切り替えは、機器本体にコンパクトフラッシュに記録されたプログラムを読み込ませることで可能である。なお、この作業は調査現場にて実施できる。本機器は89個の振動子で構成されるコンベックスタイプ水中ソナーである。ソナー部の発信周波数は1000 kHz であり、船の進行方向に対して直交方向に60度を一度にカバーして測定できる(表2)。

図1 本研究で使用した音響測深器と小型船舶

(A) 音響測深器の構成, (B) 計測中の様子, (C) 測定画面とバッテリー, (D) 使用した小型船舶。

Fig. 1 The echo sounder and the small boat for the present study

A : Components of the Echo sounder, B : The picture showing the seafloor bathymetric survey,
C : The picture showing the monitor and battery, D : The small boat for the present study.

表 1 音響測深システムの構成

Table 1 Components of echo sounder system for this study

No.	Deveice	Amount	Weight (kg)	Remarks
1	Monitor and recorder	1	7.5	Custom made, Memory in Compact Flash
2	Sonar	1	6.5	Custom made, Details in Table 2
3	GPS	1	0.8	Details in Table 3
4	Software for analysis	1	-	CD-ROM
5	Rod for sonar	3	5.7	Custom made, 0.6 m long/rod, 1.9 kg/rod
6	Fixture for sonar	1	14.0	Custom made, Uses spanner for fixture
7	Battery	1	-	Available on site, 12 V battery
Total cost: 3,700,000 JPY (No. 1-4: 3,500,000 JPY and No. 5-7: 200,000 JPY)				

表 2 本研究に用いたソナー本体の性能

Table 2 Performance of sonar of the echo sounder for this study

Category	Performance
Frequency	1000 kHz
Total number of beam	89
Swath width	60°
Transmit beam width	7°
Receive beam width	12°
Depth resolution	< 10 mm
Beam footprint	1.1 m (10 m), 2.2 m (20 m)
Sampling time	2.0 second
Typical survey speed	≤ 4.0 km/h
Min/Max depth	0.2 m/ 20 m

方位分解能はビーム角が7°であるため、水深10mでは1.1m、水深20mでは2.2mである。また、サンプリング周期が2.0秒であるため、未測深域を生じさせないための航行速度は、水深10mで時速4km以下が適している。深度分解能は、機器内の変換回路にて受波信号を認識し最適な出力値に調整しているため、10mmである。

位置情報は付属のGPS (KYOCERA Corporation : PGS3FLP-CX-111) にて計測し、機器本体に記録される。GPSは単独測位システムであり、測位誤差はおよそ10mである。GPSの詳細な性能については表3に示す。

本機器の空中重量は合計34.5kg (バッテリーの重量を除く) であり、他の測深器と比べて軽量のため運搬および包装が容易である。操作方法は簡便であり、電源を入れるだけで測深とGPSによる位置情報の取得が行われる。

測深データはコンパクトフラッシュに保存され、付属ソフトウェア (海底地形 Ver 3.31) を用いてデータの出力および描画ができる。測定データは、89本のビーム

表 3 本研究に用いたGPSの性能

Table 3 Performance of the GPS for this study

Category	Performance
ID	KYOCERA Corporation
Receive channel	12 parallel channel
Reacquisition Times	1 second
GPS accuracy	Less than 10 m
Positioning	2D and 3D positioning
Input voltage	3.3 V
Operating temperature range	-30 to 85 °C
Storage temperature range	-40 to 85 °C
Weight	800 g

ごとに5つの項目 (日付、時刻、緯度、経度、水深) が Comma-Separated Values (CSV) 形式にて出力される。地理座標系に加えて平面直角座標系で出力させることができる。また、船にソナーを取り付ける際の水平面取り付け角度、垂直面取り付け角度および喫水深度が入力可能である。このソフトウェアにテキスト形式で作成した潮位データ (例えば、気象庁の潮位観測情報) を入力することで、自動的に潮位補正が行われる。CSV形式の測定データに加えて、航路の情報を KML ファイルにて出力させることができるため、Google Earth や Google Map にて表示させることができる。さらに、付属ソフトウェアを用いて測定した生データからグリッドデータを作成することもできる。グリッド計算のためのグリッドサイズや演算円半径は、任意の値を入力することができる。また、水深の算出に用いたデータ数を確認することができるため、グリッドデータの精度を評価することが可能となっている。また、深度フィルター機能を設けているため、測定データから任意の水深幅の記録を抽出することができる。例えば、水中浮遊物の深度があらかじめ既知の場合には、その水深データを除外してグリッ

ド計算を始めることができる。描画機能として、グリッドデータを用いて等深線が表示された2次元および3次元の画像を作成することができる。

III. 結果と考察

本機器の能力を明らかにするために、サンゴ礁において小型船舶(0.56トン、しらなみ丸)を用いて地形測量を実施した。測量は2012年2月12日に沖縄県石垣島の伊原間サンゴ礁(幅1,320m)を対象に実施した(図2)。この海域では、Hongo and Kayanne (2010)によって、長さ10m間隔で礁原(Reef flat)および礁斜面(Reef slope)の断面測量が行われているため、その測線上を計測することによって比較検証を行った。海岸から100m沖合にある基準点から計測を開始し、礁嶺(Reef crest)上の1,100m沖合まで測量した。航行速度は3.0~3.5 km/hであった。

図3は、本機器の測量データとHongo and Kayanne (2010)の比較データを示している。同図から、測深器は海岸から700m沖合にむけて水深が徐々に増していく浅礁湖(Shallow lagoon)の地形プロファイルを計測

できていることがわかる。また、800~1,000m沖合にかけて分布する比高1m程度の凹凸地形、1,100m沖合の水深1m程度に広がる平らな礁嶺の地形も測定できていることがわかる。さらに、Hongo and Kayanne (2010)では10m間隔で測量したため捉えることができなかった、水平距離300m付近に見られる直径2~3m程度の大型の塊状サンゴを検出することができた。海岸から1,000m沖合で停泊して測量した直下水深の計測値は 1.12 ± 0.24 mであり、測量尺による同一地点の計測値は1.05 mであった。測定時における波浪の動揺補正は行っていないものの、測定時における筆者らの観察によると波高は0.1~0.2m程度だったため、この点を考慮すると、Hongo and Kayanne (2010)と本研究で取得したデータはほぼ一致しているといえる(図3)。

連続的に地形を捉えられるうえに、測定に要した時間は約500点の測量で約20分程度であった。測量尺と検縄を用いた測定は200点で3~4時間程度かかるため、本機器での測量は極めて効率的である。

本機器の性能上、静水時の水深は10mm以下の精度で測定することが可能であるが、実際の測定水域では、

図2 石垣島の位置および伊原間サンゴ礁

(A) 石垣島の位置図、(B) 調査を実施した伊原間サンゴ礁。サンゴ礁は幅1,320mで、海岸から浅礁湖、礁嶺、礁斜面に区分される。破線は調査測線を示す。空中写真(COK 77-4 C1-16)は1978年に国土地理院によって撮影されたものを使用。

Fig. 2 Location of the Ishigaki Island and Ibaruma reef

A : The map showing the location of Ishigaki Island, B : The photograph showing the location of Ibaruma reef. The reef is 1,320m wide and consists of a beach, shallow lagoon, reef crest, and reef slope. The dashed line shows the location of survey line. The aerial photograph (COK 77-4 C1-16) was taken by the Geospatial Information Authority of Japan in 1978.

図 3 伊原間サンゴ礁における測量結果

実線は Hongo and Kayanne (2010) による測量尺の結果を示し、破線は音響測深器のデータ (100~1,100 m 沖合まで) を示す。矢印は塊状ハマサンゴをさす。

Fig. 3 Result of bathymetric profile on Ibaruma reef

Solid line and dashed line show the results of a measurement staff by Hongo and Kayanne (2010) and the echo sounder. The profile of echo sounder indicated between 100 m and 1,100 m length from the coast line. An arrow indicates massive *Porites*.

波浪の影響や船の操舵によって生じる動揺が影響するため、今後この点を改良していく必要がある。

IV. 機器の改良点と課題

測量尺による直接測量でも波浪の影響による誤差は排除できないことを考えると、本機器を用いれば、測量尺による直接測量と同等の精度の測量を、極めて効率的に行うことができると結論づけられる。

本機器の最大の特徴は、小型・軽量かつ比較的安価であるため、小型船舶やゴムボートに装着して、極浅海域で測量ができる点にある。より高精度の地形断面測量においては動揺センサーなど高価かつ重量の大きい装置の追加が必要であるが、地形断面の測量だけでなく、例えば各種波浪計算を実施するための地形データ (数 m から数十 m グリッドで作成するもの) の作成には、今回の精度でも十分であると考えられる。その一方で、本機器の性能上の深度分解能 (10 mm) をもって数 cm 程度の誤差での高精度測量を行うには、動揺センサーを取り付けて、船の動揺補正 (鉛直軸回り・左右の傾き・前後の傾き) を行っていくことや、方位センサーを取り付けて、船首の方向角を計測することで高精度測定を実現することなどが必要である。また、GPS を用いた座標決定は単独測位にて実施したが、基準局を設置した RTK (リ

アルタイムキテマティック) 測量をすることで精度を高めることができる。加えて、高精度の Differential GPS を船首・船尾・右舷・左舷にそれぞれ設置することで、船の動揺を測定して補正することも考慮する必要がある。さらに、水中音測計を用いて音波伝搬速度を測定し、水中の音速度および屈折の影響を補正していくことも必要である。

今回は透明度が高く水温が均質であるサンゴ礁を対象に地形測量を実施したが、本機器の能力を検証するためには、浮遊物が多く透明度が低い湖沼域や水温躍層がみられる水域においても今後測定していく必要がある。

謝辞 石垣島における地形測量に際して、島袋栄三氏・宮城久治氏のご協力を得た。ここに記して謝意を表する。なお、本研究には、文部科学省科学研究費補助金特別研究員奨励費「最終氷河期以降のサンゴ礁生態系復元による地球温暖化影響下の生態系予測」(代表者：本郷宙軌，課題番号：24・4044)，若手研究 (A)「琉球列島の沿岸巨礫群を用いた過去数千年間の津波・高波規模の定量評価」(代表者：後藤和久，課題番号：23684041)，および環境省環境研究総合推進費「アジア規模での生物多様性観測・評価・予測に関する総合的研究」(代表者：矢原徹一，課題番号：S-9) を使用した。

引 用 文 献

- Hongo, C. and Kayanne, H. (2010) Relationship between species diversity and reef growth in the Holocene at Ishigaki Island, Pacific Ocean. *Sedimentary Geology*, 223, 86–99.
- Kayanne, H., Harii, S., Ide, Y. and Akimoto, F. (2002) Recovery of coral populations after the 1998 bleaching on Shiraho Reef, in the southern Ryukyus, NW Pacific. *Marine Ecology Progress Series*, 239, 93–103.
- Murase, T., Tanaka, M., Tani, T., Miyashita, Y., Ohkawa, N., Ishiguro, S., Suzuki, Y., Kayanne, H. and Yamano, H. (2008) A photogrammetric correction procedure for light refraction effects at a two-medium boundary. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 74, 1129–1136.
- Paringit, E.・灘岡和夫 (2002) 多バンド・リモートセンシングに基づくサンゴ礁マッピングへの逆解析手法の応用. *海岸工学論文集*, 49, 1191–1195.
- 山本高大・灘岡和夫・西本拓馬・Blanco, A.C.・石丸 隆 (2006) 気象擾乱に伴うサンゴ礁海域の物理・水質環境特性の動的変動過程について. *海岸工学論文集*, 53, 1076–1080.

**Evaluation of echo sounder system for shallow water areas :
an example of easy and quick measurement on coral reefs**

Chuki Hongo^{*1, a}, Kazuhisa Goto^{*2}, Koji Okada^{*3} and Yasunobu Yagita^{*3}

Keywords : topographical survey, echo sounder, small ship, coastal area, coral reef

*1 Department of Physics and Earth Sciences, Faculty of Science, University of the Ryukyus (JSPS Research Fellow). 1 Senbaru, Nishihara, Okinawa, 903-0213, Japan.

*2 Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology. 2-17-1 Tsudanuma, Narashino, 275-0016, Japan.

*3 Honda Electronics Co. Ltd. 20 Oyamazuka, Oiwa-cho, Toyohashi, 441-3193, Japan.

*a Corresponding author : g123001@sci.u-ryukyu.ac.jp