

# 水路測量への活用に向けたインターフェロメトリ音響測深機 C3D の水深精度検証<sup>†</sup>

南 宏樹\*

Evaluation of depth uncertainty acquired with interferometric sonar system C3D  
for use in hydrographic survey<sup>†</sup>

Hiroki MINAMI\*

### Abstract

Hydrographic and Oceanographic Department of Japan Coast Guard (JHOD) introduced interferometric sonar system in 2009. Since then, enough test and evaluation of the interferometric sonar have not been done for use in the hydrographic survey. This report describes the test and evaluation of the interferometric sonar conducted in 2012. The tests were done in accordance with JHOD's hydrographic survey requirements.

## 1 序論

海上保安庁海洋情報部が行っている水路測量では、船舶の航行安全を担保するために、水深情報の取得及び海底障害物の検出を行っている。現在はマルチビーム音響測深機とサイドスキャンソナーの 2 台の機器を併用することによりこれらの業務を行っている。新たな測量機器であるインターフェロメトリ音響測深機は、水深情報の取得と海底障害物の検出を 1 台で同時に行えるという利点がある。またインターフェロメトリ音響測深機は、従来のマルチビーム音響測深機よりスワ幅が広いため、より効率的な調査が可能となる。

当部では平成 21 (2009) 年度に初めてインターフェロメトリ音響測深機 (Teledyne Benthos 社製 C3D, 以下 C3D という) を試験的に導入した。当初は C3D を船に艀装することに苦労したものの、艀装方法を改良するなどしてその運用を

開始することができた。2011 年に東日本大震災が発生した際には、C3D のサイドスキャン画像を用いて、東北地方被災港湾の航路の海底障害物を検出するのに活躍した。

一方、水深情報の取得に関しては、C3D を十分活用できていない。理由の一つに C3D が取得する水深の精度検証が十分に行われていなかったことがある。今後海図改版等のための水路測量にインターフェロメトリ音響測深機を活用する場合は事前の水深精度の検証が必要不可欠である。

水深精度の検証に関しては、海外の水路当局、例えば米国海洋大気局沿岸調査部 (NOAA Office of Coast Survey) においてもインターフェロメトリ音響測深機を水路測量に使用するにあたり事前に様々な精度検証を行っている (Gostnell 2005; Gostnell et al., 2006; Gostnell et al., 2007)。

このような状況を踏まえ、2012 年 11 月、当庁

<sup>†</sup> Received October 11, 2013; Accepted December 4, 2013

\* 海洋調査課 Hydrographic Surveys Division

が保有するインターフェロメトリ音響測深機 C3D を使用して、水深データを取得し、当庁のインターフェロメトリ音響測深機実施指針に基づく測深精度の検証、マルチビーム音響測深機で取得した水深との比較検証、海底の物体の検出能力の検証等を行ったので報告する。

## 2 精度検証の概要

### 2.1 海域

2012年11月12日から16日にかけて鹿児島湾内の3地点（Station1から3）で検証を行った（Fig. 1）。

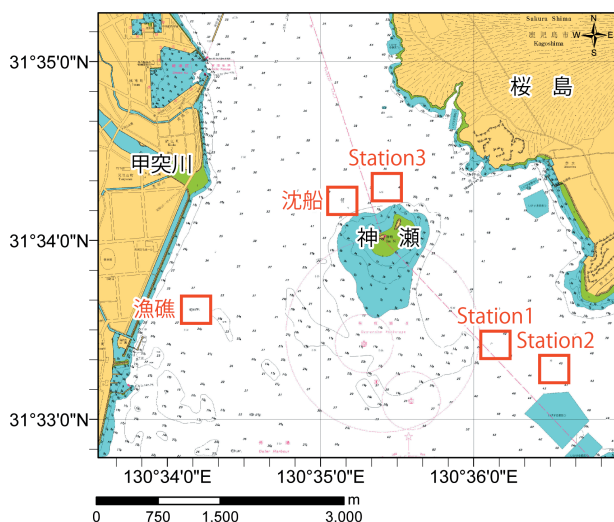


Fig. 1. Test area (Nautical chart W 214 A).  
 図1. 精度検証の海域（海図 W 214 A 鹿児島港北部）。

### 2.2 使用機器

第十管区海上保安本部所属の測量船「いそしお」



Fig. 2. C3D system deployed on S/V Isosio.  
 図2. 測量船「いそしお」に艙装した C3D システム。

Table 1. C3D system hardware.

表1. C3D システム概要。

	Device	Manufacture / Model
Sounding	C3D sonar	Teledyne / Benthos C3D - LPM
	Data acquisition system	Triton Imaging Inc. / Isis
Attitude/ Position	Motion sensor	Ashtead Technology / CDL MiniRLG 2 Gyro
	GPS for RLG alignment	Hemisphere / Crescent R110 (DGPS)
	GPS for position	Kongsberg/ Seapath 200
	DGPS receiver	Hemisphere / MBX-4
	Altimeter	Tritech International / PA 500/6-S
Sound Speed	Surface sound speed	Odom / Digibar V Model 1500
	Sound speed profile	AML/Smart SV & P

お」に C3D を艙装してデータを取得した。「いそしお」の総トン数は約 27 トン、主要寸法は全長 21 m、幅 4.6 m、喫水 2.4 m である。「いそしお」の左舷側にはしごを取り付け、このはしごに C3D を艙装した（Fig. 2）。

C3D のシステムの概要を Table 1 に示す。

### 2.3 データ処理方法

C3D のデータは XTF 形式で出力され、CARIS HIPS and SIPS 7.1.2 を用いて処理を行った。センサーのオフセット補正、喫水補正、パッチテストによって得られたロール・ピッチ・ヘディングの補正、動揺補正、潮高補正、音速補正等の各種補正はポストプロセスで行った。ノイズ除去は手動で行いフィルターは使っていない。ノイズ除去を行った測深点から 1 m 間隔のグリッドデータを作成した。グリッドデータの作成には CUBE アルゴリズムを用いた。

### 2.4 検証方法

本報告書では以下の 4 種類の精度検証について記載する。

- 1) 停船状態での測深精度の検証
- 2) 往復航走による測深精度の検証
- 3) 井桁による測深精度の検証
- 4) 海底の物体の検出能力の検証

以下に各検証の詳細を示す。

### 1) 停船状態での測深精度の検証

海上保安庁インターフェロメトリ音響測深実施指針（以下指針という）では、停船状態での測深精度の検証について「砂地の平坦な海底を利用し、作業船を停止させ、200 ピング以上を取得し、その測深点ごとの水深の平均から標準偏差を算出し、標準偏差の2倍の値が告示第102号の精度以内であること」と定められている（Fig. 3）。ここで告示第102号とは、「水路測量における測定又は調査の方法に関する告示」（平成14年海上保安庁告示第102号）を示す。

停船状態での検証では同じ海底の水深を取得することが重要であるが、現実には船を停船させたとしても、潮流や海流及び風の影響を受けて動いていたため、全く同じ海底の水深を取得しているわけではないことに留意されたい。今回の検証では、スワス角150度までの角度別の標準偏差を求めた。

### 2) 往復航走による測深精度の検証

往復航走による測深精度の検証について、指針では「狭い砂地の平坦な海底の海域に設定した測線上を往復航走してデータを取得し、水深編集を行ったデータを1m~2m間隔でグリッド化、平均化した参照データを作成する。次に上記測線に直交する測線上を往復航走してデータを取得し、水深編集を行ったデータと上記参照データを比較し、水深差が告示第102号の精度内にあるか検証する」と定められている（Fig. 4）。

### 3) 井桁による測深精度の検証

井桁による測深精度の検証について、指針では「起伏のある海底の海域において、左右ビームが100%重複するように2本の平行な測深線及びそれに直交する方向にも同じような2本の測深線を走行し、データを取得する。縦方向の測深線の左右ビームが重複する区域のデータ編集を行い、編集データを1~2m間隔でグリッド化、平均化した参照ファイルを作成する。次に横方向の測深線の左右ビームが重複する区域のデータ編集を行い、上記参照ファイルとの水深差を算出し、その値が告示第102号の精度内にあるか検証する」と



Fig. 3. Schematic image for the uncertainty test 1.  
図3. 停船状態での測深精度の検証イメージ図。

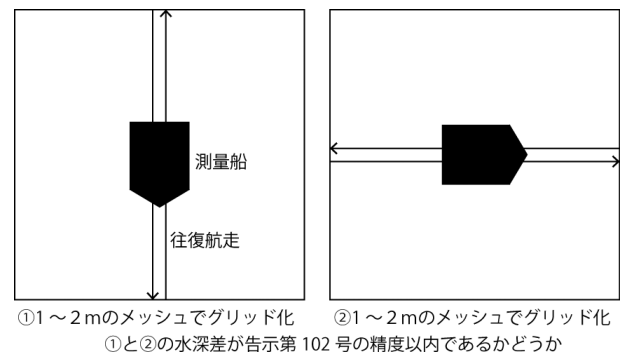


Fig. 4. Schematic image for test 2.  
図4. 往復航走による測深精度の検証イメージ図。

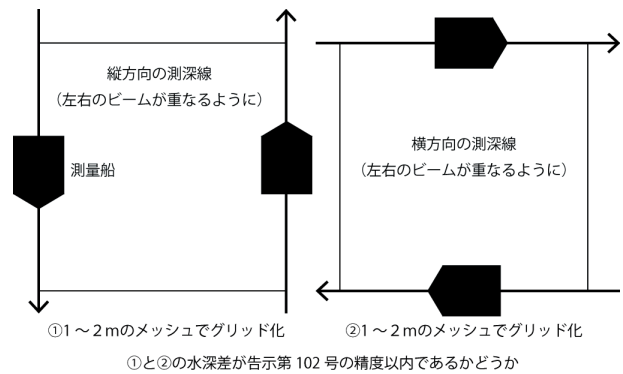


Fig. 5. Schematic image for test 3.  
図5. 井桁航走による測深精度の検証イメージ図。

定められている（Fig. 5）。

なお精度検証時においてC3Dの動揺センサーのヒープが異常値を示していたため、ポストプロセスでヒープ補正を行わずに検証を行った。検証時いそしおに搭載されているマルチビーム音響測深機EM 3002の動揺センサーを用いてヒープの値を収録していたが、ヒープの値は数cm~十数cmと小さく、検証に大きな影響をもたらすとは考え

Table 2. Wreck and fish reef used for the test.

表 2. 検証に用いた沈船と漁礁の概要.

	沈船	漁礁
位置	N31°34'13.5" E 130°35'09.0"	N 31°33'36.8" E 130°34'10.6"
水深	海図上の最浅所は33m 周辺は37~38mの平坦地形	海図上の最浅所は29 m 周辺は30~32 mの平坦地形
大きさ	長さ30m、幅10m 海底からの比高4m	20 m四方に複数の魚礁が分布、 海底からの比高2 m

られない。

#### 4) 海底の物体の検出能力の検証

沈船と漁礁の形状が異なる2つの海底の物体を適切に検出できるかどうか検証した。検証にあたっては「いそしお」のマルチビーム音響測深機 EM 3002 で捉えた沈船と漁礁の形状をリファレンスとした。Table 2 に沈船と漁礁の概要を示す。

### 3 結果

各検証について、Station 1 から3まで同様の結果が得られたため、全ての Station の結果は示さず本報告では Station 2 のみの結果を示す。

#### 1) 停船状態での測深精度の検証

C3D からの射出角度による測深精度分布を Fig. 6 に示す

内側（スワス角 120 度以内）では 1 級，2 級の精度を概ね満たしているが，特級の精度を一部満たしていないことが分かる。さらに外側のビームほど標準偏差が大きくなりスワス角が 128 度以上では 2 級の精度を満たしていない。この停船状態での検証により，2 級の精度を満たす角度がスワス角 128 度までであったため，スワス角 128 度より外側のデータはこの後に記載されている検証には用いないこととした。

#### 2) 往復航走による測深精度の検証

検証結果をヒストグラムで Fig. 7 に示す。

検証結果を，告示第 102 号に沿って求めた当該海域の水深における各種精度と共に Table 3 にまとめる。

水深差の平均値は，いずれも特級，1 級，2 級の精度を満たしている。ただし水深差の標準偏差

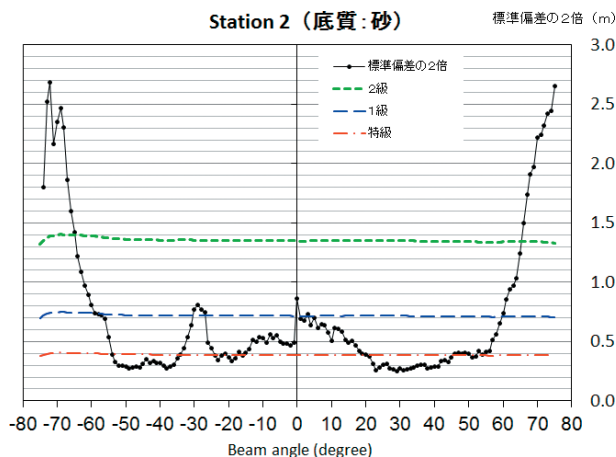


Fig. 6. Depth uncertainty for each beam angle at Station 2. The horizontal axis is beam angle from nadir, positive angles mean starboard side and negative angles mean port side. The vertical axis is twice the standard deviation (black line), the uncertainty of special order (red line), order 1 (blue line) and order 2 (green line) computed by the JCG specification.

図 6. Station 2 における角度別の測深精度の検証。横軸は直下からの角度でプラスが右舷側，マイナスが左舷側。縦軸は水深の標準偏差の 2 倍（黒実線）及び，告示第 102 号に沿って求めた当該海域の水深における特級（赤一点鎖線），1 級（青鎖線），2 級（緑鎖線）の精度。

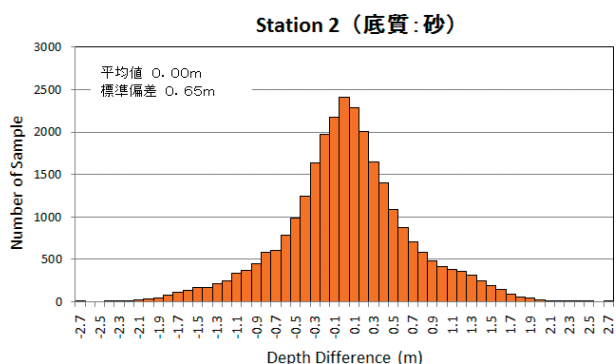


Fig. 7. Histogram of depth differences for test 2.

図 7. Station 2 における往復航走の水深差のヒストグラム（ヒストグラムのビンサイズ 0.1 m）。

が大きい。このような場合は，現行の指針通り水深差の平均値のみを各種精度と比較することは妥当でないかもしれない。

#### 3) 井桁による測深精度の検証

検証の結果をヒストグラムで Fig. 8 に示す。

Table 3. Result for test 2.

表 3. 往復航走による測深精度の検証結果.

水深差の平均値 (標準偏差)	特級	1級	2級
0.00 m (±0.65 m)	0.39 m	0.72 m	1.35 m

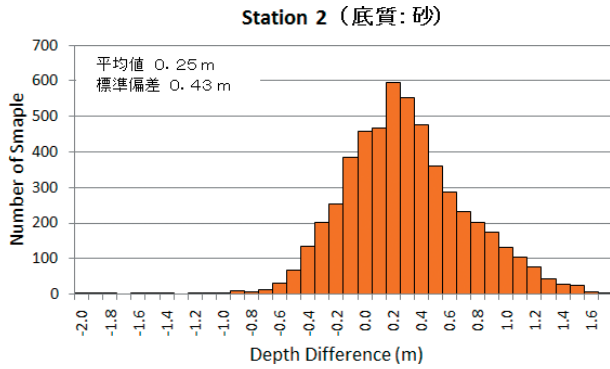


Fig. 8. Histogram of depth differences for test 3.

図 8. Station 2 における井桁内の水深差のヒストグラム (ヒストグラムのビンサイズは 0.1 m).

Table 4. Result for test 3.

表 4. 井桁による測深精度の検証結果.

水深差の平均値 (標準偏差)	特級	1級	2級
0.25 m (±0.43 m)	0.39 m	0.72 m	1.35 m

検証結果を、告示第 102 号に沿って求めた当該海域の水深における各種精度と共に Table 4 にまとめる.

井桁内の水深差はいずれも告示第 102 号の定める特級, 1 級, 2 級の精度を満たしている. しかしながら往復航走による検証同様, 水深差の標準偏差が大きいため, 水深差の平均値のみを各種精度と比較することは妥当でないかもしれない.

#### 4) 海底の物体の検出能力の検証

##### a) 沈船

Fig. 9 から分かるように C3D, EM 3002 とともに沈船を検出できている. C3D は EM 3002 に比べて, 沈船の形が不明瞭であり, 沈船の形状が凸凹しており, 検出能力は劣る. さらに検出能力の違いを調べるために沈船の水深プロファイルを検証

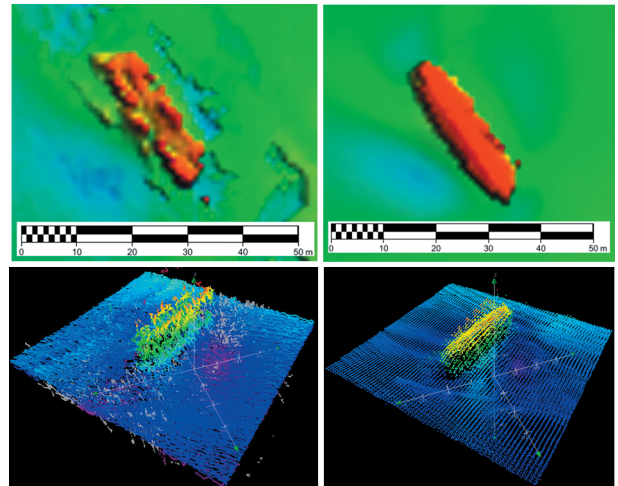


Fig. 9. Comparison images of the wreck with C3D and EM 3002. (upper) Horizontal image of the wreck created by grid data with 1 m resolution. (lower) Bird-view image of the wreck created by grid data with 1 m resolution.

図 9. C3D と EM 3002 で捉えた沈船の比較図. (上図) 1 m 間隔のグリッドから作成した沈船の平面図. (下図) 1 m 間隔のグリッドから作成した沈船の鳥瞰図.

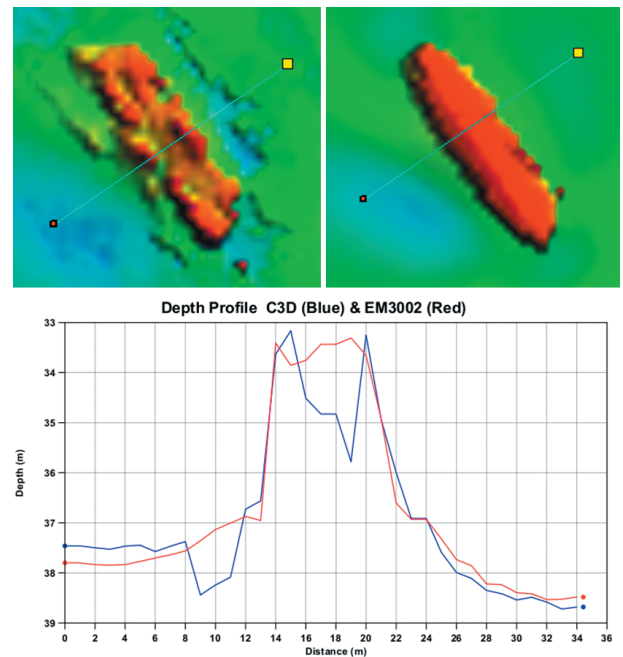


Fig. 10. Depth Profile along the wreck from NE to SW. Horizontal axis is distance (m) from NE and vertical axis is depth (m). Blue line means C3D, red line means EM 3002.

図 10. 北東 - 南西方向に沈船を横断する水深プロファイル. 横軸は北東端からの距離 (m), 縦軸は水深 (m), 青線が C3D, 赤線が EM 3002.

Table 5. Depth uncertainty for the depth in wreck area.

表 5. 沈船の海域における告示第 102 号が定める精度.

特級	1 級	2 級
0.36 m	0.67 m	1.27 m

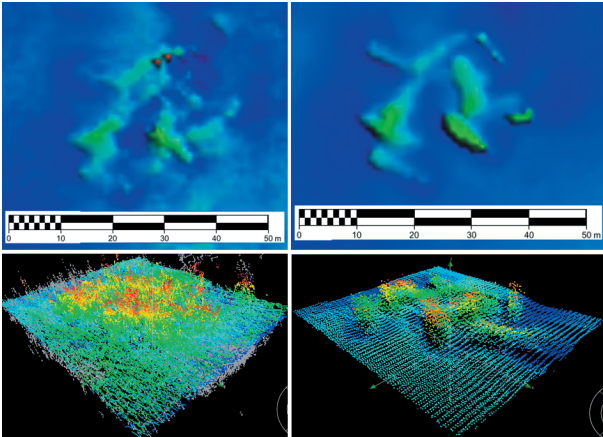


Fig. 11. Comparison images of the fish reef with C3D and EM 3002. (upper) Horizontal image of the fish reef created by grid data with 1 m resolution. (lower) Bird-view image of the fish reef created by grid data with 1 m resolution.

図 11. C3D と EM 3002 で捉えた漁礁の比較図。(上図) 1m 間隔のグリッドから作成した漁礁の平面図。(下図) 1m 間隔のグリッドから作成した漁礁の鳥瞰図.

した.

Fig. 10 のプロファイルから分かるように、沈船の水深値が 1 m 程異なる箇所がある。EM 3002 に比べて、C3D の方が 1 m ほど深く検出された。EM 3002 の水深が正しいと仮定すると、水深 34 m での深さの精度は Table 5 のようになる。水深 1 m の差は、2 級及び 1 級の精度を満たすが、特級の精度を満たさないことになる。

b) 魚礁

Fig. 11 から分かるように C3D, EM 3002 とともに魚礁を検出できていることが分かる。ただ C3D が検出した魚礁は全体的にぼやけた印象である。検出能力の違いを見るために、沈船の水深プロファイルを検証した。

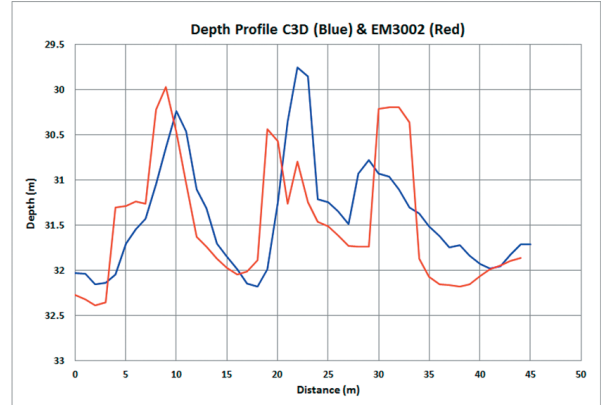
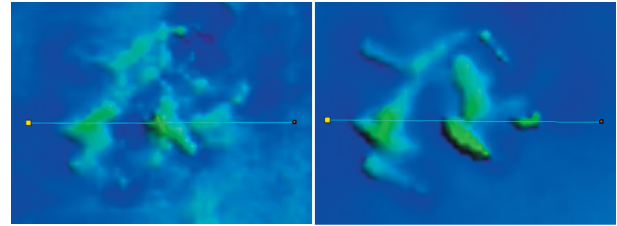


Fig. 12. Depth profile along the fish reef from west to east. Horizontal axis is distance (m) from west and vertical axis is depth (m). Blue line means C3D, red line means EM 3002.

図 12. 西-東方向に漁礁を横断する水深プロファイル。横軸は西端からの距離 (m)、縦軸は水深 (m)。青線が C3D、赤線が EM 3002.

Table 6. Depth uncertainty for the depth in the fish reef area.

表 6. 漁礁の海域における告示第 102 号が定める精度.

特級	1 級	2 級
0.34 m	0.63 m	1.21 m

Fig. 12 のプロファイルから分かるように C3D はデータのばらつきが大きいせい、作成されたプロファイルは、全体的にならされており、EM 3002 では捉えられているシャープな魚礁の形状を適切に表現できていない。EM 3002 と比べて 0.5 m~1 m 程の水深差が存在する。EM 3002 の水深が正しいと仮定すると、水深 30 m での深さの精度は Table 6 のようになる。沈船での検証時と同様、0.5 m~1 m の水深差は 2 級の精度を満たすが、1 級及び特級の精度を満たさない。

各検証の結果をまとめると以下ようになる。

1) 停船状態での測深精度の検証

スワス角が128度より外側では2級の精度を満たさない。スワス角が128度より内側では2級の精度を満たす。1級の精度は概ね満たすが特級の精度は満たさない。

2) 往復航走による測深精度の検証

特級, 1級, 2級の精度を満たす。

3) 井桁による測深精度の検証

特級, 1級, 2級の精度を満たす。

4) 海底の物体の検出能力の検証

C3Dは沈船や魚礁のような海底の物体を検出できたが、マルチビーム音響測深機 EM 3002 に比べると不明瞭であった。EM 3002 の検出した物体の位置が正しいと仮定すると、高さの精度、水平位置の精度とも、特級の精度を満たさない。

#### 4 まとめ

今回の検証結果では全ての検証項目で2級の精度を満たしたが、1級, 特級の精度については一部満たさなかった。往復航走や井桁による検証では、平坦な海底で検証を行ったため、比較的精度の良い水深情報が取得できたが、沈船や魚礁のように平坦でない凹凸のある物体では精度が悪く、1級, 特級の精度を満たさなかった。平坦な海底では精度が良いが凹凸のある海底では精度が悪くなるのはインターフェロメトリ音響測深機に限ったことではないが、どのような海底でも一定の精度を満たすことが水路測量には必要不可欠である。

また現行の指針において、往復航走や井桁による測深精度の検証では得られた水深差の平均値を告示第102号の精度と比較するように記載されているが、C3Dのように水深差の標準偏差が大きい場合はその標準偏差に関する規定も含めるべきである。

#### 5 今後の課題

インターフェロメトリ音響測深機 C3D はマルチビーム音響測深機に比べてデータ処理が難しい。要因としてデータ数が多いこと、データのば

らつきが大きいことが挙げられる。

データ数に関しては、1スワスあたりの測深点数が数千点と、マルチビーム音響測深機の数百点に比べて非常に多い。このように測深点数が膨大になるとノイズ除去等のデータ処理に時間がかかり、海図改版のスピードにも影響を及ぼすことになる。解決策の一つとしては、ノイズ除去に信頼性の高いフィルター等を活用して効率的にノイズ除去を行うことが挙げられる。また膨大なデータを一度に処理する高性能なコンピューターも必要となる。

ばらつきの大きさに関しては、誤った水深を海図の水深に採用する恐れがあるという問題につながる。水路測量においては航海安全のために最も浅い水深の測深点を採用する必要があるが、その測深点はノイズであってはいけない。例えば、ある1地点の水深を決定する場合に、その地点の周囲で取得された7個の測深点の水深が、10 m, 10 m, 8 m, 10 m, 12 m, 10 m, 10 mであった場合、8 mを水深として採用するのが水路測量においては適切であるが、そのためには8 mの測深点が確からしいことが絶対の条件であるということである。停船状態での検証結果からも分かるようにC3Dの測深点はビームの外側になるほどばらつきが大きくなる (Fig. 13)。そのばらついた水深の中でどれが最も確からしい測深点か見分けることは、経験のある水路測量技術者がデータ処

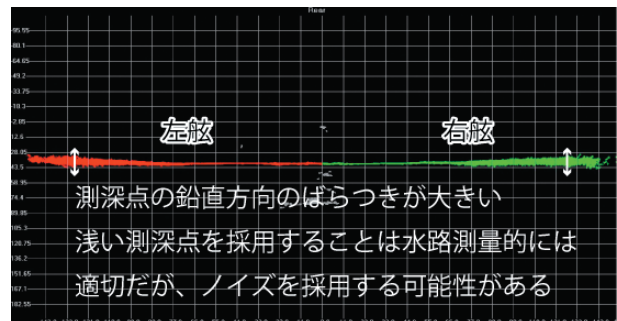


Fig. 13. Example of C3D data acquired in this test. Horizontal axis is distance from nadir and vertical axis is depth.

図 13. 今回取得した C3D データの一例。横方向は船の直下からの距離、縦方向は水深を表す。

理を行ったとしても非常に困難である。

確からしい水深を得る方法の一つとして測深点をグリッド化した後のグリッドノードにおける水深値を採用するという方法がある。このグリッド化の方法の一つには、例えば CUBE アルゴリズム (Combined Uncertainty and Bathymetric Estimator) のように各測深点の鉛直総伝搬不確かさを各測深点で計算した後に、不確かさが大きい信頼性の低い測深点を除去し、さらに、周囲の測深点の密度や類似性を統計的に判断してグリッドを作成する方法があり、米国水路当局では積極的に活用されている。グリッド化は確からしい水深を得ることができるメリットがある一方デメリットも存在する。グリッド化はデータを「ならず」ため、グリッド化後の水深は元の測深点の水深より深くなる可能性があり航海安全上は適切でない。今後 C3D を含めたインターフェロメトリ音響測深機を水路測量に活用する場合は、測深点そのものではなく、測深点から作成したグリッドデータの活用も検討すべきである。

### 謝 辞

検証海域の提案及び C3D の艀装及びデータ取得には、第十管区海上保安本部の佐伯充敏海洋調査官をはじめとした第十管区海洋情報部の職員の方々、測量船「いそしお」の白澤船長をはじめとする乗組員の方々、総務部政務課の三枝隼係員のご支援を頂きました。この場を借りて御礼申し上げます。また、インターフェロメトリ音響測深機についてアドバイスを頂いた NOAA Office of Coast Survey の Matthew J. Wilson 氏、Steve Brodet 氏 (現在 Hydroid 社所属)、NOAA Commissioned Corps Officers の Briana Welton 氏にこの場を借りて御礼申し上げます。

### 文 献

Gostnell, C. (2005) Efficiency of an interferometric sonar for hydrographic surveying: Do interferometers warrant an in-depth examination? The Hydrographic Journal, 118, 17-24.

Gostnell, C., J. Yoos, and S. Brodet (2006) NOAA test and evaluation of interferometric sonar technology, proceedings of Canadian Hydrographic Conference 2006, Halifax (Canada).

Gostnell, C., M. D. Davidson, and P. Turner (2007) NOAA's use of phase differencing bathymetric sonar technology to survey the Western Sambos Ecological Reserve for habitat mapping and charting purposes, proceeding of U.S. Hydrographic Conference 2007, Norfolk (United States).

### 要 旨

海上保安庁海洋情報部では平成 21 (2009) 年度にインターフェロメトリ音響測深機を導入した。これまで水路測量の活用に向けた水深精度の検証が十分に行われてこなかった。本報告では 2012 年に海上保安庁のインターフェロメトリ音響測深実施指針に基づいて実施した測深精度の検証について報告する。