

## インターフェロメトリ音響測深機の水深精度と異物検出能力の比較検証<sup>†</sup>

松本良浩\*

Evaluation and comparison of depth uncertainty and feature detecting capability of phase measuring bathymetric sonars<sup>†</sup>

Yoshihiro MATSUMOTO\*

### Abstract

The author conducted a test survey to evaluate the bathymetric uncertainty and feature detecting capability of three types of phase measuring bathymetric sonars (PMBS) in comparison with a conventional multibeam echosounder (MBES). All of the three PMBSs satisfied the standards of depth uncertainty and feature detecting capability specified in IHO S-44 order 1a within the slant angle of about 55 degrees. However, the standard deviation of the depth values obtained with PMBSs was several times as large as that obtained by the MBES. As each swath of PMBSs has denser soundings with high rate of noise, data cleaning procedure was time-consuming. It should be noted that sounding depths obtained with PMBSs tend to be sparse around nadir, which deteriorates feature detecting capability.

### 1 はじめに

効率よく高密度な水深が取得できるスワス音響測深機は浅海域の水路測量において近年広く利用されている。海上保安庁海洋情報部では、1997年にビームフォーミング方式の浅海用マルチビーム音響測深機(MBES: Multibeam Echosounder)を用いた測量に着手し、測量手法の検討を行ってきた(浅田・他, 1998; 森・他, 2000; Matsumoto et al., 2001; 森, 2002; 森・他, 2010)。浅海用MBESを用いた水路測量は既に業務化の域に達し、2002年には「マルチビーム(浅海用)音響測深実施指針」(平成14年3月28日保水沿第208号, 平成22年11月29日保海海第

145号により一部改正; 海上保安庁海洋情報部, 2010a)が策定されている。

一方、スワス音響測深としては後発のインターフェロメトリ方式を採用した音響測深機は、近年国内の民間企業でも既に複数の機種導入事例がある。インターフェロメトリ音響測深機(PMBS: Phase Measuring Bathymetric Sonar)は一般にビームフォーミング方式のMBESと比較してスワス幅が広いほか、サイドスキャン画像が同時に取得できるという特徴があり、浅海域における効率よい測量が期待される。

PMBSを用いて取得される水深を海図に反映させるためには、その精度や異物の検出能

<sup>†</sup> Received September 16, 2014; Accepted November 12, 2014

\* 技術・国際課 海洋研究室

Ocean Research Laboratory, Technology Planning and International Affairs Division

力が国際水路機関（International Hydrographic Organization：IHO）の定める国際水路測量基準（S-44 第5版；IHO，2008）を満たす必要がある。海洋情報部は2010年には上述した「マルチビーム（浅海用）音響測深実施指針」をほぼ踏襲する形で「インターフェロメトリ音響測深実施指針」（平成22年11月29日保海海第146号；海上保安庁海洋情報部，2010b）を策定しているが，実機による精度検証が急務であった。

海上保安庁海洋情報部は2009年に Teledyne Benthos 社製 C3D 型 PMBS を試験的に導入した。南（2014）はこの測深機を用いて精度検証を実施し，測深結果の一部で IHO-1 級あるいは特級を満たさない場合があること，全般的に水深値の標準偏差が大きく，海図に採用すべき水深の選択が困難であること等を指摘した。

こうした背景を踏まえ，現在国内で導入実績のある浅海用の PMBS 3 機種について，MBES との比較による水深精度と異物検出能力の検証を行った。

## 2 比較検証観測の概要

### 2.1 観測海域

2014年2月4日から13日にかけて京浜港の八景島付近及びイガイ根付近で観測を実施した。八景島付近の水深は概ね12mから16m程度である。イガイ根付近は水深20m前後の海域で，最浅で6m程度の浅所がある（Fig. 1）。

### 2.2 使用機器

作業船の右舷に PMBS 1 台，左舷に比較用のビームフォーミング方式 MBES 1 台を艀装し，同時観測を行った（Fig. 2）。PMBS は Teledyne Benthos 社製 C3D 型，GeoAcoustics 社製 GeoSwath 型，EdgeTech 社製 4600 型を順に設置し，MBES は Reson 社製 SeaBat8125 型を全観測期間を通じて設置した。作業船の総トン数は 4.8 トン，主要寸法は全長 11.82 m，幅 3.09 m，喫水 1.09 m である。

水中音速度の計測には AML 社製 SVPS 型を使



Fig. 1. Test area (Nautical Chart W1062).

図 1. 比較検証観測の海域（海図 W1062 東京湾中部）。

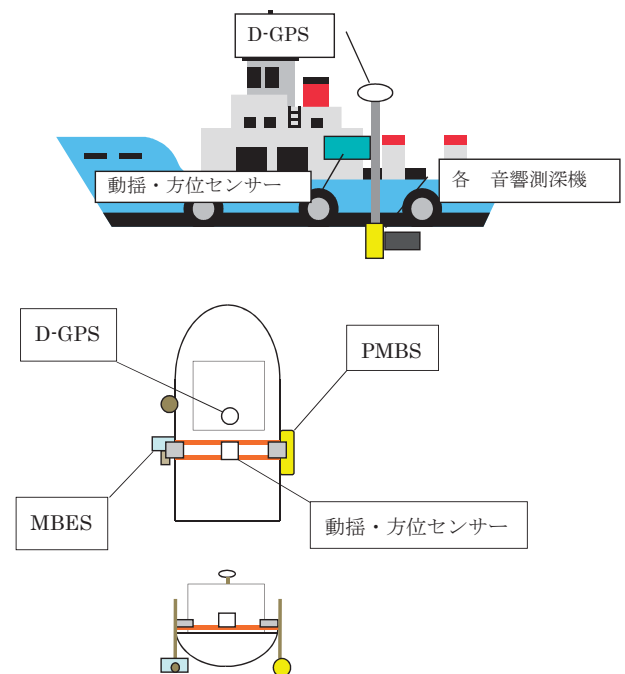


Fig. 2. Installation plan of survey equipment.

図 2. 観測機器の艀装状況。

用し，測深日1日ごとに午前と午後各1回，測量区域の最大水深まで測定した。

測深データ収録については統合水路測量ソフトウェア HYPACK 2012 を使用した。

使用機器の諸元を Table 1 に示す。

### 2.3 海底目標物の設置

PMBS の異物検出能力を確認するため，海底に以下のような目標物を直径 5 cm の単管を組み合

Table 1. Specification of survey equipment.

表 1. 観測機器の諸元.

機 器 名	規 格・形 式	性 能
インターフェロ メトリ方式 音響測深機	Teledyne Benthos 社製 C3D 型	周波数：200kHz 発振回数：30Hz
インターフェロ メトリ方式 音響測深機	EdgeTech 社製 4600 型	周波数：500kHz 発振回数：50Hz
インターフェロ メトリ方式 音響測深機	Geoacoustics 社製 GeoSwath 型	周波数：250kHz 発振回数：30Hz
ビームフォーミ ング方式 音響測深機	Reson 社製 Seabat8125 型	周波数：455kHz 測深ビーム方式：クロス ファン方式
シングルビーム 音響測深機	千本電気社製 PDR-8000S 型	CH3:210kHz 直下(半減全角 6 度)
動揺センサー兼 方位センサー	IXSEA 社製 Phins	精 度： ヒープ 5cm または 5% のいずれか大きい方 ロール・ピッチ 0.01° 方位 0.1° 方位・姿勢分解能： 0.001°
DGPS 測位	Hemisphere 社製 R110 型	測位精度 水平<0.6m
音速度計	AML 社製 SVPS 型	精度：音速度：±0.050m 測定範囲：音速度： 1400m/s~1550m/s

わせて作成し、八景島東海域において直線上に約 50 m 間隔で 4 基設置した (Fig. 3, 4).

- ・ T1: 四角錐 (底辺 2 m の正方形×高さ 1.4 m)
- ・ T2: 立方体 (1 m × 1 m × 1 m) (各側面は金網を張る)
- ・ T3: 三角柱 (底辺 2 m の正三角形×高さ 1 m)
- ・ T4: ポール (長さ 2 m の単管 4 本を直立)

## 2.4 観測要領

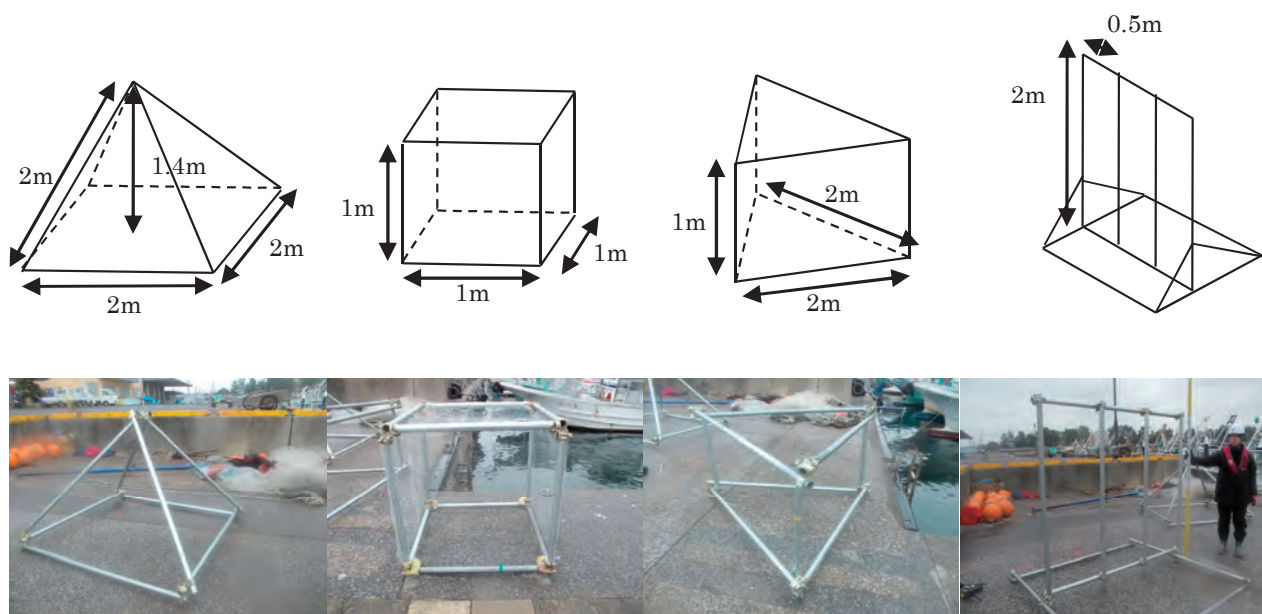
PMBS 3 機種について (1) 停船観測, (2) パッチテスト, (3) 井桁航走, (4) 海底異物調査の 4 種類の観測を実施した. Table 2 に観測実施内容と実施日の一覧を示す.

### (1) 停船観測

測深精度を検証するため、八景島東海域の砂地の平坦な海底面を利用し、異なる 2 箇所において停船させた状態で 200 ピング以上の測深を行った.

### (2) パッチテスト

測深機のバイアス補正值(ロール, ピッチ, ヨー)を測定するため、八景島東海域またはイガイ根海域の地形変化がある箇所に測線間隔 10 m 程度の



T1: 四角錐

T2: 立方体

T3: 三角柱

T4: ポール

Fig. 3. Configuration of the seafloor targets.

図 3. 海底目標物の形状.

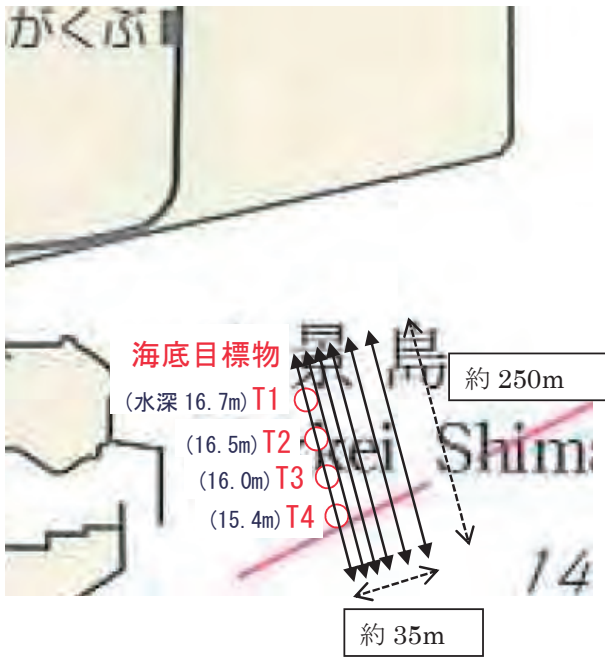


Fig. 4. Location of seafloor targets and the planned survey lines for target surveys.

図 4. 海底目標物の設置位置と海底異物調査の計画測線.

Table 2. Survey contents and dates.

表 2. 観測実施内容と実施日.

観測内容	観測海域	観測日	スワス測深機			
			SeaBat 8125	GeoSwath	C3D	4600
停船観測	八景島東	A	2月5日	A-1	A-1	
			2月10日	A-2		A-2
			2月13日	A-3		A-3
パッチテスト	イガイ根	B	2月5日	B-1a	B-1a	
			2月6日	B-1b	B-1b	
			2月10日	B-2		B-2
	八景島東	C	2月13日	B-3		B-3
			2月10日	C-1	C-1	
			2月13日	C-2		C-2
井桁航走	イガイ根	D	2月6日	D-1	D-1	
			2月10日	D-2		D-2
	八景島東	E	2月10日	E-1	E-1	
			2月13日	E-3		E-3
			2月10日	F-1	F-1	
			2月13日	F-2		F-2
海底異物調査	八景島東	F	2月13日	F-3		F-3

測線を設定し、複数測線を往復して測深を行った。

(3) 井桁航走

測深精度の検証を行うため、「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（井桁のような測深線）を走行し、データを取得する」（海上保

安庁海洋情報部，2010a；海上保安庁海洋情報部，2010b）方法により測深を行った。八景島東海域またはイガイ根海域で実施した。

(4) 海底異物調査

2.3節の通り八景島東海域に設置した海底目標物の直上及び目標物から東側へ距離5 m，10 m，15 m，25 m，35 mを平行に航走し、各2往復の測深を行った（Fig. 4）。

2.5 検証方法

上述のデータを用いて、以下のような検証を行った。

- (1) 停船状態での測深精度の検証
- (2) 井桁航走による測深精度の検証
- (3) 海底の異物の検出能力の検証

以上の検証に先立ち、手動でノイズ除去を行った。自動フィルタについては、一定のビーム角以上の外側ビームを除去するフィルタのみ、検証の際必要に応じて用いた。2.4節の(2)の観測で取得されたデータを用いて、観測日毎に測深機のバイアス補正値を算出した。なお、PMBSのソナーヘッドには右舷側と左舷側に分かれてトランスデューサが設置されていることから、バイアス調整は左右独立に算出した（Eisenberg et al., 2011）。

(1) 停船状態での測深精度の検証

2.4節の(1)の観測で取得された水深を0.5 m間隔の平均水深でメッシュ化し、メッシュ毎の標準偏差を算出し、標準偏差の2倍の値がS-44第5版（IHO, 2008）の定める水深の不確定性の範囲に収まることを検証した。また、MBESによる同時観測で取得された水深のメッシュデータを参照データとして、水深値の比較を行った。

(2) 井桁航走による測深精度の検証

2.4節の(3)の観測において平行な2測線で取得された水深を1 m間隔の平均水深でメッシュ化した。この2測線に直交する他の2測線で取得された水深とメッシュデータとの差の平均値と標準偏差を評価した。

(3) 海底の異物の検出能力の検証

2.4 節の (4) で取得された測深データを測線毎に精査し、2.3 節に述べた海底目標物が判別できるか否かを判定した。

### 3. 比較検証結果

#### 3.1 停船状態

各測深機について、ビーム角 5 度毎の測深精度 (標準偏差の 2 倍) の分布および参照水深のメッシュデータとの差の分布を検証した。

なお、今回の比較検証観測では各機種の使用条件は極力同等となるように配慮したが、日々の気象・海象の状況には違いがある。特に 2014 年 2 月 8 日と 14 日には関東地方平野部では稀に見る大雪を観測するなど、この時期の気象条件には厳しいものがあつた。そこで、海上模様の一つの指標として、各観測時のロール計測値の変動幅を合わせて記すこととする (以降の節でも同様)。

##### (1) GeoSwath

停船観測 (A-1) 時の水深の平均値は 13.6 m であり、この場合に S-44 第 5 版 (IHO, 2008) が要求する水深の不確定性 (95% 信頼区間) は、特級で 0.27 m, 1 級で 0.53 m, 2 級で 1.05 m である。参照水深のメッシュデータを Fig. 5 に示す。

結果は Fig. 6 の通りで、外側ビームほどぼらつき (図では  $2\sigma$  を表示) が大きくなる傾向にある。ビーム角 35 度以内においては特級を満たし、50 度まで 1 級、70 度まで 2 級を満たす。なお、停船観測 (A-1) 時のロール計測値の変動幅は  $-5.50$



Fig. 5. 0.5 m gridded reference bathymetric data of stationary observation (phase A-1) obtained with SeaBat 8125.

図 5. SeaBat 8125 で取得した停船観測 (A-1) の 0.5 m メッシュ参照水深データ。

度  $\sim 5.31$  度であつた。

##### (2) C3D

停船観測 (A-2) 時の水深の平均値は 12.8 m であり、この場合に S-44 第 5 版 (IHO, 2008) が要求する水深の不確定性は、特級で 0.27 m, 1 級で 0.53 m, 2 級で 1.04 m である。参照水深のメッシュデータを Fig. 7 に示す。

結果は Fig. 8 の通りで、ビーム角に従ってぼらつきが大きくなる傾向は (1) と同様である。特級には達しておらず、ビーム角 55 度まで 1 級、65 度まで 2 級を満たす。停船観測 (A-2) 時のロール計測値の変動幅は  $-6.72$  度  $\sim 4.54$  度であつた。

なお、停船状態での C3D の測深精度の検証は南 (2014) も行っており、概ね同様の結果が得ら

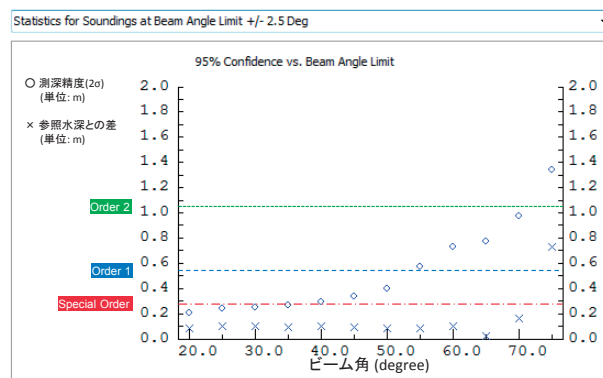


Fig. 6. Evaluation of depth uncertainty for each 5-degree beam band of GeoSwath soundings at stationary observation (phase A-1). The horizontal axis is beam angle from nadir. The vertical axis is metric. Twice of the standard deviation (circle) and the mean difference from the reference depth (cross) are plotted. Maximum allowable total vertical uncertainties (TVU) specified in IHO S-44 ed.5 (IHO, 2008) are overlaid for special order (red chained line), order 1 (blue broken line), and order 2 (dotted line).

図 6. 停船観測 (A-1) における GeoSwath のビーム角 5 度毎の測深精度の検証。横軸は直下からの角度。縦軸は水深の不確定性で、メッシュ内の測得水深の標準偏差の 2 倍 (○) および測得水深と参照水深との水深差の平均 (×) (単位はメートル)。IHO S-44 第 5 版の定める測量階級特級 (赤一点鎖線)、1 級 (青鎖線) および 2 級 (緑点線) における水深の不確定性の上限を表示。



Fig. 7. 0.5 m gridded reference bathymetric data of stationary observation (phase A-2) obtained with SeaBat 8125.

図7. SeaBat 8125で取得した停船観測 (A-2) の0.5 m メッシュ参照水深データ.



Fig. 9. 0.5 m gridded reference bathymetric data of stationary observation (phase A-3) obtained with SeaBat 8125.

図9. SeaBat 8125で取得した停船観測 (A-3) の0.5 m メッシュ参照水深データ.

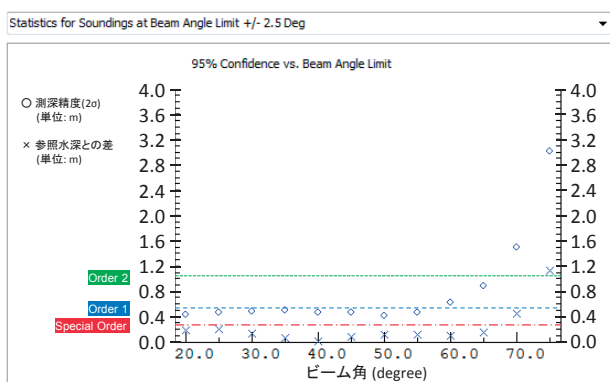


Fig. 8. Evaluation of depth uncertainty for C3D at stationary observation (phase A-2) . Same format as Fig. 6.

図8. 停船観測 (A-2)における C3D の測深精度の検証. 表示の様式は図6と同様.

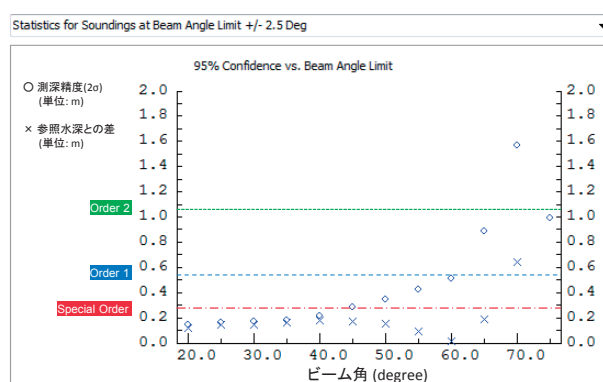


Fig. 10. Evaluation of depth uncertainty for 4600 at stationary observation (phase A-3). Same format as Fig. 6

図10. 停船観測 (A-3)における 4600 の測深精度の検証. 表示の様式は図6と同様.

れている.

(3) 4600

停船観測 (A-3) 時の水深の平均値は 16.4 m であり, この場合に S-44 第 5 版 (IHO, 2008) が要求する水深の不確か性は, 特級で 0.28 m, 1 級で 0.54 m, 2 級で 1.07 m である. 参照水深のメッシュデータを Fig. 9 に示す.

結果は Fig. 10 の通りで, ビーム角に従ってばらつきが大きくなる傾向は(1), (2)と同様である. ビーム角 45 度まで特級, 60 度まで 1 級, 65 度まで 2 級を満たす. 停船観測 (A-3) 時のロール計測値の変動幅は -6.18 度 ~ 6.08 度であった.

(1) ~ (3) の結果から, 2 級の精度を下回る外

側のビーム (GeoSwath で 70 度以上, C3D と 4600 で 65 度以上) のデータはこの後で記載する検証には用いないこととした.

3.2 井桁航走

(1) GeoSwath

本機については井桁航走をイガイ根 (D-1) と八景島東 (E-1) の 2 回行ったが, ロール計測値の変動幅は D-1 時には -7.99 度 ~ 7.87 度, E-1 時には -11.99 度 ~ 10.74 度であり, 比較的動揺の少ない D-1 を採用した. 参照水深となるメッシュデータと交差測線の航跡を Fig. 11 に示す.

検証結果を S-44 第 5 版 (IHO, 2008) に沿って求めた当該海域の平均水深 20 m における各級

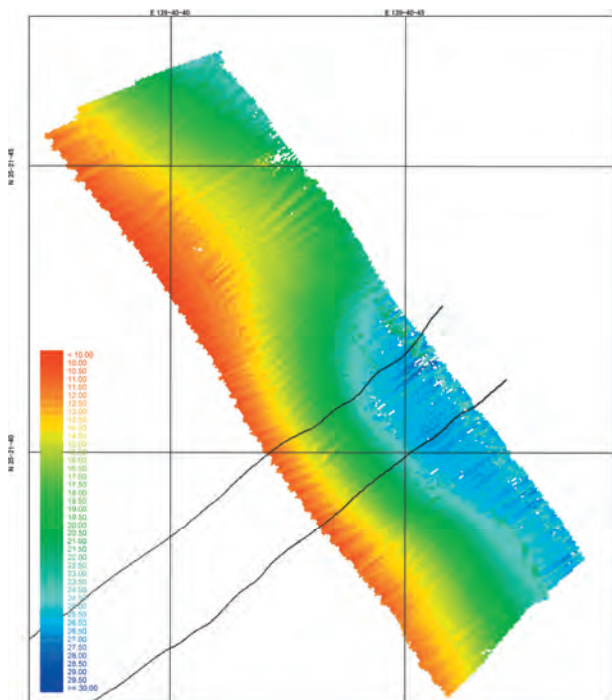


Fig. 11. 1 m gridded reference bathymetric data of cross line survey (phase D-1) obtained with GeoSwath and track lines across the area.

図 11. GeoSwath で取得した井桁航走観測 (D-1) の 1 m メッシュ参照水深データと交差測線の航跡。

Table 3. Evaluation of depth uncertainty of the PMBSs and MBES at cross line surveys.

表 3. 井桁航走観測による各測深機の測深精度検証結果。

測深機 (観測海域)	水深差の平均値 (標準偏差)	特級	1級	2級
GeoSwath (イガイ根: D-1)	-0.23 m (±1.19 m)	0.29m	0.56m	1.10m
C3D (イガイ根: D-2)	-0.46 m (±0.55 m)	0.30m	0.57m	1.11m
4600 (八景島東: E-3)	-0.21 m (±0.26 m)	0.27m	0.52m	1.04m
SeaBat8125 (八景島東: E-3)	-0.09 m (±0.10 m)	0.27m	0.53m	1.05m

の要求精度とともに Table 3 にまとめて示す。井桁内の水深差の平均値は特級の要件を満たしている。

(2) C3D

イガイ根における井桁航走観測 (D-2) 時のロール計測値の変動幅は -5.59 度 ~ 4.96 度であった。参照水深となるメッシュデータと交差測線の航跡を Fig. 12 に示す。

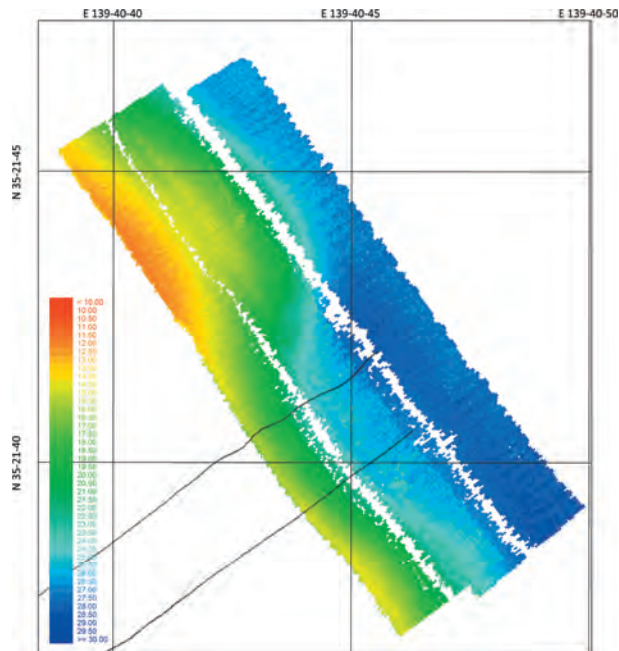


Fig. 12. 1 m gridded reference bathymetric data of cross line survey (phase D-2) obtained with C3D and track lines across the area.

図 12. C3D で取得した井桁航走観測 (D-2) の 1 m メッシュ参照水深データと交差測線の航跡。

検証結果を同様に Table 3 にまとめて示す。当該海域の平均水深 21 m において 1 級の要件を満たしている。

なお、南 (2014) は C3D について水深 40 m 程度の海域において同様の井桁航走観測による検証結果を実施し、水深差の平均値が 0.25 m、標準偏差  $\sigma = 0.43$  m という共に小さめの値の検証結果を報告している。今回の結果が大きめに出た要因としては、より起伏のある海域で観測を実施したこと、海上模様が悪くノイズがより多かったことが予想される。

(3) 4600

八景島東における井桁航走観測 (E-3) 時のロール計測値の変動幅は -3.56 度 ~ 3.08 度であった。参照水深となるメッシュデータと交差測線の航跡を Fig. 13 に示す。

検証結果を同様に Table 3 にまとめて示す。当該海域の平均水深 12 m において特級の要件を満たしている。

PMBS 3 機種の中で水深差の平均値、標準偏差

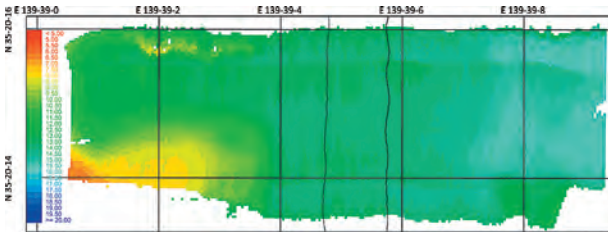


Fig. 13. 1 m gridded reference bathymetric data of cross line survey (phase E-3) obtained with 4600 and track lines across the area.

図 13. 4600 で取得した井桁航走観測 (E-3) の 1 m メッシュ参照水深データと交差測線の航跡。

共に最も優れた結果となったが、イガイ根よりも起伏が小さめで、海上模様が比較的良かったことも影響した可能性がある。

#### (4) SeaBat 8125

比較のため、SeaBat 8125 の測深データについても同様の検証を行った。八景島東における比較的動揺の少ない井桁航走観測 (E-3) による検証結果を同様に Table 3 にまとめて示す。水深 14 m において特級の精度を満たしている。

この結果と比較すると、(1)~(3) の PMBS による水深差の標準偏差は、SeaBat 8125 ( $\sigma = 0.10$ ) と比較して、GeoSwath で約 12 倍 ( $\sigma = 1.19$ )、C3D で約 5 倍 ( $\sigma = 0.52$ )、4600 で約 3 倍 ( $\sigma = 0.26$ ) と概して大きく、単純に水深差の平均値のみでは精度を評価しにくいことには留意する必要がある。

### 3.3 海底の異物の検出能力

2.4 (4) で観測した各測線の測深データから海底目標物が判別できるかを「異物が明瞭に判別できる (○)」、「周辺域と比較して浅い測深点をまばらにとらえているが、これだけで異物の存在を推定するのは困難 (△)」および「異物が判別できない (×)」の 3 段階で判定し、ビーム角と対応づけて集計した。Fig. 14 に判定の例を示す。比較のため、SeaBat 8125 の測深データについても同様の集計を行った。

なお、S-44 第 5 版 (IHO, 2008) は、特級においては一辺が 1 m を超える立方体、1a 級にお

いては一辺が 2 m を超える立方体 (水深 40 m 以浅の場合) を検出できることを要求している。今回の検証観測においては海底目標物 T2 が検出できれば、特級に相当する。T3 は一辺 1 m の立方体を大きさの点で概ね上回る形状といえるが、各面は閉じておらず骨組みのみであることから、T2 よりは検出困難であると予想される。T1 及び T4 については T2 の立方体より細い形状であり、やはり各面は閉じていないことから、検出困難であると予想される。

#### (1) GeoSwath

海底異物調査 (F-1) による検証結果を、Fig. 15 にまとめて示す。T2 (立方体) については、20 度以上の外側では 100% に近い検出率であった。20 度未満の内側では 50% となったが、この範囲で観測できた測線が少なかったことに留意すべきである。T1、T3 および T4 については、全範囲で検出困難であった。海底異物調査 (F-1) 時のロール計測値の変動幅は -10.66 度 ~ 9.46 度であった。

#### (2) C3D

海底異物調査 (F-2) による検証結果を、Fig. 16 にまとめて示す。立方体 T2 については、20 度以上の外側では概ね検出できた。10 ~ 20 度の範囲で検出率が低い。10 度未満の内側で観測できた測線はなかった。T1 (四角錐) は、20 度以上の外側で検出率が高い。20 度未満の内側では検出できなかった。T4 (ポール) は外側ビームほど検出率が高い傾向にある。T3 (三角柱) は 50 ~ 60 度以外の全範囲で検出困難であった。海底異物調査 (F-2) 時のロール計測値の変動幅は -9.09 度 ~ 8.57 度であった。

#### (3) 4600

海底異物調査 (F-3) による検証結果を、Fig. 17 にまとめて示す。立方体 T2 については、100% 検出された。T1 (四角錐) は、20 度未満の内側では検出できなかった。外側ビームほど検出率が高い傾向にある。T4 (ポール) は 20 ~ 50 度の範囲で検出率が比較的高かった。T3 (三角柱) は全範囲で検出困難であった。海底異物調査 (F



-3) 時のロール計測値の変動幅は $-8.83$ 度 $\sim 8.16$ 度であった。

#### (4) SeaBat 8125

F-1, F-2 および F-3 の全ての観測による検証結果を, Fig. 18 にまとめて示す. 立方体 T2 については, 概ね検出された. T1 (四角錐) および T4 (ポール) は, 20 度未満の内側では概ね検出されたものの, 20 度以上の外側ビームでは検出率が低い. T3 (三角柱) は 10 度未満の内側では概ね検出されたものの, 10 度以上の外側ビームでは検出困難であった.

## 4. 考察

### 4.1 水路測量における性能評価

今回の検証結果から, PMBS 3 機種とも片舷 50 度程度までのスワス幅であれば測深精度と異物検出性能の双方の観点から S-44 第 5 版 (IHO, 2008) の定める 1a 級を概ね実現していると考えられる.

ただ, 海底異物調査において, 直下から 20 度未満の内側ビームで海底目標物を取りこぼすケースが多いことには注意を要する. 例として, 各機種が直下付近で海底目標物 T2 (立方体) を捉えたケースのスweepを Fig. 19 に示す. PMBS 3 機種では, 直下周辺に有効な水深点が疎である範囲が最大 30 度程度の幅で存在した. 実際の水路測量時には, 直下のデータの抜けを避けるよう, 隣接測線の斜測をオーバーラップさせ, 必要に応じて補測を行う等の対処が必要であろう.

なお, 得られた水深データを 1 m 程度の間隔でメッシュ化するとデータの抜けはさほど目立たなくなるが, これは隣接測線からの斜測でカバーされるほかに, 船の動揺によってデータの疎な範囲が左右に振動するため直下付近のメッシュがある程度埋められているからだと考えられる.

### 4.2 ノイズの分布

PMBS では, MBES と比較して記録上にノイズが多い上に, 1 スワスあたりの水深点が多い (GeoSwath と C3D では 1440 点, 4600 では 400 点)

ことから, ノイズ除去に多くの時間を要する. これらのノイズは品質フラグや信号強度による自動フィルタ, あるいは Overhang/Undercut フィルタを適用してもうまく除去できない (または, 正常と思われる水深点も多数除去されてしまう) 場合が多く, 手動でのノイズ除去に多大な時間を割くこととなった. Fig. 19 に例示した各機種のスweepのノイズ除去前の状態を Fig. 20 に示す.

GeoSwath では, 直下周辺部に逆三角形様のノイズが多量に発生している. また, スワスの外側には「ハ」の字型にノイズが多く分布する (Fig. 20 (a)).

C3D では, 直下周辺の浅部に航跡の影響や海面の反射によると思われるノイズが分布する (Fig. 20 (b)).

4600 では, 前の 2 機種と比較してノイズが少ない傾向にある. 一方, 直下付近では測深点の抜けが多い傾向にある (Fig. 20 (c)).

SeaBat8125 では, 全般的にノイズが少なく, 直下付近の測深点の抜けは見られない (Fig. 20 (d)).

ノイズの多さについては, 観測時の海上模様の違いもあって単純比較することが困難であるが, GeoSwath と C3D は疑わしい水深点を選別せずに全て収録し, 4600 はデータ収録時にノイズの選別をある程度行っているものと予想される.

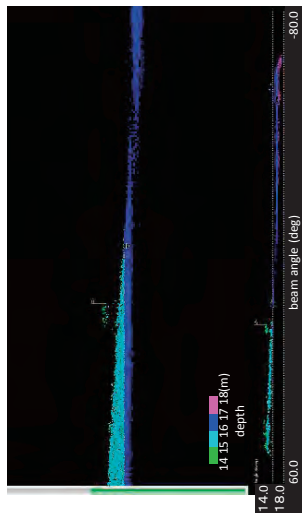
### 4.3 PMBS を水路測量に活用するために

現行の指針において, 井桁航走観測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ことと定めているが, 今回検証した PMBS は, 平均値が基準を満たしていても, 測得水深のばらつきが大きかった. 水路測量においては最浅値を海図に採用する方針で水深データを処理することから, 採用される水深は真値よりも大きく外れる可能性がある. このため, 南 (2014) が C3D について指摘したとおり, 水深差の平均値のみではなく標準偏差を評価する規定を設けるべきと考えられる.

南 (2014) が指摘したとおり, データ量が膨大

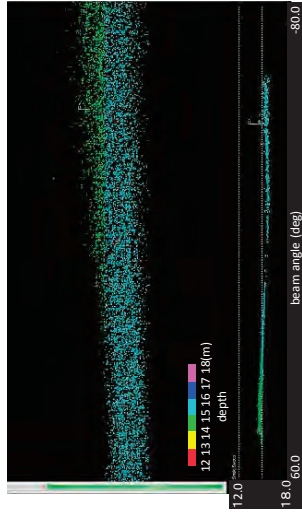
(a) GeoSwath

○の例



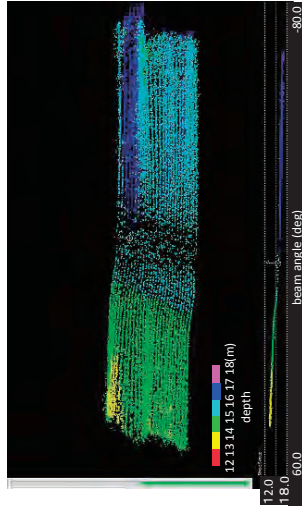
T2: ビーム角  $27.34^\circ$   
(30スイープ, 俯角  $0^\circ$  )

△の例



T4: ビーム角  $-53.77^\circ$   
(30スイープ, 俯角  $0^\circ$  )

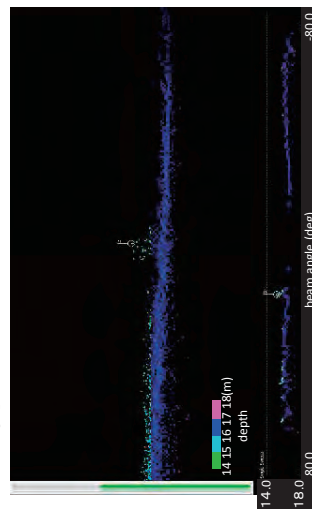
×の例



T3: 設置箇所は  $2^\circ$  付近  
(30スイープ, 俯角  $15^\circ$  )

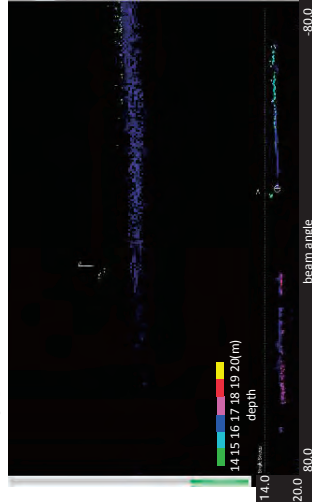
(b) C3D

○の例



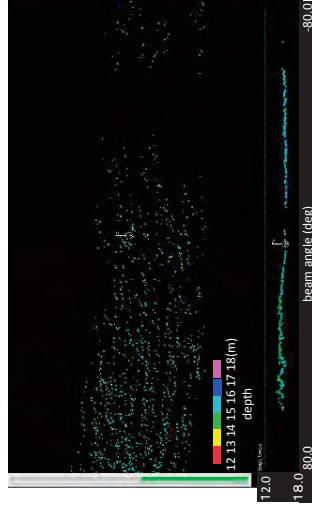
T2: ビーム角  $34.50^\circ$   
(30スイープ, 俯角  $0^\circ$  )

△の例



T1: ビーム角  $-21.21^\circ$   
(30スイープ, 俯角  $0^\circ$  )

×の例



T3: 設置箇所は  $11^\circ$  付近  
(30スイープ, 俯角  $5^\circ$  )

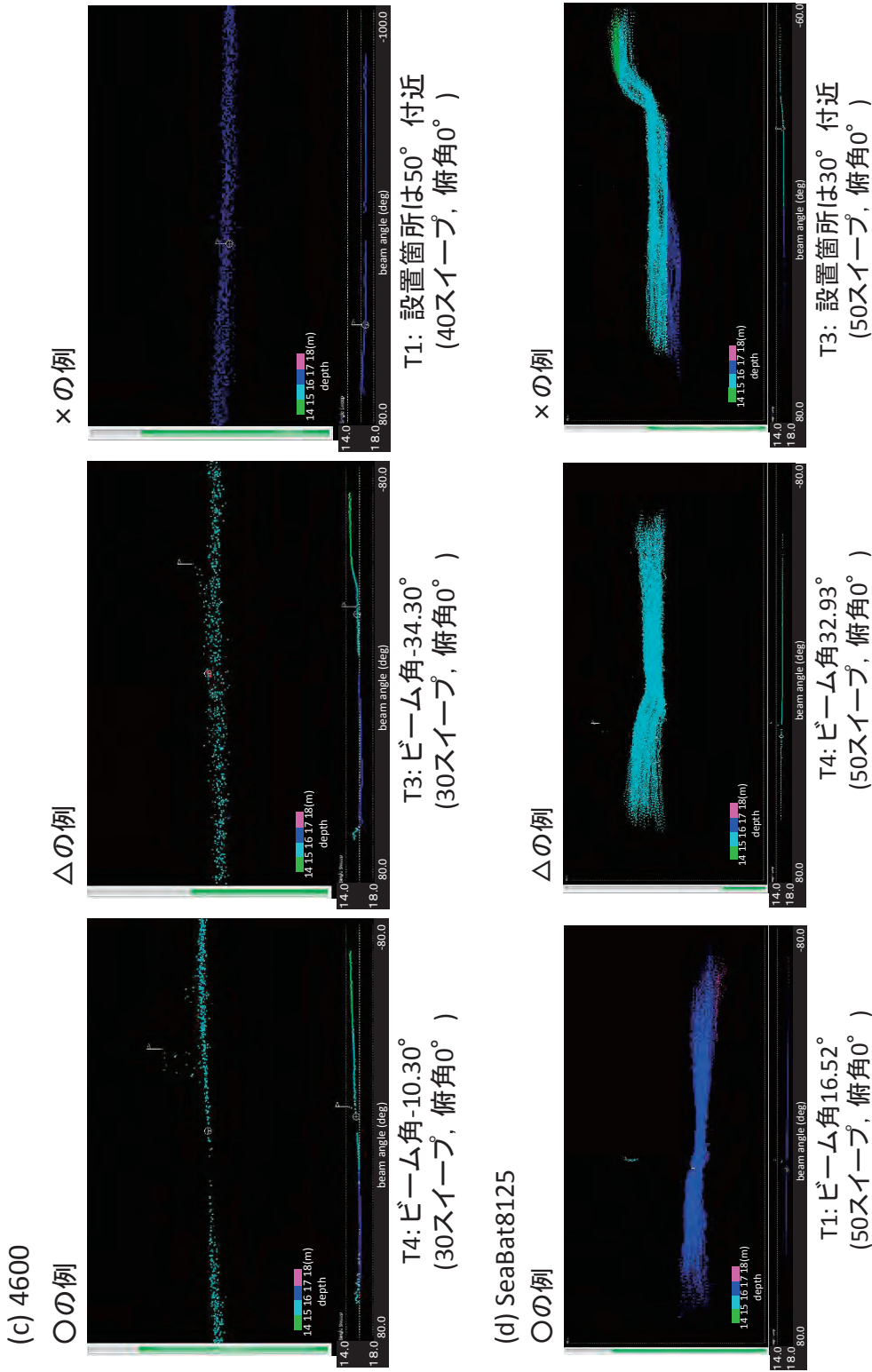


Fig. 14. Examples of rating feature detection capability in three-grade criterion: I-the object is clearly recognised (circle) ; II-relatively shallow sounding points are sparsely located, and are scarcely assumed to be an object (triangle) ; and III-nothing is recognised (cross). A single sweep is shown on the bottom pane, and a series of sweeps are piled up on the top pane. The horizontal axis represents beam angle, and the vertical axis represents sounding depth. A flag is attached on the detected target or at the assumed target position when undetected. Tested sonars: (a) GeoSwath, (b) C3D, (c) 4600, and (d) SeaBat 8125.

図 14. 「異物が明瞭に判別できる (○)」、「周辺域と比較して浅い測深点をまばらにとらえているが、これだけで異物の存在を推定するのは困難 (△)」および「異物が判別できない (×)」の3段階で海底目標物の検出を判定した例。画像の下段は単独のスweepで、上段は連続する複数スweepのプロファイルを重ねたもの。横軸はビーム角、縦軸は水深を表す。検出した海底目標物に旗印が付されている (×の例については想定位置)。使用機種は (a) GeoSwath, (b) C3D, (c) 4600 および (d) SeaBat 8125。



Fig. 15. Verification of feature detecting capability of GeoSwath at target survey (phase F-1). Ratings of feature detection are counted up for each 10-degree beam band. The width of the bars represents the number of samples.

図 15. 海底異物調査 (F-1) における GeoSwath の異物検出結果. 海底目標物別に○, △および×の判定をビーム角 10 度毎に集計. 棒の太さはサンプル数を表す.

でばらつきの大きい水深データから確からしい水深を得るためには, 人手による (一部は自動フィルタを使うとしても) ノイズ除去後の最浅値を採用するという従来の処理方法では, 多大の作業時間を要する上に, 信頼性の低い水深を採用する

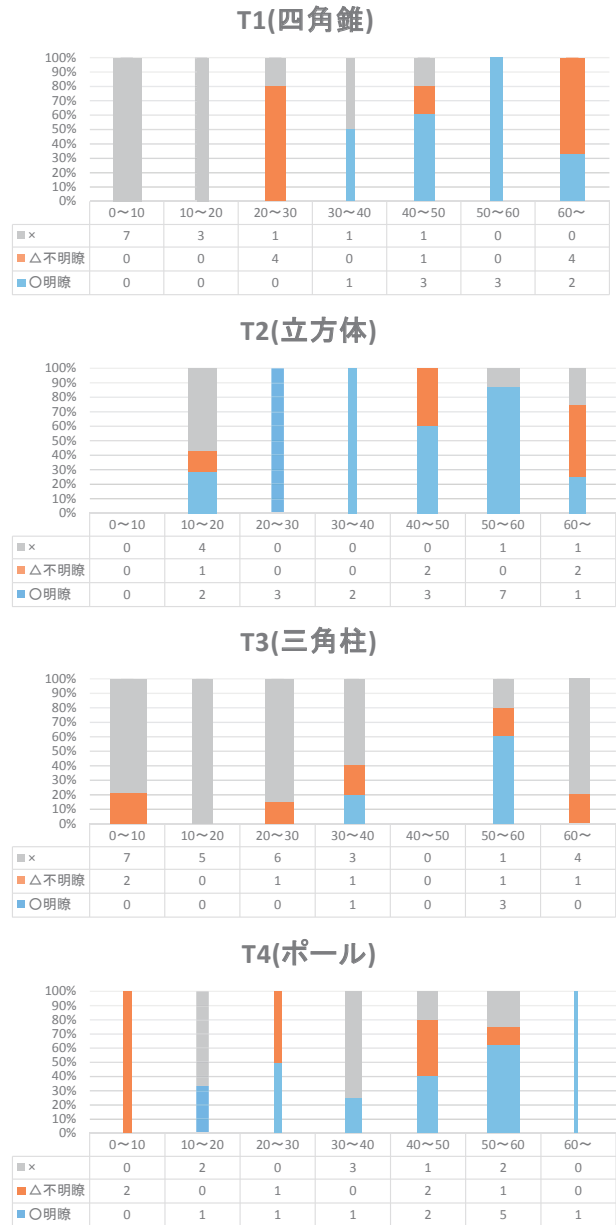


Fig. 16. Verification of feature detecting capability of C3D at target survey (phase F-2). Same format as Fig. 15.

図 16. 海底異物調査 (F-2) における C3D の異物検出結果. 表示の様式は図 15 と同様.

可能性が高くなる. 採用すべき水深の基準を再検討し, 例えば CUBE アルゴリズム (Combined Uncertainty and Bathymetric Estimator; Calder and Wells, 2007) を用いて作成したグリッドデータを成果に採用することも選択に入れるべきと考える.

また, パッチテストの手順について, 現行の「インターフェロメトリ音響測深実施指針」(海上保

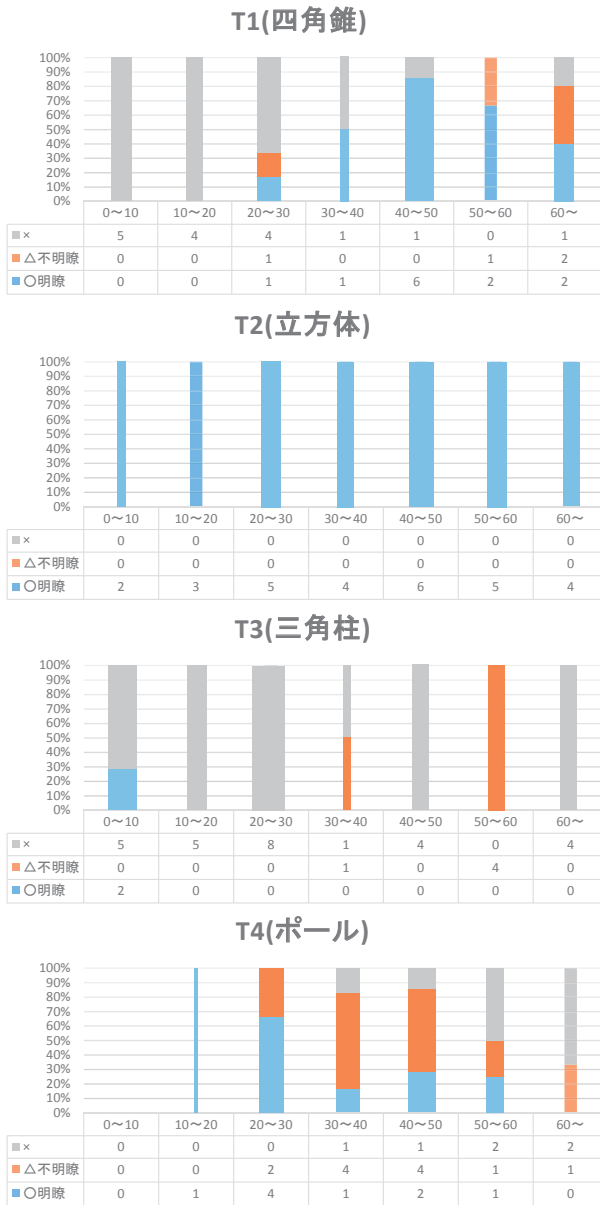


Fig. 17. Verification of feature detecting capability of 4600 at target survey (phase F-3). Same format as Fig. 15.

図 17. 海底異物調査 (F-3) における 4600 の異物検出結果. 表示の様式は図 15 と同様.

安庁海洋情報部, 2010b) は, ソナーヘッドがシングルである場合の手順を踏襲しており, PMBS のトランスデューサが右舷側と左舷側に分かれて設置されていることを考慮していない. バイアス調整は左右独立に行う必要がある (Eisenberg et al., 2011) ことから, 測線計画やバイアス値の算出順序等について検討し, 改訂の必要があろう.

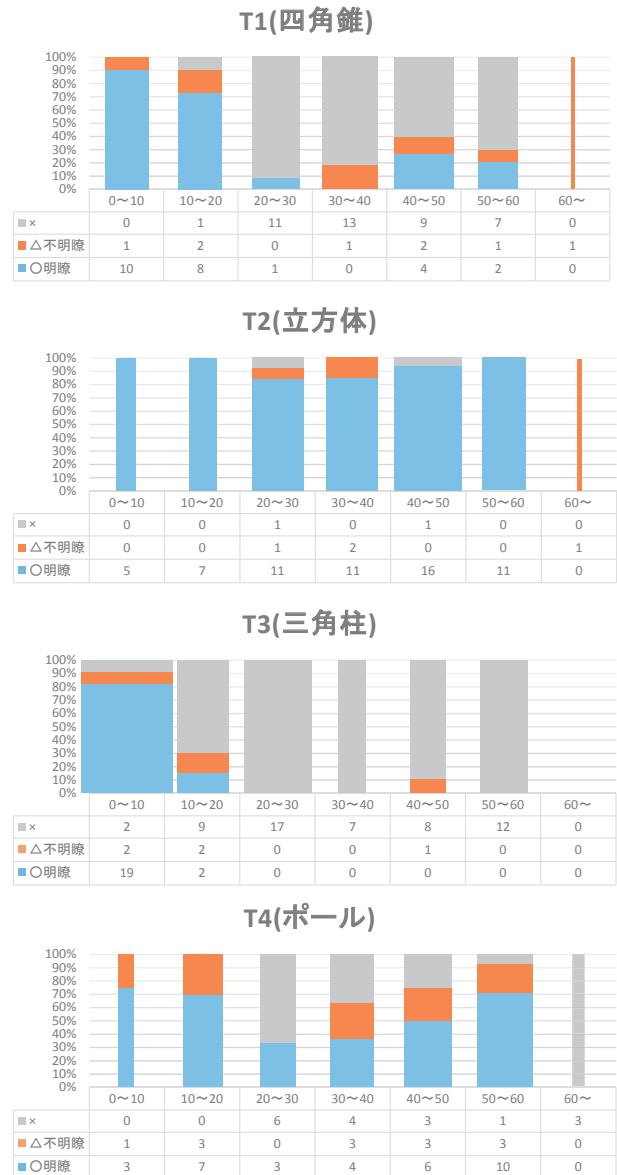


Fig. 18. Verification of feature detecting capability of SeaBat 8125 at target survey (phase F-1, F-2, and F-3). Same format as Fig. 15.

図 18. 海底異物調査 (F-1, F-2 および F-3) における SeaBat 8125 の異物検出結果. 表示の様式は図 15 と同様.

## 5. 結論

今回検証した PMBS 3 機種とも, 片舷 55 度程度までのスワ幅であれば測深精度と異物検出性能の双方の観点から S-44 第 5 版 (IHO, 2008) の定める 1a 級を概ね満たしていた. ただし, 水深値の標準偏差は MBES と比較して数倍大きい. 更に, MBES と比較して記録にノイズが多いうえに, 1 スワあたりの水深点が多いことから,

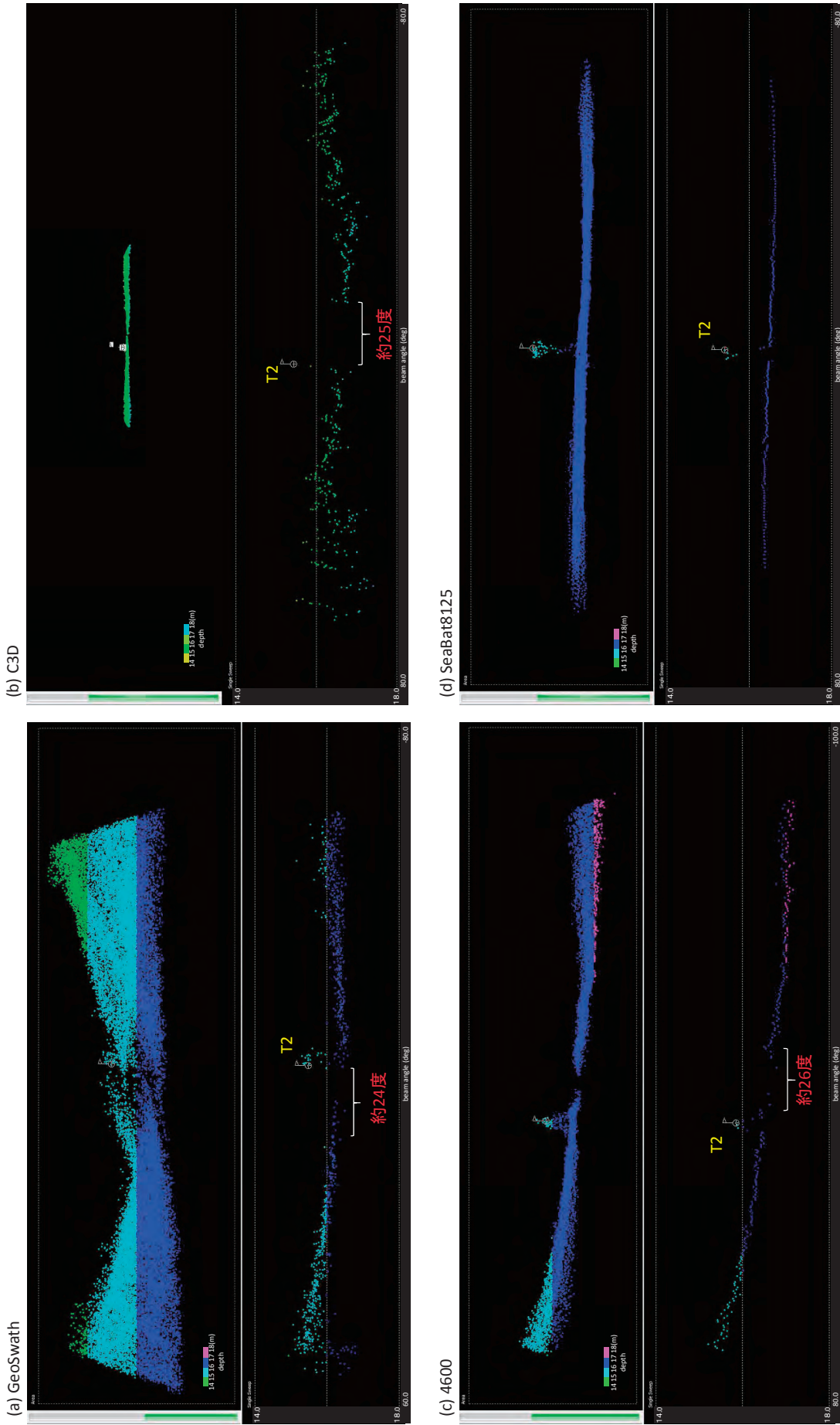


Fig. 19. Examples of sweeps detecting the cube-shaped target (T2) around nadir. Tested sonars: (a) GeoSwath, (b) C3D, (c) 4600, and (d) SeaBat 8125. The horizontal axis represents beam angle, and the vertical axis represents sounding depth.

図 19. 直下付近で海底目標物 T2 (立方体) を捉えたスweepの例。横軸はビーム角、縦軸は水深を表す。使用機種は (a) GeoSwath, (b) C3D, (c) 4600 および (d) SeaBat 8125.

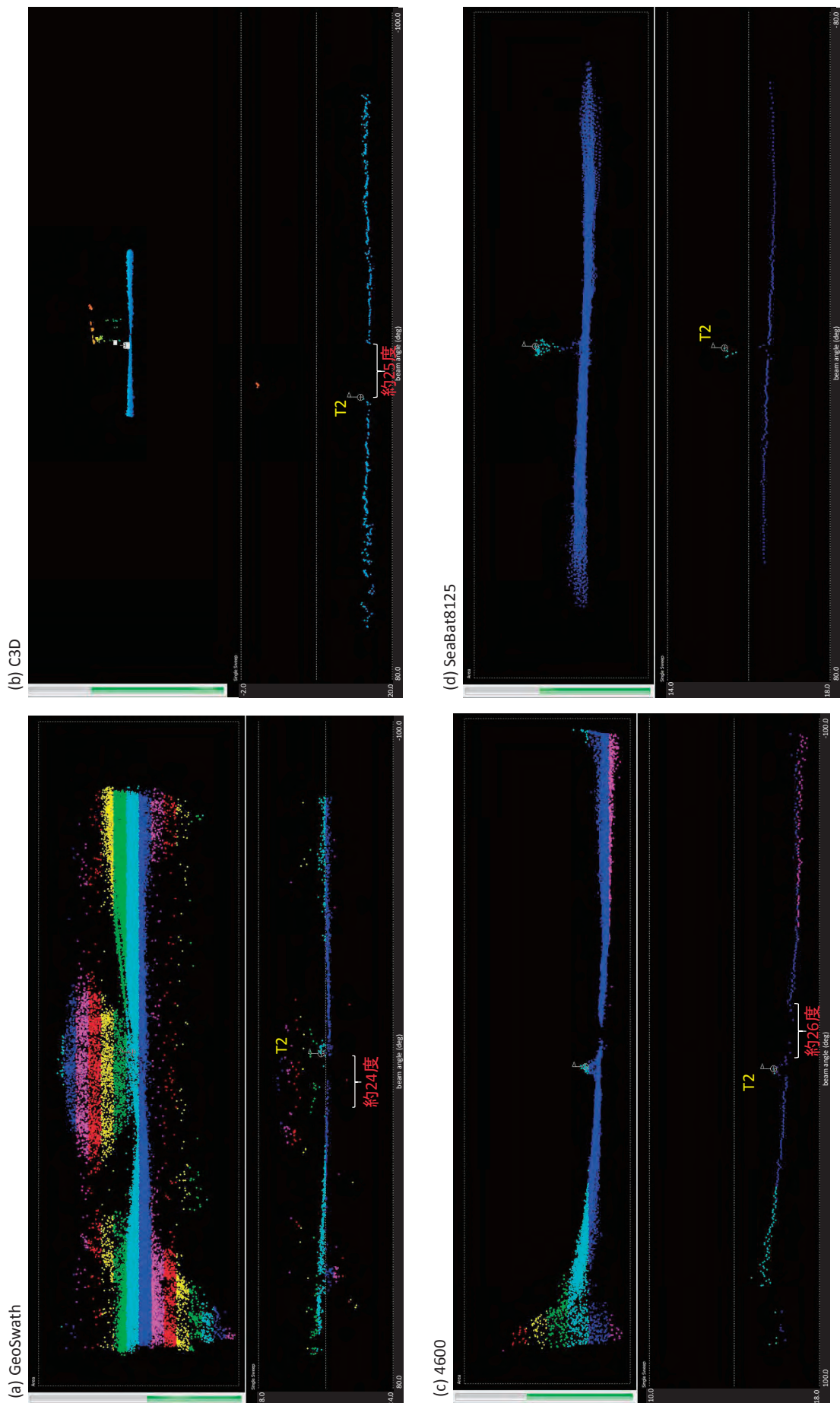


Fig. 20. Same sweeps as shown in Fig. 19 before data cleaning. Tested sonars: (a) GeoSwath, (b) C3D, (c) 4600, and (d) SeaBat 8125.  
 図 20. Fig. 19 に示した各機種のスweepのノイズ除去前の状態. 使用機種は (a) GeoSwath, (b) C3D, (c) 4600 および (d) SeaBat 8125.

ノイズ除去に多くの時間を要した。また、直下周辺の水深点が疎となり、海底の異物を検出し損なうケースがあることに注意を要する。

## 謝 辞

観測の計画と実施にあたり、株式会社アーク・ジオ・サポート様には終始ご尽力いただきました。東京大学大気海洋研究所の沖野郷子教授には本稿を査読いただき、原稿を改善する上で有益な助言をいただきました。観測の計画と観測データの解析に際し、海洋調査課の吉山武史海洋調査官、南宏樹大陸棚調査官、住吉昌直海洋調査官付には有益な助言をいただきました。この場を借りて御礼申し上げます。

## 文 献

- 浅田 昭・穀田昇一・松本良浩・政岡久志 (1998) SEABAT を使ったデジタル水深測量におけるバイアス調整法, 水路部技報, 16, 103-107.
- Calder, B. and D. Wells (2007) CUBE User's Manual Version 1.13, pp.54, University of New Hampshire.
- Eisenberg, J., M. Davidson, J. Beaudoin, and S. Brodet (2011) Rethinking the patch test for phase measuring bathymetric sonars, Proceedings for US Hydrographic Conference, Tampa, 25-28 April 2011.
- 海上保安庁海洋情報部 (2010a) マルチビーム (浅海用) 音響測深実施指針 (平成 14 年 3 月 28 日保水沿第 208 号, 平成 22 年 11 月 29 日保海海第 145 号により一部改正), 海上保安庁海洋情報部, 東京.
- 海上保安庁海洋情報部 (2010b) インターフェロメトリ音響測深実施指針 (平成 22 年 11 月 29 日保海海第 146 号), 海上保安庁海洋情報部, 東京.
- Matsumoto, Y., S. Kokuta, H. Mori, and H. Yamano (2001) Shallow water multibeam echosounding in Japan Hydrographic

Department, Proceedings for "New Technology for a New Century" Technical Conference during the FIG Working Week 2001, Seoul, 6-11 May 2001.

- 南 宏樹 (2014) 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, 海洋情報部研究報告, 51, 69-76.
- 森 弘和・山本 正・手登根功 (2000) SEABAT による水路測量, 水路部技報, 18, 1-7.
- 森 弘和 (2002) 浅海用マルチビーム測深データのバイアス補正の検証と精度評価の一手法, 水路部技報, 20, 51-57.
- 森 弘和・井上 渉・本間章禎・久間裕一 (2010) 新型浅海用マルチビーム測深機 (SEABAT 7101) 導入について, 海洋情報部研究報告, 46, 69-77.
- IHO (2008) IHO Standards for Hydrographic Surveys 5<sup>th</sup> Edition, Special Publication No44, pp.28, International Hydrographic Organization, Monaco, February 2008.

## 要 旨

インターフェロメトリ音響測深機 3 機種について、マルチビーム音響測深機との比較による水深精度と異物検出能力の検証観測を行い、観測データの評価を行った。その結果、ビーム角 55 度程度より内側であれば測深精度と異物検出性能の双方の観点から IHO 国際水路測量基準 S-44 第 5 版の定める 1a 級を概ね満たしていた。ただし、水深値のばらつきはマルチビーム音響測深機と比較して数倍大きい。更に、マルチビーム音響測深機と比較して記録にノイズが多いうえに、1 スワスあたりの水深点が多いことから、ノイズ除去に多くの時間を要した。また、直下周辺の水深点が疎となり、海底の異物を検出し損なうケースがあることには注意を要する。