

### マルチビーム測深機デュアルヘッドシステムの導入について<sup>†</sup>

吉澤 信<sup>\*1</sup>, 松本良浩<sup>\*2</sup>, 住吉昌直<sup>\*2</sup>, 南 宏樹<sup>\*3</sup>

Introduction of dual-head multi-beam echosounder<sup>†</sup>

Makoto YOSHIKAWA<sup>\*1</sup>, Yoshihiro MATSUMOTO<sup>\*2</sup>,  
Masanao SUMIYOSHI<sup>\*2</sup>, and Hiroki MINAMI<sup>\*3</sup>

#### Abstract

We replaced the multi-beam echosounders on seven 20 m-type survey vessels with dual-head systems in 2013. This report describes the installation of the dual-head multi-beam echosounder and recommended the parameter settings of the system.

#### 1 はじめに

2013（平成 25）年度に管区海上保安本部所属の 20 m 型測量船 7 隻の浅海用マルチビーム測深機を一新し、2 組の送受波器を同期発振するデュアルヘッドシステムを導入した。一般的にデュアルヘッドシステムは、測量船の進行方向に対して鉛直直下から左右に傾けて 2 組の送受波器を装備する。当庁の 20 m 型測量船は左右に 25 度の傾きで装備した。デュアルヘッドシステムの導入により、マルチビーム測深機 1 台のスワス角より広角なスワス角を設定することや、同じスワス角でも 1 台の場合より 2 倍の測深点を取得できるなどの効果が得られる。当庁では、現地測量作業の効率化に加え、水深点群のデータ処理に統計的な手法を取り入れることを検討しており、このためにより高密度な水深点群を取得することを視野に入

れてデュアルヘッドシステムを導入した。このデュアルヘッド型マルチビーム測深機（以下、「DH-MBES」という）の概要と推奨設定について報告する。

#### 1.1 DH-MBES のシステム構成

本システムは米国 R2Sonic 社製マルチビーム測深機 Sonic2024 とその周辺機器で構成される。

本システムの主な構成を Table 1 に示す。

#### 1.2 測量船への装備

これまでのマルチビーム測深機の送受波器は測量船の船底に埋め込み、中央が直下になるように取り付けられていた。

DH-MBES の送受波器は 2 組の送受波器を左右にそれぞれ 25 度の傾きを持たせ、船首側から見

<sup>†</sup> Received September 21, 2017; Accepted November 14, 2017

\* 1 海洋調査課 Hydrographic Surveys Division

\* 2 技術・国際課 海洋研究室 Ocean Research Laboratory, Technology Planning and International Affairs Division

\* 3 元 海洋調査課 大陸棚調査室 Formerly belonged to Continental Shelf Surveys Office, Hydrographic Surveys Division

るとV字になるように設置している。Photo 1は測量船「うずしお」(第五管区海上保安本部所属)の船首部の状況である。ソナーハウスが船体より張り出している。

表面音速度計は単管パイプを海水の流入路として船底キールの下に取り付け、ソナーハウスの中で流路と垂直になるように音速度センサーを単管に差し込んでいる (Photo 2)。

測位・動揺検出器はGNSS アンテナ2個, DGPS 受信機アンテナ1個をマスト (Photo 3)に, IMU (Inertial Measurement Unit: 慣性計測

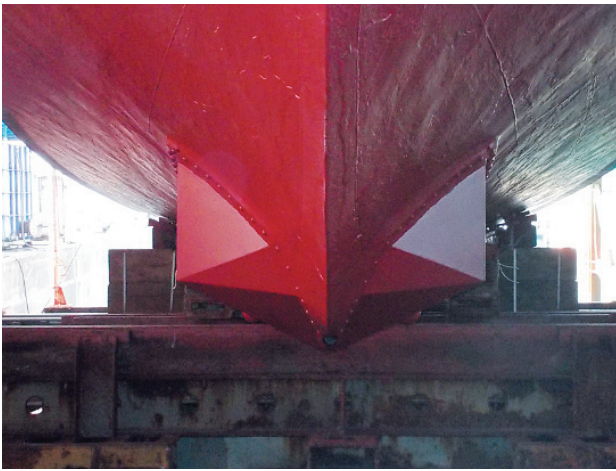


Photo 1. Sonar heads on the hull of S/V *Uzushio*.  
Viewed from the bow.

写真1. 測量船「うずしお」の船底を船首から見たソナーヘッドの様子.

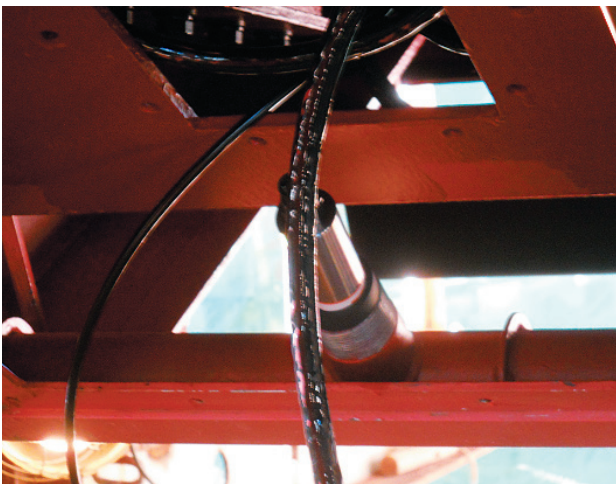


Photo 2. Surface sound velocimeter under the hull of S/V *Uzushio*.

写真2. 測量船「うずしお」船底の表面音速度計.

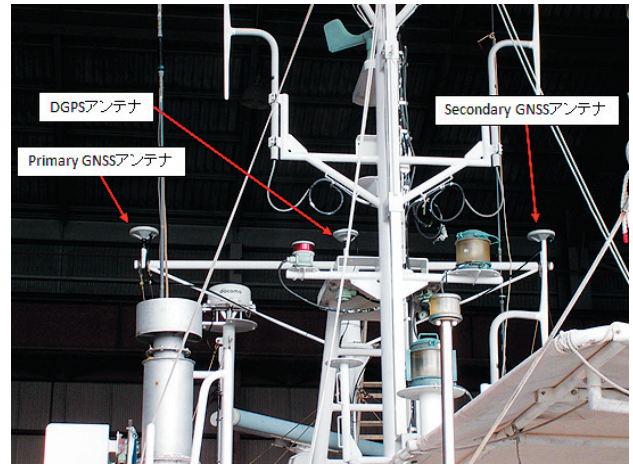


Photo 3. Mast of S/V *Uzushio* equipped with GNSS and DGPS antennae.

写真3. GNSS アンテナと DGPS アンテナを設置した測量船「うずしお」のマスト.



Photo 4. IMU (lower left) and UPS (lower right) installed on the lower part of the observation equipment rack of S/V *Uzushio*.

写真4. 測量船「うずしお」観測機器棚のIMU (左下)及びUPS (右下).

装置)を観測室 (Photo 4)に配置している.

### 1.3 推奨設定

今回採用したマルチビーム測深機は、発振周波数, スワス角, 海底検出方式, ロールスタビライズ機能など使用者の選択肢が多いため, 本技術報告では, これら機能の長所, 短所を整理し, 最も効果が期待できる標準的な設定を推奨設定として報告し, 使用者が設定に迷うようなときの指標を提供する.

## 2 機器の特徴

### 2.1 各機器の構成

システム全体の構成は Table 1 で示したとおりである。ここでは、主要機器の構成品について示していく。

#### 2.1.1 Sonic2024 の構成

マルチビーム測深機 Sonic2024 の構成品を Table 2 に示す。従来のシステムでは船上ユニットに組み込まれていたプロセッサとコントローラがソナーヘッドの受信モジュール（以下、「受波器」という）に埋め込まれている。このため、船上ユニットはソナーインターフェイスモジュール（以下、「SIM」という）だけとなり非常にコンパクトである。デュアルヘッドシステムでは、これを2式使用する。左舷側をマスター、右舷側をスレーブとしている。デッキケーブルはイーサネットの信号ケーブルと電源ケーブルが1本になっている。プロジェクタケーブルは電源ケーブルと同期信号ケーブルである。

#### 2.1.2 Micro X SV の構成

表面音速度計 Micro X SV の構成を Table 3 に示す。電源は、信号ケーブルを通して、Sonic2024 の SIM から供給される。

Table 1. Components of DH-MBES.

表 1. DH-MBES の主な構成。

主要機器	メーカー	機種
マルチビーム測深機	R2Sonic社	Sonic2024
表面音速度計	AML社	micro X SV
測位・動揺検出器	Applanix社	POS MV Wavemaster
DGPS受信機	Trimble社	SPS351
制御装置	Lenovo社	ThinkCentre M72e Tiny
データ集録装置	マウスコンピューター社	MDV-GZ6100X
UPS	ユタカ電機社	UPS1410HP

Table 2. Constituent parts of Sonic2024.

表 2. Sonic2024 の構成品。

構成品	寸法(L × W × D)	乾燥重量
受信モジュール	480 × 109 × 190mm	12.9kg
プロジェクタ	273 × 108 × 86mm	3.3kg
ソナーインターフェイスモジュール	280 × 170 × 60mm	2.4kg
その他の構成品	備考	
デッキケーブル	受波モジュール～SIM	
プロジェクタケーブル	受波モジュール～プロジェクタ	
LANケーブル	SIM～SONIC CONTROL PC	
SONIC CONTROLソフトウェア	Windows PCで動作	

Table 3. Constituent parts of Micro X SV.

表 3. Micro X SV の構成品。

構成品	備考
Micro X	本体(小型軽量ハウジング)
音速度センサー	交換式
信号ケーブル	信号, 電源

#### 2.1.3 POS MV Wavemaster の構成

測位・動揺検出器 POS MV Wavemaster (POS MV は Applanix 社の商標である。) の構成品を Table 4 に示す。システムの制御を行うユニットである PCS (POS Computer System) はラックマウント型である。

#### 2.1.4 SPS351 の構成

DGPS 受信機 SPS351 の構成を Table 5 に示す。本機は海上保安庁が運用するディファレンシャル GPS 局の中波ビーコンを受信し、補正情報を POS MV Wavemaster へ送信している。SBAS (Satellite-based augmentation system: 衛星航法補強システム) にも対応している。

#### 2.1.5 制御装置の構成

制御装置は Windows 7 Professional で動作するデスクトップ PC である。SONIC CONTROL ソフトウェアがインストールされている。制御装置

Table 4. Constituent parts of POS MV Wavemaster.

表 4. POS MV Wavemaster の構成品。

構成品	数量	備考
PCS	1台	POS コンピュータシステム
IMU	1台	慣性計測ユニット
GNSSアンテナ	2個	
アンテナケーブル	2本	
IMUケーブル	1本	
1PPSケーブル	1本	
シリアル信号ケーブル	2本	

Table 5. Constituent parts of SPS351.

表 5. SPS351 の構成品。

構成品	数量
受信機	1台
DGNSSアンテナ	1個
アンテナケーブル	1本
シリアル通信ケーブル	1本

は、1台でデュアルヘッドシステムを制御する。

### 2.1.6 データ集録装置

データ集録装置は Windows 7 Professional で動作するデスクトップ PC である。HYPACK ソフトウェアがインストールされている。

また、POS MV Wavemaster の制御・監視ソフトウェアである MV-POS View Controller がインストールされている。

## 2.2 各機器の仕様

ここでは、主要機器の仕様について示す。

### 2.2.1 Sonic2024 の仕様

マルチビーム測深機 Sonic2024 の仕様を Table 6 に示す。発振周波数は 1 kHz ステップで変更できる。表中のビーム幅とは、発振周波数が 400 kHz の場合の直下のビーム幅を示す。スワス角は 1 度ステップで変更可能である。

### 2.2.2 Micro X SV の仕様

表面音速度計 Micro X SV の仕様を Table 7 に示す。

### 2.2.3 POS MV Wavemaster の仕様

測位・動揺検出器 POS MV Wavemaster の仕様を Table 8 に示す。

Table 6. Specification of Sonic2024.

表 6. Sonic2024 の仕様。

項目	仕様
ビーム方式	クロスファンビーム
周波数	200-400kHz
測深能力	1-400m
送波ビーム幅 (Along track)	1 度 (周波数400kHz)
受波ビーム幅 (Across track)	0.5 度 (周波数400kHz)
スワス幅	10-160度
ピングレート	最大60Hz
レンジ分解能	1.25cm
海底検出モード	等角度/等密度
ビーム本数	256本

## 2.3 配線

システム全体の接続イメージを「浅海ナローマルチビーム測深機（デュアルヘッド型）取扱説明書」（株式会社東陽テクニカ，2013）から抜粋し Fig. 1 に示す。

### 2.3.1 船底部

プロジェクタケーブルは受波器とプロジェクタ（以下、「送波器」という。）を接続し、コネクタ部は水没する。デッキケーブル 2 本と micro X の信号ケーブルは、船体外板に空けた孔を通して船内の SIM と海水中に没する受波器および、micro X とを接続する。船体外板に空けた孔は電線貫通金物により水密を保持している（Fig. 2）。Photo 5 は測量船「うずしお」のデッキケーブルの貫通金物を取り付けた様子を船内側から撮影している。

### 2.3.2 マスト

POS MV Wavemaster の GNSS アンテナ 2 個と DGPS アンテナをマストなどの高所に設置している。

Table 7. Specification of Micro X SV.

表 7. Micro X SV の仕様。

項目	仕様
測定範囲	1375-1625m/s
測定精度 (Precision)	±0.006m/s
測定精度 (Accuracy)	±0.025m/s
分解能	0.001 m/s
耐圧	500m
応答時間	47 μs

Table 8. Specification of POS MV Wavemaster.

表 8. POS MV Wavemaster の仕様。

項目	事項	仕様
測位	RTK	0.02-0.1 m
	DGPS	0.5-2.0m
速度	RTK	0.05m/s
	DGPS	0.05m/s
ロール、ピッチ	RTK	0.02 度
	DGPS	0.03 度
真方位	基線2m	0.03 度
ヒープ	TrueHeave	ヒープ振幅の2%または2cm
ヒープ	Real-time	ヒープ振幅の5%または5cm





Photo 6. Cable gland for antenna cable on the roof of S/V Kurushima.  
写真6. 測量船「くるしま」の観測室上部の貫通金物。

れ、デュアルヘッドシステムを制御している。

左舷 SIM にはソナーヘッドからのデッキケーブル、表面音速度計信号ケーブル、PCS からのシリアル通信ケーブル2本と1PPS 信号ケーブル、データ集録装置と LAN ケーブルで接続されている。右舷 SIM はソナーヘッドからのデッキケーブルが接続される。

PCS は GNSS アンテナ2個とアンテナケーブル2本、IMU と信号ケーブル、DGPS 受信機とシリアル通信ケーブル、左舷 SIM とシリアル通信ケーブル2本と1PPS ケーブル、データ集録装置と LAN ケーブルで接続している。

DGPS 受信機は PCS とシリアル通信ケーブル、DGNSS アンテナとアンテナケーブルで接続している。

データ集録装置は左舷 SIM、PCS と LAN ケーブルで接続している。

## 2.4 特徴

第1に Sonic2024 は高レンジ分解能を実現するため送波器がワイドバンドである。中心周波数の周囲  $\pm 30$  kHz 程度の広範囲な周波数帯の超音波を発振している。このため、デュアルヘッドシステムでは2台の測深機が干渉しないように発振周波数を 60 kHz 以上離す必要がある。

第2に受波器の素子がラインアレイである。これまで採用してきた RESON 社製 SeaBat9001, 8101, 7101 はサークルアレイ、Kongsberg 社製 EM3002 はラインアレイであった。受波ビームの舷側方向の幅が、サークルアレイでは一定であるのに対して、ラインアレイでは中央から傾きが大きくなるほど受波ビーム幅が広くなり、ソナー中心からの傾き（ステアリング角度）が 60 度で中心の約2倍（ $\approx 1/\cos(60\text{deg})$  倍）のビーム幅となる（Table 9）。

## 3 データ検証方法

デュアルヘッドシステムの導入に際し、検証しておくべき事項がいくつかある。

Table 9. Relationship between steering angle and beam width.

表9. ステアリング角度とビーム幅の関係。

ステアリング 角度	ビーム幅	
	400kHz	320kHz
0 度	0.50 度	0.63 度
5 度	0.50 度	0.63 度
10 度	0.51 度	0.64 度
15 度	0.52 度	0.65 度
20 度	0.53 度	0.67 度
25 度	0.55 度	0.69 度
30 度	0.58 度	0.72 度
35 度	0.61 度	0.77 度
40 度	0.65 度	0.82 度
45 度	0.71 度	0.89 度
50 度	0.78 度	0.98 度
55 度	0.87 度	1.09 度
60 度	1.00 度	1.25 度
65 度	1.19 度	1.48 度
70 度	1.47 度	1.83 度
75 度	1.94 度	2.42 度
80 度	2.89 度	3.61 度

第1に、Sonic2024の測定値そのものの精度評価を行いたい。ただし、水中の音響測深においては、陸上の測距儀の検定のような基線での測定はできないので、シングルビーム測深機の測定値と比較することにより検証する。シングルビーム測深機は昭和60年頃からデジタル記録を取得しており、これまで約30年以上の実績があり、信頼あるデータ取得が確認されている。

第2に、海底のフットプリントの広さはビームの角度に応じて異なることから、この違いによる測定値のばらつきが心配される。

第3に、デュアルヘッドシステムでは、信号の干渉を避けるため発振周波数の異なる2つの測深機を使用する。Sonic2024ではマスターとスレーブで周波数を60 kHz以上離す必要がある。今回は80 kHz離し、マスターを320 kHz、スレーブを400 kHzとしており、この周波数の違いによる測定値の差を確認しなければならない。

第4に、測定データの再現性を確認したい。

第5に、これまで使用してこなかったロールス

タビライズ機能を使用するにあたり、測定値に固有誤差が生じていないか確認する必要がある。

これらの観点から実施するデータの検証として、①シングルビーム測深機の測深値との比較、②ビームの角度別のばらつきの検証、③マスターとスレーブの重複部の測深値の比較、④隣接測線の重複部の測深値の比較、⑤ロールスタビライズの機能をON/OFFした場合の測深値の比較を行った。

### 3.1 使用データ

#### 3.1.1 シングルビーム測深機の測深値との比較

測量船「おきしお」(第十一管区海上保安本部所属)により2014(平成26)年8月に測定されたデータの一部を使用する。Fig. 3が使用データの航跡図で1分格子のLMDファイルである。ここでいうLMDファイルとは、水深点の緯度、経度、水深のほか、測量船、各センサーの状況などをカンマ区切りのテキストファイルで記録したものである。南北測線は右から096、100、104、

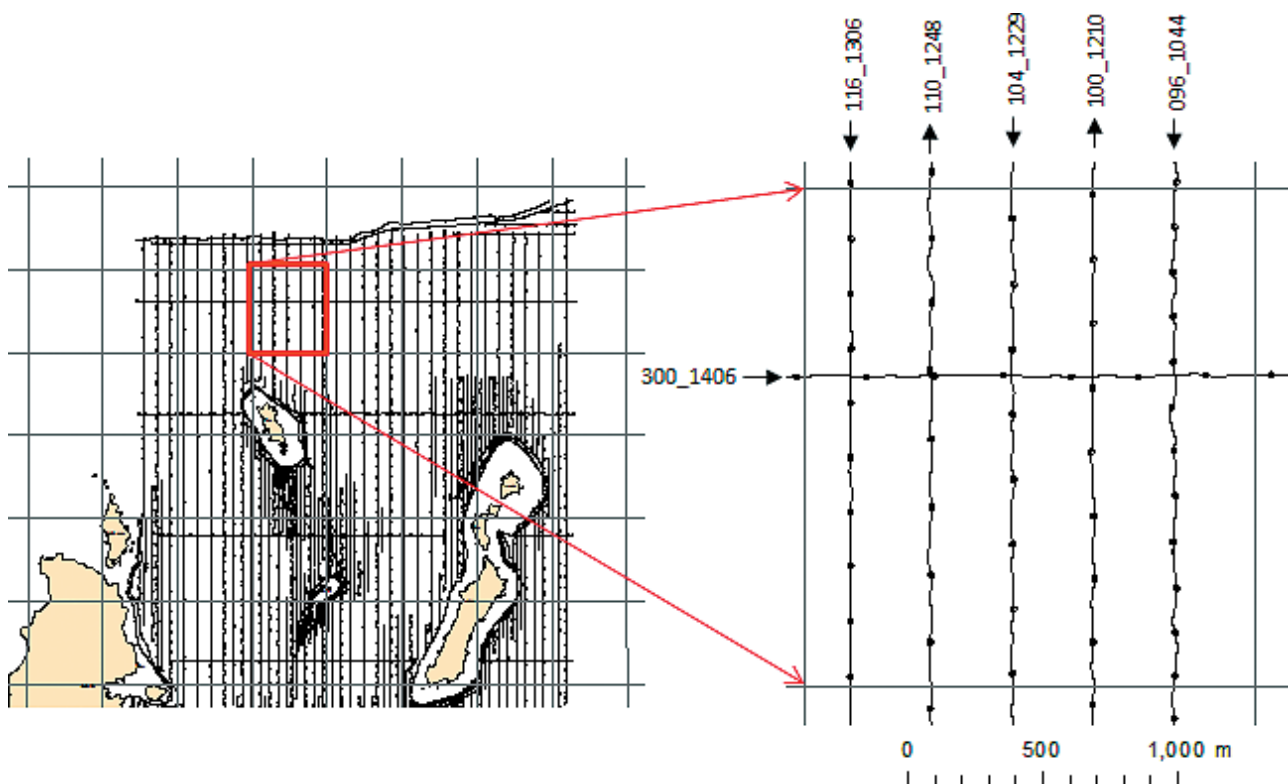


Fig. 3. Track lines of survey data used for error assessment.

図3. 検証に使用した計測データの測線図。

110, 116, 東西測線は照査線で 300 である。測深機の主な設定は、スワス幅が 100 度、海底検出方式が等角度モード、ロールスタビライズが OFF である。発振周波数は水深 100 m 付近で切替えており、100 m 以浅でマスターが 320 kHz、スレーブが 400 kHz、100 m 以深でマスターが 200 kHz または 240 kHz、スレーブが 280 kHz または 320 kHz としている。

### 3.1.2 ビームの角度別のばらつきの検証

3.1.1 と同じデータを使用する。

### 3.1.3 マスターとスレーブの重複部の比較

3.1.1 と同じデータを使用する。

### 3.1.4 隣接測線重複部の測深値比較

3.1.1 と同じデータを使用する。

### 3.1.5 ロールスタビライズの検証

ロールスタビライズ ON/OFF の比較は第三管区海上保安本部所属測量船「はましお」搭載艇により 2013 (平成 25) 年 5 月に検証のため取得したデータを使用する。

### 3.1.6 マルチビーム測深機のデータの取扱いについて

DH-MBES のビーム番号はマスターの左から右へ順に 1 から 256, スレーブの左から右へ順に 257 から 512 とする。等角度モードの受波ビームの間隔は、スワス幅 100 度をビーム本数 256 本で除算して約 0.39 度となる。ステアリング角度 (各ビームの中央を基準として測る) はスワスの中央から順に 0.195 度, 0.391 度, …, 49.805 度となる。ビーム角度は左舷側を+, 右舷側を- とする。このデータをビーム番号で 16 本ごとに抽出し、角度別に分割する (Table 10)。Table 10 のビーム範囲はステアリング角度にマスター (+24.90 度) とスレーブ (-24.91 度) のバイアスを加え、さらに、発振周波数 400 kHz の場合のビーム幅の半角を加味している。

Table 10. Ranges of steering angle and off nadir beam angle for each band of extracted 16 receiving beams of our DH-MBES.

表 10. DH-MBES における 16 本ごとに抽出した受波ビーム帯のステアリング角度と直下からのビーム角の範囲。

ビーム番号	ステアリング角度	ビーム範囲
1-16	49.80 ~ 43.95 度	75.09 ~ 68.50 度
17-32	43.55 ~ 37.70 度	68.80 ~ 62.28 度
33-48	37.30 ~ 31.45 度	62.52 ~ 56.05 度
49-64	31.05 ~ 25.20 度	56.25 ~ 49.82 度
65-80	24.80 ~ 18.95 度	49.98 ~ 43.58 度
81-96	18.55 ~ 12.70 度	43.72 ~ 37.34 度
97-112	12.30 ~ 6.45 度	37.46 ~ 31.09 度
113-128	6.05 ~ 0.20 度	31.21 ~ 24.85 度
129-144	-0.20 ~ -6.05 度	24.95 ~ 18.59 度
145-160	-6.45 ~ -12.30 度	18.71 ~ 12.34 度
161-176	-12.70 ~ -18.55 度	12.46 ~ 6.08 度
177-192	-18.95 ~ -24.80 度	6.22 ~ -0.18 度
193-208	-25.20 ~ -31.05 度	-0.02 ~ -6.45 度
209-224	-31.45 ~ -37.30 度	-6.25 ~ -12.72 度
225-240	-37.70 ~ -43.55 度	-12.48 ~ -19.00 度
241-256	-43.95 ~ -49.80 度	-18.70 ~ -25.29 度
257-272	49.80 ~ 43.95 度	25.00 ~ 18.41 度
273-288	43.55 ~ 37.70 度	18.71 ~ 12.19 度
289-304	37.30 ~ 31.45 度	12.43 ~ 5.96 度
305-320	31.05 ~ 25.20 度	6.16 ~ -0.27 度
321-336	24.80 ~ 18.95 度	-0.11 ~ -6.51 度
337-352	18.55 ~ 12.70 度	-6.37 ~ -12.75 度
353-368	12.30 ~ 6.45 度	-12.63 ~ -19.00 度
369-384	6.05 ~ 0.20 度	-18.88 ~ -25.24 度
385-400	-0.20 ~ -6.05 度	-25.14 ~ -31.50 度
401-416	-6.45 ~ -12.30 度	-31.38 ~ -37.75 度
417-432	-12.70 ~ -18.55 度	-37.63 ~ -44.01 度
433-448	-18.95 ~ -24.80 度	-43.87 ~ -50.27 度
449-464	-25.20 ~ -31.05 度	-50.11 ~ -56.54 度
465-480	-31.45 ~ -37.30 度	-56.34 ~ -62.81 度
481-496	-37.70 ~ -43.55 度	-62.57 ~ -69.09 度
497-512	-43.95 ~ -49.80 度	-68.79 ~ -75.38 度

### 3.1.7 シングルビーム測深機のデータの取扱いについて

20 m 型測量船にはシングルビーム測深機として千本電機社製 PDR-8000 を装備しており、原則、マルチビーム測深機と同時集録している。同時集録された測深値は、潮汐観測の誤差、音速度プロファイルの誤差は一致するため、データの比較には好都合である。

PDR-8000 の仕様では半減半角 (超音波エネルギーが直下の半分になる角度を半減全角といい、その半分の角度) ビーム幅が 8 度となっているが、実効のビーム幅は変化する可能性があるため、使用するデータで有効なビーム幅を検討する必要がある。ビーム幅については、浅田 (1997)



に詳細な説明がある。

PDR-8000の有効なビーム幅は、半角2.0度に決定した。傾斜が大きい海底を想定すると、PDR-8000の有効ビーム角度を過大評価するとフットプリント外側の浅所に当たるSonic2024のビームとPDR-8000とで測深値を比較することになるので、Sonic2024の測深値のほうがより浅くなる。逆に、PDR-8000の有効ビーム角度を過小評価するとフットプリント縁辺部の浅い箇所の測深値がSonic2024との比較の対象にならないのでPDR-8000の測深値のほうがより浅くなる。この角度を0.1度ステップで変化させていき、測深値の差の最小値から最大値の範囲が最小かつ標準偏差が最小となるのが2.0度であった。

## 3.2 検証の具体的手順

### 3.2.1 シングルビーム測深機の測深値との比較

まず、PDR-8000の測深点からフットプリントに相当するポリゴンを作成する。このポリゴン内に存在するSonic2024の測深点を集計し最浅値を得る。このポリゴンごとにPDR-8000の測深値とSonic2024の測深値の差をとり、この差が「水路測量における測定又は調査の方法に関する告示」（海上保安庁、2009）の特級の水域における深さの測定の誤差の限度と照合する。

### 3.2.2 ビームの角度別のばらつきの検証

Sonic2024の測深値をビーム番号で16本ごとに抽出したデータを使用する。直交する照査線のPDR-8000の測深値との差を集計する。

データの集計の方法は、前出のシングルビーム測深機の測深値との比較と同じである。

### 3.2.3 マスターとスレーブの重複部の比較

マスターとスレーブでは発振周波数が異なるので、測深値に差がないか検証を行う。

Sonic2024のデータをビーム番号で16本ごとに分割したデータを使用し、このうち直下に近い177から192（+6.22度から-0.18度）と305から320（+6.16度から-0.27度）、193から208

（-0.02度から-6.45度）と321から336（-0.11度から-6.51度）を比較する。最も距離が近い測深点の対を抽出し、その距離が0.1m以内のデータについて測深値を比較する。

### 3.2.4 隣接測線重複部の測深値比較

3.2.3節と同様にビーム番号で16本ごとに分割した測深点データを使用し、隣接測線間で同じビーム帯の測深点同士で最も距離が近い対を抽出し、その距離が0.1m以内のデータについて測深値を比較する。

### 3.2.5 ロールスタビライズの検証

推奨設定のロール値の制限を見積もる上で、ロールスタビライズの測深値への影響の有無を考慮しておく必要がある。このため、この機能をON/OFFすることで測深値に変化がないかを検証する。

ロールスタビライズの機能はデュアルヘッドシステム、シングルヘッドシステムいずれでも同じ効果を得られる。ここでは検証を単純化するためシングルヘッドシステムで行うことにした。測深機はSonic2022を使用、設定値は等角度モード、スワス角130度として、ロールスタビライズをONとOFFで同じ海域のデータを取得し、0.2mの格子データで比較をした。

なお、パッチテストはロールスタビライズONの場合、OFFの場合それぞれで実施し、各々のパッチテスト値に変更がないことを確認している。

## 4 検証結果

### 4.1 結果

#### 4.1.1 シングルビーム測深機の測深値との比較

PDR-8000のフットプリントに相当するポリゴン内に存在するSonic2024の測深点数が20点以上となるポリゴンを抽出し、PDR-8000の測深値とこのポリゴン内に存在するSonic2024の測深点のうち最浅値との差をとった。差はSonic2024の最浅値からPDR-8000の測深値を減算した。PDR-

8000 の測深点数 1775 点, 平均値  $-0.29$  m, 標準偏差  $0.086$  m, 最小値  $-0.85$  m, 最大値  $0.61$  m であった。

PDR-8000 の測深値から「水路測量における測定又は調査の方法に関する告示」(海上保安庁, 2009) が定める特級の水域における深さの測定の誤差の限度を算出し, 差と照合したところ 1775 点全てで深さの測定の誤差の限度以内であった。

#### 4.1.2 ビームの角度別のばらつきの検証

Sonic2024 の測深値から PDR-8000 の測深値を減算して測深値の差とした。

ビーム番号 1 から 32 ( $62.28$  度より外側) と 481 から 512 ( $-62.57$  度より外側) ではデータの棄却が多く比較できなかった。

比較したデータから角度による傾向は見いだせない結果となった。Table 11 に測深値の差の平均値, 標準偏差, 最小値, 最大値をビーム番号別に示す。最小値と最大値の差が最大となるのはマスターの  $-12.70$  度から  $-18.55$  度の範囲で  $1.98$  m であった。また, 平均値は  $\pm 0.31$  m 以内, 標準偏差は  $\pm 0.40$  m 以内であった。

#### 4.1.3 マスターとスレーブの重複部の比較

マスターとスレーブが直下付近で重複する測深点を比較した結果は差が  $\pm 0.9$  m 以内, 平均値が  $\pm 0.2$  m 以内, 標準偏差  $0.2$  m 以内であった (Table 12)。

#### 4.1.4 隣接測線重複部の測深値比較

隣接測線の測深点との差は  $\pm 0.8$  m 以内, 平均値は  $\pm 0.2$  m 以内, 標準偏差は  $0.4$  m 以内であった (Table 13)。測線 104\_1229 と測線 110\_1248 のステアリング角度  $-25.20$  度から  $-31.05$  度で比較したデータの頻度分布を Fig. 4 に示す。

#### 4.1.5 ロールスタビライズの検証

検証は 2013 (平成 27) 年 5 月 27 日, 28 日の 2 回実施している。ロールスタビライズ ON の測深値からロールスタビライズ OFF の測深値を減

算している。結果を Table 14 に示す。差は  $\pm 0.4$  m 以内, 標準偏差は  $0.1$  m 以内に収まっている。5 月 28 日の頻度分布を Fig. 5 に示す。

## 4.2 考察

シングルビーム測深機の測深値との比較では, 同時に集録したデータを使用しているため, 潮汐の誤差, 音速度プロファイルの誤差, その他のセンサーの誤差はキャンセルされていると考えてよい。また, マルチビーム測深機がシングルビーム測深機のフットプリントと重なる直下付近のデータしか参照していないので海底の傾斜に起因する誤差は微小と考えるとよい。このほかにオフセットの誤差が考えられる。オフセットの計測誤差は, 同じ測量において計測されていることから同程度の誤差を持つが, 直下付近の測深値に及ぼす影響は  $0.1$  m 以内である。測深値の差の最大値は  $-0.85$  m で, この点の測深値は  $114.87$  m, 深さの測定の誤差の限度は  $0.90$  m であった。測深値の差が  $\pm 0.4$  m 以内に  $95\%$  以上の測深点が収まっている。特級の深さの測定の誤差の限度と照合しても比較した測深点全てで限度より小さいことに加え, 特級の誤差の限度の半分以下に収まっているデータが  $95\%$  以上を占めており, 良好な結果が得られた。

ビームの角度別のばらつきの検証結果からは角度別の傾向などは確認できなかった。また, ばらつきは概ね平均値の  $\pm 1.0$  m 以内, 標準偏差は  $0.4$  m 以内で良好であった。

直下付近のマスターとスレーブの測深値の差は  $\pm 0.9$  m 以内, 標準偏差は  $0.2$  m 以内に収まり, マスターとスレーブでは大きな差や系統的な差は確認できなかった。

隣接測線との重複部の測深値の差は  $\pm 0.8$  m 以内, 標準偏差  $0.4$  m 以内に収まり良好であった。

ロールスタビライズ ON と OFF の測深値には差がないものと考えてよい。

Sonic2024 は受波ビームの間隔を等角度モードと等密度モードの切り替えが可能であり, 切り替えても 1 ping あたりの受波ビーム本数 256 本は

Table 11. Statistics of measured depth difference between Sonic2024 and PDR-8000 classified by steering angle.

表 11. Sonic2024 と PDR-8000 による測深値の差のステアリング角度別の統計.

	ステアリング角度	サンプル数	平均値	標準偏差	最小値	最大値
マ ス タ ー ( 左 舷 )	49.80 ~ 43.95 度	0	---	---	---	---
	43.55 ~ 37.70 度	0	---	---	---	---
	37.30 ~ 31.45 度	56	0.243 m	0.204 m	-0.11 m	0.55 m
	31.05 ~ 25.20 度	82	0.225 m	0.213 m	-0.19 m	0.74 m
	24.80 ~ 18.95 度	135	0.270 m	0.274 m	-0.44 m	1.04 m
	18.55 ~ 12.70 度	133	0.041 m	0.165 m	-0.23 m	0.62 m
	12.30 ~ 6.45 度	117	-0.128 m	0.141 m	-0.49 m	0.15 m
	6.05 ~ 0.20 度	110	-0.171 m	0.088 m	-0.41 m	0.03 m
	-0.20 ~ -6.05 度	112	-0.161 m	0.260 m	-0.66 m	1.18 m
	-6.45 ~ -12.30 度	111	-0.168 m	0.399 m	-0.70 m	1.24 m
	-12.70 ~ -18.55 度	93	-0.267 m	0.209 m	-0.46 m	1.52 m
	-18.95 ~ -24.80 度	103	-0.207 m	0.137 m	-0.39 m	0.37 m
	-25.20 ~ -31.05 度	100	-0.202 m	0.169 m	-0.40 m	0.43 m
	-31.45 ~ -37.30 度	101	-0.258 m	0.098 m	-0.40 m	0.03 m
	-37.70 ~ -43.55 度	97	-0.217 m	0.096 m	-0.37 m	0.11 m
-43.95 ~ -49.80 度	84	-0.197 m	0.118 m	-0.41 m	0.13 m	
ス レ ー ブ ( 右 舷 )	49.80 ~ 43.95 度	93	-0.218 m	0.259 m	-0.43 m	0.87 m
	43.55 ~ 37.70 度	111	-0.171 m	0.363 m	-0.54 m	1.29 m
	37.30 ~ 31.45 度	104	-0.233 m	0.322 m	-0.51 m	1.25 m
	31.05 ~ 25.20 度	100	-0.257 m	0.128 m	-0.43 m	0.34 m
	24.80 ~ 18.95 度	103	-0.255 m	0.092 m	-0.46 m	0.20 m
	18.55 ~ 12.70 度	99	-0.309 m	0.074 m	-0.48 m	-0.04 m
	12.30 ~ 6.45 度	94	-0.271 m	0.070 m	-0.41 m	-0.12 m
	6.05 ~ 0.20 度	85	-0.239 m	0.070 m	-0.43 m	-0.08 m
	-0.20 ~ -6.05 度	69	-0.181 m	0.066 m	-0.41 m	-0.08 m
	-6.45 ~ -12.30 度	90	-0.131 m	0.071 m	-0.26 m	0.04 m
	-12.70 ~ -18.55 度	74	-0.104 m	0.089 m	-0.29 m	0.06 m
	-18.95 ~ -24.80 度	57	-0.106 m	0.047 m	-0.27 m	-0.01 m
	-25.20 ~ -31.05 度	61	-0.034 m	0.065 m	-0.19 m	0.08 m
	-31.45 ~ -37.30 度	72	0.089 m	0.322 m	-0.33 m	0.99 m
	-37.70 ~ -43.55 度	0	---	---	---	---
-43.95 ~ -49.80 度	0	---	---	---	---	

変化しない。ビーム幅は変化しないため等密度モードを使用すると直下付近では受波ビームと隣接する受波ビームの間に隙間が生じる可能性がある。

20 m 型測量船が測深時に使用する速力はおおよそ 7 ノット、約 3.6 m/s である。Sonic2024 の取扱説明書 (R2Sonic Inc., 2010) によれば、レンジ

設定とピングレート、測量船の速力とピングレートから計算されるピング間距離、ソナー中心からのスワス角 90 度 ( $\pm 45$  度), 100 度 ( $\pm 50$  度), 110 度 ( $\pm 55$  度), 120 度 ( $\pm 60$  度) におけるレンジごとの直下深度 (海底は水平な平坦面と仮定、ソナー取付角度 25 度) と進行方向のビーム幅 (発振周波数 400 kHz) の関係は Table 15 のと

Table 12. Statistics of measured depth difference in the overlapped areas between the master and slave sonars around nadir.

表 12. 直下付近のマスターとスレーブの測深機による重複部の測深値の差の統計.

測線1	左舷ビーム角度	右舷ビーム角度	サンプル数	平均値	標準偏差	最小値	最大値
096_1044	6.22 ~ -0.18 度	6.16 ~ -0.27 度	421	-0.077 m	0.113 m	-0.73 m	0.28 m
	-0.02 ~ -6.45 度	-0.11 ~ -6.51 度	428	-0.019 m	0.130 m	-0.45 m	0.88 m
110_1248	6.22 ~ -0.18 度	6.16 ~ -0.27 度	193	-0.039 m	0.137 m	-0.55 m	0.42 m
	-0.02 ~ -6.45 度	-0.11 ~ -6.51 度	221	0.013 m	0.115 m	-0.26 m	0.38 m
116_1306	6.22 ~ -0.18 度	6.16 ~ -0.27 度	258	-0.120 m	0.118 m	-0.64 m	0.15 m
	-0.02 ~ -6.45 度	-0.11 ~ -6.51 度	210	-0.047 m	0.089 m	-0.34 m	0.45 m
300_1406	6.22 ~ -0.18 度	6.16 ~ -0.27 度	15	-0.085 m	0.051 m	-0.16 m	0.02 m
	-0.02 ~ -6.45 度	-0.11 ~ -6.51 度	21	-0.034 m	0.100 m	-0.34 m	0.08 m

Table 13. Statistics of measured depth difference between measurements on overlapping adjacent survey lines.

表 13. 隣接測線重複部の測深値の差の統計.

測線1	測線2	ステアリング角度	サンプル数	平均値	標準偏差	最小値	最大値
100_1210	104_1229	37.30 ~ 31.45 度	9	-0.019 m	0.374 m	-0.70 m	0.50 m
		31.05 ~ 25.20 度	38	0.111 m	0.345 m	-0.65 m	0.77 m
104_1229	110_1248	-25.20 ~ -31.05 度	49	0.053 m	0.237 m	-0.53 m	0.58 m
		-31.45 ~ -37.30 度	13	0.151 m	0.340 m	-0.26 m	0.69 m
110_1248	116_1306	37.30 ~ 31.45 度	11	-0.037 m	0.212 m	-0.34 m	0.42 m
		31.05 ~ 25.20 度	26	0.090 m	0.299 m	-0.44 m	0.69 m

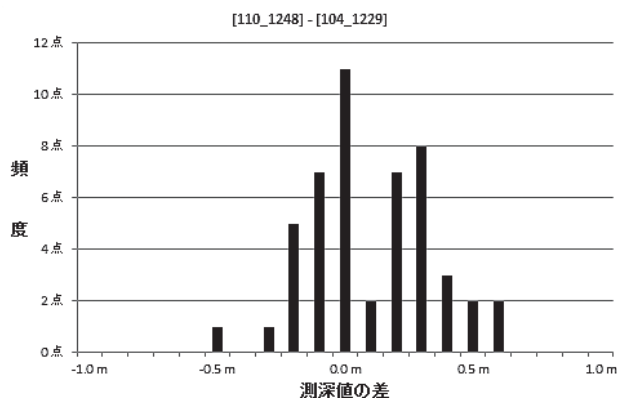


Fig. 4. Frequency distribution of sounding difference between overlapped swaths of the adjacent survey lines 110\_1248 and 104\_1229.

図 4. 測線 110\_1248 と測線 104\_1229 の測深値の差の頻度分布.

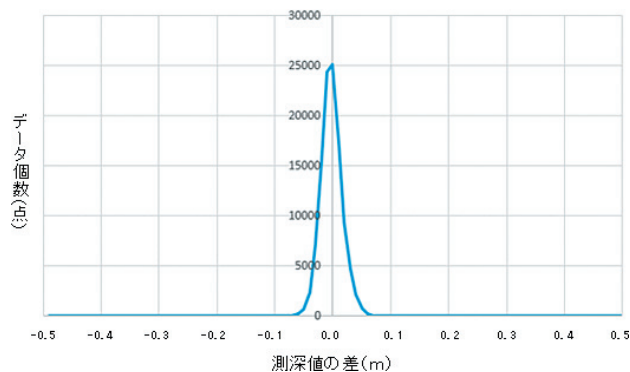


Fig. 5. Frequency distribution of depth difference between measurements with/without roll stabilization.

図 5. ロールスタビライズ ON/OFF の測深値の差の頻度分布.

Table 14. Statistics of measured depth difference between measurements with/without roll stabilization.

表 14. ロールスタビライズ ON/OFF による測深値の差の比較.

月日	5月27日	5月28日
サンプル数	79,913点	110,595点
平均値	-0.019 m	-0.009 m
標準偏差	0.018 m	0.018 m
最小値	-0.23 m	-0.39 m
最大値	0.27 m	0.16 m

おりである。ピッチングなど動揺は考慮しない理論値ではピング間距離よりビーム幅が長くないと測量船の進行方向にビームが海底に当たらない箇所が生じることになる。Table 15 で背景に着色した箇所は、ピング間距離より短いビーム幅であり、海底にビームが当たらない領域が生じる設定である。実際の運用は Table 15 のピング間距離とビーム幅に注目すると、仮に水深 10 m の海底をスワス角 90 度で測深する場合のレンジは直下

Table 15. Ping rate for each range setting, along track spacing between each ping calculated from the speed of the vessel (assuming the vessel speed to be 7 knots), relationship between nadir depth (assuming a flat seafloor) and along-track beam width at nadir (in 400 kHz transducer frequency) at sonar swath angles of 90 (± 45), 100 (± 50), 110 (± 55), and 120 (± 60) degree.

表 15. 各レンジ設定におけるピングレート、測量船の速力（7ノットを仮定）とピングレートから計算されるピング間距離、スワス角 90 度（± 45 度）、100 度（± 50 度）、110 度（± 55 度）、120 度（± 60 度）におけるレンジごとの直下深度と直下における進行方向のビーム幅の関係（発振周波数 400 kHz）。

レンジ設定	ピングレート	ピング間距離	スワス角 90 度		スワス角 100 度		スワス角 110 度		スワス角 120 度	
			直下深度	ビーム幅	直下深度	ビーム幅	直下深度	ビーム幅	直下深度	ビーム幅
3 m	60.0 Hz	0.060 m	1.03 m	0.018 m	0.78 m	0.014 m	0.52 m	0.009 m	0.26 m	0.005 m
5 m	60.0 Hz	0.060 m	1.71 m	0.030 m	1.29 m	0.023 m	0.87 m	0.015 m	0.44 m	0.008 m
7 m	60.0 Hz	0.060 m	2.39 m	0.042 m	1.81 m	0.032 m	1.22 m	0.021 m	0.61 m	0.011 m
10 m	54.3 Hz	0.066 m	3.42 m	0.060 m	2.59 m	0.045 m	1.74 m	0.030 m	0.87 m	0.015 m
25 m	24.7 Hz	0.146 m	8.55 m	0.149 m	6.47 m	0.113 m	4.34 m	0.076 m	2.18 m	0.038 m
35 m	18.2 Hz	0.198 m	11.97 m	0.209 m	9.06 m	0.158 m	6.08 m	0.106 m	3.05 m	0.053 m
50 m	13.0 Hz	0.277 m	17.10 m	0.298 m	12.94 m	0.226 m	8.68 m	0.152 m	4.36 m	0.076 m
70 m	9.4 Hz	0.383 m	23.94 m	0.418 m	18.12 m	0.316 m	12.16 m	0.212 m	6.10 m	0.106 m
100 m	6.6 Hz	0.546 m	34.20 m	0.597 m	25.88 m	0.452 m	17.36 m	0.303 m	8.72 m	0.152 m
250 m	2.7 Hz	1.334 m	85.51 m	1.492 m	64.70 m	1.129 m	43.41 m	0.758 m	21.79 m	0.380 m
350 m	1.9 Hz	1.895 m	119.71 m	2.089 m	90.59 m	1.581 m	60.78 m	1.061 m	30.50 m	0.532 m
500 m	1.4 Hz	2.572 m	171.01 m	2.985 m	129.41 m	2.259 m	86.82 m	1.515 m	43.58 m	0.761 m

深度が 10 m より深くなる 35 m に設定する。レンジ 25 m で直下水深が 8.55 m なので、水深がおよそ 8.5 m より深い海域ではレンジ 35 m の場合のピング距離で測定することになるので、レンジ 35 m のピング距離 0.198 m とレンジ 25 m の直下ビーム幅 0.149 m を比較しなければならない。この場合、理論上は測量船の速力を 5 ノットに抑えれば、水深 6 m 以深でビームが当たらない隙間を生じさせないことができる。測量船の速力を抑える以外に、スワス角を狭くすることでスラントレンジと直下深度の差を小さくすることが可能で測量船の進行方向にできるビームの隙間を小さくするのに有効である。これ以外に動揺の影響も考慮しなければならないので、スワス角は 90 度程度に狭くすることを推奨する。

## 5 推奨設定

これまでの検討結果による Sonic2024 デュアルヘッドシステムの推奨設定を Table 16 に示す。

この推奨設定は、設定項目相互に影響を与えるので設定値を変更する場合はその影響を検討し、総合的に判断しなければならない。

発振周波数は、高分解能での測定が期待できる 400 kHz と 320 kHz を使用する。海底検出方式は

Table 16. Recommended parameter settings for Sonic2024 dual-head systems.

表 16. Sonic2024 デュアルヘッドシステムの推奨設定。

設定項目	推奨設定
発振周波数	400kHz,320kHz
海底検出方式	等角度モード
スワス角	90度
ロールスタビライズ	ON
ロール値の制限	±20度

より精度が高い測深点を多く取得できることが期待できる等角度モードを採用する。スワス角は 90 度としロールスタビライズを ON にすることで作業の効率化を図れるようにした。ソナーヘッドの取付けを 25 度傾けているので直下からの傾きは最大で 70 度まで取得可能となっている。また、周波数 320 kHz では、ビームステアリング角度が 65 度を超えるとビーム幅が 1.5 度超えることからロール値が ± 20 度を超えた場合は測深値を不採用とする。

より深い水深を測定する必要があり発振周波数を下げる場合には、ステアリング角度によるビーム幅の変化を確認し、スワス角、ロール値の制限、作業効率等を総合的に判断し、設定値を決定しなければならない。

## 6 まとめ

デュアルヘッドシステムの効果はマルチビーム測深機1台のスワス角を狭くしてシステム全体として幅の広いスワス測深を可能とするところにある。今回、様々な角度からDH-MBESの評価を行うことができ、特に、ビーム角度別の検証により、マルチビーム測深機の欠点といえるスワスの外側でフットプリントが広がる現象をデュアルヘッドシステムにすることで改善できることが実証できた。

また、副次的に外側のビームにおいて測深点の棄却率（手動データ編集によりノイズ除去された測深点の割合）がある角度から急激に増大していることが判明した。1測線のデータ棄却率についてFig. 6にビーム番号別のグラフ、Fig. 7に姿勢データを補正した角度別のグラフとして示す。この測線の測深値はおよそ80 mから140 mの範囲で、55度より外側で急激にデータ棄却率が増大している。ビーム角度別のデータの棄却率が予測可能であれば、スワス角を絞ることでデータの密度を高めることや、自動フィルターで外側のデータを除外することによりノイズ除去処理の効率化が期待できる。除外できる角度については海況などで変化することも予想できるので、今後、さらに検証していくことにする。

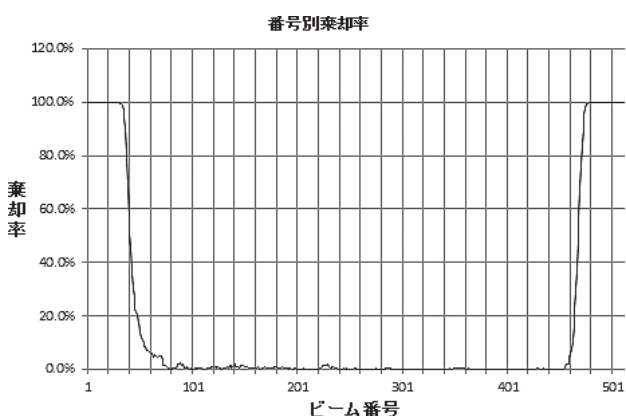


Fig. 6. Data rejection rate classified by beam numbers for line 300\_1406 (ratio of sounding points edited manually by a hydrographer).

図6. 測線300\_1406のビーム番号別データ棄却率（手動データ編集によりノイズ除去された測深点の割合）。

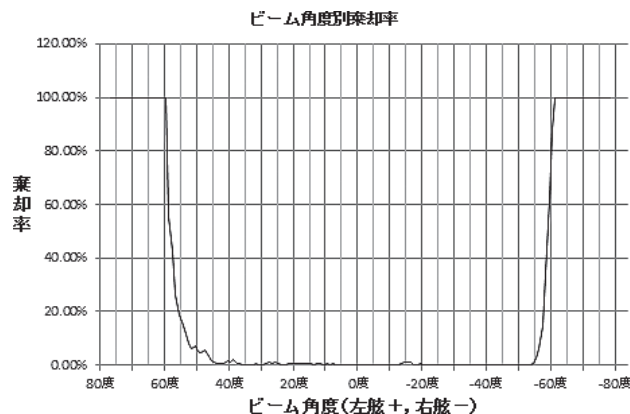


Fig. 7. Data rejection rate classified by off-nadir beam angle for line 300\_1406 (ratio of sounding points edited manually by a hydrographer).

図7. 測線300\_1406の直下からのビーム角度別データ棄却率（手動データ編集によりノイズ除去された測深点の割合）。

## 謝 辞

本稿は業務支援研究として2014（平成26）年度から4か年で実施した「デュアルヘッドソナーの精度検証」の報告として取りまとめました。第三、四、五、六、七、十管区海上保安本部海洋情報部、第十一管区海上保安本部海洋情報監理課及び海洋情報調査課、測量船「はましお」、測量船「いせしお」、測量船「うずしお」、測量船「くるしま」、測量船「はやしお」、測量船「いそしお」、測量船「おきしお」の職員、乗組員には、マルチビーム測深機デュアルヘッドシステムの艤装、運用、写真の提供、検証データの取得及び提供に関してご支援、ご協力いただきました。DH-MBESの導入に際しては、海上保安庁海洋情報部海洋調査課の皆様には、様々な点でご尽力いただきました。また、本原稿を書く上で、査読者及び編集者の方には有益で適切なお助言をいただきました。ここに記して感謝いたします。

## 文 献

- 浅田昭（1997）マルチビーム音響測深の原理，水路部技報. 15, 73-93.
- 株式会社東陽テクニカ（2013）浅海ナローマルチビーム測深機（デュアルヘッド型）取扱い説明書.

海上保安庁（2009）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4月1日海上保安庁告示第102号，平成21年3月31日海上保安庁告示第110号により一部改正），海上保安庁，東京.

R2Sonic LLC（2010），株式会社東陽テクニカ翻訳，ワイドバンドマルチビーム測深機 SONIC2024/2022 型 Operation Manual V2.0.

## 要 旨

20 m 型測量船7隻のマルチビーム測深機を換装し，2組の送受波器を同期発振するデュアルヘッドシステムを導入した．デュアルヘッドマルチビーム測深機の艙装，推奨設定について報告する．