

水路測量における技術の進歩と近年の取り組み[†]

住吉昌直^{*1}, 佐伯達也^{*2}, 大久保匡騎^{*2}, 森 雄基^{*2}, 森 弘和^{*2}, 吉澤 信^{*2}, 長野勝行^{*2},
栗田洋和^{*2}, 鐘尾 誠^{*2}, 安原 徹^{*3}, 長澤亮佑^{*2}

Technological progress and recent efforts in hydrographic survey[†]

Masanao SUMIYOSHI^{*1}, Tatsuya SAIKI^{*2}, Masaki OKUBO^{*2}, Yuki MORI^{*2}, Hirokazu MORI^{*2},
Makoto YOSHIZAWA^{*2}, Katsuyuki NAGANO^{*2}, Hirokazu KURITA^{*2}, Makoto KANEKO^{*2},
Toru YASUHARA^{*3}, and Ryosuke NAGASAWA^{*2}

Abstract

Hydrographic survey in Japan has made great progress with the widespread use of multibeam echo sounders that can map full-coverage bathymetry. In this review, we analyze the technological progress and recent efforts in hydrographic survey.

1 はじめに

マルチビーム測深機は、詳細な海底地形を面的に捉えることのできる高度な音響観測機器である。その根幹となる原理は、ミルズクロス法（クロスファンビーム法）と呼ばれ、進行方向に指向性の高い音波（送波ビーム）を送波器から発信して、海底からの後方散乱により返ってくる音波を受波器により形成したスワス方向に指向性の高い多数の受波ビームで聞き分けることにより、海底地形を面的に細かく分割して捉えている（浅田, 1997）。

日本におけるマルチビーム測深の歴史は、昭和 58（1983）年に海上保安庁（以下、当庁という）の測量船「拓洋」へ導入された米国 General Instruments 社製 Seabeam から始まった（中西,

1985；浅田・中西, 1986）。Seabeam は、当時としては世界最高峰の測深システムで、受波ビーム幅 2.7 度（直下）×送波ビーム幅 2.7 度、測深点数 16 点、水深の 60% 程度の有効スワス幅（有効な測深データが取得可能な実用的な測深幅）により、海底地形を面的に測深可能であった。Seabeam は、発信周波数 12 kHz、パルス長 7 msec と低周波数帯を使用した深海域をターゲットとした測深機であったため、送受波器サイズは非常に大きく、大型測量船の船艇に装備する必要があった。

一方で、Seabeam が導入された時代において、浅海域の水路測量は、レッド測深やシングルビーム測深（以下、水路測量では多素子音響測深の意味とする）によるアナログ記録が主流であった。

[†] Received October 20, 2020; Accepted November 16, 2020

* 1 技術・国際課 海洋情報技術調整室 Process Control and Improvement Office, Technology Planning and International Affairs Division

* 2 沿岸調査課 Coastal Surveys Division

* 3 技術・国際課 Technology Planning and International Affairs Division

浅海域におけるマルチビーム測深機が当庁で導入されたのは、それから12年後の平成7(1995)年であった(穀田・長野, 1996)。当時、阪神大震災後の被害調査に活躍していたSEABAT(米国 RESON 社製 Seabat9001S)を導入し、正しい水深が出力できるようパッチテストを含む創意工夫を経て、ようやく水路測量で使用できるようになった歴史がある(浅田・他, 1998; 森・他, 2000; 森, 2002)。

現在では、当庁の管区及び本庁測量船等へ浅海用マルチビーム測深機が既に導入されているため、当庁が直営で実施するほぼ全ての水路測量はマルチビーム測深によるものである。また、港湾局が推進するICT浚渫工(国土交通省, 2016)や民間においてもマルチビーム測深が急速に普及してきている。水路測量においては、シングルビーム測深機による「線」測量の時代から、浅海用マルチビーム測深機による「面」測量の時代へ急速に転換している。

本総説では、第2章にて浅海用マルチビーム測深機における技術進歩の歴史を振り返り、第3章にて水路測量のマルチビーム測深作業とデータ処理の現状について述べて、第4章にて浅海用マルチビーム測深データの利用事例について紹介する。更に、第5章にて水路測量成果の変遷の歴史を振り返り、第6章にて港湾ICTにともなうマルチビーム測深技術の民間普及について実例を取り上げて述べる。最後に、第7章にてまとめと今後の展望として、現在重要な課題となっているシングルビーム測深から引継ぐ既存の資料整理手法から脱却するための有力な手段として、浅海用マルチビーム測深のCUBE処理について議論する。

2 浅海用マルチビーム測深システムにおける技術の進歩

マルチビーム測深機は、詳細な海底地形を隙間なく面的に捉えることができる精密な音響観測機器である。開発当初は、深海域をターゲットとした測深機が主流であったものの、マルチビーム測深機の高周波数化・低コスト化・小型化が発展し

てきたため、現在、浅海域をターゲットとしたマルチビーム測深機が広く使用されるようになってきた。また、測位・動揺システムの性能も大きく向上したことにより、近年のマルチビーム測深データの測深精度・再現性は、飛躍的に向上した。本章では、マルチビーム測深システムにおける技術の進歩について述べる。

2.1 浅海用マルチビーム測深機の進歩

本節では、日本の水路測量に使用された浅海用マルチビーム測深機の変遷と機能の進歩について述べる(Table 1, Fig. 1 参照)。

2.1.1 Seabat9001

浅海域に特化したマルチビーム測深機が日本の水路測量に登場したのは、平成7(1995)年、海洋情報部に導入された米国 RESON 社製 Seabat9001Sであった(穀田・長野, 1996)。Seabat9001Sの発信周波数は455 kHzと浅海域(水深40-60 m以浅)に適した高周波数を使用しており、水深の2倍程度の最大スワス(測深機で設定可能な最大の測深幅: セクターカバレッジ)により、海底地形を面的に測深可能であった。受波ビーム幅1.5度×送波ビーム幅1.5度、測深点数60点により、沈船等が検出可能であった(古市・政岡, 1997)。Seabat9001Sは管区測量船の舷側に装備して使用されるため、正しい水深を出力するために、測深作業前には、艀装作業やパッチテスト等を実施する必要があった(浅田・他, 1998; 森・他, 2000; 森, 2002)。

2.1.2 Seabat8101

Seabat9001Sに続いて海洋情報部に導入された浅海用マルチビーム測深機は、米国 RESON 社製 Seabat8101であった。Seabat8101の発信周波数は240 kHzで、Seabat9001Sと比較して低周波数を使用しているため、実用的には水深300 mまで測深可能となり、最大スワスも150度と大きくなり、有効スワス幅も水深の2-4倍程度まで広がった。受波ビーム幅1.5度×送波ビーム幅1.5

Table 1. Specification sheets of multibeam echosounders in our office.
表1. 当庁が使用してきたマルチビーム測深機のスペック表.

機器名	MEGACAR		RESON		RESON		RESON		Kongsberg Maritime		R2SONIC		TELEDYNE RESON		
	機種	SeaBat9001S	SeaBat8101	SeaBat8125	SeaBat7101	EM3002	SONIC2024	SONIC2022	SeaBat T50	SeaBat T20	SONIC2024	SONIC2022	SeaBat T50	SeaBat T20	
発振周波数	455 kHz	240 kHz	455 kHz	240 kHz	240 kHz	300 kHz	200~400 kHz	200~400 kHz	300 kHz	300 m	200~400 kHz	200~400 kHz	200~400 kHz	200~400 kHz	
発信周波数の可変	x	x	x	x	x	x	○	○	x	○	○	○	○	○	
最大レンジ	200 m	500 m	200 m	200 m	500 m	300 m	500 m	500 m	300 m	500 m	500 m	500 m	500 m	575m	
送波ビーム幅 (進行方向)	1.5°	1.5°	0.5°	1.5°	1.5°	1.5°	1.0° (400 kHz) 2.0° (200 kHz)	1.0° (400 kHz) 2.0° (200 kHz)	1.5°	1.5°	1.0° (400 kHz) 2.0° (200 kHz)	1.0° (400 kHz) 2.0° (200 kHz)	1.0° (400 kHz) 2.0° (200 kHz)	1.0° (400 kHz) 2.0° (200 kHz)	
受波ビーム幅 (スワス方向;直下)	1.5°	1.5°	1.0°	1.0°	1.8°	1.5°	0.5° (400 kHz) 1.0° (200 kHz)	0.5° (400 kHz) 1.0° (200 kHz)	1.5°	1.5°	0.5° (400 kHz) 1.0° (200 kHz)	0.5° (400 kHz) 1.0° (200 kHz)	0.5° (400 kHz) 1.0° (200 kHz)	1.0° (400 kHz) 2.0° (200 kHz)	
測深点数	60点	101点	240点	240点	101, 239, 511点	254点	256, 512, 1024点 ^{*2}	256, 512, 1024点 ^{*2}	254点	254点	256, 512, 1024点 ^{*2}	256, 512, 1024点 ^{*2}	256, 512, 1024点 ^{*2}	最大1024点まで可変 ^{*2}	
最大発振レート	40Hz	40Hz	40Hz	40Hz	40Hz	40Hz	60Hz	60Hz	40Hz	40Hz	60Hz	60Hz	50Hz	50Hz	
パルス長	-	-	10 μs~300 μs	10 μs~300 μs	21 μs~225 μs	150 μs / 400 μs	15 μs~1ms	15 μs~1ms	150 μs / 400 μs	150 μs / 400 μs	15 μs~1ms	15 μs~1ms	CW: 15 μs~300 μs FM: 300 μs~10ms		
セクターカーバレッジ (最大スワス)	90°	150°	120°	120°	150°	130°	160°	160°	130°	130°	160°	160°	165°		
スワスの可変	x	x	x	x	x	○ (自動可)	○ (自動設定のみ)	○ (自動設定のみ)	x	○ (自動可)	○ (自動設定のみ)	○ (自動設定のみ)	○ (自動設定のみ)		
測深設定の自動化	x	x	x	x	△	○	△	△	○	○	△	△	◎		
ソナーヘッド重量 (空中)	18 kg	27 kg	40 kg	40 kg	33 kg	25 kg	16.2 kg ^{*1}	11.0 kg ^{*1}	25 kg	25 kg	16.2 kg ^{*1}	11.0 kg ^{*1}	13.6 kg ^{*1}	10.4 kg ^{*1}	
機装方式	可搬式(舷側)	船底装備	船底装備	船底装備	船底装備	船底装備	船底装備/可搬式(舷側・船首)	船底装備	船底装備	船底装備	船底装備/可搬式(舷側・船首)	船底装備	船底装備	船底装備	
整備状況	平成7(1995)年 ~平成13(2001)年頃	平成10(1998)年 ~平成21(2009)年 (一部)~平成26 (2014)年	平成14(2002)年 ~平成25(2015)年	平成21(2009)年 ~平成26(2014)年	平成22(2010)年 ~平成26(2014)年 (平成28(2016)年~)	平成24(2012)年~ 平成30(2018)年~	管区測量船DH 管区測量船・搭載艇 管区用船	管区測量船DH 管区測量船・搭載艇 管区用船	管区測量船 本庁測量船	管区測量船 本庁測量船	管区測量船DH 管区測量船・搭載艇 管区用船	管区測量船DH 管区測量船・搭載艇 管区用船	管区測量船DH 管区測量船・搭載艇 管区用船	管区測量船DH 管区測量船・搭載艇 管区用船	管区測量船DH 管区測量船・搭載艇 管区用船

*1 送波器、受波器のみの重量
*2 デュアルヘッドの場合も含む

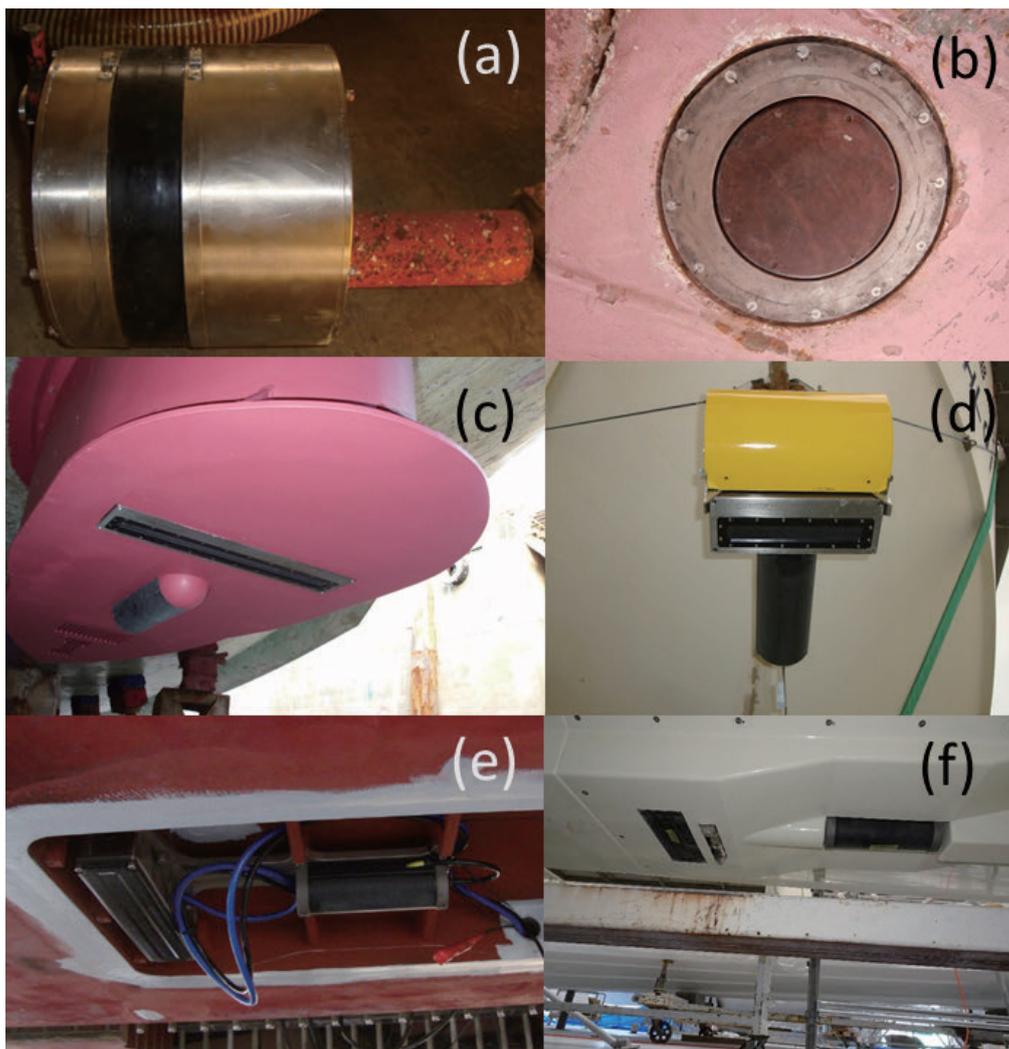


Fig. 1. Sonar head photos of multibeam echosounders in our office: (a) Seabat7101, (b) EM3002, (c) Sonic2024, (d) Sonic2022, (e) Seabat T-50, (f) Seabat T-20.

図1. 当庁で使用してきたマルチビーム測深機のソナーヘッド写真：(a) Seabat7101, (b) EM3002, (c) Sonic2024, (d) Sonic2022, (e) Seabat T-50, (f) Seabat T-20.

度と Seabat9001S と同様のため、ソナーのサイズ・重量は大きくなっている。Seabat8101 は管区測量船の船底に装備されていたため、測深作業前の艀装が不要となり、迅速な測深作業が可能となった（戸澤・他，2000）。

2.1.3 Seabat8125

Seabat8101 の他に海洋情報部に導入された浅海用マルチビーム測深機としては、米国 RESON 社製 Seabat8125 があった。Seabat8125 の発信周波数は、Seabat9001S と同じ 455 kHz で浅海域に適した高周波数を使用していた。更に、最大スワ

スも 120 度、受波ビーム幅 0.5 度×送波ビーム幅 1.0 度と Seabat9001S 以上に高性能であった。ただし、ソナーのサイズ・重量は Seabat9001S と比べてかなり大きくなっている。Seabat8125 は、主に本庁測量船の搭載艇等で可搬式のマルチビーム測深機として使用されていた。

2.1.4 Seabat7101 と EM3002

Seabat8101 の次世代の浅海用マルチビーム測深機として管区測量船に船底装備されたのが、米国 RESON 社製 Seabat7101（森・他，2010）とノルウェー Kongsberg Maritime 社製 EM3002 で

あった。

Seabat7101 は、Seabat8101 と同型の送受波器をベースに改良が施された測深機であり、発信周波数も Seabat8101 と同じ 240 kHz であった。主な特徴は、測深点数が最大 512 点まで設定可能となったため、安全な船舶交通に重要な海底特異物（沈船や漁礁等）をより確実に検出可能となった（森・他、2010）。また、有効スワ幅の範囲内においては、データ不良やノイズも少ない良好なデータ取得が可能となっていた。

EM3002 は、発信周波数は 300 kHz で、Seabat8101 と比べてより浅海域（水深 200 m 以浅）を意識した測深機であり、ソナーのサイズ・重量も、よりコンパクトになっている。Seabat7101 同様にスワ幅あたりの測深点数が増加したことに加えて、EM3002 では、レンジ、パワー、パルス長、ゲイン等の観測時の機器設定の自動化が進んだ浅海用のマルチビーム測深機であった。浅海域特有の起伏の激しい海底地形においては、自動設定モードのみでは海底地形が観測レンジから外れて暫く戻らない場合がある等の課題はあるものの、揺れた船内での測深機オペレータの支援としては十分に有効であった。

EM3002 は、送波器だけではなく、受波器においても直線アレイ（音響素子を直線に並べたアレイ）を採用している。これは、受波器において円弧アレイを採用してきた Seabat7101, Seabat8101, Seabat9001S とは異なる。直線アレイを採用した場合、受波ビームの形成にビームステアリング技術を用いる必要があるため、スワ幅外側付近の受波ビーム幅の悪化（水深データの劣化）が懸念される。ただし、有効スワ幅は水深の 2-4 倍程度であることを考えると、スワ幅外側付近の受波ビーム幅は直下ビーム幅の 1.4-2.2 倍程度の悪化に留まる。更に、位相検出による受波ビーム内の高解像技術を用いることで、水深データの劣化が軽減されることが分かってきた。以上のような理由から、現在では、受波器においても、特殊な形状で製造の難しい円弧アレイに代わって、よりシンプルな形状で低コストの直線ア

レイが主流となっている。

2.1.5 Sonic2024/2022 と Seabat T50/20

Seabat7101 と EM3002 の次世代の浅海用マルチビーム測深機として、管区測量船の船底装備等で現在も使用されているのが、米国 R2Sonic 社製 Sonic2024/2022（吉澤・他、2018）と米国 RESON 社製 Seabat T50/20（吉澤・他、2019）である。

Sonic2024/2022 と Seabat T50/20 の最大の特徴は、発信周波数が 200-400 kHz の範囲で可変となった点である。この機能により、測深機オペレータが測量海域の水深レンジに応じて発信周波数を適切に選択可能になることで、「できる限り詳しく測深したい」「できる限り深い海域まで測深したい」という両立が困難な 2 つの異なるニーズを、1 台のマルチビーム測深機で満足させることができる。例えば、浅海域の中でも、安全な船舶交通のためにシビアな調査が必要なより浅い海域（水深 40 m 以浅）では、より高分解能な水深データが取得可能な 400 kHz 帯、400 kHz 帯では測深不可能なより深い海域（水深 50-200 m 程度）では、音波がより遠くまで届く 300 kHz 帯（ただし空間分解能は発信周波数に反比例して悪化する）、更に深い海域（水深 200-400 m 程度）では、音波が更に遠くまで届く 200 kHz 帯を使用する、といった最適な測深機オペレーションが実現可能となる。

Sonic2024/2022 と Seabat T50/20 における次に大きな特徴としては、ビーム幅と測深点数の向上による水深データの高分解能化・高解像度化がある。Sonic2024 や Seabat T50 では、発信周波数 400 kHz を使用した場合で、受波ビーム幅 0.5 度（直下）×送波ビーム幅 1.0 度となり、直下付近で測深すれば、Seabat7101 や EM3002 と比較して 1.5-3.0 倍の高い空間分解能の水深データが得られるようになった。更に、測深点数も最大で 1024 点と増加しており、常に高い空間解像度の水深データが得られるようになった。このように、Sonic2024 や Seabat T50 では、海底特異物の

詳細な形状把握能力が向上することによって、海底特異物をより容易に発見して最浅部の水深をより確実に捉えることが可能になっている。

Sonic2024/2022 と Seabat T50/20 では、これまで以上に、データ不良やノイズの少ない良好なデータが取得可能になっている。このことは、マルチビーム測深機の音響性能や海底検出能力の向上による効果が大きいものの、有効スワス幅の範囲外のデータを排除してスワスを絞ることができるスワス可変機能も良好なデータ取得に貢献している。また、船体動揺によるスワスを安定化させる Roll 安定化機能は、面的な測深作業に有効な機能である。

Sonic2024/2022 と Seabat T50/20 では、マルチビーム測深機のソナーの小型化も進んでいる。特に、Sonic2022 と Seabat T20 はサイズ・重量ともにコンパクトになっており、測量船での船底装備のみならず、用船や搭載艇における可搬式での運用も実現している。これにより、今までシングルビーム測深機を使用していた測量船配備のない管区においても、用船による可搬式のマルチビーム測深機を使用可能になったことにより、全管区及び本庁測量船において浅海用マルチビーム測深機による水路測量が実施可能となった。

2.1.6 マルチビーム測深機のデュアルヘッド化

管区測量船に船艇装備されている Sonic2024 と Seabat T50 は、左右2つのマルチビーム測深機をV字に装備したデュアルヘッド型を採用している(吉澤・他, 2018; 吉澤・他, 2019)。V字に装備されている目的は、直線アレイの欠点であるスワス外側付近の受波ビーム幅の悪化を軽減することであり、左右の受波器を外側に傾けて取り付けることによりビームステアリング角度を抑制して、スワス外側でも高品質のビームを形成することができる。このため、特に水深の浅い海域では、スワス外側においても海底特異物を確実に捉えることが可能になった。また、直下付近では、左右の測深機のスワスが重複するため、海底特異物の最浅部を確実に捉えることができる。更に、スワス

をあえて大きく広げることにより、次の測線もしくは更に先の測線の海底地形の浅所の有無を事前に窺うことができるため、例えば岩場やサンゴ礁のような海底の起伏が急峻な極浅海域であっても、安全な測深作業が実現可能となっている。

2.2 測位・動揺検出システムの進歩

マルチビーム測深データの品質の向上は、測深機の進歩だけではなく、測位・動揺検出システムにおける進歩によるところも非常に大きい。

Seabat9001 と Seabat8101 の導入当時に当庁で使用されていた測位・動揺システムは、船の緯度・経度をメートル級の精度で測位するディファレンシャル GPS、船首方位を計測する GPS ジャイロ、船の傾き(ロール・ピッチ)と船の上下動(ヒープ)を計測する慣性動揺センサーの3種類のセンサーから構成されていた。このうち、特にヒープをはじめとする動揺データの計測精度の不安定性から、当時のマルチビーム測深機による取得データには Wobble と言われる系統的な誤差パターンが少なからず見られていた(森・他, 2000)。

その後、Seabat7101 や EM3002 導入以降からマルチビーム測深システムの一部として当庁で導入されているのが、カナダ Applanix 社製 POS/MV シリーズとノルウェー Kongsberg SEATEX 社製 Seapath シリーズの測位・動揺検出システムである。これらの測位・動揺検出システムでは、2つの GNSS アンテナと慣性動揺センサーの各計測データをカルマンフィルタでリアルタイム統合処理することにより、従来のシステムに比べて測位・動揺データの計測精度が安定するようになっている。このようにマルチビーム測深機の水深精度に見合う水準の測位・動揺データが得られるようになったことで、マルチビーム測深データの測深精度・再現性は飛躍的に向上した。その結果、異なる測線のマルチビーム測深データ(海底地形)の重なりが良くなり、海底特異物・測深ノイズの区別を容易かつ確実に判断できるようになった。現在、当庁の浅海用マルチビーム測深機の大

多数に使用されている POS/MV では、測位・動揺データの起因するマルチビーム測深データの問題は、GNSS 受信状況が良好ではない等の特殊な場合を除き、ほぼ見られなくなった。

近年では、後処理基線解析による測位・動揺データの更なる高精度化も進んでいる。当庁では、POS/MV による測位・動揺データの後処理ソフトウェア、カナダ Applanix 社製 POSpac MMS を導入している。POSPac MMS による後処理では、POS/MV で収録した各センサーの生データに対して、電子基準点データ等を用いた基線解析と Backward（時間軸の後方）処理も併用した高度な統合処理を適用することで、船の測位精度を、従来のメートル級から、水平で 1-3 cm 程度、鉛直で 2-5 cm 程度まで向上させることが可能である（住吉・他、2019）。このような後処理による高精度測位・動揺データをマルチビーム測深データに適用することにより、マルチビーム測深データの測深精度・再現性が更に向上し、海底特異物の微細な形状まで鮮明に捉えて最浅部を確実に把握できるようになった。

2.3 最新のマルチビーム測深システムの実力

2.1-2.2 節で述べたように、近年のマルチビーム測深システムの技術の進歩によって、浅海域においても十分に高精度な水深データを面的に取得できるようになり、新たな測深機の登場する度に取得される水深データは、より高分解能かつ高解像度なものになってきている。最新のマルチビーム測深機の一つである Seabat T50（デュアルヘッド型）では、沈船漁礁の重なっている形状まで鮮明に確認することができる（Fig. 2）。

3 現状のマルチビーム測深作業とデータ処理

マルチビーム測深機は、旧来のシングルビーム測深機では到底達成できない面的かつ詳細な水深データを取得できる非常に強力な測深システムである。そのうえ、測深作業においても、未測が生じる欠点を技術者の力量で補っていたシングルビーム測深とは異なり、マルチビーム測深ではス

ワスのオーバーラップを適切に考慮すれば、可視化されたフルカバーの調査が比較的容易に実現可能になった。一方で、マルチビーム測深機は、機器構成のシンプルなシングルビーム測深機とは異なり構成品の多い複雑なシステム（参考例：Fig. 3）であるため、実際にマルチビーム測深機で高品質な水深データを取得するには、現場で調査する水路測量技術者がシステムを理解して正しく使いこなす能力と機器トラブルにおいても臨機応変に対応する能力が必要となっている。

3.1 マルチビーム測深機の正しい取扱方法

マルチビーム測深機を正しく使いこなすためには、調査海域の測深作業前の事前準備が肝要であり、(1) 各センサーの接続・通信設定の確認、(2) 各センサーの取付状況の事前入力、(3) 測深システム全体の最終動作確認の 3 点が、特に重要である。

(1) の目的は、各センサーの物理的な接続と LAN・シリアル通信の不具合を確実に防ぐことで、複雑なシステムを取扱う上では大事なポイントである。

(2) は、具体的には、測深ソナーの喫水に加えて、海底地形を捉える測深ソナー、自船の地理座標・ヘディングを捉える GNSS アンテナ、自船の動揺（傾き・ヒープ）等を捉える慣性ジャイロ（IMU：Inertial Motion Unit）等に対して、各センサーの船体座標系に対する取付位置・取付角度を事前にシステムへ入力することである。これらの入力パラメータを求めるためには、各センサーのオフセット計測による直接的な測定、測深ソナーのパッチテスト、POS/MV の GAMS キャリブレーション等のような間接的な入力パラメータの決定を、事前に実施しておく必要がある。

(1) (2) の確認を実施したうえで、(3) の最終的な動作確認において、測深システム全体のエラー等が生じていないことや測深機が出力する水深値に異常がないこと（紙海図・ENC 等の既知の参照水深と概ね一致していること等）を確認することにより、ようやく本番の測深作業に臨むこ

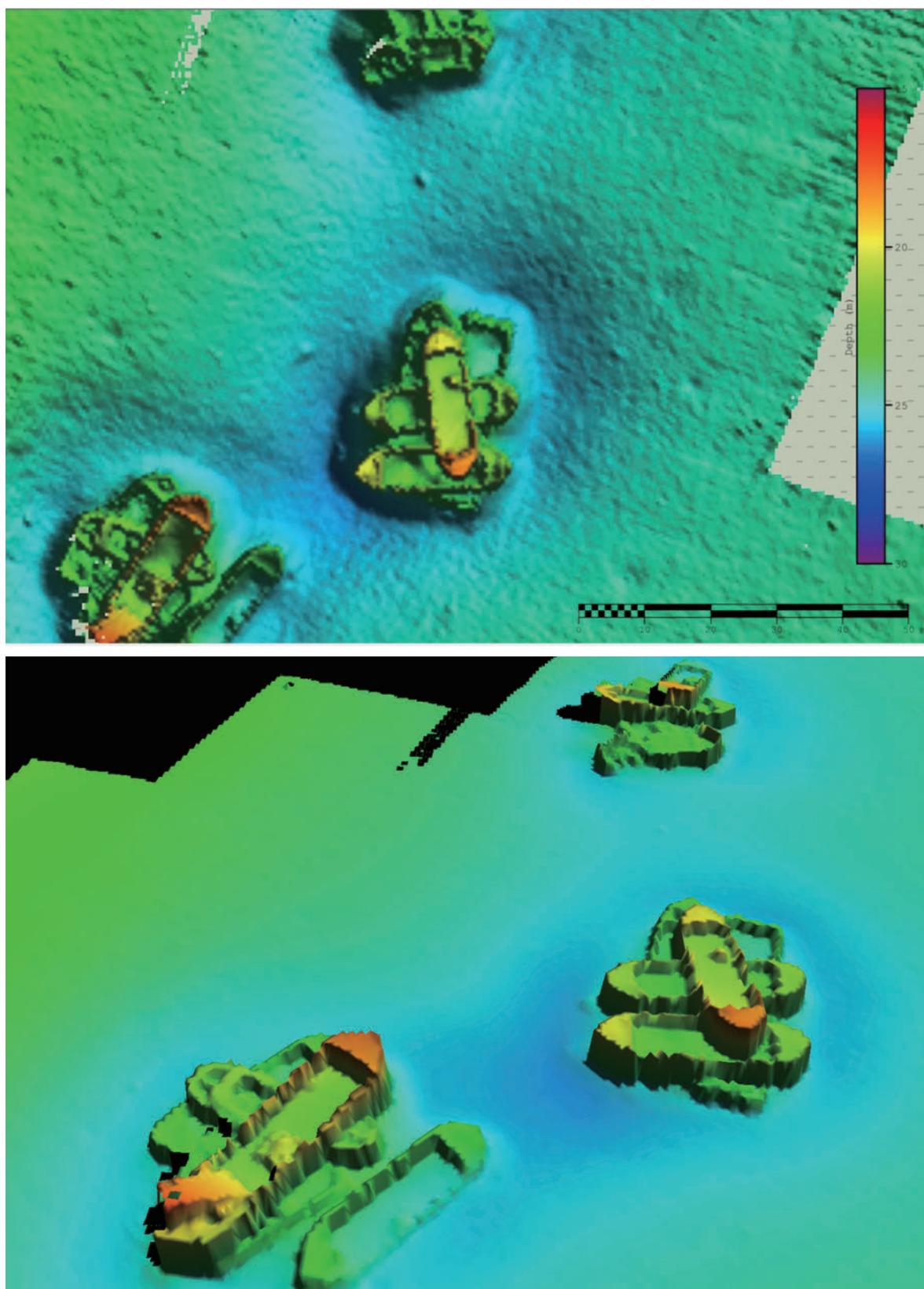


Fig. 2. High-resolution multibeam bathymetric data (50 cm grided) of shipwreck fishing reefs using Seabat T-50 (dual head). Shaded bathymetric map with vertical exaggeration 10 (top) and 3D bathymetric map without vertical exaggeration (bottom).

図2. Seabat T-50 (DH型) マルチビーム測深機による沈船漁礁の高解像度水深データ (50 cm グリッド). 海底地形陰影図 (高さ強調 10; 上部) と 3次元海底地形図 (高さ強調なし; 下部)

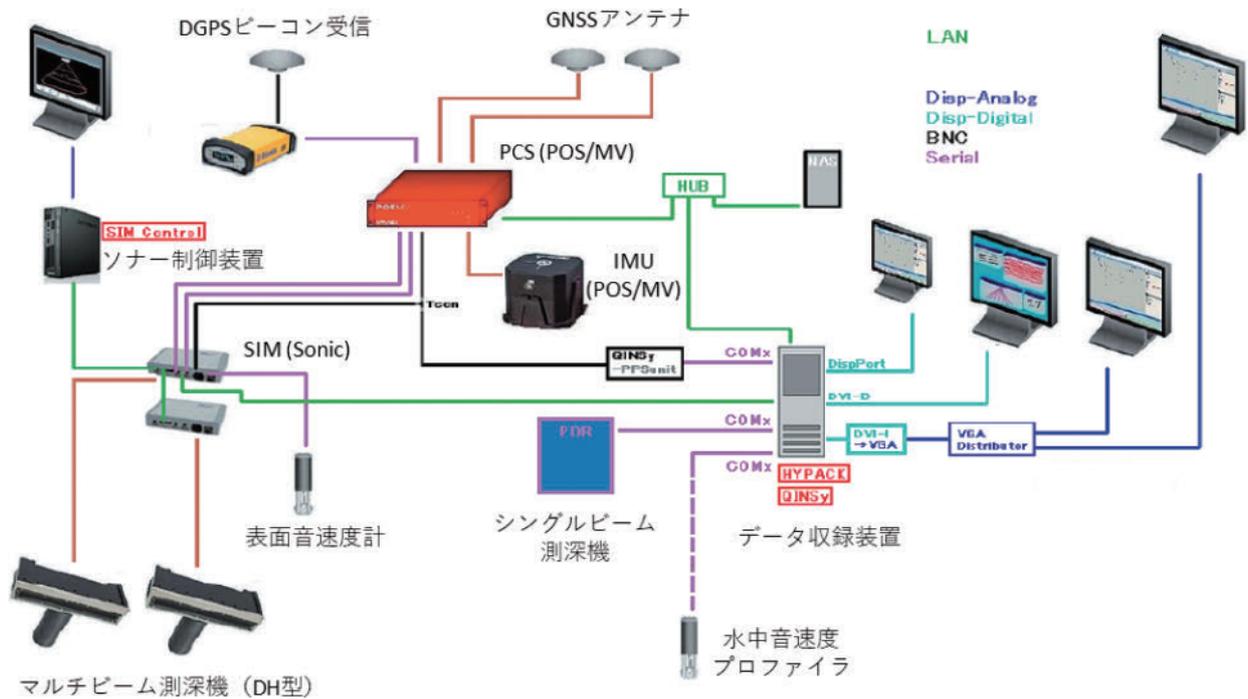


Fig. 3. Connection diagram of Sonic2024 (dual head) multibeam echosounder, modified after the Fig. 1 of Yoshizawa et al. (2018).

図3. Sonic2024 (DH型) マルチビーム測深機の系統図 (吉澤・他, 2018の Fig.1を編集).

とができる。

しかしながら、どんなに適切な準備をしていたとしても、マルチビーム測深では、システムが複雑であるが故の機器トラブルに直面する場合がある。例えば、各センサー自体の不調やセンサー間の接触不良・通信エラー等による深刻なエラーメッセージが生じた場合、調査を一時中断して、問題解決に向けて臨機応変に対応する必要がある。機器トラブルの発生時に、短時間でトラブルシュートを終えて調査に復帰できるかどうかは、水路測量技術者の技術レベルにかかっている。このため、現代の水路測量技術者は、マルチビーム測深の現場経験（特に、問題解決のために試行錯誤した経験）に加えて、複雑なシステム全体の深い知識が求められる。

3.2 現地での測深作業と一次処理

現地での測深作業においては、ノイズの少ない良好なデータを取得するため、レンジ・パワー・パルス長・ゲイン等のマルチビーム測深機の設定を適切に調節することに注意を払い、可能な限り

蛇行せず一定の速度で、計画測線上を航走することが求められる。測深作業中、大規模なデータ不良箇所・未測域が生じた場合、安全性や作業効率等を適切に考慮して速やかに補再測を実施する。

測量期間中は、測深作業を終えると、マルチビーム測深データの一次処理作業を毎日欠かさずに行う必要がある。一次処理作業の目的は、翌日の調査開始までに補再測すべき箇所を特定することであり、具体的には、水中音速度の観測値が補正值として適切に機能しているか、海底特異物の最浅部や海底地形の顕著な高まりを確実に捉えているか、データ不良箇所・未測域が無いかな等を確認している。一次処理は、以下の工程からなる。

- (1) 測深データ (RAW) の読み込み
- (2) 潮位補正 (推算値) の適用
- (3) 水中音速度補正の適用
- (4) 測深データと測位・動揺データ等との統合 (各センサーの取付状況を加味)
- (5) 水深データの仮ノイズ処理: データ不良・ノイズ箇所や海底特異物を把握するため、不要な水深点群データを簡易的に除去

(6) 補再測のための測線の検討

このような補再測の検討作業によって特定された箇所は、翌日以降に速やかに補再測を実施して、安全な船舶交通にとって重要な箇所の測量漏れが生じないように細心の注意を払うことが重要である。

補再測の検討及び実施の難易度は、海底地形や測深データの品質に大きく依存する。平坦な海底では、補再測すべき箇所の特定制も容易であるが、起伏の激しい海底や海底特異物・ノイズが多数存在する海域では、補再測すべき箇所の数も多く特定制も困難である。補再測の検討を少しでも容易にするためには、ノイズの少ない良好な測深データの取得を心がけることが大事である。

3.3 二次処理と測量成果作成

調査終了後に事務所で行う測深データの二次処理は、以下の工程からなる。

- (1) 測深データ (RAW) の読み込み
- (2) 測位・動揺データの読み込み (TrueHeave 読み込み, POSPac 処理を行った場合のみ)
- (3) 潮位補正 (実測値) の適用
- (4) 水中音速度補正の適用
- (5) 測深データと測位・動揺データ等との統合 (各センサーの取付状況を加味)
- (6) 水深データのノイズ処理: 成果作成のため、水深点群データからデータ不良・ノイズを目視で判断して、不要な水深点群データを厳密に除去
- (7) 最終的な水深データ (経緯度水深ファイル: LMD ファイル) の作成

二次処理の作業内容は、現地で行う一次処理の作業内容に見えるが、二次処理の目的は成果の作成であるため、一次処理とは違ったより高い正確性が求められる。このため、各工程において十分な点検が必要となるため、二次処理では通常でも測深時間に対して数倍もの時間がかかっている。

この二次処理の作業時間の大半を占めているのがノイズ処理である。ノイズ処理は、水深点群データを目視点検してデータ不良・ノイズを削除

して、正しい水深データを得る作業工程である (Fig. 4 参照)。ノイズ処理のスピードと品質は、水路測量技術者の勘・経験・度胸 (KKD) に大きく依存するため、未熟な技術者の場合は通常より多くの作業時間がかかってしまう。現代の浅海マルチビーム測深機は膨大な水深点群データを取得可能なため、このノイズ処理工程における改善が、今後の重要な課題となっている。

二次処理中、スマイルカーブに代表される水深データの不具合が見つかったら、フィルターによるスワス端付近の低品質データの削除や水中音速度の検証・修正等が必要になり、二次処理にかかる時間が通常より更に増大してしまう。水深データに関する深刻な問題が解決できない最悪の場合には、現地での再測量も避けられなくなるため、現地での一次処理・補再測をしっかりと行うことが非常に重要である。

このような二次処理を経て、汎用性の高い全測深点である経緯度水深ファイル (LMD ファイル) が作成される。この LMD ファイルをもとに海図に特化した地物ファイル等を作成して、最終的な水路測量成果・資料を提出する。提出された水路測量成果は審査の工程を経て正式なものとなり、安全な船舶交通のための紙海図・ENC の最新維持をはじめとして、多様な目的の製品サービスに利用されている。

4 浅海用マルチビーム測深データの利用事例

マルチビーム測深機によって隙間なく面的に捉えた浅海域の詳細な水深データは、安全な船舶交通を担う海図の最新維持に利用されるのはもちろんのこと、震災後の航路啓開・水路測量 (災害対応水路測量班, 2012a, 2012b) といった特殊な状況や様々な用途の科学的基盤データ (例えば、高精度の津波シミュレーションでは詳細な海底地形が重要; 土屋・他, 2016) において、有効利用されている。本章では、マルチビーム測深データの利用事例について紹介する。

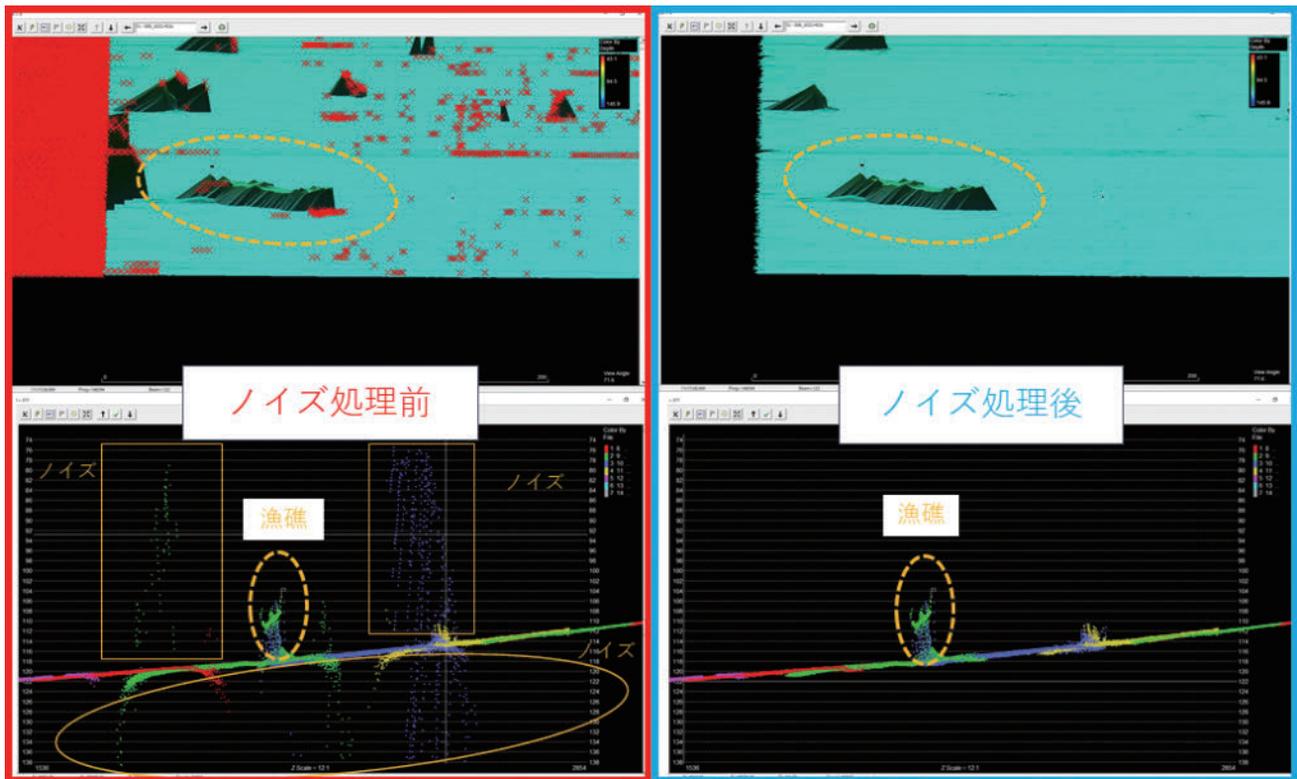


Fig. 4. Multibeam bathymetric data before (left) and after (right) manual noise editing.
 図4. 手動ノイズ処理の前（左）と後（右）のマルチビーム測深データ。

4.1 海図と CATZOC

海図は、安全な船舶交通という特定の目的のための主題図で、ユーザーにとって必要な情報のみが簡潔に表現されている。また、海図は、船舶に備え置くことが法的に義務付けられており、海図に記載されている情報は、常に最新維持しておく必要がある。このため、海図記載情報の主要な根拠となる水深データについては、船舶交通に重要な Special Order, Order 1a 海域においては特に、測深精度・隙間のない面的測深・海底特異物の検出能力等の高い品質が国際的に求められている (International Hydrographic Organization, 2008)。このような品質要求を十分に満たすために、浅海用マルチビーム測深が推奨されているため、現在では、当庁が直営で実施する水路測量の大多数においては、マルチビーム測深を採用している。

マルチビーム測深による良好な水深データが海図に反映されることにより、海図の信頼性が向上する。このような海図の品質向上を可視化する機能として、電子海図では、海図の基となった水深

データの精度情報 (CATZOC) を表示可能である。マルチビーム測深機で隙間無く面的に測深された海域には、6段階中の最高ランクを示す「A1」が付与される (Fig. 5)。このようにマルチビーム測深データの海図反映のみならず、マルチビーム測深が実施されたという事実自体が CATZOC を通して電子海図ユーザーに直接伝わる仕組みになっている。

4.2 震災後の航路啓開作業・水路測量

平成 23 (2011) 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震と津波によって、多くの国際拠点港、重要港湾等が被災した。一刻も早い岸壁の共用再開のため、当庁、地方整備局、港湾管理者である自治体等と共に、航路啓開作業を実施した。当庁では、被災港のうち 11 港に対して緊急の航路障害物調査を、主にサイドスキャンソナーとシングルビーム測深機で実施した (災害対応水路測量班, 2012a)。また、同年 4 月下旬からは、震災後の港湾の状況を反映した海図を速やかに刊行す

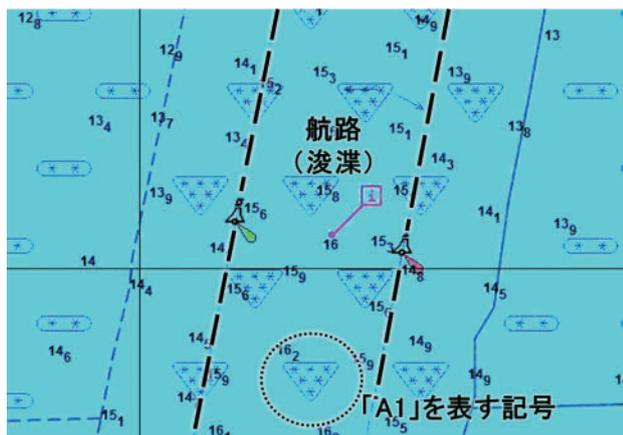


Fig. 5. ENC displaying accuracy information of bathymetric data (CATZOC: Category Zones of Confidence), modified after the Fig. 4 of Yasuhara (2020). The highest rank “A1” is displayed around the navigation route where the multibeam hydrographic survey was performed.

図5. 水深データの精度情報 (CATZOC) を表示した電子海図 (安原, 2020 の図4を編集). マルチビーム測深が実施された航路付近では, 最高ランクの「A1」が表示されている.

るための水路測量を前述の11港から開始した (災害対応水路測量班, 2012b).

震災後の水路測量・航路障害物調査において取得された浅海用マルチビーム測深データを Fig. 6 に示す. 水路測量の時点では, 航路障害物調査で発見されたクレーン等の大きな海底特異物は概ね撤去されていたものの, 津波被害による乗用車・トラック・小型船・錨等の無数の海底特異物は撤去されていない状況であった. 被災港湾に沈むこれら無数の海底特異物の状況を正確に把握する際に, マルチビーム測深による詳細かつ面的な水深データは大きく貢献した.

一方で, 無数の海底特異物がある海域においては, 浅海用マルチビーム測深データの資料整理に, 通常にも増して膨大な時間と労力を要するという大きな問題も出てきた. これは浅海用マルチビーム測深の膨大な測深点から, 水路測量技術者が目視で海底特異物とノイズを判別しなければ

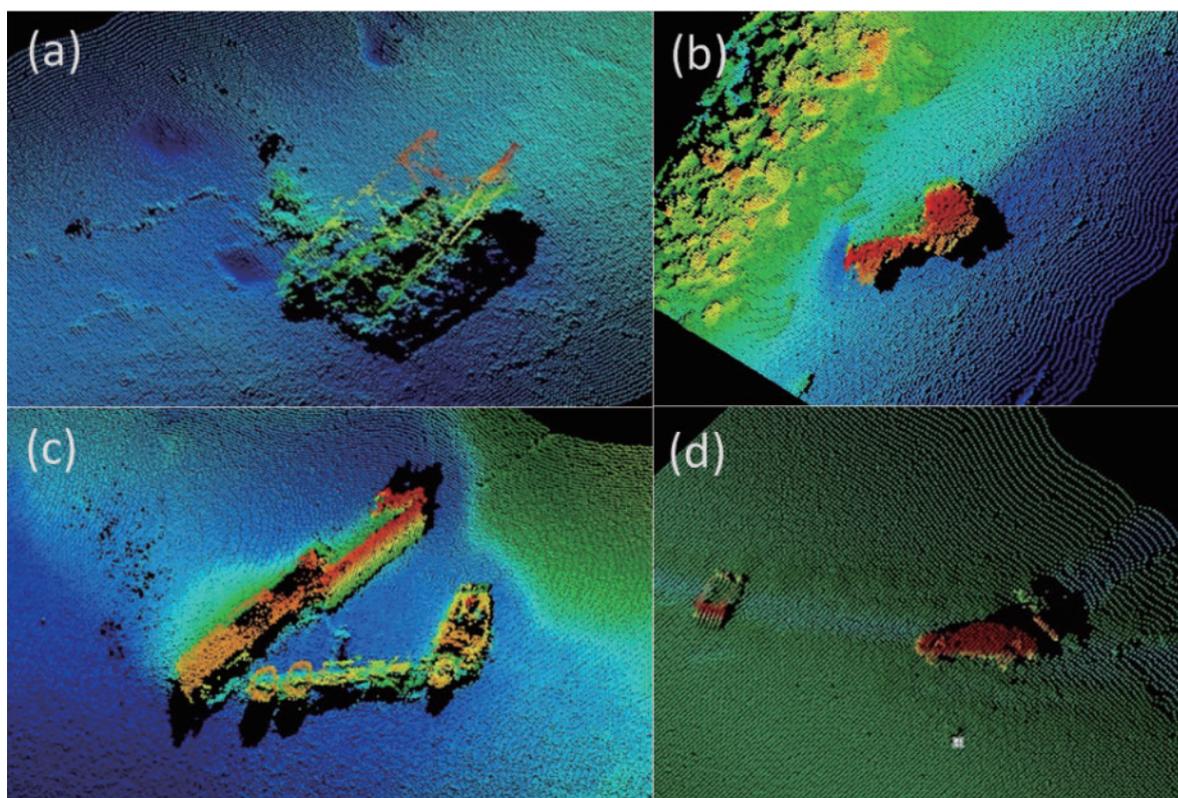


Fig. 6. Seafloor features discovered in multibeam hydrographic bathymetry after the Tohoku earthquake: (a) cranes, (b) trucks, (c) dump trucks, (d) ordinary passenger cars.

図6. 東日本大震災後のマルチビーム水深測量において発見された海底特異物: (a) クレーン, (b) トラック, (c) ダンプカー, (d) 普通乗用車.

ならない従来の資料整理の構造的な限界であると考えられる。今後の課題は、浅海用マルチビーム測深作業と資料整理の手法の抜本的な見直しであり、本課題の解決により、海底特異物の正確な状況把握をより迅速に実施できる可能性が広がる。

5 デジタル測量成果への移行：測量原図から成果データへ

水路測量成果は海図の最新維持のための基本となるものであり、技術の進歩とともに、アナログ図面（測量原図）からデジタル図面（電子測量原図）を経て、デジタルデータ（デジタル測量成果）へと変遷してきた。

5.1 測量原図

測量原図は、レッド（測鉛）やシングルビーム測深機のアナログ記録から得られた水深をはじめとして水路測量で取得した様々な測量記録を、厚紙やプラスチックシート上に取りまとめた最終

的な測量成果である（Fig. 7）。水深は、その付近を代表する浅い水深を優先しつつ海底地形を表現できるようにアナログ測深記録（紙）から抽出し、図上10mm（縮尺1万分の1で100メートル）を標準間隔として手動にて選択される。その他、等深線、海岸線の形状・種別、底質、沈船、漁網、港湾施設、航海目標等の各測量結果が、丸ペンやインク等を使用した手作業により、測量原図図式及び測量原図例の規定に従った線種や色別で描画されている。

コンピュータが普及する以前の水路測量におけるデータ記録は紙媒体が基本である。測量班員がそれぞれの役割に応じて記録する帳簿類が多く、それらの資料から測量結果を取りまとめる工程は、多岐にわたっていた。電卓などを駆使して測量計算を行い、丸ペンを使用して全ての情報を忠実に描画するなど、測量原図の完成までには長い時間を要していた。水路測量の内容を示す諸資料は綿密、かつ丁寧に綴られており、その集大成と

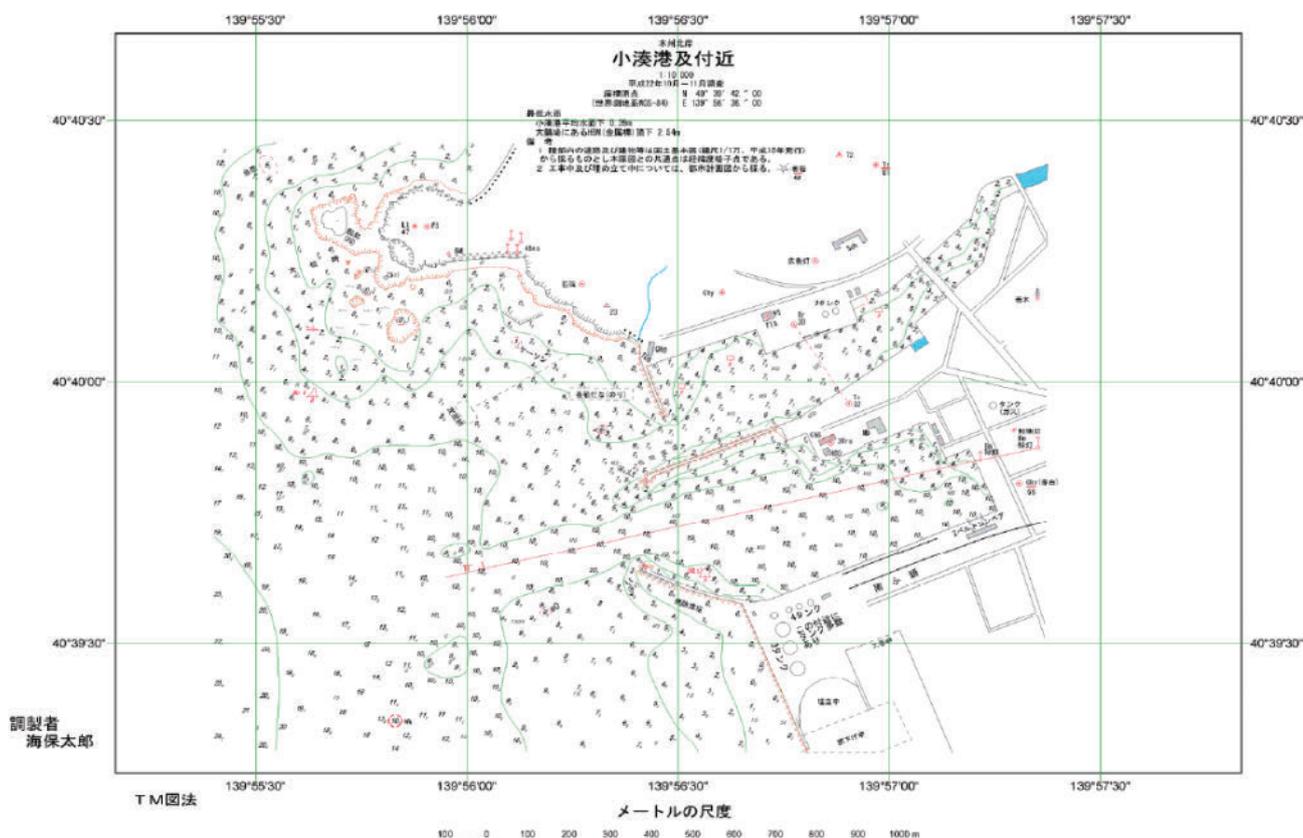


Fig. 7. An example of smooth sheet in hydrographic survey.

図7. 水路測量における測量原図の例。

なる測量原図は、データというよりは、データを利用して作成された一種の完成作品の性格を帯びている。

海図作成のための測量成果をとりまとめた測量原図は、少なくとも昭和 30 年代から平成の一桁時代まで長きに渡って作成されてきたことから、今でも当庁が保有する水路測量成果の大半を占めている。

5.2 電子測量原図

近年、シングルビーム測深機のデジタル化やマルチビーム測深機の普及により水深測量データの自動収録が主流となった。また、GPS 受信機の普及による原点測量、海上位置測量のデジタル化、当庁及び他機関所管の験潮所のテレメータ化により、水路測量全般においてデータのデジタル化が急加速で進展した。これらのデジタルデータを測量原図、海図編集に活用するために、当庁では平成 10 年頃から地理情報ソフトウェア（米国 MicroImages 社製 TNTmips）を使用し、測量成果として測量原図をデジタル化した電子測量原図を導入した（松本・戸澤，2004）。

デジタル収録された水深データについては、水深自動収録処理ソフトウェア（米国 HYPACK 社製 HYPACK）により図上 10 mm 程度の自動水深選択を行い、更に周囲の浅水深を詳細に確認しながら、利用者が分かりやすいよう微修正を行った。等深線は HYPACK と TNTmips により作成されたオートコンターを下敷きに、全て手動で作成した。その他、海岸線等の地物についてはディスプレイ上で線の色や種類で付与されている属性情報の表現を行い、情報を容易に可視化できるようになった。

電子測量原図では水深、底質、海岸線等の位置を点、線及び面のデジタルデータとして取り込み、地物に応じた属性情報を付与させたものを図示したレイアウトがデータファイルとして保存されており、デジタル化と言いつつもアナログ図面的な要素も色濃く残っていた。属性情報の付与基準は国際水路機関 IHO が定める国際規格 S-57 に

基づいていた。電子測量原図のレイアウトは、印刷媒体としてプラスチックシートに出力させ、測量原図と同様に保管している。

電子測量原図はソフトウェアによってデータソース、情報等の編集が行われることから、職人的な個人の技量にとらわれることなく規格化されたデジタル図面が作成されることになり、当庁においては丸ペンを使用する時代が終えることになった。また、外部機関から提出された測量原図についても、直営作業にて電子測量原図を作成していた。

5.3 デジタル測量成果

平成 18 年頃から当庁における浅海マルチビーム測深機の普及等により、品質の高い大容量の水深データが取得されるようになった。このような状況下で、水路測量成果を海図のみならず多様な目的への活用を図るため、平成 26 年 4 月に、水路測量の最終成果の主体が図面（印刷物）から脱却し、以下のように水深データ等のデジタルデータ群をデジタル測量成果として定めた（Fig. 8）。

- (1) 経緯度水深ファイル（テキスト形式）：水路測量で得られた水深データの全点群ファイル（LMD ファイル）。
- (2) 地物ファイル（シェープ形式）：海岸線の形状・種別、底質、沈船、漁網、港湾施設、航海目標等の各種地物のデータファイ



Fig. 8. Components of digital hydrographic survey results.

図 8. 水路測量におけるデジタル測量成果の構成要素。

ル。国際水路機関の基準に準拠して規定されており、詳細は水路測量業務準則施行細則（海上保安庁，2020）に記載されている。

等深線は HYPACK 等のソフトウェアにより自動で作成されたオートコンターを採用し、地物ファイルの作成は、当庁では米国 ESRI 社製 ArcGIS を使用している。デジタル測量成果への移行は従来の印刷媒体から脱却することから、当庁にとって大きな改革であった。

デジタル測量成果への移行にあたっては、平成 25 年 7 月から地物データファイル作成のためのソフトウェア（ArcGIS）の習熟、課題の抽出を目的とし、図面ベースの水深原稿図も測量成果とする試行期間を設定することで、業務に支障を及ぼさないよう関係課で念入りに準備をすすめるとともに、国土交通省港湾局等の関係機関に対しても規則改正に関する事前の周知を図った。

デジタル測量成果は図面ではないので、水深データである LMD ファイル自体を一見しても、測量結果が見えず理解することができないという問題があった。現在、水深データの可視化技術が進歩しており、LMD ファイルから高密度水深グリッドとそれに基づく海底地形イメージを比較的容易に作成できるようになってきたため、本問題は徐々に克服されつつある。逆に、詳細な水深データを元に可視化するとデータの段差や陰悪物等の有無が一目瞭然であるため、データ不良・ノイズの確認が容易になるなど水路測量データの品質管理の向上につながっている。

6 マルチビーム測深技術の民間普及と ICT 浚渫工

近年、国土交通省が取組む i-Construction の一環として港湾局が進めている「港湾工事における ICT 活用」の取組みとして、港湾工事にともない民間の受注業者が実施する水路測量において、マルチビーム測深が着実に普及しつつある。

平成 27（2015）年度には、全管区及び本庁測量船において浅海用マルチビーム測深機が導入さ

れていたため、水路測量のうち当庁の直営作業のほぼ全てが、マルチビーム測深へと既に移行していた（Fig. 9（a））。一方で、直営以外の水路測量では、シングルビーム測深が主流で、マルチビーム測深は僅か 10% 程度であった（Fig. 9（b））。しかし、平成 29（2017）年度、港湾局の直轄工事を対象にした「ICT 浚渫工」が開始（国土交通省，2016）されて以降、港湾工事に伴うマルチビーム測深の使用が年々増加している。直近の令和元（2019）年度には、直営以外のシングルビーム測深の件数に並ぶ 50% 程度までに至っている（安原，2020）。

ICT 浚渫工にともなう水路測量によるマルチビーム測深データの一例として、Fig. 10 を示す。マルチビーム測深の詳細かつ面的な水深データにより、浚渫跡のパターンや浚渫船を固定するためと思われる正方形の多数の支柱跡まで明瞭に捉えられている（特に、Fig. 10 の右下部分に分かりやすい）。また、以前に浚渫したと思われる部分が、時間の経過とともに自然と均らされている様子まで捉えられている（Fig. 10 の右上部分）。

最後に、ICT 浚渫工にともなう水路測量について、マルチビーム測深とシングルビーム測深の違いを改めて整理する。マルチビーム測深の最大の特徴は、シングルビーム測深では達成できない圧倒的に詳細な水深データを隙間なしで面的に取得できる点である（Fig. 11 の水深グリッド参照）。加えて、マルチビーム測深では、スワスの 100% 重複を仮定した場合でも、シングルビーム測深による補再測を含めて考えると、調査測線全体が短くなり、そのうえ補再測の検討時間も不要になるため、作業の効率化にもつながる（Fig. 11 の測線参照）。マルチビーム測深機による測深作業は、初期導入時の慣れないうちは、シングルビーム測深と比べて取扱いが複雑で難しいと感じるものの、現場における経験の蓄積・創意工夫や正しい知識の習得等によって、次第に克服されていくものと思われる。今後の課題は、マルチビーム測深データの迅速な現場処理手法の確立であり、本課題の解決により、貴重な浚渫船の待機日数を減ら

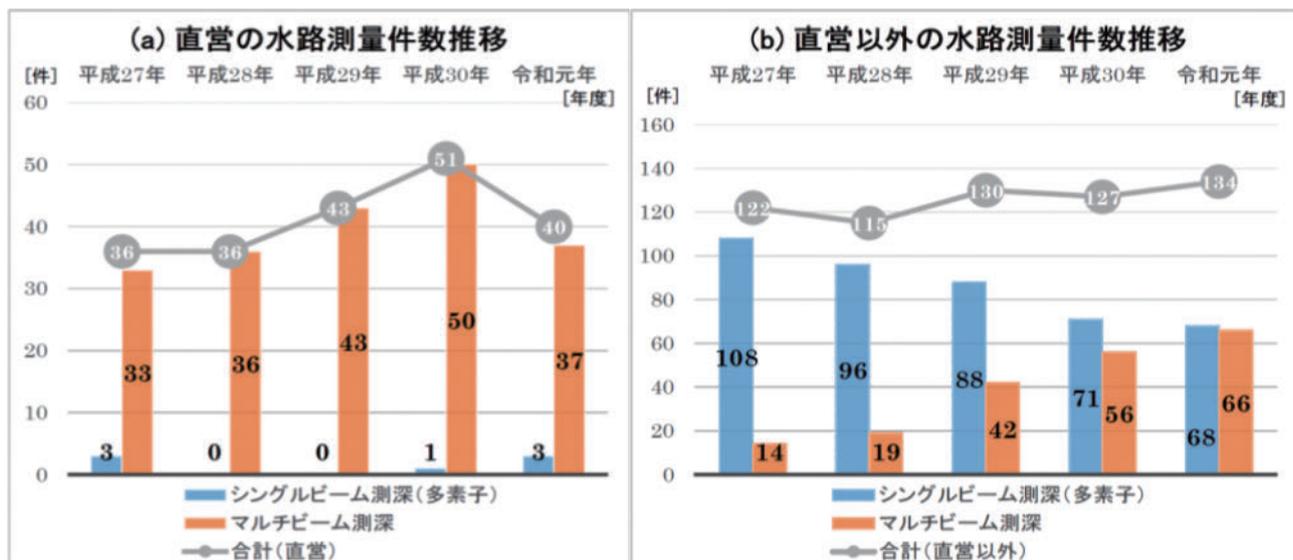


Fig. 9. Changes in the number of multibeam and single beam hydrographic surveys: (a) directly managed by our office, (b) not directly managed. Since the number of days for field survey in directly managed is approximately three times longer than that of not directly managed, the scale on the vertical axis is adjusted accordingly.

図 9. マルチビーム測深とシングルビーム測深を用いた水路測量の件数の推移：(a) 当庁が直営で実施するもの、(b) 直営以外のもの。直営では直営以外に比べて測深作業の日数が3倍ほど多いことから、縦軸のスケールを合わせている。

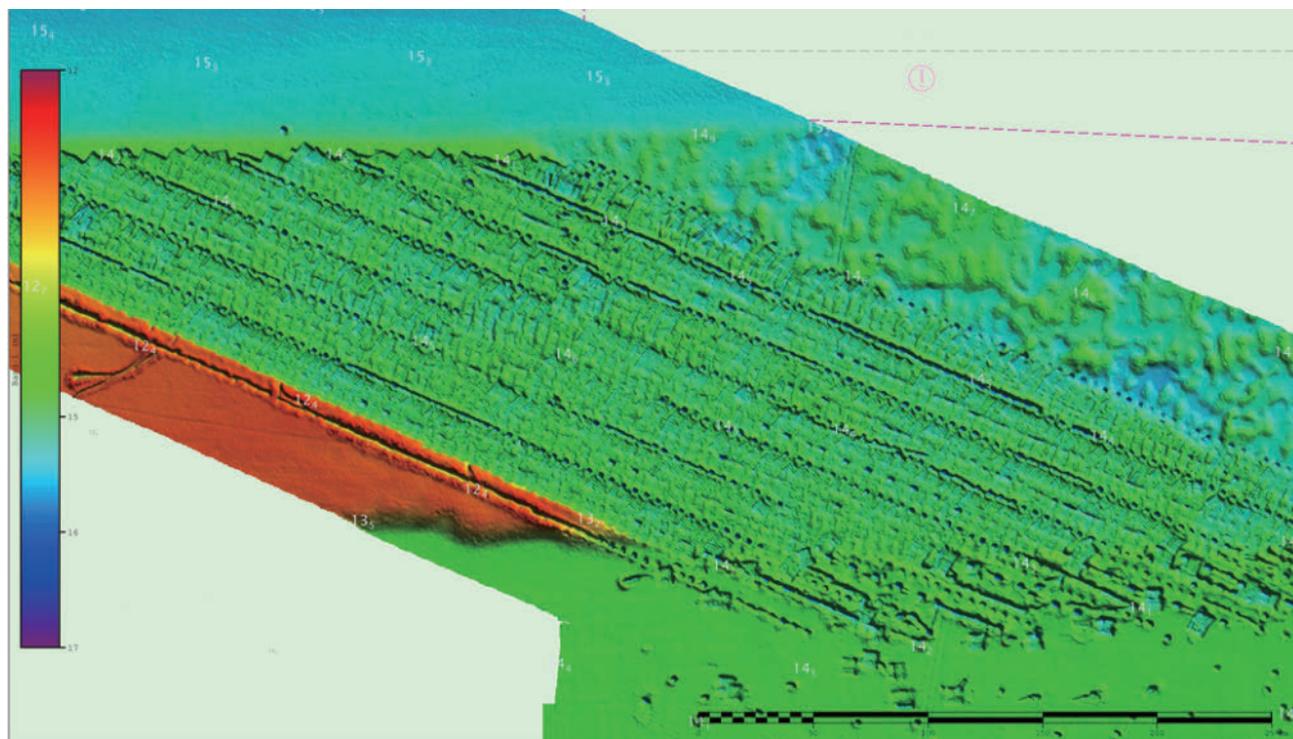


Fig. 10. Multibeam bathymetric data (~ 25 cm grided) by ICT dredging.

図 10. ICT 浚渫工におけるマルチビーム水深データ (~ 25 cm グリッド)。

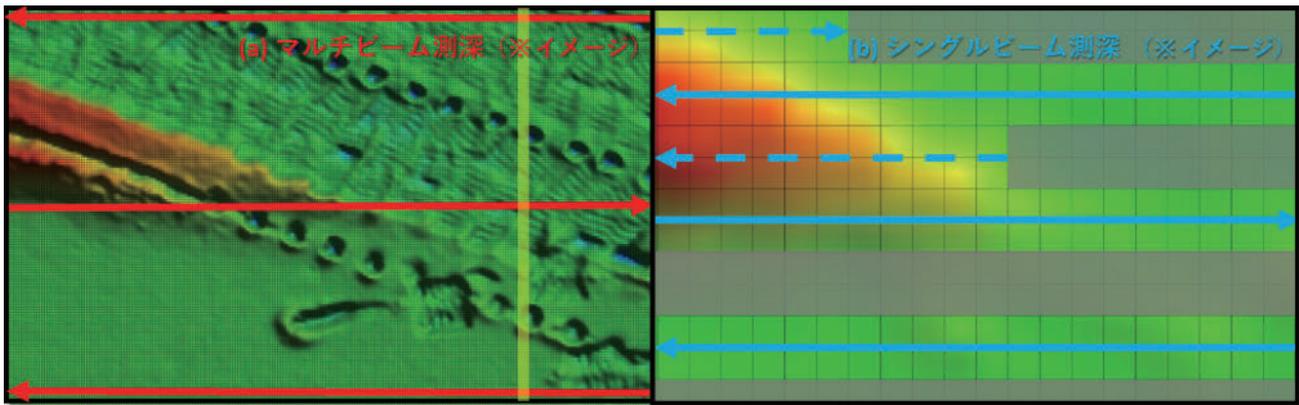


Fig. 11. Differences in bathymetric data resolution and survey lines between (a) multibeam (~ 25 cm grided) and (b) single beam (~ 4 m shallowest grided; artificially created from the multibeam data).

図 11. (a) マルチビーム測深 (~ 25 cm グリッド) と (b) シングルビーム測深 (~ 4 m 最浅グリッド; マルチビーム測深データから疑似的に作成) における水深データ解像度と調査測線の違い。

せる可能性がある。

7 まとめ・今後の展望

近年のマルチビーム測深技術の進歩は目覚ましく、現代の浅海用マルチビーム測深システムを適切に使用すれば、旧来のシングルビーム測深では達成不可能な、詳細な高密度水深データを隙間なく面的に取得できるようになった。また、測位・動揺検出システムの性能向上のため、水深データの再現性も飛躍的に向上した。

水路測量における成果の形式も時代の変化とともに推移しており、マルチビーム測深時代である現在のデジタル測量成果は、汎用性の高い LMD ファイルと海図目的に特化した地物ファイルの 2 種類である。これらのデジタル測量成果は、海図の最新維持に使用されるのみならず、その他の用途でも利用されはじめている。

このような技術的な状況において、当庁が直営で実施する水路測量は、現在、ほぼ全てマルチビーム測深となっている。更に、港湾 ICT の取組みにより、直営以外の水路測量を実施する民間においても、マルチビーム測深の普及が急速に進んでいる。

今後の重要な課題は、資料整理の手法を中心としたマルチビーム測深の抜本的な見直しである。旧来のシングルビーム測深から引継ぐ既存の資料

整理手法から脱却し、マルチビーム測深データの特徴に合った統計的なデータ処理へと大きく転換していく必要がある。現在、当庁にて本格導入を検討中の CUBE 処理について紹介する。

7.1 CUBE 処理について

CUBE 処理とは、CUBE アルゴリズム (Calder and Wells, 1998) によってマルチビーム測深の全点群から統計的に自動で求めた高密度水深グリッド (CUBE 水深) をベースとして、水深測量成果を作成する資料整理の手法であり、米国をはじめとする水路測量分野の先進国では、CUBE 水深は水路測量成果として既に使用されている (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2014, 2018; Canadian Hydrographic Service, 2012)。CUBE 処理に関する技術の詳細については、住吉・他 (2020) をご覧いただきたい。

CUBE 水深を全測深点群から作成する際には、空間分解能の性能限界であるビームのフットプリント程度のグリッドサイズを使用すれば、CUBE 水深はマルチビーム測深データの品質が基本的に保持されている。

CUBE 処理を導入することにより、膨大な数の全測深点群を目視点検するという伝統的なノイズ処理から脱却して、CUBE アルゴリズムにより自

動的に可視化された水深・属性情報マップを用いて海底特異物のみの目視点検へと転換することが可能となるため、ムダ・ムラ・ムリを排除したより客観性の高い迅速な資料整理が実現可能となる (Fig. 12).

CUBE 処理をより効果的に実施するためには、マルチビーム測深作業も併せて見直し、統計処理に適したマルチビーム測深作業を実施することが重要である。特に、船舶交通に重要な海域では、ノイズの少ない良好な高密度データの取得とスワスの100%重複を基本とした測深作業に切り替えることにより、海底特異物の見落としをより確実に防ぐと同時に、目視点検が必要な海底特異物・ノイズの判別がより迅速に実施可能になる。

CUBE 水深は、十分に高密度とはいえ基本的には統計水深であるため、従来の LMD ファイルと比べて容量が軽く、扱いやすくなっている。更に、CUBE 水深はカラーマップ等の平面で表現できるラスタ (画像) としての性質を有しているため、GIS ソフトウェアを用いて手早く可視化・GIS 解析が可能である。このため、国内外の技術動向を踏まえて、将来的には、従来の LMD ファイル形式に拘らず、例えば GIS の汎用ラスタ形式である GeoTiff 形式や NetCDF 形式や BAG 形式 (Calder et al., 2013) のような、より利用しやすい水深データの形式を検討する余地はあると思われる。

以上のように、CUBE 処理には、現在日本のマ

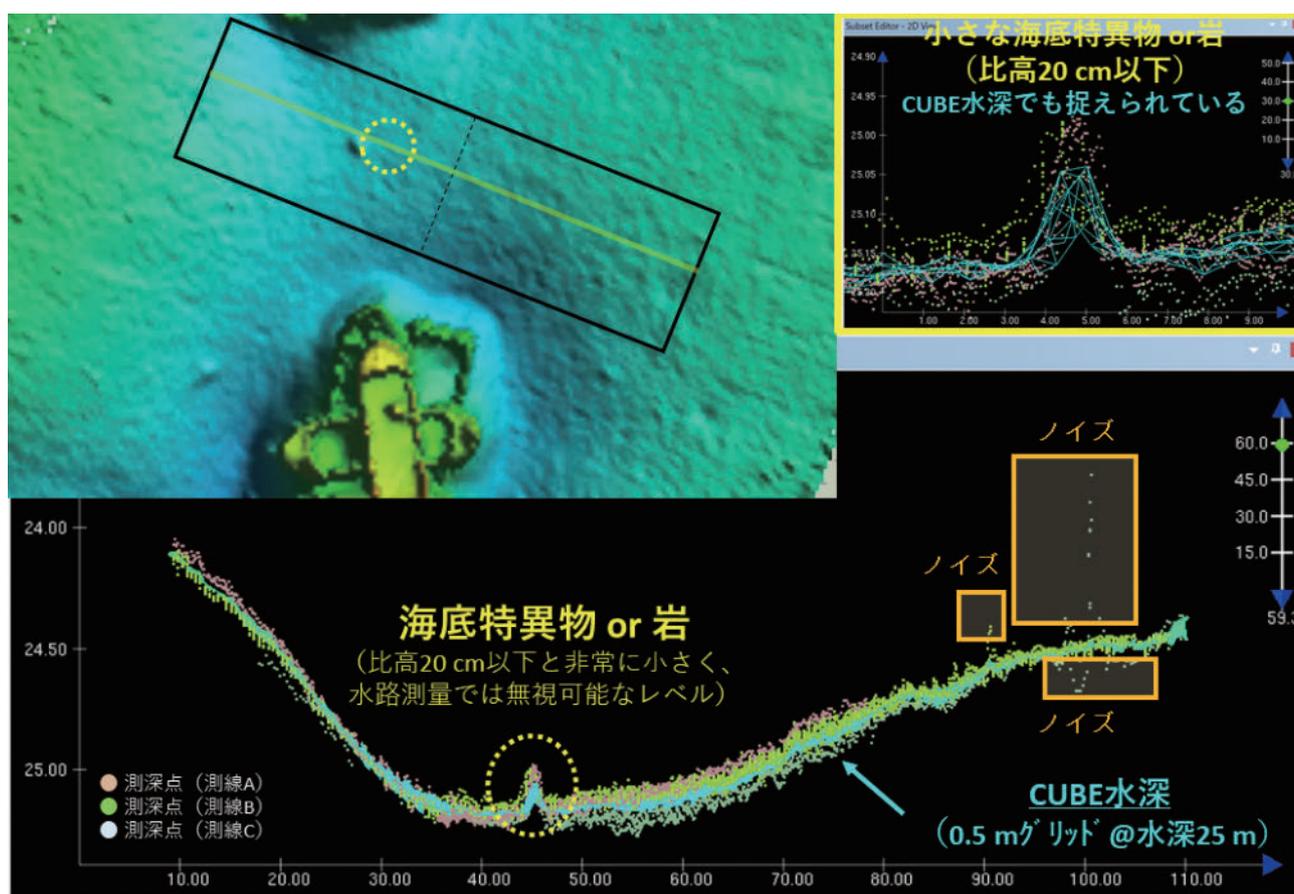


Fig. 12. CUBE depths and all the soundings from which the CUBE depths were estimated, modified after the Fig. 5 of Sumiyoshi et al. (2020). Although the conventional manual noise editing is not applied, the CUBE depths are not affected by some noise soundings, and even very small seafloor features or rocks are detected.

図 12. CUBE 水深と CUBE 水深を推定する基となった全測深点 (住吉・他 (2020) の Fig. 5 を編集)。従来の手動ノイズ処理は実施していないものの、CUBE 水深は、多少のノイズに影響されず、非常に小さな海底特異物もしくは岩まで捉えられている。

ルチビーム測深が抱える資料整理を中心とした諸問題を一気に解決することが期待される。CUBE処理の導入に向けた検討を進めるにあたり、今後は、CUBE水深の点検校正・審査に関する技術的な研究開発を推進していきたいと考える。

謝 辞

本原稿を完成させる上で、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。シングルビーム測深の時代からこれまでに渡り、測深作業・機器開発・技術支援等の観点から水路測量に携わってこられた皆様には、現在・将来の水路測量のための礎を築いてくださいました。ここに記して感謝いたします。

文 献

浅田 昭・中西 昭 (1986) シービームデータによる海底地形図の作成, 水路部研究報告, 21, 89-108.

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.

浅田 昭・穀田 昇・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, University of New Hampshire, USA.

Calder, B., S. Byrne, W. McDonald, W. Landner, B. Lamey, F. Moggert, E. Warner, and M. Russell (2013) Description of Bathymetric Attributed Grid Object (BAG), Version 1.5.1, University of New Hampshire, USA.

Canadian Hydrographic Service (2012) CUBE Bathymetric Data Processing and Analysis, CHS, Canada.

古市善典・政岡久志 (1997) 浅海用ナローマルチビーム測深機 (SEABAT) を使用した障害物調査, 水路部技報, 15, 64-67.

International Hydrographic Organization (2008)

IHO Standards for Hydrographic Surveys Special Publication No. 44, 5th Edition, IHO, Monaco.

海上保安庁 (2020) 水路測量業務準則施行細則 (昭和 58 年 4 月 27 日保水海第 13 号, 令和 2 年 3 月 27 日保海海第 140 号により一部改正), 海上保安庁, 東京.

国土交通省 (2016) 港湾における ICT 導入検討委員会, https://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_fr5_000061.html, 参照 2020 年 11 月.

穀田昇一・長野勝行 (1996) 浅海用ナローマルチビーム測深装置 (SEABAT) について, 水路部技報, 14, 56-64.

松本良浩・戸澤 実 (2004) 汎用解析型 GIS ソフトウェアによる電子測量原図の作成, 海洋情報部技報, 22, 20-32.

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) 新型用ナローマルチビーム測深装置 (SEABAT) について, 水路部技報, 18, 1-7.

中西 昭 (1985) 水路測量船「拓洋」, 水路部技報, 3, 1-5.

National Oceanic and Atmospheric Administration (2014) Field Procedures Manual, April 2014, NOAA-OCS, USA.

National Oceanic and Atmospheric Administration (2018) Hydrographic Surveys Specifications and Deliverables, April 2018, NOAA-OCS, USA.

災害対応水路測量班 (2012a) 航路障害物調査, 海洋情報部研究報告, 49, 57-86.

災害対応水路測量班 (2012b) 水路測量, 海洋情報部研究報告, 49, 96-117.

住吉昌直・松本良浩・吉澤 信・安原 徹 (2019) マルチビーム測深における高精度後処理測

位・動揺データの有用性, 海洋情報部研究報告, 57, 62-74.

住吉昌直・栗田洋和・安原 徹・橋本崇史・小川 遥・長澤亮佑・長野勝行・吉澤 信・眞保智彦・秋山裕平 (2020) マルチビーム水深測量成果における CUBE 水深の採用について: 海外水路機関における最適化の事例紹介, 海洋情報部研究報告, 58, 66-79.

戸澤 実・瀬田英憲・長瀬裕介・清野孝幸 (2000) 浅海用ナローマルチビーム測深機 (SEABAT) による沈船捜索・確認, 水路部技報, 18, 8-10.

土屋主税・橋本崇史・鈴木充広・山内明彦 (2016) 10 m メッシュと 50 m メッシュによる津波シミュレーションの比較—清水港を例として—, 海洋情報部研究報告, 53, 98-103.

安原 徹 (2020) 海図補正の技術と現場, 港湾, 2020・8, 38-39.

吉澤 信・松本良浩・住吉昌直・南 宏樹 (2018) 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, 海洋情報部研究報告, 56, 9-23.

吉澤 信・住吉昌直・長野勝行・大泊理八・井田 壮太・梅垣裕至・畠山 豊・阿部周平・塚本真由美 (2019) 27 メートル型測量船「はましお」, 海洋情報部研究報告, 57, 43-61.

要 旨

日本の水路測量は, 海底を面的にマッピング可能なマルチビーム測深機の普及により, 近年大きく進歩してきている. 本総説では, 水路測量における技術の進展状況と近年の取り組みについて報告する.