

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[†]

住吉昌直^{*1}, 栗田洋和^{*2}, 安原 徹^{*3}, 橋本崇史^{*1}, 小川 遥^{*1},
長澤亮佑^{*1}, 長野勝行^{*2}, 吉澤 信^{*2}, 眞保智彦^{*4}, 秋山裕平^{*2}

Adoption of CUBE depths in multibeam hydrographic survey results:
introduction of optimization cases in foreign hydrographic organizations[†]

Masanao SUMIYOSHI^{*1}, Hirokazu KURITA^{*2}, Toru YASUHARA^{*3}, Takafumi HASHIMOTO^{*1},
Haruka OGAWA^{*1}, Ryosuke NAGASAWA^{*1}, Katsuyuki NAGANO^{*2}, Makoto YOSHIZAWA^{*2},
Tomohiko SHINBO^{*4}, and Yuhei AKIYAMA^{*2}

Abstract

Advanced hydrographic organizations have recently adopted CUBE depths in multibeam hydrographic survey results. In this report, we analyze some expected effects of the CUBE algorithm and a multibeam survey based on CUBE depths in hydrographic survey results, which have been developed outside Japan. In addition we discuss some changes in the fundamental ideas that are at the background of multibeam hydrographic surveys.

1 はじめに

日本沿岸海域における水深測量技術は、平成 7 (1995) 年の当庁による浅海域のマルチビーム測深の開始(穀田・長野, 1996)以来、飛躍的な進歩を遂げており、従来のシングルビーム測深では不可能であった詳細な海底地形や海底特異物(沈船・暗岩・海底障害物等の浅所)を一挙に面的に捉えることが可能となっている。詳細かつ信頼性の高いマルチビーム測深によって鮮明に捉えられた海底特異物(以下、異物)を海図に反映させることにより、船舶交通の安全性をより一層高める

ことが可能になってきた。最近では、国土交通省が取り組む i-Construction の港湾における ICT 導入の一環として、水路測量と関わりの深い浚渫工においても、平成 30 (2018) 年度から、浅海マルチビーム測深の本格運用が開始されており(国土交通省, 2016)、官民間問わず、沖合・沿岸から港湾まで、水路測量におけるマルチビーム測深が広く普及している。

このように、マルチビーム測深は、現代の水路測量における主役となっている一方で、マルチビーム測深データ処理・水深測量成果の在り方に

[†] Received October 9, 2019; Accepted November 29, 2019

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

* 2 海洋調査課 Hydrographic Surveys Division

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

* 4 海洋調査課(現 測量船「平洋」) Hydrographic Surveys Division (Currently S/V “Heiyo”)

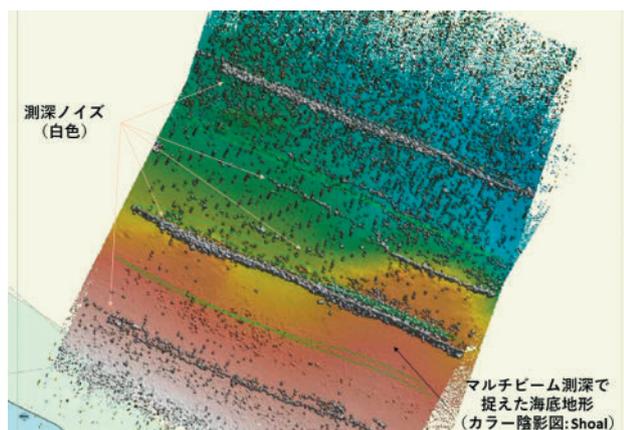


Fig. 1. A typical example of noise soundings in multibeam bathymetric data (Shoals).

図1. マルチビーム測深データ（最浅水深）にみられる測深ノイズの典型例。

関して、ノイズ処理の大幅な効率化と客観的なノイズ処理の推進、相対的に低品質な測深データの海図への採用防止、水深測量成果の可視化、といった克服すべき本質的な課題が存在する。特に、マルチビーム測深により生じるノイズデータ (Fig. 1) を編集により削除するノイズ処理は、水路測量に限らず、マルチビーム測深において最も時間を要する部分である。

このノイズ処理時間の劇的増加の主要因は、マルチビーム測深データの大容量化にある。現在、マルチビーム測深における単位時間あたりのデータ取得量は増加の一途を辿っており、特に、浅海マルチビーム測深機においては、海底反射音波の往復伝播時間が短くなるために生じる音波発信レートの増加により、シングルビーム測深機の数千倍以上にまで膨れ上がっている。このため、シングルビーム測深時代から実施されてきた測線毎に全測深点データを目視点検・編集する伝統的なノイズ処理法では、もはや対処できないと言っても過言でない程に、マルチビーム測深におけるノイズ処理は深刻な状況となっている。

また、マルチビーム測深データの異物・ノイズ判別は、シングルビーム測深データと比べて難しく、先に述べた伝統的なノイズ処理法の場合においては、更に膨大な時間を要する一因となっている。安全な船舶交通の実現を目的とした海図作成

の観点から、浅海域の水路測量、特に、余裕水深 (UKC : Under Keel Clearance) が重要な水深 40 m 程度より浅い海域における水路測量においては、航行安全を妨げる異物の見落としを防ぐと同時に、航行可能性を阻害する過度の安全サイドの考え方に基づいた、不当に浅過ぎる測深データの海図採用も防ぐ必要があるため、厳格な異物・ノイズ判別が要求される。特に、直下と斜でデータ品質に大きな差のあるマルチビーム測深 (通常、直下付近が高品質、斜付近が低品質) においては、データの品質が均質なシングルビーム測深と比べて異物・ノイズ判別が困難であり、前述の伝統的なノイズ処理手法による異物・ノイズ判別を、海図作成に必要な十分なレベルまで完遂するためには、データ処理者個人の経験・理解に基づく高度な技術が必要となる。特に、未熟なデータ処理者の場合、適切なノイズ処理が完了するまでに、熟練者の場合に比べてより一層時間を費やしてしまう。更に、熟練者の場合であっても、異物・ノイズ判別が容易でない場合が少なからず存在し、その判断はデータ処理者の主観に委ねられている。

このように、マルチビーム測深による水深測量において、シングルビーム時代から踏襲している測線毎に全測深点を目視点検する伝統的なノイズ処理手法は、膨大なデータ量と異物・ノイズ判別の困難性のため、現実的な「壁」に直面している。

マルチビーム測深の場合、全測深点データから海図のための水深選択 (安全な船舶安全のための浅所を落とさない最浅選択) を適用すると、海図において全測深点データの中で相対的に低品質な測深データばかりが優先的に選択されてしまい、マルチビーム測深データが本来持つ品質に比べて、海図に採用される水深の品質が相対的に劣化してしまうという根源的な懸念がある。

先に述べたように、マルチビーム測深データでは、斜付近はデータ品質が直下に比べて相対的に悪く、測深ノイズの発生率の増加 (吉澤・他, 2019)、音速スマイルカーブ等に代表される測深

データの系統誤差の増大，測深データの統計誤差（バラツキ）の増大等の理由のため，斜付近のデータが本来の海底地形に比べて浅くデータ記録されてしまう場合がある．このように偶然浅く記録された斜付近のデータが，優先的に海図水深として選択されてしまうため，結果的に，海図水深は直下付近と比べて品質の低いスワス端付近の測深データから選択されてしまう傾向にある．このような傾向は，米国 NOAA 沿岸測量部（OCS：Office of Coastal Survey）の水深測量原図において確認されており，Smith et al. (2002) によると，マルチビーム測深の全測深点データから選択された水深測量原図の水深は，相対的に低品質で浅い斜由来の水深が，高品質の直下由来の水深に比べて圧倒的に多く，斜付近のデータが優先的に採用されていることが報告されている (Fig. 2)．このことは，高品質の直下データが，相対的に低品質の斜データによって「上書き」されてしまうことを意味しており，たとえ異物のトップを確実に捉えるために補再測する（高品質の直下データを再取得する）模範的なマルチビーム測深作業を実施したとしても，全測深点データから最浅の水深選択によって，本来より過度に浅い測深データが優先的に海図水深に採用されてしまう懸念があるこ

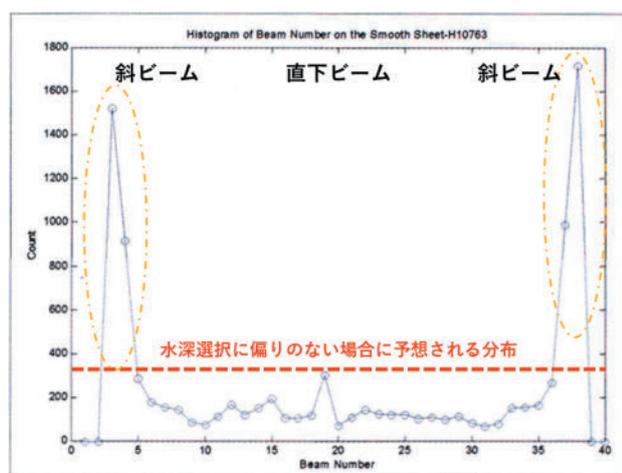


Fig. 2. Distribution function of selected soundings employed in the smooth sheet of NOAA, which is modified after the Fig. 6 of Smith et al. (2002).
図 2. 米国 NOAA の測量原図に採用された直下斜ビームの分布 (Smith et al., 2002 の Fig. 6 を編集).

とを意味している．このような懸念を払拭するためには，海図作成のために水深選択されるマルチビーム水深測量成果を，単純な全測深点データとするのではなく，マルチビーム測深の特性である各測深点データの品質の差異を考慮して作成された成果を採用することが求められる．

マルチビーム測深による高密度の水深測量成果を可視化することが，アーカイブされた成果の再利用の観点から望まれている．現在，水深測量成果は，データ汎用性の高い全測深点データの経緯度水深ファイル（以下，LMD ファイル）が採用されている（海上保安庁，2019）．旧水路測量成果であった水深測量原図から LMD ファイルへ変更することにより，デジタル化のメリットである高密度の水深測量成果の再利用可能性が原理的には担保されるようになった．他方で，水深測量成果自体は，水深測量原図とは異なり，誰が見たとしてもデータ自体を直感的には理解できない（水深測量成果のブラックボックス化）ため，再利用の際には，時間やソフトウェア費用等の可視化の手間をかけてはじめて，再利用の可否の判断に進むことができる．このように，海図作成のためや他目的の用途として，成果をより手軽に再利用可能とするためには，全測深点データである LMD ファイルの持つデータ汎用性と水深測量原図が持つ誰もが直感的に理解できるデータ視覚性を併せ持つ，高密度な水深測量成果の新たな在り方が望まれる．

マルチビーム測深を用いた水深測量に関するこれらの克服すべき諸問題は，日本固有の問題ではなく，全世界共通の課題でもある．これらの諸問題の解決策の根幹となるアイデアが，米国ニューハンプシャー大学で開発された CUBE (Combined Uncertainty and Bathymetric Estimator; Calder & Wells, 2007) である．CUBE アルゴリズムは，マルチビーム測深の特性である直下と斜のデータ品質の違いを考慮した上で，データの大容量性を活かした統計的アルゴリズムで，観測値である全測深点データと各々の不確かさ (Uncertainty) を入力値として，高密度水深（以下，CUBE 水深）

等を出力するものである。米国・カナダ・英国等の水路測量技術の先進国では、平成 14 (2002) 年頃から CUBE アルゴリズムが水路測量において使用されており、試行錯誤を経て、CUBE に基づいた水路測量の仕様・標準手順書を更新し続けてきた。現在、これら先進国の水路測量においては、CUBE アルゴリズムの使用を前提としたマルチビーム水深測量が成熟の域に達しており、測深ノイズの少ないデータ取得から浅所トップの目視判断による仕上げ作業が施された CUBE 水深の水深測量成果としての採用までの効率化かつ客観性の高い一連のデータワークフローが、既にパッケージ化されている (NOAA, 2018; CHS, 2012)。

当庁においても、平成 21 (2009) 年度から CUBE アルゴリズムの導入が議論され (小野寺, 2010)、平成 26 (2014) 年度頃にも CUBE アルゴリズムの導入が検討されたものの、本格的な実現には至っていない。近年では、菊池 (2015) において、日本語文献として、CUBE アルゴリズムが取り上げられている。

本報告では、マルチビーム測深による水路測量の諸問題を背景に考案された CUBE の基本コンセプトについて解説し、海外水路機関の水深測量成果として CUBE 水深が採用されている事例を紹介する。また、これら海外事例を受けた議論として、CUBE 水深の採用が、先に述べた水路測量におけるマルチビーム測深に関する諸問題を解決するソリューションとなっていることを解説し、水深測量成果の CUBE 水深への移行に至った背景を読み解いていく。最後に、日本のマルチビーム水深測量の効率化を目指す上で、水路測量技術者にとって必要不可欠な共有すべき根本的な考え方について議論する。

2 CUBE アルゴリズム

CUBE (Combined Uncertainty and Bathymetric Estimator) とは、マルチビーム測深で得られた大容量の全測深点データ (Soundings) と不確かさ (Uncertainty) から、統計的に尤もらしい高密度の CUBE 水深 (Depths) を出力するアルゴ

リズムである。ここでは、Calder & Wells (2007) に基づき、筆頭著者の 1 年間の米国ニューハンプシャー大学留学 (Nippon Foundation / GEBCO Training Program 2016–2017) で得られた本場の知見も交えながら、CUBE アルゴリズムについて解説する。

CUBE で使用する Uncertainty は、通常、国際水路機関が刊行する S-44 第 5 版 (IHO, 2008) によって定められる各測深点の精度評価の指標である総伝播不確かさ (Total Propagated Uncertainty: TPU) が使用される。TPU は測深誤差の確率的期待値の推定量で、鉛直成分 TVU (Total Vertical Uncertainty) と水平成分 THU (Total Horizontal Uncertainty) から成り、ソナーの測深精度、音速プロファイルの観測精度、潮位の観測精度、測位・動揺検出器の計測精度等の誤差要因が考慮される。CUBE 水深は、TPU に基づいた重み関数を用いた統計処理から得られるため、マルチビーム測深の特性である直下と斜のデータ品質の違いが自動的に考慮される。このため、高品質の直下データが実効的に優先使用されることになる。結果として、全測深点データからの最浅選択処理とは異なり、相対的に品質の劣る斜付近のデータが不当に優先採用されてしまうことを回避することができる (Fig. 3)。

CUBE アルゴリズムでは、全測深点と TPU に基づいた重み関数から CUBE 水深を得る際に、ノード (Node) と呼ばれるグリッド化された格子の節を設定するの必要があり、CUBE 水深は各ノード上で求められる。この CUBE 水深を求めるプロセスでは、まず、各ノード上で、ある範囲に含まれる測深点と各点の重み関数から、仮説水深 (Hypothesis) を統計的に計算する。

$$\sigma_p^2 = \sigma_v^2 \left(1 + \left[\frac{\text{dist} + \text{hes} * \sigma_h^2}{\text{node_spacing}} \right]^{\text{de}} \right).$$

ここで、 σ_p^2 は、各測深点の伝播不確かさ (この逆二乗が重み関数) であり、あるノードにおけるキャプチャー距離に含まれた測深点に対して計算される。 σ_v が各測深点の TVU、 σ_h が各測深点の THU、node_spacing はノード間隔 (グリッドサイ

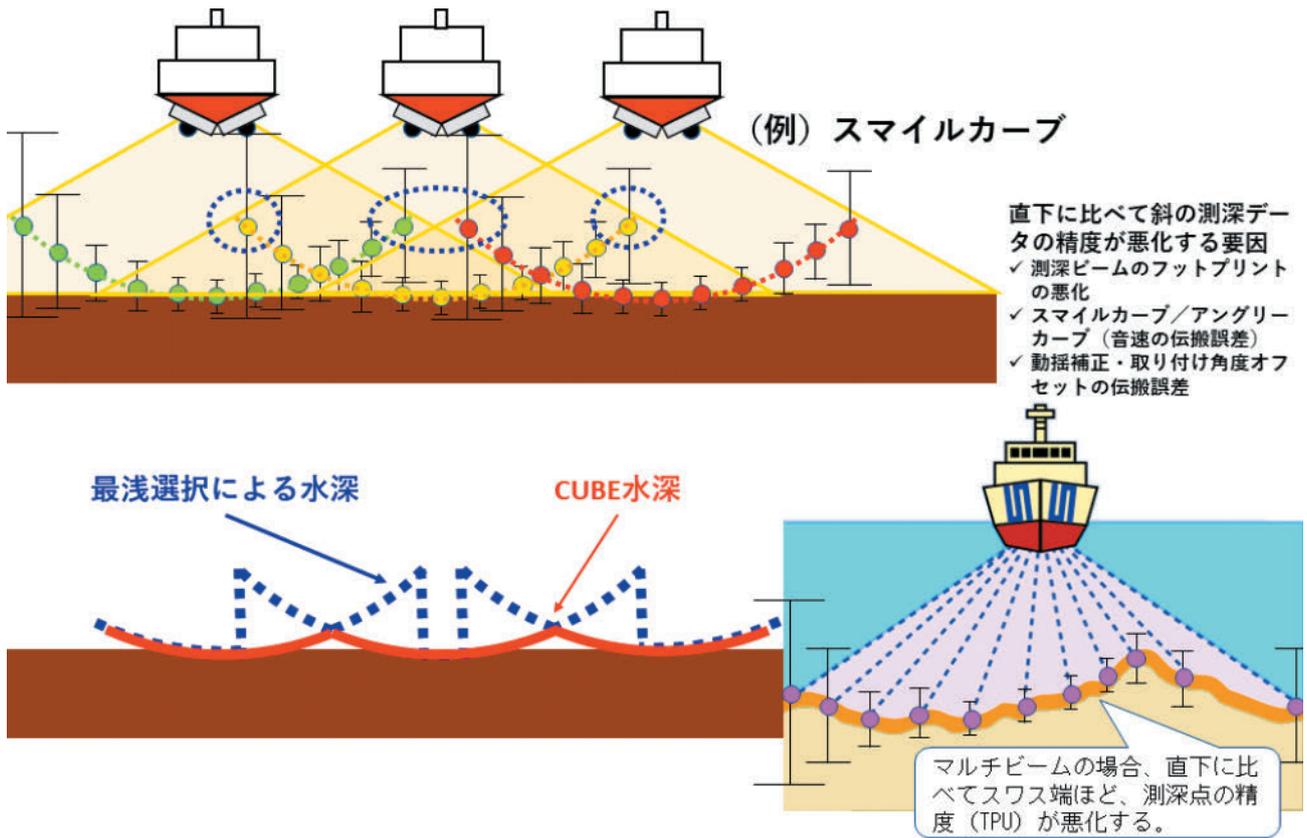


Fig. 3. Conceptual diagrams of the data quality difference between nadir and outer beams in multibeam bathymetric data and the difference between CUBE depths (estimated considering data quality), and Shoals.

図3. 直下と斜におけるマルチビーム測深のデータ精度の違い及びCUBE水深（データ精度を考慮して推定された）と最浅水深の違いに関する概念図。

ズ), $dist$ はあるノードから各測深点の距離, hes (horizontal error scalar) と de (distance exponent) はパラメータで, デフォルト設定では, $hes = 2.95$ (99% CL), $de = 2.0$ を用いる. ただし, 米国 NOAA では, 異物の浅所トップが CUBE 仮説として捉えられるように, $hes = 1.96$ (95% CL) を採用している (NOAA, 2014).

多くの場合, 各ノードに一つの仮説水深が得られ, この計算された仮説水深が CUBE 水深として採用される. 一方で, ノード近傍の測深点が統計的に有意に異なる複数の集団に分かれる場合, 一つのノードに複数の仮説水深が得られることになる. この際, CUBE 水深を自動的に得るためには, 複数の仮説水深から一つの有力な仮説水深を選ぶ必要があり, ノードの仮説水深に属する測深点数やノードの周囲の仮説水深から最も有力な仮説水深を選択する (Fig. 4). この仮説の自動選択

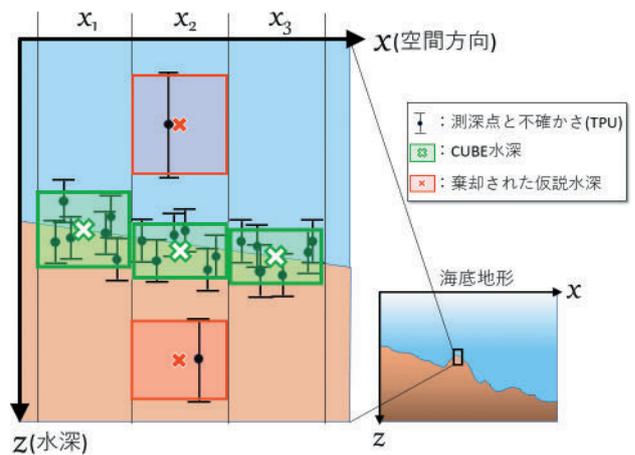


Fig. 4. CUBE hypotheses and disambiguation.

図4. CUBE 仮説水深と曖昧さ除去.

プロセスは, 曖昧さ除去 (Disambiguation) と呼ばれている. このように, CUBE 水深を求める統計処理では, 測深データ中の極端な外れ値 (Outlier) の影響を排除できるため, 単純な統計

平均とは異なり、深く記録されてしまった測深ノイズの影響により水深が本来より深く（航行の安全性を脅かす方向に）出力されたり、逆に、浅い測深ノイズにより水深が不当に浅く（航行可能性を阻害する方向に）出力されたりすることが原理的にはなく、出力結果がマルチビーム測深に適した性質を持つ。以上のように、高度な統計処理により得られる CUBE 水深は、マルチビーム測深のデータ処理結果として適した性質を有しており、今まで手動による削除が必要であった小さな測深ノイズの大部分を削除する手間がかからないという大きなメリットがある。このため、世界各国で、既に CUBE アルゴリズムが使用されている。特に、米国・カナダでは、浅所トップの目視判断による仕上げ作業が施された CUBE 水深が水深測量成果として採用されている (NOAA, 2018; CHS, 2012)。

CUBE 水深は、グリッド格子のノード上で計算されるため、水深データであるにも関わらず、ベクター形式（水深点群）としてだけでなく、ラスタ形式（水深画像）としてもデータ保存が可能である。この性質により、CUBE 水深の GIS 上における手軽な可視化が実現するため、水路測量に必要十分なレベルの異物・ノイズ判別における効率化が達成されると同時に、水路測量成果としての CUBE 水深の再利用が促進される。

以上のように、CUBE アルゴリズムは、船舶交通の安全性で重要な浅海域における水路測量においても採用可能な水深測量成果を、高度な統計的アプローチを使用した自動処理にて得られるため、マルチビーム測深データの処理における効率化を強力に推進するツールとなっている。このため、カナダ Teledyne CARIS 社製 HIPS & SIPS、米国 HYPACK 社製 HYPACK、海洋先端技術（株）社製 Marine Discovery、オランダ QPS 社製 Qimera、米国 Chesapeake Technology 社製 SonarWiz 等、数多くの市販ソフトウェアにて、既に実装されている。

CUBE アルゴリズムの利点を実際のデータで確かめるため、第三管区海上保安本部所属の測量船

「はましお」に搭載のマルチビーム測深装置（浅海用；吉澤・他, 2019）で取得したスワス幅 ±55 度かつオーバーラップ率 100% の高品質な測深データから、ノード間隔（グリッドサイズ）0.5 m の CUBE 水深を出力した（水深は概ね 25 m）。Fig. 5 の CUBE 水深は、手動によるノイズ処理は全く行っていないものの、重なっている沈船漁礁の詳細な形状まで鮮明に可視化することができた。更に、CUBE 水深と測深点を同時にプロットすると、CUBE 水深は細かい測深ノイズに影響されず、複数測線で捉えられている比高 20 cm 程度の非常に小さい異物が、CUBE 水深においても捉えられていることが分かる。このように、高品質かつ高密度なデータを取得すれば、目視判断による仕上げ処理の手間を殆どかけることなく、水路測量の最終成果として直ぐに使えるレベルの CUBE 水深が得られる。

続いて、CUBE アルゴリズムにおいて CUBE 水深を出力する際に必要な設定値のうち、重要なパラメータについて述べる。

2.1 ノード間隔（グリッドサイズ）

各ノード上の CUBE 水深を出力する際には、ノード間隔（Node Spacing / Resolution；グリッドサイズと同じ意味）を指定する必要がある。このノード間隔は、CUBE 水深のグリッド解像度を決める最も重要なパラメータである。

一般的には、測深データが持つ空間分解能／解像度を可能な限り劣化させずに、統計処理が有効に働くために十分な独立データ数（ノードあたり少なくとも数点以上）が得られるよう、適切なノード間隔を設定する必要がある。マルチビーム水深測量では、測深データの空間分解能は、主として、測深機のビーム幅と水深に比例するフットプリント（送受波ビームのフットプリントより小さな異物は分解できず、異物検出は原理的に困難）によって決まるため、直下ビームのフットプリントを目安に、ノード間隔を設定することが考えられる。なお、現代のマルチビーム測深機においては、適切なスワス幅（発信レートとスワス密

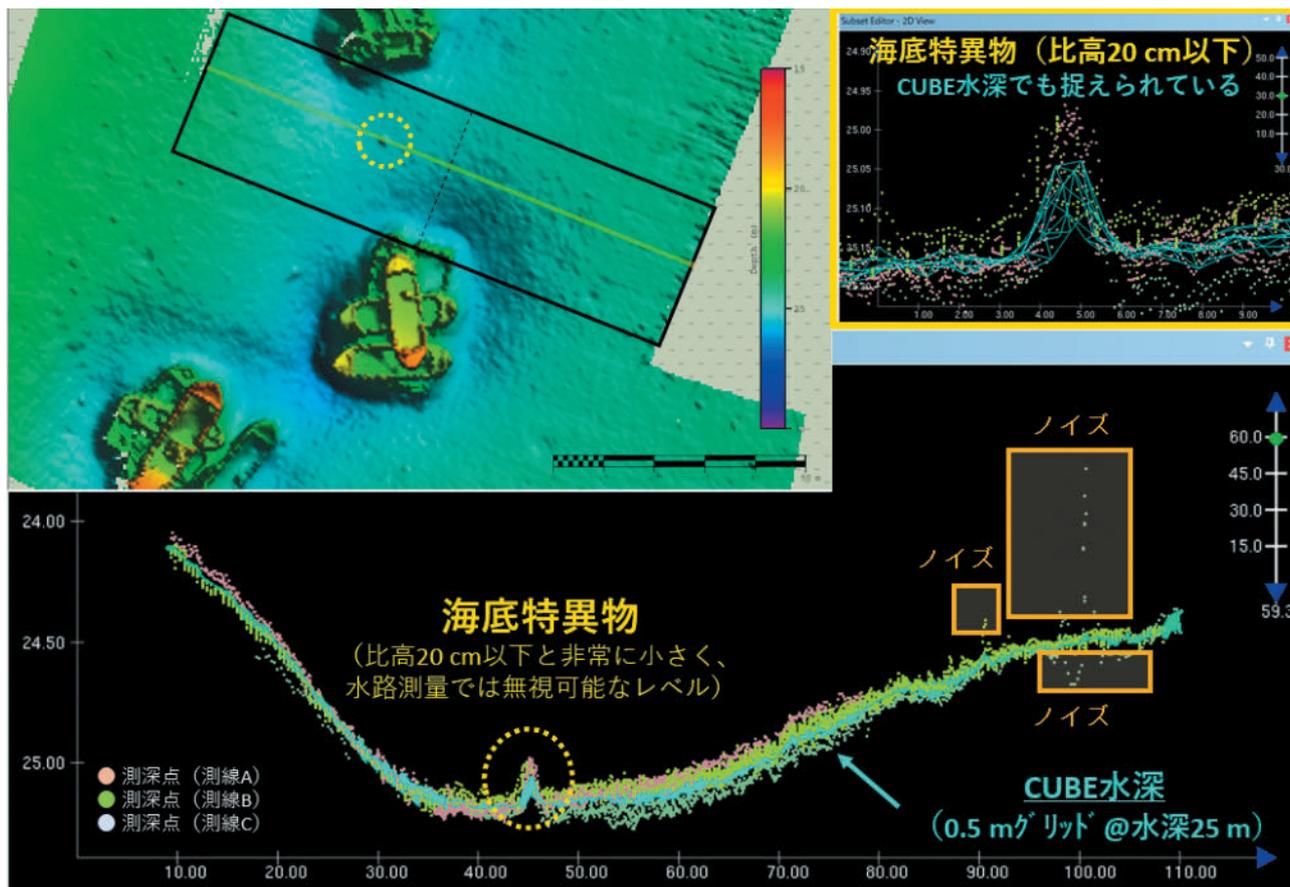


Fig. 5. CUBE depths and all the soundings (without noise rejection) from which the CUBE depths were estimated, recorded by S/V "Hamashio".

図5. 測量船「はましお」による CUBE 水深と CUBE 水深を推定する基となった全測深点（ノイズ処理は未実施）。

度) とオーバーラップ率を用いた高密度測深の実施により、送受波ビームのフットプリント内に数点程度の測深点密度を得ることは比較的容易に実現可能である。

具体的には、ビーム幅1度の測深機における直下ビームのフットプリント（平坦な海底面を仮定）は、水深20mで0.35m、水深40mで0.7mである（Table 1）。海外事例では、水深域に応じた固定グリッドサイズ（ノード間隔）を採用しており、例えば、米国NOAA沿岸測量部では、水深0-20mで0.5m、水深18-40mで1m（NOAA, 2018）、カナダ水路部CHSでは、水深0-15mで0.25m、水深15-25mで0.5m（CHS, 2012）と定められている（Tables 2, 3）。

2.2 キャプチャー距離 (Capture Distance)

各ノード上の CUBE 水深を出力する際には、

各ノードからどの程度離れた範囲内の測深点を用いるかを指定する必要がある、この設定値をキャプチャー距離 (Capture Distance) と呼ぶ。原理的には、ノード間隔と異なる値を設定可能であるが、各ノードのグリッド内の測深点と実際に CUBE 水深を求める際に使用した測深点を可能な限り一致させると直感と合致して便利である。米国 NOAA 沿岸測量部では、キャプチャー距離はノード間隔の0.707倍 (= $1/\sqrt{2}$ 倍) としており (NOAA, 2014)、各ノードのグリッド内の測深点と CUBE 水深を求める際に使用した測深点をほぼ同一視できるように定めている (Fig. 6)。

2.3 曖昧さ除去 (Disambiguation)

CUBE アルゴリズムの過程において、複数の仮説水深 (Hypothesis) が得られた場合、複数の仮説水深から一つの有力な仮説水深を自動で選ぶ

Table 1. Nadir beam footprints of multibeam echosounders.

表 1. マルチビーム測深における直下ビームのフットプリント.

水深	ビーム幅		
	1 度	1.5 度	2 度
20 m	0.35 m	0.52 m	0.70 m
40 m	0.70 m	1.0 m	1.4 m
80 m	1.4 m	2.1 m	2.8 m
160 m	2.8 m	4.2 m	5.6 m
320 m	5.6 m	8.3 m	11 m

Table 2. Grid size specifications for the CUBE depths in the NOAA.

表 2. 米国 NOAA における CUBE 水深のグリッドサイズ仕様.

水深帯域	グリッドサイズ (ノード間隔)
0-20 m	0.5 m
18-40 m	1 m
36-80 m	4 m
72-160 m	8 m
144-320 m	16 m

Table 3. Grid size specifications for the CUBE depths in the CHS.

表 3. カナダ CHS における CUBE 水深のグリッドサイズ仕様.

水深帯域	グリッドサイズ (ノード間隔)
0-15 m	0.25 m
15-25 m	0.50 m
25-50 m	1.00 m
50-100 m	2.00 m
> 100 m	> 5.00 m

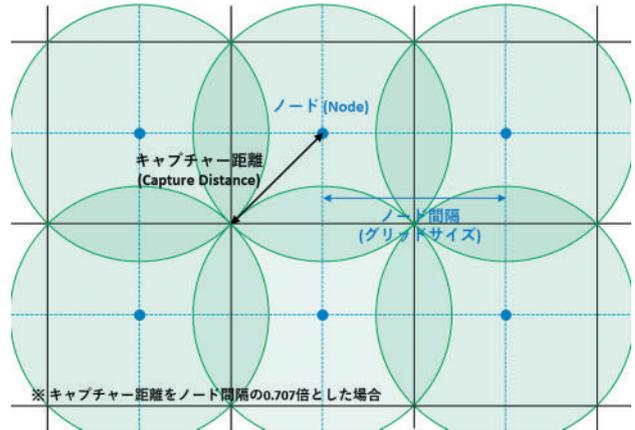


Fig. 6. Conceptual diagram of the capture distance being set to 0.707 times the node spacing (grid size).

図 6. キャプチャー距離をノード間隔の 0.707 倍とした場合の概念図.

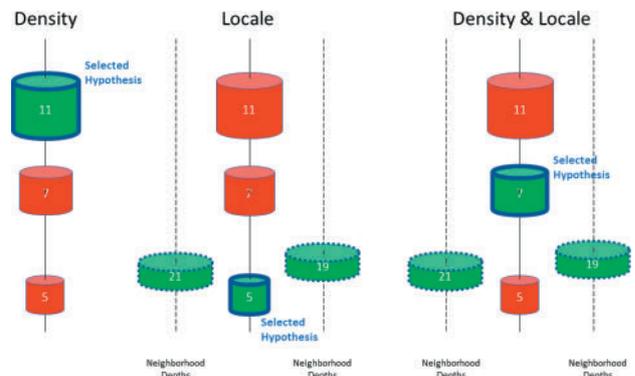


Fig. 7. Conceptual diagram of disambiguation methods in CUBE algorithm. The number in each hypothesis describes the number of soundings belonging to the hypothesis.

図 7. CUBE アルゴリズムにおける曖昧さ除去法の概念図. 各仮説の中の数字は、その仮説に所属する測深点数を表す.

ロセスを、曖昧さ除去 (Disambiguation) と呼んでいる. 自動選択手法の主なオプションとして、(1) Density, (2) Locale, (3) Density & Locale という 3 種類がある. (1) については、ノードにおける測深点が最も多く含まれた仮説水深を採用、(2) については、周囲のノードと最も無矛盾な仮説水深を採用、(3) については、(1) と (2) を組み合わせた総合的に最も確からしい仮説水深を採用する (Fig. 7). 米国 NOAA 沿岸測量部では、(3) Density & Locale を採用している (NOAA,

2014).

3 米国における CUBE 水深の成果採用

水路測量技術の先進国である米国・カナダにおいては、マルチビーム水深測量成果として、CUBE 水深が採用されている (NOAA, 2018; CHS, 2012). ここでは、海外事例の中でも、特に、CUBE 水深の扱いが洗練されている米国 NOAA 沿岸測量部における事例に絞って、水深測量成果として CUBE 水深の採用を前提としたマルチビーム水深測量について紹介する (NOAA, 2014; NOAA, 2018).

3.1 マルチビーム測深作業

マルチビーム測深作業について、主に、先に述べた筆頭著者の1年間の米国留学中に得られた現場の最新情報について紹介する。CUBE 水深にノイズが残らないように、測深ノイズが可能な限り生じないデータ取得が実践されていた。具体的には、スワ幅は、概ね±60度に設定され、斜付近の低品質なデータが取得されないよう配慮されていた。また、悪天候の際は、ノイズが多いデータしか取得できないため、緊急時を除き、無理をして測深作業しないことも印象的であった。更に、0.5 mの高解像度の CUBE 水深を求める必要があるため、リアルタイムキネマティック (RTK) や Applanix 社製 POSPac MMS という専用ソフトウェアによる後処理キネマティック等の高精度測位を使用している。

3.2 CUBE 水深の算出

マルチビーム測深による測深データに、音速プロファイル・潮位・測位動揺等の各種補正データを適用し、統合された測深点と不確かさ (TPU) を計算する。これらの全測深点と TPU から、CUBE 水深を算出する。CUBE 水深のノード間隔 (グリッドサイズ) は、Table 2 のように水深に応じて定められている (NOAA, 2018). 特に、水深 0-20 m で 0.5 m、水深 18-40 m で 1 m と定められている理由は、IHO S-44 第 5 版 (IHO,

2008) で言及されている標準的な異物である一辺 1 m / 2 m 立方体を検出するためのグリッドサイズの必要条件が、各立方体の半分の大きさ (0.5 m / 1 m) であるからである。また、前章で述べた CUBE 水深を算出するための設定パラメータ (キャプチャー距離, horizontal scale error 等) は、NOAA (2014) で定められている。

ここまでの処理は、入力ファイル (測深データや各種補正データ等) の読み込み各種パラメータ (TPU 計算のための計測精度・観測精度や CUBE 水深を算出するための設定パラメータ等) の設定を除けば、全て計算機が自動で行う処理であるが、ノイズの少ない測深データを取得することにより、この時点で、概ねノイズ除去された CUBE 水深が得られる。現在、米国 NOAA 沿岸測量部では、データ処理ソフトウェアとして、CARIS HIPS & SIPS が使用されている。

3.3 CUBE 水深の目視判断による仕上げ作業

前節で得られた CUBE 水深は、異物、特に、空間スケールの小さい異物や複雑な形状の異物について、浅所トップが押えられていない場合がある。また、この時点の CUBE 水深は、概ねノイズ除去はされているものの、一部の箇所では、測深ノイズに影響され、CUBE 水深にスパイクのようなノイズ水深が生じている。このように、自動で得られた CUBE 水深をそのまま水深測量成果として使用するには、特に、安全な船舶交通に重要な浅海域においては、大いに問題がある。そこで、可視化した CUBE 水深グリッドを点検して、CUBE 水深における異常箇所についてのみ、測深点まで立ち返った、目視による異物・ノイズ判別を実施する必要がある。

CUBE 水深における異常箇所を特定する際には、CUBE 水深グリッドのカラー表示レンジ (Color Range) や高さ強調 (Vertical Exaggeration) 等を変更しながら、水深帯域に応じた大きさの異物を見逃さない程度の適度な拡大スケールで、可視化した CUBE 水深を目視点検することが基本である。また、CUBE において計算される CUBE

水深以外の属性情報も、CUBE 水深の異常箇所の特定に有用である。CUBE 水深を求める際に使用した測深点の標準偏差 (Std_Dev)、選択された仮説水深の信頼度 (Hypothesis_Strength)、CUBE 水深を求める際に使用した測深点密度 (Density) 等が、特に有益な情報である (Fig. 8)。更に、HydrOffice QcTools の Flier Finder と呼ばれる CUBE 水深の異常箇所を発見する補助ツールが開発されている (Masetti et al., 2019)。本補助ツールは、米国ニューハンプシャー大学と NOAA が開発した公開ツールで、CUBE 水深の中に含まれるスパイク箇所 (Flier と呼ばれる) や段差箇所を自動検出するものである (Fig. 9)。本補助ツールを用いた CUBE 水深における異常箇所の抽出では、作業の客観性が高まるため、従来の全測深点の目視点検による主観的作業により

見逃された異物も発見されるケースがあり、NOAA では本補助ツールを積極的に使用している。本補助ツールは大変有用ではあるものの、決して万能ではない。例えば、比高 1 m を下回る小さな異物の検出が必要不可欠な場合には、データの品質によっては、自動検出箇所が急激に増加して、目視すべき箇所が絞り込めないといった課題もあり、まだ発展の余地は残っている。

CUBE 水深に見られるノイズ箇所については、当該箇所の測深点を目視確認した後、測深点ノイズの手動削除及び CUBE 水深の再計算を行うことにより、CUBE 水深が更新され、ノイズが見られた箇所においても、正しい CUBE 水深が得られるようになる。

CUBE 水深の異常箇所における異物・ノイズ判別において、異物が見られた場合、当該箇所の測

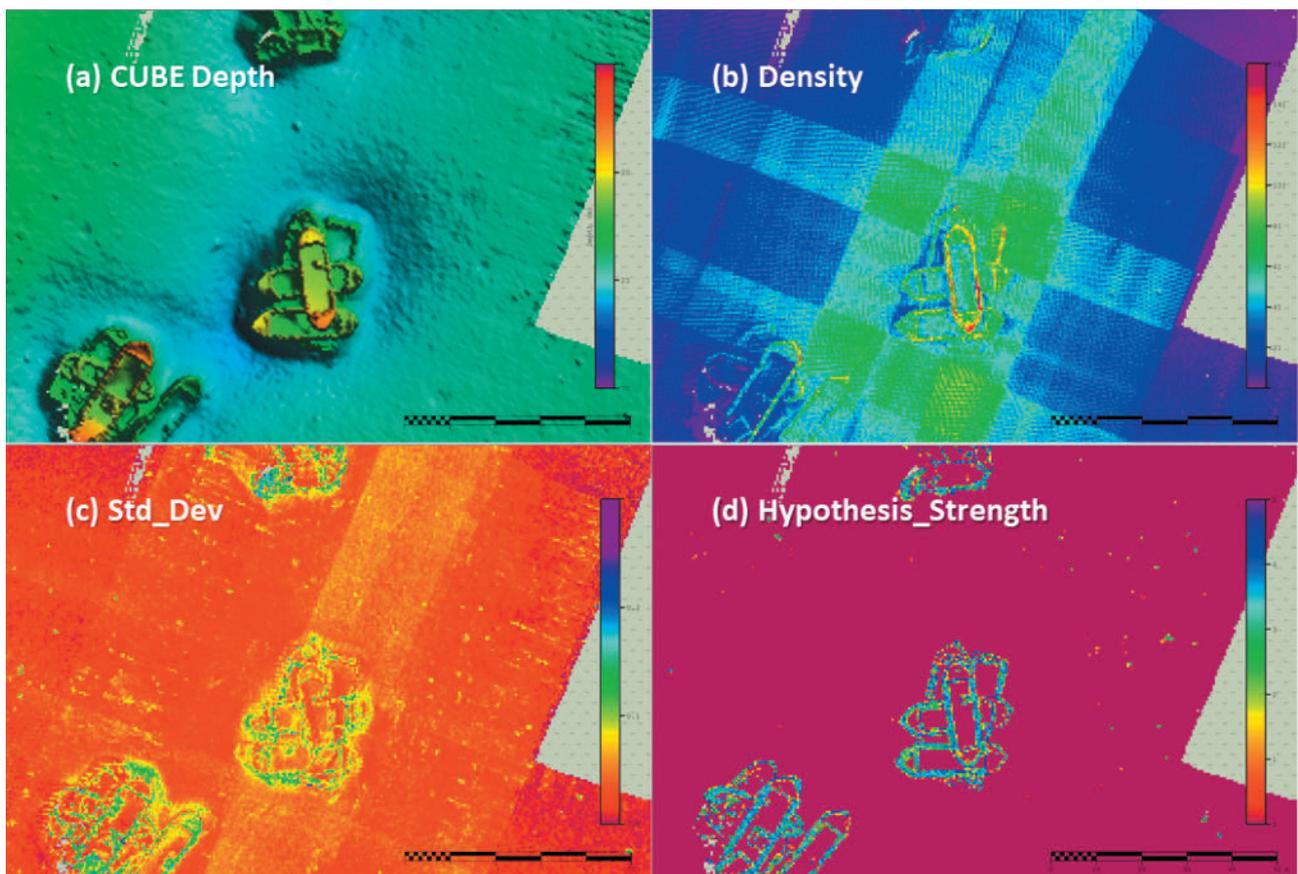


Fig. 8. CUBE depth and other attribution layers. (a) CUBE depths, (b) Sounding density, (c) Standard deviation, and (d) Hypothesis strength.

図 8. CUBE 水深とその他の属性情報レイヤー. (a) CUBE 水深, (b) 測深点密度, (c) 標準偏差, (d) 仮説水深の信頼度.

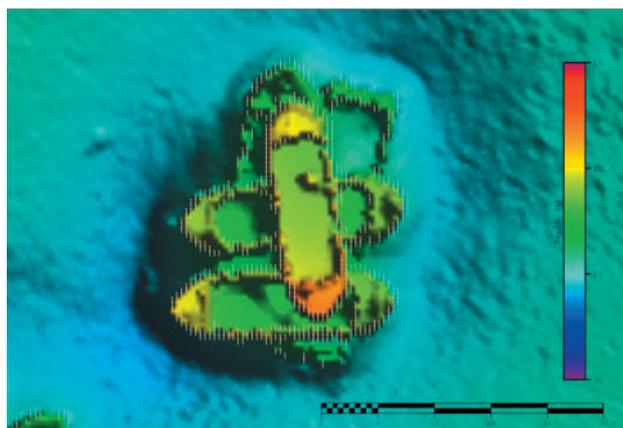


Fig. 9. Shipwreck fishing reefs in CUBE depths and results with HydrOffice QcTools applied to these CUBE depths (pink numbered flags). The shipwreck edges are automatically detected by QcTools as steps of CUBE depths. The number (“1”) on these pink flags indicates the Laplacian operation, one of the detection algorithms in QcTools manual (Masetti et al., 2019).

図9. CUBE水深の沈船漁礁とHydrOffice QcToolsを適用した結果（ピンクの数字フラグ）。沈船の淵がCUBE水深にみられる段差として自動抽出されている。ピンク数字（“1”）はQcToolsマニュアル（Masetti et al., 2019）の検出アルゴリズムの一つであるラプラシアン演算を表す。

深点まで立ち返った目視点検を行い、NOAAの判断基準に従い（NOAA, 2018）、浅所水深の保護作業（Designatedフラグの付与）を適宜実施する。現在、NOAAでは、全ての異物にDesignatedフラグを付与するのではなく、統計的に有意に浅所が落ちている場合（各測深点の精度限界を考慮した上で、データ精度を超えて異物の浅所トップが有意に落ちてしまっていると判断される場合）にのみ、浅所水深の保護作業を行うこととなっている。

以上のように、CUBE水深やCUBEアルゴリズムにより得られたその他の属性情報に対する手動／自動による異物・ノイズ判別と浅所水深保護作業の実施により、マルチビーム測深データによって捉えた異物を確実に押さえると同時に、正しい海底地形を表すCUBE水深を得ることができる。なお、CUBE水深のグリッドサイズをマルチビーム測深機のフットプリントに即して適切に

設定することで、異物検出における観測限界であるフットプリントの大きさ程度以上の異物については、少なくともCUBE水深に痕跡を残すことは可能であると分かってきており、現在ではCUBE水深に重点を置いた点検作業が効率的であるとされている。

CUBE水深及びその他の属性情報を用いた全異常箇所における異物・ノイズ判別と浅所水深保護作業が終了した後、CUBE水深をファイナライズ（Finalize）すると、CUBE水深がDesignatedフラグ付与された測深値へ置換され、仕上げ作業が完了する。

3.4 水深測量成果フォーマット

浅所トップの目視判断による仕上げ作業が施されたCUBE水深の成果フォーマットは、CARIS独自のCSAR形式ではなく、オープンフォーマットであるBathymetric Attributed Grid (BAG)形式である（NOAA, 2018）。BAG形式（Calder et al., 2013）は、ラスタースタイルで、水深レイヤー、不確かさレイヤー、水深測量に関するメタ情報から構成される。また、BAG形式は、ArcGIS等の汎用GISソフトウェアに対応している。更に、水路測量データにおける地理空間情報の国際標準を定めるIHO S-100シリーズの一つである高密度水深グリッドの国際標準IHO S-102（IHO, 2012）は、BAG形式をもとに一部変更して作られたフォーマットであり、基本的な構成は、ほぼ同一と見なすことができる。

4 議論

本報告では、はじめに、現代の水路測量の主役となっているマルチビーム測深について、ノイズ処理の大幅な効率化と客観的なノイズ処理の推進、相対的に品質の劣る測深データの海図水深への採用の防止、水深測量成果の可視化といった、日本のマルチビーム水深測量が克服すべき大きな課題があることを取り上げた。これらの諸問題を解決するためのソリューション事例として、海外の水路測量において、広く普及しているCUBE

アルゴリズムについて解説し、水路測量技術の先進国では標準となっている CUBE 水深を成果として扱うためのデータ処理フローについて、米国の事例を紹介し、その背景にある考え方を解説した。海図作成のための水深測量成果として CUBE 水深を採用するというアイデアを日本でも導入する場合、日本のマルチビーム水深測量を大きく転換させる必要があるものの、海外事例を分析する限り、これまで解決が困難と思われていたこれらの諸問題を一挙に解決する突破口となることは間違いない。特に、CUBE 水深を成果として上手く使いこなすことができれば、今まで最も苦勞していたマルチビーム測深データのノイズ処理を劇的に効率化することが可能となり、成果の客観性も高まることになる。

ただし、CUBE 水深を成果として採用するという秀逸なアイデアは、決して万能薬ではない。測深ノイズの少ない高品質なマルチビーム測深データを高密度に取得することが CUBE 水深測量成果作成の効率化の大前提となっていることを決して忘れてはならない。測深ノイズの多い品質の悪いデータを取得してしまった場合、CUBE による統計処理が有効に働かないため、CUBE 水深の仕上げ作業において目視判断すべき異常箇所が劇的に増加することとなり、結果として、データ処理に膨大な時間を要してしまうことになる。

CUBE による統計処理を有効に機能させるためには、高品質なマルチビーム測深データを取得することにより一層重点を置く必要がある。高品質な測深データの取得のために守るべき重要なポイントが、スワ幅を広げ過ぎず概ね ± 55 度までに留め、オーバーラップ率 100% を基本とすることである。

スワ幅を広げ過ぎず、概ね ± 55 度（広げても ± 60 度まで、極浅海域で広げても ± 65 度まで）に留めることにより、測深ノイズの少ないデータを取得できる上に、音波発信レートも上がり高密度測深が実現する。CUBE による統計処理が効果的に機能し、目視判断による仕上げ処理の手間が大きく減少する。その上、直下付近のフッ

トプリントの小さいビームの測深データが増えるため、異物の検出能力も向上し、異物を鮮明に捉えることが可能になる。スワ幅を可能な限り広げて測深するという従来までの考え方を大きく切り替える必要がある。

測線間隔を広く設定せず、オーバーラップ率 100% を基本とすることで、異物が隣接 2 測線にて複数回観測されるため、客観的な判断が可能となり、結果として効率的な異物・ノイズ判別が達成される。加えて、直下付近の高品質な測深データが増えるため、CUBE による統計処理が有効に機能することになる。

CUBE 水深の成果採用にあたり、水深帯域に応じた適切なグリッドサイズ（ノード間隔）を適切に規定することが大変重要である。CUBE 水深のグリッドサイズは、安全な船舶交通を担保する際に必要不可欠な異物の検出限界に関係する重要な指標である。IHO S-44 第 5 版が定める標準的な異物（1 m / 2 m 立方体）を検出するには、少なくとも異物サイズの半分の大きさのグリッドサイズ（0.5 m / 1 m グリッドサイズ）の CUBE 水深が必要であるという事実は水路測量にとって重要である。CUBE 水深のグリッドサイズを規定する際には、マルチビーム測深機の異物の検出限界（水平分解能）を表す直下ビームのフットプリント（ビーム幅と水深に比例して大きくなる性質を有する）に即して定めることで、マルチビーム測深データの本来持っている異物検出能力を最大限まで引き出すことができる。また、より小さな異物の検出を容易にするためには、より小さいグリッドサイズの CUBE 水深測量成果を作成する必要があるため、高密度測深の重要性がより一層高まることも忘れてはならない。海外事例を参考にしながら、船舶交通の安全を脅かす異物を見落とすことがないという前提で、マルチビーム測深作業から CUBE 水深測量成果作成までの一連の水深測量作業全体の最大効率化を図るため、現実的に達成可能な測深点密度も考慮しながら、最適なグリッドサイズを規定する必要がある。

異物・ノイズ判別を伴う CUBE 水深の目視判

断による仕上げ作業は、CUBE 水深を海図作成のための水深測量成果として採用するために必要不可欠な作業である。本作業の標準的な手順は、海外事例を参考に、本作業の実践を通じて、より効率的な手法を確立していくことが望まれる。現時点での最善策は、CUBE 水深やそれ以外の属性情報を用いた目視判断による手法と同時に、米国の QcTools をはじめとする CUBE 水深の異常箇所の自動検出ツールも積極的に使用していくことであると考えられる。また、後者の CUBE 水深の異常箇所の自動検出ツールは、点検箇所の絞り込みや操作性の面等において、改善の余地が残っている。海外の動向を注視しつつ、更なる効率化に向けて、独自の自動検出ツールを開発していくことも一つの選択肢として考えられる。

水深測量成果フォーマットについては、現在の LMD ファイルを入力とした海図作成フローを考えると、BAG 形式へ移行するには時間を要すると考えられる。移行期間の暫定として、例えば、CUBE 水深を現状 LMD ファイルと同形式に出力した CUBE-LMD ファイル（経度、緯度、CUBE 水深、等）を水路測量成果とすることが考えられる。ただし、Geotiff 形式のように手軽に視覚化可能なラスター水深で、水深データの不確かさ属性や水深測量データに関するメタ情報も付与できる BAG 形式は、水路測量にとって魅力的であることは事実である。既存の水深測量成果フォーマットからのスムーズな移行を意識しつつ、将来的には、GIS 上で高速に視覚化可能なラスターの利点を享受できる BAG 形式を目指していくことが望ましい。

これまでの議論のように、現在、日本のマルチビーム水深測量は、水深測量成果の在り方という根本的な部分の考え方を見直すべき時期を迎えていると考えられる。このような根本的な考え方の転換は、マルチビーム測深技術が年々進歩を遂げている状況下において、安全な船舶交通を担保する海図のため水路測量という変わらない価値を守り続けるために必要不可欠な変化だと捉えることができる。今後は、CUBE 水深を成果としたマル

チビーム水深測量の導入へ向けて、試行錯誤しながら、水路測量技術者が共有すべきこのような新しい考え方の浸透を目指していきたい。

謝 辞

第三管区海上保安本部海洋情報部、測量船「はましお」の職員・乗組員の皆様には、CUBE 水深を説明するためのマルチビーム測深データの提供等でご支援・ご協力いただきました。第五管区海上保安本部海洋情報部海洋調査課 友久武司官をはじめとする皆様、第四管区海上保安本部海洋情報部海洋調査課の皆様には、CUBE 水深を測量成果とするための先行的な試行において多大なご協力いただきました。また、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ご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

- Calder, B. & Wells, D. (2007) CUBE User's Manual, Version 1.13, University of New Hampshire, USA.
- Calder, B., et al. (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.
- International Hydrographic Organization (2008) IHO Standards for Hydrographic Surveys Special Publication No. 44, 5th Edition, IHO, Monaco.
- International Hydrographic Organization (2012) IHO Geospatial Standard for Hydrographic data Special Publication No. 102, Edition 1.0, IHO, Monaco.
- 海上保安庁 (2019) 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, 平成 31 年 3 月 25 日保海海第 132 号により一部改正), 海上保安庁, 東京.

- 菊池眞一（2015）新しい電子海図と水深カバレッ
ジ，季刊水路，Vol. 173, 16-23.
- 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 2019 年 10 月 9 日.
- 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.
- Masetti, G., Faulkes, T., & Kastrisios, C. (2019)
Hydrographic Survey Validation and Chart
Adequacy Assessment Using Automated
Solutions, US HYDRO 2019, March 18-21.
- 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.
- 小野寺健英（2010）最近の MB（マルチビーム）
測深データ処理ソフト，平成 21 年度 海洋情
報部研究成果発表会，平成 22 年 2 月 16 日.
- Smith, S. M., Alexander, L., & Armstrong, A. A.
(2002) The Navigation Surface: A New
Database Approach to Creating Multiple
Products from High Density Surveys,
International Hydrographic Review, Vol.3, 12-
26.
- 吉澤 信・他（2019）27 メートル型測量船「は
ましお」，海洋情報部研究報告，Vol. 57, 43-
61.

要 旨

海外の先進的な水路機関では，現在，マルチ
ビーム水深測量成果として CUBE 水深を採用し
ている．本報告では，海外で発展してきた CUBE
アルゴリズムと CUBE 水深を成果としたマルチ
ビーム水深測量の有用性について解説し，その背
景にある根本的な考え方の転換について議論す
る．