

デュアルヘッドマルチビーム音響測深機の測深設定の違いによる データ品質と異物検出能力の比較検証[†]

辻 泰好^{*1}, 倉敷朝子^{*2}

Comparative verification of data quality and feature detection capability of dual-head
multibeam echosounder with different sonar settings[†]

Yasutaka TSUJI^{*1} and Asako KURASHIKI^{*2}

Abstract

In order to efficiently acquire high-quality data with multibeam echosounders, it is crucial to thoroughly understand the impact of sonar settings on data quality. In this paper, systematic verification tests of vessel speed, swath angle, and pulse length focusing on the feature detection capability were conducted in shallow waters approximately at 20 m depth with a fish reef with a specific height of 5.6 m near Kure Port, using the dual-head multibeam echosounder installed on the S/V *Kurushima* of the 6th Regional Coast Guard Headquarters. The verification confirmed that a vessel speed of 6–10 knot or less, a swath angle of 110–120° (55–60° per side) or less, and a pulse length that is not unnecessarily large are appropriate for sonar settings.

1 はじめに

海上保安庁（以下、当庁という。）海洋情報部では、明治 4（1871）年に兵部省海軍部水路局が発足して以来、海図の作製及び最新維持情報の提供のために日本周辺海域を調査する水路測量を実施してきた。水路測量は船舶の航海安全を図るために必要不可欠であり、海洋情報業務の柱となっている。

日本沿岸海域における水路測量技術では飛躍的な進歩を遂げており、現在ではマルチビーム音響測深機が主流の測深機器となっている。マルチビーム音響測深機が当庁に導入されたのは昭和

58（1983）年の測量船「拓洋」に搭載された米国 General Instruments 社製 Seabeam がはじまりであるが、浅海域におけるマルチビーム音響測深機の導入は平成 7（1995）年の RESON 社製 SEABAT9001 型であった（住吉・他、2021）。マルチビーム音響測深機の導入により、詳細かつ信頼性の高いデータを広範囲に取得することにより、船舶の航海安全をより一層高めることが可能となった。

マルチビーム音響測深機は、スワスの直下に比べて斜の測深データの品質が低いという特性がある（住吉・他、2020）。このような特性を少しで

[†] Received October 10, 2023; Accepted December 8, 2023

* 1 第五管区海上保安本部 海洋情報部 Hydrographic and Oceanographic Department, 5th Regional Coast Guard Headquarters

* 2 大洋調査課 Offshore Surveys Division

も軽減するため、当庁では近年、デュアルヘッド型マルチビーム音響測深機を使用している。2組の送受波器を搭載したデュアルヘッド型マルチビーム測深機（R2Sonic社製 Sonic2024DH）を平成25（2013）年度に管区海上保安本部所属の20m型測量船7隻に導入した（吉澤・他，2018）。この測深機の導入により、広範囲なスワス測深幅の設定や高密度な測深データの取得が可能となった（住吉・他，2016；吉澤・他，2018）。

マルチビーム音響測深機において、高品質なデータを効率的に取得するためには、測深設定の違いによるデータ品質を詳細に把握することが重要である。

デュアルヘッド型マルチビーム音響測深機の導入に際し、マルチビーム音響測深機 Sonic2024 において様々な検証を実施してきた。例を挙げると、水深100 m以上の海域の海底面に着目して、シングルビーム音響測深機の測深値との比較による深さの測定誤差の限度の照合やビームの角度別のばらつきの検証、ロールスタビライズの検証等である。これらの検証結果により、スワス角、ロールスタビライズ機能、発振周波数等に関する推奨設定が報告されている（吉澤・他，2018）。

このように、マルチビーム音響測深機の測深設定に関する検証は多く実施されてきたものの、水路測量において重要な水深20 m程度の海域で異物検出に着目した体系的な検証結果は報告されていない。そのため、本稿では、呉港付近の魚礁付近において水路測量及び検証を実施し、高品質なデータを効率的に取得するため、船速、スワス角、パルス長等に関する測深設定の検討結果について報告する。

2 検証の概要

2.1 各検証の目的と実施内容

測深設定の違いによるデータ品質を詳細に確認するために観測海域であるオードノ礁付近の平坦な海底面と設置させている魚礁を用いて、Fig. 1のように、測深時における①船速の違い、②スワス角の違い、③パルス長の違いを確認する測深作

業を実施した。

2.1.1 船速の違いの検証

当庁の管区が保有する測量船では、測深中の船速を6 - 8 knotとしているが、品質の良いデータを取得できる船速の許容範囲を確認し、データ品質と調査効率の観点で最適な船速を検討するため、船速は4, 6, 8, 10, 12 knotの5種類とし、魚礁の直上を通る測線を東から西の同一方向で各2回測深した。CUBE水深、測深点密度、魚礁の最浅水深及び測深点数に着目して、船速ごとに比較検証した。なお、本検証ではスワス角110°（片舷55°）、パルス長30 μ sと設定した。

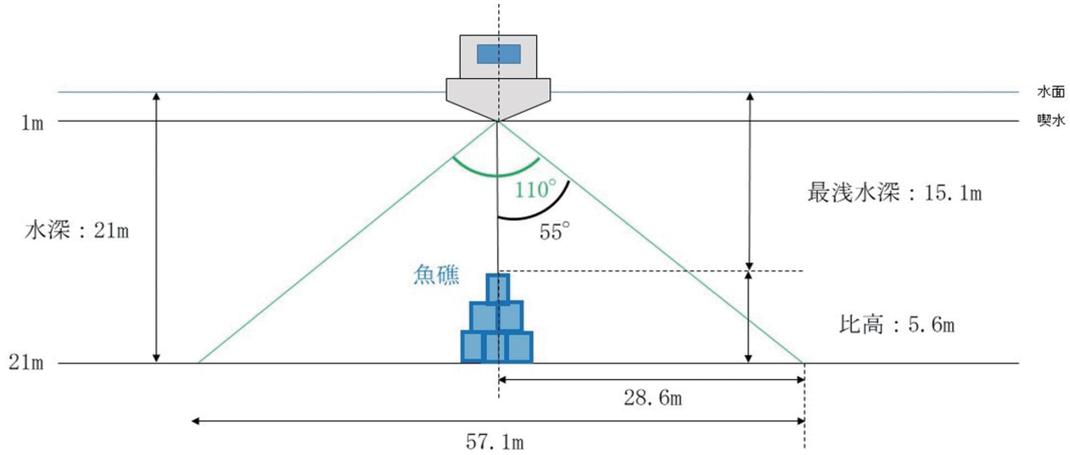
2.1.2 スワス角の違いの検証

当庁がCUBE処理を行う際に使用するスワス角は110°（片舷55°）であるが、スワス角を広げた場合でも異物を検出可能か確認し、データ品質と調査効率の観点で最適なスワス角を検討するため、スワス角は110°、120°、130°、140°の4種類とし、魚礁が各スワス角の右舷測深幅の中心にくるよう4種類の測線を設定して、各測線を東から西の同一方向で2回測深を実施した。魚礁の最浅水深、測深点数を中心に着目して、スワス角ごとに比較検証した。なお、本検証では船速7 knot、パルス長30 μ sと設定した。

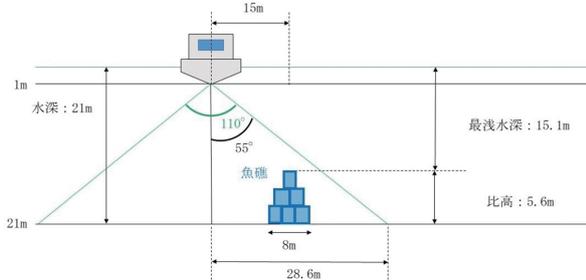
2.1.3 パルス長の違いの検証

マルチビーム音響測深機の取扱説明書（株式会社東陽テクニカ，2013）によると、水深20 m以下におけるパルス長の標準値は15 μ sから20 μ sとされているが、パルス長を大きくした場合の異物検出に対する影響を確認し、異物検出に効果的なパルス長を検討するため、パルス長は15, 50, 100, 200 μ sの4種類とし、魚礁の直上を通る測線を東から西の同一方向で2回測深した。魚礁の最浅水深、測深点数を中心に着目して、パルス長ごとに比較検証した。なお、本検証では船速7 knot、スワス角110°（片舷55°）と設定した。

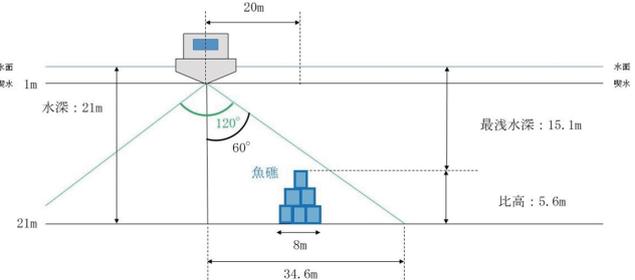
(a) Vessel Speed: 4, 6, 8, 10, 12 knot
Pulse Length: 15, 50, 100, 200 μ s



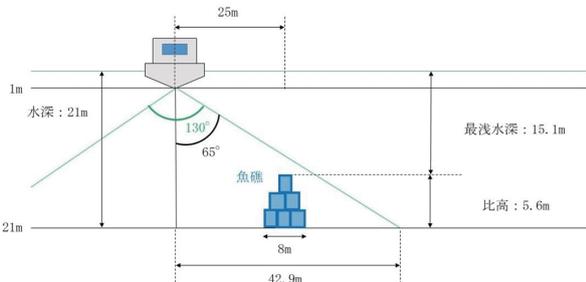
(b) Swath Width: 110° (±55°)



(c) Swath Width: 120° (±60°)



(d) Swath Width: 130° (±65°)



(e) Swath Width: 140° (±70°)

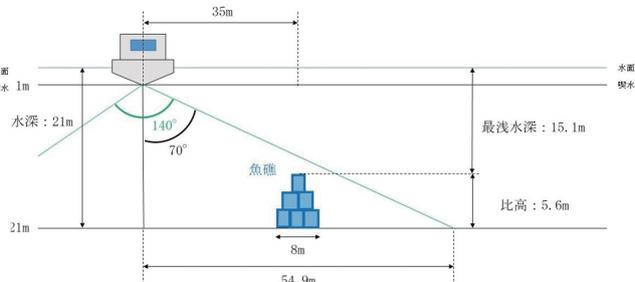


Fig. 1. Location of a fish reef and swath in each verification test.

図 1. 各検証試験における魚礁とスワスの位置関係.

2.2 観測海域

2022年7月20日に呉港南方にあるオードノ礁付近で第六管区海上保安本部の測量船「くるしま」により測深作業を実施した。Fig. 2に示すとおり、オードノ礁付近の水深は概ね20m程度であり、測深範囲の中央部に比高5.6m、最下部の一辺の長さ8mの魚礁が存在する。

2.3 使用機器

測量船「くるしま」に搭載のデュアルヘッド型マルチビーム音響測深機を使用した。Table 1に示すとおり、本測深機はR2Sonic社製マルチビーム音響測深機Sonic2024とその周辺機器からなる(吉澤・他, 2018)。

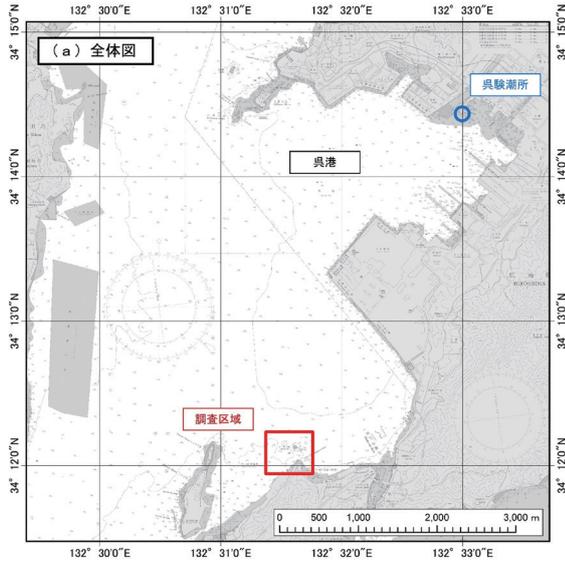


Fig. 2. (a) The area of the verification tests.
図 2. (a) 検証試験の海域。

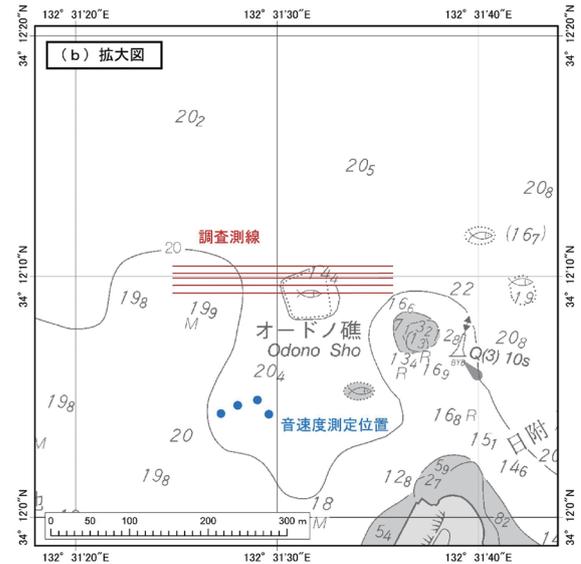


Fig. 2. (b) Planned survey lines of the verification area.
図 2. (b) 検証海域の計画測線。

測量船「くるしま」の測深機は、デュアルヘッド型マルチビーム音響測深機となっているため、2組の送受波器が左右それぞれ25度の傾いた形で船首側に取り付けられている (Photo 1)。

測位・動揺検知のため、GNSS アンテナ2個がマストに設置されており (Photo 2), IMU (Inertial Measurement Unit: 慣性計測装置) は観測室に設置されている (Photo 3)。

表面音速度の補正のために、船首キール部の単管パイプ内に音速度センサー AML 社製 micro X SV が差し込まれており (Photo 4), リアルタイムでの表面音速度の補正が可能な機構となっている。また、各層ごとの水中音速プロファイルの計測には AML 社製 Smart SV X を使用した。

3 データ収録・処理

各検証における測深データの収録では、xylem 社製ソフトウェア HYPACK 2019 を使用した。測深データの処理では、CUBE 処理 (住吉・他, 2020; 海上保安庁, 2022) に準じた処理を行い、Teledyne Geospatial 社製ソフトウェア CARIS HIPS & SIPS 10.4 (以下、CARIS という。) を使用した。続いて、データ処理の概要について以下に示す。

Table 1. Main Components of Sonic2024.
表 1. Sonic2024 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
水中音速度計	AML社	smart SV X
測位・動揺検出器	Applanix社	POS MV Wavemaster
データ収録装置	マウスコンピューター社	MDV-GZ6100X
UPS	ユタカ電機社	UPS1410HP

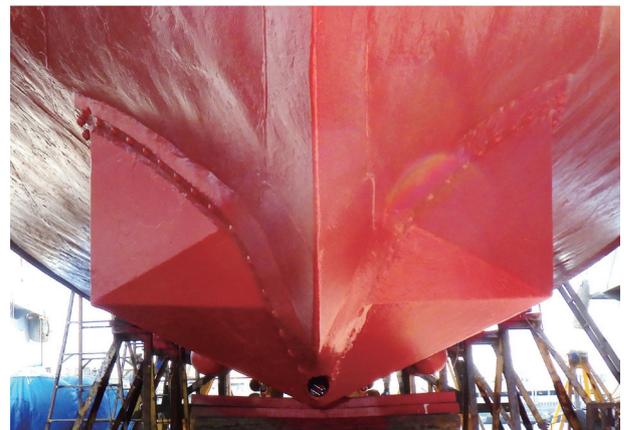


Photo 1. Sonar heads on the hull of S/V Kurushima (viewed from the bow).

写真 1. 測量船「くるしま」の船底を船首から見たソナーヘッドの様子。



Photo 2. Mast of S/V *Kurushima* equipped with GNSS antennas.

写真2. GNSS アンテナを設置した測量船「くるしま」のマスト。



Photo 3. IMU installed at the bottom of the instrument rack of S/V *Kurushima*.

写真3. 測量船「くるしま」観測機器棚の下部に設置されたIMU。



Photo 4. Surface sound speed sensor on the hull of S/V *Kurushima*.

写真4. 測量船「くるしま」船底の表面音速度計。

3.1 海上位置の高精度化

高精度の海上位置データを測深データに適用するため、Applanix社製ソフトウェア POSPac MMS 6.2を用いて、海上位置データの後処理キネマティックを実施した。電子基準点は検証海域から約5 kmの距離にある「江田島」を使用し、シングルベース処理を行った(住吉・他, 2019)。

3.2 潮高改正

検証海域付近の常設験潮所である呉験潮所(第六管区海上保安本部所管)の5分間隔の潮位観測値を使用した。潮位データに異常値が含まれていないことをCARISのTide Editorにより点検した後、測深データの潮高改正を行った。

3.3 水中音速度補正

深度ごとの音速である水中音速プロファイルは、検証海域付近で計測した。音速プロファイルの時間変化を適切に補正するため、測深作業前に1回、測深作業中に2回、測深作業後に1回の計4回の計測を行った。水中音速プロファイルは、水中音速度計を水面から海底付近まで下ろす際の計測値と海底付近から水面まで引き上げる際の計測値を平均化して、深度1 mごとのデータとして作成した。水中音速プロファイルに異常値が含まれていないことをCARISのSV Editorにより点検した後、測深データの水中音速補正を行った。

3.4 動揺補正

本船に搭載されているApplanix社製POS/MV Wave Master V5により収録された高精度の動揺データを、測深データの補正值として適用した。

3.5 CUBE水深

CUBE水深のグリッドサイズは、水路業務準則施行細則(海上保安庁, 2022)に準じて0.5 mとした。なお、CUBE水深の算出時に必要となる測深データの総伝播不確かさは、各センサーの計測精度等を基にCARISにより算出した。

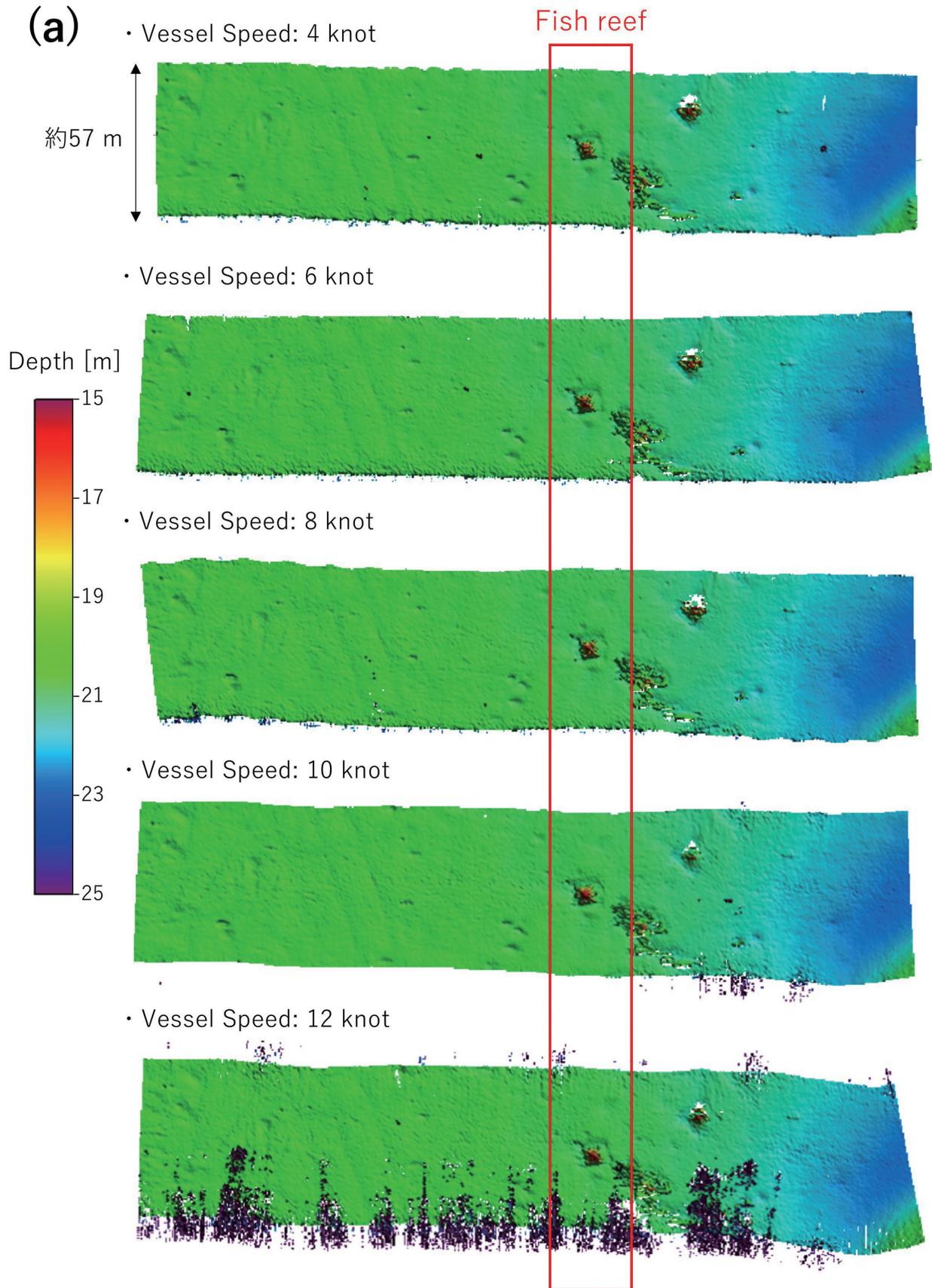


Fig. 3. CUBE depth surfaces at different vessel speeds. (a) Before manual noise removal.
図3. 異なる船速での CUBE 水深. (a) 手動ノイズ除去前.

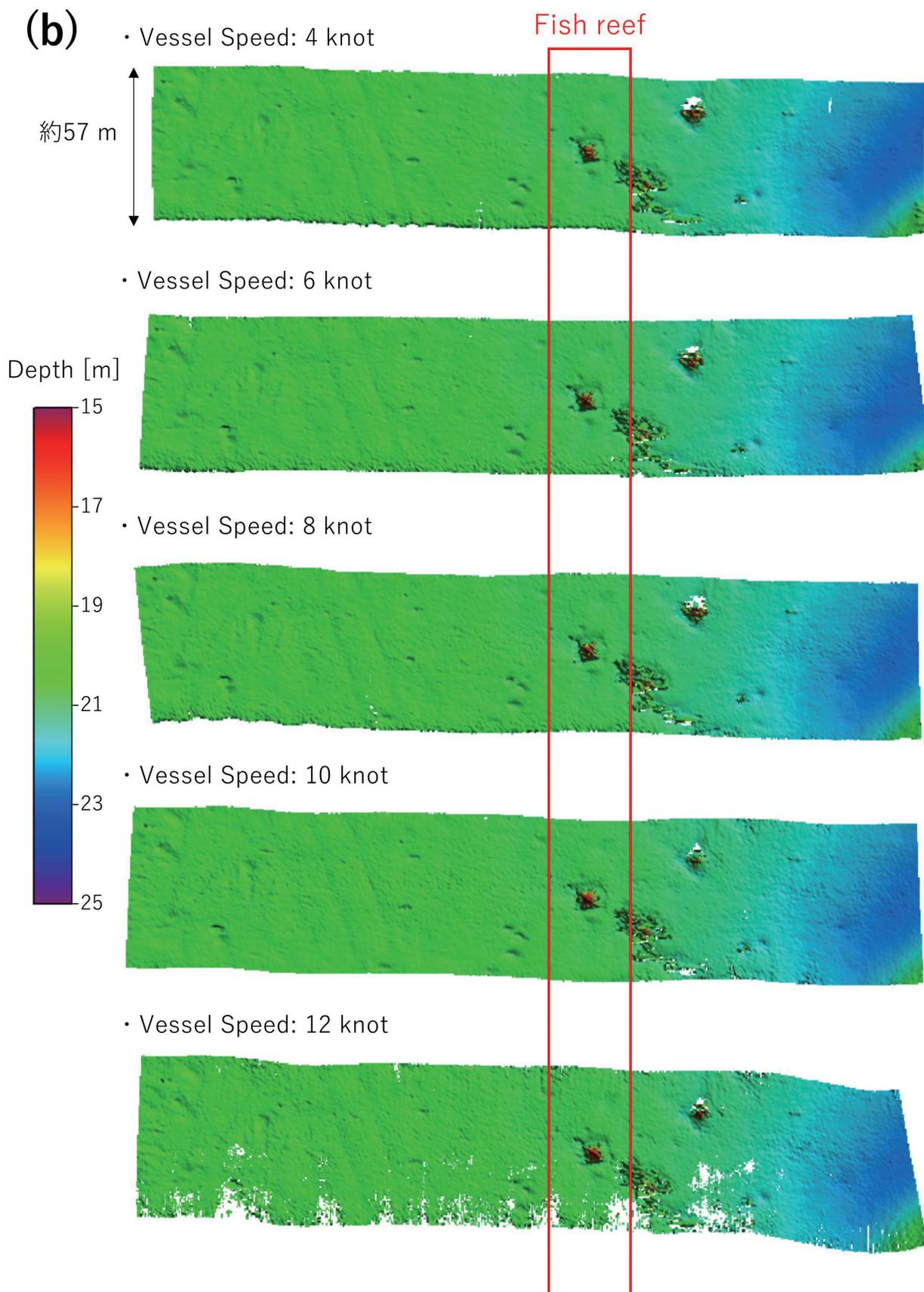


Fig. 3. CUBE depth surfaces at different vessel speeds. (b) After manual noise removal.

図3. 異なる船速での CUBE 水深. (b) 手動ノイズ除去後.

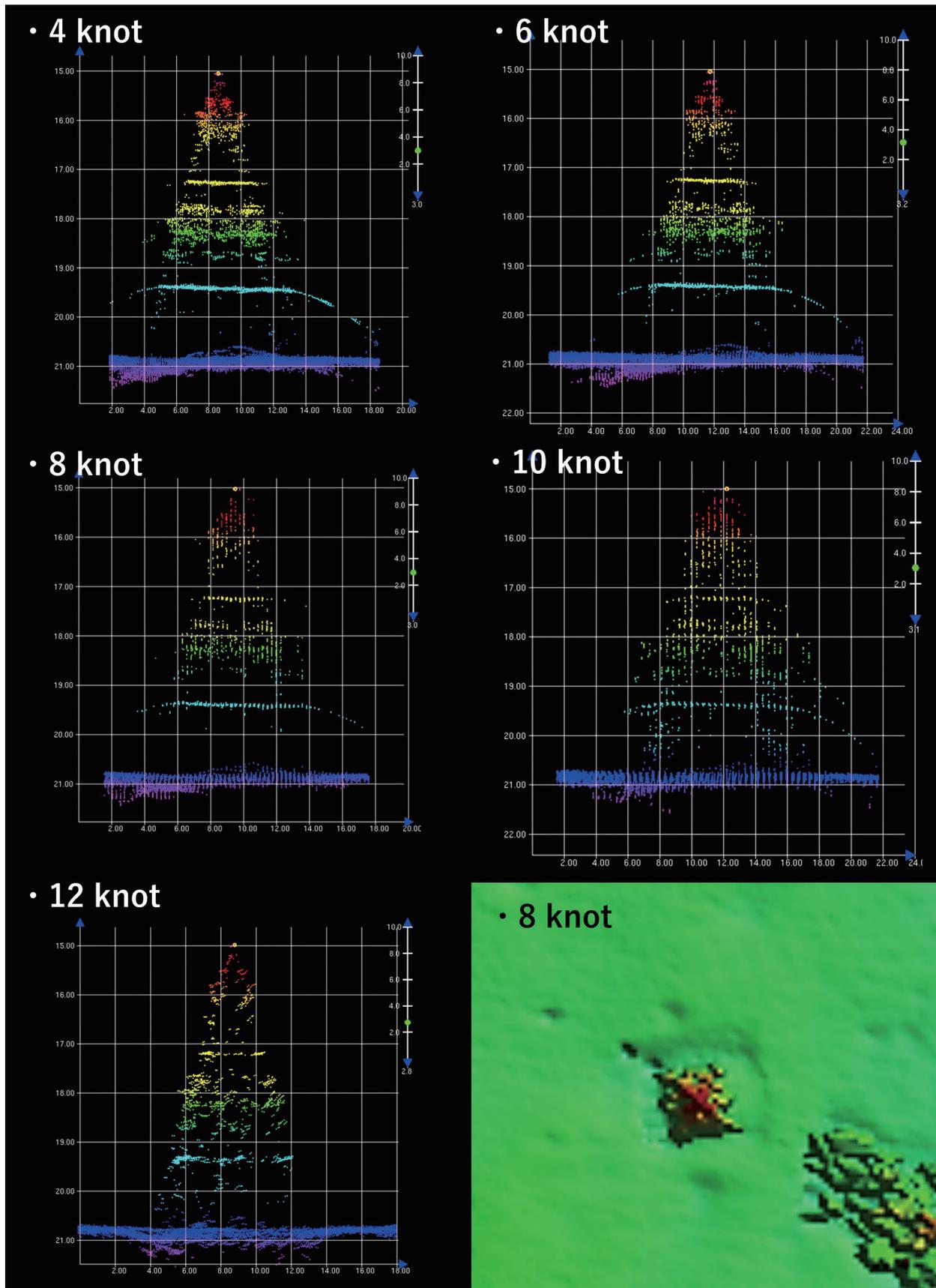


Fig. 4. Soundings of a fish reef at different vessel speeds (cross section).

図4. 異なる船速での魚礁の測深点 (断面図).

4 検証結果

4.1 船速の違いの検証

船速 4 knot から 12 knot で取得したノイズ処理を実施していない CUBE 水深を Fig. 3 (a) に、ノイズ処理を実施した CUBE 水深を Fig. 3 (b) に示す。船速が 12 knot では、スワス端付近のビームで、測深ノイズ及び測深点が存在しない白抜きグリッドが顕著に増加した。また、スワス直下付近について、全ての船速で魚礁及び海底面が捉えられていた。

各グリッドの CUBE 水深の算出に使用された測深点数 Density のスワス全体での平均値及び標準偏差は、4 knot で約 25 点 (± 13 点), 6 knot で約 16 点 (± 8 点), 8 knot で約 13 点 (± 6 点), 10 knot で約 8 点 (± 4 点), 12 knot で約 6 点 (± 4 点) であり、船速が遅いと Density が高密度で、船速が速いと低密度であるという結果であった。Density は、全ての船速において、スワス直下付近では高密度で、スワス端付近では低密度であった。

スワス直下付近で捉えた魚礁の測深点の側面図を Fig. 4 に示す。魚礁の最浅水深 15.0 m は、全ての船速で捉えられており、魚礁トップ水深の船速による違いは見られなかった。魚礁をとらえた測深点数は、4 knot で 5422 点, 6 knot で 3454 点, 8 knot で 2561 点, 10 knot で 2133 点, 12 knot で 1443 点であり、船速が速くなるほど測深点数が少なくなるという結果となった。

4.2 スワス角の違いの検証

スワス角 110° (片舷 55°), 120° (片舷 60°), 130° (片舷 65°), 140° (片舷 70°) で取得したノイズ処理を実施した CUBE 水深を Fig. 5 に示す。スワス角 120° では、スワス端付近で CUBE 水深の白抜きグリッドが徐々に増加し、スワス角 130° と 140° では、スワス端付近の CUBE 水深の白抜きグリッドが顕著に増加することを確認した。

Density のスワス全体での平均値及び標準偏差は、スワス角 110° で約 11 点 (± 5 点), 120° で約 9 点 (± 6 点), 130° で約 6 点 (± 5 点), 140°

で約 5 点 (± 4 点) であり、スワス角を広げると低密度になるという結果であった。

各スワス角の右舷測深幅の中心付近で捉えた魚礁の測深点の側面図を Fig. 6 に示す。魚礁は全てのスワス角で捉えられていたものの、最浅部の測深値はスワス角 110° と 120° では約 15 m, スワス角 130° では約 12 m, 140° では約 11 m となり、スワス角 130° と 140° では本来の最浅水深 15.0 m より浅くなっていた。また、スワス角 130° と 140° では、魚礁と思われる測深点が左右方向と鉛直上向きに広がり、魚礁の形状も不鮮明となる傾向が見られた。他方で、スワス角 110° と 120° では、魚礁を鮮明にとらえており、その測深点数は、 110° で 1212 点, 120° で 1039 点という結果になった。

4.3 パルス長の違いの検証

パルス長 $15 \mu\text{s}$, $50 \mu\text{s}$, $100 \mu\text{s}$, $200 \mu\text{s}$ で取得したノイズ処理を実施した CUBE 水深を Fig. 7 に示す。全てのパルス長で CUBE 水深に大きな違いがないことがみてとれた。

Density のスワス全体での平均値及び標準偏差は、全てのパルス長で約 13 点 (± 6 点), であり、パルス長による Density への影響がないという結果となった。

スワス直下付近で捉えた魚礁の測深点の側面図を Fig. 8 に示す。魚礁の最浅水深 15.0 m は、全てのパルス長で捉えられており、魚礁トップ水深のパルス長による違いは見られなかった。ただし、パルス長を $15 \mu\text{s}$ から大きくした場合、魚礁の形状は鉛直方向に若干不鮮明になる傾向が見られた。魚礁をとらえた測深点数は、 $15 \mu\text{s}$ で 2962 点, $50 \mu\text{s}$ で 2792 点, $100 \mu\text{s}$ で 3158 点, $200 \mu\text{s}$ で 2923 点であり、パルス長に違いは見られないという結果となった。

5 考察

5.1 船速の違いの検証

本検証では、スワス直下付近で捉えた魚礁の最浅水深の船速の違いは見られなかった。より小さ

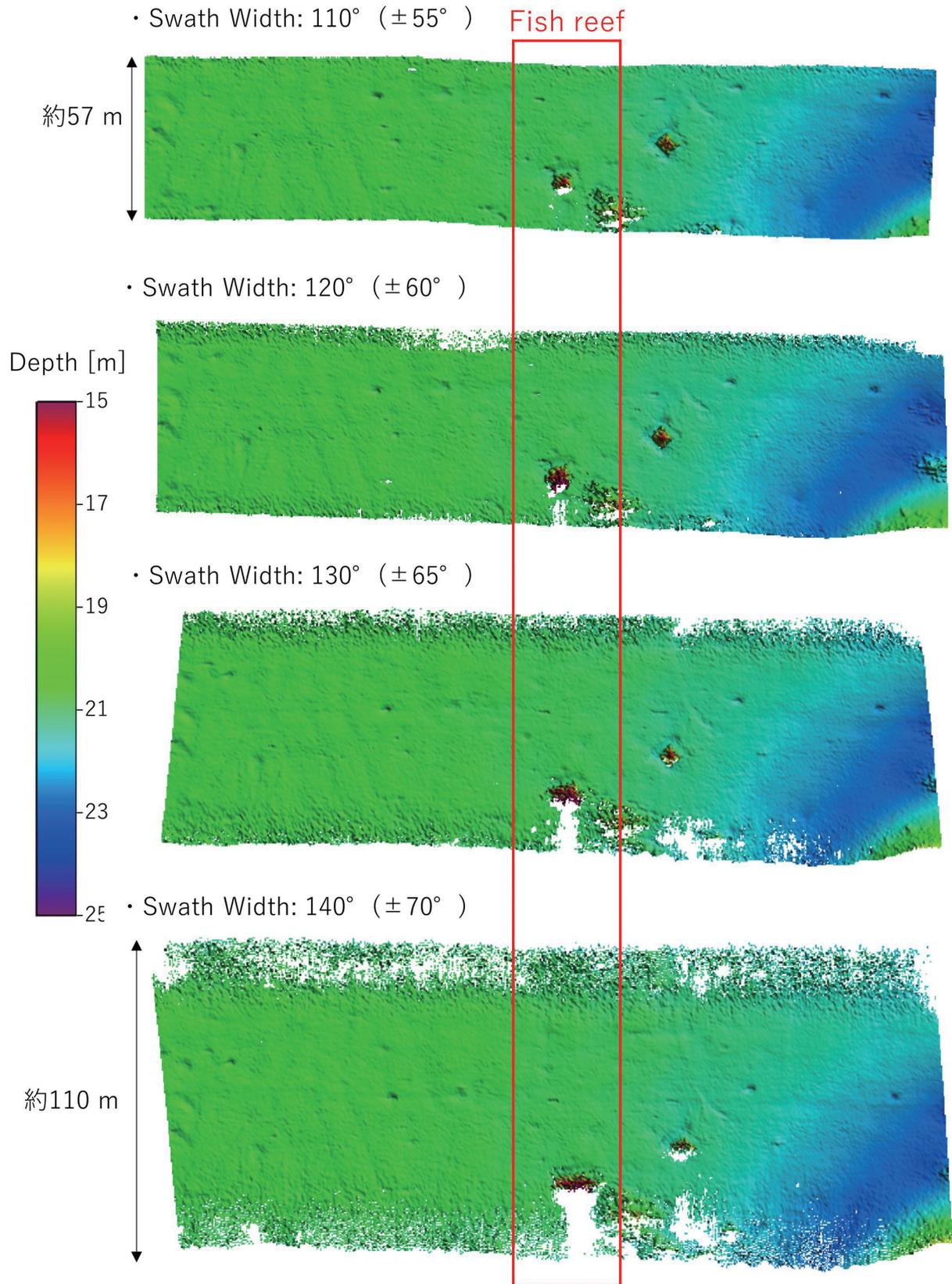


Fig. 5. CUBE depth surfaces at different swath angles.
図5. 異なるスワス角でのCUBE水深.

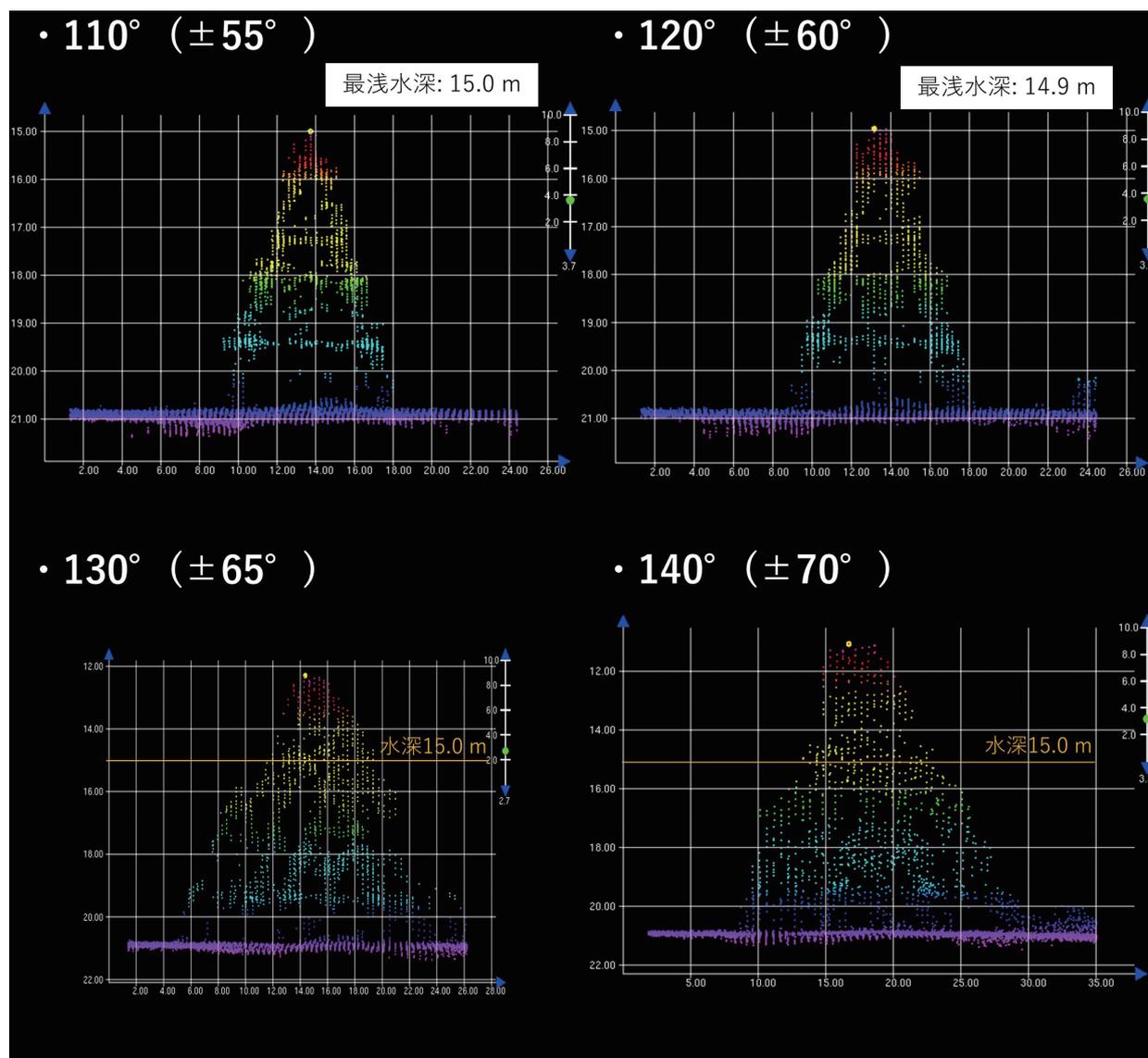


Fig. 6. Soundings of a fish reef at different swath angles (cross section).

図6. 異なるスワス角での魚礁の測深点 (断面図).

い異物の検出も念頭に、スワス端付近のビームの測深ノイズを抑え、0.5 m グリッドの測深点密度で5点以上を概ね確保するためには、船速6 - 10 knot 以下が妥当であると考えられる。

5.2 スワス角の違いの検証

本検証では、スワス片舷の中心付近で捉えた魚礁の最浅水深を精確に取得し、0.5 m グリッドの測深点密度で5点以上を概ね確保するためには、スワス角110 - 120° (片舷55 - 60°) 以下が妥当であると考えられる。また、本検証のように水

深20 m 程度以下の浅い海域では特に、スワス角110° (片舷55°) から若干広げられる可能性が示唆される。

5.3 パルス長の違いの検証

本検証では、スワス直下付近で捉えた魚礁の最浅水深等の大きな違いは確認されなかったものの、パルス長が小さい方が魚礁の形状が若干鮮明に捉えられたため、パルス長を不要に大きく設定しないことが妥当であると考えられる。

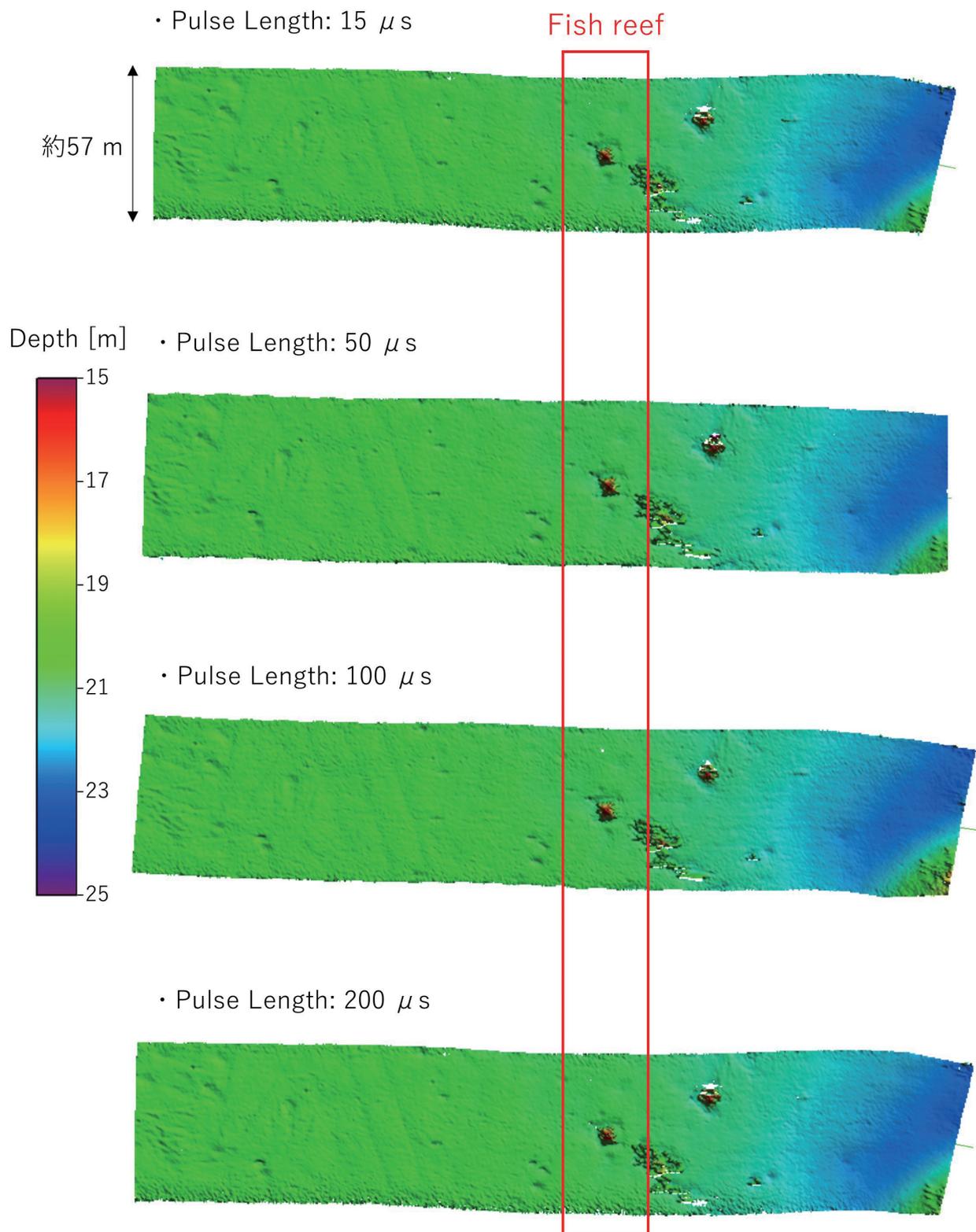


Fig. 7. CUBE depth surfaces at different pulse lengths.

図7. 異なるパルス長でのCUBE水深.

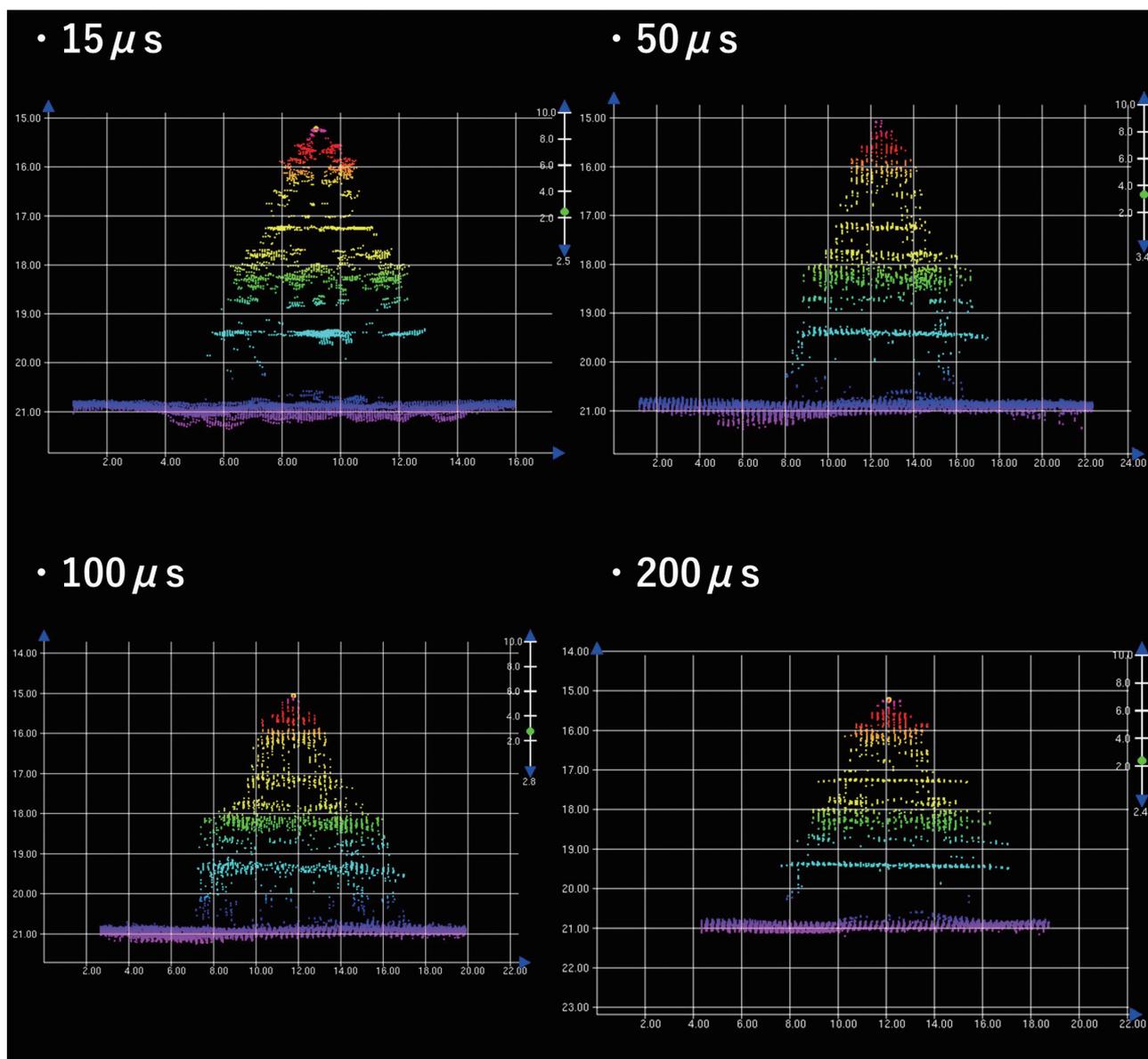


Fig. 8. Soundings of a fish reef at different pulse lengths (cross section).

図 8. 異なるパルス長での魚礁の測深点 (断面図).

謝 辞

第六管区海上保安本部海洋情報部、測量船「くるしま」の職員・乗組員の皆様には、本検証実施に際しての測深作業で多くのご支援・ご協力いただきました。また、CUBE 処理・解析においては、令和 4 年度の特修科にてご指導いただいた海上保安大学の松本 教授、南 元准教授（現 技術・国際課）より多くのご助言をいただき、本検証結果を作成することが出来ました。そして、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

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（2022）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 4 年 3 月 8 日保海沿第 184 号により一部改正），

海上保安庁, 東京.

住吉昌直・吉澤 信・木下裕巳・衛藤哲大・福本
拓生 (2016) 音響掃海機の発振出力調整によ
るマルチビーム測深機の干渉ノイズ軽減効
果, 海洋情報部研究報告, 53, 9-15.

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.

住吉昌直・佐伯達也・大久保匡騎・森 雄基・森
弘和・吉澤 信・長野勝行・栗田洋和・鐘尾
誠・安原 徹・長澤亮佑 (2021) 水路測量に
おける技術の進歩と近年の取り組み, 海洋情
報部研究報告, 59, 1-20.

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.

要 旨

マルチビーム音響測深機において, 高品質な
データを効率的に取得するためには, 測深設定の
違いによるデータ品質を詳細に把握することが重
要である. 本稿では, 第六管区海上保安本部の測
量船「くるしま」に搭載されたデュアルヘッド型
マルチビーム音響測深機を用いて, 呉港付近の水
深 20 m 程度の比高 5.6 m の魚礁のある浅海域に
おいて, 異物検出能力に注目した, 船速, スワス
角, パルス長に関する体系的な検証を行った. 本
検証では, 船速は 6 - 10 knot 以下, スワス角は
110 - 120° (片舷 55 - 60°) 以下, パルス長は
不要に大きくしないことが測深設定として適切で
あることが確かめられた.