

マルチビーム音響測深機のウォーターカラムデータを活用した 海洋物理構造の可視化に関する初期検討[†]

長澤亮佑*, 堀之内龍一*

Initial study on the visualization of physical structures in the ocean
utilizing the water column imaging of multibeam echo sounders[†]

Ryosuke NAGASAWA* and Ryoichi HORINOUCI*

Abstract

Modern multibeam echo sounders have come to be capable of recording entire underwater echo profiles. The multibeam water column imaging discovers the spatial and temporal distribution of acoustic scatterers in water mass, potentially providing essential information to elucidate dynamic processes occurring inside the ocean. This technical report considers a processing method to highlight characteristic acoustic patterns that result from oceanographic phenomena and applies the technique to data obtained by the typical Mills-cross echo sounders. The result shows distinctive mid-water acoustic anomalies of laminar and periodical patterns. The laminar pattern shows abrupt vertical changes in the echo intensity, which might correlate with the seawater profile obtained by XCTD. The periodical pattern exhibits a train of intertwined waves resembling shear instability like the Kelvin-Helmholtz billow. The result suggests the ability of multibeam echo sounders to visualize pycnocline in the water column, which would further advance physical oceanographic study in terms of analyzing the 3-dimensional spatial distribution of mid-water acoustic scatterers.

1 はじめに

マルチビーム音響測深機 (MBES: multibeam echo sounder) は, 高い指向性をもつ複数の音響ビームの形成によって水底を面的に観測する装置であり, 水路測量に広く用いられている. 近年では測深データのみならず, ウォーターカラム (water column: ソナーと水底の間の部分) におけるエコーを収録可能な機種も一般的である. このエコーデータの集合体であるウォーターカラ

ムデータを活用することにより, 水中における音響的特性の 3 次元的な可視化という観点もたらされる. 測深データには反映されにくい海中の異常物についても高い分解能をもって可視化する可能性を有するため, その活用範囲は多岐にわたる. 具体的には, 航海の安全確保の観点で重要となる沈船等の浅所の特定 (Hughes Clarke et al., 2006 など) のほか, 海底から噴出するガス等の可視化, 底生の大型藻類の音響的な可視化, 漁業

[†] Received August 19, 2022; Accepted October 4, 2022

* 大洋調査課 Offshore Surveys Division

資源の定量的な観測など、さまざまな領域で実用性が見出されている (Colbo et al., 2014).

ウォーターカラムデータはまた、海洋中の局所的な密度構造に由来する音響異常を可視化する可能性を有しており、海洋物理学領域での活用も期待される (Hughes Clarke, 2006; Colbo et al., 2014). 測深機が捉えることのできる音響異常は主に、水中の音響インピーダンス境界における後方散乱波によるものである。海洋中の等密度層に従って漂うプランクトン等の浮遊物質や、海洋中の密度躍層がその散乱源となり得ることが示唆されており (Lavery and Ross, 2007; Lavery et al., 2010; Ross and Lavery, 2012 など), MBES により得られる音響画像を解析することで、それらの空間的分布を明らかにすることが可能であると考えられる。その上で、定性的情報としての音響的描像と定量的な物理特性 (水温, 塩分, 圧力, 流速等) が対応づけられれば、時間的・空間的に疎となりやすい海洋物理観測分野において、稠密な情報をもった豊かな補助的資料をもたらすことが期待される。

海洋中の物理構造を音響的に可視化する試みは、長らくシングルビームソナーを用いた観測 (Moum et al., 2003; Lavery et al., 2010; Chang et al., 2016 など) やマルチチャンネル反射地地震探査を用いた反射波の解析 (Holbrook et al., 2003 など) によってなされてきた。それら手法によって得られる海洋中の描像は、基本的には深度方向及び調査船の進行方向を座標軸にもつ 2 次元的な画像である。これに対し、MBES によるウォーターカラムデータは、海洋中の局所的な音響特性を 3 次元的に記録するものであり、測深機が一般に備える高い角度分解能とレンジ分解能を背景に、微細な海洋物理構造へのフォーカスをより容易にするものと考えられる。MBES を用いた海洋物理学的研究の例としては、海洋中の Lee wave 及びそれに伴う乱流微細構造の空間的配置を可視化した Trevorrow (2005) が存在する。また、水路測量分野との融合的なトピックとして、内部波による水中音速場の空間変化がもたらす

MBES 測深データへの影響に関する研究 (Hamilton and Beudoin, 2010; Hughes Clarke et al., 2018) が存在する。依然として広く研究されている領域とはいえないものの、例えば海洋の内部波についてはその周期性及び波面の進行方向といった伝播を特徴づけるパラメータを解明する手がかりを与えることから、MBES の活用には潜在的な有用性が存在すると考えられる。本稿は、海上保安庁の測量船で得たウォーターカラムデータの実例を交え、海洋物理構造の可視化に関して MBES がもつ有用性について初期的な考察を紹介するものである。なお、MBES には様々な音響アレイ配置の形態が考えられるが、本稿では、線形の送波アレイとそれに直交する線形のハイドロフォンアレイ (受波アレイ) によってビームフォーミングを行うクロスファンビーム (Mills cross) 方式 (Mills and Little, 1953; Urick, 1983; 浅田, 1997; Lurton, 2010 など) のみを扱う。

2 MBES ウォーターカラム画像の基本特性

2.1 典型的なアーティファクトとノイズ

MBES で取得された典型的なウォーターカラムデータを画像として図化したものを Fig. 1 に示す。画像には、海洋中の物理現象に由来するエコーのみならず、様々なアーティファクト (artifact: 観測システム固有の特性や観測時のジオメトリの影響で生じる偽の像) やノイズが記録されている。海洋物理構造由来のエコーを特定するにあたり、それらの典型的な描像は適切に判別される必要がある。

2.1.1 サイドローブエコー

線形アレイが形成する音響ビームはメインローブ (main lobe) の周囲に複数のサイドローブ (side lobe) を伴う。例として、長さ L の線分上に音響素子が連続的に並んだ線形音響アレイを考える。個々の音響素子が同時に発振し、等方的に伝播する音波を発する場合、アレイから十分離れた位置 r における音圧は近似的に次の形で表される (Lurton, 2010)。

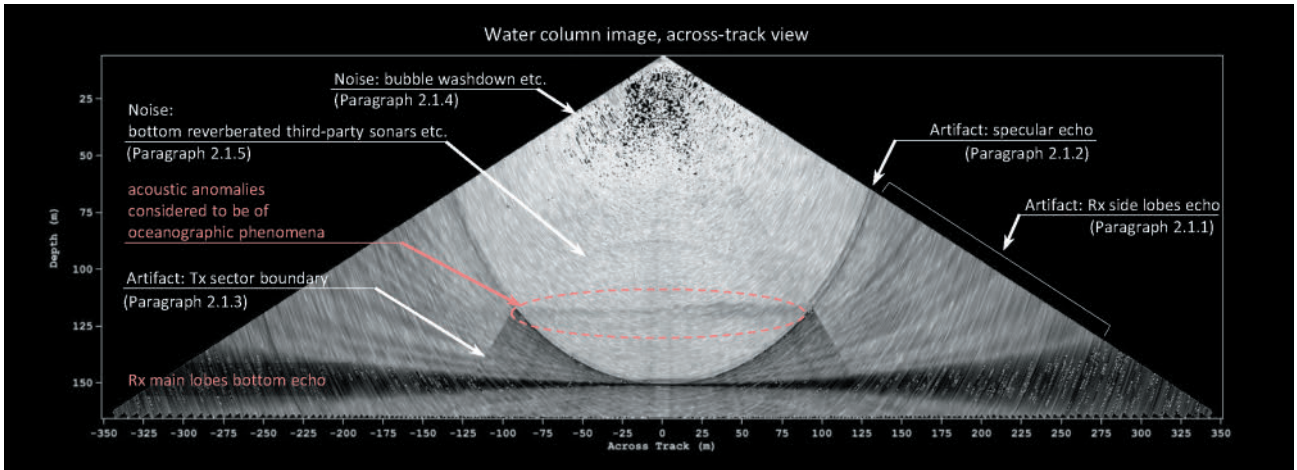


Fig. 1. An example of the multibeam water column across-track image obtained by Kongsberg Maritime EM710S echo sounder visualized using software Teledyne CARIS HIPS and SIPS version 11.4. Annotations indicate typical noises and artifacts that appeared as echoes.

図1. Kongsberg Maritime 社製 EM710S マルチビーム測深機で取得されたウォーターカラムデータの一例。ソフトウェア CARIS HIPS and SIPS ver. 11.4 を用いて図化した。エコーとして記録されたさまざまなアーティファクトやノイズを注記している。

$$p(r) \approx \frac{e^{-ikr}}{r} \left(\frac{\sin\left(k\frac{L}{2}\sin\theta\right)}{k\frac{L}{2}\sin\theta} \right)$$

ここで、アレイ中心は r の原点に存在するものとし、 k は波数、 θ はアレイの法線方向と位置ベクトル r のなす角である。この式から、音圧は角度 θ に関して sinc 関数様の空間分布をもつことがわかる。すなわち、アレイ法線方向に音圧が最大となるメインローブが存在し、その両側には音圧の強弱のパターンが対称的な形で繰り返される。このアナロジーは受波においても成立し、線形の hidrofon アレイがもつ感度の空間的分布も同様のパターンとなる。ある受波ビームに付随したサイドローブが海底面からのエコーを感知した場合には、そのビームのメインローブの向いた方向に偽のエコーが生じることとなり、これがウォーターカラム画像にアーティファクトとして現れる (Hughes Clarke, 2006)。模式図を Fig. 2 に示す。サイドローブはメインローブに比べ音圧レベルが抑制されるものの、一般にきわめて高い音響インピーダンスをもつ海底面からのエコーは感知されやすく、Fig. 1 に示したような縞状の

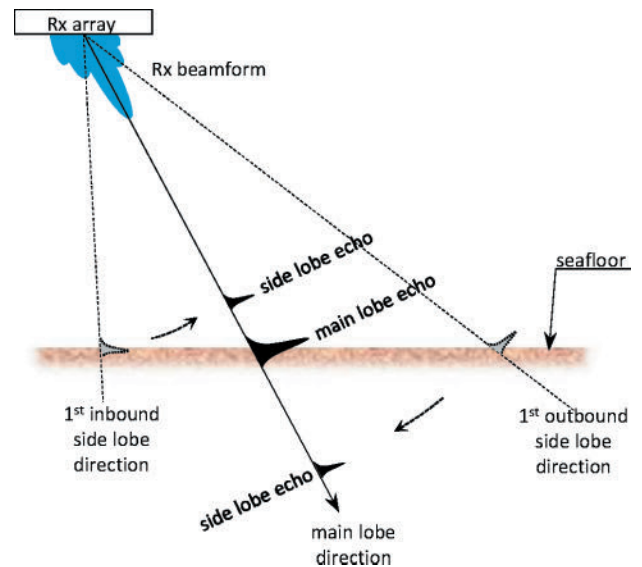


Fig. 2. Schematic image of the receiver side lobe interference on multibeam echo sounding. The bottom backscatter echo received by side lobes appears in the echograms in the main lobe pointing direction; the echoes result in banded artifacts in multibeam water column imaging.

図2. マルチビーム音響測深における受波サイドローブによる干渉の概念図。サイドローブが捉えた海底からの後方散乱波がメインローブのエコーグラムに記録されることにより、ウォーターカラム画像に縞状の像が現れる。

アーティファクトが顕著に現れる。

2.1.2 鏡面反射

MBESの送波アレイから発せられた音響ビームは、海中や海底面において反射及び散乱され、そのうちハイドロフォンアレイ方向へ伝播する成分がエコーとして観測される。主に観測されるのは散乱波のうちMBES方向へと戻る後方散乱成分のみであるが、例えば海底面に対して垂直に入射した場合などの特殊なジオメトリの下では、反射波が強力なエコーとして観測されることがある。このとき、ウォーターカラム画像には等時的な円形の像としてアーティファクトが現れる。Fig. 1において specular echo と示したものがこの現象に該当する。

2.1.3 マルチセクタ送波

MBESには、鏡面反射エコーの軽減、及び船のヨーイングに伴う測深点密度変化の補正を目的として、送波ビームを複数のセクタに分割している機種が存在する (Hughes Clarke, 2006)。これはわずかに異なる周波数をもった複数の送波ビームを異なる指向角へ発振するものであり、Kongsberg Maritime EM シリーズにおいては一般的に実装されている機能である。それぞれのセクタを構成する音響ビームは互いに異なる水中伝播特性をもつため、ウォーターカラム画像においてはセクタごとのエコーレベル分布に僅かに差異が現れる。Fig. 1は Kongsberg Maritime EM710S で取得されたものであり、送波ビームは直下及び両舷斜め方向を指向する3つのセクタから構成されている。それぞれのセクタの境界を放射状の明暗として見て取ることができる。

2.1.4 気泡等による海面付近のノイズ

船底に取り付けられたソナーを使用する場合、船の航行に伴う気泡が表層の海水と混合し、著しいノイズとしてウォーターカラムデータの品質に影響することがある (Hughes Clarke, 2006)。Fig. 1においては、浅部に集まって存在する散乱

強度の高い領域がこの現象に対応していると考えられる。

2.1.5 他の音源によるノイズ

MBES以外の音響機器の発振等、船自身が発するノイズが干渉すると、ウォーターカラム画像にはジオメトリに応じた音響異常を生じる。ノイズ源からMBES受波アレイへと音が直接伝播する場合には、海底の鏡面反射エコーと同じく円弧状の描像として現れる。一方、海底面での音響散乱を経てからMBESで受信される場合には、アレイへの入射角に応じて伝播距離が変化するため、Fig. 1に示すような上に凸のエコーが現れる (Hughes Clarke, 2006)。

2.2 エコーレベルとターゲットストレングス

ウォーターカラムデータに記録されるエコーの強弱は、その散乱波の源となった物体がもつ固有のターゲットストレングス (target strength) や、音波がソナーからその物体までの間を伝播する際に経験する減衰特性等に依存する。ハイドロフォンが受信するエコーの音圧レベル (EL) は、一般に次のようなソナー方程式で表現される (Urlick, 1983)。

$$EL = SL - 2TL + TS$$

ここで、 SL は送波の音圧レベル、 TL は伝搬損失、 TS は散乱源のターゲットストレングスである。 TL は片道分の伝播距離 r の関数として、通常、球面拡散による減衰 ($20 \log_{10} r$) と海水による吸収損失 (αr) の和として表現される。 α は使用周波数帯での距離減衰率を特徴づける海水固有の吸収係数であり、水の粘性による減衰効果に加えて、硫酸マグネシウム ($MgSO_4$) 及びホウ酸 ($B(OH)_3$) による緩和作用を含めて評価 (Medwin, 2005 など) するのが一般的である。なお、 TL の補正のため、通常、MBESにおいては音波の伝播時間に依存したゲイン (TVG: time-varying gain) が機種固有の関数として適用される。そのため、実際の測深機で記録されるエコーレベルは補正されたものであり、その絶対値が海中のター

ゲットの音響特性を即座に意味するものではない点に注意を要する。一方で、TVGが既知のソナーシステムを用いることができれば、ある推定されたTLの下で、観測されたELから散乱源のターゲットストレングスを導くことができる。TSを定量的に評価することが可能になれば、散乱特性に基づく散乱源の性状の識別へと論を進めることができる。

3 ウォーターカラムデータ処理手法の検討

3.1 深度-測線横断距離空間への射影

MBESから発せられたパルスは海中や海底での散乱を経てハイドロフォンで受信される。そして、ビームフォーミングによって複数の受波ビームに対応するエコーレベルが取得され、これが時系列データであるエコーグラム (echogram) として記録される。各発信パルス (ping)・各受波ビームに対応するエコーグラムの集合体が一般にウォーターカラムデータと呼ばれているものである。各受波ビームに対応するエコーグラムは、受波ビームの指向角をパラメータにもつ。そこで、線形尺度である音圧レベルをグレースケールで表すことにより、伝播時間-入射角 (ビーム番号) 空間におけるエコーレベルの画像が得られる。さらに、伝播時間に音速を乗じて距離に変換し、

ビーム入射角を用いて直交2成分へ分解することで、Fig. 1に示すような測線横断面上の三角形の描像として表現される。このようにして、時系列データであるエコーグラムが深度及び測線横断距離と対応付けられる。この処理についての模式図をFig. 3に示す。

3.2 スタッキング処理によるノイズ軽減

エコーグラムにはアーティファクトや系統的な音響異常のみならず、多くのランダムノイズが記録される。一般に、海洋物理現象に由来する密度構造等は海底面に比べれば音響インピーダンスに乏しく、ノイズの多い画像においてその判別は容易ではない。そこで、連続する複数のパルスによって取得されたウォーターカラム画像をひとまとめにし、統計処理によって一群の画像に共通する情報を抽出することができれば、ノイズの低減が図られると考えられる。例えばUrban et al. (2017)では、複数のエコーレベルサンプルから時間方向に中央値を選択することによって信号雑音比の向上を試みている。通常、MBESのパルス発振間隔は $\sim 0.1-10$ Hzのオーダーにあり、空間的に十分稠密なデータが取得される。他方、海洋の物理構造は空間的・時間的にある程度の拡がりをもつことが想定される。そのため、統計処理

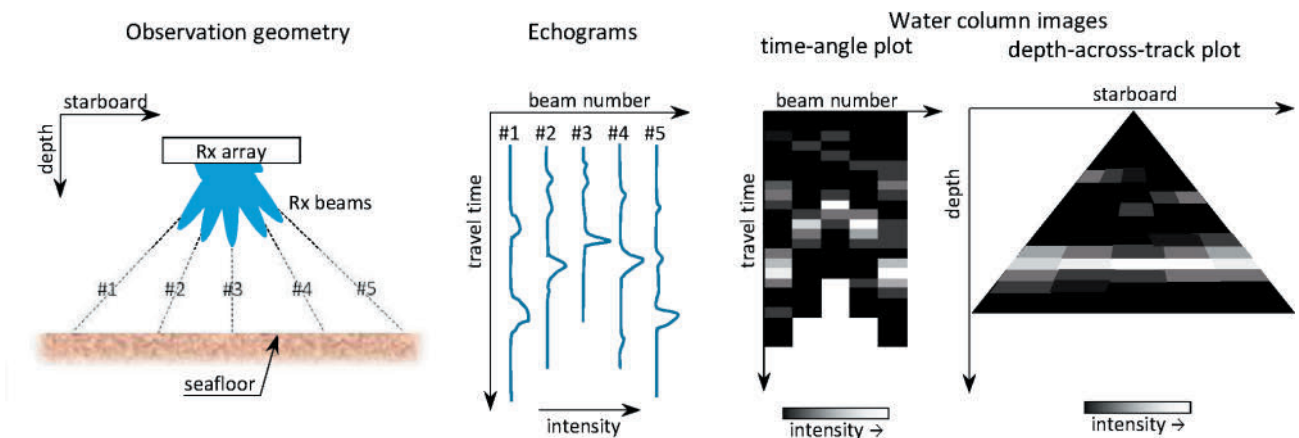


Fig. 3. Schematic image of water column image production from multibeam echograms. Time-series sound pressure level data is transformed into 2-dimensional images with linear greyscale intensity mapped in the depth-across-track surface.

図3. ウォーターカラム画像の構築についての概念図。各受波ビームによって取得されたエコーグラムが2次元のグレースケール画像に変換されることでウォーターカラム画像を得る。

に用いるパルス数をあまりに多くしすぎなければ、海洋中のターゲットからのエコーを毀損することなく、信号雑音比の向上に資すると考えられる。

3.3 2次元断面図の作成

ウォーターカラムデータは3次元空間内のエコーレベルを示すものであり、海底地形等との重畳による3Dグラフィックとの親和性は高いものの、紙面における表現や、水温・塩分等の鉛直プロファイルといった非3次元的データとの比較は容易ではない。より実用的に活用するためには、2次元平面上で散乱強度値を示した断面図の作成が必要である。例えば、①深度-測線横断方向（時刻一定断面）、②深度-測線方向（測線横断距離一定断面）、③測線横断方向-測線方向（深度一定断面）の3断面を得ることが考えられる。シングルビームソナーを用いた観測では通常②の描像のみ取得可能である一方で、単一のデータから①及び③を取得可能であることがMBESの特徴といえる。それぞれの断面作成の操作において、前節で述べたスタッキング処理を

併せて行うことが可能である。この処理についての模式図を Fig. 4 に示す。

4 実データを用いた試行

4.1 サンプルデータ及び使用ソフトウェア

本稿では、測量船「明洋」搭載の EM302、及び測量船「拓洋」搭載の EM710S を用いて取得されたソナーデータをサンプルとして用いた。両機は Kongsberg Maritime 社製造の MBES であり、EM302 は 30 kHz、EM710S は 70-100 kHz を発振周波数帯にもつ測深機である。いずれの調査も海底地形の測量を目的に行われたものであり、ウォーターカラムデータは測深データとともに取得された副次的なものである。そのため、送信パルス長を海域の深度に応じて変化させるようオペレータ側で調整しているなど、ソナーの設定は海洋物理構造の可視化のために最適化されたものではない。調査海域は EM302 データが太平洋高知県沖、EM710S データが太平洋福島県沖である。各調査海域における海水の鉛直プロファイルとの比較のため、ソナーデータ取得にあわせて行われた XCTD（投下式塩分水温深度計）及び

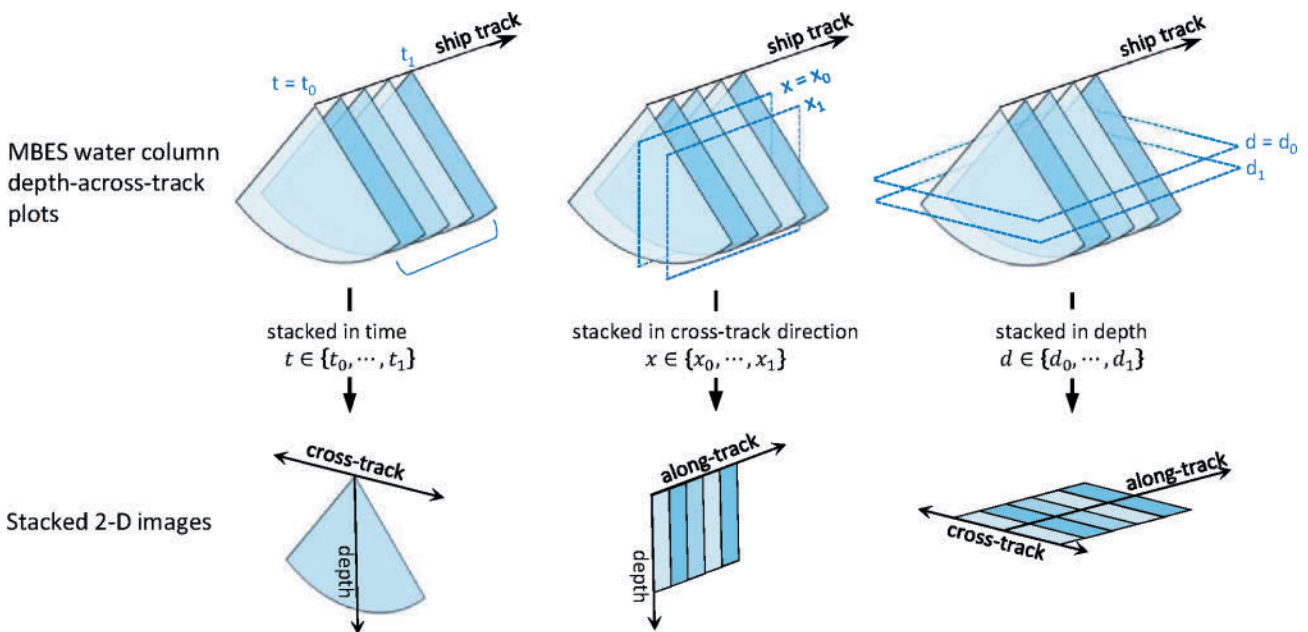


Fig. 4. Schematic image of the stacking of the water column images. 2-dimensional depth-across-track plots of each ping are lined up in space and stacked into three cross-section images.

図4. ウォーターカラム画像のスタッキング処理についての概念図。

(a) List of sonar files

ID code	MBES	frequency [kHz] *alternately in EM710S	pulse	beam width	nr. of beams	nr. of pings	duration	ping interval averaged	length	distance/ping averaged
Fs1	EM710S	71.0, 75.0, 87.0	CW, 5 ms	1° x 1°	256	6037	1799 s	0.30 s	11560 m	1.9 m
Fs2	EM710S	(79.0, 83.0, 95.0)*	CW, 5 ms	1° x 1°	256	6037	1800 s	0.30 s	10742 m	1.8 m
Fs3	EM710S		CW, 20 ms	1° x 1°	256	3687	1800 s	0.49 s	12555 m	3.4 m
Kc1	EM302	26.5, 26.9, 28.1, 28.5, 29.7, 30.1, 31.3, 31.7	CW, 50 ms	1° x 1°	288	907	1682 s	1.86 s	12189 m	13.4 m

(b) Geographic locations of ship track and XCTD/XBT casts

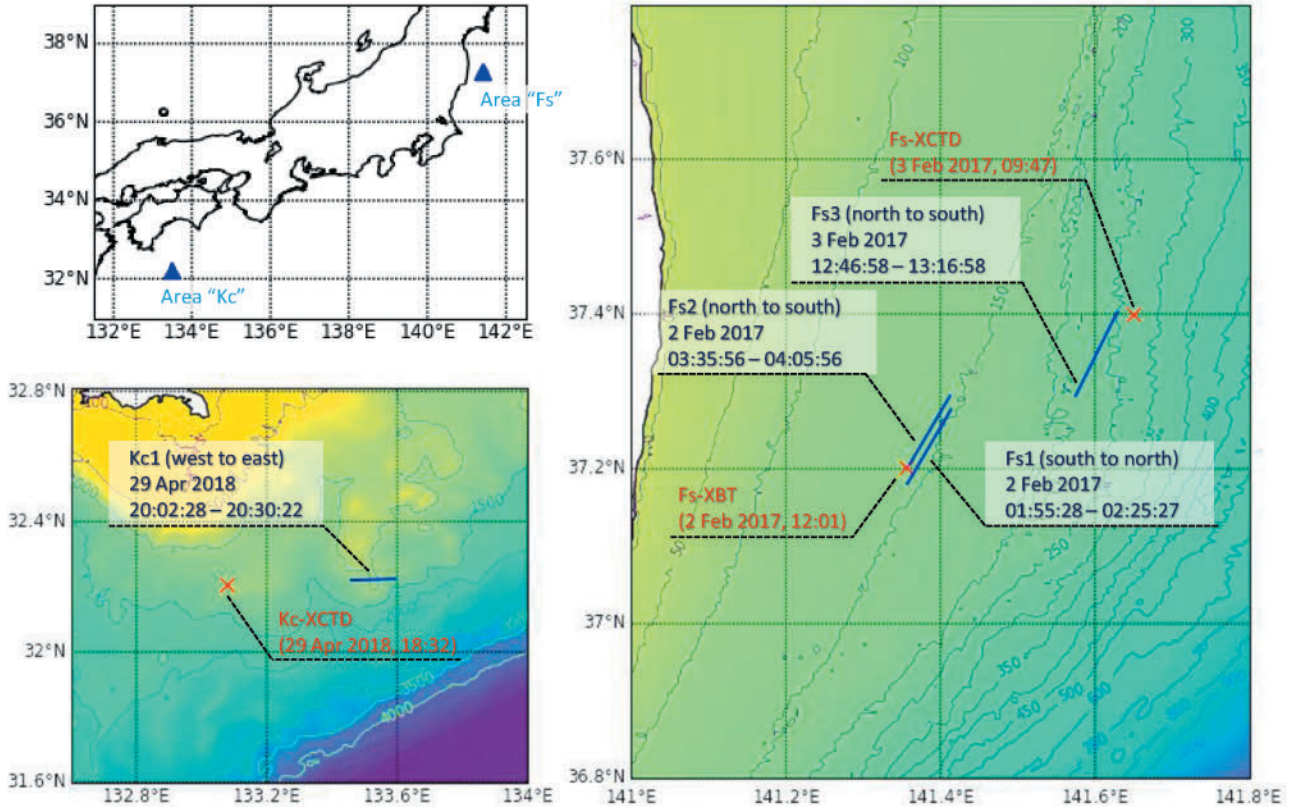


Fig. 5. (a) List of sonar data files and associated parameter settings. The number of transmit sectors is 3 in EM710S and 8 in EM302, with a non-overlapped transmit frequency range assigned to different sectors. The EM710S has the two sets of frequencies transmitted alternately. Note each sonar file is obtained for bathymetric use so that the pulse settings are not optimized for mid-water target recognition. (b) Geographic locations of the ship track recorded in each sonar file and the associated probe casts of XCTD (expendable conductivity, temperature and depth sensor) and XBT (expendable bathythermograph). The background bathymetry is from the GEBCO 2022 gridded data (GEBCO Compilation Group, 2022). All the timestamps are represented in UTC.

図5. (a) 本稿で用いたソナーデータの一覧。EM710SとEM302はともにマルチセクタ送波を実装しており、各セクタに異なる送信周波数が割り当てられている。また、EM710Sでは3つのセクタにそれぞれ2種類の周波数が割り当てられ、交互に発信される設定となっている。いずれも測深用の設定であり、ウォーターカラムデータ取得用に最適化されたものではないことに留意。(b) ソナーデータに収録された測量船の航跡及びXCTD/XBT投下地点を示した調査海域図。背景の海底地形図はGEBCO 2022グリッドデータ(GEBCO Compilation Group, 2022)を用いて作図した。時刻の表記はすべてUTCである。

XBT (投下式水温計) の観測結果も使用した。本稿で扱うデータの一覧を Fig. 5 に示す。以降、データの識別のため、図中に示したコードを用い

る。

観測に用いられた音響パルスはいずれも連続波であり、そのパルス長はソナーデータファイル

Fs1 及び Fs2 では 5 ms, Fs3 では 20 ms, Kc1 では 50 ms である. そのため, レンジ方向の観測分解能は, パルス長の半分と仮定して見積った場合, Fs1 及び Fs2 においては約 3.8 m, Fs3 においては約 15.0 m, Kc1 においては約 37.5 m である. また, 音響ビームの幅はいずれのソーナーにおいても進行方向, 測線横断方向ともに 1° であるため, 水平方向の空間分解能は例えば水深 100 m においてソーナー直下付近で約 1.7 m と見積もられる.

ソーナーデータに記録された情報の適切な読み取り及び図化のため, Python 3 を用いて解析ツールを制作し, 図化にあたっては Matplotlib のモジュールを適用した. 使用したサンプルデータの形式はいずれも Kongsberg Maritime EM シリーズの共通フォーマットに従っており, ウォーターカラムデータ取得機能の実装にあたっては同社ウェブサイトにて公開されている解説書 (Kongsberg Maritime, 2018) を参照した.

4.2 画像の構築とスタッキング処理

ウォーターカラム画像の構築とその画像処理において適用した方法について述べる. まず, 時刻 t に取得されたビーム数 N^t , 各ビームの最大ビン (サンプル) 数 M^t のエコーグラム群から, ビーム番号 $n \in \{1, \dots, N^t\}$, ビン番号 $m \in \{1, \dots, M^t\}$ に対応するエコーレベル I_{nm}^t を抽出する. データグラムからビーム入射角 θ_n^t 及びビーム毎のサンプリング周波数 s_n^t を取得することにより, 各サンプルについてソーナー面からの深度 d_{nm}^t 及び水平距離 x_{nm}^t が次のように計算される.

$$\begin{aligned} d_{nm}^t &= (c^t m / s_n^t) \cos \theta_n^t \\ x_{nm}^t &= (c^t m / s_n^t) \sin \theta_n^t \end{aligned}$$

ここで, 時刻から距離への変換には簡単のため時刻 t におけるソーナー面での音速 c^t を用いた. こうして, (n, m) で張られる直交座標系と (d, x) で表現される深度-測線横断距離系とを対応づけるウォーターカラム画像 w^t を得る.

$$w^t: (n, m) \rightarrow (d_{nm}^t, x_{nm}^t, I_{nm}^t)$$

この表式のもと, 時間方向, 測線横断方向, 深

度方向のそれぞれについて, 中央値によるスタッキングを施し 2 次元断面図を作成する. まず, 時間方向のスタッキングについては, ある時刻 t_0 から $t_0 + \tau$ ($\tau > 0$) までの連続する画像について任意の (n, m) に対するエコーレベル値の集合から中央値を選び出し, その値で画像を再構築することとした. d 及び x には時刻 t_0 での値を用いるものとして, スタック後のウォーターカラム画像を次のように得る.

$$w_{\text{median}_t(\tau)}^{t_0}: (n, m) \rightarrow \left(d_{nm}^{t_0}, x_{nm}^{t_0}, \text{median}_{t \in \{t_0, \dots, t_0 + \tau\}} \{I_{nm}^t\} \right)$$

測線横断方向のスタッキングについては, 任意の時刻 t のソーナーデータについて, 任意の d に対し, ある $x = x_0$ から $x = x_0 + \xi$ までの範囲に存在する散乱強度値の中からメディアン値を選び出し, その値で $t-d$ 平面上の画像を作成することとした. つまり, 任意の時刻 t について

$$w_{\text{median}_x(x_0, \xi)}^t: (n, m) \rightarrow \left(d_{nm}^t, x_0, \text{median}_{(n, m) \in \{(n^*, m^*)\}} \{I_{nm}^t\} \right)$$

$\{(n^*, m^*)\} = \{(n, m) \mid x_{nm}^t \in [x_0, x_0 + \xi]\}$ for given d として, この $w_{\text{median}_x(x_0, \xi)}^t$ を時間方向につなげた図を作成する操作が相当する. 同様にして, 深度方向のスタッキングについても求めることができる.

5 結果と考察

5.1 水平層状の音響異常

5.1.1 スタッキングの効果と音響異常の概形

ソーナーデータファイル Kc1 に記録されたウォーターカラム画像について, 時間方向のスタッキング処理によるノイズ低減効果の例を Fig. 6 に示す. 単一のパルスによる画像ではランダムノイズが顕著であるが, 複数パルスにわたるスタッキングによってノイズが軽減されるとともに, 鏡面反射エコーよりも浅い部分に現れている水平層状の音響異常が視覚的に明確化されたことがわかる. なお, 受波サイドローブやマルチセクタ送波によるアーティファクトがみられるが, これらはすべてのパルスに共通して現れる像であるためスタッキングで軽減されることはない.

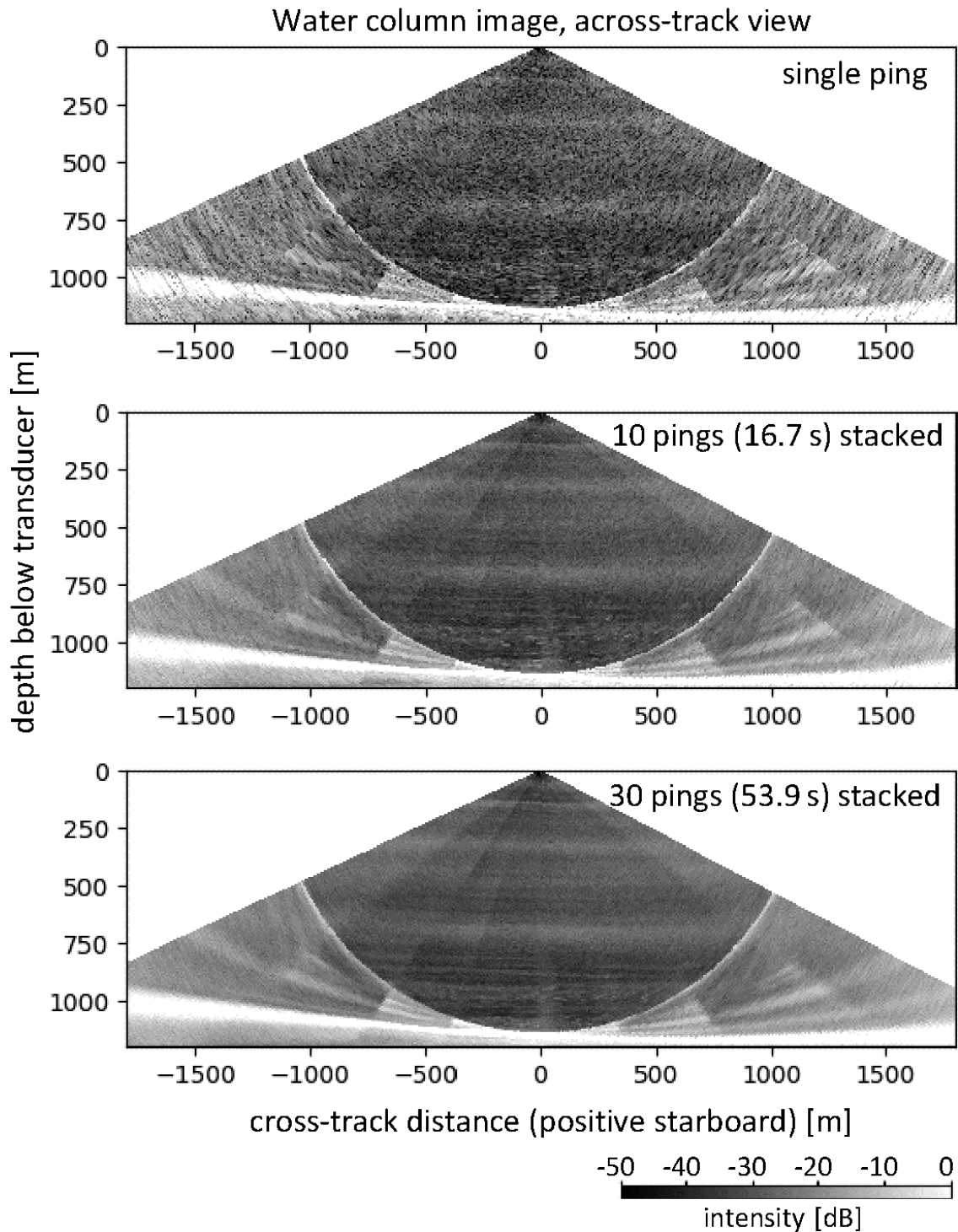


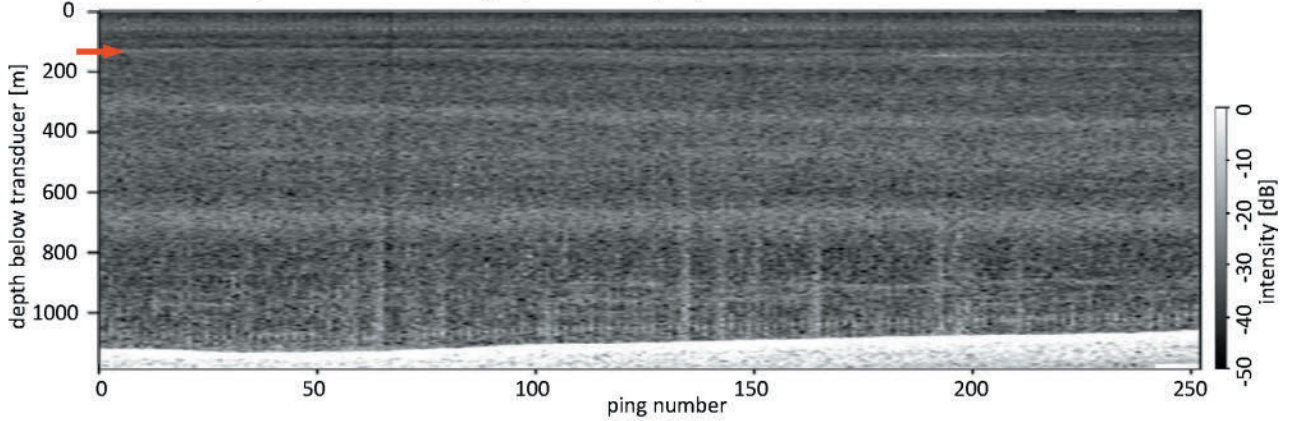
Fig. 6. Water column images of depth-across-track cross-section, showing the effectiveness of the median stacking method. The single ping image of the Kc1 sonar data (upper) is smeared with random noise. Stacking consecutive 10 pings (middle) and 30 pings (lower) improve image quality, suppressing noises and highlighting the mid-water scattering layers. Since the average ping interval is 1.86 s for Kc1, 10 and 30 pings correspond to time periods of 16.7 s and 53.9 s, respectively.

図 6. 高知沖で取得されたデータファイル (Kc1) から生成したウォーターカラム画像。時間方向のスタッキング処理によるノイズ低減効果を示している。3つの図はそれぞれ、同データファイルの最初の1パルスのみ (上図)、10パルス分のスタック結果 (中図) 及び30パルス分のスタック結果 (下図) に対応する。パルスの発信間隔は約1.86秒であり、10パルス及び30パルスはそれぞれ16.7秒及び53.9秒の時間間隔に相当する。

同データについて、深度-測線方向断面（測線横断距離一定の鉛直断面）のウォーターカラム画像を Fig. 7 (a) に示す。これは右舷側 10-20 m

に存在するデータを測線横断方向にスタックして得られた画像である。深度 1,100-1,200 m 付近に存在するきわめて強いエコーが海底面に相当す

(a) Water column image (vertical cross-section along ship track)
across-track stacked (starboard 10 - 20 m), depth binned (5 m)



(b) Vertical profiles estimated at “Kc-XCTD” XCTD sampling point

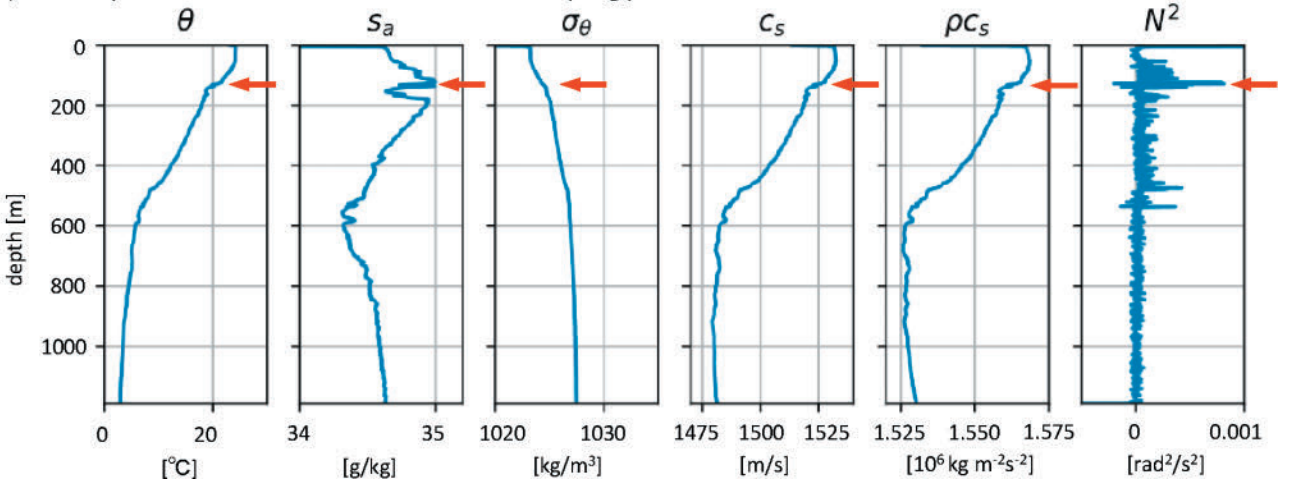


Fig. 7. (a) Water column image of the vertical cross-section along the ship track, obtained from the EM302 sonar file Kc1. Stacked horizontally (10 to 20 m of starboard side) and depth binned (5 m bin), horizontal layers of high backscatter intensity are seen. Note the horizontal axis represents ping number, not transformed into distance scale. (b) Vertical profile of physical oceanographic parameters estimated from XCTD observation data “Kc-XCTD”. TEOS-10 (IOC et al., 2010), the standard for thermodynamic calculations of seawater, is applied to estimate potential temperature θ , absolute salinity s_a , potential density σ_θ , sound speed c_s , acoustic impedance ρc_s and Brunt-Väisälä frequency squared $N^2 = -(g/\rho) d\rho/dz$. Although the location of the probe cast is not on the MBES survey lines, the spike in N^2 at around 100–200 m deep might be associated with the abrupt change in backscatter intensity in the water column image at around 100–200 m deep (indicated by red arrows).

図 7. (a) Kc1 データから生成したウォーターカラム画像。測線に沿った鉛直断面（測線横断距離一定断面）を示している。右舷側 10-20 m に存在するデータを測線横断方向にスタックし、また深度方向にはビンサイ（ビンサイズ：5 m）を施して得た画像である。横軸は発信パルス数であり、距離スケールではないことに注意を要する。(b) XCTD 観測データ (Kc-XCTD) から推定された諸量の鉛直プロファイル。推定には熱力学計算ライブラリ TEOS-10 (IOC et al., 2010) を適用した。図中の赤矢印は、水深 100-200 m において N^2 の上昇とウォーターカラム画像中の後方散乱強度の変化が対応しているとみられる箇所を示している。

ると考えられ、ウォーターカラム部分には、全断面に渡って水平な音響異常が幾層にも重なって分布していることが確認できる。これら散乱層のエコーレベルは海底面と比べれば弱いものの、背景とのコントラストからその分布する深度を視覚的に容易に見積もることができる。

5.1.2 鉛直プロファイルとの対応

Fig. 7 (b) は、Kc1 の測線近傍で取得された XCTD データ (Fig. 5 (b) 中の Kc-XCTD) から求めた諸量のプロファイルである。ポテンシャル温度 (θ)、絶対塩分 (s_a)、ポテンシャル密度 (σ_θ)、音速 (c_s)、音速と密度 (ρ) の積で定義される音響インピーダンス (ρc_s)、及び密度の深度方向変化率の関数である $N^2 = -(g/\rho)\partial\rho/\partial z$ (N は Brunt-Väisälä 振動数、 g は重力加速度) を示した。Fig. 7 (b) によれば、当該 XCTD 測定点においては水深 100–200 m 付近や水深 500–600 m 付近に塩分の顕著な鉛直変化がみられ、これが音速及び音響インピーダンスの変化としても現れていることがわかる。さらに、密度の鉛直変化率の関数である N^2 が著しい変化を見せており、密度躍層の存在が示唆される。先行研究から、海洋中の著しい密度躍層やそれに伴う音速勾配が、測深機の使用周波数帯において音響散乱を生じ得ることが報告されている (Ross and Lavery, 2012)。また、実海域における観測 (Moum et al., 2003; Chang et al., 2016 など) においても、海中における密度の鉛直変化率と音響散乱によるエコーとが対応している例が報告されている。Fig. 7 (a) によれば、水深 100–150 m 付近にエコーレベルの著しい増減を伴う薄い層構造が存在しており、これが同深度域での N^2 の急激な上昇と対応している可能性が存在する。当該観測においては、XCTD データとウォーターカラム画像は観測地点及び時刻が互いに異なるため、両者を関連付けて考察することは必ずしも適切ではない。今後、海洋物理現象に関する定量的な考察を行うにあたっては、ウォーターカラムデータによる音響的描像と物理諸量を直接比較できるような観測を実施す

ることが必要となる。

5.2 Kelvin-Helmholtz billow 様の音響異常

5.2.1 音響異常の概形

EM710S で取得されたウォーターカラムデータの一部を Fig. 8 及び Fig. 9 に示す。これらは、ソナーデータファイル Fs1, Fs2 及び Fs3 において、時間方向、深度方向及び測線横断方向のスタッキング処理を施した後、興味深い形状をしたエコーが顕著にみられる区間を切り出したものである。Fs1 及び Fs2 は水深 140–150 m ほどの海域であり、前者には水深 125 m 付近、後者には水深 115 m 付近に水平な帯状の音響異常がみられる。この音響異常は深度方向に最大 10–15 m ほどの幅をもって分布しており、これは水深の約 6–10% に相当する。Fs1 及び Fs2 の深度–測線方向断面図 (鉛直断面, Fig. 8 (c) 及び 8 (f)) を観察すると、水平 2 層に分かれた薄い散乱層が互いに絡み合うような構造をしている。いずれのデータにおいても、S 字状の比較的強いエコーが等間隔で水平方向に並んだ周期的構造を見て取ることができる。この音響異常は、深度一定断面 (水平断面) 及び測線横断面の音響画像とあわせて観察すると、その 3 次元的な配置がより明確となる。Fig. 8 (b) 及び 8 (e) は、音響異常がみられる深度における水平断面図である。Fig. 8 (b bis) に示した範囲で顕著であるが、波面に相当すると推察される縞状の明暗パターンが概ね平行に並んでいることが確認できる。同様のパターンは Fig. 8 (e bis) においても明瞭ではないが記録されている。他方、測線横断面 (Fig. 8 (a) 及び 8 (c)) においては、この音響異常は上下にわかれた 2 つの水平な散乱層として現れている。以上のことから、この帯状の音響異常は、鉛直断面 (Fig. 8 (c) 及び 8 (f)) にみられるような水平 2 層からなる周期的構造が、測線横断方向に連続性をもって、シート状に広がっていることが推察される。

ここで見られた周期的構造は、先行研究において海洋中のシアー不安定に伴う billow として観

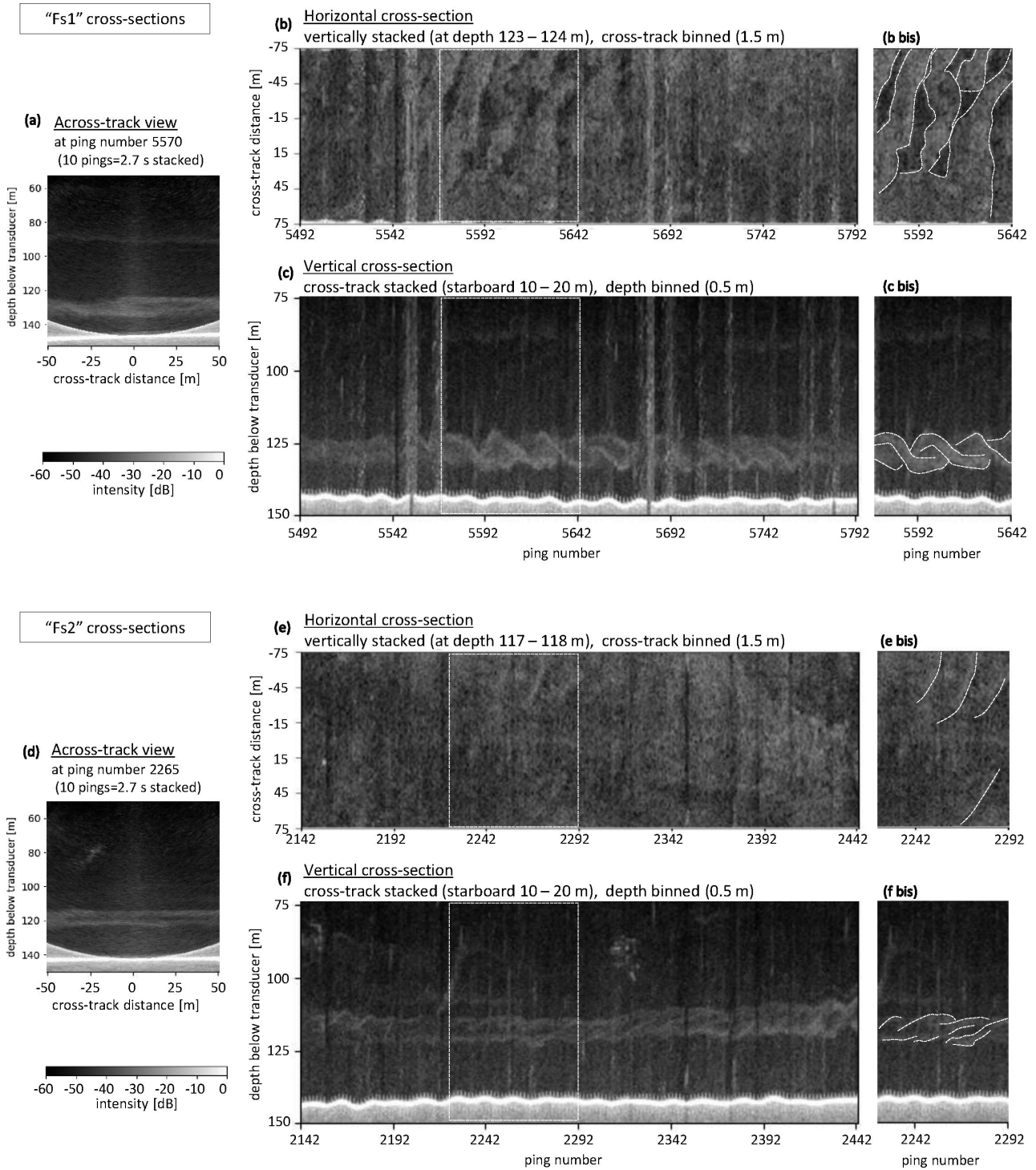


Fig. 8. Water column images generated from Fs1 data file (a – c) and Fs2 data file (d – f), showing the characteristic mid-water periodical structures with three cross-sections. (a) and (d) are depth-across-track cross-sections. Both images are 10 pings stacked, correspond to the time period of 2.7 s. (b) and (e) are horizontal cross-sections with vertically stacked, and the vertical axes represent the across-track distance (positive starboard). The stacking is applied to the depth range of 123 – 124 m for (b), and 117 – 118 m for (e). (c) and (f) are vertical cross-sections with horizontally stacked, and the vertical axes represent the depth (positive downward). The stacking is applied to the distance range of 10 – 20 m of starboard side for both images. (b bis-f bis) are water column images clipped with the dashed rectangle in the original images (b – f), with characteristic acoustic anomalies traced.

(次頁へ続く)

測された音響画像 (Geyer et al., 2010; Chang et al., 2016) とよく類似している。一般に、密度の異なる流体が互いに流速差をもって接しているとき、その境界面に生じる流体の不安定は Kelvin-Helmholtz 不安定と呼ばれ、渦巻き状の流れが境界面に沿って並んだ特徴的な構造が発達することが知られている (Thorpe, 2007 など)。

5.2.2 Fs1 及び Fs2 データの特徴

Fs1 及び Fs2 の鉛直断面図 (Fig. 8 (c) 及び 8 (f)) を比較すると、後者は散乱強度が比較的弱いこと判別は容易ではないが、S 字状の周期的構造が両者で互いに水平方向に反転していることが確認できる。また、この周期的構造の水平方向の周期は、Fs1 ではパルスの発信間隔にして平均 50 程度であるのに対し、Fs2 では明瞭ではないが最大でも概ね 40–50 程度であり、後者においてより高い空間周波数をもっているとみられる。Fig. 5 (b) に示したとおり、Fs1 及び Fs2 は互いに平行な測線上で観測されたものであり、かつ観測時の船の進行方向は互いに 180 度異なる。両画像にみられる周期的構造が同一の現象によるものであるとすれば、その構造が水平に反転して記録されていることは整合的である。また、波面の進行速度と船の進行速度の関係性によって、両測線で異なる空間周波数が見かけ上現れた可能性も考えられる。

これらの周期的構造が密度成層下のシア不安定によって生じたものと仮定すると、Hazel (1972) の議論から、その波長はシア層の厚さに依存し、位相速度は背景流の速度に一致するこ

とが想定される。そこで、Fs1 と Fs2 の約 2 時間の間に海域の鉛直密度構造及び速度構造が不変であったと仮定すれば、両測線間で観測された周期的構造の差異は、船の進行速度の違いによる見かけ上の効果が支配的であると想定される。Fig. 5 (a) に示した情報から、両測線航走時の船の平均対地速度は、Fs1 で約 12.5 kt, Fs2 で約 11.6 kt である。両者の差が海流の影響によるものとして、表層流速の測線方向成分が北向きに 0.9 kt 程度であったとすれば、周期的構造も北向きに最大 0.9 kt 以下の位相速度をもって移動していたと考えられる。両測線においてパルス発信の時間間隔はほぼ一定であったことから、上記の仮定の下にウォーターカラムデータの観測を行った場合、Fs2 では Fs1 に対して最大 $0.9 \text{ kt}/12.5 \text{ kt} = 7.2\%$ 程度の空間周波数の増加が見かけ上生じることになる。

当該観測においては海中の流速データが欠如していること等からこれ以上の具体的な考察には限界があるが、本稿で示したように音響的に観測された周期的構造を 3 断面に分解することにより、海洋中を伝播する内部波の進行の速さ及び方向を定量的に見積もることが可能であると考えられる。なお、ウォーターカラム断面図のうち測線方向の 2 断面 (水平断面図及び鉛直断面図) については、海洋物理現象それ自体の時間的・空間的变化と、観測プラットフォームである船の移動による影響とが重合した形で観測データに反映されることに注意を要する。そのため、例えば海洋中の力学的現象について物理モデルとの比較を行う際には、見かけ上の時間的・空間的变化を厳密に分

(前頁から続く)

図 8. Fs1 データ及び Fs2 データから生成したウォーターカラム画像群 (それぞれ a–c 及び d–f)。特徴的な周期的構造が見られた箇所を 3 種類の断面図により示したものである。(a) 及び (d) は測線横断面図である。いずれの画像も 10 パルス分を時間方向にスタックしたものであり、これは約 2.7 秒の時間間隔に相当する。(b) 及び (e) は鉛直断面を示しており、縦軸は測線横断距離 (右舷側が正の方向) である。スタッキング処理に用いた深度の範囲は、(b) では 123–124 m, (e) では 117–118 m である。(c) 及び (f) は水平断面であり、縦軸は深度である。スタッキング処理に用いた測線横断距離の範囲は、(c) 及び (f) とともに右舷側 10–20 m である。(b bis–f bis) は、(b–f) の各画像において長方形で囲んだ部分を抜き出し、特徴的な音響異常の輪郭を白破線で強調したものである。

離して考察する必要がある。

いたものと考えられる。

5.2.3 Fs3 データの特徴

データファイル Fs3 から描いたウォーターカラム断面図 (Fig. 9) にも, Fs1 及び Fs2 と同様の周期的構造が現れている。同測線は水深 250 m ほどの海域であり, 水深 100 m 付近に周期的構造をもった音響異常が存在する。Fs1 及び Fs2 とは異なり, 測線横断面 (Fig. 9 (a)) に顕著に周期的構造が現れていることがわかる。水平断面 (Fig. 9 (b)) には Fs1 及び Fs2 と同様の縞状パターンがみられるが, その配置には差異があり, Fig. 8 (b) 及び (e) では測線直交方向に概ね平行であるのに対し, Fs3 (Fig. 9 (b bis)) ではより測線に平行な方向へと向きが変化している様子が見て取れる。Fs3 観測時の測線航走方向は Fs1 と同一であるから, この周期的構造が Fs1 及び Fs2 のものと同様の現象であると仮定すれば, Fs3 においては波面の進行方向が顕著に異なっ

5.2.4 鉛直プロファイルとの対応

同海域において XCTD 及び XBT 観測データを基に推算された音速プロファイルを図 10 に示す。いずれの音速プロファイルにも水深 100–150 m 付近で深度方向に少なくとも 0.4 s^{-1} の音速勾配が共通してみられる。XCTD のみならず XBT を用いた観測でも音速勾配が現れていることから, 水温躍層が存在していたことは事実であり, 従って, 水温差に伴う密度躍層が周期的構造をもった音響異常パターンの生成と関係していることは考え得る。但し, 5.1 節に示した結果と同様, 鉛直プロファイルとウォーターカラムデータとの間に空間的・時間的な重複はないため, 厳密な考察が困難である点には注意を要する。このようなシア不安定の存在が想定されるようなウォーターカラム画像について更なる考察を行うにはウォーターカラムデータのみでは不十分であ

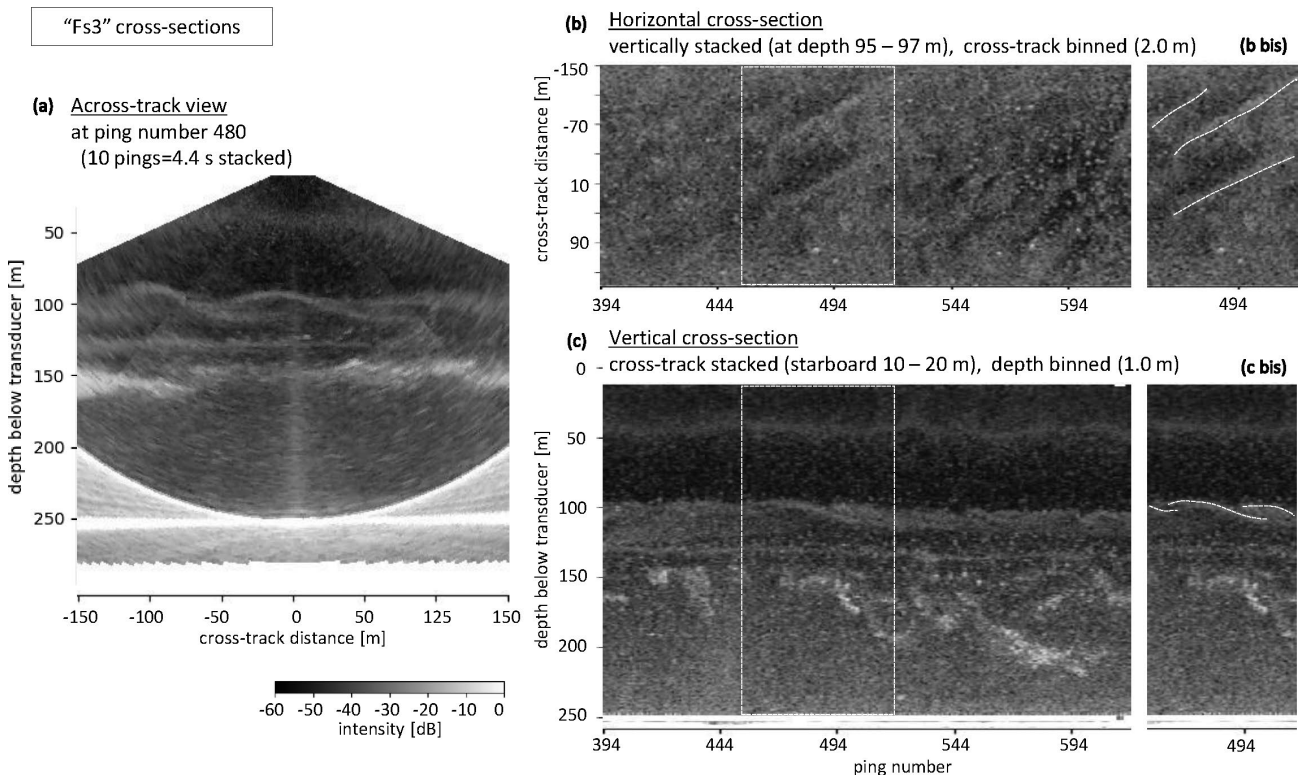


Fig. 9. Water column images generated from Fs3 data file. All images are created with the same intent as Fig. 8.

図 9. Fs3 データファイルから生成したウォーターカラム画像群。それぞれ Fig. 8 と同様の手順で作成されたものである。

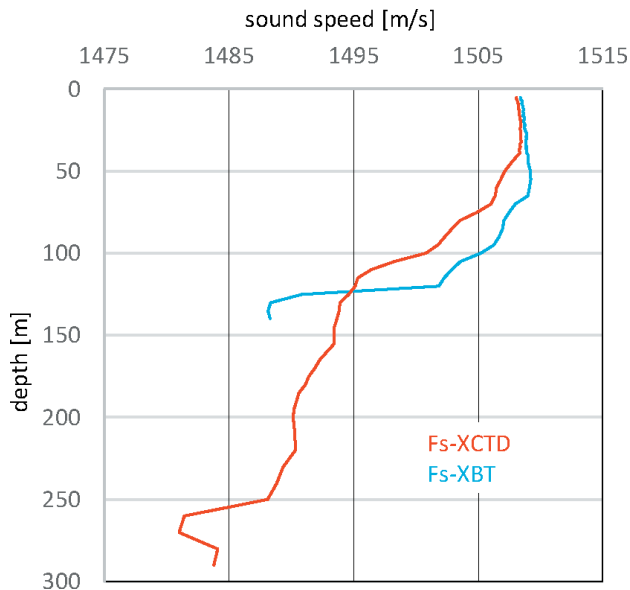


Fig. 10. Sound speed profiles estimated from XCTD and XBT observations (Fs-XCTD and Fs-XBT in Fig. 5). The estimation formula of the Hydrographic and Oceanographic Department explained by Uchida (2002) (打田, 2002 in Japanese) is applied.

図 10. XCTD 及び XBT 観測データ (Fs-XCTD 及び Fs-XBT) から推定された音速プロファイル。水路測量業務準則施行細則に記載の変換式 (打田, 2002) を適用して求められたものである。

り、稠密な CTD プロファイルの取得に加えて、ドップラ式流向流速プロファイラ (ADCP: acoustic Doppler current profiler) 等の活用による詳細な海中流速構造の観測が必要となる。

5.3 観測機器による差異の可能性

5.1 節及び 5.2 節のデータはそれぞれ EM302 及び EM710S によって取得されたものである。両者は観測周波数帯が異なるため、観測機器に依存した差異が結果に現れる可能性があるが、本稿に示したデータセットでは同一のターゲットを観測しておらず、単純な比較を行うことは不可能である。

先行研究では、海洋中の微細構造によって生じる音響散乱の特性について、周波数依存性を交えた議論が存在する (Lavery et al., 2003; Lavery et al., 2010)。一方で、実海域において MBES を用いて広域にわたる海洋物理構造を観測した例は乏

しく、観測周波数を変化させた場合に生じる音響的描像の変化については今後確かめられるべきトピックであるといえる。

6 今後に向けての課題

6.1 定量的情報との対応性

MBES により得られる音響画像は定性的情報に過ぎず、これを実際の物理現象と結びつけて論じるには、定量的な観測事実との対応性を確認しなければならない。更なる考察においては XCTD / CTD 観測による海洋の鉛直プロファイル及び ADCP による流速構造の情報は少なくとも必要である。これら観測量に基づき、ある物理モデルのもと海洋中のダイナミクスをシミュレートすることができれば、その結果現れる等密度面の力学的振る舞いと音響的に得られた描像とを対応付けて議論することも可能であろう。この対応性についての知見を蓄積することができれば、ウォーターカラム画像に現れた音響異常から実際の海洋場をある程度推測するといった活用法も想定し得る。

6.2 時間発展と空間的变化の分離

船を用いた海洋観測の特性として、観測プラットフォームが移動しているために、観測量が常に移動速度の影響を受ける点に留意を要する。ウォーターカラム画像を空間スケールに変換するためには、ソナーの発信周期とその間の船の移動速度、さらに、より厳密には音の伝播速度が有限であることの考慮の必要性が考えられる。とりわけ波動のような周期現象の解析においては、波の空間周波数といった空間的量と、波の進行速度といった時間的量との適切な分離が必要である。

6.3 散乱強度の定量的な分析

海洋中の散乱源となりうる物体や物理現象のターゲットストレングスは様々な先行研究によりモデル化されている。海洋中の細かな密度躍層等に対応する微細構造 (microstructure) や海中を漂うプランクトン類等について、観測周波数に対しどのような散乱特性をもつかという議論

(Lavery et al., 2010 など) が存在し、MBES に記録されたエコーレベルの定量的解析に活用できる可能性がある。Kongsberg Maritime EM シリーズの MBES においては、TVG として送波の音圧レベルやハイドロフォンの感度を補正するゲインオフセットが適用されている (Kongsberg Maritime, 2018) が、この設定値をデータグラム上で確認することはできない。そのため、現状では本稿で示した各種音響異常を構成する散乱源の特性を分析することは不可能である。この点に関し論を進めるには、散乱特性が既知の物体によるキャリブレーションを行うなどして、TVG が既知の観測システムを得る必要がある。

6.4 最適なデータ取得手法の検討

本稿で示したソーナーデータはいずれも海底地形測量を目的に取得されており、ウォーターカラム画像の解析に必ずしも適したものではない。測深機は、測線航走中の深度変化やイレギュラーなジオメトリに対応するための様々な機能を有することが一般的であり、発振間隔やパルス長等についての自動的な調節がリアルタイムに行われることがある。測深においては有用な機能であるが、ウォーターカラムに特化した観測においては観測条件の時間的・空間的变化は可能な限り回避すべきであり、その点を考慮したデータ取得手法を適切に検討する必要がある。例えば海洋の浅部で生じる物理現象を注視したい場合等、海底面からのエコーが必ずしも必要でない場面においては、発振間隔やパルス長を短く保つことで進行方向及びレンジ方向の分解能を向上させるといった対応が想定される。

6.5 エコーグラムから空間座標への変換手法

時系列データであるエコーグラムを空間座標に射影するにあたり、本稿では簡単のため、データグラムから取得可能な表面音速と受波ビームの指向角のみを用いた。より厳密な変換を行うには、観測海域において取得された音速プロファイルを用いて、音の屈折を考慮したレイトレーシングが

少なくとも必要である。但し、そのような音速プロファイルは必ずしもリアルタイムの音速構造と厳密に対応したものではなく、推定誤差は生じ得る。音速の差異が水中ターゲットの空間座標にどの程度の影響を及ぼすか、その見積もりも含めて考察が必要であるといえよう。

6.6 測深値への影響

MBES の発信パルスが海洋の内部波中を通過する際に屈折を生じ、測深データが影響を受けることが先行研究により示唆されている (Hamilton and Beaudoin, 2010 ; Hughes Clarke et al., 2018)。これは、音速場に空間的傾斜を伴う局所変化がもたらされることで、測深機の仮定する音速プロファイルや水平成層の前提が成立しなくなり、レイトレーシングが不適切になることで生じるものである。本稿で示したデータにおいては、Fig. 8 (c) 及び 8 (f) において海底面からのエコーが測線方向に波打つ様子がみられており、周期的構造をもった音響異常が影響した可能性が疑われる。海洋中の物理現象によって測深値に有意なアーティファクトが生じるとすれば、海底地形測量の信頼性に影響することとなる。水路測量分野においては重要なトピックであり、今後更なる解析の余地がある。

7 おわりに

水中の音響的特性を 3 次元的に記録した MBES ウォーターカラムデータの活用により、海洋中の物理構造について定量的に分析し得る描像を得た。ウォーターカラムデータは、複数のエコーグラムを複数パルスに渡って記録した 3 次元配列の構造をしており、そのデータ量は測深データと比較して格段に大きい。そのためデータストレージにおいて大きな割合を占めるが、特に水路測量分野においては水中構造物等の異常物の検出を除くと定常的な活用先が存在する状況にはなく、データ取得の意義について必ずしも十分に検討されているとはいえない。その点において本稿の結果は、測深機の特長である高分解能での水中

観測の能力を海洋物理学へと応用する可能性を示すものであり、意義深いものであると考える。今後は、興味深い海洋物理現象が期待される海域での観測を通じたサンプルデータの蓄積や、定量的解析の実現に向けたデータ処理手法の高度化など、更なる取り組みが期待される。

謝 辞

音響測深機を用いた海洋物理構造の可視化というトピックは、米国ニューハンプシャー大学で行われた John E. Hughes Clarke 教授による講義をきっかけに主執筆者が興味を抱き、取り組むに至ったものである。本研究を始めるにあたって、MBES の特性を踏まえたデータの取扱いについて教授から多大なる助言を頂いた。ここに記して謝意を表す。

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.
- Chang, M.-H., S.-Y. Jheng, and R.-C. Lien (2016) Trains of large Kelvin-Helmholtz billows observed in the Kuroshio above a seamount, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 8654-8661.
- Colbo, K., T. Ross, C. Brown, and T. Weber (2014) A review of oceanographic applications of water column data from multibeam echosounders, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 145, 41-56.
- GEBCO Compilation Group (2022) GEBCO_2022 grid.
- Geyer, W. R., A. C. Lavery, M. E. Scully, and J. H. Trowbridge (2010) Mixing by shear instability at high Reynolds number, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L22607.
- Hamilton, T. J. and J. Beaudoin (2010) Modeling the effect of oceanic internal waves on the accuracy of multibeam echosounders, Canadian Hydrographic Conference (CHC), Quebec City.
- Hazel, P. (1972) Numerical studies of the stability of inviscid stratified shear flows, *J. Fluid Mech.*, 51, 39-61.
- Holbrook, W. S., P. Páramo, S. Pearse, and R. W. Schmitt (2003) Thermohaline fine structure in an oceanographic front from seismic reflection profiling, *Science*, 301, 821-824.
- Hughes Clarke, J. E. (2006) Applications of multibeam water column imaging for hydrographic survey, *The Hydrographic Journal*, 120, 3-15.
- Hughes Clarke, J. E., M. Lamplugh, and K. Czotter (2006) Multibeam water column imaging: improved wreck least-depth determination, Canadian Hydrographic Conference, Halifax.
- Hughes Clarke, J. E., K. Sheehan, V. Quinlan, and F. Sacchetti (2018) Quantifying the impact of internal wave activity on multibeam bathymetry, Canadian Hydrographic and National Surveyors' Conference (CHC-NCS), Victoria, BC.
- IOC, SCOR, and IAPSO (2010) The international thermodynamic equation of seawater-2010: Calculation and use of thermodynamic properties, Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides No. 56, UNESCO.
- Kongsberg Maritime (2018) Kongsberg EM series multibeam echo sounder EM datagram formats, Kongsberg Maritime, Horten.
- Lavery, A. C., D. Chu, and J. N. Moum (2010) Measurements of acoustical scattering from zooplankton and oceanic microstructure using a broadband echosounder, *ICES J. Mar. Sci.*, 67, 379-394.
- Lavery, A. C. and T. Ross (2007) Acoustic scattering from double-diffusive microstructure, *J. Acoust. Soc. Am.*, 122, 1449-1462.
- Lavery, A. C., R. W. Schmitt and T. K. Stanton

要 旨

海上保安庁の測量船で取得されたマルチビーム音響測深機 (MBES) のウォーターカラムデータを解析し, 海洋物理現象に由来するとみられる特徴的な音響異常を可視化した. 特に, 水中の音響特性を3次元的に記録できる MBES は, 内部波の周期的構造等, 音響異常の空間的な配置を定量的に観測できるという利点をもつことが確かめられた. ウォーターカラム中の微細な音響的描像を得た本稿の結果は, 海洋物理学的研究への MBES 活用の有用性を示唆するものである.

- (2003) High-frequency acoustic scattering from turbulent oceanic microstructure: The importance of density fluctuations, *J. Acoust. Soc. Am.*, 114, 2685-2697.
- Lurton, X. (2010) *An introduction to underwater acoustics-principles and applications (second edition)*, 716pp., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Medwin, H. (2005) *Sounds in the sea: from ocean acoustics to acoustical oceanography*, 678pp., Cambridge University Press, Cambridge.
- Mills, B. Y. and A. G. Little (1953) A high-resolution aerial system of a new type, *Aust. J. Phys.*, 6, 272-278.
- Moum, J. N., D. M. Farmer, W. D. Smyth, L. Armi, and S. Vagle (2003) Structure and generation of turbulence at interfaces strained by internal solitary waves propagating shoreward over the continental shelf, *J. Phys. Ocean.*, 33, 2093-2112.
- Ross, T. and A. C. Lavery (2012) Acoustic scattering from density and sound speed gradients: modeling of oceanic pycnoclines, *J. Acoust. Soc. Am.*, 131, [1], 54-60.
- Thorpe, S. A. (2007) *An introduction to ocean turbulence*, 266pp., Cambridge University Press, Cambridge.
- Trevorrow, M. V. (2005) Observations of acoustic scattering from turbulent microstructure in Knight Inlet, *Acoust. Res. Lett. Online*, 6, 1-6.
- 打田昭雄 (2002) 海水中における音速度の測定と補正, *水路部技報*, 20, 91-99.
- Urban, P., K. Köser, and J. Greinert (2017) Processing of multibeam water column image data for automated bubble/seep detection and repeated mapping, *Limnol. Oceanogr.: Methods*, 15, 1-21.
- Urick, R. J. (1983) *Principles of underwater sound (third edition)*, 442pp., Peninsula Publishing, Westport, CT.