

— 総説 —

地震音響海洋学：反射法地震探査データを用いた海洋物理研究*

横田 華奈子^{†‡**}・勝又 勝郎[‡]・山下 幹也[†]・深尾 良夫[†]・小平 秀一[†]・三浦 誠一[†]

要旨

マルチチャンネル反射法地震探査 (Multi-Channel Seismic survey, MCS survey) は、これまで地震学において地下の構造探査に用いられてきた手法である。2003年にこのMCSデータを用いて海洋中の密度構造を可視化できることが指摘されてから、地震音響海洋学 (Seismic Oceanography) と呼ばれる MCS データを用いた海洋物理学が発展してきた。この新しい研究分野を本稿で紹介する。

MCS データとは人工震源から発振された音波の反射強度を記録したものである。ノイズが多いなどの難点はあるが、従来の海洋観測法では様々な制約から取得することが難しい水平・鉛直ともに高解像なデータである (水平分解能 6.25~12.5 m, 鉛直分解能 0.75~3 m)。観測は船舶を停止せずに行われるため、約 200km の測線を前述の分解能で 1 日で観測できる。MCS データを用いると広範囲の海洋中のファインスケールの密度構造を可視化することができる。ここでは一例として、伊豆・小笠原海域の 1 測線に見られた反射強度断面上の低気圧性渦を挙げる。

キーワード：地震音響海洋学, 反射法地震探査 (MCS) データ, ファインスケール, 渦

1. はじめに

マルチチャンネル地震探査 (Multi-Channel Seismic survey, MCS survey) は、1920 年代後半から、地下構造を調査するために地震学者らによって用いられてきた手法である。この手法では、人工震源から音波を発振し、その反射波の強度を測定することで、地下の密度変化を

可視化することができる。海底下の地下構造探査にも 1960 年代後半からこの手法が用いられるようになった。海底下の探査の場合、発振された音波は海水中も通過するため、データには地下の情報だけでなく海水中の情報も記録されているが (Phillips and Dean, 1991), ノイズが多かったり、データ容量削減のために記録されていなかったりしたため、ほとんど注目されてこなかった。

しかし Holbrook *et al.* (2003) は、MCS データから作成された海洋中の反射強度断面に、水温フロントが明瞭に可視化されることを見出した。さらに、音波が強く反射した面の深度と、投棄式水温計 (eXpendable Bathy Thermograph, XBT) から見積もった音速プロファイルの大きく変化する深度がよく合致していることがわかり (Fig. 1), このことから、海洋内部の現象の研究に対する MCS データの有効性が確認できた。これ

* 2010 年 3 月 29 日受理; 2010 年 8 月 26 日受理
著作権: 日本海洋学会, 2010

[†] 海洋研究開発機構 地球内部ダイナミクス領域
〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町 3173-25

[‡] 海洋研究開発機構 地球環境変動領域
〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町 2-15

** 大成建設株式会社 技術センター
e-mail address: yktnk00@pub.taisei.co.jp
TEL 045-814-7234

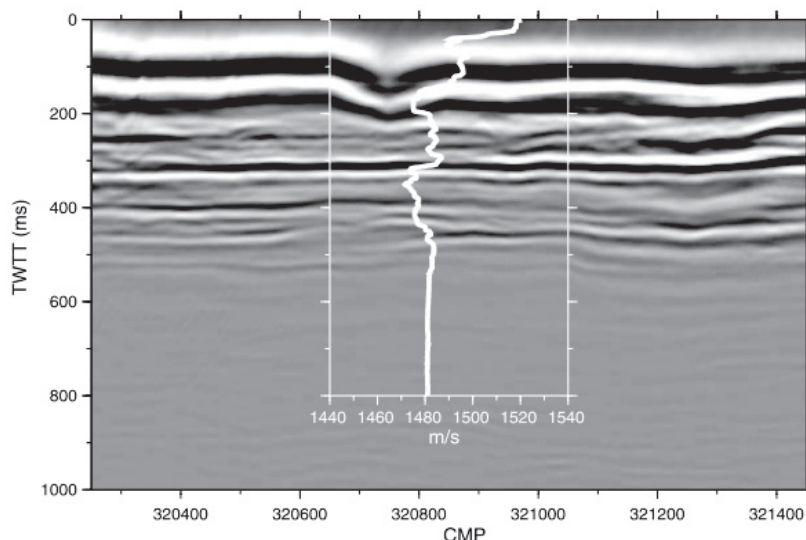


Fig. 1. Stacked seismic section (Holbrook *et al.*, 2003). The white line shows the sound speed structure calculated from the XBT data deployed at CMP 320850. In the upper 500 ms (~ 375 m), the reflectivity corresponds well to the finescale temperature variations.

を受け、MCS データを用いた海洋研究、「地震音響海洋学 (Seismic Oceanography)」が発展しつつある。地震学の分野では中村ら (2008) が地震音響海洋学を紹介しているが、我が国の海洋学者には、比較的新しい分野と思われる。本稿ではこの地震音響海洋学の実現とその可能性について紹介する。

2. MCS 観測とデータの特徴

MCS 観測では、観測船はハイドロフォン (受振器) の取り付けられたストリーマーを曳航しながら、4~5 ノットで航行する。船尾に取り付けられた人工震源であるエアガンから音波が発振され、その音波の反射波をストリーマーのハイドロフォンが受振する (Fig. 2)。1つの受振部には 10~20 のハイドロフォンが取り付けられており、それらの記録を合成し、1チャンネル分の記録となる。受振したデータは船内のコンピューターに記録される。海底下の構造を深部まで探査する場合、その間に音波は反射し、透過波の強度は徐々に弱まる。微弱な反射波を受振するために受振部の数 (チャンネル数) はできるだけ多い方がよい。その一方で、チャンネル数の増加はストリーマーケーブルが長くなることを意味し、両者の兼ね合いから、深部探査用のシステムでは、

200~500 チャンネルが用いられる。受振部の間隔は 10~数十 m で、ストリーマーケーブルは 5~10km にも及ぶ。よって、観測中、他の船舶が観測海域への侵入しないよう警戒船で監視しており、MCS 観測は非常に大掛かりな観測となる。その他にも、海底下の浅部地殻構造探査をするためのチャンネル数の少ないシステムもあり、その場合のストリーマーケーブルは 1km にも満たないため警戒船も必要なく、簡便に観測できる。

反射波データをできるだけ多く取得しノイズを減らすために、MCS 観測では船を動かしながら何度もエアガンを発振する。エアガンの発振は船の移動距離で数十 m~数百 m、つまり数十秒間隔で行われ、前述の通りストリーマーは 5~10km あるため、地下あるいは海洋中

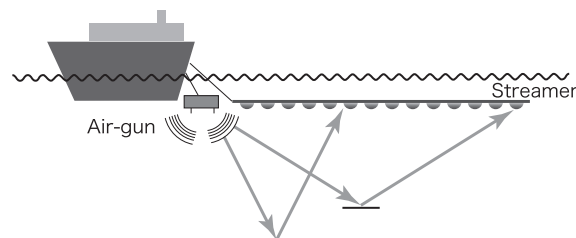


Fig. 2. A schematic of the MCS survey. The ship tows an air-gun (sound source) and a streamer (an array of hydrophones). Sounds from the air-gun reflect at the reflectors and reach hydrophones.

のある点からの反射波が、異なる発振・異なる受振部で、複数回記録できる。例えば、チャンネル数が200、受振部の間隔が25 mの場合、ストリーマーの全長は5000 mになる。発振間隔が50 mとすると、1回発振する毎に、ある1点からの反射波が受振される受振部と発振点の距離は $50 \times 2 = 100$ m ずつ遠ざかっていく。よって、ある1点からの反射波は、 $5000 \div 100 = 50$ 回記録されていることになる。このようにして得られた、ある1点からの複数のデータを、発振源からの水平距離を考慮して到達時間を補正し、深度分布に変換して足し合わせ、平均をとることで、1本の鉛直プロファイルが得られる。チャンネル数を増やして、何度も発振することで受振回数が増え、信号対雑音比が上がる。

取得されたデータの水平解像度は、6.25~12.5 mである。例えば、ストリーマーに受振部が12.5 m 間隔に取り付けられている場合、音波は発振点と受信点の中間で反射しているため、水平解像度はその半分の6.25 m となる。一方、鉛直解像度は約0.75~3.0 m である。受信器のサンプリング周波数は通常250~1000 Hz であり、また、海水中の音速は約 1500 ms^{-1} で、発振点と反射点を往復してきた音波を記録している。よって、例えば、250 Hz の場合、0.004 秒毎に記録しており、往復で $1500 \text{ ms}^{-1} \times 0.004 = 6$ m 毎のデータ、つまり鉛直解像度が約3 m 毎のデータが取得できる。これまでの海洋観測では、水平・鉛直ともに高解像度のデータを取得することは測器の機能や時間の制約で難しかったが、このMCS観測では、高解像度のデータが広範囲にわたり取得できる。

MCS観測で使用する音波の周波数は10~数百 Hz と音響ドップラー流速プロファイラー (ADCP) の周波数(数k~数百kHz)よりも格段に低周波数であるため、音波は音源から遠く離れた地下深くまで到達することができる。よって、海面から地下深くまでの全てのデータを、音源の鉛直位置は固定されたままで、取得することができる。このため、鉛直広範囲のデータを取得するために船を止める必要はなく、水平広範囲を比較的短時間で観測することが可能になる。例えば、200 km 程度の測線の観測が約1日で行える。

その一方でMCSデータには、これまで述べてきたように(1)地下と比べて海洋中の反射は微弱でノイズレベルが相対的に高くなる、(2)データがエアガンの容量や

ストリーマーの種類、ストリーマーの曳航深度などの観測システムの設定に強く依存する、(3)エアガンやストリーマーの動揺の影響を受ける、(4)データの周波数帯が音源の周波数特性(数百Hzより上でエネルギーが急減する)の影響を強く受ける、(5)海流などの流れによって音波がドップラー・シフトするがその影響を除去できない、(6)数十秒の間隔で発振しても前回の発振の残響の影響を完全には除去できない、という難点もある。

3. 地震音響海洋学の展開

近年の地震音響海洋学の復興は、Holbrookら(2003)による。彼らは2000年8月に大西洋ニューファウンドランド海盆の3測線上で行ったMCS観測データの海洋部分の反射断面を描いたところ、ラブラドル海流と北大西洋海流のフロントが明瞭に現れていることに気づいた。そこでさらに、地下構造を可視化する際の海洋中の音速を求めるために投下している1本のXBTに着目し、そこから得られた音速プロファイルとMCSデータを比較したところ、音速が変化する深度で振幅が増大することが確認できた(Fig. 1)。

そこで、彼らの研究グループは2003年に、海洋現象を焦点においたMCS観測をノルウェー海で行った。地下構造ではなく、海洋構造を調べるために行われた観測はこれが初めてであった。彼らは、海洋中の温度変化とMCSデータの定量的な関係を確立するために、110本ものXBTを172 kmの測線上で投下した。ここで初めて、フロントのようなスケールの大きい現象だけでなく、鉛直スケール35 m以下のいわゆるファイン・スケールの現象もMCSによって明瞭にとらえられることもわかった(Nandi *et al.*, 2004)。

もともと、MCSデータは地下構造を可視化するために用いられている。そこで、彼らは、明瞭に見える海洋中の反射面が波打っている様子に、まず着目した。この明瞭に見える反射面とは、音波が強く反射した面であることを意味する。音波は音響インピーダンス(=媒質の密度×媒質中の音速)が変化した点で反射することから、この水平方向に連続性を持った反射面は等密度面であるとみなせる。さらに、明瞭に見える反射面を水平方向に追跡し、水深の変化を見積もれば、等密度面変位の水平

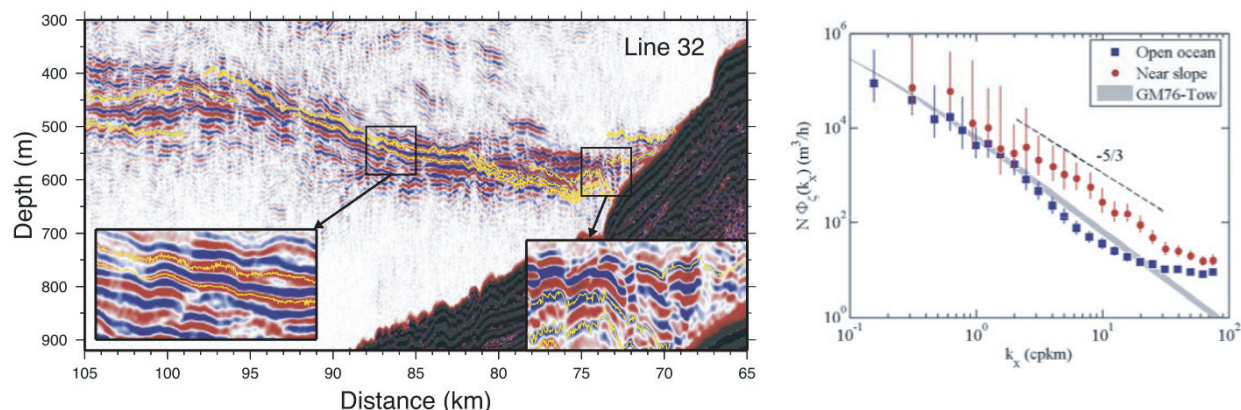


Fig. 3. (a) Seismic section from Holbrook *et al.* (2005) (Fig. 2 (b)). Peaks and troughs of reflections are shown in red and blue, respectively, in the water column and grey and black in the solid earth. Yellow lines are reflectors. The reflectors are smooth in the interior ocean but become wavy towards the bottom slope.
 (b) Horizontal wave number spectra of vertical displacement from open ocean (squares), near slope (dots), all scaled by the average buoyancy frequency, N . Vertical bars show 95% confidence intervals. The GM-spectrum for $N = 1 \sim 2.5$ cph is shown by the gray thick line. (Holbrook *et al.* (2005) Fig. 3)

変化が分かる。MCS データ解析ソフトの解釈ツールを用いて、反射面の追跡を行い、等密度面変位の水平波数スペクトルを計算すると、そのスペクトルのパワーは大陸斜面から離れた場所では海洋中の内部波エネルギーの普遍平衡スペクトルである Garrett-Munk (GM) モデル (Garrett and Munk, 1975) と同程度であるが、大陸斜面の近傍では GM モデルよりも増加していることがわかった (Holbrook and Fer, 2005) (Fig. 3)。従来の海洋観測では、鉛直高解像度でも測点間隔が数 km も空いていたり、水平高解像度でもひとつの等密度面のみしか観測できなかつたりと、制約が多かった。しかし、MCS データ用いれば、複数の等密度面変位の数 km~10 m スケールの水平波数スペクトルを計算することができることになる。

このように、MCS データは、海水の性質はわからないものの、水塊の空間構造をとらえるのに適している。この特長を生かして、ヨーロッパでは、地中海流出水から生成される渦、Meddy についての詳細な調査が行われている。2006 年 Hobbs らが中心となって、6 カ国の大学・研究機関から地球物理学者と海洋学者らが集まり、国際プロジェクトである Geophysical Oceanography project (GO プロジェクト) が立ち上げられた。このプ

ロジェクトは研究対象海域をジブラルタル海峡とカディス湾に絞って、Meddy の詳細な構造や形成過程の解明を目指しており、2008 年からいくつかの結果が報告されている。たとえば、従来の海洋観測では測ることが困難であった水平 10 m スケールまでの Meddy の正確な大きさを捉えることに成功した (Biescas *et al.*, 2008)。また、Krahmann *et al.* (2008) は、イベリア半島沖の 3 測線で観測を実施し、そのうち 1 測線で Meddy を捉えるのに成功した。彼らは、まず、等密度面変位の自動追跡アルゴリズムを提案し、その手法から計算された等密度面変位の水平波数スペクトルの詳細を調べた。その結果、どのスペクトルもそのパワーは GM モデルと同程度であったが、Meddy を捉えた近傍では他測線より増加しており、Meddy と内部波場の相互作用が活発になっている可能性が示唆された。他にも、MCS で可視化された Meddy の構造を数値シミュレーションで再現する研究も進められている (Menseguen *et al.*, 2009)
 一方、我が国でも地震学者達による黒潮や黒潮続流を対象とした研究例が報告されている。Tsuji *et al.* (2005) が 1990 年に黒潮の流路を横切る測線上で 3 日おきに行った MCS 観測のデータの海洋部分を解析してみたところ、深度約 600 m に存在する反射面が 20 日以上

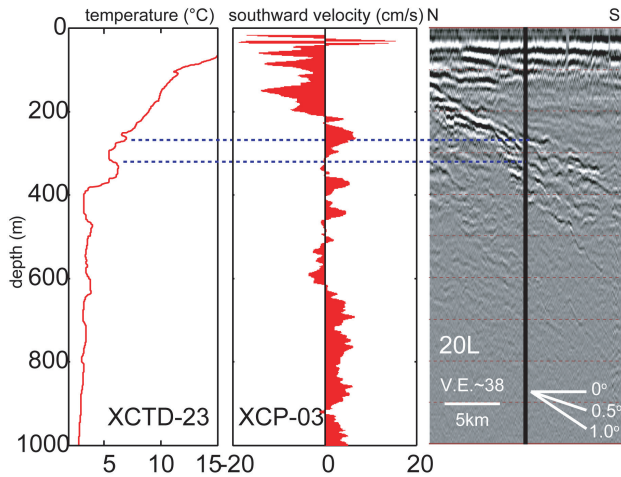


Fig. 4. Comparison of (left) XCTD temperature, (middle) XCP southward velocity, and (right) seismic reflection data. The XCP data were high-pass filtered at the wave length of 10 m. The blue lines indicate abrupt temperature and velocity changes corresponding to the seismic reflections. Thin black vertical lines on the seismic reflection data indicate locations of the XCTD and XCP casts in right panel. (Nakamura *et al.*, 2006)

にわたって持続していることが確認できた。さらに、測線近傍の1994年に取得されたCTD観測データから求めた音速構造を用いて数値計算により求めた反射波の理論波形と、実際に測定したMCSプロファイルがよく対応していることがわかった。その後、2005年になって、Nakamura *et al.* (2006)により、我が国で初めて地震音響海洋学を目的としたMCS観測が行われた。観測は黒潮統流を横切る測線上で実施され、MCS観測と同時にXCTD、さらに投棄式流速計 (eXpendable Current Profiler, XCP) が投下された。得られた水温プロファイル、水平流速の鉛直プロファイルをMCS反射断面と比較した結果、水温変化が増大する深度・流速シアーが強い深度で反射強度も強くなっていることが指摘された (Fig. 4)。

反射波の理論波形と測定したMCSプロファイルがよく対応しているならば、MCSデータからインバース法で水温が推定できることになる。Wood *et al.* (2008)は、MCSデータからインバース法により、XBTの水温値と誤差 0.1°C 以内で水温構造を推定する手法を提案した。他にも、MCSデータから計算した等密度変位の

水平波数スペクトルを用いて、鉛直拡散係数を見積もる手法が提案されている (Sheen *et al.*, 2009)。Sheenら (2009)はGregg (1989)の実験式を参考にして鉛直乱流拡散係数を間接的に見積もっている。GMスペクトルは波の周波数・鉛直波数で規定されているが、分散関係式を用いれば、周波数・水平波数に変換することができる。そして、それを周波数積分した等密度面変位の水平波数スペクトルのパワーとMCSから推定した等密度面変位の水平波数スペクトルのパワーの比を用いて鉛直乱流拡散係数を見積もっている。これらのように、MCSデータから海洋学にとって有用な物理量が、より小さい誤差で推定できるようになれば、MCSデータの活用の幅が広がっていく。他にも、MCSデータから作成した反射強度断面で反射強度が強化されている領域が M_2 内部潮汐のビームの傾きと重なっていることが示唆されており (Holbrook *et al.*, 2009)、今後は技術的なことではなく、より海洋物理学的な研究が増えてくるだろう。

上述のように、地震音響海洋学はこの数年で目覚ましい発展を遂げてきた。地震音響海洋学はRuddickら (2009)によって、海洋物理分野の雑誌でも紹介されたが、MCSデータが海洋物理学者にはまだあまり浸透していないため、なお発展途上といえる。次章では、MCSデータの「高解像度」であるという利点を示す一例を我々の所有するデータから紹介する。

4. 伊豆・小笠原海域のレンズ状構造

海洋研究開発機構・地球内部ダイナミクス領域では、1997年から研究船「かいらい」にMCSシステムを導入し、MCS観測を行っている。この13年間で100本を超える日本近海の広範囲に渡る測線データが蓄積されてきた。これらの観測は地下構造探査を目的として行われたため、大部分の測線は海溝に対して垂直もしくは平行な方向に引かれている (Fig. 5)。日本近海に限られたデータではあるが、黒潮の流軸を横切る測線も多数存在しており、また、北太平洋で特に内部潮汐エネルギーが励起されていると指摘されている (Niwa and Hibiya, 2001) 伊豆・小笠原海域には、南北に走る伊豆・小笠原島弧が存在するため多数の測線が引かれている。

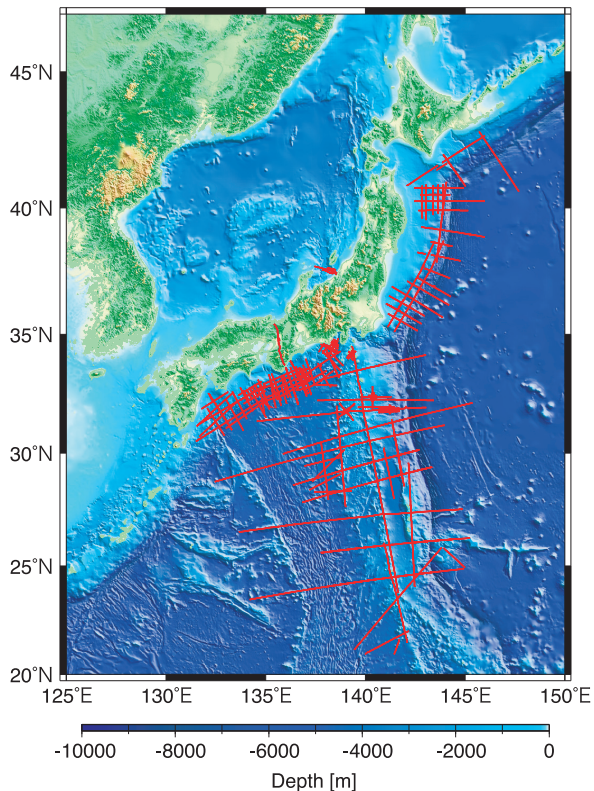


Fig. 5. The red lines show the location of legacy MCS data of JAMSTEC/IFREE (http://www.jamstec.go.jp/jamstec-j/IFREE_center/). The background map shows the water depths.

西七島海嶺付近にある測線 IBr4 の反射断面にレンズ状の構造が見られた (Fig. 6, 赤矢印)。図中、縞々が濃く見えるところほど反射強度が強く、図の下部にある特に色の濃い部分は、海水よりも反射の強い地下の構造を示している。測線は全長約 450km ある。この測線の MCS 観測は 2005 年 11 月 30 日から 12 月 3 日にかけて、研究船「かいらい」の KR05-16 航海にて南から北へ向けて実施された。本観測システムは、204 チャンネルの受振部が 25 m 間隔で、エアガンの発振は 50 m 毎、サンプリングは 0.004 秒間隔とした。測線南側に見られるレンズ状構造は水平約 50~100km、深度 300~1000 m に存在し、コア部分の水深は約 800 m である。

観測日程の直近の海面高度アノマリデータ (Fig. 7) を見ると、11 月 2 日には測線上にあった低気圧性渦 (Fig. 7, 青矢印) が、2 週間後の 16 日には、東から西進してきた別の低気圧性渦と連結し、30 日には測線の

西側に抜けているのがわかる。この低気圧性渦の水平位置とレンズ状構造の位置が対応している。また、レンズ状構造の見られる位置に時空間的に最も近傍に存在しており、30 日の海面高度からレンズ状構造と同一水塊内に存在しているとみなせる Argo フロート (WMO-ID: D2900296-65) のデータから計算した塩分、ポテンシャル水温、ポテンシャル密度の深度プロファイル (Fig. 8) を見ると、深度約 750 m にピークのある塩分極小が見られる。これがレンズ状構造のコア部分と対応していると推察できる。海面高度アノマリを考慮に入れると、このレンズ状構造は東から西へ移流してきたと推測できる。この塩分極小は塩分 34.1 未満、 $26.9\sigma_\theta$ という北太平洋中層水の特徴を持っており、北太平洋中層水の剥離した一部であると考えられる。Fig. 6 の MCS 断面を見ると、この水塊は非常に限られた範囲に分布する水塊である。そこで、観測日前後 1 ヶ月間に測線の近傍に存在していた Argo フロートのデータから緯度断面を描くと (Fig. 9)、このレンズ構造付近では特に 34.1 未満と特に低塩で (Fig. 9(a)) であるのに、数百 km 離れたところでは塩分極小は 34.2 程度であることがわかる (Fig. 9(b))。水平 100km 程度の領域に分布する水塊を捉えるのは従来の船舶による海洋観測では難しいが、MCS データを利用すれば、空間分布の詳細な把握も可能であることが確認できた。

MCS データから得られる情報は密度差であり、その精度は高くない。しかし、空間分解能の観点から考えると、非常に高解像度のデータが得られる。例えば、代表的なハイドログラフィ観測である WOCE のデータと比較してみる。Fig. 10 は WOCE の P10 線 (東経 149 度 20 分) を海洋研究開発機構が 2005 年に観測したデータの一部を用いて、Fig. 6 とほぼ同じ水平スケールで描いた水温の鉛直断面図である。Station 70 で等温線深度が深くなっており、渦を捉えていると推察できるが、測点間隔が約 60km あるため、その渦の水平スケールは測点間隔より小さいということしかわからない。つまり、Fig. 6 と Fig. 10 の比較から、従来のハイドログラフィ観測が水平 10km スケール程度であるのに対し、MCS 観測は水平スケール 10 m 程度のデータを取得可能であり、MCS データを用いれば、従来の観測では解像できなかった様々な構造が明らかになることが見て取れる。

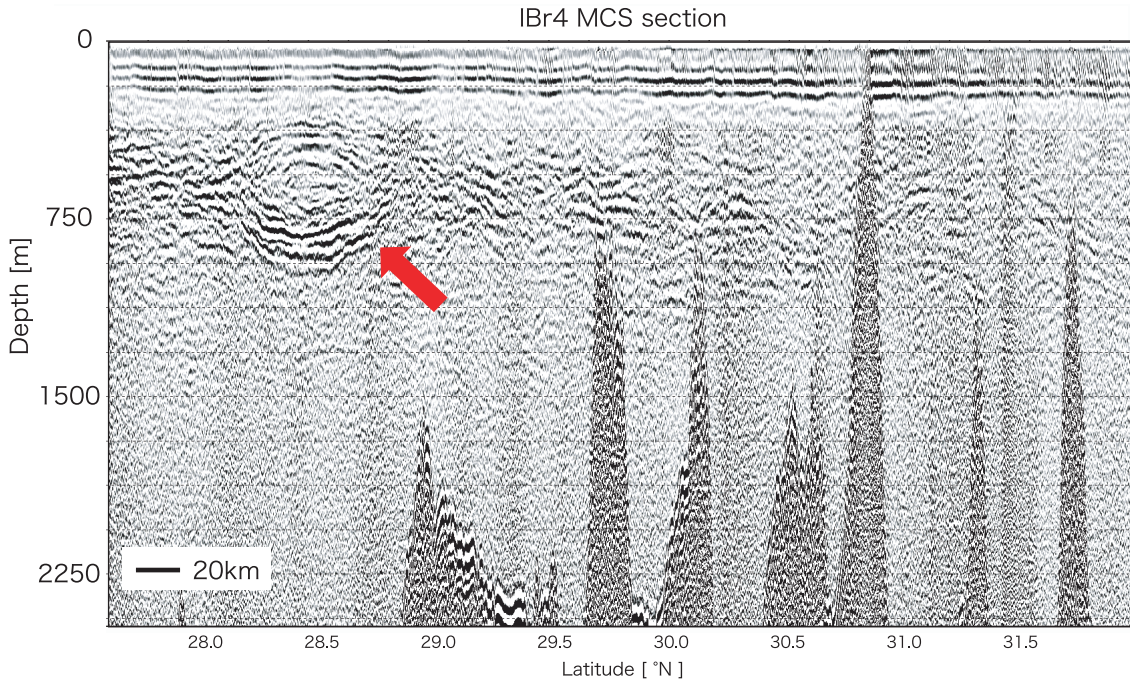


Fig. 6. Stacked seismic reflection section of IBr4 near the Izu-Ogasawara ridge. The location is shown in Fig. 7. Seismic data were acquired during KR05–16 cruise of R/V Kairei from November 30 to December 3 in 2005.

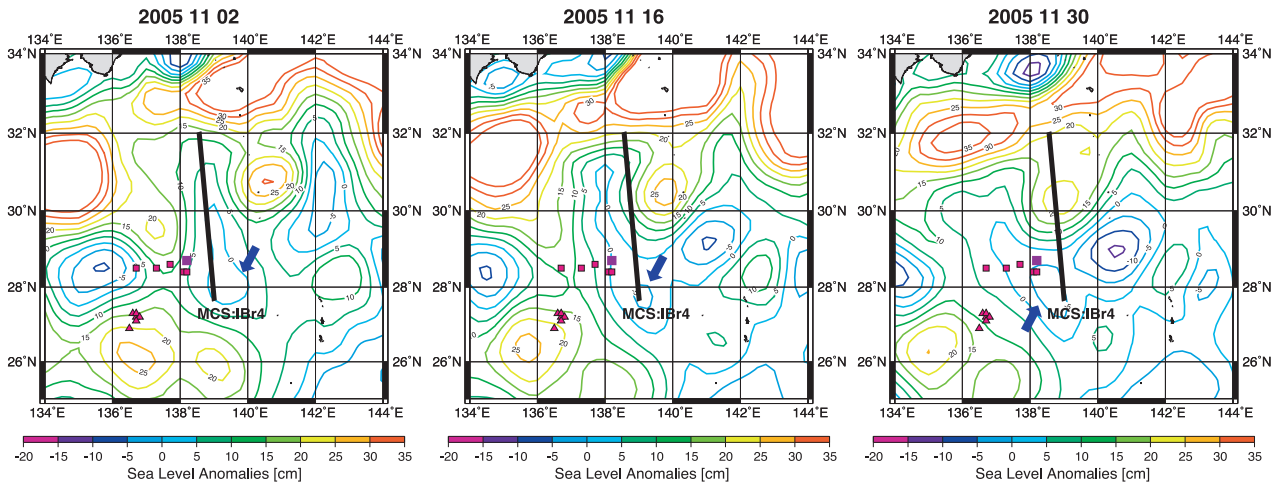


Fig. 7. Time series of SSH anomalies every two weeks from November 2 to November 30, 2005. Contour interval is 5 cm. Thick solid line is the line of MCS observation, and the purple and magenta squares and magenta triangles represent the locations of the Argo floats, located within $\pm 2.5^\circ$ of the MCS line within one month. The blue arrows show the cold ring captured in Fig. 6.

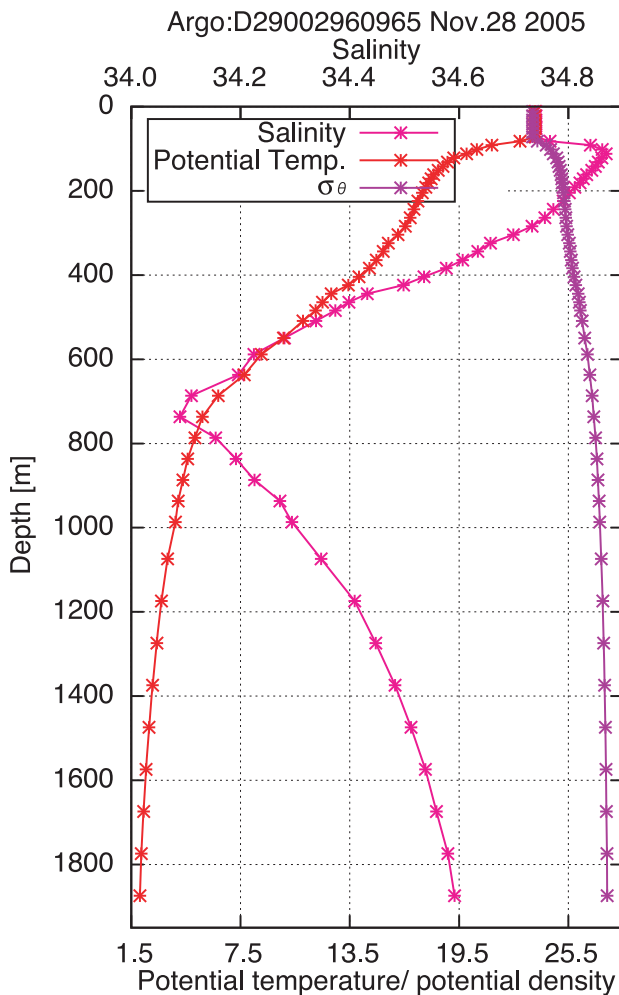


Fig. 8. Vertical profiles of salinity (magenta line), potential temperature (red line) and potential density (purple line) from the Argo float data nearest to the IBr4 line (Fig. 6). The location of floats is shown in Fig. 7 (purple square).

5. まとめと今後の展望

本稿では、これまで地下構造探査に用いられてきた MCS データを新たに海洋学に応用した地震音響海洋学について紹介した。MCS データはノイズが多いという難点はあるが、これまで海洋観測では様々な制約から取得することが難しかった水平・鉛直に高解像度なデータである。これを用いれば、水平 10 m~100km スケールと非常に広範囲の構造を可視化することが可能となる。

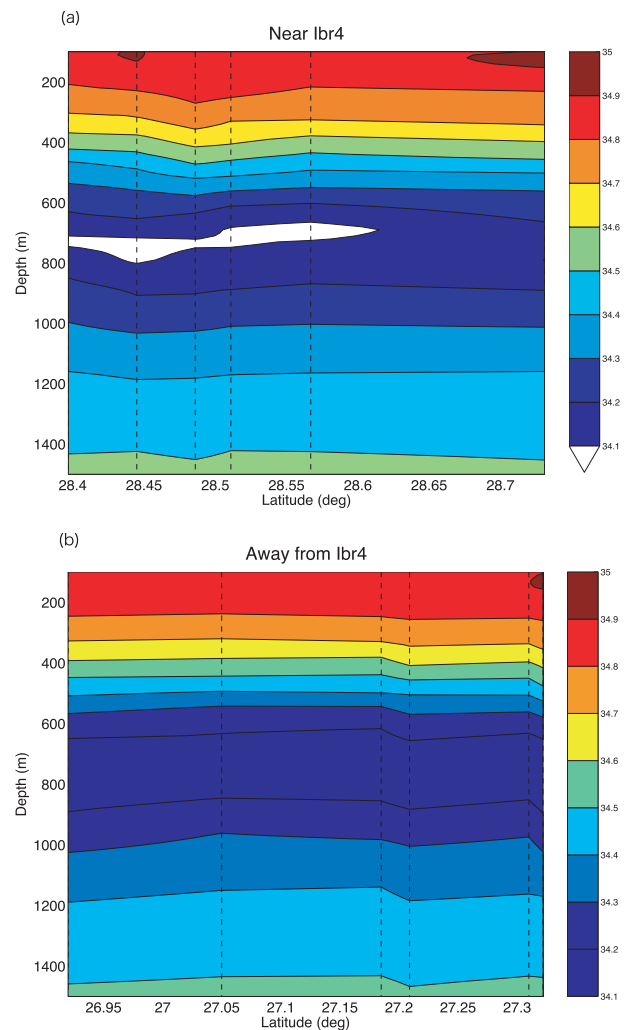


Fig. 9. Meridional section of salinity from Argo float data. The left panel shows the salinity inside the lens-shaped structure, and the right panel shows the salinity outside the lens-shaped structure on Fig. 6. On Fig. 7, the triangles show the float location used in the left panel, and the squares show the float location used in the left panel.

今回はその一例として、レンズ状構造の可視化を紹介した。水平・鉛直に高解像度なデータであるという特長を生かせば、海洋学にとっても有効なデータとして利用でき、様々な新しい知見が得られることが期待される。しかし、MCS データのみから水塊特性は決定できないので、Argo フロートやその他のデータベースから時空間的に近い範囲の海洋観測データを入手し、両者を合わせて見ていくなどの工夫が必要である。新たに海洋中のデー

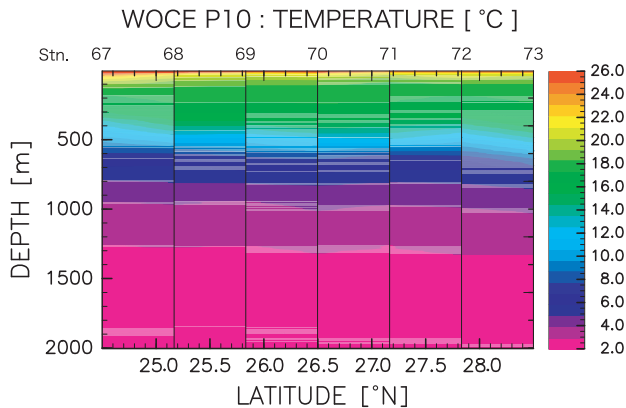


Fig. 10. A part of the temperature section from WOCE hydrographic program line P10. The station interval is about 60km. The vertical black lines indicate the location of the CTD measurements.

タを取得するために MCS 観測を行う場合は、同時に CTD 観測を行うなど、海洋物理学への応用を考慮した観測を行う必要がある。また、他にも、MCS 観測では、複数のストリーマーを曳航するなど、特殊なシステムを導入しない限り、データからは 1 方向の断面しか可視化できないため、レンズ状構造の三次元形状は確認できない。これを改善するために、MCS 観測と測線を直交する 2 方向に設定し、三次元の情報が得られるような集中観測を実施するなどの新たな観測手法の開発も必要であろう。

謝 辞

瀬戸内博士には貴重なご意見をいただき、感謝の意を表す。本研究の一部は学術振興会科学研究補助金の助成を受けて行われた。Fig. 7 では、Ssalto/Duacs によって作成され、Cnes の助成を受けている Aviso によって配布されている海面高度データを用いて作成された (<http://www.avisio.oceanobs.com/duacs/>)。Fig. 10 で用いられたデータは独立行政法人海洋研究開発機構の研究船「みらい」の MR05-02 航海にて取得された。

References

Biescas, B., V. Sallarès, J.L. Pelegrí, F. Machín, R. Carbonell, G.

- Buffett, J.J. Dañoibeitia and A. Calahorrano (2008), Imaging muddy finestructure using multichannel seismic reflection data, *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L11609, doi : 10.1029/2008GL033971.
- Garret, C. and W. Munk (1975), Space-Time Scales of Internal Waves: A Progress Report, *J. Geophys. Res.*, **80**, **3**, 291–297
- Gregg, M (1989), Scaling turbulent dissipation in the thermocline, *J. Geophys. Res.*, **94**, 9686–9698
- Holbrook, W. S., and I. Fer (2005), Ocean internal wave spectra inferred from seismic reflection transects, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L15604, doi : 10.1029/2005GL023733.
- Holbrook, W. S., P. Paramo, S. Pearse, and R. W. Schmitt (2003), Thermohaline fine structure in an oceanographic front from seismic reflection profiling, *Science*, **301**, 821–824.
- Krahmann, G., P. Brandt, D. Klaeschen, and T. Reston (2008), Mid-depth internal wave energy off the Iberian Peninsula estimated from seismic reflection data, *J. Geophys. Res.*, **113**, C12016, doi: 10.1029/2007JC004678.
- Menesguen C., B.L. Hua, C. Papenberg, D. Klaeschen, L. G'eli, and R. Hobbs (2009), Effect of bandwidth on seismic imaging of rotating stratified turbulence surrounding an anticyclonic eddy from field data and numerical simulations, *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L00D05, doi: 10.1029/2009GL039951
- Nakamura, Y., T. Noguchi, T. Tsuji, S. Itoh, H. Niino, and T. Matsuoka (2006), Simultaneous seismic reflection and physical oceanographic observations of oceanic fine structure in the Kuroshio extension front, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L23605, doi : 10.1029/2006GL027437.
- Nandi, P., W. S. Holbrook, S. Pearse, P. Paramo, and R. W. Schmitt (2004), Seismic reflection imaging of water mass boundaries in the Norwegian Sea, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L23311, doi : 10.1029/2004GL021325.
- Niwa, Y., and T. Hibiya (2001), Numerical study of the spatial distribution of the M_2 internal tide in the Pacific Ocean, *J. Geophys. Res.*, **106** (C10), **22**, 441–22,449.
- Phillips, J. D., and D. F. Dean (1991), Multichannel acoustic reflection profiling of ocean watermass temperature/salinity interfaces, in *Ocean Variability and Acoustic Propagation*, edited by J.Potter and A. Warn-Varnas, pp.199–214, Springer, New York
- Ruddick, B., H. Song., C. Dong and L. Pinheiro (2009), Water column seismic images as maps of temperature gradient, *Oceanography.*, **22**, 192–205.
- Sheen K. L., N. J. White, and R. W. Hobbs (2009), Estimating mixing rates from seismic images of oceanic structure, *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L00D04, doi : 10.1029/2009GL040106
- Tsuji, T., T. Noguchi, H. Niino, T. Matsuoka, Y. Nakamura, H. Tokuyama, S. Kuramoto, and N. Bangs (2005), Two-dimensional mapping of fine structures in the Kuroshio Current using seismic reflection data, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L14609, doi : 10.1029/2005GL023095.
- Wood, W., W. Steven Holbrook, Mrinal K. Sen, and Paul L. Stoffa (2008), Full waveform inversion of reflection seismic data for ocean temperature profiles, *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L04608, doi : 10.1029/2007GL032359.
- 中村 恭之, 野口 尚史, 辻 健, 伊藤 幸彦, 新野 宏 (2008), Seismic Oceanography—反射法を用いた海洋微細構造調査, 最新の物理探査適用事例集, 物理探査学会, 393–398

Seismic Oceanography: physical oceanography using MCS data

K. Yokota^{† ‡}, K. Katsumata[‡], M. Yamashita[†], Y. Fukao[†], S. Kodaira[†], S. Miura[†]

Abstract

Multi-Channel Seismic (MCS) survey is now a traditional method in seismology to study subsurface structures. Since Holbrook *et al.* (2003) reported that an MCS section in the Atlantic Ocean can capture a front between cold and warm water masses, the new approach in physical oceanography using MCS data, “Seismic Oceanography”, has been developed. The MCS data consist of records of sound reflectors in the ocean interior. Although the MCS data are contaminated by relatively greater noise than traditional ocean finescale measurements, the MCS enables a high resolution section (6.25~12.5 m in horizontal, 0.75~3 m in vertical) of the ocean density structures, which is difficult to obtain by traditional methods. It is possible to conduct an MCS profiling without stopping the vessel and it takes only about a day to cover a 200 km long section. We exemplify the utility of MCS data in physical oceanography using an image of a cyclonic eddy in the Izu-Ogasawara region.

Key words: seismic oceanography, Multi-Channel Seismic data, finescale, eddy

(Corresponding author’s e-mail address: ytknkn00@pub.taisei.co.jp)

(Received 29 March 2010; accepted 26 August 2010)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2010)

[†] Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC),
Institute for Research on Earth Evolution (IFREE)

3173-25 Showa-machi, Kanazawa-ku, Yokohama, Kanagawa 236-0001

[‡] Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC),
Research Institute for Global Change (RIGC)

2-15, Natsushima-cho, Yokosuka, Kanagawa, 237-0061