

魚群探知機エコーと GPS 測位によるメタンプルーム位置特定

千葉 元¹・竹内 章²・畠 俊郎³・八木光晴⁴

Identification of Methane Plume Area Using Acoustic Echo Sounder Images and GPS Data

Hajime CHIBA¹, Akira TAKEUCHI², Toshiro HATA³ and Mitsuharu YAGI⁴

Abstract

In this study, we identified the position of a methane plume in the Joetsu Basin by analyzing echo sounder images and GPS data. First, we observed the methane plume echo imagery, obtained using a quantitative echo sounder during a research cruise aboard JAMSTEC research vessel “Natsushima” in August 2013. Then we conducted two research cruises aboard the Nagasaki University training ship “Nagasaki-maru” during May 2014 and May 2015. During the 2014 cruise, we observed methane plume echo images at the position identified from the 2013 cruise data. During the 2015 cruise, we performed sea bottom core sampling at the same position using the methane plume echo imagery, and successfully obtained a methane hydrate core sample from the seafloor at a depth of approximately 560 m.

Keywords : *Navigational Instrument and Measurement, Quantitative Echo Sounder, Oceanographic Observation, GPS Positioning, Methane Hydrate Plume*

キーワード: 航海計器・測位、計量魚群探知機、海洋観測、GPS 測位、メタンハイドレートプルーム

1. はじめに

近年、メタンハイドレートが次世代のエネルギー源として注目されている。特に、日本海東縁の上越海盆では海底下の比較的浅い部分にメタンハイドレートが存在することが、船舶からの魚群探知機によるメタンで形成されるプルーム観測や、深海艇装備の観測機器による試料採取より確認されている^{(1),(2)}。

こうした深海底に存在するメタンハイドレートは、海底面の亀裂等からメタンガスとして海中に湧出することがあるが、これは直ぐに深海の低水温と高気圧により、メタンハイドレートで覆われた気泡となって上昇していく。そして、水深約 300m 程度になると、海水温度の上昇と水圧の低下によりハイドレートはメタンの気相となり、最終的には海水中に溶解していく⁽¹⁾⁻⁽³⁾。富山湾を例とした、この水温・水深による、メタンハイドレートの形態変化を Fig.1

に示す^{(1),(3)}。この図中の水温分布は、当研究で実施された 2015 年 5 月の観測航海で測定されたデータである。富山湾から上越沖の深海は約 1~2℃以下の低温のため、水深約 300m まではメタンガスをハイドレートが包むバブルが存在し、これ以浅では、バブル表層を形成するハイドレートが徐々にガス化して水中に溶解していくことが推測される。このハイドレートのバブルが海底から海面へ浮上していく様子は、魚群探知機で観測でき、この縦長形状でエコーが観測される現象を、メタンプルームと称する。

このメタンプルーム湧出点位置の特定は、メタンハイドレートの海底下への存在と、その量を推測する重要な指針となるものである。本研究では、船舶からの超音波を用いた遠隔探査により、より効率良く、また正確に、このメタンプルームの位置や形状を把握する技術を確立することを目的としている。

1 正会員 富山高等専門学校商船学科 chiba@nc-toyama.ac.jp 2 非会員 富山大学大学院理工学研究部

3 非会員 富山県立大学工学部環境工学科 4 正会員 長崎大学水産学部

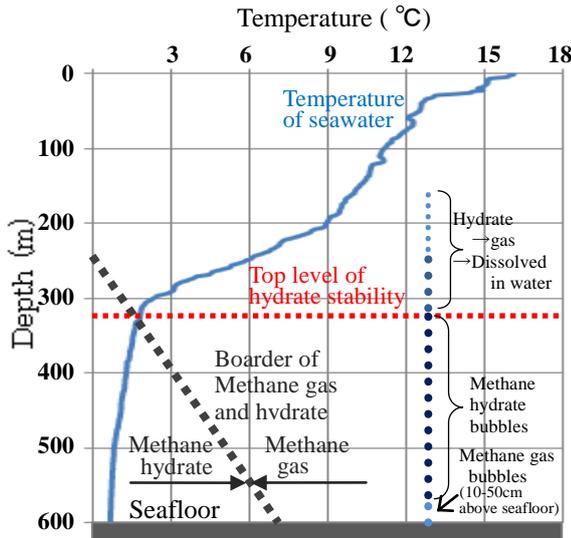


Fig.1 Methane seepage phenomenon at Toyama Bay, which the water temperature was measured at May 2015.

このメタンハイドレートが海底から海面に向かって行くメタンブルームは、通常の海水と音響インピーダンスが大きく違うために、超音波を利用した魚群探知機には明確なエコーとして確認できるものである。船上の魚群探知機から、こうしたブルームのエコーを観測することにより、船のほぼ直下にブルームがあることと、その水深を知ることができる。これと船のGPS測位による位置を照合することにより、ブルームの絶対位置（緯度・経度・水深）を特定することが可能である。

しかし、魚群探知機で使用している超音波では、観測ビーム幅が存在し、数100m海底下では数10m幅のエリアをセンサー直下と認識してしまう。

現在、漁業や海洋資源調査の観測船で良く用いられている計量魚群探知機では、取得データがデジタル化して保存され、後で信号処理をすることにより、目的とするエコーの詳細な識別を行うことができる。また、船内の精密時計やGPS・コンパス・ログ等の航行データも連動しているため、観測時の詳細な緯度・経度、方位・船速を得ることができる。

本論では、こうしたデータを分析することにより、メタンブルーム位置を特定する手法を考案したので、この実際的な手順を示す。まず2013年8月2日～7日に実施された（独）海洋研究開発機構の「なつしま」の観測航海において、計量魚群探知機（SIMRAD EK60）による探査を行った。ここで、メタンハイドレートブルームと思われるエコーを水深約560mに確認した。そして、このデータを分析することにより、ブルーム位置の推定を行うことができた。

次に、2014年5月16日～17日に、長崎大学水産

学部の「長崎丸」にて実施された観測航海にて、計量魚群探知機（KAIJYO KFC3000N）により、上記の「なつしま」の観測で推定された位置において、同様のブルームエコーを捉えることができた。そして、2015年5月15日～17日の「長崎丸」に観測航海において、同地点でブルーム観測を行い、海底からのメタンハイドレートの試料収集に成功した。

こうした一連の作業の成果として、①実際にブルームエコーが表示された魚群探知機のパラメータ、②海水温度や流速の深度特性等と比較して考察を行い推測したメタンブルームの特徴と挙動について示す。

2. 2013年8月「なつしま」による観測

2013年8月2日～7日に（独）海洋研究開発機構の「なつしま」（1,739GT）による観測航海（観測航海名 NT13-17：課題名「富山トラフの活構造マッピングと地震津波シミュレーション」）が行われた。ここで、上越海盆では船が航走しながら、「なつしま」搭載の計量魚群探知機（SIMRAD EK60, 周波数38kHz）による探査を行った。ここで、まず8月3日の夕刻に、Fig.2(a)に示す、メタンハイドレートブルームと思われるエコーを緯度 $37^{\circ} 21\sim 22'N$ ・経度 $137^{\circ} 57\sim 58'E$ の範囲を航走中に確認した。翌朝に同じ場所を船が航走した所、Fig.2(d)に示すように、前日にエコーが観測された西端から約100m南方を航走した観測にて、前日と同じ形状、反射強度分布の特徴を持ったエコーが確認された。尚、これらのエコーが観測された範囲の水深は、555～558mであった。これらのエコーは、これまでの、松本ら⁽¹⁾や青山ら⁽²⁾が観測して公開されているエコー画面と、こうした事例を参照して、筆者らを含めた現地での観測者のエコー画面の分析の経験より、メタンハイドレートブルームと判断した。Fig.2(c)に海底部分の拡大図を示しているが、海底のエコーが、ブルームの発生している場所と、その前後において、強度や形状が変化せず明瞭に示されているので、センサー廻りのバブルや電気回路系のノイズで無いことは明らかである。

ここで、計量魚群探知機で記録されていた、エコー変化にともなう、GPS測位による緯度・経度、針路から、Fig.3に示すブルーム位置の特定を試みた。

Fig.3には、両日で観測された範囲を含むよう、航跡で確認できるGPSデータから原点（0.0', 0.0'）を決め、ここから縦軸・横軸を、緯度・経度の原点からの偏差で示している。GPSはDGPS測位であり、

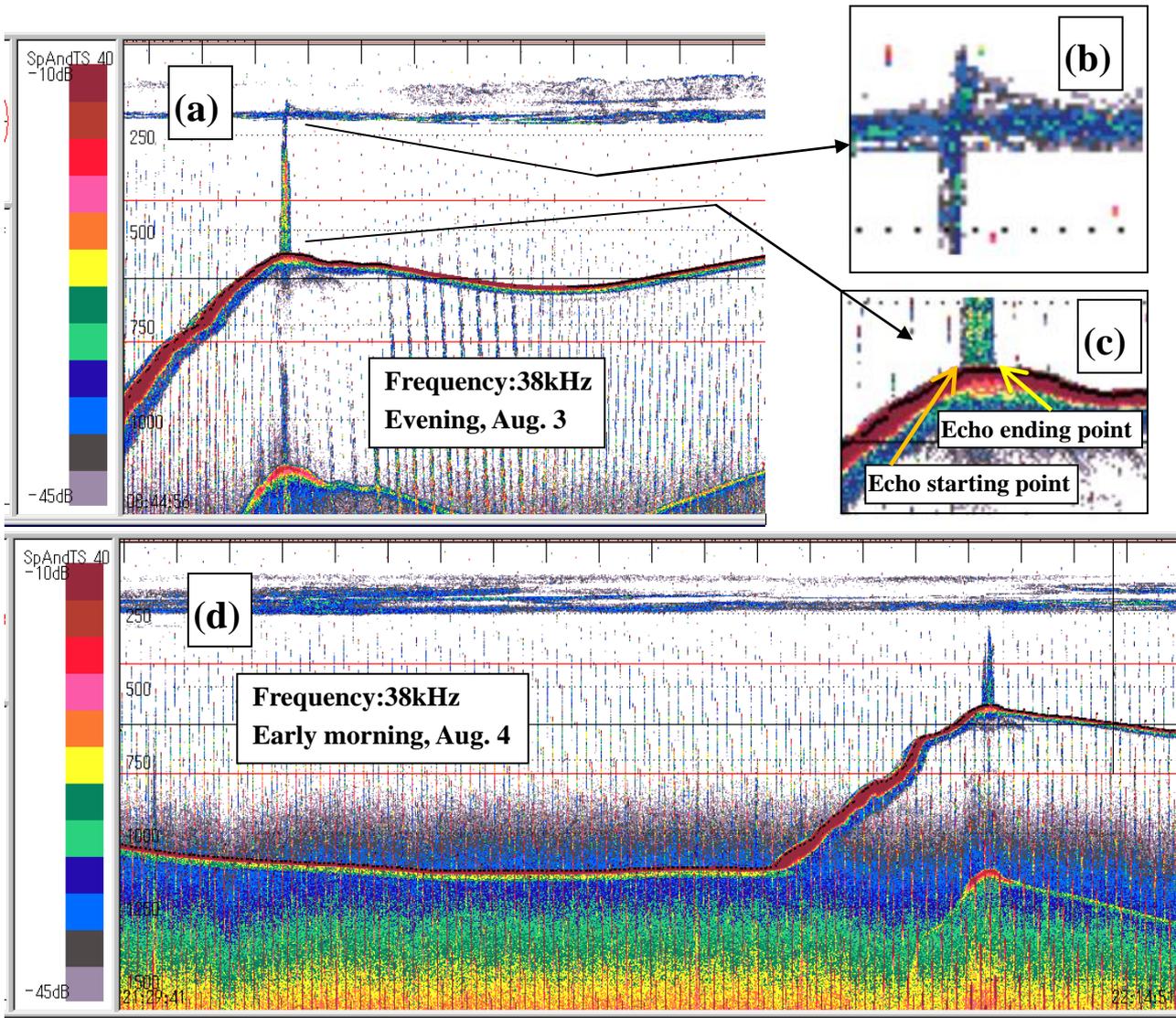


Fig.2 The plume echo images obtained by the quantitative echo sounder (SIMRAD EK60) onboard the "Natsushima" (The Y-axis shows water depth (m) and the X-axis shows the time period (approx. 30 minutes).)

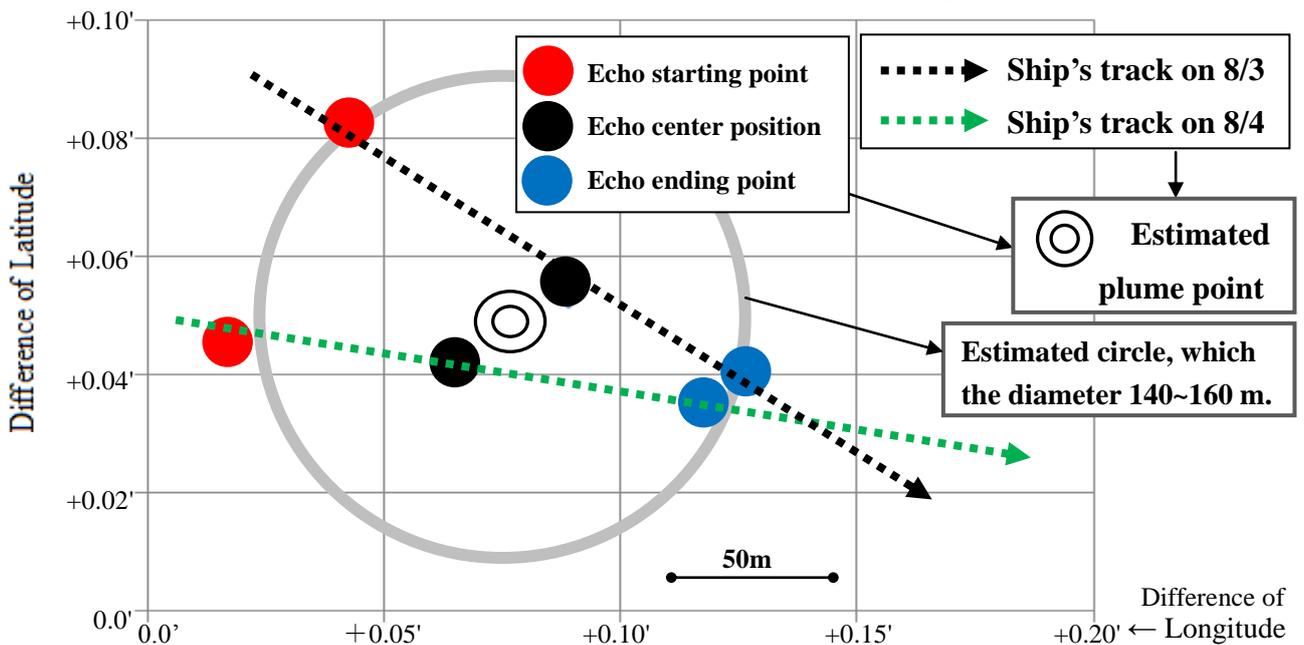


Fig.3 Plume point estimation obtained by analysis of the echo starting and ending points. The X and Y axes are shown by the position differences.

航走時の公称測位精度は、「なつしま」船内に保管されている観測機器の利用の手引きで 1m である。黒・緑破線の矢印が、それぞれ 8 月 3 日の夕刻、8 月 4 日の早朝の船の設定された針路を示している。ここで、魚群探知機のデータより、目視で確認されたブルームエコーの見え始めと、見え終りにおける時刻での GPS 測位での位置を、それぞれ赤、青丸印で示す。また、魚群探知機に表示されているエコーの、海底面付近の反射強度が特に強い部分の中心位置を黒丸印で示す。ここで、船が必ずしも設定針路通りに直線に航走できなく、航走中の DGPS の測位精度も、これまでの筆者らの多くの船上観測とデータ分析の経験から、実用上は 5~10m 程度と考えられる。また、エコーの見え始めと、見え終わりの見極めも、誤差がある。この時の船速が約 7~8kts (約 3.6~4.1m/s) であり、データの時間分解能が約 2.5 秒なので、速力 4m/s とすると、1 個のデータ当たりの平面距離長が、 $4\text{m/s} \times 2.5\text{sec} = 10\text{m}$ となる。従って、ある位置の読み取りに、10m の半分の 5m の誤差が存在する。そこで、こうした誤差量を考慮して、丸印の直径を 15m に設定した所、この丸で示した範囲が、矢印で示した船の針路に合致するようになった。

まず、ブルーム位置は、これまでの観測や分析の事例^{(1)~(3)}から、海底の亀裂等から発生するものなので、点と仮定して考えていく。ここで、この二つの反射強度が強いエリアの直近である、二つの黒丸印を結んだ線の二等分点を、ブルーム位置として考えた。ここで、この位置から出ているブルームを魚群探知機が取らえていると考え、Fig.3 における、赤丸(エコーの見え始め)と青丸(見え終り)を。ほぼ円周上とする円の半径は図から推測すると 70~80m となる。この直径が、140~160m となる円を Fig.3 中に示した。この円の中心は、ブルーム位置として考えた二重丸の地点となり、ここにブルームがあると考えるのが有望である。

尚、ビーム幅 7°で、水深 550m での、ビーム送受信の最大値より半値幅で定義される検知範囲は、半径 $33.6\text{m} [550\text{m} \times \tan(7^\circ / 2)]$ の円となり、先に推測した半径 70~80m より約 2 倍の大きさとなる。これは、ブルームの反射強度が大きいために、こうしたエコーが画像に明確に表示されたものと思える。

また、Fig.2(b)に拡大図を示す、水深約 100~200m のエコーにおいては、エコーが左から右方向、船の針路から考えると West から East への流れが伺えるが、これはこの場所を流れる海流の影響を受けてい

るためと思える。ここでは、ビーム幅 7° から計算される検知範囲は約 10~20m 内なので、距離的な分解能が上がり、こうした海流によるブルームの横方向への偏位が観測されやすくなっていると思える。

3. 2014, 2015 年の「長崎丸」による観測

2014 年 5 月 16 日~17 日に、長崎大学水産学部の「長崎丸」(1,174GT) による乗船実習の一部として、富山湾から上越沖の海洋観測が実施され、この航海の中で、前章で Fig.3 の作図から推定し、ブルームの存在を有望視したポイントにおいて、「長崎丸」搭載の計量魚群探知機 KAIJYO KFC3000N を用いての観測の機会を得た。ここで、「なつしま」で観測したものと、同じ特徴のエコーを観測することができた。

そして、2015 年 5 月 15 日~17 日には、「長崎丸」により、前年と同海域での海洋観測が実施された。

ここで、前年度の航海におけるブルーム観測点付近において、計量魚群探知機による観測を行った。Fig.4 に魚群探知機の表示画面のコピーを、Fig.5 にこの間における GPS 航跡を示す。Fig.4 示すように、この観測中に A~C の明瞭なブルームエコーが観測された。Fig.4 にて、A と C の左側に見られるエコーは、A~C に比べて、細い形状なので、魚群探知機のビームが検知範囲の端にてブルームを捉えていると思える。ここで、Fig.5 には、Fig.3 中で示したブルームの推測位置を二重丸で、A~C のブルームの平面位置を、航跡中に、A は青線、B は赤線、C は黒線で示す。本論では、この二重丸付近で確認された、Fig.4 の A, B, C のエコーについての分析と考察を行っていく。まず、南方から、この位置を目指して船を誘導し、ここで船を停船させてから、ピストンコアラーの降下を行った。ここで、「長崎丸」の機関を後進にかけているため、この水流がトランスデューサーに影響して、エコー A と B の間でエコー信号が途切れていることが、現地で確認されている。ピストンコアラーは海底にパイプを突き刺して、堆積物を採取する機器である。メタンブルーム周囲の海底下にはメタンハドレートが堆積しているため、このサンプリングが期待できる。

このコアサンプリングを行った地点を、Fig.5 中の黒丸印で示す。この場所は、Fig.4 に示すエコー B であり、船尾から降下しているピストンコアラーが計量魚群探知機のビームエリア内に入り、その軌跡を明確に捉えることができ、これが黄色線に表示されている (Fig.6 左図に示した拡大図で明確に確認でき

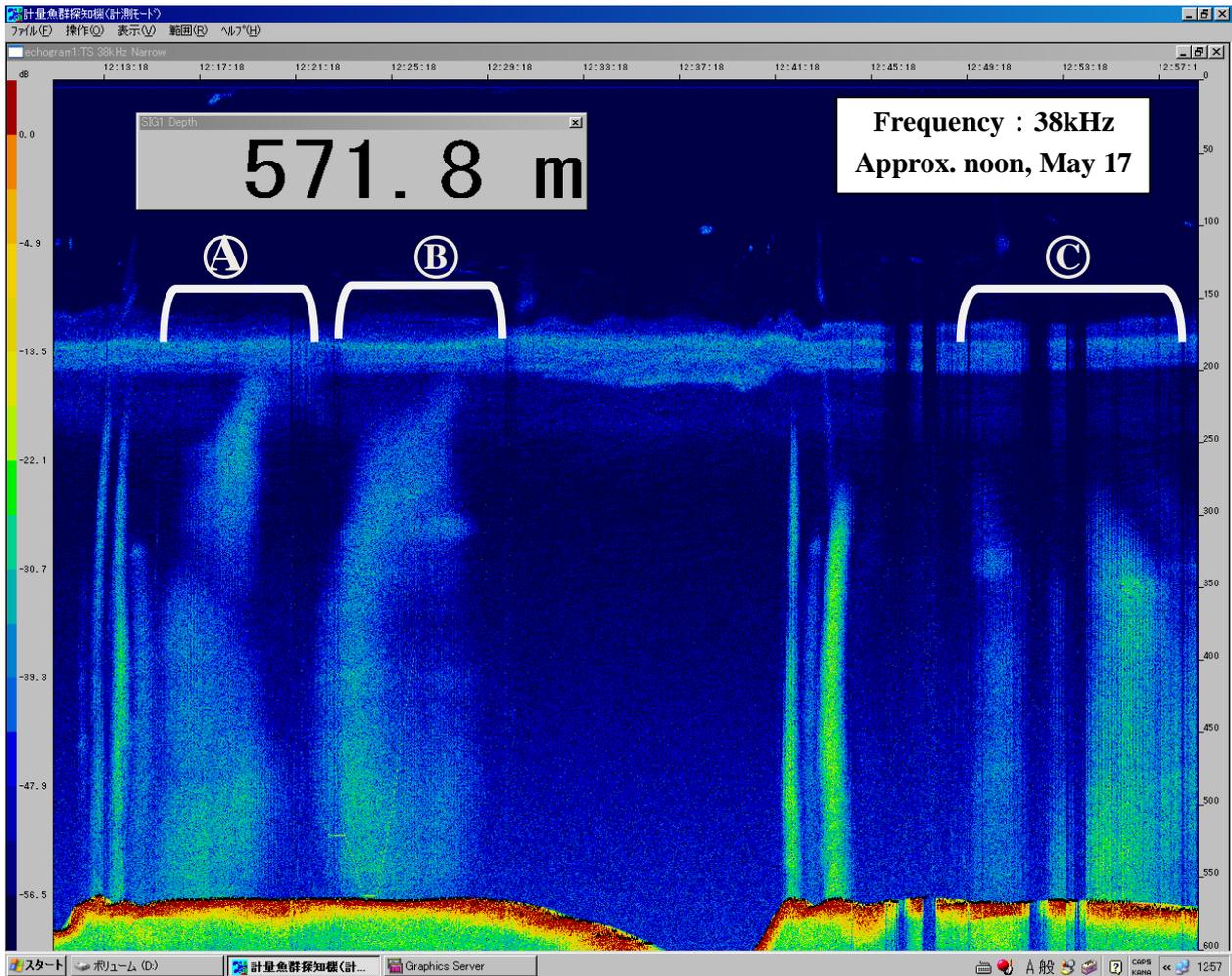


Fig.4 Plume echo imagery obtained using the quantitative echo sounder (KAIJYO KFC3000) onboard "Nagasaki-maru". (The ship's track is shown in Fig.6. The Y-axis shows water depth (m) and the X-axis shows the time, (approx. 48 minutes).)

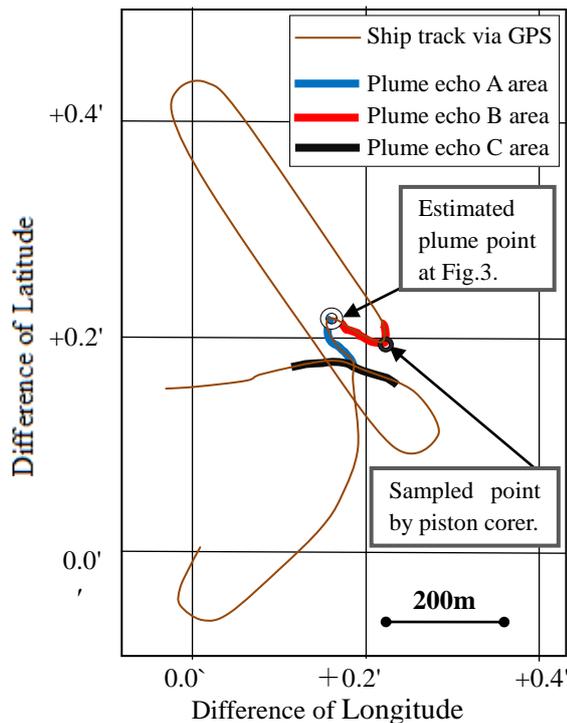


Fig.5 Ship's track and plume echo areas.

る。)。この画像データと連動した GPS データでは、着底時のコアサンプリングが、Fig.3 で示した、2013 年の「なつしま」の観測航海でプルーム発生点として有望視された二重丸内から南東方向約 80m で行われていた。そして、ピストンコアラーを回収したら、白色の氷状の物体が収集されていた。これは、乗船していた経験者の目視観測、同時に行った化学成分の分析から、メタンハイドレートであると断定できた。

4. メタンプルーム位置及び形状推定に関する考察

Fig.4 の A~C の観測時に海底からプルームが発生している平面位置を、Fig.5 に示す航跡中に、A は青線、B は赤線、C は黒線で示す。この Fig.5 に示した、観測されたエコー分布から考えると、Fig.3 で推測したポイントより、海底のプルーム発生点の位置が数 10m 南方にある可能性が高く、これは魚群探知機の

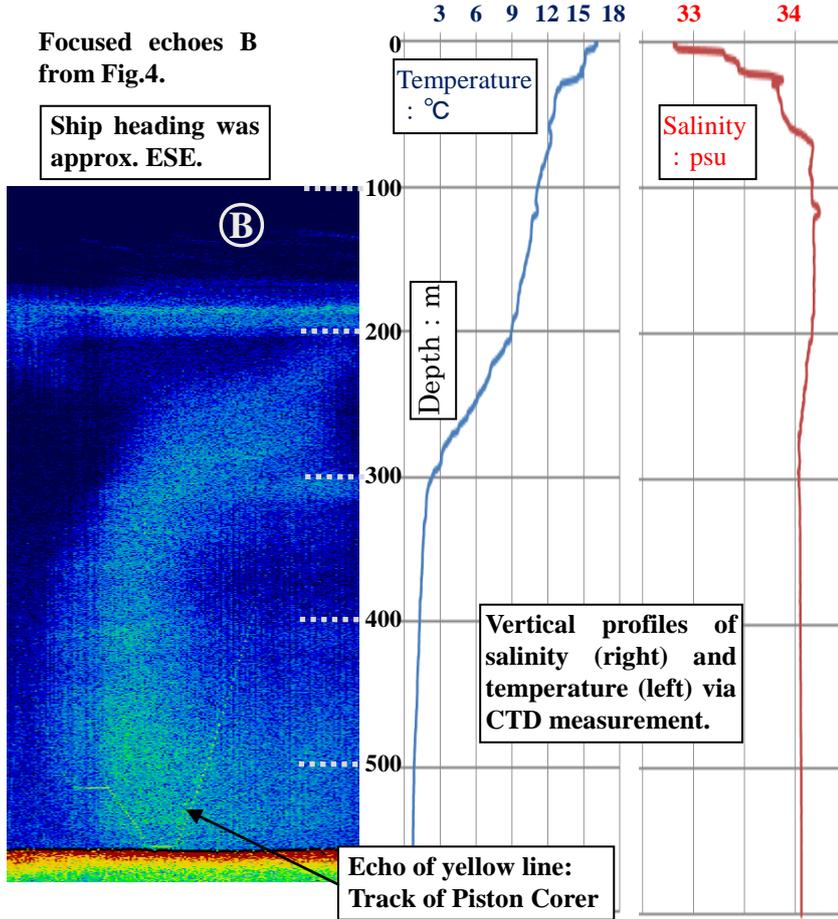


Fig.6 Images of plume echoes A in Fig.4 and vertical profiles of sea water temperature and salinity obtained via CTD aboard “Nagasaki-maru”.

トランスデューサーの設置位置や、受信機の最小受信感度に起因するものと思える。但し、プルームの噴出点位置や形状が変化している可能性があるが、海底下にはメタンハイドレートが広く分布していることが推測されるので、前章に示した通りに、推定点から約 80m 離れた場所でも、コアサンプリングを行うことができた。Fig.3 に示す 20~30m の精度の位置特定点を目指しても、実際の船の観測では、特殊な調査船を除いては 20~30m レベルの精度での位置保持は困難であり、数 10m レベルの精度が限界と思える。従って、本論で示した、複数の測線により点位置の推定を行い、この位置を目指して、再度のプルーム観測やコアサンプリングを行うことの有効性は高いと思える。

また、こうした魚群探知機エコーから、メタンプルーム位置の特定を行うためには、海水温度や流れの変化に伴う、プルームの形状変化を把握する必要がある。2013 年の「長崎丸」の観測航海時における、水温の鉛直分布の観測データや、付近の海流の数値計算データから、この考察を行う。

Fig.4 より、水深約 200m においては、横軸方向に

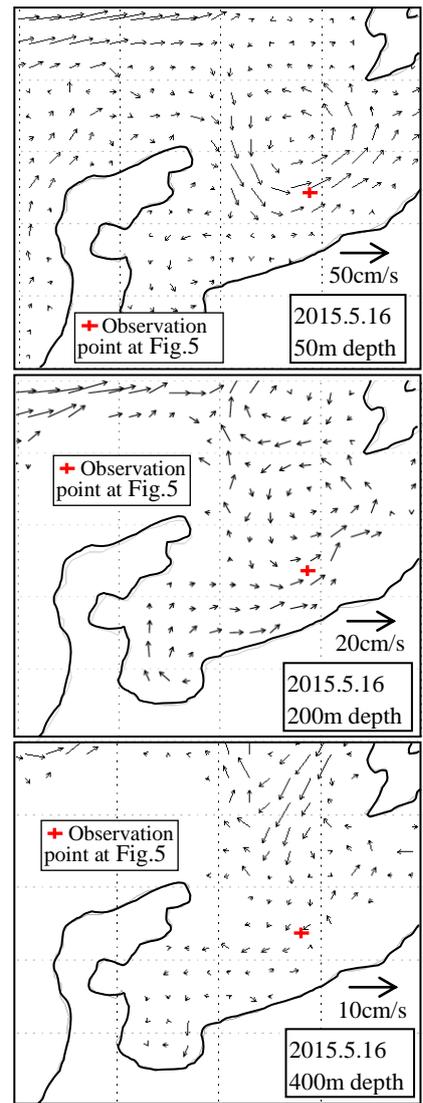


Fig.7 Distribution of the current velocities of MOVE, provided by JMA⁽⁶⁾ at three layers, 50, 200 and 400 m. The grid resolution of the model is 0.1 deg. in long. and lat..

一様な白いエコーが写っているが、これは対馬暖流水層と、その下部の日本海固有水層の境界における、温度躍層の位置と一致している。こうした境界面付近では、プランクトンの集積があり、この反射によるエコーと思える。この境界層より浅部においては、プルームのエコーが非常に弱くなるため、Fig.1 に示すメタンの水温・水圧に伴う形態変化から、ハイドレートがガスに変化し、このガスの海水への溶解が起こり、魚群探知機で検知できるエコー強度が弱くなっていると推測できる。

一方、水深が約 100~300m 深においては、これ以深に比べて、エコーが横方向に流れている傾向が見える。ここで、Fig.6 に、この横流れが明瞭であるエコーB の画像をクローズアップし、前日に富山湾南部で行われた「長崎丸」の CTD(Conductivity,

Temperature and Depth profiler : Sea-Bird SBE9)観測による、温度・塩分の鉛直プロファイルと、縦軸の水深を同一にして示す。このCTD観測は、メタンプルーム観測が行われた前日に行われたものであるが、この富山湾から上越海域においては、海表面から水深が30~50m程度までは、流入河川水・降雨・気温による場所的変動が大きい、これ以降の水深では、約200~300m深までは対馬暖流の影響を受け、また、これ以降では日本海固有水の影響により、温度・塩分の鉛直プロファイルは、数日間では一定であることが、これまでの筆者らの、この海域での観測により確認によりされている^{(4),(5)}。

また、Fig.7は、気象庁の海洋データ同化システム(MOVE/MRI.COM: Meteorological Research Institute Multivariate Ocean Variational Estimation System / Meteorological Research Institute Community Ocean Model)における、この海域の同日の流れの計算値(以下、MOVEデータとする。)を示している。この計算は、気象庁が開発した海洋大循環モデルで行っているものであり、2007年より運用を開始して、気象庁のホームページにも公開されている⁽⁶⁾。

富山高等専門学校商船学科では、気象庁より、適時に、この計算結果のデータ提供を受け、これを、COLAのGrADS(Grid Analysis and Display System)で描画している。そして、富山高専の練習船「若潮丸」に搭載されたADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)観測値との比較考察を行い、MOVEデータと良く合致することが確認されている^{(5),(7)}。

MOVEデータは、表層から水深400mまでの、各水深面での流れが、緯度・経度共に0.1°のグリッド間隔で表示されるが、Fig.7では水深50, 200, 400mの流れの状況を示している。また、Fig.5に示した観測エリアを赤十字印で示した。こうした各水深のデータを分析すると、能登半島北側を西から東へ流れる対馬暖流は、新潟方向へ南向きに蛇行し、佐渡島と富山湾の間で半時計回りの渦流を形成している。こうした流れは、表層から300m深までは、ほぼ一定した傾向で約0.1~0.2m/sの流れがある。そして、400m深の日本海固有水領域になると、観測点付近では、図右下に示す10cm/sの矢印でも表現できない、非常に小さな流の領域であることが分かる。

Fig.6の右図で示した水温・塩分の鉛直プロファイルから、水深が約300mまでは、下層の日本海固有水より、高温・高塩分である対馬暖流水の影響が大きいことが分かる^{(5),(7)}。同図の左に示すBのエコー

では、この水深約300m以浅で、プルームエコーが横流れしている様子が確認できる。この時の船の針路は、ほぼESE方向であり、Fig.7のMOVEデータから推察される、表層~200m深の流れの方向は、ほぼENE~NE方向であり、Bではプルームが針路方向に流されていくのが確認できる。また、Fig.4に示すエコーCでも、水深約300m以浅における横流れが確認できるが、ここでの船の針路は、ほぼWSW方向であり、Bの場合とほぼ逆方向の針路である。この、Cではプルームの上部が針路と逆方向に向かっているのが確認できる。これより、プルームが約300m深より上では、MOVEで計算される流れの影響を受けていることが推測できる。

こうしたメタンプルームの挙動については、海水温度・塩分、海流の方向・速力の鉛直分布をパラメータとした数値モデルによる把握手法があり⁽³⁾、今後はこうした計算結果との比較考察も検討していく。

5. おわりに

海底下に大量のメタンハイドレートの存在が有望視される海域において、メタンプルーム位置の推定を、計量魚群探知機によるエコー、これと連動したGPSによる測位より行った。まず、本論では、この過程で得られた現場データを示した。そして、このデータを分析することにより、メタンプルームが海底から発生する点の推定を行った。ここで、水深が数100mの海域では、計量魚群探知機の測定エリアが数10m幅となるが、複数の測線によるエコーを分析することにより、約10~20mの範囲内での位置推測を試みた。そして、この推定した位置において、同形状のエコーが3年に渡る観測航海で確認された。この位置特定の範囲は、GPSの測位精度、船が移動していることによる魚群探知機データの時間・距離分解能の変化の影響を受けるが、一般的には日本海固有水領域の流れは非常に弱いことから、Fig.3の作図で示した事例のように、20~30m内で行っていると考える。しかし、実際には、各船のGPS表示位置と魚群探知機のトランスデューサーの設置位置関係、船の操船限界を考慮して、Fig.5の事例に示すように、実用上は50~100m程度のずれは考慮しなければならないと考える。尚、プルームの噴出点位置や形状が変化している可能性があるが、海底下にはメタンハイドレートが広く分布していることが推測されるので、約80m離れた場所でも、コアサンプリングを行うことができた。今後も「長崎丸」

や、他船舶における同地での観測は行う予定であるので、ここで精査を行っていききたい。

また、計量魚群探知機によるエコーと、CTD 観測による水温・塩分の鉛直プロファイル、海流の数値計算データと比較考察することにより、表層から水深が約 200~300m に存在する対馬暖流の影響で流される状況を推測することができた。

こうして得られた知見を、今後、現状では魚群探知機のエコーからの識別に頼るしかない、船舶からのメタンハイドレート探査に活用していきたい。

今後の課題として、これらの海底のプルームの実像や、海面へ行くまでの拡散状況を、水中自走ロボットにより観測することを計画している⁽⁸⁾。これにより、本論で推測した事項の正当性が証明できることも期待できる。また、こうした魚群探知機エコーを用いたメタンプルーム観測を継続することにより、海底からのメタンプルーム噴出量の時間変化量を把握できる可能性がある。現状で持つ魚群探知機の観測データからの推測であるが、プルームエコーが発生している海底部分は、小高く盛り上がった丘になっていると思える。何らかの地盤圧力がここに集中し、こうした丘形状を形成していることが考えられ、これを形成する力により、海底のメタンハイドレートが押し上げられて、ここで複数のプルームが発生している可能性もあると考える。この噴出量の変化が、地殻変動による応力に関連する可能性もあり、これを地震予知や防災へのアプローチにつなげることも検討していきたい。

6. 謝辞

観測航海においては、「なつしま」、「長崎丸」の乗組員の皆様には、時には風波が強い条件下での観測機器の投入及び回収、昼夜続いてのサーベイ等、船上観測の実施において多大なご協力を頂きました。ここに深く謝意を表させていただきます。

気象庁・日本海海洋気象センターの皆様には MOVE データ使用について、多大なご指導を頂きました。MOVE データの画像化については、富山高専専攻科の小関修治学生にご尽力を頂きました。また、東京大学大気海洋研究所の道田豊教授、大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻の加藤直三教授には、本研究の遂行に際して貴重なアドバイスを多く頂きました。ここに皆様に謝意を表させていただきます。本研究の一部は（公財）環日本海環境協力センター「富山湾プロジェクト」、平成 22 年度採択の科学研

究費補助金(22560800)「富山県沿岸域の海潮流の発生メカニズムの解明と予測技術の確立」によります。

7. 参考文献

- (1) 松本良・奥田義久・蛭田明宏・戸丸仁・竹内瑛一・山王梨沙・鈴木麻希・土永和博・石田泰士・石崎理・武内里香・小松原純子 他：「日本海東縁、上越海盆の高メタンフラックス域におけるメタンハイドレートの成長と崩壊」, 地学雑誌118(1), pp.43-71, 2009.
- (2) 青山千春・松本良：「計量魚群探知機によるメタンプルームの観測とメタン運搬料の見積もり」, 地学雑誌 118(1), pp.156-174, 2009.
- (3) 河原翔・高木洋平・伴貴彦・岡野泰則・加藤直三：「深海から湧出するメタンガス/ハイドレートの挙動予測」, 第 24 回海洋工学シンポジウム OES24-050 日本海洋工学会・日本船舶海洋工学会, 2014.3.
- (4) 千葉元・竹内章・三輪哲也・町山栄章・楠本成寿・鮑巴達拉胡・松本恭平・桐山綾香・松浦知徳・古山彰一・杉江実宝：CTD・音響測深機・深海画像による富山トラフの海洋構造調査, Blue Earth'11, BE11P-29, 2011.3.
- (5) 千葉元・濱田健史・道田豊・橋本心太郎：「船舶搭載型CTD・ADCPによる富山湾の海洋環境調査」, 日本航海学会論文集第132号, pp.86-96, 2015.7.
- (6) 石崎士郎・曾我太三・碓氷典久・藤井陽介・辻野博之・石川一郎・吉岡典哉・倉賀野連・蒲池政文：MOVE/MRI.COM の概要と現業システムの構築, 測候時報 76 特別号, pp.S1-S15, 2009
- (7) 千葉元・道田豊・古山彰一・橋本心太郎：「船舶搭載型 ADCP で捉えられた富山湾の流れの特性 - 夏季湾奥部に発生する反時計回りの渦について -」, 海洋調査技術 27(2), pp.1-14, 2015.9.
- (8) Mahdi Choyekh, Naomi Kato, Timothy Short, Masahiro Ukita, Yasuaki Yamaguchi, Hidetaka Senga, Muneo Yoshie, Toshinari Tanaka, Eiichi Kobayashi, Hajime Chiba: Vertical Water Column Survey in the Gulf of Mexico Using Autonomous Underwater Vehicle SOTAB-I, Marine Technology Society Journal, May/June 2015 Volume 49 Number 3, pp.88-101, 2015.5.