

計量魚群探知機によるメタンブルームの観測と メタン運搬量の見積もり

青山千春* 松本良**

Acoustic Surveys of Methane Plumes by Quantitative Echo Sounder in Japan Sea and the Estimate of the Seeping Amount of the Methane Hydrate Bubbles

Chiharu AOYAMA* and Ryo MATSUMOTO**

Abstract

During methane hydrate exploration and research, remote and on-board acoustic surveying and monitoring of methane hydrate can be easily and economically conducted using a quantitative echo sounder. Simultaneously, the structure and the floating-up speed of methane plumes can be obtained from an analysis of acoustic data.

We conducted a survey of methane plumes from 2004 through 2008 at a spur situated southwest off the coast of Sado Island (tentatively called Umitaka Spur) and at the Joetsu Knoll. In 2007 and 2008, we performed experiments by releasing methane hydrate bubbles and methane hydrate, and letting them float upward. Consequently, we demonstrated that acoustical reflection from the methane plumes correlates with water temperature and depth, that the floating-up speed is constant but depends on the conditions of methane hydrate, that the discharge of methane hydrate bubbles changes, and that there is a wide scattering of materials below the seafloor where methane plumes are located. Furthermore, the amount of methane hydrate bubbles seeping was estimated by a preliminary calculation.

The method will be applied not only to basic research on methane hydrate but also to assessments of the environmental impact of methane hydrate exploitation.

Key words : methane hydrate, methane plume, quantitative echo sounder, echogram, volume backscattering strength, echo integration

キーワード : メタンハイドレート, メタンブルーム, 計量魚群探知機, エコーグラム, 体積後方散乱強度, エコー積分

I. はじめに

近年, 海上地震探査や検層によりメタンハイドレートが深海堆積物中に広く分布していることが明らかにされ (Shipley *et al.*, 1979; Shipley and

Didyk, 1982; 松本, 2001 など), メタンハイドレート賦存海域では掘削や潜水調査など様々な探査が行われるようになった。海底から海中へのメタンフラックスの強い海底ではしばしば変色域や化学合成生物群集, またまれにメタンを含む地層

* 株式会社独立総合研究所

** 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

* Japan's Independent Institute Co., Ltd.

** Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, University of Tokyo

水が海中に湧き出すメタンシープ (methane seep) も観察されている (例えば, 武内ほか, 2001; 町山ほか, 2003)。メタンは, 海底下で硫酸を利用した微生物活動によって酸化消費され海底までは上昇してこないのが普通であるので, 海底におけるメタンシープの存在は海底下からのメタンフラックスが非常に大きいことを意味し, 海底下でメタンハイドレートが生成集積していることを強く示唆する。したがって, メタンシープはメタンハイドレート鉱床発見の良い指標となる。近年, このメタンシープを測深や魚群探査でも使われる魚群探知機により, 音響的に検出したという報告がある (例えば, Roberts, 2001; Aoyama *et al.*, 2004; Sauter *et al.*, 2006)。

日本海東縁の上越海盆では海底下比較的浅い部分にメタンハイドレートの密集帯が分布していることが採取された試料で確認され, 海底でのメタンシープが確認されているが, さらに魚群探知機により多数のメタンブルームが海中を立ち上がる様子が音響的に観察された。これらの発見とその意義についてはすでに著者らにより予察的報告がなされ (Aoyama *et al.*, 2004; Matsumoto *et al.*, 2005; 青山, 2005; 青山ほか, 2006a, b, 2007a, b など), 本特集号の松本ほかの論文でも報告している。注目すべきは, メタンブルームをつくる“バブル”は単なる気泡ではなく, 固体の“メタンハイドレートの粒”あるいは“メタンハイドレートの皮膜で覆われた気泡”であったという発見である (図1) (松本ほか, 2009)。海底から放出されたメタンの気泡が海底直上でメタンハイドレート化し, “バブル” (固体粒子あるいは固体皮膜で覆われた気泡) となって海中を立ち上がっているのがメタンブルームである。メタンブルームを計量魚群探知機やマルチビームソナーで観察すると船上から遠隔的に水中や海底面の様子をエコーグラムとして可視化することが可能である (青山, 1996; 青山ほか, 1997, 1999, 2006a, b, 2007a, b; 青山, 2005)。本研究では, メタンブルームに関する定量的音響データを取得するため, これら先端的探査機器を日本海東縁の上越海盆におけるメタンハイドレート調査に導入した。

その目的は, (1) メタンシープがつくる海中のメタンブルームを発見しその分布を明らかにし, (2) メタンブルームの音響的な内部構造の解析からブルームを構成する“バブル”の実態と挙動を知り, さらに無人探査機 (ROV) ハイパードルフィンによる現場実験を行って, (3) メタンブルームをつくるメタン“バブル”の体積密度を音響的に見積もる手法を開発し, 最終的に (4) 観察されたメタンブルームからメタンフラックスを見積もることである。

調査は, 2004年から2008年まで毎年, 図2に示す日本海の佐渡南西沖に位置する海脚 (仮称, 海鷹海脚) と上越海丘において, 東京海洋大学所属の練習船海鷹丸 (総トン数1886t) (以下, 海鷹丸) に設置された計量魚群探知機 KFC3000 (カイジョー) および海洋研究開発機構所属の調査船なつしま (総トン数1739t) (以下, なつしま) に設置された計量魚群探知機 EK60 (SIMRAD) およびマルチビームソナー SeaBat8160 (RESON) を利用して行った。

II. 原 理

1) 計量魚群探知機

魚群探知機は, 船底に設置された送受波器から海底に向けて音波を放射し, 送受波器を頂点とする円錐状のビームの中に遊泳する魚群からの散乱波を捕捉して魚群の探知を行う装置である (実吉, 1966)。

特定の周波数 (今回は 38 kHz, 120 kHz) のパルスを送信すると音波は音響インピーダンスの異なる境界面 (水と魚, 水と海底, 水と熱水鉱床や水とメタンブルームなど) で散乱し, その一部は入射方向に戻り送受波器振動面に達する。散乱波は送受波器により音圧から電圧に変換され, 増幅器を経て A/D 変換器でデジタル信号に変換され, 画面上に時系列のエコー信号として表示される。送信した音波が再び送受波器振動面に戻ってくるまでの時間とその間の媒質中の音速分布から散乱物体までの距離がわかる。散乱の強さは, グレースケール表示, あるいはカラースケール表示される。最新の自船の位置における



図 1 湧出点で捕集されたメタンハイドレートバブル。

- a) 無人潜水探査船 (ROV) “ハイパードルフィン” が、メタンハイドレートバブルの湧出点に到着。
- b) 海底直上で、湧出しているバブルをロートで捕集しているところ。
- c) ロートの中に溜まっていくメタンハイドレートバブルは、気体ではなく固体 (メタンハイドレート) またはハイドレートコーティングされている状態。

Fig. 1 Methane hydrate bubbles were captured at the seeping point.

- a) At the seeping area, bubbles were captured using a submarine vehicle called Hyper Dolphin.
- b) Bubbles captured by a funnel.
- c) The bubbles in the funnel were not gaseous but had a solid or hydrate coating.

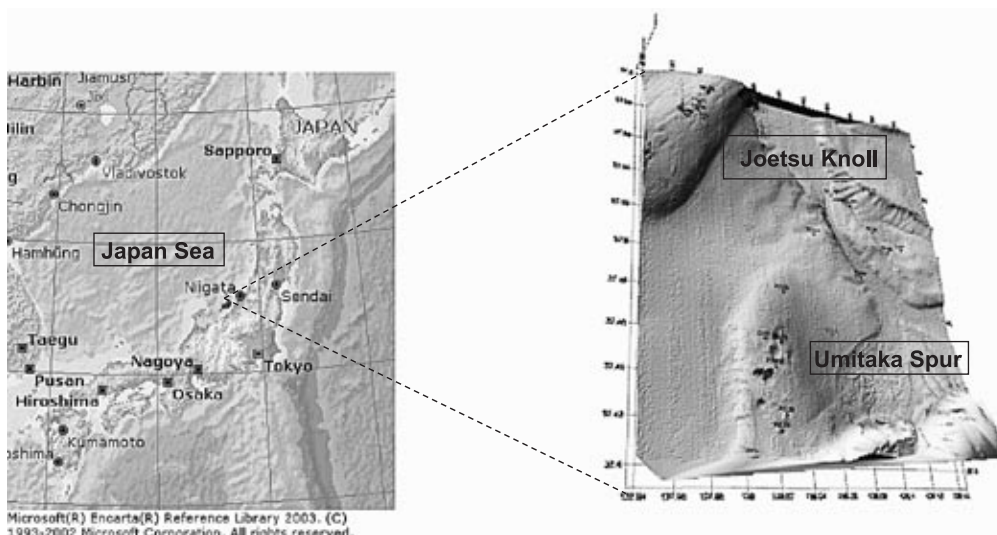


図 2 観測海域。

日本海上越市沖の上越海丘と海鷹海脚 (弘松, 準備中)。

Fig. 2 Survey sea area.

Joetsu basin and Umitaka spur located off Joetsu city (Hiromatsu, in preparation).

エコートレースは画面の右端に固定され、次のエコートレースが表示されると1トレース左側にシフトし、すべての古いトレースは左側に1トレースずつシフト表示され、画面上に海中の断面映像として表示される。

2) 水中物体による音波の散乱

計量魚群探知機とは計量を目的とし定量化された魚群探知機であり、一般にはエコー処理装置や

航海計器と統合され、構成されている。計量魚群探知機の基礎となるのは体積散乱に関するソナー方程式であり、

$$I = I_0 r^{-2} \exp(-4\alpha r) s_v(c\tau/2) \psi \quad (1)$$

で表される (海洋音響研究会, 1984; ユーリック, 1988; 古澤, 1990; 青山ほか, 1997)。ここで、 I は後方散乱波の強さ、 I_0 は音源の強さ、 r は送受波

器から物体までの距離 (m), r^{-2} は拡散減衰項, α は吸収減衰項, s_v は体積後方散乱係数, c は音速 (m/s), τ はパルス幅 (s), ψ は体積散乱の等価ビーム幅 (sr) である。

この式のパラメータのうち対象物の散乱特性を表すのは体積後方散乱係数である。他のパラメータはあらかじめ測定可能であるから, 後方散乱波の強さ I を求めれば体積後方散乱係数 s_v が判る。

2-1) 単体魚の散乱

図 3a に示すように音波が魚にあたるとその音圧が散乱されて一部が入射方向に戻ってくる。これを後方散乱という。その強さをターゲットストレングスといい,

$$t_s = I_r / I_i \quad (2)$$

と定義される。ここで I_r は魚から単位距離だけ音源方向に戻った点における後方散乱波の強さで, I_i は魚への入射波の強さである。通常は, t_s をデシベル表示したものをターゲットストレングス (以下, TS) といい, $TS = 10 \log t_s$ と表す。

受波器位置における単体魚からの後方散乱波の強さを I とすれば,

$$I = I_0 r^{-4} \exp(-4\alpha r) b^2 t_s \quad (3)$$

である。ここで, b は指向性関数である。

2-2) 小魚群の散乱

図 3b に示すように, 送受波器のビーム径に対して小さい魚群の場合を考える。魚群の大きさはビーム径に対して十分に小さな断面積 ΔS で形は柱状であるとする。音速 c , パルス幅 τ , 魚の分布密度 n とすると距離 r に相当する時間 $t = 2r/c$ にエコー合成される魚は距離分解能 $c\tau/2$ 内にいるからその数は $n\Delta S c\tau/2$ 尾となり, 魚群全体の散乱強度は $n\Delta S(c\tau/2)t_s$ となる。これを (3) 式の t_s と入れ替えれば, 受波器位置における小魚群からの後方散乱波の強さは,

$$\Delta I = I_0 r^{-4} \exp(-4\alpha r) b^2 n \Delta S (c\tau/2) t_s \quad (4)$$

となる。

2-3) 大魚群の散乱

図 3c に示すように, ビーム径より大きい魚群

の場合は, (4) 式を魚の存在する範囲 Ω (sr) (図 3c の θ に対する立体角) について積分すればよい (古澤, 1990; 青山, 1996)。 $\Delta S/r^2 = \Delta\Omega$ は立体角素分であるから, n および t_s が r の付近で同一とすれば, 受波器位置における大魚群の体積後方散乱波の強さは,

$$I = I_0 r^{-2} \exp(-4\alpha r) (c\tau/2) \psi s_v \quad (5)$$

$$\psi = \int_{2\pi} b^2 d\Omega \quad (6)$$

である。ここで, s_v は体積後方散乱係数, ψ は等価ビーム幅 (b^2 の積分を立体角 Ω について行う) で, 魚群がビームに対して十分に大きい場合は $\Omega = 2\pi$ となる。 s_v をデシベル表示したものを体積後方散乱強度 (以下, SV) といい, $SV = 10 \log s_v$ と表す。

(5) 式で魚群の散乱パラメータは体積後方散乱係数だけである。残りのパラメータは装置や伝播に関するもので, あらかじめ測定可能かまたは予測可能である。したがって, エコーレベルを求めるだけで体積後方散乱係数がわかる。(5) 式を s_v の式に書き換えると,

$$s_v = (I/I_0) r^2 \exp(4\alpha r) (2/c\tau) \psi^{-1} \quad (7)$$

となる。ここで, $r^2 \exp(4\alpha r)$ は距離 r , すなわち時間の関数であるから魚群の後方散乱係数が距離に関係なく一定であるためには時変増幅が必要である。距離に比例して増大する伝播減衰を補正するこの働きを TVG (Time Varied Gain) という。TVG としては, (3) 式と (7) 式をデシベル表示にした場合の距離項にあたる $40 \log r + 4\alpha r$ と $20 \log r + 4\alpha r$ の特性が使われる。一般に単体エコーを対象とする個体推定には $40 \log r + 4\alpha r$, 個群推定や広水域推定には $20 \log r + 4\alpha r$ を用いる。こうしてすべてのパラメータが決まるとエコーレベルから s_v を計算することができる。これを t_s で除すと,

$$n = s_v / t_s \quad (8)$$

となり魚群の密度が求まる。

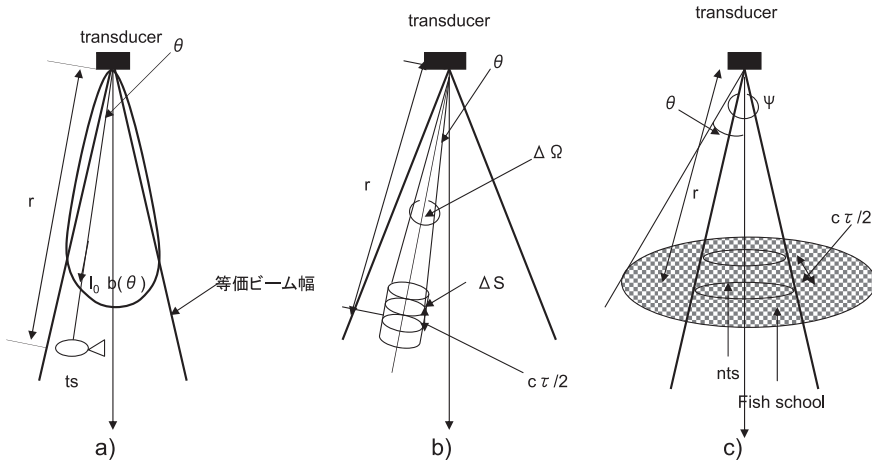


図 3 水中物体による音波の散乱のイメージ図.

- a) 単体魚からの散乱.
図上方の Transducer (送受波器) から発射された超音波が距離 r にいる単体魚にあると超音波は散乱してその一部がもときた方向に戻ってくる. これを後方散乱といい, その強さはターゲットストレングス t_s で表す. $b(\theta)$ は Transducer の指向性関数である.
- b) 小魚群からの散乱.
ビームに対して小さな魚群を断面積 ΔS で形は柱状と仮定する. $\Delta\Omega(sr)$ は魚群の存在する範囲, τ はパルス幅である.
- c) 大魚群からの散乱.
ビームに対してある程度大きな魚群の場合は体積後方散乱波の強さは, 魚群の存在する範囲 $\Omega(sr)$ について積分すればよい. n は魚の分布密度, ψ は等価ビーム幅である.

Fig. 3 Image of the scattering of sound waves due to underwater objects.

- a) Scattering from individual fish.
When ultrasonic sound waves emitted from the transducer at the top of the figure hit an individual fish at distance r the ultrasonic waves scatter and some returning in the direction from which they came. This is called return scattering, with strength represented by target strength t_s . $b(\theta)$ is the directionality function of the transducer.
- b) Scattering from a small school of fish.
A relatively small school of fish compared to the beam is assumed to form a column with a sectional area of ΔS . $\Delta\Omega(sr)$ is the area where the school of fish is located, with τ being the pulse width.
- c) Scattering from a large school of fish.
A relatively large school of fish compared to the beam can have just the strength of the returned scattered waves from their body volume integrated into the area where the school of fish is $\Delta\Omega(sr)$. n is the distribution density of the fish; ψ is equivalent beam width.

3) エコー積分

広水域推定は, 広域の平均分布密度を知り魚群の現存量を求める方法で一般にエコー積分方式といわれる. 1 発の送波に対して戻ってくるエコーは単体魚からの場合や魚群からの場合でまちまちである. 図 4a のように多くの時間または距離を走査し, ある周期 (積分周期といい, 図では m 回) を決めてエコー強度の集合平均を求める. この結果を多くの深度範囲 (積分層といい, 図では r_w) を決めてその中で平均し, 平均 SV を求める.

この結果は, 非常に大きな魚群を観察していることと等価になる (図 4b). 平均 SV より平均分布密度を求め, これに調査対象の海域の体積を掛ければ魚群の現存量が得られる (古澤, 1995).

次にこのエコー積分の方法をメタンブルームのメタン運搬量評価に応用するために, 図 5a に示すようにメタンハイドレートバブル湧出海域の直上に長時間留まり, 平均密度分布を求めた. なお, 積分層は 10 m とし, 積分幅は 5 分から 8 分とした (図 5b).

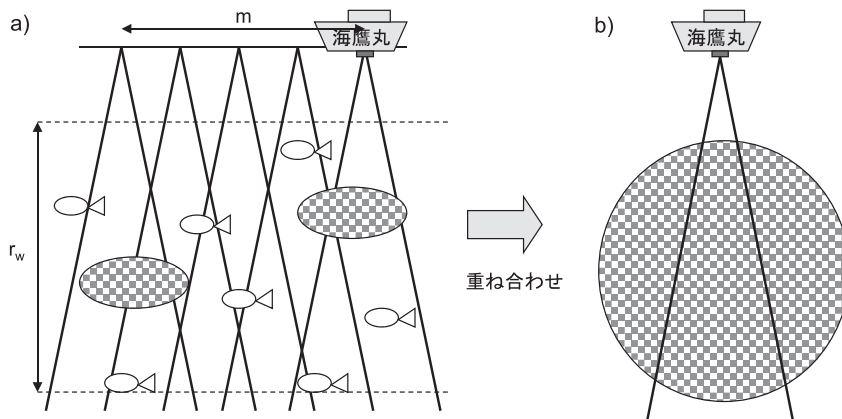


図 4 エコー積分の原理模式図。

a) で示す船の進行方向は左から右、多くの送受信についてある周期（積分周期 m ）を決めて、エコーの強さを集合平均する。さらに多くの深度範囲 r_w を決めてその中で平均する。a) の結果は、b) に示すような非常に大きな魚群を観察していることと等価になる。

Fig. 4 Fundamental pattern diagram of echo integration.

Decide the progress of the ship indicated in a) from left to right and the cycle length of many transducers (integrated cycle length m), and determine the ensemble mean of the echo strength. Then, further decide the depth range r_w for many transducers and find the mean. The results of a) are equivalent to detecting an extremely large school of fish as indicated in b).

III. メタンシープサイトの分布

1) 方法

マルチビームソナーはたくさんの音波ビームを扇状に連続的に送受信して、線から面の情報を得る (Lurton, 2002)。なつしまに搭載された SeaBat8160 は、周波数 50 kHz, 1 ビーム $1.5^\circ \times 1.5^\circ$, 最大ビーム数 126 本, スワス幅は深さ 1000 m の海底で 3000 m である。

測線に沿ってシープサイトを航走するとマルチビームソナーのディスプレイには図 6 に示すようにブルームのイメージが表示される。図中の扇の要の部分にあたるところが船底を表し、画面に垂直な方向が船の進行方向である。GPS により得られた船位から、ブルームのシープ位置と船との相対位置と船の航跡をもとに、シープ位置の緯度と経度を求めた。

2) シープサイトの分布

2005 年から 2008 年の 4 年間に行われた調査航海での観測によって見つかったブルームから推定されたシープサイトの分布を口絵 6-図 1 に示す (松本ほか, 2009)。

IV. 計量魚群探知機によるメタンブルーム観察

1) 方法

計量魚群探知機の送受波器は船底に設置され、そのコントロールはブリッジで行い、ディスプレイに表示されるエコーグラムで観察する。送受波器の周波数は 38 kHz, ビーム幅は 7° で、例えば深さ 900 m の海底で円錐状ビームの直径はおよそ 110 m である。同海域で同時に CTD 観測により水温の鉛直プロファイルを取得した。

シープサイトにおいて、ピンポイントで湧出し立ち上がるブルームの直上に船が長時間留まるように、エコーグラム上のブルームを観察しながら船位を微調整することで、ビームの範囲に常にブルームを捉え続けながらデータを取得した。

ここで、ビームの円錐の移動と実ブルームの位置関係、エコーグラム上のブルームのイメージの移動の関係を模式的に示す (図 7a-c)。図 7a に示すような円柱状のブルームの上を計量魚群探知機を動作させながら船が図の左から右方向へ通過するとき、エコーグラムに表示されるブルームのイメージは台形状になる (図 7b)。

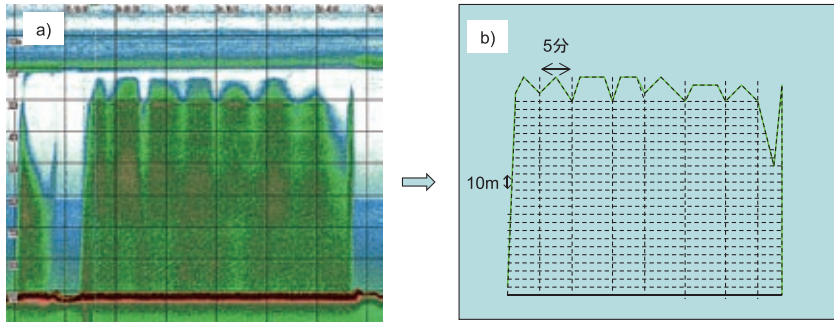


図 5 (Fig. 5)

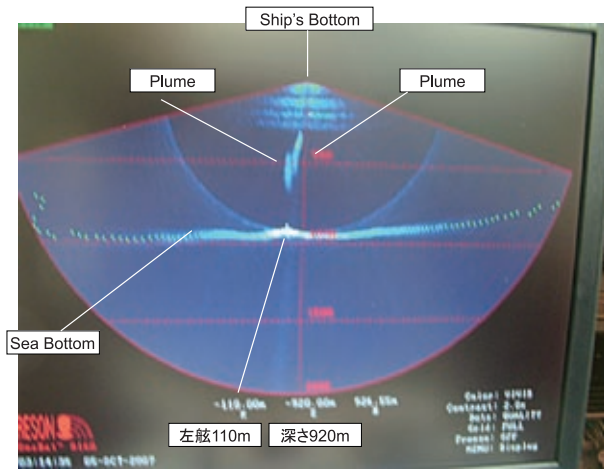


図 6 (Fig. 6)

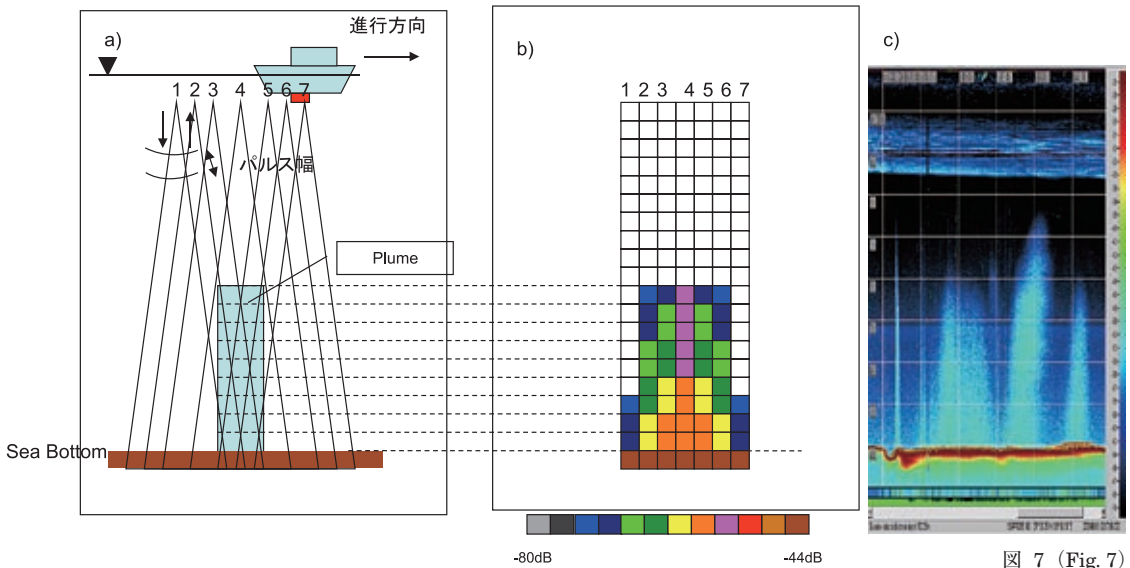


図 7 (Fig. 7)

2) メタンブルームの内部構造

2005年7月31日に取得したエコーグラムを図8aに示す。鉛直軸は船底からの距離（以下、深さ）で上方が0m、目盛りは100m間隔で、903mの赤茶色の帯が海底を表している。横軸は時間軸で、目盛りは10分間隔で、左から右に時間が経過する。05:20:00から05:55:00の間に3本のブルームが記録されているように見えるが、実際は同一のブルームを捉えている。船の位置が不安定でブルームを捕捉し続けることができなかったことによるものである。05:55:00か

ら06:45:00までは円錐ビームがほぼ完全にブルームを捉えていた。色の違いは、超音波の散乱の度合いを示し、赤が強く緑から水色にいくほど弱くなっている。水深100mから200mにある水平層は生物からの散乱、海底から鉛直方向に伸びる柱がメタンブルームの音響イメージを表している。メタンブルームのイメージは深さ900mの海底から深さ230mまで続いた。深さ230m以浅では、エコーグラム上にはブルームのイメージが現れていない。表示境界レベルの設定（-70dB）を-90dBに変えてエコーグラムを再生した結果

図5 エコー積分のメタンブルームへの応用。

メタンブルーム(a)を魚群と同様に扱い、その平均SVを求めた。積分層10mで積分幅(周期)は5分とした(b)。

Fig. 5 Application of echo integration to methane plumes.

Methane plumes (Figure a) were dealt with in the same manner as schools of fish, with the average SV sought. With integrated layers of 10 m, the integrated width (cycle length) was set at 5 minutes (Figure b).

図6 マルチビームソナーのディスプレイに表示されたメタンブルームのイメージ。

扇型の要の部分の部分が船底、図の中央部分の水平に近いラインが海底面を表す。船の進行方向は手前から画面の奥方向である。左舷側110mのところには2本のブルームのイメージ（左ブルームは深さ750mから450m、右ブルームは深さ600mから300m）が表示されている。

Fig. 6 Image of methane plumes displayed on a multibeam SONAR display.

The pivot of the fan shape indicates the ship bottom, with the mostly horizontal line at the middle of the figure representing the sea floor. The direction of movement of the ship is from the front to the back of the screen. At 110 m on the port side the images of 2 plumes (left plume with a depth from 750 m to 450 m, right plume with a depth from 600 m to 300 m) are displayed.

図7 ビーム幅とブルームの関係の模式図。

a) ビーム幅とブルームの関係。

船の進行方向は図の左から右方向で、船に搭載された魚群探知機より超音波を送受信しながら(図の1から7)、ブルーム(矩形)のある海域を通過したと仮定する。

b) ブルームイメージの表示。

魚群探知機から送信される超音波のビームは深さが深くなるに従い広がるので、受信された後方散乱波の強さのイメージはb)のように台形に表示される。

c) 表示画面の実例。

したがって、魚群探知機の表示画面(エコーグラム)に表示されたブルームのイメージは、深さが深くなるにしたがって広がっているが、これが真のすがたではないことがわかる。船速によっても表示されるイメージが真のすがたと異なる。例えば船速が速ければブルームのイメージは細くシャープに、遅ければイメージは船の進行方向に広がる。

Fig. 7 Pattern diagram of the relation between beam width and plumes.

a) Relation between beam width and plumes.

Assume the direction of movement of the ship is from left to right in the figure, with the fish finder equipped on the ship sending and receiving ultrasonic waves (Figs 1 to 7) while passing an area with a plume (rectangular).

b) Display of plume image.

The ultrasonic waves sent from the fish finder disperse as depth increases, so the strength of the return scatter waves received is presented as a trapezoid as in b).

c) Actual example of display screen.

Therefore, the plume image displayed on the fish finder display screen (echogram), widens as the depth increases, but this is not the true shape. Based on ship speed, the image can also differ from the real shape. For example, if the ship is navigating at a high speed, the plume image will be thin and sharp, while if the ship is navigating at a low speed the image will expand in the direction of the ship's movement.

さ 750 m までは散乱強度が全体的に弱くなっている。この間はビーム中心位置がブルームから外れた可能性がある。

図 12a のメタンブルームのイメージに右上がりの縞状のラインが複数見られた。図中の矩形部は、深さ 1000 m (海底) で 00:11:15 から 00:11:30 までの 15 秒間の幅で、かつ縞に垂直に深さ 850 m までを実線で囲んだ。この矩形部を拡大し、図 12b に示す。矩形の左側に強い散乱縞が海底から湧出した時刻、右側に強い散乱縞 (水色枠) と弱い散乱部分 (白枠) の平均 SV を示す。ここで、弱い散乱部分の平均 SV は、例えばこの部分には図 12c に示すようなばらつきがあり、その最大値である。この矩形は、深さ目盛りでは 1000 m の海底から深さ 850 m までを表し、時間目盛りでは 23:56:25 から 00:11:15 の約 15 分間を表している。すなわち浮上速度 0.197 m/s は後述する放出浮上実験の結果に近い。この矩形の濃淡が、間欠的な湧出を示す。

ハイパードルフィンのカメラ映像によると、海底面から湧出するメタンの気泡およびそこで形成されるメタンハイドレートバブルの大きさは直径 5 mm から 7 mm (青山ほか, 2006a) とほぼ一定である。したがって、この矩形内で観察された SV の違いは湧出量 (密度) の違いによるものと考えられる。すなわち湧出点における湧出量は非定常的 (= 間欠的) であることがわかった。図 8a に示すメタンブルームにも 05:55:00 から 06:50:00 まで海底直上から深さ 700 m に右上がりの縞模様が認められる。間欠的噴出の周期はいずれの場合も 1 分以内と短く、このことは海底下におけるメタンガス集積のメカニズムと関係すると想像されるが、詳細は不明である。

V. 現場における定量化実験

メタンハイドレートバブルの放出実験

体積が既知のメタンハイドレートバブルを音軸上で放出し、計量魚群探知機により浮上の様子を観察し、浮上速度を計算し、浮上中のメタンハイドレートバブル群の平均 SV を求めた。

1) 方法

図 13 に実験方法を示す。メタンハイドレートバブル湧出点で、ハイパードルフィンの 2 本のマニピュレータの一方に固定したロート (約 1000 ml) と他方に固定した MT 採泥器 (内径 70 mm, 長さ 285 mm) にそれぞれメタンハイドレートバブルを捕集した。メタンハイドレートバブルは、ロートと MT 採泥器に泡を捕集した状態のまま、ハイパードルフィンをつつしま直下の深さ 750 m まで移動させ、その場でまずロートをひっくり返して中のバブル約 1000 ml を放出した (1 回目の放出) (図 14 の③参照)。次に採泥器をひっくり返して 500 ml のバブルを放出した (2 回目の放出) (図 14 の④参照)。バブルの浮上を計量魚群探知機で観測し、音響データを取得した。観察時には、浮上中のバブルができる限り計量魚群探知機の音軸上に位置し、ビームから外れないように、スプリット法 (古澤, 1995) によりエコーの中心方向を計測しながら、常に船を中心方向に移動制御しながら観測を実施した。

図 14 のエコーグラムの中部分の右上がりの 2 本の帯状のラインは、1 回目の放出 (図中の③) と 2 回目の放出 (図中の④) によるメタンハイドレートバブルの浮上中の散乱のイメージである。図中の⑤のラインはハイパードルフィンの航跡で、図の右側の強い散乱はハイパードルフィンとそのケーブルに装着されたトランスポンダの信号による。3 回目のバブル放出は深さ 400 m で行った (図中の⑥)。

2) 浮上速度

浮上速度は、1 回目の放出は平均 0.157 m/s, 2 回目は平均 0.153 m/s であった。したがって、図 14 に示すように 2 本のラインはほぼ平行となり、放出した体積に関係なくほぼ等速で浮上していることがわかった。

図 14 の⑥の浮上拡散の様子を図 15 に示す。拡散の上端、中央、下端の時間変化である。メタンハイドレートバブル群の主部は中央から上端であり、下端の SV は非常に小さいことがわかっている (青山ほか, 2008)。つまり、大部分のバブルは中央～上端の間に分散して上昇している。上

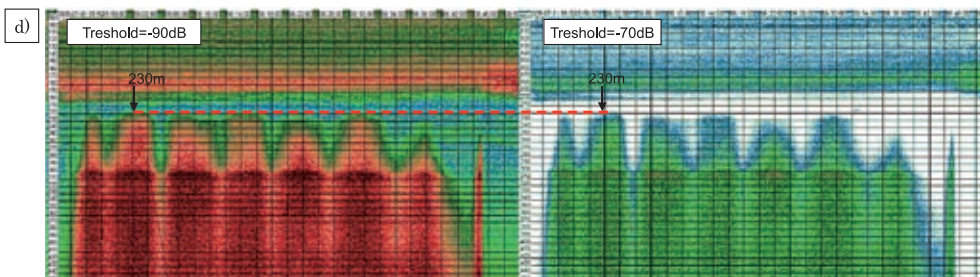
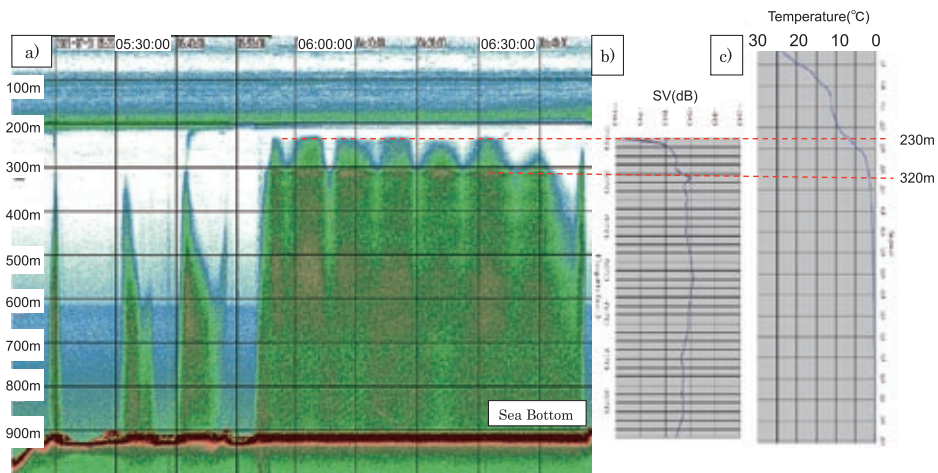


図 8 (Fig. 8)

Stability of Methane Hydrate in Joetsu basin

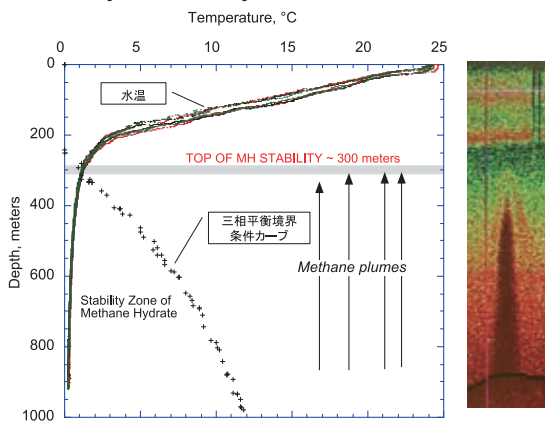


図 9 (Fig. 9)



バブル直径5-7mm 深さ479.4m

バブル直径8-10mm 深さ323.7m

図 10 (Fig. 10)

端部分の平均速度は 0.229 m/s, 中央部分は 0.220 m/s, 下端部分は 0.143 m/s であり, 下端部分は速度が不安定で, 08:51:00 から 08:51:15 には同じ深さに停留していた。バブルが小さく分裂すると海水とバブルとの間の粘性の効果が大きくなり, 浮上速度が遅くなったと考えられる。

図中の赤線は, メタンハイドレートブロック (大きさ $0.3 \times 0.3 \times 0.15$ (m)) の平均浮上速度で, 0.375 m/s でありメタンハイドレートバブルの浮上速度よりも速い。メタンハイドレートブロックの浮上実験のエコーグラムを図 16 に示した。

図 8 メタンブルームの SV の鉛直プロファイルと水温と深さの関係。

- エコーグラム。
縦軸は深さ (m) を横軸は時刻 (hh:mm:ss) を表す。鉛直方向グリッドは 100 m, 水平方向グリッドは 10 分である。一番右が最新の船の位置を示す。図下の赤茶色の部分が海底のイメージを表し, 図上が船底である。
- 平均体積後方散乱強度 (平均 SV)。
図 5 に示す積分層 10 m と積分周期 5 分でエコー積分を行った結果である。縦軸は深さ (m) で図 a) と対応している。横軸は SV (dB) で右に行くほど強い。
- 水温。
縦軸は深さ (m) で a), b) と対応している。横軸は水温 (°C) で右に行くほど低い。
- 表示境界レベルの設定 (スレッシュホールド) を変えたエコーグラム。
左図はスレッシュホールド -90 dB, 右図は -70 dB である。

Fig. 8 Relation between the vertical profile of methane plume's SV and water temperature and depth.

- Echogram.
The vertical axis indicates depth (m) while the horizontal axis indicates time (hh:mm:ss). The vertical grid is 100 m, while the horizontal grid is 10 minutes. The far right indicates the most recent position of the ship. The reddish-brown part at the bottom of the figure indicates the image of the sea floor, and the top of the figure is the ship bottom.
- Averaged volume backscattering strength (averaged SV).
This figure shows the results of echo integration for integrated levels of 10 m and integrated cycle length of 5 minutes shown in Fig. 5. The vertical axis is depth (m) corresponding to Figure a). The horizontal axis is SV (dB) with strength increasing towards the right.
- Water temperature.
The vertical axis is depth (m) corresponding to Figure a) and b). The horizontal axis is water temperature (°C) with temperature decreasing towards the right.
- Echograms with changing display threshold level.
The left figure has a threshold of -90 dB, while the right figure has a threshold of -70 dB.

図 9 上越海丘におけるメタンハイドレートの三相平衡境界条件カーブと水温プロファイルの関係。

左図は縦軸が深さ (m), 横軸が水温 (°C) を表す。右図は魚群探知機のエコーグラムに表示されたメタンブルームの音響的反射イメージである。深さは左図と対応している。深さ 300 m 付近でブルームイメージが消えている (Matsumoto, 2005; 松本ほか, 2006)。

Fig. 9 Relation between water temperature profile and three-phase equilibrium threshold conditional curve of methane hydrates that occur in Joetsu Basin.

The vertical axis of the left figure represents depth (m), with the horizontal axis representing water temperature (°C). The right figure is a sound-reflected image of a methane plume displayed on a fish-finder echogram. The depth corresponds to the left image. The plume image vanishes at around a depth of 300 m (Matsumoto, 2005; Matsumoto et al., 2006).

図 10 深さとメタンハイドレートバブルの大きさの関係。

2006 年 9 月上越海域での観測でハイパードルフィンが海底でメタンハイドレートバブルをロートに捕集し, 保持した状態で上昇しながらロート内のバブルの観察を行った。左写真は, バブル直径 5-7 mm (深さ 479.4 m), 右写真は, バブル直径 8-10 mm (深さ 323.7 m) であった。

Fig. 10 Relation between diameter of methane hydrate and depth.

The figure to the left shows that the diameter was 5-7 mm at a depth of 479.4 m, and the figure to the right shows that the diameter was 8-10 mm at a depth of 323.7 m depth.

Rehder *et al.* (2002) の深海実験によれば、メタンガスの浮上速度は水温 4.5°C、深さ 847 m から 647 m まで平均 0.251 ± 0.002 m/s であった。

これらにより、速度の違いは水温など環境条件のほか、湧出するメタンハイドレートバブルの大きさや状態の違いに関係があることが示唆される。

3) 体積後方散乱強度

第 1 回目の放出 (図 14 の③) 直後の SV は -51.6 dB で、上昇するにつれて鉛直方向に幅が広がり、散乱の強さも弱くなり、水深 300 m でイメージが消えた。右側のライン (図 14 の④) は 2 回目の放出で、1 回目の放出の 8 分後に MT 採泥器から放出されたメタンハイドレート (体積約 500 ml) からの散乱のイメージである。放出直後の SV は -61.0 dB であった。このように、はじめにひとかたまりに放出されたバブル群は粒径を反映し、浮上しながら長く鉛直方向に伸び水深 500 m 付近では 100 m ほどに広がるが、その



図 11 上昇中に発泡するメタンハイドレートブロック. ハイパードルフィンで海底のメタンハイドレートブロックを採取しカゴに保持しハイパードルフィンが上昇中にブロックの変化を観察した. メタンハイドレートの分解によって発生した大量のメタン気泡が急速に海水に溶けて消滅する様子が観察された (深さ 210 m, 2008 年 5 月, JAMSTEC のハイパードルフィンにより撮影, 日本海上越海域).

Fig. 11 Methane hydrate block foaming.

The methane hydrate block held within the cage on the ROV was dissociated and foamed during the ROV's ascent in the Joetsu basin in May 2008. Bubbles dissolved and became invisible rapidly at a depth of 210 m.

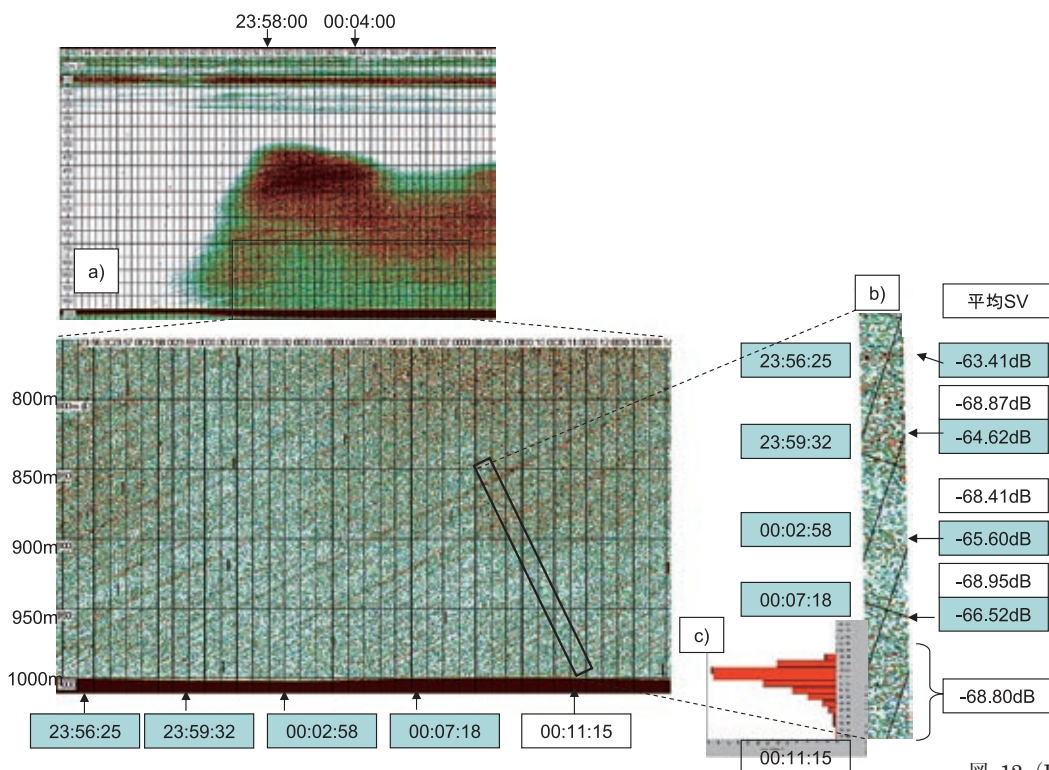


図 12 (Fig. 12)

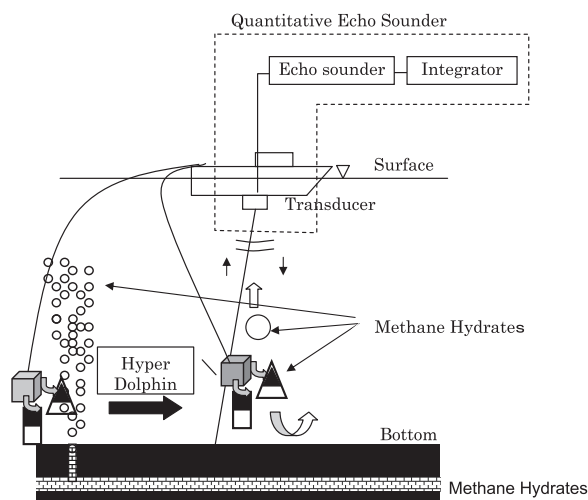


図 13 メタンハイドレートバブルの放出実験。

メタンハイドレートバブル湧出点で、ハイパードルフィンの2本のマニピュレータの一方で固定したロート(約1000 ml)と他方で固定したMT採泥器(内径70 mm, 長さ285 mm)にそれぞれメタンハイドレートバブルを捕集した。ロートとMT採泥器に“バブル”を捕集した状態のまま、ハイパードルフィンをなつしま直下に移動させ、順番にひっくり返して中の“バブル”を放出し、計量魚群探知機でそれらの音響データを取得した。

Fig. 13 Experiment with methane hydrate bubbles.

At seeping points, methane hydrate bubbles are collected using a funnel (approximately 1000 ml in volume) fixed to one manipulator of Hyper Dolphin and a MT mud sampler (70 mm in internal diameter; 285 mm in length) fixed to the other manipulator. Hyper Dolphin is positioned immediately beneath the R/V Natsushima and the bubbles are released first from the funnel and then from the MT mud sampler. Acoustic data are obtained using a quantitative echo sounder.

図 12 間欠的メタン湧出を示す微細内部構造。

- a) 縞模様が複数あるエコーグラムとその拡大図。
表示されているエコーグラムは、上図は23:43:30から00:14:00の間で、鉛直方向グリッド50 m, 水平方向グリッド30 sである。海底までの深さは約1000 m, メタンブルームのイメージが23:50:30から図右端まで続いている。上図の実線で囲んだ海底から深さ750 mまで、23:55:00から00:11:30までを拡大して下に表示した。
- b) トレースした強い散乱縞。
a) 下図から切り取った矩形を拡大表示した。矩形の右側は縞模様の平均SV(白枠は弱い散乱部分, 青枠は強い散乱部分)で左側は海底から湧出開始した時刻を示している。
- c) 弱い散乱部分の平均SVの頻度分布。
横軸が出現数, 縦軸が平均SVを表す。この場合は最大値が-68.8 dBである。

Fig. 12 Detailed internal structure indicating intermittent methane emissions.

- a) Echogram with multiple stripes and an enlarged figure.
The upper figure on the echogram displayed is the period from 23:43:30 to 00:14:00, with the vertical grid being 50 m and the horizontal grid being 30 s. The depth to the sea floor is approximately 1000 m, with the image of the methane plume continuing from 23:50:30 to the right edge of the figure. The portion of the upper figure surrounded by a solid line, from the sea bottom to a depth of 750 m, from 23:55:00 to 00:11:30 is magnified and displayed in the bottom figure.
- b) Strong reflected stripes traced.
This figure shows an enlarged representation of a rectangle from the lower figure in a). The right side of the rectangle is the average SV of the stripes (white border is weaker reflection part, with blue border being stronger reflections), while the left side indicates the time at which emissions began from the sea floor.
- c) Frequency distribution of the averaged SV of weak reflection part
The horizontal axis is the number of occurrences, with the vertical axis representing the averaged SV. In this case the highest value is -68.8 dB.

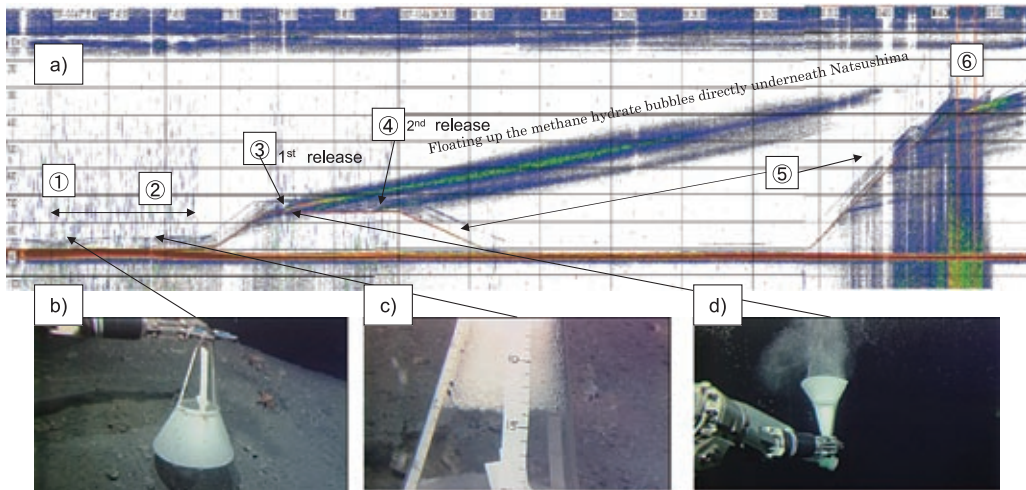


図 14 (Fig. 14)

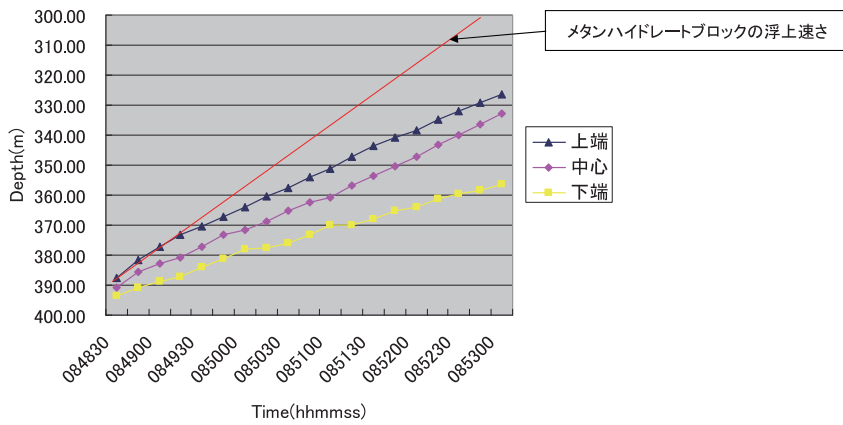


図 15 (Fig. 15)

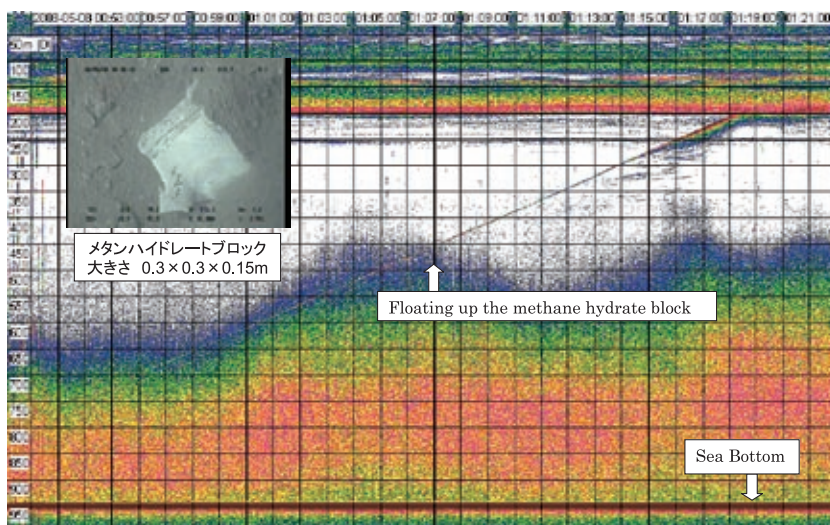


図 16 (Fig. 16)

主体部分は鉛直方向に 10 m ほどである。この伸びを反映して SV 値も減衰するが、その平均 SV は 1 回目で -63.1 dB、主体部分は -58.6 dB、2 回目で -67.3 dB であった。

VI. メタンプルームによる メタンの運搬量の見積もり

放出実験のときハイパードルフィンによる観察

で、放出されたメタンハイドレートバブル群が直径およそ 2 m の広がりです浮上開始したことがわかった。そのときのメタンハイドレートバブル群の SV と 1000 ml のロートの中のメタンハイドレートバブルの粒数が観察(図 14c)によりわかったので、(8) 式より 1 粒の TS を求める。

広がり体積は、深さ 10 m、水平方向直径 2 m と仮定すると 31.4 m³ で、放出した 1000 ml の

図 14 放出バブル浮上のエコーグラム。

- エコーグラムの中央部分の右上がりの 2 本の帯状のラインは、放出したメタンハイドレートからの散乱のイメージである。左側のほうが先にロートから放出されたメタンハイドレート(体積約 1000 ml)からの散乱のイメージである。上昇するにつれて鉛直方向に幅が広がり、散乱の強さも弱くなり、拡散していく様子が見て取れる。右側のほうはロート放出の 8 分後に MT 採泥器から放出されたメタンハイドレート(体積約 500 ml)からの散乱のイメージである。2 本のラインは、平行であることから、体積に関係なく等速で上昇していることが見て取れる。b) の作業は①で、c) の作業は②で、d) の作業は③で行っている。④で 2 回目の放出を行った。⑤はハイパードルフィンの航跡である。⑥で 3 回目の放出を行った(深さ 400 m)。
- メタンハイドレートバブルの湧出点でハイパードルフィンのマニピュレータで掴んだロートにメタンハイドレートバブルを捕集している様子。
- ロートにメタンハイドレートバブルがたまっている様子。
- なつしまの直下で、ロートの中のメタンハイドレートバブルを放出した瞬間。

Fig. 14 Methane hydrate bubbles on echograms.

- Two bands sloping up to the right at the center of the echogram show released methane hydrate bubbles scattering. The band at the left shows methane hydrate bubbles released from the funnel (approximately 1000 ml in volume) scatter. As they float upward, the scattering width increases and scattering strength decreases. The band to the right shows methane hydrate bubbles released from the MT mud sampler (approximately 500 ml in volume) scatter. Because the two bands are in parallel, the floating-up speed is constant and has no correlation with volume. ① corresponds to b) in the experiment; ② to c); ③ to d); ④: 2nd released; ⑤: the cruise lines of Hyper Dolphin; ⑥: bubbles released from a depth of 400 m.
- At floating-up points, methane hydrate bubbles are collected using a funnel fixed to one manipulator of Hyper Dolphin.
- Methane hydrate bubbles in the funnel.
- Methane hydrate bubbles just released from the funnel immediately beneath the R/V Natsushima.

図 15 鉛直方向の拡散の様子。

3 回目の放出実験のときのメタンハイドレートバブルの拡散の様子を時系列で表した。縦軸は深さ (m) を表す。青点は浮上するメタンハイドレート泡の上端、赤点は中心で黄点は下端の深さを表す。図中の赤線はメタンハイドレートブロックの浮上速さを示す。

Fig. 15 Scattering in the vertical direction (bubbles released from a depth of 400 m).

Scattering of methane hydrate bubbles in ⑥ in Fig. 14: bubbles released from a depth of 400 m. The vertical axis indicates depth (m) while the horizontal axis indicates time. The blue, red, and yellow dots respectively show upper level, center, and lower level of bubbles floating up. A red straight line shows the block floating up speed.

図 16 メタンハイドレートブロック浮上のエコーグラム。

ブロックの大きさはおよそ 0.3 m × 0.3 m × 0.15 m。

図の中央右上がりの直線がメタンハイドレートブロックからの反射のイメージで、深さ 275 m 以浅になると直線ではなくなり、ブロックが崩壊・拡散している様子が推察される。

Fig. 16 Echogram of methane hydrate block surfacing.

The size of the block is approximately 0.3 m × 0.3 m × 0.15 m.

The straight line rising up from the right of the center of the figure is the image of reflections from the methane hydrate block, with it no longer being a straight line at depths shallower than 275 m, where breakdown and dispersal of the box can be inferred.

中に、メタンハイドレートバブルの粒（バブル1粒の体積（半径5 mm）は0.523 ml）は1910粒あり、粒の大きさと数が750 mから700 mまで上昇中に変わらないと仮定すれば、1910粒が体積31.4 m³の中に存在するから、バブルの単位体積あたりの粒数 n は61粒となり、(8)式よりバブル1粒の $TS = -70.9$ dB ($TS = 10 \log t_s$)となる。

次に自然界のブルーム(図12)について考える。エコー積分(積分層10 m, 積分幅30分)より、海底直上から深さ900 mでは-66.7 dBで、(8)式より単位体積あたりの粒数は、 $S_v / T_s = 2.6$ 粒となる。反射強度はバブルの大きさにも大きく依存するので、バブルの上昇とともに散乱強度が大きくなる可能性がある。一方、上昇中に周囲の水に溶解するためバブル数が減少しサイズもあまり大きくならない可能性もある。ここでは、バブル放出量がどの程度かおおよその見積もりをするため、バブルのサイズも数も海底から浅所まで変わらないと仮定した。

海底での観察に基づき、メタンブルームの広がり直径2 mと推定、メタンブルーム中でバブルの数と大きさは浮上中に変化しないと仮定すれば、1時間に放出されるバブルが作るメタンブルームの体積は、直径2 m, 高さ600 mの円柱であるから、1885 m³となる。

単位体積中のバブルの数は2.6個であるので、600 mのブルーム中のバブル数は、 $2.6 \times 1885 = 4901$ 粒で、1粒0.523 mlであるから、体積中のメタンハイドレートは2563 mlとなる。ここで、①バブルがすべてメタンハイドレートと仮定すると、2563 mlの中のガスはその164倍の420332 ml (= 19 mol)となる。1日では $19 \times 24 = 456$ mol, 1年間では $456 \times 365 = 166440$ molとなり、これは 4×10^9 グラムである。②半分がガス、半分がハイドレートと仮定すると、ガスは1281.5 mlで、100気圧だと128150 mlとなる。メタンハイドレート1281.5 mlの中にガスはその164倍の210166 mlとなり、合計で338316 ml (= 15 mol)となる。1日では $15 \times 24 = 360$ mol, 1年間では131400 molとなり、これは $3 \times$

10^9 グラムである。③バブルがすべてガスだと仮定すると2563 mlのガスは100気圧だと256300 ml (= 11 mol)となる。1日では $11 \times 24 = 264$ mol, 1年間では96360 molとなり、これは 2×10^9 グラムである。

VII. おわりに

計量魚群探知機およびマルチビームソナーを利用した観測に基づき、海中のメタンブルームに関して以下のような知見が得られた。

(1) 日本海上越海域におけるメタンシーブサイトの分布

(2) メタンブルームの内部構造

- ブルームのSVは水温と深さに関係がある
- ブルームの高さはメタンハイドレートの安定領域と関係がある

- 浮上速度は等速であるがメタンハイドレートの状態により速さは異なる

- メタンブルームの中には海底からのメタンハイドレートバブルの湧出量が非定常的(= 間欠泉)なものがある

(3) 自然現象のブルームの1年間の湧出量を試算し、

- バブルがすべてメタンハイドレートと仮定した場合、 4×10^9 グラム (= 166440 mol)

- 半分がガス、半分がハイドレートと仮定した場合、 3×10^9 グラム (= 131400 mol)

- バブルがすべてガスだと仮定した場合、 2×10^9 グラム (= 96360 mol) となった。

今後は、メタンハイドレートの基礎的調査のみならず、メタンハイドレートの生産に伴う環境影響評価にも計量魚群探知機による音響的観測方法を応用することでメタンハイドレート生産開発に寄与することが可能である。

謝辞

乗船観測中にご支援いただいた国立大学法人東京海洋大学海鷹丸乗組員ならびに独立行政法人海洋研究開発機構なつしま乗組員とハイパードルフィン運行チームの皆様と、査読していただいた国立大学法人東京大

学浅田 昭教授と独立行政法人産業技術総合研究所
柵橋 学博士に感謝と御礼を申し上げる。なつしま
NT06-19, NT07-20, NT08-09 の海底写真は独立行政法
人海洋研究開発機構から提供いただいたものである。
御礼を申し上げる。なお、本研究に松本への科学研究
費補助金基盤 A, 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱
物資源機構からの産学連携事業補助金の一部を利用さ
せていただいた。

文 献

青山千春 (1996): 海底面を利用した魚群探知機のキャ
リレーションに関する研究. 東京水産大学 (現・
東京海洋大学) 海洋生産学専攻博士論文.
青山千春 (2005): 計量魚群探知機を利用した海中のメ
タンブルームの観察と測定に関する研究. 月刊地球,
27, 913-918.
青山千春・濱田悦之・古澤昌彦 (1997): 水槽の水面反
射を利用した計量魚群探知機の較正. 水産学会誌,
63, 570-577.
青山千春・濱田悦之・古澤昌彦 (1999): 海底反射を利用
した計量魚群探知機の総合的検証. 水産学会誌,
65, 76-83.
Aoyama, C., Matsumoto, R., Okuda, Y., Ishida, Y.,
Hiruta, A., Sunamura, M., Numamani, H., Tomaru,
H., Snyder, G., Komatsubara, J., Takeuchi, R., Hiro-
matsu, M., Aoyama, D., Koike, Y., Takeda, S.,
Hayashi, T., Hamada, H. and Kawada, Y. (2004):
Acoustical survey of methane plumes using the
quantitative echo sounder in the eastern margin of
the Sea of Japan. *Proceeding of the Techno-Ocean
2004*, 1001-1004.
青山千春・松本 良・奥田義久・石田泰士・蛭田明宏・
沼波秀樹・戸丸 仁・グレンスナイダー・弘松峰男・
青山大樹 (2006a): 新潟県上越市沖の巨大メタンブ
ルームの音響的観察. 日本地球惑星科学連合大会
2006 予稿集, G228-009.
青山千春・松本 良・蛭田明宏・石田泰士・弘松峰男・
藤 浩明・沼波秀樹・町山栄章・市来雅啓 (2006b):
日本海直江津沖におけるメタンブルームの音響的観
測. しんかいシンポジウム 2006 予稿集, 141-142.
青山千春・松本 良・町山栄章・沼波秀樹 (2007a): 日
本海上越市沖ガスハイドレート特異海域におけるマ
ルチナロービームソナーおよび計量魚群探知機によ
るメタンブルームの音響的観測. しんかいシンポジ
ウム 2007 予稿集, S37.
青山千春・滝川 清・秋元和實・園田和弘 (2007b): 魚
群探知機を利用した海底・海中環境特性把握のため
の音響的観測手法確立に関する研究. 土木学会海洋
開発論文集, 23, 549-554.
青山千春・松本 良・蛭田明宏・石崎 理・Fernando,
A.・山王梨紗・弘松峰男・沼波秀樹・町山栄章・
藤原義弘・佐藤幹夫・上嶋正人 (2008): 日本海上越
沖における計量魚群探知機を利用したメタンハイド
レートの音響キャリレーション実験. しんかいシ

ンポジウム 2008 予稿集, 61-62.

古澤昌彦 (1990): 水産資源推定のための超音波による
魚群探知に関する研究. 水産工学研究所研究報告,
11, 173-219.

古澤昌彦 (1995): 水産資源の音響調査手法 計測方法
と計量魚群探知機. 海洋音響学会, 79, 152-161.

実吉純一 (1966): 液中気泡の発生と消滅. 実吉純一・
菊池善充・能本乙彦監修: 超音波技術便覧. 日刊工
業新聞社, 158-163.

海洋音響研究会 (1984): 海洋音響 基礎と応用. 海洋
音響研究会, 80-94.

Lurton, X (2002): *An Introduction to Underwater
Acoustics*. Springer, 78-79.

町山栄章・岩瀬良一・Kevin, M. Brown・松本 良・
牧 陽之助・中山典子・小坂紋子・藤倉克則・三宅
裕志・奥谷喬司・長沼 毅・渡部裕美・荻原成騎・
武内里香・Robert Jenkins・陳 毅風・青木美澄・
今村牧子・徐 垣ほか (2003): しんかい 2000 黒島
海丘潜航調査 (NT02-07 & 08 地質系潜航調査) と海
底長期計測の概要. 深海研究, 22, 199-210.

松本 良 (2001): メタンハイドレートの分布, 産状,
メタン量. 海洋と生物, 23, 439-445.

Matsumoto, R., (2005): Methane plumes over a
marine gas hydrate system in the eastern margin
of Japan Sea: A possible mechanism for the
transportation of subsurface methane to shallow
waters. *Proceedings of the 5th International
Conference on Gas Hydrates, Trondheim*, 749-754.

Matsumoto, R., Tomaru, H., Hiruta, A., Ishida, Y.,
Takeuchi, R., Snyder, G., Kotani, R., Okuda, Y.,
Sato, M., Numamani, H., Aoyama, C., Hiromatsu,
M., Lu, H., Matsuda, M., Lu, Z., Takeuchi, E., Goto,
T., Machiyama, H., Toh, H. and Komatsubara,
J. (2005): Gas hydrate layer and prominent flares
of gas plumes in Naoetsu basin, eastern margin of
JAPAN Sea. *American Geophysical Union Fall
Meeting*, 340.

松本 良・蛭田明宏・石田泰士・青山千春・沼波秀樹・
町山栄章・弘松峰男・藤 浩明 (2006): 日本海東縁,
直江津沖の巨大メタンプリューム群と海底メタンハ
イドレート. しんかいシンポジウム予稿集, 26.

松本 良・奥田義久・蛭田明宏・戸丸 仁・竹内瑛一・
山王梨紗・鈴木麻希・土永和博・石田泰士・石崎
理・武内里香・小松原純子・Freire, A.F.・町山栄章・
青山千春・上嶋正人・弘松峰男・Snyder, G.・沼波
秀樹・佐藤幹夫・的場保望・中川 洋・角和善隆・
荻原成騎・柳川勝則・砂村倫成・後藤忠則・盧
海龍・小林武志 (2009): 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, 43-71.

Rehder, G., Brewer, P., Peltzer, E. and Friederich, G.
(2002): Enhanced lifetime of methane bubble
streams within the deep ocean. *Geophysical Re-
search Letters*, 29, 1731.

Roberts, H.H. (2001): Fluid and gas expulsion on the
northern gulf of Mexico continental slope. *Natural
Gas Hydrates Occurrence, Distribution, and Detec-*

- tion edited by Paull, K.C and Dillon, P.W., 145-161.
- Sauter, J.E., Muyakshin, I.S., Charlou, L.J., Schlüter, M., Boetius, A., Jerosch, K., Damm, E., Foucher, P.J. and Klages, M. (2006): Methane discharge from a deep-sea submarine mud volcano into the upper water column by gas hydrate-coated methane bubbles. *Earth and Planetary Science Letters*, **243**, 354-365.
- Shipley, T.H. and Didyk, B.M. (1982): Occurrence of methane hydrates offshore southern Mexico. *Initial Reports, Deep Sea Drilling Project*, **66**, 547-555.
- Shipley, T.H., Houston, M.H. and Buffler, R.T. (1979): Seismic reflection evidence for the widespread occurrence of possible gas-hydrate horizons on continental slopes and rises. *American Association of Petroleum Geologist Bulletin*, **63**, 2204-2213.
- 武内里香・町山栄章・松本 良 (2001): メタンハイドレートの分解に起因する炭酸塩類形成. 堆積学研究, **53**, 77-80.
- ユーリック, R. (1988): 水中音響の原理. 共立出版, 229-234, 281-293.
- (2008年12月12日受付, 2009年2月12日受理)