

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 25 日現在

機関番号：24403

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009 年度 ～ 2011 年度

課題番号：21760670

研究課題名（和文） 超音波流速計を用いたメタンハイドレート湧出量計測手法の開発

研究課題名（英文） Method of measurement Methane hydrate using Acoustic Doppler Current Profiler

研究代表者 新井 励 （ARAI REI）

大阪府立大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：60508381

研究成果の概要（和文）：

メタンハイドレートは石油・天然ガスに代わる次世代資源として注目されており、日本近海にも、相当量のメタンハイドレートが分布していると推測される。これらメタンハイドレートの開発を目前に控え、開発工事にともなう海底生態系に及ぼす環境影響評価を事前に実施する必要があるが現地計測データが明らかに不足しているのが現状である。そこで、本研究では開発前の現地におけるメタン噴出量および動態を計測する現地計測手法の開発を行う。

研究成果の概要（英文）：

Recently, Methane Hydrate (MH) has attracted much attention because of depletion of a finite resource such as oil and coal. The generation of carbon dioxide and the oxide of nitrogen by MH are very little compared with oil and coal. This behavior of MH means that the MH is extremely superior to oil and coal in terms of environmental problem such as air pollution and earth warming.

On the other hand, there is also great fear that the development of MH damages the benthic ecosystem. We should also assess the influence and risk of ecosystem by the development in advance. From these reasons, it is very important to measure the blowout of MH and/or methane plume. However, very few studies have been reported on measurement of MH in deep-sea area.

In this study, the author proposed a new measurement method of MH depth profiles with Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP). In this measurement method, the propagation of ultrasonic waves was regarded as inverse problem, and the depth profile of MH can be measured by model of propagation of ultrasonic underwater. Since ADCP can be obtained the three-dimensional velocity, the present method is suitable for monitoring in order to understand MH dynamics under deep sea.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
2011 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：船舶海洋工学

キーワード：メタンハイドレート、海中音響、音響計測、メタンプルーム、海洋計測、ADCP

1. 研究開始当初の背景

近年、地球温暖化や大気汚染などの原因として石油や石炭の使用による二酸化炭素や窒素酸化物の発生が懸念されており、資源の枯渇に関する問題も記載それらの資源に代わるいわゆる代替エネルギーの開発が国家規模で進められている。その代替エネルギーとして、メタンハイドレートは非常に注目されている。メタンハイドレートはメタンガスを水分子が籠状に覆う状態で存在しており、燃焼時の二酸化炭素や窒素酸化物の発生量が石油や石炭に比べると非常に少なく、また日本近海にも相当量のメタンハイドレートが分布していると考えられているため、次世代のクリーンエネルギーとして期待されている。しかしながら、メタンハイドレート開発時のメタンガス漏出による環境影響評価が十分に行われていないため、いまだ開発には至っていない。このような環境影響評価を行うには、時空間的に詳細なメタンプルームの計測データが要求される。そこで、時空間的に詳細に計測できる手法として、音波を用いた計測手法をメタンプルームに応用することを考える。しかし、基礎となるメタンプルームの音響伝播モデルはなく、またモデルに必要なメタンプルームの音響特性は把握されていない。

2. 研究の目的

本研究では、超音波流速計であるADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)を用いて、擬似的に発生させた海水中のメタンプルームの音響散乱を計測することにより、メタンプルームの音響特性を把握する。さらに、その特性を考慮し、既存の水中音響伝播モデルを改良することで、メタンプルームの濃度と空間分布に関する新しいモデルを構築し、ADCPによりメタンプルーム計測手法を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) ADCP

本研究では超音波流速計(ADCP)を使うことにより、メタンプルームの鉛直分布を非接触で計測する手法を検討する。ADCPは4つのトランスデューサーから音波を水中に発射し、浮遊懸濁物質から反射された音波のドップラーシフトから3次元方向の流速を算出する音響計測器である。また、流速のプロファイルを非接触で計測するとともに、浮遊懸濁物質等による反射音波の強度を各ト

ランスデューサーで計測することが可能である。したがって、メタンハイドレートが湧昇している海域におけるADCPによる音響散乱の計測値に対して、音響伝播モデルを用いて解くことで、海水中のメタンハイドレートの現位置における散乱強度(dB)の鉛直分布を非接触で計測することは理論的に可能である。この散乱強度はターゲットストレングス(TS)と呼ばれメタンハイドレートの音響学的体積濃度を表している。したがってTSの鉛直分布がわかればメタンハイドレートがどのように分布かを計測することが可能となる。

また、ADCPは本来流速計であるため、メタンハイドレートが湧昇する挙動を計測することが可能となる。さらにADCPは環境の調査船に搭載されていることが多く、本計測手法が確立されれば容易にデータを取得することができるばかりか、過去に取得したデータからメタンプルームに関する情報を抽出することが可能となる。

(2) 音響伝播モデル

音響理論において、水中の音波伝播は、水中における粒子の振動モードで説明することが出来る。一般的に、音圧Pはこの粒子モードによる力の変化によって生じ、水中では縦波で表され、トランスデューサーから発せられた音圧は一般的に以下の式で表される。

$$P = \frac{P_0 r_0}{r} D e^{-\alpha r} e^{j(\omega t - kr)} \quad (1)$$

ここで、 P_0 は $r_0=1\text{m}$ において標準的に定義された基準音圧で、 r はトランスデューサーからの距離、 D はトランスデューサーの指向性関数である。 α は水の吸収(α_w)と気泡や懸濁物質の減衰(α_s)による音の減衰を意味する。 ω と k はそれぞれ水中における音の角速度と波数である。ある粒子から散乱された音圧 P_s は以下のように表される。

$$P_s = \frac{aFP}{2r} D e^{-2\alpha r} e^{j2(\omega t - kr)} \quad (2)$$

ここで、 a は粒子半径、 F は形状関数で粒子の散乱特性を表している。式(1)の P は粒子における衝突圧力を示す。Fig.1に示されるように、粒子からの散乱圧力の伝播は式(2)に式(1)を代入することにより導かれ、受信時におけるトランスデューサーの指向性を考慮することで、以下の式で表される。

$$P_s = \frac{aP_0 R_0}{2r^2} FD^2 e^{-2\alpha} e^{j2(\omega t - kr)} \quad (3)$$

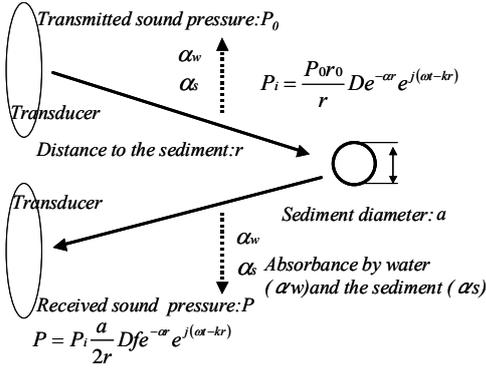


Fig.1 Propagation of sound transmitted by ADCP.

Hayらは式(3)より求めた散乱圧力より粒子の濁度(M)と電圧(V)の関係を導き出し、実験によりこの関係式の検証も行った。この関係式は以下の式で表される。

$$V^2 = R_v T I = R_v T P^2 = \left\{ \frac{k_s k_t}{\phi R} \right\}^2 M e^{-4R\alpha}$$

$$k_s = \frac{F}{\sqrt{a_s}}$$

$$k_t = R_v T \frac{0.96 P_0 R_0}{ka_t} \left\{ \frac{3\pi c}{16} \right\}$$

(4)

ここで、 τ と c はそれぞれパルス長と音速を R_v はトランスデューサーの受信感度を、そして、 T はADCPの電圧変換関数を表す。 ϕ は音源付近における音波伝搬の近距離補正係数を表す。ADCPにより計測された音響強度は、一般的に散乱圧力の対数値によって表されるため、式(4)の両辺を対数にとることで、いわゆる以下のようなソナーの式を求めることが出来る。

$$\log M = 0.1 \times \{Kc(E - Er) + 2r\alpha + 20 \log \phi r\} - 2 \log k_s k_t \quad (5)$$

$E(\text{count})$ はADCPの計測値、 Er は参照値と呼ばれ計測環境により変化する値で、 Kc は E を音響エネルギー変換する係数である。

(3) 伝播モデルによる濁度推定手法

ADCPによる計測と式(5)を用いることにより、気泡(メタンプルーム)の体積濃度分布を定量的に求めることは理論的に可能である。しかしながら、式(5)において、 Kc などの未知のパラメータがあり、これらのパラメータは回路内温度といった機器の特性に基づいて決まるため、時間的に一定ではない。

そのため、実際の気泡の鉛直濃度分布を推定するためには、これらのパラメータを用いずとも気泡を算出できる手法が必要である。そこで本研究では、まず、 α_s 、 α_w などのようなパラメータは既知のパラメータを含む数理モデルを用いることで、未知のパラメータを減らす。さらに、音響伝播モデルを空間方向に、漸化的に解くことで未知のパラメータを無くす計算手法を提案する。

放射した音波のエネルギーは減衰しながら海中を伝播し、減衰率 α は、水の吸収による減衰 α_w と音響散乱体による減衰 α_s の和 $\alpha_w + \alpha_s$ で表される。また、水による減衰率は以下に示すように、音波の周波数と海水の塩分濃度と水温に基づいていることが知られている[22], [23]。

$$\alpha_w = 10 \log e^2 \frac{f}{91500} \left[\frac{1.86 S_T f}{(f_T^2 + f^2)} + \frac{2.68 f}{f_T} \right]$$

$$f_T = 21.9 \times 10^6 \left(6 - \frac{1520}{273 + T} \right)$$

(6)

f_T は周波数関数と呼ばれている。式(6)における右辺の初項 $10 \log e^2$ は減衰をNepers/mからdB/mに変換する項で、定数である。粒子径 a_s の気泡による音波の減衰は、吸収と散乱の二つの物理現象を考慮する必要がある。異なる形状の懸濁物質による音波の吸収 α_1 は、式(7)に示すUrlickが求めた、粒子密度と海水密度および動粘性係数 ν_w で表現される式を用いる。

$$\alpha_1 = 10 \log e^2 \frac{k(\sigma - 1)^2}{2\rho_s} \left[\frac{s}{s^2 + (\sigma + \delta)^2} \right]$$

$$\sigma = \frac{\rho_s}{\rho_w}, \quad \delta = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{9}{(2\beta a_s)} \right]$$

$$s = \frac{9}{4\beta a_s} \left[1 + \frac{1}{\beta a_s} \right], \quad \beta = \left[\frac{kV_s}{s\nu_w} \right] \quad (7)$$

ここで、 ν_w 、 ρ_s 、 ρ_w はそれぞれ海水の動粘性係数、気泡と海水の密度である。Hayらは各種の形状の懸濁物質による音波の散乱を実験することで、正規化した粒子の散乱断面積 χ と粒径から粒子の散乱による音波の減衰量を式(8)のようにモデル化した。

$$\alpha_2 = 10 \log e^2 \frac{3\chi^2}{4a_s \rho_s}$$

$$\chi = \frac{1.1(4/3)k_a x^4}{[1 + 1.3x^2 + (4/3)k_a x^4]}$$

$$x = ka_s, \quad k_a = 0.18$$

(8)

ここで、 $ka = 0.18$ は圧縮率と密度の関係を表したものである。散乱と吸収の係数を伴っ

た濃度 M から導き出された実際の 1m 毎の気泡減衰 α_s は以下の式で表される。

$$\alpha_s = M(\alpha_1 + \alpha_2) \quad (9)$$

音源付近における音圧は音源表面の要素からの寄与の総和として計測されるため、前述したような遠距離音場における指向性関数により表現することが出来ない。いわゆる Rayleigh 散乱領域と呼ばれる近距離音場における散乱強度は音源からの直接波と輪郭波の干渉効果により大きく変動し、実際の受信強度は球面拡散を想定したものより小さくなることが知られている。この影響は Downing らにより詳細に調べられており、実験的に求められた式(10)を用いることで、近距離音場における懸濁物質の散乱強度を補正することが可能となる。ここで d は円形ピストン音源の直径を表す。

$$\varphi = \frac{1 + 1.35z + (2.5z)^{3.2}}{1.35z + (2.5z)^{3.2}}$$

$$z = \frac{r}{r_n} \quad r_n = \frac{\pi d^2}{\tau} \quad (10)$$

機器の特性により決まる Kc は ADCP で計測された散乱強度 E を音響強度に変換する係数で、RDI co. ltd. が出荷時にキャリブレーションすることで決まる。しかしながら、ADCP の筐体内における電子回路の温度によりこのパラメータの値はわずかに変化するため、以下の式を使う。

$$Kc = \frac{127.3}{Te + 273} \quad (11)$$

ここで、 Te はシステムの電子回路温度である。

式(5)の k_s と k_t の値は、設置した海域の水温により決まる値であるものの、本計測における ADCP の設置水深は 1100m と深い海域であり、水温もほぼ一定であることから定数として取り扱うことが出来る。しかしながら、これらのパラメータは機器により異なるため、正確な値は不明である。そこで、本研究では式(5)を空間方向に対して式(12)、(13)のように漸化的に解くことで、これらのパラメータの値を考慮せずに解く手法を提案する。

$$\log M_n = 0.1\{Kc(E_{n1} - Er) + 2r_n\alpha_n + 20\log\psi_n r_n\} - 2\log k_s k_t \quad (12)$$

$$\log M_{n+1} = 0.1\{Kc(E_{n+1} - E_{n+1}) + 2(r_{n+1}\alpha_{n+1} - r_n\alpha_n) + 20\log\frac{\psi_{n+1}r_{n+1}}{\psi_n r_n}\} - \log M_n \quad (13)$$

この式(13)は r に関して式(12)の漸化式あり、ADCP 近傍の気泡の値 M_0 が求まれば、気泡の鉛直分布が音響強度より推算することが可能であることを意味する。

(4) メタンプルームの音響特性を考慮した音響モデル検証実験

① 実験概要

本計測では、実海域において窒素ガスを用いて擬似的にメタンプルームを発生させ、ADCP によってメタンプルームの跳ね返りによる音響強度の時空間的变化を計測し、データを取得することを試みる。実験では筏の上に窒素ガスポンペを設置し海底に沈めたエアストーンにチューブで繋いで気泡を発生させる。エアストーンは細かい気泡を大量に出すために設置している。発生させた気泡の音響散乱強度は筏から係留した ADCP により計測する。また、メタンプルームの発生量による音響特性の違いとメタンプルームが発生していない海中での音響伝播を見るためポンペとエアストーンの間にはフローメーターを設置し発生量を

0,2,4,6,8,10,12,15,18,20(l/min)の 10 パターン計測する。その様子を図. 2 に示す。

さらに、ADCP の超音波の伝播速度に影響してくる塩分濃度、水温、水深を計測するため、同時に CTD 計を沈めてそれぞれのデータを取得する。

本計測では、実海域において窒素ガスを用いて擬似的にメタンプルームを発生させ、ADCP によってメタンプルームの跳ね返りによる音響強度の時空間的变化を計測し、データを取得することを試みる。実験では筏の上に窒素ガスポンペを設置し海底に沈めたエアストーンにチューブで繋いで気泡を発生させる。エアストーンは細かい気泡を大量に出すために設置している。発生させた気泡の音響散乱強度は筏から係留した ADCP により計測する。また、メタンプルームの発生量による音響特性の違いとメタンプルームが発生していない海中での音響伝播を見るためポンペとエアストーンの間にはフローメーターを設置し発生量を 0,2,4,6,8,10,12,15,18,20(l/min)の 10 パターン計測する。その様子を Fig. 4 に示す。

さらに、ADCP の超音波の伝播速度に影響してくる塩分濃度、水温、水深を計測するため、同時に CTD 計を沈めてそれぞれのデータを取得する。

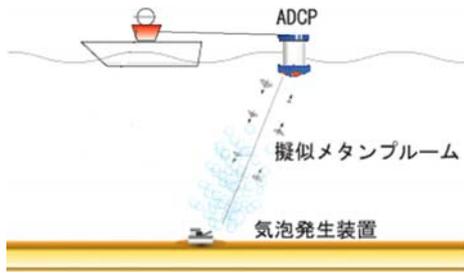


図.2 実験状況

② 実験場所

実験は大阪湾尼崎港で実施した。尼崎港は直立護岸に囲まれた閉鎖性海域であり、水深が10数メートルと浅い海域であるが、隣接する下水処理場の処理排水が放流されており、海水中の音響伝搬に影響を及ぼす塩分や水温の鉛直分布が著しい海域である。本研究の計測対象としているメタンブルーム発生海域は、水深が深く表層と底層では水温や塩分の鉛直分布の変動が顕著なことから、それらの条件を満足する尼崎港内はメタンブルーム発生海域の音場を相似的に再現し易い海域であると考え、尼崎港を本研究の実験場所として選んだ。

③ 実験結果および考察

計測で得られたデータの各流量、トランスデューサー、アンサンブル、層ごとの音響散乱強度を求める。しかし、このデータには温度躍層や濁りに関するバックグラウンドノイズが含まれているため、まずそれぞれのガスの流出量時の音響散乱強度からガスを放出していない時の海水中の音響散乱強度を引いてメタンブルームのみの音響散乱強度を求める必要がある。そこで流量が0(l/min)の音響散乱強度のデータとそれぞれの流量の差分をとることにより求める。

その結果メタンブルームの音響散乱強度の計測状態が図.3のようになり、各 Ensemble と水深方向にメタンブルームの流れが見られ、良好なメタンブルームのみの音響散乱強度が得られたと考えられる。

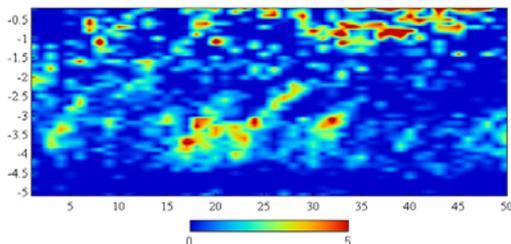


図.3 気泡による音波の反射強度

次にこの得られたメタンブルームのみの音響散乱強度の各流量の平均を求めることにより、流量による音響散乱強度を求めることができる。この結果を図.4に示す。

この結果より、流量と音響散乱強度の関係がほぼ線形であるといえる。よって、今回の実験よりメタンブルームの濃度と音響散乱強度の関係は定量的に示せたと考えられる。しかし、流量10(l/min)の音響散乱強度は少し線形近似された値よりも離れている。この結果の原因として考えられるのは尼崎港での実験の際強風が吹いたことである。強風の

影響で筏が流され、海底の気泡を発生させているエアストーンから距離が離れたため音響散乱強度が減少したからであると考えられる。

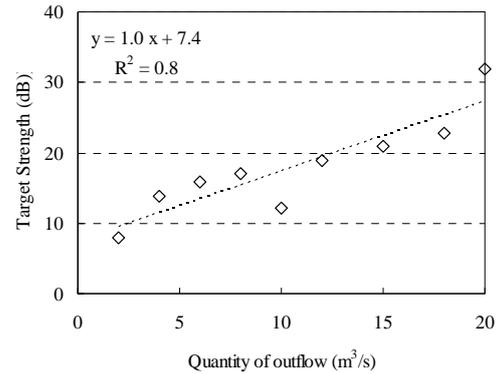


図.4 気泡の発生量と散乱強度の相関図

④ 実海域での適用

メタンブルームの発生海域と思われる海域における ADCP の計測データを解析したものの、ブルームを発見することは出来なかった。ADCP の計測領域内ではブルームの影響が無かったものと考えられる。一方、本研究期間中に熱水鉱床が存在する沖縄県伊是名海穴の調査が実施されたため、当該海域における海穴内の懸濁物質濃度を、本研究で開発した手法を用いて ADCP により計測した。その結果、伊是名海穴内には高濁度水塊が存在し、潮汐の影響を受けて濁水が変動している様子を計測することに成功した。これにより本計測手法はメタンブルームの計測のみならず、資源開発時の海域モニタリングにも有効であることがわかった。

4. 研究成果

本研究で得られた研究成果は以下④点である。

- ① メタンブルームの動態を把握するため、水中の気泡および懸濁物質が、音波をどのように散乱し、伝播していくかを物理モデルで表現した。
- ② 超音波流速計によるメタンブルームの鉛直分布計測手法を提案した。
- ③ 伊是名海穴における ADCP の計測結果に対し本研究で開発した計測手法を用いるこ

とで、ADCPにより計測された音響強度から濁度の鉛直分布計測に成功した。

④ 伊是名海穴を計測したADCPの潮流データと本研究で開発した手法による濁度データに対して周波数解析することで、水深約1250mと海底から50m付近に潮汐流の影響による濁度の変動があることが確認された。また、水深1250m付近の濁度は伊是名海穴からの鉛直方向の潮汐の流れにより供給されており、海底上50m付近までの濁度は、計測地点の南側から供給されたものであることがわかった。

これらの結果はADCPによって計測された音響強度と数学的音響伝播モデルを用いることによってもたらされたものであり、本研究で提案した手法がメタンプルームの計測や濁度モニタリングを行ううえで効果的であると言える。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

① R. Arai, Y. Onobayashi, H. Ishida, N. Maeda, T. Sugimoto, Y. Shirayama, T. Toyohara, N. Goto, “Fluctuation of High-Turbidity Water Measured by Acoustic Doppler Current Profiler at the Izena Calderon in the Okinawa Trough”, Proceedings of 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2011, pp149-156, 査読有, DOI:<http://dx.doi.org/10.1115/OMAE2011-49968>

[学会発表] (計3件)

① 新井 励、沖縄トラフ伊是名海穴におけるADCPを用いた高濁度水の変動計測、第23回資源と素材学会 平成23年9月29日、大阪

② R. Arai, “Fluctuation of High-Turbidity Water Measured by Acoustic Doppler Current Profiler at the Izena Calderon in the Okinawa Trough”, 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2011, June 19-24, Rotterdam, The Netherlands

③ 新井 励、沖縄トラフ伊是名海穴におけるADCPを用いた高濁度水の変動計測、第22回海洋工学シンポジウム 平成23年3月18日、日本海洋工学会・日本船舶海洋工学会、東京

6. 研究組織

(1) 研究代表者

新井 励

(ARAI REI)

大阪府立大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：60508381

(2) 研究分担者 ()

研究者番号：

(3) 連携研究者 ()

研究者番号：