

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：24403

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820423

研究課題名(和文) 熱水鉱床開発に向けた超音波流速計による懸濁物質濃度および粒径分布の非接触3D計測

研究課題名(英文) Three-dimensional measurement method of turbidity using ADCPs for deep ocean mining in a hydrothermal area

研究代表者

新井 励 (Arai, Rei)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60508381

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：日本周辺海域には海洋資源となりうる未発見の海底熱水鉱床の存在が予想される。また、既知の熱水鉱床周辺海域には熱水由来の特異かつ貴重な化学合成生態系が存在し、今後、これら熱水鉱床の開発を実施するに際し、周辺生態系に対し環境影響評価をすることが不可欠である。そのため、採鉱時にどの程度の濃度の重金属等を含む懸濁物質が発生・拡散・堆積し、周辺海域の生態系に影響を及ぼすか、懸濁物質を計測することで把握する必要がある。本研究ではADCPと呼ばれる超音波流速計の計測データから流速のみならず、新たに濁度に関する情報を抽出する方法を開発した。

研究成果の概要(英文)：Deep ocean mining in a hydrothermal area needs careful environmental impact assessments in terms of preservation and mitigation of biodiversity. In order to take measures against environmental impact during the mining in a hydrothermal area, it is important to measure components of hydrothermal origin with high temporal and spatial resolution on site, and to understand the ecosystem in the hydrothermal environment. In this study, I have developed a measurement method of turbidity profiles using an Acoustic Doppler Current Profilers (ADCPs). Applying this method to the ADCP measurements in a hydrothermal area in the Okinawa, we verify that this method can extract turbidity data from echo intensities measured by ADCP.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：海洋環境 海洋計測 海洋音響 海洋資源開発 海洋モニタリング

### 1. 研究開始当初の背景

日本周辺海域には海洋資源となりうる未発見の海底熱水鉱床の存在が予想される。また、既知の熱水鉱床周辺海域には熱水由来の特異かつ貴重な化学合成生態系が存在し、今後、これら熱水鉱床の開発を実施するに際し、周辺生態系に対し環境影響評価をすることが不可欠である。そのため、採鉱時にどの程度の濃度の重金属等を含む懸濁物質が発生・拡散・堆積し、周辺海域の生態系に影響を及ぼすか、懸濁物質を計測することで把握する必要がある。しかしながら現在用いられている濁度計は点計測のみであり、懸濁物質の特性や拡散状況を空間的に把握するためのデータ量としては圧倒的に不足しているのが現状である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は ADCP と呼ばれる超音波流速計の計測データから濁度に関する情報を抽出するアルゴリズムを構築することで海水中の濁度の非接触計測することを目的としている。まず、FDTD 法と呼ばれる数値計算を用いることで ADCP より発せられる音波の指向性を考慮した音波の距離減衰を計算する。さらに、懸濁物質による音波の減衰や散乱割合、ADCP の機器特性により決定するパラメータを実験より求めることで ADCP から発せられる超音波に対する懸濁物質の応答関数を求める。最後に、実海域において ADCP により濁度の非接触計測を試みた。

### 3. 研究の方法

ADCP により送受信される音波の濁度に対する応答特性を把握するためには、超音波の伝搬過程と散乱過程をモデル化する必要がある。伝搬過程は、ADCP から送信された超音波が懸濁物質に入射するまで、あるいは懸濁物質により散乱された超音波が ADCP により受信されるまでを意味する。また、散乱過程は懸濁物質に入射した音波が濁度レベルに応じてどのように散乱するかを意味する。これらを表現した式を式(1)に示す。

$$P_{ADCP} = P_0 \Phi(r) A(M) e^{-2(\alpha_w + \alpha_s(M))r} \quad (1)$$

ここで、 $P_{ADCP}$  は ADCP が受信する音圧[Pa]、 $P_0$  は ADCP から送信された音圧[Pa]、 $\Phi(r)$  は伝搬過程における音波の拡散による減衰[dB/m]、 $\alpha_w$  は水による音波の吸収[dB/m]、 $\alpha_s$  は濁度レベル  $M$  における懸濁物質による減衰[dB/m]、 $A(M)$  は濁度レベル  $M$  に対する音波の反射割合を表す。また、ADCP から送信された音圧レベルは、式(2)に表すように Transmit Power(TP)[W]に比例定数  $k$  をかけて表されることが知られている。

$$P_0 = kTP = k(TC \times 0.011451) \times (TV \times 0.380667) \quad (2)$$

ここで、 $TC$ 、 $TV$  はそれぞれトランスデュ

ーサーへの印加電流[A]、印加電圧[V]を表しており、この値は ADCP のバイナリデータから取得することができる。これらを考慮して、式(1)の両辺の常用対数をとって 20 倍した音圧レベルで表したものを式(3)示す。式(3)の右辺の第 2、3 項は伝搬過程を表現し、第 4 項は散乱過程を表現している。

$$20 \log P_{ADCP} = 20 \log TP + 20 \log \Phi(r) - 2(\alpha_w + \alpha_s(M))r + 20 \log kA(M) \quad (3)$$

通常音波の拡散による減衰  $\Phi(r)$  は球状放射を仮定し、音源からの距離に反比例する式を用いるが、ADCP から放射される音波は強い指向性を有するため、本研究では音波の伝搬過程を式(4)~(6)で表現し、FDTD 法と呼ばれる数値計算を用い、2 次元平面内の音圧や粒子速度を計算することで音波の拡散による減衰を計算する。すなわち式(3)における右辺第 2 項と第 3 項に相当する音波の伝搬過程を数値計算により求める。

$$-\frac{1}{K} \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \quad (4)$$

$$-\rho \frac{\partial v_x}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial x} + \eta v_x \quad (5)$$

$$-\rho \frac{\partial v_y}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial y} + \eta v_y \quad (6)$$

ここで  $p$  は音圧[Pa]、 $v$  は粒子速度[m/sec]、 $K$  は媒質の体積弾性率、 $\rho$  は密度[kg/m<sup>3</sup>]、 $t$  は時間変化[sec]を表し、式(5)、(6)の右辺第 2 項は、粒子速度に比例すると仮定した吸収による音波伝搬損失を表している。損失係数  $\eta$  は水による減衰  $\alpha_w$  と粒子による減衰  $\alpha_s$  の和で表現され、 $\alpha_s$  は実験より求める。

FDTD 法では音圧と粒子速度を空間・時間ともに 1/2 ステップずつ交互に配置し、離散位置  $(i, j)$  の時間  $t$  における離散方程式を作り、この離散方程式を順次解くことで、計算領域内の音圧分布や任意の点での音圧の時間波形を求める。本シミュレーションにおいて離散方程式は中央差分を用いる。主要な各パラメータの値を表 1 に示す。なお、 $y$  が音波の進行方向であるとともに、ADCP から送信される音波が 2°の指向性を有して拡散していくことを考慮して、 $dx$ 、 $dy$  の比を決定する。

このモデルを用いることで TP より、ADCP から任意の距離にあたる計測第  $n$  層における入射音圧  $P_i$  を算出することができる。さらに、音波伝搬を逆問題として捉え、ADCP の計測値である  $P_{ADCP}$  から逆算することで第  $n$  層における反射音圧  $P_{out}$  を算出することができる。すなわち ADCP による任意の計測層における超音波の入射と反射の音圧比  $P_i/P_{out}$  を算出することが可能となる。

表 1 主要パラメーター

$dx$ [cm]	5/28	$f$ [kHz]	1200
$dy$ [cm]	5	$\rho$ [kg/cm <sup>3</sup> ]	0.001
$dt$ [msec]	1/6000	水中音速	150
$\alpha_w$ [dB/m]	0.000263	[cm/msec]	

4. 研究成果

(1)室内実験結果

本研究では ADCP により送受信される超音波の懸濁物質に対する応答特性を求める実験を実施する。図 1 に示すように円筒水槽を用いて、水槽内に懸濁物質に見立てた粒子を投入し実験を実施する。水槽下部には流出口、上部には流入口を設けて、その間にポンプを設置することで水槽内部の濁度を均一にする。使用する懸濁物質は粒径 45[μm]の力オン粒子とし、濁度を調整した水槽に ADCP(1200[kHz], Teledyne RD Instruments 社製)を設置することで ADCP により計測される散乱強度の濁度に対する応答を調べる。ADCP の 4 つのトランスデューサーの相互作用を防ぐために 3 つのトランスミット回線を遮断し、起動する唯一のトランスデューサーが直下を向くよう ADCP を設置する。トランスデューサーは水面から 0.27[m]の位置に設置され、計測層厚は 0.05[m]とし、残響の影響をなくすため 1 分 1 発の超音波を発射し、各濁度において 90 分間の連続計測を行う。同時に濁度センサー付属の Compact-CTD AST687(Alec Electronics 社製)を用いて濁度計測した。実験における水槽内部の懸濁物質濃度は 10-50[ppm]であり、5ppm 刻みで濁度を変化させ実験を行った。

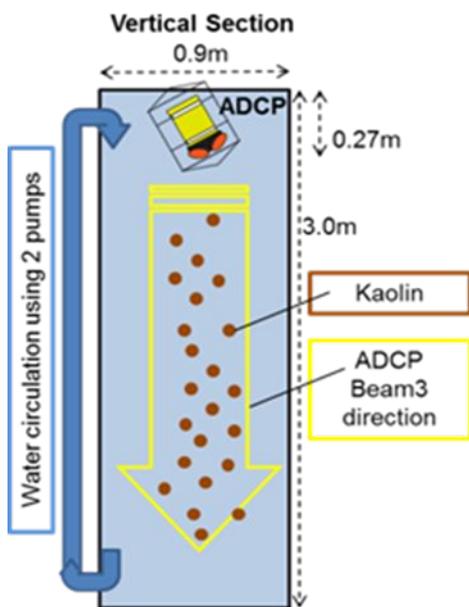


図 1 円筒水槽実験状況

ADCP から放射された超音波が懸濁物質による減衰を受けないもの( $\alpha_s=0$ )と仮定して、ADCP より距離  $r$  の濁水に入射した音圧  $P_i$  を式(4)-(6)より求める。同様に ADCP から得ら

れた計測データより ADCP から距離  $r$  の濁水により反射された音圧  $P_{out}$  を求める。しかし、実際には音波は懸濁物質による減衰  $\alpha_s(M)$  の影響を受けるため、算出された  $P_{out}$  と  $P_{in}$  の比は式(3)の伝搬過程と水による減衰の項を省いた式(7)のような濁度  $M$  と距離  $r$  の関数で表されるはずである。その式(7)の  $P_{out}$  と  $P_i$  を音圧レベルに変換したものを式(8)に示す。

$$\frac{P_{out}}{P_i} = kA(M)e^{-2\alpha_s(M)r} \quad (7)$$

$$\log \frac{P_{out}}{P_i} = \log kA(M) - 2 * \alpha_s(M)r \log_{10} e \quad (8)$$

式(8)から濁度  $M$  が一定の時の入射音圧と反射音圧の比は、ADCP からの距離に比例することがわかる。また、各濁度において、距離に対する近似直線の傾きと切片が、各々  $\alpha_s(M)$  および  $\log kA(M)$  に対応することから、濁度に対する減衰や散乱の応答特性を把握することが出来る。そこで、各濁度と距離の関係式から切片の値  $\log kA(M)$  を算出し、濁度との関係を調べた結果、図 2 に示すように濁度と ADCP の散乱強度にはある傾向をもった関係があることが確認された。そこで本研究では式(9)に示すような関係式を仮定し、最小二乗法を用いることで  $\sigma = 2.14, \gamma = 0.76$  を得た。

$$\log kA(M) = \gamma \log \sigma M \quad (9)$$

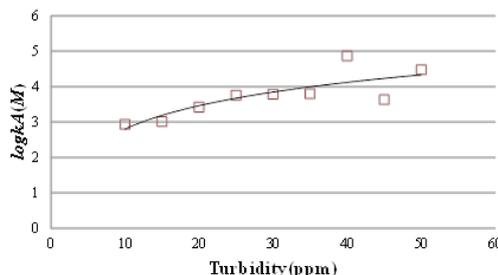


図 2 濁度と散乱強度の関係

同様に濁度と距離の関係式から、 $\alpha_s(M)$  に相当する傾きを算出し濁度との関係を調べた。図 3 に示すように  $\alpha_s(M)$  は濁度と線形性が見られたため、式(10)と置くことにした。

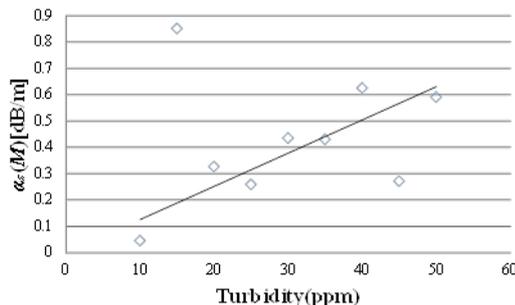


図 3 濁度と音波の減衰の関係

$$a_s(M) = 0.012M \quad (10)$$

以上より ADCP で計測された散乱強度を用いて数値計算により各観測層の入射音圧と反射音圧の比を算出し、式(8)~(10)を用いることで海水中の懸濁物質濃度を定量することが可能となる。

#### (2)実海域における濁度計測実験

2015年10月28日大阪府泉佐野市のりんくう公園内海において、ADCPによる懸濁物質濃度の計測実験を行なった。図4示すりんくう公園内海は水深が最大3.0mほどの水深で実験水槽の高さとほぼ同程度であり、実海域における適応の検証海域としては適していると判断した。まず、ADCPを実験水槽と同様に筏で固定し、10:00から16:00まで計測間隔1分で計測を行い、60分ごとに濁度計により筏の下の濁度分布を計測した。また、濁度レベルの大きな変動をADCPにより計測できるか検証するため、りんくう公園内海から採取した海底泥をADCPの上部から15:00に降らせることで、疑似的に高濁度水を発生した状態を作り出した。これらADCPにより計測された散乱強度を前述した手法により解析することで計測期間中の海水中の懸濁物質濃度を可視化した。その結果を図5に示す。海底泥を投入した15:00以降、明らかな高濁度水塊の発生をADCPの散乱強度を用いて可視化できていることがわかる。また、投入直後に比較的密度の高い泥が沈降し、一部の懸濁物質は観測終了間際まで比較的濁度の高い水塊として浮遊していることが確認できる。



図4 大阪湾泉佐野市りんくう公園

最後に、ADCPの散乱強度から算出した濁度の値の妥当性を検証するため、現地で濁度計により計測した濁度の鉛直分布と比較した。図6に海底泥投入による高濁度水塊発生前後のADCPおよび濁度計による濁度の鉛直分布計測結果を示す。高濁度水発生前は

ADCPと濁度計ともに5ppm以下の値を示し、鉛直分布もほぼ様な分布を示す結果となった。海底泥投入後の濁度水塊発生後はADCPと濁度計ともに表層から水深1.0m前後にかけて濁度が2~3ppmの値を示す結果となった。いずれの結果もADCPの散乱強度により比較的良好な濁度の定量化がはかっている結果となった。

以上の成果によりADCPの散乱強度データから新たな「濁り」に関する情報を抽出し、非接触で海水中の濁度を定量することに成功した。今後、海洋資源探査に本技術が用いられることは勿論のこと、従来ADCPにより計測されてきた過去の計測データに本技術を応用すれば、海洋における濁度に関する多くの新たな知見が得られる可能性を示唆するものである。

さらには海洋資源のみならず沿岸海域における浚渫工事やダム・河川管理の観点からも現在注目され始めているといった副次的効果も現在得られている。

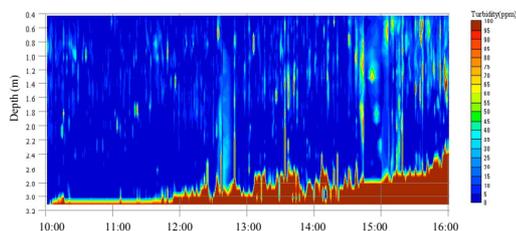


図5 濁度の計測結果

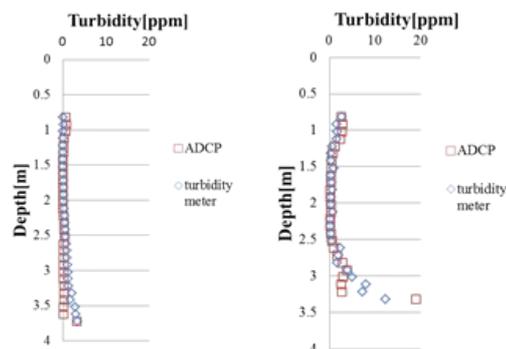


図6 濁度の鉛直分布計測結果

#### 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 3件)

新井 励, 塚原 洋平, 中田 将吾, 前田 亘宏, 島津 充, 超音波流速計による実海域の懸濁物質の可視化、可視化情報、vol.35, Suppl. No2, 2015, pp.193-196, 査読無

中田将吾, 超音波流速計による実海域の懸濁物質の計測手法、平成26年度大阪府立大学工学部海洋システム工学科卒業

## 論文集、2015、査読有

K. Komaki, M. Shimazu, S.Kondo, Y.Onishi, F. Satoshi, R. Arai, Laboratory Experimentations for New Hydrothermal Monitoring Systems Using ADCPs, Proceedings of 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, DOI: 10.1115 , 2013, 査読有

〔学会発表〕(計 2件)

新井 励,塚原 洋平,中田 将吾,前田 亘宏,島津 充,超音波流速計による実海域の懸濁物質の可視化,可視化情報全国講演会,2015年10月11日、京都工芸繊維大学松ヶ崎キャンパス(京都府・京都市)

K. Komaki, M. Shimazu, S.Kondo, Y.Onishi, F. Satoshi, R. Arai, Laboratory Experimentations for New Hydrothermal Monitoring Systems Using ADCPs, 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2013年6月10日、ナント(フランス)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

新井 励 (ARAI Rei )

大阪府立大学 工学研究科・准教授

研究者番号：60508381

研究者番号：

### (2)研究協力者

中田 将吾 (NAKATA, Syogo)