

令和元年6月15日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06912

研究課題名(和文) 熱水鉱床開発に向けたADCPによる懸濁物質の種類・濃度のリアルタイムモニタリング

研究課題名(英文) Real-time monitoring of suspended solids type and concentration with ADCP for seafloor massive sulfide deposits development

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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本課題は、超音波流速計(ADCP)による熱水鉱床の開発時に発生する異なる濁度の非接触計測である。日本周辺海域には海洋資源となる海底熱水鉱床が存在し、熱水鉱床の開発に際し周辺生態系に対する環境影響評価をするため、採鉱時に懸濁物質がどの程度発生・拡散・堆積するかを把握する必要がある。ADCPは流向流速計であるが同時に反射強度である散乱強度も計測しており、散乱強度から濁度の定量を試みた。まず、散乱強度から、超音波の距離減衰等を考慮した物理モデルにより濁度分布を推算した。さらに、濁度は複数の濁度応答の足し合わせと考え、ADCPにより推算した濁度から統計的手法により異なる懸濁物質濃度の情報を抽出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、海域調査で用いられる既存の計測器であるADCPの散乱強度データを用いることで船上・AUV・ROVより非接触で濁度の計測することが可能となるため、大幅な調査コスト削減となる。また、3次元流向流速データを取得すると同時に物質ごとの濁度を空間的に把握することが可能となり、高効率に海面下の情報が取得できる。世界的な人口増加にともない、資源の少ない日本は危機的状況に陥る危険性を有している。この課題を解決するうえで日本近海における資源開発。またそれに伴う世界に輸出できる技術開発は急務であることから、本研究から得られる成果は日本国の財産として将来の国を支える技術の一助となりえる。

研究成果の概要(英文)：Given that seafloor massive sulfide (SMS) deposits found in the western Pacific have been considered to be potential sources of metallic resources, there is a possibility that they will be mined in near future. To take measures against environmental impact during the mining of SMS deposits, it is important to measure components of hydrothermal origin with high temporal and spatial resolution on site. In this study, the author proposed a method to extract vertical distribution of the concentration of some kinds of suspended matter from observation data of ADCP. The authors used statistical analysis for the scattering intensity measuring in sea, assuming that the response to the each suspended matter. The result of this method well matched the turbidity and chl-a distribution. The author suggested use of statistical analysis to extract the independent signals are effective for non-contact measure of the vertical distribution of suspended matters with ADCP.

研究分野：海洋計測

キーワード：ADCP 濁度 浮遊懸濁物質 熱水鉱床 海中音響 統計解析

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

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

本研究は、ADCP と呼ばれる超音波式 3 次元流向流速計を用いて計測した散乱強度データから異なる懸濁物質の濃度を分離推定する手法の開発を行うものである。その手法として、ADCP がトランスデューサーを 4 個保有している点に注目し、同一計測層に対し、同時に 4 個の応答が得られることを利用する。つまり、4 個のトランスデューサーの各計測値は、複数種類の懸濁物質の応答がトランスデューサーごとに異なる重みで、独立した信号として混合されたものとし、主成分分析(PCA)、および独立成分分析(ICA)といった統計的な手法により、その混合している懸濁物質の種類ごとの濃度を推定する。

3. 研究の方法

① 物理モデルの構築

ADCP の散乱強度の計測値  $EI$  から、懸濁物質濃度を求める物理モデルを示す。懸濁物質の濃度  $M$  と、散乱強度の計測値  $EI$  との関係は、(1)式のように書ける。

$$\log M = \frac{1}{10} \{ K_r EI - 20 \log(\varphi R) - 2\alpha R \} + K_s \quad (1),$$

$R$  はトランスデューサーからの距離[m]、 $\alpha$  は音波に対する水の吸収係数[dB/m]、 $K_r$  は機器ごとの特性値、 $\varphi$  は近距離音場補正を表す。 $K_s$  は機器特性、粒子特性を表す未知のパラメーターとしてキャリブレーションするのが一般的である。散乱強度  $EI$  は、粒子特性や粒子径、さらにはバイアスの値( $E_{T_0}$ )を含んだ値として計測されているため、SN 比を考慮することで(2)式で表現できる。

$$\log \sum_{i=1}^n c_i = \frac{1}{10} \{ 20 \log(10^{K_r(EI - E_{T_0})/10} - 1) - 20 \log(\varphi R) - 2\alpha R \} + K_s \quad (2),$$

よって ADCP で計測した懸濁物質濃度  $M$  は(3)式のように複数種類の懸濁物質濃度の線形に足し合わせた結果となる。

$$M = \sum_{i=1}^n c_i \quad (3).$$

② 統計モデルによる信号解析

ADCP で計測した懸濁物質濃度  $M$  は、計測層に  $n$  種類の懸濁物質がある場合、それぞれの濃度をカオリン濁度  $c_n$  に換算した値の線形足し合わせとなる。ADCP の 4 個のトランスデューサーで計測した場合、同一計測層に対して異なる角度で超音波を送受信するため、(4)式で表すように  $i$  層における各懸濁物質濃度ごとに深度方向に不変な混合の重み  $a_j$  が掛かった状態で混合される。

$$M_i = a_1 c_{i1} + \dots + a_n c_{in} = \sum_{j=1}^n a_j c_{ij} = a c_i \quad (4),$$

また、ADCP は 4 個トランスデューサーを持ち、水深方向に  $r$  層の計測値があるので、懸濁物質濃度  $M$  は  $4 \times r$  行列で表され、計測時における加法的ノイズ( $noise_i$ )も考慮すると、混合行列  $A$ 、濃度の行列  $C$  とすると、

$$M = AC + Noise \quad (5),$$

と表せる。ノイズ成分も混合の重みが掛かった状態で観測されるとすると、

$$M = A'(C + Noise) \quad (6),$$

となる。よって行列  $A'$  の逆行列  $A'^{-1}$  を推定できれば、ノイズを分離し、各浮遊懸濁物質の濃度が推定できる。各浮遊懸濁物質の濃度を推定するために本研究では統計解析である主成分分析と独立成分分析を行った。

主成分分析(Principal Component Analysis:PCA)とは、もとの変数の一次結合で表される新たな主成分と呼ばれる変数を作成し、次元圧縮や主成分から有益な情報を読み取る方法である。

主成分は、その分散を最大にする係数で結合される変数であるため、もとのデータの情報を多く有している。観測信号  $X$  は、分散共分散行列の固有ベクトル  $T$  および主成分スコア  $Y$  から(7)式のように表せる。

$$X=YT \quad (7).$$

観測信号  $X$  に、ADCP によって計測された濁懸濁物質濃度  $M$  を用いる。PCA で求めた 4 個の主成分スコア  $Y$  はもとデータのばらつき具合の特徴を表しており、海域中の特徴ある情報が抽出されていると考えられる。ADCP の計測値は、濁度、および動物プランクトン、植物プランクトンの 3 成分の影響により大きく特徴付けられているため、主成分スコア  $Y$  と、それらの挙動を比較する。また分散値の低い主成分をノイズとして抽出でき、主成分同士は直交関係にあるため、ノイズがガウス分布を有するならば、ノイズは信号源とは独立な関係として削減できる。よって、PCA によりノイズの影響を削減した信号源のデータを抽出することが可能である。

一方、独立成分分析(Independent component analysis : ICA)は、信号源が混合された多次元観測信号に対して統計的独立性を用いて混合前の信号源を推定する手法である。統計的に独立な  $n$  個の信号発生源を  $s = (s_1, \dots, s_n)^T$  とする。これらの信号が線形に混ざったものを  $n$  箇所観測したとし、観測信号を  $x = (x_1, \dots, x_n)^T$  とする。また信号の混ざり方の係数を  $A$  とすると、

$$x = As \quad (8),$$

と表すことができる。ここで行列  $A$  は深度  $r$  に依存せず一定であるとする。ICA では、観測信号  $x$  のみを用いて次式

$$y = Wx \quad (9),$$

で定まる推定信号  $y$  の各成分が互いに独立になるような作用素  $W$  を求める。作用素  $W$  は行列  $A$  の逆行列に相当すれば、 $y$  が元の信号  $s$  と一致し、信号が分離できる。 $W$  は結果として出る  $y$  の独立性を見ながら更新する。独立性の指標として、 $y$  の非ガウス性を最大化することが ICA の手法である。

#### 4. 研究成果

熱水周辺海域における懸濁物質の種類ごとの濃度を推定するにあたり、当初から熱水周辺海域まで航海観測を実施するのは現段階では現実的では無く、非効率であることから、まずは周辺沿岸域において海中の異なる懸濁物質濃度を推定可能か実験した。対象海域は大阪府泉佐野市のりんくう公園内海において、複数種類の懸濁物質の計測実験を行った。りんくう公園内海は水深が 3.0~4.0m 程度になる海域で、表層から底層まで、多くのプランクトンや無機懸濁物質が存在する。ADCP を海面に固定点で浮かせ、水深鉛直方向の濁度(便宜上、ADCP 濁度と呼ぶ)を取得する。取得した水深方向の散乱強度データを「研究の方法①」で示した物理モデルにより計算することで超音波の距離減衰や海水による吸収の影響等を除いた散乱強度データを算出する。さらに「研究の方法②」で示した統計解析をすることで、海水中に含まれる異なる懸濁物質の鉛直分布を推定することに成功した。沿岸域の主な懸濁物質はプランクトンとその他の無生物懸濁物質と考えられる。そこでプランクトンはクロロフィル計で無生物懸濁物質は濁度計で代替し計測することで妥当性の検証を行った。Fig. 1 に示すように ADCP の散乱強度データに対し主成分分析より算出された PC2 と独立成分分析より算出された IC1 の鉛直分布と、クロロフィル計により計測された chl-a の傾向は、いずれも中層の水深 1.8m 付近にピークを持ち、同様の傾向を示す結果となった。また、Fig. 2 に示すように主成分分析より算出された PC1 と独立成分分析より算出された IC2 の鉛直分布と濁度計により計測された濁度の傾向は、いずれも底層の水深 3m 付近から上昇するといった同様の傾向を示す結果となった。

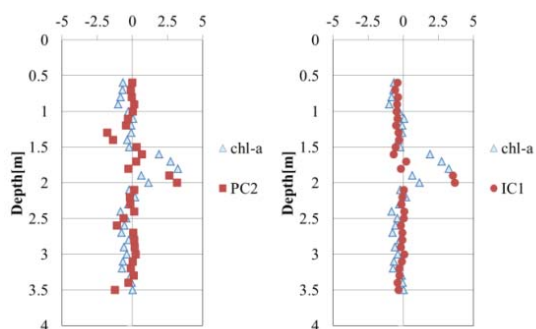


Fig.1 Comparison between chl-a and profile data of principal component and independent component at 11:38

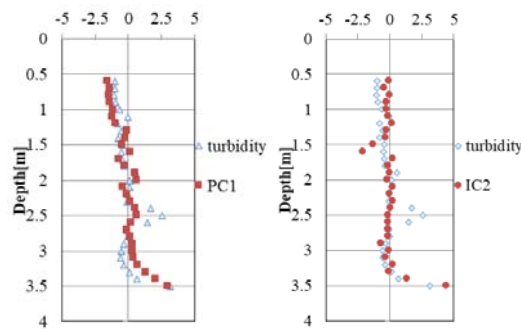


Fig.2 Comparison between turbidity and profile data of principal component and independent component at 11:38

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 1 件）

Syogo Nakata, Masaki Tachibana, Rei Arai, Yohei Tsukahara, “Method of measuring depth profile of suspended matter using ADCP and statistical analysis”, Proc. of 2018 OCEANS - MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans, 2018, DOI 10.1109/OCEANSKOB.2018.8559168, 査読無し

〔学会発表〕（計 1 件）

Syogo Nakata, Masaki Tachibana, Rei Arai, Yohei Tsukahara, “Method of measuring depth profile of suspended matter using ADCP and statistical analysis”, 2018 OCEANS - MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans, Kobe, 31, May, 2018

〔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

無し

## 6. 研究組織

### (1) 研究協力者

研究協力者氏名：立花 雅樹

ローマ字氏名： Masaki Tachibana

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。