

独立成分分析を用いた海底自然電場データのノイズ除去

佐藤真也*・後藤忠徳***・笠谷貴史**・川田佳史**,*3・岩本久則**・北田数也**

要 旨

金属鉱床探査などを目的とした自然電位探査は、陸上では従来から行われている。水中においても自然電場探査は行われており、近年では深海における自然電場観測によって海底熱水鉱床を探査する試みも始まっている。海水中では自然電位信号が小さいため、電場データに混入したノイズを除去する必要がある。しかし、複数の並行観測データを足し合わせて平均化する従来の手法（スタッキング）では、並列データに混入したノイズの間に相関が認められる場合、このノイズを除去することは難しい。そこで、海底下からの電場信号とノイズの独立性に着目し、独立成分分析（Independent Component Analysis：ICA）と呼ばれる多成分の混合信号を複数の独立な信号に分離する手法を用いて、ノイズの除去および信号の抽出を試みた。

まず曳航式自然電場探査により取得した電場データに対してICAの適用実験を行った。海底熱水鉱床や海底湧水域から離れた場所での電場データを解析した結果、本データには自然電場信号は含まれていないことが明らかとなり、抽出したノイズの原因を推定することができた。さらに、本データに対し、海底下からの自然電場信号を模した仮想的な信号成分を足しあわせて、擬似的な観測データを作成した。この擬似的データからICAを用いてノイズを抽出および除去した結果、スタッキングよりも明瞭に仮想的な信号成分を抽出することができた。

次に、自律型無人探査機を用いて取得した、海底熱水噴出域周辺での電場データに対してICAを適用した。その結果、スタッキングでは抽出することができなかった自然電場信号をICAにより抽出することができ、抽出および除去したノイズの原因を推定することができた。

以上からICAによるノイズ除去・信号抽出法は、スタッキングでは除去することが困難であるノイズを除去可能であると結論付けられる。本手法は海底自然電場探査だけでなく、陸上・海底での種々の電磁・電気探査にも広く適用可能であると思われる、より高精度の地下構造情報抽出に利用可能であると考えられる。

キーワード：自然電位・ノイズ除去・独立成分分析・海底熱水鉱床・沖縄トラフ

1. 緒 言

金属鉱床では、酸化還元反応による直流的な電位が自然状態で発生していることが知られている。そこで、地表における自然電位分布を調べることにより、潜頭性の鉱床を発見することが可能である。このような調査方法は自然電位探査と呼ばれており、古くから陸上での鉱床探査に用いられてきた（例えば Sato and Mooney, 1960）。

水中においても自然電位探査は実施されており（Heinson et al., 1999; Heinson et al., 2005）、海底下の地下水流動や鉱脈調査に用いられてきた。Fig. 1 に観測時の概念図を示す。水中での自然電位観測の際には、測線に沿って電極アレイ（固定ダイポール長の複数個の電極）を曳航しつつ、複数の電場成分を並行かつ同時に測定する。これにより、水中での自然電場（自然電位を測線方向に微分したもの）の空間分布を得ることができる（自然電場を測線方向に

2016年12月9日原稿受付；2017年3月27日受理

* 京都大学工学研究科都市社会工学専攻
〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂 C1-2 号館

** 国立研究開発法人海洋研究開発機構
〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町 2-15

*3 東北大学 災害科学国際研究所
〒980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1

第134回(平成28年度春季)学術講演会にて一部を発表

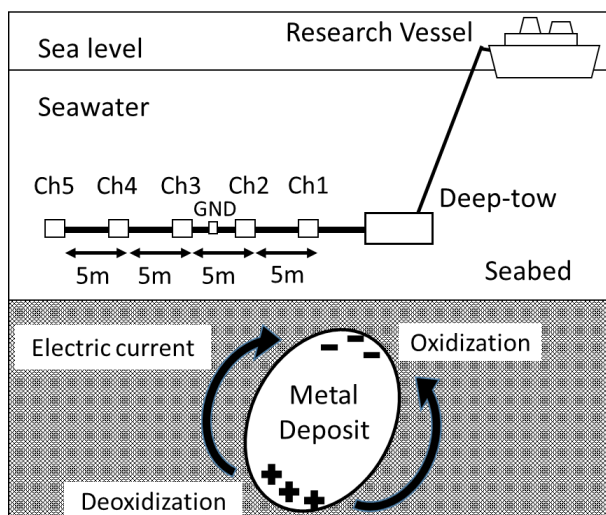


Fig. 1. Schematic view of marine self-potential (SP) exploration by a deep-tow system (during the YK15-06 cruise).

積分することにより、測線沿いの自然電位分布が得られる)。海底下に金属鉱床が存在する場合、陸上と同様に、海底面に近い部分では酸化反応が進行し、海底下の部分では熱水による還元反応が進行するため、自然電場が発生する。陸上では自然電場は空中には発生しないが、海中の場合は導体である海水中にも自然電場は及ぶ。このため、海中曳航型の自然電場探査は、陸上での自然電位探査方法と比べて非常に効率よく自然電位分布を把握することができる。この特性に着目して、近年は海中での電場観測による海底熱水鉱床探査も行われつつある（笠谷ほか, 2016）。海底熱水鉱床域では他の物理探査（海底電気探査・海底電磁探査・地震探査など）も並行して行われているが、海底自然電場探査の簡便さはこれらに先立つ広域探査と位置づけられると期待されている。

しかし、深海においては、海水の比抵抗が $0.3 \Omega\text{m}$ 程度と低いため、陸上と比べると自然電場信号は小さいと予測される。従って、測定した電場データに（陸上では問題とならないような）小さなノイズが混入するだけでも自然電場分布を得ることが困難となる場合が想定される。そこで、測定データからノイズを適切に抽出および除去し、海底下から発せられる自然電場信号を抽出する必要がある。

自然電場データに対する従来のノイズ除去法では、基準値から一定以上離れている測定値を除いた後、複数の並行観測データを足し合わせて平均化する手法（スタッキング）によってノイズの低減がなされてきた（Heinson et al., 1999）。しかし、並行観測データのノイズ間に相関が認められる場合、このようなノイズをスタッキングにより除去することは困難である。そこで本研究では、近年、脳波や音声の解析に用いられている「独立成分分析 (Independent Component Analysis: ICA)」という、多成分の混合信号を独立な信号に分解できる手法を電場データに

適用し、スタッキングでの除去が困難なノイズを抽出および除去が可能かどうかを検討した。さらに、熱水噴出地域で得られた海底自然電場探査へ本手法の適用を試みた。

本研究では、まず ICA の概要を説明する。次に熱水噴出地域から離れた場所で得られた電場データに対して ICA を適用し、ノイズの抽出を試みる。さらに、電場の生データに対して仮想的な信号成分を足し合わせた擬似的観測データを作成し、ノイズと仮想信号の分離テストを行う。最後に、海底熱水噴出域周辺で得られた電場データに対して本手法を適用し、海底下からの自然電場信号の抽出を行う。以上を通じて、海水中で測定された自然電場データのノイズ除去における ICA の適用可能性について議論を行う。

2. 手法

本研究で着目する独立成分分析 (ICA) は、多変量解析の手法の一つで、互いに独立な原信号が線形的に結合した混合信号を複数点で観測される場合に、それらの混合信号から原信号を分離・復元する手法である (Hyvärinen et al., 2005)。ICA は Jutten and Herault (1991) により新しいブラインド信号源分離の手法として提案され、Comon (1994) や Amari and Cardoso (1997) らにより基礎的な研究がなされ、現在までに様々な分野で研究・開発が行われている (Hyvärinen et al., 2005)。ここではその概要について簡単に述べる。

まず初めに n 個の独立な原信号 \mathbf{S} が式 (1) に示す行列で与えられ、我々が観測可能である混合信号 \mathbf{X} が式 (2) に示す行列で与えられるとする（ただし、 $\mathbf{s}_1 = \{s_1(t=1), s_1(t=2), \dots\}^T$ ）。

$$\mathbf{S} = \{\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \dots, \mathbf{s}_n\}^T \quad (1)$$

$$\mathbf{X} = \{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n\}^T \quad (2)$$

このとき、混合信号 \mathbf{X} は混合行列 \mathbf{H} を用いて、式 (3) のように互いに独立な原信号 \mathbf{S} の線形結合で表されると仮定する。この際、混合行列 \mathbf{H} が時間によらず一定かつ正則行列という条件が必要である。

$$\mathbf{X} = \mathbf{H}\mathbf{S} \quad (3)$$

ICA では、混合信号のみを用いて、混合行列 \mathbf{H} の逆行列に相当する分離行列 \mathbf{W} および原信号に相当する互いに独立な分離信号 \mathbf{Y} を求めることができる。

$$\mathbf{Y} = \mathbf{W}\mathbf{X} \quad (4)$$

分離行列 \mathbf{W} および分離信号 \mathbf{Y} を求めるための独立性の評価基準として相互情報量や平均情報量、尖度が利用されている (Hyvärinen et al., 2005)。本研究では、複数の原

信号が線形結合した混合信号は、振幅の頻度分布などの統計学的性質が中心極限定理によりガウス分布に近づくことに注目し、非ガウス性を独立の尺度とした。非ガウス性を式 (5) に示した平均情報量 $H(x)$ ($p(x)$ は確率変数 x の確率密度関数、 E は期待値) で近似し、分離信号が優ガウスのな確率分布であるラプラス分布 (確率密度関数は式 (6)) に従うとし、その平均情報量を最小化するような分離行列 \mathbf{W} を導出した (Hyvärinen et al., 2005)。具体的には、主成分分析 (Principle Component Analysis : PCA) を用いて混合信号を無相関化し、ニュートン法と Gram-Schmidt の正規直交化を用いることで、各々が無相関かつ平均情報量 (式 (5)) が最小となるような分離行列を求めた (Hyvärinen, 1999; Hyvärinen et al., 2005)。混合信号を PCA で前処理した後、ICA により分離信号を求めた例を Fig. 2 に示す。2つの原信号が独立である場合、その相関図は軸に沿って直交しているが (Fig. 2 左)、混合信号 (観測信号) の相関図は軸と斜交しており、相関があることがわかる (Fig. 2 中央左)。この混合信号に対して、PCA で前処理を行うと、得られた2つの信号の相関図は直交 (無相関) となるが、軸には沿っておらず、原信号とは一致しない (Fig. 2 中央右)。PCA で前処理後の信号に対して ICA を適用することで、相関図は直交のまま、軸に沿うように変換され、2つの原信号に対応する分離信号が得られる (Fig. 2 右)。本研究では以上の式に基づく ICA のプログラムを作成し、以後の解析に適用した。

$$H(x) = E \{-\log p(x)\} \quad (5)$$

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} \exp \{-\sqrt{2}|x|\} \quad (6)$$

ICA には前処理として、混合信号の振幅の平均を 0 とする中心化が必要であり、本研究では、最小二乗法により直線近似したトレンドを除去することで中心化を行った。

本研究において解析する混合信号は、並行する複数の電極 (電極アレイ) を用いて観測した電場データである (例 : Fig. 1)。電極アレイが海底からある程度離れており (例えば 50 m)、自然電場の信号源 (金属鉱床など) が海底下に埋没している場合、信号源から各電極ダイポール (各記録チャンネル) までの距離は概ね等しいため、海底下で発生した自然電場信号は各チャンネルで同時観測され、互いに概ね同じ振幅になると仮定できる。ここで、 N 個のチャンネル (Ch と略) で観測した場合、観測された電場信号 (Ch1, Ch2, ..., ChN) は式 (4) のように分離信号 \mathbf{Y}_1 から \mathbf{Y}_N の線形結合になるとする。分離信号の観測電場に対する係数に着目すると (式 (7)), k_{1j} から k_{Nj} の値が概ね等しい値を示す分離信号 \mathbf{Y}_j は、海底下からの自然電場信号と考えることができる。また、分離信号 \mathbf{Y}_j に係数 k_{ij} をかけたものが、 i 番目のチャンネルの信号成分となる。一方、 k_{1j} から k_{Nj} の値がばらつく場合 (例 : 符号が異なるなど)、分離信号 \mathbf{Y}_j は海底下からの自然電場信号ではなく、電極近傍で発生しているノイズであると考えられることができる。

$$\begin{aligned} \text{Ch1} &= k_{11} \times \mathbf{Y}_1 + \dots + k_{1N} \times \mathbf{Y}_N \\ &\vdots \\ \text{ChN} &= k_{N1} \times \mathbf{Y}_1 + \dots + k_{NN} \times \mathbf{Y}_N \end{aligned} \quad (7)$$

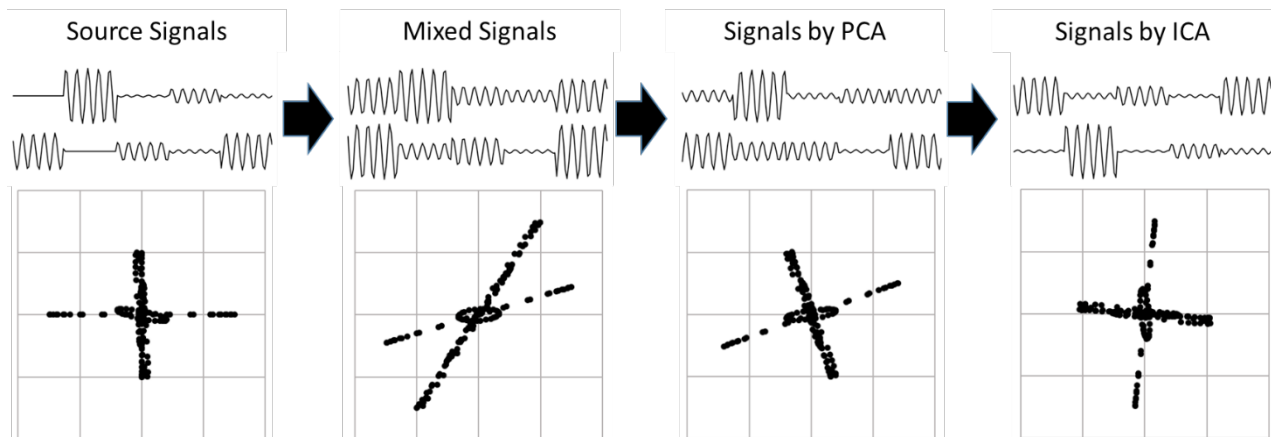


Fig. 2. Graphic presentation of detailed processes showing how ICA can decompose multi-component mixed signals into independent two signals. Here, two source signals are assumed to be independent. The cross-plot of two signals shows the orthogonal lines along the axes (left). The cross-plot of two mixed signals (i.e., observed data) shows lines oblique to the axes (middle-left). After preprocessing by PCA (mid-right), the cross-plot shows the orthogonal lines. However, they do not fit the axes. By ICA, the entropy of each signal is minimized. The final cross-plot portrays orthogonal lines along the axes (right), quite similar to the source signals.

3. 実データへの ICA の適用実験

本章では沖縄沖海底において曳航型自然電場探査で取得した電場データのうち、海底熱水噴出地域から離れた地域での電場データを用いて、ICA の適用実験を行った。まず得られた電場データに対して ICA を適用し、ノイズ成分の抽出が可能かどうかを試みた。次に、電場データの生記録に対して、海底下からの自然電場信号を模した仮想的な信号成分を加えたものを作成して、これに ICA を適用した。以上の実験を通じて、スタッキングでは除去が困難であるノイズを ICA により抽出および除去できるかどうか、また信号成分をより明瞭に抽出できるかどうかを調べて、ICA によるノイズ除去性能の評価を試みた。

まず ICA によるノイズ抽出を試みるために、海洋研究開発機構の所有する深海潜水調査船支援母船「よこすか」の YK15-06 調査航海において取得された電場データを使用することとした。YK15-06 航海では、沖縄本島から約 110 km 北西に位置する伊是名海穴（水深約 1500 m）の海底面付近で、深海曳航体（Deep-tow）を用いた自然電場探査を実施している（Fig. 1）。曳航体後方にはアンテナケーブルを装着しており、アンテナケーブル沿いの 5 箇所に銀-塩化銀非分極電極を 1 つずつ配置している。各電極間の距離は 5 m である。Ch2 と Ch3 の間に銀-塩化銀非分極電極である基準電極（GND）を置き、各電極と基準電極の間の電位差（計 5 成分：Ch1 ～ 5）を深海曳航体に搭載した増幅装置およびレコーダーにより記録した。サンプリングレートは 50 Hz である。曳航体の位置（緯度・経度・水深）は調査船の音響測距システム（SSBL）により測定される。また曳航体の海底からの高度は曳航体に搭載した高度計により、また海水の電気伝導度・温度や曳航体の深さは曳航体に搭載した CTD（Conductivity Temperature Depth profiler）センサーによりそれぞれ測定される。YK15-06 航海では曳航式の自然電場探査は 2 日間に渡って実施されている（2015 年 4 月 29 日～30 日）。4 日 29 日の曳航調査（約 10 時間）では、長さ約 2 km の同一測線に対して、2 往復しつつ自然電場探査を実施した（曳航高度を片道毎に 4 通りに変化させた：高度 50 ～ 60 m, 30 m, 20 m, 5 m）。その結果、海底熱水噴出地域やマウンド地形上では明瞭な自然電場異常±数 mV/m が観測された。同一測線上での複数曳航においてその再現性が高いこと、また曳航高度が低いほど自然電場異常の振幅が大きくなることなども確認できた（例えば、Kawada and Kasaya, 2016, 笠谷ほか, 2016）。

本研究では、まず電場データに含まれるノイズ成分の抽出に注目するために、上記のような海底熱水活動に伴う自然電場異常を含まない時間帯の観測データの解析を実施することとした。具体的には、大振幅の自然電場異常を含まず、曳航高度が最も高く（50 ～ 60 m）かつ熱

水噴出地域から 200 m 以上離れており、海底地形も平坦（地形変化が 5 m 以下）な場所で得られた電位差データ（4 日 29 日 00:23:20 ～ 00:25:40：時刻は協定世界時 UTC）に対して解析を行った（曳航測線長は水平方向に約 300 m）。5 成分の電位差データに対して、それぞれ基準電極までの距離（曳航体側が正とする）、すなわち 7.5 m, 2.5 m, -2.5 m, -7.5 m および -12.5 m で除し、その毎秒値（1 Hz サンプリング値）を各 Ch で観測した電場データとした（Fig. 3:以降、各電場データを Ch1, Ch2 ... と呼ぶこととする）。これらに対して ICA を適用し、分離信号の推定を実施した。また本データには海底熱水鉱床によるような自然電場信号が含まれていないと考えられる。そこで、後述するような仮想的な電場信号を電位差データの生記録に付加し、この擬似的観測データに対して ICA を適用することでノイズと仮想信号の分離が可能かどうかを検証する。

4. ICA 適用実験の結果

4.1 ノイズの抽出結果

5 つの観測電場（Fig. 3）に対して ICA を適用した結果、5 つの分離信号と各 Ch の電場信号に対する係数が得られた（Fig. 4）。得られた分離信号の、各 Ch の観測電場に対する係数をみると、5 つとも符号が等しくかつ大きさが同程度のものは存在しないことが明らかとなった（例えば、分離信号 Y1 に関する係数 $k_{11}, k_{21}, k_{31}, k_{41}, k_{51}$ をみると、Ch1 では正だが、Ch2 ～ 5 では負である）。海底下からの自然電場信号は各 Ch において、同時に同程度の振幅で観測されることから、本時間帯において自然電場信号は観測されていないと言える。本データ取得時には、海底熱水活動に伴う自然電場異常は含まれていないと予想されたため、この結果は妥当であると思われる。

次に、得られたノイズの要因について考察するために、まず観測電場（Fig. 3）を全て用いてスタッキングした

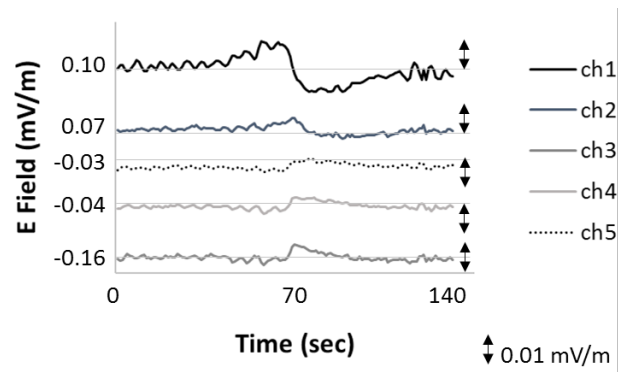


Fig. 3. Electric field observed using the deep-tow system (Fig. 1). The record starts from 00:23:20 and stops at 00:25:40 UTC, April 29, 2015.

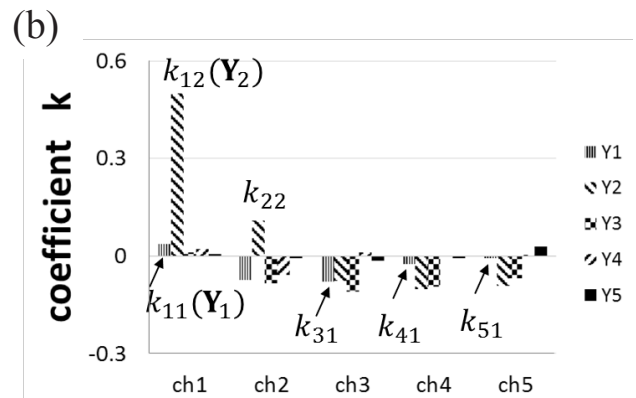
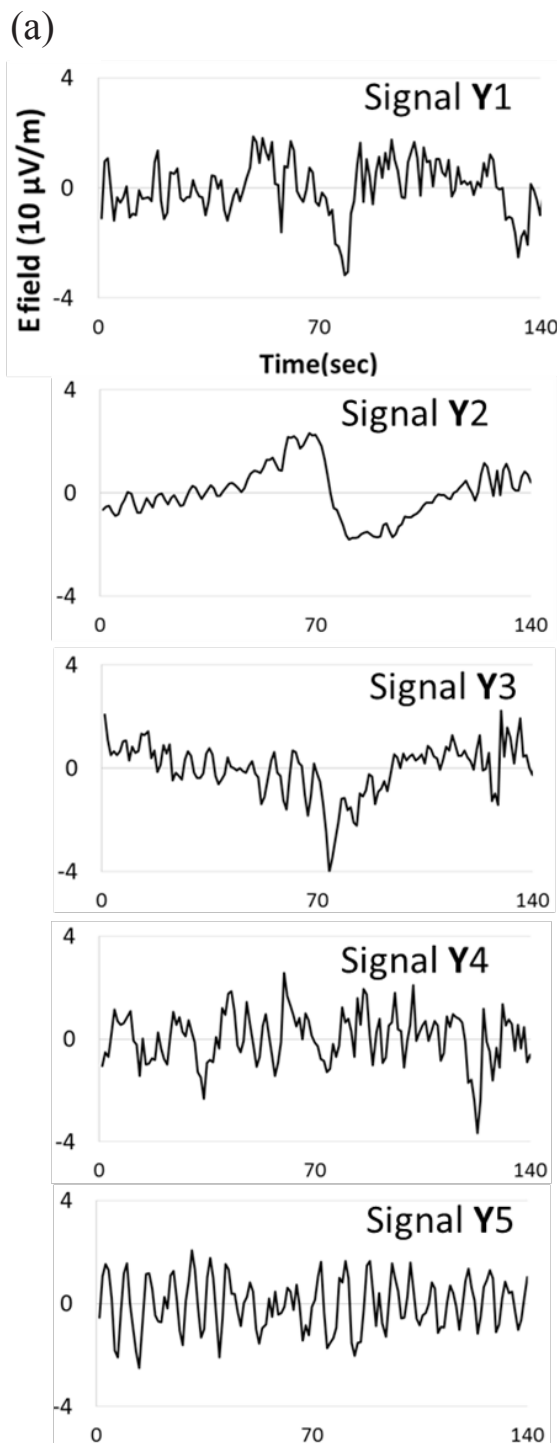


Fig. 4. (a) Separated signals Y_1, \dots, Y_5 from observed data in Fig. 3 by ICA. (b) Coefficient (k_{ij}) to observed data.

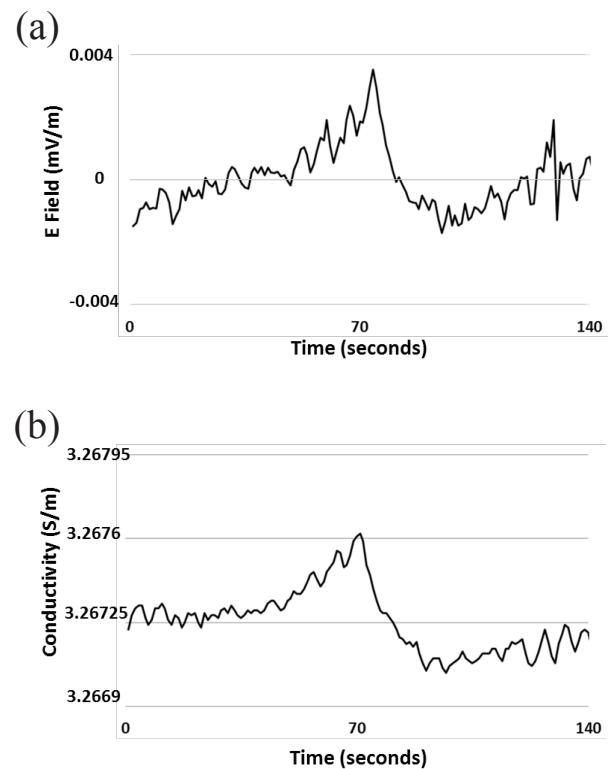


Fig. 5. (a) Stacked (averaged) electric field from all five channels in Fig. 3. (b) Temporal change of seawater electrical conductivity simultaneously measured by the CTD sensor.

波形と、海水の電気伝導度の時間変化を比較した (Fig. 5)。この2つには高い相関が見られるため、海水の電気伝導度変化によって電場ノイズが生成されている可能性が示唆される。そこで、ICAによって得られた分離信号のうち、各電場Chに対する係数が比較的大きい分離信号 Y_2 と Y_3 (Fig. 4) について海水の電気伝導度との相関を調べた。また、分離信号 Y_2 と海水の電気伝導度の変化について、3秒毎に移動平均をとったものの相関

係数を調べたところ、0.854 と高い相関性が認められた。一方、同じく3秒毎に移動平均をとった分離信号 Y_3 (Fig. 4) に対しては、分離信号 $Y_3(s+\alpha)$ (α : 位相差 sec) のように位相差を加えた上で、海水の電気伝導度の変化との相関係数を調べたところ、 $\alpha=10$ sec のとき相関係数は最大 (0.837) となった。また、分離信号 Y_2 の係数はCh1, Ch2 に対する値が大きく、分離信号 Y_3 の係数はCh3, Ch4 に対する値が大きかった。以上のことから、

ICAによって分離された成分のうち、大きな成分（ \mathbf{Y}_2 , \mathbf{Y}_3 ）は海水の電気伝導度変化に起因するノイズであることが分かった。また、このノイズはCh1, Ch2については海水の電気伝導度変化と位相ずれなく発生するが、Ch3, Ch4においては位相ずれを伴い発生している様子が明らかとなった。スタッキングではこのような詳細なノイズの様子は不明であるが、ICAによってノイズの分離が可能となり、海水の電気伝導度変化に伴うノイズの定量化が可能となったと言える。ノイズの発生要因については後に議論を行う。

4.2 仮想的信号の抽出結果

次に、海底下からの自然電場信号は観測していないことが明らかとなった観測電場データ（Fig. 3）に対して、海底下からの自然電場信号を模した信号成分を仮想的に加えた。本研究では、Fig. 6bに示した約0.008 mV/mのピークを仮想的な自然電場信号とした。この仮想的な信号は、YK15-06航海において、熱水噴出地域近傍で観測された自然電場異常の波形を参考にして作成された。Fig. 3に示した各電場Chに対し、この仮想的信号を同じ振幅で足しあわせて、仮想的な観測電場波形を作成した（Fig. 6a）。これらの仮想的な観測波形に対してICAを適用し

ノイズを抽出および除去し、与えた仮想的な電場信号を抽出することで、深海曳航方式の自然電場探査に対するICAの適用妥当性を検討した。

仮想的な観測電場データに対してICAを適用した結果、5つの分離信号が得られた（Fig. 7a）。5つの分離信号のうち、分離信号 \mathbf{Y}_3 のみ各チャンネルに対する5つの係数の符号が等しく、その大きさも同程度である（Fig. 7b）。従って2章で述べたように、分離信号 \mathbf{Y}_3 が仮想的な信号に相当する分離信号であると判断できる。分離信号 \mathbf{Y}_3 以外の分離信号を取り除いた仮想的な観測電場（Ch1～Ch5の平均）をFig. 8aに示した。Fig. 8bには、全Chのスタッキング（平均化）波形と、仮想的信号（Fig. 6b）からトレンド成分を除去したものも示している。3つの波形を比較したところ、ICAを適用することで、スタッキングでは除去することが困難であった5 $\mu\text{V}/\text{m}$ 程度のノイズ（Fig. 8a, bの60～100 secの時間帯）を除去することができた。しかしながら、ICAを適用した信号も仮想的な信号には完全に一致していないため（特にピーク部分）、ノイズ除去の性能を定量的に評価するために、ここでは下式で示される平均二乗誤差（RMSE）を導入する。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - s_i)^2} \quad (8)$$

N: データ数 y_i : 処理後の信号 s_i : 仮想的信号

スタッキングによる処理では $\text{RMSE} = 1.01 \times 10^{-3}$ mV/mであるが、ICAを適用した場合には $\text{RMSE} = 0.70 \times 10^{-3}$ mV/mとなり、ICAを適用することでRMSEが30%程度減少した。以上より、ICAによる解析結果はスタッキング処理よりも信号を明瞭に抽出できており、曳航式自然電場探査に対するノイズ除去および信号抽出においてICAの適用は有効であると考えられる。

5. ICAによる熱水噴出地域での自然電場信号の抽出

本章では深海巡航探査機「うらしま」を用いた自然電場探査で取得した電場データに対してICAを適用し、電場データからのノイズの抽出・除去、および海底下からの自然電場信号の抽出を試みた。

海洋研究開発機構支援母船「よこすか」YK15-14調査航海においては、深海巡航探査機「うらしま」を用いた自然電場探査が実施された。深海巡航探査機「うらしま」は自律型無人探査機（Autonomous Underwater Vehicle: AUV）であり、プログラムされた設定に従い、海底付近を自力で航行することができる（吉田ほか, 2011）。AUV「うらしま」は船舶よりも海底に近いところから探査を行うため、海底熱水調査や堆積構造調査、地すべり調査など、種々の海底探査での新たなプラットフォームとして活用されている（笠谷ほか, 2007; Kumagai et al., 2010;

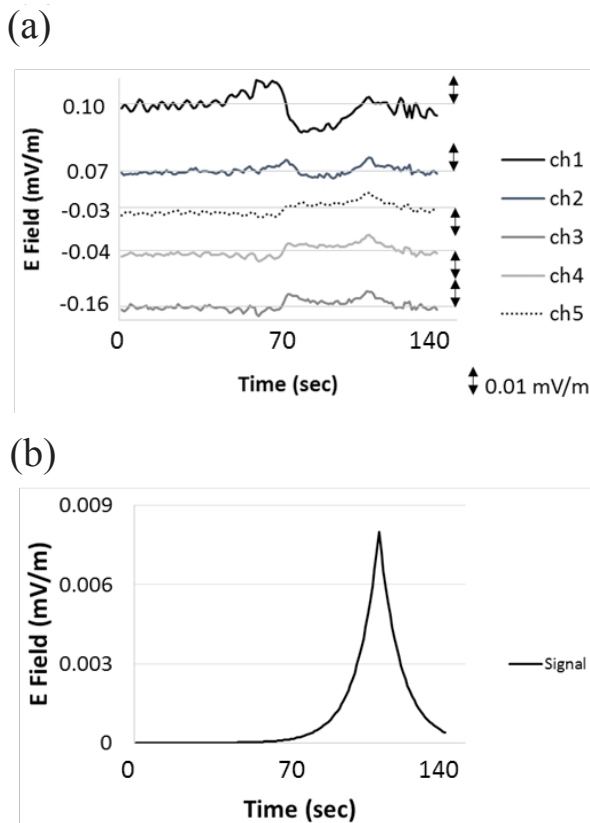


Fig. 6. (a) Synthetic electric field used for test analysis by ICA. These are made based on the observed electric field in Fig. 3 with adding a hypothetical signal simulated in (b).

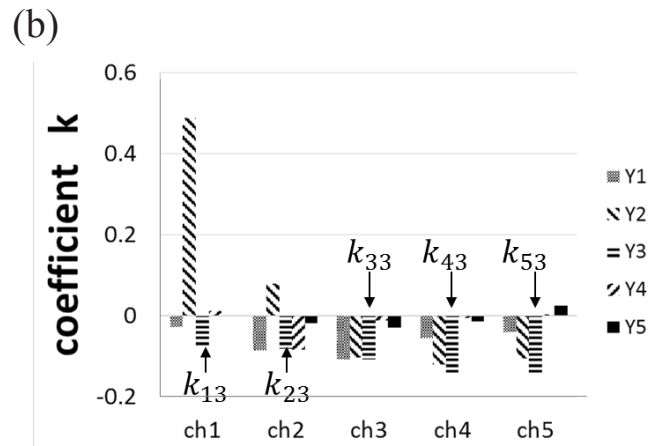
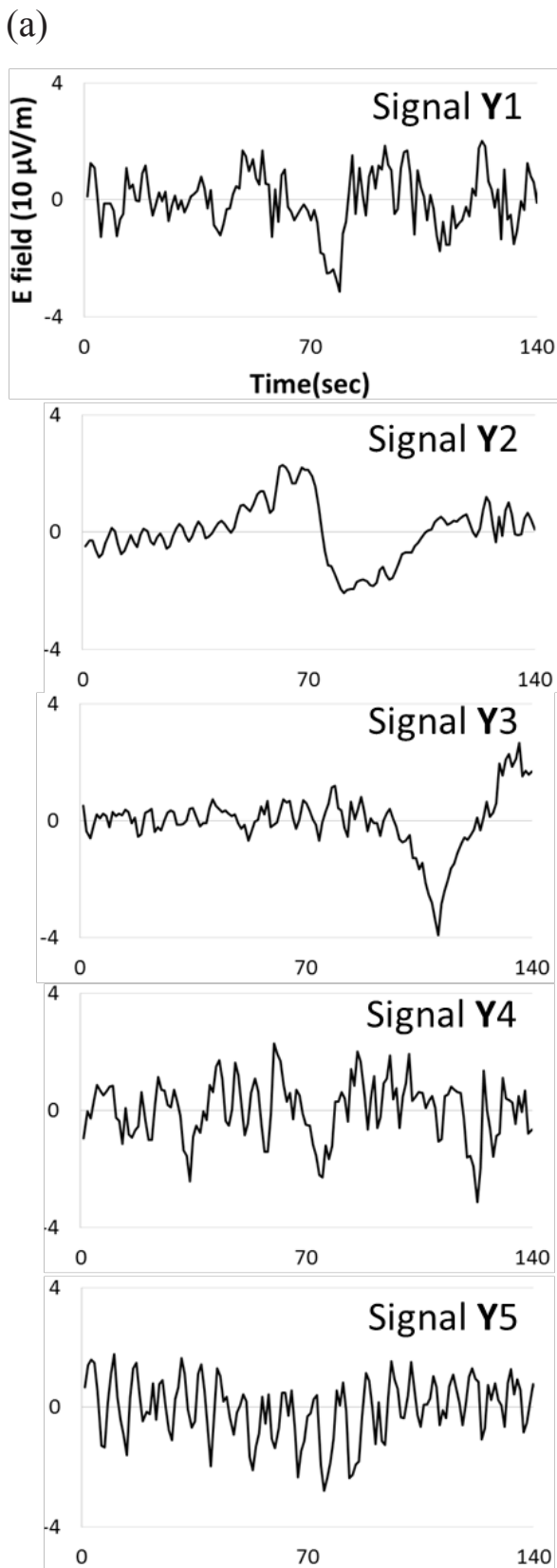


Fig. 7. (a) Separated Signals Y_1, \dots, Y_5 from synthetic data depicted in Fig. 6(a) by ICA. (b) Coefficient (k_{ij}) to synthetic data.

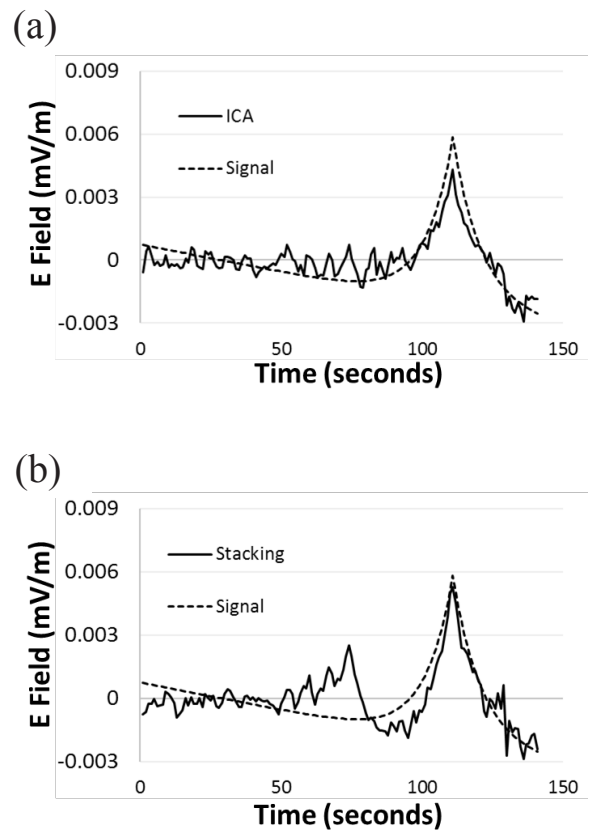


Fig. 8. (a) Noise-removed electric field (solid curve) by ICA. (b) Stacked (averaged) electric field (solid curve). Hypothetical signal Fig. 6(b) is also shown as a broken curve (linear trend is removed) in both (a) and (b).

Kasaya et al., 2011; Kasaya et al., 2015)。YK15-14 航海での自然電場探査の調査海域は、沖縄諸島久米島西方沖の海底熱水噴出地域およびその周辺である。本研究では、このうち 2015 年 8 月 16 日に取得された電場データを解析する。この潜航では、AUV「うらしま」は熱水噴出地域を含む東西約 200 m・南北約 140 m の地域において自然電場探査を実施した。本地域では、海底地形の走向は北北東-南南西方向に卓越しており、熱水噴出に関連すると思われる微細な凹凸地形域も同方向に延伸している (Fig.14a)。そこで、北北東-南南西の走向を持つ自然電場異常があると仮定して、高度約 100 m を保ちつつ、AUV を東西方向へ航行させて、面的な電場分布を取得した。同時に、「うらしま」には CTD センサー、マルチナロービーム測深機およびサイドスキャンソナーが搭載されており (笠谷ほか, 2007)、海水の電気伝導度や高度などのデータ、海底地形および表層底質を調査した。なお AUV の航行高度が低いほど観測される自然電場異常は大きくなると期待されるが、自然電場探査と同時に実施した海底地形調査の制約 (測深時のスワ幅を広げるため) から航行高度を約 100 m とした。

AUV「うらしま」に取り付けられた各電極の位置は Fig. 9a の通りである。AUV「うらしま」内部に基準電極 (GND) を設置し、外部には Ch1~Ch4 の電極を取り付けた。本調査で使用した電極は全て、銀-塩化銀非分極電極であり、GND は側面に貼り付ける場所を確保することが困難であったため内部に設置した。なお、「うらしま」内部にはもう 1 つ電極 (Ch5) も設置したが、S/N 比が非常に悪いこと、また他の電極とは離れた位置に取り付けられていたため、以後の解析に用いていない (Fig. 9 から省略した)。各電極と基準電極の間の電位差 (計 4 成分) を AUV「うらしま」に搭載した増幅装置およびレコーダーにより記録した。そのときのサンプリングレートは 5 Hz である。Ch1~4 は同一平面上にあると見なして隣接する 2 つのチャンネルの差分を電極間距離 (m) で除すことで、AUV 船尾方向の電場成分 (計 3 成分) を求めた。以降は、電極 Ch2 と電極 Ch1 間の電場を E2-1 と呼ぶこととし、以下同様に Ch3-Ch2 間を E3-2、Ch4-Ch3 間を E4-3 と呼ぶこととする。

解析に先立って、E2-1, E3-2, E4-3 で期待される電場波形を理論計算から見積った。ここで、海水の比抵抗を $0.3 \Omega\text{m}$ 、海底下の比抵抗を $1.0 \Omega\text{m}$ 、航行高度 100 m、自然電場の発生源である電流源の強度を 1.5 A と仮定する。Fig. 1 のように、鉸体の上部にみられる負の電流源が海底下 10 m に存在する条件の下、AUV「うらしま」の基準電極 (GND) と電流源の水平距離を $X(\text{m})$ として ($X < 0$ の時は「うらしま」は電流源に近づきつつある： $X > 0$ の時は遠ざかりつつある)、電場 E2-1, E3-2, E4-3 の理論値を求めた (Fig. 9b)。この際、Fig. 9a に示した各電極の水平・鉛直位置を加味した。その結果、E2-1 と E3-2 の

波形は等しく、また E4-3 における最大値と最小値の差も E2-1 や E3-2 と概ね等しくなることが分かった。本データに対して ICA を適用することができ、分離信号の係数が概ね等しい場合、その分離信号は自然電場信号を含むと考えられる。さらに電流源に対して AUV が近づくと自然電場は正に増大し、電流源直上ではゼロになり、AUV が電流源から遠ざかると負の値を示す特徴も認められた。すなわち自然電場のパターンから電流源の位置情報を得られる可能性が示唆される。

本研究では、AUV「うらしま」により取得された電場データ (2015 年 8 月 16 日) に対して ICA による解析を行った。なお、用いたデータには AUV 尾部のスラスタに起因すると思われる高周波数のノイズが顕著であったため、生データを毎秒値に変換した後に、9 秒毎に移動平均をとったもの (1 Hz サンプリング) に対して解析を実施した。解析に用いた記録の一例 (02:45:00 UTC ~ 03:15:00 UTC) を Fig. 10 に示す。

6. 熱水噴出地域での解析結果

ICA の適用結果、海底からの自然電場異常と思われる信号成分を抽出することができた。一例として、Fig. 10 に示した 3 つの電場信号に対して ICA を適用した結果を Fig. 11 に示す。このとき、海底下からの電場信号由来の分離信号は、E2-1, E3-2, E4-3 に対する係数が概ね等しくなると考えられるため、分離信号 **Y2** が海底下からの電場信号であると解釈した。そこで、**Y2** 以外の分離信号を除去した観測電場 (E2-1, E3-2, E4-3 の平均) を Fig. 12 に示す。3 つの観測電場データ (E2-1, E3-2, E4-3) のスタッキング結果 (平均値) も Fig. 12 に示した。ICA を適用した結果とスタッキングの結果は、大局的には類似している。しかしながら、両者には約 $10 \mu\text{V/m}$ の差異が生じている部分もある (Fig.12 の点線部)。この差異は (ICA の解析では) 観測電場間で共通ではなく、スタッキングでは除去することが困難であったノイズであると解釈できる。Fig. 12 の場合は、信号の最大振幅の 25% 程度に匹敵する振幅を持つノイズが含まれており、ICA によってこれを抽出および除去することができたと考えられる。なお久米島西方沖での電場データについて、CTD センサーで測定した海水の電気伝導度の変化と分離信号の相関を調べたところ、海水の電気伝導度変化と関連の見られる信号・ノイズ成分は認められなかった。

ICA による信号抽出の効果が見られたので、調査航海 YK15-14 において、AUV「うらしま」の潜航調査で得られた電場データ (2015 年 8 月 16 日 00:30 UTC ~ 04:40 UTC の約 4 時間分) についても同様に ICA を用いて解析した。AUV「うらしま」は海底から約 100 m の高度を保ちながら複数の東西測線に沿って熱水噴出地域周辺を航行していたため、ICA により抽出した自然電場信号

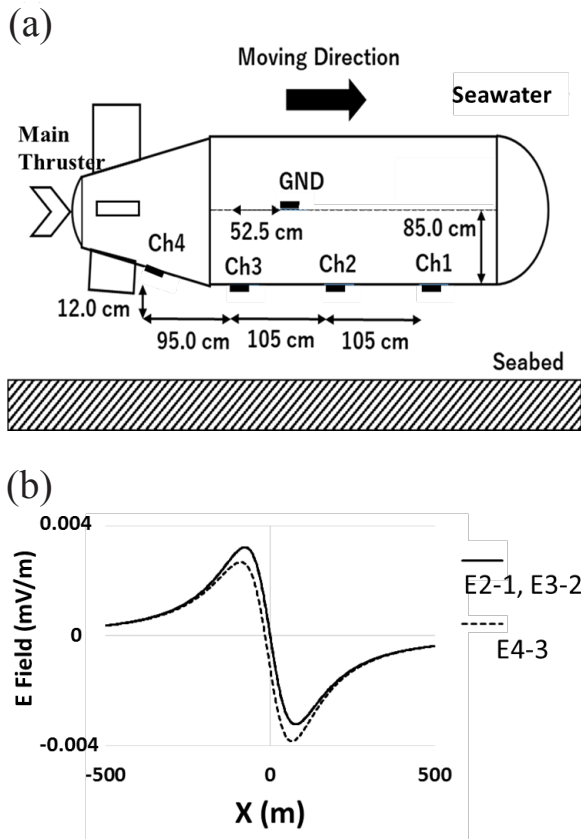


Fig. 9. (a) Schematic view of marine SP exploration by AUV "Urashima". Locations of five electrodes attached to the AUV. (b) Theoretical electric field between Ch2 and Ch1 (E2-1), between Ch3 and Ch2 (E3-2) and between Ch4 and Ch3 (Ch4-3), when there is an electric current source under the seafloor.

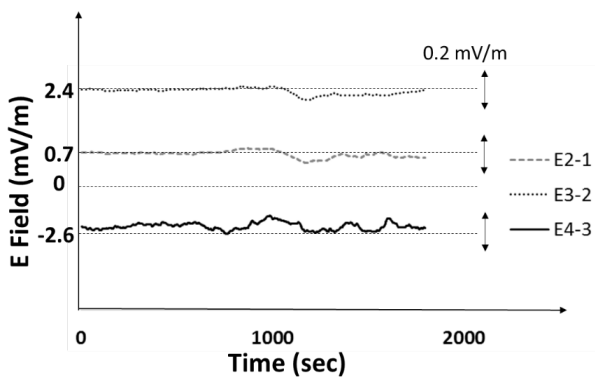


Fig. 10. Examples of observed electric fields between Ch2 and Ch1 (E2-1), between Ch3 and Ch2 (E3-2), and between Ch4 and Ch3 (E4-3).

を Fig. 13a のように面的分布として表示することができる。このとき、AUV「うらしま」が東向きに航行する時間帯と西向きに航行する時間帯があるが、Fig. 13においては西向き航行時の自然電場の符号を逆転することで、

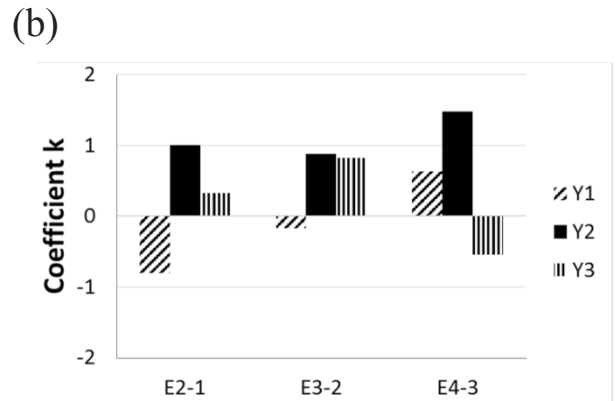
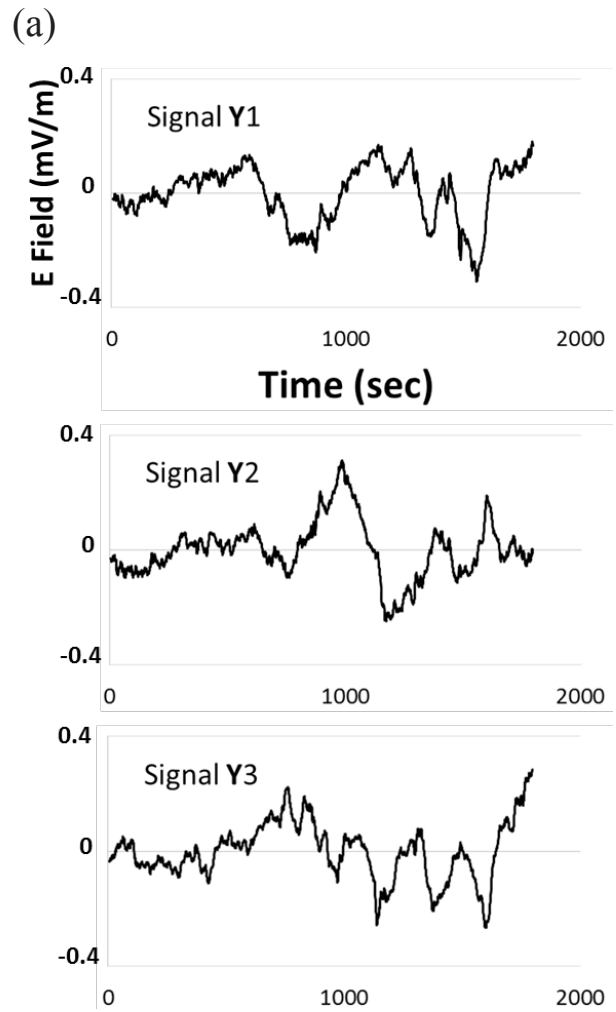


Fig. 11. (a) Separated Signals Y1, Y2 and Y3 from observed data in Fig. 10 by ICA. (b) Coefficient (k_{ij}) to observed data.

すべての東西測線において東向きに航行したように図化することとした。観測した電場が正から負へと変化する地点の海底下に自然電場の電流源があると考えられるので (Fig. 9b)、電場信号が正から負へと変化する地点 (つ

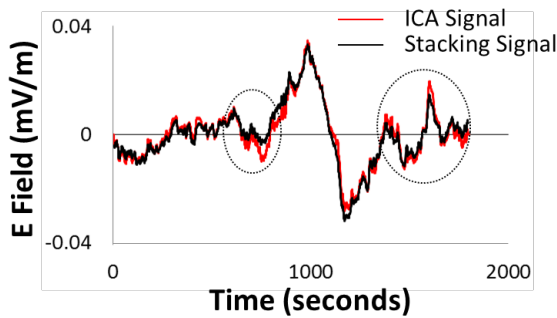


Fig. 12. Red curve is a signal treated using ICA (average of E2-1, E3-2, and E4-3). The black curve is one treated using conventional stacking. From 02:45:00, Aug. 16, 2015 to 03:15:00, Aug. 16, 2015.

まり電流源の大まかな推定位置)を点線で示した。Fig. 13bには、スタッキングにより得られた自然電場分布図も同様に示した。ICAとスタッキングの結果を比較すると、ICAを適用した結果(Fig. 13a)のほうが自然電場の変化が滑らかであり、局在化した正・負の異常がみられず、かつ正負の自然電場異常がFig. 9bのように左右対になって表れている(例: Fig. 13aにおけるLine Aでの自然電場異常をFig. 12に赤実線で示した。点線部が該当する部分)。一方、スタッキングの結果(Fig. 13b)では自然電場が非常に短い空間波長で増減する地点が多い。このため、隣り合う測線間で自然電場異常のパターンが異なっており、またICAの結果で見られたような正負対の自然電場異常が不明瞭な地域が認められる。さらに、Fig. 14aには、「うらしま」により取得された海底地形図を、Fig. 14bには海底地形図上にICAにより求められた電流源推定地(自然電場が正から負へと変化する地点)を表示した。

7. 議論

海水の電気伝導度の変化(Fig. 5b)が電場データに影響を及ぼしているが(Fig. 4)、その理由を議論する。電位測定に用いられている銀-塩化銀電極には、海水の温度や塩濃度の変化に応じて電極固有の接触電位の変化が生じる可能性がまず考えられる。また別の要因としては、曳航体自体が発するノイズが考えられる。例えば曳航体のフレームは金属製であるため、海水の濃度差や酸性度差に応じた酸化還元電位がフレーム部等に生じ、各チャンネルの電場データに観測された可能性も考えられる。いずれかが主なノイズ要因かについて、ICAによって得られた分離信号の各係数に注目しながら考察する(Fig. 4b)。YK15-06航海では、CTDセンサーを搭載している曳航体と、電極Ch4, Ch5間の距離は20 m以上に及んでいる(Fig. 1)。つまり、CTDセンサーで測定した海水の電気伝導度の変化が個々の電極にノイズを生む場合は、

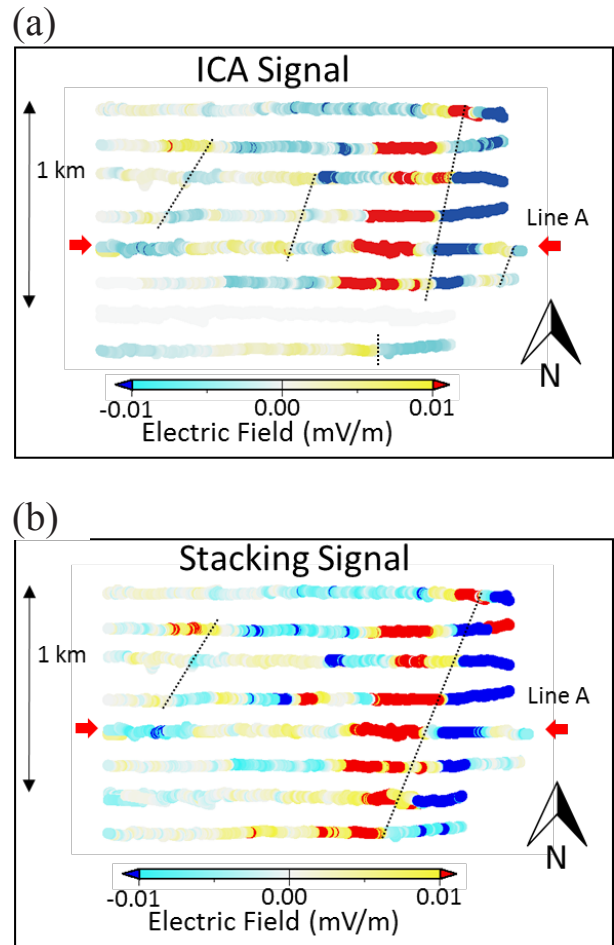


Fig. 13. Plan map of electric field processed using (a) ICA and using (b) conventional stacking. Dotted lines show estimated boundaries between positive and negative anomalies. Along Line A, data used in Fig. 12 were recorded.

曳航体のすぐ後方に位置するCh1やCh2にまず現れ、次にCh3やCh4に影響すると思われる。分離信号Y3に着目すると(Fig. 4b)、海水の電気伝導度変化(Fig. 5b)とは10 secほどの位相ずれを伴っており、またY3に関する係数 k_3 の大きさから判断すると、観測電場全体に占める分離信号Y3の割合はCh3およびCh4では大きいと言える。曳航体の位置データから換算すると、この時間帯の曳航体の速度は2~3 m/secであった。すなわち前述の10 secの位相差は、曳航体搭載のCTDセンサーで観測された海水の電気伝導度変化の影響がCh3やCh4に表れる際の時間差と概ね一致している。一方、分離信号Y3のCh5に対する係数 k_{53} がCh4やCh3に対する係数に比べ小さいのは、海水の電極内部への入り方や接し方が異なり、観測時の海水の電気伝導度の変化の影響が小さかったことが原因であると考えられる。また分離信号Y2はCh1やCh2への寄与が大きく、海水の電気伝導度変化とも相関が認められるが、Ch1・Ch2とCh3~Ch5では符号が逆転している(Fig. 4b)。曳航体から電気

的ノイズが発した場合、曳航体に対し全 Ch は同方向にあるため、符号が等しくなることから、海水の電気伝導度の変化を原因とするノイズは曳航体から発されたものではなく、(位相ずれを持ちつつ) 別々の増幅率や符号で各電極に発生した接触電位であると考えられる。このようなコヒーレントなノイズをスタッキングでは抽出・評価することは困難であったが、ICA を適用することでノイズを抽出し定量的に評価することができた。

海水中で測定された電場データへの ICA の適用は、より高い精度で海底下の自然電場信号の抽出を可能とするため、自然電位発生源 (すなわち海底下の鉱床) の検出精度を向上させられる。前述の仮想的な信号の抽出試験の結果のとおり (Fig. 8a, b), ICA 適用後の平均二乗誤差は減少し、 $5 \mu\text{V/m}$ 程度のノイズを除去できることが期待された。これを自然電位探査の 3 次元インバージョンの例と比較する。例えば Minsley et al. (2007) では数 mV/m 程度の大きさの自然電場異常を用いて信号源の位置を特定する様子が紹介されている。Minsley et al. (2007) では地表の比抵抗は $100 \sim 150 \Omega\text{m}$ であるが、海水は $0.3 \Omega\text{m}$ 程度の低比抵抗であるので、仮に Minsley et al. (2007) 同じ強度の電流源が同じ深さに埋もれている場合、海水中での電場振幅は約数百分の 1 に減じられ、電場強度は数 $\mu\text{V/m}$ 程度以下になると考えられる。本研究で示したようにスタッキングによる処理では $5 \mu\text{V/m}$ 程度の電場ノイズを除去することが困難であるため (Fig. 8b), そのままでは地下に信号源が複数存在するという誤った解釈を導く可能性がある。ICA によりノイズを適切に除去することで、より正確な信号源数およびそれらの位置を推定できると考えられる。

次に、AUV「うらしま」により取得された自然電場データのノイズ発生源について議論する。分離信号 **Y1** (Fig. 11a) は電場 E2-1 に対する係数 (Fig. 11b) が負である一方、電場 E4-3 に対する係数は正であり、電場 E3-2 に対する係数は非常に小さい。従って分離信号 **Y1** はノイズであると判断できる。このノイズの発生源を一意には決めることはできないが、電極 Ch2 と Ch3 の間 (基準電極 GND の付近) に存在する可能性が考えられる。この場合、ノイズの水平成分は電場 E3-2 には大きな影響を与えない一方、電場 E2-1 に対する係数と電場 E4-3 の係数の正負が互いに逆転している観測事実を説明しうる。次に、分離信号 **Y3** (Fig. 11a) は電場 E3-2 に対する係数が最大であり、電場 E4-3 に対する係数のみ負の値となっている。このことから、電極 Ch3 付近を発生源とするノイズである可能性が挙げられる。分離信号 **Y1** と分離信号 **Y3** から成るノイズはスタッキングでは残存していたが (Fig. 2), ICA により抽出および除去することができ、自然電場信号をより明瞭に抽出することができた。ただし、海底下からの自然電場信号を含むと考えた分離信号 **Y2** については、電場 E4-3 に対する係数が他の 2 つの電

場に対する係数よりわずかに大きい。これは電極 Ch4 の取り付け高度が他の電極とは異なっており、上下成分の自然電場信号も記録されていることが原因ではないかと思われる。

最後に久米島西方沖熱水地域で得られた自然電場の平面分布図 (Fig. 14b) について議論する。観測された自然電場が正から負へと変化する地域は南北方向に連続的に分布しているが、これらは地形の高まりの頂部および斜面部分に沿っており、北北東から南南西へと走行を持つ自然電場異常があるという仮定と一致する。地形の高まりは熱水噴出に伴って形成された小丘 (マウンド) と考えられ、マウンド頂部に見られる自然電位発生源は海底熱水鉱床に相当する可能性が考えられる。また斜面部やカルデラ壁部に熱水噴出域が存在する場合も多く (例: 伊是名海穴については経済産業省資源エネルギー庁ほか, 2013; ベヨネーズ海丘については棚橋ほか, 2006 をそれぞれ参照), 本研究で発見された斜面部の自然電位発生源は、このような熱水活動に伴う海底熱水鉱床に対応する可能性が考えられる。今後、これらの自然電位発生源周辺において、海底地質観察や岩石サンプル取得などを行うことでこれらの仮説の検証が進むものと期待される。なお ICA を適用した結果、自然電場信号がゼロである測線が調査地域の南部の一部に認められるが (Fig. 13a), これらの測線では分離信号 **Y1** ~ **Y3** のすべてに信号成分が含まれていない (いずれの分離信号にもコヒーレントノイズが含まれている) と判断されたためである。このようなすべての分離信号にコヒーレントノイズが入る要因の一つとしては、基準電極 (Fig. 9 の GND) への大きなノイズの混入が考えられる。今後の改善策としては、「うらしま」内部に基準電極を設置せずに、「うらしま」上部と下部にそれぞれ 1 つずつ基準電極を設置し、同上部・下部それぞれに電極アレイを設置する方法が考えられる。上部と下部の電極アレイが別々の基準電極を用いる場合、基準電極固有のノイズに対しても ICA により適切な評価が可能であると考えられる。

8. 結言

本研究では自然電位に起因する電場データに対して ICA を適用することで、測定系のノイズを除去し、海底下からの自然電場信号を抽出できるかどうかを試みた。深海曳航体を用いて、熱水噴出地域から離れた場所で取得した電場データに対して ICA を適用したところ、従来の手法であるスタッキングよりもノイズの特徴を詳細に抽出できた。スタッキングでは並行観測データのノイズ間に相関が認められる場合、そのノイズを除去することは困難であったが、ICA によりノイズの原因の推定が可能となった。また実データに仮想的な信号を加えた疑似的観測データに対して信号分離試験を行ったところ、

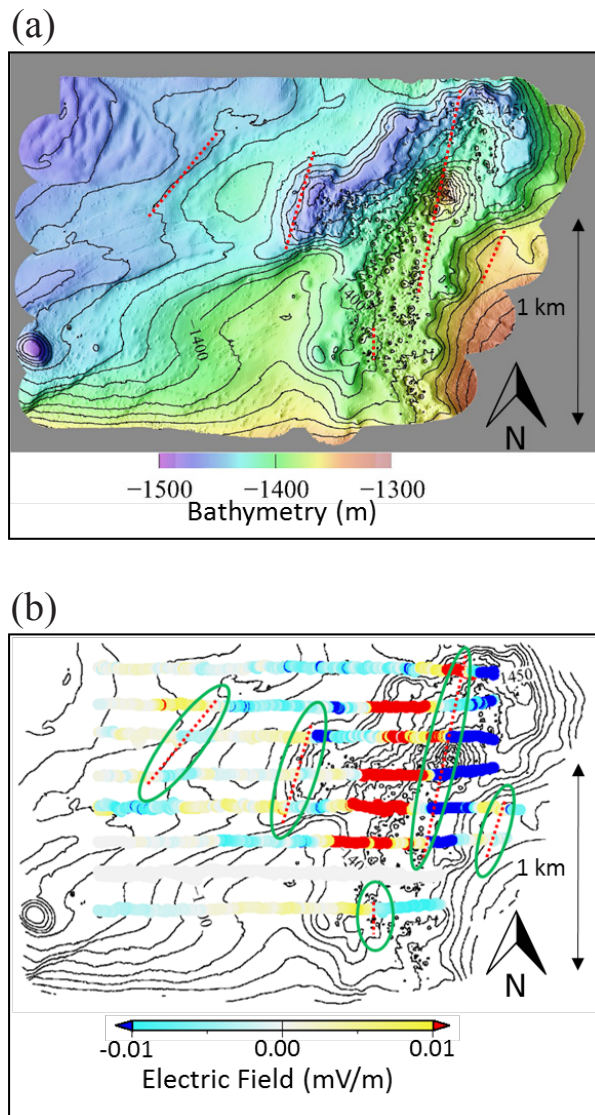


Fig. 14. (a) Bathymetric map of survey area obtained by AUV "Urashima." No data at the gray zone. (b) Same as Fig. 13(a), but with detailed topography. Green ellipses are presumed ore deposits. Red dotted lines are boundaries between positive and negative anomalies.

ICA の解析結果はスタッキングによる結果と比較すると信号の抽出精度が高いことが確認できた。

さらに沖縄沖海底熱水噴出地域において AUV「うらしま」を用いて取得した電場データに対し、ICA を適用した結果、スタッキングでの除去が困難であったノイズ（信号の 2～3 割程度の振幅）を抽出および除去することができた。このノイズは AUV「うらしま」由来のノイズである事が ICA の解析結果から推定された。AUV を用いた海底自然電場観測は、測定が簡便であり広域を比較的短時間でマッピングできるメリットがある反面、AUV 自身のノイズの影響を強く受けると考えられる。しかし、ICA により S/N 比の向上が可能となったため、海底自然電場マッピングを海底熱水鉱床発見における効果的かつ予察的な探査技術として将来的に活用できる可

能性が考えられる。

ICA によるノイズ除去・信号抽出法は海底自然電場探査だけでなく、地磁気地電流探査（MT 探査）や人工電流法電磁探査（CSEM 探査）などにおいても適用可能であると思われる。今後、海底や陸上で得られた電磁場データのノイズ除去に ICA を適用し、種々の電気・電磁探査に対する有効性も検討する予定である。

謝 辞

本研究で使用した電場データは海洋研究開発機構の深海潜水調査船支援母船「よこすか」YK15-06 航海および YK15-14 航海において取得された。よこすか船長、乗組員、観測支援員の方々のご支援に深く感謝する。調査航海 YK15-06 における自然電場観測については、町山栄章

グループリーダーに協力頂いた。調査航海 YK15-14 における自然電場観測については、東京大学大学院工学研究科の中村謙太郎准教授に協力を頂いた。本研究は内閣府戦略的イノベーション創造プログラム次世代海洋資源調査技術、文部科学省海洋資源利用促進技術開発プログラム、科学研究費補助金（基盤研究(B), No. 26289347）の支援により実施された。また原稿を注意深く査読頂き、適切な助言を頂いた匿名査読者に感謝する。

参 考 文 献

- Amari, S., and Cardoso, J. F. (1997): Blind source separation-semiparametric statistical approach, *IEEE Transactions on Signal Processing*, **45**, 2692-2700.
- Comon, P. (1994): Independent component analysis, A new concept? *Signal Processing*, **36**, 387-314.
- Heinson, G., White, A., Constable, S., and Key, K. (1999): Marine self-potential exploration, *Exploration Geophysics*, **30**, 1-4.
- Heinson, G., White, A., Robinson, D., and Fathianpour, N. (2005): Marine self-potential gradient exploration of the continental margin, *Geophysics*, **70**, G109-G118.
- Hyvärinen, A. (1999): Fast and robust fixed-point algorithms for independent component analysis, *IEEE Transactions on Neural Networks*, **10**, 626-634.
- Hyvärinen, A., Karhunen, J., and Oja, E. (2005): 詳解独立成分分析: 信号解析の新しい世界 (根元 幾・川勝真喜 訳), 東京電機大学出版社, 東京, 532pp.
- Jutten, C., and Herault, J. (1991): Blind separation of sources, Part I: An adaptive algorithm based on neuromimetic architecture, *Signal Processing*, **24**, 1-10.
- 笠谷貴史・月岡 哲・山本富士夫・百留忠洋・澤 隆雄・吉田 弘・石橋正二郎・田原淳一郎・木下正高・青木太郎 (2007): 深海巡航 AUV「うらしま」によって得られた相模湾初島沖の海底地すべり音響イメージ, *海洋調査技術*, **19**, 11-17.
- Kasaya, T., Kanamatsu, T., Sawa, T., Kinoshita, M., Tukioka, S., and Yamamoto, F. (2011): Acoustic images of the submarine fan system of the northern Kumano Basin obtained during the experimental dives of the Deep Sea AUV URASHIMA, *Exploration Geophysics*, **42**, 80-87.
- Kasaya, T., Machiyama, H., Kitada, K., and Nakamura, K. (2015): Trial exploration for hydrothermal activity using acoustic measurements at the North Iheya Knoll, *Geochemical Journal*, **49**, 597-602.
- 笠谷貴史・川田佳史・岩本久則 (2016): 海底熱水鉱床域で得られた自然電位異常, *物理探査学会第 135 回 (平成 28 年度秋季) 学術講演会講演論文集*, 195-196.
- Kawada, Y., and Kasaya, T. (2016): The self-potential method as a tool for exploring submarine buried ore bodies, *Goldschmidt 2016 Conference Abstracts*, 1453.
- Kumagai, H., Tsukioka, S., Yamamoto, H., Tsuji, T., Shitashima, K., Asada, M., Yamamoto, F., and Kinoshita, M. (2010): Hydrothermal plumes imaged by high-resolution side-scan sonar on a cruising AUV, *Urashima, Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **11**, Q12013, doi: 10.1029/2010GC003337.
- 経済産業省資源エネルギー庁, 石油天然ガス・金属鉱物資源機構, 海底熱水鉱床開発委員会 (2013): 海底熱水鉱床開発計画 第 1 期最終評価報告書, 109pp.
- Minsley, B. J., Sogade, J., and Morgan, F. D. (2007): Three-dimensional source inversion of self-potential data, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **112**, B02202, doi: 10.1029/2006JB004262.
- Sato, M., and Mooney, H. M. (1960): The electrochemical mechanism of sulfide self-potentials, *Geophysics*, **25**, 226-249.
- 棚橋道郎・塩川 智・村山信行・高取亮一 (2006): 伊豆・小笠原弧背弧リフト帯ベヨネーズ海丘で発見された大規模海底熱水鉱床, *資源地質*, **56**, 185-196.
- 吉田 弘・百留忠洋・石橋正二郎・澤 隆雄・志村拓也 (2011): 深海自律形無人探査機とその要素技術の最前線, *通信ソサイエティマガジン*, **5**, 127-136.

Noise reduction method of marine spontaneous electric field data using independent component analysis

Shinya Sato^{*}, Tadanori Goto^{*,**}, Takafumi Kasaya^{**}, Yoshifumi Kawada^{**, *3}

Hisanori Iwamoto^{**} and Kazuya Kitada^{**}

ABSTRACT

Measurements of spontaneous electrical potential (or self-potential, SP) for mineral exploration have been conducted on land. More recently, for exploration of hydrothermal ore deposits (by observing marine electric fields), underwater SP surveys are also conducted. Observed electric field data have smaller amplitudes than those obtained on land. Therefore, the noise must be removed to emphasize self-potential signals in the observed data. However, conventional "stacking" techniques cannot eliminate coherent noise which has a coherent component among the parallel observed data. This paper describes the use of a proposed noise removal technique using independent component analysis (ICA), which can decompose multi-component mixed signals into independent signals.

We tested the application of ICA to electric field data measured using deep-towed self-potential exploration. The data were obtained far from hydrothermal active areas and ore deposits. Results show that we extracted and removed noise that is difficult to extract by conventional stacking. Then we found no large marine spontaneous electric field, and inferred the causes of noise. Subsequently, to the observed electric field data we added a hypothetical marine electric signal from ore deposits to simulate the SP field. After applying ICA to the artificial electric field data we identified and eliminated the noise. The hypothetical signal was extracted more clearly than when using conventional stacking.

Based on successful application to the test data, we applied ICA to electric field data obtained by an autonomous underwater vehicle cruising in a hydrothermally active area. Results show that we extracted the marine electric field deriving from sub-seafloor sources. Such extraction was not possible using conventional stacking. This report also presents discussion of the causes of noise.

Keywords: Self-potential Noise reduction, Independent component analysis, Hydrothermal deposit, Okinawa Trough

Manuscript received December 9, 2016; Accepted March 27, 2017.

* Graduate School of Engineering, Kyoto University
C1-2, Kyoto Univ. Katsura, Nisikyo-Ku, Kyoto 615-8540, Japan

** Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
2-15, Natsushima town, Yokosuka 237-0061, Japan

*3 Tohoku University
468-1 Aoba, Aramaki, Aoba-Ku, Sendai 980-0845, Japan

A part of this paper was presented at the 134th SEGJ Spring Conference, 2016