

多電極電場データを用いたノイズリダクション —独立成分分析の適用—

村上英記* , 山口 覚**

*高知大学理学部自然環境科学科

**神戸大学理学部地球惑星科学科

Noise reduction of geoelectric data obtained by a multielectrode array system
- An application of independent component analysis to geoelectric data -

Hideki Murakami*

Satoru Yamaguchi**

*Department of Natural Environmental Science, Faculty of Science, Kochi University

**Department of Earth and Planetary Science, Faculty of Science, Kobe University

1. はじめに

都市近郊における地球電磁気計測では、都市部の人間活動にともなう電磁気ノイズをいかに削減して目的とする信号を抽出するかが重要な問題である。一般的には、信号とノイズの特性の差に着目してさまざまな処理方法が提案されている。例えば、長尾ほか（2003）の周波数領域での重み付きスタッキングによる信号（スペクトル）の検出方法や、時間領域での処理方法としては簡単なデジタル・フィルタにはじまり下泉（1994）による適応デジタル・フィルタの適用などさまざまなものが提案されている。

本報告では、兵庫県南部地震の地震断層である野島断層で実施された注水実験の際に観測した非常にノイズの大きな電場データに対して多変量解析の一方法である独立成分分析を適用した結果について報告する。

2. 解析データ

図1に本報告で扱う電場データを示す。このデータは、1997年に実施された野島断層注水実験時に注水孔周辺に設置した電極と、注水孔から400m離れた電極との間で得られた電場データである（村上ほか、1998；Murakami et al., 2001）。注水孔周辺には、25mから50mの間隔で電極を設置した。データ取得のサンプリング間隔は1秒ないしは10秒であったが、ローパスフィルタをとおして1分値にリサンプリングしたものを図1には示している。本報告ではこのリサンプリングしたデータの内、注水孔に近い測線AおよびBの8チャンネルのデータを使用する。

図1では上から注水孔に近い順番で測線A、測線B、測線Cそして測線Dの順番で電場変化を、一番下は注水量・水圧の時間変化を示している。近郊からの漏洩電流成分が大きい昼間と比較的小さな夜間との繰り返しが見られるが注水期間に何らかの電場変動があるようには見えない。2度目の注水停止後に大きな変化があるがこれは理由が不明である。この部分は今回の解析からは除く。

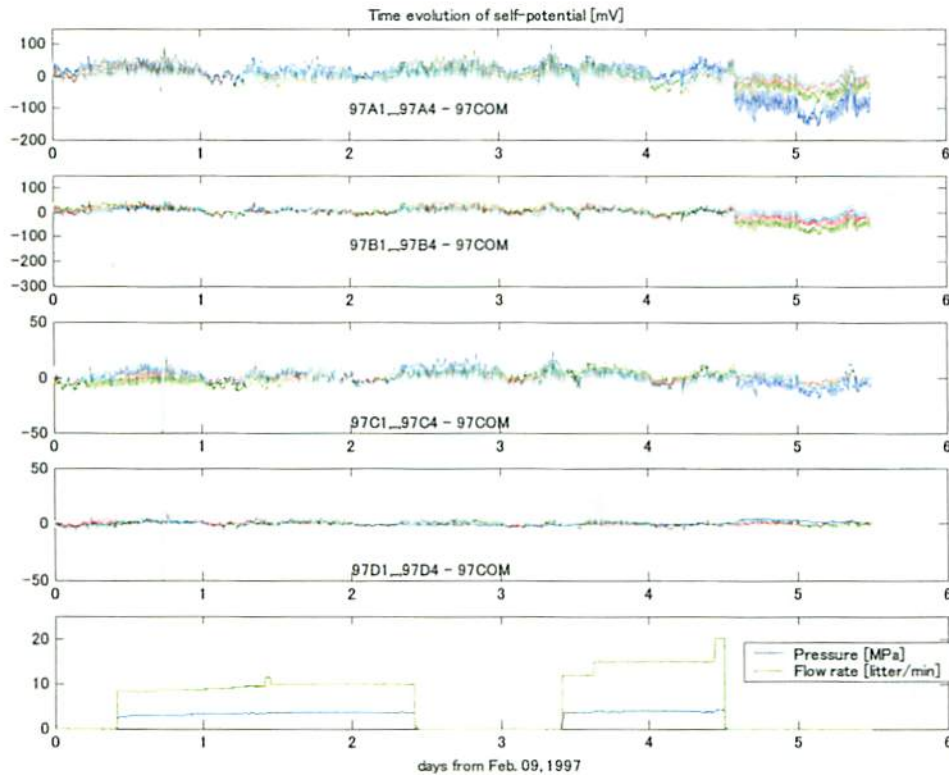


図 1. 野島注水実験における注水孔周辺の電場変化.

最上段は注水孔に近い A 測線の 4 つの電極における電場変化, 以下 B, C, D 測線と注水孔から離れた測線における電場変化を示す. 最下段は注水の流量と水圧を示す.

3. 解析方法

上記のデータに対して新しい多変量解析手法として注目されている独立成分分析(例えば, 甘利ほか, 2002a; 甘利ほか, 2002b; Cichocki and Amari, 2002; Hyvarinen et al., 2001)を適用する。以下に簡単に独立成分分析の概念について述べる。

独立成分分析では, 観測信号 x は複数の信号 s の線形結合として表されるものとする。

$$x(t) = As(t)$$

ここで行列 A は時間 t によらず一定であり, 信号 s は統計的に独立, すなわち s の確率密度関数が $r(s) = r_1(s_1)r_2(s_2)\cdots r_n(s_n)$ という積の形をとるものとする。ちなみに観測値 $x(t)$ は混合物なので, $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ の分布そのものは独立にならない。

独立成分分析では, 観測値 $x(t)$ のみを用いて行列 A の逆行列を W により,

$$y(t) = Wx(t)$$

で定まる復元信号 $y(t)$ の各成分が互いに独立となるような作用素 W を求めることになる。そこである時刻 t における W を適当に選び $W(t)$ とおき結果として出てくる $y(t)$ の独立性を見ながら $W(t)$ を次のように変えてゆく。Jutten and Herault (1991) により

$$\Delta W(t) = W(t+1) - W(t)$$

を $W(t)$ の変化分として、 $y(t)$ を見るごとに

$$\begin{aligned}\Delta W &= -\eta f(y)g(y)^T \\ f(y) &= \tanh(y), g(y) = y^3 \\ f(y) &= y, g(y) = y^3\end{aligned}$$

というように更新してゆく学習則が提案された。ここで η は小さい正の定数とする。一般的には、 I を単位行列として

$$\Delta W_i = -\eta_i [I - \varphi(y)y^T] W_i$$

という形式の更新則が数多く提案されている。また、右辺の非線形関数を線形 $\varphi(y) = y$ とした場合には主成分分析と同等になることが知られている。

信号の分解という立場から主成分分析との比較で整理すると次のようになる。主成分分析も独立成分分析も

$$x(t) = s_1(t)\gamma_1 + \dots + s_n(t)\gamma_n$$

という形で確率変数ベクトルの分解を与える。ここで、基底系 $\{\gamma_i : i = 1, \dots, n\}$ を直交基底に選ぶのが主成分分析で、分解の係数の独立というより強い制約を満たすために斜交基底を選んでいるのが独立成分分析と言える。

実際の解析には Chihika and Amari (2003) により公開されている MATLAB 用の独立成分分析パッケージ ICALAB (アルゴリズム AMUSE) を使用しておこなった。

4. 解析結果

まず図 2 に注水孔に近い 8 カ所の電極で得られた電場データに独立成分分析を適用した結果を示す。図 2 の右側は解析に使用した時系列データで、左側は独立成分分析により得られた 8 つの成分である。独立成分分析では得られた結果の順番 (図の上下) には特に意味がないので、ここでは仮に上から順番に第 1 成分、第 2 成分と呼ぶことにする。また振幅は規格化されているので相互の大小比較もここでは意味がない。

図 2 の左側の分解された成分のうち第 8 成分は近郊からの漏洩電流成分を表していると考えられる。さらに第 1 および第 2 成分は明瞭な日周変化であり、やはり注水に関連した変動とは考えられない。そこで、第 1、第 2 そして第 8 成分を削除して、各チャンネルの電場データとして復元した結果が図 3 である。復元されたデータを見ると注水期間中に数 mV から十数 mV の電場変動があることがわかる。変動の大きさはチャンネルにより異なるが、変動の極性がすべてのチャンネルで同一であるという特徴があることがわかる。注水にもっとも関連していると思われる第 3 成分だけ選択し各チャンネルに戻してやった結果を図 4 に示す。注水の開始・停止に同期した電場変動であることがよくわかる。

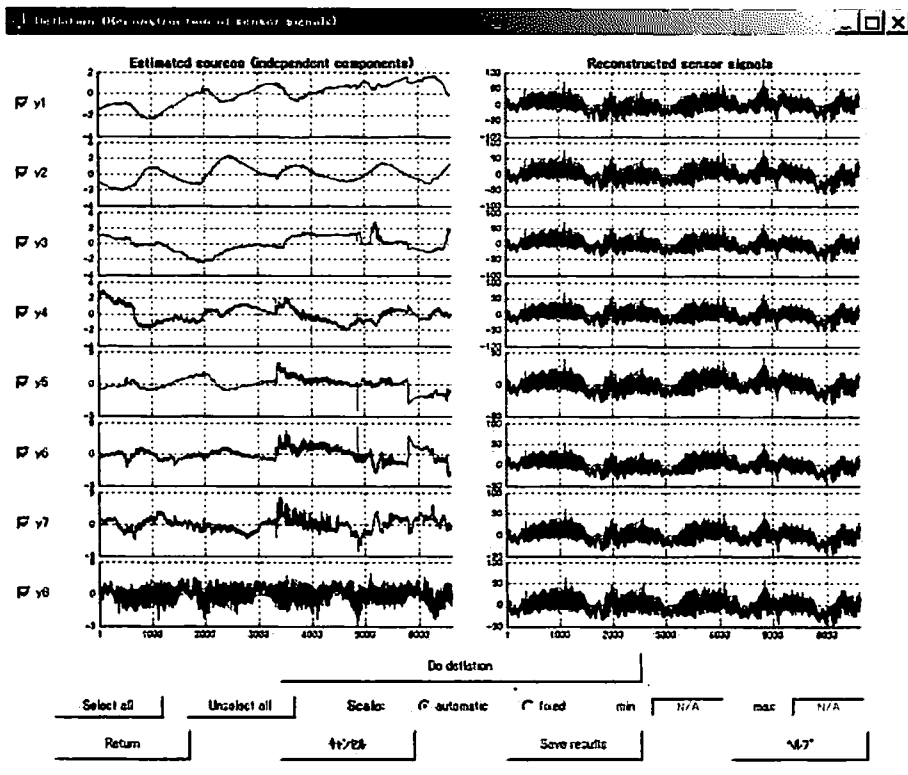


図2. ICALAB による独立成分分析の結果.

左側が独立成分分析の結果で、順番に特に意味はない。右側は観測データで、上から注水孔に近い測線 A (A1, A2, A3, A4), 続いて測線 B (B1, B2, B3, B4) のデータを示している。

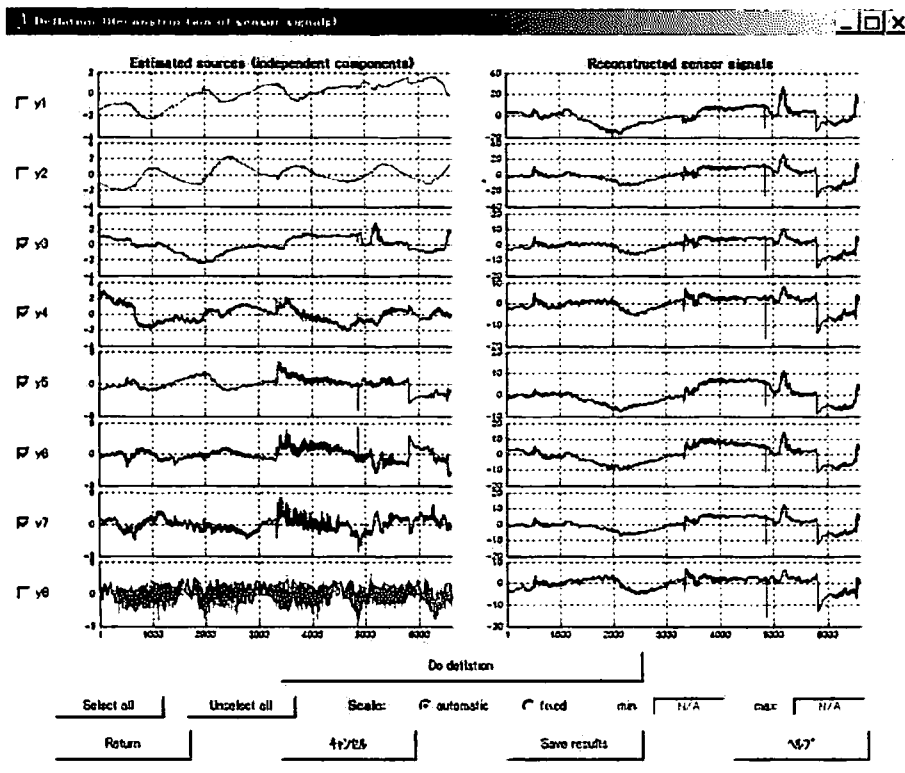


図3. 注水に関連する成分による復元 (1)。右側は、独立成分分析の結果出てきた 8 成分のうち明らかにノイズおよび日周変化と思われる 3 つの成分を除いて各チャンネルに復元した電場変動。

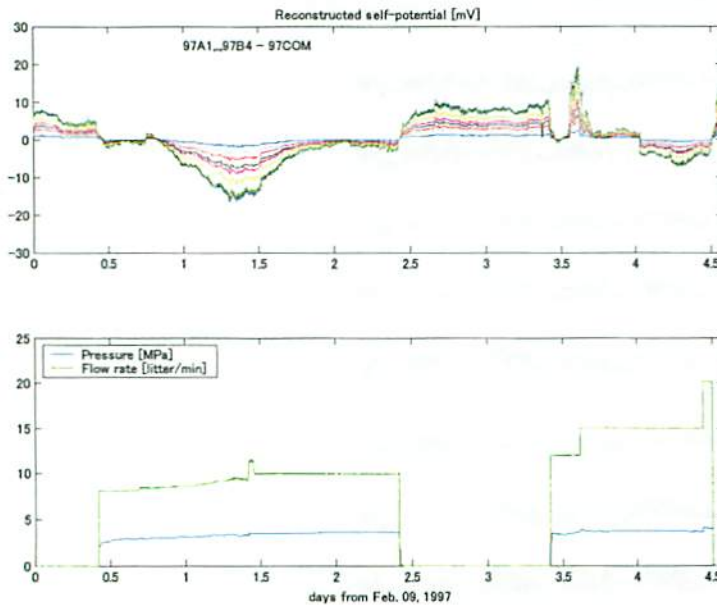


図4. 注水に関連する成分の復元
(2). 注水との関連が一番明瞭な第3成分だけを選択し各チャンネルにもどした電場変動(上)と流量・水圧(下).

5. 考察

独立成分分析により検出された注水に伴う電場変化を Murakami et al. (2001) の Fig. 3 と比較してみると、時間的な変化の様子や変動の極性或振幅の大きさがほぼ同様であることが確認できる。Murakami et al. (2001) では、注水孔から約 600m離れた地点での電場データを使い短周期成分の補正に使用し、補正済みのデータに見られる日周変動を注水孔から離れた D3 地点の日周変動を規準にして更に補正をするという方法を取った。

次に、独立成分分析の特性を調べるために、主成分分析をデータに適用した結果との比較をおこなう。独立成分分析をおこなった注水孔に近い8成分の電場データを主成分分析した結果を図5に示す。図5の上から第1主成分、第2主成分の順番で、一番下の成分が第8成分である。第1主成分はノイズを含んだ日周変化を示しており、第2主成分は注水に伴う電場変動を表しているように見える。しかしながら、独立成分分析で見られた日変化のみの成分は見あたらない。図6に主成分分析の結果得られた第1主成分を除去し残りの7成分を使ってもとの各チャンネルの電場データに復元した結果を示す。得られた結果は、独立成分分析の結果とことなり必ずしも注水に同期した変化が復元されたわけではない。また、チャンネルによっては変化の極性が逆になっているものもある。これは第1主成分中に、注水に伴う変動成分が含まれているためと考えられる。

上記で明らかなように、本研究で解析対象としたデータについては独立成分分析を用いてきわめて良好な結果を得ることができた。以前の方法 (Murakami et al., 2001) ではリファレンス点の欠測のために完全に処理できなかった部分も含めて注水により発生した電場変動をうまく抽出することができた。また、注水実験に伴う電場変動のような矩形に近い変化を検出する場合、デジタル・フィルタを使ったフィルタリングでは信号の立ち上がりや落ち下りの緩和特性を歪ませる結果となることが予想されるが、独立成分分析ではそのような結果にはならない点もこの方法の利点と言える。

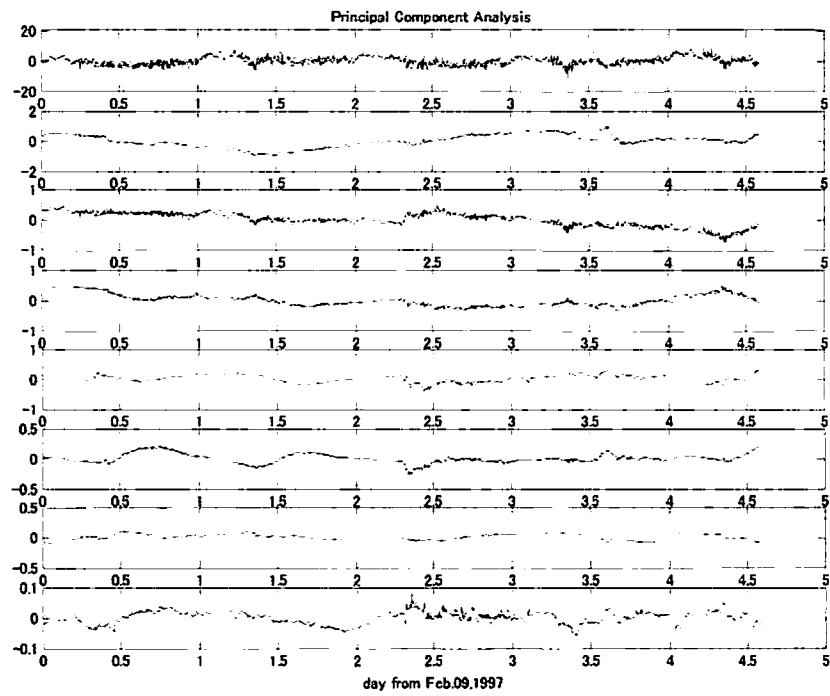


図5. 主成分分析の結果. 上から第1主成分, 第2主成分の順番で一番下が第8主成分.

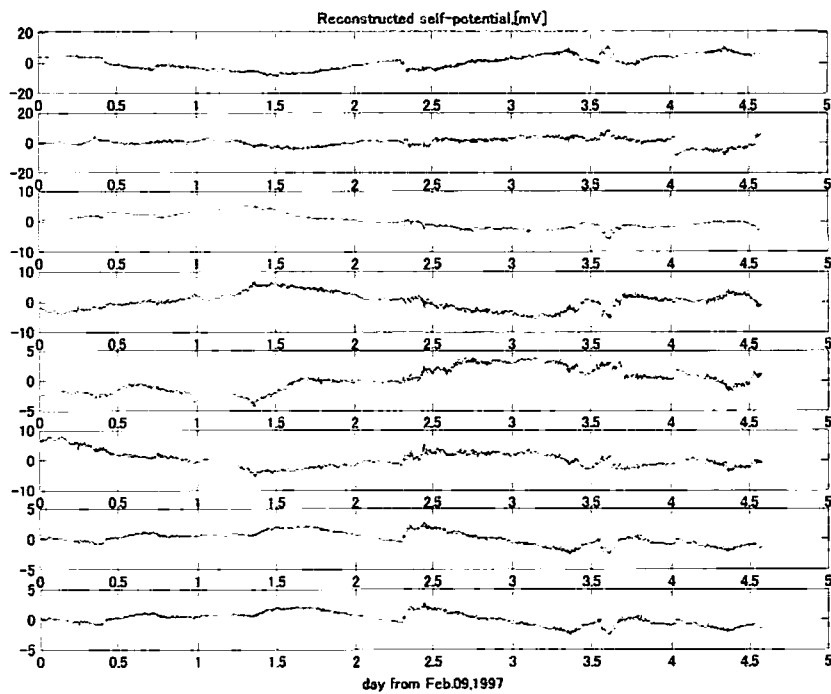


図6. 復元した各チャンネルの電場. 図5に示した主成分分析の第1主成分のみを除去して復元した電場.

今回のデータについては、抽出したい信号に対する先験的な情報（注水の期間や他の方法による結果）があったために分析した成分中の中で求めたい信号とそうでない信号との区別ができたが、一般的には分析して得られた成分のどれを選択するかという問題が残る。とりわけ扱うデータのチャンネルが多くなるにつれて求めたい信号が複数の成分に分離してしまい、どれを選択するかが重要な問題になる。また、アルゴリズムによっても得られる結果が異なる場合があるので、解析結果の安定性について検証するために数値実験等をさらにおこなう予定である。

参考文献

- 甘利俊一・村田 昇 編, 独立成分分析 - 多変量データ解析の新しい方法, サイエンス社, 東京, 2002a.
- 甘利俊一・佐藤俊哉・竹内 啓・狩野 裕・松山 裕・石黒真木夫, 多変量解析の展開-隠れた構造と因果を推理する, 岩波書店, 東京, 2002b.
- Cichocki, A. and S. Amari, Adaptive Blind Signal and Image Processing, John Wiley, 2002.
- < <http://www.bsp.brain.riken.go.jp/ICALAB/> >
- Hyvarinen, A. J. Karhunen and E. Oja, Independent component analysis, John Wiley & Sons, 2001.
- Jutten, C. and J. Herault, Separation of sources, Part I, Signal Processing, 24, 1-10, 1991.
- 村上英記・橋本武志・大志万直人・住友則彦・山口 覚・本蔵義守, 注水実験時の電磁気観測, 月刊 地球, 号外 No. 21, 54-58, 1998.
- Murakami, H., T. Hashimoto, N. Oshiman, S. Yamaguchi, Y. Honkura and N. Sumitomo, Electrokinetic phenomena associated with a water injection experiment at Nojima Fault on Awaji Island, Japan, The Island Arc, 10, 244-251, 2001.
- 長尾大道・中島崇裕・熊澤峰夫・國友孝洋, 観測時刻によってノイズレベルが異なる場合の最適スタッキング方法 - 電磁アクロスのテスト観測データを例にして -, CA 研究会論文集 2003 年, 140-147, 2003.
- 下泉政志, ADF の MT データへの適用 (1), CA 研究会論文集 1994 年, 147-153, 1994.