

独立成分分析による磁場水平成分のノイズ除去と房総半島における MT 探査への適用
奥田真央・茂木透（北海道大学）

Noise reduction of horizontal components of magnetic field by means of Independent Component Analysis and its application to the Magnetotelluric survey in Boso Peninsula

Mao Okuda, Toru Mogi (Hokkaido University)

Abstract

We carried out a MT survey in the Boso peninsula (Chiba, Central Japan), however, large artificial noise was contaminated in the MT data and the resistivity and phase showed near field effect at the frequency band below 1Hz. To avoid the local noise, we attempted to apply the independent component analysis (ICA). ICA can be separated into all underlying sources without knowing these sources or the way that they are mixed. In this study, we used the frequency domain ICA program (Bingham and Hyvärinen, 2000) for complex signals to deal with the phase part. This is an extension of the FastICA algorithm and is based on a fixed-point iteration scheme for complex valued signals.

We applied the ICA method to improve horizontal magnetic components in MT data. ICA composed of two components both the data observed in Boso area and the noise free magnetic data observed in Kakioka observatory was applied for each horizontal magnetic component. To work ICA effectively, we needed to divide into several narrow frequency bands and applied the ICA at each band. After the ICA processing, the apparent resistivity showed gentle change and the phases take non-zero values. These results revealed that ICA has a potential to handle noisy data.

1. はじめに

房総半島沖では、過去 20 年間に少なくとも 5 回、スロースリップ地震が発生していることが知られており、スロースリップ地震の発生には、水が重要な役割を果たしているといわれている（小原，2007）。しかし、その発生の際となる地下構造の特徴についてはまだ明らかになっていない。本研究は、地殻に含まれる間隙水のつながりや量に敏感な比抵抗値の分布を MT 法によって求め、スロースリップ地震の発生場について議論しようとするものである。

MT 観測点は、房総半島全域にわたり東西方向には約 7.5km、南北方向には約 9km の間隔で、計 41 点設置した（Fig.1）。Phoenix Geophysics 社製 MTU-5 探査機を観測に使用し、2400Hz、150Hz、15Hz でサンプリングした。また、このうち一部の観測点にはテラテクニカ社製 U43 探査機を使用し、1 Hz サンプリングでデータを記録した。

房総半島では、全域にわたり直流電車が走り人口密集地も多いので、全ての観測点において、日中のデータに極めて振幅の大きいノイズが記録された（Fig.2）。ノイズの影響でみられる現象のひとつにニアフィールド現象がある。この現象は、自然由来ではない信号が観測点の近傍から発生している場合に平面波という仮定を満たさないために発生する。それが混入すると、一見ノイズの少ない見掛け

比抵抗値や位相が得られるが、見掛け比抵抗値の異常な増加や位相が 0 になる現象が起きる。

MT データに含まれる地域的なノイズを軽減する方法として、リモートリファレンス法(Gamble et al., 1979)がよく使われる。リモートリファレンス法 (RR 法) は、同時観測された十分遠くにある別の観測点の水平磁場成分を用いてノイズの影響を軽減する手法である。日本列島規模の範囲内での水平磁場は相関が高いので、これを利用して RR 法は、参照点のデータと相互パワースペクトルを用いることで相関の低いローカルなノイズ成分を除去する。しかし、Padua et al.(2002)によると、直流電車のノイズに対して、RR 法によるデータの改善効果が大きくないことが示されている。実際に房総半島で観測されたデータに対して RR 法を適用した結果、いくつかの観測点ではエラーバーが大きくなり見掛け比抵抗・位相の値が定まらなかった。そこで、本研究では、RR 法よりも強力なノイズ分離法として期待される独立成分分析法 (ICA) を MT データに適用し、ニアフィールド等のノイズ除去効果について検討を行った。本研究は、房総半島地域において MT 法による比抵抗構造を求めるための第 1 歩の研究と位置付けられる。

2. 独立成分分析 (ICA)

本研究では、RR 法に比べより強固なノイズ除去を試みるため、独立性により信号を分離する手法である独立成分分析 (ICA) (村田, 2004) を MT 磁場データに適用した。統計的に独立な n 個の信号源を $\mathbf{s}(t) = (s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t))^T$ (但し $t = 0, 1, 2, \dots$) とする。T は転置行列を表す。この信号源から発生した信号を測定した n 個の観測データを $\mathbf{x}(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))^T$ と書くとする。原信号と観測信号の関係は未知の混合行列 A によって以下のように記述できる。

$$\mathbf{x}(t) = A\mathbf{s}(t)$$

独立成分分析とは、混合作用素 A に関する情報を一切持たずに原信号 $\mathbf{s}(t)$ の各成分同士が互いに独立であるという情報だけを用いて、観測信号 $\mathbf{x}(t)$ から原信号を復元する手法である。ここで、ある線形作用素 W を用いて、観測信号 $\mathbf{x}(t)$ から復元信号 $\mathbf{y}(t)$ を

$$\mathbf{y}(t) = W\mathbf{x}(t)$$

と表現する。復元信号 $\mathbf{y}(t)$ の各成分が互いに独立となるような復元作用素 W を求めることができたとき、線形作用素 W はすなわち A の逆行列であり、復元信号 $\mathbf{y}(t)$ は原信号 $\mathbf{s}(t)$ と等しくなる。本研究では、位相差に関する情報も扱うため、周波数領域 FastICA アルゴリズム (Bingham and Hyvärinen, 2000) を使用した。これは 4 次の統計量尖度の絶対値の最大化を独立性の評価関数とし、最適化法として不動点法を用いる手法である。また前処理として無相関化を行い探索する行列を直交行列に限定することで、解の収束をより高速に行うことができるという特徴を持つ。

RR 法は前述の通り水平磁場成分の相関によってノイズの除去を行っている。一方で、ICA は各成分が統計的に独立となるように W を決定する。一般的に、独立であれば無相関だが、無相関であっても必ずしも独立とはいえない。これは、単位円となった共分散行列に回転の任意性が残っているためである。ICA は無相関の信号が混合している場合に回転行列を用いることにより、元の原信号への分離を試みる手法である。

3. ICA の適用方法

本研究では、RR 法と同様にまず磁場水平成分に対する ICA によるノイズ除去を試みた。ICA を適用するデータは、MTU5 により記録された 15Hz サンプリングのデータと U43 により記録され 1Hz サンプリングのデータである。通常 ICA を適用するときは、房総地域内に同時観測した複数の磁場データを ICA の入力成分として互いに共通な部分とそうでない部分と分離する。しかし、本研究の対象地域は、どこでもノイズレベルが極めて高いため、シグナル成分を見つけるためにはノイズのない地点でのデータを参照するが必要であると考えた。そのため本研究では、参照点データとして、1Hz サンプリングデータに対しては柿岡地磁気観測所の磁場データ、15Hz サンプリングデータに対しては江刺、沢内（岩手県）で観測された MT データを使用し、それらを ICA の入力成分とした。また、対象とする磁場水平成分のパワーは周波数帯域によって大きく変化する。このようなデータを一気に扱うとパワーの小さい帯域に対して ICA が働かないので、これを避けるため、パワーがあまり変わらない帯域に分割しそれぞれで ICA を行うこととした。磁場水平磁場の南北成分と東西成分それぞれに ICA を適用した。ICA 適用後、算出された各成分に対して同時刻の参照点との相互相関係数を計算し、値の高い成分を自然磁場由来のシグナルを多く含む成分であると判断する。周波数領域 ICA ではデータとしてフーリエ係数を複素数で取り扱うが、一連の ICA 処理による変化のようすを容易にするため、Fig.3 には周波数ごとのパワーの値の変化を示した。

4. ICA 適用結果

適用例として、観測点 450 において 2014 年 12 月 18 日に MTU5 により記録された磁場南北成分の 15Hz サンプリングデータに対して ICA を適用した結果を示す。まず、観測点 450 および参照点の江刺観測点で記録された午後 21 時から翌午前 9 時の磁場南北成分の周期 20 秒～100 秒成分のみを抜き出した時系列波形を Fig.4 に示す。このデータを周波数領域に変換し、フーリエ係数に対して ICA 適用後、参照点データと相関が高い成分を房総データに含まれるシグナル成分とした。

ICA 適用後、推定された復元信号 2 成分と江刺観測点の磁場南北成分との相関係数をそれぞれ計算した結果、第一成分が 0.9826、第二成分が 0.0472 となった。そのため第一成分をシグナルと判定してそれを残し、相関の低い第二成分を 0 とおいた行列を構成し、それに W の逆行列を掛けることにより、実際に房総観測点 450 で記録されたデータに含まれる磁場シグナル成分を抽出した。抽出後、逆フーリエ変換により時系列データに再び変換した。ICA により分離されたシグナル成分およびノイズ成分の時系列波形を Fig.5 に示す。ICA 適用前の Fig.4 と比較すると、振幅の大きな波形はノイズ成分として分離されている。

5. ICA 適用の効果

以上の方法で改良された水平磁場成分を用いて、BIRRP法 (Chave and Thomson, 2004) により見掛け比抵抗、位相を求めた。ICA の効果を見るために、以下の4ケースに対して見掛け比抵抗・位相をBIRRP法により算出した。

- (a) シングルサイト解析の結果 (観測点のデータのみを使った解析)
- (b) リモートリファレンス解析結果
- (c) ICA でノイズ分離を行った磁場データを用いて解析を行った結果
- (d) 参照点の磁場データを使った解析結果

観測点 450 で得られたデータに対するそれぞれのケースでの結果を Fig.6 に示す。

シングルサイト解析の結果 Fig.6(a)ではニアフィールドの影響がみられ、付近に電流の送信源が存在すると考えられる。このデータに対してリモートリファレンス処理を行うと Fig.6(b)のように周期 10 秒から 100 秒の間でエラーバーが非常に大きく、リモートリファレンス処理によるデータ改善の効果は得られなかった。これに対して ICA で改良した磁場データを用いて得られた結果 (Fig.6(d)) をみると、エラーバーが小さく、前後の見掛け比抵抗や位相の値とも矛盾しない値を示している。この結果から、ICA によるノイズ除去は効果があると考えられる。

一方、参照点のデータに強く影響されることから、参照点と全く同じ波形を ICA により作り出している可能性がある。この検討を行うために、参照点の磁場データと観測点の電場データを用いて見掛け比抵抗・位相を算出した (Fig.6(c))。その結果は、エラーバーが大きくなり、見掛け比抵抗や位相の値が一意に定まらない結果となった。これは、その地点における電場と、それに対応する磁場の応答が得られなかったためであると考えられる。以上の結果より、ICA の適用により房総観測点独自の特徴をもった自然由来の磁場シグナルを、観測された磁場データから分離することが可能と考えられる。しかし、測点によっては、ICA による改良がうまくいかず RR による改良の方がよかった場合もある。ICA の適用方法についてはさらに検討が必要であろう。

6. まとめ

リモートリファレンス法でデータの改良がみられなかった周波数帯の磁場水平成分データに対して独立成分分析 (ICA) を適用し、ノイズ成分と MT 法のシグナル成分の分離を試みた。ICA 適用後のデータを用いて見掛け比抵抗・位相を算出すると、エラーバーの値が小さくなり、その値は前後の周波数の結果とも矛盾がない結果が得られた。よって、ICA は MT 法のノイズ除去に効果があると考えられる。

参考文献

Chave, A.D. and D. Thomson, Bounded influence magnetotelluric response function estimation. Geophysical Journal International, 157, 988-1006, 2004.

Bingham, E. and A. Hyvärinen, A fast fixed-point algorithm for independent component analysis of complex valued signals, International Journal of Neural Systems, 10, 1-8, 2000

Gamble, T.D., Goubau, W.M., Clarke, J., 1979. Magnetotellurics with a remote magnetic reference. Geophysics 44, 53–68.

村田昇, 2004, 入門 独立成分分析, 東京電機大学出版社

小原一成, 2007, スロー地震と水, 地学雑誌, 116(1) 114-132

Padua, M. B., Padilha, A. L. and Vitorello, I., 2002, Disturbances on magnetotelluric data due to DC electrified railway: A case study from southeastern Brazil, Earth, Planets and Space 54:591-596

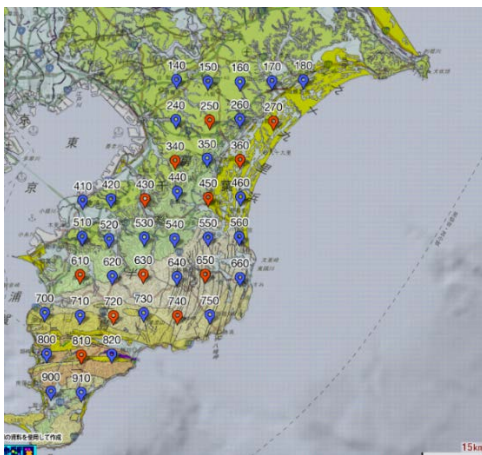


Fig1 : Sites of MT survey

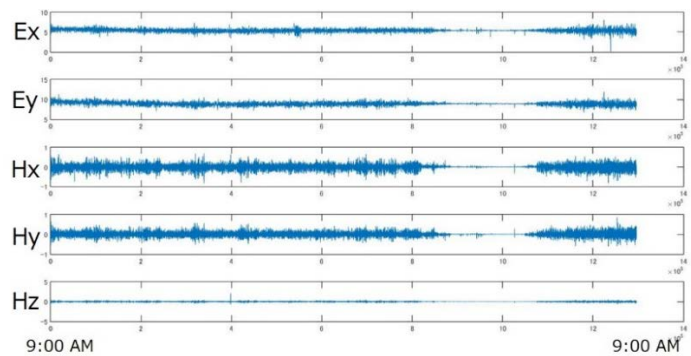


Fig2 : Time series for 1 day data of 15 Hz sampling in site 270. Data are contaminated with heavy cultural noise.

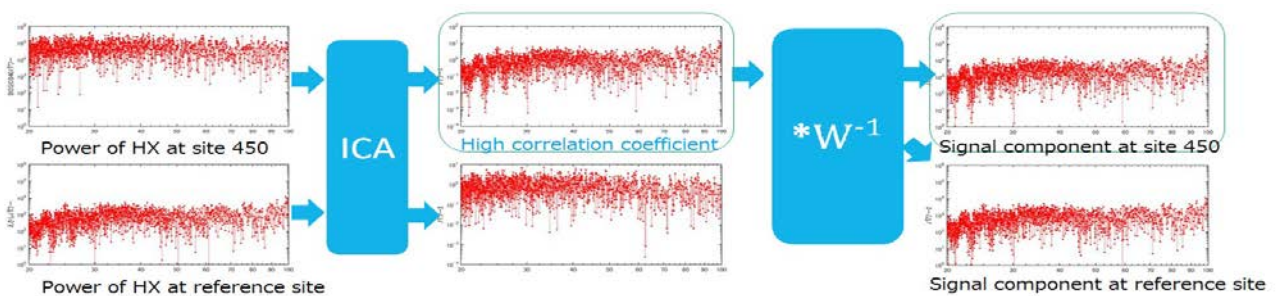


Fig.3 : The process of ICA in the frequency domain

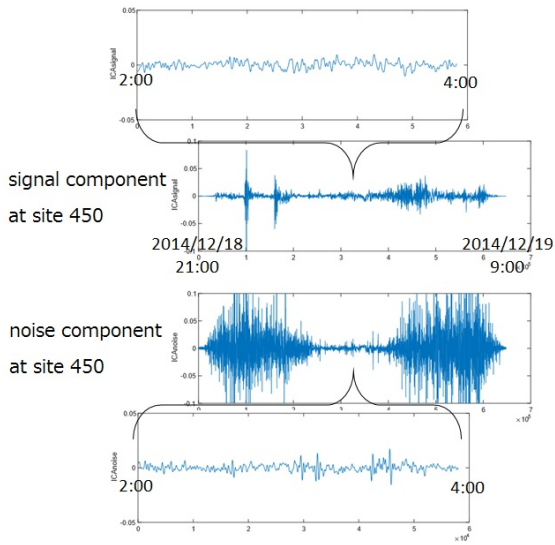


Fig.4 : Time series of HX recorded at site 450 and reference site (Esashi) before ICA.

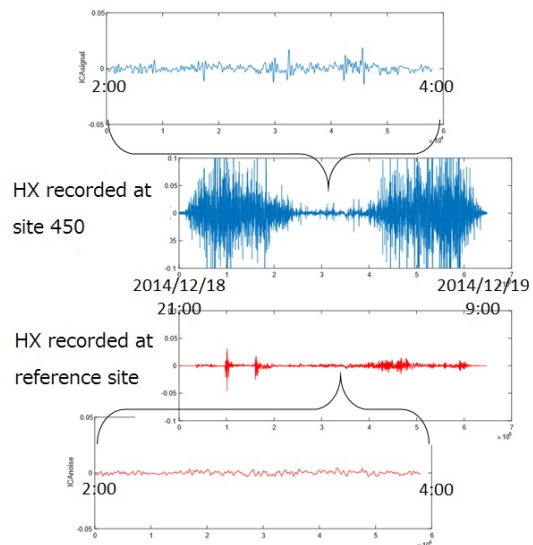


Fig.5 : Time series of HX recorded at site 450 after ICA.

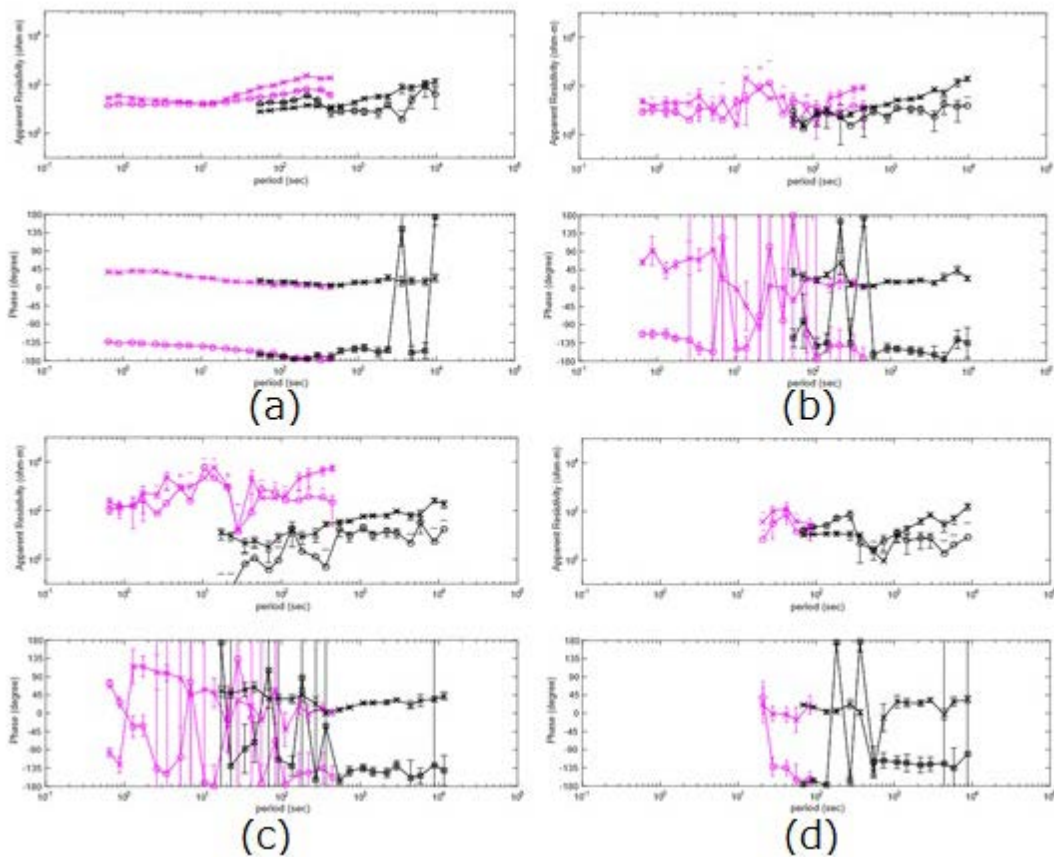


Fig.6 The apparent resistivity and phase using data sampled 15 Hz (red) and 1 Hz (black). (a) single processing, (b) remote reference analysis, (c) Single processing with magnetic component at reference site and electric field at Boso site, (d) ICA processing.