

東伊豆単成火山群MTアレイ観測について

防災科学技術研究所 上嶋 誠
地質調査所 小川康雄
東京大学地震研究所 歌田久司・小山 茂

Magnetotelluric Array Measurement
of the Higashi-Izu Monogenetic Volcano Group
M. Uyeshima (NIED), Y. Ogawa (GSJ), H. Utada and S. Koyama (ERI)

1. はじめに

伊豆半島東方沖群発地震が繰り返し発生したり、1989年の手石海丘海底火山噴火の勃発等、伊豆東方域は現在、マグマが関与した活発な地殻変動が起こっている地域である。伊豆半島はほとんど全てが火山岩から出来ているが、最も新しい火山は大室山を代表として伊豆半島東部やその東方海域に集中し、伊豆単成火山群と呼ばれる。

キュリー点深度の分布¹⁾から、本地域の地下がかなり高温であることが示唆される。また、地震波の解析からこの地域の地下約16~20kmあたりに反射面が見られ、それが地下の溶融体によるものである可能性が報告されている²⁾。

もし、そういった溶融体が地下に存在し、その厚さがかなり薄くても²⁾それがシート状につながって分布しているなら、低比抵抗異常として電氣的構造からも捉えられるはずである。そういった構造の検出を目的としてMTアレイ観測が行われた³⁾(図1)。TMモードを用いた2次元解析の結果、大室山の直下1kmより浅いあたりに帯水によるものと思われる10~70[Ωm]程度の低比抵抗層の存在が示唆された。また、それより深い部分はむしろ比抵抗はかなり高くなる(5k~20k[Ωm])という結果もその時の解析によって得られた³⁾。しかし、図1で示されるように、この地域は周囲を直流電化路線で取り囲まれている上に観測期間が1点あたり2~3日と短かったため、MT測線上東に行くほどデータの質が極端に悪くなり解析可能周期帯もせいぜい10秒より速いところのみであった。そこで、その観測を補充する目的で、図1の黒点で示された4点でEM109、U30各2台のflux-gate型磁力計を用いた毎秒サンプリングでのULF-MTアレイ観測を行った。

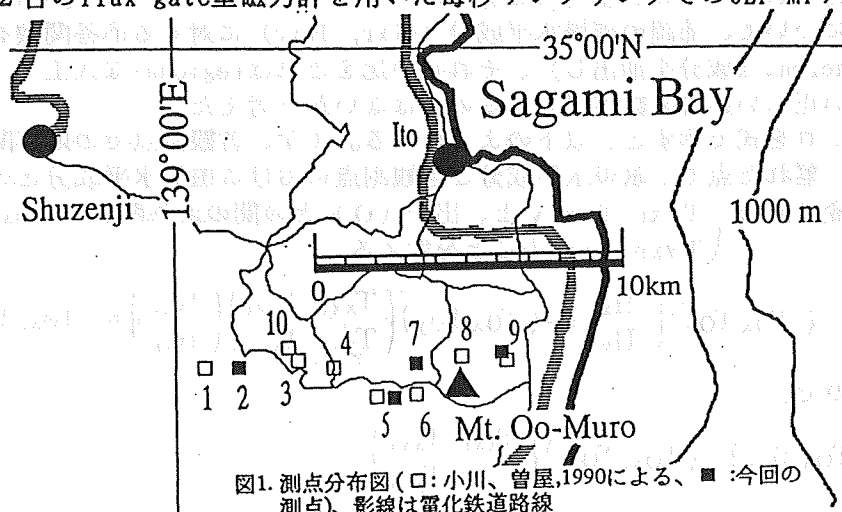


図1. 測点分布図(□:小川、曾屋,1990による、■:今回の測点)、影線は電化鉄道路線

2. 観測及び解析について

電場の基線長は20~40mであり、電極としてはPhoenix社製の鉛-塩化鉛電極を用いた。観測期間は、1991年2月4日~10日の一週間であり、この期間中顕著な磁気嵐は起こらなかった。EM109やU30では5-500秒のバンドパスフィルタがかけられているので、4秒平均をとり128データ(512秒まで)のFFT及びstackingによる周波数解析を行った。短周期については、周波数方向の平均化も行った。予想通り昼間のノイズが著しかったため、変動の振幅が大きい夜間(1:30-4:30)のデータのみを用いて解析を行うことにした。

図2にsite02、09の各種のpower-spectrumを示す。比較のために、気象庁柿岡地磁気観測所でのカスマー毎秒値より推定したspectrumも示してある(こちらにも5-500秒のバンドパスフィルタをかけた。数10秒より短周期側でspectrumがフラットになっているが、これについては後述する)。東(09)のデータの質が特に悪く、例えば磁場3成分 $H_x-H_y-H_z$ を比較してみると、特に短周期で H_z のpowerが他2成分の数10倍にもなっていることが読み取れる。伊東線など、観測点ごく近傍の電車は停止する時間帯のデータを解析しているはずなので、これらの異常なパワーは、東海道本線からの漏れ電流によるものと推定される。こういったノイズの混入のため、普通に全区間のstackingを行っても正しい応答関数を得ることが出来なかった。そこで、robust解析法による自動的異常区間除去法⁴⁾やlocalなremote-reference法⁵⁾(例えば09の解析に05の磁場水平成分を用いる)を試みたが、それによっても正しい応答関数を得ることは出来なかった。ここで、'正しくない応答関数'とは、例えば磁場変換関数が極端に大きな値(1以上)を示したり(例えば図4の下段)、impedanceの絶対値と位相の両周波数依存が調和的ではないような状況を指す。前者の方法が成功しなかったのは、入出力間でcoherentな人工ノイズがのっていたためと考えられ、後者については、今回の全測線にわたってcoherentな人工ノイズが磁場水平成分にものっていたためと考えられる。

そこで、柿岡地磁気観測所で得られた磁場水平成分毎秒値を解析に用いることにした。柿岡の磁場水平成分に、上述の東海道本線からの漏れ電流の影響があるとは考えられない。しかし、地球外部起源自然の変動についてはcoherentであろう。従って、入力(H_x, H_y)、出力(H_z, E_x, E_y 、以下まとめてOと記すことにする)それぞれについて、柿岡の磁場水平成分(H_{xr}, H_{yr})に対する応答関数を推定し(coherentな成分を抽出し)、それらの比をとればregionalな人工ノイズの影響をうけない正しい応答関数が得られるのではないかと考えた。

これを式で示すと、以下ようになる。まず、各観測点での応答関数(T_{0x}, T_{0y})を、離れた点での磁場水平成分と各観測点における磁場水平成分との間のいわゆるHD変換関数($T_{xxr} \ T_{xyr}$)と、出力(O)との間の応答関数(T_{0xr}, T_{0yr})で表す($T_{yxr} \ T_{yyr}$)ことを考える。

$$O = (T_{0x} \ T_{0y}) \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} = (T_{0x} \ T_{0y}) \begin{pmatrix} T_{xxr} & T_{xyr} \\ T_{yxr} & T_{yyr} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_{xr} \\ H_{yr} \end{pmatrix} = (T_{0xr} \ T_{0yr}) \begin{pmatrix} H_{xr} \\ H_{yr} \end{pmatrix} \quad (1)$$

なので、

$$(T_{0x} \ T_{0y}) = (T_{0xr} \ T_{0yr}) \begin{pmatrix} T_{xxr} & T_{xyr} \\ T_{yxr} & T_{yyr} \end{pmatrix}^{-1} \quad (2)$$

と表される。次に、(2)を用いて具体的に (T_{Ox}, T_{Oy}) をstackingによってデータより得られる各auto-及びcross-spectrumの推定値を用いて表すことにする。以下、上付きバーで示された量は、それぞれstackingによってデータより推定された各auto-及びcross-spectrumであり、行列に付いている t や $^{-1}$ は、それぞれ転置行列、逆行列を示す。離れた点での磁場水平成分に対する応答関数やHD変換関数は、それぞれ、

$$(T_{Oxr} T_{Oyr}) = (\overline{H_{xr}O} \overline{H_{yr}O}) t \overline{R}^{-1} \quad (3a)$$

$$\begin{pmatrix} T_{xxr} & T_{xyr} \\ T_{yxr} & T_{yyr} \end{pmatrix}^{-1} = [t \overline{R}^{-1}]^{-1} \begin{pmatrix} \overline{H_{xr}H_x} & \overline{H_{yr}H_x} \\ \overline{H_{xr}H_y} & \overline{H_{yr}H_y} \end{pmatrix}^{-1} \quad (3b)$$

と、表される。ここで、 \overline{R} は離れた点での磁場水平成分のspectrum行列、

$$\overline{R} = \begin{pmatrix} \overline{H_{xr}H_{xr}} & \overline{H_{xr}H_{yr}} \\ \overline{H_{yr}H_{xr}} & \overline{H_{yr}H_{yr}} \end{pmatrix} \quad (4)$$

である。従って、(2)に(3a), (3b)を代入してやると \overline{R} が消えて、

$$\begin{pmatrix} T_{Ox} \\ T_{Oy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \overline{H_{xr}H_x} & \overline{H_{xr}H_y} \\ \overline{H_{yr}H_x} & \overline{H_{yr}H_y} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \overline{H_{xr}O} \\ \overline{H_{yr}O} \end{pmatrix} \quad (5)$$

が得られる。(5)は、とりもなおさずremote-reference法⁵⁾による応答関数推定の式であり、通常に応答関数算出式と比べて、auto-及びcross-spectrum推定の際に離れた点での磁場水平成分を用いることによって、すべてがcross-spectrumで表されるようになっている。即ち、remote-reference法とは、上述してきたように、各観測点における入出力間の応答関数を求める際に、離れた点での観測値にcoherentな成分を入力、出力各観測値から抽出し、それら相互の比をとる方法であると解釈されるのである。

3. 柿岡地磁気観測所磁場毎秒値を用いたremote-reference解析

まず、図3に02,09における $(H_x, H_y, H_z, E_x, E_y)$ 5成分の離れた点での磁場水平成分 (H_x, H_y) に対する2入力1出力系のmultiple-coherencyを示す。上段では、離れた点として柿岡、下段では05が用いられている。左2列では普通入力として用いられる (H_x, H_y) 、右2列では出力として用いられる (H_z, E_x, E_y) が示されている。

まず、上段の柿岡に対するものを見ることにする。 $\{H_x, H_y\} - (H_{xr}, H_{yr})$ については、数十秒迄は全く無相関で、そこからcoherencyは増大し、最も長周期側で0.7程度になる。この、短周期側で無相関になるのは、一つには、この解析で用いた柿岡の磁場毎秒値の分解能が0.1[nT]であったことに起因すると思われる。図2で示したように、ULF帯の長周期側から数秒にかけて自然電磁場のpowerはほぼ直線的に小さくなるが、数十秒から数秒にかけて柿岡のpowerはフラットになっている。即ち、この周期帯において分解能が不足しているのである(従ってこの後で述べる柿岡をreferenceにとった解析も、短周期側は信用出来るものではない)。もう一つの原因として、もともこの周期帯での離れた点の間のcoherencyが存在しない可能性もある。今回の解析からは、この点を確かめることは出来ないが、ここで述べたfar-remote-referenceがどれ位の周期まで、どれ位離れた点にまで適用し得るかを明確にする必要がある。

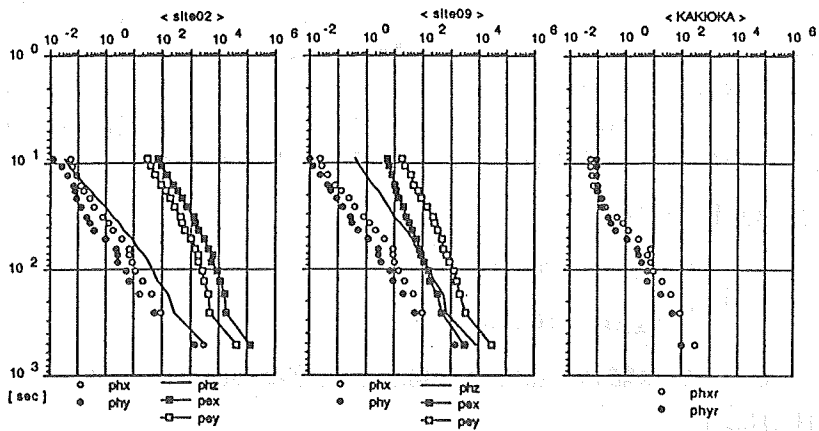


図2. power spectrum. 02,09については5成分を、
柿岡については磁場水平成分のみ示してある

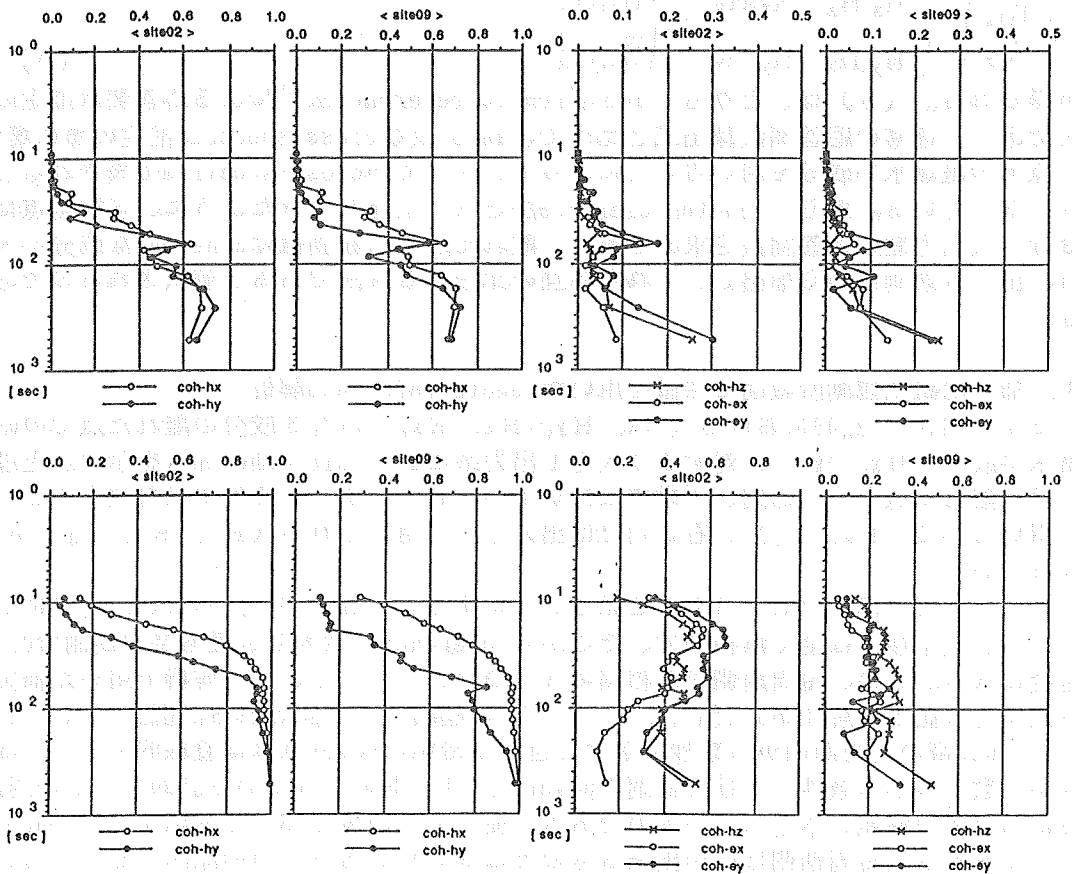


図3. 02,09における reference 点磁場水平2成分に対する multiple coherence
上段は柿岡(far-reference)、下段は05(local-reference)に対するもの
左2列は入力(Hx,Hy)、右2列は出力(Hz,Ex,Ey)の coherence

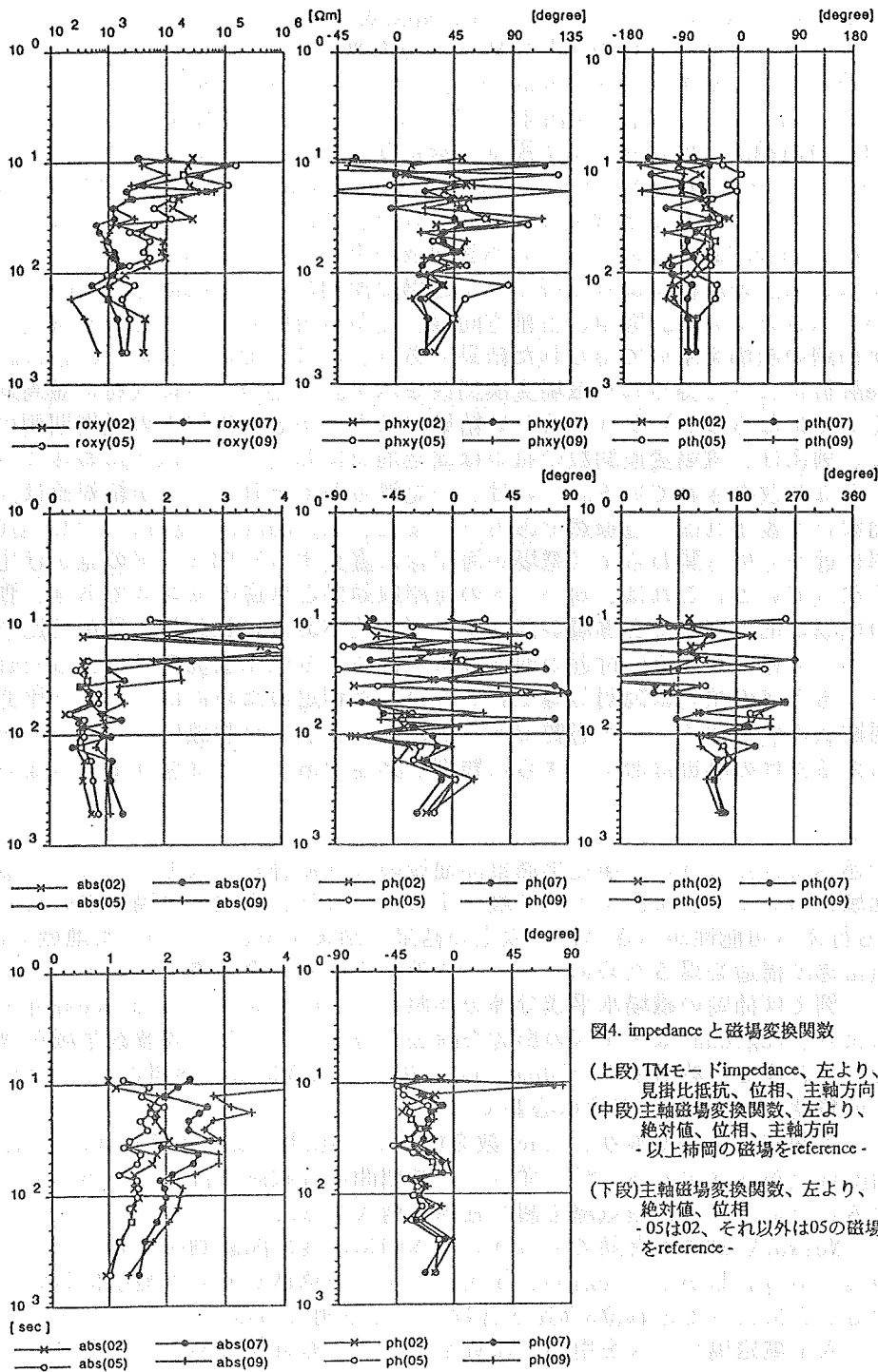


図4. impedance と磁場変換関数

(上段) TMモード impedance、左より、
見掛け抵抗、位相、主軸方向
(中段) 主軸磁場変換関数、左より、
絶対値、位相、主軸方向
-以上柿岡の磁場をreference -
(下段) 主軸磁場変換関数、左より、
絶対値、位相
-05は02、それ以外は05の磁場
をreference -

{Hz, Ex, Ey} - (Hxr, Hyr)については、相関成分は殆ど無く(0.25以下)、特に出力に対して人工ノイズの影響が著しい様子が読み取れる。

以上で述べてきた柿岡に対するcoherency(上段)と、05に対するもの(下段)とを比較すると、localには入出力共相関がより高いことが読み取れる(出力のcoherency(右2列)の横軸が上段に対して下段は2倍になっていることに注意)。しかし、上段のcoherencyこそが自然のシグナルに対する本当のcoherencyであり、下段の高い相関は人工ノイズによるものと考えられる。それ故、2. で述べたように、robust解析やlocal-remote-referenceによっても応答関数が正しく推定されなかったのであろう。

図4には、以上の解析によって得られた磁場変換関数とimpedanceとがすべての観測点について示されている。図中、主軸方向は、北から右回りを正にとった角度である。上中段が柿岡の磁場を用いて得られた結果であり、参考までに下段にlocal-remote-reference解析によって得られた磁場変換関数を示す。上述のように(特に短周期において全くあてにならない)かなり苦しい結果ではあるが数10秒以上の長周期側のみに注目して、例えば、磁場変換関数の値がほぼ全地点にわたって1以下におさまっているなど、かなり改善されている。これは、一見滑らかでそれらしいが絶対値は大きい下段の曲線と比較すれば一目瞭然であろう。また、impedanceを見ると、02から09にかけて海岸に近づくにも関わらず(電場が海岸線に直交する)TMモードの見かけ比抵抗値が低くなっている。これは、同モードの海岸線効果とは逆のセンスであり、測線上海岸側の地域の地下深部に良導層が存在する可能性がある。しかし、見かけ比抵抗だけなら、1. で述べた大室山付近の地下浅所に存在する低比抵抗層³⁾によるstatic効果によっても上述の傾向は説明し得る。こういった判定のためには、見かけ比抵抗や位相の周期依存性を知ることが必要であるが、ここで示した曲線には到底上述のことを判定し得るだけの品質は無く、さらに観測が必要であることは言うまでもない。

4. まとめ

以上で述べてきたように、伊豆半島東部地域のように著しく人工ノイズに汚染されている地域においても、解析に工夫を凝らすことにより、自然電磁場を用いたMT法をULF帯でも行える可能性が示された。以上の結果を踏まえて、こういった地域で正しい地下電気伝導度構造を得るためにとるべき方策をまとめて箇条書にすると、

(1) 例えば柿岡の磁場水平成分等を参照したfar-remote-reference解析を行うことにより、regionalなノイズの影響を除去し得る。しかし、周波数帯域が数秒程度までのいわゆる自然電磁場の'dead band'に及ぶ場合には、参照として用いる磁場データの精度も1-10[pT]程度は必要である。

(2) 相関成分がある限り、stack数を増やし自由度を増大させれば、応答関数の決定精度は上がるはずである⁶⁾。従って、長期間連続観測を行うことが望ましい。そうすることによって、磁気嵐を掴む確率も増大する。

(3) Network-MT法も有効であろう。基本的に、長期間観測を念頭においた観測法だからである。しかし、regionalな人工ノイズが卓越している地域において長基線にすることによってどれ位S/N比が稼げるかは不明である。

(4) 人工電磁場ソースを用いた探査を行うことも有効である。この際、人工電磁場ソースとして従来のloopやdipoleの他、鉄道の漏れ電流を利用したり、鉄道の架線を利用して能動的に電流を流す方法⁷⁾も将来期待がもたれる。等となる。上記の方法を組合せ、連続観測によってさらに電気伝導度の構造の変化迄

捉えることに成功したなら、活発な地殻変動やそれに伴う全磁力変化⁸⁾等が如何なるメカニズムによって起こっているのかを理解する一助と成ろう。

5. 謝辞

気象庁地磁気観測所からは、flux-gate型磁力計EM109を借用し、また、地磁気毎秒データを提供して頂いた。また、現地調査に関して、伊東市の協力を得た。

参考文献

- 1) 大久保泰邦他(1987)、立体的に見るキュリー等温面、地質ニュース、395、1-4.
- 2) 加藤孝志(1991)、伊豆半島東岸の溶融体を伴う地殻深部不連続面、東京大学修士論文、25pp.
- 3) 小川康雄・曾屋龍典(1990)、東伊豆単成火山群のMT法探査、CA研究会論文集、133-149.
- 4) 上嶋 誠(1990)、電磁気観測データのrobust stacking法について、CA研究会論文集、243-253.
- 5) Gamble, T.D. et al. (1979), Magnetotellurics with a remote magnetic reference, *Geophysics*, 44, 53-68.
- 6) Bendat, J.S. & Piersol, A.G. (1971), *Random Data; Analysis and Measurement Procedures*. (日本語訳) : ランダムデータの統計的処理、培風館、401pp.
- 7) 浜野洋三、私信(1992).
- 8) 例えば、Sasai, Y. & Ishikawa, Y. (1991), Tectonomagnetic signals related to the seismo-volcanic activity in the Izu Peninsula, *J. Phys. Earth*, 39, 299-319. など.