地電位異常変化のリアルタイム検出

気象庁地震観測所* 森 俊 雄†

Real-Time Detection of Anomalous Geoelectric Changes

Toshio MORI

Matsushiro Seismological Observatory, Nishijo 3511, Matsushiro,
Nagano-shi, Nagano, 381-12 Japan

(Received December 11, 1990; Accepted March 7, 1991)

We have been observing geoelectric field in land using the facilities of NTT corporation and on the ocean-floor using the ocean bottom seismograph observation systems of JMA, in the cenral part of Japan. By these observations we obtain highly stable data compared with those by ordinary observations. Some anomalous changes preceding earthquakes and volcanic eruptions were detected by simple methods. However, we still do not have general concepts about the anomalous changes in the electric fields as precursors of tectonic activities, that is, when, how long, how much intense and what type.

In order to improve the detectability of anomalous changes and automatically detect the precursory signals generated by seismic or volcanic activities in real-time or in quasi-real-time, we need to eliminate the effects of external geomagnetic changes and the motion of sea water. I have proposed that the induced electric fields in land and on the ocean-floor are expressed by a stochastic difference equation using the associated data such as the magnetic fields and/or sea level. The parameters of the equation are determined so as to minimize the *AIC* (Akaike Information Criterion).

In this study, I apply above method to the various electrical records from January to September, 1989. In the case of the electric fields at Mito-group, induced electric fields such as daily variations and telluric storms can be calculrated using the magnetic variations, and are considerably eliminated from the observed field. Then the degree of improvement in detecting anomalous electrical variations at the Mito-group is 5-10 times using *X*, *Y* and *Z* components of magnetic field. One at the Numazu-group is about 5 times using *X* and *Y*, and one on the ocean-floor is about 10 times using *X*, *Y* and sea level. In these cases, practically, the determined parameters were applicable for few months.

Key words: Geoelectric field, Associated data, Induced field, Residual field, Precursor.

§ 1. はじめに

気象庁では海底地震観測システムを利用した海底地電位観測を 1978 年より、気象研究所と地磁気観測所では NTT (日本電信電話株式会社) の通信施設を利用した地電位観測を 1983 年より行っている。これらの観測では柿岡地磁気観測所等で行われてきたような従来の方法による地電位観測と比較して精度の高い、特に、長期変動について非常に安定した記録が得られている。これまでに、1980 年の伊豆半島東方沖地震 (*M* 6.7) や 1986 年

11 月の伊豆大島噴火などで前兆現象らしい異常地電位変化が観測された [森 (1982, 1989, 1990), MORI (1987), TAKAYAMA and MORI (1990)]。

しかしながら、地震や火山噴火の前兆的地電位異常変化について、いつ、どのような形態で、どの程度の大きさの変化が現れるかについては、まだ確立されているとはいえない。従来の方法による地電位観測では、電極と土壌間の接触電位が不安定な場合が多く、降雨や気温などの影響を受けやすい。また、直流電車や工場からの漏洩電流などの人工的の擾乱を受けることも多い。さらに、降雨等による影響やノイズがない場合でも、周期数日以下の目立つ変化の大部分は地磁気変化による誘導電位変

* 〒381-12 長野県松代町西条 3511 番地

† 現在、気象庁地震火山部

Fig. 1. Observation networks for geoelectric field and the location of the Kakioka Magnetic Observatory (KAK). Electric fields at Mito (MTO) and Numazu (NMZ) regions have been observed using the electrodes and the underground cables of NTT corporation. Electric observations between OMZ and TS1 off Tokai, and between KTU and BS1 off Boso are carried out using the power feeding arrangement of the ocean bottom seismograph of JMA.

化である。また、海底地電位の場合には、海水の運動による影響も大きい [MORI (1987), 森 (1989)]。従って、地磁気変化や潮流に伴う電位変化を取り除き、可能な限り微小な異常変化をも検出できる方法を確立しておく必要がある。

NTT 施設を利用した地電位観測では、電極深度が深く (5 m 以深)、接地抵抗が低い (2Ω 以下) ため、接地電位が非常に安定していると考えられる。また、基線が長いために局所的に発生する電氣的ノイズ等も軽減されきわめて安定した高精度の記録が得られている。そこで、これらのデータを利用して、地磁気変化に伴う誘導電位変化を取り除き、微小な異常変化を検出する研究が始められた。地電位異常変化を検出する方法として、確率差分方程式と BAYTAP-G による解析が行われている [MORI (1987), 高山・森 (1987), 森 (1989), OZIMA *et al.* (1989)]。BAYTAP-G は、石黒・他 (1984) によって開発されたプログラムで、観測値を平行観測値に対する応答成分、潮汐成分、トレンドおよび不規則成分に分解でき、過去の現象について異常変化があったかどうかを確認するためには優れた解析方法である。しかし、BAYTAP-G による解析は、大容量の計算機を必要とし、また、平行観測値に対する応答、潮汐成分が計算毎

Table 1. Abbreviation, distance and direction for the geoelectric observations.

	Abbreviation	Distance (km)	Direction (N° E)
Mito-group	ISI-MTO	27.4	40
	KSM-MTO	19.0	93
	HIO-MTO	18.8	-165
Numazu-group	SUZ-NMZ	15.6	-29
	ITO-NMZ	25.9	-55
	ATM-NMZ	18.9	-55
	ODW-NMZ	32.0	-124
Off Tokai	K	108.6	32
Off Boso	S	81.7	-48

に異なり、その解釈が問題となるため、リアルタイムの使用するには適さないと考えられる。ここでは、リアルタイム (または、準リアルタイム) で異常変化を検出する方法を確立し、地震や火山噴火予知に役立てることを目的として、確率差分方程式による解析を進める。また、この方法は、自動処理が可能であるため、監視者が必ずしも地球電磁気現象に精通していなくても、検出可能であると考えられる。

MORI (1987) 等は主に、水戸系統 (Fig. 1 の MTO およびそれと結んだ地点) の笠間-水戸 (KSM-MTO) 間の地電位変化について、地磁気変化を考慮した確率差分方程式を適用し、その有効性を示してきた。ここでは、水戸系統の他の基線、人工的ノイズが目立つ沼津系統 (Fig. 1 の NMZ およびそれと結んだ地点) の地電位変化や海底地電位変化にも同方程式の適用を試みる。

§ 2. データについて

解析に利用した地電位の観測基線等を Fig. 1 に示す。それらの略号、基線長、方向を Table 1 に示す。

水戸系統では水戸 (MTO) を基準にして石岡 (ISI)、笠間 (KSM)、常陸太田 (HIO) の電位変化を、沼津系統では沼津 (NMZ) を基準にして修善寺 (SUZ)、伊東 (ITO)、熱海 (ATM)、小田原 (ODW) の電位変化を観測している。これらの観測は、NTT の電極と地下埋設ケーブルを利用したもので、基線長は数 10 km と長い。Fig. 2 は 2 年間のデータについて柿岡の地電位変化や降水量との関係を示したもので、地電位変化は日平均値でプロットしてある。1986 年 8 月の台風による大雨では、柿岡の地電位は大きく変化しているが、水戸系統では変化しておらず、降雨の影響のないことがわかる。これは主に接地電位が安定しているためと考えられるが、基線が長い効果にもよる。また、1986 年の伊豆大島の噴火の数日前よ

Fig. 2. Electric variations in daily mean values at NTT stations and at Kakioka, and the daily precipitations at MSM (near Numazu) and at MTO. We have had much precipitation by typhoon at the beginning of August, 1986, and the anomalous changes in the electric field at Kakioka (NS, EW) had occurred. While, electric fields of the Mito-group showed no remarkable anomalous change at that time. Several days prior to eruption of Izu-Oshima volcano, the electric potential at ODW decreased by about 800 mV.

Fig. 3. The hourly mean values of the magnetic fields at Kakioka (X, Y, Z) electric fields at Mito-group (ISI-MTO~HIO-MTO), Numazu-group (SUZ-NMZ~ODW-NMZ), off Tokai (K) and off Boso (S), and sea levels off Tokasi (T) and off Boso (B). Marks (*) are due to the defect in K and T.

り、小田原(ODW)で約800 mVの電位低下が観測された。

海底地電位は、東海沖および房総沖に設置された気象庁の海底地震常時観測システムの給電システムを利用したもので、観測値は地震波形、潮位変化等と共に、気象庁にテレメータされている[森(1982)]。東海沖ではFig. 1のOMZ-TS1間、房総沖ではKTU-BS1間の地電位を測定しており、本文ではそれぞれ、略号“K”および“S”で表わす。海底地震計先端部のTS1およびBS1では、津波計による潮位の観測を行っており、それぞれの地点における潮位変化を略号“T”および“B”で表わす。

また、柿岡における地磁気変化の北、東および下方向の成分をそれぞれ、“X”、“Y”および、“Z”とする。

上記の観測値は、1秒または1分値で与えられているが、本論文での解析期間は、1989年1月～9月の1時間平均値(30分～29分の毎分値の平均値)を使用することにする。Fig. 3は地磁気、地電位および潮位変化の1時間平均値をプロットしたものである。これらの観測値のうち東海沖の地電位と潮位データは伝送系の不調から時々欠測することがある(Fig. 3中の*印)。また、房総沖の海底地電位の場合には、勝浦付近を通過する直流電車によるノイズが入る[森(1989)]。電車によるノイズは発車の時に数分程度入るが、3月1日～3月28日の期間については、上述の直流電車によるスパイク状ノイズ等については直線補間による補正を行った。確率差分方程式の係数を求めるためには、欠測のないデータを使用する方がよりよい結果を生むであろうことを考慮して解析期間を定めた。水戸系統と房総沖の地電位変化については1989年3月1日12時～3月28日12時(A期間、649個)、また、沼津系統と東海沖の地電位変化については1989年8月11日0時～9月10日0時(D期間、721個)の各期間について確率差分方程式の係数を求めた結果について報告する。

§ 3. AICの分布と応答特性

地電位観測値 $E(t)$ を、それに関係すると考えられる参照観測値 $U_i(t)$ の確率差分方程式

$$E(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{m=-L}^K \{a_i(m)U_i(t-m) + \varepsilon(t)\} \quad (1)$$

で表わす。 n は参照観測値の成分数、 K および L は過去および未来の時間、 $\varepsilon(t)$ は不規則変化を表す。 $a_i(m)$ は U_i の応答係数を表し、 K, L の値に対して、最尤法によって決定される。種々の K, L に対してAIC(Akaike Information Criterion)[SAKAMOTO *et al.* (1986)]を計算し、一般的には、AICを最小にするようなパラメータが

用いられる。

例えば、水戸系統の地電位変化KSM-MTOを $E(t)$ とおき、 U_i を柿岡における地磁気変化 X, Y および Z とおいた場合を、KSM-MTO= (X, Y, Z) と表すことにする。Fig. 4はA期間におけるKSM-MTO= (X, Y, Z) と $S=(X, Y, B)$ の場合の K, L に対するAIC分布と応答特性を示す。AICの値は、 $0 \leq K \leq 15, 0 \leq L \leq 15$ の範囲で計算した。

KSM-MTO= (X, Y, Z) の場合は、 $(K, L)=(14, 7)$ でAICが最小値となり、 $(8, 7)$ で極小値となる。AIC最小値を0と置くと $(8, 7)$ では2.0となり、このときの応答特性(応答係数とそれらをフーリエ変換して求められる周期特性)はFig. 4の右側のようになる。 $S=(X, Y, B)$ の場合は、 $(K, L)=(4, 1)$ でAIC最小となり、他に極小値は存在しない。

AICの値はその差に意味があり、1～2程度以上ならAICの値の差は有意、また、パラメータ数はデータ数を N とすると、 $2N^{1/2}$ 程度以下が良いといわれている[SAKAMOTO *et al.* (1986)]。このような条件を考慮すると、KSM-MTO= (X, Y, Z) の場合は $(K, L)=(8, 7)$ の極小値を採用することが望ましく、 $S=(X, Y, B)$ の場合の $(K, L)=(4, 1)$ は十分に条件を満足している。しかし、種々の組合わせ(E や U_i を変更)で計算した場合、必ずしも条件を満足するような極小値が得られない場合もある。応答特性は地下電気伝導度を反映し、 $L \neq 0$ の場合は地電流変化の磁場変化への効果を示すものと考えられるが、一般的に $K+L$ の値が大きい程、周期特性曲線が異常に振動するようになり、物理的説明も困難になってくると思われる。異常変化をリアルタイム的に検出する場合を考えると、実用的な面から $K+L$ の値が小さいこと、とりわけ未来の値(L)が小さい方が検出時間が早くなることなどを考慮して、パラメータを選択するほうが良いと考えられる。

§ 4. 残 差

ある地域の地電位異常変化を検出しようとする場合、他地域の地電位変化を参照することも考えられるが、ここでは、誘導電位変化および海水に誘導された電流の陸上への浸透を考慮して、陸上の地電位変化については地磁気変化と海底地電位変化、海底地電位変化の場合は地磁気変化と潮位変化を参照観測値とした場合の結果を示す。AICの計算範囲は例で示したのと同様に、 $-15 \leq m \leq 15$ である。極小値がいくつか存在する場合は、 $K+L$ の値の小さい極小値、さらに $K+L$ が同程度の場合には、未来の時系列データの使用を少なくするために L の小さい極小値の応答係数 $a_i(m)$ を採用した。

Fig. 4. Distribution of AIC values (left) and response functions for minimum AIC (right). Here, for example, KSM-MTO=(X, Y, Z) means that the electric variations at KSM-MTO are calculated using X, Y, Z. ● shows the adopted minimum in the AIC value. ○ in the upper figure shows the smallest minimum in the AIC value. On the right-hand side, the impulsive response (RESPON) in time domain, the amplitude (AMP) and phase (PHASE) of the response functions in frequency domain for each associated data are down.

Fig. 5 は水戸系統の地電位変化と房総沖海底地電位変化の場合で、方程式 (1) のパラメータは A 期間で求めた。OBS は観測値を表す。R は残差を表し、例えば ISI-MTO における $R:XY$ は X, Y から地電位変化を推定し、観測値から推定値を差し引いた残差を表す。3 月 14 日頃には大きな磁気嵐があるが、誘導電位変化はほぼ完全に取り除かれている。短周期変動で ISI-MTO の場合は、 $R:XY, R:XYZ, R:XYS$ でほとんど差はないが、他の基線では $R:XY, R:XYZ, R:XYS$ の順で変動が小さくなっている。長周期変動では ISI-MTO および HIO-MTO の残差で 3~4 日の変動が目立ってくるが、これは参照観測値である X, Y, Z および S に 3~4 日周

期の変化がないために相対的に目立ってくる。S (房総沖海底地電位) には、ほとんど毎日電車のノイズが入り、そのノイズの詳細な特性を検討していない現段階においては、簡単に補正できないため、実用的なことを考えると、S をリアルタイム的に使用することは困難である。KSM-MTO の場合は地磁気変化による誘導電位変化が大きいため、地磁気変化を考慮することにより、10 倍程度検出精度を高められる。ISI-MTO や HIO-MTO の場合は地磁気変化による誘導電位変化が小さいため、相対的に人工擾乱が目立ってくる。そのため、地磁気変化を参照観測値としても、KSM-MTO ほど効果的ではない。ISI-MTO と HIO-MTO の場合の異常変化の検出精度の

Fig. 5. Observed (OBS) and residual electric fields (R) at Mito-group and at S (off Boso). $R:XYZ$, for example, indicates the residual electric field calculated using X , Y and S . The parameters of equation (1) are determined so as to minimize the AIC value in the interval A .

向上は、3~4日程度の周期を除くと5倍程度になる。

房総沖地電位変化(S)の場合は、地磁気変化だけで残差を求めた場合($R:XY$ および $R:XYZ$)には日変化の部分が残るが、潮位変化をも参照観測値とすると($R:XYB$)日変化を取り除くことができる。即ち、MORI (1987)で指摘されているように、海底地電位変化には潮位変化に伴う電位変化がかなり含まれていることになる。観測値と $R:XYB$ の残差の変動を比較すると、長期変動を除いて1/10程度になる。

沼津系統の地電位変化および東海沖海底地電位変化の結果はFig. 6に示す。パラメータを求めた期間は D 期間である。残差はどの基線でも日変化がほとんど除去され、 $R:XY$ 、 $R:XYZ$ 、 $R:XYK$ 間で優劣の差はない。従って、実用的には、参照観測値が少ない $R:XY$ を使用すればよい。観測値の変動に対して残差の変動は、どの基線でも1/5程度である。沼津系統の地電位変化を毎分値でプロットした場合、目立つ変化の大部分は人工的ノイズにも見えるが[例えば、森(1989)]、このように1

時間平均値を使用して確率差分方程式を適用することによって、異常変化の検出精度を高めることができる。同図*印(9月3日)にはどの残差にも異常変化が見られるが、これらは沼津における人工的ノイズと考えられる。

東海沖海底地電位(K)の場合は、房総沖海底地電位の場合と同様、 X 、 Y と潮位変化を参照観測値とすることによって、地磁気変化や海水の運動による誘導成分を大部分取り除くことができる。

次に A および D 期間で求めた確率差分方程式のパラメータを他の期間に適用した場合の例をFig. 7に示す。水戸系統は X 、 Y 、 Z を用いた場合、沼津系統は X 、 Y を用いた場合である。海底地電位は X 、 Y と潮位(T)を用いた場合であるが、房総沖海底地電位はノイズの補正を行っていないため計算していない。水戸系統は3~4ヵ月前の応答係数、沼津系統と K (東海沖海底地電位)は1~2ヵ月後の応答係数を使用した結果である。

水戸系統のデータについては、どの基線についても半

Fig. 6. Observed (OBS) and residual electric fields (R) at Numazu-group and at K (off Tokai). R : XYZ , for example, indicates the residual electric field calculated using X , Y and K . The parameters are determined in the interval D . Anomalous values (mark $*$) at Numazu-group in Sep. 3 become clear in the residual field. These anomalies are related to artificial noises.

日周期程度以下の変化は、3ヵ月程前の応答係数を用いても誘導成分はほぼ取り除かれているが、HIO-MTOの1日程度以上の周期の変動は、かえって観測値よりも目立ってくる。KSM-MTO=(X , Y), (X , Y , Z)の場合の応答係数に季節変化のあることは、森(1989)によって指摘されており、6ヵ月程度前の応答係数よりもむしろ1年前の応答係数を用いた方が、残差の変動が小さくなる。ある期間で決めた応答係数がどの程度の期間まで適用させることができるかさらに詳細な検討が必要であるが、実用的な面からは3ヵ月程度であろう。

Fig. 7の沼津系統の場合は残差での変動の程度は、どの基線でも同程度で日変化がかなり取り除かれている。応答係数を決めた期間から離れると除々に残差の変動の

程度は大きくなる。1989年7月13日にはITOに近い手石海丘で海底火山噴火があったが、今回の解析では異常らしき現象は見られなかった。

東海沖海底地電位の場合もFig. 7の残差では、日変化が僅かに残っているが、誘導成分はかなり取り除かれている。この場合も応答係数を決めた期間から離れるに従って残差の変動の程度は大きくなる。

Fig. 7で、*1は潮位(T)の欠測、*2はテレメータのカウンターエラーによるものである。

§ 5. ま と め

水戸系統、沼津系統の地電位観測値、および海底地電位観測値から、地震や火山噴火の前兆的異常変化を、高

Fig. 7. Observed (OBS) and residual electric fields (R) at Mito-group, Numazu-group and K . Residual fields at Mito-group, and ones at Numazu-group and K are calculated with the parameters determined in the interval A and D , respectively. Anomalous residuals marked by *1 and *2 are due to the defect in T and the counter error in K , respectively.

精度でリアルタイムに検出する方法を確立することを目的として、確率差分方程式による解析を進めた。参照観測値として、地磁気変化や潮位変化を使用した。

水戸系統では柿岡の地磁気変化を用いて誘導電位変化を除去し検出精度を5~10倍程度高めることができる。また、房総沖の海底地電位変化を考慮することによって、更に精度を高めることができるが、電車によるノイズを取り除かなければならないことを考えると、房総沖海底地電位を用いることは現段階では実用的でない。

沼津系統の地電位の場合は、地磁気 X , Y 成分を用いることによって、異常変化の検出精度を5倍程度高めることができる。高山(1989)は沼津系統の地電位変化は人工的雑音のため日周変化が非常に大きいと述べているが、今回の解析では日変化も大部分除去されており、数時間以上の長周期変化の大部分は地磁気変化による誘導電位変化の可能性が高い。しかし、さらに検討する必要がある。

海底地電位変化の場合は、地磁気変化の他に潮位変化を用いることによって、10倍程度異常変化の検出精度

を高めることができる。

ある期間のデータによって、確率差分方程式(1)式の応答係数を決定しておけば、観測値が1個増えた場合、直ちにその値が異常かどうかを判定できることになる。但し、現段階では、ここで求めた応答係数を適用できる期間は数ヶ月程度であろう。(1)式で L は未来の値を表わすため、 $L=0$ 以外ではリアルタイムで検出することにはならないが、現段階では、かなり満足すべき結果であろうと思われる。また、今回の解析では1時間平均値を使用したため、数時間以下の短周期変化を検出することはできない。1分値による解析は、高山・森(1989)によって試みられ、短周期誘導成分がかなり取り除かれる見通しがついているが、今後は短周期から長周期までを包括する方法を検討する必要がある。

また今回は、地磁気変化や潮位変化に対する地電位変化の応答特性については、限られた期間についての解析であるため、さらに、時間的変動を検討するとともに、それらの物理的裏付けを行う必要もある。水戸系統の地電位変化には、地球潮汐による変化も示唆されており

[MORI (1987)], 理論的に潮汐変化を取り除く必要がある。地磁気変化の分潮では、主太陽日周潮 (S_1), 半日周潮 (S_2) が大きく、また、わずかではあるが、主太陰半日周潮 (M_2) も含まれている。BAYTAP-G による解析で、平行観測値として地磁気変化を用いた場合、 S_1 , S_2 , M_2 相当周期等について、地磁気変化と地球潮汐あるいは海洋潮汐による変化分の分離が難しい。確率差分方程式に潮汐成分の項を加えることによって、さらに異常変化の検出精度を高めることはできると考えられるが、その前に、地磁気変化に含まれる潮汐成分に応答する成分とそうでない成分を分離することを考える必要がある。

謝 辞

通信施設を利用した地電位観測は日本電信電話株式会社 (NTT) の好意によって行われており、同社に対し深く感謝するとともに、実際の観測にあたられており、また、解析に対して有益な助言をいただいた地磁気観測所の小嶋美都子博士、気象研究所の高山寛美氏に感謝致します。海底地電位の資料編集については気象庁の香月修一氏に協力していただき感謝致します。

文 献

石黒真木夫・佐藤忠弘・田村良明・大江昌嗣, 1984, 地球潮汐データ解析—プログラム BAYTAP-G の解析

- 一, 統計数理研究所彙報, **32**, 71-85.
- 森 俊雄, 1982, 東海沖の海底地電位変化について—海底地震常時観測システムの利用—, 地震 2, **35**, 213-221.
- MORI, T., 1987, Variations in the geoelectric field with relation to crustal conditions of the earth., *Geophysical Magazine*, **42**, 41-104.
- 森 俊雄, 1989, NTT 施設を利用した地電位観測, 地磁気観測所技術報告, **28**, 1-77.
- 森 俊雄, 1990, 気象庁海底ケーブル地震計による地電位観測, 月刊海洋, **22**, 483-490.
- OZIMA, M., T. MORI and H. TAKAYAMA, 1989, Observation of earth-potential using telegraphic facilities and analysis with BAYTAP-G., *J. Geomag. Geoelectr.*, **41**, 945-962.
- SAKAMOTO, Y., M. ISHIGURO and G. KITAGAWA, 1986, Akaike Information Criterion Statistics, KTK Scientific Publishers, 1-290.
- 高山寛美・森 俊雄, 1987, 地磁気変化による誘導電位変化の除去の試み, 気象研究所研究報告, **38**, 17-28.
- 高山寛美・森 俊雄, 1989, 長基線地電位の誘導電位変化の除去, 地球電磁気・地球惑星圏学会講演予稿集, 春, III-2.
- 高山寛美, 1989, 沼津付近で観測される長基線地電位の特徴, 気象研究所研究報告, **40**, 63-81.
- TAKAYAMA, H. and T. MORI, 1990, The character of the geoelectric field observed with a long electrode span., *Tectonophysics*, **185**, 141-151.