地磁気変化による誘導電位変化の除去の試み

高山 寛美・森 俊雄

A Trial of Elimination of Geoelectric Field Variations Induced by Geomagnetic Variations

by

Hiroimi Takayama and Toshio Mori

Meteorological Research Institute, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

(Received Aug. 9, 1986; Revised Nov. 28, 1986)

Abstract

A model built in the time domain between geomagnetic variations and geoelectric field variations is applied to observation values. The parameters of the model are obtained by minimizing AIC (Akaike Information Criterion). The model with parameters obtained estimates the geoelectric field variations induced by geomagnetic variations and the residuals are calculated by subtracting the estimated values of the induced geoelectric field variations from the observation values.

The result indicates that this method is available for variations with periods between a few hours and a few days. The spectral density of the residual geoelectric fields has peaks with periods of O_1 and M_2 constituents. On the contrary, that of the observation fields has peaks with periods of S_1, S_2, S_3 etc.

1. は じ め に

観測される地電位差の原因としては、地磁気変化による誘導電位変化、電気鉄道や工場などの電気施設からの漏電、地中での化学作用による電位差、電荷をもつ水などの移動、結晶の圧電効果、電光放射等の大気現象など種々考えられる。地電位差変化のうち長周期変化は電極の接触電位などの影響がいちじるしいが、周期1日以下の短周期変化については、地磁気変化との相関があり、大きな部分を占めている(力武, 1972)。したがって観測された地電位差データから地殻活動に伴う自然電位変化を検出するためには、この地磁気変化による誘導電位変化を除く必要がある。このことは吉松(1937a)以来、柿岡地磁気観測所構内において、平行する長短2本の基線で地電位差を測定し、地磁気変化による誘導電位変化が基線長に依

存することから、それらの重み付きの差(差電位差)をとることによって試みられており、地震の前に変化した例も報告されている(吉松, 1937b, 1938, 1943, 1984; 柳原・横内, 1967)。

現在日本電信電話株式会社(N T T)の好意により電話局のアースとそれらの間の通信ケーブル施設を利用して、数10kmの長基線の地電位差観測を行っている(森, 1985; Mori, 1987)。そのうち水戸で観測している電話局の位置をFig.1に示す。この観測による地電位差データは人工的擾乱によるノイズはかなり小さく、地磁気変化による誘導電位変化の部分が大きい。そこで、この地電位差観測データから地磁気変化による誘導電位変化を除去し、地殻活動等に伴う自然電位変化の検出を試みた。なお地磁気変化は柿岡地磁気観測所における地磁気データを使用した。

Fig.1 Map showing observation sites, which are the repeater stations of the Nippon Telegraph and Telephone Corporation (NTT). MTO:Mito, ISI:Ishio-ka, KSM:Kasama, HIO:Hitachiohta, KAK:Kakioka Magnetic Observatory.

2. 方法

地磁気変化による地電位変化を推定する方法として、各種の電気探査によって地下の電磁氣的構造を求めて、それによって地磁気変化に対する地電位差変化の応答特性を得て行うことが考えられる。しかし、3次元的な構造を仮定すると大規模な計算を必要とする。そこで地電位差変化を地磁気変化の回帰式で表わすモデルを仮定し、観測値に適用して得られたパラメータをもつモデルによって地磁気変化による誘導電位変化を推定することにする。

地磁気変化による誘導電位変化は、電磁氣的に均質等方性の半無限媒質の場合、周期的な変化に対しては次のように考えられる。磁場変化 H が水平面内のある方向にのみ存在し、その周期を T 、媒質の透磁率を μ 、比抵抗を ρ とすると、それによって誘導される電場 E は、水平面内で H に直交する方向に生じ、 E と H の間には、

$$\frac{E}{H} \propto \sqrt{\frac{\mu\rho}{T}} e^{(\pi/4)i}$$

の関係がある。すなわち、電場は磁場に対して、位相が $\pi/4$ だけ進み、その振幅比は $1/\sqrt{T}$ に

比例する。

一般に磁場変化と電場変化は線形関係にあるので、時間領域において、任意の方向の地電位差 $C(t)$ は、地磁気変化の南北成分 $X(t)$ 、東西成分 $Y(t)$ と次の関係が期待される。ただし、すべてその平均値を差し引いたものとする。

$$C(t) = \sum_{m=-L}^K \{a(m)X(t-m) + b(m)Y(t-m)\} + \varepsilon(t)$$

ここで $a(m)$ および $b(m)$ はそれぞれ地磁気変化の南北成分 $X(t)$ と東西成分 $Y(t)$ に対する応答特性を表わす係数、 $\varepsilon(t)$ は地電位差の観測値のうち地磁気変化による誘導電位変化以外のものであり、観測上のノイズも含んでいる。コンボリューションの中で応答の係数に負の部分があるのは、位相の進みを考慮したものである。

このモデルを任意の区間の地磁気および地電位差の観測値に適用し、AIC(赤池の情報量基準)を最小にする $K, L, a(m), b(m), (m = -L, \dots, K)$ を求める。AICは次式で定義される量である(赤池, 1976)。

$$AIC = -2 \times (\text{モデルの最大対数尤度}) + 2 \times (\text{モデルの自由パラメータ数})$$

回帰モデルについては次のようになる。

$$AIC = n \log 2\pi + n \log d(p) + n + 2p$$

ここで n はデータ数、 p はパラメータ数、 $d(p)$ はその時の残差分散である。この場合 $p = 2 * (K + L + 1) + 1$ 、 $d(p)$ は $\varepsilon(t)$ の平均2乗誤差である。なおパラメータ数は $2\sqrt{n}$ 程度以下でなければならない。AICはその値の差に意味があり、1~2程度以上ならAICの値の差は有意であると考えられる(坂元ほか, 1983)。

この方法で決めた係数と地磁気変化の観測値とのコンボリューションを地磁気変化による誘導電位変化の推定値と考え、その地電位差観測値からの差を計算する。

3. 計算結果

柿岡地磁気観測所における地磁気変化と笠間-水戸間(19.0km, N87°W)の地電位差の観測値の例をFig.2に示す。サンプリング間隔は60分で、期間は1985年3月8日から8月16日までである。データは1秒値を3600個平均したものである。

区間A(Aのついた←→で示した区間)にモデルを適用した。KとLをそれぞれ横軸と縦軸と

Fig.4 Characteristics of model A with parameters determined due to interval A. The left half is for X component and the right half is for Y component. From top to bottom, impulse response in mV/km/nT, amplitude characteristic in common logarithms in mV/km/nT, and phase characteristic in radian.

Table 1 Parameters obtained by applying models to intervals A(left) and B(right).

Model A			Model B		
X	m	Y	X	m	Y
0.031	-4	-0.048	-0.079	-1	0.005
-0.023	-3	-0.003	-0.474	0	-0.255
0.030	-2	0.003	0.398	1	0.202
-0.136	-1	0.028	0.002	2	0.070
-0.434	0	-0.401	0.045	3	0.043
0.339	1	0.315	0.010	4	0.037
0.035	2	0.017	0.049	5	0.001
0.050	3	0.049	-0.004	6	0.018
0.030	4	-0.014	0.022	7	-0.008
0.013	5	-0.008	-0.016	8	0.088
0.002	6	0.081	0.013	9	-0.043
0.033	7	-0.038	0.036	10	0.001
-0.017	8	0.028	-0.003	11	0.030
0.024	9	0.000	0.008	12	-0.019
0.008	10	-0.032	-0.021	13	0.042
-0.026	11	0.026	0.002	14	0.024
0.010	12	-0.011	-0.041	15	0.037
-0.024	13	0.033			
0.024	14	0.004

Fig.5 Result obtained by applying model A to interval A. The upper three curves are the observation values of the geomagnetic and geoelectric field variations. The fourth represents the estimated values of the induced geoelectric field variations, the bottom one the residuals left by subtracting the estimated values from observation values.

Fig.6 Characteristics in the frequency domain of the time series in Fig.5. The left half is for observation values and the right half for the residuals. The upper three curves are multiple and partial coherencies and the bottom one spectral density in common logarithms in $(\text{mV}/\text{km})^2 \cdot \text{hour}$.

ている。地磁気擾乱による大きな地電位差変化はかなり取り除けている。しかし残差に見られる3時間程度以下の周期の変化が、観測値のノイズか1時間というサンプリング間隔によるものかはわからない。一方1日以上周期、特に5〜7日周期の変動が目立つが、これは観測値にみられる変動がそのまま残ったものである。

この時系列の周波数領域での性質をFig.6に示す。左側が地電位差観測値について、右側はその残差についてのものである。観測値において、3時間から3日ぐらいの周期の範囲で地磁気変化との関連の強いことを示している。それに対し、残差においては全般にコヒーレンシーが低く、地磁気変化に関連した部分はかなり取り除けていると考えられる。スペクトルではともに S_1 (周期24.0 h), S_2 (12.0 h), S_3 (8.0 h) 等の太陽に関係する分潮の周期でピークが見られるが、観測値では非常に鋭く、残差ではややなだらかになっている。

Fig.7は、区間Aについて求めたパラメータを持つモデルを他の区間B (Fig.2でBのついた←→で示した区間) に適用した例である。区間Bは5月13日から6月8日までの約26日間でデータ数は623個である。区間Aでの例と同様に残差に5〜7日の長周期変動がみられる。この時系列の

周波数領域での性質をFig.8に示す。残差のコヒーレンシーは、 S_1 , S_2 , S_3 等の分潮の周期付

Fig.7 Result obtained by applying model A to interval B. The legends are the same as in Fig.5.

Fig.8 Characteristics in the frequency domain of the time series in Fig.7. The legends are the same as in Fig.6.

Fig.9 Characteristics of model B with parameters determined due to interval B. The legends are the same as in Fig.4.

近において観測値についてのものより低くなっているが、Fig.6と比較すると高く、地磁気変化によって誘導された地電位差変化が、いくらか残っていると考えられる。スペクトルにおいてはピークの鋭さはなくなっているが、 S_1 、 S_2 、 S_3 等の周期付近にピークは見られる。

次に区間Bにモデルを適用し得られた係数をTable 1とFig.9の上段に示す。この場合 $K=15$ 、 $L=1$ である。区間Aについて得られた係数と同様な傾向をもつが、Xに対する係数の大きさとYに対する係数の大きさが、区間Aについてはほぼ同程度であったが、区間Bについては前者が後者

に比べてかなり大きい。また周波数領域でみると、Yに対する振幅特性で長周期の部分が減衰していかない。これは区間BのY成分にみられるわずかなドリフトによるものである。一方X成分に対する周期特性は区間Aについて得られたものとはほぼ一致している。

この区間Bで得られたパラメータをもつモデルを使って、同じ区間の地磁気変化による誘導電位変化を推定し、その観測値からの残差を計算し、それらをFig.10に示す。区間Aから得られたパラメータをもつモデルを使ったFig.7と良く一致している。そのスペクトルと地磁気変化にたいする

Fig.10 Result obtained by applying model B to interval B. The legends are the same as in Fig.5.

コヒーレンシーをFig.11に示す。区間Aから得られたパラメータをもつモデルを使った場合の結果 (Fig.8) と比較して、地磁気変化による誘導電位

変化の推定は当然さらに良くなっている。しかし、区間Aでの結果 (Fig.6) と比較すると、X成分についてのパーシャル・コヒーレンシーがやや高い。

区間Aと区間Bについて得られたパラメータをもつモデルを3月8日から8月16日までの観測値に適用し、それぞれの残差をFig.12に示す。上段に地磁気変化のX成分を示し、モデル区間を←→で示した。区間Bによる残差で特徴的に見られることは、短周期変化の振幅がモデル区間に比べてその他の期間において大きいことである。これはFig.2で見られるように、区間Aが大きな磁気嵐を含んでいるのに対し、区間Bは含んでいないという違いによると考えられる。1日より長い周期の変動は両方ともによく一致している。同図の下段に水戸地方気象台における有感地震と日降水量 (水戸地方気象台, 1985) を示す。これらと関連すると思われる地電位差の残差の変化は見られない。

同時に観測を行っている他の基線のデータに適用した結果をFig.13に示す。上から石岡-水戸間 (27.4km, S 40° W), 笠岡-水戸間 (19.0km, N 87° W), 常陸太田-水戸間 (18.8km, N 15° E) の残差, 柿岡地磁気観測所における地磁気のX成分, Y成分である。モデルのパラメータを得るために用いた区間は4月1日から5月10日まで (区間A) であり、サンプリング間隔は1時間である。

Fig.11 Characteristics in the frequency domain of the time series in Fig.10. The legends are the same as in Fig.6.

Fig.14 Orbits of the steepest descent direction and the amplitude of the geoelectric field variations.

笠間－水戸間では残差の分散が観測値の分散に対して約 $1/8$ になっているのに、他の2つの基線では約 $1/2$ にしかっていない。ただし、常陸

太田－水戸間のデータのうち7月10日から7月22日までと8月8日以降は欠測である。常陸太田－水戸間ではかなり大きく、石岡－水戸間ではわずかなであるが、3～4日の周期の変動がみられ、その位相も合っているようである。残差の振幅は笠間－水戸間と常陸太田－水戸間が同程度であり、石岡－水戸間ではかなり小さい。

Fig.14は2つずつの基線によって決まる地電位差の最大降下の方角とその大きさを示す軌跡であり、上が北で縦と横のバーは $\pm 20 \text{ mV/km}$ の大きさを示している。この付近の地域での地電位差変化の卓越方向は北西－南東方向である。石岡－水戸間の基線はこれとほぼ直交する向きであるためにその変化は非常に小さい。

(<MODEL> 85 3 8D OH OM. N = 1621, K = 10, L = 2, MFPEC = 26)
 (<DATA> 85 3 8D OH OM. N = 1621, DT = 144 MIN)

Fig.15 Result obtained by applying a model to the interval from March 8 to August 16, 1985. The legends are the same as in Fig.5. (Sampling period is 144 minutes in Fig.15 to 17.)

Fig.16 Characteristics of the model with parameters determined due to interval from March 8 to August 16, 1985. The legends are the same as in Fig.4.

Fig.17 Characteristics in the frequency domain of the time series in Fig.15. The legends are the same as in Fig.6.

次に、サンプリング間隔60分の場合の残差に見られた5～7日程度の周期の変動と地磁気変化との関連を調べるため、サンプリング間隔144分、データ数1621個（3月8日から8月16日までの約162日間）の笠間－水戸間の観測値にモデルを適用した。その結果をFig.15に示す。この場合も数日程度の周期の変動が見られる。Fig.16に係数とその周期特性を示す。係数は±1の範囲だけが大きく、振幅特性もX成分については1日より短い周期において、Y成分については全周期において $1/\sqrt{T}$ に比例する傾向が見られる。Fig.15の時系列の周波数領域での性質をFig.17に示す。観測値において、5～7日付近の周期でのコヒーレン

シーはかなり低く地磁気変化との関連はあまり大きくないと考えられる。残差についてはY成分との間に10～15時間の周期にやや関連がみられるが、他はほとんどない。観測値のスペクトルでは S_1 、 S_2 、 S_3 の鋭いピークが見られる。一方、残差のスペクトルでは S_1 のピークがなくなり O_1 （約25.82h）のピークが見られ、 S_2 のピークがかなり低くなり M_2 （約12.42h）のピークも見られ、 S_3 のピークも非常に低くなっている。残差の時系列に見られる数日周期の変動については地磁気変化との関連はみられない。また、サンプリング間隔が60分の場合の結果（Fig.12）と比較して、数時間以下の短周期の変化を除いて良く一致

している。

4. ま と め

NTTの電話局のアースとその間の通信ケーブル施設を利用して観測している地電位差の観測値から、地磁気変化の水平成分の観測値を使って、地磁気変化による誘導電位変化の部分を除去することを試みた。まず、地電位差と地磁気変化の水平成分との間に時間領域でのモデルを仮定し、それを適当な区間のデータにあてはめそのパラメータを決定した。さらにそれに基づいて地磁気変化による誘導電位変化を推定し、地電位差の観測値から差し引いた残差を計算した。その結果、数時間から3日ぐらいの周期の変化についてはかなり除去することができた。また残差のスペクトルに O_1 や M_2 の周期のピークが見られた。

地電位差変化の地磁気変化に対する比は1日より短い周期で $1/\sqrt{T}$ に比例する傾向があるが、地電位差変化が北西-南東の卓越方向をもち、ほぼ東西の基線である笠間-水戸間の地電位差観測値に地磁気変化の南北成分(X)だけでなく東西成分(Y)による誘導と考えられる変化が見られる。これはmagneto-telluric法の観測で多くの場合電場と磁場の振幅比は $1/\sqrt{T}$ に比例するが位相差が $\pi/4$ とならず、媒質を一樣とすることが困難である(力武, 1972) ことと同様に、この付近の電磁気の地下構造が、不均質性、異方性の一方あるいは両方をもつことを示唆している。

仮定したモデルに関して次のような問題点があげられる。(1)モデルのパラメータが、あてはめる区間によって異なる。(2)区間Bについて求めたパラメータをもつモデルを用いて得た残差の短周期変化の振幅がモデル区間とそれ以外の区間で変化する。(3)区間Aについて求めたパラメータをもつモデルを用いて他の区間Bの残差を計算すると地磁気変化との関連がみられた。

これらの問題点の理由として次のことが考えられる。(1)仮定したモデルが地磁気変化のうち水平2成分だけを使っている。(2)モデルをあてはめた区間が現象の一般的性質から偏った性質をもっている。したがって、地磁気変化のZ成分も考慮す

るなどのモデルの改良が必要であり、またできるだけ広い周期帯域の変化をもつ区間を選んでモデルをあてはめなければならないと考えられる。

残差に見られる O_1 や M_2 の周期の変化が地球潮汐によるものであるか、あるいは海洋潮汐の影響によるものであるか今後検討していきたい。さらに残差の時系列で見られる数日程度の周期をもつ変動が、人間活動に伴うノイズであるのか、あるいは自然電位変化であるのか興味ある問題である。

地電位差観測は日本電信電話株式会社の御好意により行われており感謝いたします。柿岡磁気観測所には、地磁気・地電位データを使用させていただき感謝いたします。なおスペクトル解析には統計数理研究所によって発表されている“時系列の解析と制御のためのプログラムパッケージ”TIMSAC(赤池・中川, 1972)を利用した。

参 考 文 献

- Mori, T., 1987: Variations in the Geoelectric Field with Relation to Crustal Conditions of the Earth, *Geophys. Mag.* (in press)
- 赤池弘次・中川東一郎, 1972: ダイナミックシステムの時系列解析と制御, サイエンス社, 123-187
- 赤池弘次, 1976: 情報量基準AICとは何か, 数理科学, No.153, 5-11
- 水戸地方気象台, 1985: 茨城県気象月報
- 森俊雄, 1985: 長基線地電位試験観測, 気象研究所研究報告, 36, 149-155
- 力武常次, 1972: 地球電磁気学, 岩波書店, 393-397
- 坂元慶行・石黒真木夫・北川源四郎, 1983: 情報量統計学, 共立出版, 42-64
- 柳原一夫・横内恒雄, 1967: 地震に伴う地電流の異常, 地磁気観測所技術報告, 7, 53-58
- 吉松隆三郎, 1937a: 地電流の地方的並に局所的研究, 気象集誌, 15, 145-158
- 吉松隆三郎, 1937b: 昭和11年12月27日伊豆新島強震及び同年10月26日安房野島崎沖顕著地震と地電流の変化に就いて, 気象集誌, 15, 158-160
- 吉松隆三郎, 1938: 昭和13年1月12日紀伊水道強震と地電位差の異常, 気象集誌, 16, 295-297
- 吉松隆三郎, 1943: 昭和18年9月10日鳥取地震と地電位差の変化, 地磁気観測所要報, 5, 66-67
- 吉松隆三郎, 1984: 昭和19年12月7日東南海地震と柿岡の地電位差の異常変化, 地磁気観測所要報, 20, 61-64.

地磁気変化による誘導電位変化の除去の試み

高山 寛美・森 俊雄

地磁気変化とそれによる誘導電位変化との間の時間領域におけるモデルを仮定し、観測値にあてはめそのパラメータを決定した。このモデルによって誘導電位変化を推定し、地電位差観測値からの残差を計算した。

その結果、この方法によって数時間から3日ぐらいの周期の誘導電位変化を除去することができた。観測値のスペクトルが S_1 , S_2 , S_3 等の周期にピークをもつものに対し、残差のスペクトルは O_1 や M_2 の周期にピークをもつ。