

漏洩電流の性質について (1)

住友 則彦・小泉 誠・後藤 忠徳
松尾 成光・渡辺 邦彦

ON CHARACTERISTICS OF ELECTRIC CURRENT LEAKED FROM ELECTRIC RAILWAYS (1)

By *Norihiko SUMITOMO, Makoto KOIZUMI, Tadanori GOTO*
Shigemitsu MATSUO and Kunihiko WATANABE

Synopsis

Preferred orientation surveys of telluric currents which are leaked from electric railways are carried out around Obaku ground to estimate precise position of the Obaku fault which is covered with sedimentary layers. The method is based on some characteristics of leaking currents which tend to flow with preferred orientations depending upon electrical resistivity structures beneath observation sites. The result shows the fault line is not clearly identified because data are not sufficient although one of candidates is estimated to run along east side of the ground. This is rather consistent with the result found from a γ -ray survey carried out by Mino and Takeuchi.

Temporal changes of the preferred orientation on the Obaku fault are also precisely examined to detect temporal changes of resistivity around the Obaku fault in relation to some crustal activities such as earthquake occurrences. We find that day to day fluctuations of the preferred orientation is as small as several degrees although the direction is a little fluctuated with precipitations.

1. はじめに

直流電車軌道からの漏洩電流が都市近郊に於ける電磁気観測に大きな障害になることは広く知られている。しかし、漏洩電流の性質を詳しく調べてみると、その流れ方は全く不規則ではなく、場所を固定するとそこでは電流の流れる卓越方向がほぼ一定であること、地下の抵抗構造に支配されることなどが分かってきた。この性質を利用して地下の被覆断層の位置推定が試みられている^{1,2)}。藤原・他²⁾によれば、被覆断層が堆積層下で縦ずれ成分を持っているならば、地表での見かけ比抵抗が断層を境にして異なるので、漏洩電流は断層を横切るときに屈折するとして、花折断層などの調査を行なっている。この方法はまだ完成されてはいない。多くの事例を積み重ねることによって探査方法としての実用化を目指したいと考えている。

ここでは、防災研究所の近くにある黄檗断層を調査の対象にした。この断層は京都盆地の南部の東縁をほぼ南北に走っており、活断層研究会³⁾では確実度 1、活動度 B の断層としている。すでに、狐崎・他⁴⁾、小林・他⁵⁾等によって地震探査法、入倉・他⁶⁾によって微動観測から、さらに見野・他⁷⁾によるガンマー線探査法などによって位置決めがなされているが、それぞれに異なった結果を得ている。我々の方法が適用できるかどうか、また今後の開発すべき問題点を探るために、同じ場所を選び探査を試みた。なお、この場所では以前土井・住友¹⁾によって漏洩電流法が試みられているが、その時は主として漏洩電流の振幅の変化に注目して概査がなされただけである。

一方、漏洩電流卓越方向の時間変化の有無を調べることも興味深い問題である。卓越方向が全く地下の抵抗構造のみに依存するのであれば、もし抵抗構造が時間変化をすれば方向の変化として検出できるはずである。Buchbinder et al.⁸⁾ は地電流の卓越方向の季節変化と地下水との関連性を調べている。地震発生に関連して電気抵抗が変化することは多くの研究者^{9,10,11)} によって報告されている。電気抵抗の変化を検出する方法は、人工電流法、マグネトテリック法、CA 変換関数法などがある。しかし、都市近郊で自然の電磁気シグナルを用いて抵抗変化を検出することは、漏洩電流の影響が大きく不可能に近い。もしノイズである漏洩電流を逆利用して抵抗変化を検出することが出来るなら、都市近郊での地震予知の有力な手段になり得る。ここでは卓越方向の時間変化の決定精度を調べた。

2. 測定方法および解析方法

測定方法は本質的には藤原・他²⁾ の方法と変わりはない。Fig. 1 に測定システムのブロック図を示した。電極にはフェニックス社製鉛一塩化鉛電極を用いた。これは平衡電極の一種で、電極と大地との接触面で分極作用による接触電位差が生じないので、設置後のいわゆるドリフトがほとんどない。従って高倍率で観測が可能である点が優れている。電位差測定は東西、南北直交2成分、電極間隔10mで行なった。電極からの入力信号をローパスフィルター（遮断周期10秒）付き地電流アンプ（横浜電子製）を通して、ティアック社製 DR-F1 により、サンプリング間隔1Hz でデジタル収録した。同時にアナログ記録計にも

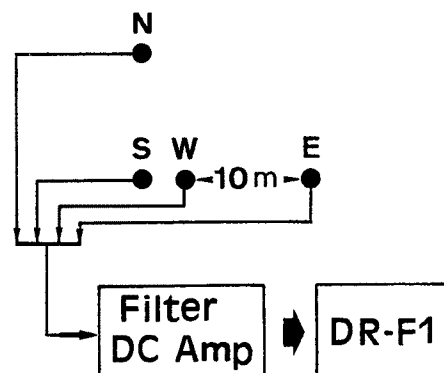


Fig. 1. A block diagram showing the measuring system of the telluric currents.

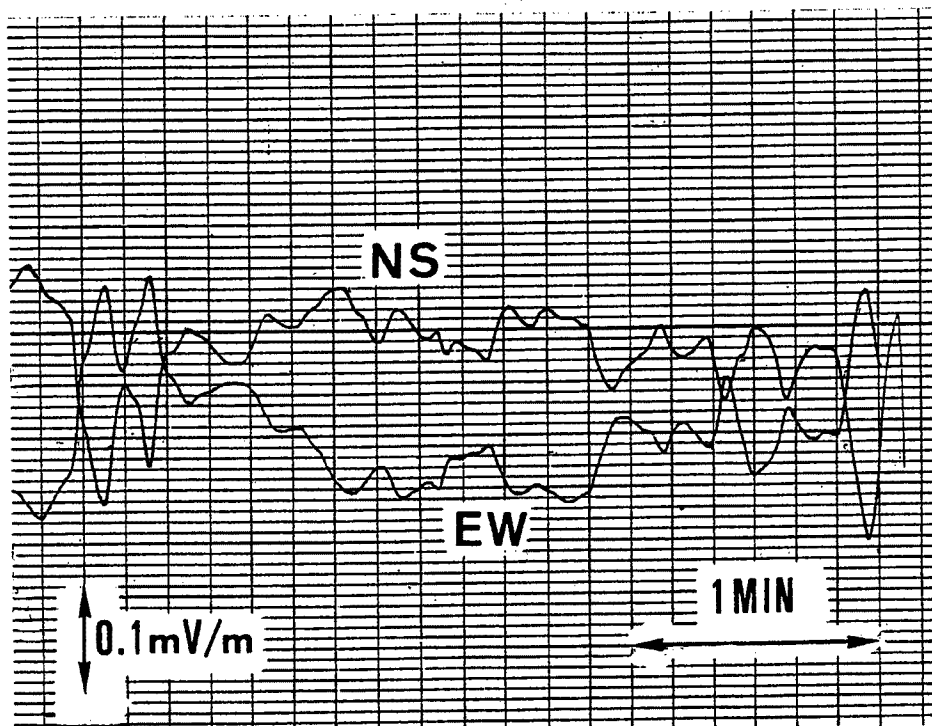


Fig. 2. An example of wave forms of the leaked currents from railways. Two components of the two orthogonal directions are well synchronized.

波形を記録した。

Fig. 2 に観測された電位差波形の一例を示した。南北および東西成分がかなり良く同期している事が分かる。波形の振幅比もほとんど一定のように見える。これは電流の流れる方向が一定していることを示唆するものである。この記録から方向を求めるには次の方法によった。

- 1) 原記録から移動平均により長周期成分（13秒以上）を除去し、短周期成分を抽出。
- 2) 直交2成分から軌跡を描かせ、最小2乗法により勾配を求める。

別の観測点の記録波形例を Fig. 3 上に示した。この場合は南北と東西の波形の対応が悪い。これは電流の流れる方向がたまたま電極配置軸方向の一つに近かったためと考えられる。この様な場合は、初めは測定現場で電極配置軸を回転させて、モニター記録上で直交2成分が対応した変化をするような方向を探した。しかし、後には観測は南北と東西それぞれ2方向に固定し、計算時に座標軸の回転を行なって精度よくとまる方向を探した。Fig. 3 下に座標軸の回転後の波形例を示した。最近では、測定現場で直接パソコンに取り込み、計算機の中で座標軸の回転などを行なって、直ちにその場所での漏洩電流卓越方法を求める方法を開発し採用している。

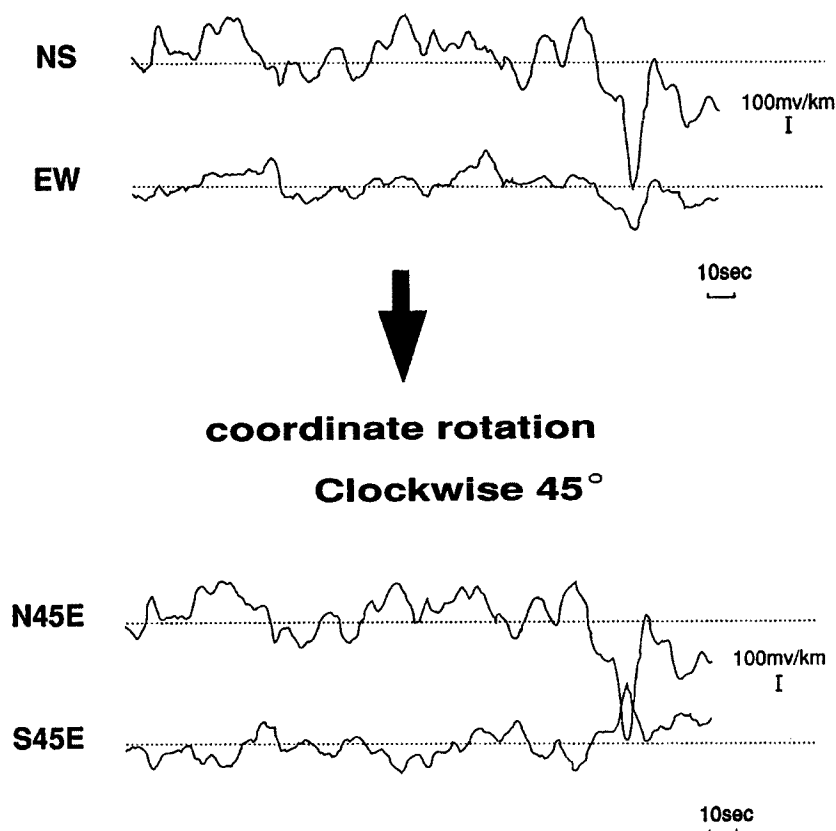


Fig. 3. Upper: Another example of wave forms of the leaked currents which are not synchronized.

Lower: Wave forms of the leaked currents which are calculated with some rotation of the coordinate axes. They seem to be well synchronized.

3. 測定場所および測定結果

Fig. 4 の黄檗断層は大凡の位置である。断層は京大の宇治黄檗グラウンドの下を通っていると推定されている。Fig. 5 に入倉・他⁶⁾、小林・他⁵⁾、見野・他⁷⁾らによる断層推定位置を示した。図にみられる通り、

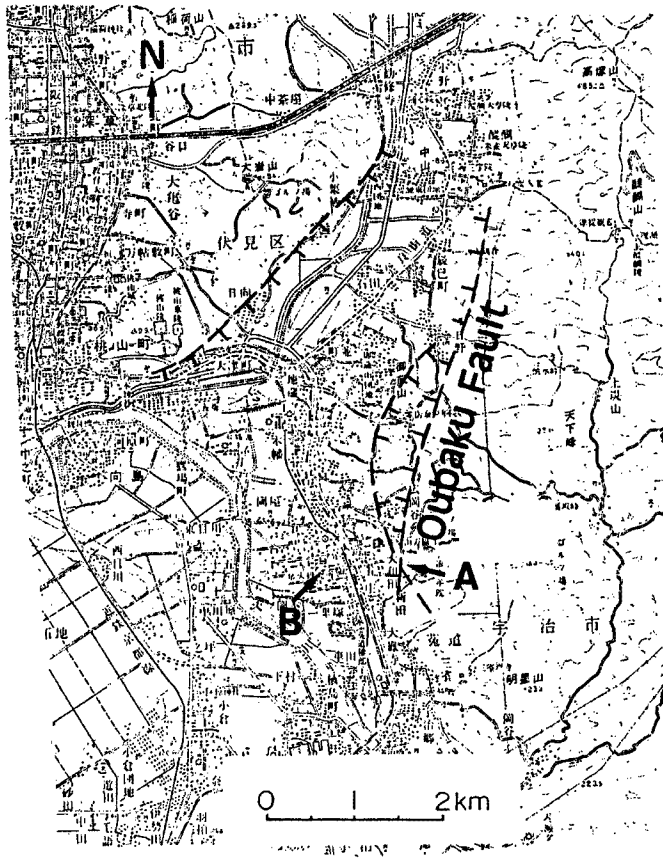


Fig. 4. Topographical setting of the site under study (after Kobayashi et al.⁵⁾).

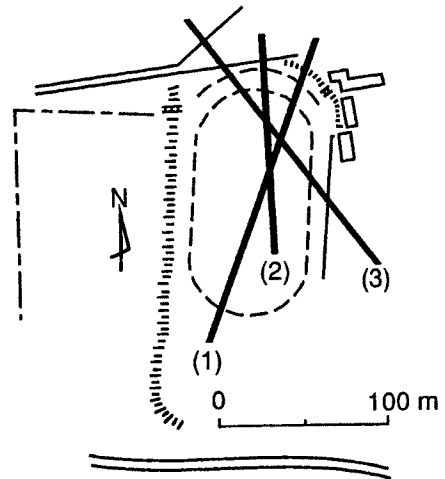


Fig. 5. Schematic position of the Obaku fault lines proposed by Irikura et al.⁶⁾ (1), Kobayashi et al.⁵⁾ (2) and Mino et al.⁷⁾ (3).

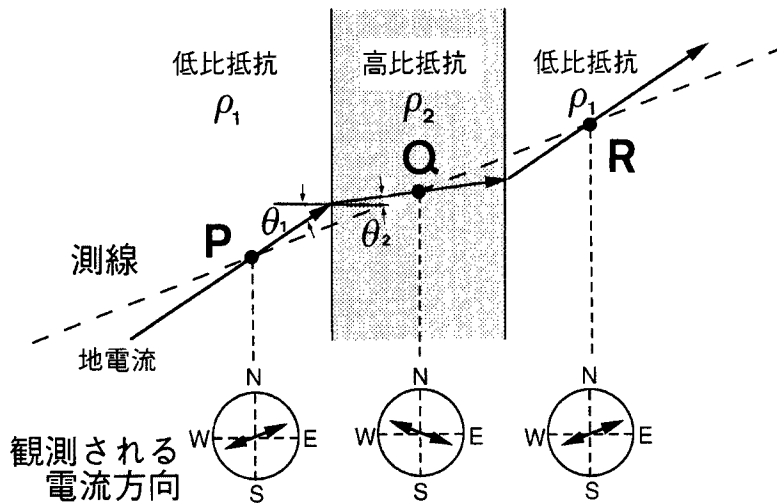


Fig. 6. Schematic preferred orientation of telluric currents which are distorted at discontinuity of resistivity.

3者の推定は大きく食い違っている。小林⁵⁾によれば、宇治黄檗グランド辺りは、黄檗断層の副断層が通っているの、水平位置が少しでもずれると副断層を探索する事になるのではないかとしている。

我々もこのグランド内に測線を設けて漏洩電流の卓越方向の分布を調べた。卓越方向から断層位置を推定する考え方は、藤原・他²⁾によるものと同じである。Fig. 6に電流方向を変化の様式図を示した。すなわち、地電流は比抵抗の異なる境界を流れるとき、良く知られているように次式に従って屈折する。

$$\rho_1 \cdot \tan \theta_1 = \rho_2 \cdot \tan \theta_2$$

ここで、 ρ_1, ρ_2 は比抵抗、 θ_1, θ_2 はそれぞれ地電流の境界への入射角および屈折角である。もし、測線が図の点線で表わしたような経路をとるなら、例えば、P, R点では E_x と E_y は同相であるが、Q点では逆位相

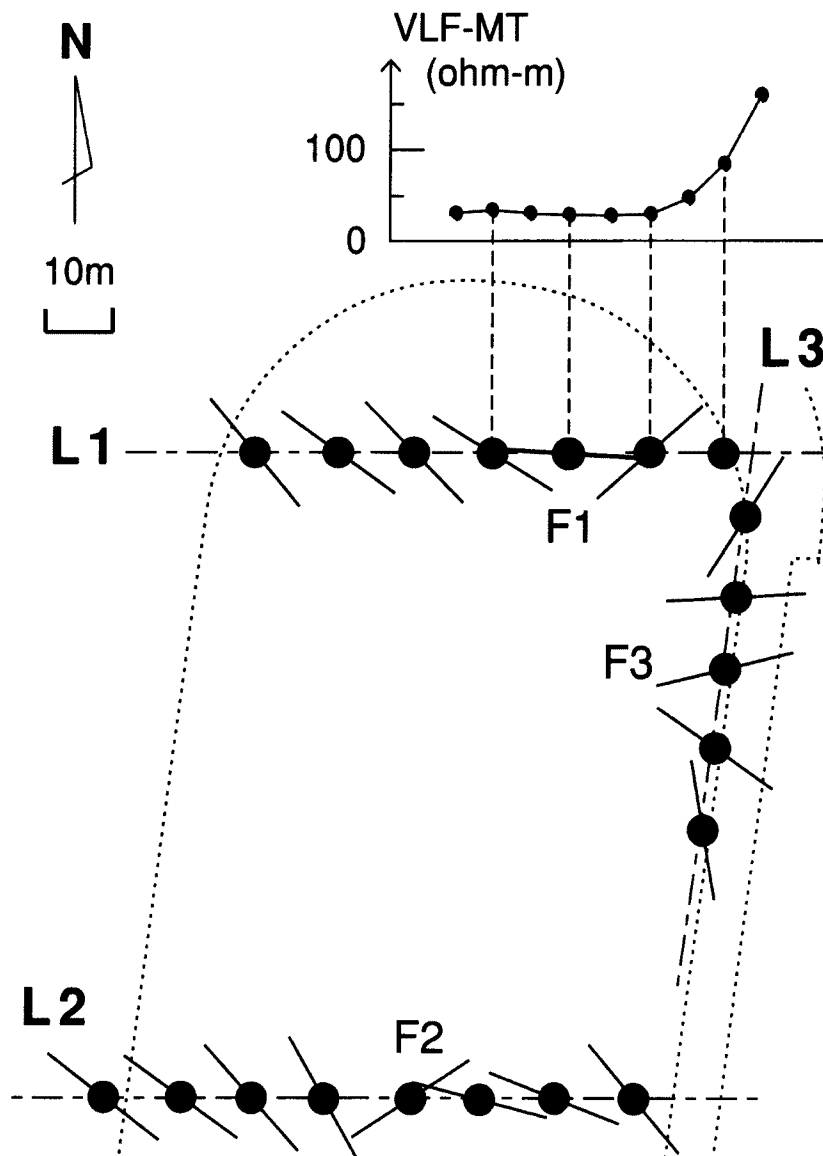


Fig. 7. Distribution of preferred orientations of telluric currents on the Obaku ground. A line passing through F1 and F3 is estimated to be probably the Obaku fault based upon the present study. Another line passing through F1 and F2 is a possible fault line. Result of the VLE-MT survey is shown in upper part of the figure.

になる。この様に比抵抗の不連続境界での地電流の卓越方向の変化から断層線を推定する。

このグラウンドは電車軌道（JR 奈良線および京阪電鉄宇治線）から直線距離約 500 m の位置にある。Fig. 7 にグラウンド内における我々の測定結果を示した。これから直ちに断層位置を一義的に決めることは難しい。グラウンドの東側が急な斜面になっているので、測定点を東に広げることが出来なかった。測線 L1 の F1 付近で方向が大きく変わっている。藤原・他²⁾によればこの下に比抵抗の不連続な境界があると思われる。測線 L2 の F2 辺りにやはり方向が変わっているところがある。しかし、この地点のデータは他の地点に比べてばらつきが大きく信頼性が乏しかったので、ここでは、あえて無視したが断層線がこの辺りの下を通っている可能性は残されている。今後再調査の必要が有ろう。

我々は地形などの状況証拠から、むしろ、測線 L3 の F3 付近に不連続境界が有るのではないかと推定している。F1 と F3 を結ぶ方向は見野・他⁷⁾が得た断層線の方向に近い。そこでグラウンドの南側を通っている道路に沿って測線を取り同様な測定をした結果を Fig. 8 に示した。F1 と F3 を結ぶ線の延長と測線 L4 との交点は、F4 付近になるが、電流方向に特徴的な変化は見られなかった。すぐ後で述べるような理由で我々は断層線はこの付近の下を通っている可能性が高いと考えている。しかし、電流方向の急変はむしろ F4 の西側 100 m 位にある。有力な候補の一つである。ただ、この辺りには人工物の影響が有るように見えるので明確な事は分からない。この点をさらに明らかにするには、もっと測点を密にする必要があるが、道路条件などで測定点が制限されるのでやむを得なかった。

藤原・他²⁾は花折断層の調査において、VLF-MT を併用して、断層線の位置推定を試みている。そこで

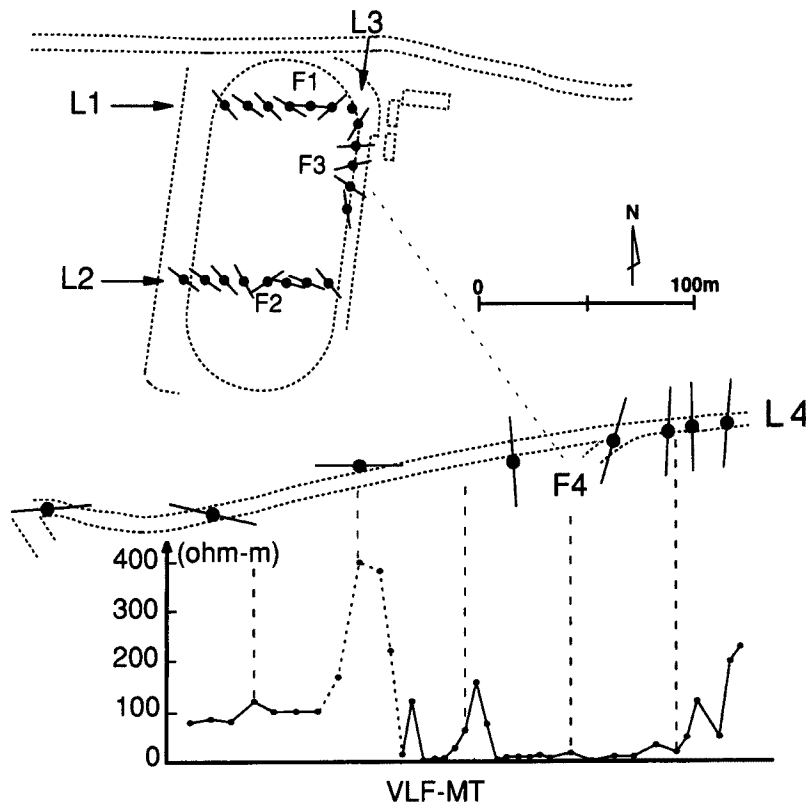


Fig. 8. Distribution of preferred orientations of the telluric currents along a road which is situated southern side of the Obaku ground. The estimated fault line which passes through F1 and F3 is extended toward F4. However particularly characteristic change of the preferred orientation is not found near F4. The VLF-MT results are shown in lower part of the figure.

我々も測線 L1 及び L4 において VLF-MT を行なった。測定された比抵抗値を Fig. 7 及び Fig. 8 の上部、下部に示した。これによると測線 L1 の場合は、F1 の東側辺りから見かけ比抵抗が増加している。また、測線 L4 の場合も F4 の辺りから比抵抗は漸次増加していることがわかる。この増加は基盤が浅くなっていることを反映していると考えられる。VLF-MT の探査深度を考えると、基盤までの深さは 100 m を越えることはないと推定される。狐崎・他⁴⁾の報告では山側のボーリングが 50 m で基盤に達したと有るので、これと矛盾しない。L4 の中央辺りにみられる大きな揺らぎ (Fig. 8 グラフ中の破線) は先に述べたように、この付近にある水路の人工物の影響と思われる。

以上の事から、今回の調査だけでは黄檗断層の位置を同定する事は出来なかったが、今後測線をグランドの北側等に設けることによって、正確な位置を推定できるのではないかと考えている。予備的な実験ではアスファルトの上でも、簡易に土盛りをする事によって、電極の設置ができ、電位差測定が可能であることが分かったので、市街地でもこの方法は適用できると思われる。

4. 漏洩電流卓越方向の時間変化

次に、電流卓越方向の時間変化を考えよう。いま、Fig. 6 において仮に、 $\rho_1/\rho_2=0.1$ とし、もし ρ_2 が 10% 変化したとすると、 θ_2 は約 3 度変化する。もし、山崎断層で観測されたように¹²⁾、抵抗が 30% 程度も変化すると屈折角約 10 度の変化が期待される。後に述べるように、これは十分検出可能な角度である。

Fig. 9 は狐崎・他⁴⁾によって求められた黄檗断層の構造の一断面である。この場合、山側の見かけ比抵抗は谷側に比べて高くなることが期待される。山崎断層の様な破碎帯が十分発達したところでは、地殻応力の変化にともなった地下水の変化による比抵抗変化が期待される。黄檗断層の破碎帯の幅がどの程度であるか

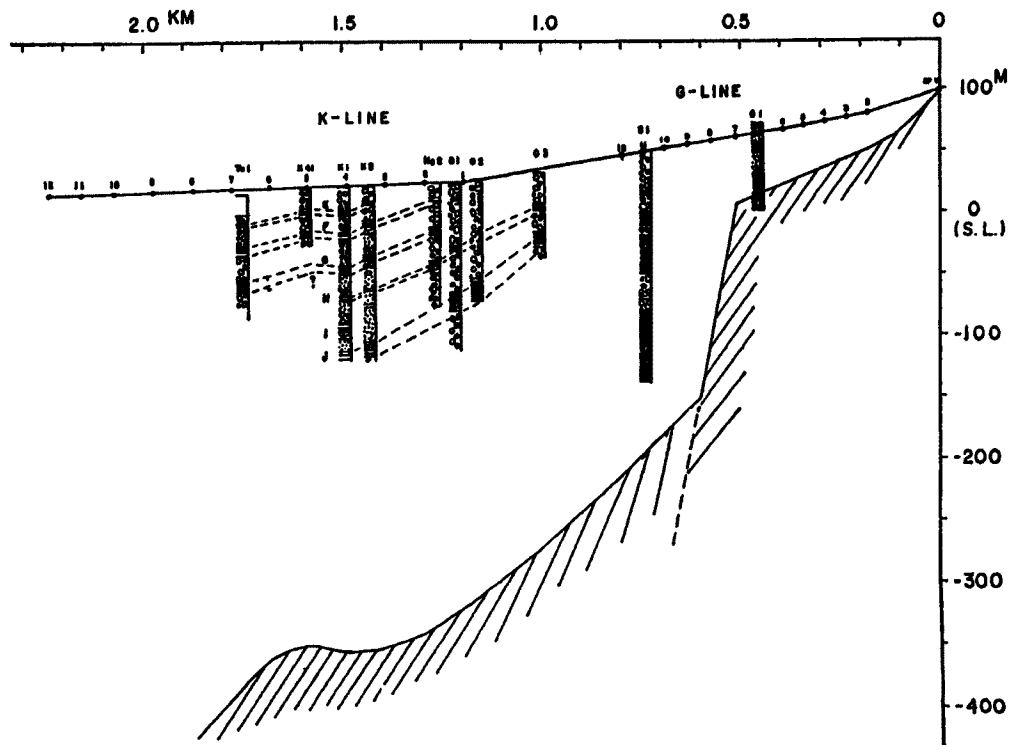


Fig. 9. Geological section estimated by Kitsunezaki et al.⁴⁾ based on well log data as well as the seismic exploration data.

現時点では明瞭ではない。従って観測にかかるような抵抗の変化が起こり得るか否かは分からない。しかし、ここでは卓越方向が日々どの程度安定に測定できるかを調べることにした。

観測点の位置は Fig. 4 に A と印した地点で、断層の東側で基盤までの深さが浅い方に当たる。電極は鉛管を塩化ナトリウムで鍍金した鉛—塩化鉛平衡電極を地中約 50 cm に埋設したものを用いた。東西、南北それぞれ 10 m の電極間隔で、ローパスフィルター付きアンプを通し、DR-F1 に毎日の16時から20時まで4時間、1 Hz サンプリングしたデータを用いた。方向を求める方法として、次の3方法を比較した。

- イ) パワースペクトルの比から算出
- ロ) 波形の振幅比から算出
- ハ) 軌跡の平均勾配を YORK 法を用いて算出

ここでは、仮に上の3方法を、パワースペクトル法、振幅比法、YORK 法と呼ぶことにする。

初めにパワースペクトル法を説明する。Fig. 10 に漏洩電流のパワースペクトルの一例を示した。これは記録からデータ長128秒区間ずつを切り出し、直流成分の除去、データウィンドウを掛け、FFTによりスペクトルを求め、さらに周波数域で平滑化したのち、パワーを計算、この操作を10回繰り返し各々のパワーを stack した。図の縦軸はパワーの平方根で表示している。これから分かるように、漏洩電流はかなり幅広い周波数域でパワーを持っていることが分かる。周期による東西成分と南北成分の比（すなわち、卓越方法）はほとんど変わらない。長周期側の方が幾らか安定の傾向にあった。ここでは比較的方向が安定している周期32秒付近の方向を採用した。

次に波形の振幅比から直接方向を求める方法を説明する。上と同様に、データ長として、128秒をとり、

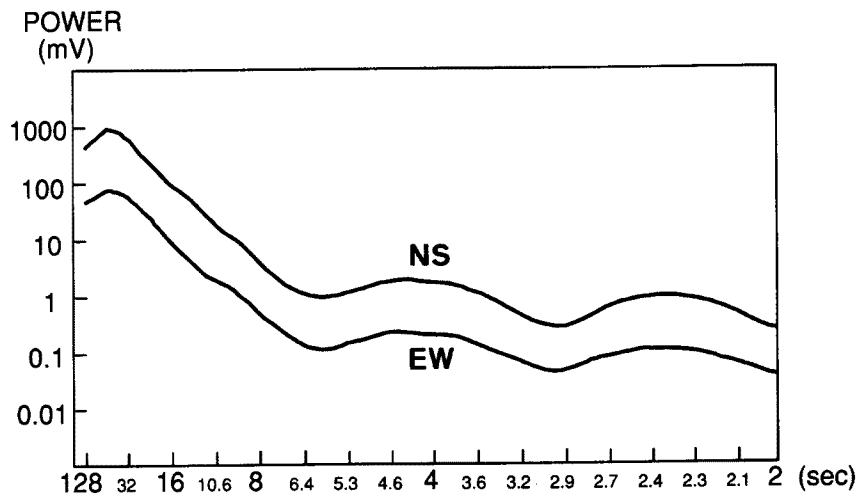


Fig. 10. Power spectra of artificially leaked currents from railways.

直流成分除去、移動平均をした後、絶対値をとり、直交2成分各々の平均振幅を求め、毎秒の振幅の大きさが両成分とも平均振幅の5割を越えるもののみを抽出し、それぞれから方向を計算、それらの平均値を求めた。この操作を10回繰り返し、各回の標準偏差の重みをつけて平均した値を、解析期間（約20分間）の代表値とした。

最後に、YORK 法（最小2乗法的一种）による計算について説明する。これは E_x と E_y 成分から得られる軌跡に直線を当てはめて勾配を計算するのであるが、 E_x , E_y 両方の成分に誤差が混入しているとみなされるので、軌跡上の各点から直線へおろした垂線の長さの2乗和が最小になるように（これを YORK 法と呼ぶ）直線を当てはめている。この計算ではデータ長を1時間、つまり3600個の全データから、毎時の平均勾配を求めている。Fig. 11 にこれら三つの方法の比較を示した。今回比較した期間に限れば、York 法によ

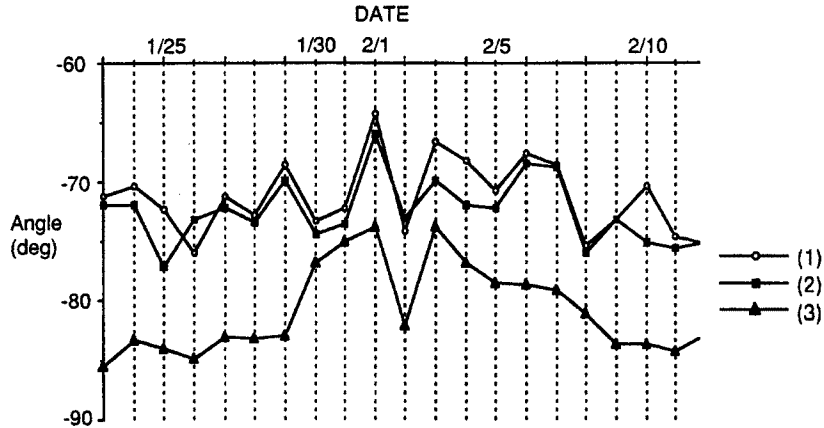


Fig. 11. Comparison of preferred orientation angles of the telluric currents which are calculated by the power spectral method (1), the wave amplitude method (2) and the York method (3) which is a kind of the least square method.

る方向の変化が若干他の方法と異なる傾向にあるが、他の時期について調べた結果、これら3方法にはほとんど著しい違いは無いことが確認されている。これらの方法による方向の時間平均値の標準偏差はおよそ1度くらいである。

一方、防災研究所構内で一昨年かから電極のテストをかねて、地電流の卓越方向を調べている場所（以後、これをB地点と呼ぶ）がある。Fig. 4にBと印した地点で、電車軌道からおよそ400メートルはなれている。ここでは、第12図に示すように、鉛一塩化鉛電極を半径10mの円上に8カ所、中心に1カ所設置し、それぞれ中心電極と周囲の各電極との電位差を連続的に測定している。電極は深さ約60cmに埋設している。観測の例として、電極1、3、5、7と0との間の電位差について、91年3月から5月にかけての変化（夜間午前2時の値）を降雨のデータとともにFig. 13に示した。ドリフトはかなり小さい。雨の影響が若干見受けられるが必ずしも一対一対応はつかない。また、Fig. 12にはこの場所における局所的な漏洩電流の強さおよび方向の分布を示した。この様な狭い範囲でも、電流の強度や方向に若干の系統的な差異が見られる。これらは地下の比抵抗構造に起因すると考えられる。

Fig. 14に黄檗グラウンドにおけるA地点での日々の方向変化と防災研究所構内のB地点のそれとを比較した結果を示す。驚くべき事に、両者の変化の様子はきわめて似ている。もしこれが抵抗の変化によるのであれば、両地点の地下構造に共通点があることになるが、B地点は堆積層の厚いところで断層からは十分はなれているので、とてもA地点との共通点は見いだされない。Fig. 15にグラウンドにおけるYORK法によった方向とその時の地電流の東西成分のパワーおよび宇治地区の日雨量を示した。これを見ると明らかにパワーの変化と方向変化は対応しており、またそれらは降雨（防災研究所構内で測定）の量とも相関があるように見える。この事は、雨によってレールと大地との接地抵抗が低下し、漏洩電流量が増大し、かつレール上の

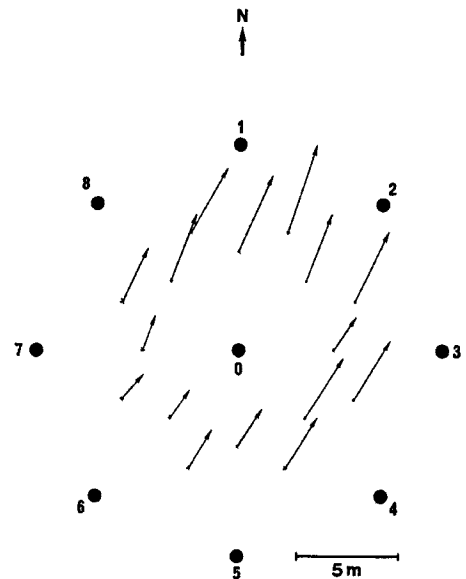


Fig. 12. An example of spatial distribution of the preferred orientation angles of leaked currents at an extremely local place.

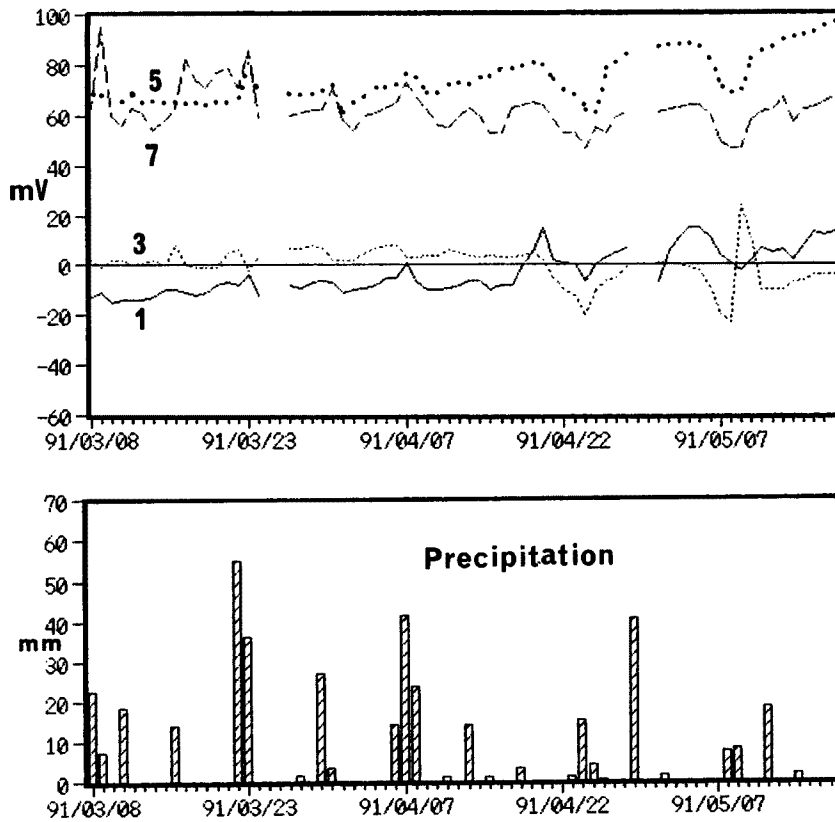


Fig. 13. Temporal changes of self-potentials measured in different directions. They are a little affected by precipitations.

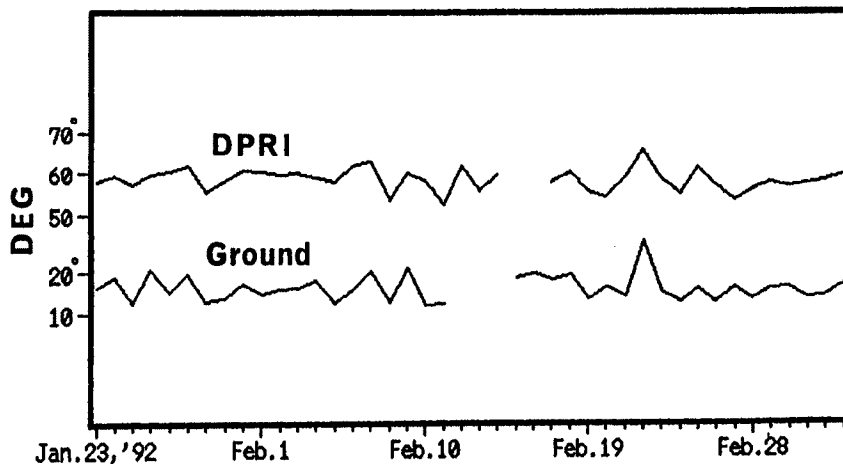


Fig. 14. A parallel observation of the preferred orientation angles of the telluric currents at two stations which are nearly 1000 m apart from each other.

漏洩分布が変化したと考えられる。この結果 A 点及び B 点での電流の流れ方が変化したのであろう。もっとも、雨によって A 点、B 点付近の抵抗構造が変化したとも考えられるが、これが両地点に共通した変化と考えるのは余りにも偶然すぎると思われる。今後の詳しい検討が必要である。次に、解析した時間帯によって方向の変化に違いがあるか否かを確かめるため、各時間帯別の方向の変化を Fig. 16 に示した。これ

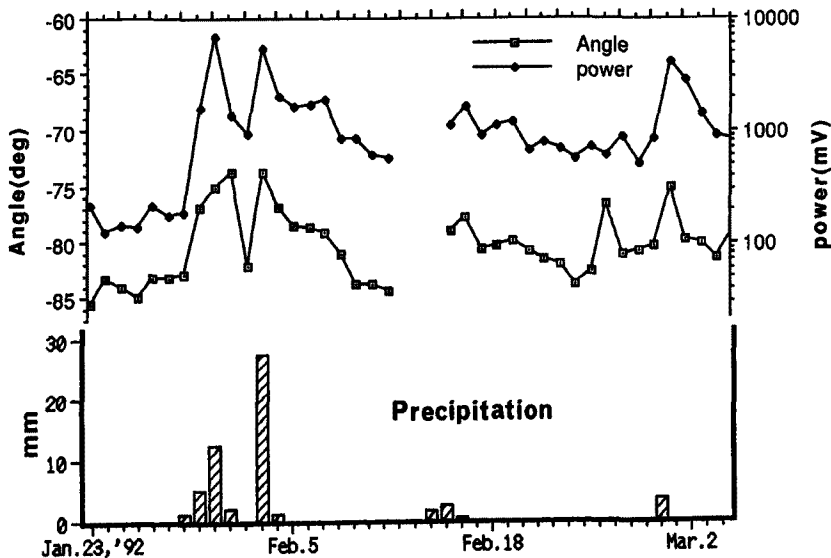


Fig. 15. Correlation between the preferred orientation angle of the telluric current calculated from the York method and the power of fluctuations of the telluric currents. Precipitation is indicated at the lower.

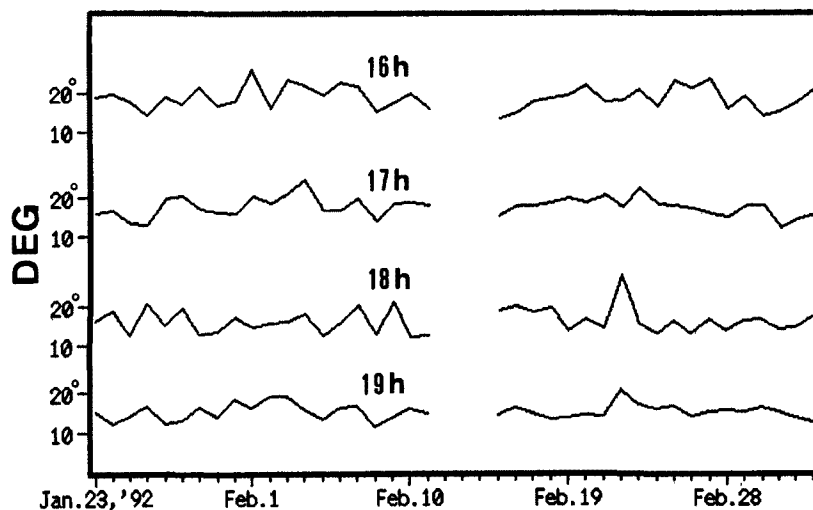


Fig. 16. Comparison among the preferred orientation angles which are calculated using the data of different time sections every day.

によると、方向の絶対値にはいくら系統的な差異は認められるものの、全体としての傾向は似ているようである。しかし、数日程度の細かい変化は、時間帯によっていささか異なるようである。また方向のばらつきは19時の時間帯が一番小さかった。

以上の事から、A、B 両地点に共通した変化の原因はソース側、つまり電車の配置の日々の揺らぎや、降雨による漏洩電流の変化に関係しているのではないかと考えている。時間帯によって方向変化が若干異なることもこの考え方を支持しているものと思われる。この性質はソースに原因する変化と地下の抵抗変化によるものとの区別が可能であることを示唆する。すなわち、漏洩電流卓越方向を2地点、つまり、一つは断層上もしくはその周辺で、いま一つを断層から十分はなれた場所で観測し、両者を比較することによって、抵抗変化そのものによる方向変化を検出する事が出来ると思われる。

5. ま と め

電車軌道のすぐ側を除けば、漏洩電流の流れる方向は場所に固有の卓越方向が有ることは、かなり一般的な性質と言って良さそうである。漏洩電流の卓越方向は、もともとは個々の電車の位置と変電所(10~20 km 毎に軌道に沿って設置されている)の位置関係で決まると考えられるが、変電所1区間内にある電車が複数ある場合は、それぞれの電車位置に関係した漏洩電流の足し合わせとなるので平均的な方向が決まるのであろう。そしてこの卓越方向が地下の電気抵抗構造の影響を受け局所的に屈折するものと考えられる。この様な性質を利用すれば、被覆断層に縦ずれ成分があり、基盤面が浅ければ堆積層の上から、断層位置を推定する事の可能性が高いことが分かった。この方法は街中でも可能であるので有用と思われる。但し、通常市街地の地下には様々な人工的な埋設物が有るので注意が必要である。黄檗断層の位置は今回の観測のみからは特定できなかったが、今後観測範囲を広げることによって、明確にすることが出来ると考えている。

電車のダイヤが著しく変わらない限り、毎日のある時間帯を固定すれば、漏洩電流の方向はかなり安定していて、日々のばらつきは2~3度で有ることが分かった。方向は降雨の影響をある程度受けるが、これは1 km 近く離れた地点でも共通した変化を示したので、これはソース側、つまりレールからの漏洩電流の密度変化によると考えられる。この影響を除くには、断層近辺とそこから十分はなれた2地点で並行観測をすれば、断層近辺の電気抵抗の変化のみ識別出来ると考えられる。

この研究にあたり、京大グランドおよび施設の一部を貸していただいた、京都大学学生部に厚くお礼申し上げます。また、観測時に協力をいただいた地震予知研究センター大学院生、平松良浩氏にお礼申し上げます。降雨量のデータを提供していただいた、防災研究所内水災害部門にお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 土井恵治・住友則彦：電気鉄道からの漏洩電流の性質と電気探査への応用，京大教養部地学報告，第19号，1984，pp. 31-41.
- 2) 藤原 智・住友則彦・塩崎一郎：電気鉄道からの漏洩電流の性質と電気探査への応用(2)，京大教養部地学報告，第21号，1986，pp. 8-16.
- 3) 活断層研究会：日本の活断層，東京大学出版会，1990，pp. 224-229.
- 4) 狐崎長環・後藤典俊・岩崎好規：地震活動からみた京都盆地南部の地下構造とこれに関連した地震工学上の若干の問題，京大防災研究所年報，第14号 A，1971 pp. 203-215.
- 5) 小林芳正・入倉孝次郎・堀家正則・天池文男・岸本清行・春日茂 (1980)：黄檗断層の地震探査，京大防災研究所年報，第23号 B-1，1980，pp. 95-106.
- 6) Irikura, K and T. Kawanaka: Characteristics of Microtremors on Ground with Discontinuous Structure, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Vol. 30, 1980, pp. 81-96.
- 7) 見野和夫・竹内文朗：黄檗断層付近の γ 線測定，京大防災研究所年報，第20号 B-1，1977，pp. 29-33.
- 8) Buchbinder, G. G. R., R. D. Kurtz and A. Lambert: A Review of Time-Dependent Geophysical Parameters in the Charlevoix Region, Quebec, Earthq. Predict. Res. 2, 1983, pp. 149-166.
- 9) Barsukov, O. M. and O. N. Sorokin: Variations in apparent resistivity of rocks in the seismically active Garm region, Izv. Acad. Sci. U. S. S. R. (Phys. Solid Earth), 8, 1973, pp. 685-687.
- 10) Mazzella, A. and H. F. Morrison: Electrical resistivity variations associated with earthquakes on the San Andreas fault, Science, 185, 1974, pp. 85-857.
- 11) Zhao, Yu-Lin and Fu-Ye Qian: Electrical resistivity anomaly observed in and around the epicentral area prior to the Tangshan earthquake of 1976, Acta, Geophys. Sinica, 21, 1978, pp. 181-190.
- 12) Sumitomo, N and K. Noritomi: Synchronous precursors in the Electrical Earth Resistivity and the Geomagnetic Field in Relation to an Earthquake near the Yamasaki Fault, Southwest Japan, J. Geomag. Geoelectr., 38, 1986, pp. 971-989.