

直流電車軌道からの漏洩電流のモデル化とその応用(2)

笠谷 貴史・住友 則彦・後藤 忠徳

MODELING OF ARTIFICIAL TELLURIC CURRENTS LEAKED FROM THE DC ELECTRIC RAILWAY AND ITS APPLICATION TO ELECTRICAL RESISTIVITY SOUNDINGS (2)

By Takafumi KASAYA, Norihiko SUMITOMO and Tadanori GOTO

Synopsis

Artificial telluric currents leaked from the DC electric railway are often unwanted noise sources in electromagnetic surveys. In order to examine characteristics of such noise sources we calculate the leakage currents from the DC electric railway using a simplified model, comparing it with observed leakage currents.

Observations of leakage currents were carried out at nine sites around Koka town, Siga prefecture. Preferred orientations of the leakage currents were examined at each site distributed along a measuring line perpendicular to a DC electric railway.

It is concluded that theoretical values for the leakage currents are roughly explainable for some characteristics of the leakage currents observed.

1. はじめに

都市近郊における電磁気的観測において、直流電車からの漏洩電流の影響は大きく、自然の磁場や電場の観測の障害になることが多い。そのため直流電車が観測に及ぼす影響について、今までにも多くの研究がなされている。Yanagihara⁹⁾、徳本・角村⁷⁾等では直流電車が磁場の観測に与える影響をモデル計算によって求めている。また、電場に与える影響として、土井・住友¹⁾、藤原・住友³⁾、住友他⁹⁾などの研究がある。土井・住友などによれば、漏洩電流の流れ方は全く不規則ではなく、観測点固有の卓越方向を示すなどの一定の性質を持つこと、その卓越方向と振幅を用いることにより地下の比抵抗構造を定性的には推定しうることが報告されている。そこで本研究では直流電車からの漏洩電流を利用した埋没断層などの位置推定といった電気探査法として精度を向上するため、漏洩電流の電流源を考慮したモデル計算を行い、漏洩電流の振る舞いを調べた。笠谷・住友他⁴⁾では、Fig. 1中の1のモデル(ここでは片側起電と呼ぶ)で漏洩電流の評価を行った。しかし実際の電車は両側から起電されている状態が多いので、本研究ではその計算方法を拡張して、複数の変電所と電車を設定した場合にも対応できるようにした。今回は特に漏洩電流の卓越方向の安定性についての検証に始まり、Fig. 1の片側起電と両側起電のモデルの二つのモデルに対して研究を行った。また、

1. Single power substation railway system



2. Two power substation railway system

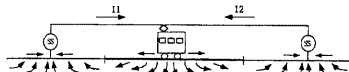


Fig. 1 Model of leakage currents from an electric railway. SS shows a power substation.

モデルから計算される漏洩電流の卓越方向と実際の観測結果との比較も行った。なお観測は滋賀県の甲賀町のJR草津線の近傍で行った。

2. モデル化

2.1 漏洩電流の計算方法

直流電車からの漏洩電流をモデル化するには、まず電流の漏れ方を考える必要がある。電流の漏れ方には様々なものが考えられるが、笠谷・住友他⁴⁾によりラインソース、つまりレールのあらゆる場所から電流が漏洩している、を仮定したほうが、漏洩電流の振る舞いを説明し易いことが分かっている。今回は電流の漏れ方としてラインソースを用い、起電方式の違いによる2種類のモデルを考えてモデル計算を行った。この2種類の

モデルの概念図がFig. 1である。最初のモデルは電車の片側からのみ起電されているモデル、次のモデルが電車が両側から起電されているモデルである。ここではモデル計算の単純化のために、地下構造は一樣でレール抵抗や漏れ抵抗も一定で変化しないと仮定した。また今回のモデル化では電場の卓越方向の議論のみとし、振幅については言及しないこととする。

基本的な算出方法は徳本・角村⁷⁾、電食・土壤腐食ハンドブック²⁾に基づいた。起電区間(変電所と電車との間)の外側のレールにも帰線電流の一部が流れると考えるため、線路の起終点、もしくは電車、変電所で区切られたFig. 2のような小区間を考え計算を行う。以下に計算方法を示す。

レール上の任意の点pを考え、線路を流れる電流を $J_r(p)$ 、漏洩電流を $i(p)$ とすると、次の関係が成り立つ。

$$i(p) = -dJ_r(p)/dp \quad \dots\dots\dots (1)$$

また、レール対地電圧 $V(p)$ は、単位長さあたりのレール抵抗と漏れ抵抗をそれぞれ R_r 、 ω とすると

$$dV(p)/dp = -R_r \cdot J_r(p) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$V(p) = \omega \cdot i(p) \quad \dots\dots\dots (3)$$

(1), (2), (3)式から

$$d^2J_r(p)/dp^2 = (R_r \cdot \omega) \cdot J_r(p) \quad \dots\dots\dots (4)$$

で表される常微分方程式が得られる。この一般解は次のようになる。

$$J_r(p) = A \cdot \exp(\alpha \cdot p) + B \cdot \exp(-\alpha \cdot p) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし

$$\alpha = \sqrt{R_r \cdot \omega}$$

である。

小区間ごとに(5)式のA, Bを求めることによって、各小区間ごとのレール電流・レール対地電圧の一般解を得る。

また電位ポテンシャル V 、電流 i 、地下の比抵抗 R には

$$V = i(p) \cdot R / (2 \cdot \pi \cdot L)$$

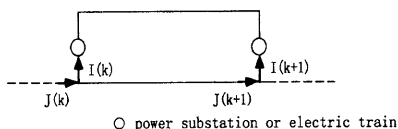


Fig. 2 Scheme of circuit un of power substation, fieder line, electric train and railway. J and I are current flow in a rail and a fieder line, respectively. Open circle is a substation or an electric train.

の関係が成り立つ。ここでの L は電流源と観測点との距離を表している。この式の L を漏洩電流の漏れ点と観測点との距離と考え、漏れ点がレール全体にわたって無数にあるとして積分すれば、任意の観測点での電位ポテンシャルを計算することが出来る。

2.2 モデル計算

先の算出方法に基づいて実際の観測地域に近い電車と変電所配置で漏洩電流のモデル計算を行った。

片側起電モデルの場合で等電位面がどの様に変化するかを示したのがFig. 3である。横軸(X軸)は線路に沿った距離、縦軸(Y軸)は線路に直交する距離で、いずれも単位は任意である。変電所は $X = 17$, $Y = 0$ の位置にあり、電車が $(X = 4, Y = 0)$ から $(X = 14, Y = 0)$ まで動いた場合を想定している。こ

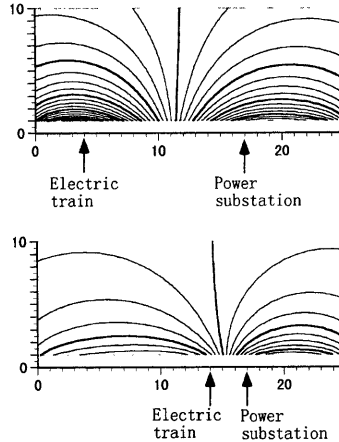


Fig. 3 Electrical equipotential surfaces around a railway from which leakage currents is flown out. Upper and lower figures indicate each equipotential surfaces corresponding to different positions of an electric train.

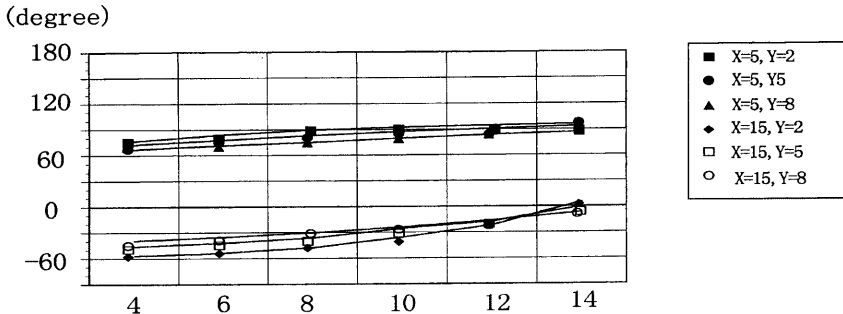


Fig. 4 Change of direction of calculated leakage currents from a railway as an electric train moves. A horizontal axis shows the position of an electric train.

のように等電位面の変化は比較的小さいことが分かる。もし電車の移動に伴う電流がレール全体として漏れずに、特定の点から漏れると仮定した場合には、等電位面の変化は **Fig. 3** のそれに比べて大きく、電場ベクトルの方向も大きく変化することが分かっている (笠谷・住友他⁴⁾による)。角度変化をはっきり見るために、**Fig. 3** の xy 平面の上の任意の点で、電車の移動に伴う電場ベクトルの方向変化を計算した。そのうちの6点について示したのが **Fig. 4** である。図中の角度は真北から時計回りに計ったもので、 x と y の座標は **Fig. 3** 中の点である。傾向として、軌道から離れるにしたがって方向変化が少なく、変電所に近い点 ($X = 15$ の3点) に比べ、変電所から離れた点 ($X = 5$ の3点) の方が角度変化が小さい事が分かる。

次に、両側起電の場合の等電位面の変化を **Fig. 5** に、方向変化を **Fig. 6** に示した。変電所が $x = 12, Y = 0$ と $x = 27, Y = 0$ にあり、その間を電車が移動する場合を想定している。ここで特徴的なのは、片起電では電車軌道から離れていくに従って、方向変化が小さくなる傾向が見られたが、両側起電ではそのような傾向は見られない。つまり両側起電では変電所と観測地点との位置関係が非常に重要だと考えられる。

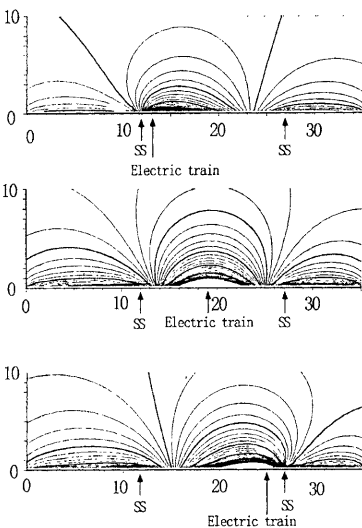


Fig. 5 Electrical equipotential surfaces around a railway from which leakage currents is flown out. Figures indicate each equipotential surfaces corresponding to different positions of an electric train. SS shows a power substation.

(degree)

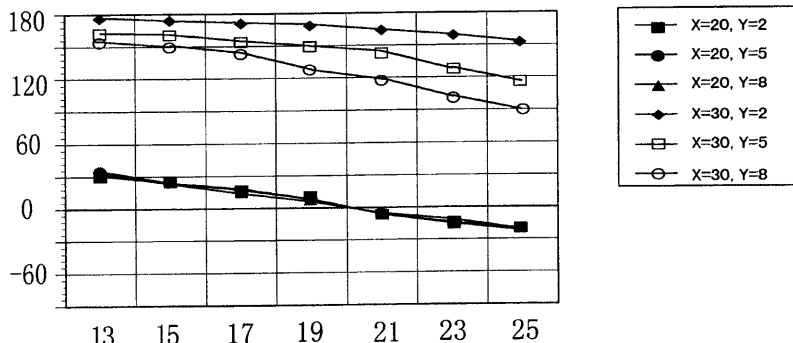


Fig. 6 Change of direction of cauculated leakage currents from a railway as electric train moves. A horizontal axis shows the position of an electric train.

3. 漏洩電流観測について

3.1 漏洩電流観測の概要

観測に当たって、モデル計算値との比較を容易にするために、次の点に留意して観測地域を選定した。

- 1・漏洩電流源となる電車軌道が出来るだけ単純であること
- 2・電車の本数が少ないこと
- 3・片側起電と両側起電の両方の場合の比較が出来ること

これらの点を考慮した結果、観測を滋賀県と三重県との県境にほど近い滋賀県甲賀町一帯で行った。観測地域周辺の地図を Fig. 7 に示す。漏洩電流源となるのは JR 草津線で、地図中の範囲ではおよそ NW-SE 方向に延びている。起点は地図中下の柘植駅で、そこから北上し東海道線に合流して終点の草津駅に至る。なお、草津線には変電所が2カ所あり、一カ所は甲賀駅のすぐ側、もう一カ所は甲西駅と三雲駅のほぼ中間地点にある。ここでは便宜上、前者を甲賀変電所、後者を甲西変電所と呼ぶことにする。また、Fig. 7 には信楽高原鉄道と近江鉄道が描かれているが、前者は非電化路線で影響はないと思われる。後者は電化されているものの、今回の観測対象である草津線に比べると十分観測点から離れ、かつ運行本数も少ないため影響は少ないと考えている。

観測点は Fig. 7 に示した6点である。この観測ではリファレンス点を2点（電車軌道から0.8 km の HKD と 5.6 km の OHR）設置して連続観測を行い、その間を移動観測を行った。このことにより、3観測点で常に同一の電車の漏洩電流の波形が取れていることになる。よって時刻表を参照することによって個々の電車と観測波形との対比が容易となる。また、各観測点の配置は電車軌道に対してほぼ垂直になるように

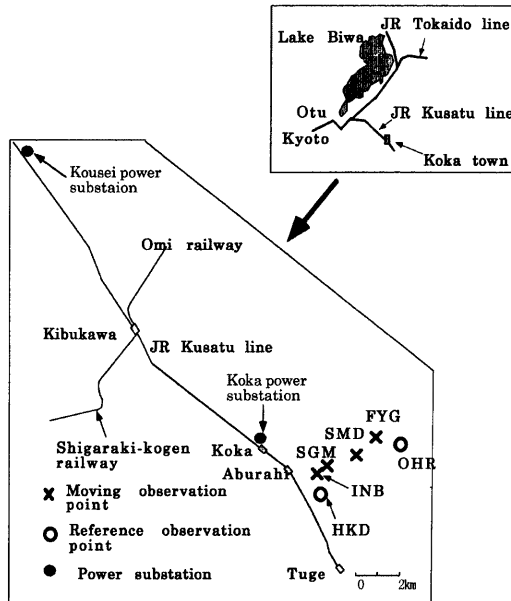


Fig. 7 Locations of the observation points

設定した。

測定には定点、移動観測ともフェニックス社製の鉛-塩化鉛電極を用いた。定点観測は地磁気地電流計のU36を用い、東西、南北直交2成分、電極間隔20 m、サンプリング周波数1 Hzで観測を行った。また移動観測はローパスフィルター（カットオフ周波数は0.3 Hzに設定）付きの地電流アンプを用い、同じく2成分、電極間隔10 m、サンプリング周波数10 Hzで観測を行った。

3.2 観測結果

ここでは、観測結果を2つの見方から見ることにした。まず一つは片側起電区間と両側起電区間のそれぞれに1編成の電車のみが走行している場合の観測電場を調べる見方である。もう一つは時間帯を区切って、時間帯ごとの相違を見る見方である。今回は観測された電場の卓越方向を調べるのが主な目的である。そこでまず電場の各成分の観測値から平均値を除去後、変化分のみを取り出し、電場ベクトルの軌跡を描かせ、卓越方向の変化を調べることにした。

まず、1編成のみの電車の漏洩電流の様子を調べた。電車の位置が片側起電の状態にあるときの電場ベクトルの卓越方向をFig 8に示す。なお、この図に用いたデータ長は20分で、これらの全観測点で、電車が片側起電区間（拓殖をでて甲賀に着くまで）を走行している時間を含んでいる。比較的明瞭な卓越方向を持つ観測点は、電車軌道から離れたFYGとリファレンス点であるOHRの2観測点であった。電車軌道から離れた観測点ほど一定の卓越方向がはっきりと認められるのに対し、観測点が電車軌道に近づくにつれて一定の卓越方向を持たなくなること分かる。また、振幅の大きな漏洩電流は草津線の電車が駅（この場合では拓殖駅と油日駅）を発車するときに生じていることが、時刻表との対比により明らかであった。また、拓殖と油日を電車が発車したときの漏洩電流の振幅を比べると、拓殖を発車したときの方が大きい。

次に電車の位置が両側起電の状態にあるときの観測結果について述べる。この状態の電場を観測しているのは連続観測を行った2観測点（OHR、HKD）のみである。ここでは最終電車（草津発拓殖行き）の漏洩電流の波形記録を用いた。これをFigs. 9, 10に示す。Figs. 9, 10に示した図のうち、電車が両側起電区間にいるのは(2)と(3)、片側起電区間が(4)で、(1)はそれらを全て描かせた図である。両側起電区間にいるときの方が片側起電区間の記録に比べ振幅が小さい。このことは軌道に近いHKD (Fig. 9)の方が顕著である。またOHR

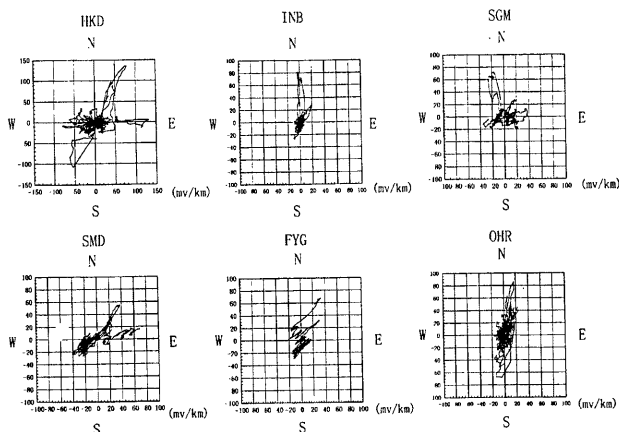


Fig. 8 Loci of telluric currents observed at observation points. Preferred orientations are clear at FYG and OHR.

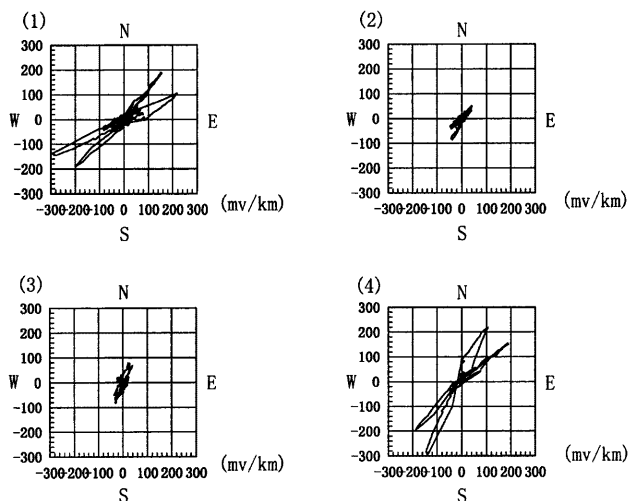


Fig. 9 Locuses of telluric currents observed at HKD in different time zone.

(1) 23 : 56 on Sept. 20, 1995~0 : 26 on Sept. 21, 1995

(2) 23 : 56~0 : 06 (3) 0 : 06~0 : 16 (4) 0 : 16~0 : 26

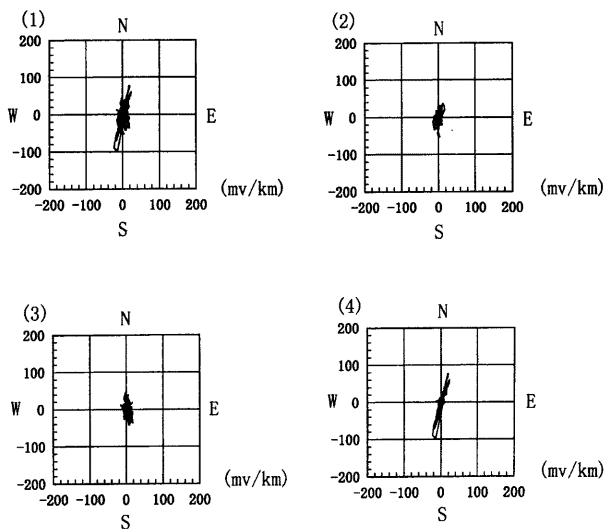


Fig. 10 Locuses of telluric currents observed at OHR in different time zone.

(1) 23 : 56 on Sept. 20, 1995~0 : 26 on Sept. 21, 1995

(2) 23 : 56~0 : 06 (3) 0 : 06~0 : 16 (4) 0 : 16~0 : 26

(Fig.10)の(2), (3)から必ずしも電場ベクトルの軌跡が一定の方向を持っていないことがわかる。逆にOHRに対してHKDの方が両起電区間ではある一定の卓越方向を持っていることが分かる。この性質は片側起電の状態の時とは異なり、電車軌道から遠ければ必ず卓越方向が一定するとは言えないことを示唆している。

次に個々の電車ごとではなく、時間帯によって漏洩電流の卓越方向がどの様に変化するかにについて考察する。電車軌道から最も離れているOHRの電場変化を用いた。時刻表から草津線の列車の運行本数を調べ、時間帯を朝の通勤時間帯、昼間帯（午前10時頃から午後4時頃まで）と夕方の通勤時間帯の3つに分けた。それぞれの時間帯別の代表的な電場変化と、その電場ベクトルの卓越方向を示したのがFig. 11, Fig. 12, Fig. 13である。この結果から昼間帯に比べて朝と夕方の方が大きな振幅を持っていることが分かる。この振幅が大きい漏洩電流は、片起電区間にいる電車の影響であるが、昼間帯に比べて振幅が大きい。この理由は明らかではないが、通勤時間帯には車両を増結する事も多く、そのために起電電流量が増え、漏洩電流の振幅が大きくなった可能性が考えられる。

また、全ての時間帯に対して、ほぼ南北に近い卓越方向を持っていることも特徴的である。そこで電場ベクトルの卓越方向の安定性を確かめるために、最小二乗法を用いて1時間ごとの卓越方向を求めた。これを

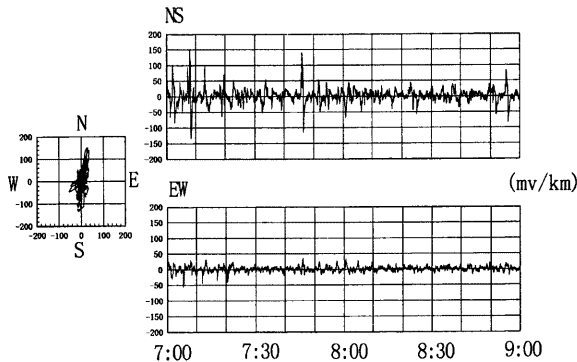


Fig. 11 Wave form of telluric currents observed from 7:00 to 9:00 on Sept. 21, 1995

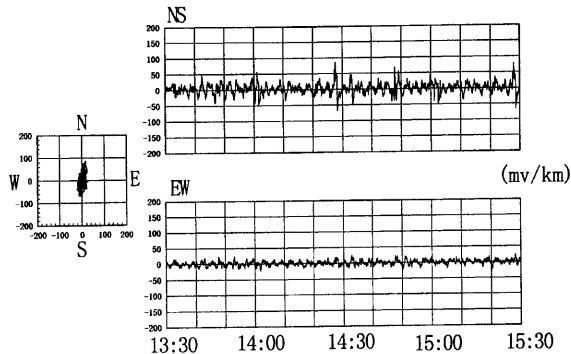


Fig. 12 Wave form of telluric currents observed from 13:00 to 15:30 on Sept. 20, 1995

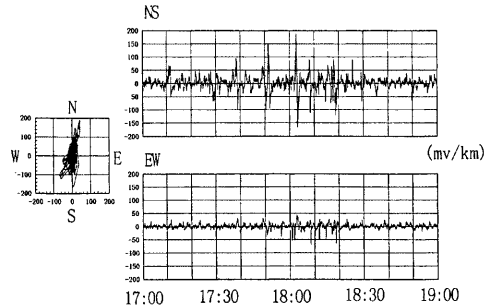


Fig. 13 Wave form of telluric currents observed from 17:00 to 19:00 on Sept. 20, 1995

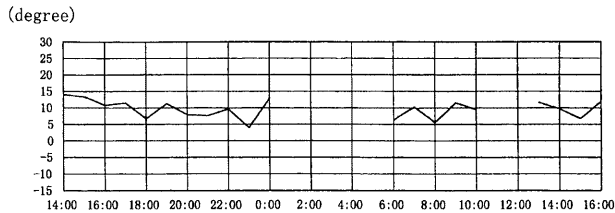


Fig. 14 Time change of preferred orientations of telluric currents at OHR. From 0:00 to 6:00 and 10:00 to 13:00 data were not available due to traffic stopping and lack of data respectively.

Fig. 14 に示した。これからも電場がある一定の卓越方向を持っていることが分かる。2 日間を通しての角度変化は最大で 10 度で、この変化は住友他⁶⁾で報告されているのとはほぼ同程度の変化量である。しかしながらこのほぼ南北を示す卓越方向は、電車が片側起電区間（拓殖-甲賀間）にあって、かつ電車軌道と観測点との距離が近いときに観測される振幅の大きな漏洩電流の影響が大きいために、ほぼ南北の卓越方向を示していると考えられる。このことは時刻表と対比から明らかである。今回の観測に限れば、平均的な卓越方向が、観測点との距離が近い片起電区間の影響を強く受けている事は事実である。走行区間と卓越方向との関係調べるためには、両起電区間の影響が支配的になるとと思われる甲賀町の北部で観測をする必要があろう。

3.3 観測結果のまとめ

以上のことから、甲賀での漏洩電流の観測結果をまとめると、

- (a) 比較的安定した漏洩電流の卓越方向が見られる
 - (b) 漏洩電流の大きな振幅の変化は、電車の発車時に生ずる事が多い
 - (c) 振幅の大きな漏洩電流は、片側起電区間に電車がいたときに観測される
 - (d) 電車が片側起電区間にあるときに比べ、両側起電区間にあるときは方向の安定性が良くない。
- などが分かった。

(a) は土井・住友¹⁾などと同様の性質を示している。しかしながら、平均的な卓越方向が一定に見えても、

詳しく波形を見ると(d)のように、電場ベクトルの卓越方向に系統的な揺らぎがある。今回の観測結果に限って言えば、卓越方向は、振幅の大きなシグナル、つまり片側起電区間に電車がいて、の卓越方向に大きく依存しているように見える。このことから観測点と電車軌道からの距離が極端には大きくない場合、電場の卓越方向は、最も近い起電区間からの漏れ電流の影響を受けやすいことが予想される。しかしながら、これは今回の観測から推測されることであって、もっと面的に観測点を増やして再検証が必要があると考えている。

4. 観測値とモデル計算との比較

次にモデル計算によって得られた電場ベクトルの向きと、観測から得られた電場の卓越方向との比較をおこなった。笠谷・住友⁴⁾から電流の漏れ方は、ラインソースとして漏れると考えた方が、観測事実を説明しやすいことが確かめられているため、ここではポイントソースは扱わない。また、ここで計算される電場ベクトルの値は、電車が駅を出発する位置にあるときの瞬間的な方向である。計算は先のモデル計算と同様の手法を用い、実際の電車と変電所と観測点の位置関係を考慮して計算を行った。比較した観測点は連続観測を行った OHR と HKD の 2 観測点である。また、ここでも片側起電の場合と両側起電の場合とを分けて考える。

まず片側起電の場合について考察する。OHR と HKD でのモデル計算によって得られた電場ベクトルの向きを Fig. 15 に示した。図中の矢印は実線が拓殖駅発車時のもの、破線の矢印が油日駅発車時のベクトルの向きである。実際の観測値は Fig. 8 の通りであるので、その方向と比較を行った。その結果、OHR の方では良い一致を示すが、HKD の方は OHR に比べ一致が良くないことが分かる。また、OHR でのモデル計算によって得られたベクトルの向きの角度変化は約15度であり、計算された電場ベクトルの方向が比較的安定していると言える。

一方、両側起電の場合はどうであろうか。両側起電モデルでの電場ベクトルの計算値を示したのが Fig. 16, 17 である。それぞれ HKD と OHR に対応しており、矢印は各駅を出発する位置で計算された角度を示している。草津線の両側起電区間(甲西-甲賀間)には駅が4駅あり、Fig. 16, 17 の(a)は Fig. 9, 10 の(2)の観測時間に出発した駅で計算された角度を、(b)は Fig. 9, 10 の(3)に観測時間に出発した駅で計算された角度のそれぞれ対応している。

両側起電モデルの場合、HKD の方がモデルと観測値との一致が良く、方向の変化も少ない。それに対して、OHR の方は計算された方向は観測値とは若干異なり、変化も片側起電区間の結果に比べれば大きい。

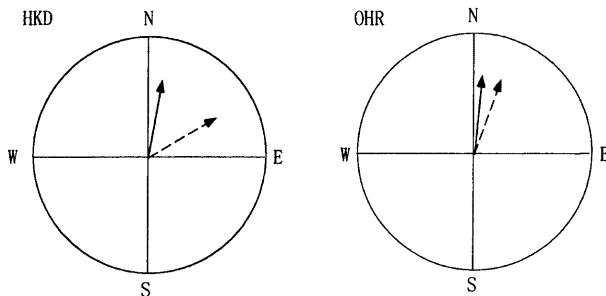


Fig. 15 Calculated directions of leakage currents at HKD and OHR using the single power substation railway system.

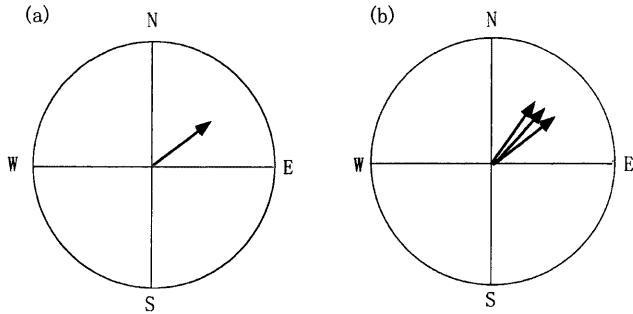


Fig. 16 Calculated directions of leakage currents at HKD using the two power substation railway system.

(a) indicates an expected direction during an interval from 23 : 56 to 0 : 06

(b) indicates an expected direction during an interval from 0 : 06 to 0 : 16

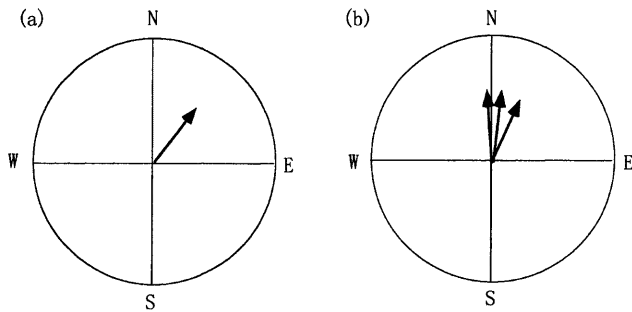


Fig. 17 Calculated direction of leakage currents at OHR using two power substation railway system.

(a) indicates an expected direction during an interval from 23 : 56 to 0 : 06

(b) indicates an expected direction during an interval from 0 : 06 to 0 : 16

モデルと観測値の一致はこの図を見る限り良くない様に見える。しかし、実際の波形から各駅を出発するときの振幅を読みとって比較すると、おおよそ一致することが分かった。

5. まとめ

観測結果の検討から、電車が片側起電区間に入っているときと両側起電に入っているときで、電場の卓越方向に違いがあることが明らかになった。片側起電の場合、卓越方向の変化量の大小は、単純に電車軌道からの距離が重要であった。ところがそれに対して両側起電では、距離だけではなく、観測点と変電所との位置関係が非常に重要になっている。軌道に非常に近い HKD での結果が、このことを良く表していると思わ

れる。また観測された電場の振幅から、観測点での電場の卓越方向を大きく支配するのは、最も近い起電区間からの漏れ電流であることも確かめられた。これらの傾向はモデル計算の結果とおおよそ一致した。

実際に漏洩電流を応用するには、今後どのような考え方をすれば良いであろうか。大きく分けて2つの考え方があってと思われる。まず一つは積極的に漏洩電流源となっている電車をモデル化して、決定論的に扱う考え方である。本研究がそれに当たる。また、二つ目の考え方は、住友他⁶⁾の様に、漏洩電流が様々なところから到来するものと考え、統計的な扱いをするやり方である。

一つ目の考え方をする場合であるが、これまでの結果から、

(a) 観測点が軌道から極端に離れていない場合、電場の卓越方向に支配的なのは最も近い起電区間からの漏れ電流であること

(b) 草津線のような比較的平坦なところを走る鉄道では、電車が力行する区間は駅の発車直後に多く、その他は空走している区間が多いこと

などが明らかになった。(b)は観測電場の大きなシグナルがほとんど電車の発車時刻と対応するためである。この様なときに、力走する区間が既知で、それがそれほど時間的に変動しないのだとすれば、漏洩電流のモデル化が可能となり、漏洩電流をソースとした電磁気探査への応用が期待出来ると考えている。

今回は、電流源の移動に対する漏洩電流の卓越方向についての検証を行った。次の段階としてモデルと観測値の振幅の比較も行う必要がある。振幅の議論も交えることが、先に書いた実際の応用に際して重要であると思われる。しかしながら、今回のモデル化によって複数の変電所と電車がある場合でも、ソースの漏洩電流の評価を行えるようになった。降雨にともなう漏れ抵抗の日変化などの問題は依然として残っているものの、これまでのモデル化によって漏洩電流源の見積もりが可能になった。よって、電気抵抗から見た地下構造を定量的に見積もるための準備が出来たと考えている。

今後は、地下構造を含めた場合の漏洩電流の3次元のモデル化を推し進め、甲賀地域でのさらに広範囲の面的な観測や、地下構造の分かっている地域での観測を行いたいと考えている。

この研究にあたって、町有地の使用を許可していただいた甲賀町役場にお礼申し上げる。また、観測を手伝っていただいた、地震予知研究センターの大学院生の坂中伸也、市來雅啓、谷元健剛諸氏にもお礼申し上げる。

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，京都大学教養部地学報告，19，1984，pp.31-41.
- 2) 電気学会・電食防止研究委員会編：新版電食・土壌腐食ハンドブック，コロナ社，1977.
- 3) 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)，京都大学教養部地学報告，21，1986，pp.8-16.
- 4) 笠谷貴史・住友則彦・後藤忠徳：直流電車軌道からの漏洩電流のモデル化とその応用(1)，CA研究会1996年論文集，1996，pp.25-32.
- 5) 宮腰潤一郎・西田良平：鉄道レール漏れ電流利用による中央構造線地下電気伝導度の測定，CA研究会論文集，1987，pp.279-284.
- 6) 住友則彦・小泉誠・後藤忠徳・松尾成光・渡辺邦彦：漏洩電流の性質について(1)，京都大学防災研究所年報，1994，pp.279-290.
- 7) 徳本哲男・角村悟：直流電車による磁場擾乱：地磁気観測所要報，Vol20，No2，1984，pp.33-44.
- 8) 渡辺邦彦・小泉誠・和田安男・松尾成光・平野憲雄・住友則彦：活断層における地電位差観測(1)，京都大学防災研究所年報，1992，pp.313-322.
- 9) Yanagihara, K: Magnetic Field Disturbance Produced by Electric Railway, Memo. Kakioka Magn. obs., Suppl. Vol7, 1977, pp.17-35.