

土壌への加圧により発生する地電流変化について

大 島 汎 海

概 要

未電化時代の常磐線に運行していた蒸気列車を利用して、土壌に圧を加えたために生ずる地電流変化を測定した結果と、それに対する一解釈について報告する。測定の結果、地電位差には 20 mV を超す大きな変化が観測されたが、列車荷重程度の圧では測定にかかるほどの大地比抵抗の変化（大地比抵抗の値に対しその変化分の大きさが 1% 程度以上あれば検出可能である）は全く認めることが出来なかった。これは地電位差に現われた大きな変化を大地比抵抗の変化によって説明しようとする考えを完全に否定するものである。そこで大地を半無限にひろがる多孔質隔壁と考え、その中に土壌水が満たされており、それと土粒との間に電気二重層が形成されているものとして、そのような大地に加圧することにより土粒細隙を土壌水が移動して、それに伴う流動電位が生じ、そのために大地中に漏洩電流が流れると考えて見た。この考えにもとづいて計算を行なったところ、実測した地電位差変化とよく一致する結果が得られた。これにより土壌への加圧により発生する地電流変化の主たる原因は土壌中の流動電位とその大地中への漏洩であるという結論に到達した。この問題は大地中の圧力不均衡域と差電位差の関連を通じて、地震予知問題と重要な結びつきをもってくる可能性があるものと考えている。

1. は し が き

非電気軌道から 300 m ばかり離れた地点で行っていた地電流観測の連続記録に、軌道を通過する列車に対応した異常変化が現れた⁽¹⁾とか低気圧の通過により地電位差にその影響が見出された⁽²⁾という古い報告がある。この現象については筆者等も 1948 年に、当時未電化であった常磐線の蒸気列車を利用して測定を行ったのであるが、残念ながら測定結果は整理の手が及ばぬままに今日まで資料庫の下積となってしまっていた。しかし、この現象は地電流における差電位差現象、ひいては地震予知における地電流現象の役割りに対し何等かの示唆を与え得るものと考えられるので、古い測定資料ではあるがそのまま放置するにしのびず、現在残存している資料を出来る限り整理し、それに対して一応の解釈を試みた結果を報告する。

この測定は 1948 年 5 月 24 日に常磐線沿いの広闊な畑作地帯で行ったもので、当時常磐線は上野—松戸間を除いてまだ全く電化されておらず、通過する列車はすべて蒸気機関車によって牽引されていたものである。測定点は Fig. 1 に示した通り石岡駅の北方約 2 km の地点である。この付近は関東ロームの赤土に覆われた全くの平坦地で、当時は一面の麦畑であったと記憶している。人家も観測基地として縁先を借用した小さな農家以外にはなく、軌道にほぼ平行してその西側約 70 m のところを走る笠間街道も、当時はめったに車の通行もなかった。軌道は観測点の南方石岡駅に向って 1.4 km の辺りから、北方羽鳥駅に向って 3 km まで、全長 4.4 km の区間は全くの直線コースとなっている。

付近には測定に影響を及ぼすような電流源はなく、このことは測定中の検流計の動きからも確認することが出来た。なお幸い自然の地電流も比較的静穏で急激な変化は少なく、列車

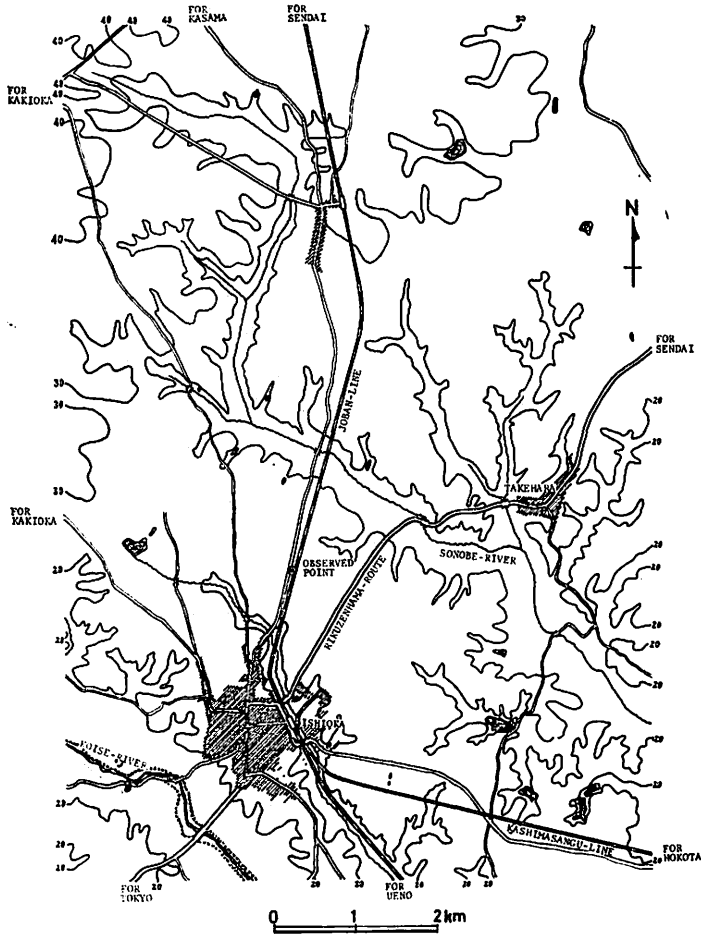


Fig. 1. The location of the observed point and the topography of the near vicinity.

通過による急変化を確実に測定することが出来た。

この時の測定は地電位差のみでなく、それとともに大地比抵抗の測定も行ったが、これには列車通過による変化を全く認めることは出来なかった。これにより列車通過時における地電位差の特異変化は、列車荷重による大地比抵抗の変化にその原因を求め得ないことが明瞭となった。

ここでは、この特異変化が列車荷重による土壌水の移動によって生ずる流動電位の大地中への漏洩によって生ずるものとして、一つの解釈を試みることにした。

2. 測 定

測定地点は非電気軌道が直線コースをとって走っており、その沿線が一様な土質で、平坦

な地形をもっているような場所で、なおその上に人工的な電気擾乱の存在しないところという事で“はしがき”に述べたような位置を選定した。測定は1948年5月24日に行ったもので、この日は朝から小雨が降ったり止んだりの天候であった。まづ午前中に大地比抵抗の測定を行ない、午後地電位差を測定した。

2.1. 大地比抵抗の測定

大地比抵抗は Wenner の4極法電極系列を用いて、Gish-Rooney の測定法⁽³⁾によって測ることとした。このために横河電機 K.K. 製の L-10 型大地比抵抗測定器を使用し、電極は同測定器付属の金属電極をそのまま用いた。

この L-10 型測定器の原理は Fig. 2.⁽⁴⁾ に示すように、手動クランクにより発電機を回転させ、電流変成器 CT の1次側を通して電流電極 C₁, C₂ より地中に交替直流電流 I を流し、これによって電位電極 P₁, P₂ 間に生じた電位差 V は CT の2次側に挿入された抵抗 r の両端に生ずる電圧と打消し合うように抵抗をスライドして零位法によって直接には $R = V/I$ ($= k \cdot r$, $k =$ 常数) を測定するものである。この R から見掛けの比抵抗 ρ は、電極間隔を a とすると、 $\rho = 2\pi \cdot a \cdot R$ である。この零位法における零検出器としては発電機軸に直結したコンミュテーターと直流検流計を組合せたものが用いられている。

以上で明らかのように、この測定器は大地比抵抗の値を連続記録し得るものではなく、又任意の瞬間の値を自由に読み取る事の出来るものでもない。従って、この測定器を用いて、列車通過時の大地比抵抗の変化をとらえるといっても、それは変化する値を逐一追跡するというでなく、単に変化が生ずるか否かを判別し得るにとどまるものであろうと覚悟をきめて、次のような方法をとることにした。即ち、列車が観測点に近づく前にまず平常状態における ρ を測定しておき、そのまま(即ち零位法用のメーターが零を示している状態)静かに発電機を回転しつづけながら列車の通過を待つ。こうしていると、列車の通過により、もし大地比抵抗に何等かの変化が生ずるならば、必ずメーターが零の位置から左右どちらかへ偏る筈である。この偏りの鋭敏度は“ $R \times 1/100$ ”程度である。即ち、変化した値を測定するだけの余裕はないかも知れないが、すくなくとも列車通過が通過点付近の大地比抵抗に変化を与えるか否かは、明確に判定することは出来るわけである。

ここで、4極法の電極系列を配置する測線は Fig. 3 に示したように軌道に垂直なもの(S.R. 1)と平行したもの(S.R. 2)との2種を設けた。測定は下り旅客列車の通過時に S. R. 1 測線につき1列車、S.R. 2 測線につき1列車の各1回宛を行った。

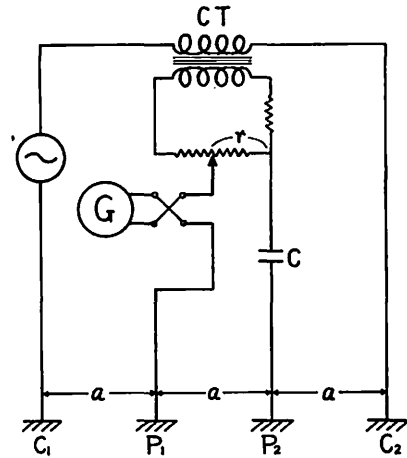


Fig. 2. Earth-resistivity measuring apparatus, L-10 type (after K. Yanagihara)

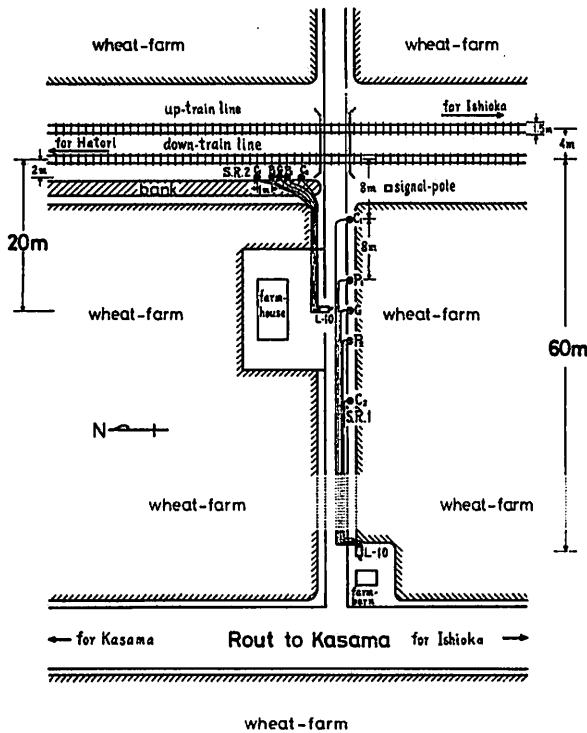


Fig. 3. Arrangement of apparatuses and electrodes for the earth-resistivity measurement.

以下、列車時刻は日本中央標準時で表示したが、当時は夏時刻というものを使っていた関係上、誤解を防ぐ意味で括弧内にこの時刻をも併記しておくこととした。

(i) 09時02分(10時02分, 夏時刻)石岡駅発車の下り旅客列車の通過時に, S.R. 1 測線による測定。

電極配置は Fig. 3 に示した通りで, C_{11} 極から下り線軌道中心線までの距離は 8 m で, 電極間隔 a_1 も 8 m にとつてある。L-10型測定器は下り線軌道から約 60 m 離れた小屋の前庭に置いて測定を行った。

列車通過前の平常時における測定値は $R=1.96 \text{ ohm}$ で, $\rho=0.986 \times 10^4 \text{ ohm}\cdot\text{cm}$ であった。列車通過時においてメーター指針の偏りは全く認められなかった。

(ii) 10時46分(11時46分, 夏時刻)石岡駅発車の下り旅客列車通過時に, S.R. 2 測線による測定。

電極配置は Fig. 3 に示した通りで, 各電極は下り線軌道中心線から約 2 m 離れた小石混りの小溝中に $a_2=1 \text{ m}$ の間隔で配置した。測定器の位置は下り線路より約 20 m 離れた道路端であった。

列車通過前の平常時における測定値は $R=36 \text{ ohm}$ で, $\rho=2.26 \times 10^4 \text{ ohm}\cdot\text{cm}$ であった。列車通過時には先の No. 1 のときと同様メーター指針の偏りは全く認められなかった。

2.2. 地電位差の測定

地電位差の測定には横河電機 K.K. 製の D-2L 型検流計回路に $1 \times 10^4 \text{ ohm} \sim 5 \times 10^4 \text{ ohm}$ 程度の高抵抗を直列に挿入して使い、電極には直径 5 cm (断面菊花状) 長さ 30 cm の炭素棒を使用した。ここで使用した D-2L 検流計というのは、周期約 3 sec, 電流感度 10^{-8} amp./mm 程度の検流計とランプ・スケールを一つのケースにコンパクトにまとめた光示式検流計の一種である。

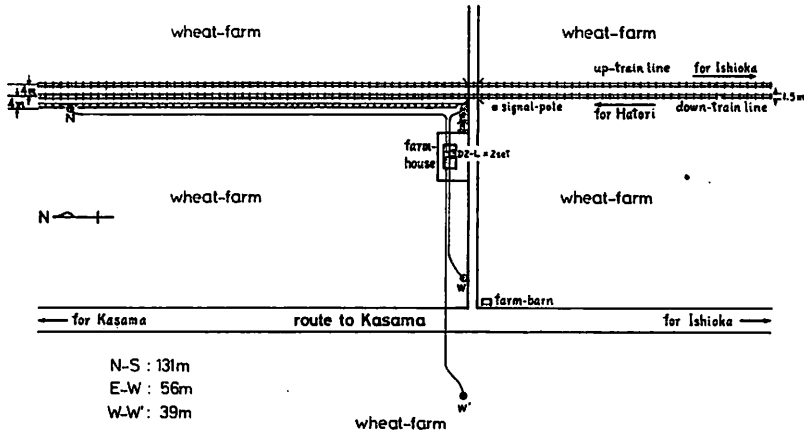


Fig. 4. Arrangement of apparatuses and electrodes for the earth-current potential measurement.

測定基線は軌道に垂直なもの 2 種と平行なもの 1 種を設けた。その電極配置は Fig. 4 の通りで、各基線長は $EW=56 \text{ m}$, $WW'=39 \text{ m}$ (この 2 種が軌道に垂直)、 $NS=131 \text{ m}$ (これが軌道に平行) にとった。ここで W 極は EW, WW' 両基線に共通で、E 極と S 極は同一の極で、EW, NS 両基線に共通である。N 極と S(E) 極は下り軌道中心線より約 4 m はなれて、低い土堤と麦畑との間の赤土の小溝中に約 1.5 m の深さに埋設した。W 極は道路際の麦畑中、W' 極は笠間街道を越えた麦畑中にそれぞれ埋設した。W 極、W' 極の埋設点の土質は、上部 30 cm 程度は有機物を含んだ黒土であり、その下に関東ロームの赤土がつづいている。

それぞれの測定基線における感度は、ランプ・スケールの mm 目盛スケール上で $NS=3.69 \text{ mV}/131 \text{ m/mm}$, $EW=0.925 \text{ mV}/56 \text{ m/mm}$, $WW'=1.48 \text{ mV}/39 \text{ m/mm}$ であった。この感度は電極から地中をも含めた全測定回路に対して測定されたものである。

地電位差の測定は列車の先頭が、下り列車の場合は石岡駅方面より S(E) 極に接近しはじめてから、後尾が N 極を通過し羽鳥駅方面へ数 100 m 以上遠ざかるまで、上り列車の場合は反対に先頭が羽鳥駅方面より N 極に接近しはじめてより、後尾が S(E) 極を通過し石岡駅方面へ数 100 m 遠ざかるまで、それぞれの間 5 sec おきに検流計の振れを目視で読み取ってゆくという方法をとった。列車位置は、列車の全長が比較的正確にわかるので、その先頭と後尾が S(E) 極を通過する時刻を計っておくことにより、その時間差から列車の秒速を求め、それを基として、各測定時における S(E) 極を基点とする列車位置を測定することとした。

測定対象には、貨物列車の場合は上り1列車，下り2列車，旅客列車の場合は上り2列車，下り3列車の合計8列車を選んだ。しかし実際の測定に当っては、下り貨物1列車，下り旅客1列車について、その通過時点で検流計回路に故障が起ったため完全な測定が出来なかったため、結果は6列車分しか得られなかった。各列車の推定速度は次のとおりであった。

測定番号	観測点 括弧内	通過時刻 夏時刻	列車種別	列車速度 (m/sec)
No. 1	11時 12分	(12時 12分)	上り貨物	15.0
No. 2	12 22	(13 22)	下り旅客	10.4
No. 3	12 45	(13 45)	下り貨物	6.8
No. 4	13 28	(14 28)	上り旅客	16.0
No. 5	14 07	(15 07)	下り旅客	欠測
No. 6	14 18	(15 18)	下り貨物	欠測
No. 7	15 22	(16 22)	上り旅客	16.0
No. 8	15 47	(16 47)	下り旅客	17.0

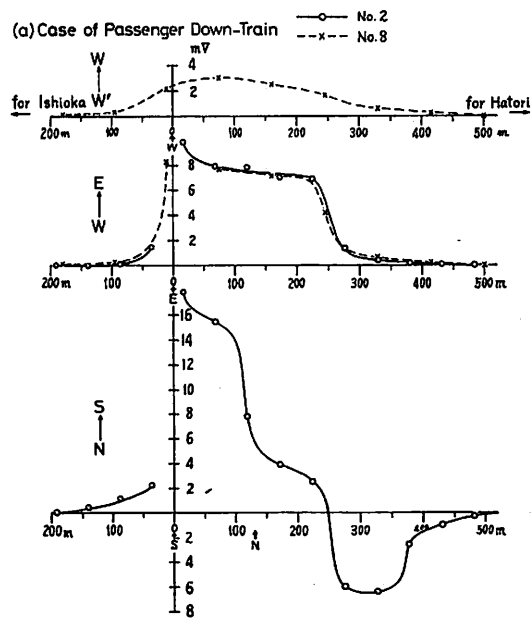
測定結果は Fig. 5, (a)~(d) に旅客列車，貨物列車，上り，下り別に各基線の状態を示した通りである。ここに示した結果は、推定し得る自然の地電位差変動を消去したものである。

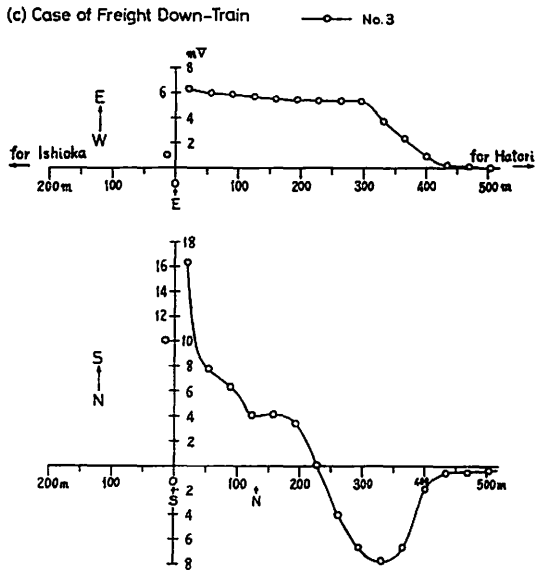
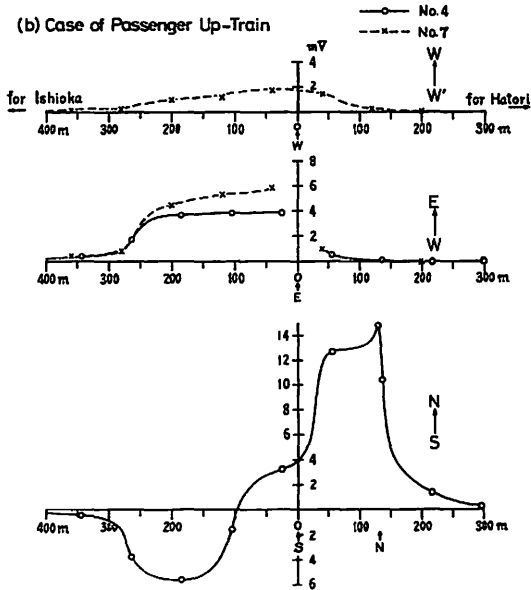
自然の地電位差変化の推定，列車位置の推定という不確定要素が入り込んでいるため，Fig. 5 の横軸，列車位置には， ± 15 m，縦軸，地電位差には ± 2 mV 程度の誤差は含まれているものと考えられる。

3. 考 察

第2章で述べた実測結果より，列車通過時の通過点近傍の地中に異常な電位差が発生するという事実ははっきりと確認出来，列車位置との数量的な関係も得ることが出来たので，この章では，どういう機構によってこの異常電位の発生が起るのかとい

Fig. 5. Changes of earth-current potentials observed on each base-line when some train was passing by the observed point.

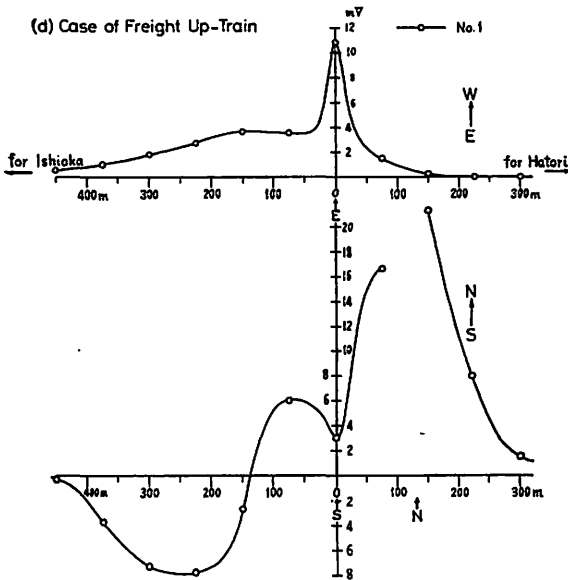




う点について考察をすすめて見ることとする。

まず、列車重量程度の圧が地表面にかかったくらいでは、土地の比抵抗に影響を与えるだけの力にはなり得ない、ということは第2章第1節の測定結果より見てあきらかである。すくなくとも測定精度にかかる程の影響がないことは確かである。しかるに同章第2節の測定結果より見て、列車通過時にはその近傍に予想外に大きな地電位差変動が生ずることは確かである。ところがこの地電位差変動の原因を大地比抵抗に求めようとしても、先に述べたように大地比抵抗は、たとえそれに変化があったとしても、 $\rho/100$ 程度以下で、測定精度にはかからぬ程の微小なものであるところから、とうていこれでもって上記地電位差変動を説明することは出来ないことである。しかし、この軌道は非電気軌道であって、列車は蒸気機関車に牽引されているもので、列車から軌道をとおって地中に漏洩する電流があるとは考えられないし、実際にそのようなものは存在しない。それでここでは残された可能性の一つである流動電位をとり上げて考えて見ることとした。

このことは、水を含んだ多孔質のものに外圧を加えると、その細隙を水が移動するということからその可能性が推測されるもので、すなわち、土壤は鉱物質の細粒から成り立っており、その空隙には土壤水が含まれている。このことから、土地というものが等価的には水を含んだ多数の毛細管で構成されている一種の



毛細管系であり、管壁と水との界面には電気二重層が存在するもの、と考えて差支えないであろう。このように考えると、そのような毛細管系の上を列車のような重量物が通過すると、その重量に相当する圧力がこの毛細管系の一端にかかり、その圧に応じて毛細管中を土壌水が移動し、その移動にともなって土壌水中の可動電荷が移動することとなり、そのために土壌水の移動する方向に従って流動電位が生ずるはずである。このため大地の加圧点近傍と無限遠点との間に電位差が生じ、大地電気伝導度に従ってその間に電流が流れ、自然の地電位差分布に変化を生じ、それが測定されるものと考え

える。このように考えると、発生した流動電位は大地中に漏洩電流を生じ、その電気的エネルギーは圧力という機械的エネルギーによって起された毛細管中の土壌水の動きを押しかえそうとする方向に働く。しかし、この機械的エネルギーの印加が静的なものであるならば、その一部は上記の電気的エネルギーとして、また大部分は他の形で次第に失われてゆき間もなく平衡に達して、土壌水の動きも止まり、従って流動電位も漏洩電流も消滅してしまうわけであるが、列車通過という短時間の間にはとうてい平衡状態に到達しきれないので、その間電流は流れつづけるものと考えられる。それに列車は停止しているわけではなく 10~20 m/sec、即ち12輛編成の旅客列車は 10~20 sec で1点を通過する、という速さで進行しているわけであるから、流動電位の発生源はそれにもなって移動し、地上の一点で見ているかぎり、それによる漏洩電流は列車通過の間完全に観測されつづけることとなる。

列車通過点近傍の地表面で観測される第2章第2節で述べたような地電位差の異常変化の発生機構をこのように仮定して計算を試みることにする。まづ列車荷重は車輪、軌条、枕木、道床を通じて地中に加わってゆくわけであるが、この状況をそのまま正直に取り扱うことは困難であるし、ここではそこまでの議論は必要でないと考えられるので、近似的に次の状況を考えることとした。即ち枕木と同じ巾をもち、列車長に相当する長さをもった長方形の板を軌道上に軌道の延長方向に長軸を一致させて置き、その上に列車重量に等しい重量を持つ上記長方形と同形の底面をもつ直方体が載荷されているものとして取り扱うこととした。この場合土地が完全弾性体でないかぎり、板底面即ち地表面の圧力分布は一様にはならず、中心部に集中する傾向が生ずる。この傾向は、Fig. 6 に示した Kögler—Scheidig の砂地盤における圧力分布の実測結果⁽⁶⁾にも明瞭にあらわれている。この傾向を考慮に入れて、ここでは単位面積当りの平均圧が一様に分布する面は、列車長を長軸とし、枕木巾を短軸と

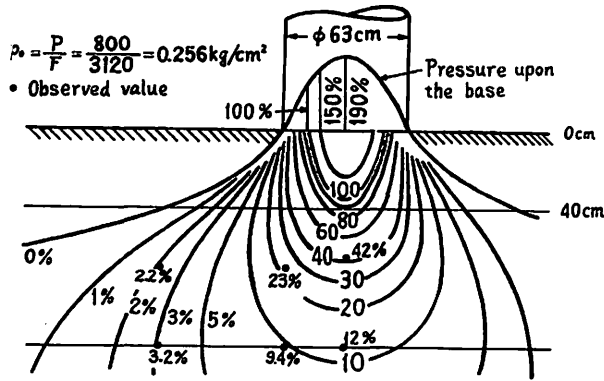


Fig. 6. Distribution of the pressure in the earth when it acts upon the ground-surface (after T. Mogami).

する極く細長い回転楕円体の地下半表面であると近似することとした。即ち毛細管系の実効的な開口面がこの面であるとして流動電位を考え、漏洩電流による地中電位の分布は、この回転楕円体の長軸上に軸長に等しい長さの直線電極をおいて、そこにこの楕円体表面に流動電位によって生じたと同じ電位を生ぜしめるような電流が加えられるものと考えた場合と等価であるとして計算を行った。

まづ流動電位の計算は Helmholtz—Smoluchowski の式⁽⁶⁾を用いる。

$$E = \frac{PD\zeta}{4\pi\eta\lambda} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 P は毛細管両端の圧力差で、 $P \text{ dyne/cm}^2 = [981 \text{ cm/sec}^2] \times [G \text{ (平均荷重) gr/cm}^2]$ 、 D は誘電率、 $\text{e.s.u./}9 \times 10^{11}$ 、 ζ は界面動電圧、 volt 、 η は粘性係数、 $\text{poise} = \text{dyne} \cdot \text{sec/cm}^2$ 、 λ は土壤水の電気伝導度、 mho/cm 、 E は流動電位、 volt である。しかし蒸気機関車に牽引される列車においては、機関車と客・貨車とは平均重量に大きな相違があるので、これをひっくりめて均一荷重とするには無理がある。そこで、機関車部と客貨車部との2部分に分けて考え、後でそれぞれによって生ずる電位分布を合成することとした。いま機関車部に関係する量には“ e ”，客貨車部に关するものには“ r ”の添字をつけることとして、各部により生ずる流動電位を計算する。その場合、重力の加速度、土の誘電率、土粒と土壤水との界面動電圧、土壤水の粘性係数、土壤水の電気伝導度は測定区域・時間内において、荷重には無関係に一定と考えて差支えないので、(1)式は次のように書き替えることが出来る。

$$E = K \cdot G, \quad K = \frac{gD\zeta}{4\pi\eta\lambda} = \text{常数} \dots\dots\dots(2)$$

いま、 $g = 981 \text{ cm/sec}^2$ 、 $D = 81/(9 \times 10^{11}) \text{ c.g.s.}$ 、 $\zeta = 4 \times 10^{-2} \text{ volt}$ 、 $\eta = 10^{-2} \text{ dyne} \cdot \text{sec/cm}^2$ 、 $\lambda = 3 \times 10^{-4} \text{ mho/cm}$ とすると、

$$K = 9.37 \times 10^{-5} \dots\dots\dots(3)$$

である。

それ故、機関車部・客車部それぞれによる流動電位 $E_e \cdot E_r$ はそれぞれ次式から求められる。

$$E_e = 9.37 \times 10^{-5} \cdot G_e \dots\dots\dots(4)$$

$$E_i = 9.37 \times 10^{-5} \cdot G_i \dots\dots\dots(5)$$

ここで、機関車部の長さ=2000 cm, 枕木巾=150 cm, 機関車部全重量=80×10⁶ gr とすると、

$$G_e = 267 \text{ gr/cm}^2$$

又、客車は12輛編成であるが、重量は乗客の多少によって左右されるので、ここでは平均的に1輛当り 75 kg の人間(手荷物も含み) 200人が乗っているものとして勘定しておく。そこで客車部全長=2000 cm×12=24000 cm, 枕木巾=150 cm, 客車部総重量=45×10⁶ gr×12=540×10⁶ gr とし、

$$G_i = 150 \text{ gr/cm}^2$$

となる。そこで(4), (5)式より

$$E_e = 25.0 \times 10^{-3} \text{ volt} \dots\dots\dots(6)$$

$$E_i = 14.1 \times 10^{-3} \text{ volt} \dots\dots\dots(7)$$

となる。

(6), (7) のように求められた, E_e, E_i はそれぞれ各部の長さを長軸とし, 枕木巾を短軸とし, 長軸を回転軸とする回転楕円面の地下の半面に生ずる流動電位で, 次にそれぞれの回転楕円体の長軸上にそれと等しい長さをもつ直線電極を仮想し, 電気伝導度 $\kappa = 0.5 \times 10^{-4}$ mho/cm の大地中にそれらより電流を供給するとして, それぞれの面に E_e, E_i を生ぜしめる電流 I_e, I_i を求めることとする。この場合, 正しくは直線電極の長さは回転楕円体の焦点間距離に等しくとらねばならないわけであるが, ここで考えている回転楕円体は極端に細長いものであるので [長軸長]≐[焦点間距離] とおいて計算することとした。そこで漏洩電流による電位を計算するために Fig. 7 の

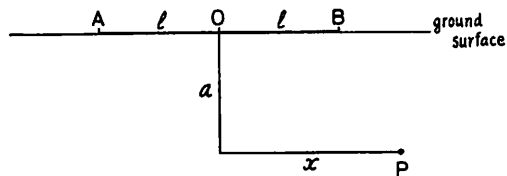


Fig. 7.

ようなモデルを考える。ここで線分 AB は大地上においた直線電極で, それを通して大地中に電流 I を流すものとする。そのときの任意点 P の電位を求めると, AB の中点 O を円筒座標の原点とし, $OA = OB = l, P$ 点の座標を (x, a, θ) として, この場合, 電位 φ は θ に無関係に, x と a のみによって次式で表わされるように決まる。

$$\varphi = \frac{1}{2\pi\kappa} \cdot \frac{I}{2l} \log \frac{(l-x) + \sqrt{a^2 + (l-x)^2}}{-(l+x) + \sqrt{a^2 + (l+x)^2}} \dots\dots\dots(8)$$

故に I は次式のように表わされる。

$$I = 4\pi\kappa l \varphi \left\{ \log \frac{(l-x) + \sqrt{a^2 + (l-x)^2}}{-(l+x) + \sqrt{a^2 + (l+x)^2}} \right\}^{-1} \dots\dots\dots(9)$$

そこで, まず機関車部については, $\kappa = 0.5 \times 10^{-4}$ mho/cm として, $l_e = 10^3$ cm で, $x_e = 0, a_e = 75$ cm の位置で $\varphi = E_e = 25.0 \times 10^{-3}$ volt であるから, (9) 式より

$$I_e = 2.39 \times 10^{-3} \text{ amp.} \dots\dots\dots(10)$$

同様に、客車部については、 κ は同じで $l_t = 12 \times 10^3$ cm で、 $x_t = 0$, $a_t = 75$ cm の位置で $\varphi = E_t = 14.1 \times 10^{-3}$ volt であるから、(9) 式より

$$I_t = 9.14 \times 10^{-3} \text{ amp} \dots\dots\dots(11)$$

となる。ここで x_e , x_t はそれぞれ機関車部、客車部の各中心を座標原点とする 2 座標系のそれぞれに対する任意点の x 座標で、 l_e , l_t は各部における仮想電極の半長である。

次に、(10), (11) のように求めた I_e , I_t を使って (8) 式を、機関車部、客車部のそれぞれに対して、次のように書き替える。

$$\varphi_e = 3.8 \times 10^{-3} \log \frac{(10^3 - x_e) + \sqrt{a_e^2 + (10^3 - x_e)^2}}{-(10^3 + x_e) + \sqrt{a_e^2 + (10^3 + x_e)^2}} \dots\dots(12)$$

$$\varphi_t = 1.2 \times 10^{-3} \log \frac{(12 \times 10^3 - x_t) + \sqrt{a_t^2 + (12 \times 10^3 - x_t)^2}}{-(12 \times 10^3 + x_t) + \sqrt{a_t^2 + (12 \times 10^3 + x_t)^2}} \dots\dots(13)$$

ここで、 φ_e , φ_t はそれぞれ機関車部の仮想電極、客車部の仮想電極によって任意点に生ずる電位である。それ故両部による任意点の総合電位 φ は

$$\varphi = \varphi_e + \varphi_t \dots\dots\dots(14)$$

である。

ここまで旅客列車についてのみ記述し、貨物列車については意識的に避けてきたが、これは旅客列車は列車編成、車輛規格がほぼ一定（少くとも観測時点において）しており、乗客の多寡のみが客車部の重量に影響してくるが、この平均値よりの偏差は余り大きくないものと考えられ、それに比して貨物列車の方は編成、車輛規格とも不定といっている位で、その上貨車の内容も不確定であるため、平均的な取り扱い是不可能であり、列車毎にその明細を調査した上でないと実測と計算の比較を論じ得ないからである。当時の記録にはその点の記載はなく、今となっては調査の仕様もないので、残念ながら貨車についての実測結果は単なる参考資料としかなし得なかった。又旅客列車の重量概算に当って、客車 1 輛の乗客数を 75 kg の人間 200 人としたのは一見過大に見えるが、昭和 23 年（1948 年）当時はまだまだ太平洋戦争終戦後の混乱期であり、交通事情も最悪の時期であったためこの程度の見積りは平均状態としてさして無理はない値である。

この様なわけで、上記旅客列車を当時の標準的なものとして、(12), (13), (14) 式によって、Fig. 4 に表示した各電極点に生ずる電位を計算し、それぞれの電極組合せによる EW, NS(E), WW' 各 2 点間の電位差を求めた。この結果は Fig. 8, (a), (b) に実線で示しておく。この場合、加圧による土壌中の流動電位は加圧点で負の値をとり、地中の漏洩電流は周囲から加圧点に向かって流入する形となる。Fig. 8, (a), (b) には比較のため実測結果をも点線で示しておいた。この際 EW 基線については上り旅客列車、下り旅客列車とも 2 例ずつあるので、それ等の平均を示しておいた。

Fig. 8 より明らかなように、変化の向き及び列車の移動ともなう変化の推移は実測と計算において実によく合っており、大きさの点でも EW 基線においては充分事実を説明し得ている。ただ NS 基線において、大きさの点で割り合い大きくズレていることについては説明されない。なお残念なことに、列車速度に比して測定の間隔が粗ら過ぎたため、変化

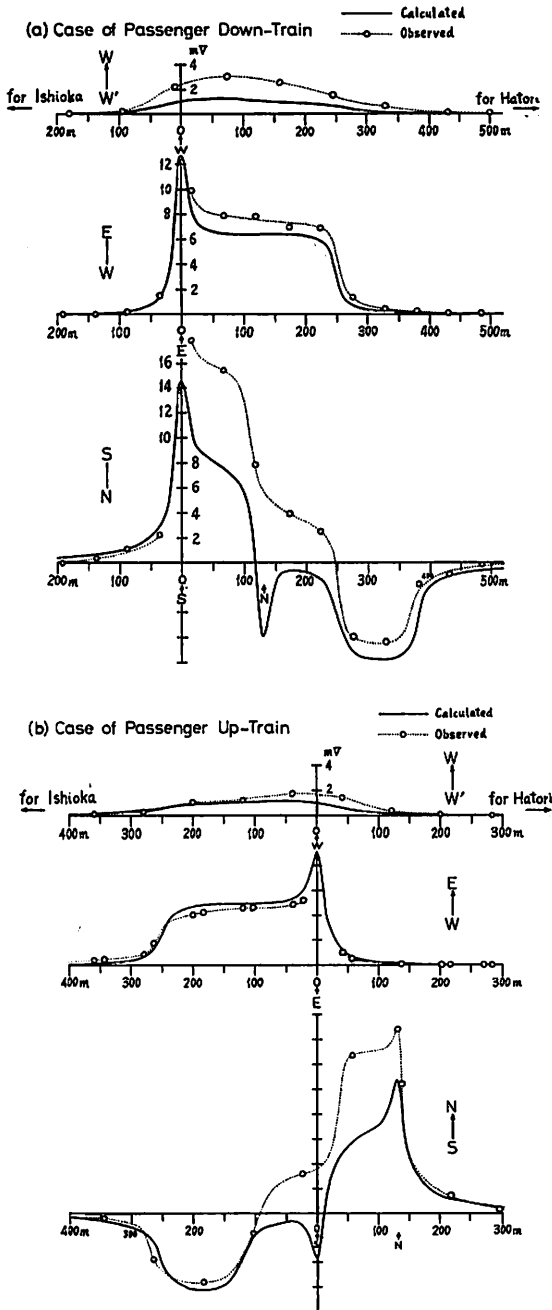


Fig. 8. Changes of earth-current potentials calculated on each base-line when a imaginary train is passing by the observed point and comparison between those and observed results.

のピーク時点に対する測定値が得られていない。ただ、Fig. 5 の (d) に示した測定番号 No. 1 の上り貨物列車の 1 例のみが、偶然機関車の S(E) 極点通過時に測定を行っており、その結果は明らかに計算結果に現われているようなピークを示している。これから類推して、もし連続記録を採るならば、実測変化曲線はピーク時においても、計算結果を裏書きする変化を記録するはずであると期待することが出来る。ということは、既に列車通過点近傍に現われる地電流の異常変化は、列車加圧による土壤中の流動電位の発生と、その漏洩によるものであるということを肯定していることで、このことは上記の計算結果と実測との一致の程度から見て、基本的な発生機構に関する限り充分首肯し得るものである。ただ軌道と平行した NS 基線に現われる不一致が少々気にかかる問題をもっているようである。特に、列車の先頭が S 極から N 極 (又は逆) に向かって 200 m あたりにあるときの実測値が、図の上で、なお割り合いに大きな正方向の量をもっている点である。これは、軌道に垂直な方向の計算値のみならず実測値から判断しても、列車圧の作用が S 極と N 極に全く同じに及ぶものであれば、この付近では負あるいはせいぜい零であるべきで、少なくとも正の値はとるはずがないと考えられるからである。勿論自然の地電位差にそれを説明するに足る変化があったかも知れないが、いくつかの測定例において常に自然電位が同じように作用

したとは考えにくいので、この見方は今のところ否定的であると思っている。又S極とN極で列車圧の作用条件に相異のあることも考えられるが、これも両極に固有の条件に相異があるものであれば上り列車の結果と下り列車の結果では正反対の影響が現われてよいはずであるのに、現実には両者は同じ傾向をもっていることから、この見方も否定せざるを得ない。この点は同じNS基線のピーク時の実測値が、計算値又はEW基線の実測値に比して、過大である点とともに、いずれはその理由を明らかにする必要があると考える。

以上の結果から見て、なお解決を要する問題点がないわけではないが、列車通過点近傍において観測される地電位差の異常変化は、その主たる発生機構において主役を演じているものが列車加圧によって軌道直下付近に生ずる流動電位の漏洩であると断定しても差支えないであろう。

4. ま と め

古い観測資料で、測定条件の不明確な点、ことに列車と電極との関係位置の推定において十分な精度が出せなかった点に幾分の不満がある。しかし列車通過時にその近傍に生ずる地電位差の異常変化が、大地比抵抗に基因するものでなく、地中の電気化学的要因、即ち流動電位に基因するということはほぼ確認し得たものとする。殊に大地比抵抗の方は実測の結果 200~300 gr/cm² 程度の加圧では、使用した測定器の測定能力の範囲内においては全く変化を認めることは出来ず、たとえそれ以下の微小変化があったと仮定しても、それでは余りに微小に過ぎて、地電位差の変化量を説明することは不可能であるということが明らかとなった。

その上、土壌への加圧により地電位差に変化を生ずる機構が土中の流動電位とその漏洩にあるとして、非常に単純化したモデルについて計算を行い、実測によく一致した結果が得られたということは、この現象の応用面に対して非常に有利なことと考えられる。このことから地上又は地中の特定区域に圧力不均衡が生じた場合、その程度に応じて、地電位差に測定可能な変化を生ずる範囲を予測することが可能となり、又逆に地電位差に生じた局地異常から、それが地中の圧力不均衡に原因するものであると考えられる場合には、その圧力不均衡の程度及びその発生区域を推定することも可能となってくるであろう⁽⁷⁾。といってもこの場合、単一測定からは一義的には決まるものでなく、適当な測点分布があって初めて可能となるもので、この点差電位差観測を適当に分布した複数地点で連続して行うことにより、圧力不均衡の発生地域並びにその量を推定することが可能となるものと考えている。ただ問題は圧力不均衡があれば必ず流動電位が発生するかどうかということで、土質条件と流動電位発生条件とについてのより深い調査が必要となってくる。ともかく、地震予知問題とからんで、地震と地電流の結びつきにおいてもっとも可能性の高い現象の一つといえるのではないかと考えている。

地電位差の観測は比較的簡単で、経費もかからぬので、大は人工地震の実験の利用、小は車輛、重量物等の移動の利用等あらゆる機会を使って更にこの現象についての詳細な裏付け調査を行うべきであると考えている。その場合、観測は連続記録が望ましいことで、測定装置のレスポンスは 1 sec 以下、感度は記録紙上で 0.2 mV/mm 以上、記録紙の送りは 2.0~

3.0 mm/sec 即ち 120~180 mm/min. のもので、少くも2成分以上の同時記録の出来るものを用意すべきで、適当な基線配置と相まって微細な調査資料を得ることが出来るものとする。この際には当然第3章の末尾で述べた問題点の解明にも留意すべきであろう。又観測点配置においては1点を基準点として、発生点の規模にもよるが、そこから数100 m離れた位置に設置すると便利であろう。こうして発生点からの距離による減衰状況も実測しておくことが必要である。

謝 辞

筆をおくに当り、この論文を筆者の名で発表することを快諾下されたばかりでなく、懇切な助言までいただいたことにたいし、当時この観測を主宰された上司であり恩師である東京理科大学教授吉松隆三博士に、まず衷心よりの感謝を捧げたい。ついで、執筆に際し種々の便宜激励を給わった地磁気観測所長安井豊博士、調査課長久保木忠夫氏、また当時この観測を共にし、この度の執筆のきっかけを作られ、終始直接の指導鞭撻を給わった技術課長柳原一夫博士に深甚の謝意を表するとともに、当時この観測を共にした郷野中彦、北村正丞両氏に謝意を表す。なお当時の常磐線の軌道・車輛・その他について助言をもらった菅野晴夫氏（現在水戸管理局原町機関区助役）に感謝したい。（昭和44年1月）

文 献

- (1) Hirayama, M. (1951); Earth Current due to Stress (Abstract), Mem. of Kakioka Mag. Obs., 6, 1, p. 68.
- (2) 菊池繁雄 (1939); 地電位傾度に現われた低気圧の影響について, Mem. of Kakioka Mag. Obs., 2, 2 and 3, p. 94—99.
- (3) Gish, O. H. and W. J. Rooney (1952); Measurement of Resistivity of large Masses of undisturbed Earth, Terr. Mag., 30, p. 161—188.
- (4) Yanagihara, K. (1958); On the Measurement of Earth-Resistivity, Mem. of Kakioka Mag. Obs., 8, 2, p. 47—52.
- (5) 最上武雄 (1948); 土の力学 (物理学集書 12), 河出書房, p. 150—151.
- (6) 駒形作次 (1948); 界面電気化学概要, 産業図書株式会社, p. 104—111.
- (7) 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, 3, p. 53—58.
- (8) 吉松隆三 (1937); 地電流の地方的並に局所的研究, 気象集誌第2輯, 第15巻, 第4号, p. 145—158.

On Earth-Current Variations caused by the Pressure acting upon the Ground

Hiromi OSHIMA

Abstract

Results of the measurement of earth-current variations caused by the pressure acting upon the ground and a possible interpretation are reported in this paper. The pressure was given by trains with steam-engine running on the Joban-line which had not been electrified yet in this measurement. Large changes above 20 mV in the earth-current potential were observed when the train passed by. However, in the specific earth resistivity no change was found exceeding the relative measuring accuracy, say order of about 10^{-2} , in the region where the train weight acted upon the ground effectively. Then, these changes observed in the earth-current potential are not able to be interpreted by the change of the specific earth resistivity. Author considers that the earth is formed of semi-infinite porous medium which is filled with water and the electric double layer is formed on the boundary between soil and water. When the pressure act upon the surface of such earth, the water may move through narrow capillary in the soil and streaming-potentials may be generated. The streaming-potential may cause leakage currents in the earth. Calculated potentials according to this consideration show good agreement with observed changes of the earth-current potential. Author, therefore, concludes that the main cause of the earth-current variation generated by the pressure acting upon the ground is streaming-potential and its leakage current in the earth. This problem may have important relation to the earthquake prediction because non homogeneous pressure in the ground may cause the so-called "Difference of Earth Potentials" by Prof. T. Yoshimatsu.