

福島・米沢間電気鉄道による原町地電流の擾乱

柳原一夫・大島汎海

On the Earth-Current Disturbances at Haranomachi caused by the Leakage Current from the Electric Railway, Fukushima-Yonezawa

by Kazuo YANAGIHARA and Hiromi ŌSHIMA

From April 1949, some strange but minor disturbances of similar type have been recorded at nearly constant times on each electrogram at Haranomachi; we call it here "W-type" disturbance. (Fig. 1, Fig. 4 and Fig. 5) After some preliminary works those disturbances were supposed to be some artificial ones caused by the leakage current from the electric railway near Haranomachi, Ō-u Line from Fukushima to Yonezawa, or Fukushima Dentetsu Line (Fig. 3), and further examinations supported the estimation that the Ō-u Line affected predominantly the earth-currents at Haranomachi.

Then, in May 1952, quick-run recording of earth-current potentials at Haranomachi, observations of current supplied at Niwasaka, one of the transformer stations, and those of distance-time and current-time curves for each train were performed for several trains of usual service, including the express "Chōkai". (Fig. 11) And thus it was confirmed that the "W-type" disturbances were due to the leakage current from the electric railway, Ō-u Line, and that the first half of W-variation was appeared only when the train run from Fukushima to Sasakino, and the other half did from Sasakino to Niwasaka.

Some detailed numerical discussions were done in § 4, 5. If it is assumed that leakage coefficient of rails, $\alpha=0.153\text{ km}^{-1}$, total current supplied, $I=1000$ ampere, electric conductivity of the earth, $\sigma=6\times 10^{-5}\text{ ohm}^{-1}\text{ cm}^{-1}$, the earth-current potential gradients at Haranomachi, E , for each position of train can be given as in Table 1, 2.

By this calculation, numerical values of the "W-type" disturbance can be deduced fairly well. (dotted line in Fig. 11) And furthermore, it can be justified that there are predominant effects when the train or locomotive only runs near Fukushima, while none when the train runs further away from Niwasaka.

§ 1. 緒 言

地電流観測における障碍のうち、電気鉄道よりの漏洩電流が重大な原因の一つであることは言をまたない。仙台・福島よりそれぞれ 70km, 45km 距つている原町¹⁾において地電流の観測を始めから長い間、電気鉄道よりの漏洩電流によると思われる人工的擾乱は何等認められなかつたのであるが、1949年中頃より ほぼ 定刻に短時間現われる小さいが人工的らしい擾乱が認められるようになり、いろいろの予備調査によつて、国鉄奥羽本線の福島・米沢間の電化により常時 2000 A に達する電流を使用する電気機関車が、走行することとなつたため、その地中への漏洩電流によつて

1) 原町。地磁気観測所原町出張所 福島県相馬郡石神村馬場

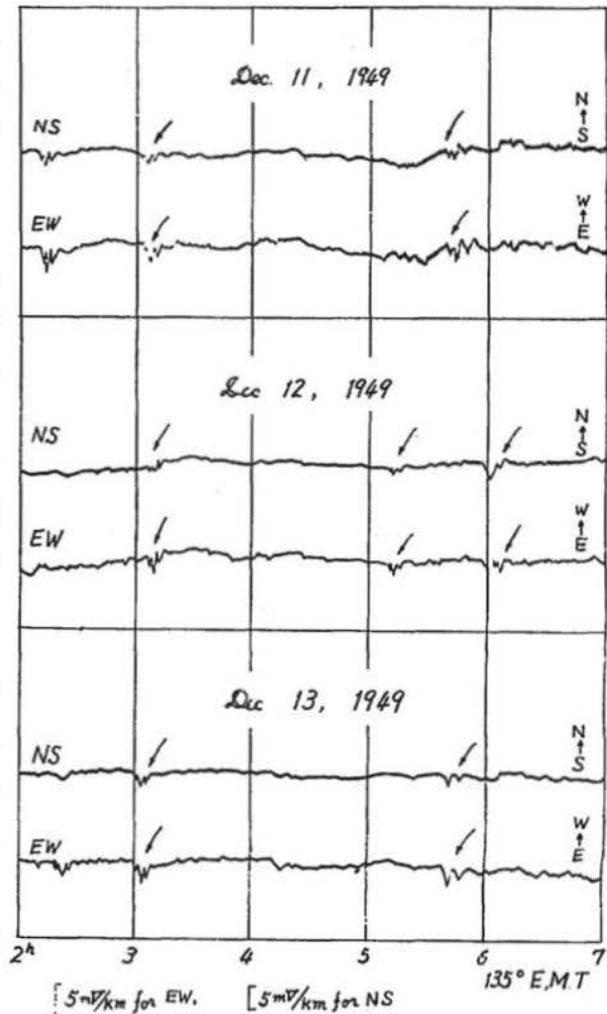
ひきおこされたものであるとの確信をえたので、1952年5月機関車に同乗して使用電流、機関車位置の記録、変電所における饋電電流記録、原町における地電流の早廻し記録等の同時観測を行った。この結果擾乱が同区間の漏洩電流によるものであることが確定し、かつもつとも近い変電所の所在する庭坂駅以遠に電気機関車が進行した場合、擾乱がほぼ消失するという現象も明瞭となつたので通常の業務には支障ないが広い地域における地電流の分布状況と地下構造との関係その他について智見を得る目的をもつて調査報告することにした。

§ 2. 擾乱の形状及び予備調査

1949年の中頃は丁度原町における地電流観測装置の整備期間中であつたが、整備終了後同じような型の擾乱が毎日繰り返えされることを見出し、筆者等の一人はこれをW型変化と仮りに名付けて調査した。これは第1図にみられる如く10分~20分継続するW字状の変化をなすためにかく名付けたものである。変化の較差は不同であるが、東西南北両成分とも2mV/km程度である。尙この場合15mm/hourの歩みの遅廻し記録上にはほぼ瞬時的変化とみられる擾乱や、やや長く30分~40分継続すると思われる変化も存在することが認められるが、W型変化が極めて明瞭である。(第1図)

このW型変化は毎日ほぼ同一時刻に現れるが、必ずしも同一時刻に限らず10分~20分の継続時間に対して20分~30分程度の“ズレ”をみせることがしばしばある。又日によつては対応時刻に全然現れられないか又は極めて不明瞭で認め難いことがある。これ等の事柄は、W型変化の一般的形状、殊にその記録上よりみて“滑らか”でないことから、自然の現象でないことは察せられるにも拘らず

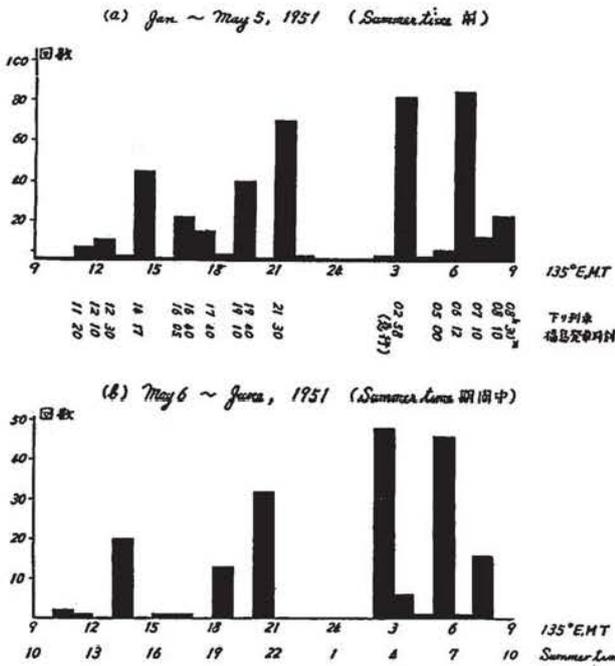
Artificial disturbances of earth-current potentials at Heranomachi



第 1 図

その原因の調査を著しく困難にした。又前記の観測装置の整備以前は記録の寸法値が大きかつたため従つて小さな変化は見出し難く、W型変化の存在の有無を確かめるのに不利であつたことも困難性を増す原因の一つである。

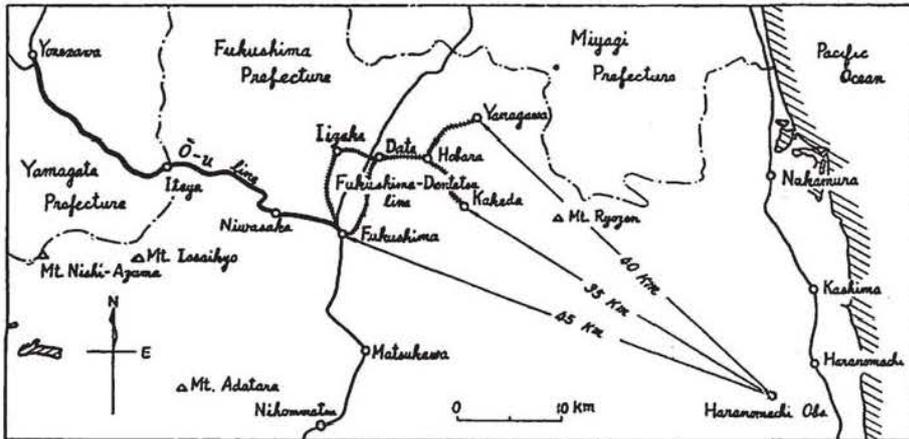
しかし乍ら毎日ほぼ同一時刻に現れることから1時間毎に区切つてその間に現れるW型変化の



第 2 図

度数頻度を求めると第2図(a)(b)の如くなる。ここには自然現象としての地電流の擾乱、例えば地電流嵐とか脈動、早い波状変化等によつて覆われて明瞭でないものは除き明らかにW型変化と思われるもののみについての統計である。ここに注目すべき現象は第2図(a)(b)を比較すれば明らかな様に夏時刻の切換えに伴つて明瞭に1時間の“ズレ”を示し、原因となるものが夏時刻に従うものであることを示している。かくしてW型変化の原因は工場事業所等の電気機器によるものか、電気鉄道よりの漏洩電流によるものであることが十分可能と考えられ、前者については原町附近を筆者等

の一人が調査した結果、原因となりうるものは見当らなかつた。後者について、原町に最も近い電



第 3 図

気鉄道を地図に示せば第3図の如くであつて、福島電鉄の各線と国鉄の奥羽本線福島・米沢間がこれである。福島電鉄の掛田・梁川は原町の観測所より直線距離それぞれ 35km, 40km であり、奥羽本線の原町にもつとも近い福島駅は 45km であつて、福島電鉄よりも遠いがその電力使用量より考えて国鉄の方がより多く影響を与えようと考えられ、又 W 型変化のもつとも明瞭でありかつ較差の大きいものが午前3時前後に現われることからその様に考えられる。即ちこの時刻には電車はすべて休止しており、一方福島発2時58分下り急行“鳥海”が丁度対応している。そこで第2図の時間対頻度分布と列車時刻表とを比較してみると、頻度分布の大きい時刻にはほぼ福島発下り列車が対応している。(第2図下段の福島発下り列車の時刻表参照)

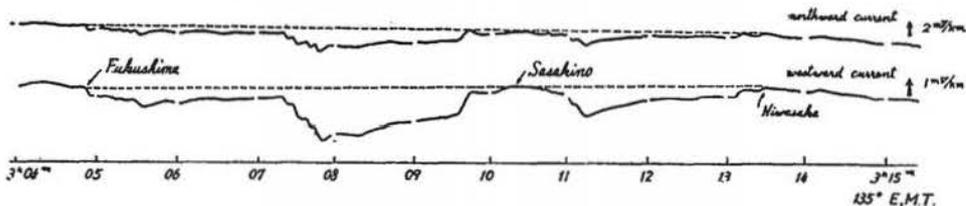
なお福島・米沢間電化に伴う電気機関車運行開始状況は次の通りである。

電気機関車試運転開始	1949年3月26日(午前9時18分)
電気機関車公式運転開始	1949年4月1日
同上 全列車	1949年4月24日

試運転時における擾乱を検出しようと試みたが、これは使用電力量が少ないためか又は前述のようにこの頃の地電流記録の寸法値が大き過ぎたためか、恐らくは両方の原因によつて明瞭には認められなかつた。

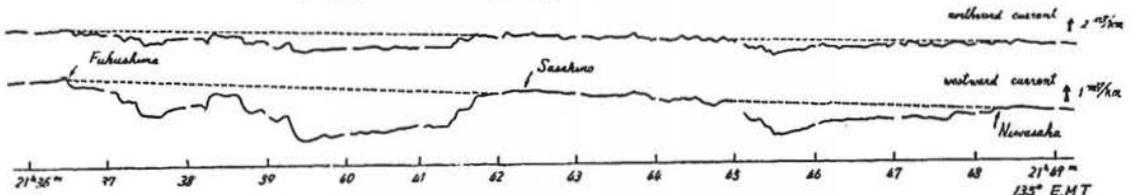
又1950年9月の日食の前後約1ヶ月にわたる地電流の高感度早廻し記録のうち、自然現象としての地電流の極めて静穏であつてW型変化の明瞭にみうるものを第4図に示す。これは前記の下り急行“鳥海”に対応するものであつて、図中福島、笹木野、庭坂等とあるのは後の同一列車に対する調査によつて得られた資料よりそれぞれの駅を列車が発車又は通過する時刻を示している。(第11図

Example of quiescent-record of W-type disturbance, Oct. 10, 1950



第 4 図

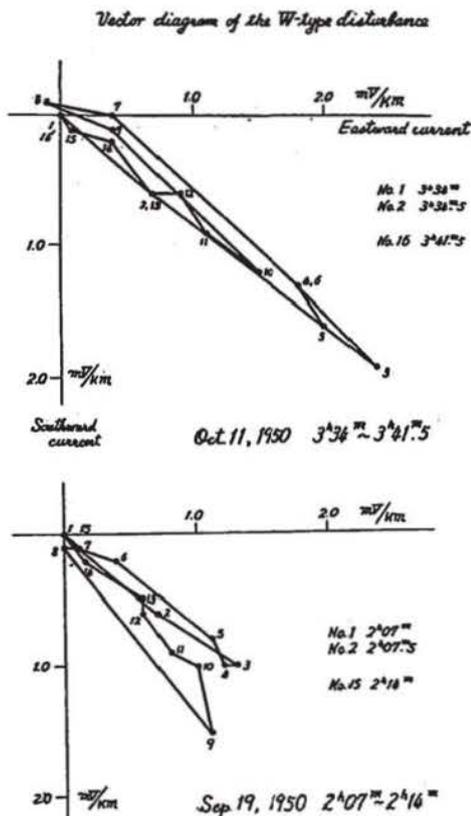
Example of quiescent-record of W-type disturbance, Oct. 6, 1950



第 5 図

参照) 或いは擾乱の始まり、即ち図中福島として矢印で示してある所を列車が福島を発車したときにとると、擾乱の終りは9分後であつて、即ち庭坂を通過した頃と考えられる時刻となる。これは第4図に示したもののみでなく、普通列車でもつと時間が長くなるものについても列車運行表と対照すると、やはり庭坂駅発車後は擾乱と思われるものは消失している。(第5図) なお第6図にはW型変化の二三の例について30sec毎に読みとつてベクトル図としたものを示す。このベクトル方向は自然現象としての短周期変化の平均ベクトル方向とほぼ一致する。

次にこの変化の大きさと天候との関係であるが、午前3時頃、即ち下り急行“鳥海”に対応すると思われるW型変化の最大較差をそれぞれの天気に対して図示すると第7図の如くなる。ここに○, ⊙, ⊗, ⊕はそれぞれその時刻前後の福島附近の天気が快晴, 晴, 曇, 曇又は雨, 雨であることを示す。この図によつてみると天気が悪くなると較差が増す様な傾向がみえるが、これが軌道床の湿り工合とか大地の比抵抗の変化等によつて漏洩電流の割合が変



第 6 図

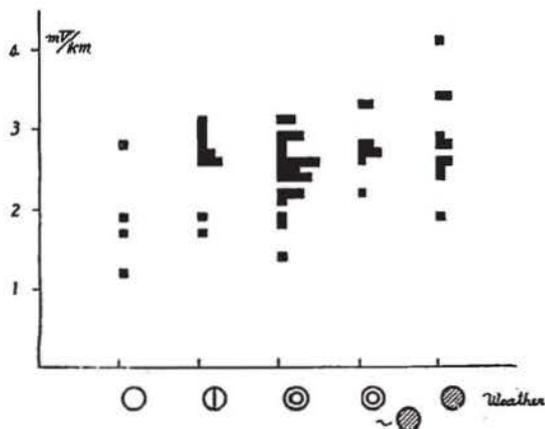
つたものか、他の原因によつて源の使用電力に変化を生じたものが2次的に現われたものかは不明である。

§ 3. 1952年5月の調査

前節に述べた如くW型変化は奥羽本線の福島・米沢間の電化区間の電気機関車運行に伴う漏洩電流によつて生起するものであることがほぼ明らかとなつたが、なお

- (i) W型変化の生起時刻が列車運行表に一致しないのは実際の運転に遅延があるとしても明確ではなく、又運行表にない臨時列車等との対応も明らかでない。

Range of the W-type disturbance



第 7 図

(ii) 早廻し記録においては“コブ状”に、遅廻し記録に於ては瞬時的変化として現れている変化が何によつて起るか不明である。

(iii) 擾乱の始まり(第4図、第5図中福島として矢印で示してある所)を列車が発車したときとすると、列車運行表から考えて、庭坂附近より以速では明瞭な擾乱は認められなく、むしろ擾乱の終りが明瞭といふ程であつて、この原因が不明である。

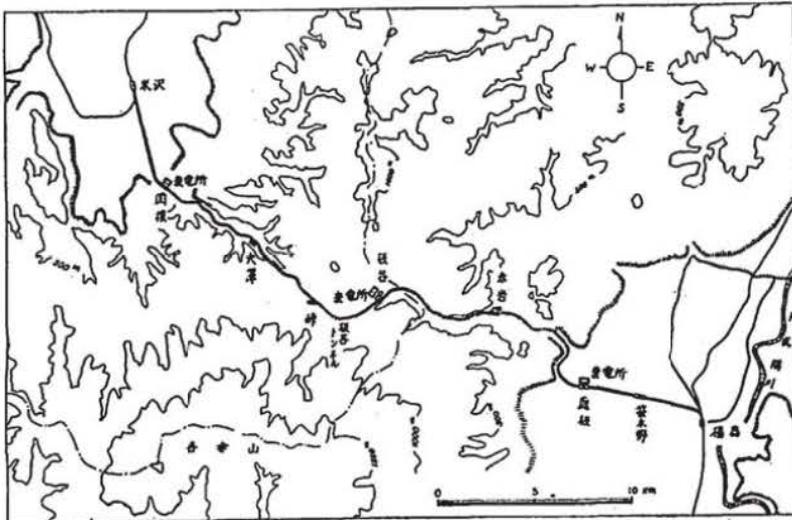
これ等(i)(ii)(iii)等の不明確さのために、なほ奥羽本線の漏洩電流によるものであると確定することは不可能であつて、他の未知の原因による擾乱が含まれているかも知れず、特に(ii)の項目についてはその形状の著しく異なる点より、他の二三の可能な原因についても調査されたが福島電鉄の漏洩電流を除いてはいづれもその可能性が薄らいた。その福島電鉄の漏洩電流についてもこの型の擾乱は深夜においても起りうることにW型変化に附随して起り易いという点、及びこの点を除いては生起時刻に規則性が少な過ぎる等ということより考えて、可能性が少ないと考えられるが、なおこのときまでは明確でなかつた。(後に述べるがこれも奥羽本線よりの漏洩電流によるものと考えられる)

かくしてW型変化が奥羽本線の電気機関車運転に伴う擾乱であることを確定すると共に、(i)(ii)(iii)等の疑問を明らかにするために2,3の予備調査と共に1952年5月下旬、10列車に対して、原町における地電流の早廻し記録、そのうち5列車に対して、機関車同乗による使用電流、列車位置、制御器のノッチ位置等、及び庭坂変電所における饋電電流等の同時観測を行つた。

なお、福島・米沢間の配電、帰線、使用電気機関車、路線状態等については次の通りである。

(i) 配電、帰線、変電所関係

変電所は庭坂、板谷、関根の三ヶ所であつてそれぞれ起点福島から6.9km、21.4km、35.4km

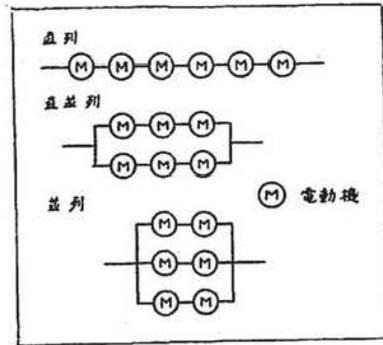


第 8 図

の地点にある。(第8図) 饋電線は変電所より 325mm^2 の断面積の銅より線2條並列に接続し、饋電線と架線とは平坦区間では250m間隔に、庭坂一関根間では120m間隔に接続され部分的に急勾配又はトンネル内では60m、30m間隔に接続される。帰線は変電所のみにて接続される。饋電電圧は直流1500V、電車線電圧は列車運転時は通常1300V~1400V、最低900Vとなつた記録がある。

(ii) 電気機関車及びその運転

使用している電気機関車はすべてEF16型であつて、この型式はEF15型に電力回生装置を附したもので、福島-米沢間の電化区間の特徴は電力回生装置を有することで、列車が下り勾配にあるときはインバーターを通して電力を回生している。EF16型は1CC1、即ち動軸6ヶを有し、その制御は直列、直並列、並列の三段になつている。(第9図) 勿論各段内に抵抗を入れ何段かに制御する様になつているが通常運転の場合には各段で抵抗を全部抜いたtopの状態

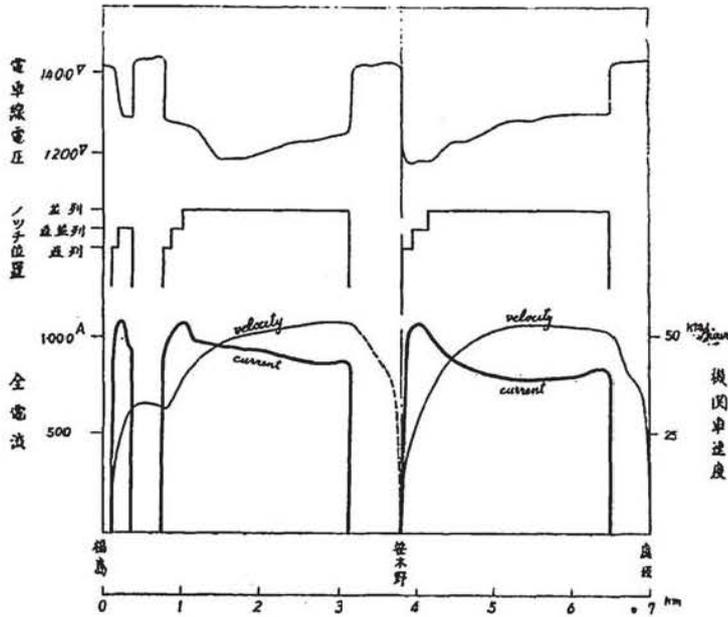


第9図

各段の抵抗を入れたままの中間の状態は数十秒の程度である。停車駅間のノッチ位置、電車線電圧、使用電流、速度等の一例を第10図に示す。

この区間においては牽引重量に応じてこのEF16型電気機関車一輛又は二輛を用いて運転する、例えば急行“鳥海”は機関車二輛を用いることが多い。

地電流は通常の観測と同様に高抵抗と検流計の組合せにより光学的にプロマイド紙上に記録する方法により、検流計



第10図

計を常統観測の回路に直列に加えて観測した。即ち基線長は東西1.33km、南北0.85kmである。レコーダーの歩みは20mm/minでドラム一回転毎に10mm横に移動する様になつている。時刻は毎分00秒から02秒まで光源を消して記録した。

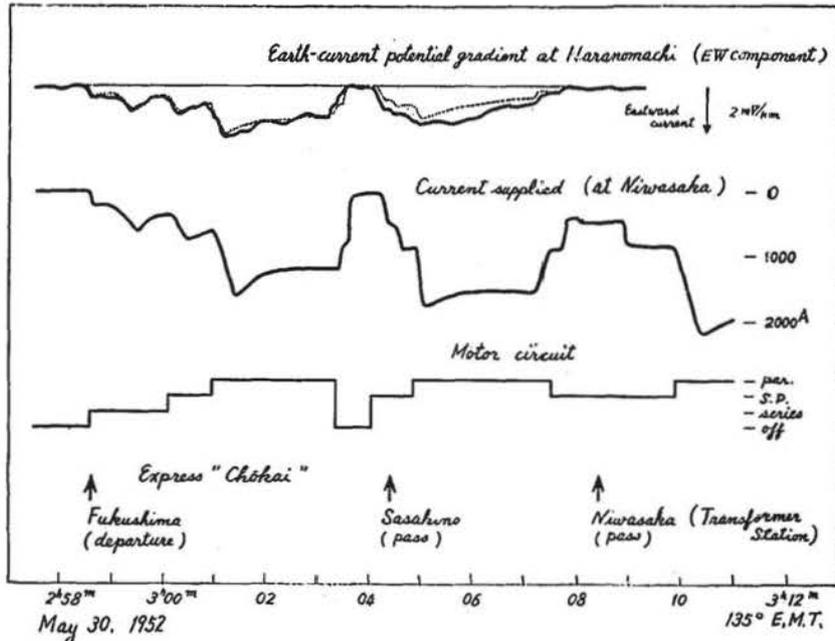
庭坂変電所における饋電電流の記録計は早廻しにしても歩みが2mm/minであるので、時刻の

正確を期するために毎分00秒毎に時刻を記入した。

機関車同乗による記録は、i) ノッチ位置を変更ある毎に時刻と共に記録し、ii) 機関車の位置を毎杆又は毎0.5杆のマークを通過する毎に時刻を記入し、iii) 機関車内の電流計により使用全電流を急変ある毎に時刻と共に記入した。ただし重要列車には機関車二輛を用いるので、時刻対位置のみを主な目的とし、ノッチ位置及び電流は庭坂変電所の饋電電流の参考とするに止めた。

これらの各記録の同時観測を5列車について行つたのであるが、あいにくこの期間は自然現象としての地電流がやや静穏でなく、満足しうる記録としては30日午前2時58分福島発の下り急行“島

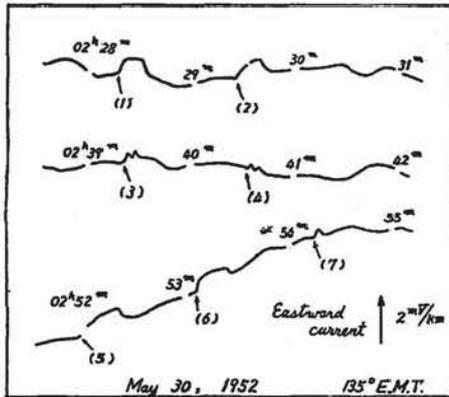
海”に対するもののみであつた。この記録を第11図に示す。この場合も3時4分以後、即ち列車が笹木野以遠に進んでからは自然の地電流はやや擾乱となり、図にみられる如く3時4分以後の変化の較差はそれ以前の変化の較差と同じ位であつて、これは今迄のW型



第 11 図

変化の現われ方、即ち第1図、第4図、第5図にみられる如く第2の変化の方が第1の変化よりも小さいということと喰い違つているが、これは自然の擾乱が重疊したためと思われる。なお図には東西成分のみを示したが、南北成分もほぼ同様であるが、自然の擾乱と思われるものがやや大きく重疊しているので省略した。

列車は福島を2時58分32秒に発車し、駅構内のポイントの錯綜した所を通り抜けるとすぐ曲線路にかかるので、この間直列で進みそれから急激に直並列、並列とノッチを進め、笹木野駅の手前でノッチを元まで戻し、やや速度を落して笹木野駅を通過し再び並列までノッチを進め、庭坂駅の手前で再び直並列まで戻し通過して並列に進め山間部に進んでゆく。従つて地電流の記録には笹木野駅附近に列車があるとき一度元の位置に戻り、その前後に変化を生じて全体として所謂W型の変化となつて現われる。普通列車の場合も笹木野駅と庭坂駅に停車する点を除けばほぼ同様である。



第 12 図

庭坂駅以遠において人工的擾乱と思われるものがみとめられなくなる点については §4, §5 に述べる。

又前記列車の発車前約30分に電気機関車は車庫を出るが、この時ノッチを進めて電流を消費する毎に第12図にみられる如くコブ状の変化として現れる。図中(1)(2)……(7)等と番号を入れたのはすべてこれ等であつて、機関車同乗の際のノッチ進めの時刻の記録と良く一致している。例えば(1)は筆者等の一人が機関庫前で機関車に乗つて発車したときであつて $02^h28^m20^s (\pm 5^s)$ と記録されている。地電

流の遅廻し記録上に瞬時の変化として記録されるものはこれ等の機関庫又は福島駅附近における機関車の入れ換え等によるものである。

§ 4. 列車の位置によつて変化する原町の地電位差

饋電線と電車線とは相当密に(平坦区間では平均 250m, 山間部 120m 間隔乃至それ以下) 接続され、又帰線は変電所においてのみ軌條に接続されているので、列車による負荷を抵抗で代表されると第13図又は第15図に示した如くなる。ただし軌條から大地へは漏洩抵抗 ρ を通して漏洩があるものとする。

次に軌條のうち福島—機関庫間の軌條を福島から 0.5 km の長さに4線出ていると近似する。そしてこれに対する漏洩抵抗 ρ , 漏洩係数 α 等は福島・米沢間と等しいとする。

ρ , α , その他の数値については国鉄において1949年3月測定した値をそのまま使うこととする。それは板谷変電所において饋電線を上り方面, 下り方面に分離し、それぞれ福島或いは米沢において饋電線と軌條とを短絡した回路に適当な負荷抵抗を通して 200A 程度の電流を流して、全電流, 全電圧降下, 及び各駅における軌條電流, 軌條対地電圧を測定したものであつて、この結果のうちここに必要なものを次に記しておく。

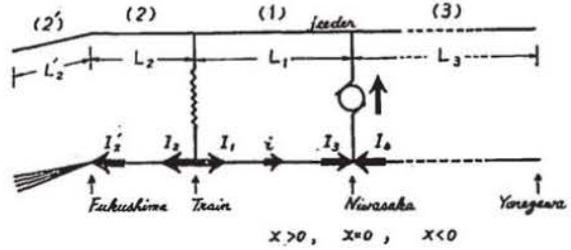
福 島 — 板 谷 間

距 離	19.8km
架線抵抗実測値	0.492 Ω
架線抵抗計算値	0.463 Ω
帰回路抵抗実測値	0.099 Ω
平均軌條抵抗	0.0200 Ω /km
軌條漏洩係数 α	0.153km ⁻¹
軌條漏洩抵抗 ρ	0.904 $\Omega \cdot km$

又この測定において、福島における軌條電流の板谷方面に向うものと他の方面すべてへ向うものと
の比の実測値 $56A/108A=0.52$ と、前記の福島—機関庫間の軌條の仮定より計算した値 0.51 と
を比較するとほぼ一致している。

i) 列車が福島庭坂間にある場合

列車が福島庭坂間にある場合には、板谷・関根 両変電所の寄与は小さいと考えられるので変電所
としてはもつとも近い庭坂のみを考えると
第 13 図の如くなる。列車から 庭坂までを
第 1 区間、列車から福島までを第 2 区間、
庭坂以遠を第 3 区間、福島・機関庫間を
第 2' 区間とすると軌條電流 i 、及び単位距
離に対する漏洩電流 $\frac{di}{dx}$ は、庭坂を $x=0$
(福島側を $x>0$)、 i は福島より庭坂へ向う向きを正として (第 13 図)



第 13 図

第 1 区間においては：

$$i_1(x) = \{I_1 \sinh \alpha x + I_3 \sinh \alpha (L_1 - x)\} / \sinh \alpha L_1 \quad (1)$$

$$\frac{di_1}{dx} = \alpha \{I_1 \cosh \alpha x - I_3 \cosh \alpha (L_1 - x)\} / \sinh \alpha L_1 \quad (2)$$

第 2 区間においては：

$$i_2(x) = \{I_2' \sinh \alpha (L_1 - x) - I_2 \sinh \alpha (L_1 + L_2 - x)\} / \sinh \alpha L_2 \quad (3)$$

$$\frac{di_2}{dx} = \alpha \{-I_2' \cosh \alpha (L_1 - x) + I_2 \cosh \alpha (L_1 + L_2 - x)\} / \sinh \alpha L_2 \quad (4)$$

第 3 区間においては：

$$i_3(x) = -I_4 \sinh \alpha (L_3 + x) / \sinh \alpha L_3 \quad (5)$$

$$\frac{di_3}{dx} = -\alpha I_4 \cosh \alpha (L_3 + x) / \sinh \alpha L_3 \quad (6)$$

第 2' 区間においては：

$$i_2'(x) = -I_2' \sinh \alpha (L_1 + L_2 + L_2' - x) / 4 \sinh \alpha L_2' \quad (7)$$

$$\frac{di_2'}{dx} = \alpha I_2' \cosh \alpha (L_1 + L_2 + L_2' - x) / 4 \sinh \alpha L_2' \quad (8)$$

となる。ここに I_2' 、 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 等はそれぞれ福島、列車の位置、庭坂 (変電所) における軌條
電流であつて第 13 図の如くとするものとする、 $L_2'=0.5\text{km}$ は先の仮定による軌條長、 L_2 は福島・
列車間距離、 L_1 は列車・庭坂 (変電所) 間距離、 $L_3=33.8\text{km}$ は庭坂・米沢間距離であり、 α は軌條
漏洩係数 $\sqrt{\frac{r}{\rho}}$ (r は軌條の単位長の電気抵抗、 ρ は軌條単位長の漏洩抵抗) であつて、前記の如

く国鉄による試験結果 $\alpha = 0.153\text{km}^{-1}$ を用いる。

全饋電電流を I とすると

$$I_1 + I_2 = I, \quad I_3 + I_4 = I$$

なること、及び福島、機関車の位置、庭坂の各区分点において両側の区間から求めた軌條の大地電位が等しいことから I_1, I_2, I_3, I_4, I_2' 等を求めると

$$I_1 = \frac{ac + bD + cD}{1 + bD + bc + cD} \cdot I \tag{9}$$

$$I_2 = \frac{1 + bc - ac}{1 + bD + bc + cD} \cdot I \tag{10}$$

$$I_3 = \frac{aD + bc + cD}{1 + bD + bc + cD} \cdot I \tag{11}$$

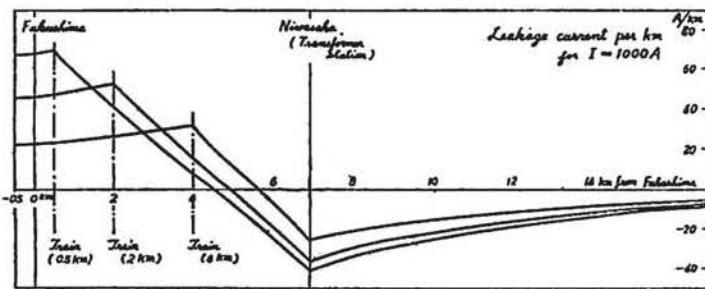
$$I_4 = \frac{1 + bD - aD}{1 + bD + bc + cD} \cdot I \tag{12}$$

$$I_2' = \frac{1 + bc - ac}{1 + bD + bc + cD} \cdot \frac{e}{f+d} \cdot I \tag{13}$$

となる。ただしここに

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{1}{\sinh \alpha L_1}, \quad b = \frac{1}{\tanh \alpha L_1}, \quad c = \frac{1}{\tanh \alpha L_3} \doteq 1, \\ d &= \frac{1}{\tanh \alpha L_2}, \quad e = \frac{1}{\sinh \alpha L_2}, \quad f = \frac{1}{4 \tanh \alpha L_2'}, \\ D &= d - \frac{e^2}{f+d} \end{aligned} \right\} \tag{14}$$

とする。従つてこれ等の I_1, I_2, I_3, I_4, I_2' の値を (2) (4) (6) (8) に代入して、軌條よりの漏洩電流を求めることが出来る。列車の位置と共に変化する漏洩電流の例を第14図に示す。こ



第 14 図

こには列車が福島よりそれぞれ 0.5km, 2km, 4km にある場合を示しいずれも $I=1000A$ の場合の値である。但し機関庫と福島間については軌條 4 條中単線に対するもののみを示す。

次にこの漏洩電流によつて任意の地表上の一点 P に生ずる電

位は、大地の比電気伝導度が一定で σ であるならば、軌道上の各点 (福島からの距離 s) から今電位を求めるべき点 P との距離を $R(s)$ とすると、

$$\sum_p \frac{1}{2\pi\sigma} \int \frac{di_n}{dx} \frac{1}{R(s)} ds \tag{15}$$

で表わされる。ただし積分範囲は i_n に対して第 n 区間内とする。今その距離を $R(s)$ で測られた軌道上の各点と P とを結ぶベクトルの方向を考えると、福島・米沢間に対して $E 20^\circ S$ から $E 25^\circ S$ の 5° 以内であり、かつ与える影響の少ないと思われる関根・米沢間を除けば $E 20^\circ S$ から $E 22^\circ S$ で 2° 以内であるからほぼ同一方向と考えることが出来る。従つて原町における地電流観測用基線の長さ東西 1.33km, 南北 0.85km に比して $R(s) > 45\text{km}$ が十分大きいことを考えて原町における地電位差は $E 21^\circ S$ の方向に

$$E = \sum_n \frac{1}{2\pi\sigma} \int \left(-\frac{di_n}{dx} \frac{1}{R(s)^3} \right) ds \quad (16)$$

で与えられる。

P 点を原町の東西基線の W 極にとつて、 $R(s)$ を地図上で実測しこれを 5 区間に分けて次の如く近似する。

$$1^\circ \text{ 福島} \sim \text{機関車間} \quad R(s) \equiv 45.2\text{km} \quad (17)$$

$$2^\circ \text{ 福島} \sim s = 8.25\text{km} \quad R(s) = (s + 44.85)\text{km} \quad (18)$$

$$3^\circ \text{ } s = 8.25\text{km} \sim s = 9.75\text{km} \quad R(s) \equiv 53.1\text{km} \quad (19)$$

$$4^\circ \text{ } s = 9.75\text{km} \sim \text{板谷} \quad R(s) = (0.897s + 44.35)\text{km} \quad (20)$$

$$5^\circ \text{ 板谷} \sim \text{米沢} \quad R(s) = (0.885s + 44.20)\text{km} \quad (21)$$

この近似のうち関根・米沢間では最大 1.5km 位の誤差が出来るが、これは原町から最も遠くかつ漏洩電流も少ない所であるから、影響が小さく誤差は無視しうるものと考えられる。

従つて (1) (2).....(14), (17).....

第 1 表

(21) より (16) を計算して $2\pi\sigma E/I$ を第 1 表に示す。又この表第 2 欄以下には $\sigma = 6 \times 10^{-8} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$, $I = 1000A$ とした場合の E , 及びその東西成分の値を示した。

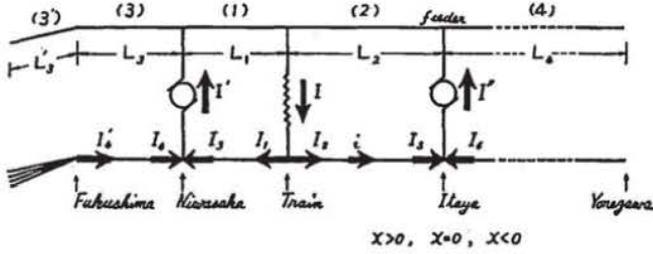
実際の列車運行の際には位置が変ると共に I も変るので第 11 図に示した場合について第 1 表の値と、図中の庭坂における饋電電流の値とを用いて原町における地電位差の東西成分の変化を求め同図中に点線で示した。ただし $\sigma = 6 \times 10^{-8} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ としてある。

Position of train s (or L_2), km	$2\pi\sigma E/I$ km^{-2}	E mV/km	Eastward component mV/km
0 (Fukushima)	$\times 10^{-4}$ 0.609	1.61	1.50
1	0.565	1.50	1.40
2	0.499	1.32	1.23
3	0.419	1.11	1.04
4	0.311	0.82	0.77
5	0.219	0.58	0.54
6	0.112	0.30	0.28
6.92 (Niwasaka)	0	0	0

$$\sigma = 6 \times 10^{-8} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}, I = 1000A$$

ii) 列車が庭坂・板谷間に進んだとき

列車が庭坂以遠に進み庭坂・板谷間にあときは、電力は主として庭坂・板谷の両変電所から供給さ



第 15 図

れ、関根変電所の寄与は少ないと考えられるのでこれを無視して第15図の如く表す、庭坂・列車間を第1区間、列車・板谷間を第2区間、庭坂・福島間を第3区間、板谷以遠を第4区間、福島・機関庫間を第3'区間とし、板谷を $x=0$ として福島側を

$x > 0$, i を i) と同じ向きにとると、軌条電流 i , 単位距離に対する漏洩電流 $\frac{di}{dx}$ はそれぞれ、

第1区間では

$$i_1(x) = - \left\{ I_3 \sinh \alpha (x-L_2) + I_1 \sinh \alpha (L_1+L_2-x) \right\} / \sinh \alpha L_1 \quad (22)$$

$$\frac{di_1}{dx} = - \alpha \left\{ I_3 \cosh \alpha (x-L_2) - I_1 \cosh \alpha (L_1+L_2-x) \right\} / \sinh \alpha L_1 \quad (23)$$

第2区間では

$$i_2(x) = \left\{ I_2 \sinh \alpha x + I_3 \sinh \alpha (L_2-x) \right\} / \sinh \alpha L_2 \quad (24)$$

$$\frac{di_2}{dx} = \alpha \left\{ I_2 \cosh \alpha x - I_3 \cosh \alpha (L_2-x) \right\} / \sinh \alpha L_2 \quad (25)$$

第3区間では

$$i_3(x) = \left\{ I_4' \sinh \alpha (x-L_1-L_2) + I_4 \sinh \alpha (L_3+L_2+L_1-x) \right\} / \sinh \alpha L_3 \quad (26)$$

$$\frac{di_3}{dx} = \alpha \left\{ I_4' \cosh \alpha (x-L_1-L_2) - I_4 \cosh \alpha (L_3+L_2+L_1-x) \right\} / \sinh \alpha L_3 \quad (27)$$

第4区間では

$$i_4(x) = - \left\{ I_6 \sinh \alpha (L_4+x) \right\} / \sinh \alpha L_4 \quad (28)$$

$$\frac{di_4}{dx} = - \alpha \left\{ I_6 \cosh \alpha (L_4+x) \right\} / \sinh \alpha L_4 \quad (29)$$

第3'区間では

$$i_3'(x) = \left\{ I_4' \sinh \alpha (L_3'+L_3+L_2+L_1-x) \right\} / 4 \sinh \alpha L_3' \quad (30)$$

$$\frac{di_3'}{dx} = - \alpha \left\{ I_4' \cosh \alpha (L_3'+L_3+L_2+L_1-x) \right\} / 4 \sinh \alpha L_3' \quad (31)$$

と表わされる。ここに $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6, I_4'$ は列車位置、庭坂、板谷、福島における軌条電流であつて、第15図の如くとするものとする。 $L_3'=0.5\text{km}$ は i) における L_2' と同様前記の仮定による軌条長、 L_1 は列車・庭坂間、 L_2 は列車・板谷間、 $L_3=6.92\text{km}$ は福島・庭坂間、 $L_4=19.33\text{km}$ は板谷・米沢間の距離であり、 $\alpha=0.153\text{km}^{-1}$ は i) と同じ値を使うものとする。

庭坂変電所における饋電電流を I' 、板谷におけるものを I'' とし、それぞれの饋電電圧を V_1 、 V_2 とすると

$$V_1 + \rho \left(\frac{di_1}{dx} \right)_{x=L_1+L_2} - L_1 w I' = V_2 + \rho \left(\frac{di_2}{dx} \right)_{x=0} - L_2 w I'' \quad (32)$$

が成立つ。 ρ は i) と同様、 w は饋電線に吊架線及び電車線を含めた架線全体の単位長当りの抵抗である。今 $V_1 = V_2$ 、かつ

$$\left| \rho \left(\frac{di_1}{dx} \right)_{x=L_1+L_2} - \rho \left(\frac{di_2}{dx} \right)_{x=0} \right| \ll L_1 w I' \text{ 又は } \ll L_2 w I'' \quad (33)$$

とすると、近似的に

$$L_1 I' = L_2 I'' \quad (34)$$

となる。所で本節の始めに記した国鉄の試験結果によれば、福島・板谷間の架線抵抗実測値 0.492Ω に対して帰回路抵抗実測値は 0.099Ω であるから (33) はほぼ成立つものと考えられる。従つて (34) が成立つとして、その他に全饋電電流を I として

$$I_1 + I_2 = I, \quad I_3 + I_4 + I_5 + I_6 = I' + I'' = I$$

及び福島、庭坂、列車の位置、板谷の各区分分点において、両側の区間より計算した軌條の大地に対する電位 $\rho \left(\frac{di}{dx} \right)$ が等しいとおくと i) と同様にして $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6, I_4'$ を求めることが出来る。即ち

$$I_2 = \frac{\frac{a^2}{c-b} + b + \frac{eg}{f+g} \frac{L_1}{L_1+L_2} - \frac{ac}{c-b} \frac{L_2}{L_1+L_2}}{b+f + \frac{a^2}{c-b} - \frac{e^2}{f+g}} \cdot I$$

$$I_1 = I - I_2$$

$$I_4 = \frac{a}{c-b} \cdot I_1 - \frac{b}{c-b} \frac{L_2}{L_1+L_2} \cdot I$$

$$I_6 = -\frac{e}{f+g} \cdot I_2 + \frac{f}{f+g} \frac{L_1}{L_1+L_2} \cdot I$$

$$I_3 = \frac{L_2}{L_1+L_2} \cdot I - I_4$$

$$I_5 = \frac{L_1}{L_1+L_2} \cdot I - I_6$$

$$I_4' = dI_4$$

ただし、

$$a = \frac{1}{\sinh \alpha L_1}, \quad b = \frac{1}{\tanh \alpha L_1}, \quad c = \frac{d}{\sinh \alpha L_3} - \frac{1}{\tanh \alpha L_3}, \quad d = \frac{4 \tanh \alpha L_3 \cdot \tanh \alpha L_3'}{\sinh \alpha L_3 (\tanh \alpha L_3 + 4 \tanh \alpha L_3')}$$

$$e = \frac{1}{\sinh \alpha L_2}, \quad f = \frac{1}{\tanh \alpha L_2}, \quad g = \frac{1}{\tanh \alpha L_4}$$

とする。これを (23) (25) (27) (29) (31) に代入して漏洩電流を求め i) と同様にして原町における地電位差 E を計算して $2\pi\sigma E/I$ の値を第 2 表に示した。又第 1 表と同様に $\sigma = 6 \times 10^{-5} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$, $I = 1000A$ とした場合の E の値、及びその東西成分をも示した。

§ 5. 実測された原町の地電位差と計算値の比較

前節 i) の終りに記した如く $\sigma = 6 \times 10^{-5} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ とすると第 11 図の実測された地電位差は同図中の假電流を使つて計算した値と良く一致する。ここで笹木野・庭坂間においてやや一致が悪くなるのは、前述の如く自然の地電流の擾乱が重疊したためと考えられ、事実もつと静穏なときより

第 2 表

Position of train L_1 (distance from Niwasaka) km	$2\pi\sigma E/I$ km ⁻²	E mV/km	Eastward componeut mV/km
0 (Niwasaka)	0	0	0
0.70	$\times 10^{-4}$ -0.013	-0.03	-0.03
1.33	-0.030	-0.08	-0.07
2.83	-0.061	-0.16	-0.15
4.00	-0.095	-0.25	-0.23
5.00	-0.108	-0.29	-0.27
6.00	-0.116	-0.31	-0.29
7.00	-0.119	-0.32	-0.30
8.00	-0.115	-0.30	-0.28
9.00	-0.109	-0.29	-0.27
10.00	-0.098	-0.26	-0.24
11.00	-0.084	-0.22	-0.21
12.00	-0.060	-0.16	-0.15
13.00	-0.039	-0.10	-0.09
14.43 (Itaya)	0	0	0

$\sigma = 6 \times 10^{-5} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$, $I = 1000A$

んだ W 型変化の記録は第 4 図、第 5 図の如くむしろ点線で示した計算値の方に似ている。又第 12 図に示した様な変化は電気機関車が福島附近で動いている場合であつて、第 1 表にみられる如く同一電流に対しては最も影響の大きい所であつて、0.3 mV/km 程度の变化を生ずるのに必要な電流は 200A 以下であるから十分遠しうる大いさと考えられる。

しかし以上の事柄は σ を適当に仮定した場合であつて、福島と原町を含む様な大きな地域についての大地の比電気伝導度 (又は比抵抗) については測定結果もなくただ仮定に止るが、この場合の様に電気機関車の動く範囲 (庭坂・福島間 6.92km) に比して観測点までの距離 ($R(s) \geq 45.2\text{km}$) が大きい場合には、電気機関車の移動によつて变化する地電位差を考える限り $\sigma = \text{一定}$ と考えても差支えないものと思われる。

庭坂以遠に列車が進んだ場合前記の通り実測ではほぼ擾乱がみとめられないのであるが、第 2 表に示した様に計算によれば小さい乍らも擾乱がある筈であつてこの点庭坂迄の場合と多少異つている。列車が庭坂を離れると共に計算による地電位差は極めて除々に以前と反対方向に変化し、かつその絶対量も小さいので記録紙上の見落としをおそれて多くの例について調べたが何等認められなく、又普通列車は中間駅赤岩に停車するから、それに対応する早廻し記録を調べたが変化は認めら

れなかつた。前節 ii) の計算においては i) と同様に $\alpha=0.153 \text{ km}^{-1}$ としたが、今庭坂以遠においては接地抵抗が極めて大きく、 $\rho \rightarrow \infty$ とすると第2表における E はすべて0となる。これは ρ の実測値、福島・板谷間に対しては $\rho=0.904 \Omega \cdot \text{km}$ 、板谷・米沢間に対しては $\rho=1.964 \Omega \cdot \text{km}$ より考えても可能であり、又庭坂を出るとすぐ山間部に入ること、並びに庭坂の西を南北に帯状に走る花崗岩地帯があつて、障壁の役目を果しているのではないかと考えられる点等を考慮に入れて、 $\rho \rightarrow \infty$ でないまでも E の値が現在の観測にかからない程度に小さくなる位 ρ が大きいために、庭坂以遠に列車が進んだ場合、擾乱がみとめられなくなつたものと思われる。

又上り列車、即ち米沢より福島方面に向うものについては、板谷トンネル以東は下り勾配であるので殆んど電力を消費せず、逆に § 3 に記した様に電力回生装置により電力を送り返しているので、電流は逆に流れる。その大きさは勾配の急な庭坂以西において大きく、庭坂・福島間では平地に出るため殆んど零となるので、庭坂以西の場合は下り列車と同じ理由により、又庭坂・福島間では源となる電流が少ないため、原町における地電流の記録には現われないものと思われる。ただし庭坂以東では始動のためには普通にノッチを入れ、惰勢がついて勾配にかかつてから回生装置に切り換えるので、その前者は前述の遅廻し記録における瞬時的変化の一部に寄与しているものと思われるが、回生による逆向きの変化は回生電流が少ないために現われないものであろう。

なお、実測された擾乱ベクトルの方向は計算した値と 20° 位違つているが、これは実測されたものが自然の地電流の変化の平均方向とほぼ一致することを考え合せて、地下の電氣的構造と関係あるものと思われ、観測点を変えた場合の擾乱の大きさ及び方向、従つてその擾乱を起す源となる漏洩電流の分布と地下の電氣的構造等と共に今後の問題である。

終りに臨みこの調査を筆者等と共に遂行された仁井田一郎・大地洗両技官を始めとして、多大な御協力を戴いた国鉄仙台鉄道管理局、福島第2機関区、福島電力区、庭坂変電区、又種々の御便宜を賜つた福島測候所の各位に対して深遠な謝意を表すると共に、この調査の機会を与えられ、かつ有益な助言を賜つた今道前所長及び吉松所長に厚く御礼申し上げます。