

地球磁場鉛直分力變化度の測定及び電車影響の問題

今 道 周 一

Observation of Variability of the Earth's Vertical Magnetic Field, and Some Considerations on the Effective Magnetic Field due to Electric Works.

By S. Imamiti.

At the Kakioka magnetic observatory, induction current in a single turned horizontal circuit caused by changes of the vertical magnetic field of the earth is recorded continuously. The area of the circuit is 1×10^8 square metres and it is buried about 20 cm. below the earth's surface to prevent any current due to wind and other artificial causes. In the circuit a galvanometer is connected in series, which has a sensibility of 3.2×10^{-8} amp./mm. or 6.4×10^{-7} volt/mm. and a period of 8 seconds. Induction current i in this installation is given by the formula $i = 0.5 \Delta z / \Delta t$ amp. Variability correspond to bay type variations, pulsations, initial part of magnetic storms and magnetic variations accompanied by Dellinger effect are studied. But they are so disturbed by artificial magnetic field that it is impossible to obtain exact conclusions except the following points; (1) there are no special changes in the variations above mentioned. (2) on disturbed days much minute oscillations of period 3~5 seconds and of amplitude 0.02~0.05 γ are recorded than on calm days. (3) bay type variations and pulsations are generally accompanied by such fine oscillations. The artificial magnetic field are caused mainly by the Tōbu Electric Rail Way and that of the government in Tokyo and in it's suburb. Especially the Nikkō line of the former, which is about 50 km. westerly away from Kakioka gives much effect than others. It is a noticeable fact that the mean diurnal variation of variability at Kakioka is similar to the mean load curve recorded at a transforming station of the Tōbu-Nikkō line, and curves corresponding to time derivatives of current-time curves for electric cars of the same line are found in the records of variability. Strength of the magnetic field due to a rectangular circuit formed by a positive feeder and a rail is calculated, and it leads to the result that the vertical field at a point 50 km. away from the circuit gives no detectable effect to the above installation. If we take, however, into consideration of leakage current from the rail to the ground, the rectangular circuit is replaced by a straight current of which strength is equal to the difference between the current flowing in the feeder and that in the rail. In this case, under some conditions of the underground, this straight current, which is 10 km. of length and 300 amp. of strength will give appreciable effect at the point.

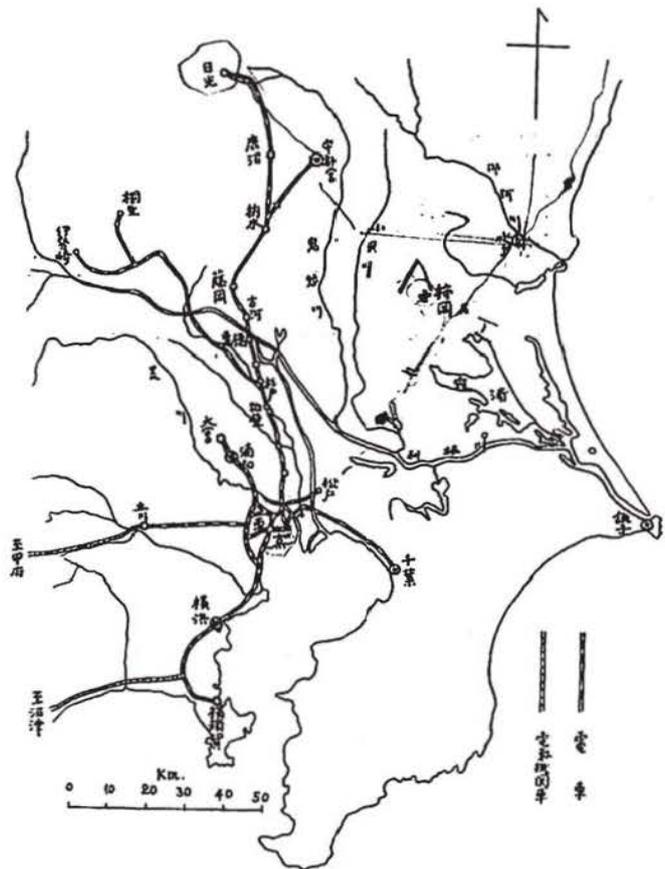
Magnetic effects of leakage currents alone are also calculated. They are treated as circular horizontal currents of $x^2 + y^2 + 2\mu y - k^2 = 0$ and the current density is assumed to be inversely proportional to the distance from x axis, where μ is the variable parameter and k is a constant. Calculation shows that *the vertical component of magnetic field at any point due to such circular currents is mostly caused by the currents with which the point is enclosed*, and the thickness of this current sheet to give a fairly great deviation as 10 mm. on a recording photographic paper is about 600 metres. The current density at the observing station corresponding to the above deviation is 1×10^{-12} amp., which is obtained from a recorded earth current.

It must be remembered that there are no detectable artificial magnetic effect on the ordinary magnetic observation at Kakioka.

緒言 地球磁場の變化を連続して記録せしむる事は、約五十年前から實施されて一定の場所に於ける變化及び地球上の位置に對する變化等かなり詳細に知られ、其等に関する研究も極めて多く發表されてゐる。近年種々の方面に地球磁氣が重要さを加へ來り、單に磁場 F の變化のみでなく、其れの時間に對する割合即ち變化度 dF/dt の状態を知る必要を感じて來た。此の變化度の測定は極めて少なく、殊に連続記録せしめてゐる觀測所は英國の Eskdalemuir 其他一二に過ぎない。本所に於ても昭和十年十一月以來鉛直分力の變化度を連続記録せしめてゐるが、此處では開始以來から昭和十二年十二月までの材料に就いて報告する事とした。此の觀測の目的は勿論自然現象としての

磁場の變化度を得る事にあつたのであるが、上記期間中に得た材料を整理してみると地球磁場の稍大きい擾亂日を除く外、人工的磁場擾亂と看做し得る變化度が極めて多い事が判明した。此れは柿岡から 50 杆乃至 60 杆の距離に在る東武鐵道の淺草雷門から日光に到る線及び東京市内或は郊外の省線電車によるものの様に考へられる。此等の影響は通常の地球磁氣測定には少しも差支へは無い程度であるが、自然現象としての地球磁場の變化度 dF/dt の測定は、柿岡に於ても夜間 2 時から 4 時の間丈けが稍可能であるのみで、晝間は人工的磁場の爲めの變化度が卓越し、自然的のものとの區別は特別な場合を除いては不可能である。第一圖は柿岡附近に於ける電氣鐵道のうち電力の大きいものの位置を示した。

第一圖



設備 變化度の測定には二つの方法がある。何れも線輪に誘導する電流を測るのであるが dF/dt を擴大する方法が異なつて居り、一つは線輪の面積を大きくして擴大し、他は Perminvar の様な誘磁率が極めて大きく、磁氣履歴の小さい特殊合金に依つて、磁力線を集合して其の部分の磁場を

大ならしめ、コイル内に生ずる誘導電流を記録せしめるものである。前者は最も一般に用ひらるゝ方法であるが、後者は最近の合金製作の發展に依つて出現したもので最近長岡博士の製作された優秀な装置がある⁽¹⁾。本所に於て使用した方法は前者に依るもので、線輪は BS 12 番鉛被線を東西 400 米南北 250 米の矩形とし其の面積は 10^5 平方米である。此の鉛被線は風の爲めに動揺して地球磁場による誘導電流を生ぜぬ様、地表から約 20 厘位の深さに埋没してある。かゝる廣大な矩形の邊を同一水平面上にとる事は困難であつてかなり高低はあるが、全體としては大體水平と看做してよく、従つて此の線輪には鉛直分力のみが作用し、水平分力の影響は之れに比して省略し得るのである。鉛被線は完全に接地されてゐるから線の外部に於ける電氣的影響は之れに依つて遮蔽されてゐる。線輪の兩端は當觀測所實驗室内に導入し、スイッチ、萬能分流器を通じて檢流計に絡がれる。檢流計は横河電機製作所製 D3 型 E 級で臨界制動に於て使用され、其の常數は次の通りである。

内部抵抗 4 ohm. 臨界抵抗 15 ohm 週期 3 秒 感度 $\begin{cases} 3.2 \times 10^{-8} \text{ amp.} \\ 6.4 \times 10^{-7} \text{ volt.} \end{cases}$

線輪の全長約 1500 米で此の全抵抗 8 ohm である。上の装置に於て線輪に誘導する電流 i は

$$i = -\frac{1}{R} \cdot S \cdot \frac{\Delta n}{\Delta t}$$

であつて、 R は全抵抗 S は線輪の面積 Δn は Δt 時間に單位面積を通じて變化する鉛直分力 Z の磁力線の數である。今 i を Amp. で表はし $R=19$ ohm, $S=10^5$ 平方厘とすると

$$i = -0.5 \frac{\Delta z}{\Delta t} \text{ amp.}$$

故に上記の檢流計を使用した場合檢流計から 1 米の距離に於て、光點が 1 毫變位する爲めには $\Delta z/\Delta t = 6.4 \times 10^{-8} \text{ gauss/sec.} = 6.4 \times 10^{-3} \gamma/\text{sec.}$ であつて Δz と Δt との関係は次の通りとなる。

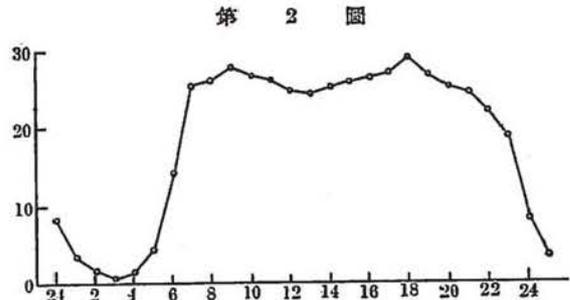
記録は 1 分の長さ 13 秒で毎分 2 秒間づゝ光源を消して刻時した。圓筒は一回轉約一時間とし一回轉の間に軸の方向に 5 毫づゝ移動する様にした。普通 0.1 γ 以下の變化は記録に表はす事は困難であるが、右表に見る様に 3 秒の週期を有するものは約 0.02 γ 程度のものも明瞭に現はれ、従つて變化度の觀測は普通の磁力記録に表はれない變化が多く記録せられる。

Δt	Δz (γ)
1 sec	6.4×10^{-3}
3 "	1.9×10^{-2}
1 minute	0.38
10 "	3.8
60 "	23

記録された變化。上記の装置に依つて記録されたものは後述の理由から人工的磁場によつて擾亂され、自然現象としての地球磁場の變化度を純粹に分離する事は困難で、此の觀測を始めた目的に對して充分の考察をなす事が出来ないのは遺憾であるが、兎も角著るしい變化のみに就いて記述する。

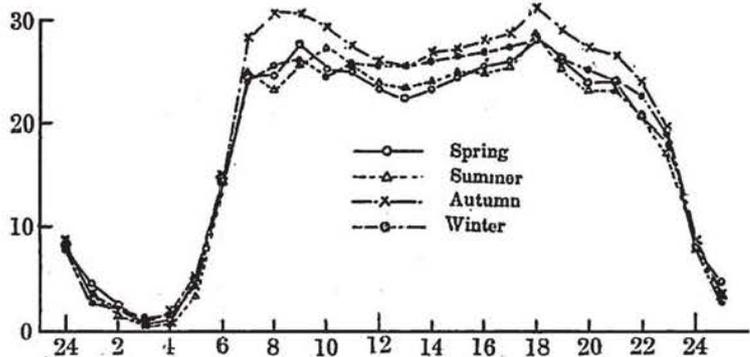
(1) 日變化. 上記期間中に於ける國際地磁氣靜穩日のうち完全な記録 53 日を選んで其の平均を求めた. 其の方法は小野博士の方法⁽²⁾に依つたもので 2 耗間隔の平行線を引いた硝子板を記録紙の上に置き、每一時間に就き曲線と平行線との交點を數へた. 第 2 圖は此の平均日變化曲線である. 此の曲線から 2 時と 4 時との間が最も靜かで、5 時から 7 時の間に急に増大し 19 時頃までは大體同様な値を持続してゐるが 23 時から 1 時までには再び急に減少してゐる. 尚値は大きくないけれ共、

8~9 時頃と 18 時頃とに極大があり 13 時頃極小がある. 第 3 圖は季節別の變化度平均であるが、此の圖からも大體解る様に、春と夏は小さく冬は稍大きく秋は目立つて大きい. 此の現象が一般的のものか或は上記期間特有のものかは今後の調査に待つ事とする. 時間に依る變化には四季に依る別は認められ無い.



四季に依る變化無き事及び 8 時及び 18 時頃の Rush hour 附近に極大を有する事から既に此の日變化が人工的磁場の影響を受けてゐる事が推察される. 寫眞第 1 は磁氣的に靜穩な日の最も一般的現象である.

第 3 圖



(2) 擾亂. 寫眞第 2 a は稍擾亂の日の普通の磁力記象で同 b は之れに相當する變化度の記象である. b から見ると、12 時頃から 17 時頃までは週期比較的短かく振幅の小さい振動 (週期 15~20 秒, 振幅約 1γ) が多いが 18 時頃から 5 分~10 分程度の週期を有し 10γ 程度の振幅を有する緩慢な變化が多い. 之れは a に於ても大體存在してゐるが短週期の方は a の記録から見出す事は困難である. 一般に靜穩な日より擾亂日の方が短週期變化の出現が多いが 3 秒位より以下の週期を有する變化はあまり記録されてゐない. 之れはかゝる週期のものが存在しないのではなく、一つは檢流計の性能に依り、一つは存在しても振幅が小である爲めと考へられる. 然し雷の時及び特殊な氣象状態の時は衝激的な記録が得られる. 此の現象に關しては本要報に櫻井氏がとりまとめて報告してゐる.

(3) 灣狀變化. 寫眞第 3 a は灣狀變化であつて、同 b は之れに對する變化度である. a で鉛直分

力の最も変化の大きい處は、15分間に 25γ 位であるから b では最大變位が原記象紙上約4耗になればよい。此の變位は b で線の間隔が最も廣くなつてゐる部分に相當する。寫眞第4aも小灣狀變化であつて、之れに相當する變化度が同 b である。

(4) 脈動狀變化 寫眞第5から第9までは何れも脈動狀變化を示すもので、第5aには脈動變化がよく判明しない程であるが、同 b には明瞭に出て居り、更に短週期の變化を含んでゐるのが解る。寫眞第7aでは終日緩慢な變化をなしてゐるが、同 b では2時前後に微小脈動狀變化が生じてゐる。之れは1時頃から4時30分頃まで連続した脈動狀變化の一部であつて、週期は約3~4秒、最大振幅 0.02γ 程度である。かゝる現象は晝間にもあると考へられるが、晝間は前記の理由で不明である。寫眞第8aの脈動はかなり明瞭であるが、同 b にも判然としてゐる。寫眞第9aの脈動も明瞭であるが、同 b では其の振幅が減衰して行く様子が見られる。此等の脈動は何れも其の中に更に短週期の脈動を含んでゐるが之れは脈動に就いての一般現象の様である。

(5) 磁氣嵐の急始。寫眞第10から同第15までは磁氣嵐の急始部分のみの寫眞である。磁氣嵐の始まる前に特殊の變化が起るか否かと云ふ事は一つの問題であるので、急始部分の記録を數個例示した。寫眞第10、第12、第13及び第15は何れも晝間に起つてゐるもので人工的擾亂の爲め、此の點は判明し難いが、もし急始部に特殊の變化があつたとしても、極めて小さいものである事が推察される。寫眞第11及び第14は夜間の靜穩な部分に起つてゐるので急始部の變化は明瞭に觀察される。即ち第11bに於ては極めて平滑な曲線であるが、第14bでは急始の最初の處に約30秒間に互り振幅の小さい脈動狀變化が重なつてゐる。之れは普通の磁力記録でも時として顯はれるのであるが、寫眞第14bに依つて2~3秒程度の短週期振動が混合する場合のある事が知られる。其他急始部の何れの記録に於ても急始前或は急始部に特殊の變化は認められない。

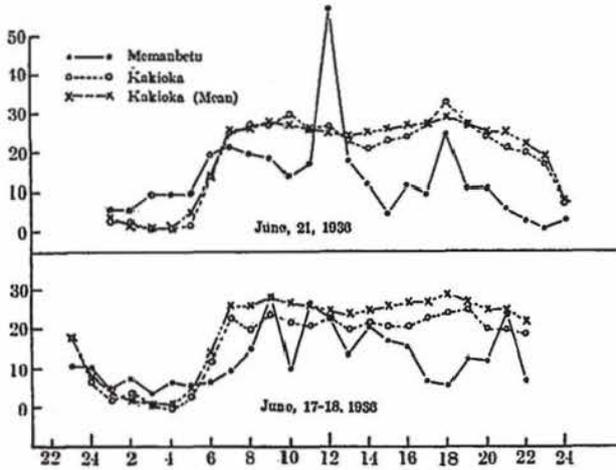
(6) Dellinger 現象。此の現象は晝間部だけに限られてゐるので、純粹な記録は得られなかつたが、其のうちの二三を例示する。寫眞第16は昭和11年11月25日 $13^h32^m \sim 14^h07^m$ に互る無線障蔽に相當する記録であるが、此の變化度では磁力變化の最も急であつた數分間のみが現はれてゐる。即ち 13^h32^m 頃から始まり 13^h38^m 頃には平常に復してゐる。寫眞第17も明瞭な磁力變化を伴つた現象であつて變化度の方にも明かで 13^h09^m 頃に始まり 13^h12^m 頃は終つてゐる。寫眞第18aは普通の磁力記象で之れも判然此の現象に相當する磁力變化が表はれてゐるが同 b の變化度も此れに對應したものを記録してゐる。此等の記象から見ると Dellinger 現象の際も既に報告されてゐる⁽²⁾以外の特殊な磁氣的變化は認められない。たゞ寫眞第18bに於て 8^h45^m 頃から 8^h51^m 頃まで微細な變化が混入してゐる。之れは週期2~3秒、振幅 0.005γ 程度の振動であつて、此の現象の際かゝる複雑な振動が存在する事は考へ得られる事である。

(7) 特殊變化. 寫眞第 19 から第 21 までの記録には極めて短週期の振動が現はれてゐる. かゝる現象は僅かに此の三回のみ観測されたもので寫眞第 19 は昭和 10 年 11 月 15 日 12^h17^m から 12^h55^m まで連続したもので, 其の振幅は 5×10^{-8} amp. に達し, もし週期を 1/20 秒とすれば 0.2 γ の振幅となる. 寫眞第 20 は昭和 12 年 12 日 13^h16^m から 13^h24^m の間に出現したもので振動が急に短時間止まり再び急に始まつてゐるのが見られる. 寫眞第 21 は昭和 12 年 5 月 20 日 12^h30^m から 16^h までの間に起つたもので, 之れは時間は長いが振幅は前二者より小である. 此等の日は何れも曇天で風速も 0.6 米毎秒から 3.7 米毎秒程度に過ぎず降水は無かつた. 唯 11 月 15 日は ∞^2 で 5 月 20 日は ∞^1 であるので空中電氣的現象では無いかと思はれるが, 5 月 12 日には煙霧は観測されず, ベンドルフ自記電位計による大氣の電位傾度にも特別の變化は認められなかつた. 此の現象に似たものが北海道女満別に於ける同様な装置での観測にも時として現はれてゐるが週期は數秒位で, 此の三記録に比し著しく長週期である. 此の現象が自然現象によるか人工的のものか或は又測定装置の器械的なものであるか尙不明である.

寫眞第 22 の矢印 a, b は夫々自轉車が線輪を外方から内方へ及び内方から外方へ横斷した時の現象である. 寫眞第 23 は女満別に於て自動車線輪の一角に接近し少時間線輪に平行に走り, 線輪の他の一角から遠ざかつた場合の記象である. 此等の現象は磁性體が線輪に接近する時單位時間に線輪を切る磁力線の數が次第に増加し線輪を横斷した後再びこれが減少する事から了解出来る. 寫眞第 23 が極大及び極小の中間で小時間零附近の値をとつてゐるのは, 線輪に平行に磁性體が運動してゐる時間で, 此の場合線を横ぎる磁力線の時間に對する割合はほぼ一定であると考へればよい. 自動車の場合は線輪を横斷しないから往復共同一の形となり, 自轉車の時の様に逆の形とはならない. もし火山等で地下から磁性體が噴出する様な場合には寫眞第 23 の様な形となる事が想像される.

(8) 北海道女満別に於ける記象との比較. 昭和 11 年 6 月北海道に於ける日蝕観測に際し, 女満別に於ても柿岡と同様の装置で水平線輪に依る鉛直分力の變化度を自記せしめた. 女満別に於ける線輪の面積は 6×10^4 平方米で, 検流計は理研製のものを使用した. 其の週期は 5 秒で, 感度は 5×10^{-9} amp. であるが感度は 1/3 に減じて記録せしめた. 寫眞第 24 は女満別に於ける記録の一つで同第 25 は之れに相當する日の柿岡に於ける記録である. 此の兩記録を比較すると, 女満別に於けるものの方が柿岡に於けるものより微小變化少なく, 曲線が平滑で且つ急な變化が少ない. 今兩記録に就いて變化度の時間的分布を第 1 圖の方法によつて求めてみると第 4 圖の様になる. 柿岡の方は兩方共平均曲線と殆ど同様であるが, 女満別の方は各日特有の變化をなしてゐる. 柿岡と女満別とでは磁場の變化には大差は無いが圖の様に變化度は大いに異なつてゐる. 殊に 6 月 21 日 12 時附

第 4 圖



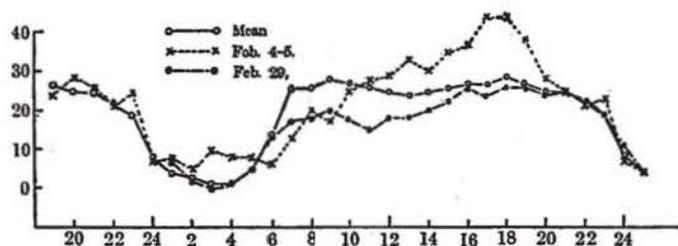
近に於ける女満別の大きい値は緯度による差異が明かに現はれてゐる。柿岡の方が兩日共相似たものである事は柿岡が人工的擾亂の影響を受け、女満別に於ては自然現象を忠實に記録してゐる様に考へる方が至當の様に思はれる。北海道に於ても女満別附近には大規模の鑛山や炭坑がないので、人工的な磁場の影響は考慮しなくてもよいが、大鑛山や大炭坑の附近では運搬用電車の爲めにかなりの距離まで影響を

與へる。故に變化度の測定に際しては附近にある電車線等直流電氣事業を十分に調査し、之れに依つて記録を吟味する必要がある。

人工的擾亂の推察。 前に一二の理由から柿岡にて得た變化度の記録中には人工的擾亂が混入してゐる事を述べたが、此の點に關し充分考察して見たいと思ふ。先づ斯様に考へられる理由を列挙してみる。(1) 自然現象としての地磁氣變化度は季節的變化を有するのであるが第 3 圖に示した様に少しも時間的ずれが無い。(2) 此等の日變化圖に於て 8 時頃及び 18 時頃の Rush hour 附近に極大を有し、電車の全く休止してゐる 2 時から 4 時迄は最も靜穩である。(3) 寫眞第 1 に於て矢印にて示した a の變化は大體年を通じて 1^h45^m 頃であり、b で示した變化も年を通じて 4^h12^m 頃である。此の變化は磁氣擾亂の日は打ち消されて判明しないが靜穩な日には常に出現する。之れも地球磁氣現象としては規則的に過ぎる。(4) 寫眞第 26 に矢で示した變化は大體一時間の間隔を置いて出現してゐる。(5) 更に此の事を確信に導くものとして電車の休止時間 2 時から 3 時の間に時として現はれる著るしい變化がある。此の變化を觀測した日及び變化が最も大であつた時刻を次に掲げる。此の表に示した様に此等の日は Oct. 19 を除いては悉く日曜、祭日又は之れに準ずる日であつて、東武鐵道では此等の日の 0^h 頃雷門發、5^h 少し前日光着の臨時電車を出してゐる。Oct. 19 は月曜であるが團體申込には臨時電車を出す事があるので其れに依るものと思はれる。寫眞第 27 は 7 月 15 日のお盆に出した臨時電車に依るものと考へられるものである。(6) 昭和 11 年 2 月 4 日の關東地方大雪に依り 4 日 21 時頃から翌 5 日の午前まで東京市内及び郊外共電車の運轉は中止され又は運轉車輛が減少した。もし日變化圖が主として電車によるものならば此の日の日變化は當然平常と異なるべきであるが第 5 圖にみる様に平常とは大いに異なつてゐる。尙又昭和 11 年 2 月 29 日は所謂二二

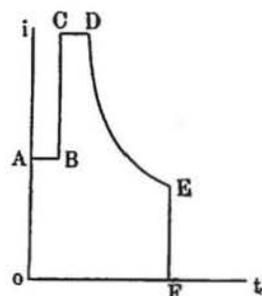
變化を観測した日		最大變化の時刻	曜日其他
1935	Nov. 3	2 ^h 10 ^m	日曜. 祭日.
"	" 10	2 20	日曜.
1936	April 3	2 04	祭日.
"	July 15	2 09	盆
"	" 16	2 15	"
"	Oct 11	2 15	日曜.
"	" 18	2 18	"
"	" 19	2 21	月曜.
"	" 25	2 14	日曜.
"	Nov 1	2 11	"
"	" 8	2 19	"

第 5 圖



と變化度曲線は di/dt に應じて種々の曲線を畫く筈である。其故電車の運轉に要する電力量の計算に用ひられる電流時曲線を知れば變化度は此の曲線に相當するものがなければならぬ。二箇又は二組の電動機を二段に直並列制御を以て制御する場合の簡単な電流時曲線は第6圖であつて、縦軸に電流をとり横軸に時間をとつてある。起動に際して電流は O から A まで急に増加し一定加速度の間は電流は大體一定であるが、此の一定加速度の間に電動機が直列から並列に移る際電流は急に2倍に増加し、 B から C の値となる。次に電動機の特性に依つて加速する場合には電流は DE に沿ふて次第に減少し、惰走が始まれば電流は E から F の値に至り零となる。上の場合 AB の時間は大體 CD の時間に等しい。此の第6圖に相當する di/dt は OA 及び BC に相當する二つの山があり、次に EF に相當する反対方向の山がある筈である。此の形は東武電車の夜間臨時電車の場合に多く記録され、寫眞第28は之れを示してゐる。晝間は電車の運轉が複雑な爲めに、記象

第 6 圖



型も重複して明瞭を缺くがよく注意して調べると、此の形をとつてゐるものが多い。一定加速度起動時間中の山が二つで無く寫眞第27に示したものの様に一つしか現はれないものや、二つの山のうち一つが極めて小さいもの等が多いが此等は運轉が標準の様に行はれぬ爲めであらうと思はれる。斯様に電流時曲線に相當する變化度まで記象してゐる事實から、平常日の變化度の大部分は電車の影響である事が知られる。(8) 次に此等の影響は省線電車と東武電車と何れが大であるかを調べて

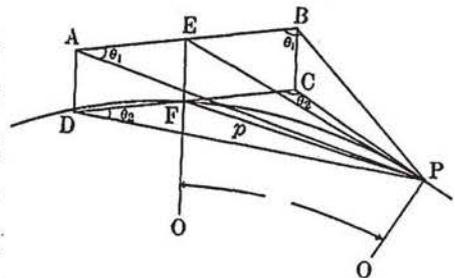
六事件の爲めに東京市附近の電車は5^h30^mから12^hまで殆んど全部運轉を停止された。此の日の日變化も同圖に示してある様に此の影響が現はれてゐる。(7)以上の事で電氣鐵道が變化度に對して影響を及ぼしてゐる事は信じられるが尙一つ興味ある現象があるので述べる事にする。電車の影響は他の條件例へば大地の電氣的状態等が同一であれば、電車の電動機を流るゝ電流の多少に關係し、 dt 時間に di なる電流が流れたりとする

みる。東武電車は大體運轉時間が5時から23時の間であるが、省線は4時から翌日の2時少し前まで運轉してゐる。4^h15^m前後に大宮及上野から初發電車があり、山手線及び總武本線には1^h40^mから1^h47^mの間に終止する終電車があるが此等の時刻は丁度寫眞第1にけるb及びaの矢印の時刻に一致してゐる。此等の變化が省線に依るものとすれば寫眞第27の變化に比し約1/4程度である。又省線の變電所の負荷曲線は8^h~9^h頃及び17^h~18^h頃に極大を有するが11^h~15^hの間は極大値の約1/2の値をとつてゐる。之れに反し東武電車日光線の負荷曲線は正午附近も8^h或は18^h附近の値と大差なく、此等兩負荷曲線を第2圖の變化度日變化曲線と比較すると、東武電車の曲線と殆んど一致してゐる。此等の事から柿岡に於ける人工的磁場の擾亂は東武電車によるもの最も大で、省線に依るものは其の約1/4程度となる。一列車に要する電力は省線も東武日光線も大體同様と思はれるから、柿岡よりの距離が省線の最近で60杆、東武線が50杆である事を考へても、東武線の影響が大である事が推察出来る。東武日光行臨時電車が最も大きい影響を與へる時刻は2^h15^m前後である事は前に記したが、此の時刻には丁度電車は新古河驛と藤岡驛又は靜和驛の間にある事となる。柿岡から此の線までの距離は約50杆で、省線との距離は60杆であるから兩者の影響の比を4とすると距離の7乗乃至8乗に逆比例して影響を與へる事になる。此の事は考へ難い事であつて兩線の變電所と負荷點間の距離、線路の状態にも關係するが、恐らく藤岡附近にある遊水池の濕潤の爲めに東武線の此の附近の漏洩電流を大ならしめてゐるのではないかと思はれる。

人工的磁場の計算。 上述の事から上記の装置に依る柿岡に於ける靜穩日の磁氣變化度は大部分電車に影響されてゐる事が判明したが、如何にして影響するかと云ふ事に就いては二つの原因が考へられる。其の一は變電所から饋電線を経電動機を通り軌條を歸線とする電流回路に依る直接の磁場で其の二は軌條から大地への漏洩電流の爲めに生ずる磁場である。次に此等の磁場の値の概略値を求めてみる。

(a) 矩形電流回路に依る磁場。電車に依る直接の磁場を考へるに當つて、最も簡單な形は、變電所より負荷點までの距離を長邊にとり、饋電線の地上よりの高さを短邊とする矩形電流回路である。簡單の爲めに磁力を求むる點Pは矩形の長邊の中點E及Fを通り矩形の面に直角な平面と地表との交線上に在りとし、矩形の面は鉛直であるとする。第7圖に於てはABCDは矩形電流回路でPは考ふる點、E及FはAB及CDの中點で $\angle PAE = \angle PBE = \theta_1$ 、 $\angle PCF = \angle PDF = \theta_2$ 。とし $AE = EB = h$ 、 $AD = BC = l$ とする。P點に於ける此の矩形電流による鉛直分力即ちOP方向の磁力を求めるにはAD及BCの影響はAB

第7圖



第7圖に於てはABCDは矩形電流回路でPは考ふる點、E及FはAB及CDの中點で $\angle PAE = \angle PBE = \theta_1$ 、 $\angle PCF = \angle PDF = \theta_2$ 。とし $AE = EB = h$ 、 $AD = BC = l$ とする。P點に於ける此の矩形電流による鉛直分力即ちOP方向の磁力を求めるにはAD及BCの影響はAB

及 CD に比し省略されるから茲では AB 及 CD に依るもののみを考へればよい。回路を流るゝ電流を i とすれば AB によつて P 點に於て EP に直角方向に働く磁力 H_{AB} は

$$H_{AB} = - \int_{\theta_1}^{\pi - \theta_1} \frac{i \sin \theta}{r_1} d\theta = \frac{2i}{r_1} \cos \theta_1$$

茲に θ は AB 上の任意の一點と P とを結ぶ直線が AB となす角であつて r_1 は EP の長さである。同様に CD に依つて FP に直角に作用する磁力 H_{CD} は

$$H_{CD} = - \frac{2i}{r_2} \cos \theta_2$$

OP が H_{AB} の方向となす角を u , H_{CD} となす角を v とすれば P に於ける鉛直分力 F_v は

$$F_v = 2i \left(\frac{\cos \theta_1 \cos u}{r_1} - \frac{\cos \theta_2 \cos v}{r_2} \right)$$

今最も大きい磁力の影響を與へる古河、靜和間に就いて考へてみると、變電所は古河と栃木に在り、古河 藤岡間は古河より、藤岡 栃木間は栃木より送電するので、變電所から最も遠い負荷點までは大體 10 軒としてよい。柿岡は此等の區間の中點を過ぎ、軌條に直角な直線上に在りと考へても大差ないから、大體上の場合を適合してよい。柿岡から軌條までの距離約 50 軒であるから、上式に於て $h = 5 \text{ km}$, $l = 6 \text{ m}$, $FP = 50 \text{ km}$ とすれば、 $\theta_1 = \theta_2 = 87^\circ 17'$ $u = 13'.3$ $v = 13'.7$ で $r_1 \doteq r_2$ としてよい故

$$F_v = 2 \times 10^{-12} \text{ gauss} = 2 \times 10^{-7} \gamma$$

但し $i = 1000 \text{ amp.}$ とした。

水平線輪に依る誘導電流は前記した様に $i = 0.5 \Delta Z / \Delta t$ であるが、 $\Delta t = 1/100$ 秒程度の短時間では使用した檢流計は彈動的であると考へる方が適當である。檢流計を臨界抵抗で使用し *Ballistic slow* に相當する光點の變位を n_0 耗とすると檢流計を流れた電氣量 Q は

$$Q = \frac{T_0 S_i e}{2\pi} n_0.$$

である。茲に T_0 は檢流計の固有週期、 S_i は其の電流感度で、 e は自然對數の底である。

今の場合 $\Delta Z = 2Q = 2 \times 10^{-12} \text{ gauss}$ であるからこれに相當する n_0 を求めると $n_0 = 2 \times 10^{-5}$ 耗となり此の變位は記録上判別することは出来ない。即ち上に考へた様な短形電流の影響は考慮しなくともよい事になる。

以上は饋電線を流るゝ電流が全部軌條を経て負極に歸るものとしたが、實際では電動機を経た電流の約 30% は軌條から大地へ漏洩し大地を歸線として負極に歸るのである。

最も簡単に饋電線を流るゝ電流を i_a とし軌條を流るゝ電流を i_b とし饋電線のみ $i_a - i_b$ の電流がある場合の P 點に於ける鉛直分力を求むると $(i_a - i_b) = 30^7 \text{ amp}$ としたとき

$$F_r = 1 \times 10^{-5} \text{ gauss} = 1 \gamma$$

となる。此の場合にも彈動的に取扱ふと、 $n_0 = 1 \times 10^9$ 耗となり記録上かなり大きい變位が得られなければならない。然るに記録された最大變位は大體 10 耗程度であるから此の變位に相當する磁場を生ずる爲めには $i_a - i_b = 30 \text{ amp}$ となり、漏洩電流の大部分は軌條に近い距離を流れて負極に歸り、10% 程度が遠方に廣がる事となる。

漏洩の状態は地表の濕潤及び地下層の様子其の比抵抗等の値に關するから漏洩電流が軌條附近に集中してゐるものと看做し得ない條件のもとでは、此の場合 C を定數とすれば $C(i_a - i_b)$ なる直線電流に依る直接の磁場が有り得る事となる。

(b) 漏洩電流に依る磁場。負極母線は一般にたゞ軌條に接続するのみであるから、歸線に於ける漏洩電流は負荷點附近では大地へ、電源附近では大地から歸線へ歸るから、歸線の中點に大地と同電位の點が存在する。其故漏洩電流は大略第 8 圖の形となる。(AB の上方にも同様の電流がある) 圖中 OOD 曲線は電位の變化を表はしてゐる。軌條から充分遠方の點では流線は A 點から出發し B 點に集合するものと考へて大差は無い。而して此の場合には軌條を x 軸とし其の中點 O を通る垂直線を y 軸とすれば此等

の流線は第 9 圖に示す様に

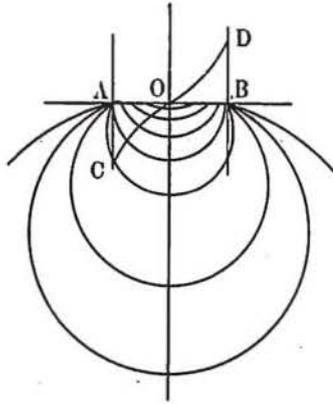
$$x^2 + y^2 + 2\mu y - k^2 = 0$$

なる圓の一群と看做してよい。茲に μ は媒介變數である。かゝる圓電流の一群が一平面上に在る場合 y 軸上の一點 P に於ける鉛直磁力を求めてみる。一般には流線は第 8 圖に於て AB を

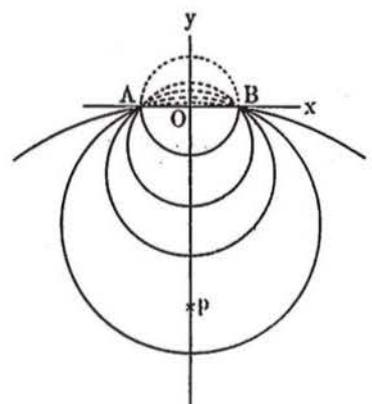
軸として π 丈回轉した時の形をとるべきであるが、此處には流線が平面と見做し得る薄い層にのみある場合を考へる。

一般に圓の中心 O を過ぎる直線上の一點 P に於ける磁氣ポテンシャルは此の直線が圓の中心を過ぎて、圓の面に直角な直線となす角を θ とすれば次式で與へられる。⁽⁴⁾

第 8 圖



第 9 圖



$$\phi = -2\pi i \left\{ 1 + \frac{r}{a} P_1(\theta) + \dots + (-)^n \frac{1 \cdot 3 \cdot \dots \cdot (2n-1)}{2 \cdot 4 \cdot \dots \cdot 2n} \cdot \frac{r^{2n+1}}{a^{2n+1}} P_{2n+1}(\theta) + \dots \right\} \quad (r < a)$$

$$\phi = 2\pi i \left\{ \frac{1}{2} \frac{a^2}{r^2} P_1(\theta) + \dots + (-)^n \frac{1 \cdot 3 \cdot \dots \cdot (2n+1)}{2 \cdot 4 \cdot \dots \cdot (2n+2)} \cdot \frac{a^{2n+2}}{r^{2n+2}} P_{2n+1}(\theta) + \dots \right\} \quad (r > a)$$

茲に a は圓の半徑 r は圓の中心から P までの距離で i は電流密度である。 P 點に於て OP に直角方向の磁力を $F_{r,\theta}$ とすると

$$F_{r,\theta} = -\frac{1}{r} \frac{d\phi}{d\theta}$$

であるから、圓の面に對する鉛直分力は $F_{r,\theta}$ の式に $\theta = \pi/2$ と置けばよい。然る後式を計算が容易な形に整理すると次の式となる。

$$F_r = \frac{2\pi i a}{a^2 - r^2} \left\{ 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^2 \left(\frac{r}{a}\right)^2 - \frac{1}{3} \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}\right)^2 \left(\frac{r}{a}\right)^4 - \dots - \frac{1}{2n-1} \left(\frac{1 \cdot 3 \cdot \dots \cdot 2n-1}{2 \cdot 4 \cdot \dots \cdot 2n}\right)^2 \frac{r^{2n}}{a^{2n}} - \dots \right\} \quad r < a$$

$$F'_r = \frac{\pi a^2 i}{r(r^2 - a^2)} \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2}\right)^2 \frac{a^2}{r^2} + \frac{1}{3} \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}\right)^2 \frac{a^4}{r^4} + \dots + \frac{1}{n+1} \left(\frac{1 \cdot 3 \cdot \dots \cdot 2n-1}{2 \cdot 4 \cdot \dots \cdot 2n}\right)^2 \frac{a^{2n}}{r^{2n}} + \dots \right\} \quad r > a$$

F_r は P 點を流線の内部に有する電流に依る鉛直分力で、 F'_r は P 點を囲まない電流に依る鉛直分力であつて、其等の方向は互に反對である。今 P 點と流線との距離と云ふ意味を y 軸上で AB に對し P 點側にある流線に對するものとし、 P から AB 側に測つた距離を $-d$ 、反對側に測つた距離を $+d$ とし、此等の d の値に對して F_r 及び F'_r が如何に變化するかを求めて見る。此の場合 i を如何に定めるかゞ問題となる。

服部技師⁽⁶⁾に依れば i は軌道からの距離に逆比例すると考へられる。然し氏の測定點は比較的軌條に近いので數十軒の點まで、此の考へを適用してよいか否かは問題である。此の點に關し幸に寫眞第 27 に記録された變化度に相當して、地電流の變化も記録されてゐるから、之れを基礎として i を求める事とする。寫眞第 29 は此の地電流變化の記録であつて、寫眞第 27 の矢印の變化に相當するものが寫眞第 29 にも矢印で示してある。此の記録は地電流用兩極板の距離 1 軒の南北成分のもので矢印の變化は 1×10^{-3} volt/km. である。故に大地の抵抗を大體 1×10^4 ohm とすれば電流密度の南北成分は $1 \times 10^{-3} \times 10^{-5} \times 10^{-4} = 1 \times 10^{-12}$ amp. となる。然るに軌條の負荷點及電源附近即ち第 9 圖の A 點及 B 點附近では y 成分をもつて全電流密度を表はし y 軸上の點に於ては x 成分をもつて之れを表はす事が出来るから此の場合の柿岡に於ける電流密度は $i = 1 \times 10^{-11}$ amp. としよ。服部氏の測定⁽⁶⁾に依ると盆地側では軌條から 100 米で $i = 5 \times 10^{-9}$ amp. 600 m で $i = 5 \times 10^{-10}$ amp. となつてゐるが山側では此等の値の數倍となつてゐる。今此等の値をとつて東武線附近に適用する事は不適當かも知れないが大體の見當を付けるには役立つ事と思ふ。 i が距離に逆比例するとすれば軌條から p_0 の距離で i_0 であり、 p の距離で i であれば $i_0 p_0 = ip$ であるから $i =$

5×10^{-9} amp. $p=100$ m とし $p_0=5 \times 10^4$ m とすれば $i_0=1 \times 10^{-11}$ amp. となり, $i=5 \times 10^{-10}$ amp. $p=600$ m とすると $i_0=6 \times 10^{-13}$ amp となる. 此等の値を地電流から求めた $i=1 \times 10^{-12}$ amp. と比較すれば約 10 倍から 6 倍位の値となるが距離の自乗に逆比例するとすれば, 約 1/15 から 1/50 位の値となるから, 服部技師の結果は今の場合にも大體適合することとなる. それで今は距離に逆比例するとして取扱ふ事にする. 然るときは上式に於て i のかほりに $i_0 p_0/p$ をとり (p_0+d) 或は (p_0-d) に對する $F/\pi i_0 p_0$ を求めると次表を得る.

(p_0+d) km.	$F_V \times 10^{10}/\pi i_0 p_0$	(p_0-d) km.	$F_V' \times 10^{10}/\pi i_0 p_0$	d km.	$(F_V - F_V') \times 10^{10}/\pi i_0 p_0$
50.5	0.24594	49.5	0.02329	0.5	0.22265
51.5	0.12120	48.5	0.00732	1.5	0.11388
52.5	0.07444	47.5	0.00417	2.5	0.07027
53.5	0.05533	46.5	0.00283	3.5	0.05250
54.5	0.04390	45.5	0.00208	4.5	0.04182
55.5	0.03696	44.5	0.00161	5.5	0.03534
56.5	0.03206	43.5	0.00130	6.5	0.03076
57.5	0.02808	42.5	0.00108	7.5	0.02700
58.5	0.02523	41.5	0.00084	8.5	0.02439
59.5	0.02290	40.5	0.00077	9.5	0.02213
62.5	0.01802	37.5	0.00051	12.5	0.01751
67.5	0.01398	32.5	0.00029	17.5	0.01309
72.5	0.01067	27.5	0.00018	22.5	0.01049
77.5	0.00884	22.5	0.00011	27.5	0.00872
82.5	0.00758	17.5	0.00007	32.5	0.00751
87.5	0.00660	12.5	0.00005	37.5	0.00655
92.5	0.00586	7.5	0.00004	42.5	0.00582
97.5	0.00525	2.5	0.00001	47.5	0.00524

上表の値を圖示すると第 10 圖となる. 圖に於て縦軸には F をとり横軸には d をとつてある. 圖中上の曲線は上表中第二列の値を表はし下の曲線は第四列の値を表はす. 第六列の値は殆ど上方の曲線と重なるので記入するのを省略した.

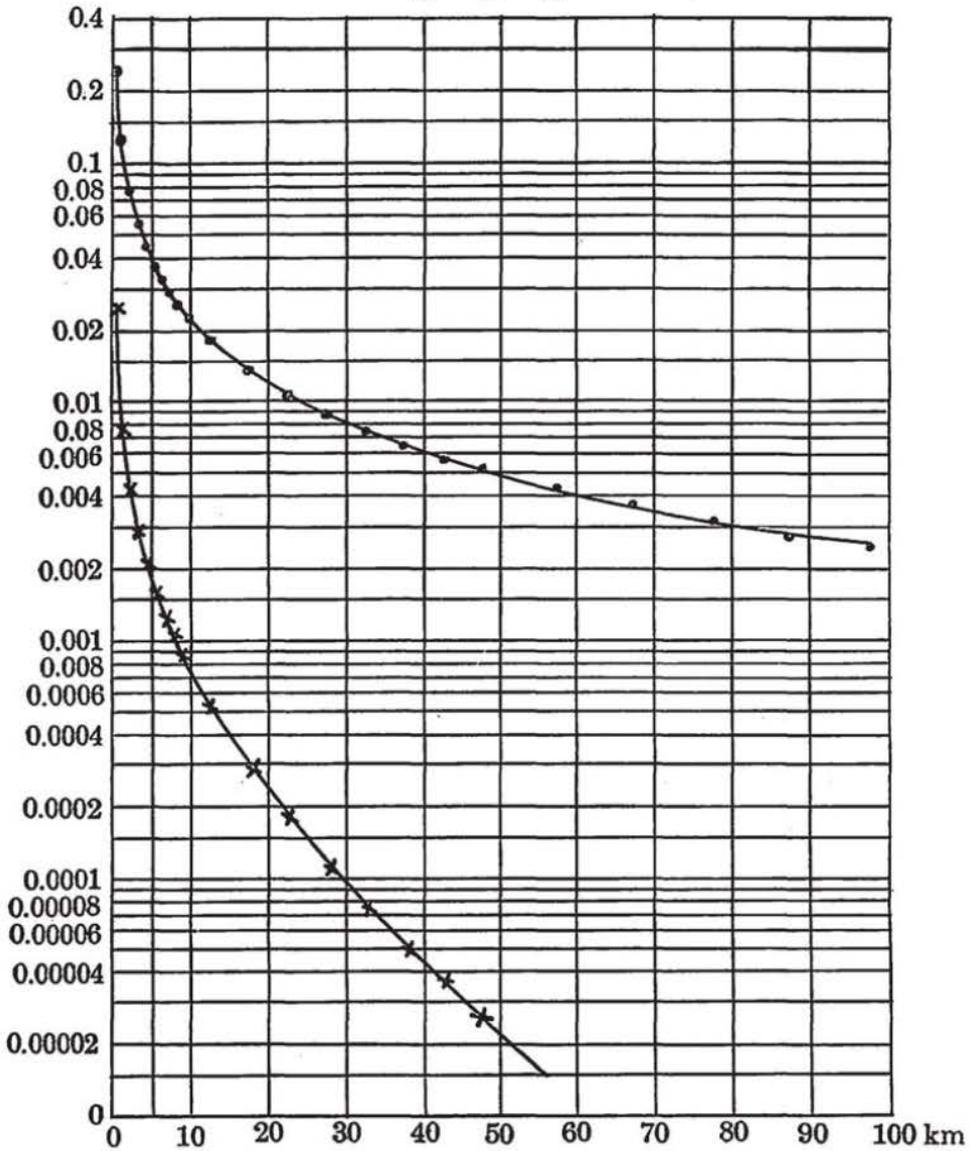
P 點から 10 杆までは各 1 杆に對し上表の値を平均値とし, 10 杆から 50 杆までは各 5 杆に就き上表の値を平均値として取ると P 點から ± 50 杆の距離までに就いては

$$\begin{aligned} \Delta F &= F_V - F_V' = \pi i_0 p_0 \times 10^{-10} \\ &= 1.5 \times 10^{-11} \text{ gauss} \\ &= 1.5 \times 10^{-6} \gamma. \end{aligned}$$

となる. P 點に極めて接近した點では如何になるかと云ふと 1 米のところで $\Delta F = 5 \times 10^{-16}$ gauss であるが, 傾度が極めて急であるから考慮しなくてもよい.

故に漏洩電流を $x^2 + y^2 + 2\mu y - k^2 = 0$ なる圓電流群とし, 電流密度を軌條からの距離に逆比例するとした時, 軌條から充分遠方 ($p_0 > k$) にある點 P に於ける鉛直磁場は其の大部分が P 點を内部に有する流線に起因し, 軌條から P 點までの距離を 50 杆とし P 點に於ける電流密度を $i_0 = 1 \times 10^{-12}$ amp. とすると P 點に生ずる鉛直磁場は約 1.5×10^{-11} gauss となる.

第 10 圖



記録から得た最大變位を 10 耗とし、檢流計が彈動的とすれば、此の變位を生ずる爲めには

$$\Delta Z = 2Q = \frac{2T_0 S_t e}{2\pi} n_0$$

に於て $n_0 = 10$ と置く事によつて、 $\Delta Z = 9 \times 10^{-7}$ gauss となる。此れから電流層の厚さの概略値として $9 \times 10^{-7} / 1.5 \times 10^{-11} = 600$ 米を得る。此の結果から見ると軌條から充分遠方では漏洩電流は比較的淺い表層に限定されてゐる事が知られる。

概要 1×10^6 平方メートルの水平線輪に感度 1×10^{-8} amp. 週期 3 秒の検流計をつなぎ、鉛直磁力の變化による誘導電流を記録せしめた。此の鉛直分力の變化度 dF/dt の日變化は柿岡より約 50 軒西方にある東武電車の負荷曲線に一致してゐる。湧状變化、脈動狀變化、磁氣嵐の急始部及び Dellinger 現象に伴ふ磁力變化に相當する變化度に就き調査したが、晝間は全く人工的擾亂の爲めに純粹な自然現象の記録を得られなかつたから、此等に就いて充分の考察を爲す事は出来なかつたが、此等の現象に際して特殊な變化は認められなかつた。唯一般に擾亂の日は靜穩な日よりも 2~3 秒程度の週期を有し、振幅 0.02~0.05 γ 程度の微細な振動が多く、脈動狀變化も其の中に此の種の振動を含んでゐる。

電車の饋電線と軌條より成る矩形電流に依る直接の磁場の變化度は $i=1000$ amp. 位でも軌條から 50 軒の距離では上記の装置には影響を與へない。漏洩電流を考慮した直線電流の影響は條件次第で、相當の影響を與へ得る。漏洩電流のみに依る影響はこれを圓電流群として考へた場合軌條の中點を過ぎ之れに直角な線上に於て軌條から充分遠方の點では、鉛直磁場は此の點を圓内に有する圓電流に依つて大部分が生起される。地電流から求めた漏洩電流の電流密度に依つて計算した結果此の圓電流の電流層の厚さは約 600 米となる。

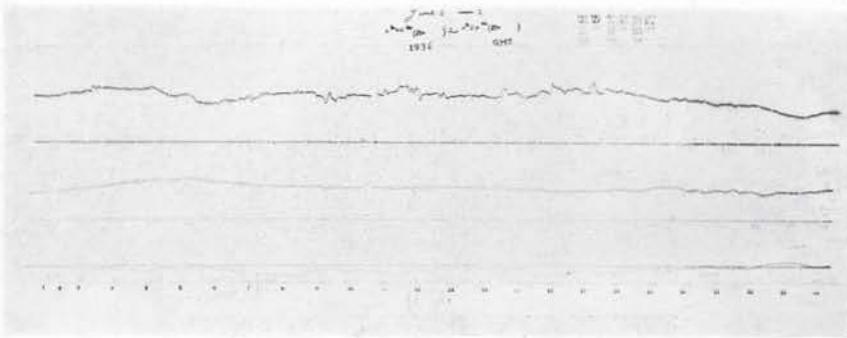
終りに變化度觀測を御許可下さつた岡田臺長に感謝の意を表する。尙鐵道省の林技師は電氣鐵道に關し種々の知識を供され、同省官房研究所の服部技師からは漏洩電流實測結果に關する文獻の御贈與を得、東京鐵道局の田崎技師は省線電車に就き、東武鐵道の笠井氏は同電車の運轉狀態に關し詳細な御説明を與へられ大いに便宜を得た。茲に上記の諸氏に對し御禮を申し上げる。

- (1) 池邊常刀：地磁氣變動記錄裝置；應用物理，第 6 卷 第 7 號. p. 1-2.
- (2) S. Ono : On the Magnetic Characterization of Days and the Variability of Natural Phenomena; Annual Report of the Cent. Met. Obs. of Japan Magnetic Observation for the year 1916.
- (3) 今道周一：無線短波障礙と地球磁場の變化；柿岡地磁氣觀測所要報 第 1 卷，第 1 號. p. 13-19.
- (4) C. Maxwell: Electricity and Magnetism, Vol. II. 3. ed. p. 334.
- (5) 服部定一：軌條漏洩電流に關する實地試驗 (II); 鐵道大臣官房研究所業務研究資料. 第二十七卷，第二十七號. p. 8.
- (6) 同上.

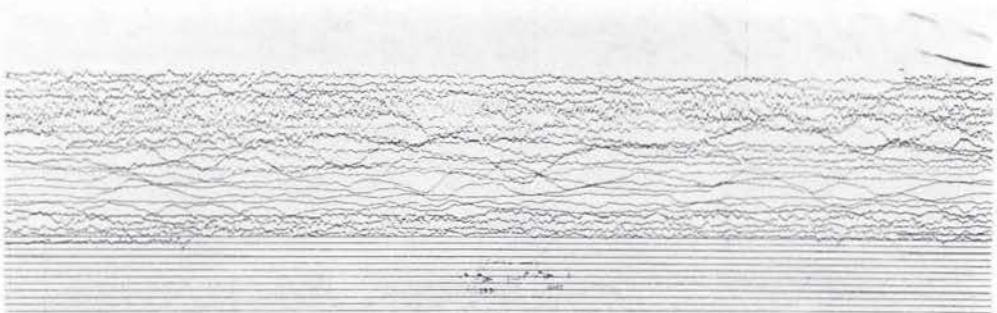
(於柿岡地磁氣觀測所 昭和 13 年 9 月)



1

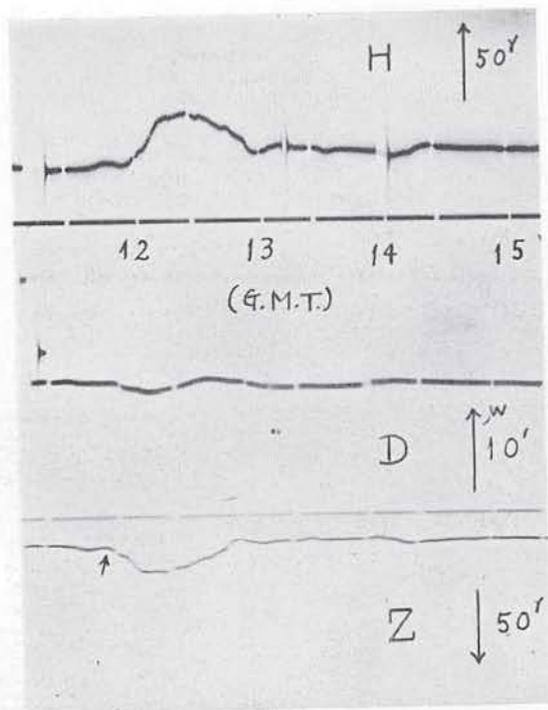


2 a

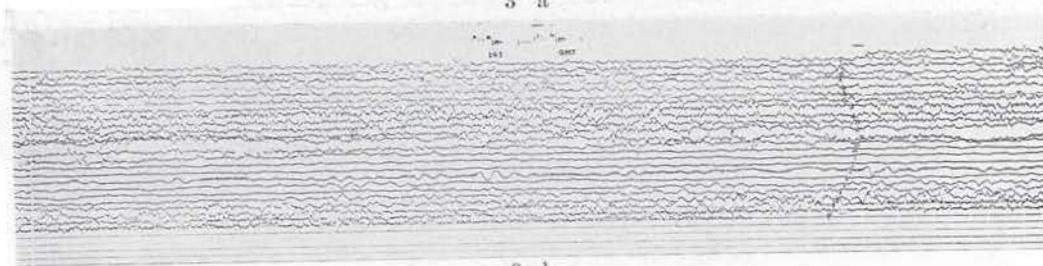


2 b

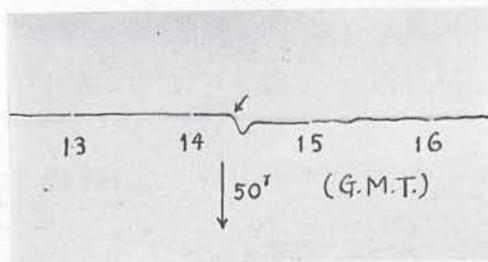
Plate II.



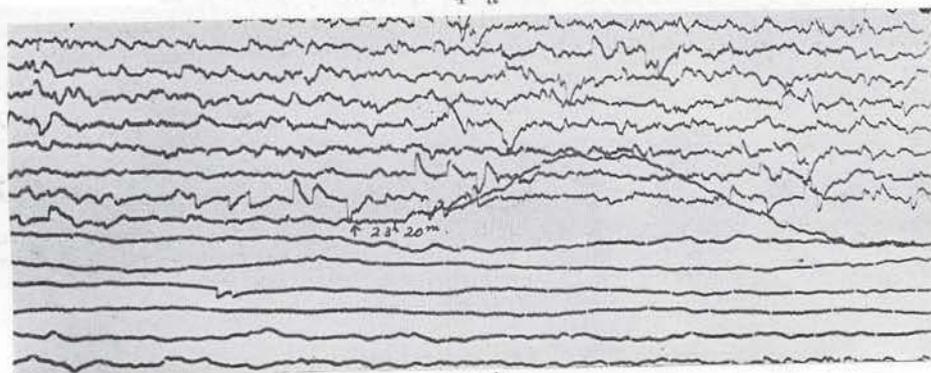
3 a



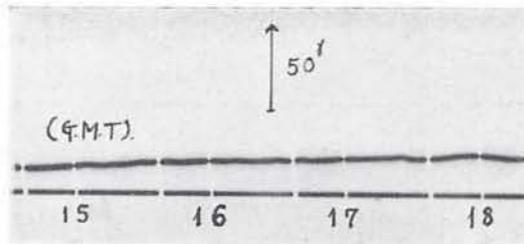
3 b



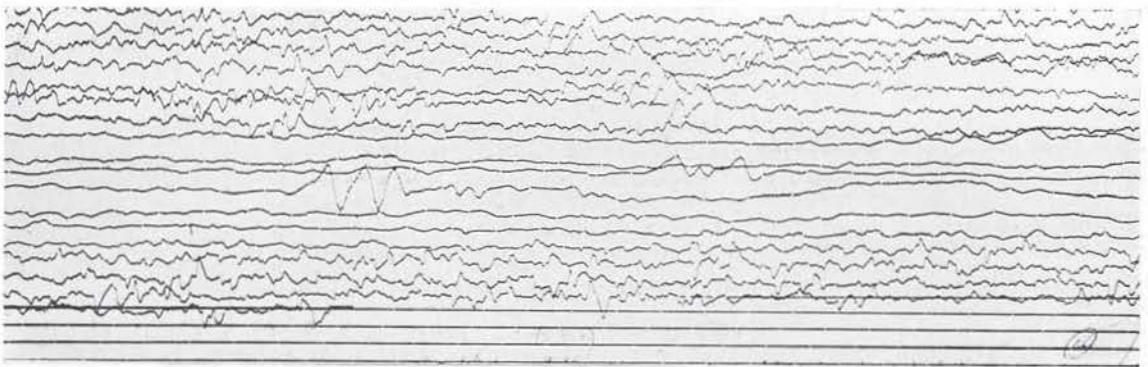
4 a



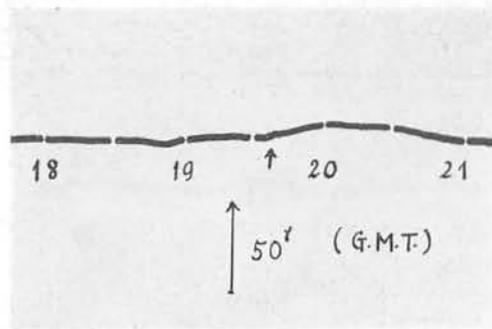
4 b



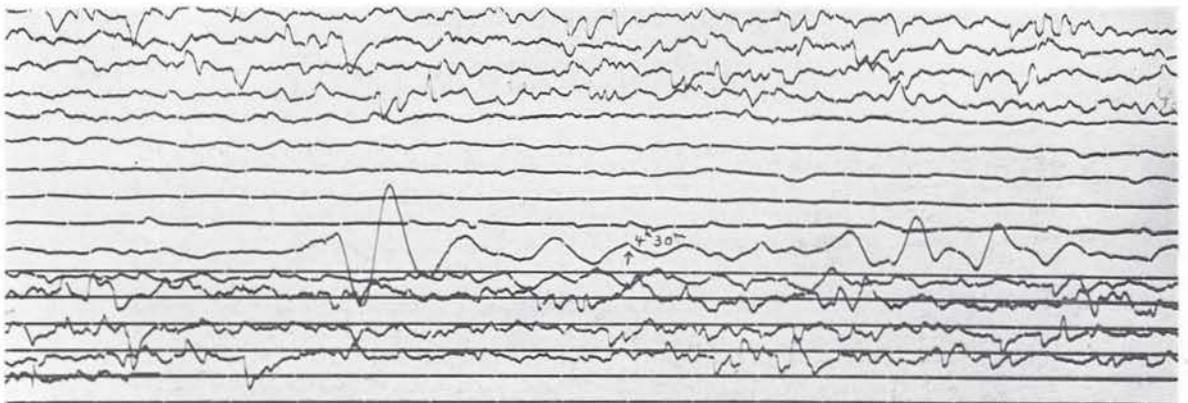
5 a



5 b

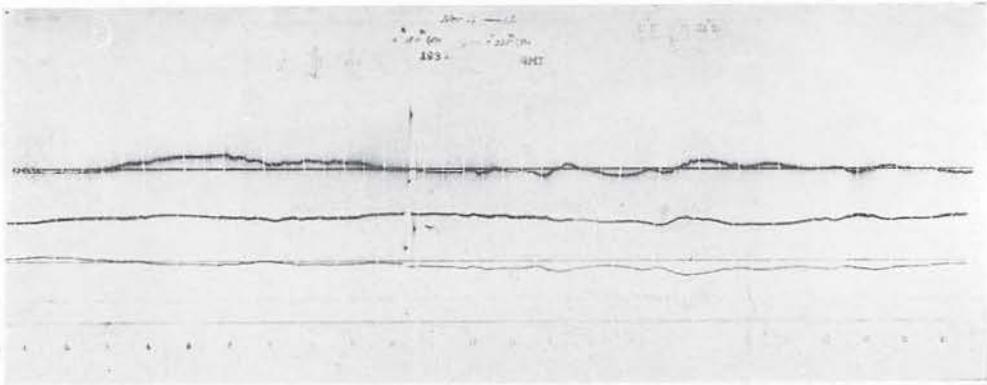


6 a

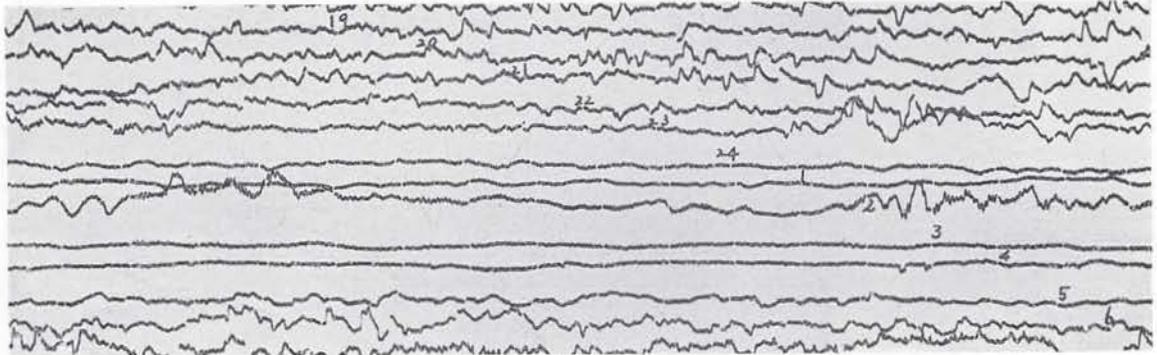


6 b

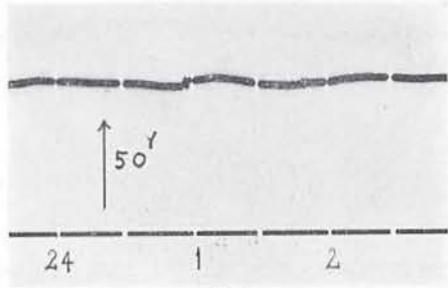
Plate IV.



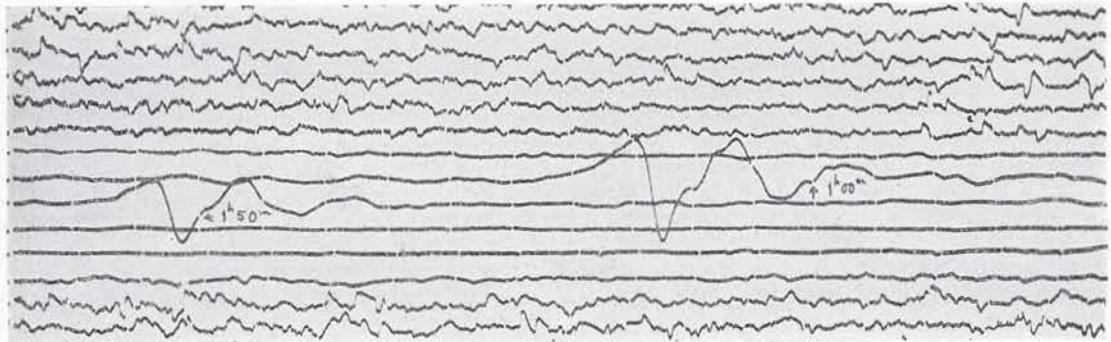
7 a



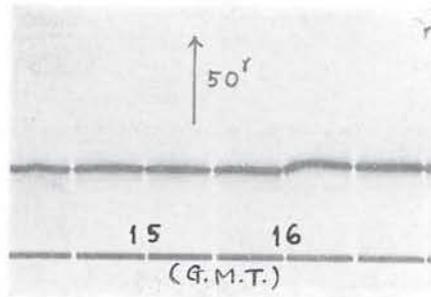
7 b



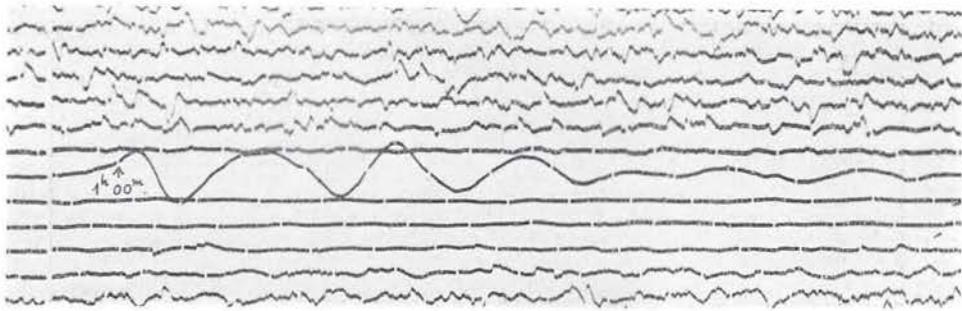
8 a



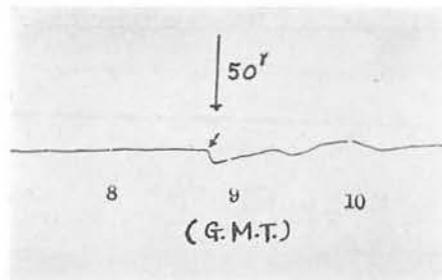
8 b



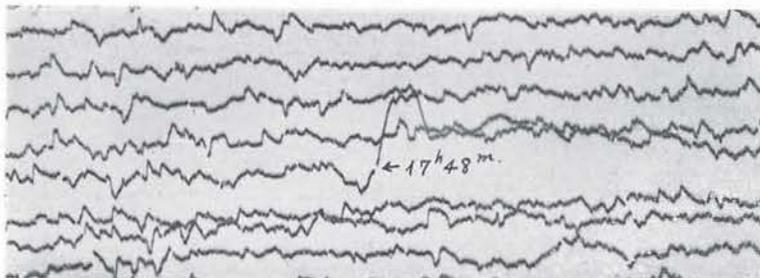
9 a



9 b

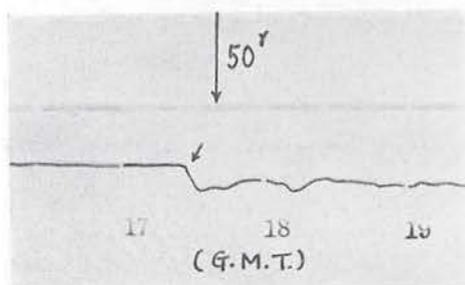


10 a

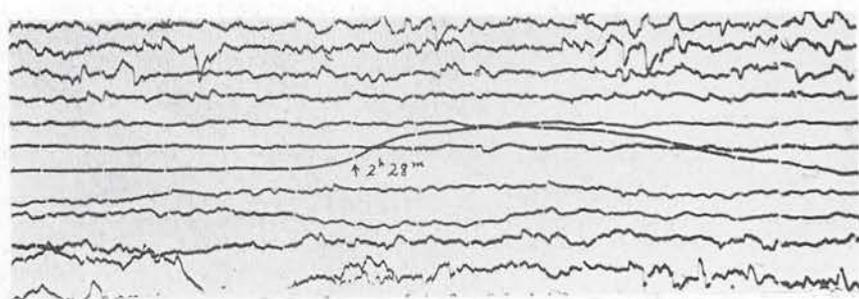


10. b

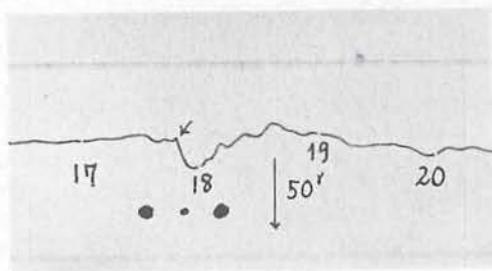
Plate VI.



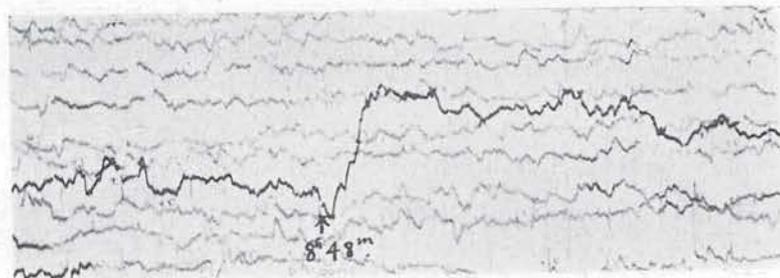
11 a



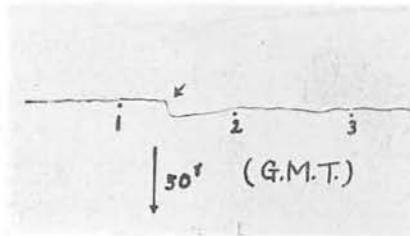
11 b



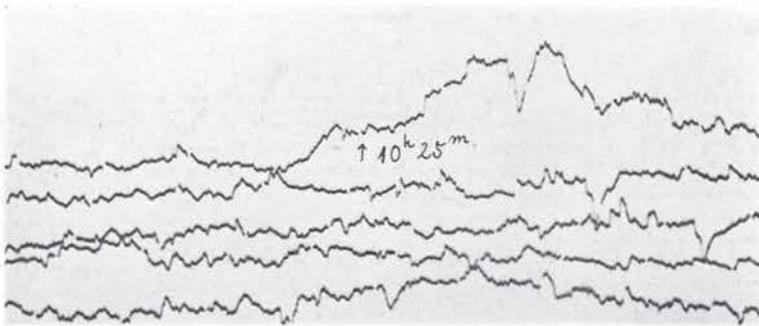
12 a



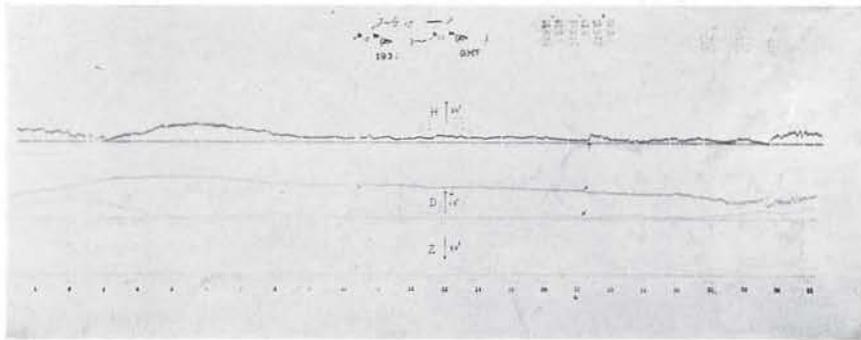
12 b



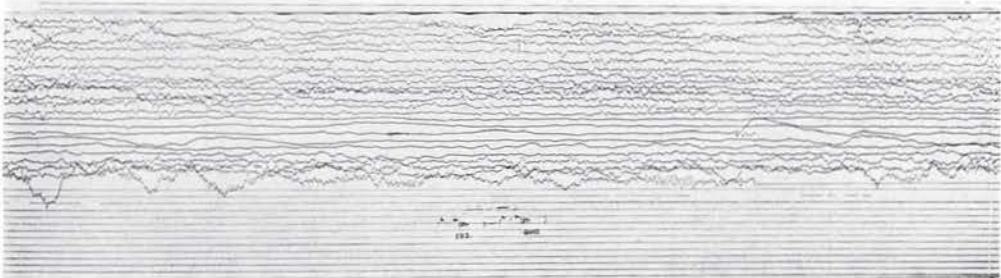
13 a



13 b

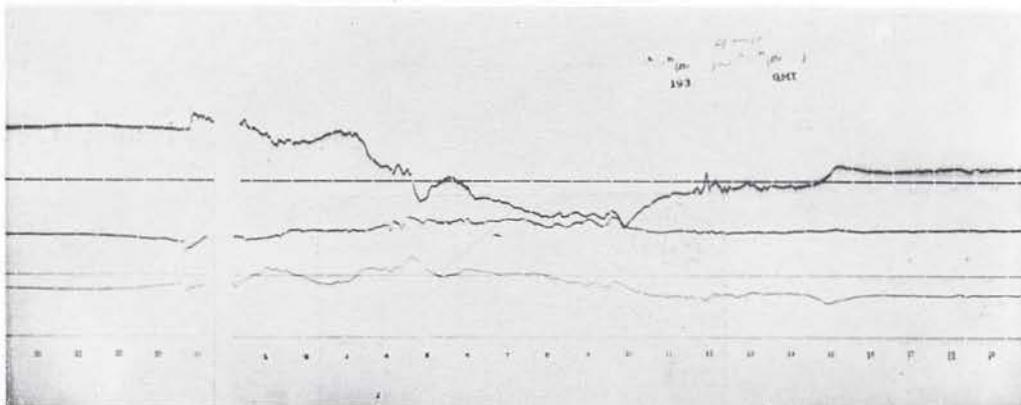


14 a

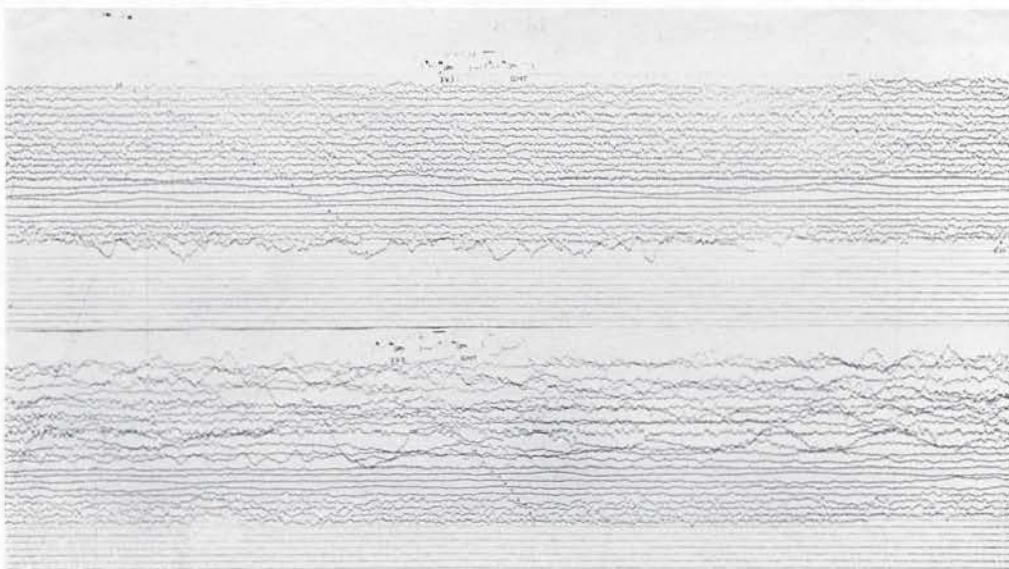


14 b

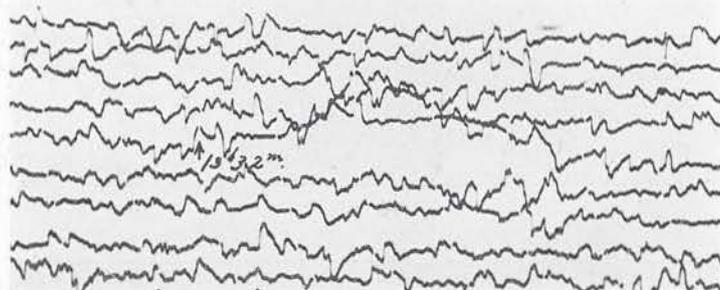
Plate VIII.



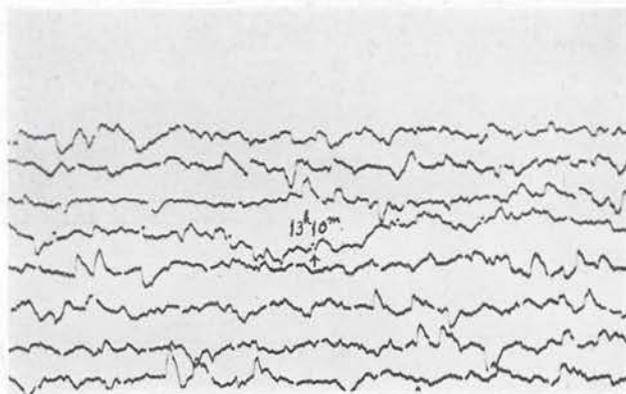
15 a



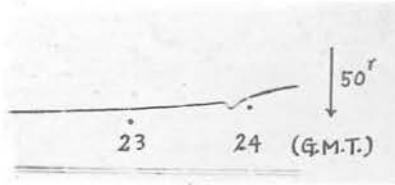
15 b



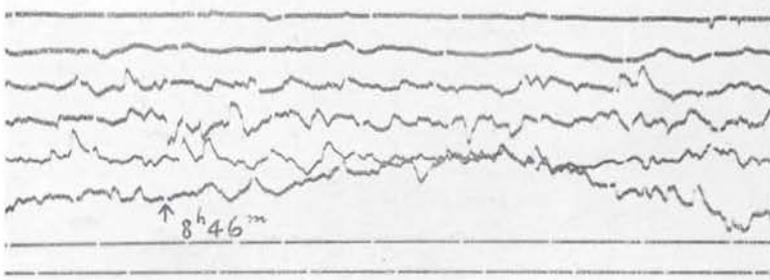
16



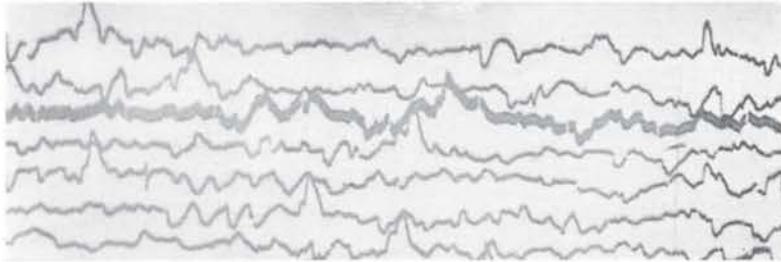
17



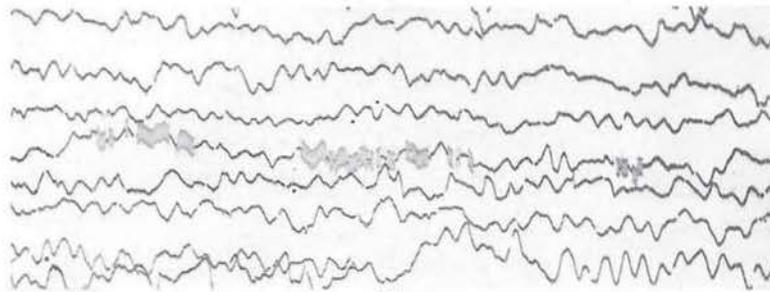
18 a



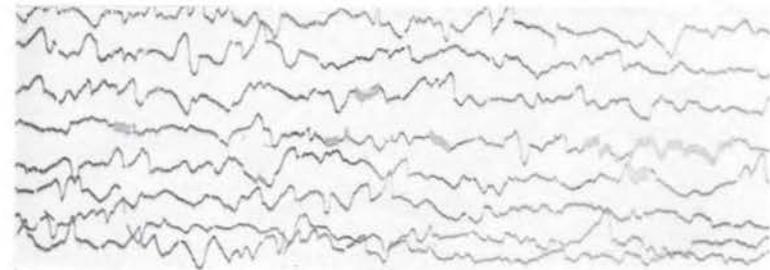
18 b



19

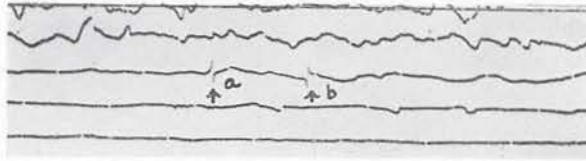


20

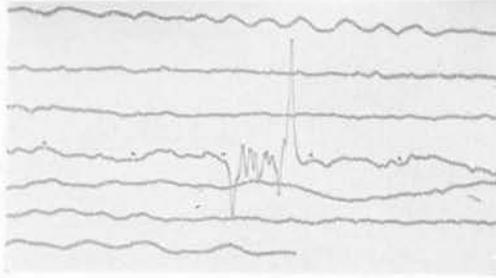


21

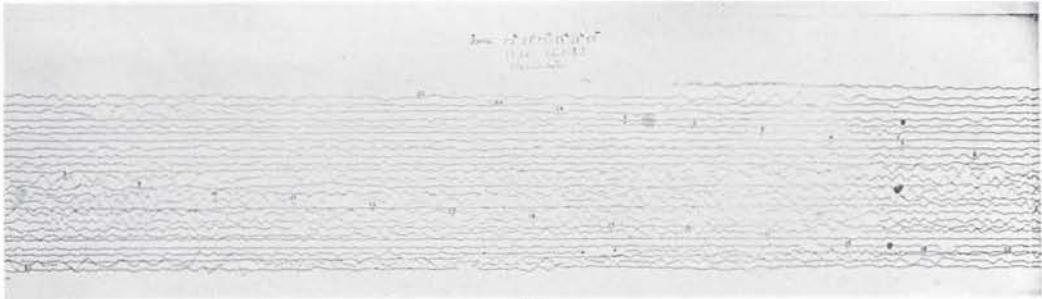
Plate X.



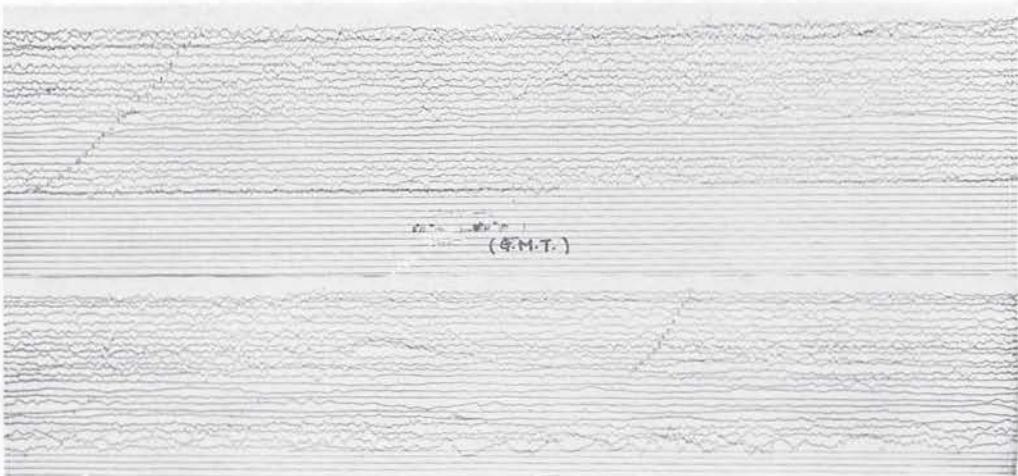
22



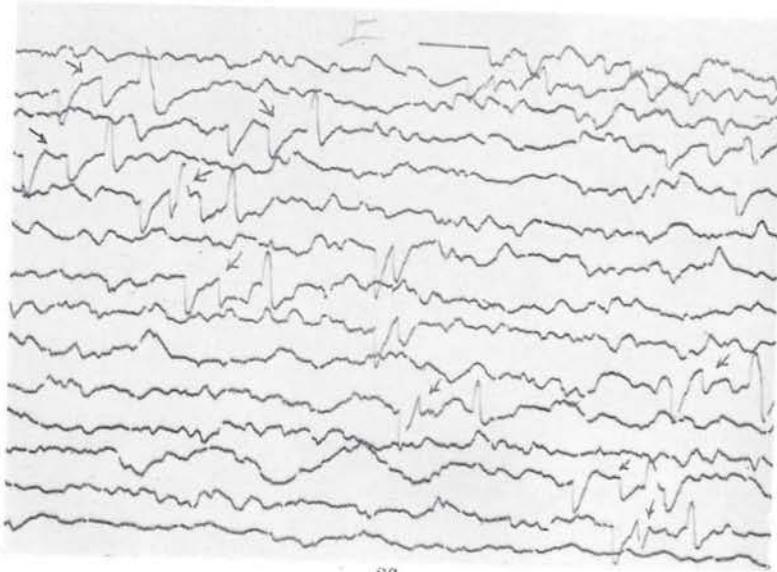
23



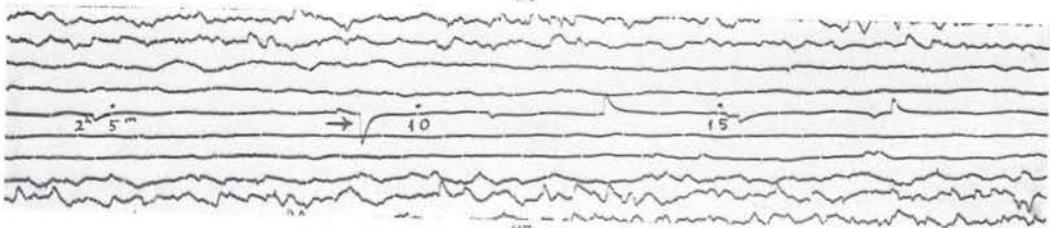
24



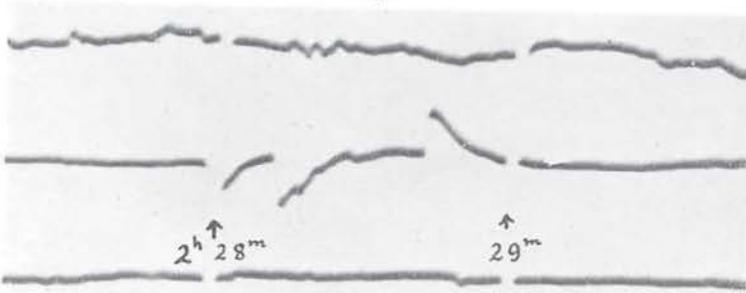
25



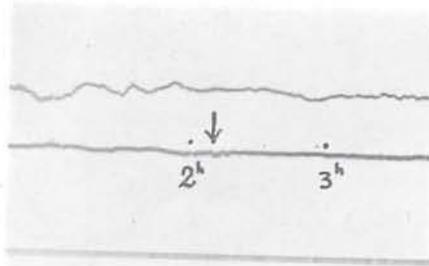
26



27



28



29