

大地の分極と地電流

柳 原 一 夫

Induced Polarization and Earth-current

By

KAZUO. YANAGIHARA

Abstract

At the first and final times of introducing the direct current into the earth through two electrodes, a transient decaying potential difference is found sometimes between another pair of electrodes (Fig. 1). This induced polarization was noticed by H. Noto at 1930, and has been applied to electrical prospecting for ground water. (M. Iwasa, 1942).

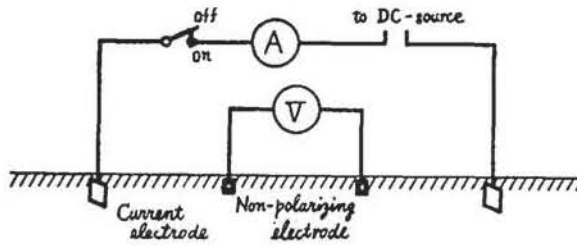
Dielectric absorption of the layered earth for interpreting the phenomena became meaningless because the relaxation time by the theory was the order of $\epsilon/4\pi\sigma$, that was less than 10^{-3} sec (T. Kiyono, 1949). An alternative is proposed in this paper. That is the concentration cell at the effective membrane formed by the capillary of clay particles.

Distribution of these concentration cells in the ground determines the magnitude of the induced polarization voltage of which observed value reaches sometimes to some tenths of the voltage measured between the electrodes at the stationary state. (Figs 5-8). These large observed values were not discussed in the paper by Vacquier et al (1957) who proposed the concentration cell earlier. But their cells are formed at the capillary between sand particles to which clay adheres, and clay plays the role in the source of ions.

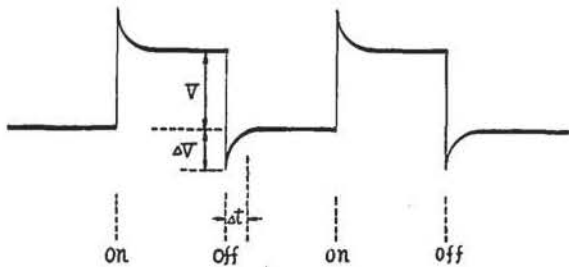
The relaxation time of growth or decay of concentration cells at the capillary between clay particles in our theory is accounted as several seconds to some minutes: that is observed decay times.

§ 1. 緒 言

大地に設置した電極（それは特に目的をもつて埋設した電極でも又電車軌條のようなものでもよい）から電流を流して適当な距離を距てた2点の電位差を測定すると、通電開始時に数秒～数分程度の過渡現象が表れ、平衡に達してから電流を断つとすぐ電位差零には帰らず通電始めと逆の過渡現象を経て零に戻るという経過をたどるのが通常である（第1図）。このことは古くから知られ（H. Noto, 1930）、又地下探査の手段として実用に供されている



V-record



usual case [Δt : several seconds ~ some minutes
 $\Delta V/V$: > several tenths

Fig. 1.

(岩佐茂作, 1942).

この現象は電流を流す電極の表面における分極作用、又はもつと一般的にいつて流電極附近の電流密度の大きい部分での分極作用（電解分極、濃度分極等）によるものと一見思われ易いが、測定例を注意深く検討すればそうでないことが明らかである。勿論電極及び電極附近の分極作用は一般的には常に存在するものであるからこの影響の無視しうるか又は除去した測定結果について考へての場合である。又電位差を測定する電極の分極作用もしばしば疑われ易いが、いわゆる非分極性電極、——例えば素焼壺内に硫酸銅溶液を入れその中に銅をおいたもの——を用い、更にこの電極に測定

する場合の電流と同程度の電流を外部から通じて分極作用が起きないことを確かめて測定に使用しても上記現象に変わりはない。更に流電極から遠く距つた地点での地電位差と磁場との同時測定の機会に全く同様な過渡現象が地電位差と磁場の両方に認められ、単なる電極の分極作用でないことを明らかに示している。（地磁気じょう乱協, 1954）又同じ測定において流電流には通電開始時に同様な過渡現象が認められていないことを考へ合せると流電極又はその附近の分極作用と考へることが不都合であることも明らかである。

このようにして、第1図のような現象は大地の割合広い範囲にわたるある種の分極作用であろうと考へられる。そしてそれが地層の境界特に地下水の存在と関連して現れることが多いので、複合誘電体の吸収によつて説明しようとする試みもあるが、この考へ方によつては過渡現象の減衰の時間が $\epsilon/4\pi\sigma$ (ϵ は電媒常数, σ は電気伝導度) の程度であるので（清野, 1949）、どんなに都合よく考へても 10^{-8} 秒以下にしかないから通常秒乃至分の程度で現れる過渡現象を説明するのは困難である。

又金属鉍床附近においてはある種の電解分極が起りこのような現象が現れることも考へられ、実験的にも確かめられるが（Bleil, 1953）、通常の大地上においてこの作用を考へることは妥当でない。

§ 2. 大地中の界面電気 2 重層と電気滲透

§1 で述べた第 1 図のような過渡現象を誘起分極と呼ぶことにしよう。この誘起分極が残留電荷法の名のもとに地下の帯水層の探査に応用され有効さを発揮していることから考えても地中の水分が何等かの作用をしていることは疑いもない。従つて土中の界面電気 2 重層の働きを考慮する必要があると思われる。例えば水自身の電気伝導度よりもそれに土を混じたものの方がかなり大きいことなどこの作用が相当大きな役割を果していると考えられる現象を見出すことが屢々ある。

ある一つの円形断面の毛細管をとつて、今簡単のために界面電気 2 重層を分子容量的に考えその毛細管内の溶液の通常の伝導による電流を I_0 、界面動電位 ζ の存在による表面伝導の電流を I_s とすれば、Smoluchowski により

$$I_s/I_0 = (D\zeta)^2 / 8\pi^2 \gamma \eta \delta \lambda \quad (1)$$

と表わされる。但し D はその溶液の電媒常数、 γ は毛細管の半径、 η は粘性係数、 δ は界面電気 2 重層の厚さ、 λ は溶液の電気伝導度である。

今 D としては水の値をとり $D=80$ esu, $\zeta=10^{-4}$ esu (=30 mV), γ としては粘土粒子の平均半径 $\gamma=10^{-4}$ cm, $\eta=10^{-2}$ dyne · sec/cm², $\delta=10^{-7}$ cm, $\lambda=10^{-4}$ mho/cm とすると

$$I_s/I_0 = 0.09$$

となつて、たゞの溶液の場合に比して約 1 割の電流の増加を生ずる。

このような毛細管の両端に電圧 V が加つたとき電気滲透作用によつて単位時間に運ばれる液量は、毛細管の長さを l として

$$v = \frac{D\zeta V \gamma^2}{4\eta l} \quad (2)$$

によつて与えられる。この液によつて毛細管の低電位側の圧力は次第に増加する。一方この圧力差 P によつて Poiseuille の法則に従い逆方向に

$$v' = \frac{\pi \gamma^4 P}{8\eta l} \quad (3)$$

だけの液量が運ばれる。

$v=v'$ のとき平衡に達し、このときの圧力 P は

$$P = \frac{2\zeta V D}{\pi \gamma^2} \quad (4)$$

によつて与えられる。このとき圧力 P のもとに流動電位 E が毛細管の両端に働き E は

$$E = \frac{PD\zeta}{4\pi\eta\lambda} \quad (5)$$

と与えられる。(5)に(4)を代入すると

$$E = \frac{(D\xi)^2 \cdot V}{2\pi^2 \gamma^2 \eta \lambda} \quad (6)$$

となる。

$D=80$ esu, $S=30$ mV ($=10^{-4}$ esu), $\gamma=10^{-4}$ cm, $\eta=10^{-2}$ dyne · sec/cm², $\lambda=10^{-4}$ mho/cm とすると

$$E/V = 3.6 \times 10^{-4}$$

となり即ち逆起電力はもとの電圧に比して殆ど無視しうる程度である。従つて通常の大地において誘起分極を電気滲透と流動電位の組合せで説明することは困難である。

§ 3. 粘土粒子間細隙における濃度分極

土中において粘土粒子が作る細隙は一種の膜相当の作用をされると考えられるからこゝに電場がかゝると電解透析が起る。ある電流量が通過した状態を静的に考えれば、膜の両側で電解質の濃度変化が起り、又酸性及び塩基性反応が起るが、これを過渡状態において考えると複雑である。

土中で粘土粒子が半径 γ , 長さ l の毛細管を作つているとする。この毛細管に電圧 V がかかり電流が流れると §2 で述べたように通常の伝導電流 I_0 の他に表面伝導電流 I_s が流れる。粘土と水の場合の界面電気 2 重層では粘土が負、水が正に帯電するから表面伝導電流 I_s は正イオンによつて作られる。毛細管の陽極側即ち電位の高い方を 1 側, 陰極側即ち電位の低い方を 2 側とする (第 2 図)。

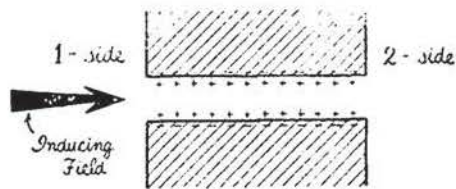


Fig. 2.

毛細管の 2 側の境界においてはまず正イオンの過剰が起るがこれは $\epsilon/4\pi\sigma$ 程度の緩和時間で消滅し、全体として中性で正負両イオンの増加を生ずる。同様に毛細管の 1 側の境界においてはイオン濃度の減少をもたらす。時間 Δt の間のイオン

の増加 (又は減少) は $I_s \cdot \Delta t$ に等しい。従つてこれに相当する濃度変化が毛細管の両端に出来るわけであるが、土中で粘土粒子の作る細膜は隔膜のような明瞭な境界のあるものでないから毛細管の長さ l は有効な相当長と考へて、 $I_s \cdot \Delta t$ のイオンは $(l/2) \cdot \pi \gamma^2$ にわたつて分布するものと考えよう。溶液 (水) のもともとのイオン濃度は i/v によつて与えられる。但し i は通常の伝導電流密度即ち $I_0/\pi \gamma^2$, v は電場 V/l でのイオンの移動速度である。単位時間の濃度増加の割合を $\Delta C/C$ とすると

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{2v_0 V}{l^2} \cdot \frac{I_s}{I_0} \quad (7)$$

となる。但し $v_0 = v/(V/l)$ ，即ち単位電場でのイオンの移動速度である。

2側，1側の濃度をそれぞれ C_2 ， C_1 として濃度比 C_2/C_1 の単位時間後の値は $\Delta C \ll C$ として

$$\frac{C_2}{C_1} = \frac{C + \Delta C}{C - \Delta C} \approx 1 + 2\frac{\Delta C}{C} \quad (8)$$

と表わされる。この濃度比 C_2/C_1 によつて液間に電位差

$$E = \frac{l_M - l_A RT}{l_M + l_A F} \log_e \frac{C_2}{C_1} \quad (9)$$

を生ずる。 l_M ， l_A はそれぞれ正イオン，負イオンの易動度， R は気体常数， F はファラデー常数， T は絶対温度である。

(7)，(8)，(9) から逆起電力の変化は

$$\frac{dE}{dt} = \frac{l_M - l_A RT}{l_M + l_A F} \cdot \frac{I_s}{I_0} \cdot v_0 \cdot \left(\frac{V}{l^2}\right) \times 9.21 \quad (10)$$

従つて毛細管の両端にかゝる電圧 V の変化は

$$-\frac{dV}{dt} = \frac{l_M - l_A RT}{l_M + l_A F} \cdot \frac{I_s}{I_0} \cdot \frac{v_0}{l^2} \times 9.21 \cdot V \quad (11)$$

によつて与えられる。これを解いて

$$V = V_0 e^{-t/T_0} \quad (12)$$

とおけば

$$T_0 = \frac{1}{\frac{l_M - l_A RT}{l_M + l_A F} \cdot (9.21) \cdot \frac{I_s v_0}{I_0 l^2}} \quad (13)$$

と与えられこの T_0 が過渡現象の減衰時間を示す。 V_0 は最初に加えた電圧である。

T_0 の値を評価するために， $l_M/l_A = 3/2$ ， $T = 293^\circ\text{K}$ ， $R = 8.31 \times 10^7 \text{ erg/}^\circ\text{K}$ ，

$F = 9.65 \times 10^4 \text{ coulomb}$ ， $I_s/I_0 = 0.09$ ， $v_0 = 10^{-5} \text{ (cm/sec)/(volt/cm)}$ ， $l = 2\gamma = 2 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$

とすると

$$T_0 = 1.0 \text{ sec}$$

となる。又粘土粒子の大きさに関する量以外は同様として $\gamma = 10^{-4} \text{ cm}$ ， $l = 10^{-3} \text{ cm}$ とすれば

$$T_0 = 25 \text{ sec}$$

又 $\gamma = 5 \times 10^{-4} \text{ cm}$ ， $l = 10^{-4} \text{ cm}$ とすれば $I_s/I_0 = 9 \times 10^{-3}$ となつて

$$T_0 = 125 \text{ sec}$$

等といずれも通常測定値にみられるような値となる。

地中においてこの微小部分に起る逆起電力による分極作用の積分したものが実際に測定されるものであつてその量は逆起電力の起る有効部分の全体に対して占める割合に依存する。従つて極端な場合においては分極作用がもともとの場と同程度の場合もありうる筈である。

この節の考え方によれば緩和時間も逆起電力の大きさも合理的な値をうる事が出来る。勿論モデルは非常に簡略化しており、いろいろな因子を無視している（例えば拡散等を十分考慮していない等）から十分とはいえないが現状においては一般の大地における誘起分極の原因と考えたい。本節の考え方と類似の説を Vacquier et al (1957) が述べているが、誘起分極量 ($\Delta\varphi$) のもとの場 V に対する値が $1/100$ 程度以下の実験値及び野外観測値を主体にしての議論であるので我々の場合に適用することは困難である。我々の場合には次節に示すようにもつとずつと大きい量をしばしば認めている。

§ 4. 地磁気観測所（柿岡）の近傍における測定例について

地中漏洩電流が地磁気及び地電流に及ぼす影響について地磁気観測所の近傍で種々の試験を行つた機会（地磁気じょう乱協, 1954, 1955）にえられた誘起分極の数例を第3～第8図に示す。第3図は第5図に示した地点における記録の例である。第4図は測定を行つた全体の場所を示す地図、第5～第8図は誘起分極を各観測点でベクトル的に示したものである。この場合いずれもウェンナーの電極配列によるものでなく接地点から遠く離れた——この場合数軒程度——地点で比較的近い点間——この場合数百米程度——の電位差を測定しそれを電場に換算したものである。

第5図に示したものは我孫子（Abiko）、金町（Kanamachi）を接地点とする多くの測定のうちの一例である。そして図には流電電流を 1000 A の場合に換算してあるが実際に流した電流は 300～600 A である。図には大地を一様と考えた場合の流線を細線で記入してあるが、各測定点での電場の方向はほぼこの流線の方に一致している。これに対して誘起電場の方向はもとの電場の反対方向に対して北側の4点では反時計廻りの方向に南側の2点では時計廻りの方向に進んでいる。このことから §3 に述べた逆起電力を生じている部分を推定

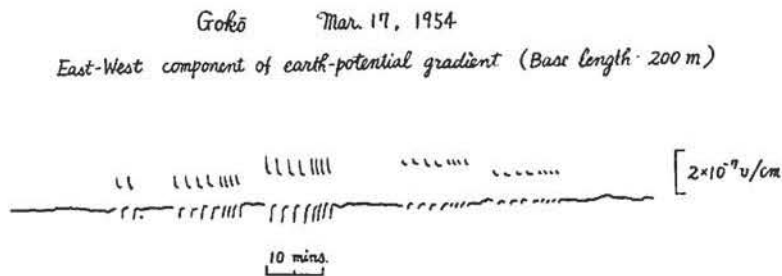


Fig. 3.

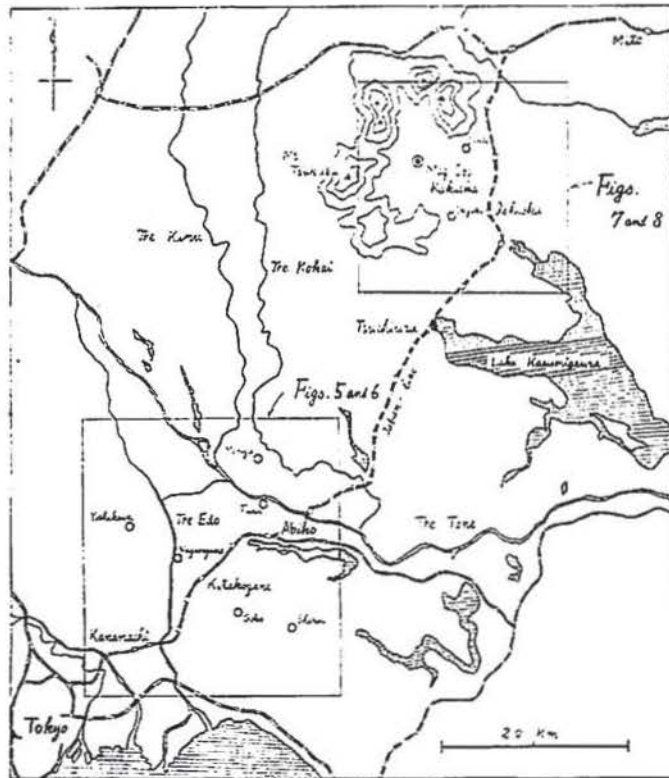


Fig. 4.

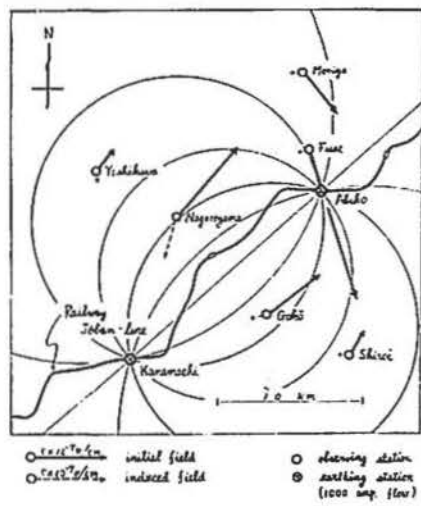


Fig. 5.

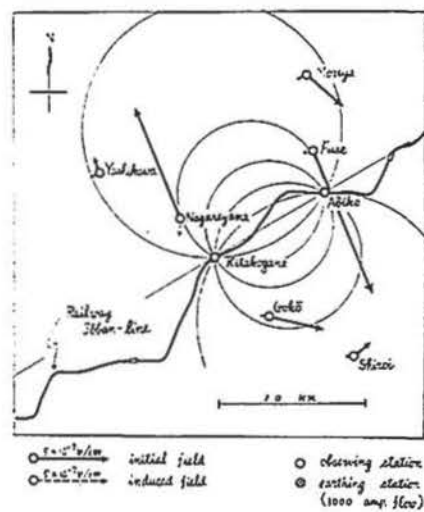
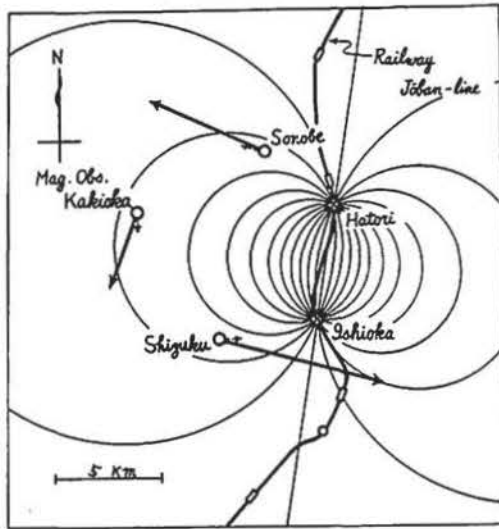
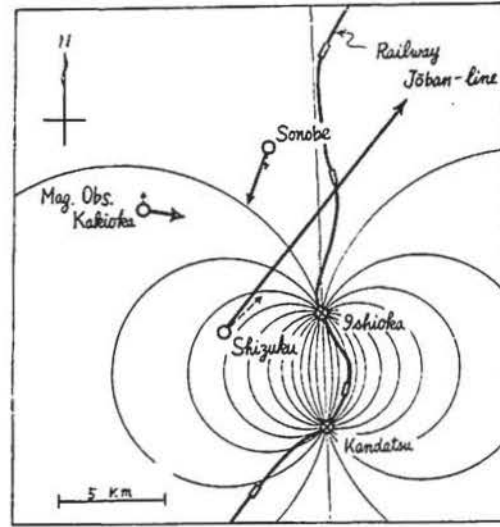


Fig. 6.



10^{-6} v/cm initial field
 10^{-4} v/cm induced field
 ○ observing station
 ⊗ earthing station (228 amp. flow)

Fig. 7.



10^{-6} v/cm initial field
 10^{-4} v/cm induced field
 ○ observing station
 ⊗ earthing station (283 amp. flow)

Fig. 8.

してみると、金町寄りよりも我孫子方向により多く逆起電力を生ずる傾向があると考えられる。これは我孫子附近が沼沢地帯であることと一致している。

誘起電場の大きさは流山 (Nagareyama) ではもとの場の 1/3 以上に達している。

第6図に示したものは第5図の金町の接地を北小金 (Kitakogane) に移した場合である。

このとき吉川 (Yoshikawa) と流山では誘起電場は第5図の場合と違って時計廻りの方向に進んでいる。これを第5図の場合と考え合せると北小金、流山と金町の間が逆起電力生成に有効に働いていると考えられる。そして第5図の場合に流山で誘起電場が最大であることも一致した結果である。従つてこれ等の推定を合せると第5図、第6図の地域では全体として東よりに誘起分極を起す傾向が大きく、且流山、北小金と金町の間で局部的にその傾向の大きい所があると考えられる。この後者については江戸川地域が作用しているのではなからうか。

第7図、第8図の場合は各測定点での誘起電場がいずれももとの場と同一方向で一見奇妙に見えるが、これは両接地点を結ぶ線に対して観測点の反対側、即ち羽鳥 (Hatori)、石岡 (Ishioka)、神立 (Kandatsu) より東側に誘起分極を生ずる地域があると考えると都合よく説明出来る。これは地形的に見て西側が山地で東側が霞浦を含んで沼沢地帯であることと一致する。

次にこのように誘起分極の測定される地域で観測される汎世界的地電流——それは地磁気

変化と相伴つて汎世界的に現れるもの——に影響を及ぼしていないだろうか、ことに誘起分極の減衰時間と同程度の周期をもつ脈動に対しては位相、振幅等を変えてはいないだろうかという心配が考えられるが、第5図～第8図に示した各点で同時に認められた脈動について位相の違い（もし第5図と第7図のように汎世界的地電流に対する誘起電場がもとの場と反対方向及び同一方向に表れるならそれ等の各点では位相の違いがある筈である）を検出しようと試みたが誤差の範囲内で位相は完全に一致していた。但し記録紙の送り速度は1.5 mm/min であるので高々5～10秒程度しか時間精度がないから2分乃至3分位の脈動に対して十分といえないがこの程度（5%以下）においては影響はないといえるだろう。

文 献

- [1] Noto, H., (1930) Some, Experiments on the Earth Current (1); Japanese Journal of Astronomy and Geophysics, VII, No. 3 p. 103~124
 - [2] 岩佐茂作：電気試験所研究報告, 第461号 (1942)
 - [3] 清野 武：電気学会誌 (1949)
 - [4] Bleil, D. F., (1953) Induced polarization—a method of geophysical prospecting: Geophysics, 18, p. 636—661
 - [5] 地磁気じょう乱対策協議会, 常磐線電化に伴う地磁気及び地電流じょう乱試験第一次試験結果報告, 及び第二次試験結果報告 1954, 1955
 - [6] Vacquier, V., C.R., Holmes, P.R., Kintzinger, and M., Lavergne, (1957) Prospecting for ground water by induced electrical polarization: Geophysics, 22. p. 660—687
- [Fig. 1の訂正] 不等号>は<が正しい。