

## S. P. 検層について

陶山 淳治\*

## On the Interpretation of S.P. Log

by  
Junji Suyama

## Abstract

The theory of S.P. Log interpretation is reviewed. The feature of actual S.P. Log obtained in bore-holes investigating for ground water, steam and other resources is also considered.

## 要 旨

S.P. 検層の解析理論の発達について述べ、石油坑井において発達した解析理論を地熱・地下水その他の試・採掘坑井における結果に適用する場合の問題点につき述べ、考察を加えた。

## 1. 緒 言

電気検層が発明されてすでに千分の1世紀を經過し、諸外国においては S.E.P. (Schlumberger) をはじめとし、WELEX. WIDCO. PGAC らの各社が油田・ガス田の開発に検層技術のサービスを行なっているが、わが国においては帝国石油 K.K. が過去 10 数年にわたり油田・ガス田の開発に検層技術を利用しているだけである。物理探査部は各方面からの要望に答え、電気検層技術の確立を目標として昭和 32 年度より 3 カ年の計画で電気検層技術の常用化 (routine work 化) の研究を行なってきた。第 1 期 3 カ年計画においては電気検層技術の現状の把握と測定器の試作とを当面の課題として採り上げた。いかなる研究業務においても、既存の技術を充分理解しておくことは不可欠の問題であるが、本所においては電気検層技術はガス田・地下水・温泉地熱・炭田等多方面にわたり利用され、また物理探査に関連ある地球物理学的研究に利用されるため、石油工業の分野で発達した既存の技術を充分理解し、坑井および地質条件の異なるこれらの分野へ適用する際予想される問題点を把握することが必要である。

事実、これまでわれわれが試験的に行なった検層図および既存の検層図のうちには、種々雑多な現象が認められ、その解釈は定性的にも容易でないものが多い。これ

らは主として坑井条件の相違によるものと筆者は考えている。S.P. 検層の解釈は定性的にも容易でないように思われるので、S.P. 検層の理論の現状と留意すべき問題を記してみた。電気検層の解析理論についてはすでに多くの書籍で述べられているので、詳しくは巻末の教科書を一読されたい。

## 2. S.P. 曲線解析理論の発展

1927 年 C. M. Schlumberger<sup>1)</sup> は Pechelbronn において最初の電気検層の実験を行なって以来、Schlumberger Engineer により引続き実験が行なわれ、1931 年 Caucasus 油田において S.P. 現象を発見した。S.P. の原因には動電位 (electrokinetic potential) と電気化学的電位 (electrochemical potential) とが関係するが、その主体は前者にあると始めは考えていた。しかしながら、資料が収集されるにつれて、次第にこのような考えでは解釈できぬ例が増加してきたので、Schlumberger<sup>2)</sup> は plastic clay について電気化学的起電力に関する実験を行ない、前記の考えに再検討を加えた。

このような実験により、S.P. の電気化学的的成分は次の型で与えられる相界電位 (boundary potential) で、主として塩分濃度の異なる液体間の相互作用によって生ずることをみいだした。

$$\text{電気化学的起電力 } E_e = K \log \frac{R_m}{R_w} \quad (1)$$

ここに、 $K$  は常数、 $R_m$ ,  $R_w$  はおのおの泥水・同生水の比抵抗である。

彼は頁岩および粘土の如き不透性の地層は多孔質滲透性地層→不透性物質→泥水と流れる電流を生ずる起電力の発生原因であると考えた。しかしながら、彼の求めた  $K$  の値はあまりにも小さく、全電位の僅か約 20% を説明しうるのみであり、 $K$  の実測値の信頼度に疑問をもち

\* 物理探査部

ながら、S.P. の主要成分は動電位であるとする従来の考えを訂正することはできなかった。

その後、Mounce および Rust<sup>3)</sup> は 1943 年当時まで定説となっていた“S.P. の主体は動電位であり、滲透率に影響を与える要素は同時に動電位に影響を及ぼすゆえ、S.P. 曲線は砂層の滲透率を反映する”という説<sup>2)</sup>に疑問をもち、砂層に比べ泥壁の滲透率は著しく低いことに着目し、滲透率と動電位の関係を調べた。その結果、砂の滲透率と動電位の大きいさとの間にはほとんど関連がなく、動電位の大きいさ自体も著しく小さいもので、動電位成分は S.P. の主要成分とは考えられぬことを明らかにした。同時に、彼は検層図上で頁岩は常に安定した電位を示すことにヒントを得、頁岩電位の存在を実験的に確かめ、濃塩水—頁岩—淡塩水の連鎖 (chain) による反応が接続電流のエネルギーを供給するもので、かような電気化学的起電力が S.P. の主体をなすと考えた。

同じ頃 Tixier は検層図を編集し、NaCl 溶液に対しては次の関係式で電気化学的成分が与えられることを示した。

$$E_c = 71 \log f_{1c_1}/f_{2c_2} \quad (2)$$

ここに、 $c_1, c_2$  はおのおの濃度、 $f_1, f_2$  は平均活量係数である。

上記関係式 (2) で採用した  $K$  の経験値 (71) は地域によりいくらか変化することが認められたが、そのような変化は溶液に含まれる塩の種類に関係するものと考えられた。

1948 年に至り、Wyllie<sup>4)</sup> は実験的ならびに理論的考察に基づき、泥水・地層水はイオン強度のみを異にする NaCl 溶液であり、頁岩電位がそのイオン強度に無関係に Nernst の式に従うと考えられる範囲では、S.P. 起電力の電気化学的成分  $E_c$  は次式で与えられることを明らかにした。

$$E_c = 2t - \frac{RT}{F} \ln \frac{a_w}{a_m} \quad (3)$$

ここに、 $t$  は  $Cl^-$  の輸率で絶対温度  $T$  および濃度の関数、 $a_w, a_m$  はおのおの地層水・泥水の平均活量、 $R$  は気体恒数、 $F$  は Faraday 恒数である。

その結果、S.P. 曲線の電気化学的成分の定量解析—すなわち、 $E_c, a_m, T$  の値より  $a_w$  を求めること—の道が開かれた。なお泥水・地層水の平均イオン活量  $a_m, a_w$  と、ろ過水<sup>5)</sup>・地層水の比抵抗  $R_{mf}, R_w$  との間には

註1) このような説に基づき、当時 S.P. 曲線を Permeability curve または Porosity curve と呼んだ。

註2) 泥水比抵抗でなく、ろ過泥水比抵抗が関係することを Patnode<sup>5)</sup> は明らかにしている。すなわち、泥水比抵抗と、ろ過水比抵抗との間には Archie の式がなりたつ。

$a_w/a_m = R_{mf}/R_w$  の関係がなりたつと考える稀薄溶液においては、活量を比抵抗で置き換えた方が実際的には便利であり、次の式が用いられる。

$$E = 2t - \frac{RT}{F} \ln R_{mf}/R_w = K \log \frac{R_{mf}}{R_w} \quad (4)$$

なお、注意すべきは、稀薄溶液において  $Na^+, Cl^-$  以外のイオン、例えば  $Ca^{2+}, Mg^{2+}, HCO_3^-, SO_4^{2-}$  の影響が無視できない場合、および高い濃度の NaCl 溶液においては (4) 式は成立しない。

かくして、S.P. の主要成分は電気化学的成分であり、その起電力  $E_c$  は地層水と泥水の化学ポテンシャルによって決まり、Eq (4) で与えられることが明らかにされた結果、S.P. 曲線は地層水の活量ならびに比抵抗の算定のため積極的に利用されることとなった。すなわち、S.P. の主要成分である電気化学的起電力を S.P. 曲線よりできうる限り正確に決定し、次に、熱力学的立場から導かれる関係式を用い、地層水の性質を求められた電気化学的起電力の値より算定する積極的立場に立つに至った。実際問題として、S.P. 曲線をこのように利用するためには、泥水柱が検層施行時に一様であることは不可欠の条件である。泥水循環停止直後に測定することが強く要望されるのも実はこのためである。またさらに一歩進み、S.P. 曲線の解析精度を良好ならしむるため、泥水の性質を制御することが行なわれるようになったのもこの頃からである。なお、泥水柱が一様であれば、S.P. 曲線の偏倚のみを利用するため測定に使用する電極の性質はあまり重要な問題とならない<sup>6)</sup>。

### 3. S.P. 曲線の解析精度に関連する問題

S.P. 曲線より地層水の性質を算定する場合、その精度<sup>7)</sup>は次の要素に左右される。

誤差としては、

(1) S.P. 曲線よりその電気化学的成分の起電力  $E_c$  を決定する手続きの途上導入されるものと、(2) 起電力  $E_c$  と地層水の活量との関係を規定する Eq (3) の信頼度に関連するものとに大別される。

解析手続きの (1) の段階で導入される誤差の 1 つは S.P. 偏倚  $V$  は頁岩基線 (shale base-line) と砂層線 (sandline) との間隔によって求められるため、頁岩基線と砂層線とを検層図上で決定する際生ずる。この種の誤差は個人の電気検層技術の認識力如何によっても影響される。砂層線の決定が容易でないおもな理由は 2 つある。

註3) 電極電位が安定である必要はある。泥水柱が一様でない場合には、電極電位の変化を考慮すべきである。

註4) S.P. 曲線の測定精度は充分と仮定している。

幾何学的影響 (geometrical effect) と渗透性地層内に含まれる粘土分の影響とである。S.P. 偏倚  $V$  と地層中に存在する全起電力  $E_{total}$  との間には, Doll<sup>9)</sup> によって詳細に論じられたように次の関係がある。

$$E_{total} = V \left[ \frac{R_{shale} + R_{mud} + R_{sand}}{R_{mud}} \right] \quad (5)$$

こゝに,  $R_{shale}$ ,  $R_{mud}$ ,  $R_{sand}$  はおのおの頁岩・泥水柱および渗透性地層の有効抵抗である。

すなわち, 一定の  $E_{total}$  に対し,  $V$  の値は泥水柱・頁岩層および隣接する渗透性地層の比抵抗と幾何学的拡がりの大きさによって変化する。 $V$  は幾何学的影響<sup>註5)</sup> をうける。

S.P. の偏倚  $V$  は電気化学的電池内に電流が流れず, 内部電位降下の存在せぬ条件の下で最大値を示し, 電池の起電力と等しい値をとる。この最大値は, Static S.P. 値と呼ばれる。すなわち,  $R_{mud} \gg R_{shale} + R_{sand}$  で  $R_{shale} + R_{sand} = 0$  と置き無視しうる場合は  $E_{total} = V$  で,  $V$  は Static S.P. に等しいとみなしうる。なお, 実際の検層図上で S.P. 偏倚が平坦な最大値を示す部分では,  $E_{total} \approx V$  と考えられる。 $V/E_{total}$  と Geometrical effect との関係を表わした偏差曲線表 (departure chart) は Worthington & Meldau<sup>7)</sup> および Schlumberger Well Surveying Corp<sup>8)</sup> によりそれぞれ独自のアナログモデルを用いて作られている。

粘土分を含む渗透性地面前面の S.P. 偏倚は見掛け上 Eq (4) の  $K$  の値が減少した場合と同様な現象を呈する。この場合の S.P. 偏倚の最大値を Pseudo Static S.P. 値と呼ぶ。粘土分を含む地層の S.P. 減少係数 (reduction factor)  $\alpha = P.S.P./S.S.P.$  は含有粘土の性質と量によって左右されるが, P.S.P. の値より  $\alpha$  を用い適確に S.S.P. を求めることは実際上不可能である。Doll<sup>9)</sup>, Poupon et al.<sup>10)</sup> および Wyllie<sup>11)12)</sup> らによって明らかにされた比抵抗検層の資料を利用して粘土分を含む渗透性地層の S.P. 偏倚を解析する方法を用いた方がよい。

電気化学的成分以外の S.P. 起電力の関与もまた誤差の原因となりうるが, その主要な成分は動電位的成分である。しかしながら, 後に述べるように, 動電位的成分は複雑であり, これを正確に補正する方法は現在ない。

(2) の段階に導入される誤差は Eq (3) の式の信頼度に関連する。

Wyllie<sup>13)</sup> は Illinois, Oklahoma および Kentucky 油田の電検図につき Eq (4) の信頼度を検討し, 平均としてこの関係式が充されるという結果をえた。一方, 天

註5) 浸入領域の比抵抗および拡がりの影響も当然幾何学的影響の内に含まれるが, 浅漏を簡単とするため Eq (5) では除いた。

然の頁岩についての実験<sup>14)</sup> により, 低イオン強度においては頁岩はいずれも Eq (3) で与えられる Nernst の電位に近い値の電位を示すことが知られた。しかしながら, 高イオン強度においては, 測定された電位と Nernst の電位との間の差異は大きく, その差は頁岩ごとに異なり, 不完全膜電極と合致する特性がえられた。

このような現象を検討するため, 頁岩を天然の荷電膜 (charged membrane) と考え, Meyer-Sievers-Teorell の理論<sup>註6)</sup> に基づき, 膜を過って生ずる電位を膜内固定電荷のイオン活量  $A$ , 外部溶液の活量  $a_1, a_2$  および膜内の陰陽イオン易動度  $U_{Na}, U_{Cl}$  の関数として計算すると,

$$E = \frac{RT}{F} \ln \frac{a_1}{a_2} \frac{A + \sqrt{A^2 + 4a_2^2}}{A + \sqrt{A^2 + 4a_1^2}} + \frac{RT}{F} U \ln \left[ \frac{\sqrt{A^2 + 4a_1^2} + UA}{\sqrt{A^2 + 4a_2^2} + UA} \right] \quad (6)$$

となる。

$$\text{こゝに, } U = \frac{U_{Na} - U_{Cl}}{U_{Na} + U_{Cl}}$$

Eq (6) をみれば,  $A \gg a_1, a_2$  ならば, この膜を過って発達する電位は Nernst の電位 (すなわち完全膜の電位) に近づくこと, および  $A$  の絶対値が大きいほど, 換言すれば, イオン交換容量が大きいほど, 高い活量の溶液に対しても Nernst の電位から偏倚しなくなることがわかる。

一方,  $A \ll a_1, a_2$  の場合, 膜を過って発達する電位は通常の液間電位にすぎなくなり, 一方の溶液の活量  $a_1$  を一定とし, 他方の溶液の活量を次第に増してゆくと, 膜を過る電位は Nernst の電位より次第に減少してゆく。このような電位の減少は電解質が次第に膜内へ拡散し, 膜内電流の一部が陰イオンにより運ばれるようになる。すなわち “anion leak” が生ずるために起こる。

そこで, 頁岩の物理的ならびに化学的性質が有効電荷  $A$  および膜内における陽イオンと陰イオンの易動度比を規定し, したがって “anion leak” を規定することを考えれば, 試料について測定された頁岩電位が Nernst 電位に合致する濃度範囲が頁岩の性質および構造の関数として与えられる事実を理解することができる。

例えば, 頁岩の圧密の度合は頁岩の電気化学的効率にかなりの影響を及ぼすが, 少なくとも物理的性質は採取された頁岩試料と天然状態で地下に賦存する頁岩とでは

註6) Meyer-Sievers-Teorell の理論については, K.S. Spiegler & M.R.J. Wyllie “Electrical Potential Differences”, Phys. Tech. in Biological Research, Vol. 2, p 344~347 をみよ。

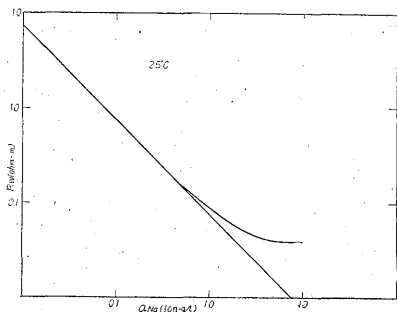
著しく異なるはずである。天然状態下にある頁岩の性質を考えるうえで、もっとも特徴的な事実は、数多くの検層図上にかなりの深度にわたり一定した頁岩基線が認められることである。天然状態においても頁岩は不完全膜として挙動するとすれば、頁岩基線上にのるすべての頁岩は同一の“anion leak”をもたねばならぬ。すなわち、これらの頁岩はすべて同一の有効電荷  $A$  を有し、かつ頁岩内における陽イオン・陰イオン易動度比がすべて等しいはずである。また、一方天然状態で地下にある頁岩は測定された採取頁岩試料と物理的性質を異にするため、完全膜として挙動するものと考えれば、これらの頁岩が検層図上に一定して頁岩基線を生ずることは当然である。なぜなら、完全膜として挙動し Nernst の式で与えられる電位を示す範囲内においては、不均質な膜電極の物理的性質ないし含有陽イオン交換物質の種々と量はなんら重要な働きをしないことが理論的に考えられるし、実験的<sup>15)</sup>にも明らかにされているからである。実際に、長い地質学的時間にわたり堆積した頁岩がすべて同一の物理的性質を有するとは考え難い。例えば、これらの頁岩に含まれる粘土の性質と量、有機分の量、シルトの量は互いに異なるであろうし、それらが蒙った石化 (lithification) の程度も異なるはずであるが、にもかかわらずこれらが一定した頁岩基線を形成するのは、これら頁岩が完全膜として挙動するためと考える方が妥当である。

現在までにえられている資料をもとにすれば、天然状態にある頁岩層は完全膜として挙動し、先述の条件下においては Eq (3) で与えられる電気化学的起電力を発生するものと考えることができる。

これまでの記述においては、対象とする溶液はすべて純粋な NaCl 溶液としたが、われわれが実際に取り扱う溶液、すなわち、ろ過水・間隙水のうちには、NaCl 以外の塩を含むものが多い。

この種の溶液は次の2つの場合に分けて取り扱うことができる。

(1) NaCl 以外の塩の濃度が NaCl の濃度に較べて



第1図

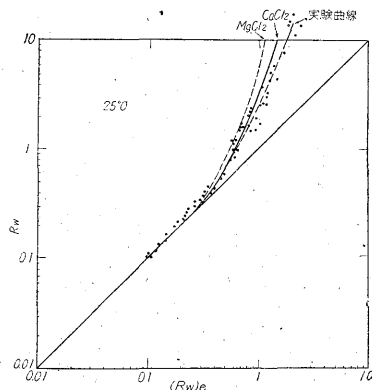
無視しうる場合

(2)  $\text{Na}^+, \text{Cl}^-$  以外のイオンの存在が無視しえぬ場合

(1) の場合には、純粋の NaCl 溶液として取り扱うゆえ、Eq (3) により電気化学的起電力が与えられる。しかし、高濃度の溶液においては、 $\text{Na}^+$  活量と比抵抗との間に逆比例関係はなりたぬ。例えば、 $25^\circ\text{C}$  においては、 $0.1\Omega\text{-m}$  以下の NaCl 溶液に対し  $\text{Na}^+$  活量と比抵抗は直線関係にない。NaCl の濃度が約 40,000 ppm 以下の溶液に限り Eq (3) の代りに Eq (4) を近似的に採用しうるが、約 40,000 ppm 付近以上の高濃度の NaCl 溶液に対しては Eq (3) を用いるか、または M. Gondouin et al.<sup>16)</sup> が実験的に求めた補正表よりえられる等価抵抗<sup>註7)</sup> に関し Eq (4) を適用するかのいずれかの方法によらねばならぬ。

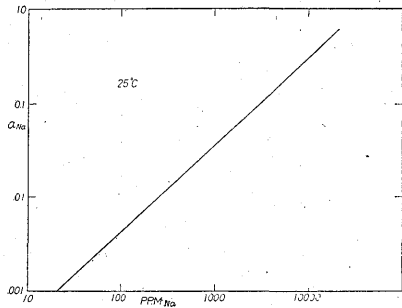
(2) の場合、S.P. の電気化学的起電力は Eq (3) では与えられず、多価イオン系に対する頁岩電位の式が適用される。多価イオン系に対する膜電位については Marshall, Sollner, Scatchard および Wyllie<sup>14)</sup> らの研究があり、多価イオン系に対する膜電位、Bionic potential の式が理論的に導かれている。しかしながら、膜内イオンの輸率比の決定等の問題が残されており、いま直ちにこれらの理論式を S.P. の電気化学的成分の解析に適用するまでに至っていない。しかし、Gondouin et al.<sup>16)</sup> は電気検層の分野で問題となる  $\text{Na}^+, \text{Cl}^-$  以外のイオン  $\text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+}, \text{HCO}_3^-,$  および  $\text{SO}_4^{2-}$  の影響に関する実験をもとに単独イオン活量 (single ion activity) の概念を導入し、次の近似式を求めた。

$$E = 2t \frac{RT}{F} \ln \frac{(a_{\text{Na}} + \sqrt{a_{\text{Ca}} + a_{\text{Mg}}})_w}{(a_{\text{Na}} + \sqrt{a_{\text{Ca}} + a_{\text{Mg}}})_m} \quad (7)$$

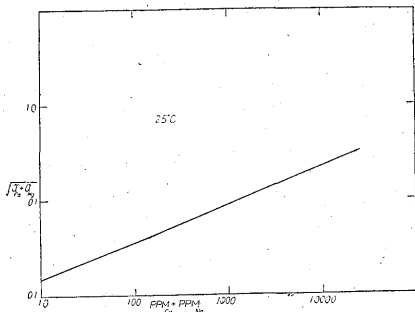


第2図

註7) この等価抵抗  $(R)_e$  は  $(R)_e = A/a_{\text{Na}}$  で与えられる。ここに、 $A$  は稀薄 NaCl 溶液に対しては 1 となる (第1図)。



(a)



(b)  
第3図

こゝに、 $a_{Na}$ ,  $a_{Ca}$  および  $a_{Mg}$  はおのおの Na, Ca および Mg の単独イオン活量。

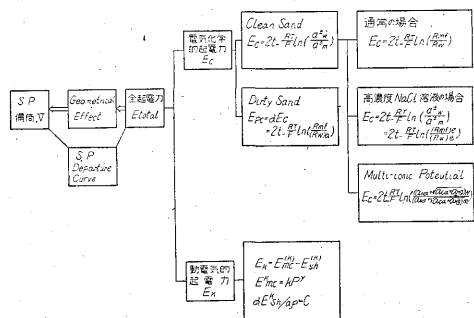
また、同時に、いくつかの坑井よりえられた間隙水について測定した  $a_{Na}$ ,  $\sqrt{a_{Ca} + a_{Mg}}$  と化学分析よりえられた Na および Ca+Mg 濃度とを比較し、統計的平均としての Na ppm 濃度と  $a_{Na}$ , Ca+Mg ppm 濃度と  $\sqrt{a_{Ca} + a_{Mg}}$  との関係を求めた (第3図 a, b)。間隙水・ろ過水に含まれる  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  の含量が知られている場合に、上記の関係より計算される電気化学的成分の値が S.P. の実測値とかなりよく合致するいくつかの例を明らかにしている。

なお、 $Na^+$ ,  $Cl^-$  以外のイオンが間隙水・ろ過水中に含まれるときは、活量 ( $a_{Na} + \sqrt{a_{Ca} + a_{Mg}}$ ) と比抵抗との関係は単純なものではなく、各地質区ごとに実験的に求める必要がある<sup>註8)</sup>。

先にも述べたが、S.P. 偏倚 V よりその電気化学的成分を決定する際、S.P. の動電位成分の影響を考慮しておく必要がある。動電位成分は沈降電位 (sedimentation potential または dorn's effect) よりむしろ流動電位 (streaming potential) によると考えられる。流動電位の

註8) 地域、地質時代および濃度の異なる地層水試料 100 以上について両者の統計的關係を Gondouin et al. が求め、真の比抵抗対等価抵抗図として表わしている (第2図)。

大きさは単純な系、とくに電気的経路が水力的経路と同一の場合に対しては流れの生ずる圧力差に比例する。流動電位はまた流動坑井水と地層岩石充填物の表面との間に存在すると電位 (界面動電位) の関数であるが、 $\zeta$  電位自身地層の性質、とくに岩石構成固体の性質によって左右されるとともに、溶液の濃度の複雑な関数でもある。したがって、特定の  $\zeta$  電位については、流動電位は流動溶液の比抵抗に比例すると考えられる<sup>註9)</sup> が、ある比抵抗の溶液に対して求めた流動電位の値を、同一の化学組成を有するが同一温度で比抵抗の異なる溶液に対して外挿することは許されぬ。したがって、動電位成分を求め、S.P. 偏倚を補正することは至難な業である。



第4図

実際問題として、地層を覆うかなり厚い泥壁によって泥水の浸入が妨げられているロータリー式で掘さくされた坑井の場合と、泥壁がなく、坑井水圧と地層圧との間に差圧があると、直ちに坑井水の地層へ向けての運動が起る綱掘の坑井の場合とでは、流動電位の発生箇所は全く異なる。ロータリー式で掘さくされた坑井においては、泥水柱の静水圧と地層圧との間の最大圧力降下は泥壁内で生ずるため、圧力分布の関数として与えられる流動電位の主要部分は泥壁内で生じ、地層充填物内で発生する流動電位は泥壁内のものに較べ無視しうほど小さい<sup>註17)</sup>。

泥壁は圧密により変形するため、泥壁内に生ずる流動電位と泥壁を過る差圧との間には一次的關係は存在せず、次の関係式で両者は結ばれる<sup>17)</sup>。

$$E_s = kP^y \quad (8)$$

こゝに、 $E_s$  は流動電位、 $P$  は差圧  $k$  は泥水比抵抗により左右されるが、泥水比抵抗のみにより決定しえぬ常数

$y$  は特定の温度、特定の泥水に対し定る常数で泥壁の変形能 (deformability) に関連がある。実験的に求め

註9) たゞし、この場合表面電導は無視し、かつ固体物質は不導体と仮定している。

られている平均値は約 0.75<sup>14)</sup> である。

上記の関係式に対する温度変化の影響は複雑でまだ明らかでない点があるが、その大きさは小さく実際的影響はあまり大きなものでない。泥壁の厚さが流動電位の大きさに影響を与えぬことは理論的に明らかである<sup>17)</sup>。 $\kappa, \gamma$  および差圧  $P$  を実験的に正確に決定するにはいくつかの困難な問題が存在するため、流動電位の大きさの正確な算定は現状では不可能であり、上記の関係式は流動電位の大きさの概算に役立つのみである。

ところで、頁岩もまた幾らかの流動電位を発生することは、頁岩の性質と泥壁の性質との類似性より、当然予想しうる<sup>17)</sup>。Gondouin et al.<sup>18)</sup> および M.J. Hill et al.<sup>19)</sup> は頁岩の流動電位の存在を実験的に確認し、頁岩の流動電位は泥壁の流動電位と種々の点で類似なものであるが、差圧との間にはほぼ一次的関係が存在することを明らかにした。頁岩の差圧増加に伴う圧密の変化は泥壁の場合より著しく小さく、それが頁岩の電位的性質に与える影響は著しく小さいことがその原因と考えられる。ところで、S.P. 偏倚  $V$  は常に頁岩基線を基準として算定されるものであるから、S.P. の電気化学的起電力を求めるにあたり、動電位成分により導入される誤差  $\Delta E_k$  は泥壁の流動電位  $E_{mc}$  と頁岩の流動電位  $E_{sh}$  の代数差  $E_{mc} - E_{sh}$  によりおおよそ決定される。すなわち  $\Delta E_k = E_{mc} - E_{sh}$ 、 $E_{mc}$ 、 $E_{sh}$  はともに同じ極性であり、かつ同位の大きさのものであるゆえ、 $\Delta E_k$  は  $E_{mc}$ 、 $E_{sh}$  より小さい値となる。なお、低圧側においては  $|E_{mc}| > |E_{sh}|$ 、高圧側においては  $|E_{mc}| < |E_{sh}|$  で、これらの中に存在するある値で  $\Delta E_k = 0$  となる。したがって、 $\Delta E_k = 0$  となる圧力側より低圧側においては  $\Delta E_k$  は S.P. 偏倚を増加せしめ、高圧側においては S.P. 偏倚を減少せしめる。また  $\Delta E_k = 0$  となる差圧の値は泥壁・頁岩およびろ過水の性質によって変化する。頁岩により生ずる流動電位が確認されたことは、低透過率の岩石が幾らかの流動電位を生ずることを意味することにもなる。あまり大きくなく透過率をもつ岩石に対しては、坑井水圧と地層圧の圧力降下は泥壁内と岩石内に分配されるはずであり、したがって流動電位も泥壁内のものと、地層内のものとの合成として現われることが当然期待されるが、こうした問題は今後の研究により次第に明らかにされるであろう。いずれにしろ、実際の問題は動電位成分による誤差  $\Delta E_k$  をできる限り小さくすることにあり、そのためには泥水比抵抗を可能な限度で小さくすることが必要である。泥水比抵抗  $R_m < 1 \Omega\text{-m}$  (25°C) においては  $\Delta E_k$  は一般に無視しうる程度となることが知られている。

#### 4. その他注意すべき問題

われわれが得た検層図のうちには、浸透性砂層前面において正の S.P. 偏倚を示すものがあった。それらの坑井は泥壁によって完全に坑壁が覆われているものであり、S.P. 偏倚は主として電気化学的成分からなるものと考えられる場合であった。ろ過水の活量が地層水の活量より大なる場合は、当然このような S.P. 偏倚がえられる。そのうちの1つは江戸川河口近くの基礎調査用の坑井であり、泥水比抵抗は  $2.1 \Omega\text{-m}$  (22°C) で、地層水の比抵抗はえられていないが、地質的には後者が高比抵抗を示すことが充分予想される場合であり、したがって S.P. の正の偏倚が砂層前面で当然期待しうるものであった。別の例は、天然ガス探査のための試掘坑であり、泥水比抵抗は  $8.4 \Omega\text{-m}$  (29.3°C) であった。この場合には浅部においては S.P. の正の偏倚が、深部においては S.P. の負の偏倚が認められており、後者の部分の掘さくによる循環泥水の塩度が上昇したものである。このほか、淡水性ガス鉱床の試掘孔において、濁の水を用いて泥水を作成した場合、S.P. の正の偏倚が認められているが、この場合は泥水比抵抗が泥水作成に使用した水より活量が増加した<sup>16)</sup>ためと思われる。このように S.P. の偏倚が砂層前面で正の値を示すことは、理論的にも実際的にも認められる現象である。

次に、温泉・地熱地帯の検層図に表われる S.P. 曲線は全く種々雑多であり、定性的な解釈の困難なものが多い。その原因としては、温泉地帯においては綱掘の坑井が多く、浸透性の地層ないし部分が泥壁によって被覆されていないため、流動電位成分が卓越することならびに坑井水は循環泥水の如き人為的なものでなく、かつ一様でないことにあると考えられる。したがって、このような坑井の検層図に対しては上記の理論は適用できない。まず、坑井水比抵抗の分布を測定すべきである。ロータリー式で掘られた坑井においても、温泉地帯においては高温のため泥壁が完全に形成されていないため、流動電位成分が著しく卓越したものである例が多い。このような例については Microlog によって泥壁の発達状況を調べる必要があると思う。温度の上昇が S.P. 曲線に与える影響<sup>18)</sup>は坑井内電極電位の変化の影響と電気化学的 S.P. 起電力および流動電位の温度による変化とに大別されよう。しかしながらいずれも著しい影響はないようである。鉛電極の電極電位の変化は pH 10.5~12.5 の泥水に対して 0.19~0.13 mV/°C、頁岩膜の Seebeck 効果に伴う電気化学的成分の変化は約 0.27 mV/°C とともに正の偏移 (drift) を生ずる。流動電位成分に対する温度の影響は前述のように複雑であるが著しく小さく、かつ一般に負の偏移を生ずる。

先に述べたように、S.P. 偏倚より地層水の活量また

は比抵抗を決定するためには、検層時の泥水柱は一様である必要がある。もし、泥水柱の性質が変化した場合、当然 S.P. 曲線は変化する。一般に坑井条件が変化する場合 S.P. 曲線は変化するが、坑井条件が変化しない場合にも S.P. 曲線が変化する<sup>20)</sup>が知られている。

孔隙率および滲透率の大きな砂層においては浸入領域の分布が時間とともに変化する<sup>21)</sup>ため、砂層の下端部の S.P. 偏倚が時間とともに減少する。例えば、初期 (-) 125 mV の偏倚を示した砂層が、2, 3 日後の検層図上では (-) 85 mV の偏倚しか示さず、この間約 40 mV の S.P. の減少が認められることがある。一方、flushing の不十分な地層においては、flushed zone の間隙水活量が時間とともに減少し、ろ過水の活量に近付くため、泥壁を過って発生する電気化学的起電力が時間とともに減少し最終的には消滅する結果 S.P. 偏倚の時間的増大がみられる。例えば、初期の検層図上では全電気化学的起電力より 4 割も減少した S.P. 偏倚がみられるが、2, 3 日後には完全な電気化学的起電力による S.P. 偏倚が認められることがある。

## 5. 結 語

S.P. 検層の理論の現状と実際に検層図を解釈するに当たって注意すべき点を述べた。われわれはまだ S.P. 曲線を定量的に解析する段階に達していないが、定性的に解釈する際でも、地域的特性を充分考慮しなければならない。そのためには基礎資料の収集が必要であるととも、検層器の測定精度を向上せしめることも当面の重要課題である。これらの点については後日報告する予定である。

(昭和 35 年 6 月稿)

## 文 献

- 1) Schlumberger, C. M. & Leonardon, E. G.: Electrical Coring; A Method of Determining Bottom-Hole Data by Electrical Measurements, Trans. A.I.M.E., Vol. 110, p. 237~272, 1934
- 2) Schlumberger, C.M. & Leonardon, E.G.: "A New Contribution to Subsurface Studies by Means of Electrical Measurements in Drill Holes, Trans. A.I.M.E., Vol. 110, p. 273~289, 1934
- 3) Mounce, W.D. & Rust, W.M.: Natural Potentials in Well Logging, Trans. A.I.M.E., Vol. 155, p. 49~57, 1944; Vol. 164, p. 288~294, 1945
- 4) Wyllie, M.R.J.: A Quantitative Analysis of the Electrochemical Component of the S.P. Curve, Trans. A.I.M.E., Vol. 186, p. 17~26, 1949
- 5) Patnode, H.W.: "Relationship of Drilling Mud Resistivity to Mud Resistivity, Trans. A.I.M.E., Vol. 186, p. 14~16, 1949
- 6) Doll, H.G.: The S.P. Log. Theoretical Analysis and Principles of Interpretation, Trans. A.I.M.E., Vol. 179, p. 146~185, 1948
- 7) Worthington, A.E. & Meldau, R.F.: Departure Curves for the Self-Potential Log, Trans. A.I.M.E., Vol. 213, p. 11~16, 1958
- 8) Schlumberger Well Surveying Corp. Document, No. 8
- 9) Doll, H.G.: The S.P. Log in Shaly Sands, Trans. A.I.M.E., Vol. 189, p. 205~214, 1950
- 10) Poupon, A., Loy, A.E. & Tixier, M.P.: A contribution to Electrical Log Interpretation in Shaly Sand, Jour. Petr. Tech., Vol. 6, p. 271, 1954
- 11) Wyllie, M.R.J. & Southwick, P.F.: An Experimental Investigation of the S.P. and Resistivity Phenomena in Dirty Sands, Jour. Petr. Tech., Vol. 6, p. 44~57, 1954
- 12) Wyllie, M.R.J., P.F. Southwick, J.G. Jr Mckelvey & K.S. Spiegler: The Application of A Three-Element Model to the S.P. and Resistivity Phenomena by Dirty Sands, Geophysics, Vol. 20, No. 4, p. 913, 1955
- 13) Wyllie, M.R.J.: Statistical Study of Accuracy of Some Connate-Water Resistivity Determinations Made from Self-Potential Log Data, B.A.A.P.G., Vol. 33, p. 1892, 1949
- 14) Wyllie, M.R.J.: Role of Clay in Well-Log Interpretation, Proc 1st National Conf on Clays and Clay Technology, State of Calif. Dept. Natural Resources Bull., 169, p. 282, 1955
- 15) Wyllie, M.R.J. & H.W. Patnode: The Deve-

- lopment of Membranes Prepared from Artificial Cation-Exchange Materials with Particular Reference to the Determination of Sodium-Ion. Activities, Jour. Phys. Colloid. Chem., Vol. 54, p. 204, 1950
- 16) Gondouin, M., M.P. Tixier & G.L. Simard: An Experimental Study on the Influence of the Chemical Composition of Electrolytes on the S.P. Curve, Trans. A.I.M.E., Vol. 210, p. 58, 1957
- 17) Wyllie, M.R.J.: An Investigation of the Electrokinetic Component of the S.P. Curve, Trans. A.I.M.E., Vol. 192, p. 1, 1951
- 18) Gondouin, M. & C. Scala: Streaming Potential and the S.P. Log, Trans. A.I.M.E., Vol. 213, p. 170, 1958
- 19) Hill, H.J. & A.E. Anderson: Streaming Potential Phenomena in S.P. Log Interpretation, Trans. A.I.M.E., Vol. 216, p. 203, 1959
- 20) Segesman, F. & M.P. Tixier: Some Effects of Invasion on the S.P. Curve, Trans. A.I.M.E., Vol. 216, p. 138, 1959
- 21) Doll, H.G.: The Invasion Process in High Permeability Sands, Petr. Engr., Jan 1955