

岩石の比抵抗の主要因

高倉伸一
(地質調査所)

Chief factors in resistivity of rocks

Shinichi Takakura
(Geological Survey of Japan)

1. はじめに

大地の比抵抗（電気伝導度）の分布を把握する電気・電磁探査法は、資源探査、土木調査および防災予知など幅広い分野で使用されている。しかし、その結果から地質構造を解釈するとなると、不十分なところが多いのが現状である。この理由の一つとして、岩石の比抵抗を決める要因が多く、比抵抗構造を解釈する知識に統一性がとれていないことがあげられる。

比抵抗構造の解釈には、岩石の比抵抗を孔隙率と孔隙水の比抵抗の関数で表した Archie(1942)の経験式が適用されることが多い。この経験式では、岩石の電気伝導は孔隙中の水を媒体とするイオン伝導であることを前提としている。水を含まないほとんどの鉱物は絶縁体であるので、この前提は基本的には正しい。

しかし、Archieの経験式は未固結・未変質の粒状の岩石を対象として求められた実験式であり、全ての岩石への適用には限界がある。とくに、粘土質の岩石ではArchieの経験式が成立しなくなることは、石油探査の分野ではよく知られた事実である。

我が国は地震や火山の活動度が高く、降水量も比較的多く、また新第三紀にはかなりの部分が海面下にあったことから、岩石中には風化、熱水、あるいは続成作用によって生じた粘土鉱物が普遍的に存在する。したがって、石油探査の分野に限らず、我が国のとくに浅部の比抵抗構造を解釈するためには、粘土鉱物との関連性を考えることが必要不可欠である。

ここでは、高倉（1995）に基づいて、岩石の比抵抗を決める主要因について、粘土鉱物の影響を中心にレビューする。

2. 岩石の比抵抗を決める要因

2.1 Archieの経験式

Archieの経験式では、 ϕ を孔隙率、 S を水飽和率、 ρ_w を孔隙水の比抵抗とすれば、岩石の比抵抗 ρ は、

$$\rho = a \cdot \phi^{-m} \cdot S^{-n} \cdot \rho_w \quad (1)$$

で表される。ここで、 a 、 m 、 n は地層を構成する岩石の性質に依存する定数であり、たとえば砂岩層に対しては $a = 0.5 \sim 2.5$ 、 $m = 1.3 \sim 2.5$ 、 $n = 2$ 程度の値をとる（物

理探査学会,1989)。岩石が地下水面以下にあるとして、水飽和率を100% ($S = 1$) とすると、(1)式は、

$$\rho = F \cdot \rho_w \quad (2)$$

と表される。ここで、 $F (= a \cdot \phi^{-m})$ は地層比抵抗係数(formation factor)である。Archieの経験式より、孔隙率が高いほど、また孔隙水の比抵抗が低いほど、岩石の比抵抗が低くなることがわかる。

なお、当然のことながら、孔隙水以外に電気伝導の媒体となる物質が含まれる場合や、孔隙が連結しておらず電流の道が寸断されている場合は、Archieの経験式は成立しない。具体的には、前者とケースしては、1)導電性鉱物が含まれる場合や2)粘土鉱物が含まれる場合がある。また、後者としては、3)岩石が固結しており孔隙率がほとんど0に近い場合がある。このうち、1)については、一部の金属鉱床を除けば稀であることから、ここでは考慮しない。また、3)については、岩石中の割れ目の連結の程度が比抵抗に左右し、浸透理論(たとえば、Stauffer(1985))や平行板モデル(たとえば、Brown(1989))による説明が必要であるが、これについては別途報告する。以下では、我が国の地質では普遍的な2)の場合の岩石の比抵抗について説明する。

2.2 粘土鉱物の影響

各種粘土鉱物の含有量による比抵抗変化の一例(西川,1992)を第1図に示す。これによると、含まれる粘土鉱物の量が多いほど比抵抗が低下することがわかる。また、粘土鉱物の種類により、比抵抗の低下の程度が大きく異なることもわかる。モンモリロナイト(スメクタイトの一種)は、数%の量でも比抵抗を1桁以上低下させ、セリサイト(雲母粘土鉱物の一種)もモンモリロナイトほどではないが比抵抗を大きく低下させるが、ミョウバン石、緑泥石、カオリナイトはそれほど比抵抗を低下させない。

粘土鉱物による超過導電性は、その表面に形成される電気二重層におけるイオン交換反応に起因すると考えられる。一般に粘土鉱物の表面には負電荷が卓越して存在しているため、陽イオン交換が起こりやすい(たとえば、白水,1988)。したがって、各種粘土鉱物が示す超過導電性の大きさは、その粘土鉱物がもつ陽イオン交換容量(CEC)の大きさに関連するはずである。主な粘土鉱物の陽イオン交換容量(白水,1988,表3.1より抜粋)を第1表に示す。CECはスメクタイトが大きく、その次に雲母粘土鉱物が大きく、緑泥石とカオリナイトは小さい。このようにCECの大きさは、第1図の結果をよく説明する。

また、石油探鉱の分野では、粘土鉱物が含まれる場合の岩石の導電率(比抵抗の逆数)に関する多くの実験式が提案されている(Waxman and Smits,1968; Clavier et al.,1977; Sen et al.,1988; Sen and Goode,1992)。Sen and Goode(1992)の実験式によると、岩石の導電率 $\sigma (=1/\rho)$ は、

$$\sigma = \frac{1}{F} \left(\sigma_w + \frac{D \mu_{DL} Q_v}{1 + C \mu_{DL} Q_v / \sigma_w} \right) + E \mu_{DL} Q_v \quad (3)$$

と表される。ここで、 σ_w は水の導電率、 μ_{DL} は電気二重層におけるイオンの移動度

(mobility)、Fは地層比抵抗係数、C、D、Eは鉱物や孔隙の形状に依存する定数で一種の地層比抵抗係数である。また、 Q_v は孔隙容積 1 cm^3 あたりのNaイオン換算のミリ等価量の陽イオン変換濃度であり、

$$Q_v = C E C \cdot \rho_d (1 - \phi_t) / \phi_t \quad (4)$$

と表される。ここで、 ρ_d は粘土鉱物を含む岩石の乾燥密度であり、 ϕ_t は全孔隙率 (total porosity、孔隙水と粘土鉱物の境界領域を含めた孔隙率) である。

(3)式は、 σ が第1項のArchieの経験式 ($\sigma = \sigma_w / F$) で表される導電率に、第2項以下の Q_v の関数となる導電率 (超過導電率) が加わった値であることを意味している。また、(4)式は Q_v がCECの大きさに比例することを意味している。

なお、付録Aに孔隙水の導電率の高い場合と低い場合の経験式を示す。これより、岩石の導電率は、孔隙水の導電率の高低にかかわらず、Fと σ_w と $\mu_{DL} Q_v$ の関数になることがわかる。すなわち、岩石の比抵抗はおもに孔隙率と孔隙水の比抵抗とCECの大きい粘土鉱物の含有量に依存する。

また、以上の式より、CECの大きい粘土鉱物が多量に含まれるほど、あるいは孔隙水の導電率が小さくなるほど、超過導電率が相対的に大きくなるので、岩石の比抵抗はArchieの経験式から予想される値より低くなることが理解される。

2.3 温度

一般に地下の温度は深度とともに上昇する。温度が上昇するとイオンの移動度が增大するので、岩石の導電率は深度とともに増加すると考えられる。ここでは、イオンを含む水溶液の比抵抗と粘土鉱物の電気二重層におけるイオン移動度の温度依存性を検討し、岩石の比抵抗の温度依存性を議論する。

水溶液の比抵抗の温度依存性については、これまでも多くの実験式が示されている。たとえば、横山ほか(1983)では、水溶液の温度をT (°C)、 $T = 20^\circ\text{C}$ における比抵抗を ρ_{w20} とし、 $G = \rho_w / \rho_{w20}$ とすると、 50°C 以上の領域において、

$$T + 273 = \frac{608}{\log G + 2.16} \quad (5)$$

の関係があることが求められている。また、Arps(1953)では、水溶液の温度をT°Cとし、 $T_1^\circ\text{C}$ における導電率を σ_{w1} 、 $T_2^\circ\text{C}$ における導電率を σ_{w2} とすると、

$$\sigma_{w2} = \frac{T_2 + 21.5}{T_1 + 21.5} \sigma_{w1} \quad (6)$$

の関係があることが示されている。さらに、Sen and Goode(1992)では、塩化ナトリウム(NaCl)溶液の導電率 σ_w について、モル濃度をMとすると、

$$\sigma_w = (5.6 + 0.27T - 1.5 \cdot 10^{-4} T^2) M - \frac{2.36 + 0.099T}{1.0 + 0.214} M^{3/2} \quad (7)$$

となることが示されている。

以上の式は、溶存するイオンの種類や量が異なる水溶液から導かれた実験式であるが、いずれも温度の上昇とともに水溶液の導電率が高くなることを示している。各式から求まる導電率を20℃のときの導電率で正規化した結果を第2図に示す。ここで、(7)式の計算では $M=1$ とおいた。この図より、各式から求まる導電率は多少の差異はあるものの、200℃までの範囲ではいずれの式もほぼ等しい結果を与えることがわかる。

一方、粘土鉱物の電気二重層におけるイオンの移動度の温度依存性については、Waxman and Thomas(1974)のデータをもとにSen and Goode(1992)が詳しい検討を行っている。これによると、岩石の温度を T とし、 $T=22^{\circ}\text{C}$ におけるイオンの移動度を μ_{DL22} とすると、電気二重層におけるイオンの移動度には、

$$\mu_{DL} = \mu_{DL22} (1 + 0.0414(T - 22)) \quad (8)$$

という温度依存性がある。(8)式は μ_{DL} が温度に比例することを意味している。

水溶液の導電率の温度依存性と粘土鉱物の電気二重層におけるイオンの移動度の温度依存性とを比較するため、第2図に μ_{DL} を μ_{DL22} で正規化した結果を重ねる。これより、温度の上昇に対し μ_{DL} の変化の方が水溶液の導電率の変化より60~70%程度大きいことがわかる。

以上の実験式は、水溶液の導電率や粘土鉱物の電気二重層におけるイオンの移動度がいずれも温度とともに増大することを示している。(5)~(7)式や(8)式を(3)式に代入すると、温度の上昇により岩石の比抵抗は低下するということが理解される。

3. 基礎試錐による検証

3.1 使用データ

ここでは、新潟および秋田油田地域の基礎試錐「東頸城」と「仁賀保」の坑井データに基づき、上述した岩石の比抵抗の主要因について検証する。

基礎試錐「東頸城」の比抵抗、孔隙率、地層温度、および粘土鉱物の分帯を第3図(高倉, 1995)に示す。また、基礎試錐「仁賀保」の比抵抗、孔隙率、地層温度、および粘土鉱物の分帯(高倉, 1995)を第4図に示す。ここで、比抵抗と孔隙率については1.07m(3.5フィート)間隔で測定された値と、孔口から100mごとにその値を相乗平均により平滑化した値を示している。また、粘土鉱物の分帯はX線回析と薄片観察により推定したものである。ただし、基礎試錐「仁賀保」の粘土鉱物の分類には、スメクタイトの代わりにモンモリロナイトが用いられている。

3.2 両試錐における岩石の比抵抗の特徴とその要因

両試錐の比抵抗検層データが示す比抵抗は、短波長的な変化を無視すれば、いずれも地表から深部に向かい高-低-高となだらかに変化している。比抵抗の変化には、地質年代および地質層序はほとんど反映されていない。また、孔隙率、温度、粘土鉱物のなかでは、粘土鉱物の影響が最も大きく、とりわけスメクタイト(モンモリロナイト)の影響が顕著である。

スメクタイト帯(モンモリロナイト帯)では、比抵抗は1~3 Ωm 前後と非常に低

く、孔隙率が減少するにもかかわらず深度とともに低下する傾向にある。したがって、スメクタイト帯の岩石の比抵抗は、CECの大きいスメクタイトによる超過導電性が卓越しているため、相対的に孔隙率の影響が小さくなっていると判断できる。また、深度に伴う比抵抗の低下は、スメクタイトの含有量の増加と温度の上昇の二つの要因の相乗効果によるものと考えられる。

イライト/スメクタイト混合層帯になると、比抵抗の低下は終わる。混合層帯の上部が依然として低比抵抗であるのは、スメクタイトを含む混合層粘土が多量に存在するからと推測される。イライト/スメクタイト混合層帯の下部や緑泥石/スメクタイト混合層帯になると、比抵抗は深度とともに上昇する傾向となり、緑泥石帯になるとその上昇の度合いは大きくなる。これは、CECの大きい粘土鉱物の含有量が減少し、イライトや緑泥石などCECの小さな粘土鉱物の含有量が増加しているからと推測される。

また、イライト/スメクタイト混合層帯より深部では、比抵抗と孔隙率との間に負の相関がみられるようになる。したがって、この深度になると孔隙率の影響が相対的に大きくなると判断できる。しかし、ほぼ同じ孔隙率を示す深度の比抵抗を比較すると、深部の方が比抵抗は高く、また(5)~(8)式など用いて温度を補正すると深部の比抵抗はさらに高くなることより、比抵抗を決める要因が孔隙率だけではないことは明らかである。

一方、イライト/スメクタイト混合層帯以深になると、いずれの試錐でも比抵抗と温度の関係は理論とは整合しなくなる。したがって、深部では温度の影響は他の要因と比較して小さいと判断できる。

4. おわりに

以上、岩石の比抵抗を決める要因について、粘土鉱物の影響を中心にレビューした。著者の専門である石油探鉱における研究がベースとなっているので、内容が続成変質を受けた岩石に偏っていることは否めない。しかし、理論は基本的なことであり、粘土鉱物を含む他の岩石への応用も可能と考える。

岩石の比抵抗の要因については、これまで地球電磁気学の分野ではあまり考慮されてこなかった。むしろ、石油探鉱の分野など工学において研究が進んでいる。今後、他の分野の知識を積極的に取り入れ、地球電磁気学の分野における新しい研究を期待したい。

付録A

岩石が高導電率の水で飽和された場合 ($\sigma_w \rightarrow \infty$)、 $C \mu_{DL} Q_V / \sigma_w \ll 1$ であるので、地層比抵抗係数をまとめて、 $A = D + EF$ とおくと、導電率 σ は、

$$\sigma = \frac{1}{F} (\sigma_w + A \mu_{DL} Q_V) \quad (A.1)$$

と表される。これより、高導電率の水で飽和された岩石の導電率は、Archieの経験式の項 (σ_w / F) と超過導電率の項 ($A \mu_{DL} Q_V / F$) の和で表されることがわかる。

一方、岩石が低導電率の水で飽和された場合 ($\sigma_w \rightarrow 0$)、 $C \mu_{DL} Q_V / \sigma_w \gg 1$ であるので、 $F' = (1 + D/C)$ 、 $A' = EF'$ とおくと、導電率 σ は、

$$\sigma = \frac{1}{F} (\sigma_w + A^{-1} \mu_{DL} Q_v) \quad (A.2)$$

と表される。したがって、低導電率の水で飽和された岩石の導電率も、Archieの経験式の項 (σ_w/F) と超過導電率の項 ($A^{-1} \mu_{DL} Q_v/F$) の和で表されることがわかる。

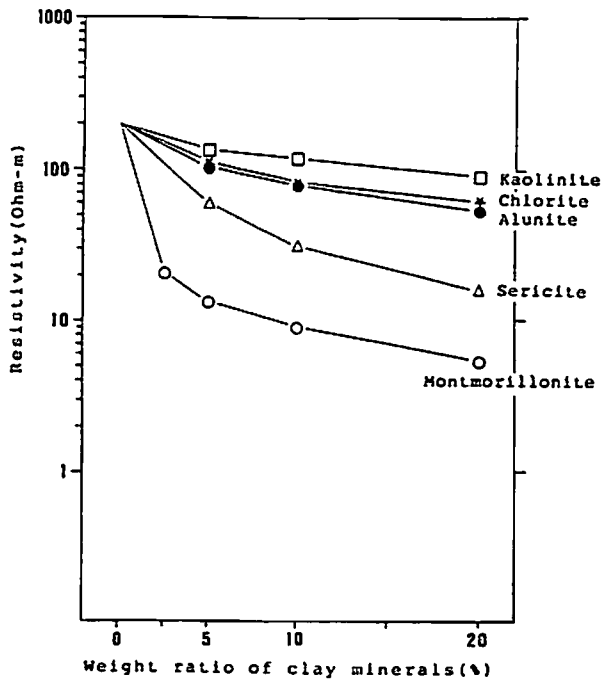
参考文献

- Archie, G. E. (1942): The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *Trans. AIME*, 146, 54-62.
- ARPS, J. J. (1953): The effect of temperature on the density and electrical resistivity of sodium chloride solutions, *Petr. Trans. AIME*, 198, 327-330
- Brown, S. T. (1989): Transport of fluid and electric current through a single fractures, *J. Geophys. Res.*, 94, 9429-9438.
- 物理探査学会 (1989): 図解物理探査, 239p.
- Clavier, C., Coates, G., and Dumanoir, J. (1977): The theoretical and experimental bases for the "dual water" model for the interpretation of shaly sands, *Ann. Mtg., Soc. Petr. Eng.*, SPE paper no. 6859.
- 西川信康 (1992): 菱刈鉱山における変質鉱物と物性との関係, 平成3年度広域地質構造調査報告書, 構造解析総合調査, 通商産業省, 157-187.
- Sen, P. N., Goode, P. A., and Sibbit, A. (1988): Electrical conduction in clay bearing sandstones at low and high salinities, *J. Appl. Phys.*, 63, 4832-4840
- Sen, P. N., and Goode, P. A. (1992): Influence of temperature on electrical conductivity on shaly sands, *Geophysics*, 57, 89-96.
- 白水晴雄 (1988): 粘土鉱物学 - 粘土科学の基礎 -, 朝倉出版, 185p.
- Stauffer, D. (1985): *Introduction to percolation theory*, Taylor and Francis, 小田恒孝訳, 浸透理論の基礎, 吉岡書店.
- 高倉伸一 (1995): 新潟および秋田油田地域の新第三系岩石の比抵抗, *物理探査*, 48, 161-175.
- Waxman, M. H., and Smits, L. J. M. (1968): Electrical conductivities in oil-bearing Shaly Sands, *Soc. Petr. Eng. J.*, 8, 107-122.
- Waxman, M. H., and Thomas, E. C. (1974): Electrical conductivities in shaly sands, I. The relation between hydrocarbon saturation and the resistivity index, II. The temperature coefficient of electrical conductivity, *J. Petr. Tech.*, 14, 213-225.
- 横山秀吉・中塚勝人・阿部司・渡部賢一 (1983): 含水岩石の比抵抗の温度依存性とその地下温度予測への応用について, *日本地熱学会誌*, 5, 103-120.

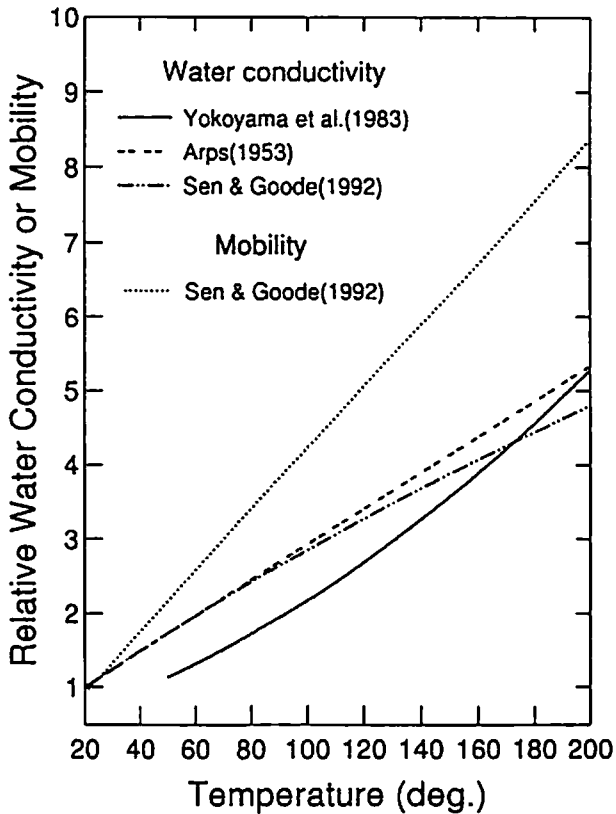
第1表 主な粘土鉱物の陽イオン交換容量 (白水, 1988)

カオリナイト	2 ~ 10
ハロイサイト	5 ~ 40
雲母粘土鉱物	10 ~ 15
緑泥石	2 ~ 10
パーミュキュライト	100 ~ 150
スメクタイト	60 ~ 100
イモゴライト	20 ~ 30
アロフェン	30 ~ 135

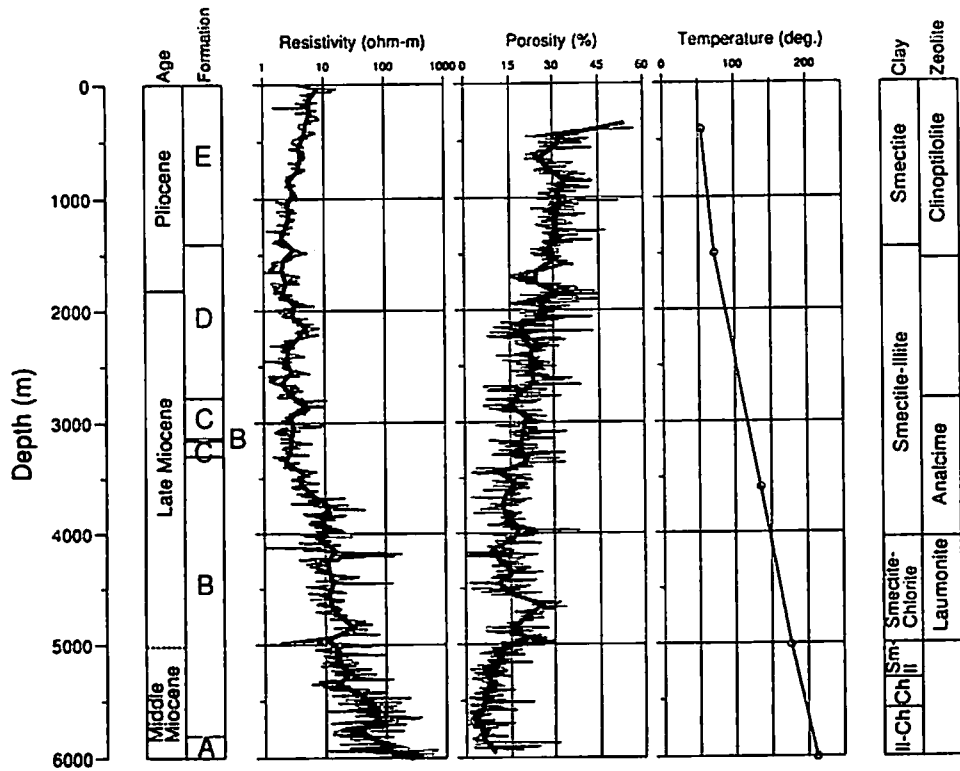
単位は、me/100g。pH7.0, イオン濃度 $10^{-1} \sim 10^{-2} N$ の溶液中の値



第1図 各種粘土鉱物の含有量による比抵抗変化 (西川, 1992)

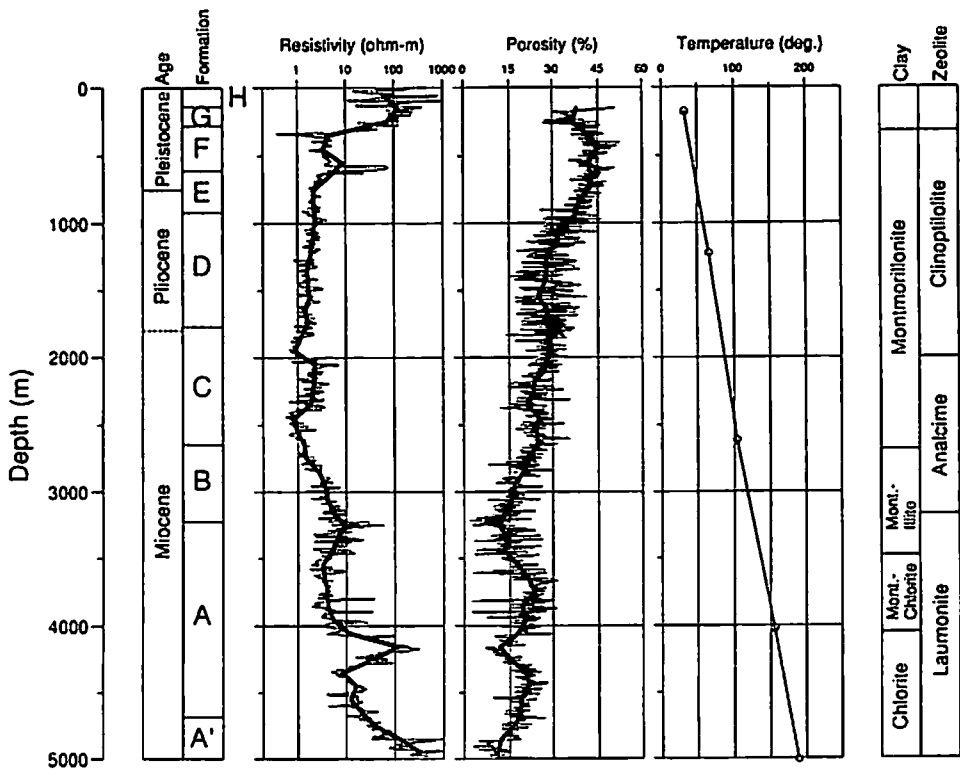


第2図 イオンを含む水溶液の比抵抗と電気二重層中のイオンの移動度の温度依存性 (高倉, 1995)



第3図 基礎試錐「東頸城」の検層図 (高倉, 1995)

A:七谷層、B:下部寺泊層、C:上部寺泊層、D:椎谷層、E:西山層。



第4図 基礎試錐「仁賀保」の検層図 (高倉, 1995)

A:青沢層、A':八塩沢川層、B:女川層、C:船川層、D:下部天徳寺層、E:上部天徳寺層、F:笹岡層、G:西目層、H:鳥海山噴出物。