

地層水の比抵抗

岩石比抵抗 その1

小野 吉彦*

Various Problems on the Resistivity of Formation Water (Rock Resistivity 1)

by

Yoshihiko Ono

Abstract

In this report, various problems on the resistivity of groundwater or formation water which plays an important role in conductivity of rock are discussed from standpoint of applied geophysics.

Firstly, the significance for the occurrence of groundwater in electrical prospecting is discussed briefly, and nextly the effects of various factors on the resistivity of formation water are considered in detail.

In fossil water, the concentration of dissolved salt (NaCl) can profoundly affect the resistivity of water, but the composition effect is not so important as in fresh water. Temperature produces also great influence on the fossil water resistivity, but produces no material influence on the shallow groundwater. The pressure effect may be generally neglected in this case.

In electrical log interpretation, these factors have been considerably studied. In this report specially, the composition effects of the fresh water resistivity are considered in detail.

- 1) Relative contributions of important ions to water conductivity or conversion factors from their concentration to NaCl concentrations are approximately calculated.
- 2) Fresh water resistivity ρ is expressed in the next form

$$\rho = \frac{m}{\sum \frac{mi}{\rho_i}}$$

where ρ_i is resistivity of each salt (dissolved in a given fresh water) which has so-called "concentration in normality" equal to the total electrolyte "concentration in normality" m , and also mi is "concentration in normality" which each salt actually holds in that water.

Finally, possibility of applying information of groundwater resistivity to geological problems is considered.

要 旨

岩石比抵抗の知識を地質調査にもつとりに入れるためには、その比抵抗と地質との関連性についての知識が必要である。電気検層の量的解釈技術の進歩は、この問題に関するいろいろな知識をわれわれに与えてくれたけれども、もつと広い分野への適用という点を考えれば、まだ未解決の問題がたくさんあるように思われる。

筆者はこの報告では、岩石比抵抗に最も重要な貢献をする地層水(地下水)の比抵抗について、応用地球物理学的観点から、いろいろな考察を行なつてみた。

まず、地下水が電気探査でどのような役割りを演ずるかを概念的に論じ、次いで、それらの水、いわば地質的制約を受けて存在している水の、比抵抗を支配する諸因子について考察した。一般的には水の比抵抗はいろいろな

因子の影響を受けることが考えられるけれども、実際には水がおかれている地質的環境に制約されて、そのなかでは、特定の少数因子が重要性を有するにすぎないことが多い。電気検層解釈では主として化石水が研究対象となつており、その比抵抗についての詳細な研究報告が発表されており、実際に量的解釈にこれらの知識が導入されているけれども、淡水帯の電気検層の適用は、まだ試験段階の域をでない。そこで、淡水の比抵抗にとくに重点をおいて考察を行なつた。

各イオンの水比抵抗に対する貢献について近似的に計算を行ない、NaCl 等価量の換算係数を算出し、また、稀薄溶液において実験的に認められている事実から、淡水の比抵抗 ρ は次の式によつて計算されることを知つた。

* 物理探査部

$$\rho = \frac{m}{\sum \frac{mi}{\rho_i}}$$

こゝに ρ_i は与えられた淡水中に含まれる全電解質の全規定度 m に等しい規定度で、各成分電解質が示す淡水比抵抗であり、 mi はその成分が實際有する濃度(規定度)である。したがつて、各成分塩の分析値が得られれば、計算から水の比抵抗を求めることも可能であるし、もし、イオン濃度と固形物総量との間に一定の相関が得られるならば、水の比抵抗から逆に近似的に分析を行なう可能性を有する。

最後にこれらの結果に基づいて、水比抵抗の広い応用性を論じている。

1. 緒言

最近、電気検層技術の発展に伴つて、岩石の電気的性質を組織的に研究しようとする機運が高まつてきている。電気検層がいわば石油開発の申し子であり、これまでの岩石比抵抗の研究の主目的が、油層の比抵抗とその地質的諸特性との間の関係を法則化し、電気検層資料の量的解釈に応用することにあることに思いをいたせば、岩石比抵抗の研究を、電気検層技術と切り離して論ずることは不可能に近い。しかしながら、油層の問題に限定することなく、もつと一般的に、岩石の比抵抗の内蔵する諸問題を整理し、解決を計ることによつて、岩石比抵抗の知識の新しい応用の仕方が生れでる可能性は充分あると考えられる。もしそれがたとえ充分ではないとしても、電気検層の新分野への適用において、岩石比抵抗の系統的知識は、その適用範囲の拡大や、量的解釈の精度の向上に役立つと同時に、巨視的対象を扱う地表の電気探査に対してさえも、重要な貢献を行なうことは充分予測されるところである。

本報文においては、岩石比抵抗に重要な役割りを演じている、間隙水の比抵抗に関する諸問題を考察するものである。

2. 岩石比抵抗を支配する因子

岩石の導電性を支配する因子は、大別すると次のようなものである。

- (1) 岩石を構成する物質の比抵抗
- (2) 岩石の固体組織の大きさや形状
- (3) 粘土の存否とその量
- (4) 岩石の空隙を占有する液体の比抵抗
- (5) 液体の飽和度と空隙内における配置

もし、岩石が導電性鉱物で構成されて、しかも空隙を全く有しないか、空隙内に導電性溶液を全然含有しないならば、岩石比抵抗は構成鉱物の比抵抗と、その配列の

仕方によつて決定される。換言すれば、岩石の組織だけの函数となるはずである。しかるに周知のように、岩石の主要鉱物は一般に絶縁体となされうほどの高比抵抗値を有している。たとえば乾燥状態にある石英は少なくとも $10^{10}\Omega\cdot m$ 以上の値を示す。それゆゑ、乾燥した岩石の比抵抗はその造岩鉱物の比抵抗とほぼ同程度の値を示すことが期待され、実測値もこれをうらがきしている。ところが、天然の状態、つまり現場での測定値はずつと低い値を示し(高比抵抗値といわれるものでも $10^5\Omega\cdot m$ を超えることはまれである)。しかも数術に及ぶ広い範囲にわたつて変動している。特殊な例外は別として、金属鉱床では直接鉱物が重要な役割を果しているし、砂鉄が砂中に含まれている場合は、その影響が少なからず示される。また粘土は乾燥状態では絶縁体であるけれども、水分を含んでいるときは導電性粒子が存在するのと同様な働きをする。

造岩鉱物が岩石の導電性に寄与することはほとんどまれで、その主導権を握っているのは岩石中の間隙水である。そして、その変動の要因は間隙水の比抵抗と含水量である。

定性的には、間隙水の比抵抗が低いほど、含水量が大きいほど、あるいは、水が空隙を飽和していれば、孔隙率の大きいほど、岩石比抵抗は小さくなる¹²⁾¹⁸⁾。

つまり鉱物粒子の岩石比抵抗に与える影響は二次的なものであり、導電性を妨げる絶縁性固体組織といういわば消極的な意味での貢献にすぎない。しかし、この消極的貢献が数式にとり入れられ¹⁾、地質と比抵抗との橋渡しの役割りを演ずるに至つて、電気検層の解釈技術はすばらしい発展の第一歩を踏み出したのであるが¹⁹⁾、地表探査においても、このような諸関係を充分理解しておくことは、データ解釈に必要なことと思われる。

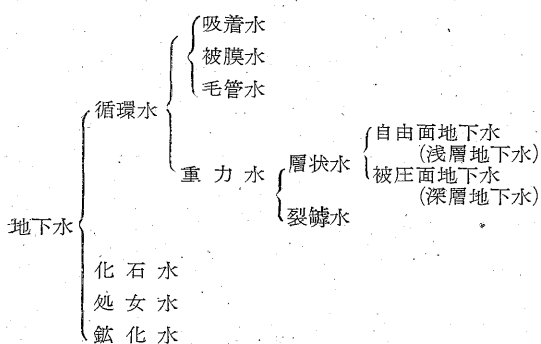
現在、諸外国では、地層の比抵抗に対する粘土の影響について、研究が集中的になされておられ、含粘土質帯油層の電気検層の量的解釈も可能となつてきた¹⁾¹⁹⁾²⁰⁾。

3. 天然における水のあり方とそれの電気探査において果たす役割

岩石の導電性に重要な役割を演じている間隙水は、それぞれ地質的制約の下に存在しており、水比抵抗もそれに伴つていろいろな因子の影響を受けるわけである。最初に天然における水のあり方を概観し、併せて、その水が電気探査の適用にどのような役割を果してきたかを考察してみよう。

地下水は水理地質学の教科書の解くところによれば、第1表のように分類される¹⁴⁾。そのうち、水理地質学的研究がまだ充分なされていない鉱化水、処女水および裂

第1表 地下水の分類 (I)



礫水を除いて岩石の比抵抗の研究という観点に立つて、第2表のように整理してみよう。

第2表 地下水の分類 (II)

- I 酸化帯……………吸着水・毛管水等
- II 淡水飽和帯…… {浅層地下水
 {深層地下水
- III 塩水飽和帯………化石水

酸化帯は気候の影響を最もよく受け、水の状態は気象条件によつて左右されやすい。さらに、表層を形成する土壌の性質は複雑多岐にわたり、電気探査における重要性の小さいことも手伝つて、酸化帯における比抵抗の問題は、あまり研究されていないように見受けられる。地表の比抵抗探査を実施するうえで、この帯域は次のことによつて影響を与える。

- (1) 接地条件
- (2) 表層効果

接地の良否が測定結果に影響を与えることが当然考えられる。接地抵抗は理論的には電極の形状と周囲の土壌の比抵抗とによつて左右されるが、実際には、そのほか、電極と土壌との密着の度合にもよる。例えば粘土質の土壌では密着性が良好であるのに反し、砂質土壌ではずつと悪くなる。一般に、土壌の水分はその比抵抗および密着性に影響を与える。

また、土質の不均質と含水量の多少によつて生ずる表層の比抵抗分布が複雑なことから、浅所の物質ほど、地表の比抵抗曲線に大きな影響を与えることから、絶対的厚度が小さいにもかかわらず、深部の探査対象の徴候を遮蔽することがある。自由地下水面が浅い場合には、毛管水がこの帯域の比抵抗に及ぼす効果は大きい。地下水面に達するまで、水分は深さとともに増加し、したがつて、土壌の比抵抗は減少することが多い。この減少の仕方については、なんらの報告もないけれども、これが比抵抗曲線の解析精度にひびくというので、土壌比抵抗が深さとともに、連続的に変化する場合の比抵抗曲線が、若

干計算されている¹⁰⁾¹⁵⁾。深部を対象にした探査では、上層を適当な等価層におきかえて解析することが多く、これらの変動は大して問題にするには及ばないが、10数mの深さのものを対象にする場合には、多少の影響を与えるようである。要するに、酸化帯が比抵抗探査で占める役割は積極的なものでなく、妨害的なものであるといえよう。

酸化帯が電気探査において重要性に欠けるのに対し、飽和帯はしばしば探査の対象となる。浅層地下水は気象条件によつても影響されるほか、そのあり方については地質および地形の両者の影響を同時に受ける。浅層地下水の上限を形成する自由地下水面は、必ずしも帯水可能層の形状を表わさない。このことは浅層地下水の電気探査にあつて重要なことがらである。垂直探査の解析から得られる境界は、原理的には帯水層(帯水可能層)の上限でなく、自由地下水面であり、したがつて、固定的なものではない。実際には解析精度の関係から、自由地下水面と帯水層の上限とのいづれとも区別つかないことがしばしばある。筆者の経験によれば、豪雨の前後で測定した結果に明瞭な差が認められた。これは、降雨による地下水面の上昇によるものである。ことに小規模な宙水性の帯水層の場合に著しい。

また、他の対象の水平探査で、地形の影響を考慮せねばならない時、いわゆる幾何学的地形効果、いわゆる、岩質の差から生じた地形効果のほかに、地下水面の形状に由来する見掛けの地形効果が比抵抗曲線に入ってくる点でも重要なことである。

Heiland は帯水層と上下層との関係によつていろいろな型の比抵抗曲線が得られることを模式図で示している⁹⁾。帯水層の徴候は、上層および下層と帯水層との関係により、必ずしも一定の形で現われるわけではないので、予想される帯水層の規模、厚さ、周囲の地質条件等を勘案して探査を行なわないと、全く逆の結論を招くことさえありうる。

一方、深層地下水、すなわち、被圧面地下水の上限は帯水層の上限と一致する。したがつて、地表の測定曲線に反映するに足る厚さと、上下層との間の比抵抗差を有するならば、原理的には解析から帯水層をとらえることが可能である。しかし、実際には、個々の帯水層の相対厚度(被覆全層の厚さに対する帯水層の厚さの比)が1より小さいのが普通である¹⁶⁾。多くの場合多少の比抵抗差があつたとしても、特定の帯水層を検知することは困難で、電気探査から判読できるものは帯水層群(もしくは、不透水層群)であつて、個々の帯水層ではない。

深層地下水の水量、水質が気候・気象条件によつて左右される度合は深さとともに減少し、大量の水が集水で

きる点等から、工業用水や農業用水として利用されることも多いので、電気探査あるいは電気検層の利用をもつと考える必要があろう。

さて、これまで述べてきた地下水は循環水で、特殊な地域を除いて、淡水であり、その比抵抗も高く数 $10 \Omega\text{-m}$ 以上の値を示す。

ところで、化石水は堆積時に地層内に閉じこめられた古い時代の塩水で、場合によつては海水よりも濃度が高く、比抵抗はきわめて低い。さらに、一般に深所に存在するため、地温上昇の影響を受けて比抵抗は常温の値より低くなる。油層の電気検層の量的解釈を可能とした理由の1つは、この塩水の存在に負うところが大きい。もし、淡水であつたならば、多分、現在のような成功を取めるに至らなかつたであらう。

地層の多少の緻密化にもかかわらず、化石水の低比抵抗は、一般に、地層の比抵抗を減少する。この低比抵抗は、化石水帯水層群の上限、もしくは基盤のもとと緻密質岩石の深度および形状を地表探査から求めることに利用できるであらう。わが国においては、それほど深部探査は施行されていないが、本所では大島において最大電流電極間隔 2~300 cm に及ぶ垂直探査法を試験的にこなつたが¹⁾、これはおそらくわが国でこれまで実施された最大の深部探査であらう。ヨーロッパ諸国、ことに仏・ソ両国では、電気探査が地震探査とならんで、あるいはその補助として、石油探査に利用され、かなりの成功を取っている。

4. 水の比抵抗に影響する諸要因

前節では、水の“あり方”とその差異が、電気探査にどのような形で結びつきうるかについて、きわめて概念的に述べた。この節では、それぞれ区分された水が、その地質的制約の下で受ける各種の因子の影響について考察してみよう。

水の比抵抗を、それに関係すると思われる種々の因子の函数として、簡単な数式で表わしうるならば、実用上、すこぶる有用である。しかし、これを一般的に取扱うことは困難であるので、それぞれの環境に応じた函数関係を研究してゆく方が實際的であらう。

普通、水の比抵抗を左右する因子として、組成・濃度および温度が考えられる。

天然の水は組成・濃度とも、きわめて広範な変動範囲を有しており、しかも、地温変動に伴う水温変化も著しいものがある。したがつて、天然の状態で観測される水の比抵抗は、広域にわたつて分布している。

最高は雨水の $10^3 \Omega\text{-m}$ から、最低は海水あるいは化石水の $0.1 \sim 0.01 \Omega\text{-m}$ 台に至るまで、数桁に及ぶ変動域

を有している。しかし、それぞれの環境に支配される水は、もつと狭い変動範囲をもつにすぎず、また、比抵抗を支配する各因子も、環境の差異に応じて、重要性が増したり、減じたりする。例えば、化石水の比抵抗の研究においては、組成の因子の重要性は減少するが、温度変化の影響は重要である。一方、淡水帯では、温度差が影響する程度は僅少であり、濃度もそう高濃度になることはないけれども、化石水のように NaCl 成分だけが卓越することがないので、組成の多様性が問題になる。飽和帯においては一応水が地層を飽和していると考えてさしつかえないので、飽和度を問題にする必要はないけれども、石油・ガス鉱床の電気検層では、油が水にとつて代つて岩石内の空隙を一部ないし全部飽和するので、逆に、水で完全飽和していると仮定した場合の比抵抗値と、実際の比抵抗値とを比較することによつて、油・ガスの飽和度を求めることが可能である。酸化帯では水の比抵抗のみならず、飽和度が岩石の比抵抗に影響を及ぼす。

つまり、油層の電気検層で成功を取めた解釈技術は、そのままの形で淡水帯に適用しようとするとき大きな誤差を招きやすい。

天然の水の導電性可溶成分は、アルカリ金属、もしくは、アルカリ土金属の塩化物、硫酸塩および炭酸塩がおもであり、その他の金属塩は比較的少ない。これらの成分は水の流動により周囲の可溶性物質の補給を受けてできるものであるから、水の径路を形成する地層の鉱物組成が、水の可溶性成分の数を決定し、供給源からの距離や地層構成粒子の粒度および流速等の諸条件が濃度を左右する。地質条件の違いや気候・気象条件の差異が水質に大きく影響することは事実であつて、わが国における地下水の性質が、大陸に比較して明らかな違いを示すのも、これらの理由による。また、山間水が沖積平野の水よりも一般に比抵抗が高いことも、先に述べた諸条件の差が、溶解の難易の差となつて現われたものである。

同じ供給源、同じ帯水層に属する水は一定の環境のなかにあるために、その比抵抗値は必ずしも等しくはないとしても、ある法則にしたがつて変化することが予想される。また、異なるグループに属する水が接触している地帯では、なんらかの不連続をもたらすと想像される。蔵田らが、水比抵抗を地下水調査に利用しているのも¹⁴⁾、基本的には同じ概念に基づいているものと解せられる。彼らは水比抵抗分布の形状から、地下水の流動径路、帯水層の追跡、あるいは各水系の比較等が可能であるといつている。実際、同じ供給源を有する同一帯水層に属する水が、ある一定の系列で変化してゆく場合は、かなり認められるようである。

化石水が組成の多様性という複雑な影響から解放されて、NaCl の濃度と温度だけの函数として、その比抵抗を近似的に表わすことが可能となり、電気検層に利用されているが、同じ思想の下に、電気検層を地下水調査へ応用する試みも発表されている。しかし、純度の高い部分で、水質と比抵抗との間の関係を定量的に論ずることは難しいのではないと思われる。

5. 溶液の比抵抗と組成・濃度との関係

電解質溶液の比抵抗は、その電解質の濃度 C における当量電導度を Λ_c とするならば、次の式によつて濃度の函数として表わされる。

$$\rho_w = \frac{10}{\Lambda_c m} \dots\dots\dots (1)$$

ここに

ρ_w —溶液の比抵抗で $\Omega\text{-m}$ で表わされたもの

m —溶液 1 l 中に含まれる電解質のグラム当量数

Arrhenius の電離説にしたがつて、その電解質の電離度を α とすれば、当量電導度はイオン易動度と次の式で結びついている。

$$\Lambda_c = \alpha F (l_{ca} + l_{ck}) \dots\dots\dots (2)$$

無限に稀積したときは $\alpha=1$ となり

$$\Lambda_0 = F (l_{0a} + l_{0k}) \dots\dots\dots (3)$$

である。ここに F は Faraday 常数で、 l_{ca} と l_{ck} とは与えられた濃度における陰陽両イオンの易動度である。 l_{0a} と l_{0k} は無限稀積時におけるイオン易動度で、各イオンに固有な値を有し、通常 $\lambda_0^+ = F l_{0c}$ および $\lambda^- = F l_{0a}$ で表わされた量、すなわち、無限稀積における陽イオンおよび陰イオンの当量電導度が用いられる。おもなイオンの当量電導度が第 3 表に示してある。

第 3 表 主要イオンの無限稀積溶液における当量電導度 (25°C)

| イオン | λ_0^+ | イオン | λ_0^- |
|------------------|---------------|-------------------------------|---------------|
| H ⁺ | 349.8 | OH ⁻ | 198.6 |
| Na ⁺ | 50.1 | Cl ⁻ | 76.35 |
| K ⁺ | 73.5 | HCO ₃ ⁻ | 44.5 |
| Mg ²⁺ | 53.0 | SO ₄ ²⁻ | 80.0 |
| Ca ²⁺ | 59.5 | CO ₃ ²⁻ | 69.3 |

(1) は (2) を利用して

$$\rho_w = \frac{10}{\alpha F (l_{ca} + l_{ck}) m} \dots\dots\dots (4)$$

のようにかきかえることができる。この式は、与えられた電解質溶液の濃度 m において、 α , l_{ca} および l_{ck} が既知であれば、計算によつて溶液の比抵抗を決定しうる

ことを示している。

ところで、岩石内に含まれている水は各種の塩を溶解し、そのなかにはいろいろなイオンが存在しているの、水の比抵抗を表わす式は一般に次の形をとる。

$$\rho_w = \frac{10}{F \sum (\alpha_a l_{ca} m_a + \alpha_k l_{ck} m_k)} \dots\dots (5)$$

ここに、 m_a と m_k とは各イオンの濃度 (溶液 1 l 中のイオンのグラム当量数) で、 α_a と α_k とは各イオンの関与する成分塩の電離度である。

α は無限稀積時で 1 の値をとり、濃度の増加とともに減少するが、淡水では 1 に非常に近い値をとると考えられる。また、イオン易動度は溶液の粘性に逆比例するとみなされるが、一定温度においては、濃度の増加による粘性の上昇はごく僅かであるので、イオン易動度に対する濃度の影響は大したものではないと考えられる。したがつて、近似的には ρ_w の変化に影響するものは濃度だけであるとみなしてさしつかえない。しかし、海水浸入帯帯化石水帯では、高濃度であるので、電離度やイオン易動度の変化も認められ、上の場合に較べてもつと複雑な形で影響を与える。

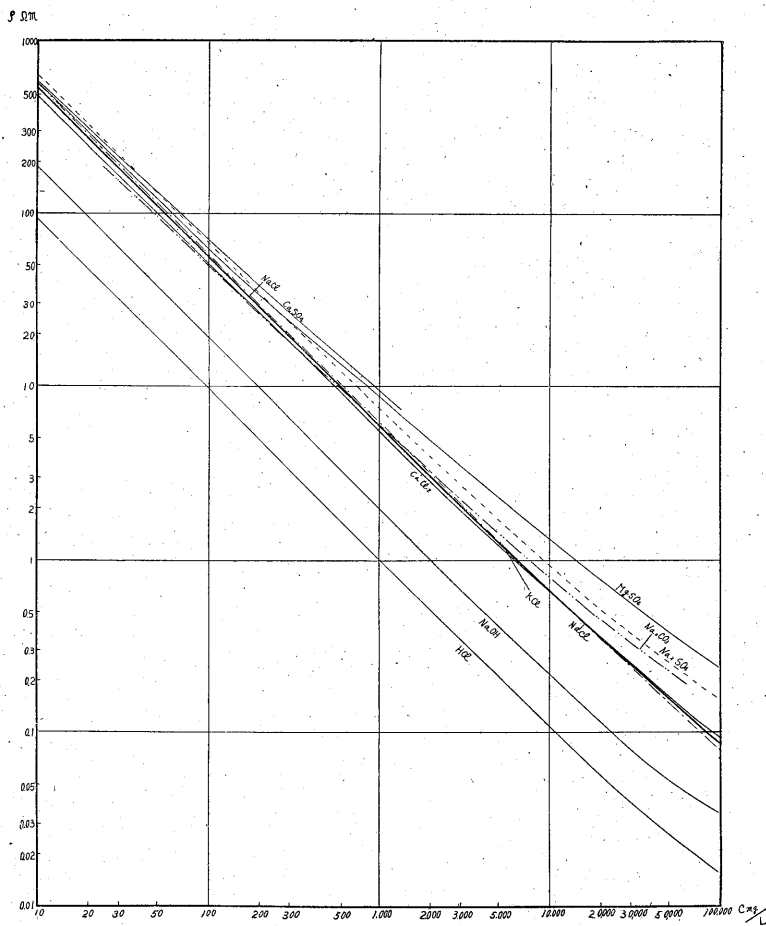
次に、溶液比抵抗に及ぼす組成の差異の影響を考察しよう。普通の地層水にみられる主要イオンの易動度は、互いにそれほど著しい差は認められない (第 3 表参照) ことと、電離度に大した差がないと仮定することによつて、地層水の溶解成分の全濃度が卓越成分のそれであるとみなしても、実際上さしつかえない場合が多い。とくに、NaCl が主成分をなす化石水にあつては、可溶成分全部が NaCl であるとして取り扱つても、大した影響を生じないことが多いようである。それで、組成の及ぼ

第 4 表 各種イオンの比較電導度

| 陽イオン | 比較電導度 | 陰イオン | 比較電導度 |
|------------------|-------|-------------------------------|-------|
| Na ⁺ | 1.00 | Cl ⁻ | 0.99 |
| K ⁺ | 0.86 | SO ₄ ²⁻ | 0.76 |
| Ca ²⁺ | 0.92 | CO ₃ ²⁻ | 1.06 |
| Mg ²⁺ | 2.00 | HCO ₃ ⁻ | 0.33 |

第 5 表 各種塩溶液の比較電導度

| 塩の種類 | 比較電導度 | 塩の種類 | 比較電導度 |
|---------------------------------|-------|---------------------------------|-------|
| NaCl | 1.00 | NaHCO ₃ | 0.52 |
| KCl | 0.95 | CaCO ₃ | 1.20 |
| CaCl ₂ | 1.13 | MgCO ₃ | 1.34 |
| Na ₂ SO ₄ | 0.85 | Na ₂ CO ₃ | 1.04 |
| CaSO ₄ | 0.95 | | |
| MgSO ₄ | 1.02 | | |



第1図 各種溶液の濃度—比抵抗曲線図 (18°C)

す影響は、濃度の場合ほど重要性がないことがうかがわれる。しかし、もう少し定量的に組成の差異が比抵抗に及ぼす効果の程度をみるため、次のような考察を行なってみよう。

イオン当量電導度をそのイオンの当量で割った値は、イオン易動度が濃度に関せず一定で、電離度も濃度によって大した影響を受けないと仮定した場合の比較電導度を与え、あるいは濃度換算率を示すものである。例えば、 Na^+ イオンは 25°C で 50.1 なる当量電導度を有し、上に述べた比は 2.18 となり、 Mg^{2+} イオンは 4.36 となる。 Mg^{2+} イオンは Na^+ イオンのちょうど倍の値を示すことになるが、比抵抗への貢献という点からいえば、 Na^+ イオン 2 ppm が Mg イオン 1 ppm と等価であることを示している。主要イオンの換算係数を第4表に示す。この表では便宜上 Na^+ イオンの電導度を1としてある。

同じようにして、いろいろな電解質溶液の比較電導度

が第5表に示してある。これによれば、主要な塩溶液の比抵抗は mg/l (または ppm) で表わした濃度が等しければ、塩の種類が異なっても、溶液の比抵抗に大した変化をもたらさないことが推定される。表中、最高の MgCO_3 と最低の NaHCO_3 とで約 2.5 倍の開きがあるが、いろいろな塩が混じり合っているとみなされる地下水では、特殊の場合を除けば、組成による差異が、大幅に比抵抗に影響することはないと考えてよいであろう。

第1図は 18°C における各種の塩溶液の濃度—比抵抗曲線を示すが、前述の考察を裏付ける結果が得られている。この図 International Critical Tables¹¹⁾ のデータを利用して作ったもので、比較のために HCl および NaOH の曲線が併示してある。この両曲線とも NaCl 曲線には平行しているが、はるかに低い比抵抗値を示している。これは H^+ および OH^- イオンの易動度が他のイオンに比較して著しく大きいことによる。その他の曲線は NaCl 曲線に接近していて、濃度の増大に伴って、

開きが、大きくなつてゆく。これは前の考察における仮定が濃度の大きいところで成り立たなくなるためと解釈される。

濃度が低くなれば、各濃度—比抵抗曲線は直線状になり、横軸とのなす角度は 135° に近づく。これは電離度とイオン易導度が一定値に近づくためで、この部分では水溶液の比抵抗は濃度と逆比例の関係があるとしてよい。

第1図の NaCl 曲線の直線部分 (10~1,000 mg/l) は

$$\log \rho_{\omega} + e \log C = \log A' \dots\dots\dots (6)$$

の形で表わされるが、 $b \cong 1$ であるから

$$\rho_{\omega} = \frac{A'}{C} \text{ (mg/l)} \dots\dots\dots (7)$$

$$A' = 5500 \text{ (18}^\circ\text{C)} \dots\dots\dots (8)$$

となる。

他の塩溶液でも同じ範囲では $A = 5000 \sim 9000$ であるので、濃度から比抵抗を概算するには $A' = 5000$ もしくは 6000 を採用すればよい。

Guyod は油田地帯の地層水は $5,000 \sim 150,000 \text{ mg/l}$ 程度の濃度の NaCl を含んでおり、この範囲では次のような近似的関係が成り立つといっている⁷⁾。

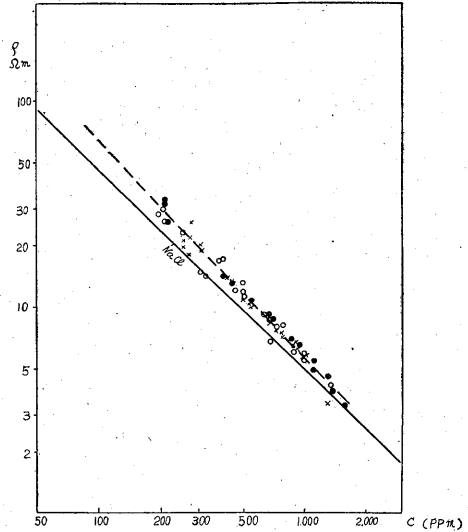
$$\rho_{\omega} = \frac{5000}{C} \dots\dots\dots (9)$$

また、固形物総量と比抵抗との間にも類似した関係がみられることが予想される。第2図は Jones and Buford が同一帯水層における固形物総量に対する比抵抗の関係の例を図示したものを、NaCl 曲線と合わせて両対数方眼紙上に表現してみたものである¹³⁾。この図で低濃度で NaCl 曲線との差が大きく、高濃度になるにつれて同曲線に近づく傾向にあるのは、低濃度では NaCl の量は比較的重要なでなくなり、おそらく他の成分の影響が強くなっていくのではないかと解釈される。

1種類以上の強電解質を含む稀薄溶液中では、それぞれ電解質の電離度、したがって当量電導度は、その電解質が全含有電解質の規定度の総計と同じ規定度で、単独に存在した場合に与うべき電離度、あるいは当量電導度と同一の値を示す。この事実は共通イオンを有する場合のみならず、共通イオンをもたない電解質の間にも成立することが、Sherrill によつて実験的に証明された。全濃度を m 規定度とすると、この事実から次のような数式が導かれる。

$$\rho_{\omega} = \frac{m}{\sum \frac{m_i}{\rho_i}} \dots\dots\dots (10)$$

こゝに ρ_{ω} は混合溶液の比抵抗、 ρ_i は各成分電解質が



第2図 同一帯水層の固形物総量と水比抵抗との関係の1例
同じ帯水に属するものは同じ印を付してある。いずれも
25°C に換算した値である。

与えられた混合溶液中に含まれる全電解質の規定度で表わした全濃度 m に等しい濃度 (規定度) で、単独に存在するときを示す溶液比抵抗であり、 m_i は実際その溶液中に存在する成分塩の濃度 (規定度) である。

この式は淡水の可溶成分が分析から得られれば、上の式と各塩の濃度—比抵抗曲線とから比抵抗が決定されることを示している。濃度が高くなつた時、上の実験事実が成立するかどうか、まだわかっていないようであるが、少なくとも、われわれの関与する地層水では、近似的に成り立つとみてよからう。

以上の考察においては、電離説にしたがつて、組成・濃度の影響について論じたものであるが、もつと立ち入った考察を進めるためには、イオン引力説による必要がある。現在の目的に対しては、電離説で充分であると思われるので、イオン引力説のたすけを借りずに考察を進めたい。

前にもふれたように、組成の影響を考えるのに、適当な換算係数を用いて NaCl だけの溶液におきかえることが可能である。電気検層の解釈において必要な塩水の比抵抗は、普通 S. P. 曲線から求められるが、これが不可能な場合、もし、地層水の分析結果が得られているならば、計算によつて、地層水の比抵抗を求めよう。現在、一般によく利用されているのは Dunlap and Hanthorne の方法であろう⁹⁾。彼らは他のイオン濃度の比抵抗に対する寄与を NaCl のそれに換算して、NaCl の濃度—比抵抗曲線から比抵抗を求める方法を提案している。その換算係数は実験的に決められたもので、第6表に掲げてあ

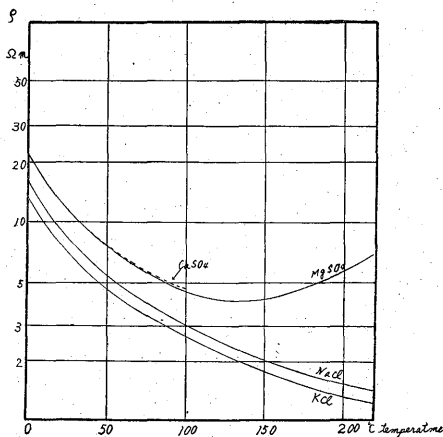
る。しかし、広範囲に変化する濃度・温度の影響を、特定の値として表わすことは一般には不可能であろう。したがって、この方法は NaCl が主成分である水に対して、他の塩の影響を考えねば誤差が大きい場合に適用されるもので、条件が異なつてくれば別の換算係数を用いねばならない。

第6表 水比抵抗算出用の換算係数

| | | |
|------------------|-----------------------------|-------------|
| Na | ppm × 1.00 = N ₁ | 等価 NaCl ppm |
| Ca | ppm × 0.95 = N ₂ | 〃 |
| Mg | ppm × 2.00 = N ₃ | 〃 |
| Cl | ppm × 1.00 = N ₄ | 〃 |
| SO ₄ | ppm × 0.50 = N ₅ | 〃 |
| HCO ₃ | ppm × 0.27 = N ₆ | 〃 |
| CO ₃ | ppm × 1.26 = N ₇ | 〃 |
| ΣN _i | = 全等価 NaCl ppm | |

6. 温度圧力と比抵抗との関係

すでに述べたように、深度を増すにつれて地下水の温度も増加する。地下 1,000 m の深所に存在する化石水について考えると、地温増昇率を 0.03° C/m として、地表の温度を 20° C とすれば、その温度は約 50° C になり、3,000 m の深さでは約 120° C となり、観測する温度範囲は相当広い範囲に及ぶ。温度が地下水に及ぼす影響は濃度ほど著しいものではないとしても、相当の重要性をもつことは、NaCl の濃度が 1,000 mg/l から 10,000 mg/l まで増したとき、比抵抗が 1/10 に減ずるのに対して、温度が 0° C から 100° C まで上昇するとき、比抵抗が 1/5 に減ずることからうかがえる。第3図に温度と各種溶液の比抵抗との関係を示す。



第3図 各種溶液の比抵抗と温度との関係 (m=0.01 N)

温度の上昇に伴ない、水の粘性係数は 1° C について約 2.5% ずつ低下し、水溶液の比抵抗もほぼこれと同じ

程度で減少する。これはイオン易動度が粘性と逆比例の関係にあるからである。ところで、水の誘電率は温度の上昇とともに低下するので、水の電離させる能力は減少してくるはずである。このことは前と逆に比抵抗を増加する因子として作用する。実際には、低温では前者の影響が大きく、高温になると後者の影響が次第に重要になり、ある温度で極小値を通過することになる。第2図の MgSO₄ がその例である。NaCl でも温度の上昇に伴ない、その比抵抗の減少率は次第に小さくなる。

それぞれの濃度における温度—比抵抗曲線は、互いに類似した形状を示す。t° C と t'° C における比抵抗を、それぞれ ρ_t および ρ_{t'} とすれば、ρ_t/ρ_{t'}—t 曲線はかなりの近似で濃度には関係しないことが実証されている。

この関係を示す実験式としては、Dakhnov は次のような関係式を発表している。

$$\rho_t = \frac{\rho_{18}}{1 + \alpha + (t - 18)} = \rho_{18} \rho_t \quad t > 0^\circ\text{C} \quad (11)$$

ここに、ρ₁₈ および ρ_t は 18° C および t° C における溶液の比抵抗 (Ω·m) である。また、α は比抵抗の温度係数で 18~58° C で 0.025/° C の値をとる。

また、Arps は華氏で表わした温度と比抵抗との間に、次の近似的関係があると述べている。

$$\rho_t = \rho_{t'} \frac{t' + 6.77}{t + 6.77} \approx \rho_{t'} \frac{t' + 7}{t + 7} \dots\dots\dots (12)$$

次に、圧力の影響であるが、温度に較べるとはるかに重要性に欠け、実際にはほとんど無視してさしつかえない。この問題に関する Körber の実験によれば、圧力の増加とともに比抵抗は減少し、ある圧力で極小値をとる。20° C、0.01 N の濃度の NaCl 水溶液は 2000 気圧で極小値をとり、1 気圧の時の値より約 7~8% 減少するという。また Adams によれば、比抵抗に対する圧力の影響は濃度によつても差異があるが、一般に ± 5% であるという。温度によつても影響し、上昇するほどその影響は小さくなるという。圧力を加えてゆくと粘性が変化し、したがってイオン易動度が変化し、また、電離度も変わると考えられる。弱電解質では比抵抗が圧力によつて相当変化するが、これは主として、電離度の変化によるものである。これに反して、強電解質は電離度がさほど増すことは考えられないので、粘性の変化の影響の方がきいてくる。

いずれにせよ、われわれが関係する深度では、圧力の影響は無視してさしつかえないと思われる。

7. 水の比抵抗の地質調査への応用とその可能性

地下水の比抵抗の知識を地質調査に応用する可能性は、これまでの考察からもうかがえることであるが、実際、すでに油田地帯の電気検層においては、量的解釈が行なわれているし、また、他の方面への応用も次第になされるようになった。

電気検層については立派な教科書、すぐれた文献が数多く発表されているので、こゝで改めて述べるまでもなからうが、一言にしていうならば、水の比抵抗は他の測定量とともに、帯油層の状態、ことに、孔隙率と油、もしくはガスの飽和度の決定に利用されている。

普通の水井戸に、電気検層がしばしば利用されているが、水質推定に役立たせようとする試みが若干発表されている。油田地帯で成功した方法論を、そのまま淡水帯に適用するには、若干の無理はあるけれども、少なくとも、淡塩水転移帯や海水混入帯のように比較的塩分の多い地方で、くだんの水質が利用目的に対して、適当か否かの資料を与えてくれる可能性はある。Pryor は電気検層のデータを用いて、可溶成分がすべて NaCl であると仮定して求めた濃度と、化学分析から得られた塩化物の濃度、あるいは固形物総量との間の関係を図示している¹⁷⁾。これによると、NaCl 等価量が 500 ppm から 1,500 ppm まで変化するのに、塩化物の濃度は数 ppm から数 100 ppm まで変化している。これより高い濃度では、NaCl 等価量と塩化物の量とは近似的に一致する。このことは少なくとも 2,000 ppm 以上ならば溶解物を全部 NaCl とみなしてもさしつかえないけれども、1,500 ppm 以下では塩化物の量は次第に減少してくるので、NaCl 等価量から塩化物の量を決定するのは、誤差の大きいことを示している。しかし、彼の結果は、いろいろな地層から得られたものであるので、上に述べた相関も少しばらついている。

Jones らは同一帯水層で、固形物総量に対する各イオン濃度の相関をあらかじめ求めておき、また、固形物総量と水の比抵抗との関係を調べておけば、水比抵抗の測定から、各イオン濃度の推定を行なうことができるとして、電気検層を水質の推定に応用している¹⁸⁾。このことが可能なのは、固形物総量と各イオン濃度との間に相関がある場合に限るわけであるが、例えば、海水では塩素量と塩分との間に、一定の関係があることが実証されているように、少なくとも、狭い範囲の環境においては、上のような相関が成り立つことが可能であろう。

蔵田らは水比抵抗の水理地質学への応用を試みている。もし、地下水が点供給源を有し、同一媒質内を流れるならば、イオン濃度は供給源からの距離の函数として

表わされ、水の比抵抗は遠方にゆくにしたがって低くなる。他の条件が全く等しければ、媒質を構成する粒子の接触面積が大きければ大きいほど、すなわち粒度が小さければ小さいほど、イオン濃度は高くなり、比抵抗は低くなる。したがって各環境に対する経験式として表わすことに成功するならば、水比抵抗は水理地質学へもつと貢献することになるであろう。

淡水に電気検層を適用するとき、あるいは測定によらず水比抵抗を求めたいとき、5. で考察したように、分析値があれば計算から比抵抗を求めることも可能である。

地表の比抵抗法に対する水比抵抗の役割りについてはすでに 3. に述べている。もし、調査前に附近の水の比抵抗あるいは分析値が得られているならば、そして、帯水層の厚さ等に関する推定が可能であるならば、非団結性砂礫についての Archie の式を利用して、帯水層の比抵抗 ρ を推定することができる。

$$\rho = \rho_w \frac{1}{\phi^{1.3}} \dots \dots \dots (13)$$

こゝに、 ϕ は地層の孔隙率であり、沖積層ならば適当な推定値を与えることができる。帯水層が浅ければ、比抵抗曲線から ρ が決定され、推定した比抵抗との差異について論ずることもできる。深い場合には、粘土と砂礫層の互層による擬似異方性の大小についての資料ともなり、解釈に役立たせることも可能である。

例えば Flathe⁹⁾ は海岸地帯における比抵抗探査から (13) 式を用いて、海水の浸入の状態を推定している。

8. 結 言

岩石の間隙水は岩石比抵抗に重要な役割を演じており、反面、地質的な制約を受けて存在しているので、水比抵抗もいろいろな因子の影響を受けている。一般的には水の比抵抗は、組成・濃度および温度の函数として表わされ、これらの因子は自然界で相当な変動範囲をもつので、水比抵抗を地質調査に応用することは一見難問であるけれども、水が地質的制約のなかに存する限り、一定の地質条件のなかで、これらの因子のあるものは重要性を減じたり、無視して構わないようになり、あるいは地質的な結びつきも可能となることも考えられるので、広い分野へ利用できるのではないかとも思われる。こうした事情が研究によつて漸次わかってくれば、簡単に測定できる水比抵抗の重要性は増してくるであろう。

今回の考察では、いわゆる層状水を主として考えたが、鉱山の物理探査という点を考慮すれば、裂隙水の問題もおざりにすることはできない。現状では水理地質学においても、あまり研究が進められていないようであるが、少なくとも電気探査の立場から、今後この裂隙水

と比抵抗とのいろいろな関係を研究する必要があると思われる。

(昭和32年8月稿)

文 献

- 1) Archie, G. E. : The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics, Trans. AIME., Vol. 146, p. 54~62, 1942
 - 2) Arps, J. J. : The Effect of Temperature on the Density and Electrical Resistivity of Sodium Chloride Solutions, Trans. AIME., Vol. 198, p. 327~330, 1953
 - 3) Dakhnov, V. N. : 石油・天然ガス鉱床の電気探査(露文), Moscow, 1953
 - 4) de Witte, L. : A Study of Electric Log Interpretation Methods in Shaly Formations, Jour. Petroleum Techn., Vol. 7, No. 6, p. 103~110, 1955
 - 5) Dunlap, H. F. & Hanthorne, R. R. : Calculation of Water Resistivities from Chemical Analyses, Trans. AIME., Vol. 192, p. 373~375, 1951
 - 6) Flathe, H. : Possibilities and Limitations in Applying Geoelectrical Methods to Hydrogeological Problems in the Coastal Areas of North-west Germany, Geophysical Prospecting, Vol. 3, p. 95~110, 1955
 - 7) Guyod, H. : Fundamental Data for the Interpretation of Electric Logs, Oil Weekly, Vol. 115, No. 8, 1944
 - 8) Heiland, C. A. : Geophysical Exploration, Prentice-Hall, New York, 1946
 - 9) Hill, H. J. & Milburn, J. D. : Effect of Clay and Water Salinity on Electrochemical Behavior of Reservoir Rocks, Jour. Petroleum Techn., Vol. 8, No. 3, p. 65~72, 1956
 - 10) Huber, A. : Über der Einfluss der Bodenfeuchtigkeit auf geoelektrische Tiefenmessungen, Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Vol. 3, p. 330~338, 1951
 - 11) International Critical Tables, 1929
 - 12) Jakosky, J. J. & Hopper, R. H. : The Effect of Moisture on the Direct Current Resistivities of Oil Sand and Rocks, Geophysics, Vol. 2, No. 1, 1937
 - 13) Jones, P. H. & Buford, T. B. : Electric Logging Applied to Groundwater Exploration, Geophysics, Vol. 16, No. 1, p. 115~139, 1951
 - 14) 蔵田延男 : 水理地質学, 朝倉書店, 1955
 - 15) Mooney, H. M. : Effect of a Variable Surface Layer on Apparent Resistivity Data, Mining Engineering, Vol. 6, No. 11, p. 121~124, 1954
 - 16) 小野吉彦・室住正義・本間一郎 : 成層構造の比抵抗探査について, 地質調査所月報, Vol. 9, No. 6, 1958
 - 17) Pryor, W. A. : Quality of Groundwater Estimated from Electric Resistivity Logs, Illinois State, G. S. Circular, 215, 1956
 - 18) Sundberg, K. : Effect of Impregnating Waters on Electrical Conductivity of Soils and Rocks, Trans. AIME., Geophysical Prospecting, p. 367~391, 1932
 - 19) Wyllie, M. R. J. : The Fundamentals of Electric Log Interpretations, p. 126, Academic Press Inc. (New York), 1954
 - 20) Wyllie, M. R. J. & Southwick, P. E. : An Experimental Investigation of the Self-potential and Resistivity Phenomena in Dirty Sand, Trans. AIME., Vol. 201, p. 44~57, 1954
- その他参考にしたものとして
- Robinson, R. A. & Stokes, R. H. : Electrolyte Solutions, Butterworth Scientific Publication, London, 1955
- Jhonson, M. : Theoretical and Applied Electrochemistry