

# 水の遠隔電磁探査における誘電分散の基礎研究

松本裕史、茂田直孝、熊澤峰夫、中島崇裕  
核燃料サイクル開発機構東濃地科学センター

## Basic study of dielectric dispersion for remote observation of water by electromagnetic method

Hiroshi Matsumoto, Naotaka Shigeta, Mineo Kumazawa and Takahiro Nakajima  
Tono Geoscience Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC)

### 1. はじめに

岩石の電磁物性（誘電率  $\epsilon$ 、電気伝導度  $\sigma$ 、あるいは複素誘電率  $\epsilon^* = \epsilon + \sigma/i\omega$ ）はわずかな含水で大きく変化する。含水により誘電率の分散性が現れ、誘電率はキロヘルツ以下の低周波で周波数に逆相関して増加し、ミリヘルツでの誘電率は乾燥時のそれ  $10^{10}$  F/m 以下（比誘電率  $\epsilon_r$  で 10 以下）の  $10^4 \cdot 10^6$  倍にも達する。電気伝導度は温度や含水により桁で増加するが、周波数依存性は無視できる程度に小さく、かつ  $\epsilon$  は  $\sigma$  よりも小さな量であると考えられてきたので、これまでの電気探査では  $\sigma$  が遠隔観測の主な対象であった。そこで、地殻内部の電気物性分布を電磁氣的に遠隔探査する場合、観測データの周波数依存性はすべて信号伝達の深さの効果と仮定する方法が採用されている。しかし、水の存在によって地殻内は電氣的物性に大きな周波数依存性があると予想されるので、これを考慮する電磁的遠隔探査によって、地下に存在する水とそれを介して発生する諸現象を解明する手がかりが得られると考えられる。もちろん、 $\epsilon$  の効果は小さいので、電磁アクロス（熊澤ら, 2000; 中島ら, 2000; Yokoyama *et al.*, 2002）などの高い S/N を得る観測を要する。しかし、それによって複素誘電率スペクトルの観測が可能になれば、複素誘電率から地下水の分布や岩石の含水状態に関して質的な新情報が得られるであろう（小川, 熊澤, 1996）。

含水した粘土鉱物、金属鉱物はイオン交換反応、酸化還元反応に起因する強い誘電分散を示す（ $\cot \delta = \epsilon \omega / \sigma > 0.1$ ;  $\delta$  は損失角）（Chilidze *et al.*, 2000）。誘電性の強さをを経験的にパラメーター化した IP（強制分極）法によりこれら鉱物の地下探査が行われてきた。またこれら鉱物の電磁物性研究も多い。しかし、花崗岩など多くの岩石の誘電物性は IP 法の従来精度では検出できず、その誘電物性はあまり知られていなかった。

いくつかの研究が、含水花崗岩、砂岩などで、複素誘電率の実部と虚部が周波数に反比例する「 $1/f$  型」誘電分散を報告している。我々は「 $1/f$  型」誘電分散はイオン伝導性の卓越する系が普遍的にもつ性質であり、地殻の大部分は「 $1/f$  型」誘電分散を示すのであろうと考えている。しかし「 $1/f$  型」誘電分散に関する研究例は少なく、その性質と実態は明らかにされていない。

電気物性の実験的研究は四極法および二極法によるインピーダンスあるいはアドミッタンスの測定により行われる。しかし、従来のほとんどの報告に測定法が明確に示されていない上に測定データの信頼度が明らかでない。本研究では、界面物性とバルク物性の両方の物理的理解を得られるように、（1）四極法と二極法の併用、（2）アクロス測定法の導入、（3）計測に冗長度を増やす、の三つによって信頼性と精度が高いアドミッタンスの新測定法を開拓した。

この測定法により、水の誘電分散の測定をおこない、水が確かに「 $1/f$  型」誘電分散を示すことを確

認したので報告する。また高温下でガラス、onyx も同様の誘電分散を示すことがわかったのであわせて報告する。

## 2. 「1/f」型誘電分散に関する過去の研究

いくつかの研究で複素誘電率の実部と虚部が周波数に反比例する「1/f型」誘電分散を報告している。Lockner & Byerlee (1981)は飽和花崗岩および砂岩について、Shadi *et al.* (1975)は湿った砂について「1/f」型誘電分散の観測例を報告している。Jonscher *et al.* (1978)は砂、hollanditeに「1/f」型誘電分散の観測しその原因が電荷のホッピングであるとしている。一方強い誘電体でも同様の報告があり、Dissado & Hill (1984)、Jonscher (1974)によりホッピングによる理論が提出されている。岡本、玉城 (1978)は水それ自身が「1/f型」誘電分散を示し、不純物濃度の増大にともない複素誘電率が増加することを示している。水のような均質な物質で顕著な誘電分散がおこること、しかも構造も組成も異なる含水岩石と同様の誘電分散をしめすことは注目に値する。

われわれは、「1/f型」誘電分散はイオン伝導性の卓越する系が普遍的にもつ性質であり、地殻の大部分は「1/f型」誘電分散を示すのであろうと考えている。この分散の誘電性はあまり強くない ( $\cot \delta \sim 0.01$ )、従来のIP法の精度では検出できなかったと思われる。

## 3. 複素誘電率と誘電分散

物質に外場  $E$  を加えると物質内部で正負の電荷の移動がおこる。このとき、自由電荷の巨視的な流れが生じる性質を伝導性とよびその強さを  $\sigma$  で表す。一方、電荷の有限変位による分極  $P$  を生じる性質を誘電性と呼び、その強さを誘電率  $\epsilon$  で表す。ここでは、 $\sigma$  と  $\epsilon$  を、経験則  $i_e = \sigma E$  (Ohmの法則、 $i_e$ は伝導電流)、 $D = \epsilon E$  ( $D$ は電束密度)を記述する現象論的パラメーターだとしておく。

誘電分極の生じる原因として、束縛された電荷 (たとえば原子に束縛された電子や、結晶中の陽イオン、陰イオン対) の存在や、自由電荷の滞留を生じさせる、物質内部の局所的な  $\sigma$  の不均質性が挙げられる。また粘土鉱物のイオン交換反応、金属鉱物の酸化還元反応も誘電分極が生じる原因となる。

電気伝導度  $\sigma$ 、誘電率  $\epsilon$  を持つ物質に非定常電場  $E$  を加えると電流  $i = i_e + i_d = \sigma E + \epsilon \partial D / \partial t$  が生じる。

交流電場  $E = E_0 e^{i\omega t}$  の場合、電流  $i$  と電場  $E$  の関係は次のようになる。

$$i = (\sigma + j \omega \epsilon) E = \sigma^* E \quad (1)$$

$$i = i \omega (\epsilon + \sigma / j \omega) E = i \omega \epsilon^* E \quad (2)$$

ここで  $\sigma^* \equiv \sigma' + i \sigma'' = \sigma + i \omega \epsilon$  は複素電気伝導度、 $\epsilon^* \equiv \epsilon' - i \epsilon'' = \epsilon + \sigma / i \omega$  は複素誘電率である。

一般に  $\sigma, \epsilon$  は周波数の関数であるが、含水岩石では一般的に  $\sigma$  に比べ  $\epsilon$  の分散性が顕著であるため、電磁物性の分散性の表現には  $\epsilon^*$  を用いるのが適当である。

$\epsilon^*, \sigma^*$  の実部と虚部の比  $\epsilon'' / \epsilon' = \sigma' / \sigma'' = \sigma / \epsilon \omega$  は物質を流れる伝導電流と変移電流の大きさの比を表し、一般に損失角  $\delta = \tan^{-1}(\sigma / \epsilon \omega)$  または  $\tan \delta = \sigma / \epsilon \omega$  の形にして誘電損失の大きさを表す指標としている。 $\epsilon, \sigma$  が周波数によらず一定値  $\epsilon_0, \sigma_0$  であっても、(1)、(2)式に従い複素誘電率と  $\tan \delta$  は周波数依存性を持ち、特性周波数  $f_c = \sigma / 2\pi \epsilon$  より高周波で  $\tan \delta < 1$ 、低周波で  $\tan \delta > 1$  となる。これは低周波では伝導電流が支配的となり電磁波は拡散波の形で伝播し、高周波では変位電流が支配的となり電磁波は波動として伝播することを示している。含水岩石では誘電分散がおこり低周波で  $\epsilon$  が増加するが、これは拡散

性の電磁波が波動性を持つことを意味しており、電磁探査にとって重要な意味を持つ。

「1/f型」誘電分散では複素誘電率は以下のような現象論的経験式で与えられる。

$$\epsilon^* = e^{i\alpha} f^n \quad (3)$$

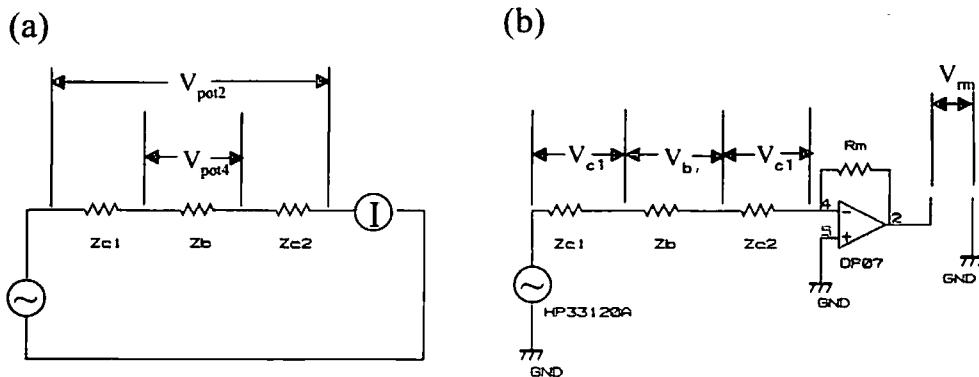
このとき  $\tan \delta = \tan \alpha = \text{const.}$  となる。これは、低周波数における電磁拡散波は、減衰が小さく遠距離まで伝播することを意味する。

#### 4. アクロス式計測による複素誘電率測定

複素誘電率を測定するには、試料に交流電圧  $E$  を印加して電流  $i$  を流し、 $E$  と  $i$  の振幅と位相を測定して (1) または (2) 式より  $\epsilon$ 、 $\sigma$  を求める。電子伝導性の電極と、イオン伝導性の岩石との界面に大量の電流が流れるとその界面に電荷がたまり分極が生じるが、この影響をさけてバルクの分極を測定するために四極法と呼ばれる電極配置が用いられる (第1図(a))。また高周波では分極の影響が小さく、簡便のため二極法が用いられる (第1図(a))。従来用いられてきた二極法、四極法に対し、我々は第1図(b)に示す4.2極法とも呼ぶべき測定法を用いた。界面を含む部分のインピーダンス ( $Z_{c1}$ 、 $Z_{c2}$ ) とバルクのインピーダンス ( $Z_b$ ) を同時かつ独立に測定することにより、相互に関連した現象の解析、および測定的不安定さやバイアス (電極と試料の接触抵抗など) をより明確に認識できる。

任意関数発生器により出力した正弦波信号をバッファアンプ (Burr-Brown INA114) を介して被測定インピーダンスに印加する。四極法の配置で電極を設置し、各電極間の電位  $V_{c1}$ 、 $V_b$ 、 $V_{c2}$  を測定する。オペアンプ (OP07) を用いた電流-電圧変換回路により電流  $I$  を電圧値  $V_m = -I \times R_m$  として測定し、インピーダンス  $Z_{c1}$ 、 $Z_b$ 、 $Z_{c2}$  を独立に測定する。電位の測定にはA/Dボード (National Instruments DAQ-Card6036E) を使い、任意関数発生器と同期させてA/D変換を行った。

測定で得られた電圧波形  $V(t)$ 、および電流波形  $I(t)$  からインピーダンスを求めるのにアクロス流のデータ処理により、インピーダンスとその測定誤差を同時に求める。その方法は、スタック後の時系列波形  $V(t_k) = V(k\Delta t)$  ( $k=0, 1, \dots, N-1$ ) に正弦波  $n$  周期が含まれるようにしておくこととフーリエ変換により得られる離散スペクトル  $V(\omega_k) = V(k/2N\Delta t)$  ( $k=-N/2-1, 0, 1, \dots, N/2$ ) から印加信号 ( $k=n$ ) とその高調波成分 ( $k=2n, 3n, \dots$ ) のラインスペクトル群と、その間に  $n-1$  本ずつ存在するノイズ成分のスペクトル群が得られる。前者を信号チャンネル、後者をノイズチャンネルと呼び、両者の振幅から信号振幅、ノイズ振幅が得られ、



第1図 (a) 四極法 ( $V_{pot4}$  および  $I$  を測定)、二極法 ( $V_{pot2}$  および  $I$  を測定) によるインピーダンス測定法。 $Z_{c1}$ 、 $Z_{c2}$  は界面を含む部分、 $Z_b$  はバルクの部分のインピーダンスを表す。(b) 測定に用いたインピーダンス測定回路。左側の関数発生器 (HP33210) で出力した信号を印加し、右側の電流-電圧変換回路

S/Nを評価できる。得られた電流・電圧スペクトル $I(\omega) \cdot V(\omega)$ の位相振幅比とその誤差からインピーダンスとその誤差を求める。

## 5. 水の誘電分散測定

脱イオン水、およびNaClを加えた溶液 ( $8.5 \times 10^{-5} \text{ mol/l}$ 、 $4.1 \times 10^{-4} \text{ mol/l}$ ) の三種の試料の複素誘電率を測定した。測定にはステンレスメッシュ電極 (40 mm × 18 mm、電極間隔18 mm) 四枚をそなえたアクリル製溶液セル (セル定数0.04 m) を用いた。

印加電圧 $V_{\text{app}} = 5 \text{ V}$ の条件で各試料の複素誘電率を測定した結果を第2図(a)、(b)に示す。第1図(b)の $Z_b$ 、 $Z_{c1}$ の部分の複素誘電率をプロットしているが、これはそれぞれ従来の四極法測定、二極法測定に相当する。水は高周波で $\epsilon' = \text{const.}$ (領域Iとする)という性質をもつが、周波数が下がるにつれ $f_{c1} = 1000 \text{ Hz}$ 、 $f_{c2} = 50 \text{ Hz}$ 、 $f_{c3} = 1 \text{ Hz}$  (NaCl濃度 $8.5 \times 10^{-5} \text{ mol/l}$ の場合) を境に $\epsilon' \propto f^{1.5}$ 、 $\epsilon' \propto f^{0.5}$ 、 $\epsilon' \propto f^{1.0}$ (それぞれ領域II, III, IVとする)という三種の誘電分散が観測されることが分かる。また $f_{c1}$ での $\epsilon'$ の変化は、二つの誘電分散過程が存在し、それぞれ電磁氣的に直列に接続されていることを、 $f_{c2}$ での $\epsilon'$ の変化は二つの誘電分散過程が並列に接続されていることを示している。

第2図 (a)、(b)の各スペクトルを、周波数を電気伝導度 $\sigma$ で規格化してプロットしたものを第2図 (c)に示す。電気伝導度 $\sigma$ の異なる三種の水が類似の複素誘電率スペクトルをもつこと、 $\sigma$ の変化により緩和周波数のシフトが起こることが分かる。低周波の領域III、IVの部分では複素誘電率は $\sigma$ の違いに依存して異なるスペクトル形を示すことがわかる。

第2図(b)の測定における電位電極波形の全高調歪み(total harmonic distortion; THD)を(d)に示す。また周波数を電気伝導度 $\sigma$ で規格化したプロットを(e)に示す。THDの増加する周波数帯と $\epsilon' \propto f^1$ なる誘電分散が現れる周波数帯に強い相関があることが分かる。THDは高調波の存在を表すが、高調波振幅が小さいときはその周波数成分のノイズ振幅に影響を受ける。THDの周波数依存性がフラットな部分はTHDがノイズ振幅より決まっている部分であり、10HzでみられるTHDのジャンプはスタック条件の違いによるものである。

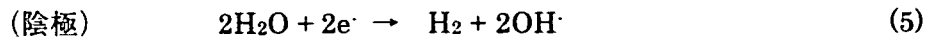
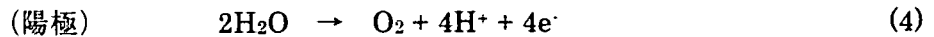
電流電極表面には電気二重層が形成されているが、この部分に加わる電圧 $V'_{c1}$ を第1図(b)の $V_{c1}$ から $V_b$ を引いて推定し、ボルタモグラム(電流電圧特性)を得た。電極間のセル定数のばらつきが存在するので、これを100Hzでのアドミッタンスの絶対値の比により補正して引き算を行った。第2図の各試料の測定に対応するボルタモグラムを第3図(a)・(c)に示す。周波数が下がると電気二重層電圧が増加し、それに伴いボルタモグラムが歪むことがわかる。第2図(d)、(e)でのTHDの増加はこのボルタモグラムの歪みを表している。

## 6. 水の誘電分散の実体論

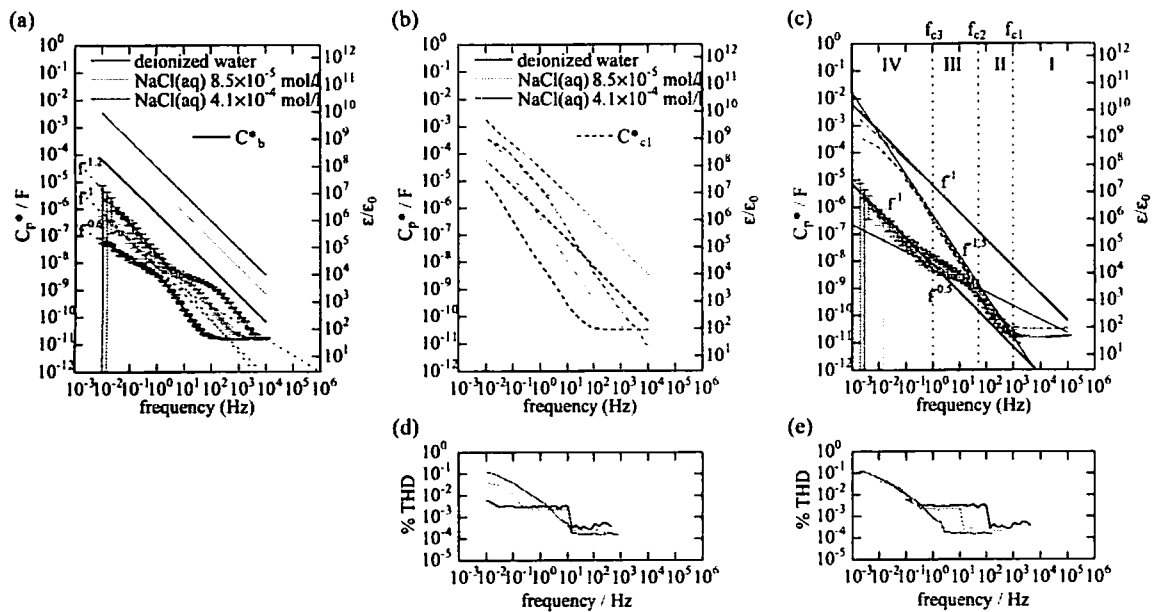
これまで見てきた水の誘電分散の実体について考えてみる。電子伝導性の金属とイオン伝導性の水の界面に電場を加えると界面に正負の電荷がたまり電気二重層ができる。この状態は界面がキャパシタンス $C$ (アドミッタンス  $Y = i\omega C$ )で表される電磁物性をもつことを意味する。一方、バルク溶液は比較的純抵抗 $R$ に近い性質を持つ。二極法相当の測定ではこの界面とバルク溶液のつくるRC直列回路を観測することに相当する。このモデルでは $f > f_c = (2\pi RC)^{-1}$ で $\epsilon' = \propto f^2$ 、 $\sigma = \text{const.}$ で $f < f_c$ で $\epsilon' = \text{const.}$ 、 $\sigma \propto f^2$ という関係が得られる。 $\epsilon'$ が $f^2$ でなく $f^{1.5}$ に比例するのは、界面がアドミッタンス $Y = (i\omega)^n C$  ( $0 < n < 1$ )

で表される比理想的キャパシタンスとしての性質をもつことに起因し、 $n=0.75$  とおくと  $\epsilon > f_c$  で  $\epsilon' = \alpha f^{1.5}$  という関係が導かれる。なお岡本、玉城(1978)の報告している水の誘電分散は第2図の二極法相当の測定とおなじスペクトルをしており、二極法により観測した界面の分極の効果を観測している可能性が高い。

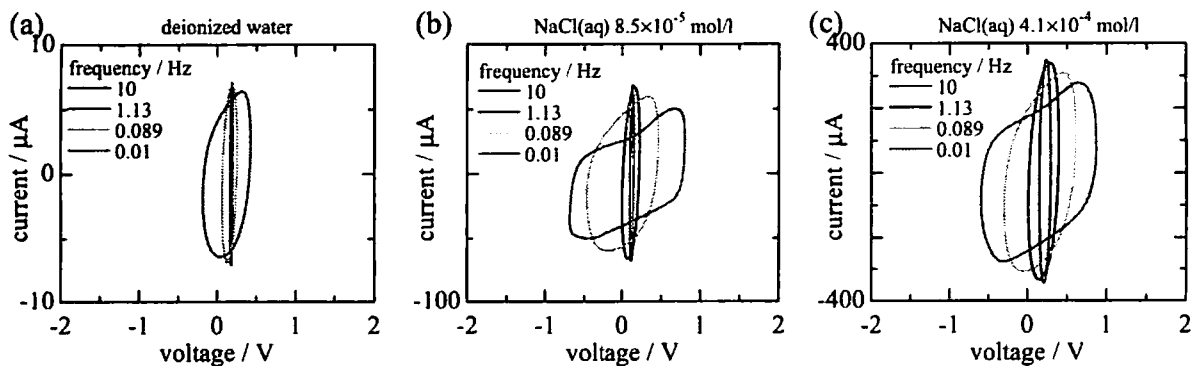
電極と水の間に大きな印加電圧を印加する、または電圧を長時間印加することにより電気二重層が発達すると、電極-水界面の電位差を駆動力として次式のように $H_2O$ の電気分解が起こる。



このような電気化学反応により、金属と水中のイオン、分子との間で電子の授受が起こり、電極をと



第2図 NaClを異なる濃度で含む水の複素誘電率スペクトル。(a) 四極法による測定。(b) 二極法相当の測定。(c) 電気伝導度 $\sigma$ で周波数を規格化したプロット。(d) 二極法相当の測定での電極電位波形の全高調波歪 (THD)、および(e) 電気伝導度 $\sigma$ で周波数を規格化したプロット。



第3図 図2の測定ので得られたデータから推察した電気二重層電圧と電解電流の軌跡 (ボルタモグラム)。測定試料は(a) 脱イオン水、および(b)  $8.5 \times 10^{-5} \text{ mol/l}$ 、(c)  $4.1 \times 10^{-4} \text{ mol/l}$  の NaCl 水溶液。

して水の中を伝導電流が流れる。先のRC直列回路モデルでは $f < f_c$ で $\sigma$ の減少が予想されるのに、二極法相当の測定で得られた水の複素誘電率では $\sigma$ の減少がわずかなのは、低周波で電気化学反応(4)、(5)がおこるためである。

反応(4)、(5)を起こすためには、電流電極間に1.2V以上の電圧を加える必要があるが、さらに電圧を上げると反応は急速に進行する。つまり、反応(4)、(5)により流れる電流(電解電流)と電極間電圧はダイオード特性を示す。

このダイオード特性は、それは第3図のボルタモグラム(推定した電気二重層電圧 $V'_{c1}$ と電流 $I$ の軌跡)から読み取ることができる。ボルタモグラムが楕円のとき、VI特性が直線(Ohmic)であることを示し、その開きは $V$ と $I$ の位相差を表す。電圧振幅が大きくなると電圧が飽和するようにボルタモグラムの形が歪むが、このひずみは電圧が上がるにつれ電解電流が急激に増加することを表している。

以上のように、二極法相当の測定で観測された複素誘電率スペクトルと、その実態である界面の電気二重層の電磁物性について一定の理解が得られた。

次に四極法で測定されるバルクの水誘電分散について考える。含水岩石でキロヘルツ以下の周波数で起こる低周波誘電分散は、イオン伝導性の異なる界面でおこる化学反応(金属鉱物の酸化還元反応、イオン交換反応)が主な原因であり、水のような均質な物質では低周波誘電分散は起こらないと考えられている。しかし、第2図はバルク部で確かに誘電分散が起こることを示している。我々はこの驚くべき実験的事実に対し、次に述べる界面での電気化学反応によりバルク部で生じる化学ポテンシャル勾配による誘電分極をそのメカニズムと考え、その物理モデルを構築しようと試みている。

電流電極における電気化学反応(式(4)、(5))により $H_2$ 、 $O_2$ が生成するが、これらはバルク部に拡散して $H_2$ 、 $O_2$ の濃度勾配を形成する。 $H_2$ (還元体)と $O_2$ (酸化体)の濃度勾配が存在すると、式(4)、(5)の逆反応が起こり、バルク溶液部に起電力が生じる。この起電力は電流電極に加えた電位差と逆向きである。つまり $H_2$ と $O_2$ の濃度勾配によりバルク部に誘電分極が生じるのである。

バルク部特有の誘電分散 $\epsilon \propto f^{0.5}$ のべき数-0.5は拡散反応が電荷移動を律速していることを示唆する。電気化学反応が進行すると電極界面とバルク溶液との間で反応物、反応生成物の拡散による輸送がおこるが、この拡散反応が電気化学反応を律速する結果、拡散反応の性質が誘電率の周波数依存性をきめていると考えられる。さらに低周波では $\epsilon \propto f^1$ なる誘電分散が起こるが、これは電場を印加した時間に比例して反応が進行しエネルギーが蓄積されるという電気化学反応の性質を反映していると考えられる。

以上のように、水の界面、バルクのしめす誘電分散について定性的な理解が得られた。今後は現象を数式で記述して、実体論にもとづく「 $1/f$ 」型誘電分散の定式化を目指している。

## 7. 固体イオン伝導体の複素誘電率測定

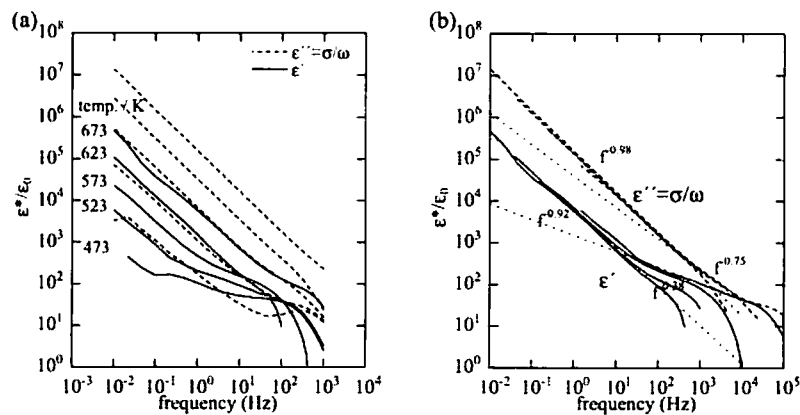
これまで議論してきた「 $1/f$ 型」誘電分散は、水に限らず、イオン電導体が普遍的に持つ性質であると考えられる。ほとんどの鉱物はイオン伝導性であるが、常温の伝導率は非常に小さい。しかし地殻内部の高温になると電気伝導度はアーレニウス式に従って上がり、400℃では室温の水と同程度の大きな電気伝導度を持つ。そこで、イオン伝導性鉱物の例としてonyx( $CaCO_3$ )およびパイレックスガラスについて、高温における複素誘電率測定を行った。その結果を示す第4、第5図には、確かに「 $1/f$ 型」誘電分散、あるいは類似の誘電分散の存在が見て取れる。この測定が二極法であることを考慮しても、鉱物でも大局的には水と同種の誘電分散がおこることを確認できたと考えられる。なお100Hz以上で複素誘電

率スペクトルが曲がっているのはケーブルの浮遊容量の影響である。

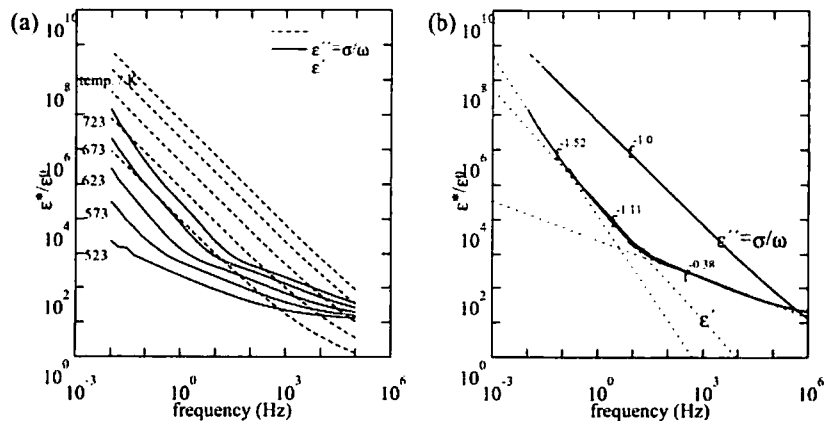
複素誘電率の温度依存性からその活性化エネルギー（化学反応を進行させるのに必要なエネルギー）は非常に小さく、0.1eVのオーダーであることが分かった。これはLi<sup>+</sup>、H<sup>+</sup>などの小さなイオンの伝導性が誘電分散とイオン伝導性を支配していることを示す。onyxもガラスも構造水としてH<sub>2</sub>Oを多く含む。このH<sub>2</sub>O起源のH<sup>+</sup>の挙動がonyx、ガラスの複素誘電率を規定していると想像される。

## 8. まとめ

アクロス計測により水の誘電分散を測定した。アクロス式データ処理により複素誘電率スペクトルとその測定誤差を得た。これにより水が「1/f」型誘電分散を示すことを明快に示すことができた。また固体イオン伝導体（onyx、ガラス）の測定でも水と類似の複素誘電率スペクトルが得られ、「1/f」型誘電分散はイオン伝導体の普遍的性質であることが示唆された。複素誘電率の活性化エネルギーは10<sup>-1</sup> eVオーダーであった。これは構造水として含まれていたH<sup>+</sup>が電気伝導、誘電分散に寄与していることを示唆する。



第4図 (a) 二極法により測定した onyx(厚さ 5.5 mm セル定数 3.2×10<sup>-2</sup> m)の複素誘電率。(b) 周波数を電気伝導度σで規格化したプロット。



第5図 二極法により測定したピアレックスガラス(厚さ 1.0 mm セル定数 1.32×10<sup>-3</sup> m)の複素誘電率。(b) 周波数を電気伝導度σで規格化したプロット。

## 参考文献

- Chilidze, L., Gueguen, Y. & Ruffet, C. Electrical spectroscopy of porous rocks: a review-I. Theoretical models. *Geophys. J. Int.*, **137**, 1-15, , 1999.
- Chilidze, L., Gueguen, Y. & Ruffet, C. Electrical spectroscopy of porous rocks: a review-II. Experimental results and interpretation. *Geophys. J. Int.*, **137**, 16-34, 1999.
- Dissado, A. L. & Hill, M. R. Anomalous Low-frequency Dispersion, *J. Chem. Soc.* **80**, 291-319, 1984.
- Jonscher, A. K., Hopping losses in polarizable dielectric media, *Nature*, **250**, 191-193, 1974.
- Jonscher, A. K., Low-frequency dispersion in carrier-dominated dielectrics, *Philos. Mag.*, **B38**, 587-601, 1978.
- 熊澤峰夫, 國友孝洋, 横山由紀子, 中島崇裕, 鶴我佳代子, アクロス:理論と技術開発, 及び将来展望. 核燃料サイクル開発機構技報, **9**, 115-129, 2000.
- Lockner, D. & Byerlee, J., Complex resistivity measurements of confined rocks, *J. Geophys. Res.* **90**, 7837-7847, 1985.
- 中島崇裕, 國友孝洋, 熊澤峰夫, 横山由紀子, 電磁アクロスの開発と送信実験, 地震研究所彙報, **75**, 413-428, 2000.
- 岡本敬一, 玉城逸夫, 水の電気特性, 78回物理探査学会予稿集 261-219, 1988.
- 小川克郎, 熊澤峰夫, 音波と電磁波のアクロスによる地殻内の水と応力と物理状態の常時リモートセンシングへむけて, 日本地震学会講演予稿集 1996年度秋季大会, 45, 1996.
- Shahidi, M. Hasted, J. B. & Jonscher, A. K. *Nature* **258**, 595-597, 1975.
- 横山由紀子, 熊澤峰夫, 中島崇裕, 射線モデルと自己回帰型のモデルを組み合わせた電磁場伝達関数の分解方法 - 水平成層構造の場合 -, 地震研究所彙報, **75**, 393-411, 2000b.
- Yokoyama, Y., M. Kumazawa, and T. Nakajima, Transfer function measured by electromagnetic sounding with an accurately controlled signal, *Earth Planets Space*, **54**, 459-472, 2002.