

# 水の遠隔電磁探査における誘電分散の基礎研究

## II. 改良四極法による 1/f 型誘電分散の測定

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

#### II. 1/f type dielectric dispersion observed by improved four electrode method.

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

#### 1. はじめに

岩石は乾燥状態では一般に絶縁体であるが、電解質で導電性のある水 ( $H_2O$ ) を含むことにより、その物性は大きく変化し、電気伝導度 $\sigma$ は桁の増加を示す。また水-鉱物界面での電気化学反応による誘電分極のため、誘電率 $\epsilon$ が低周波で増加する型の誘電分散現象が起る。したがって、主に水の量と連結度に依存する $\sigma$ と、水の存在状態が支配する電気化学的過程や岩石のマイクロ組織構造に依存する $\epsilon$ とは、互いに独立の物質パラメータである。(Chilidze *et al.* 1999 ; Olhoeft 1985).

一方、最近の研究によれば、地殻の深部には、かなりの量の  $H_2O$  が様々な状態で存在していて、地震発生などのテクトニクスを支配しているらしい。そこで、地球電磁気学的観測による地殻内部の複素電気伝導度  $\sigma^* = \sigma + j\omega\epsilon$  (あるいは等価な複素誘電率  $\epsilon^* = \epsilon + \sigma/j\omega$ ) の分布がわかり、かつその結果を物性科学的に解釈できれば、地下にある  $H_2O$  の分布や挙動を遠隔的に把握できることになる。

含水岩石の多くは、これまで顕著な誘電分散は示さないとされてきた。例えば 1Hz での比誘電率を 10 とすると誘電性の強さを表す  $\cot \delta = \epsilon\omega/\sigma$  は  $10^{-6}$  以下になり、含水岩石の誘電性は導電性に比べ無視できるほど小さいと結論される。しかし、多様な含水岩石が  $\epsilon^*$  が周波数に反比例して増加する「1/f 型」誘電分散 (と仮に呼ぶ) を示し、kHz ~ mHz でも誘電性の強さを表す  $\cot \delta$  は  $10^{-2}$  程度の値を持つ、という報告がある。

(Lockner & Byerlee, 1985; Jonscher, 1978; Shahidi *et al.*, 1975; Lesmes & Morgan, 2001)。これは従来の常識に反するが、事実ならば地殻を構成する含水岩石は低周波でも観測可能な誘電性を持つ可能性がある。

これまで MT 法などでは誘電率の効果を小さいとし、その観測のための工夫をしていなかった。しかし、例えば小川、熊澤(1996)が提案した電磁アクロス(熊澤, 1997; 横山・他, 1999; 中島・他, 2000)のように、従来よりも高精度な観測が実現されつつあり、将来的に複素誘電率の観測が可能になると期待される。今後得られるであろう観測データの解釈だけでなく、観測技術上の問題や観測法の確立にも、実験室での物性測定により地殻物質の電磁的物性を明らかにし、観測上重要な先見情報を得ることが重要である。

しかし現状では kHz 以下の周波数では含水岩石の複素誘電率の測定例は少なく、その性質は明らかにされていない。その理由として、kHz 以下では電極表面に生じる分極によるバイアスが測定に入りやすく、また測定環境の電磁ノイズに対応するため長時間の繰り返し測定が必要になることが挙げられる。また高温条件での鉱物の電気物性も重要な先見情報であるが、測定例が少なくその性質は明らかになっていない。

我々は kHz 以下での含水岩石の電気物性解明には、測定手法の精度向上が最重要課題であると考え、 $\cot \delta$  で  $10^{-3}$  の観測精度を目標に測定手法の開発に取り組んできた。電磁ノイズの問題に対してはアクロス計測の

導入（松本・他、2003）による誤差評価とノイズレベルに応じて適切な重みをつけるスタッキング手法（長尾ら、2003）を導入し、測定データの精度の向上とその定量的評価を可能にした。そして従来信頼性が高いとされてきた四極法による複素誘電率測定において、これまで十分な検討と対応がなされていなかった問題を見出した。それは試料と電極の導電性が異なると電位電極を通りぬけて流れる電流により電位電極表面に分極が生じ、その結果試料がみかけ上誘電分散を示すような測定データが得られるという効果である。検討の結果、試料と似た導電性を持つ電極材質使用して適切な方法で電極を設置することによりこの効果を十分に抑制できることが分かった。本論文ではこの電極設置法に関する検討を報告するとともに、この検討を踏まえて開発した高温下での固体試料の複素誘電率測定手法について報告する。

## 2. 岩石電気物性とその表現：複素誘電率、複素電気伝導度について

含水岩石のマクロな電気物性 ( $\epsilon, \sigma$ ) は、現象論的には大きさ  $\epsilon\kappa$  のキャパシタンスと大きさ  $\sigma\kappa$  のコンダクタンスの等価並列回路で表現することができる。  $\kappa$  は考える領域の大きさに関する定数で、断面積  $S$  と厚さ  $d$  の直方体の領域では  $\kappa = S/d$  になる。物質の誘電率  $\epsilon$  は電気変位  $D$  と電場  $E$  の間の現象論的關係式  $D = \epsilon E$  により定義される。電気変位  $D$  と誘電分極  $P$  の関係式  $D = \epsilon_0 E + P$  ( $\epsilon_0$  は真空の誘電率) から分かるように、物質の誘電率  $\epsilon$  は電場  $E$  に誘起される物質の誘電分極  $P$  の大きさに関する量である。一般には電気変位  $D$ 、電場  $E$ 、分極  $P$  はベクトル、 $\epsilon, \sigma$  はテンソルであるが、ここでは一次元の場合を考え、全ての量をスカラーとして取り扱うこととする。

角振動数  $\omega$  の交流電場  $E$  に対し、誘電率  $\epsilon$ 、電気伝導度  $\sigma$  を持つ物質を流れる変位電流密度は  $i_d = \partial D / \partial t = j\omega\epsilon E$ 、伝導電流密度は  $i_c = \sigma E$  だから、電流密度  $i = i_d + i_c$  と電場  $E$  の関係は次のように書くことができる。

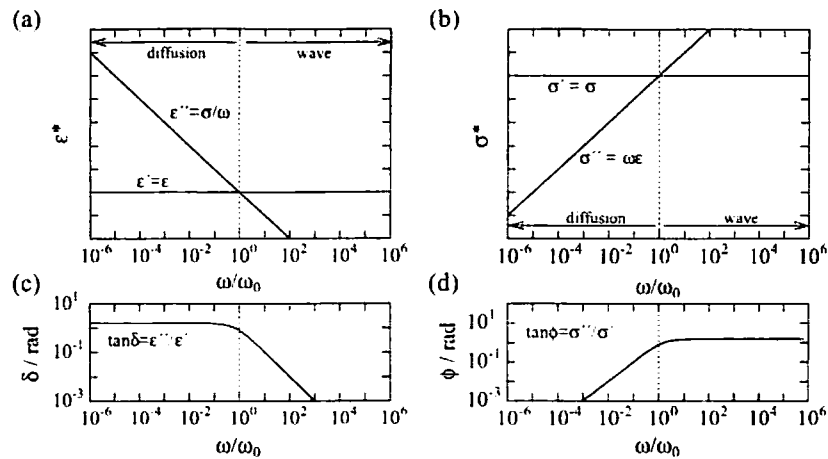
$$i = (\sigma + j\omega\epsilon)E = \sigma^* E \quad (1)$$

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

ここでは  $\sigma^*, \epsilon^*$  はそれぞれ複素電気伝導度、複素誘電率である。

$$\sigma^* = j\omega\epsilon^* = \sigma' + j\sigma'' = \sigma + j\omega\epsilon \quad (3)$$

$$\epsilon^* = \sigma^*/j\omega = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon + \sigma/j\omega \quad (4)$$



第1図 誘電率  $\epsilon$ 、電気伝導度  $\sigma$  が周波数依存性を持たないモデルの (a) 複素誘電率  $\epsilon^*$ 、(b) 複素電気伝導度  $\sigma^*$ 、(c) 損失角  $\delta$ 、(d) 角度  $\phi = \pi/2 - \delta$ 。横軸は  $\epsilon^*$  ( $\sigma^*$ ) の実部と虚部が一致する周波数  $\omega_0$  で規格化している。

$\epsilon^*$ 、 $\sigma^*$ は導電性の大きさを表す損失角 $\delta$ と  $\tan \delta = \sigma'/\sigma'' = \epsilon''/\epsilon' = \sigma/\omega\epsilon$ の関係がある。なお  $\tan \delta$ は伝導電流と変位電流の比を表し、電磁波は  $\tan \delta \gg 1$  の時拡散波として、 $\tan \delta \ll 1$  の時波動として伝播する。

含水岩石では、一般に誘電率は顕著な周波数依存性を持つが電気伝導度は周波数依存性が小さいため、 $\sigma^*$ より $\epsilon^*$ による表示の方が物性の特徴を表現しやすい。誘電性より導電性が顕著であるため、 $\tan \delta$ や $\delta$ よりも  $\cot \delta$ または $\phi = \pi/2 - \delta$ を用いるのがよい。例として、第1図(a) - (d)に $\epsilon$ 、 $\sigma$ が周波数依存性を持たないモデルについて $\epsilon^*$ 、 $\sigma^*$ 、 $\delta$ 、 $\phi$ を示した。

### 3. 複素誘電率測定法について

#### 3. 1 複素誘電率の測定法

複素誘電率は式(2)のように電流密度  $i$  と電場  $E$  のスペクトルの位相振幅比から求められる。実験的には、電流を流す電極と、電位差を計測する電極を試料に設置し、電流電極を流れた電流  $I$  から試料内の電流密度  $i = I/S$  を、電極間の電位差  $V$  から試料内の電場  $E = V/d$  を推定して、複素誘電率を  $\epsilon^* = (i/E)/j\omega = (IS^{-1}/Vd^{-1})/j\omega = C^*/\kappa$  として求める。ここで  $C^* = (I/V)/j\omega$  は複素キャパシタンスである。

#### 3. 2 複素誘電率測定法の検討：電極の分極の問題

複素誘電率測定を精度よく行うためには、試料内の電流密度  $i$  と電場  $E$  の推定が精度よくなされること、そのために  $i$ 、 $E$  の分布が均質である必要がある。これらの条件を阻害する要因として、試料表面の漏洩電流や試料と電極の界面に電流が流れることにより生じる電気二重層の分極が知られている。また電位電極を設置すること自体、これらの条件を乱す可能性がある。

一般的には電流印加用の電極（電流電極）の間に電位測定用の電極（電位電極）を設置した四極法を用いれば精度の高い測定ができるとされている。この方法では電流電極の分極の影響を受けずに電位電極間の試料の複素誘電率を測定することができる。また電位電極間電位の測定に十分高い入力抵抗を持つ増幅器を用いれば電位電極間に電流が流れることはないので電位電極表面に分極を生じることはないと考えられている（例えば本研究で使用した Burr-Brown INA114 の入力抵抗はカタログ値で  $10^9 \Omega$  以上である）。さらに試料と電極の化学的性質の違いによる分極を防ぐため、非分極性の電位電極が望ましいとされている。

試料に電位電極を設置することに関して、我々はこれまで見落とされてきた問題を見出した。それは電位電極を通り抜けて流れる電流の存在により電位電極表面に分極が生じ、その結果試料があたかも誘電分散を生じ誘電率が增大するよう見えることである。試料より高い電気伝導度をもつ電位電極の場合、電極近傍の電流が電極に集中して流れるため、この効果は電極断面積が小さくても顕著に現れる。

電気伝導度が高い材質の電極は、その寸法が有限だと電流のショートカット経路になる。また試料の含水岩石はイオン伝導性であるのに対し電極は電子伝導性であるために、両者の界面を電流が流れる時電位電極表面に電流キャリア（イオン、電子）の分極が生じる。分極  $P$  の電極表面での全平均  $\langle P \rangle$  はゼロでもそのエネルギー  $\langle P^2 \rangle / 2\epsilon$  は有限であるから、これが誘電分極として見えるのである。異なる電流キャリア（イオン種、電子）を持つ二つの媒質の界面を電流が通過して流れる過程は、異種キャリア間の電荷交換（電気化学反応：熱活性の拡散律速過程）速度に依存する。このため電極近傍におけるイオンの滞留と物質の濃度勾配（電気化学ポテンシャル勾配）の発生に周波数(時間)依存性が存在し、誘電率に周波数依存性が生じる。

ここで検討した問題の具体例として、水の複素誘電率の測定結果を第2図に示す。水は MHz 以下で周波数によらず、比誘電率 80 を示すと考えられる。二極法測定では第2図(a)の様に顕著な誘電分散が観測され

る。これは電流電極表面の電気二重層の物性である。ステンレスメッシュの電位電極により第3図(a)の方法で行った四極法測定では、第2図(b)のように第2図(a)と異なる誘電分散が観測された。これは水が誘電分散を示さないという常識と反しており、先に述べた電位電極表面の分極の効果と考えられる。第3図(c)のように寒天ブロックを使用した四極法測定（3. 3節参照）では、第2図(c)のように、誘電率は観測誤差範囲内で周波数によらず一定値を取っている。次節では第2図(b)の金属電極でみられる電位電極の分極の効果を抑制する方法の実験的検討と、その結果考案した第3図(c)に示す寒天ブロックを使用した測定法を紹介する。

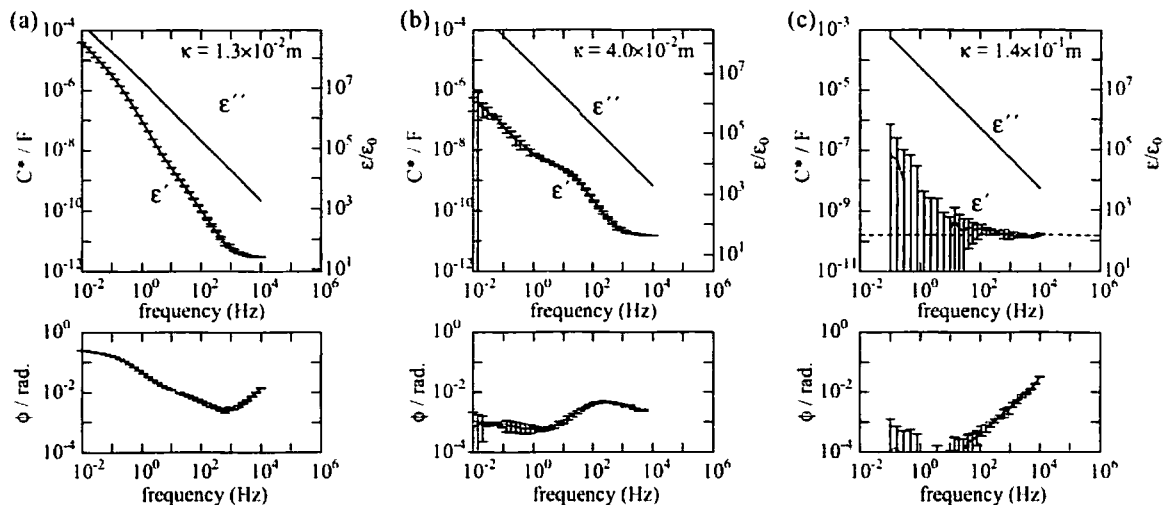
### 3. 3 イオン伝導性電極を用いた低バイアス測定法

前節の考察を踏まえると、電位電極の分極効果を減らすためには、次のようにするのがよい。

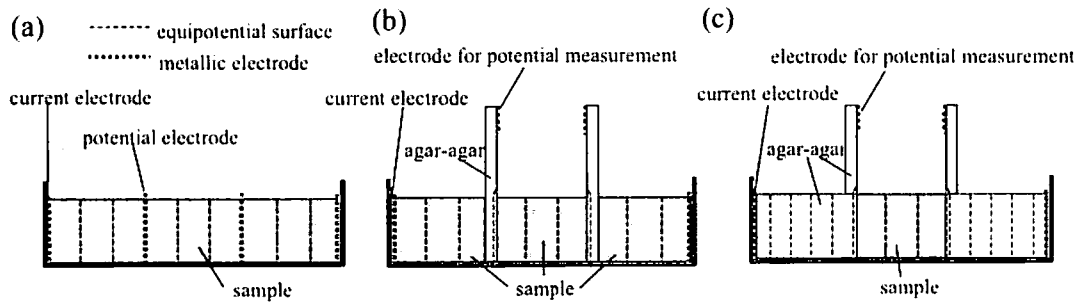
1. 電極と試料の界面が等電位でない領域の面積を減らす様に電極の寸法や形状、配置を設定する。
2. 試料と似た導電メカニズムを持ち、電気伝導度も近い材質を電極に用いる。

この考えを検証するため、(a) 白金メッシュ、(b) ステンレスメッシュ、(c) 断面積の小さなステンレス線、(d) 板状寒天の4種の電位電極で、既知物性試料（NaCl  $10^{-5}$  mol/lの水溶液；周波数によらず比誘電率約80で一定、 $\sigma = 2 \times 10^{-3}$  S/m）を測定した。寒天は水と近い電気物性を持つため電位電極の分極が小さいと考えた。結果を第4図に示す。第4図(a)、(b)では1 kHz以下の周波数における $\phi$ には最大10 mrad程度の誘電性の増大が見られるが、(c)、(d)では誘電率は減少し、(d)では100 Hzから1 Hzまでの低周波数において、複素誘電率の位相角が、測定限界の1 mrad以下であり、先の考え方が妥当であることが確認された。

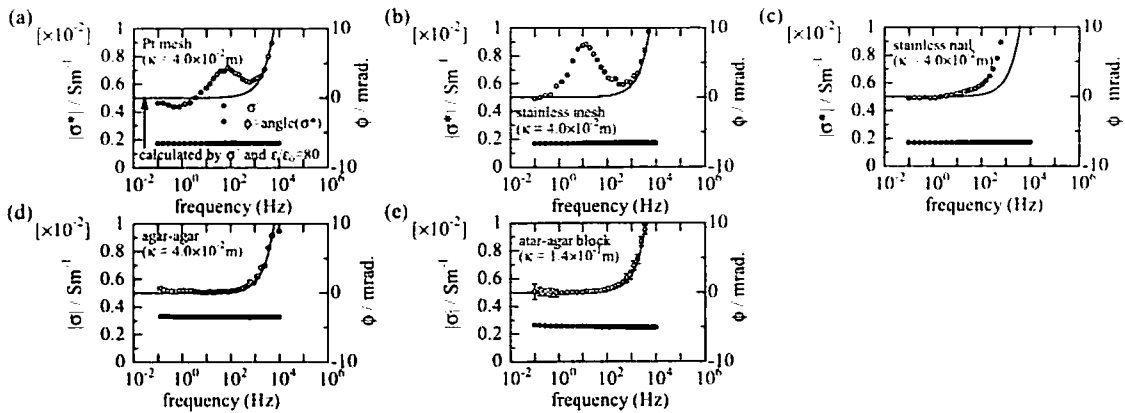
第4図(d)では1 Hz以下で $\phi$ が若干増加している。これは電極のたわみによる効果と考えられる。そこで、試料界面を電流と垂直に保って測定を行うために第3図(c)のように寒天のブロックで試料を挟み寒天の試料との接触面での電位を測定する方法を考案した。この方法により、第4図(e)のように1 Hz以下でもバイアスを $10^{-3}$  rad以下に抑えることができた。



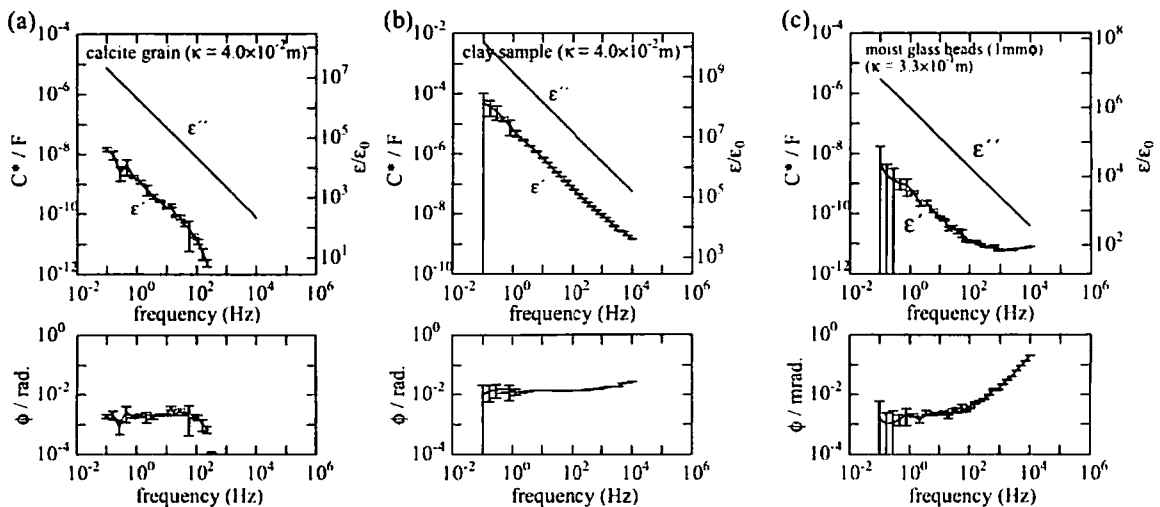
第2図 水の複素誘電率の測定結果。(a) 二極法、(b)ステンレスメッシュの電位電極を用いた四極法、(c) 寒天ブロックを用いた四極法による。上段の図には複素電気容量( $C^*$ )とこれを比誘電率に換算した値を左右の縦軸に示すとともにセル定数 $\kappa$ を示した。下段の図に $\phi = \pi/2 - \delta$  ( $\delta$ は損失角)を示す。 $\epsilon^*$ の実部 $\epsilon'$ と $\phi$ に誤差棒を示す。



第3図 四極法における電極設置法. (a) 金属メッシュ、および(b) 板状寒天を用いる方法. (c) 試料を寒天ブロックで挟み、その界面の電位を測定する方法.



第4図  $10^{-6}$  mol/l NaCl 水溶液の複素電気伝導度 $\sigma^*$ の電位電極の違いによる測定結果の違いの比較. 電位電極として、(a) 白金メッシュ、(b) ステンレスメッシュ、(c) ステンレス線、(d) 板状寒天を用いた. (e) では寒天ブロックで試料を挟み、試料とブロックの界面の電位を板状寒天で測定する方法を用いた. 図中の $\kappa$ はセル定数. 各図において複素電気伝導度の絶対値 $|\sigma^*|$  (●) および位相角 $\phi$  (○) を示し、それぞれ左側と右側の表示で測定値を表す. 水の比誘電率の $\epsilon/\epsilon_0 = 80$  と $\sigma$ の測定値から推定した $\phi$ を実線で示す.



第5図 (a) 含水した  $\text{CaCO}_3$  の粒子、(b) 含水粘土試料、(c)  $1\text{mm}\phi$  のガラスビーズを重量比で 1:700 の量の  $10^{-3}$  mol/l NaCl 水溶液で濡らした試料の複素誘電率スペクトル. セル定数 $\kappa$ を図中に示す.

### 3. 4 低バイアス測定による湿潤試料の複素誘電率測定

寒天電極を用いて含水試料（カルサイト粒子、粘土、ガラスビーズ）の測定を行った結果、各種の含水試料が  $1/f$  型誘電分散を示し、 $\phi$  は 10 mrad 前後の値を示した（第5図）。前節の検討を考慮すると、第5図の測定における電極の分極によるバイアスは 1 mrad の程度と考えられる。このことから観測された複素誘電率は電極の分極の効果ではなく試料の物性であると考えられる。イオン伝導性の電極による低バイアス測定により、含水試料が確かに  $1/f$  型誘電分散を示すことを確認することができた。

### 4 電極の分極の効果と $1/f$ 型誘電分散について

ここで電極表面の分極の効果（第2図(a)、(b)）と含水試料の示す誘電分散（第5図(a)–(c)）における誘電率の周波数依存性と、その物理的意味について考えておく。

第2図(a)と(b)では誘電率 $\epsilon$ が  $f^{1.5}$  に比例している領域があるが、これは電極–試料（水）界面のなすコンデンサーへの充放電の過程を表している。電極近傍の電気的性質は溶液コンダクタンス（アドミッタンス  $G$ ）と界面容量（アドミッタンス  $i\omega C$ ）の直列等価回路で表すことができるが、これを (1)式に従い $\sigma$ に比例するコンダクタンスと $\epsilon$ に比例するキャパシタンスの並列回路として解釈するために $\epsilon \propto f^{2n}$  という周波数依存性が現われる。界面容量の $\omega$ の係数  $n$  は理論上は 1 であるが、実際には 0.8 程度になることが多く、その結果 $\epsilon \propto f^2$ でなく $\epsilon \propto f^{1.5}$ という周波数依存性になる。

一方、第2図(b)では 1Hz 以下で $\epsilon \propto f^1$ という周波数依存性が現われている。この領域では、3. 2節でのべたように、電極（ステンレスメッシュ）–試料（水）界面で電気化学反応が起こり電極近傍に生じた反応生成物が印加電場と逆の起電力を生じて誘電分極として現われていると考えられる。誘電分極の強さは反応生成物の量に関係するが、これは印加電場の周波数  $f$  に反比例する。そのため、 $\epsilon \propto f^1$ という周波数依存性になると考えられる。

第5図でも $\epsilon \propto f^{1.0}$ という関係が現われている。これは試料の性質であり、試料内部で電気化学反応による誘電分極が生じているものと考えられる。しかし、たとえば第5図(c)のガラスビーズと水の系では、水の電気伝導度( $10^{-1}$  S/m)に比べ、ガラスのそれ ( $10^{-13}$  S/m) はあまりにも低く両者の界面に電流が流れ電気化学反応が起ることは考えにくい。ガラス表面の水層には、数 nm の厚さで電気二重層が形成されており、この部分はバルクの水より高いイオン濃度、電気伝導度を持っている。バルクの水と固相表面の電気二重層の界面で電気化学反応が起っているのかもしれない。

### 5. 高温での鉱物試料の四極法測定

鉱物は高温下で観測可能なイオン伝導性を示す。3. 3節でのべた考え方にに基づき、高温下での固体イオン伝導体試料の複素誘電率測定法を検討した。イオン伝導性を持つ物質としてガラス（これは 400℃では  $10^{-1}$  S/m という高い電気伝導度を持つ）を用い、試料に取り付けたガラスの電位を試料から離れた部分に取り付けた金属を用いて計測することにより、試料内部の電流分布を乱さずに試料電位を計測する。

まず第6図(a)の方法を考案した。試料にガラスの電位電極を溶着し、電位電極の端と試料の両端に銀ペーストを塗布し、それぞれ電位計測用の接点と電流電極として用いる。この方法によりバイレックスガラスの測定を行った結果を第7図(a)に示す。測定された電気伝導度は周波数によらずほぼ一定で、 $\phi$  は 100 Hz 以下ではほぼゼロで誘電性は観測されなかった。この結果より、ガラスの電位電極を用いた四極法測定により、電極の分極を $\phi$ で 1 mrad 以下に抑えた測定を行えたと考えられる。なお第7図(a)で 100 Hz 以上で $\phi$ が負に

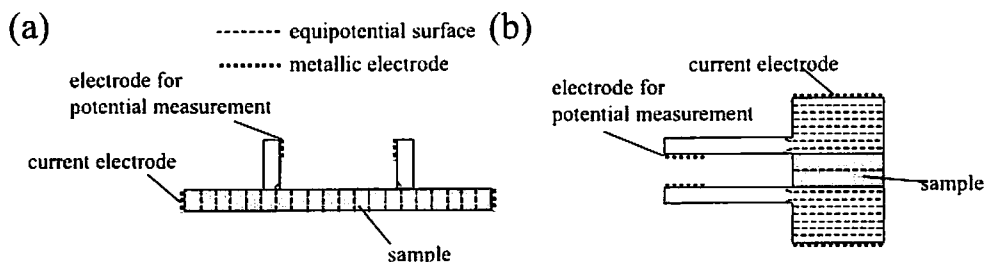
なるのは測定回路の浮遊容量の影響である。

電気伝導度の低い試料ではセル定数を大きくして試料のインピーダンスを下げる必要があり、第7図(a)の方法は望ましくない。そこで第3図(c)の方法を応用し、薄板試料に電流電極を取り付けたガラスのブロックを貼り付け、ガラスブロックの試料端の電位を計測する方式の四極測定法を考案した(第6図(b))。この方法で onyx( $\text{CaCO}_3$ )の測定を行った結果、第7図(b)のような複素誘電率スペクトルが得られた。

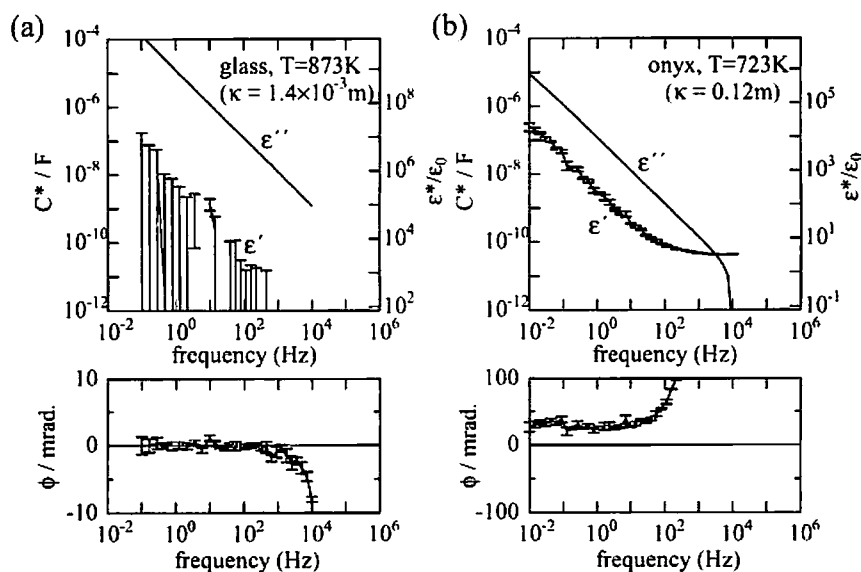
パイレックスガラスでは  $\cot \delta$  で  $10^{-3}$  の誤差範囲で誘電性が観測されなかった。一方、onyx では  $1/f$  型誘電分散が観測され  $\cot \delta$  は  $10^{-2}$  程度の大きさであった。パイレックスガラスが誘電分散を示さず、onyx が誘電分散を示すのは、パイレックスは非晶質だが均質である一方、onyx は  $\text{CaCO}_3$  の微結晶であり粒界を内部に含むため不均質な電気伝導性を持つことと関係すると考えている。

## 6. まとめ

含水岩石、あるいは高温条件での鉱物などのイオン伝導体試料の四極法測定において、電子伝導性の金属



第6図(a) ガラスの電位電極を用いた四極測定法。銀ペーストを塗布して電位計測用の接点と電流電極として用いる。試料に設置したガラス電極を介して試料に印加した電流から離れた位置で電位の計測を行う。(b) 薄板試料測定のための四極測定法。電流電極を片面に設置したガラスブロックで試料をはさみこみ、ブロックの試料端面付近の電位を印加電流から離れた場所(左側)で計測する。



第7図 (a) パイレックスガラスと (b) onyx の複素誘電率の測定結果。セル定数 $\kappa$ を図中に示す。

を電位電極に用いると、試料と電極の界面を通り抜けて電流が流れる結果電極表面に分極を生じ、見かけ上 $\phi$ で 10 mrad 程度の誘電性が生じる場合があることがわかった。またイオン伝導性の電位電極を用いることによりこの効果を抑制できることがわかった。

この問題に対処するため、イオン伝導性の材質（寒天、ガラス）を用いた複素誘電率測定法を開発し、常温、あるいは高温条件において kHz 以下の周波数でも電位電極の分極の効果を $\phi$ において 1 mrad 以下に抑えた測定を可能にした。この手法を用いて従来測定が困難だった kHz・mHz の周波数領域で常温下の湿潤試料、高温下での固体試料の複素誘電率測定の性質を明らかにすることが期待される。

今回行った測定では、水やガラスなどは 3 桁の測定精度で観測可能な範囲では誘電分散を示さないこと、湿潤粒状試料（湿潤状態の粘土試料、ガラスビーズ、石英粒子）や微結晶の集合体である onyx は 1/f 型誘電分散を示すことが分かった。この結果からは物質の構造の不均質性が 1/f 型誘電分散の原因と示唆されるが、さらに多くの試料の測定やモデル実験により 1/f 型誘電分散の実体を明らかにすることが望まれる。

## 参考文献

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的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.

Chilidze, L., Gueguen, Y. & Ruffet, C. Electrical spectroscopy of porous rocks: a review-I. Theoretical models. *Geophys. J. Int.*, **137**, 1-15, 1999.

Jonscher, A. K., Low-frequency dispersion in carrier-dominated dielectrics, *Philos. Mag.*, **B38**, 587-601, 1978.

熊澤峰夫, 電磁界変動に関する主張と提案: 反先行現象シンドローム, もっと広い周波数帯での観測, そしてもっと精密な電気伝導度分布の解明へ向けて, *Conductivity Anomaly* 研究会論文集, 1-8, 1997.

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.

Lesmes, D. P. & Morgan, F. D. Dielectric spectroscopy of sedimentary rocks. *J. Geophys. Res.* **106**, 13329-13346, 2001..

Lockner, D. & Byerlee, J., Complex resistivity measurements of confined rocks, *J. Geophys. Res.* **90**, 7837-7847, 1985.

松本裕史, 茂田直孝, 熊澤峰夫, 中島崇裕, 水の遠隔電磁探査における誘電分散の基礎研究, *Conductivity Anomaly* 研究会論文集, 148-155, 2003.

長尾大道, 中島崇裕, 熊澤峰夫, 國友孝洋, 観測時刻によってノイズレベルが異なる場合の最適スタッキング方法 - 電磁アクロスのテスト観測データを例にして -, *Conductivity Anomaly* 研究会論文集, 2003.

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.

小川康雄, 電磁波で地殻構造と水の動きを見る, *科学*, **72**, 204-208, 2002.

Olhoeft, G. R., Low frequency electrical properties, *Geophysics*, **50**, 2492-2503, 1985.

Shahidi, M. Hasted, J. B. & Jonscher, A. K. Electrical properties of dry and humid sand, *Nature* **258**, 595-597, 1975.

Stuart, M. R. Dielectric constant of quartz as a function of frequency and temperature, *J. App. Phys.* **26**, 1399-1404.

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, 2000.