

水の電磁遠隔探査における物性論の基礎研究 1. 石英等の誘電率測定

Basic studies of dielectric dispersion for remote observation of H₂O-containing rocks: (I) ion-doped quartz, etc

松本 裕史[1], 茂田 直孝[2], 熊澤 峰夫[3], 中島 崇裕[2]

Hiroshi Matsumoto[1], Naotaka Shigeta[2], Mineo Kumazawa[3], Takahiro Nakajima[1]

[1] サイクル機構東濃地科学センター, [2] サイクル機構・東濃地科学センター, [3] JNC・東濃

[1] Tono Geoscience Center, JNC, [2] JNC, TGC, [3] Tono, JNC

<http://www.jnc.go.jp/>

岩石の電磁物性は含水により変化することが知られており、観測される地下の電磁気構造を適切に解釈すれば地下水の分布と状態を知ることが可能である。これまでは主に電気伝導度 σ を観測量としてきたが、わずかな含水量変化による σ の値の変化は小さく、また周波数依存性も小さいため、得られる情報は限られていた。近年、わずかな含水量変化により岩石の誘電率の周波数依存性が大きく変化し、低周波数領域での誘電率 ϵ が乾燥状態のその $10^2 - 10^5$ 倍以上にも増大する場合があることが明らかになりつつある。電気伝導度 σ の代わりに複素誘電率 $\epsilon^* = \epsilon + i\sigma/\omega$ のスペクトルを観測することにより、従来よりも格段に敏感な地下水の遠隔電磁探査が実現できると考えられる。

岩石の複素誘電率スペクトルから地下水の分布状態を把握するためには、複素誘電率と岩石種と含水状態の関係が既知でなければならない。しかし、含水状態の岩石の誘電分極機構は複雑で、複素誘電率スペクトルは岩石種、含水状態により多様に変化すること、データの蓄積とその解析例があまり多くないことから、十分な理解が得られていない。複素誘電率スペクトル観測による地下構造探査の実現のためには、含水した岩石の電磁物性の解明が不可欠である。

一般に、誘電分極は、極性分子の回転による配向分極や、マクロな連続性をもたないイオン伝導層でのイオンの移動による分極によって生じる。誘電率が周波数によって変化することを誘電分散とよぶが、これは誘電分極過程の固有周波数 f_0 (緩和時定数 τ の逆数) と電場変動の周波数 f の違いによりおこる。 $f_0 > f$ の時に誘電分極が生じて誘電率が增大するが、 $f_0 \ll f$ では多くの場合、誘電分極の成長が飽和して誘電率は一定値に漸近する。

含水した岩石は粒界水がイオン伝導性を持ち、誘電分散が生じて誘電率 ϵ はキロヘルツ以下の低周波領域で $10^{-8} - 10^{-5}$ F/m (比誘電率で $10^3 - 10^6$) にも達する。一方、乾燥した岩石は誘電分散を示さず、誘電率 ϵ は周波数によらず 10^{-10} F/m (比誘電率で 10) 程度である。含水した岩石の複素誘電率のスペクトル形は岩種、含水率により異なるが、特に粘土鉱物によるイオン交換、金属鉱物による酸化還元反応が関与する時は複雑なスペクトルを示す。

花崗岩、砂岩、砂などのサンプルについて、注目すべき現象として、単純で特徴的な複素誘電率スペクトルが報告されている。すなわち、キロヘルツ以下の周波数で、誘電率が観測周波数 f に反比例して増加するのである。電気伝導度 σ の周波数依存性は一般に小さいので、結果として複素誘電率 $\epsilon^* = \epsilon + i\sigma/\omega$ は、実部、虚部ともに測定周波数 f に反比例するという著しい特徴を持つことになる。この $\epsilon^* \propto 1/f$ となる誘電分散をここでは $1/f$ 型誘電分散と呼ぶ。 $1/f$ 型誘電分散はイオン交換、金属酸化還元反応が関与せず、純粋なイオン伝導性による誘電分極過程が卓越している系でおこると考えられ、岩石のみならず、イオン伝導性結晶などでも起こると考えられる。

$1/f$ 型誘電分散は、1) $1/f$ 型誘電分散を示す岩石の複素誘電率 $\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon'' = \epsilon + i\sigma/\omega$ は 1mHz でも周波数に反比例して増加し、2) その結果として周波数に抛らず損失角 $\delta = \arctan(\epsilon''/\epsilon') = \sigma/\omega\epsilon$ が一定である、という二つの奇妙な特徴を持つ。粒界水中をイオンが移動することにより誘電分極が生じるなら、通常 f_0 は 1mHz よりも大きく、また損失角は周波数依存性を持ち $f=f_0$ の時に最大となる。 $1/f$ 型誘電分散の特徴 1) 2) はイオン伝導による誘電分極では説明できない。

1mHz 以下という長周期で起こる反応として、固液界面、あるいは固体内での電気化学反応が考えられる。我々は $1/f$ 型誘電分散は電気化学反応とイオン伝導の複合した誘電分極過程であると考え、その解明を目指す。

$1/f$ 型誘電分散と、イオン伝導性の関連を調べるために、イオン伝導性固体の誘電分散の観測を行う。本研究では、もっとも単純なイオン導体と考えられる石英単結晶を実験材料に採用する。石英の c 軸方向にはイオン伝導性があるので、これを利用して H^+ などのイオンのドーブや抽出でイオン濃度を制御できる。加えて、その過程自体が誘電分散の機構に直接関係しているという著しい特徴を持っている。この実験では、イオン濃度 (ドーブで制御) イオン移動度 (温度で制御) の関数として、誘電分散スペクトルを低周波領域で測定するとともに、この過程で発生すると予測されるイオン濃度勾配を測定し、測定量間の相互関係を実験的に証明することを計画している。