

アクロス計測による複素誘電率スペクトル測定 . これまでの実験で見えてきた 1/f 型誘電分散の性質について

Complex Dielectric Permittivity Spectroscopy with ACROSS Measurement System V. Review of Studies on 1/f-type Dielectric Dispersion

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

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

岩石は乾燥状態では一般に絶縁体であるが、高いイオン導電性を持つ水を含むことによりその物性は大きく変化し、電気伝導度 s は桁の増加を示す。また水 - 鉱物界面での誘電分極が生じることにより、誘電率 ϵ が低周波で増加する誘電分散という現象が起こり、誘電率も増加する。含水岩石の ϵ と s は粒界水の量とともに、 H_2O が関与する岩石の組織構造と物理的・化学的性質に関する、互いに質的に異なる情報を含んでいると考えられる。

電磁気的手法により地殻の複素電気伝導度(あるいは複素誘電率)をモニタリングし、その結果を物性の知見に基づき解釈すれば、地下水の分布や挙動を高い感度で捕らえることができ、さらには地震発生などのテクトニクスと H_2O の関わりを明らかにできるであろう。

含水岩石の物性について、これまでの研究、観測は主に電気伝導度を対象として行われており、誘電率の性質は、まだよく分からない部分が多い。金属鉱物を含む岩石は、金属酸化還元反応により強い誘電分散を示すことが知られているが、それ以外の一般の含水岩石では顕著な誘電分散は生じないと考えられている。電磁的擾乱の伝播特性は、複素誘電率 $\epsilon^* = \epsilon + s/j\omega$ 、または等価な複素電気伝導度 $s^* = s + j\omega\epsilon$ で決まる (j は虚数単位、 ω は角周波数)。誘電性の強さを表す $\cot d = \epsilon\omega/s$ (d は損失角) は、比誘電率を 10 とするとキロヘルツ以下では $\cot d$ は 10^{-6} ~ 10^{-9} 程度になり、誘電率の効果は無視できるほど小さいということになる。

幾つかの過去研究を総括すると、含水岩石には複素誘電率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)という現象が存在すること、この時 $\cot d$ が周波数によらず 10^{-2} ~ 10^{-3} という値をもつことが示唆される。これが事実なら 1mHz での誘電率は 10^6 以上に達することになり、地殻の大部分の岩石は低周波でも観測可能な誘電性を持つと結論され従来の常識は覆される。またバルクの水すら 1/f 型誘電分散を示すことを示唆する報告もあるが、これは誘電分散は固液界面などの不均質構造の存在により生じるという常識に反する、驚くべき現象である。

このように、1/f 型誘電分散は注目すべき現象であるが、残念ながらこれまでの研究例は少なく、その性質やメカニズムはまだ明らかになっていない。そこで我々は 1/f 型誘電分散の存在の確認とそのメカニズムの解明を目指して、これまでに電極の分極の抑制や電氣的ノイズの対処に取り組み複素誘電率を位相について 10^{-3} rad. の精度で測定する手法を確保し(松本ら; 本セッション別講演)、1/f 型誘電分散の実験的研究を行ってきた。ここでは我々のこれまでの研究で明らかになった 1/f 型誘電分散の性質を報告する。

各種の含水試料(鉱物粒子、土壌試料、粘土など)を測定したところ、すべての試料で 1/f 型誘電分散が観測され、 $\cot d$ は 10^{-2} ~ 10^{-3} の程度であった。粒径を 1mm に揃えたガラスビーズをわずかに濡らした試料でも同様の結果が得られた。含水試料では特異的な鉱物の存在や粒径によらず、1/f 型誘電分散が生じるものと考えられる。バルクの水の測定を行ったところ、周波数によらず比誘電率約 80 を持ち、複素誘電率の位相角 10^{-4} rad の誤差範囲内で誘電分散は観測されなかった。まとめると、1) 多くの含水試料は 1/f 型誘電分散を示すこと、2) バルクの水は誘電分散を示さない、または観測できないほどに小さい、ということが分かった。

1/f 型誘電分散のメカニズムとして、Lesmes et al. (1992) は粒径分布に起因する緩和時間のフラクタル性を挙げている。しかし、1/f 型誘電分散は粒径を揃えたガラスビーズでも生じるのだから、粒径分布がその本質であるとはいえない。我々は、1/f 型誘電分散の原因は導電性の不均質性による電気化学ポテンシャル勾配の形成であると考えている。異なる電流キャリア(イオン、または電子)を持つ層の界面では、界面でのキャリアの滞留による電気二重層形成と、異種キャリア間での電子移動を介して電流が流れる。この時、イオンや電気化学反応生成物の濃度勾配が生じるが、この濃度勾配による起電力が誘電分極として観測されると考えられる。誘電率が周波数に反比例する、つまり電場を印加した時間に比例した量のエネルギーが蓄積されることは電気化学反応の特徴に符号する。

含水試料で観測された 1/f 型誘電分散は、1) 電流電極、または 2) 鉱物粒子表面の電気二重層で電気化学ポテンシャル勾配形成が原因であると考えられる。今後、電気化学ポテンシャル勾配の測定などにより、1/f 型誘電分散のメカニズムを明らかにすることを計画している(松本ら; 本セッション別講演参照)。