短波長帯における岩石の電磁気定数*1

— 岩質の影響 —

佐々木靖人*2・藤井厚企*2・中村康夫*2

Electromagnetic Parameters of Rocks in Short Wave Band

— Influences of Lithologic Characters —

Yasuhito SASAKI*2, Atsuki FUJII*2 and Yasuo NAKAMURA*2

Key words : 比抵抗 resistivity, 誘電率 dielectric constant, 岩質 lithologic character

Abstract

Electromagnetic parameters of rocks in short wave band (mainly 15 MHz), such as resistivity and dielectric constant, were examined for various rocks and minerals to derive a proper geological interpretation from radar tomographic data.

In this paper, influences of lithologic characters, for example, mineral or rock type, porosity, grain diameter, were tested in detail.

Obtained results are as follows :

1. Resistivity and dielectric constant decrease as the increase of frequency. The decrease rate of resistivity of dried rock is higher than that of saturated rock, and the decrease rate of dielectric constant is inverse to that of resistivity.
2. Resistivities of minerals are distributed in proportion to the $-2 \sim -3$ power of dielectric constants of those minerals.
3. Minerals can be classified four types on the diagram of resistivity versus dielectric constant, felsic minerals, mafic minerals, clay minerals, and iron ore, in order from high resistivity and low dielectric constant to low resistivity and high dielectric constant.
4. Resistivities of part of sedimentary rocks and volcanic rocks are relatively lower than those of minerals which have the same dielectric constant.
5. Dielectric constant of dried rock is approximated to the Lichtenecker's law.
$$\log \varepsilon = a \log \varepsilon_a + b \log \varepsilon_b + \cdots + n \log \varepsilon_n$$
$$\varepsilon$$
 : relative dielectric constant of a dried rock, $a \sim n$: volume rate of each minerals or pore, here $a + b + \cdots + n = 1$, $\varepsilon_a \sim \varepsilon_n$: relative dielectric constant of each minerals and pore air.
6. In the case of dried rock, the resistivity increases in proportion to the $-2 \sim -3$ power of the dielectric constant according to the increase of porosity. In the case of saturated rock, dielectric constant continuously increases according to the increase of porosity, but the resistivity mostly decreases at a specific porosity.
7. The resistivity of a rock decreases according to the reduction of its grain diameter.

Some of these results are correspond to the past studies qualitatively except for the result No. 2. 4. and 6. which are unknown in the past.

1. は じ め に

1970年代以降、岩盤の面的探査手法として弾性波・電磁波・比抵抗・水圧パルスなどを用いた各種のジオトモグラフィ技術が盛んに開発されている。このなかでも、電磁波トモグラフィは特に高分解能の探査手法として注目されている。しかし、土木分野における電磁波トモグラフィの利用例は、弾性波トモグラフィなどに比べ少ないようである。その原因は次の2点に求められるであろう。1つは、電磁波トモグラフィによって得られる電磁気学的な物性値が、土木分野で必要とされる力学的な物性値と直接的な相関がないとみなされていること、2つめは、そうした電磁気学的物性値（電磁波の速度や減衰等）の地質の意味が整理されていないため、信頼性の高い地質解釈ができないこと、である。特に後者は、電磁波トモグラフィの利用上、大きな制約となっている。何故なら、ほとんどの物理探査で得られる物性値分布は、地質解釈を仲介して初めて利用できる性質のものだからである。

通常、電磁波トモグラフィの地質解釈は、解析結果画像とボーリングコアなどを比較し、地質技術者が定性的に行っているが、岩盤の電磁波伝播特性と岩質の関係に無知なまま実施される地質解釈は、客観性に乏しいだけでなく、誤った判断ともなりかねない。このため、電磁波トモグラフィを土木分野で有効に活用するには、岩盤の電磁波伝播特性が岩盤内部のどのような地質性状に依存して変化するかを明らかにすることが不可欠である。しかし、岩石は多くの鉱物や空気、水などの複雑な混合体であるので、岩盤中の電磁波の伝播特性を理論的に解くことは極めて困難である。したがって、現在のところ、さまざまな岩石の電磁気特性を実験的に整理し、解析結果との比較をしていくことが現実的である。このような観点から、本論文では、まず室内実験により、短波長帯における岩石の電磁気特性、特に電磁波の伝播速度や減衰に大きな影響を及ぼす比抵抗と誘電率について、岩質の影響を整理した。

2. 岩石の電磁気特性に関する既往の研究

岩石の電磁気特性のうち重要な定数は、比抵抗（あるいはその逆数の導電率）、透磁率、誘電率などである。通常の岩石の透磁率は cgs 単位系ではほぼ 1 とみなして

よいので、電磁波の速度や減衰に関しては、誘電率や比抵抗が強く影響する。そこで本章では、主に MHz 帯域における岩石の誘電率や比抵抗に関する既往の研究について概述する。

直流における岩石の比抵抗については電気探査に関連して、またマイクロ波以上の電磁波についてはリモートセンシング分野で比較的多くの研究があるのに比べ、MHz 帯域での誘電率や比抵抗については、最近研究例が増加してきたとはいえ、まださほど多くはない。しかし Hz~kHz の比較的低い周波数帯域では、1940~1950年代から基礎的な研究があり¹⁾、KELLER and LICASTRO²⁾は誘電率と比抵抗の積が岩石の特徴を示すとしている。

1960年以降は、電磁探査の発展に伴い、1 MHz 程度までの電磁気特性について多く研究が行われるようになった。横山³⁾は砂岩と石灰岩について周波数による誘電率と比抵抗の関係を調べ、誘電率が比抵抗のべき乗に比例することを見いだした。SCOTT *et al.*⁴⁾は岩石と土壤について誘電率と比抵抗および周波数の関係を調べ、誘電率が比抵抗のべき乗と周波数のべき乗の積に比例することを示した。横山⁵⁾は秋田県小坂鉱山付近の堆積岩や火山岩について、広帯域誘電損率測定器と平行平板電極（固体用）および同心円電極（粉末用）を用い、30 Hz~1 MHz における誘電率を測定した。その結果、岩石の誘電率は周波数の上昇とともに減少し、一定値に漸近すること、含水した岩石の誘電率は、低い周波数側において水自体の誘電率よりも高くなりうること、一旦乾燥させた岩石は、その後に復水させても元の誘電率を示さないこと、誘電損失は岩石により特定の周波数で極大を示すことなどの知見を得ている。横山・堀津⁶⁾は岩石を複数の鉱物混合体と考え、混合体誘電率算定のため経験式の適合度を調査し、乾燥した岩石に対して最も適合した式が含水時には適合できないことを示した。横山⁷⁾はこれらの知見を踏まえ、1 MHz までの岩石の電磁気特性について整理した。

1970年以降は電磁波反射法探査等の発展に伴い、MHz 帯域の測定例が増加してきた^{8),9)}。荘司・大橋¹⁰⁾は共振法（Q メーター法）により 50 kHz~50 MHz における土の誘電率を測定し、誘電率の平方根と間隙率の間に 1 次的相関関係があるとしている。坪田ほか¹¹⁾はインピーダンスアナライザにより 10~30 MHz における花崗岩等の比抵抗や誘電率を測定し、誘電率は周波数にあまり依存しないこと、比抵抗と誘電率に相関があること、FeO や FeO+TiO₂ と誘電率や比抵抗の相関があることなどを示している。矢戸ら¹²⁾、渡辺ら¹³⁾は土、主

*1 日本応用地質学会平成3年度研究発表会で一部講演

*2 建設省土木研究所 Public Works Research Institute, Ministry of Construction

にローム土の電磁気特性とその他の諸物性の関係について一連の研究を継続している。また, TAHERIAN *et al.*¹⁴⁾は炭酸塩岩や砂岩などの堆積岩について電磁気特性を整理し, Cole-Cole 式の適合性が良いことを述べている。天野・田辺^{15), 16)}は, 平衡ストリップ線路により 13 MHz~550 MHz における電磁気特性を測定する方法を開発して花崗岩, 安山岩および凝灰岩等で誘電率や比抵抗等を測定し, 比誘電率は周波数の増加とともに単調に減少するが, 誘電分散は凝灰岩や安山岩で大きく, 花崗岩で小さいこと, 誘電分散は高周波数帯域で一定値に漸近すること, 導電率と体積含水率の関係は岩種にあまり依存しないこと, 電磁波の速度や減衰から岩盤の密度や水分量を評価できる可能性があることなどを示している。北村ほか¹⁷⁾は, 300 MHz および 780 MHz において岩盤中の亀裂の幅や挟在物の種類が電磁波の伝播特性に及ぼす影響について実験し, 伝播速度よりもむしろ振幅が挟在物や水を有する亀裂の影響を強く受けるとしている。

このほか特に 1980 年代以降は, RANKIN and SINGH¹⁸⁾, KNIGHT and ENDRES¹⁹⁾, KORRINGA²⁰⁾, LANGE²¹⁾, SEN²²⁾, KNIGHT and NUR²³⁾, LANGE and SHOPE²⁴⁾, PASCAL *et al.*²⁵⁾, SHEN *et al.*²⁶⁾, RUFFET *et al.*²⁷⁾など, 実験的・理論的に, 鉱物粒子や間隙の形態, 含水率, 間隙水中の塩分濃度, 粘土含有率などが電磁気特性に及ぼす影響について検討した事例が見られるようになってきている。

以上のように, 電磁波トモグラフィの周波数帯域である MHz 帯域における岩石の電磁気特性に関する研究は, 現在活発にデータが収集されつつある。しかし, 岩質の影響や含水の影響など, 岩石の電磁気特性の複雑性とその統一的なモデル化の方法に関しては, 解決の糸口はまだつかめていない。これは岩石の内部構造や構成物質が多様であることのみならず, 岩石と水の境界層が岩盤全体の電磁気特性に複雑に影響し, 現象の理論的なモデル化が極めて困難であることに起因している。このため岩石を構成する基質の誘電率を乾燥時と湿潤時で別に設定する方法¹⁹⁾など, 大胆なモデル化を要しているのが現状である。

3. 電磁波の伝播に関する基本定数と基本解

電磁波の伝播に関係する定数としては前述のように, 誘電率と比抵抗が最も重要な定数である。また, 電磁波の周波数により誘電率が変化する性質(誘電分散)も重要である。この性質により, 電磁波の位相速度と群速度は厳密には一致せず, 伝播とともに波形が変化していく

性質を持っている。上記のような各種の定数は岩質や周波数毎に複雑に変化するので, 岩石中の電磁波の伝播の厳密な理論解を求めることは困難である。しかし, 位相速度と群速度が一致するような平面波において, 一般媒質中を z 方向に伝播する波の波動方程式(1)について解を求めると, (2)式が得られる。

$$\partial E_x / \partial z = \sigma \mu \partial E_x / \partial t + \epsilon \mu \partial^2 E_x / \partial t^2 \quad (1)$$

$$E_x = E_{x0} \exp(j\omega t - kz) \quad (2)$$

ここに, σ : 導電率(比抵抗 ρ の逆数), μ : 透磁率, ϵ : 誘電率, E_{x0} および E_x : 伝播前と伝播後の電界強度, j : 虚数単位, ω : 角周波数, t : 時間, z : 伝播距離, k : 伝播定数($=\beta - j\alpha$), α : 減衰定数, β : 位相定数である。このとき, 電磁波速度 $v(=\omega/\beta)$ および減衰定数 α は, それぞれ(3)式および(4)式で表される。

$$v = (2/\epsilon\mu)^{0.5} [1 + (\sigma/\omega\epsilon)^2]^{0.5} \quad (3)$$

$$\alpha = \omega [(\epsilon\mu/2) \{1 + (\sigma/\omega\epsilon)^2\}^{0.5} - 1]^{0.5} \quad (4)$$

電磁波トモグラフィにおいては, v や α が求められるので, これから逆に誘電率 ϵ や比抵抗 ρ が(5)式や(6)式のように求められる。

$$\epsilon = (\omega^2 - v^2\alpha^2) / \mu v^2 \omega^2 \quad (5)$$

$$\rho = 1/\sigma = \mu v / 2\alpha \quad (6)$$

厳密には誘電率は複素数であるが, 今回の一連の実験では実部について測定し, 比抵抗は, 並列等価回路(コンデンサと抵抗が並列するような回路)における並列抵抗²⁸⁾を測定した。

4. 実験方法および供試体

4.1 実験方法

短波長帯における主な岩石や鉱物の電磁気定数と, これに各種の要因が及ぼす影響について実験した。実験項目は岩石物理試験と電磁気特性の試験である。岩石物理試験は供試体の体積を求めた後, 乾燥重量と水中湿潤重量を 0.01 g まで測定した。電磁気特性の試験はインピーダンス・ゲインフェーズアナライザ(YHP 社製 HP4194A)に, 厚さ約 12 mm の供試体まで測定できるテストフィクスチャ(YHP 社製 HP16451B, 電極直径 38 mm)を接続し, 比誘電率(物質の誘電率を真空の誘電率で除したもの), 比抵抗, 損失係数を 0.01~15 MHz の範囲で測定した(図-1)。その代表値は, 電磁

a. Diagram of sample fixture and measuring system

b. Measuring method of consolidated sample

c. Measuring method of unconsolidated sample

図-1 測定方法の概要図

波トモグラフィの利用周波数20~150 MHzに最も近く、かつ本測定系で測定可能な最大周波数である15 MHzとした。以下、本論文においては、特に断りのない限り、比抵抗、比誘電率、損失係数とは、15 MHzにおけるそれを示すものとする。

4.2 供試体

供試体は日本で産する主な岩石や鉱物、ならびに人工の球形ガラスビーズである。電磁気特性の測定は、60°Cの炉乾燥状態（粘土鉱物の収縮や変質が生じないように60°Cの比較的低温で24時間以上乾燥した後、デシケータ中で24時間以上静置した状態）、飽和状態（水を満した容器に供試体全体を浸漬させ、1時間脱気した後、そのまま大気圧に戻して24時間以上静置した状態）、ならびに飽和状態から室内で乾燥していく過程において行い、岩石や鉱物など固結した供試体は厚さ10 mm、直径50 mmの円盤状供試体とし、ガラスビーズやモンモリロナイト（未固結供試体）は上記の厚さおよび内径のプラスチック製円筒ホルダーの上下に薄いセロファン（厚さ約45 μm）を張り付けてその内部に入れた（図-1）。このセロファンにより、未固結な供試体の測定値には絶対誤差が生じる。例えば15 MHzでの花崗岩の誘電率は、セロファンがない場合に比べ0.7%（乾燥時）～1.8%（飽和時）、比抵抗は-3.2%（乾燥時）

図-2 鉱物における周波数と比誘電率、比抵抗の関係

①乾燥時の比誘電率、②飽和時の比誘電率、③乾燥時の比抵抗、④飽和時の比抵抗

～8.1%（飽和時）変化した。この測定誤差については特に補正しなかった。ただし、以下の検討のなかで、この2種の測定方法による結果を同列で対比・議論することは極力避けることとした。

5. 実験結果

5.1 周波数による変化

図-2~4は、一般的な鉱物、堆積岩、火成岩の、乾

乾燥および飽和状態における周波数（長波～短波）と比誘電率や比抵抗の関係である。図-2 ①～④は鉱物、図-3 ①～④は堆積岩、図-4 ①～④は火成岩であり、供試体の種類や間隙率は図-5～7 にそれぞれ対応している。また、図中①は乾燥時の比誘電率、②は飽和時の比誘電率、③は乾燥時の比抵抗、④は飽和時の比抵抗である。同図によると、比誘電率、比抵抗、いずれも周波数の増加とともに値が低下する。その変化率は、比誘電率は飽和時の方が大きく（乾燥時が周波数の0～0.5乗、飽和時は周波数の-0.5～-1乗にほぼ比例）、比抵抗は乾燥時の方が大きい（乾燥時が周波数のほぼ-1乗、飽和時が0～0.5乗に比例）。また、比誘電率は周波数の増加とともにある値に収束する傾向があるが、比抵抗は15 MHz 付近でも収束する傾向が見られない。さらに、鉱物と堆積岩や火成岩を比較すると、一部の鉄鉱類を除き、全体として鉱物の方が周波数による比誘電率の変化（誘電分散）が小さい。これは鉱物供試体の方が異種鉱物の境界面が少なく均質であることなどに起因すると思

われる。

5.2 鉱物や岩種による変化

図-5～7 はそれぞれ一般的な鉱物、堆積岩、火成岩の、15 MHz における比誘電率と比抵抗の関係である。いずれの図においても、比誘電率と比抵抗には負の相関があり、比抵抗が比誘電率のほぼ-2～-3 乗に比例する形で分布している。

鉱物（図-5）について見ると、最も高比抵抗・低誘電率の（電磁波速度が大きく、また減衰が小さい）鉱物は石英や長石などの珪長質鉱物であり、次いでやや苦鉄質な鉱物、粘土鉱物（Na タイプモンモリロナイト。同試料は含水により膨張し、大気圧下で飽和すると乾燥時の間隙率を維持できなかったため飽和時の試験は実施していない。）と続き、最も低比抵抗・高誘電率な鉱物は磁鉄鉱や赤鉄鉱などの鉄鉱類である。特にモンモリロナイトは、化学組成は珪長質鉱物に近いにもかかわらず、苦鉄質な鉱物よりも鉄鉱類に近い値を示している。実験時のモンモリロナイトの間隙率は他の供試体に比べて著

図-3 堆積岩における周波数と比誘電率、比抵抗の関係
①乾燥時の比誘電率、②飽和時の比誘電率、③乾燥時の比抵抗、④飽和時の比抵抗

しく高いが、乾燥状態においては間隙率の高い鉱物ほど高比抵抗・低誘電率（空気の電磁気特性）に近くなると考えられるので、モンモリロナイトそのものの電磁気特性は図-5に示したよりもさらに低比抵抗・高誘電率になるものと思われる。

一般に高誘電率の原因は、微小な導体の存在、あるいは何らかの分極現象に求められるが、モンモリロナイトの化学組成を考えると、前者よりも後者の現象が関与している可能性が高い。この結果は、岩石が珪長質か苦鉄質かといった問題よりも、粘土鉱物の含有量などが岩石の電磁気特性を大きく左右する可能性があることを示唆

しており、電磁波トモグラフィの探査結果を地質的に解釈する上で重要である。堆積岩や火成岩の分布を見ると種々の岩種が図上で必ずしも岩石学的に系統的な分布をしていないが、その原因は上記のような点にも求められる。

次に堆積岩（図-6）について見ると、石灰岩は他の岩石よりも図のやや右上（高比抵抗・高比誘電率側）に、またチャートは上（高比抵抗側）に位置しているが、他の岩石はほぼ比抵抗が比誘電率の $2 \sim 3$ 乗に比例するように、ある幅の範囲内に分布している。しかし、鉱物と比較するとその分布は全体にやや低比抵抗側にシフ

図-4 火成岩における周波数と比誘電率, 比抵抗の関係
①乾燥時の比誘電率, ②飽和時の比誘電率, ③乾燥時の比抵抗, ④飽和時の比抵抗

トしている。

火成岩 (図-7) について見ると、堆積岩に比較してわずかながら高比抵抗側にずれる (したがって、鉱物と同程度のところに分布する) ものが多く、その主体は、数が少ないので明瞭ではないが、深成岩である。安山岩や流紋岩などの火山岩は相対的に比抵抗が低く堆積岩と類似した分布を示している。また、一般に珪長質な岩石 (花崗岩や流紋岩) と苦鉄質な岩石 (はんれい岩や玄武岩など) では、後者の方が抵抗が低く、誘電率が高いと推定されるが、少なくとも今回の供試体で見ると、比抵抗や比誘電率は、流紋岩でも玄武岩などと同様に低比抵抗・高誘電率のものがある。

図-5~7の鉱物や岩石全体について乾燥時と飽和時の値を比較すると、飽和時は乾燥時に比較して相対的に低比抵抗・高比誘電率側にシフトし、その程度は間隙率の大きいものほど、また、乾燥時の比抵抗が大きく比誘電率が小さいものほど大きい。

5.3 間隙率による変化

図-8は乾燥した球形のガラスビーズ (直径0.05 mm) を用い、所定の間隙率になるようにホルダーに詰めて比誘電率を測定した結果である。なお、間隙率60~80%の場合はホルダー中の上部に間隙ができることが避けられなかったが、できる限り緩く詰めてそのまま測定を行った。

図-5 15 MHzにおける鉱物の比誘電率と比抵抗の関係

図-6 15 MHzにおける堆積岩の比誘電率と比抵抗の関係

複数の物質の混合体の比誘電率の算定式としては、いくつかの理論式や経験式があり、一般に、Beer の(7)式や Lichtenecker の(8)式の適合性が良いと言われている⁶⁾。

$$\sqrt{\epsilon} = a \sqrt{\epsilon_1} + b \sqrt{\epsilon_2} + \dots + x \sqrt{\epsilon_n} \quad (7)$$

図-7 15 MHzにおける火成岩の比誘電率と比抵抗の関係

図-8 乾燥したガラスビーズにおける間隙率と比誘電率の関係

$$\log \epsilon = a \log \epsilon_1 + b \log \epsilon_2 + \dots + x \log \epsilon_n \quad (8)$$

ここに、 ϵ は混合体の比誘電率、 $\epsilon_1 \sim \epsilon_n$ は各物質の比誘電率、 $a \sim x$ は混合体に占める各物質の体積率($a+b+\dots+x=1$)である。両式を実験結果に適用すると、(8)式の方が実測値に近い。したがって、乾燥状態においては(8)式が有効である。これは横山⁶⁾の結果と調和する。

図-9は同試験による比誘電率と比抵抗の関係である。間隙率が増加すると高比抵抗・低比誘電率となり、そのパターンは比抵抗が比誘電率の-2~-3乗にほぼ比例する。

図-9 乾燥したガラスビーズにおける比誘電率と比抵抗の関係

図-10 飽和したガラスビーズにおける比誘電率と比抵抗の関係

図-10は図-8と同様に直径0.05 mmのガラスビーズを用い、蒸留水および0.1 mol/lの食塩水により飽和させた状態で間隙率を変えて測定したときの比誘電率と比抵抗の関係である。なお、同図における比誘電率や比抵抗は供試体下面の電極と供試体の間にセロファンを仲介した値であるため、特に飽和時はセロファンの絶縁効果により絶対誤差が生じて、真の値よりも比抵抗は大きく比誘電率は小さくなる可能性がある。セロファンを用いずに測定する方法としては同軸電極を用いる方法¹⁴⁾

図-11 ガラスビーズの粒径と比誘電率、比抵抗、損失係数の関係

図-12 ガラスビーズの比誘電率と比抵抗に及ぼす粒径の影響

などが考えられるが、ここでは間隙率による相対的な変化を観察するのが主目的であることから、そのまま測定している。

測定結果によると、飽和状態においては、乾燥状態とは逆に間隙率の上昇とともに比誘電率が上昇する。一方、比抵抗は間隙水の水質により異なり、蒸留水で飽和したときには間隙率の上昇とともに比抵抗が上昇するのに対し、塩水の時にはほとんど変化がなく、塩水自体の

比抵抗とはほぼ同程度である。この理由を特定するのは困難であるが、塩水で飽和された供試体の比抵抗が塩水自体の比抵抗に大きく依存するのに対し、蒸留水の場合、蒸留水の比抵抗が比較的大きいために、ガラスビーズと蒸留水の界面の表面電導効果が供試体の比抵抗に対し相対的に大きな影響を与える可能性が考えられる。

図-10では試料の関係上、低い間隙率の状態を再現できないが、間隙率が0のときのガラスの比抵抗は $10^4 \Omega \cdot m$ 程度、比誘電率は6.8程度（本材料の板状供試体における1 MHzでのカタログ値）であることを考えると、低い間隙率の領域では、間隙率の上昇とともに比抵抗は低下、比誘電率は上昇し、ある程度以上間隙率が高くなると、比誘電率は引き続き上昇するが比抵抗はあまり変化しないか、蒸留水の場合、再び上昇に転じ、全体として同図上で「し」型のパターンを示す可能性がある。

5.4 粒度による変化

図-11は化学組成は同一で粒度のみが異なる球形ガラスビーズをそれぞれ同一の間隙率（40.3%）になるように充填して、比抵抗、比誘電率、損失係数を測定したものである。同図によると、同一の間隙率でも粒度によって比抵抗や損失係数は変化し、細粒になるほど比抵抗が小さく、また損失係数が大きくなる。比抵抗の低下の度合いは、直径が1/100になるのに対して比抵抗は約1/6程度となっている。一方、比誘電率にはほとんど変化がない（ただし飽和時には、細粒になるほど比誘電率はわずかながら増加する）。

図-12は同試験による比誘電率と比抵抗の関係（飽和時）である。乾燥時は比誘電率にわずかな変化しかないのでグラフは比抵抗のみが変化するが、飽和時もそれに近い傾向にあり、ほぼ比抵抗のみが変化するという点で図-9のパターンとは異なっている。粒度により比抵抗が減少する機構としては、粒度が小さくなると単位重量当りのガラスと空気との界面の面積（比表面積）が多くなり、表面電導効果などにより電磁波が減衰しやすくなることが考えられる。KNIGHT and NUR²³⁾は60 kHz～4 MHzにおける砂岩の測定結果から、比誘電率と電磁波周波数の関係はべき乗則に従い、かつ、比誘電率の周波数依存の程度は単位体積当りの表面積に比例することを見いだした。本実験では周波数変化については取り扱っていないが、粒度によって比誘電率が変化する点は一致する。ただし、比誘電率よりむしろ比抵抗が大きく変化することが図-12から明らかであり、表面積変化による周波数依存の程度についても、比誘電率よりもむしろ比抵抗でより大きな変化が生じる可能性がある。一般に、粘土鉱物が低比抵抗であるのは、鉱物表面の電気

特性のみならず粒度の影響も大きいと考えられる。しかし図-12に見られるように、単に細粒であるだけでは比誘電率にさほど大きな変化は生じないので、粘土鉱物の場合には比誘電率を上昇させる粒度以外の機構（例えば粘土表面の電気的性質）も考える必要がある。

6. ま と め

短波長帯における岩石や鉱物の電磁気定数、特に比誘電率と比抵抗について、岩質の影響に着目して実験した。この結果、次のことがわかった。

- ① 周波数の増加とともに比誘電率や比抵抗は低下し、その変化率は、比誘電率に関しては飽和時の方が大きく、比抵抗に関しては乾燥時の方が大きい。
- ② 比誘電率と比抵抗には負の相関があり、比抵抗は比誘電率のほぼ2～3乗に比例する。
- ③ 鉱物は高比抵抗・低誘電率のものから低比抵抗・高誘電率のものへと順に、珪長質鉱物、苦鉄質鉱物、粘土鉱物、鉄鉱類に分けられる。
- ④ 堆積岩や火山岩の一部は、一般的な鉱物の分布に比較してやや低比抵抗側にシフトして分布する。
- ⑤ 乾燥時における間隙率と比誘電率の関係はLichteneckerの式で近似できる。
- ⑥ 間隙率による比抵抗と比誘電率の変化のパターンは、乾燥時と飽和時で大きく異なる。
- ⑦ 粒径が小さくなると比抵抗が低下する。

これらの結果のいくつかは、既述したいくつかの論文の実験結果と定性的に一致している。ただし②や④などは、既存の論文では多くの岩種・岩質についてまとめて実験されていないこともあって、今まで知られていなかった点であると考えられる。

今回は主に岩質の影響について検討したが、上記のまとめに示したように、岩石が水を含んだ状態の電磁気特性は乾燥時とは大きく異なることが判明した。特に含水率や水質の相違は、岩盤としての電磁気特性に大きな影響を与える可能性がある。間隙水の影響については続報で検討する予定である。

参 考 文 献

- 1) 鈴木廉三九, 横山秀吉 (1956): 紀州鉾山鉾床母岩の誘電率について, 東北鉾山, 3[1], pp. 1-7.
- 2) KELLER, G. V. and LICASTRO, P. H. (1959): Dielectric constant and electric resistivity of natural-state cores, United States Geological Survey Bulletin, 1052H, pp. 257-285.
- 3) 横山秀吉 (1964): 岩石の高周波数における比抵抗と誘電

- 率の関係, 日本鉱業会誌, Vol. 80, No. 915, p. 727.
- 4) SCOTT, J. H., CARROLL, R. D. and CUNNINGHAM, D. R. (1967): Dielectric constant and electrical conductivity measurement of moist rock: A new laboratory method, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 72, No. 20, pp. 5101–5115.
 - 5) 横山秀吉 (1977): 30 Hz~1 MHz 周波数領域における岩石の誘電率について—岩石の誘電的性質に関する研究(第一報), 日本鉱業会誌, Vol. 93, No. 1071, pp. 347–352.
 - 6) 横山秀吉, 堀津多三郎 (1978): 岩石の誘電率の算定について—岩石の誘電的性質に関する研究(第二報), 日本鉱業会誌, Vol. 94, No. 1083, pp. 317–322.
 - 7) 横山秀吉 (1980): 岩石の電気的性質, 物理探鉱, Vol. 33, No. 5, pp. 34–44.
 - 8) CHUNG, D. H., WESTPAL, W. B. and SIMMONS, G. (1970): Dielectric properties of apollo lunar samples and their comparison with earth material, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 75, No. 32, pp. 6524–6531.
 - 9) 北原 良 (1984): VHF・UHF 領域における岩石の電気的性質について, 日本鉱業会研究発表講演会講演要旨集, pp. 317–318.
 - 10) 莊司泰敬, 大橋武一郎 (1986): 室内試験による土の比抵抗, 比誘電率の測定, 昭和61年応用地質学会研究発表会論文集, pp. 79–82.
 - 11) 坪田浩二, 則竹和光, 登内正治, 広瀬雅信 (1989): 岩石に対する電磁波特性基礎実験(その2), 物理探査学会第80回学術講演会論文集, pp. 292–297.
 - 12) 穴戸敏雄, 渡辺直隆, 藤田龍之, 古河幸雄 (1987): 土の電気特性, 物理探査学会第76回学術講演会講演論文集, pp. 215–219.
 - 13) 渡辺直隆, 穴戸敏雄, 藤田龍之, 古河幸雄 (1989): 土の電気特性(その2), 物理探査学会第81回学術講演会講演論文集, pp. 247–248.
 - 14) TAHERIAN, M. R., KENYON, W. E. and SAFINYA, K. A. (1990): Measurement of dielectric response of water-saturated rocks, *Geophysics*, Vol. 55, No. 12, pp. 1530–1541.
 - 15) 天野雄二, 田辺一夫 (1989): 地盤の電磁波伝播特性に関する検討(I)—岩盤の電磁波伝播定数の測定法とその適用—, 電力中央研究所報告 T89065, 23p.
 - 16) 天野雄二 (1991): 地盤の電磁波伝播特性に関する検討(II)—岩盤の電磁波伝播定数に及ぼす水分ならびに温度の影響—, 電力中央研究所報告 T90051, 34p.
 - 17) 北村孝海, 向上拡美, 塩崎 功, 弘末文紀, 登内正治 (1989): 岩盤レーダーによる電磁波伝播特性について, 物理探査学会第81回学術講演会論文集, pp. 281–284.
 - 18) RANKIN, D. and SINGH, R. P. (1985): Effect of clay and salinity on the dielectric properties of rock, *Journal of Geophysical Research*, vol. 90, No. B10, pp. 8793–8800.
 - 19) KNIGHT, Rosemary and ENDRES, Anthony (1990): A new concept in modeling the dielectric response of sandstones: Defining a wetted rock and bulk water system, *Geophysics*, Vol. 55, No. 5, pp. 586–594.
 - 20) KORRINGA, J. (1984): The influence of pore geometry on the dielectric dispersion of clean sandstones, *Geophysics*, Vol. 49, No. 10, pp. 1760–1762.
 - 21) LANGE, James N. (1983): Microwave properties of saturated reservoirs, *Geophysics*, Vol. 48, No. 3, pp. 367–375.
 - 22) SEN, P. N. (1984): Grain shape effects on dielectric and electrical properties of rocks, *Geophysics*, Vol. 49, No. 5, pp. 586–587.
 - 23) KNIGHT, Rosemary J. and NUR, Amos (1987): The dielectric constant of sandstones, 60 kHz to 4 MHz, *Geophysics*, Vol. 52, No. 5, pp. 644–654.
 - 24) LANGE, James N. and SHOPE, Steven S. (1981): Microwave properties of drilling fluids, *Geophysics*, Vol. 46, No. 3, pp. 322–332.
 - 25) PASCAL, H., PASCAL, F. and RANKIN, D. (1982): Some aspects of attenuation and dispersion of electromagnetic waves in fluid-saturated porous rocks and applications to dielectric constant well logging, *Geophysics*, Vol. 47, No. 3, pp. 388–394.
 - 26) SHEN, L. C., SAVRE, W. C., PRICE, J. M. and ATHAVALE, K. (1985): Dielectric properties of reservoir rocks at ultra-high frequencies, *Geophysics*, Vol. 50, No. 4, pp. 692–704.
 - 27) RUFFET, C., GUEGUEN, Y. and DAROT, M. (1991): Complex conductivity measurement and fractal nature of porosity, *Geophysics*, Vol. 56, No. 6, pp. 758–768.
 - 28) 物理探査学会 (1989): 図解物理探査, 物理探査学会, p. 194.

(1992年7月15日受付, 1993年3月23日受理)