

# 土質試料の電磁気特性測定

鈴木 敬一<sup>1)</sup>・小松 幹雄<sup>1)</sup>

## 1. はじめに

地中レーダ探査は我が国では1970年代に実用化され、路面下の空洞探査や埋設管探査などで実績を上げてきた。最近では、装置も簡便なものも多く、探査効率も高いことから非破壊調査技術として多分野で適用されている。

一方、資源探査、特に石油関係の調査においては、物理探査のデータ(例えばP波速度)から有用な工学的物性値、例えば孔隙率を推定する、あるいはその時間的変化を捉えて埋蔵量を推定することなどが実用化されている。物理探査データから物性値を推定する学問分野はロックフィジックスとして体系化されている。

地中レーダ探査においてもロックフィジックス的なアプローチにより、単に埋設管や空洞を探すだけではない付加価値を提供することができると考えられる。例えば、Greaves *et al.* (1996)では、電磁波の速度分布から、地質構造と体積含水率を2次元断面として推定することを試みている。

しかし、地中レーダは他の物理探査より歴史が浅く、そのため電磁波に関わる物性値(電磁波速度、すなわち比誘電率)に関しては、体系化されたデータは少なく岩石や海外で取得されたデータしかないのが現状である。

そこで筆者らは国内の土質試料を採取し、比誘電率・導電率・透磁率(3つを合わせて電磁気特性という)についてネットワークアナライザを用いて測定している。また、土質試験を行い、比誘電率と体積含水率の関係を調べている。ここではその結果について報告する。

## 2. 土質試験

土質と電磁気特性との対比を行うため、以下の土質試験を実施した。

- ①砂置換法による土の密度試験(JIS-A-1214-1995)
- ②土粒子の密度試験(JIS-A-1202-1999, JGS-T111-2000)
- ③含水比試験(JIS-A-1203-1999, JGS-T121-2000)

これらの試験から得られる結果を用いると、以下の物性値を計算することができる。

$$\begin{aligned}\delta_w &= \rho_d \times \frac{w_n}{100} && \text{体積含水率} \\ \delta_m &= \left(1 - \frac{w_n}{100}\right) \cdot \frac{\rho_t}{\rho_s} && \text{土粒子体積率} \\ \delta_a &= 1 - (\delta_m + \delta_w) && \text{空気体積率}\end{aligned}\tag{1}$$

ただし、 $\rho_d$ は乾燥密度、 $\rho_s$ は湿潤密度、 $\rho_t$ は土粒子密度、 $w_n$ は含水比である。

## 3. 測定試料

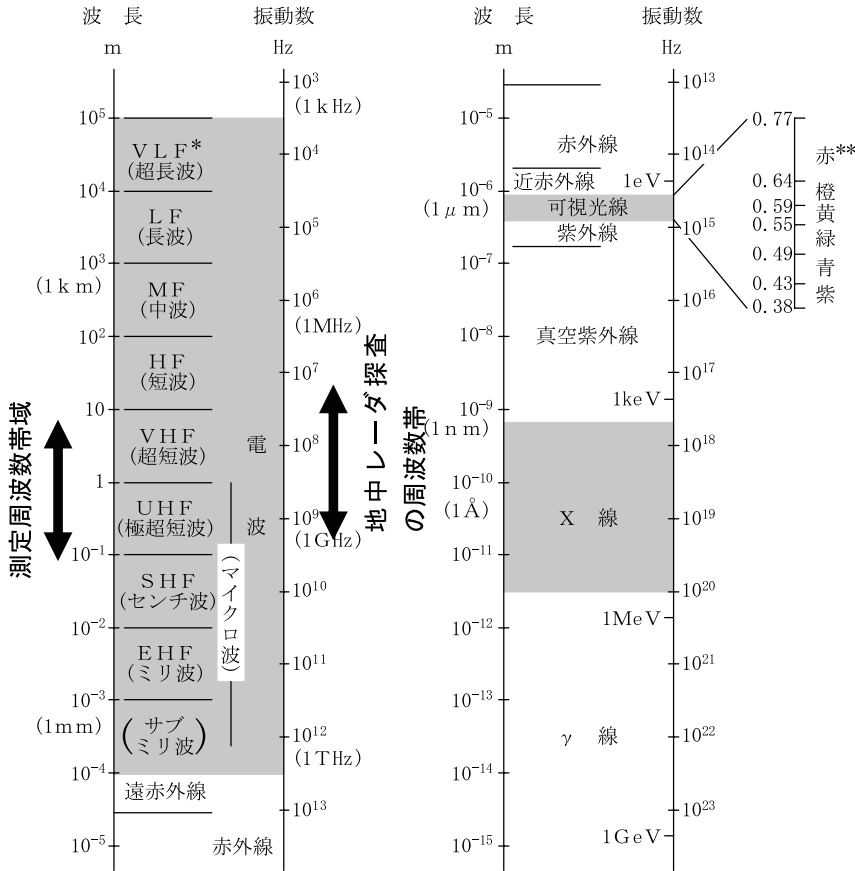
測定試料の土質・採取地・数量は第1表に示すとおりである。このうち宮崎県えびの市産の試料は土質

第1表 測定した土質とその産地・数量。

土質	産地	測定数
ローム	茨城県ひたちなか市	12
スコリア	静岡県御殿場市	12
泥炭	北海道石狩市	12
ローム(黒ぼく)	宮崎県えびの市	6
		42

1) 川崎地質株式会社 事業本部 探査技術部

キーワード: 電磁波速度, 比誘電率, 導電率, 体積含水率, 誘電分散



\* 電波の周波数帯の英字による呼び方は国際電気通信条約無線規則による。  
 \*\* 可視光線の限界ならびに色の境界には個人差がある。

第1図 電磁波の呼び名と周波数・波長の関係。

区分としてはロームに分類されるが、有機質を多く含み、色調も黒っぽい。茨城県ひたちなか市産のロームと区別するため、えびの市産のロームを「黒ぼく」とこれ以降は表記する。

#### 4. 電磁気特性の測定方法

電磁波は周波数帯（あるいは波長）に応じて国際電気通信条約無線規則により名前がつけられている（第1図）。また、周波数により利用方法も異なる。例えば、FMラジオは中波（MF帯）、FMラジオやテレビ放送（地上アナログ、VHF帯）は超短波に利用されている。地中レーダは、数MHzから1GHz程度までを使用する。すなわち中波から極超短波（UHF帯）である。本測定は地中レーダで使用される周波数帯域を

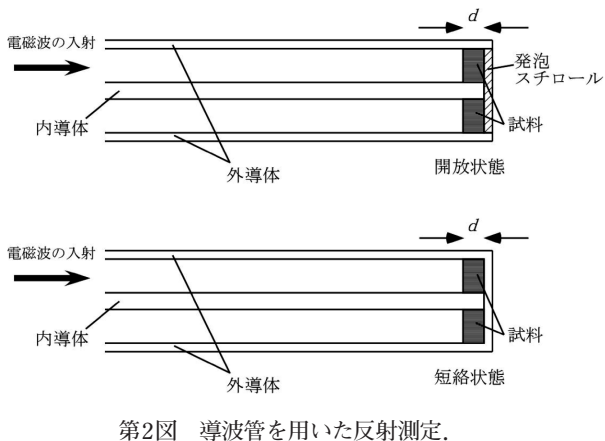
ほぼ網羅するように50MHz～3GHzとした。

電磁波の伝搬様式は、伝搬定数と呼ばれる次式であらわされる。

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)} = j\left(\frac{2\pi}{\lambda_0}\right)\sqrt{\mu_r\epsilon_r} \quad (2)$$

ここで、 $\epsilon$ は誘電率、 $\sigma$ は導電率、 $\mu$ は透磁率、 $j$ は虚数単位、 $\omega$ は角周波数、 $\lambda_0$ は媒質内を伝搬するときの波長、誘電率と透磁率の添字 $r$ は真空の値に対する比であることを示し、 $\epsilon_r$ と $\mu_r$ をそれぞれ比誘電率、比透磁率という。

第2図に示すように、電磁波が外に放射しない構造の管（このような管を導波管という）の端部に試料を置き、反射係数 $\Gamma$ を測定する。反射係数から次式により試料のインピーダンスを求めることができる。



第2図 導波管を用いた反射測定.

$$Z_C = \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} Z_0 = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \quad (3)$$

ただし、 $Z_C$ は媒質のインピーダンス、 $Z_0$ は導波管の特性インピーダンスである。したがって電磁波の反射係数を測定することにより、伝搬定数を求めることができる。伝搬定数は(2)式に示すとおり電気特性(誘電率と導電率)と磁気特性(透磁率)が関わっている。しかし、試料背面が、

- ①空気するとき反射係数=1
- ②導体するとき反射係数=-1

という性質を利用すると、

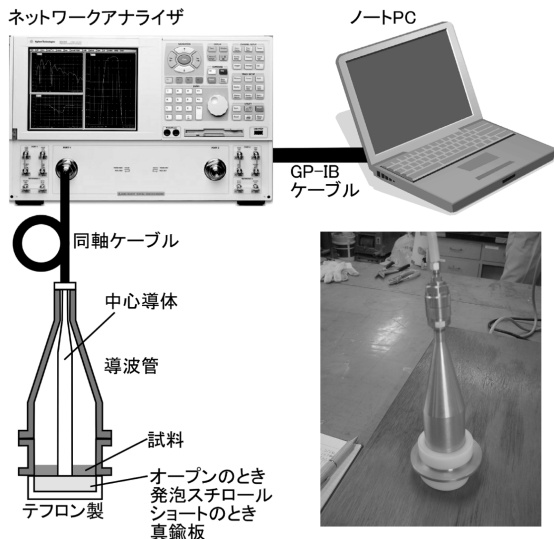
$$\epsilon_r = -j \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{\gamma}{Z_{CN}} = \epsilon'_r - j\epsilon''_r \quad (4)$$

$$\mu_r = -j \frac{\lambda_0}{2\pi} Z_{CN} \gamma = \mu'_r - j\mu''_r \quad (5)$$

と変形することが可能である。ただし、 $Z_{CN}$ は $Z_0$ で規格化したインピーダンス、比誘電率と比透磁率の'はそれぞれの実数部、''はそれぞれの虚数部である。(4)式及び(5)式により、比誘電率と比透磁率を分離することができる。実際には試料背面を空気にするにはできないため、空気と同じ電磁気特性とみなせる発砲スチロールを用いる。導電率は、比誘電率の虚数部を用いて、

$$\sigma = \epsilon''_r \epsilon_0 \omega \quad (6)$$

とあらわすことができる。ただし、 $\epsilon_0$ は真空の誘電率(=8.854×10<sup>-12</sup> F/m)である。比誘電率と電磁波速



第3図 測定システム.

度 $v$ は、真空中の電磁波速度 $C$ (=2.998×10<sup>8</sup> m/sec:定数, 光の速度)を用いると、

$$v = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (7)$$

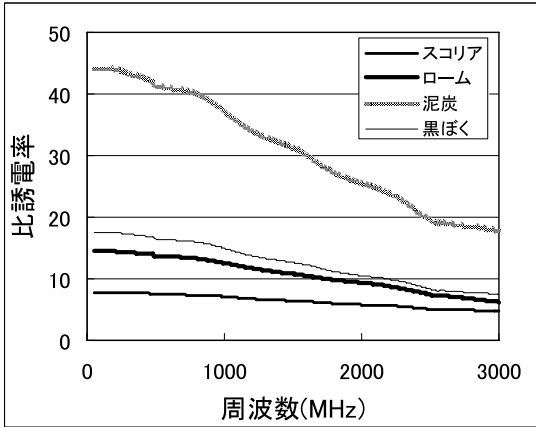
とあらわすことができる。

反射係数は、ネットワークアナライザ(Agilent Technology社製N5230A)を用いて測定した。第3図に示すようにネットワークアナライザに同軸ケーブルを用いて導波管を接続し、その中に試料を設置して反射係数を測定する。データの収録にはノートPCを用いた。

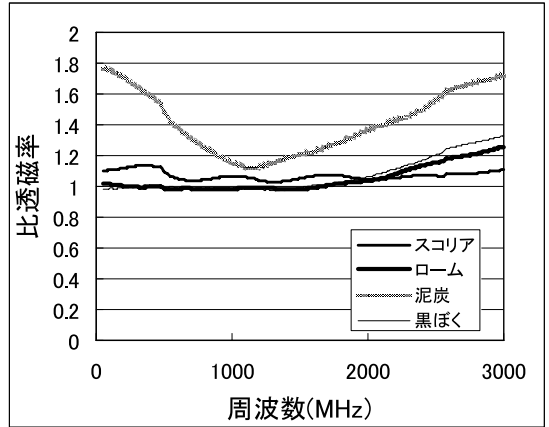
導波管内に土質試料を乱さないで設置することは非常に難しい。そのため次に示す方法により、導波管内で原位置の湿潤密度を再現する方法を考案した。

- ①湿潤密度から導波管内での試料厚さが所定の値になるときの重量を計算し、その分の重量を測り取る。
- ②試料を導波管内に入れ、所定の試料厚さになるように締め固める。

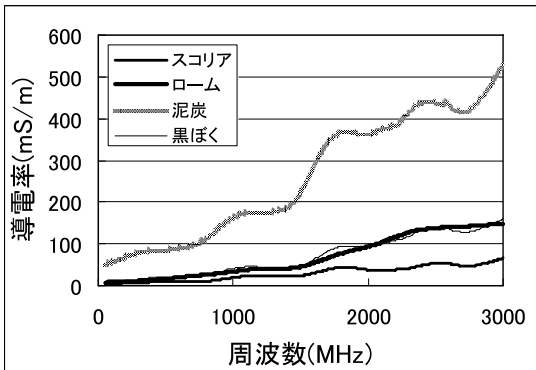
なお、本研究では試料厚さを1mm, 2mm, 4mmと3回変え、それぞれ電磁気特性を測定し、その平均値をもって測定結果とした。



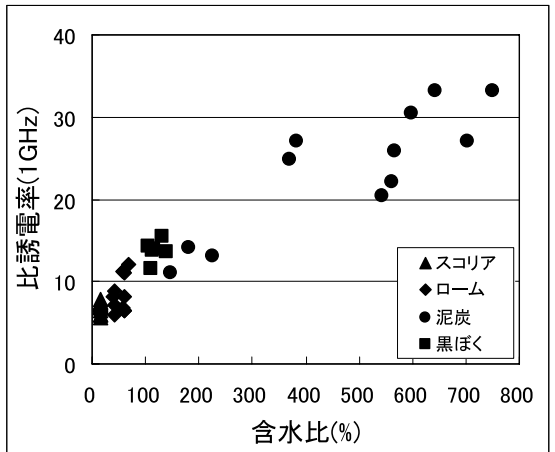
第4図 比誘電率の測定例.



第6図 比透磁率の測定例.



第5図 導電率の測定例.



第7図 含水比と比誘電率.

## 5. 測定結果

第4図に比誘電率の測定結果の例を示す。どの試料も比誘電率は周波数依存性（誘電分散という）を示し、周波数が高くなるにつれて低下する。スコリアは最も誘電分散が小さく、泥炭が最も大きい。ローム・黒ぼくではその中間的な誘電分散を示す。

第5図に導電率の測定例を示す。導電率は周波数が高いほど大きな値を示す。導電率が高い物質ほどその中を伝わる電磁波の減衰が大きくなるため、このことは周波数が高くなるほど地中レーダの探査深度が低下する一因を示している。

第6図に比透磁率の測定例を示す。比透磁率の値は、泥炭を除いて周波数に依存せず、ほぼ一定である。当該地域の泥炭は酸化鉄が2%程度含まれてい

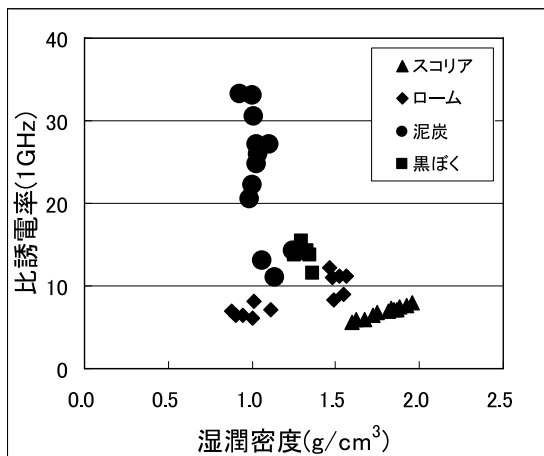
るため、比透磁率の値が大きいと考えられる。

(7)式は、厳密には次式を満たす場合に成立する。

$$\left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2 \ll 1 \quad (8)$$

$$\mu = \mu_0$$

すなわち、比透磁率の値が真空の値  $\mu_0$  ( $=1.257 \times 10^{-6}$  H/m) に等しく、導電率が角周波数と誘電率の積より十分小さいことが条件である。今回の測定結果では、1.5GHz程度までは(8)式の関係が成立している。通常の地中レーダ探査では、(7)式をどのような場合にも適用しているように思われるが、厳密にはこのような確認が必要である。



第8図 湿潤密度と比誘電率.

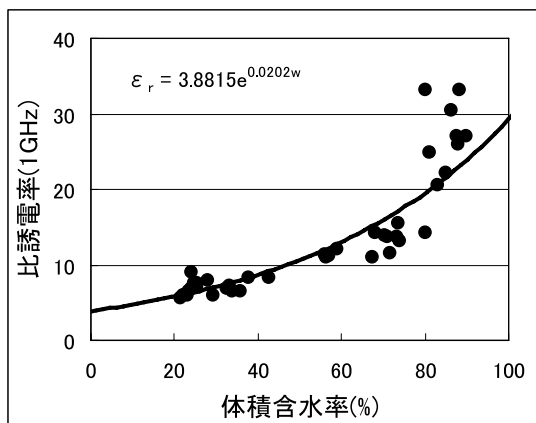
第7図に含水比に対する比誘電率を示す。このときの比誘電率は1GHzの値であり、(8)式の条件は成立している。この図からわかるように、含水比が大きいほど比誘電率の値が大きい。また、第4図からわかるとおり含水比の大きい泥炭では周波数依存性が大きく、含水比の小さいスコリアでは周波数依存性が小さい。

第8図は、湿潤密度と比誘電率の関係を示したグラフである。スコリア以外は、湿潤密度と比誘電率との間に相関性がほとんど認められない。当該スコリアは比較的淘汰が良く、湿潤密度がほとんど含水比に依存しているため、比誘電率と湿潤密度との間に相関が現れたと考えられる。

第9図は、(1)式の第1式により計算した体積含水率と比誘電率の関係である。泥炭の場合は、バラツキが大きい。比誘電率の値は体積含水率と強い相関があるように見える。これについては次章で詳述する。

## 6. 考察

水を含む媒質の誘電分散は、以下のようなメカニズムにより生じると考えられる。1個の水分子を大局的に見ると電荷の偏りがあり、これが分極の原因となっている。誘電率は分極の度合いをあらわす物理量であり、水は大きな誘電率を示す。外部から電場を与えると、電場の正負に応じて分極の方向が揃えられる。電磁波のような交流電場の場合には電場の正



第9図 体積含水率と比誘電率.

負が交互に変わるので、それに応じて水分子の向きも変わる。周波数が低いときは電場の変化に応じて水分子の向きが変わるが、周波数が高くなると電場の変化に水分子の動きが追従できなくなる。これが誘電分散の原因である。

水と土粒子の混合物では非常に大きな誘電率を示す場合がある。たとえば、純粋な水の比誘電率は80、土粒子の比誘電率が4程度であるのに対し、混合物では周波数によっては100以上を示す場合もある。分極した分子が土粒子の間に置かれると、水分子の分極によって土粒子表面にも電荷があらわれる。そのため水分子だけで存在するよりも、土粒子との混合物の方が分極の効果が大きくなり、誘電率の値も大きくなると考えられる。

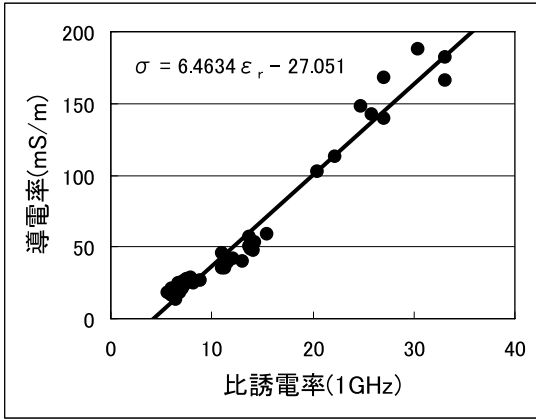
第9図に体積含水率と比誘電率を全ての土質についてプロットしたグラフを示す。指数関数で回帰分析をすると、

$$\epsilon_r = 3.8815 \exp(0.0202 \delta_w) \tag{9}$$

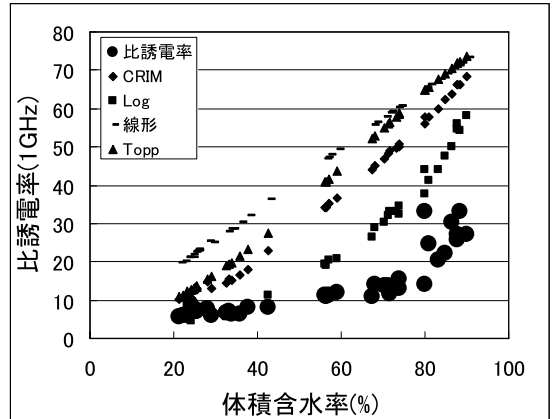
の関係が得られた。体積含水率が0のときは比誘電率が約4となり、乾燥した粘土や砂の比誘電率の値とほぼ等しくなる。

第10図は全ての試料について比誘電率と導電率をプロットしたグラフである。この図より、比誘電率が大きいと導電率も大きいことがわかる。両者の関係を1次式で近似すると、

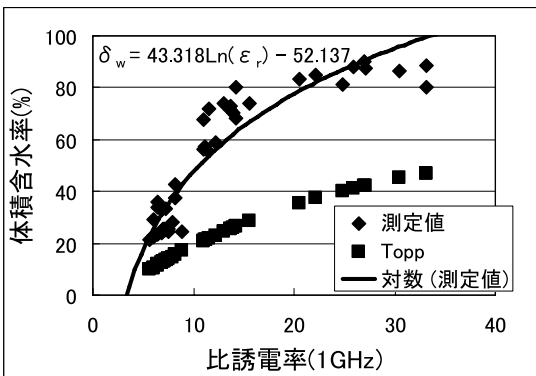
$$\sigma = 6.4634 \epsilon_r - 27.051 \tag{10}$$



第10図 比誘電率と導電率.



第12図 体積含水率と比誘電率の各種モデルによる計算値.



第11図 比誘電率と体積含水率及びToppの式による計算値.

となる。

比誘電率と体積含水率との関係は、Toppの実験式(Topp *et al.*, 1980)として知られ、TDR (Time Domain Reflectometry) 土壌水分計に使われている。

Toppモデル：

$$\epsilon_r = 3.03 + 9.3\delta_w + 146.0\delta_w^2 - 76.7\delta_w^3 \quad (11)$$

または

$$\delta_w = -0.0503 + 0.0292\epsilon_r - 5.5 \times 10^{-4}\epsilon_r^2 + 4.3 \times 10^{-6}\epsilon_r^3$$

第11図に比誘電率に対する測定値とToppモデルによる計算値を示す。測定値の回帰分析結果は、

$$\delta_w = 43.318 \ln(\epsilon_r) + 52.137 \quad (12)$$

である。

Toppの式以外にも土を空気・水・土粒子の混合体

として考え、いくつかのモデルが提唱されている。

線形モデル：

$$\epsilon_r = \epsilon_a \delta_a + \epsilon_m \delta_m + \epsilon_w \delta_w$$

CRIMモデル：

$$\sqrt{\epsilon_r} = \delta_a \sqrt{\epsilon_a} + \delta_m \sqrt{\epsilon_m} + \delta_w \sqrt{\epsilon_w} \quad (13)$$

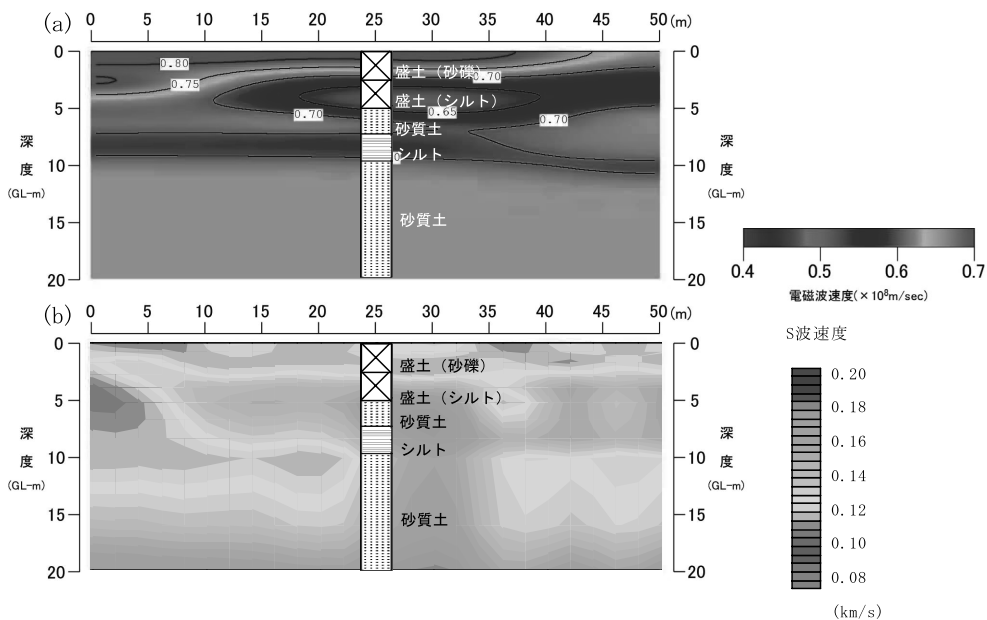
Log則モデル：

$$\log \epsilon_r = \delta_a \log \epsilon_a + \delta_m \log \epsilon_m + \delta_w \log \epsilon_w$$

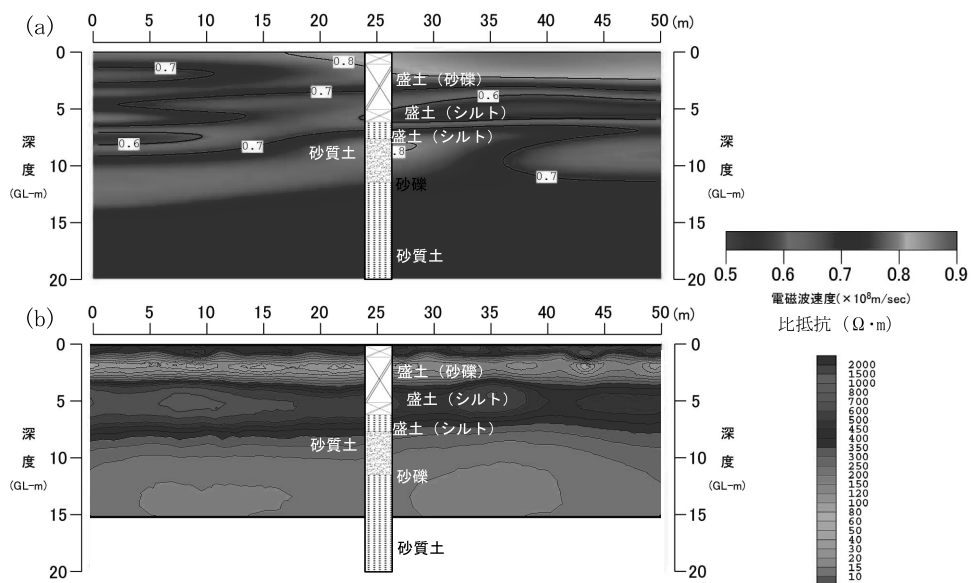
ただし、 $\epsilon_a$ は空気の比誘電率(=1)、 $\epsilon_m$ は鉱物粒子の比誘電率(=4を仮定)、 $\epsilon_w$ は水の比誘電率(=81)である。これらの実験式やモデルと測定値の関係を第12図に示す。体積含水率50%以下では、測定値はLog則モデルと最も調和的である。

## 7. 電磁波速度による土質構造探査

電磁波速度による土質構造探査事例を口絵の第1図と第2図に示す。両者とも連続波レーダ探査による河川堤防の速度解析結果である。ワイドアングル法を水平方向に5m間隔で行い、速度解析によって深度方向の速度構造を求め、コンター化したものである。口絵の第1図では表面波探査、口絵の第2図では2次元比抵抗探査との結果を対比した。これらの図からわかるように、いずれの手法でも似たような画像イメージが得られている。しかし、連続波レーダ探査以外の手法は、水平方向の連続性が悪い、閉じたコンター(いわゆる目玉)があるため見にくい、などの欠点がある。これに対し、連続波レーダ探査の結果には土質・



第13図 (a) 連続波レーダによる速度解析と(b) 表面波探査の比較。



第14図 (a) 連続波レーダによる速度解析と(b) 2次元比抵抗探査の比較。

地質技術者が断面図を描くのと同様のイメージが得られている。以上の結果より、電磁波速度分布断面はボーリング孔間を補完するためのツールとして非常に有効であるといえる。

## 8. まとめと今後の課題

比誘電率は体積含水率と相関があり、比誘電率(電磁波速度)から体積含水率を推定できる可能性がある。体積含水率が低い(50%以下)場合は、Log則モデルが調和的である。

電磁波速度または比誘電率から体積含水率を推定できれば、土質工学的に非常に有効である。例えば河川堤防内部の水の分布や、電磁波速度を繰り返し測定してその変化を調べることは防災上の効果が期待できる。

地中レーダ探査を適用する際、電磁気特性に誘電分散があることを議論されることはこれまで少なかった。今後、電磁波速度を議論するときは周波数(帯域)を明記する必要がある。

今後、さらにデータを増やして検証し、地中レーダ探査結果の定量的解釈ができるようにしていきたい。

**謝辞:**口絵の第1図と第2図は、川崎地質株式会社保全技術グループにご協力いただいたものである。産業技術総合研究所の高倉伸一博士には原稿の査読をしていただき、貴重な助言を頂いた。ここに記して謝意を表する。

### 引用文献

- 物理探査学会編(2005):新版物理探査用語辞典,愛智出版,288.  
 岡田文明(1993):マイクロ波工学,学献社,396.  
 Greaves, R. J., Lesmes, D. P., Lee, J. M. and Toksoz, M. N. (1996): Velocity variations and water content estimated from multi-offset ground penetrating radar, *Geophysics*, 61, 3, 683-695.  
 高有機質土の力学的性質および試験方法に関する研究委員会(1990):高有機質土の工学,社団法人土質工学会,333.  
 前田憲一・木村磐根(1984):現代電磁波動論,オーム社,pp.248.  
 Mavko, G., Mukerji, T. and Dvorkin, J. (1998): The rock physics handbook, Cambridge Univ. Press, 329.  
 西方敦博・清水康敬(1985):導波管法による複素誘電率・透磁率の測定,信学技報, MW84-129, 84, 310, 33-39.  
 社団法人地盤工学会編(2000):土質試験の方法と解説(第1回改訂版),社団法人地盤工学会,902.  
 Topp, G. G., Davis, J. L. and Annan, A. P. (1980): Electromagnetic determination of soil water content; measurements in coaxial transmission lines, *Water Resour. Res.*, 16, 574-582.  
 Wharton, R. P., Hazen, G. A., Rau, R. N. and Best, D. L. (1980): Advancements in electromagnetic propagation logging, *Soc Petro. Eng.*, Paper9041.

---

SUZUKI Keiichi and KOMATSU Mikio (2008): Measurement of electromagnetic property of soils.

<受付:2007年11月30日>