

(70) 電磁波による岩盤探査

EXPLORATION OF ROCK STRUCTURE BY ELECTROMAGNETIC WAVES

今井 博*・川上 純**

Hiroshi IMAI and Jun KAWAKAMI

Through model experiments and field tests, the exploration method by electromagnetic waves (EM) is confirmed its application to find fracture zones containing water in rock mass. To determine the depth of reflecting objects, it is necessary to know the velocity of EM (i.e. dielectric constant). Therefore, the electric constants of 19 rock samples are measured for 1~120 MHz by 1 MHz, and an experimental equation estimating a dielectric constant of wet rock is made as functions of the dielectric constant of dry rock, water content of rock mass and frequency of radar antenna. It is said that validity of its application to EM exploration is applicable from field tests, pointed out that EM is very sensitive to water, because a wet fracture of which width is several milimeters can be detected by EW where the frequency of antenna is 350 MHz.

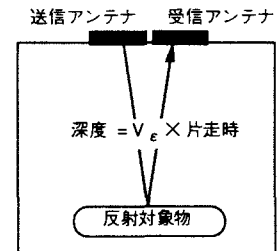
Keywords: Electromagnetic wave, Dielectric constant, Reflection exploration, Radar

1. まえがき

通常、岩盤内の地質構造の探査は弾性波を用いて行なわれ、特にトンネル切羽前方探査技術として、弾性波を用いたHSPやTSP¹⁾などが現在研究されているが、近年電磁波を用いた探査技術も用いられるようになった。例えば、遺跡調査では非破壊調査として有効な探査技術になりつつある。

電磁波探査データの解析方法は弾性波による反射法やトモグラフィ法と基本式は全く同じ形式であるが、その結果の示す物理情報は全く異なる。弾性波による探査では岩盤の弾性波速度や振幅の異方性²⁾も含めた力学的情報が得られ、一方、電磁波による探査では岩盤内の電磁気学的情報が得られる。探査深度や解像度についても、電磁波による探査では弾性波による探査に比べ、使用する周波数を高くし解像度を高くできるが、減衰率が高くなり探査深度は浅くなるという特徴がある。さらに、電磁波探査を使用する大きな理由は、非破壊・非接触で探査が可能なこと、しかも振動ノイズには無関係に測定できることにある。

本論文では、岩石の比誘電率測定（岩石試料の電磁波伝播速度測定）、模擬地盤を用いた反射特性実験、現地実験などから、上述した利点を持つ電磁波反射法のトンネル切羽前方探査などの岩盤探査への適用性を検討し、その結果を報告する。



図一 電磁波の反射と深度計算

* 正会員 理博 大成建設㈱技術研究所地盤研究部岩盤研究室

** 正会員 大成建設㈱技術研究所地盤研究部岩盤研究室

2. 岩石の比誘電率

岩盤内の電磁波伝播速度 V_e は、岩盤を完全誘電体とすれば透磁率は 1 にでき、岩石の比誘電率 ϵ で一意に決定できる： $V_e = \text{光速} / \sqrt{\epsilon}$ 。この速度および片走時を用いて、図-1 に示すように、反射対象物の深度が得られる。したがって、電磁波反射法探査では岩石の比誘電率が重要である³⁾。

弾性波の速度は、対象地盤固有の力学的性質で決定されるが、電磁波の場合は、岩石の比誘電率や対象地盤の含水比だけではなく、探査に用いる電磁波の周波数の関数であるため、岩石の比誘電率の周波数依存性を知ることが必須となる。この理由により、採石場やトンネル工事現場より岩石を採集し、含水比の測定、未乾燥状態および乾燥状態で 1 MHz～120 MHz までの周波数に対する比誘電率を測定した。

2・1 測定概要

表-1 に示す自然状態の岩石試料について、厚さ 4～5 mm、直径 5 cm 程度の円盤を作成し、YHP ネットワーク・スペクトラム・アナライザを用いて電気容量を測定し、治具でのエッジ効果を考慮して比誘電率に換算した。表-1 から、含水比が花崗岩→粘板岩→礫岩→シルトの順に増加する傾向があり、一方、砂岩にはばらつきがある。これはすべての砂岩の試料が原位置で同じ環境（風化度や水理系など）にならなかったと考えられる。

2・2 解析概要

測定結果をもとに、周波数 f および含水比 w に対する比誘電率比 $\delta\epsilon$ （仮称）を表示したのが図-2 である。この比誘電率比は

$$\delta\epsilon = (\epsilon_w - \epsilon_d) / \epsilon_d \quad \text{-----①}$$

で定義する。ここで、 ϵ_w は湿潤状態での岩石の比誘電率、 ϵ_d は乾燥状態での比誘電率を表す。図-2 によれば、 $\delta\epsilon$ は、周波数 f の増加に従い指数的に減少し、含水比 w に対して指数的に増加する傾向が確認され、これを統一的に表現する実験式を $\delta\epsilon = aw^b$ の形で整理する試みを行った。係数 a および b は周波数依存性を持たせて、次の実験式を得た。

$$\delta\epsilon = 2.13 f^{0.455} w^{0.819} f^{0.0493} \quad \text{-----②}$$

式②を用いると、電磁波の周波数、含水比および乾燥状態での比誘電率から湿潤状態での岩石の比誘電率が推定できる。結果的に、岩石の比誘電率の周波数 f および含水比 w の両方の依存性を含む形で整理することができた。

表-1 試料の含水比

岩種	含水比 wt%	岩種	含水比 wt%
砂岩	0.170	凝灰角礫岩	6.645
花崗岩	0.194	礫岩	9.209
粘板岩	0.219	砂岩	11.152
粘板岩	0.240	砂岩	12.030
粘板岩	0.273	砂岩	14.954
花崗岩	0.385	砂岩	20.796
砂岩	0.395	シルト	21.857
砂岩	0.628	砂岩	24.309
流紋岩	1.081	シルト	26.092
流紋岩	1.929	凝灰質シルト	49.341

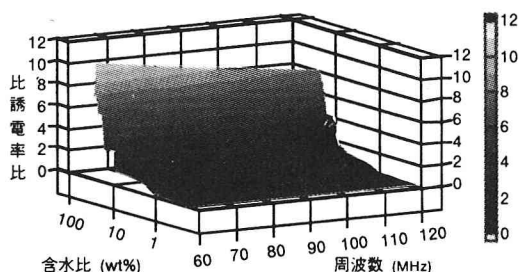


図-2 岩石の含水比および周波数と比誘電率の関係

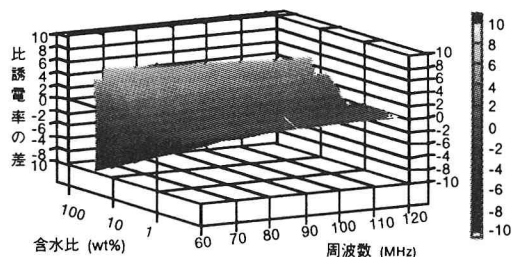


図-3 岩石の推定値比誘電率と湿潤状態の比誘電率の差

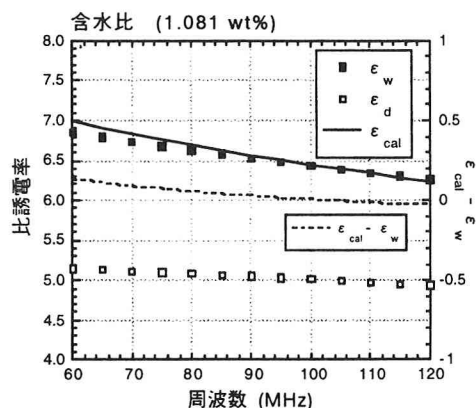


図-4 岩石の比誘電率の推定

式②によって推定された湿潤状態での岩石の比誘電率と測定値との差を図-3に示す。表-1で分かるように試料の約半数は含水比が1%以下であり、それらに対する比誘電率の推定はかなり良く、例として図-4に示すように確認することができる。図中のマーク■, □, 実線はそれぞれ湿潤状態, 乾燥状態, 推定された比誘電率であり左の縦軸に対応し, 点線は湿潤状態および推定した比誘電率の差(推定誤差)を示し, 右の縦軸で表した。含水比が1%以上では, 推定値は湿潤状態での比誘電率からずれ誤差を生ずるが, そのずれの割合は逆に少なくなる。すなわち, 含水比が小さく比誘電率の値が小さい場合は精度良く推定でき, 含水比が大きく比誘電率の値が大きい場合でも推定が可能ながことが分かった。電磁波反射法をトンネル切羽前方探査などの岩盤探査への適用する際にはこの程度の推定ができれば良いと考えられる。

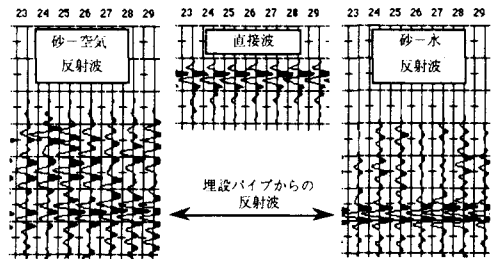


図-5 電磁波反射実験における境界面での位相変化

3.電磁波反射データ処理

電磁波の速度は, 伝播する媒質の比誘電率および透磁率によって決定されるが, 前述したように, 岩盤では透磁率=1と仮定してよい。したがって, 電磁波の速度 V および反射係数 R は,

$$V = C / \sqrt{\epsilon_g} \quad \text{-----③}$$

$$R = (\sqrt{\epsilon_g} - \sqrt{\epsilon_r}) / (\sqrt{\epsilon_g} + \sqrt{\epsilon_r}) \quad \text{-----④}$$

で表される。ここで, C は光速, ϵ_r および ϵ_g はそれぞれ反射対象物および岩盤の比誘電率である。 ϵ_r は空気の場合は1, 水の場合は81であり, ϵ_g はこの中間である。式④によれば, 反射対象物が空気の場合あるいはそれに近い状態では, R はプラスで位相は変化しない。一方, 反射対象物が水の場合, R はマイナスで位相が逆転する。実験でも, 図-5に示すように, この反射波の特徴を確認した。図-5では, 4号珪砂の中に空洞のパイプおよび水を封入したパイプを用いた。

3・1 土槽実験概要および処理結果

土槽内に模擬地盤を作成し電磁波反射実験を行った。実験は3GHzの導波管をアンテナとし, トレース間隔2cmで1m測定した。

図-6には, 水で濡らせてビニール袋に封入した段ボールを水平より 0° , 30° , 60° に傾斜させて電磁波の反射データを取得し, 前処理後(上図), $f-k$ マイグレーションを行った結

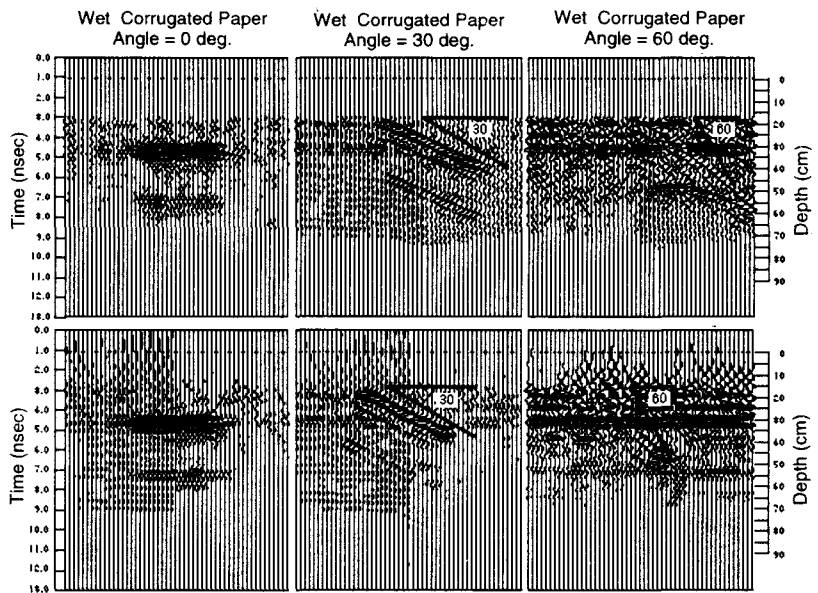


図-6 珪砂に埋設した(水を濡らせた)段ボールからの反射記録およびマイグレーション結果

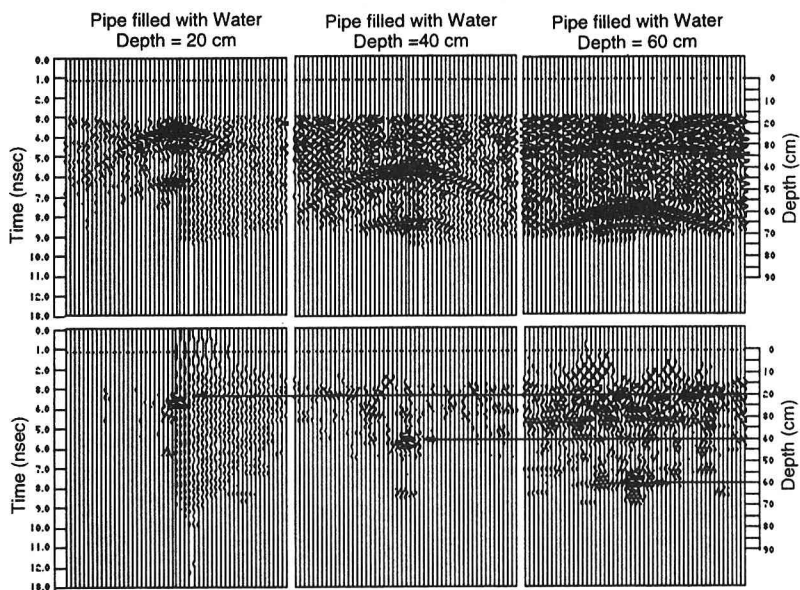


図-7 珪砂に埋設したパイプ（水封入）からの反射記録およびマイグレーション結果

果（下図）を示す。

図-7には、直径10 cmのパイプを珪砂内に、深度20 cm、40 cm、60 cmにそれぞれ埋設し、電磁波の反射データを取得し、前処理後（上図）、 $f-k$ マイグレーションを行った結果（下図）を示す。

図-6および図-7に示したように、解析結果は埋設物の深度および形状を良くイメージしている。なお、この測定の前処理では、同じ測定点で5トレースのスタッキングを行い、

埋設物なしの場合の反射データを差し引き（バイアスになっているノイズ除去）、バンドパス・フィルタをかけ、直接波の部分をミュートした。

3・2 野外実験概要および処理結果

地中レーダ（350 MHz）を用いて茨城県笠間市の採石場で電磁波反射法の実験を行った。解析結果の例として、茨城県笠間市の採石場AおよびBで行った実験結果を示す。

まず、現地において、適当な4種類の大きさの岩石ブロックを用いて電磁波の透過実験を行い、走時プロットから電磁波の速度、 11.6 cm/ns が得られた。ちなみに、岩石の比誘電率は6.7と求められた。現地の岩種は花崗岩であり、得られた比誘電率は若干湿った花崗岩の典型的な値で、妥当な値であると言える。

以下、測定データ（前処理済）およびマイグレーション処理結果を示す。

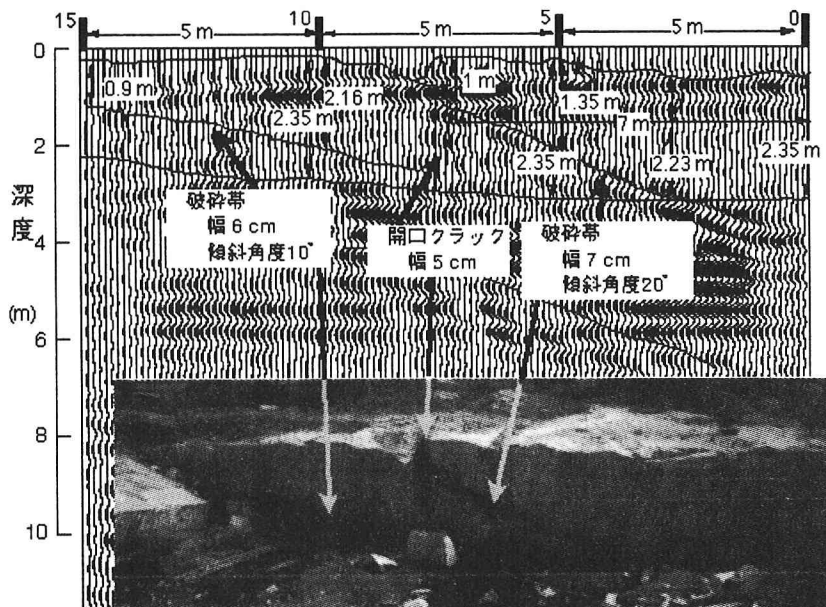


図-8 採石場Aでの電磁波反射記録（処理済）と現地の亀裂との対比

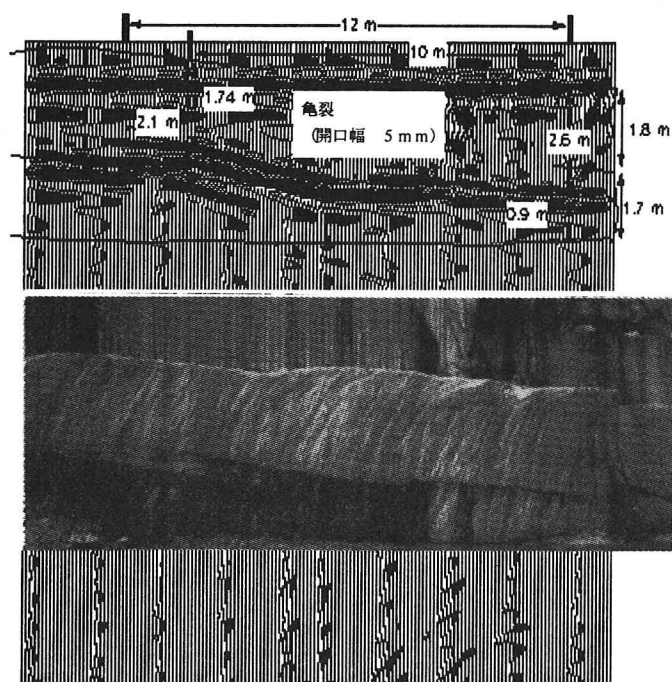


図-9 採石場Bでの電磁波反射記録（処理済）と現地の亀裂との比較

なお、トレースの時間軸から深度軸への変換は、図-1に示したように、先に求めた電磁波速度を用いて行った。

(1) 採石場A

図-8に採石場Aにおける実験で得られた電磁波反射記録（処理済）および現地写真を示す。傾斜角度約 20° 幅平均7cmの亀裂が特に強調された結果を得た。また、その亀裂より以深の平行に走る亀裂もイメージすることができた。

(2) 採石場B

図-9に採石場Bにおける実験で得られた電磁波反射記録（処理済）および現地写真を示す。図で明かなように、開口幅はわずか5mmではあるが、水を含む亀裂を捉えることができた。電磁波は水の存在に対し敏感に反応することがあらためて確認できた。

今回の解析では、地表の凹凸についての補正は行っていないが、電磁波反射記録は、傾斜・位置が写真をもとに作

成した亀裂の位置と良く対応しており、作成した解析ソフトの動作確認も含めて良い結果を得た。

4. まとめ

岩石の比誘電率測定では、乾燥状態の比誘電率・原位置の含水比・使用する電磁波の周波数から、原位置の岩盤の比誘電率を推定するための、周波数依存性および含水比依存性を考慮した実験式を導出し、その適用性が確認できた。

土槽実験では、珪砂内に水を封入したパイプや水で湿らせた段ボールを埋設して模擬地盤を作成し、3GHzの電磁波を用いて埋設物の位置の特定ができた。採石場での電磁波反射実験では、350MHzの地中レーダを用いて岩盤内の亀裂の特定の実証実験を行い、良好な結果を得ることができた。これにより、岩盤内の比誘電率の変化を調査する電磁波反射法探査は、音響インピーダンスの変化を調査する弾性波反射法とその手法に関して同様であることが確認された。

これらの結果から、電磁波反射法のトンネル切羽前方探査などの岩盤探査への適用性が確認できた。

5. 参考文献

- 1) 川上 純・今井 博・峯村英二・奥 秀朗・小林光雄：TSPによるトンネル切羽前方探査の調査例とその検証、トンネル工学研究発表会論文・報告集、pp.343～346、1994.11.
- 2) 今井 博・川上 純：稲田花崗岩の原位置および岩石サンプルの異方性、土木学会第48回年次学術講演会講演概要集、pp.1295～1296、1994.9.
- 3) 今井 博：電磁レーダを用いた土槽模擬実験、土木学会第49回年次学術講演会講演概要集、pp.688～689、1995.9.