

周波数可変方式電磁波トモグラフィによる 堆積岩の透水特性構造調査

HYDROGEOLOGICAL SURVEY IN A SEDIMENTARY ROCK BY ELECTROMAGNETIC “FREQUENCY TOMOGRAPHY”

升元 一彦*, 須山泰宏*, 戸井田克*

Kazuhiko MASUMOTO, Yasuhiro SUYAMA and Masaru TOIDA

At the construction of important facilities in a deep underground, for example a repository of high-level radioactive waste, it is necessary to estimate the hydrogeologic structure in a rock mass, such as a distribution of porosity or flow path. An electromagnetic “frequency tomography” technique, in which continuous and multi-frequency (1-80MHz) electromagnetic wave can be transmitted and tomography analysis can be calculated in each frequency, should be one of the sophisticated techniques to obtain an information about hydrogeologic structure. As the result of *in-situ* test in a sedimentary rock using this technique combined with a resistivity tomography and a tracer testing, it was demonstrated that rock type, porosity distribution and distinctive flow path could be estimated in a sedimentary rock.

Key Words: rock mass, electromagnetic tomography, sedimentary rock, multi-frequency

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物処分場等の岩盤地下空洞建設時においては、間隙率分布や卓越した水みちといった岩盤内の透水特性に係わる構造を高精度に把握する必要がある。電磁波トモグラフィは、これらのニーズに合致する調査手法であり、筆者らはこれまでパルス波方式の電磁波トモグラフィを花崗岩等の結晶質岩に適用することにより、電磁波速度や減衰係数から岩盤内の水みちや含水率分布を求める方法を開発してきた¹⁾。一方、堆積岩においては、1) 電磁特性が他の岩種と大きく異なる泥岩が含まれ、さらに砂岩泥岩といった互層状態になっていることが多い、2) 堆積岩中の泥岩部は電磁波を大きく減衰させる、3) 堆積岩には電磁特性的に異方性がある²⁾、といった堆積岩の持つ特異性により電磁波トモグラフィの適用が困難であった。

堆積岩サイトにおける調査を可能にするため、連続波を送信する周波数可変方式の電磁波トモグラフィを開発し、その適用性確認試験を原位置において実施した。前報³⁾では、本手法を用いることにより従来のパルス方式に比べて探査距離が改善され、水みちだけでなく電磁波速度の周波数依存特性から岩種、主に泥岩部の推定が可能であることを報告した。本報告では、電磁波振幅の利用により詳細な透水特性構造に関する情報が得られ、トレーサー追跡試験を併用することにより卓越した水みちが把握できる可能性があることを示し、これらの結果を比抵抗トモグラフィとの比較により検証した。

2. 試験概要

(1) 試験孔レイアウト

試験サイトの地質は第三系の砂岩泥岩互層で薄い礫岩層を挟在する。今回、試験のために4本のボーリング孔を図-1に示す間隔で直線上に削孔した。削孔深度はNo.1,2,4孔で40m、No.3孔では36.5mで、各孔にφ75~100mm

* 正会員 鹿島建設(株) 技術研究所

のストレーナー入りの塩ビケーシングが設置してある。ボーリング孔の配列方向は、地層の走向方向にほぼ直交する方向である。地層は70～80度の高角で傾斜しており、No.1孔側で泥岩優勢層が、No.4孔側で砂岩優勢層が分布している。削孔はコアボーリングで行ったが、岩盤中には微小な亀裂が多く入っており、全区間にわたって健全なコアを採取することは困難であった。相対的に砂岩部は泥岩部に比べ RQD が小さくなっている。また、地下水位は、ほぼ GL-3m に位置していた。

(2) 試験方法

電磁波トモグラフィは、No.3-No.4 孔間の深度 10m から 35m の位置において 1m ピッチで実施した。今回適用した周波数可変方式の電磁波トモグラフィ計測装置は、周波数を変化させて連続的に電磁波を送信できるもので、これにより分解能を低下させずに探査距離を延ばすことが可能である。また、パルス波では得られない周波数毎の透過特性に関する情報も求めることができる。この装置では 1～80MHz まで周波数を変化させることができるが、今回は予備試験結果を参考に 1～40MHz までを 200 ステップに分けて計測した。トレーサー追跡試験は、パッカーで閉塞した No.3 孔 16-17m 区間に塩水トレーサーを 2 日間圧入した後で、上述と同じ領域でトモグラフィ計測を実施するもので、トレーサー投入前後での計測結果の変化から水みちを把握することを目的とした。

比抵抗トモグラフィは No.1-No.4 孔間において、電磁波トモグラフィと同様、トレーサーの投入前後で計測を実施した。比抵抗トモグラフィ計測では、電極が塩ビケーシング内のストレーナーのない位置にある場合、電流が地盤に十分流れないため正しい計測ができない。従って、No.4 孔は全長ストレーナーであるため深度 9.5m から 37.5m まで 1m ピッチで 29 点電極を配置したが、No.1 孔ではストレーナー位置である 17.5m から 37.5m まで 5m ピッチで 5 点電極を配置した。この計測により得られた結果から電磁波トモグラフィ結果の検証を行った。

(3) 解析結果の評価方法

電磁波トモグラフィ解析では、分割したメッシュ毎に電磁波の伝播速度と振幅減衰に関する情報が得られる。一般に周波数が高い場合、電磁波速度 v には図-2 に示す(1)式の関係が、減衰係数 α には(2)式の関係がある。ここで、電磁特性である比誘電率 ϵ_r 、導電率 σ は岩石により固有の値を示し、含水状態や周波数により変化することが知られている⁴⁾。

電磁波速度 v と伝播時間 t との関係は以下の式で表される。

$$t = 1/v \cdot r \quad (r: \text{伝播距離}) \quad \text{-----} (3)$$

速度に関するトモグラフィ解析では、この式に基づき、計測された伝播時間 t から分割した各セル内のスローネス ($1/v$) を逆解析により計算している。同様に、減衰係数 α と受信振幅 A との関係は平面波を仮定すると以下の式で表される。

$$\ln(A/A_0) = -\alpha \cdot r \quad (A_0: \text{送信振幅}) \quad \text{-----} (4)$$

振幅減衰に関するトモグラフィ解析では、減衰係数 α を求めるために本来は振幅減衰比 A/A_0 を計測すべきであるが、 A_0 を今回確定でなかったため、今回の解析では計測された受信振幅 A から以下の式に基づき α' を計算している。

$$\ln A = \alpha' \cdot r \quad \text{-----} (5)$$

α' を今回振幅比と呼ぶこととする。(4)、(5)式から振幅比 α' と減衰係数 α との間には以下の関係がある。

$$\alpha' = \ln A_0 / r - \alpha \quad \text{-----} (6)$$

このため、減衰が大きいものほど振幅比 α' は小さくなることになる。

室内試験により岩石試料の比誘電率、導電率を計測し、(1)、(2)式により電磁波速度、減衰係数を求めた結果を図-2 に示す。試料は原位置試験サイトのボーリングにより採取された

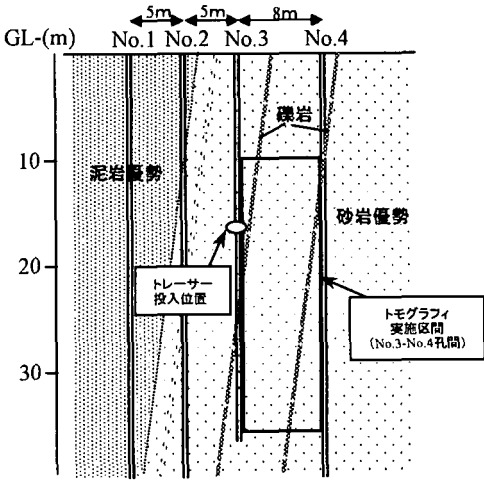


図-1 ボーリング孔レイアウト

室内試験方法

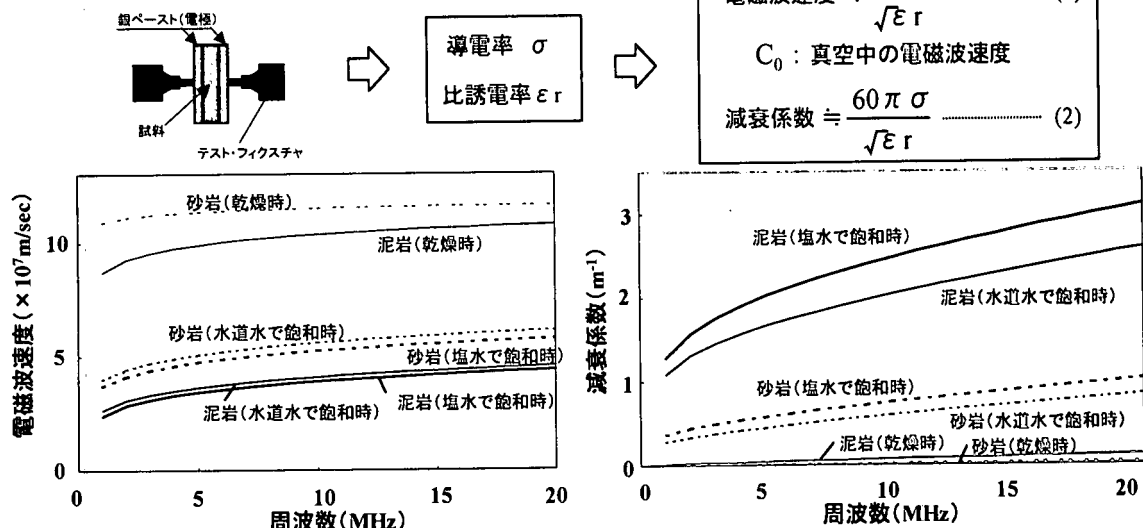


図-2 岩石試料の室内電磁特性計測結果

泥岩、砂岩コア用い、乾燥時、水道水（EC:39mS/m）で飽和時、塩水（EC:1,827mS/m）で飽和時について計測した。塩水の濃度は、トレーサー注入に用いたトレーサーの濃度と同じとした。泥岩、砂岩各々3サンプルずつについて、これまで筆者らが実施してきたインピーダンス/ゲイン・フェーズ・アナライザを用いる方法²⁾で計測を実施した。サンプルの平均間隙率は泥岩で22%、砂岩で16%であった。この結果から、周波数の増加に対して電磁波速度、減衰係数ともに増加する傾向が見られ、その傾向は含水状態の試料ほど顕著であることが分かった。岩種別では、泥岩は砂岩よりも周波数依存特性が大きく、この特性を利用することにより泥岩を区別することが可能と考えた。さらに、塩水で飽和させたときの方が水道水で飽和させたときよりも電磁波速度は減少し、減衰係数は増加することが分かった。このことから、トレーサーを電磁波トモグラフィで追跡することも可能と判断できた。

3. 試験結果

(1) 電磁波トモグラフィ解析結果

周波数可変方式電磁波トモグラフィの特徴は周波数帯域毎にトモグラフィ解析が可能であることである。電磁波速度、振幅減衰に関して3つの異なる周波数帯域で解析を実施した結果を図-3、4に示す。計測は40MHzまで実施したが、12MHz以上の周波数帯域では深度差の大きいパスでの振幅減衰が大きく、トモグラフィ解析に耐えるデータが取れなかったため11MHzまでを解析対象とした。全体的に周波数が増加するに従い速度は増加、振幅比は減少しており、これは減衰係数が増加していることになるが、共に岩石試料の計測結果と一致している。速度分布と振幅比分布を比べると、振幅比分布において明瞭にNo.4孔深度10mからNo.3孔深度20-30mにかけて左下がりの低振幅比部が連続しており、この方向は地層の傾斜方向とほぼ一致していることから、振幅減衰において異方性の影響が大きいことが分かった。

各トモグラフィ解析結果を速度、振幅比の相対的な分布で比較すると、各周波数帯域で必ずしも同じ傾向を示さない。これは岩盤のもつ周波数依存特性の違いを反映した結果と考えられる。このような周波数依存特性の違いを評価するために、前報³⁾で検討したように周波数に対する変化率を求めた。3~5MHzに対する9~11MHzの変化率を示したものが図-5である。岩石試料の計測結果（図-2参照）から、砂岩乾燥時、泥岩乾燥時、砂岩含水時、泥岩含水時の順に速度増加率、振幅比減少率共に大きくなると考えられる。このことに基づくと、No.3孔の深度25mから30m付近の速度増加率、振幅比減少率共に大きい部分は、コア観察からは砂岩優勢部と判断したが、泥質な岩

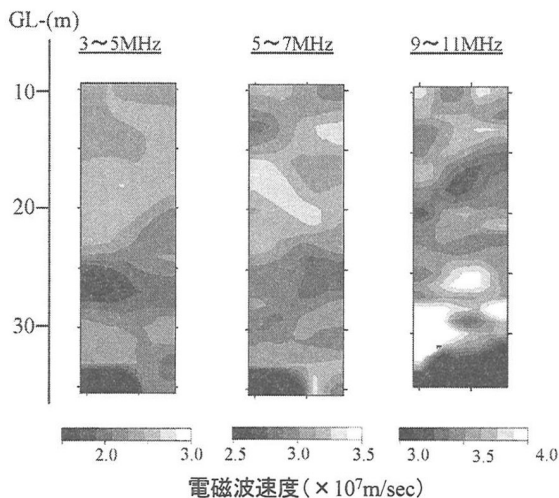


図-3 電磁波トモグラフィ解析結果 (速度)

が存在している部分と考えられる。一方、速度増加率が大きくないが振幅比減少率が高い部分 (例えば No.3 孔 13m から No.4 孔 18m 部や No.4 孔 30m 付近) は砂岩で亀裂が多く含水比の大きい部分と判断でき、図-3 の速度分布で低速度部として検出している部分とほぼ一致している。このように堆積岩部での電磁波トモグラフィの結果は、異方性や泥岩部の影響を考慮した上で解釈する必要がある。

(2) トレーサー追跡試験結果

塩水トレーサー投入後、電磁波トモグラフィ計測を実施し、周波数帯域毎のトモグラフィ解析を行った。図-6、7 にはトレーサー投入前に対する投入後の速度、振幅比変化率の分布を周波数帯域ごとに

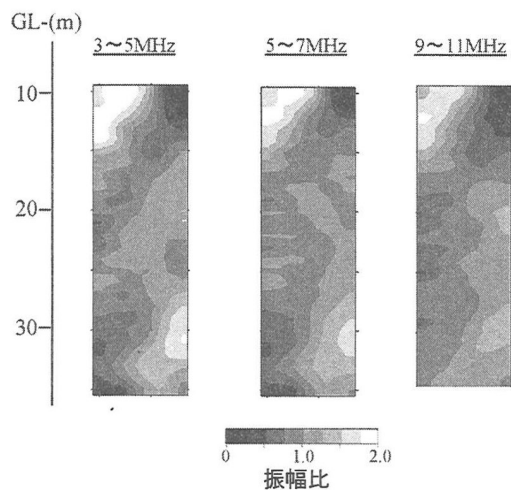


図-4 電磁波トモグラフィ解析結果 (振幅減衰)

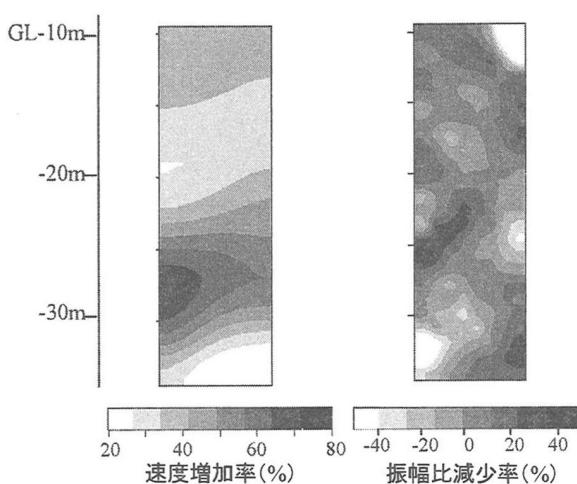


図-5 3~5MHz に対する 9~11MHz の変化率

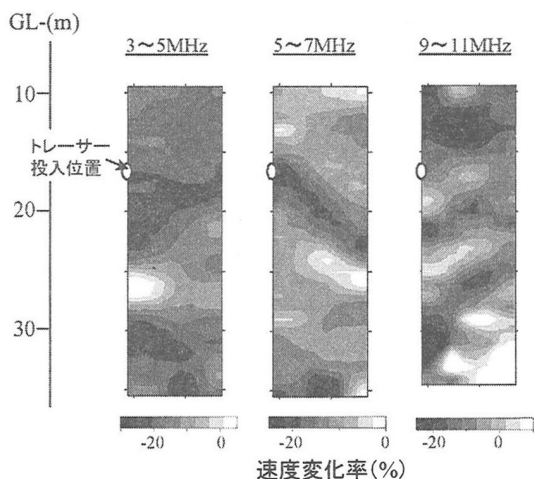


図-6 トレーサー投入前後の速度変化率

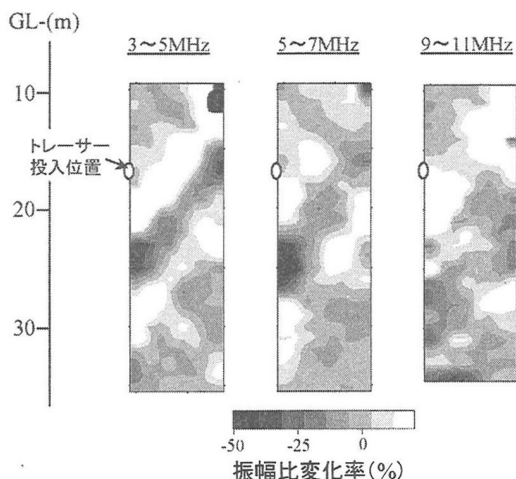
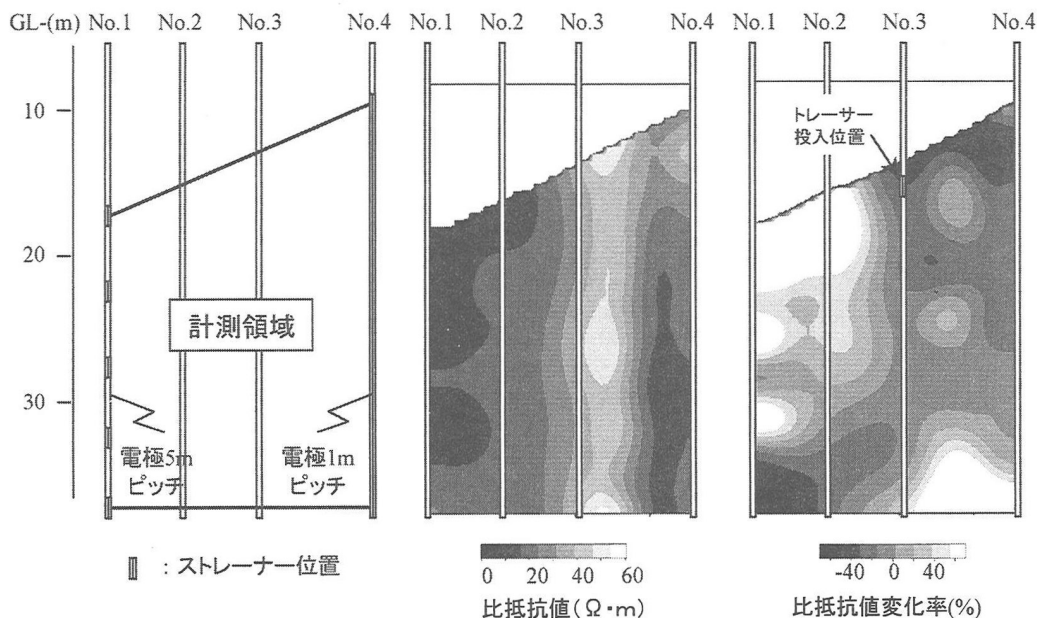


図-7 トレーサー投入前後の振幅比変化率



図－8 比抵抗トモグラフィ実施結果

示す。岩石試料の計測結果から、速度、振幅比が減少している部分が塩水の浸入範囲と推定できる。速度変化率の5-7MHzにおいては、投入区間から右下へ浸入している結果が得られているが、その他の周波数帯域や振幅比変化率の結果では、投入区間から右上方に浸入領域が見られ、さらにNo.4孔20mからNo.3孔23m,30m方向へ広がっていることが分かる。

以上の結果を検証するため実施した比抵抗トモグラフィの結果を図－8に示す。比抵抗トモグラフィでは、比抵抗値が小さい部分は含水比が大きい部分と考えられ、塩水トレーサーが浸入した範囲は比抵抗値が減少した領域として捉えられる。図－8のNo.3-No.4孔間の比抵抗値変化率分布において、比抵抗値の減少域は電磁波トモグラフィから得られた速度、振幅比減少部とほぼ一致していることが分かる。これらのことから、電磁波トモグラフィによりトレーサー浸入域が把握できたと考えられる。

4. おわりに

連続波を送信する周波数可変方式の電磁波トモグラフィの適用性確認試験を堆積岩の原位置において実施した。その結果、電磁波速度と振幅の周波数依存特性を総合的に検討し、さらに岩石試料計測結果も併せて評価することにより、岩種の違いや異方性を考慮に入れた透水特性構造を把握できることが分かった。また、トレーサー追跡試験を併用することにより卓越した水みちが把握できる可能性を示した。今後、周波数特性と実際の岩盤の性状との対応関係について検討していく予定である。

参考文献

- 1) 日比谷啓介, 稲生道裕, 升元一彦: 電磁波トモグラフィによる岩盤内の含水状態評価について, 第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, p.256-260, 1993.
- 2) 戸井田克, 宮嶋保幸, 稲葉武史, 升元一彦: 岩石試料の比誘電率, 導電率と間隙率との関係について, 第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, p.109-114, 1998.
- 3) 升元一彦, 須山泰宏, 戸井田克: 周波数可変方式電磁波トモグラフィの軟岩への適用性について, 平成12年度応用地質研究発表会講演論文集, p.169-172, 2000.
- 4) 例えば, 横山秀吉, 堀津多三郎: 岩石の誘電率算定について-岩石の誘電的特性に関する研究-, 日本鉱業会誌, 93(1071), p.347-352, 1977.