ボアホール型レーダーを用いた水みち調査

北村孝海*・稲葉秀雄*・向上拡美*
塩崎 功*・滝沢 究*・登内正治**

Investigation of Hydraulic Pathways with Borehole Radar

Takaomi KITAMURA*, Hideo INABA*, Hiromi KOJO*, Isao SHIOZAKI*,
Kiwamu TAKIZAWA* and Shoji TONOUCHI**

Key words : 探査 exploration, ボアホール borehole, レーダー radar,
探査距離 explorative distance, 水みち hydraulic pathway

Abstract

Recently, structures of strata and permeability in the rock mass have been investigated with borehole radar systems using electromagnetic waves.

As a result of examinations, the explorative distance of the system was limited from 100 meters in the fractured granite rock mass under present conditions in Japan, and further improvements are needed to lengthen its explorative distance.

Using the propagative characteristics of electromagnetic waves, high permeability zones (hydraulic pathways) can be estimated by the tomographic data obtained from the results of crosshole measurements before and after salt water injection.

1. ま え が き

放射性廃棄物の岩盤内処分においては、長期にわたって人間の生活環境への影響を避けるため、処分施設の設計・施工技術、人工バリア等の処分技術、処分後のプラグ技術、環境影響評価技術などさまざまな研究開発が進められている。この中で、処分施設を設置する地点の地質、地下水の状況は、処分された放射性核種が移行・拡散する場合の重要な影響因子であるため、これらの調査・解析技術の研究開発は重要な課題である。この中の

1つの技術として、岩盤の亀裂あるいは破碎帯を検出するために、電磁波を用いたボアホール型レーダーの開発が進められている。これについては、放射性廃棄物処分に関するストリーバプロジェクトにおけるRAMACシステムがよく知られている。RAMACシステムについては、国内においても適用試験が行われ、反射法による探査で亀裂の多さを定性的に知ることができ、顕著な亀裂帯がどのように連続しているかを知ることができるとの報告¹⁾が見られる。

また、国内でボアホール型レーダーを独自に開発し、地盤あるいは岩盤構造調査へ適用した事例の報告も見られる^{2),3)}。

さらに、電磁波が岩盤の電気的性質を反映して伝搬す

* 顧問組 HAZAMA CORPORATION

** 川崎地質㈱ KAWASAKI GEOLOGICAL ENGINEERING CO. LTD.

る特性を利用し、岩盤内の電氣的性質を人為的に変化させて、その前後での調査結果から岩盤の特性を明らかにする応用例が見られる。その1つとして、A. L. RAMIREZ⁴⁾は、岩盤中に塩水を注入する前後で調査を行い、注入前後の振幅変化から塩水の浸入ゾーンを割り出し、水みちの推定を行っている。

このように、ポアホール型レーダーを利用した探査では、岩盤性状の把握とともに、岩盤中の電氣的特性を人為的に変化させることによって岩盤の水理特性を推定できる利点を持つため、地下水の流動形態が問題となる放射性廃棄物処分において有望な調査技術の1つである。

一方、放射性廃棄物の岩盤内処分を考えたとき、地質構造の詳細な調査が重要であることは論をまたないが、多数の調査用ボーリングを掘ることは、岩盤の一部を破壊し、新たな地下水流動や水質混合を与え、亀裂に沿った岩盤の物理化学的狀態に変化をもたらし、将来の核種漏洩の経路になる可能性があることなどから望ましくない。このため、ボーリング孔は長間隔（数100 m）とすることが求められ、ポアホール型レーダーについても、分解能を落とすことなく長距離調査を可能にすることが最重要な課題の1つと考えられる。

このようなことから、本論では、(1) ポアホール型レーダーの探査可能距離に関する現状と課題について検討し、さらに、(2) 地下水挙動の場としての岩盤構造の推定・岩盤透水性の割出しを目的としたポアホール型レーダーによる水みち調査への適用性について考察を行う。

2. 探査可能距離について

2.1 既往の研究例

ポアホール型レーダーで、探査可能距離について明示された既往の研究例として次のようなものがある。

① ストリーバ鉱山でRAMACシステムを用いたものでは、反射法による探査結果で、探査可能距離が100 m（アンテナ中心周波数20 MHz）に達したと報告されている⁵⁾。

② RAMACシステムの国内での適用試験では、土岐花崗岩において破碎帯の検出が行われ、反射法による探査可能距離は、20 MHzで25 m 前後、60 MHzで18 m 前後であるが、岩石の亀裂の存在やその状態によって大きく変化し、例えば、20 MHzで15 m、60 MHzで10 mの箇所もあったと報告されている。また、20 MHzのアンテナにより、孔間距離37 mでトモグラフィ探査を実施している⁶⁾が、最大測線長もしくは探査可能距離については記述がない。

③ 同じくRAMACシステムを国内で用いた事例と

して、牧野⁷⁾は領家深成岩地帯の花崗閃緑岩において反射法による透過特性の調査を行い、透過距離は20 MHzで15～40 m、60 MHzで10～25 mであったと述べている。

④ 新ら⁸⁾は、国産の孔間探査装置を用い、真壁花崗岩において透過法の実験を行い、崖錐部が電磁波の低速度構造として識別できたこと、および新鮮な岩盤中では探査可能距離は中心周波数80 MHzで40 m程度であったと述べている。

⑤ 福田⁹⁾は、中心周波数約100 MHzのアンテナを用いて、釜石鉱山（花崗閃緑岩）において、最大透過距離56 mを得ている。この値は、最大の測線長である。

筆者らの事例^{10),11)}では、亀裂が多く含水率の高い $C_M \sim C_L$ 級の花崗岩で、透過法による探査可能距離は中心周波数80 MHzのアンテナで20 m、中心周波数30 MHzのアンテナで30 m、また C_L 級主体の砂岩・頁岩互層における探査可能距離は、中心周波数80 MHzで11 mであった。また未発表ではあるが、比較的堅硬な $C_H \sim C_M$ 級の流紋岩では中心周波数80 MHzで16 mの探査可能距離を確認している。

なお、各研究事例で言う探査可能距離は、必ずしも探査の可能な限界距離を意味していない。孔間探査の場合、探査目的によっては、それ以上の測線を必要としなかった場面もあるからであろうが、概して探査可能距離については扱いが曖昧な印象を受ける。

ここで注意すべきことは、探査可能距離の定義である。探査可能距離とは、探査目的としている何らかの対象、すなわち物標の分別が可能な最大の到達距離を意味するものである。したがって、単なる電磁波の到達限界距離とは異なる。

2.2 到達距離と周波数の関係

中心周波数 f の半波長ダイポールアンテナの距離 R [m]における電界強度 E [V/m]は、

$$E = k/R \cdot \exp\{-\alpha(f)R\} \quad (1)$$

ここに、

k : 比例係数, α : 減衰係数,

f : アンテナ中心周波数 [Hz]

である。

今、アンテナ中心周波数 f_0 における諸量に添え字0を付ければ、アンテナ中心周波数 f_0 における電界強度 E_0 に対する E の比、 E/E_0 は、

$$E/E_0 = R_0/R \cdot \exp\{-\alpha(f)R + \alpha(f_0)R_0\} \quad (2)$$

となる。

式(2)の左辺を1とおけば、

$$R = R_0 \cdot \exp\{-\alpha(f)R + \alpha(f_0)R_0\} \quad (3)$$

が得られる。

式(3)は、異なる2つのアンテナ中心周波数 f, f_0 を用いた場合の、電界強度が等しくなる距離 R と R_0 の関係を表したものである。

岩盤中を透過する電磁波の吸収減衰係数 α が任意の周波数 f に対して求まるならば、アンテナ中心周波数と到達距離の一組の値(R_0, f_0)がわかれば、式(3)から任意の周波数 f に対する到達距離 R が求められる。

もし距離 R_0 として、物標の識別ができる限界の距離、すなわち探査可能距離 $R(f_0, \max)$ を知ることができたとすれば、これから任意の周波数 f に対する電磁波の、その岩盤における到達限界距離 $R(f, \max)$ ：

$$R(f, \max) = R(f_0, \max) \cdot \exp\{-\alpha(f)R(f, \max) + \alpha(f_0)R(f_0, \max)\} \quad (4)$$

を知ることができる。

その際、電磁波探査の適用範囲であるVHF (Very High Frequency) の下限値10 MHzを使用可能最小中心周波数 $f_{\min}$ と定義すれば、10 MHzにおける到達距離、すなわち10 MHzの中心周波数を持つ電磁波の到達限界距離 $R_{\max}$ が、

$$R_{\max} = R(f_{\min}, \max) = R(10 \text{ MHz}, \max) \quad (5)$$

と求められる。

ただし、到達限界距離 $R_{\max}$ で物標の識別が可能か否かは不明である。従って、10 MHzで探査可能な距離かどうかは、探査目的と併せて別に確認しなければならない。

なお、減衰係数 $\alpha(f)$ は、Thraneの実験式¹³⁾から表-1のように求められる。表-1の数値は、導電率 σ によって異なり、対象とする岩盤の平均的な導電率 σ を予め求めておく必要がある。

2.3 探査可能距離と課題

(1) 研究事例から見た探査可能距離

各研究事例に記述されている到達距離を、使用された周波数 f_0 における物標の識別可能な限界距離、すなわち探査可能距離 $R(f_0, \max)$ であると解釈し、図-1にプロットした。したがって、図-1に記載の点は、真の探査可能距離より小さい値が示されている可能性がある。また、図-1では、反射法の場合は2倍の値を探査可能距離とした。

図中の曲線は、式(4)を用いて到達限界距離 R を求め、

表-1 Thraneの実験式から求めた α - f の関係

f [MHz]	α [Np/m] $\sigma = 0.000$	α [Np/m] $\sigma = 0.017$	α [Np/m] $\sigma = 0.034$
10	0.001	0.363	0.725
20	0.002	0.364	0.727
30	0.005	0.367	0.729
40	0.009	0.371	0.733
50	0.013	0.376	0.738
60	0.019	0.381	0.744
70	0.026	0.388	0.750
80	0.034	0.396	0.758
90	0.043	0.405	0.768
100	0.053	0.416	0.778
110	0.064	0.427	0.789
120	0.077	0.439	0.801
130	0.090	0.452	0.814
140	0.104	0.467	0.829
150	0.120	0.482	0.844
160	0.136	0.499	0.861
170	0.154	0.516	0.878
180	0.173	0.535	0.897
190	0.192	0.555	0.917
200	0.213	0.575	0.937

※1 Np/m = 8.68 dB/m

図-1 ポアホール型レーダーの探査可能距離

$R-f$ の関係を示したものである。各曲線は、図中の各点で示された対象岩盤の探査可能距離 R_0 とアンテナ中心周波数 f_0 から成る座標 (R_0, f_0) を通るように描かれている。ただし導電率は、NO.8~11では $\sigma=0$ (水に相当)、NO.12については $\sigma=0.017$ S/m (0.01%の塩分濃度に相当) と仮定した。岩盤の平均的な導電率 σ を0~0.017 S/m の中間に取れば、NO.8~11はもっと緩やかに、NO.12はもっと勾配のきつい曲線になると考えられる。例えば、図-1では釜石花崗岩とストリーパ花崗岩は逆転しているが、これは導電率の取り方によっては逆転しなくなる。

図-1の10 MHzに相当する到達距離が、電磁波の到達限界距離 $R(f=10 \text{ MHz, max})$ となる。この到達限界距離 R は、物標の分別能力を無視した距離であり、必ずしも物標が識別できるとは限らない。アンテナ中心周波数は、ある目的に沿って必要な分別能力が満足されるように選ばれるからである。

表-2は、各研究事例の地質と場所に関する記述、探査可能距離と電磁波の到達限界距離の関係をまとめたものである。電磁波の到達限界距離は、式(5)から求めた。

図-1から、以下のようにまとめられる。

① 岩種、岩質、岩盤等級によって探査可能距離は大きく左右される。

② 堆積岩と比べると火成岩の方が減衰が少ない。これは結晶質岩石と堆積圧縮された岩石との電磁波透過特性の違い(例えば分極特性)を反映しているものと推察される。

③ 花崗岩で比較すると、岩盤等級に比例して探査可能距離が伸びている。

④ 花崗岩と流紋岩では探査可能距離と岩盤等級が逆転している。これは、生成深度の違い(例えば結晶密度)を反映しているものと思われる。

⑤ 岩盤等級の良好な花崗岩では、アンテナ中心周波数の減少による探査可能距離の伸びが著しいが、岩盤等級が低下するほど、その差が少なくなり、堆積岩ではあまり差がない。

(2) 探査可能距離の推定

国内の岩盤では亀裂の少ない堅硬な花崗岩はあまり見られないと言われているが、図-1によると釜石花崗岩の電磁波到達限界距離は極めて大きい。その値は、ストリーパ花崗岩での反射法の探査可能距離の2倍よりも大きく、この図から単純に探査可能距離を論ずるには、やや問題があるように思える。これは前述したように、 $R-f$ 曲線が岩盤の平均的な導電率 σ にやや荒い仮定を置いて描いた曲線であるからである。本来は、岩盤毎に導電率を求め、その値を用いて表-1と式(4)から R -

表-2 各事例の地質と探査可能距離

NO	参考資料	岩種 および 等級	場所	アンテナ中心 周波数 (MHz)	到達距離 (m)	探査可能 距離(m)※
1	Olssonら ⁵⁾	花崗岩	ストリーパ	20	200	235
2	佐久間ら ⁶⁾	花崗岩	岐阜	20	50	52
3	"	"	"	60	36	67
4	"	"	"	20	37	38
5	牧野ら ⁷⁾	花崗閃緑岩	不明	20	80	86
6	"	"	"	60	50	115
7	新ら ⁸⁾	花崗岩	茨城	80	40	136
8	福田ら ⁹⁾	花崗閃緑岩	釜石	100	56	600
9	筆者ら ¹⁰⁾	花崗岩 ($C_M \sim C_L$)	宮城	80	20	38
10	"	"	"	30	30	34
11	筆者ら	流紋岩 ($C_H \sim C_M$)	岐阜	80	16	27
12	筆者ら ¹¹⁾	頁岩 (C_L 主体)	山口	80	11	12

※式(4)で、アンテナ中心周波数 $f = 10 \text{ MHz}$ とした場合の距離

※NO. 1, 2, 3, 5, 6は、反射法によるものであり、文献に記載された透過距離を2倍している。

f 曲線を描く必要がある。

しかし、他の事例では互いに矛盾する関係にはないようであり、花崗岩での探査可能距離は岩盤等級により10~200 m、堆積岩では1例しかないが10 m 程度に分布する。

一般に、物標の分別能力は距離や波長とともに減少するから、実際の探査が各岩盤でどこまで可能かについては、電磁波信号のスペクトル、岩盤の電磁波に対する伝達関数などを用いた別の議論が必要である。

また、既往の各研究事例を相互に比較して知識を整理し、かつ探査可能距離について論議することは、探査装置の仕様や岩盤の状態、特に亀裂などの記述情報が不足していて、まだ準備が不十分な状況にあるということもできよう。

このような状況に基づき、図-1よりボアホール型レーダーの探査可能距離を定量的に論ずることは、本論では避けたい。また、 R - f 曲線を求めるために用いた式(4)などは、幾何学的減衰の項など適用範囲の実証的な吟味が必要である。ただ、探査可能距離(または到達限界距離)と岩質、岩盤等級、アンテナ中心周波数の関係が、図-1のような傾向にあること自体は非常に興味深い。また、各事例からも明らかなように、通常の探査条件ではアンテナ中心周波数は20~100 MHz の範囲にあるから、この範囲に限定すれば、実際に行われた探査で到達した距離は、ストリーパを除いて100 m 以内であり、これを大きく越えることは、現在の機器では困難であることがうかがえる。

(3) 今後の課題

こうした探査可能距離で電磁波探査が積極的に利用できる分野としては、比較的狭い範囲での岩盤構造調査、水みち探査、漏洩などのモニタリング等が考えられる。しかし、放射性廃棄物処分を対象としたサイトサーベイのように、極めて広い範囲を対象とした調査を行う場合には、さまざまな課題が残る。

例えば、探査可能距離を伸ばすためには、電磁波の発信方法、発信電力、発信周波数の検討、S/N 比の改善などが必要と思われるが、探査距離を伸ばすために最も簡単な方法の1つとしてアンテナ中心周波数を下げると波長が長くなり、物標の識別能力を示す検出能が低下する。また、発信電力を上げると発熱量が増加し、例えば特殊な冷却装置を併用するとしても、ボアホールに挿入可能な直径にアンテナソンドを納めるには常識的な限界が存在する。

しかし、一方では積極的な改良も行われている。その1つがM系列信号を利用するもので、なるべく検出能

写真-1 調査位置全景 (花崗岩における水みち調査)

を落とさずに探査可能距離を延伸する方法として、ビート方式の符号化パルス圧縮レーダーについての報告例¹²⁾が見られる。こうした方向で技術開発が進むことにより、火薬を用いた弾性波探査や広域比抵抗探査のように、数 km に及ぶ広範囲の領域でトモグラフィ探査が実施できるようになると、適地の選定を始めとする放射性廃棄物処分が大きく前進するものと期待される。

3. 水みち調査への適用性

放射性廃棄物の岩盤内処分においては施設周辺の岩盤の力学的性状に加えて、核種が漏洩した場合の移行に地下水の流動状態が大きく影響するため、水理特性から見た岩盤の亀裂・破砕帯の分布・連続性などを知ることが重要となる。そこで本章では、ボアホール型レーダーを用いた調査のうち、岩盤中に塩水を注入する前後でトモグラフィ測定を行い、水みち探査への適用性を検討した2つの事例について示し、考察を加える。

3.1 花崗岩における水みち探査

(1) 調査位置および地質

調査位置は、宮城県伊具郡丸森町の福島県営松ヶ房ダム(施工中)洪水吐横の実験サイトである(写真-1)。サイトには $\phi 66$ mm、深さ30 mのボーリング孔3本(最大孔間距離30 m)を設けてある(図-2)。

当地域は阿武隈山地北部に位置し、阿武隈帯と呼ばれる花崗岩類および広域変成岩類によって構成され、実験サイトは白亜紀後半の花崗閃緑岩からなっている。実験サイト横の亀裂観察およびボーリングコア観察の結果から決定した岩盤等級は C_M ~ C_L 級、RQD は平均40%程度で亀裂頻度は5~10本/m と全体に亀裂がよく発達している。亀裂の走向傾斜は、N10~20W 60~70NE およびN40~50W 70~80SW に集中し、これらの亀裂は一部に粘土を挟んでいる。また、地下水の経路となって

図-2 ボーリング孔配置 (花崗岩における水みち調査)

いると思われる部分があり、幅 2~10 mm 程度の鉄分や他の有色鉱物の集積のため黒色化した部分が認められる。

(2) 調査方法

調査は、塩水注入前の自然状態の岩盤で 1 回目の調査を行い、それを初期値として塩水注入後のデータの変化を調べた。塩水注入後は、注入終了 1 時間後、18 時間後、および 42 時間後 (それぞれ測定開始時間) の 3 回について調査を行った。ボーリング孔は Br.2 と Br.3 (孔間距離 10 m) を使用し、調査した深度は 5~20 m 区間で、深度 1.5 m 間隔ごとにトモグラフィデータを収集した。図-3 にトモグラフィ測線図を示す。

塩水は、水 1 m³ に塩 50 kg の割合で溶解した 50000 ppm の塩分濃度で、注入圧 1 kg/cm² にて Br.2 の深度 5~10 m 区間へ合計 5.5 m³ を注入した。

実験には、中心周波数 80 MHz のアンテナを使用した。

なお、事前に深度 5~30 m 区間で 5 m 毎にルジオン試験を実施し、各深度の透水性を把握した。

(3) 調査結果

① 事前に Br.2 孔を用いて実施された透水試験の結果では、深度 5~10 m が 10 Lu 以上、10 m 以深は 0.1 Lu 以下であった。注入前の比減衰トモグラフィ (振幅比の自然対数をとったもの、図-4) においては、深度 5~10 m 付近 (特に、5~6 m 付近) に減衰の大きいゾーンが見られ、透水性の高いゾーンと良く一致する結果が得られた。

② 注入直後の比減衰トモグラフィ結果および注入前と注入直後の差トモグラフィ (振幅比の自然対数をとったものの差、図-5) によると、減衰の大きくなったゾーンは、Br.2 (塩水注入孔) 側では深度 5~7 m 付近、Br.3 側では深度 7~12 m 付近に見られた。この結果は、

図-3 トモグラフィ測線 (花崗岩における水みち調査)

Br.2 の深度 5~10 m 区間で注入された塩水が、いったん水平方向に侵入し、そこから斜め下向きに侵入したように見える。実際、深度 5.5 m 付近には幅 1~2 mm の水平な亀裂が存在し、約 1 m 入った地点では、Br.3 の深度 13.5 m 付近から斜め上向きに伸びる 1 mm の幅を有する亀裂 (N85E 70S) 面と遭遇する。すなわち、トモグラフィと亀裂データは全体的に整合一致する。また、別途実施したボアホールテレビカメラによる孔壁観察結果では、亀裂の多い区間と電磁波振幅の減衰が大きくなった区間がよく対応している。

3.2 砂岩・頁岩互層における水みち探査

(1) 調査位置および地質

調査位置は、山口県宇部市二俣瀬区大字木田字落畑小野湖畔にある宇部興産 (株) 厚東川採石所である (写真-2)。地質は、中生代三疊系である埴生層群に区分され、頁岩が主体で細粒砂岩を挟む。露頭およびボーリングコアの観察によれば、岩盤の岩級区分は C_M~D 級の範囲に分布し、多くは C_L 級岩盤に相当する。層理面の走向は N80W~EW とほぼ東西であり、傾斜は 50° 程度の北落ちを示している。亀裂は層理面に沿うもの、層理面に直交するもの、これらに斜交するもの、および層理面を切る連続性のよいものの 4 種類から成る。このうち優勢なものは、層理面もしくは層理面に沿う亀裂、および

図-4 比減衰トモグラフィ (花崗岩における水みち調査)

図-5 比減衰の差トモグラフィ (花崗岩における水みち調査)

写真-2 調査位置全景（砂岩・頁岩互層における水みち調査）

層理面を切る連続性のよい亀裂である。

（2）調査方法

調査地点には $\phi 66$ mm、深さ15 mの調査用ボーリング孔を孔間距離5 mで南北方向の直線上に3本設置しており、S3-S2間で水みち調査を行った（図-6）。調査は、まず自然状態の地盤について行い、次に水みちを調べるため塩水を地盤に注入した後に調査を行った。使用したアンテナの中心周波数は80 MHzであった。

塩水は、花崗岩における水みち探査と同じ濃度のものを用い、G2孔（ $\phi 66$ mm、深さ10 m）の深度3.5~10 mの区間に注入した。塩水注入は2段階に分けて行い、第1段階では注入量は 0.5 m^3 、第2段階では注入量は 0.944 m^3 であった。第1段階と第2段階の塩水注入後に、各々電磁波による探査を行った。トモグラフィ測線を図-7に示す。

なお、岩盤の透水性を調査するために、G2孔を用いて深度3.5~10 m区間を3区間に分けてルジオン試験を行った。

（3）調査結果

① 図-8に示した電磁波の比減衰トモグラフィ結果

図-6 ボーリング孔配置（砂岩・頁岩互層における水みち調査）

によれば、塩水注入前の自然地盤に比べ、第1段階の塩水注入後においては、特に深度7~10 mで著しく減衰が大きくなり、深度5 m以浅にも一部減衰の大きくなる場所が見られる。さらに、第2段階の塩水注入後においては、減衰の大きいゾーンが拡大している。このような結果から、塩水注入によって電磁波の減衰が大きくなったゾーンは、導電率の大きい塩水が侵入したゾーンと判断され、相対的に他のゾーンより高い透水性を持つゾーン（水みち）であろうと推定された。

② ルジオン試験の結果は、深度3.5~5 mで約1600 Lu、5~7.5 mで約500 Lu、7.5~10 mで約600 Luであった。ルジオン値の絶対値は非常に大きい、各区間の相対的な透水性の大小が反映されていると考え、電磁波の振幅減衰の大きなゾーンから得られた水みちは、ルジオン値の大きい位置と必ずしも対応していないことがわかる。

③ 塩水注入前後の比減衰の差トモグラフィを図-9に示す。図-9によれば、ボーリングコアとの比較で

図-7 トモグラフィ測線（砂岩・頁岩互層における水みち調査）

は、亀裂の多い部分へ必ずしも塩水が優勢に浸入していない部分もある（S3孔の深度11 mで深と接する三角形の領域）。

しかし、その他の多くの部分では、層理面と亀裂によって構成される透水構造に従って侵入しているように見える。すなわち、砂岩に代表される層理面に遭遇した塩水が、層理面に平行な亀裂に沿って広がり、さらにその層理面を切る連続性のよい亀裂に沿って広がっているようである。このことは、トモグラフィ上に亀裂面を詳細に記入することによって、より理解しやすくなると思われるが、亀裂の数が多いため、図-9には砂岩の分布のみ示してある。ただし、ボアホールテレビカメラによる孔壁観察の結果によれば、図-9の亀裂の密な部分、および細片状の部分が集っている深度では、一部を除いていずれも減衰の大きいゾーンと一致している。この例外部分であるS3孔の深度11 m以深に見られる空白域は、露頭に見られたものと同様の粘土などを挟在した断層で区切られている可能性もあるが、この深度では確認されていない。

3.3 水みち調査への適用性

(1) 透水構造の評価

火成岩（花崗岩）と堆積岩（砂岩・頁岩の互層）の水みち探査事例について、塩水注入前後の比減衰の差トモグラフィとボーリング調査結果、露頭観察結果、ボアホールテレビカメラによる孔壁観察結果とを比較し、簡単な考察を加えた。

図-8 比減衰トモグラフィ（砂岩・頁岩互層における水みち調査）

岩盤に注入された塩水は、比重・粘性の点で地下水とはほとんど変わらず、岩盤中の地下水とは同様の挙動を示すと考えられることから、岩盤中の透水経路に関する情報の多くは、こうした探査結果と地質調査結果を総合することで、ある程度明らかになるものと思われる。

特に、電磁波透過特性のうち、減衰特性は塩水によって大きく変化する性質を持っており、電磁波透過速度に関するトモグラフィよりも、岩盤中の透水経路に関する情報を抽出する能力に優れているものと考えられる。

検討したふたつの水みち探査事例でも、減衰に関するトモグラフィによって、いずれの場合もかなり明瞭に塩水侵入の状況がとらえられており、その選択的な侵入の様子と孔壁観察などによる亀裂面の走向・傾斜は概略ではあるが一致している部分が多い。これらを総合すれば、さらに詳細な透水構造が描けるであろう。同様に、異なる断面でも構造を描き、かつ塩水注入位置を移動させることで透水構造が少しずつ明らかとなり、次第にあるまとまった岩体の透水構造を描き示すことができ

るだろうと思われる。

(2) 透水特性の評価

透水構造はともかく、透水性の評価については、まだ振幅減衰の大小による相対的な評価にとどまっており、絶対的な透水性の評価には至っていない。トモグラフィの各セルの数値が示す物理的な意味と岩盤基質部の物性、それに亀裂物性を何等かのモデルで表現し、これらが合理的に説明し得るものであることが証明できれば、透水特性の評価も可能となるであろう。それには簡単な岩盤モデルとそれに対応する電磁波伝搬特性を把握した上で、電磁波伝搬解析を順解析として検討する必要がある。双方、つまり電磁波透過計測から得られたデータと、そのデータから逆解析してトモグラフィ表示し、そこから得られた何らかの岩盤モデルを用いて順解析した結果が矛盾なく一致すれば、これをもって岩盤モデルと評価してもよいであろう。その上で、各セルの示す電磁波透過特性と岩盤基質、亀裂の各物性を検討することができれば、それらの相関から透水特性とセル数値を結び

付ける関係が明らかになる。

このようにして得られた岩盤の透水構造と透水特性は、然るべき手法で水理学的に検討され、その結果が水理学的な調査結果と一致するなら、岩盤の水理学的構造と特性が判明したと評価してよいであろう。今後は、そうした方向で検討が行われるものと予想される。

(3) 岩盤による水みちの違い

今回の2つの事例で明らかになったことの1つに、電磁波の振幅減衰が大きいゾーン（もしくは大きくなったゾーン）とルジオン値との対応、あるいは亀裂の多い箇所との対応で、岩盤によって相反するような結果が得られた点が挙げられる。

これは、岩盤内の地下水流動が水みちに沿って選択的に行われていることを示したものであり、亀裂の方向や幅だけでは岩盤内の地下水流動が記述できないことを示している。亀裂に沿った地下水流動は、亀裂の連続性、亀裂相互の接続性、挟在物の有無、亀裂面のラフネスとその異方性等によって影響され、これらのパラメータを記述することなく地下水流動を決定することはできないということを示している。

上記の結果はまた、ルジオン値に関する重要な性格を表している。すなわち、従来から言われているように、ルジオン値は岩盤内部の特定の点に関する情報であって、その点での透水特性（速度の次元）は示すが透水構造（空間の連続性、体積の次元）は示していない。したがって、大きいルジオン値を示した位置に塩水やグラウトが大量に入るとは限らず、逆に小さいルジオン値であっても、大量注入が可能な場合がある。こうした事実は実際にダムなどでの岩盤注入時に遭遇することがあり、近年になって徐々に理解されつつあるが、放射性廃棄物処分においても重要な点である。

岩盤中の地下水流動を決定する地質要因を知るには、電磁波探査の結果とともに、ボーリングコア、孔壁観察あるいは露頭観察結果等を参考にした評価が必要である。これらの要因が、露頭の情報で記述できればよいが、岩盤内部での情報が不可欠であるとなると、電磁波探査などによる調査が不可欠だということになる。前述のように、亀裂あるいは挟在物による電磁波の伝搬特性を室内実験等で把握することにより、トモグラフィの各セル内数値との照合によって対象岩盤の透水構造・透水特性をモデルを介して構築できる可能性がある。

トモグラフィ解析の信頼性についてはまだ十分な評価がされていないため、そこから推定される結論についても疑問の余地がないわけではない。しかし、本論で示したように、現在、塩水注入を併用した電磁波トモグラフ

ィを除いて、この種の透水構造を探査できる手法は見当たらないと言ってよいのではないと思われる。

4. あとがき

本論では、①ポアホール型レーダーの探査可能距離を研究事例に基いて検討し、②同装置を用いた水みち調査結果について考察を加えた。今後、さらに有効利用を図るためには、検出能を確保した上で発信法を改良する等により、探査可能距離を延伸する必要がある。岩盤の水理特性・力学特性の評価等を行うためには、まず岩盤の構造を特定することが必要になる。これについては、塩水注入を併用した電磁波トモグラフィ探査と露頭観察・ボーリング調査・ボーリング孔壁観察によって、その概略の推定を行うことができることを示した。ジオトモグラフィの一般の評価はまだ十分でないが、トモグラフが示している物理的な意味と信頼性に関する検討が進むことによって、岩盤構造と物性の推定に大きく貢献することが期待される。

なお本論のうち、花崗岩における水みち探査は、ポアホール型レーダーの共同開発先である川崎地質(株)と共同で実施したもので、第22回岩盤力学に関するシンポジウムで発表したもの¹⁰⁾に一部修正・加筆した。また、砂岩・頁岩の互層における水みち探査については、山口大学工学部社会建設工学科中川浩二教授の指導のもとで、宇部興産(株)、日本基礎技術(株)、ダイヤモンド(株)、川崎地質(株)、(株)間組が共同実験を行ったもので、第23回岩盤力学に関するシンポジウムに発表した内容¹¹⁾の一部を修正・加筆したものである。関係者の協力・助言、特に実験サイトの設置を許可いただいた福島県、宇部興産(株)の方々に紙面を借りて厚く謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 仙波 毅, 尾方伸久, 坪田浩二, 大沢英昭 (1989): ポアホールレーダーの応用例 (特に花崗岩に対する RAMAC の適用), 地下電磁計測ワークショップ論文集, pp. 66~70.
- 2) 利岡徹馬 (1989): 土質地盤におけるレーダートモグラフィの適用例, 地下電磁計測ワークショップ論文集, pp. 61~65.
- 3) 向上拡美, 北村孝海, 塩崎 功, 登内正治 (1989): 岩盤レーダーに関する室内および現地実験について, 第21回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 186~190.
- 4) A. L. RAMIREZ, R. J. LYTLE (1986): Technical Note-Investigation of Fracture Flow Paths Using Alterant Geophysical Tomography, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 23, No. 2, pp. 165~169.
- 5) 例えば, O. OLSSON, O. FORSLUND, L. LUNDMARK,

- E. SANDBERG and L. FALK (1986): Borehole Radar-A New Technique for Investigation of Large Rock Volumes, Large Rock Caverns Proceedings of the International Symposium, pp. 997~1008.
- 6) 佐久間秀樹, 坪田浩二, Olle OLSSON, Lars LUNDMARK (1988): 土岐花崗岩における RAMAC システムの適用試験, 物理探査学会第78回 (昭和63年度春季) 学術講演会講演論文集, pp. 305~309.
- 7) 牧野憲一郎, 佐藤源之 (1989): 花崗岩中におけるポアホールレーダの透過性について, 地下電磁計測ワークショップ論文集, pp. 71~72.
- 8) 新 孝一, 北野晃一, 堀 義直 (1988): 花崗岩地域における電磁レーダジオトモグラフィの実験, 電力中央研究所報告, U88016.
- 9) 福田和寛, 利岡徹馬, 竹中 久, 長 久 (1990): 花崗岩岩盤の内部構造探査におけるレーダー技術の適用, 物理探査学会, 第82回 (平成2年度春季) 学術講演会講演論文集, pp. 388~393.
- 10) 向上弘美, 北村孝海, 塩崎 功, 登内正治 (1990): ポアホール型岩盤レーダーによる水みち探査への適用実験, 第22回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 136~140.
- 11) 北村孝海, 米田俊一, 寺戸康隆, 登内正治, 中川浩二 (1991): 岩盤レーダー・比抵抗探査による水みちおよびグラウト効果の調査, 第23回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集.
- 12) 長棟章生, 手塚浩一, 小峰 勇 (1989): ビート方式による符号化パルス圧縮地中レーダ, 地下電磁計測ワークショップ論文集, pp. 23~26.
- 13) E. NYFORS and P. VANIKAINEN (1989): Industrial Microwave Sensors, Artech House, 64 p.

(1991年8月15日受付, 1991年11月30日受理)