

# ボアホールレーダ

佐藤 源之<sup>1)</sup>

## 1. はじめに

地表面での地中レーダ計測では電波が地中で受ける強い減衰のため計測深度に制限を受ける。この限界を超える地下深部の地層調査が必要なとき、地下深部まで井戸(ボアホール)をボーリングしてボアホール中に地中レーダを降下させればボアホール近傍の地層について大深度での地中レーダ計測も可能になる。ボアホールを利用する地中レーダをボアホールレーダと総称する。地層調査に使用できるボアホールの直径は通常10cm以下であり、地表で使用する地中レーダシステムをそのまま利用することはできない。本稿ではボアホールレーダに特有な技術とボアホールレーダ計測の特徴について述べ、地層調査への応用例を紹介する。

## 2. ボアホールレーダの特徴

ボアホールレーダはボアホールを利用することで初めて実現可能なレーダ計測形態に最大の特徴をもっている。つまり地表での地中レーダ計測ではアンテナを地表面で2次元的に走査するが、ボアホールレーダではボアホールを利用した3次元的なアンテナ走査も可能である。1本のボアホールに送受信アンテナを配置するシングルホール、送受信アンテナを2本のボアホールに配置するクロスホール、更にボアホールと地表に配置するVRP (Vertical Radar Profiling) などの計測形態が利用されている。

地中レーダは非接触・高速を特色とする地下計測方法である。通常地中レーダではこの特長を生かして小型軽量のレーダ装置を移動しながら地下構造の水平的な広がりを計測する。地表面では

レーダ装置の可搬性と地表の凹凸によりレーダアンテナの大きさが制約され、一般には1m以下の大きさのアンテナが利用されている。アンテナの共振はアンテナの大きさに依存するから、地中レーダの送信波長はアンテナの大きさにほぼ相当する1m以下であり、周波数では500MHz-1GHzに対応する(佐藤1994)。一方レーダ分解能は送信波長と同程度であるから、結果としてレーダ分解能はアンテナの大きさにほぼ等しくなる。つまり地表での地中レーダは埋設管や浅層地層構造など1m程度以下の大きさをもつ対象物体の計測に適するように設計されている(Annan *et al.*, 1994)。しかしこの波長領域の電波は減衰が大きく、計測限界は数mである。深部地層の計測には波長の長い送信電波を利用すればよいが、波長に比例してレーダ分解能が劣化するから浅層地層構造などの精密測定には適さない。

一方ボアホールレーダは地層構造や地下き裂面など数m以上の大きさの物体を計測対象としている。また利用できるボアホール数の制約から1本のボアホールからできる限り遠方まで計測する必要がある。こうした理由からボアホールレーダでは1m以上の波長の電波を使用している。これは一般的な地表地中レーダのおよそ1/10である100MHz以下の周波数に対応する。これによりボアホールレーダは堆積岩中で数m、花崗岩や岩塩など水分の少ない地層中では数十m以上の距離まで計測が可能となる。計測深度はボアホールレーダゾンの耐圧やケーブルの長さなど、レーダシステムの機械的条件で決められ、深度2000mで計測可能なボアホールレーダシステムも開発されている(牧野他, 1992)。

1) 東北大学 東北アジア研究センター:  
〒980-8576 仙台市青葉区川内  
E-mail: sato@cneas.tohoku.ac.jp

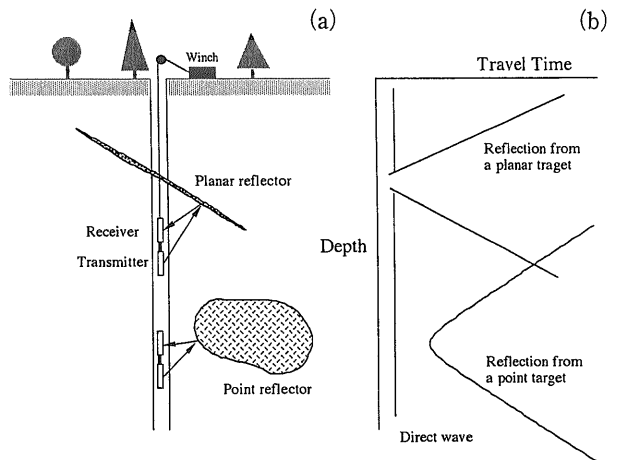
キーワード: ボアホールレーダ, 地中レーダ, 地下き裂計測, 地層調査, 岩塩鉱計測, 水みち調査, レーダシステム

### 3. ボアホールレーダシステム

ボアホールレーダシステムの基本構成は通常の中地レーダと共通するが、レーダアンテナがボアホールゾンデに収納され、測定・制御器とボアホールゾンデの間が長いケーブルで接続されている点異なる。ケーブル長は計測目的に応じて決められるが、10m程度から1000mを超えるシステムまで実験に利用されている。ボアホールゾンデは通常直径10cm以下の耐水・耐圧性円筒容器である。ゾンデ中にアンテナを収納し電波の送受信を行うためFRPなど非金属材料が使用される。ボアホールレーダシステムのアンテナはゾンデ形状の制約から、円筒状のダイポールアンテナが一般に使用される。波長1m以上の電波を送信するダイポールアンテナ長は1m程度になり、送受信アンテナ用ボアホールゾンデはそれぞれ2m程度の長さになる。特にレーダ探知距離の大きいシステムでは送受信アンテナ間隔を離す必要があり、全長が10mを越すこともある(Nickel *et al.*, 1983)。このような長大なレーダシステムが利用できるのもボアホールレーダの特長である。

ボアホールレーダ用ケーブルは地表装置との信号伝送ならびにボアホールゾンデ昇降・支持の役割がある。ボアホールレーダではアンテナとの電磁干渉を防ぐため、非金属ケーブルの利用が望ましく、光ファイバを合成繊維で補強したケーブルが多く使用されている(佐藤1991)、(Sato *et al.*, 1993)。また100mを超えるようなケーブルでは電動ウインチを利用してボアホールゾンデを昇降する。

口絵1に東北大学が開発したボアホールレーダシステムの概観を示す(Miwa *et al.*, 1999)。この写真ではクロスホール計測を行うために送信アンテナと受信アンテナを収納したゾンデを切り離しているが、シングルホール計測では2本のゾンデを結合して使用し全長4mとなる。口絵2は東北大学が試作した直径30mmボアホールレーダシステムである。既存ボアホールレーダシステムが使用できない細径ボアホールでも計測可能なレーダシステムの開発をめざしている。口絵3は米国地質調査所がトレーサテストなどに利用している商用ボアホールレーダである(Lane *et al.*, 1998)。

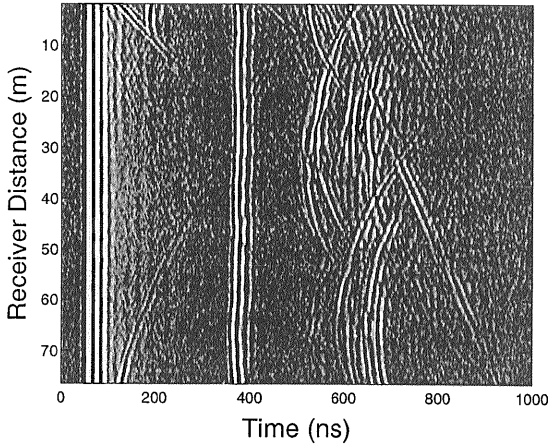


第1図 ボアホールレーダによるシングルホール計測。送受信アンテナは同一間隔に固定され、ボアホール内を昇降しながら物体からの反射波計測を行う。

- (a) アンテナ配置とレーダ対象物の形状。
- (b) 典型的なレーダ波形。地下き裂のような平面的広がりをもつ物体と、貫入岩やボアホールから離れた位置にある地層境界面などからのレーダ反射波はパターンが異なるので、レーダ波からの形状認識に利用される。

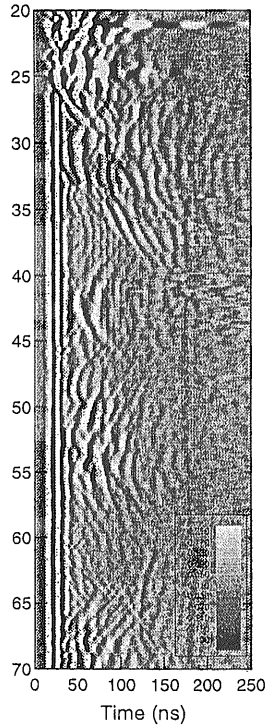
### 4. シングルホール計測

ボアホールレーダではシングルホール計測が最も一般的に利用される。シングルホール計測では送受信アンテナのボアホールゾンデを結合し、ボアホール中を昇降しながら対象物からの反射波を捉える。本手法は地表の地中レーダが地表面を移動する代わりにボアホール中を移動するものに他ならない。地表の地中レーダでは電波はほぼレーダの真下に送信されるからアンテナ直下の地層構造を計測しているのに対し、ボアホールレーダにおいてアンテナからの電波はボアホールの全周方向に送信され、全周方向からの反射体を同時に捉えている。シングルホール計測における対象物とレーダ計測波形の関係を第1図に示す。通常の中地レーダは2次元断面内の反射波を考えるのに対しボアホールレーダでは3次元的な反射波到来を考慮する必要がある。第1図(b)には典型的な計測対象として平面的な広がりをもつ地下き裂と、孤立物体からの反射波を模式的に示す。異なる反射パターンから反射体形状のおおよその推定が可能である。



第2図 岩塩鉱におけるシングルホール・ボアホールレーダ計測波形. 東北大学, ドイツ連邦地球科学資源研究所 (BGR) の共同研究による. 400ns付近に連続して見られるボアホールに平行する坑道からの反射波の他, 採掘後の空洞, 天然地層境界面などからの反射波が見られる(ドイツ連邦, アッセ鉱山).

岩塩鉱では1970年代よりボアホールレーダが実用的に利用されており, 最も成功したボアホールレーダ応用分野の一つである(Nickel et al., 1983). 第2図にドイツ連邦共和国アッセ岩塩鉱山で東北大学が計測したシングルホール・ボアホールレーダ計測波形を示す. アッセ鉱山の地層中には岩塩採掘跡である100m四方, 高さ5m程度の巨大な空洞が多数3次元的に分布している. ボアホールレーダ測定は岩塩中にボーリングされた水平なボアホールで行った. 第2図の縦軸はボアホールレーダの水平位置を示している. レーダ波形中アンテナ位置に関係無く400ns付近に直線状に連なる波はボアホールに平行する坑道壁面からの反射波である. その後に3, 4個重なり合っている双曲線状の波はボアホールの上下に位置する空洞の天井面や床面からの反射波である. 反射はボアホールレーダに最も近い点で生じるため, 第1図に示した孤立物体からの反射波の特徴を示している. それぞれの波形について反射時間の遅れから反射体までの距離を算出することで反射を生じる空洞を特定することができる. また全区間にわたって700-900ns付近に斜めに連なる反射波は不純物を含む岩塩脈からのものと予想している. 第2図のレーダ



第3図 花崗岩体中におけるシングルホール・ボアホールレーダ計測波形(竹下他, 1999). 東北大学, 米国地質調査所(USGS)の共同研究による(米国ニューハンプシャー州, ミラーレイク実験サイト FSE-3ボアホール).

計測ではボアホールから最大約60m離れた物体まで検出している.

花崗岩中の水みち計測もボアホールレーダの最も実用的に利用されている分野の一つである. 米国地質調査所ではボアホールレーダを利用した花崗岩中の地下水理構造の研究を行っている. 特に森林土壌における水理研究を目的とした実験サイトを米国ニューハンプシャー州・ミラーレイクに有している. 第3図に東北大学が同サイトで計測したボアホールレーダ波形を示す(竹下他, 1999). 第1図に模式的に示した地下き裂からの反射波がV字形列としてとして現れており, V字頂点の深度25, 30, 42, 52m付近で地下き裂がボアホールに連結していることがわかる. また波形列の形状からき裂の傾きが推定できる.

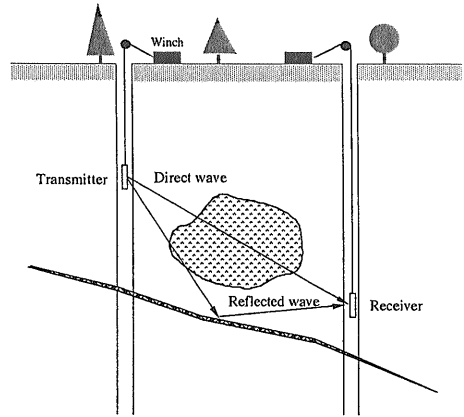
岩塩や花崗岩は水分をほとんど含まないので電氣的に均質な誘電体とみなせる. こうした媒質中では電波の減衰が小さい上, 水を僅かにでも含む媒質と周囲の地層の誘電率が大きなコントラストを持つため, 明瞭なレーダ反射波を発生する. このためボアホールレーダは不透水層における水みち検知などで極めて威力を発揮し, 深部地下の地下水流動特性の可視化などに利用されている. こうし

た技術は廃棄物地層処分のための基礎研究などでも応用され、1980年代には国際的な共同プロジェクトでボアホールレーダシステムの開発が進められた(Niva et al., 1987; Olsson et al., 1992).

堆積岩は岩塩や花崗岩に比べ一般に電気抵抗が低くシングルホール計測によるボアホールレーダの探査距離も短い。断層のボアホールレーダ計測など低電気抵抗地層中でのレーダ計測の需要は高く、今後の研究が必要な分野である。

### 5. クロスホール計測

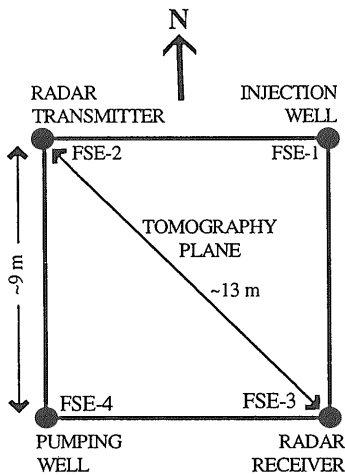
互いに接近したボアホールが2本以上利用できる場合、送受信アンテナを異なるボアホールに配置するクロスホール計測が可能である。送受信アンテナ間を伝搬する電波の減衰量と伝搬時間を計測することで第4図に示す様にボアホール間の地層構造を推定する(Harris, 1997; Lytle, 1979)。計測波形からの推定にはトモグラフィ解析が良く用いられる。本手法は医用CTスキャンと同じ原理に基づくが医用CTスキャンでは計測対象を取り囲む計測を行うことで人体内部構造をトモグラフィ解析により精密に画像化している。ボアホールレーダではボ



第4図 クロスホールボアホールレーダ計測。2つのボアホール中に送信アンテナと受信アンテナを配置し、アンテナ間を伝搬する電波を計測する。通常トモグラフィ解析などにより、ボアホール間の地層構造推定を行う。

アホールの位置が制約されるため地層を取り囲むデータ取得は不可能であり、トモグラフィ解析精度の劣化は免れない。しかしシングルホール計測で要求されるレーダ分解能はクロスホール計測においてそれほど重要ではなく、より低い周波数を利用することができたため花崗岩中では数十m間隔のボアホールにおいてもトモグラフィ解析が報告されている。

前述したミラーレイク実験サイトにおいて、米国地質調査所はボアホールレーダによるトモグラフィ技術を利用し地下水利構造の研究を行っている(Lane et al., 1998)。水利構造を知るためにボアホールに水を圧入し、他のボアホールからの流出位置と流出量を測定することでボアホール間を連結しているき裂の構造を推定するトレーサテストが用いられる。Laneらはトレーサテスト中の塩水の移動挙動をボアホールレーダによるトモグラフィにより可視化することに成功した。塩水は電気抵抗が低いいため、電波は塩水を含む地下き裂を通過するとき強い減衰を受けるので電波減衰量トモグラフィにより地下き裂中の水の浸透挙動が計測できる。第5図にミラーレイクサイトにおいて実験に利用された4本のボアホールの水平位置を示す。トレーサテストではFSE-1ボアホールに塩水を約10分間圧入し、以後電気導電率の低い浄水を圧入し続けた。圧入した塩水は地下き裂内を浸透し約50分で出



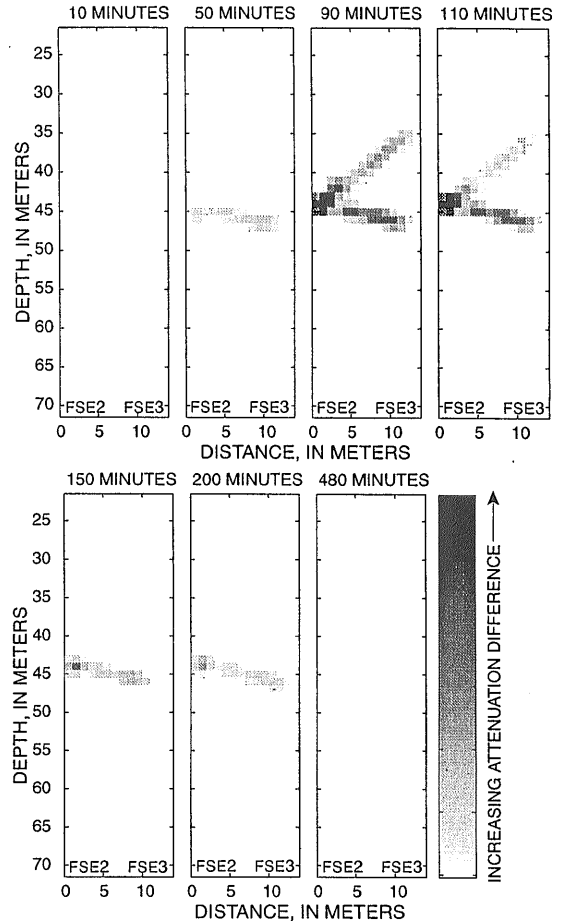
第5図 米国ニューハンプシャー州、ミラーレイク実験サイトにおいて米国地質調査所がトレーサテストに利用したボアホールの平面配置図(Lane et al., 1998)。FSE-1より塩水を圧入し、FSE-4から回収する。このときFSE-2とFSE-3の間でクロスホールボアホールレーダ計測を行う。

口側ボアホールFSE-4に到着し、その後10時間にわたり流出を続けた。Laneらは本サイトで塩水の圧入作業中、連続的にFSE-2とFSE-3の間でクロスホールボアホールレーダ計測を行った。1セットのレーダデータの取得には10分間を要し、圧入開始から5時間連続して行われた。1セットごとにトモグラフィ解析が行えるから10分ごとの状況の変化を知ることができる。第6図に測定開始後の減衰率変化をトモグラフィで求めた結果を示す。図面で左側にあるFSE-1の45m付近から徐々に減衰率の高い領域が帯状に進展し、上方と下方に分岐した後150分過ぎから消滅していく様子がわかる。分岐した減衰域は右側のボアホールFSE-3の深度35m、45mに交差しているが、これは第3図でシングルホール計測によって検出されたき裂の深度と一致している。

## 6. VRP計測

送受信アンテナをボアホール中、受信アンテナを地表に置くことでクロスホール計測より自由度の高いレーダ透過波計測が可能である。こうした手法をVertical Radar Profiling (VRP) 法と呼ぶ。VRPは浅層地層の3次元的計測に有効であり、地表からの地中レーダ計測が難しい10m以深まで利用可能な場合もある。VRPでは送受信アンテナを相対的に走査するため、計測レーダ波形から反射物形状を直接読み取ることは難しい。このため弾性波探査で用いられるマイグレーション信号処理により垂直断面図を作成する(佐藤 他1997)。第7図は遺跡調査を目的として実施した仙台城石垣内部構造のVRPレーダ計測波形のマイグレーション処理結果である(Zhou *et al.*, 1998)。送信アンテナ用ボアホールの坑口から南東と南西方向の地表測線上で受信アンテナを走査し、マイグレーション結果は測線に沿う垂直断面で示している。本図では深度2-4mに強い波が見られ、反射体の存在が予想できた。また20m付近まで反射波が見られており複雑な地層構造が予想される。VRPによる解析結果から予想した石垣内部構造を第7(b)図に示す。2-4mの反射は埋没した石組み、それより下に見られる構造は人工的な埋め戻しなどであると予想した。VRP計測を実施した地点では1998年末までに石

1999年5月号

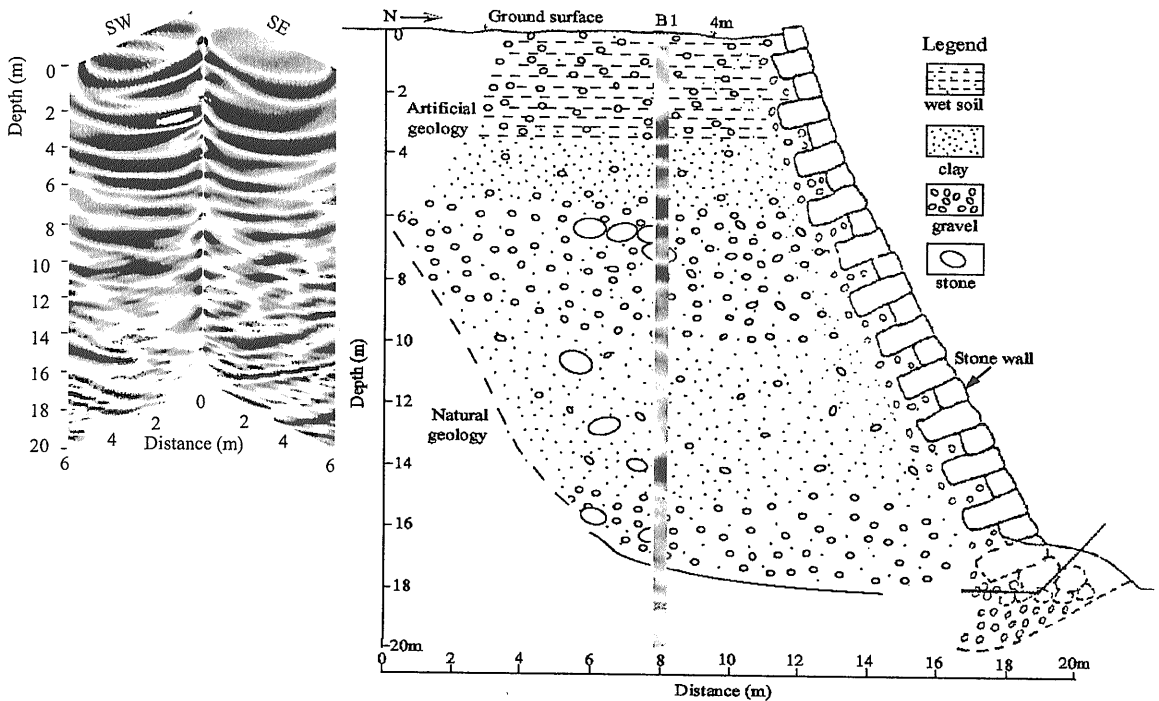


第6図 クロスホールレーダを利用した減衰トモグラフィによって捉えられたトレーサテスト中の塩水の移動挙動。塩水中で電波は強い減衰を受けるのでき裂に沿って圧入された水が広がる様子を可視化できる。図面左側がFSE-2、右側がFSE-3ボアホール。トレーサテスト用の塩水は計測断面を横切るように圧入されている(米国ニューハンプシャー州、ミラーレイク実験サイト、米国地質調査所による(Lane *et al.*, 1998))。

垣解体修復工事に伴う発掘が行われ、深度2m付近を頂上とする大規模な石組み構造の存在が確認されている。

## 7. おわりに

ボアホールレーダは地表からの地中レーダ計測では得ることができない深部地質情報の計測手法として多くの特長を有している。本稿では主として



第7図 VRPボアホールレーダ計測にマイグレーション処理を施して得られた垂直断面図。ボアホールから東西、東南方向に地表測線を設定している(仙台市,仙台城) (Zhou *et al.*, 1998)。  
 (左) マイグレーションによって得られた垂直断面図。東西、東南方向の地表測線に沿う断面を示しており、2面の交点が送信アンテナを配置したボアホールの位置。深度2-4mに強い反射が見られる。  
 (右) VRPの結果から推定した仙台城石垣の内部構造。中央にVRPの結果を示している。深度6m付近に大きな石の存在を予想した。遺跡調査の結果この深度より下部に大規模な石組みが発見された。

電気抵抗の高い地層中でのボアホールレーダ応用例を示したが、こうした好条件では極めて有効に地質情報計測ができる。

反面、電気抵抗が低い地層でのボアホールレーダ計測は難しく、我々はレーダポラリメトリの利用によるレーダ計測限界の拡大について研究を継続している (Miwa *et al.*, 1999 ; Sato *et al.*, 1994b)。またシングルホール計測では地下き裂の傾斜と深度は従来のボアホールレーダ計測で推定できるが、き裂の走向を推定することができない。反射波の到来方向を計測できる指向性ボアホールレーダシステム (Flachenecker, 1978 ; Olsson *et al.*, 1992) を利用すれば3次元反射体形状が推定可能である。しかし実用化のためにはやはり計測可能距離の拡大が望まれている。こうした新技術の開発により、ボアホールレーダの応用範囲は高電気抵抗の岩体に限らず、各種の地層調査や土木・建築分野などで今後も広がるのが期待される。

### 謝 辞

本稿で紹介したボアホールレーダ実験は多くの方々の協力によって実現することができた。ミラーレーク実験サイトでの実験は米国地質調査所 John Lane Jr. 氏らのグループとの共同研究であり文部省科学研究費補助金 (国際学術共同研究, 課題番号10044122) ならびに (財) 地球環境財団研究奨励金による助成を受けた。アッセ鉱山での計測はドイツ連邦国立地球科学資源研究所 (BGR) ならびにニーダーザクセン地質調査所 (NLfB) との共同研究であり、特に Rudolf Thierbach 氏の協力をいただいた。仙台城における実験は仙台市の御協力によるものであり、仙台市教育委員会金森安孝氏には遺跡調査に関する情報提供ならびに指導をいただいた。最後に、日ごろよりレーダシステム開発ならびにフィールド実験に参加・協力をいただいている東北大学佐藤研究室学生諸君に感謝いたします。

## 参考文献

- Annan, A. P. and Cosway, S. W. (1994) : GPR frequency selection, Proc. 5th International Conference on Ground Penetrating Radar, June 12-16, Kitchener, Ontario, Canada, 747-760.
- Flachenecker, G. (1978) : Small transistorized receiving antennas for radar-measurements in salt deposits, Int. Symp on Antennas, 287-290.
- Harris, J. M. (1987) : Diffraction Tomography with arrays of discrete sources and receivers, IEEE, Trans. Geosci. Remote Sensing, GE-25, 448-455.
- Lane, J. W. Jr., Haeni, F. P. and Day-Lewis, F. D., (1998) : Use of Time-Lapse Attenuation-Difference Radar Topography Methods to Monitor saline tracer Transport in Fractured Crystalline Bedrock., Proc. Int. Conference on Ground penetrating Radar, GPR98, Kansas, 533-538.
- Lytle, R. J., Laine, E. F., Lager, D. L. and Davis, D. T. (1979) : Cross-borehole electromagnetic probing to locate high-contrast anomalies, Geophysics, 44, 1667-1676.
- 牧野憲一郎, 長田和洋, 池田隆司, 山水史生 (1992) : 2000m級ボアホールレーダの開発井と測定例, 第2回地下電磁計測ワークショップ論文集, 資源素材学会地下計測部門委員会, 13-18.
- Miwa, T., Sato, M. and Niitsuma, H. (1998) : Subsurface Fracture Measurement with Polarimetric Borehole Radar, IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, vol. 37, no. 2. 828-837.
- Nickel, H., Sender, F., Theirbach, R. and Weichart, H. (1983) : Exploring the interior of salt domes from boreholes, Geophysical prospecting, 31, 131-148.
- Niva, B., Olsson, O. and Bluemling, P. (1988) : Radar crosshole tomography with application to migration of saline tracer through fracture zones, NAGRA Tech. Rep. 88-31.
- Olsson, O., Falk, L., Forslund, O. Lundmark, L., and Sandberg, E. (1992) : Borehole radar applied to the characterization of hydraulically conductive fracture zones in crystalline rock, Geophysical Prospecting, 40, 109-142.
- Sato, M. and Thierbach, R. (1991) : Analysis of a borehole radar in cross-hole mode, IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing GE-29, pp. 899-904.
- 佐藤源之 (1991) : 坑井間ボアホールレーダ計測, 電子情報通信学会秋季大会, SC-1-7, 2, 439-440.
- Sato, M. and Suzuki, T. (1993) : Recent Progress in Borehole Radars and Ground Penetrating Radars in Japan, IEICE Trans. Commun., E76-B-10, 1236-1242.
- 佐藤源之 (1994a) : ボアホールレーダのシステム設計と研究開発動向, 物理探査, 47, 516-529.
- Sato, M., Ohkubo, T. and Niitsuma, H. (1994b) : Cross-Polarization Borehole Radar Measurements with a Slot Antenna, Applied Geophysics, vol. 33/1-3, 53-61.
- 佐藤源之, 路原, 新妻弘明 (1997) : パーティカル・レーダ・プロファイリング (VRP) による地下構造の推定法と群馬県田尻遺跡への応用, 物理探査 第50巻第3号, 196-207.
- 竹下盛康, Lane, J. W., 佐藤源之 (1999) : ポラリメトリックボアホールレーダによるミラーレイクフィールドでの地下き裂計測, 岩盤地下水理に関するワークショップ論文集, 資源・素材学会地下計測部門委員会, 52-57.
- Zhou, H., Sato, M., (1998) : Vertical Radar Profiling Technique for Investigation of Deeper Structure in Sendai Castle, Expanded Abstracts, SEG/EAGE/CPS Beijing '98 Int. Geophysical Conference & Exhibition, Beijing, 269-274.

---

SATO Motoyuki (1999) : Borehole Radar.

< 受付 : 1999年4月1日 >