

GPRを用いた3次元反射法探査による活断層調査

阿部 信太郎¹⁾

1. はじめに

GPR (Ground Penetrating Radar) 反射法探査は、電磁波を用いた反射法探査であり、地中レーダー法とも呼ばれている。すなわち、送信アンテナから地中に向けて照射された電磁波が地中のターゲットにあたり、反射して地表面に戻ってきた波とその伝播時間を受信、計測する。用いる波が電磁波か弾性波かの違いだけで、測定方法、解析方法の原理は陸上における反射法地震探査と同様である。

欧米諸国においては、均質かつドライな地盤中の地下水分布を把握するための調査手法として広く用いられている。日本国内においては、高精度な探査能力を生かして、既設埋設物に対する損傷防止のための非破壊的調査法として用いられてきた。

このGPR反射法探査の探査可能深度をさらに大きくすることにより、その適用範囲を地質調査、特に活断層調査に広げることを検討した。

2. ステップ式連続波レーダーの特長

従来から広く用いられているGPRは、地中への送信信号としてパルス波を用いている。出力する電磁波の周波数帯域及び地中の電気特性にもよるが、その分解能は0.2 m ~ 0.3 mを有している。しかし、探査可能深度に関しては、地中における電磁波の減衰が著しいため2 m ~ 3 m程度である。特に日本のような湿潤な土壌においてはさらに減衰が激しくなる場合もあり、地表下20 m程度の探査可能深度を必要とする地質調査への適用を考えるには、この点の改善が必要である。

パルス波を用いたGPRにおいて探査可能深度

を大きくするためには、送信信号のエネルギーを大きくすれば良く、分解能を向上させるためには、パルス幅を短くすれば良い。ただし、送信エネルギーは信号振幅の自乗と送信時間に比例する。すなわち、送信信号の振幅を大きくし、かつパルス波の時間幅を大きくとることによって送信エネルギーを増大することができるが、これと同時に送信信号の波長が長くなるため、分解能は低下する。すなわち、パルス波をGPRの送信信号として用いる限りは、探査可能深度の増大と分解能の向上は両立しない。

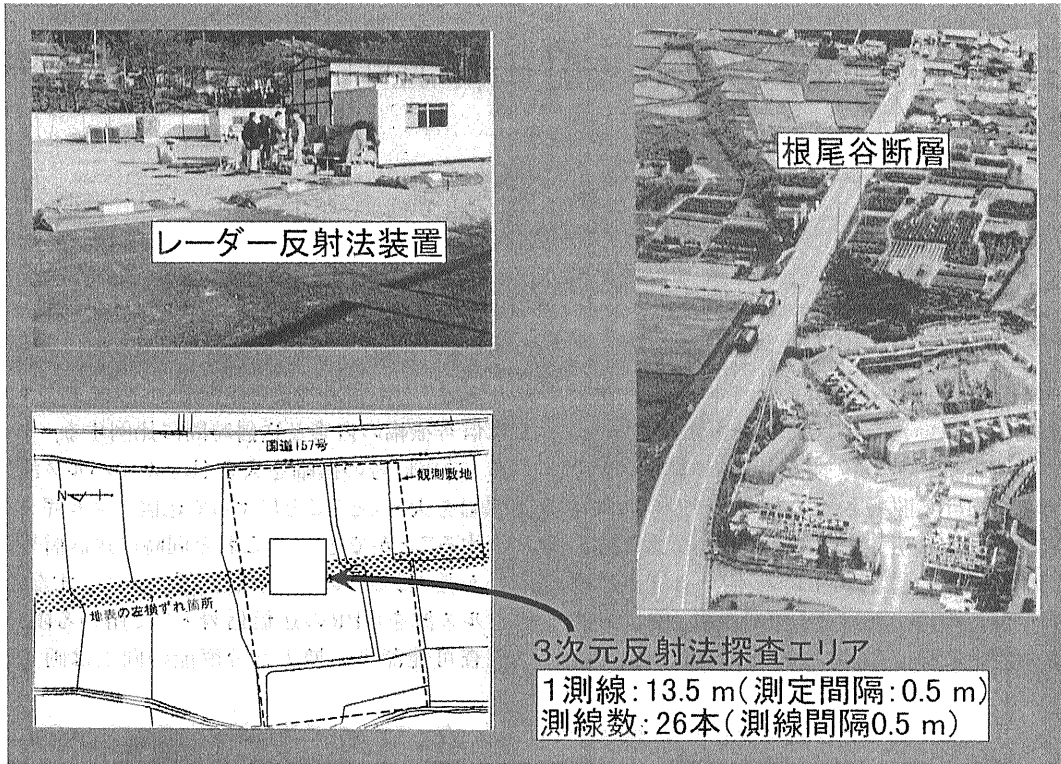
一方、ステップ式連続波レーダー (Step Continuous Wave Radar) で用いる送信信号は、同じ振幅で低周波数から高周波数へ段階的に移行する正弦波である。このような信号はチャープ信号とも呼ばれる。チャープ信号は送信時間に対して段階的に周波数を変化させることが可能であり、正弦波を送信している時間 (掃引時間) を長くとることによって送信エネルギーを増大させることができる。また、波長と周波数帯域幅は反比例の関係にあるので、送信信号の波長が短ければ短いほど、広い周波数帯域を持つことになる。したがって、チャープ信号を用いた場合、移行する周波数帯域幅を広くすればするほど、得られるデータの分解能が向上することになる。すなわち、GPRの送信信号としてチャープ信号を用いることにより、探査可能深度の増大と分解能の向上を理論的には両立できる。

3. 根尾谷断層におけるステップ式連続波レーダーを用いた反射法探査の概要

これまで得られているステップ式連続波レーダーの適用事例から判断すると、地盤中の電磁波伝

キーワード: 断層, GPR, 反射法探査, 3次元

1) 財団法人 電力中央研究所 我孫子研究所:
〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646



第1図 根尾谷断層におけるステップ式連続波レーダーを用いた反射法探査の概要。

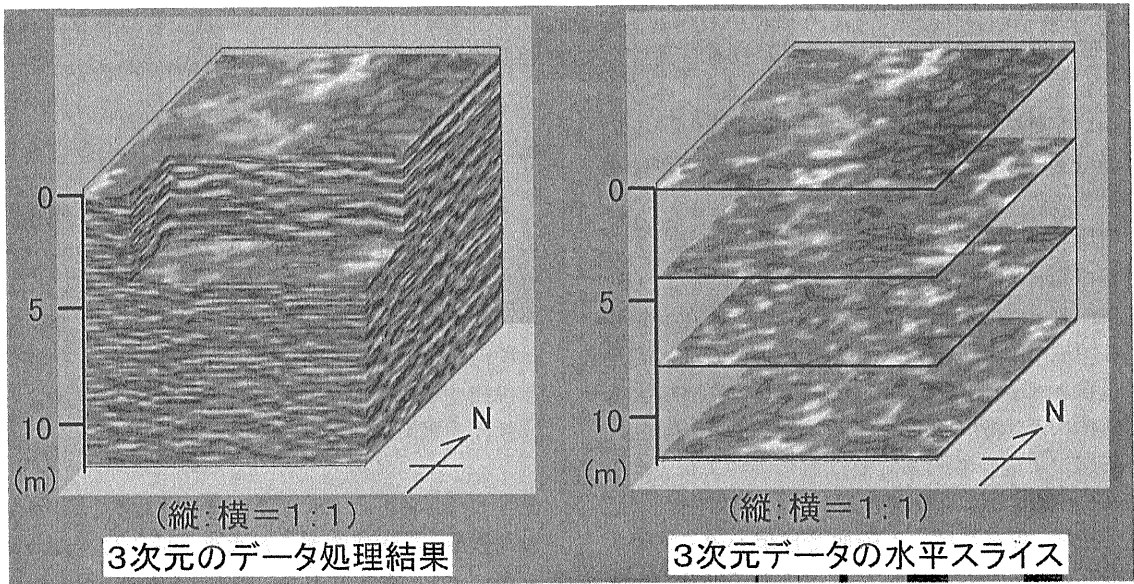
播速度が約 50000 km/sec とすれば、探査可能深度は土質地盤においては10 m～15 m、岩盤においては20 m～30 mである。ただし、地表下に極端に強い反射面が存在した場合、その反射面における送信信号のエネルギー損失が大きくなり、それより深部にはエネルギーが透過し難くなる。このような探査可能深度を小さくする要因はステップ式連続波レーダーに特有の問題というよりは、GPRに限らず弾性波も含めた反射法全体の適用限界とも言える問題である。

また、我々が所有している探査装置の送信周波数帯域幅は 44.4 MHz であり、これをパルス幅に換算すると波長は約 1.1 m となる。通常、反射法探査においては、最低でも反射波の 1/2 波長程度のサイズまでは識別が可能であるとされている。したがって、我々の装置を用いて GPR 反射法探査を実施した場合の地層分解能は 0.6 m 程度と考えられる。

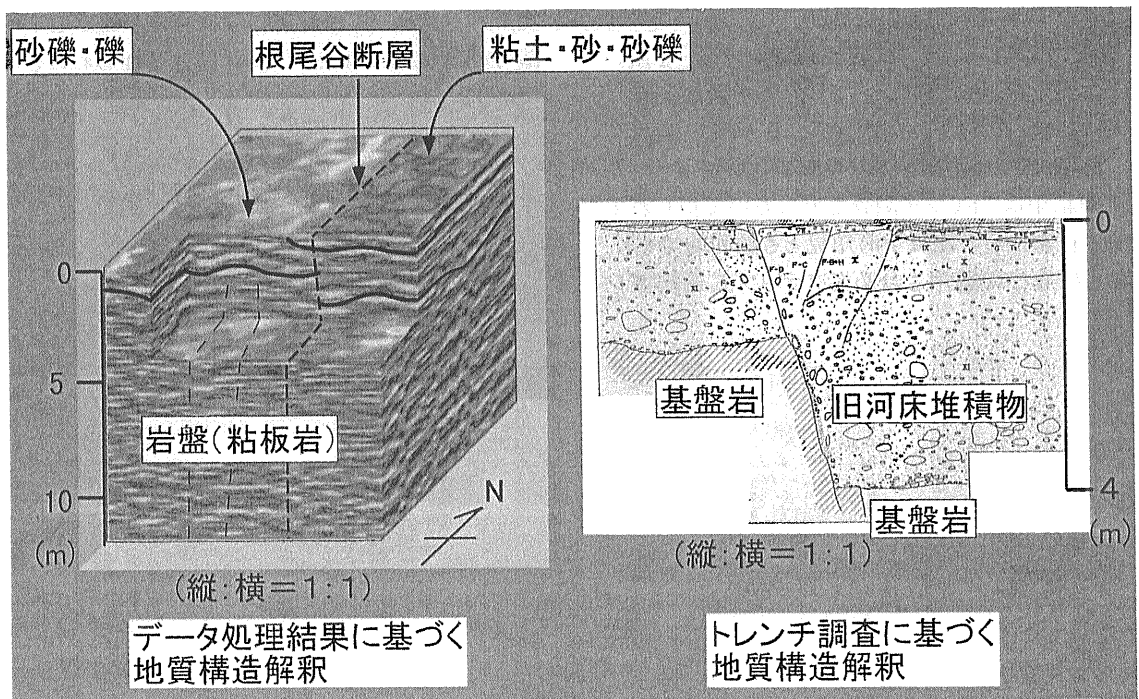
以上のような探査性能を有するステップ式連続波レーダーを用いて、3次元反射法探査を実施し

た。実験フィールドとしては、根尾谷断層を選定した。根尾谷断層は、岐阜県南西部を震源とする、我が国最大の内陸地震 (M=8.0) である濃尾地震 (1891年) の際に地表に出現した活断層である (活断層研究会編 1991)。根尾谷断層においては、活動履歴解明のために多数のトレンチ調査が既に実施されており、その浅部構造は詳細に把握されている。

3次元探査領域は、測線のほぼ中央に根尾谷断層を含むように設定した (第1図)。測線数は26本、1本の測線長は13.5 m、測定間隔は0.5 m、測線間隔も0.5 mである。取得されたデータに対しては、陸域における反射法地震探査の通常データ処理とほぼ同様な処理を1測線ごとに施し、26本の2次元反射断面を作成した。最終的には、これら26本の測線について、平面的な分布も考慮した表示を行うことにより、地表下の根尾谷断層を3次的にイメージングした。



第2図 ステップ式連続波レーダーを用いた3次元反射法探査による根尾谷断層のイメージング。



第3図 3次元反射法探査結果に対する地質構造解釈。

4. ステップ式連続波レーダーを用いた3次元反射法探査による根尾谷断層のイメージング

3次元反射法探査データの解析処理結果によれ

ば、地表下10 m程度まで有意な記録が得られている(第2図)。記録断面は3次元表示で、縦軸、横軸ともに距離軸となっており、縦横比は1:1である。反射波振幅に応じて色付けしてある。色の違いは、

物質の電気的なインピーダンスの差に対応しており、弾性波の場合と同様に、そこに存在する物質の違いを反映していると考えられる。また、水平スライス断面を作成することにより、反射パターンの平面分布、及び深度方向への変化も追跡可能である。

根尾谷断層は、青色が卓越する領域と緑色～黄色が卓越する領域の境界としてとらえられている。既存のトレンチ調査結果を参照すると、青色が卓越する領域は砂礫を含む粘土の地層に対応し、緑色～黄色が卓越する領域は、それよりも粒径の大きな砂礫により構成された地層に対応付けられる。

断層による基盤の垂直変位量については、水平スライス断面による根尾谷断層の深度方向への追跡により、断層を挟んだ両側で反射パターンの差が不明瞭になる深度としてとらえられている。上載している堆積物の厚さを考慮すると、基盤の変位量は2 m程度となる。断層の走向については、深度方向での変化は見られない。

以上のように、ステップ式連続波レーダーを用いた3次元反射法探査によって、根尾谷断層を挟んだ堆積物分布の違い、断層による基盤の垂直変位、地表下における断層の走向が把握できた。これらの結果は、トレンチ調査などにおいて得られていた、従来からの地質学的知見とも調和的であり、3次元探査への適用も含めてステップ式連続波レ

ーダーを用いたGPR反射法探査の断層調査に対する有効性が確認された(第3図)。

5. まとめ

レーダー反射法探査は、完全な非破壊的調査であるため、都市型防災に対応するための活断層調査など、トレンチ掘削や大規模な人工地震構造探査が困難な地域における地下構造把握に大きな成果が期待できる。また、ボーリング調査やトレンチ掘削と併用する場合においても、その掘削位置決定の信頼性を飛躍的に向上させるもの考える。

謝辞：本論文を執筆する機会を与えてくださった地質調査所・海洋地質部 倉本真一博士に感謝の意を表します。本論文をまとめるにあたり、神奈川県立温泉地学研究所の小田義也氏には、有益な御意見を頂きました。また、本研究は(財)電力中央研究所の所内研究「最新の物理探査法による地下内部可視化技術の開発」の一部により行われたものであります。

参考文献

活断層研究会編(1991)：新編 日本の活断層，東京大学出版会。

ABE Shintaro (1999)：The imaging of fault with GPR 3-D reflection method.

<受付：1999年4月1日>