

[別紙1]

論文の内容の要旨

論文題目 地下水環境計測のための地中レーダ探査法の
高精度化に関する研究

氏名 尾西 恭亮

人口増加や工業生産の拡大、加えて進行する気候変動に伴い、戦略物資としての水の重要性が高まる傾向にある。水管理の観点から地下水観測の重要性が高まりつつある。現在唯一十分な信頼性を有する地下水観測手段である井戸観測は、水位精度は高いが空間時間方向への記録の連続性は不十分である。そのため、井戸観測を補完する広域経時観測手法の需要がある。すなわち、物理探査による地下水観測の信頼性向上への強い要求がある。

本研究は地中レーダ法による地下水観測の信頼性向上と情報量増加を目的とする。地中レーダ法が地下水観測に有用であることを示し、技術開発の軌道に乗せることを目指し進められた。この目的に対し、本研究は以下の5点の探査および解析法の改良を行った。(1)地中レーダ記録の探査位置精度の向上をねらいとしたRTK-GPS同期観測法の開発。(2)地中レーダによる地下水観測の信頼性向上のための毛管帯付近のレーダ反射波分析。(3)地下水経時観測手段確立のための、Time-lapse法の適用効果の評価と実地探査の実用性向上。(4)探査記録のS/N向上のためのCMP法の高効率化手法の考案と実用性向上。(5)情報量増加と適用用途拡大を図った周波数解析による導電率観測法の提案。

これまでの地中レーダ法は埋設管、空洞、舗装層厚等の対象の判別技術に過ぎない。これに対し、現在研究開発が進められているプラスチック地雷探知技術等はより低コントラスト対象の判別技術への発展と捉えられる。さらに、本研究では物性分布や物性値の導出法を追求している。水分率分布や油汚染域の計測法の確立を最終目標と掲げている。地中レーダ技術における本研究の位置づけは現行技術の2歩先を目指したものと捉えられる。

本論文では5つの研究方法、すなわち、RTK-GPS同期観測法の開発、水分率遷移領域反射波の評価、Time-lapse法の実用化、高効率CMP法の考案、周波数解析による導電率分布観測手法の考案、各々について独立した章で方法と結果を述べる。

始めに、RTK-GPS同期観測法の開発を述べる。一般の地中レーダ探査と異なり、Time-lapse法やCMP法等高度な探査法や処理法の適用には、10~100倍高い探査位置精度が必要となる。地中レーダ探査の探査位置精度の向上を目的に、水平精度1cmのRTK-GPSを利用した高精度探査手法を

開発した。この結果、Time-lapse 法や CMP 法が実地観測可能な高い探査位置精度の記録取得が可能となった。また、標高静補正が処理可能となり、記録解釈の信頼性が向上した。さらに、50m 四方の3次元探査が1時間で高速に探査可能となり、地中レーダの活用性が向上した。地中レーダ法の発展展開には S/N 改善技術の革新がなければ為し得ない。提案する RTK-GPS 同期観測法は地中レーダ法のブレークスルー技術となる高い可能性を有する。

次に、地下水面上部領域の電磁波反射を分析した。油汚染の拡散は地下水面上部の水分率遷移領域や毛管帯の幅に大きな影響を受ける。しかし、井戸観測だけでは水分率遷移領域幅や毛管帯厚の測定は困難である。また、地中レーダによる広域地下水分布の高精度探査の実現には、地下水面上部領域における反射波の詳細な分析と検討が必要となる。そこで、本研究では試験観測設備を用い模擬土壌の水位を変化させ、高周波アンテナで地下水面上部の反射波を記録し分析した。その結果、地中レーダの電磁波は水分率遷移領域で強く反射することを確認した。遷移領域幅に伴う反射波の波長変化を確認し、その比率変化を関数化し、反射波長による遷移領域幅の評価手法を提案した。さらに、実地観測記録に提案評価手法を適用し、遷移領域幅や毛管帯厚の推定を試み、粒径分布による推定値と適合する結果を得た。

さらに、本研究では Time-lapse 法の実用化を図った。Time-lapse 法とは地下対象の状態変化前後で探査を行い変化域を推定する方法である。Time-lapse 法は弾性波探査において EOR や地熱貯留層探査で成果を上げている。地中レーダは再現性が高く、Time-lapse 法に適している。Time-lapse 法には高い探査位置精度が要求されるが、RTK-GPS 同期観測法により実現性が高まった。本研究では始めに地中レーダの Time-lapse 法の有効性および精度評価を行った。試験観測設備を用い、時系列記録による情報量増大効果を確認した。さらに、差分処理によるエタノールの拡散深度特定に成功し、Time-lapse 探査により背景雑音に埋没する流体流動の検出能力を実証した。この事実は、地中レーダによる油汚染域直接観測の高い実現可能性を有することを示している。最後に、RTK-GPS 同期観測法による地中レーダの Time-lapse 法の実地探査の適用性を評価した。相模川河岸および黒部川扇状地沿岸で試験した。参照井の水位変化に伴う反射面の変動を観測し、地中レーダの Time-lapse 法の実地探査への高い実用性を証明した。

本研究は地中レーダの CMP 法実用化のため、効率向上手法の考案を行った。CMP 法は弾性波探査では不可欠な S/N 改善技術であり、地中レーダにおいても CMP 記録による高いコヒーレントノイズ抑制効果が確認されている。しかし、現在の地中レーダの利点は高速、低費用観測とされ、CMP 探査の強い要求がない。このため、本研究では、商業利用における実現性を高めるため、地中レーダの CMP 観測の効率を向上させ、高効率 CMP 探査法の考案と効率改善評価を行った。提案手法は通常探査に対し15倍の探査経費増加に対し、コヒーレントノイズ抑制効果は4倍と評価した。また、実地試験観測を応用地質株式会社の筑波試験地と黒部川扇状地沿岸で行い、十分な運用性

と高い記録取得効率を確認した。重合度の増大により、高精度な速度解析が行え、水分率の空間分布情報を提供可能とした。

改良手法の最後として、周波数解析による導電率分布の計測手法を検討した。現在の地中レーダ記録解析は誘電率分布のみを解析対象としているが、電磁波伝播は誘電率だけでなく導電率にも影響を受けるため、理論的には地中レーダにより地下導電率情報の抽出が可能である。導電率分布の検出は塩淡境界や汚染域の観測に有効である。導電率境界において電磁波は反射し、反射波の中心周波数は低下することをFDTDシミュレーションで確認した。損失項を考慮した反射係数の解析解では、導電性媒質境界の反射係数は高周波側で低下傾向を示し、その結果の中心周波数の低下が原因のひとつであると指摘した。試験観測設備を用い、一定地下水面上部の塩水領域拡大条件の探査記録を取得し、高導電領域拡大に伴う周波数低下傾向が確認され、周波数解析による導電率領域分布観測の実際の観測装置による有効性が確かめられた。さらに、周波数変化解析による導電率分布観測手法を提案した。

本研究は、地中レーダによる地下水観測の信頼性向上と情報量増加を目的に5点の探査および解析法の改良を行った。始めに、RTK-GPS同期探査法を開発した。実地探査における高再現性と高速探査を実現し、S/N向上効果が高い高度な探査および処理法の適用を可能とした。次に、地中レーダによる高精度地下水探査に必要な、レーダの地下水面上部領域反射を詳細に分析検討した。遷移領域幅と反射波長の間関係を定量評価し、遷移領域幅の推定方法を提案した。また、地中レーダのTime-lapse法による微小変動の検出能力を実証した。Time-lapse法の実地探査の実用性を向上させた。さらに、高効率CMP探査法を考案し、地中レーダの活用用途拡大可能性を高めると共に、水分率の空間分布観測を実利用可能とした。最後に、導電率境界反射波の周波数低下傾向を明らかにし、周波数解析による導電率分布観測手法を提案した。