

京都大学	博士（工 学）	氏名	鈴木 敬一
論文題目	地盤の誘電特性を考慮したステップ式 FM-CW 地中レーダの開発		
<p data-bbox="197 465 435 499">（論文内容の要旨）</p> <p data-bbox="185 557 1393 633">本論文は、物理探査技術のひとつである地中レーダ探査に関する研究をまとめたものであり、序論と8章及び結論からなっている。</p> <p data-bbox="185 694 1393 815">序論では研究の背景と動機が述べられている。現状の地中レーダ探査の限界を示し、二つの課題があることを示している。第一は探査可能な深度が浅いために適用範囲が限られること、第二に物性の議論がないために空洞や埋設管などを探すという使われ方に限られていることである。</p> <p data-bbox="185 875 1393 1093">第1章では探査深度を延長するための方策としてステップ式FM-CW地中レーダの原理と特長を検討している。この原理を元に、ステップ式FM-CW地中レーダを開発し、実際に埋設管の敷設してある場所で比較実験を行い、従来方式の地中レーダでは3mまでの埋設管しか検知できないのに対して、ステップ式FM-CW地中レーダでは深度5mまでの埋設管を検知するだけでなく10m程度までの地層境界などの地下構造についても明瞭に捉えていることを示した。</p> <p data-bbox="185 1153 1393 1413">第2章では本研究で開発したステップ式FM-CW地中レーダを用いて河川堤防に適用した結果、深度15m程度までの土質推定断面図と整合する結果が得られた。さらに従来からの方法であるプロファイルを得る測定方法だけでなく、速度構造を求め、体積含水率の推定を試みている。この結果を、同じ場所で別途行われた電気探査と比較し、高い整合性を確認した。しかしながら、従来使われているの電磁波速度と体積含水率の関係を与えるToppの式については、定性的には整合しているが絶対値については問題があることを指摘した。</p> <p data-bbox="185 1473 1393 1550">第3章では、地盤を構成する空気、水、土粒子の誘電特性（特に電磁波伝搬速度と体積含水率の関係）についての既存研究をまとめ、Topp式の課題を示している。</p> <p data-bbox="185 1610 1393 1912">第4章では、電磁波速度と体積含水率の関係を把握するため、土を入れた水槽で地下水位を変えて実験を行った。実験を行うにあたり、測定システムとしてネットワークアナライザを利用したステップ式 FM-CW 地中レーダと透過な測定システムや、従来型のアンテナより広帯域のアンテナの開発も行っている。実験の結果、電磁波速度と体積含水率には相関関係が認められたが、電磁波速度の小さい（比誘電率の高い）場合には Topp 式と整合したが、電磁波速度の大きい場合（比誘電率の低い場合）は整合しなかった。電磁波速度（あるいは比誘電率）と体積含水率の関係を明らかにするために、さらに次章において土質試料を用いた実験を行っている。</p>			

第5章では、同軸導波管を用いた土質試料に対して比誘電率を測定し、別途実施した土質試験による体積含水率との関係を調べた。測定システムは同軸導波管とネットワークアナライザを用いた反射係数測定によりインピーダンスを求め、それから比誘電率を計算している。その結果、体積含水率が大きい場合には比誘電率が大きいだけでなく、周波数依存性（誘電分散）が認められたため、周波数毎の実験式を提案した。これらの実験式はToppの式とは異なる結果となったが、Wobshallによる準分散モデルと整合するような結果が得られた。

第6章では、岩石の誘電特性について検討している。電磁波の伝搬に関しては速度だけでなく、媒質の減衰をあらわすQファクターがあるが、本研究ではこれに注目した。Qファクターは周波数によらず一定であると考えられている。様々な堆積岩と火成岩についてインピーダンスアナライザを用いてQファクターを測定したところ、周波数によらずQファクターは一定値を示した。さらに体積含水率との関係を調べたところ、岩石の種類によらず体積含水率とQファクターとの関係は、混合体モデルから推定される関係と一致する結果が得られた。地中レーダ探査において原位置のQファクターが測定できれば、体積含水率を精度良く推定できることを示した。

第7章では、地盤の誘電特性に起因する地中レーダの受信波形の崩れを補償するデコンボリューション処理を簡便に行うために、Hilbert変換を用いた方法を提案し、数値実験及び実データに適用し、その効果を確認した。

第8章では、ステップ式FM-CW地中レーダと誘電特性を用いて、非破壊で港湾構造物（ケーソン式防波堤）の診断を行うことができるシステムを開発した。空洞の有無によって現れる波形とスペクトルの特徴に注目し、これを自動で判定するプログラムを開発し、特許を取得している。ここで開発された装置を実際の堤防に適用した結果、7割以上の確率で空洞を自動判定することができるようになっただけでなく、技術者の経験や習熟度に依存せずに判定ができるようになった。

最後に結論では、序論で述べた現状の地中レーダ探査の課題を本研究の成果により解決できる可能性が拓けたことを述べ、本研究の成果について要約し、さらに今後の展望としてモニタリング技術としても有望であることが示されている。

(論文審査の結果の要旨)

地中レーダ探査は、分解能が高いことと作業性が良いことから、空洞探査や埋設管探査に利用され実績を上げてきた。しかしながら、空洞や埋設管を探すという検知器的な用途として使われることがほとんどであり、探査深度が2~3mと浅いことと、物性（この場合は地盤の誘電特性、特に電磁波伝搬速度）に関する議論が無く、空洞や埋設管の判定においては、技術者個人の経験や力量に頼っているというのが現状であり、他の物理探査手法と比べると研究が進んでいない。本論文は、これらの課題を解決するため、ステップ式周波数変調連続波（FM-CW）地中レーダの開発に係わる研究をまとめたのものであり、得られた主な成果は以下の通りである。

- ① ステップ式周波数変調連続波（FM-CW）地中レーダを考案、開発し、従来の地中レーダよりも探査深度が延長することを示した。
- ② 開発されたステップ式FM-CW地中レーダを、河川堤防の探査に適用した結果、堤体内部の構造を高分解能で探査することができた。
- ③ 水槽内に入れた土を用いて、水槽内の水位を変えて電磁波速度の変化を調べ、電磁波伝搬速度と体積含水率の関係を精密に検討した。
- ④ 同軸導波管を用いた誘電特性の測定方法を考案し、様々な土質試料について誘電特性を測定し、電磁波速度と体積含水率の関係について新しい実験式を提案した。
- ⑤ 岩石の誘電特性から減衰の指標となるQファクターと体積含水率の関係について明らかにした。
- ⑥ 以上の議論を踏まえ、港湾構造物であるケーソン式防波堤の空洞を探査するシステムを開発し、従来技術では探査できなかった深度での空洞を探査することが可能となっただけでなく、誘電特性と防波堤の構造をパラメータとして入力すれば、研究者や技術者個人の力量や経験に依存しないで同じ結果を得ることができるようになった。

以上、本論文は、従来3m程度までしか探査できなかった地中レーダ探査法に関して、ステップ式周波数変調連続波（FM-CW）を利用する事により、探査深度を20m程度まで探査可能とただけでなく、誘電物性の議論を導入することにより地盤の体積含水率の空間分布を把握する可能性を拓いた。このように、本論文は、地中レーダ探査技術に対して、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成25年1月17日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。