

令和 2 年 6 月 13 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06407

研究課題名(和文) リモートセンシングによる地下土壌の鉛直伝搬速度スペクトルの推定法に関する研究

研究課題名(英文) Study on estimation method of vertical propagation velocity spectrum of underground soil by remote sensing

研究代表者

西堀 俊幸 (Nishibori, Toshiyuki)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・主幹研究開発員

研究者番号：80280361

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、惑星探査機からレーダ波を使って離れた距離から地下内部の探査を行う場合を想定して、地下媒質中の電磁波の屈折を計算して、探査機の真下にある反射点から探査機までの伝搬距離の変化による遅延プロファイル間との相関によって垂直方向の伝搬速度スペクトルを求めるリモートCMP法の検証を行った。本研究では本アイデアを実証するために、実験室の環境で多層模擬土壌を使って土壌から離れた場所からのリモートセンシングにより媒質の伝搬速度スペクトルの垂直分布を算出することを試みた。その結果、本手法は有効であることを示すことが出来た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

等を用いて遠隔から地下内部探査を行う計画が存在しなかったため、CMP法の学術的な研究の進展が見られなかった。本研究により、新しいリモートCMP法による地中の電波伝搬スペクトルの測定が遠隔から可能になれば、探査機による火星衛星の地下内部探査に貢献出来るだけでなく、地球観測における航空機搭載用地下レーダサウンド等による地下探査での応用も期待出来る。

研究成果の概要(英文)：In this study, assuming the case of conducting underground exploration from a distance away from a planetary probe using radar, the refraction of electromagnetic waves in the underground medium is calculated, and the reflection point directly below the probe is calculated. We verified the remote CMP method to obtain the vertical propagation velocity spectrum by the correlation with the delay profiles due to the change of the propagation distance to the spacecraft. To verify this idea, we tried to calculate the vertical distribution of the propagation velocity spectrum of the medium by remote sensing from a place away from the soil using a multi-layer simulated soil in a laboratory environment. As a result, we were able to show that this method is effective.

研究分野：計測工学

キーワード：地中レーダ レーダサウンダー

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

火星衛星の表面からサンプルを採取する場合、採取した試料が着陸地点周囲の表面や地下構造を考慮した上でどのような位置づけになるかを確認する必要がある。加えて、衛星の表層や地下浅部の構造を明らかにすることは、火星衛星の表層進化過程を調査する上で極めて重要である。そこで、探査機から衛星地下の構造を調査することが出来る唯一の科学観測機器として、地下レーダサウンダを搭載することが計画されている。このような地下レーダサウンダは探査機からリモートセンシングにより表層や地下のイメージングを行う目的で使用されるが、一般的に観測対象である地下構造は未知であり、また不均質であることから、地下における電磁波の速度分布は様でない。そのため、地下における電磁波の速度分布を推定し、観測深度を決めることは地下のイメージング処理において必要である。

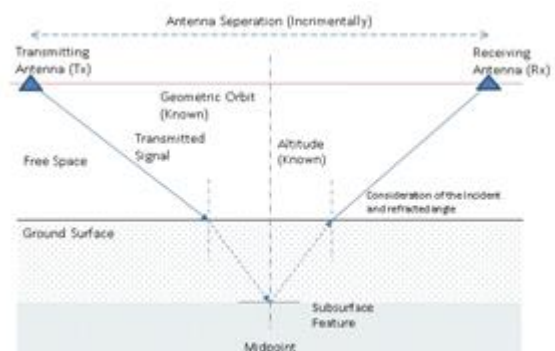
観測地点における地下の比誘電率、即ち伝搬速度を推定する問題は、地中探査レーダ(GPR: Ground Penetrating Radar)の分野において CMP(Common mid-point) 法として知られている。GPR による地下探査では、計測点で採取した土壌サンプルの含水率や圧密度の維持が実験室環境で困難な事から、プローブ法ではなく、計測現場における実測が重要視されている。そこで CMP 法を用いて不均質媒質中の深度方向の伝搬速度スペクトルを求め、比誘電率の垂直分布を求める手段が古くから用いられていた。ところが、CMP 法は地表面に設置した送受信別(バイスタティック)のアンテナ間隔を段階的に変える走査が必要であり、モノスタティックなレーダ観測で実施することは出来ない。CMP 法は送受信アンテナの間隔をパラメータとした時の遅延プロファイルとアンテナの幾何学的な光路長変化から、伝搬遅延時間を補正してアンテナ間距離の変化による遅延プロファイル間の相関、即ち、アンテナ中央位置直下における速度スペクトルの鉛直分布を求める方法である。即ち、2機の探査機を用いて地下レーダサウンダ観測を行う場合、もしくは、送信機をサンプル採取位置に投下する場合などの方法を選択すれば、バイスタティックなレーダ観測が可能であると考えられ、遠隔からでも地下の伝搬速度スペクトルの鉛直分布測定の可能性が期待出来る。

### 2. 研究の目的

本研究では CMP 法に着目し、地表面から離れた位置にある探査機から、地表面のサンプル採取点等を中央位置とした直下の伝搬速度スペクトルを計測する新しいリモート CMP 法を提案し、その実現性を検証した。ここで提案するリモート CMP 法は、各探査機の水平位置が既知であり、互いに探査機の位置が制御可能だと仮定した場合、各探査機と地表面までの距離を地表面のレーダクラッタから識別することにして、地表面における屈折も考慮した上で地中を含む形で探査機中央直下の反射点と探査機の幾何学的な伝搬距離の変化による遅延プロファイル間の相関を求めて伝搬速度スペクトルを求める方法である。GPR における CMP 法では、アンテナが地面と接しているため、真空中を伝搬した入射波が媒質(地表面)境界を透過する時の屈折を考慮する必要は無いが、リモート CMP 法では境界で大きく屈折が生じるため、入射点と透過点の 2 点の屈折を考慮し、媒質中の幾何学的な伝搬距離を算出する。土壌表面の比誘電率は自由空間法により複素反射率を計測することで求め、透過波と反射波の屈折角度の計算に使用する。研究では、バイスタティックなレーダ散乱計をベクトルネットワークアナライザで構成し、損失がある比誘電率が既知の誘電体板を多層に配置し、試料面から離れた位置よりリモート CMP 法にて試料の厚さ方向の伝搬速度スペクトルの推定を行い、測定誤差を含めて検証して算出方法の妥当性を実証した。

### 3. 研究の方法

火星衛星表面より離れた位置から地下の比誘電率垂直構造を推定する手法を検証するために、バイスタティックなレーダ散乱計を用いて、損失がある比誘電率が既知の多層誘電体板を配置し、試料面から離れた位置よりリモート CMP 法(右図)にて試料の厚さ方向の伝搬速度スペクトルの推定を試みた。まず、理論特性との比較が容易なマイクロ波帯による実験検証を行った後、火星衛星用地下レーダサウンダの観測仕様に合わせて UHF 帯での評価実験を行った。用意する試料は誘電体板の積層のみならず、比誘電率が異なる土壌サンプル(砂、砂利)を鉛直に配置した試料も用意した。比誘電率の測定はレーダ散乱計による自由空間法による測定とプローブ法による測定により求めた。



#### 4. 研究成果

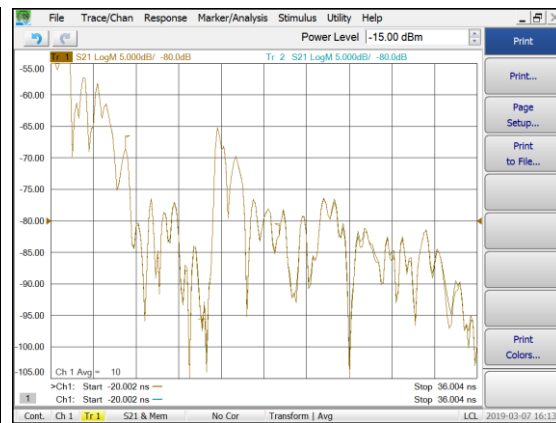
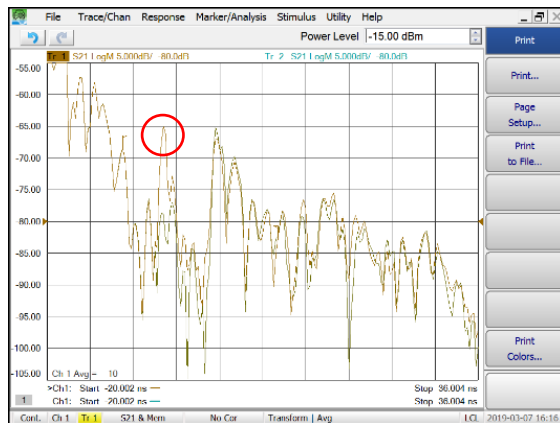
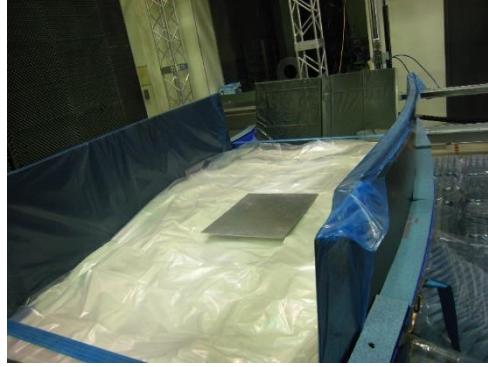
##### 1) バイスタティック・レーダ散乱計の構築

超広帯域パルス圧縮レーダ用として製作した Vivaldi タイプアンテナを使用したフルポラリメトリなレーダ散乱計をベクトルネットワークアナライザにより構築し、時間分解能を持つ地中レーダ実験装置を構築した (右図)。アンテナは測定偏波に応じて偏波角の変更が可能のように取付可能にし、送受信アンテナの間隔はリモート CMP 測定のために移動設定が可能な仕組みを持たせた。



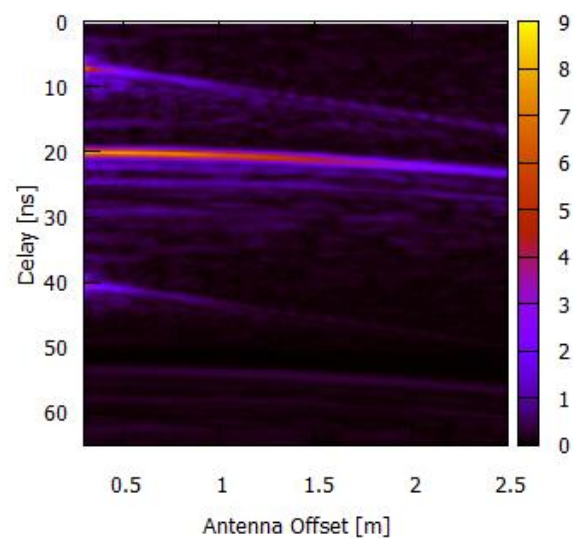
##### 2) レーダ散乱計のキャリブレーション及び調整

誘電体板とアルミ板を試料にしてレーダ散乱計のキャリブレーションを行った。誘電体板の誘電率はプローブ法で実測した上で、レーダ散乱計による複素反射特性の測定 (入射角を直交 2 偏波とする) から求めたものと比較を行った。右図に実験の様子を示した。また、キャリブレーション時に取得したアルミ板の反射を捉えたレーダ A スコープデータを下図に示す。左図は模擬土壌面にアルミ板を置いた時のレーダ A スコープデータ、右図の赤丸印が模擬土壌のみのレーダ A スコープデータである。これにより、土壌面からの反射波の遅延時間を確認と受信レベルの健全性を確認した。



##### 3) 誘電体板を用いたリモート CMP 法の検証

構築したレーダ散乱計を用いて、送受信アンテナの間隔を変えながら、複数の遅延プロファイルを得て、媒質界面による屈折を考慮した幾何学的な距離変化との相関から伝搬速度スペクトルの垂直分布を算出するソフトウェアを作成し、既知の誘電体板の誘電率の垂直構造を求め、理論値及びプローブ法による測定結果と比較することで、リモート CMP 法の精度を検証した。解析により求められた CMP データの例を下図に示す。



測定は樹脂製の水槽の底にアルミ板を置き，砂を水槽に充填して，その情報に位置する二つの広帯域アンテナの間隔を水平走査することでリモート CMP データを得ている．実験で得られたリモート CMP データを処理して伝搬速度スペクトルの鉛直分布を求められることがわかり，別途実施した模擬土壌面でのアンテナ走査でえられた CMP データから計算した伝搬速度スペクトルとほぼ一致することがわかった．よって，リモート CMP 法の有効性が確かめられ，この方法による探査機からの内部探査にも応用が期待出来る．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Akihisa Uematsu, Toshiyuki Nishibori, Takuji Arima
2. 発表標題 Detection and Identification of Buried Target Objects based on Multi-Angle Bi-Static Ground Penetrating Rader Experiment with Synthetic Aperture Radar Technique
3. 学会等名 SPIE Remote Sensing 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Kumamoto, T. Usui, H. Kurokawa, R. Noguchi, S. Azuma, K. Ishiyama, F. Tsuchiya, N. Terada, H. Miyamoto, T. Nishibori, T. Iwata, M. Ozaki, K. Seki, A. Yamazaki, M. Ohtake
2. 発表標題 Radar sounder for exploration of ices below the surface of the Mars and the Moon
3. 学会等名 第19回惑星圏研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 西堀俊幸
2. 発表標題 P/L帯フルポラリメトリックレーダ散乱計を用いた表層・地下情報識別法に関する研究
3. 学会等名 第1回極限環境電磁波センシング研究施設ワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	宮本 英昭  (Miyamoto Hideaki)  (00312992)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授    (12601)	

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	植松 明久 (Uematsu Akihisa) (00450685)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・主任研究開発員  (82645)	
研究分担者	真鍋 武嗣 (Manabe Takeshi) (50358991)	大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・客員研究員  (24403)	