

地下レーダーアレイ観測に基づく月地下における 電波伝搬速度構造推定のシミュレーション研究

神田恵太郎¹, 熊本篤志¹, 石山謙², 春山純一³, 加藤雄人¹

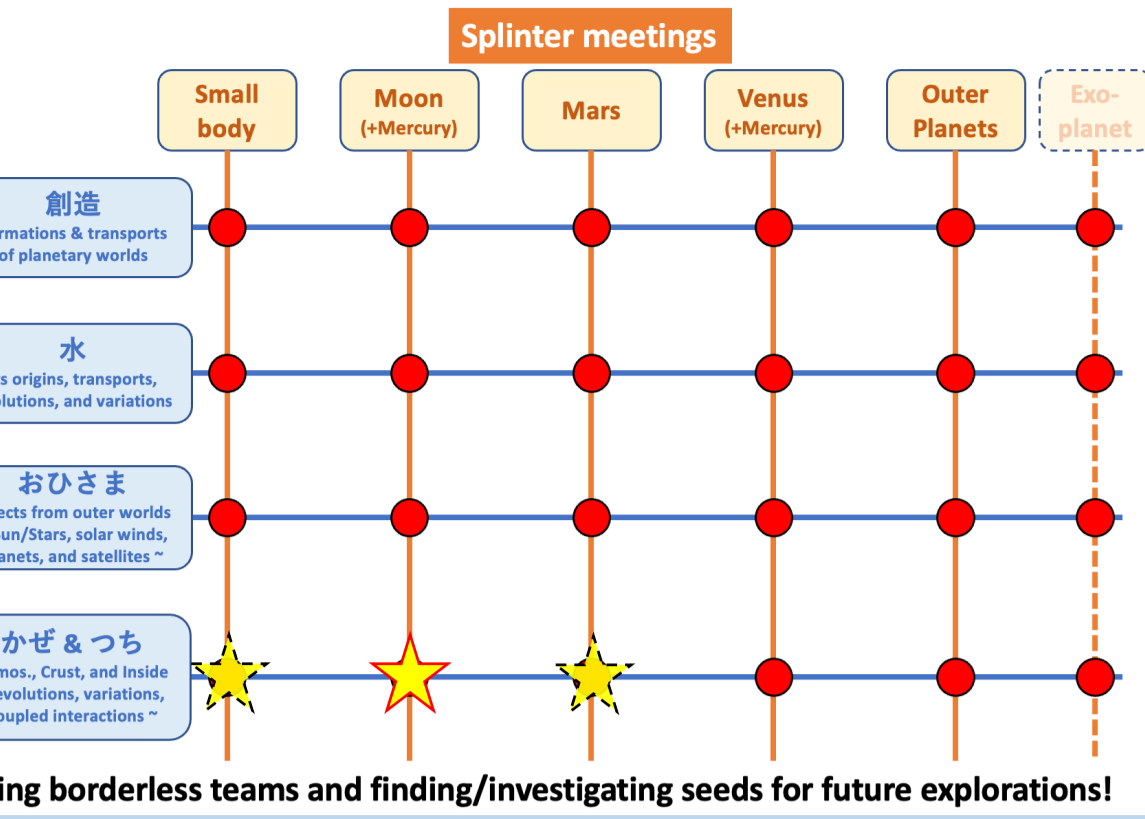
¹東北大学, ²東京国際効果専門職大学, ³JAXA

我々は地下レーダーアレイを利用して月地下の電波伝搬速度構造を定量的に決定する手法の検討に取り組んでいる。

月の表面にはさまざまな形態の溶岩層が存在しており、これまで光学カメラ[Hiesinger et al. (2002); Robinson et al. (2012)]やかぐや搭載のレーダサウンダー[Oshigami et al. 82014]], 嫦娥ミッションの地中レーダ等[Yuan et al. (2021); Feng et al. (2023)]による観測が行われてきた。溶岩層探査における地中レーダの利点は、地下に埋没した溶岩層も観測可能なことである。しかし、これまで月探査に投入されてきた地中レーダは、1つの探査機に送信アンテナも受信アンテナも両方搭載して観測を行うもので、地下の速度構造を定量的に決定できないという制約があった。一方地球での実験から送信アンテナと受信アンテナを別の場所に設置し、送受信点の間隔を変えながら観測を行うことで地下の速度構造を定量的に推定できることが知られている[Daniels (2004)]。

本研究の目的は、地球で実施されているような、地下レーダーアレイを利用して地下の速度構造を定量的に決定する手法を、月探査に適用可能かどうか検討することである。我々は、FDTD シミュレーションによる模擬観測データの作成と、模擬観測データの解析による地下構造モデルの速度構造の推定を実施した。今回の検討では地下 40m までの地下構造モデルを使っており、異なる3種類のアンテナ間隔について地下構造の推定精度を比較した。

結果として、アンテナ間隔が広いほどより深くまで精度良く溶岩層の深さを推定可能な傾向が見られ、光学カメラ観測で報告されているような地下 20~40 m に埋没する溶岩層を観測するためには 1~2 m 程度のアンテナ間隔が必要なことが示唆された。一方、地下媒質の速度構造と誘電率構造については推定誤差が大きく、推定精度を向上させるためには異なる解析手法を検討する必要があるとわかった。具体的には、現在は地表面における電波の屈折の影響を考慮しない解析手法をとっているため、De Pue et al. (2016)で提案された、地表面における電波の屈折を考慮する解析手法を利用した検討を今後進めていく予定である。



地下レーダーアレイ観測に基づく月地下における電波伝搬速度構造推定のシミュレーション研究

*神田恵太郎¹, 熊本篤志¹, 石山謙², 春山純一³, 加藤雄人¹

¹東北大学, ²東京国際工科専門職大学, ³JAXA

keitaro.kanda.q1@dc.tohoku.ac.jp



Summary

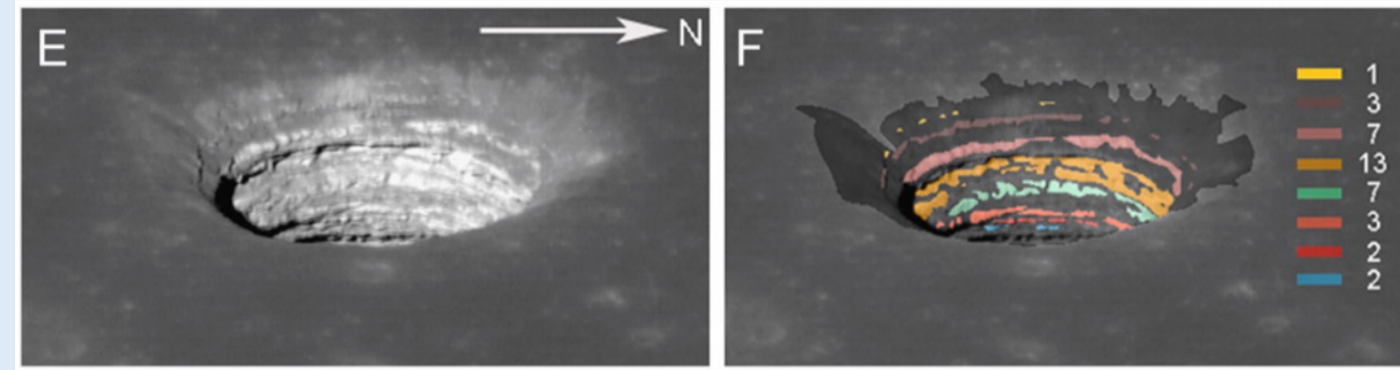
- これまでの月地下レーダーは地下の電波伝搬速度構造を決定できず、定量的に地下構造の深さを推定することができなかった。
- 月地下の観測を想定したFDTDシミュレーションにより作成した地下レーダーアレイの模擬観測データに対しNMO方程式を利用した解析を施し、地下の電波伝搬速度構造推定を試みた。
- NMO方程式による地下構造解析は、深さ推定には有効だが伝搬速度・誘電率の推定には別手法の検討が必要とわかった。

1. 序論

- 月の火山活動様式は大きく分けて2種類[1, 2]

Flood basalt filling

- 海領域形成の主要因、厚さ数十メートルの溶岩層を形成



静かの海の縦穴壁面で確認された薄い溶岩層 [4]

Basalt plain type volcanism

- Flood basalt fillingの後に発生、厚さ数メートル程度の薄い溶岩層を形成
- カメラ観測[3, 4], レーダ観測[5, 6, 7]によりこれらの溶岩層の厚みや年代発展が調べられてきた。

地下レーダによる薄い溶岩層探査

- 地下レーダの利点: 露頭になっていない、地下に埋没した溶岩層も探査可能
- これまでの月地下レーダ:
 - 送信アンテナと受信アンテナを同じ探査機に搭載、送受信点距離を一定に保ったまま観測を行う
 - この観測方式では地下の電波伝搬速度構造を定量的に推定できず、伝搬速度を仮定して溶岩層の深さや厚みを推定する必要がある。
- 地球での実験から、送信アンテナと受信アンテナを別々の場所に配置し、送受信点距離を変化させながら観測を行うことで地下の電波伝搬速度構造を定量的に推定できると知られている[8]。

本研究の目的

地下レーダーアレイ観測によって月地下の電波伝搬速度構造を定量的に決定する手法の検討

2. 手法

地下レーダーアレイによる月地下探査を想定してFDTDシミュレーションを実施し、作成した模擬観測データの解析による地下構造モデルの電波伝搬速度構造の推定を試みた。

2.1. FDTDシミュレーションによる模擬観測データの作成:

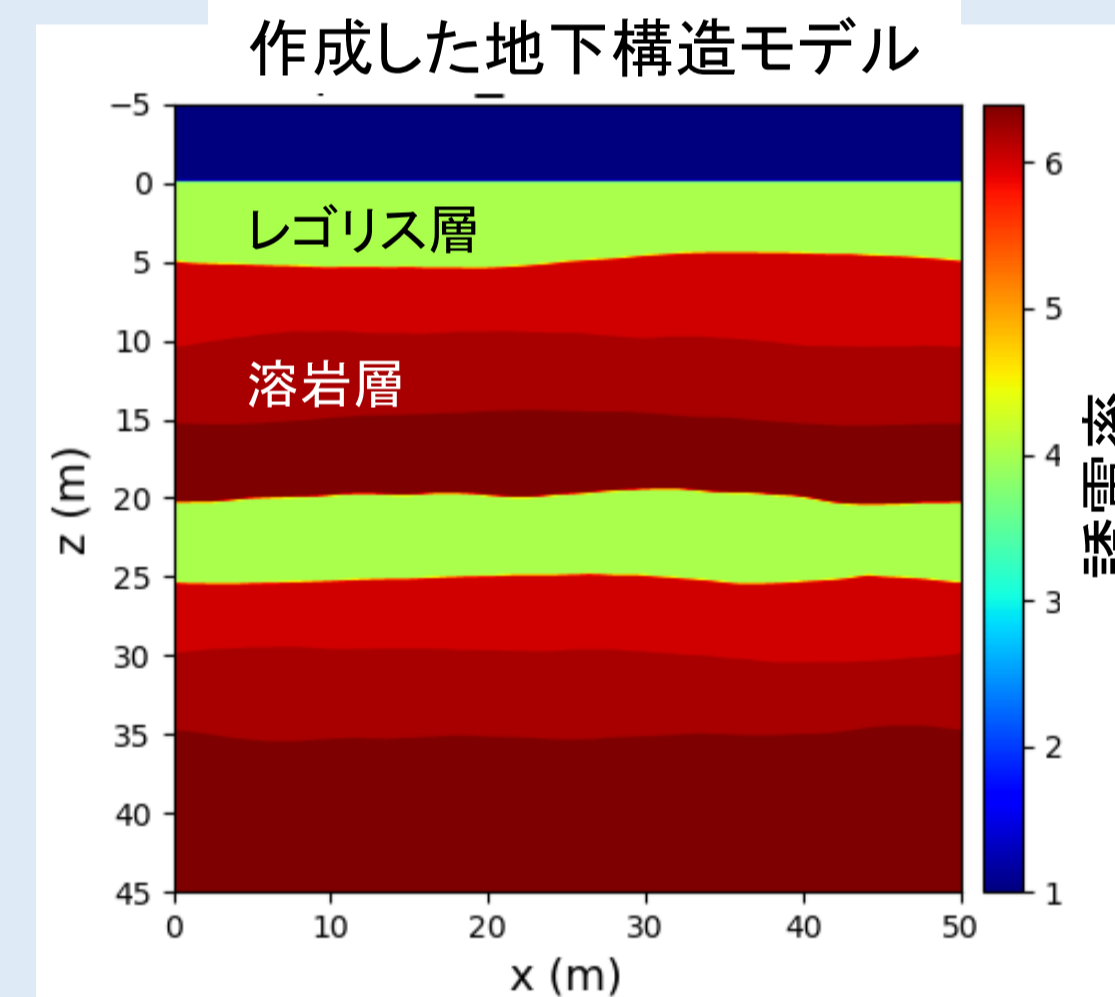
- 使用ツール: gprMax [9]

地下構造モデル

- レゴリス層と薄い溶岩層が堆積した地形を想定

- レゴリス層: 誘電率4
- 薄い溶岩層: 誘電率6, 6.2, 6.4
- それぞれの層の厚みは全て5m

- シミュレーションボックス: 50x50m (2次元)



地下レーダーの配置

- 周波数: 300MHz
- アンテナ数: 21点
- アンテナ間隔 (3種類): 0.5m (アレイ全長10m) / 1m (アレイ全長20m) / 2m (アレイ全長40m)

2.2. 速度構造の解析:

Normal Moveout (NMO) 方程式

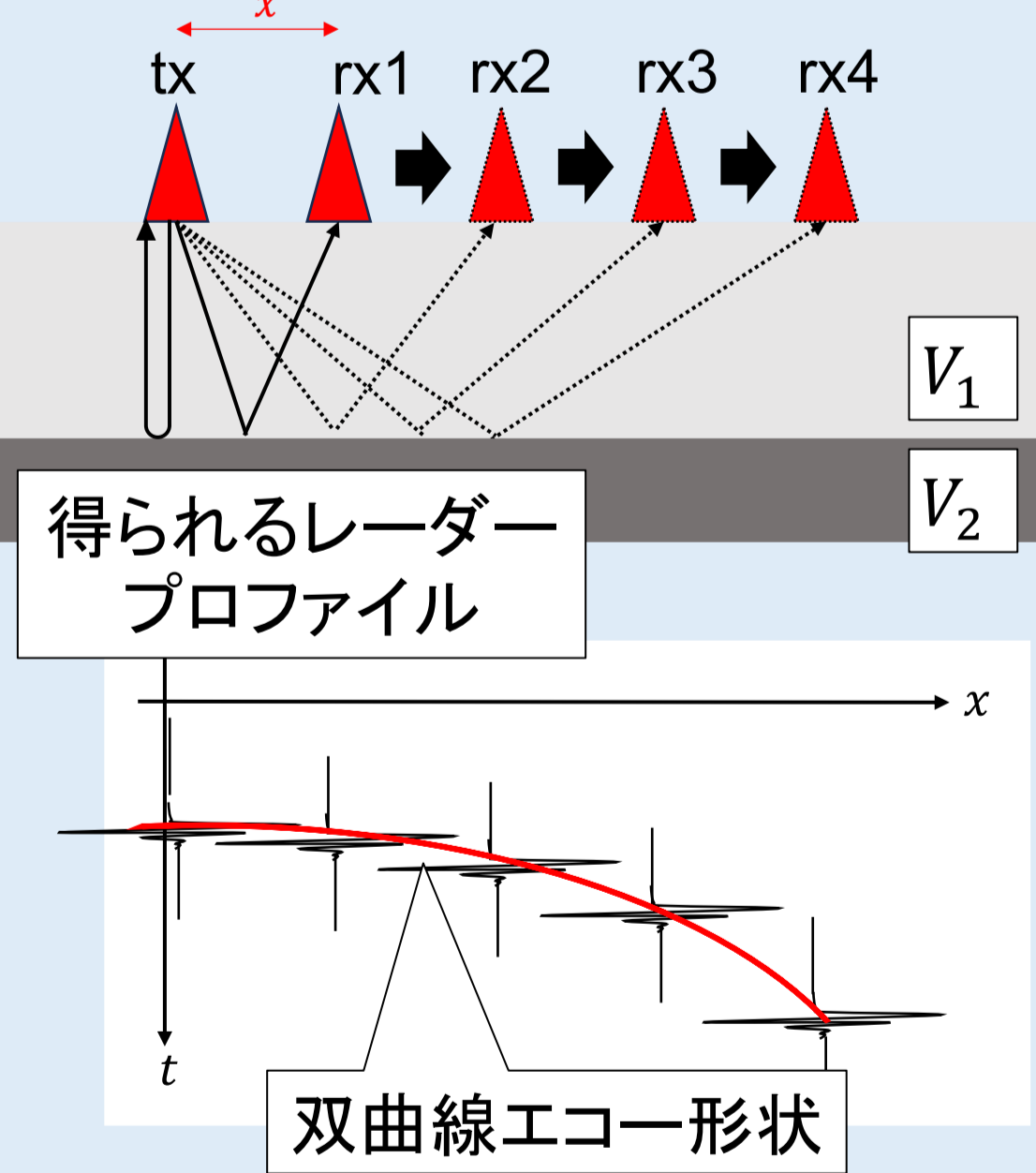
- 送信アンテナと受信アンテナの距離を変えながら観測

レーダープロファイル上でエコーが双曲線型になる→

双曲線エコーの形状の近似: $t_i = \sqrt{t_{0,i}^2 + x^2/V_{RMS,i}^2}$ (NMO方程式)[10]

- t_i : i番目の地下エコーの遅れ時間 [s] → 観測値
- x : 送信アンテナと受信アンテナの距離 [m] → 既知
- $V_{RMS,i}$: i番目の反射エコーの平均伝搬速度 [m/s] → 未知
- $t_{0,i}$: i番目の反射の鉛直往復時間 [s] → 未知

送受信点の距離を変えながら観測



得られた t_0 と V_{RMS} から地下構造モデルの電波伝搬速度構造を推定:

- i番目の溶岩層境界面の深さ d_i : $d_i = t_{0,i} \cdot V_{RMS,i} / 2$

$$v_i = \sqrt{\frac{V_{RMS,i}^2 \cdot t_{0,i} - V_{RMS,i-1}^2 \cdot t_{0,i-1}}{t_{0,i} - t_{0,i-1}}}$$

- 第i層内の誘電率 ϵ_i : $\epsilon_i = c^2 / v_i^2$

モデル設定と比較、推定精度を評価

アレイ観測データの相関解析

- アンテナは21点→パスの取り方は21x21=441通り
- 異なるアンテナセットの観測データで相関をとり、模擬観測データで見られた双曲線エコーを説明できる t_0 と V_{RMS} の組み合わせを探す:

$$F(V_{RMS}, t_0) = \sum_i \sum_{j \neq i} f_i \left(\sqrt{t_0^2 + \frac{x_i^2}{V_{RMS}^2}} \right) \cdot f_j \left(\sqrt{t_0^2 + \frac{x_j^2}{V_{RMS}^2}} \right)$$

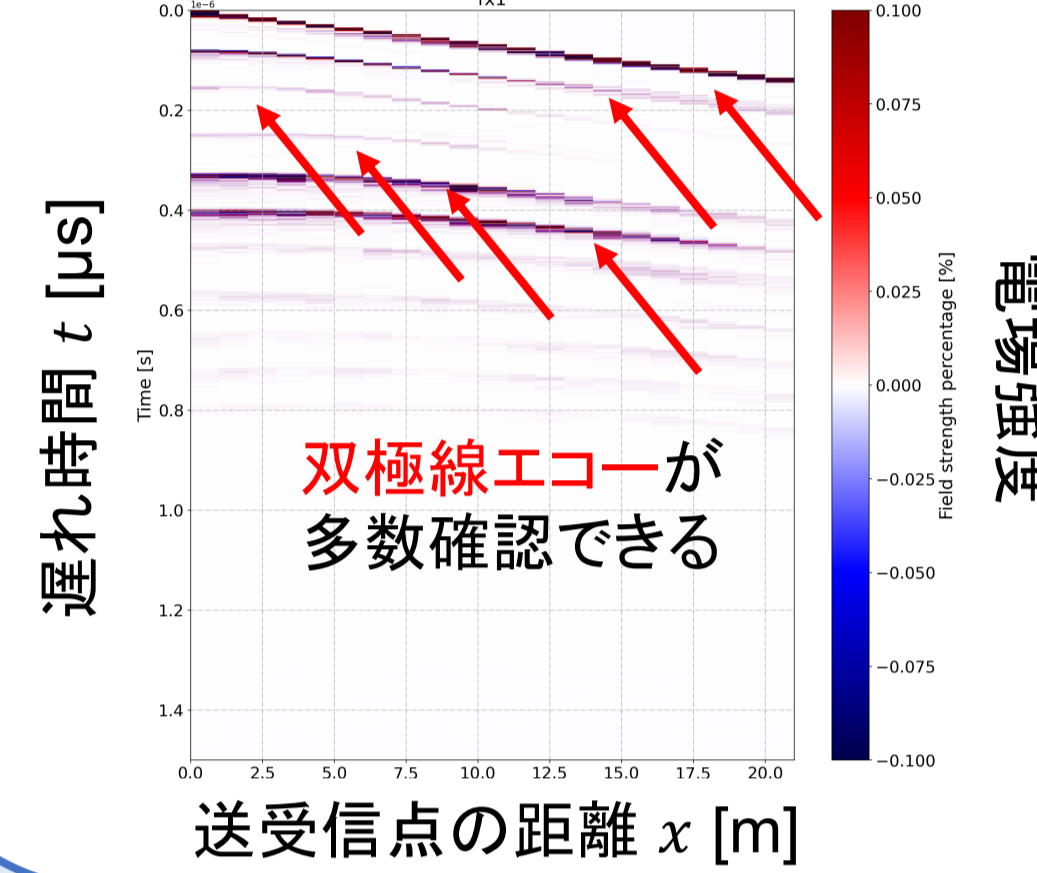
- $F(V_{RMS}, t_0)$:
- f_i, f_j : i, j番目のパスで時刻tに観測された電波強度

3. 結果と考察

作成した模擬観測データの例

- 送受信点間隔: 2m
- 受信点: $x=0$ [m]
- 送信点: $x=0-40$ [m]

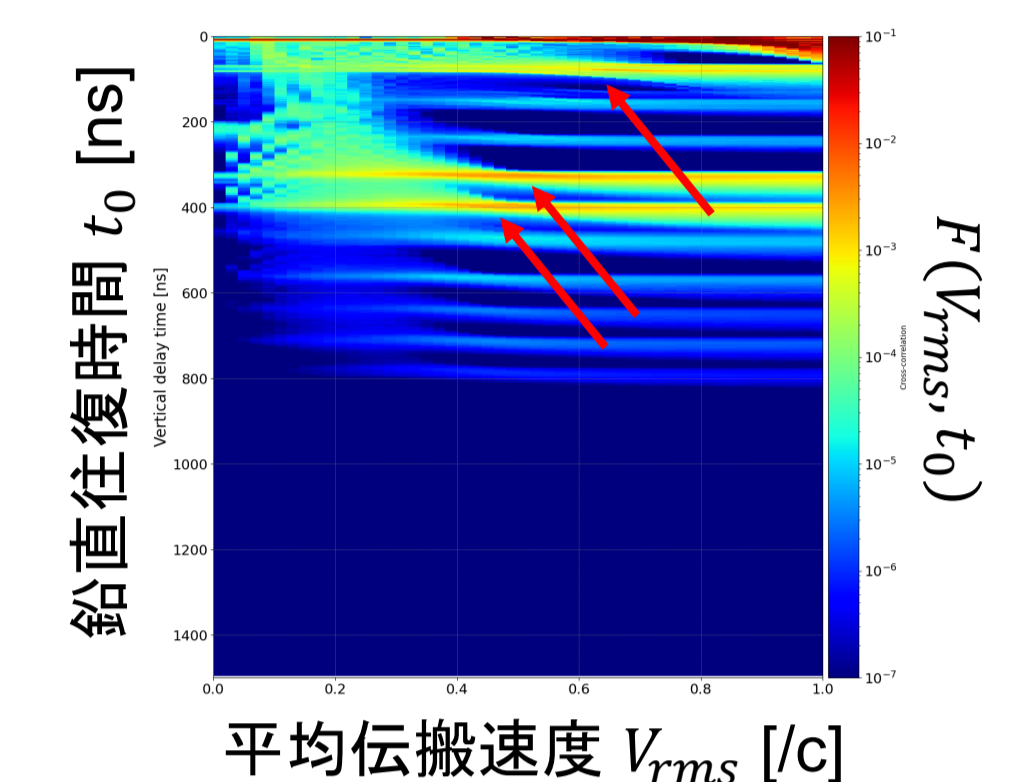
得られたレーダープロファイル



双曲線エコーが多数確認できる

相関解析結果の例

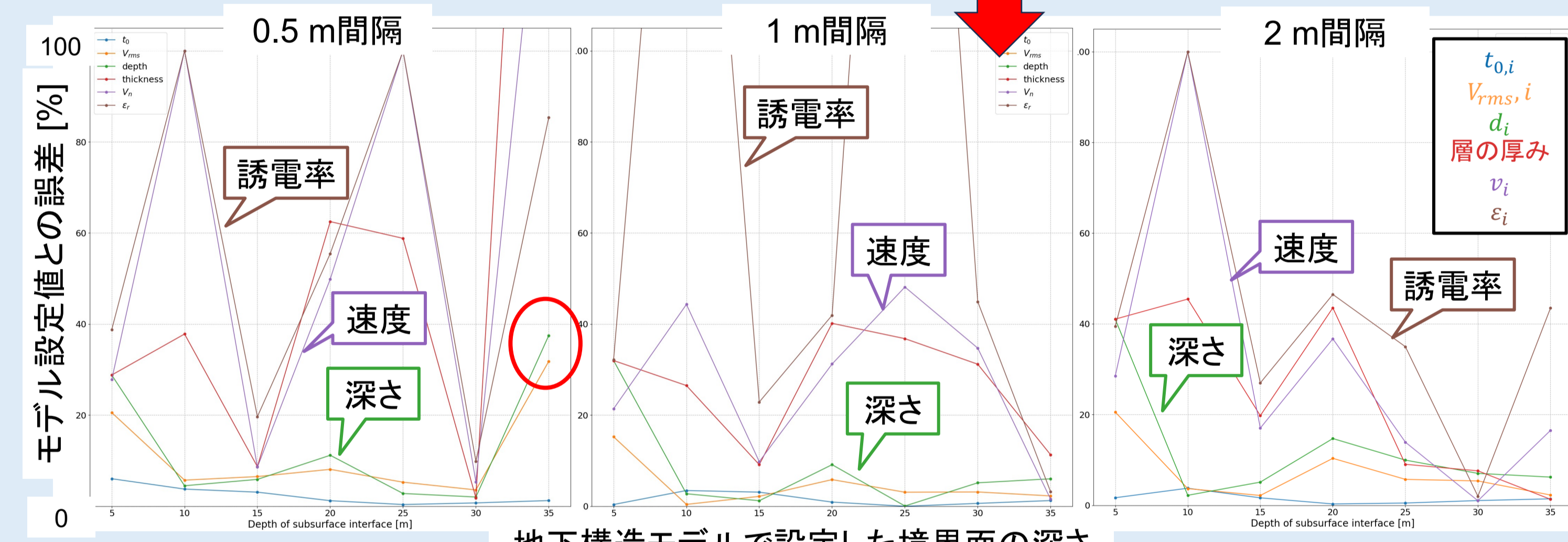
- $F(V_{RMS}, t_0)$ の計算結果
- 送受信点間隔: 2m



平均伝搬速度 V_{RMS} [C]
カラーが濃い箇所 → 観測された双曲線エコーを説明できる t_0, V_{RMS} の組み合わせ

地下構造の推定結果

$F(V_{RMS}, t_0)$ のプロットから t_0, V_{RMS} を読み取り境界面の深さ, v_i, ϵ_i を計算



t_0, V_{RMS} の推定について

- t_0 : 3種類のアンテナ間隔全てにおいて全域で誤差5%以内
- V_{RMS} : アンテナ間隔によって違いが生じた
 - 0.5m間隔: 地下10~30mでは誤差15%以下だが、深さ35mで誤差が倍以上に拡大(赤丸内)
 - 1m/2m: 地下10~35mで一貫して誤差15%以下を保っている。

深さの推定について $d_i = t_{0,i} \cdot V_{RMS,i} / 2$

- 第1層(地下5m): 浅いところでは双曲線近似が成り立ちにくいので誤差が大きい[10]。
- アンテナ間隔の違いによる影響
 - 0.5m: 地下10~30mでは誤差15%以下だが、深さ35mで誤差が倍以上に拡大(赤丸内)。
 - 1m/2m: 地下10~35mで一貫して誤差15%以下を保っている。
- カメラ観測からは薄い溶岩層が地下20~40m程度の深さに存在することが示唆されている[4, 6]。

各層内の伝搬速度, 誘電率について

$$v_i = \sqrt{\frac{V_{RMS,i}^2 \cdot t_{0,i} - V_{RMS,i-1}^2 \cdot t_{0,i-1}}{t_{0,i} - t_{0,i-1}}} \quad \epsilon_i = c^2 / v_i^2$$

- 全域で誤差がかなり大きい。(v_i推定値の6割, ε_i推定値の8割が誤差20%以上)
- v_iを精度よく求めるためには、i層の t_0, V_{RMS} と(i-1)層の t_0, V_{RMS} をそれぞれ精度よく求める必要がある(上式)。
 - 現在の手法では t_0, V_{RMS} の誤差はそれぞれ0~5%, 0~15%程度
 - V_{RMS} の誤差の影響が伝搬速度・誘電率の推定誤差に効いていると思われる。

V_{RMS} の推定精度改善

- 今回用いたNMO方程式では地表面での電波の屈折の影響を考慮できていない。
 - 地下境界面でも屈折は生じるが地表面での屈折が最も大きく、 V_{RMS} の推定誤差の大きな要因になっていると考えられる。
- 改善策: 地表面での屈折の影響を考慮したNMO方程式[11]を使う。
 - [11]による修正NMO方程式はアレイ全長と同程度のスケールの、浅い領域での推定精度が改善されることは報告されているが、アレイ全長よりも深い地下での効果は未知数で、検証が必要。

4. 結論

- NMO方程式を用いた地下構造推定は、埋没溶岩層の深さを定量的に推定する手法としては有効。
- 一方、各層内での伝搬速度と誘電率の推定については数十%以上の大きな誤差が見られた。
- 伝搬速度, 誘電率推定の誤差は V_{RMS} の誤差による影響が大きい。
- V_{RMS} の推定精度を高めるためには地表面での電波の屈折を考慮したNMO方程式の利用が有効と考えられる。

[1]Greely (1975), *Lunar Sci. Conf. VI*,1975LPI....6..309G [2]Gifford and El-Baz (1981), *The moon and the planets*, doi:10.1007/BF00896904 [3]Hiesinger et al.(2002), *Geophys. Res. Lett.*, doi: 10.1029/2002GL014847 [4]Robinson et al. (2012), *Planetary and Space Science*, doi: 10.1016/j.pss.2012.05.008 [5]Oshigami et al. (2014), *J. Geophys. Res.: Planets*, doi: 10.1002/2013JE004568 [6]Yuan et al. (2021), *Earth Planet. Sci. Lett.*, doi: 10.1016/j.epsl.2021.117062 [7]Feng et al. (2023), *J. Geophys. Res.: Planets*, doi: 10.1029/2022JE007714 [8]Daniels (2004), *Ground Penetrating Radar* (2nd) [9]Warren et al. (2016), *Comput. Phys. Commun.*, doi: 10.1016/j.cpc.2016.08.020 [10]Dix (1955), *GEOPHYSICS*, doi:10.1190/1.1438126 [11]De Pue et al. (2016), *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth. Obs. Remote Sens.*, doi: 10.1109/JSTARS.2015.2439333