

地中レーダーによる月地下岩石サイズ分布の推定

*神田恵太郎⁽¹⁾、熊本篤志⁽¹⁾、石山謙⁽²⁾、加藤雄人⁽¹⁾

(1)東北大学、(2)東京国際工科専門職大学

月面を覆う岩石のサイズ-頻度分布は月面の形成年代や進化の過程を反映している。これまで月面の岩石のサイズ-頻度分布はカメラ観測により調査されてきた(e.g. Di et al., 2016; Li et al., 2017)が、カメラ観測では現在の月面しか観測できず、過去の月面のサイズ-頻度分布を知ることはできない。そこで、我々は地中レーダー(ground penetrating radar: GPR)観測に着目した。本研究の目的は、嫦娥4号に搭載された Lunar Penetrating Radar (LPR)の観測データから、レゴリス中に含まれる岩石のサイズを調査することである。

まず、GPR観測で得られる極性と岩石サイズの関係を調べるため、FDTD法によるGPR観測のシミュレーションを実施した。計算には gprMax(Warren et al., 2016)を用いた。LPRと同じ中心周波数 500 MHz の GPR を用いて、レゴリス(誘電率 3)中に設置した岩石(誘電率 9)の観測を模擬した。岩石の直径を 1 cm から 15 cm まで変化させたところ、得られた極性に基づいて岩石サイズを 3 種類に分類できることを発見した。直径 5 cm 以下では送信波と同じ極性のエコーが 1 つだけ得られた(グループ 1)。直径 6-8cm では上端と下端のエコーを完全には区別できなかったものの、送信波と同じ極性で 2 つのピークを持つエコーが観測された(グループ 2)。このように GPR の分解能以下の岩石であってもサイズを分類できると示されたことは、本研究を通して得られた重要な成果である。直径 9 cm 以上の岩石では送信波と同じ極性(岩石上端からのエコー)と逆の極性(岩石下端からのエコー)のエコーがペアとなって観測された(グループ 3)。

次に、FDTDシミュレーションで得られた岩石サイズ分類を嫦娥4号のLPR観測データに適用した。最上層のレゴリス層中に含まれる双曲線エコーを目視で検出したところ、88個の双曲線エコーを確認した。前述の3つの分類にしたがってこれらのエコーの極性を調べたところ、グループ 1: 46 個、グループ 2: 12 個、グループ 3: 4 個という結果になった。グループ 3 については岩石の誘電率を 9 と仮定してサイズを推定したところ、52.5 cm から 15.0 cm の推定値が得られた。他 26 個についてはシミュレーションで得られた 3 種類の極性には当てはまらず、空洞やレゴリス中の低密度領域からのエコーと考えている。得られた結果を Di et al., 2016 による嫦娥 3 号のカメラ観測の結果と比較したところ、我々の解析では 10 cm 以上の岩石の割合が比較的低いことがわかった。これは、嫦娥 3 号と 4 号の着陸エリアの表面年代の違い(それぞれ 8000 万年前と 30 億年前)を反映していると考えている。

本研究により GPR 観測により地下の岩石サイズ-頻度分布が初めて明らかになった。今後より深い層の解析を進めていき、過去の岩石サイズ-頻度分布と月表層の進化の歴史を調査する予定である。



地中レーダー観測による 月地下岩石サイズ分布の推定

*神田恵太郎⁽¹⁾、熊本篤志⁽¹⁾、石山謙⁽²⁾、加藤雄人⁽¹⁾

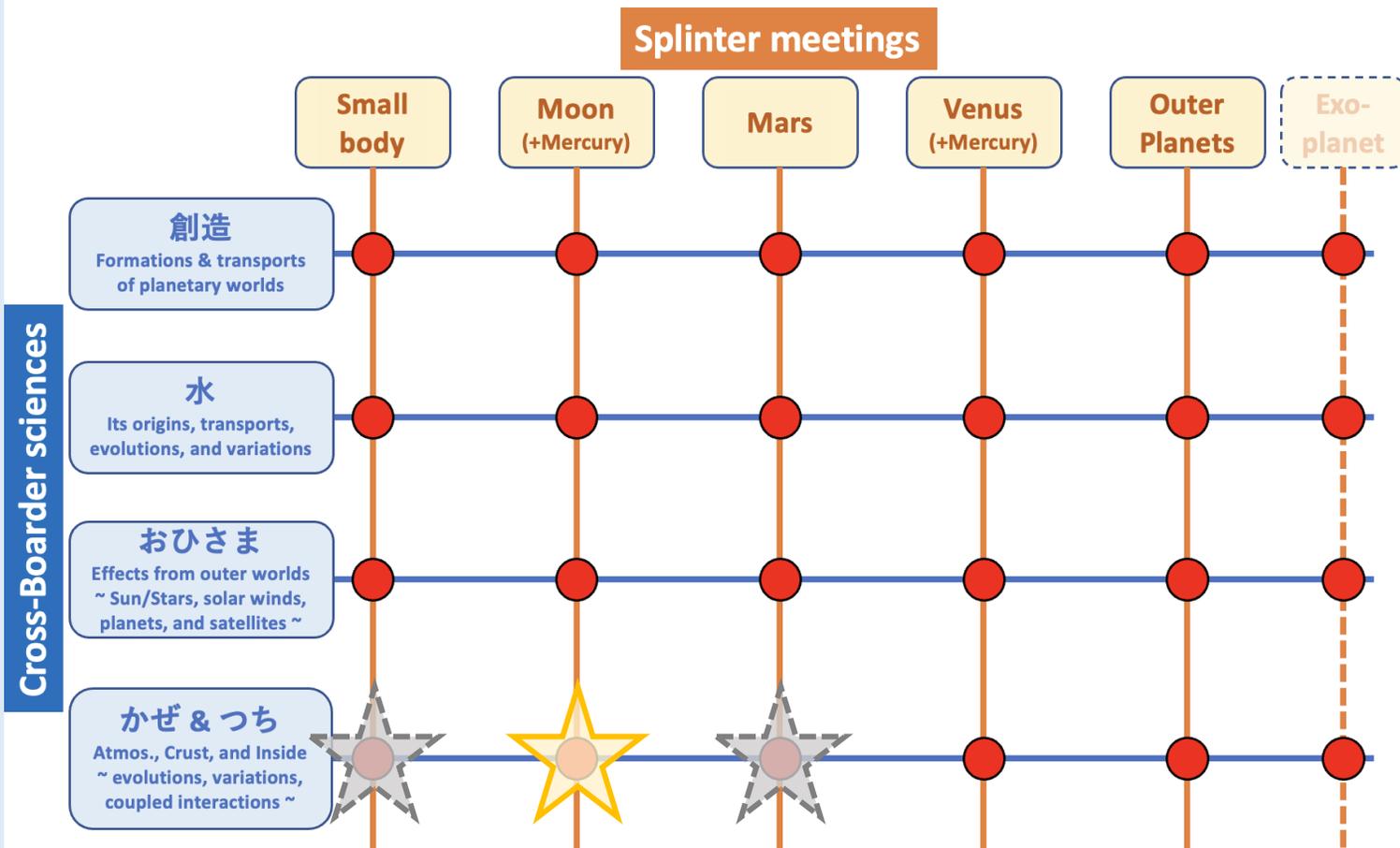
(1)東北大学、(2)東京国際工科専門職大学

はじめに

- 対象: 月のつち
- キーワード:
 - 地中レーダー(GPR)
 - 岩石サイズ-頻度分布(RSFD)
- 応用先: 火星、小天体

Focus points of the Symposium

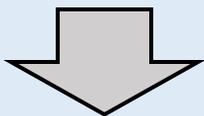
Multiple Column x Low approach for Science requirement & Mission strategy



Making borderless teams and finding/investigating seeds for future explorations!

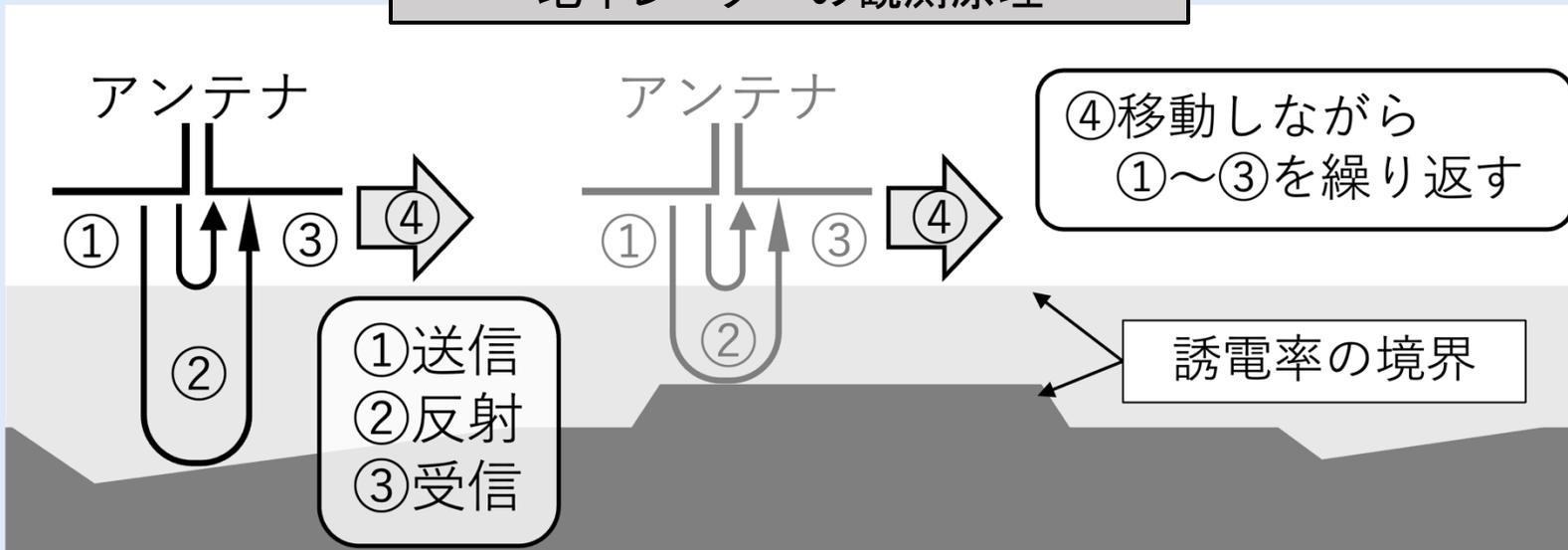
月の岩石サイズ-頻度分布

- **岩石サイズ-頻度分布(RSFD)**: 月面の年代や歴史を反映する。
 - これまで: カメラ観測 (Di et al., 2016; Li et al., 2017)
 - しかし、カメラ観測では現在の月面しか観測できない。

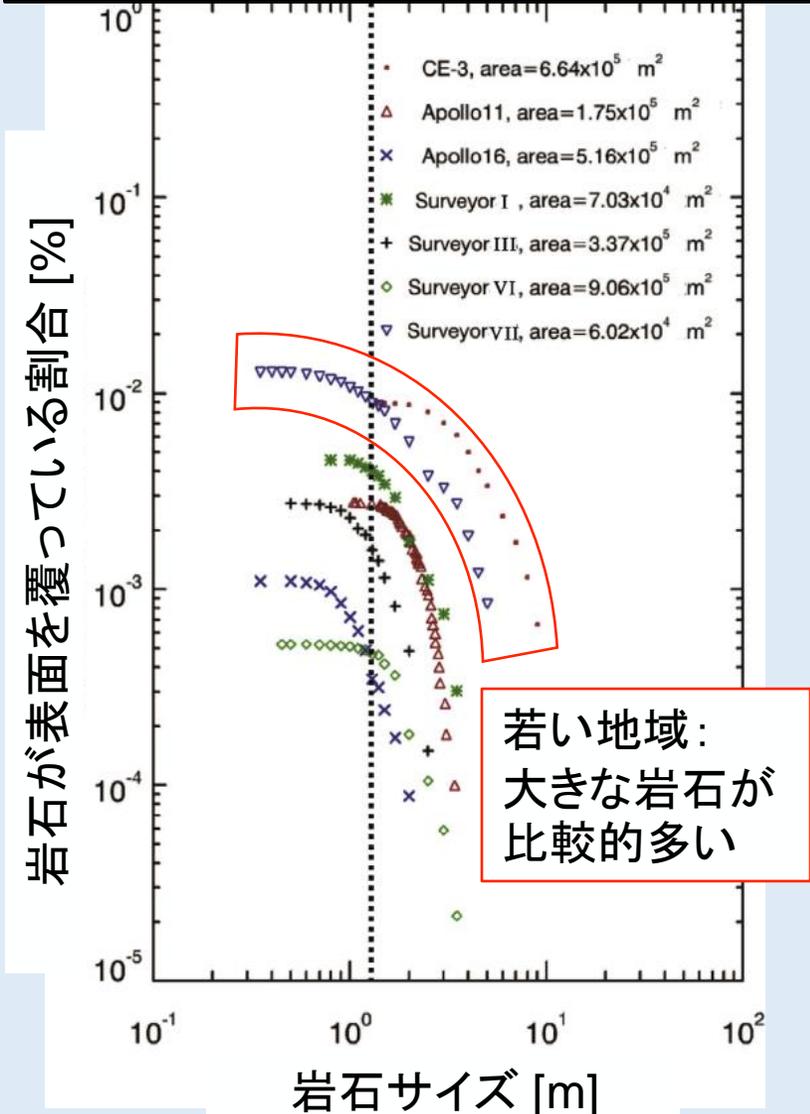


- **地中レーダー(GPR)観測の利用**
 - 電波を用いた非破壊の地下探査手法。
 - 利点: 異なる年代に形成された**複数の地下層を観測できる**。

地中レーダーの観測原理



LRO NACを用いて調査した、異なる地域のRSFD (Li et al., 2017)



地中レーダーによる月探査

- ◆ Chang'E-3, 4, 5 (CE-3, 4, 5): 月面でのその場GPR探査を実施
 - CE-3, 4: Lunar Penetrating Radar (LPR)
 - CE-5: Lunar Regolith Penetrating Radar (LRPR)

- ◆ LPRによるレゴリス中に含まれる岩石の空間分布調査:

- Hu et al. (2019): CE-3/LPR
- Zhang et al. (2021): CE-4LPR

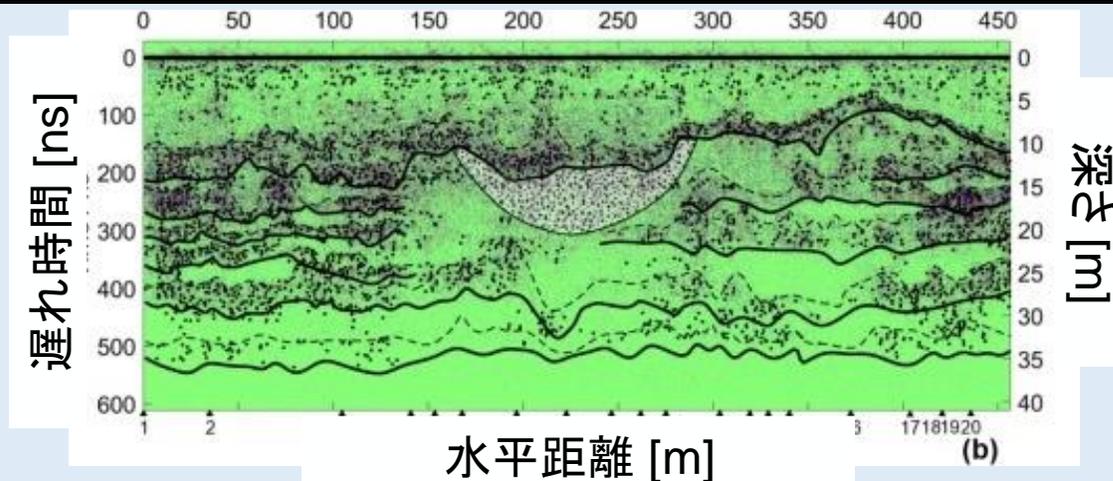
- ◆ しかし、岩石のサイズ分布は未調査

- 理由: 岩石に由来するエコーは複雑

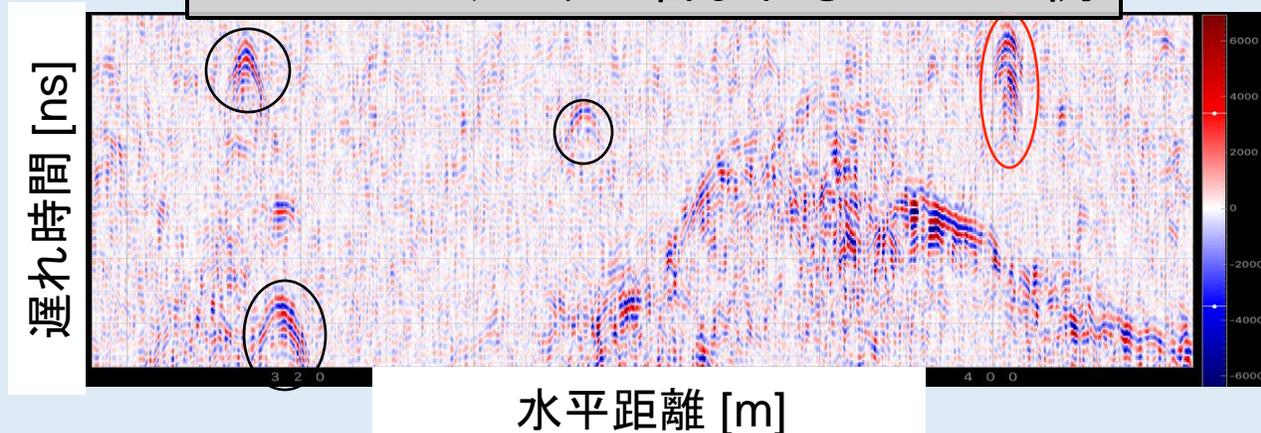
岩石サイズ推定のためには岩石上端・下端からのエコーの区別が必須

得られたエコーの極性を解析することで岩石上端・下端からのエコーを区別できるのでは？

レゴリス中に含まれる岩石の空間分布 (Zhang et al., 2021)



CE-4/LPRデータに含まれるエコーの例



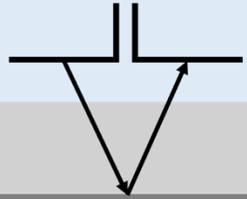
2つのエコーが重なり1つになっている？

岩石上端・下端からのエコーがそれぞれ観測されている？

地中レーダー観測における電波の極性

◆電波の反射係数は誘電率によって決定される(Neal, 2004):

GPR antenna



$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}}$$

- $\epsilon_2 > \epsilon_1$: $R < 0$ → 送信波と同じ極性のエコー
- $\epsilon_1 > \epsilon_2$: $R > 0$ → 送信波と逆の極性のエコー

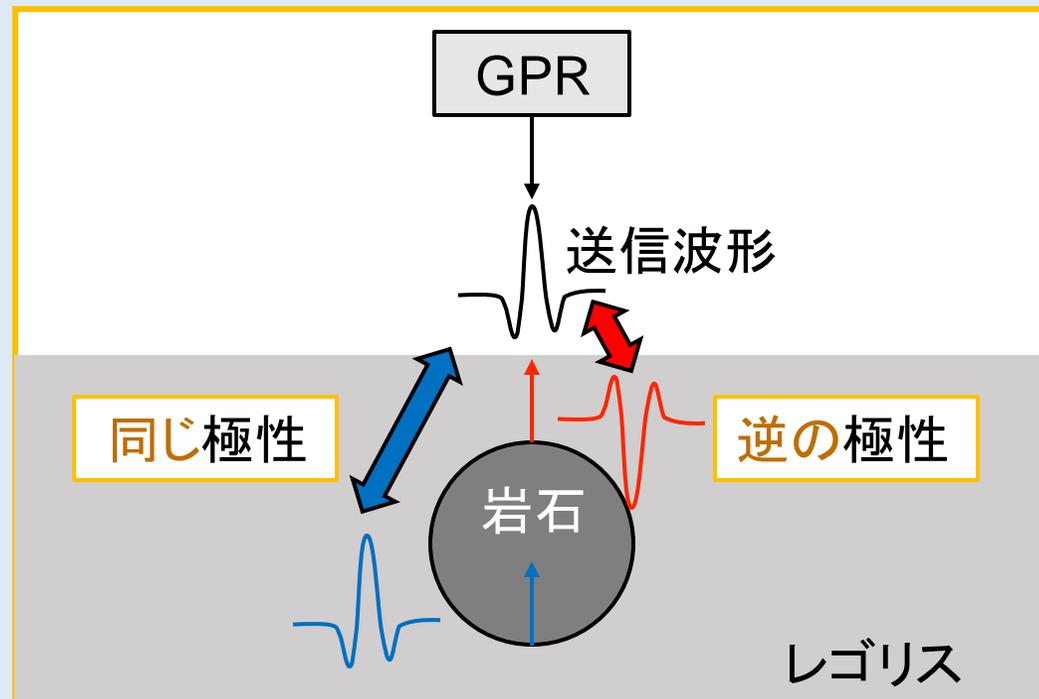
◆レゴリス中の岩石を探索する場合:

- レゴリス: $\epsilon_r = 3$ (Feng et al., 2022)
- 岩石: $\epsilon_r = 6-15$ (Chung et al., 1970)

◆上端と下端の区別ができない場合

- 2つのエコーが混ざった波形が得られるはず。
 - その極性は？
 - 岩石のサイズによって波形は変化する？

➤特徴を掴めればサイズ分類できる？



本研究の目的

背景

- 岩石のサイズ-頻度分布は月面の年代や歴史を反映している。
- GPR観測により月地下の岩石サイズ-頻度分布を調査したい。
- GPR観測で得られた極性に基づいて岩石のサイズを推定・分類できる可能性がある。

本研究の目的

GPR観測により地下のRSFDを調査し、月表層進化を理解する。

上記目標のため今回取り組んだこと:

その1: GPR観測のシミュレーション

目的: 得られる極性と岩石サイズの間関係を調べる

その2: CE-4/LPRデータ解析

目的: CE-4着陸地域のレゴリス中の岩石サイズ分布を調べる

周波数、送信波形の設定と予想される極性

中心周波数

- LPR CH2と同じ500 MHz に設定
- 分解能: 21 cm ($\epsilon_r = 3$)、12 cm ($\epsilon_r = 9$)

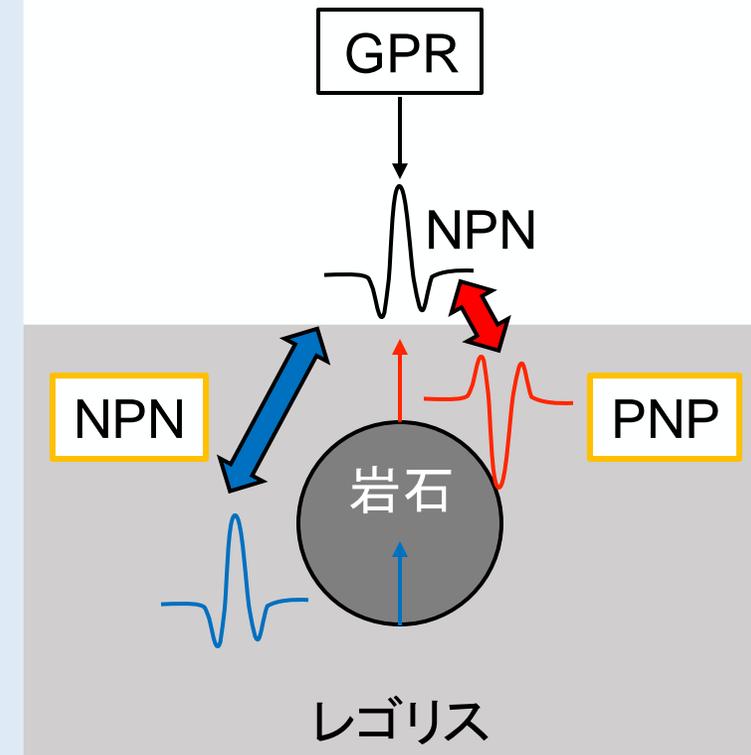
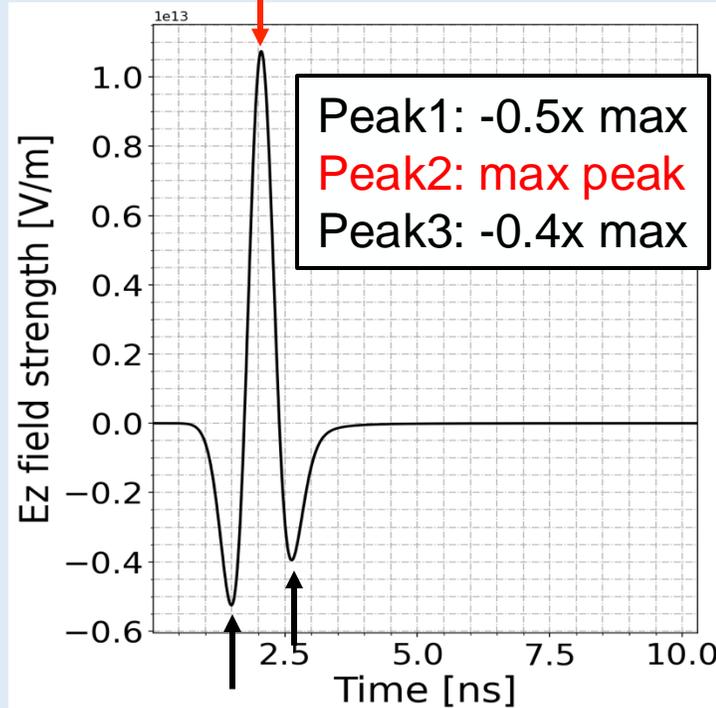
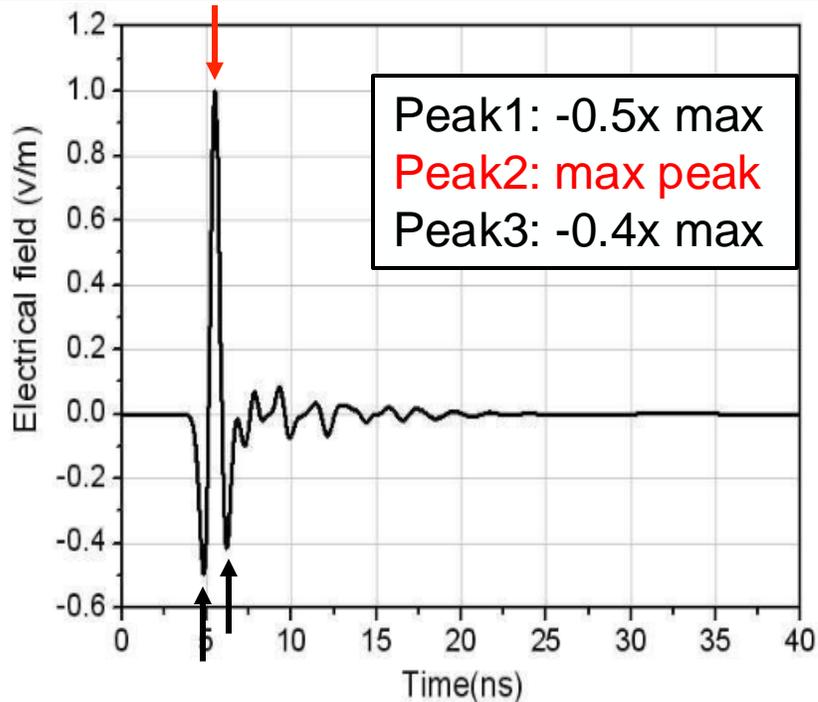
送信波形の特徴

- 3つのピークを持つ
- negative-positive-negative → **NPN**と呼ぶ
- 逆の極性の場合**PNP**と呼ぶ

LPR CH2の送信波形
(Fang et al., 2014)

シミュレーションで
用いる送信波形

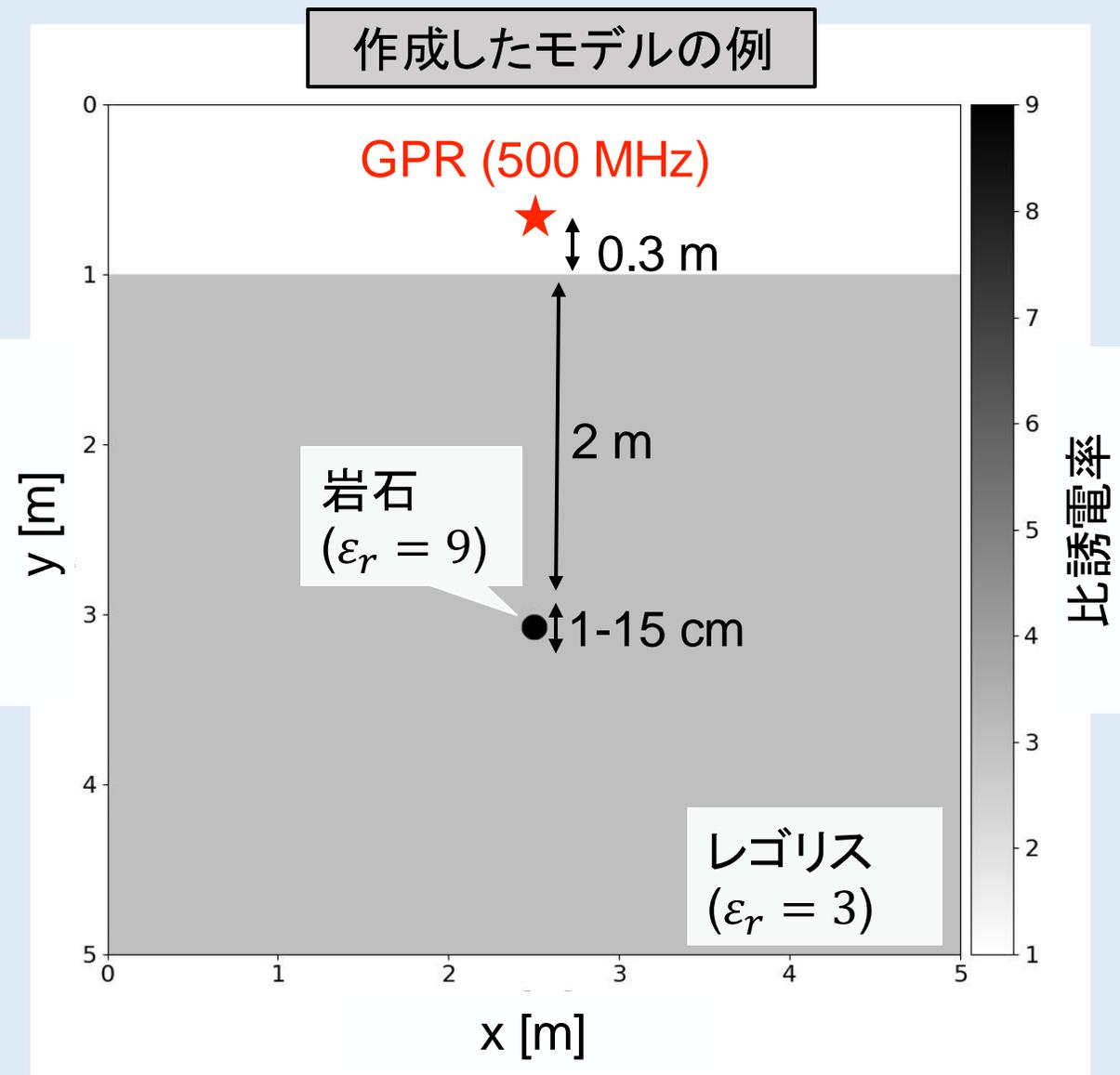
予想される極性



地下構造モデルの設定

- レゴリス ($\epsilon_r = 3$) 中に岩石 ($\epsilon_r = 9$) を配置
- 岩石サイズは1-15 cmで変化させる
- 得られる極性と岩石サイズの関係进行调查する

シミュレーション手法: FDTD法
使用ツール: gprMax (Warren et al., 2016)



結果と考察

Key point: 岩石サイズの推定について

• エコーの極性と波形に基づいて岩石のサイズを3種類に大別できる:

- 1-5 cm: 1ピークのNPN→グループ(1)
- 6-8 cm: 2ピークのNPNP→グループ(2)
- 9-15 cm: PNPとNPNのセット→グループ(3)

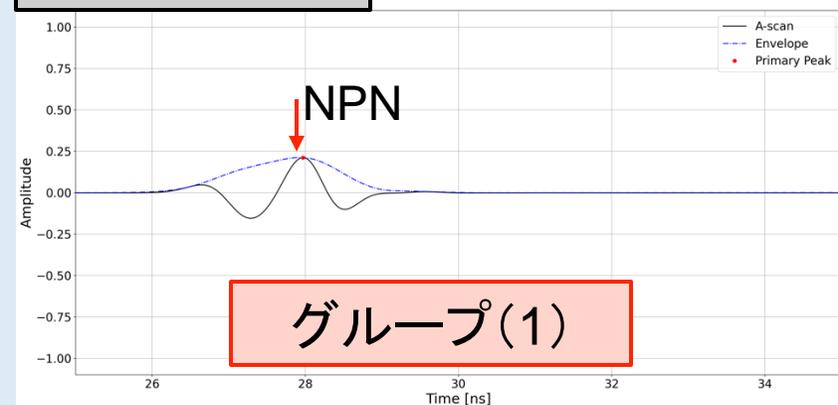
分解能未満の岩石でも大まかにサイズを分類できる

2つのエコーの時間差から岩石サイズを推定可能

分解能 > 岩石サイズ

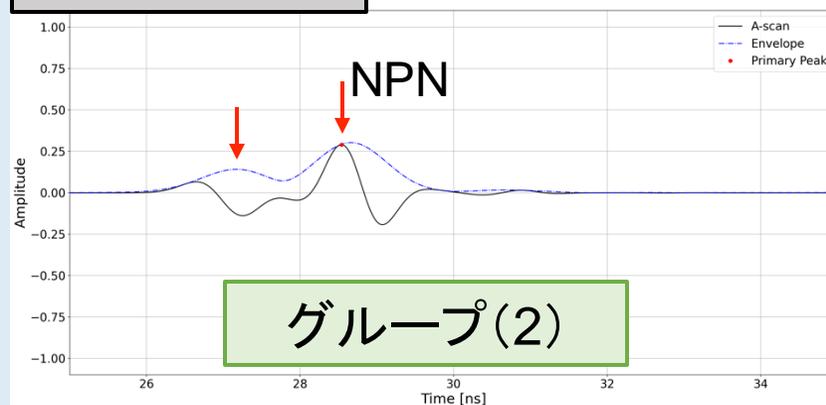
岩石サイズ > 分解能

A-scan: 5 cm



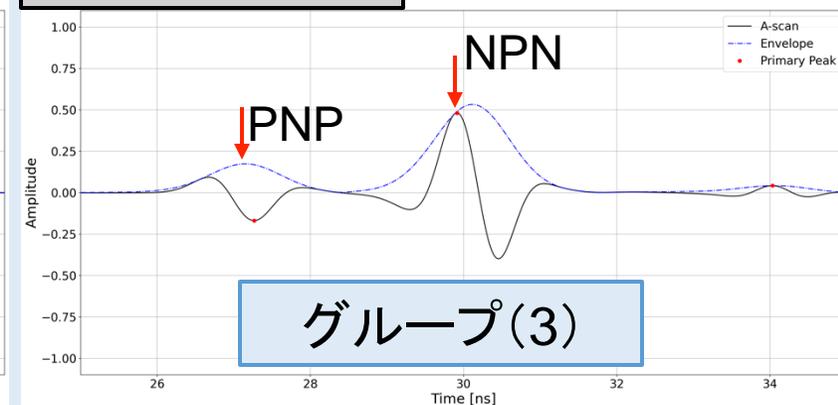
上端・下端のエコーが完全に重複して1つのエコーになっている

A-scan: 8 cm



上端・下端のエコーが部分的に重複し、2コブ形状のエコーが得られる。

A-scan: 15 cm

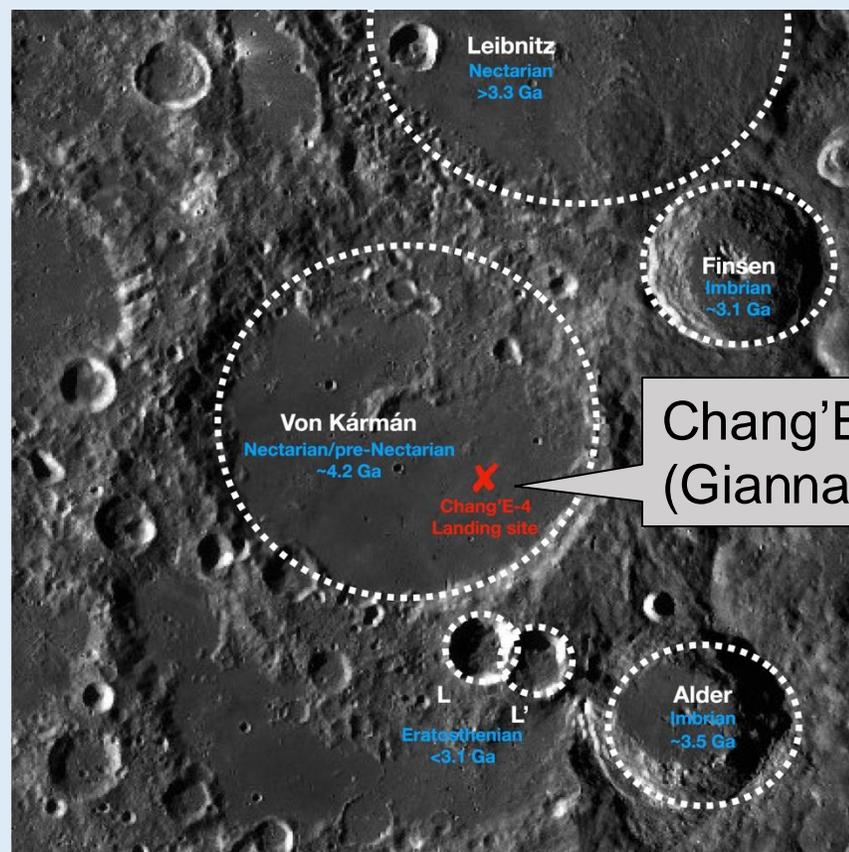


上端・下端のエコーを完全に分離でき、予想通りの極性がセットで得られた。

CE-4、LPRの概要

Chang'E-4 (CE-4)

- 2019年にSPA盆地内のVon Kármánクレーターに着陸。
- これまでに1500 m移動

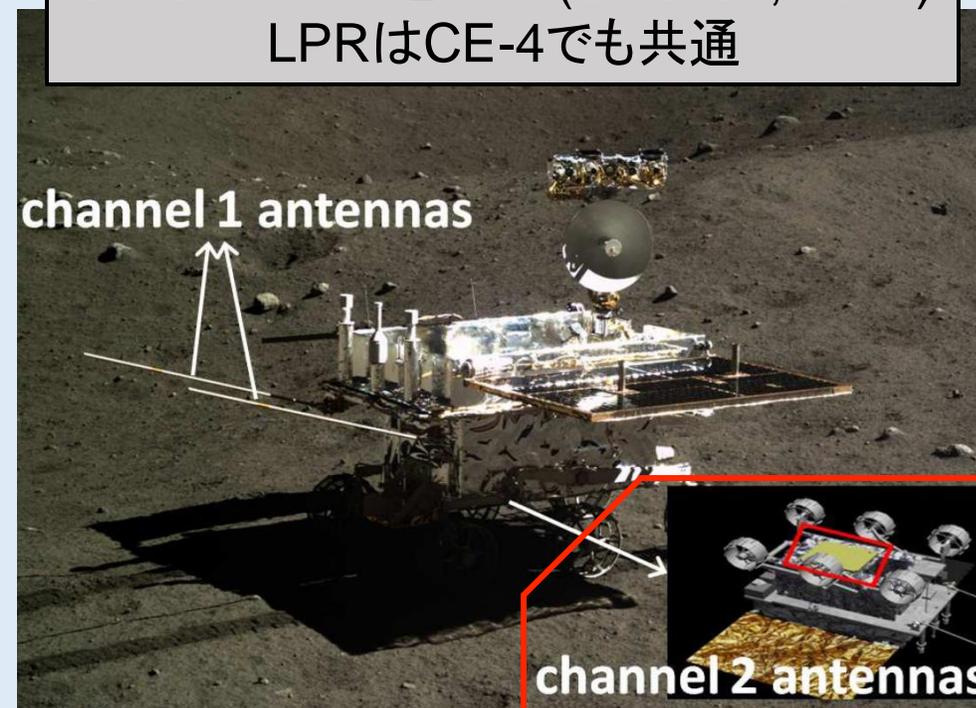


Chang'E-4の着陸場所
(Giannakis et al., 2024)

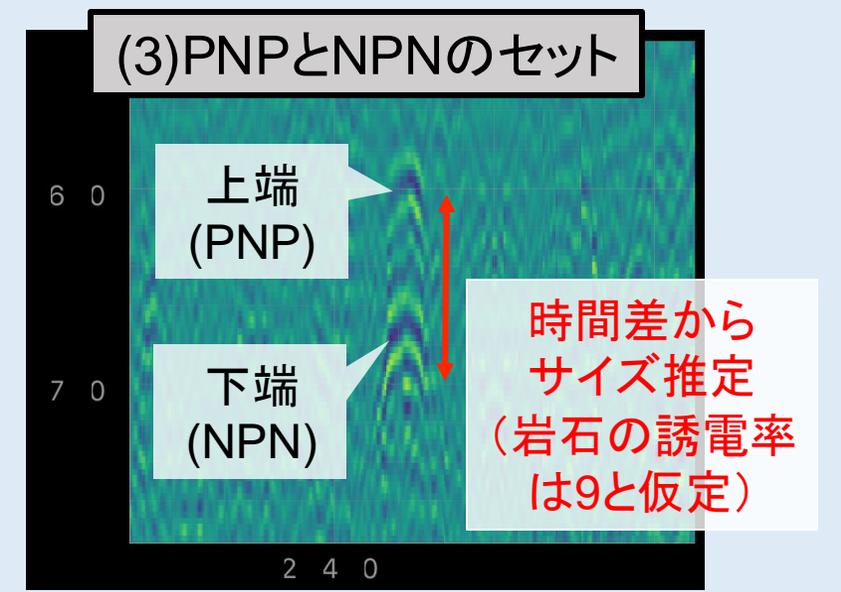
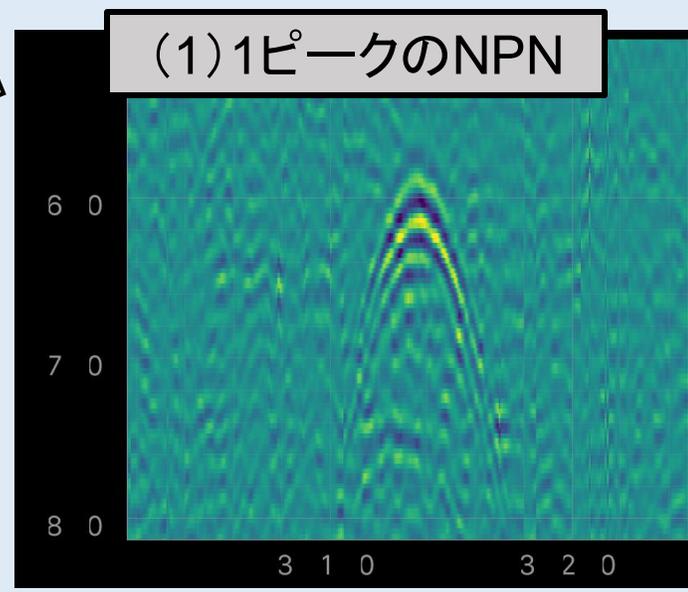
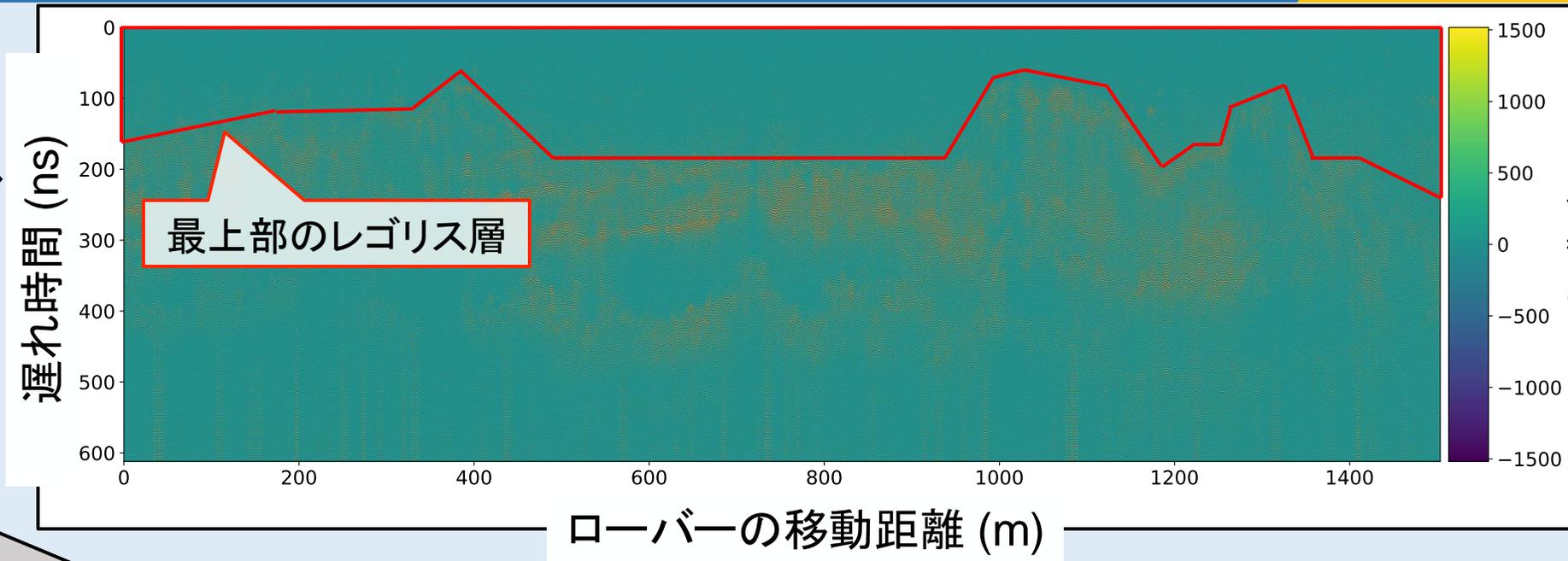
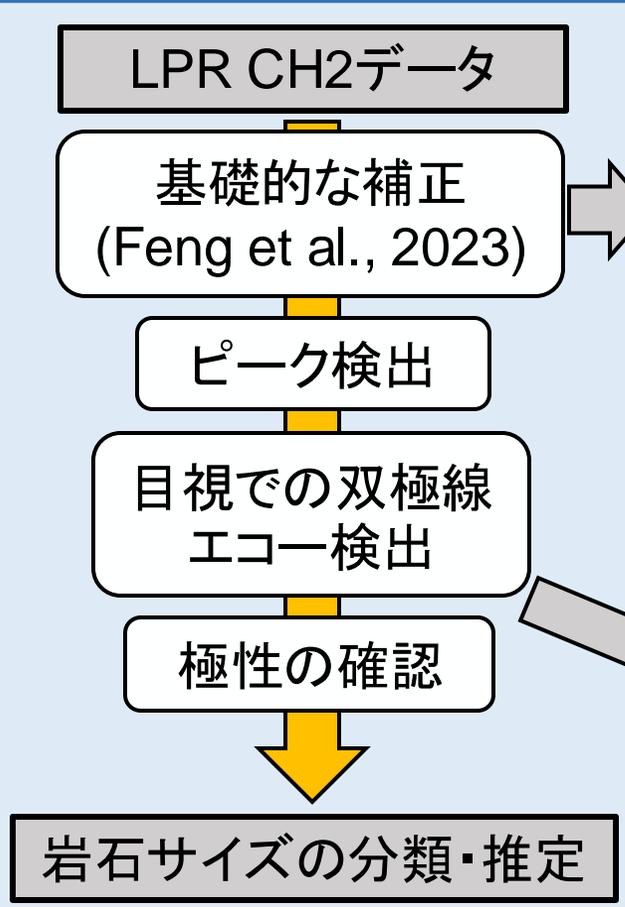
LPR (Lunar Penetrating Radar)

- CH1: 40-80 MHz
- CH2: 250-750 MHz
- 今回はCH2のデータを解析

CE-3ローバーとLPR (Su et al., 2014)
LPRはCE-4でも共通



データ解析

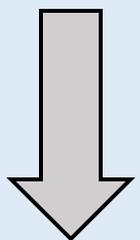


今回は最上部のレゴリス層中に含まれるエコーのみを解析。(より深い層ではエコーが多くて手動での検出が難しい。)

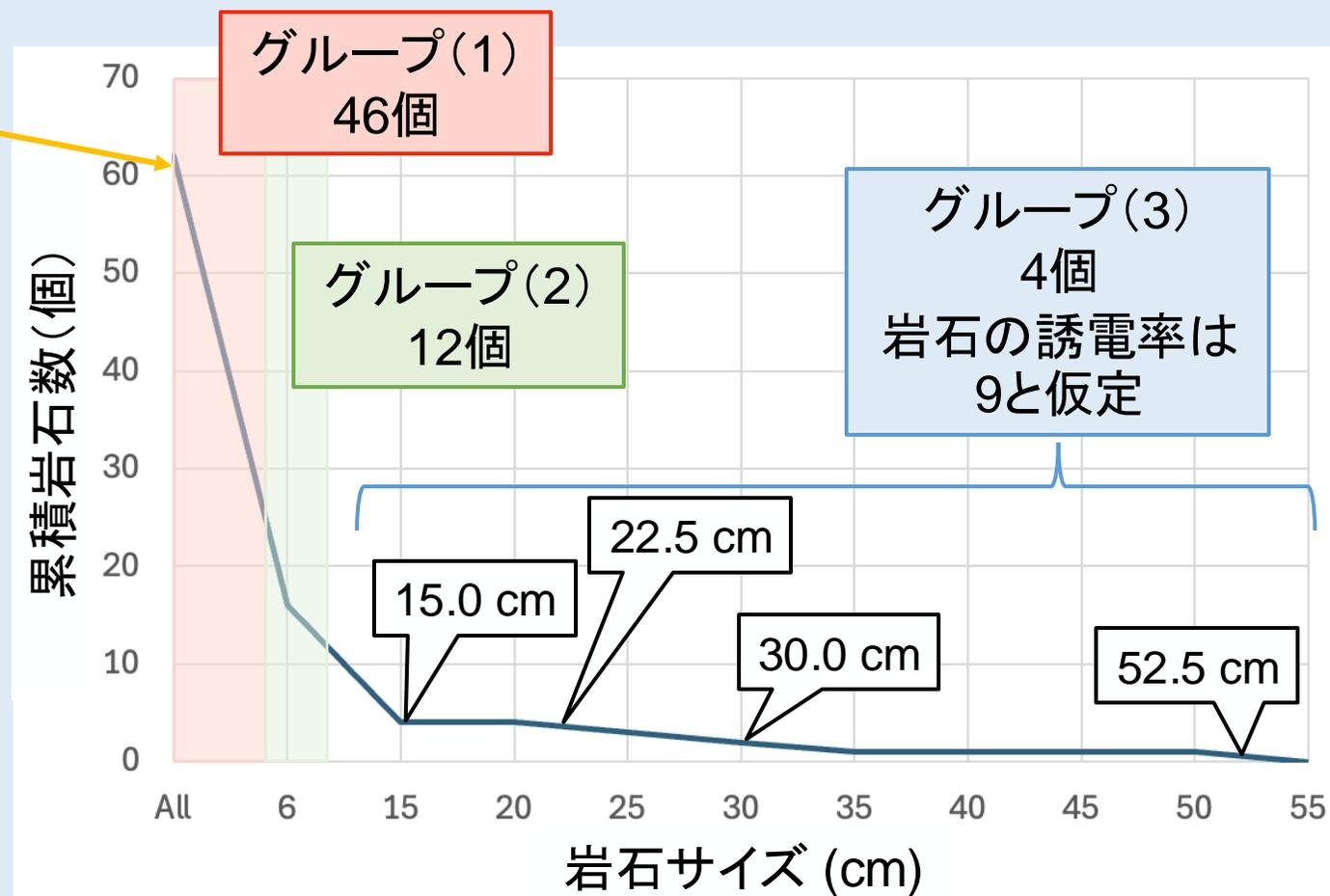
➤ 今後の課題

結果

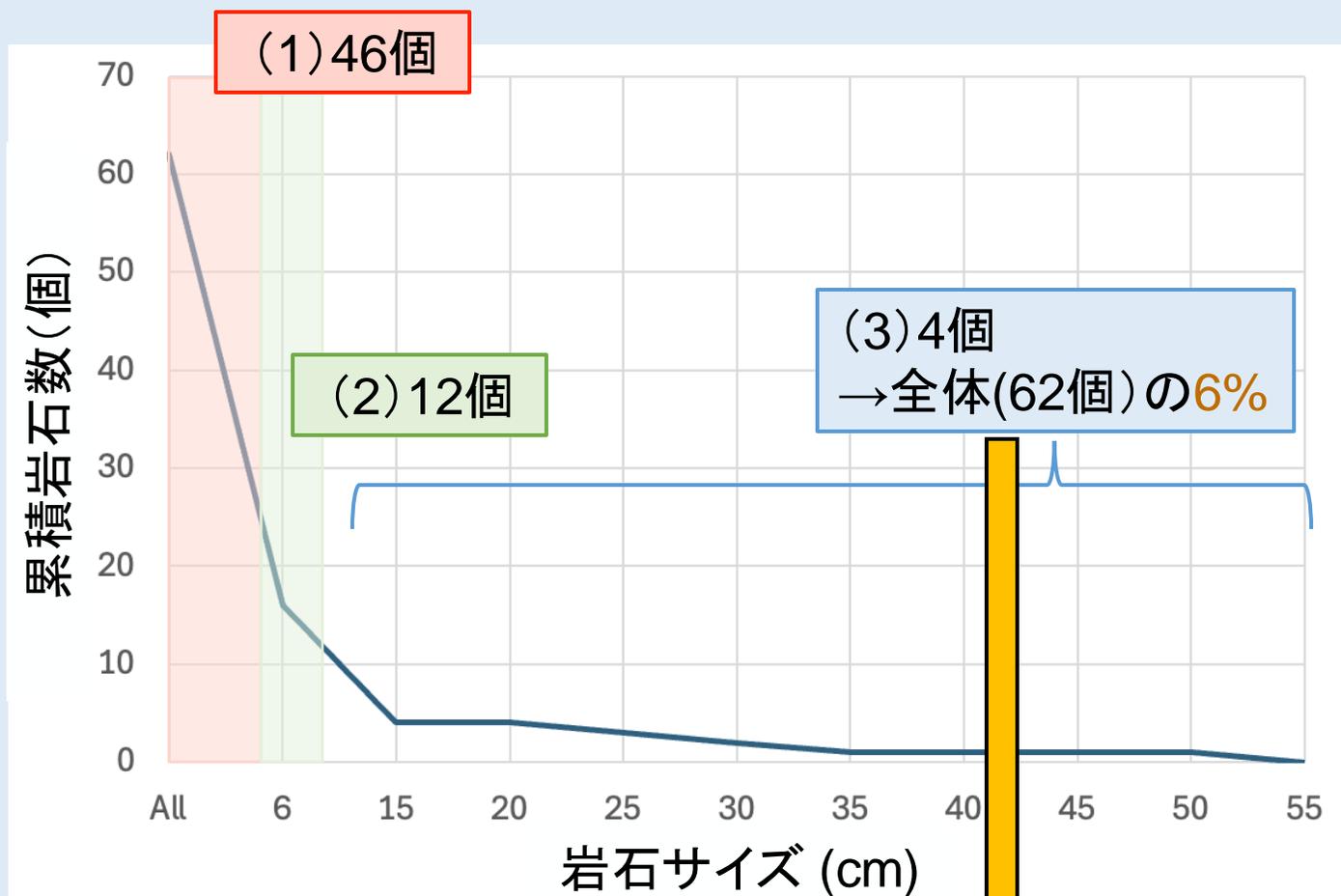
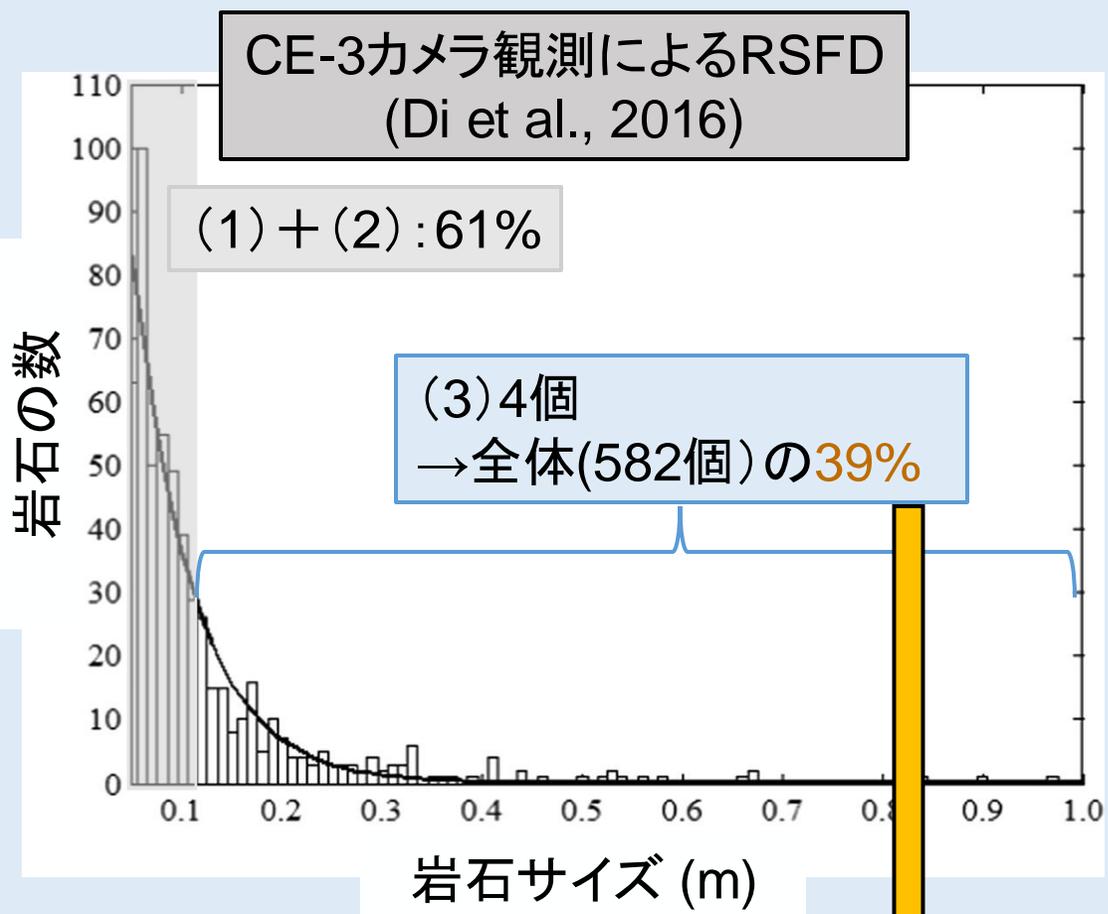
検出した双曲線エコーの総数	88
(1)、(2)または(3)のどれかに該当する極性を持つエコー	62
その他のエコー	26



- PNPx1、NPNとPNPのセット、などが得られた
- 岩石観測で期待される極性とは逆の極性
 - レゴリスよりも低誘電率の媒質からの反射
 - 空洞やレゴリスの低密度領域からのエコーを観測したと考えられる。



月面カメラ観測との比較



Key point: 地下と地上のRSFD比較

- レゴリス中における大きな岩石の割合は月面よりも低い
- 表層年代の違いを反映? (CE-3: 80 Ma^a, CE-4: ~3 Ga^b)
- 今後の課題

a Xiao et al., 2015; b Giannakis et al., 2021

本研究の目的

GPR観測により地下のRSFDを調査し、月表層進化を理解する。

その1: GPR観測のシミュレーション

目的: 得られる極性と岩石サイズの関係性を調べる

- 結果のポイント:
 - 得られた極性に基づいて岩石サイズを3種類に大別できる。

その2: CE-4/LPRデータ解析

- 目的: CE-4着陸地域のレゴリス中の岩石サイズ分布を調べる
- 結果のポイント:
 - 88個の双極線エコーを検出、うち岩石由来と思われるものは62個あった。
 - CE-3カメラ観測で得られたRSFDと比較すると、10 cm以上の岩石の割合が低いことがわかった。

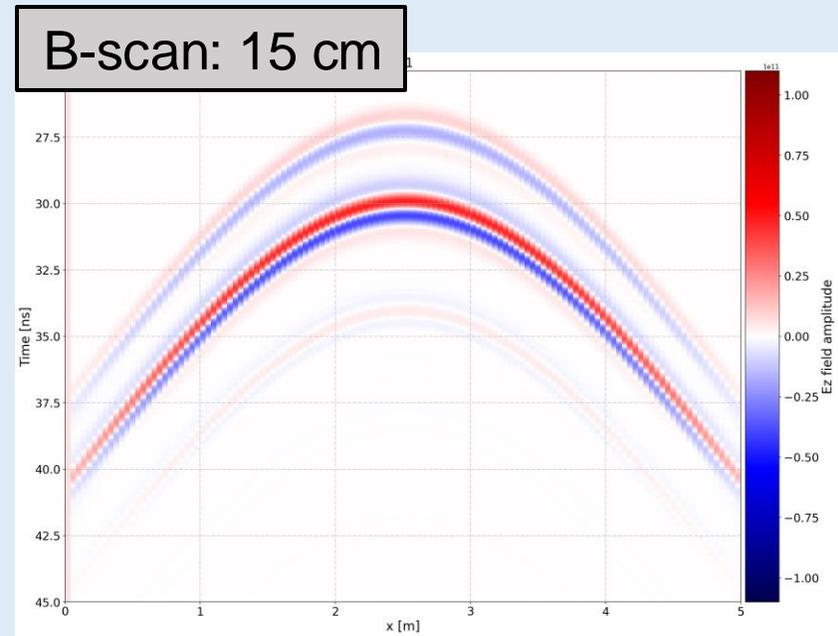
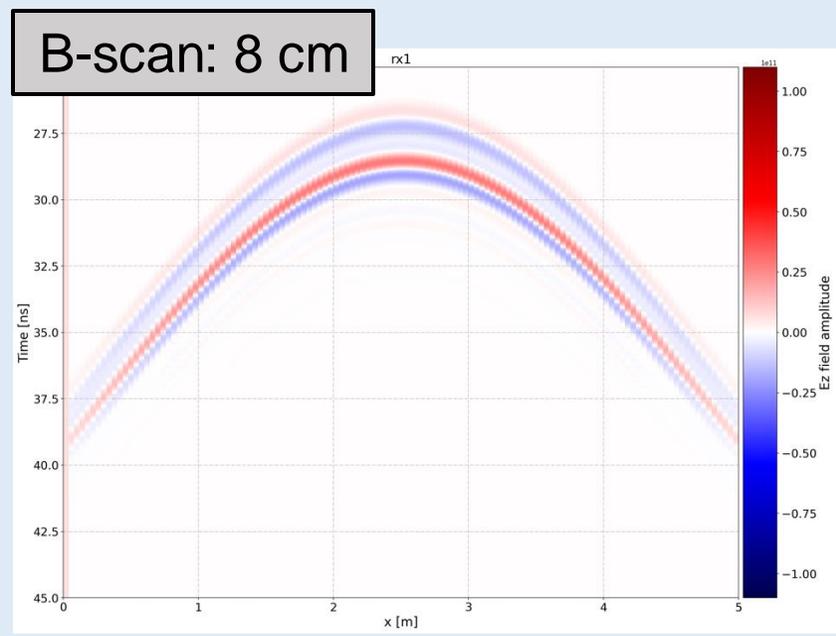
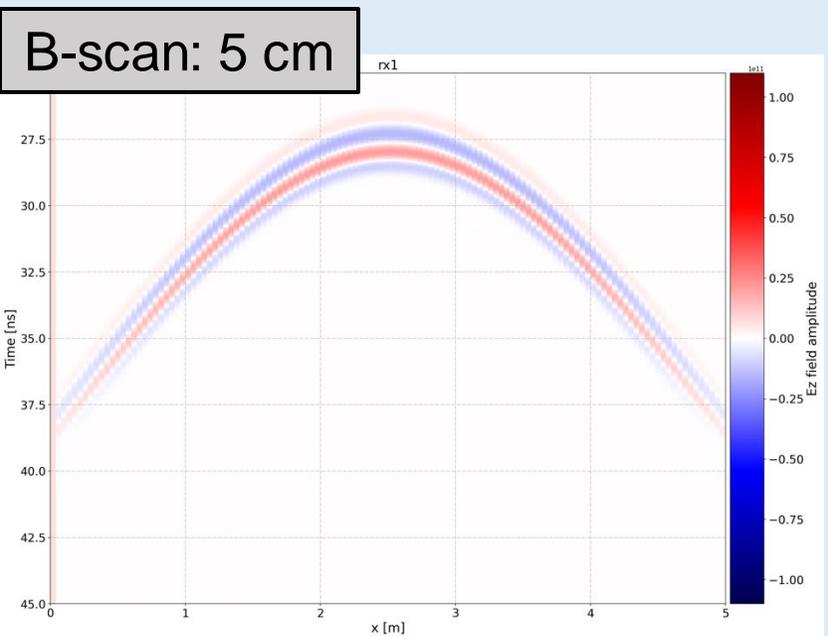
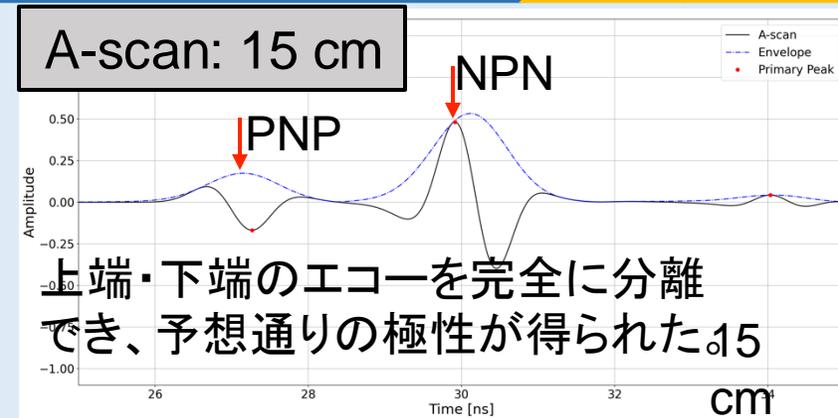
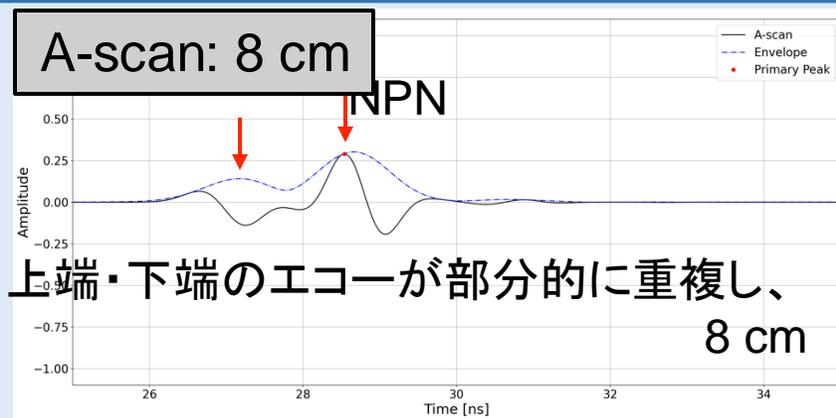
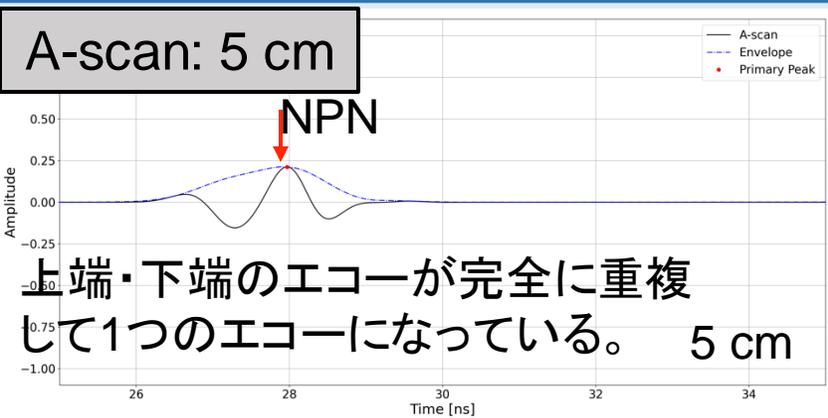
今後の課題

- より深い層の双曲線エコーを検出する手法の開発
- CE-3, 4着陸エリアの表面年代の違いによるRSFDへの影響評価

- Chung, D. H., W. B. Westphal, and Gene Simmons. 1970. "Dielectric Properties of Apollo 11 Lunar Samples and Their Comparison with Earth Materials." *Journal of Geophysical Research (1896-1977)* 75 (32): 6524–31. <https://doi.org/10.1029/JB075i032p06524>.
- Di, Kaichang, Bin Xu, Man Peng, Zongyu Yue, Zhaoqin Liu, Wenhui Wan, Lichun Li, and Jianliang Zhou. 2016. "Rock Size-Frequency Distribution Analysis at the Chang'E-3 Landing Site." *Planetary and Space Science* 120 (January):103–12. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2015.11.012>.
- Fang, Guang-You, Bin Zhou, Yi-Cai Ji, Qun-Ying Zhang, Shao-Xiang Shen, Yu-Xi Li, Hong-Fei Guan, et al. 2014. "Lunar Penetrating Radar Onboard the Chang'e-3 Mission." *Research in Astronomy and Astrophysics* 14 (12): 1607–22. <https://doi.org/10.1088/1674-4527/14/12/009>.
- Feng, Jianqing, Matthew A. Siegler, Yan Su, Chunyu Ding, and Iraklis Giannakis. n.d. "Layered Structures in the Upper Several Hundred Meters of the Moon along the Chang'E-4 Rover's First 1000-m Traverse." *Journal of Geophysical Research: Planets* n/a (n/a): e2022JE007714. <https://doi.org/10.1029/2022JE007714>.
- Feng, Jianqing, Matthew A. Siegler, and Mackenzie N. White. 2022. "Dielectric Properties and Stratigraphy of Regolith in the Lunar South Pole-Aitken Basin: Observations from the Lunar Penetrating Radar." *Astronomy & Astrophysics* 661 (May):A47. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202143015>.
- Giannakis, Iraklis, Javier Martin-Torres, Yan Su, Jianqing Feng, Feng Zhou, Maria-Paz Zorzano, Craig Warren, and Antonios Giannopoulos. 2024. "Evidence of Shallow Basaltic Lava Layers in Von Kármán Crater from Yutu-2 Lunar Penetrating Radar." *Icarus* 408 (January):115837. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2023.115837>.
- Hu, Bin, Deli Wang, Ling Zhang, and Zhaofa Zeng. 2019. "Rock Location and Quantitative Analysis of Regolith at the Chang'e 3 Landing Site Based on Local Similarity Constraint." *Remote Sensing* 11 (5): 530. <https://doi.org/10.3390/rs11050530>.
- Li, Bo, Zongcheng Ling, Jiang Zhang, and Jian Chen. 2017. "Rock Size-Frequency Distributions Analysis at Lunar Landing Sites Based on Remote Sensing and in-Situ Imagery." *Planetary and Space Science* 146 (October):30–39. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2017.08.008>.
- Neal, Adrian. 2004. "Ground-Penetrating Radar and Its Use in Sedimentology: Principles, Problems and Progress." *Earth-Science Reviews* 66 (3): 261–330. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.01.004>.
- Su Yan, and, and, and, and and and. 2014. "Data Processing and Initial Results of Chang'e-3 Lunar Penetrating Radar." *Research in Astronomy and Astrophysics* 14 (12): 1623. <https://doi.org/10.1088/1674-4527/14/12/010>.
- Warren, Craig, Antonios Giannopoulos, and Iraklis Giannakis. 2016. "gprMax: Open Source Software to Simulate Electromagnetic Wave Propagation for Ground Penetrating Radar." *Computer Physics Communications* 209 (December):163–70. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2016.08.020>.
- Zhang, Ling, Yi Xu, Roberto Bugiolacchi, Bin Hu, Cai Liu, Jialong Lai, Zhaofa Zeng, and Zhijun Huo. 2021. "Rock Abundance and Evolution of the Shallow Stratum on Chang'e-4 Landing Site Unveiled by Lunar Penetrating Radar Data." *Earth and Planetary Science Letters* 564 (June):116912. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.116912>.

付録

シミュレーション結果: B-scan

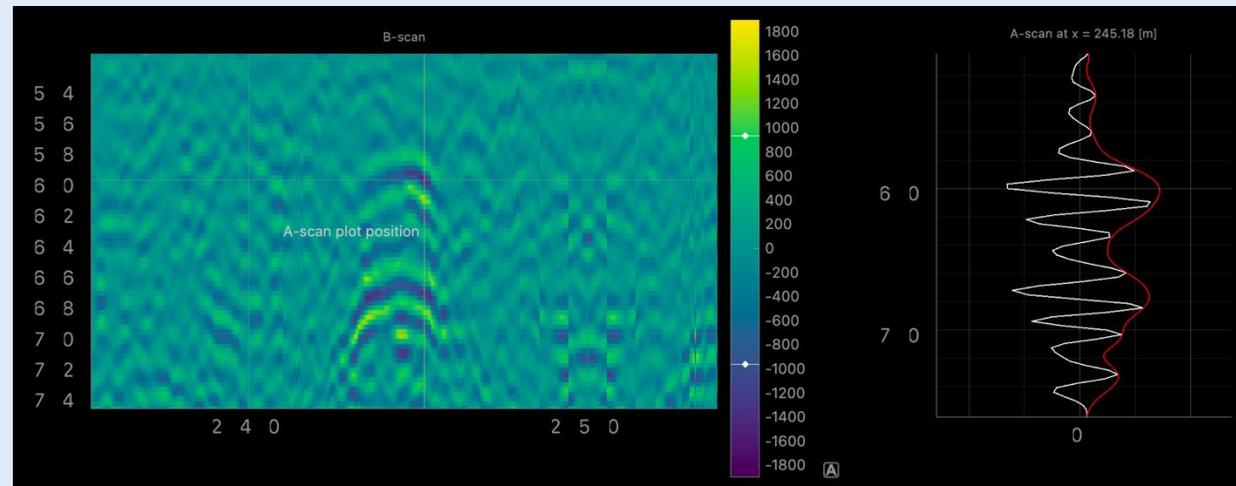
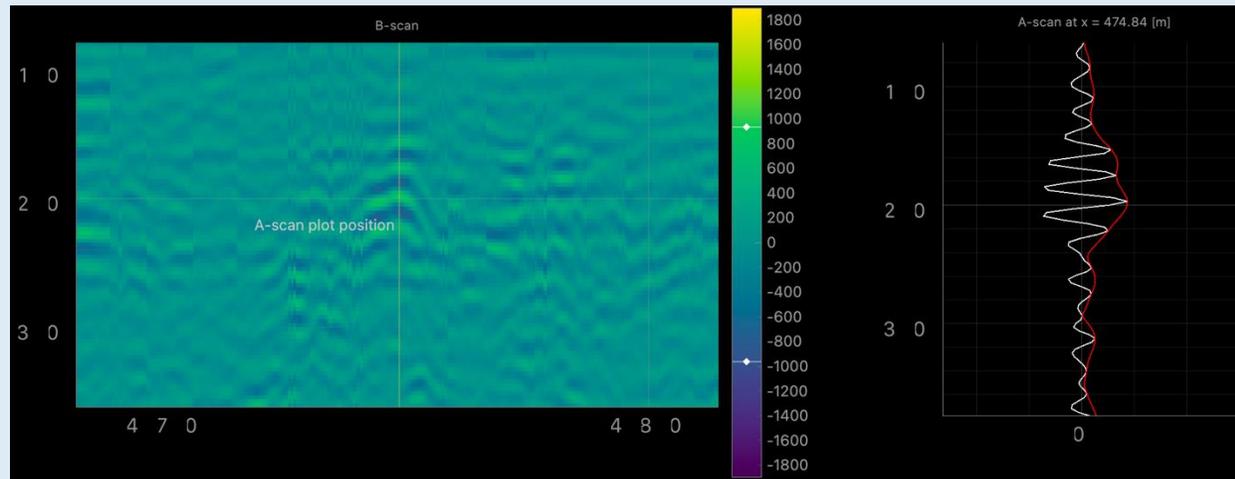
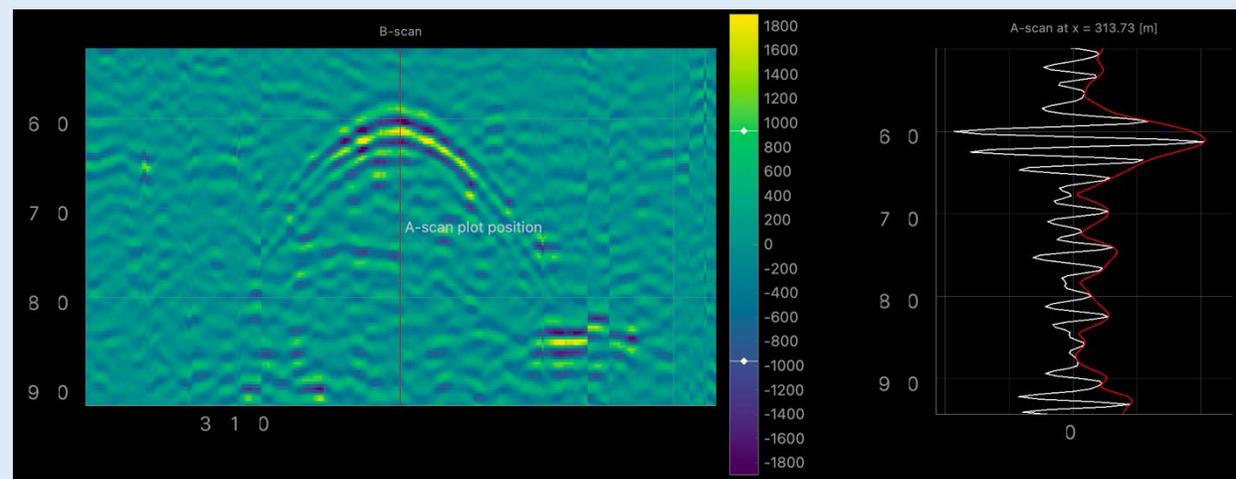


1-5 cm: 1ピークのNPN

6-8 cm: 2ピークのNPN

9-15 cm: PNPとNPN

検出された双曲線エコーの例



嫦娥4号カメラ観測との比較

