

月の未崩壊地下空洞(溶岩チューブ)の発見

論文題名

“Detection of Intact Lava Tubes at Marius Hills on the Moon
by SELENE (Kaguya) Lunar Radar Sounder”

(かぐや搭載月レーダサウンダーによる月のマリウス丘の未崩壊溶岩チューブの発見)

(Geophysical Research Letters 日本時間10月18日(オンライン)掲載)

T. Kaku(郭哲也)^{1,2}, J. Haruyama(春山純一)¹, W. Miyake(三宅互)², A. Kumamoto(熊本篤志)³,
K. Ishiyama(石山謙)¹, T. Nishibori(西堀俊幸)¹, K. Yamamoto(山本圭香)⁴, Sarah T. Crites¹,
T. Michikami(道上達広)⁵, Y. Yokota(横田康弘)^{1,6},
R. Sood⁷, H. J. Melosh^{8,9}, L. Chappaz¹⁰, and K. C. Howell⁸

¹Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, (宇宙航空研究開発機構/宇宙科学研究所).

²Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, Tokai University (東海大学大学院/工学研究科).

³Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University (東北大学大学院/理学研究科) .

⁴National Astronomical Observatory of Japan (国立天文台).

⁵Faculty of Engineering, Kindai University (近畿大学/工学部).

⁶Faculty of Science, Kochi University (高知大学/理学部).

⁷Department of Aerospace Engineering and Mechanics, College of Engineering, The University of Alabama, Tuscaloosa, AL, USA.

⁸School of Aeronautics and Astronautics, Purdue University, West Lafayette, IN, USA.

⁹Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Science, Purdue University, West Lafayette, IN, USA.

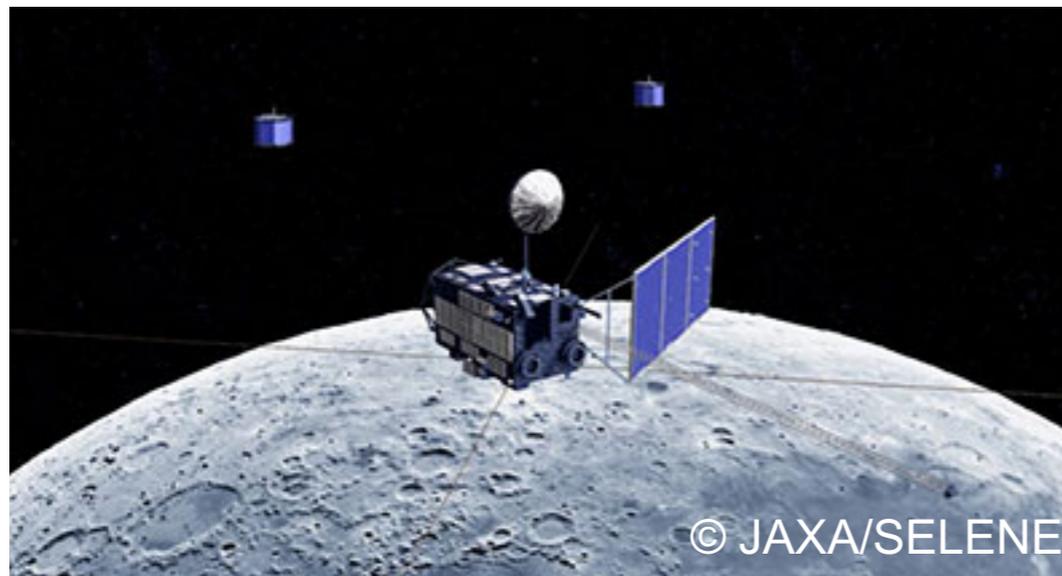
¹⁰AstroLabs, Pasadena, CA, USA.

2017年 10月18日

宇宙航空研究開発機構

本研究のポイント

- 日本の月周回衛星「かぐや」に搭載された電波レーダによる新成果
- 月の火山地域であるマリウス丘地域に、「かぐや」が発見した縦孔を東端として、西に約50km延びる巨大な地下空洞(溶岩チューブ)を発見。
- 月の地下空洞(溶岩チューブ)は、人類の活動領域の拡大の面からも、また科学的な研究面からも重要であることから、地下空洞の存在を確実にした今回の成果は、非常に大きな意義をもつ。



かぐや

2007年 打ち上げ(10周年)

<http://www.selene.jaxa.jp/>



本日の内容

0. 概要

1. 背景

- ・月の縦孔と地下空洞
- ・大きな縦孔の位置

2. 本研究内容

- ・かぐや搭載月レーダサウンダー(機能、地下空洞検知方法)
- ・調査結果
- ・結果の重要性
- ・今後の研究計画

3. まとめ

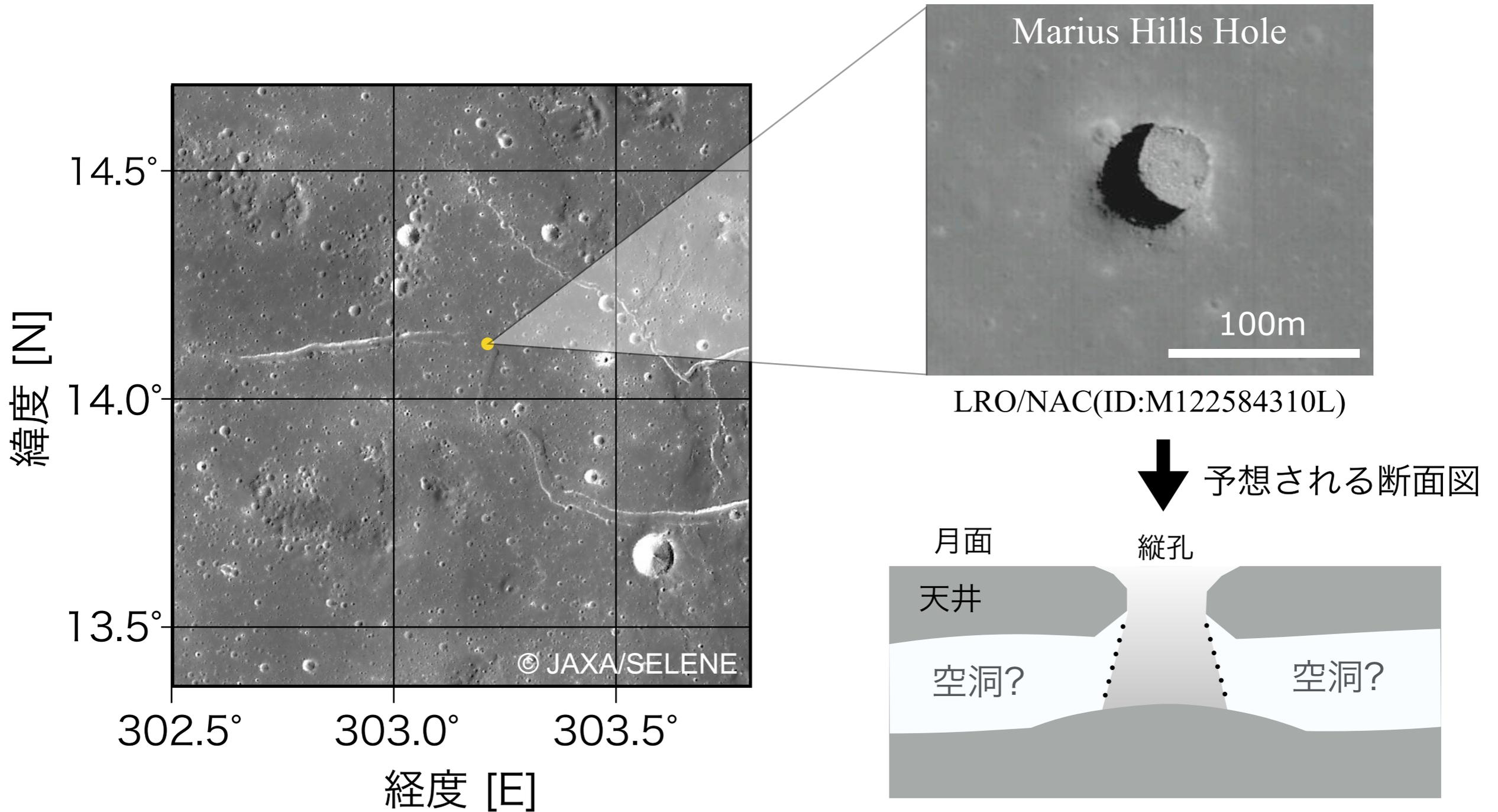
概要

- 溶岩が流れた後に形成される**地下空洞(溶岩チューブ)**が、もし月に存在すれば、人類の活動拡大の面からも、また科学的な研究面からも重要である。というのも、地下空洞は放射線などによる厳しい環境から逃れることができる**将来の月面基地建設地**の最適地であり、また、月面と異なり微隕石で破壊されていない新鮮な岩石を有することから**様々な科学的な課題を研究する上で有用な地域**だからである。
- しかし、これまで月の地下空洞の存在は確認されていなかった。
- 本研究では、地下空洞への入り口だと考えられる縦孔が見つまっているマリウス丘において、**かぐや搭載月レーダサウンダー**の観測データを用いて地下空洞の探索を行い、**縦孔から西方に約50kmに渡って延びている未崩壊の地下空洞**の特徴を発見した。これは、重力場データとも整合。
- 縦孔は、こうした地下空洞への入り口の可能性があるが、縦孔の数は非常に少なく、科学的探査や基地を作ることのできる地下空洞は希少かもしれない。
- 本研究による月の地下空洞の発見によって月への人類進出や科学的な知見の集積がより進むことが期待される。

背景

月の縦孔と地下空洞

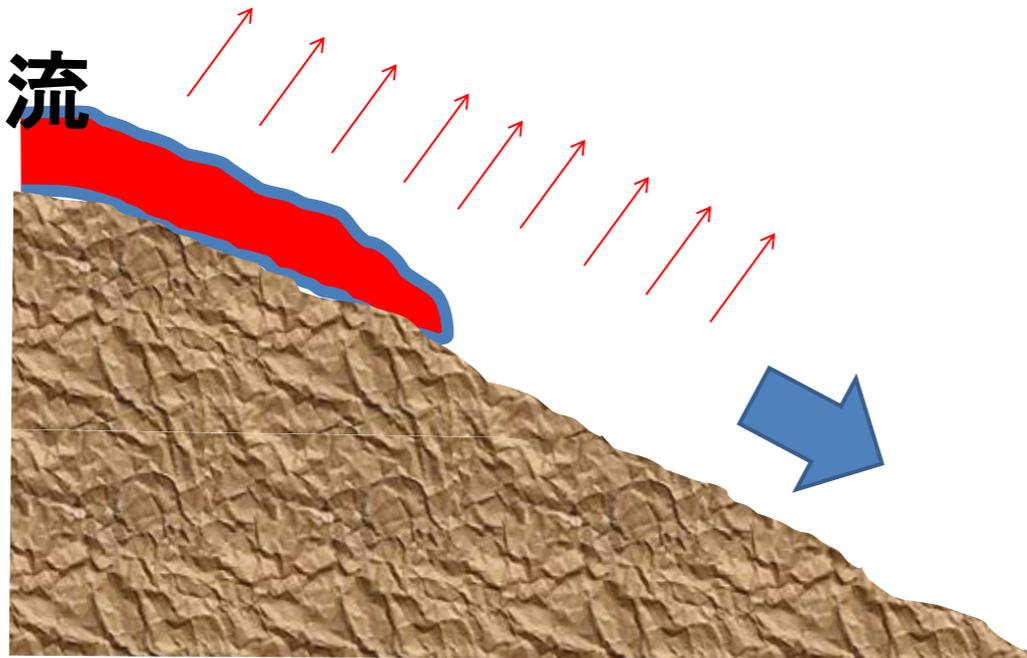
2009年、かぐやによって直径深さ共に約50mの深い縦孔が見つかった
これは地下空洞に隕石衝突等で開いたものと考えられた



地下空洞は月面上に溶岩が流れた後に形成された溶岩チューブと考えられる。

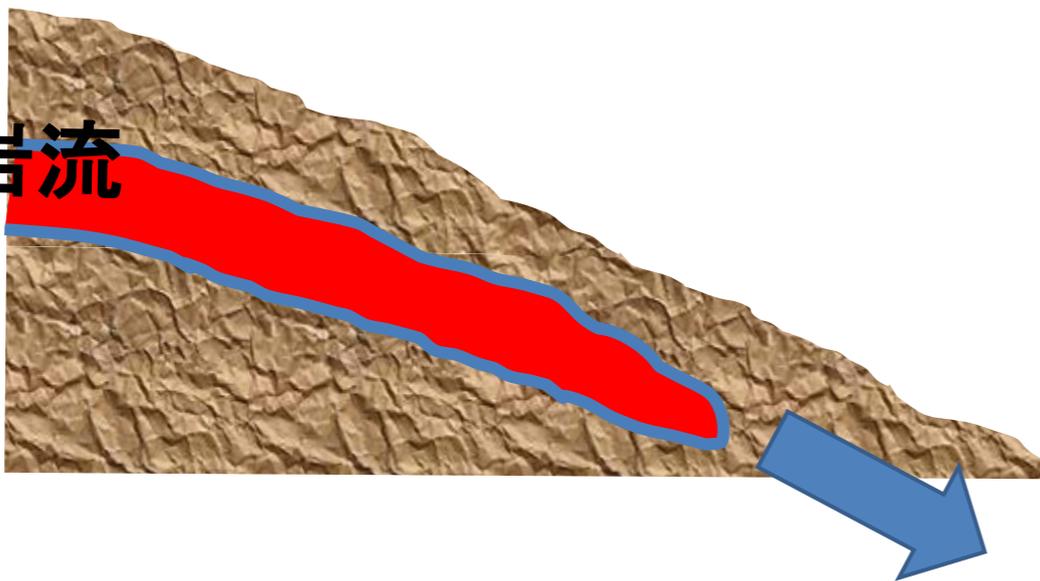
溶岩チューブの成因

溶岩流



溶岩は流れていくうちに、
表面が冷えて固まっていく。

溶岩流



流れやすい溶岩の場合、
表面は固まっても表面下を流れていく。
火山活動が終わると溶岩が抜けきって
空洞(溶岩チューブ)ができる。

富士山の麓に多く見られる地下空洞
(風穴と呼ばれていたりする)は、
ほとんど溶岩チューブである。

背景 月の地下空洞(溶岩チューブ)の特徴

地下空洞は**基地建設地**や**科学探査**に適している

• 天井の存在

地下空洞の中は、放射線、紫外線、隕石衝突などから機器や人が守られ、また定常な温度環境（例えば赤道域で、 -20°C 付近）

• 広大な空間

地球からの類推で、数十mの高さ、数百mの広さの空間

• 月の火山活動の歴史

月の火山活動史の詳細な情報を有している

• 月の固有のガス成分

空洞形成時に溶岩内に水などのガス成分を捕獲している可能性

• 月の固有の磁場

月に固有磁場が生じたか否かの情報を有している可能性

背景 かぐやが発見した直径深さ共に数十mに及ぶ縦孔

月の表

月の裏



マリウス丘の縦孔

静の海の縦孔

賢者の海の縦孔

© JAXA/SELENE

大きな縦孔の数は、限られている

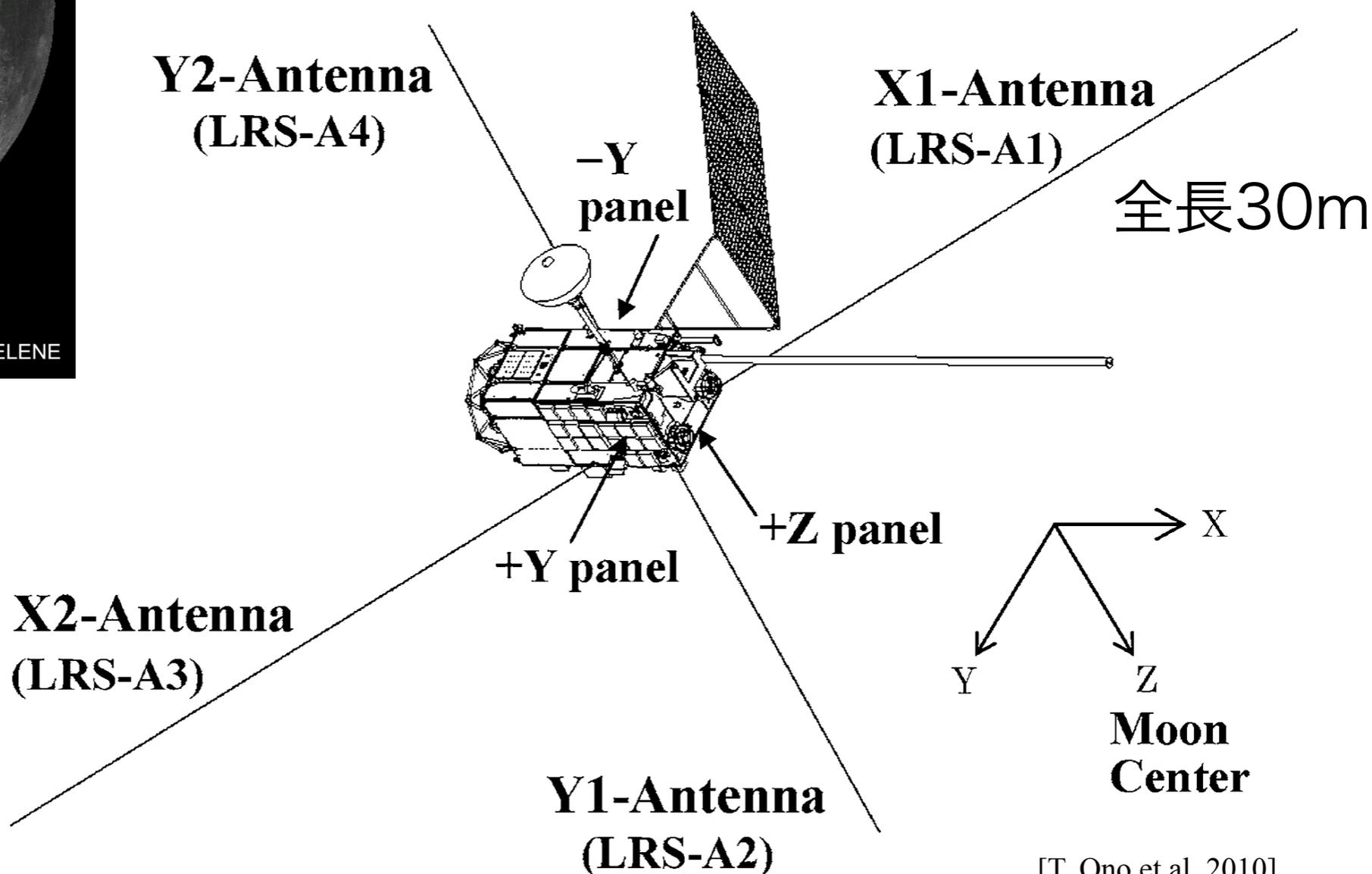
しかし、地下空洞がどれほど広がっているか
分かっていなかった。

本研究

マリウス丘の縦孔近傍を 月レーダサウンダー(LRS)で調査



かぐやに搭載されていたLRSのアンテナ

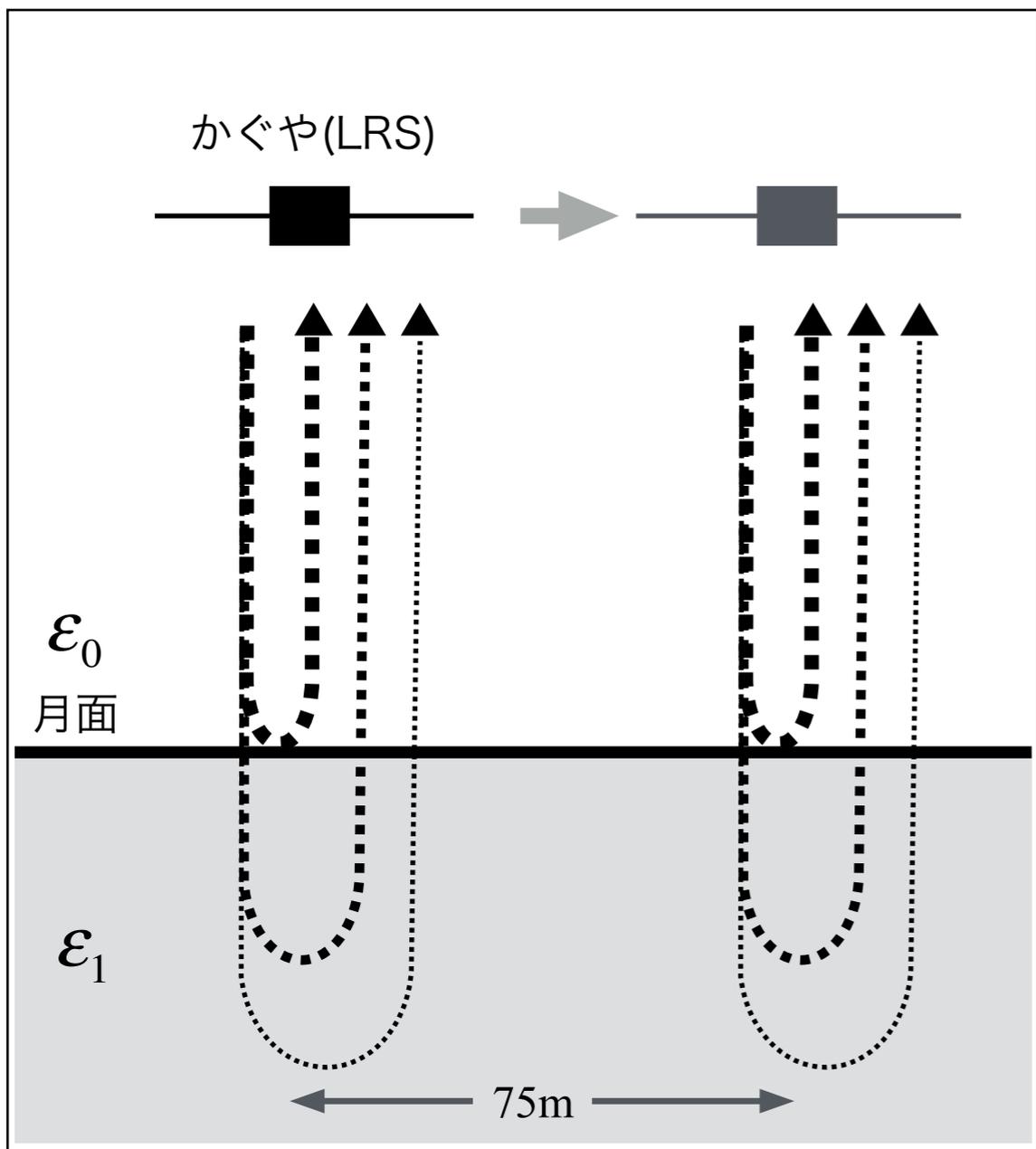


[T. Ono et al, 2010]

本研究

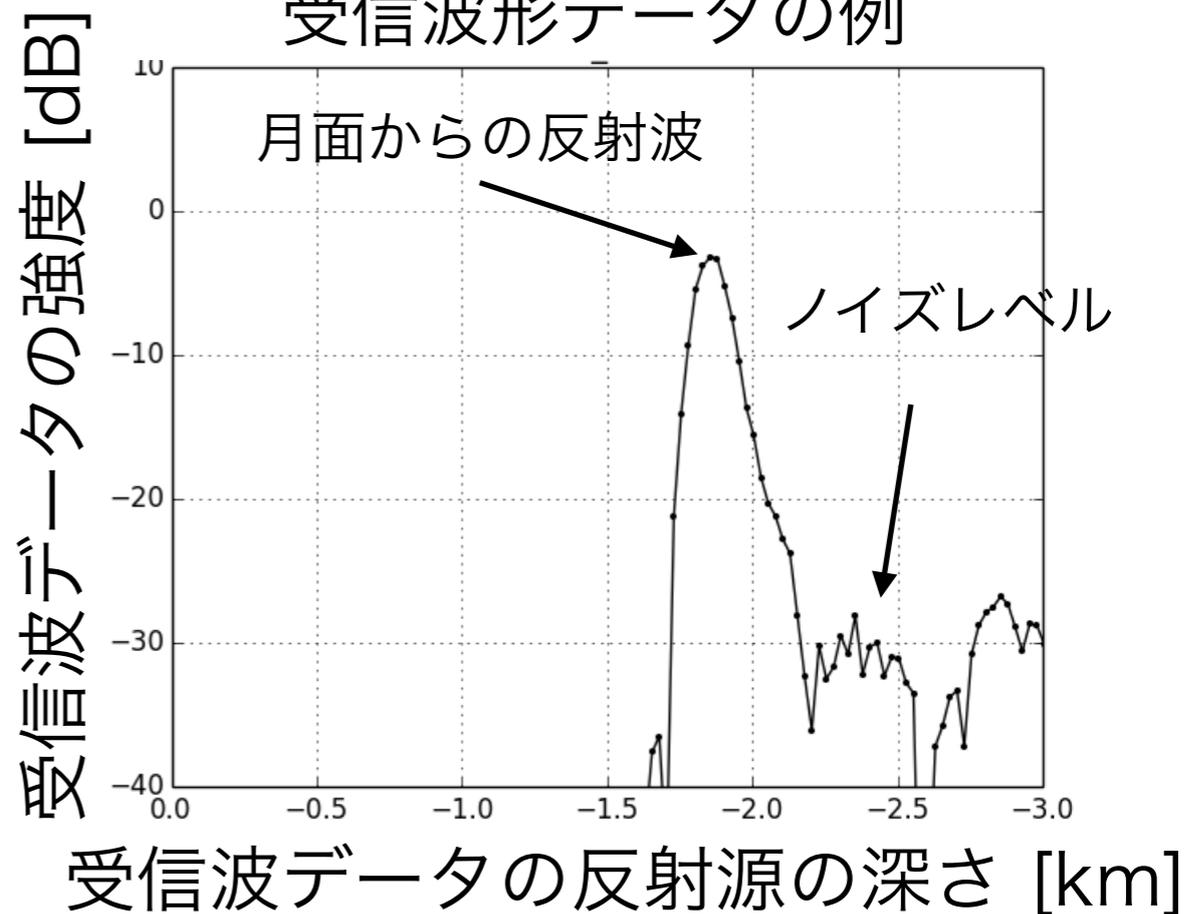
月レーダサウンダー(LRS)とは？

周波数帯 4~6MHz(chirp pulse)
パルス幅 $200\mu s$, パルス間隔20Hz



LRS観測の模式図

一般的な、地下に明確な境界のない
受信波形データの例



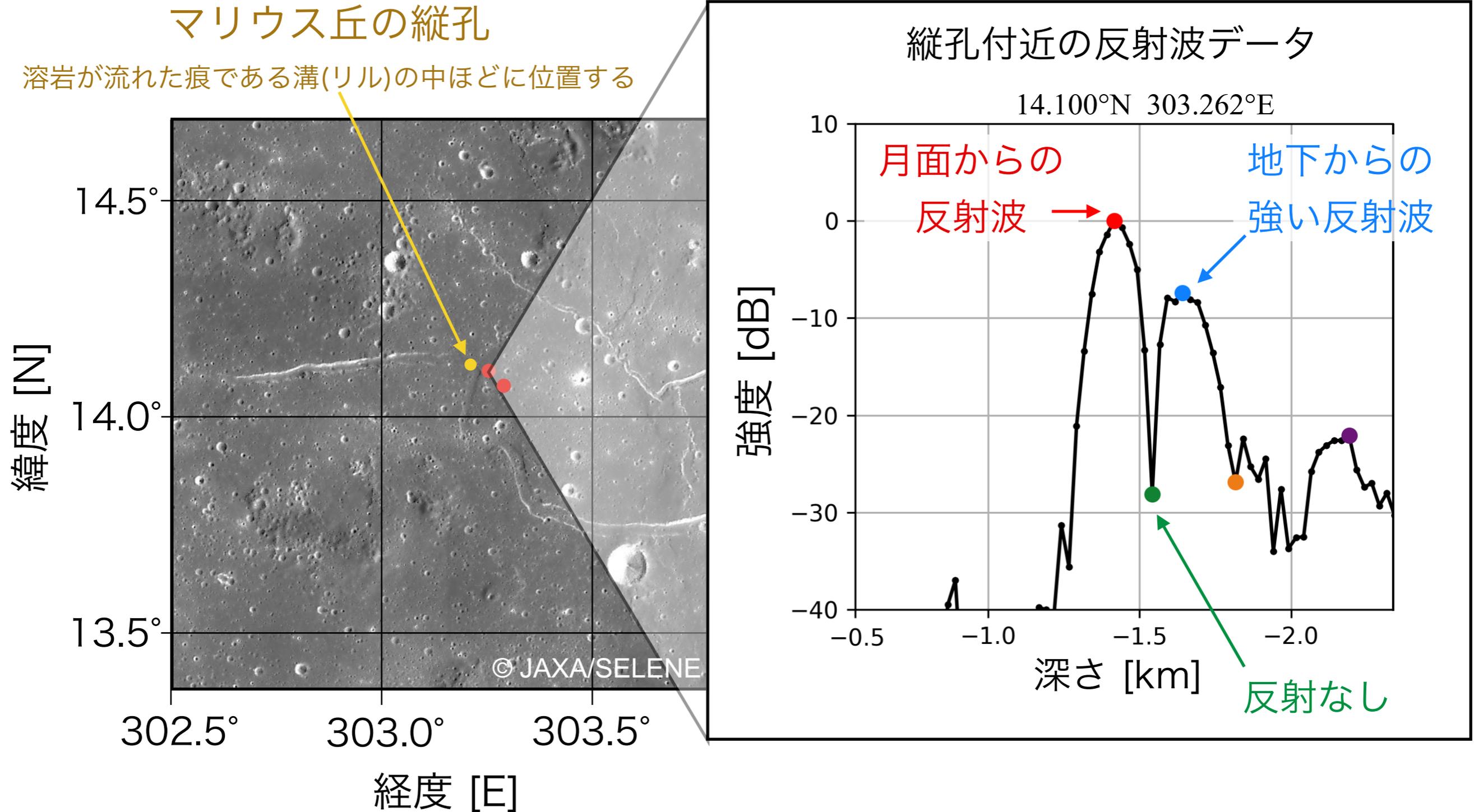
深さ[km] (横軸)

LRSアンテナから送信された電波が、月表面並びに地下において反射した後、LRSアンテナで受信されるまでの時間を、地下の物質誘電率を1と仮定して地下の反射面の深さに換算。したがって、ここでの深さはみかけで、**実際の反射面の深さはここでの深さより浅くなる。**0点は月の平均半径の位置に相当する。

受信波データの強度[dB] (縦軸)

送信波電力と受信波電力の相対的な強度

本研究 マリウス丘の縦孔付近の反射波データに 未崩壊の地下空洞(溶岩チューブ)の傾向を発見



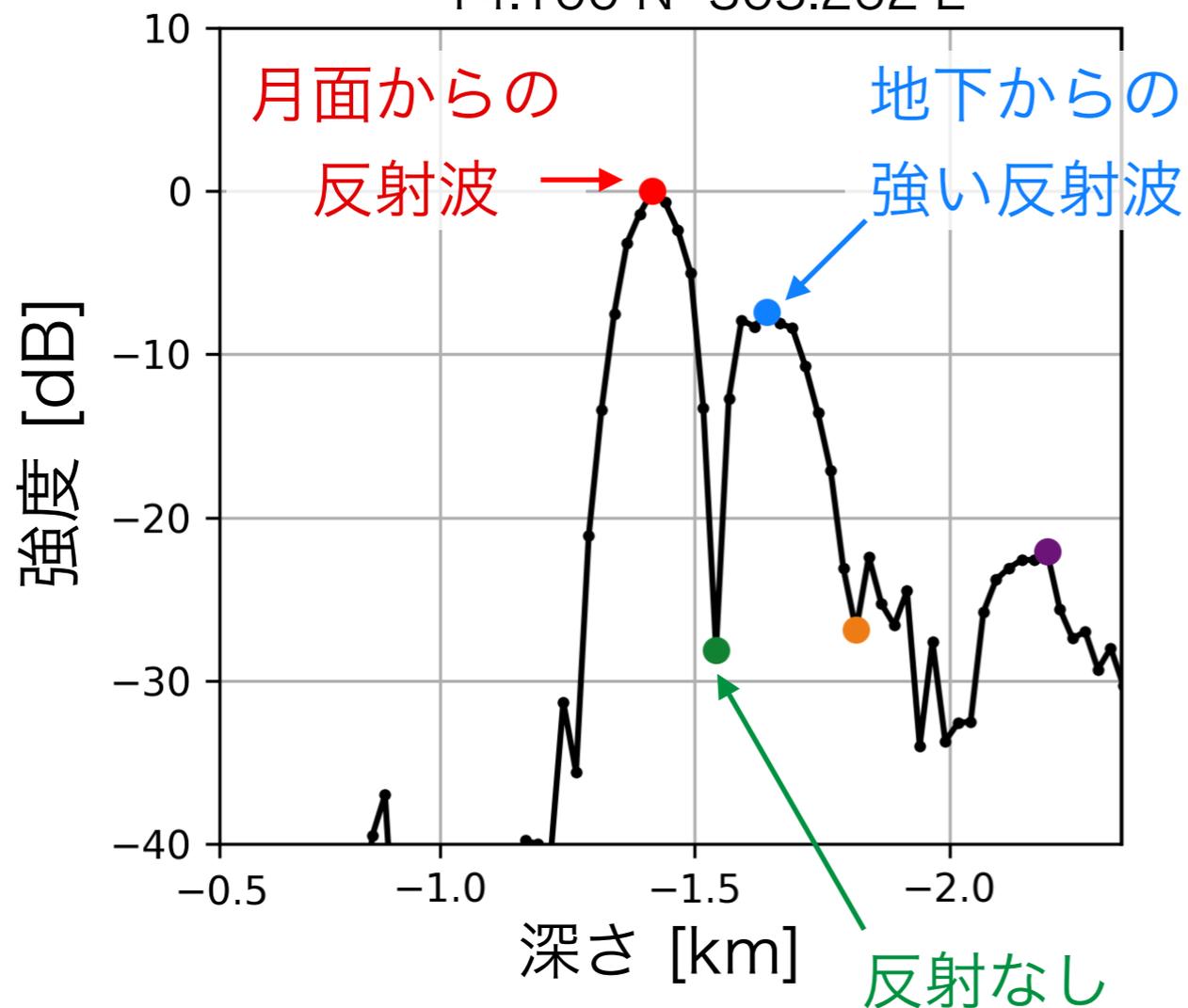
月表面以外に地下から、深さ(みかけ)225mから強い反射波を検知
(右図の「地下からの強い反射波」)

本研究

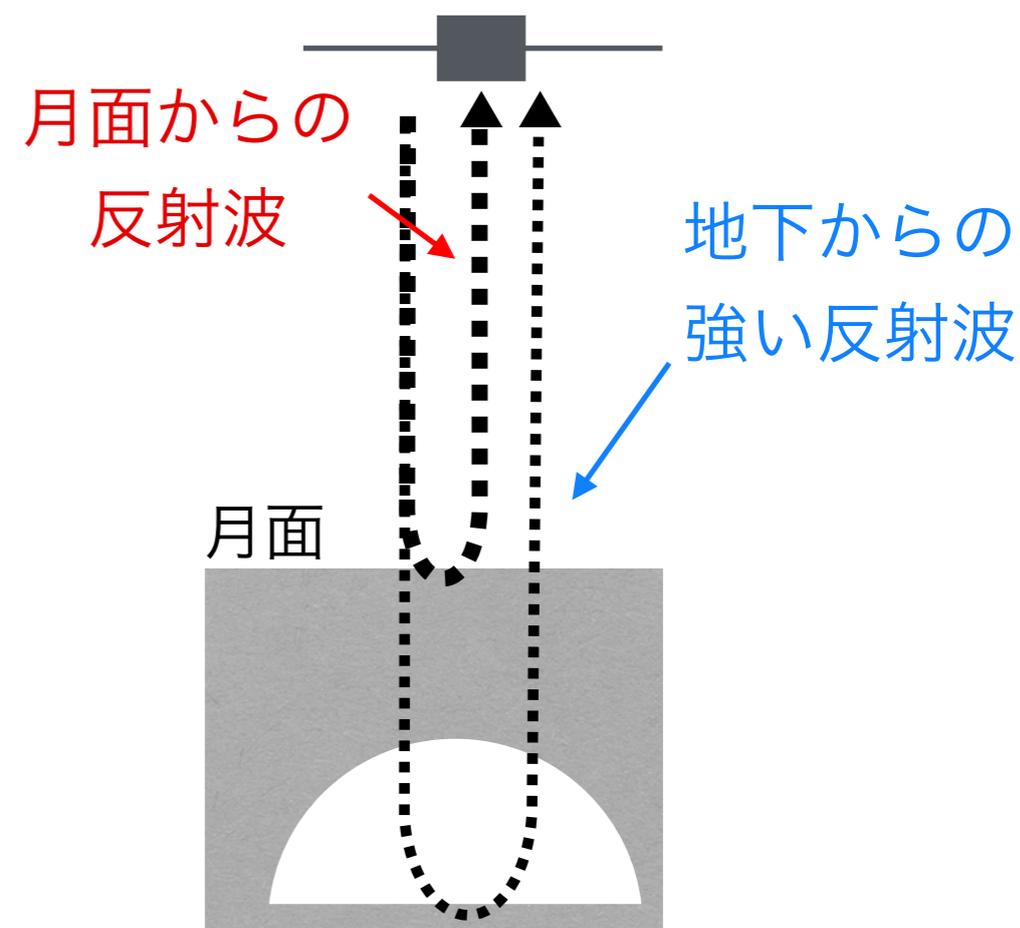
マリウス丘の縦孔付近のLRSデータに 未崩壊の地下空洞(溶岩チューブ)の傾向を発見

縦孔付近のLRSデータ

14.100°N 303.262°E



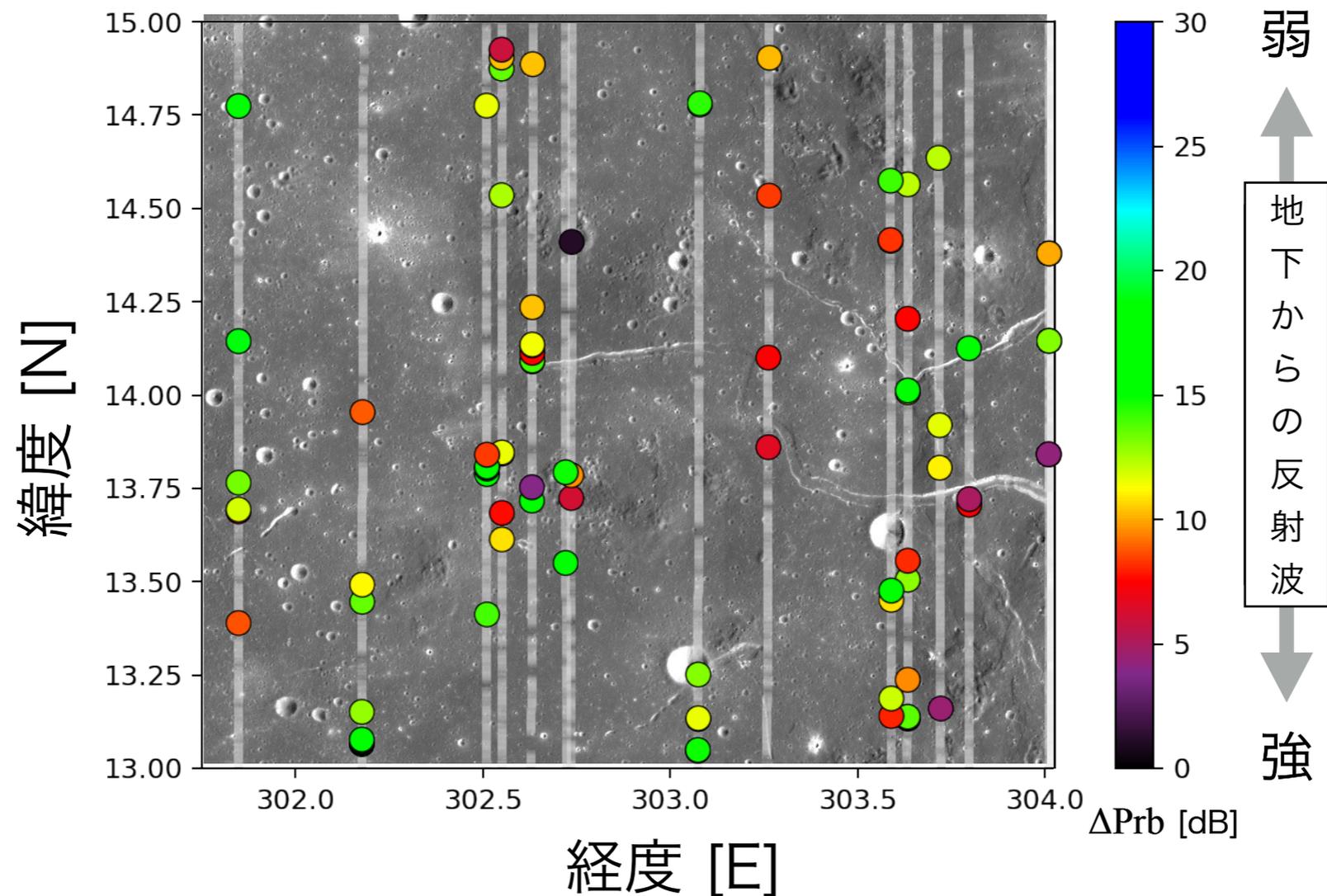
深さ(みかけ)225mから、未崩壊
の地下空洞の天井または平らな
底面からと思われる強い反射波



実際の反射面の深さは、ここでのみかけ深さより浅くなる。

本研究 地下空洞が存在することを示すLRSデータが観測された場所

領域：縦孔周辺(北緯13.00°~15.00°，東経301.85°~ 304.01°)

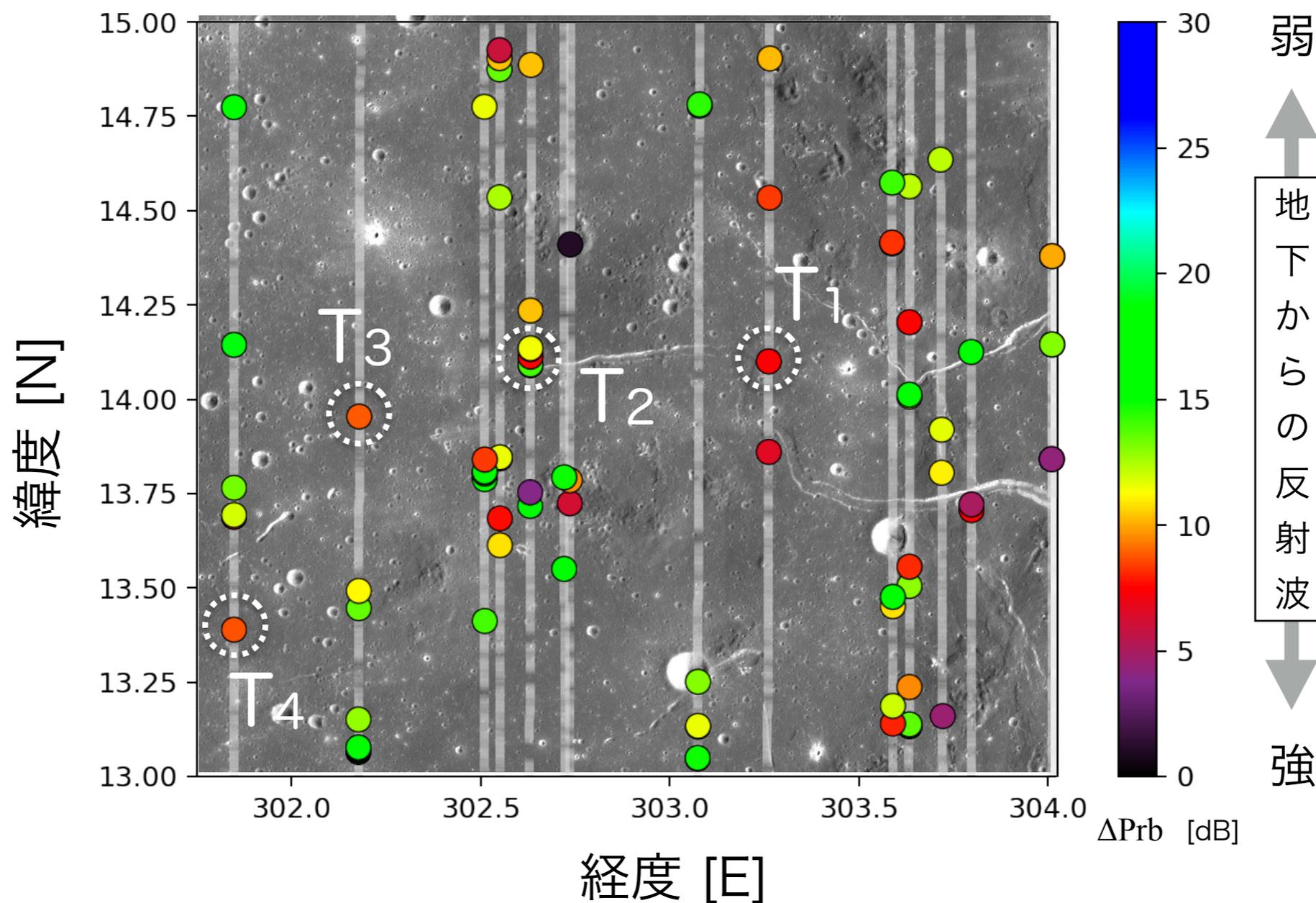


背景は月面画像データ、縦線はLRSの測線を示す。

縦線上の丸印は、地下からの反射波強度が特に強いデータが観測された場所を示し、丸印の色(月面からの反射波と地下からの反射波強度差を表す)が、紫色に近いほど強い反射を生じる面、つまり天井あるいは床をもつ地下空洞が存在している可能性がある

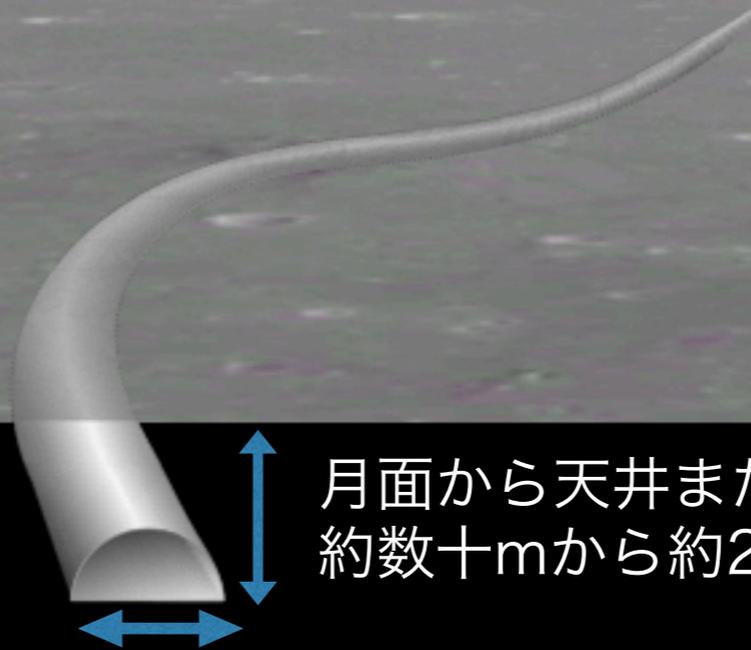
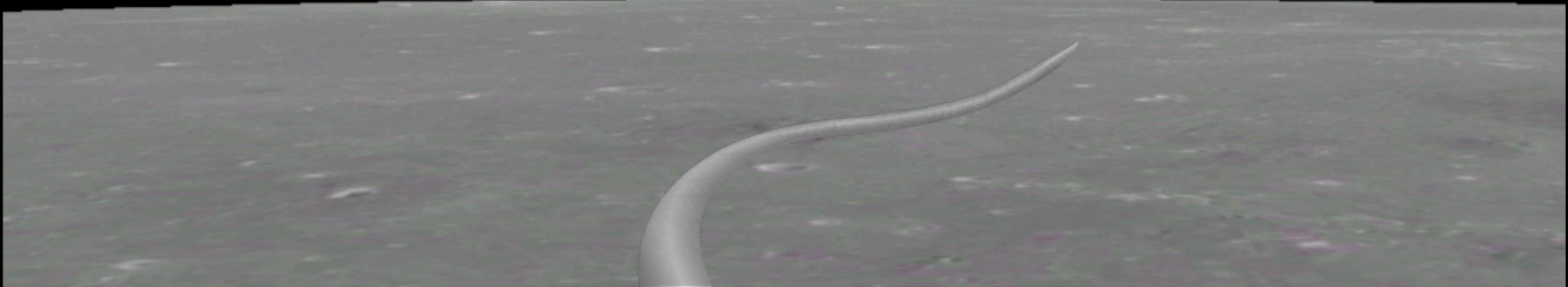
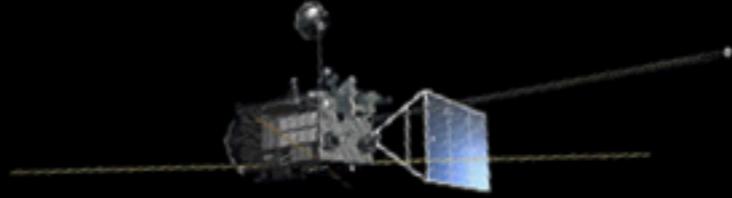
本研究 地下空洞が存在することを示すLRSデータが観測された場所

領域：縦孔周辺(北緯13.00°~15.00°，東経301.85°~ 304.01°)

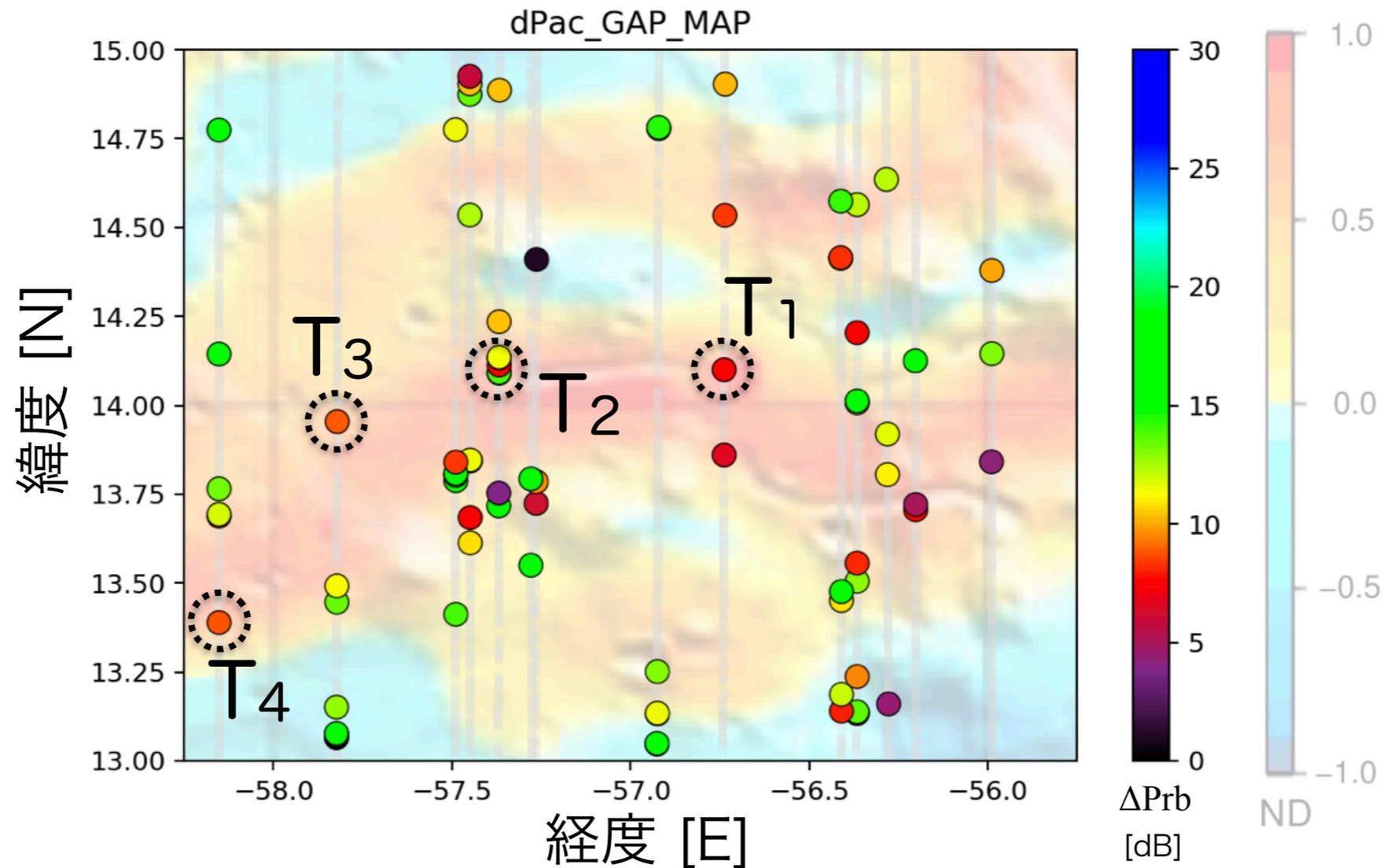


特に縦孔に近接するT₁ならびにその西のT₂~T₄と示した場所は溶岩の流れによって形成されたとされる溝(リル)に沿って位置し、T₁~T₄は地下からの反射波強度がほぼ同じである。

つまり、T₁~T₄に沿って地下に同じ規模の未崩壊の空洞があることが示唆される。



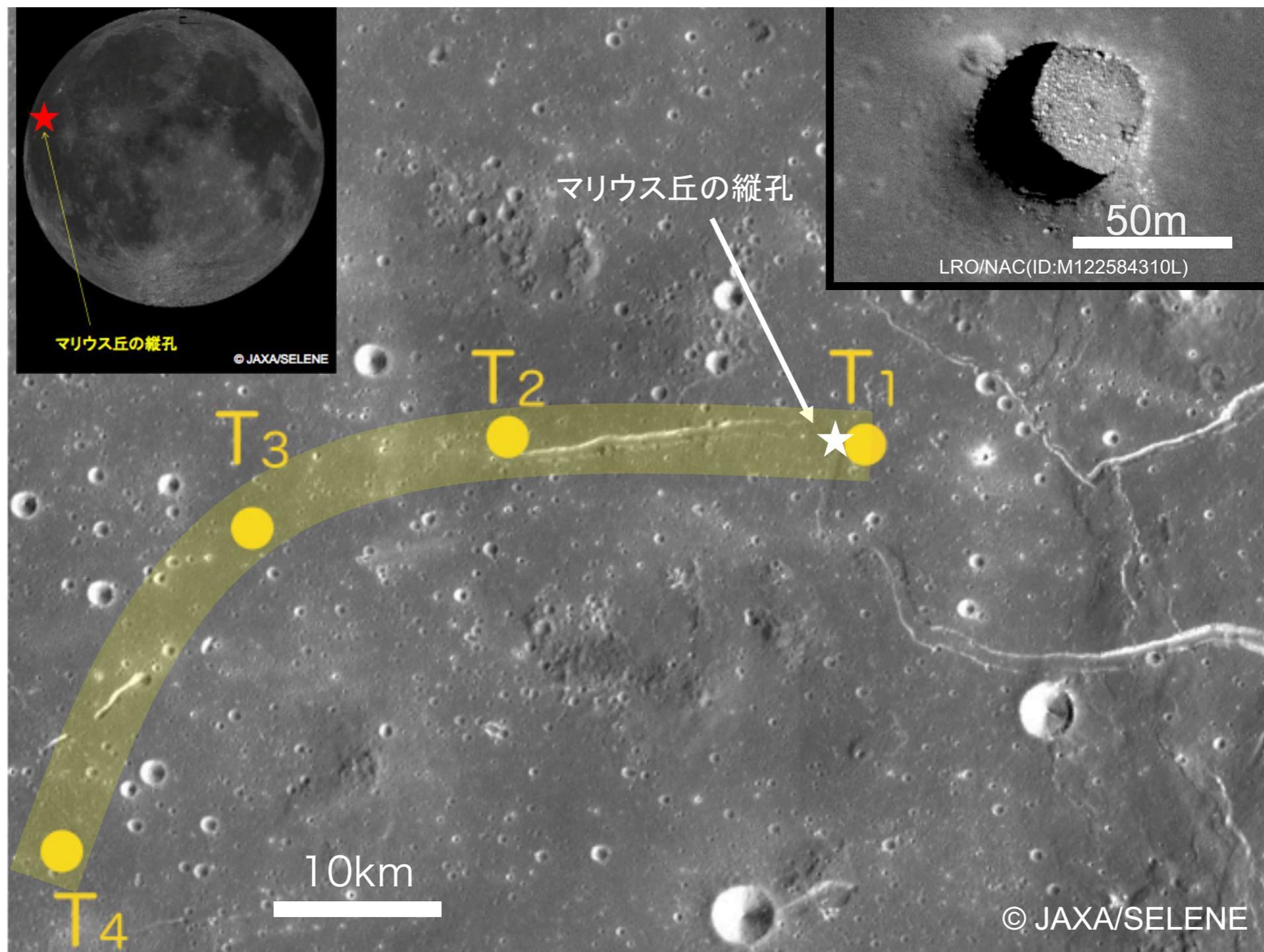
月面から天井または床までの深さは、
約数十mから約200m。



アメリカの探査機グレイルによる重力場データで検出された質量密度の低い領域(薄い赤色で示されている領域; Chappaz. et al, 2017)に T₁~T₄が位置している。

つまり、縦孔を東端として、西に約50km延びる未崩壊の地下空洞(溶岩チューブ)が存在することは、重力場のデータとも一致する。

縦孔から、西に約50km延びる未崩壊の地下空洞(溶岩チューブ)は、
将来の都市レベルの基地を作ることができるほど大きい。



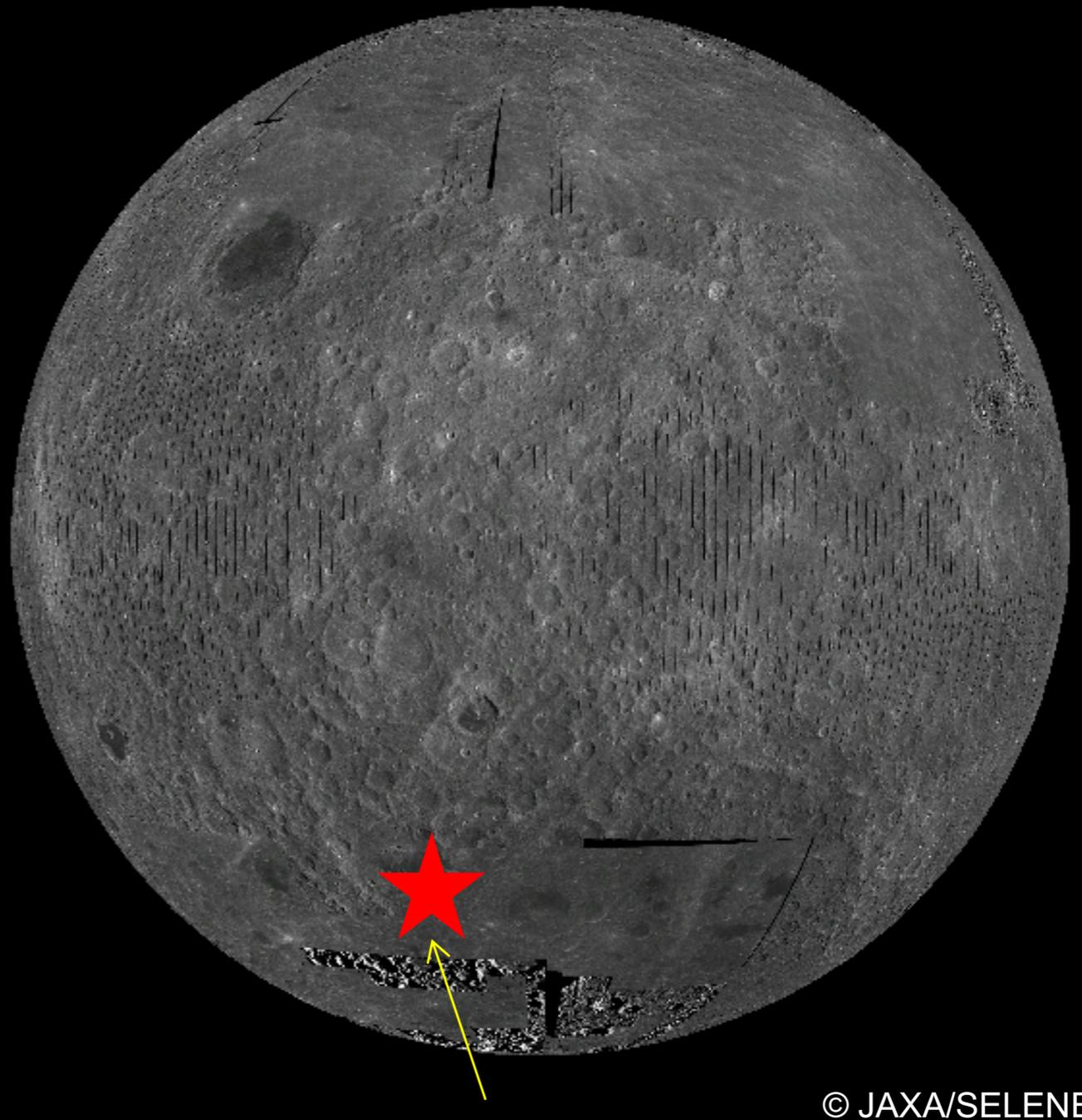
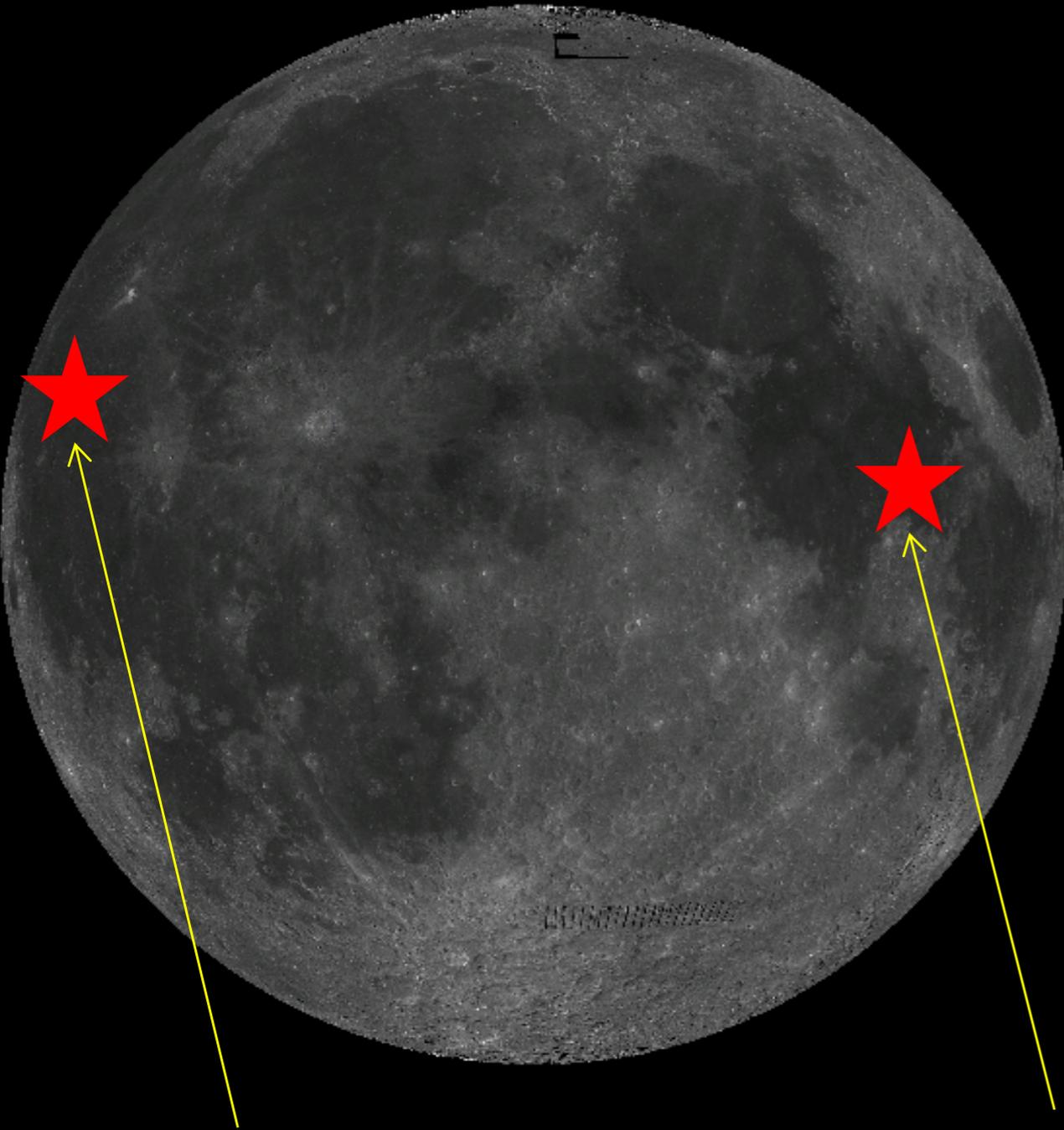
今後の研究計画

- さらに領域を広げて探索し、最終的には**月全球**に渡って探索を行う
- **月表面の物質や地形**、さらには**磁場**などの、かぐやを始めとする最新の月探査データ情報を参考に地下空洞の存在や成因などの研究を進める。

かぐやが発見した直径深さ共に数十mに及ぶ縦孔

月の表

月の裏



© JAXA/SELENE

マリウス丘の縦孔

静の海の縦孔

賢者の海の縦孔

大きな縦孔の数は、限られている

まとめ

- 月に地下空洞(溶岩チューブ)が存在すれば、人類の活動拡大の面からも、また科学的な研究面からも重要である。
- しかし、これまで月の地下空洞の存在は確認されていなかった。
- 本研究では、縦孔が発見されているマリウス丘で、かぐや搭載月レーダサウンダーのデータを用いて地下空洞の探索を行い、縦孔から西方に約50kmに渡って延びている未崩壊の地下空洞の特徴を発見した。これは、重力場データとも整合。
- 縦孔は、こうした地下空洞への入り口の可能性があるが、縦孔の数は非常に少なく、科学的探査や基地を作ることのできる地下空洞は希少かもしれない。
- 本研究による月の地下空洞の発見によって月への人類進出や科学的な知見の集積がより進むことが期待される。