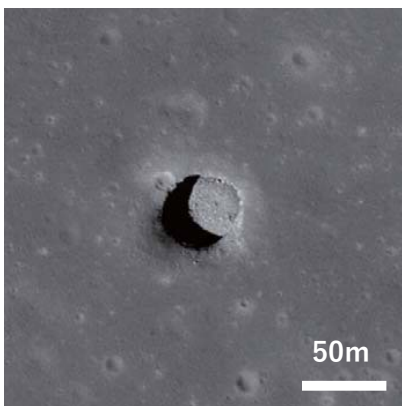
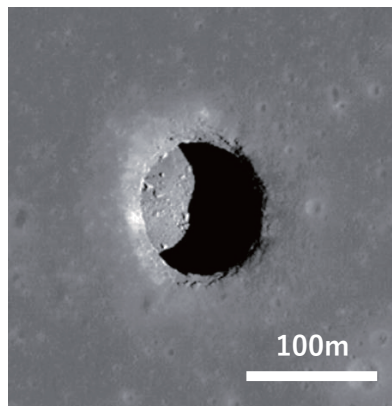


月の縦孔と地下空洞

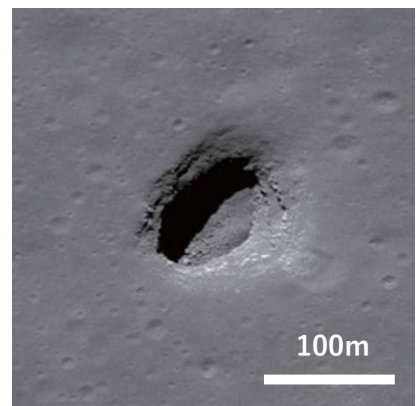
月の海領域に**地下空洞へとつながる大きな縦孔**が3つ発見されている。
 LROの斜め撮像から**地下空洞が数十m程度奥に続いている**ことがわかっている。
 →しかし、**月の地下空洞の水平方向への広がり**はわからない



マリウス丘の縦孔



静かの海の縦孔



賢者の海の縦孔

@NASA/LRO-NAC

地下空洞の重要性

月の地下空洞の水平分布



月利用	月の科学
<ul style="list-style-type: none"> ✓ 基地建設の候補地選定 ✓ 空洞内の基地の規模 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 縦孔や地下空洞の形成過程 ✓ 噴出したマグマの物性の推定 ✓ マグマ内の揮発性物質の有無

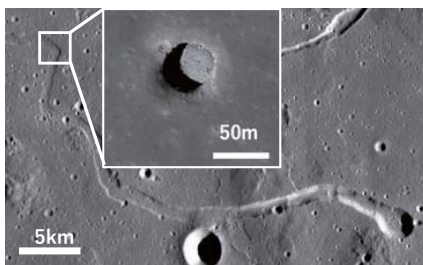


衛星レーダーデータを用いて月の地下空洞を検出し、その地下空洞の形成過程について考察する。

月の縦孔・地下空洞の形成過程

マリウス丘の縦孔

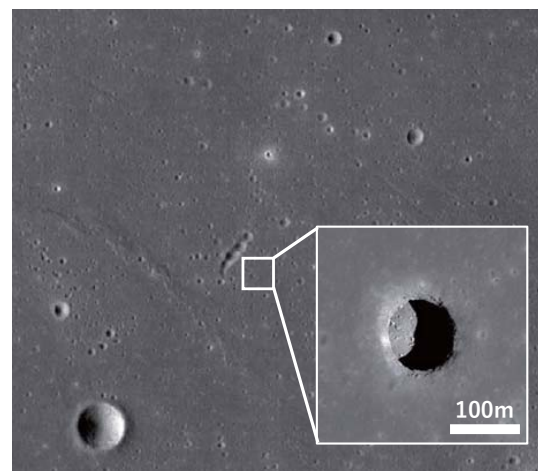
- リル内を流れる溶岩による溶岩チューブの形成
- 隕石衝突による縦孔の形成



© Google Earth

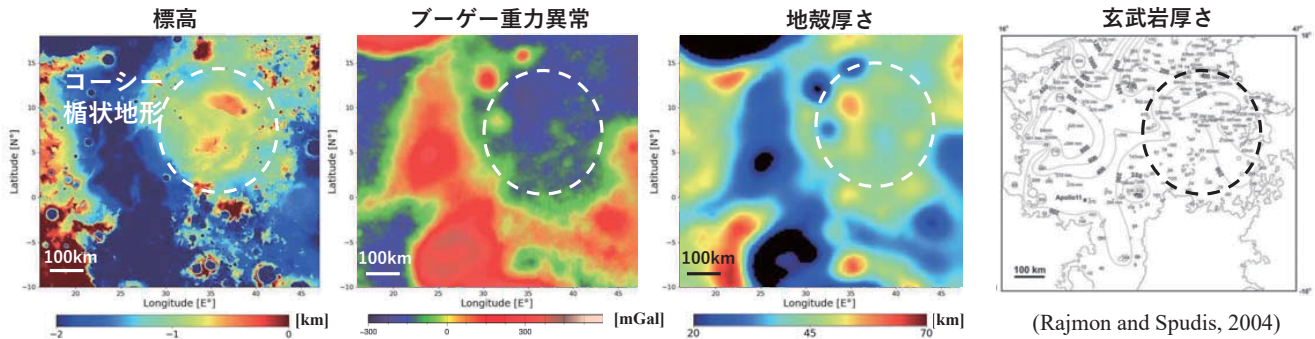
静かの海の縦孔

- リルが存在せず、孤立的な縦孔
- 縦孔・地下空洞の形成要因はわからない



5/14

静かの海東部のコーシー楕状地形



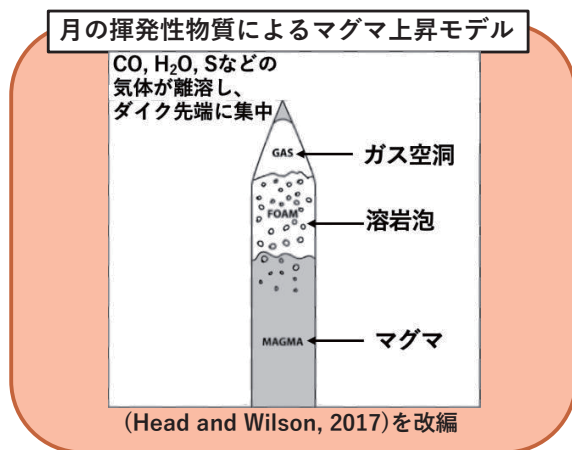
- 楕状の高まりがある
- マスコンが存在しない
- 地殻が他の衝突盆地に比べて厚い
- 玄武岩層が他の衝突盆地に比べて薄い

静かの海のコーシー楕状地形

一般的な衝突盆地とはマグマの噴出過程が異なる特殊な領域???

6/14

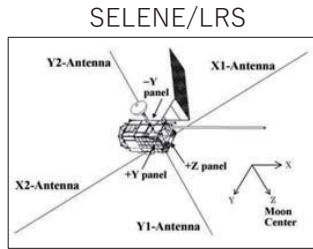
地下ガス空洞



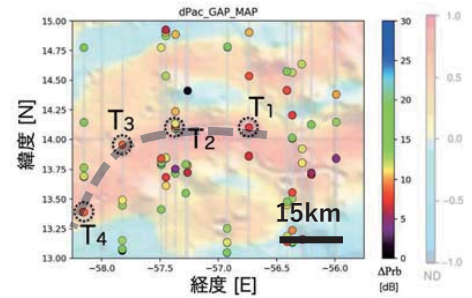
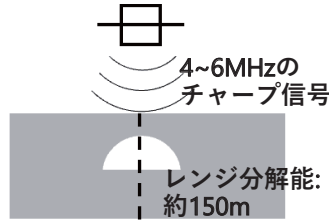
✓ 月マントルが揮発性物質に富むと、マグマが上昇する途中で揮発性物質が発泡し、ダイク先端にガス空洞が形成される。

地下ガス空洞を検出することができれば、月のマントル内の揮発性物質の観測的証拠となる。

月レーダーサウンダ(LRS)による地下空洞検出



(Kumamoto+, 2008)

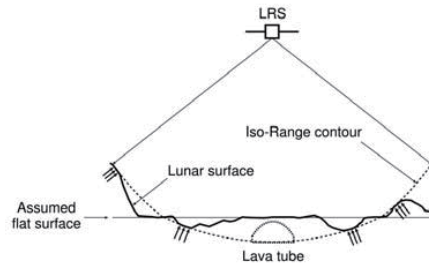


(Kaku+, 2017)

ココが、問題点!!

側方地形と地下エコーを誤認する可能性

地表面散乱の効果を除去した上で、未発見の地下エコーを発見したい!!



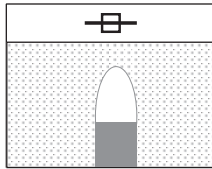
(Kobayashi+, 2020)

本研究の目的

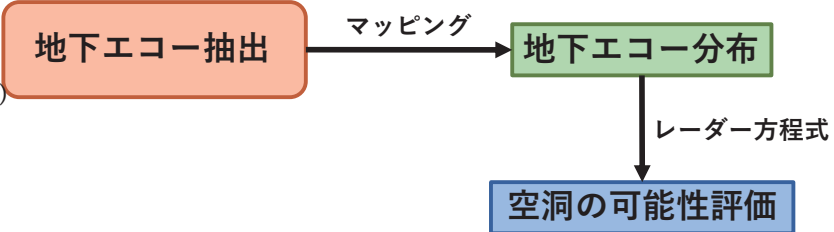
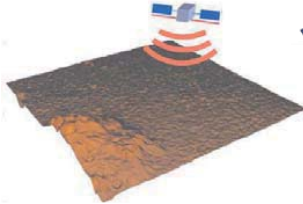
Q. 静かの海の地下に空洞が存在するか?
 → 静かの海での空洞形成過程と揮発性物質関与の可能性を議論する

[解析の流れ]

LRS観測データ(地表面+地下)

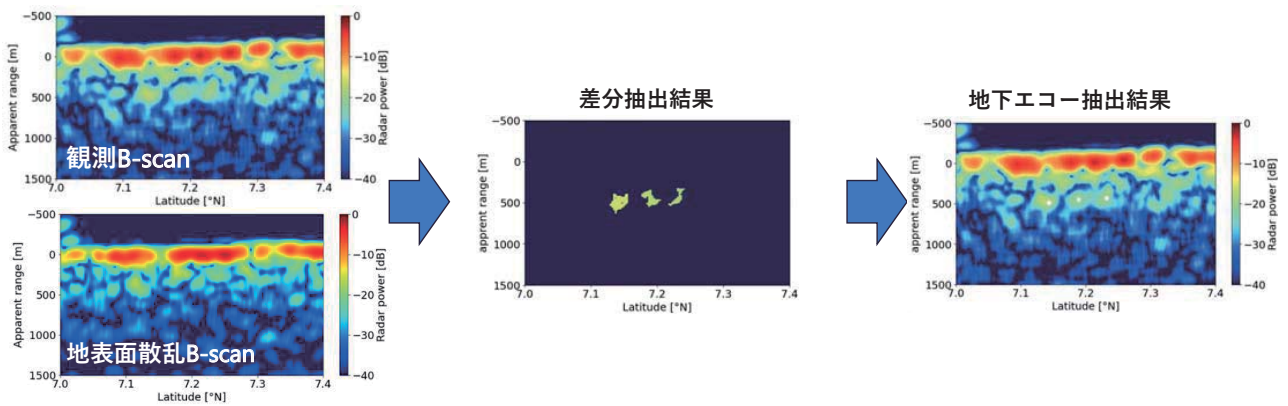


地表面散乱シミュレーション
 (地表面の情報のみ) (Nozawa+, 2022)



9/14

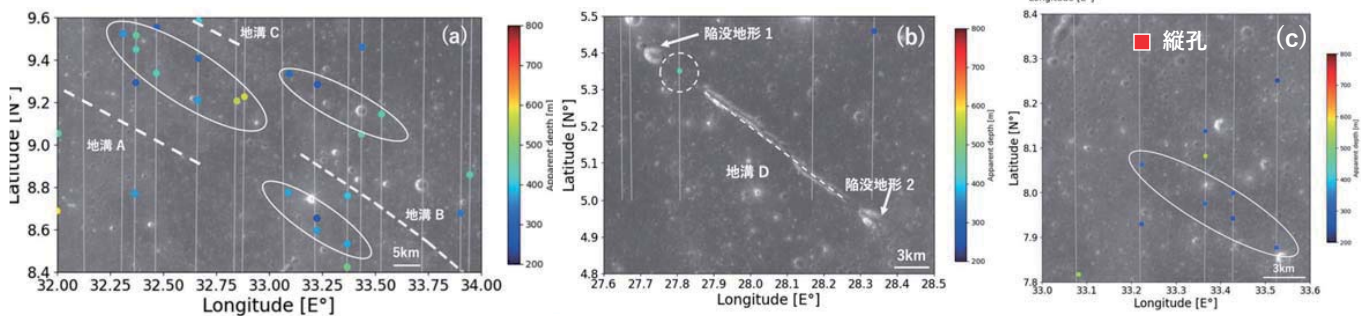
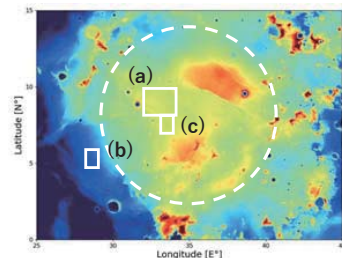
地下エコー抽出手順



- (1) 観測B-scanと地表面散乱B-scanの差分を計算
- (2) 観測B-scanでエコー強度が-25dB以上、かつ、(1)の差分値が+10dB以上となるエコーを抽出
- (3) (2)で抽出したエコーのうち、横幅が600m以上、厚さが300m以上のものを抽出
- (4) (3)で抽出したエコーを観測B-scanにプロット

地下エコー抽出結果

10/14



- ✓ 地溝(点線)の延長線上に地下エコー(丸)が連続的に存在(左図)
- ✓ 陥没地形と地溝の領域に地下エコーが存在(中図)
- ✓ 縦孔の近くに複数測線に渡って連続的に地下エコーが存在(右図)

レーダー方程式による反射強度解析

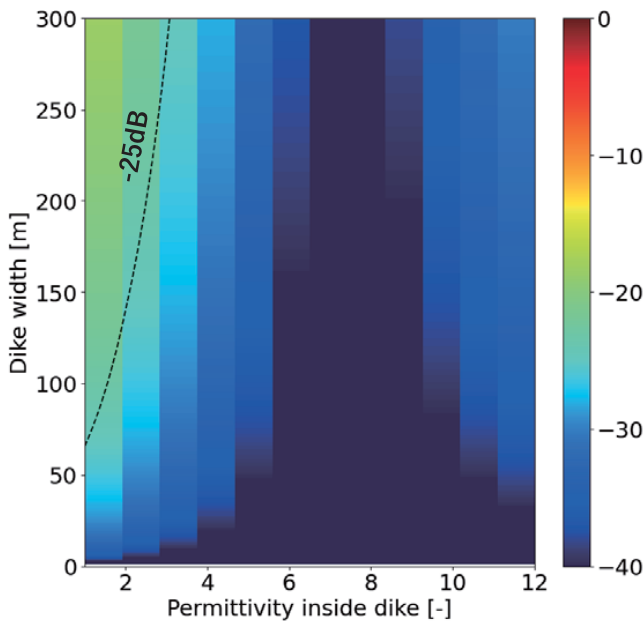
$$I = 10 \log_{10} \left(\frac{R_{sub}^2}{R_{sur}^2} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{W_{sub}}{W_{sur}} \right) - 2\alpha D$$

ダイク-母岩境界の反射係数に起因する項
ダイクの大きさに起因する項
母岩通過時の減衰項

ダイク先端の比誘電率: $\epsilon_2 = 1 \sim 12$
ダイク幅: $w_{sub} = 1 \sim 300$ m
 母岩の比誘電率: $\epsilon_1 = 7.4$
 (Fe=20 wt%, TiO₂=8.8 wt%, 空隙率=10%)
 ((Huang and Wieczorek, 2012), (Carrier et al., 1991) の計算式を使用)
 天井厚さ: $D = 500 / \sqrt{\epsilon_1} = 183$ m
 減衰率: 3.6×10^{-2} dB/m ((Pommerol+, 2009) の計算式を使用)

ダイク幅(w_{sub})とダイク内の物質の比誘電率(ϵ_2)を変化させて、ダイク先端からの反射強度を調査する。
 →観測データから抽出した地下エコーの強度(-25dB)を説明可能な地下構造モデルを推定する。

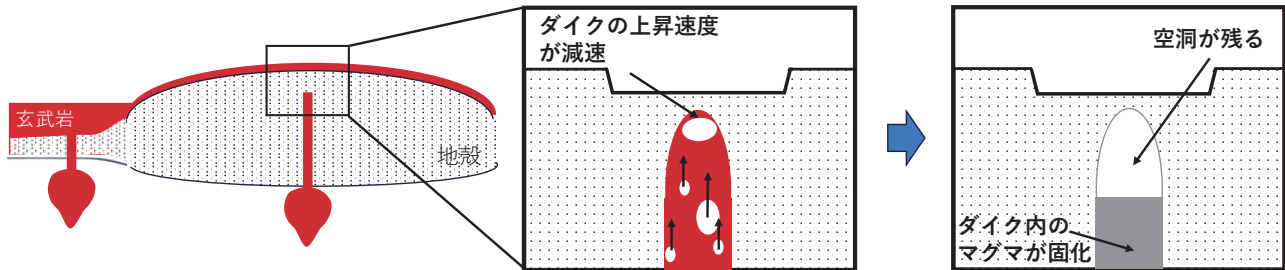
地下反射強度解析結果



- ✓ダイク内の比誘電率が1~3、ダイク幅が70~300mの範囲であれば、-25dBのエコー強度を説明できる。
 - ✓ダイクが比誘電率4以上のマグマで満たされている場合は、ダイク幅にかかわらず、-25dB以上とはならない。
- 地下空洞もしくは空隙率の高い溶岩泡のような物質で埋められていると考えるとエコー強度を説明できる

考察

地溝を形成した地下貫入ダイクの先端に空洞もしくは空隙率の高い(誘電率の低い)物質が存在



静かの海でのマグマ上昇及び地下空洞形成のシナリオ

- ① 揮発性物質の発泡による密度低下により、コーシー楕状地形下の厚い地殻内をダイクが上昇
- ② ダイクが表層に達すると、表面とダイク先端の間の圧縮応力により地溝が形成する。
- ③ 上昇したダイクは上部のより低密度な層で上昇速度が低下し、①で発生した気体がダイク先端に集中する。
- ④ 火成活動の衰退に伴い、内部のマグマは冷え固まり、ガス空洞だけが保存される。

まとめ

結果

- ✓ 他の衝突盆地に比べて、斜長岩地殻が厚い静かの海のコーシー楕状地形の下に、地溝に沿った反射強度が-25dB以上の地下エコーを発見した
- ✓ 発見された地下エコー強度は、ダイクの先端に空洞構造もしくは高い空隙率をもつ物質の存在を仮定することで説明できる

結論

- 静かの海は斜長岩地殻が厚いため、マグマが浮力のみでは上昇できず、揮発性物質の発泡により上昇した可能性がある。
- 地溝に沿った地下エコーは、地溝を形成した貫入ダイクの先端に揮発性物質が集中したガス空洞もしくは溶岩泡からの反射であると考えられる。

今後の展望

- ◆ LRS全球解析を行い、地下のガス空洞の全球マップを作成することで、月内部の揮発性物質の分布を調査する。