

深層学習を用いたクレーター形態分類による 火星地下氷圏への示唆

A Study of Martian Cryosphere Based on Morphological Classification of Rampart Crater
Using Deep Learning Approach

ARC-Spaceシンポジウム 2025
12/19/2025

杉本佳祈^{1, 2}, 出村裕英³, 臼井寛裕²

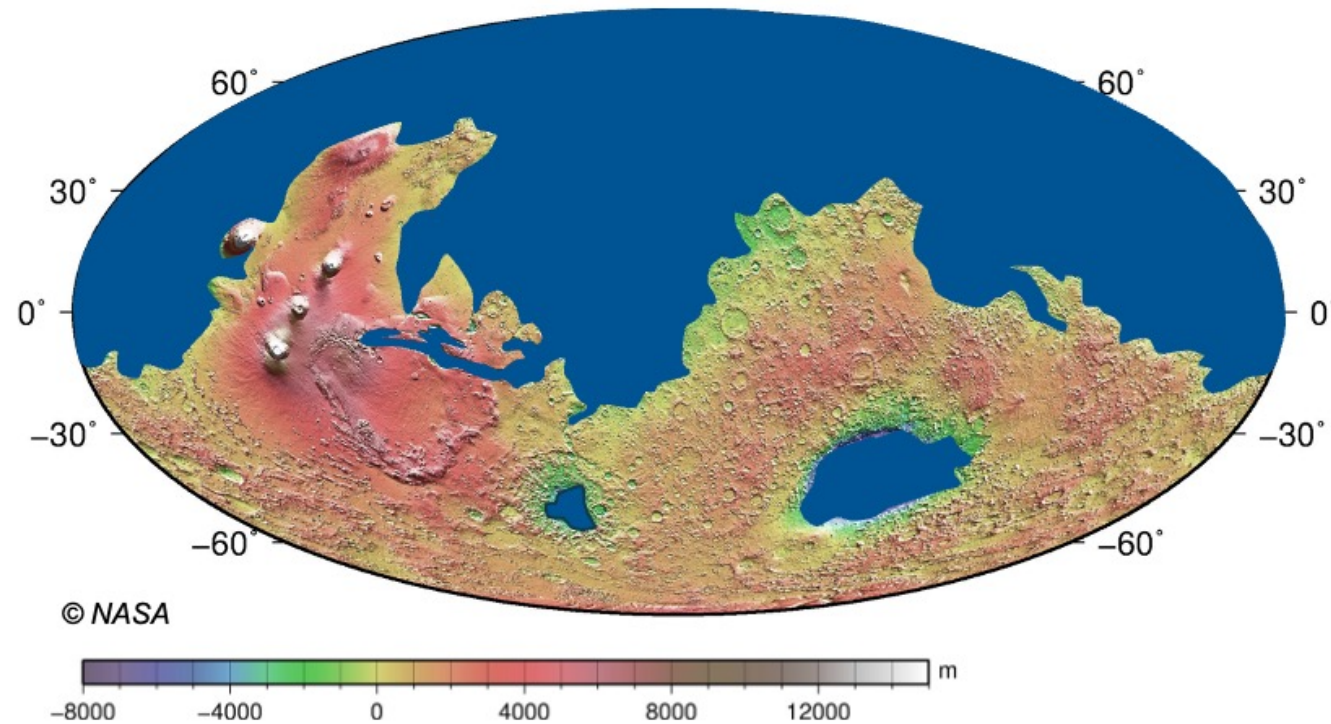
¹東京大学 理学系研究科地球惑星科学専攻

²JAXA 宇宙科学研究所

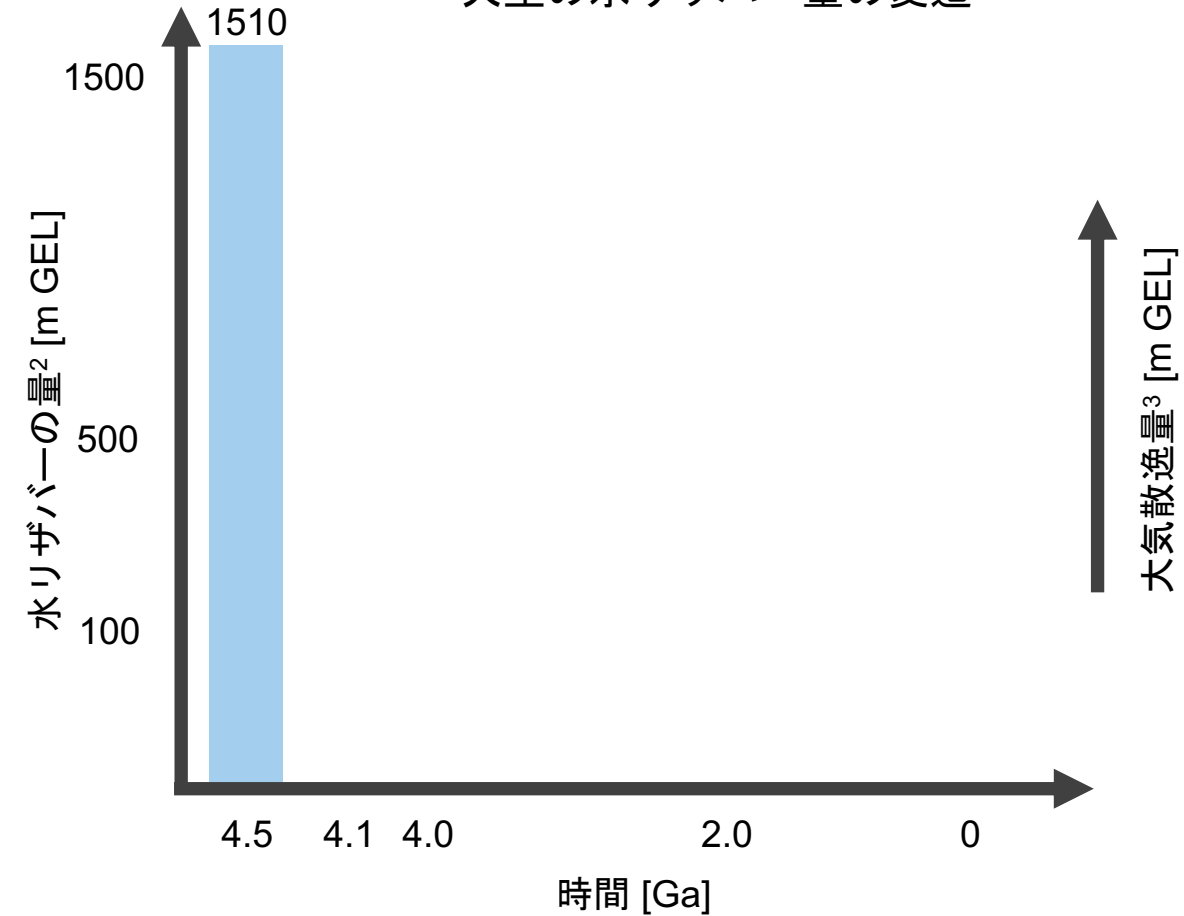
³会津大学

地下氷が火星の隠れた水リザーバーとして重要な役割を果たす

～40億年前の火星の表層水¹



火星の水リザーバー量の変遷



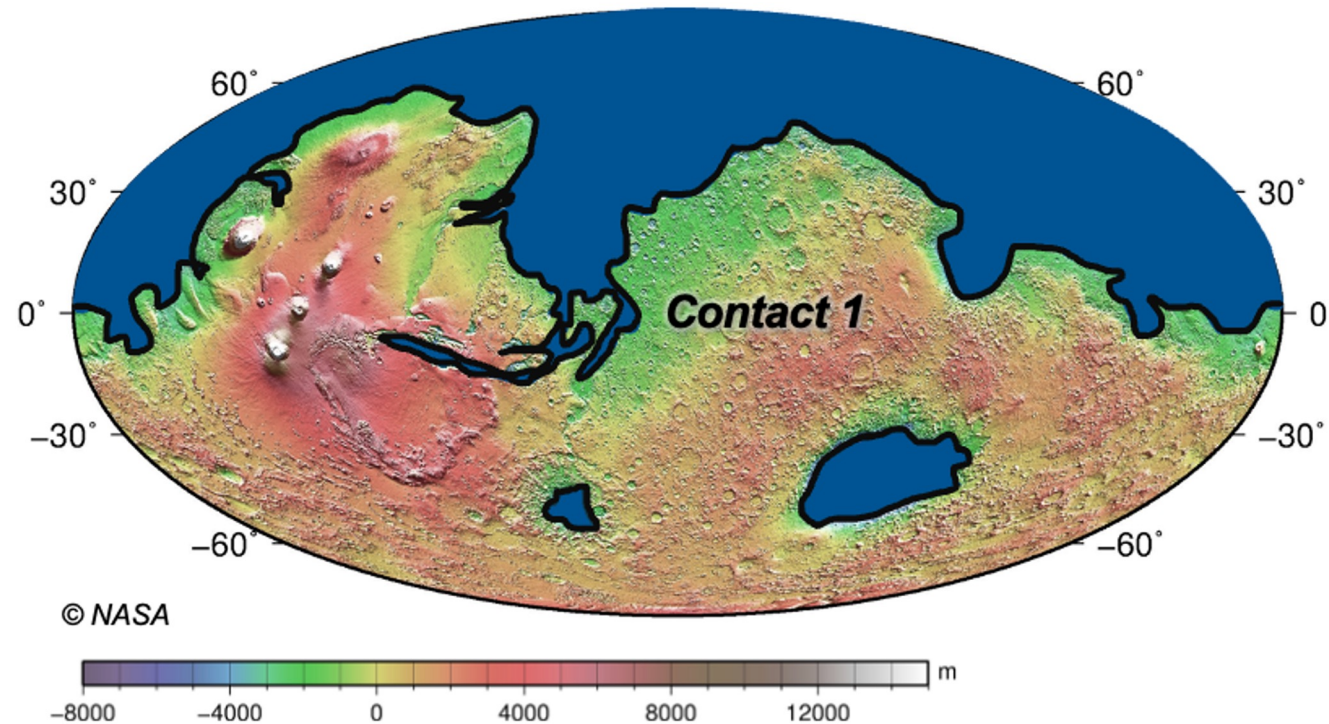
GEL: 全球等価層 (全球を均等に覆った時の水の厚さ)

[1] Clifford and Parker, (2001), [2] Carr and Head, (2003), [3] Kurokawa et al., (2014)

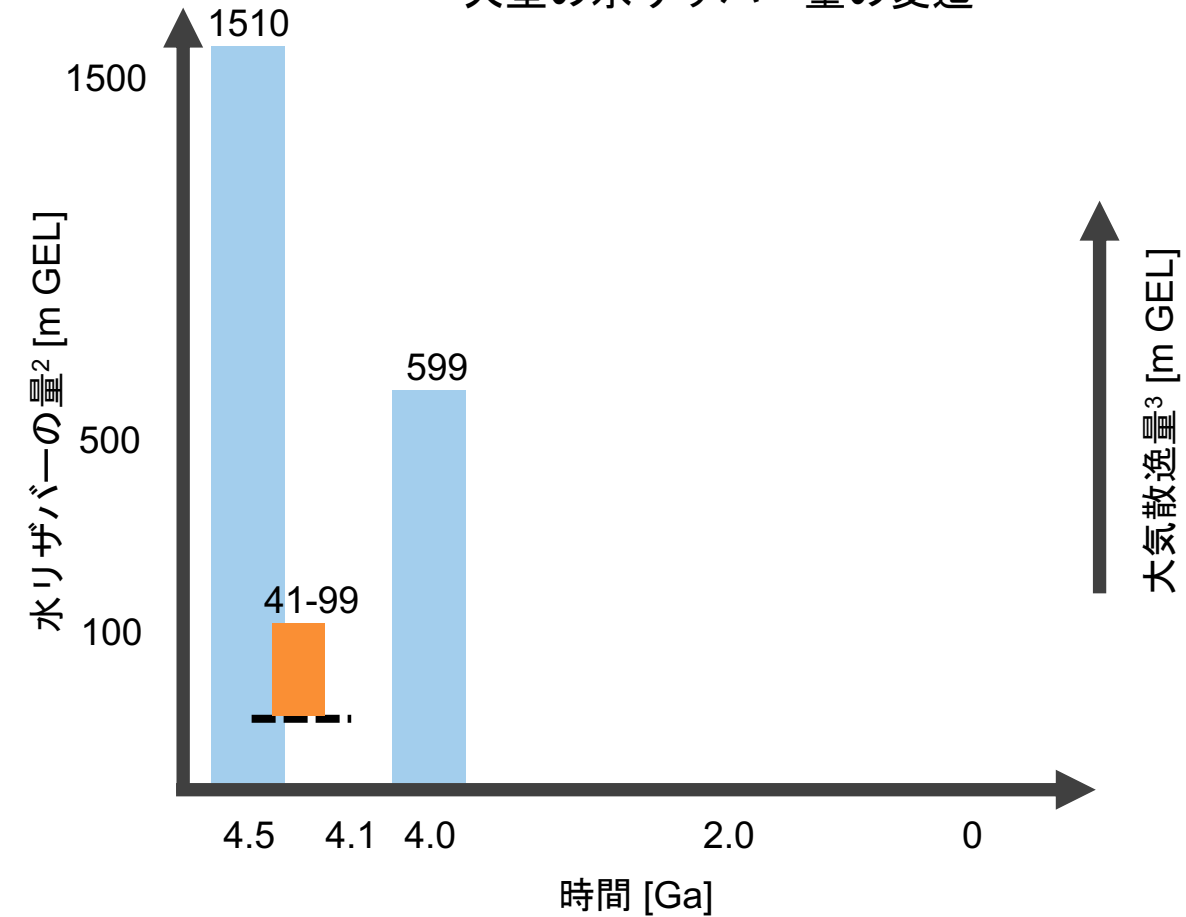
[3] Zuber et al., 1998 [4] Smith et al., 1999

地下氷が火星の隠れた水リザーバーとして重要な役割を果たす

約40億年前の火星の表層水¹



火星の水リザーバー量の変遷



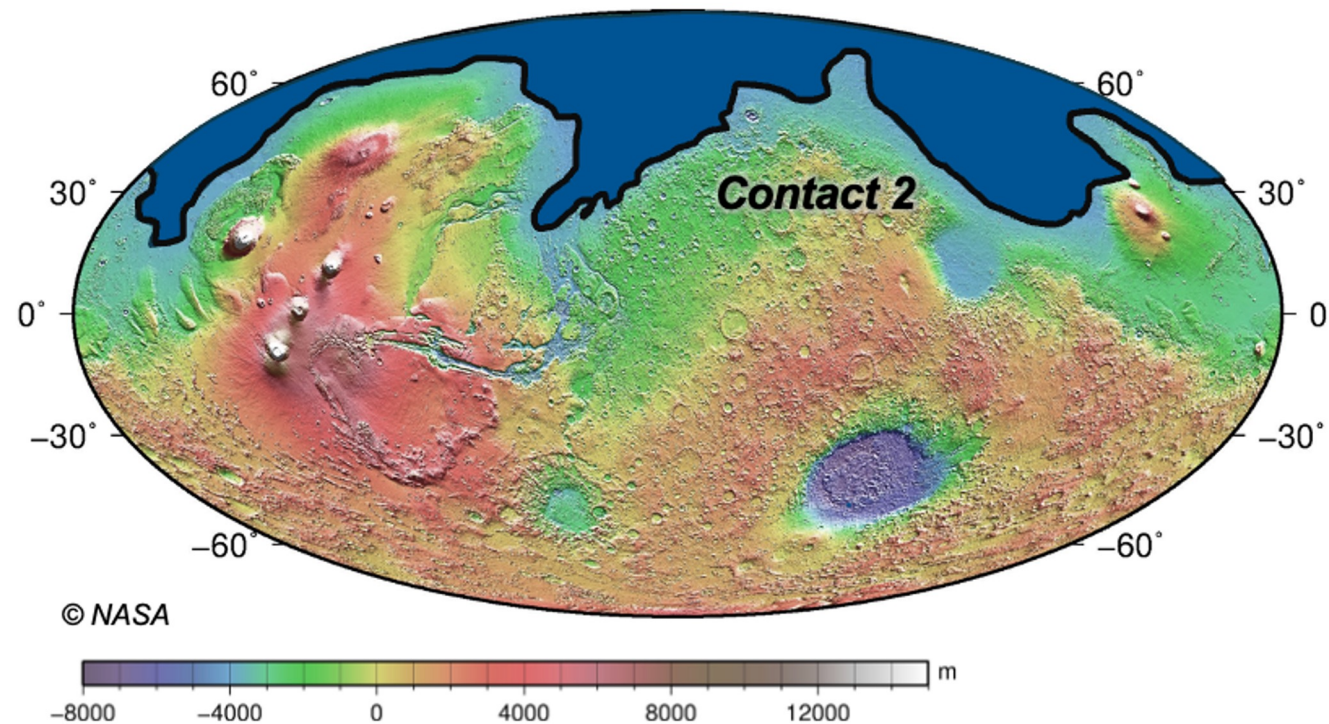
GEL: 全球等価層 (全球を均等に覆った時の水の厚さ)

[1] Clifford and Parker, (2001), [2] Carr and Head, (2003), [3] Kurokawa et al., (2014)

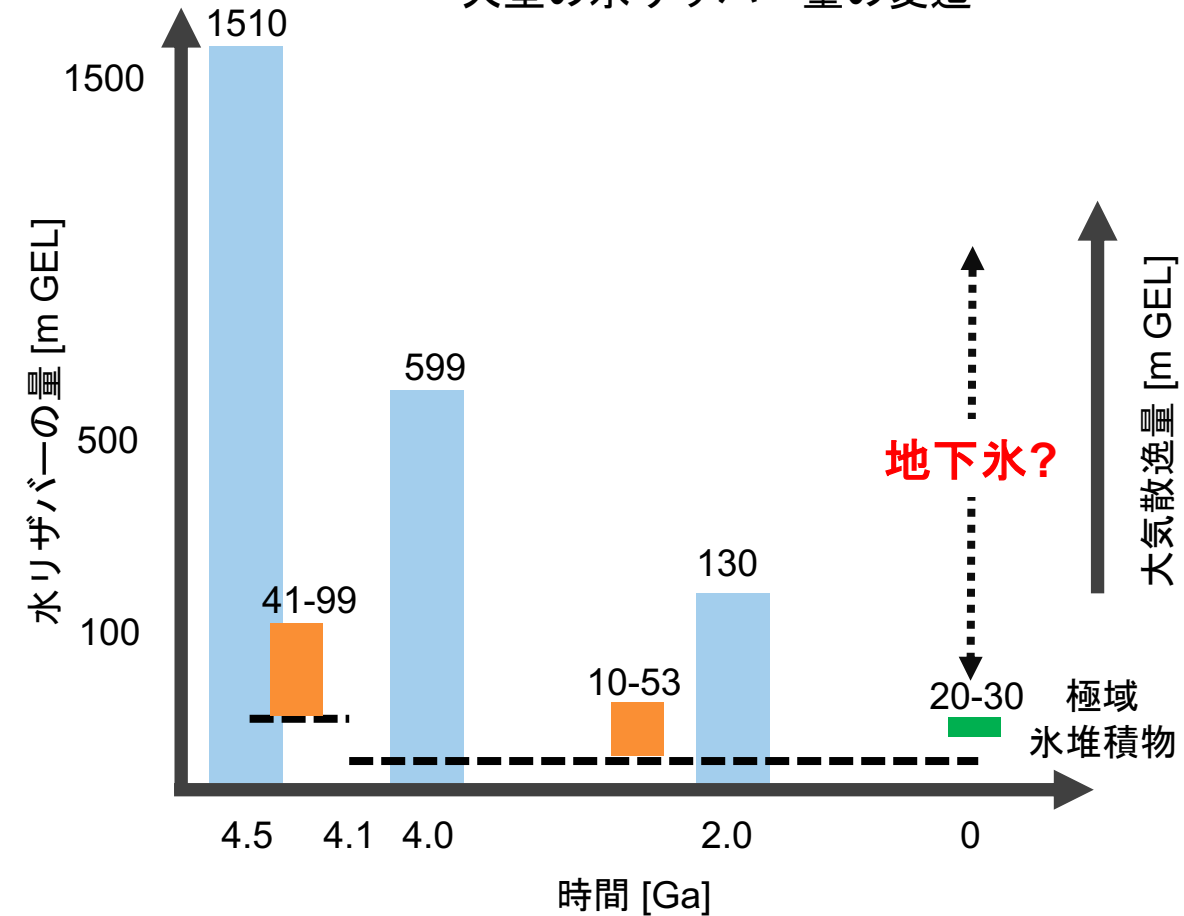
[3] Zuber et al., 1998 [4] Smith et al., 1999

地下氷が火星の隠れた水リザーバーとして重要な役割を果たす

約40-20億年前の火星の表層水¹



火星の水リザーバー量の変遷



古海洋² >> 散逸した水³ + 氷堆積物^{3, 4}

? 隠れた水リザーバー

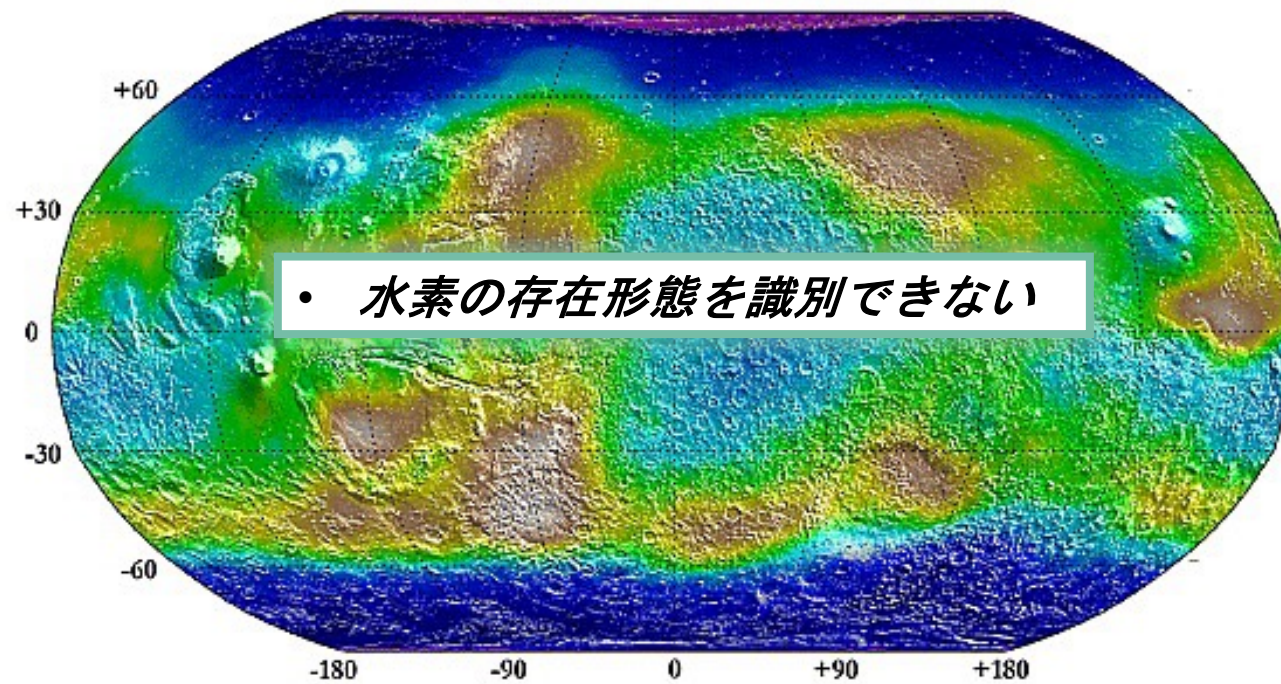
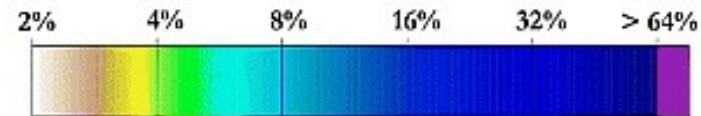
GEL: 全球等価層 (全球を均等に覆った時の水の厚さ)

[1] Clifford and Parker, (2001), [2] Carr and Head, (2003), [3] Kurokawa et al., (2014)

[3] Zuber et al., 1998 [4] Smith et al., 1999

多様な観測手法により現在の火星にも地下氷が存在することが明らかとなった

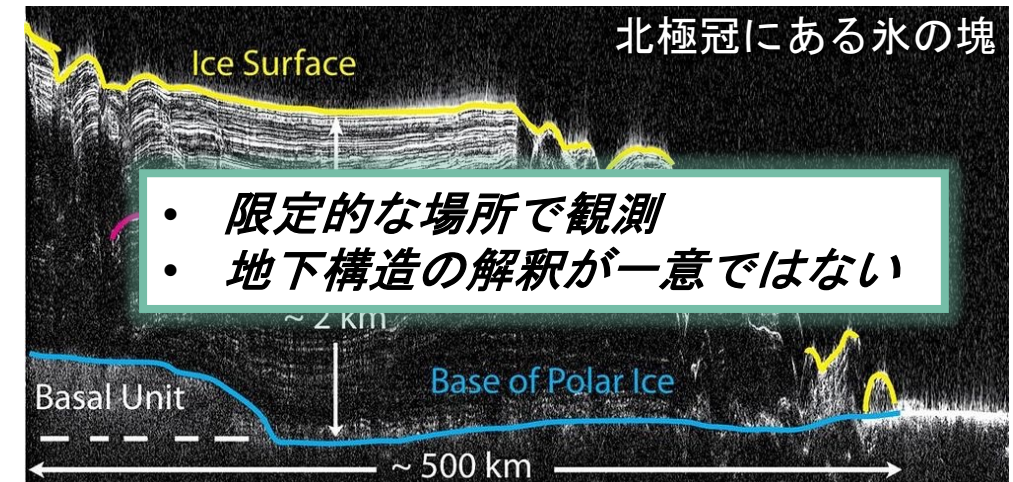
◆ 中性子分光計による表層水素量の推定



中性子計測から推定された地下1m以内の水相当量（WEH）の全球分布

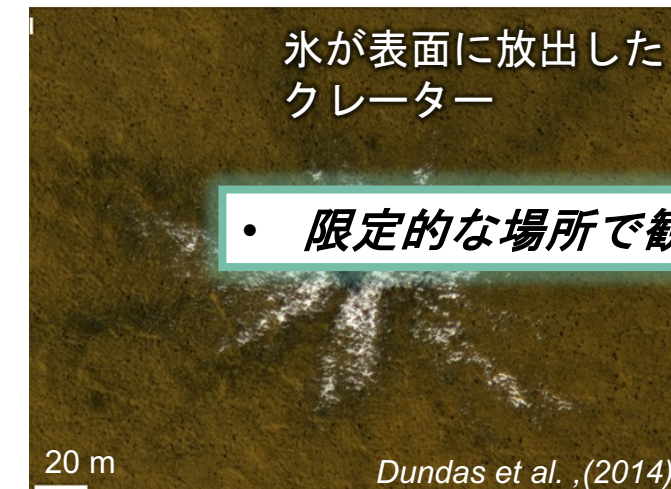
Feldman et al., (2004)

◆ レーダーサウンディングによる地下氷層の検出



© NASA/JPL-Caltech/ASI/UT

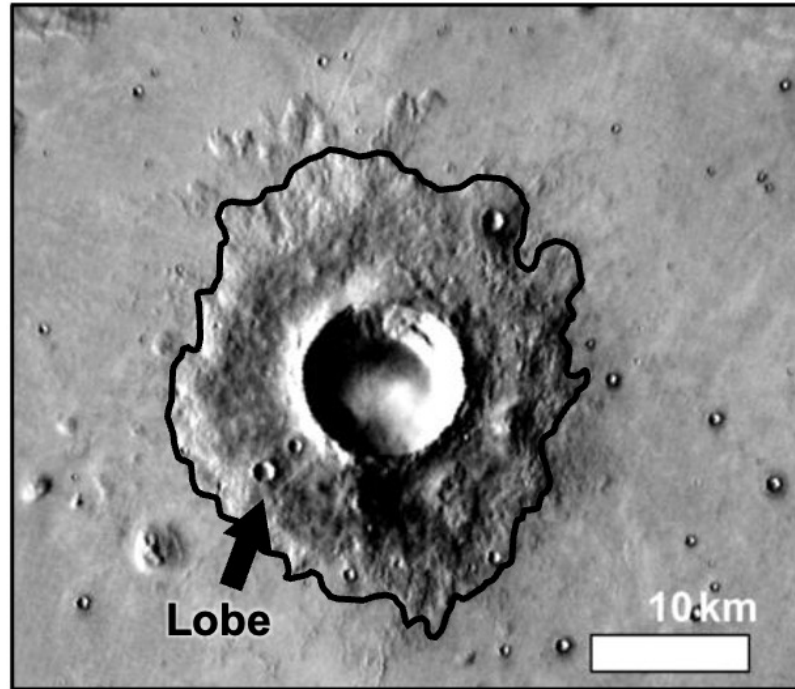
◆ 衛星画像による直接的な観測



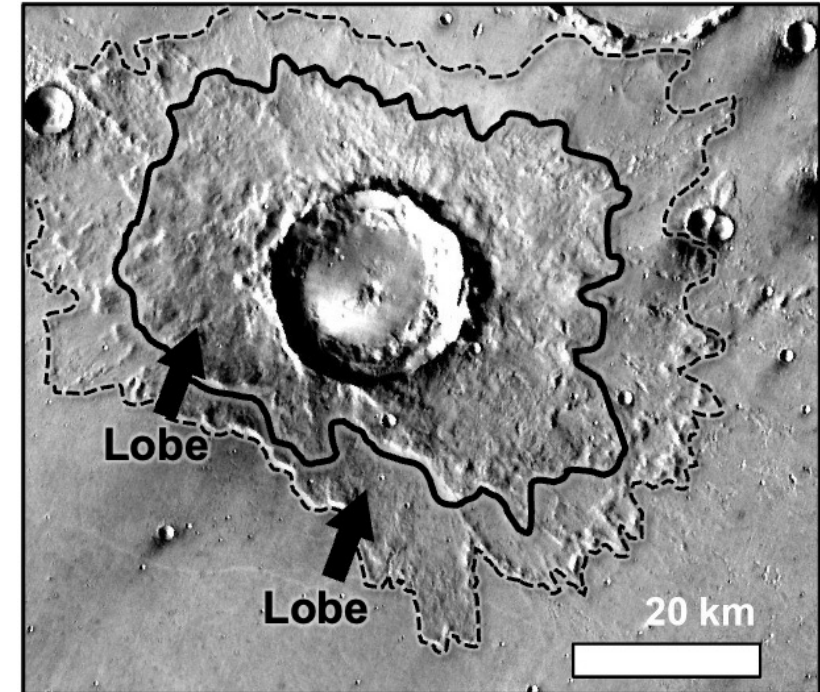
Dundas et al., (2014)

ランパートクレーターの形態と成因に統一的な解釈がない

イジェクタの湾曲が小さく
連続したローブをもつランパートクレーター



イジェクタがうねり
不連続のローブをもつランパートクレーター



形成仮説

地下氷が関係? : 地下の揮発性物質が豊富な相に衝突し形成された e.g., Barlow and Perez, 2003

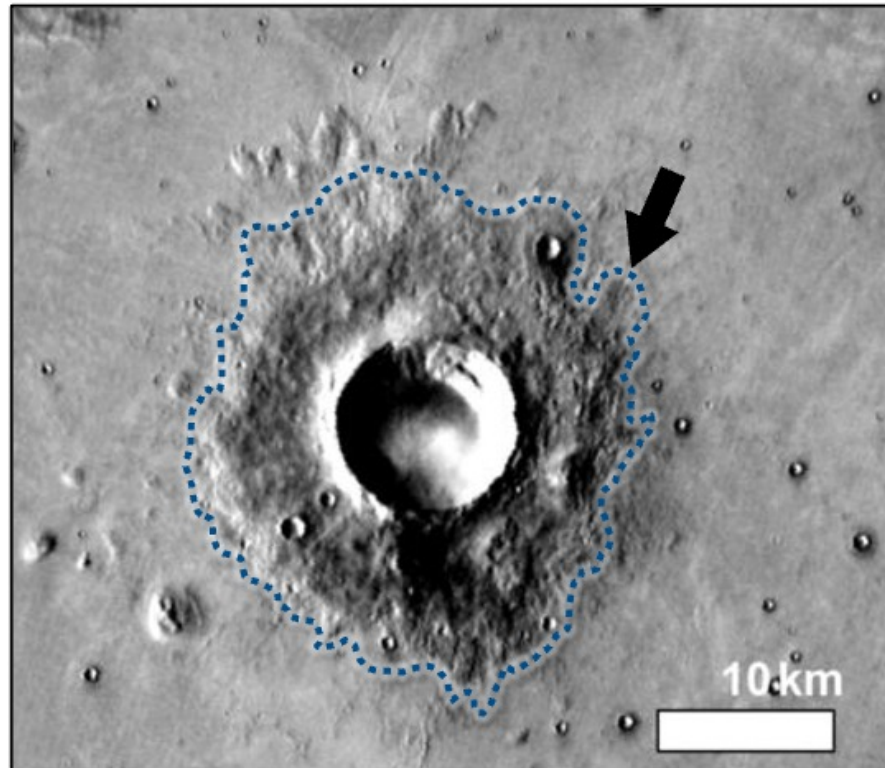


Combination?

大気の効果? : 大気とイジェクタが相互作用することにより形成された e.g., Schultz, 1992

湾曲率は形成要因の識別に有用な形態分類指標となりうる

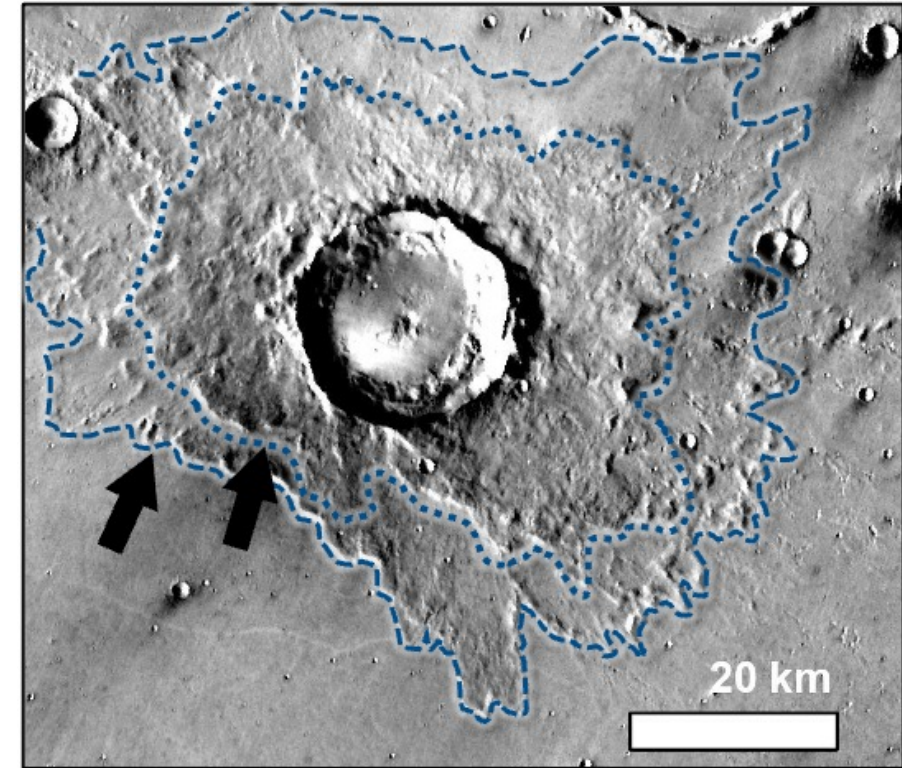
湾曲度が低いイジェクタ



高粘性物質の流動？

- 粗粒物質 (Baratoux et al., 2005)
 - 高い粒子濃度の流れ (Wohletz and Sheridan, 1983)
- etc.

湾曲度が高いイジェクタ

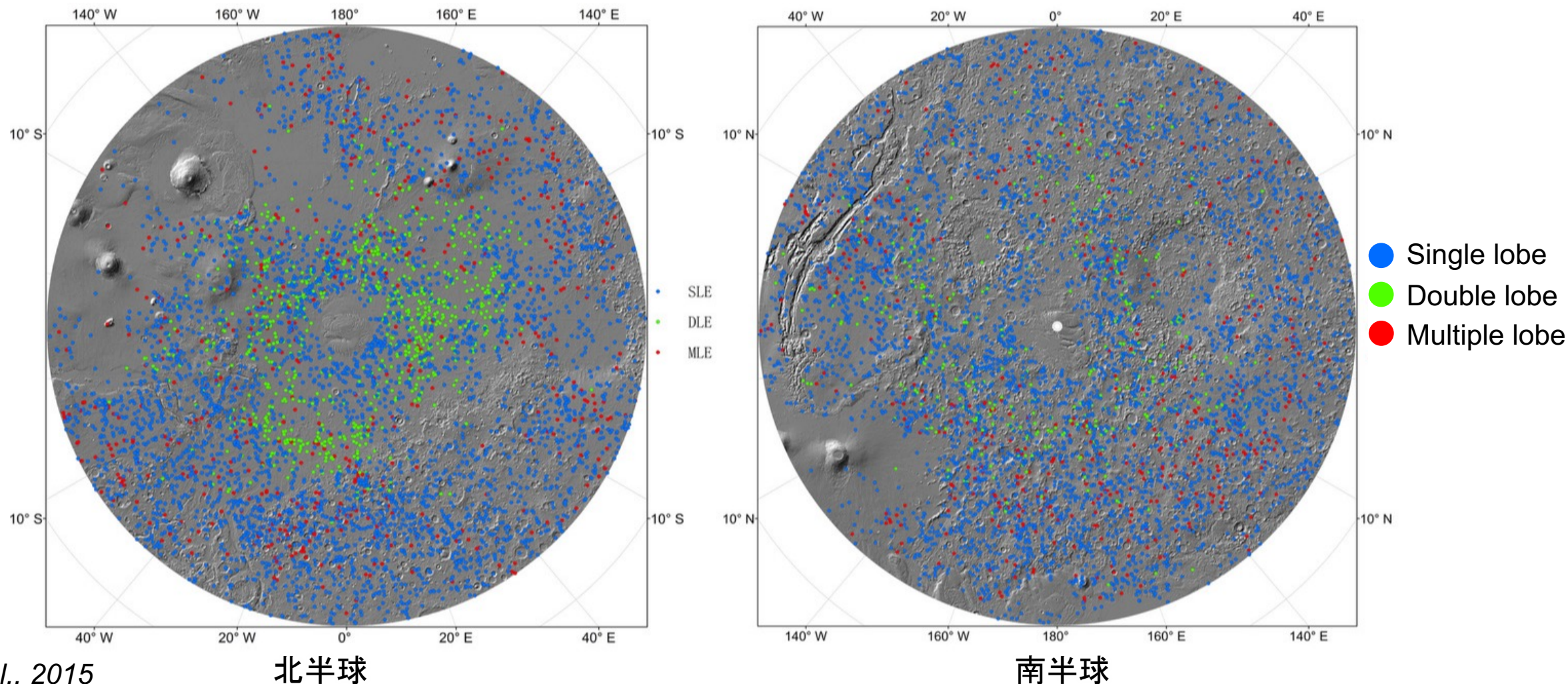


低粘性物質の流動？

- 細流物質 (Baratoux et al., 2005)
 - ベースサージ (e.g., Baloga et al., 2005)
- etc.

ランパートクレーターの形態の多様性と全球的な分布が人力調査を困難にする

ランパートクレーターの多様な形態の分布



ゴール

火星の隠れた水リザーバーを紐解く鍵となる、地下氷分布の時空間変遷を解明する



◆ 課題：地下氷の指標となりうるランパートクレーターの成因と形態の統一的解釈はなされていない

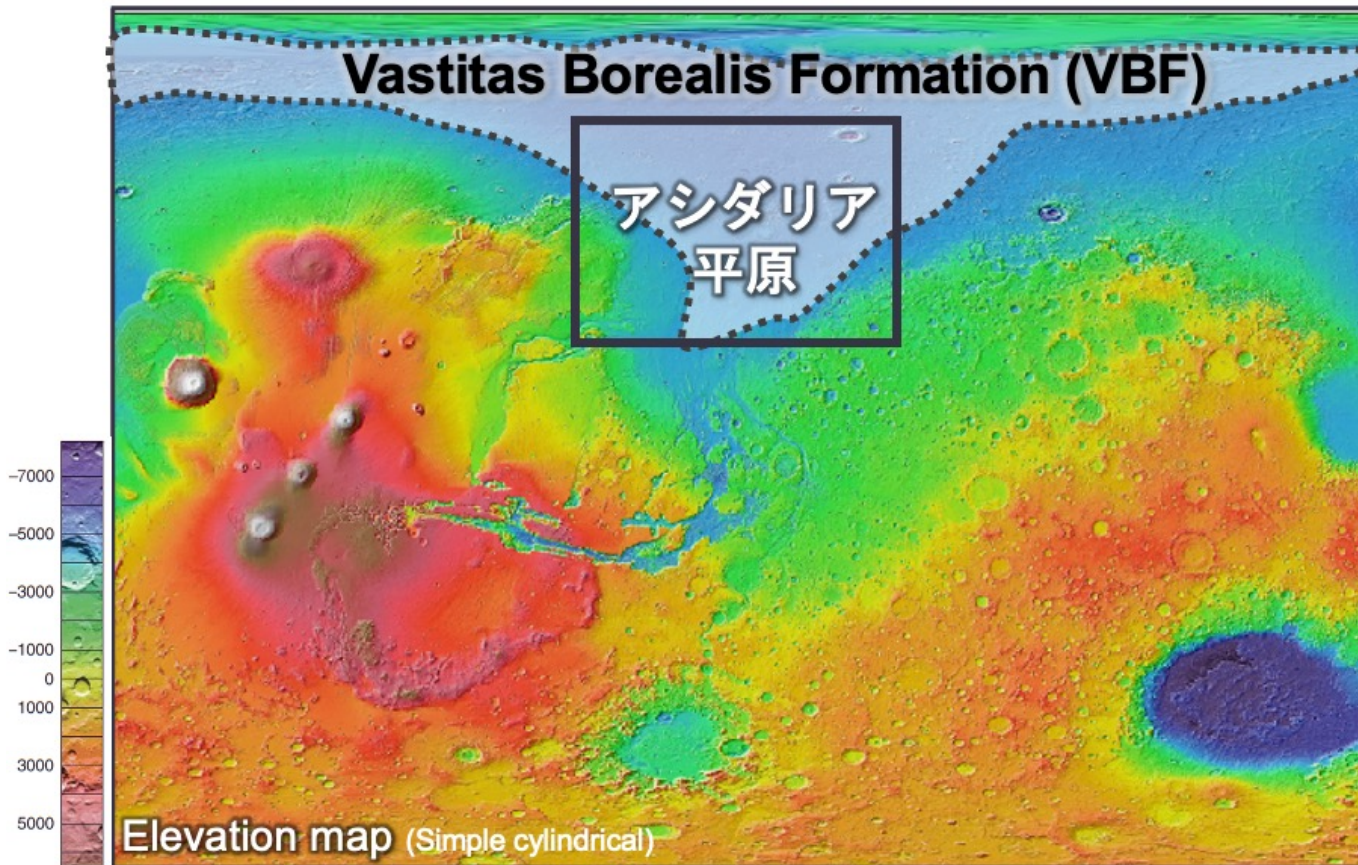
- 全球に普遍的に存在し、多様な形態をもっている
- 人力調査では手法的な限界がある

◆ 目的：

- 地下氷に起因するランパートクレーターの形態を特定する
- ディープラーニング手法を用いてクレーターの形態分類および分布調査において効率的な新たな手法を開発する

アシダリア平原はランパートクレーターの形態分布調査に最適な地域である

火星の標高マップ



◆ アシダリア平原

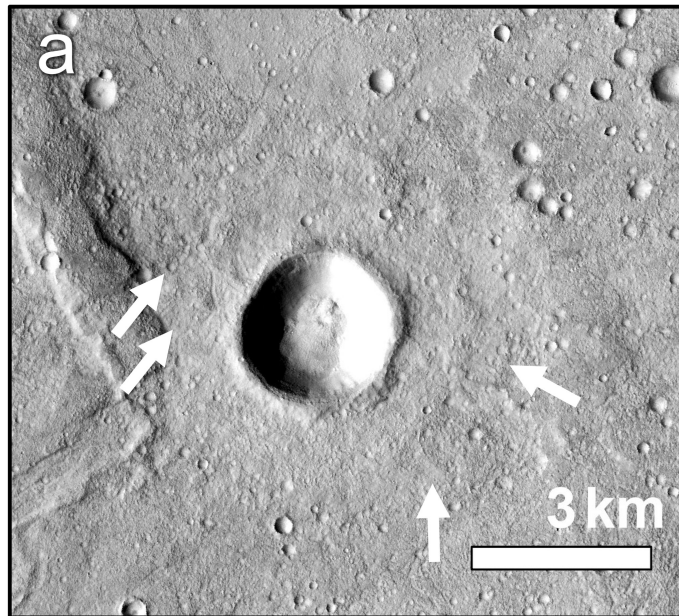
- 北半球の中緯度から高緯度に位置する
- 低地と高地で構成されている
- 南部はアウトフローチャネルが集合したクリセ平原と接している

◆ Vastitas Borealis Formation (VBF)

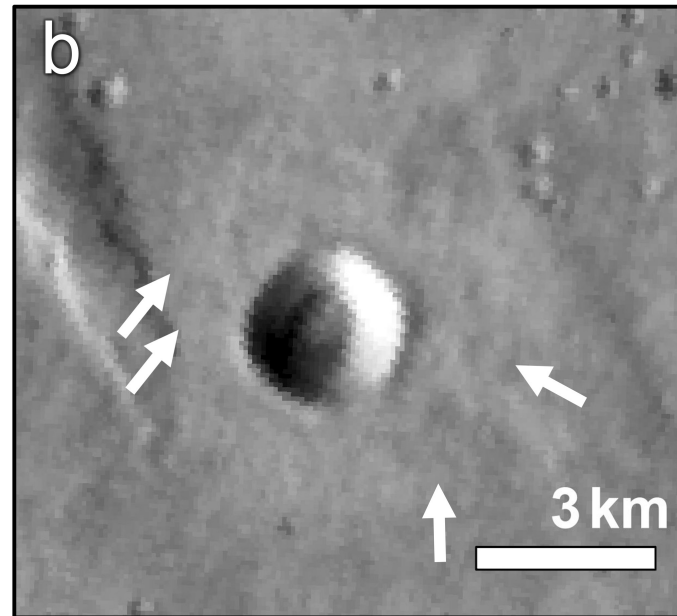
- 北半球の低地を覆う堆積層
- 南部高地からの洪水により運ばれた含水堆積物が、氷の昇華を経て残された残存堆積物 (e.g., Carr and Head, 2003)

TIR夜間画像では地表面の物質特性が反映され、ローブを明瞭に捉えている

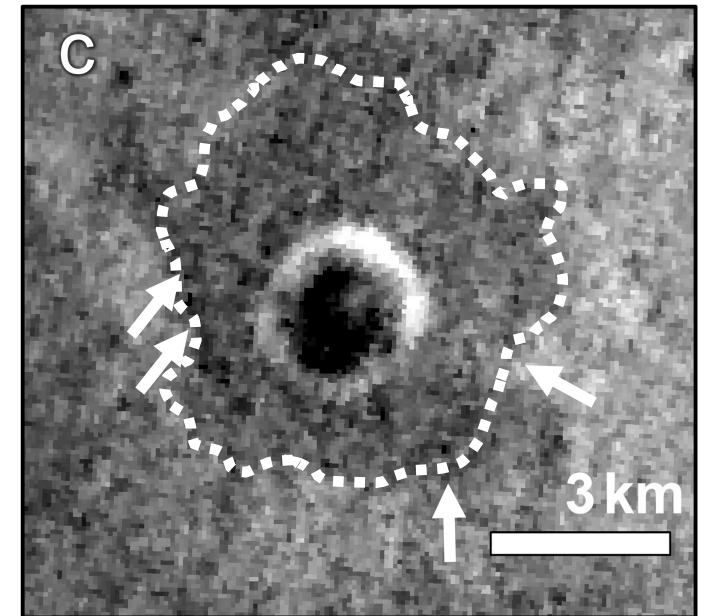
可視画像



熱赤外 (TIR) 昼間画像

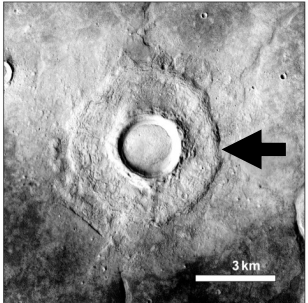
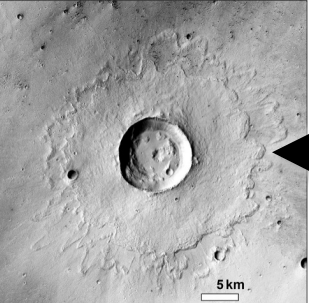
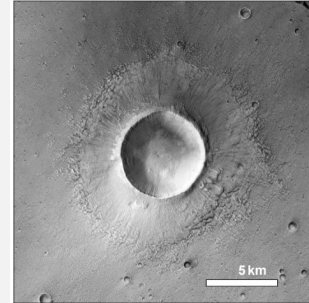
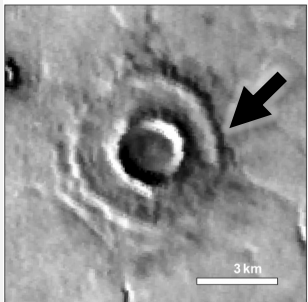
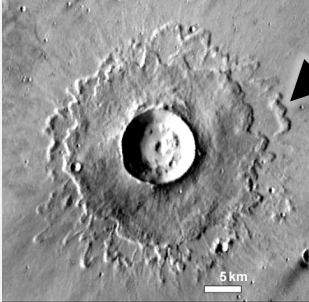
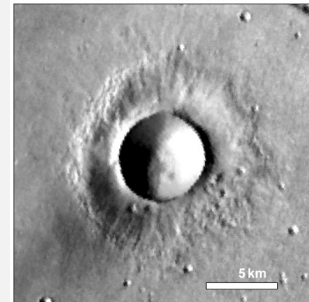
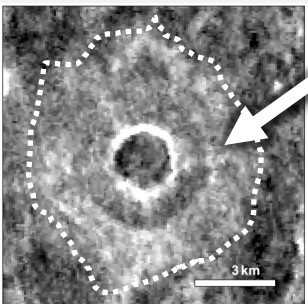
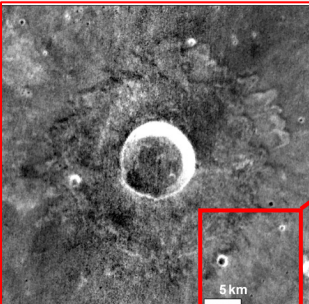
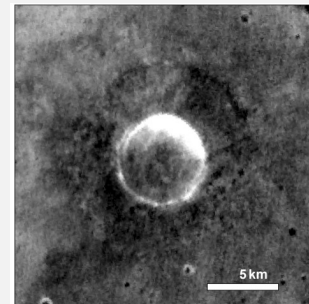


TIR夜間画像



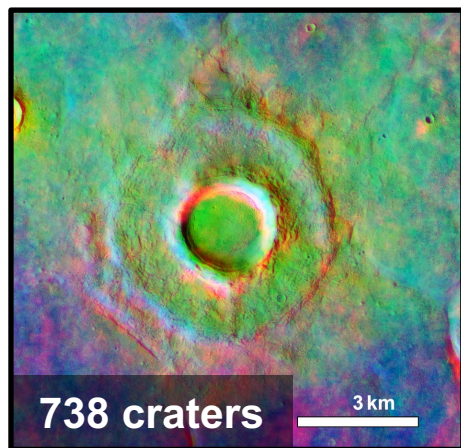
ローブと周囲の境界が
明確に識別できる

可視・TIR昼間・TIR夜間画像を組み合わせた形態分類

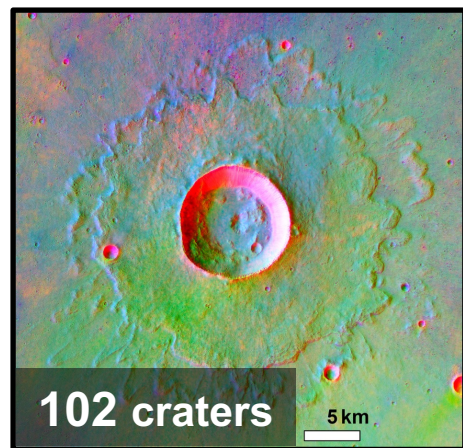
画像データ	Thick-Circular	Thin-Sinuuous	Unclassified
可視 5m/pixel <ul style="list-style-type: none"> 高解像度な地形コントラスト 	 丸みを帯びたローブ	 曲がりくねったローブ	
TIR 昼間 100m/pixel <ul style="list-style-type: none"> アルベド 日射条件 	 顕著な地形の起伏	 顕著な地形の起伏	
TIR 夜間 100m/pixel <ul style="list-style-type: none"> 粒径や熱伝導率に起因する熱慣性 	 ローブ	 ローブ	

RGB画像を用いた転移学習で形態分類を行う

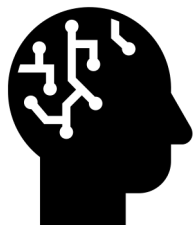
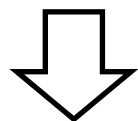
モデルの学習と検証



Thick-Circular



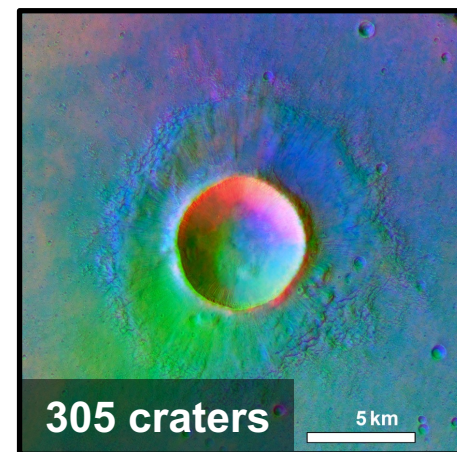
Thin-Sinuuous



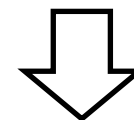
- GoogLeNet (事前学習済み) 使用
- ハイパーパラメータの調整 (モデルの最適化)
- Accuracyを用いた検証



分類



Unclassified



- 分類精度の評価
 - Precisionの算出
 - Thick-Circular*: 91.6%
 - Thin-Sinuuous*: 59.4%

Thick-Circular

246 craters

Thin-Sinuuous

59 craters

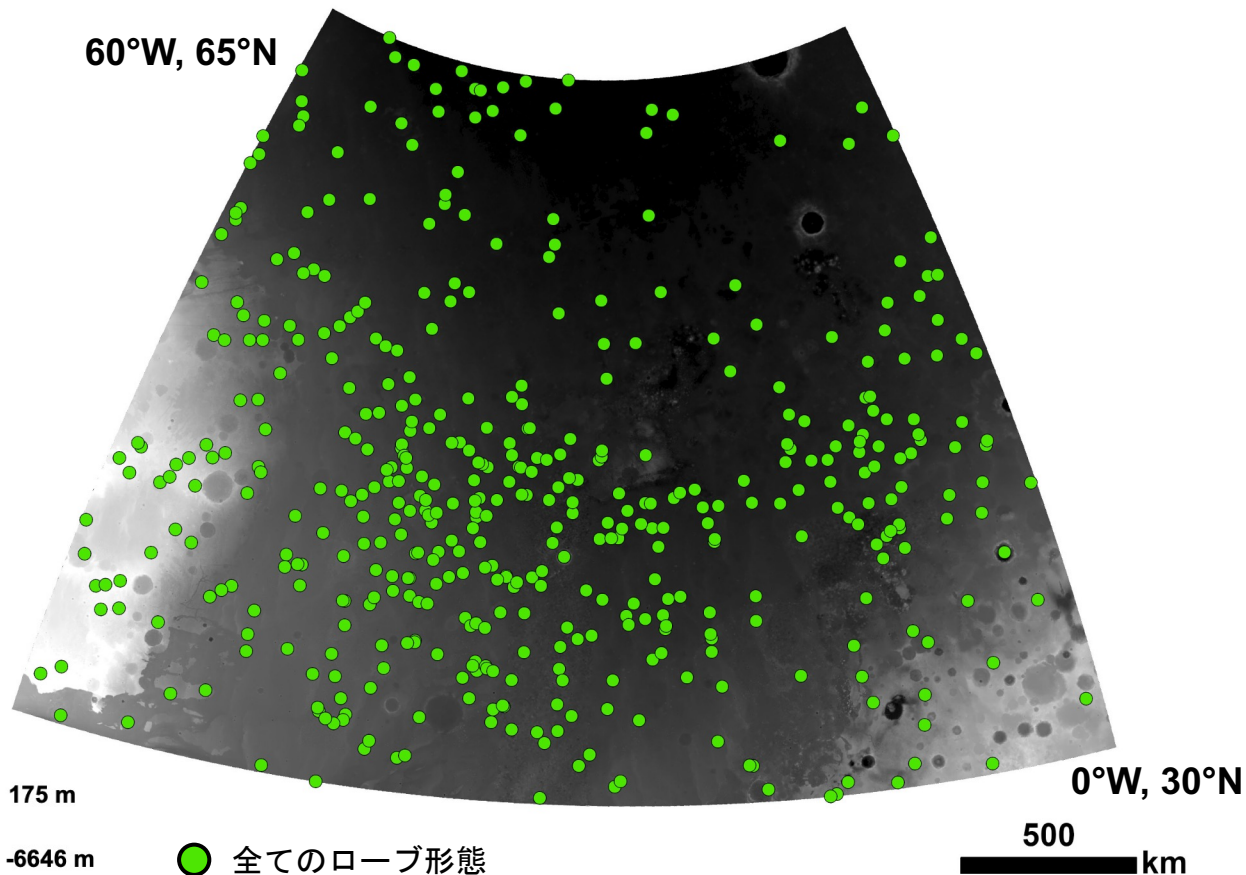
熱赤外夜間画像はクレーターの特定に大きく寄与した

アシダリア平原のランパートクレーターの空間分布

462 の層状クレーター

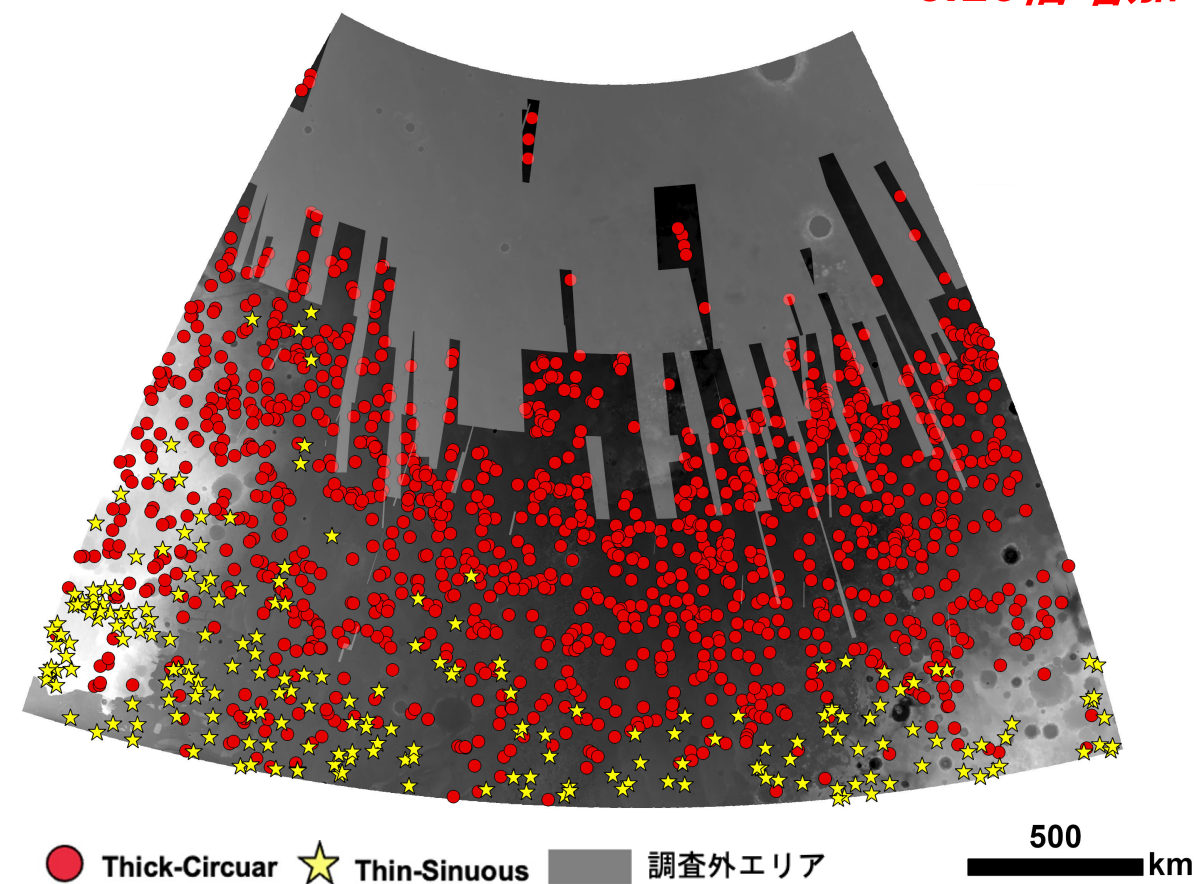
(既存のクレーターデータベース *Lagain et al., (2021)*)

60°W, 65°N

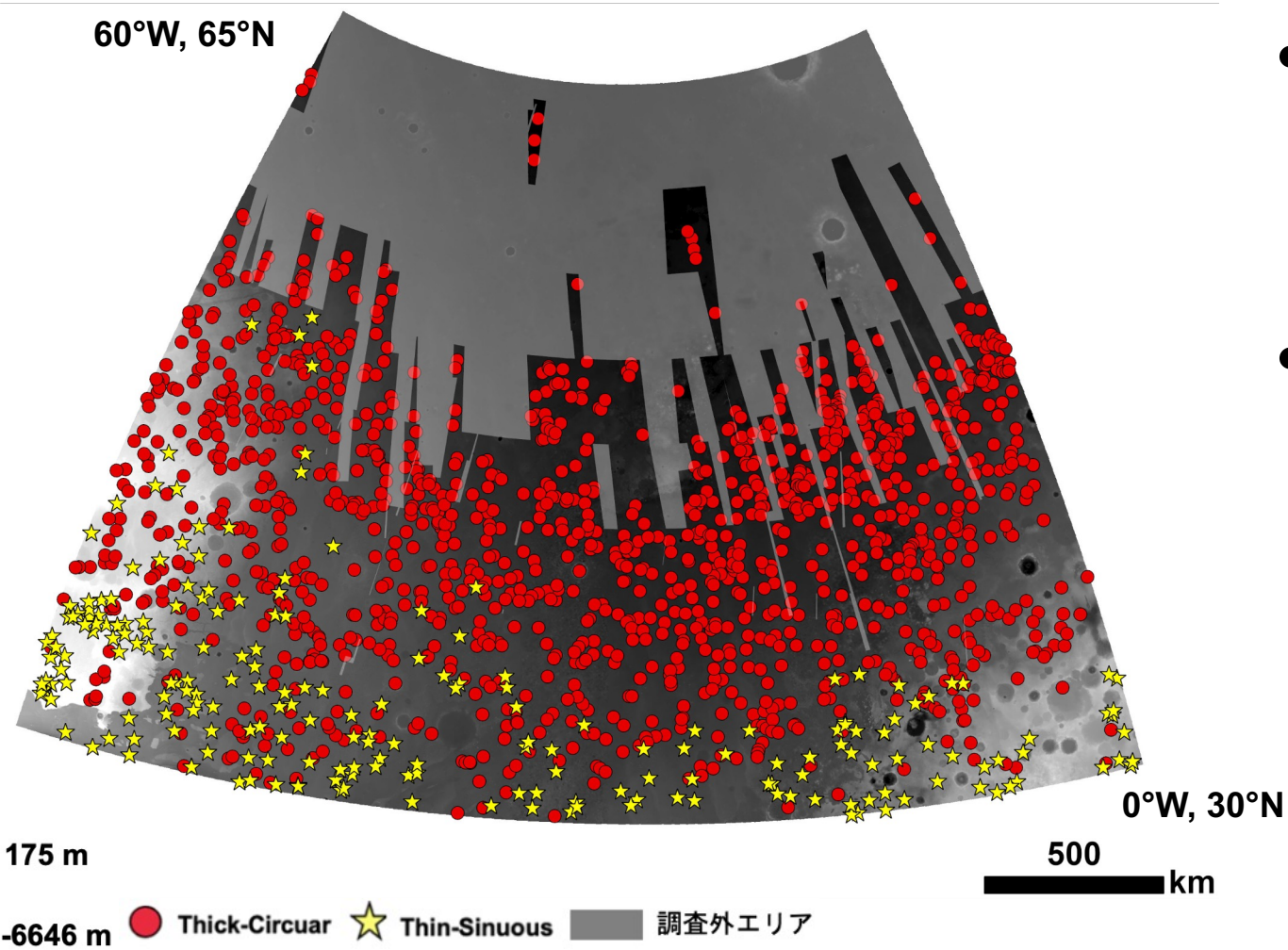


1503 のランパートクレーター

3.25倍増加



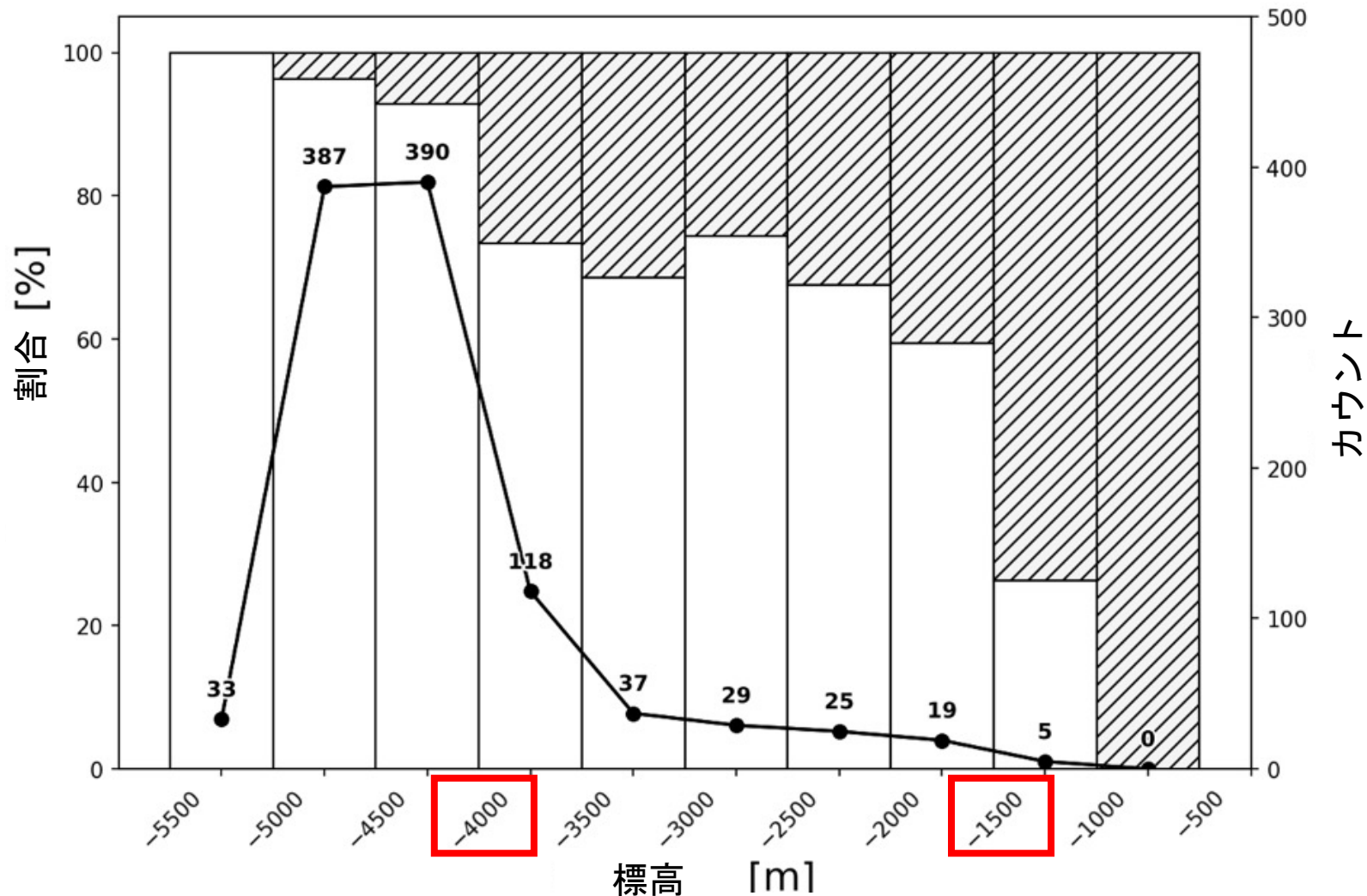
クレーター形態は、標高と緯度に相関した空間分布を示す



- **Thick-Circular** クレーター：
全域に満遍なく分布しているが、
高緯度と低地に集中している
- **Thin-Sinuuous** クレーター：
比較的に少数で、中緯度帯と高地に
集中している

Thick-Circularクレーターは、2つの標高の境界を境に分布割合が増加している

形態割合と標高の関係



- 標高が低くなるにつれて Thick-Circularの数が増える
- Thick-Circularの分布割合は **二つの標高** を境に低地側に顕著に増加する

Thin-Sinuus
Thick-Circular
Thick-Circular counts

Thick-Circularクレーターは、過去の水の堆積場に形成された可能性がある

VBFの外縁 (~3.7–3.2 Ga)

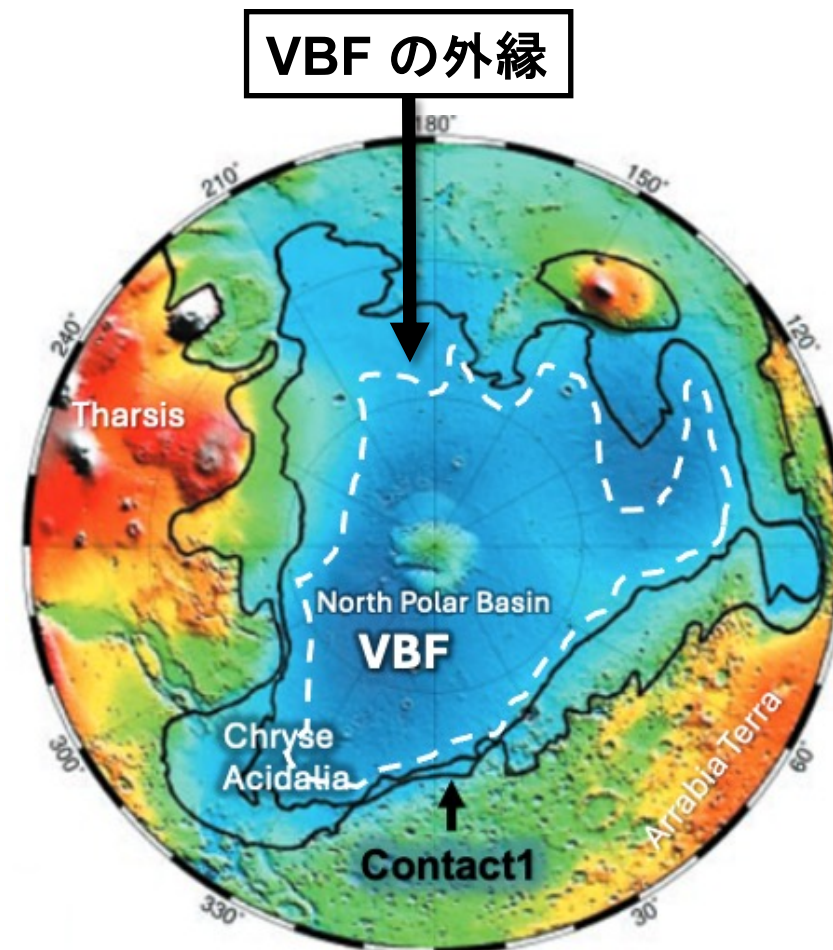
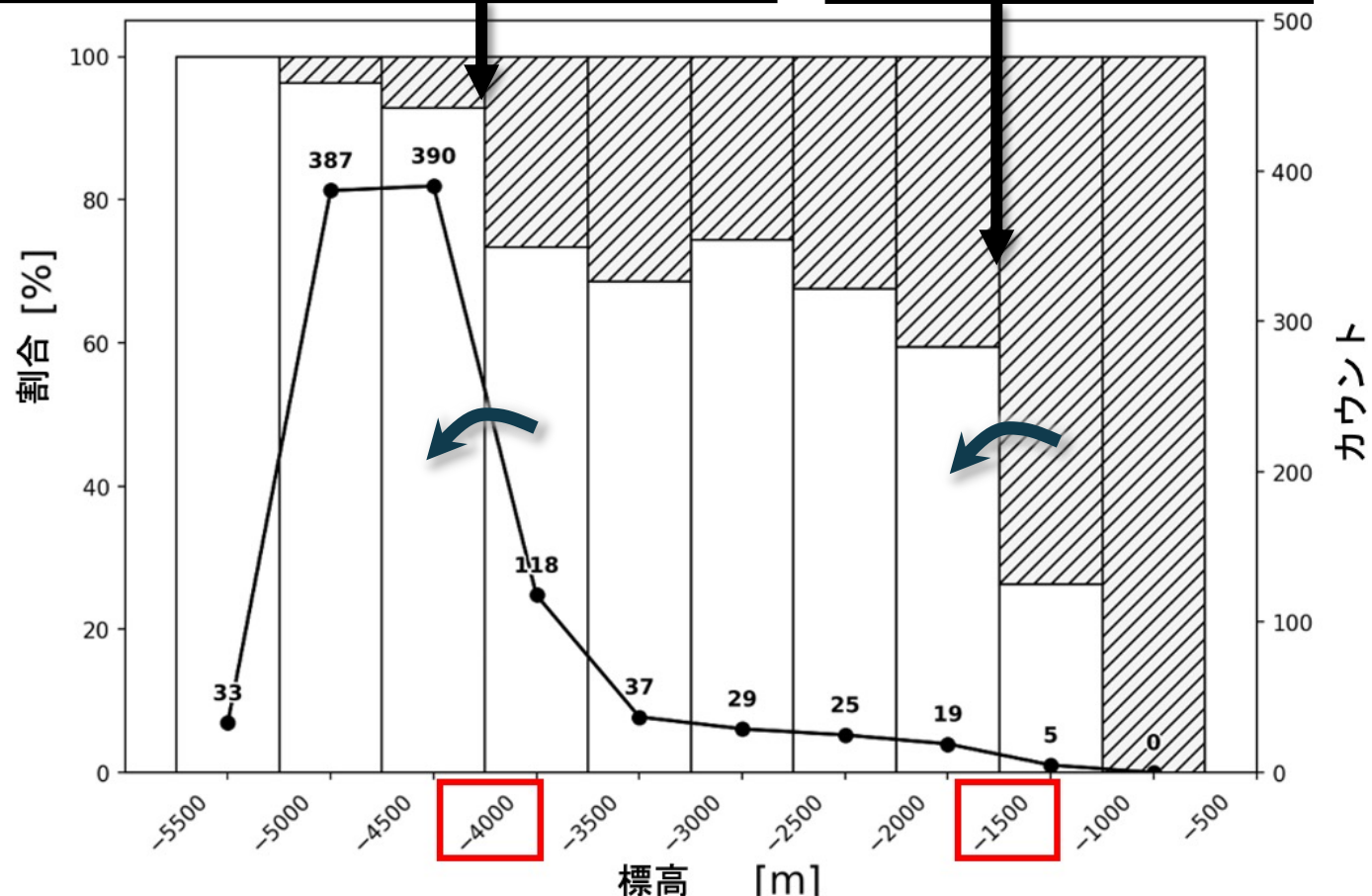
平均標高: -3903 ± 393 m

Carr and Head 2003

Contact 1 (~4.0–3.6 Ga)

平均標高: -1680 m

Head et al., 1999

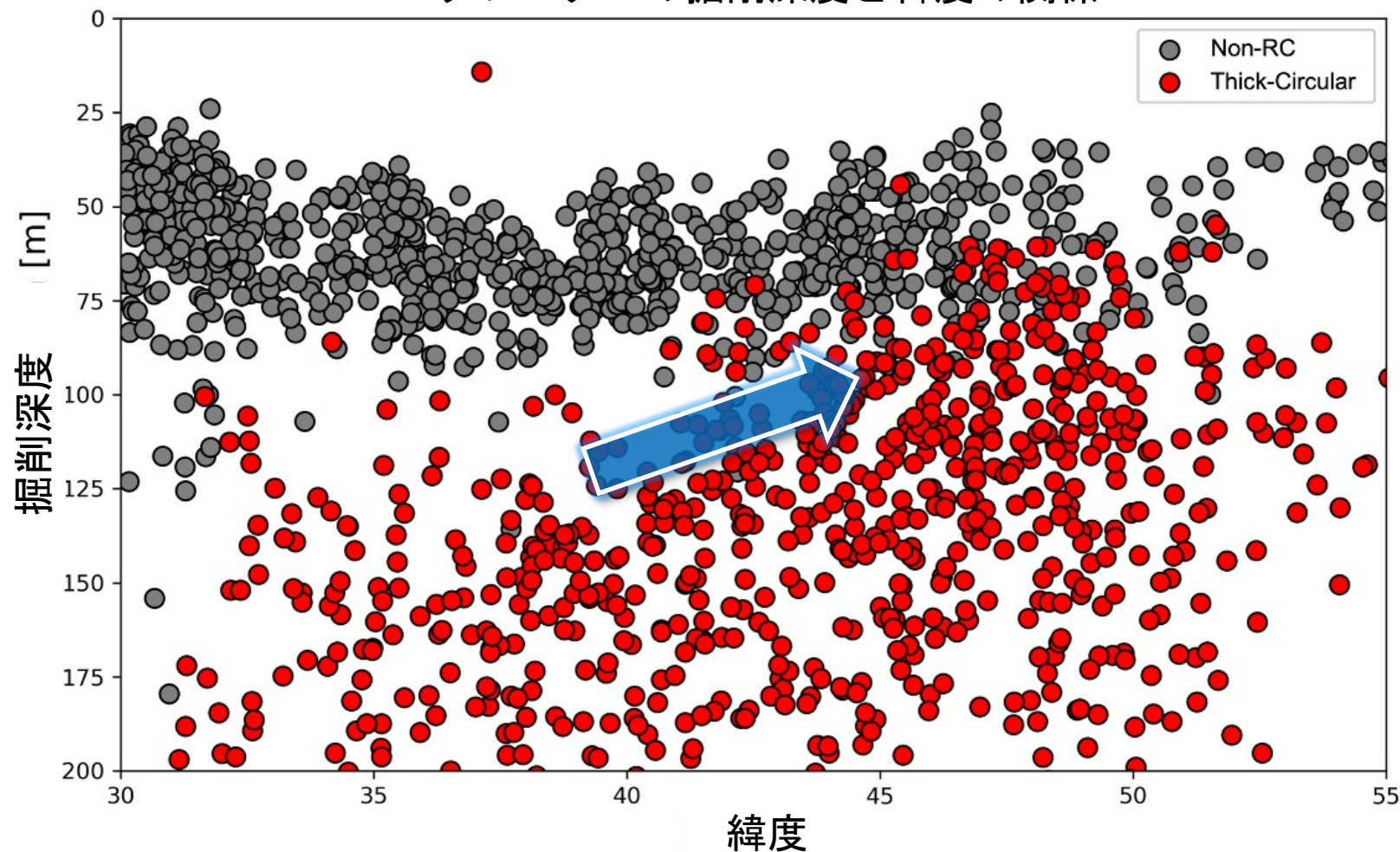


Head et al., (1999) を元に改変

北半球における提唱された海岸線とVBFの外縁の位置
(北極中心のマップ)

アシダリア平原では地下氷面が 50-75 m 程度と示唆される

クレーターの掘削深度と緯度の関係



- クレーター直径と深さの関係式

$$d_{ex} \approx 0.1D_{transient} \approx 0.084D_{final}$$

Melosh, 1989

- Thick-Circularの最小掘削深度は、高緯度に向かうにつれて小さくなる
- Non-RCの掘削深度は 25-75 m に集中している
- アシダリア平原の地下氷面は 50-75 m に位置する可能性がある
- Thick-Circularの掘削深度の緯度依存性は時間変化を表している可能性がある

- 地下氷は火星の隠れた水リザーバーとして重要な役割を果たす
- ランパートクレーターは地下氷の指標となるが、形態の多様さと膨大な全球的分布により人力調査や統一的な形成要因の解釈には限界がある
- 熱赤外夜間画像によりイジェクタを明瞭に捉えることが可能となり、既存の3倍以上のランパートクレーターを特定した
- ランパートクレーターの形態別の空間分布により、厚く丸みを帯びたローブをもつものは、過去の水の堆積場に形成された可能性がある
→ 湾曲率は形成要因の識別に有用である
- クレーター直径サイズは緯度依存性があり、地下氷面は高緯度ほど浅くなることを示す
- アシダリア平原の地下氷面の深さは50-75 mと示唆される