

《 》

Morphometry of small recent impact craters on Mars: Size and terrain dependence, short-term modification

W. A. Watters¹, L. M. Geiger¹, M. Fendrock¹, and R. Gibson¹

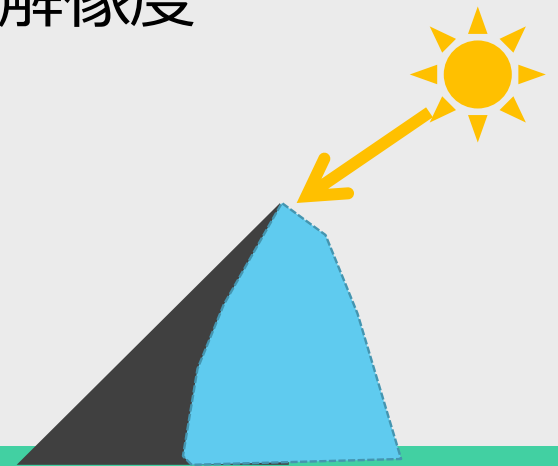
¹Department of Astronomy, Whitin Observatory, Wellesley College, Wellesley, Massachusetts, USA

神戸大 M2 大村知美

1. Introduction



- かつて衝突クレーター形状分布の研究は二次元画像から作られたデータを用いていた
 - Photoclinometry, Shadow measurements
- 衛星のレーダー、レーザー高度計による高度マップの出現により、大規模なクレーター形状の研究が可能に
- 現在は、衛星の高解像度のカメラを用いた stereographic observations により、高解像度の高度モデルが得られるようになった



- これまでの火星衝突クレーターの研究
 - $D > 5$ kmにおける単純、複雑クレーターのスケーリングが特徴づけられてきた
 - ここで研究された単純クレーターの中には緩和された単純クレーターが含まれると考えられる [Pike, 1988]
 - 部分的な、重力によるクレーター壁の崩壊による
- ⇒これらのサイズにおける研究クレーター形状のサイズ依存は小さな($D < 1$ km)クレーターに適用できない

本研究

- 火星表面の進化や、異なる環境、長さのスケールにおけるクレーター緩和に関連する考察を、小さい領域のクレーター($D < 5$ km)について行う

目的

- どのようにクレーター形状は緩和されるかを調べる
 - 比較的新しいクレーターの形状の、地域、直径への依存
 - 重力によるクレーターリムの崩壊が重要な、注目すべき過程になるサイズ

2. Crater Population and Database

- HiRISE stereo imagesより単純衝突クレーターを選ぶ
 - (a) 深いキャビティを持つ
 - (b) エジェクタが見える
- 選ばれたクレーターのDEM(digital elevation models)を生成
 - 2次クレータによる汚染を防ぐため、新鮮な複雑クレーターのレイの中や、複雑クレーターから数km内で起こったクレーターは除いた
- 直径：25 m-5.2 km
- 全球的分布：Fig. 1



HiRISE stereo images

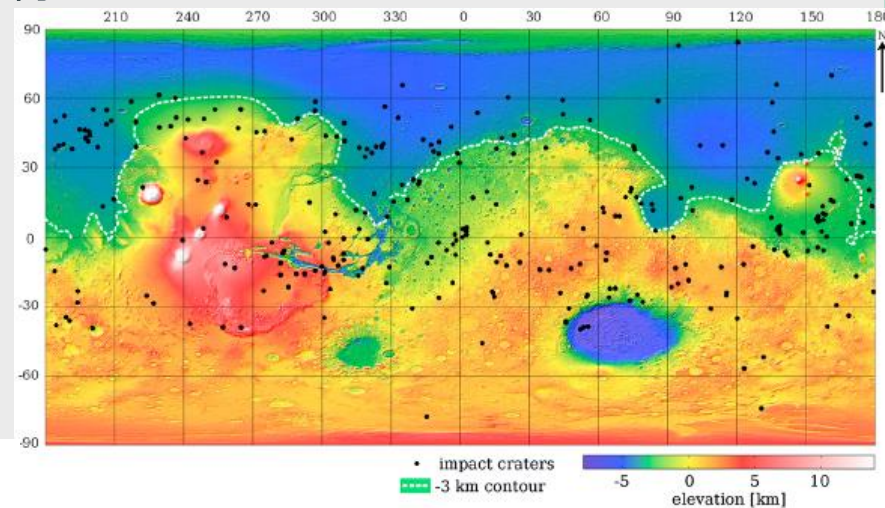


Fig. 1 Population of craters

3. Measurements of Crater Shape

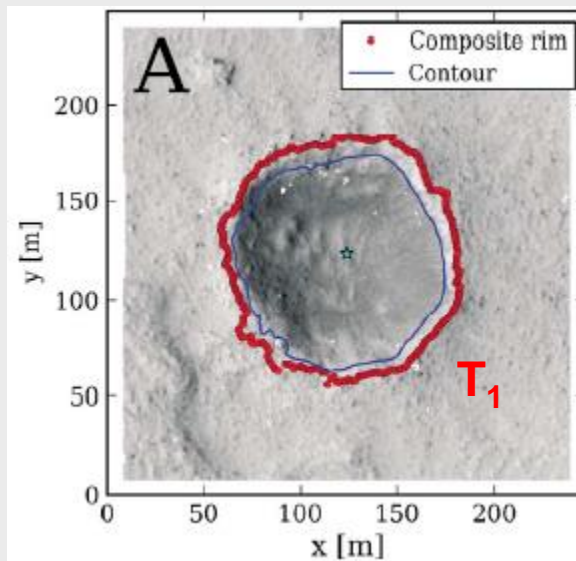


- Digital Elevation Models (DEMs)より、次の値を測定
 - (a) 単純衝突クレーターの断面図
 - (b) クレーターキャビティの体積
- Digital Elevation Models (DEMs)
 - 火星調査衛星のHiRISE cameraによるstereo imageから生成
 - 解像度：およそ1-15 m/pixel
 - 誤差：< 0.5 m.

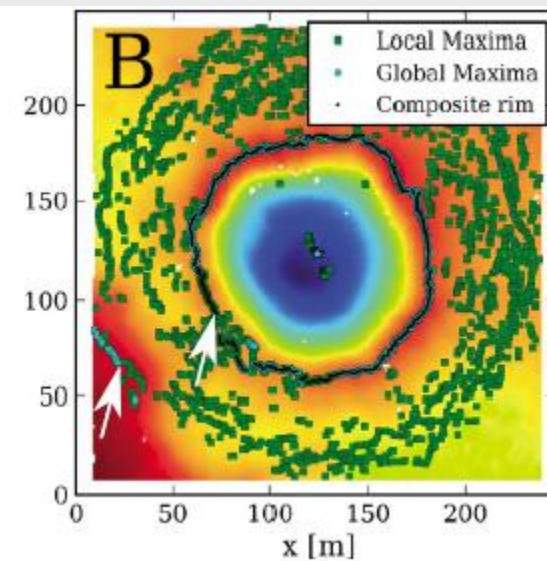
3.1. Rim Trace and Radial Profiles



- 大まかな中心、半径を決める⇒DEMsが生成される
- クレーター中心から3Rと3.5R地点の円の高度をサンプリング⇒周りの表面
- 半径方向の断面図をサンプリング、不連続を修正
 - リムより遠い、リム近くの盛り上りを拾ってしまうなど
- **rim trace** : T_1 を得る



クレーター画像



DEM画像

- 直径と中心(P_0)
 - T_1 の2-D投影図にfitする円より求める
- P_0 を中心に断面図をとり、以下の量を計算

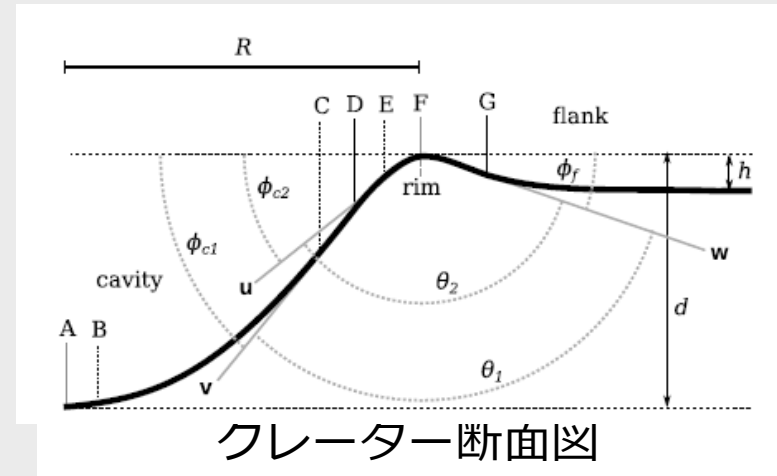
- リム-底深さ(d)
- リム高さ (h)
- Cavity shape exponent (α^c)

クレーター形状の評価に用いる

- キャビティ壁半ば、上方、flank表面で測定した傾き (ϕ_{c1} , ϕ_{c2} , ϕ_f)
- キャビティ側、Flank側のリムの曲率半径 (ξ_c , ξ_f)
- “rim decay” length scales (l_c , l_f)
- “rim span.”(θ_1, θ_2)

崩壊度合いの評価に用いる

- クレーターキャビティの体積
 - 2つの高度での輪郭を計算
 - ✦ (a) リム周りの最も低い高度
 - ✦ (b) 周りの地形の近似的な高度
 - 2つを用いて平均的な体積を計算する



4. Subpopulation Comparisons



- 直径、緩和の及ぶ範囲、標的物質の特性の影響を調べるため、Subpopulation同士を比較
- Subpopulation
 - 目で見た緩和度合いでの分類(MV1,MV2,MV3)
 - 目に見える特徴+リム高さ/直径比、深さ/直径比から見た緩和度合いでの分類(MM,HM,LM)
 - 形成されている場所による分類
 - エジェクタの特徴での分類
 - 形成されている緯度と高度での分類(“highlands” ,“lowlands”)
 - 形成されている緯度での分類
 - 大きさでの分類

- 目で見た緩和度合いでの分類

- MV1, MV2, MV3

- ✦ 画像より、目に見える緩和の特徴を点数化してクレーターに**緩和指数 i_M** を割り当てる

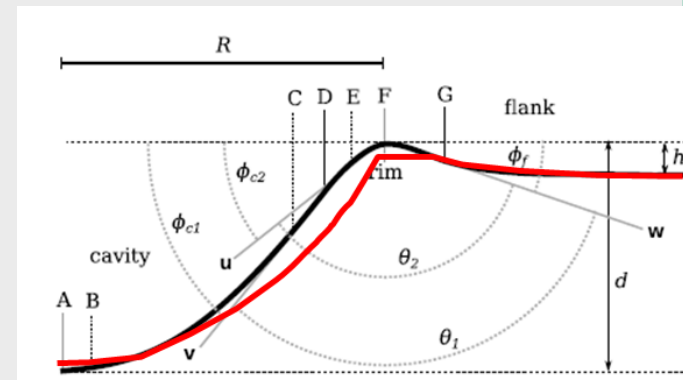
- **緩和指数 i_M**

- エジェクタの浸食、キャビティ内の堆積、キャビティ、エジェクタ内のクレーターの存在によって値が大きくなる(-2-+6)
- ✦ 緩和指数 i_M のみでクレーターを分類

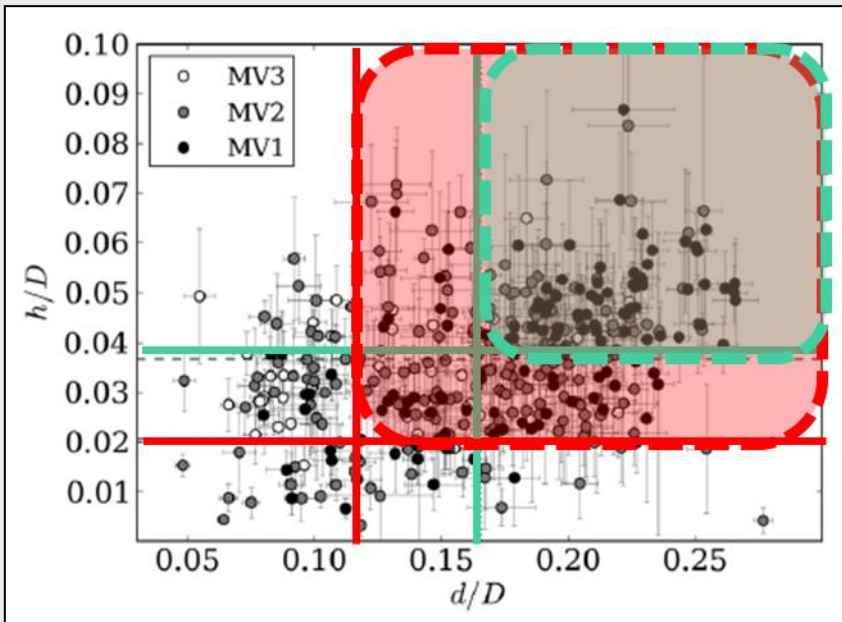
- 目に見える特徴+h/D, d/Dでの分類

- 浸食、緩和が起こればクレーターリムは低く、直径は大きくなる傾向を予想

⇒この前提に基づき、クレーターを分類



- 目に見える特徴+h/D, d/Dでの分類



緑線：平均値

赤線：平均値 - 標準偏差

- LM (Least modified)

- ✦ MV1+図中緑

- ✦ 目に見えて緩和が少ない、もしくは深さ、リム高さが十分にある

- MM (Moderately modified)

- ✦ MV3に属しない、かつ赤色

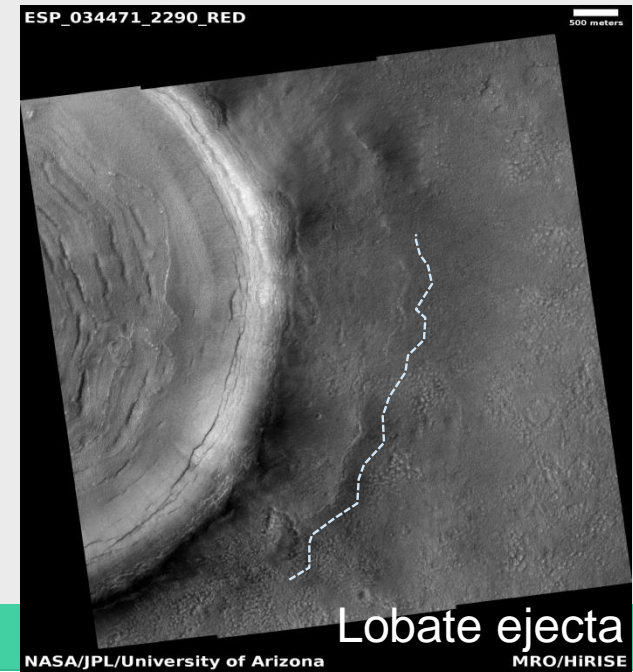
- ✦ 目に見える明らかな緩和はなく、深さ、リム高さもそれなりにある

- HM (Highly modified)

- ✦ MMに属しないもの=MV3+図中赤

- ✦ 見るからに緩和されている、もしくは浅く、リムが低い

- クレーターが形成されている場所による分類
 - 場所の割り当てには *Tanaka et al. [2014]* の地図を用いた
 - あくまで表面の状態について(クレーター形状には内部も影響)
 - ✦ Lavas : 溶岩流で形成されている
 - ✦ Volcanics : 溶岩流、火砕性あるいは火砕碎屑物流で形成されている
 - ✦ Coarse deposits : 粗い粒子を含む堆積より成る
 - ✦ Pure coarse deposits : 粗い粒子の堆積に支配されている
 - ✦ Fine deposits : 細かい粒子を含む堆積より成る
 - ✦ Vastitas Borealis
 - ✦ Impact unit : クレーター、エジェクタ内
 - 構成物、構造が強度に影響する
- エジェクタの特徴での分類
 - Lobate ejectaを持っているか
 - ✦ 流動化を示唆する

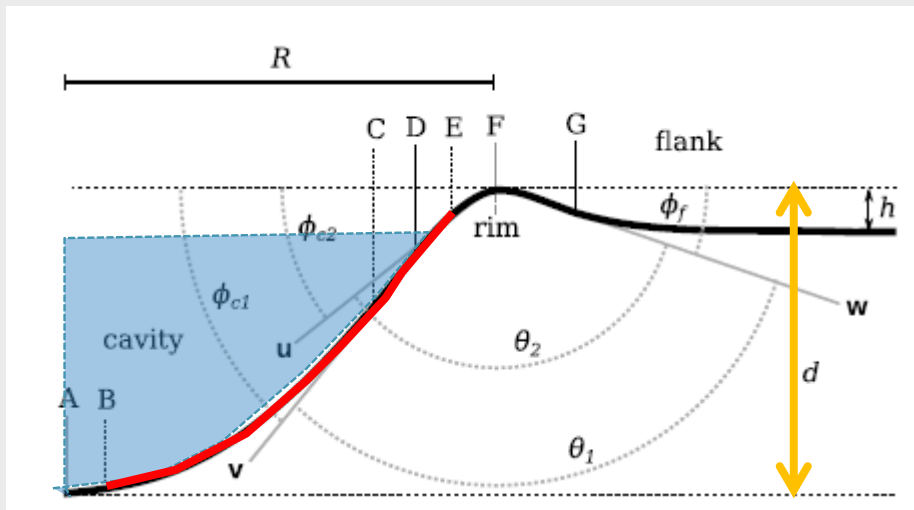


5. Measured Morphometric Distributions

• 5.1. Crater Cavity

- 深さ
- キャビティ体積
- キャビティ形状 と直径の関係

• 5.2. Crater Rims



- Cavity shape exponent (α_c)
B-Eの曲線を r のべき乗でfitしたときの指数

$$z = Br^{\alpha_c}$$

r : Bからの距離
 z : Bからの高さ

5.1. Crater Cavity

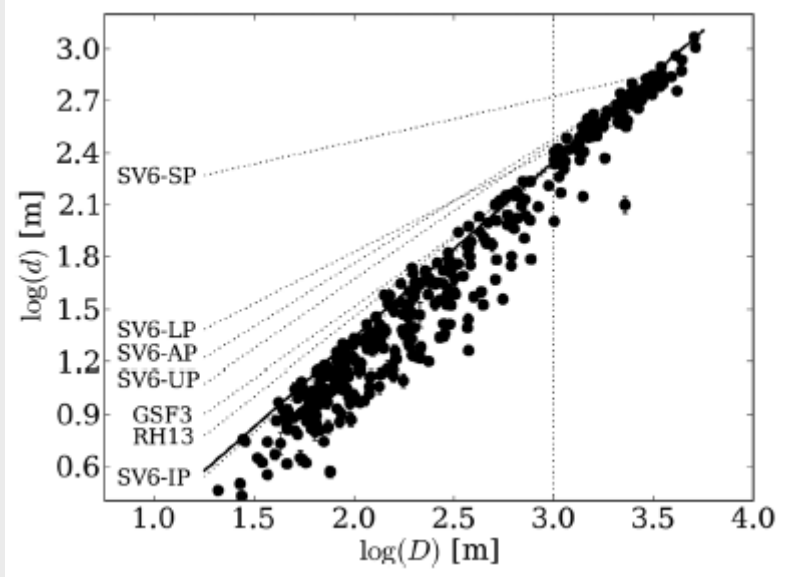


Fig.5 深さと直径の関係

先行研究で得られたスケーリングもプロットされている

※スケーリングに用いられたのは本研究より大きい範囲のクレーター

※クレーター深さの測定方法は研究により異なる

深さと直径

- 本研究の結果でフィッティングすると

$$d = (0.205 \pm 0.012) D^{1.012 \pm 0.009}$$

d : リム-底深さ (m)

D : クレーター直径 (m)

- 過去の研究とも一致
 - 月や水星の新しい単純クレーターとも似ている
- 先行研究より得られたスケーリングを小さいサイズまで外挿すると、深さを大きく見積もってしまう
 - 違いはどこから？

5.1. Crater Cavity

クレーター体積

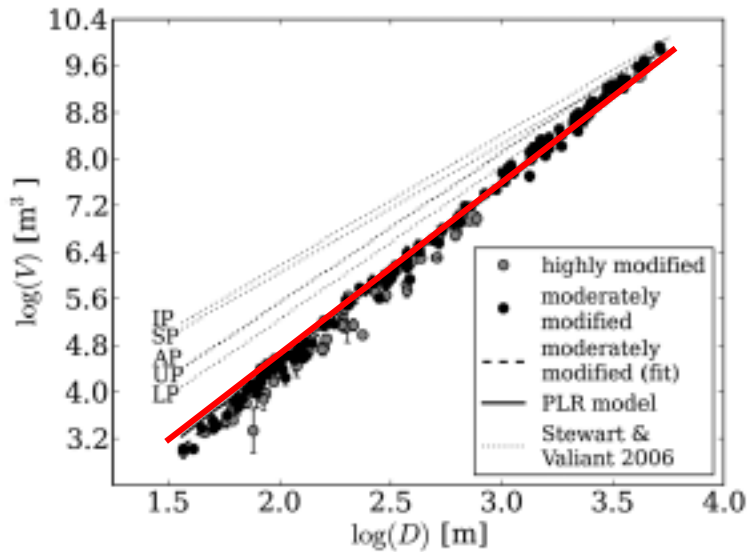


Fig. 7 クレーター体積の直径への依存

先行研究のfitを外挿したのもプロットされている

D < 1 km については

体積を大きく見積もっている → 崩壊が関係

- 本研究の結果で *fit* すると

$$V = (0.029 \pm 0.0012) D^{(3.16 \pm 0.015)}$$

D : クレーター直径 (m) V : クレーター体積 (m³)

- Volume for a “power law of revolution” (PLR)
 - キャビティ体積をべきで表した断面図の回転と考える

$$V = \frac{B \pi D^3}{16(2/\alpha_c + 1)}$$

- constant aspect ratio $d/D = 0.2$ 、 $\alpha_c = 1.75$ のとき測定値とよく一致 (Fig. 7 赤)
 - ✦ 直径大 ⇒ 体積小
 - ✦ 直径小 ⇒ 体積大で見積もる傾向は有 (少し)

5.1. Crater Cavity



キャビティ形状

- キャビティ形状のプロファイルをべき乗でフィッティング

$$z = Br^{\alpha_c}$$

- 直径の強い関数ではない

○ 小さいサイズの、比較的緩和されていないクレーターはより円錐型になる傾向は見られる

✦ $D < 500$ m : 43 %が $\alpha_c < 1.5$

✦ $D > 500$ m : 14 %が $\alpha_c < 1.5$

- 大きなサイズの、緩和されたクレーターは放物型を超えた形状

○ least modified (LM) cratersの多くは $D > 2.5$ kmで $\alpha_c > 2.0$

○ 直径が単純-複雑クレーター境界に近づくことでキャビティ上方の壁の部分的な崩壊による堆積物で埋められている

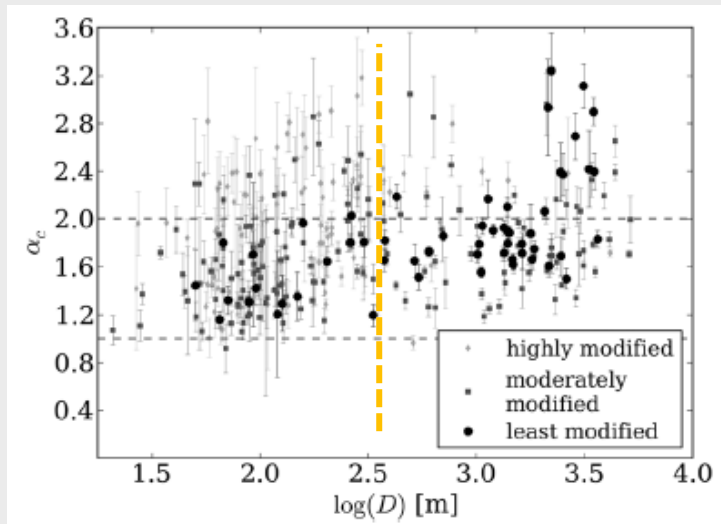
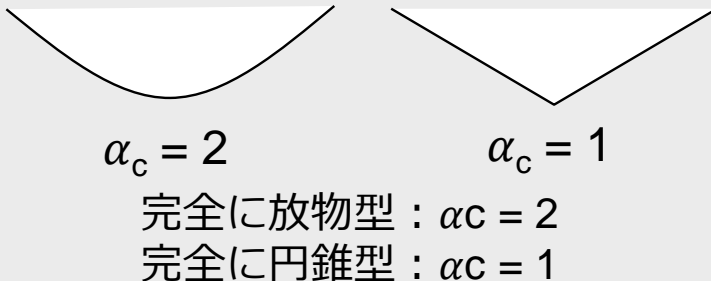


Fig. 6 α_c の直径への依存

平均値 : $\alpha_c = 1.75 \pm 0.12$

標準偏差0.43 (MMの場合)



- cavity shape exponent (αc)
 - 小さいクレーターで1に近づく = クレーターが円錐型に近づく

- 原因

- 弾丸の潜り込み深さの違いと関連？

小さい弾丸：大気によってより減速

- 浅い潜り込み⇒円錐型



大きな弾丸：大気の影響をあまり受けず、高速度衝突

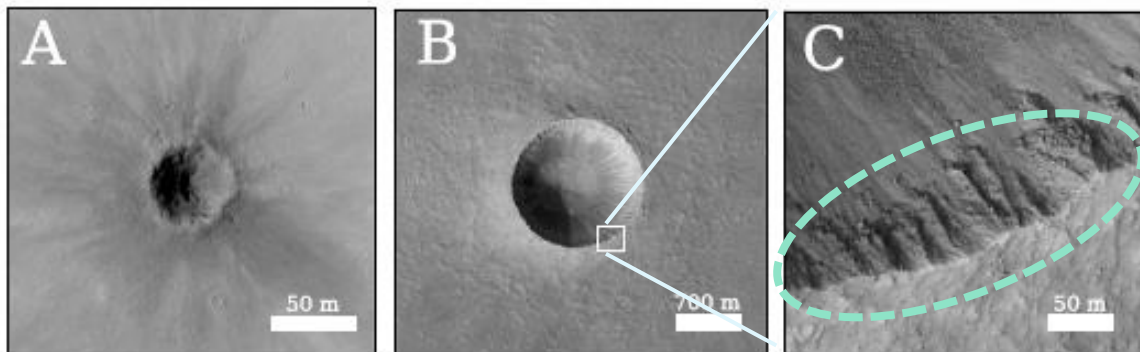
- 深い潜り込み⇒おわん型の、掘削が支配的なキャビティ

- しかしながら、最新のモデルに基づく直径~100 mのクレーターを作るのに必要な物体が火星の薄い大気では相当減速されるということはない
- また、我々のサンプルの、小さい直径範囲のものが離れた二次クレーター(遅い衝突速度で形成される⇒円錐型に)に支配されているという可能性もある

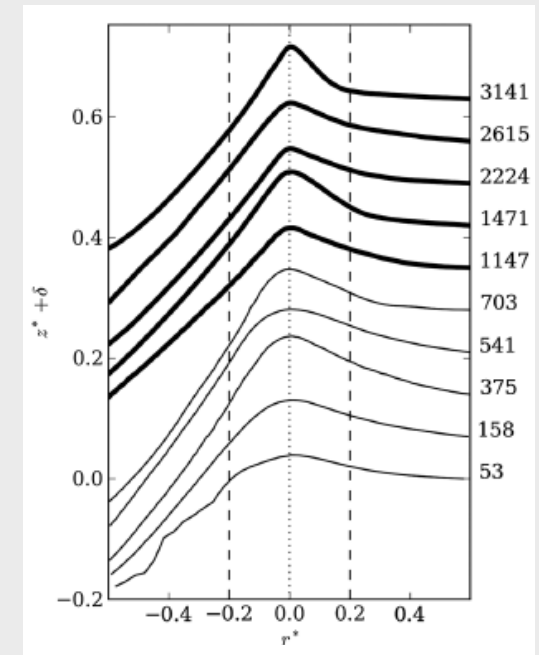
5.2. Crater Rims



- リム高さの直径への依存は $D < 5$ km で変化しない
- リムの形状はクレーター大 \Rightarrow 急になる
 - $D \approx 1$ km で Mass-wasting が起こり、リムは平らに
 - リムの "roundness" に関するパラメーター
 - リムに関連する角度
 - リムの角度と Lobate ejecta について

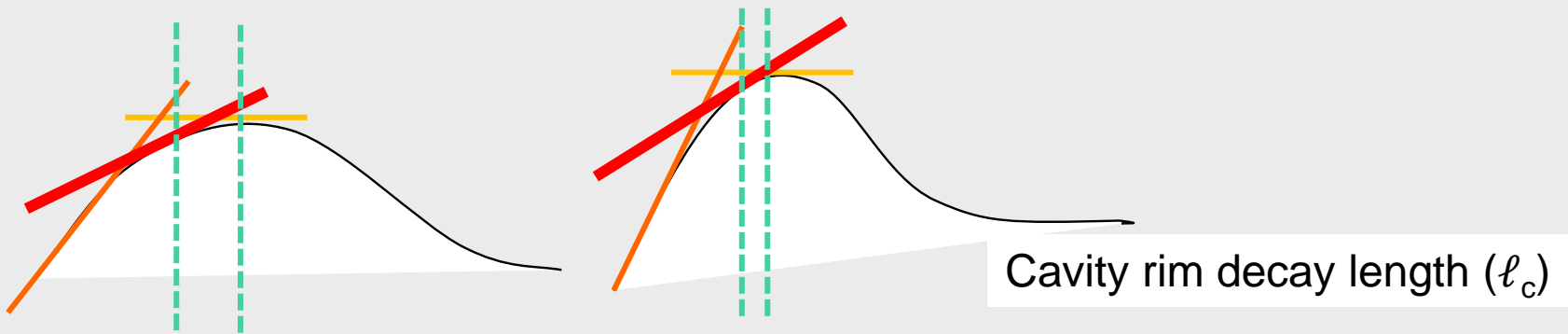


Mass-wasting



リム断面図

- リムの”roundness”に関するパラメーター



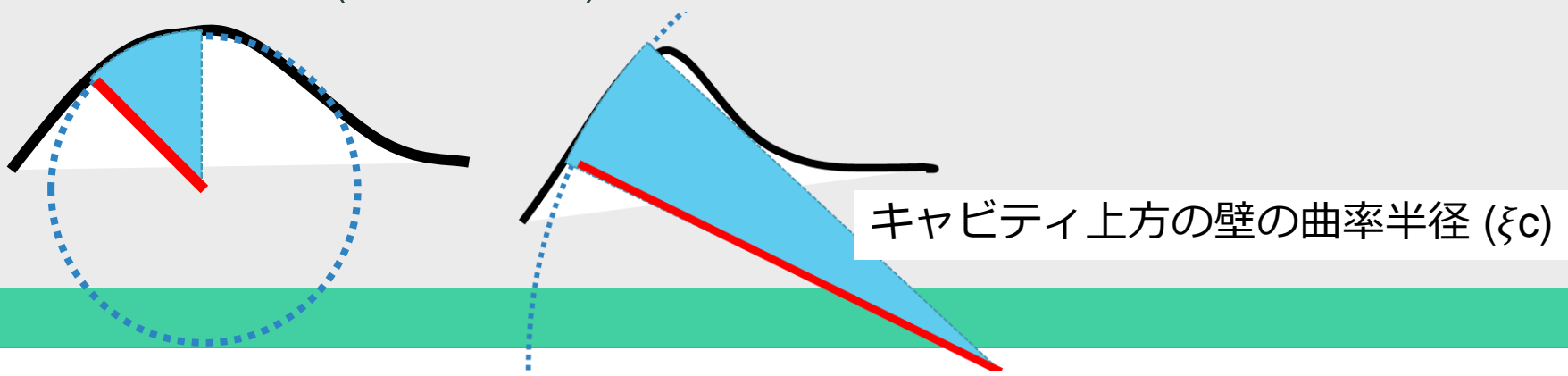
- “rim decay length” (ℓ)

- ✦ 断面図の傾きが0(rim)から最大傾きの半分の傾きになるまでの距離

- リムが急になると短くなる

- 壁の曲率半径 (ξ)

- リムが急(リムが平ら)→値は大



キャビティ側の“rim decay length”, リム近くの曲率半径で比較

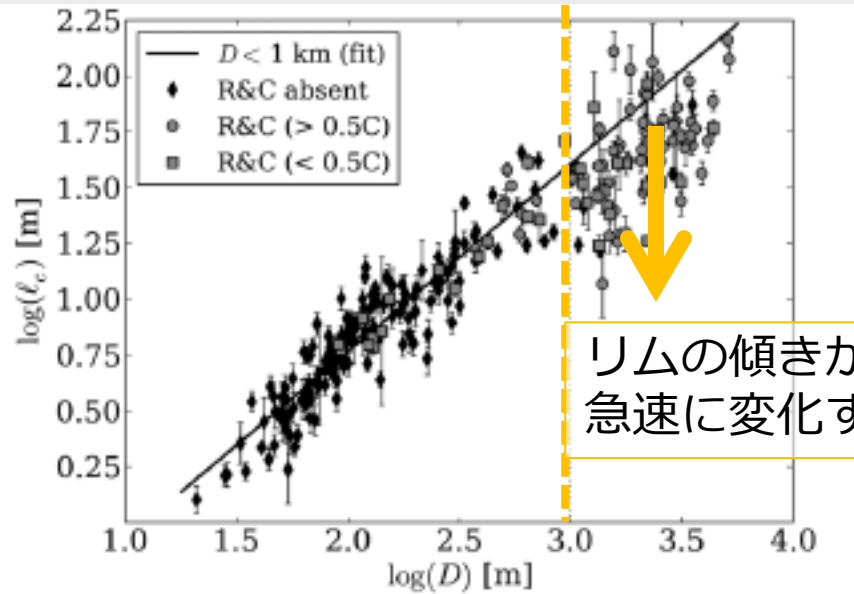


Fig.10 “rim decay length”と直径

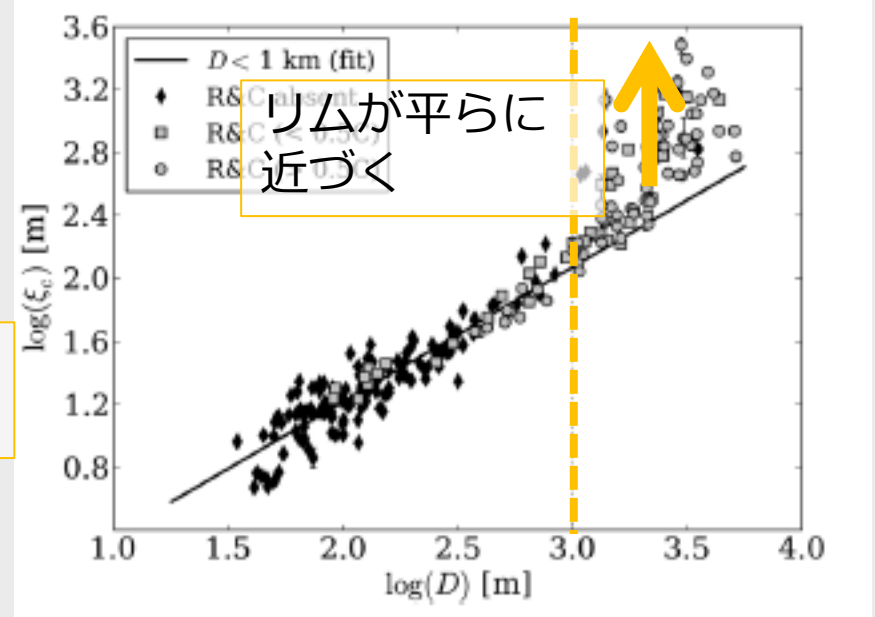
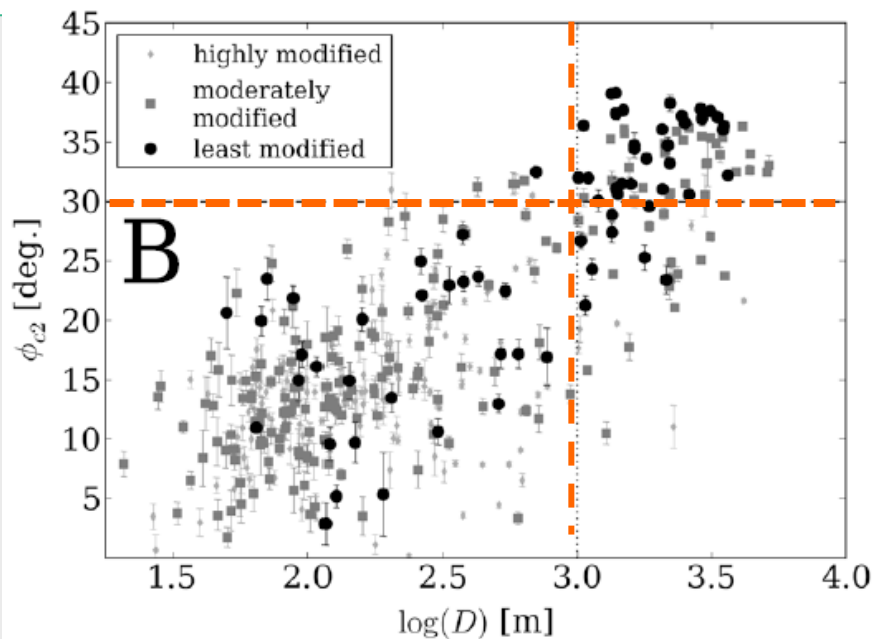


Fig.11 リム近くの曲率半径(ξ_c)と直径

- $D > 1$ km で値が傾向から外れる
 - “rim decay length”が短い側に外れる
 - キャビティ上方の壁の曲率半径が大きい側に外れる

⇒ mass-wasting によってリムが急に(平らに)なったことを示す

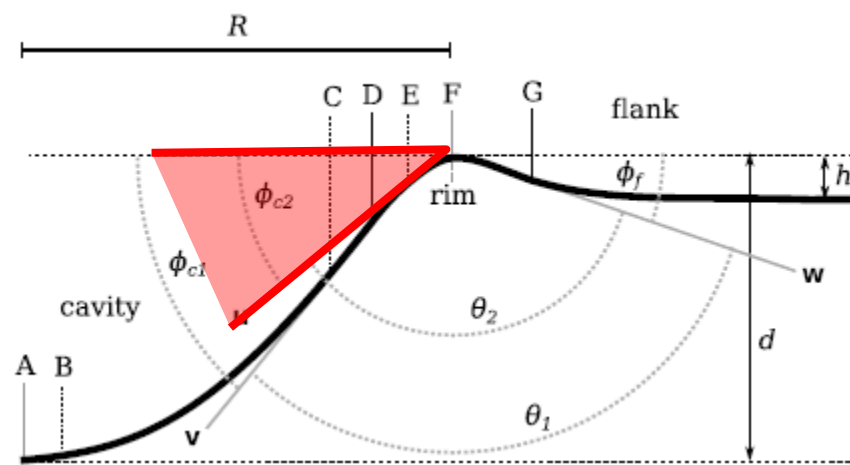


Upper cavity slope (ϕ_{c_2})と直径の関係

- Mass-wastingが起こったのはなぜか？

⇒ リムの傾きが安息角を超えたため

- 惑星表面の物質なら、たいてい安息角 $> 30^\circ$
- upper cavity slope (ϕ_{c_2})
 - $D > 1$ km で 30° を超える → Mass-wasting が起こり、リムが急になった
- 重力による崩壊は小さな直径 ($D \approx 1$ km) で始まる



Upper cavity slope (ϕ_{c_2})

- 重力による崩壊は小さな直径($D \approx 1$ km)で始まる

- 問の答え

- simple-complex transition diameter 近くの単純クレーターより得たクレーター深さと体積のスケーリングを本研究の範囲($D < 5$ km)に外挿すると、値を大きく見積もってしまっていた
⇒重力による崩壊が小さな直径で始まっており、重力による崩壊でクレーター直径が大きくなるため

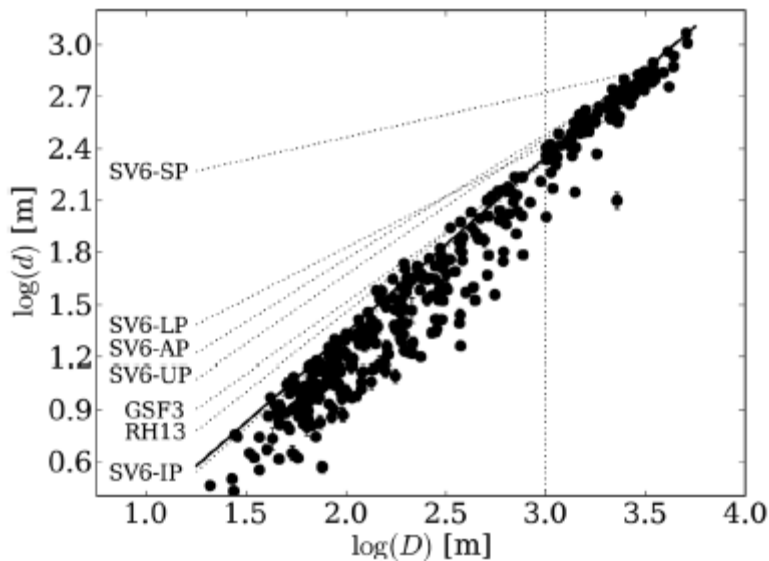


Fig.5 深さと直径の関係

先行研究で得られたスケーリングもプロットされている

※スケーリングに用いられたのは本研究より大きい範囲のクレーター

※クレーター深さの測定方法は研究により異なる

Lobate ejectaとリム角度の関係

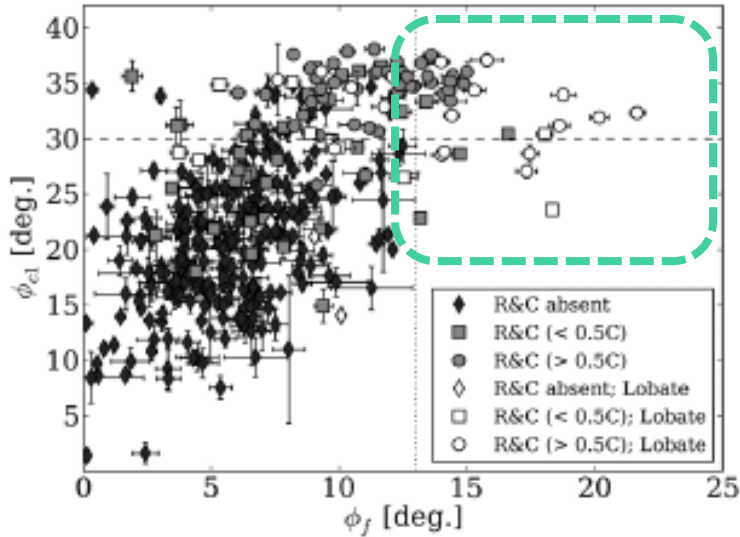
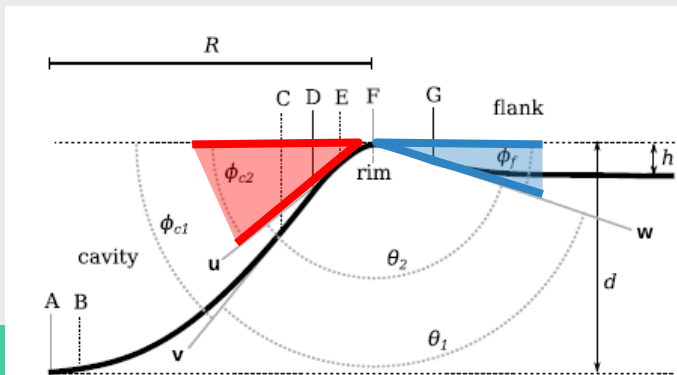


Fig. 14
Middle cavity slopeとflank slope の関係

- 急なmiddle cavity slopesとflank slopesを持つクレーターは、ほぼlobate ejectaを持つ
- このことは他の研究でも言及されている
 - 急な角度で形成されたflankが崩壊するという観点から説明されている, [Barnouin-Jha et al., 2005]



Middle cavity slope (ϕ_{c1})
Flank slope (ϕ_f)

6. Discussion



6.1. Short-Term Modification

- 緩和の仕方によるリム形状変化
 - 長期的な緩和
 - ✦ 土や氷のクリープによってリムは時間と共に丸みを帯びる
 - 短期的な緩和
 - ✦ Mass wastingによってリムは緩和が進むにつれ平らになる
 - 本研究で扱ったクレーターの85%は低緯度に存在
 - 氷が少ない
 - よく保存されたクレーターを選んだ⇒短期的な緩和を観測
- ⇒ Mass wastingが支配的、リムは緩和で平らになる

6.2. Terrain Dependence



- 場所への依存を議論する
 - 主に強度に注目
 - ✦ 強度がある⇒急な傾きを保持できる
 - 比較的緩和されていないクレーターについてのみ行う (MM, MV1)
- d/D (クレーター深さ)
 - 強度のある物質から成る地域の方が大きい
 - ⇒火星の大きなクレーターを用いた研究の結果と一致
- リムの傾き
 - 強度の小さい地域のほうがゆるい
- 低緯度、高緯度で、比較的緩和されていないクレーター(MV1, MM, LM)の深さ、リム高さの特徴に違いはみられなかった
- 氷に富んだ物質に形成されているにも関わらず、強度のある表面の特徴を示すクレーターが存在した
 - 高いリム(larger h/D)、深いキャビティ(larger d/D)、よりおわん型の形状(larger ac)、急なflank slopesを持つ等
- ⇒氷に富んだ層は薄く、下に強い岩石層がある？

7. Conclusions



- 直径、形成地域、緩和状態によるクレーター形状の特徴について述べた
 - 高解像度のDEMを使うことで、これまでよりも小さな範囲のクレーターを調べた($25\text{ m} < D < 5\text{ km}$)
- 緩和が進むと、以下の傾向が見られた
 - キャビティは埋められ、形状はより放物線状になる、あるいはそれを超える
 - リムの傾きはよりゆるくなる
 - 重力による崩壊が起こるとリムは急になる
 - 崩壊により、直径は大きくなる
- これまでの研究で得られたスケーリング則を小さなクレーター($D < 5\text{ km}$)に外挿すると、深さ、体積を大きく見積もることが分かった(特に $D < 150\text{ m}$)
- クレーター直径が 1 km を超えるとリムは崩壊により、シャープになった
 - 安息角との関係
- 氷に富んだ平地に形成されたにも関わらず、強度のある標的の特徴を示すクレーターが存在した
 - 下に頑丈な層？

