

2015年度前期 第3回衝突勉強会

# The quantitative relationship between small impact crater morphology and regolith depth

Gwendolyn D. Bart

Icarus 235 (2014) 130–135

名古屋大学 M1 田口 雅子

# 1. Introduction

- 月表面 : 衝突によって表面が破壊 … **レゴリス層** [Melosh,2011,Ch. 7]  
→ 衝突のサイズや持続時間を示す
- 火星表面 : 衝突 + 水, 火山活動, 風成プロセス  
→ 破壊された, レゴリスのような層

## 衛星画像からレゴリス深さを推定する方法

- ❖ 小クレーター周辺にbouldersが存在するか → レゴリス層を掘り抜いているか  
+ クレーターの掘削深さからレゴリス深さの上限値制約 [Shoemaker and Morris, 1969; Wilcox et al., 2005]
- ❖ Earth-based raderのデータ + rader散乱モデル  
→ 月表側でのレゴリス深さ推定 [Shkuratov and Bondarenko, 2001; Campbell and Campbell,2006; Fa and Wieczorek, 2012]
- ❖ **層状のターゲットに形成された小クレーターの独特な地形から推定**  
[Oberbeck and Quaide, 1967; Quaide and Oberbeck, 1968; Bart et al., 2011]



## 本研究

小さな衝突クレーター (D~10-300 m) と  
ターゲットの層構造の関係の理解を深める解析をいくつか行った

# 1. Introduction : 本研究の流れ

- **Section 2**

小クレーターの地形からレゴリス深さを推定できると示した実験・研究について

❖ 先行研究 : Quaide and Oberbeck (1968) vs. 最近の研究 : Bart et al. (2011)

→ より最近の研究で示された小クレーターとレゴリス深さの関係の性質に関しての新たな疑問を検証, その解明のための解析を報告

- **Section 3**

層構造とクレーター地形の明確な関係 : 解析されたことがなかった updateされた手法の適用が不確かだった3つの状況について

- **Section 4**

クレーター形状のどの大きさが層厚に関係するのかを示す新たな実験について

- **Section 5**

Section 4 で行われた解析を実際の月のデータに適用

- **Section 6**

crater-layering relationshipによって層厚の推定が可能な境界条件について

- **Section 7**

本研究で示した手法の火星への適用の可能性について

# 2. Background

## ❖ Oberbeck and Quaide (1967)

(a) 一様な組成のターゲット

(b) 基盤岩の上に弱い表層（レゴリス層）をもつターゲット



(a) → おわん型クレーター

(b) → **異なるクレーター地形**

おわん型から central mound

→ flat floor → concentric と進行

$D_A/t$  増加

### 実験条件

projectiles :Lexan,  $0.28 \pm 0.02$  g

衝突速度 :  $1.7 \pm 0.1$  km/s at 0.5 mm Hgチャンバー

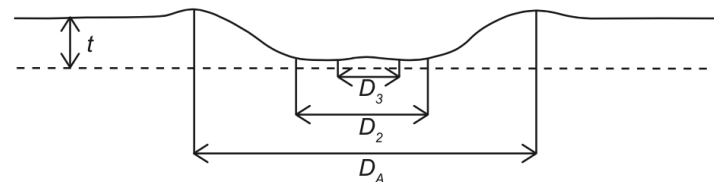
表層 : さまざまな厚みの loose quartz sand

基盤層 : epoxy樹脂で固めた quartz sand

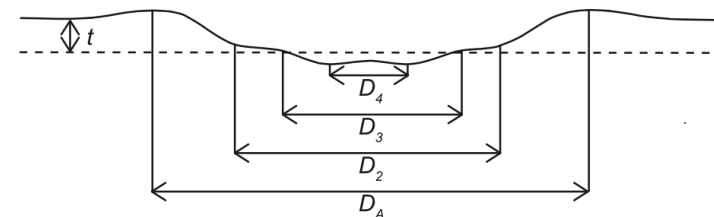
$D_A/t$	Morphology	Physical description
<4	Bowl-shaped crater	Crater formed completely within the regolith
4-7.5	Bowl-shaped crater with a central mound	Crater still completely within the regolith; bottom of crater is close to the regolith/bedrock interface
7.5-10	Bowl-shaped crater with a flat floor	Crater still completely within the regolith; flat floor is at the regolith/bedrock interface
>10	Crater within a crater (concentric)	Upper part of crater is within the regolith; inner crater is formed in the bedrock

Table 1. 直径300 m 以下のクレーターにおける  $D_A/t$  (クレーター直径/レゴリスの厚み) 増加に伴う地形進化

central mound



flat floor



concentric

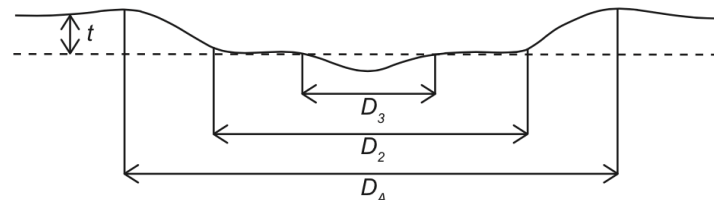


Fig 1. 層構造をもつターゲットへの衝突によって形成された地形プロファイルの模式図[数値シミュレーション : Senft and Stewart (2007, Fig.12b-d.)]

## 2. Background

### ❖ Oberbeck and Quaide (1968)

実験データから得られた関係式

$$\frac{D_F}{D_A} = k - \left(\frac{D_A}{t}\right)^{-1} 2 \cot \alpha \quad (1)$$

$D_A$ : クレーター直径,  $t$ : レゴリスの厚み,  
 $D_F$ : inner mound, flat floor, concentricな特徴の直径  
 $\alpha$ : 物質の安息角,  $k$ : 物質の性質に弱く依存した定数 (月表面の最適値: 0.86)

O&Q (1968) はこの式からではなく, クレーター数密度を測定し,  
クレーターがある地形から次へと遷移する直径を調べることでレゴリス深さを推定  
→ 惑星のクレーターで  $D_F$  は一度も測定されたことがなかった

### ❖ Bart et al. (2011)

固体惑星天体でのレゴリスの厚み ( $t$ ) は以下の2つの計測値によって算出可能

1. リムからリムまでのfinal craterの直径,  $D_A$  / 2. inner featureの直径,  $D_F$

式(1)を  $t$  について解くと,  $t = \left(k - \frac{D_F}{D_A}\right) D_A \tan(\alpha) / 2 \quad (2)$

式(2)に  $D_A$ ,  $D_F$  を代入することでレゴリスの厚み  $t$  を算出

→ レゴリスの深さはどのように, クレーターの特定の地形と関係しているのか?  
crater-layering relationship が制約する条件とは?

# 3. Inner feature measurement

❖ 高解像度( 0.5 m /px : LROC )のデータにより, 内部の詳細が見えるため  $D_F$ を測定する場所の決定が難化

❖ central mound

- ✓ クレーター壁面 - central mound 斜面の間で傾斜の変化あり
- ✓ moundに向かって, 滑らかに傾斜が変化するクレーター壁面をもつ場合が多い
- ✓  $D_F$  は通常のクレーター壁面から傾斜が変化した, クレーターの底面 ( $D_2$ ) と, central mound の主部 ( $D_3$ ) またこれら2つの場所の midpoint (最小値がある場所) で計測

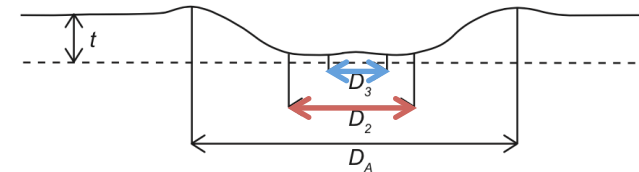
❖ flat floor

- ✓ クレーター壁面: flat floorに近づくにつれて平坦に
- ✓  $D_F$  は通常のクレーター壁面から傾斜が変化したクレーターの底面 ( $D_2$ ) と, 最も内側にあるflat floor, もしくは  $D_2 \sim D_3$ ,  $D_3 \sim D_4$ の2つのslopeの間で傾斜が変化する場所で測定 ( $D_3$  or  $D_4$ )

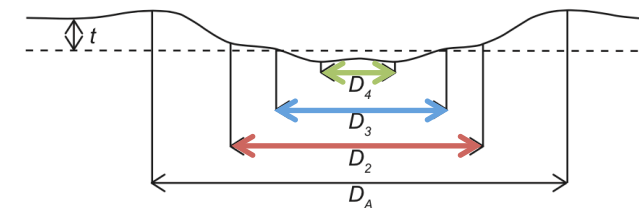
❖ concentric crater

- ✓  $D_F$  は通常のクレーター壁面から傾斜が変化したクレーターの底面 ( $D_2$ ) と, 最も内側にあるクレーターの頂上 ( $D_3$ ) で計測

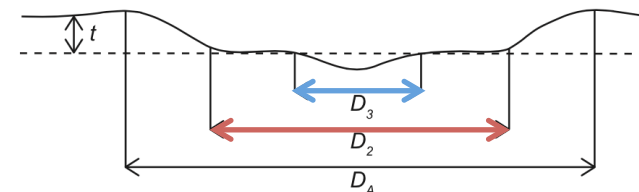
central mound



flat floor



concentric



# 4. Procedure

- 正確なレゴリスの深さを得るための適切な  $D_F$  の計測地点を検証するために層状ターゲットへの小さな衝突の数値シミュレーションの結果を検証する

## ❖ Senft and Stewart, 2007

厚さ 10 m のレゴリスに覆われた玄武岩のターゲットに、鉛直方向に秒速 17 km で玄武岩のprojectileを衝突

使用したコード：CTH

レゴリス層をダメージパラメーター = 1 → ひっぱり強度 ~ 0 と与えることで表現

- ✓ 形成されたクレーターのプロフィール：

室内実験[Quaide and Oberbeck, 1968]で得られたものと同様の地形進行を示す

→ ターゲットでの強度の違いが特有のクレーター地形を生み出すことが確かめられた

- 本研究では、計測値  $D_F$  がどのように層厚に関係するのか定量的に決定するためモデル化されたクレーター[Senft and Stewart, 2007, Figs.12 and 13]のプロファイルを用いる
  - ✓ 数値モデル：既知のレゴリス深さ + 特定のクレーターのプロフィール情報を保持
    - (2)式を適用することで、式が正しいレゴリスの深さを得られる計測値はどれか決定することができる

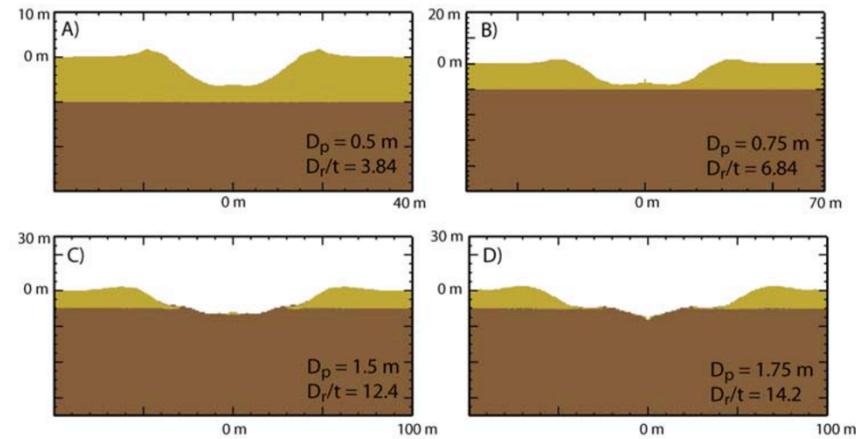


Fig 2. 厚さ 10 m のレゴリスに覆われた玄武岩への衝突のシミュレーション結果 [Senft and Stewart (2007, Fig.12b-d.)]

# 4. Procedure

- 層状のターゲットへの衝突の6つのシミュレーション[Senft and Stewart, 2007, Figs. 12b-d and 13b-d]で、できるだけ多く  $D_F$  と  $D_A$  を計測

- ❖  $D_A$  : 片方のリムの頂上から反対のリムの頂上まで水平に計測

- ❖  $D_F$  : Section 3で述べたように計測地点が不確か

→ 多様な  $D_F$  の計測がシミュレーションされたクレーターで行われた

- 式(2)を用いてそれぞれの $D_F$ でレゴリスの厚み  $t$  を計算し、どの計測地点がシミュレーションで用いられた実際の厚み (10 m) に最も近いかを検証

- その結果、基盤岩/レゴリス境界付近の

クレーターの底のさまざまな地形に関わらず、

$D_F$ の最も良い計測地点は、通常のクレーター壁面から

傾斜が変化した底面の直径 ( $D_2$ ) である

concentric

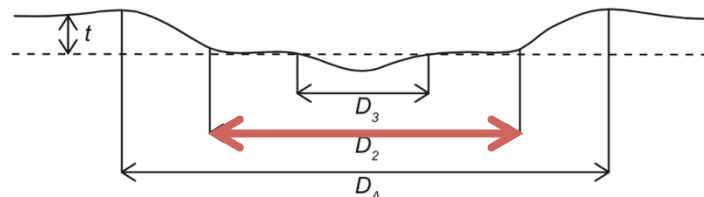


Table 2. [Senft and Stewart, 2007, Figs.12 and 13]でシミュレーションされたクレーターの解析結果.

Crater type	Senft and Stewart (2007)	$D_F$ (m)	$D_A$ (m)	$t$ (m)	How $D_F$ was measured
Central mound	Fig. 12b	13.80	66.61	13.06	$D_3$ = diam of central mound
		27.20	66.61	<b>9.04</b>	$D_2$ = bottom of crater wall slope
Flat floor	Fig. 12c	29.33	120.90	22.43	$D_4$ = diam of inner flat floor
		50.70	120.90	16.01	$D_3$ = at regolith depth
		72.38	120.90	<b>9.49</b>	$D_2$ = bottom of crater wall slope
Concentric	Fig. 12d	43.40	136.57	22.25	$D_3$ = diam of central pit
		85.84	136.57	<b>9.50</b>	$D_2$ = bottom of crater wall slope
Central mound	Fig. 13b	6.12	92.98	22.18	$D_4$ = diam of tiny central mound
		25.88	92.98	16.25	$D_3$ = diam of peak ring
		43.80	92.98	<b>10.86</b>	$D_2$ = bottom of crater wall slope
Flat floor	Fig. 13c	27.11	92.19	15.67	$D_3$ = diam of peak ring
		42.30	92.19	<b>11.11</b>	$D_2$ = bottom of crater wall slope
Concentric	Fig. 13d	25.71	145.14	29.78	$D_3$ = diam of central pit
		86.87	145.14	<b>11.40</b>	$D_2$ = bottom of crater wall slope (slight change in wall slope)



Fig 3. LROC NAC image M113697607L  
at 8.261°N, 39.41°E (D = 77 m). 右が北.

## 5. Data

- 実際の月のデータ (Mare Tranquillitatis の3つのクレーター) で本手法の検証を行った
  - ✓ Fig.3 : concentric , Fig.4 : central mound
- 計測値は  $D_A$ , クレーター直径 ;
  - $D_2$ , クレーター壁面の基底の直径 ;
  - $D_3$ , inner crater もしくは moundの直径 ;
  - $D_4$ , 最も内側の穴の直径
- Fig.3とFig.4の下のクレーターで $D_2$ の計測によってそれぞれ4.7m, 4.5mというレゴリスの深さが得られた
  - ❖ Mare Tranquillitatis でのレゴリスの平均計測値
    - 4.6 m [Oberbeck and Quaide, 1968]
    - 4.4 m [Bart et al., 2011] と誤差を含めるとよく一致

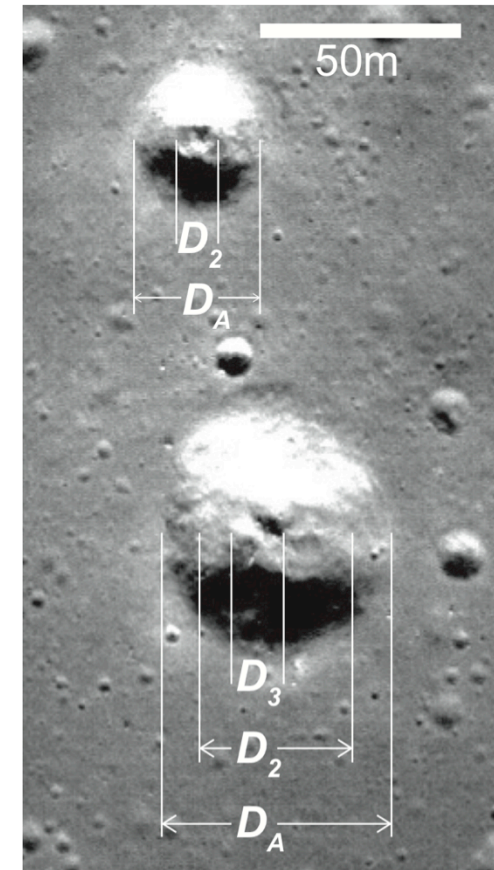
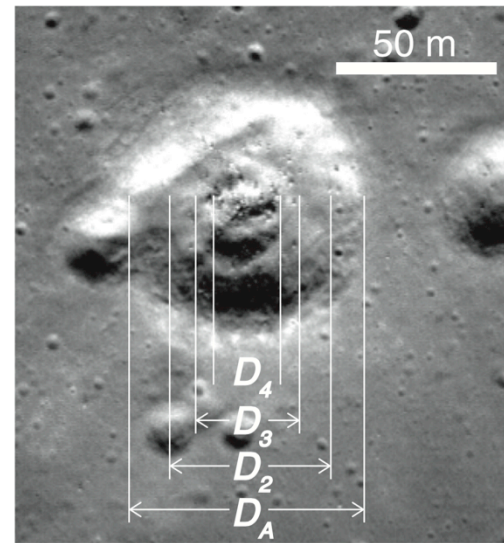


Fig 4. LROC NAC image M113697607L  
Top : at 8.6789°N, 39.451°E (D = 32.1 m).  
Bottom : at 8.6795°N, 39.454°E (D = 58.9 m ). 右が北.

# 5. Data

	Crater data Fig. 2	Regolith depth $t$ (m)
Latitude	8.261°N	-
Longitude	39.41°E	-
$D_A$ , diameter (m)	72.2 ± 1.5	-
$D_2$ , base of crater wall (m)	46.6 ± 2.0	<b>4.7 ± 0.7</b>
$D_3$ , rim of inner crater (m)	29.5 ± 2.1	9.8 ± 0.7
$D_4$ , inner feature (m)	15.7 ± 2.2	13.9 ± 0.8

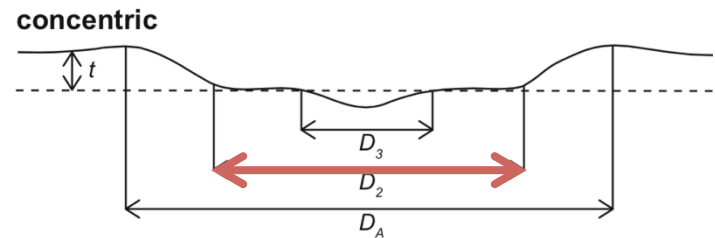
	Crater data Fig. 3 bottom	Regolith depth $t$ (m)
Latitude	8.6795°N	-
Longitude	39.454°E	-
$D_A$ , diameter (m)	58.9 ± 1.9	-
$D_2$ , base of crater wall (m)	35.6 ± 2.3	<b>4.5 ± 0.8</b>
$D_3$ , inner feature (m)	12.6 ± 1.0	11.4 ± 0.6

	Crater data Fig. 3 top	Regolith depth $t$ (m)
Latitude	8.6789°N	-
Longitude	39.451°E	-
$D_A$ , diameter (m)	32.1 ± 1.7	-
$D_2$ , base of crater wall (m)	9.7 ± 0.3	<b>5.4 ± 0.5</b>

Table 3. 3つの月面クレーターの観測結果。  
 $t$  の計算結果において、先行研究に最も近い値は太字。

- $D_3$ と $D_4$** を用いたレゴリスの深さ推定値は、他の手法による推定より明らかに大きく、調和的でない
- したがってモデルクレーター、月クレーター、どちらの解析も通常のクレーター壁面の傾斜が変化する基底での計測値である **$D_2$** の直径が、レゴリス深さの計算に用いる正しい値であると示す



# 6. Limits

- クレーター直径 — 掘削深さ

- 式(1)のプロット(Fig.5) :

$D_F / D_A \sim 0.2$ 以下 ( $D_A / t \sim 5$ 以下) or  $D_A / t \sim 20$ 以上 ( $D_F / D_A \sim 0.7$ 以上)

→ 変化が小さく厚みを制約できない

⇒ 式(2)は $D_F / D_A = 0.2 \sim 0.7$ ,  $D_A / t = 5 \sim 20$  のときに最もよく適用できる

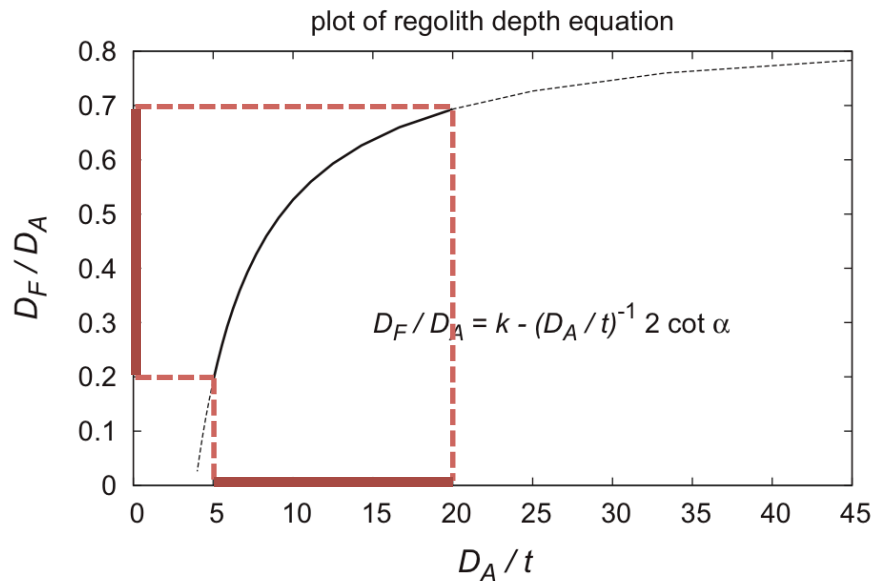


Fig 5. レゴリス深さの式(1)のプロット.

$$\frac{D_F}{D_A} = k - \left(\frac{D_A}{t}\right)^{-1} 2 \cot \alpha \quad (1)$$

$$t = \left(k - \frac{D_F}{D_A}\right) D_A \tan(\alpha) / 2 \quad (2)$$

# 6. Limits

- 式(2)を $D_A$ の関数だと考えると,

$$t = \frac{k - D_F/D_A}{2 \cot \alpha} D_A \quad (3)$$

- 式(3)は $D_F / D_A$ の最大値0.7で,  $t = 0.0048 D_A$ , 最小値0.2で  $t = 0.198 D_A$  (Fig.6)

- Mare Tranquillitatis : レゴリスの厚み約 **5 m**  
→ 25~104 m の直径をもつクレーターが最も正確なレゴリスの厚みを示す

- Quaide and Oberbeck (1968)

「衝突クレーターが大きくなれば,  
ターゲット岩石での強度の違いは, 地形進化の支配において重要性が低くなる」

- ❖ 観測結果 : 月の海の上にある~200 m 以上のクレーターは独特の地形を示さない

↕ 整合的

- ❖ 本研究での理論的境界 : 直径200 m 以上のクレーターはレゴリスの深さに敏感でない(Fig.6)

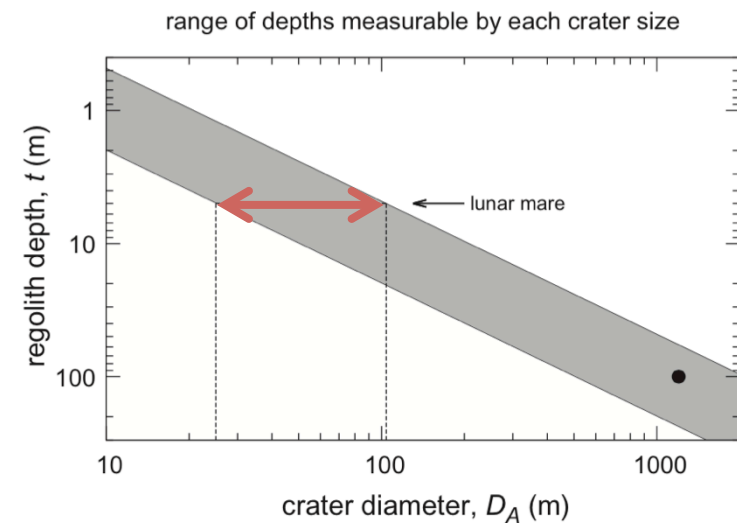


Fig 6. クレーターのサイズによってレゴリスの深さが計測可能な範囲

# 6. Limits

- Melosh (1989) : concentricな地形をもつ月の衝突クレーター ( $D = 1.2 \text{ km}$ )
  - ❖ このクレーターがさらに強度の高い岩体の上を覆う100 m の弱い層の上で形成されたと提案
  - ❖ LROCデータ : 直径 1.2 km, クレーター壁面の基底の直径 $\sim 700 \text{ m}$   
→ 式(2)より, レゴリスの厚みは100 m
  - ❖ これらのデータをFig.6に点でプロット  
→ 地形が合理的にレゴリスの深さを説明すると予想される範囲
- このような深いレゴリスの深さでは, 今までと異なる層を見ている可能性

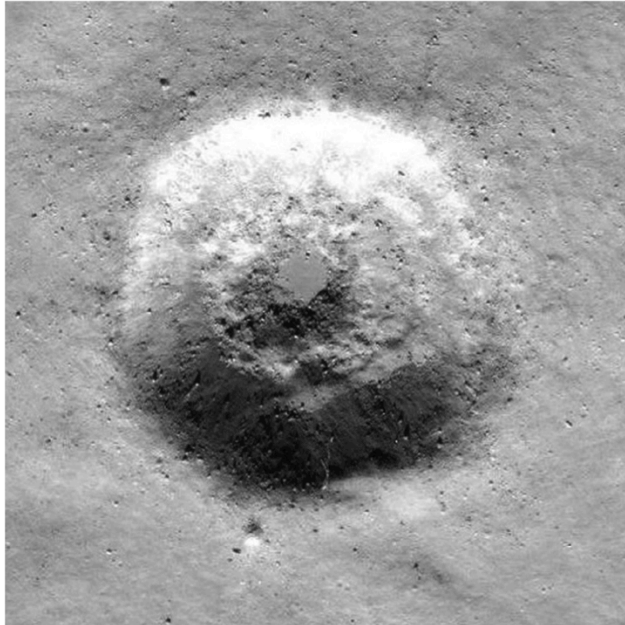
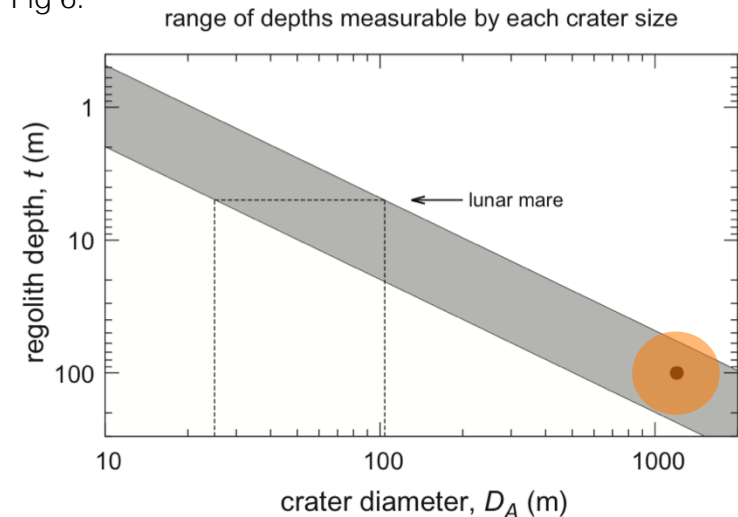


Fig 7. Mare Serenitatisの東に位置するクレーター  
Apollo image AS15-P-9287

- ❖ 海の溶岩流のlayer
- ❖ 過去のクレーターフロアの存在

Fig 6.



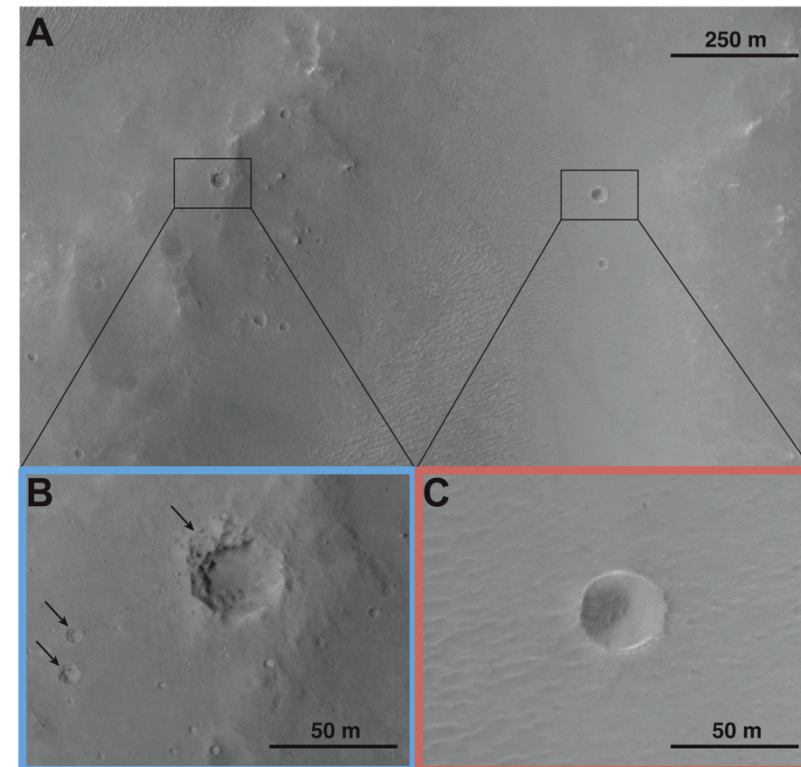
# 7. Discussion

- この手法を用いたレゴリスの深さ推定  
→ **月でのみ**行われてきた
  - ✓ 最もよい画像：アポロ計画以前にメートルスケールの分解能（Lunar Orbiter）
  - ✓ 大気および活発な地形プロセスの欠如：長期間のクレーターの保存
- ❖ 他の惑星
  - ❖ 水星：非常に低解像度の画像
  - ❖ 火星：活発な表面活動

これらの問題が解決されれば  
この手法を適用可能

- Fig.8 : MRO, HiRISE camera image  
近接する2つのクレーター：異なる地形  
→ **異なる表面下の性質を示唆**
  - ❖ **Fig.7B** : concentric クレーター(D = 40 m)  
→ ターゲット岩石に層構造が存在
  - ❖ **Fig.7C** : 完璧なおわん型クレーター(D = 35 m)  
→ dust は十分な深さをもつ

Fig 8. HiRISE image ESP\_011490\_1725



火星：風成やtectonicな活動によって  
多くのクレーターが劣化



HiRISEアーカイブから新鮮なクレーターを  
選別することで本手法の適用可能性

# 8. Conclusion

- 本研究では小さな衝突クレーターとレゴリスの深さの関係の定量的関係が示された
- レゴリスの深さは2つの観測可能な値  $D_F$  と  $D_A$ , 式(2)によって計算される
  - ❖  $D_F$ のもっともよい計測地：元のクレーター壁面の斜面の底
- 式(2)は  $D_F / D_A = 0.2 \sim 0.7$ ,  $D_A / t = 5 \sim 20$  のとき適用可能
- 現在まで, この手法は月でのみ用いられてきたが  
火星から持ち帰られた高解像度の画像データによって  
火星でもこの手法を適用することができるかもしれない