



火星衛星の表層に関する研究の現状と将来

菊地 紘
東京大学

東工大 2018年8月31日(金)

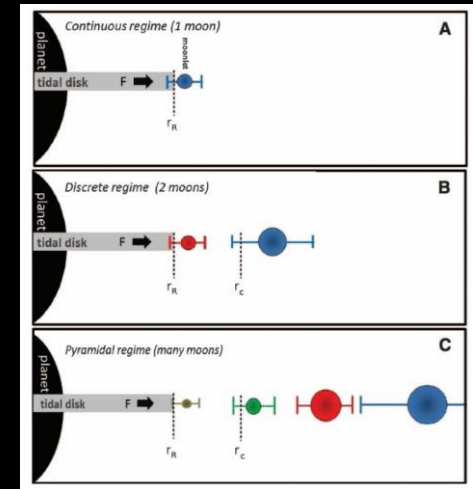
1. 火星衛星の研究意義
2. これまでの探査（今回は画像解析メイン）
3. 現在の研究
 - スティックニークレーターの年代
 - フォボス近傍の重力場
 - 内部構造の推定
4. 今後の研究

1. 火星衛星の研究意義

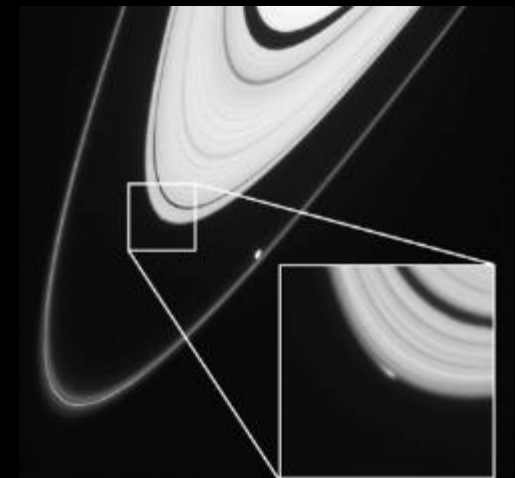
ロッシュ限界付近は衛星形成にとって重要な場

- ロッシュ限界付近
衝突などの過程で円盤の粒子密度、速度分布、マススペクトルが変化し衛星の成長に影響
- 問題点
 - 円盤物質の起源、供給過程、晴れ上がりの過程
 - 微衛星がどのように成長過程
 - 供給物質がどのようにふるまう？どんな軌道？破壊に寄与？
- 理論計算、数値実験と同時に観測的な制約条件を与えることが必要

どの衛星を観測するのがいいのか？



規則衛星の形成モデル
Crida and Charnoz, 2012



土星のA環でのMoonletの形成 Murray et al. 2014

どの天体のロッシュ限界に着目するか

	satellite	Orbital Radius / Roche limit (fluid)%	Semi-major axis	eccentricity	inclination	Mean radius	
Mars	Phobos	89	9376	0.01510	1.0930	11.3	
Jupiter	Metis	94	128000	0.00020	0.0600	21.5	環の中
	Adrastea	95	129000	0.00150	0.0300	8.2	環の中
	Amalthea	88	181366	0.00319	0.3740	83.5	スペクトルから捕獲衛星か
Saturn	Pan	70	133584	0.00001	0.0001	14.1	エンケの空隙
	Atlas	78	137670	0.00120	0.0030	15.1	A環の羊飼い衛星
	Prometheus	80	139380	0.00220	0.0080	43.1	F環の羊飼い衛星
	Pandora	83	141720	0.00420	0.0500	40.7	F環の羊飼い衛星
	Epimetheus	99	151410	0.00980	0.3510	58.1	ダストのリング
	Janus	97	151460	0.00680	0.1630	89.5	ダストのリング
Uranus	Cordelia	79	49751	0.00026	0.0085	20.1	イプシロン環の羊飼い衛星
	Ophelia	86	53763	0.00992	0.1036	21.4	イプシロン環の羊飼い衛星
	Bianca	94	59166	0.00092	0.1931	25.7	
	Cresside	98	61767	0.00036	0.0060	39.8	
Neptune	Naiad	72	48227	0.00040	4.7500	33.0	トリトンによって壊された衛星か
	Thalassa	75	50075	0.00020	0.2100	41.0	トリトンによって壊された衛星か
	Despina	78	52526	0.00020	0.2160	75.0	トリトンによって壊された衛星か
	Galatea	79	61953	0.00004	0.0520	88.0	トリトンによって壊された衛星か

2. これまでの探査

- フライバイ:
NASA Mariners 4, 5 and 6
ESA Rosetta



- オービター:
NASA Mariner 9
Viking Orbiters 1 and 2 [VO]
Soviet Phobos 88
NASA Mars Global Surveyor [MGS]
NASA Mars Odyssey Orbiter [MO] (still operating)
ESA Mars Express (still operating) [MEX]
NASA Mars Reconnaissance Orbiter (still operating) [MRO]
NASA Mars Atmosphere and Volatile Evolution Mission (Still operating)
ESA ExoMars (Still operating)
ISRO Mars Orbiter Mission (still operating) [MOM]



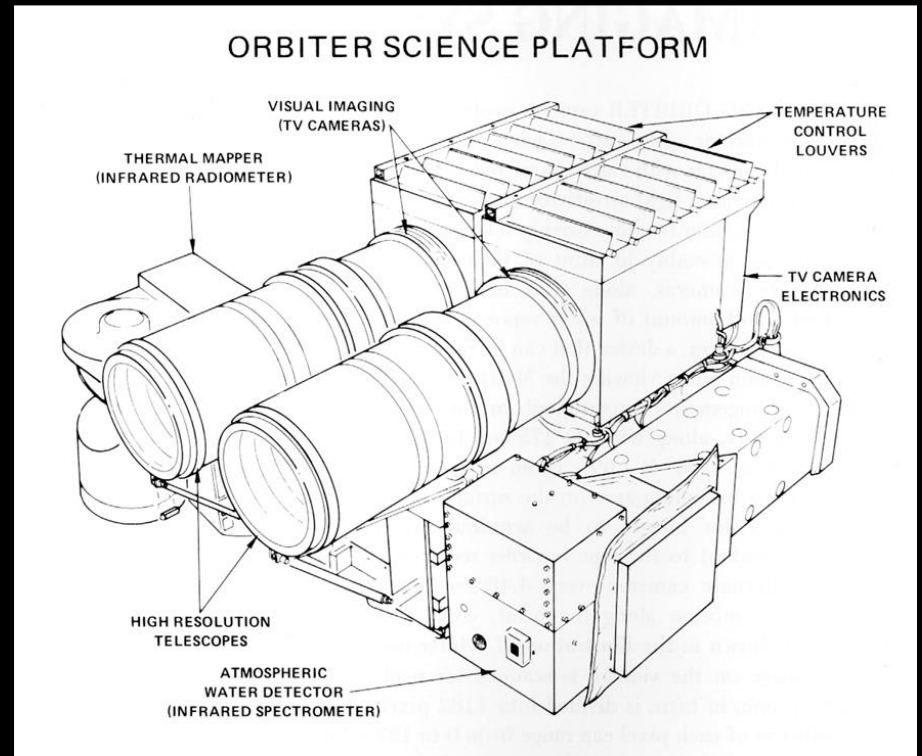
- ランダー、ローバー:
Viking Landers 1 and 2
Mars Pathfinder
Mars Exploration Rover Spirit and Opportunity (still operating)
Mars Surface laboratory Curiosity (still operating)



Viking Orbiter の画像データ

Viking mission の目的

1. 火星の高解像度画像の取得
2. 火星表面と大気のcharacterigation
3. 火星の生命探査



Viking Orbiter Camera: Visual-Imaging System

Viking画像で最も解像度の良いフォボスの画像

画像ID：244A03

空間解像度（最小）：2.921837 m/pixel

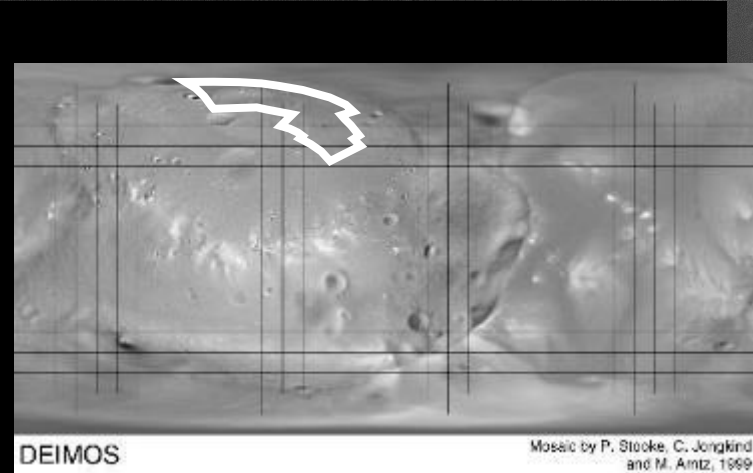
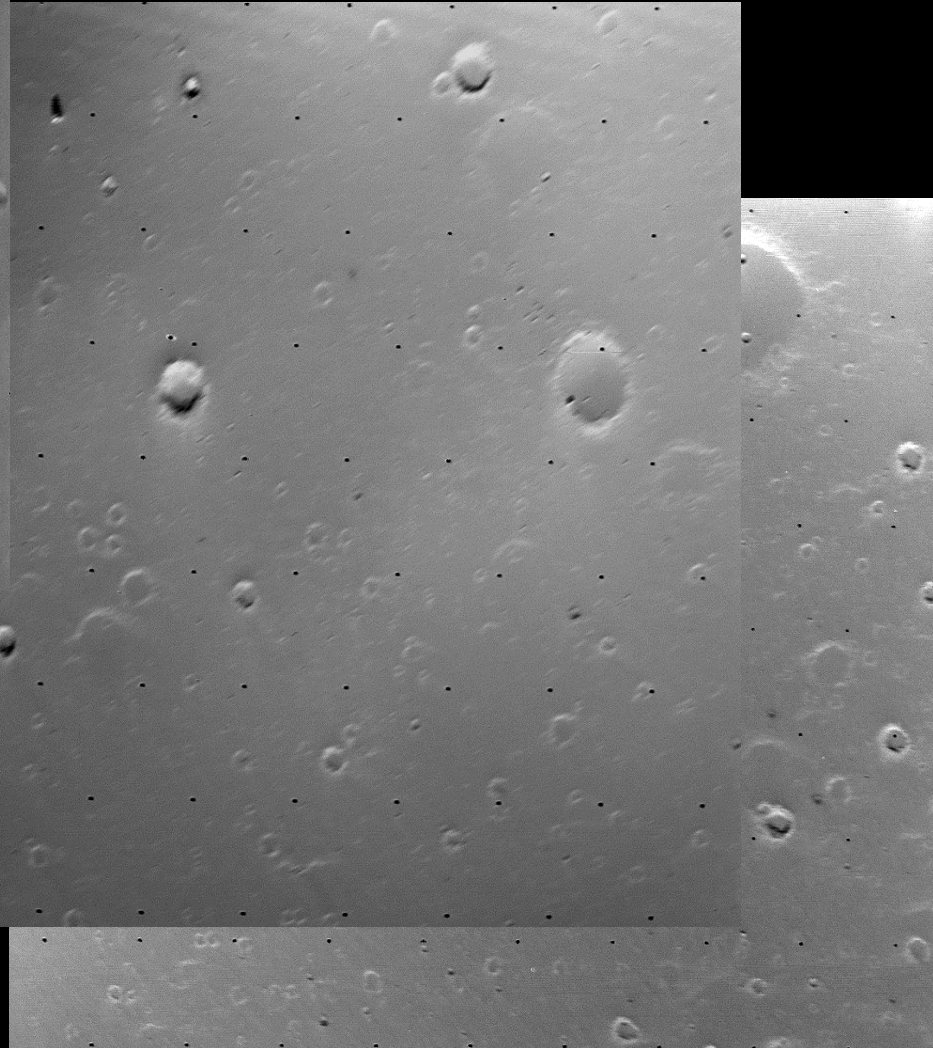
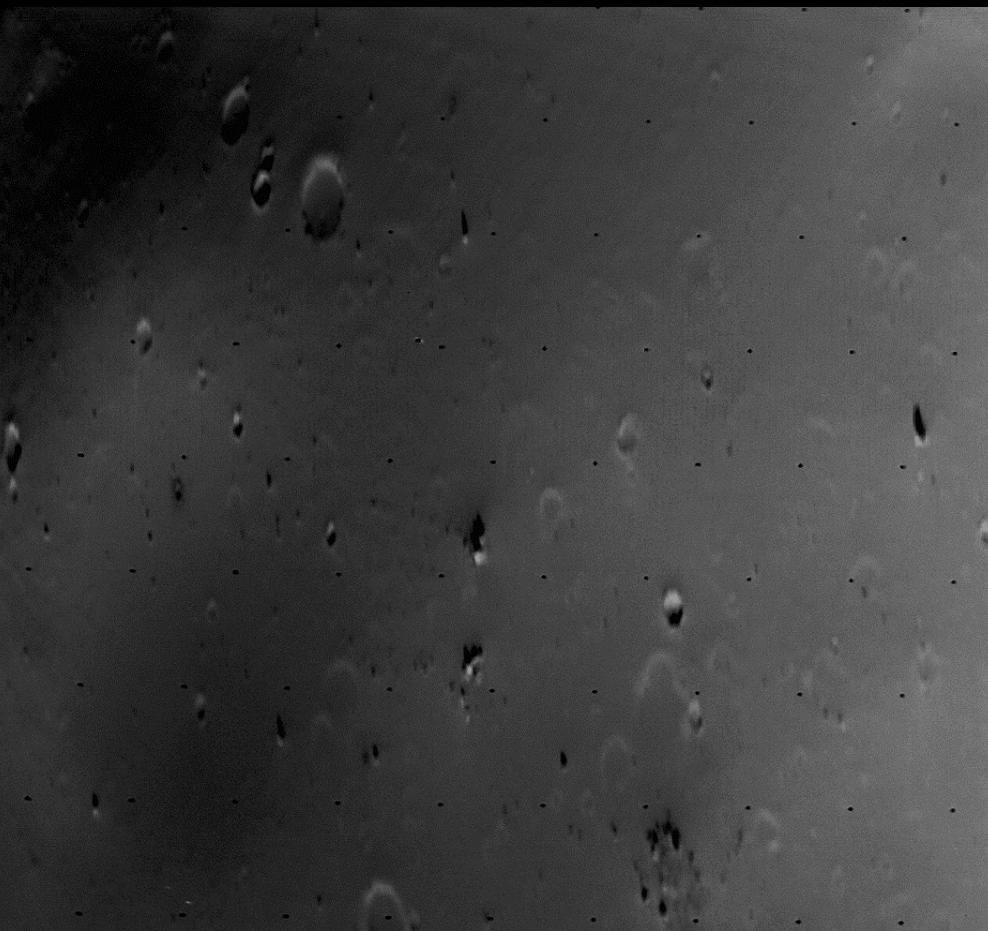
空間解像度（最大）：3.120062 m/pixel

Deimosの高解像度画像

探査機：Viking 2 orbiter

画像番号：vo2_423b61, vo2_423b62, vo2_423b63

解像度：~1m/pixel



Viking 探査の成果の一部

Phobos

- スティックニークレーター [Asphaug and Melosh 1993; Fujiwara, 1989]
- Space weathering [Thomas, 1979; Simonelli et al., 1998]
- グループと呼ばれる溝構造 [Thomas et al., 1979]

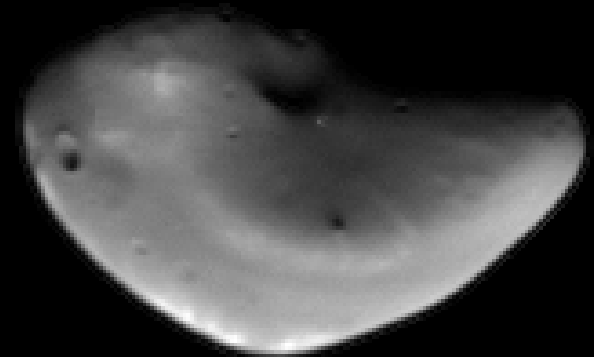
Deimos

- 滑らかな表面 [Thomas, 1979]
- 南側の大きな窪地 [Thomas, 1989]
- Streamers [Thomas and Veverka, 1980; Thomas et al., 1996]

Phobosの後行側とDeimos全球は今でもViking dataが中心

二つの衛星のクレーター累積数密度は類似 [Thomas and Veverka 1980]

これ以降に探査された他の小天体と良い比較対象



Phobos 2

Phobos 2は探査の途中で通信が途絶えてしまったが重要な知見を与えた

- ・ フォボスの平均密度： $1.9 \pm 0.1 \text{ g/cm}^3$

[Avanesov et al., 1991; Murchie and Erard 1996]

- ・ 擬カラー画像の取得

[Murchie et al., 1991; Avanesov et al., 1991; Murchie and Erard 1996]

フォボスには赤いユニットと青いユニットと呼ばれる領域がある

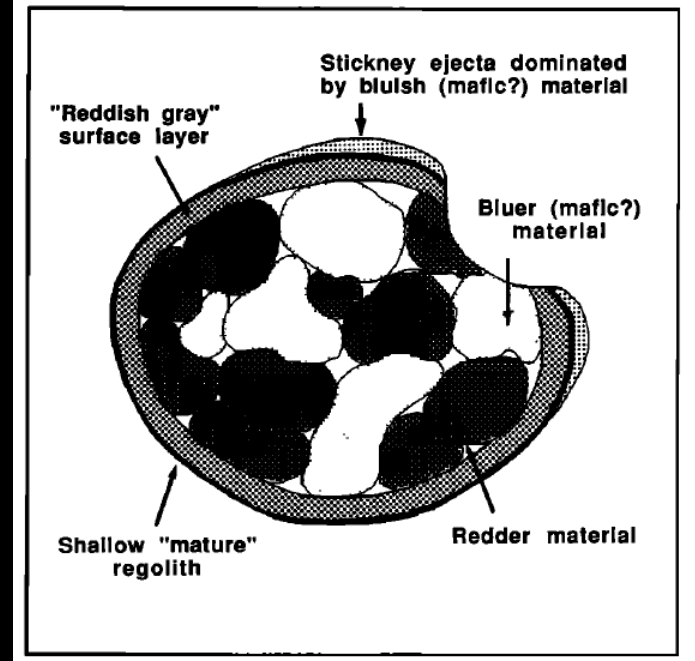
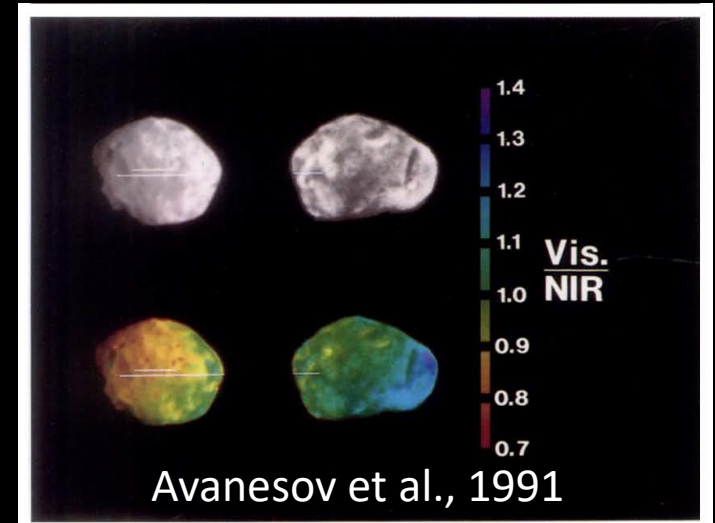
分光的に表面は不均質

→不均質な岩質分布

→単一の岩質鉱物の宇宙風化

→物理特性の違い

スペクトルがC、D型小惑星に似ていることから捕獲説の根拠

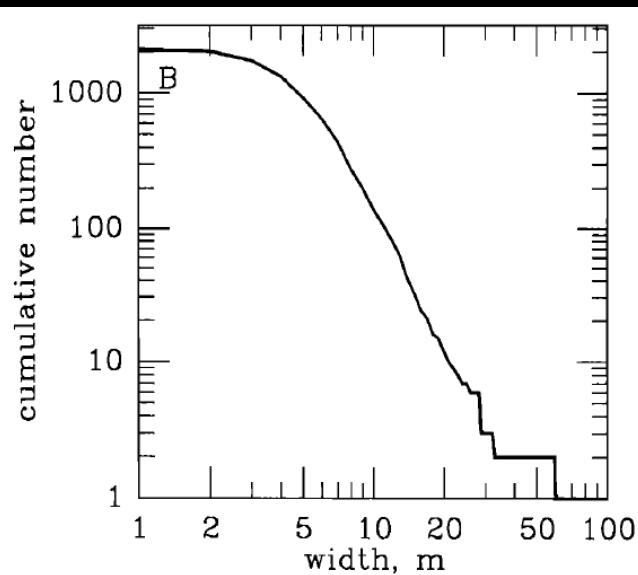
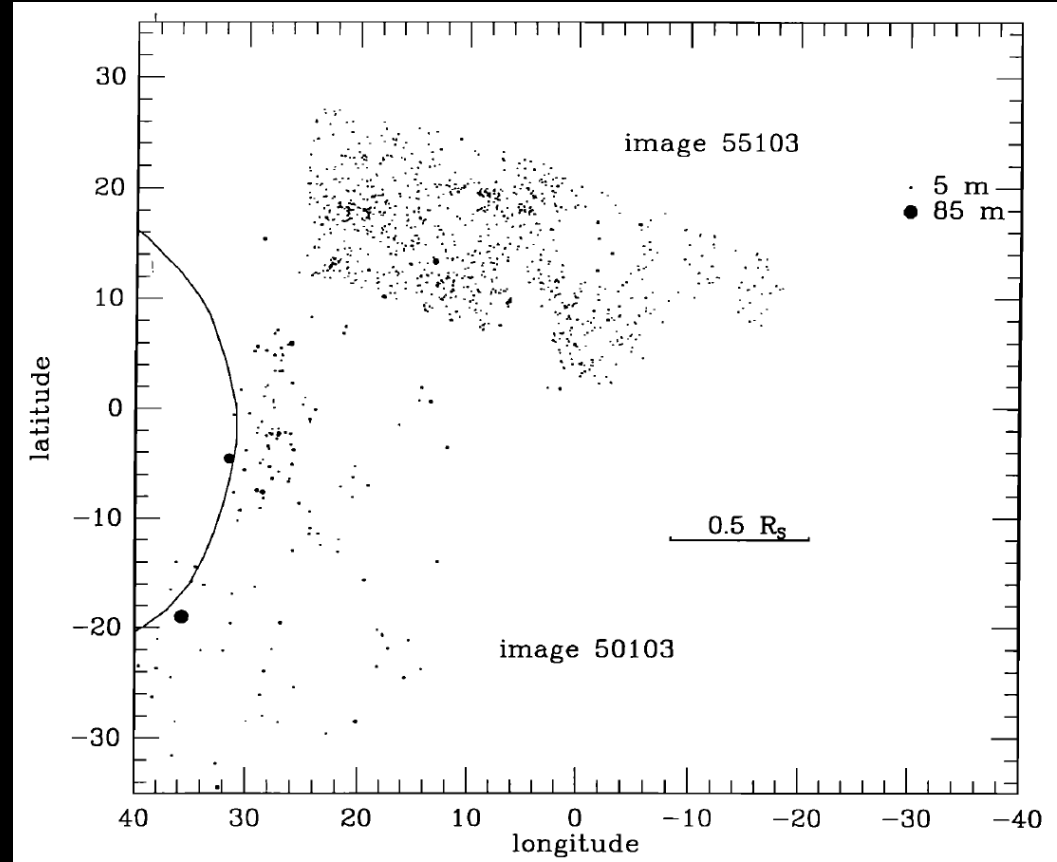
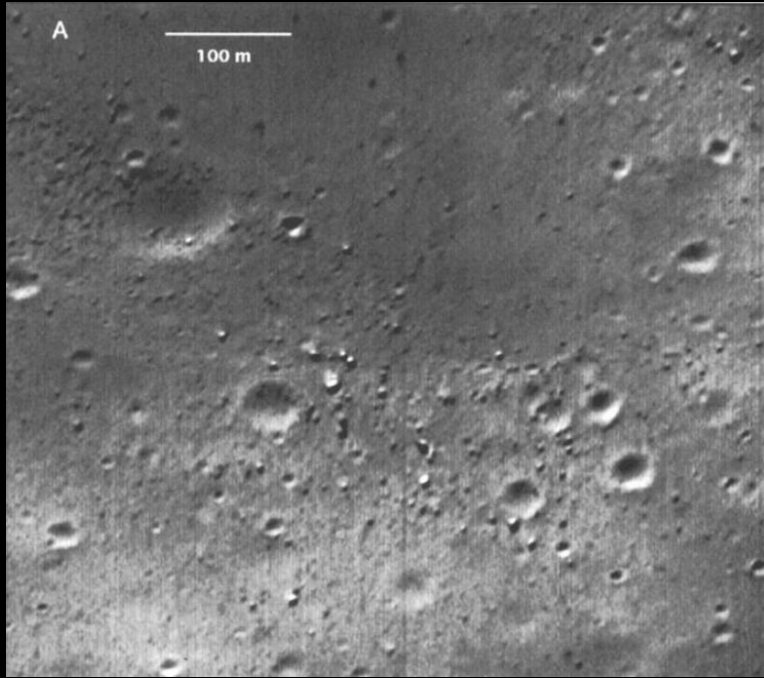


Mars Global Surveyor

画像の総数は少ないが、フォボスの全画像のうちで最も解像度のよい一つ



Mars Global Surveyor の代表的な成果と問題点



成果：ボルダーと呼ばれる岩塊の空間分布を詳細に測定
[Thomas et al., 2000]

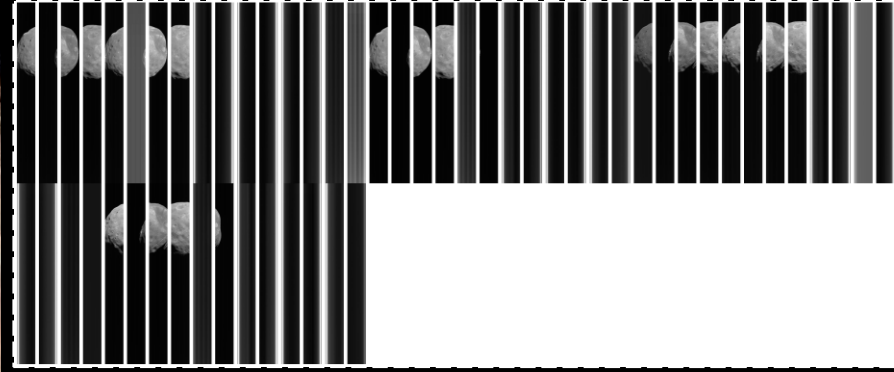
問題点：撮像したときの情報が不正確なためGIS
上で扱うのが難しい

HiRISE (MRO)

PSP_007769_9010_IRB



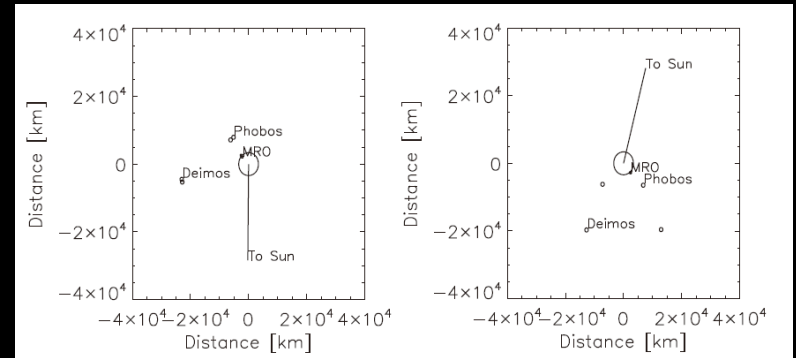
PSP_007769_9015_IRB



ESP_012065_9000_COLOR



ESP_012068_9000_COLOR5

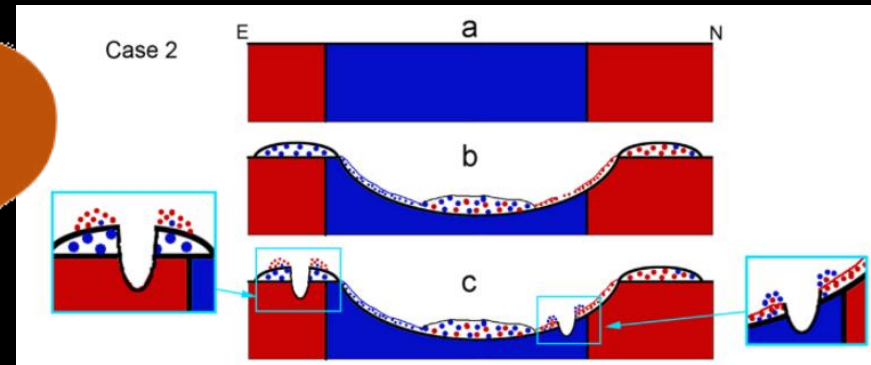
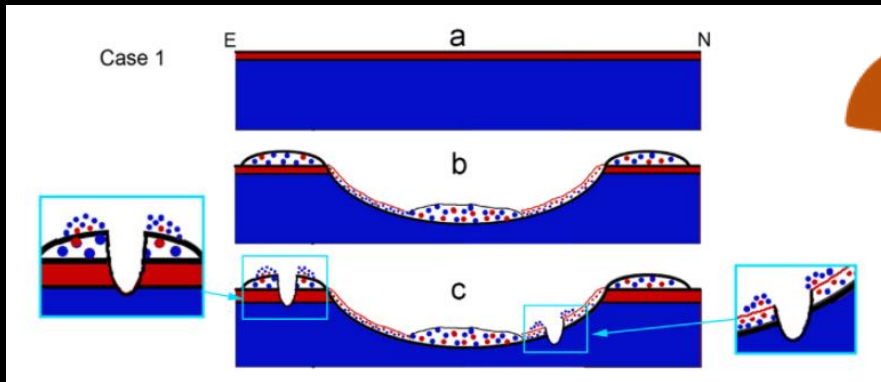
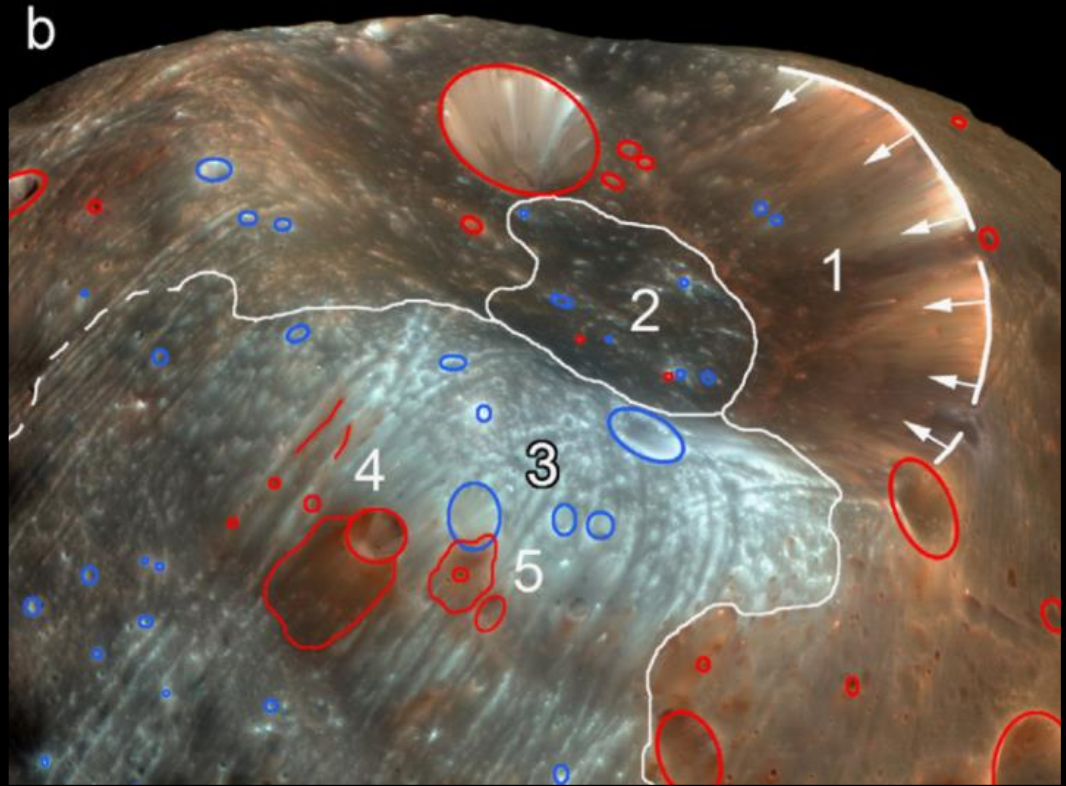


Thomas et al., 2011

内部構造の提案

単純な2層構造であるという見方の修正を余儀なくした

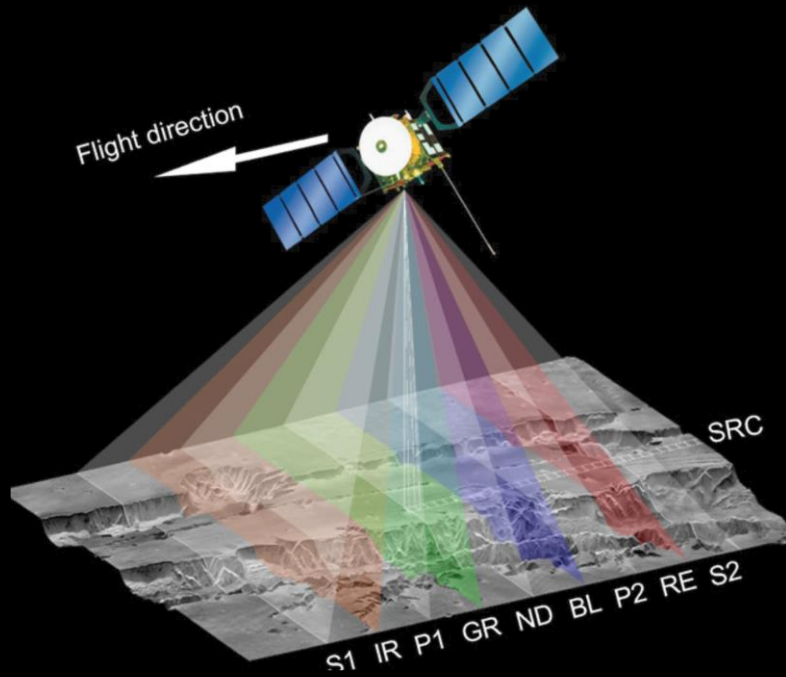
今のところコンセンサスな内部構造の推定はされていない



Basilevsky et al., 2014

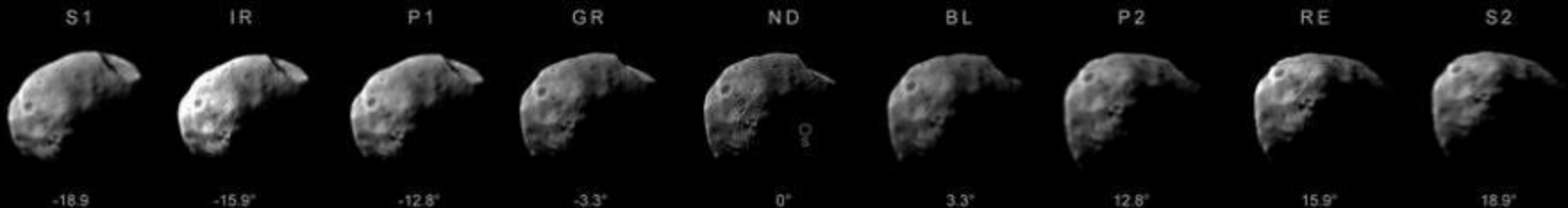
Mars Express

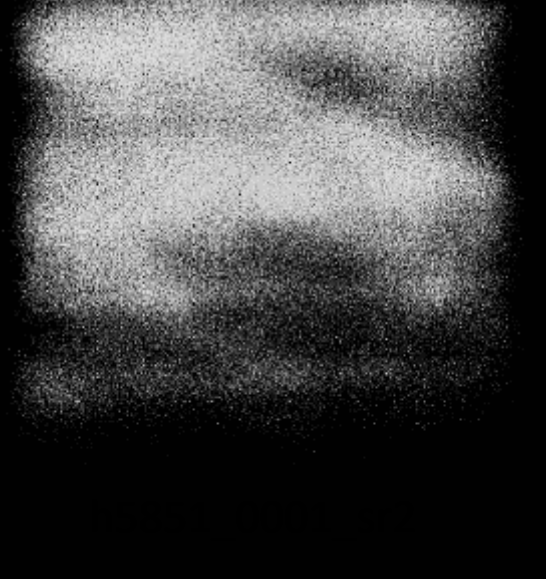
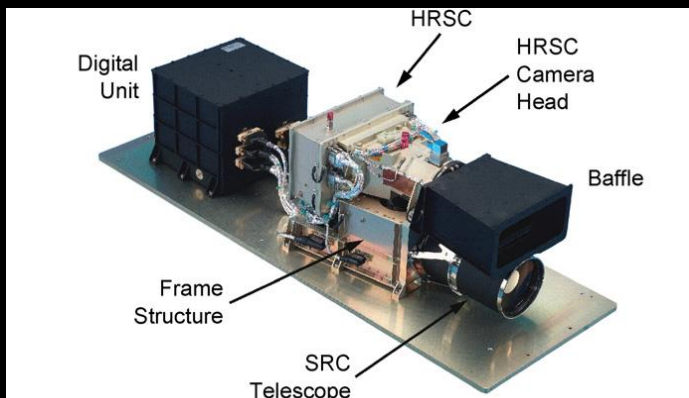
High Resolution Stereo Camera



Orbit 5861

Direction	Channel	λ (nm)
+18.9°	Stereo 1	675 ± 90
+15.0°	Near Infrared	970 ± 45
+12.8°	Photometry 1	675 ± 90
+2.4°	Green	530 ± 45
0.0°	Nadir	675 ± 90
-2.4°	Blue	440 ± 45
-12.8°	Photometry 2	675 ± 90
-15.0°	Red	750 ± 20
-18.9°	Stereo 2	675 ± 90





h5851_0002_sr2



h5851_0000_nd2



h5851_0003_sr2



h5851_0004_sr2

現時点でのフォボスの最高解像度画像

Phobos と Deimos の基本的な情報

	Phobos	Deimos
Orbital semimajor axis [km]	9,377	23,460
Orbital period [h]	7.66	30.3
Orbital eccentricity	0.0151	0.0003
Orbital inclination to Mars' equator [°]	1.093	0.93
Rotational period	Synchronous	Synchronous
Size [km]	26.06×22.80×18.28 [1]	15.0×12.2×10.4 [2]
Density [kg/m ³]	1860 ± 13 [1]	1490 ± 190 [3]
Gravity [m/s ²]	3-8 × 10 ⁻³	2 × 10 ⁻³
Escape velocity [m/s]	11.39	5.56
Hill sphere radius [km]	21.5	16.5
Normal reflectance, 0.55 μm	0.071 ± 0.012 [4]	0.069 ± 0.007 [5]

軌道要素などのデータ

Characteristics of Phobos and Deimos

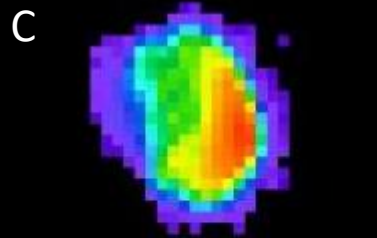
[1] Willner et al. (2014).

[2] Thomas (1993).

[3] Mass from Jacobson (2010), volume from Thomas (1993).

[4] Simonelli et al. (1998).

[5] Thomas et al. (1996).



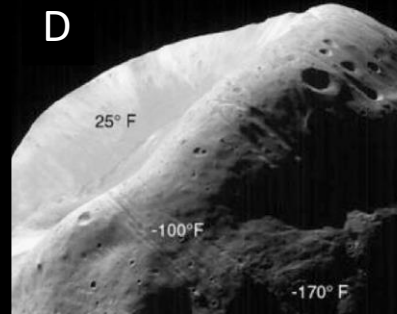
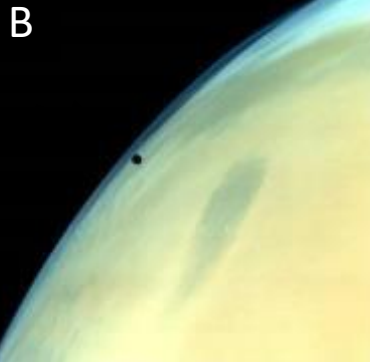
最近のデータ

A: 後行半球の画像 ExoMars

B: カラー画像 Mars Orbiter Mission (MOM)

C: 表面温度 Mars Odyssey TEMIS

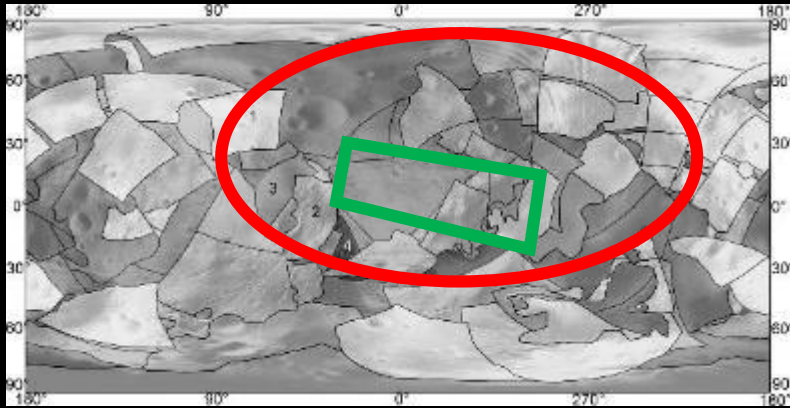
D: 表面温度 MGS TES [Duxbury et al., 2014 PSS]
(これは最近ではないがCの比較のため)



画像データ

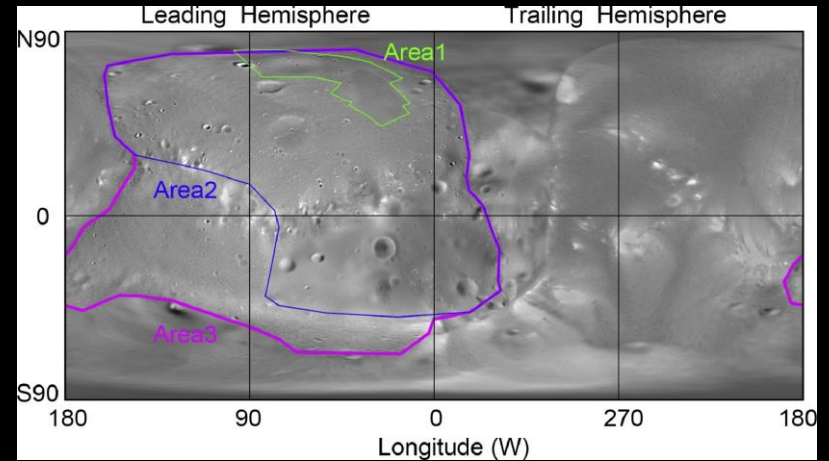
解像度の良いものは、VO, MGS, MEX, MRO

Phobos



Karachevtseva et al., 2014 に加筆

Deimos



Hirata, 2017

- (1)~(4)MEX and VO, 緑 MGS, 赤 MRO.
 (1) (3–6 m/pixel), (2) (6–10 m/pixel), (3) (10–20 m/pixel),
 (4) (20–40 m/pixel), 緑: 2 m/pixel, 赤: 6 m/pixel.

- Area 1: VO ~ 1 m/pixel 1.2% of the total surface area
 Area 2: MRO 20 m/pixel 33.5%
 Area 3: VO 43 m/pixel 50.4%

High-resolution spacecraft image data of Phobos

Spacecraft	Acquisition date	Number		Highest Resolution [m/pixel]	
		(Phobos / Deimos)		(Phobos / Deimos)	
Mariner 9	1971-1972	80	-	200	200
Viking orbiter 1 and 2	1976-1980	385	164	16	~1
Phobos 2	1989	37	-	260	-
Mars Global Surveyor	1998	16	-	1.2	-
Mars Express	2004-	5175-	1435-	7	~100
Mars Reconnaissance orbiter	2008	2	2	5.8	20

フォボスとディモスのクレーターに関する知見の整理

フォボスの最大クレーターはスティックニークレーター:9.4 km
ディモスの最大クレーターはヴォルテールクレーター:3 km
もしくは、南の盆地:~10 km

フォボスとディモスの数密度はほぼ同じで、ランダムに分布
月のクレーター年代学、スケーリング則を適用すると、フォボスの最も古い地域は、

集積説:43億年

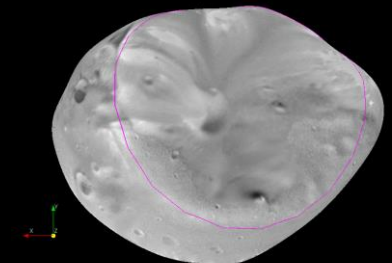
捕獲説(最近):35億年

スティックニークレーターの年代

集積説:42億年

捕獲説:26億年

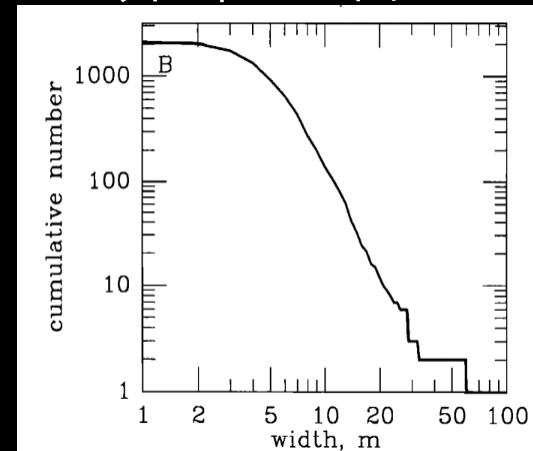
Thomas and Veverka 1977, 1980,
Schmedemann et al. 2014.
Salamuniccar et al. (2014),
Hirata 2017



ボルダーに関する知見の整理

- ボルダーのサイズ頻度分布や数密度は小惑星のものと類似で最大ボルダーは~100 m
- フォボスのmサイズのボルダーの平均寿命は、火星の衝突フラックスを用いて月から外挿すると1000万年程度であると推定されている。スティックニー付近にあるボルダーがスティックニー由来なら、スティックニーは非常に若いのかもかもしれない

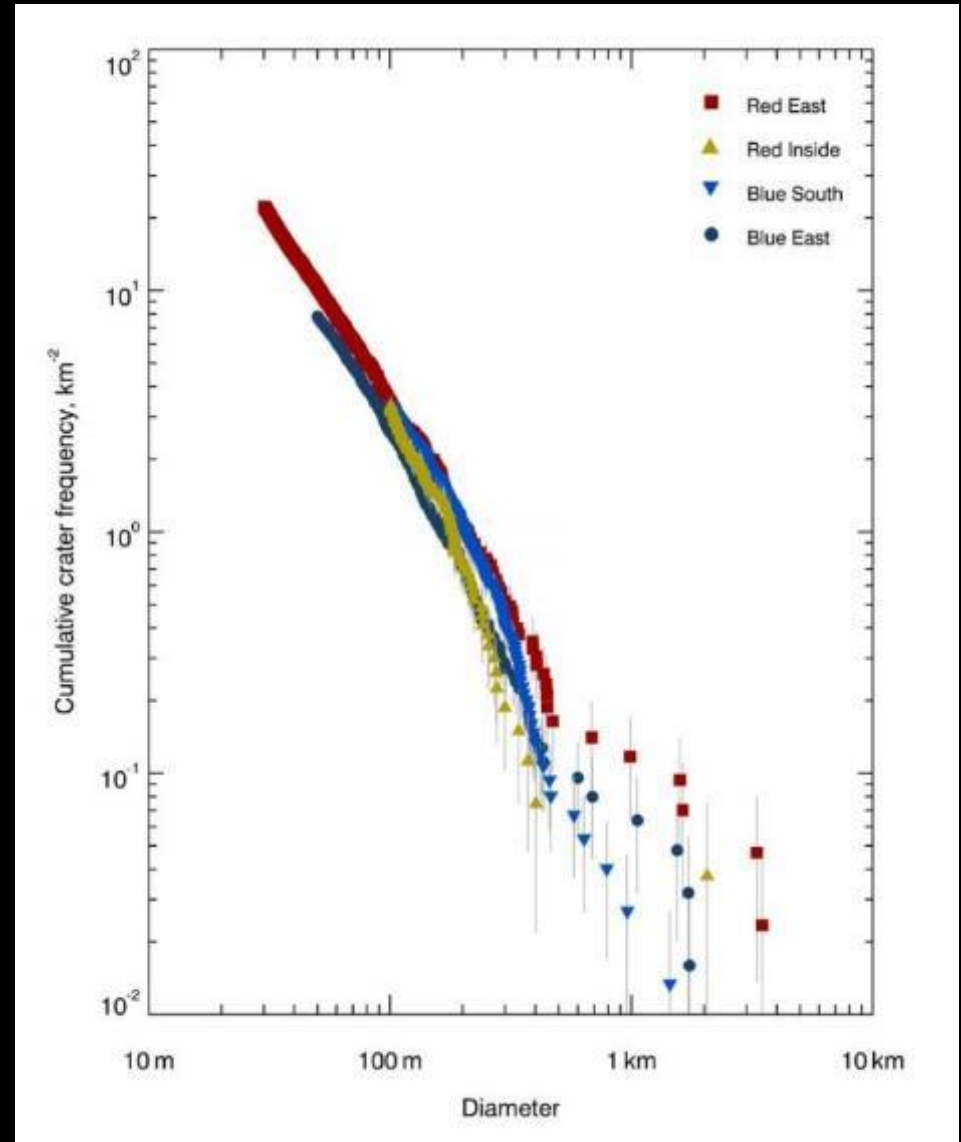
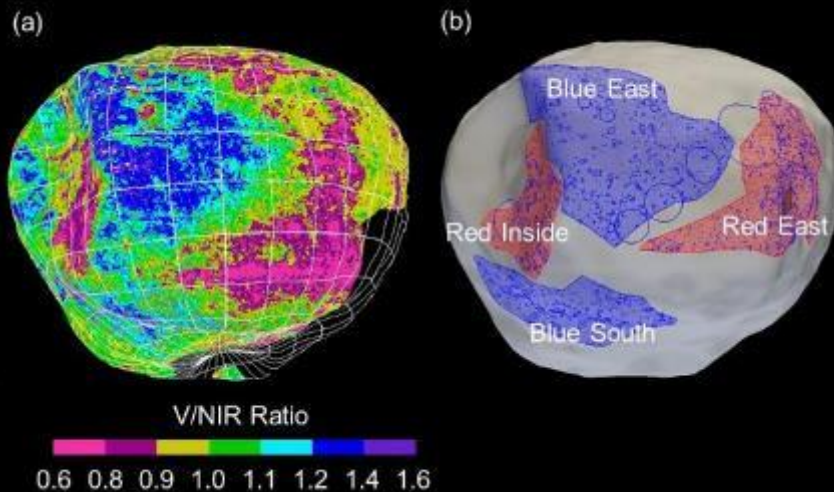
Thomas et al., 2000
Basilevsky et al., 2013



現在の研究

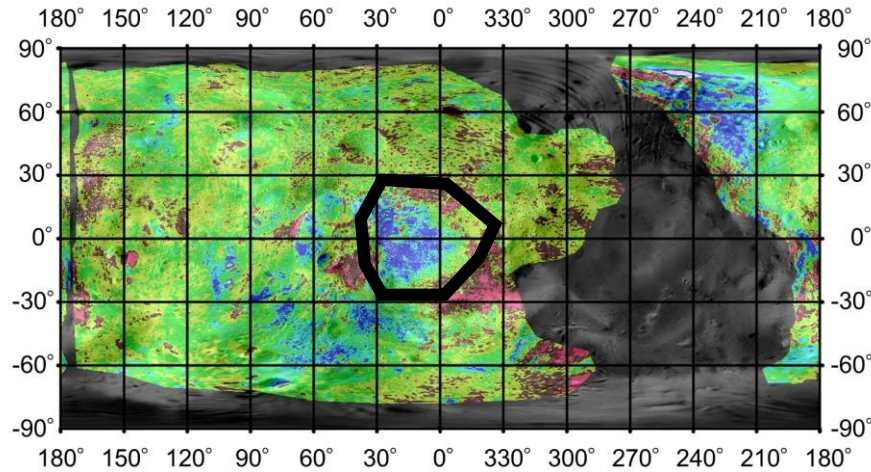
フォボスのブルーユニットの起源とフォボスのスティックニークレーターの年代

フォボスのユニットごとのクレーターカウンティング



二つのブルーユニットはまったく同じ年代となっているとは限らない

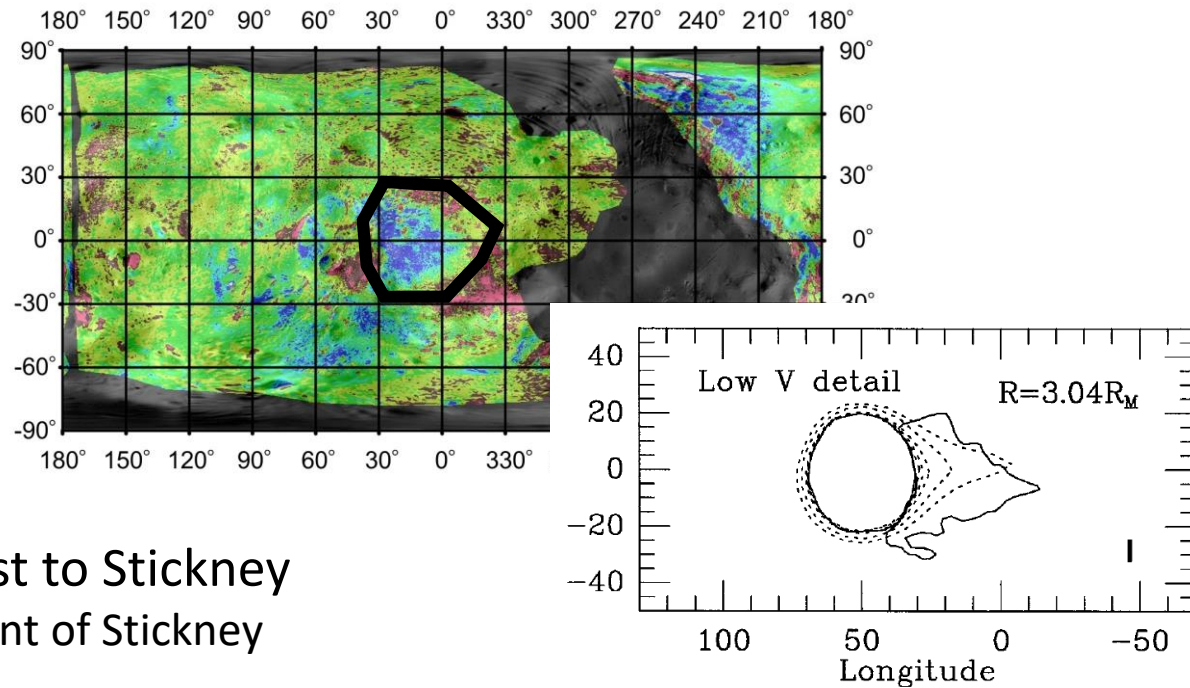
The hypotheses of the origin of blue units



Blue unit of the east to Stickney

1. Ejecta emplacement of Stickney
(Thomas, 1998)
2. Landslide inside Stickney
(Shingareva and Kuzmin 2001)
3. Internal heterogeneous structure
(e.g., Basilevsky et al. 2014)

The hypotheses of the origin of blue units



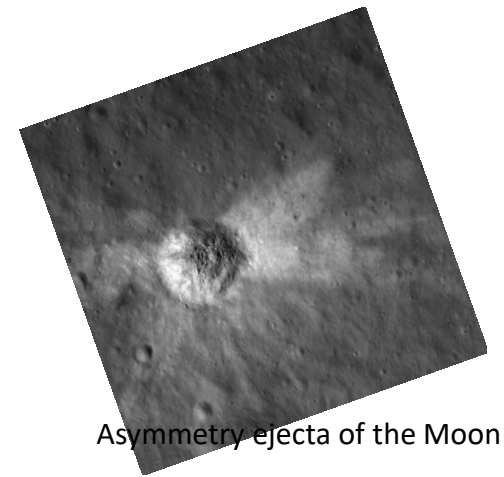
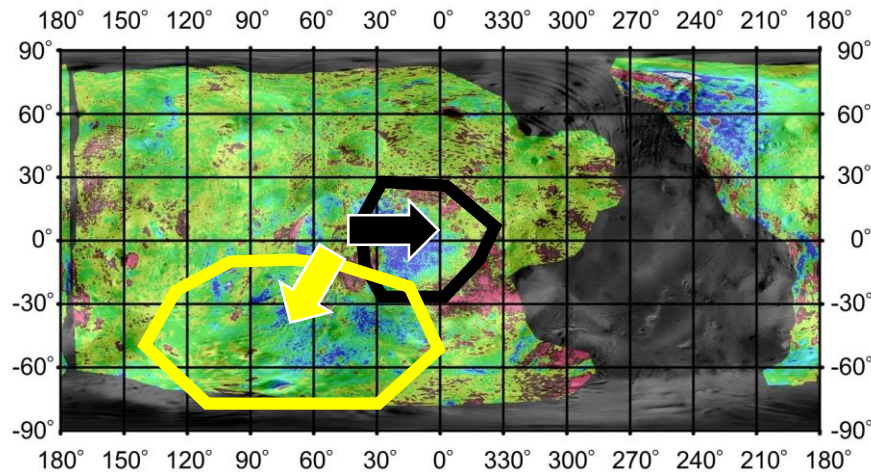
Blue unit of the east to Stickney

1. Ejecta emplacement of Stickney

(Thomas, 1998)

A **symmetrical ejecta** curtain from Stickney traveling at low velocity would re-impact at the location where the blue unit is found to the east of Stickney if the orbital semi-major axis was **3-3.4 Mars radii** (and the spin rate were slower than today).

The hypotheses of the origin of blue units



Asymmetry ejecta of the Moon

Blue unit of the east to Stickney

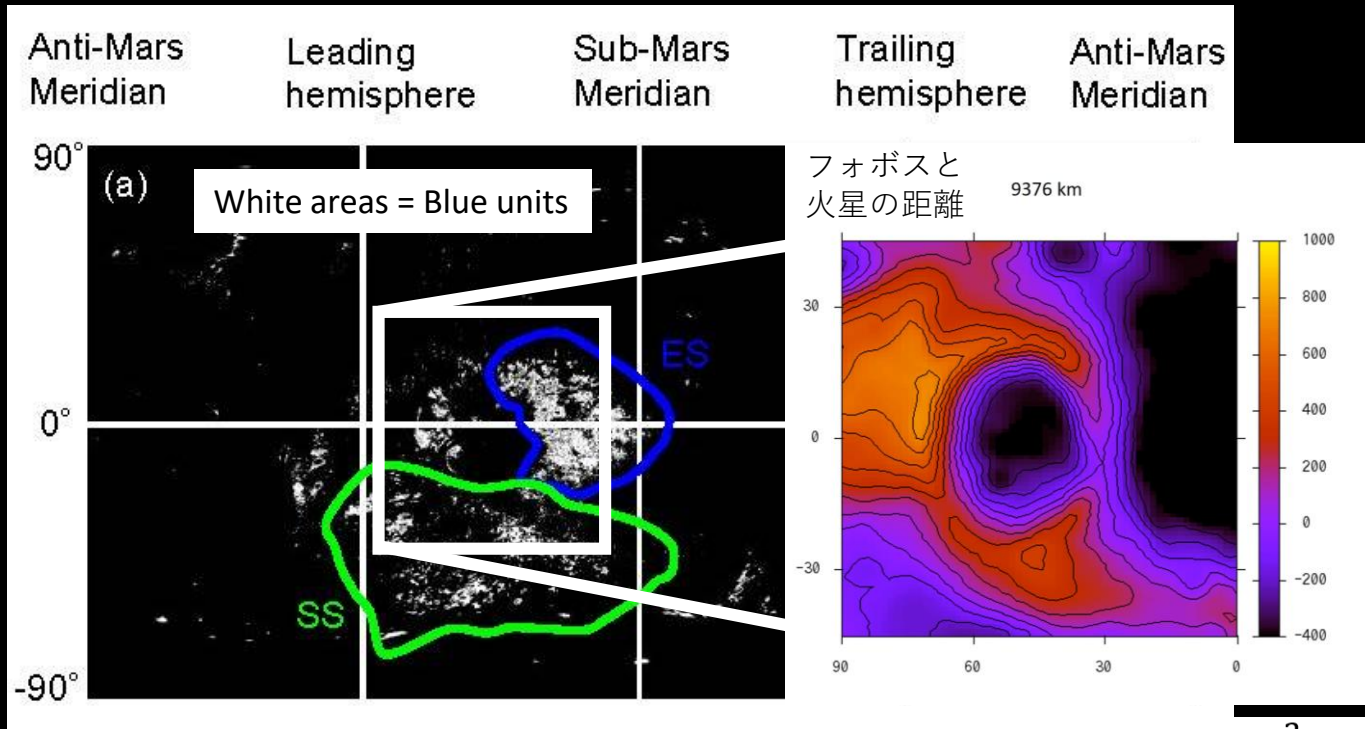
1. Ejecta emplacement of Stickney
(Thomas, 1998)
2. Landslide inside Stickney
(Shingareva and Kuzmin 2001)
3. Internal heterogeneous structure
(e.g., Basilevsky et al. 2014)

Blue unit of the southwest region

Asymmetrical ejecta of Stickney ?
(Thomas 1998)

The orbital semi-major axis was 3-3.4 Mars radii ?

Dynamic height around Stickney crater

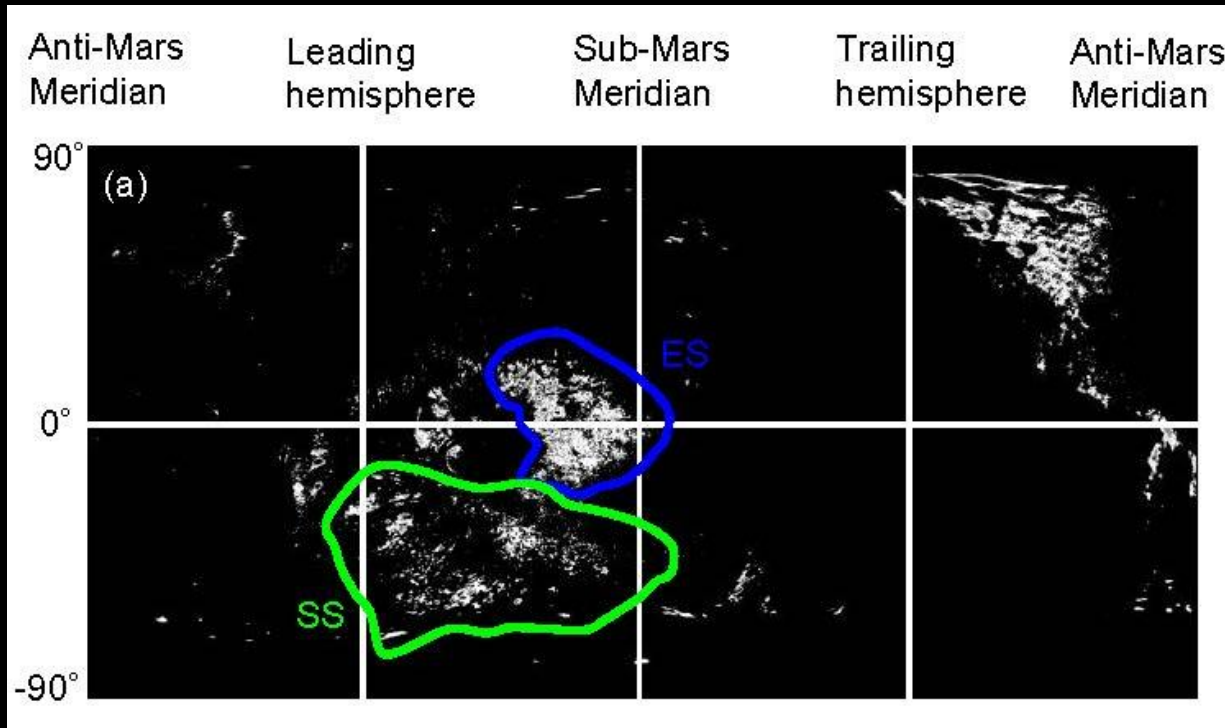


The dynamic height (H) of the southwestern rim of Stickney crater is relatively low in all cases

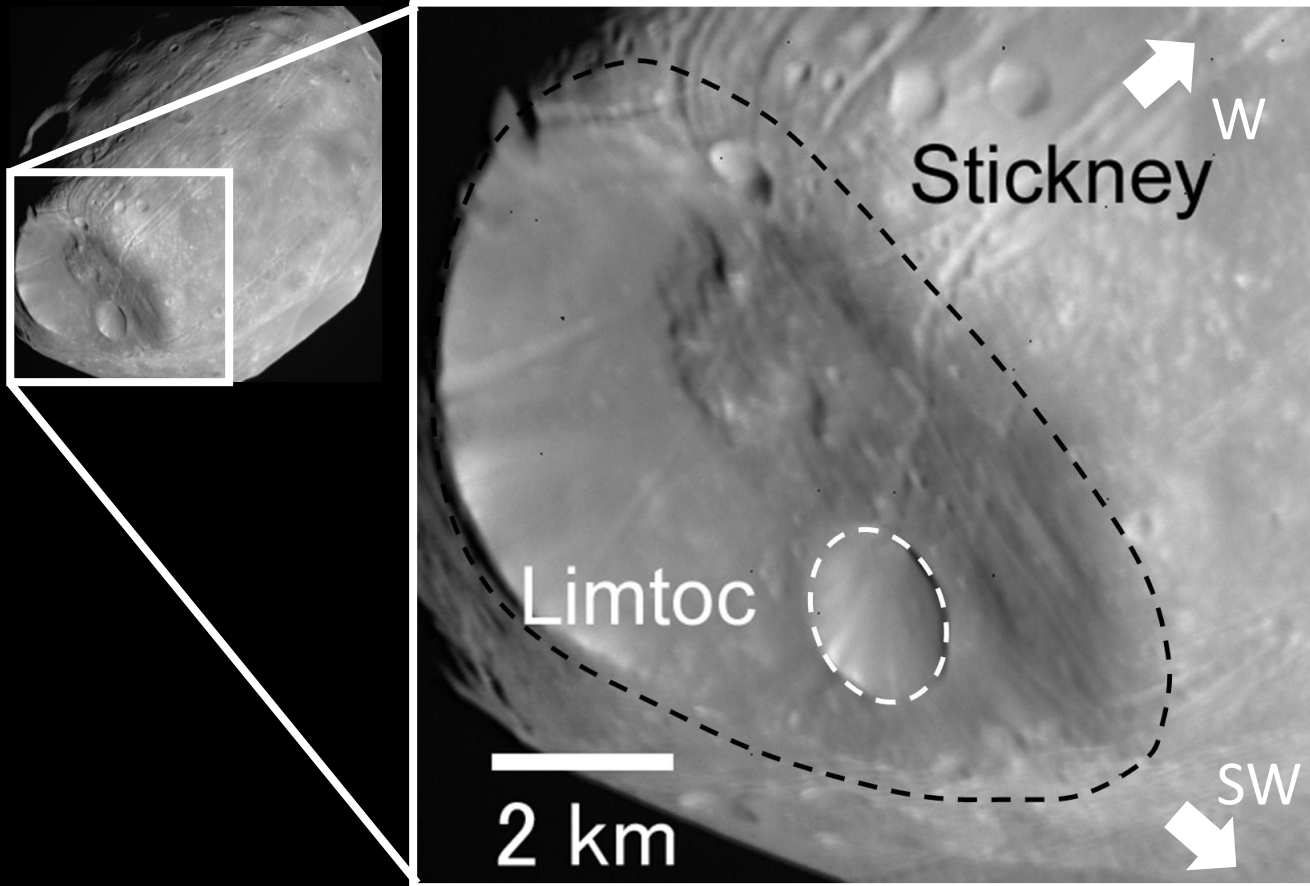
$$-J = \frac{n^2}{2} \left(x + R_P - \frac{m}{M} R_P \right)^2 + \frac{n^2 y^2}{2} + \frac{GM}{R} - U$$

$$H = \frac{J_0 - J}{g_0}$$

Dynamic height around Stickney crater



These origins of two blue units may be different



Method of numerical simulations with the shape model

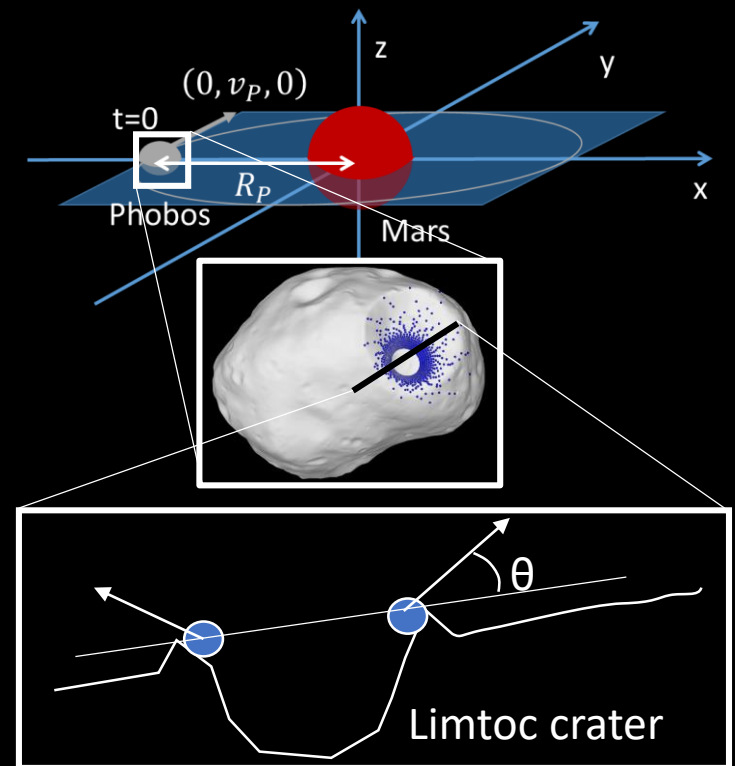
Using three-body simulations and a shape model of Phobos, we investigate the regions **where launched particles from Limtoc crater collide** again with the shape model.

Initial conditions of Phobos are as follows:

- Shape model: Gaskell shape model (Gaskell, 2011)
- The orbit of Phobos: Circle and inclination (zero)
- The range of the orbital radius: $2.77, 3.54, 4.43 R_M$

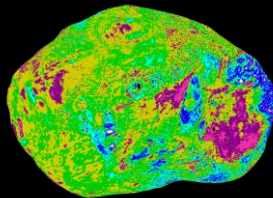
Initial conditions of the particles:

- Set at equal intervals on the circle in increments of 1 degree, for a total of 360 particles
- Initial particle launch angle from the horizontal plain (θ), is set to either $35.4, 45^\circ$
- The magnitude of relative velocity of particles to Phobos varies from 3 to 7 m/s in 1 m/s increments

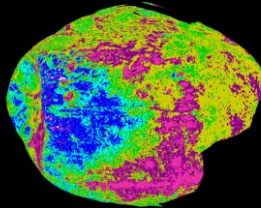


Results: (Leading → Sub-Mars hemisphere)

Launching angle



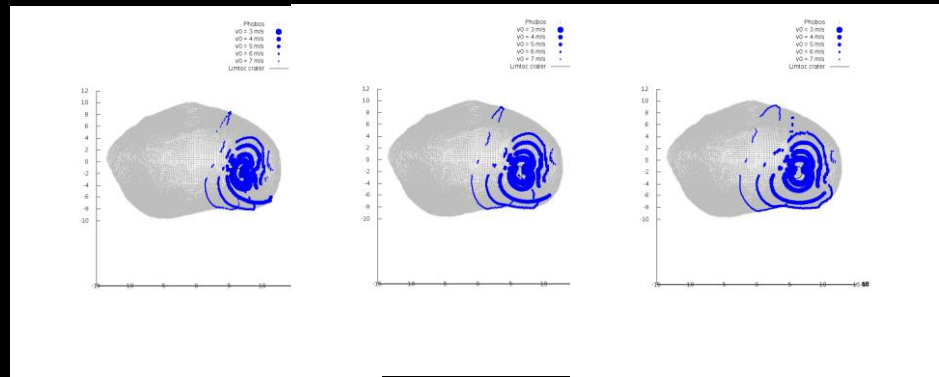
Leading



Sub-Mars

35.4°

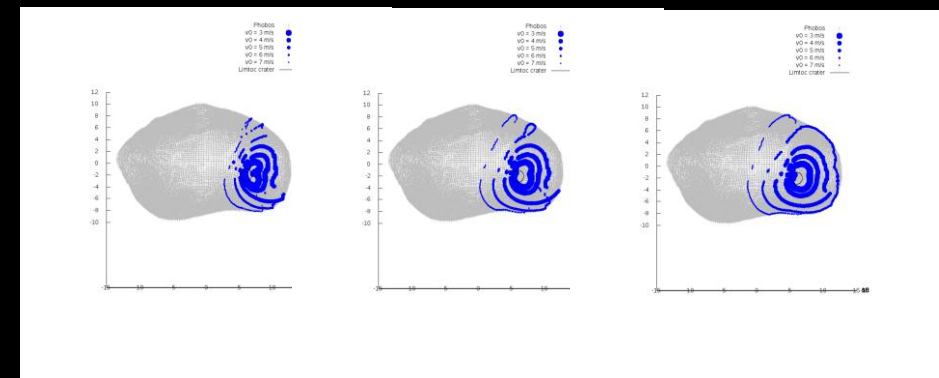
45°



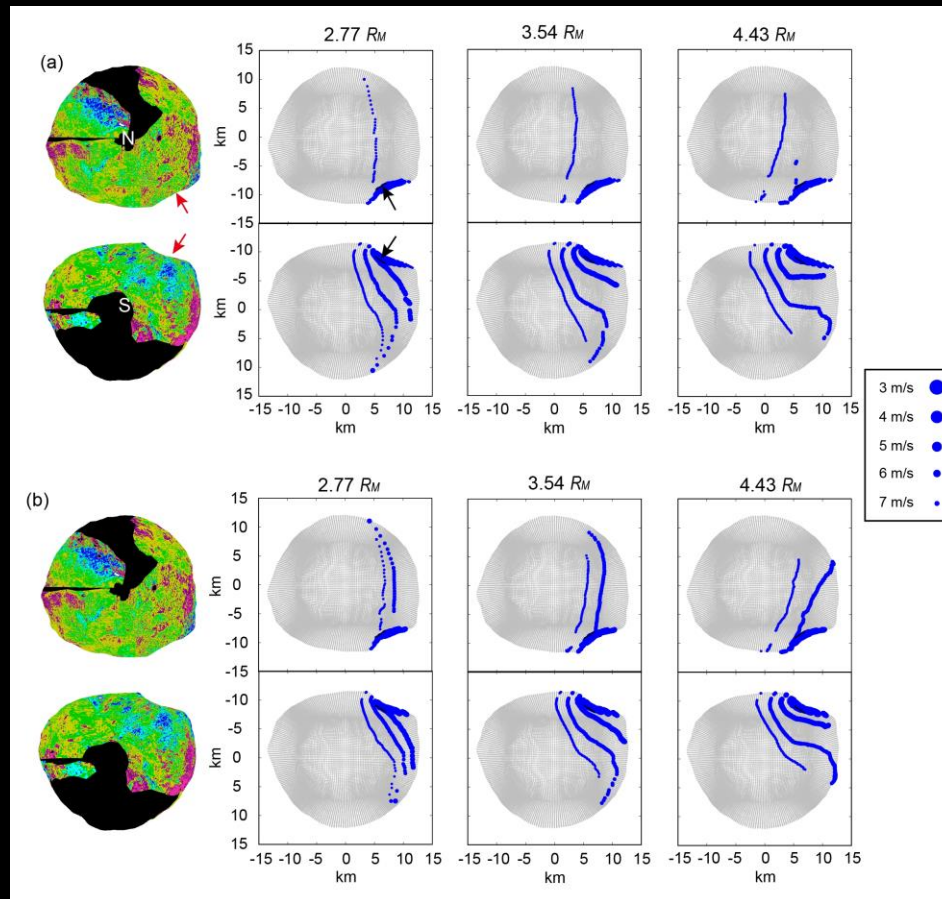
2.77

3.54

4.43 R_M

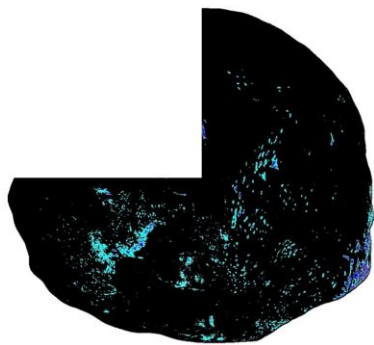


Results: (Northern and Southern hemisphere)



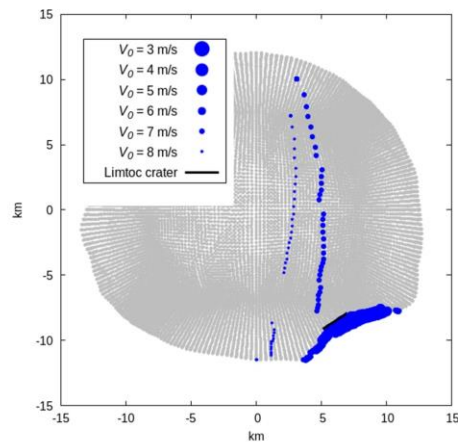
Results: (Northern and Southern hemisphere)

(a)

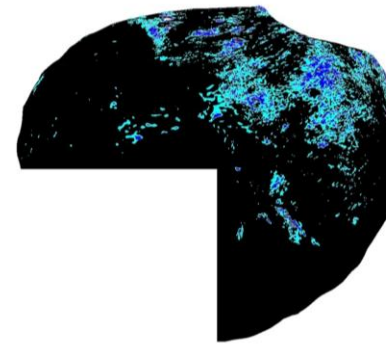


Northern hemisphere

(b)

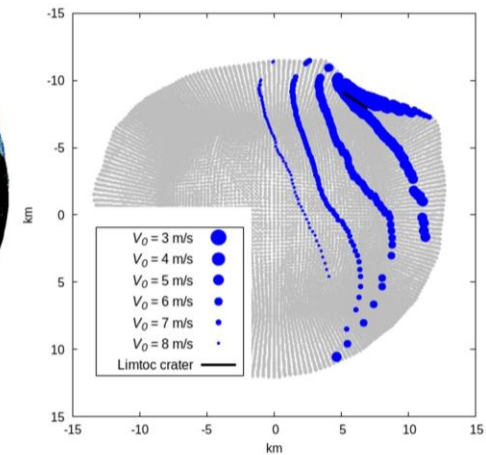


(c)



Southern hemisphere

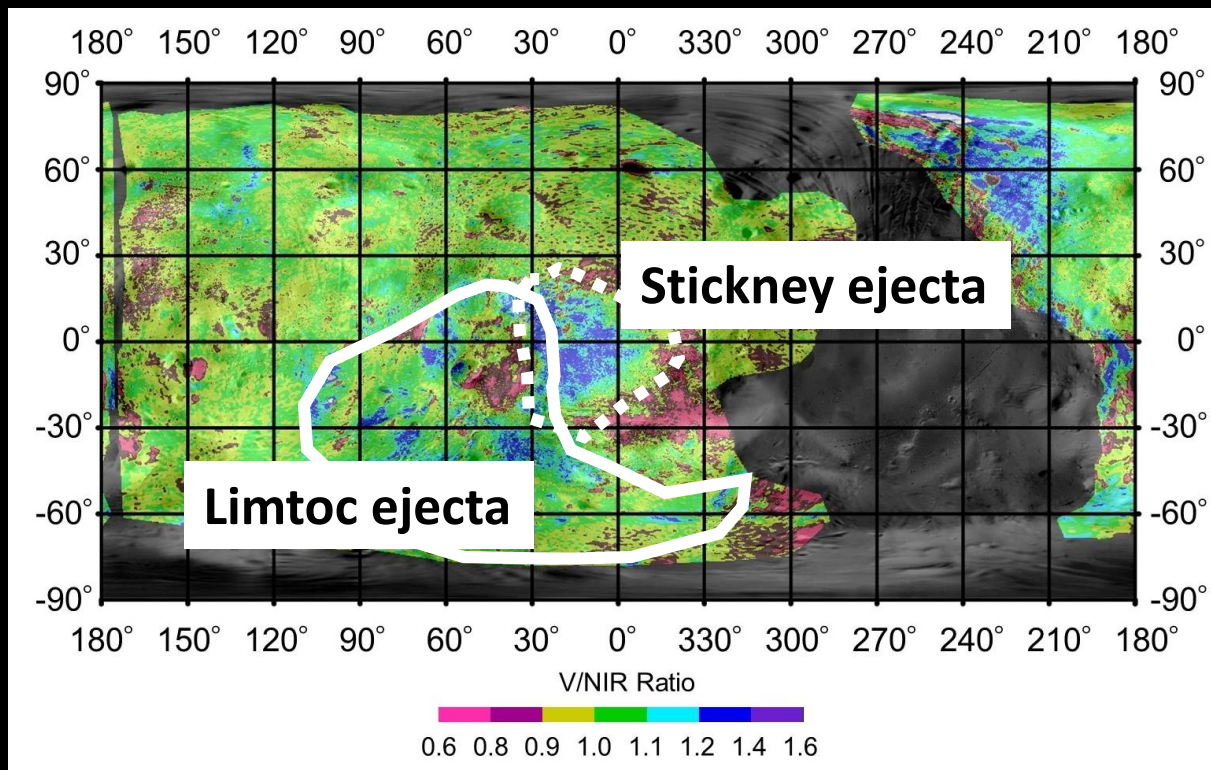
(d)



Comparison of observed Blue Unit distribution (a, c) with results of three-body simulations shown on the shape model (b, d). In both the northern and southern hemispheres, the observed blue unit region is consistent with the result of the simulations.

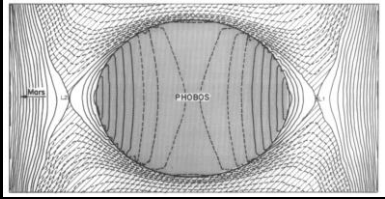
The origin of blue units on Phobos

The formational process of blue unit could be contributed to not only Stickney but also Limtoc impacts.

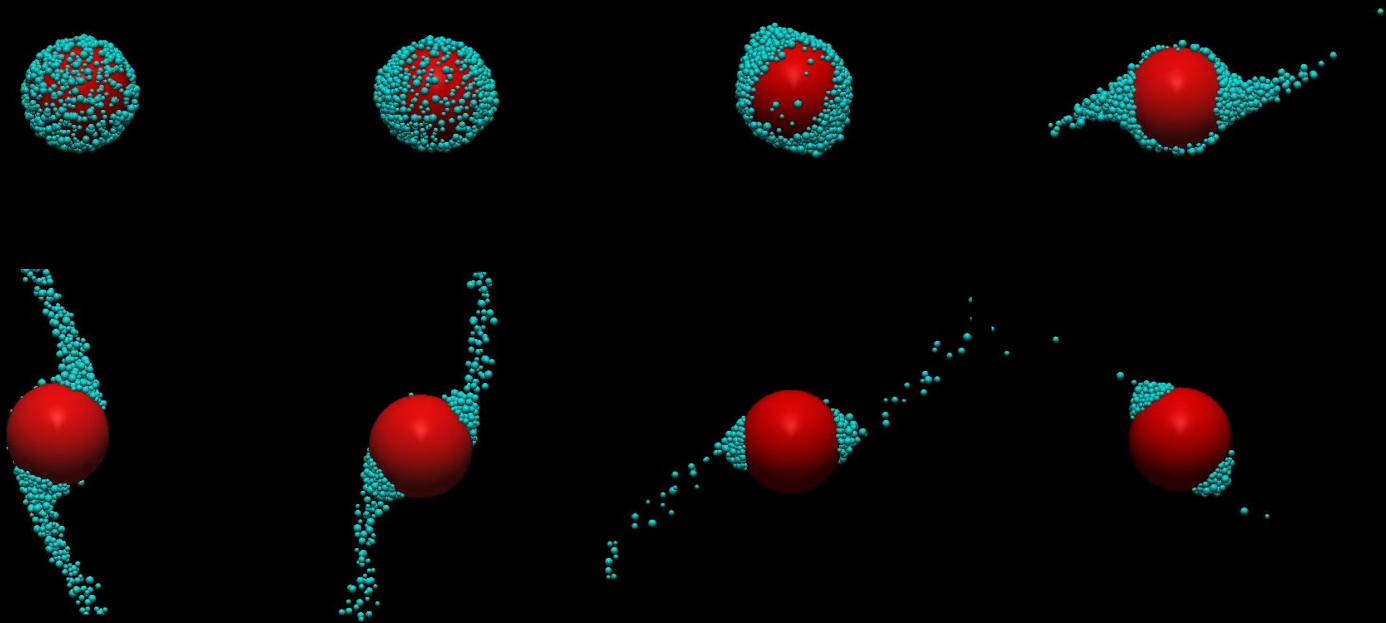


フォボス近傍の重力場と地形の比較

フォボスのロシュローブと地形の比較



Dobrovolskis and Burns 1980



N体計算

2. ロシュローブの外側に実体積がある小天体

ロシュローブの三軸径

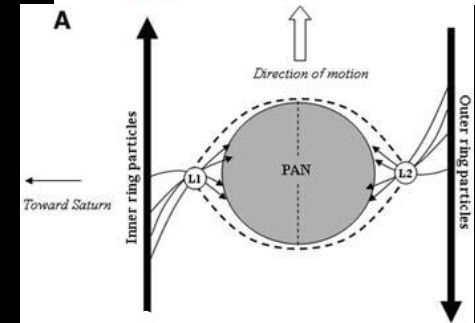
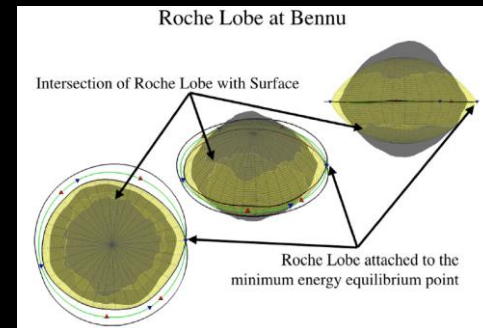


Satellite	a_{orbital} (km)	Mass ($\times 10^{19}$ g)	r_m (km)	a (km)	b (km)	c (km)	$\pm \delta a, \delta b, \delta c$ (km)	c/a	a_R (km)	$b_R = c_R$ (km)	a/a_R	ρ_{crit} (g cm^{-3})	ρ (g cm^{-3})	ρ/ρ_{crit}
Pan	133,584	0.495 ± 0.075	14.2 ± 1.3	17.4	15.8	10.4	2.0, 1.3, 0.84	0.60	19.1	12.7	0.91	0.45	0.41 ± 0.15	0.92 ± 0.32
Daphnis	136,504	0.0084 ± 0.0012	3.9 ± 0.8	4.5	4.3	3.1	0.8, 0.8, 0.9	0.69	4.9	3.2	0.93	0.42	0.34 ± 0.21	0.80 ± 0.50
Atlas	137,670	0.66 ± 0.06	15.1 ± 1.4	20.9	18.1	8.9	1.4, 2.5, 0.8	0.43	21.6	14.4	0.97	0.41	0.46 ± 0.10	1.12 ± 0.24
Prometheus	139,380	15.67 ± 0.20	43.1 ± 2.7	66.3	39.5	30.7	3.2, 3.2, 2.0	0.46	62.9	41.9	1.05	0.40	0.47 ± 0.065	1.18 ± 0.17
Pandora	141,720	13.56 ± 0.23	40.3 ± 2.2	51.6	39.8	32.0	1.8, 2.1, 2.9	0.62	61.0	40.7	0.85	0.38	0.50 ± 0.085	1.32 ± 0.23
Epimetheus	151,410	53.07 ± 0.14	56.7 ± 1.9	58.0	58.7	53.2	2.5, 3.2, 0.8	0.92	102.7	68.4	0.57	0.31	0.69 ± 0.13	2.25 ± 0.42
Janus	151,460	188.91 ± 0.50	89.6 ± 2.0	97.4	96.9	76.2	2.9, 2.2, 1.2	0.78	157.4	105	0.62	0.31	0.63 ± 0.063	2.03 ± 0.21
Methone	194,440	-	1.6 ± 0.6	-	-	-	0.6	-	-	-	-	0.15	-	-
Anthe	197,700	-	~ 1	-	-	-	-	-	-	-	-	0.14	-	-
Pallene	212,280	-	2.2 ± 0.3	2.6	2.2	1.8	0.4, 0.3, 0.2	0.69	-	-	-	0.11	-	-
Telesto	294,710	-	12.4 ± 0.4	15.7	11.7	10.4	0.6, 0.3, 0.3	0.66	-	-	-	0.04	-	-
Calypso	294,710	-	10.6 ± 0.7	15.0	11.5	7	0.3, 2.3, 0.6	0.47	-	-	-	0.04	-	-
Polydeuces	377,200	-	1.3 ± 0.4	1.5	1.2	1.0	0.6, 0.4, 0.2	0.67	-	-	-	0.02	-	-
Helene	377,420	-	16.5 ± 0.6	19.4	18.5	12.3	0.2, 1.0, 1.0	0.63	-	-	-	0.02	-	-

衛星	ロシュローブ堆積/実体積[%]
Pan	109
Daphnis	125
Atlas	89
Prometheus	85
Pandora	76
Phobos	78

Parco et al., 2007

質量がある程度定まっている衛星で比較すると、土星の衛星 Pan, Daphnis, Atlas, そして Prometheus がロシュローブから出ている。これは、環を構成する粒子がそれらの天体に堆積する効果であると考えられている (Charnoz et al., 2007) 小惑星の Benu もそうかもしれない (Scheeres et al., 2016)



Charnoz et al., 2007

ロシュローブの外側に実体積がある小天体はある

フォボス周りの重力場

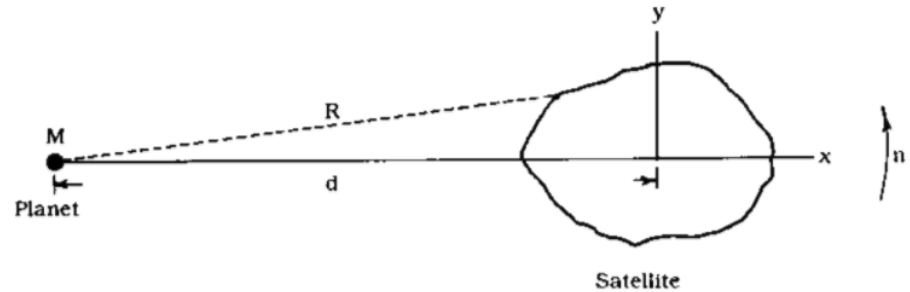
太陽-地球-月のように、互いに相互作用する3つの物体の運動を扱う問題を3体問題という。3つ目の物体の質量が他の2体の運動に影響を及ぼさないほど小さい場合の、3体目の運動を考える問題を制限3体問題という。特に共通重心のまわりを円運動する2つの天体からの万有引力をうける十分に小さい質点の運動を考える問題は円制限三体問題とよばれ、ラグランジュポイントとよばれる5つの平衡点が存在することが知られている。

火星-フォボス系において微小粒子が受ける重力場は、フォボスを同期回転する円運動とすると円制限3体問題(restricted three-body problem (CR3BP))となり、回転デカルト座標系で以下のように記述できる[Thomas 1993]。

$$\ddot{x} - 2n\dot{y} = n^2 \left(x + d - \frac{m}{M} d \right) - \frac{GM(x+d)}{R^3} - \frac{\partial}{\partial x} U$$

$$\ddot{y} + 2n\dot{x} = n^2 y - \frac{GM y}{R^3} - \frac{\partial}{\partial y} U$$

$$\ddot{z} = -\frac{GMz}{R^3} - \frac{\partial}{\partial z} U,$$



n の要素：コリオリ力

n^2 の要素：回転加速度

GM/R の要素：火星の潮汐力

ここで、この系で静止している粒子に注目するとコリオリ力が0となるため積分すると

$$-J = \frac{n^2}{2} \left[x + d - \frac{m}{M} d \right]^2 + \frac{n^2 y^2}{2} + \frac{GM}{R} - U.$$

となる。これはヤコビ積分や疑似ポテンシャルと呼ばれ、エネルギーや運動量は保存しない。

CR3BPとHCWの比較

さきほどのCR3BPにおける各成分の運動方程式は、 $\mathbf{x}=\mathbf{y}=\mathbf{z}=\mathbf{0}$ で線形化すると

$$\ddot{x} - 2n\dot{y} - 3n^2x = u_x$$

$$\ddot{y} + 2n\dot{x} = u_y$$

$$\ddot{z} + n^2z = u_z$$

となる。この方程式はHill Clohessy Wiltshire (HCW)とよばれている。
これを積分すると

$$C = \frac{1}{2}\omega^2(3x^2 - z^2) + U(\mathbf{r}) - \frac{1}{2}v^2$$

ω : フォボスの角速度

となる。フォボス表面の重力加速度を比較すると、CR3BPとHCWの誤差は0.1%以下のため、これはよい近似である。

フォボスの自己重力場の解析手法

フォボスのような不規則形状の天体では、フォボス自身による重力場の求め方は大きく分けて3通りあり、それぞれのモデル間の誤差は2%以下になることが知られている(Shi et al, 2012)。

①球面調和関数展開を用いる(Scheeres氏はこの手法)

$$U = \frac{GM}{r} \sum_{l=0}^{\infty} \left(\frac{R}{r}\right)^l \sum_{m=0}^l [C_{lm} \cos m\lambda + S_{lm} \sin m\lambda] P_{lm}(\sin \phi).$$

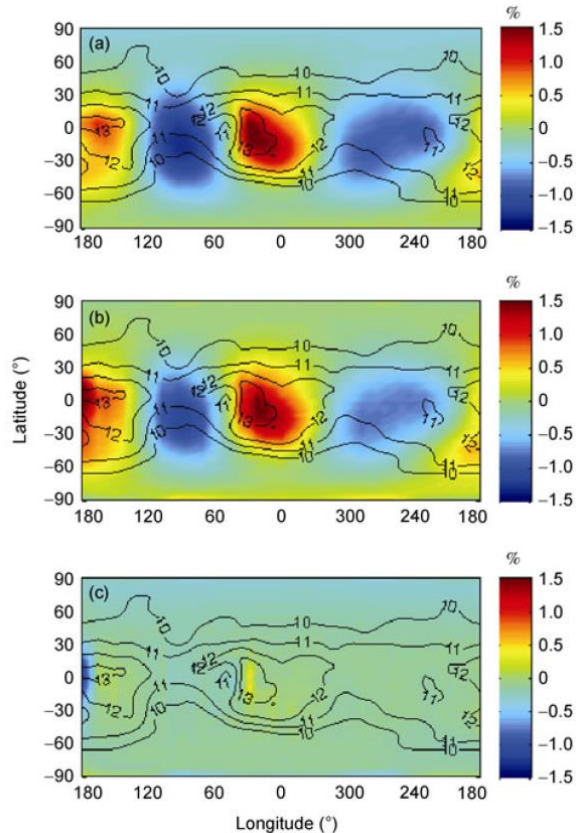
②形状モデルを堆積要素に分けて計算(私たちはこの手法)

$$U = G\rho\Delta v \sum_{i=1}^N \frac{1}{r_i}$$

③形状モデルを密度一定の多面体として計算(Werner and Scheeres, 1997)

$$U = \frac{1}{2} G\rho \left(\sum_{\text{faces edges}} \mathbf{r}_F \cdot \hat{\mathbf{n}}_F \hat{\mathbf{n}}_E \cdot \mathbf{r}_E L_E - \sum_{\text{faces}} \mathbf{r}_F \cdot \hat{\mathbf{n}}_F \hat{\mathbf{n}}_E \cdot \mathbf{r}_F \omega_F \right)$$

②と③はほぼ同じ結果となるが、①はモデル間での誤差が若干大きい。これは球面調和関数展開ではフォボスの歪な形状をうまく定めることができないことに起因する (Brillouin sphereの境界問題)。

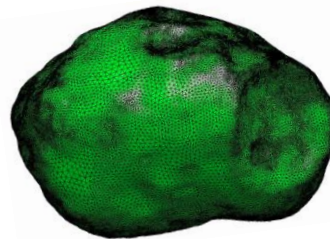


モデル間の誤差：上は①-②、中図は①-③、下図は②-③。①が他のモデルと比べて誤差が大きい。

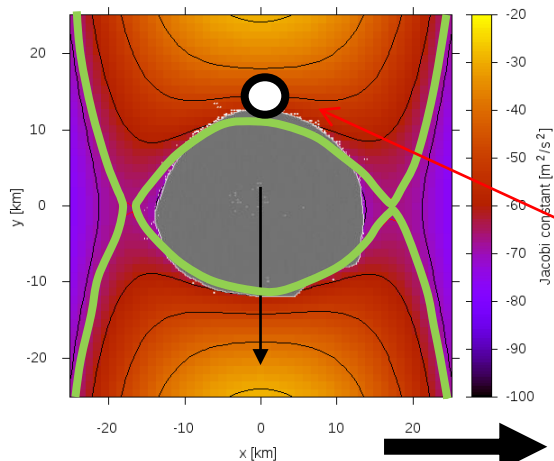
私たちは②を少し改良して解析した。

フォボスを285448個の頂点で57148個の三角形の多面体 (内部を1602854個の四面体) に分割

$$U = G\Delta\rho \sum_{i=1}^N \frac{\Delta v_i}{r_i}$$

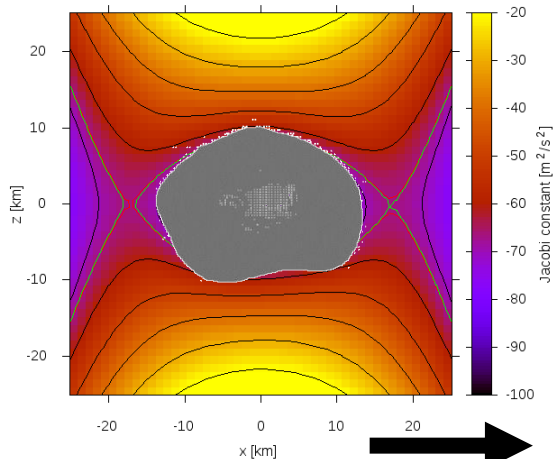


フォボス近傍の重力場



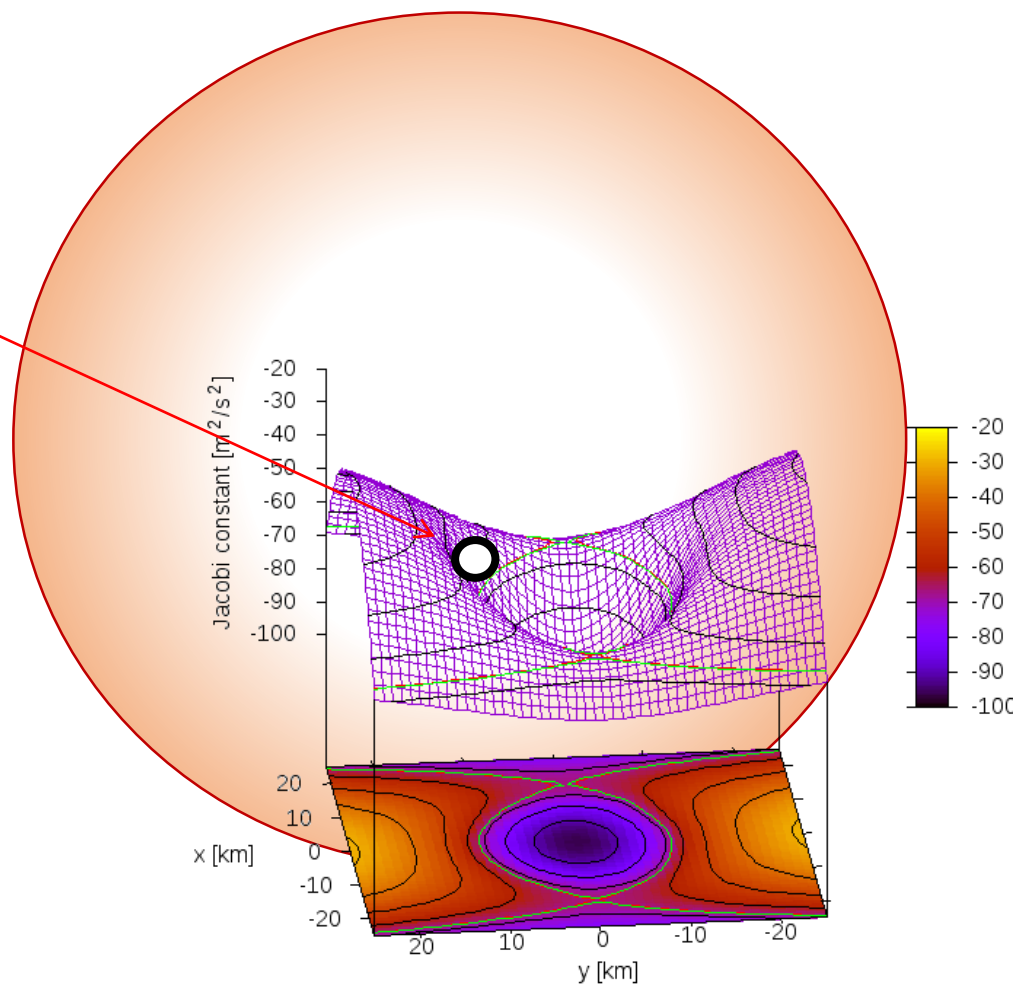
極からみた疑似ポテンシャル

火星側



先行面からみた疑似ポテンシャル

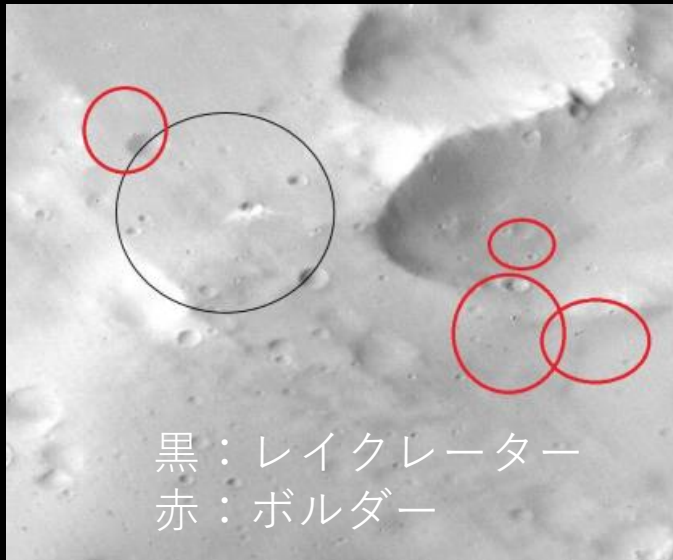
火星側



反火星側からみたフォボスの赤道面における疑似ポテンシャル

フォボスにはフォボスのロシュローブをはみ出している領域が存在する。
注意：フォボスのy軸（z軸）方向では、フォボスがロシュローブから出ていてもその近傍ではフォボスに向かう重力場であるため、この付近に物質があればフォボスに堆積する

比較的若いと考えられる地形とボルダーのマッピング



黒：レイクレーター
赤：ボルダー

Planets and Satellites > Mars > Phobos > Image Based > Gaskell

File View Help

Tracks DEMs

Phobos Imaging Data MOLA Structures Images

Paths Polygons Circles Ellipses Points

C:\Users\hiroshi\Documents\sbmt-2017.03.13-window

Load... Save...

Id	Type	Name	Details	Color	Label
1	circle	default	Diamet...		
3	circle	default	Diamet...		
4	circle	default	Diamet...		
5	circle	default	Diamet...		
6	circle	default	Diamet...		
7	circle	default	Diamet...		
8	circle	default	Diamet...		
9	circle	default	Diamet...		
10	circle	default	Diamet...		
11	circle	default	Diamet...		
12	circle	default	Diamet...		
13	circle	default	Diamet...		
15	circle	default	Diamet...		
16	circle	default	Diamet...		
17	circle	default	Diamet...		
19	circle	default	Diamet...		
20	circle	default	Diamet...		
21	circle	default	Diamet...		

Edit Delete

Hide All Show All

Hide Labels Show Labels

Delete All

Change Normal Offse...

Change Line Width...

Ready. Distance: 43.698 km

A 3D rendering of the Phobos moon, showing its irregular shape and numerous craters. Several green crosshair markers are overlaid on the surface, indicating specific locations of interest.

内部構造の推定

内部構造の推定

$$\theta = \frac{2e}{1 - \frac{1}{3\gamma}}$$

$$\gamma = \frac{B - A}{C}$$

$$C_{20} = \frac{B + A}{2} - C$$
$$C_{22} = \frac{B - A}{4}$$

天体の慣性モーメントは、その天体の内部構造を制約する上で重要

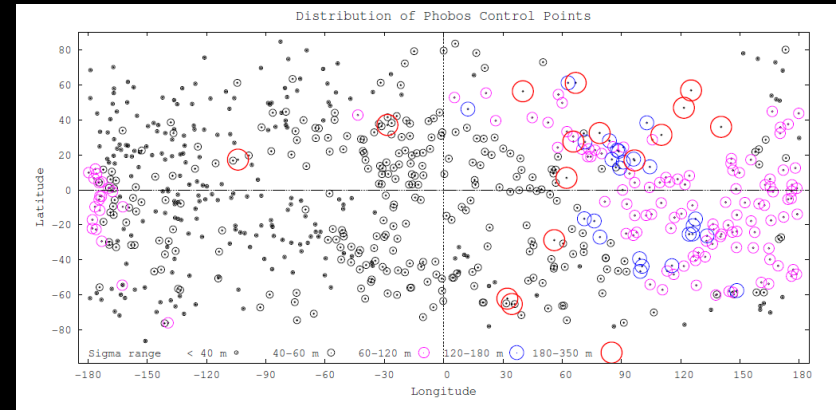
慣性モーメントは、強制振動の振幅、2次の重力場係数から求まる
しかし、2次の重力場係数の誤差が大きいため慣性モーメントは定まらない

アプローチ

振幅の精度は良くなっているから、内部構造をある程度仮定して慣性モーメントを求めることでその強制振動の振幅の値から内部構造を制約できないか？

強制振動の振幅の観測と計算値

Observed amplitude	Reference
-0.8 ± 0.3	Duxbury 1991
-0.78 ± 0.4	Seidelmann et al., 2007
-1.24 ± 0.15	Willner et al., 2010
-1.09 ± 0.09	Oberst et al., 2014
-1.14 ± 0.03	Burmeister et al., 2018



Burmeister et al 2018

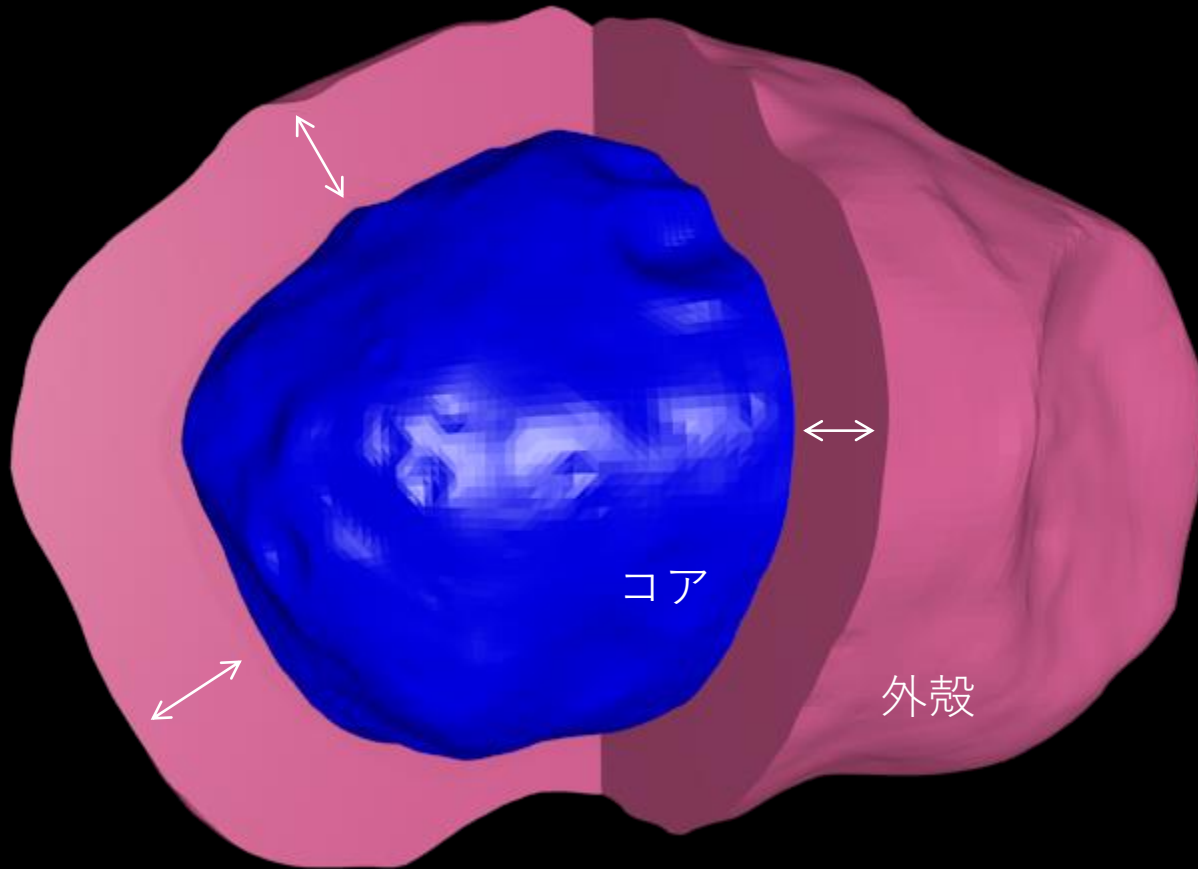
Shape model type	Modeled amplitude	
Ellipsoid	-1.15	$a = 13.03 \text{ km}$ 、 $b = 11.40 \text{ km}$ 、 $c = 9.14 \text{ km}$
Duxbury	-0.9	Duxbury, 1991
Thomas model (1989)	-1.06	We calculate θ using the model
Willner model (2010)	-1.1	Willner et al., 2010
Gaskell model (2015)	-1.07	We calculate θ using the model
Ernst model (2018)	-1.07	We calculate θ using the model

$$\begin{pmatrix} L_x \\ L_y \\ L_z \end{pmatrix} = \sum_i \begin{pmatrix} m_i(r_i^2 - x_i^2) & -m_i x_i y_i & -m_i x_i z_i \\ -m_i y_i x_i & m_i(r_i^2 - y_i^2) & -m_i y_i z_i \\ -m_i z_i x_i & -m_i z_i y_i & m_i(r_i^2 - z_i^2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix}$$

$$\gamma = \frac{I_{yy} - I_{xx}}{I_{zz}}$$

$$\theta = \frac{2e}{1 - 1/3\gamma}$$

手法：パラメータとモデル



パラメータ

1 内部のコアの密度

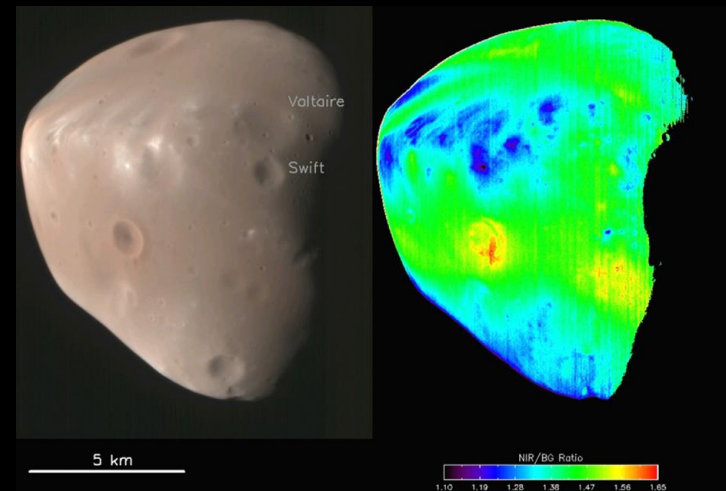
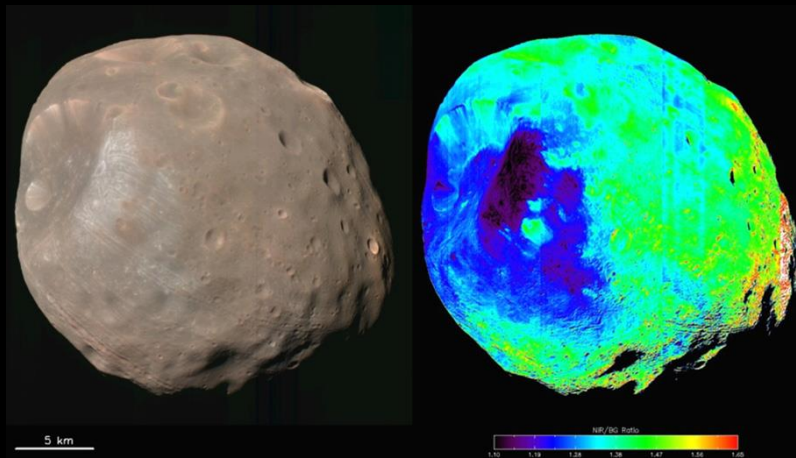
2 外殻の密度

これらを与えれば自動的に振幅が求まる

等レイヤーモデルと球殻モデルの場合で計算した

今後研究されるべき解析と必要となるデータ

- 全球のカラーマップ
- フォボスとディモスのユニット同士での比較
- 歪な形状を考慮したクレーターマッピング
- ディモスの詳細なデータ（特に後行と南側）



Thomas et al., 2011

まとめ

- 探査データは豊富に蓄積されており、どのデータも有用
- スティックニーの年代は軌道の減衰から計算してみると若いのかもしれない
- フォボスの地形は現在の重力場の影響を受けている
- フォボスの表層の密度が分かれば、ある程度内部構造を制約できる