フォボス・ダイモスの力学的 起源のレビュー A. Cradoc/Lorus 21 (2011) 150-165

樋口有理可 東京工業大学

Landis 2009







- 火星にはPhobosとDeimosという2個の衛星がある。
- これらの起源については、60年代から小惑星捕獲説と周火星円
 盤内での固体集積説のふたつが主に唱えられてきた。
- それぞれに致命的な弱点があった: 捕獲説の弱点:規則衛星の軌道を持つ(順行円軌道) 集積説の弱点:組成が火星より外側の小惑星と似ている
- 過去の観測(Viking, Phobos 2)は集積説を否定するものであったが、新しい観測(Mars Express)は否定しないことがわかった。
- 加えて、巨大衝突による月形成の大規模計算や、巨大惑星の 規則衛星・リング形成の計算結果を受け、近年は集積説を検証 する計算が続いているが、PhobosとDeimosの両方を説明できる 結果は得られていない。
- ・ 少なくともDeimosは捕獲説では説明できない。



Planets and Pluto: Physical Characteristics

This table contains selected physical characteristics of the planets and Pluto.

Planet	Equatorial Radius	Mean Radius	Mass	Bulk Density	Sidereal Rotation Period	Sidereal Orbit PeriodV(1,0)		Geometric Equatorial Albedo Gravity		Escape Velocity	ヒル 半径
	(km)	(km)	$(x \ 10^{24} \text{ kg})$	(g cm ⁻³)	(d)	(y)	(mag)		(m s ⁻²)	(km s ⁻¹)	$(R_{\rm p})$
Mercury	2439.7 D ±1.0	2439.7 D ±1.0	0.330104 E ±.000036	5.427 ^[*] ±.007	58.6462 🖻	0.2408467 B	-0.60 E ±0.10	0.106 🖪	3.70 📳	4.25 🖺	90
Venus	6051.8 D ±1.0	6051.8 ២ ±1.0	4.86732 G ±.00049	5.243 🛎 ±.003	-243.018 🖻	0.61519726 B	-4.47 🗉 ±0.07	0.65 🖪	8.87 🖺	10.36 🛎	170
Earth	6378.14 (D) ±.01	6371.00 D ±.01	5.97219 (H) ±.00060	5.5134 🖺 ±.0006	0.99726968 🖪	1.0000174 B	-3.86 B	0.367 B	9.80 🖺	11.19 🖭	240
Mars	3396.19 D ±.1	3389.50 D ±.2	0.641693 ±.000064	3.9340 ^[*] ±.0008	1.02595676 🖻	1.8808476 [B]	-1.52 🖪	0.150 B	3.71 [*]	5.03 🖄	320
Jupiter	71492 ₪ ±4	69911 ₪ ±6	1898.13 🗓 ±.19	1.3262 ≛ ±.0004	0.41354 🖻	11.862615 B	-9.40 🖪	0.52 B	24.79 🖺	60.20 🖺	740
Saturn	60268 (D) ±4	58232 D ±6	568.319 [K] ±.057	0.6871 ≛ ±.0002	0.44401 🕑	29.447498 ^[B]	-8.88 [<u>B</u>]	0.47 [<u>B</u>]	10.44 🖆	36.09 🖺	110
Uranus	25559 D ±4	25362 D ±7	86.8103 L ±.0087	1.270 ≛ ±.001	-0.71833 🖻	84.016846 B	-7.19 🖪	0.51 B	8.87 🖺	21.38 🖺	2800
Neptune	24764 D ±15	24622 D ±19	102.410 ™ ±.010	1.638 🖺 ±.004	0.67125 ⊵	164.79132 B	-6.87 🖪	0.41 B	11.15 🖺	23.56 🖺	4800
Pluto	1151 🖾 ±6	1151 <u>©</u> ±6	.01309 N ±.00018	2.05 ^[*] ±.04	-6.3872 🕒	247.92065 B	-1.0 [B]	0.3 B	0.66 🖺	1.23 📳	6500

木下宙(1998)

火星の衛星(1)

Mean orbital elements referred to the local Laplace planes

Epoch 1950 Jan. 1.00 TT Solution: MAR080

Sat.	<u>a</u>	<u>e</u>	<u>w</u>	<u>M</u>	<u>i</u>	<u>node</u>	<u>n</u>	<u>P</u>	<u>P</u> <u>w</u>	<u>P</u> node	<u>R.A.</u>	<u>Dec.</u>	<u>Tilt</u>	Ref.
	(km)		(deg)	(deg)	(deg)	(deg)	(deg/day)	(days)	(yr)	(yr)	(deg)	(deg)	(deg)	
Phobos	9376.	0.0151	150.057	91.059	1.075	207.784	1128.8447569	0.3189	1.1316	2.2617	317.671	52.893	0.009	<u>5</u>
Deimos	23458.	0.0002	260.729	325.329	1.788	24.525	285.1618790	1.2624	27.3703	54.5367	316.657	53.529	0.889	<u>5</u>

- *a* Semi-major Axis (mean value)
- *e* Eccentricity (mean value)
- *w* Argument of periapsis (mean value)
- *M* Mean anomaly (mean value)
- *i* Inclination with respect to the reference plane: <u>ecliptic</u>, ICRF, or <u>local Laplace</u> (mean value)

node Longitude of the ascending node (mean value) measured from the node of the reference plane on the ICRF equator

- *n* Longitude rate (mean value)
- **P** Sidereal period (mean value)
- P_w Argument of periapsis precession period (mean value)
- P_{node} Longitude of the ascending node precession period (mean value)

Martian System

Sat.	<u>GM</u> (km ³ /sec ²)	<u>Mean radius</u> (km)		<u>Mean density</u> (g/cm ³)	<u>Magnitud</u> V ₀ or R	<u>e</u>	<u>Geometric</u> <u>Albedo</u>		
Phobos	0.0007112±0.0000010	[4]	11.1±0.15	[5]	1.872±0.076	11.4±0.2	[6]	0.071±0.012	[6]
Deimos	0.0000985±0.000024	[4]	6.2±0.18	[5]	1.471±0.166	12.45±0.05	[6]	0.068±0.007	[7]

http://ssd.jpl.nasa.gov/?sat_elem

火星の衛星(2)

Table 1Shape (best-fit ellipsoid), volume, mass and density of Phobos and Deimos, from (1) Willner et al. (2010), (2) Rosenblatt et al. (2008), (3) Thomas (1993), (4) Jacobson (2010), (5) This study

	Phobos	Deimos
Radius (in km)	13.0 × 11.39 × 9.07 (1)	$7.5 \times 6.1 \times 5.2$ (3)
Volume (in km ³)	5748 + / - 190 (1)	1017 + / - 130 (3)
Mass (in 10 ¹⁶ kg)	1.06 + / - 0.03 (2)	0.151 + / - 0.003 (4)
Density (in g/cm^3)	1.85 + / - 0.07 (5)	1.48 + / - 0.22 (5)



Fig. 1 Recent images of the Martian moons from current Mars orbiting spacecraft. (1a) Phobos from Mars Express High Stereoscopic Resolution Camera (courtesy DLR/ESA); (1b) Phobos and (1c) Deimos from Mars Reconnaissance Orbiter High-Resolution Imaging Science Experiment (Thomas et al. 2010)

Phobos, Deimosの起源いろいろ

小惑星捕獲説: 巨大惑星の不規則衛星のように

- ・ 小惑星のような低密度と低アルベドを持つ
- (Vikingのデータによると炭素質 -> 火星より外側で誕生)

巨大衝突&周火星円盤内での固体集積説:地球の月のように

- ・ 規則衛星の軌道を持つ -> 円盤経由の形成の結果と調和的
- 火星系の角運動量は(まるで地球系のように)大きい
 -> 過去の巨大衝突を示唆
- Mars Explorer のデータでは炭素質というより珪酸塩質
 -> 小惑星である必然性はない

オリンポス山の軽石説:出典不明(少なくとも2001年以前)の俗説

- ・ 手近にある低密度天体
- ✓ オリンポス山は楯状火山 -> 軽石は出てこない



火星に近づいた小惑星-> 捕獲 -> 円軌道化

- ・ 捕獲のためのエネルギー散逸
 - ・ 周火星円盤のガス抵抗 e.g., Burns 1978
 - ・ 火星の原始大気の抵抗 e.g., S. Sasaki 1990
 - ・ 連小惑星の崩壊(3体相互作用) e.g., Landis 2002
 少なくとも一時的な捕獲は不可能ではない。
- 円軌道化のメカニズム
 - ・ 周火星円盤のガス抵抗 e.g., Lambeck 1979
 - 火星の原始大気の抵抗 e.g., S. Sasaki 1990
 - 火星の潮汐力 e.g., Burns 1978, Landis 2002
 特にDeimosにおいて非常に難しい(潮汐が効かない)。
 円軌道化する前に2体が衝突してしまう。

捕獲説の支持: Viking, Mariner 9, 地上観測, Phobos 2

- Ceres、Pallas、Phobosは波長 とアルベドの関係が似ている。 (Fig.1, Pang et. al., 1978)
- ・ Phobosは密度が低い。 [Viking: 2.2g/cm²] [Phobos 2: 1.9g/cm²]

-> PhobosはC型小惑星か



Fig. 1. The spectral albedo of the moon, asteroids (1) Ceres and (2) Pallas, and the martian satellite Phobos. There is no normalization between the different sets of data in this figure. Pang et. al. 8 1978

捕獲説への打撃(1): Phobos 2データ再検討

- Pang et. al. 1978は様子の異なる2領域をまとめて解析していた。
- ・ Phobos 2データを領域別に解析しなおしたらC型ではなかった。



捕獲説への打撃(2): Mars Express

- ・ Phobosはフィロ珪酸塩のスペクトルとよく一致する(下図)。
- テクト珪酸塩と一致する領域もある。
- C型とは言えない。 c
 (強いて言うならT型)
- 超始原的物質が ある証拠はない のでTNO起源では ないだろう。

✓ エイコンドライト
 かもしれないとし、
 捕獲説を完全に
 否定してはいない。



Fig. 9. (a) Examples of spectral matches for TES White Class spectra. (b) A mixture of biotite (50%) and antigorite (50%) provide the best spectral match to the observed TES spectrum (red curve). Nepheline (blue curve) also provide good spectral match. However, the Christiansen frequency in the spectrum of the nepheline is shifted towards shorter wavelengths with respect to that observed in the Phobos. (c) Spectrum of PFS orbit 5870 is best matched by phyllosilicates.

円盤内集積説:状況証拠

巨大衝突

- 火星系は地球系のように角運動量が大きいので、オフセットの巨大衝突はあったと考えるのが自然である。
 - Dones & Tremaine 1993
- ・ 火星表面のクレータを見ても巨大衝突があったのは明らか。

円盤形成と集積

- ・ 巨大クレータより、岩石が蒸発する ほどの高温になったと推測される。
- 楕円クレータは、衛星として生き残れなかったmoonletsが火星の潮汐 カによって火星に落下した跡と思われる。

Craddock (2011)



Fig. 1. A double, oblique impact crater located at 40.5°N, 222.5°E north or Archeon Fossae. Although the origin of such elliptical impact craters on Mars is uncertain, Chappelow and Herrick (2008) determined that the nature of these particular features is best explained by the impact of a former Mars-orbiting moonlet. Potentially many such moonlets were in orbit around Mars at one time, and Phobos and Deimos are the only two surviving objects.

円盤内集積説: 最近の数値計算 Rosenblatt & Charnoz (2012)

近い/遠い(Roche限界=2.5R_{Mars}で分ける)周火星円盤を考える。

- 内側円盤
 - > 土星リングの流体計算コード(Charnoz+2010, 2011)を改良して使う。
 - > 各タイムステップで、Roche限界の外に出た質量は1個のmoonletになる とする。
 - moonletsは自己重力、円盤重力、火星の潮汐力による軌道進化と合体 成長をする。
 -> 最大でPhobos程度に成長することは可能。
 - > 円盤が薄くなると潮汐力が卓越してくるので大きいmoonletほどより内側に落ち込んでくる。
 -> Phobos, Deimosの配置は再現できない。
- 外側円盤
 - 火星から遠いために潮汐力が効かないので、古典的な微惑星集積による惑星形成と同じである。
 - その結果を応用して見積もると、Phobos, Deimosを個別に形成されうる パラメタ領域は存在するが、両方が形成されることはない。

今後、より詳しく調べる必要がある。