# フォボス・ダイモスの力学的 起源のレビュー2

樋口有理可 東京工業大学

#### Landis 2002, 2009



R.A. Craddock/Icarus 211 (2011) 1150-1161





- ・ 火星にはフォボスとダイモスという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
- C型小惑星に似ているというのが捕獲説を積極的に指示する最大の根拠であったが、新しい観測では、強いていうならT型、D型、P型に似ている。
- 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、フォボスとダイモスの両方を説明でき る結果は得られていない。
- 少なくともダイモスは捕獲説では説明できない。

## 火星の衛星(1)

#### Mean orbital elements referred to the local Laplace planes

Epoch 19 Solution	950 Jan. : MAR0	1.00 TT 80			- 0(	、起流	原に寄ら	ず惟	当まし	.い				
Sat.	<u>a</u>	<u>e</u>	<u>w</u>	<u>M</u>		node	<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>
	а	a Semi-major Axis (mean value) http://ssd.jpl.nasa.gov/?sat_ele								.nasa.gov/?sat_elem				
	e	Eccentricity (mean value)												
	w	Argument of periapsis (mean value)												
	M	Mean anomaly (mean value)												
	i	<i>i</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	<i>n</i> Longitude rate (mean value)												
	Р	Siderea	l period (n	nean 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 <sup>3</sup> /sec <sup>2</sup> )	<u>Mean radius</u> (km)		<u>Mean density</u> (g/cm <sup>3</sup> )	<u>Magnitud</u> V <sub>0</sub> 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]	$0.068 \pm 0.007$	[7]

## 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 <sup>3</sup> )	5748 + / - 190 (1)	1017 + / - 130 (3)
Mass (in 10 <sup>16</sup> 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)

## フォボス,ダイモスの起源説

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
- ・ D型、T型小惑星に似ている、始原的、というデータも
- ・ 火星のマントルとは似ていない、というデータも

### 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

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
     特にダイモス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。







by a letter in the key. The horizontal line at 10<sup>18</sup> kg is the limit of the work from the 1980s<sup>2,8,9</sup>. The upper portion of the plot remains consistent with that work, but immense detail is now revealed at the lower mass range<sup>19</sup>.

Demeo+2014

## フォボスは何型?

 Phobos 2のデータを領域別に再解析したところ、フォボスはC型 小惑星ではない。D型でもない。強いて言うならT型か。

[Murchie & Erard 1996]

- Mars Express のデータは、フィロ珪酸塩とスペクトルがよく一致することなどからC型は否定。強いて言うならT型。超始原的物質はない。
- Mars Reconnaissance Orbiter搭載のCRISM(The Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars)のデータでは、フォ ボスもダイモスも火星とは似ていない。元はCM炭素質コンドライト のような始原的物質と考えられる。
  [Fraeman+2013]
- ロゼッタ搭載のOSIRIS(The Optical, Spectroscopic, and Infrared Remote Imaging System)のフライバイ時の観測データでは、D型。

[Pajola+2014]

### 何とも言えてない

### 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 1 Rosenblatt & Charnoz (2012)

近い/遠い(Roche限界=2.5R<sub>Mars</sub>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。
     -> 最大でフォボス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。
    ->フォボス、ダイモス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、フォボス、ダイモス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。



ジャイアントインパクトによる周火星円盤形成のSPH計算



**Fig. 2.** Snapshots of an SPH simulation during the impact and disk formation. Ejected particles are shown in black and disk particles are shown in red. The blue particles are considered part of the planet. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)