Sinton crater, Mars: Evidence for impact into a plateau icefield and melting to produce valley networks at the Hesperian-Amazonian boundary

O Sinton Crater

Gareth A. Morgan & James W. Head III 2009, Icarus 202, 39-59

衝突論文セミナー 2010年1月19日 長 勇一郎 東大 理

ESA // DLR // FU Berlin (G.Neukum) Image NASA // USGS

・ 火星の二分性の境界に位置するSinton craterの 周囲には, valley networkがよく発達している. ▶ ①Valley networkの分布と規模を詳しく調べ, <u>流水fluxを見積もった</u>. ②Sinton craterの形成年代を調べた. その結果、このvalley networkは隕石の衝突が地 表面に堆積していた氷を溶かしたことによって 形成されたことが示唆された. ▶ Valley networkの形成と衝突を関連づけること で、火星の二分性境界付近に氷河が発達していた 時期に制約を与えた.

本論文の目的

Sinton crater周辺のvalley networkが、そこに堆積していた氷への衝突に伴う流水で形成されたことを実証する.

行うこと
 Crater周囲の地形を調べる
 Crtaterの形成年代を調べる
 流量フラックスを推定
 衝突によって生じた水の量を推定
 衝突によるValley network形成モデルを実際の地形の観測事実と比較

発表の流れ

1. Introduction ◆ 火星の流水地形 ◆ 火星の年代区分 2. Sinton地域の地形 ◆ 周辺の地形 ◆ クレーター内部の地形 3. Valley networkの分 布 ◆ Sinton craterの周りに広 がるvalley networks

4. Valley networkの流 量フラックス ◆ 流量の見積もり 5. Valley networkとク レーターの形成年代 6. Valley networkを形 成する水の起源 7.衝突によるValley network形成モデル 8.まとめ

I. Introduction

1. 火星の流水地形
 2. 火星の年代区分と流水地形

火星の流水地形

Outflow channel ◆ 巨大な流水地形(幅 数十km) ◆ 水源は主に地下(カオス地形) ◆ 大規模な洪水の際に形成? Valley network ◆ 中規模の流路(幅 数百m) ◆ 様々な形態 ▶ Gully(浸食谷) ◆ 斜面に存在する幅<数十mの 小規模な谷地形 ◆ 水によって形成されたかは 微妙







火星の年代区分と流水地形

Hesperian(~3.3-2

Table 5.1 Martian stratigraphic subdivisions, with summaries of major geological events and approximate ages of boundaries [21]

Noachian(~37 Ga)	System	Major activity	Approximate age and duration
 ◆ 温暖湿潤 	Late Amazonian	Glaciation and formation of polar layered deposits (PLD); major outflow channels; eolian activity; formation of shergottites	$0.4 \pm 0.2 - 0.0 \text{Gyr}$
◆ 降雨によるValley	Middle Amazonian	Resurfacing of northern plains; formation of nakhlites and chassignites	$1.5 \pm 0.5 - 0.4 Gyr$
networkの発達	Early Amazonian	Resurfacing of northern plains; volcanic activity at Elysium Mons; deep erosion of Valles Marineris	$3.1 \pm 0.2 - 1.5 \text{ Gyr}$
Hesperian(~33-29	<i>Hesperian–Amazon</i> Late Hesperian	<i>ian boundary (3.3–2.9 Gyr)</i> Numerous outflow channels: limited volcanic	$3.4 \pm 0.2 - 3.1 \text{Gyr}$
	Early Hesperian	activity; fluvial infilling northern plains Formation of outflow channels: volcanic	~3.7–3.4 Gvr
Ga)		activity; Tharsis volcanism continues; formation of Gusev plains volcanics	
◆ GlobalなValley network	Noachian–Hesperia	<i>n</i> boundary (~ $3.7 Gyr$)	2.9.1. 2.7.6
の形成は停止	Late Noachian	networks; Tharsis volcanism begins; layered volcanic and sedimentary rocks in Valles Marineris; deposition of Burns formation	3.8±0.1-~3.7 Gyr
◆ 大規模な洪水による	cliction the planot.	under acidic conditions; Columbia Hills alkaline volcanism	
Outflow Channelの形成	Middle Noachian	Heavy bombardment; highland volcanism and formation of intercrater plains; late heavy bombardment; dynamo inactive	$4.0 \pm 0.2 - 3.8 \text{Gyr}$
Amazonian(~0 Ga) ◆ 寒冷乾燥	Early Noachian	Magma ocean; crust-mantle-core differentiation; formation of ALH84001; magnetic dynamo active; formation of crustal dichotomy; intense bombardment; loss of primary atmosphere	4.57–4.0 Gyr

Teylor & McLennan, 2009

2. Sinton地域の地形

Sinton craterの位置と大きさ
 Sinton crater周囲の地形
 Sinton crater内部の地形
 Sinton craterの特殊性

Sinton craterの位置と大きさ



氷河の活動が活発だった 痕跡

Leneated valley fill(LVF), Lobate debris apron(LDA)と 呼ばれる氷河性堆積物が 周りを覆う



Sinton crater周囲の地形



クレーター内部の特徴的な地形/地質



Sinton craterの特殊性



 Sintonとサイズ・新し さが似たクレーター との比較
 Rim付近から出発する 密なValley network
 不明瞭なEjecta deposit
 通常とは異なる浸食作 用がEjectaに働いた可能

性を示唆

3. Valley network の分布

- I. Sinton valleyの概要
- 2. Sinton crater南東に広がるvalley network
- 3. Sinton crater南に広がるvalley network
- 4. Sinton crater内部に広がるvalley network

Sinton valley networkの概要 衝突地形と極めて密接に関係した分布



valley networks

<u>Sinton crater</u>南東部

10 km

Sinton crater rim



傾斜がなだらか(I.5°)で真っ直ぐに 南東へ流れるのがこの地域の特徴



tear drop形の中州

<u>Sinton crater</u>南東部

Sinton crater rim

10 km



Abandoned valleys
河岸段丘
河床に細かい構造

<u>Sinton crater</u>南東部





複雑な流れ

流線型島

Sinton crater南部





▶リム付近の窪地を水源 とするような河川地形 ▶ 窪地を跨ぐような河川 地形→窪地とvalley networkが同時に存在 していた証拠 Plateauに切り込む Alcoveに向けて多数の Valley networkが発達

Sinton crater内部



▶扇状地の発達 ▶水路の不連続: 一度潜行し再度 出現 ▶ クレーター 外部のvalley networkとは異 なるプロセスで 形成された可能 性あり

4. Valley networkの 流量フラックス推定

流量flux推定方法

 $Q = A(g_m s R^{4/3} / g_e n^2)^{1/2}$

(Komar, 1979)

 $Q: Flux \rightarrow 知りたい$

- A:水路の断面積→リモセンデータから.水路に満杯の水を仮定(Fluxの上限値)
- $s: 水路の勾配 \rightarrow U モセンデータから$
- R:水力半径(水路の平均深さで代用可能)→リモセンデータから
- *g_m*:火星の重力→既知の定数
- *g_e*:地球の重量→既知の定数

n: Manning係数→地球上の水路での実験から与える(=0.0545; Wilson et al., 2004)

クレーター南東/南/西における最大の水路の 流量fluxを,水路の形状を調べることで推定

流量fluxの推定結果

Valley system	Width (m)	Depth (m)	Slope (°)	Q (m ³ s ⁻¹)
Sinton Southeast	320	20	1.5	8×10^4
Sinton South	234	12	2.8	2.5×10^{4}
Sinton West	480	50	2	1.4×10^{5}
Valley entering Jezero Crater, Nili Fossae (Fassett and Head, 2005)	170–400	-	- 降水	500–900
Ceraunius Tholus Valleys	250-700	20-60	5-8	4×10^{4} -
(Fassett and Head, 2007)		人	(山活重	0×10^{5}
Syrtis major planum outflow channel (Mangold et al., 2008)	500	50	0.7	5 × 10 ⁵

Sintonの流量fluxは,降水による緩慢なValley network形成(I0-20 yr)よりも,火山噴火による 氷の融解に伴う突発的な流水に類似

5. Valley networkと クレーターの形成年代

1. 地域の区分
 2. クレーター年代測定
 3. 形成年代のまとめ

地形の形成年代推定(crater counting)



I. Western counts 地域の区分 2. Southern counts 3. Crater fill counts





地形の形成年代(まとめ)

クレーター外のplateau ◆3 Gyr (Hesperian/Amazonian 境界) ◆ 衝突はHesperian/Amazonian 境界頃発生 ◆ Valley networkはその直後以降に形成 クレーター内部の堆積物 ◆100-500 Myr (Late Amazonian)に堆積 ▶ plateau南部の氷河性堆積物 ◆100 Myr (Late Amazonian)に堆積 ◆Late Amazonianの氷河活動によって堆積

6. Valley network を形成する水の起源

1. 地下水の可能性
 2. 降雨の可能性
 3. 氷雪の融解の可能性

Sinton valleyの水の供給源

▶ 地下水說→×

◆ 高地に定常的な帯水層は考えづらい

◆ 段丘の非存在

◆ カオス地形の非存在

 ▶ 降雨説→×
 ◆ 降雨による河川のフラックスは 小さすぎる

◆ 降雨による河川地形よりも平坦で 複雑に分岐している

◆ 氷に富む堆積物の存在にconsistent

- ◆ 水路が未発達なことにconsistent
 - 細かい水路が残っているのは, valley networkが成熟していない証拠



天体衝突による氷の融解量の推定

◆衝突天体

- 運動エネルギー = mv²/2
- ρ: Chondriteと同等
- r: クレーター直径のI/I0
- v: 10 km/s for asteroids (Ivanov, 2001), 40 km/s for comets (Steel, 1998)

→約I0¹⁷kJのエネルギーが解放されると推定 そのうち変換効率α(パラメーター)が熱量に変換

$$M_{\rm ice} = \frac{E}{L}$$

M_{ice}: 溶ける氷の質量 *E*: 熱量=10¹⁷ × (変換効率) kJ *L*: 融解熱=335 kJ/kg

融解量の推定値

Percentage of initial projectile kinetic energy	Ice thickness that could be melted (m)	Volume of water (km ³)	Duration of flow within the valleys (days)
1	109	500	16
3	328	1500	47
5	547	2500	78
10	1090	5000	157
20	2188	10,000	314

 ▶ 5-10%の変換効率でも,十分な量(厚さ500-1000 m)の 氷を溶かすことが可能
 ▶ 現在のLVF/LDA depositと同等な厚み(Li et al., 2005)
 →氷が堆積していたとしたら,衝突によって溶かす ことが十分可能.

7. 衝突によるvalley networkの形成モデル

Valley networkの形成モデル

衝突以前



▶氷に富む堆積物がplateauの表面に積もっている
 ◆ ice-rich/ice-related depositの存在
 ◆ 軌道傾斜角の揺らぎによって二分性境界に通年の降雪はあり得る(Madeleine et al., 2007)

Valley networkの形成モデル

衝突時



Valley networkの形成モデル 氷融解開始とValley networkの形成



熱いejectaやmeltが覆い被さることで氷を溶かす
 Sinton地域の特徴的な地形が説明可能

- Ejecta blanketが未発達: Ejectaは水によってplateauの 周囲の谷に押し流されてしまったため
- リムに垂直な直線的な流路: Ejectaの配列によって水流が 影響を受けたため
- 流路が未成熟: Ejectaが冷えた/溶かす氷が枯渇したこと により浸食作用が停止したため

Valley networkの形成モデル





▶ 激しく浸食されたEjecta blanketとvalley network ▶ 断層に沿った熱水システムが点在(Osinski et al., 2005)

8.まとめ

- Sinton craterの周囲に広がる地形, valley networkの 分布および形状を調べた.
- Valley networkの流量fluxが降雨で説明できないほど 大きいことを示した.
- Sinton craterの形成年代(=Valley networkの形成年代の上限値)がLate Hesperianであることを示した.
- Valley networkへの水の供給源として、台地を覆う氷の堆積物が有力であることを示した.
- 天体衝突で溶かすことの出来る氷の量は充分多いこと を示した.
- ★Sinton craterを作った天体衝突が堆積した氷を溶かし、周囲にvalley networkを形成したと考えられる.
 ★天体衝突時に氷が存在していたことは、この地域の氷河活動の年代制約に繋がる.