

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 30 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K13890

研究課題名(和文)数万人の市民と行う膨大な惑星探査画像の解析：手法開発と火星の現在の活動度の発見

研究課題名(英文)Citizen mapping of planetary images in a space museum: Finding possible recent activities on Mars

研究代表者

宮本 英昭 (MIYAMOTO, Hideaki)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授

研究者番号：00312992

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：火星における現在のクレーター生成頻度が把握できたら、年代推定の精度が大きく向上する。本研究は宇宙ミュージアムTeNQで約2年間にわたり、3万人以上の方々にご協力いただきながら、合計3,549のCTX画像のペアを精査し、計476個の新しいクレーター類似地形を判別した。調査した領域の総面積は $\sim 1.0 \times 10^7 \text{ km}^2$ (これは火星全体の7.06%に相当する)で、ATFは $3.7 \times 10^7 \text{ km}^2\text{yr}$ であることから、この地形の生成率は $\sim 1.3 \times 10^{-5} \text{ /km}^2\text{/yr}$ となった。これは画像解析に基づく先行研究の値や理論計算に基づく衝突フラックスの値よりも1桁以上も大きい結果であった。

研究成果の概要(英文)：Current formation rate of craters is an essential information in estimating formational ages of recently geological activities. Because automatic identification of new craters is, at least currently, difficult, we performed "citizen mapping" of craters in a space museum, TeNQ, located the center of Tokyo. More than 30,000 people joined this activity for more than two years. We successfully identified 476 new dark patches within  $1.0 \times 10^7 \text{ m}^2$ , which is about 7.06% of the entire Mars. This gives the formational rate of  $1.3 \times 10^{-5} \text{ km}^2\text{/yr}$ , which is one order of magnitude larger than previous analyses based on image analyses and theoretical impact flux.

研究分野：惑星科学

キーワード：火星 衝突クレーター 活動度 市民マッピング 博物館

## 1. 研究開始当初の背景

現在の火星表面での地質活動度は極めて小さいと考えられているが、地質学的にみて以外に近年まで活動が続いていた可能性も指摘されている。また火星周回機による観測によって、火星表面が未だに変化し続けていることも明らかとなっている [e.g., Carr & Head, 2010]。例えばマーズ・グローバル・サーベイヤー (MGS) の空間解像度 1m の MOC カメラや最高空間解像度 25 cm の火星探査機マーズ・リコネッサンス・オービター (MRO) の巨大望遠カメラ HiRISE が撮像した地質現象として、現在も地球と同等以上のフラックスで移動し続ける砂丘の存在が見つかった [Bridges et al., 2012]、RSL と呼ばれる季節変化する斜面上の筋状模様 [McEwen et al., 2011] や、スロープストリークと呼ばれる流動現象を示す斜面の変化 [Malin and Edgett, 2001]、新しく削剥作用によって生じる斜面上の地形 [Malin et al., 2006] など、例として挙げることができる。

本研究で注目したのは、火星表面の全域で現在も生じている、直径数十~数百メートルの暗い斑点模様 (ダークパッチあるいはパッチと呼ぶ) である (図 1)。ダークパッチはこれまで、小さな衝突現象によって生じた放出物 [Malin et al., 2006] と考えられてきたが、一方で、衝突現象以外の地質現象とする解釈 [Malin and Edgett, 2001; Kereszturi et al., 2009; Kieffer et al., 2006; Horváth et al., 2009; Kieffer et al., 2006] も存在する。しかし、現在のダークパッチの生成率に関する研究は、理論計算に基づく現在の衝突頻度の推定値 [JeongAhn and Malhotra, 2015; Williams et al., 2014] や限定的な時間・空間領域での画像解析 (画像の比較による判別) による推定値 [Malin et al., 2006; Daubar et al., 2013] に限られており、全球的に連続する 10 年以上をかけて取得された膨大なデータに基づく調査は行われていない。

本研究では特に、新しく生じる地形的特徴の自動抽出が未だに技術的に確立していない点に着目した。これは今後機械学習等によ

って自動化される可能性が高いが、研究提案段階ではこれが実現化はされておらず、肉眼による観察が最も信頼度が高い。しかしこれは当然、作業に多大な時間と労力を要する。そこで本研究では数万人の市民に膨大な惑星探査画像の解析を協力してもらうことでこうした現状を改善しようと試みた。

## 2. 研究の目的

本研究に用いる画像が占める面積 (3000 組以上の画像ペア) は火星全体の約 7% に相当する。単一の画像は 50~200 メガピクセルで構成されるため、全ての画像を専門家のみで肉眼で解析するのは現実的でない。加えて、異なる太陽入射角、校正条件で得られた異なる画像同士を計算機によって自動的に比較し、さらにそこから新たに生じた地形的特徴のみを検出することは技術的に未だに困難である。代表的な理由として、膨大なファイルサイズの画像を解析するためのリソースや時間が限られていたり、わずかに異なる位置ずれや歪みをもつ 2 画像を完全に位置合わせする技術的な困難さ、そしてダークパッチと類似した別の地質現象 (例えば影の長さや方向の変化、風によって生じる変化、スロープストリーク、風成地形、ダストデビルなど) を区別することの難しさが挙げられる。

そこで本研究代表者は、東京都心に位置する宇宙ミュージアム TeNQ の内部に本研究に特化した作業空間を構え、このミュージアムの年間来場者数は 20 万人以上で、そのうち 3 万人以上の来場者が約 2 年間にわたる本研究の活動に参加していただくこととした (図 2)。

展示室内に常駐するスタッフが来場者が画像解析ソフトウェアを操作する手助けすることで、来場者 1 人当たり 15-30 分をかけて新しいダークパッチを発見する作業を可能にし、発見者には景品を贈呈するインセンティブを与えた。得られた結果は 20 名以上のボランティアが再度解析したのち、4 名の研究者によって再確認する体制を整えた。チーム全体は火星地質学のバックグラウンドを持つ専門家 3 名によって組織した。そうす

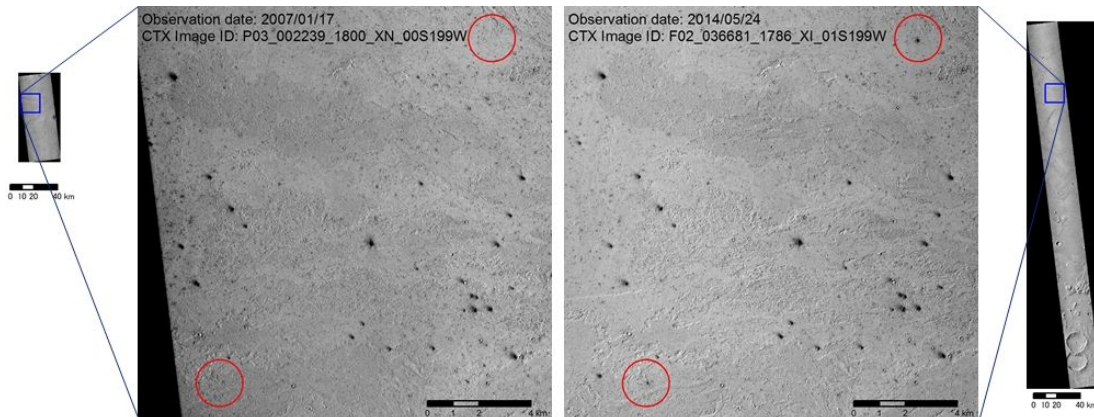


図 1. CTX 画像ペアとその拡大図。赤い円の内側に示したダークパッチは、2007 年 (左) で見られず、2014 年 (右) で生じたもの (宮本ほか, 2016)。



図2.(左)宇宙ミュージアム TeNQ は株式会社東京ドームと東京大学との協同で実現した。TeNQ サイエンスエリアは宮本研究室が設計・監修を行った。(右)本研究のために TeNQ 内に常設展示として設置した作業空間(東京大学が進める【火星研究プロジェクト】)

ることでダストデビルやスロープストローク、風成地形といった類似地形の誤った判別結果を極めて正確かつ効率的に排除する体制を整えることとした。

### 3. 研究の方法

研究領域は Daubar et al. [2013]のアプローチに従い、比較する2画像(新・旧)が重なり合う領域を、MGS 熱放射分光計(TES) Dust Cover Index (DCI; 粒子サイズを最も反映する周波数帯 1350 1400  $\text{cm}^{-1}$  の熱放射 [Ruff and Christensen, 2002])の値が比較的高い(0.96 以上; ダストが比較的厚く積もった)領域(図3)から選択した。

解析に使用したのは MRO 搭載の空間解像度約 5-6 メートルの CoTeXt (CTX[Malin et al., 2006])カメラ画像(2006年から2017年までに撮像されたもの)を用いた。2018年3月末までに計 3,549 の画像ペア(撮像領域の重なり合う2枚の新・旧画像1組)を衛星画像解析ソフトウェア ArcGIS を用いて比較することとした。ダークパッチの生成率(単位面積・

単位年あたりの新しいダークパッチの生成数)の計算には Daubar et al. [2013]が定義した計算式 Area-Time Factor (ATF)を用いた。これは2画像の重なり合う面積と時間間隔の積を全画像ペアで積分したもので、発見数を ATF で除算することで生成率とみなした。

### 4. 研究成果

本研究では計 3,549 の CTX 画像ペアから計 476 個の新しいダークパッチを判別することに成功した(図3)。調査した領域の総面積は  $\sim 1.0 \times 10^7 \text{ km}^2$ (火星全体の 7.06%に相当)、ATF は  $3.7 \times 10^7 \text{ km}^2\text{yr}$  であることから、ダークパッチの生成率は  $\sim 1.3 \times 10^{-5} / \text{km}^2/\text{yr}$  となった。これは画像解析に基づく先行研究の値( $1.65 \times 10^{-6} / \text{km}^2/\text{yr}$ ) [Daubar et al., 2013]、および理論計算に基づく衝突フラックスの値 ( $10^{-8}-10^{-6} / \text{km}^2/\text{yr}$ ) [JeongAhn and Malhotra, 2015]よりも1桁以上大きい結果である。この途中経過は Miyamoto et al. (2017)、宮本ほか(2017)で報告した。

CTX 画像のサンプリングバイアスが無視で

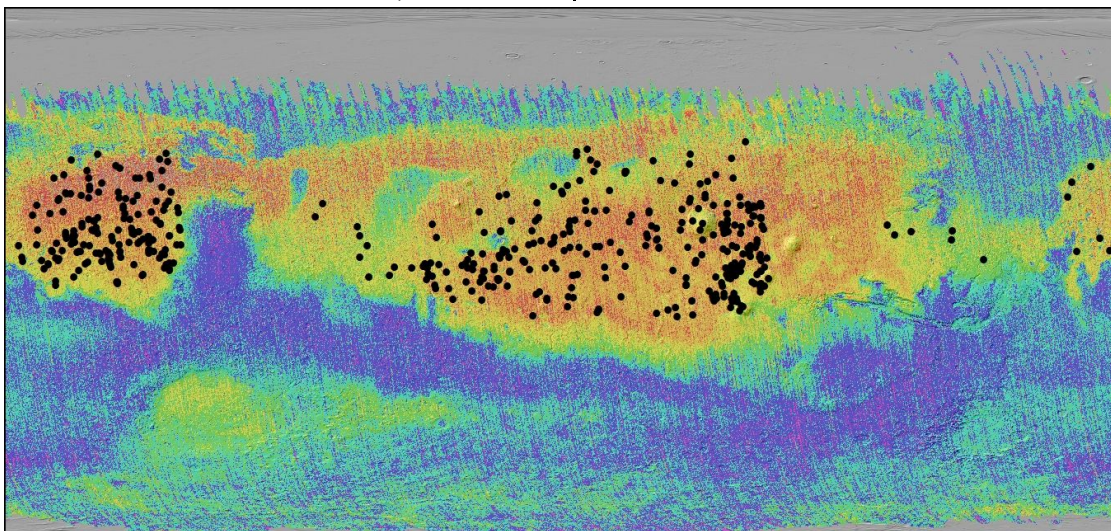


図3. 本研究で発見した新しいダークパッチの全球図での位置(黒色の円)。ベースマップは全球 TES DCI マップ [Ruff and Christensen, 2002] (暖色ほどダストの被覆量が多い)

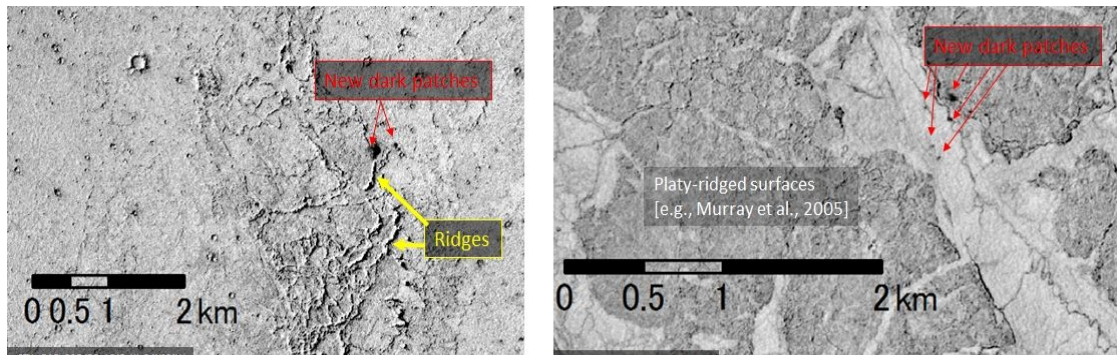


図4. 構造地形に沿って生じた新しいダークパッチのCTX画像(宮本ほか, 2017)。

きるとすると、本研究で求めた生成率の値は、近年の衝突イベントの頻度の真の値あるいはその他の地質現象を意味すると考えられる。衝突現象とすると、ダスト剥ぎ取りによる表面の変化はダストの比較的厚い領域の方がダストの少ない領域よりも顕著になると考えられる。一方で、その他の地質現象とすると、新しいダークパッチは近傍の断層などの構造地形に沿って生じたガスの放出現象を表している可能性がある。そこで、実際に新しいダークパッチ周辺を丹念に観察したところ、新しいものの一部が確かに峰に沿って生じていることを確認した。この成果は宮本ほか(2017)で報告するとともに、現在国際論文を執筆中である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 5 件)

1. Hemmi, R., and H. Miyamoto, (2017) Distribution, morphology, and morphometry of circular mounds in the elongated basin of northern Terra Sirenum, Mars. *Progress in Earth and Planetary Science*, 4, 26. doi: 10.1186/s40645-017-0141-x.
2. Rodriguez, J.A.P., A.G. Fairén, K.L. Tanaka, M. Zarroca, R. Linares, T. Platz, G. Komatsu, H. Miyamoto, et al. (2016) Tsunami waves extensively resurfaced the shorelines of an early Martian ocean. *Scientific Reports*, 6, 25106, doi:10.1038/srep25106.
3. 宮本 英昭, 小松 吾郎, ドーム ジェームズ, 逸見 良道, 白井 寛裕, 山岸 明彦, (2016) 地形学から見た火星の表層環境と生命探査. *地学雑誌*, 125(1), 171-184. doi: 10.5026/jgeography.125.171.
4. Dohm, J.M., and H. Miyamoto, (2016) Geomorphological indication of ancient, recent, and possibly present-day aqueous activity on Mars.

*Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, 125(1), 171-184. doi: 10.5026/jgeography.125.121.

5. Fairén, A.G., J.M. Dohm, J.A. Rodríguez, E.R. Uceda, J. Kargel, R. Soare, H.J. Cleaves, D. Oehler, D. Schulze-Makuch, E. Essefi, M.E. Banks, G. Komatsu, W. Fink, S. Robbins, J. Yan, H. Miyamoto, et al. (2016) The Argyre Region as a Prime Target for in situ Astrobiological Exploration of Mars. *Astrobiology*, 125(1), 171-184. doi: 10.5026/jgeography.125.121.

[学会発表](計 9 件)

Yamashiki, Y.A., H. Sato, R. Kuroki, H. Miyamoto, and R. Hemmi (2017), Hydrological process of Martian surface in Hesperian epoch, *American Geophysical Union Fall Meeting 2017*, New Orleans, LA, USA (December 11-15, 2017).

宮本 英昭, 逸見 良道, Parsons Reid (2017), 市民参加型の画像解析による現在の火星におけるダークパッチの形成率, 2017年日本惑星科学会秋季講演会, 大阪府豊中市・大阪大学豊中キャンパス(2017年9月27-29日)

Hemmi, R., and H. Miyamoto, (2017), Morphologic and morphometric study of pitted mounds in southern Acidalia Planitia, Mars, *Asia Oceania Geosciences Society 14th Annual Meeting 2017*, Singapore (August 6-11, 2017).

Yamashiki, Y., H. Sato, R. Kuroki, R. Miyamoto H., and R. Hemmi, (2017) Hydrological Simulation of Valley formation in Hesperian Marsian Surface. *JpGU-AGU Joing Meeting 2017*, Makuhari Messe, Chiba, Japan (May 20-25, 2017).

Hemmi, R., and H. Miyamoto, (2017) Thermophysical and topographic analyses of conical mounds in northern

Terra Sirenum, Mars: Implications for their origins. *JpGU-AGU Joing Meeting 2017*, Makuhari Messe, Chiba, Japan (May 20-25, 2017).

Miyamoto H., R. Hemmi, and J. Dohm, (2017) Current production rate of dark splotches on the surface of Mars. *JpGU-AGU Joing Meeting 2017*, Makuhari Messe, Chiba, Japan (May 20-25, 2017).

宮本 英昭, Dohm James M., 逸見 良道, 田中 宏幸, 新谷 昌人, 西堀 俊幸, 熊本 篤志, 春山 純一, 小松 吾郎, 臼井 寛裕, 新原 隆史, 火星地下構造探査チーム (2016) 火星の浅部地下構造に関するレビューと今後の探査戦略. 第 49 回月・惑星シンポジウム, 神奈川県相模原市・宇宙科学研究所 (2016 年 7 月 20-21 日)

Hemmi, R., H. Miyamoto, and J.M. Dohm, (2016) Distribution and geomorphology of well-preserved pitted mounds in Terra Sirenum, Mars: Implications for possible mud volcanism. *Japan Geoscience Union Meeting 2016*, Makuhari Messe, Chiba, Japan (May 22-26, 2016).

Miyamoto, H., and J.M. Dohm, (2016) Geomorphological view of the aqueous history of Mars and candidates of current habitable environments. *Japan Geoscience Union Meeting 2016*, Makuhari Messe, Chiba, Japan (May 22-26, 2016).

〔その他〕

ホームページ:

東京大学が進める【火星研究プロジェクト】

URL:[https://www.tokyo-dome.co.jp/tenq/event/event\\_mars.html](https://www.tokyo-dome.co.jp/tenq/event/event_mars.html)

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

宮本 英昭 ( MIYAMOTO, Hideaki )  
東京大学・大学院工学系研究科・教授  
研究者番号 : 00312992

### (4)研究協力者

逸見良道 ( HEMMI Ryodo )  
東京大学・総合研究博物館・特任研究員