

令和 3 年 5 月 13 日現在

機関番号：34304

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K14393

研究課題名（和文）地球のつむじ風は惑星共通か～着陸機画像を用いた火星との比較～

研究課題名（英文）Comparison of dust devils between Earth and Mars

研究代表者

小郷原 一智 (OGOHARA, Kazunori)

京都産業大学・理学部・准教授

研究者番号：50644853

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,800,000円

研究成果の概要（和文）：Mars Exploration Rovers Spiritに搭載されたNavigation Cameraの観測画像から火星のダストデビルを抽出し、その発生日時、持続時間、直径をすべて記録した。かつてはダストデビルの直径や移動速度の分布しか報告されていなかったが、これにより、個々のダストデビルの特徴と周囲の大気環境との関係を調査できるようになった。

日別のダストデビル頻度には7 solsおよび2 sols程度の周期の変動があるようにも見えるが、あまりはっきりしない。

周回機とSpiritのダストデビル観測が同時期に十分な数行われていないため、周囲の大気環境との比較を有意に行うことができなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

かつては火星ダストデビルの直径や移動速度の分布しか報告されていなかった。本研究により、Spirit着陸地点における、3火星年にわたる個々のダストデビルの発生日時、持続時間、直径が記録された。着陸地点からの相対的な位置も計測されたので、ダストデビルも移動経路（直線なのか曲がるのか）を導出することも可能である。今後は、火星ダストデビルのデータベースとしての活用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：Martian dust devils were extracted from the images observed by the Navigation Camera onboard Mars Exploration Rovers Spirit, and the date and time of occurrence, duration, and diameter were all recorded. In the past, only the distributions of dust devils' diameters and migration speeds were reported, but now we can investigate the relationship between the characteristics of individual dust devils and the surrounding atmospheric environment. The daily dust devil frequency seems to have a periodic variation of about 7 sols and 2 sols, but it is not clear.

Since the number of dust devils observed by Spirit was not large enough during the orbiter observation, it was not possible to make a significant comparison with the surrounding atmospheric environment.

研究分野：惑星気象学

キーワード：火星 ダストデビル 着陸機

1. 研究開始当初の背景

火星では、直径数 m ~ 数 km のダストデビルと呼ばれるつむじ風が多発している。火星のダストデビルのメカニズムは、地球のダストデビルに基づいて理解されている (Renno et al., 1998; 2000)。しかし、地球の大気条件を前提とする地球のダストデビルの理論が火星ダストデビルにも適応可能かどうかは、依然として未解決の問題である。火星においてダストデビルが発生しやすい大気条件を統計的に明らかにするとともに、地球のダストデビルの理論と整合的な傾向が見られるか検証しなければならない。観測画像に写るダストデビルを目視検出し、直径分布や移動速度分布を報告した先行研究はすでにある (Greeley et al., 2010)。しかし、提出されているのは分布のみであるので、どのような大気条件のときに、どのような大きさの、どれくらいの持続時間のダストデビルが発生しやすいかは未だにわからない (Lorenz 2009)。

先行研究でまとめられているのは、ダストデビルの直径や移動速度などの度数分布のみである。したがって、ダストデビルの属性 (発生頻度や直径、持続時間など) と大気条件との関係を明らかにしようとする、結局すべての画像を目視で再確認することになる。しかし、そのような作業を行うことは現実的には困難を伴う。この問題を解決すべく、申請者は近年、火星の氷雲やダストデビルを機械学習を用いて自動検出手法を開発した (Ogohara et al., 2016a; 2016b)。氷雲については 8 割、ダストデビルについては 9 割を超える検出率を達成した (Ogohara et al., 2018)。この手法を用いれば、画像を目視確認することなく、発生時刻、持続時間、大きさを自動記録できる。

また一方で、火星大気データベース (MACDA) がすでに公開されている。申請者は、MACDA に見られる火星赤道大気の特徴的な時空間スペクトルを発見している。したがって、この MACDA と申請者が開発したダストデビル自動検出手法を用いれば、どのような大気条件においてどのようなダストデビルが発生しやすいかを明らかにすることができる。

2. 研究の目的

本研究は、着陸機による火星観測画像に写るダストデビルの大きさや持続時間、頻度などの属性と、周囲の大気条件 (温度、安定度、気圧など) との関係から、火星ダストデビルの発生条件を明らかにし、その結果が既存のダストデビルの理論と整合的であるか検証することであった。

- (1) Ogohara et al. (2016b) が開発したアルゴリズムを用いて、画像が撮影された時刻 (画像ヘッダに記載) に発生しているダストデビルの数と直径、画像中における位置を自動計測する。さらに、ダストデビルの光学的厚さや持続時間、移動速度もわかる。
- (2) 探査機着陸地点における安定度、風速、境界層厚、地表面温度などダストデビルの発生にかかわるとされる物理量を、火星大気データベース MACDA から抽出し、時系列化する。それとダストデビルの発生時刻や頻度、直径などの属性との相関を明らかにする。
- (3) (2) で明らかになったダストデビルの属性 (直径など) と大気条件 (安定度など) との関係が、Renno et al. (1998) の理論や Nishizawa et al. (2016) の数値計算結果から予想されるものであるか検証する。

3. 研究の方法

(1) ダストデビルの自動検出

Ogohara et al. (2016b; 2018) のアルゴリズムを用いて、火星探査機 Spirit 搭載の Navigation Camera (Spirit/ Navcam) が撮影したすべての画像から、ダストデビルを自動検出する。発生時刻、持続時間を取得することが可能である。

周回機が撮影した着陸地点付近の超高解像度画像に写る地面模様をもとに、Spirit からダストデビルまでの距離を算出することで、ダストデビルの直径を求められる (Greeley et al., 2006)。

(2) ダストデビルと周囲の大気条件との関係性を明らかにする

観測されているすべてのダストデビルの属性 (撮影時刻、持続時間、直径、移動速度、頻度 etc) は Step 1 において整理され、リスト化される。さらに、先行研究では示されていなかったダストデビルの属性同士の相関 (直径-持続時間など) も明らかになり、より詳細な火星ダストデビルの記述が可能になる。

周囲の大気データとして、公開されている火星大気解析データベース (Mars Analysis

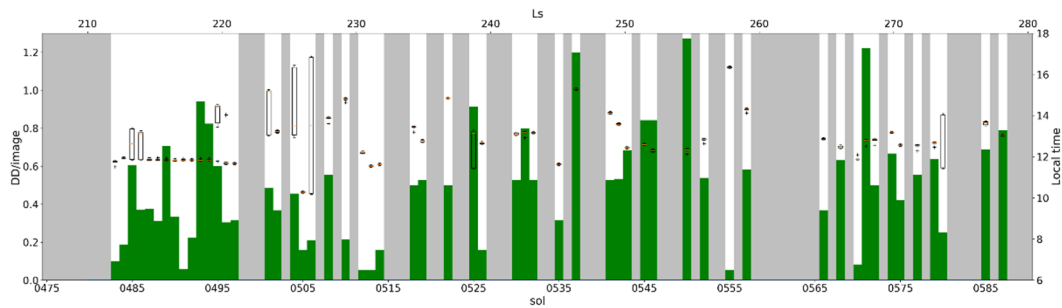


図 1 Spirit の観測開始最初の Mars Year (MY)におけるダストデビルの日別頻度と観測地方時。緑のヒストグラムは画像 1 枚当たりのダストデビル数 (左軸), 箱ひげは観測地方時 (右軸) を示している。

Correction Data Assimilation, MACDA) を用いる (Montabone et al., 2014)。着陸地点の高度補正をした後, 周囲の環境に関連する物理量 (気圧, 温度, 風速, 安定度, 地表面温度, 対流混合層厚など) を時系列化する

ダストデビルのリスト () および周辺の大気条件に関する物理量のデータ () から, それらの相関が明らかになる。例えば, 対流混合層厚が大きくなったときに, 大きなダストデビルが発生する確率が高くなると予想できる。

(3) 従来のダストデビルの理論との比較

Renno et al. (1998; 2000) は, ダストデビルの最大風速および直径 (最大風速になる半径 $\times 2$) と, 境界層上端高度や地表面温度との関係式を提案している。まずは, 観測されたダストデビルの直径および大気データから得られる境界層厚が, この関係式に従うか調査する。さらに, Nishizawa et al. (2016) の数値計算で得られた半径分布とも比較する。

4. 研究成果

(1) ダストデビルの自動検出

図 1 は, Ogohara et al. (2018) の方法で自動検出した, Spirit の観測開始最初の Mars Year (MY) におけるダストデビルの頻度の時系列である。当該手法で自動検出した後, 目視でその結果が正しいことを確認し, 間違っている場合には修正した。複数の画像に写る同一のダストデビルを重複せず に 計 数 した。そのうえで, 各 sol に観測されたダストデビルの総数を画像枚数で割ることで, 画像 1 枚当たりのダストデビル数を求めた。sol によって観測地方時のばらつきが異なり, 正午付近に集中して観測している時期もあれば, より広い地方時範囲に散発的に観測している sol もある。図 1 からは明確な周期性は見取れないが, sol 0483 から 15 sols 程度の連続した期間においては, 画像当たりのダストデビル数に 7 sols 程度の周期があるようにも見える。ただし, 他の時期においてはそのような周期性を見取ることができない。一方, 観測地方時の中央値と画像当たりのダストデビル数の散布図である図 2 から, 画像当たりのダストデビル数に 2 sols の周期があるように見える。しかし, それほどははっきりしておらず, おそらく統計的には有意でない。Greeley et al. (2006; 2010) が実施したダストデビルの直径計測は, Spirit の観測画像に写る地表面の模様と, Mars Global Surveyor (MGS) に搭載された Mars Orbiter Camera (MOC) が観測した火星の可視画像に写る模様を比べることで, Spirit とその観測画像に写るダストデビルとの距離を見積もる方法であっ

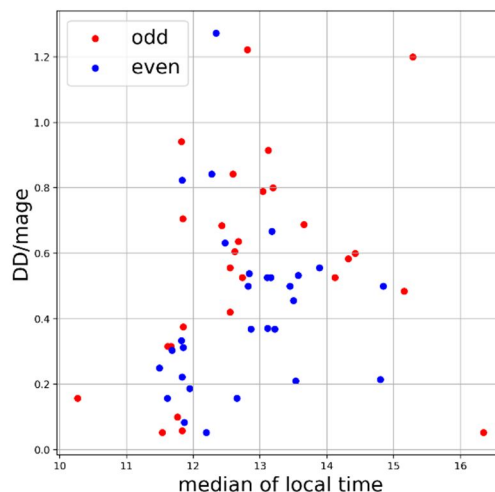


図 2 各 sol の観測地方時の中央値と当該 sol における画像一枚当たりのダストデビル数との関係。赤色が奇数 sol, 青色が偶数 sol を意味している。

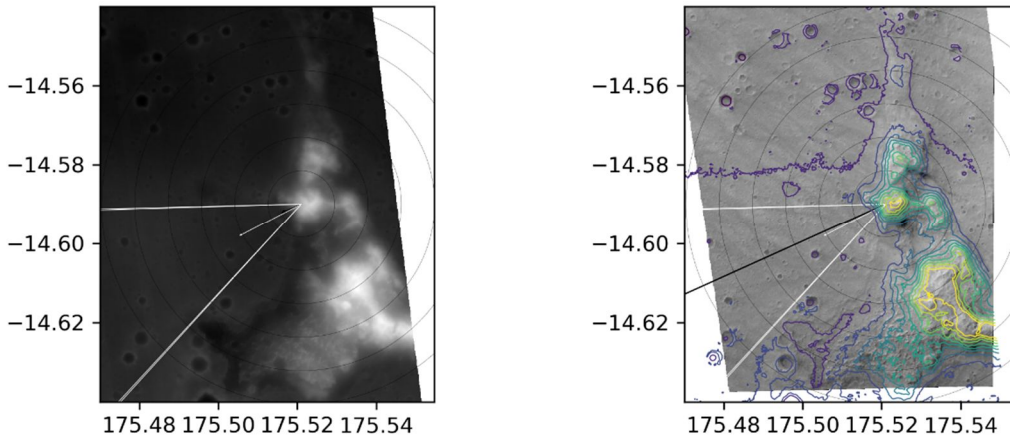


図3 (左) HiRISE のステレオ視画像から作成された DEM, (右) MGS/MOC によって観測された Columbia Hills 付近の可視画像と左の DEM (等高線). 横軸は経度, 縦軸は緯度である. 白線は Navigation Camera の視野の端, 黒線は boresight vector, 白矢印は Spirit からダストデビルに向かうベクトルである. 黒細線は Spirit を中心とする半径 500 m ごとの同心円を表している.

た. しかし, Spirit の北西側には明確な模様やクレーターがなく, 彼らの論文に記載されている方法ではダストデビルまでの距離を算出することができなかった. そこで, SPICE toolkit を用いて画像上のダストデビルの下端(地面と接する点)の視線ベクトルを着陸地点を中心とする座標系に変換し, Spirit からダストデビル下端に向かうベクトルと地表面との交点を求めることで, Spirit とダストデビルとの距離を算出できた. 地表面の高度データには, Mars Reconnaissance Orbiter に搭載されている超高解像度カメラ HiRISE のステレオ視画像から作成された Digital Elevation Map (DEM)を用いた(図3). Spirit の活動領域である Columbia Hills の南西側にある比較的大きなクレーターを用いて精度検証したところ, およそ-10%の系統誤差があることが分かった.

(2) ダストデビルと周囲の大気条件との関係性を明らかにする

(1)の方法で Spirit の観測画像からダストデビルを抽出し, リスト化した. (1)の方法でダストデビルの直径も計測した. しかし, ダストデビルのどこの直径をダストデビルの直径とすべきか(スカート部分なのか 地方から数 m 離れたところなのか), 検出されたものすべてをダストデビルとみなすべきか(明らかに立ち上がっていないものや, 地面付近が明るいだけのものもダストデビルなのか)など, ダストデビルの統計を左右するにもかかわらず明確な答えのない問題に直面した. したがって, (1)の方法で計測した数値はあるが, それがダストデビルの直径と言えるかは定かではない. したがって, ある程度信頼できるものは, ダストデビルの発生日時のリストにとどまっている.

ダストデビルの頻度を比較する火星大気データとして MACDA を想定していた. MACDA は MGS に搭載されている Thermal Emission Spectrometer (TES)の温度データを同化した再解析データである. Spirit の観測初年は確かに MGS の観測期間の最後の年であったが, TES はすでに運用を停止していた. したがって, Spirit が多くのダストデビルを観測した期間は MACDA に含まれていなかった. Spirit の観測 2 年目以降は MGS の次の探査機 MRO の観測期間であるが, Spirit の 2 年目は大きなダストストームが発生してダストデビルをあまり観測できていない. そこで, MRO に搭載された Mars Climate Sounder (MCS)の温度データを同化した, EMARS と呼ばれる再解析データを取得し, Spirit 3 年目のダストデビル頻度と比較した. 図 4 は Spirit 3 年目のダストデビル数の時系列と, 同時期の EMARS に含まれる Spirit 着陸地点に最も近い格子点における地表気圧の変動の関係を示している. 地表気圧の変動は当該期間においてトレンドし, 全幅 1 sol の移動平均を施している. それら二つに明確な相関は見取れないし, 何より明らかにダストデビルの観測日が少ない. さらに, 観測 1 年目は約 20 秒ごと計 21 枚程度の観測が 1 セットのダストデビル観測として実行されていたが, 観測 3 年目においては時間間隔が数秒程度の観測が相当数ある. 1 sol にタイムラプス動画を数 10 秒撮影しただけであるので, ダストデビルの発生数は少なからざるを得ない. Spirit 3 年目のデータをもってしても, ダストデビルと周囲の大気条件との関係性を明らかにするのは困難であった.

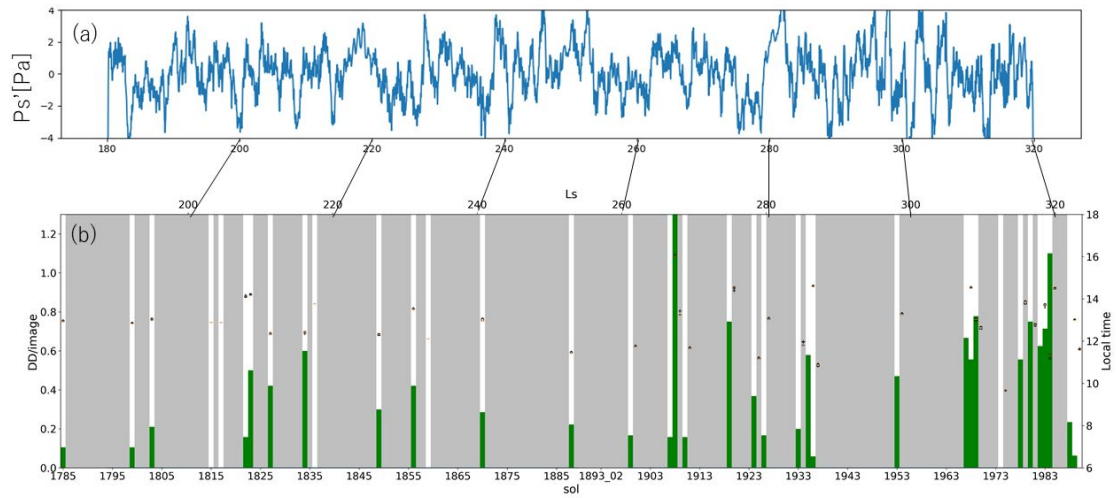


図 4 Spirit 3 年目のダストデビル数の時系列(b)と、同時期の EMARS に含まれる Spirit 着陸地点に最も近い格子点における地表気圧の変動(a)の関係を示している。(b)は図 1 と同じであるが、Spirit 3 年目のダストデビル抽出結果である。地表気圧の変動は当該期間においてデトレンドし、全幅 1 sol の移動平均を施している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

| | |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名 Ogohara Kazunori, Watanabe Takeru, Okumura Susumu, Hatanaka Yuji | 4. 巻 61 |
| 2. 論文標題 Automatic detection of typical dust devils from Mars landscape images | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Advances in Space Research | 6. 最初と最後の頁 1158 ~ 1169 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.asr.2017.11.030 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 Ogohara K. |
| 2. 発表標題 Re-Examination of Greeley et al. (2006): Toward an Understanding of a Correlation Between Dust Devil Frequency and Atmospheric Waves Around the Spirit Rover |
| 3. 学会等名 9th International Conference on Mars (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 矢島一輝, 小郷原一智 |
| 2. 発表標題 差分輝度値の確率密度分布を用いた火星塵旋風の自動検出 |
| 3. 学会等名 第17回情報科学技術フォーラム |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 矢島一輝, 小郷原一智 |
| 2. 発表標題 Automated detection of Martian dust devils in multiframe images observed by the MER/Spirit rover |
| 3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 小郷原一智 |
| 2. 発表標題 火星におけるダストデビルの発生頻度と周囲の大気環境 |
| 3. 学会等名 日本気象学会2021年度春季大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|