

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：34304

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04044

研究課題名（和文）多様なダストストームを通じた火星上層大気への効率的物質輸送過程の研究

研究課題名（英文）Efficient transport processes toward the Martian upper atmosphere associated with the variety of dust storms

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） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：火星北半球に位置するArcadia平原西部に着目し、Mars Global Surveyorに搭載されたMars Orbiter Cameraによるおおよそ3火星年分の観測画像から深層学習を用いてlocal dust stormを自動検出するとともに、発生緯度経度、発生季節、面積を記録した。その結果、至点と分点の間の中途半端は季節にダストストームが発生しやすいことが分かった。火星再解析データセットと比較することで、地表近くに存在する周期2 solsの大気波動の振幅が顕著になるタイミングでダストストームが多発していることを明らかにした。この大気波動はその周期と波数から傾圧不安定波と考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

世界で初めて深層学習を用いて火星ダストストームを自動検出し、緯度経度、季節、面積を自動記録することで、当該地域におけるダストストームの統計的特徴を明らかにした。目視検出した過去の研究と整合的な結果が得られ、他の地域への応用が期待できる。ダストストームの発生と相関がある波動を特定できたので、ダストストームのメカニズムの解明へとつながる。さらに、火星北半球中緯度のダストストームは、実は地球の中緯度でよくみられる一般的に知られた大気現象で説明できる可能性がある。大気現象の点で、地球と火星はよく似ていることの証左として、一般に発表できるかもしれない。

研究成果の概要（英文）：Focusing on the western Arcadia Planitia in the northern hemisphere of Mars, local dust storms were automatically detected using deep learning from Mars images taken by the Mars Orbiter Camera onboard the Mars Global Surveyor for approximately three Mars years, and the latitude, longitude, season, and area of local dust storms were recorded. The results show that dust storms are more likely to occur in the seasons between the solstices and equinoxes. Comparison with the Mars Reanalysis dataset reveals that dust storms are more frequent when the amplitude of atmospheric waves with a period of 2 sols near the surface is significant. These atmospheric waves are considered to be baroclinic waves based on their period and wavenumber.

研究分野：惑星気象学

キーワード：火星 ダストストーム 物質輸送

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

火星大気中に浮遊するダストは、太陽放射を吸収する大気中の加熱源であり、現在の火星気候を決定する一因となっている。加熱源であるということは、大気運動も支配しているということであり、現在の火星の大気循環や物質の輸送はダストを抜きにして語ることはできない。中でも、大気中に巻き上げるダスト量が多く、様々な空間スケールを持つダストストームは、以下の点で特に重要である。

- ① ダストストームが多発すると、大気の光学的厚さが全球的に上昇する。
→ 大気への主たるダスト供給機構である。
- ② 急激な太陽放射加熱により上空数十 km まで急上昇することで、大循環よりもはるかに効率的にダスト自身、水 (H₂O) やその他の微量成分を上層大気に輸送する。
→ 効率的な宇宙への散逸を可能にする。

すなわち、ダストストームの発生メカニズムを明らかにし、季節や地域によって異なる大気中へのダスト供給機構を理解できれば、現在の火星気候システムのみならず大気散逸を通じた気候の変遷をも理解することにつながる。

大きさが 1000 km 以下の「ローカルダストストーム」は最も数が多く、年間数千個発生するとされている (Cantor et al., 2001)。さらに近年の観測により、明瞭な模様のあるローカルダストストームは、その模様により pebbled タイプ、puffy タイプ、および plume-like タイプの 3 種類に分類できるとされている (Kulowski et al., 2017)。この 3 種類のダストストームの多発地帯は明らかに異なっていて、pebbled は南半球中緯度、puffy は低緯度、plume-like は北半球中緯度に多い。このことは、3 種類のダストストームの発生メカニズムが異なっていることを意味している。他にも形成過程の多様性を示唆する様々な形状のダストストームが観測されている。地球の雲にも積乱雲、巻雲 (筋雲)、高積雲 (ひつじ雲) など様々な形状があり、それぞれ形成メカニズムが異なっている。形成メカニズムの異なる雲は物質の鉛直輸送効率も異なり、実際地球の積乱雲は成層圏へ効率的に物質を輸送している一方で、高積雲は対流圏を出ない。したがって、火星のダストストームに複数の形成メカニズムがあり、メカニズムに基づいて水蒸気や微量物質の鉛直輸送効率も様々であると考えるのが自然である。

2. 研究の目的

上記を受け、本研究の目的は以下の 2 つである。

- 目的
 - (ア) 規模や形状、模様をもとにして火星のダストストームを分類し、周囲の大気条件との相関から発生メカニズムを解明する
 - (イ) ダストストームによる上層大気への物質供給の地域差や季節変化を推定する

3. 研究の方法

本研究では、火星観測画像に写るダストストームの形状や模様、規模などの属性と、周囲の大気条件 (気圧、大気安定度、風速など) との相関からダストストームのメカニズムを特定する。特定された大気現象を数値シミュレーションで再現することで、上層へのダストおよび水の輸送量、その季節変化を調査する。

- (1) ダストストームの検出と外見的特徴に基づく分類
深層学習を用いたダストストーム領域分割手法 (Gichu and Ogohara 2019 など) を用いて、探査機 Mars Global Surveyor (MGS) が 1999 年から 2005 年までに観測したすべての火星画像からダストストームを抽出する。規模や、形状、模様といった外見的特徴に基づいて、ダストストームを分類する。
- (2) 大気データと合わせたダストストーム発生メカニズムの特定
火星大気再解析データ (EMARS) を用いて各種類のダストストームに典型的な周囲の大気条件を調査し、ダストストームのメカニズムを種類ごとに明らかにする。例えば、中緯度で 2-3 日にごとに、決まって低気圧の西側にダストストームが発生するのであれば、寒冷前線に伴う強風で発生する可能性が高い。その上、渦形状を取っていれば、その発生メカニズムとして竜巻が候補に挙がる。
- (3) 数値シミュレーションによる上層への物質輸送量の推定
数値モデルを用いて、ダストストームのメカニズムとして特定された大気現象の数値シミュレーションを行う。

4. 研究成果

- (1) Semantic segmentation 手法の 1 つである U-net を用いて火星ダストストームの領域を抽出する方法を検討した (Ogohara and Gichu 2022). MGS に搭載された Mars Orbiter Camera (MOC) が観測した, 火星北半球の Arcadia 平原および南半球の Hellas 盆地に着目した. 当該地域はそれぞれ plume-like dust storm および pebbled dust storm の頻発地域である (Kulowski et al., 2017). 図 1 は提案手法を用いて抽出したダストストームの発生頻度の季節分布である. Wang and Richardson (2015) による先行研究と整合的な結果が得られている. なお, Arcadia 平原におけるダストストームサーベイの途中で, 当該地域の西端の Phlegra Montes 東側において波状雲が多数観測されることが分かった. 目視で波状雲を数えた結果, 北半球冬季にもつばら発生することが分かった (Ogohara and Ro 2023).

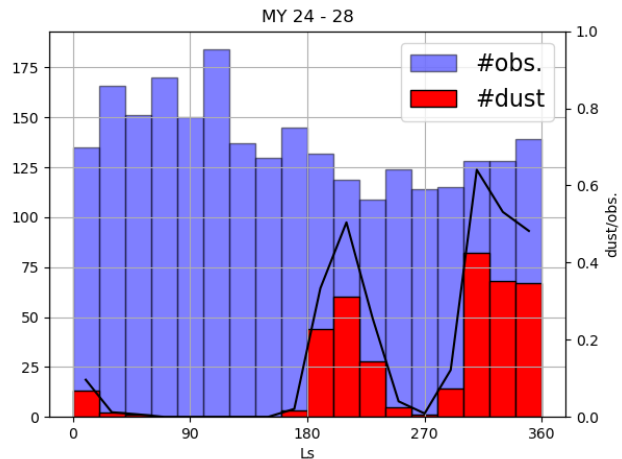


図 1 深層学習を用いて抽出されたダストストームの頻度の季節変化

- (2) EMARS を用いて Arcadia 平原におけるダストストームが発生するときに典型的な気圧配置を明らかにした. (1) で抽出したダストストームの観測日時をもとに, その時の地表気圧配置, ジオポテンシャルハイト, 気温, 地表面応力などの分布の合成図平均を作成した (図 2). その結果, 当該地域のダストストームは, 中緯度傾圧波動のうち周期 2 sols (火星の 2 太陽日) のモードの暖気中で発生する傾向にあることが分かった. しかもこのモードは地表面近くに局在していた. 中緯度のダストストームは確かに中緯度の寒冷前線と関連付けられることが多かったが, それは寒冷前線に伴う比較的広範囲にわたる強風ではなく, 不安定な暖気中の対流現象に伴うものである可能性が示唆される. なお, Phlegra Montes 東側の波状雲の形成頻度と周囲の大気環境を比較することで, 波状雲は Phlegra Montes に付随する風下山岳波によって形成されることが明らかになり, その形成高度は 10km 以下であることが制約された (Ogohara and Ro 2023).
- (3) Arcadia 平原において示唆されたダストストームの発生メカニズムの実現可能性を検証するため, 大気大循環モデル DCPAM5 火星版 (高橋ほか 2018) を用いて数値シミュレーションを行った. 水平解像度は T85 とし, スピンアップを経た後, Arcadia 平原でダストストームが多数観測された Ls=200° 付近に注目した. ところが, 大気の静的安定度など対流に関係する物理量の時空間変動を確認する以前に, EMARS の合成図平均でダストストームの発生との関連が明らかになった地表近くの波数 3 周期 2 sols のモードは再現されなかった. このことは, 火星再解析データの信頼性の問題も含めて, 精査する必要がある. Montabone et

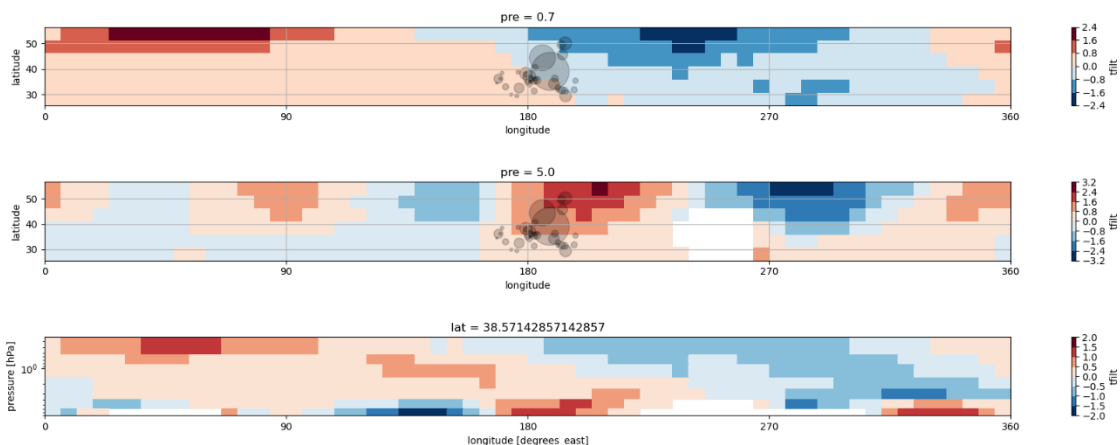


図 2 Arcadia 平原におけるダストストーム発生時の, (上段) 0.7 hPa 気温偏差の水平分布, (中段) 5 hPa 面気温偏差の水平分布, (下段) 気温偏差の経度-高度分布の合成図平均. 黒丸はダストストームの発生地点を示しており, その大きさは面積を意味している.

a1. (2015)によって整備されたような現実的なダスト分布データをDCPAM5に実装していないからかもしれないし、EMARSの作成過程に何か問題があるのかもしれない。EMARSは確かにMGSに搭載されたThermal Emission Spectrometer (TES)によって得られた温度データを同化してはいるが、当該モードが存在しているようなかなり地表面に近い高度をTESが高精度に分解できるわけではない。今後は、MGSの後継のMars Reconnaissance Orbiterの観測期間や他の地域でも同じことを行い、データ同化に使われた観測データ影響や、ダストストームの関連すると示唆されるモードの確かさを検証する必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

| | |
|---|--------------------|
| 1. 著者名 Ogohara Kazunori, Nakagawa Hiromu, Aoki Shohei, Koyama Toru, Usui Tomohiro, Terada Naoki, Imamura Takeshi, Montmessin Franck et al. | 4. 巻 74 |
| 2. 論文標題 The Mars system revealed by the Martian Moons eXploration mission | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Earth, Planets and Space | 6. 最初と最後の頁 1-32 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-021-01417-0 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 該当する |

| | |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名 Ogohara Kazunori, Gichu Ryusei | 4. 巻 160 |
| 2. 論文標題 Automated segmentation of textured dust storms on mars remote sensing images using an encoder-decoder type convolutional neural network | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Computers & Geosciences | 6. 最初と最後の頁 105043 ~ 105043 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.cageo.2022.105043 | 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 - |

| | |
|--|-------------------|
| 1. 著者名 Ogohara Kazunori, Ro Maaya | 4. 巻 75 |
| 2. 論文標題 Cloud trains associated with Martian Mountain Lee Waves on the eastern side of the Phlegra Montes | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Earth, Planets and Space | 6. 最初と最後の頁 1-9 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-023-01767-x | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 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 小郷原一智 |
| 2. 発表標題 Arcadia平原における火星ガス トストームの特徴 |
| 3. 学会等名 日本気象学会2021年度秋季大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 小郷原一智 |
| 2. 発表標題 複数地域における火星ダスト ストームの自動領域分割 |
| 3. 学会等名 日本気象学会2022年度春季大会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 小郷原一智, 義忠隆生 |
| 2. 発表標題 Unetを用いた火星ダストストームのセグメンテーション |
| 3. 学会等名 宇宙地球環境の理解に向けての統計数理的アプローチ |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Kazunori Ogohara |
| 2. 発表標題 FREQUENCY OF DUST STORMS IN THE WESTERN ARCADIA PLANITIA: COMPARISON WITH REANALYSIS DATA |
| 3. 学会等名 7th Mars Atmosphere: Modelling and Observations (国際学会) |
| 4. 発表年 2022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 |
|---------|---------|
|---------|---------|