

火星ダストストームの拡大地域特性

小郷原一智（京大院理） 里村雄彦（京大院理）

1. Introduction

火星においては大中小さまざまなスケールのダストストームの存在が知られている。このうち、*Cantor et. al.*(2001) の定義によれば、local dust storm は水平規模 $1.6 \times 10^6 \text{km}^2$ 以下、持続時間 2 日未満のもの、regional dust storm は水平規模 $1.6 \times 10^6 \text{km}^2$ 以上、持続時間 2 日以上のもを言う。極軌道衛星による時空間分解能の低い観測しかないことから、各々のダストストームの空間構造、寿命はもちろん、Local dust storm から regional dust storm への発達はまだ全く解明されていない。本研究は、数値シミュレーションを用いて、大規模ダストストームへの拡大機構の解明を試みるものである。

2. Approach

Fig. 1 は *Cantor et. al.*(2001) による、火星における local dust storm の発生地点と regional dust storm の中心位置の分布を示している。Local dust storm は大規模地形付近や極冠の淵周辺に分布していることがわかる。一方、regional dust storm の位置は必ずしも local dust storm の多発地帯と一致せず、local dust storm が発生していないところでも観測されている。すなわち、local dust storm がいくら発生しても大きくなれない地域が存在していることになる。我々はこのことから、火星にはダストストームの拡大地域というものがあり、拡大地域に入ることができたダストストームはより大きなダストストームへと拡大でき、入ることができなかったダストストームはそのまま一生を終えるのではないかと考えた。そこで、以下の手順でアプローチする。

1. 火星上でダストストームが拡大しやすい地域を示す全球マップを作る。
2. 作成したマップに見られたダストストームが広がりやすい一つ一つの地域について、感度実験やデータ解析を行うことによって、ダストストームの拡大をつかさどる気象現象を突き止める。

ただ、ダストストームの拡大地域があったとしても、そこにダストストームが進入すれば即大規模ダストストームになるとは限らない。ある地点からダストストームの水平規模が大きくなるということはダストが薄くなることである

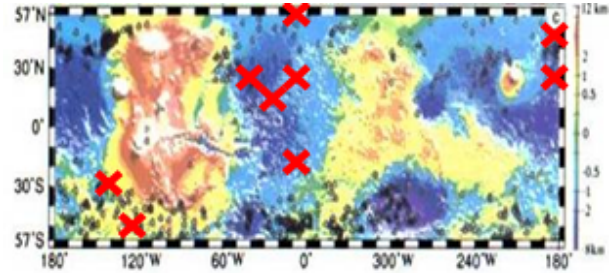


Fig. 1. 1999 年から 2000 年にかけての local dust storm の発生地点（黒点）。赤い×印は regional dust storm の中心位置。*Cantor et. al.* (2001) を加工している。

ので、ダストストームであり続けるには内部で何らかのダスト巻上げ過程が必要である。しかし、メソスケールの local dust storm ならともかく、総観規模の regional dust storm が対流のみによって拡大したり、地球の積雲のように雲システムを形成したりしながら拡大していくことは考えにくく、移流拡散による拡大が支配的であると思われる。したがって、上のようなアプローチでも、ダストストームの拡大地域を突き止められると考えた。以下では、(1) のマップ作成について第一報を報告する。

3. Model and Experimental setup

本研究で用いたモデルは σ 座標系球面プリミティブ方程式を基本方程式系とするスペクトルモデルである Dennou AGCM を火星用に改変したものである（*Ogohara and Satomura* 2008）。ただ、モデル内のダストの予報変数は混合比であったが、保存性向上のため、予報変数を地表気圧 p_s とダスト混合比 q をかけあわせた、 $p_s q$ に変更し、方程式を以下のように書き換えた（変数の意味については、Appendix を参照。）

$$\frac{\partial p_s q}{\partial t} = -\frac{1}{a(1-\mu^2)} \frac{\partial(p_s q U)}{\partial \lambda} - \frac{1}{a} \frac{\partial(p_s q V)}{\partial \mu} - \frac{\partial(p_s q \dot{\sigma})}{\partial \sigma} + S_{dust}. \quad (1)$$

さらに、 $p_s q$ を計算する際は、計算された風速を用いて $p_s q$ を移流するように変更した。移流スキームは 2 次精度 Van Leer スキーム（*Van Leer* 1979）と 1D Cell-Integrated スキー

ム (Nair and Machenhauer 2002) を併用した。分解能は T42L32 ($\sim 2.8^\circ \times \sim 2.8^\circ$ 、鉛直 32 層) とし、季節は $L_s=180$ (北半球春分) とした。背景ダスト分布は Forget *et al.* (1999) と同様であり、1 火星年の spin-up 中は時間変化しないが、その後は風速場と重力沈降によって変動する。地表から大気へのダストフラックスは 0 にしてあるが、重力沈降による大気から地表へのダストフラックスは存在している。極冠分布は Mars Climate Database (<http://johnson.lmd.jussieu.fr:8080/las/servlets/dataset>) の値を用いた。CO₂ の昇華凝結による地表気圧変化に関しては、Mars Climate Database の地表の各格子点における極冠質量のデータから、CO₂ の相変化による大気の質量変化率をもとめ、それを地表気圧変化率に直して与えている。また、気温が昇華点温度を下回ると、気温を昇華点温度に修正する。(Takahashi *et al.*, 2003)

全球に配置したダストソースからダストを人為的に一定期間、一定量放出することで、ダストストーム拡大地域マップを作成する。

1. ダスト放出量、放出期間

Cantor *et al.* (2001) を参考に、ダストの放出期間は 1 日、ダストの総放出量は 200000 [kg] とした。

2. ダストの放出方法

Takemura *et al.* (2000) を参考に、最下層の温位を θ_1 とした場合、 $\theta_1 + \delta\theta$ よりも温位が低い層に、鉛直方向に一定の混合比で与える。また、ダストソースの水平方向の広がり是一次式で与える。

$$S_D = \begin{cases} \left\{ \frac{q_0}{2} \left(1 + \cos\left(\frac{\pi r}{r_0}\right) \right) \right\}^{0.6} & r < r_0 \\ 0. & r \geq r_0 \end{cases}$$

S_D は放出するダスト質量の鉛直積分値である。ここで、 r_0 はダストソースの半径、 r はダストソースの中心からの大円距離である。本研究では a を火星半径として $r_0 = \frac{1}{16}\pi a$ とした。 q_0 は S_D の全球時間積分値が 200000 [kg] となるように決めた。

3. ダストソースの配置

ダストソースは reduced grid の中心に配置する (Fig. 2)。

4. Results

まず、ダストストームの広がりを定義する。ダストを放出しないコントロールランにおけるダストのカラム質量 M_c [kg/m²] と、 i 番目のダストソースからダストを放出した計算におけるダストのカラム質量 M_i [kg/m²] の差を M_{di} [kg/m²] とする。 M_{di} は経度方向に 128、緯

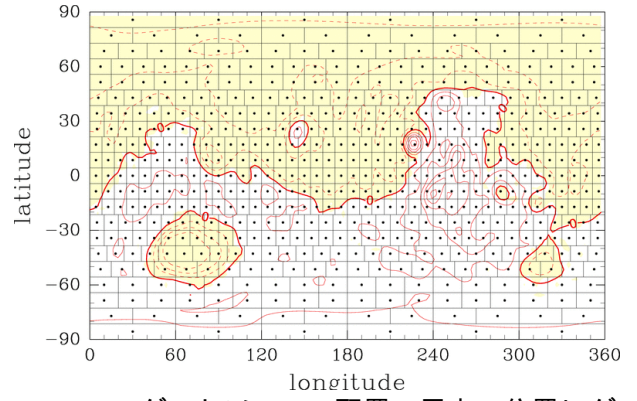


Fig. 2. ダストソースの配置。黒点の位置にダストソースの中心が来る。赤線は計算で用いた火星の地形を現しており、等高線間隔は 2000 m で、実線は正の値、点線は負の値を示している。

度方向に 64 の大きさを持つ二次元データであり、さらに時間の関数である。 M_{di} がある閾値よりも大きい領域を i 番目のダストソースからダストを放出した場合のダストストーム領域であるとし、その面積をダストストームの面積とする。本研究では、この閾値を 0.002 [kg/m²] とし、この値は 5-11.6 μm 帯の光学的厚さでおおよそ 0.07 に相当する。

Fig. 2 の各黒点を中心とするダストソースからダストを放出したときのダストストーム面積にしたがって、その各格子に色を付けて得た図が、Fig. 3 である。つまり、Fig. 3 は $L_s=180$ において、火星上のどの領域にあるダストが広がりやすいか、を示した、拡大地域マップである。ダスト放出開始 1 日後にはタルシス付近や Sirenum から Aonia にかけての領域から放出したダストが比較的広い領域に広がっていることが分かる。また、Acidalia 平原でも同様に同様である。一方、Hellas 盆地内部や Margaritifer Terra ではあまり広がっていないことが分かる。ダスト放出後 2 日目には、Erisyum 山の東側や Arabia 平原から放出したダストも広範囲に広がっている。やはり、ここでも Hellas 盆地と Margaritifer Terra から放出したダストはあまり広がっていない。ダストは放射活性であるので高地にダストが存在するほうが、ダストの広がりには有利であること、また、この時期緯度には傾圧波動が存在していることが、これらの特徴の理由であると考えられる。また、ここには示していないが、ダストを放出するタイミングを半日遅らせた計算も行った。その結果、Sirenum-Aonia 地域やタルシスなどの顕著な拡大地域は拡大地域でなくなり、Acidalia から Utopia にかけての領域が新たに拡大地域となった。このことは、ダストの拡大にとって日周期の現象が非常に重要であることを示唆して

いる。

5. Future works

本研究で示した結果は、ある時間からダストを1日間放した場合の結果であるので、ダストを放出を開始した時間によって得られるマップが変わってしまうことが予想される。つまり、発散領域にダストが放出されたほうが拡大には有利であると考えられ、その発散領域はさまざまな波動によって常に時間変動しているからである。したがって、ダスト放出開始時刻を1日、2日、2日半などいくらかずらした計算を行い、結果を確認して、ダストが拡大しやすい地域を純粋に示すマップを作成する必要がある。その上で、一つ一つの拡大地域について、なぜその地域が拡大地域たりえているのかを、感度実験やモデル出力の解析によって明らかにする必要がある。

6. Appendix:基礎方程式の変数

$$\dot{\sigma} \equiv \frac{d\sigma}{dt}$$

$$\mu \equiv \sin \varphi$$

$$U \equiv u \cos \varphi$$

$$V \equiv v \cos \varphi$$

p_s : 地表気圧、 ϕ : 緯度、 λ : 経度、 σ : 鉛直 σ 座標、 a : 火星半径、 S_{dust} : 物理過程による変化率 + ダストソース項である。

参考文献

- [1] Cantor, B. A., P. B. James, M. C. Caplinger, and M. J. Wolff (2001), Martian dust storms: 1999 Mars Orbiter Camera observations, *J. Geophys. Res.*, *106*(E10), 23653–23687.
- [2] Forget, F., F. Hourdin, R. Fournier, C. Hourdin, and O. Talagrand (1999), Improved general circulation models of the Martian atmosphere from the surface to above 80 km, *J. Geophys. Res.*, *104*(E10), 24155–24175.
- [3] Nair, R. and B. Machenhauer (2002), The mass conservative cell-integrated semi-Lagrangian advection scheme on the sphere, *Mon. Weather Rev.*, *130*, 649–667.
- [4] Ogohara, K and T. Satomura (2008), Northward movement of Martian dust localized in the region of Hellas Basin, *Geophys. Res. Lett.*, *35*, L13201, doi:10.1029/2008GL034546.

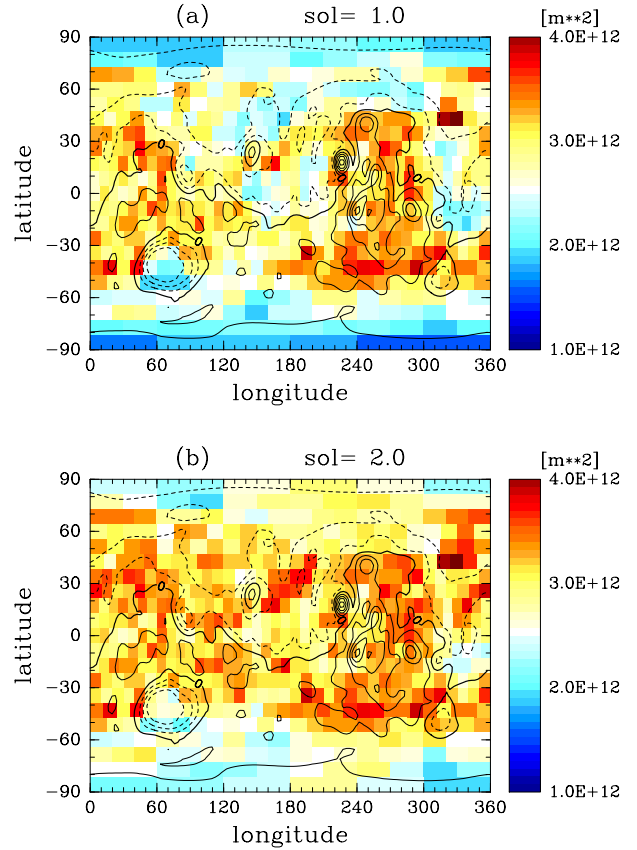


Fig. 3. $L_s=180$ における、ダストストームの拡大地域マップ。陰影はダストストームの大きさ $[m^2]$ を示している。黒線は計算で用いた火星の地形を現しており、等高線間隔は 2000 m で、実線は正の値、点線は負の値を示している。

- [5] Takahashi, Y. O., H. Fujiwara, H. Fuku-nishi, M. Odaka, Y.-Y. Hayashi and S. Watanabe (2003), Topographically induced circulation in the Martian atmosphere, *J. Geophys. Res.*, *108* (E3), doi:10.1029./2001JE001638.
- [6] Takemura, T, H. Okamoto, Y. Maruyama, A. Numaguchi, A. Higurashi and T. Nakajima (2000), *J. Geophys. Res.*, *105*(D14), 17,853–17,873.
- [7] Van Leer, B (1976), Towards the Ultimate Conservative Difference Scheme. 4. A new approach to numerical convection, *J. Comp. Phys.*, *23*, 276–299.