火星におけるダストストームの拡大地域

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1.6×10⁶km²以下、 持続時間2日未満のもの、regional dust storm は水平規模1.6×10⁶km²以上、持続時間2日以 上のものを言う。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。
- 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])

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_sq 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。)。

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

さらに、 p_sq を計算する際は、計算された風速を 用いて p_sq 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 (~2.8°×~2.8°、鉛直 32 層)とし、 季節はL_s=0(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。 CO_2 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 **3**. (*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。

- 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 広がりは次式で与える。

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

 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 度方向に 64 の大きさを持つ二次元データであ



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。

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=0 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2日後にはタルシス 付近、特に Solis Planitia や Alba Patera 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、Hellas Basin 北端や Isidis Planitia でも同様も同様である。一方、 Hellas Basin 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3日目には、Chryse Platinia、Erisyum山 の東側、Hesperia-Cimmeria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 Basin と Margaritifer Terra から放出し たダストはあまり広がっていない。つまり、放 出2日目はおおむね高地で、3日目にまでなる と、例外となる経度あるものの、おおむね中緯 度において広範囲に広がっている。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、この時期中緯度には傾圧波動が存在してい ることが、その理由であると考えられる。

5. Future works

本研究で示した結果は、ある時間からダスト を1日間放出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、 ダストが多量に大気に注入されたときに太陽放 射を受けたほうが拡大には有利であろうし、傾 圧波の発散領域にダストが放出されたほうが 拡大には有利であろうということである。した がって、ダスト放出開始時刻を半日、2日、2 日半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

- 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.
- [5] Takahashi, Y. O., H. Fujiwara, H. Fukunishi, M. Odaka, Y.-Y. Hayashi and



Fig. 3. $L_s=0$ 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。

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.