

機関番号：14501
 研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2008 年度 ～ 2010 年度
 課題番号：20740284
 研究課題名 (和文) 高解像度火星大気大循環モデルを用いた中小規模擾乱とダストストームの研究
 研究課題名 (英文) Study on small and medium scale disturbances and dust storm on Mars by using a high resolution Mars atmosphere general circulation model
 研究代表者
 高橋芳幸 (TAKAHASHI YOSHIYUKI)
 神戸大学・大学院理学研究科・助教
 研究者番号：00372657

研究成果の概要 (和文)：火星大気温度、循環構造を決定する上で大きな影響を及ぼすダストの供給において重要な役割を果たすと考えられる中小規模擾乱の実態とそのダスト巻き上げへの影響を調べるため、水平格子点間隔約 90–11 km という非常に高い解像度での火星大気大循環シミュレーションを実施した。シミュレーションの結果、様々な小規模擾乱の発生、衰退が初めて示された。また、小規模擾乱はダスト巻き上げに重要な寄与をしており、火星気候を考える上でそれら小規模擾乱の実態の解明が不可欠であることが示唆された。

研究成果の概要 (英文)：In order to investigate features of small and medium scale disturbances in the Martian atmosphere, which would play important roles to lift dust, numerical simulations of Martian atmosphere with quite high resolutions are performed. The horizontal grid sizes of simulations ranges from about 90 to 11 km. Simulation results show many kinds of atmospheric disturbances with various horizontal scales. Further, the results show that such small scale disturbances contribute dust lifting significantly. These results imply that the understanding of features of such disturbances is necessary to consider maintenance mechanisms of current Martian climate.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2009 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：地球惑星

科研費の分科・細目：地球惑星科学・超高層物理学

キーワード：惑星大気，火星，大気大循環モデル

1. 研究開始当初の背景

(1) 惑星半径や、地形の起伏の大きさとその形状といった点で地球とは異なる火星の大気循環は古くから様々な研究されており、地球大気中では見られない興味深い現象が報告されてきた。例えば、火星大気中の東西平均循環は地球対流圏のそれに比べて大きな赤道非対称性を持つことが示されており (例

えば Smith et al., 2001), また火星では頻繁に大小様々な規模のダストストームが発生することも知られている (例えば Martin and Zurek, 1993, Cantor et al., 2001). これらの現象に関する研究には地上望遠鏡や探査機を用いた観測が重要な役割を果たしてきた一方で、数値モデルを用いた研究も非常に重要な役割を果たしてきた。

(2) 火星大気の循環についてはこれまでに様々に研究されてきているが、これまでの研究は主に水平スケール約千キロメートル程度の傾圧擾乱や惑星規模の循環、または数十キロメートル以下の局所的な循環を対象としてきた。そのため、それらの間のスケールを持つ中小規模擾乱の実態とそれらと大規模循環との相互作用については未だあまり調べられていない。地球を含む惑星大気循環が様々なスケールの現象の相互作用の結果としてその構造が決定されることを考えると、中間スケールの現象について調べられていないことは、現状では我々が惑星規模循環についても本質的には理解できていないことを意味する。

(3) 一方、中小規模擾乱は、火星大気中におけるダスト分布の形成・維持に関しても重要な役割を果たしていると考えられる。火星では大気中にダストが浮遊しており、しばしば大小様々な規模のダストストームが発生する。特に火星においては、全球がダストに覆われるような非常に大規模なダストストームに発達することがあることも知られている。しかしながら、そもそもどのような条件でダストが巻き上げられ大気中に供給されるのか、大気中のダストの分布がどのように決まっているのか、またどのような条件の時にダストストームとして知られる現象にまで至るのか、などは未だに良くわかっていない。過去の研究から、観測されるダストの量は、惑星規模循環による巻き上げ効果だけでは説明できないとされており(例えば Wilson and Hamilton, 1996)、中小規模擾乱の役割が注目されている。

2. 研究の目的

(1) 以上の事を踏まえ、申請者は惑星規模循環から中小規模循環までを同時に扱うことのできる高解像度火星大気大循環モデルの開発と、それを用いた数値計算を開始していた。水平格子間隔百キロメートル以上の解像度での、火星の全球大気循環シミュレーションは申請者が行っているもののみである。本申請研究では、この研究を発展させつつ継続して行うことで、火星大気中の中小規模擾乱の特性と、それがダスト巻き上げに及ぼす影響を調べることを目的としている。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、申請者が開発してきた高解像度火星大気大循環モデルと、地球シミュレータを用いて、数十キロメートルオーダーの水平解像度での計算を行うことで、「研究目的」に述べた火星大気中の中小規模擾乱の実態とそれらが惑星規模循環やダスト巻き上げ過程に及ぼす影響を明らかにする。

(2) 本研究で用いるモデルは、高解像度計算

を行うために最適化された地球大気大循環モデル AFES (Atmospheric general circulation model for the Earth Simulator; Ohfuchi et al. (2004)) を基にして、申請者が開発した火星大気を計算するための様々な物理過程を導入したものである。移流計算には、鉛直方向に静力学近似を行った流体力学の方程式系 (プリミティブ方程式系) を用い、それに放射過程、乱流過程、地表面過程、二酸化炭素の凝結・昇華過程を導入している。AFES は超高解像度での計算を念頭に長い年月をかけて最適化されてきたモデルであるため、それを基に開発した火星大気モデルも高解像度計算を行う上で最適なツールとなっている。

(3) 本研究では、このモデルを用いて、T79L96, T159L96, T319L96, T639L96 (それぞれ、水平格子間隔約 90, 44, 22, 11 km, 鉛直 96 層) の解像度で計算を行う。高解像度での計算結果の詳細な解析に加えて、複数の解像度での計算結果の比較により、火星大気中の中小規模擾乱の特性とそのダスト巻き上げへの影響を評価する。本研究で計算を行う解像度は、火星大気大循環モデル計算でこれまでに一般的に用いられてきた解像度の 4-32 倍であり、他のグループでは容易に実現することはできない。また、今回用いた最も高い水平解像度、T639 (格子点間隔約 11 km) は、およそ静力学近似が成立する限界に近い解像度となっており、今回使用するモデルの枠組みで可能なもっとも高い解像度の計算となっている。

(4) 一連の計算においては、実際の火星の地表面の起伏やアルベド、熱慣性の分布を与えている。しかし、これら地表面特性の変化の擾乱生成への影響を調べるために、起伏がなく、アルベド・熱慣性の様な条件での感度実験も行い、結果を比較した。

4. 研究成果

(1) 高解像度の計算の結果、モデル内には様々な大気擾乱が見られた。図 1 に、T639L96 の解像度の計算から得られた、北半球の秋 ($L_s = 201$, L_s は黄経を表し, $L_s = 0, 90, 180, 270$ はそれぞれ北半球の春分, 夏至, 秋分, 冬至を表す) の 4 hPa 気圧面における相対渦度の全球分布を示す。この時期の循環の特徴の一つは、北半球の中高緯度に励起される東西波数 2-3 の傾圧不安定波動である。そして、これらの波動に伴い、しばしば細長く伸びた渦度の構造が見られ、これらは傾圧波動に伴う前線を表している。また、計算結果には、傾圧不安定波動よりも小さなスケールを持った、様々な種類・水平スケールの中小規模擾乱が見られた。それらの中には、地形に起因するものだけでなく、地形に起因せず、自励的に

発生するものが存在する。

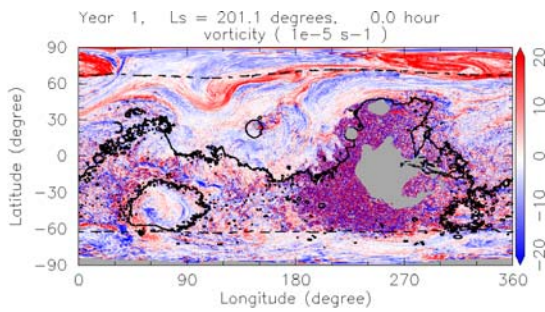


図 1. T639L96 の解像度の計算で得られた、4 hPa 気圧面における渦度の全球分布. 実線、破線はそれぞれ火星地形の 0 m の等高線と極冠境界を表し、灰色の領域は山の領域を表す.

(2) 地形に起因する擾乱としては、山の風下側にみられる地形性の渦 (図 2, 3) や、地形の起伏に伴うストリーク / シアー (図 4) が挙げられる. これらの擾乱の水平スケールは、地形の起伏の水平スケールに依存しており、モデルで表現される地形の起伏のスケールに応じた様々な水平スケールの擾乱が表現されていることがわかる. 他方、必ずしも地形に起因しない擾乱としては、低緯度で見られる小規模渦群が挙げられる (図 1). これらの小規模渦群は、一様な地表面特性を与えた感度実験においても同様に発生しており、地面の特性に依らず、モデル内で自動的に発生している (図は示さない).

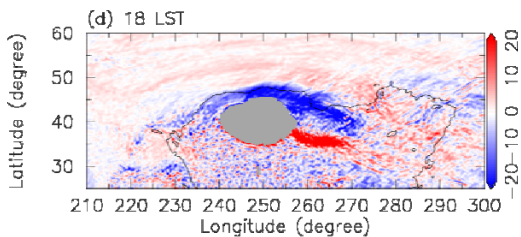


図 2. Alba Patera 付近の 18 LST (local solar time) における相対渦度のコンポジット図.

(3) 上に述べた中小規模擾乱の中のいくつかは、明確な日変化を示しており、火星大気中の擾乱の生成に、日変化が非常に重要な影響を及ぼしていることが示唆される. 例えば、Alba Patera 周辺の中規模渦 (図 2) は、1 火星日の周期で生成と消滅を繰り返している. 山の周囲の風系の解析より、これは平均流と山との相互作用と、山の周囲の日変化する斜面風の重ね合わせで形成されていると考えられる.

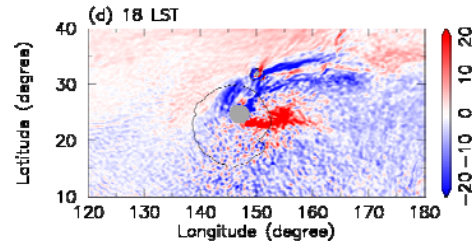


図 3. Elysium 付近の 18 LST (local solar time) における相対渦度のコンポジット図.

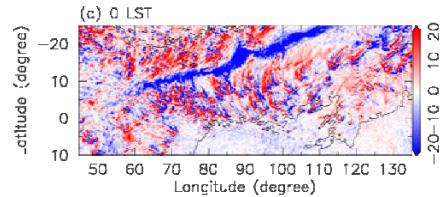


図 4. Hellas 盆地北側領域の 0 LST (local solar time) における相対渦度のコンポジット図.

(4) 一方、低緯度の小規模渦は、図 1 では 180E-300E, 60S-30S の領域に形成されているが、時間とともに生成領域が移動しており、移動速度は火星の自転速度に対応している (例えば、図 5 参照). 局地的に見ると、これらの小規模渦は午後の時間に形成され、夜に消滅する日変化を示す.

(5) これらの小規模渦は、用いたモデルにおける熱対流的な運動の表れであろうと考えられるが、その水平スケールは 20 km 程度であり、今回用いた解像度で表現される最小スケールに近い. 異なる解像度での計算結果で見られる小規模渦の水平スケールは異なっており、解像度が高くなるほど、渦のスケールは小さくなっていく. 本研究で実施した最も高い解像度の計算では、この水平スケールは収束していないようであり、現実にはより小さいスケールの循環が生じていると推察される.

(6) 次に、本研究で用いたモデルでのダスト巻き上げ過程を調べた. 図 5 に、相対渦度の全球分布と、その時刻における地面でのダスト質量フラックスを示す. このダストフラックスは、モデルに導入したダスト巻き上げパラメタリゼーションによって診断したものである. このパラメタリゼーションは、Newman et al. (2002) によって提案されたパラメタリゼーションのうちの 1 つ、摩擦速度閾値依存巻き上げパラメタリゼーション (threshold-sensitive near-surface wind stress lifting parameterization) であり、摩擦速度がある閾値を超えた場合にのみダストが巻き上げられる. 図 5 にも見られる通り、本研究

で行った計算において、最も顕著なダスト巻き上げイベントは、傾圧波動およびそれに付随する前線の通過に伴うものであった。しかし、図 5 の低緯度に小規模のダスト巻き上げイベントが多数見られるように、より小規模の擾乱に伴うダスト巻き上げも確認できる。例えば、図 5 の小規模のダスト巻き上げイベントの発生領域は、低緯度の小規模渦群の発生領域と重複しており、高解像度モデルで表現される中小規模擾乱が確かにダスト巻き上げに寄与していることがわかる。

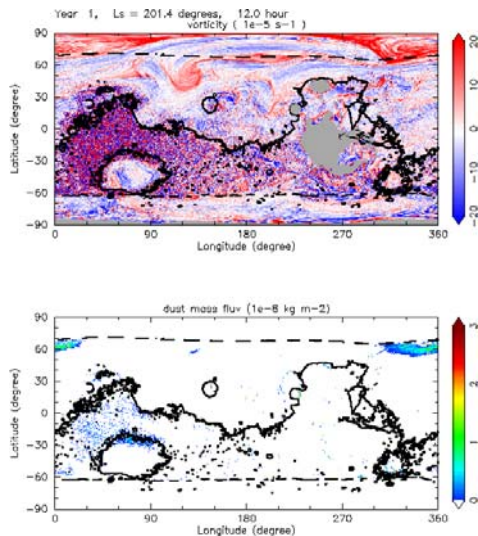


図 5. T639L96 の解像度の計算で得られた相対渦度 (上) とダストフラックス (下). 実線と破線はそれぞれ火星地形の 0 m の等高線と極冠境界を示す。

(7) 次に、それら中小規模擾乱によるダスト巻き上げの、惑星全体での巻き上げ量に対する寄与を調べた。図 6 に、計算結果から求めた、全球積分ダスト巻き上げフラックスの、解像度依存性を示す。この図には、比較のために、地表面特性が一律の感度実験から得られた全球積分ダスト巻き上げフラックスの値も示している。地形の起伏やアルベド・熱慣性の空間分布の存在によって、巻き上げられるダストの量は大きくなっており、地表面特性に起因する擾乱がダスト巻き上げにおいて非常に重要な役割を果たしていることが示唆される。一方、モデルで診断されたダスト巻き上げ量は、地形の起伏やアルベド・熱慣性の空間分布に関わらず、解像度が高くなるにしたがって増加している。このことは、より高い解像度のモデルで表現されるようになった小規模擾乱がダスト巻き上げに寄与していることを示している。しかも、解像度の増加に伴う、ダスト巻き上げ量の増加は非常に大きく、

火星のダスト巻き上げに関わる研究において、小規模擾乱による寄与をいかにして見積もるかが本質的に重要な問題であることが明らかになった。

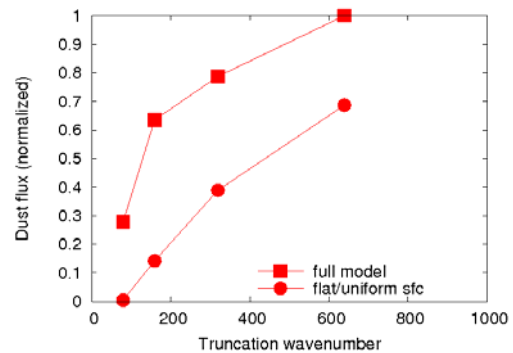


図 6. 規格化された全球積分ダストフラックスの解像度依存性. ■と●はそれぞれ、地表面特性の空間分布がある場合とない場合の値を示す。

(8) 以上より、本研究によって、火星大気中に生じている数十キロメートルから千キロメートル程度の水平スケールの大気擾乱について初めて知見が得られた。モデル計算では、地形の起伏に起因する多数の擾乱に加え、熱対流の表れと考えられる自励的な小規模渦が見られ、そのいくつかの生成については、日変化が非常に重要な役割を果たしていることが明らかとなった。また、それら小規模擾乱は、火星大気中に常に浮遊しているダストを供給する上で本質的な役割を果たしていることも示された。このことは、火星のダスト分布、ひいては現在の気候状態を理解する上で、ダストの巻き上げに寄与する小規模擾乱の特性を理解しつつ、惑星規模循環による輸送まで正しく記述することが必要であることを意味する。

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 1 件)

- ① 高橋芳幸, 林祥介, 小高正嗣, 大淵濟, 高解像度火星大気大循環モデルで見られる中小規模擾乱, 第 11 回惑星圏研究会収録, 査読無, Vol. 1, 1-4, 2010.

〔学会発表〕(計 7 件)

- ① Takahashi, Y. O., Y.-Y. Hayashi, M. Odaka, and W. Ohfuchi, High resolution general circulation model experiments of the Martian atmosphere: Resolution dependence of disturbance and surface stress, Fourth

- International Workshop on the Mars Atmosphere: Modelling and Observations, Paris, France, Feb. 8, 2011.
- ② Takahashi, Y. O., Y.-Y. Hayashi, M. Odaka, and W. Ohfuchi, Effects of small and medium scale disturbances on the dust lifting on Mars: general circulation model experiments, JpGU Meeting 2010, Makuhari, Chiba, Japan, May 23, 2010.
 - ③ Takahashi, Y. O., Y.-Y. Hayashi, M. Odaka, and W. Ohfuchi, Medium and High Resolution Simulations of Martian Atmosphere, 2nd OFES International Workshop and ESC-IPRC Joint Workshop on Computationally-Intensive Modeling of the Climate System, Honolulu, Hawaii, US, Dec. 10, 2009.
 - ④ Takahashi, Y. O., Y.-Y. Hayashi, M. Odaka, and W. Ohfuchi, High Resolution Simulations of the General Circulation of the Martian Atmosphere: Small and Medium Scale Disturbances and Dust Lifting Processes, Third International Workshop on The Mars Atmosphere: Modeling and Observations, Williamsburg, Virginia, US, Nov. 10, 2009.
 - ⑤ 高橋芳幸, 林祥介, 小高正嗣, 大淵濟, 高解像度火星大気大循環モデルで表現されるダスト巻き上げ過程, 日本流体力学会年会 2008, 神戸, 兵庫, 2008年9月7日.
 - ⑥ 高橋芳幸, 林祥介, 小高正嗣, 大淵濟, Resolution dependence of dust mass flux simulated by Mars general circulation model: seasonal variation, 第124回 SGEPS 総会および講演会, 仙台, 宮城, 2008年10月11日.
 - ⑦ 高橋芳幸, 林祥介, 小高正嗣, 大淵濟, 火星大気大循環モデルで表現されるダスト巻き上げ量の解像度依存性, 日本地球惑星科学連合 2008年大会, 幕張, 千葉, 2008年5月25日.

[図書] (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 芳幸 (TAKAHASHI YOSHIYUKI)
神戸大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：00372657

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者