

火星のダストストーム

小高正嗣, 高橋芳幸

〈北海道大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻 〒060-0810 札幌市北区北10条西8丁目〉

e-mail: odakker@gfd-dennou.org

e-mail: yot@ep.sci.hokudai.ac.jp

近年の火星探査衛星による観測により、火星ダストストームの描像、空間スケールとその違いによる発生頻度と持続時間が明らかになってきた。比較可能な観測データが増加したことにより、ダストの分布をモデル内で決めることができるような大気大循環モデルを用いてダストストームの発生と衰退をシミュレーションする試みが行われるようになってきている。大循環モデルによるダスト分布の予報性能を向上させるためには、ダスト巻き上げの微細過程に関するパラメーターと、大気大循環モデルでは陽に表現することができないスケールをもつ風速変動のモデル化方法を検討する必要がある。

1. はじめに

これまでに行われた探査衛星観測により、火星は地球以外では気象学的観測データの最も多い惑星である。そのため世界のさまざまな研究者、研究グループが火星気象の研究に取り組むようになってきている。特に現在も稼働中の探査衛星マーズグローバルサーベイヤーは、過去の観測に比べはるかに高い時間空間分解能で火星の気象観測を行っている。比較可能な観測データが集積されてきたことにより火星気象の数値シミュレーション研究も活発に行われるようになった。

本稿では最近の火星の気象に関する研究の例として、火星に特徴的な大気現象であるダストストームの観測および数値シミュレーションの結果を紹介する。2節では火星と火星の気象に関する基本的な事項についてまとめ、ダストを含め火星の気象を特徴づける要素を概観する。3節では火星大気の大気現象であるダストストームとダストデビルの特徴を、これまでの観測結果とマーズグローバルサーベイヤーによって撮影された画像

を用いて示す。4節では最近行われているダストストームの数値シミュレーションの事例を紹介し、5節では今後の展開について議論する。

2. 火星の気象概観

火星は地球のすぐ外側の公転軌道上に存在する惑星である。赤道半径は地球の約半分であり、重力加速度の大きさは地球の1/3強である。自転軸の傾きと自転周期は地球とほぼ同じである。平均軌道半径は地球の1.5倍、軌道離心率が地球よりも大きいため火星の軌道は地球のそれよりも楕円に近い。平均軌道半径上で受け取る太陽からの放射フラックスの大きさは地球の半分以下であり、軌道が楕円に近いため近日点と遠日点で太陽からの放射フラックスの大きさは平均値の約40%ほど異なる。現在の軌道では遠日点はほぼ北半球の夏至、近日点はほぼ北半球の冬至にあたる。平均地表温度は218 K、平均地表気圧は6 hPaである。火星の地表は砂と礫に覆われ、液体の水は地表に存在しない(図1¹⁾)。大気成分の95%は二酸化炭素であり、次いでアルゴン、窒素が含まれる。



図 1 マーズパスファインダーによって撮影された火星の地表 (NASA Planetary Photojournal <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA02406> より引用).

表 1 火星と地球のさまざまなパラメーターの比較.
平均地表面温度は Houghton³⁾ より, その他は Read と Lewis²⁾ より抜粋.

パラメーター	地球	火星
赤道半径 (km)	6,378	3,397
重力加速度 (m/s ²)	9.81	3.72
自転軸の傾き (°)	23.93	25.19
自転周期 (s)	86,499	88,775
平均軌道半径 (AU)	1	1.5
軌道離心率	0.017	0.093
公転周期 (sol)	365	668
太陽放射量 (W/m ²)	1,367	589
平均地表面温度 (K)	280	218
平均地表気圧 (hPa)	1,013	6
大気組成 (%)	N ₂ (77) O ₂ (21) H ₂ O (1) Ar (0.9)	CO ₂ (95) N ₂ (2.7) Ar (1.6) O ₂ (0.13)
惑星アルベド	0.30	0.25
有効放射温度 (K)	256	210
スケールハイト (km)	7.5	10.8

太陽からの放射量と惑星表面からの赤外放射量との釣り合いによって決まる火星の有効放射温度は 210 K であり, 観測される平均地表面温度 218 K はこの値に近い. 有効放射温度と平均地表面温度とのずれは大気の温室効果によるものであり, 温

室効果による温度の上昇は地球に比べると小さい. 大気温度として有効放射温度を用いた場合の火星大気のスケールハイト (気圧が地表気圧の 1/e となる高度) は 10.8 km である. これは地球のスケールハイトと同程度であり, 赤道半径に比べると十分小さい値である. 以上で触れたパラメーターの具体的な数値は表 1 に示した^{2), 3)}.

以上のパラメーターからわかる気象学的に重要な地球と火星の類似点は, (1) 惑星の自転効果が無視できないこと, (2) 大気温度は太陽放射と赤外放射との釣り合いによってほぼ決まること, (3) 惑星規模で考えた場合, 大気の鉛直スケールは水平スケールより小さいことである. これらの特徴は地球大気温度および循環構造を理論的に考察する際の基礎であるため, 地球の気象学理論に基づく大気大循環モデルを用いた火星気象のシミュレーションはある程度の成功を収めている (4 節参照).

もちろん火星には地球とは異なる要素も存在し, それらは実際に観測される火星の大気現象と密接に関係している. 火星の気象を特徴づける要素は, (1) 乾いた大気, (2) 冬極における大気主成分の凝結と夏極での昇華, (3) 大気中に常時存在するダスト, の三つである. 大気中に存在する水

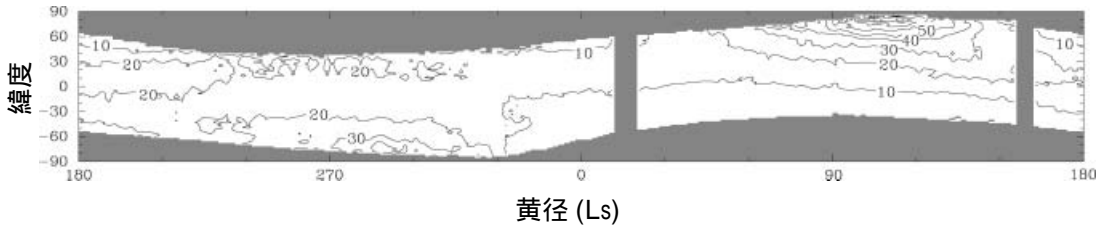


図 2 マーズグローバルサーベイヤーによって観測された火星大気中の東西平均した可降水量の季節変化。単位は μm 。灰色の部分はデータの欠損領域を表す (M. D. Smith 博士より提供)。

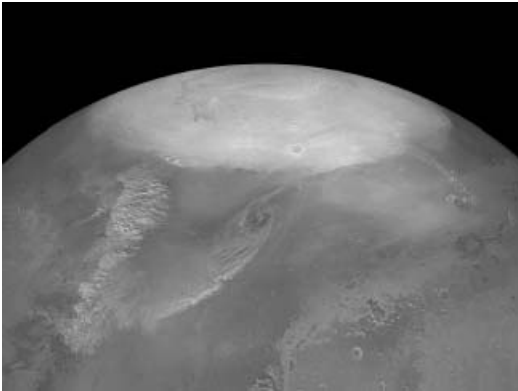


図 3 マーズグローバルサーベイヤーによって撮影された春の北極冠とリージョナルダストストーム (NASA Planetary Photojournal <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA04050> より引用)。

蒸気量は非常に少ない。図 2 にマーズグローバルサーベイヤーの赤外放射スペクトル計により観測された東西平均した可降水量 (単位面積の気柱に含まれるすべての水の量) の季節変化を示す。横軸は黄経であり、 $L_s=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ はそれぞれ北半球の春分, 夏至, 秋分, 冬至に対応する。この図から火星大気中の水蒸気量のオーダーは可降水量にして $10 \mu\text{m}$ 程度であることがわかる。水蒸気量は少ないものの大気中では飽和に近いため、赤道付近では水の凝結によって生じた氷雲がしばしば観測される。しかし水蒸気の凝結潜熱は大気の放射加熱量に比べ非常に小さいため⁴⁾、水蒸気の凝結による大気温度および循環構造への影響はほとんどないと考えられている。これは地

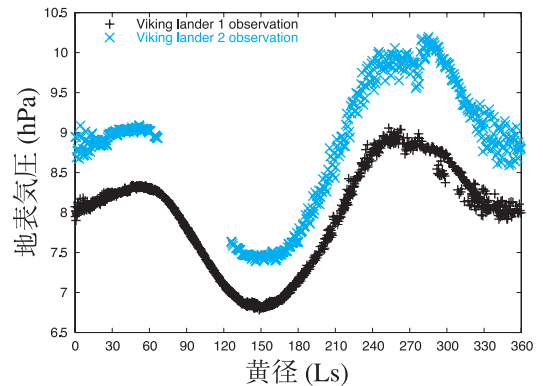


図 4 バイキング着陸船によって観測された日平均地表気圧の季節変化⁵⁾。下側の曲線はバイキング 1 号, 上側の曲線はバイキング 2 号の観測結果。

球大気温度および循環構造が水蒸気の凝結潜熱により大きく影響されていることと対照的である。

二つめの特徴である大気主成分の凝結は、地表気温が二酸化炭素の凝結温度まで下がる火星の極夜領域で生じる。冬に極域の地表を覆った二酸化炭素の水は夏には昇華するため、極冠 (極域の白く見える領域) は冬半球では緯度 50° 付近まで張り出し (図 3¹⁾)、夏半球では極付近にまで後退する。この火星極冠の季節変化に伴い、地表気圧も季節変化する。図 4 にバイキング 1 号および 2 号着陸船によって観測された日平均地表気圧の季節変化を示す⁵⁾。2 本の曲線のずれは観測地点間の高度差によるものである。地表気圧は秋分の少し

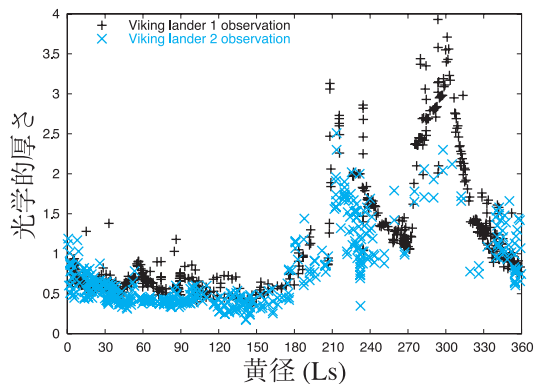


図5 バイキング着陸船によって観測された可視光(波長 $0.67 \mu\text{m}$) に対するダストの光学的厚さの季節変化⁹⁾。+はバイキング1号, ×はバイキング2号の観測結果。

前と春分で減少し, 夏至の少し前と冬至で増加する。季節変化の振幅は両観測点とも最大で 1 hPa 程度であり, これは平均地表気圧のおよそ 16% である。

三つめの特徴であるダストは火星の気象を考えるうえで無視できない重要な存在である。というのは火星大気中のダストは可視および赤外放射を

散乱吸収することで大気を加熱し, 大気の温度と循環構造に大きな影響を及ぼしているからである^{6), 7)}。図5にバイキング着陸船によって観測された可視光に対するダストの光学的厚さの季節変化を示す。この図から火星の大気中には季節によらず常にある程度の量のダストが存在していることがわかる。ダストによる大気の温度構造への影響を示したのが図6である。この図は観測された鉛直温度分布⁸⁾と鉛直1次元放射対流モデルによる計算結果⁹⁾とを比較したものであり, 左側にダストのない場合のモデル計算結果を示し, 右側には平均的なダスト量と鉛直分布を考慮した場合のモデル計算結果を示した。ダストを考慮したモデル計算結果は観測結果とよい一致を示している。

さらに図5にはダストの光学的厚さが急激に1を超える現象が冬至の前後に2回起こったことが示されている。可視光に対する光学的厚さが1になると地表へ直接届く太陽の放射フラックスは大気上端での値の $1/e$ になる。このダスト量の急激な変動は後述する惑星規模のダストストーム(砂嵐)の発生時に対応している。全球規模の大気の

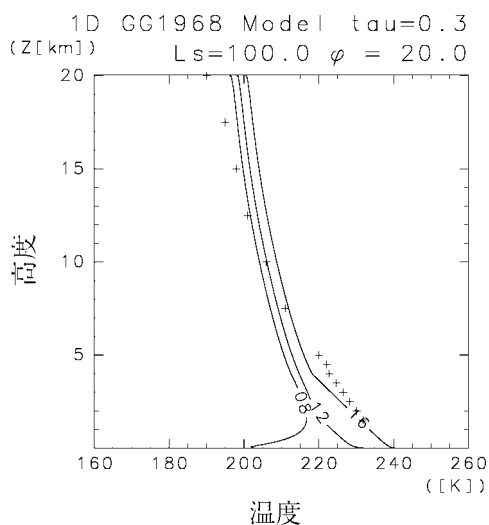
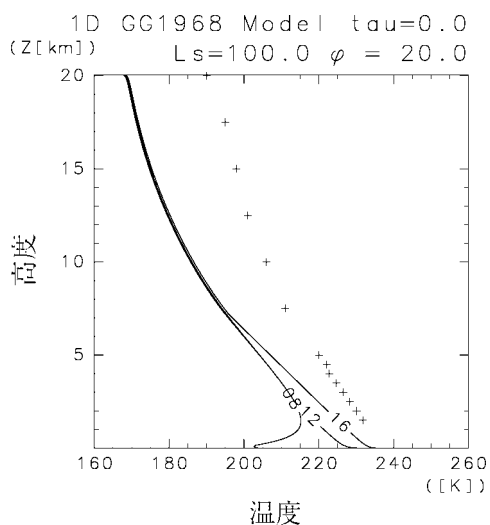


図6 バイキング1号により観測された鉛直温度分布⁸⁾と鉛直1次元放射対流モデルによる計算結果⁹⁾との比較。+が観測結果, 実線がモデル計算。図中の数字は時刻を表す。左側はダストを考慮しない場合, 右側はダストを考慮した場合。(小高⁹⁾, 図1, 図2を改変)。

流れを計算する大気大循環モデルを用いた研究¹⁰⁾によれば、大気中のダスト量が増えるとダストによる放射加熱量が増加し、その結果惑星規模の循環が強まることが示されている。次節ではこの惑星規模のダストストームを含む火星のダスト現象に注目し、これまでの観測によって明らかとなっているその特徴について述べる。

3. 火星のダスト現象

火星におけるダストを伴う大気現象としては、ダストストームとダストデビル（塵旋風）がある。ダストストームは大気中のダスト量を大きく変動させる原因であり、その空間スケールの大きい順に、グローバル、リージョナル、ローカルと3種類に分類されている¹¹⁾。空間スケールの異なるダストストームは、発生頻度、持続時間も互いに異なっている。ダストデビルはその時空間スケールはダストストームに比べずっと小さいが、大気中に常時ダストが存在していることに対し重要な役割を果たしていると考えられている。

グローバルダストストームは惑星全体を覆うようなスケールをもつダストストームである。現在ではその空間スケールを的確に示すために「惑星を囲むダストストーム」(planet-encircling dust storm)と呼ばれているが¹¹⁾、本原稿では慣習的に用いられてきた「グローバルダストストーム」という言葉を用いることにする。これまでの観測でほぼ確実にグローバルダストストームであろうと考えられているのは1956, 1971, 1973, 1977a, 1977b, 1982, 2001年のダストストームである¹²⁾。これらのダストストームはいずれも北半球の秋から冬（南半球の春から夏）にかけて南半球で発生し、一度発生すると3カ月程度持続することが観測されている。1971, 1977a, 2001年のグローバルダストストームは探査衛星などによって画像が得られており、その描像を把握することができる。図7（表紙掲載）はハッブル宇宙望遠鏡により撮影された2001年のグローバルダストストーム前

後の火星の画像である¹³⁾。このとき火星は全球がダストに覆われ、表面はほとんど見るができなくなってしまう。マーズグローバルサーベイヤーの赤外放射スペクトル計の観測によれば、このダストストームは南半球にあるヘラスと呼ばれるクレーター盆地で発生し、3週間ほどで火星全体を覆うまでに発達した¹⁴⁾。

リージョナルダストストームはおよそ1,000 km以上で惑星規模以下の水平スケールをもつダストストームであり、ローカルダストストームは水平スケール1,000 km以下のダストストームである。持続時間はリージョナルダストストームは数日、ローカルダストストームは1~2日程度とされている。ただし、現在の探査衛星観測では衛星の周回軌道の都合により1日以下の時間スケールをもつ現象の観測は困難であることに注意が必要である。マーズグローバルサーベイヤーの可視カメラには1999年内の半年で783個のリージョナルおよびローカルダストストームがとらえられ、解析の結果このうちの数個がリージョナルダストストームで残りはローカルダストストームであることが明らかとなった¹⁵⁾。ローカルダストストームが頻繁に発生していることを明らかにしたのは、マーズグローバルサーベイヤーの大きな成果である。図3には北極冠の周囲に存在する二つのリージョナルダストストームが示されている。このうち図中央部のダストストームは、地球の温帯低気圧に似た渦状の構造をもっている。図8左側は北極付近で撮影されたローカルダストストームである。リージョナルおよびローカルダストストームは、極冠の境界付近の中高緯度で多く観測されている¹⁵⁾。極冠の縁では気温の南北勾配が大きくなりやすい。そのため地球の温帯低気圧と同様の擾乱が発達しやすく、それに伴う風によりダストが巻き上げられることが多いのではないかと考えられている。

グローバルダストストームの発達メカニズムとして、ハドレー循環の遷移¹⁶⁾、潮汐波と呼ばれる

大気中の波動の重ね合わせ¹⁷⁾、ハドレー循環と潮汐波などの惑星規模の風の重ね合わせ¹⁸⁾、ダストの台風モデル¹⁹⁾が提案されている。上記のいずれのモデルも風による大気へのダスト巻き上げが何らかの原因で増えると、ダストによる大気の放射加熱量が増加しそれによって大規模場の循環が強められさらに大気中へダストを巻き上げやすくなる、というフィードバックが働くことを想定している。しかし、どのメカニズムが卓越して働いているかを検証できるほど十分な気象観測データは得られていないため、グローバルダストストームの発達メカニズムはいまだによく理解されていない。また、それぞれのスケールのダストストーム相互の関係についてもこれからの研究課題である。

図8右側は北半球の中低緯度で撮影されたダストデビルである。ダストデビルはダストによって可視化された大気の渦であり、マーズグローバルサーベイヤーのカメラによってしばしば撮影されている。水平スケールは10 m から1 km 程度、鉛直スケールは平均的には2-3 km、大きなものでは8 km 前後に達する²⁾、²⁰⁾、²¹⁾。火星に着陸した探査機によるダストデビルと思われる渦の直接観測によれば、渦の中心は周囲より1 Pa 程度気圧が低く気温は5 K ほど高い²²⁾。観測された渦に伴う高度1.6 m での水平風速は30 m/s を超えることがある²⁰⁾。この風速値は地表からダストを巻き上げるのに十分な大きさであると考えられている。

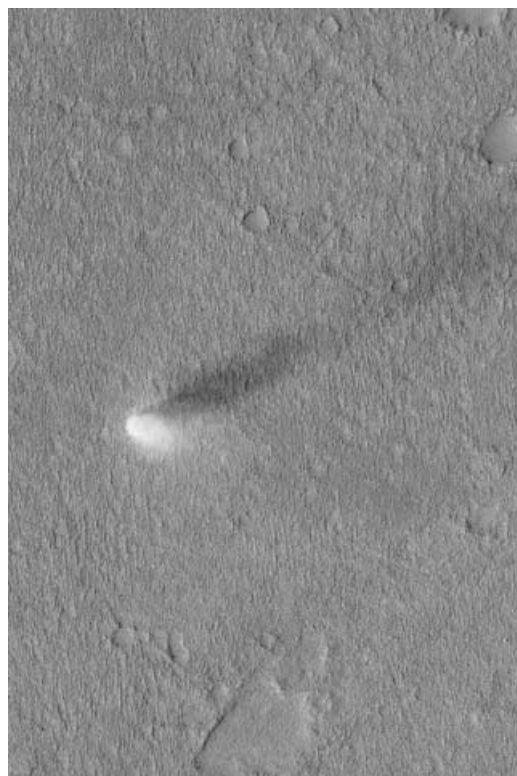


図8 マーズグローバルサーベイヤーによる撮影された(左)ローカルダストストーム(87.6°N, 176.6°W)と、(右)ダストデビル(32.0°N, 182.1°W)。画像の横軸のスケールは両方とも3 km である。(画像は NASA Planetary Photojournal <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA05024> と <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA04698> より引用)。

ダストデビルの発生メカニズムとしては、地表面付近の水平方向の渦が熱対流などの上昇流によって鉛直方向の渦になる、熱対流に伴いせん状の上昇流が形成される、などが提案されている。火星の地表付近の熱対流は日変化によって励起されるので、ダストデビルの持続時間は1日以下と考えられている。熱対流に伴う風の強さは対流層の厚さの平方根に比例し、対流層の厚さは大気中ダスト量が減少すると増加する²³⁾。したがって、ダストデビルの発生頻度は大気中のダスト量が減少すると増加すると予想され、ダストデビルによる大気へのダスト供給により大気中の平均的なダスト量が維持されているのではないかと考えられる。

4. ダストストームの 数値シミュレーション

ダストストームの発達と減衰のメカニズムを明らかにすることは、火星気象学の課題の一つである。この課題に取り組むために、大気大循環モデルを用いたシミュレーションが行われるようになってきた。本節では火星大気大循環モデルの概要を説明したうえで、そのモデルを用いたダストストームおよび大気中のダスト循環に関する最新の話題を紹介する。

大気大循環モデルはそもそも天気予報のためのシミュレーションモデルとして開発された数値モデルである。モデル内では大気は3次元方向の格子点に分割され、各格子点上の気温、気圧、風は流体力学に基づく方程式を解くことにより求められる。火星大気大循環モデルは地球用の大気大循環モデルを基に、さまざまなパラメーターと物理過程を火星用に変更したものである。モデルの基本的な枠組は、鉛直方向に静水圧近似を行った大気の流れを記述する運動方程式、質量保存の式、熱力学の式から構成される。これに大気の放射、乱流混合、大気主成分のCO₂の凝結昇華、地面の熱収支を計算する物理過程が加えられている。モ

デルの下部境界条件にあたる地面の起伏は、マーズグローバルサーベイヤー搭載のレーザー高度計の観測によって得られた地形データ²⁴⁾に基づいている。地面のアルベドおよび熱慣性の分布はこれまでに行われた探査衛星観測によって得られたデータを基に与えられている。現在のモデルの標準的な水平解像度は緯度経度にしておよそ5°×5°(300 km×300 km)程度である。鉛直解像度はモデルによって異なり、モデル大気の鉛直層数がおおよそ20-40の範囲でさまざまな解像度が試されている。大気境界層を表現するためにモデルの最下層は地上5-30 mにあり、高高度まで達する火星の子午面循環を表現するため、下層大気の大循環に注目するモデルでも上端は高度80 km以上に配置されることが多い。火星大気の温度場と風の場に着目したシミュレーションを行う場合、ダストの空間分布は固定してダストの放射効果だけを考慮したモデルが用いられる。このような場合、ダスト質量混合比は水平方向には一様で鉛直方向には乱流拡散による上向き輸送と重力沈降による下向き輸送とが釣り合った分布²⁵⁾が与えられる。現在の火星大気大循環モデルはダストの空間分布を固定すれば、観測される温度場、極冠の拡大と縮小、地表気圧の季節変化をおよそ再現することができる性能をもっている²⁶⁾。

ダストストームおよび大気中のダスト循環のシミュレーションを行う場合には、ダストは放射活性なトレーサーとして扱う必要がある。風による大気中のダスト輸送は地球大気における水蒸気の輸送とほぼ同様の方法で大気大循環モデルに組み込むことができる。問題となるのは地表面から大気へのダスト供給のモデル化である。地球の砂漠における経験から、風による地表面からのダスト巻き上げは砂粒の躍動(saltation)と、その砂粒の衝突によるダストの叩き出しという二つの段階を経て起こると考えられている。躍動とは大気境界層内の風によって生じる地表面応力により、比較的大きなサイズの砂粒が巻き上げと落下を繰り返

しながら水平方向に移動する現象である。躍動する砂粒が地面に衝突することで砂粒より小さなダストが効率よく大気中に叩き出される。火星においてもこの過程が働いていると考えられている根拠は、火星において最も巻き上げやすい砂粒の粒径は風洞実験によれば $100\ \mu\text{m}$ 程度²⁷⁾であり、火星大気中で観測されるダストの粒径(約 $2\ \mu\text{m}$) よりもずっと大きいこと、 $2\ \mu\text{m}$ サイズのダストを直接巻き上げるには音速に匹敵する程度の地表風速が必要であり、そのような地表風は火星では観測されていないことである。

躍動によるダストの巻き上げを適当にモデル化すれば、地表面からのダスト供給を大気大循環モデルで考慮することができる。しかしながら、このような巻き上げ過程を考慮した大気大循環モデルによるダストストームのシミュレーションはこれまで行われてはいなかった。その理由の一つは大気大循環モデルで計算される地表面風応力は、大気中にダストが少ないと砂粒の躍動を起こす

めに必要な臨界値を超えられないからである。そのためこれまでのダストストームシミュレーションはダスト巻き上げの起こる場所と大気中への供給量を固定して行われおり、自然なダストの巻き上げと輸送をシミュレーションすることは困難であった。

しかし近年になって上記のような物理的な過程に基づくダスト巻き上げモデルを大気大循環モデルに組み込んで、自然なダスト巻き上げと輸送をシミュレーションする試みが行われ始めている。そのような例として以下ではオックスフォード大学の Newman らによるシミュレーションの例^{28), 29)}を紹介する。大気大循環モデルで計算される風は格子間隔程度のスケールでの平均値であることから、Newman らはダストの巻き上げにはモデルの水平解像度以下のスケールをもつ局所的な風のゆらぎが寄与していると考えた。そこで風のゆらぎ考慮した地表面におけるダスト巻き上げモデルを定式化し、それを組み込んだ大気大循環モデル

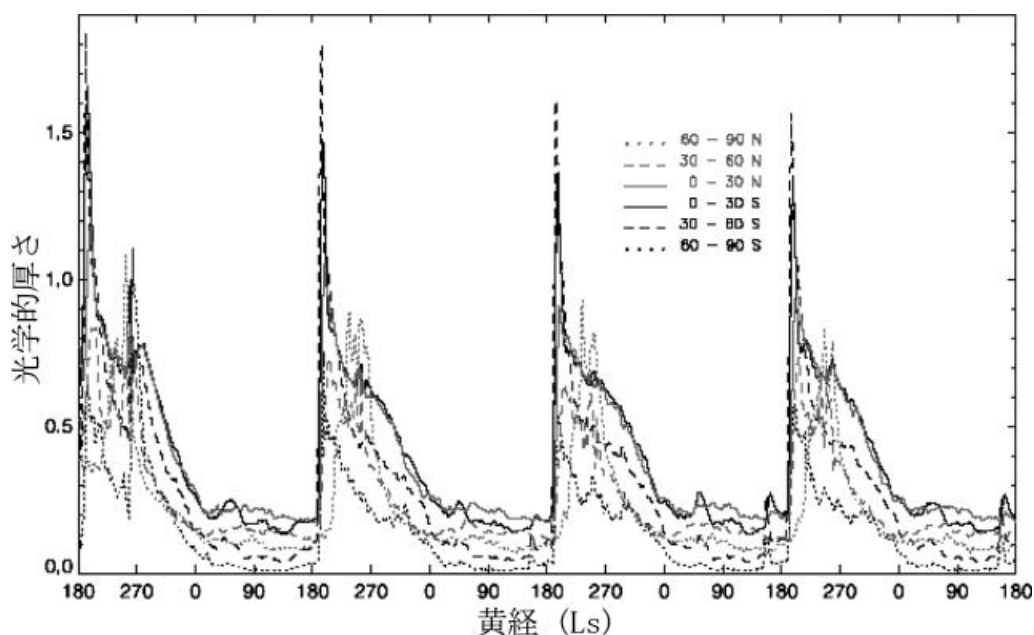


図 9 Newmanらによって行われた数値実験から得られた各緯度帯での東西平均した可視光に対するダストの光学的厚さの季節変化 (Newman, et al.,²⁹⁾ Fig. 3 を改変). この計算では乱流による風のゆらぎの幅をゼロとし、ダストデビルによるダスト巻き上げモデルを考慮している。

内で大気中のダスト量にどのような時間変動が現れるのかを調べた。彼女らはダスト巻き上げに關与する局所的な風のゆらぎの構造を2種類に分割して考慮している。一つは連続的な時空間分布をもつ乱流的な運動による寄与であり、もう一つはコヒーレントな構造（ダストデビル）による寄与である。前者を考慮するとモデルで計算される風では躍動が起こらない場合でも、乱流的な運動による風のゆらぎによって風速値が嵩上げされることにより躍動が生じることになる。後者は最近の探査衛星により火星でしばしば観測されようになったダストデビルによって2 μm サイズのダストが風によって直接巻き上げられることを考慮したものである。これはダストデビルの通過に伴う一時的な気圧の低下によってダストの巻き上げに必要な風応力が低下し、通常よりも弱い風で2 μm サイズのダストを直接巻き上げることができる^{27), 30)}、ということを想定している。乱流的な風に伴う躍動によるダスト巻き上げ量は躍動による砂の水平方向のフラックスに比例するとし、ダストデビルによるダスト巻き上げ量は地表からの顕熱フラックスと熱機関として考えたダストデビルの効率³¹⁾に比例するとしている。

Newmanらは上記のダスト巻き上げモデルの組み込み方と風のゆらぎの幅などのパラメータをさまざまに変えてシミュレーションを行っている。そのうちダストデビルによる巻き上げを考慮し、乱流的な運動による風のゆらぎを0とした場合の計算結果を示す。これは大気中に定常的に存在するダストはダストデビルにより巻き上げられ、風による地表面応力が臨界値を超えると躍動と浮遊によるダスト巻き上げが突発的に生じることになる。ダスト巻き上げ量を定める比例係数などのパラメータは、計算される大気中のダスト量が観測値の範囲内となるように調整している。図9はそのシミュレーションによって得られた東西平均したダストの光学的厚さの季節変化を示す。図中の各線は各緯度範囲内の平均値を示し

ている。ここで注目すべき点は、南半球の夏の時期 ($L_s=200-270^\circ$) にダストの光学的厚さの急激な増加が全球的に見られることである。これは数値モデル内で突発的なグローバルダストストームの発生が表現できたことを示している。モデルで計算されたグローバルダストストームの発生時期と場所は、過去に観測されたダストストームのそれらと整合的であった（図は示さない）。

Newmanらのシミュレーションは、現状で考えられているダスト巻き上げ過程を忠実に考慮してグローバルダストストームの自発的な発生を表現できた点に大きな価値がある。加えて火星大気においては格子点サイズ以下の運動構造の表現が全球規模での気候表現に非常に重要であることを例示している。しかし、すでに指摘したように、モデル内で突発的な大規模ダストストームを発生させるためには、巻き上げ量を定める比例係数や乱流的な運動に伴う風のゆらぎの幅などのパラメータを適切に選ぶ必要がある。さらに図9は南半球の夏の時期 ($L_s=200-270^\circ$) では毎年必ずグローバルダストストームが発生することを示しており、これは現実火星でのグローバルダストストームの発生頻度とは矛盾する。このような観測とシミュレーションとの食い違いは、火星大気における鉛直対流や境界層乱流に関するわれわれの知識が不十分であることを表している。ダストデビルという派手な現象の認知と相まって、火星大気研究には大気の微細な運動構造を調べることのできる領域高分解能モデルの投入が進められつつある³²⁾。

5. まとめと今後の展開

マーズグローバルサーベイヤーの観測により、火星のダストストームの現象論的な理解は大きく進展したと考えられる。探査衛星のカメラによる鮮明な画像によりダストストームの描像を把握しやすくなり、赤外放射スペクトル計による観測はグローバルダストストームが全球に拡大していく様子とその時間スケールをダストの光学的厚さと

いう定量的な指標を用いて明らかにした。ローカルダストストームが頻繁に発生し、ダストデビルは火星においてごく普通に存在する現象であることも明らかとなった。

一方で、大気大循環モデルの開発とそれを用いた研究が活発に行われるようになったことにより、ダストの分布を大循環モデル内で決定し、グローバルダストストームの発生と衰退を表現する試みが行われるようになってきている。南半球の夏という観測で知られているのと整合的な時期と場所で自発的な大規模ダストストームの発生を示した計算例も報告されている。しかし現在のところ、大規模ダストストームが年によって発生したりしなかったりするという特徴は再現することができていない。今後の課題である。

大循環モデルによるダスト分布の予報性能を向上させるためには、ダスト巻き上げ量を決める比例係数などの微細過程パラメーターの不確定性を押しさえると同時に、巻き上げに寄与すると考えられるモデル格子間隔以下のスケールでの風の速度変動とその表現を検討する必要がある。微細過程の不確定性を押しさえするためには室内実験が有効であると考えられる。これまではあまりよくわかっていない $100\ \mu\text{m}$ サイズの粒子が地面に再衝突することによる $2\ \mu\text{m}$ サイズのダストの巻き上げ効率を実験的に見積もることができるに違いない。同時に、そのような風洞内でダストデビルを再現することで、ダストデビルの旋回中心における気圧減少がダスト巻き上げ過程に及ぼす影響を定量的に見積もることができるだろう。このような実験には火星の環境を再現できるような風洞の開発が必要になるが、これらの実験によってダスト巻き上げ量の見積もりの精度は大きく向上する可能性がある。

風の速度変動を検討するための有効な手段としては、高空間分解能の領域モデルを用いた数値実験が考えられる。大循環モデルでは陽に表現できない局所的現象とそれに伴う風の場についての知

見を集積することができるだろう。さまざまな背景場の条件下でダストデビルの再現実験を行うことで、ダストデビルの基本構造とその発生特性を調べることが可能となる。また、領域モデルの高い空間分解能で、火星に見られる勾配の急な斜面を正確に表現し、それらに関連した局地循環に伴う強風や、それに伴うダスト巻き上げ過程についての知識を得ることも期待できる。

ダスト分布の予報性能を向上させることにより、ダストと大気循環そして地表面が相互作用する系としての火星気候を議論することが可能となる。そのような視点での研究は、これまでから一歩進んだ火星気候変動の理解へ道を拓くものになるだろう。

参考文献

- 1) NASA Planetary Photojournal, JPL, NASA, <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/>
- 2) Read P. L., Lewis S., 2004, *The Martian Climate Revisited* (Springer-Verlag, New York)
- 3) Houghton J., 2002, *The Physics of Atmosphere*, 3rd ed. (Cambridge Univ. Press, Cambridge)
- 4) Zurek R. W., et al., 1992, in *Mars*, ed. Kiffer H. H., Jakosky B. M., Snyder C. W., Matthews M. S. (Arizona Press, Tucson), p. 835
- 5) Lee S., 1995, *NASA Planetary Data System*, http://atmos.nmsu.edu/PDS/data/v1_1001/
- 6) Gierasch P. J., Goody R. M., 1972, *J. Atmos. Sci.* 29, 400
- 7) Pollack J. B., et al., 1990, *J. Geophys. Res.* 95, 1447
- 8) Seiff A., Kirk D. B., 1977, *J. Geophys. Res.* 82, 4364
- 9) 小高正嗣, 2001, *遊星人* 10, 48
- 10) Murphy J. R., et al., 1995, *J. Geophys. Res.* 100, 26357
- 11) Martin T. Z., Zurek R. W., 1993, *J. Geophys. Res.* 98, 3221
- 12) Kahn R. A., et al., 1992, in *Mars*, ed. Kiffer H. H., Jakosky B. M., Snyder C. W., Matthews M. S. (Arizona Press, Tucson), p. 1017
- 13) NASA Hubble Space Telescope Site, <http://hubblesite.org/>
- 14) Mars Global Surveyor Thermal Emission Spectrometer Site, <http://tes.asu.edu/dustindex.html>
- 15) Cantor B. A., et al., 2001, *J. Geophys. Res.* 106, 23653
- 16) Schneider E. K., 1983, *Icarus* 55, 302

- 17) Tillman J. E., 1988, *J. Geophys. Res.* 93, 9433
- 18) Leovy C. B., et al., 1973, *J. Atmos. Sci.* 30, 746
- 19) Gierash P. J., Goody R., 1973, *J. Atmos. Sci.* 30, 169
- 20) Ryan J. A., Lucich R. D., 1983, *J. Geophys. Res.* 88, 11005
- 21) Thomas P., Gierash P. J., 1985, *Science* 230, 175
- 22) Schofield J. T., et al., 1997, *Science* 278, 1752
- 23) 小高正嗣ほか, 2001, *ながれ* 20, 507, *ながれマルチメディア*, <http://www.nagare.or.jp/mm/2001/odaka/>
- 24) Smith D. E., et al., 1999, *Science* 284, 1495
- 25) Conrath B. J., 1975, *Icarus* 24, 36
- 26) 高橋芳幸ほか, 2004, *遊星人* 13, 145
- 27) Greeley R., Iversen J. D., 1985, *Wind as a Geological Processes on Earth, Mars, Venus, and Titan* (Cambridge Univ. Press)
- 28) Newman C. E., et al., 2002a, *J. Geophys. Res.* 107, 5123, doi: 10.1029/2002JE001910
- 29) Newman C. E., et al., 2002b, *J. Geophys. Res.* 107, 5124, doi: 10.1029/2002JE001920
- 30) Greeley R., et al., 2003, *J. Geophys. Res.* 108, 5041, doi: 10.1029/2002JE001987
- 31) Rennó N. O., et al., 1998, *J. Atmos. Sci.* 55, 3244
- 32) Toigo A. D., et al., 2003, *J. Geophys. Res.* 108, 5047, doi: 10.1029/2002JE002002

Dust Storm in the Martian Atmosphere

Masatsugu ODAKA and Yoshiyuki O. TAKAHASHI

Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University, Kita 10, Nishi 8, Kita-ku, Sapporo 060-0810, Japan

Abstract: Recent spacecraft observations reveal the feature of Martian dust storm and its horizontal scale, occurrence frequency and duration. Because of increasing of Martian meteorological data, numerical simulations of Martian dust storm by using General Circulation Model (GCM) which can predict distribution of atmospheric dust are now beginning to be challenged by several research groups. In order to improve forecast performance of atmospheric dust distribution by using GCM, it is necessary to consider parameters associated with micro physics of dust loading and parameterization of small scale wind fluctuations which cannot be represented in GCM explicitly.