

論文の内容の要旨

論文題目 Study of the Effects of Dust in the Martian Meteorology Using a
General Circulation Model
(大気大循環モデルを用いた火星の気象におけるダストの効果の研究)

氏名 黒田 剛史

火星の大気は CO_2 を主成分としたもので、地球よりも寒冷、地表面気圧は 6mb 程度であり、水の量はその気象への影響を無視できるほど少ない。さらに全球規模のダストストームが発生することが、重要な特徴として挙げられる。全球規模のダストストームは南半球の春から夏の時期に観測されており、年によっては全球には広がらず局地的な規模にとどまることもある。Mars Global Surveyor は、北半球の秋季($L_s=205^\circ-210^\circ$)に全球規模のダストストームが発生した場合、その影響で高度 60km 以下の日中の大気温度が最大 40K も上昇することを観測した。このような温度分布の変化は火星大気の安定性や力学に大きな影響を及ぼす可能性がある。

火星大気では周期が 1 日以上の変圧不安定によると見られる大気波動が、北半球の秋から冬にかけて観測されている。Mars Global Surveyor の観測によると、ダスト濃度が比較的薄い場合、秋季(秋分から冬至にかけて)の地表面付近では約 6 日周期のもの(東西波数 1)と約 3 日周期のもの(東西波数 2)が卓越して見られ、上空に行くにつれて波数 1 成分が卓越する。冬季(冬至以降)になると上空の波数 1 成分の振幅はより大きくなり、下層では北緯 70 度以北への波の伝播が見られなくなる。また Viking の観測によると、冬季の全球ダストストーム時はダストが薄い時と比べて波の振幅が大幅に小さくなり、見積もられた卓越波の波数もダストストームのない時に比べて大きくなる。秋季の全球ダストストーム時ではこのような波の減衰は見られ

ない。

本研究では CCSR/NIES AGCM を火星大気用に改良した 3 次元の大気大循環モデルを用いて、ダストが大気の放射及び力学に与える影響の研究を行った。このモデルは水平分解能が約 5.6°、鉛直 30 層で上端高度は約 80km、火星の地形・アルベド・熱慣性のデータ、極域での CO₂ の凝結・昇華過程を導入している。さらに波長 0.2μm~200μm を 19 の波長域に分けた放射コードを用いて、CO₂ の赤外放射及びダストの赤外放射と太陽光吸収の効果を計算している。CO₂ の近赤外波長域における太陽光吸収の効果は、*Forget et al.* [1999, 2003] で与えられた気圧・太陽~火星間の距離・太陽天頂角による加熱率の関数を用いて導入している。CO₂ の赤外放射は 4.3μm、10μm、15μm の各波長域において考慮されているが、4.3μm 及び 10μm 波長域の効果は 15μm 波長域と比べて非常に小さい。

大気モデルでダストの放射効果を評価するにあたっては、ダストのパラメータ(複素屈折率・粒径分布)及び鉛直分布を考慮する必要がある。本研究ではまず複素屈折率に *Ockert-Bell et al.* [1997]、*Toon et al.* [1977] 及び *Forget* [1998] によって見積もられたもの(以下 'Refractive A')、粒径分布に *Tomasko et al.* [1999] による観測値(有効半径 1.6μm、有効分散 0.2μm)を用いて計算した。鉛直分布については観測データがないため、*Conrath* [1975] による乱流拡散と重力沈降の釣り合いを考慮した理論式をもとに相対的なダストの質量混合比の分布を定め、ダストの質量混合比は観測と整合的な光学的厚さが得られるように導入した。以上は世界の他の火星大気大循環モデルの多くで採用されている設定である。この設定を用いたところ、北半球の秋季 ($L_s=205^\circ-210^\circ$) の昼間の温度分布において、ダストが少ない場合(波長 0.67μm における光学的厚さ ≈ 0.2)は観測とよく整合した結果が得られたが、全球ダストストーム時(波長 0.67μm における光学的厚さ ≈ 2.2)では観測よりも 10-20K も高い分布が得られた。

全球ダストストーム時の温度分布の観測との差を小さくするために、ダストのパラメータ(複素屈折率・粒径分布)が温度場の計算結果へ及ぼす影響の感度実験を行った。まず粒径分布の有効半径を 3.5μm まで大きくして、赤外に対する可視光の光学的厚さを小さくしたところ、全球ダストストーム時の中層大気の加熱が弱まる一方で低層大気の加熱が強まり、高度 0.1-1mb での温度が約 10K 低下する一方で地表面付近の温度が約 10K 上昇した。これによって中層大気での整合性は高まったが、低層大気での不整合がさらに大きくなった。次に、有効半径を 1.6μm に戻し、複素屈折率のデータを *Wolff and Clancy* [2003] によって見積もられたもの(以下 'Refractive B')に差し替えたところ、中層・低層大気ともに観測と整合する温度分布が得られた。'Refractive B'は紫外と可視光における屈折率の虚部の値が'Refractive A'よりも小さい

ため、太陽光による加熱率が約 20%小さくなることに加えて赤外波長域での冷却はより強く、その影響が'Refractive A'による温度分布よりも 10-15K ほど低い温度分布となって現れた。

このように、ダストの複素屈折率のデータの違いは、全球ダストストーム時に対応するダスト濃度のもとでは 15K もの温度分布の違いを引き起こしうるものである。ダスト濃度が小さい場合では、これらのダストパラメータの温度分布への影響は小さい。異なるダスト濃度において観測と整合する温度分布が得られる'Refractive B'と Tomasko et al. [1999]による粒径分布を用いて、火星大気の傾圧波の季節及びダスト濃度による変化の研究を行った。

まず、北半球の秋季($L_s=195^\circ-225^\circ$)でダストが少ない場合における地表面付近の温度のスペクトル解析を行ったところ、約 3 日周期・波数 2 の要素が最も卓越しており、これは同季節の Viking2 号の観測データの解析結果[Barnes, 1981]及び線形論からの見積もりと一致した。さらにこの季節及びダスト濃度での傾圧波の鉛直分布を見ると、上層では 3 日周期・波数 2 に加えて 5.5 日周期・波数 1 の要素の卓越も見られ、波数 1 及び波数 2 の振幅の鉛直分布は、上空で波数 1 の卓越が大きくなるという点で Mars Global Surveyor の観測データの解析結果[Banfield et al., 2004]と一致した。波数 2 の波が波数 1 の波に比べて上空に伝播しにくい様子は、各波数に対する波の屈折率の 2 乗(n_k^2)の分布から説明できる。波数 2 のほうが上空で n_k^2 が負になる領域が大きく、そのため上空に伝播しにくい。

北半球の冬季($L_s=280^\circ-300^\circ$)でダストが少ない場合では、6.6 日周期・波数 1 の要素が地表面と上層の両方で卓越し、その振幅は秋季の波数 1 の要素と比べて非常に大きくなった。この波の特徴の季節変化は Mars Global Surveyor の観測データの解析結果[Wilson et al., 2002; Banfield et al., 2004]と整合的であり、大気の基本場の変化と線形論からこの変化を説明することができる。線形論によると、東西風の鉛直シアーが大きくなるとより小さな波数の不安定波の成長率が大きくなり、また大気の安定度(Brunst-Väisälä 振動数)が小さくなるとより大きな波数の不安定波の成長率が大きくなる。秋季と冬季の大気の基本場を比較すると、モデルと観測の両方で冬季のほうが東西風の鉛直シアーと大気の安定度が大きくなっており、よってこのような基本場の季節変化が傾圧波の特徴の季節変化と関係していることがわかる。

さらに大気の基本場から potential vorticity の南北勾配($\partial q/\partial y$)を求めると、秋季では正だった北緯 70 度付近の低層域での値が冬季では負に転じる変化がモデルと観測の両方で見られた。この負の領域の存在は不安定の必要条件を示すもので、不安定波の振幅の増加に影響を与えている可能性がある。それと共に $\partial q/\partial y$ の値は n_k^2 の値の計算式の中に含まれており、 $\partial q/\partial y$ が小さくなると n_k^2 も小さくなる。モデルと観測の両方で冬季に下層で北緯 70 度以北への波の伝播

が見られなくなるのは、これによって北緯 70 度付近の低層域での n_k^2 の値が冬季には負に転じるためである。

北半球の冬季($L_s=280^\circ-300^\circ$)で全球ダストストームが起こっている場合のモデル実験では、北極域の上空(高度 $\sim 0.1\text{mb}$)の温度がダストの少ない場合に比べて 60K ほど上昇する。この強い加熱は力学の効果によるもので、南半球で強い放射加熱を受けて発達した循環によって引き起こされたと考えることができる。地表面付近の温度のスペクトル解析を行うと、波の振幅は Viking2 号の観測データの解析結果[Barnes, 1980]と同様に著しく小さくなり、ダストが少ない場合の波数 1 に代わって波数 2-4 が卓越している。この時、中緯度の地表面付近ではダストが少ない場合と比べて東西風の鉛直シアが著しく減少しており、また大気安定度も小さくなっている。不安定波の成長率は大気安定度よりも東西風の鉛直シアにより依存することにより、振幅の著しい減少と卓越波数の増加は線形論から定性的に説明できる。また、高度 $\sim 0.7\text{mb}$ では地表面付近で卓越している波がほとんど消失し、代わりに 5.5 日周期・波数 1 の要素が卓越している。 n_k^2 の分布や運動量の流れを見ても、地表面付近の波がほとんど上層へ関与していないことが確認できる。北半球の秋季($L_s=195^\circ-225^\circ$)でこのような全球ダストストームによる傾圧波の著しい減衰が起こらないのは、ダストによる強い加熱が北緯 40 度付近まで見られ、また北極域の上空の温度が冬季ほど上昇しないことで、北半球中緯度域の南北温度傾度が保たれるからである。

このように本研究では、3 次元の大循環モデルを用いて過去に観測された火星大気の温度場の再現実験を行い、その結果観測データの解析結果と整合する傾圧波の季節変化及びダスト濃度による変化がモデルでも得られ、さらに大気の基本場の変化からそのメカニズムを説明することができた。