

CCSR/NIES AGCM を用いた火星大気シミュレーション

東京大学気候システム研究センター 黒田剛史, 高橋正明, 橋本尚久
(Kuroda Takeshi, Takahashi Masaaki & Hashimoto Naohisa)

本研究では、CCSR/NIES AGCM を用いての火星大気モデルの開発に一貫して取り組んでいる。その現在までの成果を、ここに発表する。

1. 火星大気の基礎知識とその研究の歴史

火星の大気は CO₂ を主成分とし、平均 6hPa (地球の 150 分の 1 程度) と薄く、水はほとんど存在しない。表面の温度は平均 220K 程度と寒冷である。そして、その気象に大きな影響を与えているのが、大気中に浮遊するダストである。

火星の大気中には、常にダストが浮遊している。この浮遊するダストは平均半径約 1 μ m の酸化鉄を含んだケイ酸塩であると推定されている (Kahn et al., 1992)。ダストは年間を通して発生する局地的な砂嵐 (ダストストーム)、さらにはある特定の時期に特定の場所から発生する全球規模の大ダストストームによって絶えず火星大気中に送り込まれている。全球規模の大ダストストームは、決まって南半球の春から夏にかけて¹、南半球の限られた場所で発生している。それは、火星の公転軌道の離心率は 0.0934 と大きく、さらに火星の近日点が南半球の夏至点に近いところ (火星中心黄経 $L_s=250^\circ$) にあるため、南半球の春から夏にかけての日射量は北半球のそれの約 1.3 倍になり、そのため、南半球の春から夏にかけての対流活動が北半球のその時期より強くなることに起因していると思われる。

火星のダストストームの観測は、地上の天体望遠鏡、バイキングによる探査 (1970 年代)、ハッブル宇宙望遠鏡 (1990~)、そしてマーズグローバルサーベイヤー (1997~) によって行われている。バイキング 1 号と 2 号 (ともに 1975 年打ち上げ) の観測によると、火星大気中のダストの量は、可視光の領域での光学的厚さが平常時でも 0.3~0.5 程度はあり、大ダストストーム時になると、約 3 にも達する (Zurek, 1982)。大ダストストーム時には、ダストは高さ 60km の地点まで舞い上がる。また、バイキングの周回船は、この南半球の春から夏にかけての時期に、10~30° S の低緯度帯と縮退する南極冠の周縁部という 2 つのグループに分かれて集中的に発生する局地砂嵐を観測している。

1990 年代になると、ハッブル宇宙望遠鏡、さらにマーズグローバルサーベイヤーによって新たなダストストームの観測が行われた。これらは北半球の春に北極冠上空にダストの渦が発生しているのをたびたび観測したが、バイキングが観測したような全球規模の大ダストストームは、この年代には観測されなかった。

ところが、2001 年 6 月、1977 年以来実に 24 年ぶりに全球規模の大ダストストームが観測された。南半球のヘラス盆地から発生したダストストームはみるみるうちに火星全体に拡がり、発生から 2 週間でほぼ全球がダストに覆われるまでに至った。ちなみにバイキング及びそれ以前の観測で大ダストストームの発現が認められた地域には、

1. ヘラスの北西端とノアキスの間の傾斜面 (1956、1971 年に発生)
2. クラルス水路の西、南、あるいは南東に面した傾斜面 (1973、1977 年に発生)
3. 大シルチスの東の低地インディス平原 (1943、1958 年に発生)

の 3 箇所があり (図 1 参照)、今回の大ダストストームの発生地 (上記の 1.にあたる) も含めてこれらはいずれも東や南東向きの傾斜地である。このことから、大ダストストーム発生の大きな要因として、地形効果というの

¹ 火星の赤道傾斜角は地球とはほぼ同じ 25° であるので、地球と同様な明確な季節変化がある。

² 火星中心黄経：北半球の春分を基準とした火星の季節を示す指標で、 L_s の記号で表される。 $L_s=0^\circ$ が北半球の春分、 $L_s=90^\circ$ が北半球の夏至、 $L_s=180^\circ$ が北半球の秋分、 $L_s=270^\circ$ が北半球の冬至にあたる。

が考えられる。ダストを表面から大気中へ持ち上げるためには、25m/s の風が表面近くで必要とされているが、北半球の平坦な場所に降りたバイキング着陸船はこのような強風をめったに観測しなかった。このことから、大ダストストーム発現には地形効果による風の増大が重要なことが示唆される。

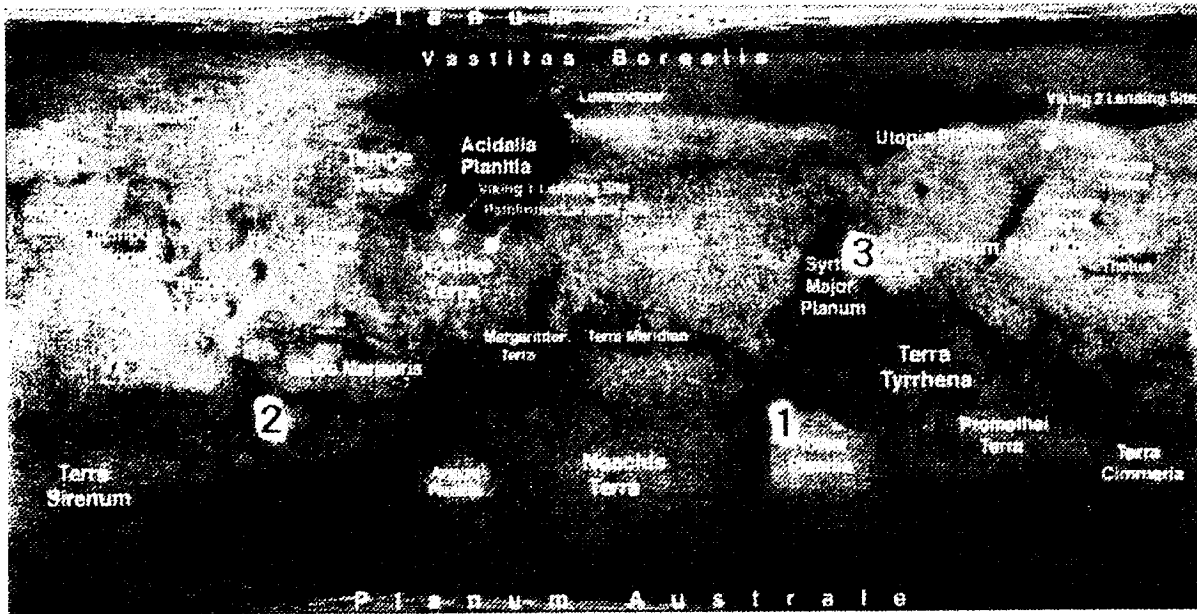


図 1 マースグローバルサーベイヤーによる火星地形図。地形に記されている 1~3 の数字は前頁で挙げた大ダストストームの発現が認められる1~3の箇所に対応する。

そして、もう 1 つ火星の気象学を語る上で重要と言われているのが、大きな熱潮汐波の存在である。火星は大気が薄く、大気の熱容量が非常に小さいため、夜昼間の温度差が大きくなる。さらに、大気中のダストによって太陽光が吸収され、大気の日周期の膨張・収縮により風が発生する。とりわけ赤道地方と夏半球では大循環に伴う東西風が弱いので、熱潮汐波が目立ちやすくなる。図 2 は、バイキング 1 号と 2 号の地表面気圧の変動に対する 1 日潮と半日潮の振幅の季節変化である。平常時でもその振幅は 1 日潮・半日潮共に 1 号の着陸地点で表面気圧の 1%、2号で 0.5%程度あり、大ダストストーム発生時ではそれぞれ 3~4 倍の振幅になっている。熱潮汐の効果は大ダストストーム発生のメカニズムにも大きく絡んでいると考えられており、地形の熱的・力学的効果により東進する東西波数 1 の波 (ケルビン波) と西進する 1 日潮が干渉により強めあう結果、強風が生じてダストが大気中に巻き上げられる、という説明もある。

また、1 年を通して大気中の CO₂ 総量が大きく変化することも、火星大気の大きな特徴として挙げられる。これは離心率の大きな火星軌道の影響でドライアイスの極冠が季節と共に形・総量が大きく変わるため、バイキング 2 号の観測によると表面気圧が北半球の晩夏のあたりで約 7.5hPa まで減少するのが北半球の初冬 (近日点の前後) では約 10hPa にまで増加し (Barnes, 1981)、このように約 25%の振動をもって気圧が変わる。また前述の通り、縮退する極冠の周縁部ではダストストームの発生が多く観測されており、気圧の変動がダストストームの発生に与える影響、極域のダストストームが極冠の形成に与える影響が示唆される。

火星の大気大循環については、十分な観測結果が得られておらず、3 次元の大気大循環モデル (GCM) を用いた研究がなされている。火星大気 GCM を用いた研究は、主に以下のところで今までになされている。

- NASA/AMES

1969 年に UCLA の地球 GCM をもとにして誕生

1981 年より現実的な地形と表面のアルベドを導入、その後極冠生成プロセスと季節的気圧変化、傾圧渦や準定常渦、ハドレー循環、大ダストストーム発生機構、大気大循環における地形の影響などの様々な研究が行われている。(Pollack et al., 1981, 1990; Haberle et al., 1993; Barnes et al., 1993, 1996; Murphy et al.,

1995; Hollingsworth et al., 1996 など)

- LMD (フランス)

1992年より独自に開発したCO₂とダストの放射コードとCO₂の凝結・昇華過程を取り入れた火星GCMを開発、初めて日射の強制力のみによるまる1火星年の積分計算を行い、バイキングが観測した気圧の季節的、短期的変化をよく再現している。(Hourdin et al., 1993, 1995; Collins et al., 1996 など)

- Oxford

スペクトルモデルを用い、傾圧波の東西波数3が卓越した様子や、ハドレー循環の赤道を横切ったの低空の流れが山の東側で強くなる現象を示している。(Collins and James, 1995; Joshi et al., 1994 など)

- GFDL

熱潮汐の役割の研究や極夜の昇温の再現を行っており、ダストを動的に扱う試みもなされている。(Wilson and Hamilton, 1996; Wilson, 1997 など)

本研究で用いるCCSR/NIES AGCMをベースにした火星大気GCMは、これまで他のGCMではあまり導入されたことのないダストの巻き上げ過程を導入し、ダストの動きとダストによる大気加熱を相互作用させていることを大きな特徴としている。

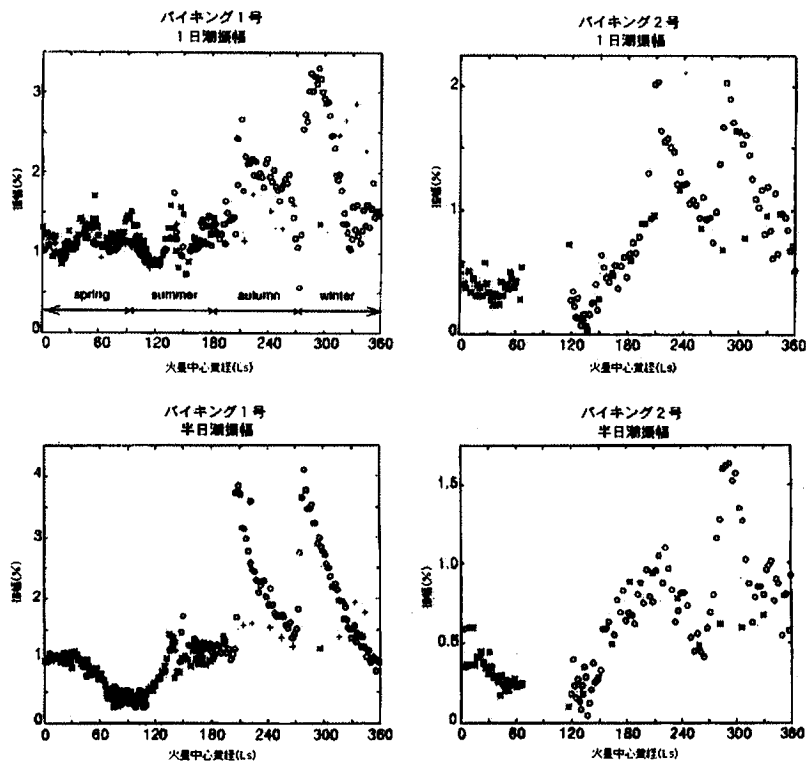


図 2 バイキング1、2号が観測した地表面気圧の変動に対する1日潮と半日潮の振幅の季節変化 (Wilson and Hamilton, 1996)。3~4日間で平均した地表面気圧に対する比で示されている。急激に振幅が増大している時期が大ダストストームの発生に一致している。

2. モデルの概要

本研究で使用したモデルは、東京大学気候システム研究センターと国立環境研究所の共同研究で開発された大気大循環モデル (CCSR/NIES AGCM) のバージョン 5.4g を火星環境に当てはめるためにパラメータを以下のよ

うに変更したものである。

- 惑星半径 (3397 km)
- 重力加速度 (3.7 m/s²)
- 大気定圧比熱 (843.16 J/(K・kg)) ※純粋な CO₂ における値
- 大気気体定数 (188.86 J/(K・kg)) ※純粋な CO₂ における値
- 太陽放射量 (地球の 0.43 倍)
- 大気の成分 (CO₂ 95.3%、O₂ 0.13%)
- 軌道要素 (離心率 0.0934、赤道傾斜角 25.19°)
- 暦 (684 日/年、24 時間/日)

モデルの解像度は水平方向が約 5.6° (グリッド間隔約 333km) であり、鉛直はσ座標 31 層で、モデル上端の高さは約 80km になる。これは、ダストの巻き上げ過程を表現するのに十分な高度である。また、このモデルには水過程は含まれておらず、乾燥対流調節が入っている。

大気放射過程は、Nakajima et al. (2000)を用いている。CO₂ の吸収は、波数で 550~770cm⁻¹ (波長 13.0~18.2μm) のみ取り扱っている。水蒸気の効果はこのモデルでは考慮していない。

ダストの粒径分布は、以下の式に基づいている。

$$\frac{dn(r)}{d(\log r)} = \frac{N}{\sqrt{2\pi} \log \sigma_i^*} \exp\left[-\frac{(\log r - \log r_i)^2}{2(\log \sigma_i^*)^2}\right]$$

ここで N は総粒子数、n(r)は半径が r より小さい粒の数、r_iはダストのモード半径、σ_i*はダスト粒径の標準偏差になる。CCSR/NIES AGCM 5.4g の標準設定では、r_i=0.5μm、σ_i*=2.99 で、ダストの吸収・散乱・消散はサハラ砂漠のダストの成分に基づいて設定されており、本実験ではこの標準設定をそのまま用いている。

地表面のアルベドデータは、NASA の "Consortium" のデータを用いている。もとの 1° × 1° のデータをモデルの解像度に合わせて平均化して用いた。CO₂ の凝結過程はまだ導入されておらず、そのため緯度 74 度以上は極冠と見立てて、一様に北極では 0.7、南極では 0.5 に設定している。極域でのこの数値は、NASA がバイキングの地表面気圧の観測結果とモデル結果が整合するように設定した値である (図 3)。地形のデータは、マースグローバルサーベイヤーの観測結果を用いた。これももとの 1° × 1° のデータをモデルの解像度に合わせて平均化して用いている (図 4)。

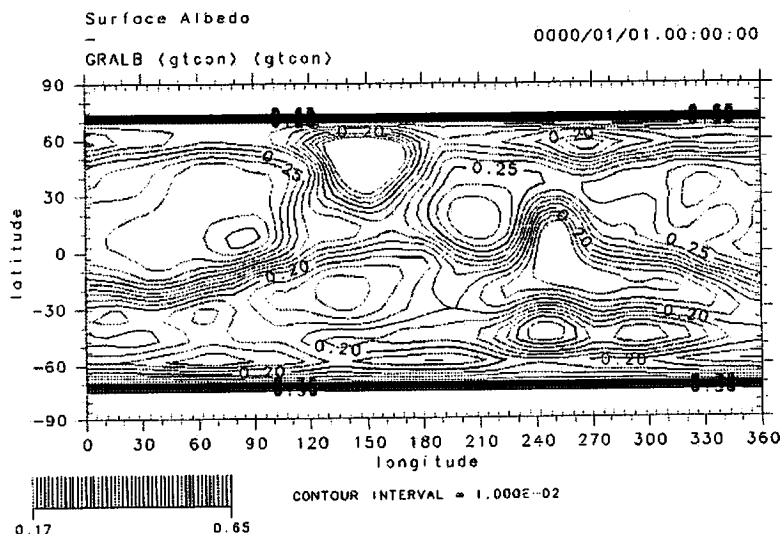


図 3 モデルに使われている地表面アルベド分布。

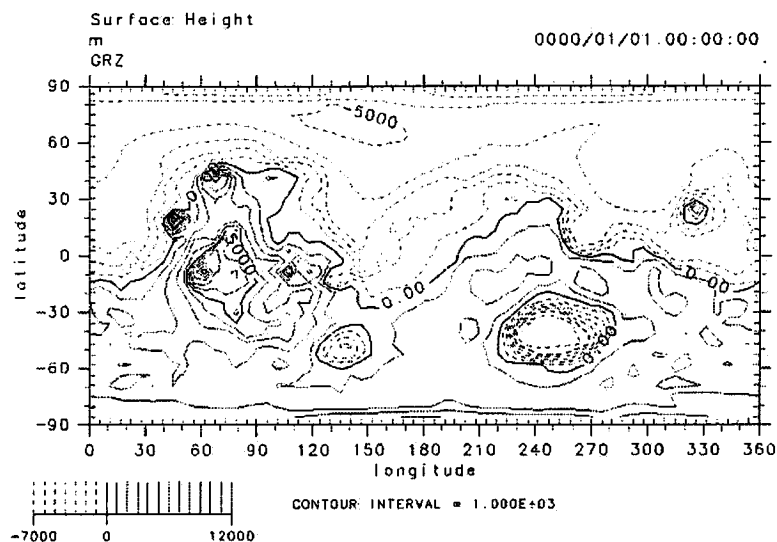


図 4 モデルに使われている地表面高度分布。

ダストの巻き上げは、以下の式より地表面からのダストのフラックスを求めることで表現している。

$$F = \rho C_E |v| q_g$$

ここで ρ は大気密度、 C_E はバルク係数、 v は地表面の風速、 q_g は地表面のダスト混合比、 q_1 は1層目のダスト混合比である。これに巻き上げの条件として、

1. 極冠と見立てている部分 (緯度 74° 以上) では巻き上がらない
2. 地表面の風速が 25m/s 以上
3. リチャードソン数が負 (大気が不安定) のとき

を付け加えた。

ダストの重力沈降は、Rader (1990) を用いている (以下の式)。

$$v_d = \frac{2\rho_d r_d^2 g}{9\eta} \cdot \left\{ 1 + \frac{\bar{l}_{air} (a + b \exp[-c r_d / \bar{l}_{air}])}{r_d} \right\}$$

ここで η は大気 (二酸化炭素) の粘性、 r_d はダスト半径、 ρ_d はダスト密度、 \bar{l}_{air} は大気平均自由行程、 a, b, c は Rader (1990) で定められる定数で、 $\rho_d = 1.2 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 、 $r_d = 1.27 \mu\text{m}$ としている。この r_d の値は、一般的に報告されている火星ダストの半径に合わせたもので、大気の放射過程で用いているモード半径の 2.5 倍ほどである。

3. 結果

3.1 観測されている温度分布・東西風分布との比較

$L_s = 330^\circ \sim 350^\circ$ (地球で 2 月下旬 ~ 3 月上旬に相当する季節) における経度平均・時間平均した温度分布のモデルの計算結果を図 5 に示す。これとマリナー 9 号による観測結果 (Conrath, 1981) と比較すると、赤道から北緯 40 度にかけてはモデルのほうが全体的な温度がやや低めながらも似通った温度分布が見られる。北緯 40 度以北では、 $0.1 \sim 5\text{hPa}$ の高度において観測で鉛直様な温度分布になっているのがモデルでは再現されておらず、水平温度傾度はこの範囲で観測の約半分になっており、そのため経度平均・時間平均した東西風分布のモデルの計算結果はマリナー 9 号による観測結果から求めたものの約半分になっている (図 6)。

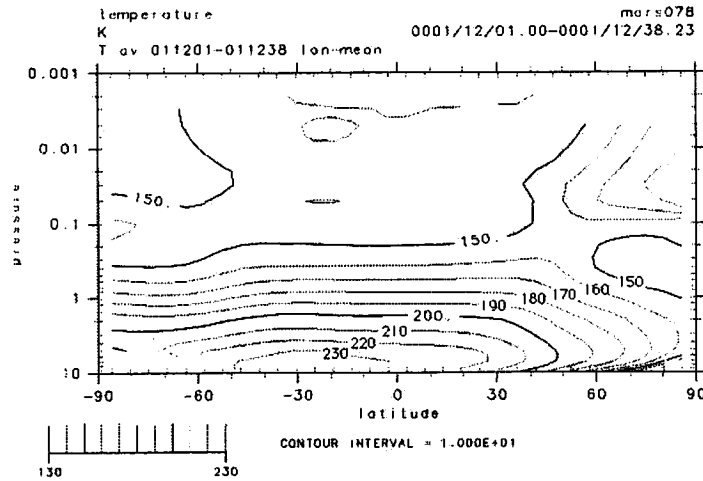


図 5 $L_s=330^\circ \sim 350^\circ$ における時間平均・経度平均した温度分布の計算結果。

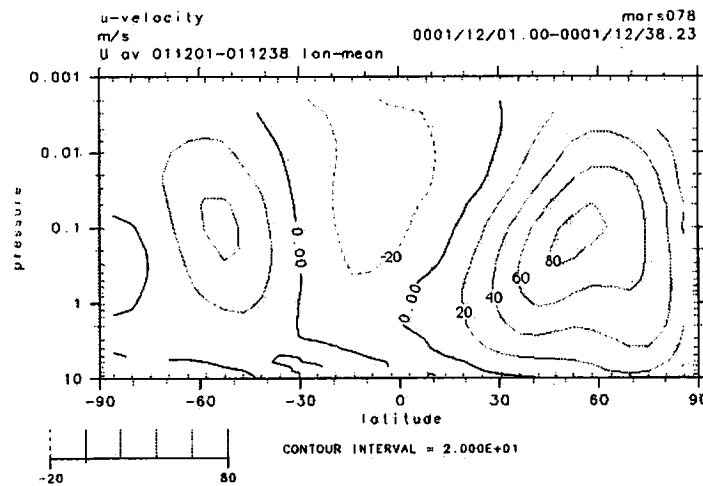


図 6 $L_s=330^\circ \sim 350^\circ$ における時間平均・経度平均した東西風分布の計算結果。

3.2 火星表面の光学的厚さの年間推移

$L_s=199.0^\circ \sim 202.7^\circ$ (北半球の秋) における時間平均した火星表面の光学的厚さ分布のモデルの計算結果を図 7 に示す。この分布は、Christensen et al. (1998) に掲載されている同時期のマーズグローバルサーベイヤーによる観測結果に定性的に非常に近いものが得られた。ここで光学的厚さの計算は、Takemura et al. (2000) に基づいている (以下の式)。

$$\tau = \frac{3Q_{ext}(r_d)}{4\rho_d r_d} \sum_{l=1}^{k_{max}} \frac{q_{ld}(l)\Delta p_l}{g}$$

ここで、 $q_{ld}(l)$ は第 l 層でのダストの質量混合比、 Δp_l は第 l 層での上下の境界の気圧差である。 $Q_{ext}(r_d)$ は消散効率因子で、ダスト半径 r_d によってきまる無次元の定数である。 $\rho_d=1.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $r_d=1.27 \mu\text{m}$ 、 $Q_{ext}(r_d)=2.729$ としている。

また、ダストの光学的厚さの年間推移を全球の表面気圧を 6.1mb に補正した光学的厚さのデータをとって見てみた。すると、 $L_s=246^\circ$ 及び $L_s=272^\circ$ (南半球の初夏、近日点前後) の 2 回に渡って南半球のクラルス水路付近 (図 1 の「2」にあたる場所) から光学的厚さが最大 2.3~2.7 に達する大規模なダストストームが発生した (図 8, 9)。これらのダストストームは発生から 2~4 週間で全球の光学的厚さを一様に大きくするもので、観測さ

れている全球規模の大ダストストームの発達過程と一致するものである。また、 $L_s=82^\circ$ （北半球の初夏）においても北半球のアルバ火山の南東で光学的厚さが最大 3 に達する大規模なダストストームが発生したが、このようなダストストームの発生は観測事実では見られない。

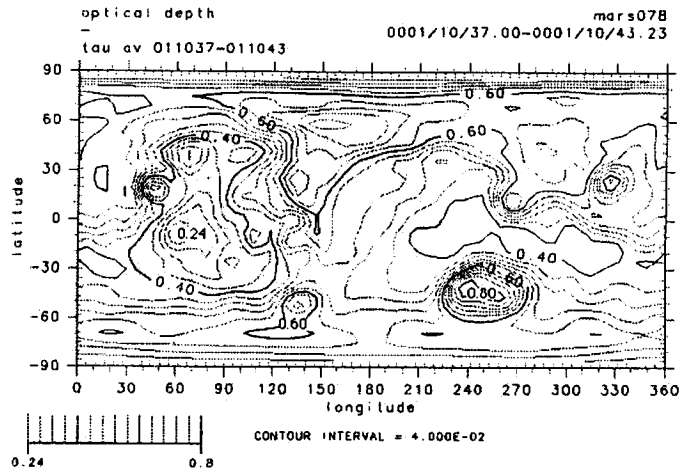


図 7 $L_s=199.0^\circ \sim 202.7^\circ$ における時間平均した火星表面の光学的厚さ分布のモデルの計算結果。

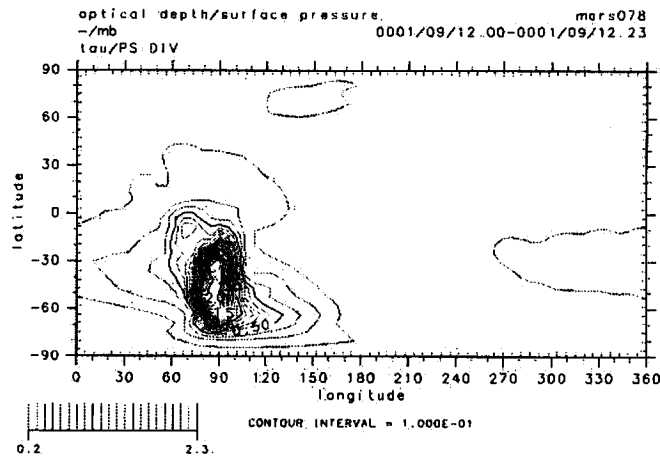


図 8 $L_s=246^\circ$ における、全球の表面気圧を 6.1mb に補正した光学的厚さ分布のモデルの計算結果。

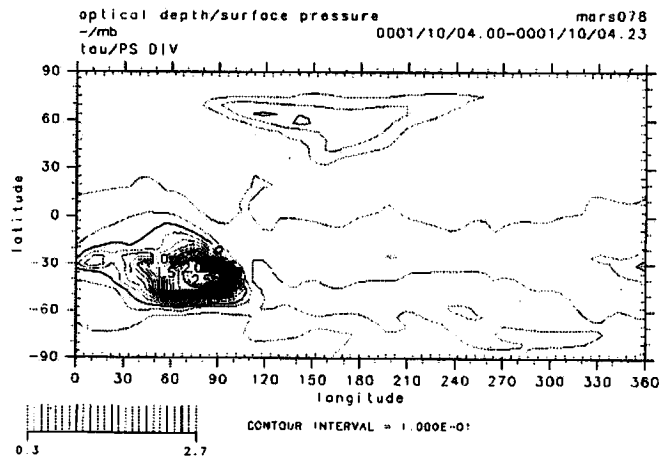


図 9 $L_s=272^\circ$ における、全球の表面気圧を 6.1mb に補正した光学的厚さ分布のモデルの計算結果。

3.3 バイキングで観測された傾圧波動のシミュレーション

このモデルではまだ大気中のCO₂の総量の年変化やCO₂の凝結・昇華過程が含まれていない。そのため、バイキング2号の着陸地点の最寄りのグリッドにおける表面気圧の年変化もほとんど変化がない(図10)。でも、秋から冬にかけての2~3日周期の傾圧不安定は観測結果と同様にほぼ同じ振幅で存在し、それはスペクトル解析の結果にも表れている(図11)。

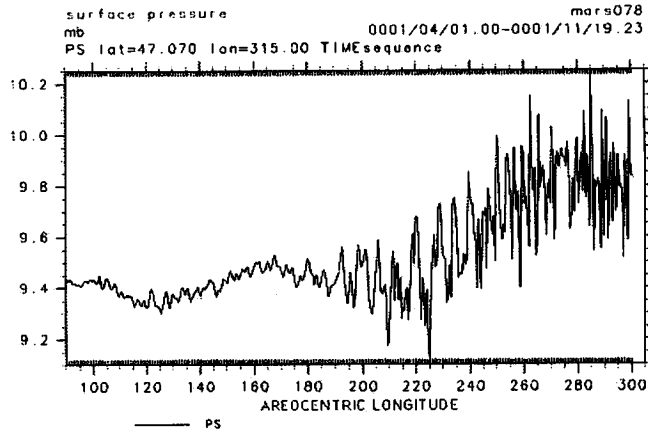


図10 $L_s=90^\circ \sim 310^\circ$ (北半球の夏至から地球で2月上旬頃にあたる季節まで)の間のバイキング2号の着陸地点に最も近いグリッド点におけるモデルの表面気圧の変動の計算結果。Barnes, (1981)の観測データに対応させて出力した。

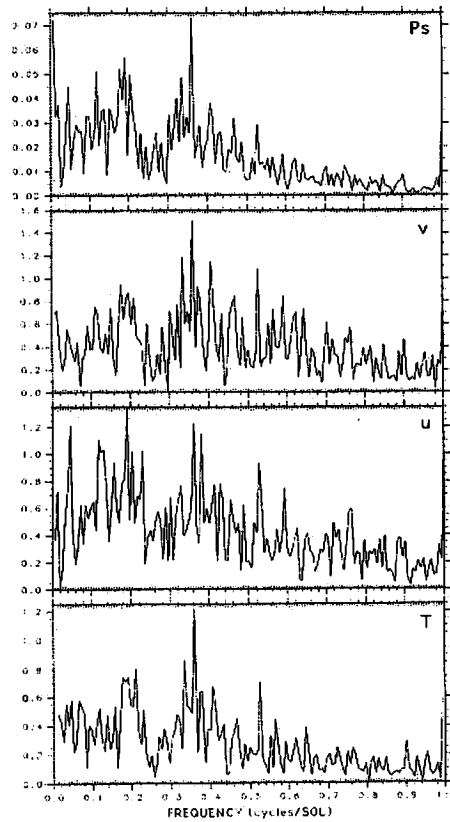


図11 $L_s=230^\circ \sim 310^\circ$ (地球で11月中旬~2月上旬に相当する季節)におけるバイキング2号の着陸地点に最も近いグリッド点の表面気圧、南北風、東西風、温度の数値計算データを1日より長い周期についてスペクトル解析した結果。どれも25日周期(0.4cycles/SOL)のあたりで卓越しているのがBarnes, (1981)の観測データの解析結果と一致している。

3.4 大気潮汐の振る舞い

第 1 章で述べた通り、火星大気には大きな振幅の熱潮汐波が存在する。バイキング 1 号及び 2 号の着陸地点に最も近いグリッド点で計算された地表面気圧の変動に対する 1 日潮と半日潮の振幅の季節変化を図 12 に示す。図 2 で既に示した観測データの解析と比較すると、半日潮は定性的に大気中のダスト濃度が濃くなる秋～冬で振幅が増大しているのが一致している（定量的には 10 分の 1 程度と小さいが）。ただこのモデルでは北半球の夏でも大規模なダストストームが生じてダストの濃度が濃くなっている時期があるので、1 日潮に関しては北半球の夏の振幅が観測のデータと比べて定性的に大きくなっている。

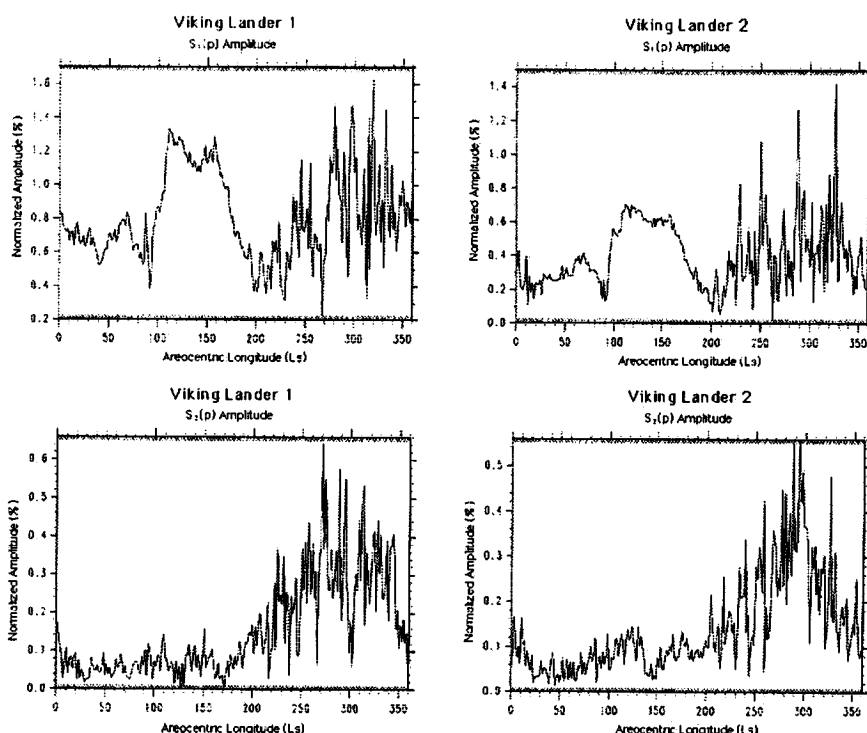


図 12 バイキング 1 号及び 2 号の着陸地点に最も近いグリッド点で計算された地表面気圧の変動に対する 1 日潮と半日潮の振幅の季節変化。

4. まとめと課題

本研究で用いたモデルは、地表面で 25m/s 以上の風が吹いた時にフラックスを用いてダストを巻き上げ、そうして大気中に巻き上がったダストが大気加熱に関わってくるものである。この巻き上げの条件で十分な量のダストを大気中に維持させることができ、比較的観測に近い温度分布や東西風分布を得ることができた。ただ、秋から冬にかけての北極域の温度分布は観測と食い違っている。これは極冠の生成過程が導入されていないためと思われる。今後これを導入することによっての改善が期待される。

ダストストームの生成・消滅に関する過程については、このモデルでは南半球の春から夏にかけて南半球のクラルス水路付近から 2 つの大規模なダストストームが発生し、ダストは 1~2 週間で南半球全体に拡がった後に赤道を越えて北半球にも拡がり、発生から 2~4 週間で全球の光学的厚さを一様に大きくした。これは観測されている全球規模の大ダストストームの発達過程とよく一致している。ただ、北半球の夏にもダストが南緯 60 度付近にまで達するくらいの大規模なダストストームの発生がモデルの中では見られるが、北半球においては春～夏に北極冠の上空に覆いかぶさるようなダストストームが観測されているものの、これほど大規模なものは観測では報告されていない。

熱潮汐に関しては、モデルの計算結果から得られた振幅は定量的には観測と比べて 1 日潮では少し、半日潮で

はかなり小さい。そして北半球の夏においてモデル内で大気中のダストの量が多い分、その時の 1 日潮の振幅が定性的に観測より大幅に大きくなっている。

以上の結果より、モデルの信憑性も含め、今後追求・改善すべき点が多くあるのが現状である。

参考文献

- Barnes J. R., 1981: Midlatitude Disturbances in the Martian Atmosphere: A Second Mars Year, *J. Atmos. Sci.*, 38, 225-234.
- Barnes, J. R., J. B. Pollack, R. M. Haberle, R. W. Zurek, C. B. Leovy, H. Lee, and J. Schaeffer, 1993: Mars atmospheric dynamics as simulated by the NASA/Ames general circulation model, 2, Transient baroclinic eddies, *J. Geophys. Res.*, 98, 3125-3148.
- Barnes, J. R., R. M. Haberle, J. B. Pollack, H. Lee, and J. Schaeffer, 1996: Mars atmospheric dynamics as simulated by the NASA/Ames general circulation model, 2, winter quasi-stationary eddies, *J. Geophys. Res.*, 101, 12753-12776.
- Conrath B. J., 1981: Planetary-Scale Wave Structure in the Martian Atmosphere, *Icarus*, 48, 246-255.
- Christensen P. R., D. L. Anderson, S. C. Chase, R. T. Clancy, R. N. Clark, B. J. Conrath, H. H. Kieffer, R. O. Kuzmin, M. C. Malin, J. C. Pearl, T. K. Roush, and M. D. Smith, 1998: Results from the Mars Global Surveyor Thermal Emission Spectrometer, *Science*, 279, 1692-1698.
- Haberle, R. M., J. B. Hollingsworth, J. L., R. M. Haberle, J. Barnes, a. f. c. Bridger, J. B., Pollack, H. Lee, and J. Schaeffer, 1996: Orographic control of storm zones on Mars, *Nature*, 380, 413-416. など
- Kahn, R. A., T. Z. Martin, R. W. Zurek, and S. W. Lee, 1992: The Martian dust cycle, *Mars*, 1017-1053
- Murphy, J., J. B. Pollack, R. M. Haberle, C. B. Leovy, O. B. Toon, and J. Schaeffer, 1995: Three-dimensional numerical simulation of Martian global dust storms, *J. Geophys. Res.*, 100, 26357-26376.
- Nakajima T., M. Tsukamoto, Y. Tsushima, A. Numaguti, and T. Kimura, 2000: Modeling of the radiative process in an atmospheric general circulation model, *Applied Optics*, 39, 4869-4878.
- Pollack, J. B., C. B. Leovy, P.W. Griman, and Y. Mintz, 1981: A Martian General Circulation Model experiment with large topography, *J. Atmos. Sci.*, 38, 3-29.
- Pollack, J. B., R. M. Haberle, J. Schaeffer, and H. Lee, 1990: Simulations of the general circulation of the Martian atmosphere, 1, Polar processes, *J. Geophys. Res.*, 95, 1447-1473.
- Pollack, J. R. Barnes, R. W. Zurek, C. B. Leovy, J. R. Murphy, H. Lee, and J. Schaeffer, 1993: Mars atmospheric dynamics as simulated by the NASA/Ames general circulation model, 1, the zonal-mean circulation, *J. Geophys. Res.*, 98, 3093-3124.
- Rader, D. J., 1990: Momentum slip correction factor for small particles in nine commongases, *J. Aerosol Sci.*, 21, 161-168.
- Takemura, T., H. Okamoto, Y. Maruyama, A. Numaguti, A. Higurashi and T. Nakajima, 2000: Global three-dimensional simulation of aerosol optical thickness distribution of various origins, *J. Geophys. Res.*, 105, 17853-17873.
- Wilson, R. J., and K. Hamilton, 1996: Comprehensive model simulation of thermal tides in the Martian atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, 53, 1290-1326.
- Zurek, R. W., 1982: Martian great dust storms: An update. *Icarus*, 50, 288-310.