# CCSR/NIES 火星 GCM の現状

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

## 1 はじめに

火星の大気は CO<sub>2</sub> (95.3%)を主成分としたもので、水は微量しか存在せず、大気圧は 6~10 hPa で推移している。地表面の温度は大体 150K(極冠域)~290K(南半球の夏の日中)の間 で推移し、大気が薄いため昼夜間の地表面の温度差も太陽直下域で平均 70~80K ほどに達する。

また火星大気の大きな特徴として,全球規模のダストストームの存在が挙げられる。全球規模 のダストストームは決まって火星の近日点に近い南半球の春から夏にかけての時期に発生し,そ の規模には年ごとの特徴が見られる(Liu et al., 2003 など)。

さらに微量ながら存在する  $H_2O$  の氷雲や水蒸気の分布も観測されている。氷雲は北半球の夏 の低緯度域,また冬の北極域に多く存在し,水蒸気は夏の極域に集中して存在する傾向がある (P earl et al., 2001; Smith, 2002 など)。

火星大気の研究のための火星 GCM の開発は 1960 年代に始まり, NASA/AMES, LMD/ AOPP, GFDL といった研究機関でこれまでになされている。本研究では, CCSR/NIES AGC M をベースに独自に開発中の火星 GCM の現地点での概要と, それから得られている結果を紹介 する。

#### 2 モデルの概要

CCSR/NIES AGCM 5.4g をベースとしており,水平分解能は T21 (グリッド間隔約 5.6°× 5.6°,赤道上で 333km),鉛直分解能は 33 層,モデル上端の高度は約 90km である。地形デー タはマースグローバルサーベイヤー (MGS) 搭載の MOLA による観測のものを,地表面アルベ ドと熱慣性のデータはいくつかの観測・解析結果を用いて Forget et al. (1999, 2001) により 作られた全球データを用いている。熱慣性とは地表面の熱容量と熱伝導率の積の平方根で,熱慣 性が 600[J/K m<sup>2</sup>s<sup>1/2</sup>]を超える高緯度の地域では氷極冠の存在を仮定して Larsen and Dahl-Jensen (2000) を参考に,それ以外の地域では Mellon (2001) を参考にして地表面の熱容量と 熱伝導率を求め、モデルに組み込んだ。

CO<sub>2</sub>極冠生成過程は Forget et al. (1998)をもとに導入している。すなわち,予報された大 気温度が凝結温度より小さくなった時に凝結が起こり,凝結した CO<sub>2</sub>は即座に地表まで落下す る。その際に,潜熱の解放,落下するドライアイスのポテンシャルエネルギーの解放,落下中の ドライアイスを暖めるのに要するエネルギーを考慮する。そして凝結した CO<sub>2</sub>の分だけ大気の CO<sub>2</sub>の総量が減少するように質量調整が行われる。

 $CO_2$ の放射効果について、 $15\mu$ m 吸収帯での効果は k-distribution 法を用いた Nakajima et al. (2000)のスキームを使用、 $550\sim770$  cm<sup>-1</sup>の波数領域を 9 つのサブチャネルに分けて導入している。さらに近赤外太陽光吸収による大気加熱率を、Lopez-Puetras and Lopez-Valverde (1995)の放射輸送モデルの結果をもとに Forget et al. (2003)で定めた簡略化された関数を用いて導入している。非局所熱力学的平衡 (non-LTE)の効果はこのモデルには含まれていない。

ダストの放射効果の導入も、Nakajima et al. (2000)のスキームを用いて行っている。ダスト

のパラメータは最新の火星ダストの研究結果に基づいて、複素屈折率は紫外~可視領域(波長5 $\mu$ m以下)はOckert-Bell et al. (1997)で求めた値を、5~17 $\mu$ mの波長域では Toon et al. (1977)のmontmorillonite219bの値を、17 $\mu$ m以上の長波長域は Forget (1998)を参考にした一定値を用いている。粒径分布は Markiewicz et al. (1999)で示された変形ガンマ関数(有効半径=1.71 $\mu$ m,有効分散=0.25)を用いている(図1)。

大気中のダストの分布は, Lewis et al. (2001)の "MGS Scenario" と定性的に一致するよう に与えている(図2)。これはLMD/AOPPの火星GCMでMGSの観測結果を再現するように導入 された季節・緯度・高度に依存する分布関数である。



図1: モデル内で放射効果の計算に用いたダストの複素屈折率の実部(左)と虚部(中),及び粒径分布(右)。



図2: モデル内の地表面でのダストの光学的厚さ(可視光領域)の季節-緯度分布。

### 3 結果

温度240K,地表面気圧8hPaの等温静止状態から2年間走らせて,2年目の結果を解析した。温度分布との計算結果をMGSによる観測結果と比較したものを図3に示す。特に両極の春と秋で極域の下層の温度が高めになる傾向があるものの,0.1mbより下の高度域では観測とよく整合する結果が得られている。また,図4に示した各季節の質量流線関数の計算結果では,北半球と夏と冬の時期において火星に特徴的な子午面循環の様子(夏極から冬極に向けて赤道をまたぐ大循環の存在)が示されている。図4で現れているように、北半球の冬の時期の方が北半球の夏の時期よりも循環が強いことは,他の火星GCMの結果からも示されている(Haberle et al., 1993; Forget et al., 1999; Richardson and Wilson, 2002; Takahashi et al., 2003)。その要因として,



図3: (上から順に)北半球の春分,夏至,秋分,冬至の前後の時期の時間平均・経度平均した温度分布 をモデルで計算した結果(左)と,それに対応するMGSの観測結果(Smith et al., 2003,右)。



図4: 北半球の春分(左上),夏至(右上),秋分(左下),冬至(右下)の質量流線関数[kg/s]をモデルで 計算した結果。

火星の離心率が大きく(0.093),また近日点が南半球の夏至の直前期に当たることに起因する太陽放射量の差異のほか,北半球から南半球に向けて上り坂になっている火星の地形の影響も大きいことが指摘されている(Richardson and Wilson, 2002)。

このモデルでバイキング2号の観測地点に最も近いグリッドにおける日平均地表面気圧の年間 変化の計算結果と、バイキング2号による観測結果を図5に示す。Ls=0°(北半球の春分)前後 で気圧が少し低くなり気味だが、観測されている年間の気圧の変動(年平均の約25%)は再現 されている。また、観測で北半球の秋~冬にかけて顕著に見られる傾圧不安定波が原因と考えら れる(Barnes, 1981)振動数の大きな振動も、観測結果とほぼ整合した振幅で再現されている。

図6は、モデル内での地表面のCO<sub>2</sub>極冠の量の季節-緯度分布である。極域に降り積もる極冠 による地表面高度の年間変化は、MGS-MOLAでの観測によると両極域で1~1.5m程度となって いる (Smith et al., 2001)。このモデルの結果では、両極とも最も極冠が厚くなる春分の頃に は経度平均して1000~1100 [kg/m<sup>2</sup>] 程度の量のCO<sub>2</sub>極冠が存在する。CO<sub>2</sub>極冠の密度を910 [kg/m<sup>3</sup>] (Smith et al., 2001)とすると、この時期の極域での極冠の厚さは経度平均1.1~1.2m となり、観測事実とほぼ一致していると言える。



図5: バイキング2号着陸地点に最も近いグリッドにおける日平均地表面気圧の年間変化の計算結果(左) とバイキング2号の観測による日平均地表面気圧の変化(右)。



図6: モデル内での地表面のCO2極冠の量[kg/m2]の季節-緯度分布。

#### 4 まとめ

本研究では、CCSR/NIES AGCM をベースとした火星GCMの現在までの開発状況をまとめた。前々回の研究集会(黒田ら,2002)で発表したモデルに、さらにCO<sub>2</sub>極冠の生成過程,CO<sub>2</sub>の近赤外太陽光吸収の効果,観測結果に基づいた火星のダストパラメータが導入された。その結果,温度分布においてはT21の分解能でMGS-TESの観測結果とよく整合した結果が得られるようになった。地表面の気圧の年間変化,傾圧不安定によるものと思われる気圧振動,両極に降り積もるCO<sub>2</sub>極冠の量も,ほぼ観測事実通りに再現された。

また、本研究では導入していないが、この火星 GCM に CO<sub>2</sub>ドライアイス雲や H<sub>2</sub>O 氷雲の放 射効果を導入した研究にも取り組んでいる(酒井, 2004)。今後はそれに加え、CO<sub>2</sub> 及びダスト の放射スキームのさらなる改善を図ると共に、本研究では導入しなかったダストの巻き上げ過程 を再導入し、各種ダストストームの再現やダストの循環の詳しい研究を行っていく予定である。

#### 参考文献

Barnes J. R., 1981: Midlatitude Disturbances in the Martian Atmosphere: A Second Mars Year, J. Atmos. Sci., 38, 225-234,

- Forget F, M. Angelates I Coll, Y. Wanherdrick, F. Hourden, S. Lewis, P.Read, F. Taylor, M. Lopez-Valverde and M. Lopez-Puertas, 2003: Modeling of the General Circulation with the LMD-AOPP-IAA GCM: Update on Model Design and Comparison with Observations, Abstract of "Mars atmosphere modelling and observations", Granada, Spain, 6 pp.
- Forget F., Y. Wanherdrick and S.R. Lewis, 2001: Validation of the Mars General Circulation Model and Climate Database with new spacecraft observations, European Space Agency Technical Report, 22 pp.
- 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 80km, *J. Geophys. Res.* **104**, 24155-24175.

Forget F, F. Hourdin and O. Talagrand, 1998: CO, Snowfall on Mars: Simulation with a General Circulation Model, Icarus 131, 302-316.

- Haberle, R. M., J. B. 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.
- 黒田剛史,高橋正明,橋本尚久,2002: CCSR/NIES AGCM を用いた火星大気シミュレーション,「地球流体力学研究集会 惑星大気の力 学」研究集会報告,九州大学応用力学研究所,43-52.

Larsen J. and D. Dahl-Jensen, 2000: Interior Temperatures of the Northern Polar Cap on Mars, Icarus 144, 456-462.

Lewis S. R., M. Collins and F. Forget, 2001: Mars Climate Database v3.0 Detailed Design Document, European Space Agency Technical Report, 29 pp.

Liu J. and M. I. Richardson, 2003: An assessment of the global, seasonal, and interannual spacecraft record of Martian climate in the Thermal infrared, *J. Geophys. Res.* **108**(E8), 10.1029/2002JE001921.

- Lopez-Puertas M. and M. A. Lopez-Valverde, 1995: Radiative Energy Balance of CO<sub>2</sub> Non-LTE Infrared Emissions in the Martian Atmosphere, *Icarus* **114**, 113-129.
- Markiewicz W. J., R. M. Sablotny, H. U. Keller, N. Thomas, D. Titov and P. H. Smith, 1999: Optical properties of the Martian aerosols as derived from Imager for Mars Pathfinder midday sky brightness data, *J. Geophys Res.* **104**, 9009-9017.
- Mellon M. T., 2001: Thermal Inertia and Rock Abundance, Abstract of "Exploring Mars with TES: A Data User's Workshop", Tempe, Arizona, 6 pp.
- 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.
- Ockert-Bell M. E., J. F. Bell III, J. B. Pollack, C. P. McKay and F. Forget, 1997: Absorption and scattering properties of the Martian dust in the solar wavelengths, J. Geophys. Res. 102, 9039-9050.
- Pearl J. C., M. D. Smith, B. J. Conrath, J. L. Bandfield and P. R. Christensen, 2001: Observations of Martian ice clouds by the Mars Global Surveyor Thermal Emission Spectrometer: The first Martian year, J. Geophys. Res. 106, 12325-12338.
- Richardson M. I. and R. J. Wilson, 2002: A topographically forced asymmetry in the martian circulation and climate, Nature 416, 298-301.

酒井大輔,2004:GCMを用いた火星のダスト,ドライアイス雲,水収支過程に関する研究,東京大学修士論文.

- Smith M. D., B. J. Conrath, J. C. Pearl and P. R. Christensen, 2003: TES Instrument and Thermal Structure Observations, Abstract of "Mars atmosphere modelling and observations", Granada, Spain, 4 pp.
- Smith M. D., 2002: The annual cycle of water vapor on Mars as observed by the Thermal Emission Spectrometer, J. Geophys. Res., **107**(E11), 10.1029/2001JE001522.
- Smith D. E., M. T. Zuber and G. A. Neumann, 2001: Seasonal Variations of Snow Depth on Mars, Science 294, 2141-2146.
- Takahashi Y. O., H. Fujiwara, H. Fukunishi, M. Odaka, Y. Hayashi and S. Watanabe, 2003: Topographically induced north-south asymmetry of the meridional circulation in the Martian atmosphere, J. Geophys. Res. 108(E3), 10.1029/2001JE001638.
- Toon O. B., J. B. Pollack and C. Sagan, 1977: Physical Properties of the Particles Composing the Martian Dust Storm of 1971-1972, Icarus 30, 663-696.