

101 : 103 : 110 : 504 (気象力学 ; 大気大循環 ; 惑星気象 ; 計算技術)

## 4. 惑星大気モデリング—探査・系外惑星をにらんで

高橋 芳幸\*

### 1. はじめに

惑星大気の研究において惑星探査が決定的な役割を果たしてきたことは間違いないが、同時に数値モデルを用いた研究が古くから開始されており、探査の歴史と合わせて進展してきた。

例えば火星の大気大循環計算は、UCLAの地球大気大循環モデルを基にして1960年代に始められていた(Leovy and Mintz 1969)。その後1990年代後半以降になると、NASAやESAによる火星探査(Mars Global Surveyor, Mars Express等)の展開と合わせて、米国ではLeovy and Mintzの研究を継続したNASA Ames Research Centerのグループ(Haberle *et al.* 1999など)に加えて、GFDL(Geophysical Fluid Dynamics Laboratory)のグループ(Wilson and Hamilton 1996など)、欧州ではLMD(Laboratoire de Météorologie Dynamique)とオックスフォード大学のグループ(Forget *et al.* 1999など)によって火星大気モデルの開発とそれを用いた研究が行われるようになった。日本においても複数のグループで火星の大気大循環計算が実施されてきている(Takahashi *et al.* 2003; Kuroda *et al.* 2005; Ogohara and Satomura 2008)。他方2000年代には、大循環だ

けでなく雲解像モデルを惑星条件で用いた、惑星に比べて小さなスケールの循環の研究も各国で行われるようになってきた(Odaka *et al.* 2001; Toigo and Richardson 2002)。このようなモデル研究は火星のみならず他の惑星、特に地球型惑星や土星の衛星のタイタンに対しても展開されてきている。

これらのモデルは現実の惑星大気の構造のいくつかを表現することに成功し、その結果として大気の循環構造や擾乱についての多くの知識をもたらした。また近年では、少なくとも火星大気に対しては、比較的蓄積が大きくなってきた観測データを用いたデータ同化も行われるようになってきている(Lewis *et al.* 2007; Hoffman *et al.* 2010; Lee *et al.* 2011)。また、観測からはあまり情報の得られていない惑星の古気候や、系外惑星大気的气象・気候を調べるためにもモデルは使われるようになってきている。さらにモデルは惑星探査計画の設計においても利用されるようになった。そこで本講演では、近年の惑星大気モデリングについて、特に地球の次に詳細に観測されていると言われる火星を中心に紹介する。

### 2. 惑星大気モデルの概要

惑星大気の数値モデルは、金星、火星等の地球型惑星のように惑星半径に比べて薄い大気を扱う際や、木星型惑星であってもその表層の大気循環に注目する際には、ほとんどの場合に地球大気の研究に用いられて

---

\* 神戸大学大学院理学研究科、

yot@gfd-dennou.org

© 2018 日本気象学会

いるモデルを改変して構築されてきた。そのため惑星大気モデルの力学過程は概ね地球大気で用いられているものと同じである。つまり、支配方程式系は大循環モデルでは主に薄い大気の近似をしたプリミティブ方程式系であり、領域モデルでは完全圧縮系、準圧縮系、非弾性系が用いられている。

惑星大気モデルと地球大気モデルとの違いは主に物理過程であり、その中でも放射過程と物質循環に関わる過程だろう。惑星によって大気の主成分は異なり、またそれぞれにおいて熱構造、循環構造の決定に重要な微量成分は異なる。各惑星で問題となる微量成分としては、火星のダスト、金星の  $\text{H}_2\text{SO}_4$  や未だ正体が特定されていない雲、木星の水蒸気や  $\text{CH}_4$  などの炭化水素系の物質が挙げられる。そのため、放射伝達の基礎方程式は普遍的なものであるとしても、地球大気の計算に用いられている気体・エアロゾルの光学パラメータを必ずしもそのまま惑星大気の放射伝達計算で用いることはできず、通常、各惑星大気に合わせて放射パラメータが用意される。

また各惑星に重要な物質の分布の推定には、それぞれに応じた物理過程が必要となる。例えば火星のダストに関しては、地球のダスト研究に基づいて、地表応力の関数としてダストの巻き上げ・放出量が定式化されているが、それに加えて定常的に大気中に存在するダストを維持するための巻き上げ過程として、塵旋風による巻き上げをモデル化したパラメタリゼーション (Newman *et al.* 2002a など) を導入することが通例となっている。これは火星において塵旋風が実際に多数観測されている事実に基づいて、地球における役割

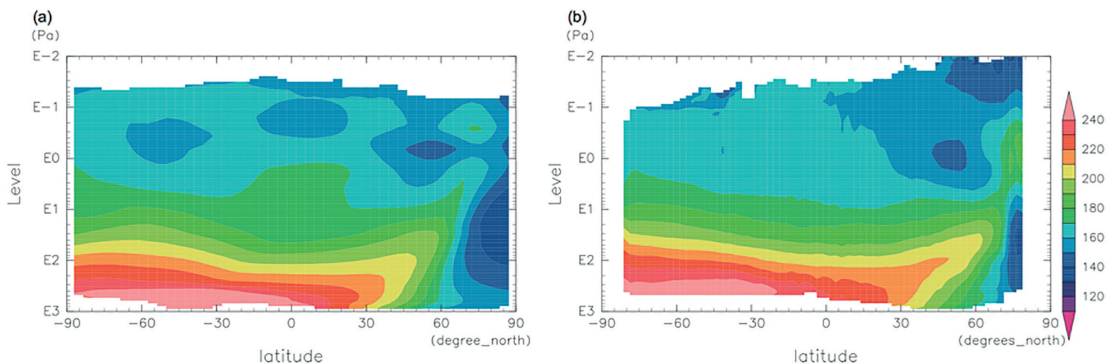
以上に塵旋風が重要視されているためである。

### 3. 火星大気モデルの計算例

ここで我々のグループで構築してきた火星大気モデルの結果の一例を示す。第1図に地球流体電脳倶楽部有志で構築した惑星大気大循環モデル DCPAM (<http://www.gfd-dennou.org/arch/dcpam/> 2018年1月9日閲覧) を火星条件で走らせた結果得られた東西平均温度分布の一例を示す。比較のために観測結果も示している。このモデルはプリミティブ方程式系をスペクトル変換法で解く力学過程に、物理過程として乱流混合過程 (Mellor and Yamada (1982) level 2.5)、火星大気用に構築した放射モデル、土壌熱伝導モデル、大気主成分である  $\text{CO}_2$  の凝結・昇華過程を取り入れたものである。このモデルに観測結果を理想化したダスト分布を与えて計算を行った。我々のモデルでは季節、緯度、高度によっては10 K程度のバイアスがあり、これは我々よりも開発の進んでいる他の研究機関による火星大気モデルより大きいかもしれない。それでも観測される平均的な温度分布の特徴をおおむね表現することができている。

### 4. 惑星探査への貢献

近年では惑星大気の数値モデルは惑星探査計画の設計のためにも使われるようになってきている。そのような例の中で、ここではLMDによって構築された Mars Climate Database (Lewis *et al.* 1999) と我々のグループで行っている、国内の工学・理学研究者で検討中の次期火星探査に向けた火星表層環境評価の活動を



第1図 火星大気の北半球の冬期における東西平均温度分布：(a) DCPAM を用いて T31L36 の解像度で実施した火星計算，(b) Mars Reconnaissance Orbiter 搭載 Mars Climate Sounder による観測。示している値は、各緯度における地方時15時の温度の平均値である。

紹介する。

#### 4.1 Mars Climate Database

Mars Climate Database (MCD) は、1990年代後半から再び精力的に行われるようになった火星探査において、探査計画の設計や工学的な機器設計および理学的な観測結果の解析に使用することを旨として、ESA および CNES (Centre National D'Etudes Spatiales) の支援の下で構築された、火星全球の温度、気圧、風速などのデータベースである。このデータベースの実体は、LMD とオックスフォード大学のグループで構築された火星大気大循環モデルの計算結果を統計処理したものである。90年代後半以降の火星探査熱の再燃に先立って作成が開始されたこともあり、これらのモデル計算には観測データの同化は行われていない。しかし、当時までに得られていた観測結果との比較を通してその質を評価した上で、火星の理学・工学研究において広く用いられている。実際、このデータベースは世界200以上の理学・工学グループで利用されており、火星探査の設計と、それらによって得られたデータをより深く使用する基盤として機能し続けている。

#### 4.2 日本による次期火星探査のための表層環境評価

MCD が火星探査計画の設計に利用されてきたことを述べたが、同種の試みを我々のグループでも行っている。2014年現在、JAXA および大学等の工学・理学研究者によって、日本による火星着陸探査計画が検討されている。我々のグループではこの検討において、着陸機・ローバー（探査車）の設計の為に必要となる火星表層環境情報を、数値モデルを用いて提供することを目指しており、一部分は既にデータを提供し使用されている。

この活動では我々は、大循環モデル・雲解像モデル・LES モデルの三つのモデルを用いて、それぞれ異なる時空間スケールの現象をカバーすることを目指している。大循環モデルは既に述べた DCPAM であり、雲解像モデルは CReSS (Tsuboki and Sakakibara 2002) を基に火星条件に適用したもの、LES モデルは SCALE-LES (西澤ほか 2013; Sato *et al.* 2014) を火星条件に適用したものである。現在までに大循環モデルの計算結果を基に推定した着陸候補地点の気温、風速、気圧を探査機設計グループに提供しており、熱設計などに利用されている。他方、SCALE-LES モデルで計算した結果は火星飛行機設計グルー

プに提供され、火星大気中の小規模擾乱・乱流が飛行に及ぼす影響の推定に利用されている。現在は CReSS に DCPAM の火星放射モデルを導入した領域モデルの構築を急いでおり、完成次第、着陸候補地点周辺の局所的な地形の起伏に伴う局地循環の効果も考慮した上で環境評価データを探査機設計グループに提供する予定である。

### 5. 惑星の古気候と系外惑星

惑星大気循環モデルは近年、観測からはなかなか情報が得られない惑星の古気候や系外惑星大気の研究にも使われるようになってきた。例えば地形に見られる流水地形に基づきかつては温暖湿潤だったと考えられている火星は、どういった機構でその表層環境を維持したかが古くからの未解明問題である。歴史的には鉛直1次元モデルを用いた放射対流平衡の議論に基づき、大気の主成分である CO<sub>2</sub> による温室効果、CO<sub>2</sub>凝結による潜熱加熱の寄与、凝結によって生じる CO<sub>2</sub> 氷雲による放射効果が議論されてきた (たとえば Pollack *et al.* 1987; Kasting 1991; Forget and Pierrehumbert 1997; 光田 2007)。しかし近年では大気大循環モデルを用いて古気候を調べる研究が行われるようになってきている (Forget *et al.* 2013 など)。これらの研究では、鉛直1次元計算で仮定せざるを得なかった雲水量や雲量がモデル内で決定され、また自転軸の傾きやそれに伴う季節変化などの要因も考慮される。それらの研究の結果として近年明らかになったことは、大気量を増やし、CO<sub>2</sub>氷雲の放射効果を考慮しても、大気大循環モデル計算では全球が雲で覆われるわけではなく、一火星年平均で表面温度が 273 K を超えることはなさそうなことである。このような研究は新しい古火星気候の描像を描き出しつつある。

また系外惑星の研究にも大気大循環モデルが用いられ、液体の水の存在可能性や系外惑星が持ちうる広いパラメータ範囲における大気循環構造などが調べられるようになってきた。例えば太陽系から 20 光年ほどの距離にある恒星 Gliese 581 を公転する惑星 Gliese 581 c, d (新しい観測によると Gliese 581 d は誤検出であった可能性が指摘されている。Robertson *et al.* (2014) を参照) について、大気大循環モデルを用いてその表面における液体の水の存在可能性が議論されている (Wordsworth *et al.* 2011; Leconte *et al.* 2013)。これらの研究も、従来鉛直1次元モデルを用いて行われてきた研究の大気大循環モデルを用いた素

直な拡張であるが、系外惑星として検出されやすい「同期回転惑星」(恒星の近傍を公転する公転と自転が同期した惑星)で特徴的な永続的な昼半球と夜半球の対比などの空間非一様性を直接表現できる利点がある。これらの惑星については、恒星からの距離や公転周期、恒星から受け取る放射のスペクトルなどの情報は得られており、理論的考察から公転と自転が同期していることが推定されているものの、惑星質量の正確な値や大気の組成、大気量、地形や海陸分布などはわからない。そのため実際に行われている計算は、それらわからないパラメータを仮定したものであり、それらの惑星大気の循環構造や表層環境を正確に推定できるわけではない。しかし限られた範囲とは言え、液体の水が存在できる条件が示され、その状態の気候維持メカニズムが議論されている。

## 6. 惑星大気モデルの困難

ここまで火星大気を中心にして惑星大気モデルが概ね成功を取めてきた側面について述べてきたが、ここで惑星大気モデリングが直面してきた困難の例を三つ示す。

一つ目の例は火星でしばしば発生することが知られている惑星規模ダストストームの表現についてである。火星大気中には常にある程度の量のダストが浮遊しており、同時に様々な規模のダストストームが発生することが知られている (Read and Lewis 2004など)。また発生するダストストームのうちのいくつかは、時に惑星全球を覆うようなものに発達する。しかし、これら惑星規模ダストストームは毎年発生するわけではなく、その発生に年々変動があることが知られている。この物理機構を明らかにするべく、これまでに火星大気大循環モデルを用いてダストストームの発生とダストの循環を再現しようとする試みも行われてきた (たとえば Newman *et al.* 2002b; Basu *et al.* 2004; Kahre *et al.* 2006)。これらは大気中のダスト量の季節変化を大まかに表現することができるようにチューニングされ得るが、しかし惑星規模ダストストームの年々変動はほとんど表現することができていない。例外的にダスト巻き上げパラメタリゼーションにおけるパラメータを非常に上手くチューニングすることで年々変動を表現することができるとする報告もあるが (Basu *et al.* 2006)、火星境界層の観測例も少なく、ダスト巻き上げパラメタリゼーションの検証も十分になされていない現状では、実際の火星における

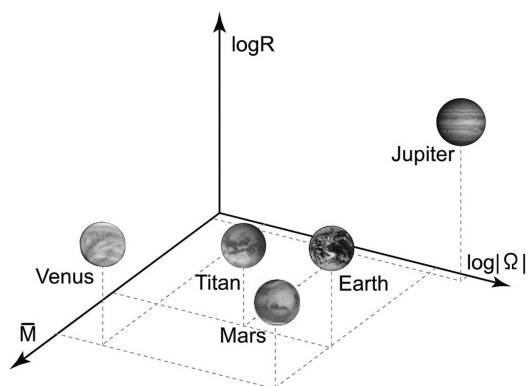
年々変動を表現できているのかどうかはよくわからない。

二つ目の例は、金星大気スーパーローテーションの表現についてである。金星大気中のスーパーローテーションは、大循環モデルにニュートン冷却による熱強制を与えることで長らく調べられてきた (たとえば Yamamoto and Takahashi 2003)。これらの研究では、モデルは金星で観測される程度の風速を持ったスーパーローテーションを表現し、そのスーパーローテーションのモデル内でのメカニズムが議論された。しかし、これらの研究では、仮定された熱強制が大きく、子午面循環の効果が過大評価されている可能性が指摘されていた (たとえば Takagi and Matsuda 2007; Hollingsworth *et al.* 2007)。他方、太陽加熱の日変化成分により励起される熱潮汐波に注目した研究 (Takagi and Matsuda 2007) により、熱潮汐波が大きな東西風加速の原因となることも示されたが、子午面循環による寄与との関係が明らかではなかった。これに対して近年は金星大気の放射モデルが構築され、それをを用いた大気大循環計算が実施されるようになってきている。しかしそのようなモデルを用いた金星大気大循環計算で表現されるスーパーローテーションは、特に下層大気中の風速が観測される風速に達しないことが報告されており、現状では大気大循環の基本構造である東西風分布の特徴も十分に表現できていない (たとえば Lebonnois *et al.* 2010)。そして、観測結果の不足もあって実際の金星大気スーパーローテーションのメカニズムが明らかになっていない現段階では、モデルの結果の検証も容易ではない。

三つ目の例は、上に述べた金星大気スーパーローテーションの例に関係しているが、モデルの力学過程により密接にかかわる問題である。各研究機関で構築された金星大気大循環モデルを持ち寄り、共通したニュートン冷却に基づく熱強制、レイリー摩擦に基づく地面摩擦、そして定数係数の乱流拡散を与え、金星大気のパラメータで計算を実施する相互比較実験が行われている (Lebonnois *et al.* 2013)。しかし条件を合わせた実験でありながら、各モデルで得られた東西平均東西風の構造は大きく異なることが報告されている。

## 7. まとめ

惑星大気モデルは惑星探査の展開とも合わせて主に地球大気モデルを改変して構築され、研究に用いられ



第2図 惑星半径 ( $R$ ), 自転速度 ( $\Omega$ ), 平均分子量 ( $M$ ) を軸とするパラメータ空間内の各惑星。

できた。それらはいくつかの惑星の大気に対しては、その温度構造や循環の基本構造の特徴を表現することに成功し、観測だけからはわからない現象の物理機構を明らかにするために用いられており、また探査計画の設計にも用いられるようになってきている。さらにそれらモデルは、観測から情報を得ることが非常に難しい古気候や系外惑星の気候・表層環境の推定に用いられ、研究分野に新たな展開をもたらしている。

しかしながら既に述べたように、現状のモデルは火星の惑星規模ダストストームの年々変動を表現することはできていないし、金星大気循環に関してはその基本的な構造であるスーパーローテーションも十分に表現できていない。これらの事例は、地球よりも日変化の大きな火星における境界層乱流や、自転が地球に比べて非常に遅い金星における大規模循環などに関して、その物理機構と大気モデルの振る舞いが十分に理解されていないことを反映しているのだろう。特に金星大気相互比較における東西平均風構造の大きな差異は、地球大気モデルに基づいて惑星大気モデルを構成するにあたって、力学的枠組みにおいてさえ未知の要素が残っていることを示唆している。これらの課題の解決には、JAXAで運用を続けている金星探査機「あかつき」をはじめとした太陽系内外の惑星の探査との連携や、大循環モデル、雲解像モデル、LESモデルといった異なる時空間スケールを扱うモデルを組み合わせた研究によって、様々な時空間スケールの運動および物理機構の理解とそのモデル化および計算結果を検証していくことが必要だろう。その結果として地球、太陽系内惑星、系外惑星を含めて任意の惑星の

大気をより良く表現するモデルを構築することができれば、惑星の表層環境、気候、大気循環構造を、例えば惑星半径、自転角速度、大気組成といったパラメータの関数として整理する(第2図)といった形の理解を構築していくことができるかもしれない。

#### 参考文献

- Basu, S., M. I. Richardson and R. J. Wilson, 2004: Simulation of the Martian dust cycle with the GFDL Mars GCM. *J. Geophys. Res.*, **109**, doi:10.1029/2004JE002243.
- Basu, S., J. Wilson, M. Richardson and A. Ingersoll, 2006: Simulation of spontaneous and variable global dust storms with the GFDL Mars GCM. *J. Geophys. Res.*, **111**, doi:10.1029/2005JE002660.
- Forget, F. and R. T. Pierrehumbert, 1997: Warming early Mars with carbon dioxide clouds that scatter infrared radiation. *Science*, **278**, doi:10.1126/science.278.5341.1273.
- Forget, F., F. Hourdin, R. Fournier, C. Hourdin, O. Talagrand, M. Collins, S. R. Lewis, P. L. Read and J.-P. Huot, 1999: Improved general circulation models of the Martian atmosphere from the surface to above 80 km. *J. Geophys. Res.*, **104**, doi:10.1029/1999JE001025.
- Forget, F., R. Wordsworth, E. Millour, J.-B. Madeleine, L. Kerber, J. Leconte, E. Marcq and R. M. Haberle, 2013: 3D modelling of the early martian climate under a denser CO<sub>2</sub> atmosphere: Temperatures and CO<sub>2</sub> ice clouds. *Icarus*, **222**, doi:10.1016/j.icarus.2012.10.019.
- Haberle, R. M. *et al.*, 1999: General circulation model simulations of the Mars Pathfinder atmospheric structure investigation/meteorology data. *J. Geophys. Res.*, **104**, doi:10.1029/1998JE900040.
- Hoffman, M. J. *et al.*, 2010: An ensemble Kalman filter data assimilation system for the martian atmosphere: Implementation and simulation experiments. *Icarus*, **209**, doi:10.1016/j.icarus.2010.03.034.
- Hollingsworth, J. L., R. E. Young, G. Schubert, C. Covey and A. S. Grossman, 2007: A simple-physics global circulation model for Venus: Sensitivity assessments of atmospheric superrotation. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, doi:10.1029/2006GL028567.
- Kahre, M. A., J. R. Murphy and R. M. Haberle, 2006: Modeling the Martian dust cycle and surface dust reservoirs with the NASA Ames general circulation model. *J. Geophys. Res.*, **111**, doi:10.1029/2005JE002588.
- Kasting, J. F., 1991: CO<sub>2</sub> condensation and the climate of early Mars. *Icarus*, **94**, 1-13.

- Kuroda, T., N. Hashimoto, D. Sakai and M. Takahashi, 2005: Simulation of the Martian atmosphere using a CCSR/NIES AGCM. *J. Meteor. Soc. Japan*, **83**, 1-19.
- Lebonnois, S., F. Hourdin, V. Eymet, A. Cresspin, R. Fournier and F. Forget, 2010: Superrotation of Venus' atmosphere analyzed with a full general circulation model. *J. Geophys. Res.*, **115**, doi:10.1029/2009JE003458.
- Lebonnois, S. *et al.*, 2013: Model of Venus atmosphere. Towards Understanding the Climate of Venus (Bengtsson L. *et al.* eds.), ISSI Sci. Rep. Ser. 11, Springer, 129-156.
- Lecante, J., F. Forget, B. Charnay, R. Wordsworth, F. Selsis, E. Millour and A. Spiga, 2013: 3D climate modeling of close-in land planets: Circulation patterns, climate moist bistability, and habitability. *Astron. Astrophys.*, **554**, doi:10.1051/0004-6361/201321042.
- Lee, C., W. G. Lawson, M. I. Richardson, J. L. Anderson, N. Collins, T. Hoar and M. Mischna, 2011: Demonstration of ensemble data assimilation for Mars using DART, MarsWRF, and radiance observations from MGS TES. *J. Geophys. Res.*, **116**, doi:10.1029/2011JE003815.
- Leovy, C. and Y. Mintz, 1969: Numerical simulation of the atmospheric circulation and climate of Mars. *J. Atmos. Sci.*, **26**, 1167-1190.
- Lewis, S. R., M. Collins, P. L. Read, F. Forget, F. Hourdin, R. Fournier, C. Hourdin, O. Talagrand and J.-P. Huot, 1999: A climate database for Mars. *J. Geophys. Res.*, **104**, doi:10.1029/1999JE001024.
- Lewis, S. R., P. L. Read, B. J. Conrath, J. C. Pearl and M. D. Smith, 2007: Assimilation of thermal emission spectrometer atmospheric data during the Mars Global Surveyor aerobraking period. *Icarus*, **192**, 327-347.
- Mellor, G. L. and T. Yamada, 1982: Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys.*, **20**, doi:10.1029/RG020i004p00851.
- 光田千紘, 2007: 放射過程によって調節された二酸化炭素氷雲による古火星大気の温室効果. 北海道大学理学研究科博士論文.
- Newman, C. E., S. R. Lewis, P. L. Read and F. Forget, 2002a: Modeling the Martian dust cycle 1. Representations of dust transport processes. *J. Geophys. Res.*, **107**, doi:10.1029/2002JE001910.
- Newman, C. E., S. R. Lewis, P. L. Read and F. Forget, 2002b: Modeling the Martian dust cycle 2. Multianual radiatively active dust transport simulations. *J. Geophys. Res.*, **107**, doi:10.1029/2002JE001920.
- 西澤誠也, 佐藤陽祐, 八代 尚, 宮本佳明, 吉田龍二, 富田浩文, Team SCALE, 2013: 広領域・高解像度実験のための気象 LES モデルの開発. *ながれ*, **32**, 149-152.
- Odaka, M., K. Nakajima, M. Ishiwatari and Y.-Y. Hayashi, 2001: A numerical simulation of thermal convection in the Martian lower atmosphere with a two-dimensional anelastic model. *Nagare Multimedia*, 2001, <http://www2.nagare.or.jp/mm/2001/odaka/index.htm> (2018年1月9日閲覧).
- Ogohara, K. and T. Satomura, 2008: Northward movement of Martian dust localized in the region of the Hellas Basin. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, doi:10.1029/2008GL034546.
- Pollack, J. B., J. F. Kasting, S. M. Richardson and K. Poliakov, 1987: The case for a wet, warm climate on early Mars. *Icarus*, **71**, 203-224.
- Read, P. L. and S. R. Lewis, 2004: The Martian Climate Revisited: Atmosphere and Environment of a Desert Planet. Springer, 326pp.
- Robertson, P., S. Mahadevan, M. Endl and A. Roy, 2014: Exoplanet detection. Stellar activity masquerading as planets in the habitable zone of the M dwarf Gliese 581. *Science*, **345**, doi:10.1126/science.1253253.
- Sato, Y., S. Nishizawa, H. Yashiro, Y. Miyamoto and H. Tomita, 2014: Potential of retrieving shallow-cloud life cycle from future generation satellite observations through cloud evolution diagrams: A suggestion from a large eddy simulation. *SOLA*, **10**, doi:10.2151/sola.2014-003.
- Takagi, M. and Y. Matsuda, 2007: Effects of thermal tides on the Venus atmospheric superrotation. *J. Geophys. Res.*, **112**, doi:10.1029/2006JD007901.
- Takahashi, Y. O., H. Fujiwara, H. Fukunishi, M. Odaka, Y.-Y. Hayashi and S. Watanabe, 2003: Topographically induced north-south asymmetry of the meridional circulation in the Martian atmosphere. *J. Geophys. Res.*, **108**, doi:10.1029/2001JE001638.
- Toigo, A. D. and M. I. Richardson, 2002: A mesoscale model for the Martian atmosphere. *J. Geophys. Res.*, **107**, doi:10.1029/2000JE001489.
- Tsuboki, K. and A. Sakakibara, 2002: Large-scale parallel computing of Cloud Resolving Storm Simulator. H. P. Zima et al. eds., High Performance Computing, Springer. 243-259.
- Wilson, R. J. and K. Hamilton, 1996: Comprehensive model simulation of thermal tides in the Martian

- atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, **53**, 1290-1326.
- Wordsworth, R. D., F. Forget, F. Selsis, E. Millour, B. Charnay and J.-B. Madeleine, 2011: Gliese 581d is the first discovered terrestrial mass exoplanet in the habitable zone. *Astrophys. J. Lett.*, **733**, doi:10.1088/2041-8205/733/2/L48.
- Yamamoto, M. and M. Takahashi, 2003: The fully developed superrotation simulated by a general circulation model of a Venus-like atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 561-574.
-