

惑星気象学の近年の展開*

松田佳久*1・高橋芳幸*2・林祥介*2・中島健介*3

1. はじめに

近年、惑星気象学発展の気運が高まっている。惑星気象学は新しい分野なので、関心や人気が単調に増大しているように思われるが、決してそうではない。1960~70年代はアメリカ・旧ソ連による惑星探査が行われ、それまで全く知られていなかった知見をもたらした。同時に、理論的、数値実験的な研究がアメリカを中心に活発に試みられ、日本でも森山茂氏が火星に関して先駆的な研究を始めていた。ところが松田が金星のスーパー・ローテーションについて研究をまとめた1980年頃からアメリカにおいて惑星気象の研究熱が急速に冷めてしまった。大気科学の主要な研究テーマとして気候問題や環境問題がクローズアップされ、実際の重要性を持たない惑星気象から関心(予算?)が引いてしまったことが理由であろう。

近年再び惑星気象に関心が高まってきた理由の1つは観測の新展開である。ヨーロッパの Venus Express が金星に到達したことは記憶に新しいし、金星の総合気象観測をめざす日本の探査機の打ち上げも迫っている。また地上からの惑星観測も盛んになってきている。勿論、これと同時に、GCM が簡単に利用できるようになったことも重要である。

今までの研究の進展状況は惑星により相当の差がある。火星はGCMによるシミュレーション的研究の段階にあるが、木星型惑星は原理的な事についても未解明の部分が多い。これを念頭において以下の総説を讀

んで頂きたい。参考として、松田による教科書¹⁾及び松田ほかによる解説²⁾を挙げておく。(松田)

2. 金星の気象学

惑星、特に金星の研究に関与している者にとって現在の最大の関心は、2010年打ち上げ予定の日本の金星探査衛星 Venus Climate Orbiter (VCO) 計画(公式プロジェクト名 PLANET-C)である。VCOには金星に雷があるか否かを調べる測器(雷・大気光カメラ)も搭載されているが、やはり関心の中心はスーパー・ローテーションである。同時に、地上からの観測も進んでおり、日本での金星大気に対する関心は理論面も含めて高まっている。外国においても同様であり、米欧でもGCMによる研究が試みられている。

2.1 金星大気の構造と運動の概要

金星の地表面気圧は約92気圧もあり、その約97%は二酸化炭素である。地表面の温度も約730 Kある。高さ45~70 kmに濃硫酸の液滴からなる雲層があり全球を覆っているため、太陽光の78%が反射される。この高いアルベドのため、地球よりも太陽に近いにも拘らず、金星の太陽光吸収量は地球より小さく、有効放射温度も低い。残りの太陽光も大部分は雲層で吸収され、地表面に到達する太陽エネルギーは全吸収量の12%に過ぎない。にも拘らず、地表面や下層大気の温度が地球よりはるかに高いのは、膨大な量の二酸化炭素による温室効果が原因である(微量成分である水蒸気の温室効果も無視できない)。

金星の自転は地球や火星に比べて大変遅い(周期243地球日、向きは公転と逆)が、旧ソ連やアメリカの惑星探査などにより、大気全体が自転と同じ方向に非常に速く回転していることが確認されている。これを金星大気のスーパー・ローテーションという。その風速は高さとともに単調増大し、70 km付近で100

* Recent developments of planetary meteorology.

*1 Yoshihisa MATSUDA, 東京学芸大学教育学部。

*2 Yoshiyuki O. TAKAHASHI, Yoshi-Yuki HAYASHI, 北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻。

*3 Kensuke NAKAJIMA, 九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門。

© 2007 日本気象学会

m/s (自転速度の60倍)に達する。今の所、自転と反対方向の風は見つかっていない。このスーパー・ローテーションを維持するメカニズムを明らかにすることが、現在の金星気象学の最重要課題である。これ以外にも、温室効果の正確な計算、濃硫酸の液滴の分布、子午面循環の有無や形態、紫外光観測で見えるY字形模様様の成因、VCOなどにより観測が進むと思われる小スケールの運動、雷の有無などの諸問題があるが、紙数の関係もありここでは割愛する。

2.2 スーパー・ローテーション研究の現状

スーパー・ローテーションの生成メカニズムとして、いくつかの説が既に1970年代に提案されている。共通した発想は、何らかのメカニズムにより大気中で東西一様の東風と西風を異なった高度で対生成し(大気中の全運動量は保存される)、自転と反対方向の風は地面摩擦でつぶし(これにより地面から自転方向の運動量が大気に供給される)、自転方向の風を大気に残すというものである。東西一様の東西風の対生成には運動量の鉛直輸送が必要であるが、それを担うものとして(1)夜昼間対流(遅い自転から期待される)の傾き、(2)雲層の太陽加熱が励起する熱潮汐波、(3)子午面循環、の3つが候補に挙げられてきた。(1)は従来、東西・鉛直2次元面内(赤道上)で検討され、夜昼間対流の不安定により夜昼間対流の傾きと鉛直シアを持った東西一様流ができることをThompson³⁾が示した。しかし、球面上で調べてみると、これはうまく作動しない^{4,5)}。従って残る候補は(2)か(3)ということになる。それを検討するために、最近のGCMなどの数値実験の結果をみてみたい。

最近、山本ら^{6,7,8)}がGCMを用いてスーパー・ローテーションを一応うまく再現した。そこでは地面付近から雲層に及ぶ子午面循環が形成されており、これが角運動量を上方輸送しスーパー・ローテーションが実現したようである。つまり、この実験ではGierasch⁹⁾やMatsuda¹⁰⁾の研究した(3)のメカニズムが作動していると思われる。ただ、この実験では下層の太陽加熱が現実よりかなり大きい様である。一方、高木らは雲層加熱が励起する熱潮汐波を詳しく調べ、これが下層まで伝播することを見いだした。つまり熱潮汐波が自転と逆方向の運動量を地面まで運んで捨てることで、スーパー・ローテーションが実現する可能性がある。実際、GCMで調べてみると、観測と似た高速東西流が再現された^{11,12,13)}。この結果は(2)のメカニズムを支持する。しかし、このモデルでは子午面循環

が正確に取り入れられていないので、検討の余地がある。この他の金星GCMの結果¹⁴⁾を含めて考えても、まだスーパー・ローテーションの生成メカニズムについて確定的なことは言えない。即ち、金星の気象学は現在、活発な研究段階であると言えよう。(松田)

3. 火星の気象学

火星大気の大循環に関する知識はこの10年程度の間飛躍的に増大した。90年代後半以後、火星探査計画が数多く進められ60~70年代以来の活況を迎えたことと、それにあわせて世界の研究グループが数値モデルの開発とそれによる研究を進めてきたことによる。

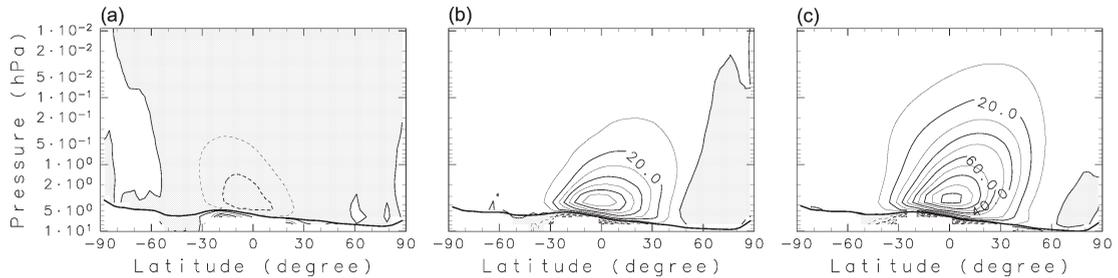
3.1 火星大気大循環の基本的特徴

火星には海が無いために地面の熱容量が小さく、大気も希薄なため、地面付近の大気温度の変動が大きい。日変化の振幅は60~70 K¹⁵⁾に達し、また季節変化の振幅は、赤道傾斜角(25.19°)が地球と同程度であるにもかかわらず、高緯度では約90 Kに達する。この地面温度の激しい季節変化を反映して、地面付近の「対流圏」も含めて東西平均気温場は地球の中層大気に似た著しく南北非対称な構造となり、子午面循環も春や秋のごく短い期間を除けば赤道を横切る緯度幅の広い1セルの循環となる(第1図a, b)。

また、火星大気大循環を考える上で無視できない要素として地面の大きな起伏がある。惑星規模の起伏に限っても、その振幅は大気のスケールハイト(~11 km)に匹敵する¹⁶⁾。この大振幅の起伏により、中高緯度では定常惑星波が励起され¹⁷⁾、また低緯度には、地球では海洋(側面境界を持つ)の典型的特徴である「西岸境界流」が存在する¹⁸⁾。南半球の方が北半球よりも3 km程度標高が高いことも重要である。この南北半球高低差は、南北非対称な子午面循環(第1図a, bの夏冬の循環強度差に注意)を形成するとともに¹⁹⁾、水蒸気やダストの分布に影響を及ぼしていることが指摘されている²⁰⁾。

3.2 火星大気の年々変動とダストストーム

火星大気は、大気も地面もその熱容量が小さいにも関わらず、大きな年々変動を示すことが知られている。この大きな年々変動は、大気中のダスト量の変動によってもたらされており、子午面循環の構造や強度もそれに応じて大きく変動する(第1図b, c)。ある程度の量のダストは常に大気中に存在するが、それに加えて数メートル規模の塵旋風(“dust devil”)から惑星規模のものまで様々な規模のダストストームが発



第1図 火星大気大循環モデルで得られた子午面循環の質量流線関数：大気中のダスト量あまり多くない時の北半球の夏 (a)、冬 (b)、大規模なダストストームが発生している時の北半球の冬 (c)。等値線間隔は $10 \times 10^8 \text{ kg/s}$ であり、正の値は時計周りの循環を表す。

生ずる。そのため、ダストの光学的厚さは可視光（波長 $0.67 \mu\text{m}$ ）で見て0.2程度から3を超える値まで、1桁以上変動する。中小規模のダストストームは毎年、相当数が発生しているが、惑星規模のダストストームは起こる年と起こらない年がある²¹⁾。

近年、ダストストームの発生の原因が多少とも理解されるようになってきている。例えば、塵旋風のような小規模なものは、鉛直熱対流に伴って生成されることを示す数値計算²²⁾がある。このような塵旋風が火星において比較的容易に形成されるのは、局所的な乾燥対流の風速が地球の湿潤対流のそれに比べて大きく、地表面応力も大きいこと²³⁾に起因していると考えられる。しかし、大規模なダストストームへの発展に関する理解は、断片的な記述に留まる。その過程には大小様々な規模の擾乱が関与していると考えられるが、どのような大規模循環の元でどのような小規模擾乱が発達するのか、逆に、どのような小規模擾乱の集団的発現が大規模擾乱としてのダストストームにつながるのか、さらに、大気中へのダストの供給が放射吸収を介して擾乱の成長にどのように関わっているのか、などは未だ理解されるには至っていない。様々なダストストームの発生原因と火星大気の年々変動の理解は、今後の重要な課題である。（高橋・林）

4. 木星型惑星の気象学

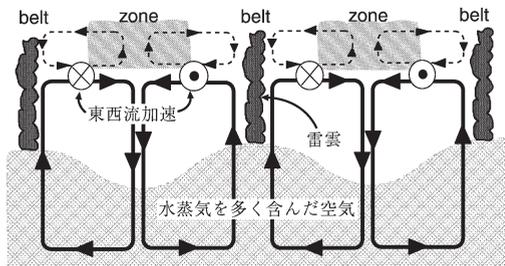
ここでは主に木星大気の観測・理論の発展をまとめる。末尾に重要な参考文献^{2,24,25,26)}をあげておく。木星には1970年代以降、ボイジャー、ガリレオ、カッシーニの3探査機が接近した。特にガリレオは8年間にわたり軌道周回を行い、プローブを投入した。プローブは24気圧の深度までの大気組成や温度・圧力を測定したが、例外的に乾いていると考えられる領域に

突入したため、データの代表性には問題が残った。特に、太陽系科学的にも重要な深部の水蒸気混合比は謎のままであり、将来の探査の課題である。

4.1 東西風ジェット・渦・雷雲の関係

木星大気重要な構造として、雲の縞状構造を伴う平均東西風と、「大赤斑」をはじめとする多数の渦が有名だが、今やこれに加えて、対流雲を挙げるべきである。対流雲は主に水蒸気の凝結潜熱により駆動され、地球大気の場合と同様、大気温度・湿度構造を拘束すると考えられているが、同時に惑星規模の雲の縞状構造とも関係する。縞状構造のうち、表層の雲が多い部分（「ゾーン」）は高気圧性、少ない部分（「ベルト」）は低気圧シアである。かつては、地球のハドレー循環との類推から、ゾーンで上昇流が想定されていたが、これは積乱雲がゾーンでなくベルトで生じることと矛盾する。現在は、この雷雲活動の分布は、Williams²⁷⁾に始まる東西風の shallow origin 説を3次元的に対流圏深部まで延長した構造の一環であると考えられるようになってきている（第2図）。その一方で、縞状構造の deep origin 説、すなわち、これが深部の惑星規模対流運動の一環だとする説の方も、大規模な数値計算²⁸⁾が観測と似た風速緯度分布を再現するなど、現実味を増している。shallow origin 説と deep origin 説の勝負あるいは役割分担は今後の課題である（両説の詳細は松田¹⁾の第4章を参照）。

大赤斑を始めとする渦については1990年代始めまで主に水平二次元の枠組で研究が多数行われ、これらが対流圏表層の安定成層領域に限られた現象であり、また、東西風の不安定から生まれることがわかっている。逆に、これらの渦が二次元乱流的逆カスケードを経て東西風を作ることはない。ここ数年は三次元数値モデルによる研究も行われるようになったが、計算条



第2図 対流雲との相互作用による東西風の維持機構。対流雲活動が励起したロスビー波が東西風との相互作用でこれを加速し、この東西風加速がコリオリ力を介して子午面循環を駆動する（東西風の符号は北半球を想定）。この子午面循環が「ベルト」において水蒸気を多く含んだ空気を上昇させ、ここでの雷雲活動を活発にする。

件を拘束すべきデータは圧倒的に不足し、必要な計算資源は地球の大循環計算より桁違いに大きく、前途多難である。大赤斑など木星の模様色の起源も謎であり、観測・理論的研究と並行して地道な物質科学的研究が必要である。

4.2 その他の木星型惑星およびタイタン

土星は、現在、カッシーニによる周回観測の最中である。対流雲や渦の詳細な画像などが撮影されており、今後の研究の発展が期待される。天王星と海王星も、ボイジャーによるフライバイの後ハッブル宇宙望遠鏡と地上の望遠鏡（大気ゆらぎを動的に補正する技術により解像度が向上した）で観測され、種々の変動が確認されている。例えばボイジャーが発見した海王星「大黒斑」は木星大赤斑と異り短寿命であったし、ボイジャーの撮影時には模様が殆んど無かった天王星には、多数の斑点が出現している。これらは季節変化と関係するとも言われるが、長い軌道周期を考えると全貌の把握には時間がかかるだろう。

最後に、木星型惑星ではないが、土星の衛星タイタンについて触れておく。タイタンは窒素を主成分とする地表気圧で1.5気圧もの大気を持ち、混合比2%に達するメタンの相変化も予想されてきたが、ヘイズ層が観測を阻んできた。2005年にホイヘンス探査機が突入して撮影した景観には、侵食地形は見られるものの、期待された「大洋」は無かった。しかしカッシーニの観測で高緯度地方に湖が多数みつかり、激しく変化する雲活動も確認された。この様な（メタンの）水循環の存在は太陽系で最も地球的であり、今後、広く研究が展開されるだろう。（中島）

参考文献

- 1) 松田佳久, 2000: 惑星気象学, 東京大学出版会, 204pp.
- 2) 松田佳久ほか, 2005: 天文月報 (特集: 惑星気象学の世紀), **98**, 6-58.
- 3) Thompson, R., 1970: *J. Atmos. Sci.*, **27**, 1107-1116.
- 4) Takagi, M. and Y. Matsuda, 1999: *J. Meteor. Soc. Japan*, **77**, 971-983.
- 5) Takagi, M. and Y. Matsuda, 2000: *J. Meteor. Soc. Japan*, **78**, 181-186.
- 6) Yamamoto, M. and M. Takahashi, 2003a: *J. Atmos. Sci.*, **60**, 561-574.
- 7) Yamamoto, M. and M. Takahashi, 2003b: *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1449, doi: 10.1029/2003GL016924.
- 8) Yamamoto, M. and M. Takahashi, 2004: *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L09701, doi: 10.1029/2004GL019518.
- 9) Gierasch, P. J., 1975: *J. Atmos. Sci.*, **32**, 1038-1044.
- 10) Matsuda, Y., 1980: *J. Meteor. Soc. Japan*, **58**, 443-470.
- 11) Takagi, M. and Y. Matsuda, 2005: *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L02203, doi: 10.1029/2004GL022060.
- 12) Takagi, M. and Y. Matsuda, 2006a: *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L13102, doi: 10.1029/2006GL026168.
- 13) Takagi, M. and Y. Matsuda, 2006b: *J. Geophys. Res.*, submitted.
- 14) Lee, C. *et al.*, 2005: *Adv. Space Res.*, **36**, 2142-2145.
- 15) Schofield, J. T. *et al.*, 1997: *Science*, **278**, 1752-1758.
- 16) Smith, D. E. *et al.*, 1999: *Science*, **284**, 1495-1503.
- 17) Hollingthworth, J. L. and J. R. Barnes, 1996: *J. Atmos. Sci.*, **53**, 428-448.
- 18) Joshi, M. M. *et al.*, 1994: *Nature*, **367**, 548-551.
- 19) Takahashi, Y. O. *et al.*, 2003: *J. Geophys. Res.*, **108**, 5018, doi: 10.1029/2001JE001638.
- 20) Richardson, M. I. and R. J. Wilson, 2002: *Nature*, **416**, 298-301.
- 21) Zurek, R. W. and L. J. Martin, 1993: *J. Geophys. Res.*, **98**, 3247-3259.
- 22) Toigo, A. D. *et al.*, 2003: *J. Geophys. Res.*, **108**, doi: 10.1029/2002JE002002.
- 23) Odaka, M. *et al.*, 2001: *Nagare*, **20**, Nagare Multimedia, <http://www.nagare.or.jp/mm/2001/odaka/index.htm>.
- 24) Rogers, J. H., 1995: *The Giant Planet Jupiter*, Cambridge Univ. Press, 418pp.
- 25) Bagenal, F. *et al.* 編, 2004: *Jupiter: The Planet, Satellites and Magnetosphere*, Cambridge Univ. Press, 719pp.
- 26) Vasavada, A. R. and A. P. Showman, 2005: *Rep. Prog. Phys.*, **68**, 1935-1996.
- 27) Williams, G. P., 1978: *J. Atmos. Sci.*, **35**, 1399-1426.
- 28) Heimpel, M., *et al.*, 2005: *Nature*, **438**, doi: 10.1038/nature04208.