

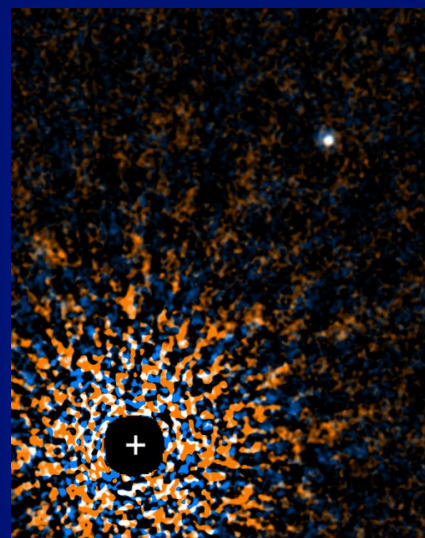
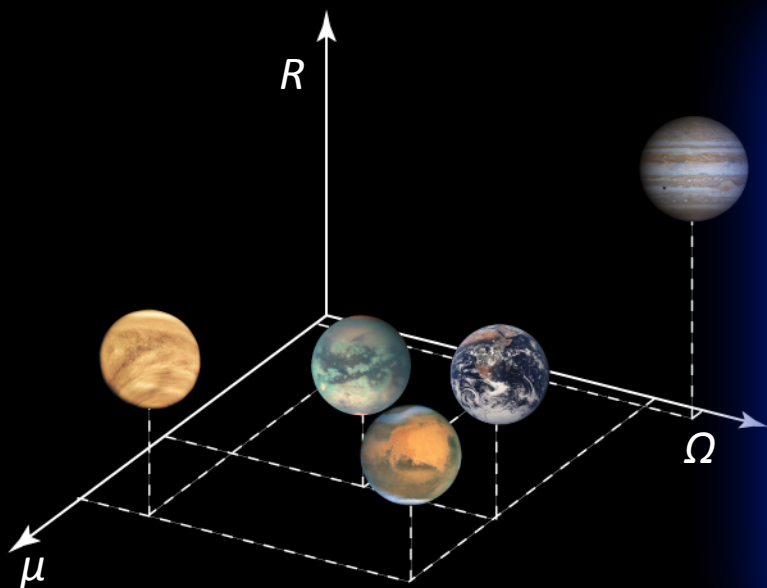
Sygentica

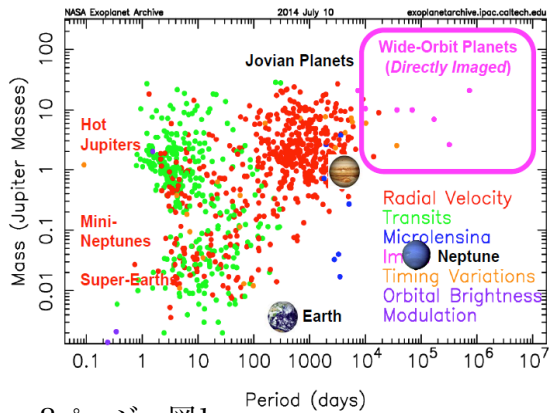


公益社団法人 日本気象学会
2014年度秋季大会シンポジウム

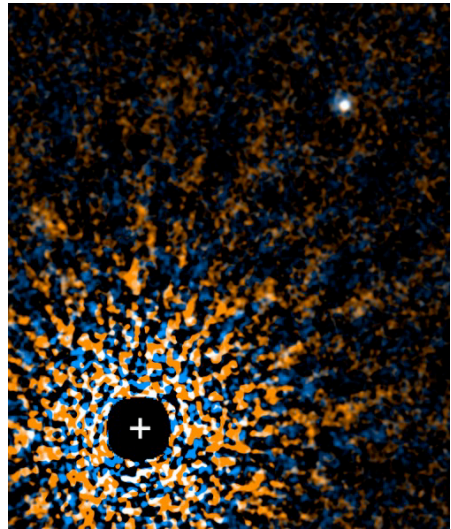
惑星大気研究の最前線

日時： 10月22日(水) 大会第2日 15時40分-17時55分
場所： 福岡国際会議場 5階 国際会議室

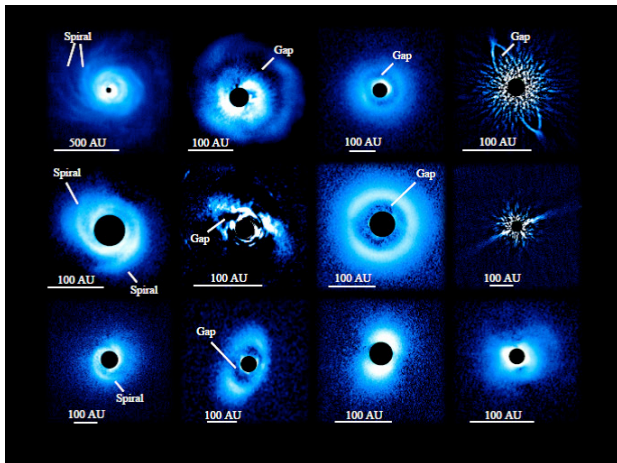




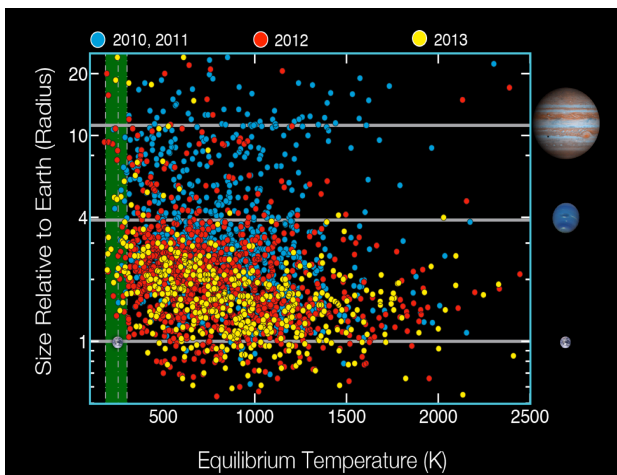
2ページ 図1
系外惑星の公転周期（日）と質量
（単位：木星質量）の分布図



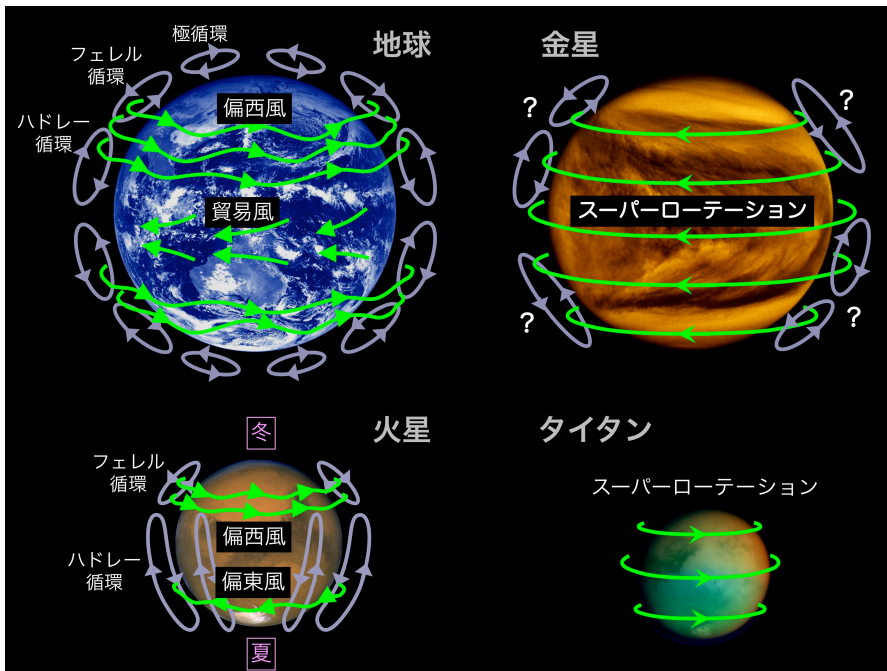
3ページ 図2
すばる望遠鏡とHiCIAO カメラで直接に撮像された「第二の木星」GJ504b（右上の点状天体）。中心の明るい主星（左下）の影響は抑制されている。白十字は主星の位置で、主星・惑星の距離は約44au。クレジット：国立天文台。



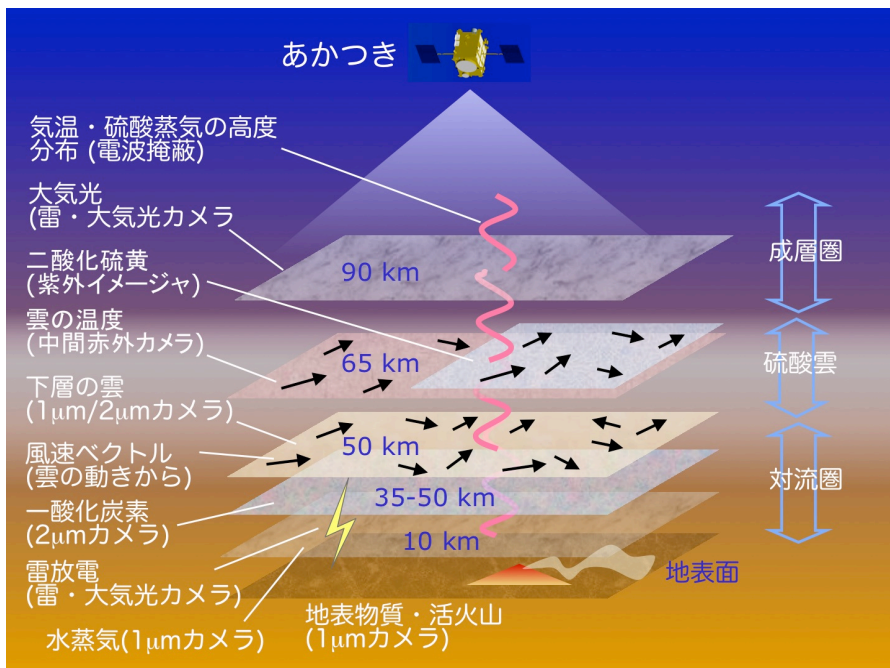
3ページ 図3
すばる望遠鏡とHiCIAO カメラで直接に撮像された若い恒星のまわりの円盤。スケールは100au。クレジット：国立天文台。



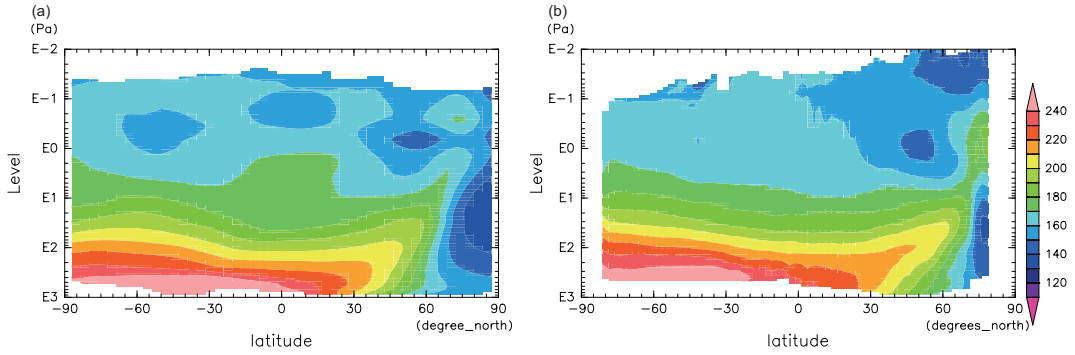
4ページ 図4
ケプラー衛星が発見した惑星候補（丸印）とハビタブル惑星候補（枠内）を、惑星サイズと平衡温度図上にプロットしたもの。丸印の色分けは発見年を表わす。左端の緑色領域がハビタブルゾーンに対応する。クレジット：NASA。



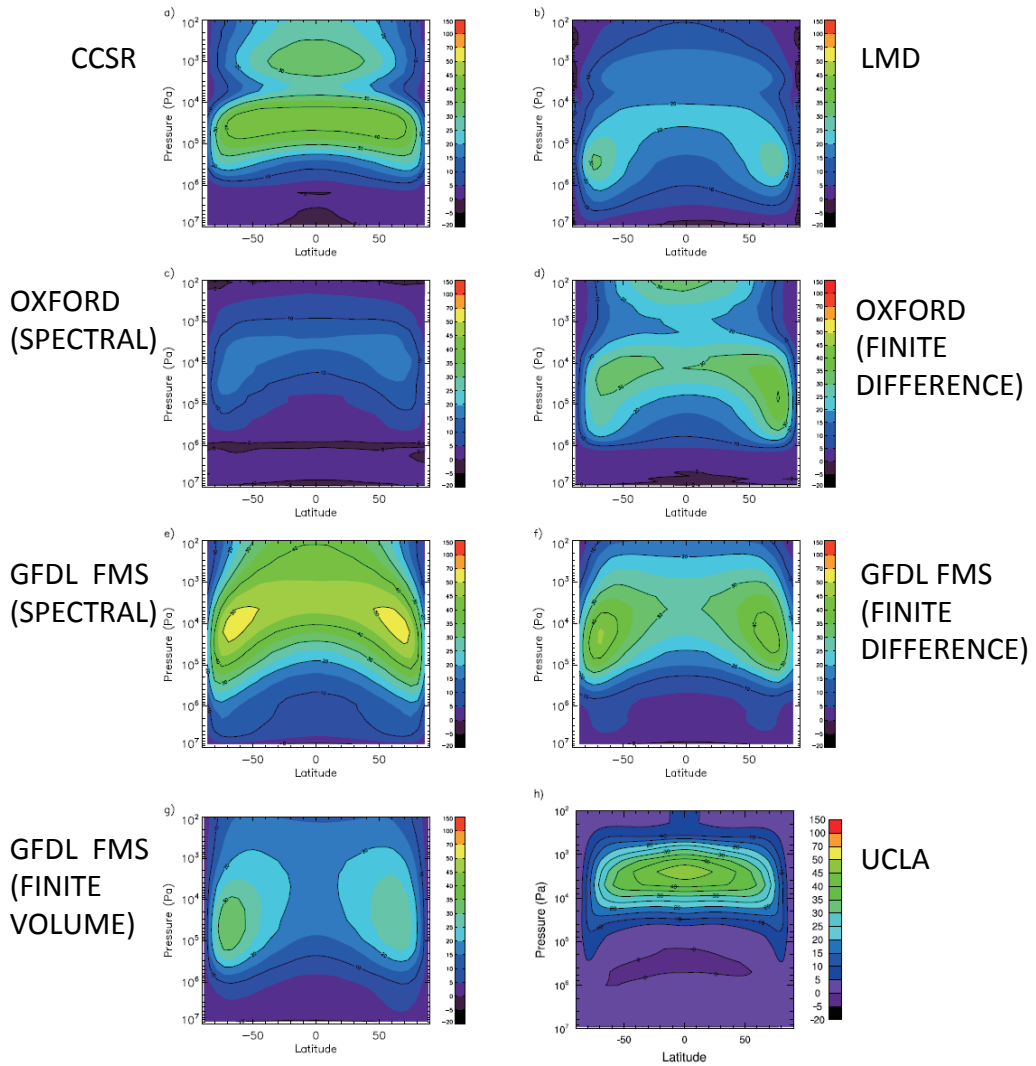
14ページ 第4図
地球、金星、火星、タイタンの風系 (写真はNASA提供)



17ページ 第6図
「あかつき」による3次元大気観測のイメージ



20ページ 図1
 火星大気の大気北半球の冬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, 各経度における 地方時15時の温度の平均値である.



22ページ 図2 金星大気大循環モデルの相互比較で得られた東西平均風 Lebnnois et al (2013) の Fig.2.

日本気象学会 2014年度秋季大会シンポジウム

惑星大気研究の最前線

日 時：2014 年 10 月22 日〔水〕 15:40～17:55

会 場：福岡国際会議場 5階 国際会議室

趣 旨

かつて惑星は夜空の「彷徨える星」に過ぎませんでした。観測技術の発展と探査の実現を経た現在、それぞれの環境と歴史を有する地球と同等の「世界」として認識されています。惑星の大気の成り立ちや、そこに見られる現象の探求から生まれた「惑星気象学」も高度に発展し、幅広い問題と繋がりを持つに至っています。大気運動の多様性は地球流体力学に新しい問題意識を提供しており、大気の組成や量の多様性は太陽系全体の形成や進化に関する考察に繋がっています。探査も各惑星で進展しており、特に火星では質量とも充実した探査が数値モデリングの高度化を促し、地球と同様のデータ同化も行なわれています。金星も、来年末に金星周回軌道に到達する日本の「あかつき」による本格的な大気探査を控えています。こうした太陽系惑星研究の蓄積を待っていたかのように、1995年、ついに太陽以外の星を周る「太陽系外惑星」が発見され、20年目の現在、その数は1000個を越えています。その多様性は我々の太陽系内の諸惑星を遥かに上回る一方、生命の想定も可能な「第二の地球」が見いだされる可能性も近づいています。今回のシンポジウムでは、太陽系外惑星も含めて急速に視野を広めつつある惑星大気研究の最前線を提示し、今後を展望します。参加者の皆様には、併せて、「地球気象学」の位置と、その果たし得る役割についても思いを巡らせて頂ければ幸いです。

司 会： 中島 健介（九州大学大学院理学研究院）

基 調 講 演

ページ

田村 元秀（東京大学大学院理学系研究科・自然科学研究機構国立天文台）

「太陽系外惑星一発見20年で見えてきたもの」…………… 1

はしもと じょーじ（岡山大学大学院自然科学研究科）

「水惑星の形成と進化」…………… 7

今村 剛（JAXA 宇宙科学研究所）

「金星気象衛星『あかつき』と今後の惑星大気研究」…………… 13

高橋 芳幸（神戸大学大学院理学研究科）

「惑星大気モデリング—探査・系外惑星をにらんで」…………… 19

総 合 討 論 パネリスト：基調講演者

[表紙説明] 上段：金星周回軌道に入る「あかつき」の想像図（JAXA 提供）
下段左：パラメタ空間の中に置かれた諸天体（NASA の画像を元に高橋芳幸氏が作成）
下段右：すばる望遠鏡と HiCIAO カメラで撮像された「第二の木星」（国立天文台提供）

太陽系外惑星—発見 20 年で見えてきたもの

田村元秀（東京大学大学院理学系研究科・自然科学研究機構国立天文台）

1. はじめに

「この広い宇宙で地球だけが特別の存在なのか？ それとも第 2 の地球はありふれた存在で、そこには生命がいるのではないか？」 人類にとって根源的とも言えるこの問いは、2000 年以上前の哲学者たちも抱いていたが、これに対する科学的な答えを現在の私たちもまだ知らない。

しかし 1995 年の太陽以外の恒星の周りの惑星（系外惑星）の発見を契機として、この状況は一変した。太陽系内に留まらず、無数の恒星の周りに地球に似た惑星を探し、そこに生命の証拠を科学的に求めることができる時代が到来した。実際、これを契機に、世界中で系外惑星を対象とする多種多様な天文観測が行われるようになった。その発見数だけに着目しても、20 年足らずの短い期間で現在までに確認された系外惑星は既に 1800 個程度もある。有力な候補まで入れると 5000 個を超える。

発見数だけでなく、この 20 年において特筆すべき内容は本稿ではカバーしきれないほど数多いが、地上巨大望遠鏡による直接観測とケプラー衛星による多数の間接的検出と惑星の統計は、系外惑星研究の重要マイルストーンとも言える。本講演では、この 2 つのテーマを扱う。^a

2. 多様な探査手法で発見された多様な系外惑星たち

系外惑星を観測することは容易ではない。もっとも近い恒星でも約 1.3 パーセク（1 パーセクは約 3×10^{16} m、あるいは、地球・太陽の距離 [1 au、1 天文単位、約 1.5×10^8 m] の約 20 万倍）

も離れており、太陽系内の惑星と比べて数十万倍も遠くにあるからである。現在の技術では探査機を送ることは難しいため、望遠鏡を用いた天文観測に限られる。しかし、その観測の試みは意外にも古く、例えば、アメリカのヴァンデカンブラによって 1930 年代からは数十年にもわたる長期的な探査も行われていた。しかし、いずれも失敗に終わった。

太陽系を 10 パーセクの距離から眺めた場合、惑星の代表である「木星と地球」と太陽との「角距離とコントラスト（惑星と太陽との明るさの比）」は、それぞれ、0.5 秒角と 5×10^8 、および、0.1 秒角と 5×10^9 になる。ただし、コントラストは可視光波長で惑星反射光を見たものである。いっぽう、赤外線波長で惑星の熱放射を検出する場合、コントラストは 5×10^7 と 7×10^6 となる。惑星と恒星を空間的に見分けることは現在の技術では可能になっているが、コントラストがあまりにも大きいため、地球大気・望遠鏡・光学系などによる主星の明るい光の広がりによって惑星光が隠されてしまう。あたかも、遠方の灯台のサーチライトのそばで、仄かに光る蛍を見つけるようなものなのである。そこで、惑星からの光を主星と区別して直接撮像するのではなく、惑星が主星におよぼす影響を間接的に捉える手法が先に成功した。

代表的な系外惑星検出方法としては、(1) 惑星の公転運動による主星自体の速度ふらつきを分光的に測定する手法（視線速度法、ドップラー法とも呼ぶ）、(2) 主星の前面を惑星が通過する際の明るさの変化を精密に捉える手法（トランジット法）、(3) 重力レンズの効果を利用する手法（マイクロレンズ法）、(4) 主星の周期的シグナルの惑星公転による時間変化を捉える手法

^a 編注：太陽系外惑星に関する幅広い解説として、間もなく田村(2014) が出版される。

(タイミング法、パルサー法も含む)。これらはいずれも惑星そのものを直接に見分けて観測しているのではないため、間接法である。

最初に成功したのはドップラー法である。たとえば、木星の公転運動により、太陽は秒速約12メートルでふらつく。現在の技術では、人が歩く速さで恒星が運動することさえ検出できる。1995年のスイスのマイヨールとケロツツによる普通の恒星まわりの最初の系外惑星の発見もこの手法による。新天体は木星の重さの約半分の巨大惑星だったが、何よりも驚きは、その公転周期がわずかに約4日で、主星からわずかに0.05 auの距離に位置することであった。太陽系でもっとも公転周期の短い水星でも、周期は約88日(軌道長半径は0.4 au)である。新惑星は恒星に近いので表面温度が千度を超える灼熱の木星(ホットジュピター)と考えられる。

2000年には、別の観測方法であるトランジット法が成功した。惑星の軌道面が恒星と地球を結ぶ視線上にあるときに、いわば惑星のシルエットをとらえる、この完全に独立な2つの間接法によって惑星の存在が確認されたことにより系外惑星の存在は疑いないものとなった。さらに、両方のデータを併せることにより惑星の半径と質量が求め、惑星密度を導き、理論と比較して惑星の内部構造に迫ることができる。最近では、トランジット分光観測や赤外線観測から、惑星大気や惑星温度構造を調べることで可能になった。現在では、それ以外の間接法である、マイクロレンズ法、アストロメトリ法、タイミング法も成功している。

このように多様な天文観測手法で発見された系外惑星は、宇宙に「新世界」があることを教えてくれた。なかでも、恒星のごく近傍(水星軌道よりも内側)を周回する高温の惑星の存在は想定外であった(図1参照)。質量に応じて、ホット・ジュピター、ミニ・ネプチューン、スーパーアースと呼ばれている。スーパーアースは地球より重く10倍以下の惑星の総称で、既に

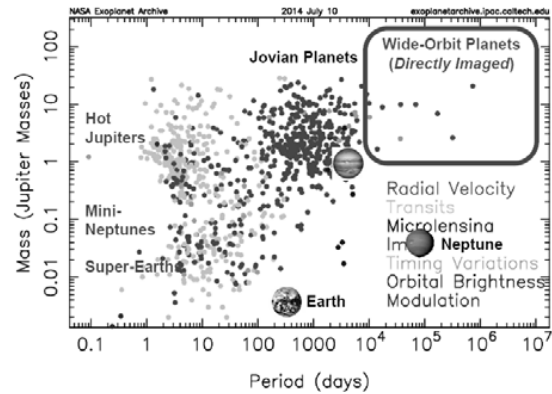


図1 系外惑星の周期(日)と質量(単位:木星質量)の分布図。

100個以上(ケプラー衛星からの候補は800個以上)発見されている。ほぼ地球サイズのケプラー惑星候補も300個以上報告されている。このように惑星の新世界が開拓された結果、太陽系が標準的な惑星系の姿かどうかは今後の観測を待たねばならない状況となっている。

しかしながら、これらの系外惑星の存在は、いずれも『間接的』方法によって実証されたものである。間接観測の成功後も、長らく直接観測は未成功であった。

3. 第二の木星の直接撮像と惑星誕生現場の解明に成功した SEEDS プロジェクト

系外惑星の直接観測については、2004年頃からいくつかの候補天体があったが、いずれも主星から100 au以上と遠く、太陽系と同列に論じることが難しかった。2008年から、ようやく太陽系サイズや惑星形成論で期待される降着円盤のサイズ(100 au以内)の軌道にある系外惑星が撮像されてきた。しかし、これらはいずれも木星質量の約10倍程度かそれ以上という超巨大惑星であったが、太陽系では氷惑星しか存在しないような遠方に巨大惑星が存在することがわかった。遠方巨大惑星と近接惑星は新しい種類の惑星であるが、現在、この遠方惑星を開拓しているのがすばる望遠鏡による SEEDS プロジェクト(Tamura 2009)である。

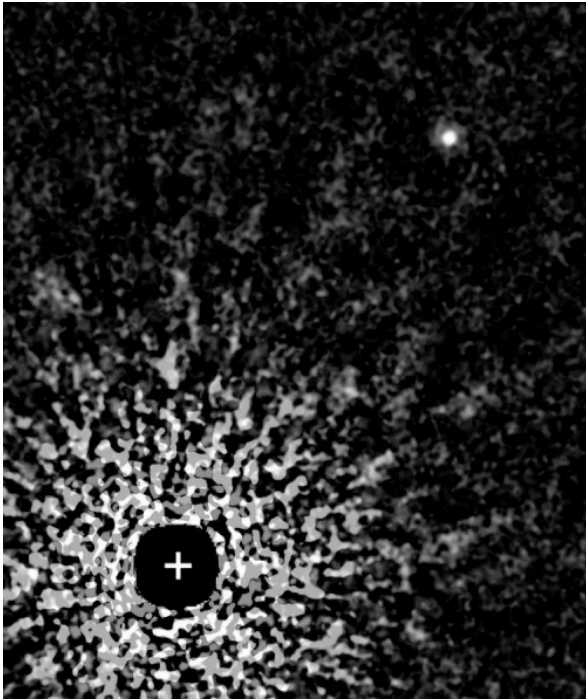


図2 すばる望遠鏡とHiCIAOカメラで直接に撮像された「第二の木星」GJ504b (右上の点状天体)。中心の明るい主星からの光 (左下) の影響は抑制されている。+は主星の位置で、主星・惑星の距離は約44 au。クレジット：国立天文台。

SEEDSは、太陽系外惑星とその形成現場を直接観測によって研究するために、新規に開発された高コントラスト観測装置HiCIAOと補償光学系A0188を用いて、2009年から開始されたすばる望遠鏡における戦略的観測プロジェクトである。国内外の約120人のメンバーが参加している(研究代表者：田村元秀)。褐色矮星を除いた普通の恒星まわりの太陽系サイズの系外惑星系の直接撮像例はまだ10例に満たないが、そのうち3例の報告がSEEDSプロジェクトによるものである。

なかでも、2013年8月に公表されたGJ 504 bという太陽型星の惑星は、最小質量が3木星質量と、直接撮像された惑星の中では最も軽い惑星の発見となった(図2)。地球から約60光年の距離にあり、軌道長半径は約44 AUである(Kuzuhara et al 2013)。直接観測においては、惑星候補の明るさを測定し、理論進化モデルと

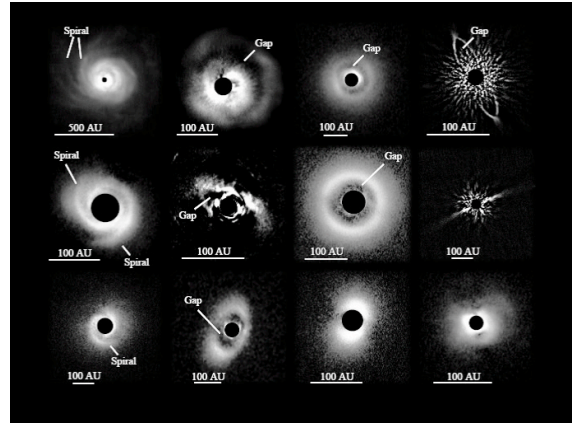


図3 すばる望遠鏡とHiCIAOカメラで直接に撮像された若い恒星のまわりの円盤。スケールは100 au。クレジット：国立天文台。

天体年齢から質量を推定するが、その不定性は若い天体ほど大きく、用いるモデルによっては、これまでに検出されている系外惑星はいずれも若過ぎて、質量が14木星質量以上となり、惑星ではなく褐色矮星に分類されてしまう。GJ 504 bは年齢2億年と比較的年老いているので、このモデルによる質量推定の不定性は小さい。すなわち、GJ 504 bは用いる天体光度進化モデルによらず惑星と呼べる唯一の撮像された系外惑星である。更に興味深いことに、これ以外に撮像された惑星はいずれも赤い近赤外線カラーを示すが、GJ 504 bのみ青いカラーを示す。木星も同じ傾向があるので、この意味でも第二の木星と呼べるだろう。

さらに、SEEDSプロジェクトでは惑星の誕生現場である原始惑星系円盤と残骸円盤の直接観測も進めている。これらの円盤は中心星の反射光で輝いているため、反射光の偏光を捉える高コントラスト観測が有効である。これにより、これまで観測できなかった中心星のごく近く(0.1秒角)の円盤を捉え、太陽系サイズの微細構造を調べることが可能になった。その結果、多数の円盤において空隙構造や渦巻腕構造を発見した(図3)(Hashimoto et al 2011; Thalmann et al 2010; Muto et al 2012; Hashimoto et al 2012;

Kusakabe et al 2012; Mayama et al 2012; Grady et al 2013; Follette et al 2013)。これらの構造は、惑星と円盤の相互作用によって生じうるため、惑星存在の兆候と考えることもできる。実際、そのうちの数天体では円盤内に伴星候補も報告されている (Kraus and Ireland 2012; Quanz 2013)。

これらの直接観測から、太陽質量の 1-3 倍の恒星のまわりで、遠方に木星の数倍から十数倍もの巨大惑星が存在する例が見つかってきた。また、同じスケールで惑星の兆候と思われる円盤構造も見えてきた。この 2 つを結び付けることによって、円盤から巨大惑星が生まれる過程に制限を付けることができるだろう。SEEDS サーベイが完成することによって、このような遠方惑星の統計と成因の解明が期待される。また、系外惑星を直接に高コントラストで分光観測し、その大気中の一酸化炭素と水蒸気を発見することにも成功している (Konopacky et al 2013)。

4. ケプラー衛星によるトランジット観測の展開とハビタブル惑星

大気の揺らぎの影響の無いスペースからの観測は、地上に比べて 10 倍以上もの精密なトランジット測光を可能にする。2009 年 3 月に打ち上げられたケプラー衛星は、はくちょう座の方向の約 15 万個の星の明るさの変動を測る最強のトランジット観測装置である (Borucki et al 2011)。2013 年 1 月までに 2036 個の恒星を回る 2740 個の惑星が公表された。図 4 はそれらの質量と軌道長半径の分布である。惑星の質量が軽いほど、また、周期が長いほど検出が難しいため、統計を議論するためには周期を限り、検出限界を考慮した補正が必要となる。周期が 85 日未満の惑星に限って、初めて地球型惑星を含む系外惑星の質量別頻度が得られた (Fressin et al 2013; Howard et al 2012; Ford et al 2011)。その結果、太陽系の水星より内側にあるような短周期惑星の頻度は、木星型惑星で約 2%、海王星型惑

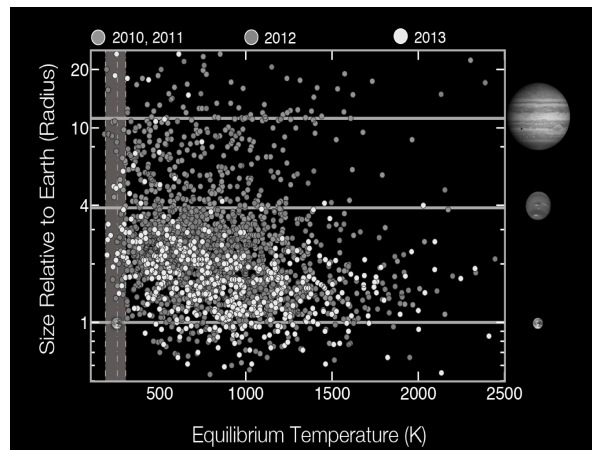


図 4. ケプラー衛星が発見した惑星候補 (丸印) とハビタブル惑星候補 (枠内) を、惑星サイズと平衡温度図上にプロットしたもの。丸印の色分けは発見年を表わす。左端の影領域がハビタブルゾーンに対応する。
クレジット : NASA。

星およびスーパーアースが約 20%、地球型惑星で約 17% となり、軽い惑星が非常に数多いことがわかった。第二の地球と呼べるような周期が 365 日程度で地球質量の惑星はまだ報告されていないが、十分な周期をカバーすれば検出可能である。実際、当初の 3.5 年の運用予定に加えてさらに 3.5 年の延長が許可されたところであったが、2013 年に入って姿勢系トラブルがあり、8 月には系外惑星の観測が断念されたのが残念である。しかし、全てのデータの公開によって、ハビタブルゾーンにある地球型惑星の統計にまで言及できることが期待されている。

これまでの地上観測などにより発見されたハビタブル惑星は既に 15 個程度、ケプラー・ハビタブル惑星候補は 90 個程度報告されている。たとえば、ケプラー-186 という太陽質量の 0.5 倍の恒星 (赤色矮星) の周りには、ほぼ地球半径のハビタブル惑星が発見された (Quintana et al 2014)。また、映画スターウォーズの舞台となったような、連星を周回するハビタブル惑星 (ケプラー-47 (AB) c) も実際に発見されている (Orosz et al 2012)。

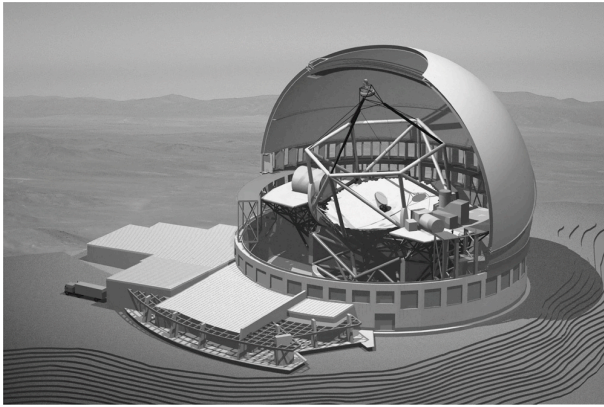


図5. TMT望遠鏡の完成想像図。
クレジット：TMT。

5. 将来計画

第2の地球を探索する観測は今後10年で大きく進展すると考えられている。地球型系外惑星の大気を調べ、水・酸素など地球大気に特徴的なスペクトル、あるいは、植物のクロロフィルのスペクトルを観測し、生命存在の証拠をリモートセンシングにより捉えることは、次世代望遠鏡の大きな使命と言える。そのためには、惑星を直接にとらえることが不可欠である。

それらを実現するための次世代望遠鏡と観測装置の検討が進みつつある。日本でも、2021年に完成予定の口径30メートル次世代超巨大望遠鏡「TMT」(図5)のため系外惑星専用観測装置の検討が行われている(Matsuo et al 2010)。それ以降の計画(JTPFやWFIRSTなど)のためのコロナグラフの基礎開発も活発である。また、近未来では、すばる望遠鏡のための地球型惑星探索装置IRD(Tamura et al 2012)や惑星分光装置CHARISの開発が急ピッチで進んでいる。さらに、ケプラー衛星の再利用により、黄道面に沿った惑星探索を進める「K2」やケプラーの後継機とも言える次期トランジット衛星「TESS」(2017年打上げ予定)も進行している。IRDやTESSやK2は、将来の第二の地球の撮像の観測対象を発見するために不可欠であろう。

このように系外惑星研究は、今後も天文学・惑星科学において重要な発見をもたらす事が期待されるだけでなく、アストロバイオロジーという「宇宙における生命」の研究に不可欠な情報を提供する基盤分野となるだろう。

参考文献

- Borucki, W. J. et al. 2011: Characteristics of Kepler planetary candidates based on the first data set, *Astrophys. J.*, **728**, 117.
- Ford, E. B. et al. 2011: Transit timing observations from Kepler. I. Statistical analysis of the first four months, *Astrophys. J. Suppl.* 197, 2.
- Fressin, F. et al. 2013: The false positive rate of Kepler and the occurrence of planets, *Astrophys. J.*, 766, 81.
- Follette, K. et al. 2013: Mapping H-Band scattered light emission in the mysterious SR21 transitional disk, *Astrophys. J.*, 767, 10.
- Grady, C. et al. 2013: Spiral arms in the asymmetrically illuminated disk of MWC 758 and constraints on giant planets, *Astrophys. J.*, 762, 48.
- Hashimoto, J. et al. 2011: Direct imaging of fine structures in giant planet-forming regions of the protoplanetary disk around AB Aurigae, *Astrophys. J.*, 729, L17.
- Hashimoto, J. et al. 2012: Polarimetric imaging of large cavity structures in the pre-transitional protoplanetary disk around PDS 70: Observations of the disk, *Astrophys. J.*, 758, L19.
- Howard, A. W. et al. 2012: Planet occurrence within 0.25 AU of solar-type stars from Kepler, *Astrophys. J. Suppl.*, 201, 15.
- Konopacky, Q. M. et al. 2013: Detection of carbon monoxide and water absorption lines

- in an exoplanet atmosphere, *Science*, 339, 1398-1401.
- Kusakabe, N. et al. 2012: High-contrast near-infrared polarization imaging of MWC480, *Astrophys. J.*, 753, 153.
- Kuzuhara, M. et al. 2013: Direct imaging of a cold Jovian exoplanets in orbit around the Sun-like star GJ504, *Astrophys. J.*, 774, 11.
- Kraus, A. L., and, Ireland, M. J. 2012: LkCa 15: A young exoplanets caught at formation? *Astrophys. J.*, 745, 5.
- Matsuo, T. et al. 2010: Second-Earth Imager for TMT (SEIT), *Proc. SPIE*, 8846-56.
- Mayama, S. et al. 2012: Subaru imaging of asymmetric features in a transitional disk in upper Scorpius, *Astrophys. J.*, 760, L26.
- Muto, T. et al. 2012: Discovery of small-scale spiral structures in the disk of SAO 206462 (HD 135344B): Implication for the physical state of the disk from spiral density wave theory, *Astrophys. J.*, 748, L22.
- Orosz, J. A. et al. 2012: Kepler-47: A transiting circumbinary multiplanet system, *Science*, 337, 1511-1514.
- Quanz, S. P. 2013: A young protoplanet candidate embedded in the circumstellar disk of HD 100546, *Astrophys. J.*, 766, L1.
- Quintana, E. V. et al. 2014: An Earth-sized planet in the habitable zone of a cool star, *Science*, 344, 277-280.
- Tamura, M. 2009: Subaru strategic exploration of exoplanets and disks with HiCIAO/A0188 (SEEDS), *Exoplanets and disks: their formation and diversity: proceedings of the international conference, Kailua-Kona, Hawaii, 9-12 March 2009*, AIP Conference Proceedings, 1158, 11.
- Tamura, M. et al. 2012: Infrared Doppler instrument for the Subaru Telescope (IRD), *Proc. SPIE*, 8446-1.
- 田村元秀, 2014: 第二の地球を探せ! — 「太陽系外惑星天文学」入門, 光文社新書
- Thalmann, C. et al. 2010: Imaging of a transitional disk gap in reflected light: Indication of planet formation around the young solar analog LkCa 15, *Astrophys. J.*, 718, L87.

水惑星の形成と進化

はしもと じょーじ (岡山大学大学院自然科学研究科)

1 地球のような惑星

宇宙望遠鏡 Kepler によって観測された系外惑星の候補は 3000 個を越え (Exoplanets Data Explorer), 惑星は宇宙にありふれた存在であることが科学的な観測によって明らかになった。系外惑星研究は, 系外惑星の発見だけでなく, 系外惑星がどのような惑星であるのかを明らかにすることをも含めた段階へと移行しつつある (田村氏の講演)。近い将来には, 系外の地球型惑星の直接観測が可能になり, 系外惑星の中に地球のような惑星があるのかどうかについて科学的な根拠をもって議論することができるようになるだろう。

ここでは簡単に, 地球のような惑星という言い方をしたが, それを科学的に議論するためには「地球のような惑星」を科学的に定義する必要がある。地球の特徴は何であるのかというのは簡単に決められる問題ではないが, 地球の表面が広く液体の水からなる海洋に覆われていることをもって地球の特徴とし, 「地球のような惑星」を定義するものとして「水惑星」という言葉が使われることがある。たしかに, 地球の両隣にある金星と火星の表面に海洋は存在せず, 地球にだけ海洋が存在していることを考えると, 水惑星というのは地球の特徴をよく捉えているようにも思える。また, 地球の生命が生存していくためには液体の水が必要とされることから, 水惑星であることは生命を育む惑星 (生存可能惑星) であるための必要条件と考えることもできる。生命を育む惑星であることが地球の一番の特徴であると考えらるなら, 水惑星は地球のような惑星を定義するにふさわしいと言うこともできる。

後述するように, 「水惑星」もまたそれを明確に定義しようとするに困難に直面するのだが, ここではそのことはおいておいて, 水惑星とは「惑星の表面がある程度のまとまった量の液体の水で覆われた惑星」ということとして, 水惑星の形成とその存在確率について議論していくことにする。最初に 1 次元放射対流平衡モデルに基づいた古典的な海洋形成条件についてレビューし, 次に太陽系内の地球型惑星について探査が明らかにしたことと理論的な水惑星の形成条件の整合性につ

いて考察する。最後に水惑星の形成に関する現在の知見をまとめ, もう一度「水惑星」とは何であるのかについて議論する。

2 海洋存在条件

惑星の表面に海洋が形成されるためには, まずなによりも惑星表面に十分な量の H_2O が存在していなければならない。 H_2O は宇宙にありふれた元素である水素 (H) と酸素 (O) から構成される分子で, 宇宙には広く存在していることが知られているが, 惑星表面にある H_2O の量がどのようにして決まっているのかについては, ほとんどわかっていない。 H_2O の存在量についての議論は先送りすることにして, 十分な量の H_2O が存在する場合に海洋が形成される条件について考えることにする。

液体の水が安定に存在する条件は, 温度と圧力によって物理的に定義することができる。まず圧力については, 三重点の圧力 (611.73 Pa) よりも高い圧力が必要となる (これより低圧では気相と固相のみが安定となる)。大気を保持することのできる重力を持つ惑星であれば, 惑星表面でこの圧力の条件は満足されていると考えてよい。したがって, 惑星表面で液体の水が安定に存在できるかどうかを決めるのは, 惑星表面の温度ということになる。すなわち, 温度が低すぎれば凍り付いて固体の水となり, 温度が高すぎれば蒸発して気体 (水蒸気) になるということである。

惑星表層の温度は加熱と冷却が釣り合うように決まる。冷却は惑星自身が熱放射を宇宙空間へ射出することによっておこなわれ, 加熱は入射した中心星 (太陽系の場合は太陽) の光を吸収することで生じる。本当は惑星深部から惑星表層に流入する熱というものもあって, 地球の場合だと固体地球から大気に流れ込む熱は地殻熱流量と呼ばれている。現在の地球において地殻熱流量による加熱の大きさ (100 mW/m^2) は太陽光の吸収による加熱の大きさの 1000 分の 1 以下であり, 無視することができる。

中心星放射加熱の大きさは、中心星の光度、中心星からの距離、惑星アルベドで決まる。中心星放射の加熱と釣り合う熱放射を出す温度は有効放射温度 T_e と呼ばれ、次の式で計算される。

$$T_e = \left(\frac{S(1-A)}{4\sigma} \right)^{1/4}$$

ここで S は大気上端における中心星放射のフラックス、 A は惑星アルベド、 σ はステファン・ボルツマン定数である。加熱と冷却が釣り合った状態にある惑星を外から見ると、有効放射温度になっている。この有効放射温度になっている場所は、外から見て光学的厚さが1になる場所である。大気が惑星の出す熱放射に対して不透明であれば、地表でなく大気のどこか上の方の温度が有効放射温度になり、地表の温度は有効放射温度よりも高い温度になることがある。この地表温度と有効放射温度の差が温室効果で、温室効果の大きさを見積もることができれば、惑星表面の温度を見積もることができ、海洋が存在できるか否かを定めることができる。

海洋が存在できるか否かという問題を広いパラメタ空間の中で調べるにあたっては、1次元放射対流平衡モデルを用いて温室効果の強さを見積もられることがおこなわれてきた (例えば, Abe 1993)。これらのモデルにおいては、惑星表面に大量の H_2O があるものとして大気中の H_2O 量は大気の温度に応じてしかるべく調節されると仮定し、 H_2O 以外の温室効果気体の量が変ったときに地表温度がどう変わるのかを計算によって求めている。 H_2O 以外の温室効果気体として何を仮定するかによって詳細は変わるが、これらのモデルによって明らかにされたのは、海洋が存在するためには中心星放射による加熱の大きさがある程度の範囲に入っていないなければならないということであった。中心星放射の加熱が強すぎる場合には暴走温室状態に陥って海洋は蒸発し、中心星放射の加熱が弱すぎる場合には CO_2 などの温室効果気体を加えても H_2O が液体として安定に存在できる温度まで暖まらず凍結してしまう。中心星放射の加熱の強さは、中心星の光度と惑星アルベドが決まると、中心星からの距離だけで決まる。地球のように海洋に覆われた惑星のアルベドは地球と同程度であろうと思うと、海洋が存在できる (暴走温室にも凍結にもならない) ちょうどよい中心星からの距離の範囲というものが決まることになる。この中心星からちょうどよい範囲はハビタブルゾーンと呼ばれ、現在の太陽系においては太陽から 0.95AU から

1.37AU (1AU は太陽・地球間の距離) の間が海洋の存在できるハビタブルゾーンであるとされており (例えば, Kasting and Catling, 2003), その中にある惑星は地球だけである。

暴走温室と凍結によって定義される海洋存在条件 (ハビタブルゾーン) は、水惑星になるか否かを判定するひとつの目安となるものであるが、これだけ見ていけばよいというものではもちろんない。ハビタブルゾーンの中にあつたとしても、惑星表層に H_2O がなければ水惑星にならない。惑星表層に十分な量の H_2O があつたとしても、大気中にしかるべき量の温室効果気体が含まれていないと水惑星にならない。これらのことは、ハビタブルゾーンが十分条件でなく必要条件にすぎないことを意味している。

一方で、ハビタブルゾーンが必要条件になっているかどうかについても考える必要がある。1次元放射対流平衡モデルでは大気的气体成分が放射に及ぼす影響はよく評価されているが、雲やエアロゾルといった大気中に存在する粒子が放射に及ぼす影響はあまりきちんと評価されていない。雲はその粒径を決めてやらないと放射強制力を評価することができないし、そもそも雲は時間的・空間的に偏在しているためそれを1次元放射対流平衡モデルで扱うことが難しい。雲やエアロゾルの放射強制力を考慮に入れたとき、ハビタブルゾーンがどのように変更されるのかは、あまりよくわかっておらず、今後の課題として残されている。また、惑星アルベドについても考える必要がある。地球の場合、惑星アルベドの値は雲の影響を強く受けているが、現在の地球と異なる条件 (中心星放射加熱, 大気組成, 大気温度) においたとき雲がどのように変化し、惑星アルベドがどのように変化するのか、それを推測することすら難しい。惑星アルベドが想定よりも大きくなればハビタブルゾーンは内側へ移動し、惑星アルベドが想定よりも小さくなればハビタブルゾーンは外側へ移動する。案外に、ハビタブルゾーンは広いのかもしれないし、狭いのかもしれない。

3 太陽系の地球型惑星

3.1 地球

現在の地球はその表面の約7割を海洋で覆われている。地質記録を見ると、一時的に全球凍結のようなことはあつたにしても、海洋は38億年くらい前からほぼ

途切れることなく存在し続けてきたと考えられる。すなわち、地球は 38 億年前からずっとハビタブルゾーンの中にいたことになる。

ずっと海洋が存在していたのなら、安直に昔の地球は今の地球と変わらなかったと考えてもよいように思えるが、昔の太陽は現在の太陽と違うため、昔の地球は今の地球と同じであるわけにはいかない。このことは「暗い太陽のパラドクス」と呼ばれている（例えば、Sagan and Mullen, 1972）。太陽は中心核でおこる核融合反応で発生したエネルギーを放出することで光り輝いているが、この核融合反応の活発さは時間とともに増大すると考えられている。これは、核融合反応が水素をヘリウムに変えるため、時間の経過とともに中心核を構成するガスの平均分子量が大きくなって粒子数は減少し、星の重さを支える圧力を維持するために中心核の温度は上昇し、その結果として核融合反応が起こりやすくなるためである。太陽光度は現在の 70%程度から時間とともに徐々にその光度が大きくなってきたと推定されており、地球のアルベドと大気組成が現在のそれと変わらないのであれば、20 億年前以前の地球は凍結してしまうことになる。

地質記録との整合性をとるものとして一般に考えられているのは、昔の地球大気には現在よりも多量の温室効果気体が含まれており、その温室効果が弱い太陽光度を補って温暖な環境を維持していたとするものである。1次元放射対流平衡モデルによると、およそ 1 気圧の CO_2 が大気であれば暗い太陽の下でも地球は海洋を保持することができるとされている。地表には炭酸塩岩の中に固定された CO_2 が 50-100 気圧分あるので、1 気圧程度の CO_2 が大気にあってもよい。

海洋を持つ惑星の大気 CO_2 量は、火成活動で大気に放出される CO_2 量と、海洋中で炭酸塩岩に固定されて大気から除去される CO_2 量の釣り合いで決まるとする考えがある (Walker et al. 1981)。海洋中で生成する炭酸塩岩の量は、海洋に供給される Ca イオンの量で規定されており、海洋に供給される Ca イオンの量は陸地に降った雨によって陸地の岩石がどれだけ化学風化するかによって決まる。温暖な環境では、降水量が増え化学風化も進みやすいため Ca イオンが大量に供給され、大量の CO_2 が炭酸塩岩に固定されて除去される。そうすると大気中の CO_2 量は減少して温室効果が弱まることによって表層環境は寒冷化する。逆に寒冷な環境では、降水量が少なく化学風化も進みにくいため Ca イオンの供給量が抑えられ、炭酸

塩岩に固定される CO_2 量が少なくなるため大気中の CO_2 量は増える。そうすると CO_2 の温室効果によって表層環境は温暖化する。このように大気中の CO_2 量が決められているならば、大気 CO_2 量が自動的に調整されることによって、ちょうど海洋が存在するような表層環境が維持されることになる。

この大気 CO_2 量を維持する機構は、ウォーカー・サイクルと呼ばれたり、ウォーカー・フィードバックと呼ばれたりする。地球ではウォーカー・サイクルが働くことによって、太陽光度の時間変化によらず地球は海洋が存在できる条件にあり続けたのかもしれない。ウォーカー・サイクルは、化学風化によって供給される Ca イオンの量を変化させることによって表層環境を変えるため、表層環境が変わるには 100 万年程度以上の時間がかかる。これより短い時間スケールでは、全球凍結のような極端な状態に陥ることもありえる。そしてもし全球凍結に陥った場合でも、ウォーカー・サイクルが働いていればいずれ全球凍結から抜け出して海のある状態に戻ることができる。全球凍結の発見以前において、ウォーカー・サイクルが地球の表層環境に影響していたことを示す明確な証拠は存在していなかったが、地質記録に残る全球凍結とそこからの脱出は、地球においてウォーカー・サイクルが確かに働いたことを示す証拠と見ることができる。

3.2 火星

現在の火星に海洋は存在しない。火星の表層は乾燥しているが、この乾燥は平均の地表温度が 230 K という低温のためで、 H_2O そのものが存在しないわけではない。 H_2O はあっても乾燥している現在の火星は「地球のような惑星」という意味での「水惑星」ではないが、いくつかの証拠から考えて過去には地表が海洋で覆われた「水惑星」の時代があったと考えられている（例えば、Baker et al. 1991）。

過去の火星に海洋が存在したと考えられるようになったのは、探査機 Viking によって撮影された地表の写真の解析によって、波打ち際とおぼしき地形や、流水によって形成されたらしき河川状の地形が発見されたからである。その後、探査機 Mars Global Surveyor による重力場の測定により、この波打ち際とされた一連の地形が確かに等重力ポテンシャル面上にあることが確認され、過去の火星に海洋が存在したことは確からしいと考えられるようになった。また、探査機 Mars

Odessey のガンマ線スペクトロメーターの観測によって地下に H₂O が大量に存在することが示唆されている。

火星が温暖湿潤であった時代はクレーター年代学(衝突クレーターの数に基づいて年代を推定する手法、絶対年代を決めるのは難しいが、相対年代はよく決まる)に基づいて見積もることができ、流水によって作られたと考えられているバレー・ネットワークは 38 億年前以前に形成されたと推定されている。もしも温暖湿潤な環境が長期間にわたって維持され活発な水循環があったとすると、おそらく古い地形は浸食され消されてしまうと考えられるが、火星には古い地形も残されていることから温暖湿潤であった期間は比較的短いものであったと考えられる。また、水に関連する地形が一度に形成されたとも考えにくいことから、海洋が形成されたのは 1 回だけでなく、寿命の短い海が何度か繰り返し形成されたのではないかと推察されている。

地質学的に温暖湿潤な火星が存在したことはほぼ間違いないと考えられる一方で、気候学的には 38 億年前以前の火星に温暖な表層環境をつくりだすことは難しい。地球の項で説明したように 38 億年前の太陽光度は現在に比べるとだいぶ暗いため、火星地表の広い範囲が液体の水の安定に存在する温度になるためにはかなり強い温室効果が必要とされる。かつては 5 bar 程度の分厚い CO₂ の大気が形成されれば温暖な火星になると考えられていたこともあったが、中心星放射の加熱がある程度以上に弱い条件下では CO₂ 自身が凝結してしまうことによって、十分な温室効果をもたらすことはできないことが明らかにされた (Kasting 1991)。地球型惑星の表層に大量に存在すると考えられる CO₂ は温室効果気体としてもっとも考えやすいものであるが、温暖な火星を作り出すためには CO₂ 以外の温室効果が必要である。凝結した CO₂ の雲が持つ温室効果、CH₄ や SO₂ といった CO₂ 以外の温室効果気体、さらには CH₄ から光化学反応で生成する有機エアロゾルによる太陽放射の吸収など、火星を暖める機構としていくつかのものが提案されているが、それらで本当に火星が暖まるのかどうかは明らかではない。暗い太陽の下でハビタブルゾーンが太陽系の内側へ縮んだ過去において、火星がハビタブルゾーンの中に入るのとは簡単なことではない。

なぜ過去に火星が温暖であり得たのかという謎が解けていないのと同様に、温暖な火星が現在あるような寒冷な火星へとどのように進化したのかについてもあまりわかっていない。単純には太陽光度が大きくなる

につれて火星の表層環境もより温暖な環境になると考えるのが自然であるが、そうはならなかった。おそらくは温室効果を担っていた成分の一部が大気から失われることによって寒冷化したと考えられるが、それが何であるのかはわかっていない。

また、過去の火星を温暖にするのに CO₂ だけでは不足だが、大量に存在するであろう CO₂ が温室効果のある程度の部分をまなかつたことは間違いない。現在の火星大気は CO₂ が主成分であるがその量は 6 hPa でしかないため、過去に数 bar の CO₂ 大気があったとしたらその CO₂ は大気から取り除かれたことになる。液体の水が存在すれば炭酸塩岩を生成することで大気から CO₂ を取り除くことができるが、寒冷化した後の火星で大量の炭酸塩岩を生成することはできないとすると、凍結した時点でかなりの量の CO₂ が大気に残ることになる。ある程度の量は宇宙空間へ逃散¹ することによって失われたと考えられているが、十分な量の CO₂ を宇宙空間へ逃散させることができるのかどうかは明らかでない。

H₂O の行方もまた、CO₂ の行方と同様に問題である。現在の火星の表面には極域に氷の形でいくばくかの H₂O が存在しているが、その量は海洋を形成するほどではない。かつて海洋を形成した H₂O の一部は宇宙空間へ逃散し、一部は地下に潜ったと思われるが、それぞれどのような過程でどれくらいの量が表面から移動したのかはわかっていない。惑星表層に存在する水の量がどのように決まっているのかという問題に絡んでも、火星の表面から H₂O が消失する過程がどのようなものであったのかを考えることは興味深い。

3.3 金星

現在の金星に海洋は存在しない。金星の表層は乾燥していて、H₂O は大気中にほんの少しの量が含まれているにすぎない。大気中の水蒸気量を可降水量で表すなら 30~100mm で、地球の表層には平均水深にして約 3000m の水があることに比べると、その量は 10 万分の 1 程度でしかない。現在の金星は表層にある H₂O の量がとても少なく、水惑星ではない。しかしながら、金星もまた過去には海洋を保持していた可能性が示唆されている。

¹大気流出 (escape) 過程は日本語で「散逸」と書かれることが多いが、散逸は dissipation を表す言葉としても使われるため紛らわしい。ここでは escape に対応する過程を「逃散」と表す。

まず、金星大気に含まれる水素の同位体比から、過去の金星には現在ある量の100倍以上の H_2O が存在していたと推定される。金星大気の水素同位体比は地球の海水のそれに比べると、重水素が100倍ほど多くなっている。太陽系において地球と金星はごく近傍にあり、地球と金星はほぼ同じ物質から形成されたと考えると、地球と金星の材料物質の水素同位体比は同じであったと考えられる。水素が宇宙空間へ逃散する過程では、軽い水素は重い水素よりも逃散しやすいため、水素が逃散すると惑星に残った水素は重い水素の割合が増加する。すなわち、金星大気の水素同位体比は金星から大量の水素が逃散した結果として説明することができる。過去の金星に大量の水素があったのなら、水素と酸素が結合してつくられる H_2O も大量にあったと考えられる。

海洋が形成されるためには、 H_2O が大量に存在するだけでなく、地表がほどよい温度になっている必要がある。金星は地球に比べると太陽に近く、大気上端に入射する太陽放射のフラックスは地球のその約2倍となっている。そのため、地球をそのまま金星の位置まで移動させると暴走温室状態に陥ってしまう。すなわち、現在の金星はハビタブルゾーンの外にある。しかし、過去の太陽光度は現在の70%程度であったとすると、その時代のハビタブルゾーンは現在よりも太陽系の内側にずれて設定されることになる。惑星アルベドがそこそこに大きくなれば、過去の金星は暴走温室状態に陥らず海洋存在条件を満足していた可能性がある。

金星には火星と違って古い地形が残されていないため、地形学的な手法で海洋の存在を調べることはできないが、化学的な痕跡が残されている可能性はある。火成岩の一種に花崗岩と呼ばれる種類の岩石があり、この岩石は水が存在する条件下で玄武岩が溶融して生成すると考えられている。花崗岩は地球以外の惑星で発見されておらず、花崗岩は水と深く関連していると考えられる。水がないと生成しない花崗岩が金星に発見されたなら、過去の金星には海洋が存在していたと考えられるのが妥当であろう。

金星はその全面を分厚い雲で覆われているため、その地表を観測することが難しく、地表物質を全球的に調べることができないでいた。近年になって、近赤外域の特定の波長において地表から射出された光が大気を透過して漏れ出ていることが発見され、この近赤外線を使って金星地表を構成する物質を推定することができるようになった(Hashimoto and Sugita 2003)。ご

く限られた情報しか取得できないため全てを確定することはできないが、金星の地表は玄武岩的な組成と花崗岩的な組成の2つに分けられることが明らかになった(Hashimoto et al. 2008)。玄武岩的な組成は主に金星の低地に見られ、花崗岩的な組成は主に金星の高地に見られる。玄武岩と花崗岩の密度を比べると後者の方が軽く、軽い物質が高地を作ることはアイソスタシーの考え方とも整合的である。近赤外線の観測だけで花崗岩の存在を断定することはできないが、金星の高地は花崗岩で構成されている可能性がある。

過去の金星に海洋が存在していたとしたら、金星は湿潤な状態から現在の乾燥した状態へと進化したことになる。太陽光度の増大にともなって暴走温室状態に陥り、海洋は失われたと考えるのが自然であろう。海洋を形成していた H_2O は水素が宇宙空間へ逃散することで消失したと考えられるが、水素が、いつ、どのように、どれくらいの量、逃散したのかについては不明なことも多い。ここでもまた、惑星表層に存在する水の量がどのように決まっているのかという視点で見て、金星の海洋の消失過程は興味深い。

4 水惑星の存在確率

地球という惑星を特徴づけている海(地表に存在する大量の液体の水)であるが、海が存在することはどれくらい特殊なことなのだろうか。太陽系内の3つの地球型惑星、金星、地球、火星を見ると、この中で現在海洋を保持しているのは地球のみであり、水惑星の存在確率は1/3である。しかし先に見たように、過去においては火星にも金星にも海洋が存在していた可能性がある。火星と金星にも海洋が存在していたとしたら、過去の太陽系において水惑星の存在確率は3/3であったことになる。この数字だけを見ると、水惑星の形成はありふれたことであると結論される。一方で、現在の太陽系において海洋を保持している惑星は地球だけであるということもまた事実であるので、水惑星はどこにでも形成されるが、それが長期間にわたって存在することができるかどうかの方が問題ということなのかもしれない。

水惑星と呼ばれるためには、どれくらいの量の水があればよいのかという問題はとても難しい。惑星表層に液体の水が存在するだけでよいのなら、現在の火星と金星は実は水惑星である。現在の火星表層は酷寒の環境だが、定常的ではないが一時的には液体の水が存

在することのできる温度・圧力条件になる地域が存在する。そして、液体の水が流れて形成されたと考えられる地形が現在もつくられており、地表近くに液体の水が存在することがあることは間違いない。金星は、地表温度が735Kにも達していて地表で液体の水は安定に存在することはできないが、高度50-70kmにある雲層の温度・圧力は地球の対流圏とあまり変わらず、そこには濃硫酸水溶液からなる雲が存在している。濃硫酸ではあるが水溶液であり、液体の水が存在している。現在の火星と金星に存在する液体の水は量が少ないため、地球のような惑星という意味で水惑星と呼ぶことはできないと思うが、こうした液体の水の存在する領域は生存可能領域と考えることはできるので、その意味で地球外生命の探索という意味においては探索の対象とされるべきなのかもしれない。

水が大量にある惑星もまた、地球のような惑星とは違うものになる。惑星表面の大量の水があると陸地は水没してしまう。陸地がない惑星こそ水惑星と呼ぶべきなのかもしれないが、陸地がない惑星は地球のような惑星とは違うように思われる。地球の気候が安定に維持されてきたのは、ウォーカー・サイクルによって大気CO₂量がちょうどよい量に維持されてきたからであるとすると、地球のように安定な気候が維持されるためには陸地が必要ということになる。ウォーカー・サイクルが働くためにはある程度の大きさの陸地が必要であり、陸地が存在するためには惑星表層にある水の量が多すぎたはいけない。

陸地が存在するかどうかは、惑星表面の凸凹の大きさと、惑星表面にある水の量の兼ね合いで決まる。凸凹が大きければ水が多少たくさんあっても水没をまぬがれる地面が存在する。ある程度の大きさの惑星においては重力がそこそこに強いので、あまり大きな凸凹は維持することができない。そう考えると陸地が存在するという条件を満足する水の量の上限というのは、それほど大きくなることができない。地球の表層にある水の量が2倍になれば陸地の大部分は水没してしまうことを考えても、地球が地球らしくあることのできる水の量というのは狭い範囲に縛られているように思われる。地球の海水の量は 1.4×10^{21} kg であり、地球の質量 (6×10^{24} kg) に対する割合は 0.02 % でしかない。惑星表層に存在する水が多すぎたはいけないという条件は、もしかすると非常に厳しい条件であるのかもしれない。

参考文献

- Abe, Y., 1993: Physical state of the very early Earth. *Lithos*, 30, 223-235.
- Baker, V. R., R. G. Strom, V. C. Gulick, J. S. Kargel, G. Komatsu, and V. S. Kale, 1991: Ancient oceans, ice sheets and the hydrological cycle on Mars. *Nature*, 352, 589-594.
- Exoplanets Data Explorer, (Available at <http://www.exoplanets.org/>)
- Hashimoto, G. L., and S. Sugita, 2003: On observing the compositional variability of the surface of Venus using nightside near-infrared thermal radiation. *J. Geophys. Res.*, 108(E9), 5109, doi:10.1029/2003JE002082
- Hashimoto, G. L., M. Roos-Serote, S. Sugita, M. S. Gilmore, L. W. Kamp, R. W. Carlson, and K. H. Baines, 2008: Felsic highland crust on Venus suggested by Galileo Near-Infrared Mapping Spectrometer data. *J. Geophys. Res.*, 113, E00B24, doi:10.1029/2008JE003134
- Kasting, J. F., 1991: CO₂ condensation and the climate of early Mars. *Icarus*, 94, 1-13.
- Kasting, J. F., and D. Catling, 2003: Evolution of a habitable planet. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 41, 429-463.
- Sagan, C., and G. Mullen, 1972: Earth and Mars: Evolution of atmospheres and surface temperatures. *Science*, 177, 52-56.
- 田村元秀, 2014: 本シンポジウム講演.
- Walker, J. C. G., P. B. Hays, and J. F. Kasting, 1981: A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of Earth's surface temperature. *J. Geophys. Res.*, 86, 9776-9782.

金星気象衛星「あかつき」と今後の惑星大気研究

今村 剛 (JAXA 宇宙科学研究所)

1. 金星気象衛星のつまずきと再出発

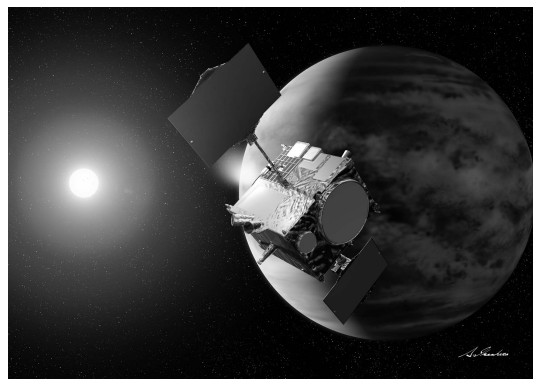
「あかつき」は金星の気象衛星として立案され、10年にわたる開発の末、2010年5月に打ち上げられた。計画では金星周回軌道上から「ひまわり」などの地球気象衛星に似たりリモートセンシングによって大気の運動を映像化し、スーパーローテーションや雲形成のメカニズムといった謎に挑む(第1図)(Nakamura et al. 2011)。

同年12月、「あかつき」は金星周回軌道に入ることを試みた。それまで順調に旅を続けてきたが、主エンジンが途中で停止したため金星の横を素通りした。金星到着には失敗した。

この失敗のあと、プロジェクトチームでは事故原因の究明と、「あかつき」をもう一度金星まで戻す方法の検討を始めた。主エンジンが停止した際には、燃料を押し出すための高圧ガス供給のバルブの動作不良が引き金となり、燃料と酸化剤を混合する際の配合が狂ったために、主エンジンの燃焼器が異常な高温となり破損したと推定された。その一方で、探査機が異常を検知して自律的に燃焼を停止したため、燃料は大半が残っている。そこで、主エンジンに再度点火して改めて金星を目指すことが検討された。問題は主エンジンが使用に耐える状態であるかどうかである。かくして2011年9月に試験噴射を行ったが、もはや必要な推進力は得られないということがわかった。

残された手段は、本来は姿勢制御用の4基の小さなエンジン(RCS:reaction control system)を長時間連続噴射することによる軌道制御である。主エンジンが燃料と酸化剤を混合燃焼させて推力を得る2液式エンジンであるのに対し、RCSは燃料を触媒反応で分解させて推力を得る1液式エンジンである。今後RCSしか使わないとすると酸化剤は無駄な重量であり、また酸化剤の重量を抱えたままでは十分な加速が得られない。そこで2011年10月に、もともと予定になかった酸化剤排出を行い、65kgもの軽量化に成功した。

いよいよ2011年11月、再度金星を目指し、RCSによる軌道制御を行った。10分間に及ぶRCS連続噴射は初めての経験である。予期せぬ事態に備えて緊張して臨んだが、計画通りの安定した加速が得られた。同様の噴射を3回行い、合わせて240m/秒の速度変更を達成



第1図 「あかつき」の想像図。赤外線で見える雲のイメージを夜側に描いている。

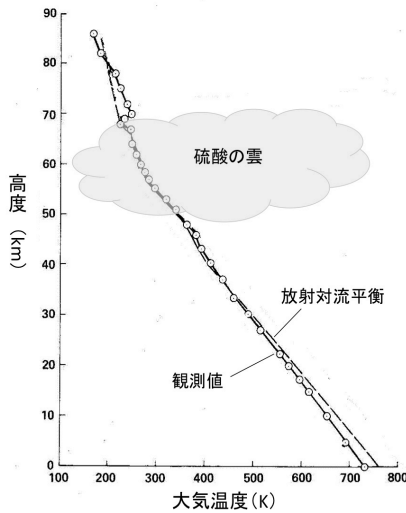
した。「あかつき」は今、2015年末に再び金星に会合することを目指して太陽系の旅を続けている。

2. 金星気象学の問題

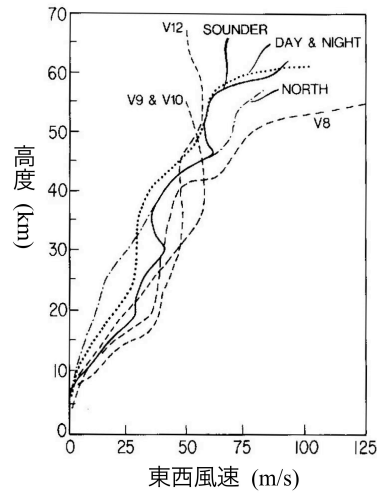
2.1 大気構造

金星は太陽から約1億kmの距離(地球-太陽間の0.72倍)のところを公転している地球型惑星である。大きさは地球の0.95倍で、地球とほとんど同じと言って良い。これまでの探査によって明らかになった金星の素顔は地球とはかなり違ったものである。地表は460℃という灼熱の世界である(第2図)。大気は主に二酸化炭素からなり(96.5%)、その量は大変多く、地表面気圧は90気圧(水深900m相当)である。海はなく、大気中の水蒸気は0.003%程度と、かなり乾燥している(地球では1%程度)。地表には火山が散在し、数億年前に大規模な地殻変動で噴出したと考えられる溶岩におおわれている。高度50-70km付近には濃硫酸の雲が浮かび、惑星全体をおおう。

金星の高温の直接の原因は太陽に近いことではない。金星の雲は入射太陽光の78%を反射する(地球では30%)。太陽光は雲と大気と通過するうちにさらに弱まり、地表まで届く太陽光は地球の10分の1にすぎない。にもかかわらず、膨大な二酸化炭素がもたらす強力な温室効果のために、わずかなエネルギーをもとにして効果的に暖まっているのである。地球では二酸化炭素の増加による温暖化が問題になっているが、金星は温暖化の究極の姿を見せていると言えるかもしれない。



第2図 金星の放射対流平衡の温度分布と探査機による観測結果(Pollack et al. 1980 を改変)



第3図 米国とロシアの着陸機によって測られた金星の東風の高度分布(Schubert et al. 1980 を改変)

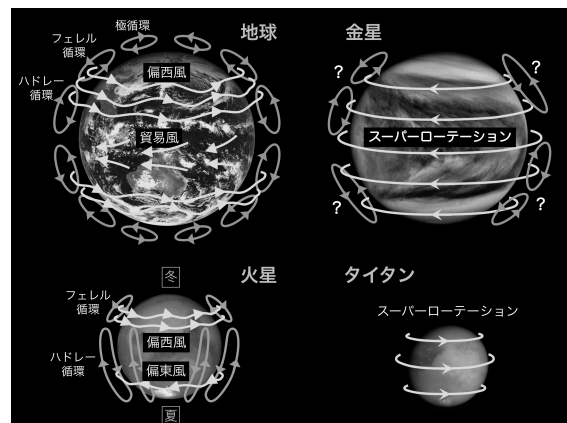
46 億年前に太陽系が作られた時、金星にも海があったということはあることである。そのころの金星では、地球と同様に二酸化炭素は海に溶け込み、炭酸カルシウムを生成して地殻に取り込まれていたかもしれない。しかし地球の2倍の太陽光を浴びる金星は地球よりも暖かく、そのために原始の金星の大気には地球よりも多くの水蒸気が含まれていたであろう。水蒸気は徐々に高層大気に運ばれ、太陽紫外線によって水素と酸素に分解され、水素は重力を振り切って宇宙空間に流れ出してしまったということが考えられる。金星の海はこのようにして失われたのかもしれない。一方、重い酸素は簡単には流出しないと考えられるため、その行方は謎である。

2.2 スーパーローテーション

金星大気はその力学状態においても特徴的である。金星の自転は地球とは逆向きで、その周期は 243 地球日と長く、赤道での自転速度は 1.6 m/秒である。1 太陽日が 117 日という長さであるため、太陽側と反太陽側で大きな温度差がつき、太陽側で上昇した空気が反太陽側に流れ込んで下降するような「夜昼間対流」が存在すると予想されたこともあった。しかし金星の下層大気の放射緩和時定数は数十年という長さなので、温度差は東西方向にはよく均されるはずであり、夜昼間対流にはなりそうにない。地球と同様に自転軸に対して対称な運動が卓越するとしたら、そのような風は地球と同様に自転の強い影響下であり、自転の遅い金星の風は自転と同程度に遅いと考えることができる。たとえば地球の偏西風は 30 m/秒程度で、赤道での自転速度 460 m/秒の 1 割以下である。

さて観測によれば、金星では全ての緯度で自転と同方向の風が吹き、雲が存在する高度 60 km 付近では 100 m/秒、自転の 60 倍の角速度に達する(第3図)。この高速風を「スーパーローテーション」と呼ぶ。地球の带状風がコリオリ力と気圧傾度力のバランス状態(地衡風)にあるのに対して、自転より風のほうが速い金星では、带状風に対して働く遠心力が気圧傾度力とバランスしている(旋衡風)と考えられる。

このような風系は地球と大きく違っている(第4図)。地球の場合、熱帯地方では東風、中緯度では西風が卓越し、いずれも前述のように自転速度より遙かに遅い。もう一つの大気を持つ地球型惑星である火星では、地球に似た風が吹いていると考えられている。一方、土星の衛星タイタンでは自転速度の 10 倍程度のスーパーローテーションが起こっているらしい。タイタンは惑星ではない



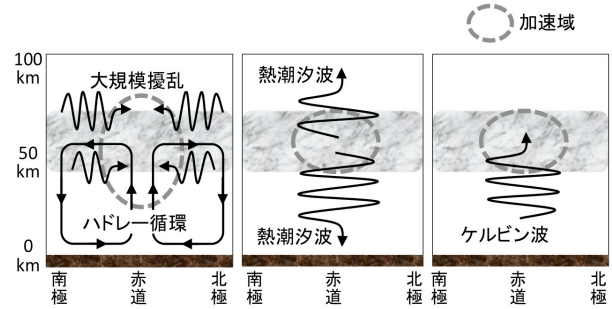
第4図 地球、金星、火星、タイタンの風系 (写真はNASA 提供)

が、窒素を主成分とする大気を持つ。スーパーローテーションは惑星の風の基本形態の一つであるのかもしれない。

地球や火星の偏西風は、子午面循環による固体惑星から中高緯度への自転軸周り角運動量の移流によって、かなりの部分を説明できる。ここで角運動量の符号は自転と同方向の回転を正とする。一方、金星のように赤道上空で角運動量が最大になるような風速分布はそうはいかず、非軸対象な擾乱による角運動量輸送がなくては維持できない(Hideの定理; Hide 1969)。

これまでスーパーローテーションを説明する様々な理論が提唱されてきた(第5図)。比較的有力な説として、Gierasch (1975)が提唱し、いくつかのGCM実験でそれに沿った説明がなされているものがある(Yamamoto and Takahashi 2006)。まずハドレー循環が、低緯度において地表から上空へと角運動量を移流し、上空で低緯度から高緯度へと角運動量を移流する。その一方で、何らかの非軸対象な大規模擾乱により高緯度から低緯度へと角運動量が運ばれれば、大気を持つ角運動量が低緯度ほど大きいような風速分布になる。ここにハドレー循環が重なると、角運動量の増えた低緯度で上昇流、角運動量が減った高緯度で下降流となるため、正味では上向きに角運動量が運ばれてスーパーローテーションが作られる。低緯度向きに角運動量を運ぶ擾乱は、ハドレー循環が中高緯度に作り出すジェットに起因する順圧不安定から生じると期待されてきた(Rossow and Williams 1979)。しかし一方で、地球ではそのようなジェットは傾圧不安定擾乱を生み、ロスビー波を放射することによって低緯度から中高緯度へと角運動量を運び、中緯度ジェットを強化することが知られている(Vallis 2006)。角運動量輸送の向きを支配するパラメータは明確でないように思われる。大規模擾乱も子午面循環も観測からはほとんど分かっていない。

他に有力な仮説として、雲層が太陽光を吸収して暖まることによって励起される熱潮汐波が下向きに伝わり、地表まで到達して固体惑星に角運動量を渡す、というものがある(Takagi and Matsuda 2007)。雲層から見ると太陽は自転とは反対方向に動くため、太陽光加熱により励起される熱潮汐波は負の角運動量を持つ。そのため熱潮汐波は負の角運動量を固体惑星に渡すことになり、大気に正の角運動量が蓄積してスーパーローテーションとなる。雲頂付近では実際に熱潮汐波らしき周期変動が捉えられている。肝心の下層大気へ伝搬する熱潮汐波の観測的裏付けが待たれている。



第5図 スーパーローテーションの様々な仮説。
(左)ハドレー循環、(中)熱潮汐波、
(右)Kelvin波による加速。

赤道ケルビン波など自転方向の角運動量を持つ波動が上向きに伝搬することによりスーパーローテーションを維持するという考えもある。それらしき風速変動が実際に雲頂で観測されており、少なくとも雲頂付近の鉛直シアの維持には寄与がありそうである(Del Genio and Rossow 1990)。

このような仮説はあるものの、GCM実験では放射強制を非現実的に大きくしないとスーパーローテーションが生じないという状況が長く続いてきた。現実的な設定ではハドレー循環が著しく弱いことが原因であるようである(Lebonnois et al. 2010)。金星大気のモデリングが難しい理由の一つに、大循環の時間スケールが数十年という長さであるということがある。スーパーローテーションは地球では問題にしないような小さな加速が長い時間をかけて蓄積して生じるのかもしれない。そのため、数値粘性など人為的な要因による角運動量輸送を慎重に評価する必要があることが指摘されている。

静止大気から計算を始めるとスーパーローテーションが再現されずに高緯度にジェットが作られるが、スーパーローテーションする初期状態から始めるとスーパーローテーションが維持される、という報告が近年いくつかなされている。それが正しいのだとすると、金星の大気循環は多重解を持つということになる。かつてMatsuda (1980)は解析的手法により金星におけるスーパーローテーションと夜昼間対流の多重解の存在を示唆したが、ここで言う多重解と共通性があるかもしれない。

多重解の可能性は気候進化の研究に問題を提起する。雲量や大気の構造は大気大循環の影響下にある。大気の組成と量を与えれば惑星のアルベドや温度は一意に決まると考えるのが普通だが、そうではないとしたら、惑星の気候進化において力学状態の履歴を考慮せねばならなくなる。スーパーローテーションがどれほどロバストな現象であり、モデルに含まれていない物理過程(メ

ソスケール、雲物理など)を考慮してもなお多重解が無くならないのかどうか、研究が必要である。

2.3 子午面循環

子午面循環はスーパーローテーションや物質輸送の要であるが、その構造はほとんど分かっていない。地球のように遠心力に比べてコリオリ力が卓越する場合には、熱源分布や帯状風加速分布に対して子午面循環がどう決まるか、ある程度の理解がある。しかしスーパーローテーション大気において子午面循環の構造がどう決まるのかは理解されていない。

雲画像に見られる細かな模様を追跡するとスーパーローテーションに重畳して極向きの運動が見られることから、雲頂高度(〜70 km)には極向きの循環があると考えられてきた。しかし雲追跡は昼側でしかできないので、推定された循環は熱潮汐波の影響を受けており、子午面循環を反映するとは言いがたい。夜側には赤道向きの流れがあるかもしれないのである。雲頂の筋状の模様を子午面循環とスーパーローテーションによる空気塊の引き延ばし効果と考えると子午面循環を推定する議論もあるが、あくまで間接的な推定である。

金星は自転が遅いことから、赤道から極域まで達するハドレー循環(直接循環)があると古くから予想されてきた。太陽光加熱による熱源が地表面と雲層の2カ所に局在しているために、下層大気と雲層高度に別々にハドレー循環が存在して上下に積み重なっているという考えがあり、さらには2つのハドレー循環に挟まれるように間接循環があるという想像もある(Schubert et al. 1980)。その一方で、大気はスーパーローテーションに伴う角運動量を持っており、加熱強制だけに基づいて子午面循環を論じるわけにはいかない。

観測された温度分布をもとにして、子午面循環の構造とそれと整合的な帯状風加速分布を診断的に推定する、という試みもある(Hou and Goody 1985)。その結果によれば、直接循環と関節循環が上下に積み重なり、複雑な加速・減速分布が見られる。そのような構造の物理的説明は明確でなく、現実性はよくわからない。雲より上の領域では、温度分布から極向きの循環を推定したうえで、スーパーローテーションに乗った回転座標系で地球の中層大気力学のダウンワードコントロールの概念を適用する試みがある(Imamura 1997)。

現実的な加熱強制を与えた GCM 結果(Lebonnois et al. 2010)によれば、雲層高度と下層大気でそれぞれ直接循環が卓越するものの、局所的な間接循環が様々な

緯度や高度に現れている。高度 70 km 付近に位置する中緯度ジェットの近傍では傾圧不安定に伴う間接循環があるという考えもある。

子午面循環は温度分布の不思議な特徴を説明するかもしれない。第 2 図に示したように高度およそ 40 km 以下では温度減率が乾燥断熱温度減率に極めて近い。このことから、地表から高度 40 km まで達する深い対流が不安定成層を解消していることが想像された。しかし観測された温度減率は断熱温度減率よりもわずかだが小さい。わずかではあっても有意に安定成層であるような温度分布を、微視的な対流による不安定の解消で実現できるとは考えられない。Stone (1975)の先駆的な解析的研究によれば、金星のように放射緩和時定数の長い大気では、ハドレー循環によって極めて断熱温度減率に近い安定成層が生じうる。この問題を現実に近いモデルによって掘り下げることがなされていない。

2.4 硫酸の雲

金星では海がないことの帰結として、大気中に硫黄化合物と塩素化合物が地球に比べ桁外れに多く存在する。そのため様々な触媒サイクルを経て硫酸が多く生成され、これが雲(エアロゾル)となって上空を覆っている(Mills et al. 2007)。しかし硫酸生成に関わる具体的な反応系はよくわかっておらず、観測とモデルの食い違いも大きい。たとえば SO_2 から H_2SO_4 への酸化に関わる酸素分子が観測で検出されていない一方で、光化学モデルは観測による上限値よりもはるかに多い量を予想している。硫酸や凝結核の生成過程が不明確であるために、金星のアルベドがどのように調節されているのかを理解できない状況である。

金星の雲は可視光では特徴に乏しいが、紫外線で見ると、赤道から高緯度まで斜めに伸びる暗い帯や数十〜数百 km 規模の細胞状構造など様々な模様が観察される(第 4 図)。光化学が支配する上層大気と熱化学が支配する下層大気が雲層高度で接していると考えられているが、雲頂の様子は、そのように異なる性質を持つ気塊がダイナミックに混じり合う過程を反映するのだろう。ただし明暗のもとになる太陽光吸収物質の正体は、単体の硫黄や塩素など諸説あるもののはっきりしない。多様な模様を作り出す力学過程もほとんど特定されていない。

雲は下層大気から放射される赤外放射によって下から加熱されており、そのため雲底近くでは対流が生じる。この対流は、雲の下に漂う硫酸蒸気を持ち上げて雲粒

へと凝結させ、さらに雲形成に関わるSO₂やH₂Oの輸送、重力波励起を介して大規模構造の形成に関わると想像されている。対流の水平分布はわかっていないが、日射は雲層上部を加熱して大気を安定化することから、低緯度や日中では対流が抑えられ、逆に高緯度や夜間で対流が強くなるという考えがある(Imamura et al. 2014)。通常の境界層対流とは逆の日射依存性が、このように雲やエアロゾルに覆われた惑星の基本的な特徴であるのかもしれない。

金星の雷放電は、おそらく雲物理と関連する問題である。発光そのものの確からしい観測は無いものの、雷放電が起源と思われる電波雑音が探査機によってとらえられている(Russell et al. 2007)。地球では積乱雲の中で様々な大きさの氷晶が作られて互いに衝突することが電荷分離のために必要と考えられている。木星で観測されている雷も同様である。しかし、暖かく乾燥した金星大気でそのようなことが起こることは考えにくい。金星の雷の研究は、広く惑星大気における電荷分離の考え方に再考を迫る可能性がある。

3. 金星気象衛星の挑戦

「あかつき」は赤道面に近い長楕円軌道上から、多波長で複数高度の対象を連続的にグローバル撮影し、大気の3次元構造の時間変化をとらえる(第6図)。スーパーローテーションに関わる波動や子午面循環をとらえること、雲生成に関わる力学を明らかにすること、雷の時空間分布を明らかにすることなどを目的とする。

1 μm カメラ(IR1)と2 μm カメラ(IR2)は、金星大気がほぼ透明となる近赤外の波長1 μm, 1.7 μm, 2.3 μmで、可視光では見えない深部の雲や微量ガスの変動を映像化する。波長1 μm付近では地表の鉱物組成や活火山の有無についても調べる。これらの波長で長期にわたり連続的な撮像観測を行うのは「あかつき」が初めてである。中間赤外カメラ(LIR)は波長10 μmで雲の温度分布を可視する。この波長での連続的な撮像観測も今回が初めてである。昼夜関係なく観測できるこのカメラによってこそ、正しく平均した子午面循環や、雲層の日変化サイクルが明らかになるだろう。紫外イメージャ(UVI)は紫外線でSO₂など雲の形成に関わる化学物質の分布をとらえるとともに、その変動から雲頂での大気運動を調べる。雷・大気光カメラ(LAC)は、雷放電の発光を超高速度測光でとらえて雷の有無という問題に終止符を打つとともに、下部熱圏の酸素大気光を撮影して重力波などを可視化する。これら光学観測に加えて電



第6図 「あかつき」による3次元大気観測のイメージ

波掩蔽がある。これは、探査機と地上局を結ぶ電波が惑星大気を通過する機会を利用して、気温の高度分布や、雲が蒸発して生じる硫酸蒸気の高度分布を得るというものである。

画像データはパイプライン処理によって惑星探査・天文分野での標準的なデータフォーマットである FITS 形式に変換され、幾何情報とともにアーカイブされる。さらに、金星の緯度-経度座標に展開した画像データと、時間的に連続した画像から雲追跡アルゴリズムにより求めた風速ベクトル分布が、NetCDF 形式でアーカイブされる。これらのデータは電波掩蔽データも合わせて一般に公開され、広く気象学研究に供される。

金星周回軌道は当初案では周期が30時間、近金点高度が数百km、遠金点高度が8万kmの予定だったが、新たな計画では燃料不足のために周期が1週間以上、遠金点が数十万kmとなる。解像度の低下により解析の精度が低下することは避けられないが、多波長の連続全球観測というメリットは失われておらず、当初計画に迫る成果を得ることは十分に可能と考えている。

4. 「あかつき」がもたらすもの

「あかつき」はこれまでになく時間的・空間的に密な気象データをもたらすはずである。重要な力学過程を全高度領域で可視化するようなデータセットが手に入るわけではないが、様々な条件設定でのモデル計算を観測と比較することによって、ありそうな物理過程とそうでないものを峻別し、これまで述べてきた大気力学の問題について確からしいシナリオを制約していくことができるだろう。また、新しい観測波長とこれまでになく連続的な気象データは、そもそも金星にはスーパーローテーション以外にどのような気象現象が存在するのかを洗い出

すという、発見的研究を可能にする。そのような研究こそ、新たな科学テーマの創出につながり、我々の惑星観を豊かにするはずである。

研究成果は金星を越えた普遍論への第一歩でなくてはならない。たとえば、金星大気のスーパーローテーションを理解することは、地球や火星がそれとは異なる風系を持つ必然性を理解することにつながる。おそらく共通の流体现象が全ての惑星で形を変えて生じている。それがなぜ惑星ごとに異なる帰結をもたらすのかを理解するのが次のステップである。大規模擾乱による低緯度向き角運動量輸送は、地球においても赤道域からのロスビー波放射によって生じており、他の要因のせいでスーパーローテーションに至らないだけである、という指摘もある(Kraucunas and Hartmann 2005)。

金星は系外惑星研究におけるモデル惑星でもある。濃密 CO₂ 大気と硫酸雲は、中心星に近すぎたために水を失った地球型惑星の普遍的な姿とも予想されている。また、中心星の近くを公転する系外惑星が多く発見されているが、そのような惑星は常に同じ面を中心星に向ける、同期回転惑星であると考えられる。そうなると昼側は灼熱、夜側は極寒の、生命の存在に適さない過酷な環境になりそうである。しかし同期回転惑星は自転が遅く、金星やタイタンと似た状況であるため、スーパーローテーションが生じて昼夜間で熱が均されて極端な気候を回避するという考えもある。

我々が参入する惑星大気探査は、現業的な気象観測網で得られるデータを利用できる地球気象研究とも、既存の探査データを用いて行う惑星大気研究とも違って、我々自身が限られた期間に取得するデータが全てである。ぎりぎりまで観測計画の最適化を行い、足りない部分は頭(数値モデル)で補う。この実戦を通して、惑星大気という圧倒的に未知なる世界に対するアプローチを習得したい。それは、その先に控えているはずの火星大気探査、次期金星大気探査、木星探査にもつながる道のはずである。このような挑戦に興味を持っていただける皆様の参加を歓迎したい。

参考文献

Del Genio, A. D., and W. B. Rossow, 1990: Planetary-scale waves and the cyclic nature of cloud top dynamics on Venus. *J. Atmos. Sci.*, 47, 293-318.
Gierasch, P., 1975: Meridional circulation and the maintenance of the Venus atmospheric rotation. *J. Atmos. Sci.*, 32, 1038-1044.

Hide, R., 1969: Dynamics of the atmospheres of the major planets with an appendix on the viscous boundary layer at the rigid bounding surface of an electrically conducting rotating fluid in the presence of a magnetic field. *J. Atmos. Sci.*, 26, 841-853.
Hou, A. Y., and R. M. Goody, 1985: Diagnostic requirements for the superrotation on Venus. *J. Atmos. Sci.*, 42, 413-432.
Imamura, T., 1997: Momentum balance of the Venusian midlatitude mesosphere. *J. Geophys. Res.*, 102, 6615-6620.
Imamura, T., T. Higuchi, Y. Maejima, M. Takagi, N. Sugimoto, K. Ikeda, and H. Ando, 2014: Inverse insolation dependence of Venus' cloud-level convection, *Icarus*, 228, 181-188.
Kraucunas, I., and D. L. Hartmann, 2005: Equatorial superrotation and the factors controlling the zonal-mean zonal winds in the tropical upper troposphere. *J. Atmos. Sci.*, 62, 371-389.
Lebonnois, S., et al., 2010: Superrotation of Venus' atmosphere analyzed with a full general circulation model. *J. Geophys. Res.* 115, E06006.
Matsuda, Y., 1980: Dynamics of the four-day circulation in the Venus atmosphere. *J. Meteor. Soc. Japan*, 58, 443-470.
Mills, F. P., L. W. Esposito, and Y. L. Yung, 1982: Atmospheric composition, chemistry, and clouds. *Exploring Venus as a Terrestrial Planet*, 73-100.
Nakamura, M., et al., 2011: Overview of Venus orbiter, Akatsuki. *Earth Planets Space*, 63, 443-457.
Rossow, W. B. and G. P. Williams, 1979: Large-scale motion in the Venus stratosphere, *J. Atmos. Sci.*, 36, 377-389.
Russell, C. T., T. L. Zhang, M. Delva, W. Magnes, R. J. Strangeway, and H. Y. Wei, 2007: Lightning on Venus inferred from whistler-mode waves in the ionosphere, *Nature*, 450, 661-662.
Schubert, G., et al., 1980: Structure and circulation of the Venus atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 85, 8007-8025.
Stone, P. H., 1975: The dynamics of the atmosphere of Venus. *J. Atmos. Sci.*, 32, 1005-1016.
Takagi, M. and Y. Matsuda, 2007: Effects of thermal tides on the Venus atmospheric superrotation, *J. Geophys. Res.*, 112, D09112.
Vallis, 2006: *Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics*. Cambridge University Press, 745pp.
Yamamoto, M. and M. Takahashi, 2006: Superrotation maintained by meridional circulation and waves in a Venus-like AGCM, *J. Atmos. Sci.*, 63, 3296-3314.

惑星大気モデリング—探査・系外惑星をにらんで

高橋芳幸 (神戸大学大学院理学研究科)

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 (e.g., Haberle et al., 1999) に加えて、GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) のグループ (e.g., Wilson and Hamilton, 1996), 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 (e.g., Forget et al., 1999) 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 (e.g., Takahashi et al., 2003; Kuroda et al., 2005; Ogohara et al., 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なわれるようになってきた (e.g., 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大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、系外惑星大気の大気・気候を調べるためにも使われるよ

うになっている。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。例えば、火星であればダストがそのような物質であり、金星であれば H_2SO_4 や未だ物質が特定されていない雲、木星であれば水蒸気や CH_4 などの炭化水素系の物質である。そのため、放射伝達の基礎方程式は普遍的なものとしても、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

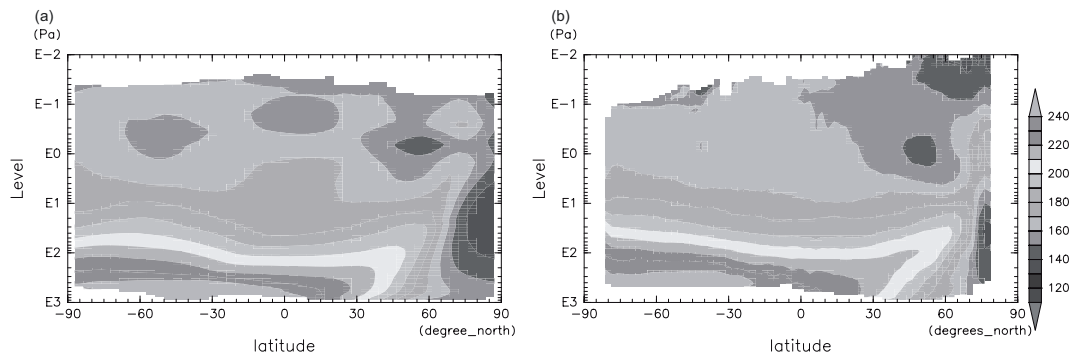


図 1: 火星大気の本半球の冬における東西平均温度分布: (a) DCPAM を用いて T31L36 の解像度で実施した火星計算, (b) Mars Reconnaissance Orbiter 搭載 Mars Climate Sounder による観測. 示している値は, 各経度における地方時 15 時の温度の平均値である.

る巻き上げをモデル化したパラメタリゼーション (e.g., Newman et al., 2002a) 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. 図 1 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/>), 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. 比較の為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, 主成分である 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, 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ではバイアスがより小さいかもしれないが, 我々のモデルでも, 概ね観測される平均的な温度分布の特徴を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紹介します.

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目指して, ESA および CNES 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態は, 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. このデータベースの開発当初は 90 年代後半以降に火星観測が再び盛んになるよりも前であったこともあり, このデータベースに結果が収録されている計算は観測データを同化していない. 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 (小高他, 本大会; 杉山他, 本大会). 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, 我々は三つのモデル, 大循環モデル, 雲解像モデル, LES 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の, LES モデルは SCALE-LES (西澤他, 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の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_2 による温室効果, CO_2 凝結による潜熱加熱の寄与, 凝結によって生じる CO_2 氷雲による放射効果が議論されてきた (e.g., 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なわれるようになってきている (e.g., Forget et al., 2013). 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_2 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 581c, d¹ 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, 恒星の近傍を公転する, 公転と自転が同期した惑星において実現されている永続的な昼と夜などの空間非一様性が大循環モデルでは直接表現され, 議論することができる. 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っ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

¹新しい観測によると, Gliese 581d は誤検出であった可能性が指摘されている (Robertson et al., 2014).

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 (e.g., Read and Lewis, 2004). また、発生するダストストームの内のいくつかは、時に惑星全球を覆うようなものに発達する。しかしながら、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 (e.g., 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 (e.g., 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いく、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 (e.g., 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 (e.g., Lebonnois et al., 2010). そして、観

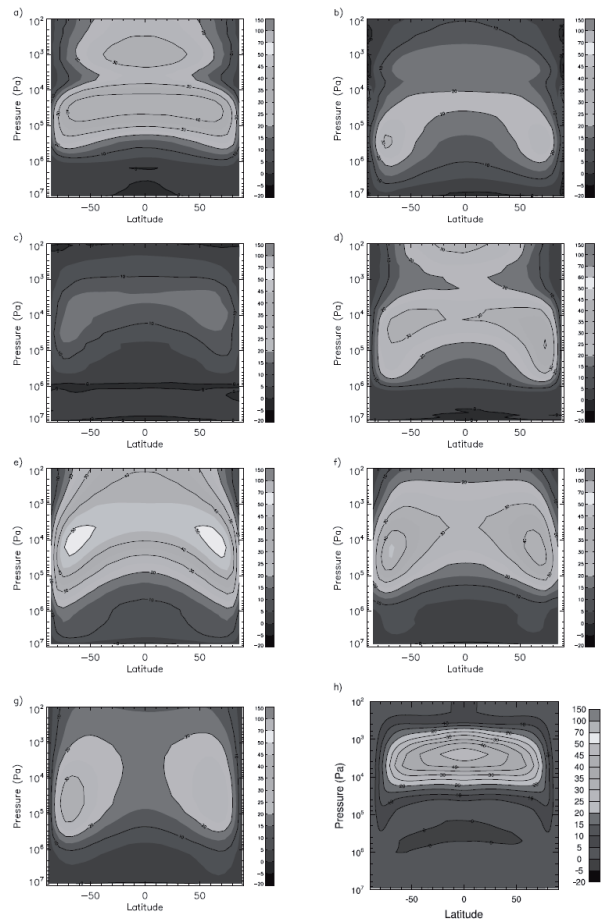


図 2: 金星大気大循環モデルの相互比較で得られた東西平均東西風: (a) CCSR, (b) LMD, (c) オックスフォード大学 (スペクトル), (d) オックスフォード大学 (差分), (e) GFDL FMS (スペクトル). (f) GFDL FMS (差分), (g) GFDL FMS (有限体積), (h) UCLA (Lebonnois et al., 2013, Fig.2).

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 (図 2).

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、研究に用いられてきた。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る研究によって、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(図3)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

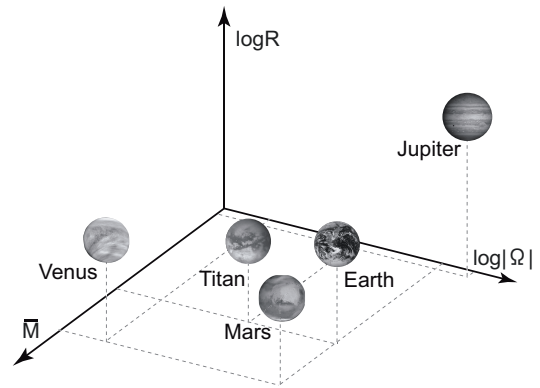


図 3: 惑星半径 (R), 自転角速度 (Ω), 平均分子量 (\bar{M}) を軸とするパラメータ空間内の各惑星.

the GFDL Mars GCM, *J. Geophys. Res.*, 109, E11006, doi:10.1029/2004JE002243.

Basu, S., R. J. Wilson, M. I. Richardson, and A. P. Ingersoll, 2006: Simulation of spontaneous and variable global dust storms with the GFDL Mars GCM, *J. Geophys. Res.*, 111, E09004, doi:10.1029/2005JE002660.

Forget, F., and R. T. Pierrehumbert, 1997: Warming early Mars with carbon dioxide clouds that scatter infrared radiation, *Science*, 278, 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, 24155.

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_2 atmosphere: Temperatures and CO_2 ice clouds, *Icarus*, 222, 81.

Haberle, R. M., M. M. Joshi, J. R. Murphy, J. R. Barnes, J. T. Schofield, G. Wilson, M. Lopez-Valverde, J. L. Hollingsworth, A. F. C. Bridger, and J. Schaeffer, 1999: General Circulation Model Simulations of the Mars Pathfinder Atmospheric Structure Investigation/Meteorology Data, *J. Geophys. Res.*, 104, 8957.

- Hoffman, M. J., S. J. Greybush, R. J. Wilson, G. Gyarmati, R. N. Hoffman, E. Kalnay, K. Ide, E. J. Kostelich, T. Miyoshi, and I. Szunyogh, 2010: An ensemble Kalman filter data assimilation system for the martian atmosphere: Implementation and simulation experiments, *Icarus*, 209, 470.
- 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, L05202, 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, E06008, doi:10.1029/2005JE002588.
- Kasting, J. F., 1991: CO₂ condensation and the early climate of Mars, *Icarus*, 94, 1.
- Kuroda, T., N. Hashimoto, D. Sakai, and M. Takahashi, 2005: Simulation of the martian atmosphere using a CCSR/NIES AGCM, *J. Meteorol. Soc. Jpn*, 83, 1.
- Lebonnois, S., F. Hourdin, V. Eymet, A. Crespin, R. Fournier, and F. Forget, 2010: Superrotation of Venus' atmosphere analyzed with a full general circulation model, *J. Geophys. Res.*, 115, E06006, doi:10.1029/2009JE003458.
- Lebonnois, S., C. Lee, M. Yamamoto, J. Dawson, S. R. Lewis, J. Mendonca, P. L. Read, H. Parish, G. Schubert, L. Bengtsson, D. Grispoon, S. Limaye, H. Schmidt, H. Svedhem, and D. Titov, 2013: A comparative analysis of simplified general circulation model of Venus atmosphere, *ISSI Sci. Rep. Ser.* 11, 129.
- 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, A69.
- 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, E11011, 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.
- 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, 24177.
- 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 aerobreaking period, *Icarus*, 192, 327.
- Mellor, G. L., and T. Yamada, 1982: Development of a Turbulent Closure Model for Geophysical Fluid Problems, *Rev. Geophys. Space Phys.*, 20, 851.
- Newman, C. E., S. R. Lewis, and P. L. Read, 2002a: Modeling the martian dust cycle 1. Representations of dust transport processes, *J. Geophys. Res.*, 107, 5123, doi:10.1029/2002JE001910.
- Newman, C. E., S. R. Lewis, and P. L. Read, 2002b: Modeling the martian dust cycle 2. Multiannual radiatively active dust transport simulations, *J. Geophys. Res.*, 107, 5124, doi:10.1029/2002JE001920.
- 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*, 20 (Available at <http://www.nagare.or.jp/mm/2001/odaka/index.htm>)

- Ogohara, K., and T. Satomura, 2008: Northward movement of Martian dust localized in the region of the Hellas Basin, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L13201, doi:10.1029/2008GL034546.
- Pollack, J. B., J. F. Kasting, S. M. Richardson, K. Poliakoff, 1987: The case for a wet warm climate on early Mars, *Icarus*, 71, 203.
- Read, P. L., and S. R. Lewis, 2004: The martian climate revisited: Atmosphere and environment of a desert planet, Springer, 326pp.
- Rennó, N. O., M. L. Burkett, and M. P. Larkin, 1998: A simple thermodynamical theory for dust devils, *J. Atmos. Sci.*, 55, 3244.
- Robertson, P., S. Mahadevan, M. Endl, and A. Roy, 2014: Stellar activity masquerading as planets in the habitable zone of the M dwarf Gliese 581, *Science*, 345, 440.
- 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, 10-14, doi:10.2151/sola.2014-003.
- Toigo, A. D., and M. I. Richardson, 2002: A mesoscale model for the Martian atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 107, 5049, 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.
- 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.
- Wilson, R. J., and K. Hamilton, 1996: Comprehensive Model Simulation of Thermal Tides in the Martian Atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, 53, 1290.
- 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, L48.
- 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: 高領域・高解像度実験のための気象 LES モデルの開発, *ながれ*, Vol.32, 149-152.
- 光田千紘, 2007: 放射過程によって調節された二酸化炭素水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.