

101 : 103 : 110 : 412 (気象力学 ; 大気大循環 ; 惑星気象 ; 衛星気象学)

3. 金星気象衛星「あかつき」と今後の惑星大気研究

今 村 剛*

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予定である(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。

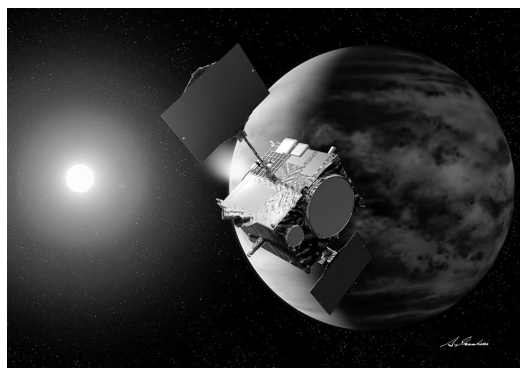
残された手段は、本来は姿勢制御用の4基の小さなエンジン(RCS: reaction control system)を長時間連続噴射することによる軌道制御である。主エンジンが燃料と酸化剤を混合燃焼させて推力を得る2液式エンジンであるのに対し、RCSは燃料を触媒反応で分解させて推力を得る1液式エンジンである。今後RCSしか使わないとすると酸化剤は無駄な重量であり、また酸化剤の重量を抱えたままでは十分な加速が

* JAXA 宇宙科学研究所。

現所属：東京大学大学院 新領域創成科学研究科。

t_imamura@edu.k.u-tokyo.ac.jp

© 2018 日本気象学会



第1図 「あかつき」の想像図。赤外線で観察する雲のイメージを夜側に描いてある(提供 JAXA)。

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、65 kg もの軽量化に成功した。

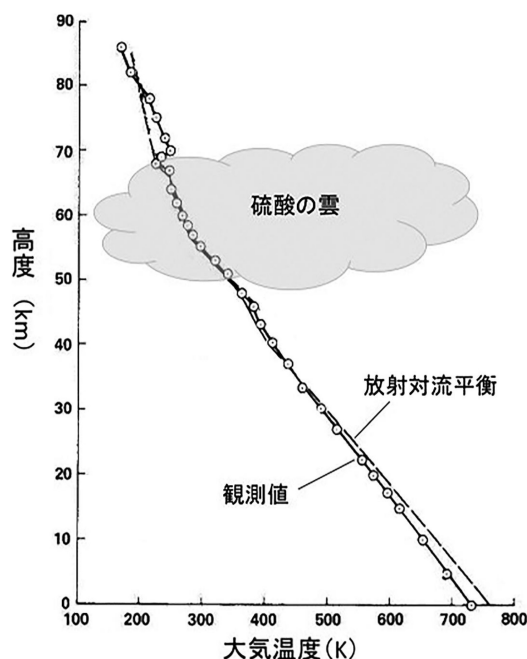
いよいよ2011年11月、再度金星を目指し、RCS による軌道制御を行った。10分間に及ぶ RCS 連続噴射は初めての経験である。予期せぬ事態に備えて緊張して臨んだが、計画通りの安定した加速が得られた。同様の噴射を3回行い、合わせて240 m/s の速度変更を達成した。「あかつき」は今、2015年末に再び金星に会合することを目指して太陽系の旅を続けている(中島注:「あかつき」はその後2015年12月7日に金星軌道に入り、観測を開始している)。

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)のところに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。しかし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750 K 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900 m 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、全表面は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50~70 km 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



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)。

い。金星の雲は入射太陽光の78%を反射する(地球では30%)。太陽光は雲と大気を通してさらに弱まり、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。

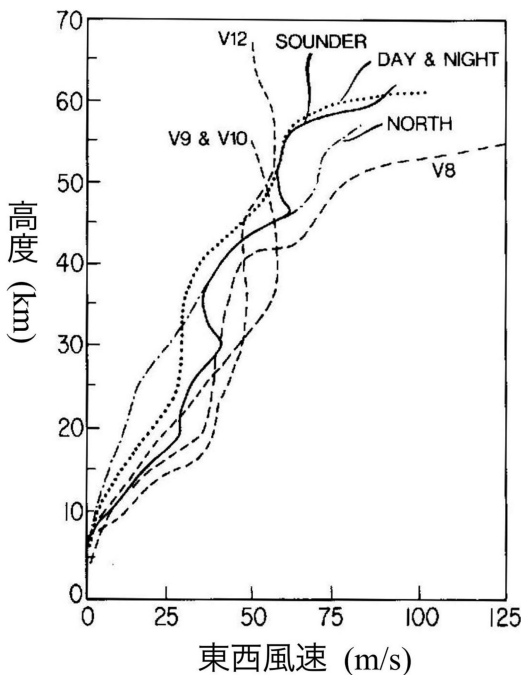
46億年前に太陽系が作られた時、金星にも海があったということはあることである。そのころの金星では、地球と同様に二酸化炭素は海に溶け込み、炭酸カルシウムを生成して地殻に取り込まれていたかもしれない。しかし地球の2倍の太陽光を浴びる金星は地球よりも暖かく、そのために原始の金星の大気には地球よりも多くの水蒸気が含まれていたであろう。水蒸気は徐々に高層大気に運ばれ、太陽紫外線によって水素と酸素に分解され、水素は重力を振り切って宇宙空間に流れ出ってしまったということが考えられる。金星の海はこうにして失われたのかもしれない。一方、重い酸素は簡単には流出しないと考えられるた

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、その周期は約243地球日と長く、赤道での自転速度は1.6 m/sである。1太陽日が約117地球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にあり、自転の遅い金星の風は自転と同程度に遅いと考えるくなる。たとえば地球の偏西風は30 m/s程度で、赤道での自転速度460 m/s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/s、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



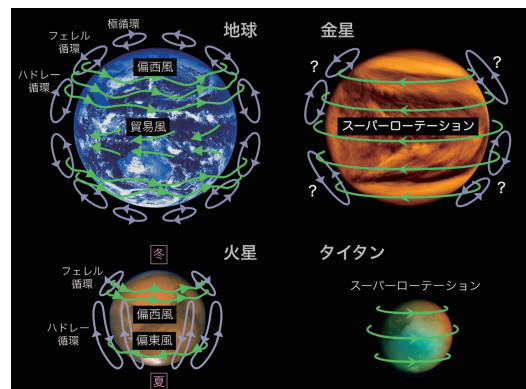
第3図 米国とロシアの着陸機によって測られた金星の東風の高度分布 (Schubert *et al.* 1980を改変)。

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。

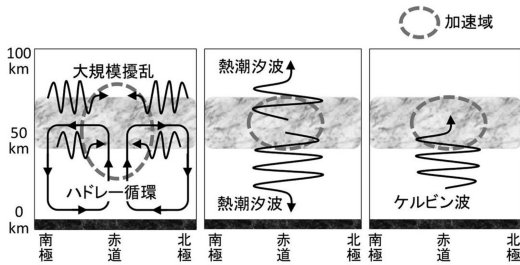
このような風系は地球と大きく違っている（第4図）。地球の場合、熱帯地方では東風、中緯度では西風が卓越し、いずれも前述のように自転速度より遙かに遅い。もう一つの大気を持つ地球型惑星である火星では、地球に似た風が吹いていると考えられている。一方、土星の衛星タイタンでは自転速度の10倍程度のスーパーローテーションが起こっているらしい。タイタンは惑星ではないが、窒素を主成分とする大気を持つ。スーパーローテーションは惑星の風の基本形態の一つであるのかもしれない。

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輸送によって、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、非軸対称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）。比較的有效な説として、Gierasch (1975) が提唱したものがあり、いくつかのGCM実験の結果がこの説に沿って説明されている（例えば 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、何らかの非軸対称な



第4図 地球、金星、火星、タイタンの風系（写真はNASA提供）。



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。

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ば、大気が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。

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。しかし雲足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て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、直接循環と間接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内側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なが小さい。わずかながら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はなされていない。

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。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、雲頂の模様は、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 SO_2 や H_2O 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化する。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 SO_2 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。

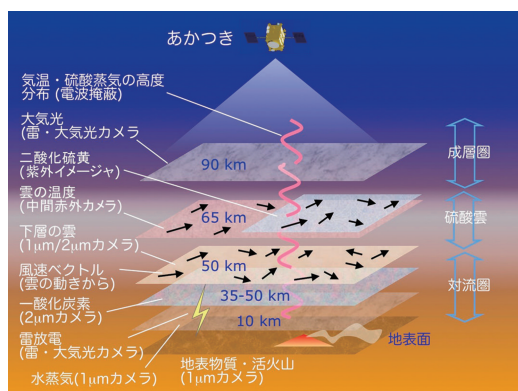
画像データはパイプライン処理によって惑星探査・天文分野での標準的なデータフォーマットである FITS 形式に変換され、幾何情報とともにアーカイブされる。さらに、金星の緯度-経度座標に展開した画像データと、時間的に連続した画像から雲追跡アルゴリズムにより求めた風速ベクトル分布が、NetCDF 形式でアーカイブされる。これらのデータは電波掩蔽データも合わせて一般に公開され、広く気象学研究に供される。

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い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



第6図 「あかつき」による3次元大気観測のイメージ。

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現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。濃密な 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。そうすると昼側は灼熱、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しようという考えもある。

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。この実践を通して、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. J., 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**, doi:10.1029/96JE03882.
- 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., F. Hourdin, V. Eymet, A. Cressin, 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.
- 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, 2007: Atmospheric composition, chemistry, and clouds. L. W. Esposito *et al.* eds.: Exploring Venus as a Terrestrial Planet, American Geophysical Union, 73-100, doi:10.1029/176GM06.
- Nakamura, M. *et al.*, 2011: Overview of Venus orbiter, Akatsuki. *Earth Planets Space*, **63**, 443-457.
- Pollack, J. B., O. B. Toon and R. Boese, 1980: Greenhouse models of Venus' high surface temperature, as constrained by Pioneer Venus measurements. *J. Geophys. Res.*, **85**, 8223-8231.
- 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**, doi:10.1029/JA085iA13p08007.
- 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**, doi:10.1029/2006JD007901.

Vallis, G. K., 2006: Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics. Cambridge Univ. 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.