

一番星へ行こう!

日本の金星探査機の挑戦 その42

~超回転~

堀之内 武¹

1. はじめに

金星探査機あかつきの最大の目標は金星大気のスーパーローテーション(超回転)の解明でした。あかつきの観測結果が出始めて以来、プロジェクトマネージャーの中村正人さんは、会う人ごとに(というのは大げさですが)「それでスーパーローテーションはわかったんですか」と聞かれ続けたようです。

超回転そのものは半世紀以上前より観測されていますが、その機構に観測から迫るのは難題です。過去の研究でまともに取り組めたと言えるものはありません。筆者自身があかつきのデータを使って超回転の研究を始めたのは2017年の秋でした。あかつきの観測が2015年の12月に始まってから既に2年近くたっていました。データが溜まるのを待っていた面もありますが、できるかどうかわからないので先延ばしにしていた面もあります。なお、中村さんにもだれにも、やってくれというプレッシャーはかけられてないことは断っておきます(居心地のいいチームです)。はじめしてみると、「これはいける」という感触がすぐ得られ、あかつきの科学ワーキングチーム会合で意気揚々と報告しました。しかし、そこからの足固めには時間がかかりました。やっとこの4月に論文を出版することができましたので[1]、この場で報告させていただきます。

大気の超回転とは、質量あたりでみた自転軸周り

の角運動量が、固体惑星のその最大値(即ち赤道地表面での値)よりも上回ることで、局所的には定義できます。それより小さな角運動量は、どこかの緯度の地表面付近からの移流で簡単に作れます。例えば地球の中緯度のジェット気流は、角運動量の観点から超回転ではないということになります。大域的には、全大気の角運動量を質量で割ったものと、赤道地表面の質量当たりの角運動量を比較します。前者のほうが大きければ、その大気はグローバルに超回転していると言えます。金星大気では前者と後者の比が10程度です。同様な比を局所的にみると、赤道の雲頂付近(高度約70 km)にあるピークでは50以上にもなります(自転の速さ1.8 m/sに対し、風速が100 m/s前後、即ち一周4-5日)。

2. 超回転を解明するって?

そもそも、観測から超回転を解明するってどういうことでしょう。超回転のメカニズムの問題は、どのように出来て(成因)、どのように維持されているかと分けることができます。成因問題は、超回転がない状態からどうできるかという問題と捉えられていますが、ない状態は観測されていませんし、ない状態が過去にあったかどうかともわからないので、仮想的な問題ともいえます。観測で直接扱いうる問題があるとすれば、それは維持問題です。

維持問題は二つにわけて考えられます。一つは、(A)4日循環と呼ばれる非常に強い超回転率を含む

1.北海道大学 地球環境科学研究院
horinout@ees.hokudai.ac.jp

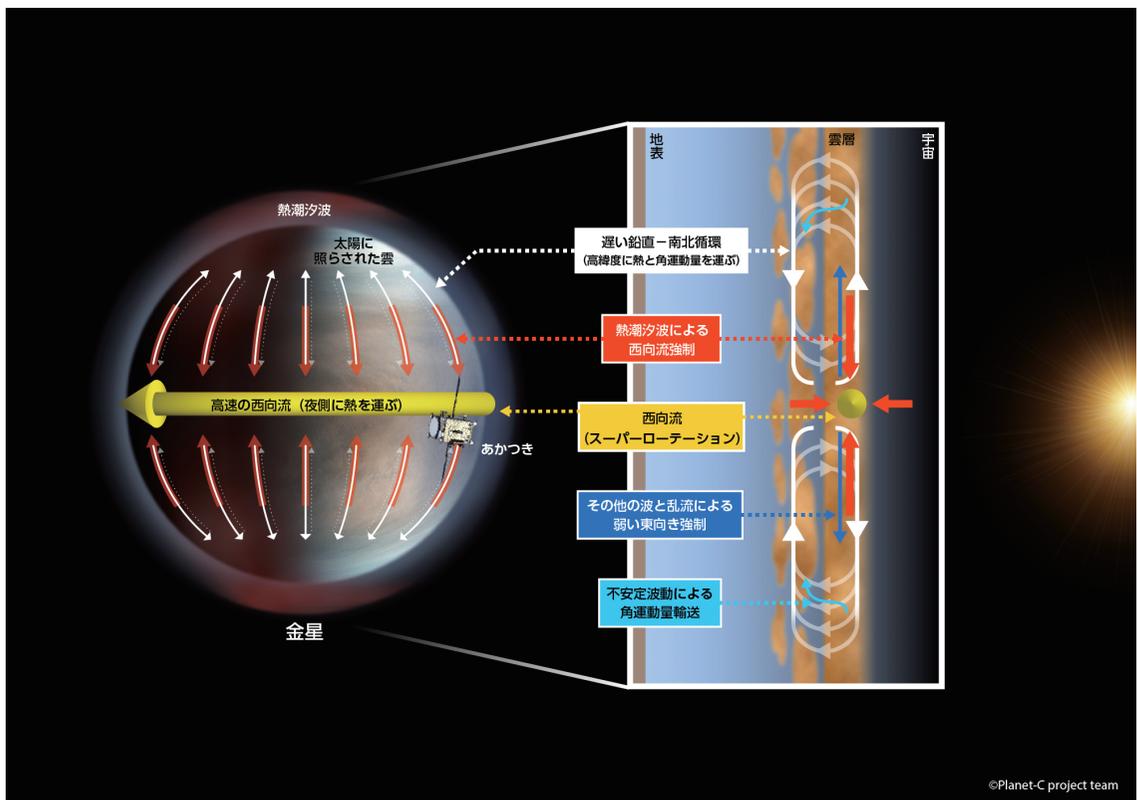


図1: あかつきの観測から提案されたスーパーローテーションの維持機構の模式図。文献1のプレスリリースより(クレジット:Planet-C project team)。金星の雲層の子午面循環(白い矢印)による移流は、角運動量を一様化するように働きます。熱潮汐波は、それを補うように、水平および鉛直に角運動量を運び(赤い矢印)、スーパーローテーションを加速するように働きます。熱潮汐波以外の波や乱流は、低緯度の雲頂付近では弱いながら潮汐とは逆に働き(青い矢印)、中高緯度では別の重要な役割を果たします(水色の矢印。不安定による擾乱が子午面循環を短絡するように角運動量を運びます)。これらの組み合わせにより、子午面循環によるゆっくりとした極向きの熱輸送と、スーパーローテーションによる速い夜側への熱輸送が両立するシステムが形成されて、太陽からの熱が効率的に分配されます。

風速構造がどのように成り立つか、もう一つは、(B)それが長期的に保てるか、です。金星の東西風は、地表付近で弱く、高度とともに増加します。つまり、上空で速くても、それに応じた摩擦が地面では働かない構造になっています。そこで、(A)観測される大気内部の角運動量の分布が如何にして保てるか、(B)惑星表面における大気と地面の間の釣り合いはどう実現されるかと、分けて問うことができるという次第です。関わる時間スケールは(A)では短いところで100日のオーダー、(B)では少なくとも万日のオーダーとなります。もちろん二つの問題は独立ではありませんが、鍵となる高度や時間スケールが異なるの

で、一旦は分解して考えるのが良いだろうというのが、筆者の考えです。観測だけでかなり取り組める可能性があるのは(A)であり、(B)については、観測は補助的な手段とならざるを得ないでしょう。従って、今回発表した論文[1]で取り組んだのは(A)です。その中の一部ですが、最も重要と考えられる点について、幸いにもあかつきの観測から強力な制約を得ることができました。上で述べた観測による制約可能性を考えると、あかつきの主目的はかなりの程度達成できたと言えるでしょう。ただし、観測には限りがあり、ベストを尽くしても不確定要素は残ることは申し添えておきます。

3. 雲を追跡する

金星の連続画像から雲の動きを調べて風速を推定することは、古くは1970年代のマリナー10号のフライバイ時の観測で実施されました[3]. その後、パイオニア・ビーナス・オービター(PVO), ビーナス・エクスプレス(VEx)の長期観測に対しても実施され、多数の論文が出版されています. PVOまでは主に紫外線で観測される雲頂の模様を追跡が行われました. VExではそれに加え、近赤外の窓波長($\sim 2\mu\text{m}$)を使って、雲の下の大気熱放射で照らされる雲の影絵の追跡も行われています. これらの研究や電波掩蔽観測より、超回転の風速分布や熱潮汐波の構造が調べられてきました. さらに近年、惑星規模のロスビー波やケルビン波と解釈される、従来は輝度で観測されてきた数日周期の波も、雲追跡風で捉えられています[4].

さて、超回転のメカニズムを調べるには、角運動量の輸送を定量する必要があります. それは、平均からのずれの掛け算の平均による二次の効果を定量することなので、精度要求が格段に上がります. 2015年12月の軌道投入の8カ月ほど前に行った、雲追跡に関する内輪の研究集会において、筆者は、水平スケール1000 kmの構造を誤差 2—3 m/s 以内で捉えるという目標を提案しました. それまでの研究からすると、とんでもない数値です(それまでの研究では、誤差の見積りも自体不明確でしたが).

金星の雲追跡では、目視によるマニュアル追跡と相互相関法などによる自動追跡が使われてきました. 過去の研究では、マニュアル追跡のほうが精度がよいと考えられてきましたが、追跡に適した特徴的な模様を慎重に選択するとまばらにしかデータが得られません(すると二次効果の定量が難しくなり得ます). あかつきプロジェクトでは、神山徹さんによって改良された(おそらくそれまでの金星研究史上最良の)自動追跡 [5]をもとにした追跡プログラムが、最初の金星到着(2010年12月)前後より整備されてきました. また、正確な雲追跡を行う前提として、画像が金星上に正確にマップされている必要がありますが、探査機本体から得られる姿勢情報はしばしば不十分です. あかつきも探査機の仕様上そうなので、こちらも神山さんの経験を踏まえて、画像に写る金

星の縁を使って補正するマッピングプログラムが、より早い時期から開発されています. 両プログラムの実装を主に担ったのは、小郷原一智さんです. それを高木征弘さん、神山徹さん、樫村博基さん、佐藤尚毅さんなどが支えました(筆者の貢献は、データ形式に関する助言などに限られています).

その傍ら、筆者は学生と共同で別の自動追跡法を開発しました [6]. それは、通常は2枚の画像を使う相互相関法を、多数の画像を同時に活用するように拡張したものです. 通常的手法も含まれますから、「取り入れて損はない」です. さらに、相関曲面の先鋭度に基づく精度評価指標を開発しており、結果のスクリーニングに有効なのは明らかでした. よってそれらをあかつき用の雲追跡プログラムに組み込むことを提案しました. 実装を担ってくれたのは、2015年4月に宇宙研の研究者として採用された村上真也さんです. 村上さんが論文をもとに再実装して組み込む間、筆者のほうは相関曲面の複数のピークから候補を選択する「緩和ラベリング法」の改良などの手法開発とプログラム実装を行いました[7]. こうして、軌道投入後の2016年初頭に、現在あかつきで使われている雲追跡プログラムが出来上がりました. なお、村上さんは、着任以来、あかつきデータ生成パイプラインの大黒柱として、上記マッピングプログラムの改良やパイプライン運用など様々な役割を担っています.

さて、最近になって、異なる時刻の雲追跡の結果をラグランジュ的にトレースし比較することで、実際の不確定性を導く手法を確立しました[1のオンライン補遺]. その結果、紫外画像による雲頂の雲追跡では、上記の研究会で提案した当初目標が実際に達成できていることがわかりました.

4. 超回転の維持機構

本題に入ります. 東西方向の運動方程式を緯度、気圧(=鉛直座標)を固定して東西に平均したものは、 $\frac{\partial M}{\partial t} = -\mathbf{v}^* \cdot \nabla M + \rho_0^{-1} \nabla \cdot \mathbf{F}$ と表せます(気象学で変形オイラー平均と呼ばれる方程式です). ここで、 M は質量当たりの角運動量、 \mathbf{v}^* は子午面循環の速度(ストークスドリフトと呼ばれる効果を含む)、 ρ_0 は密度のようなもの(実際には気圧に比例)、 \mathbf{F} はエリアクセン-パーム(EP)フラックスと呼ばれる、渦角運

動量輸送を表す項です。定常状態では左辺がゼロなので、右辺の2項の釣り合いが成り立ちます。論文[1]ではまず、これまでの観測データ(突入プローブによる放射観測)をもとにシンプルな仮定を置いて v^* の分布を大雑把に見積もり、それに伴う南北の熱輸送が、宇宙からみた短・長波放射の差の緯度分布と概ね合うことを確認し、 $v^* \cdot \nabla M$ を見積もりました。これを、雲追跡から得られる様々な大気擾乱にともなう $\nabla \cdot \mathbf{F}$ と比較すれば、超回転がいかなるバランスのもとに成り立っているかがわかります。

ただし、当然ながら、観測からこの項の全大気中の分布が得られるわけではありません。そこでのを絞ります。それは、赤道域の雲頂付近にある M のピークが如何にして作られているかということです。短波吸収の約半分は雲層で起きますので、雲層上部には極向き、下部には赤道向きの子午面循環があります[1, 2]。それは M をラグランジュ保存的に移流するだけなので、中高緯度から戻った大気の M を増やして復活させる機構が必要になります。逆に赤道から離れる経路上で M は減少しなければなりません。それは必然的に起こる順圧・傾圧不安定が担えますので、低緯度での M 再生に注目します。ギーラッシュによる理論[8]では、 $\nabla \cdot \mathbf{F}$ は渦粘性が担うと仮定されます。特に、水平の渦粘性は、自転軸周りの角速度を一様化するように働くため、移流で中高緯度に運ばれる M を低緯度に戻す働きがあるとされます(この働きによって、超回転をない状態から生成できます)。一方で、 $\nabla \cdot \mathbf{F}$ は大気の波の生成・散逸によっても生じます。そこで、渦粘性でなく、熱潮汐波による鉛直の角運動量輸送が重要であるという説もあります[9, 10]。はたして結果はどうだったでしょうか。

\mathbf{F} の水平成分は主に東西風と南北風の掛け算(東西方向の運動量の南北フラックス)からなります(もう一つ項がありますが、着目している領域では小さいと考えられます)。これを、熱潮汐波とその他の波または乱流にわけて見積もりました。すると前者は赤道向きに、後者はそれより弱く極向きに角運動量を輸送しているという結果になりました。 \mathbf{F} の鉛直成分においては、低緯度においては東西風と鉛直風の掛け算の項が卓越すると考えられますが、観測から鉛直風は直接見積もれません。そこで熱潮汐波については、観測された振幅と波長から理論式に基づい

て見積もりました。その結果、水平成分の収束と同程度の加速効果が見込まれるという結論になりました。一方、他の波や乱流については、見積もりは得られません。以上は図1のようにまとめられます。狭義のギーラッシュメカニズムにおける水平渦粘性の効果は、低緯度では角速度一様化とはむしろ逆に働いています。また、潮汐による運動量輸送は、期待されていた鉛直方向だけでなく、水平にも働いて角運動量のピークを再生する働きを担っていることが特徴的です。ただし、潮汐による角運動量輸送の見積もりは、昼面での観測からは難しく、様々な角度から検討したとは言え、今後変わってくる可能性はあると考えられます。観測だけからできることには限りましたので、今後は数値シミュレーションなどの助けを借りて研究する必要があるでしょう。

5. 超回転の役割

最後に、超回転の役割について触れておきます。それは、昼面と夜面の間の熱輸送だと考えられます。超回転以外の運び方として、太陽直下点とその反対側とを結ぶ軸(自転軸とは直交)に対して対称な「夜昼間」対流も考えられます。しかし、そのような循環は子午面循環同様、上下動を必要とし、また水平には加速減速を必要とします。超回転のような円に沿った流れは鉛直運動を必要としないので、より速くなりやすいでしょう。ただし、東西流だけでは南北に熱が輸送できません。そこで、熱潮汐波など渦角運動量輸送を起こせる運動を介して、子午面循環と東西循環を両立させられれば、広く水平に熱を行きわたらせることができます。今回あきらかになったのは、そのような熱輸送システムのあり様の一つだと言えます。

引用文献

- [1] Horinouchi, T. et al., 2020, *Science* 368, 405.
- [2] Schubert, G. et al., 1980, *J. Geophys. Res.* 85, 8007.
- [3] Limaye, S. S., and Suomi, V. E., 1981, *J. Atmos. Sci.* 38, 1220.
- [4] Kouyama, T. et al., 2013, *J. Geophys. Res.* 118,

37.

- [5] Kouyama, T. et al., 2012, *Planetary and Space Science* 60, 207.
- [6] Ikegawa, S. and Horinouchi, T., 2016, *Icarus* 271, 98.
- [7] Horinouchi, T. et al., 2017, *Meas. Sci. Technol.* 28, 085301.
- [8] Gierasch, P. J., 1975, *J. Atmos. Sci.* 32, 1038.
- [9] Fels, S. B. and Lindzen, R. S., 1974, *Geophysical Fluid Dynamics* 6, 149.
- [10] Takagi, M. and Matsuda, Y., 2007, *J. Geophys. Res.* 112, D09112.