

一番星へ行こう! 日本の金星探査機の挑戦 その58 ～ 雲頂の風と波 ～

堀之内 武¹

「一番星へ行こう!」への寄稿は2020年以来4年ぶり2回目です。このぶんど次は2028年でしょうか。それまであかつきが元気に観測を続けてくれたら最高です。というのも、今回の話題は、「長く観測して初めて見えてくること」です。最近出版された論文[1]の話をします。こちら、地味だけど実はエポックメイキングと、自分では思っています。

あかつきの紫外線イメージャーUVIは、365 nm付近と283 nm付近の2つのフィルターで、雲による太陽光の反射を捉えます。365 nmは、いわゆる未知吸収物質によりコントラストが大きくなり、Pioneer Venus Orbiter, Venus Express (VEx) でも採用された伝統的な波長です。283 nmは、未知吸収物質に加えて、SO₂の吸収も起こります。両波長で捉えられる模様には正の相関があり、似ていることが多いのですが、あまり似てないときもあり、そういうときは283 nm画像で雲追跡を行って得られる風(以後283 nm風と呼びます)のほうが365 nm風より速い西向きの風になってることが、これまでのあかつきの観測により明らかになっています[2]。金星の自転の向きも西向ですので、要するに283 nmで捉えられる「超回転」(スーパーローテーション)のほうが、365 nmでのそれより速いわけですが、それはより高高度の風を反映することが多い結果と考えられています[2]。具体的な高度差は不明ですが、

今回出版した論文[1]では、2015年末から2023年3月までの7年強にわたるUVIの観測から導かれた283 nm風と365 nm風を用いて、超回転の変動と、

波数1の惑星規模波動の変動を研究しました。

過去には、ロム-スカーグル(LS)ピリオドグラムを使ってVExの365 nm風を5~8年分解析した研究[3, 4]により、VExの観測期間中に徐々に超回転が速くなっていたことが明らかになり、さらに周期二百数十日程度の周期的な変動の存在も示唆されました。ただし、[4]は、この周期的変動には実体がなく偽物である可能性があるとして解釈しました。[4]は[3]に比べて、解析対象期間が数年多かったのですが、すると[3]より10%ほど短い卓越周期が得られました。それが観測軌道の特性に基づく人為的な周期に近いことから、実体を疑ったという次第です。

[3]と[4]の見立てのどちらが正しいのでしょうか。しかし、その問い以前に私は、ピリオドグラムを使って時系列にフィットする単色波動的な周期的変動をみつけようとするアプローチ自体が必ずしも妥当ではないと考えました。フィッティング結果を時系列に重ねると確かに似てはいるものの[3]、より長い期間のデータを使うと卓越周期が変わる[4]ということは、単一の卓越周期を探すことは必ずしも生産的ではないことを示唆します。そもそも、流体の運動においては、周期的なほうが例外的でしょう。周期的な変動は、周期的な外力への応答や、比較的特殊な自励振動の結果として現れます。一方で、気象学の歴史では、連続的なスペクトルの形から様々な示唆が得られてきました。たとえば、3次元乱流のコルモゴロフ理論などの、スケール間相互作用によるエネルギー等のカスケードの理論と観測、2次元乱流理論、飽和内部重力波の鉛直波数スペクトルなどをあげることができます。後述する惑星規模波動の研究について

1.北海道大学地球環境研究院
horinout@ees.hokudai.ac.jp

も、先行研究におけるスペクトルの扱いには種々違和感をもっていました。

そこで、金星大気の先行研究に倣うのではなく、気象学流にスペクトル解析を行うことにしました。ただし、観測ギャップの扱い等、気を付けるべきことがあり、よく考えないと簡単に落とし穴に落ちます。詳しくは[1]に書きましたが、あかつきの紫外観測は(VE_xでも)、主に観測される「地方時」(実質的には太陽直下点に相対的な経度)が概ね金星の公転とともに遷移していき、昼面の観測が難しい時期があることに伴うデータギャップができるほか、地方時に固定された潮汐成分が誤って時間変動に見えてしまうという作用があります。後者の問題を防ぐため、先行研究では特定の地方時の風速に限って使うことが行われましたが[3]、それだと多くのデータを捨てねばならずギャップ期間も増えます。一般論として、ギャップが増えると、良いフィッティング結果が偶然得られてしまう可能性も増します。そこで、平均的な潮汐成分を引いた上で、全データを使うことにしました。試みの成否は、得られたスペクトルに、軌道遷移に伴う人工的な周期が現れるか否かで判断できます。様々なテストと考察を行い、自信が持てるスペクトルを得ることができました。

図1は[1]に掲載したスペクトルの一部で、365 nmでの東西風のスペクトルです。283 nmの結果も似ています[1]。最初に結果の質に関わるやや込み入った話を書くので、その点に興味のない方は、この段落は飛ばして次に行かれて構いません。図1はFFTによる離散フーリエ変換(DFT)の結果(青)と、LS法の結果(黒)の両方を含みます(LSスペクトルはよく、実質的な周波数分解能よりはるかに高い分解能で結果が示されます。単一の周期性の探索には良いのですが、人為的に滑らかな曲線が得られて結果の安定性に関する勘違いが起りやすいことから、ここではDFTと同じ分解能で表示しています。論文を読むときは、こういうことも要注意です)。低周波では主にDFTとLSで補間の有無が異なることから結果が変わります。どちらが正しいとは言えないので、両者の違いから不確実性が見えると考えるとよいでしょう。高周波ではシステムチックにLSスペクトルのほうが大きくなります。DFTでは補間により高周波が抑えられがちなのは、考えればすぐお分かり

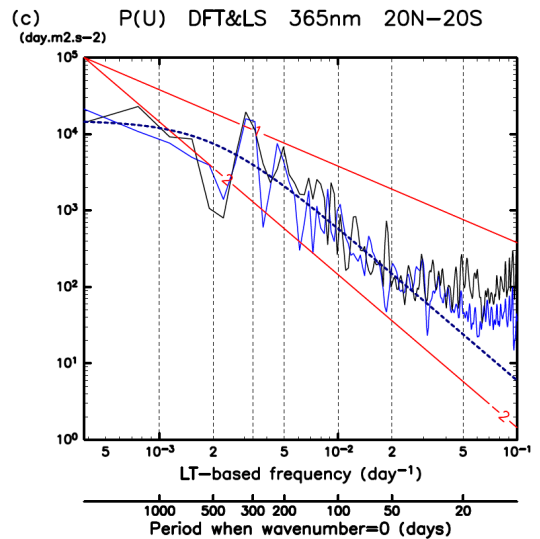


図1: 文献[1]のFig. 8c. 365 nmによる緯度南北20度以内の平均東西風のパワースペクトル。青はDFT、黒はLS法による。横軸は振動数または周期(ただし座標系は太陽直下点に基づいているので、東西波数0の場合に限る)。赤線は振動数の-1乗、-2乗に比例する傾きを表す。点線は振動数 f について $a(c+f^2)^{-1}$ の形を主観的に当てはめたもの(a, c は定数)。詳しくは[1]を参照のこと。

でしょう。一方、LSは逆にスペクトルの期待値より大きくしがちであることを示せます([1]のAppendix. 恐らく既存のLS法の解説にはないのではないかと思います)。両者の差が小さい数十日以上周期では、データギャップの副作用は小さいと言えます。なお、そうなったのは全データを使ったからで、特定の地方時のデータしか使わないと広範にギャップの影響を受けてしまうことを、[1]に示しました。DFTとLSの両方の結果を示すこと、お勧めです(同様な先行研究は知らないです。恐らくこれまであまりなかったのではないかと思います)。

さて、図1には二百数十日周期の変動の卓越はありません。一方で目立つのは、周期300日ぐらいから高振動数でスペクトルが規則的に減っていくことです。凡そ振動数の-2乗に比例して減ります。低周波ではスペクトルが頭打ちの傾向がみられ、線形緩和のあるランダムウォークの位置のスペクトル(点線)に形が似ています。細かく見ると、周期500日ぐらいにスペクトルの落ち込みがありますが、それには意味があるのか偶然なのかを判断するには、今後の研究

を待つ必要があるでしょう。スペクトルは全般に連続的な様相を呈し、何らかの気象内部での変動によって超回転の速さが変動しているのではないかということが伺えます。恐らく、単一の周期性を追求することにはあまり意味がないと疑われます。

この結果は、気象学者の立場で考えると「まあそうだよな」というものです。でも、あまり気象学に慣れていない研究者にとっては、発想の転換を求めるものかもしれません（様々な科学分野で、変動の研究といえばトレンドか周期性の探求だと思っている人は多そうです…）。では、もしも超回転の変動のスペクトルは連続スペクトルのだとすると、それは何によってもたらされるのでしょうか。今のところは、何らかの内部変動によるのではないかということしか言えません。まさに今後の研究テーマです。

惑星規模波動についても、7年強にわたるデータの解析より面白い示唆が得られました[1]。金星の雲頂付近の低緯度ではこれまで、超回転より少し速く伝播する、赤道ケルビン波に似た東西波数1の波動と、超回転より少し遅く伝播する、赤道ロスビー波に似た東西波数1の波動が知られてきました（[3]など多数の研究あり）。今回、前者は、超回転の速さの変化にあわせて位相速度が変化することがわかりました。波の存在域が鉛直に狭く、雲頂付近に限られていると考えたと説明はつきます。かつては地球の成層圏におけるケルビン波とのアナロジーで、特に根拠なく下層からの伝播が想定されることもありましたが、それでは説明が難しいです。一方、赤道ロスビー波的な波は比較的周期が安定しています。これは、より深くから存在することと矛盾しません。た

だし、やはり中立波として単純に鉛直上方に伝播するモデルを考えることは旗色が悪いと考えられます[1]。

以上のように、長期にわたる観測結果をきちんと料理し、よく考えて解釈するといろいろなことが見えます。超回転の変動要因に関する示唆、惑星規模波動の変動からの存在領域等に関する示唆は斬新で、より長期にわたる観測による研究が望まれます。あかつきの運用期限はこれまで二度にわたって延長されてきましたが、2024年度から5年間、新たな延長が認められました。その主な科学目標は長期変動の解明で、具体的なテーマ設定においては[1]が大きく役立ちました。

もちろん、観測だけでなく、数値モデリング、そして理論的な研究も必要です。幅広い力を結集することで、今後も面白いサイエンスが展開できるのではないかと思います。

参考文献

- [1] Horinouchi, T. et al., 2024, *Journal of Geophysical Research: Planets* 129, e2023JE008221, <https://doi.org/10.1029/2023JE008221>.
- [2] Horinouchi, T. et al., 2018, *Earth, Planets, Space* 70, <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0775-3>.
- [3] Kouyama, T. et al., 2013, *Journal of Geophysical Research: Planets* 118, 3, <https://doi.org/10.1029/2011je004013>.
- [4] Khatuntsev, I. V. et al., 2013, *Icarus* 226, 140, <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.05.018>.

著者紹介

堀之内 武

北海道大学地球環境研究院教授。京都大学理学研究科地球惑星科学専攻修士。博士(理学)。日本学術振興会海外特別研究員(米国ワシントン大学)、京大大学生存圏研究所等を経て2020年より現職。専門は気象学・地球流体力学。日本気象学会理事、気象集誌編集委員長を務める。