

金星の雲頂高度で見られる風速の周期的変動について

神山 徹(東大・理)、中村 正人、佐藤 毅彦、今村 剛(ISAS/JAXA)、二穴 喜文(IRF)

・ 研究の背景と目的

金星には、金星自転速度($\sim 1.6 \text{ m s}^{-1}$)に比べはるかに大きな風速を持って大気が循環する「スーパーローテーション」と呼ばれる現象が存在している。これまでの観測から、東西風速は高度が上がるにつれて上昇し、高度 70km では自転速度の 60 倍、 100 m s^{-1} にも達することが報告されている(Schubert et al., 1983)。

また、スーパーローテーションは常に同じ風速を持っているわけではなく、様々な周期で時間変化をすることが知られている。Pioneer Venus 周回機ミッションによって行われた 1979 年から 1985 年に渡る長期の観測から、雲頂高度のスーパーローテーションは数年周期の変動をする可能性が示唆された(Del Genio et al., 1990)。しかし実際に観測が行われた機会は解析期間に対して疎であり、その変動周期、変動の振幅は明らかではない。一方、Rossow et al., 1990 では雲の明るさ変化の周波数解析から 4 日、5 日周期の変動が得られており、これらの変動は惑星スケールの赤道ケルビン波、ロスビー波に由来してもたらされるものと報告されている。また赤道域の東西風速が 4 日(日 = 地球日)、あるいは 5 日周期、約 10 m s^{-1} の振幅で変動する様子が Galileo 探査機搭載の Solid State Imaging system (SSI) によって得られた画像データから見出されている(Belton et al., 1990)。我々のグループではこの短い周期の変動について、SSI 取得画像を基に解析を行い、東西風速の変動成分が惑星スケール、波数 1 の構造を持つことを示し、2008 年に報告を行った。

このようにスーパーローテーションには短周期、長周期の時間変動が存在する。短周期の変動は惑星スケールの波動の伝播に伴うことが示唆されているが、長周期の変動については Pioneer Venus での観測の制限によりその詳細は明らかではない。平均東西風速の変動は大気波動と平均東西風速の相互作用が重要となることが地球の気象観測から知られており、スーパーローテーションの時間変動を調べることで金星における大気波動とスーパーローテーションの関わりを明らかに出来る可能性がある。

欧州宇宙機構(ESA)によって打ち上げられた Venus Express(VEX)は金星周回軌道に投入された 2006 年 3 月から現在に至るまで金星の観測を継続的に行っている。VEX 搭載の Venus Monitoring Camera (VMC) は紫外(315 nm)、可視、近赤外の波長のフィルターを持ち(Markiewicz et al., 2007)、紫外波長では金星昼面、雲頂高度($\sim 70 \text{ km}$, Moissl et al., 2008)にある雲を撮像している。VEX は南極上空を遠金点に取る軌道周期約 24 時間の楕円軌道を取り、VMC は南半球上空から金星の広範囲撮像観測をほぼ毎軌道行っている。このような現状をふまえ、本研究では 3 年以上に渡って行われている VMC、紫外波長で取得された雲画像を用い日々の風速変動から数年にわたる長周期の風速変動について解析を行った。

・ 使用したデータ/解析手法

本研究では、ESA によって公開されている VEX 観測データのうち、VMC によって 2006 年 4 月～2008 年 11 月に撮像された紫外雲画像データを使用した。VEX の軌道の制限により、軌道ごとに撮像されるローカルタイムが異なるため、広く昼面が撮像されていた 211 軌道のデータを用いた。各軌道での風速を求める解析では、金星に対する衛星軌道、姿勢情報を基に画像に写る金星を緯度・経度座標に展開し(図 1)、小スケールの雲模様を強調するためハイパス処理を行った。展開画像に対して、相互相関に基づく雲の特徴追跡の手法(神山ら, 2009)を用いて風速を算出した。衛星軌道、姿勢情報の導出には NASA による SPICE を用いた。先行研究から、風速のばらつきが最大の風速推定の誤差要因となることが報告されており(Moissl

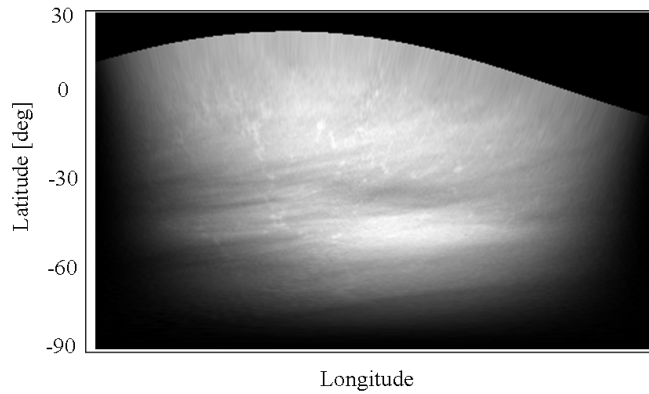


図 1. 使用した展開雲画像例 (2006 年 5 月 20 日)。緯度 -90° ~ 30° 、太陽直下点を中心として ± 90 度の経度範囲で展開。

et al., 2008)、本研究では風速推定誤差は着目する風速ベクトル周りの風速場の標準偏差から見積もりを行った。

・ 解析結果

VEX の軌道や観測のタイミングにより軌道ごとに撮像されるローカルタイム、緯度範囲が異なるため、長期間の変動を解析する際には多くの軌道で雲が写る緯度 -10° から -20° 、ローカルタイム 13 時から 14 時に解析する範囲を限定した。この範囲に含まれる風速を平均し、211 軌道分の風速を導出した(図 2)。軌道投入された 2006 年 4 月 20 日を時間の原点としている。

この結果から、200 日目から続く観測期間では風速値が増大し約 120 m s^{-1} まで増加している。しかし次の 450 日目から始まる観測期間では風速は約 80 m s^{-1} と大きく減少している様子が見られた。またこの観測期間でも風速が増大する傾向が見られた。続く 659 日目からの期間、及び 899 日目から始まる期間では風速が減少する様子が見られた。このように風速変動に一定の傾向が見られたため、211 軌道分のデータにサインカーブで最小二乗法を用いたフィッティングを行った。その結果、振幅が $15 \pm 2 \text{ m s}^{-1}$ 、周期 241 ± 3 日、平均風速 $108 \pm 2 \text{ m s}^{-1}$ というパラメータで最適解が得られた。また、周期を公転周期に固定して解析で行ったフィッティングを同様に行ったところ、振幅が $18 \pm 3 \text{ m s}^{-1}$ 、平均風速 $114 \pm 2 \text{ m s}^{-1}$ というパラメータで収束解が得られた。

以上から金星の東西風速には金星のおよそ 1 年、あるいはちょうど 1 年に相当する周期で振幅 15 m s^{-1} 程度の振動が存在することが分かった。ただし、解析に用いた約 1000 日の期間ではこの長期的な変動の周期に対して十分には長くなく、変動が安定して存在するかどうかはさらに長期間のデータを解析する必要がある。同様の解析を南北風速についても行ったところ(図 4)、南北風速には日々の風速変動が平均南北風速に比べ同程度の大きさで存在し、明確な長周期の変動は同定できていない。

続いて各観測期間において、ローカルタイムを固定した座標系で日々の東西風速の平均を行った。その結果、いずれの観測期間においても低緯度帯ではローカルタイム 12 時で風速の極小値を持ち、朝方、夕方に向かって風速が増大するローカルタイム依存の構造が得られた(図 3)。赤道の太陽直下点で風速が極小値を取り、朝方、夕方にむかって増大する構造は熱潮汐波を取り入れたスーパーローテーションを再現する数値計算の結果(Takagi and Matsuda, 2006)や Pioneer Venus の観測で得られた構造(Del Genio et al., 1990)とよ

く一致しており、熱潮汐波が金星大気に安定に存在し風速に影響を与えていることを示唆する結果が得られた。ただし 450 日目からの期間における平均東西風速分布では中緯度に風速の極大が見られるのに対し、他の期間では低緯度帯で風速の極大が見られ、観測期間によって異なる緯度依存が見られた。

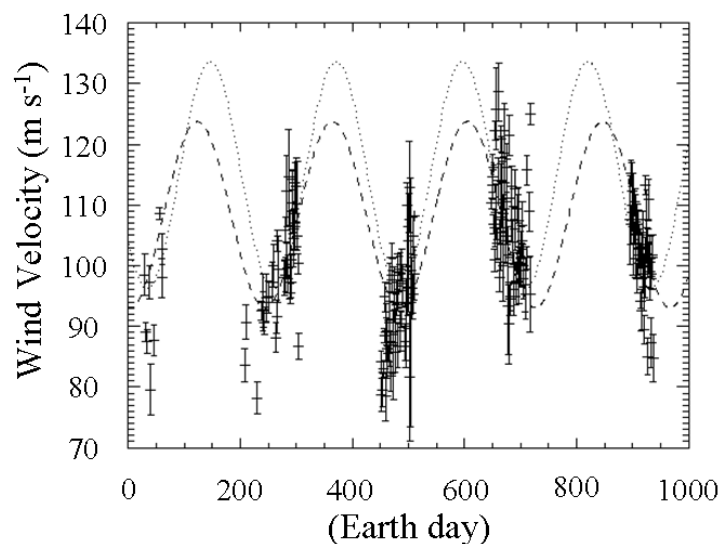


図 2. 金星雲頂高度における東西風速の時間変化。横軸は 2006 年 4 月 20 日を原点とする時間(日)、縦軸は西向きを正とする東西風速。破線は周期を固定せず正弦関数のフィッティングを行った結果を示し、点線は周期を金星公転周期に固定してフィッティングを行った結果を示す。

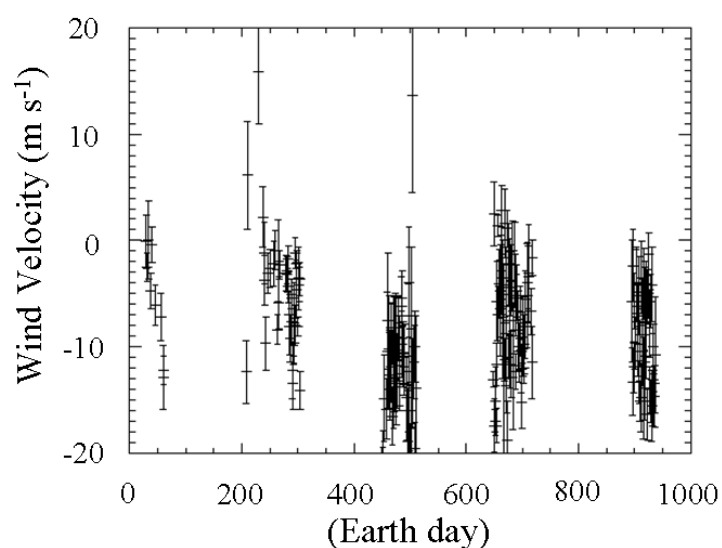


図 3. 金星雲頂高度における南北風速の時間変化。横軸は 2006 年 4 月 20 日を原点とする時間(日)、縦軸は北向きを正とする南北風速。

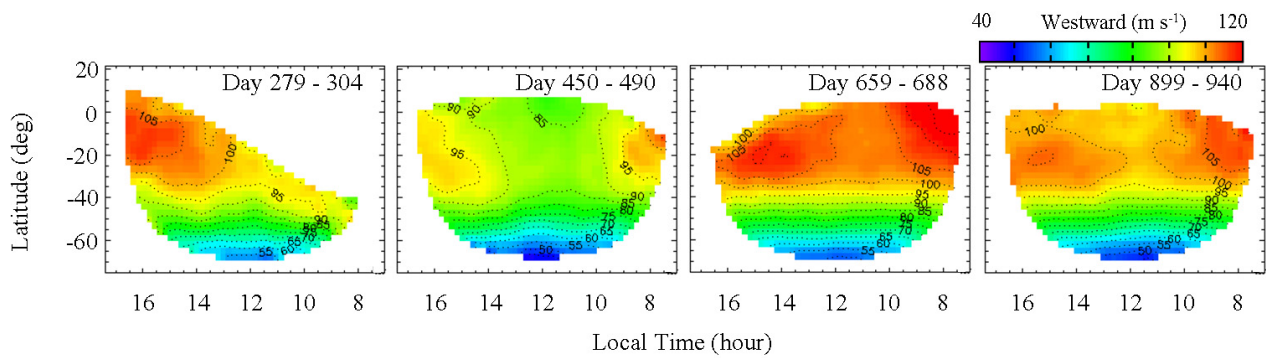


図 4. ローカルタイム、緯度座標系で日々の東西風速を平均して得られた風速分布。横軸はローカルタイム、縦軸は緯度、カラーコンターは西向きを正とする東西風速を表す。白の領域はデータ欠損を示す。

・ 考察

長周期変動の解析では 241 日のおよそ 1 金星年周期の風速変動が得られた。地球の赤道域成層圏においては準 2 年変動と呼ばれる東西風速の周期的変動が存在する。この解釈に用いられた Holton and Lindzen モデル(Holton and Lindzen, 1968)では、平均風速と赤道ケルビン波、ロスビー波の相互作用が周期的変動をもたらすと考えられた。本研究で得られた風速分布に対してフーリエ解析を行った結果、風速の遅い位相に対応する 450 日目からの観測期間では、その期間の平均東西風速よりも速く伝播する約 4.5 日周期の風速変動が見られ、一方他の期間では平均東西風速よりも遅く伝播する 5 日から 5.5 日周期の風速変動が見られた。平均東西風速よりも速く伝播する変動は赤道ケルビン波的であり、遅く伝播する変動はロスビー波的であるが、これらの変動が大気波動に由来するものかどうか詳細な解析を現在進めている。

別の要因として、太陽光加熱の季節変化が上げられる。解析結果で示したように金星公転周期で周期を固定してフィッティングを行っても観測結果をよく再現する。金星の離心率はおよそ 0.007 とほぼ真円であるが、受ける太陽光フラックスは最大と最小で約 3% 変化する。また同時に赤道傾斜角が約 2.6 度あり、太陽直下点が赤道を挟んで 1 公転周期で南北に移動する。地球と比較するとどちらのパラメータも小さいが、太陽光加熱の季節変化によって大気波動が励起されることがあれば長周期変動がもたらされる可能性がある。ただし定量的な結果は未だ得られていないため、太陽光加熱の寄与について結論は得られていない。

・ 結論/今後

本研究では、紫外波長で得られた VMC の撮像観測データを解析することで、金星雲頂高度でおよそ 1 金星年の周期をもつ東西風速の変動が存在することを示した。またローカルタイム、緯度座標系で各観測期間の東西風速を平均することで、風速分布に熱潮汐波に由来すると思われる構造が安定に存在すること、また緯度依存性が変化することを示した。長周期変動をもたらす要因は様々考えられるが、現在はまだ定量的な見積もりが出来ておらず結論は出ていない。

今後は、順次公開される VMC のデータを基に解析期間を延ばし、東西風速の時間変化をさらに明確にしていく。また 2010 年 5 月に打ち上げられ、同年 12 月に金星周回軌道に入り観測を行う「あかつき」探査衛星の取得データを解析することで、時間変動の成因について迫っていきたい。

・ 参考文献

- Belton, M. J. S., et al., 1991: Images from Galileo of the Venus cloud deck. *Science*, **253**, 1531-1536.
- Del Genio, A. D., et al., 1990: Planetary-Scale Waves and the Cyclic Nature of Cloud Top Dynamics of Venus. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 293-318.
- Evans, A. N., 2000. Glacier surface motion computation from digital image sequences. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **38** (2), 1064-1072.
- Markiewicz, W. J., et al., 2007: Venus monitoring camera for Venus express, *Planet. Space Sci.*, **55**, 1701-1711.
- Moissl, R., et al., 2009: Venus cloud top winds from tracking UV features in Venus Monitoring Camera images, *J. Geophys. Res.*, **114**
- Qing X. Wu., 1995: A Correlation-Relaxation-Labeling Framework for Computing Optical Flow - Template Matching from a New Perspective, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **17**, 843-853.
- Rossow, W. B., et al., 1990: Cloud-tracked winds from Pioneer Venus OCPP images. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 2053-2084.
- Schubert, G., 1983: General circulation and dynamical state of the Venus atmosphere. In: D.M. Hunten, L. Colin, T.M. Donahue and V.I. Morozet, Editors, *Venus, University of Arizona Press*.
- Takagi and Matsuda, 2005: Sensitivity of thermal tides in the Venus atmosphere to basic zonal flow and Newtonian cooling, *Geophys. Res. Lett.*, **32** (2005).
- 神山ら, 2008: 雲の特徴追跡を用いた金星雲頂高度の風速場解析, 大気圏シンポジウム・講演集, **22**, P-5
- 神山ら, 2009: Venus Express データに基づく複数高度での金星風速場の観測, 大気圏シンポジウム・講演集, **23**, P-15