金星雲頂高度での風速変動と大気波動の関連性について

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(~1.6m 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,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 and Rossow, 1990)。また、金星探査 Venus Express 搭載、Venus Monitoring Camera(VMC)取得データを基に行った解析から約 250 日周期(日 = 地球日)の準周期的な変動が見られることが示唆された(神山ら, 2010)。

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、あるいは 5 日周期、約 10m 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、その周期に比べ観測期間が十分とは言えず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数日周期の変動と長周期変動を併せて調べることにより、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。

Venus Express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。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(~ 70km, Moissl et al., 2009)にある雲を撮像している。Venus Express 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ることから、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 Venus Express 観測データのうち、VMC によって 2008 年 1 月～2008 年 3 月に撮像された紫外雲画像データを使用した。Venus Express 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

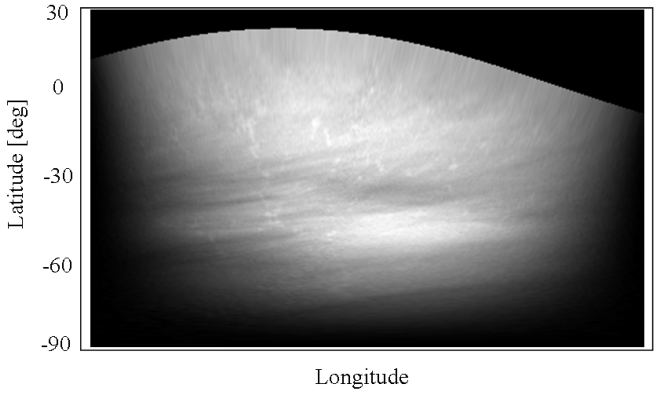

図 1. 使用した展開雲画像例 (2006 年 5 月 20 日)。緯度-90°～30°、太陽直下点を中心として±90 度の経度範囲で展開。

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 et al., 2009)、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

解析に用いた期間は、赤道域・低緯度帯でスーパーローテーションの減速が顕著な時期であり、全体の傾向としておよそ 50 日間で 10m s^{-1}以上の減速が見られていた。また赤道域～中緯度帯で広範囲に雲の明るさが暗く、高緯度帯で雲の明るさが特に明るい二分化した分布を示していた。

日々の風速変動、雲の明るさ変動を調べたところ、約 5 日周期の変動が東西風速、南北風速、雲の明るさに見られていた(図 2a)。それぞれの変動に対して周波数解析を行ったところ、3 つの変動すべてで約 4.7 日周期に変動の極大値が見られた(図 2b)。この 4.7 日周期の変動は、解析を行ったすべての緯度帯で、経度平均をした東西風速よりも遅い位相速度で西向きに伝播する変動であった。

周波数解析から得られた位相関係から、4.7 日周期の変動に対してその水平構造を再現した(図 3)。4.7 日周期の変動に伴う速度ベクトルの変化はちょうど渦を巻く構造を持ち、ロスビー波が持つ構造によく一致していた。雲の明るさは、この 4.7 日周期の変動がスーパーローテーションの向きと逆向きに進行していると見なすとよく説明されうる位相関係を持っていた。

・ 議論

これまでに行われた大気波動に着目したシミュレーションでは、赤道や低緯度帯で余剰になった運動量を極向きに運ぶことによってスーパーローテーションを定常にする役割をロスビー波は持つことが示唆されている(Yamamoto and Tanaka, 1997)。解析によって得られた速度場から、4.7 日周期の変動がもたらす運動量輸送を調べた(図 4)。その結果緯度 40°を境にして低緯度側では赤道向きの運動量輸送が、高緯度側では極向きの輸送が見られ、シミュレーションで予想された働きと矛盾する運動量輸送を行っていることがわかった。このことから、水平構造のみを見るとロスビー波は運動量を赤道に集める役割を果たしているといえる。ところがこの時期は赤道域・低緯度帯で顕著な風速の減速が見られた時期であり、それぞれ

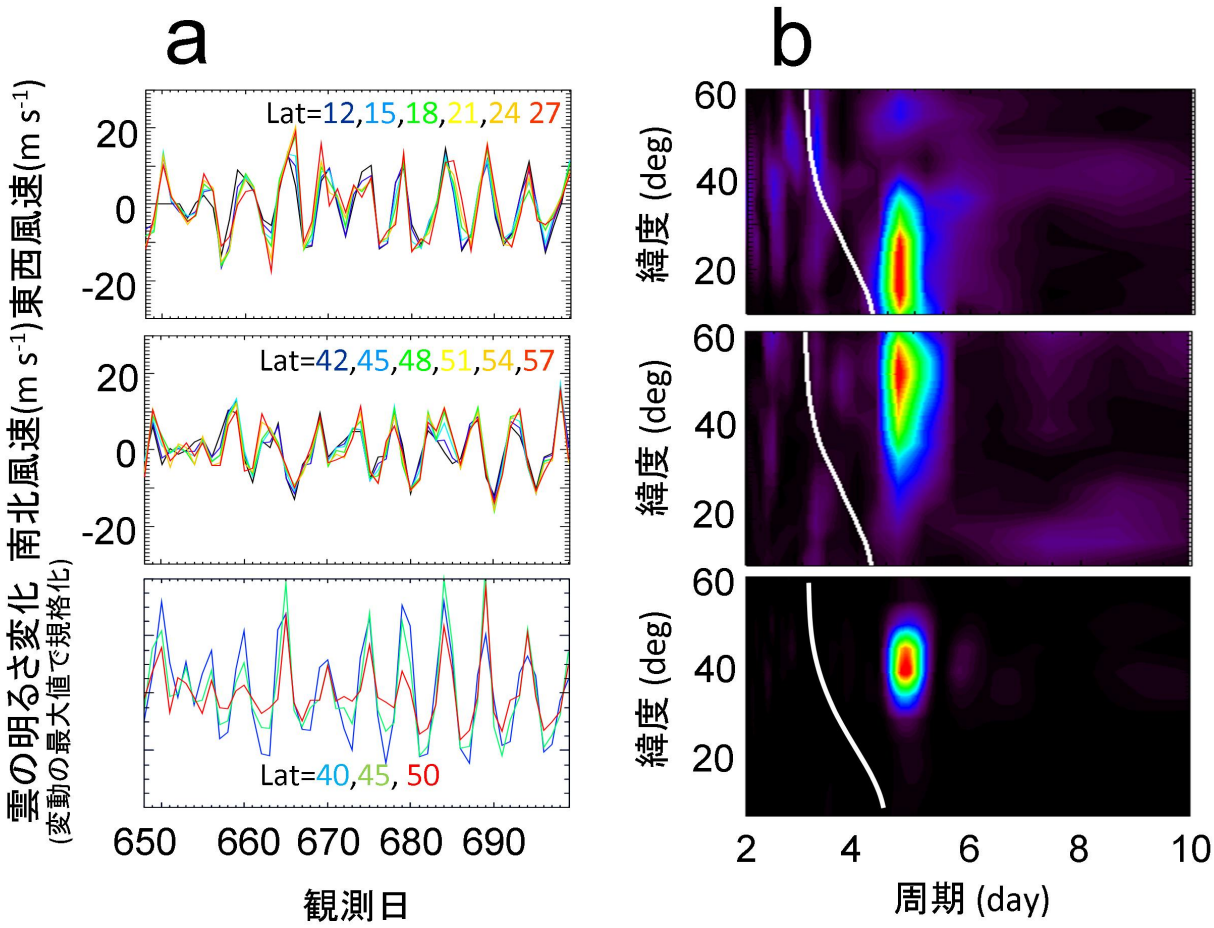

図 2. a) 2008 年 1 月から 3 月の雲画像から得られた東西風速・南北風速・雲の明るさの変動。横軸は Venus Express が軌道投入された日からの経過日を表す。b) それぞれの変動の周波数解析結果。横軸は周期、縦軸は緯度、カラーは規格化したパワースペクトル密度を表す。図中の白線は昼面において経度平均をした東西風速に相当する周期。

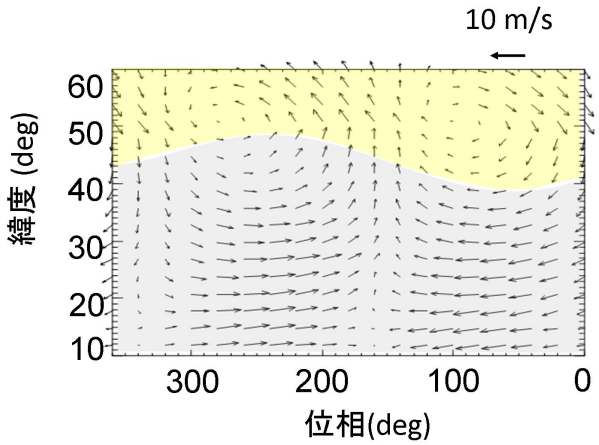

図 3.周波数解析から求めた位相関係より再現した 4.7 日周期変動の風速場と雲の明るさ分布。横軸は変動の位相、縦軸は緯度、ベクトルは風速を表し、雲の明るい領域を薄黄色、暗い領域をグレーで示す。

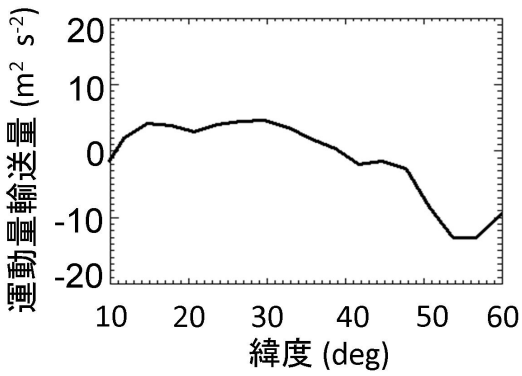

図 4. 観測された 4.7 日周期変動に伴う運動量輸送量。赤道向きの輸送を正、極向きを負とする。

の観測結果は矛盾する傾向を示した。一方ロスビー波は鉛直伝播し波のエネルギーを失う際、平均流を遅くする働きも持つ。よってスーパーローテーションの長期的な変動に対しては、ロスビー波の水平構造ではなく、鉛直伝搬の様子が重要であることが示唆される。

・ 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、赤道域・低緯度帯でスーパーローテーションが顕著な減速を示す時期に 4.7 日周期のロスビー波が存在することを示した。またこのロスビー波の伝播に伴って雲の明るさが変化するさまを示した。今後は、順次公開される VMC のデータを基に解析例を増やすことで、スーパーローテーションの時間変化と大気波動の関わりを明らかにしていく。

・ 参考文献

Belton, M. J. S., Gierash, P. J., Smith, M. D., Helfenstein, P., Schinder, P. J., Pollack, J. B., Rages, K. A., Morrison, D., Klaasen, K. P., Pilcher, C. B., 1991. Images from Galileo of the Venus cloud deck. *Science*, **253**, 1531-1536.

Del Genio, A. D., Rossow, W. B., 1990: Planetary-Scale Waves and the Cyclic Nature of Cloud Top Dynamics of Venus. *J. Atmos. Sci.,* **47**, 293-318.

Markiewicz, W. J., Titov, D. V., Ignatiev, N. I., Keller, H. U., Crisp, D., Limaye, S. S., Jaumann, R., Moissl, R., Thomas, N., Esposito, L., Watanabe, S., Fiethe, B., Behnke, T., Szemerey, I., Michalik, H., Perplies, H., Wedemeier, M., Sebastian, I., Boogaerts, W., Hviid, SF., Dierker, C., Osterloh, B., Böker, W., Koch, M., Michaelis, H., Belyaev, D., Dannenberg, A., Tschimmel, M., Russo, P., Roatsch, T., Matz, K. D., 2007. Venus monitoring camera for Venus express. *Planet Space Sci.*, **55**, 1701-1711.

Moissl, R., Khatuntsev, I., Limaye, S. S., Titov, D. V., Markiewicz, W. J., Ignatiev, N. I., Roatsch, T., Matz, K. –D., Jaumann, R., Almeida, M., Portyankina, G., Behnke, T., Hviid, S. F., 2009. Venus cloud top winds from tracking UV features in Venus Monitoring Camera images. *J. Geophys. Res.*, **114**, E00B31.

Rossow, W. B., Del Genio, A. D., Eichler, T., 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*.

Yamamoto, M., Tanaka, H., 1997. Formation and maintenance of the 4-day circulation in the Venus middle atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, **54**, 1472-1489.

神山徹, 今村剛, 中村正人, 佐藤毅彦, 二穴喜文, 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

神山徹, 今村剛, 中村正人, 佐藤毅彦, 二穴喜文, 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

神山徹, 今村剛, 中村正人, 佐藤毅彦, 二穴喜文, 2010: 金星の雲頂高度で見られる風速の周期的変動について, 大気圏シンポジウム・講演集, **24**, P-15