

Venus Express データに基づく複数高度での金星風速場の観測

神山徹 (東大理), 中村 正人 (ISAS/JAXA), 佐藤 毅彦 (ISAS/JAXA), 今村 剛 (ISAS/JAXA), 二穴 喜文 (IRF)

・研究の背景と目的

金星には大気が金星自転速度($\sim 1.8 \text{ m s}^{-1}$)に比べ高速に循環している「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。観測から東西風速は高度が上がるにつれ増加することが知られており (Schubert et al 1983)、高度 10 km 程で自転速度を追い越し、高度 70 km では自転速度の 60 倍、 100 m s^{-1} にも達する。金星大気がこのような風速分布を持つことは未だ解明されていない。

金星では様々な時間・空間スケールの波動の伝播が大気中の角運動量を輸送し、上層大気に蓄積することでスーパーローテーションに代表される大気循環を生成・維持していると考えられている。現在数値計算などから有力なメカニズムとして子午面循環と渦粘性 (Gierasch 1975)、熱潮汐波による大気加速 (Felts & Lindzen 1974)、赤道ケルビン波による大気加速 (Yamamoto & Tanaka 1990) といったメカニズムが提唱されている。

実際にスーパーローテーションを維持するために重要なメカニズムを知るためには、観測に基づく定量的な実証が必要である。先行研究において、雲画像から雲の特徴を追跡し風速場を推定する手法 (図 1) を用いてスーパーローテーションの物理を解明するアプローチが Pioneer Venus 探査機での長期観測 (1978 年 ~ 1985 年) に対して行われ、金星雲頂高度に熱

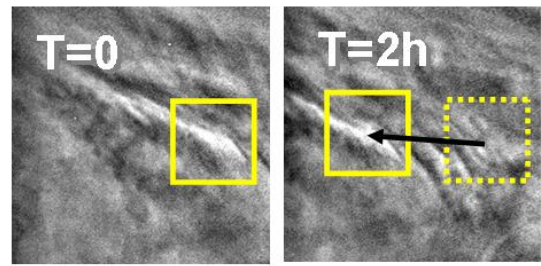


図 1 : 雲の特徴追跡の概念図。T=0 での画像に見られた雲の特徴を、T=2h の画像から見つけ出しその移動ベクトルを推定することで風速を求めることができる

潮汐波、赤道ケルビン波に由来すると思われる構造を見出した (Del Genio et al 1990)。しかしこの観測は雲頂高度に限られ、実際に下層大気から上層へもたらされる運動量を定量的に見積もることはなされていない。その後 Galileo 探査機による金星観測 (1990 年 2 月) においても同様のアプローチが取られたが、観測の制限から定量的に大気波動による運動量輸送の定量的な見積もりは得られていない。

2006 年 4 月から欧州宇宙機構 (ESA) により打ち上げられた探査衛星 Venus Express が観測を続けている。Venus Express は紫外、可視波長を用いた雲頂高度 ($\sim 65 \text{ km}$) にある雲の撮像観測に加え、可視赤外分光撮像装置 (VIRTIS) により、金星大気の窓波長を利用した雲低高

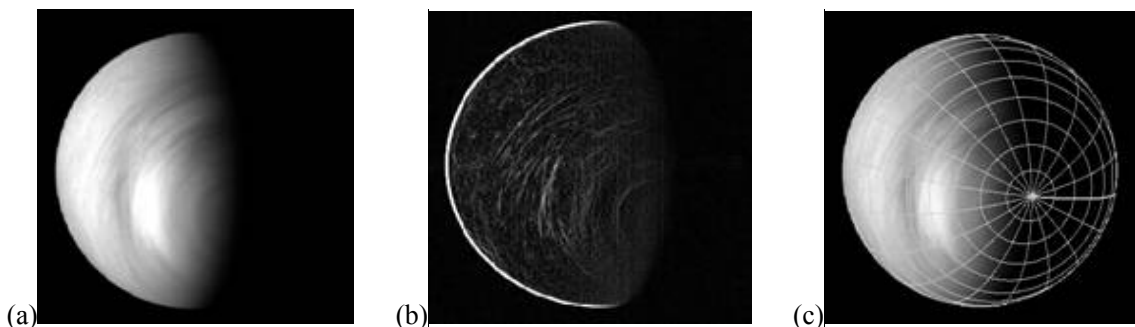


図 2: 画像に映る金星の緯度経度算出例。(a) 撮像画像、(b) 撮像画像に微分を行った結果、(c) 金星の縁に対して最小二乗法を用いて円をフィッティングし金星の中心座標を求め、軌道情報とあわせ緯度経度線を求めた画像。緯度線は 10 度間隔、経度線は 20 度間隔で引いてある。

度(~44km)にある雲の分光撮像観測を行っている。これらのデータを組み合わせて用いることにより、過去の観測では得られなかった複数の高度に渡る金星大気の情報を得られる。このような現状をふまえ、本研究では Venus Express 取得データに基づき複数高度に渡る風速場の解析を行った。また撮像画像から必要な地理情報を得るための技法についての考察とその精度評価を行った。

・使用したデータ/解析手法

本研究では解析の初めとして、Venus Express 搭載の Venus Monitoring Camera (VMC)が 2006 年 5 月 20 日、21 日に取得した雲頂高度の撮像画像、VIRTIS が 2006 年 7 月 2 日、4 日に取得した分光撮像画像を用いた。

特に、VMCによって撮像された画像では金星がほぼ真円で写っており(図 2a)、画像処理によってその中心座標を求めることができる。本研究ではまず得られた画像を微分し金星の縁を際立たせ(図 2b)、各縁の画素とその近傍の画素の微分値分布をガウシアンでフィッティングすることによりサブピクセル単位で金星の縁を求めた。さらに得られた縁に最小二乗法を利用した円のフィッティングを行い、金星の見かけの半径とその中心座標を求めた。精度評価のため、この手法を太陽光入射角と衛星出射角に依存する関数(Belton et al., 1990)を用い作成した惑星模擬画像(図 3)に適用した結果、中心座標の誤差は 0.1 ピクセル以下となった。これは風速に換算して 3 m s^{-1} 以下に対

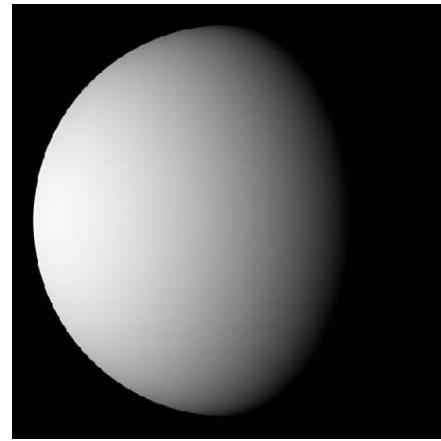


図 3: 太陽光入射角と衛星出射角を考慮し作成した惑星模擬画像。

応し、スーパーローテーションに対して十分な精度を持つことを確認した。

以上の手法によって得られた中心座標と衛星の軌道情報などを組み合わせることで画像上の各点において緯度経度を求めることができる(図 2c)。本研究ではこの緯度経度を基に撮像画像を南極を中心とした正距方位図法に準拠した座標系に展開し風速を導出した。風速を導出する際に、特徴追跡に失敗し間違っ

・解析結果/考察

・雲頂高度

VMC によって得られたデータのうち波長

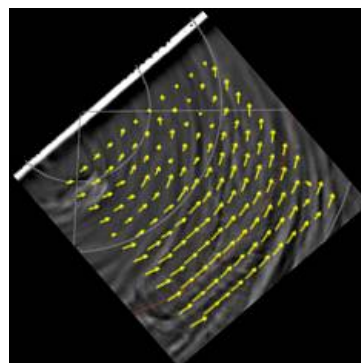
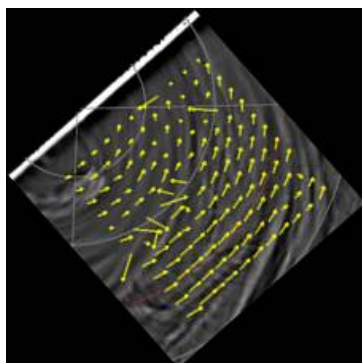


図 4: 誤った推定をした雲の移動ベクトルの修正。図中の矢印は雲の移動ベクトルを表す。修正前(左図)に画像中央に見られた誤ベクトルが、よりもっともらしい方角へ修正されている(右図)。

365nm の撮像データを用いて得られた画像を基に雲頂高度での風速場を導出した(図 5)。得られた結果から、20 日、21 日共に夕方側(ローカルタイム 18 時)に風速の大きい領域があることが分かった。また 20 日と 21 日では風速の絶対値が 10m s^{-1} 以上変化するなど大きな日変化があることが分かった。これらは同じ雲頂高度を観測した過去の Pioneer Venus や Galileo 探査機での観測でも見られている。

・雲底高度

VIRTISによって得られる分光撮像画像データから、金星大気の窓波長に当たる波長 $1.7\mu\text{m}$

での画像を基に東西風速を導出した(図 6)。波長 $1.7\mu\text{m}$ は金星大気の窓波長であると同時に、金星に広く存在する雲の雲粒に強く散乱を受ける波長であり、この波長を用いることで雲底の情報を得ることが出来る (Allen & Crawford, 1983)。この結果、雲底での平均東西風速は雲頂に比べ約 20m s^{-1} ほど小さいことが確認された。また図 6 に見られるように 7 月 2 日、4 日にローカルタイムに依存するような共通する構造は見られなかった。雲頂高度と同様風速 10m s^{-1} 程度の大きな風速の違いが見られた。

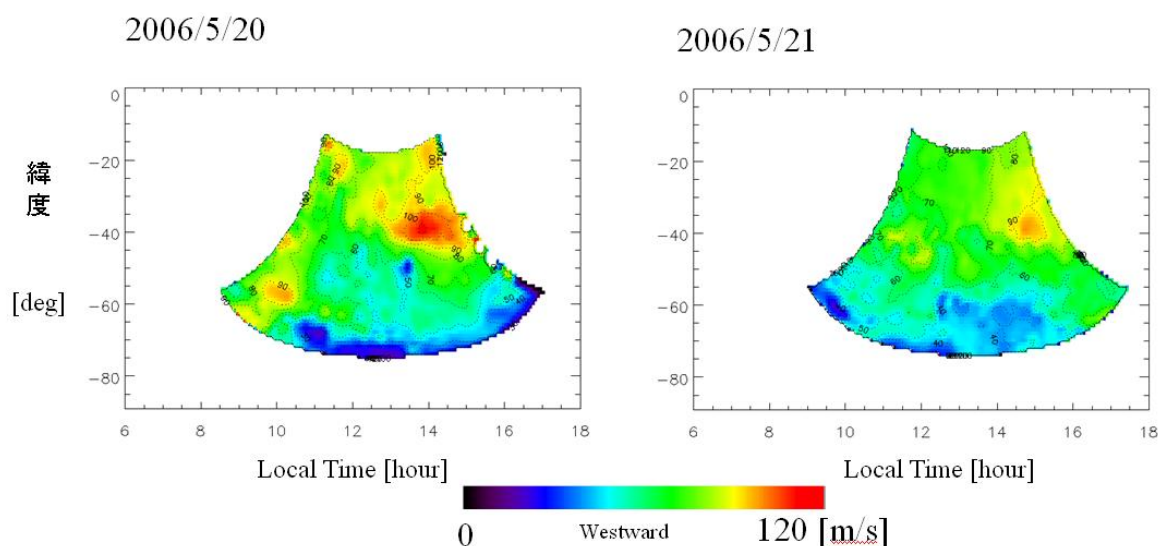


図 5 : 2006 年 5 月 20 日、21 日における雲頂高度(~65 km)の東西風速分布。横軸はローカルタイム、縦軸は緯度を表し、カラーコンターは西向きを正とした風速を表す。

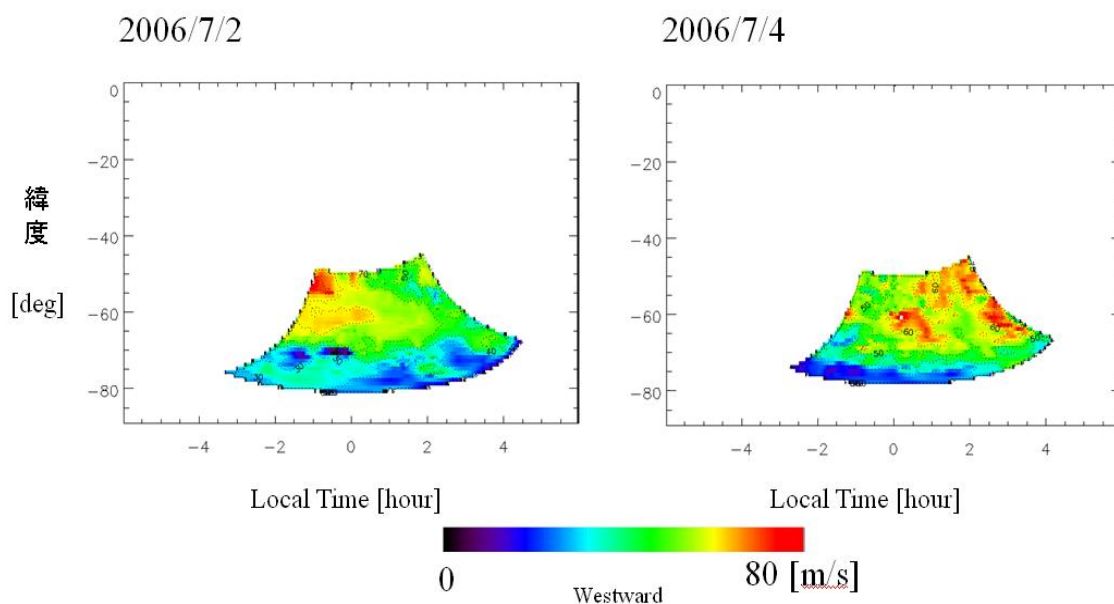


図 6 : 2006 年 5 月 20 日、21 日における雲底高度(~44 km)の東西風速分布。横軸はローカルタイム、縦軸は緯度を表し、カラーコンターは西向きを正とした風速を表す。

・ 結論

本研究では雲の特徴追跡を用いた風速の推定手法を Venus Express 搭載の VMC、VIRTIS から得られたデータに適応することで異なる高度での金星大気の風速場を得ることが出来た。

ただし本発表では平均的な風速場や平均場からの揺らぎなど大気波動に由来する風速変動を見るまでには至っておらず、今後はより多くのデータから風速場を求め、大気波動を抽出することを目指している。

・ 参考文献

- Allen, D. A., Crawford, J. W., 1984: Cloud structure on the dark side of Venus. *Nature*. **307**, 222-224
- Del Genio, A.D., et al., 1990: Planetary-scale waves and the cyclic nature of cloud top dynamics on Venus. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 293-318.
- Fels, S. B., and R. S. Lindzen, 1974: The interaction of thermally excited gravity waves with mean flows. *Geophys. Fluid. Dyn.*, **6**, 149-191.
- Gierasch, P. J., 1975 : Meridional circulation and the maintenance of the Venus atmospheric rotation, *J. Atmos. Sci.*, **32**, 1038-1044.
- Rossow, W. B. et al., 1990: Cloud-tracked winds from Pioneer Venus OCPP images. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 2053-2084.
- Schubert, G et al., 1980: Structure and circulation of the Venus atmosphere, *J. Geophys. Res.* **85** (A13), 8007-8025.
- Yamamoto, M., and H. Tanaka, 1997: Formation and maintenance of the 4-day circulation in the Venus middle atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, **54**, 1472-1489.