

雲の特徴追跡を用いた金星雲頂高度の風速場解析

神山 徹 (東大理)、中村 正人 (ISAS/JAXA)、佐藤 毅彦 (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

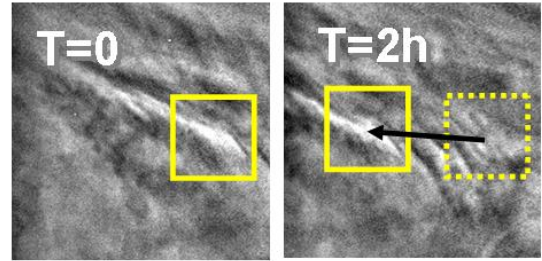


図 1 : 雲の特徴追跡の概念図。T=0 での画像に見られた雲の特徴を、T=2h の画像から見つけ出しその移動ベクトルを推定することで風速を求めることができる

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)。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、少ない画像データから風速の空間分布を詳細に推定する手法が確立されていなかったこともあり、求めた風速場から大気波動を分離することは困難であった。

このような現状をふまえ、本研究では限られたデータからも大気波動を同定することが可能な精度の良い手法を構築することを目的とした。またこの手法を用いることで、これまでなされていなかった Galileo 探査機が取得した観測結果から大気波動成分を同定し、それが与える大気加速率を定量的に見積もるこ

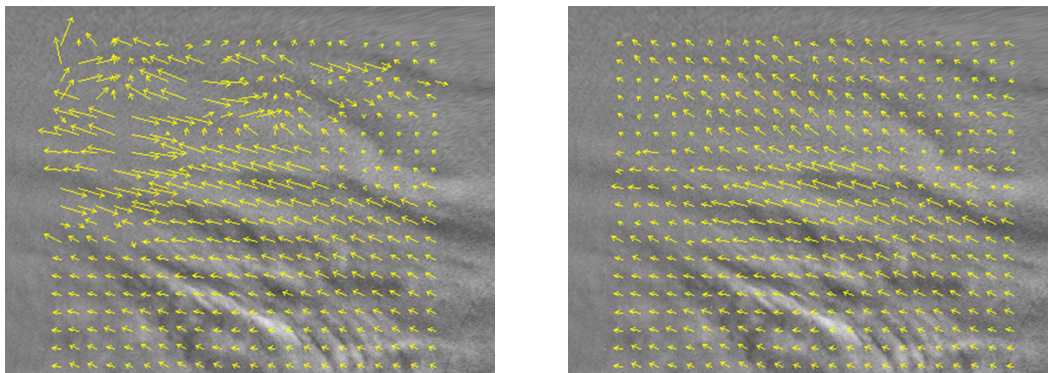


図 2 : 誤った推定をした雲の移動ベクトルの修正。図中の矢印は雲の移動ベクトルを表す。修正前 (左図) に画像左上領域に見られた誤ベクトルが、よりもっともらしい方角へ修正されている (右図)。

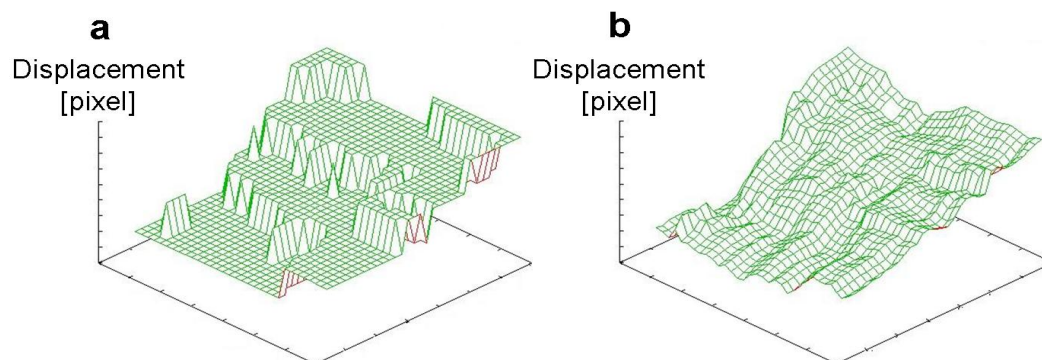


図 3: 連続的な移動量の推定。図中の高さは画像組から求めた雲の移動量に対応し、各座標は画像上の移動ベクトルを求めた座標に対応する。従来手法ではピクセル単位の推定であったため離散的に移動量が求められていたのが(左図)、本研究ではサブピクセル単位まで移動量を見積もることで連続的な移動量を得ている(右図)。

とを目指した。

・使用したデータ/解析手法

本研究では、Galileo 探査機が 1990 年 2 月 13 日～17 日に取得した、撮影時間に 2 時間の間隔を持つ 7 組の金星雲画像組を用いて解析を行った。この観測では波長 418nm での雲頂高度での反射光が観測されており、高度は約 65 km と見積もられている(Belton et al 1990)。

本研究では相互相関法と呼ばれる特徴を追跡する手法に基づき、雲の移動ベクトルを求めることで日々の風速場の推定を行った。この推定を行う際に、誤った推定をしたベクトルの修正を行う(図 2)、またサブピクセル単位の移動ベクトル推定を行う(図 3)など推定手法の改良を行い、これらを組み合わせることで従来の手法に比べより詳細な解析が可能な手法を構築した。

・解析結果/考察

本研究ではまず太陽光加熱によって励起される熱潮汐波に由来する構造を抽出するため、13 日～17 日までの風速分布をローカルタイムに固定した座標系で平均した。その結果、平均東西風速において、赤道域で正午から夕方にかけて風速が増大する特徴がみられた。またローカルタイム 15 時の低緯度帯にピークを持つ分布であることがわかった(図 4)。このような風速分布は Pioneer Venus 探査機での

1982 年における観測においても同様に見られ(Rossow et al 1990)、熱潮汐波に由来する構造が安定に存在することを示唆する結果が得られた。

一方、各日の風速分布から平均した東西風速を差し引き熱潮汐波に由来しない構造を抽出したところ、赤道域を中心とした金星一周の長さに対応する周期的な構造が卓越していることがわかった(図 5)。これは、この周期的変動が赤道に最大振幅を持つ赤道ケルビン波によるものであると示唆される結果であった。また赤道域での風速変動と雲の明るさを比較してみたところ、ちょうど位相が π だけずれた顕著な逆相関が見られた(図 6)。Pioneer Venus 探査機による観測結果ではこの位相の

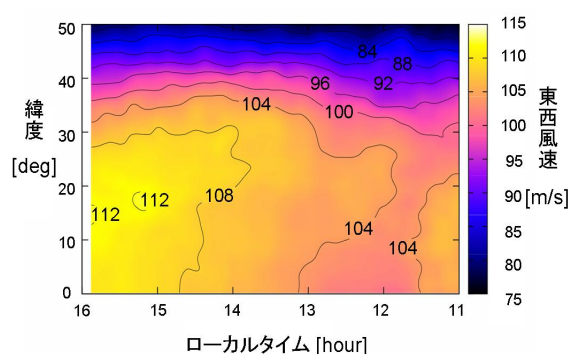


図 4 :1990/2/13~2/17 の西向きを正としたローカルタイムに固定された平均東西風速分布。等高線中の数字は風速を表す

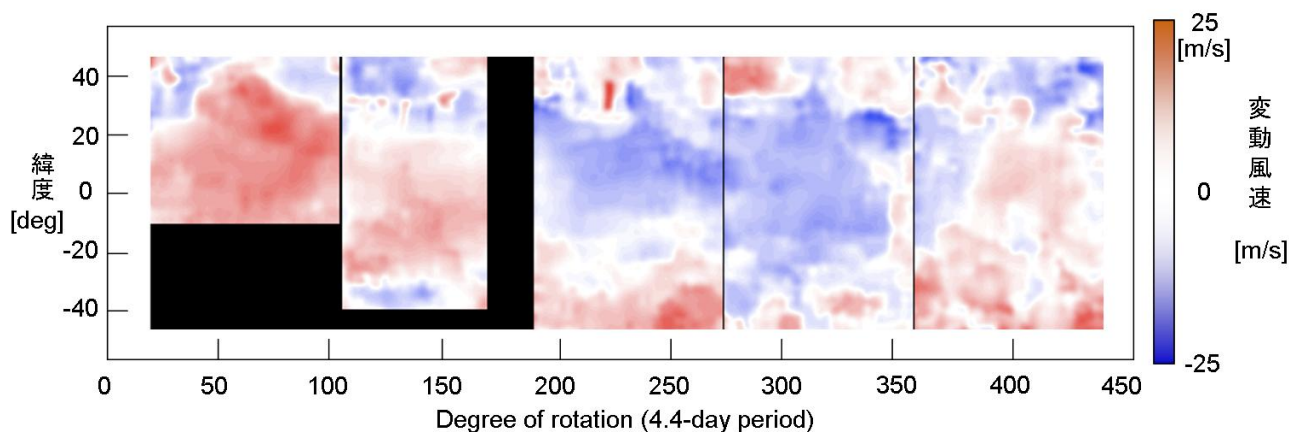


図 5：ローカルタイムに固定された風速成分からの変動成分の分布。横軸は雲と共に回転する座標系にとった相対的な経度、色は平均風速からの変動を表し、正の領域は平均風速より西向きの風速が大きい領域を示す。またデータが無い領域は黒色で示した。

ズレが $\pi/2$ と報告されており (Rossow et al 1990)、現在この違いが何によってもたらされたか、また位相のズレが示す物理について検討中である。

さらにこの構造が赤道ケルビン波であるとして、この波動が雲層高度で放射減衰する際にもたらす大気加速の強さを求めたところ、1 地球日で大気を 0.3 m s^{-1} 加速できる強さの波

動であると見積もられた。この見積もりは 1983 年から 1985 年にかけて Pioneer Venus 探査機で見積もられた加速率 ($0.2 \text{ m s}^{-1} \text{ day}^{-1}$ Del Genio et al 1990) と同程度の大きさであり、また過去の数値実験と比較してスーパーローテーションの維持に無視できない大きさであった。

・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改良することで、Galileo 探査機が観測した金星雲画像データから初めて熱潮汐波、赤道ケルビン波に由来する構造を抽出した。また赤道ケルビン波がもたらす大気加速がスーパーローテーションの維持・変動の一端を担っている可能性を示した。

今後、本研究で培った解析手法を用いて現在 Venus Express にて観測されているデータを解析することで、本研究で見出した大気波動の時間変動や安定性をさらに詳細に議論していく予定である。

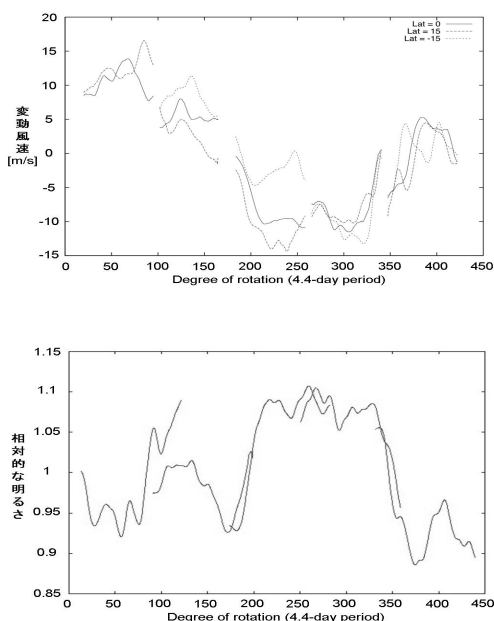


図 6：赤道域でのローカルタイムに固定された風速成分からの変動風速(上図)と規格化した雲の相対的な明るさ (下図)の比較。横軸は雲と共に金星を回る相対的な経度。不連続は異なった観測日であることを示している。

· 参考文献

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.