

雲追跡手法を用いた金星雲層における物質輸送の研究

奈良佑亮[1], 今村剛[2], 村上真也[3]

[1] 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

[2] 東京大学大学院新領域創成科学研究科複雑理工学専攻

[3] 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

1. 序論

金星は高度約 50 km から 70 km にわたる厚い硫酸の雲に覆われている。この雲層ではスーパーローテーションと呼ばれる、雲頂で 100 m/s を超える西向きの風が極付近を除く金星全体で常に吹いている。スーパーローテーションの生成、維持されるメカニズムは未解明である。紫外波長域には未同定物質による吸収帯が存在し、可視波長にまで及んでいるため (Moroz et al., 1985)、その空間分布は金星の熱収支に深く関わっていると考えられる。雲の主成分である二酸化硫黄が雲頂で光化学生成するための材料物質や未同定吸収物質がどのように輸送されるかが金星大気構造の理解に重要であり、そのプロセスとしてはスーパーローテーションに加えて子午面循環や擾乱による輸送が考えられるが、その詳細は分かっていない。

吸収物質の空間分布には様々な特徴が知られており、そのうちの一つに Y 字模様と呼ばれる、赤道から高緯度にわたる大規模な構造が存在している (図 1)。その成因についてはこれまでも議論されてきた。

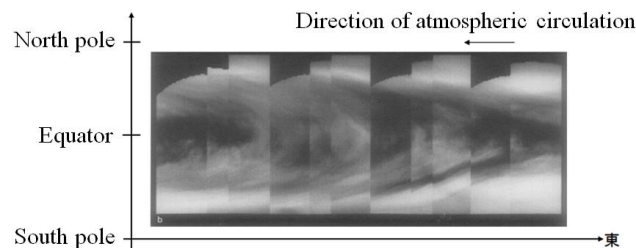


図 1 金星の紫外画像のモザイク (Del Genio and Rossow, 1982)。横倒しの「Y」のような形をした模様が観察される。

Smith and Gierasch (1996) は定常的な風速場によって水平移流された物質の分布が緯度線に対して傾いた筋状になることを示し、吸収物質が赤道域で下層から間欠的に供給されることで Y 字に似た模様ができるとしている。しかし、Del Genio and Rossow (1990) による輝度変動の周期解析の結果、輝度の東西変動周期は平均東西風の循環周期と異なることが示されており、吸収物質が単に定常的な風速場のみに移流されているわけではなく、波動が寄与していると考えられる。

本研究では、Venus Express 搭載の撮像装置により得られた紫外画像に雲追跡手法を適用して風速場を導出し、雲層の模様の変動との比較を行うことにより、紫外吸収物質の分布を支配する大気循環を調べる。特に、金星の雲頂で最も大規模な濃淡模様である Y 字模様の形成過程を大気波動の観点から明らかにすることを目的としている。

2. 相互相関法による風速場の推定

2.1. 用いたデータ

欧州宇宙機関の金星探査機 Venus Express に搭載されていた撮像装置 Venus Monitoring Camera (VMC) により得られた画像を解析に用いた。Venus Express は極軌道で金星を 24 時間の周期で周回し、2006 年 3 月から 2014 年 12 月まで観測運用を実施した。Venus Express の詳細については Svedhem et al. (2007) で VMC の詳細につ

いては Markiewicz et al. (2007) で紹介されている。VMC は紫外 (365 nm), 可視 (513 nm), 赤外 (965, 1010 nm) の 4 波長で金星を撮像していた。本研究では、紫外画像のうち金星の比較的広範囲が視野に収まっているものを使用した。衛星の軌道の制約から、このような観測を行っているものは南半球に限られる。解析には Y 字模様が顕著に見られ、かつ、比較的連続した観測が行われていた 2007 年 7 月から 8 月に取得された 32 日分のデータを用いて、1 日あたり 1 つの風速場を求めた。

2.2. 相互相関法による雲移動ベクトルの推定

相互相関法は異なる時刻の画像の相互相関係数を求めることで、その時間間隔での模様の変位を求める手法である。本研究では $10^\circ \times 10^\circ$ の領域が 1 時間後の画像のどこに最も相関が高くなるかを、風速の範囲が、東西風速 50 m/s から 150 m/s、南北風速 -60 m/s から 60 m/s であるとして求めた。風速は、北向き、東向きを正にとっている。図 2 に相互相関法による雲移動ベクトルの導出の一例を示す。

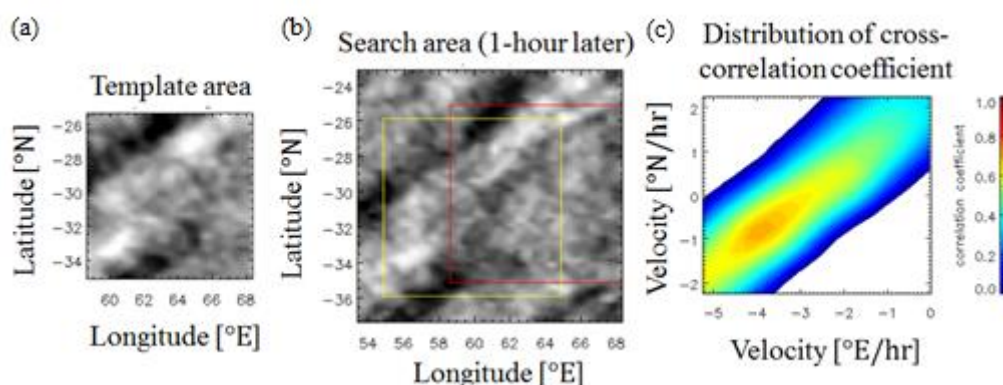


図 2 雲移動ベクトル導出の一例。テンプレート(a)をずらしながら探索領域(b)との相互相関係数を求め、東西・南北の変位に対してプロットしたものが(c)である。相関係数が最大となる変位が画像間で模様が移動した距離であるとみなす。(b)の赤枠はテンプレートの位置に対応する。黄枠はテンプレートとの相関が最も高くなる領域を示している。赤枠と黄枠の位置の差が 1 時間の間にテンプレートが移動した距離であるとみなす。

時間経過に伴い模様が変形することや、似た模様が異なる場所に存在することによって、相互相関曲面のピークがなまったり、複数のピークが現れたりする場合がある。これを低減する手法として、時間的に連続した複数の画像から得られた相互相関曲面を重ね合わせて誤りを防ぐ方法を導入した (Ikegawa and Horinouchi, 2016)。

3. 結果

3.1. 風速場推定の結果

以上のようにして求めた風速場の一例を図 3 に示す。ベクトルの場所による違いを見やすくするために、赤道域の平均角速度で剛体回転する成分を背景風として差し引いている。背景風を差し引くことにより、この例では Y 字の腕に対応する斜めの帯状の構造に沿うような風速成分があることを見て取れる。解析期間における平均の東西風速は低緯度 (5-20°S) では -83.8 ± 0.2 [m/s]、中緯度 (30-45°S) では -91.4 ± 0.3 [m/s] となった。ここで、符号は東向きを正にとっている。周期に換算すると、それぞれ 5.22 ± 0.01 日、 3.68 ± 0.01 日である。誤差は、標準偏差を標本数の平方根で割ることで導出した。

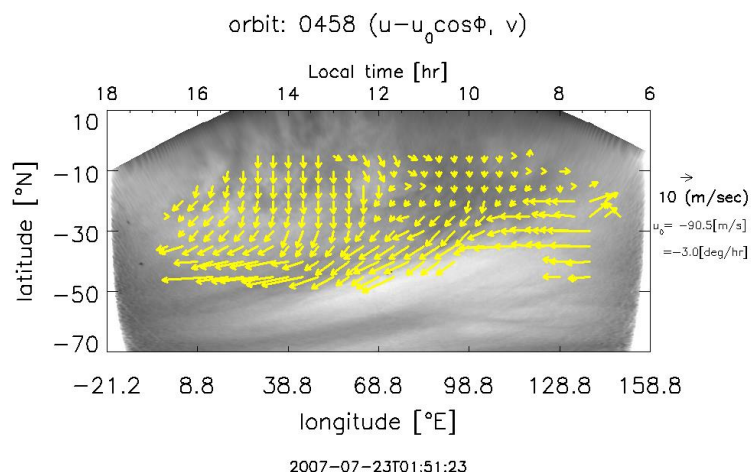


図3 相互相関法による雲移動ベクトルの推定結果の一例。赤道域の平均角速度を差し引いたベクトルを表示している。

3.2. 擾乱成分における南北風と輝度分布の比較

波動の寄与を考察するために、輝度と風速の擾乱成分を調べた。具体的には、ローカルタイムと緯度を固定して時間平均した成分を差し引いた風速場と輝度の比較を行った。ローカルタイムに固定した成分は帯状平均と熱潮汐波の重ね合わせであると考えられるため、これを差し引いたものはその他の擾乱成分を表している。図4に南北風と輝度の擾乱成分の東西分布を示しているが、Y字模様が観察される軌道において、暗部と極向きの流れが極大になる位置がずれていることが見て取れる。解析した期間、別の軌道でもY字模様付近で南北風と輝度の関係に同様の傾向が見られた。

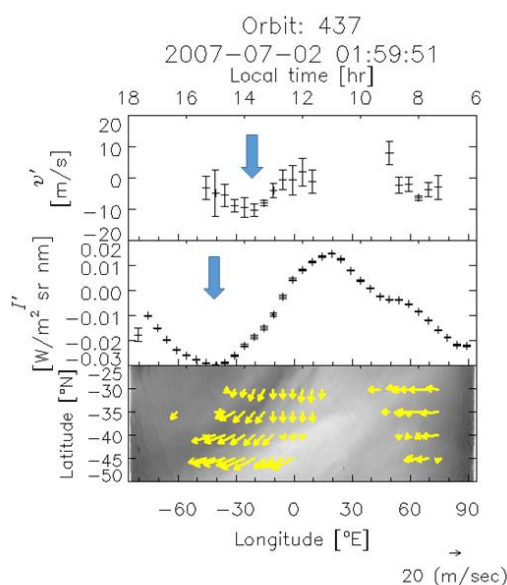


図4 輝度と南北風の空間分布の比較。上側のパネルは南北風の擾乱成分の緯度 $30\text{-}45^\circ\text{S}$ での平均値、中央のパネルは輝度値の擾乱成分の緯度 $30\text{-}45^\circ\text{S}$ での平均値、下側のパネルは輝度、風速分布をあわせて表示したものである。

このような輝度分布と風速分布が伝播する様子を、Y字模様が特に明瞭に観察された4日間隔の3つの画像で図5に示す。今回の解析期間において、平均東西風の循環周期は3.7日であり、4日間にわたってこの速度で移

流されると西に391°移動するため、そこから360°を差し引いた31°ずつ東にずらして4日間隔の画像を並べた。こうすることで、背景風に対して伝播しない構造は同じ位置にとどまり、伝播する構造が可視化できる。Y字模様は背景風より遅く西に移動していることがわかる。また、帯状の明暗の境界で観察できる極向きに傾いた風速場も帯状の構造とともに西向きに動いている様子が観察できる。先に述べた輝度と南北風の位相関係とあわせて、スーパーローテーションする大気を基準に考えると、暗部は極向きの風より位相が遅れていると言える。

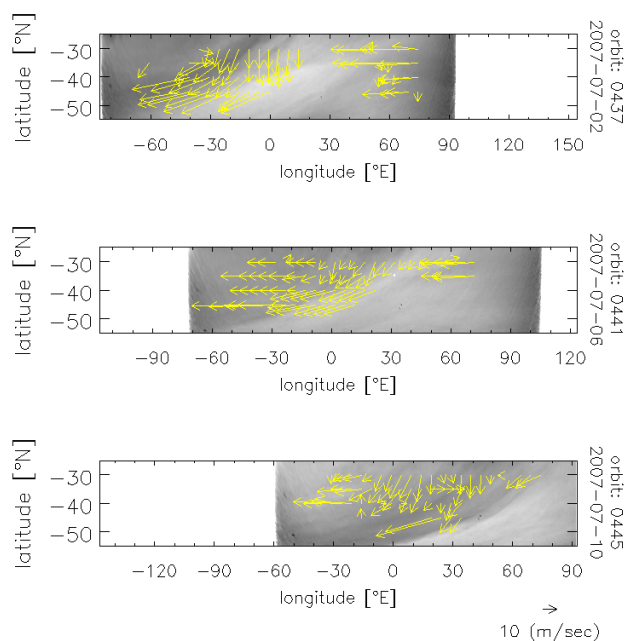


図5 平均東西風と同速度で移流される構造が止まって見えるよう経度をずらしながら4日隔てた画像を並べた。各画像に風速場を重ねて表示している。

3.3. 輝度・風速変動の周期解析

背景風とは異なる速度で模様が移動しているということは波動により模様が作られていることを示唆するものである。そこでLomb-Scargle法(Scargle, 1982)により風速場と輝度変動の擾乱成分について周期解析を行った。赤道域については5-20°S、60-75°Eの範囲で、中緯度については30-45°S、60-75°Eの範囲で、輝度、東西風、南北風のそれぞれの日の値を平均し、得られた時系列を周期解析した。輝度については低緯度、中緯度ともに4.4日の周期が検出された。東西風に関しては低緯度では輝度と同程度の4.3日の周期が検出されたが、中緯度では雲移動ベクトルが求まらないことによる欠測が多く、統計的に有意な周期性を確認できなかった。南北風に関して、低緯度では5.0日の周期が検出され、輝度や東西風とは異なる変動周期を持っている。中緯度では、東西風と同様の理由で有意な周期性を確認できなかった。表1に得られた周期性を平均東西風の循環周期とともにまとめた。輝度変動の周期は赤道域と中緯度で同程度だが、赤道域よりも中緯度の背景風の角速度が大きい結果として、輝度変動は背景大気に対して、低緯度では西向きに伝播する一方、中緯度では東向きに伝播している。

		Period [days]			Cycle of mean zonal wind [days]
		Brightness	Zonal wind	Meridional wind	
Latitude [° S]	5 - 20	4.4 ± 0.2	4.3 ± 0.2	5.0 ± 0.3	5.22 ± 0.01
	30 - 45	4.4 ± 0.2	-	-	3.68 ± 0.01

表1 輝度、東西風、南北風を周期解析した結果。解析期間の平均東西風の循環周期もあわせて示している。周期解析結果の誤差には、スペクトルのピークをガウス関数でフィッティングしたときの半値半幅を用いている。

赤道域においては、輝度と東西風の位相がスーパーローテーションと同方向に伝播しており、南北風とは異なった周期を持っていることからケルビン波が存在していると考えられる。一方、中緯度の背景のスーパーローテーションに対して逆向きに位相が伝播する性質を持つ波動としてはロスビー波と慣性重力波が考えられるが、分散関係から前者と判断される。

中緯度では解析に使用できる雲移動ベクトルに乏しいため周期解析が困難であるが、風速場と輝度のパターンと一緒に伝播する様子がいくつかの時期に観察されることから(図5)、輝度分布と同様に風速場にも背景大気に相対的にスーパーローテーションと逆方向に伝播する成分があると考えられる。そこで、中緯度の輝度変動と同じ周期(4.4日)の変動が南北風にも存在するとし、この周期の正弦波を輝度変動と南北風変動の時系列にフィッティングすることで輝度と南北風の位相差を調べた(図6)。その結果、南北風と輝度変動の位相差は 0.8π となり、南北風の変動が輝度変動に対して位相が遅れていることが分かった。これを背景風とともに動く系でみると、逆に輝度変動の位相が南北風に対して遅れる。南北風の時系列へのフィッティングは良好とはいえないが、図4のように暗部と極向きの流れが強くなる位置がずれる傾向が観察されており、解析結果はこれと矛盾しない。

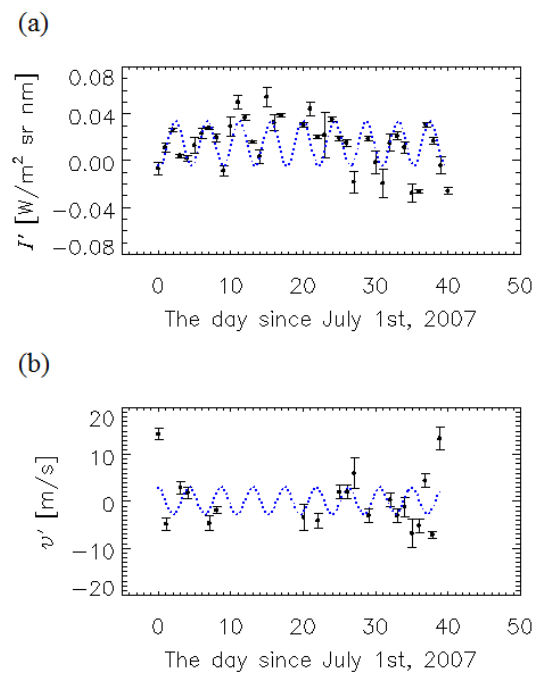


図6 (a)輝度変動の時系列を周期4.4日の正弦波でフィッティングした結果(青点線)。(b)南北風に対する同様の結果。

4. 考察

4.1. 風速場の伝播と紫外吸収物質の南北移流

中緯度においてスーパーローテーションする大気に対して東向きに伝播する輝度分布と、それとともに東向きに伝播するような風速場が観察された。さらに、西から東に向かって輝度が増加する位置に極向きの流れが極大になる位置が対応している傾向があり、スーパーローテーションする大気に対して東向きに伝播する波動とみなすと、暗部は極向きの流れに対して位相が遅れていると言える。

紫外吸収物質は雲頂以下に多く存在していることが示唆されており(Esposito, 1980)、赤道域で上昇流により雲頂に供給されると考えられている。この鉛直輸送はハドレー循環(Gierasch, 1975)やケルビン波(Del Genio and Rossow, 1990)が担っていると想像される。このようにして雲頂にもたらされた吸収物質が子午面循環によって極向きに輸送され、中緯度において背景風に対して東向きに伝播する南北風の場合によって極向きに移流される。物質の変位は速度の積分値であるため、図7のように、風速分布と吸収物質の到達する緯度には位相のずれ

が生じ、極向きの風の極大に対して輝度低下の極大の位相が遅れることになる。このようにして波動によって Y 字の斜めの構造が形成されると考えられる。高緯度ほど角速度の大きい背景風や、南北風と相関する東西風によって、さらに斜めに引き伸ばされるような形になると考えられる。

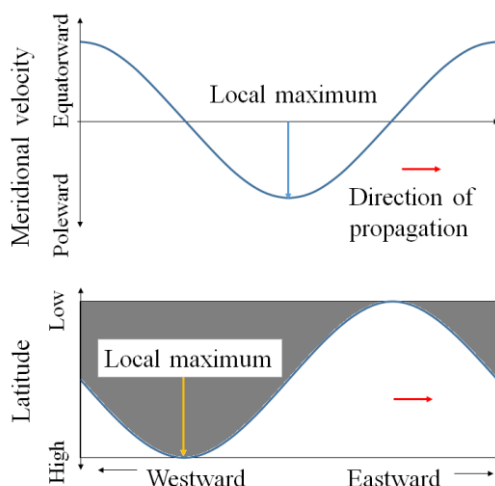


図7 背景風に対して伝播する南北風の場合によって吸収物質も伝播するイメージ

5. まとめ

Venus Express 搭載の撮像装置 VMC の紫外画像に相互相関法を適用し、金星雲頂の風速場を導出した。従来より精度の高い雲追跡手法を用いることで、風速場の空間分布の議論が可能となった。Y 字模様が顕著に観察される時期を解析し、風速場と輝度分布の両方に着目して、金星雲頂における紫外吸収物質の輸送過程を考察した。

輝度の変動周期は赤道域、中緯度で同程度であるが、背景風の角速度が赤道域で小さく中緯度で大きいため、輝度は低緯度では背景風に対して西向きに伝播し、中緯度では東向きに伝播する。このことから、赤道域においてケルビン波によって下層から供給された吸収物質が、子午面循環によって中緯度に移流され、さらに中緯度においてはロスビー波による移流と中緯度ジェットによって Y 字模様が形成される、というメカニズムが示唆された。

参考文献

Del Genio, A. D. and W. B. Rossow, 1982, Temporal variability of ultraviolet cloud features in the Venus stratosphere, *Icarus*, 51, 391-415.

Del Genio, A. D. and W. B. Rossow, 1990, Planetary-scale waves and the cyclic nature of cloud top dynamics on Venus, *J. Atmos. Sci.*, 47, 293-318.

Ikegawa, S. and T. Horinouchi, 2016, Improved automatic estimation of winds at the cloud top of Venus using superposition of cross-correlation surfaces, *Icarus*, 271, 98-119.

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

Moroz, V. I., A. P. Ekonomov, B. E. Moshkin, H. E. Revercomb, L. A. Sromovsky, J. T. Schofield, D. Spankuch, F. W. Taylor and M. G. Tomasko, 1985, Solar and thermal radiation in the Venus atmosphere, *Adv. Space Res.*, 11, 197-232.

Scargle, J. D., 1982, Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical Aspects of special analysis of unevenly spaced data, *Astro. J.*, 263, 835-853.

Smith, M. D. and P. J. Gierasch, 1996, Global-scale winds at the Venus cloud-top inferred from cloud streak orientations, *Icarus*, 123, 313-323.

Svedhem, H., D. V. Titov, D. McCoy, J. -P. Lebreton, S. Barabash, J. -L. Bertaux, P. Drossart, V. Formisano, B. Häusler, O. Korablev, W. J. Markiewicz, D. Nevejans, M. Pätzold, G. Piccioni, T. L. Zhang, F. W. Taylor, E. Lellouch, D. Koschny, O. Witasse, H. Eggel, M. Warhaut, A. Accomazzo, J. Rodriguez-Canabal, J. Fabrega, T. Schirmann, A. Clochet and M. Coradini, 2007, Venus Express-The first European mission to Venus, *Planet. Space Sci.*, 55, 1636-1652.