

## Venus Express VMC の可視画像解析による金星雲頂の微細構造

奈良 佑亮 [1]、今村 剛 [2]、村上 真也 [2]

[1] 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻

[2] 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

### 1. 概要

金星の雲の紫外線観測では、低緯度に数十から数百 km の空間スケールの不規則な乱流のような模様が観察され(Markiewicz *et al.*, 2007b)、これに似た模様が可視画像でもコントラストは小さいながら見られる。可視波長領域は雲の吸収物質による影響が少ないため、上層雲の水平分布をよく表していると考えられ、雲の形態を読み取るのに適している。また太陽放射の大半は可視波長領域にあるため、この波長領域での雲の反射率は惑星のエネルギー収支にとって重要である。そのため、金星における雲の生成メカニズムと、その雲が金星大気の熱構造におよぼす影響を考える上で、可視波長を用いた研究は重要である。本研究では、可視波長での金星の雲の形態と雲の運動を手がかりに、どのような物理が雲の構造形成に働いているか理解することを目的とする。そのための重要な物理量のひとつである風速を推定するために、輝度の変化の小さい可視画像の模様を差分、平滑化処理によって抽出した。

### 2. 用いるデータと差分平滑化処理

使用したデータは ESA の金星探査機 Venus Express 搭載の撮像装置 VMC (Venus Monitoring Camera) である。1 周 24 時間の極軌道で、主に南極から赤道付近までの範囲を撮像する。VMC は UV (365nm), VIS (513nm), NIR (965nm, 1000nm) の波長域で観測する (Markiewicz *et al.*, 2007a)。本研究では VMC が 2006 年 5 月から 2014 年 12 月のあいだに取得した金星画像のうち比較的ノイズの小さい可視画像を選び出して解析した。画像の解析には、金星探査機「あかつき」搭載カメラの画像データ解析用に開発された、金星の画像を緯度経度座標に投影するソフトウェアを用いた。太陽光入射角に依存する大きなスケールの明暗パターンを除くため、あらかじめ輝度を、太陽直下点で観測した場合の値に換算する、Minnaert law で補正している。

図 1a は VMC により得られた可視画像の一例である (軌道番号:471、画像 ID:44)。VMC の画像には検出器に固定された筋状のノイズがあり、図 1b のように緯度経度座標に展開するとこのノイズは同心円状になる。可視画像は雲の構造に伴う輝度の空間変化が小さいので、このようなノイズが存在しているのは雲の構造を捉えることが難しい。

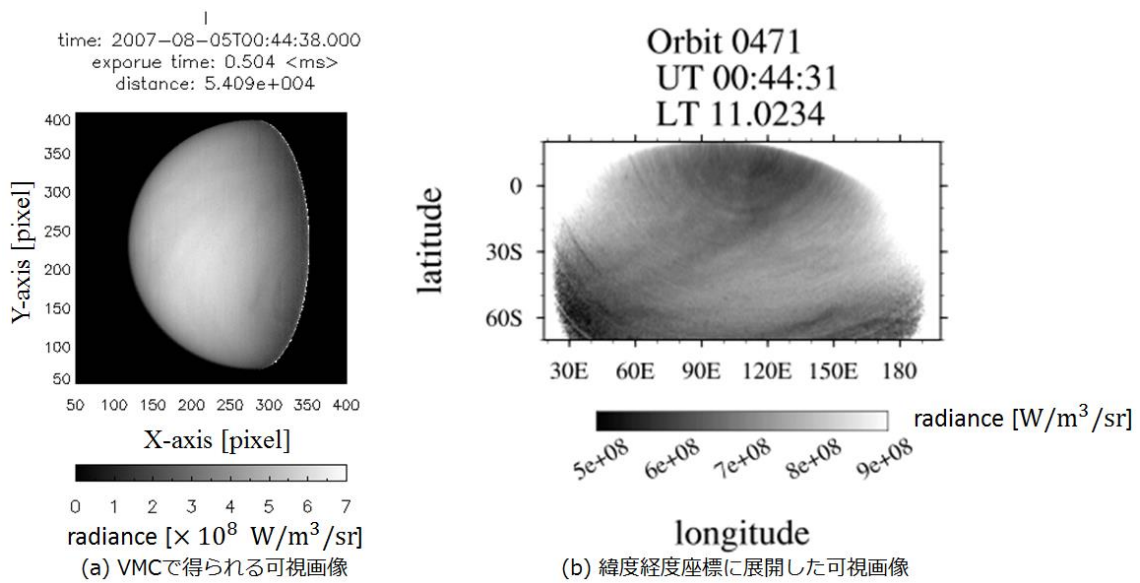
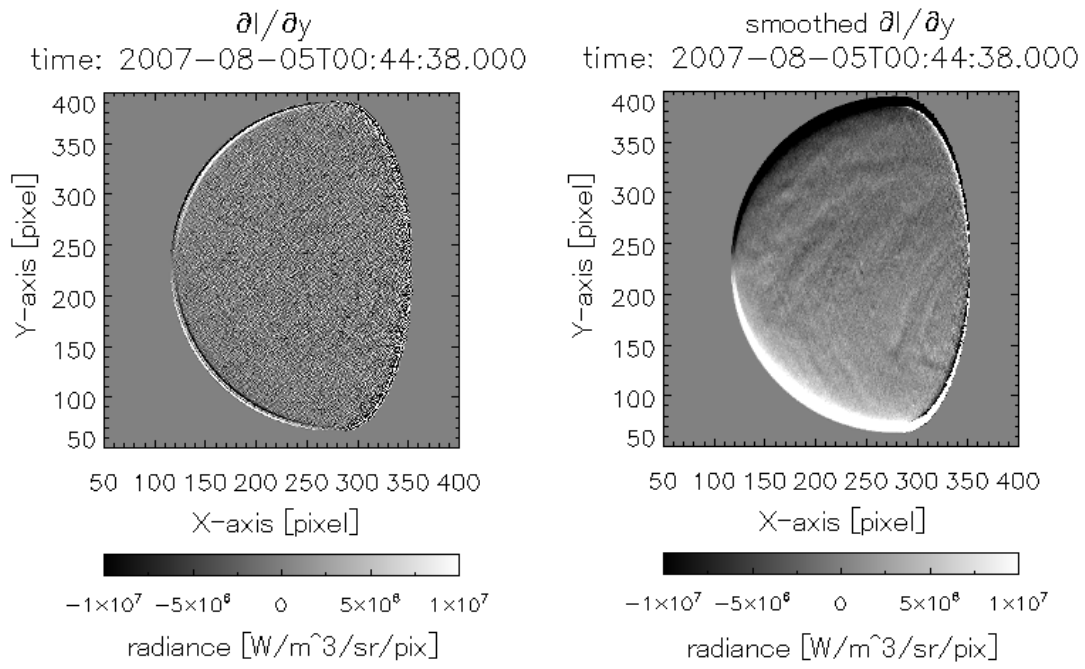


図 1. VMC により得られた可視画像に Minnaert law を施したものの一例。(a) 処理前の画像。画像には検出器に固定された筋状のノイズがある。(b) 画像を緯度経度座標に展開したもの。展開することで筋状のノイズは同心円状となる。

そこで、筋状のノイズに平行に空間差分をとることによって筋を取り除くことを試みた。差分には4次精度中心差分を用いた。これにより、筋状の成分を取り除くことはできたが、差分方向の細かなノイズが強調され、雲の構造に伴う明暗が見にくくなっている(図 2a)。差分操作は高周波ほど強調するのでノイズの高周波成分が強調される。この高周波成分を取り除くため、差分画像の平滑化を行った。平滑化には差分と同方向の9点移動平均を用いた。図 2b は平滑化の処理をした金星画像である。図 1a と比較すると、筋状のノイズが取り除かれ、かつ輝度の変化が強調されることにより、雲の構造が抽出された。

### 3. 風速の推定

このようにして得られた画像を緯度経度座標に展開し、相互相関法により風速ベクトルを求めた。軌道番号 457、画像 ID:14 と 19 の1時間間隔のデータについて、 $10^\circ \times 10^\circ$ の領域が1時間後のどの領域と最も相関が高いかを調べることで風速を決定した。図 3 は得られた風速ベクトルを差分、平滑化処理をした画像に重ねたものである。この図から、模様ははっきり見えている領域では風速がもっともらしく推定されていると考えられる。



(a) 差分処理を行った可視画像

(b) 差分、平滑化処理を行った可視画像

図 2. 可視画像の処理。(a)は可視画像を差分したもの。差分は筋状のノイズと同方向に行った。(b)は差分処理をした可視画像を平滑化したもの。平滑化は差分と同方向に 9 点移動平均で行った。

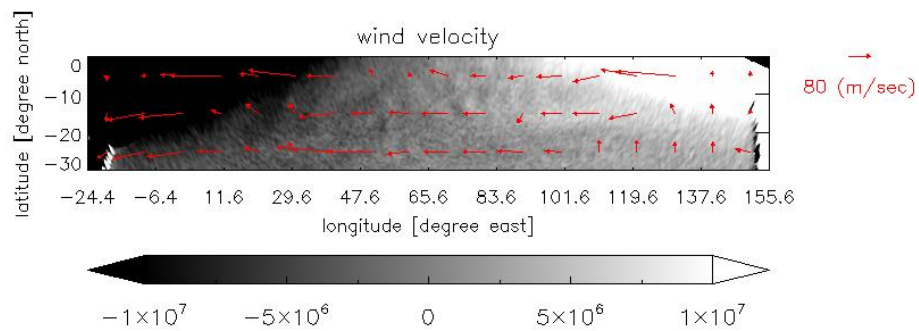


図 3. 相互相関法により推定した風速ベクトルを差分、平滑化処理後の可視画像に重ねた。緯度範囲は 0°S~30° S、経度範囲は太陽直下点を中心に±90 度である。

軌道番号 456–463 についても風速を求め、ローカルタイム 12 hr、南緯 15 度の風速の時間変化をプロットした(図 4)。この図を見ると軌道番号 457、458 ではもっともらしく風速が推定されているが、それ以外の時期は典型的なスーパーローテーションの速度である 100 m/s からかなり外れた値にまでデータが散らばっている。図 5 に示すように、雲の様子が顕著である場合は風速の推定がもっともらしい結果となる。

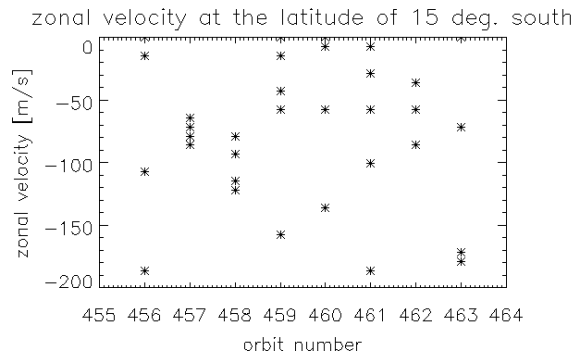


図 4. 南緯 15 度、ローカルタイム 12 hr の東西風の時間変化。軌道番号 457、458 以外はこの領域で雲の様子が不明瞭であるために風速の推定がもっともらしくない結果となっている。

#### 4. まとめ

差分、平滑化の処理により検出器に固定された筋状のノイズを取り除き、輝度の変化の小さい可視画像の様子を抽出できた。風速については輝度の変化が顕著な領域では推定することが出来た。相互相関係数の重ね合わせによる風速推定の誤りの低減(Ikegawa and Horinouchi, 2016)、誤差の評価が必要である。今後は、異なる高度領域を観測する他の波長と比較することで、可視画像の雲の様子が他波長ではどのような振る舞いをしているのか、風速の鉛直シアなどを調べ、低緯度における金星の雲の形態について考えていく。

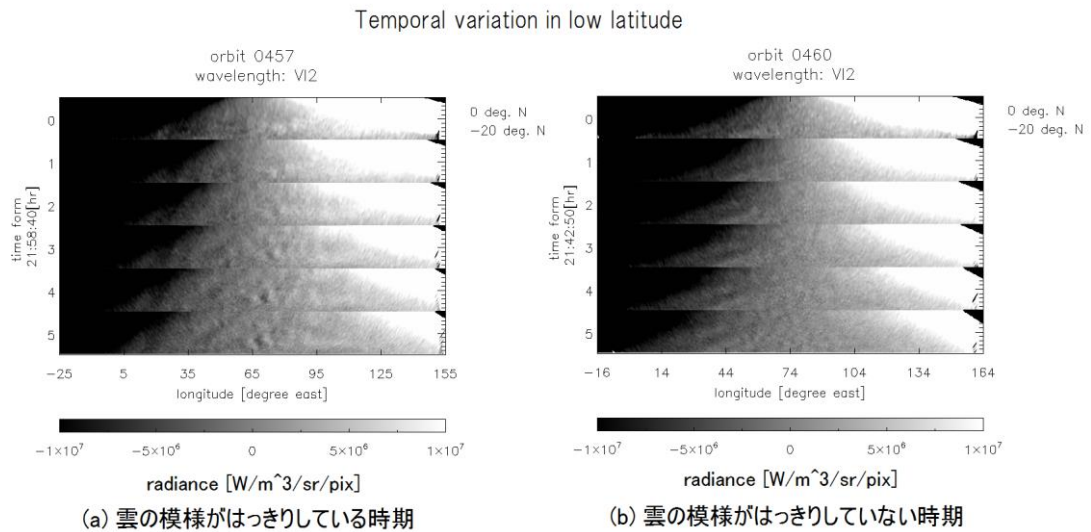


図 5. 緯度 $0^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{S}$ 、経度範囲は太陽直下点 $\pm 90$ 度の差分雲画像の時系列。1時間おきにならべたもの。(a) 雲の構造のはっきり見えている時期。このようなときは風速がもっともらしく推定される。(b) 雲の構造の構造のはっきりしない時期。このようなときは風速の推定が難しい。

#### 参考文献

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, K. D. Matz, 2007a, Venus monitoring camera for Venus Express. *Planetary and Space Science*, **55**(12), 1701-1711.

Markiewicz, W. J., D. V. Titov, S. S. Limaye, H. U. Keller, N. Ignatiev, R. Jaumann, N. Thomas, H. Michalik, R. Moissl and P. Russo, 2007b, Morphology and dynamics of the upper cloud layer of Venus. *Nature*, **450**(7170), 633-636.