



Title	金星雲高度および風速の同時推定
Author(s)	武, 直樹; Take, Naoki; 渡部, 重十 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 74, 57-66
Issue Date	2011-03-19
DOI	<a href="https://doi.org/10.14943/gbhu.74.57">https://doi.org/10.14943/gbhu.74.57</a>
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/45152">https://hdl.handle.net/2115/45152</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	P57-66take.pdf



## 金星雲高度および風速の同時推定

武 直樹・渡部 重十

北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻

(2011年1月24日受理)

### Simultaneous Estimation of Cloud Height and Wind Velocity of Venus

Naoki TAKE and Shigeto WATANABE

Department of CosmoSciences, Graduate School of Science, Hokkaido University

(Received January 24, 2011)

Venus has numerous cloud features caused by unknown UV absorber in ultraviolet light. Horizontal wind velocities have been derived by tracking those features in order to examine the atmospheric circulation such as superrotation. However, the generation mechanism is not well understood yet, because the altitude of the winds is ambiguous. Ignatiev et al. (2009) performed radiative transfer calculations and showed that the cloud top altitudes in  $1.51\mu\text{m}$  wavelength are  $74 \pm 1\text{km}$  in low and middle latitudes and  $63\text{--}67\text{km}$  in polar region, respectively. They investigated also the correlation between the cloud top altitude in UV wavelength and that in infrared, and found that those cloud top altitudes are almost same in low and middle latitudes under the assumption of constant scale height of the cloud. In this paper, we propose a fully geometrical method using 3 images to derive cloud height and wind velocities simultaneously. The cloud height and wind velocities estimated by this method are similar to other results.

#### I. はじめに

金星を可視光で見るとほとんど模様は見えないが、紫外光で見ると Fig.1 のような様々な模様が見える。波長  $365\text{nm}$  においてカメラは金星の雲頂で散乱された太陽光をとらえるが、何らかの紫外線吸収物質（未だ同定されておらず、Unknown Absorber と呼ばれる）がその高度付近に存在するために、雲による太陽光散乱が弱められて暗い部分が生じると考えられている。また、そのような吸収物質の不均一な分布 (Pollack et al., 1980) や、特に高緯度に関しては雲そのものの不均一 (Kawabata et al., 1980) が濃淡模様に寄与することがわかっている。

一方、金星には雲頂高度において速さ約  $100\text{m/s}$  に達する、スーパーローテーションと呼ばれる高速の東風が全球的に吹いていることが知られている。この風の生成・維持機構としてはい

くつかの説（例えば、Gierasch, 1975; Fels and Lindzen, 1974; Hou and Farrell, 1987）があるものの、観測的な事実が不足しているためにまだ明らかになっていない。このような金星の気象現象を調べるため、雲の構造を追跡することで風速を求めるといった研究が広く行われてきた（例えば、Rossow et al., 1990; Limaye, 2007; Markiewicz et al., 2007b）。しかし、この方法によって求められた風がどの高度で吹いているのかということに関しては、まだはっきりとわかっていない。風の吹いている高度を知ることは、金星の大気循環を理解する上で、また Unknown Absorber の正体と生成過程を知る上で非常に重要である。

Ignatiev et al. (2009) は金星雲層のモデルを用いて放射輸送計算を行い、波長  $1.5\mu\text{m}$  における雲頂高度（光学的深さ  $\tau=1$  と定義される）は中低緯度で  $74 \pm 1\text{km}$ 、極域で  $63\text{-}67\text{km}$  であることを示した (Fig.2)。また、紫外 ( $0.365\mu\text{m}$ ) における雲頂高度と近赤外 ( $1.5\mu\text{m}$ ) における雲頂高度を比較した結果、中低緯度において両者はほぼ同じであることが示された (Fig.3)。しかし、彼らは雲の構造およびスケールハイトを仮定している。

本研究では、そのような雲の光学的性質によらず、探査機の位置と雲の幾何学的な位置関係のみから雲高度を決定する方法を提案し、実際のデータに適用する。

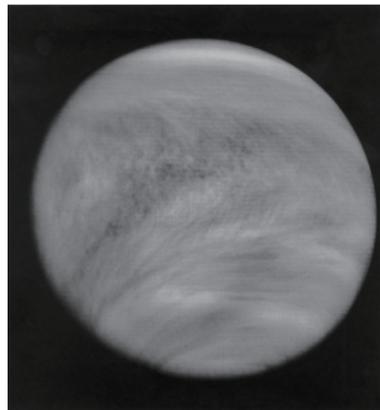


Fig. 1. Ultraviolet (365nm) image of Venus' clouds taken by the Pioneer Venus Orbiter (provided by NASA).

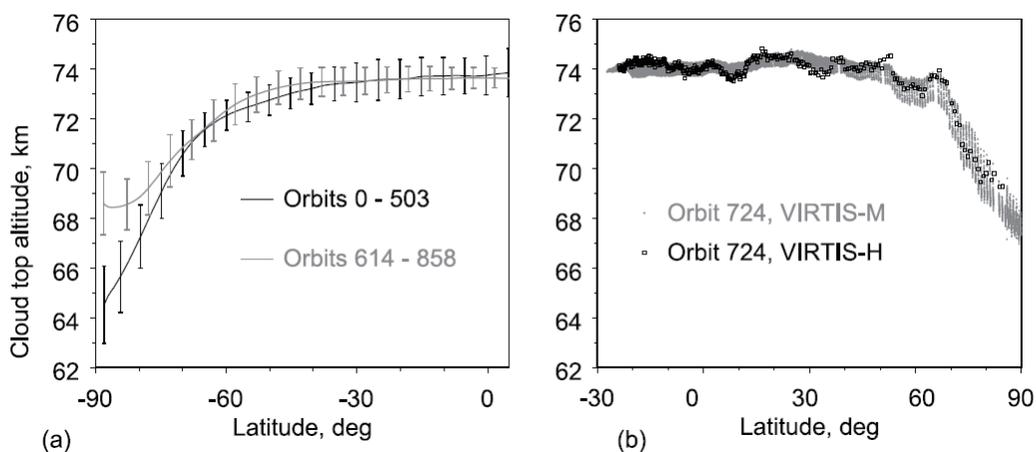


Fig. 2. Cloud top altitude in near-infrared (Ignatiev et al., 2009).

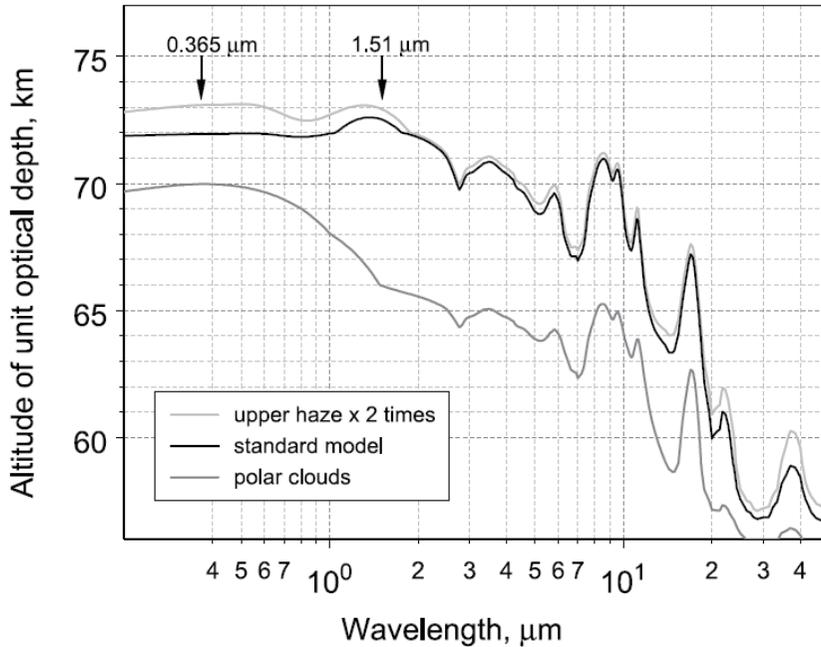


Fig. 3. Cloud top altitude as a function of wavelength (Ignatiev et al., 2009).

## II. データ

使用したデータは、ヨーロッパ宇宙機関 (European Space Agency, ESA) が2005年に打ち上げた金星周回衛星 Venus Express (Svedhem et al., 2007) 搭載の紫外/可視/近赤外カメラ, VMC (Venus Monitoring Camera)(Markiewicz et al., 2007a) による, 紫外 (365nm) 画像データである. Venus Express は南極側約 66,000km を遠金点, 北極側約 250km を近金点とする楕円極軌道を 24 時間の周期で周回している. VMC は画像サイズが  $512 \times 512$  pixel, 視野角が約  $17.5^\circ$  であり, 空間解像度は遠金点で約 45 km/pixel, 近金点で約 0.2 km/pixel である. 本解析においては高度情報を得るため, 主に金星に接近した時の画像を用いる. 具体的には Orbit 256 (2007/01/02), 261 (01/07), 269 (01/15), 273 (01/19), 277 (01/23), 281 (01/27) の 6 軌道のデータの中から, 探査

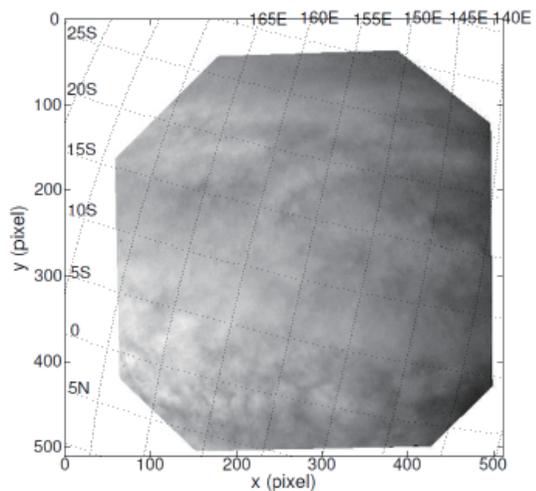


Fig. 4. An example of VMC images.

機高度約 1000km ~ 10000km の画像を使用した。この時、撮像間隔は約 30 秒 ~ 10 分であった。また、探査機の位置・姿勢情報を得るために、NASA 提供の SPICE Toolkit (Acton, 1996) を使用した。

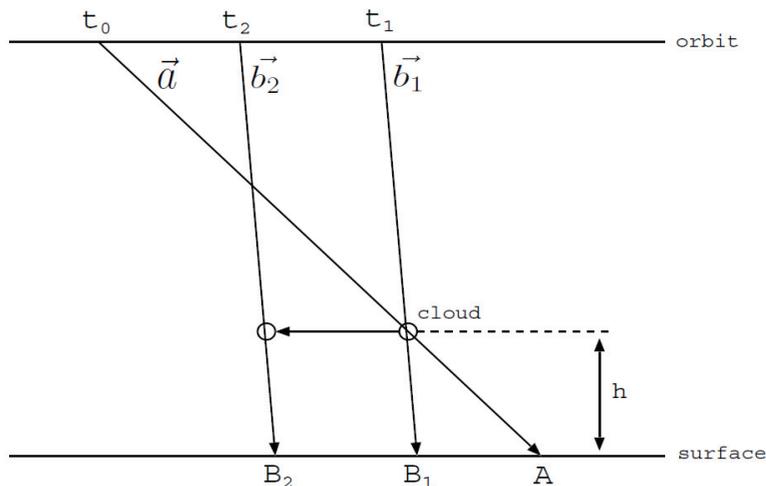
### III. 方 法

#### 1. 概要

基本となる方法論は、2 枚のそれぞれ異なる角度から撮影した画像を用いて、それらの視差を利用したステレオ視の原理により被写体の奥行きを求める、というものである。今回の場合は同時に 2 枚の画像を撮ることはできないので、時間間隔  $\Delta t$  をあけて撮影した 2 枚の画像を用いる、モーションステレオ法と呼ばれる方法を適用する。しかし、被写体である雲は時間間隔  $\Delta t$  の間に風により流されているため、画像上で得られた視差は実際の雲の高さと風速の（探査機の進行方向に平行な）成分が合わさったものになってしまう (Fig.5)。そのため本研究においては、Horváth and Davies (2001) が地球の雲に適用した、3 枚の画像を使って風速の成分を分離する、という方法を用いる。その際彼らは、3 枚の撮像の間に

1. 雲の高度は変わらない (鉛直流なし)。
2. 水平風速は変わらない。

という仮定を用いることによりパラメータを制約した。本研究においても同じ仮定を用いる。



**Fig. 5.** A schematic of the relationship between apparent disparity and the true cloud height and wind velocity (modified from Horváth and Davies, 2001). Here  $h$  is the cloud height;  $t_0$ ,  $t_1$ , and  $t_2$  are the imaging times;  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}_1$ , and  $\vec{b}_2$ , are the look vectors; and  $A$ ,  $B_1$ , and  $B_2$  are the projected image locations of the cloud. Viewing a cloud from two different directions at two different times ( $t_0$ ,  $t_1$ ) results in an image disparity  $AB_2$  that is a combination of a disparity due to height only ( $AB_1$ ) and a disparity due to motion only ( $B_1B_2$ ).

## 2. 解析の流れ

解析は、(1) 画像組の選出 (2) 歪曲収差の補正 (3) 緯度経度投影 (4) ハイパス処理 (5) テンプレートマッチング (6) 視差計算 の順に行った。

### ■画像組の選出

データの中から時間的に連続した、同じ地点が写っている 3 枚の画像を選び出す。ここでは、この 3 枚の画像を時系列順に、画像 1、画像 2、画像 3 と呼ぶ。

### ■歪曲収差の補正

一般に光学系には様々な収差が生じ、中でも歪曲収差は結像位置を変化させるため、雲追跡を行う場合にはその補正を行う必要がある。一般に歪曲収差は、光軸中心からの距離の 3 乗に比例し、

$$r' = r (1 + kr^2)$$

で近似できることが知られている。ここで、 $r$  は歪みがない場合の光軸中心からの距離、 $r'$  は歪んだ後の光軸中心からの距離である。神山ほか (2011) は、VMC 画像に写った金星の縁を利用してこの歪み係数  $k$  を求め、その結果を  $k = (-3.13 \pm 0.03) \times 10^{-7}$  とした。本研究ではこの値を用いて補正を行う。

### ■緯度経度投影

それぞれの画像は探査機の高度や回転角が変化しているために、そのままでは雲追跡が難しい。そのため、ここでは緯度経度座標系に展開することでその補正を行う。ただしこの際に、投影する球（金星は自転速度が極めて遅いため、球体とみなしてよい）の半径を指定する必要がある。ここではその半径を 6051.8km (=金星地表面) として解析を行った。また、画像の補間にはバイリニア補間を用いた。

### ■ハイパス処理

模様を追跡しやすくするため、緯度経度投影後の画像に対してハイパス処理を行う。ここでは、 $21 \times 21$  の移動平均フィルタによって平滑化した画像を元の画像から減算した。

### ■テンプレートマッチング

2 枚の画像から対応点を見つける場合によく用いられる方法として、テンプレートマッチングがある。本解析では、1 枚目の画像から 10pixel おきに大きさ  $21 \times 21$  pixel の領域を取り出してテンプレートとし、2 枚目の画像中から最も類似度が高い点を探して対応点とした。類似度の計算には正規化相互相関

$$R = \frac{\sum_{i,j}^N (I(i,j) - \bar{I})(T(i,j) - \bar{T})}{\sqrt{\sum_{i,j}^N (I(i,j) - \bar{I})^2} \sqrt{\sum_{i,j}^N (T(i,j) - \bar{T})^2}}$$

$$\bar{I} = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j}^N I(i,j)$$

$$\bar{T} = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j}^N T(i,j)$$

を用いた。ここで、 $N$ はテンプレートの大きさ ( $N \times N$ )、 $T$ はテンプレートの輝度、 $I$ は2枚目の画像における対応領域の輝度である。また、マッチングの精度を上げるため、相関が最大値をとった近傍の3点に2次曲線をフィッティングし、対応点をサブピクセル精度で求めた。この際発生する系統的な誤差 (Shimizu and Okutomi, 2005) を抑えるため、元の画像を0.5pixel ずらした画像を基に得られる推定結果との平均をとった。

このような計算を画像1と画像2の間で行い、画像2において求めた対応点の近傍を再びテンプレートとして画像2と画像3の間でマッチングを行う。また、画像1と画像3の間でもマッチングを行う。この処理により、対応点が3組求まることになる。

### ■視差計算

前節で求められた対応点は金星表面に投影されたものであったので、これらの対応点の組を3次元の視線ベクトルの組に直す。ある2つの視線ベクトルに対して、ある一つの高度を与えると、その間を結ぶ風速ベクトルが1つ求まる。したがって、前節で求められた3組の対応点に対しては3つの風速ベクトルが求まる。これらの風速ベクトルの差が最も小さい高度を最小二乗によって求め雲高度とし、3つの風速ベクトルの平均をその地点における風速とする。

### 3. テスト画像を用いた検証

開発した手法によって雲高度と風速が正しく推定できるかを確認するため、テスト画像を用いて検証を行った。テスト画像は、ある1つの画像の組の1枚目の画像をある高度において風速の分だけ平行移動し、そ

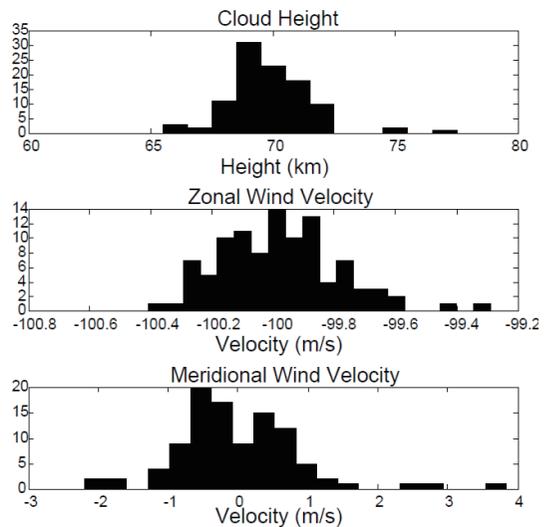


Fig. 6. Distribution of (top) cloud heights (middle) zonal wind velocities (bottom) meridional wind velocities derived from test images.

れを画像 2, 画像 3 の視点から見た画像を生成することで得た。ここでは、高度は 70km, 東西風速は -100m/s, 南北風速は 0m/s とした。このテスト画像の組について本手法を適用した結果を Fig.6 に示す。雲高度, 東西風速, 南北風速ともに平均的には正しい値を推定できていることがわかる。正しい値からのばらつきは、テンプレートマッチングの誤差（この画像組においては  $\pm 0.1$  pixel 程度）に由来する。

#### IV. 結果と考察

開発した手法を実際のデータに適用した結果を Figs.7, 8 に示す。Fig.7 は 4 軌道 (Orbit 256, 261, 269, 273) において、画像組ごとに平均した雲高度と風速の緯度分布であり、Fig.8 は 6 軌道全てのデータを緯度  $2^\circ$  ごとに平均したものである。エラーバーはそれぞれの  $1\sigma$  範囲を示す。Fig. 8 の平均雲高度の分布を見ると平均値は 80km 付近を上下しており、Fig.3 に示された 365nm における雲頂高度より若干高いが、エラーバーの範囲を考慮すると概ね一致していると言える (Fig.9)。時折推定結果が数 10km 変化するのは、平均する軌道数が少ないために、後述する探査機の位置・姿勢情報の誤差の影響が残っているものと思われる。東西風速に関しては -100m/s 付近の値をとり、過去の観測とも一致する (Fig.10)。また南北風速に関しては、ばらつきは大きいものの、北半球の中緯度に向かうにしたがって次第に北向きの風が強くなるという過去の観測結果との一致を示唆するような傾向を示した (Fig.11)。

このように、平均的な値に関しては過去の観測と似たような結果が得られたが、個々の雲に関してはばらつきが大きく、画像組で平均した値の標準偏差はテスト画像の場合の 10 倍以上となった。この要因としては、雲の変化や形が不明瞭なためのマッチングミスと、探査機の姿勢情報の誤差があげられる。後者に関しては最大で 3pixel とも言われており、これは高度にすると 100km を超えるずれになるが、多数の推定結果を平均することで影響は少なくなると考えられる。また、今回の解析ではテンプレートマッチングによって雲追跡を行う際、相関曲面におけるピーク先鋭化 (Hart, 2000) や、誤って推定された風速ベクトルを修正する (Qing, 1995) などの高精度化処理を行っておらず、単に相関係数による閾値処理のみ行っている。推定の精度を上げるためにはこのような工夫も必要であろう。

**謝辞** 本研究で用いたデータを提供して下さった、Venus Express/VMC チームの皆様に感謝致します。

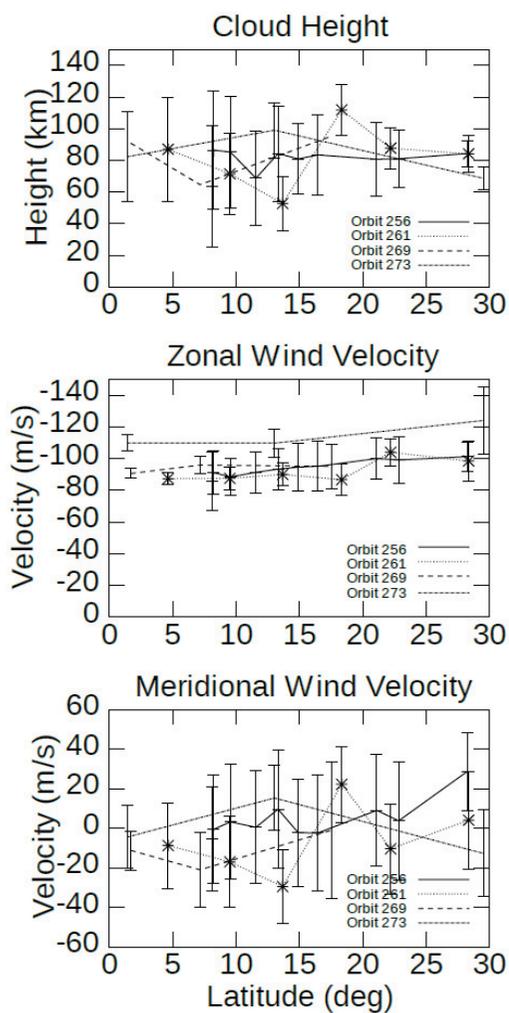


Fig. 7. Latitudinal distribution of (top) cloud heights (middle) zonal wind velocities (bottom) meridional wind velocities for 4 different orbits.

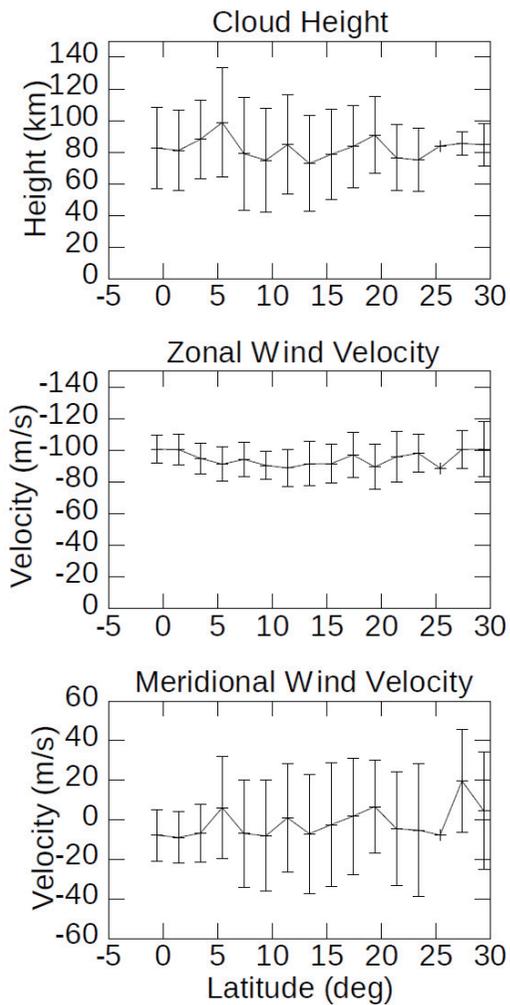


Fig. 8. Latitudinal distribution of (top) cloud heights (middle) zonal wind velocities (bottom) meridional wind velocities averaged over 6 orbits.

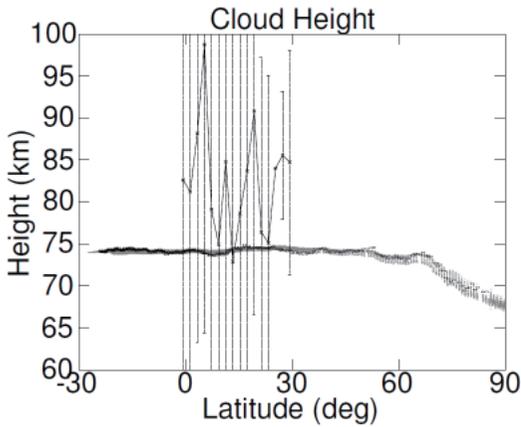


Fig. 9. Comparison between mean cloud heights in the latitudes between  $\sim 0$ -30 degrees estimated by this method and the cloud top altitude in orbit 724 reported by Ignatiev et al. (2009).

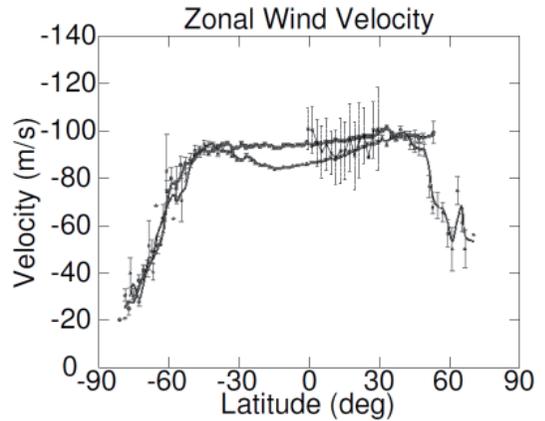


Fig. 10. Comparison between mean zonal wind velocities in the latitudes between  $\sim 0$ -30 degrees estimated by this method and those reported by Limaye (2007) (two bold lines with errorbars, which corresponds to two different periods of 1980 and 1982).

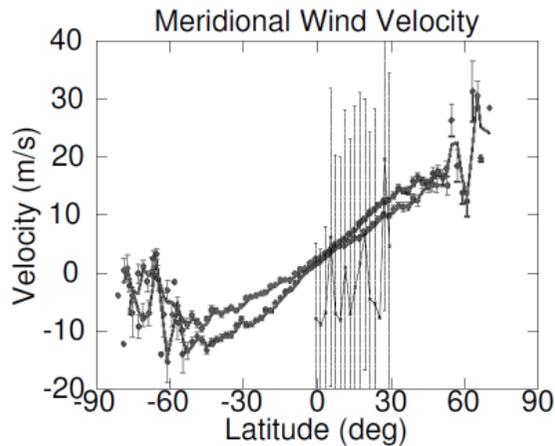


Fig. 11. Same as Fig.10, but for meridional wind.

## 文献

- Acton, C. H., 1996. Ancillary Data Services of NASA's Navigation and Ancillary Information Facility, *Planet. Space Sci.*, **44**, 65-70.
- 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.
- Hart, D. P., 2000. Super-Resolution PIV by Recursive Local-Correlation, *Journal of Visualization*, **3** (2), 187-194.
- Horváth, Á., and R. Davies, 2001. Feasibility and Error Analysis of Cloud Motion Wind Extraction from Near-Simultaneous Multiangle MISR Measurements, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **18**, 591-608.

- Hou, A. Y., and B. F. Farrell, 1987. Superrotation induced by critical-level absorption of gravity waves on Venus: An assessment. *J. Atmos. Sci.*, **44**, 1049–1061.
- Ignatiev, N. I., D. V. Titov, G. Piccioni, P. Drossart, W. J. Markiewicz, V. Cottini, Th. Roatsch, M. Almeida and N. Manoel, 2009. Altimetry of the Venus cloud tops from the Venus Express observations, *J. Geophys. Res.*, **114**, E00B43, doi:10.1029/2008JE003320.
- Kawabata, K., D. L. Coffeen, J. E. Hansen, W. A. Lane, M. Sato and L. D. Travis, 1980. Cloud and haze properties from Pioneer Venus polarimetry, *J. Geophys. Res.*, **85 (A13)**, 8129–8140, doi:10.1029/JA085iA13p08129.
- 神山徹・山崎敦・山田学, 2011. 金星縁を利用した画像歪の推定, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告, JAXA-RR-10-010.
- Limaye, S. S., 2007. Venus atmospheric circulation: Known and unknown, *J. Geophys. Res.*, **112**, E04S09, doi:10.1029/2006JE002814.
- 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, 2007a. Venus Monitoring Camera for Venus Express, *Planet. Space Sci.*, **55 (12)**, 1701–1711, doi:10.1016/j.pss.2007.01.004.
- 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**, 633–636, doi:10.1038/nature06320.
- Pollack, J. B., O. B. Toon, R. C. Witten, R. Boese, B. Ragent, M. Tomasko, L. Esposito, L. Travis and D. Wiedman, 1980. Distribution and source of the UV absorption in Venus' atmosphere, *J. Geophys. Res.*, **85 (A13)**, 8141–8150, doi:10.1029/JA085iA13p08141.
- Qing, X. Wu., 1995. A Correlation-Relaxation-Labeling Framework for Computing Optical Flow – Template Matching from a New Perspective, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **17 (8)**, 843–853.
- Rossow, W. B., A. D. Del Genio and T. Eichler, 1990. Cloud-tracked winds from Pioneer Venus OCPP images, *J. Atmos. Sci.*, **47**, 2053–2084.
- Shimizu, M., and M. Okutomi, 2005. Sub-Pixel Estimation Error Cancellation on Area-Based Matching, *International Journal of Computer Vision*, **63 (3)**, 207–224.
- Svedhem, H., D. V. Titov, D. Mocooy, J. P. Lebreton, S. Barabash, J. L. Bertaux, P. Drossart, V. Formisano, B. Häusler, O. Korabiev, W. J. Markiewicz, D. Nevejans, M. Pätzold, G. Piccioni, T. L. Zhang, F. W. Taylor, E. Lellouch, D. Koschny, O. Witasse, H. Eggel, M. Warhant, 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 (12)**, 1636–1652, doi:10.1016/j.pss.2007.01.013.