

金星雲高度と風速の同時推定および波状構造の解析

北海道大学 大学院理学院 宇宙理学専攻
武 直樹, 渡部重十

要旨

金星雲層のモデルを仮定せず、2枚もしくは3枚の画像を用いて幾何学的手法により雲高度および風速を導出する方法を開発した。この方法を Venus Express 搭載の VMC カメラによる紫外画像に適用した結果、2画像から求めた平均雲高度は赤道付近で約 $100 \pm 10 \text{ km}$ と高い値を示したものの、 10° N – 30° N では約 $80 \pm 15 \text{ km}$ となり、大枠としては先行研究と一致した。また3画像を用いて求めた雲高度は2画像のものより若干低く、赤道から 30° N では約 $80 \pm 30 \text{ km}$ となり、平均値は先行研究の値に近づいた。この時、風速に関しても先行研究との一致を見せた。また、VMC 画像に写った波状の構造を解析し、大気波動の存在とその雲高度・風速推定への影響を調べた、その結果、波の成因と種類は特定できなかったものの、真昼付近に多く見られ、波面は低緯度で緯度線に垂直、高緯度では平行な向きであり、全体としては背景風と同じ向きに進んでいることがわかった。また、雲高度/風速推定に使われたデータの範囲で波は存在しなかったものの、今後発展した解析を行う上では影響を与え得ることが示唆された。

1 はじめに

金星には雲層上部において速さ約 100 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。この高度における大気運動を調べるため、紫外 (365 nm) で撮影された画像に写った雲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。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(雲頂高度)を知ることは、金星の大気循環を理解す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 $63\text{--}67 \text{ km}$ であることを示すとともに、紫外 (365 nm) 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、中低緯度において両者はほぼ同じであることを示した。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た。本研究では、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した。

2 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 (VEX) 搭載の紫外/可視/近赤外カメラ、Venus Monitoring Camera (VMC) による、紫外 (365 nm) 画像データである。VEX は南極側約 $66,000 \text{ km}$ を遠金点、北極側約 250 km 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 $512 \times 512 \text{ pixel}$ 、視野角が約 17.5° 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、探査機高度約 1000 km

~10000km の画像を使用した。これは金星の南半球低緯度から北半球中緯度の範囲に対応する。この時、撮像間隔は約 1–10 分であった。

3 方法

基本となる方法論は、連続する画像中に写った同じ雲を追跡し、ステレオ視の原理からその奥行きを求める、というものである。しかし、VEX/VMC は同時に複数の画像を撮影することはできないため、ある短い時間間隔で撮られた複数の画像を用いるものとする。この間に雲は風で流されるため、雲高度と風速は切り離せないものとなり、同時に求めるためには何らかの仮定が必要になる。本研究で用いた 2 つの解析方法とそこで用いた仮定を以下に示す。

3.1 2 枚の画像を用いた方法

時間的に隣り合った 2 枚の画像から、雲高度を導出する。ここで、過去の観測より金星における南北風速は極めて弱いということが知られているため、2 枚の画像を用いた方法では南北風を 0 と仮定し、雲高度と東西風速を求めた。

3.2 3 枚の画像を用いた方法

2 枚の画像を用いた方法では南北風速を仮定することにより雲高度を求めたが、3 枚の画像を使えば、その仮定をより弱いものに置き換えることができる。本研究では、3 枚の撮像間に風速は変化しないという仮定をおいて雲高度、東西風速、南北風速の 3 つを同時に求めた。

3.3 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) 雲追跡 (6) 視差計算 の順に行った。このうち、(2) 歪曲収差の補正に関しては、神山ほか (2011) が求めた歪み係数 $k = (-3.13 \pm 0.03) \times 10^{-7}$ を用いた。

4 結果

この方法を VMC による紫外画像に適用した結果を図 1 に示す。2 枚の画像から求めた雲高度は青、3 枚の画像から求めた雲高度は緑で表されている。示した値は解析に用いた 6 軌道分のデータを緯度 2° ごとに平均したものであり、エラーバーは

それぞれの 1σ 範囲を表す。平均雲高度は赤道付近で約 $100 \pm 10\text{km}$ と高い値を示したものの、 10°N – 30°N では約 $80 \pm 15\text{km}$ となり、大枠としては先行研究と一致した。また 3 画像を用いて求めた雲高度は 2 画像のものより若干低く、赤道から 30°N では約 $80 \pm 30\text{km}$ となり、平均値は先行研究の値に近づいた。この際、平均東西風速は -100m/s 前後であり、先行研究と一致した (図 2)。3 枚の画像より求めた平均南北風速 (図 3 中の緑線) は、Pioneer Venus の観測から求められた平均南北風速 (赤と青の線; Limaye, 2007) と比較すると全体的に低いようにも見えるが、VEX/VMC の観測より求められた南半球における平均南北風速 (黒線; Moissl et al., 2009) とはよい連続性が得られた。

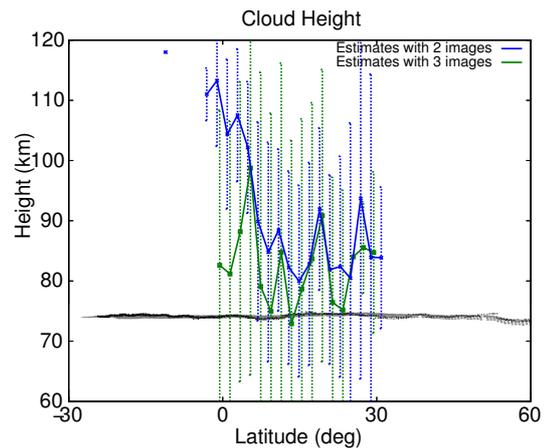


図 1 2 枚 (青) もしくは 3 枚 (緑) の画像から求めた平均雲高度と、雲層のモデルを用いた放射輸送計算により求められた雲頂高度 (74km 付近の線; Ignatiev et al., 2009)。

5 波状構造の解析

VMC の画像には時折、大気波動に由来すると思われる波状構造が写る。この構造が実際に重力波などの大気波動を表しており、その移動が位相の伝播を表しているとしたら、雲高度・風速推定に大きな影響を及ぼし得る。そのため、本研究では画像に写った波状構造の分布や波長、移動速度を求め、その特性と雲高度・風速推定への影響を調べた。

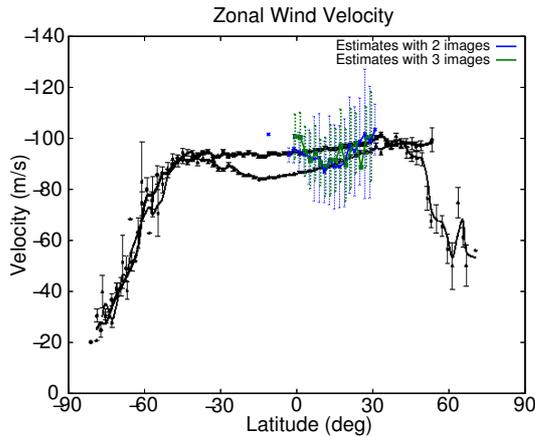


図2 2枚(青)もしくは3枚(緑)の画像から求めた平均東西風速と、Pioneer Venusの観測から求められた平均東西風速(黒い線; Limaye, 2007). 黒い2本の線は平均した期間の違いを表す。

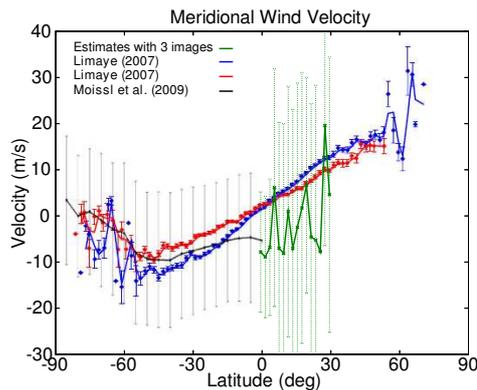


図3 3枚の画像から求めた平均南北風速(緑), Pioneer Venusの観測から求められた平均東西風速(赤と青の線; Limaye, 2007), および Venus Expressの観測により求められた平均南北風速(黒; Moissl et al., 2009). Limaye(2007)による2本の線は平均した期間の違いを表す。

5.1 分布と向き, および移動する向き

図4に波状構造の波面の向きと移動する向きを示す。波構造はLocal Timeの正午付近に集中するような分布を見せ(右図), 波面の向きは低緯度において緯度線に対してほぼ垂直, 中緯度においては様々な向きが見られ, 高緯度(60°以北)では緯度線に対してほぼ平行な向きに現れる傾向がみられた。また

全体としては背景風に流される形で西向きに動いていることがわかった。なお, 今回雲高度・風速推定に用いた6軌道において解析に用いたデータの中には波状構造は見つからなかった。

5.2 速度

図5は波構造の東西方向の移動速度と南北方向の移動速度である。これを見ると, 低緯度では背景風(東西風-100m/s, 南北風0m/s)と同程度であるが, 中高緯度においては明らかに背景風として知られている速度とは異なるため, 波動の存在が示唆される。ただし, 移動速度については, 公開されている探査機の姿勢情報の誤差を無視した場合である。

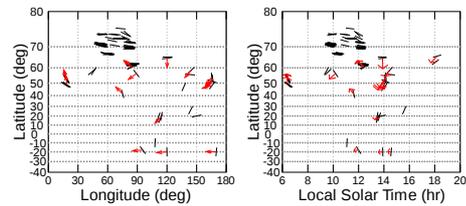


図4 波面の向きと動く向き。黒線は波面の向きを表し, 赤の矢印は速度ベクトルの向きを表す。左図は横軸が地理経度, 右図は横軸が地方時である。

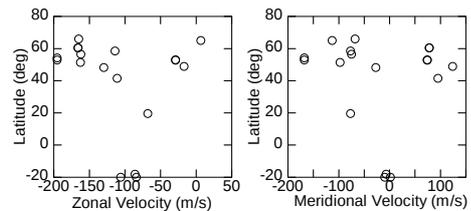


図5 波の(左)東西方向(右)南北方向の移動速度。

5.3 分散関係

図6に波状構造の分散関係を示す。同時に, 単純な内部重力波の線形モデル(自転効果無視, プシネスク近似, 2次元)から導かれる分散関係も示した。この際背景風は図7のように仮定した。図の左上に集中する一部の点は $\lambda_z = \infty$ となる線を超えており, 内部重力波であるためには1桁ほど値が大きすぎると思われる。これらの点は主に中高緯度で

観測された波に対応する。また、 $\lambda = 4\text{km}$ もしくは $\lambda = 2.5\text{km}$ となる線に乗っているように見える3つの点は、南半球の低緯度で観測されたものであり、これらの波は内部重力波を表している可能性がある。しかし、ここで用いた背景風の仮定は極めて粗いものであり、また探査機の姿勢情報の誤差も無視しているため、波の特性の詳細については言及することができない。しかしいずれにしても、波状構造は背景風とは行った速度で動いており、今後解析範囲を広げて雲高度・風速推定をする場合には影響を及ぼし得ることがわかった。

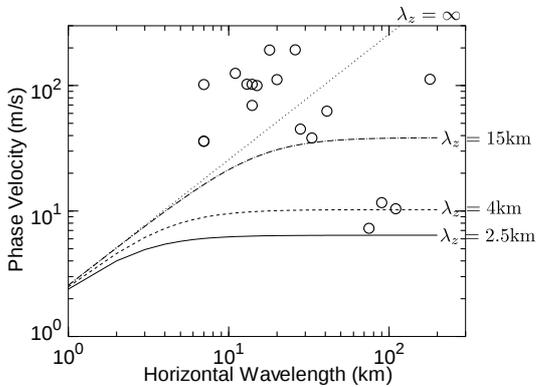


図6 観測された波状構造の分散関係. 鉛直波長 λ_z が 2.5, 4, 15km の内部重力波の分散曲線も同時に示す。

6 まとめ

本研究では、雲層のモデルを用いず、2枚もしくは3枚の画像から幾何学的に雲高度と風速を求める方法を開発した。この方法により求められた雲高度と風速は先行研究とよい一致を見せた。また、画像に写った波状構造を解析することにより、その特性と雲高度・風速推定への影響を調べた。その結果、今回雲高度・風速推定に用いたデータの中では検出されなかった。しかし、中高緯度において波状構造は背景風とは明らかに異なった速度で動いており、波動の存在を示唆するとともに、今後さらに範囲を広げて雲高度と風速を解析する上では大きな影響を及ぼし得ることがわかった。

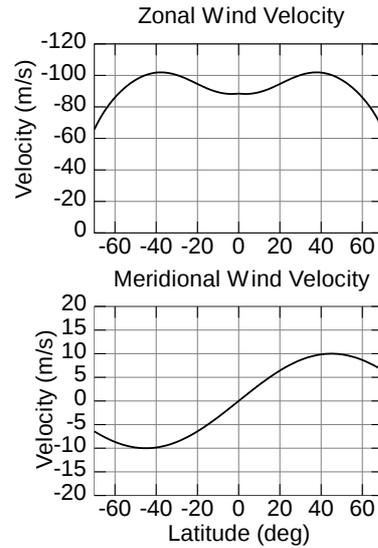


図7 仮定した背景風. (上) 東西風 $\bar{u} = 5 \times 10^{-9}X^6 + 10^{-6}X^5 + 7 \times 10^{-5}X^4 + 0.0015X^3 - 0.0121X^2 - 0.1183X - 88.432$ および (下) 南北風 $\bar{v} = 10 \sin(2\pi x/180)$. ここで、 X は緯度の絶対値 (deg) に負号をつけたもの、 x は緯度 (deg) である。東西風は Markiewicz et al. (2007) による。

引用文献

- 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.
- 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.
- 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, 2007. Morphology and dynamics of the upper cloud layer of Venus, *Nature*, **450**, 633-636, doi:10.1038/nature06320.