

# 地上赤外分光観測から迫る金星昼面大気波動現象

細内麻悠<sup>1</sup>、岩上直幹<sup>1</sup>、大月祥子<sup>2</sup>、高木征弘<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 東京大学・理・地球惑星科学、<sup>2</sup> ISAS / JAXA)

## 1. 概要

金星昼面からの太陽散乱光を地上赤外分光観測し、大気主成分である二酸化炭素を定量することで高度60–65 kmの大気波動現象の研究を行った。観測期間は2007年5月および11月、2009年6月、2010年8月の計4期間である。その観測データの解析から、観測高度における雲の模様の回転周期を2007年5月は5日、2010年8月は5.5日と見積もった。また、2007年から2010年にかけて代表反射高度が1から2 km低下していた。これらの経年変化の理由として、雲構造の変化などによる観測高度の低下や、背景場の変化にともなう波動の位相速度の変化の可能性が考えられる。

この結果は、金星大気の準周期的年々変動の片鱗だと考えている。また、大気状態全球図の作成には、過去の研究例に倣った剛体回転だけではなく、Venus Expressが観測した風速分布から導出した差動回転も考慮した。

## 2. 背景

### 2.1 金星大気における波動現象の重要性

波動現象が担う鉛直角運動量輸送がスーパーローテーションの生成・維持に寄与する可能性については以前から指摘されている[Yamamoto and Tanaka, 1997; Takagi and Matsuda, 2007]。

また、赤道ケルビン波は、紫外線で観測される横Y字形の雲模様を作ると考えられている(例えば、今村他 [2003])。さらに、金星の子午面循環は不明であるが、ロスビー波のEPフラックスにより子午面循環が駆動できると言われている [Imamura, 1997]。

よって波動現象の理解を深めることで、金星の大気循環や雲の生成機構など、金星の大気に関する大問題の解明につながる可能性があると言える。

### 2.2 金星大気の準周期的年々変動

金星大気では、雲粒子(濃硫酸の液滴)と密接な関係を持つ、大気微量成分SO<sub>2</sub>の不可思議な年々変動が観測されている[Belyaev et al., 2008]。また、平均東西風速[del Genio and Rossow, 1990]や波動現象[Rossow et al., 1990]でも年々変動が確認されている。

これらの年々変動は準周期的である可能性が示唆されており、地球赤道域大気の準2年振動(quasi-biennial oscillation : QBO)が、対流圏から伝播してくる波動と平均流の相互作用によって生じる[松野・島崎[1981], p.234–241]ように、この変動も大気波動と平均流の相互作用によるものではないかと推測される。

### 2.3 本研究の特長

本研究では金星大気の主成分であるCO<sub>2</sub>を赤外昼面分光観測により定量することで高度60–65 kmの現象を観測した。用いた赤外線が散乱・反射する代表的な高度は、得られた吸収量から約60 kmとなる。そこから5 km厚み(高度60 kmにおける金星大気のスケール

ハイト)の大気による吸収を受けていると考え[Iwagami et al., 2008]、観測高度は上記の範囲となる。

この手法により、過去よく研究されている紫外昼面撮像(約70 km)、赤外夜面撮像(約50 km)とも異なった高度を観測することが可能である。この高度の波動現象の研究は、他に例が少ない。他の高度との現象の比較を行うことも本研究の展望の1つである。50–70 kmというのは、金星大気では重要な加速域であるので、例えば、西向き運動量を持った波動が碎波していくところを見つけられれば、大気加速の証拠を得たことになる。

また、赤外昼面観測を行う場合、撮像では一般にコントラストが小さく波の検出が難しい。そのため、この研究では分光的手法を用いている。Venus ExpressのVIRTISは赤外分光観測を行っているが、観測対象になっているのは夜面である。

Venus Expressの軌道は極軌道になっているので、北半球は近くを一瞬で通り過ぎることになる。そのため、北半球については、力学観測に適したデータを得ることはできない。対して、地上観測は全球スキャンするため昼面全体を一度に観測することが可能である。

さらに、地上観測は半永久的に観測継続可能であることから、2.2で述べた年々変動を観測できる可能性も高い。

### 3.方法

ハワイ島のマウナケア山頂にある観測施設 IRTF (InfraRed Telescope Facility)の口径3 m赤外望遠鏡およびCSHELL分光器を用い、金星昼面の分光観測を行った。

観測期間はハワイ標準時(HST = UT – 10<sup>h</sup>)で2007年5月25–31日および11月10–13日、2009年6月12・13・15日、2010年8月2–9日の計4期間である。観測は最大離角時の近傍で行った。2007年5月・2010年8月は宵の明星、2007年11月・2009年6月は明けの明星を観測した。図1に示す通り、宵の観測ではローカルタイムが夕方の金星を、明けの観測ではローカルタイムが朝方の金星を観測することができる。

今回CO<sub>2</sub>の定量には、P24線(図2参照)の吸収等価幅を用いた。本研究ではほぼ全ての議論を吸収等価幅により行う。吸収等価幅は雲層内で散乱・反射される高度が低くなるほど大きくなる値なので、雲の高度と密接な関係を持つパラメータである。吸収等価幅は装置関数幅やシーイング、天候などの観測条件によらない保存量だという利点を持つため、測定期間の異なるデータの比較に適している。

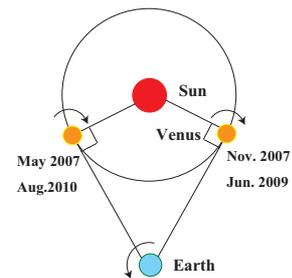


図1: 太陽-金星-地球の観測時の位置関係の概念図  
矢印は金星・地球、それぞれの自転の方向

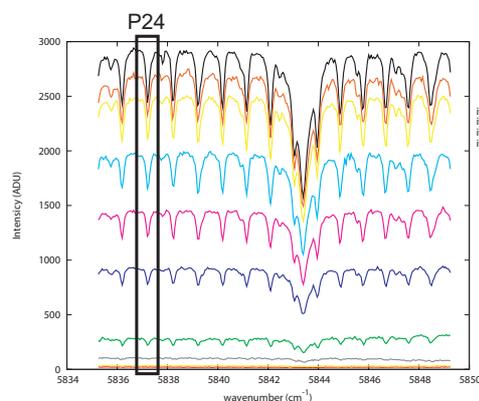


図2: スペクトルの例 (iy ; スリットのピクセル番地)

周期構造は金星大気のCO<sub>2</sub>帯の回転構造。

5843 cm<sup>-1</sup>付近の構造はフラウン・ホーファー線。

y方向は天の南北に沿っており、ディスク中央と端で輝度が異なる。

## 4.結果と考察

### 4.1 大気状態全球図

本研究では、各観測期間ごとの大気の変動を捉えることを目標としている。そのため、各日の観測結果を連結して大気状態全球図を作成した。まず、Belton et al. [1991]やCrisp et al. [1991]などに倣い、金星の大気は4–5.5日の周期で剛体回転しているものと考えて各期間、各日のデータを連結した。つまり、4日周期を仮定した場合、大気は4日で360°回転するので、1日経つごとに90°動いた場所の大気を観測していると仮定している。本研究では、剛体回転だけではなく、Venus Expressのデータから作成した、緯度帯ごとに速度が異なる、差動回転も考えた。大気状態全球図は図3の通り。

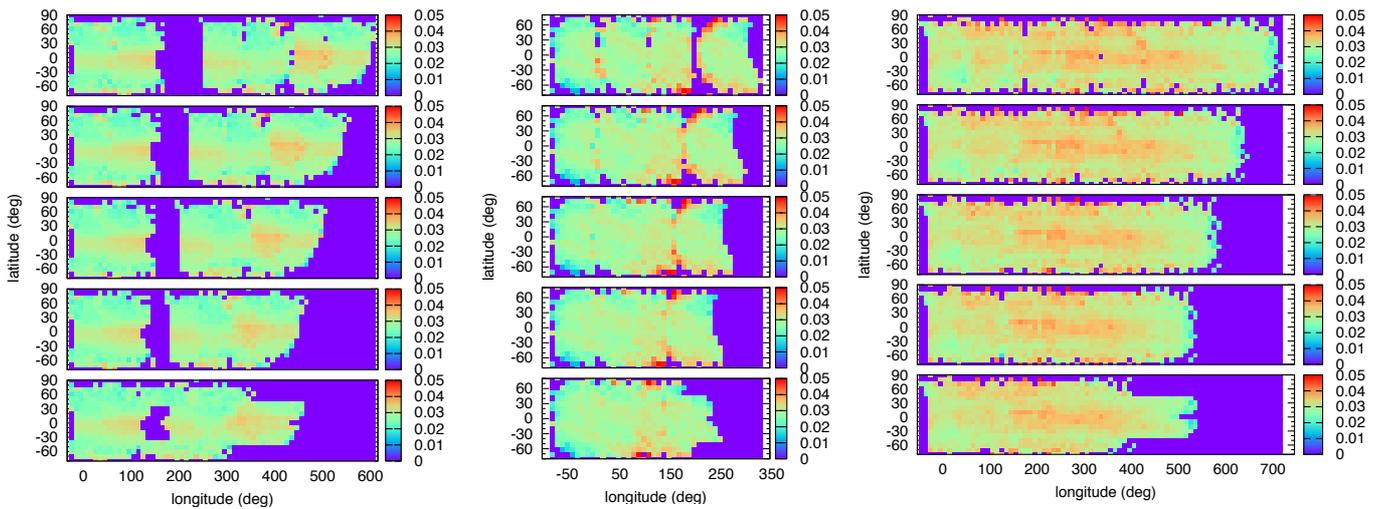


図3：大気状態全球図(左から2007年5月、11月、2010年8月)

縦軸 緯度(°)、横軸 経度(°)、カラーバー 吸収等価幅( $\text{cm}^{-1}$ )

各図、上から4、4.5、5、5.5日周期の剛体回転、差動回転による大気の循環を仮定して作成

### 4.2 模様の回転周期

この観測データにフーリエ変換とほぼ同じ概念の計算をし、波数1の惑星波動の卓越から、雲の模様が回転する周期を2007年5月は5日、2010年8月は5.5日であると見積もった。雲の模様の回転周期は、平均流と雲の位相速度の重ね合わせである。本研究のデータのみでは位相速度は求められないので、Venus Expressによる観測結果などから位相速度の大きさを見積もり、平均流の周期、つまり大気の循環周期を算定したい。60–65kmの高度域での大気の循環周期を特定しようとする研究は他に例を見ない。この高度での大気の循環周期は、70 kmで大気が約4日で循環しているという事実、つまりスーパーローテーションに3次元的な知見を加えることができる。

### 4.3 経年変化

吸収等価幅およびそれから求めた代表反射高度の、2007年から2010年での変化量を求めた(図4)。どちらも標準誤差( $\sigma = (\text{不偏分散})/\sqrt{N}$ )に対して有為に変化している。図4右より、2007年から2010年にかけて代表反射高度が1から2km低下している。

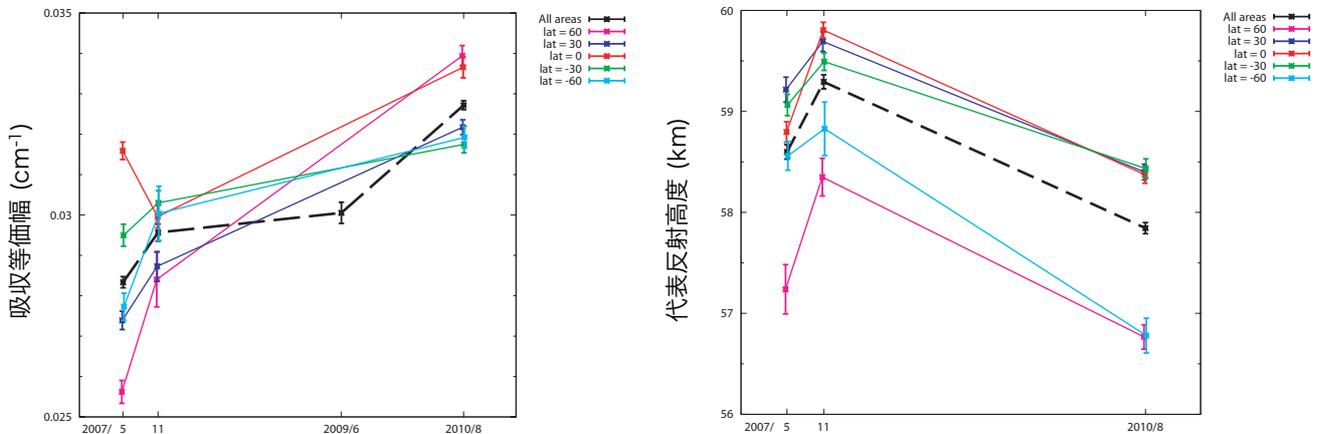


図4: 2007/5~2010/8の経年変化  
エラーバーは標準誤差

金星の風速観測例(図5)より、高度が低下すると風速は減速する。このことから、4.2の回転周期の変化は、観測高度が低下したことにより平均流風速が減速して起きたと考えることができる。観測高度の変化を引き起こす原因は、例えば雲構造の変化などが考えられる。平均流に対して波動が相対運動しているとき、その位相速度の大きさにより模様の回転周期も変動しうる。年による周期の違いは、背景場の何らかの変化にともなう波動の位相速度の変化である可能性もある。

これは、金星大気の準周期的年々変動と関連性が高い現象であると考えている。大気主成分であるCO<sub>2</sub>の吸収等価幅を用いてこういった変動を観測したのは、本研究が初めてである。

しかし、今回の観測データではCO<sub>2</sub>の増加及び代表反射高度の低下に、一方向の変化を見ただけである。今後も観測を続けることで準周期的な変動なのかただの経年変化なのか見極めたい。天候などに左右される輝度などに比べ吸収等価幅は安定して観測できる量であり、地上観測は半永久的に継続可能なので、年々変動を捉えることは可能である。また、準周期的年々変動であればその周期や、SO<sub>2</sub>や風速・波動現象の変動との関連性を解明することにより、2.2で述べた金星大気の準周期的年々変動を捉えることができると考えている。

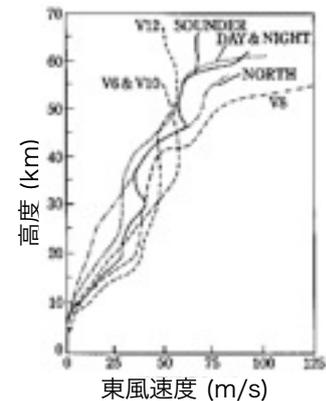


図5: 投下プローブによる金星の東風の高度分布 [Schubert, 1983] より

## 参考文献

- Belton, M. J. S., P. J. Gierasch, M. D. Smith, P. Helfenstein, P. J. Schinder, J. B. Pollack, K. A. Rages, D. Morrison, K. P. Klaasen, and C. B. Pilcher (1991) "Images from Galileo of the Venus cloud deck," *Science*, Vol. 253, pp. 1531- 1536.
- Belyaev, D., O. Korablev, A. Fedorova, J.-L. Bertaux, A.-C. Vandaele, F. Montmessin, A. Mahieux, V. Wilquet, and R. Drummond (2008) "First observations of SO<sub>2</sub> above Venus' clouds by means of Solar Occultation in the Infrared," *J. Geophys. Res.*, Vol. 113. E00B25.
- Crisp, D., S. McMuldroch, S. K. Stephens, W. M. Sinton, B. Ragent, K.-W. Hodapp, R. G. Probst, L. R. Doyle, D. A. Allen, and J. Elias (1991) "Ground-based near-infrared imaging observations of Venus during the Galileo encounter," *Science*, Vol. 253, pp. 1538-1541.
- 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.*, Vol. 47, pp. 293-318.
- Imamura, T. (1997) "Momentum balance of the Venusian midlatitude mesosphere," *J. Geophys. Res.*, Vol. 102, pp. 6615-6620.
- Iwagami, N., S. Ohtsuki, K. Tokuda, N. Ohira, Y. Kasaba, T. Imamura, H. Sagawa, G. L. Hashimoto, S. Takeuchi, M. Ueno, and S. Okumura (2008) "Hemispheric distributions of HCl above and below the Venus' clouds by ground-based 1.7  $\mu\text{m}$  spectroscopy," *Planet. Space Sci.*, Vol. 56, pp. 1424-1434.
- Rossow, W. B., A. D. del Genio, and T. Eichler (1990) "Cloud-tracked winds from Pioneer Venus OCPP images," *J. Atmos. Sci.*, Vol. 47, pp. 2053-2084.
- Takagi, M. and Y. Matsuda (2007) "Effects of thermal tides on the Venus atmospheric superrotation," *J. Geophys. Res.*, Vol. 112. D09112.
- Yamamoto, M. and H. Tanaka (1997) "Formation and Maintenance of the 4-Day Circulation in the Venus Middle Atmosphere.," *J. Atmos. Sci.*, Vol. 54, pp. 1472-1489.
- 今村剛・下山学・堀之内武 (2003) 「金星の雲の形態学」, 『日本惑星科学会誌』, 第12 卷, 第4号, 254-260 頁.
- 松野太郎・島崎達夫(1981) 『成層圏と中間圏の大気』, 大気科学講座, 第3号, 東京大学出版会.