

P-19

VEX/VMC の UV 画像解析による金星大気乱流のエネルギー輸送構造の推定  
**Energy transport structure of Venusian turbulence estimated by the  
VEX/VMC UV image analysis**

寺口 朋子[1]; 笠羽 康正[1]; 高橋 幸弘[2]; 星野 直哉[1]; 渡部 重十[2]; 山田 学[3]  
[1] 東北大・理・地球物理; [2] 北大・理・宇宙理学; [3] ISAS/JAXA

## 1. Abstract

金星大気中にはさまざまな空間スケールの波が混在し、乱流を形成している。紫外域で観測される雲頂高度（約 70km）には、スーパーローテーションと呼ばれる高速西向風が存在する。この高度における乱流エネルギーの輸送・散逸の理解は、金星大気運動を支配するエネルギー伝搬構造を解明する上で重要である。

ある波数の波の持つエネルギーが隣接した波数の波に移っていくことをカスケード現象と呼ぶ。2次元乱流の古典論によると、波数  $k$  でのパワースペクトル強度  $P(k)$  は、 $P(k)=C_k k^{-n}$  という式で表せる。 $n=3$  のとき乱流のエンストロフィ（渦度<sup>2</sup>）が、 $n=5/3$  のときエネルギーがそれぞれカスケードしていると考えられている。この式は様々な仮定を要するが、地球の対流圏界面における風や温位はかなり正確にこの法則に従うことが知られる。

探査機によって得られた金星の画像を用いたパワースペクトルの解析はこれまでもたびたび行われてきた。しかし、Galileo 探査機ではフライバイする間の短時間の観測であり、撮像期間が最も長い Pioneer Venus でも高々3ヶ月間のデータしか取得していない。従って、長期にわたるパワースペクトルの時空間変動については、殆ど分かっていないと言って良い。Venus Express 搭載の Venus Monitoring Camera (VMC) は、その楕円極軌道を生かして、南半球の高緯度域をより高空間分解能で撮像しており、2005年11月から現在までの4年にわたって継続的なデータを蓄積してきた。

本研究では、VMC が撮像した南半球画像から、雲の濃淡のパワースペクトルの長期変動の解明を目指している。ここまで行っているスナップショットの解析では、地球・金星両方での先行研究で示されているように、パワースペクトルの変曲点を挟んで低波数側の領域では傾きが急で、高波数側では緩やかであるという2領域化が見られた。この結果は、低波数側の領域では乱流のエネルギーカスケードが、高波数側ではエンストロフィカスケードがそれぞれ支配的であることを裏付ける。また、傾き  $n$  の値は、画像によっては緯度帯でばらつきを持っており、3、5/3 と完全に一致してはいない。このことは、地球に比べ金星の乱流におけるエネルギーの流れが非定常的であることを示唆し、大気の粘性や拡散率の違いなどに起因する可能性がある。

## 2. Introduction

UV 観測では雲頂高度（～70km）を観測できることから、本研究では UV 画像の空間スペクトル解析による金星の雲頂高度における乱流のエネルギー輸送構造を把握することを目的としている。データは Venus Express に搭載された Venus Monitoring Camera のものを使用している。使用した観測モードでのデータは以下のような仕様である。

### Venus Express(VEX)

#### 観測期間

2005 Nov～現在もデータ取得中

#### 軌道

楕円極軌道を周回

### Venus Monitoring Camera(VMC)

広角（～17.5°）デジタルカメラ

観測波長: 345-385nm(UV)

空間分解能: 7 – 45 km/pixel

撮像時間間隔: ～10min

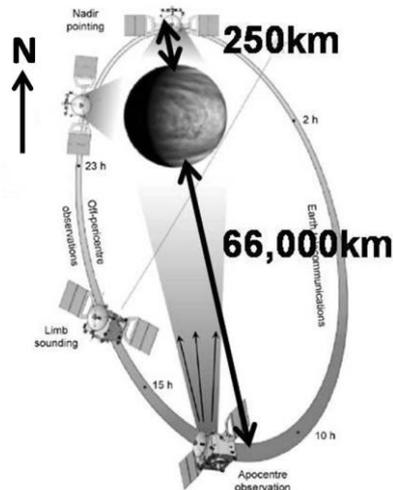


Fig.1 Venus Express 軌道図。[Markiewicz et al., 2007]に一部加筆。

2次元乱流の古典論では、粘性が無視できないとき

$$P(k) = C_k k^{-n}$$

k: 波数

P(k): 波数 k でのパワースペクトル強度

とあらわすことができ、 $n=5/3$  のとき energy cascade、 $n=3$  のとき enstrophy cascade が

主に起こっているとされる。Fig.2 に示すように、地球では風速や温位のデータを用いてスペクトル解析が行われていて、この古典論を裏付ける結果が見て取れる。

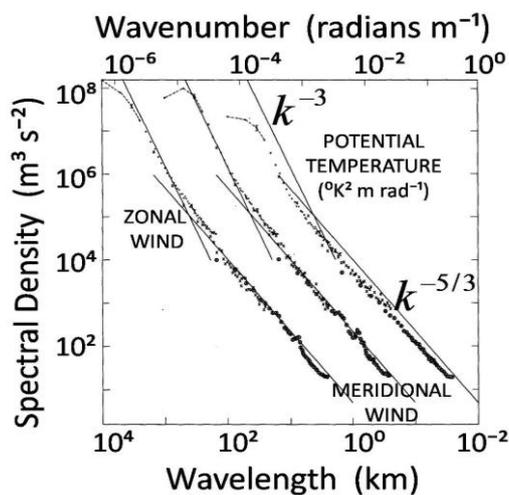


Fig. 2 地球対流圏界面近傍での風・温位のパワースペクトル  
[Nastrom et al., 1985]

### 3. Analysis

解析には、現在公開されている VMC の紫外線画像データを用いている。

これは hot pixel, dark current などの各種補正済みの画像である。

解析は、

1. 輝度の天頂角依存性を除去

輝度分布モデル[Belton et al., 1991]を使用

2. 直交地理座標に展開

3. パワースペクトル密度 (PSD) を計算

東西方向 (緯度 2°おき) の雲の明暗をフーリエ変換

という手順で行った。

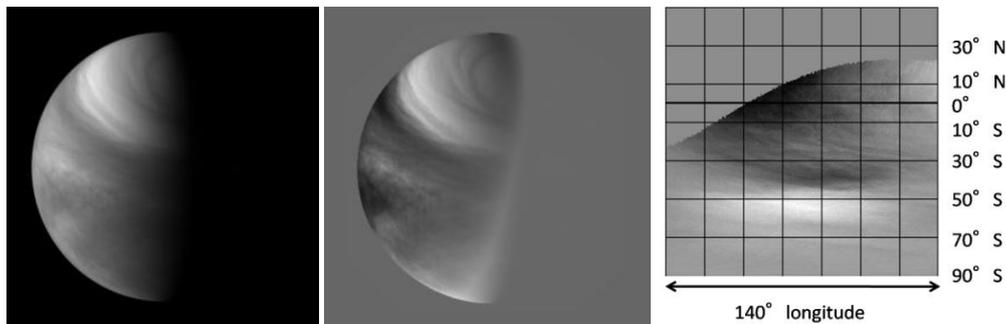


Fig. 3 (左) 元の画像 (中央) 輝度天頂角依存性除去後の画像 (右) 直交地理座標図

( いずれも 2006-05-20 22:00:55 )

## 4. Results

解析の結果、fig.4のような、傾きが低波数側で急で高波数側で緩やかなスペクトルが得られた。これは地球や金星における同様の先行研究の結果(1例にfig.7)と一致している。ただし、緯度による傾きの変化の度合いは画像によってばらつきがあり、地球での先行研究結果とは異なっている。

また Fig.5,6 の右上のグラフにあるように、高緯度領域ほど、傾きの差が大きくなる傾向が見られ、これも先行研究[Peralta et al.,2006]の結果と一致する。このことから PSD の傾きは緯度依存性を持つことが示唆される。

また特徴的な点としては、fig.8 の 44S のように、低波数側の傾きが急激に落ち込んでいる点が存在することがあげられるが、このデータの有意性は未検証であり、今後確認したい。この点を除けば、2つの慣性小領域の境界点における波数は  $0.001\text{-}0.002\text{ /km}$  付近を推移しており緯度依存性が小さいことから、雲頂高度では全球的にほぼ一定のスケールの波にエネルギーの流入がある可能性があると言える。このエネルギー流入に関しても、地球には傾圧不安定波が存在するため、波長 $\sim 5000\text{km}$ のスケールで大規模なインジェクションが起きていることが知られているが、金星ではどうであるかという観測結果は得られていない。本研究での現在の解析範囲(波長 max $\sim 5000\text{km}$ )では、低波数側で傾きが特徴的に変化する点は認められないことから、より大きなスケールでインジェクションが起きている可能性が考えられる。

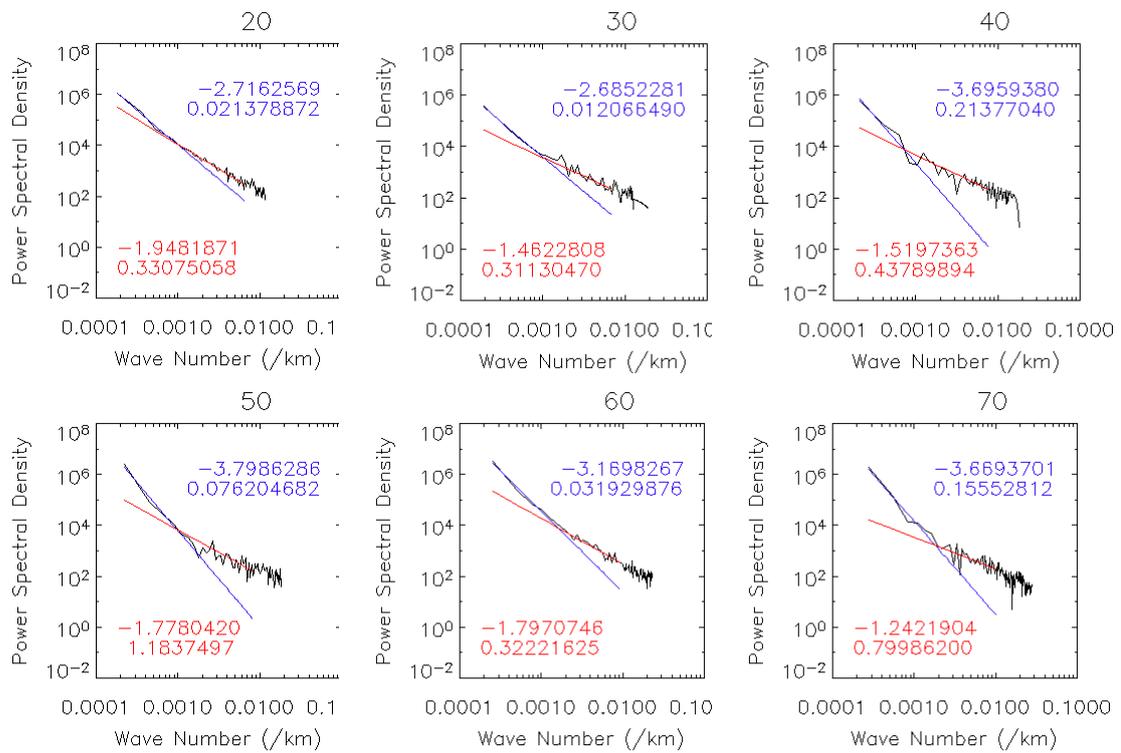


Fig.4 緯度 10° おきの PSD の例 ( 2006-05-21 22:07:09 ) 範囲は 20°S-70°S。  
数字は (上) PSD の近似直線の傾き、(下) 残差の二乗和。

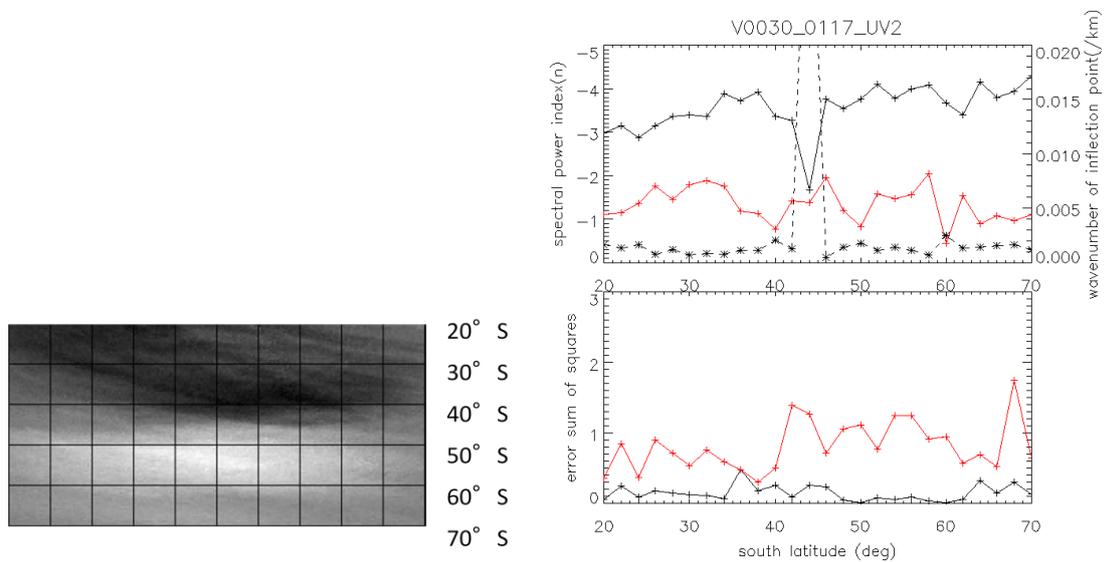


Fig. 5 2006-05-20 22:00:55 のデータ。

(左) 経度 100° の画像  
 (右上) 実線: 低波数側 (黒)・高波数側 (赤) での PSD の傾きの緯度依存性。  
 黒破線: 境界点の波数

(右下) 低波数側 (黒)・高波数側 (赤) での近似直線との残差二乗和。直線近似の精度を表す。

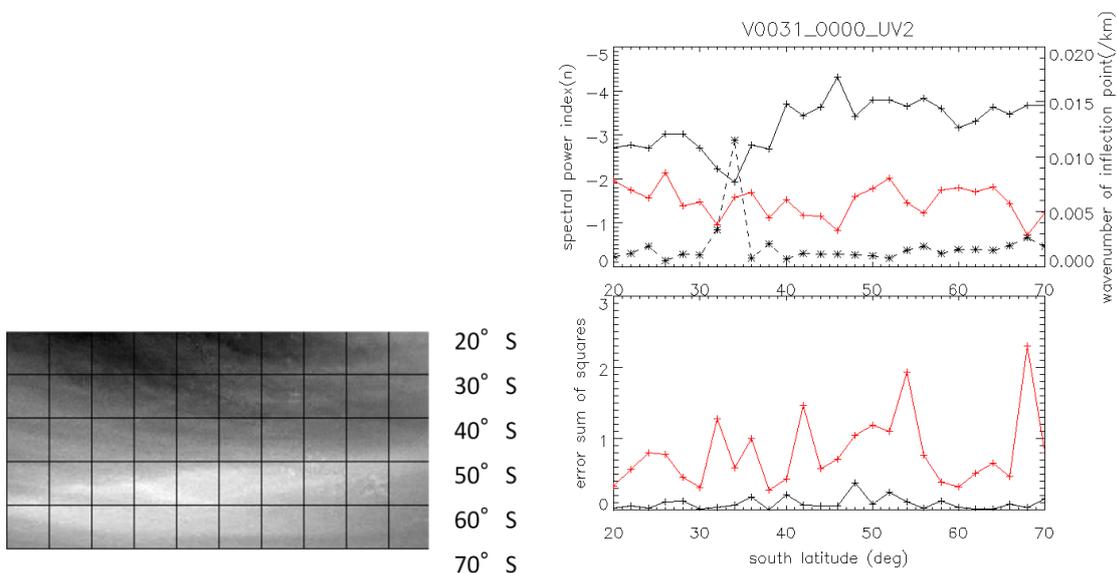


Fig. 6 2006-05-21 22:07:09 のデータ。

(左) 経度 100°の画像

(右上)実線：低波数側 (黒)・高波数側 (赤) での PSD の傾きの緯度依存性。

黒破線：境界点の波数

(右下) 低波数側 (黒)・高波数側 (赤) での近似直線との残差二乗和。直線近似の精度を表す。

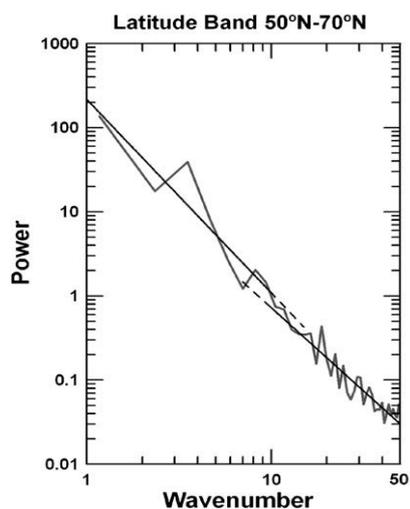


Fig. 7 20°の緯度幅のパワースペクトル [Peralta et al., 2006]

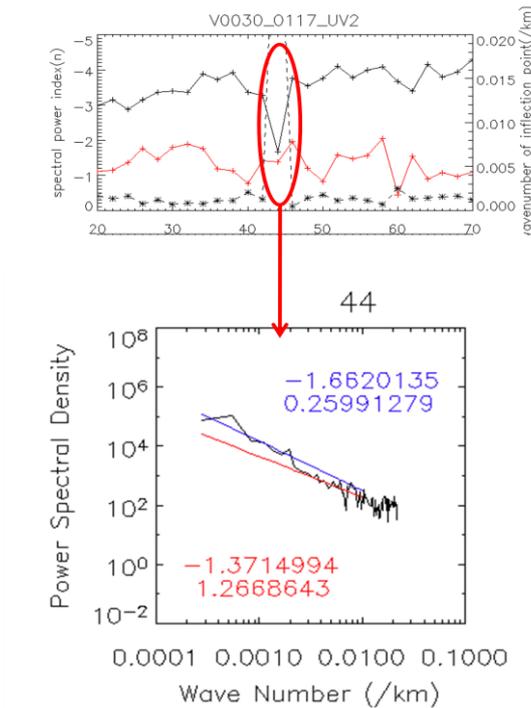


Fig. 8 2006-05-20 22:00:55 44°S のパワースペクトル

総括すると、今回の研究では先行研究に比べ高波数までの結果を導出した結果 PSD の波数に伴う傾きの変化から、高波数側ではエネルギーカスケード、低波数側ではエンストロフィカスケードが支配的ということが示唆された。この結果は先行研究とも一致するものである。一方 PSD の傾きには緯度変化と時間変化の両方が見られ、定常的とはいえない。これは地球での結果と異なっている点である。

また、2つの慣性小領域の境界点における波数は緯度依存性が小さいことから、雲頂高度では全球的にほぼ一定のスケールの波にエネルギーの流入があるという可能性が考えられる。このインジェクションのスケールや原因となる現象については、今後解析数を増やすとともに、複数画像の合成などによって解析する経度範囲を広げる工夫によって検証を進めていきたいと考える。

また、高度によってインジェクションが起こる波のスケールやエネルギー/エンストロフィの散逸の様子にどのような変化があるかについて議論することができれば、垂直方向の循環構造や対流のスケールの推定につながることを期待される。

## References

Belton, M. J. S., and 20 colleagues, (1991)

Images from Galileo of the Venus cloud deck, *Science*, 253, 1531-1536

Nastrom, G. D., and K. S. Gage, (1985)

A climatology of atmosphere wavenumber spectra of wind and temperature observed by commercial aircraft, *J. Atmos. Sci.*, 42, 950-960

Peralta, J., Hueso, R., Sanchez-Lavega, A., (2007)

Cloud brightness distribution and turbulence in Venus using Galileo violet Images, *Icarus*, 188, 305-314

Markiewicz, W.J., Titov, D.V., and 29 coauthors, (2007)

Venus Monitoring Camera for Venus Express , *Planetary and Space Science* 55 1701–1711