

# 地球型惑星における大気重力波の鉛直波数スペクトル

安藤紘基 (東大・理・地惑)、今村剛 (ISAS/JAXA)、津田敏隆 (京大理)

## 1. 背景

地球の気象学において重力波の鉛直波数スペクトルは、波の生成、伝播、そして減衰過程の指標として用いられてきた。本研究では、金星探査機 Venus Express と火星探査機 Mars Global Surveyor の電波掩蔽観測で得られた鉛直温度分布から、重力波に伴うと思われる小規模な温度擾乱を抽出し、それらの鉛直波数スペクトルを世界で初めて求めた。金星重力波については Venus Express 電波掩蔽の open-loop データを自ら解析して得られた温度分布を用いた。一方、火星重力波については NASA が一般向けに公開している温度分布データを用いて解析を行った。

## 2. 解析過程

金星重力波については、高度 65-80 km と 75-90 km それぞれにおける温度分布を 3 次関数で fitting し、その残差を重力波に伴う温度擾乱と見なす(図 1)。そして背景場の温度で擾乱を規格化した後に高度方向にフーリエ変換し、個々のスペクトルを 7 つの緯度帯で分類した。ちなみにスペクトルは波長範囲 1.4-15 km をカバーする。

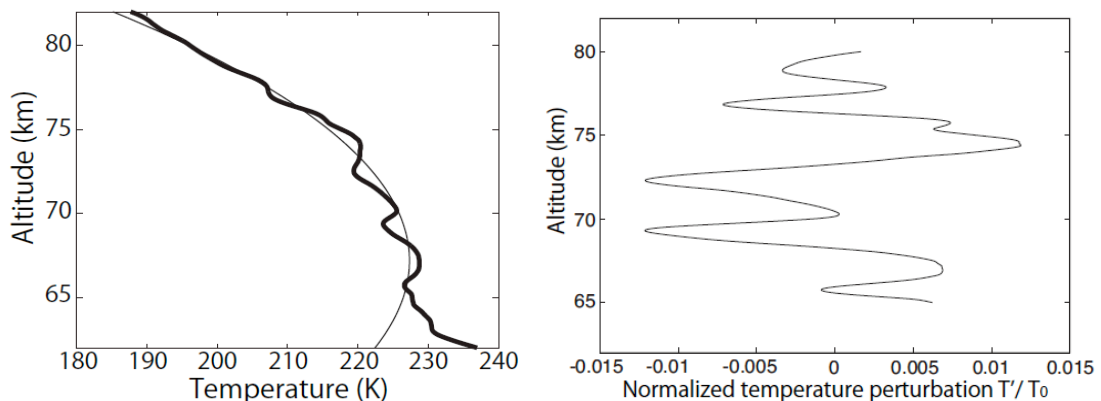


図 1 左 : 3 次関数による fitting の例。右 : fitting 成分を元々の温度分布から差し引き、その差分を背景の温度で規格化したもの。

火星重力波については、高度 3-32 km における温度分布を 3 次関数で fitting し、その残差を重力波に伴う温度擾乱と見なす(図 2)。そして背景場の温度で擾乱を規格化する。得られた擾乱を 3-20 km と 15-32 km にて高度方向にフーリエ変換し、個々のスペクトルを 5 つの緯度帯と季節で分類する。スペクトルは波長範囲 2.5 -17 km をカバーする。

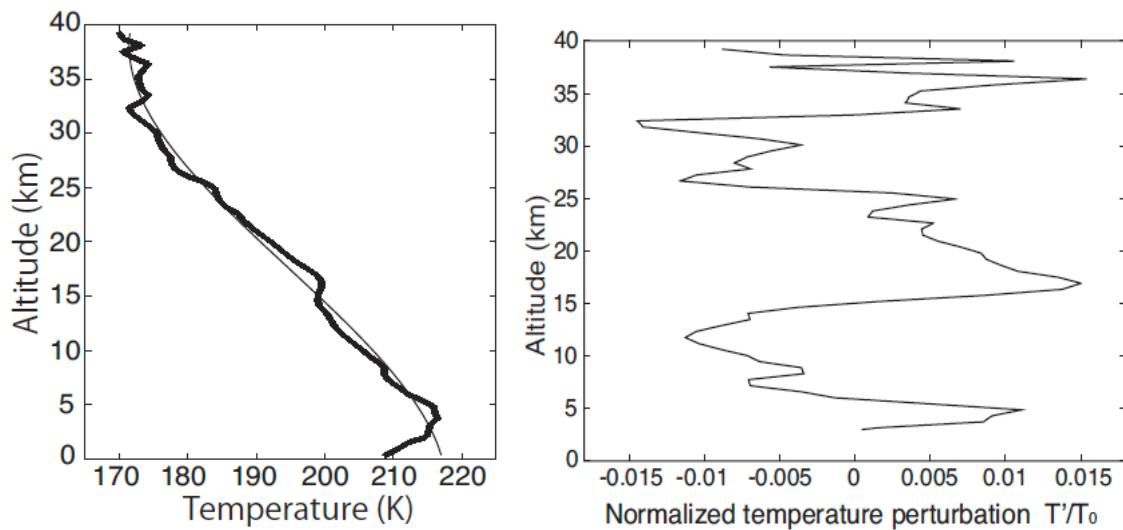


図 2 図 1 と同じ。ただし火星の場合を示した。

### 3. 解析結果

図 3 は金星重力波の、図 4 は火星重力波のスペクトルである。金星の場合、スペクトル密度は高波数側では右肩下がりであり、低波数側ではスペクトルは平たい。またスペクトル密度は基本的に高緯度で大きく低緯度で小さいという傾向が見られた。そしてスペクトル密度は高度と共に大きくなることが分かる。一方、火星の場合も金星のケースと同様で、高波数側では右肩下がりであり低波数側では傾きが小さい。またスペクトル密度はどの季節でも基本的に赤道域で最大である。そして、スペクトル密度はあまり高度方向に変化しない。

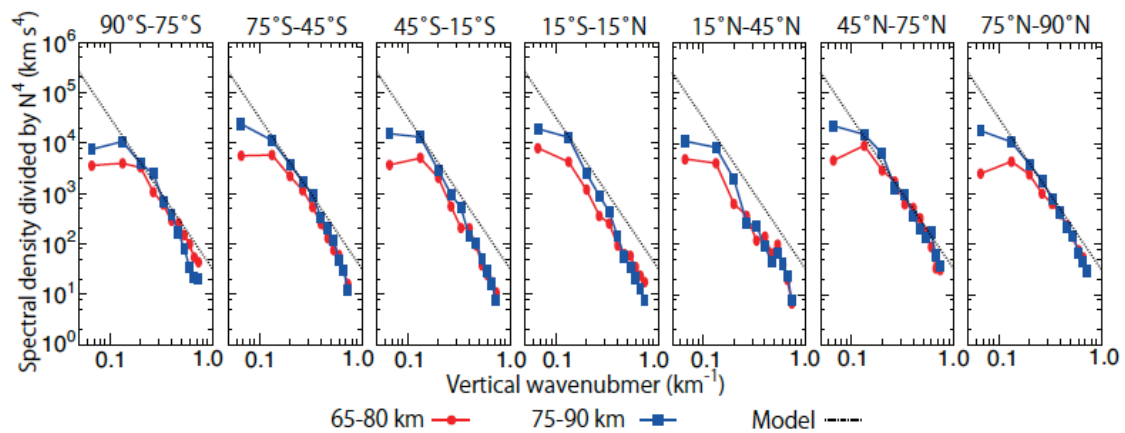


図3 金星重力波の鉛直波数スペクトル。赤線は高度 65-80 km におけるスペクトルで青線は 75-90 km におけるスペクトルを表す。黒点線は、飽和理論スペクトルを表す。

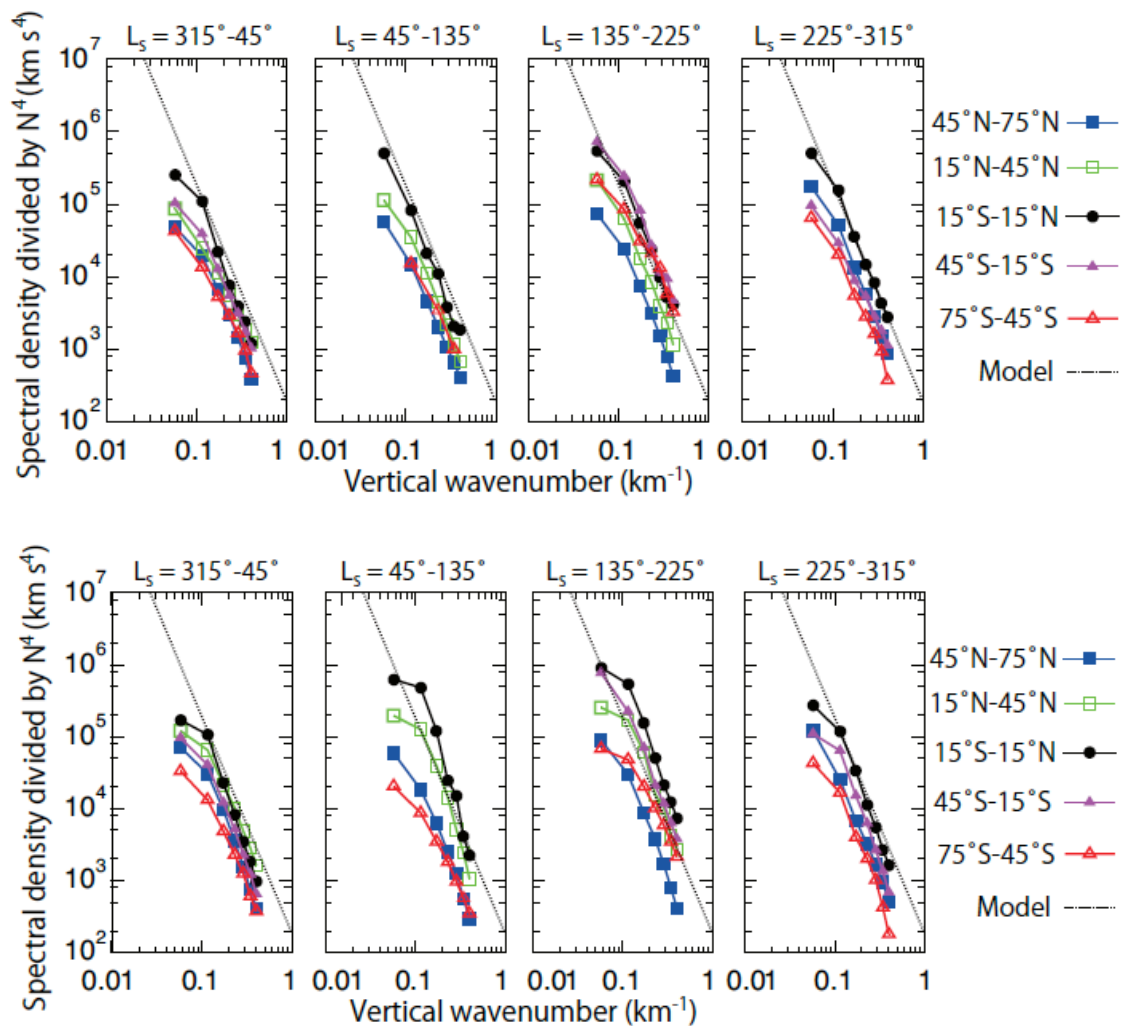


図4 火星重力波の鉛直波数スペクトル。上図は高度 15-32 km でのスペクトルで、下図は高度 3-20 km でのスペクトルを表す。

#### 4. 考察

金星・火星大気で得られたスペクトル密度は、基本的に地球気象で構築されてきた飽和理論スペクトルのそれに近い。特に金星高緯度における鉛直波数スペクトルは鉛直波長 3-8 km の範囲で、火星赤道域における鉛直波数スペクトルは 2.5-8 km の範囲で、それぞれ飽和理論スペクトルに良く従っている。鉛直波数スペクトルの決定機構については良く理解されていないが、解析結果から金星・火星大気では放射減衰だけでなく飽和によっても重力波が減衰している可能性がある。この仮定の下に重力波の砕波に伴う乱流拡散係数を推定した。

Holton and Zhu (1984) によると、波の飽和に伴う乱流拡散係数は以下の式で与えられる；

$$D = \frac{k_x c^{*2}}{2 N^3} \left( \frac{c^{*2}}{H} - \frac{\alpha N}{k_x} \right)$$

ここに  $k_x = 2\pi/\lambda_x$  は水平波数 ( $\lambda_x$  は水平波長)、 $c^* = N/k_z$  は内部位相速度、 $\alpha$  は放射緩和時定数、 $H$  はスケールハイト、 $N$  は大気安定度を表す。またこの計算に使ったパラメーターを表 1 に、また計算結果を図 5 に示した。これを基に、金星大気における鉛直渦拡散による物質輸送の典型的な時間スケールは、高度 65-80 km では  $H^2/D = 30-70$  日、75-90 km では  $H^2/D = 4-7$  日である。Imamura (1997) によると金星における子午面循環による移流の時間スケールは ~90 日である。故に、乱流拡散は子午面循環と同じくらいの時間スケールである。一方火星の場合、鉛直渦拡散による典型的な時間スケールは  $H^2/D = 60-100$  日である。Santee and Crisp (1995) によると火星における子午面循環による移流の時間スケールは ~38 日である。従って火星でも乱流拡散は子午面循環と同程度に物質輸送に寄与する。

Parameters	Venus 65-80 km	Venus 75-90 km	Mars 15-32 km
Horizontal wavelength $\lambda_x$ (km)	300-450	300-450	300-450
Vertical wavelength $\lambda_z$ (km)	5	8	8
Brunt-Väisälä frequency $N$ (rad s <sup>-1</sup> )	0.02	0.02	0.01
Radiative relaxation rate $\alpha$ (day <sup>-1</sup> )	2.0	4.0	1.0
Scale height $H$ (km)	5	5	10
Diffusion coefficient $D$ (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )	4-9	40-70	9-20

表 1 乱流拡散係数の推定に用いた種々のパラメーターの値

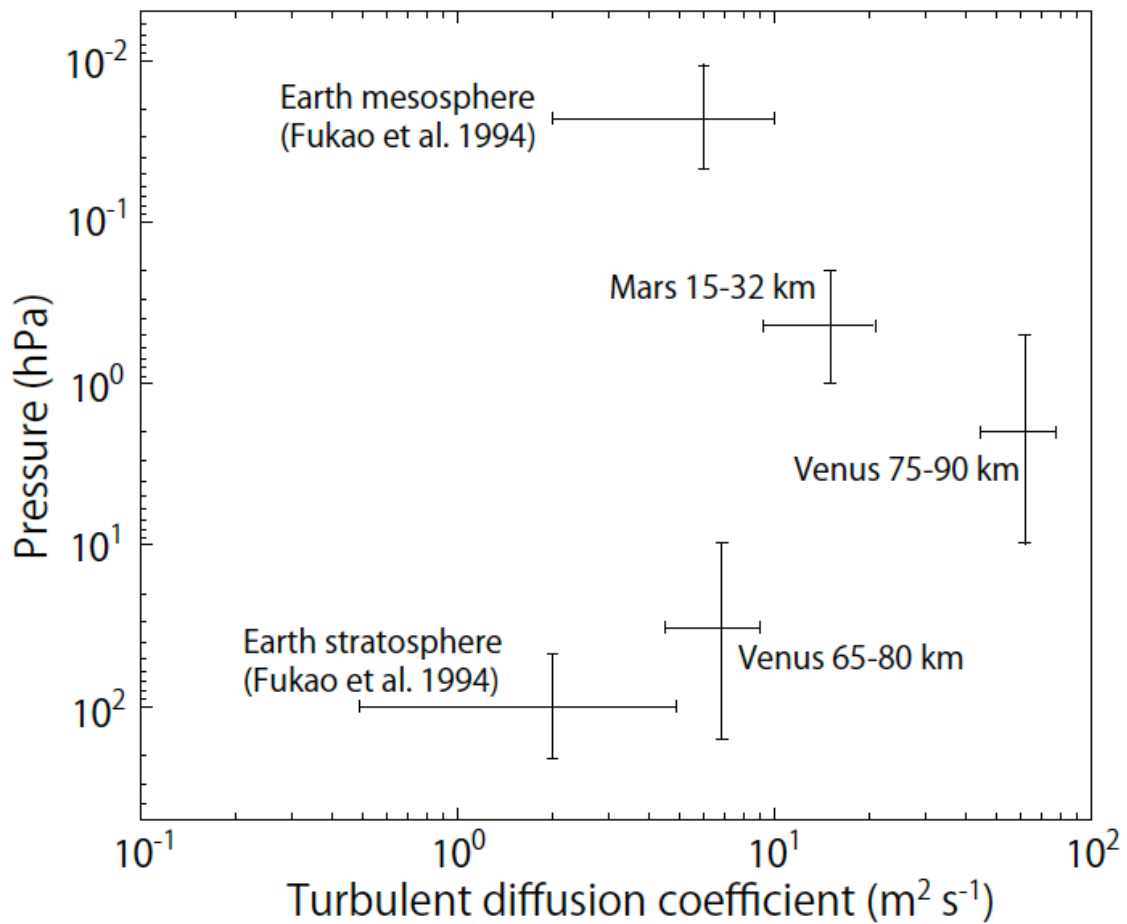


図5 地球、金星、火星における乱流拡散係数の比較。

## 5. まとめ

本研究では Venus Express と Mars Global Surveyor の電波掩蔽観測から得られた温度分布を用いて、金星・火星大気における重力波の鉛直波数スペクトルを世界で初めて計算した。その結果、金星でも火星でも低波数側でスペクトルは平たく、高波数側で右肩下がりと言う地球の成層圏や中間圏で見られる様なスペクトルが得られた。基本的に地球気象で構築されてきた飽和理論スペクトルのそれに近く、金星・火星大気では放射減衰だけでなく飽和によっても重力波が減衰している可能性がある。この仮定の下に重力波の碎波に伴う乱流拡散係数を推定した。これらの推定値は金星・火星における光化学において今後リファレンスとして活用される事が期待される。

また本研究で得られたスペクトルは金星・火星大気の高高度領域における大

気循環の数値計算に利用できる。これまで金星や火星の高高度領域の大気循環は、大気下層で生成される重力波が励起していると考えられ、重力波のパラメタリゼーションを組み込んだ大気循環モデルによる再現が試みられている。しかし従来のパラメタリゼーションは、地球大気で観測された重力波に基づいたものであり、現実の金星や火星で得られたものではない。現在、本研究で得られたスペクトルを利用した、より現実的な理論モデルの構築を検討中である。