

Vertical wavenumber spectra of gravity waves
in terrestrial planetary atmospheres
(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

内容

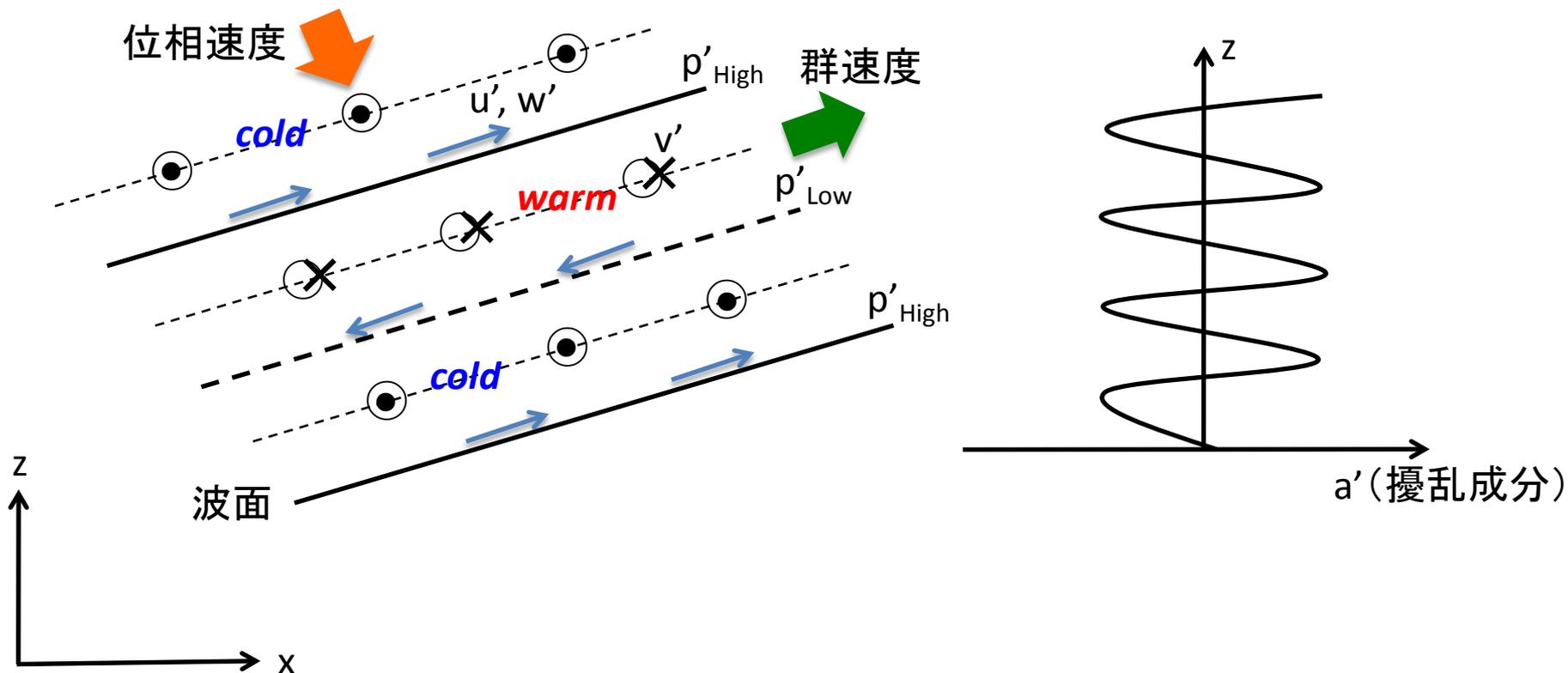
1. 重力波について
2. 地球・金星・火星大気における重力波の研究
3. 観測手法（電波掩蔽について）
4. 解析手順・解析結果・考察
5. まとめ

概要

- 金星探査機 Venus Express と火星探査機 Mars Global Surveyor における電波掩蔽観測で得られた温度分布から鉛直伝搬する重力波を捉え、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求めた。
- 地球気象で構築された重力波の飽和理論スペクトルを指標にして、金星・火星大気における重力波の減衰機構を考察し、また乱流拡散係数を見積った。

重力波について

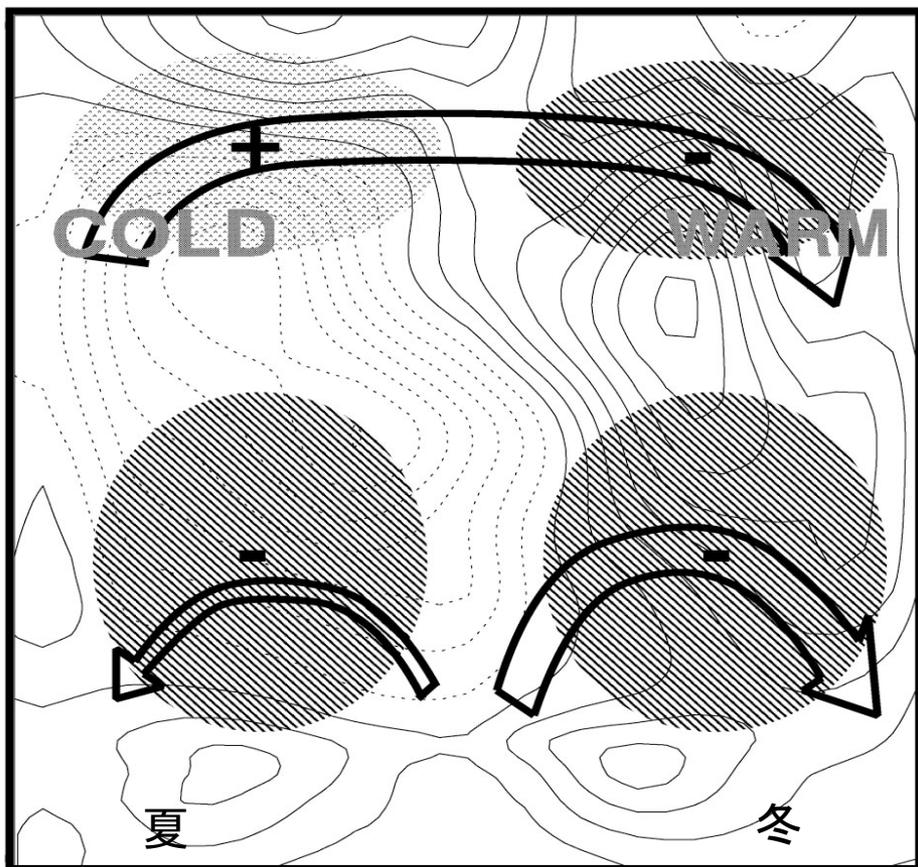
重力波における位相の関係図
(鉛直断面)



地球大気における重力波のソースとして、
地形性、積雲対流、シアー不安定などがある。

地球成層圏・中間圏における重力波の背景場への影響

重力波の減衰に対する背景場の応答の概念図

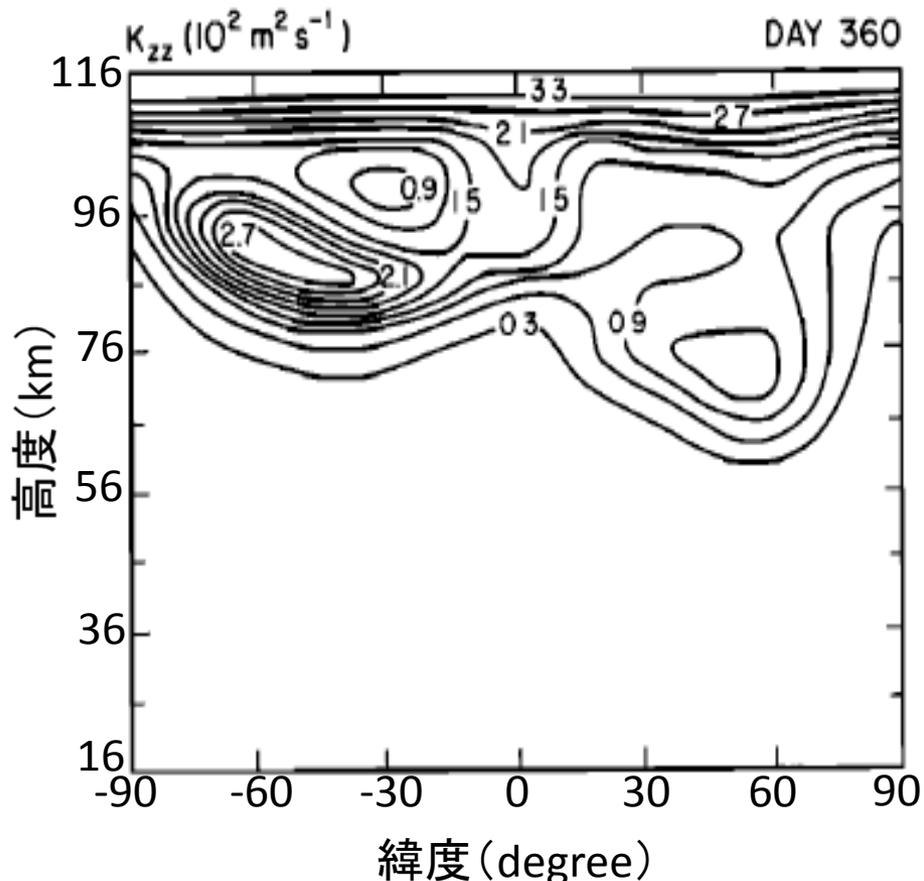


SUMMER

WINTER

Fritts et al. (2003)

砕波に伴う乱流拡散係数

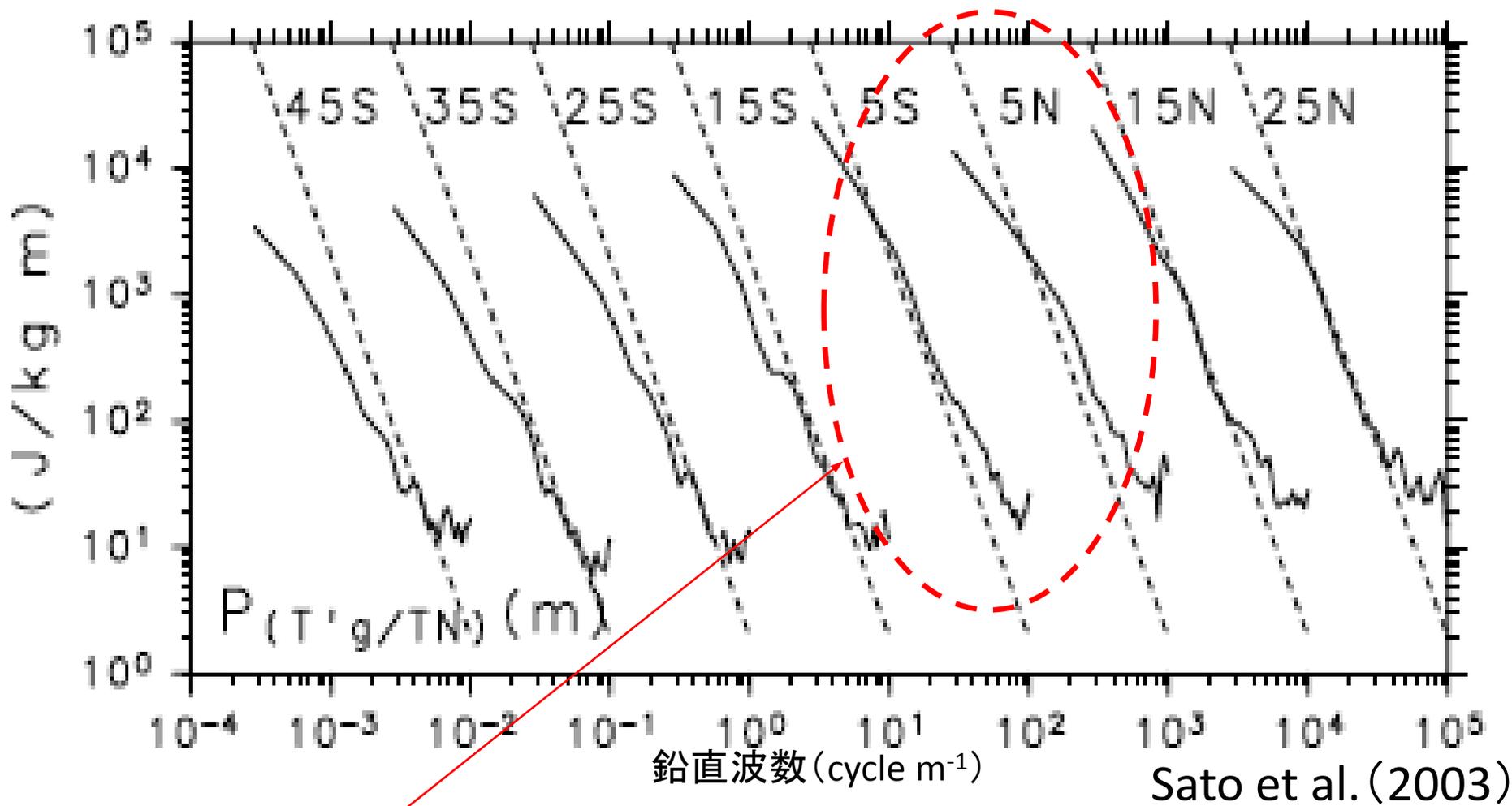


緯度 (degree)

Garcia and Solomon (1985)

重力波が減衰すると、波の持つ運動量が解放されて風速場・大気循環・温度場に影響を与える。そして砕波に伴う乱流は物質輸送に寄与する。

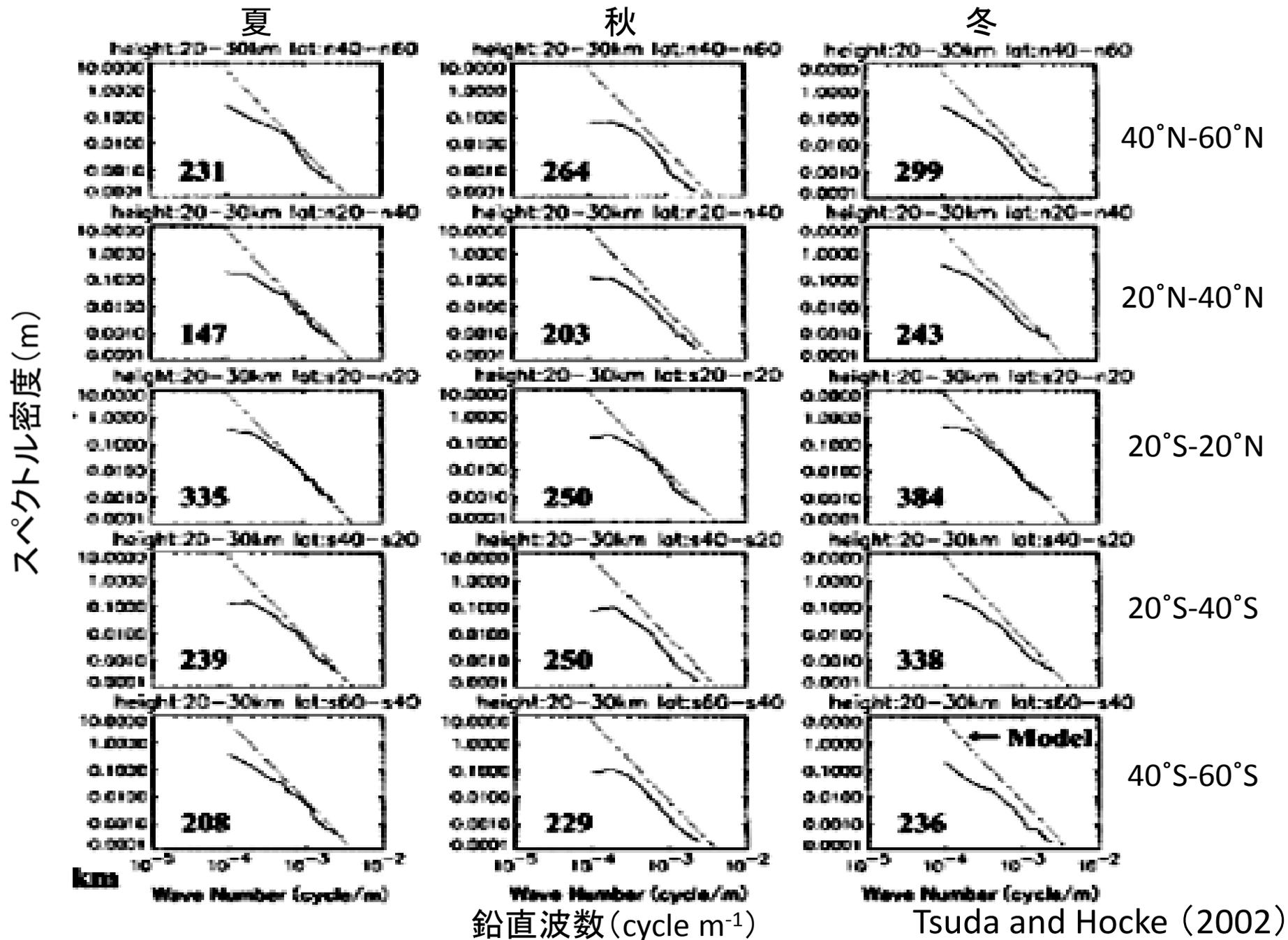
GPSラジオゾンデにより得られた成層圏下層(18-25 km)における重力波の鉛直波数スペクトル



赤道付近でスペクトル密度が大きくなっている。

⇒ 積雲対流が重力波の生成に寄与している事を示唆する。

地球GPS掩蔽により得られた成層圏における重力波の鉛直波数スペクトル

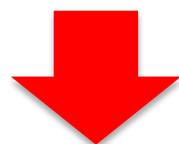


対流不安定と重力波の碎波 (Lindzen, 1981)

重力波が鉛直方向に伝搬すると、その振幅は高度共に指数関数的に増大する。

$$(\propto \exp(z/2H))$$

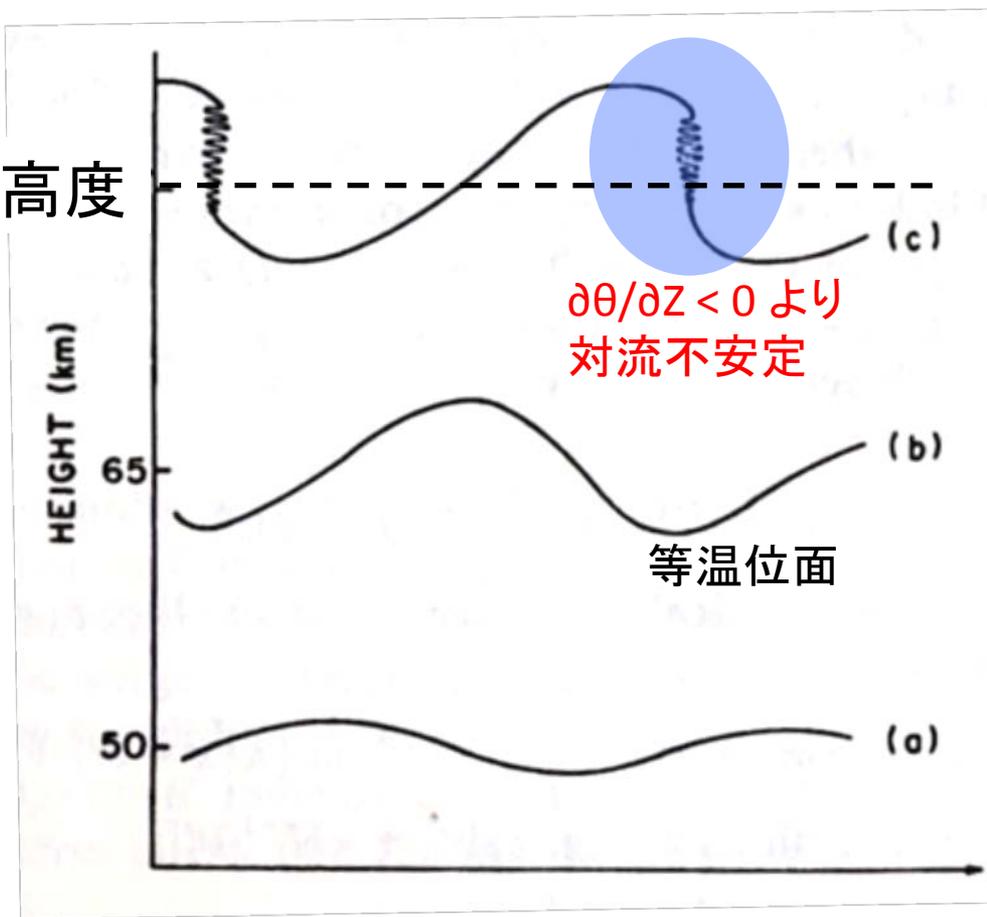
碎波高度



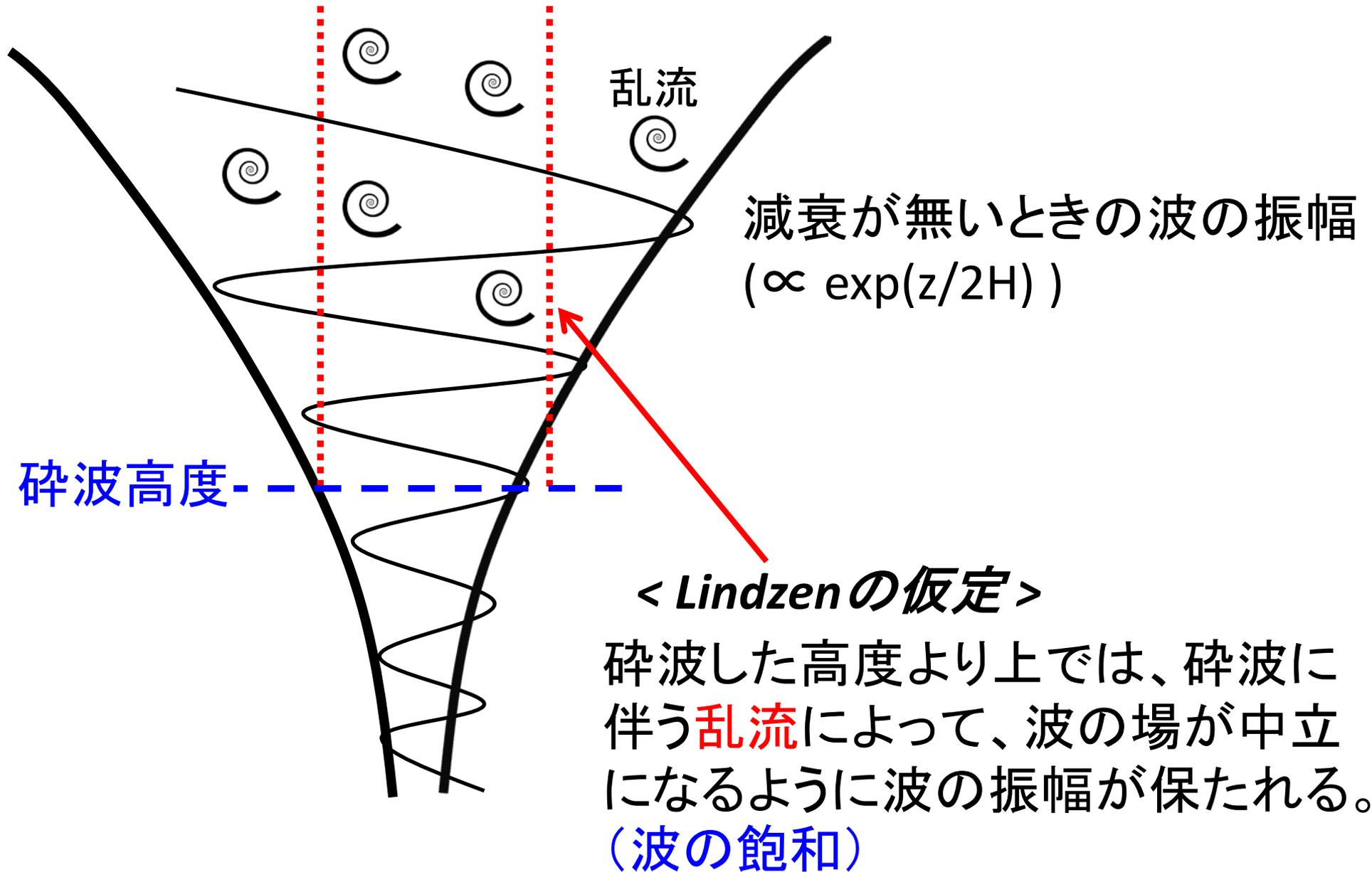
もしこのまま振幅が増大すると、ある高度で対流不安定が生じる;

$$\partial\theta/\partial Z = \partial(\theta_0 + \theta')/\partial Z < 0$$

この時、重力波は碎波する。



Lindzenの仮定と波の飽和 (Lindzen, 1981)



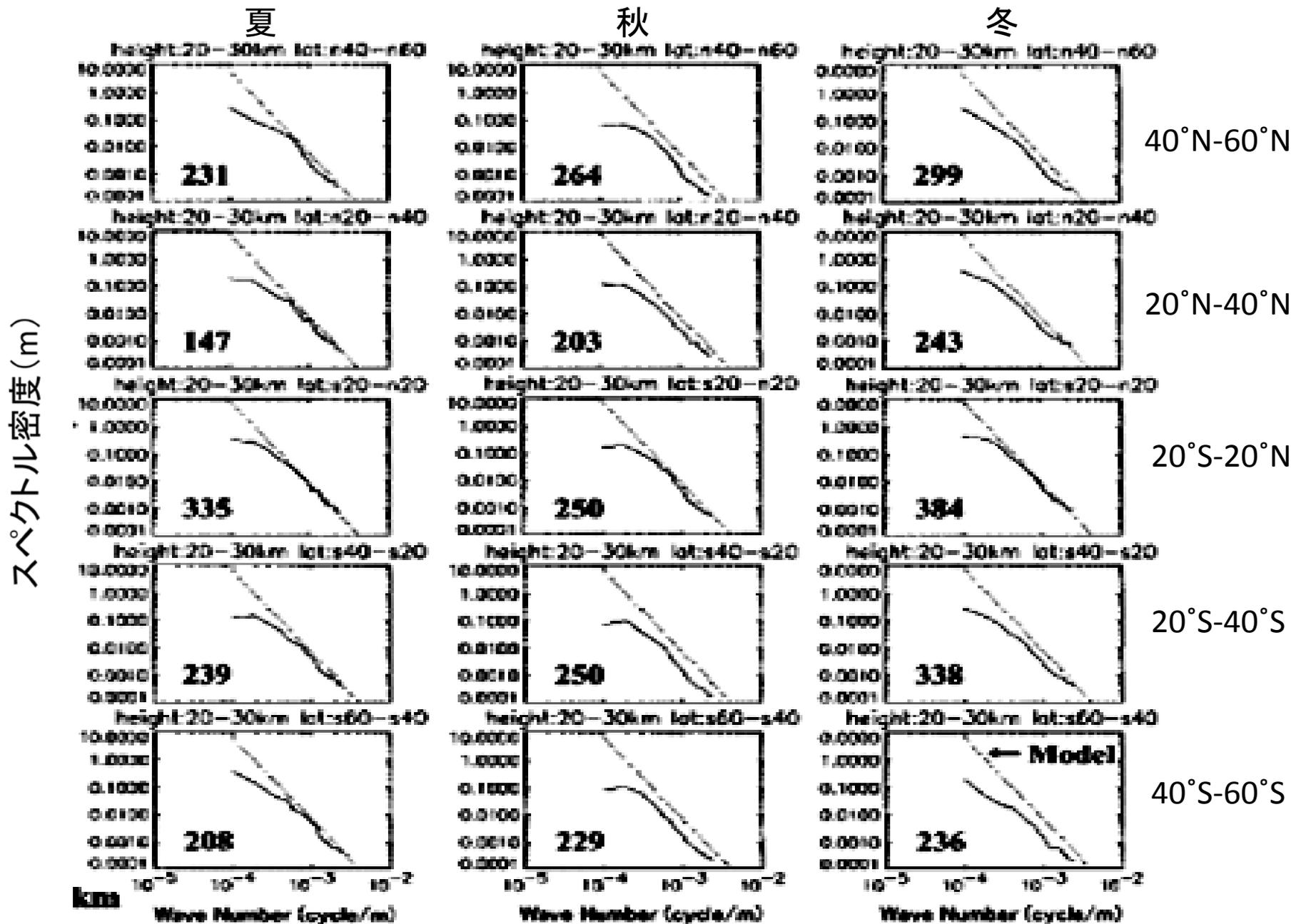
飽和重力波の鉛直波数スペクトル

$$\frac{F_{T'/T_0}(k_z)}{N^4} = \frac{1}{10g^2 k_z^3}$$

T' : 重力波に伴う温度擾乱, T_0 : 背景場の温度,
 N : ブラント=バイサラ振動数, g : 重力加速度,
 k_z : 鉛直波数

Tsuda et al. (1991),
Tsuda and Hocke (2002)

地球GPS掩蔽により得られた成層圏における重力波の鉛直波数スペクトル

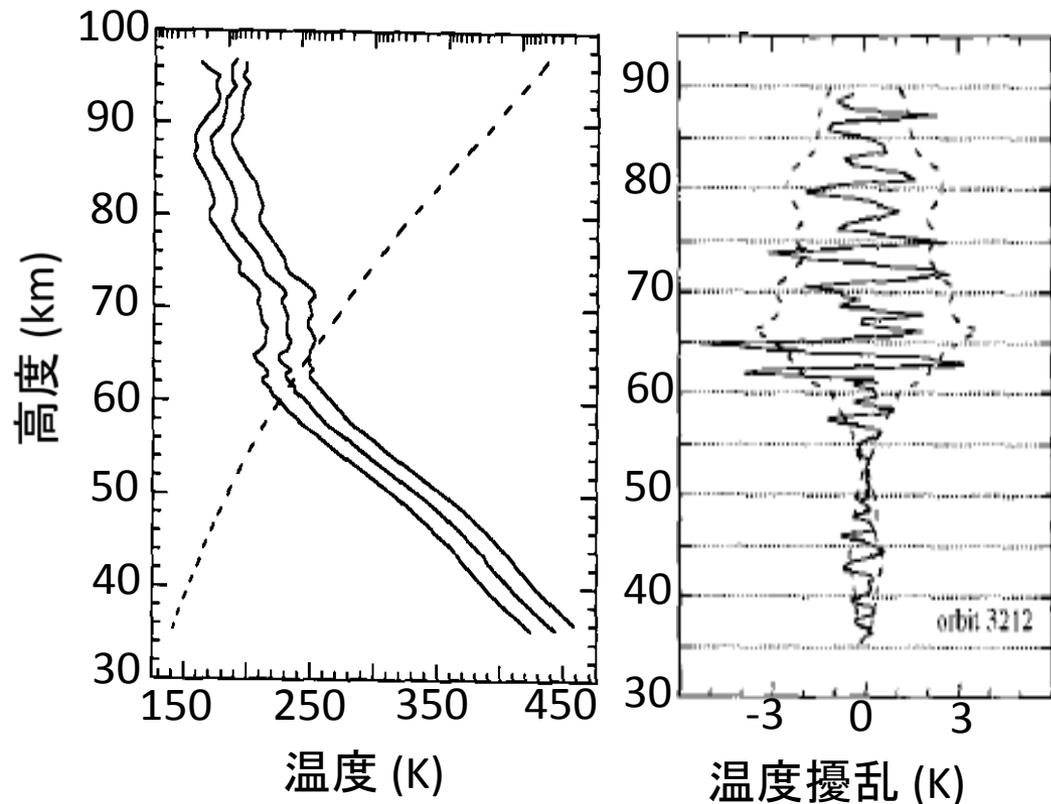


重力波の鉛直波数スペクトル

- ◎ 波のエネルギーが波長に対してどのように分配されているか分かる。
- ◎ 波の生成源や減衰過程の考察に役立つ。

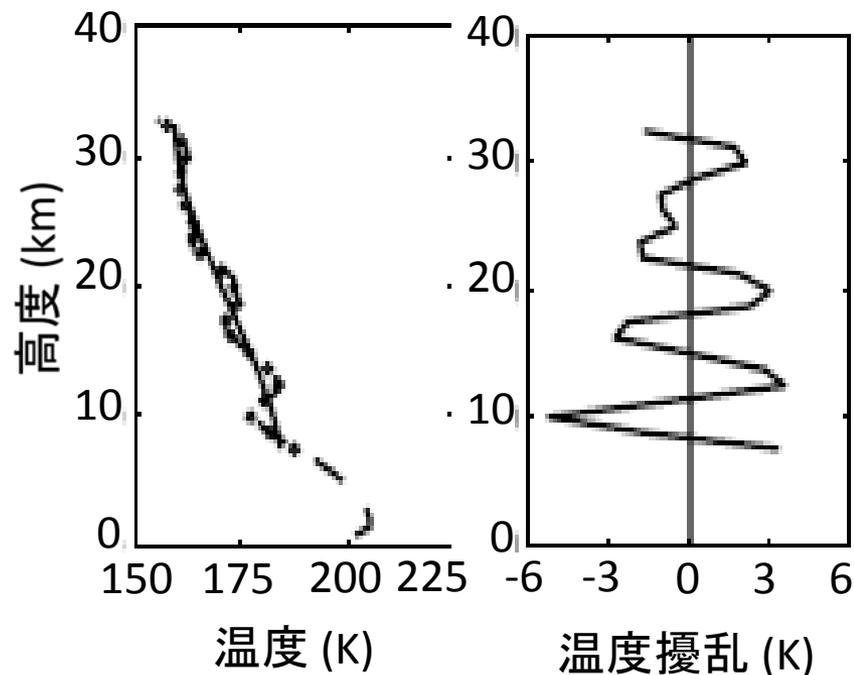
金星・火星大気における重力波の観測例

金星大気



Magellan or VEX 電波掩蔽観測で得られた温度分布から、鉛直伝搬する重力波を捉えた。(Hinson and Jenkins 1995 ; Tellmann et al. 2012)

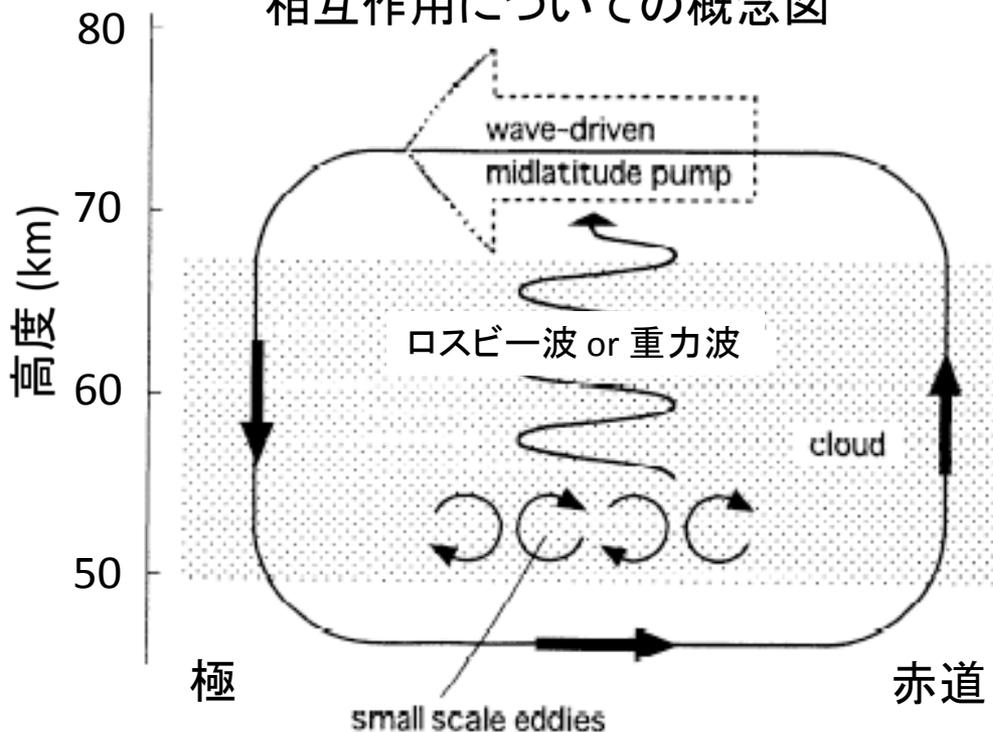
火星大気



MGS電波掩蔽観測で得られた温度分布から、鉛直伝搬する重力波を捉えた。(Creasey et al. 2006 ; Ando et al. 2012)

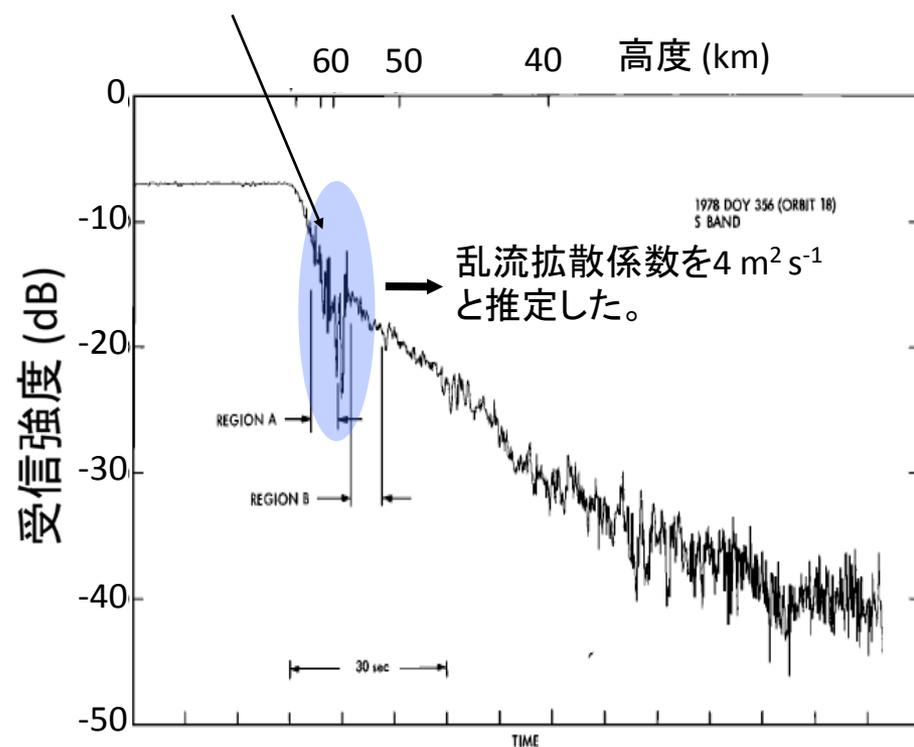
金星大気における重力波の背景場への影響

金星中間圏における背景場と波動の相互作用についての概念図



Imamura (1997)

乱流によるものと推察されている電波の受信強度のゆらぎ

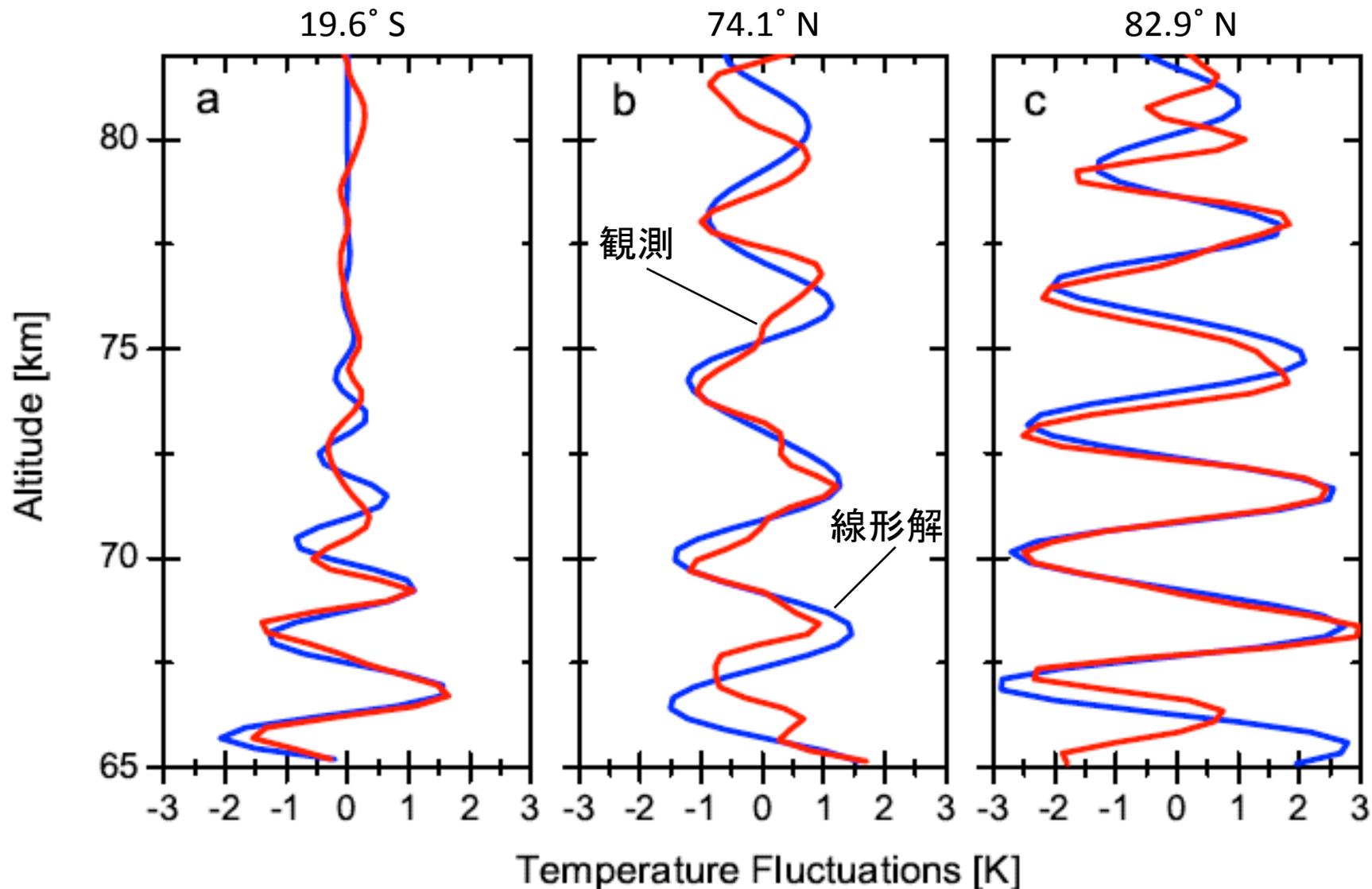


Woo et al. (1980)

重力波がどのような過程で減衰するのか、十分に理解されていない。また重力波と乱流の関連性について良く分からない。

金星重力波と放射減衰(Tellmann et al. 2012)

重力波の振幅の高度変化を放射減衰だけで説明できるように波の周期を適当に与えて、線形解と観測を比較している。(但し、着目した鉛直波長は4km未満。)



重力波の振幅の成長率

$$T' \propto e^{\beta z}, \quad \beta = \frac{1}{2H} - \frac{1}{2} \frac{2\pi}{N} \frac{\lambda_x}{\lambda_z^2} \frac{1}{\tau}$$

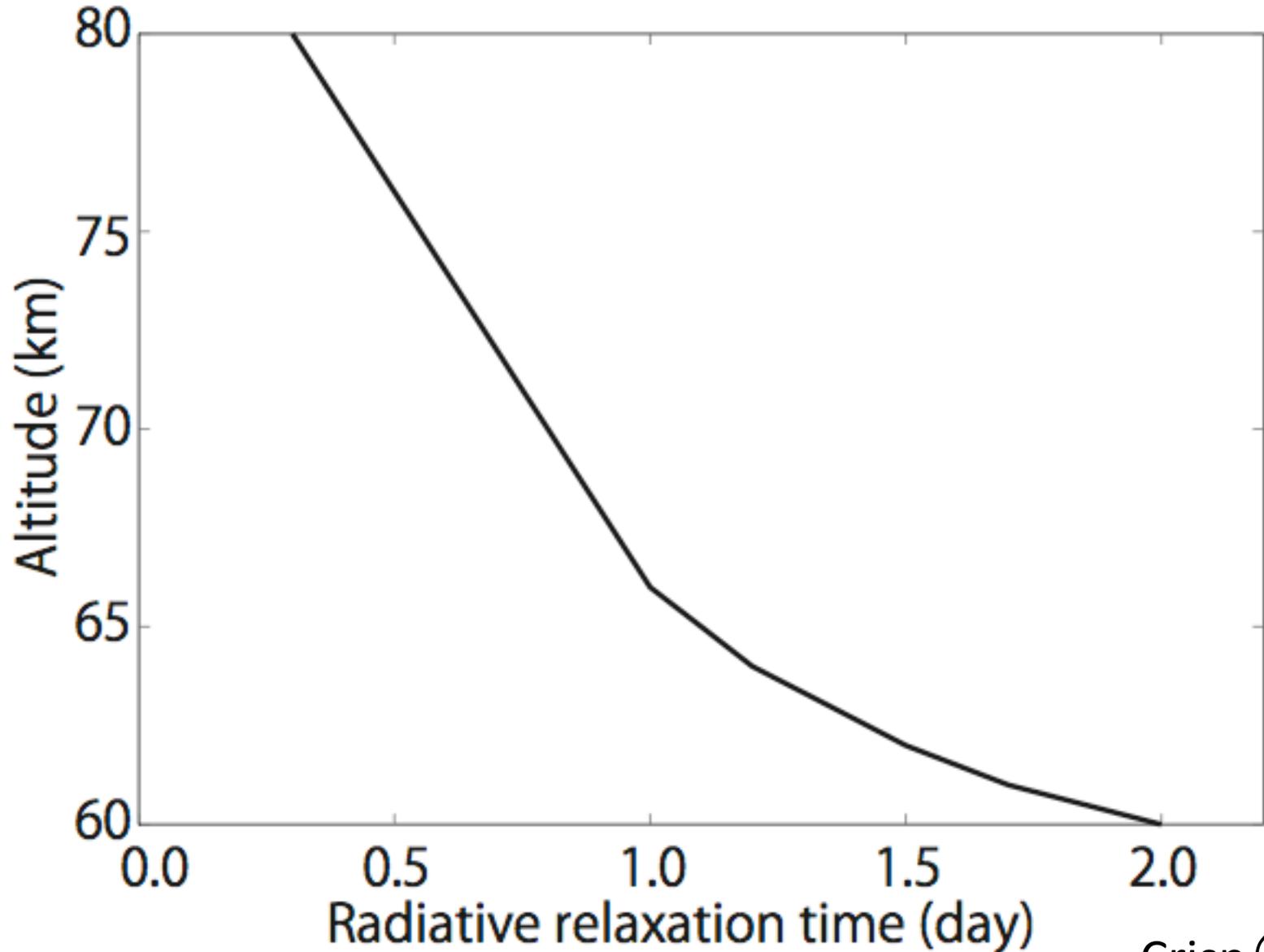
密度減少に伴う成長

放射減衰

H: スケールハイト, N: 浮力振動数(大気安定度)
 λ_z : 鉛直波長, λ_x : 水平波長, τ : 放射緩和時間

$\beta > 0 \Rightarrow$ 波の振幅は高度と共に増大する
 $\beta < 0 \Rightarrow$ // 減衰する

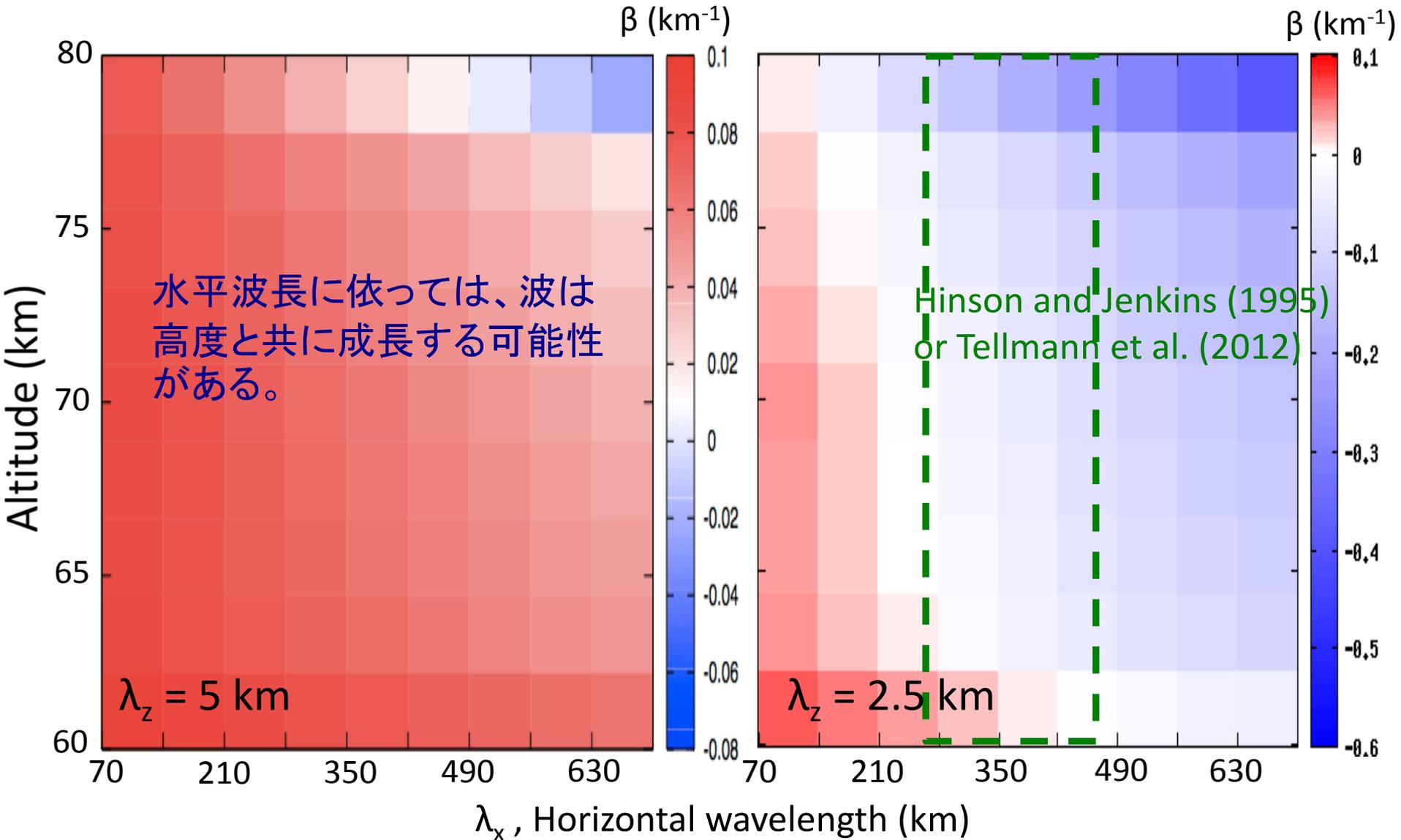
放射緩和時間 ($\lambda_z = 5 \text{ km}$)



Crisp (1989)

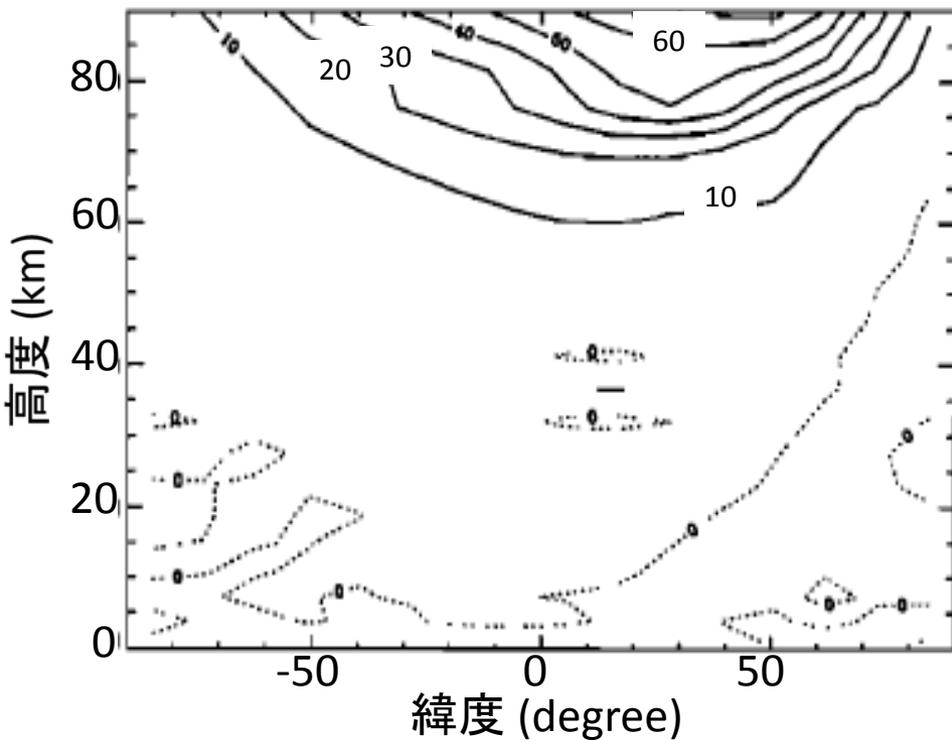
振幅の高度成長率 β の高度分布

$$T' \propto e^{\beta z}, \quad \beta = \frac{1}{2H} - \frac{1}{2} \frac{2\pi}{N} \frac{\lambda_x}{\lambda_z^2} \frac{1}{\tau} \quad (H = 5 \text{ km}, N = 0.02 \text{ rad s}^{-1})$$

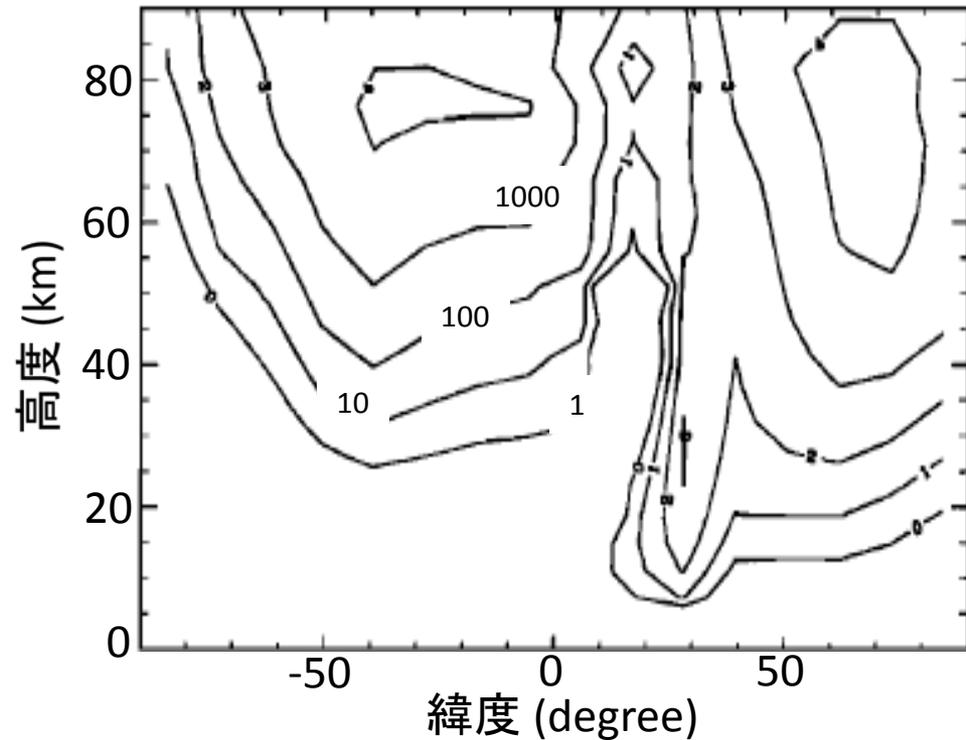


火星GCMを用いた重力波の背景場への影響について (Joshi et al. 1995)

波の減衰により生成される子午面流

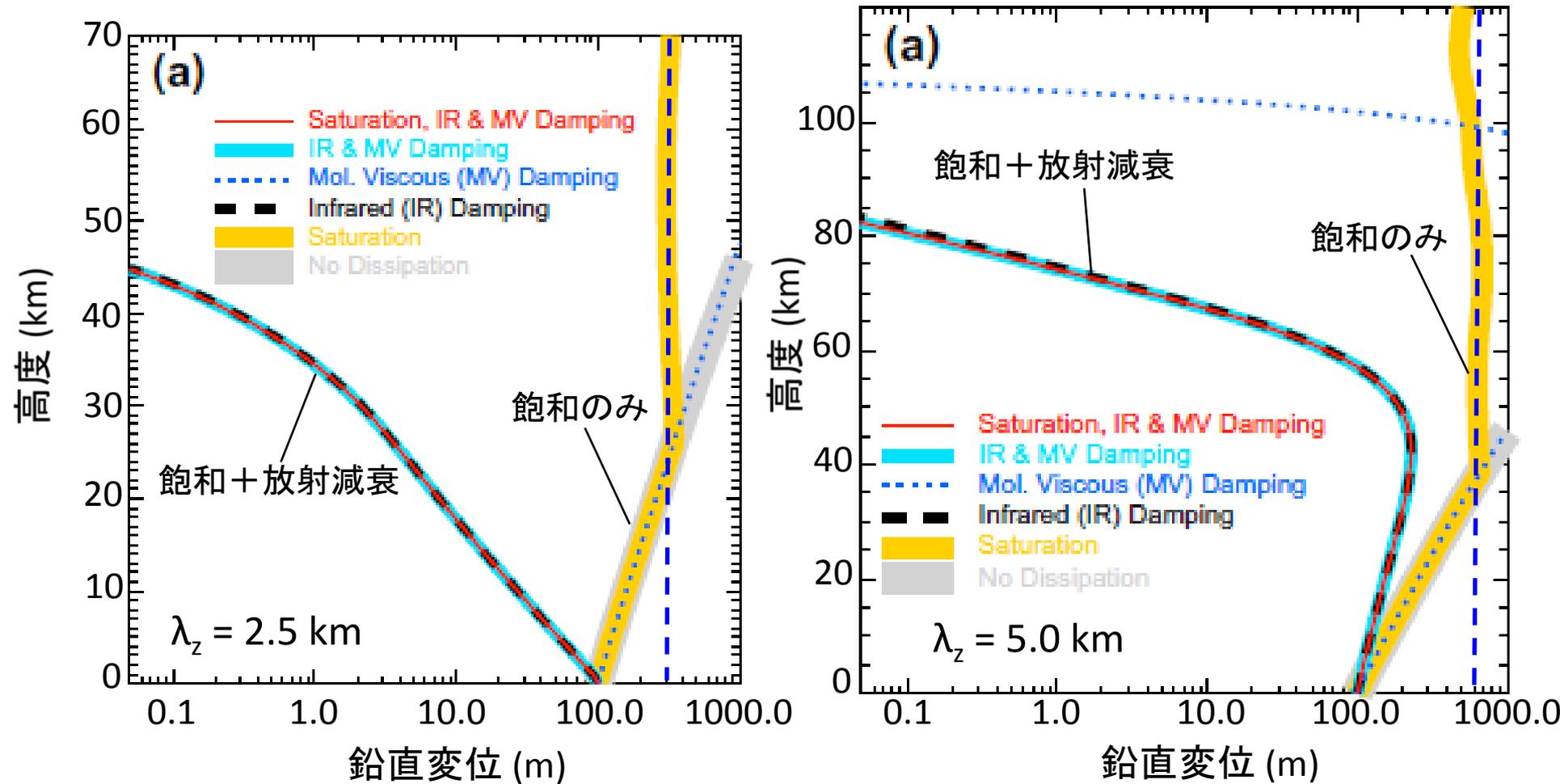


砕波に伴う乱流拡散係数



重力波の減衰には飽和のみが寄与すると仮定しており、放射減衰は無視している。また考えている重力波は地形性のものだけを考慮している。
⇒ 実際の火星大気では、飽和と放射減衰が同時に効く可能性がある。

火星大気における重力波の振幅の高度成長 (Eckermann et al. 2011)



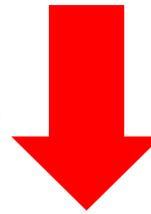
この結果によれば、放射減衰によって重力波の成長は妨げられる。
 ⇒ Eckermann et al. (2011) の結果は、ある固定した水平波長や初期振幅に対して得られたもので限定的な結果。

研究目的

地球とは異なる環境にある金星・火星大気での重力波の性質について理解を深める。

⇒ 大気循環、物質輸送、光化学などに関する研究の礎を築く。

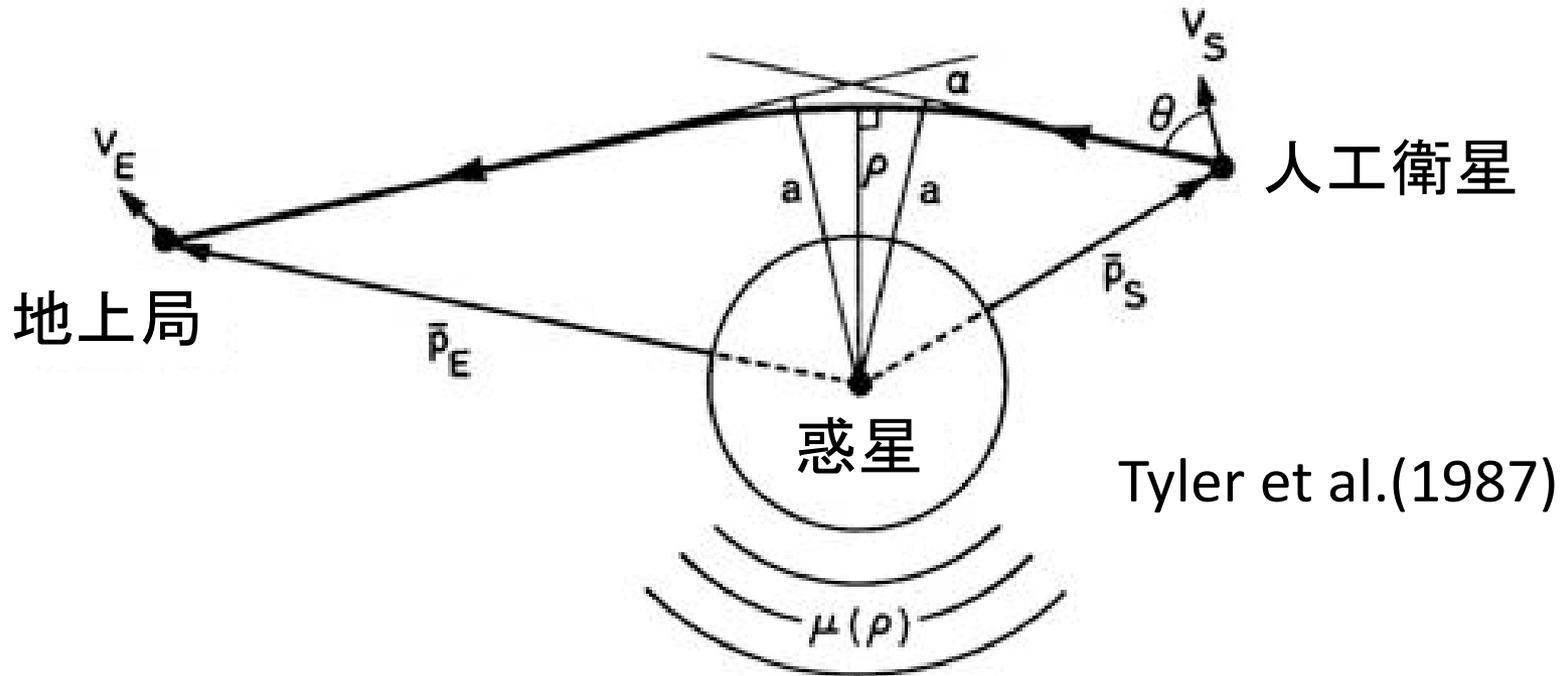
電波掩蔽法により鉛直温度分布を高精度・高分解能で取得できる。



遠隔観測にもかかわらず、様々な季節・場所にて温度を測定できる。

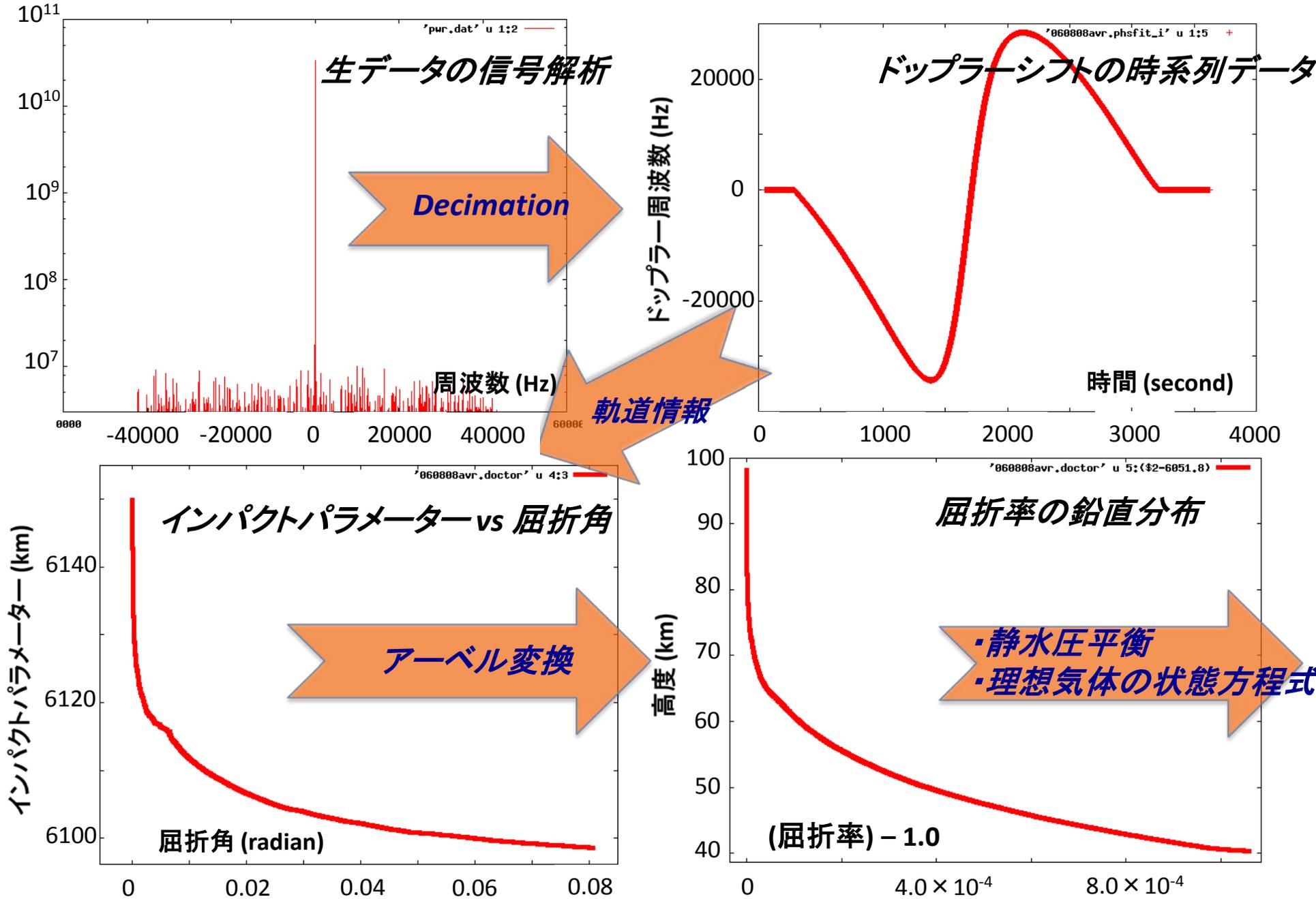
- ◎ 金星・火星大気における重力波のスペクトルを統計的に調べる。
⇒ 波長ごとのエネルギーの差異、スペクトルの緯度依存性や高度変化
- ◎ 地球気象で構築された飽和理論スペクトルを指標にして、金星・火星大気におけるスペクトルについて考察する。
⇒ 波の減衰機構の考察、乱流拡散係数の推定

電波掩蔽と温度分布

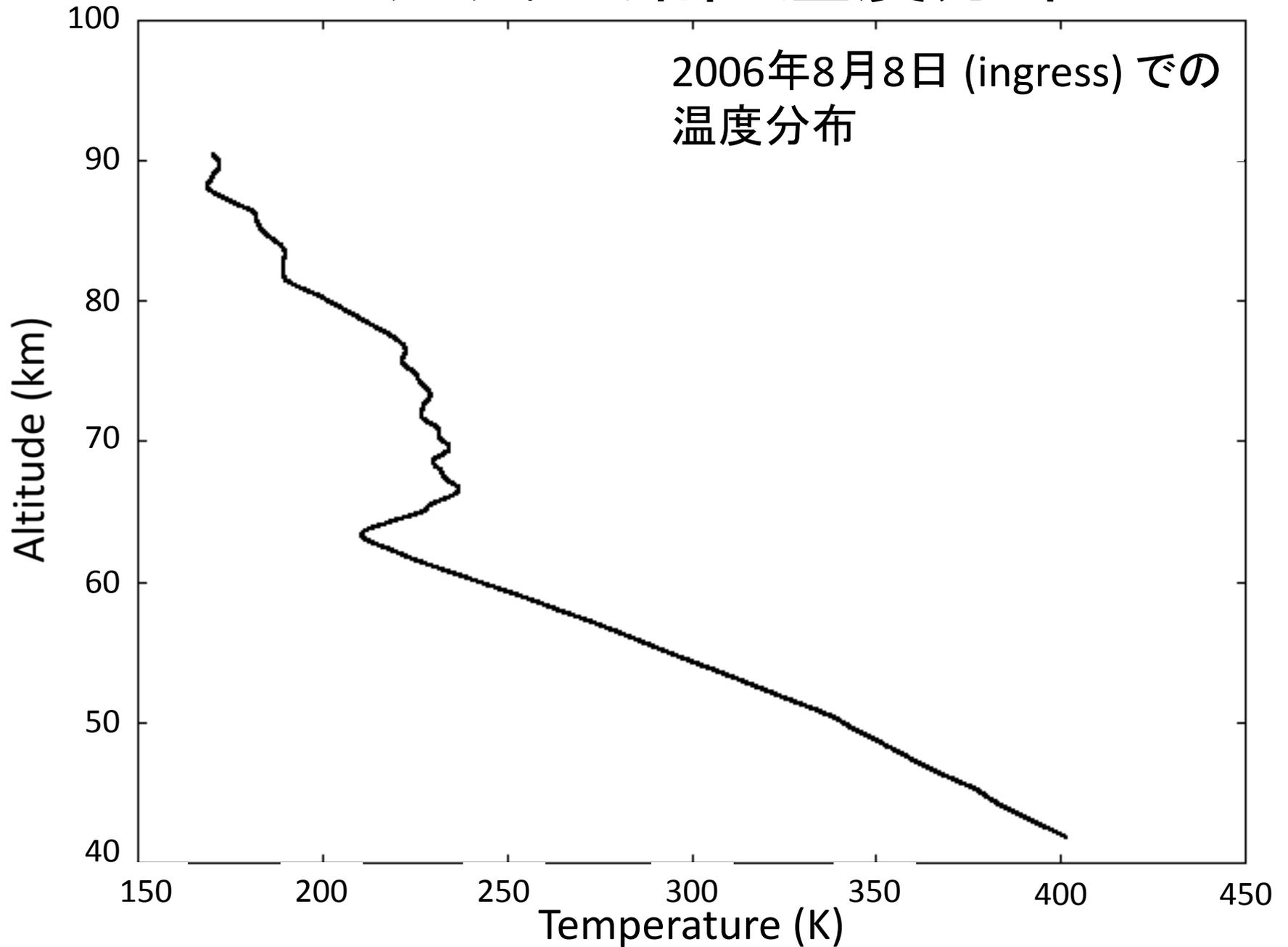


- ① ドップラーシフト, 衛星の速度 \Rightarrow 射出角 θ
- ② θ , 軌道情報 \Rightarrow 屈折角 α , インパクトパラメーター a
- ③ α , a , Abel変換 \Rightarrow 屈折率 $\mu(\rho)$, 大気密度 $N(\rho)$ (ρ : 高度)
- ④ $N(\rho)$, 静水圧平衡, 理想気体の状態方程式
 \Rightarrow 気圧 $p(\rho)$, 温度 $T(\rho)$

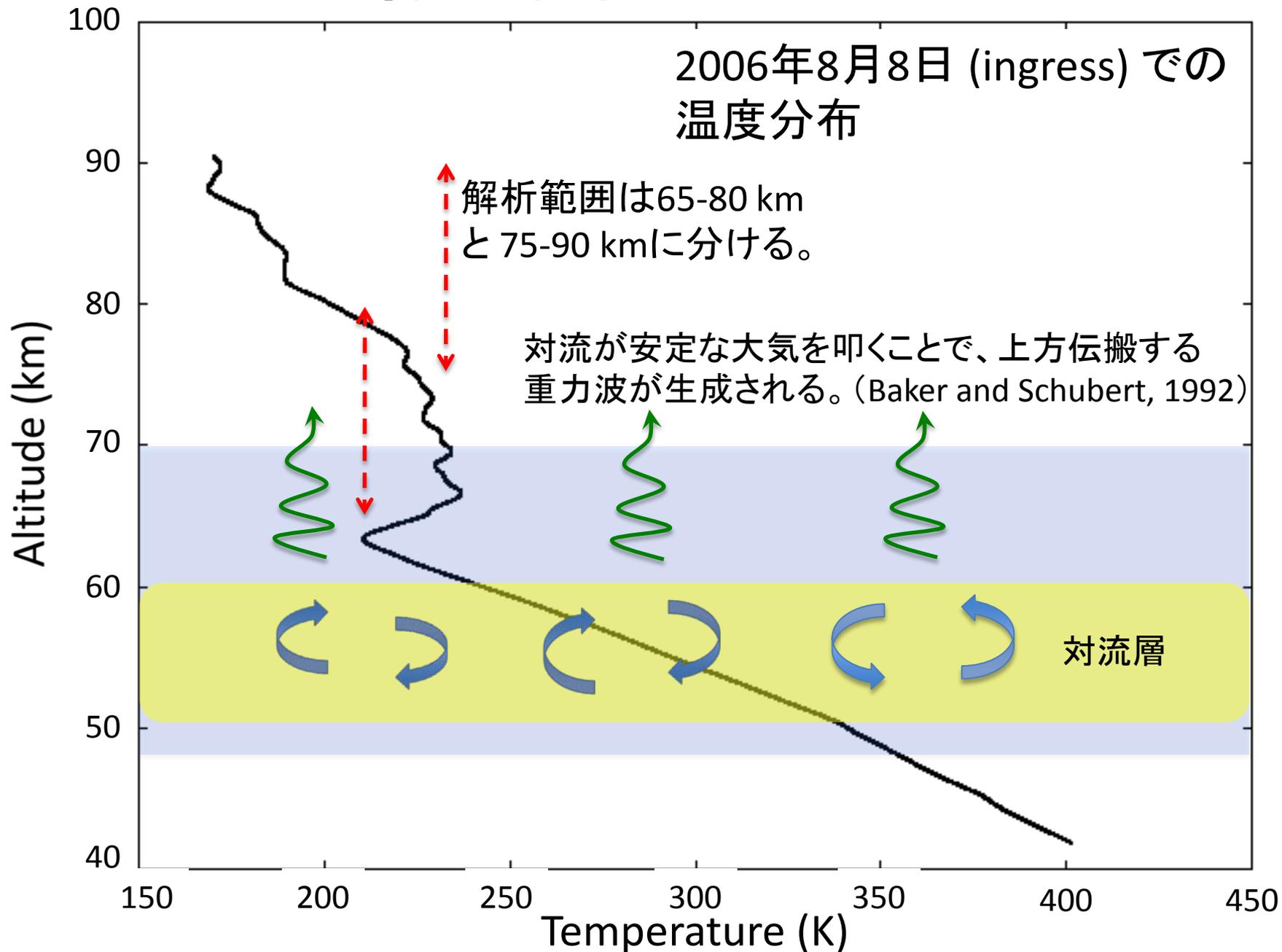
金星大気の温度分布の計算



金星大気の鉛直温度分布

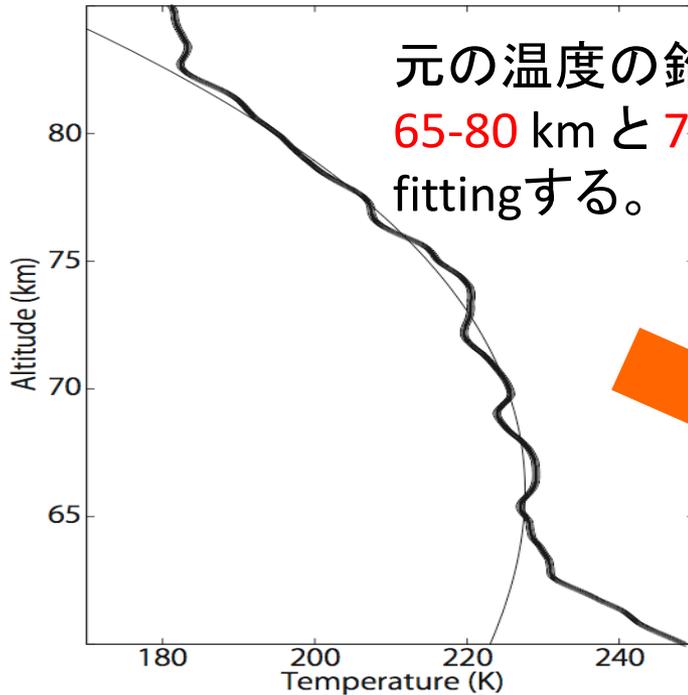


解析範囲について

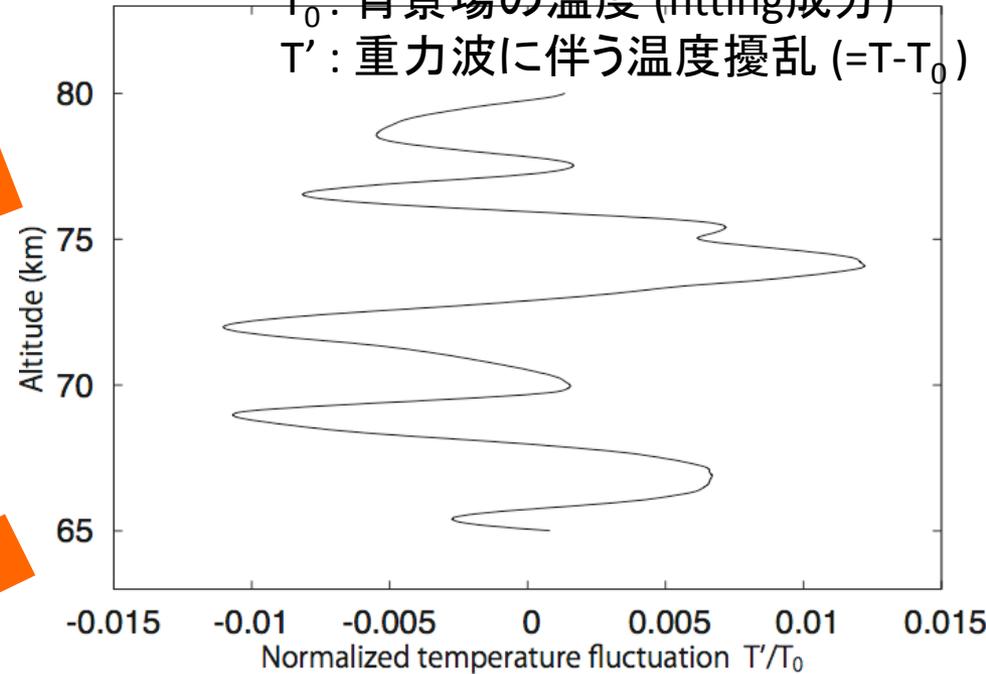


金星重力波の鉛直波数スペクトルの計算

元の温度の鉛直プロファイル(T)に対して、
65-80 km と 75-90 km の範囲で、3次関数を
fittingする。

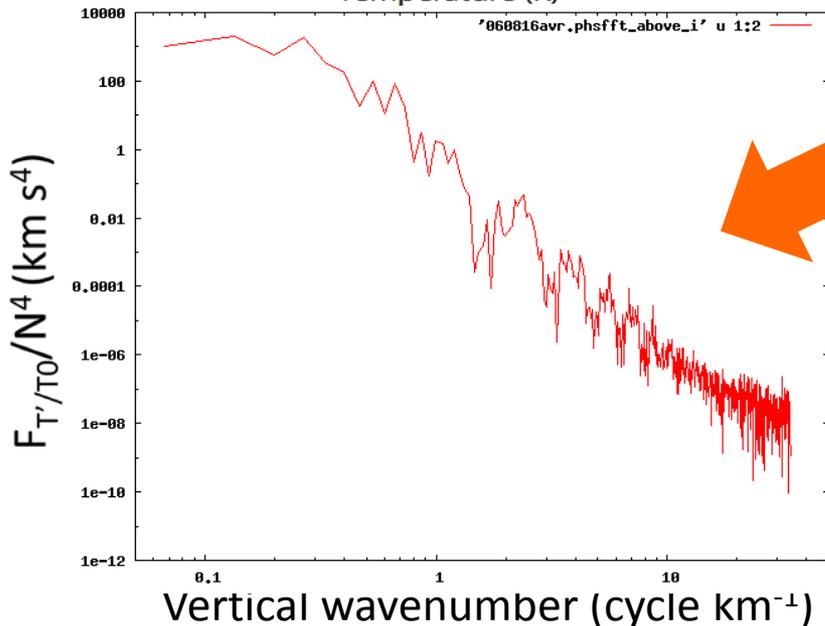


T_0 : 背景場の温度 (fitting成分)
 T' : 重力波に伴う温度擾乱 ($=T-T_0$)



fitting成分 (T_0) を元のプロファイルから差し引き、それを重力波に伴う温度擾乱 (T') と見なす。

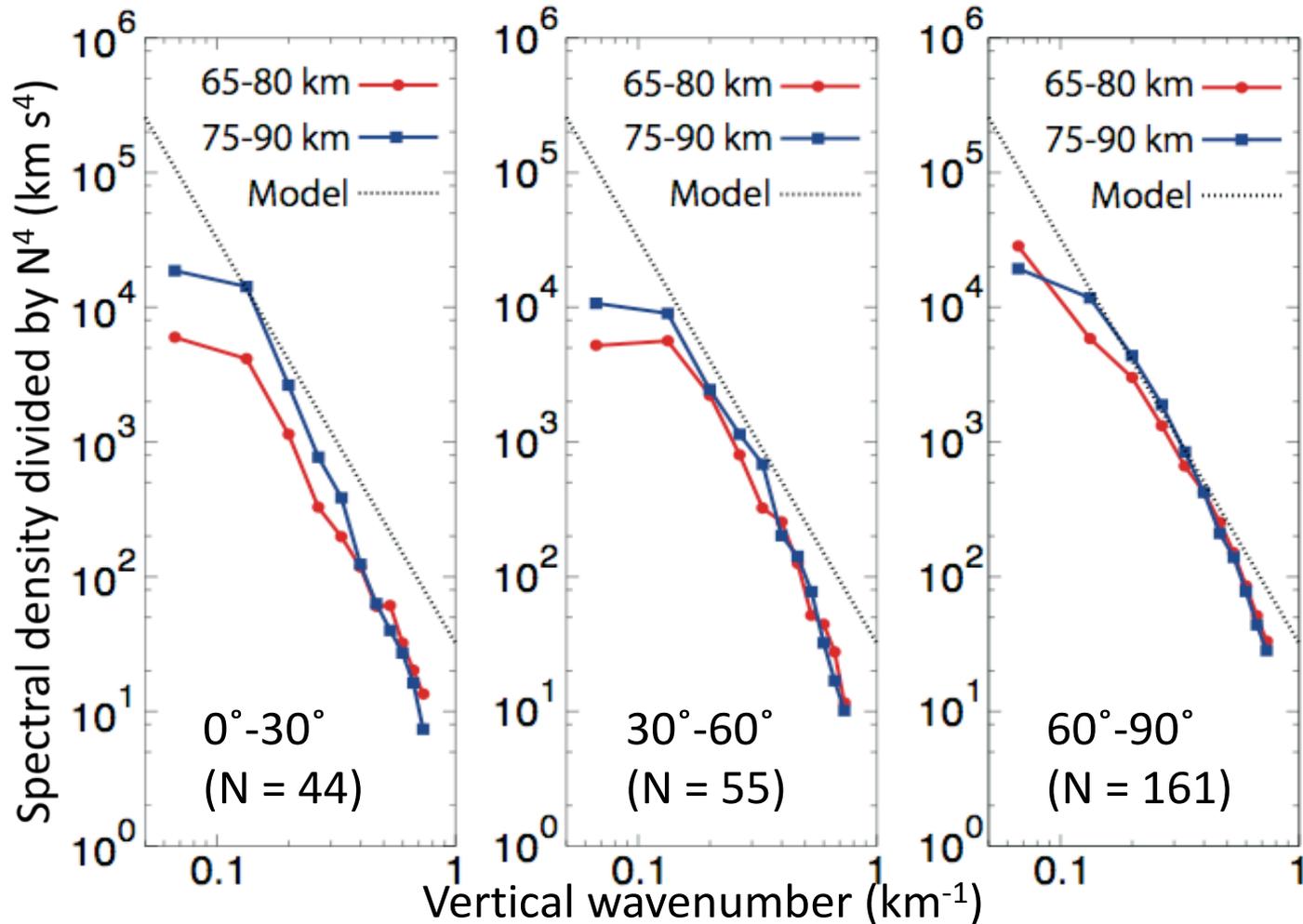
T'/T_0 の鉛直波数スペクトルを求め、それを3つの緯度帯 (0° - 30° , 30° - 60° , 60° - 90°) で分類する。



Venus Express電波掩蔽について

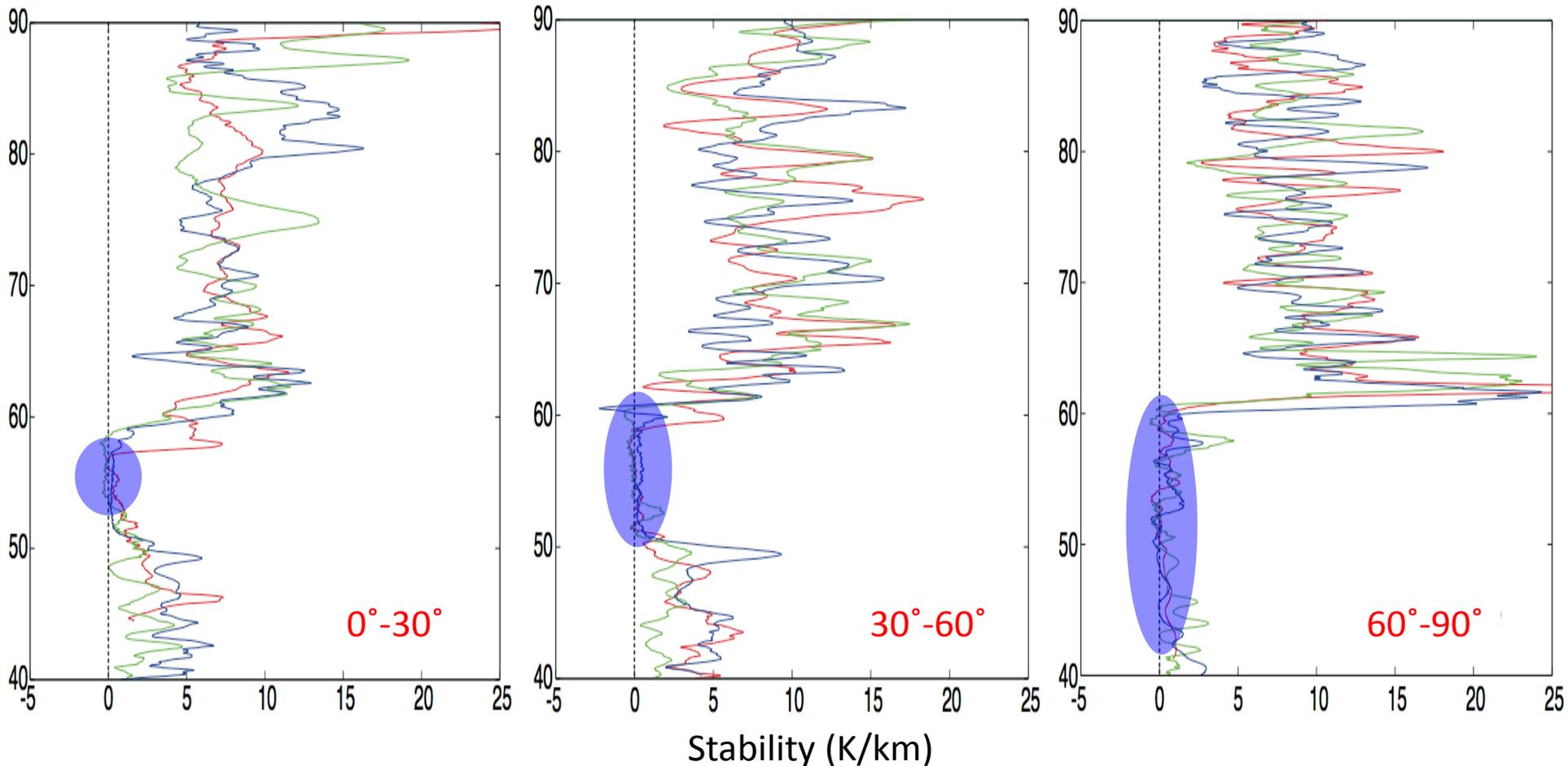
- 極軌道、周回の周期は1日程度。
 - ⇒ 高緯度での観測が多い。また解析して得られたデータ数は260個。
- 温度測定誤差・・・0.1 K
- 鉛直分解能・・・700 m
 - ⇒ ナイキストの定理から、観測できる波長は1.4 km以上。

金星大気における鉛直波数スペクトル



- ◎ 低波数側で平たく、高波数側で右肩下がり、という地球成層圏・中間圏で見られる様な形をしている。
- ◎ 高緯度ほどスペクトル密度は大きい。また鉛直波長が3-4 km未満の波は高度と共にあまり変化しないが、それより長い波は高度と共にスペクトル密度が増大している。
- ◎ 高い高度領域では飽和理論スペクトルに近く、特に高緯度ではそれと同程度である。

緯度による対流層の厚さの違い



緯度が高いほど対流層が厚くなる。

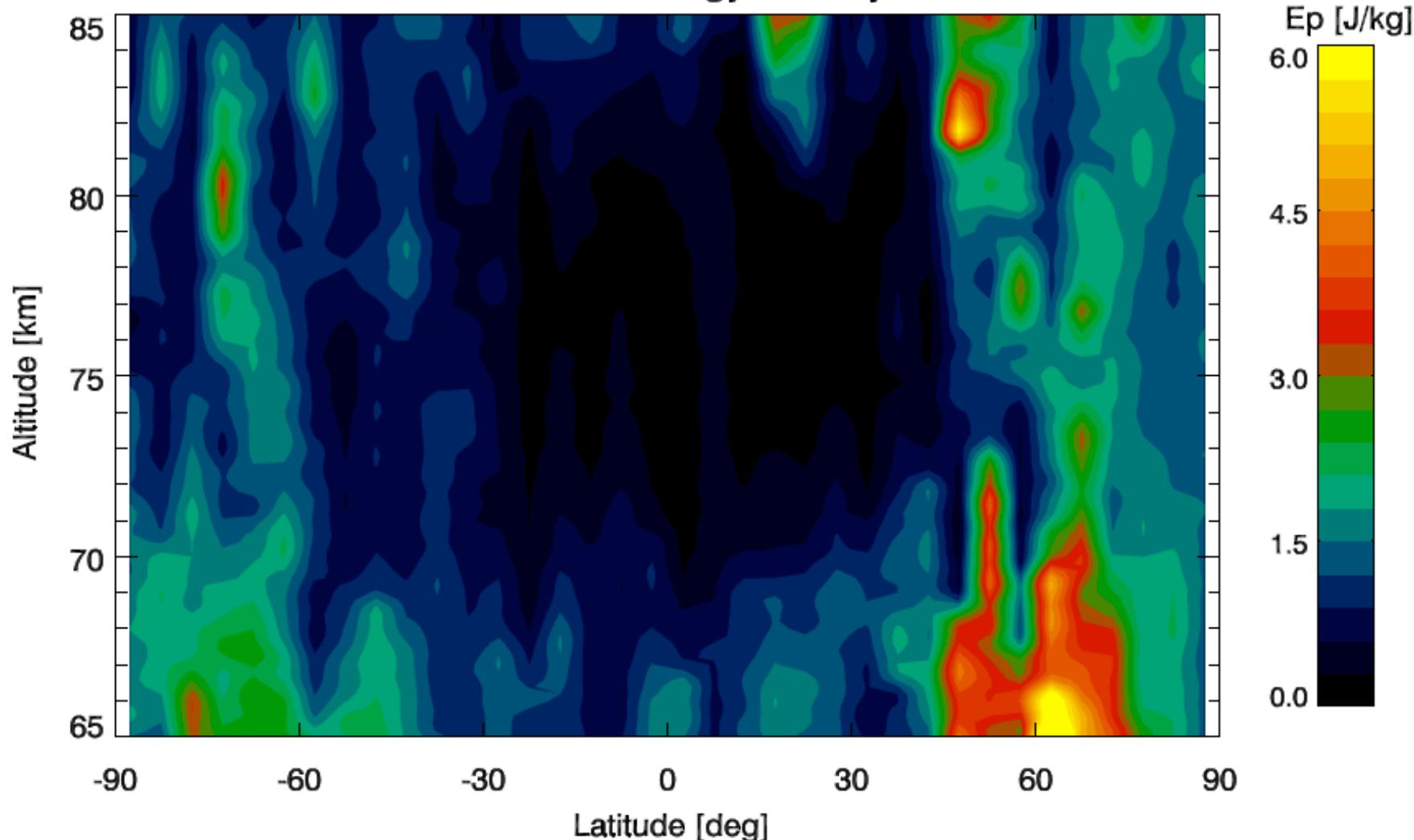
・・・緯度帯によってスペクトル密度に差が出ることの要因？

重力波のポテンシャルエネルギーの分布

(Tellmann et al. 2012)

Potential Energy Density

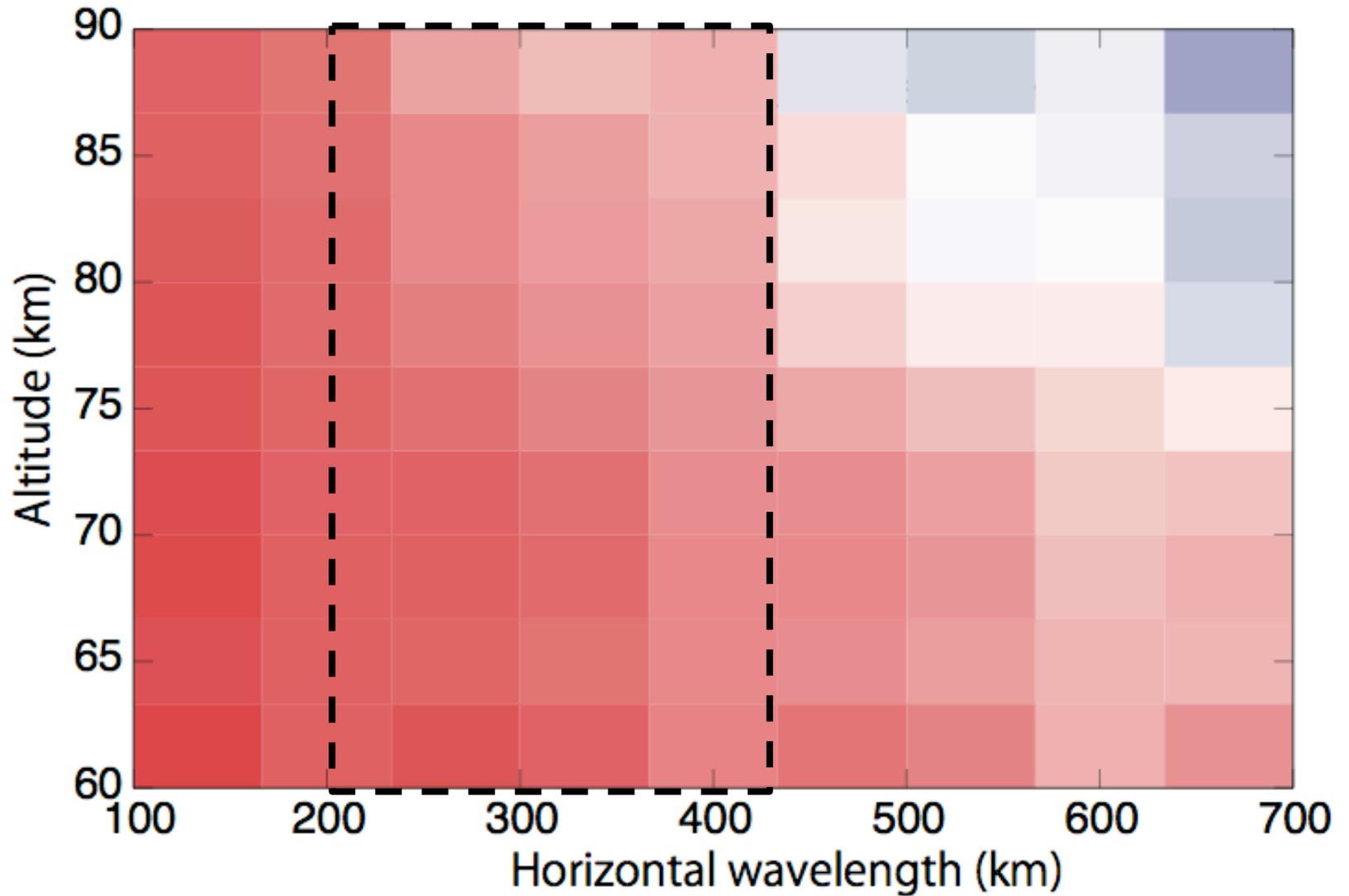
$$E_p = \frac{1}{2} \left(\frac{g}{N} \right)^2 \overline{\left(\frac{T'}{\bar{T}} \right)^2}$$



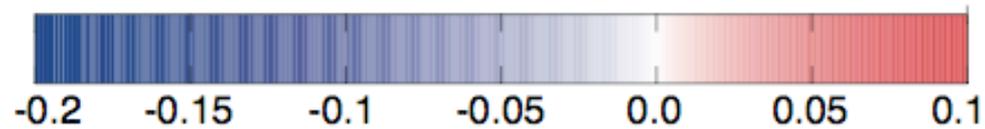
低緯度では小さく、高緯度では大きい。

⇒ こちらの結果と定性的には整合的。

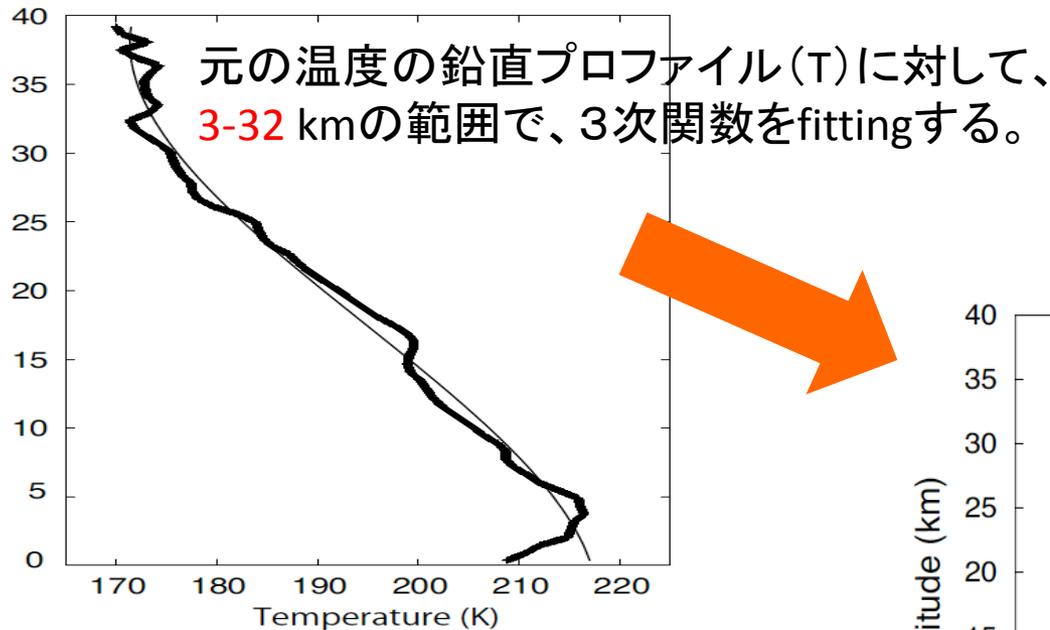
水平波長の見積もり



高度成長率 β

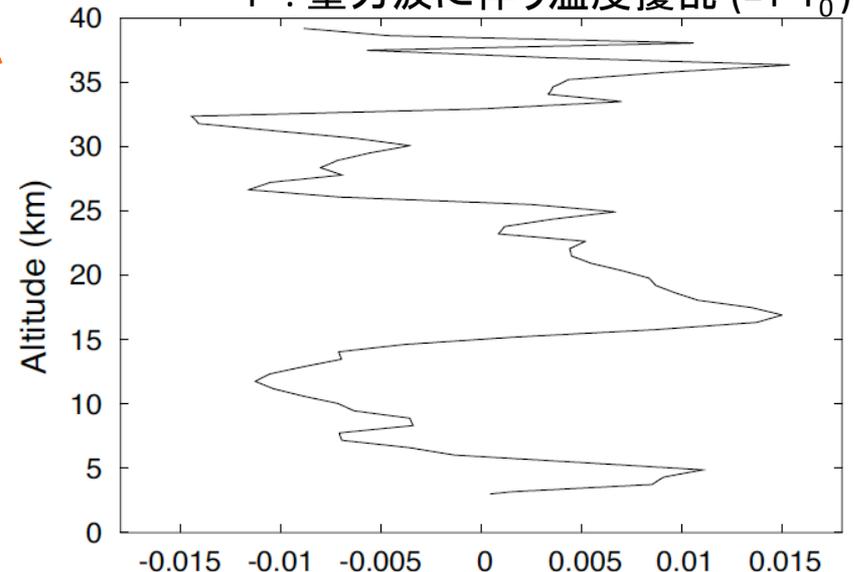


火星重力波の鉛直波数スペクトルの計算



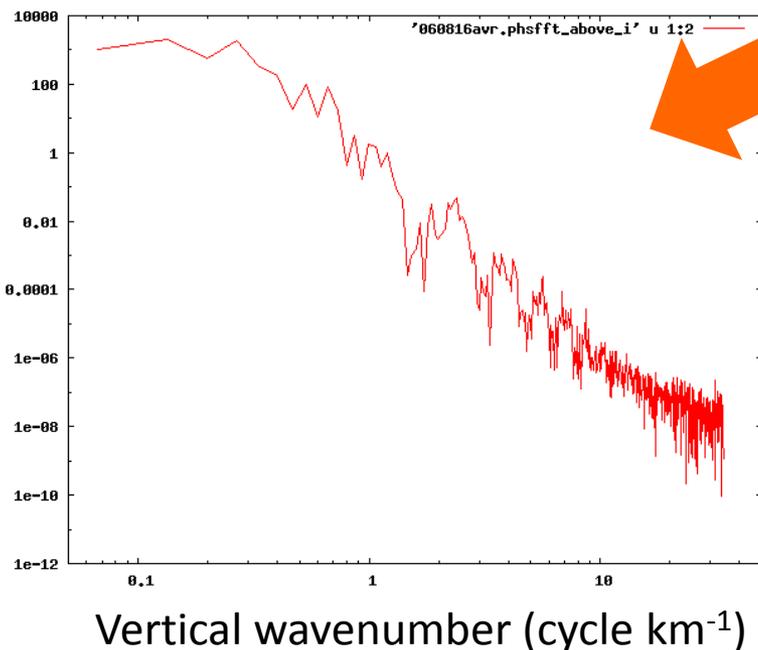
MGS電波掩蔽で得られた温度分布の公開データを使用。

T_0 : 背景場の温度 (fitting成分)
 T' : 重力波に伴う温度擾乱 ($=T-T_0$)



Normalized temperature perturbation T'/T_0
fitting成分(T_0)を元のプロファイルから差し引き、それを重力波に伴う温度擾乱(T')と見なす。

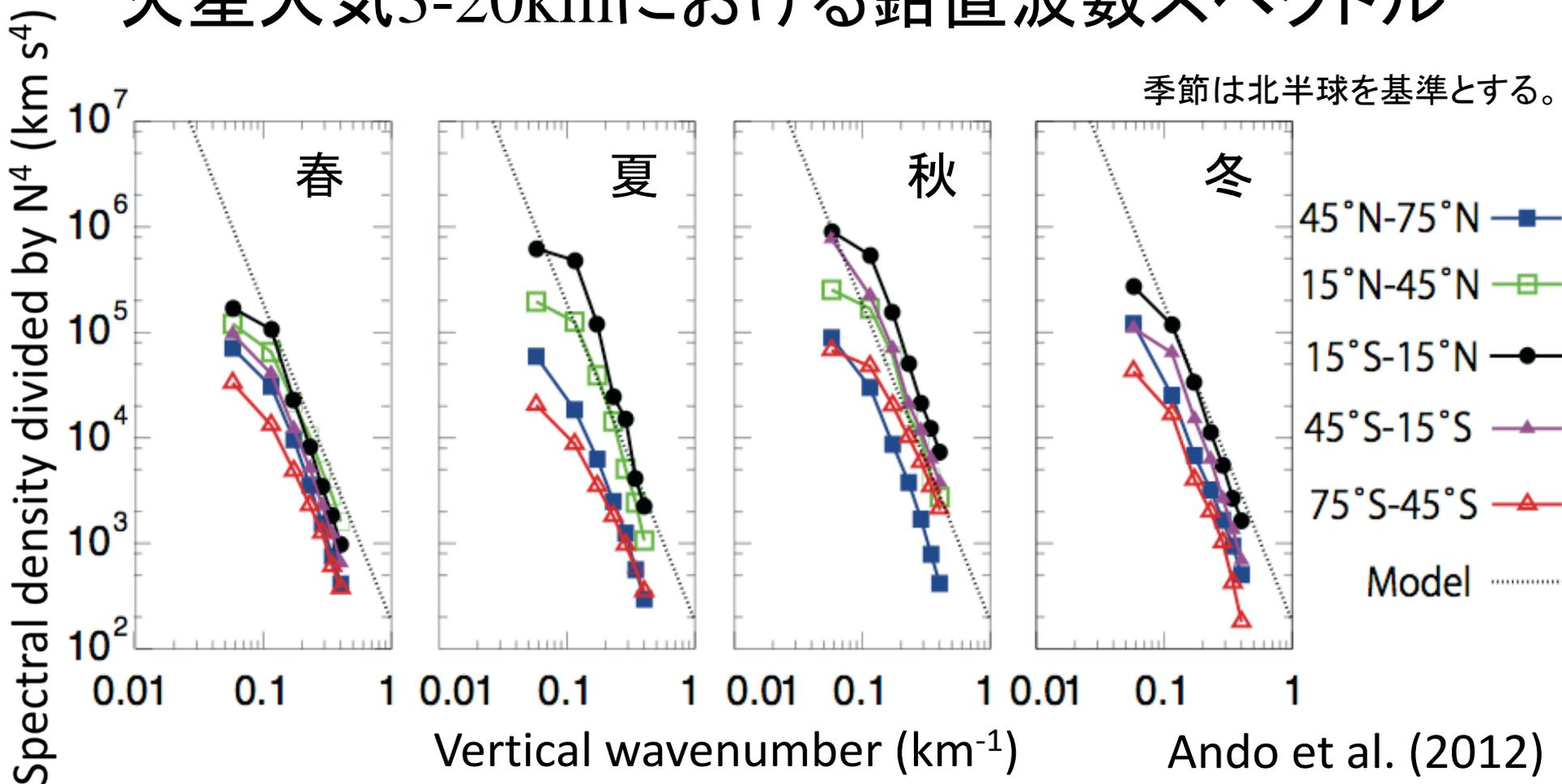
T'/T_0 の鉛直波数スペクトルを求め、それを季節ごとに5つの緯度帯(75°S-45°S, 45°S-15°S, 15°S-15°N, 15°N-45°N, 45°N-75°N)で分類する。



Mars Global Surveyor電波掩蔽について

- 極軌道かつ太陽同期軌道。
 - ⇒ 高緯度での観測が多いが、軌道投入初期は赤道域の観測も行っている。また用いたデータ数は21174個。
- 温度測定誤差 …… 0.1 K
- 鉛直分解能 …… 1.25 km
 - ⇒ ナイキストの定理から、観測できる波長は2.5 km以上。

火星大気3-20kmにおける鉛直波数スペクトル

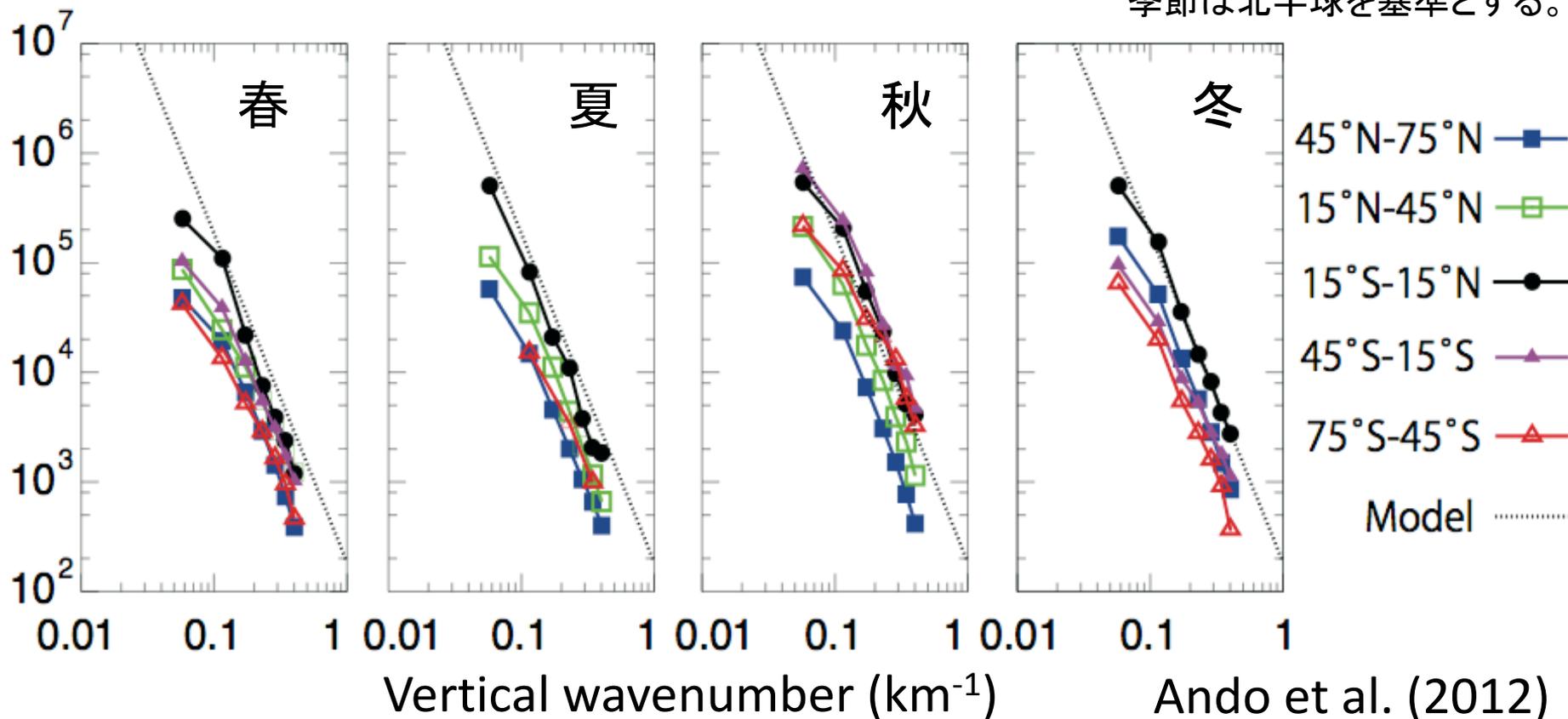


- ◎ 低波数側で平たく高波数側で右肩下がり、という地球成層圏・中間圏で見られる様な形をしている。
- ◎ どの季節でも基本的に赤道域でスペクトル密度は最大となる。

火星大気15-32kmにおける鉛直波数スペクトル

Spectral density divided by N^4 (km s^4)

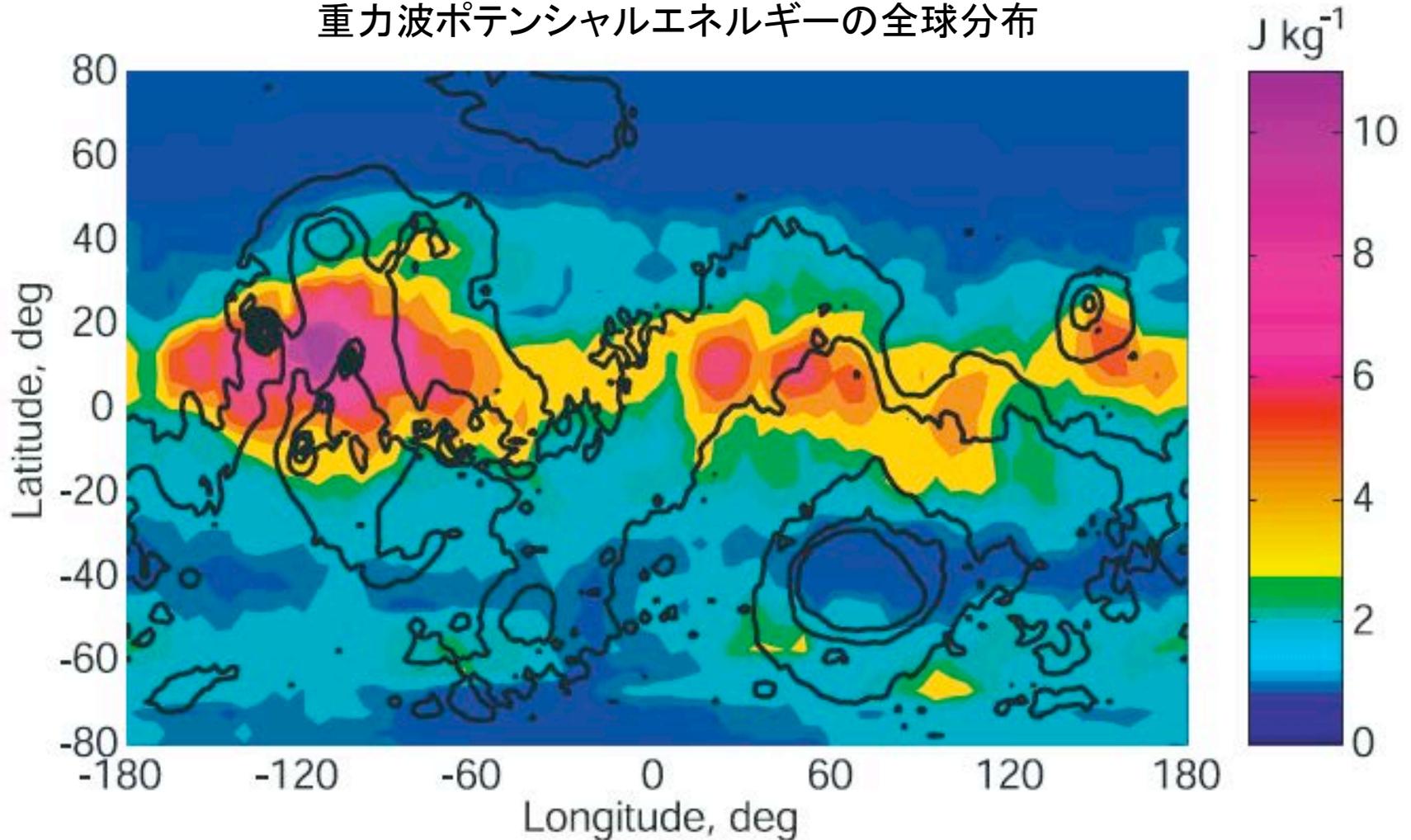
季節は北半球を基準とする。



- ◎ 低波数側で平たく高波数側で右肩下がり、という地球成層圏・中間圏で見られる様な形をしている。
- ◎ どの季節でも基本的に赤道域でスペクトル密度は最大となる。またスペクトル密度は高度方向にあまり変化しない。

重力波のポテンシャルエネルギーの分布 (Creasey et al. 2006)

重力波ポテンシャルエネルギーの全球分布



ポテンシャルエネルギーは、赤道域で大きく高緯度では小さい。
⇒ 本研究の解析結果と定性的には整合的。

乱流拡散係数の見積もり

対流不安定が生じているとき、波の飽和に伴い乱流が生じている。放射減衰が効くような大気における乱流拡散係数は、以下のように記述できる；

$$D = \frac{k}{2} \frac{(U - c)^2}{N^3} \left(\frac{(U - c)^2}{H} - \frac{\alpha N}{k} \right) \quad \text{Holton and Zhu (1984)}$$

D : 乱流拡散係数、 k : 水平波数、 N : 大気不安定度
 c : 位相速度、 α : 放射緩和時間、 H : スケール高さ

$$|U - c| = N/k_z = N\lambda_z/2\pi$$

金星 (65-80 km) : $k = 2\pi/400 \text{ km}^{-1}$, $N = 0.02 \text{ rad s}^{-1}$, $U - c \sim 16 \text{ m s}^{-1}$ ($\lambda_z = 5 \text{ km}$),
 $\alpha = 2.0 \text{ day}^{-1}$, $H = 5 \text{ km}$

金星 (75-90 km) : $k = 2\pi/400 \text{ km}^{-1}$, $N = 0.02 \text{ rad s}^{-1}$, $U - c \sim 25 \text{ m s}^{-1}$ ($\lambda_z = 8 \text{ km}$),
 $\alpha = 4.0 \text{ day}^{-1}$, $H = 5 \text{ km}$

火星 : $k = 2\pi/400 \text{ km}^{-1}$, $N = 0.01 \text{ rad s}^{-1}$, $U - c \sim 13 \text{ m s}^{-1}$ ($\lambda_z = 8 \text{ km}$),
 $\alpha = 1.0 \text{ day}^{-1}$, $H = 10 \text{ km}$

乱流拡散係数の見積もり

	金星高緯度 (65-80 km)	金星高緯度 (75-90 km)	火星赤道域 (15-32 km)
飽和+放射減衰	5	45	11
飽和のみ	12	82	20

(単位 : $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)

- (cf)
- 金星 {
- Woo and Ishimaru (1981) ... $4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
(60 km ; 電波強度)
 - Prinn (1974) , Zhang et al. (2012) ... $1-10^2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
(60-100 km ; 鉛直1次元光化学モデル)
- 火星 {
- Blamont and Chassefiere (1993) ... $10^1-10^4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
(40 km ; 鉛直1次元光化学モデル)
 - Joshi et al. (1995) ... $10^1-10^2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
(20-40 km ; 火星GCM)

物質輸送の時間スケール

τ_D : 乱流拡散による鉛直方向の輸送の時間スケール ($= H^2/D$)

τ_C : 子午面循環による輸送の時間スケール

(金星)

$\tau_D \sim 60$ days , $\tau_C \sim 90$ days (Imamura, 1997)

(火星)

$\tau_D \sim 100$ days , $\tau_C \sim 38$ days (Santee and Crisp, 1995)

(地球成層圏)

$\tau_D \sim 1.5$ years , $\tau_C \sim 4$ years (Holton et al, 1995)

よって物質の輸送には、金星でも火星でも子午面循環と乱流拡散は同程度に寄与する。また地球に比べて、輸送の時間スケールはとても短い。

まとめ

- 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求めた。
 - ◎ 金星でも火星でも、地球成層圏・中間圏で見られる様なスペクトルが得られた。
 - ◎ 金星では高緯度ほどスペクトル密度が大きく、火星では赤道域で基本的にどの季節でもスペクトル密度が最大となる。また、それらの上限は、飽和理論スペクトルにかなり近い。
- 地球気象で構築された飽和理論スペクトルに立脚して考えると、金星・火星大気でも放射減衰だけでなく飽和も波の減衰に寄与する可能性がある。また乱流と重力波の因果関係を考慮しながら、乱流拡散係数を観測的に推定した。