

簡易金星版 AFES における 運動エネルギースペクトル解析

櫻村 博基 (神戸大)・杉本 憲彦 (慶應大)・高木 征弘 (京産大)・松田 佳久 (学芸大)
大淵 済 (JAMSTEC)・榎本 剛 (京大防災研)・中島 健介 (九州大)・高橋 芳幸・林 祥介 (神戸大)

謝辞：北村祐二博士、石岡圭一博士、岩山隆寛博士に多くの助言を頂きました。本研究は地球シミュレータ
利用課題『AFESを用いた地球型惑星の大気大循環シミュレーション』及び『AFESを用いた火星・金星大気
の高解像度大循環シミュレーション』のもとで実施しました。

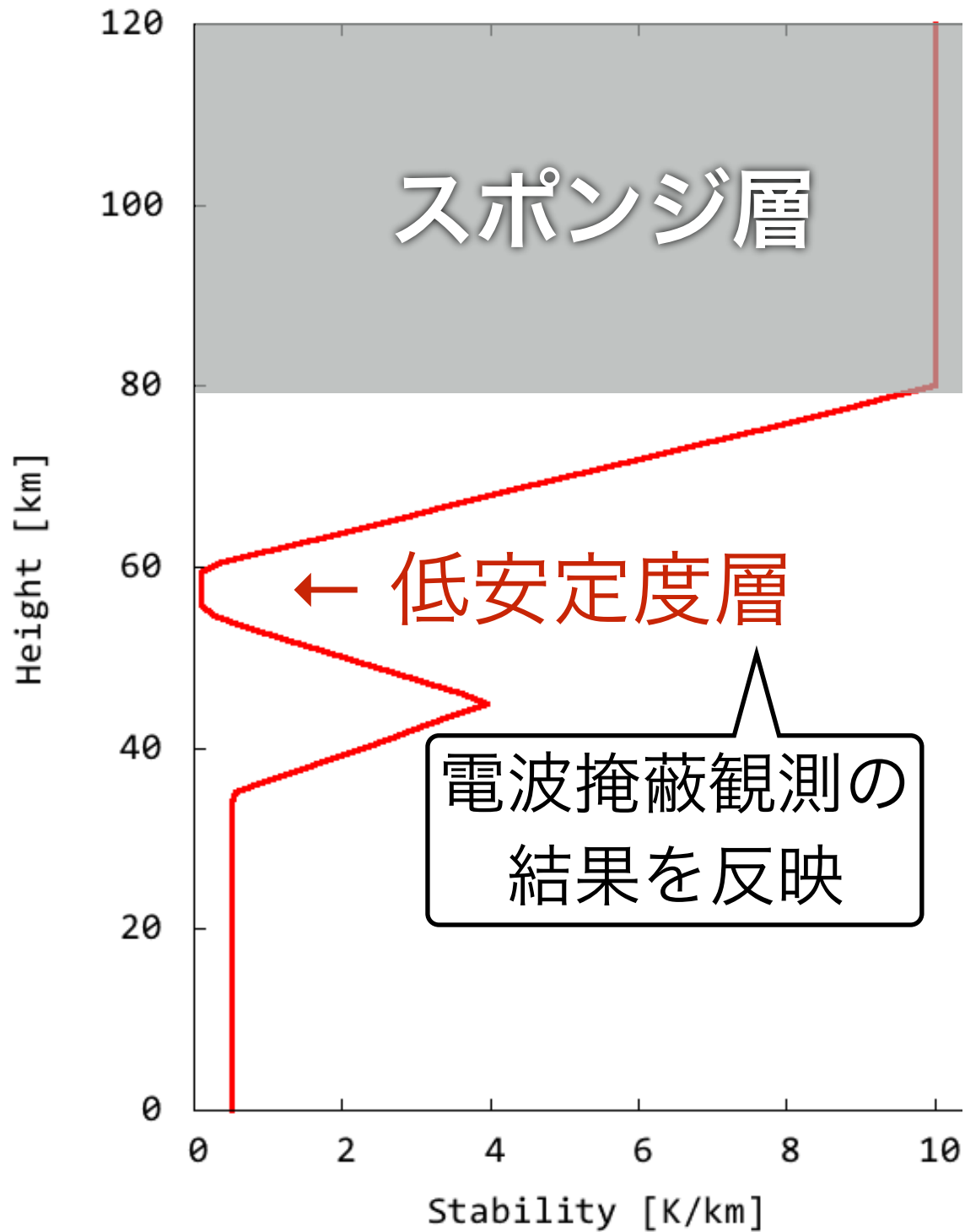
はじめに

- 金星大気の循環を理解するためには、大気大循環モデル（AGCM）による数値シミュレーションも重要である。
- 我々は、地球シミュレータに最適化された AGCM である AFES (Ohfuchi et al. 2004; Enomoto et al. 2008) の簡易金星版を開発し、従来よりも高解像度の数値計算を実施してきた。
 - 極渦の解析 (Ando et al. 2016; 次の発表)
 - 惑星規模波動の解析 (Sugimoto et al. 2013, 2014; さらに次の発表)
 - 運動エネルギースペクトル解析 (本発表)
 - エネルギースペクトルは、惑星スケールからモデルが解像可能な最小スケールまでの運動エネルギー分布を記述する方法。
 - 地球大気のエネルギースペクトルは航空機観測 (Nastron & Gage 1985) によって求められ、その分布は AGCM で再現されている (Takahashi et al. 2006 など) 。
 - 金星大気のエネルギースペクトルを求めることは比較惑星学的にも重要。

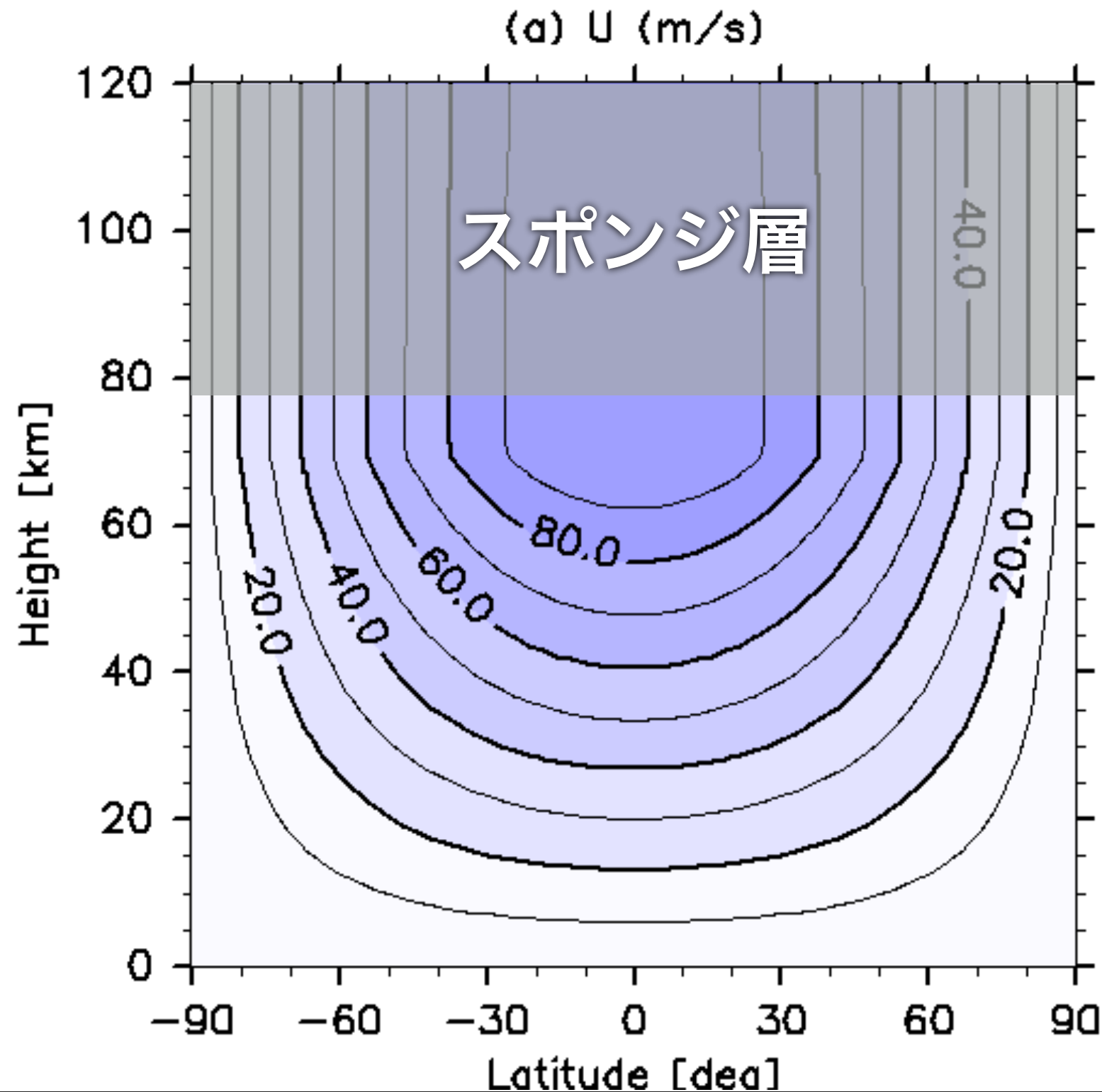
簡易金星版 AFES 計算設定

- 空間解像度：
 - 切断波数 T159 ($\sim 0.75^\circ \times 0.75^\circ$; 480×240 グリッド)
 - 鉛直層数 L120 ($\Delta z \sim 1\text{km}$; シグマ座標)
- 放射過程は簡易：
 - 水平一様なニュートン冷却 と日変化含む太陽加熱 (0–80 km; 60–70kmで強い)
 - **基準温度場に 低安定度層 (55–60km) を配置**
- 渦粘性 (サブグリッドスケールの乱流の効果)
 - 4 次の水平超粘性 (∇^4) — 切断波数に対する緩和時間 0.01 地球日
 - 鉛直渦粘性 — 係数 $0.15 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$
- 自転は地球と同じ向き
- 雲・湿潤過程なし・乾燥対流調節なし
- スポンジ層 ($\geq 80\text{km}$)
- 初期値：基準温度場と温度風平衡にあるスーパーローテーション流
- 積分期間：4 地球年 (解析期間は最後の 1 地球年分：準定常状態)

ニュートン冷却の 基準温度場の安定度 (Sugimoto et al. 2013)

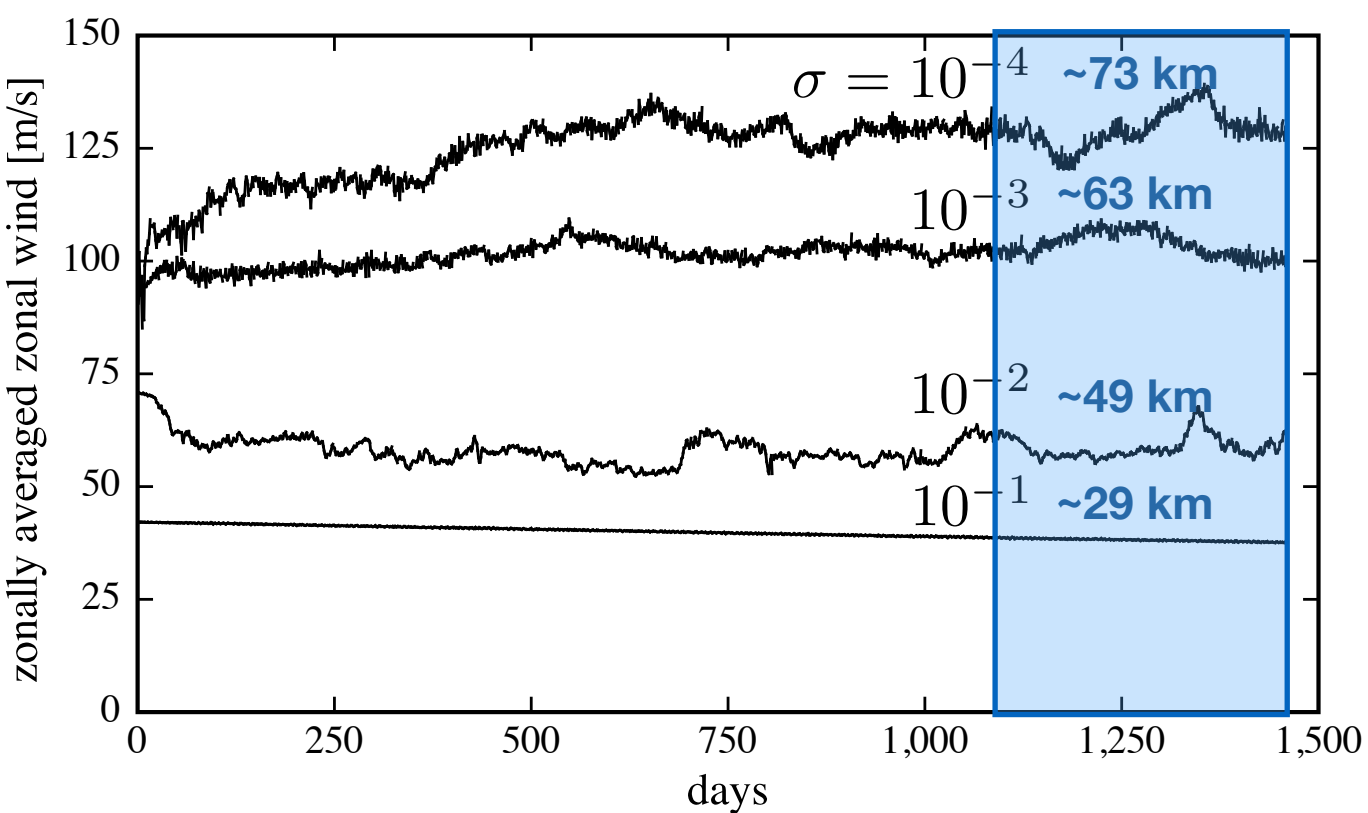


初期スーパーローテーション流

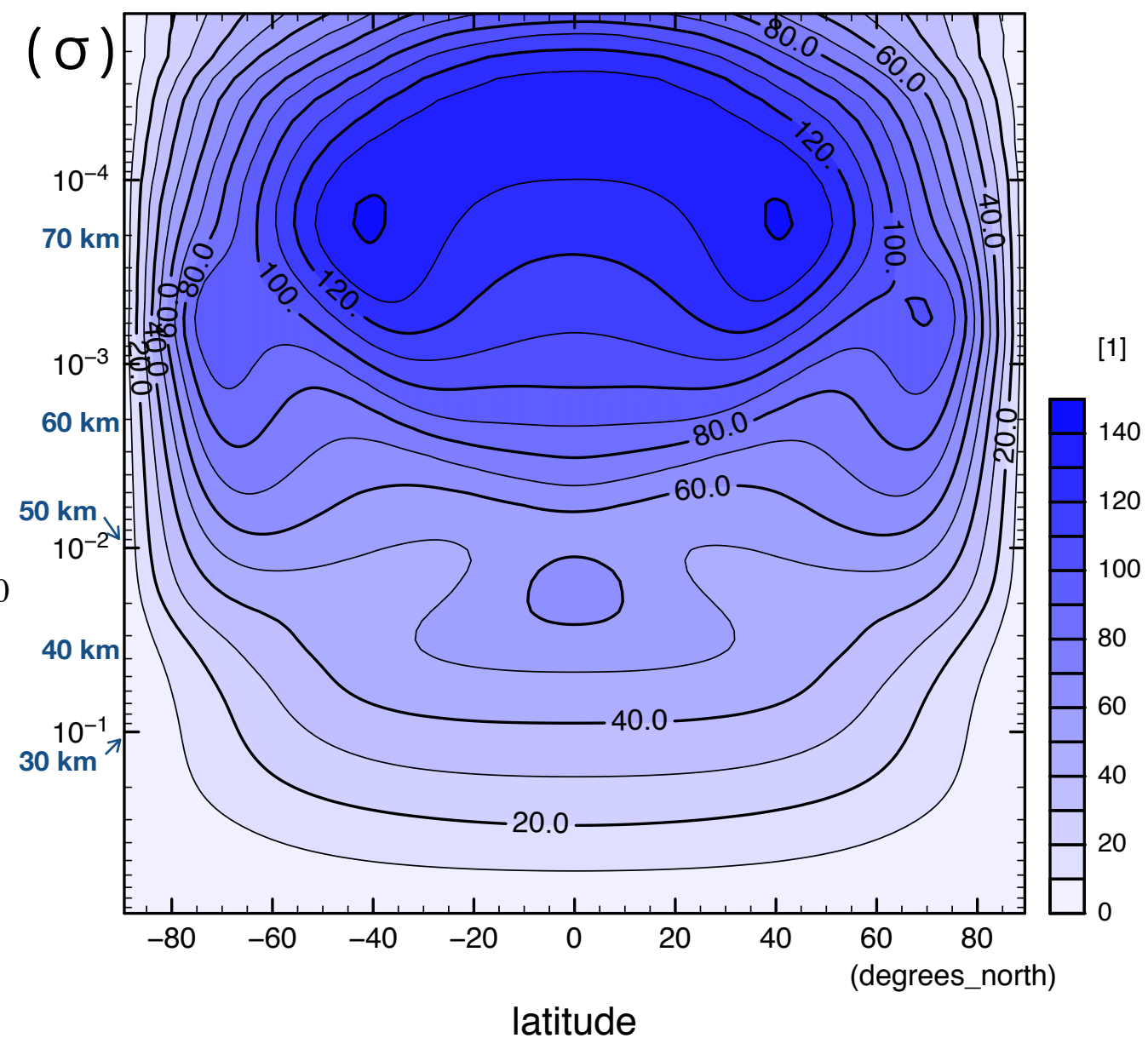


計算結果 | 平均東西風

赤道上空の平均東西風の 時間発展

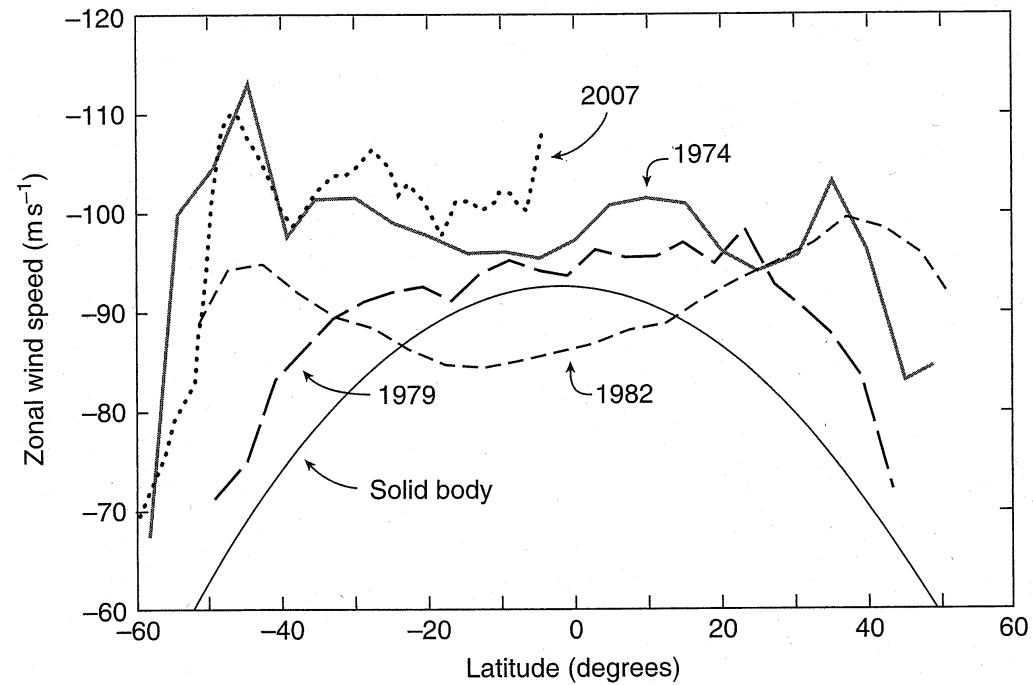


最後の1地球年分の 時間東西平均



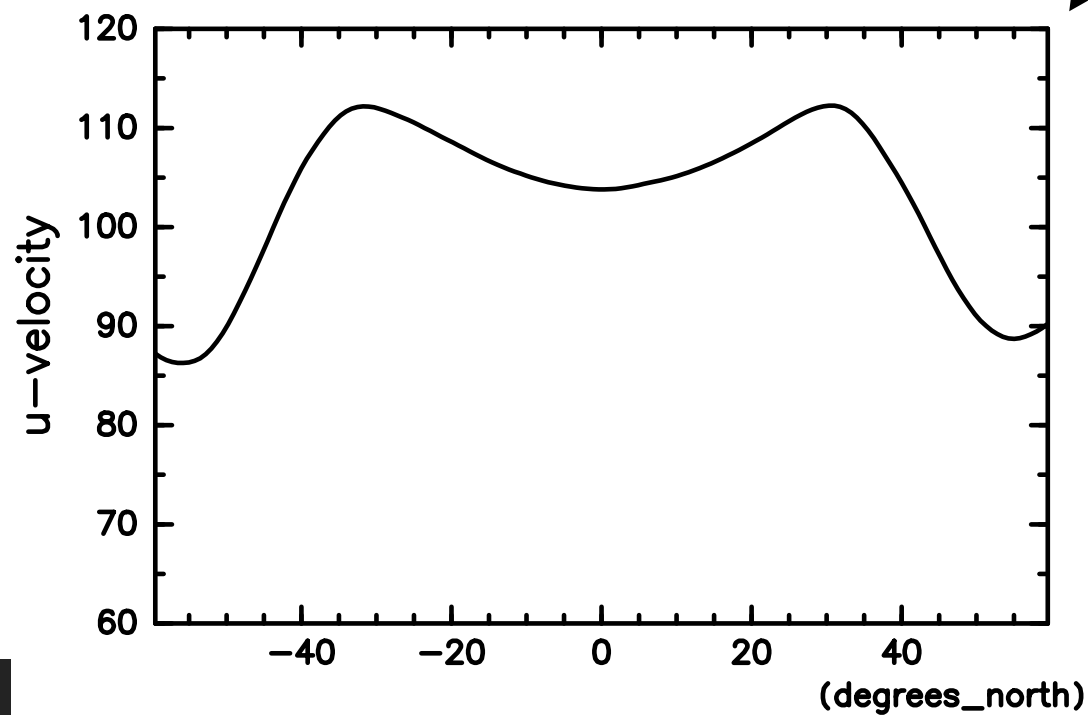
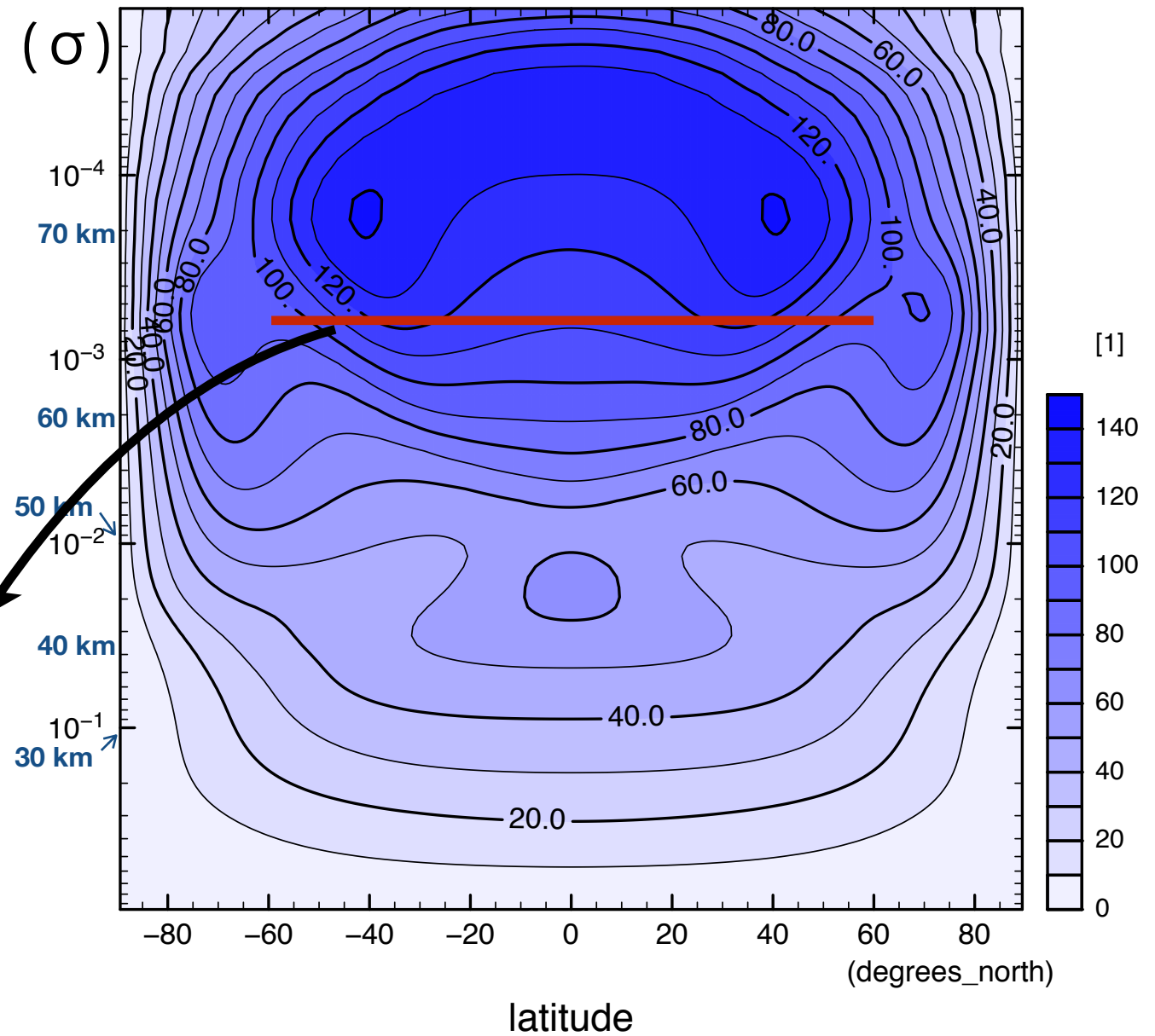
計算結果 | 平均東西風

観測：雲追跡風

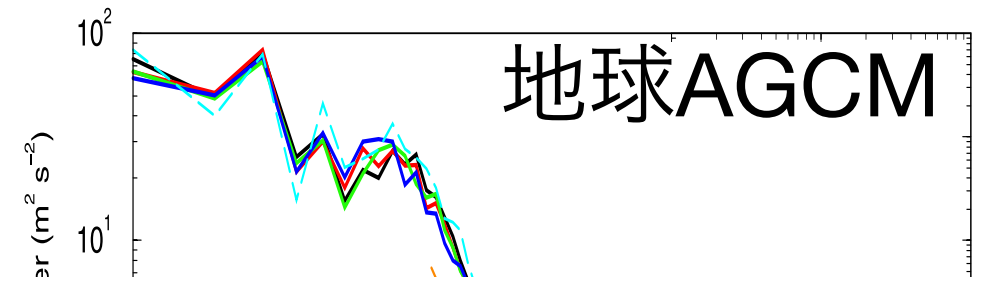
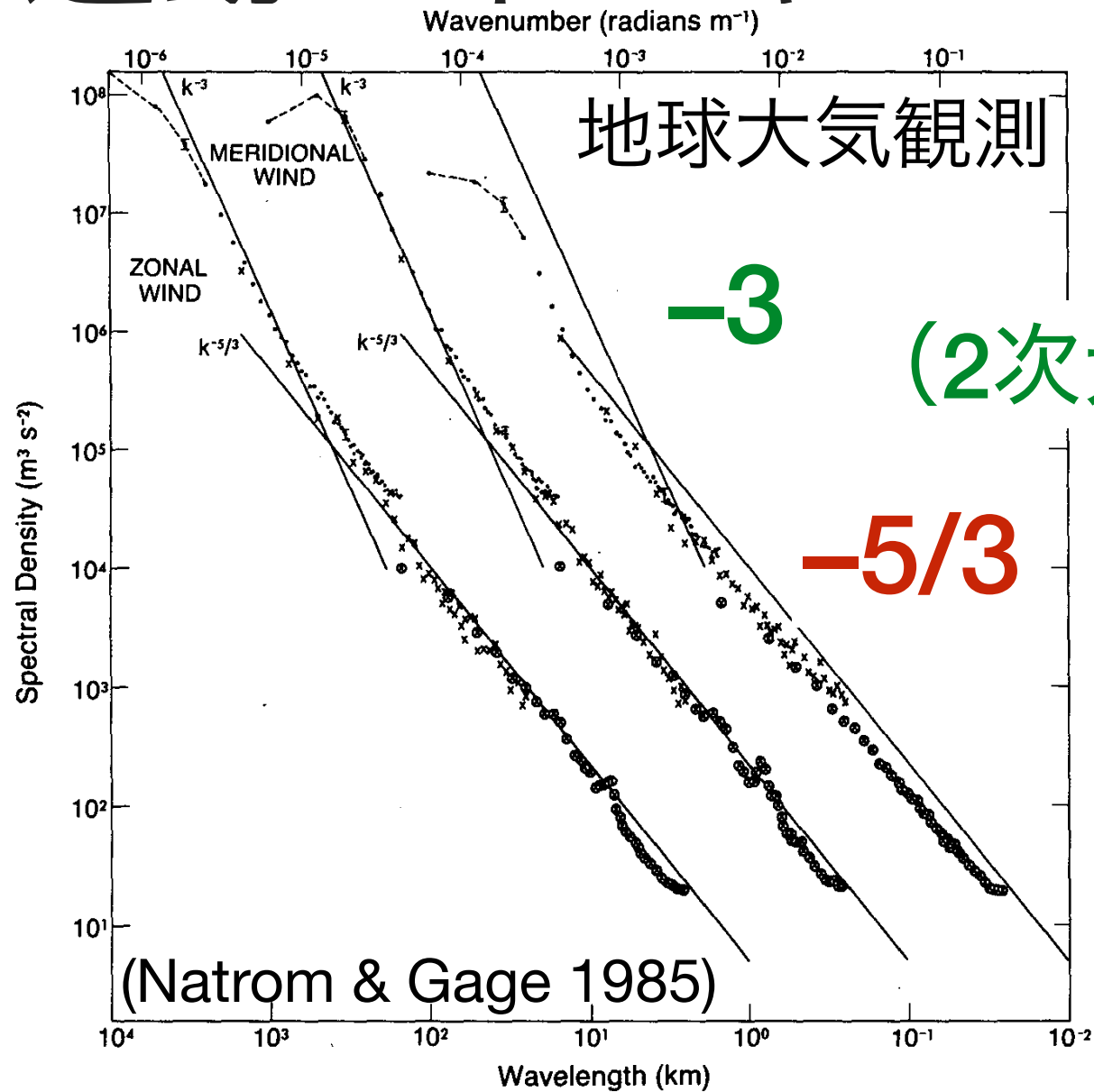


(Taylor 2010)

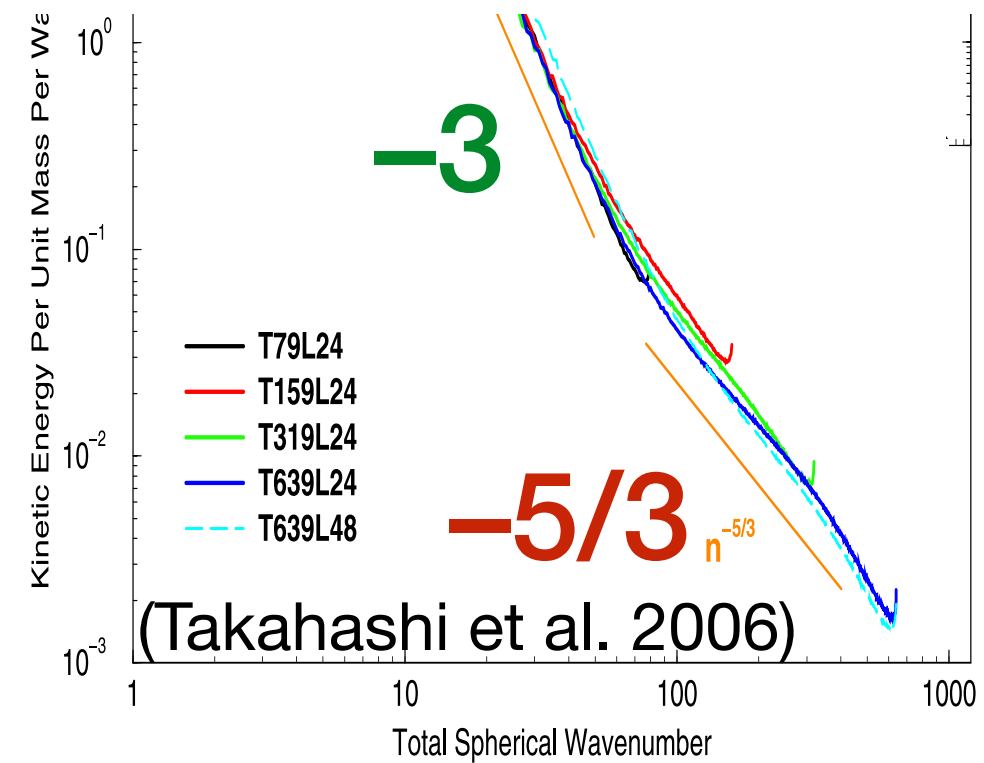
最後の1地球年分の
時間東西平均



運動エネルギーースペクトル | 地球



-3 (2次元乱流による下向きカスケード)



$$E_n^{\text{total}} = \frac{a^2}{2n(n+1)} \sum_{m=-n}^n (\zeta_n^m \zeta_n^{m*} + D_n^m D_n^{m*})$$

(Koshyk & Hamilton 2001)

鉛直渦度

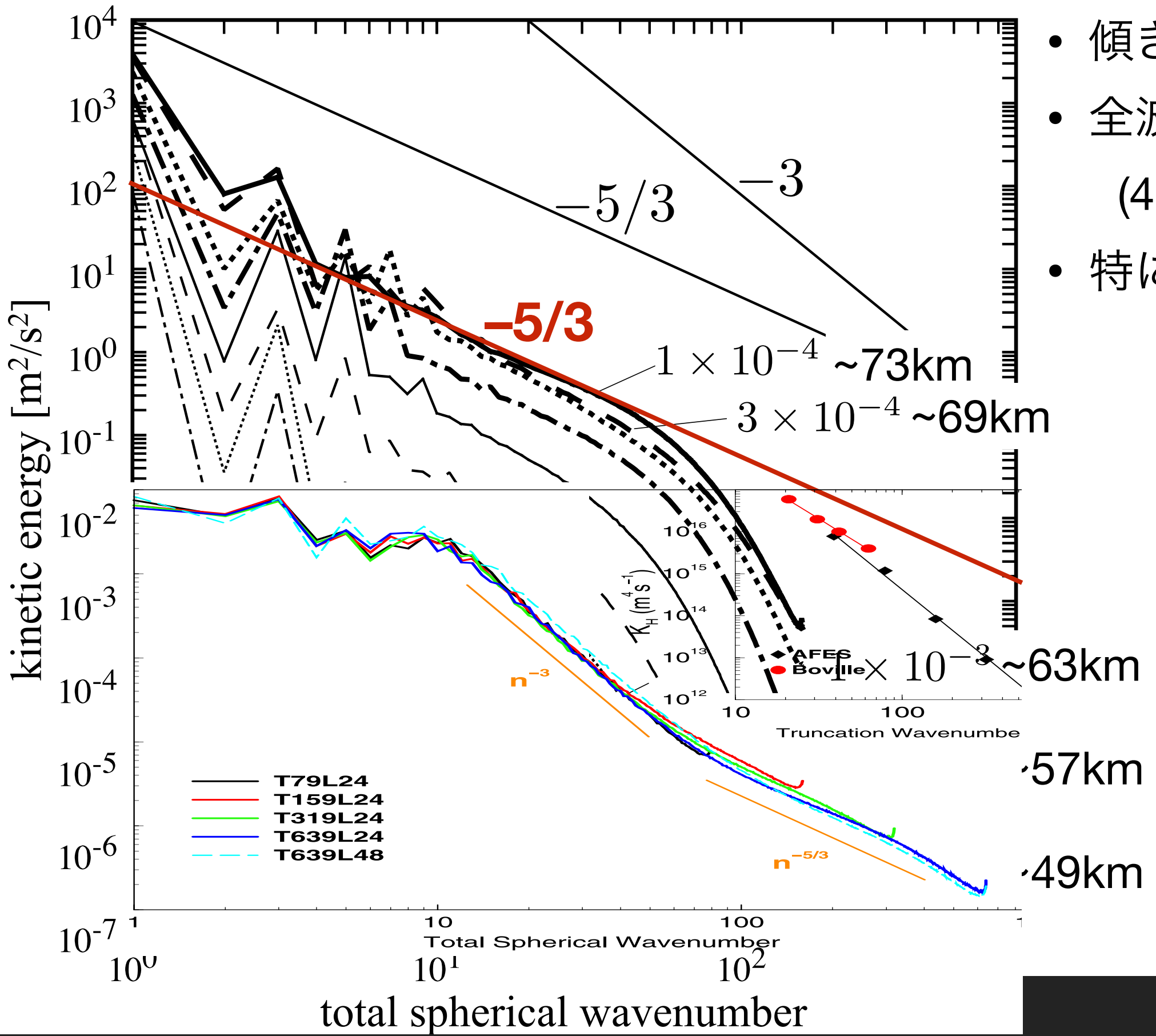
水平発散

(球面調和関数展開の係数)

(n : 全波数, m : 東西波数, a : 惑星半径)

運動エネルギーースペクトル | 金星

- 傾き $-5/3$ が目立つ
- 全波数 10 ~ 45
(4,000 ~ 900 km)
- 特に高度 70 ~ 60 km



運動エネルギーースペクトル | 回転成分・発散成分

(Koshyk & Hamilton 2001)

$$E_n^{\text{total}} = \frac{a^2}{2n(n+1)} \sum_{m=-n}^n (\zeta_n^m \zeta_n^{m*} + D_n^m D_n^{m*})$$

$E_n^\zeta + E_n^D$

鉛直渦度 水平発散

(球面調和関数展開の係数)

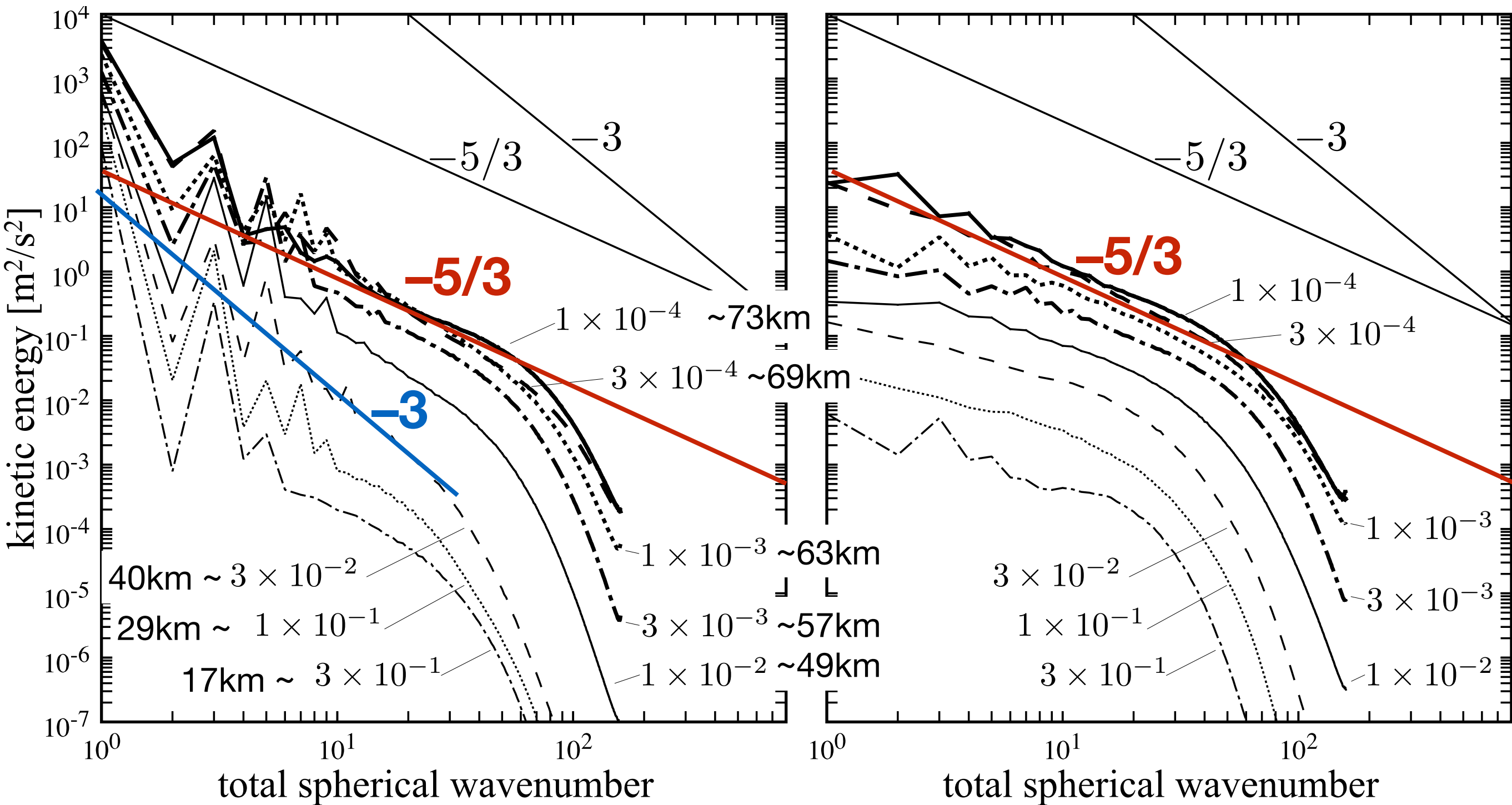
回転成分： $E_n^\zeta = \frac{a^2}{2n(n+1)} \sum_{m=-n}^n \zeta_n^m \zeta_n^{m*}$

発散成分： $E_n^D = \frac{a^2}{2n(n+1)} \sum_{m=-n}^n D_n^m D_n^{m*}$

(n : 全波数, m : 東西波数, a : 惑星半径)

回転成分

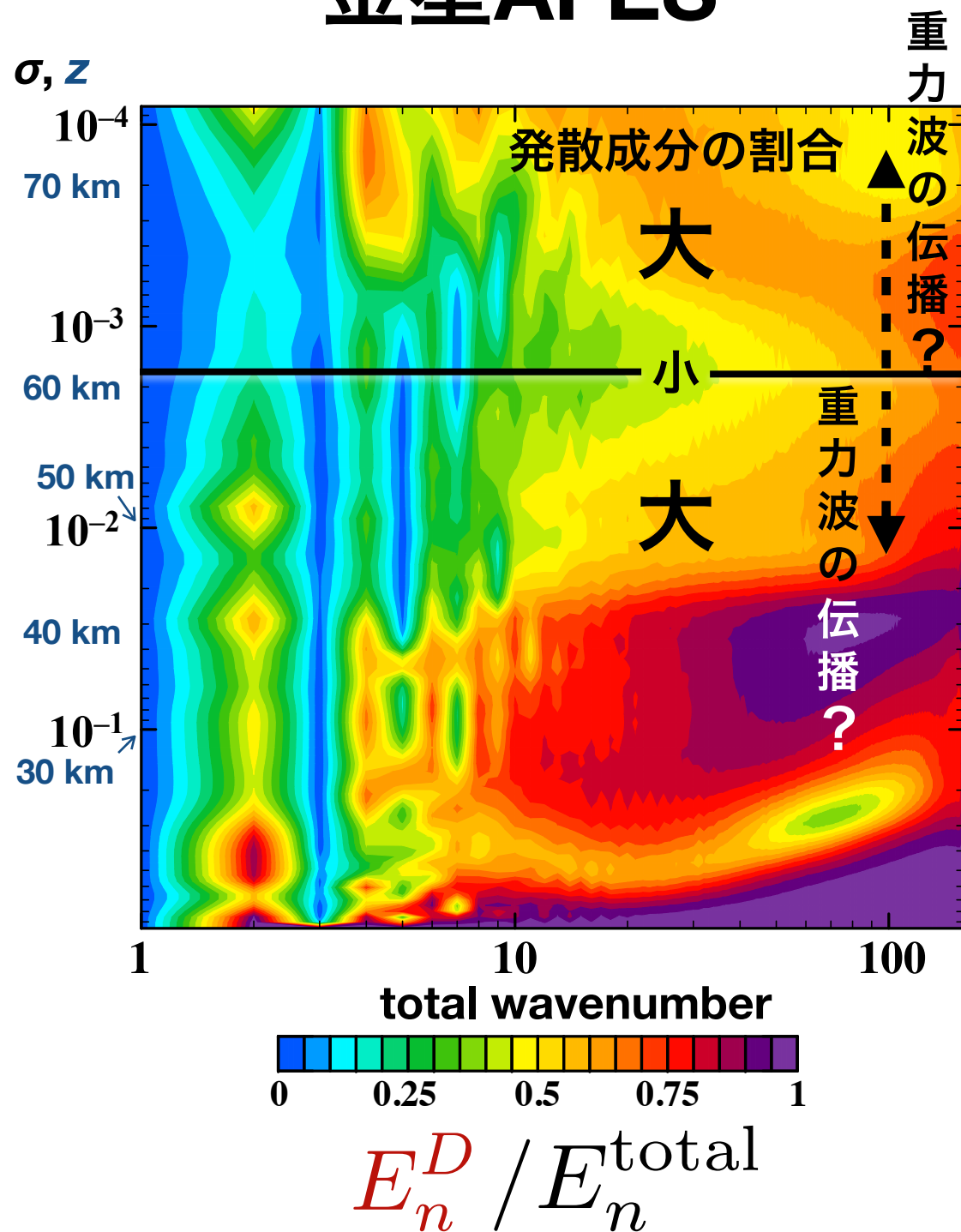
発散成分



- 回転成分は 高度約 57~73km では $-5/3$ に近い。40kmは -3 乗則
- 発散成分は低波数側まで $-5/3$ 乗則。

鉛直分布 | 発散成分の割合 $E_n^D / E_n^{\text{total}}$

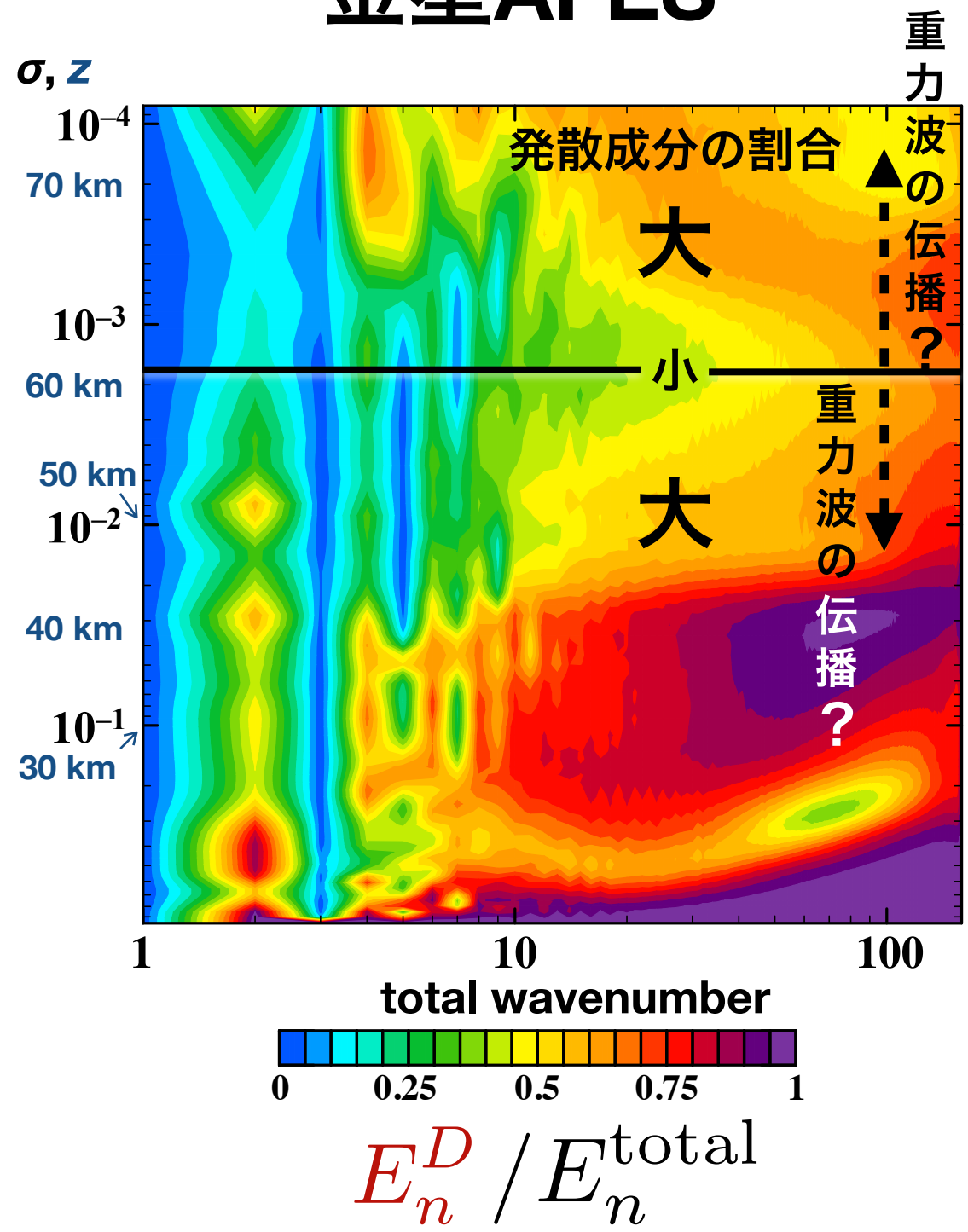
金星AFES



- 高波数側は発散成分が卓越
- 高度 60 km 付近は、その上下に比べて回転成分が大きい。
- 重力波の伝播を示すか？
 - ➡ 重力波解析は未着手
 - ➡ 今回はスペクトル解析からの推察を述べる。

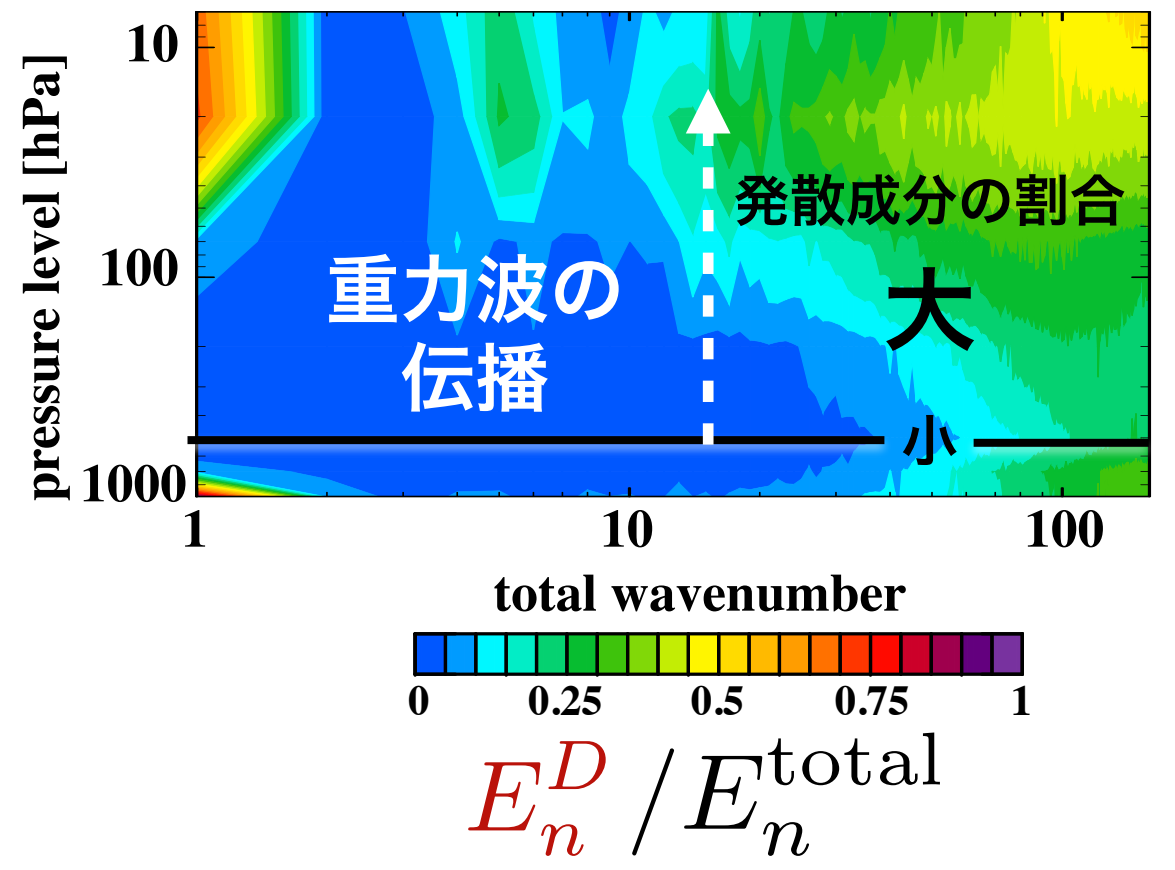
鉛直分布 | 発散成分の割合 $E_n^D / E_n^{\text{total}}$

金星AFES



地球AFES

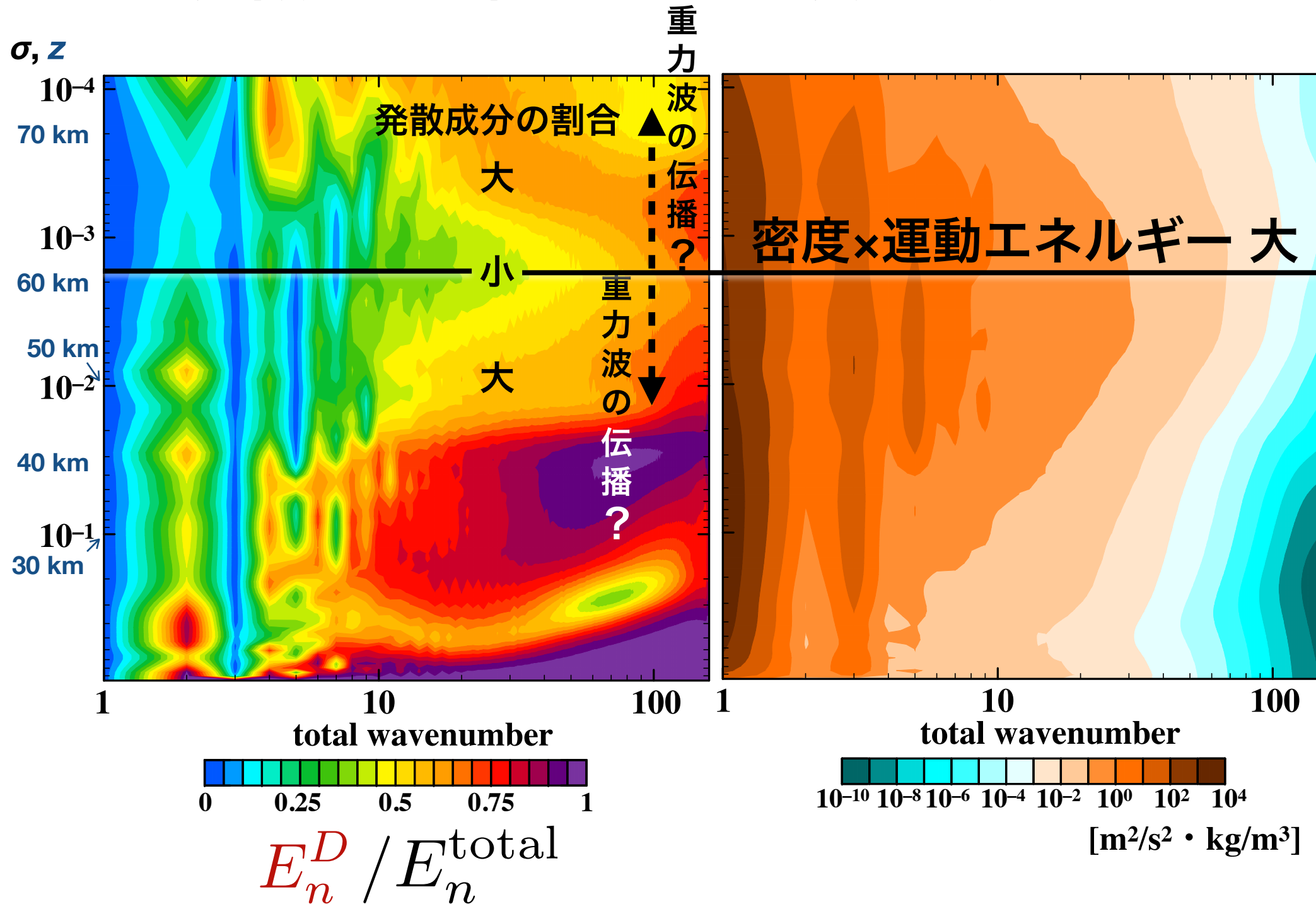
(Takahashi et al. (2006) のデータ)



鉛直分布 | 金星AFES

発散成分の割合

密度×運動エネルギー

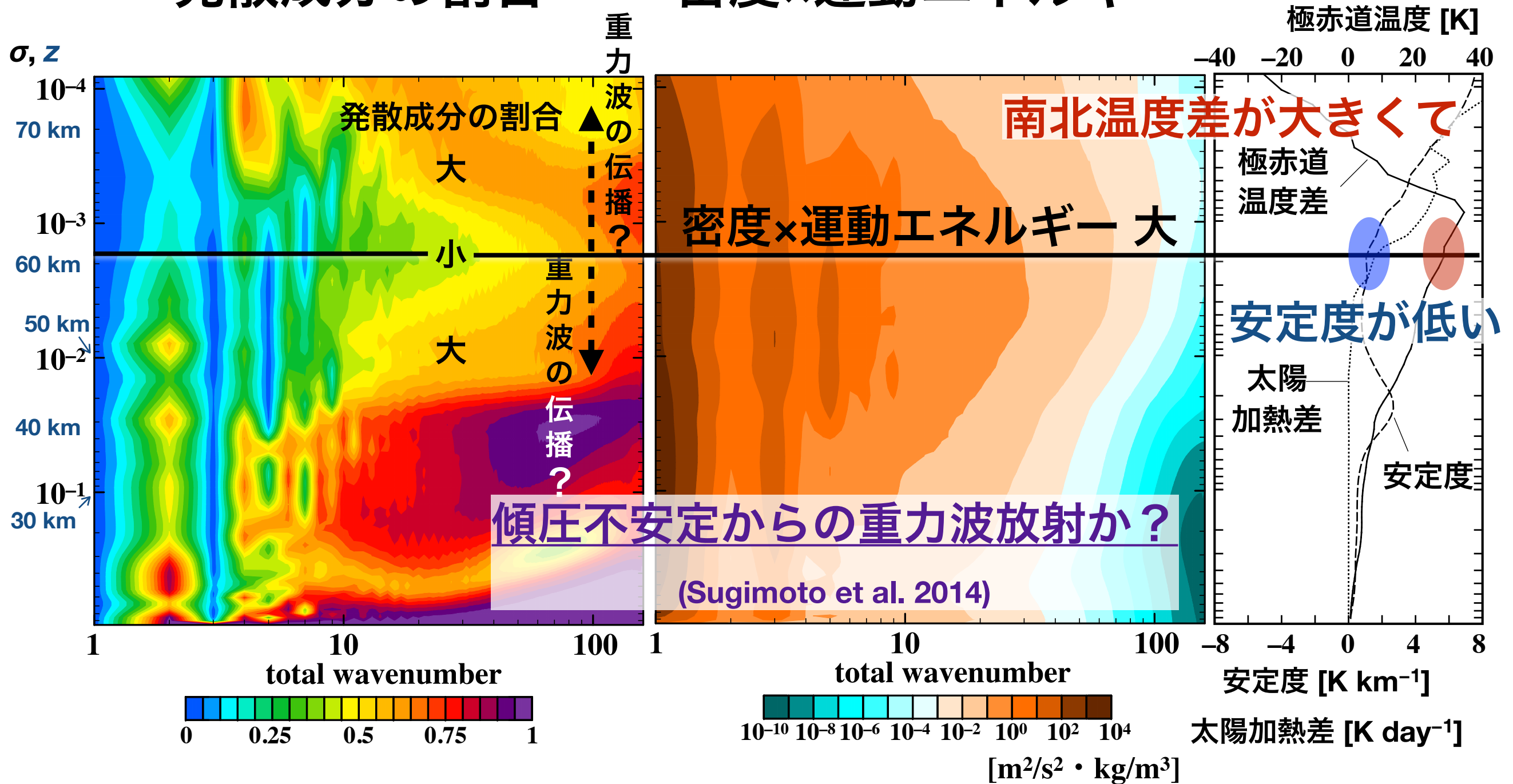


▶ 発散エネルギーが上下に伝播すれば、伝播先で発散成分の割合が高くなる。

鉛直分布 | 金星AFES

発散成分の割合

密度×運動エネルギー



ここまでのまとめ

- **簡易金星版大気大循環モデル AFES を用いて高解像度計算を実施。**
 - スーパーローテーション流を初期値として4地球年の積分。
 - 東西風速場は観測と似た分布。
- **水平運動エネルギースペクトル E_n を計算。**
 - $4 < n < 45$ の範囲で $-5/3$ 乗則。
 - (地球では $10 < n < 80$ で -3 乗則、 $80 < n$ で $-5/3$ 乗則)
- **E_n を発散成分 E_n^D と回転成分 E_n^R に分解。**
 - 発散成分は多くの高度で低波数側まで $-5/3$ 乗則に近い。
 - 回転成分は、高度 $\geq 57\text{km}$ では $-5/3$ 乗則、 40km 付近では -3 乗則。
- **発散成分の割合の高度分布を調査。**
 - 発散成分の割合が極小となる高度、と
 - 密度をかけた運動エネルギーが極大となる高度、がおおよそ一致。
 - ▶ この高度で励起された発散エネルギー（重力波）が上下に伝播している様子を示している。
 - この高度は、南北温度差が大きい&安定度が低い。
 - ▶ 傾圧不安定によって励起される重力波の上下伝播による寄与の可能性。

雲画像 (輝度値スペクトル) との比較

Mariner 10 (Travis 1978) Galileo (Peralta et al. 2007) Venus Express
 Pioneer Venus (Rossow et al. 1980) (Teraguchi et al. 2011)

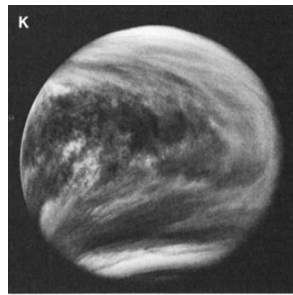
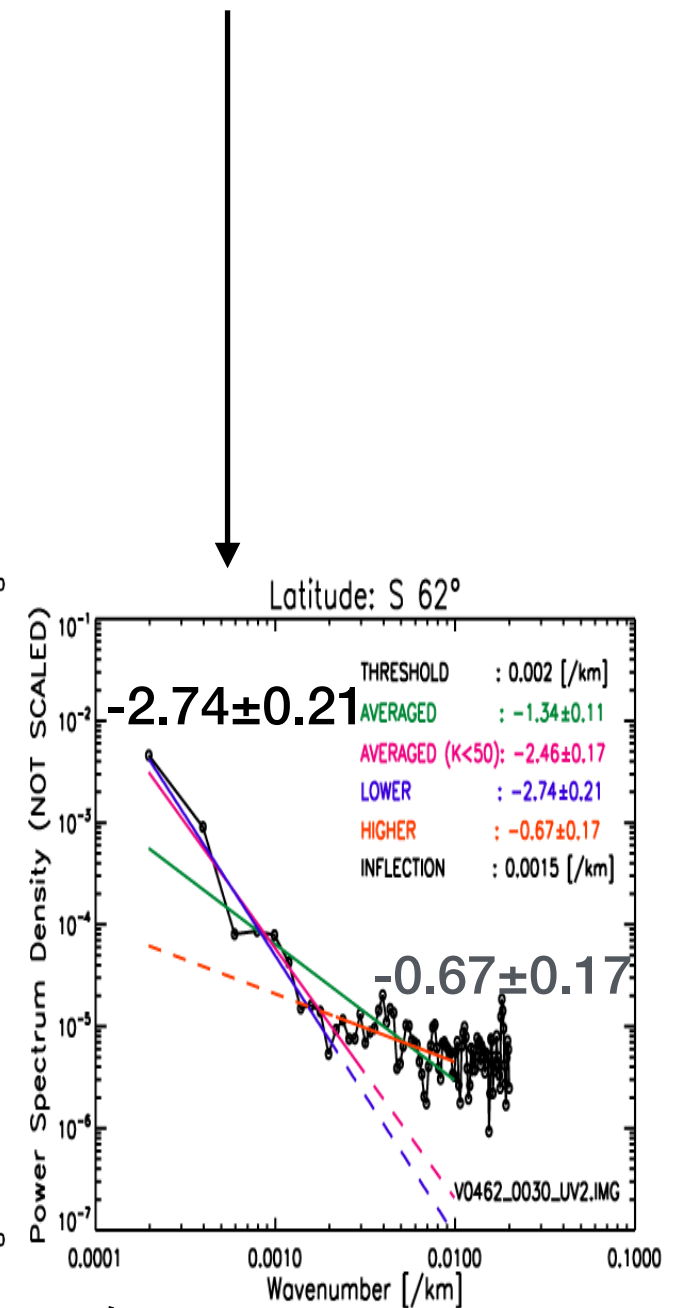
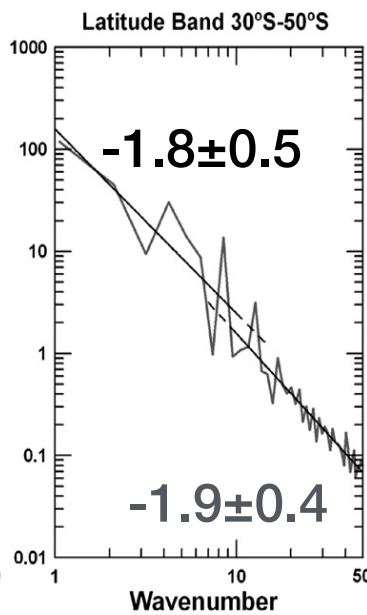
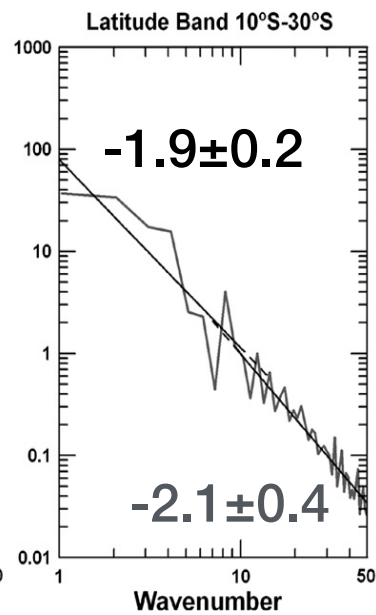
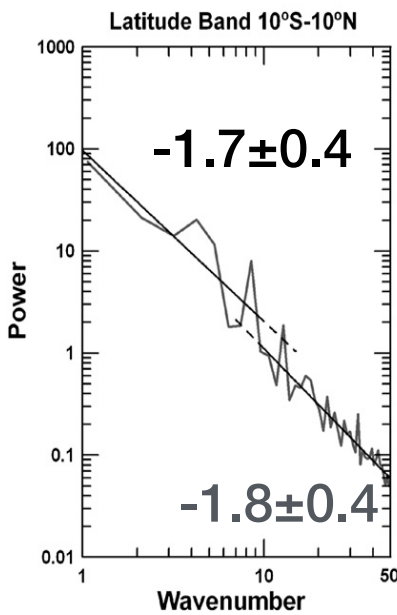
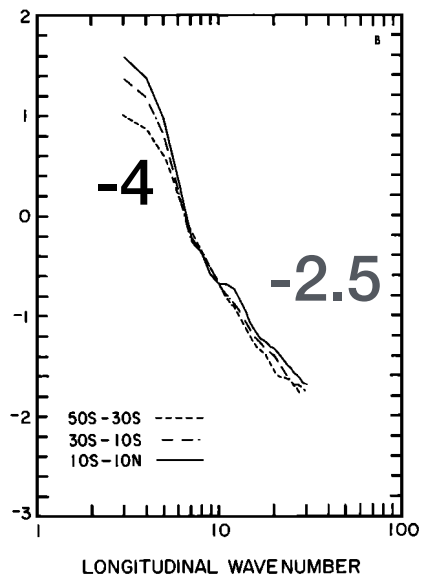
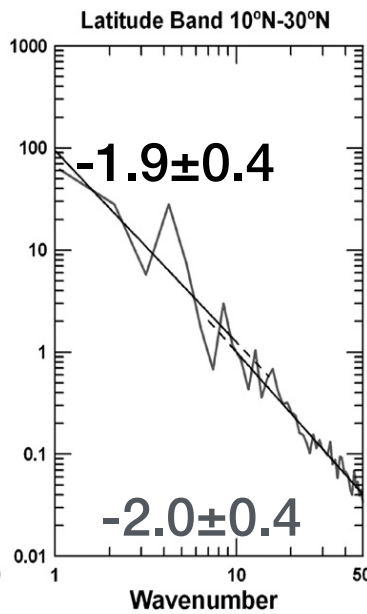
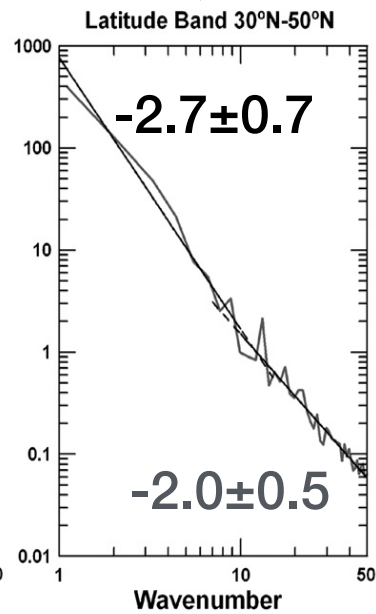
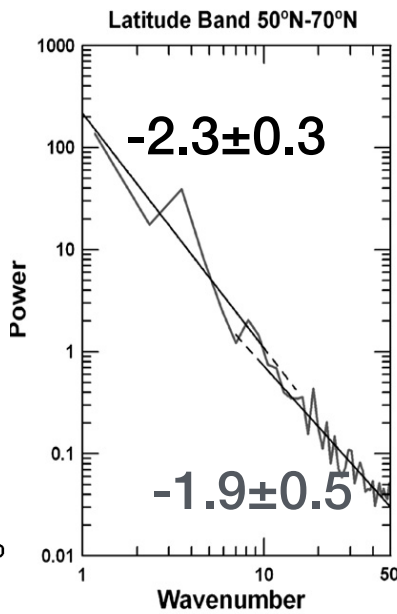
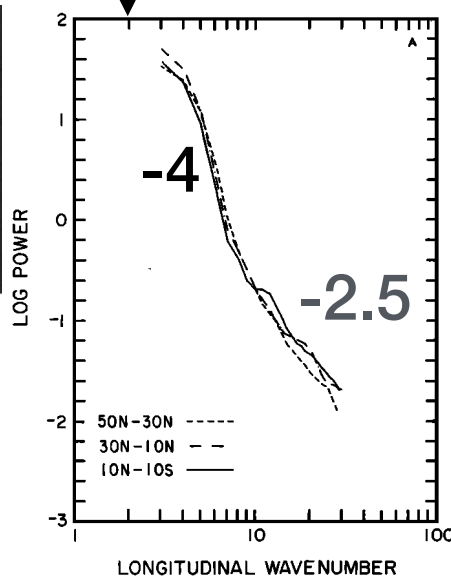


Fig. 2. Pioneer Venus OCPP images.



輝度値パワースペクトルは $-5/3$ 乗よりも急な傾き。
 ただし雲の濃淡パターンが運動パターンと一致する保証はない...