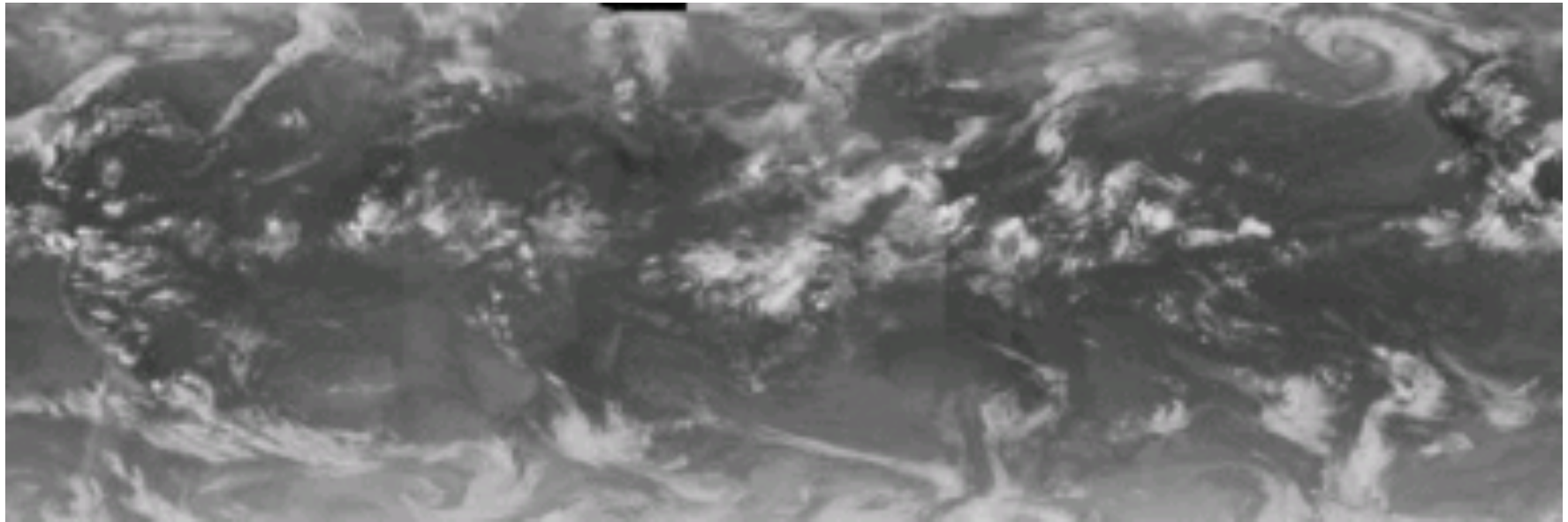


# 惑星大気の波数スペクトル

JAXA宇宙科学研究所 今村剛

1. 3次元乱流
2. 2次元乱流
3. 地球大気の波数スペクトル
4. 火星大気の波数スペクトル



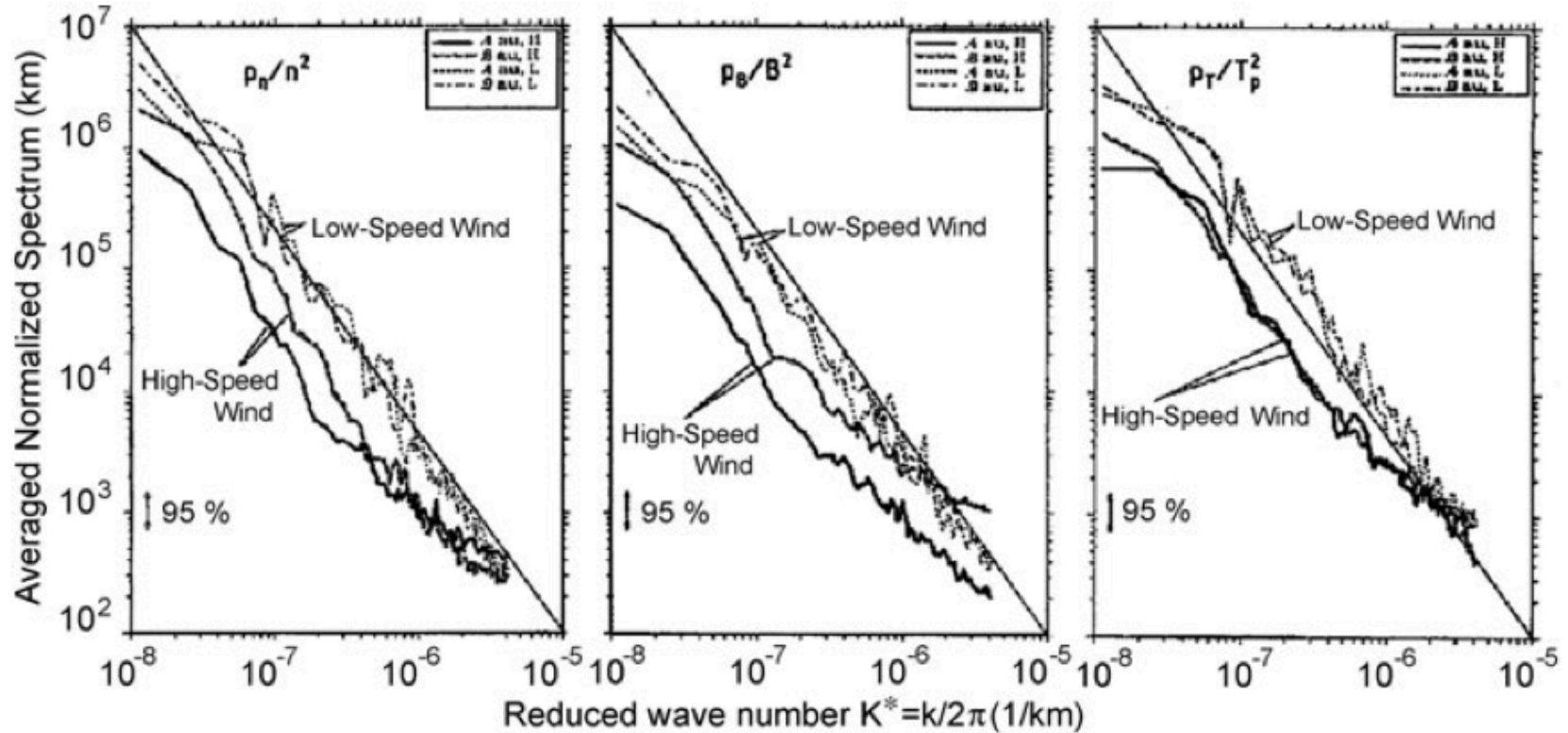
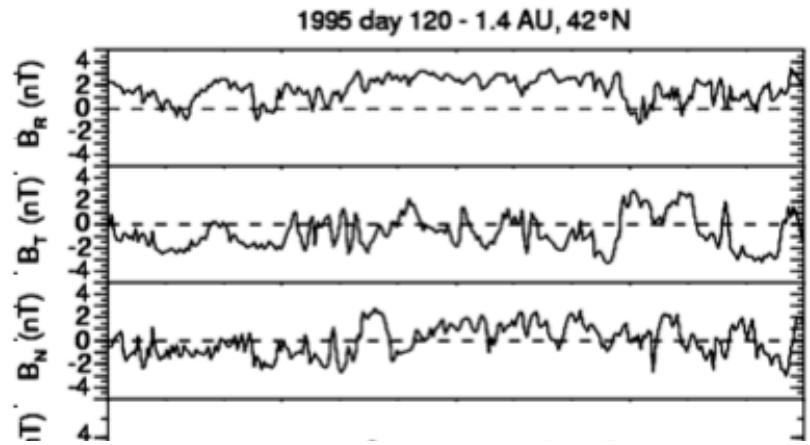
# 3次元等方乱流のエネルギースペクトル

- エネルギー供給・散逸のない等方的な慣性小領域ではエネルギースペクトル  $E(k)$  ( $m^3 s^{-2}$ ) は
  - 波数  $k$  ( $m^{-1}$ )
  - 単位質量あたりエネルギー消散率  $\varepsilon$  ( $m^2 s^{-3}$ )だけで特徴付けられるはず
- 次元解析より

$$E(k) = A \varepsilon^{2/3} k^{-5/3} \quad : \text{コルモゴロフの}-5/3 \text{乗則}$$

# 太陽風プラズマの 乱流スペクトル

**Fig. 26** Solar wind fluctuations as seen on Ulysses in various variables versus time for one full day at a latitude of  $42^\circ$  north and distance of 1.4 AU. From top to bottom: Magnetic field components and magnitude, and plasma temperature, density and flow speed (after Horbury and Balogh 2001)



**Fig. 36** Compressive turbulence spectra for the relative fluctuations of density and magnetic field magnitude and proton temperature (after Marsch and Tu 1990b; Tu and Marsch 1991)

## 2次元乱流の場合(準地衡風乱流、成層乱流)

以下の方程式に従う2次元流体を考える

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\vec{v} \cdot \nabla \zeta, \quad \zeta \equiv \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = \nabla^2 \Psi$$

$\zeta$  : 渦度     $\psi$  : 流線関数

- 全領域ではエネルギーに加えてエンストロフィー  $\zeta^2/2$  も保存
- 2次元ではエネルギーは大きな渦へ (upward cascade)、エンストロフィーは小さな渦へ (downward cascade) 移ると予想
- スペクトルの傾きは2種類
  - エネルギーが流れる領域:  $E(k) = A \varepsilon^{2/3} k^{-5/3}$   
( $\varepsilon$ : エネルギー消散率)
  - エンストロフィーが流れる領域:  $E(k) = B \eta^{2/3} k^{-3}$   
( $\eta$ : エンストロフィー消散率)

# 簡単な考察

エネルギー $E$ とエンストロフィー $Z$ をエネルギーのスペクトル密度 $E(k)$ で表すと

$$E = \int E(k) dk$$

$$Z = \int k^2 E(k) dk$$

初期状態でエネルギーが波数  $k_1$  に集中していて、これが時間が経って波数  $k_0 = k_1/2$  と  $k_2 = 2k_1$  に流れたとすると、エネルギーとエンストロフィーの保存から

$$E_0 + E_2 = E_1$$

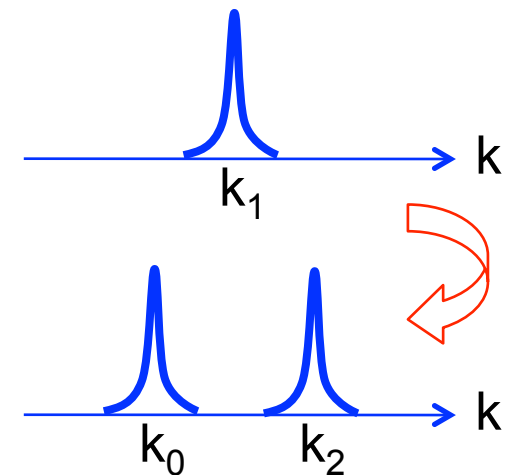
$$(k_1/2)^2 E_0 + (2k_1)^2 E_2 = k_1^2 E_1$$

ここから

$$E_0 = 0.8E_1 \quad E_2 = 0.2E_1$$

$$Z_0 = 0.2Z_1 \quad Z_2 = 0.8Z_1$$

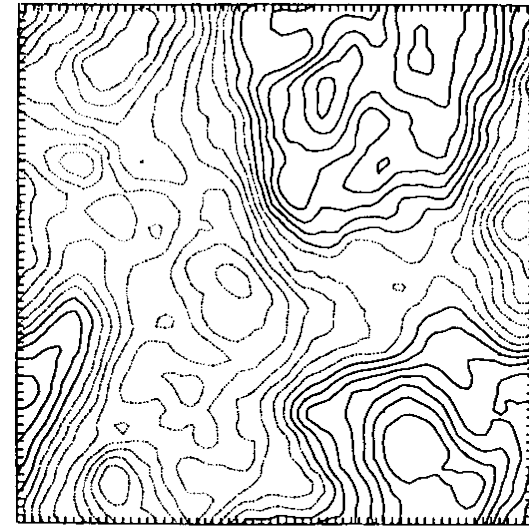
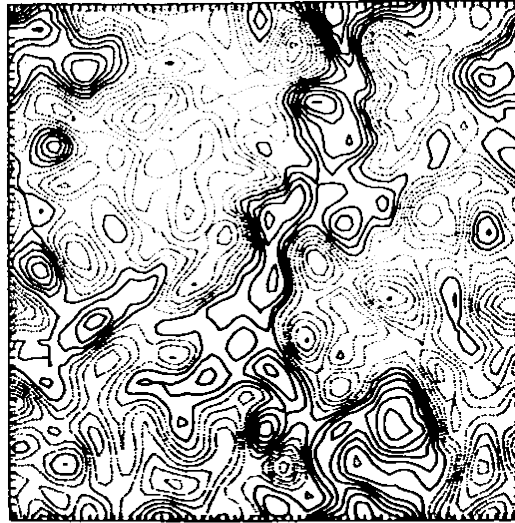
エネルギーは低波数へ、エンストロフィーは高波数へ流れる。



時間 = 10.87

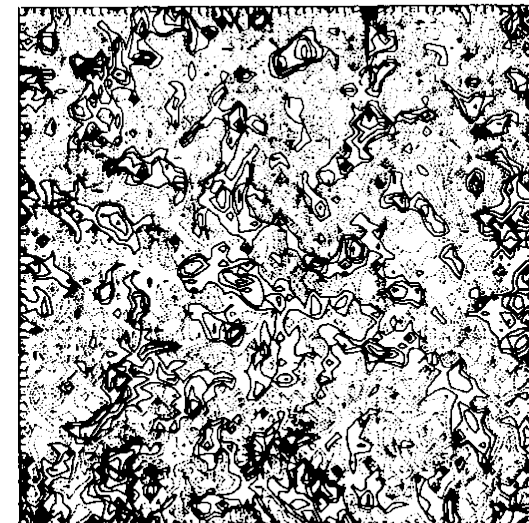
時間 = 75.45

流線関数  $\psi$



(a)

渦度  $\zeta$

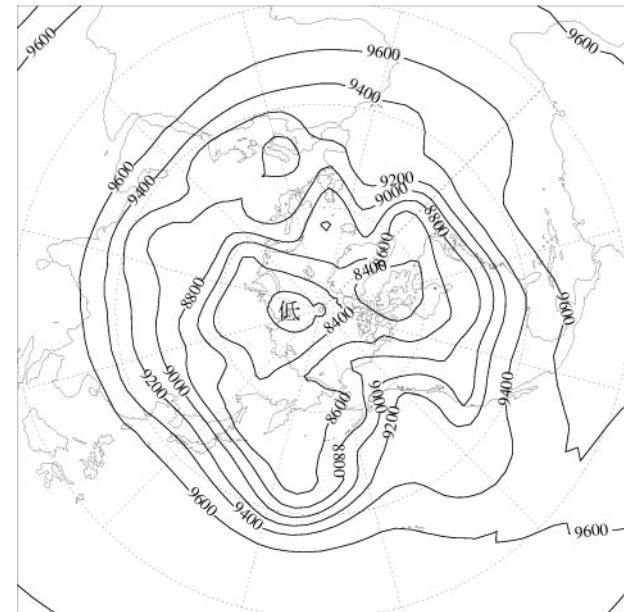
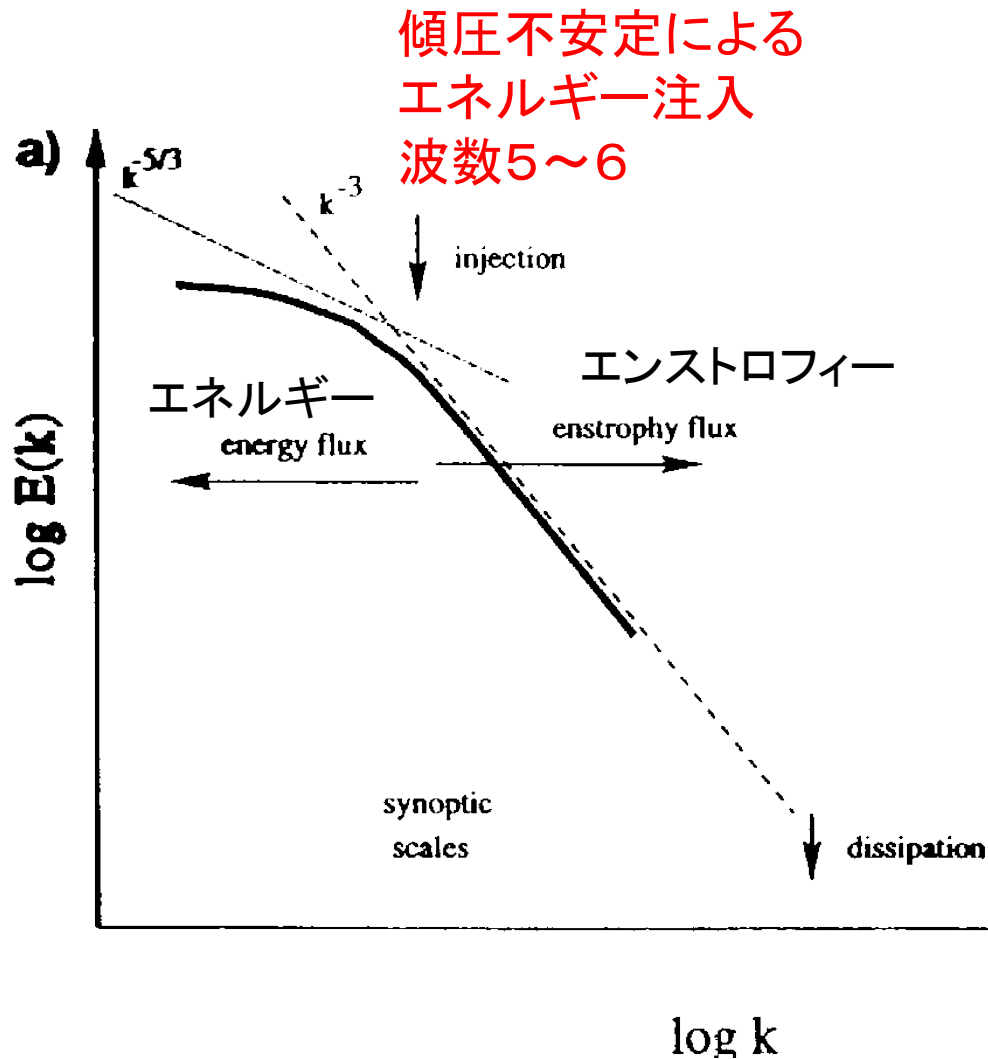


(b)

$$\zeta = \nabla^2 \psi$$

図 4.1 リリー (Lilly, 1969) の 2 次元乱流の数値実験の結果  
左側の図が  $t=10.87$ , 右側の図が  $t=75.45$  での結果. (a)は流線関数, (b)は  
渦度の分布図.

# 2次元乱流理論からの予想



2002年1月15日の300hPa面  
での等高線



# 地球大気の波数スペクトル (Nastrom & Gage, 1985)

## 民間航空機による大気擾乱の水平構造の観測

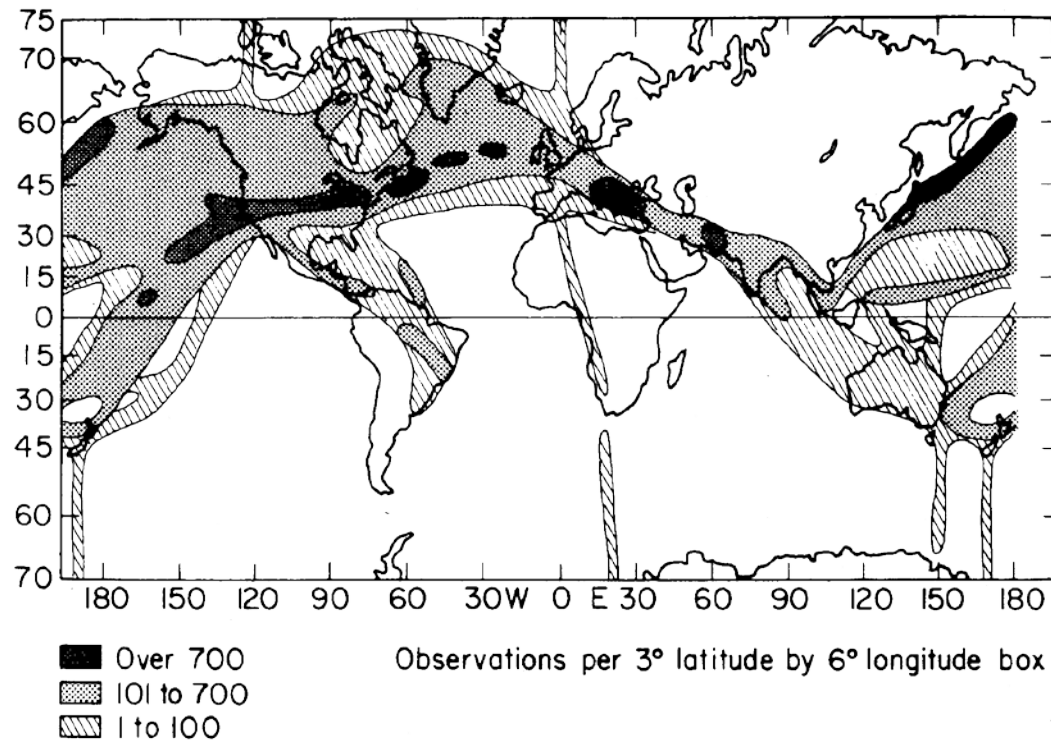
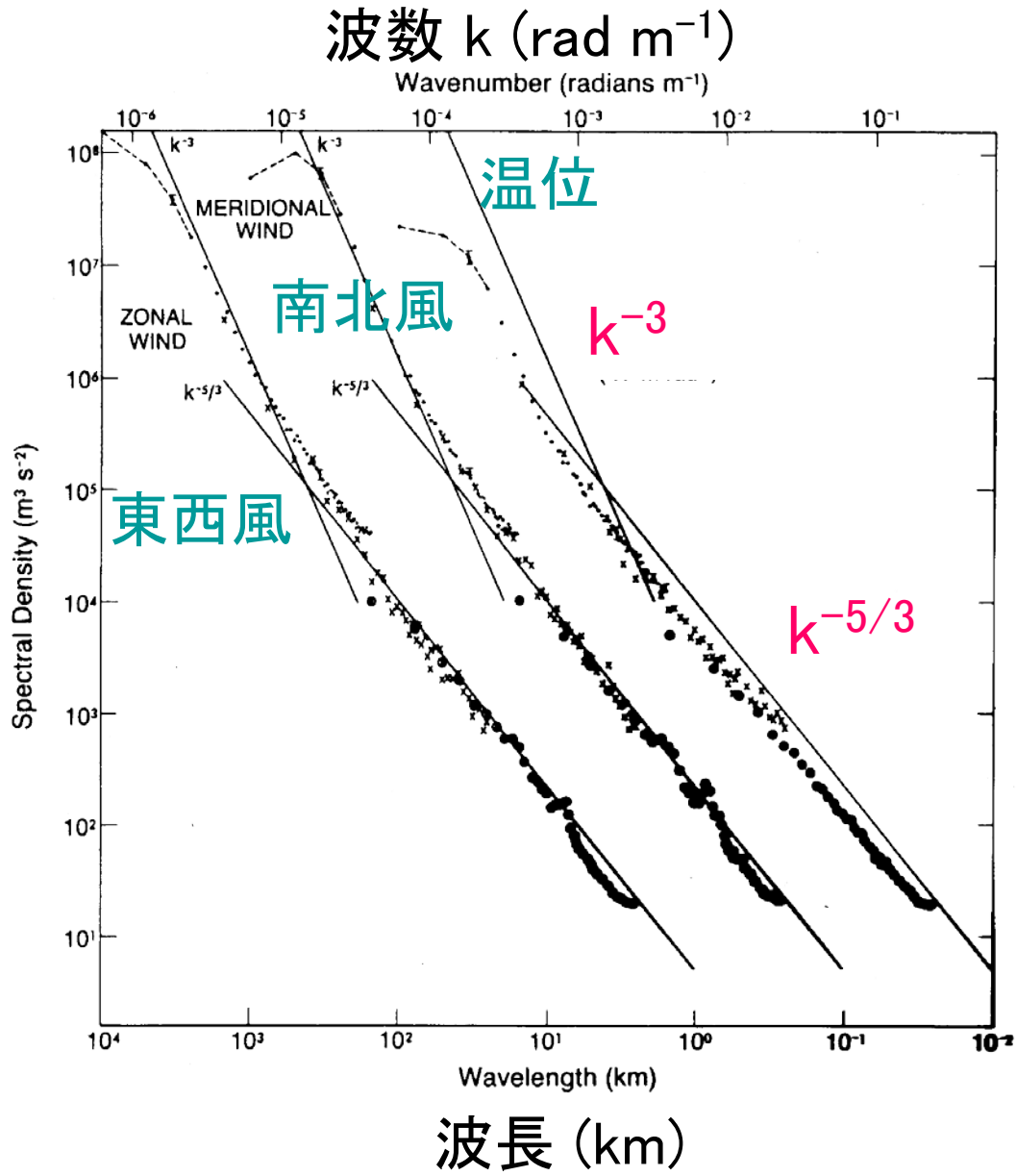


FIG. 1. Geographical distribution of GASP observations from flight segments at least 2400 km long; see text.

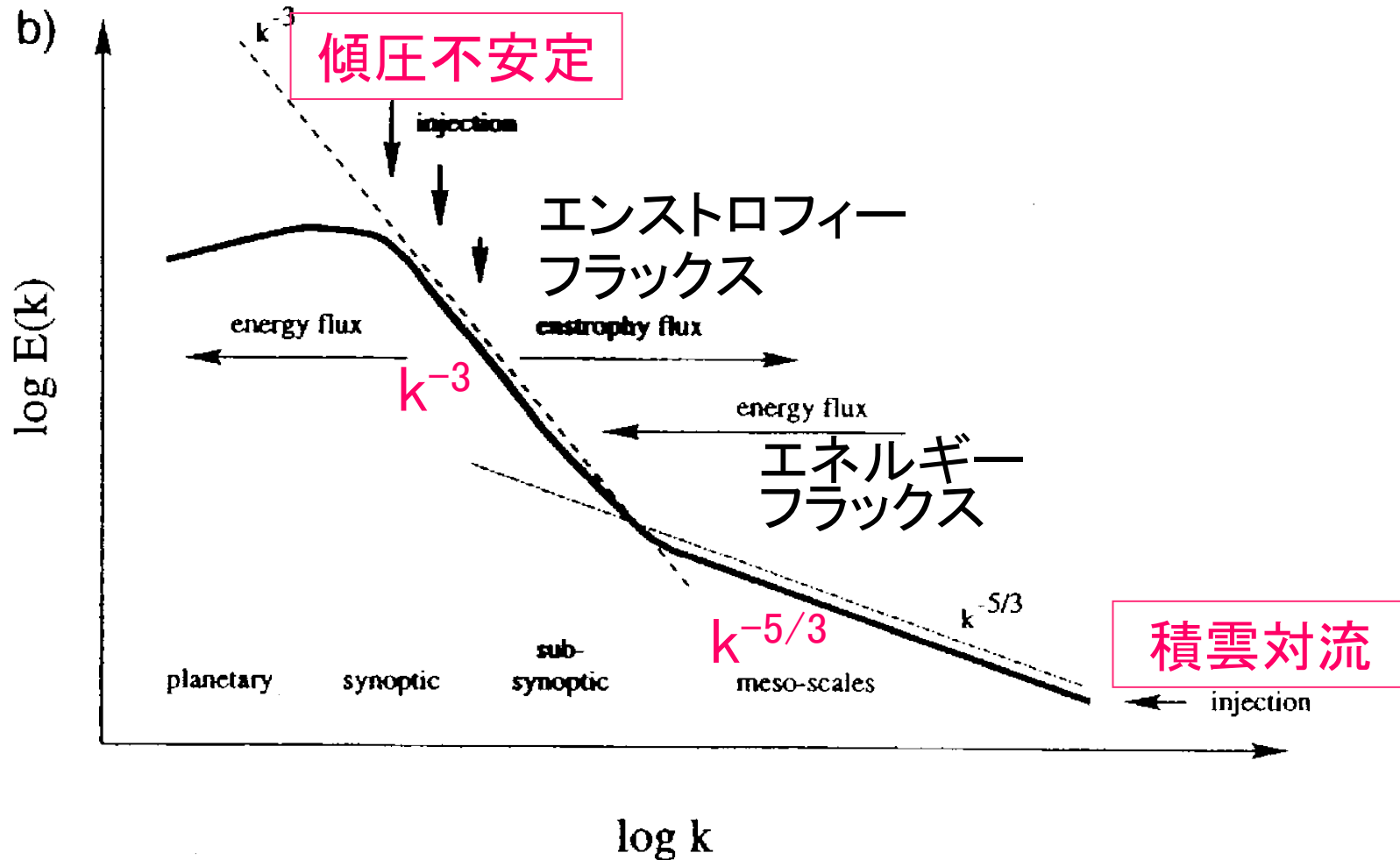
# 航空機観測のデータから求めた波数スペクトル

スペクトル密度 ( $\text{m}^3 \text{s}^{-2}$ )



緯度・季節にあまり依らない “Universal spectrum”

# 古典的解釈 (Lilly 1990 など)



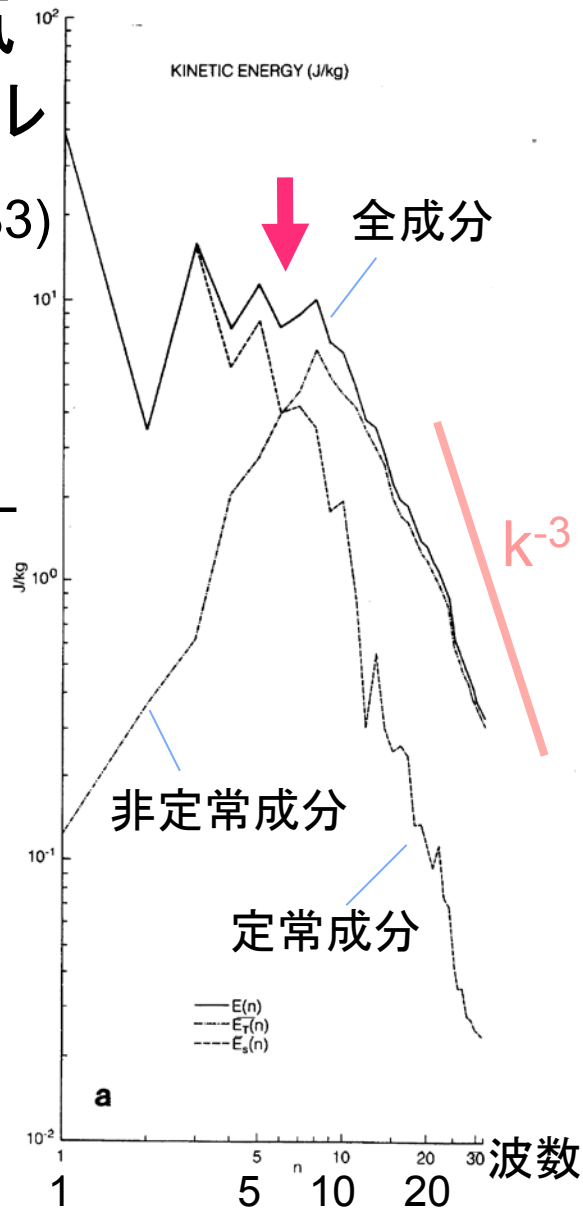
\* 準地衡乱流では擾乱のエネルギーは運動エネルギー2成分と位置エネルギーへ等分配される (Charney, 1971)

# 再解析データから 求めた地球大気 の波数スペクトル

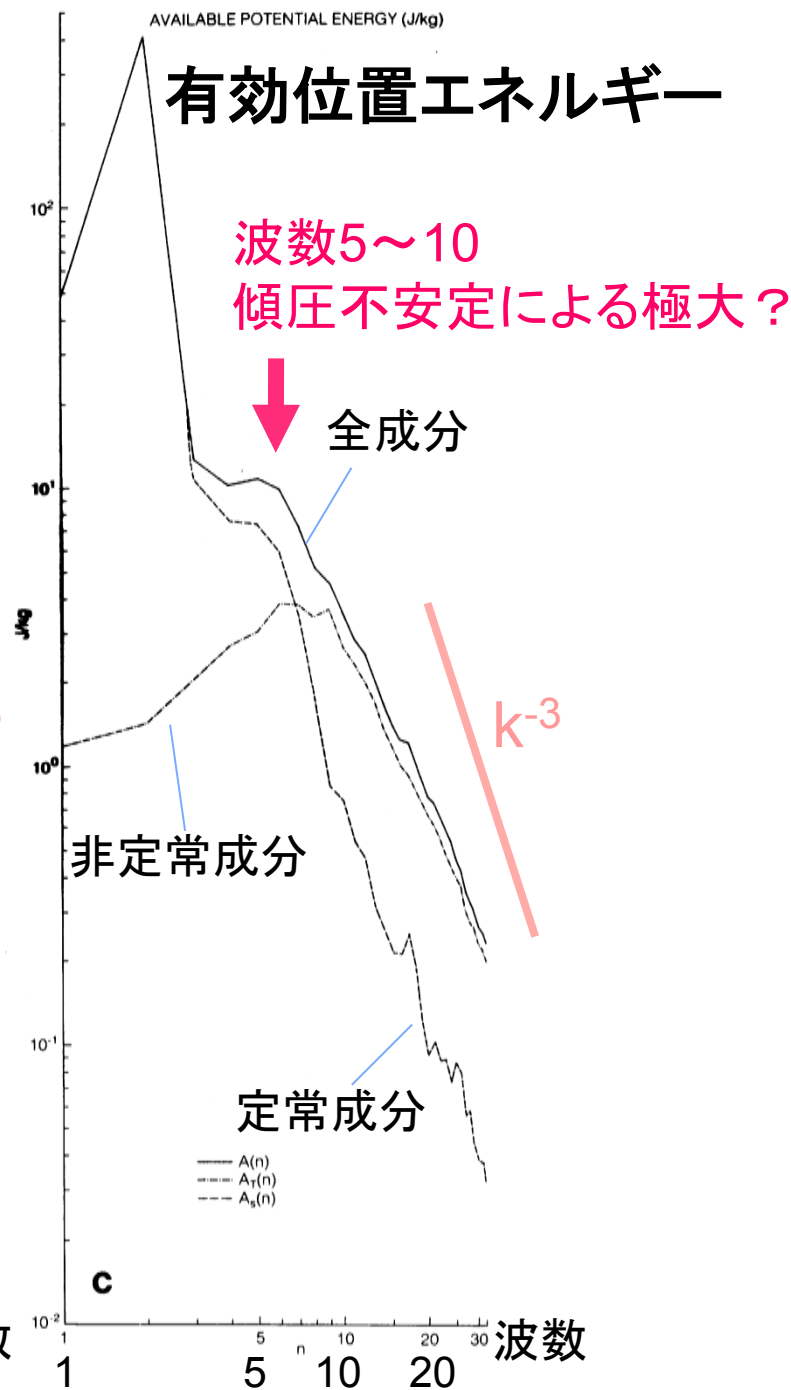
Boer & Sheperd (1983)

エネルギー  
(J/kg)

## 運動エネルギー



## 有効位置エネルギー



# Rhines scale

- 2次元非発散の渦度方程式

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \beta v = 0$$

$\zeta$  : 渦度       $\beta$  : 惑星渦度の南北  
勾配

- Rhines scale

$$k_{\beta} = \sqrt{\frac{\beta}{2U}}$$

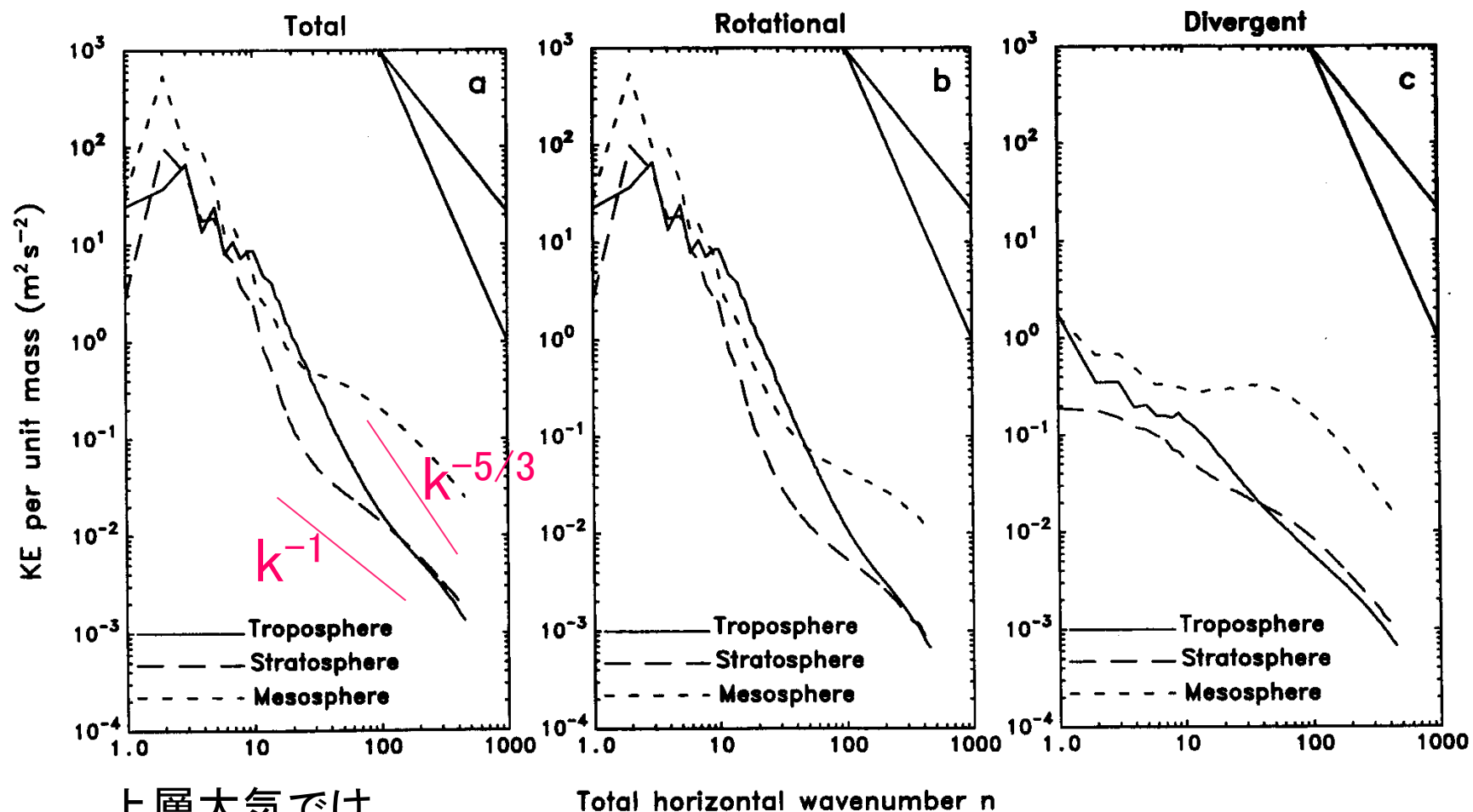
$U$  : 風速擾乱の典型的な大きさ

この波数で相対渦度の移流項と惑星渦度の移流項の大きさが等しくなる。これより大きなスケールでは乱流よりロスビー波が卓越してupward cascadeが停止。

地球では  $k_{\beta} = \sqrt{1.5E-11/10} \sim 9E-7 \text{ (m}^{-1}\text{)} \sim$  東西波数4.1 @45°

火星では  $k_{\beta} = \sqrt{2.1E-11/10} \sim 1.4E-5 \text{ (m}^{-1}\text{)} \sim$  東西波数1.7 @60°

# 高解像度GCM (Koshyk and Hamilton 2001) における対流圏・成層圏・中間圏でのスペクトル



上層大気では

- 短波長重力波が卓越
- 波長数千kmの総観規模擾乱が減衰 (Charney-Drazin filtering)

# 問題意識

- メソスケールのスペクトルをアップワードカスケードで再現するには、最小スケールに大きなエネルギー供給を要する
- メソスケールまでエネルギーがダウンワードカスケードという考えもある (Tung & Orlando, 2003)
- メソスケールの  $k^{-5/3}$  を重力波で説明する説も有力
- 他の惑星まで含めて 'universal spectrum' なのか？

# 火星大気の波数スペクトル

(たぶん後にも先にもこれらしかない)

- 惑星スケール～総観スケール

Imamura, T., and H. Kobayashi, Wavenumber spectra of planetary-scale disturbances in the Mars atmosphere, *Icarus*, 199, 286-294, 2009.

- 総観スケール～メソスケール

Imamura, T., Y. Kawasaki, and T. Fukuhara, Mesoscale spectra of Mars' atmosphere derived from MGS TES infrared radiances, *J. Atmos. Sci.*, 64, 1717-1726, 2007.



# 惑星のパラメータ

(松田 (2000) を改変)

	大気の主成分	赤道半径 (km)	平均気圧 (hPa)	太陽光強度 (W/m <sup>2</sup> )	反射率	平均地表温度 (K)	自転周期 (日)	放射緩和時間 (日)
地球	N <sub>2</sub> (78%), O <sub>2</sub> (21%)	6378	1013	1370	0.30	288	1	100
金星	CO <sub>2</sub> (96%)	6052	92000	2617	0.78	750	243	20000
火星	CO <sub>2</sub> (95%)	3397	6	589	0.16	220	1.03	3

- ・ 火星の傾圧不安定の最大成長率モード  
東西波数 3~4 (Barnes 1984)  
    ↔ 地球の傾圧不安定 波数5~10
- ・ Rhines scale波数~1.7  
    ↔ 地球でのRhines scale波数~5

# 火星の傾圧不安定波？

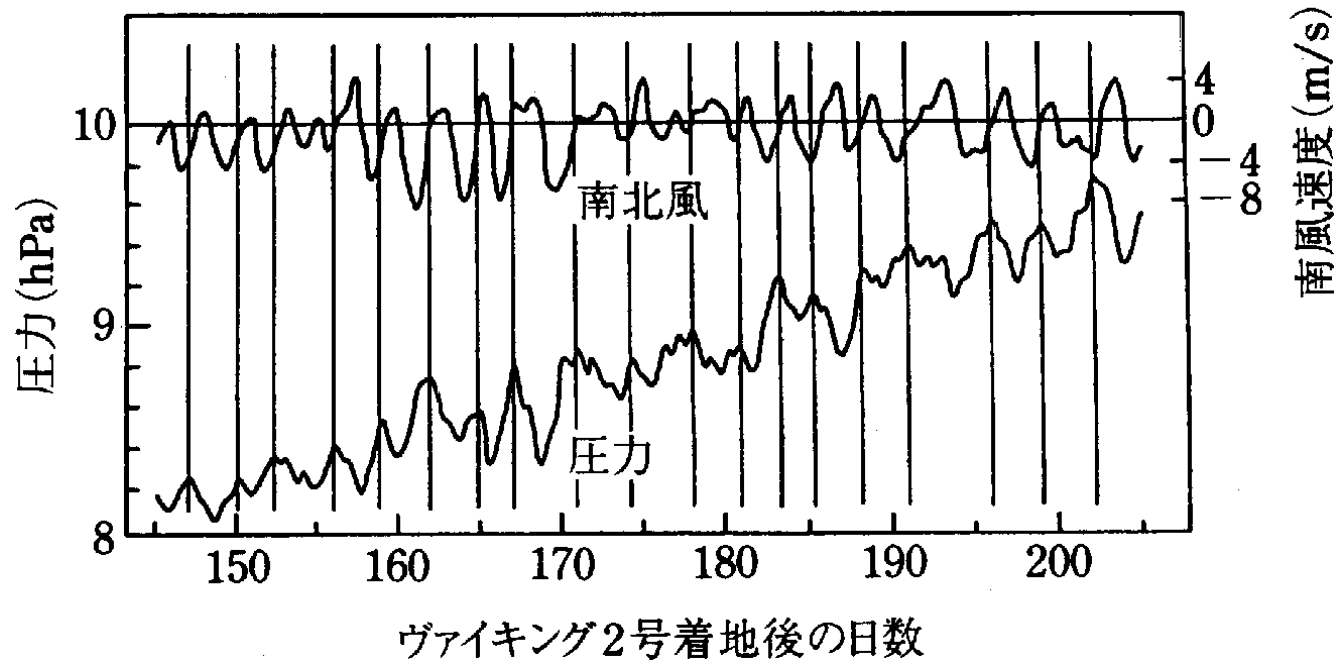
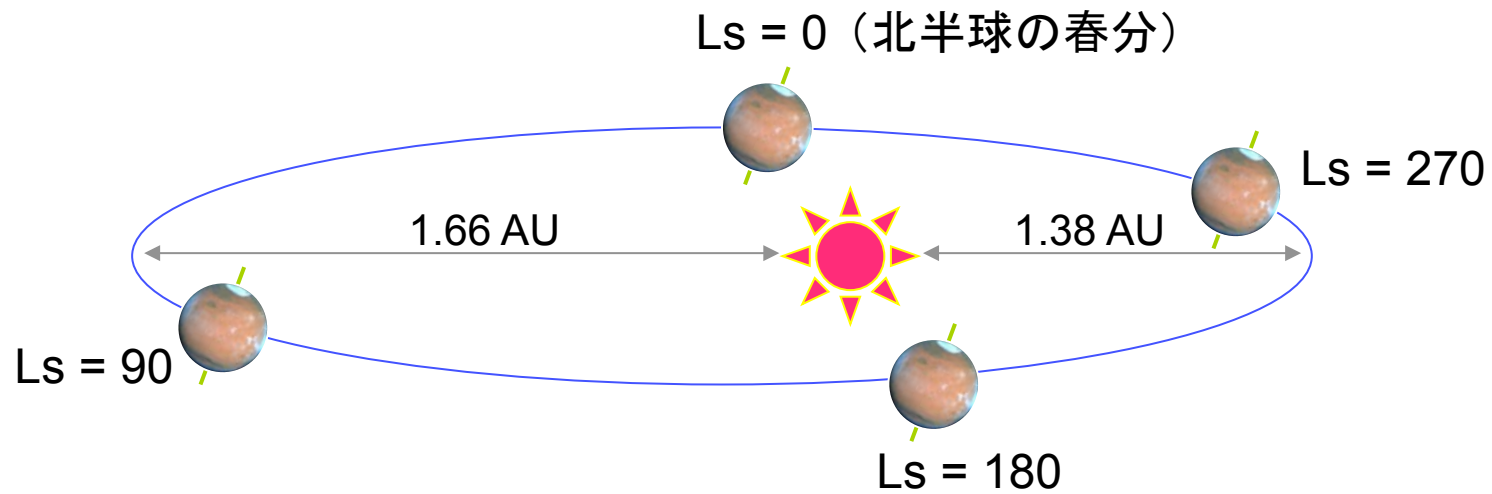


図 1.24 温帯低気圧に伴う南北風速（上）と地表面気圧（下）の変動の、着地したヴァイキング 2 号による観測 (Ryan *et al.*, 1978)

横軸は着地後の日数。縦線は気圧最大のところを示している。熱潮汐による変動を取り除くために、1 日の移動平均が掛けてある。

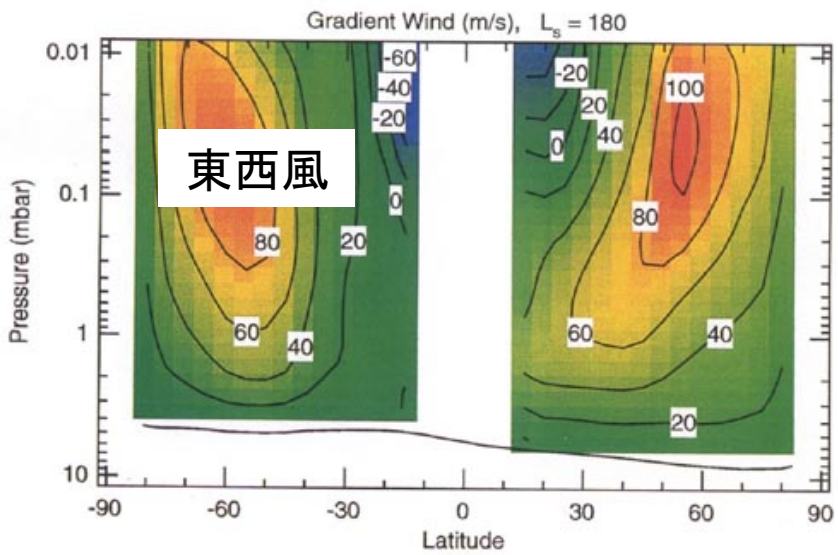
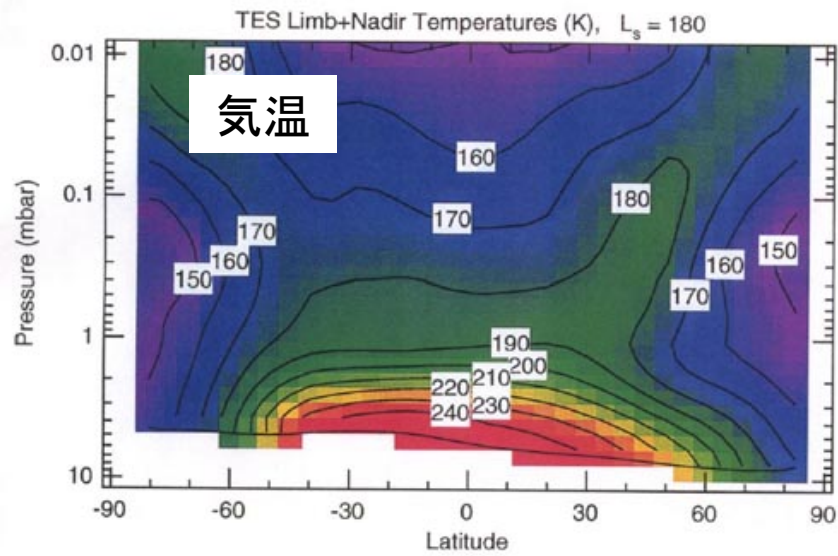
# 火星の四季

火星中心黄経  $L_s$  で表記

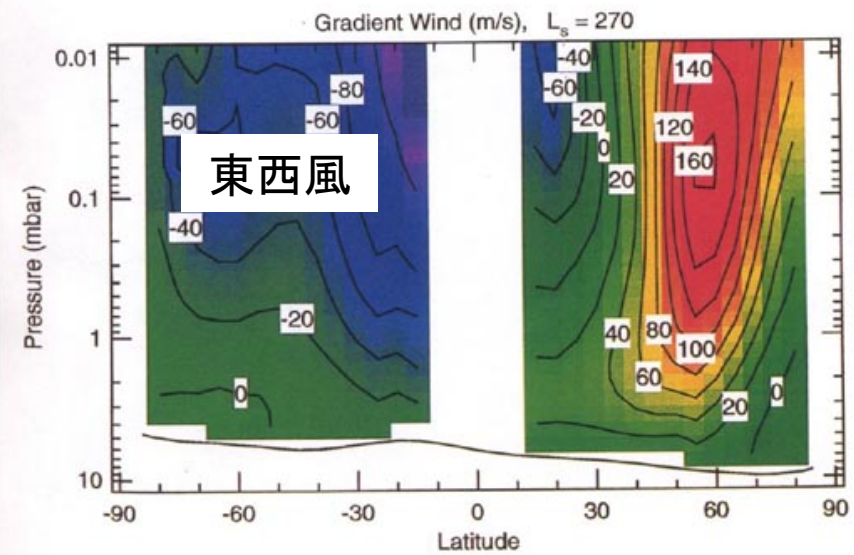
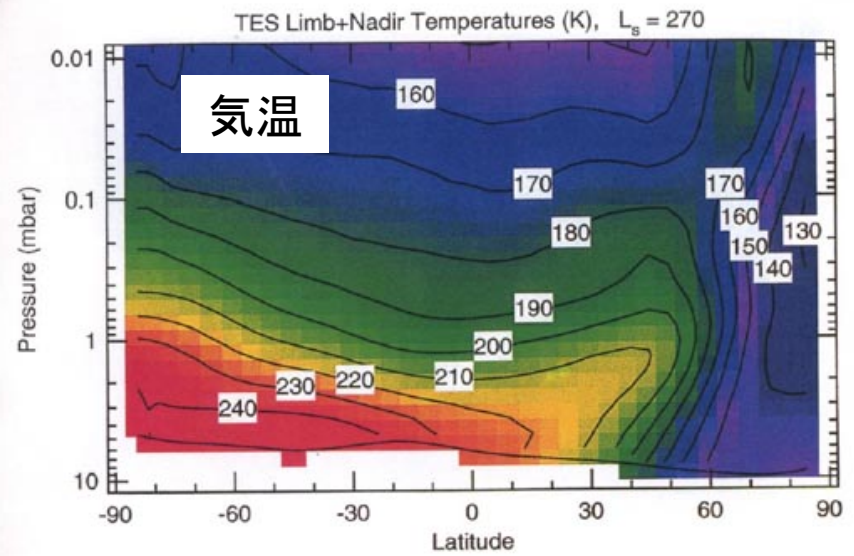


南半球の夏至点が近日点に近い

# 北半球の秋



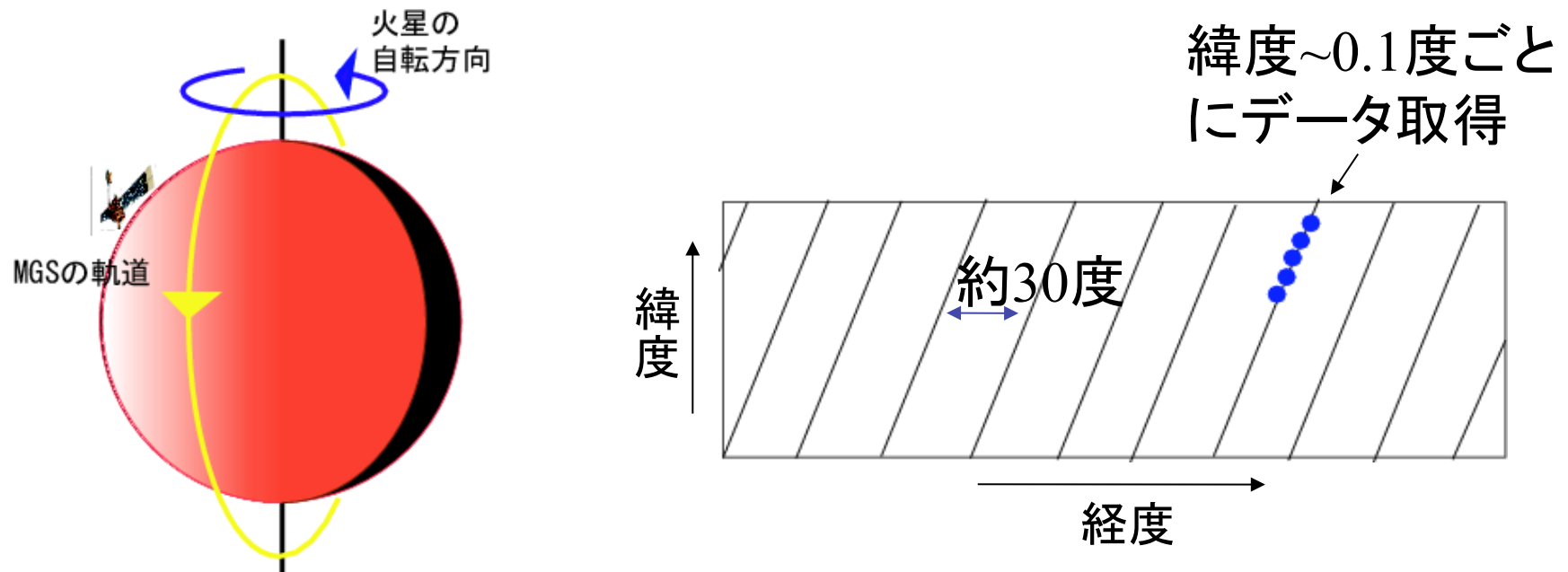
# 北半球の冬

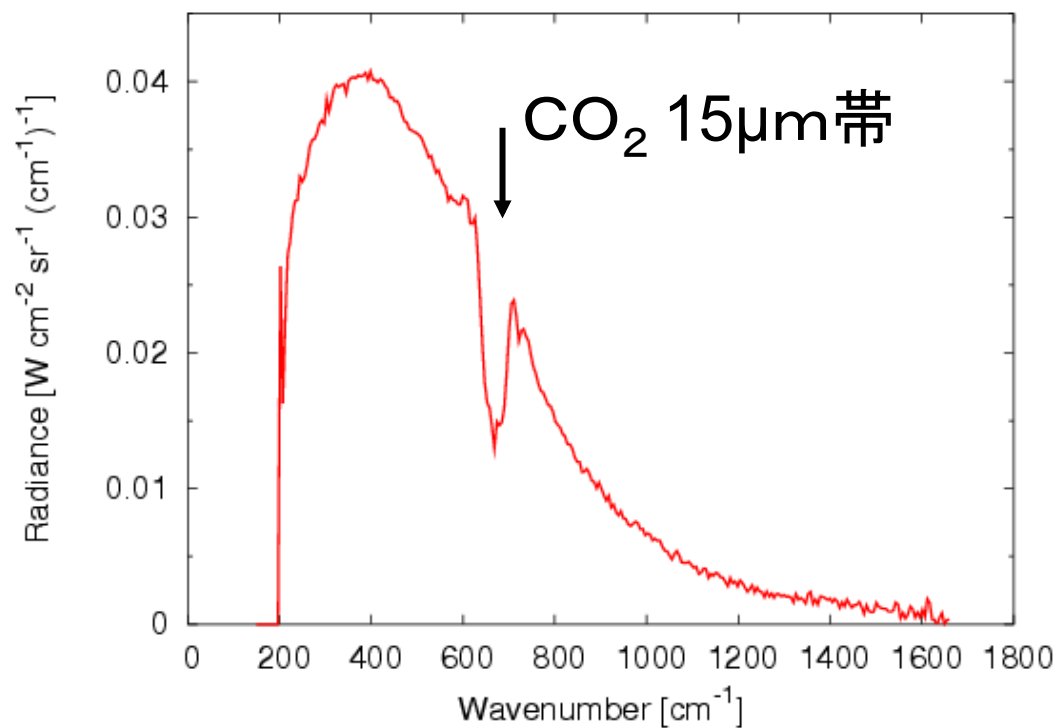




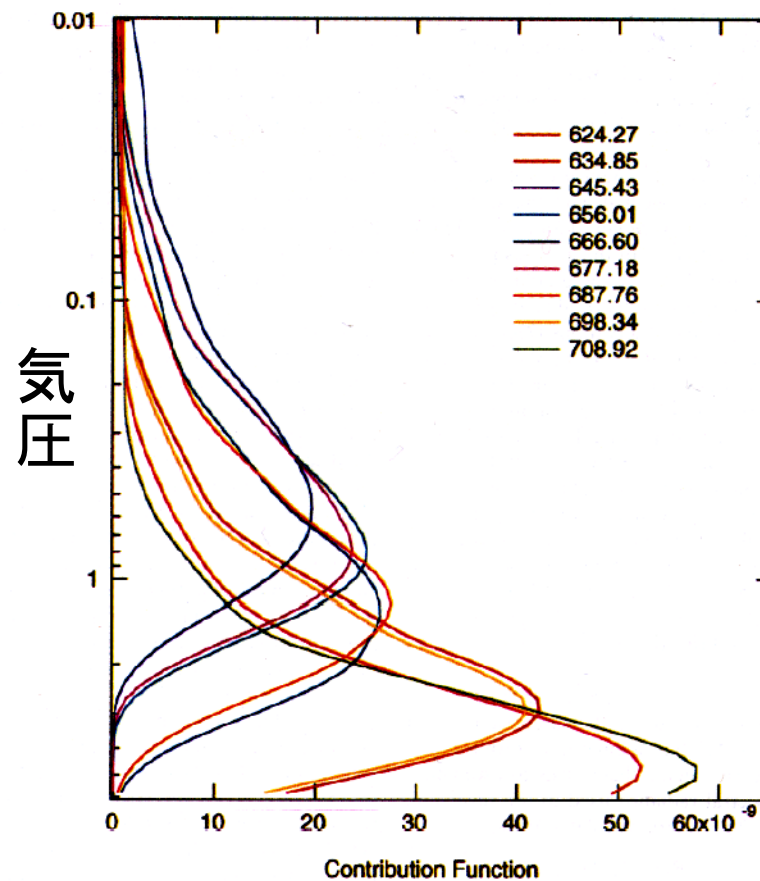
# Mars Global Surveyor Thermal Emission Spectrometer (TES)

- 波数200-1700  $\text{cm}^{-1}$ の上向き赤外放射を観測
- 太陽同期準回帰軌道、約2時間で火星を1周
- 2時と14時で観測 → 14時のデータを使用
- 1999～2004年：Mars Year (MY) 24～27

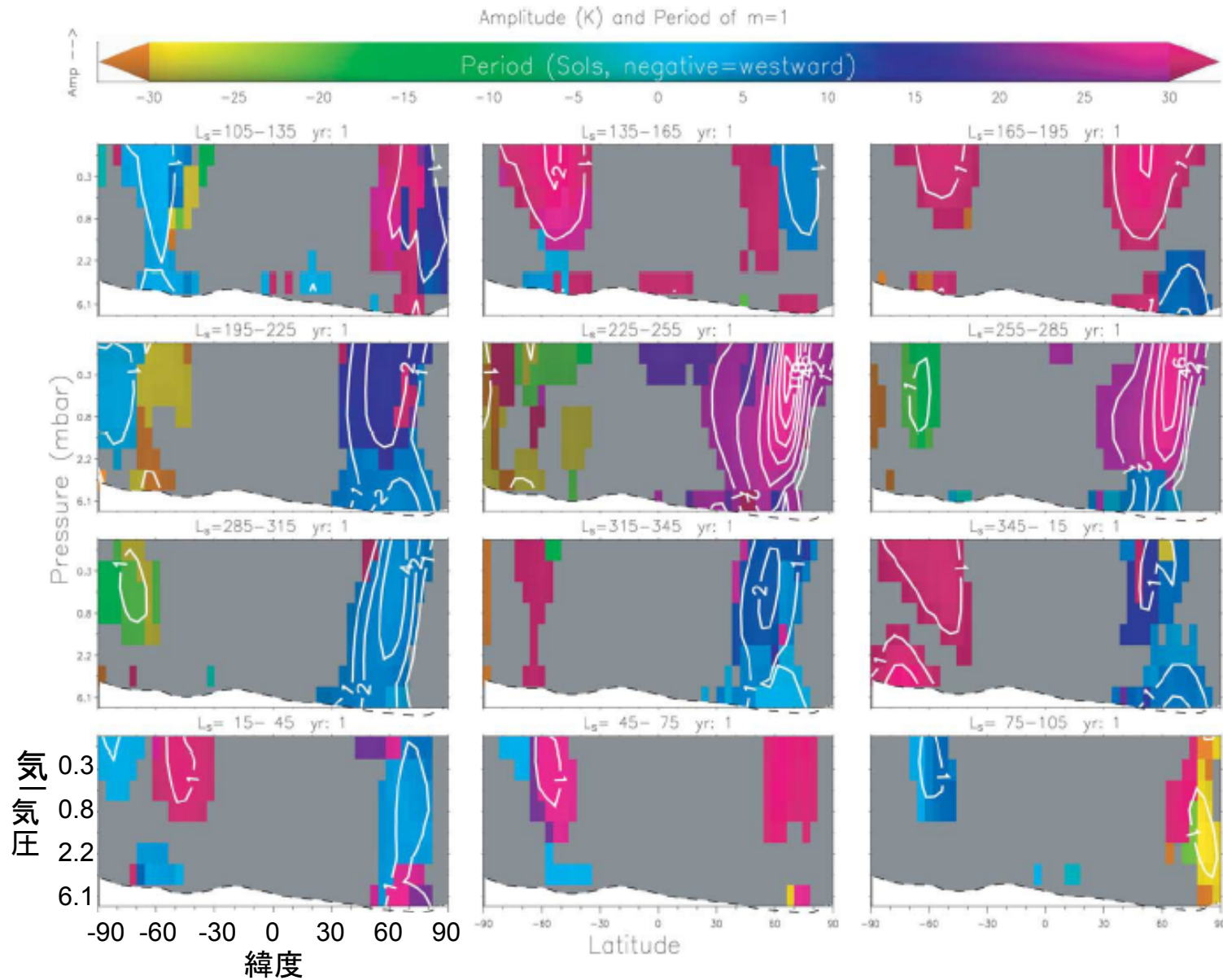




TESによるスペクトルの一例



標準的な火星大気における  
CO<sub>2</sub> 15 $\mu\text{m}$ 帯での寄与関数



TESデータによる東西波数1の伝搬性波動の子午面構造の季節変化(等高線:振幅、色:周期) (Banfield et al. 2004)

# 火星大気の惑星規模～総観規模の波数スペクトル

Imamura and Kobayashi (2009)

- 先行研究・波数1～3の個別の波の空間構造は調べてられているがスペクトル形状の報告はない
  - 本研究のアプローチ
    - 定常成分**: 火星の‘1ヶ月’(Ls60°区間、約60火星日)ごとの平均温度分布
    - 変動成分**: 連続した12軌道(360°の経度範囲を概ねカバー)から1日ごとの温度分布を求め、そこから定常成分を差し引いたもの
- 両者の東西波数1-6のスペクトルを5つの緯度帯で季節ごとに求めた。気圧面は2.2hPa(約10 km)と0.5hPa(約23 km)。



# 有効位置エネルギーへの変換

- 背景場の温位分布が水平方向にほぼ一様として、温度のスペクトルは鉛直変位のスペクトルと関連づけられる。鉛直変位はさらに有効位置エネルギーと対応し、結局次の関係が成り立つ。

$$\Phi_{PE} = \left( \frac{g^2}{2N^2 \bar{T}^2} \right) \Phi_{TT}$$

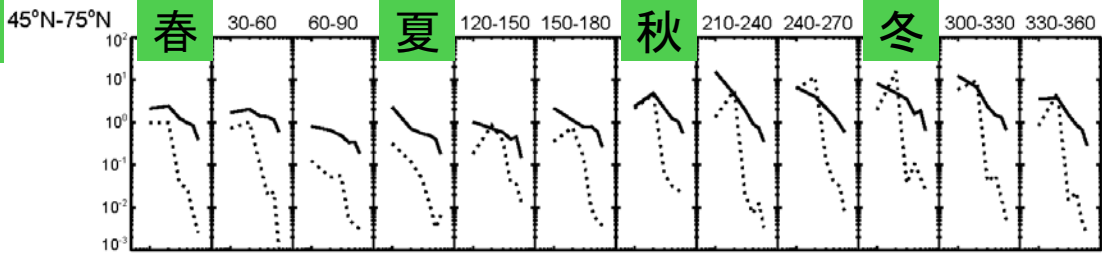
有効位置エネルギー  
スペクトル

温度スペクトル

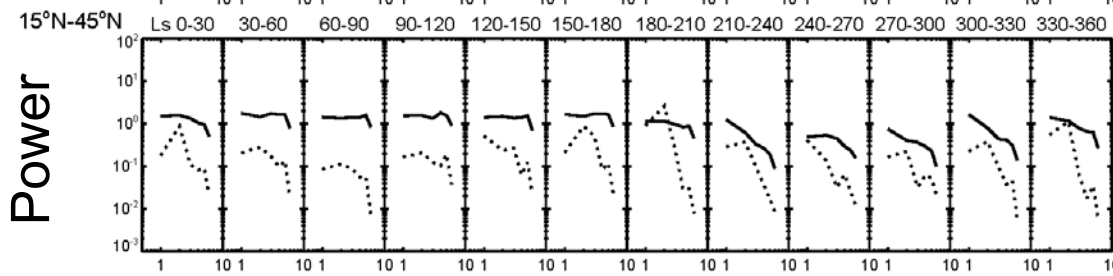
- 浮力振動数 $N$  と 背景温度 $T$  はTESのリトリバルによる温度から計算

2.2 hPa / MY 26

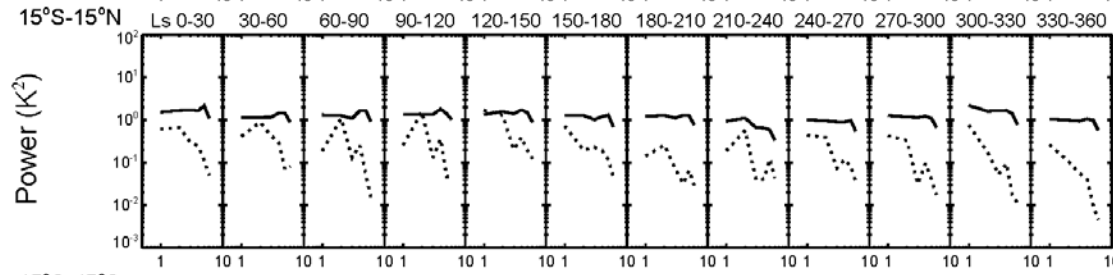
(北半球)



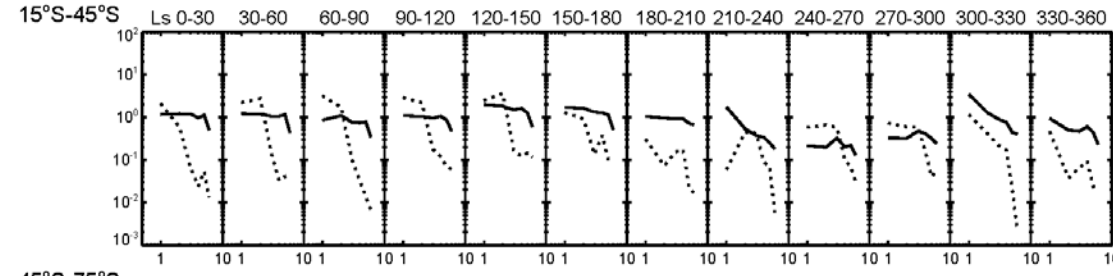
45-75°N



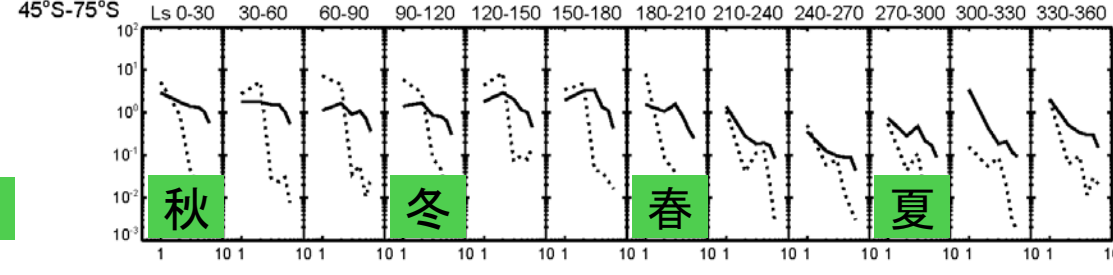
15-45°N



15°S-15°N



15-45°S

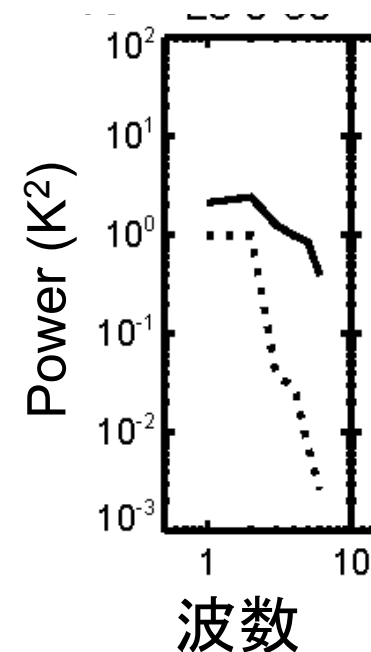


45-75°S

(南半球)

—— 変動成分

- - - 定常成分



Zonal wavenumber

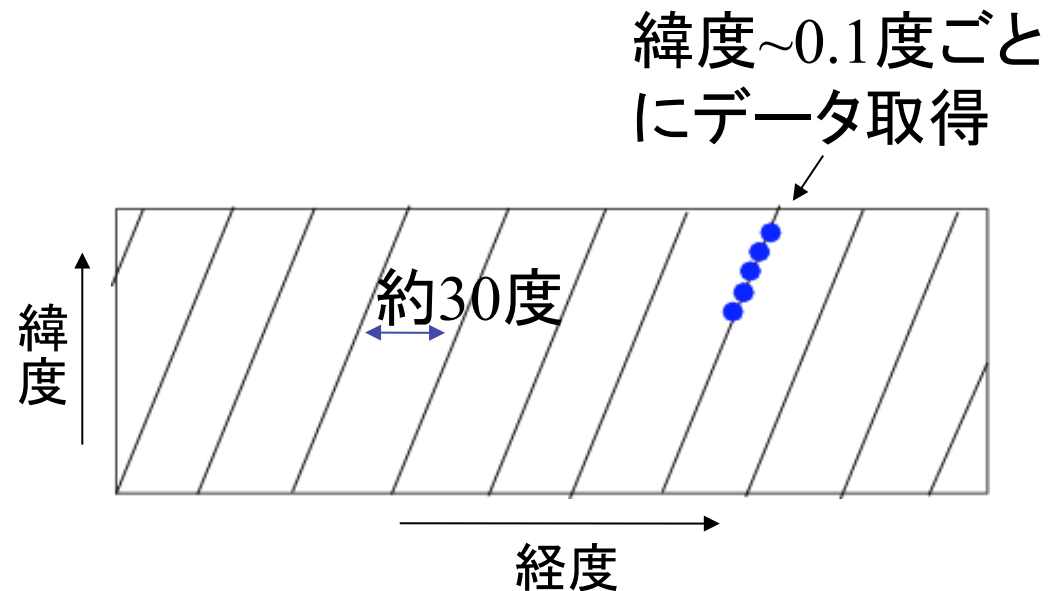
# 火星大気のスเปクトル(波数1-6)の特徴

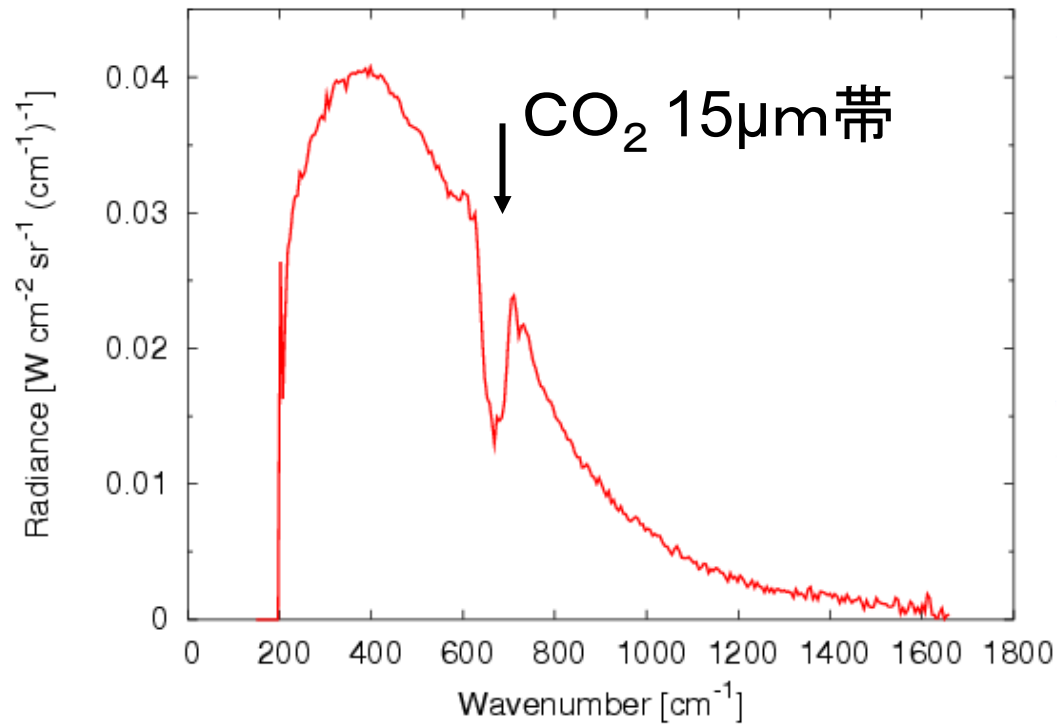
- 定常成分は波数2で極大となる傾向があり、それより高波数側で急激に振幅減少 →地形の波数2の影響か
- 変動成分は波数1で極大となる傾向があり、定常成分に比べてスเปクトルの傾きは小さい  
→ 傾圧不安定からupward cascade? Rhines scaleとは矛盾しない
- 高波数側では変動成分が卓越(地球と同じ)
- 高緯度では冬に極大、夏に極小 →傾圧波の影響か
- 南北温度勾配が極めて小さい夏半球の中・高緯度でも負のスเปクトル勾配 .. 何がエネルギー源なのか
- 変動成分は同じ季節でも北半球のほうが南半球より大きい
- 低緯度では変動成分は平坦、白色雑音的

# 火星大気の総観～メソスケールのスペクトル

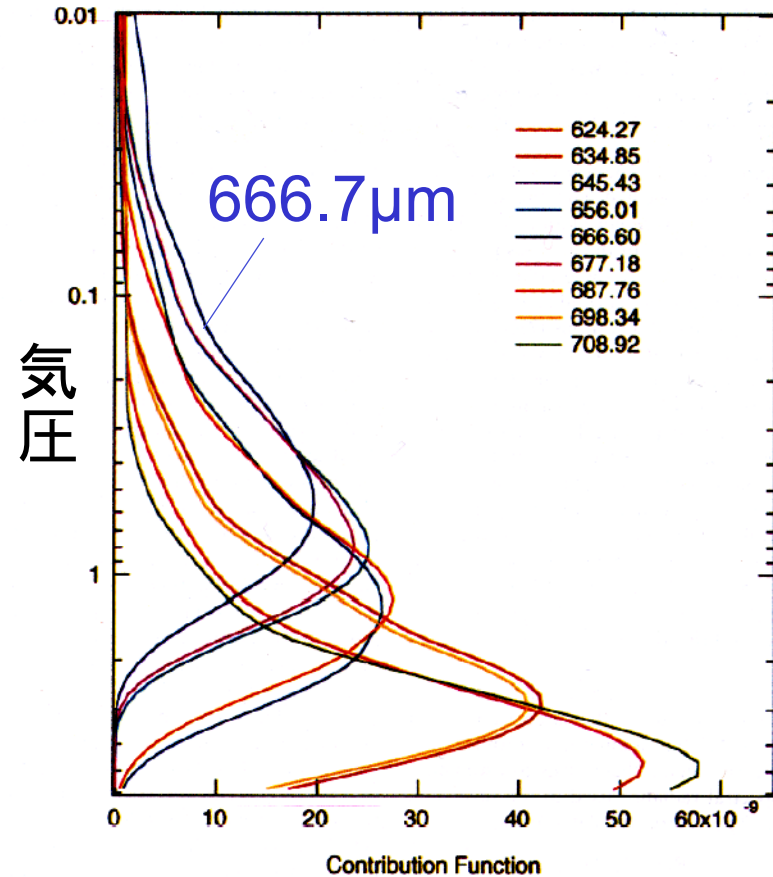
Imamura et al. (2007)

- 個々の軌道に沿った密な大気放射データを利用して軌道に沿った1次元分布をスペクトル解析





TESによるスペクトルの一例



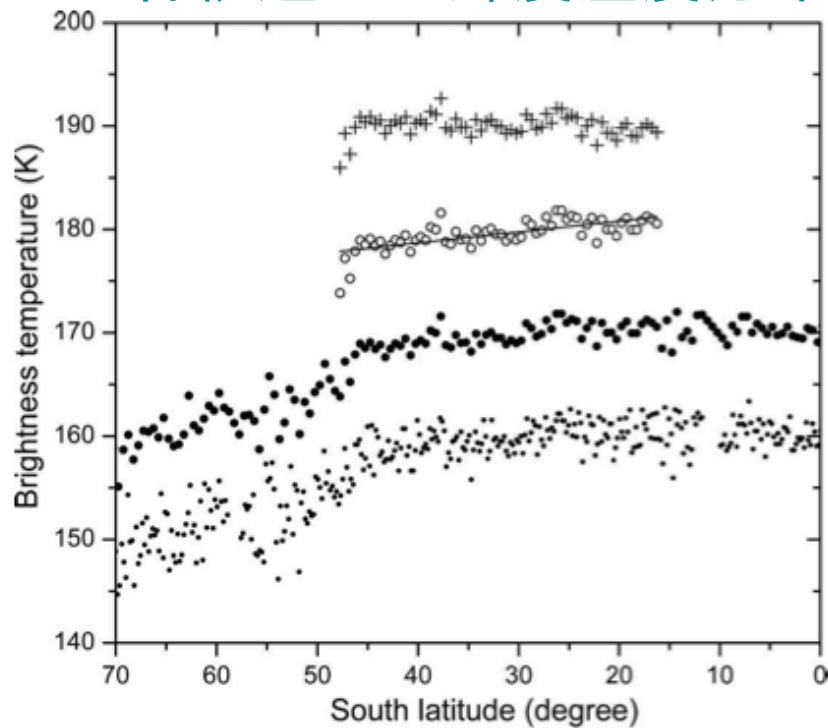
標準的な火星大気における  
CO<sub>2</sub> 15  $\mu m$ 帯での寄与関数

高度15-25kmの大気温度を反映する波数668  $cm^{-1}$ の輝度温度の分布を解析

64°S, 32°S, 0°, 32°N, 64°Nを中心に各32°の緯度幅を切り出す

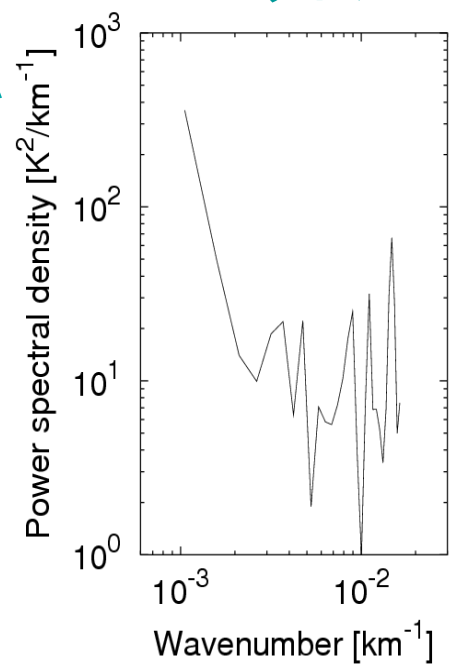
# 解析手順

## 各軌道上の輝度温度分布



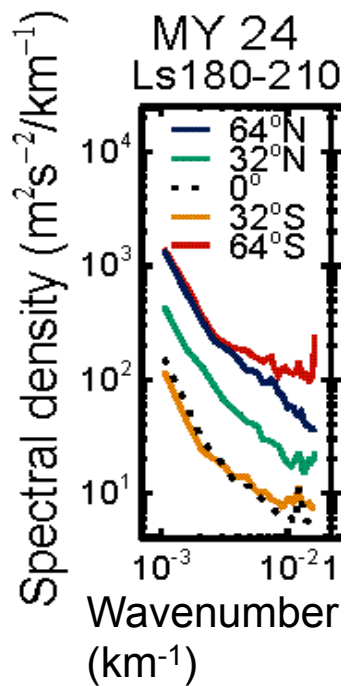
FFT

## 1軌道のパワー スペクトル



波数2以上について1ヶ月  
( $\Delta L_s=30$ )ごとに平均

ただし高緯度では  
16度幅に2分割して計算し、平均



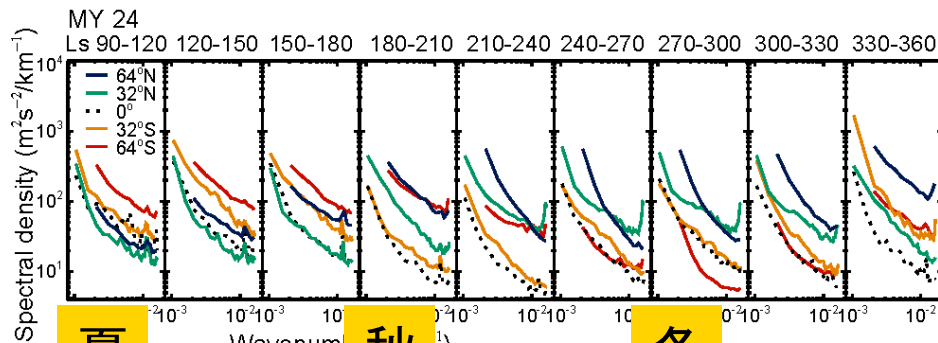
(北半球)

春

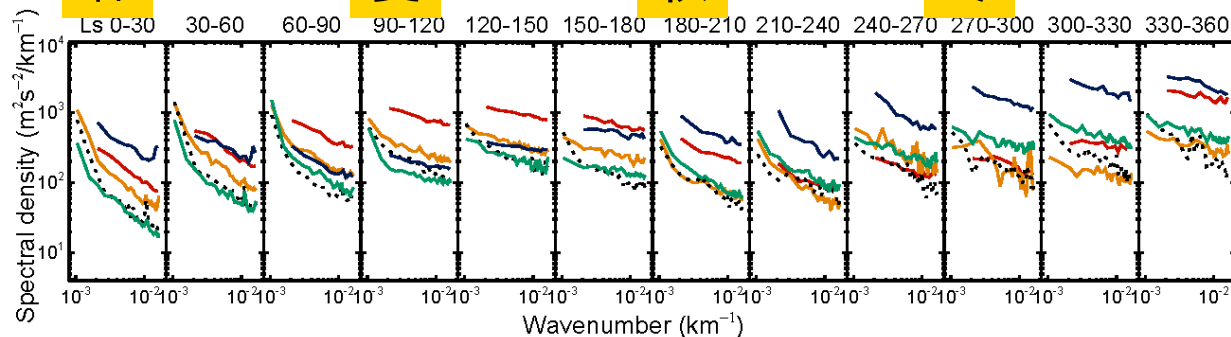
夏

秋

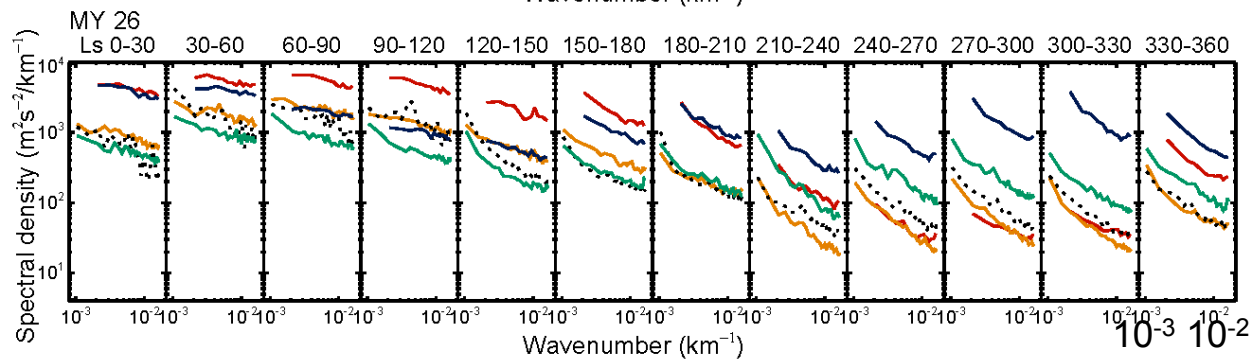
冬



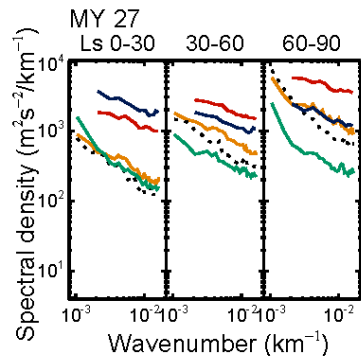
MY 24



MY 25



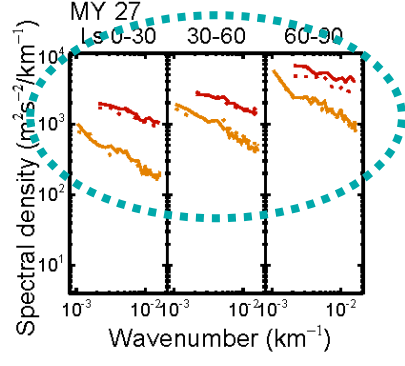
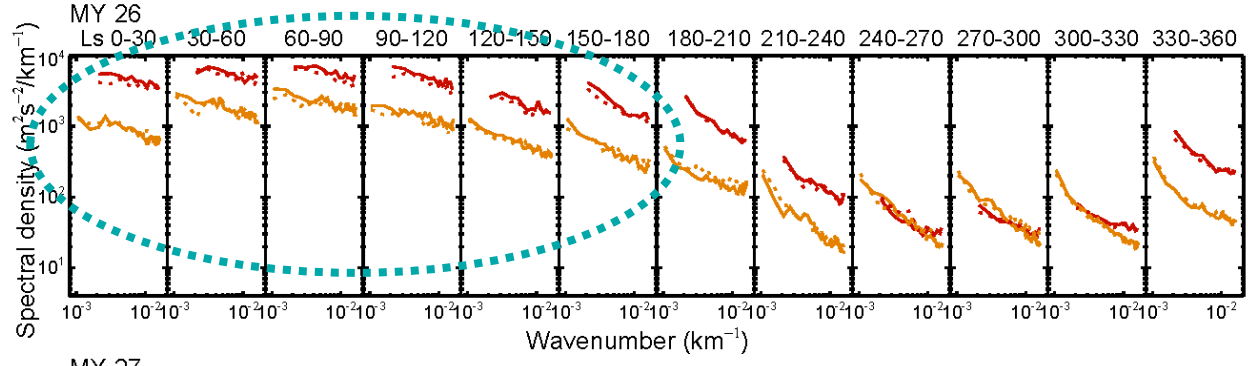
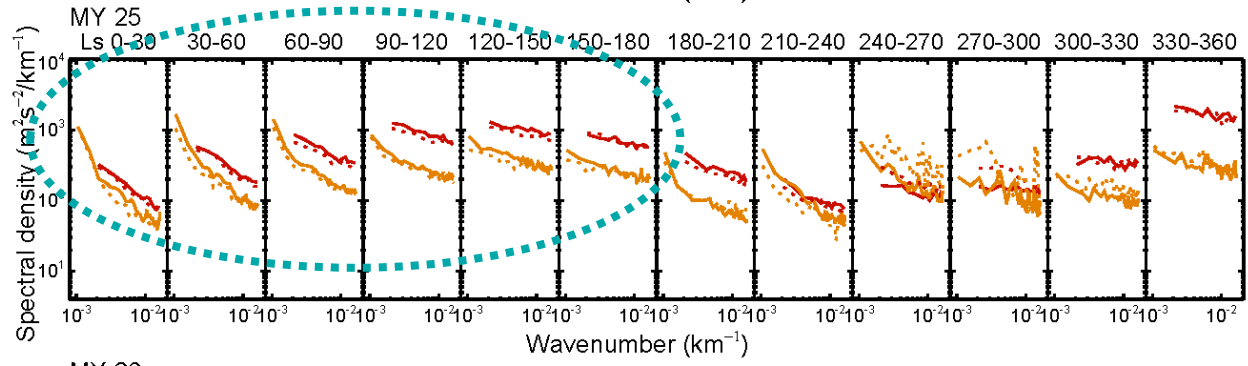
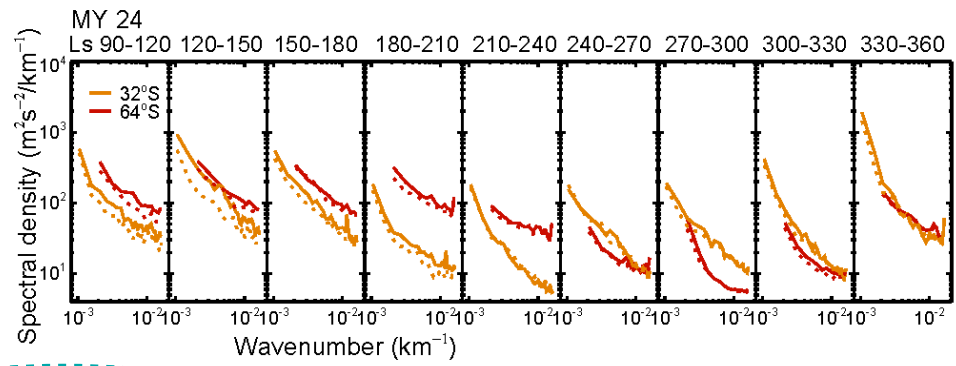
MY 26



MY 27

# 経度依存性 (南半球)

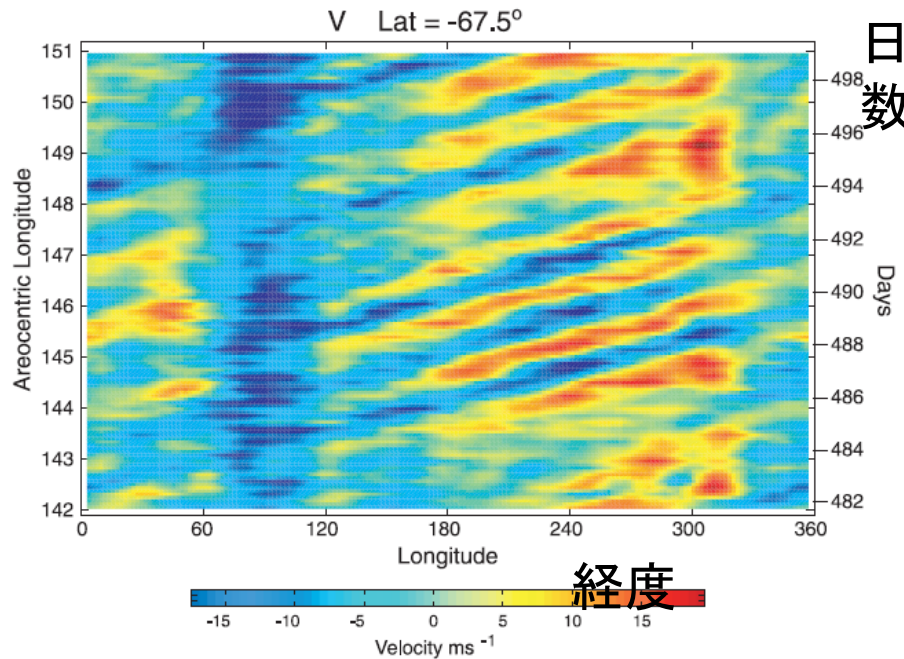
実線 180-360°E  
破線 0-180°E



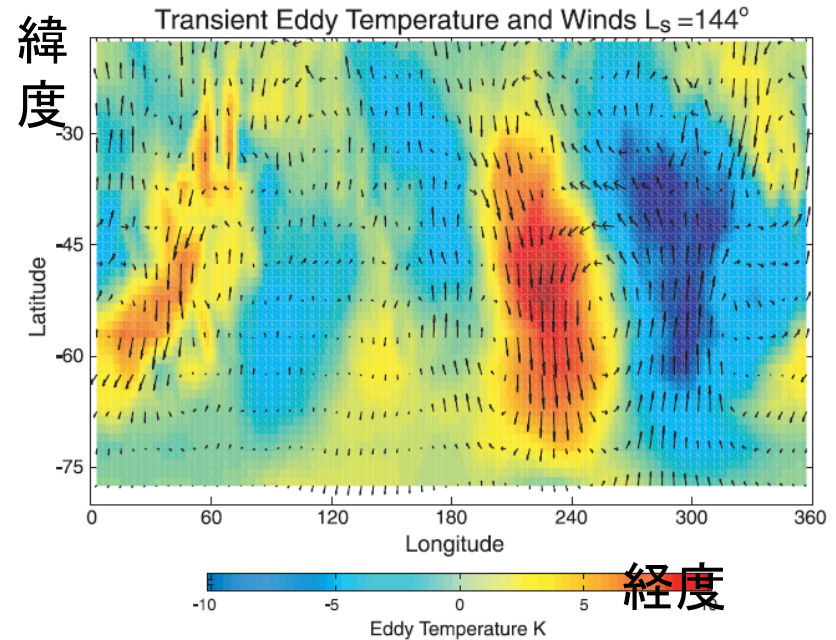
南半球の冬の中・高緯度において  
180-360°Eのほうがパワー大



# Storm tracks (Hinson & Wilson, 2002)



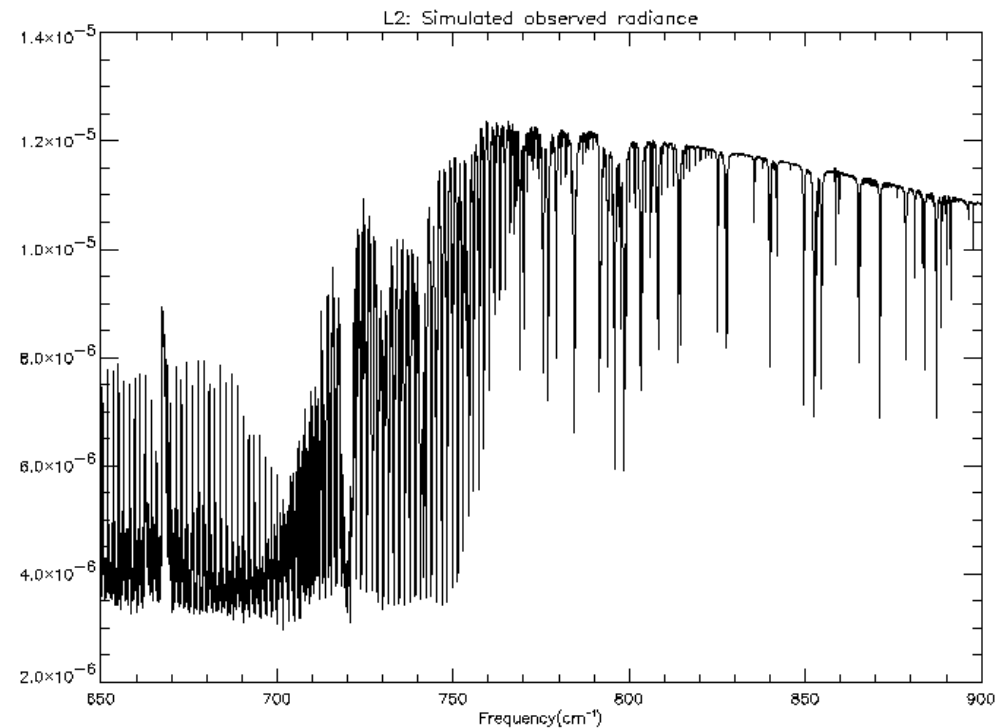
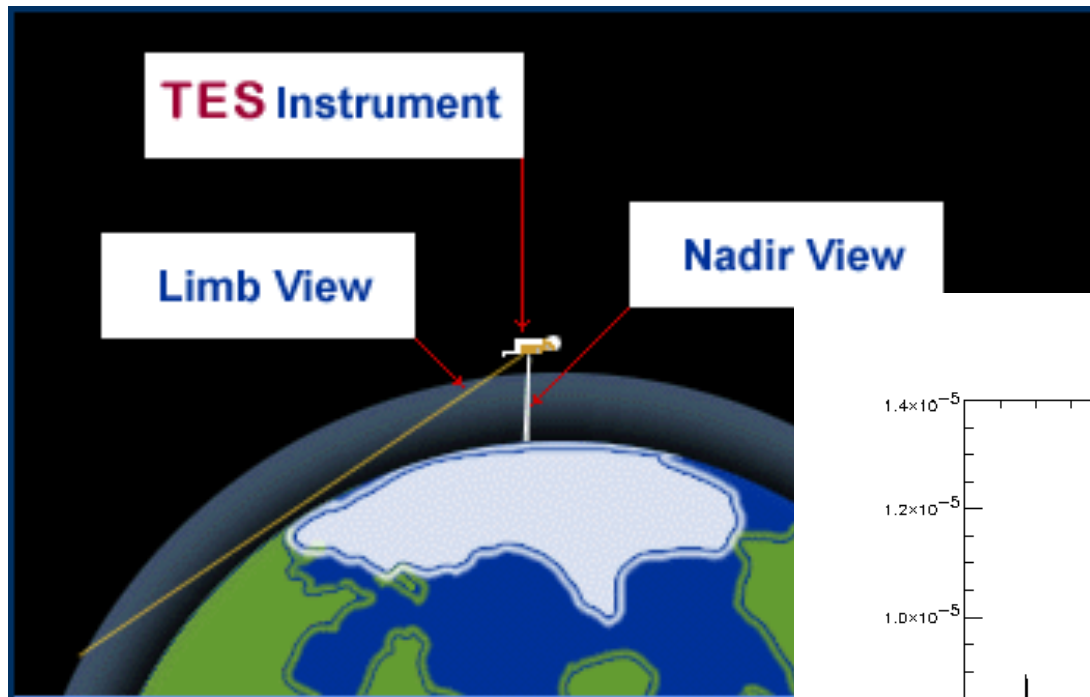
**Plate 1.** Meridional winds (in  $\text{m s}^{-1}$ ) at 300 Pa and  $67.5^\circ\text{S}$  as simulated by the MGCM. The time scale is labeled at left in  $L_s$  and at right in solar days. Positive winds are equatorward. Waves traveling eastward appear as patterns sloping from lower left to upper right. Stationary waves are also present, producing steady poleward winds near  $90^\circ\text{E}$ .



**Plate 2.** Synoptic map of the temperature and horizontal wind fields of the traveling eddies in the MGCM simulation. Results are shown at the 300-Pa pressure level for  $L_s = 144^\circ$ . Temperatures (in K) are indicated by color shading. Wind speed and direction are indicated by the length and orientation of the arrows. Warm temperatures are closely aligned with poleward flow and cool temperatures with equatorward flow.

- 周期2日、東西波数3程度で東向きに伝播
- 東経180-330度で特に振幅が大きい

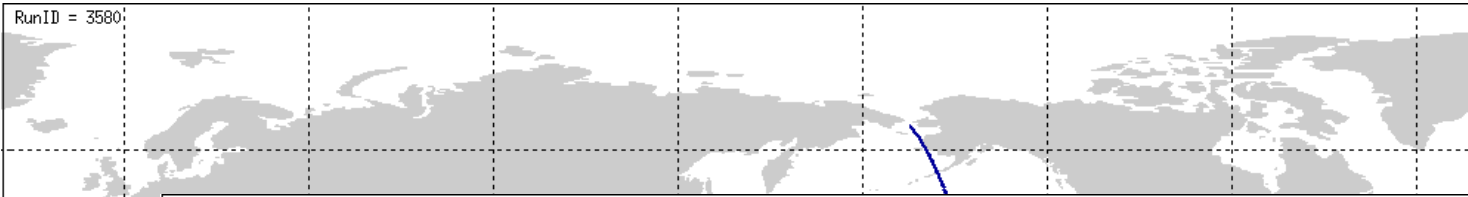
# 地球大気観測衛星AURA搭載TESのリトリバル温度を用いて波数スペクトルを導出



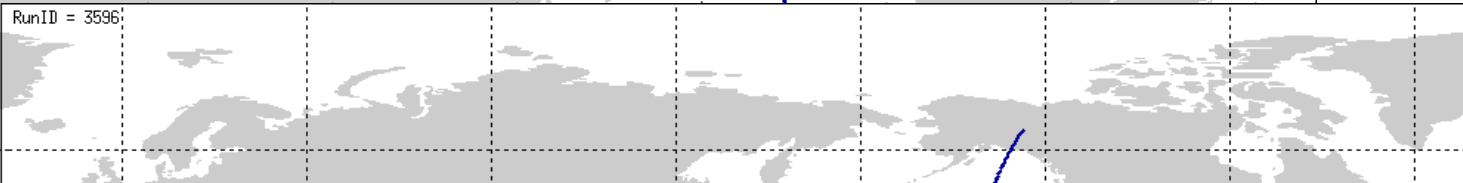
極軌道衛星

高頻度観測時には緯度0.4度  
おきにサンプリング

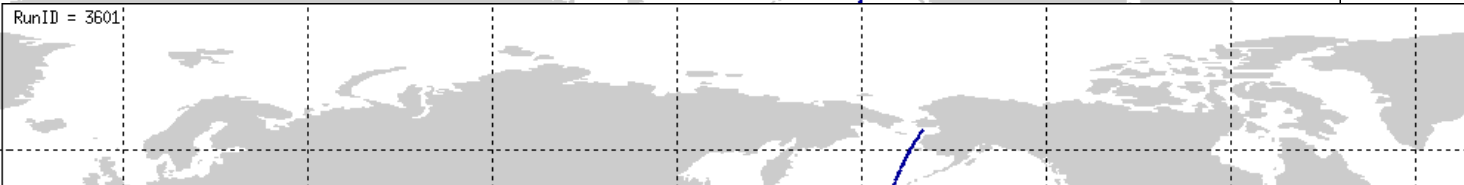
RunID = 3580:



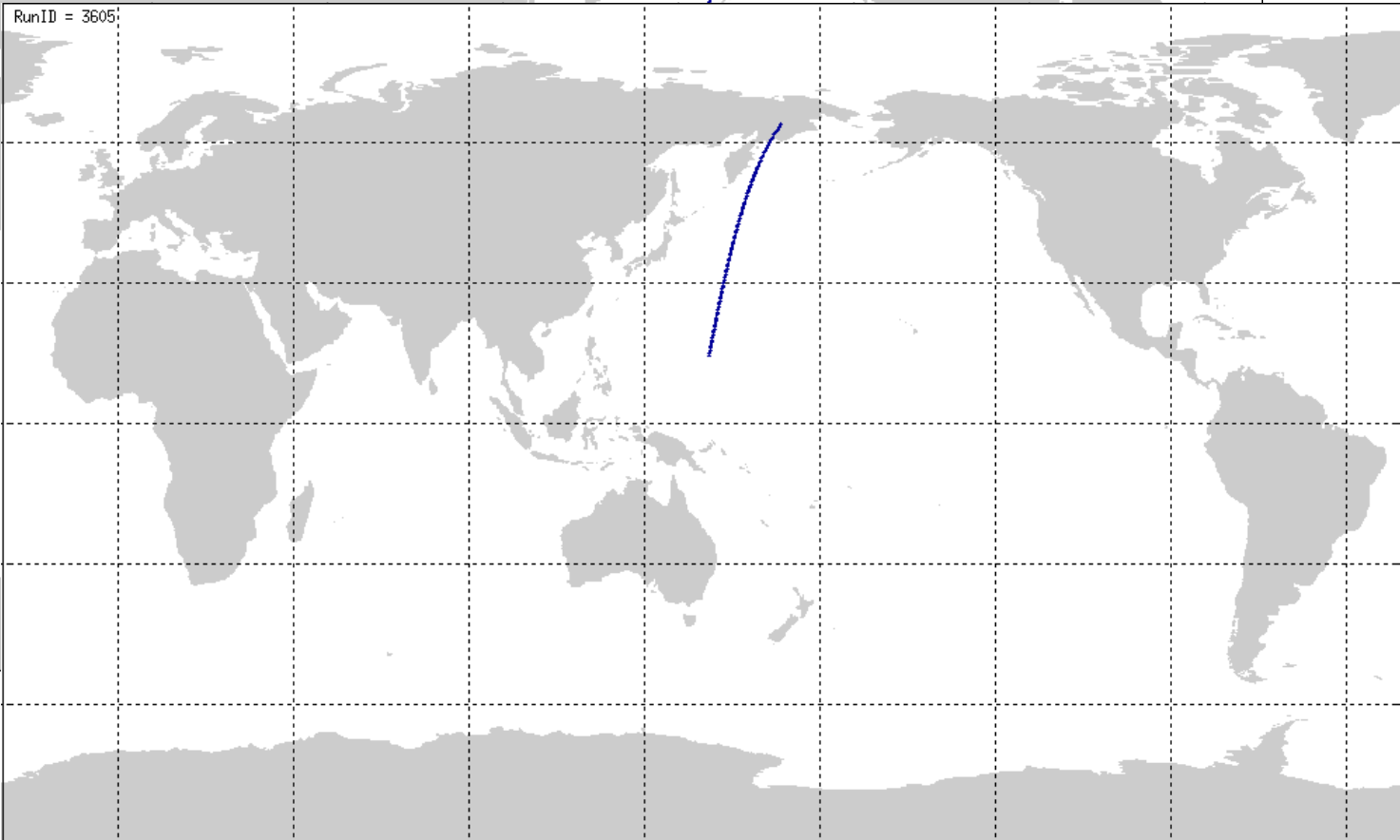
RunID = 3596:



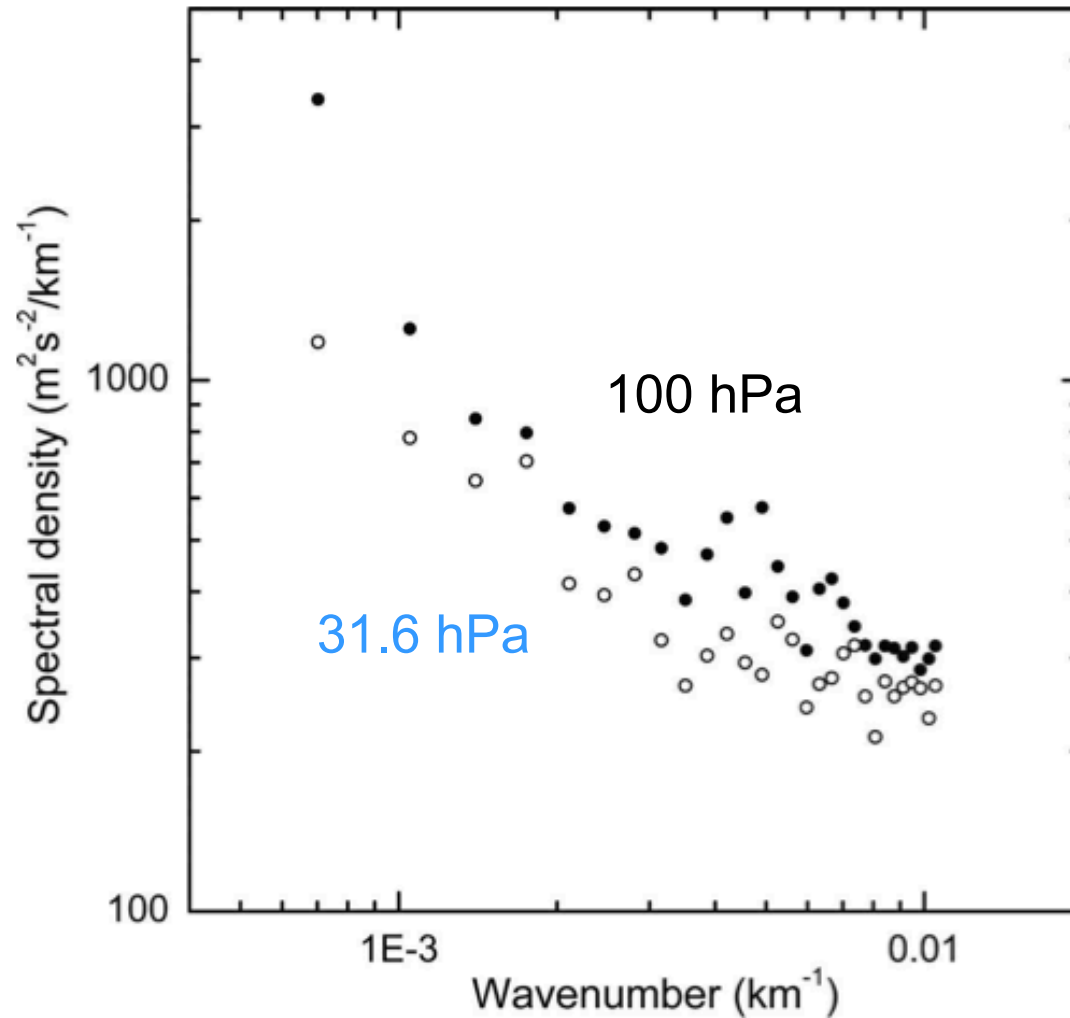
RunID = 3601:



RunID = 3605:



# 地球成層圏のスペクトル



火星と似ている

FIG. 5. Potential energy spectra of the terrestrial stratosphere at 100.0 hPa (filled circles) and 31.6 hPa (open circles) calculated from temperatures remotely measured by the *Aura* TES in the latitudinal band of  $30^\circ$ – $55^\circ\text{N}$  over the Pacific Ocean.

# 火星大気のスเปクトル(60–1000km)の特徴

- 冬半球や春・秋の高緯度の傾圧帯でパワーが大きい
- 長波長側では $-3$ 乗に近い急勾配 → 傾圧不安定擾乱から2次元乱流としてカスケード？
- 短波長側では $-5/3$ 乗より緩やか → 内部重力波？
- 年々変動が大きく、各緯度でのパワーの季節変化の規則性はよくわからない
- 南半球でストームトラックと関係がありそうな経度依存性あり
- 同じ方法で求めた地球成層圏のスเปクトルと共通の特徴が見られる

# 2つの波数領域のスペクトルを連結

0.5hPa, MY25

