

金星大気における波と平均流と の相互作用

*高木征弘(京都産業大学・理学部)

松田佳久(東京学芸大学・自然科学系)

発表の概要

- 金星大気スーパーローテーション
 - 金星の自転周期、夜昼間対流
 - 高速東西風の発見
 - 研究の現状
- 熱潮汐波メカニズム
 - Fels and Lindzen (1974), Plumb (1975) の理論
 - 金星の大気構造、雲層付近の太陽光吸収
 - Takagi and Matsuda (2005, 2006, 2007)
 - タイタン大気 of 熱潮汐波 (荒井 2012)
- その他の波
 - スーパーローテーションの時間変動 (Kouyama 2012)
 - 56-64 km の波 (Hosouchi et al. 2012)
 - 金星中間圏・熱圏の大循環 (Hoshino et al. 2011)
- まとめ

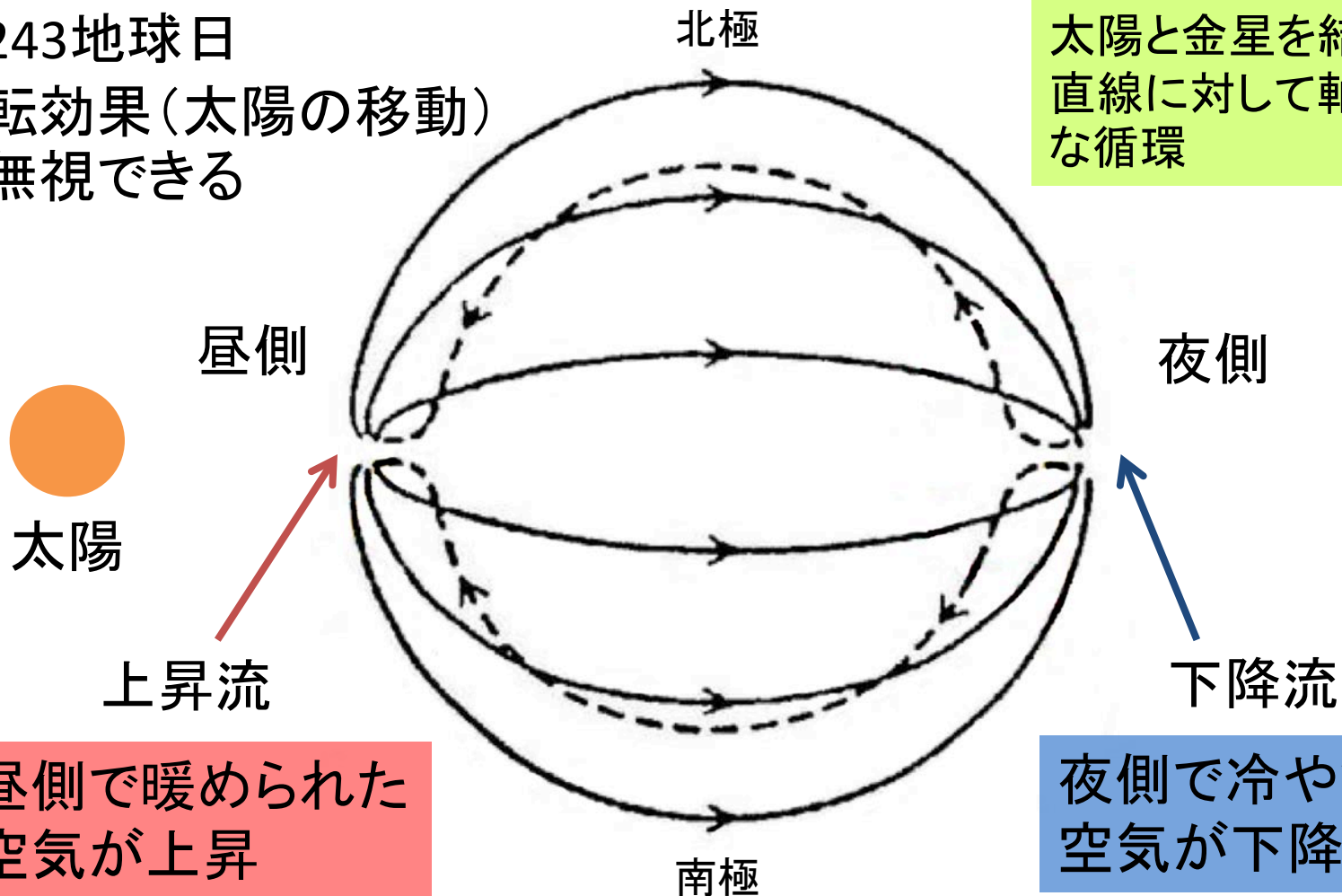
金星の天文パラメータ

| | 金星 | 地球 |
|--------|----------------------------------|---------------------------------|
| 赤道半径 | 6052 km | 6378 km |
| 重力加速度 | 8.90 m/s ² | 9.80 m/s ² |
| 公転周期 | 224日 | 365日 |
| 自転周期 | -243日 | 1日 |
| 1太陽日 | 117日 | 1日 |
| 太陽放射量 | 2617 W/m ² | 1370 W/m ² |
| アルベド | 0.78 | 0.30 |
| 有効放射温度 | 224 K | 255 K |
| 大気組成 | CO ₂ , N ₂ | N ₂ , O ₂ |
| 地表気圧 | 92 bar | 1 bar |

夜昼間対流

金星の自転周期：
～243地球日
自転効果(太陽の移動)
が無視できる

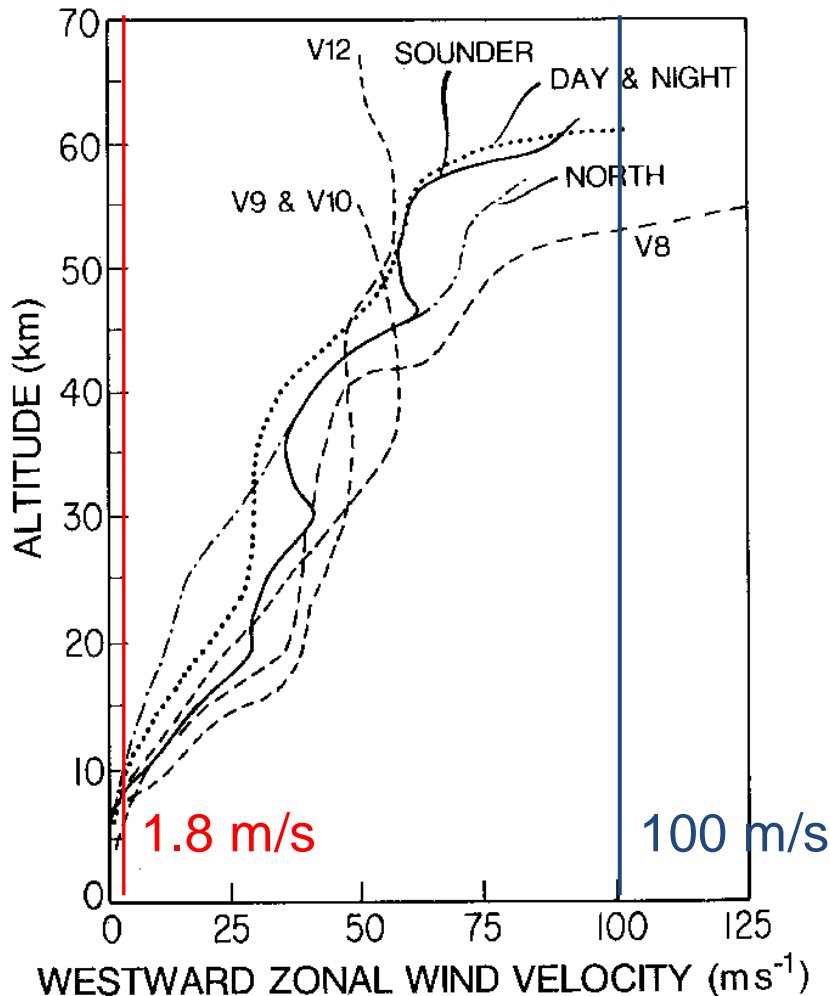
太陽と金星を結ぶ
直線に対して軸対称
な循環



昼側で暖められた
空気が上昇

夜側で冷やされた
空気が下降

高速東西流の発見



Schubert et al. (1980)

- 風速は高さとともに増大
- 高度 70 km で ~ 100 m/s
 - 自転速度の約60倍
 - 回転周期: 約4日
- 上層 (> 70 km) では高さとともに風速減少
- 全球的に分布
 - 緯度分布は剛体回転に近い
- 時空間変動

東西風速の緯度分布

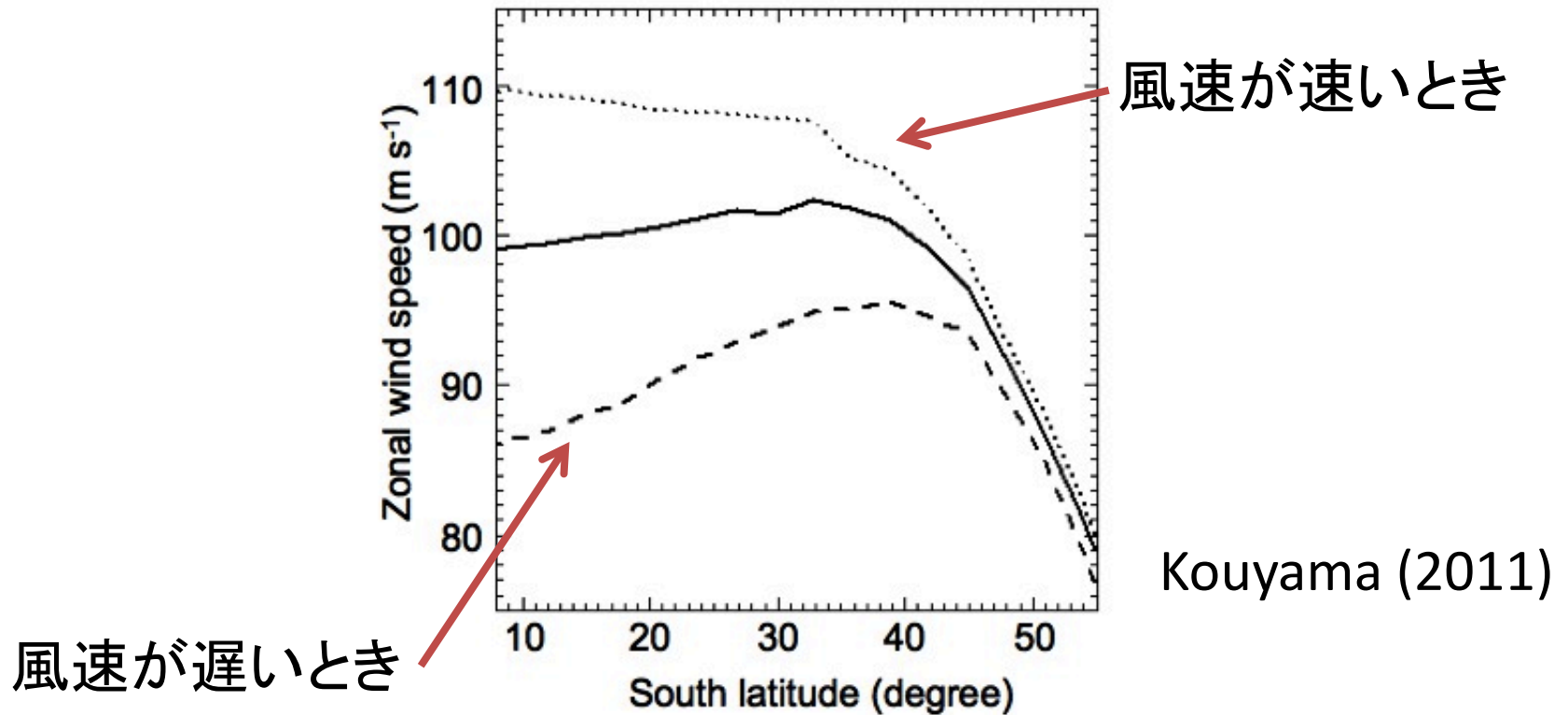


Figure 4.11. Time-averaged, zonal-mean zonal wind distributions as functions of the latitude for the whole observation period (solid), the fast background wind period (dotted), and the slow background wind period (dashed).

提案されたメカニズム

- Moving flame (動く炎), Thompson メカニズム
 - Schubert and Whitehead (1969), Thompson (1970)
 - Takagi and Matsuda (1999, 2000)
- 熱潮汐波メカニズム
 - Fels and Lindzen (1974), Plumb (1975)
 - Newman and Leovy (1992)
 - Takagi and Matsuda (2005, 2006, 2007)
- Gierasch メカニズム
 - Gierasch (1975), Matsuda (1980, 1982)
 - Yamamoto and Takahashi (2003), Lee et al. (2007), Hollingsworth et al. (2007)
 - Kido and Wakata (2008), Yamamoto et al. (2009)

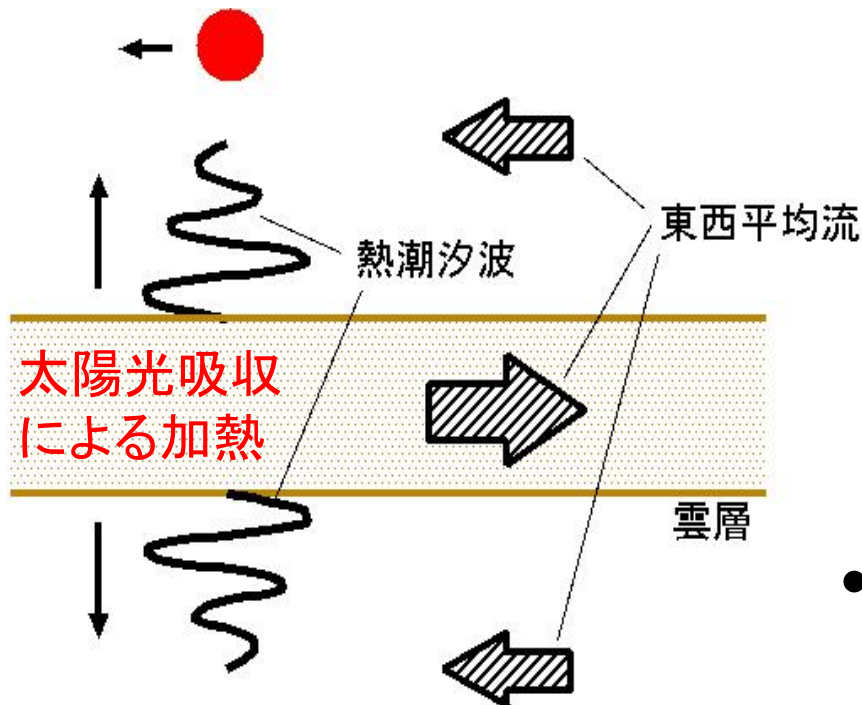
熱潮汐波メカニズム

- 熱潮汐波とは

- 太陽加熱によって励起される重力波
 - 東西波数1=一日潮
 - 東西波数2=半日潮
- 金星大気中では雲層付近で太陽光が吸収され、熱潮汐波が強く励起される。

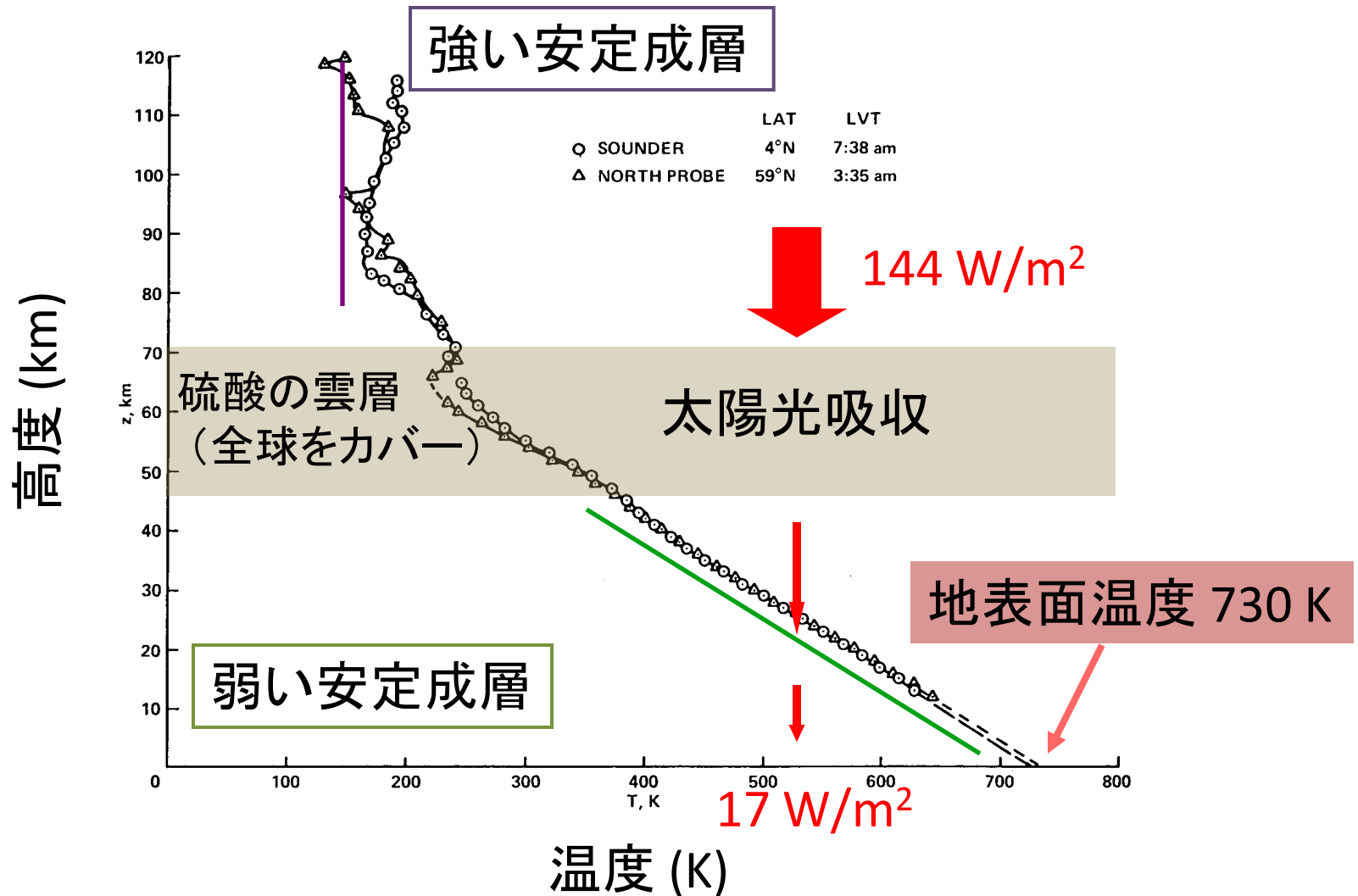
- 熱潮汐波に伴う運動量

- 励起される領域(雲層)では位相速度と逆方向(自転の方向)の平均流が誘導される。

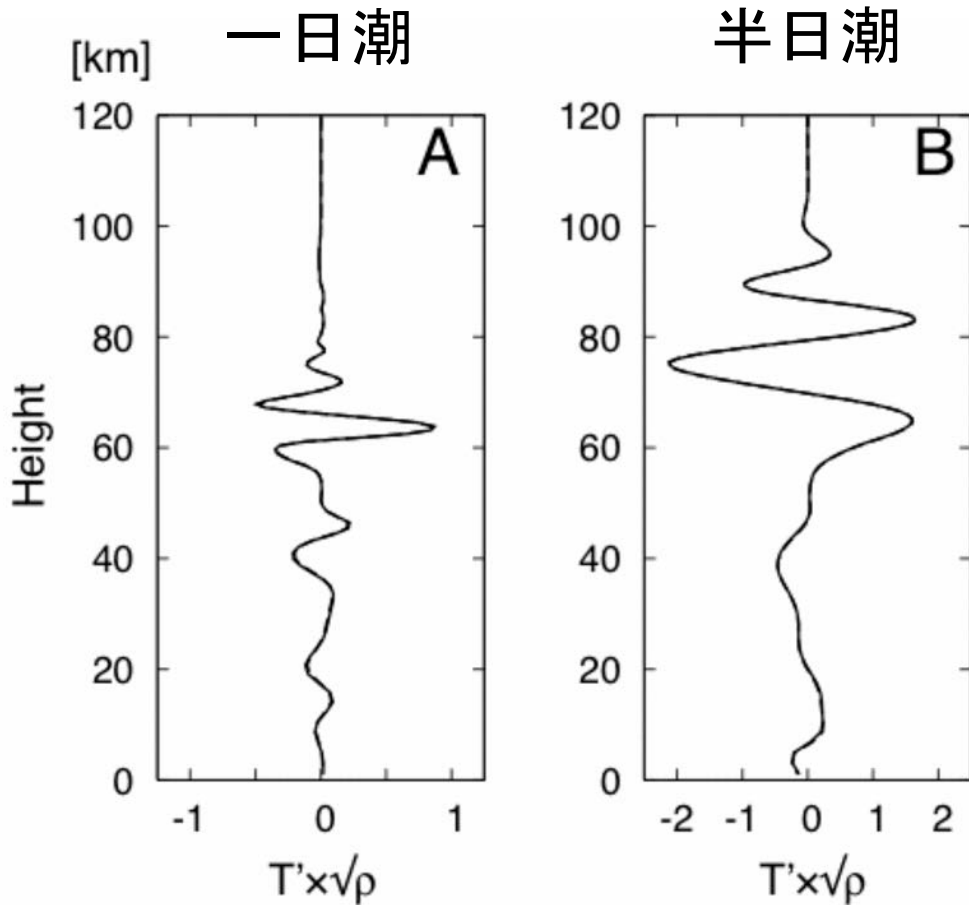


熱潮汐波は位相速度方向の運動量を伴う

金星大気の鉛直構造



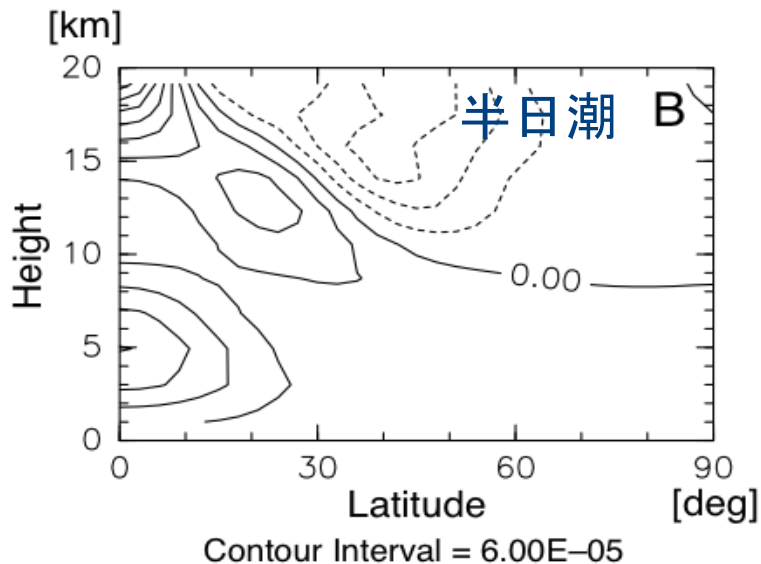
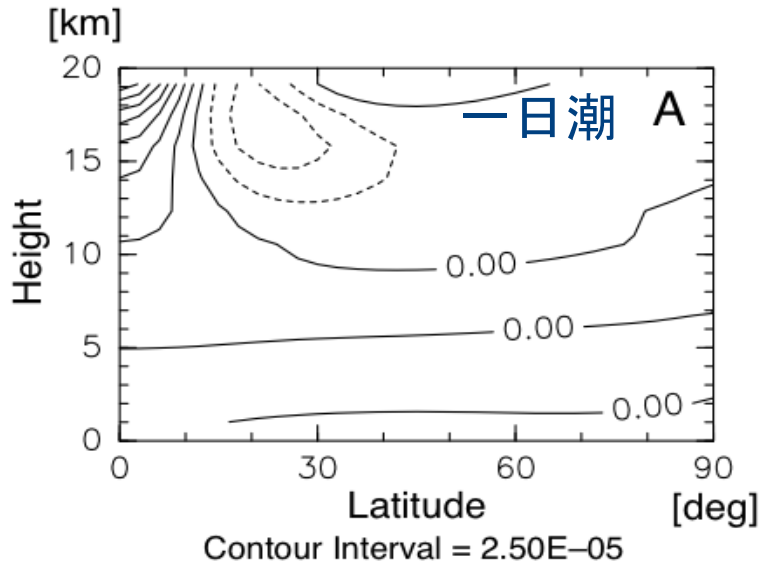
熱潮汐波の鉛直構造



- 雲層で励起された一日潮、半日潮は地面付近まで下方伝播する。
 - 0–40 km での振幅はほとんど雲層加熱で決まり、地面加熱などの影響はほとんど無視できる。
- 雲層高度から地面付近への運動量輸送を示唆。

Takagi and Matsuda (2005, 2006)

地面付近での平均流生成

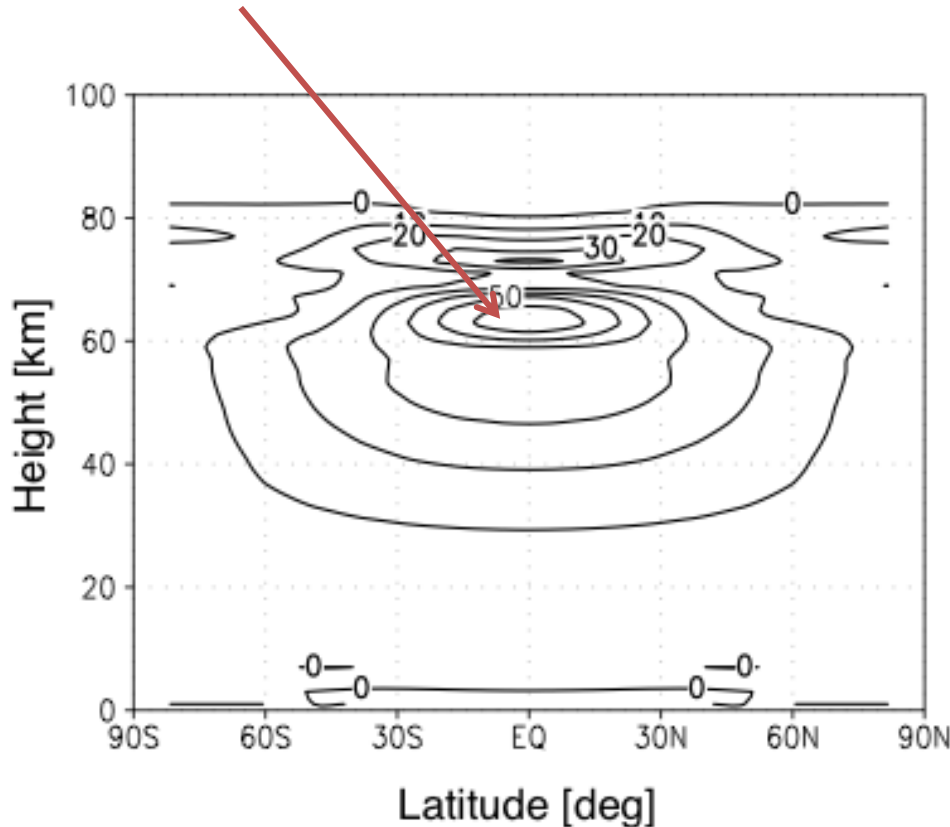


- 一日潮の効果
 - 最下層ではほとんど効果なし
- 半日潮の効果
 - 高度 0–10 km の低緯度域で平均東西流を減速（自転と逆向きに加速）
 - 減速率: 2.4×10^{-4} m/s/day
- 固体部分からの運動量供給
 - 半日潮によって誘導された自転と逆向きの平均東西流に地表面摩擦が作用

雲層と下層大気の間での運動量交換・固体惑星からの運動量供給を示唆

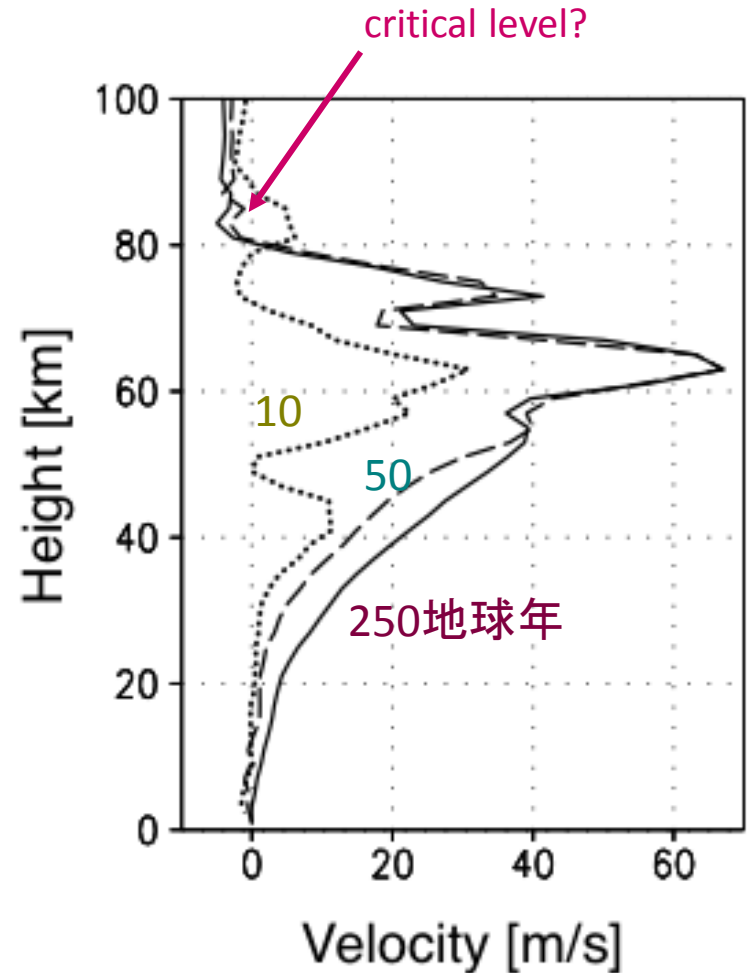
GCM を用いた検証

U_{max} ~ 70 m/s



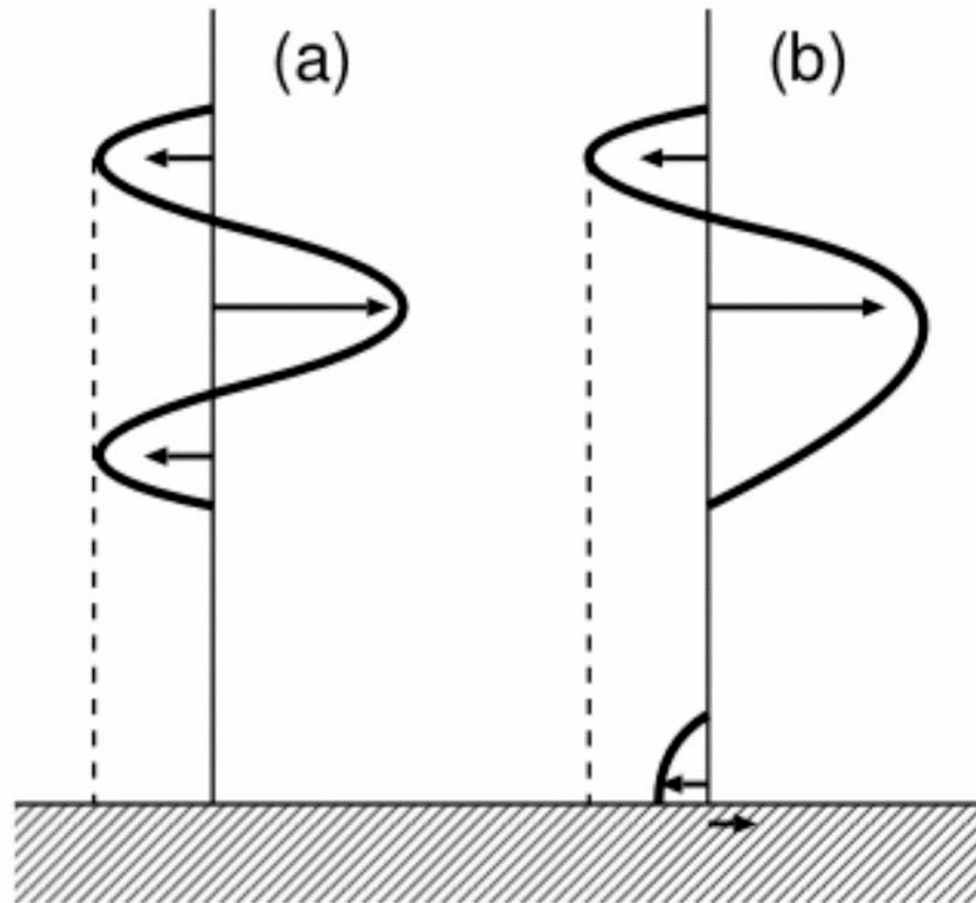
平均東西流の緯度-高度分布
(積分開始から250地球年)

Takagi and Matsuda (2007)



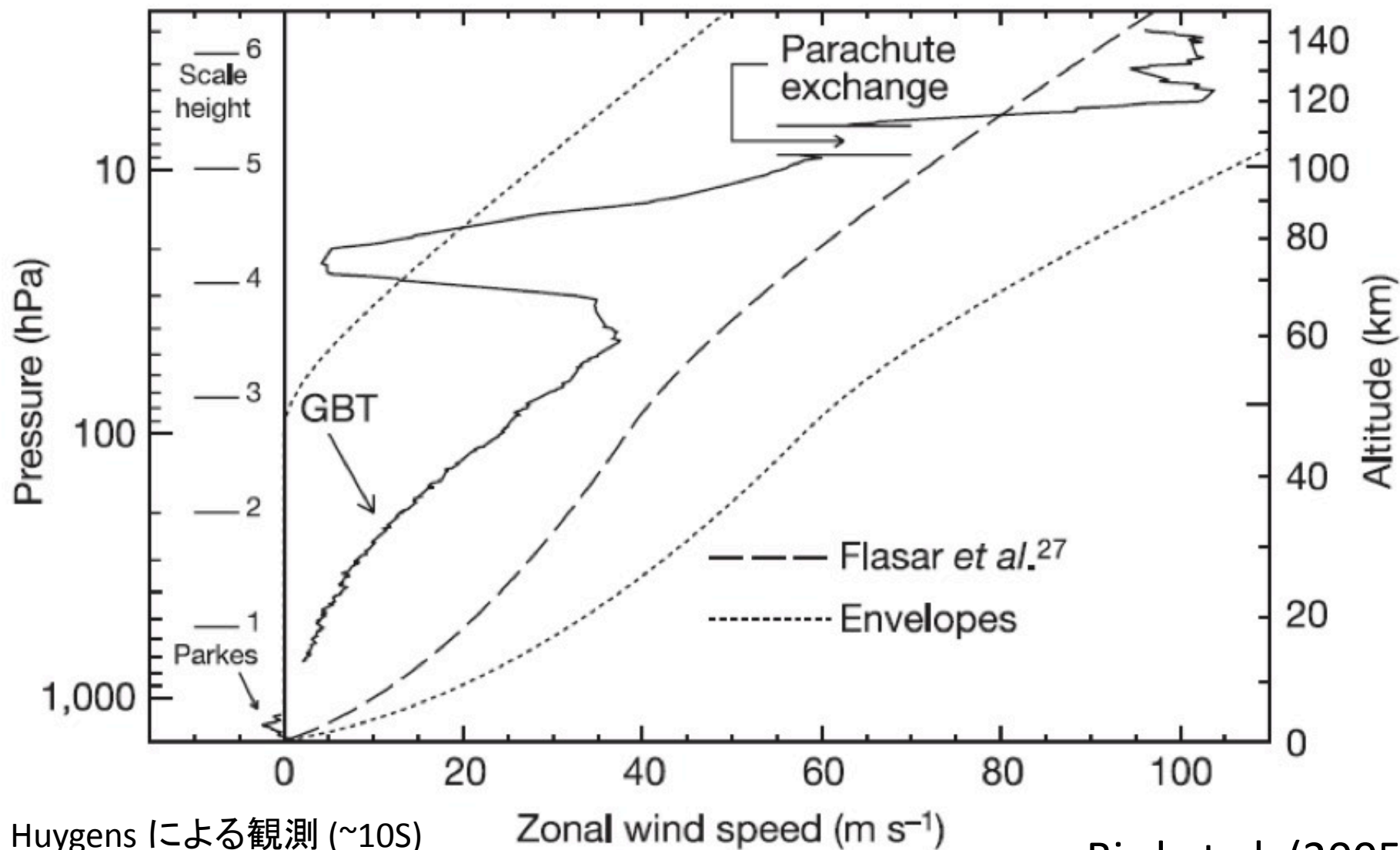
赤道での平均東西流の時間変化

改訂版・熱潮汐波メカニズム



Generation mechanisms of the superrotation: (a) Fels and Lindzen (1974), (b) Takagi and Matsuda (2007)

タイタン大気のスーパージョーテーション

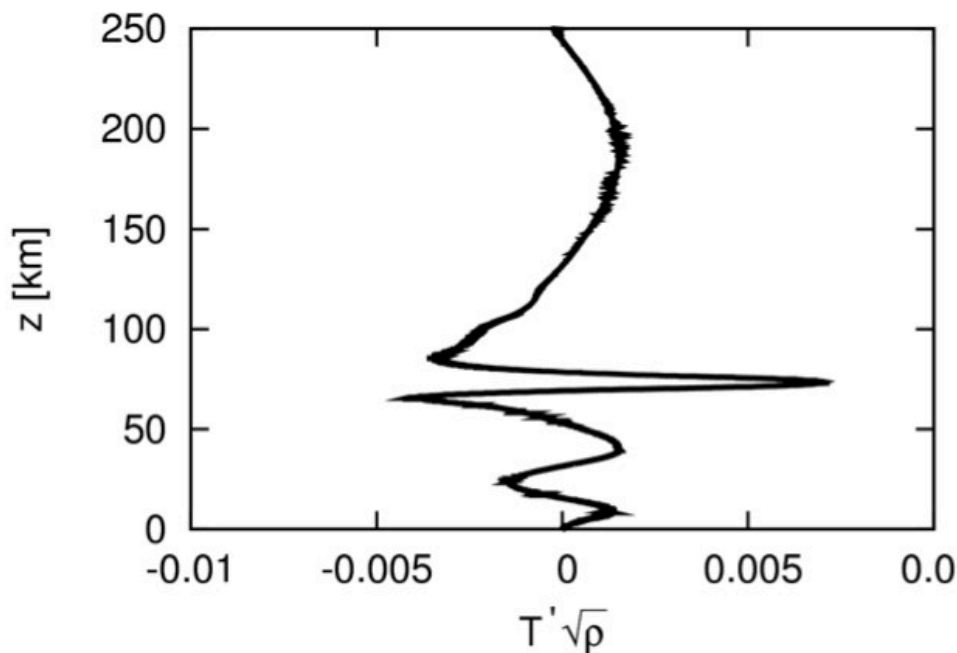


Huygens による観測 (~10S)

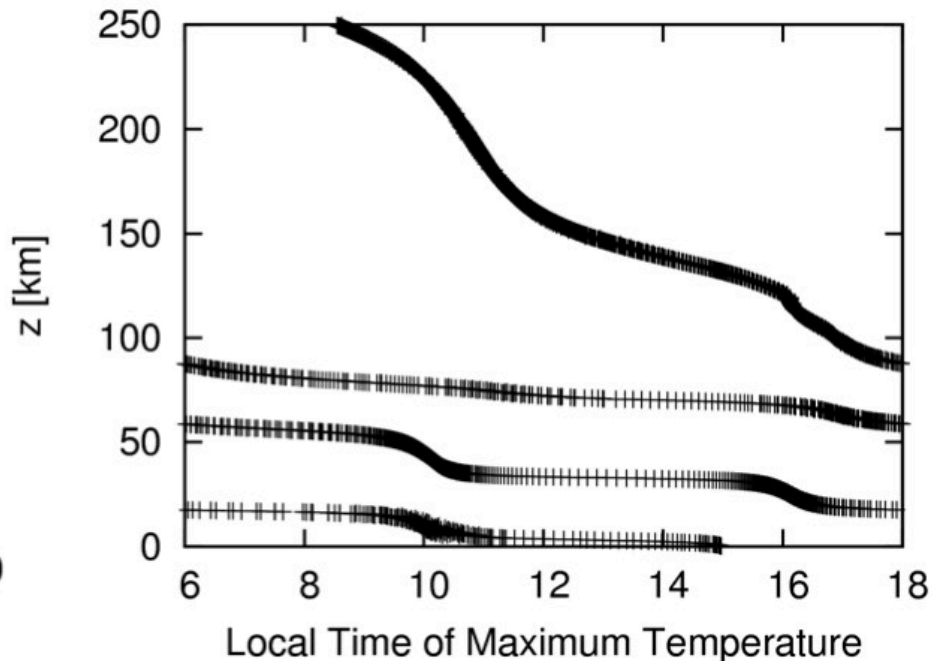
Bird et al. (2005)

タイタン大気の熱潮汐波

半日潮の鉛直構造



位相



金星と異なり、タイタン大気の熱潮汐波は地上から上層に上方伝播する。
→金星の熱潮汐波メカニズムは働かない。

荒井 (2012)

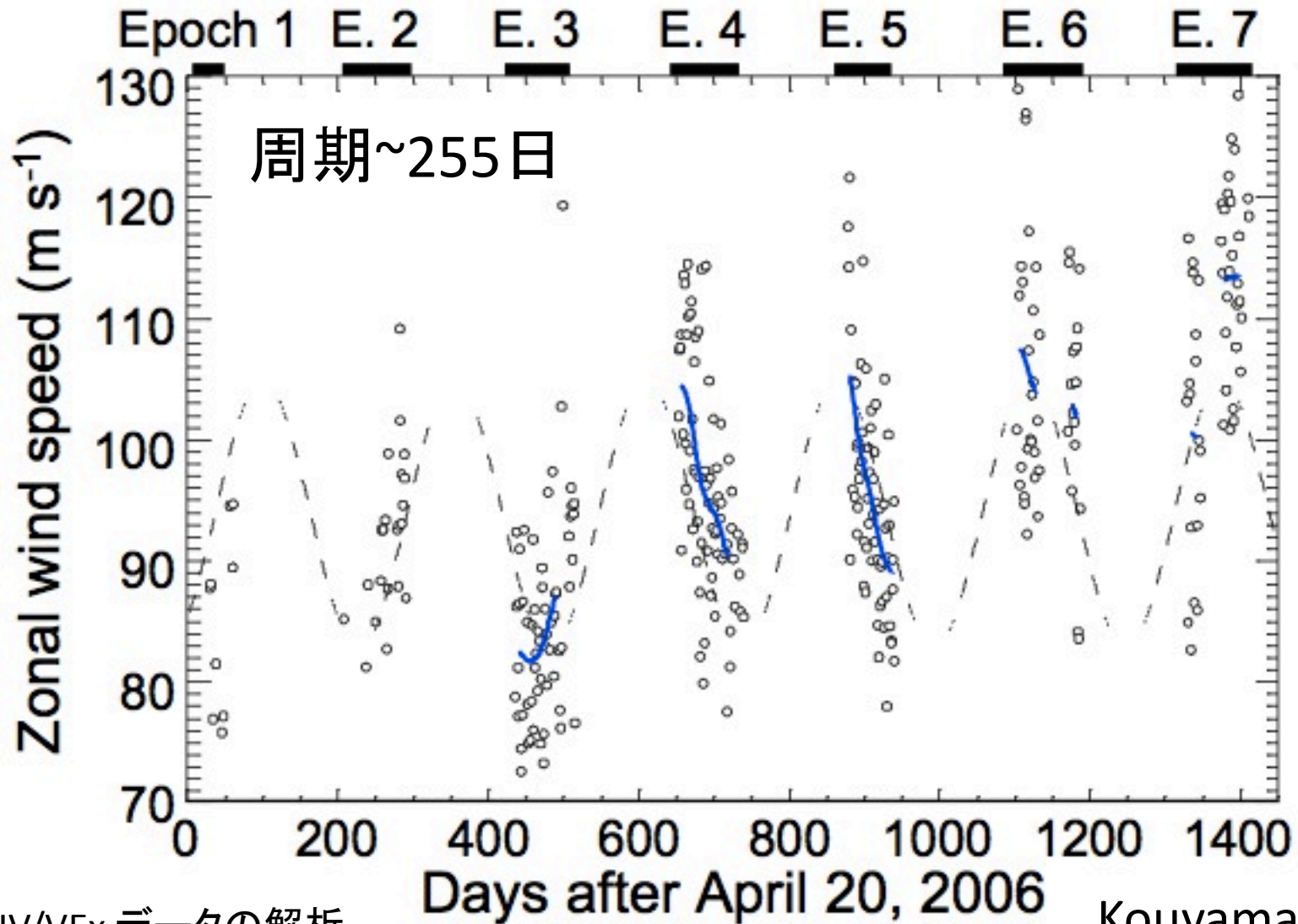
熱潮汐波以外の波

- 赤道「ケルビン波」
 - 雲頂高度、周期4日程度
- 中高緯度「ロスビー波」
 - 雲頂高度、周期5日程度
- 重力波
 - 地形性： $c = 0 \text{ m/s}$
 - 雲層内の対流で励起されるもの： $c = \sim 70 \text{ m/s}$

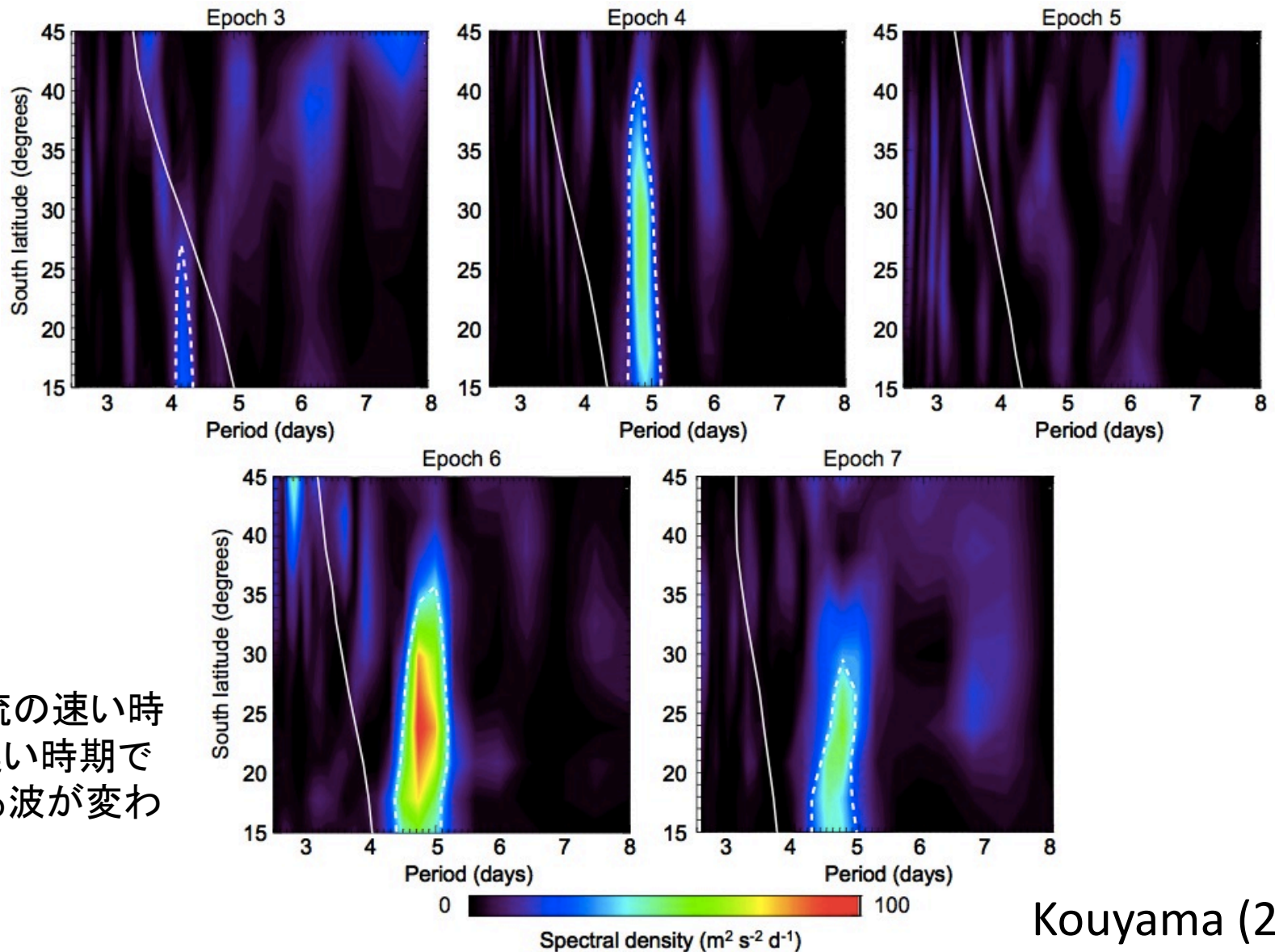
平均東西流の周期的変動に関係？

中間圏・熱圏の循環に影響？

平均東西流の時間変動



平均東西流と波の周期

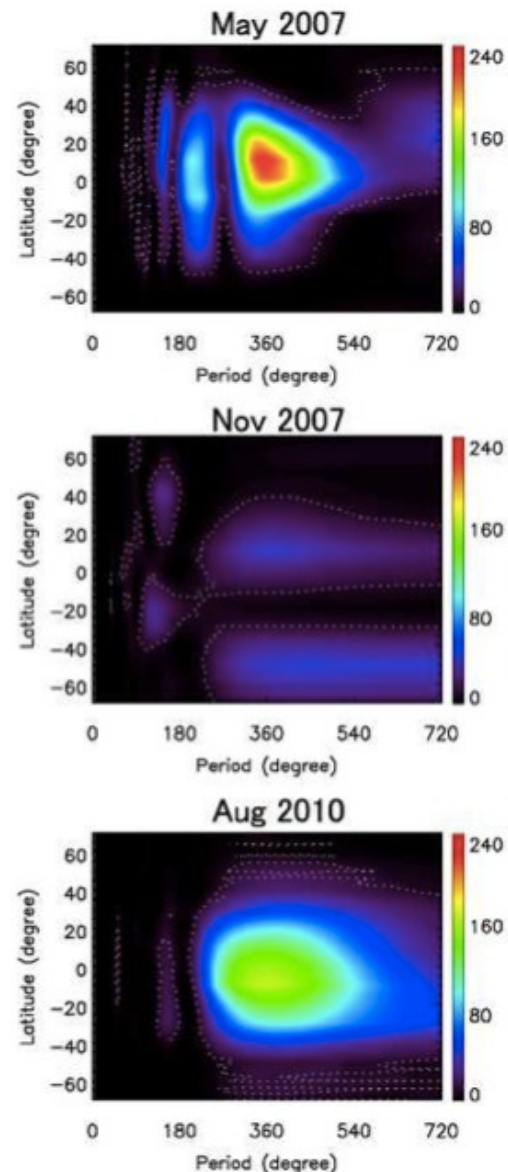
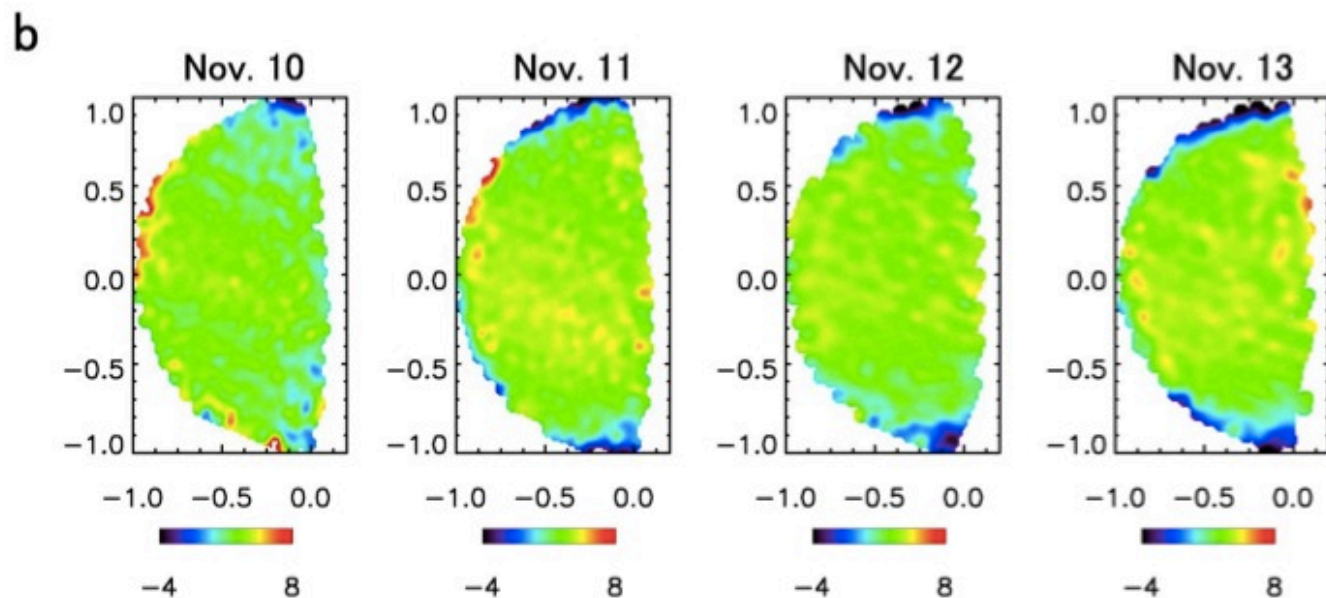
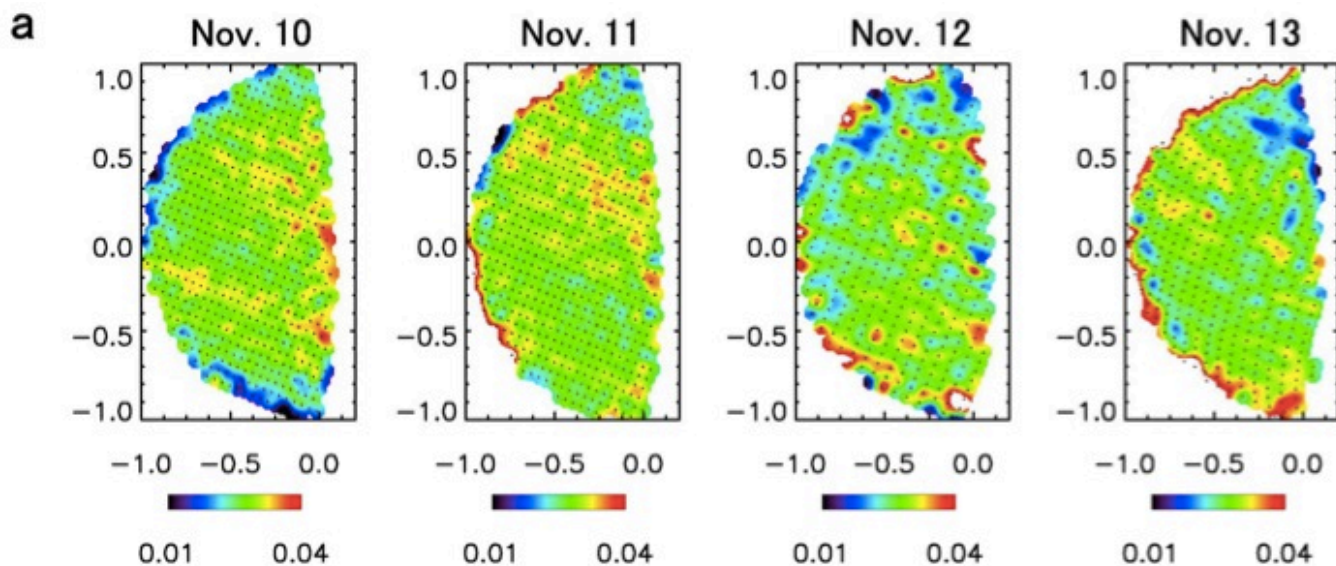


東西流の速い時期と遅い時期で現れる波が変わる？

58-64 km の波

周期: 3.5, 4.9, 8.4 日
波数: 1, 2(?)

CO₂による 1.7 μ m の吸収



Hosouchi et al. (2012)

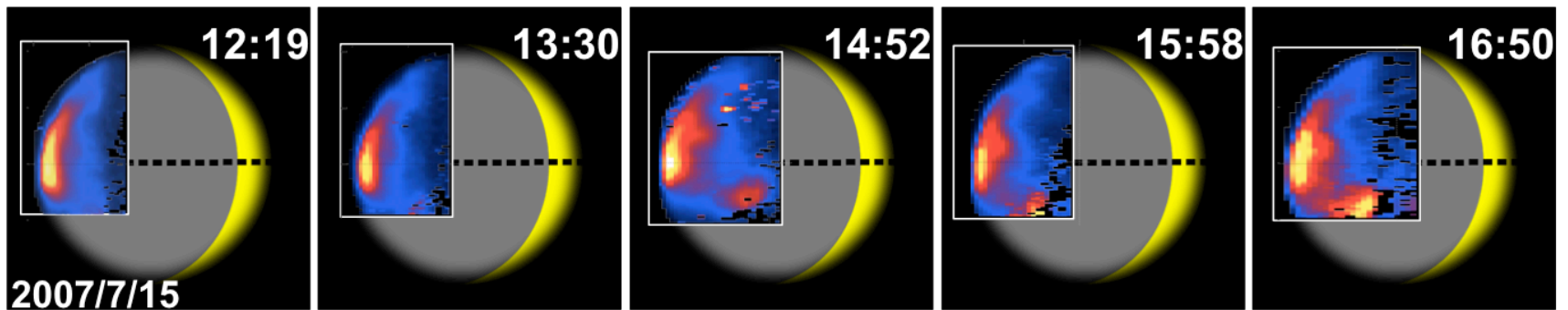
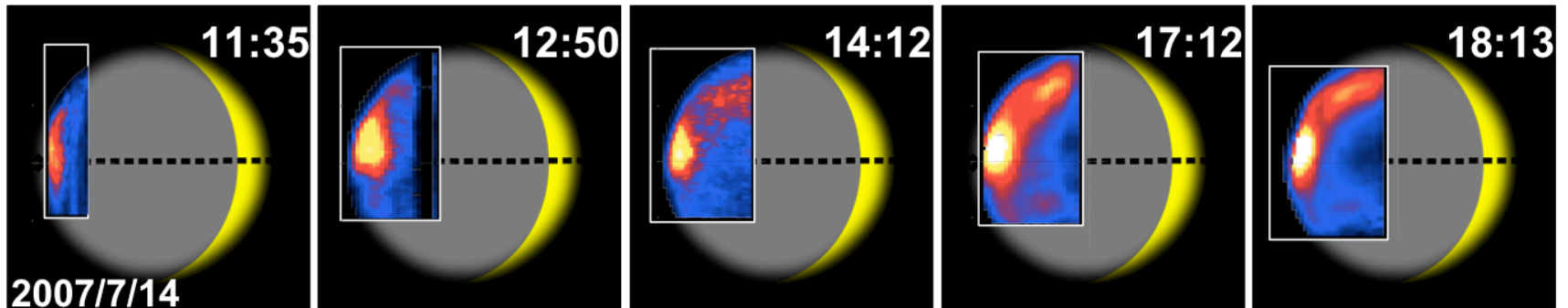
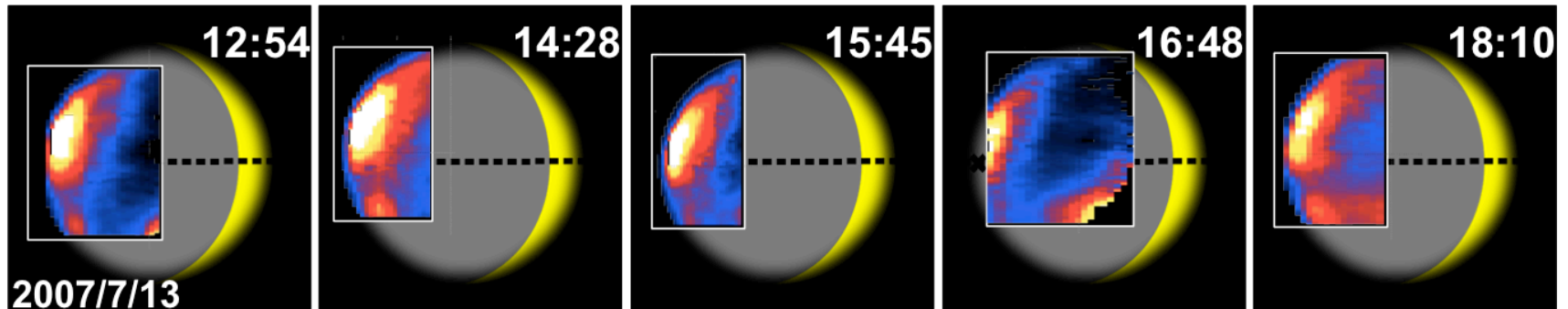
金星中間圏・熱圏の大循環

| 高度 | 平均東西流 | 夜昼間対流 | |
|-----------------|------------------|------------------|--|
| > 70 km | 高さとともに減少 | ? | 温度分布からの推定 |
| 97 km | 132 ± 10 m/s | ? | Shah et al. (1991), CO 吸収線 |
| 95 km | 40 ± 15 m/s | 40 ± 15 m/s | Lellouch et al. (1994), CO 吸収線 |
| 105 km | 90 ± 15 m/s | 90 ± 15 m/s | Lellouch et al. (1994), CO 吸収線 |
| 110 ± 10 km | 25 ± 15 m/s | 120 ± 30 m/s | Goldstein et al. (1991), CO ₂ 吸収線 |

金星の O₂ 大気光

- 昼側上層大気で CO₂ が光解離する
$$\text{CO}_2 + h\nu \rightarrow \text{CO} + \text{O}$$
- 夜昼間対流によって O が夜側に運ばれ、高度 95 km 付近で再結合する
$$\text{O} + \text{O} + \text{M} \rightarrow \text{O}_2^* + \text{M} + h\nu (1.27 \text{ um})$$
- O₂ 大気光の発光領域 (夜昼間対流の下降域) は真夜中から朝側に偏ることが多い。
→ 平均東西流 (スーパーローテーション) による移流?

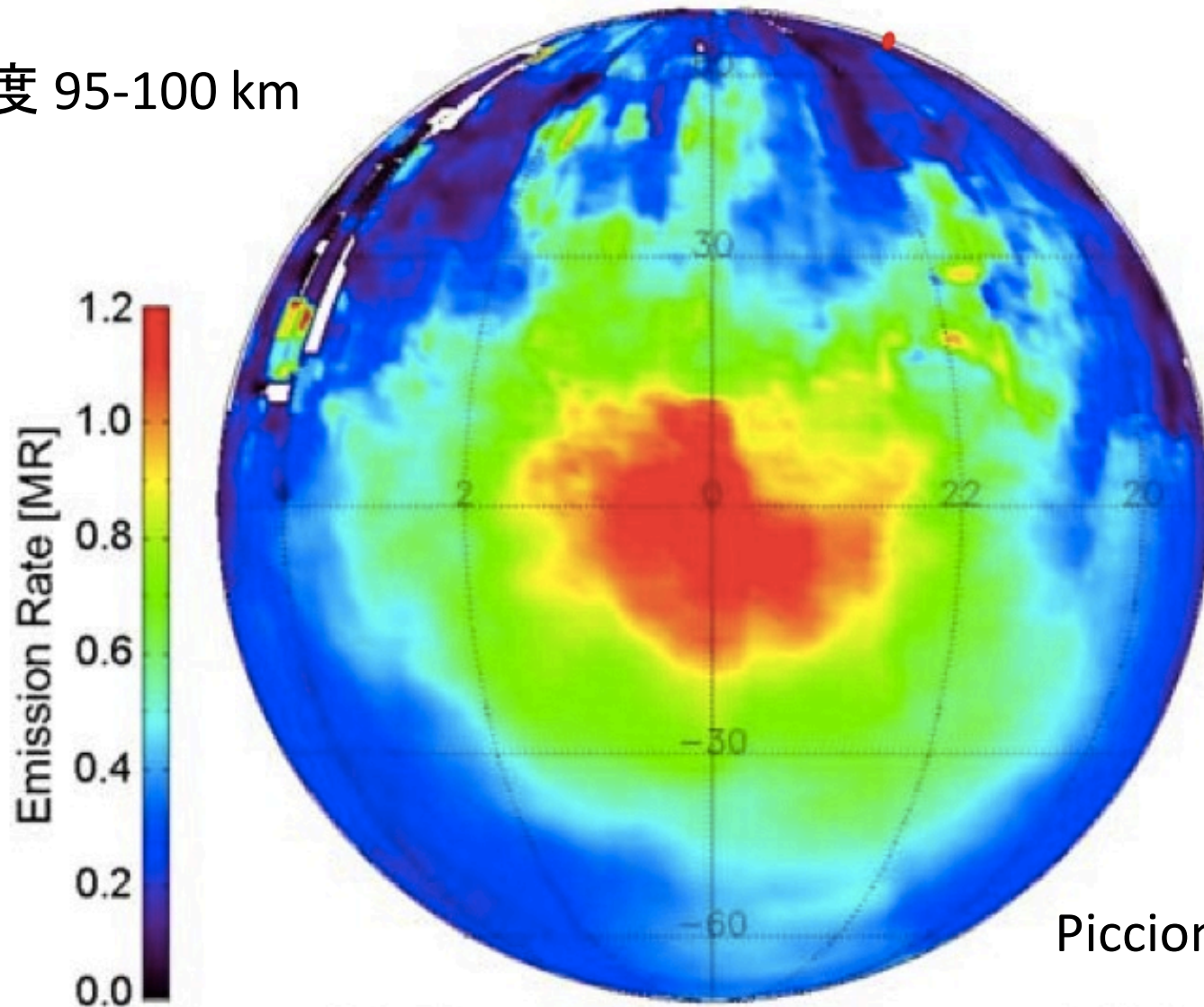
大気光の時間変動(地上観測)



VIRTIS/Venus Express の観測

高度 95-100 km

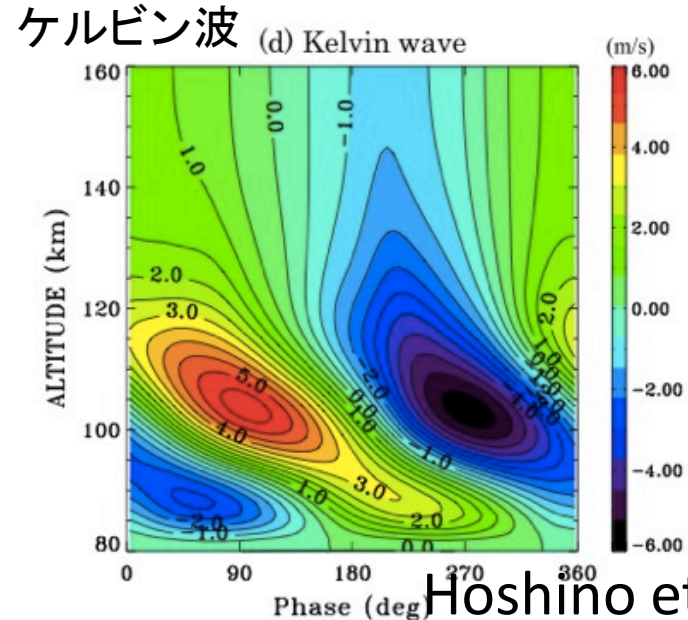
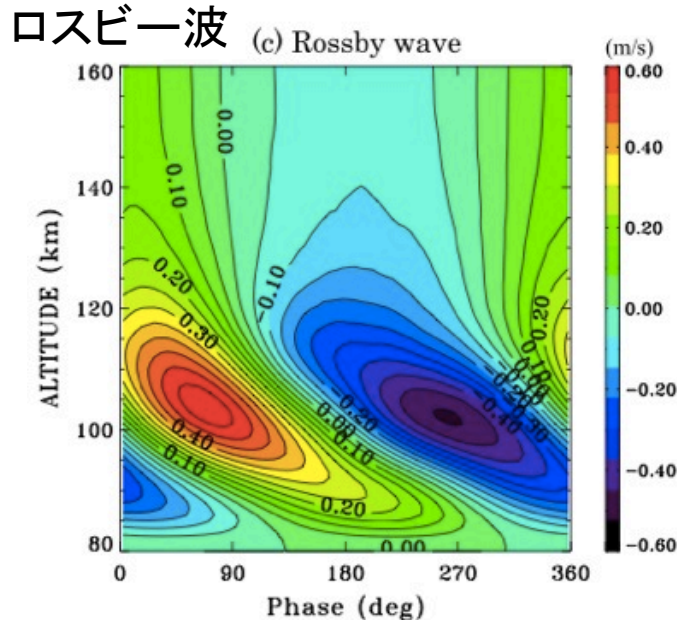
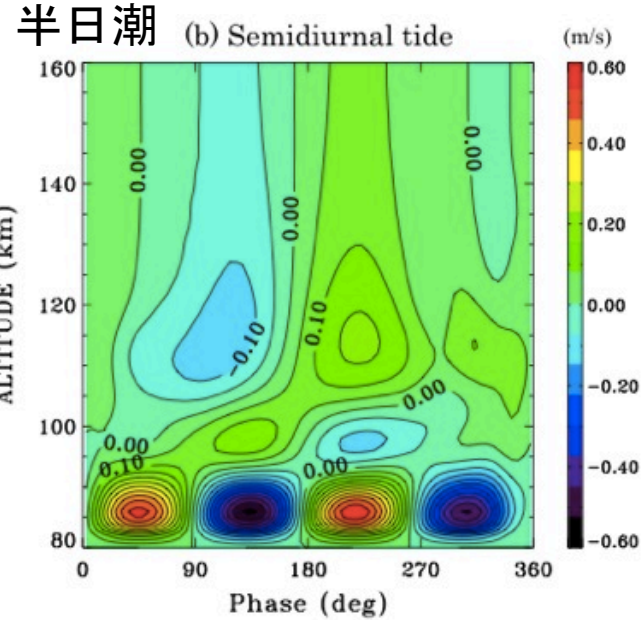
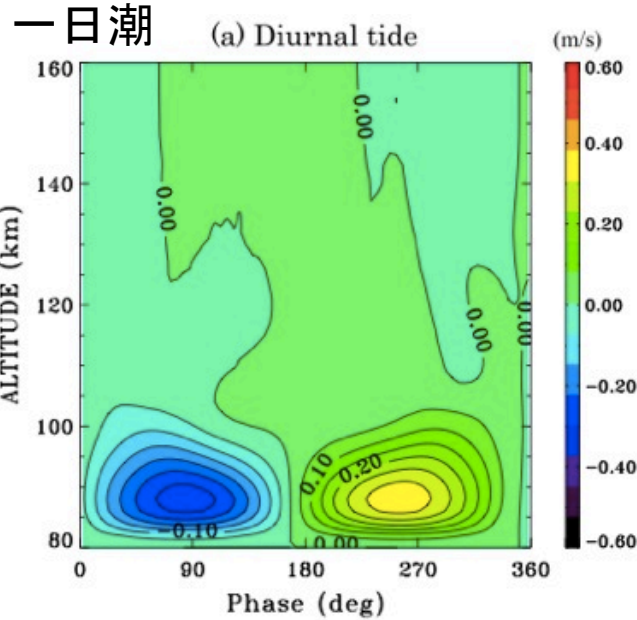
a



Piccioni et al. (2009)

Mean global map of the (0,0) oxygen nightglow

力学・大気化学(大気光)モデリング



まとめ

- 金星大気スーパーローテーション(高速東西流)は、波(熱潮汐波)と平均流の相互作用で作られている可能性がある。
- 雲頂高度でのスーパーローテーションの時間変動に、波が寄与している可能性が示唆されている。(金星版QBO by 神山さん)
- 熱圏・中間圏の大循環が注目されているが、詳しいことはまだわからない。今後の観測とモデリングに期待。