

# 金星大気 スーパーローテーションの 鉛直粘性依存性

神戸大学理学研究科惑星学専攻

服部蒼紀

# 目次

## ■はじめに

- 金星のスーパーローテーション
- ギーラッシュメカニズム
- Yamamoto and Takahashi (2003)
- Sugimoto et al. (2019)
- 角運動量
- 粘性
- 本研究の目的

## ■モデルと実験設定

- 力学過程と物理過程
- 実験条件

## ■実験結果

- YT03 との比較
- 鉛直粘性依存性
  - 東西平均東西風
  - 全球角運動量

## ■まとめ

はじめに

# 金星のスーパーローテーション

- 金星では、スーパーローテーションと呼ばれる、雲層 (50 - 70 km) で約 100 m/s の自転と同じ向きの風が吹く。
- 赤道の角運動量が中緯度へ移動したとしても、風速は数倍にしかならず、赤道で自転速度の 60 倍の風速はめずらしい

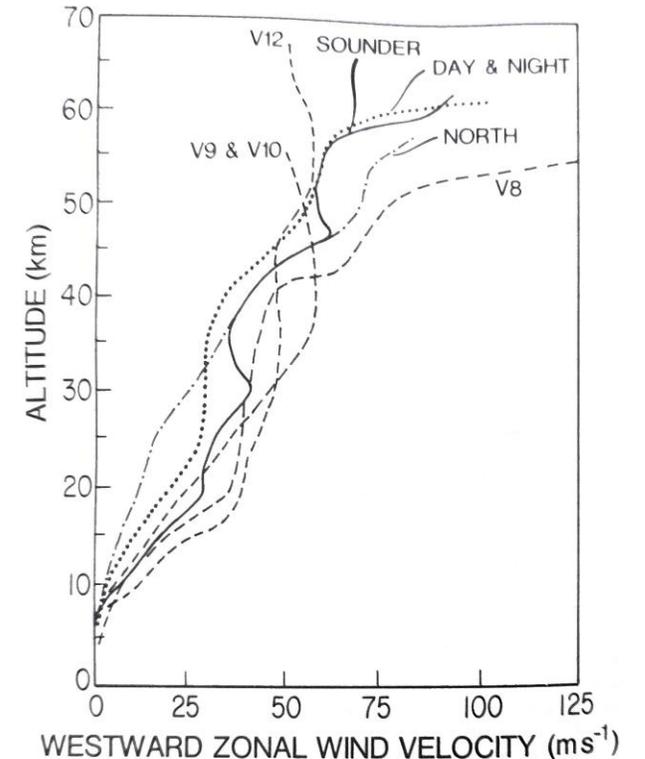


Fig. 9. Vertical profiles of east-to-west wind speed from Doppler tracking of Veneras 8, 9, 10, and 12 (V8, V9, V10, V12) and interferometric tracking of Pioneer Venus probes (from Schubert et al. 1980a).

直接観測による、金星大気の風速  
Schubert (1984) より

# 粘性

- プリミティブ近似での運動量方程式は下である.

$$\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \frac{\nu_h}{a^2 \cos \varphi} \left\{ \frac{1}{\cos \varphi} \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial \lambda^2} + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \cos \varphi \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \varphi} \right) \right\} + \nu_v \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial z^2} + \mathbf{g} + \mathbf{F}$$

- 大気大循環モデルでは, モデルの解像度より小さなスケールの運動量の交換を粘性で表現する. (渦粘性)
- 成層した大気では, 水平方向に比べて, 鉛直方向は混ざりにくい  
ため  $\nu_h$  と  $\nu_v$  は別の値を取る.

$\mathbf{v}$ : 風ベクトル, 鉛直風  $p$ : 圧力  $\lambda, \varphi$ : 経度, 緯度

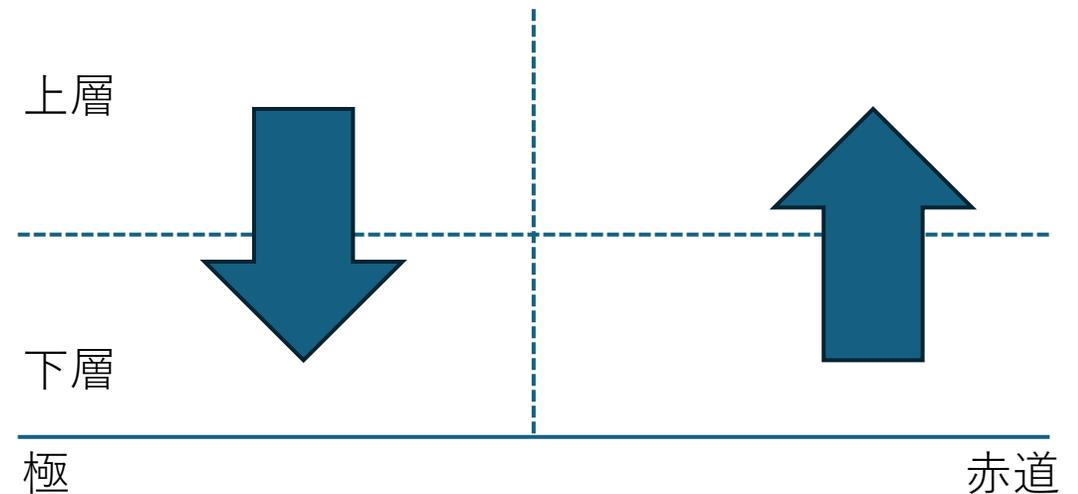
$\nabla$ : 勾配演算子

$\nu_h, \nu_v$ : 水平拡散係数, 鉛直拡散係数

$\mathbf{g}$ : 重力加速度  $\mathbf{F}$ : 外力

# 平均子午面循環メカニズム

- 赤道で上昇, 極で下降する流れ
- 各層で剛体回転
  - 水平粘性は大きく, 鉛直粘性は小さい
- 赤道と極の角運動量フラックスはつりあう
  - $\omega_H R_E = \omega_L R_p$   
よって, 上層の角速度は,  $\omega_H = \frac{R_E}{R_p} \omega_L$
- これによって, 上層は下層より速くなる



$\omega_H$ : 上層の角速度  
 $\omega_L$ : 下層の角速度  
 $R_E$ : 赤道の自転軸からの距離  
 $R_p$ : 極の自転軸からの距離

# Yamamoto & Takahashi (2003)

■大気大循環モデルで  
スーパーローテーションを再現

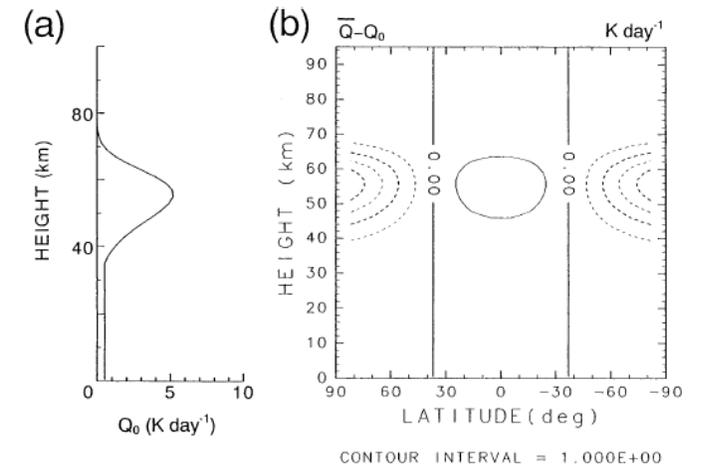
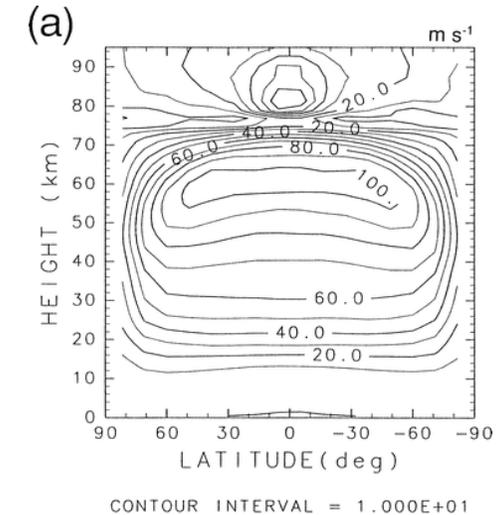
■実際の金星より強い加熱

- 地表の加熱率を代表にして全球加熱率を見積もると、約  $6600 \text{ W/m}^2$  で太陽定数から得られる加熱率約  $600 \text{ W/m}^2$  の10倍以上

■東西一様加熱

■鉛直粘性係数は  $0.15 \text{ m}^2/\text{s}$

■スポンジ層 (84 km より上)



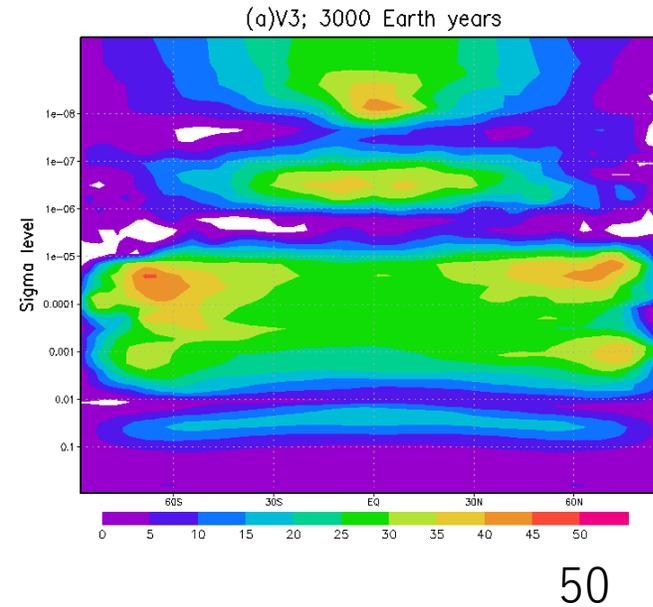
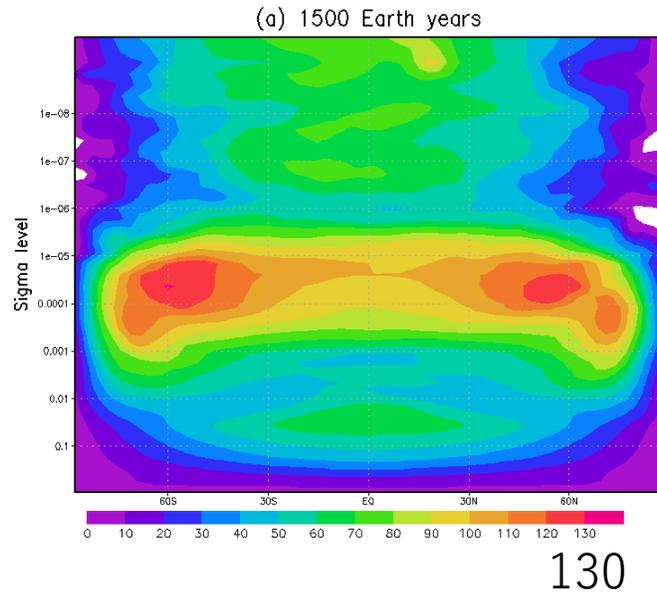
# Sugimoto et al. (2019)

## ■大気大循環モデルで鉛直粘性の強さを変えた実験

- 鉛直粘性係数  $0.15 - 0.0015 \text{ m/s}^2$  の10 種の値
- 現実的な加熱
- スポンジ層 (約 80 km より上)
- 地表付近のレイリー摩擦
- VIRA (Seiff et al., 1985) に基づく温度プロファイル
- 静止大気を初期条件
- 解像度は T42L60 (水平方向約2.8 度 × 約 2.8 度, 地表から約 120 km まで)

## ■鉛直粘性の強さによって東西風が変化した

# 東西風の子午面分布の鉛直粘性依存性



どちらの図も Sugimoto et al. (2019) の Support information

## ■鉛直粘性係数 $0.0015 \text{ m}^2/\text{s}$

- 1500 地球年で  
速いスーパーローテーション

## ■鉛直粘性係数 $0.15 \text{ m}^2/\text{s}$

- 3000 地球年で  
遅いスーパーローテーション

# 本研究

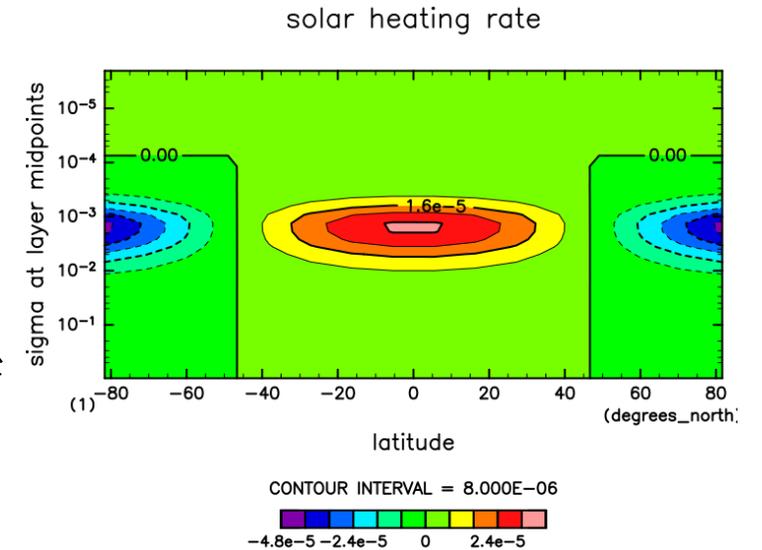
- DCPAM 5 を用いて, 準定常状態での東西風の子午面分布の鉛直粘性依存性を調査した.
  - Yamamoto and Takahashi (2003) に似た設定で計算した
  - Sugimoto et al. (2019) ではスーパーローテーションは鉛直粘性係数  $0.0015 \text{ m}^2/\text{s}$  で速く, 鉛直粘性係数  $0.15 \text{ m}^2/\text{s}$  で遅い

# モデルと実験設定

# 力学過程と物理過程

## ■ Yamamoto & Takahashi (2003) に準じる.

- プリミティブ方程式系
  - 薄い大気, 静水圧平衡を仮定した, 回転系での方程式系
- 東西一様加熱
- ニュートン冷却
  - 放射平衡温度に達するように調整する.  $\left(\frac{dT}{dt} = \frac{T - T_{eq}}{\tau}\right)$
- 地表摩擦
  - 大気最下端のみに働く.
- スポンジ層
  - 高度 80 km より上で, 東西風が減衰するように与える.



$T$ : 温度

$T_{eq}$ : 放射平衡温度

$\tau$ : 緩和時定数

# 実験設定

## ■解像度 T10L50

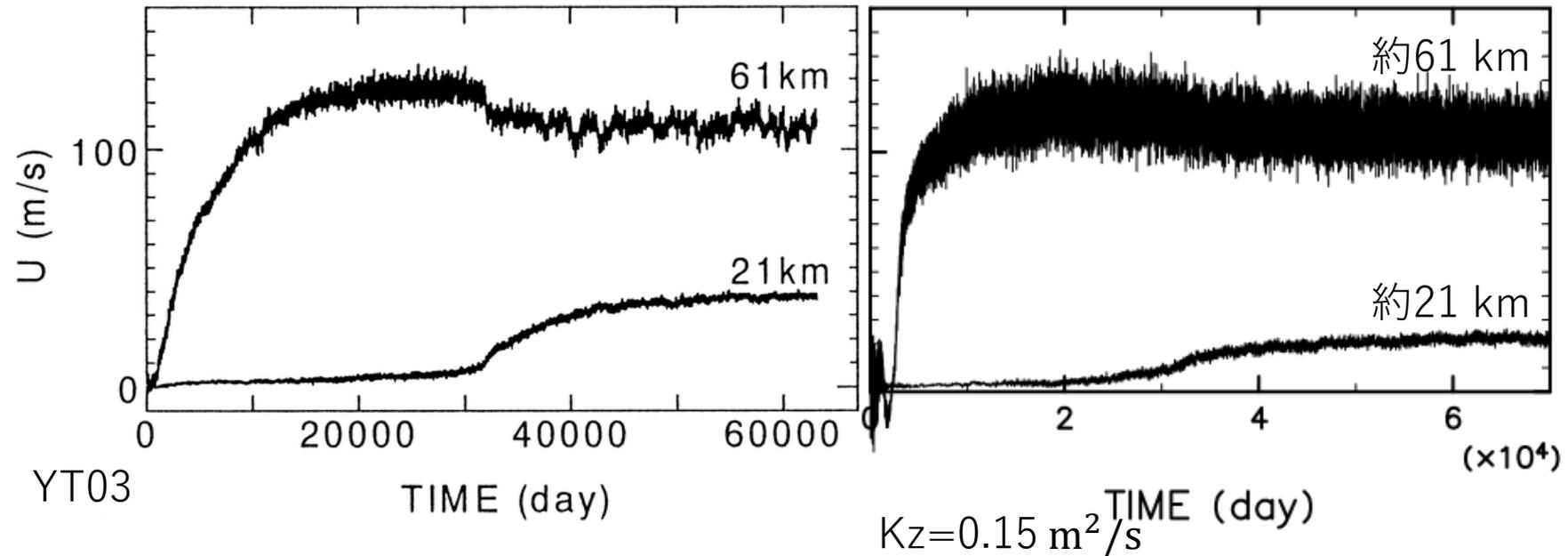
- 東西分割 32, 南北分割 16 km 鉛直分割 50 (地表から約 85 km まで)

## ■初期条件 静止大気, 小さな温度擾乱あり

## ■鉛直粘性係数 0.15, 0.30, 0.75

# 実験結果

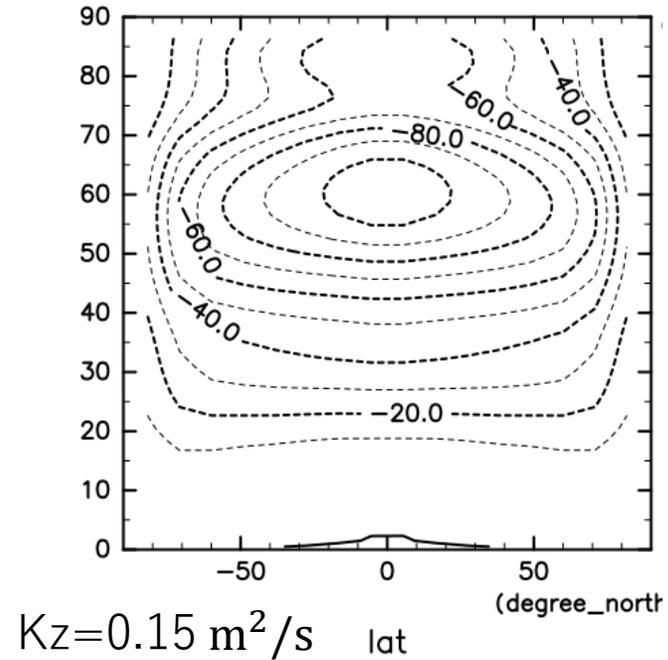
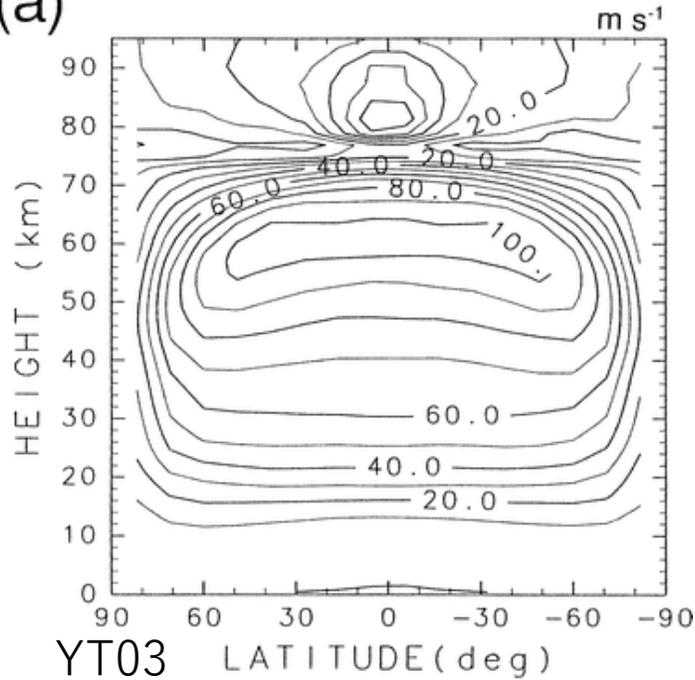
# YT03 との比較 (東西風の時間発展)



- 高度約 61 km では、風速の振幅が大きいが、風速の中心値は大きく変わらない
- 高度約 21 Km では、YT03 に比べて風速が大きくならなかった。

# YT03 との比較 (東西風の子午面分布)

(a)



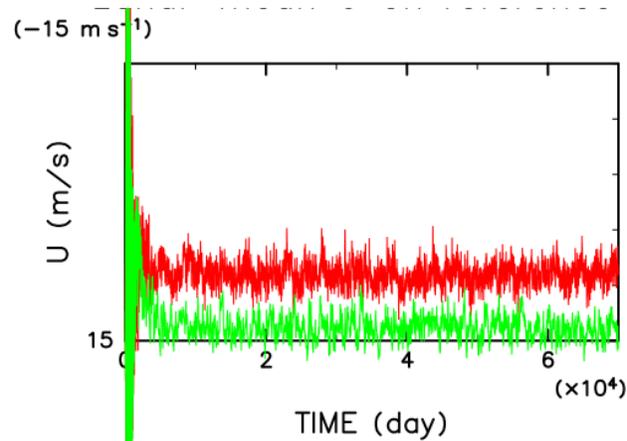
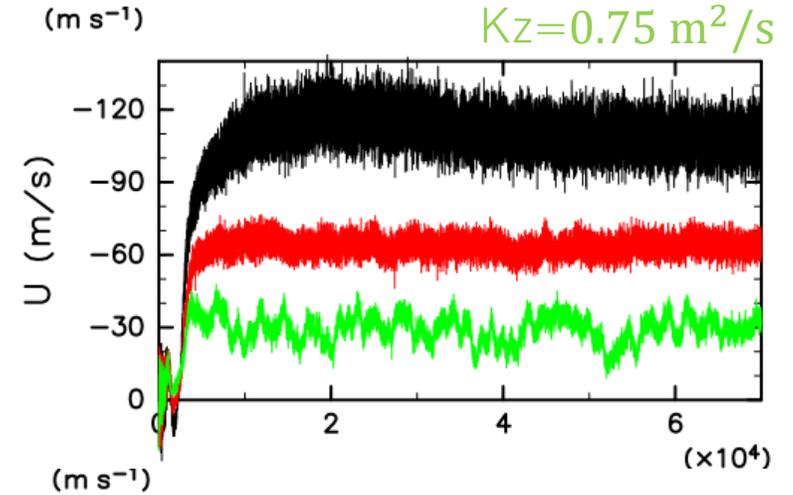
- YT03 は本実験より緯度方向に広がる  
強いスーパーローテーションの領域を持つ。

CONTOUR INTERVAL = 1.000E+01

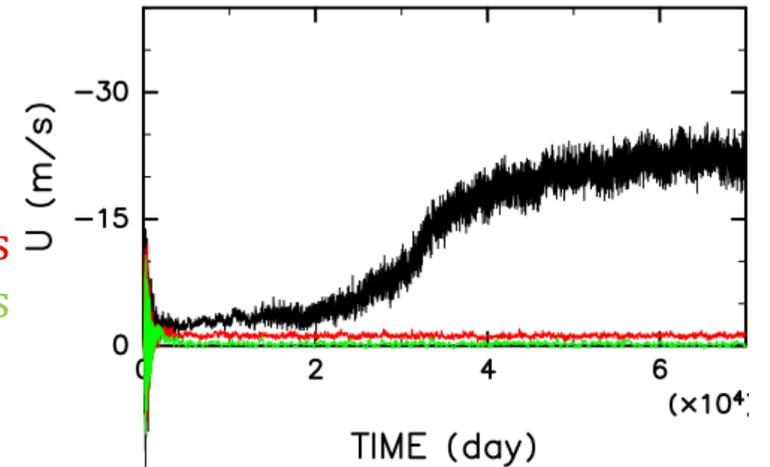
# 鉛直粘性依存性 (東西風の時間発展)

@ ~61 km  
 $K_z=0.15\text{m}^2/\text{s}$   
 $K_z=0.30\text{m}^2/\text{s}$   
 $K_z=0.75\text{m}^2/\text{s}$

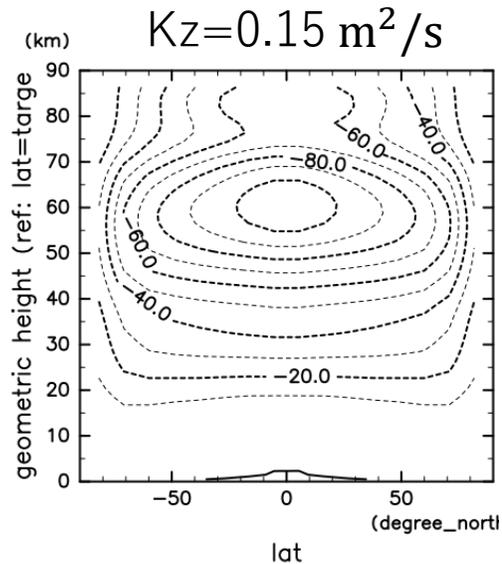
- 高度約 61 km では、鉛直粘性係数と、風速が、比例している。
- 高度約 21 km では、風速は、鉛直粘性係数 $0.15\text{m}^2/\text{s}$  の場合とそれ以外で大きく異なる。



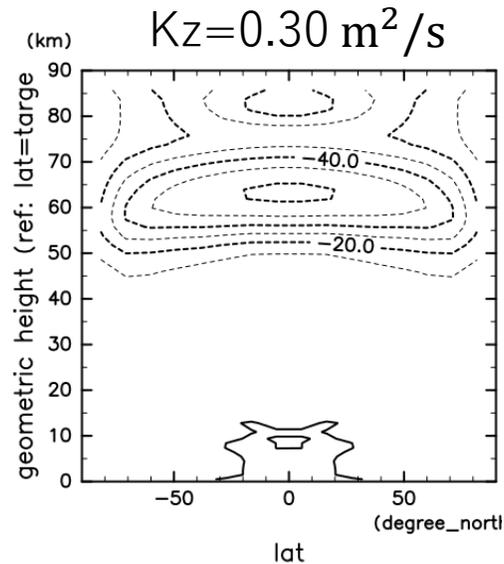
@ ~21 km  
 $K_z=0.15\text{m}^2/\text{s}$   
 $K_z=0.30\text{m}^2/\text{s}$   
 $K_z=0.75\text{m}^2/\text{s}$



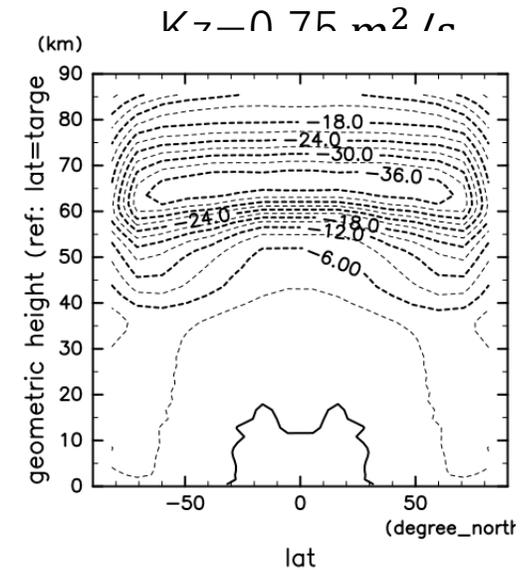
# 鉛直粘性依存性(東西風の子午面分布)



CONTOUR INTERVAL = 1.000E+01



CONTOUR INTERVAL = 1.000E+01

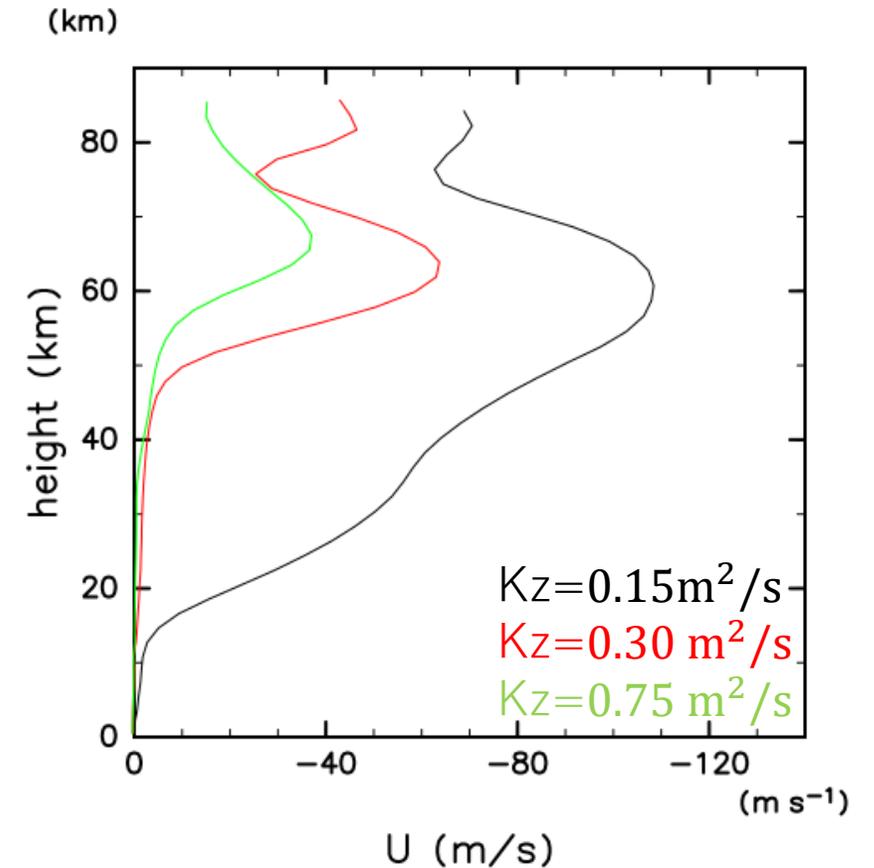


CONTOUR INTERVAL = 3.000E+00

- 鉛直粘性が強いと、スーパーローテーションが弱くなる。
- 鉛直粘性が強いと、地表摩擦の効果がより上に影響する。

# 鉛直粘性依存性 (東西風の鉛直分布)

- 鉛直粘性が  $0.15 \text{ m}^2/\text{s}$  の場合とそれ以外で、高度約  $20 - 60 \text{ km}$  での東西風の鉛直変化が異なる
  - $0.15 \text{ m}^2/\text{s}$  以外の場合では、高度  $45 \text{ km}$  から上で東西風が増加する。



# 角運動量

## ■ 薄い大気近似での角運動量を

$$M(\lambda, \varphi, \sigma, t) = \rho\Omega a^2 \cos^2 \varphi + \rho u a \cos \varphi$$

と定義する

- 右辺第一項は、惑星の回転による大気の角運動量で、惑星角運動量である。
- 右辺第二項は、地表から見た大気の角運動量で、相対角運動量である。
- 大気が、固体惑星と一体で回転しているとき相対角運動量はゼロとなる。

$M$  : 絶対角運動量

$\lambda, \varphi$  : 経度, 緯度

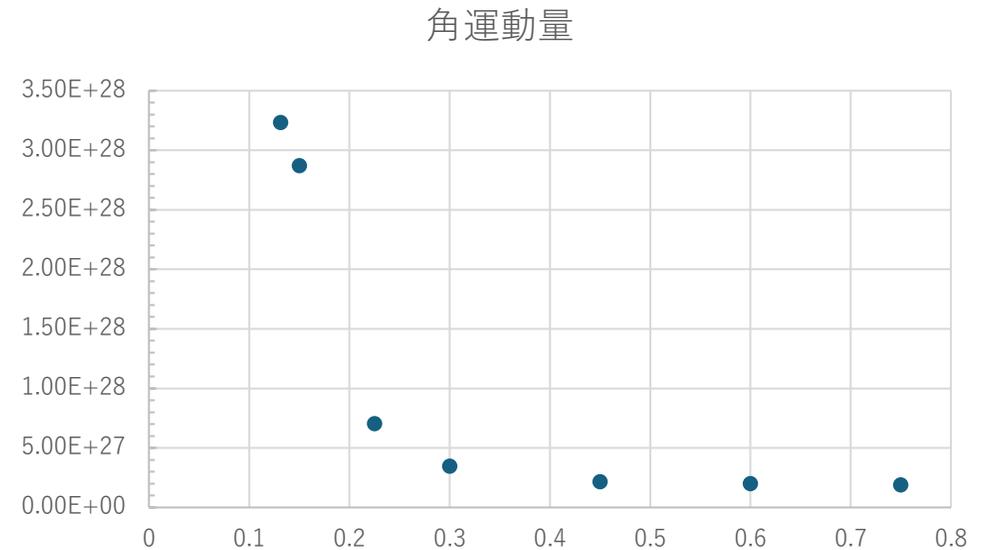
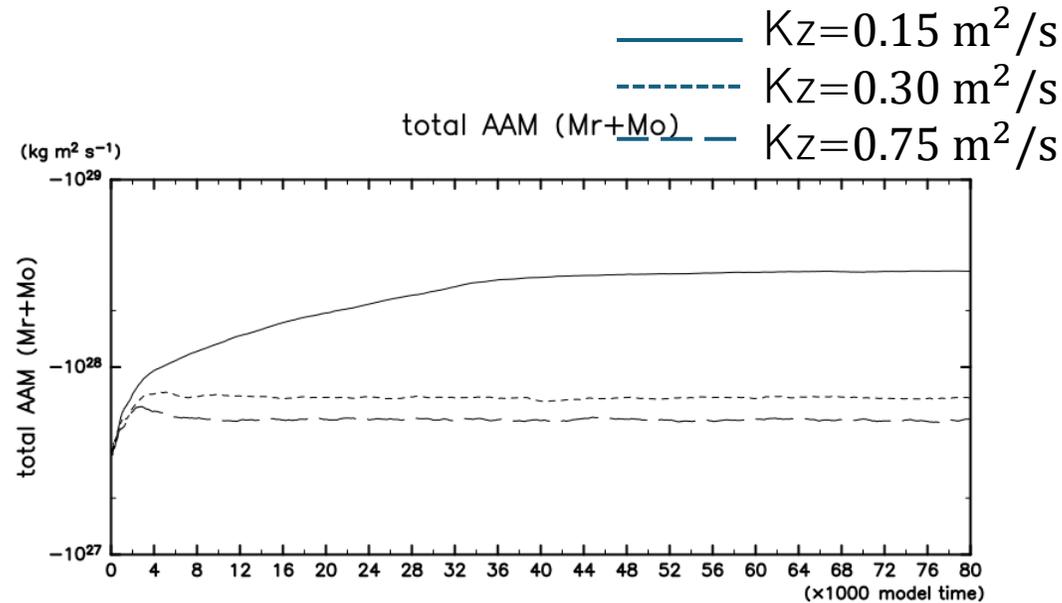
$\sigma \equiv p/p_s$  : 地表圧力  $p_s$  で規格化された圧力

$t$  : 時刻

$\rho, \Omega, a$  : 大気密度, 自転角速度, 惑星半径

$u$  : 東西風の対地速度

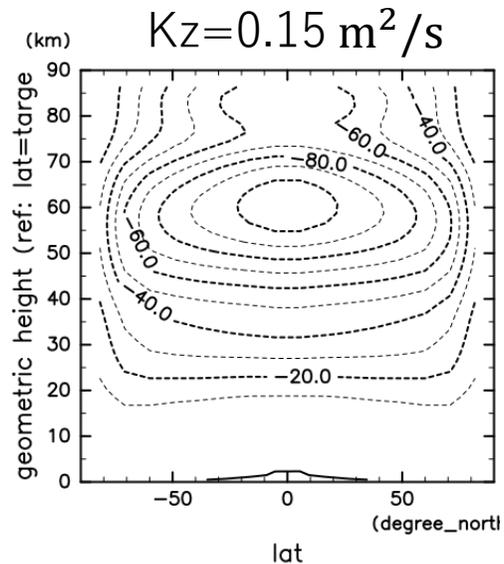
# 鉛直粘性依存性 (角運動量)



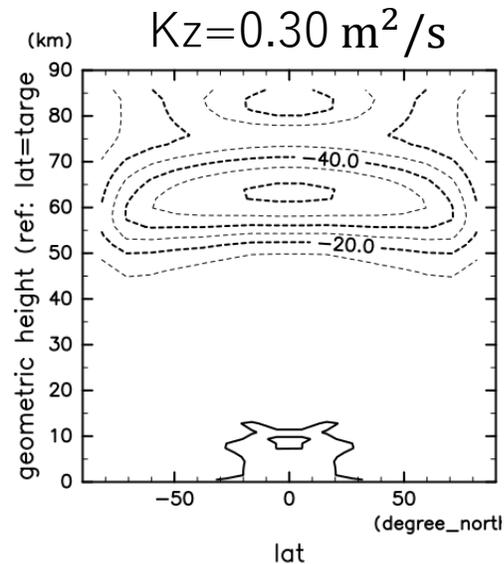
- 準定常状態までに要する時間が、鉛直粘性係数  $0.15 \text{ m}^2/\text{s}$  とそれ以外で異なる
- 準定常状態で、全球合計相対角運動量は鉛直粘性係数に対して減少する。

# まとめ

- 鉛直粘性が強いと、スーパーローテーションが弱くなった。
  - Sugimoto et al. (2019) と同様の結果
- 全球合計相対角運動量は鉛直粘性が強いと小さくなる。



CONTOUR INTERVAL = 1.000E+01



CONTOUR INTERVAL = 1.000E+01

