

大気大循環モデルを用いた 金星大気の角運動量収支解析

流体地球教育研究分野
服部蒼紀

目次

- イントロ
- 研究の目的
- 実験設定
- 実験結果
- 考察
- まとめ

イントロ

角運動量

- 大気の角運動量は $M = \int_V \rho u a \cos \varphi dV + \int_S \Omega a \cos \varphi \frac{p_s}{g} a \cos \varphi dS$ で定義される大気の持つ回転の強さである.
- 上の式の左辺第二項は惑星自体がもつ回転の強さ: 絶対角運動量である.
- 左辺第一項の大気が地表よりも遅いまたは早いことによる, 相対角運動量がある.

鉛直粘性

- 粘性は速度の拡散である.
- 例えば物質の拡散が大きければ, 一点にとどまっていた物質が全体へ素早く広がる.
- 速度ならば, 速度差(シアー)があれば, シアーを解消するように働く.
- 粘性係数が大きければシアーが素早く解消される.
- 鉛直粘性は, 粘性の中でも鉛直シアーを均す.

金星のスーパーローテーション

- 金星は観測による直接観測の結果から、高度 70 km で 60 m/s を超える強い自転と同じ向きの風が吹いている

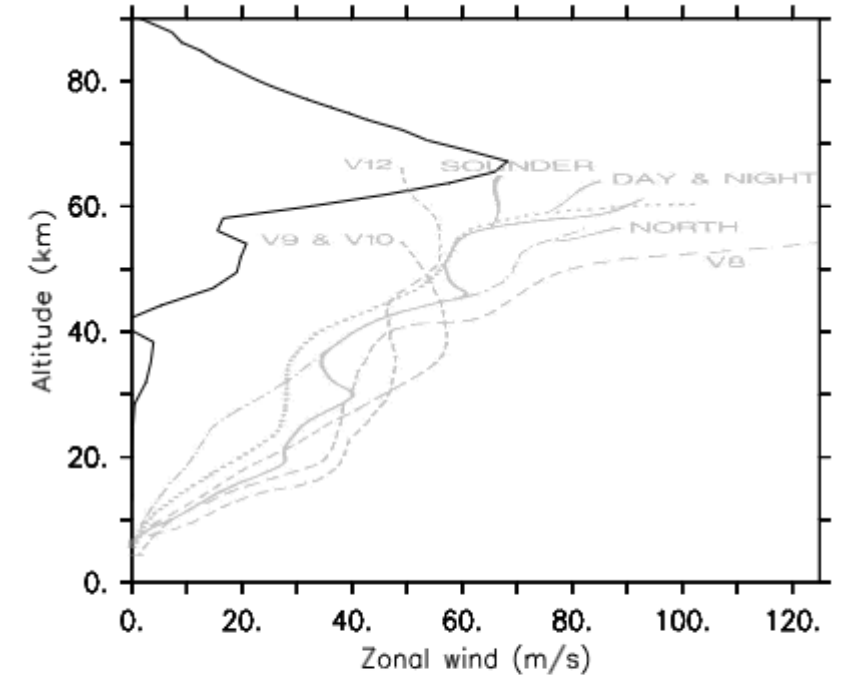


Figure 7. Vertical profile of the zonal wind at equator obtained after 350 Venus days in the reference simulation, averaged over longitudes and the last two Venus days of the simulation (black line). Data obtained from the Venera and Pioneer Venus missions (taken from Schubert [1983]) are shown for comparison (gray).

Lebonnis et al. (2010)

ギーラッシュメカニズム

松田 (2000) によると

- 南北温度差のみで決まる子午面循環があれば, 角運動量は赤道で上層へ, 極で下層へ輸送される.
- 輸送された角運動量は, 水平粘性が無限大ならば, 上層の赤道から極の角運動量の輸送はすぐさま赤道へ戻され, 鉛直シアが生じる.
- 鉛直粘性は, 鉛直シアを均すので, 子午面循環の効果より小さくならない.

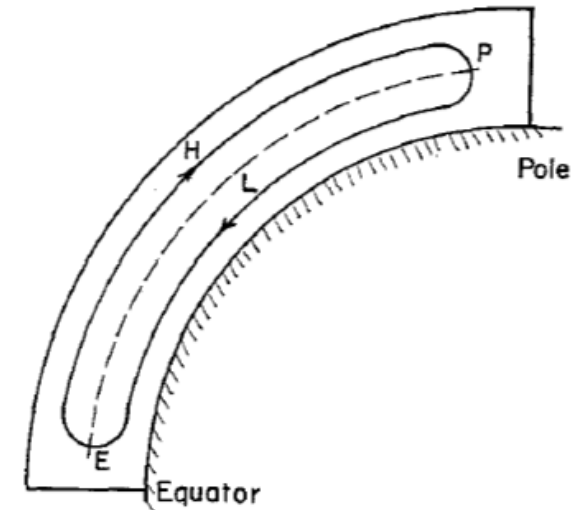


FIG. 1. Schematic of meridional cell. If the angular momentum per unit mass is greater at point E than at P, the meridional cell produces an upward flux of angular momentum. If it is greater at point H than at L, there is a poleward transport.

Gierasch (1975)

大気大循環モデルを用いた先行研究

- Yamamoto and Takahashi (2003):
ギーラッシュメカニズムによるスーパーローテーションを再現した。
鉛直粘性係数は $0.15 \text{ m}^2/\text{s}$
- Lebonnois et al. (2010)
現実的な物理過程を用いて、ギーラッシュメカニズムによるスーパーローテーションを再現した。
鉛直粘性係数は $0.025 \text{ m}^2/\text{s}$ または、高度による値
- Sugimoto et al. (2019)
鉛直粘性係数を変化させて、スーパーローテーションの生成と維持を調べた。
鉛直粘性係数は
 $0.15, 0.12, 0.1, 0.07, 0.05, 0.03, 0.025, 0.02, 0.015, 0.0015 \text{ m}^2/\text{s}$

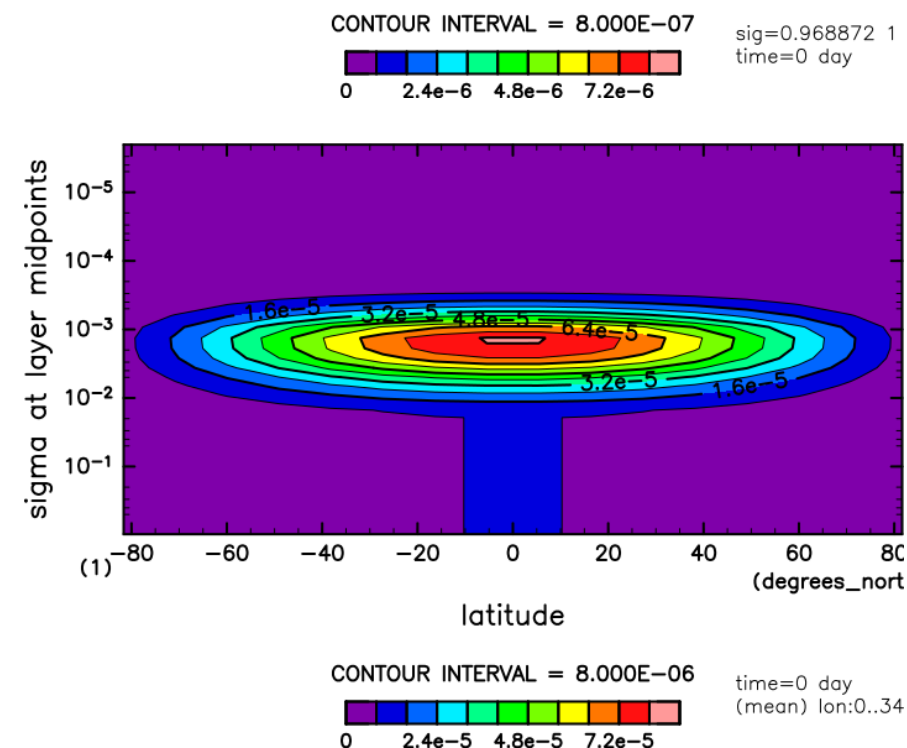
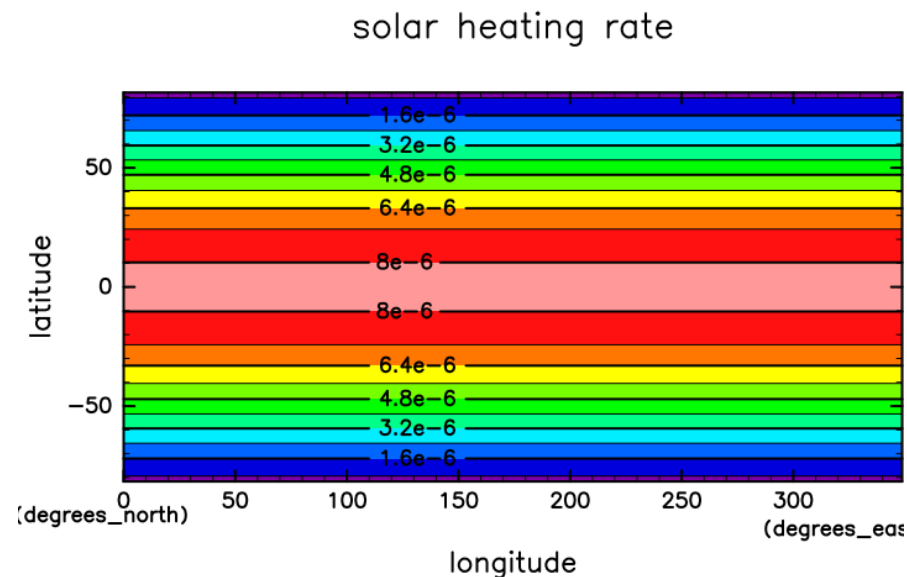
研究目的

- 鉛直粘性係数の値は, 研究によって大きく異なる
- 鉛直粘性係数を変更することで, 金星大気における鉛直粘性の効果を明らかにする.

実験設定

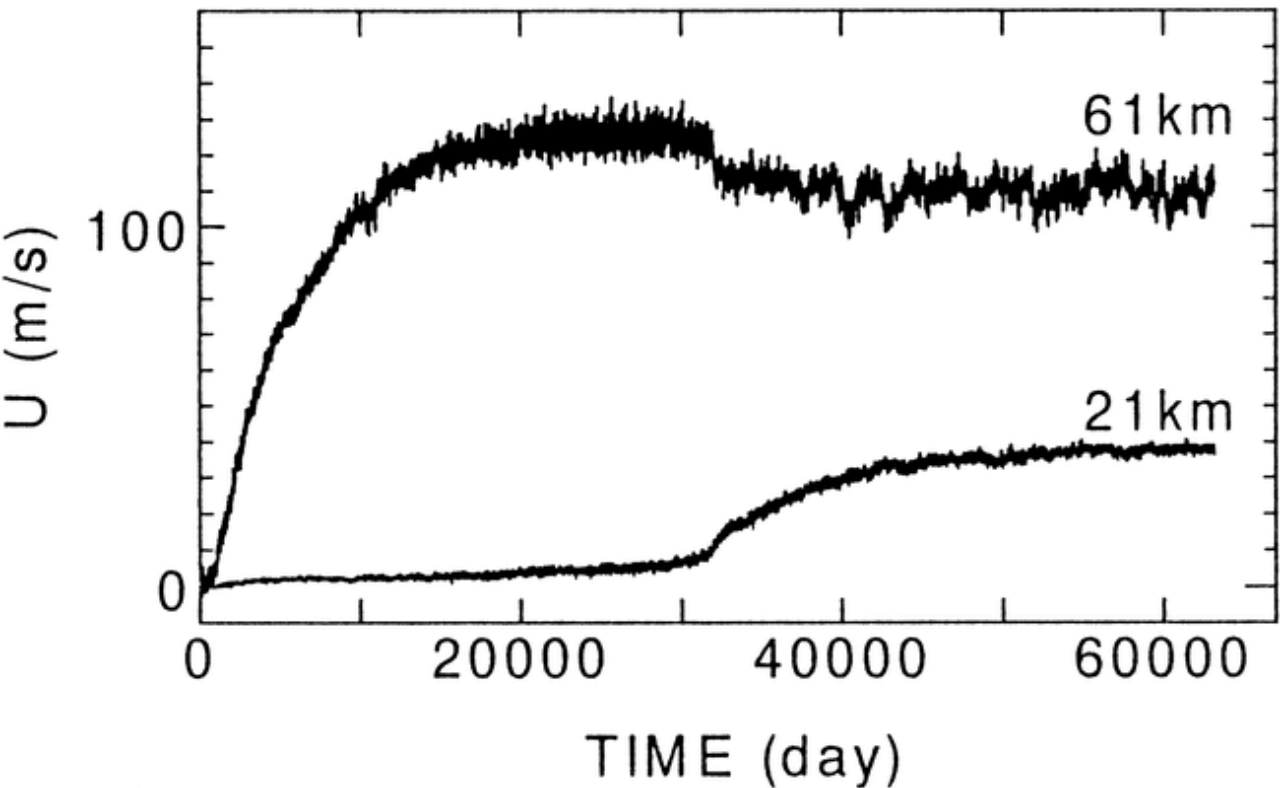
実験設定

- DCPAM 5
- 力学コア: HS84
- 物理過程
 - ニュートン冷却
 - 地表摩擦あり
 - スポンジ層あり(東西風)
 - 東西一様加熱(右図)
 - 鉛直粘性係数 (K_z)
3 ケース (0.15, 0.30, 0.75)
- 初期条件: 静止大気

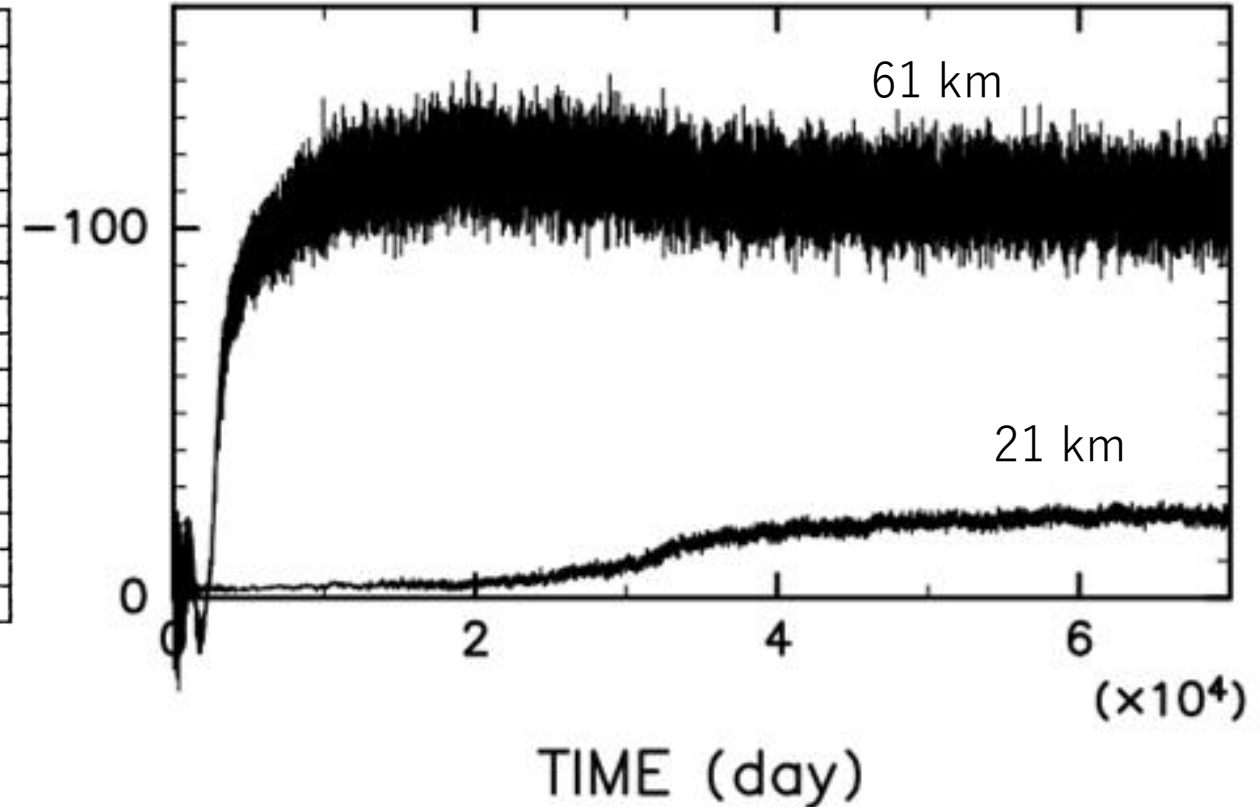


実験結果

YT03 追試 (スピニアップ)



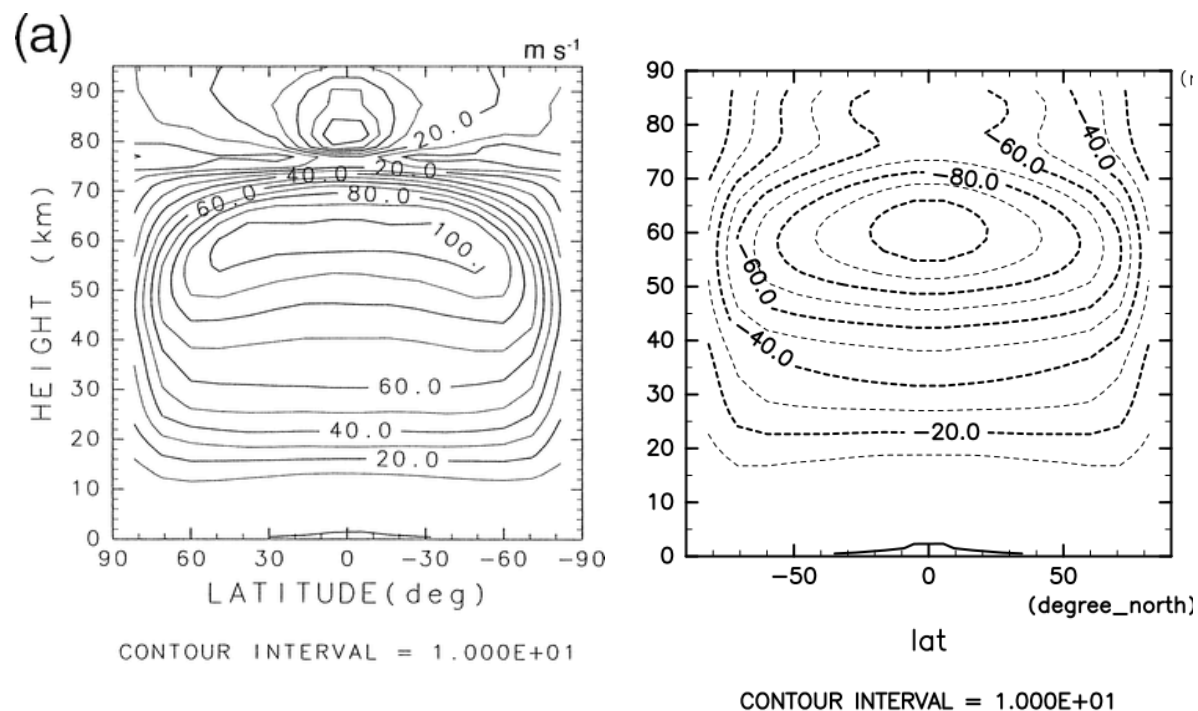
YT03 fig3



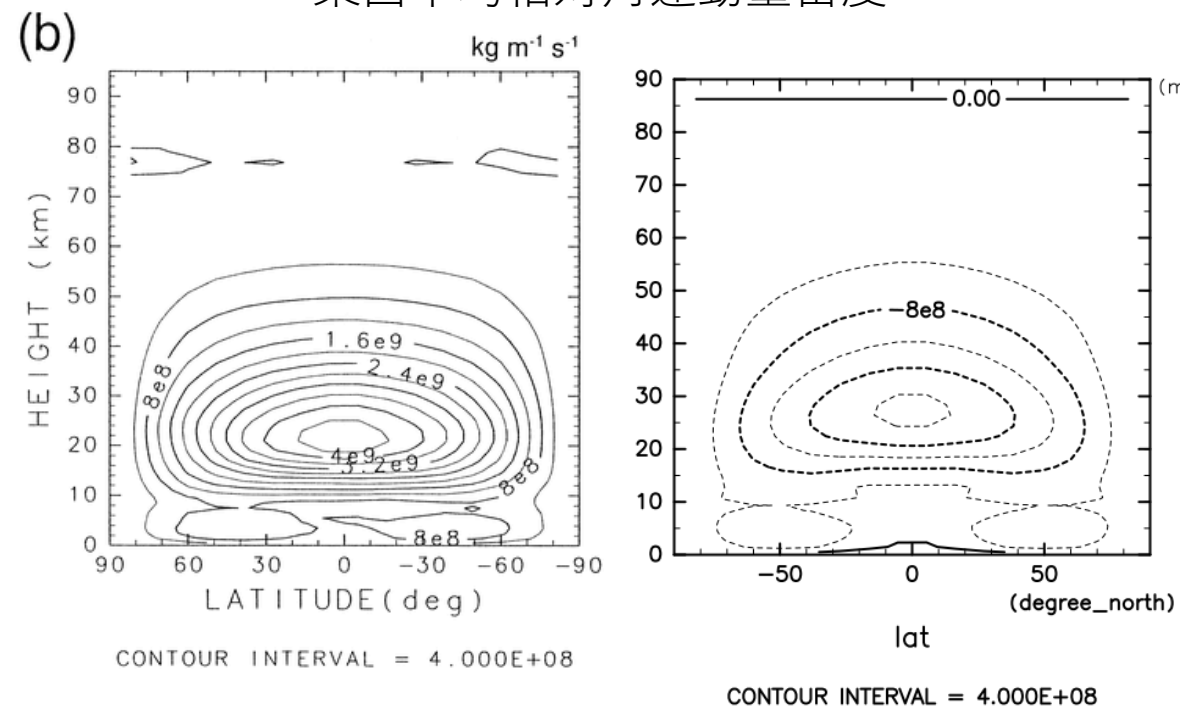
- 61 km で, 風速の振動が大きい, 東西風の速度は大きく変わらない
- 21 km では十分に東西風が強くなかった.

YT03 追試 (子午面構造)

東西平均東西風

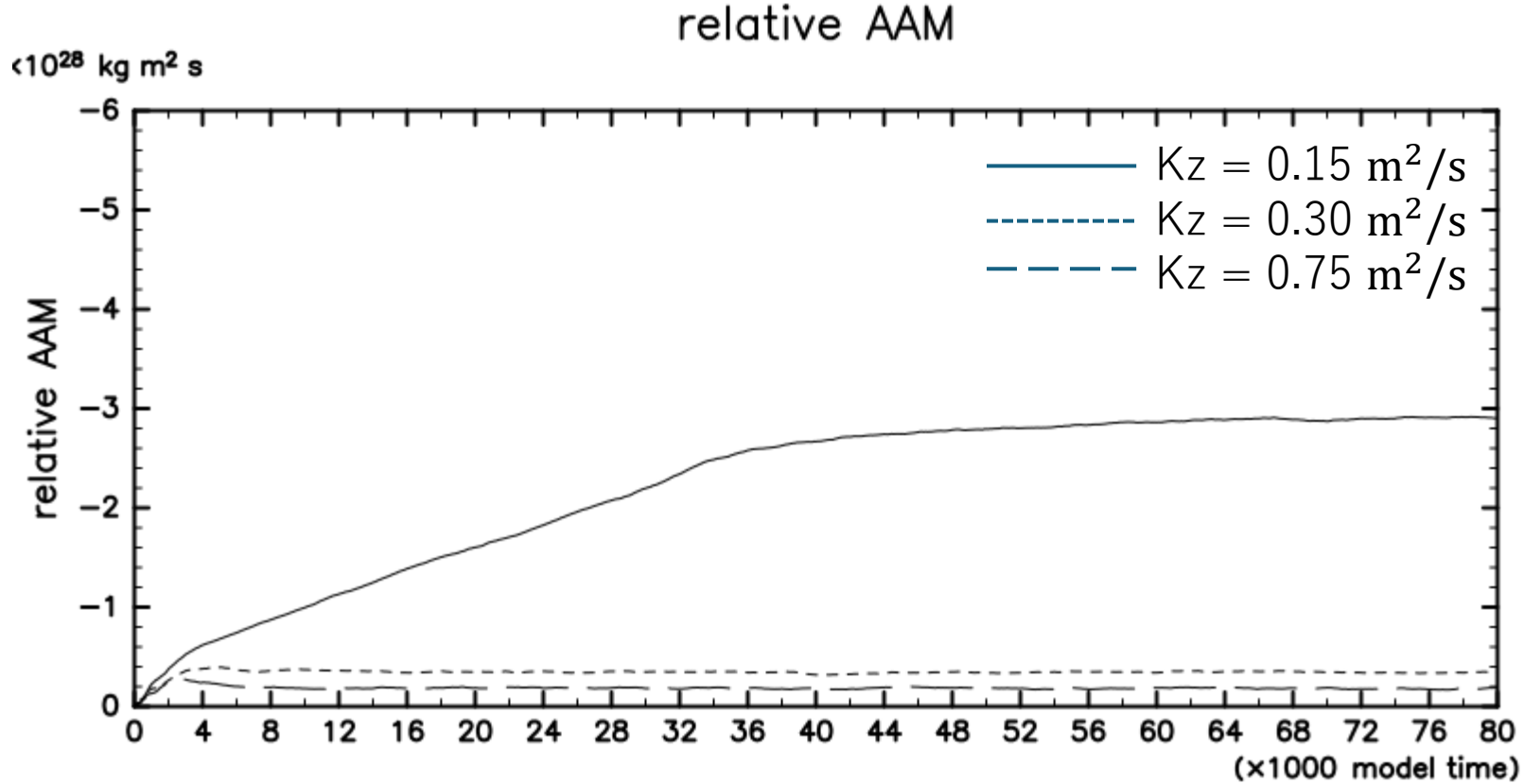


東西平均相対角運動量密度



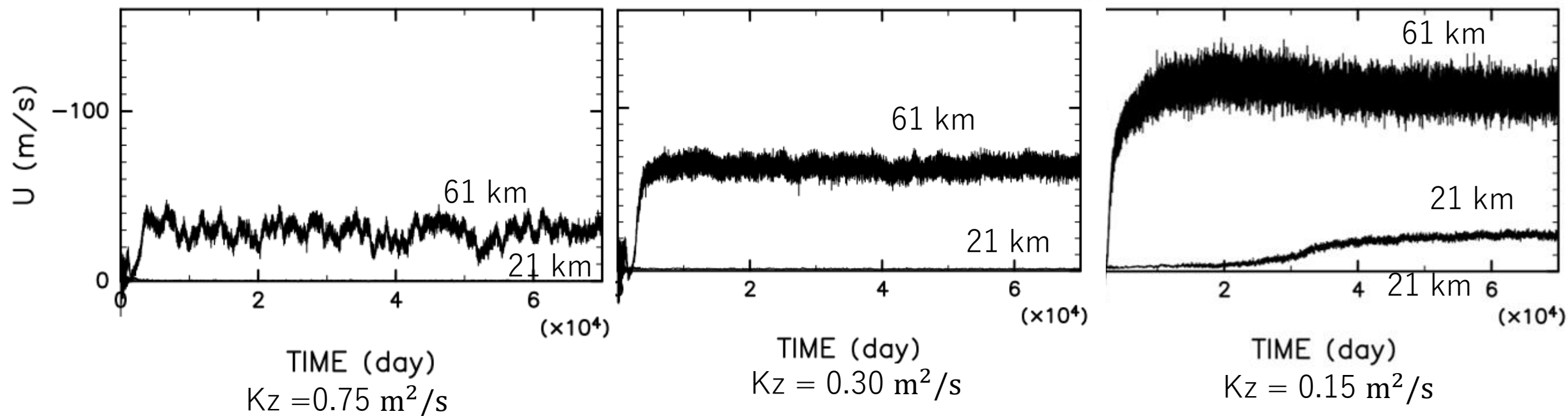
- YT03 の方は横に長い強い風の領域を持つ

相対角運動量の鉛直粘性依存性



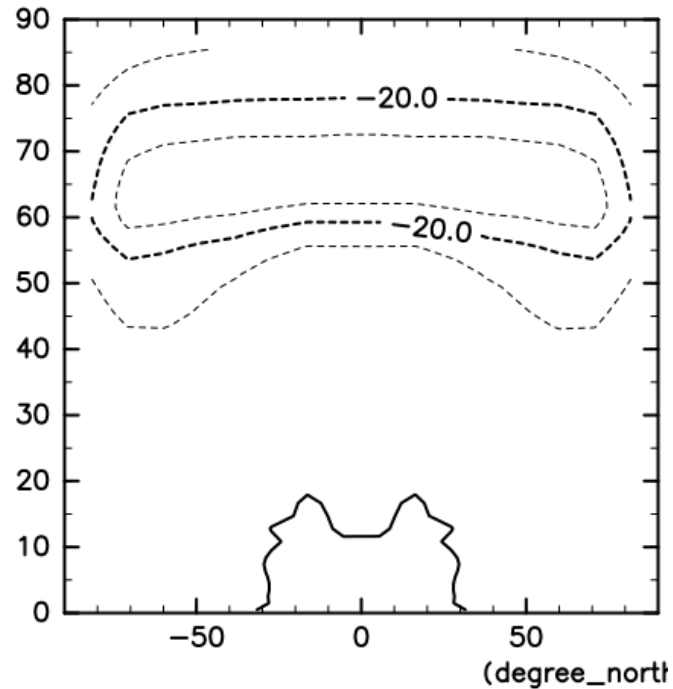
- 鉛直粘性が強いと, 相対角運動量^{time}は小さくなる.

東西風の鉛直粘性依存性



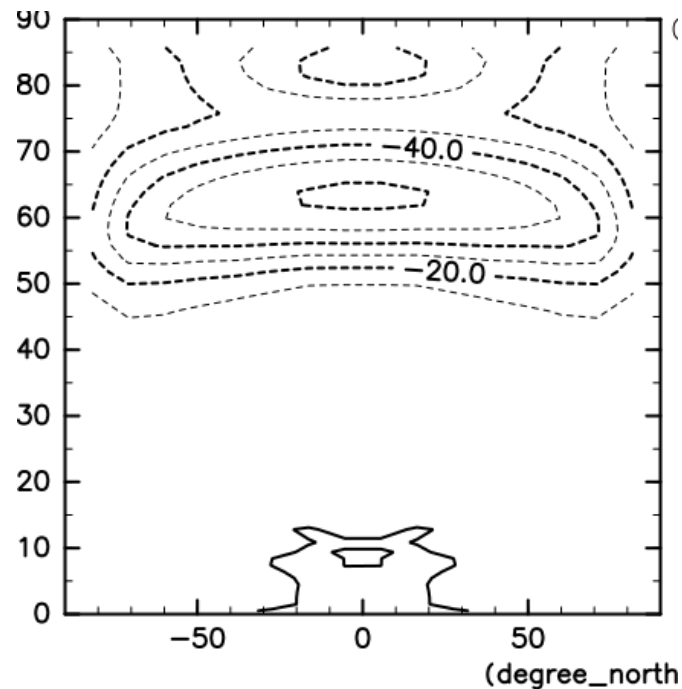
- K_z が大きくなると, どちらの高度でも, 風速は低下した

東西風の鉛直粘性依存性(子午面)



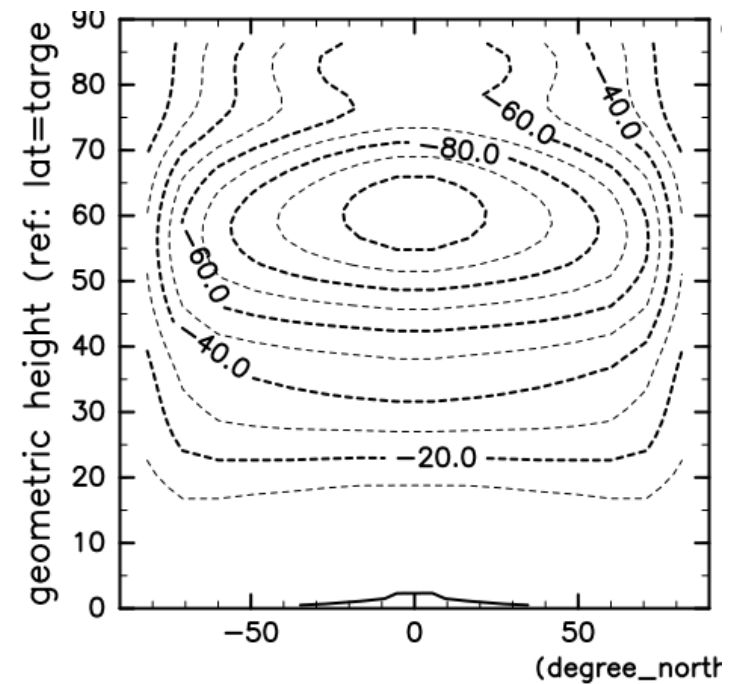
$$K_z = 0.75 \text{ m}^2/\text{s}^{\text{lat}}$$

CONTOUR INTERVAL = $1.000\text{E}+01$



$$K_z = 0.30 \text{ m}^2/\text{s}^{\text{lat}}$$

CONTOUR INTERVAL = $1.000\text{E}+01$

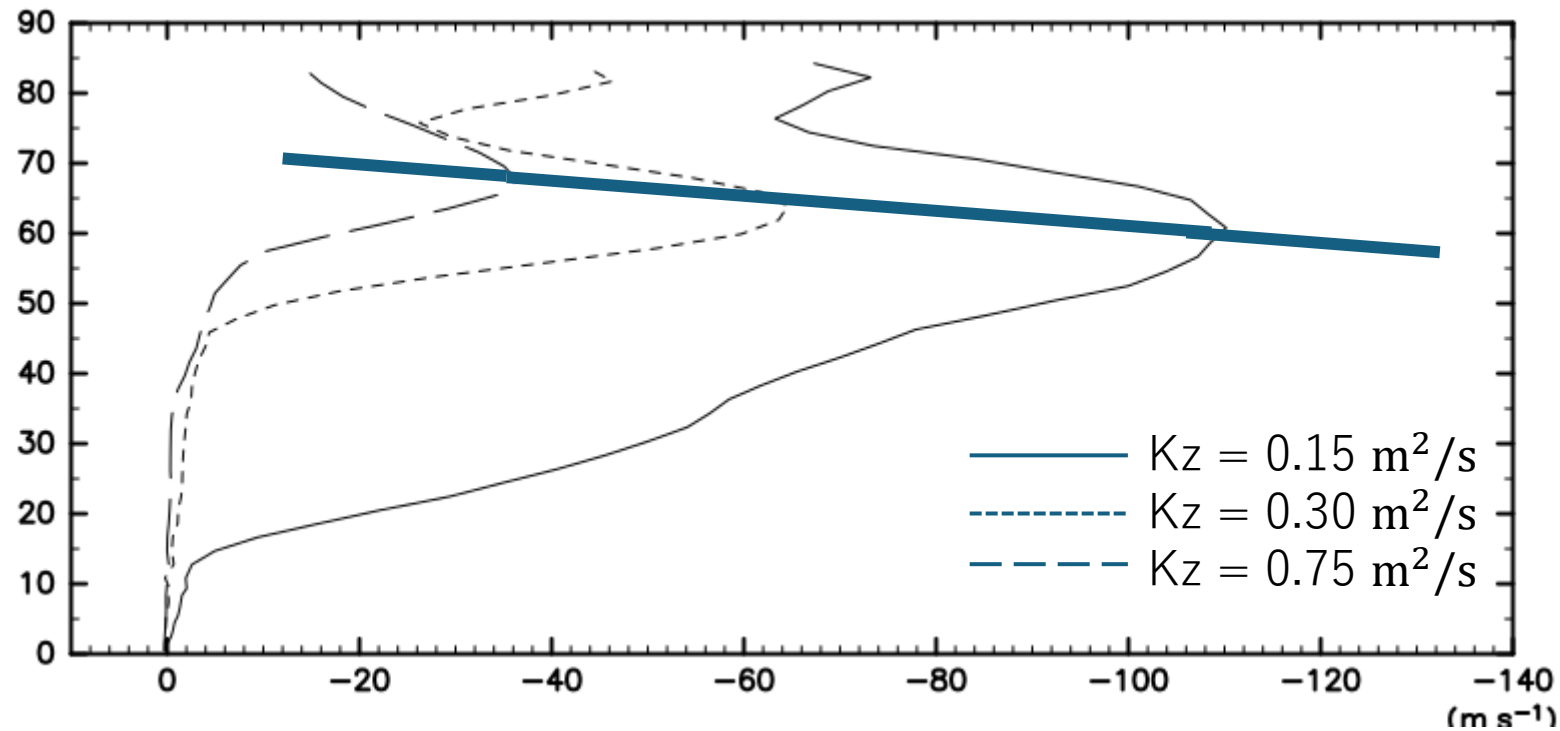


$$K_z = 0.15 \text{ m}^2/\text{s}^{\text{lat}}$$

CONTOUR INTERVAL = $1.000\text{E}+01$

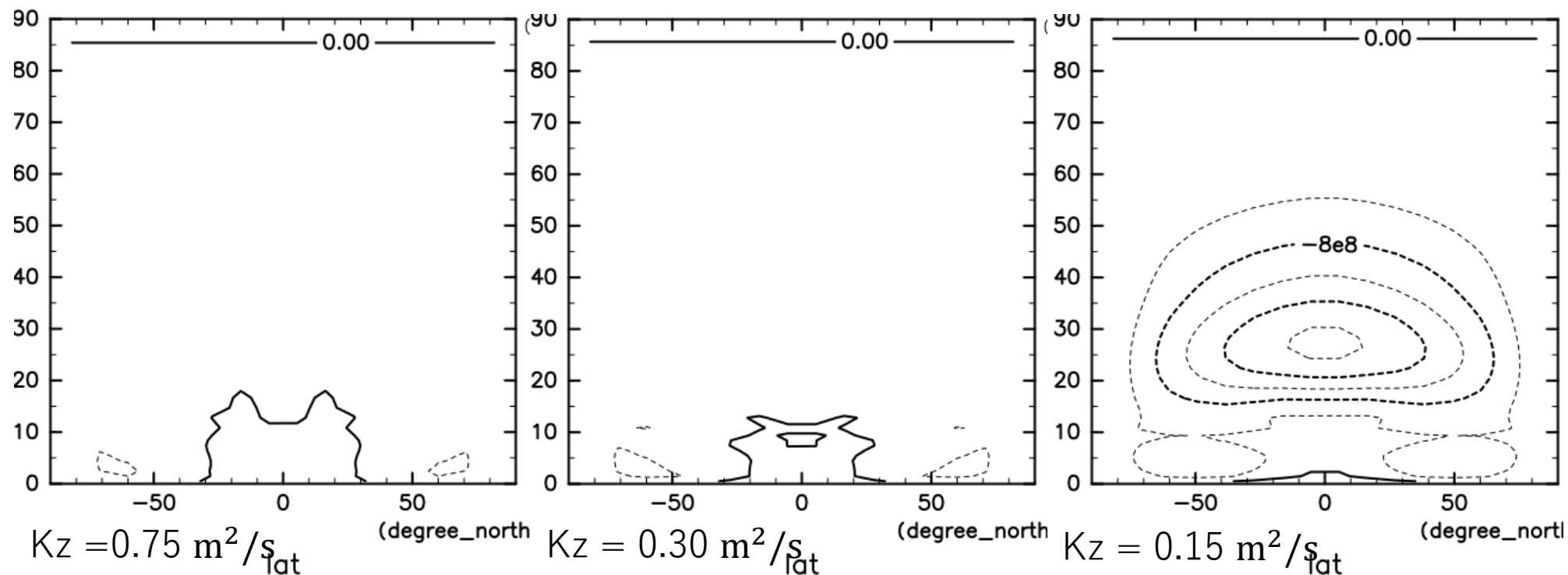
- 鉛直粘性が強くなると, 高度 60 km 付近の東西風が弱くなる.

東西風の鉛直粘性依存性(鉛直分布)



- 鉛直粘性が強くなると, 最大風速の高度が上昇する

相対角運動量密度の鉛直粘性依存性

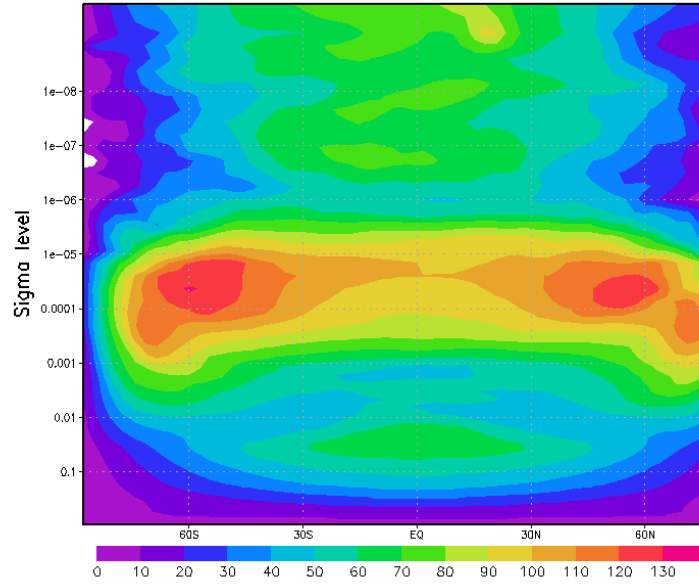


- 相対角運動量密度は、風速と密度の積のため、東西風が弱い

議論

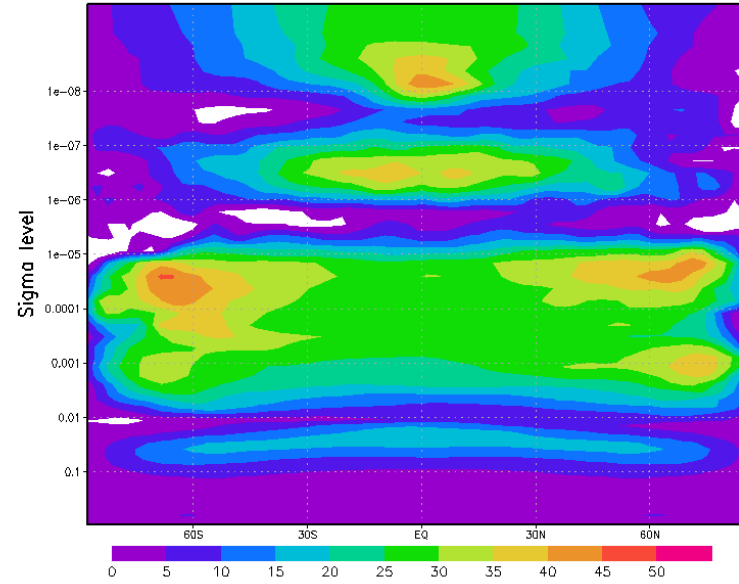
東西風の鉛直粘性依存性

(a) 1500 Earth years



0.0015 m²/s

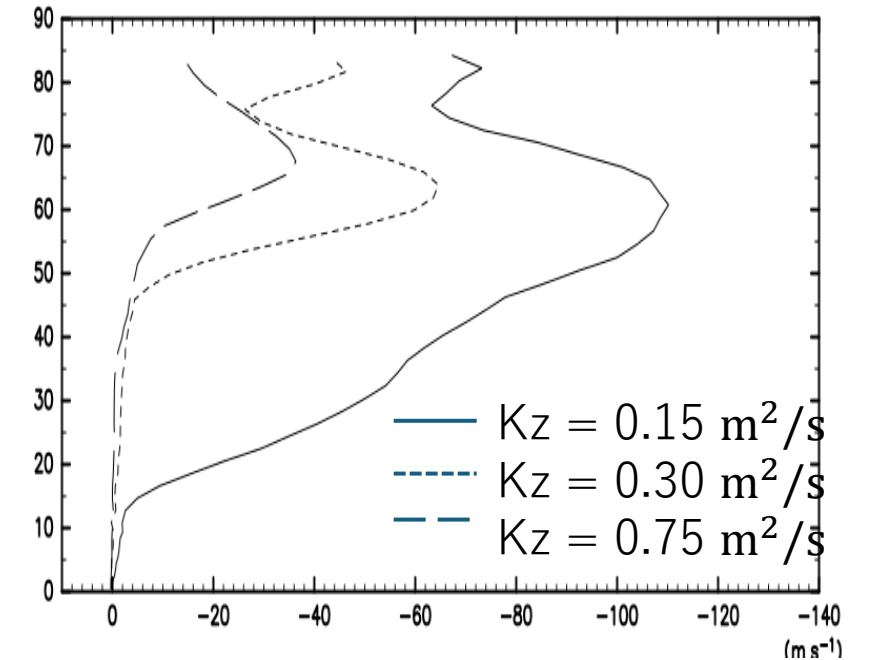
(a)V3; 3000 Earth years



0.03 m²/s

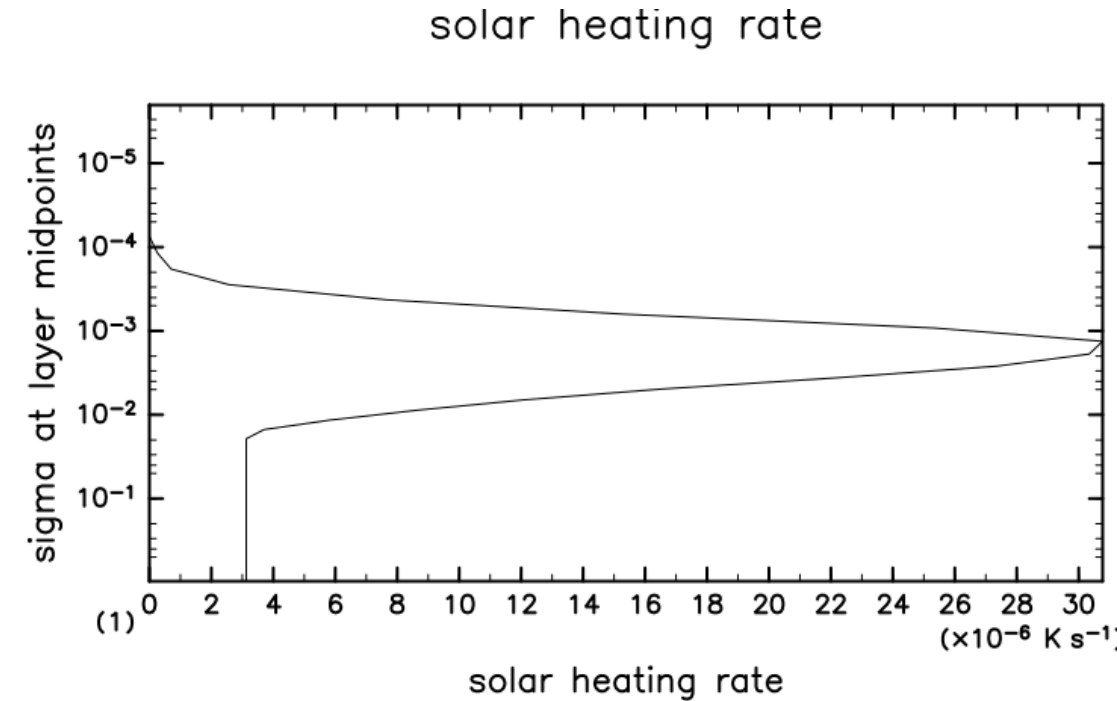
Sugimoto et al. (2019)

- Sugimoto et al. (2019) は鉛直粘性が強いと、静止大気からスーパーローテーションが再現されないと指摘している



YT03 の加熱率の大きさの見積もり

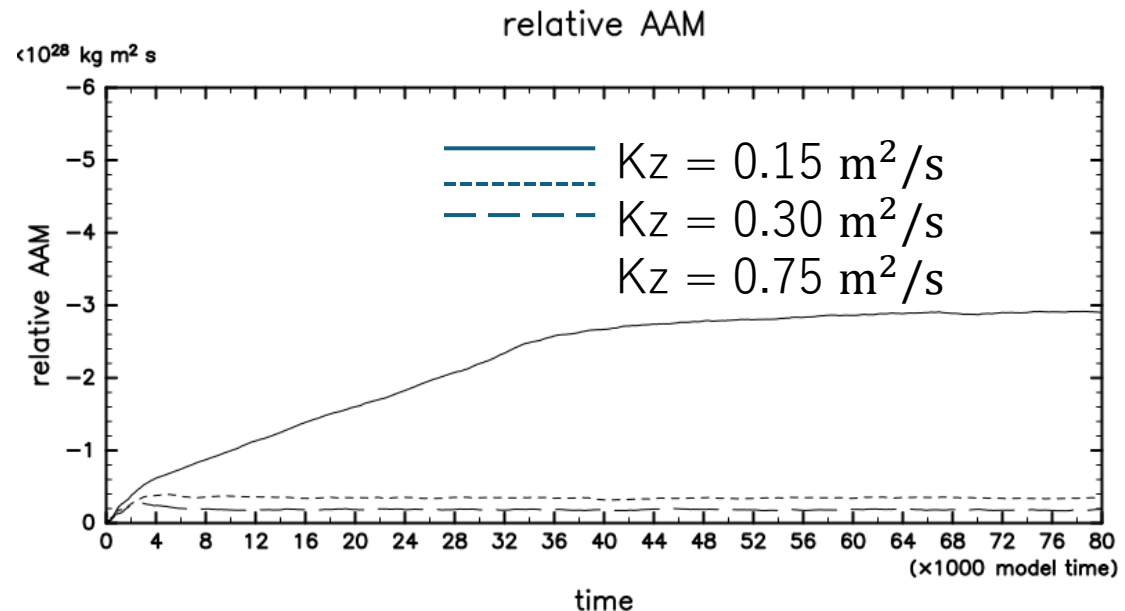
- YT03 の加熱率は Lebonnois et al. (2010) などで過剰に大きいと批判されている.
- 左図の地表の加熱率が 100 kmまで続くと仮定し, 高度 55 km の密度を用いて, エネルギー [W/m^2] を計算すると, 約 $740 \text{ W}/\text{m}^2$ となる
- 太陽定数とアルベドを用いた吸収するエネルギーは約 $220\text{--}65 \text{ W}/\text{m}^2$



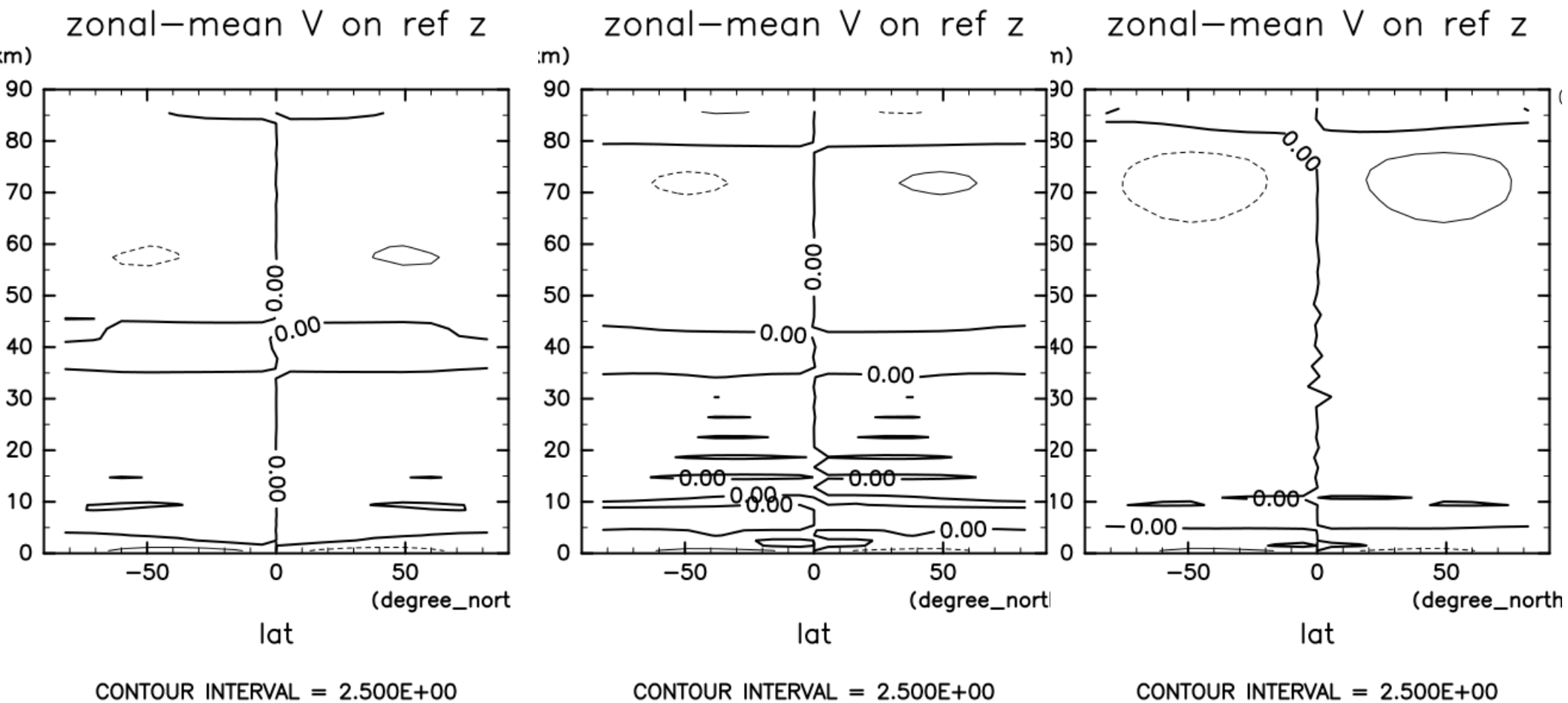
まとめ

結論

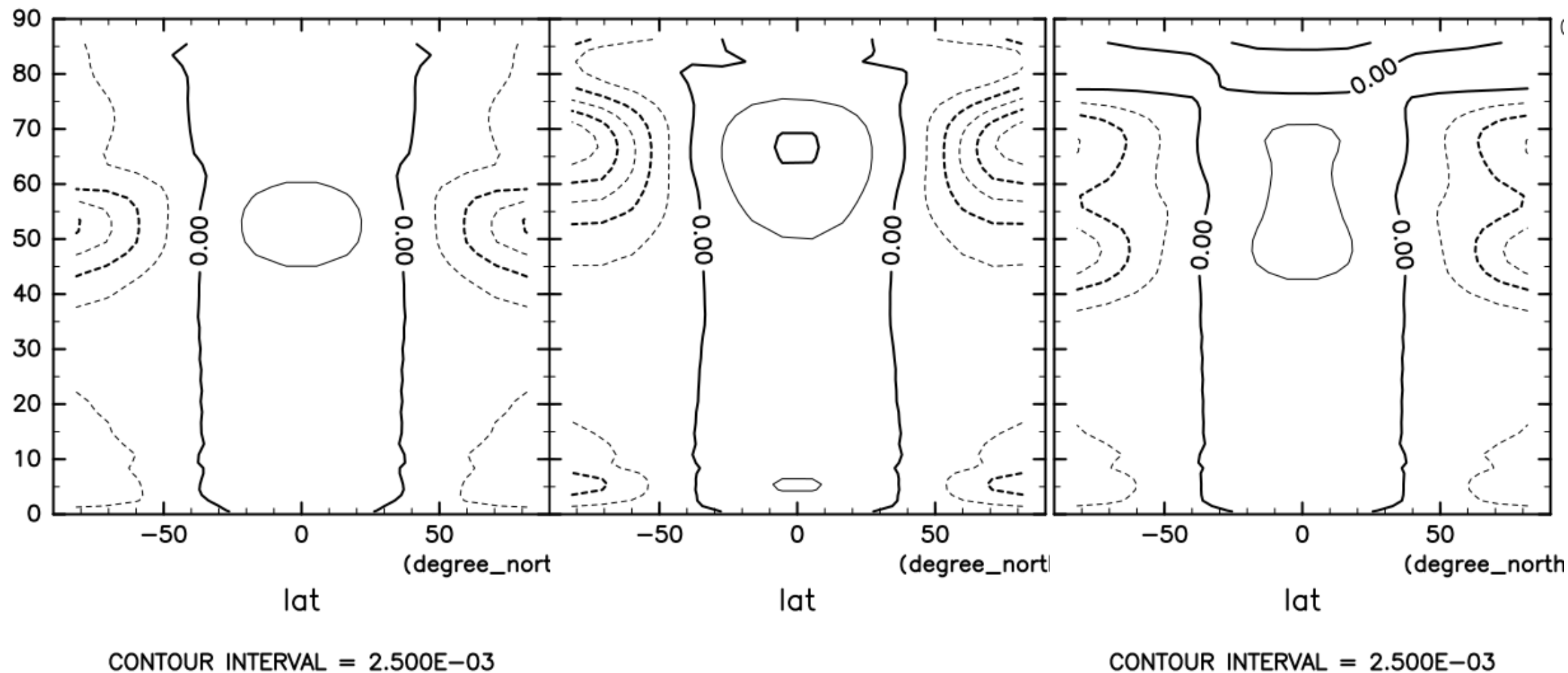
- 鉛直粘性の効果が大きいと、運動量が上層へ蓄積されずスーパーローテーションは弱まり、大気全体の相対角運動量も増加しない。
- 鉛直粘性係数の値は, Lebonnois et al. (2010), Sugimoto et al. (2019) に比べて大きく, 今回の実験の強い加熱が関係しているかも。



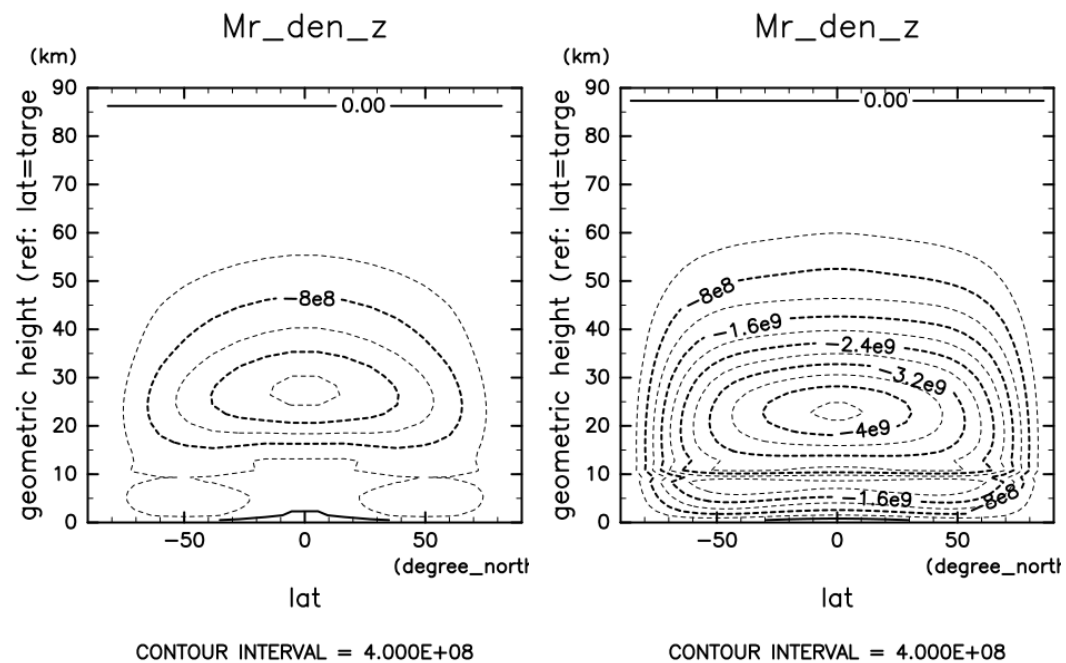
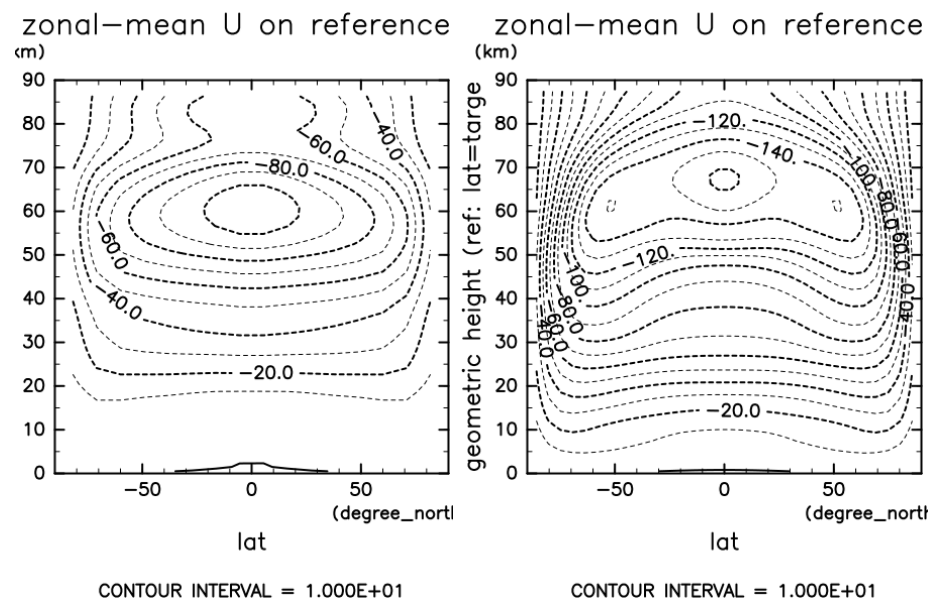
南北風の鉛直粘性依存性



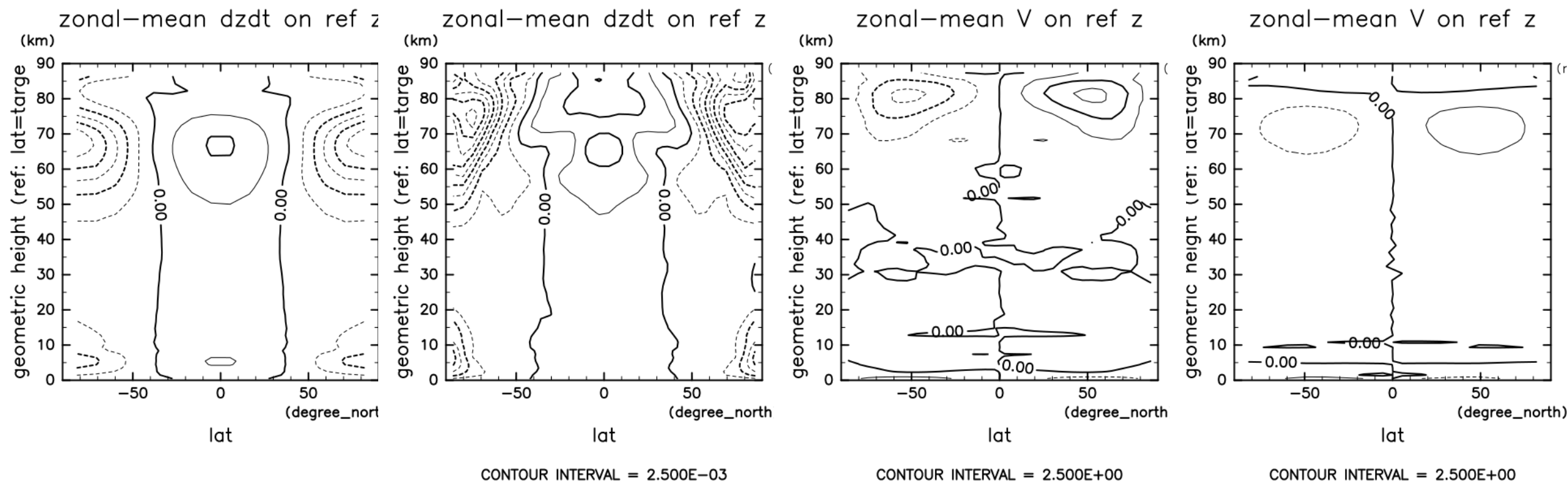
鉛直風の鉛直粘性依存性



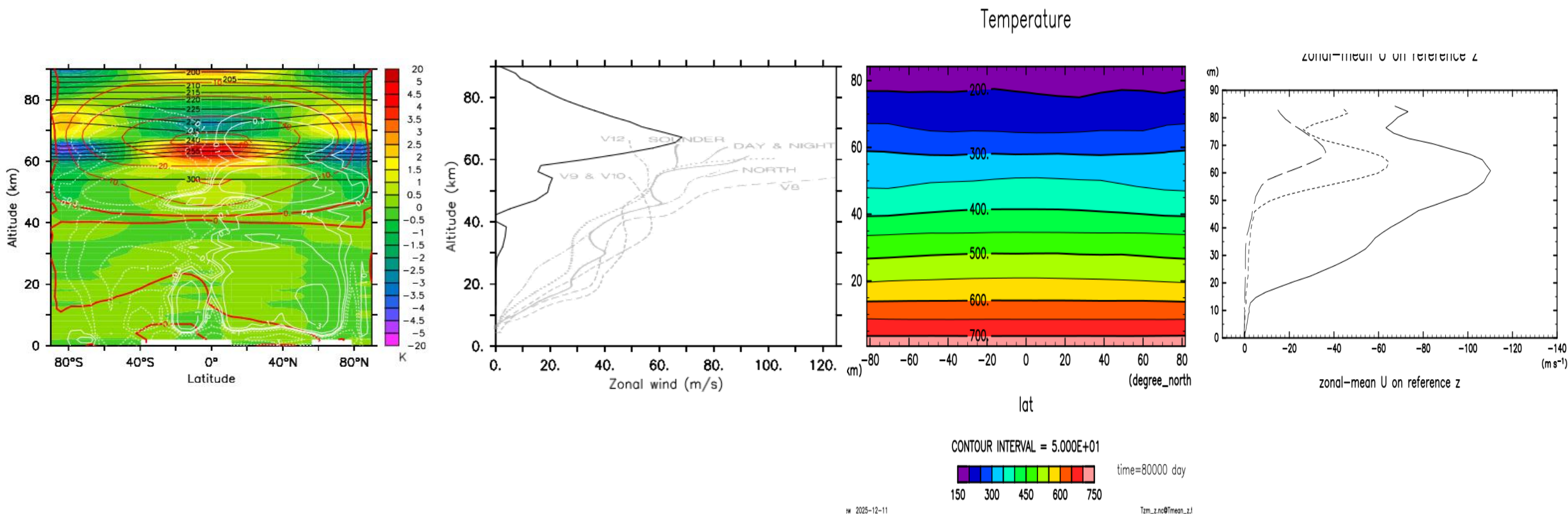
解像度依存性(1)



解像度依存性(2)



YT03 での高い鉛直粘性係数



- 温度風関係が重要な気がする..