

金星大気 スーパーローテーションの 鉛直粘性依存性

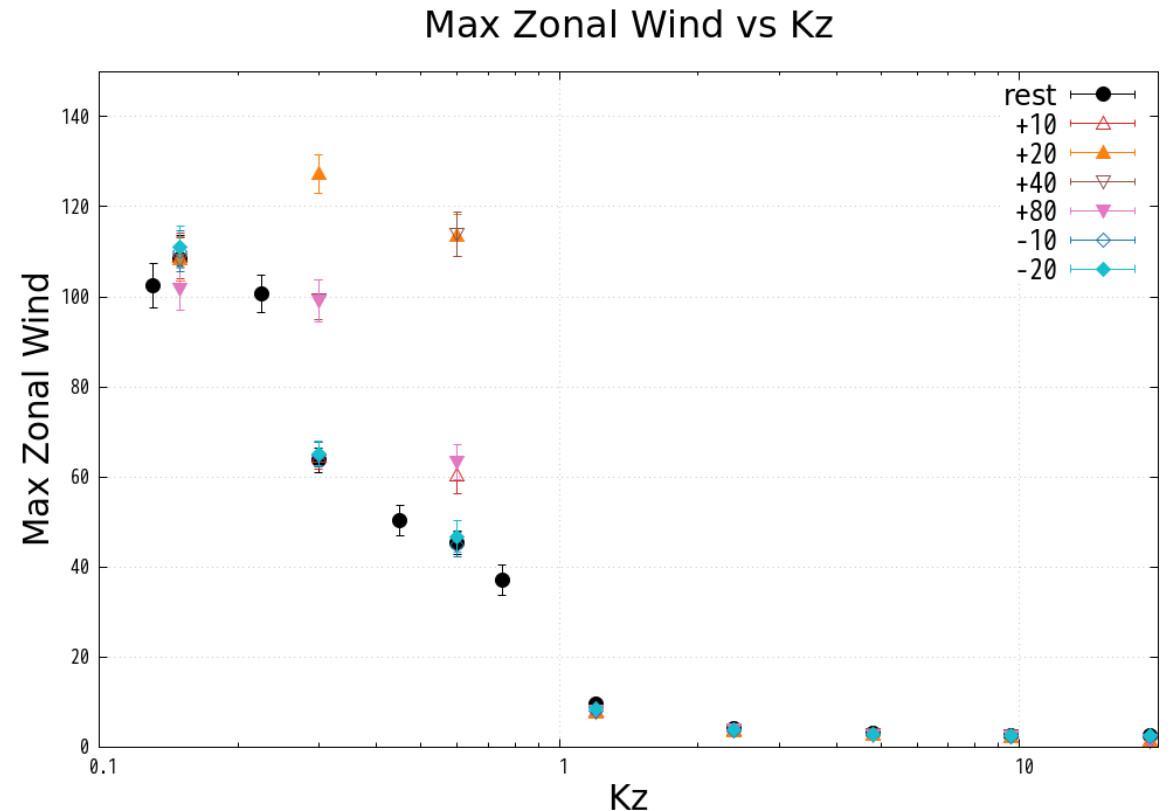
神戸大学理学研究科惑星学専攻
服部蒼紀

今回の発表のまとめ

鉛直粘性が強いと、スーパーローテーションは起こらない

- スーパーローテーションが
起こる鉛直粘性は
Sugimoto+ (2019)
より二桁大きい

同一粘性でも初期値によって
複数の解の可能性



スーパーローテーションとは

- 高度 50 km より高い場所で, 風速 100 m/s を超える自転と同じ向きの東西風が吹く (スーパーローテーション)
- 固体惑星の回転より 60 倍速い

	金星	地球
自転周期	243 日	1.00 日
赤道での地表の速度	1.81 [m/s]	465 [m/s]
自転角速度	3.0×10^{-7} [/s]	7.3×10^{-5} [/s]

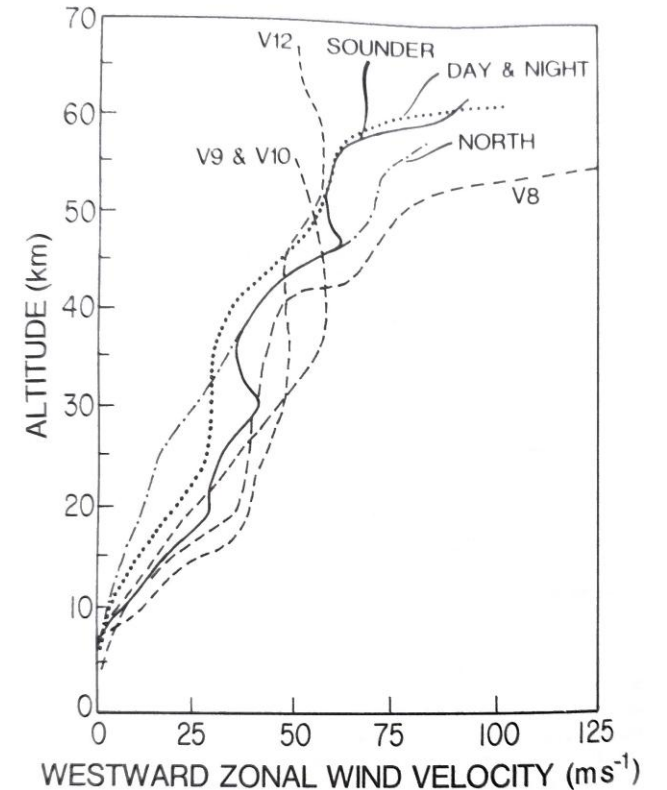


Fig. 9. Vertical profiles of east-to-west wind speed from Doppler tracking of Veneras 8, 9, 10, and 12 (V8, V9, V10, V12) and interferometric tracking of Pioneer Venus probes (from Schubert et al. 1980a).

Schubert (1983)

子午面循環による上層大気の加速

低緯度で上昇, 高緯度で下降する流れ

各層で剛体回転

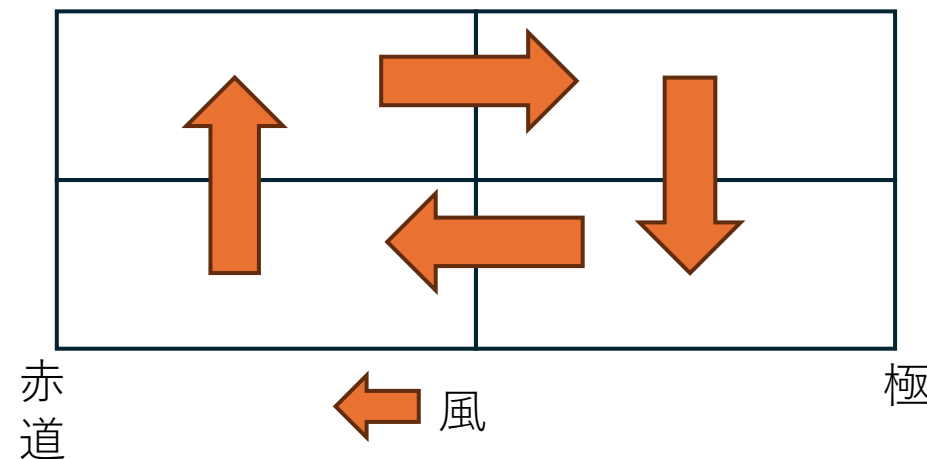
- 水平粘性が大きく, 鉛直粘性が小さい

定常のとき, 上向きと下向きの
角運動量フラックスはつりあう

- $\omega_L R_E = \omega_U R_p$

よって, 上層の角速度は, $\omega_U = \frac{R_E}{R_p} \omega_L$

$R_E > R_p$ より, 上層は下層より速くなる



ω_U : 上層の角速度

ω_L : 下層の角速度

R_E : 低緯度の自転軸からの距離

R_p : 高緯度の自転軸からの距離

鉛直粘性

鉛直粘性は速度の鉛直勾配を小さくする

鉛直粘性が非常に大きければ、大気は上層と下層の角速度が同じになる

- 大気と地表の間の摩擦が大きければ、大気は地表と同じ角速度
 - 金星は角速度が非常に遅い (赤道で約 2 m/s)

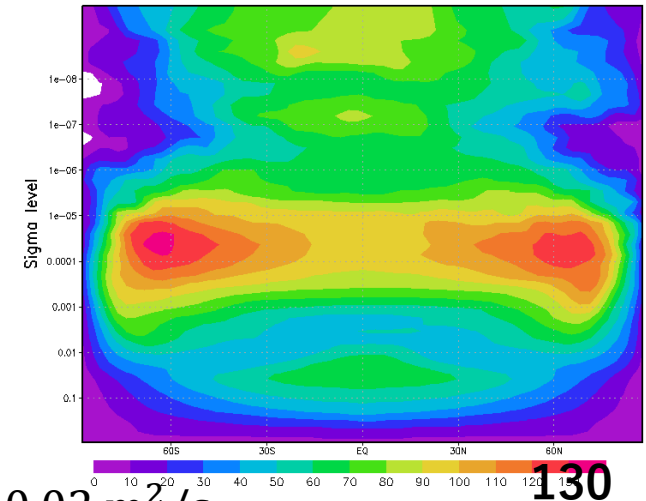
鉛直粘性が強いと、上層の角速度は大きくならない

鉛直粘性とSR

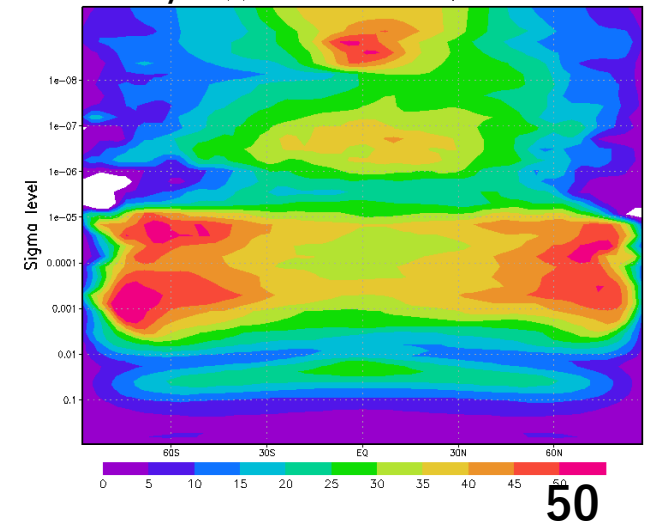
Sugimoto et al. (2019) は大気大循環モデル AFES-Veunsを用いて、
静止状態と SR の 2 つの初期値から長時間積分

- 鉛直粘性 $0.0015 \text{ m}^2/\text{s}$
どちらの初期値でもSRは生成・維持された。
- 鉛直粘性 $0.02 \text{ m}^2/\text{s}$
どちらの初期値でもSRは生成・維持されない

$$K_z = 0.0015 \text{ m}^2/\text{s} \quad \text{(b)SR; 1000 Earth years}$$



$$K_z = 0.02 \text{ m}^2/\text{s} \quad \text{(b)V3 SR; 3000 Earth years}$$



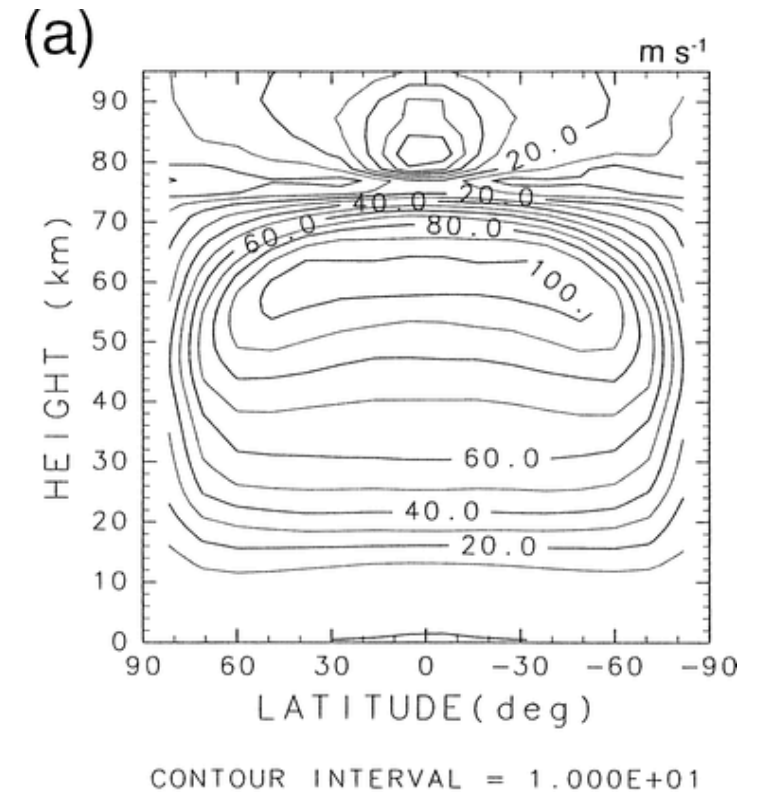
Sugimoto+ (2019)

鉛直粘性とSR

- Yamamoto & Takahashi (2003)
 - T10L50, 非現実的な加熱
 - 初期値は静止
 - 鉛直粘性係数 $0.15 \text{ m}^2/\text{s}$ で SR した
- Sugimoto+(2019)
 - T42L60, 現実的な加熱
 - 初期値は静止とSR
 - 鉛直粘性係数 $0.15 \text{ m}^2/\text{s}$ ではSR しない

SR する/しないを分けるのは何?

- YT03 の設定で, 鉛直粘性の強さを変えて計算を行い, SRの生成・維持の条件を調べる



Yamamoto & Takahashi (2003)

モデル全体

DCPAM5：地球流体電脳倶楽部による大気大循環モデル

- プリミティブ方程式
- 物理過程
 - 放射加熱・冷却
 - 地表摩擦
 - 水平粘性
 - 鉛直粘性

実験設定

- 解像度 T10L50 (YT03)
- 放射加熱・冷却 東西一様加熱, ニュートン冷却(YT03)
- 地表摩擦 レイリー摩擦, 時定数 30 日 (YT03)
- 水平粘性 4 次の超粘性, 時定数 40 日(YT03)
- 鉛直粘性 0.15 (YT03) 0.30 … 19.2 m²/s 8 通り
- 初期値 静止大気(YT03), 鉛直一様東西風速 6 通り
- 積分時間 63180 日 (YT03), 80000 日

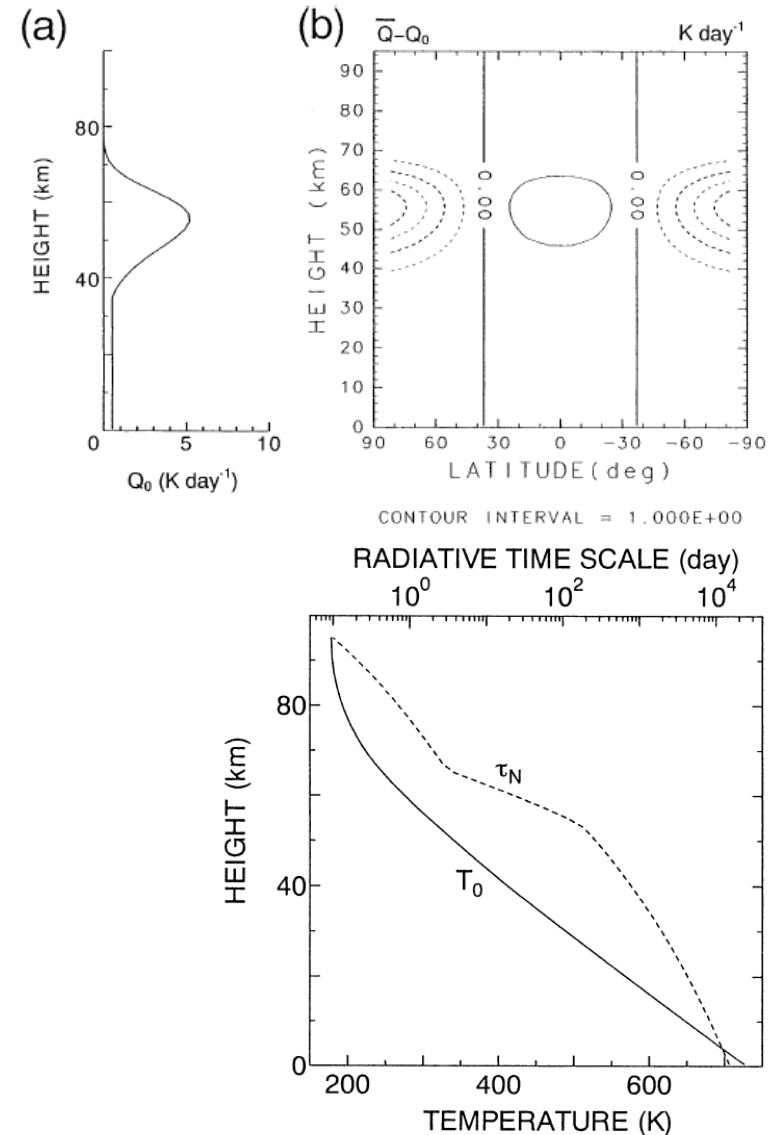
YT03 の放射加熱・冷却

東西一様加熱

- 高度 55 km でピーク
- 下層で 0.52 K/day

緩和時間は最大で 10^4 日

緩和先の温度は安定



加熱率の見積もり

モデルの加熱フラックス F [W/m^2] は,
全球平均加熱率 $Q(z)$ [K/day] から

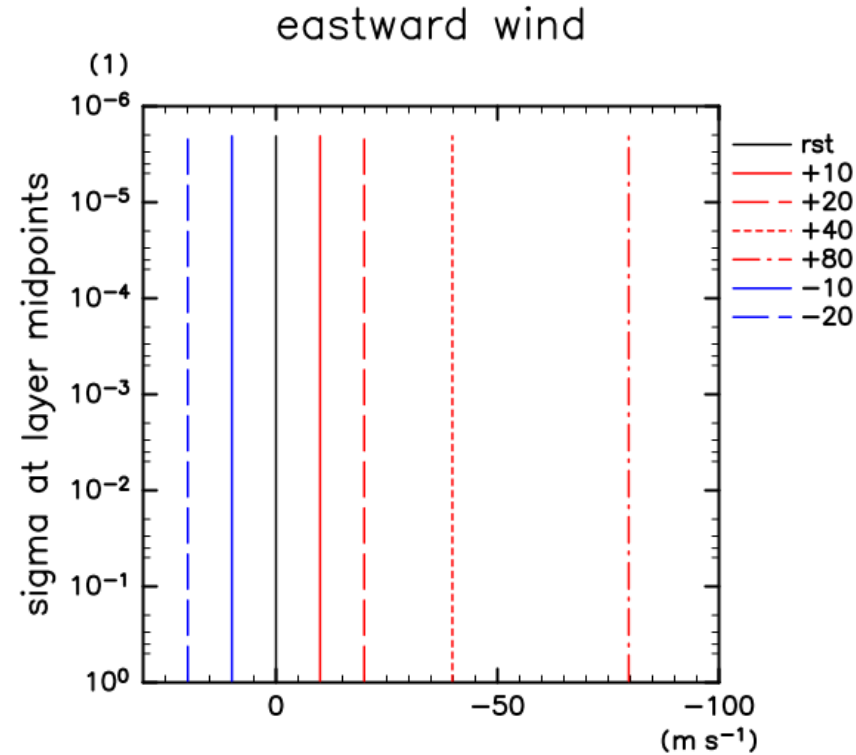
$$F = c_p \int_0^{\infty} \rho Q dz = \frac{c_p}{g} \int_{p_s}^0 \rho Q dp$$

- YT03 の F は, $1180 \text{ W}/\text{m}^2$
 - 下層の加熱が強い
- 金星の正味の吸収放射フラックスは, $200 \text{ W}/\text{m}^2$

実際の金星より強い子午面循環

初期値

- 鉛直方向一様な分布 (-20, -10, 10, 20, 40, 80 m/s)
- 赤道で最大となるような \cos 型の南北分布

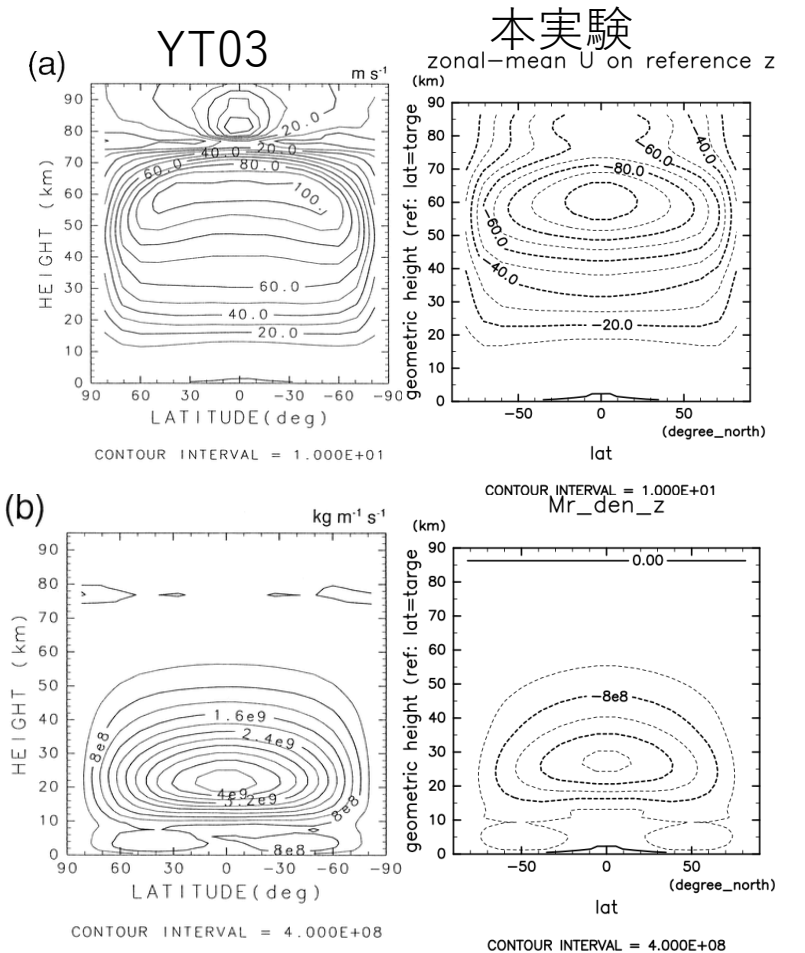
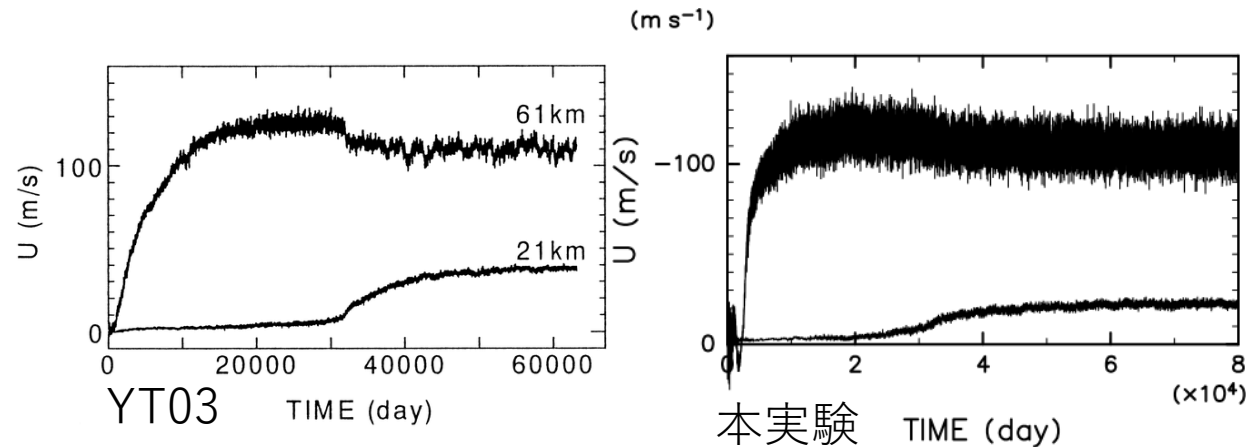


YT03 との比較

雲層より低い高度で, 東西風が YT03 に
比べ遅い傾向がある

- YT03 より角運動量輸送が弱い可能性

100 m/s を超える領域が高緯度に
広がっていない

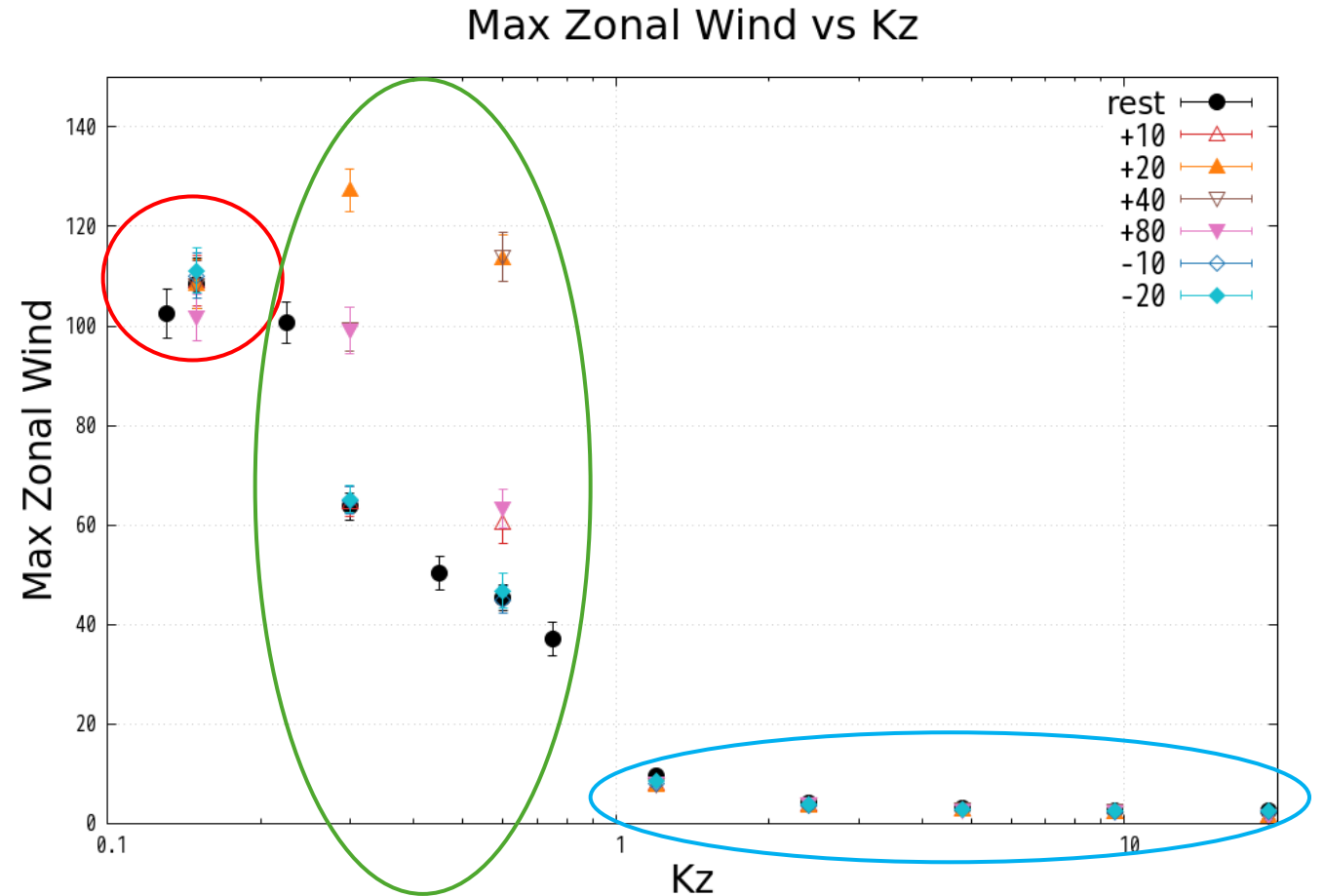


鉛直粘性と東西風の関係

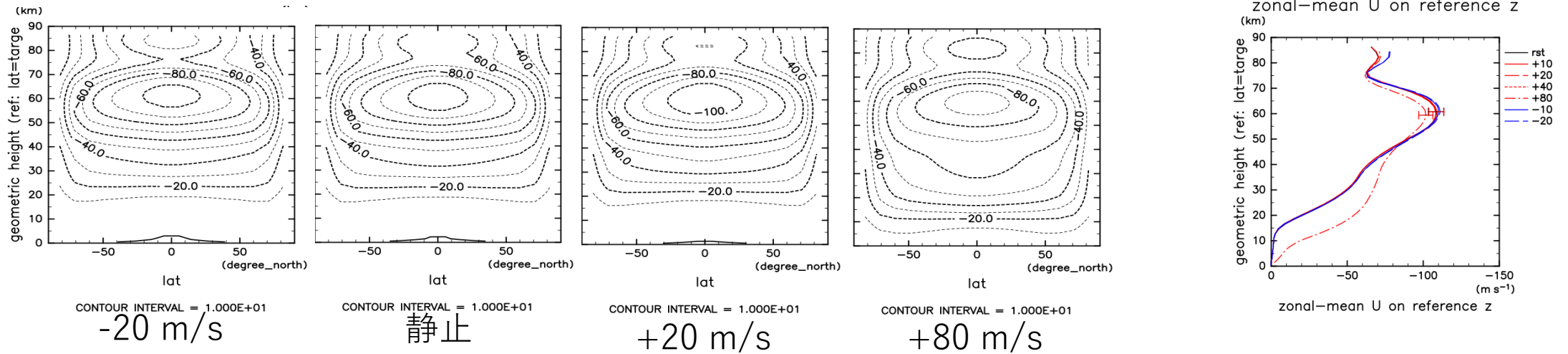
小さい鉛直粘性では、
全ての初期値でSR する

大きい鉛直粘性では、
全ての初期値で
SR しない

中程度の鉛直粘性では、
SR するかは初期値依存

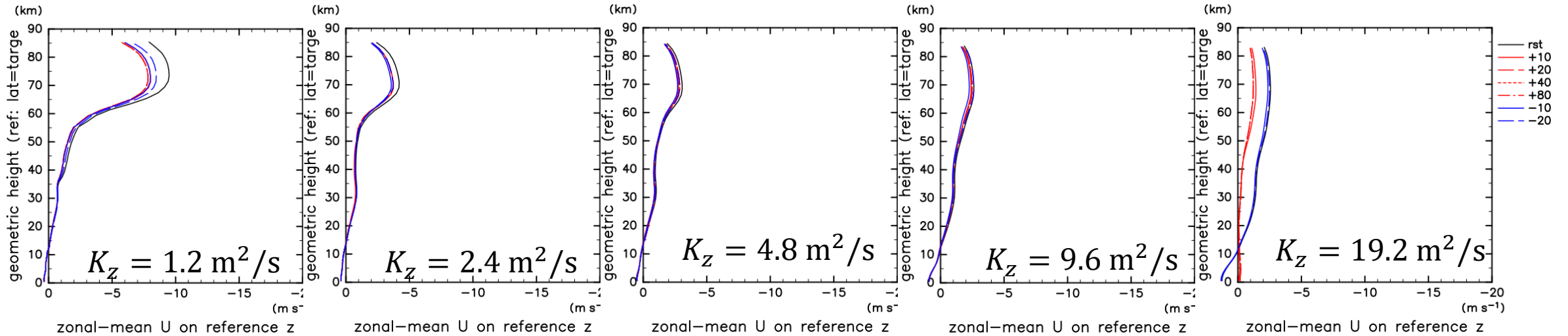


鉛直粘性が小さい場合 ($K_z = 0.15 \text{ m}^2/\text{s}$)



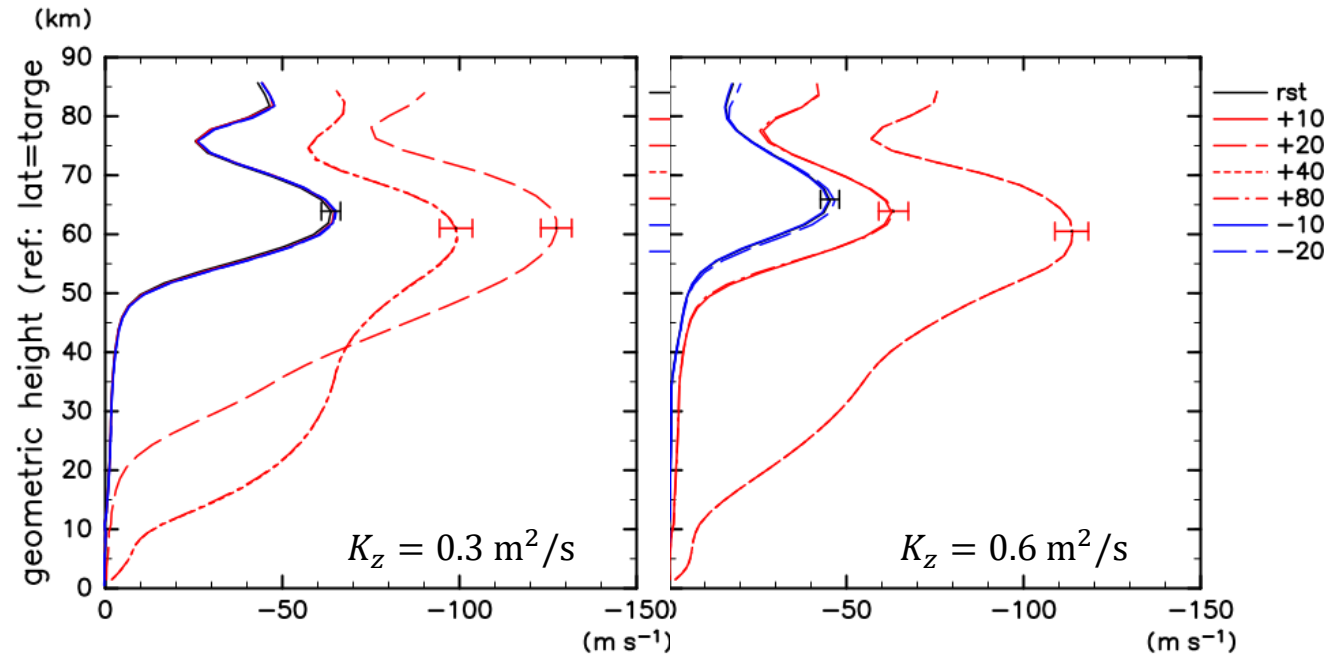
初期値 +80 m/s とそれ以外で多重平衡解の可能性

鉛直粘性が大きい場合 ($K_z \geq 1.2 \text{ m}^2/\text{s}$)



$K_z = 19.2 \text{ m}^2/\text{s}$ の時, 2つの多重平衡解がある可能性

鉛直粘性が中程度の場合 ($K_z = 0.3, 0.6 \text{ m}^2/\text{s}$)



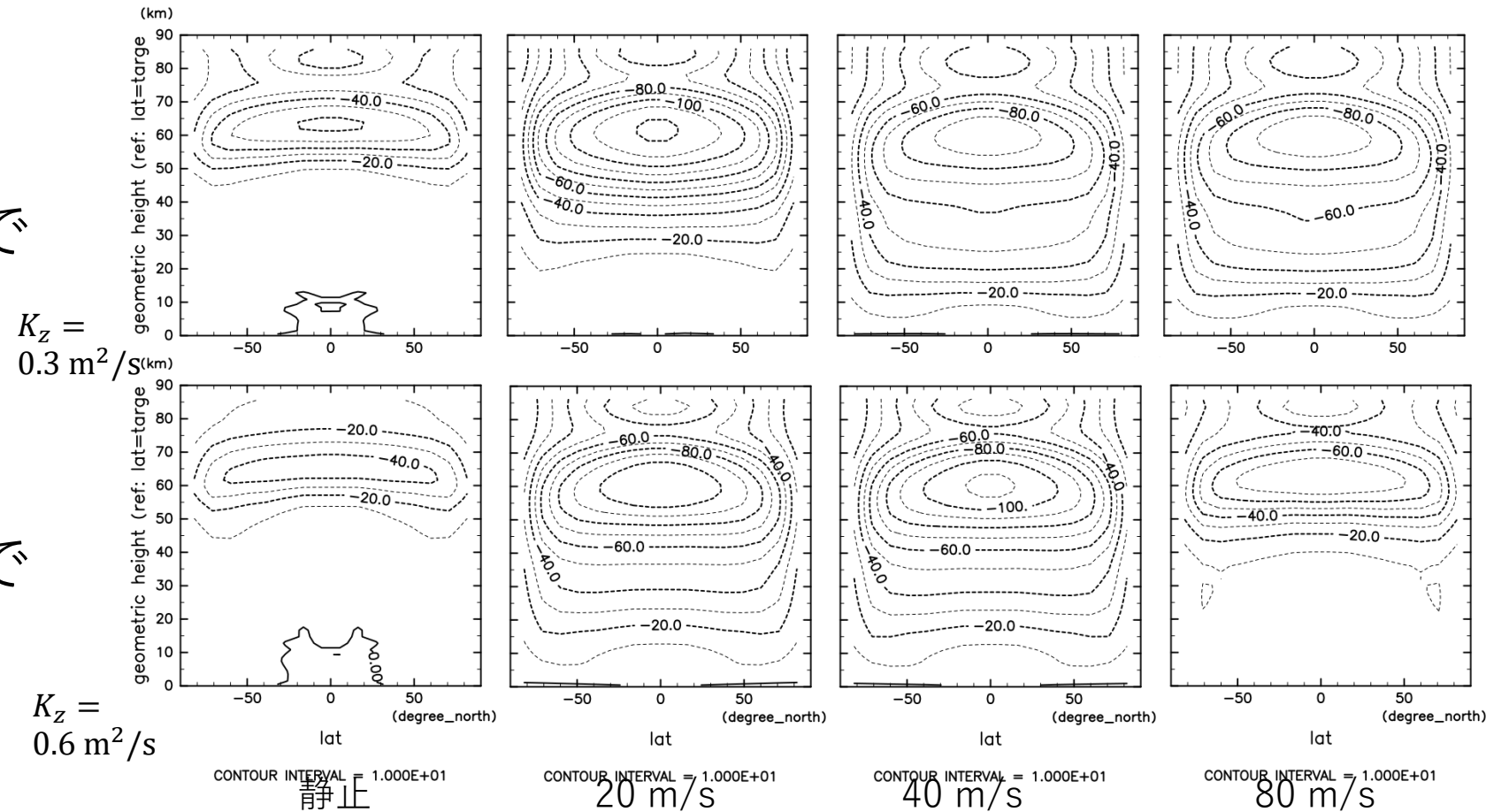
少なくとも 3 つの多重平衡解がある

- $K_z = 0.30 \text{ m}^2/\text{s}$: +20 m/s と +40, 80 m/s とそれ以外
- $K_z = 0.60 \text{ m}^2/\text{s}$: +20, 40 m/s と +10, 80 m/s とそれ以外

鉛直粘性が中程度の場合 ($K_z = 0.3, 0.6 \text{ m}^2/\text{s}$)

$K_z = 0.30 \text{ m}^2/\text{s}$:
初期値
40 m/s, 80 m/s で
類似構造

$K_z = 0.60 \text{ m}^2/\text{s}$
初期値
20 m/s, 40 m/s で
類似構造



まとめ

鉛直粘性が中程度の場合, 少なくとも 3 つの多重平衡解

- なぜ中程度の粘性の場合のみ 3 つなのか不明

鉛直粘性が低い場合, SR するが, 多重平衡解の可能性

