

金星のスーパーローテーション における熱潮汐の重要性: Lebonnois et al. (2010)の紹介

神戸大学理学研究科惑星学専攻
服部蒼紀

目次

- はじめに
 - 金星大気の観測の歴史
 - スーパーローテーションの維持機構
 - 単純な放射輸送の問題点
- モデルの解説
 - 力学コア
 - 放射輸送
 - シミュレーション条件
- 結果
 - 角運動量
 - 鉛直構造
 - 温度分布
 - 東西風
 - 南北鉛直面の加熱率
 - 感度実験
- スーパーローテーションの機構
 - 角運動量輸送
 - 波の分析
- 結論

はじめに

- 金星大気の観測の歴史
- スーパーローテーションの維持機構
- 単純な放射輸送の問題点

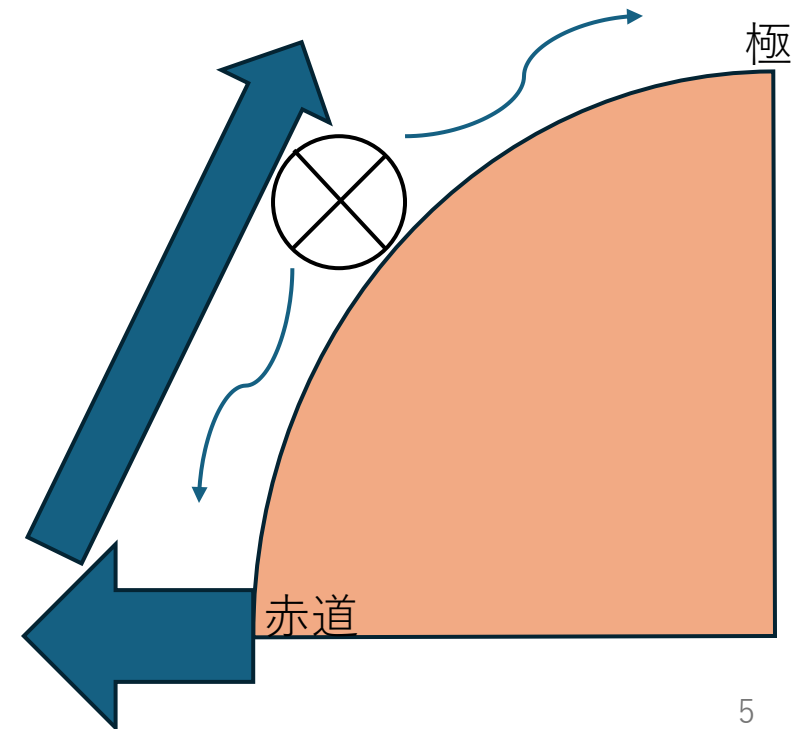
金星大気の特徴

- 1970-1980 年代に直接探査 (Venera, Pioneer Venus, Magellan)
 - 地表において二酸化炭素が 95 %
 - 地表の圧力は 92 気圧
 - 地表温度は 735 K
 - 雲層が地表から 48 km から 70 km の領域に全球を覆う.
 - 雲の上部で対地速度が 100 m/s 以上のスーパーローテーションを持つ.
 - 両極の緯度 60 度あたりに渦構造が集中する.
 - 赤道極間で 1 セルの循環がある. (今回はハドレーセルと呼ぶ)
 - Seiff et al., (1985) によって参照温度プロファイル VIRA が作られた.

スーパーローテーションの維持機構 (1)

GRW 機構

- 熱的な子午面循環がスーパーローテーションを起こす.
 - Gierasch (1975), Rossow and Williams (1979) による
- 赤道が極に比べて角運動量が多い場合, 赤道で上向きの角運動量輸送が起こる.
- 上空の方が地表より角運動量が多い場合, 極向きへ角運動量輸送が起こる.
 - これらが高緯度でジェットが誘発する.
- ジェットの両側面が順圧不安定になり, 角運動量を赤道向きへ輸送する.



スーパーローテーションの維持機構 (2)

移動する火炎と熱潮汐

- 移動する火炎の機構
 - 自転加熱によって誘発される潮汐渦が角運動量を上向きに輸送する.
- 熱潮汐
 - 角運動量を中低緯度では上向きと赤道向きへ輸送する.
 - 角運動量を赤道向きで輸送するのは GRW 機構とは真逆

単純な放射輸送の問題点

- 単純な放射輸送
 - Yamamoto and Takahashi (2003, 2004, 2006) と Hollingsworth et al. (2007) は加熱率を 0.5 K/地球日 としてハドレーセルを再現した
 - 実際の加熱率は 10^{-3} K/地球日 と予想されているため, かなり強い加熱率をシミュレーションでは要求される.

モデルの解説

- 力学コアとパラメタ化
 - 温度に依存する比熱
 - 温位の定式
 - GCM のパラメータ
- 放射輸送
 - 単純な放射輸送
 - 完全な放射輸送
 - ◆ ξ 行列
- シミュレーション条件

力学コア

- LMDZ Earth モデル

- 有限離散化差分法である.

- 保存する量

- ◆順圧非発散流れのポテンシャルエンストロフィ

- ◆軸対称流れに対する角運動量

- 解像度

- ◆水平 48×32 ($7.5^\circ \times 5.625^\circ$)

- ◆鉛直 50 層

- ◆時間 1.5 min

- 計算方法

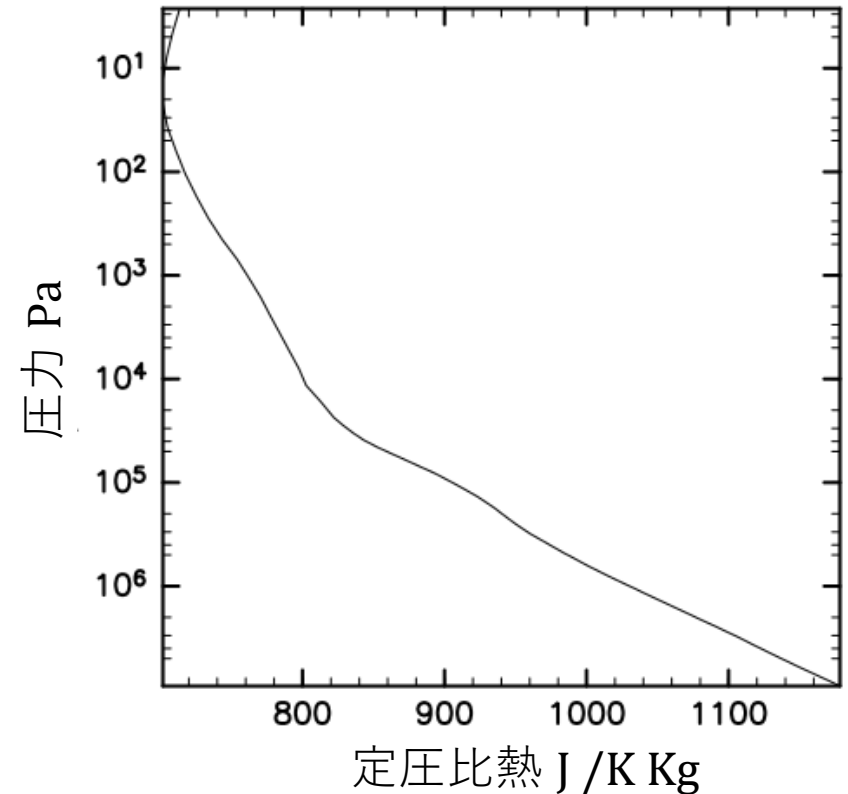
- ◆リープフロッグ時間積分

温度に依存する比熱

- VIRA に近似的に似るように定圧比熱を作る

$$C_p(T) = C_{p_0} \times \left(\frac{T}{T_0} \right)^\nu \quad (1)$$

- ただし $C_p = 1000 \text{ J/K Kg}$,
 $T_0 = 460 \text{ K}$, $\nu = 0.35$ である.
- 右図は (1) の式と VIRA から得られる定圧比熱である.



VIRA を (1) に代入して定圧比熱を求めた.

温位の定式

- 温位は

$$\int_{\theta}^T C_p \frac{dT}{T} = \int_{p_{ref}}^p R \frac{dp}{p} \quad (2)$$

で求められ, C_p に (1) を代入すると,

$$\theta^v = T^v + v T_0^v \ln \left(\frac{p_{ref}}{p} \right)^{R/C_{p0}} \quad (3)$$

が得られる. (R は気体定数)

- 温位は予報変数として使われ, 温度 T は (3) から得られる.

GCM で用いたパラメータ (1)

金星の性質		地表, 土壌, 境界層のパラメータ	
惑星半径	6051.3 km	地表アルベド	0.1
重力加速度	8.87 ms^{-1}	地表熱慣性	$2000 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-0.5} \text{ K}^{-1}$
公転周期	224.7 地球日	地表粗さ定数	0.01 m
回転率	$-2.99 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$	混合長	35 m
自転周期	-243. 地球日	最小乱流定数	$3. \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
一日の長さ	$1.0087 \times 10^7 \text{ s}$	• 自転は地球と逆回転である. • 一日の長さ (日の出から次の日の出までの時間) は, 約 117 地球日である. • 地表熱慣性は多孔質でない玄武岩の値である.	
自転軸の傾き	約 180°		
公転軌道	真円		
太陽との距離	$108.15 \times 10^6 \text{ km}$ (0.73 au)		

GCM で用いたパラメータ (2)

水平散逸パラメータ

水平散逸時定数 (3×10^6 Pa 以上)	2×10^4 s
水平散逸時定数 (3×10^6 Pa 以下)	1×10^4 s
繰り返し回数	2

大気の性質

地表平均圧力	9.2×10^6 Pa (91 atm)
平均モル量	43.44 g mol^{-1}

- 3×10^6 hPa は
参照シミュレーションでは
約 17 km,
VIRA では
約 15 km である.
- 水平散逸は, ラプラスianを
2 回作用している.

単純な放射輸送

- ある緯度, 高さごとに温度 $T_0(\phi, p)$ が決まっている.
次の時間の温度は, ある地点の温度と T_0 が
時定数 τ で緩和されることから求められる.

$$\frac{\delta T_{rad}}{\delta t} = - \frac{T(\lambda, \phi, p, t) - T_0(\phi, p)}{\tau} \quad (4)$$

- T_0 は VIRA で得られた温度 T_{ref} , 赤道極間の温度差 T_1 を用いて求められる.

$$T_0(\phi, p) = T_{ref}(p) + T_1(p) \left(\cos \phi - \frac{\pi}{4} \right) \quad (5)$$

完全な放射輸送

- 各層の加熱率は 68 個の波長帯と別な層それぞれからの加熱率を
プランク関数 B と幾何光学因子 ξ の総和で表される.

- 個々の加熱率

$$\Psi(i, j, \lambda) = (B(T_i, \lambda) - B(T_j, \lambda))\xi(i, j, \lambda) \quad (6)$$

- ある層への加熱率は下である.

$$-C_i = \sum_{\lambda} \sum_j \Psi(i, j, \lambda) \quad (7)$$

ξ 行列について

- Eymet et al. [2009] がガスに対する k 係数の相関をモンテカルロ法を用いて計算した.
 - Eymet et al. [2009] は Zasova et al. [2007] の雲モデルを用いて粒子の分布と性質を考慮に入れた.
 - 東西方向には一様である.
- この GCM では Ψ をそれぞれの放射ステップで、温度場を用いて計算している.

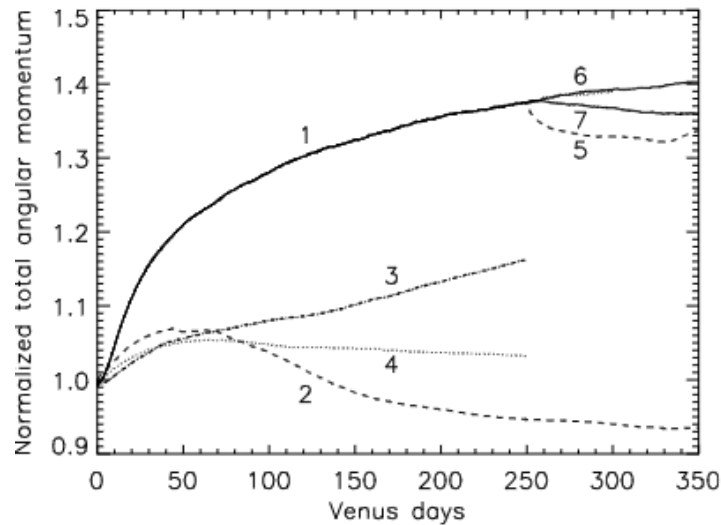
シミュレーション条件

- 参照実験
 - 計算日数 350 金星日
 - 地形の効果あり
 - 初期条件
 - 東西風なし
 - VIRA のデータに似せた温度プロファイル
 - ※ この実験の結果 250 金星日と 350 金星日では, 大気の状態は類似している. (後述)
- 長期シミュレーション
 - 参照実験の地形なし
 - 定数の比熱 (地形 有/無)
350 金星日
 - ニュートン冷却 (地形 有/無)
250 金星日
- 250 日後のデータを初期値とした感度実験
 - 64 × 48 の水平度解像度
 - 日変化なし
 - スポンジ層

結果

- 角運動量
 - 総角運動量の変化
 - 総角運動量の分析
- 鉛直構造
 - 鉛直温度と鉛直安定度
- 温度分布
- 東西風
 - 東西風と流線関数
 - 赤道での東西風
- 南北鉛直面の加熱率
 - 雲層の中部から下部
 - 地表から雲層下端
- 感度実験
 - 高解像度
 - 日変化の停止

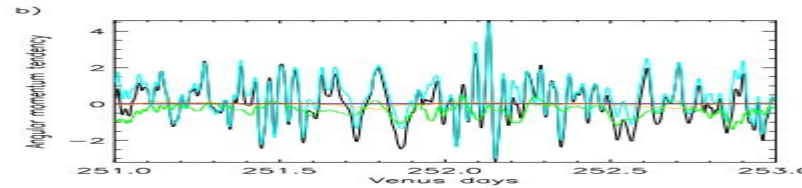
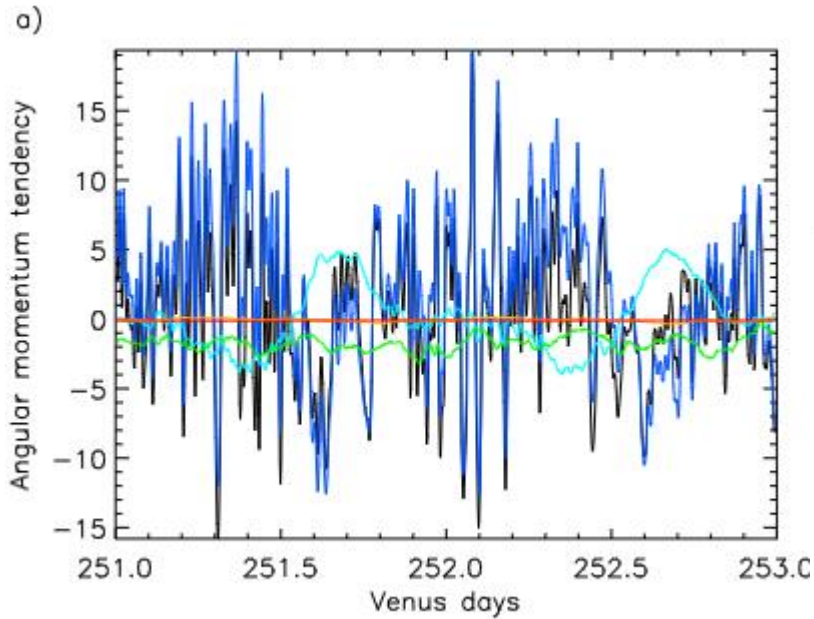
総角運動量の変化



- 1; 参照シミュレーション
- 2; 地形なし
- 3; 地形ありで比熱が定数
- 4; 地形なしで比熱が定数
- 5; 日変化なし
- 6; スポンジ層
- 7; 高解像度

- 参照シミュレーションでの総角運動量は250 金星日と 350 金星日で2%しか変わらない.
- スポンジ層を導入した場合も参照シミュレーションとほとんど同様である.

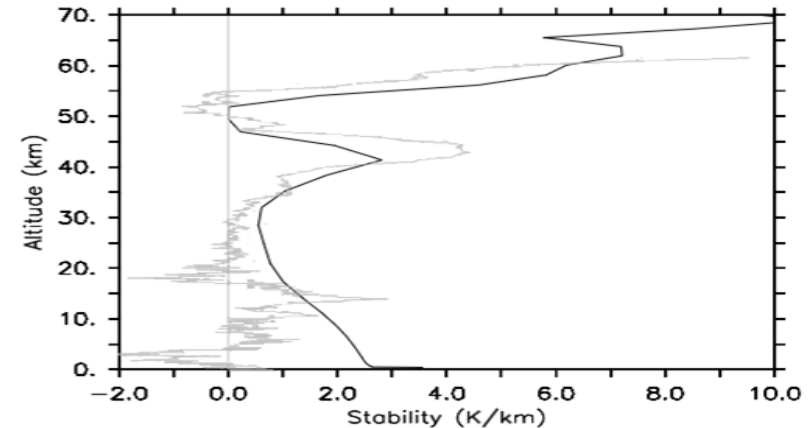
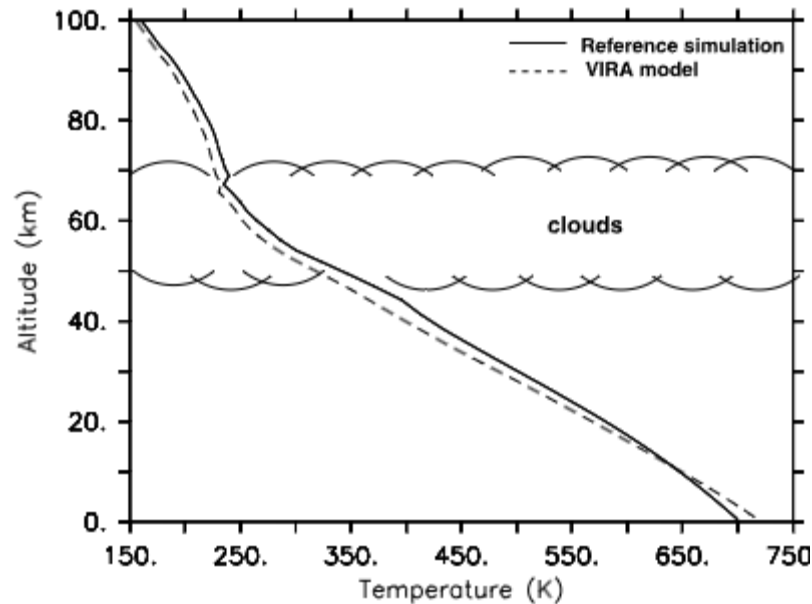
総角運動量の分析



- 山岳トルクが角運動量変化を大きく変化させる.
- 次に支配的なものは境界層による摩擦である.

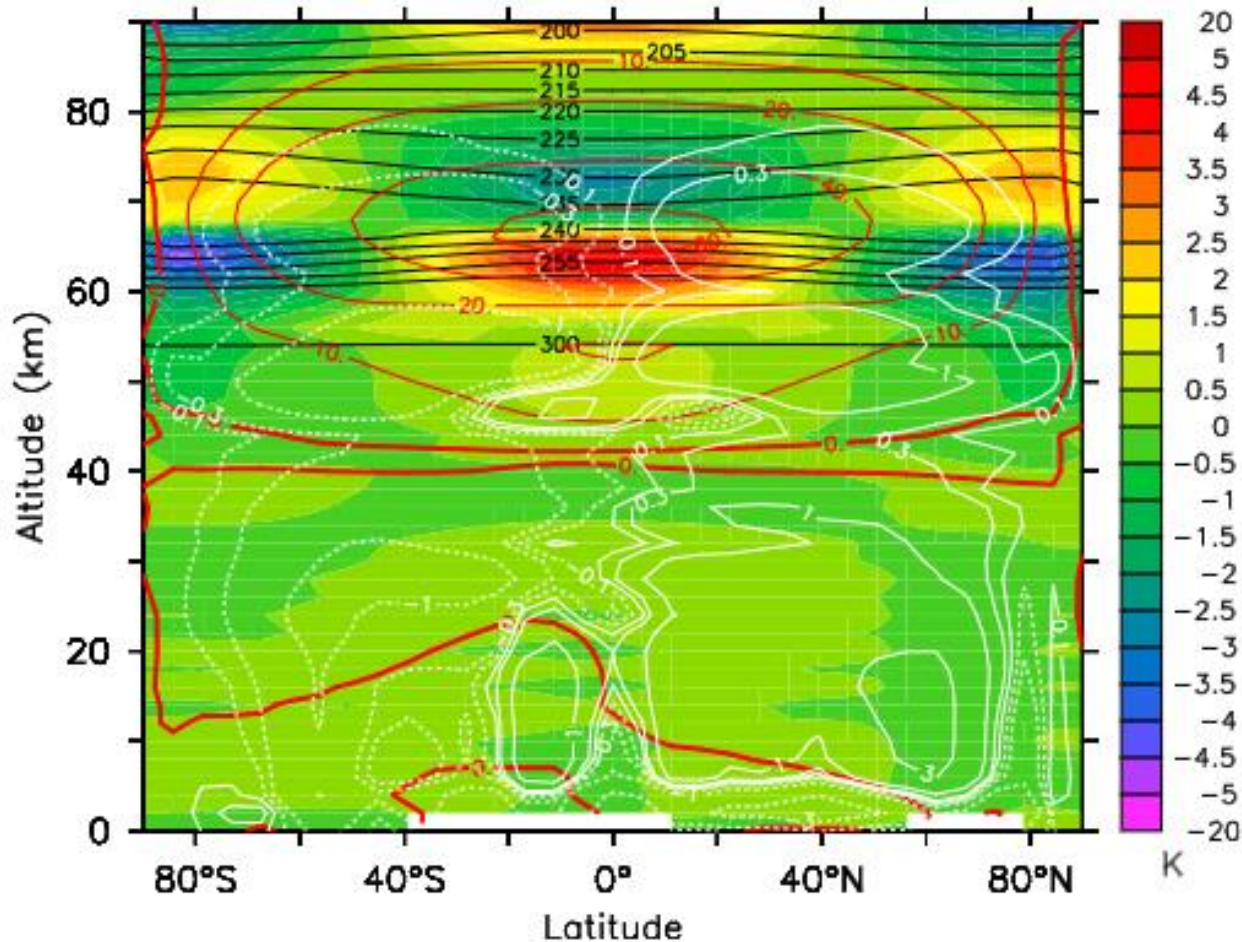
黒; 総角運動量変化
深い青; 山岳トルク
薄い青; 境界層の摩擦
黄緑; 移流による輸送
橙; 水平散逸による輸送
赤; スポンジ層による効果

鉛直温度と鉛直安定度



- 雲層の下部と中部に対流領域がある
- 雲層下端から 30 km では安定している
- 30 km より下では不安定である.

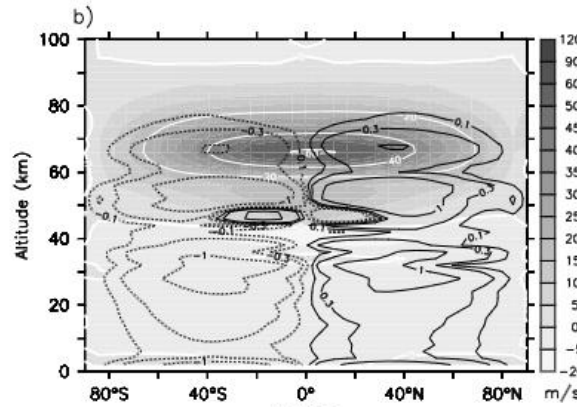
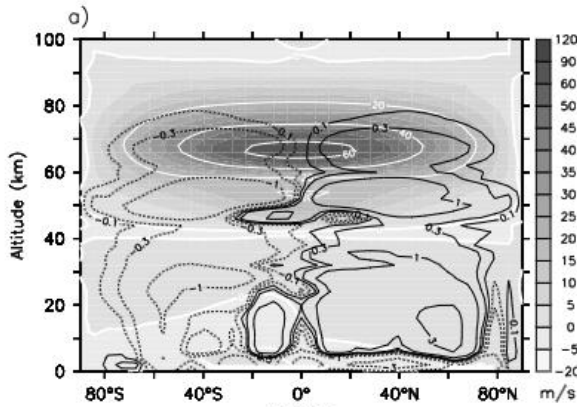
温度構造



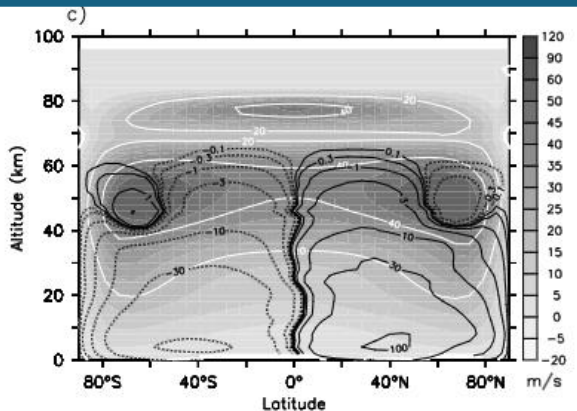
- 55 km (雲層中部) より下では南北温度差は小さい.
- 観測では 60 – 70 km の緯度 60° – 75° の領域で高温の領域が見られるが、シミュレーションでは雲のパラメータ化の違いにより表れない.
- 70 km より上で南北温度差が逆転する.

東西風と流線関数

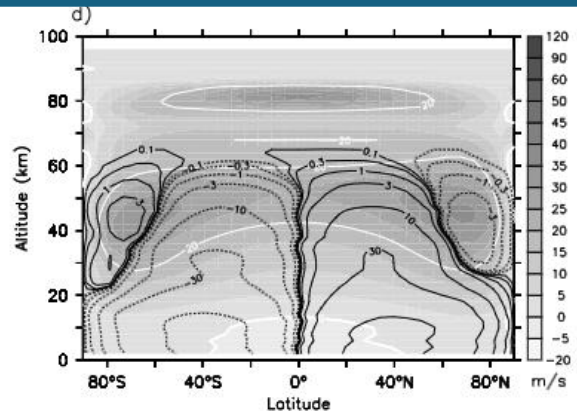
完全な放射輸送



単純な放射輸送



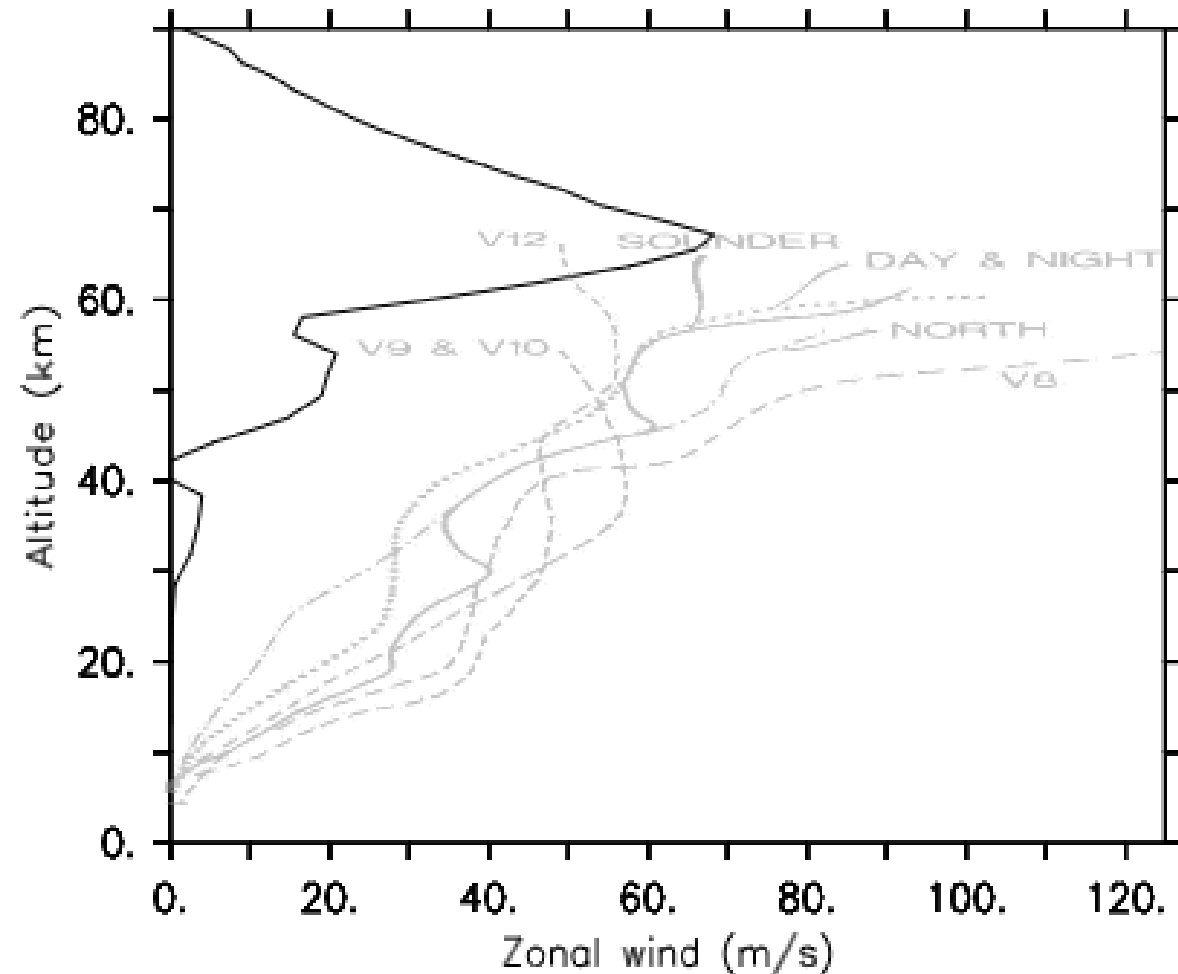
地形あり



地形なし

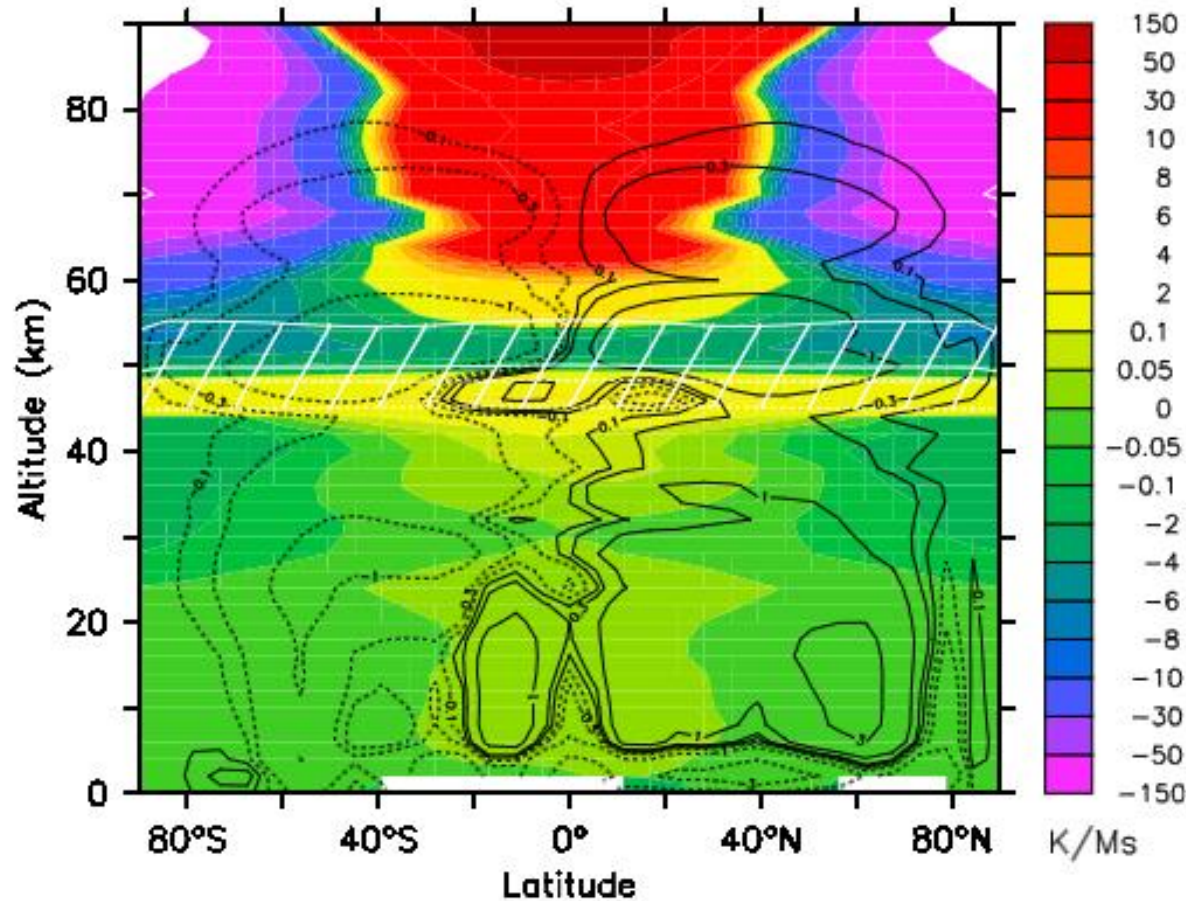
- 地形がある方が, 東西風の最大値は大きい.
- 単純な放射輸送の方が, 完全な放射輸送よりもスーパーローテーションのピークの高度が低い.
- 単純な放射輸送では, 高緯度の雲層の領域で対流がある.
- 温度構造と東西風は旋衡流平衡を通して連動する.

赤道での東西風



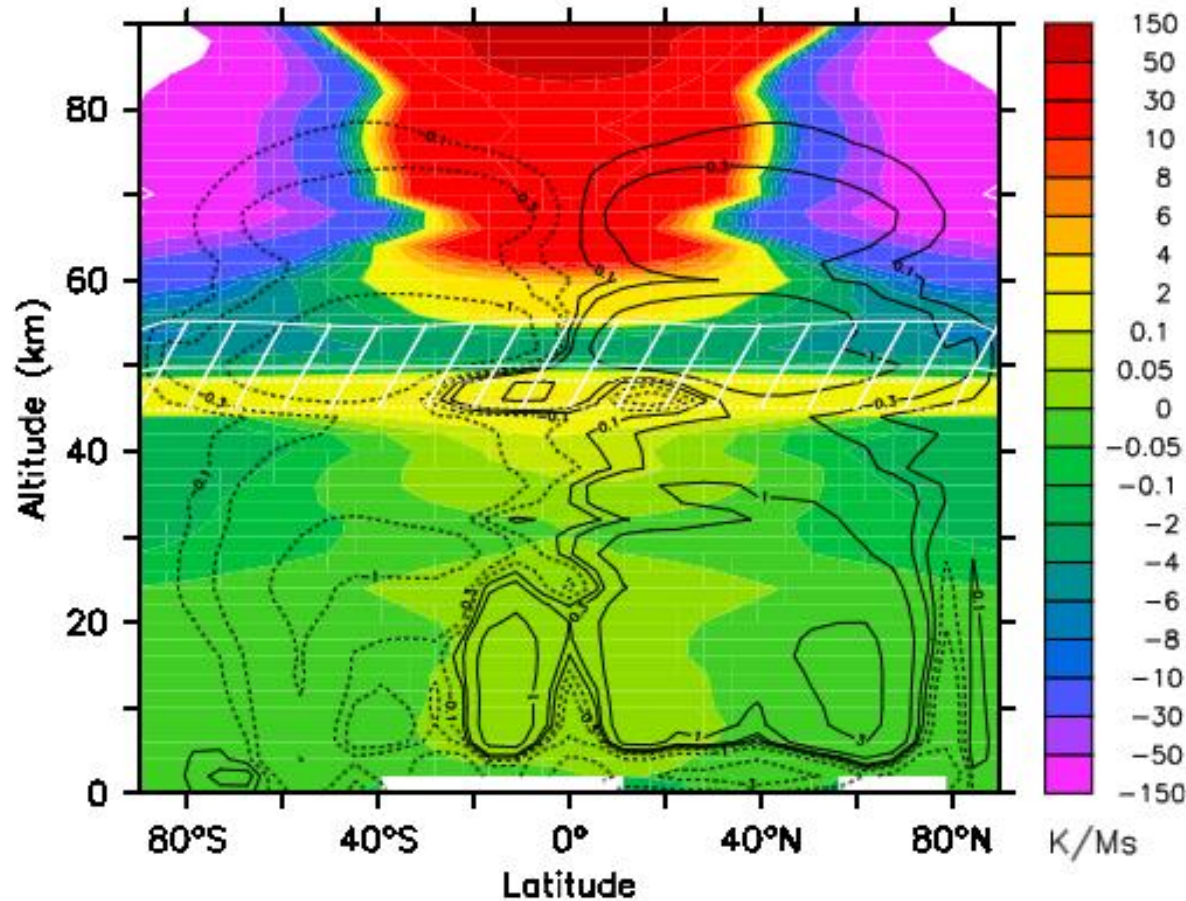
- 鉛直プロファイルは観測と一致しない.
 - 40 km より下では観測では高度とともに増加するが、このシミュレーションではそうでない.

南北鉛直面の加熱率による分類



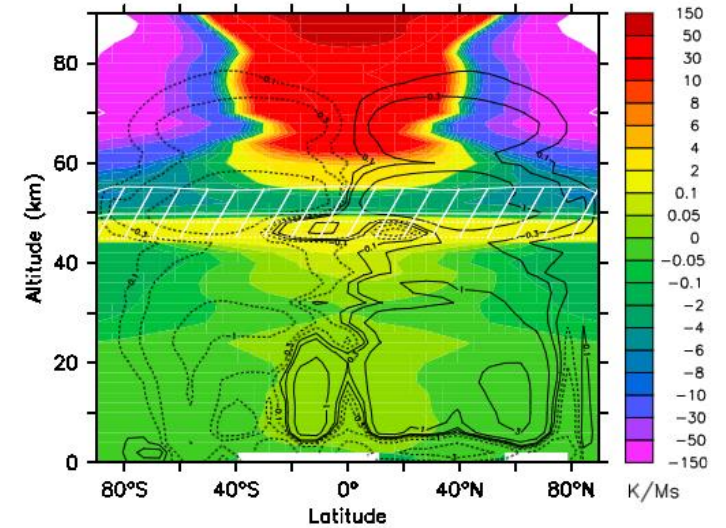
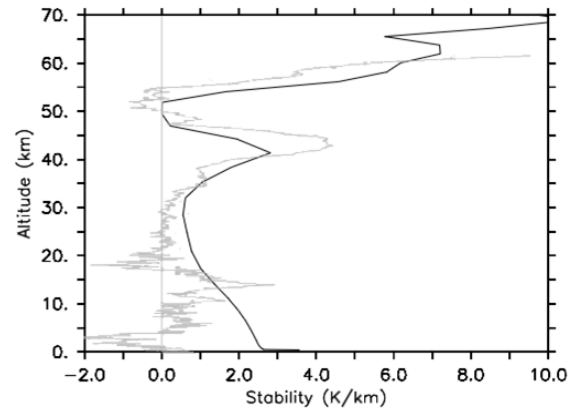
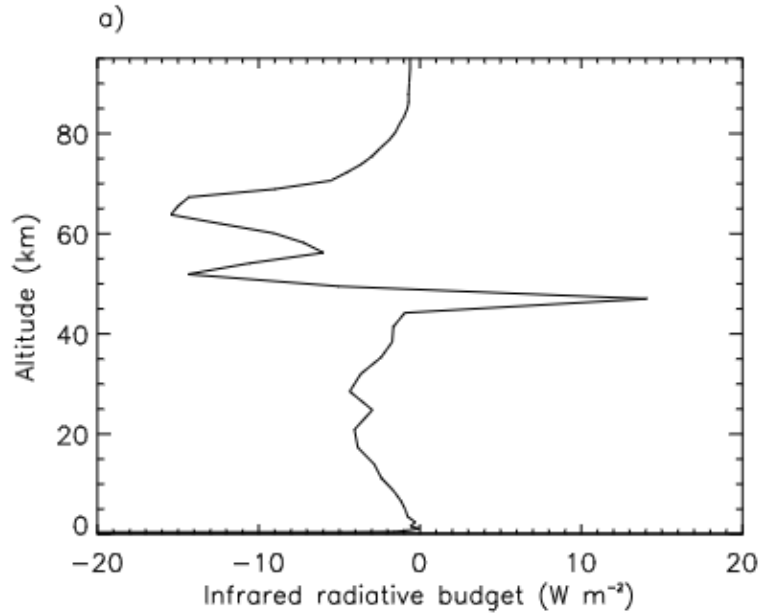
- 白網掛け領域は移流が支配的であり、大きい循環がある.
- 白網掛け領域より上では弱い循環がある.
- 白網掛け領域より下では極赤道間で加熱率が小さい.

雲層の中部から下部 (45 km – 60 km) (1)



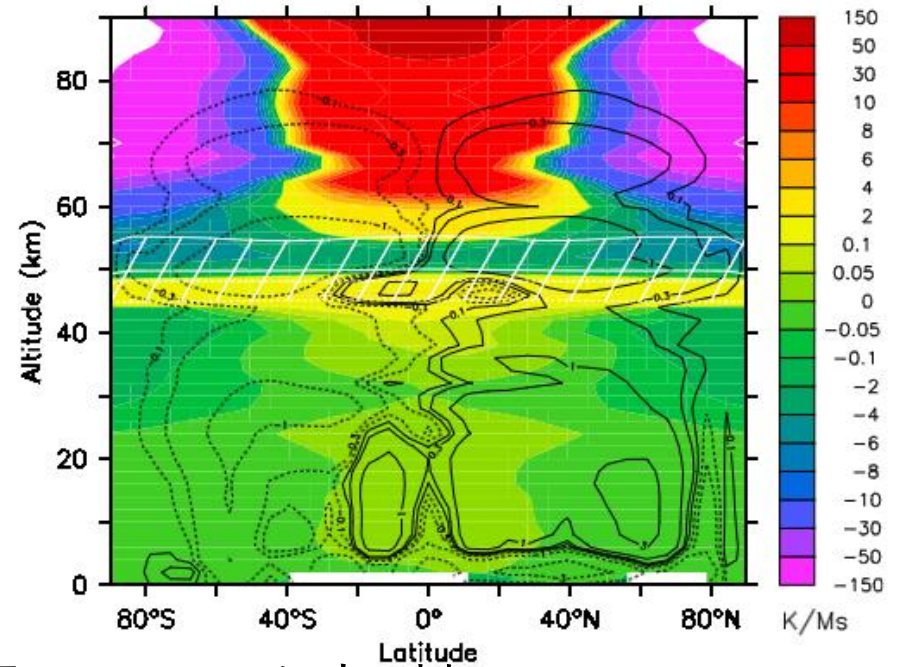
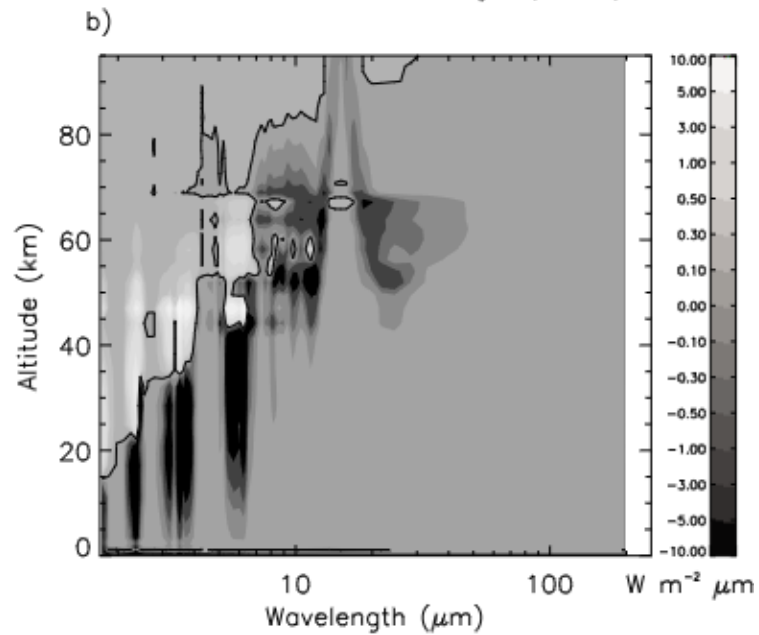
- この領域では熱的な直接循環がある.
- 55 km の赤道域で加熱が最大
- 50 km – 55km では
全球で冷却されている.
- 雲層下部 (47 km) では
それより下の領域から
加熱される.

雲層の中部から下部 (45 km – 60 km) (2)



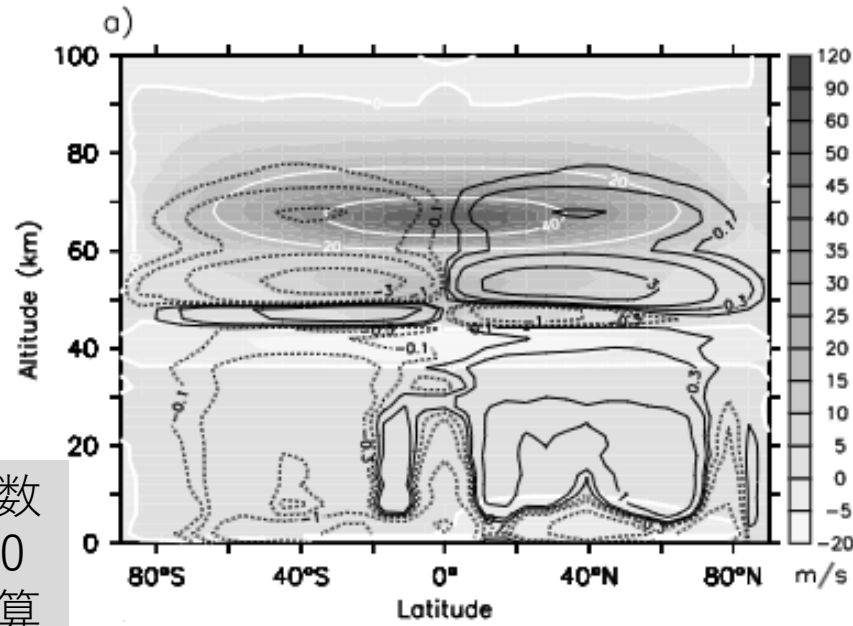
- 赤外放射収支は安定度と対応している.
- 47 km から 55 km にかけて温度勾配が断熱温度勾配より大きい.

地表から雲層下端

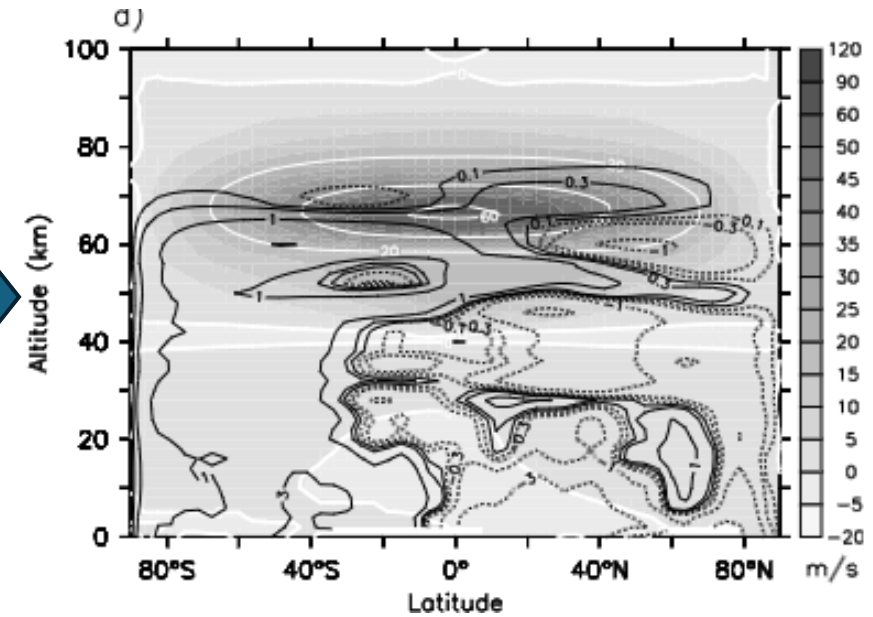


- 3 – 7 μm の領域が窓領域となり雲層より下を加熱する.

感度実験（高解像度の影響）



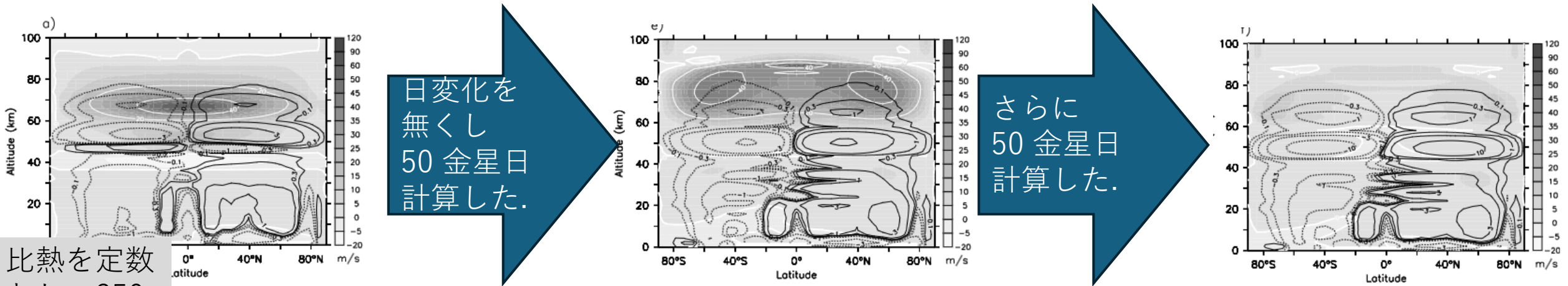
64 × 48
の解像度
に変更し 100
金星日
計算した。



比熱を定数
として250
金星日計算

- 高解像度で計算すると地表による摩擦の効果を大きくし、地表から雲層下端までの対流を非対称にする。

感度実験（日変化なしの影響）



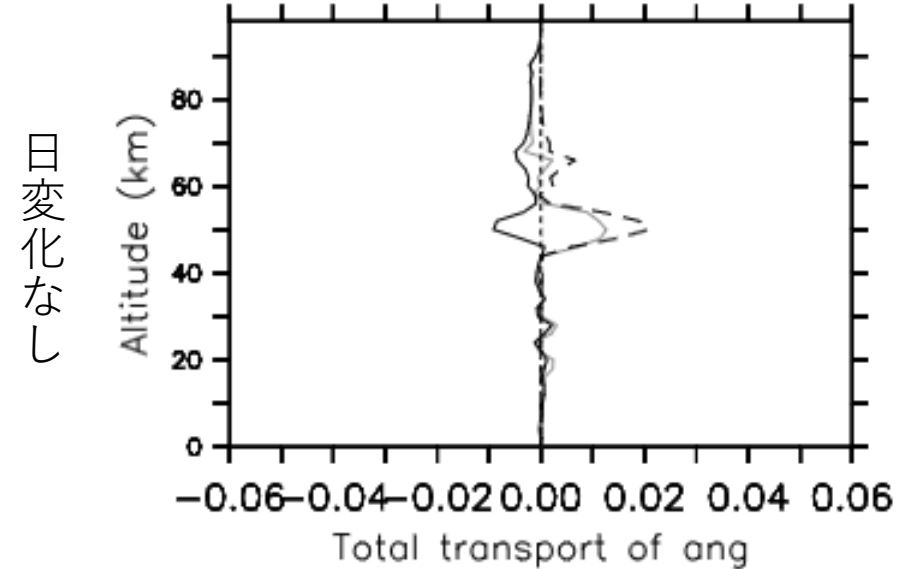
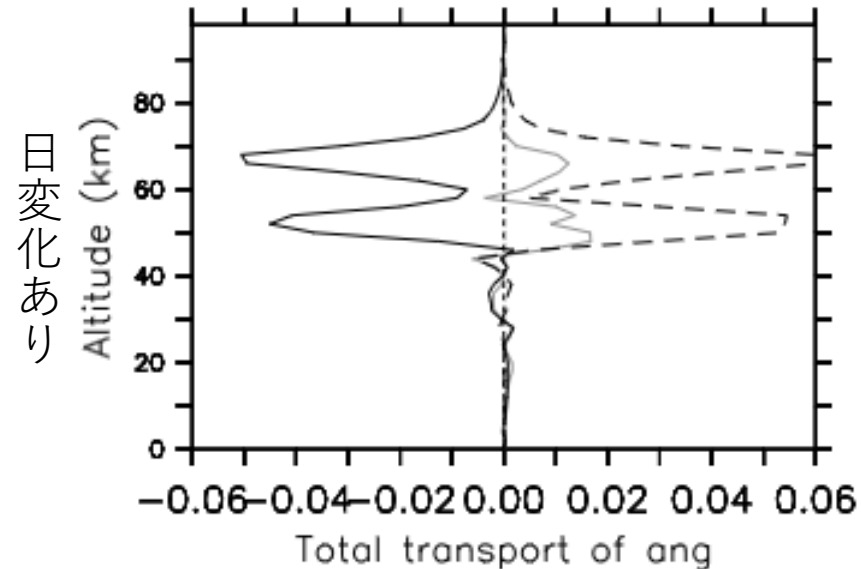
- 日変化がなくなると高度 70 km を中心に中高緯度ジェットが一度現れる.
- しかし総角運動量が減少するため, スーパーローテーションは維持されない.

スーパーローテーションの機構

- 角運動量の輸送
 - 鉛直方向
 - 水平方向
- 波の分析
 - 経度 0 度, 65 km
 - 赤道
 - 北緯 60 度

角運動量の鉛直輸送 (全体)

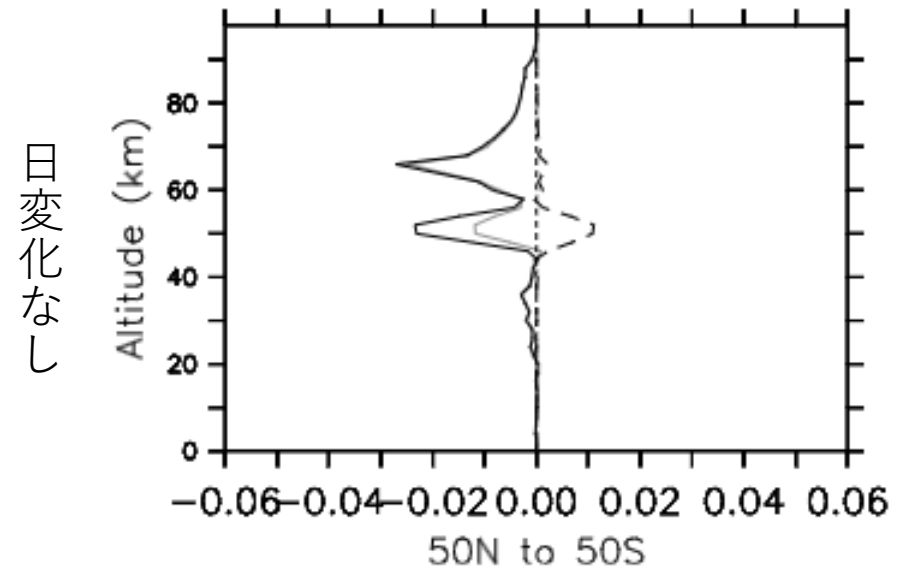
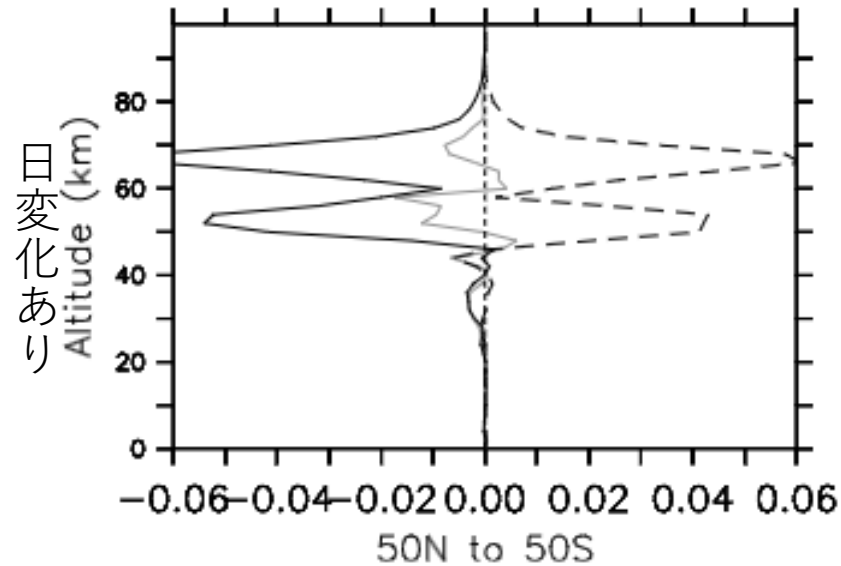
実線; 平均子午面循環
破線; 一時的な波
点線; 定在波
薄線; 総鉛直輸送



- 平均子午面循環が角運動量を上へ輸送し, 波が角運動量を下へ輸送する.
- 日変化ありの方がより強く鉛直方向に運動量を交換する.

角運動量の鉛直輸送（中緯度-赤道）

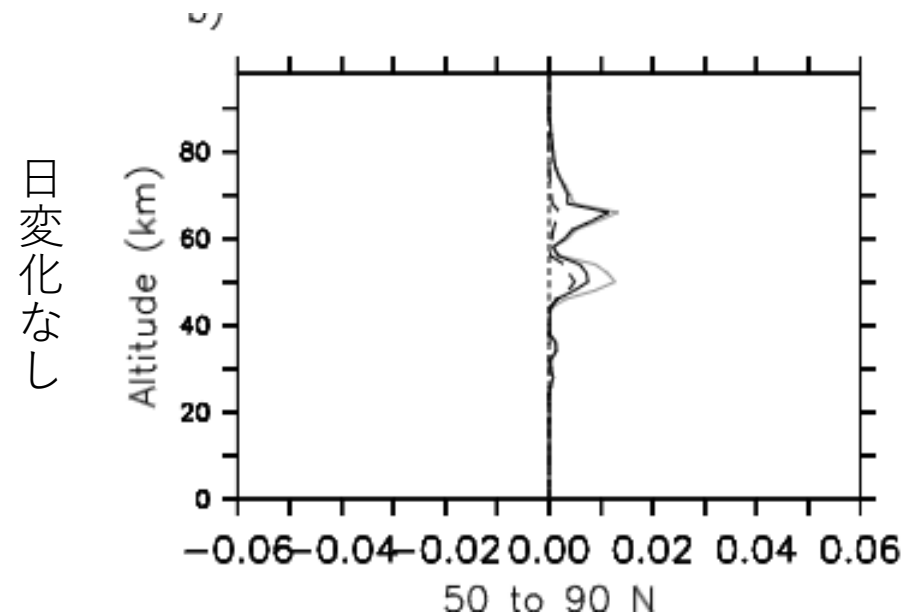
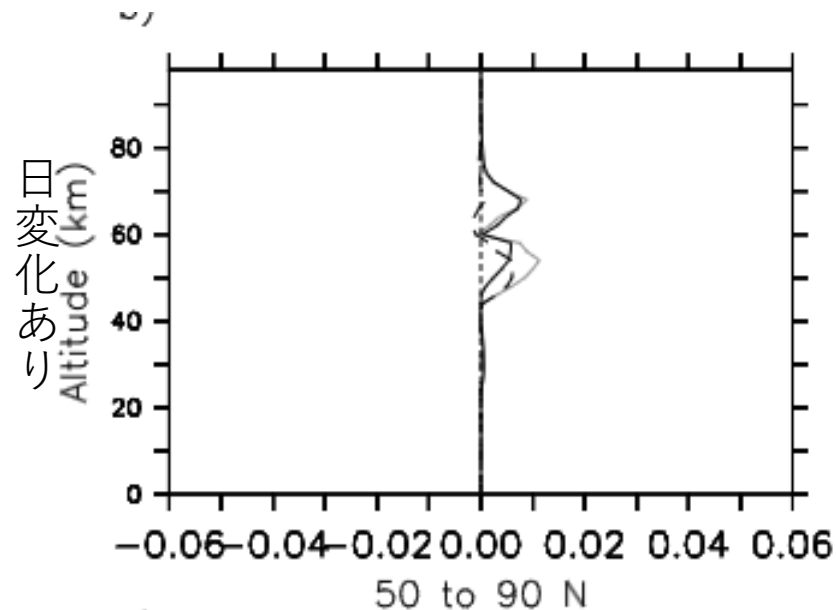
実線; 平均子午面循環
破線; 一時的な波
点線; 定在波
薄線; 総鉛直輸送



- 日変化ありの場合は, 70 km 周辺の一時的な波による下への角運動量輸送が多い.
- 日変化なしの場合の 70 km 周辺の薄線は実線とほとんど被る.

角運動量の鉛直輸送 (高緯度-中緯度)

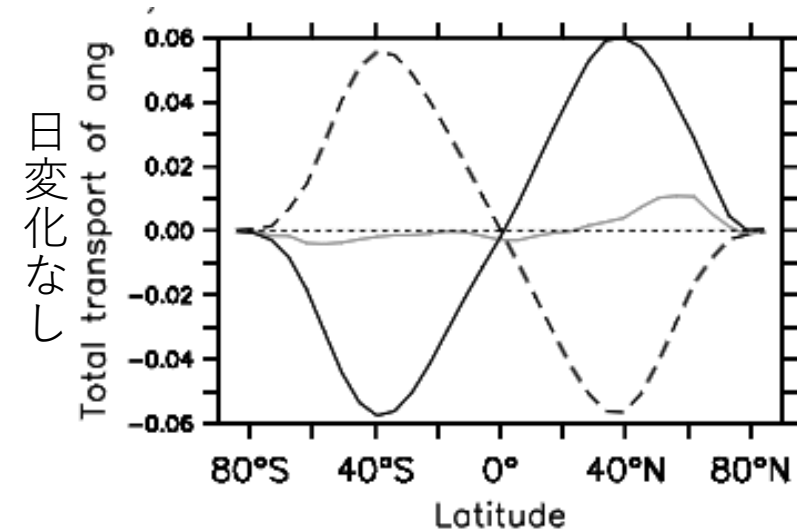
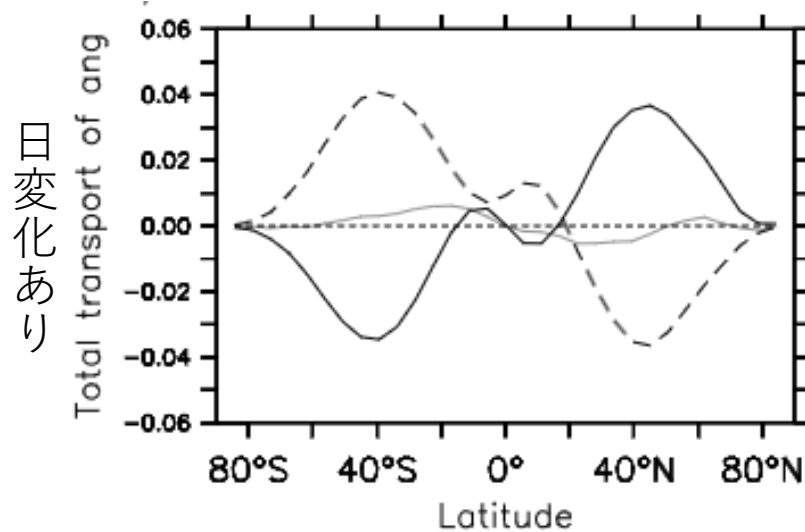
実線; 平均子午面循環
破線; 一時的な波
点線; 定在波
薄線; 総鉛直輸送



- 高緯度から中緯度の角運動量の鉛直輸送は日変化の有無にかかわらず, 下へ角運動量を輸送する.

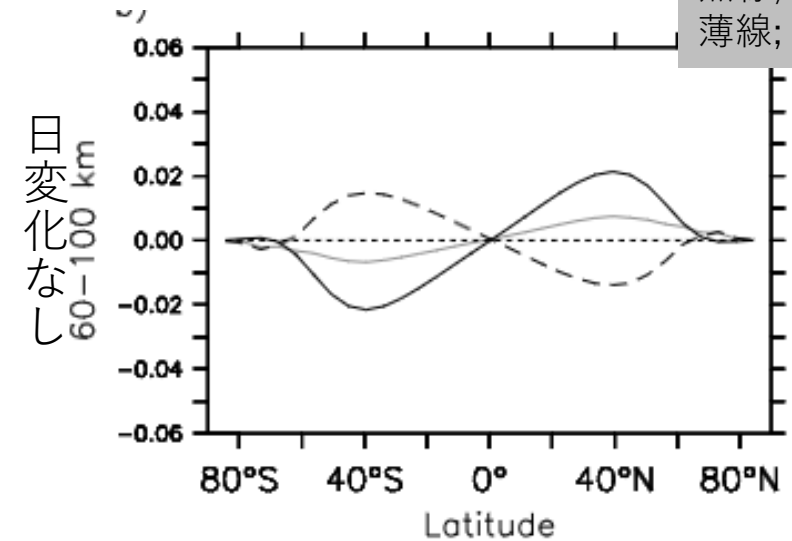
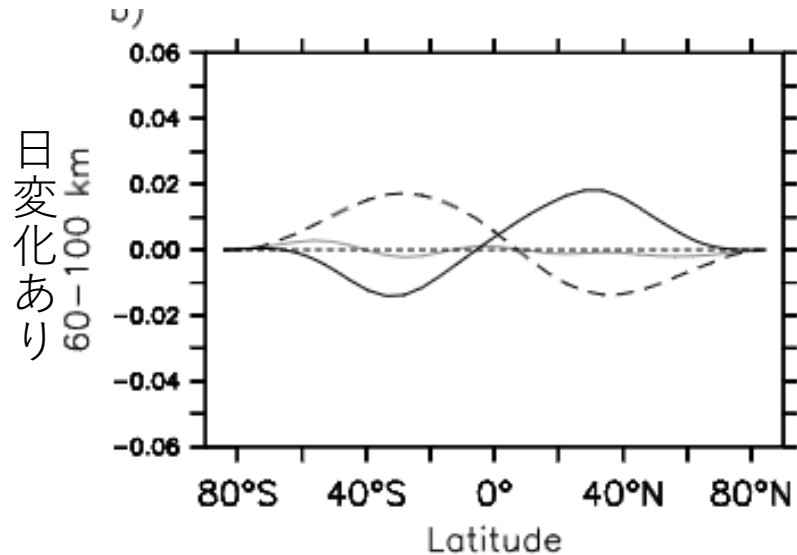
角運動量の南北輸送 (全体)

実線; 平均子午面循環
破線; 一時的な波
点線; 定在波
薄線; 総南北輸送



- 日変化ありの場合, 赤道への輸送が最も大きい緯度が日変化なしの場合に比べて低緯度側にある.

角運動量の南北輸送（雲層上部, 中間圏）

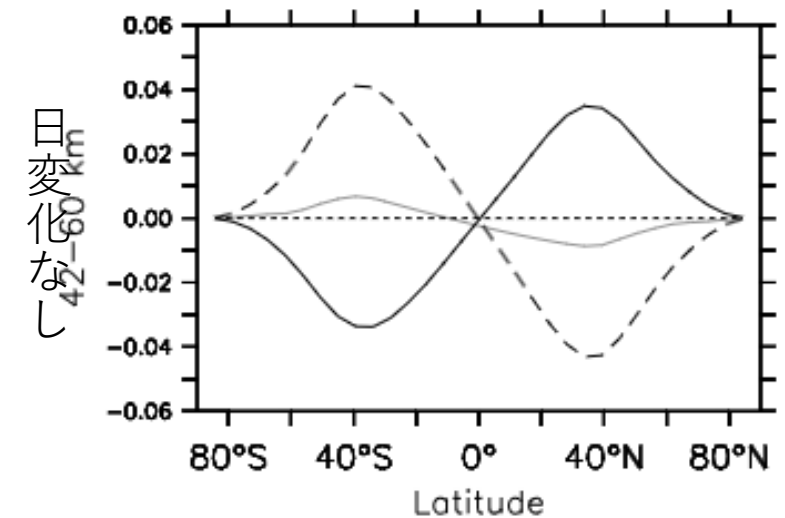
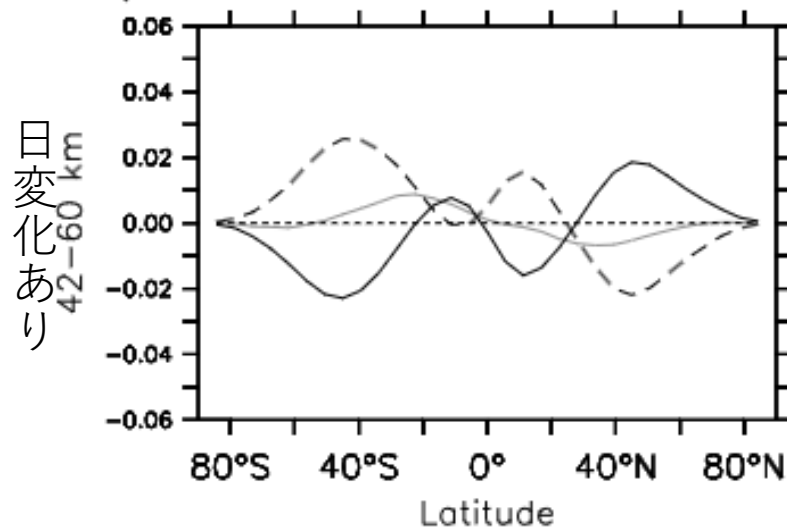


実線; 平均子午面循環
破線; 一時的な波
点線; 定在波
薄線; 総南北輸送

- 日変化なしの場合は平均子午面循環が強いため、赤道へ角運動量を強く輸送する。

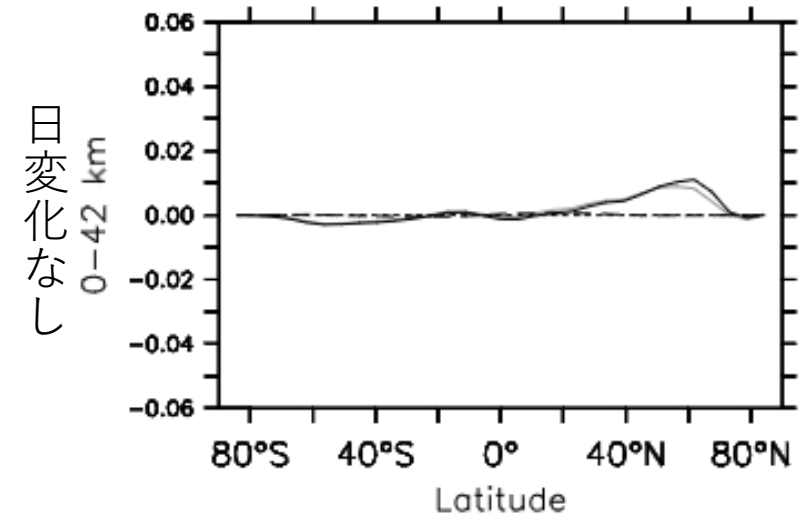
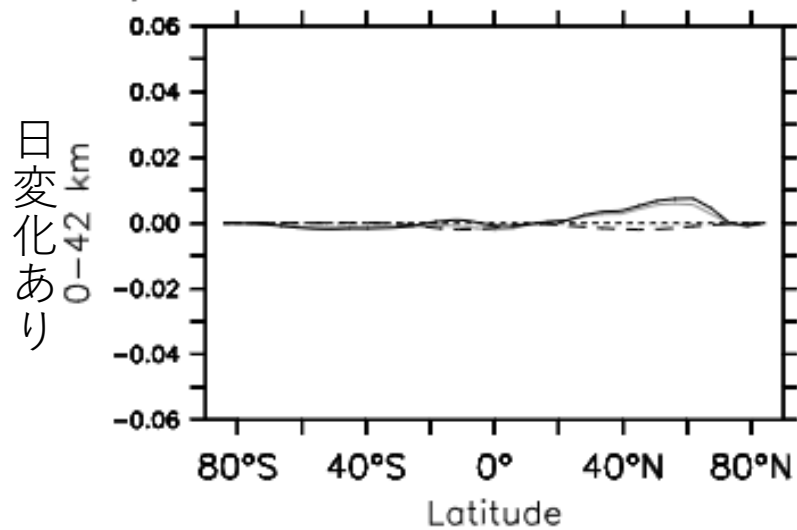
角運動量の南北輸送（雲層中部下部）

実線; 平均子午面循環
破線; 一時的な波
点線; 定在波
薄線; 総南北輸送



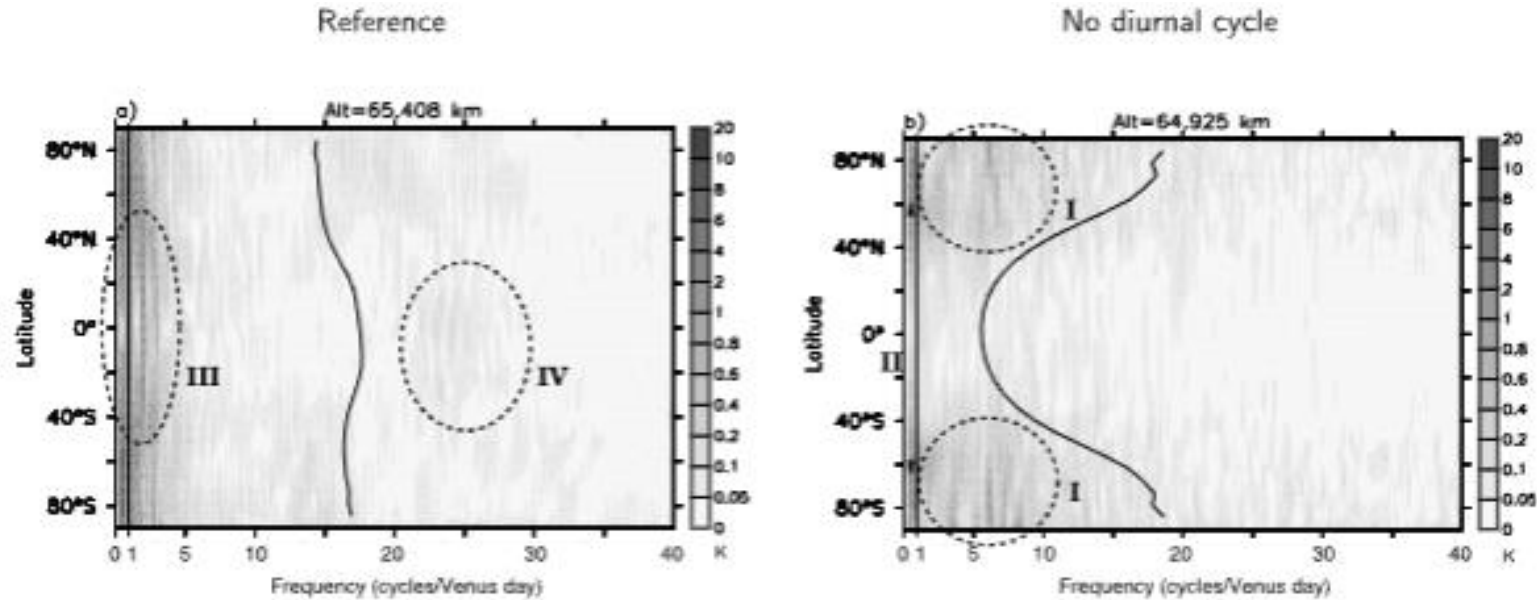
- 日変化がある場合, 緯度約 30° で平均子午面循環による輸送と一時的な波による輸送の役割が逆転する.

角運動量の南北輸送（地表から雲層下端）



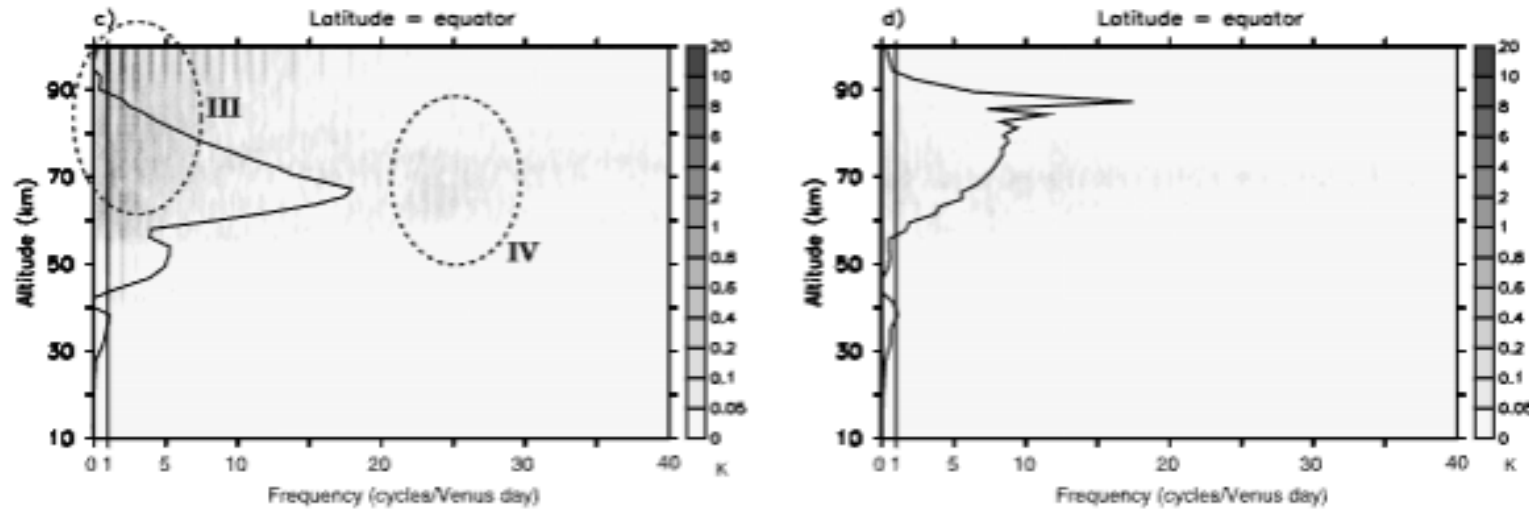
- どちらも北半球と南半球が対称でない影響を受けている.

波の分析 (経度 0 度, 65 km)



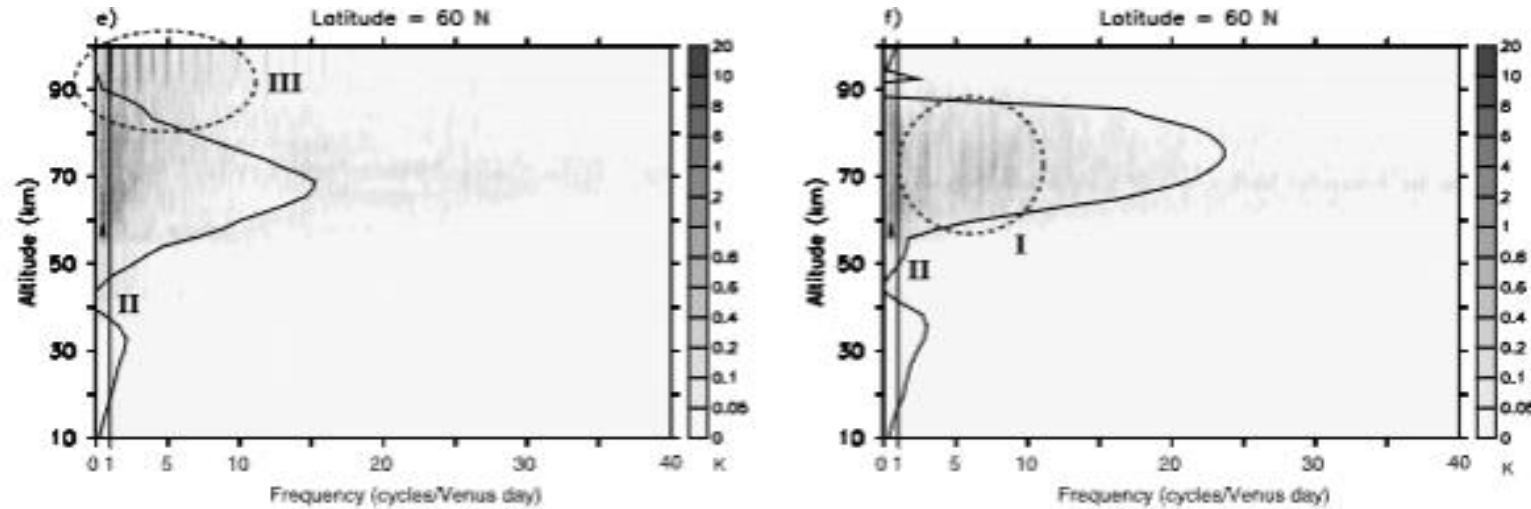
- 黒実線は平均東西風である.
- タイプ I, IV の波は東西風へ影響を与える.
- タイプ III, は東西風へ影響へ与えない

波の分析 (赤道)



- タイプ III の波は, 日変化ありの場合の支配的な波である.
- 日変化なしの場合には, 赤道で支配的な波は見られない.

波の分析 (北緯 60 度)



- タイプ II は雲の上昇に関連する.

結論 (1)

- 定圧比熱の変化の有無は, 温度構造に影響を与えるが, 流線関数にはあまり影響を与えない.
- 単純な放射輸送と完全な放射輸送を比較することで, 風の変化を示した.
- スーパーローテーションは 40 km より上で現れたが, 現実の東西風よりも強くはなかった.

結論 (2)

- 支配的な子午面循環は雲層の中に赤道 - 極間のセルである.
- 高度 15 km より下で安定した大気となってしまった.
- 雲層上部で赤道と高緯度での南北温度差が観測より小さい.
 - 雲構造, 温度場, 風の場の相互関係の妥当な計算がまだなされていない.
- 日変化がない場合は, GRW 機構と無矛盾である.
 - 今回のシミュレーションではジェットを維持することはできなかった.