

金星大気スーパーローテーションの
放射強制に対する依存性
**Dependence of Superrotation in
Venusian atmosphere on radiative
forcings**

馬場健聡

BABA Takeaki

北海道大学理学院 宇宙理学専攻
惑星宇宙グループ 地球流体力学研究室

Planetary and Space group, Geophysical Fluid Dynamics Laboratory.

Department of CosmoSciences,

Hokkaido University.

2012/03/31

要旨

金星の高度 70km 付近では 100m/s にも達する強い東風が、どの緯度経度においても吹いている。この東風の風速は自転速度の約 60 倍に相当する。また、この東風が維持される現象は、金星大気スーパーローテーション (以下では、スーパーローテーションと記す) と呼ばれている。Gierach(1975) は、スーパーローテーション維持のためには、上層における高緯度から低緯度への角運動量輸送が必要であると主張した。しかし、角運動量輸送の担い手に関しては未だに解明されていない。

Yamamoto and Takahashi(2003, 以下では YT2003 と記す) と Kido and Wakata(2007, 以下では KW2007 と記す) はそれぞれ、金星大気を想定した大気大循環モデル (GCM) を使い、スーパーローテーションの再現を試みた。YT2003, KW2007 どちらの計算においても、波が角運動量を輸送する事により、強い東風を得る事が出来た。しかし、得られた東西風速分布は互いに大きく異なり、YT2003 では赤道に最大東西風速 100m/s, KW2007 では両極に最大東西風速 50m/s の極値を持つような東西風速分布である。YT2003 と KW2007 では、異なる放射強制 (放射平衡温度分布, 太陽加熱率), 解像度, 鉛直拡散の設定を与えており、東西風速分布の差がどの設定の違いによるものであるのかは明確ではない。

本研究では、解像度, 鉛直拡散の設定の値をそろえて、放射強制のみを変えた実験を行う事でスーパーローテーションの放射強制に対する依存性を調査した。最初に YT2003, KW2007 の太陽加熱率, YT2003, KW2007, Hou and Farrel(1987, 今後は HF1987 と記す) の放射平衡温度分布をそれぞれ組み合わせ計 6 種類の実験の比較を行った。ここで、与えた放射強制に関してより詳しく説明する。本研究で与えた 2 種類の太陽加熱率は、極値が高度 60km より下に存在するもの (YT2003 と同様のもの), 極値が高度 60km より上に存在するもの (KW2007 と同様のもの) である。また、3 種類の放射平衡温度分布は、安定度が中立的であるもの (YT2003 と同様のもの), 高度 60~70km で安定度が高いもの (KW2007 と同様のもの), 50~60km で安定度が低いもの (HF1987 と同様のもの) である。極値が高度 60km より下に存在し、下層での値が大きい太陽加熱率を与えた場合には、どの放射平衡温度分布を与えても、赤道に最大東西風速 100m/s の極値を持つ東西風速分布を得た。極値が高度 60km より上に存在し、下層での値が小さい太陽加熱率を与えた場合には、どの放射平衡温度分布を与えても、両極に最大東西風速 50m/s の極値を持つ東西風速分布を得た。この結果より、東西風速分布は放射平衡温度分布よりも太陽加熱率に大きく影響を受ける事がわかった。

次に、太陽加熱率の極値が存在する位置、下層での値のどちらが東西風速分布により大きな影響を与えるのかを調査する。その結果、太陽加熱率の極値が存在する位置、下層での値をそれぞれ組み合わせて更に2種類の実験を行った。下層での値が大きい太陽加熱率を与えた実験では、赤道に極値を持つ東西風速分布を得る事が出来た。YT2003, KW2007 で角運動量を輸送しているとされた「波」の活動度を表わす EP-Flux 用いた考察を行ったところ、下層で大きな値を持つ太陽加熱率を与えた実験においては、西向きの運動量を輸送する、水平方向へは極向き、鉛直方向へは下向きの波が高度 60km, 赤道付近で発生していた。それに対し、下層で小さな値を持つ太陽加熱率を与えた実験においては、鉛直方向への波の発生はなく、水平方向極向きの波の発生量も、高度 60km より上に極値を持つ太陽加熱率を与えた実験と比較して少ない値であった。以上より、東西風速分布は太陽加熱率の下層での値に大きく依存する事がわかった。放射を考慮した金星大気の数値実験を行う場合には、下層での放射も正しく計算出来なければ、大気の運動を正確に再現することは出来ないであろう。

目次

第1章	はじめに	3
第2章	数値計算モデル	6
2.1	支配方程式系	6
2.2	離散化	9
2.3	計算パラメータ設定	9
第3章	計算結果	11
3.1	過去の研究で用いられた放射強制を使用した実験	11
3.1.1	各実験における最大東西風速の時系列図	11
3.1.2	定常状態における各実験の比較	13
3.2	太陽加熱率変更実験	17
3.3	定常状態における EP-Flux, 残差循環	22
3.3.1	EP-Flux の解析	22
3.3.2	南北残差循環	26
3.3.3	鉛直残差循環	28
第4章	まとめ	30
付録A	EP-Flux モジュールの動作確認	32
1	地球計算との比較	32

金星大気スーパーローテーションの放射強制に対する依存性	2
2 v を高度場に変換した際の線形補間	34
3 高度場における鉛直流 W の確認	34
付録 B dcpam5 での EP-Flux モジュールの使用法	35
1 温位, 鉛直風の計算	35
2 圧力座標系への変換	35
3 EP-Flux の計算	36
付録 C 図集:実験毎の各物理量の時間発展	37
謝辞	68
参考文献	69

第1章 はじめに

金星は、地球と同様に主に岩石で構成され、赤道半径と質量に関しても地球と近い値を持っている。しかし、風速分布が地球のものとは全く異なっている。金星の高度 70km 付近では 100m/s にも達する強い東風があらゆる緯度経度において吹いている。この東風は、自転速度の約 60 倍に相当する。自転速度を超える大気の循環は、一般にスーパーローテーションと呼ばれている。他の惑星でも 100m/s 以上の風やスーパーローテーションは観測されているが、自転速度の 60 倍ものスーパーローテーションは金星でしか観測されていない。

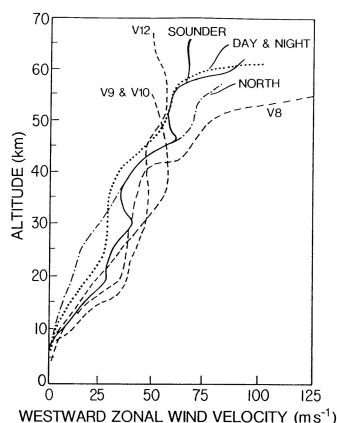


図 1.1: 図中の V8, V9, V10, V12 はそれぞれヴェネラ 8, 9, 10, 12 号のドップラートラッキングで得られた東風の鉛直分布。図中の DAY, NIGHT, SOUNDER, NORTH は、それぞれパイオニア・ヴィーナスの各プローブに付けられた名称であり、それぞれのプローブの干渉計によって観測した東風の鉛直分布である。(Schubert et al. 1980)

金星大気におけるスーパーローテーションの観測は、1960 年代の紫外線観測によって Y 字を横倒しにしたような模様が、4(地球)日で金星を東から西へ一周している事、つまり 100m/s の速さで移動している事が発見された事から始まった (Boyer and Guerin, 1966)。1969 年、ソビエト連邦の探査機ヴェネラ 7 号のプローブ観測により、金星大気で 100m/s の東風が吹いている事が直接観測され、模様の移動が波による輸送ではない事が確かめられた (図 1.1)。

金星では子午面方向の大気の大規模循環が起こっていると考えられている。子午面循環のみを考えた時、角運動量保存則によれば、上空では赤道で自転と逆向きの東西風、極では自転速度を超える自転と同じ向きの東西風が吹くことになる。しかし、実際には金星の高度 70km 付近において、あらゆる緯度経度でスーパーローテーションが起こっている。そこで、Gierasch(1975) は、金星大気スーパーローテーション維持のためには、上層における高緯度から低緯度への角運動量輸送が必要であると主張した

Gierasch(1975) を受けて、Yamamoto and Takahashi(2003, 以後 YT2003 と記す) と Kido and Wakata(2007, 以後 KW2007 と記す) は、金星大気を想定した数値シミュレーションを行い、スーパーローテーションを維持するメカニズム、つまり角運動量輸送の担い手を調査した(結果を図 1.2 に示す)。YT2003, KW2007 で用いる両モデルは、CCSR/NIES AGCM version 5.4(Numaguchi et al. 1995) を金星大気に適用できるように修正したものである。また、解像度に関して、YT2003 では水平方向を三角切断波数 10 で、鉛直方向 0~90km を 50 層に切断した事に対し、KW2007 では水平方向に三角切断波数 21 で、鉛直方向 0~100km を 50 層に切断した。また 4 次の鉛直拡散の e-folding time に関して、YT2003 では 40 日とした事に対し、KW2007 では 24 時間とした。放射強制(放射平衡温度分布, 太陽加熱率) に関して、YT2003 と KW2007 でそれぞれ異なる物を与えた。その結果、得られた東西風速分布は大きく異なり、YT2003 では赤道に最大東西風速 100m/s, KW2007 では両極に最大東西風速 50m/s の極値を持つような東西風分布を得ている(図 1.2)。YT2003 は、重力波、ロスビー波、混合ロスビー重力波などの大気波動が、赤道方向に角運動量を輸送すると主張し、KW2007 は、波数 1 の大気波動が角運動量を輸送すると主張した。

YT2003 と KW2007 では、複数の計算設定(解像度, 4 次の鉛直拡散の e-folding time, 放射平衡温度分布, 太陽加熱率) が少しずつ異なるというだけで、大きく異なる計算結果を得た。その原因が、上記 4 つの変更のどれに存在するのか、明確ではない。本研究では、放射強制が変われば、大気温度場が変わり、大気波動の伝搬特性も変化すると予想した上で、放射強制に着目した。金星大気スーパーローテーションの放射強制依存性を調査するべく、解像度と e-folding time を固定し、放射強制を変えて計算を行い、実験結果を比較した。具体的には、YT2003, KW2007 の太陽加熱率、放射平衡温度分布に、Hou and Farrel(1987, 今後は HF1987 と記す) の放射平衡温度分布を加え、計 2 種類の太陽加熱率、3 種類の放射平衡温度分布をそれぞれ組み合わせ、計 6 種類の実験を行った。その結果を比較することで、東西風速分布が太陽加熱率、放射平衡温度分布にどの程度依存するのかを調査する。

第 2 章では、本研究に使用したモデルの説明を行う。第 3 章では、計算結果の比較、大気波動の活動度を表す EP-Flux を用いた考察を行う。第 4 章では、結果を踏まえた全体の考察を行う。

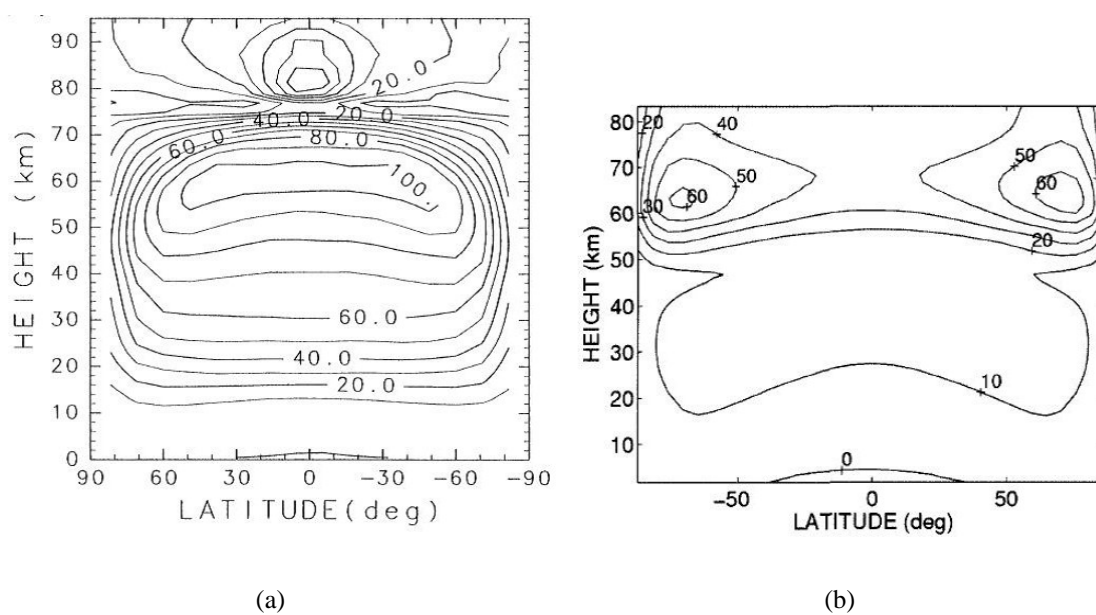


図 1.2: 先行研究における東西風分布. 両図ともに横軸は緯度, 縦軸は高度 [m], コンターは東西風速 [m/s], コンター間隔は 10[m/s]. (a)YT2003 の東西風分布. 63180 日から 117 日間の時間平均をとったもの. (b)KW2007 の東西風分布. 163567 日から 116 日間の時間平均をとったもの.

第2章 数値計算モデル

本研究では3次元球面プリミティブ方程式系に基づく惑星大気大循環モデル DCPAM を用いた。本章では、数値計算モデル DCPAM の説明を行う。

2.1 支配方程式系

DCPAM では支配方程式として、以下のような回転球面座標におけるプリミティブ方程式を用いる。この方程式系は鉛直軸に $\sigma = \frac{p}{p_s}$ を取った σ 座標を用いている。

連続の式, 静水圧の式, 発散方程式, 渦度方程式, 熱力学の式はそれぞれ

$$\frac{\partial \pi}{\partial t} + \mathbf{v}_H \cdot \nabla_{\sigma} \pi = -\nabla_{\sigma} \cdot \mathbf{v}_H - \frac{\partial \dot{\sigma}}{\partial \sigma}, \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} = -\frac{RT}{\sigma}, \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} = \frac{1}{a} \left(\frac{1}{1-\mu^2} \frac{\partial U_A}{\partial \lambda} + \frac{\partial V_A}{\partial \mu} \right) - \nabla_{\sigma}^2 (\Phi + R\bar{T}\pi + KE) + \mathcal{D}(D), \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{1}{a} \left(\frac{1}{1-\mu^2} \frac{\partial V_A}{\partial \lambda} - \frac{\partial U_A}{\partial \mu} \right) + \mathcal{D}(\zeta), \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} = & -\frac{1}{a} \left(\frac{1}{1-\mu^2} \frac{\partial UT'}{\partial \lambda} + \frac{\partial VT'}{\partial \mu} \right) + T'D \\ & - \dot{\sigma} \frac{\partial T}{\partial \sigma} + \kappa T \left(\frac{\partial \pi}{\partial t} + \mathbf{v}_H \cdot \nabla_{\sigma} \pi + \frac{\dot{\sigma}}{\sigma} \right) + \frac{Q}{C_p} + \mathcal{D}(T) + \mathcal{D}'(\mathbf{v}), \end{aligned} \quad (2.5)$$

と表わされる。

ここで, φ は緯度 [deg.], λ は経度 [deg.], σ は p/p_s , t は時間 [s] である。 p は気圧, p_s は地表面気圧であり, $\mu \equiv \sin \varphi$ である。

モデルで時間発展を計算することとなる予報変数は以下の通りである。

$$\pi(\varphi, \lambda) \equiv \ln p_s, \quad (2.6)$$

$$T(\varphi, \lambda, \sigma) : \text{気温 [K]}, \quad (2.7)$$

$$\zeta(\varphi, \lambda, \sigma) \equiv \frac{1}{a} \left(\frac{1}{1-\mu^2} \frac{\partial V}{\partial \lambda} - \frac{\partial U}{\partial \mu} \right) : \text{渦度 [s}^{-1}\text{]}, \quad (2.8)$$

$$D(\varphi, \lambda, \sigma) \equiv \frac{1}{a} \left(\frac{1}{1-\mu^2} \frac{\partial U}{\partial \lambda} + \frac{\partial V}{\partial \mu} \right) : \text{発散 [s}^{-1}\text{]}. \quad (2.9)$$

ここで,

$$U(\varphi, \lambda, \sigma) \equiv u(\varphi, \lambda, \sigma) \cos \varphi, \quad (2.10)$$

$$V(\varphi, \lambda, \sigma) \equiv v(\varphi, \lambda, \sigma) \cos \varphi, \quad (2.11)$$

$$u : \text{東西風速}, \quad (2.12)$$

$$v : \text{南北風速} \quad (2.13)$$

である。流線関数 ψ と速度ポテンシャル χ を導入すると、 U, V, ζ, D はそれぞれ以下のように表わされる。

$$U = \frac{1}{a} \left(\frac{\partial \chi}{\partial \lambda} - (1-\mu^2) \frac{\partial \psi}{\partial \mu} \right), \quad (2.14)$$

$$V = \frac{1}{a} \left(\frac{\partial \psi}{\partial \lambda} + (1-\mu^2) \frac{\partial \chi}{\partial \mu} \right), \quad (2.15)$$

$$\zeta = \nabla^2 \psi, \quad (2.16)$$

$$D = \nabla^2 \chi. \quad (2.17)$$

各時間ステップで診断的に求められる変数は以下の通りである.

$$\Phi \equiv gz : \text{ ジオポテンシャル高度 } [\text{m}^2 \text{ s}^{-2}], \quad (2.18)$$

$$\dot{\sigma} \equiv \frac{d\sigma}{dt} \equiv \frac{\partial \sigma}{\partial t} + \frac{u}{a \cos \varphi} \frac{\partial \sigma}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial \sigma}{\partial \varphi} + \frac{\partial \sigma}{\partial \sigma}, \quad (2.19)$$

$$\bar{T}(\sigma) : \text{ 基準温度 } [\text{K}], \quad (2.20)$$

$$T'(\varphi, \lambda, \sigma) \equiv T - \bar{T}, \quad (2.21)$$

$$T'_v(\varphi, \lambda, \sigma) \equiv T_v - \bar{T}, \quad (2.22)$$

$$U_A(\varphi, \lambda, \sigma) \equiv (\zeta + f)V - \dot{\sigma} \frac{\partial U}{\partial \sigma} - \frac{RT'_v}{a} \frac{\partial \pi}{\partial \lambda} + \mathcal{F}_\lambda \cos \varphi, \quad (2.23)$$

$$V_A(\varphi, \lambda, \sigma) \equiv -(\zeta + f)U - \dot{\sigma} \frac{\partial V}{\partial \sigma} - \frac{RT'_v}{a} (1 - \mu^2) \frac{\partial \pi}{\partial \mu} + \mathcal{F}_\varphi \cos \varphi, \quad (2.24)$$

$$\mathbf{v}_H \cdot \nabla_\sigma \pi \equiv \frac{U}{a(1 - \mu^2)} \frac{\partial \pi}{\partial \lambda} + \frac{V}{a} \frac{\partial \pi}{\partial \mu} \quad (2.25)$$

$$\nabla_\sigma^2 \equiv \frac{1}{a^2(1 - \mu^2)} \frac{\partial^2}{\partial \lambda^2} + \frac{1}{a^2} \frac{\partial}{\partial \mu} \left[(1 - \mu^2) \frac{\partial}{\partial \mu} \right], \quad (2.26)$$

$$KE(\varphi, \lambda, \sigma) \equiv \frac{U^2 + V^2}{2(1 - \mu^2)} \quad (2.27)$$

$$D(\zeta) : \text{ 渦度の水平拡散}, \quad (2.28)$$

$$D(D) : \text{ 発散の水平拡散}, \quad (2.29)$$

$$D(T) : \text{ 熱の水平拡散}, \quad (2.30)$$

$$D(q) : \text{ 水蒸気の水平拡散}, \quad (2.31)$$

$$\mathcal{F}_\lambda(\varphi, \lambda, \sigma) : \text{ 小規模運動過程 (経度方向)}, \quad (2.32)$$

$$\mathcal{F}_\varphi(\varphi, \lambda, \sigma) : \text{ 小規模運動過程 (緯度方向)}, \quad (2.33)$$

$$Q(\varphi, \lambda, \sigma) : \text{ 放射, 凝結, 小規模運動過程等による加熱・温度変化}, \quad (2.34)$$

$$S_q(\varphi, \lambda, \sigma) : \text{ 凝結, 小規模運動過程等による水蒸気ソース}, \quad (2.35)$$

$$D'(v) : \text{ 摩擦熱}. \quad (2.36)$$

定数は以下の通りである.

$$a : \text{ 惑星半径 } [\text{m}], \quad (2.37)$$

$$R : \text{ 乾燥大気 of 気体定数 } [\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}], \quad (2.38)$$

$$C_p : \text{ 乾燥大気 of 大気定圧比熱 } [\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}], \quad (2.39)$$

$$f : \text{ コリオリパラメータ } [\text{s}^{-1}], \quad (2.40)$$

$$\kappa \equiv R/C_p, \quad (2.41)$$

$$\epsilon_v : \text{ 水蒸気分子量比}. \quad (2.42)$$

2.2 離散化

本節では数値計算モデル DCPAM における離散化の手法を説明する。水平方向の離散化はスペクトル法を用いる。この際、展開関数には球面調和関数、波数切断には三角切断を用いる。鉛直方向の離散化には Arakawa and Suarez(1983) のスキームを用いる。本研究では、水平方向の離散化における三角切断の切断波数として 10、鉛直方向の離散化の層数として 50 を用いている (T10L50)。その際の経度格子点数は 32、緯度格子点数は 16 となる。

時間積分は、semi-implicit スキームを用いる。具体的には、重力波に関する項は台形型 implicit スキームを、その他の項には leapfrog スキームを適用する。leapfrog スキームを用いることによって生じる計算モードの増幅を抑えるため、Asselin(1972) の時間フィルターを 1 ステップ毎に適用する。本研究では、時間積分を行う際の時間間隔を 1 時間とした。

2.3 計算パラメータ設定

本研究で行った数値実験の計算設定を以下に示す。

初期の温度平均値	400 [K]
初期の地表面気圧平均値	9.2d6 [hPa]
初期の東西風速	0 [m s-1]
積分時間	70300 日
惑星半径	6.050e6 [m]
回転角速度	2.992677e-7 [s-1]
重力加速度	8.87 [m s-2]
乾燥大気の定圧比熱	820.0 [J kg-1 K-1]
乾燥大気の気体定数	191.4 [J kg-1 K-1]

表 2.3.1: 本研究における金星実験の計算設定

本実験で与えた放射強制を以下に図で示す。

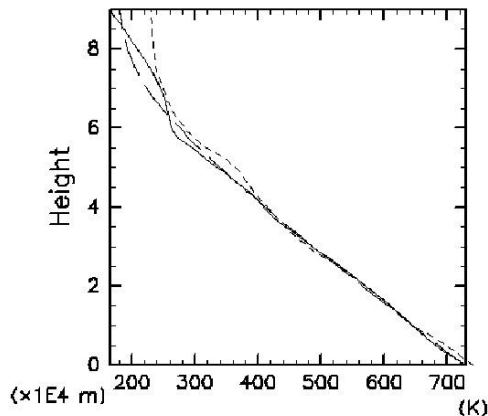
最初に、YT2003, Hou and Farrel(1987, 以後 HF1987 と記す), KW2007 で与えられた放射平衡温度分布 (図 2.1(a)), YT2003, KW2007 で与えられた太陽加熱率 (図 2.1(b)) を用い、それぞれを組み合わせ合計 6 種類の数値実験を行った。与えた放射平衡温度分布の大気の安定度として、YT2003 のものは中立的、KW2007 のもの

は安定, HF1987 のものは不安定である. また, 太陽加熱率に関して, YT2003 のものは極値が高度 60km より低い位置に存在し, 下層での値が大きい (0.52K/day) 事に対し, KW2007 のものは極値が高度 60km より高い位置に存在し, 下層での値が小さい (0.08K/day).

次に, 東西風分布が太陽加熱率の極値の位置, 下層での値, どちらにより大きく影響を受けるのかを調査するべく, 極値の位置, 下層での値をそれぞれ組み合わせて 4 種類の実験を行う.

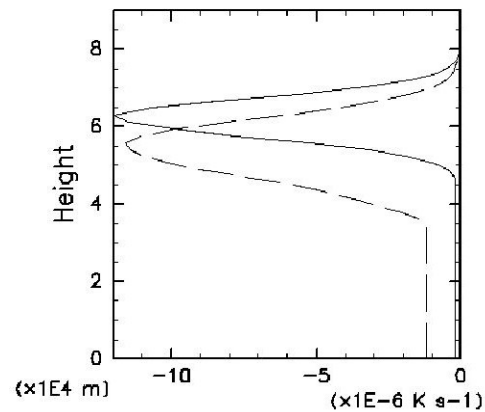
また, 実験の呼び方に関して, YT2003 の放射平衡温度分布, YT2003 の太陽放射加熱率を用いた実験の事を「VTEq-YT2003_SHR-YT2003 実験」と呼ぶ事にする.

radiative equilibrium temperature



(a)

solar heating rate



(b)

図 2.1: 本実験で与えた放射強制. (a) 放射平衡温度分布. 横軸は温度 [K], 縦軸は高度 [m]. 実線が KW2007, 破線が YT2003, 点線が HF1987 に基づくもの. (b) 太陽加熱率. 横軸は加熱率 [K/s], 縦軸は高度 [m]. 実線が KW2007, 破線が YT2003 に基づくもの.

第3章 計算結果

本章では、本研究で行った計算結果を示す。

3.1 過去の研究で用いられた放射強制を使用した実験

本節では、東西風分布が放射強制温度分布と太陽加熱率のどちらにより大きな影響を受けるのかを調査する。過去の研究 YT2003, KW2007, HF1987 で用いられた放射平衡温度分布, YT2003, KW2007 で用いられた太陽加熱率をそれぞれ組み合わせ 6 種類の実験結果の比較を行う。

3.1.1 各実験における最大東西風速の時系列図

各実験における最大東西風速の時系列図を図 3.1.2 に示す。始めに、各実験の最大風速に関して議論する。YT2003 の太陽加熱率を与えた実験 (図 3.1(a), 図 3.1(c), 図 3.1(e)) では、いずれも 100 ~ 120m/s にも及ぶ大きな最大風速が現れている。これに対し、KW2007 の太陽加熱率を与えた実験 (図 3.1(b), 図 3.1(d), 図 3.1(f)) における最大風速は、いずれも 40 ~ 50m/s 程度に止まっている。

次に最大風速の時間発展の仕方に関して議論する。YT2003 の太陽加熱率を与えた実験 (図 3.1(a), 図 3.1(c), 図 3.1(e)) においては、最大風速は 10000 日で 80m/s に達し、その後は緩やかに増加し、約 30000 日に定常状態に達する。これに対し、KW2007 の太陽加熱率を与えた実験 (図 3.1(b), 図 3.1(d), 図 3.1(f)) における最大風速は、8000 日まで急激に増加し約 40m/s に達する。その後、緩やかに増加し約 60000 日に定常状態に達する。

最大東西風速は大きさ、時間発展の仕方共に太陽加熱率に大きく依存する事がわかった。YT2003 の太陽加熱率を与えた実験の方が、KW2007 の太陽加熱率を与えた実験よりも大きな最大東西風速を得る事が出来た。どの実験においても約 60000 日で定常状態に達する結果を得たので、次節以降では、十分定常状態となった 70000 ~ 70300 日における各物理量を詳しく考察する。

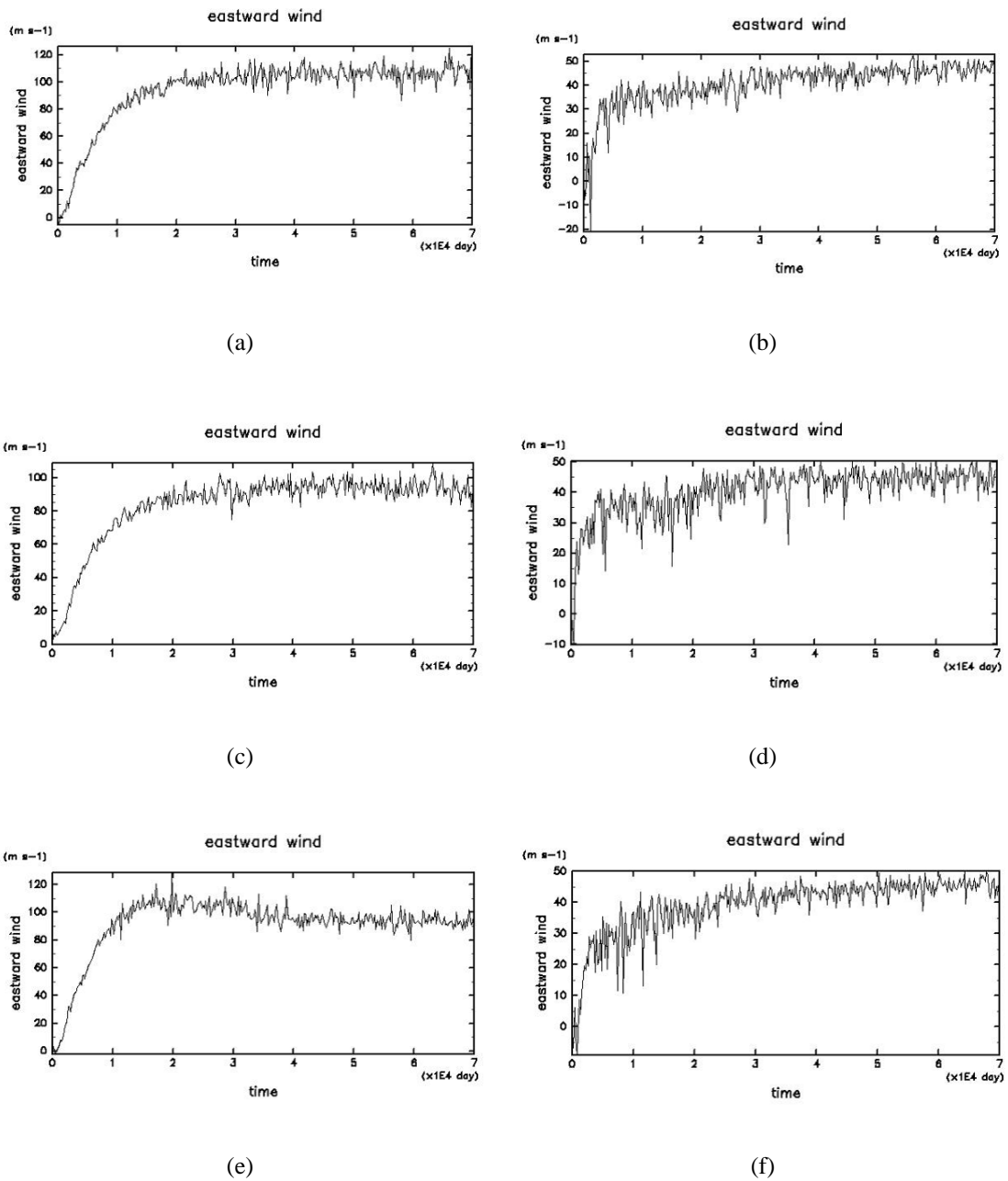


図 3.1: 各実験東西風の極値の時間発展 (a) VTEq-YT2003_SHR-YT2003 実験 (緯度 5°) (b) VTEq-YT2003_SHR-KW2007 実験 (緯度 70°) (c) VTEq-KW2007_SHR-YT2003 実験 (緯度 5°) (d) VTEq-KW2007_SHR-KW2007 実験 (緯度 70°) (e) VTEq-HF1987_SHR-YT2003 実験 (緯度 5°) (f) VTEq-HF1987_SHR-KW2007 実験 (緯度 70°)

3.1.2 定常状態における各実験の比較

本節では、定常状態において、東西風がどのように維持されているかを議論する。定常状態となった 70000 ~ 70300 日における東西風分布を 図 3.2 に図示する。各実験の各物理の比較に関しては、図集を参照されたい。

まず、東西風に関して議論する。YT2003 の太陽加熱率を与えた実験 (図 3.2(a), 図 3.2(c), 図 3.2(e)) では、いずれも 100m/s 以上の東西風が高度 50 ~ 60km, 赤道付近に現れた。特に YT2003 の放射平衡温度分布を与えた実験では、110m/s の最大風速を得た。KW2007 の太陽加熱率を与えた実験 (図 3.2(b), 図 3.2(d), 図 3.2(f)) では 60m/s の東西風が高度 65 ~ 75km, 極付近に現れた。また、放射平衡温度分布に関しては、YT2003, KW2007, HF1987 の順に、東西風に対する寄与が大きいことがわかるが、いずれも太陽加熱率の寄与程大きいものではない¹⁾。図 3.2, の結果より、東西風分布が放射平衡温度分布よりも太陽加熱率の与え方に大きく依存している事がわかる。

次に、南北風分布 (図 3.3), 鉛直風分布 (図 3.4) を見る事で、子午面循環に関して議論する。まず、南北風に関して、YT2003 の太陽加熱率を与えた実験 (図 3.7(a), 図 3.3(c), 図 3.3(e)) では、高度 60km ~ 80km, 緯度 20 ~ 60 °で 4m/s 以上の強い南北風が低緯度から高緯度に向かって吹いている。KW2007 の太陽加熱率を与えた実験 (図 3.3(b), 図 3.7(d), 図 3.3(f)) では、高度 60km ~ 70km, 緯度 20 ~ 70 °で 4m/s 以上の強い南北風が低緯度から高緯度に向かって吹いている。次に 鉛直風に関しては、どの実験においても、緯度 -40 ~ 40 °, 高度 0 ~ 70km で上昇流, 緯度 $\pm 40 \sim \pm 80$, 高度 0 ~ 70km で下降流が起こっている。YT2003 の太陽加熱率を与えた実験 (図 3.8(a), 図 3.4(c), 図 3.4(e)) では、0.003 ~ 0.004m/s 程の極値, KW2007 の太陽加熱率を与えた実験 (図 3.3(b), 図 3.7(d), 図 3.3(f)) では、m/s 程の極値を得ている。以上より、YT2003 の太陽加熱率を与えた実験は、KW2007 の太陽加熱率を与えた実験に比べてより大きな子午面循環が発生していることになる。

¹⁾どうしたものか ...

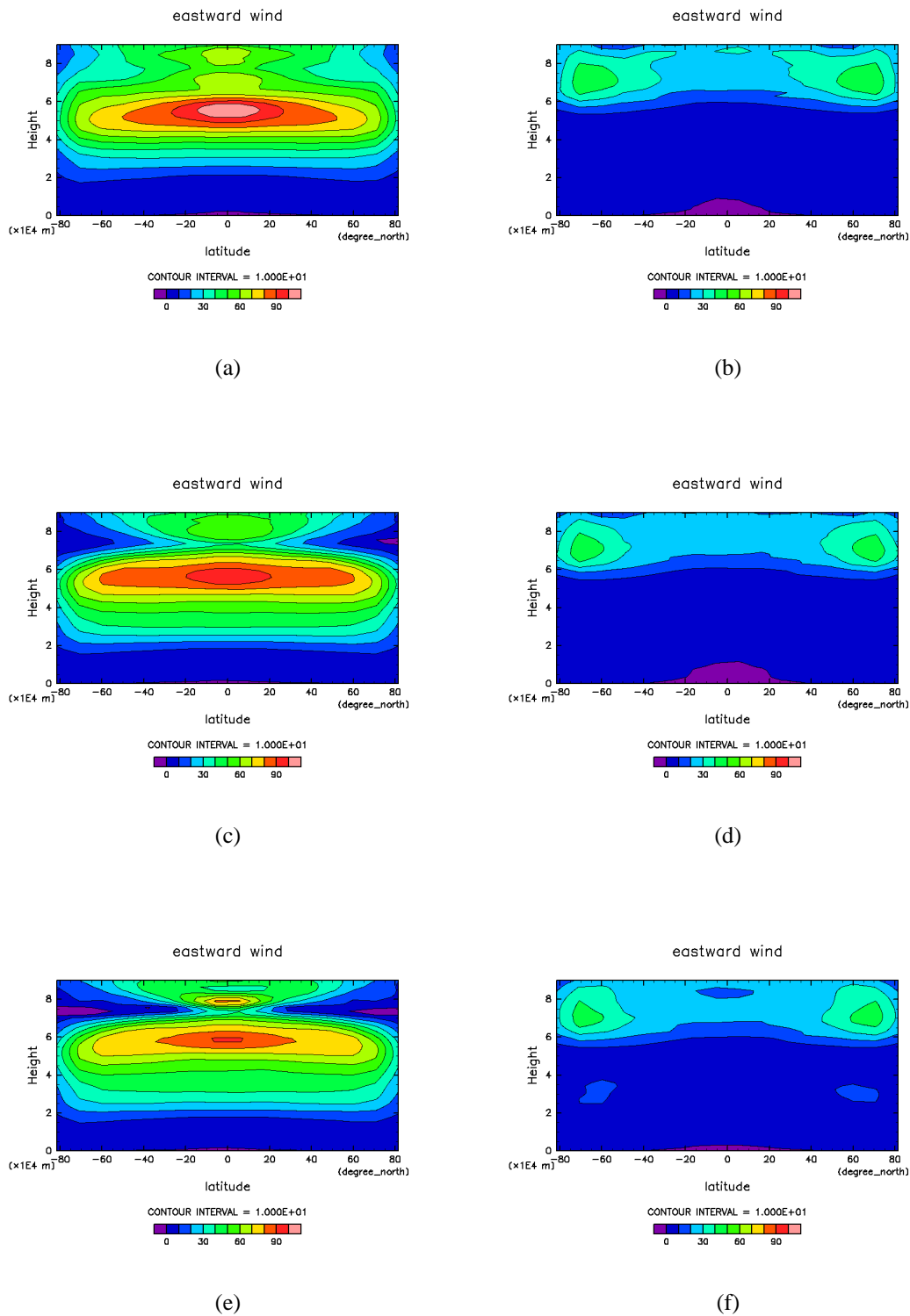


図 3.2: 各実験における, 70000 ~ 70300 日の時間平均を取った東西風分布 [m/s]. コンター間隔は 10[m/s]. (a) VTEq-YT2003_SHR-YT2003 実験 (b) VTEq-YT2003_SHR-KW2007 実験 (c) VTEq-KW2007_SHR-YT2003 実験 (d) VTEq-kintore_M.tex (e) VTEq-HF1987_SHR-YT2003 実験 (f) VTEq-HF1987_SHR-KW2007 実験

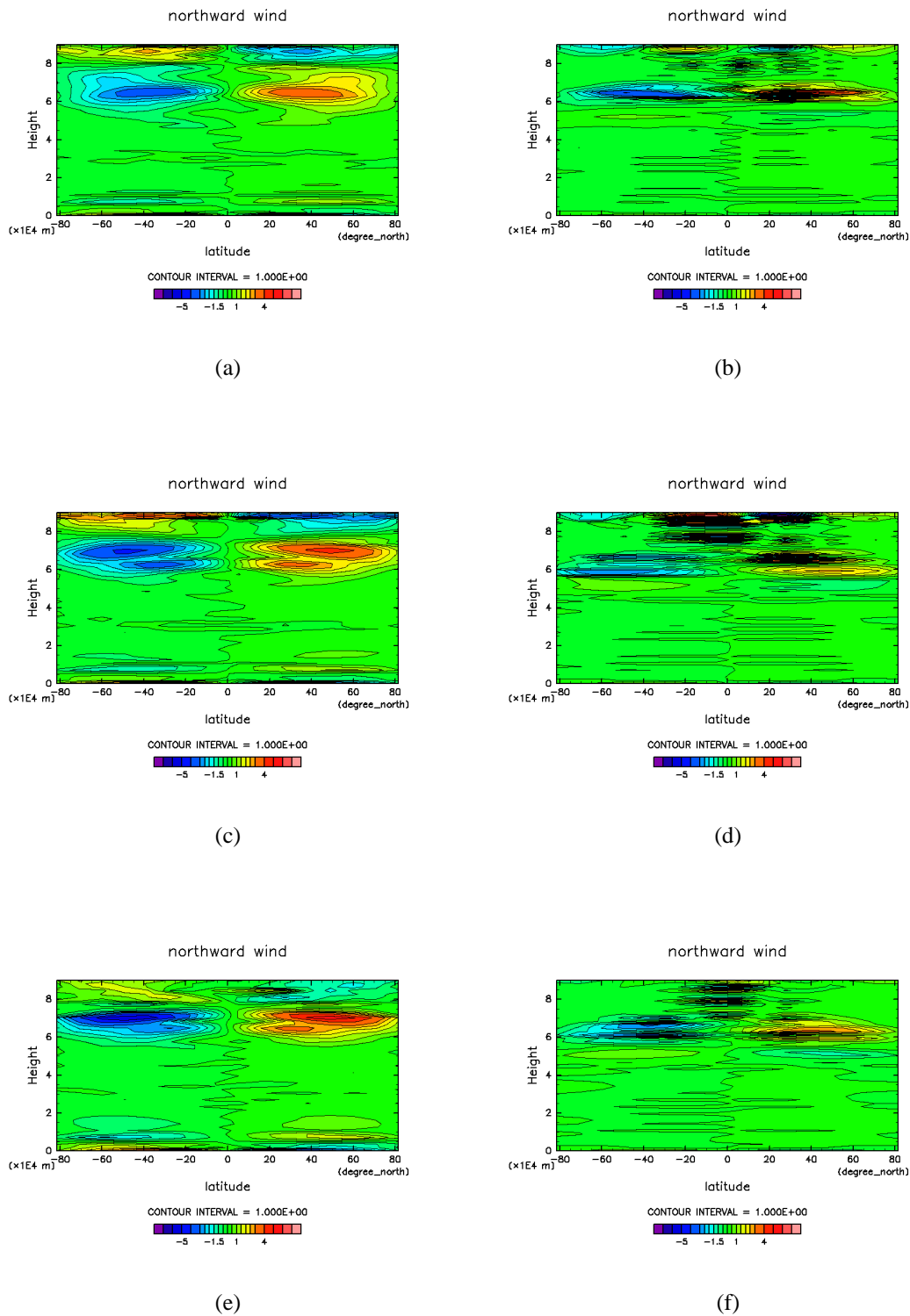


図 3.3: 各実験における, 70000 ~ 70300 日の時間平均を取った南北風分布 [m/s]. $-3 \sim 3$ [m/s] におけるコンター間隔は 0.5 [m/s]. $-3 \sim 3$ [m/s] 外におけるコンター間隔は 1 [m/s]. (a) VTEq-YT2003_SHR-YT2003 実験 (b) VTEq-YT2003_SHR-KW2007 実験 (c) VTEq-KW2007_SHR-YT2003 実験 (d) VTEq-KW2007_SHR-KW2007 実験 (e) VTEq-HF1987_SHR-YT2003 実験 (f) VTEq-HF1987_SHR-KW2007 実験

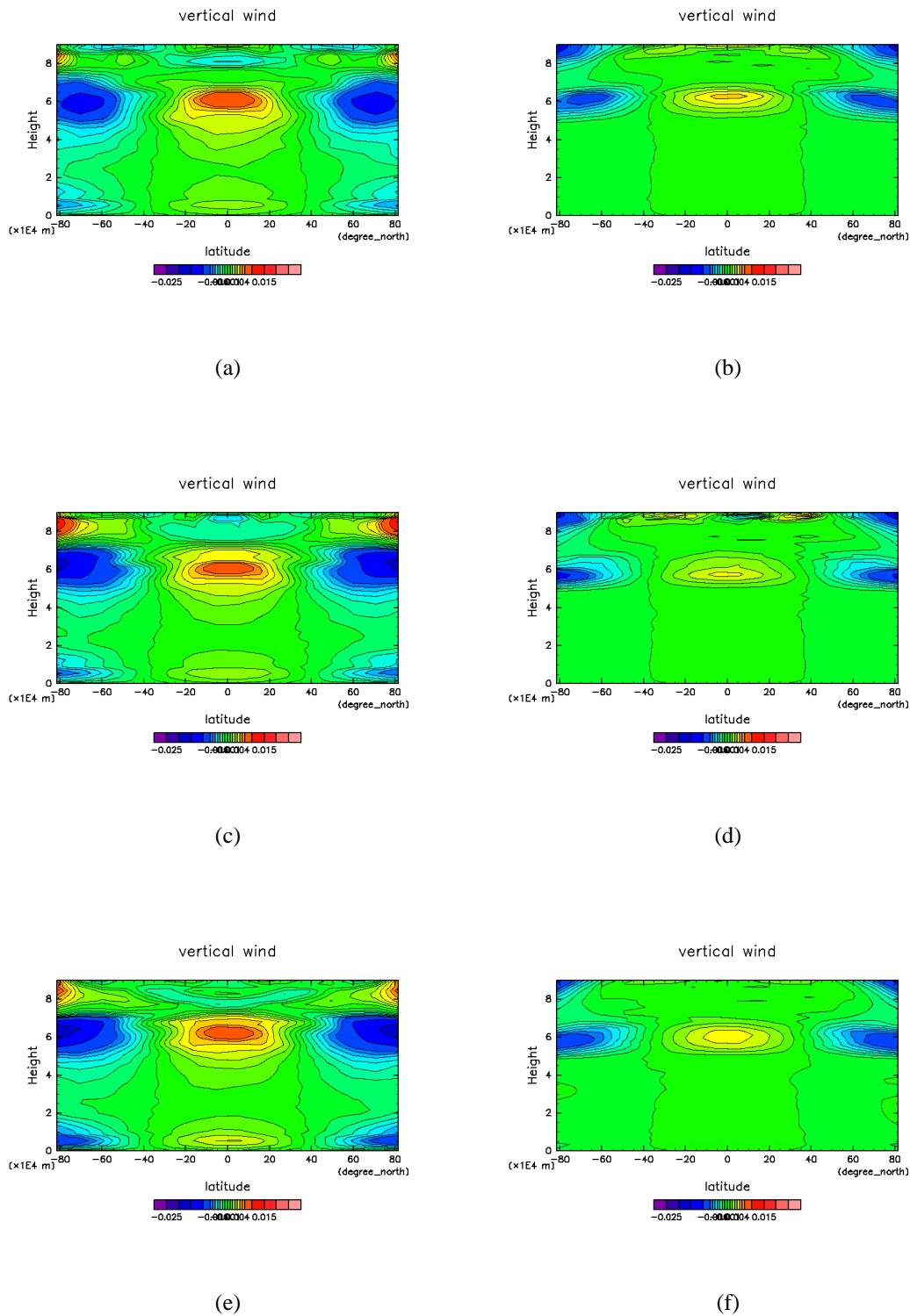


図 3.4: 各実験における, 70000 ~ 70300 日の時間平均を取った鉛直風分布. $-7 \sim 7E-3$ [m/s] におけるコンター間隔は $1E-3$ [m/s]. $-7 \sim 7E-3$ [m/s] 外におけるコンター間隔は $5E-3$ [m/s]. (a) VTEq-YT2003_SHR-YT2003 実験 (b) VTEq-kintore_M.tex
 2012/03/31(馬場健聡)
 YT2003_SHR-KW2007 実験 (c) VTEq-KW2007_SHR-YT2003 実験 (d) VTEq-KW2007_SHR-KW2007 実験 (e) VTEq-HF1987_SHR-YT2003 実験 (f) VTEq-HF1987_SHR-KW2007 実験

3.2 太陽加熱率変更実験

3.1 節より, 東西風速分布が放射平衡温度分布よりも太陽加熱率の与え方に大きく依存している事が示された. しかし, YT2003 で与えた太陽加熱率と KW2007 で与えた太陽加熱率では, 極値の位置と下層での値が大きく異なる. 具体的には, YT2003 で与えた太陽加熱率は, 極値の高度が低く, 下層での値が 0.52 と大きい. KW2007 で与えた太陽加熱率は, 極値の高度が高く, 下層での値が 0.082 と小さい. そこで, 極値の位置と下層での値のどちらが東西風速分布に大きな影響を与えるのかを調査する. 極値の位置と下層での値をそれぞれ組み合わせて, 更に 2 種類の実験を行った. 本章で取り扱う実験は, 太陽加熱率の変化のみに着目するため, 放射平衡温度分布として YT2003 の物を使用した. 本章で取り扱う実験で与えた太陽加熱率を図 3.5 に示す. 図 3.5(a) は 2 章 図 2.1(b) で掲載したが, 比較のため再度掲載する. 新たに与えた太陽加熱率は 図 3.5(b) に示す 2 種類である. 図 3.5(b) 実線で示す太陽加熱率を与えた実験を VTEq-YT2003_SHR-KW2007_surf-0.52, 破線で示す太陽加熱率を与えた実験を VTEq-YT2003_SHR-YT2003_surf-0 と命名する.

結果を図 3.6, 図 3.7, 図 3.8 に示す. 太陽加熱率の下層での値が大きい実験 (VTEq-YT2003_SHR-YT2003(図 3.6(a)), VTEq-YT2003_SHR-KW2007_surf-0.52(図 3.6(b))) は, 赤道で極値を持つような東西風速分布を得た. それに対し, 太陽加熱率の下層での値が小さい実験 (VTEq-YT2003_SHR-YT2003_surf-0 (図 3.6(c)), VTEq-YT2003_SHR-KW2007(図 3.6(d))) では極に極値を持つような東西風速分布を得た. これより, 赤道で極値を持つような東西風速分布を得るためには, 下層での太陽加熱率がある程度大きい必要があることがわかった.

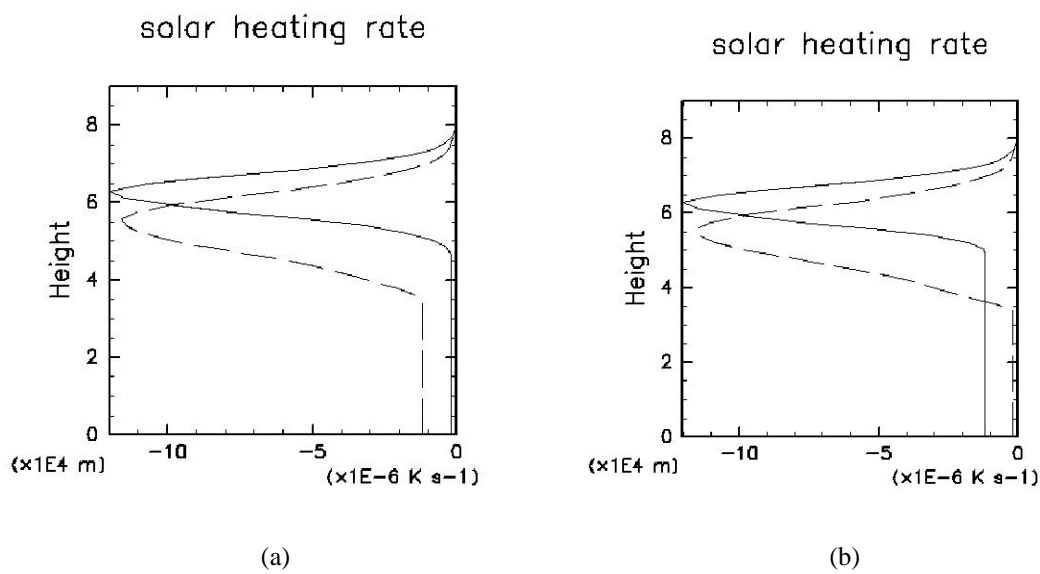


図 3.5: 本実験で与えた太陽加熱率. 横軸は加熱率 $[\text{K/s}]$, 縦軸は高度 $[\text{m}]$. (a) 実線が KW2007, 破線が YT2003 に基づく太陽加熱率. (b) YT2003 と KW2007 に基づく太陽加熱率より新たに作成した太陽加熱率. 実線は極値の高度が高く, 下層での値が大きいもの (SHR-KW2007_surf-0.52), 線は極値の高度が低く, 下層での値が小さいもの (SHR-YT2003_surf-0).

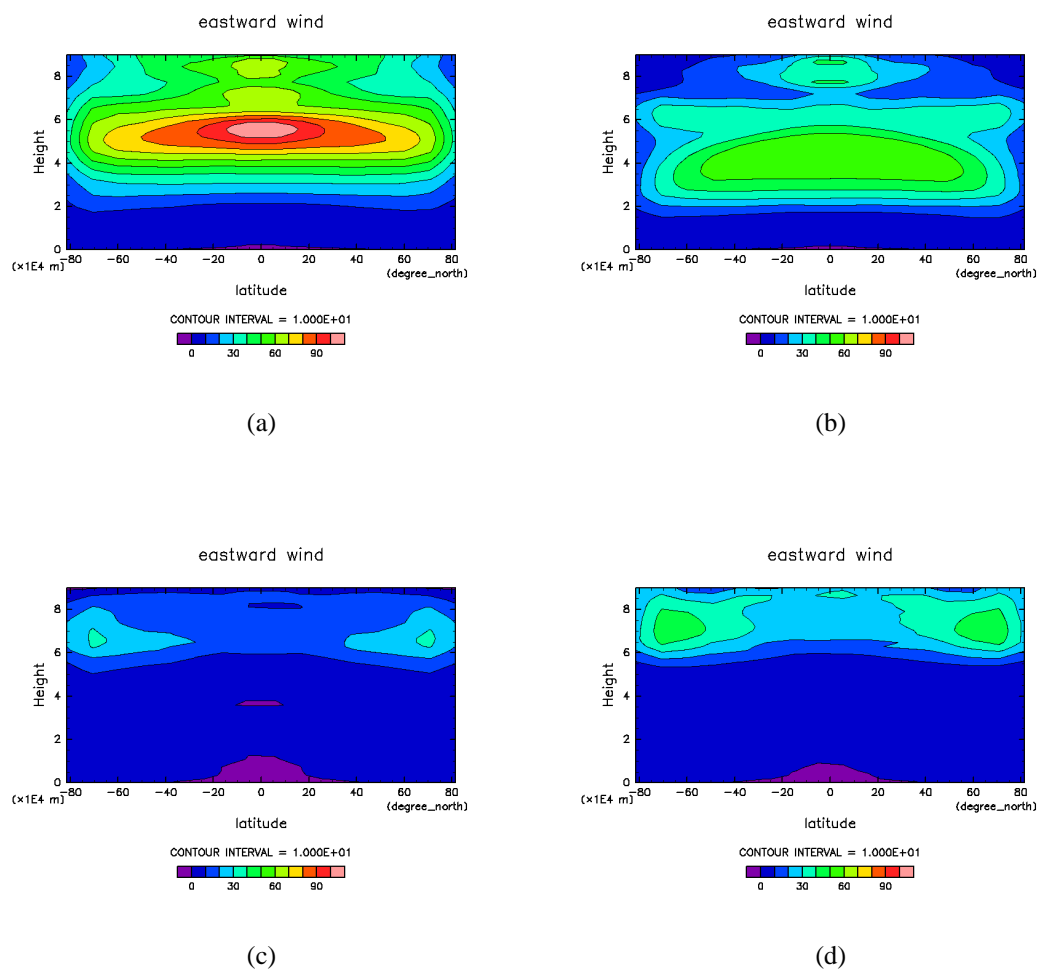


図 3.6: 各実験における, 70000 ~ 70300 日の時間平均を取った東西風分布. (a) VTEq-YT2003_SHR-YT2003 実験 (b) VTEq-YT2003_SHR-KW2007_surf-0.52 実験 (c) VTEq-YT2003_SHR-YT2003_surf-0 実験 (d) VTEq-YT2003_SHR-KW2007

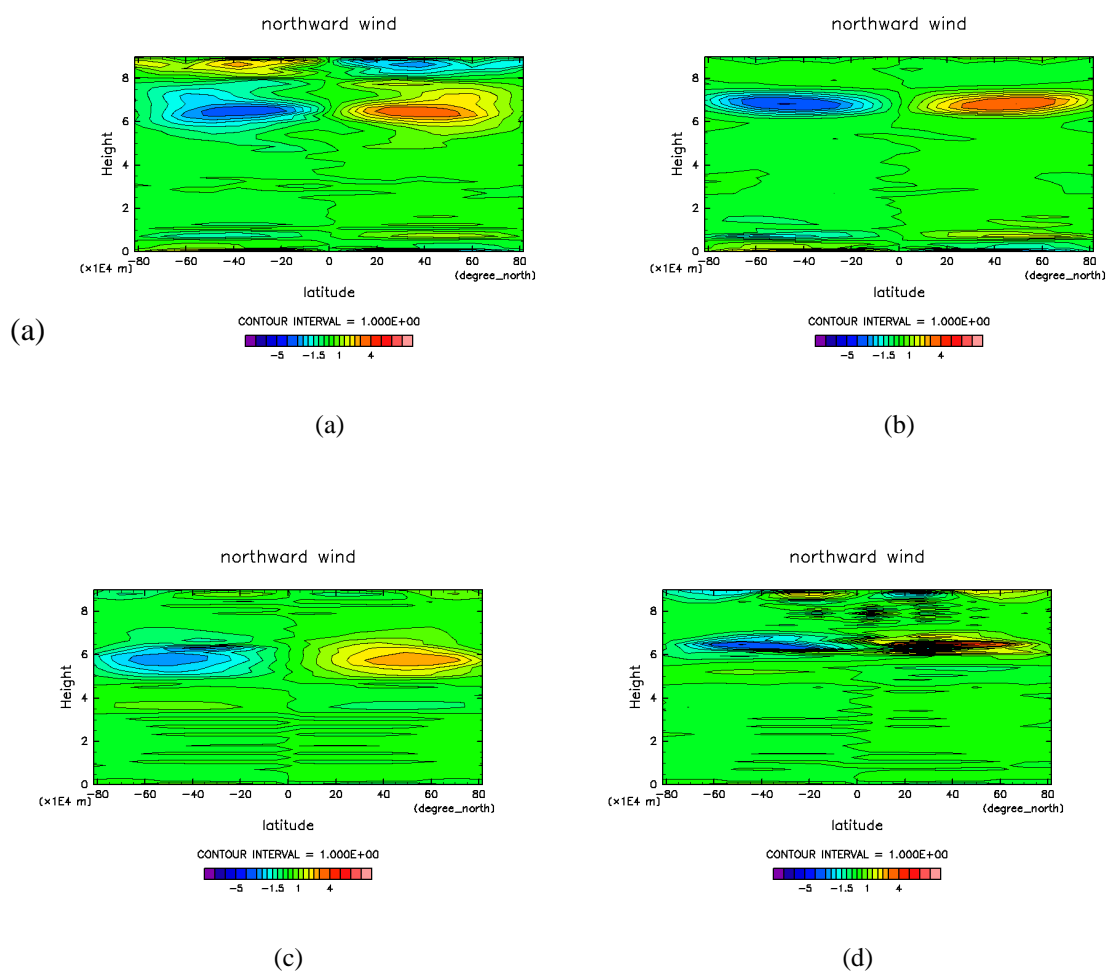


図 3.7: 各実験における, 70000 ~ 70300 日の時間平均を取った南北風分布 (a) VTEq-YT2003_SHR-YT2003 実験 (b) VTEq-YT2003_SHR-KW2007_surf-0.52 実験 (c) VTEq-YT2003_SHR-YT2003_surf-0 実験 (d) VTEq-YT2003_SHR-KW2007

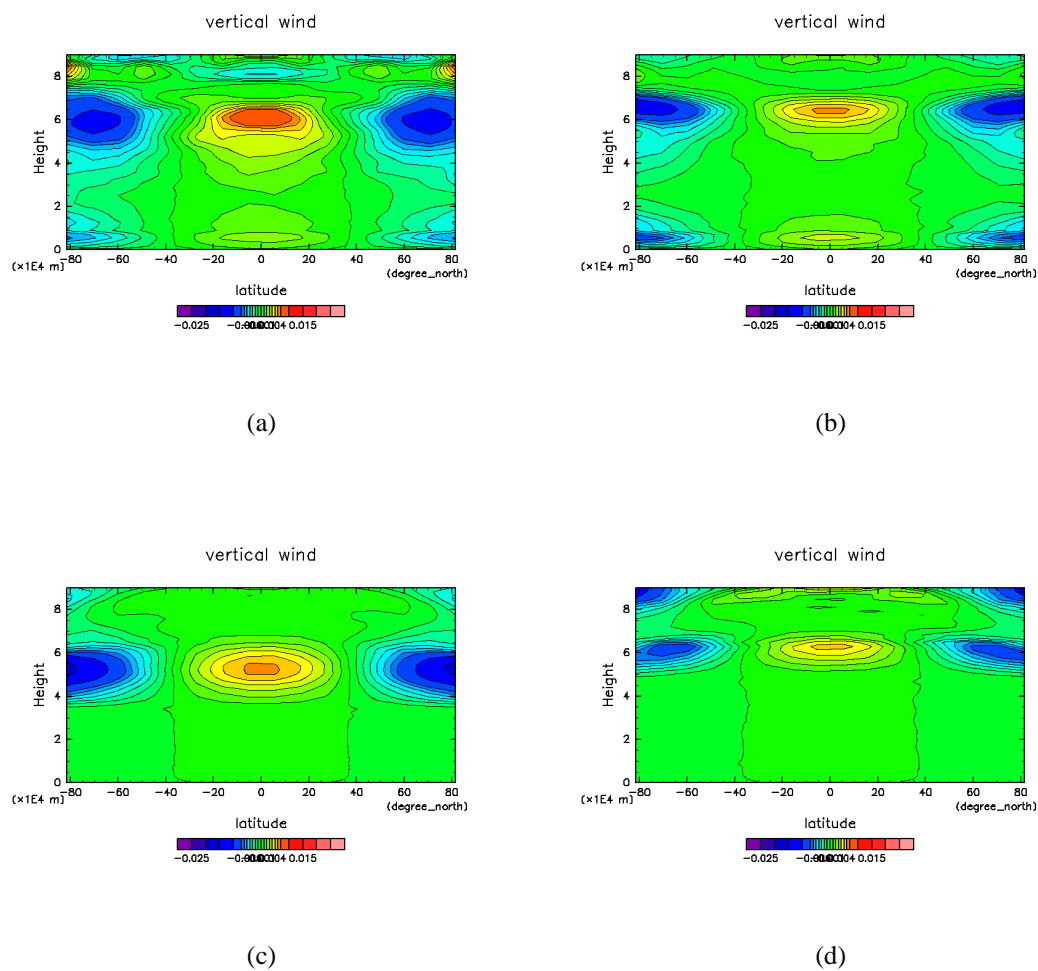


図 3.8: 各実験における, 70000 ~ 70300 日の時間平均を取った鉛直風分布 (a) VTEq-YT2003_SHR-YT2003 実験 (b) VTEq-YT2003_SHR-KW2007_surf-0.52 実験 (c) VTEq-YT2003_SHR-YT2003_surf-0 実験 (d) VTEq-YT2003_SHR-KW2007

3.3 定常状態における EP-Flux, 残差循環

東西平均を取った際の東西風の時間発展方程式は以下のとおりである.

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = -\bar{v}^* \left(\frac{1}{a \cos \phi} - \frac{\partial}{\partial \phi} \bar{u}(\cos \phi) - f \right) - \bar{w}^* \frac{\partial \bar{u}}{\partial z^*} + \frac{1}{\sigma \cos \phi} \nabla \cdot \mathbf{F} + \bar{X} \quad (3.1)$$

この時, 南北方向, 鉛直方向の残差循環 \bar{v}^*, \bar{w}^* , EP-Flux $\mathbf{F} \equiv (F_\phi, F_{z^*})$ はそれぞれ, 以下のように定義される.

$$\begin{aligned} \bar{v}^* &= \bar{v} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial z^*} \left(\rho_0 \frac{\bar{v}'\theta'}{\frac{\partial \theta}{\partial z^*}} \right), \\ &= \bar{v} - \frac{1}{\sigma} \frac{\partial}{\partial z^*} \left(\sigma \frac{\bar{v}'\theta'}{\frac{\partial \theta}{\partial z^*}} \right). \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\bar{w}^* = \bar{w} + \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\cos \phi \frac{\bar{v}'\theta'}{\frac{\partial \theta}{\partial z^*}} \right). \quad (3.3)$$

$$F_\phi = \sigma \cos \phi \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z^*} \frac{\bar{v}'\theta'}{\frac{\partial \theta}{\partial z^*}} - \bar{u}'\bar{v}' \right). \quad (3.4)$$

$$F_{z^*} = \sigma \cos \phi \left(\left[f - \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \phi} \cos \phi \right] \frac{\bar{v}'\theta'}{\frac{\partial \theta}{\partial z^*}} - \bar{u}'\bar{w}' \right). \quad (3.5)$$

EP-Flux は, 波による西向き運動量輸送を表すベクトルである. 定常状態における, 式 (3.1) 右辺第 1 項目, 第 2 項目残差循環による移流項と第 3 項目 EP-Flux の発散項に関して解析を行う. 定常状態 70000 ~ 70300 日でデータ出力間隔 6 時間として再計算を行い, EP-Flux, 残差循環 を計算した.

3.3.1 EP-Flux の解析

各実験における, EP-Flux の発散項 $\frac{1}{\sigma \cos \phi} \nabla \cdot \mathbf{F}$ と EP-Flux $\frac{1}{\sigma \cos \phi} \mathbf{F}$ を図 3.9, 図 3.3.1 に図示する. 図 3.9, 図 3.3.1 の各図の等値線は EP-Flux の発散項の値を表し, ベクトルは EP-Flux を表す.

YT2003 の太陽加熱率を与えた実験 (図 3.9(a), 図 3.9(c), 図 3.10(a), 今後これらの実験群の事を SHR-YT2003 実験群と呼ぶ.) においては, EP-Flux は高度 40 ~ 65km の広い範囲で赤道から極に向かっている. これは赤道から極に向けて西向きの運動量が輸送されている事を表わしている.

KW2007 の太陽加熱率を与えた実験 (図 3.9(b), 図 3.9(d), 図 3.10(b), 今後これらの実験群の事を SHR-KW2007 実験群と呼ぶ.) では, EP-Flux は高度 60km 付近でのみ赤道から極に向かっている.

YT2003 の太陽加熱率を与えた実験 (今後は SHR-YT2003 実験群と呼ぶ。) での赤道における EP-Flux の発散の値は, KW2007 の太陽加熱率を用いた実験 (今後は SHR-KW2007 実験群) での赤道における EP-Flux の発散の値より大きかった. SHR-YT2003 実験群では EP-Flux の発散の項の寄与が大きいため, SHR-KW2007 実験群より大きな東西風速を得る事ができたのではないかと考えられる。また, SHR-YT2003 実験群では SHR-KW2007 実験群とは異なり, 鉛直下向きの EP-Flux も赤道における EP-Flux の発散に寄与していた。これは, 下層における太陽加熱率に関して, YT2003 では KW2007 よりも大きな値を与えていることが関係しているのではないかと考えられる。

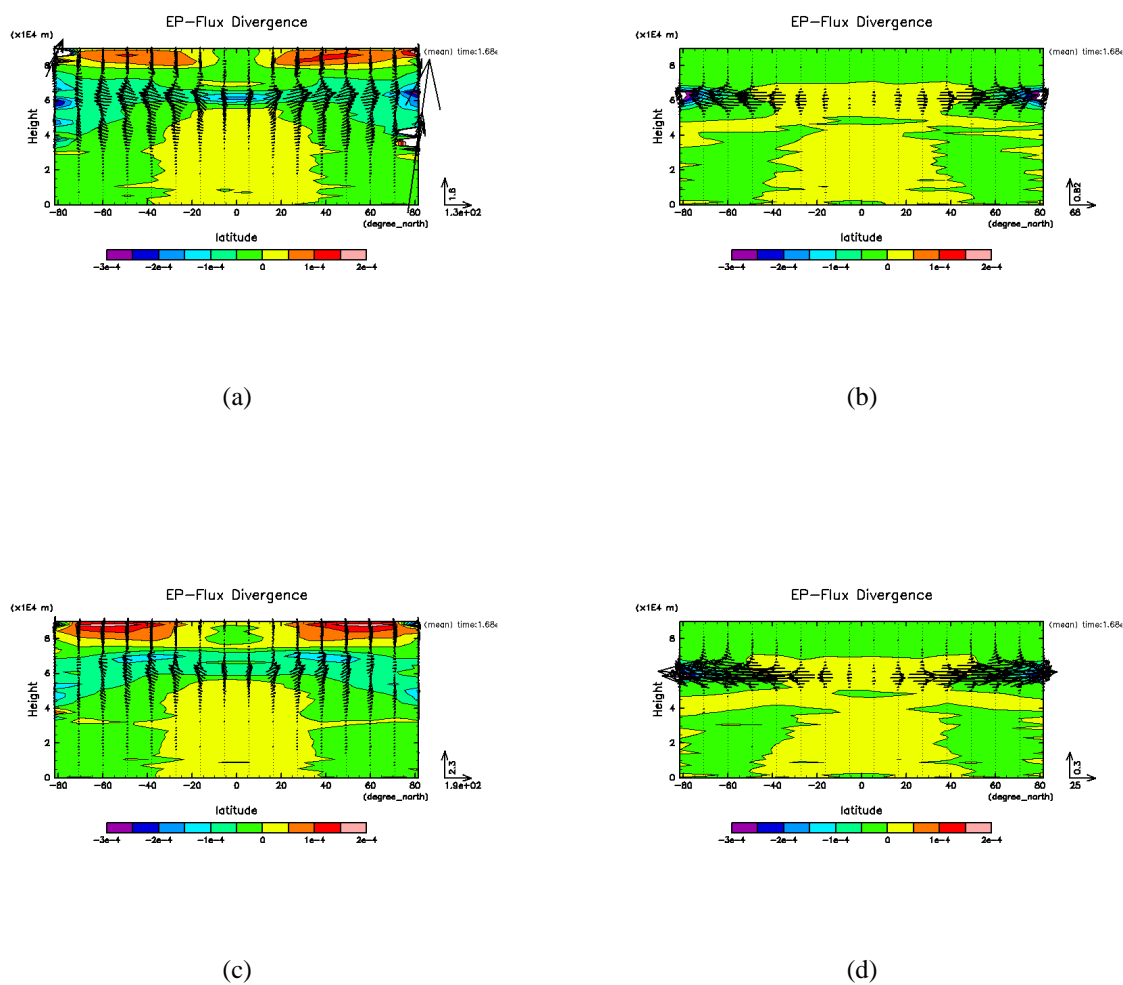
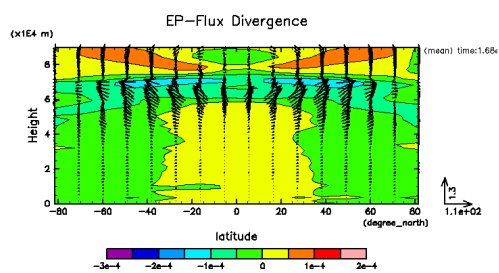
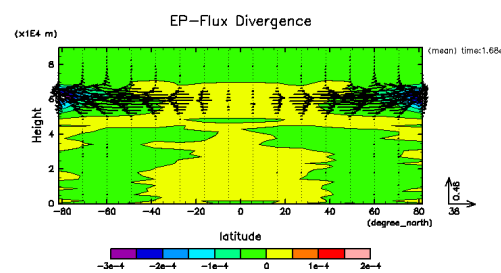


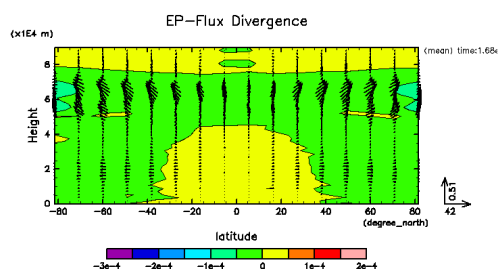
図 3.9: 定常状態における各実験の EP-Flux の発散分布 $\frac{1}{\sigma \cos \phi} \nabla \cdot F$. ベクトルは, EP-Flux. (a) VTEq-YT2003_SHR-YT2003 実験 (b) VTEq-YT2003_SHR-KW2007 実験 (c) VTEq-KW2007_SHR-YT2003 実験 (d) VTEq-KW2007_SHR-KW2007 実験



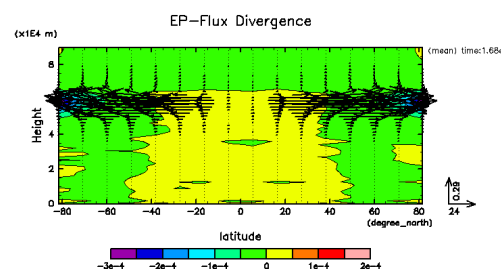
(a)



(b)



(c)



(d)

図 3.10: 定常状態における各実験の EP-Flux の発散分布 $\frac{1}{\sigma \cos \phi} \nabla \cdot F$. ベクトルは, EP-Flux. (a) VTEq-HF1987_SHR-YT2003 実験 (b) VTEq-HF1987_SHR-KW2007 実験 (c) VTEq-YT2003_SHR-KW2007_surf-0.52 実験 (d) VTEq-YT2003_SHR-YT2003_surf-0 実験

3.3.2 南北残差循環

各実験における南北残差循環の値を 図 3.11, 図 3.3.2 に図示する. SHR-KW2007 実験群では, SHR-YT2003 実験群に比べ高度 60km 付近における極向きの南北残差循環の最大値が大きい. SHR-KW2007 実験群では, 最大東西風速は極に現れているが, これは南北残差循環によって赤道から極に運動量が運ばれたためではないか.

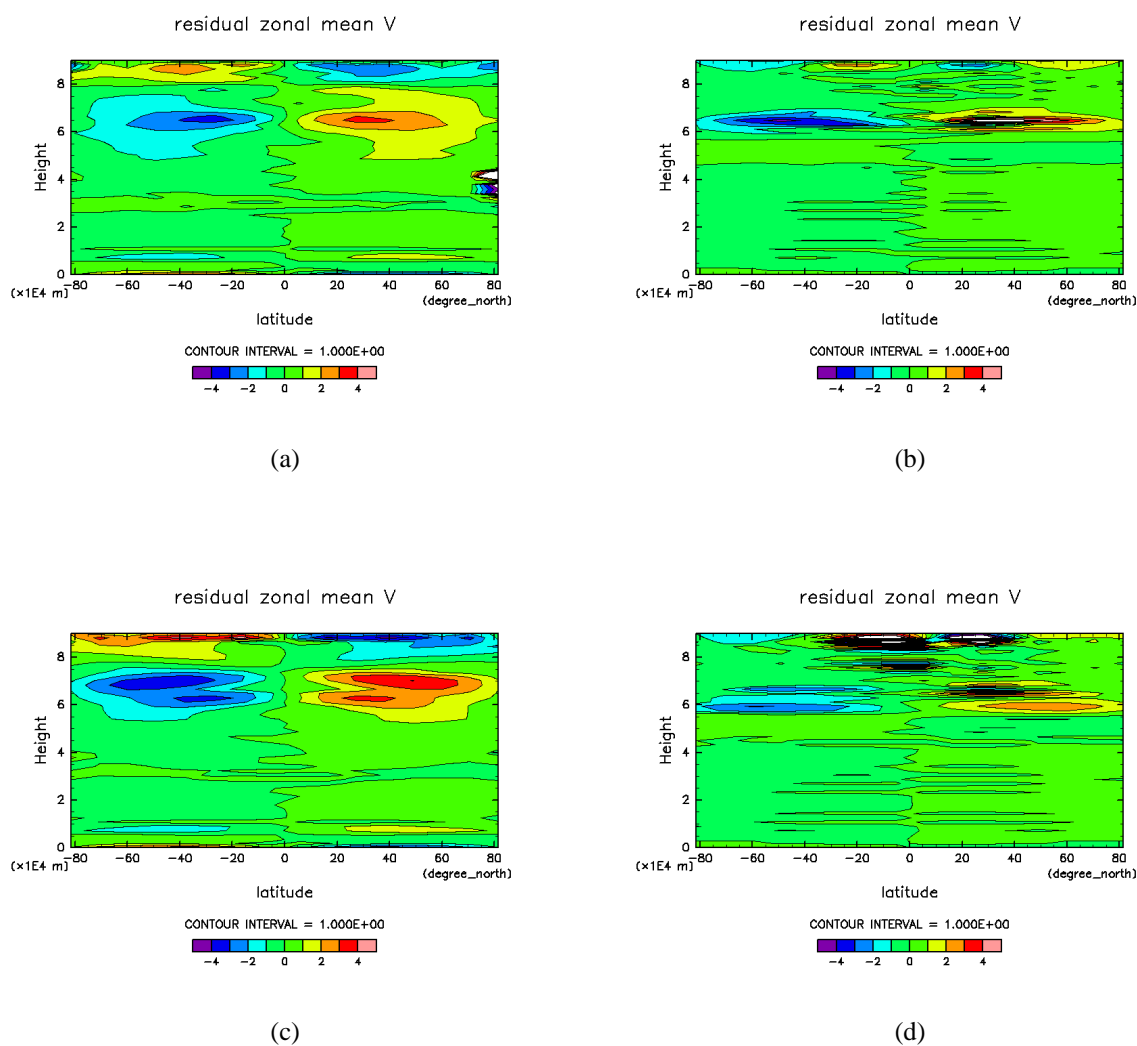


図 3.11: 定常状態における各実験の南北残差循環. (a) VTEq-YT2003_SHR-YT2003 実験 (b) VTEq-YT2003_SHR-KW2007 実験 (c) VTEq-KW2007_SHR-YT2003 実験 (d) VTEq-KW2007_SHR-KW2007 実験

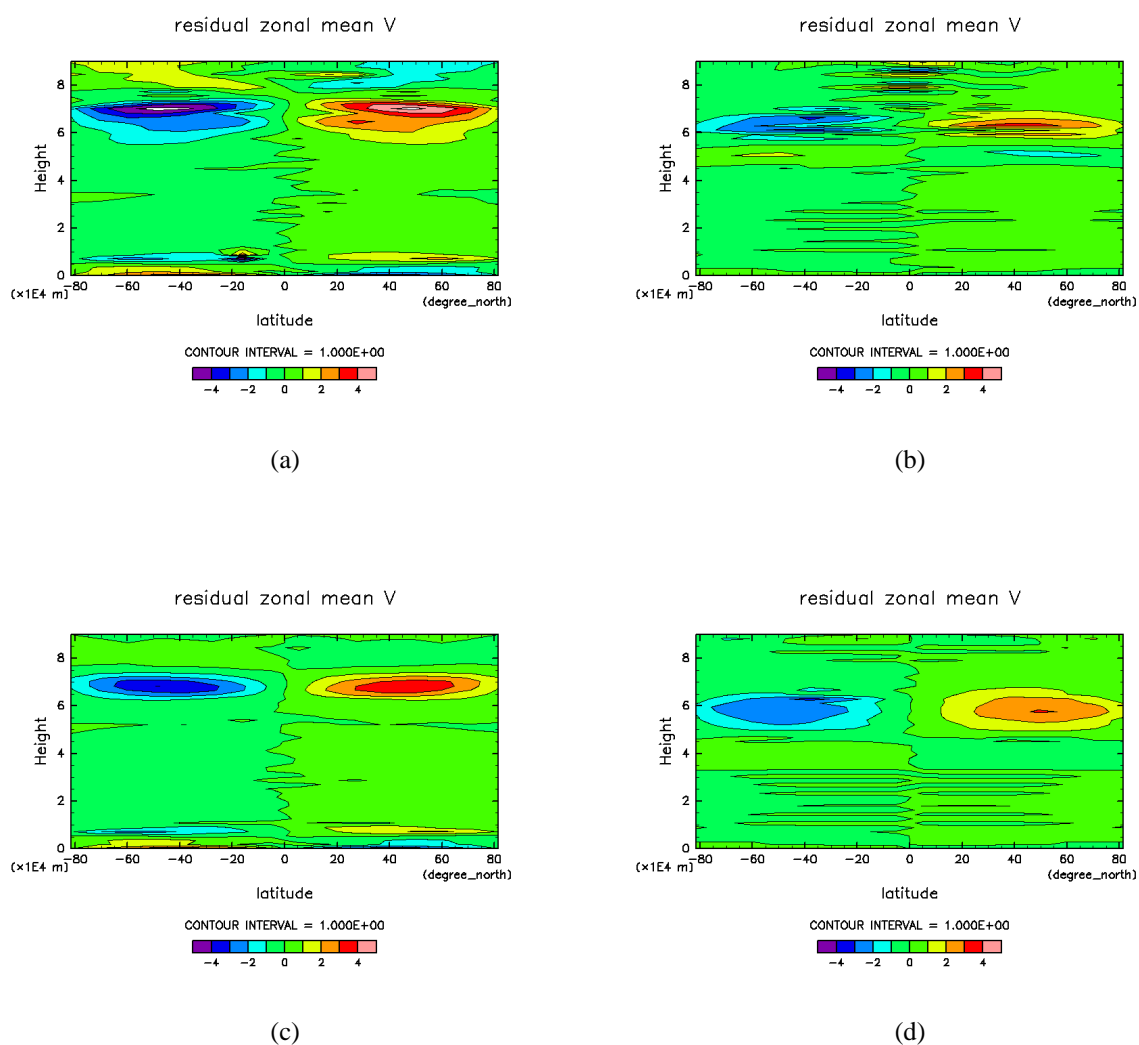


図 3.12: 定常状態における各実験の南北残差循環. (a) VTEq-HF1987_SHR-YT2003 実験 (b) VTEq-HF1987_SHR-KW2007 実験 (c) VTEq-YT2003_SHR-KW2007_surf-0.52 実験 (d) VTEq-YT2003_SHR-YT2003_surf-0 実験

3.3.3 鉛直残差循環

各実験における鉛直残差循環の値を 図 3.13, 図 3.3.3 に図示する. SHR-YT2003 実験群は SHR-KW2007 実験群に比べて, 全体的に大きな値を持っている. 鉛直方向への運動量の輸送が大きいということを表している.

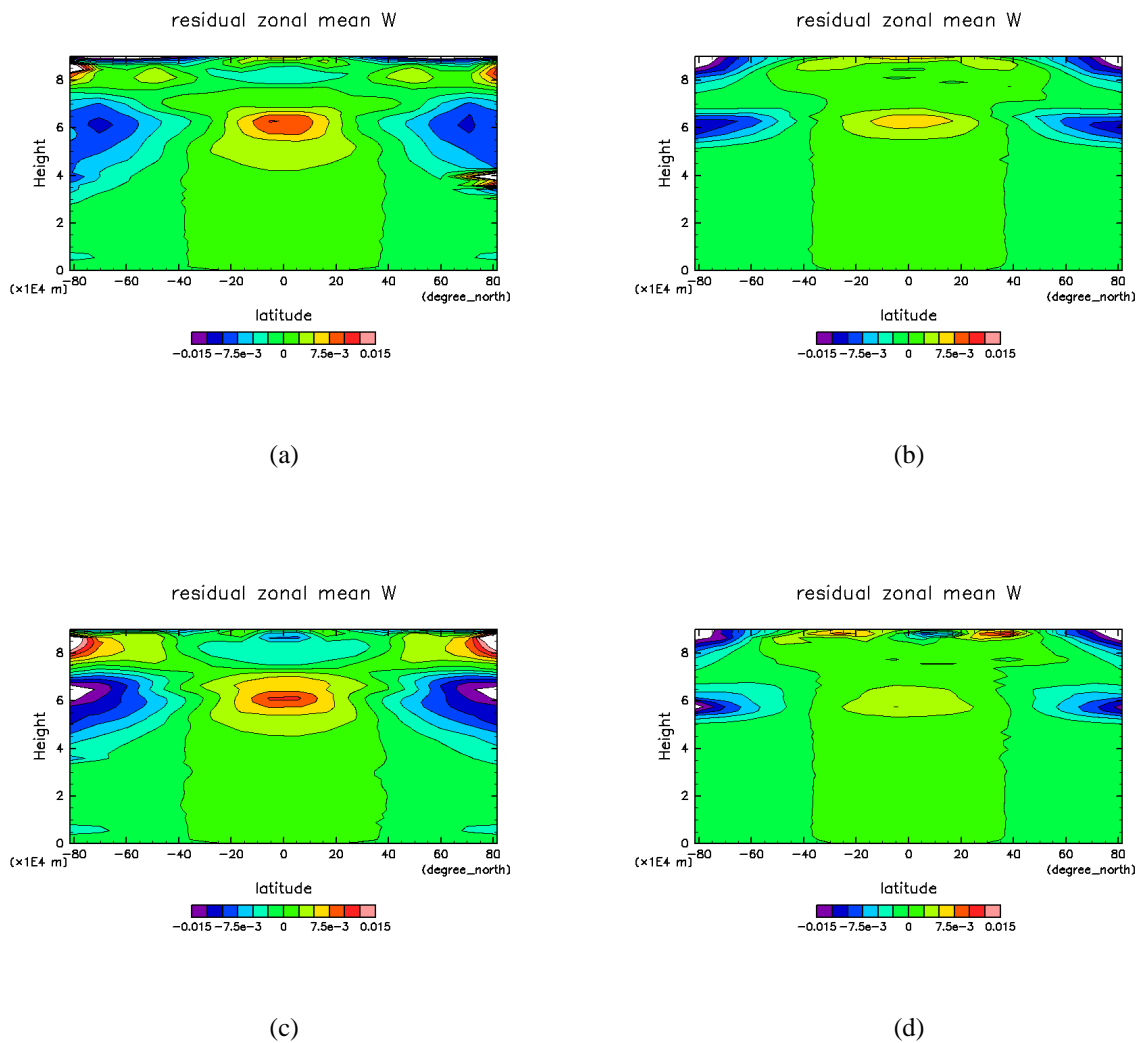


図 3.13: 定常状態における各実験の鉛直残差循環. (a) VTEq-YT2003_SHR-YT2003 実験 (b) VTEq-YT2003_SHR-KW2007 実験 (c) VTEq-KW2007_SHR-YT2003 実験 (d) VTEq-KW2007_SHR-KW2007 実験

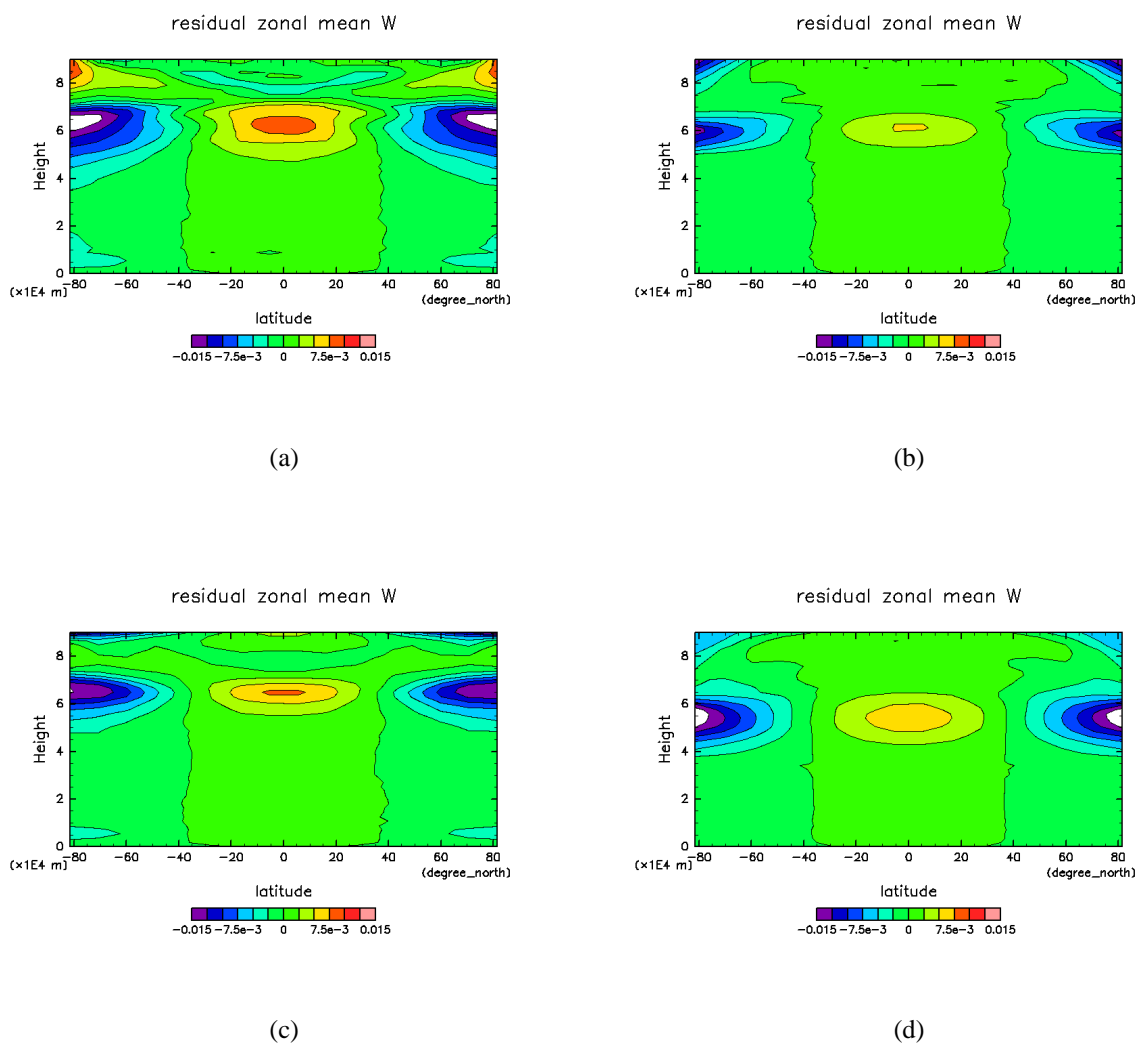


図 3.14: 定常状態における各実験の鉛直残差循環. (a) VTEq-HF1987_SHR-YT2003 実験 (b) VTEq-HF1987_SHR-KW2007 実験 (c) VTEq-YT2003_SHR-KW2007_surf-0.52 実験 (d) VTEq-YT2003_SHR-YT2003_surf-0 実験

第4章 まとめ

本研究では、スーパーローテーションの放射強制に対する依存性を調査した。Yamamoto and Takahashi (2003, 以後 YT2003 と記す), Kido and Wakata (2007, 以後 KW2007 と記す) の太陽加熱率, YT2003, KW2007, Hou and Farrel(1987, 今後は HF1987 と記す) の放射平衡温度分布をそれぞれ組み合わせ計 6 種類の実験を最初に行った。本実験で与えた太陽加熱率は、極値が高度 60km より下に存在し下層での値が大きいもの (YT2003 と同様のもの), 極値が高度 60km より上に存在し下層での値が小さいもの (KW2007 と同様のもの) の 2 種類である。また、本実験で与えた放射平衡温度分布は、安定度が中立的であるもの (YT2003 と同様のもの), 高度 60 ~ 70km で安定度が高いもの (KW2007 と同様のもの), 50 ~ 60km で安定度が低いもの (HF1987 と同様のもの) の 3 種類である。極値が高度 60km より下に存在し、下層での値が大きい太陽加熱率を与えた場合には、どの放射平衡温度分布を与えても、赤道に最大東西風速 100m/s の極値を持つ東西風速分布を得た。極値が高度 60km より上に存在し、下層での値が小さい太陽加熱率を与えた場合には、どの放射平衡温度分布を与えても、両極に最大東西風速 50m/s の極値を持つ東西風速分布を得た。

次に、太陽加熱率の極値が存在する位置、下層での値のどちらが、東西風速分布に大きな影響を与えるかを調査した。極値が存在する位置、下層での値をそれぞれ組み合わせ更に 2 種類の実験を行い、計 4 種類の実験の比較を行った。その結果、下層での値が大きい太陽加熱率を与えた実験では、赤道に極値を持つ東西風速分布を得る事がわかった。更に、波の活動度を表わす EP-Flux の計算も行った。その結果、太陽加熱率の下層での値が大きい実験では、太陽加熱率の下層での値が小さい実験に比べ、鉛直方向の波による運動量の輸送が存在した。

これらの結果より、下層での太陽加熱率が東西風速分布および波による運動量輸送に大きく影響を与えていることがわかった。今後、金星大気の数値実験を行う際に、放射過程を計算する場合は、下層での放射をしっかりと計算しなければ、正確な大気の運動を再現することは出来ないであろう。

最後に EP-Flux を解析した。SHR-YT2003 実験群では、SHR-KW2007 実験群に比べて下層からより多くの運動量が輸送されている事がわかった。その原因は YT2003 で与えている太陽加熱率は、下層における値が KW2007 で与えている太陽加熱率の下層における値よりも大きい事が原因なのではないかと考えられる。また SHR-

KW2007 実験群において, 最大東西風速が極付近に現れている事は, 南北残差循環によって, 運動量が赤道から極に運ばれたためであると考えられる.

そこで, 今後の課題としては, 各実験において赤道に運動量を輸送しているものが具体的に何であるかを考察することである. その手法としては, EP-Flux のフーリエ解析を行い, どの波数の波が赤道への運動量を輸送しているかを調査する, という事が考えられる.

付録A EP-Flux モジュールの動作確認

前述の通り本研究では EP-Flux の解析を行った。本章では EP-Flux を計算する際に使用したモジュールが正しく動作しているかを確認する。

1 地球計算との比較

まず、観測から得られた地球の EP-Flux の値と、地球設定の計算から得られた値を使用し、モジュールを用いて計算した EP-Flux の値の比較を行う。この際、本研究で行った計算設定を表 1.1.1 に示す。

初期の温度平均値	280 [K]
初期の地表面気圧平均値	1.0e5 [hPa]
空間解像度	T21L16
経度格子点数	64
緯度格子点数	32
積分時間	1 年
時間間隔	40 分
惑星半径	6.371e6 [m]
回転角速度	7.292e-5 [s-1]
重力加速度	9.8 [m s-2]
乾燥大気 of 定圧比熱	1004.0 [J kg-1 K-1]
乾燥大気 of 気体定数	286.85714285 [J kg-1 K-1]

表 1.1.1: 地球計算の計算設定

観測値から得られた EP-Flux として H. J. Edmon, JR et al. (1980) の値を使用した。

彼らは EP-Flux を以下のように定義した.

$$F_\varphi \equiv -a \cos \varphi \bar{u}'v' \quad (1.1)$$

$$F_p \equiv f a \cos \varphi \bar{u}'\theta' / \bar{\theta}_p \quad (1.2)$$

本研究で用いたモジュールで計算している EP-Flux の表式は以下の通りである.

$$\hat{F}_\varphi \equiv -\sigma \cos \varphi \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z^*} \frac{v'\theta'}{\partial z^*} - \bar{u}'v' \right) \quad (1.3)$$

$$\hat{F}_z^* \equiv \sigma \cos \varphi \left(\left[f - \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial \bar{u} \cos \varphi}{\partial \varphi} \right] \frac{v'\theta'}{\partial z^*} - \bar{u}'w' \right) \quad (1.4)$$

それぞれの式のオーダーの違いについて考える. 式 (1.1), (1.1) は式 (1.3), (1.3) より a^2 のオーダー (10^{12}) と 82 kPa のオーダー (10^2) 大きい.

それぞれの結果は以下の通りである.

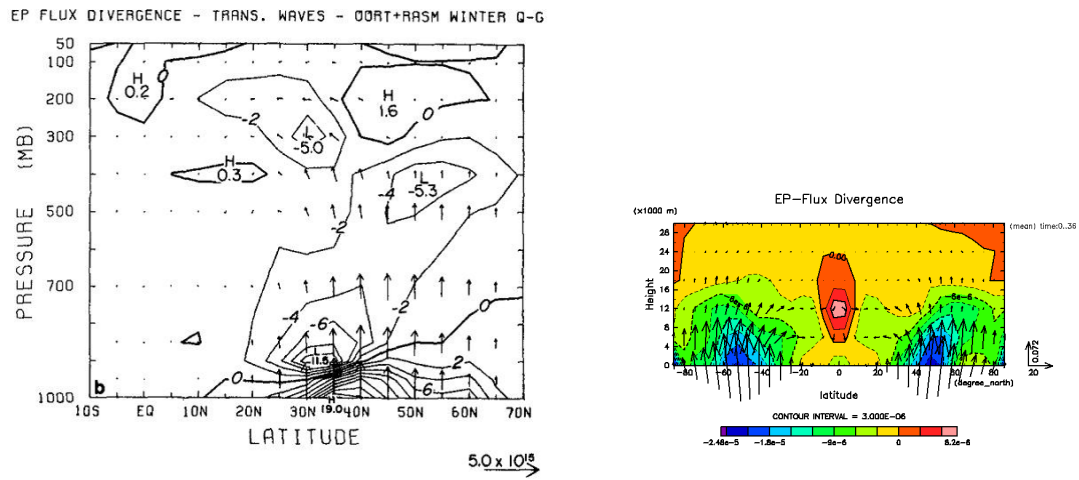


図 1.1: (a) 等高線は EP-Flux の発散, 矢印は EP-Flux を表す. それぞれ, 冬季 5 年間の平均値を取っている. 元になった観測データは Oort and Rasmusson(1971). (H. J. EDMON et al. 1980). (b) 本研究で使用したモジュールを用いて作成した EP-Flux. 等高線は EP-Flux の発散, 矢印は EP-Flux を表す. 全計算時間 1 年の平均値を取っている.

epflux に関して分布のパターンは一致している. また大きさについてもオーダーのずれはない.

2 v を高度場に変換した際の線形補間

線形補間とは、とある格子点 z における量 A をその近傍の値を使って以下のように補間する方法のことである。

$$A_0 = \frac{\Delta z_1 A_2 + \Delta z_2 A_1}{z_1 + z_2} \quad (1.5)$$

今, $z_1 = 77810.5[\text{m}]$, $z = 79200[\text{m}]$, $z_2 = 80001[\text{km}]$ の場合を考える。この時, 各高度における v の値は $v_1 = -4.80007[\text{m/s}]$, $v_0 = 2.71[\text{m/s}]$, $7.059[\text{m/s}]$ である。線形補間を用い, これが v_1, v_2 より v を求める。

$$v_0 = \frac{\Delta z_1 v_2 + \Delta z_2 v_1}{v_1 + v_2} \quad (1.6)$$

$$= \frac{801 \times (-4.80007) + 1390.5 \times 7.059}{801 + 1890.5} \quad (1.7)$$

$$= \frac{-3845.7 + 9815.53}{2191.5} \quad (1.8)$$

$$= 2.7 \quad (1.9)$$

以上より, 線形補間により求められた v の値は正しい事が示された。

3 高度場における鉛直流 W の確認

本研究では, ruby スクリプトを用い, σ から w を計算した。本章では, 高度 $\sigma = 0.0088$ を例にとり, w が正しく計算できているか確認する。

$$w = \frac{-\sigma TR}{g\sigma} \quad (1.10)$$

$$= \frac{-2.3 \times 327 \times 191.4}{8.87 \times 0.0088} \quad (1.11)$$

$$= 1840385.2 \times 10^{-9} \quad (1.12)$$

$$= 0.0018. \quad (1.13)$$

スクリプトにて計算された w の値は 0.0025 である。これより, w は正しく計算されたと言って問題ない。

付録B dcpam5 での EP-Flux モジュールの使用法

本研究では, EP-Flux の計算に `gphys`¹⁾ のモジュールである EP-Flux モジュールを使用した. 本節では `dcpam5` で出力される nc ファイルを使用し, EP-Flux モジュールで EP-Flux を計算する方法を説明する.

`dcpam5` で出力される nc ファイルに必要なものは, `venus_U.nc`(東西風), `venus_V.nc`(南北風), `venus_SigDot.nc`(sigma 座標の鉛直風), `venus_Temp.nc`(温度), `venus_Ps.nc`(地表面圧力) である.

1 温位, 鉛直風の計算

まず, 温位 θ と鉛直風 ω を計算し, それぞれ `venus_Theta.nc`, `venus_DpDt.nc` として出力する. その際, 以下の式を使用する.

$$\theta = T \left(\frac{1}{\sigma} \right)^{\left(\frac{R}{c_p} \right)} \quad (2.1)$$

$$\omega = P_s \frac{D\sigma}{Dt} \quad (2.2)$$

この際, 必要な nc ファイルは `venus_Temp.nc`(温度), `venus_Ps.nc`(地表面圧力) である.

2 圧力座標系への変換

`dcpam5` において出力される nc ファイルは, デフォルトでは鉛直座標として sigma 座標を持っている. EP-Flux モジュールは圧力座標系を持った物理量で計算する必要がある. そこで, 最初に各物理量の鉛直座標を sigma 座標から圧力座標に変換する.

¹⁾`gphys` は物理量を扱うためのクラスである. これは地球流体電脳倶楽部により開発された.

まず, 各 sigma に対応した鉛直圧力場を計算し `venus.P.nc` として出力する. sigma 座標を圧力座標に変換するスクリプト `gpinterpo_sig-p` と `venus.P.nc` を使用し, `U_prs.nc`(東西風), `V_prs.nc`(南北風), `DpDt_prs.nc`(鉛直風), `Temp_prs.nc`(温度) あるいは `Theta_prs.nc`(温位) を出力する.

3 EP-Flux の計算

最後に, 出力された `U_prs.nc`(東西風), `V_prs.nc`(南北風), `DpDt_prs.nc`(鉛直風), `Temp_prs.nc`(温度) あるいは `Theta_prs.nc`(温位) を `EP-Flux` モジュールに読み込ませることで `EP-flux` を計算する. `EP-Flux` モジュールで計算された結果出力される物理量は, `EP-Flux`, `EP-Flux` の発散, 流線関数, 緯度 [rad], 高度 [m], 帯状平均東西風速, 帯状平均気温, 帯状平均擾乱運動量フラックス, 帯状平均擾乱熱フラックス, 帯状平均気温鉛直勾配である. 以下に `EP-Flux` モジュールの実行例を記す.

```
GPhys::EP_Flux::ep_full_sphere(U, V, omega, Theta, false)
```

ここで, 温度の代わりに温位を用いる場合は `false` とする.

付録C 図集:実験毎の各物理量の時間発展

前節では最大東西風速分布を比較したが, 結果に関するより詳しい考察のため, 本節では, 実験毎の各物理量 (東西風速分布, 南北風速分布, 鉛直風速分布, 温度分布) の時間発展に関して結果を見ていく.

VTEq-YT2003_SHR-YT2003 実験

VTEq-YT2003_SHR-YT2003 実験における東西風分布, 南北風分布, 鉛直風分布, 温度分布に関してそれぞれ議論する.

まず, 図 3.1 東西風の時間変化について記述する. 図 C.1(a) 0 ~ 5000 日において, 30 m/s 程の最大東西風速が高度 60km 付近中緯度に現れている. 時間の経過と共に, 最大東西風速は徐々に赤道方向に移ると共に大きくなり, 図 C.1(c) 3000 ~ 40000 日では赤道付近に 110m/s 程の大きな最大風速が現れる. その後は 70000 日まで定常状態が維持されている.

次に図 3.2 南北風について記述する. どの時刻においても, 高度 80km 以下では極方向の風が, 高度 80km 以上では赤道方向の風が吹いている. 図 C.2(a) 0 ~ 5000 日においては, 最大風速 3 ~ 4m/s 程の極方向の風が高度 50 ~ 60km 中緯度で吹いている. 図 C.2(b) 5000 ~ 10000 日においては最大風速の大きさは 0 ~ 5000 日とあまり変わらないが, その高度が 65 ~ 75km に変化した. 定常状態となった図 C.2(c) 30000 ~ 40000 日においては, 5000 ~ 10000 日より少し強い最大風速 3 ~ 5m/s 程の極方向の風が高度 60 ~ 80km 中緯度という広範囲で吹いている. また, 高度 80km 以上では, 2 ~ 4m/s 程の赤道方向の風が吹いている. 図 C.2(d) 60000 ~ 70000 日においては, 既に定常状態となった 30000 ~ 40000 日に比べて大きな変化はない.

次に図 3.3 鉛直風について記述する. 図 C.3(a) 0 ~ 5000 日においては, 高度 30

~ 65km の中緯度から極付近で 0.015 ~ 0.025m/s 程の上昇流, 赤道付近で 0.005 ~ 0.010m/s の下降流が表れている. 図 C.3(b) 5000 ~ 10000 日では, 上昇流, 下降流ともに強さ, 南北方向の位置は変えずに高度のみ 35 ~ 70km 付近に移動した. 定常状態となった図 C.3(c) 30000 ~ 40000 日においては, 上昇流, 下降流ともに高度 60 ~ 80km 付近に移動し, 風速も 0.015 ~ 0.020m/s とやや強くなった. 図 C.1(d) 60000 ~ 70000 日においては, 既に定常状態となった図 C.1(c) 30000 ~ 40000 日に比べて大きな変化はない. また, 定常状態における鉛直風分布と南北風分布を対応させて見ると, 高度 60 ~ 80km でハドレー循環が起こっているように思われる.

最後に図 3.4 温度分布に関して記述する. どの時刻においても, 上層が低温, 下層が高温という鉛直構造をしている. 特に大きな時間変化はしていない.

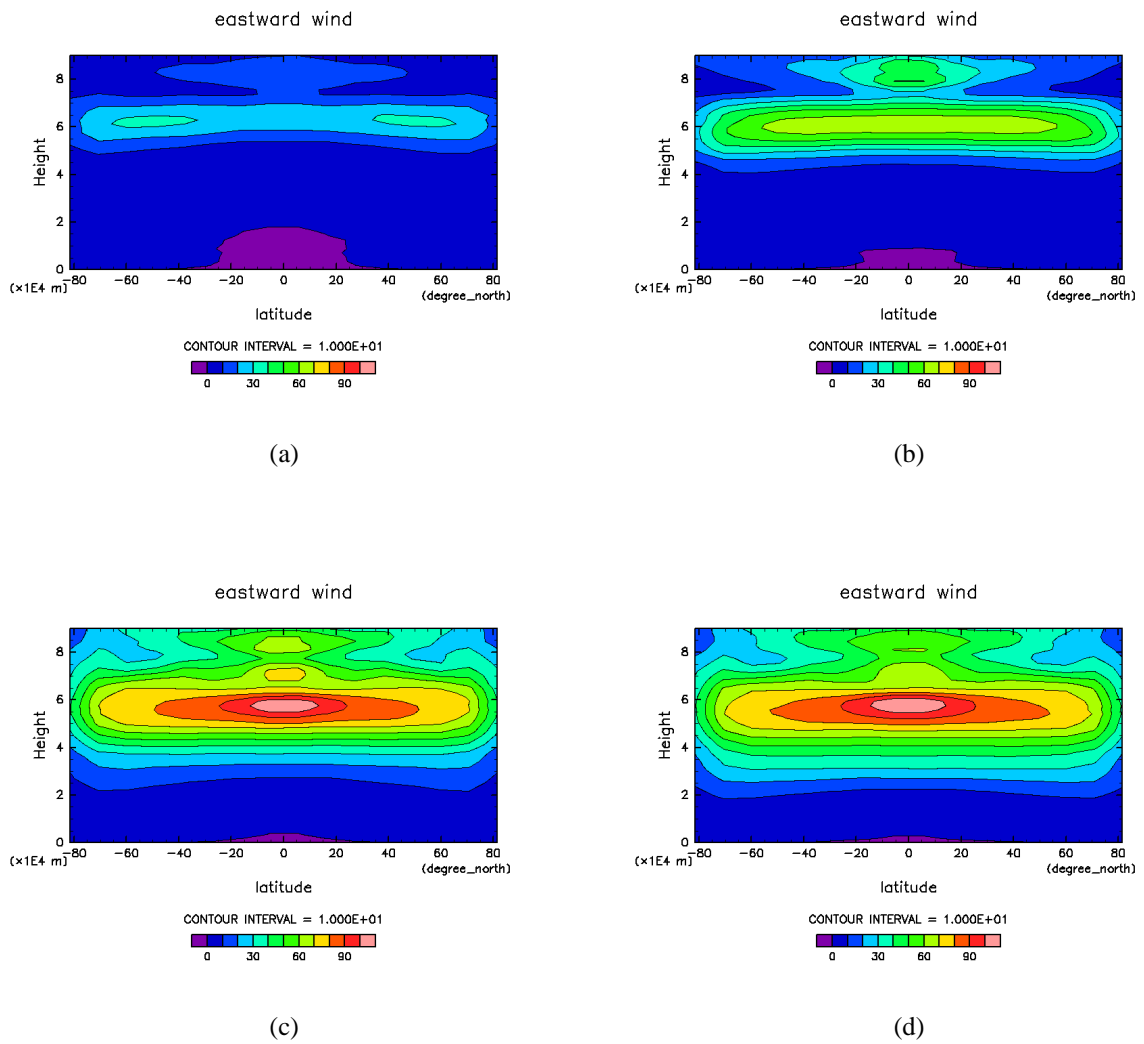


図 3.1: YT2003 の放射平衡温度分布, YT2003 の太陽放射加熱率を用いた実験の東西風分布 (a) 0 ~ 5000 日における時間平均 (b) 5000 ~ 10000 日における時間平均 (c) 30000 ~ 40000 日における時間平均 (d) 60000 ~ 70000 日における時間平均

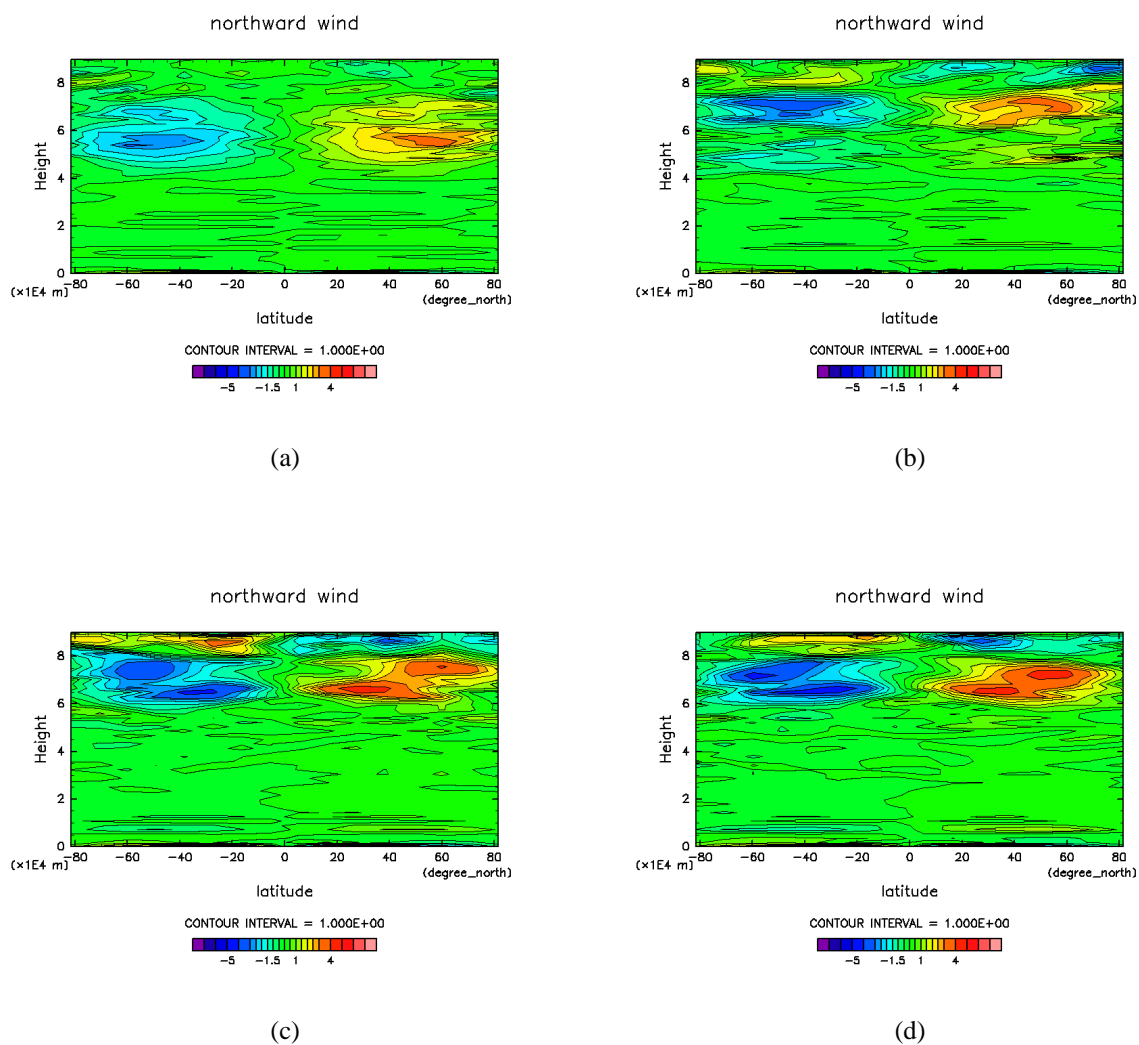


図 3.2: YT2003 の放射平衡温度分布, YT2003 の太陽放射加熱率を用いた実験の南北風分布 (a) 0 ~ 5000 日における時間平均 (b) 5000 ~ 10000 日における時間平均 (c) 30000 ~ 40000 日における時間平均 (d) 60000 ~ 70000 日における時間平均

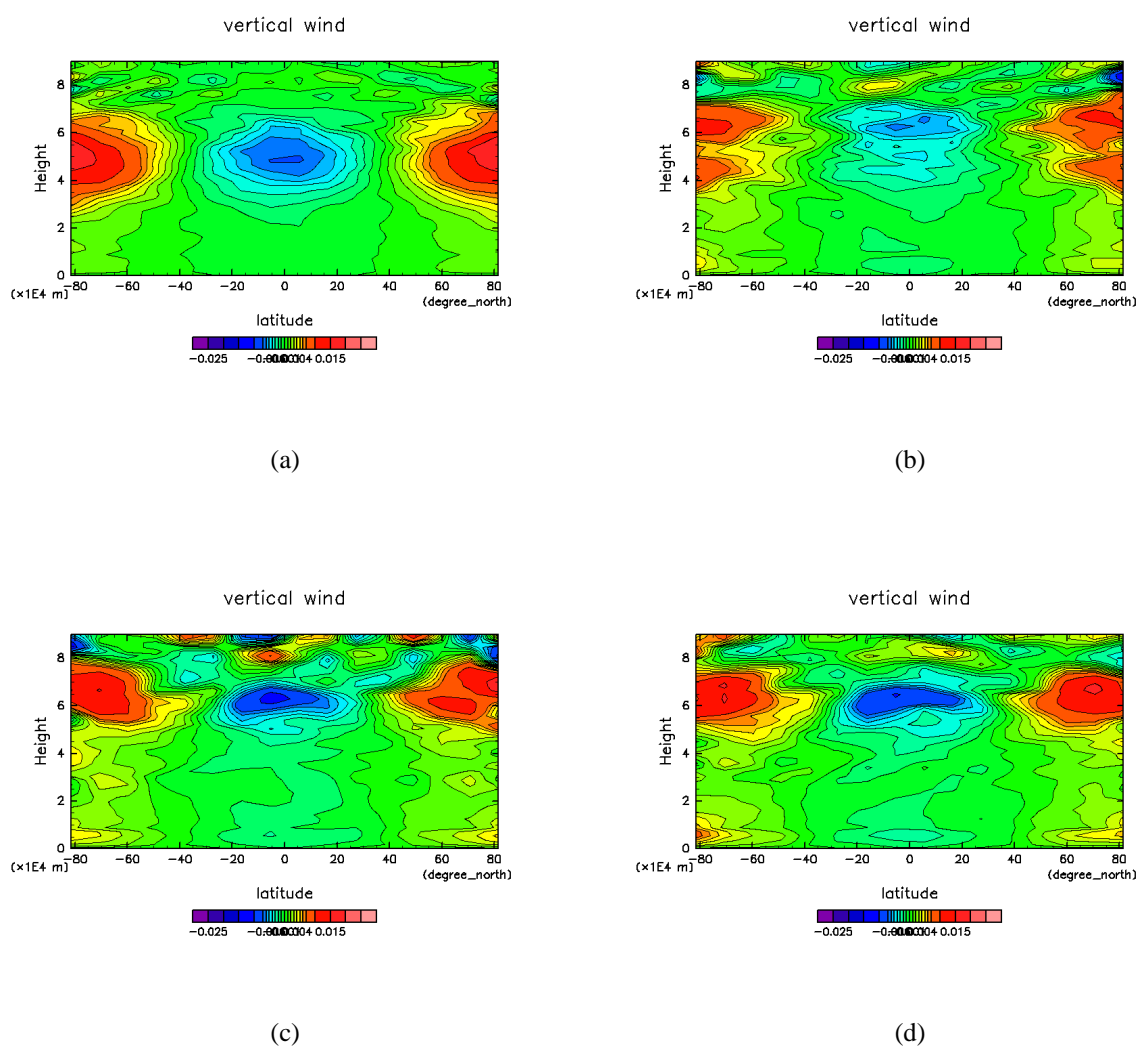


図 3.3: YT2003 の放射平衡温度分布, YT2003 の太陽放射加熱率を用いた実験の鉛直風分布 (a) 0 ~ 5000 日における時間平均 (b) 5000 ~ 10000 日における時間平均 (c) 30000 ~ 40000 日における時間平均 (d) 60000 ~ 70000 日における時間平均

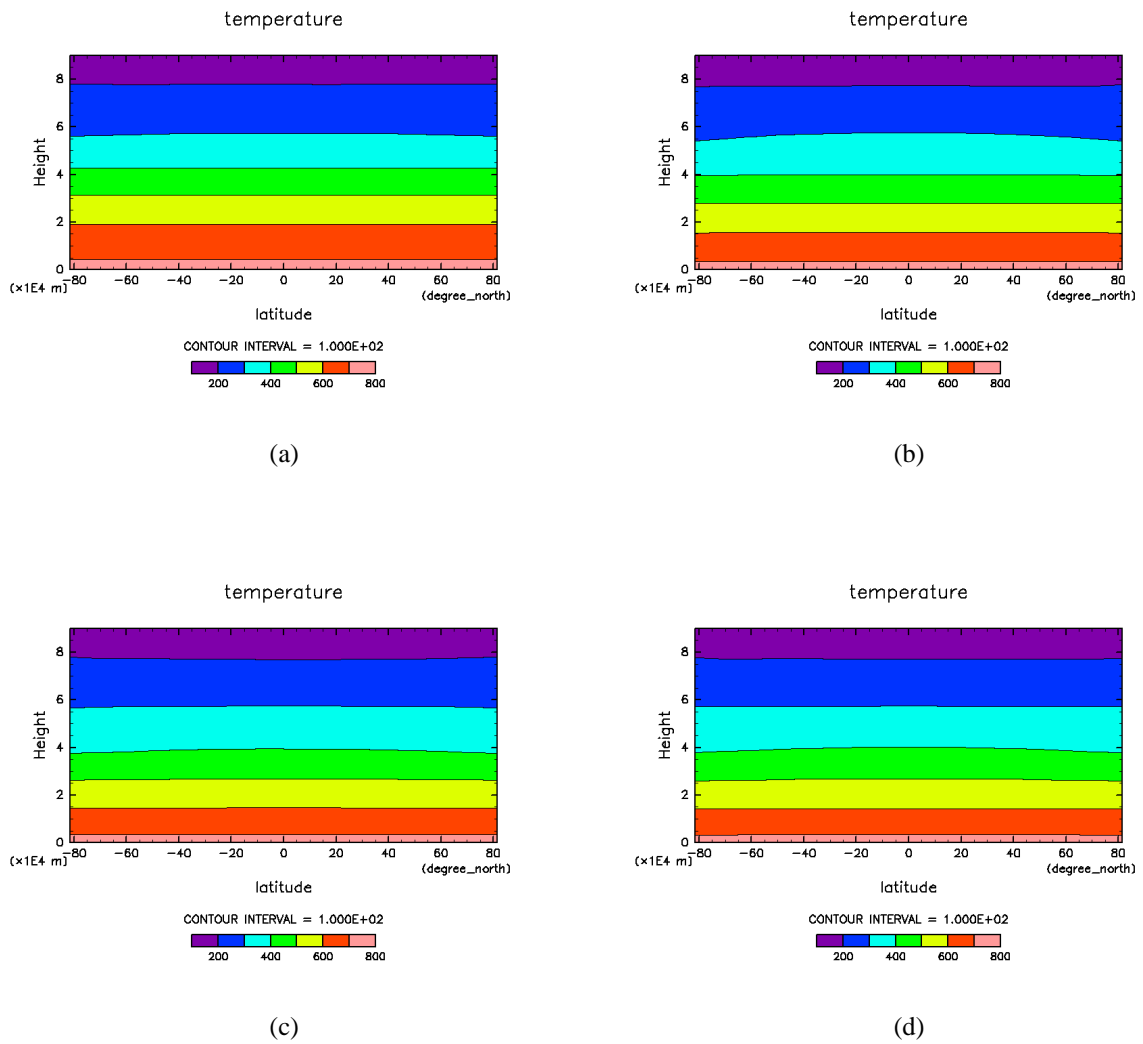


図 3.4: YT2003 の放射平衡温度分布, YT2003 の太陽放射加熱率を用いた実験の温度分布 (a) 0 ~ 5000 日における時間平均 (b) 5000 ~ 10000 日における時間平均 (c) 30000 ~ 40000 日における時間平均 (d) 60000 ~ 70000 日における時間平均

VTEq-KW2007_SHR-YT2003 実験

VTEq-KW2007_SHR-YT2003 実験における東西風分布, 南北風分布, 鉛直風分布, 温度分布に関してそれぞれ VTEq-YT2003_SHR-YT2003 実験と比較しながら議論する.

まず, 東西風に関して記述する. 図 C.5(a) 0~5000 日, 図 C.5(b) 5000~10000 日における最大風速, 風速分布に大きな違いはない. 定常状態になった図 C.5(c) 30000~40000 日, 図 C.5(d) 60000~70000 日における最大風速は赤道に 100m/s であり, VTEq-YT2003_SHR-YT2003 実験と比較してやや小さい.

次に 南北風, 鉛直について記述する. 各時刻における風速分布, 最大風速ともに VTEq-YT2003_SHR-YT2003 実験の南北風と大きな違いはないように思われる.

最後に 温度分布について記述する. 大きな時間変化はなく, 下層における分布は VTEq-YT2003_SHR-YT2003 実験と大きな違いはない. 高度 75km より高い場所においては, VTEq-YT2003_SHR-YT2003 実験よりやや温度が高い.

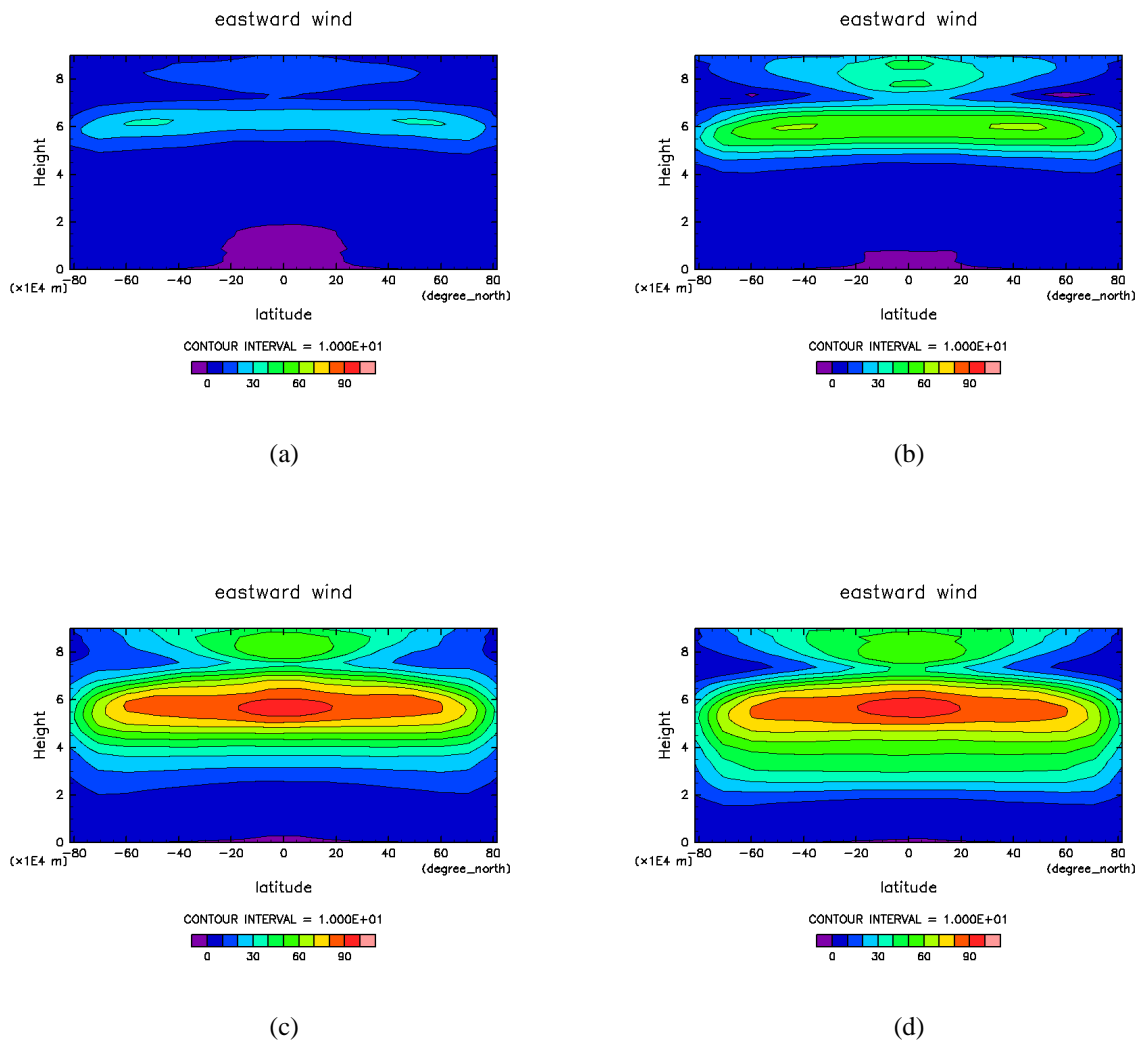


図 3.5: KW2007 の放射平衡温度分布, YT2003 の太陽放射加熱率を用いた実験の東西風分布 (a) 0 ~ 5000 日における時間平均 (b) 5000 ~ 10000 日における時間平均 (c) 30000 ~ 40000 日における時間平均 (d) 60000 ~ 70000 日における時間平均

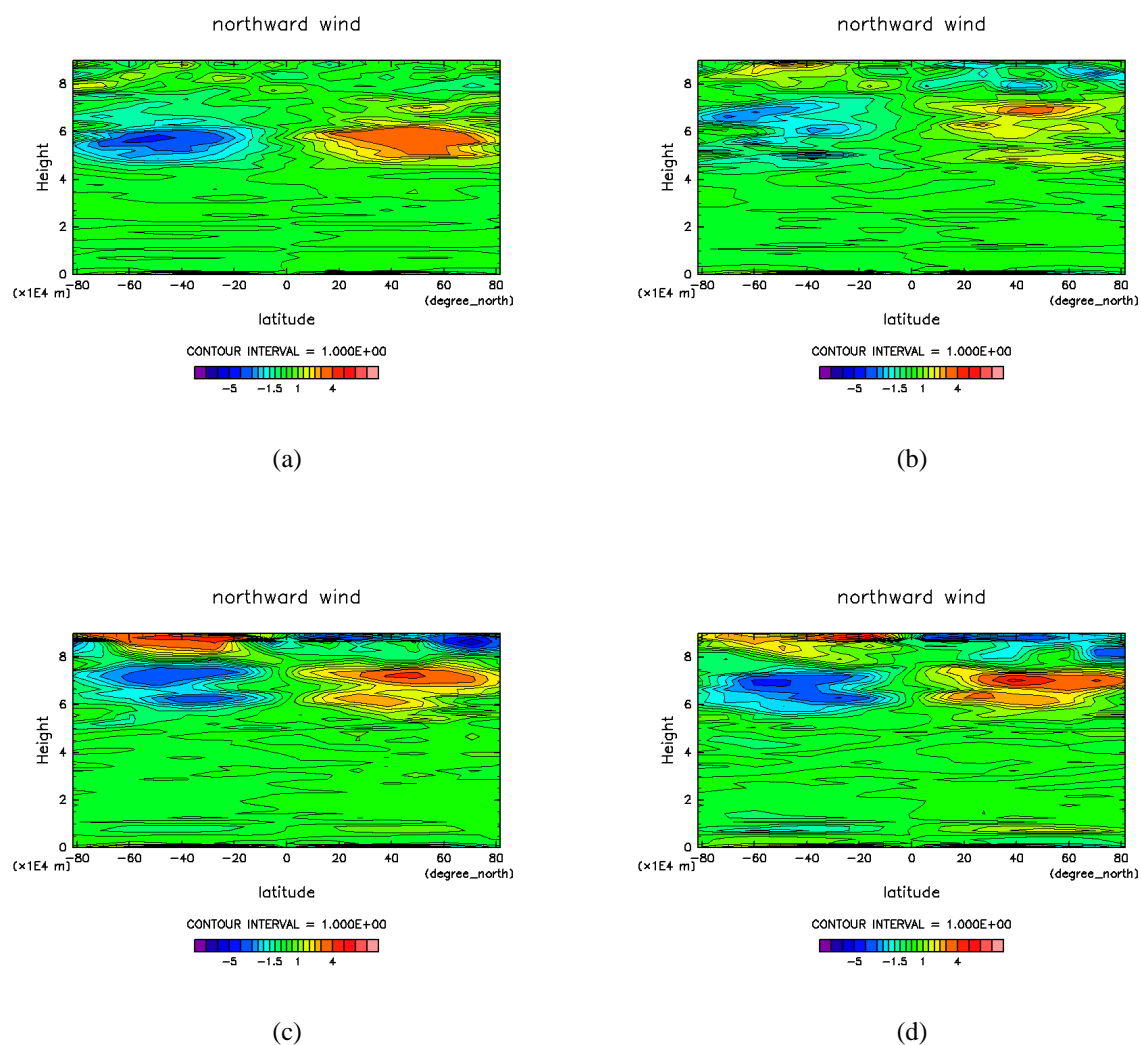


図 3.6: KW2007 の放射平衡温度分布, YT2003 の太陽放射加熱率を用いた実験の南北風分布 (a) 0 ~ 5000 日における時間平均 (b) 5000 ~ 10000 日における時間平均 (c) 30000 ~ 40000 日における時間平均 (d) 60000 ~ 70000 日における時間平均

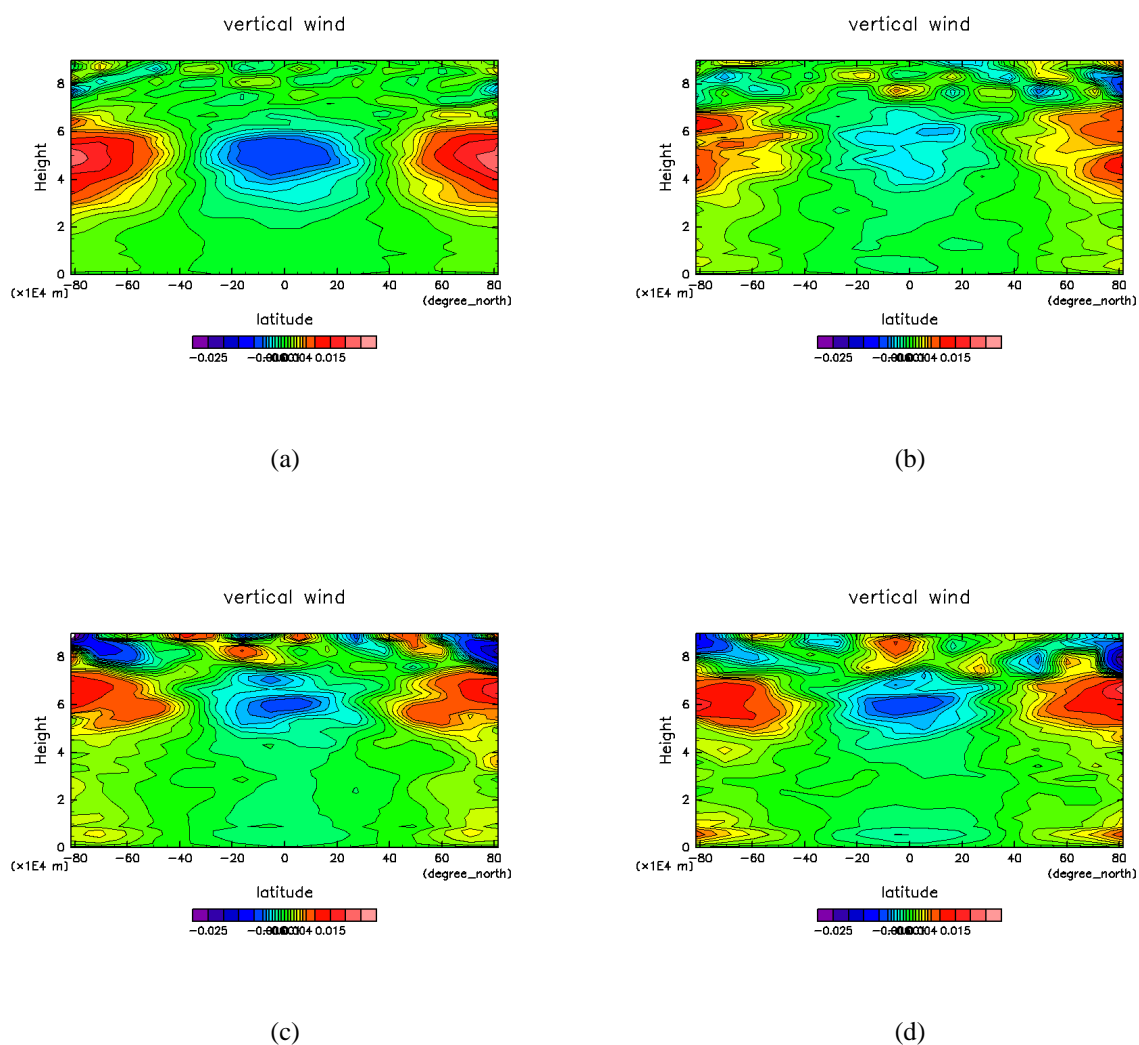


図 3.7: KW2007 の放射平衡温度分布, YT2003 の太陽放射加熱率を用いた実験の鉛直風分布 (a) 0 ~ 5000 日における時間平均 (b) 5000 ~ 10000 日における時間平均 (c) 30000 ~ 40000 日における時間平均 (d) 60000 ~ 70000 日における時間平均

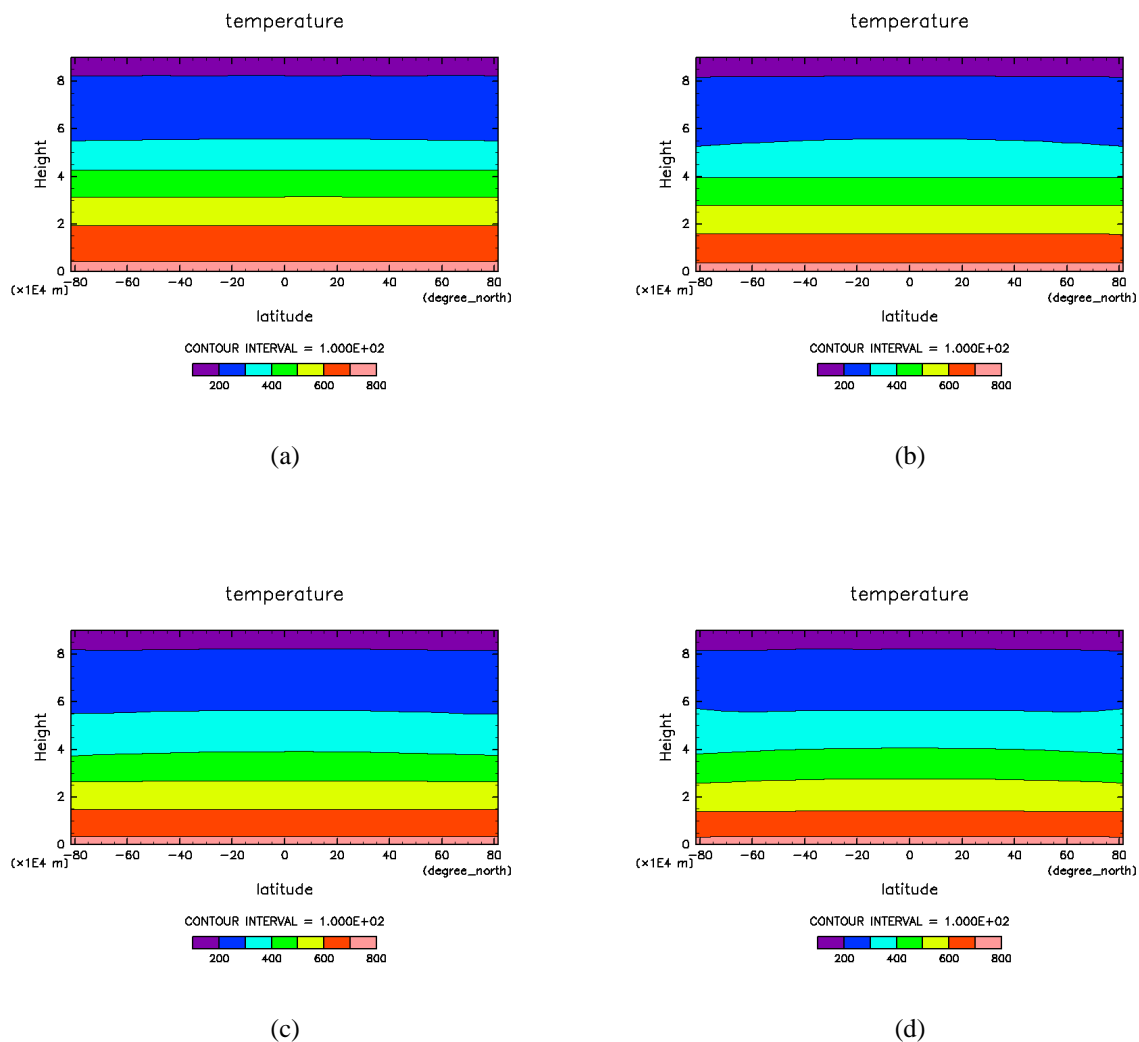


図 3.8: KW2007 の放射平衡温度分布, YT2003 の太陽放射加熱率を用いた実験の温度分布 (a) 0 ~ 5000 日における時間平均 (b) 5000 ~ 10000 日における時間平均 (c) 30000 ~ 40000 日における時間平均 (d) 60000 ~ 70000 日における時間平均

VTEq-HF1987_SHR-YT2003 実験

HF1987 の放射平衡温度分布, YT2003 の太陽放射加熱率を用いた実験における東西風分布, 南北風分布, 鉛直風分布, 温度分布に関してそれぞれ VTEq-YT2003_SHR-YT2003 実験と比較しながら議論する.

まず 図 3.9 東西風に関して記述する. 図 C.9(a) 0 ~ 5000 日, 図 C.9(b) 5000 ~ 10000 日における最大風速, 風速分布に大きな違いはない. 図 C.9(c) 30000 ~ 40000 日においては, 高度 60km 赤道付近に 110m/s 程の最大風速が現れているが, その出現範囲は緯度 -5 ~ 5 度と VTEq-YT2003_SHR-YT2003 実験に比べて狭い. 60000 ~ 70000 日においては, 最大風速は高度 60km, 赤道付近に 100m/s であり VTEq-YT2003_SHR-YT2003 実験と比較してやや小さい.

次に, 図 3.10 南北風に関して記述する. 図 C.10(a) 0 ~ 5000 日, 図 C.10(b) 5000 ~ 10000 日における最大風速, 風速分布に大きな違いはない. 図 C.10(c) 30000 ~ 40000 日, 図 C.10(d) 60000-70000 日においては, 高度 60 ~ 80km における 4 ~ 6m/s の極向きの最大南北風速が, VTEq-YT2003_SHR-YT2003 実験と比べて南北方向に広範囲に現れている. また, 高度 80km 以上の赤道向きの風速は VTEq-YT2003_SHR-YT2003 実験と比べて若干弱い.

次に, 図 3.11 南北風に関して記述する. 図 C.11(a) 0 ~ 5000 日, 図 C.11(b) 5000 ~ 10000 日における最大風速, 風速分布に大きな違いはない. 図 C.11(c) 30000 ~ 40000 日, 図 C.10(d) 60000-70000 日においては, 高度 80km 以上における極付近の下降流が 0.025m/s と VTEq-YT2003_SHR-YT2003 実験と比較してやや大きい. 南北風分布と鉛直風分布を併せて見た時, 定常状態においては, 高度 80km 以上におけるハドレー循環は, VTEq-YT2003_SHR-YT2003 実験と比較して強いと思われる.

最後に, 図 3.12 南北風に関して記述する. 大きな時間変化はなく, 下層における分布は VTEq-YT2003_SHR-YT2003 実験と大きな違いはない. しかし, 高度 75km より高い場所においては, VTEq-YT2003_SHR-YT2003 実験よりやや温度が高い.

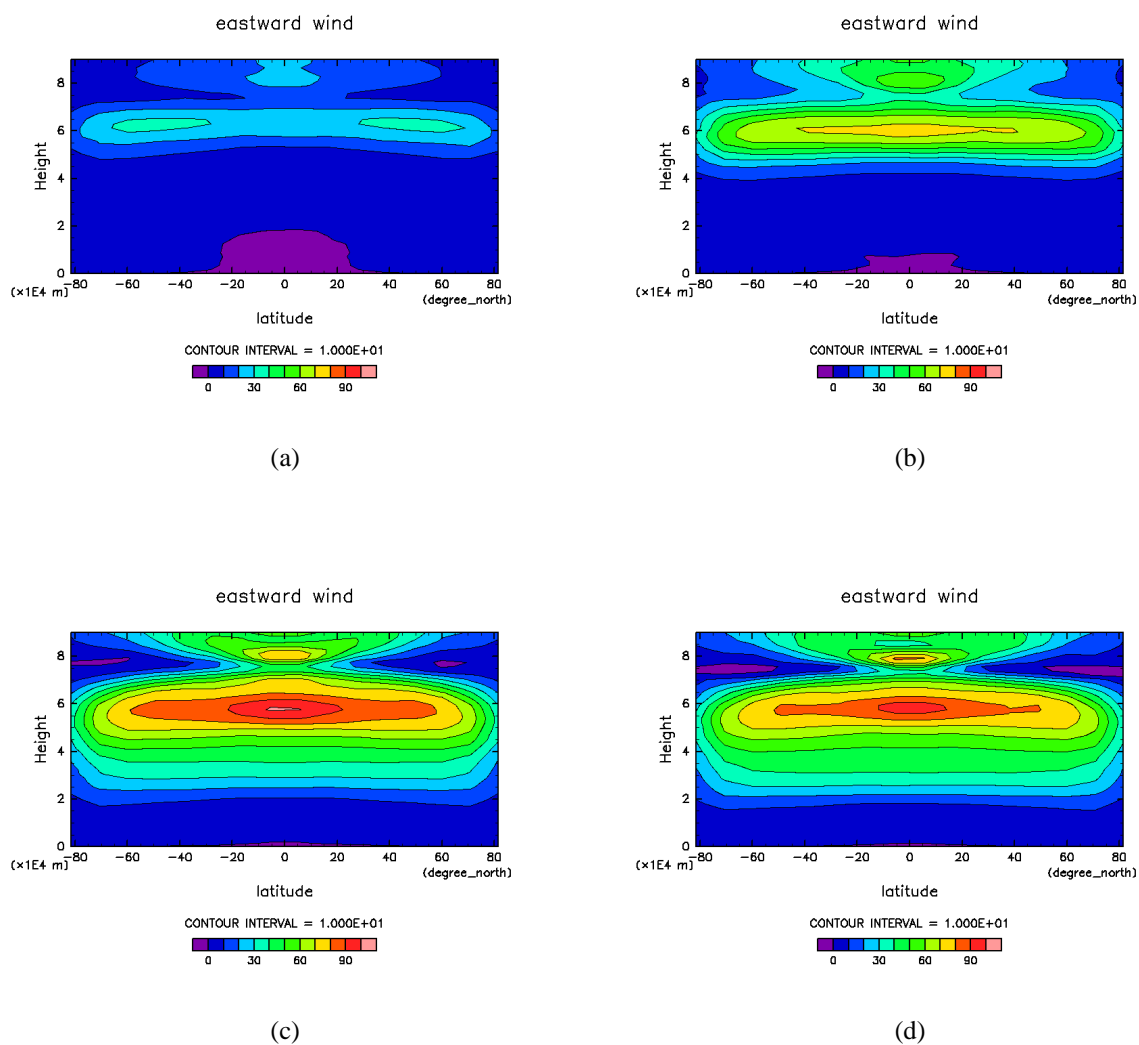


図 3.9: HF1987 の放射平衡温度分布, YT2003 の太陽放射加熱率を用いた実験の東西風分布 (a) 0 ~ 5000 日における時間平均 (b) 5000 ~ 10000 日における時間平均 (c) 30000 ~ 40000 日における時間平均 (d) 60000 ~ 70000 日における時間平均

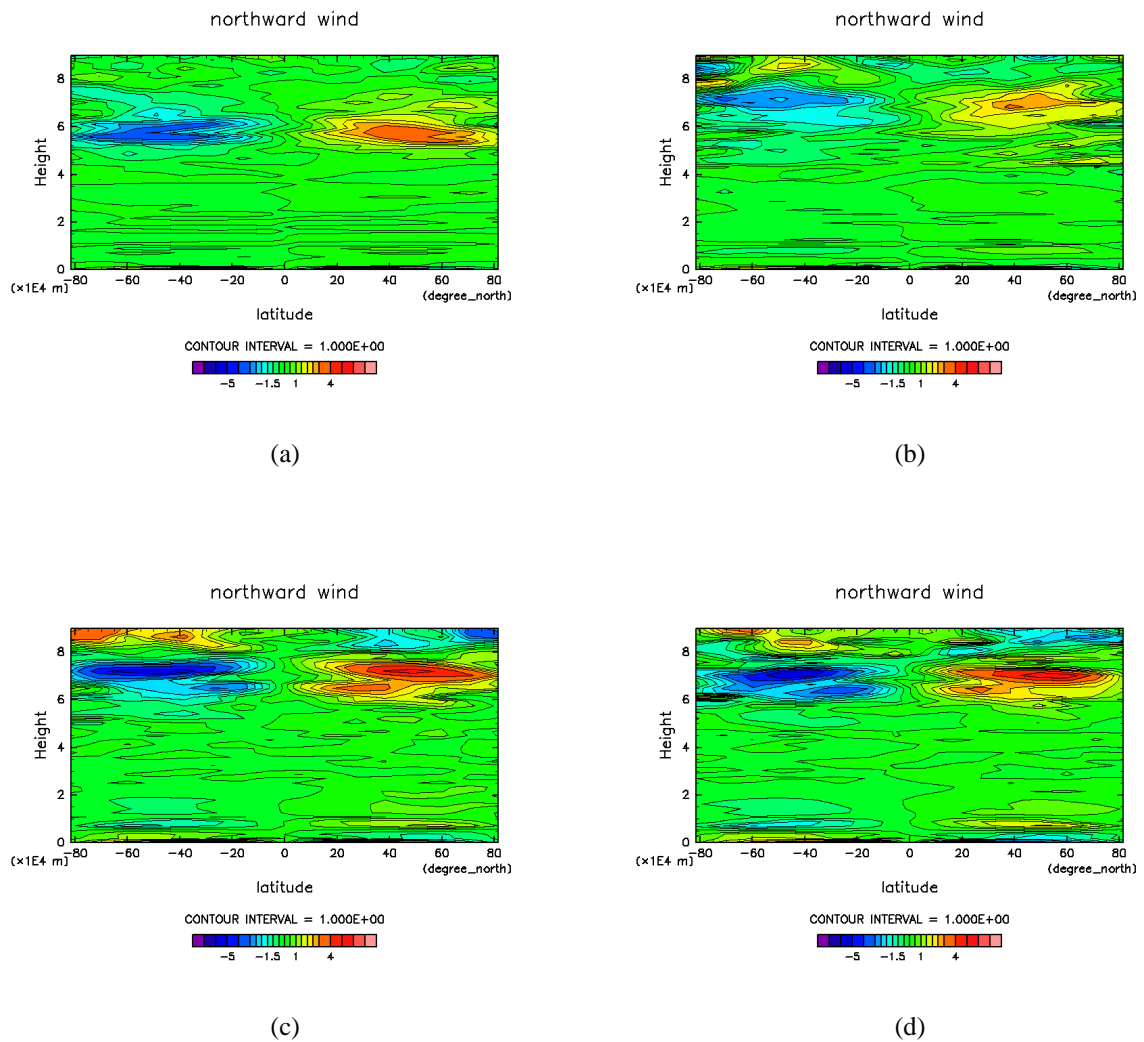


図 3.10: HF1987 の放射平衡温度分布, YT2003 の太陽放射加熱率を用いた実験の南北風分布 (a) 0 ~ 5000 日における時間平均 (b) 5000 ~ 10000 日における時間平均 (c) 30000 ~ 40000 日における時間平均 (d) 60000 ~ 70000 日における時間平均

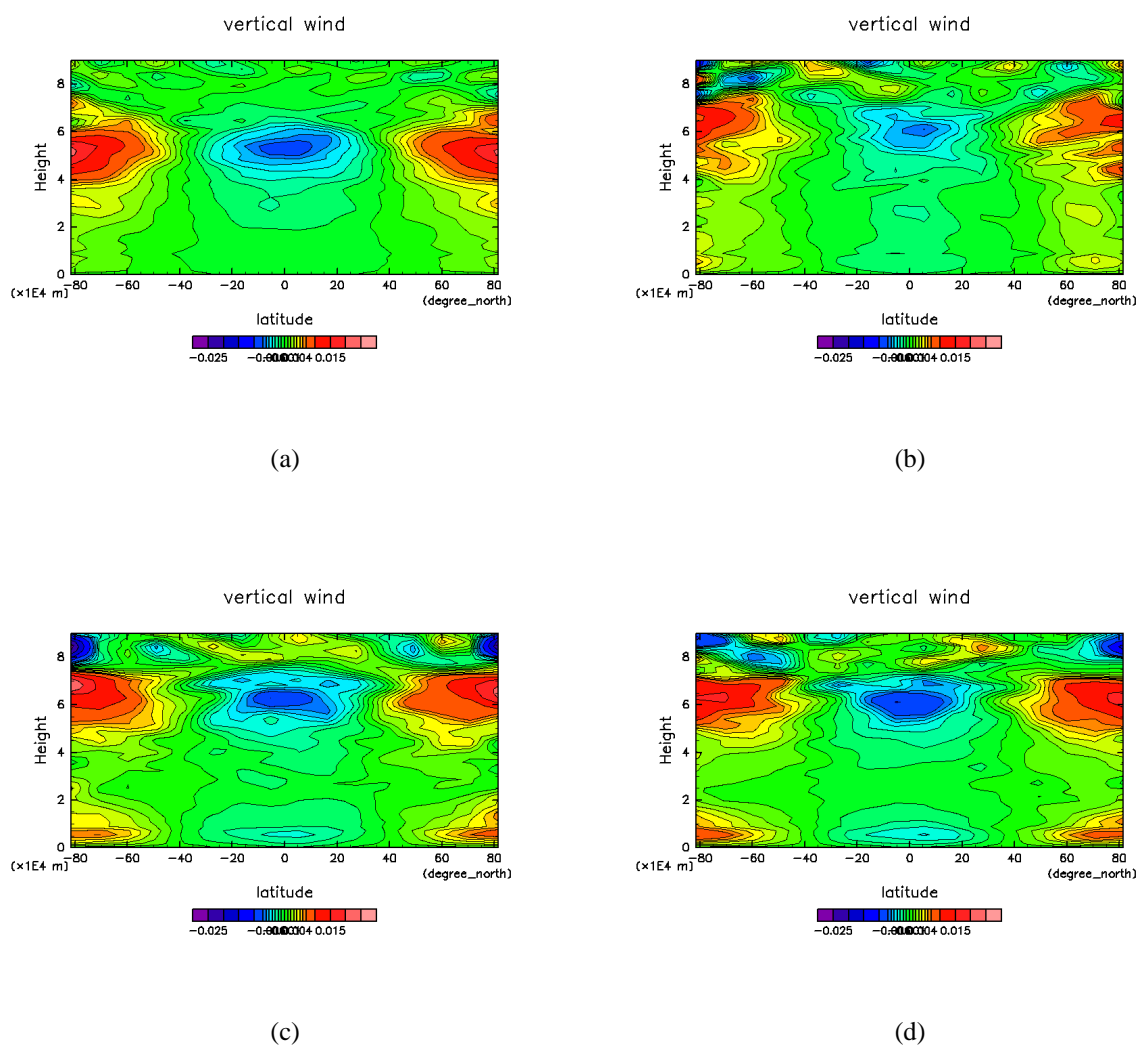


図 3.11: HF1987 の放射平衡温度分布, YT2003 の太陽放射加熱率を用いた実験の鉛直風分布 (a) 0 ~ 5000 日における時間平均 (b) 5000 ~ 10000 日における時間平均 (c) 30000 ~ 40000 日における時間平均 (d) 60000 ~ 70000 日における時間平均

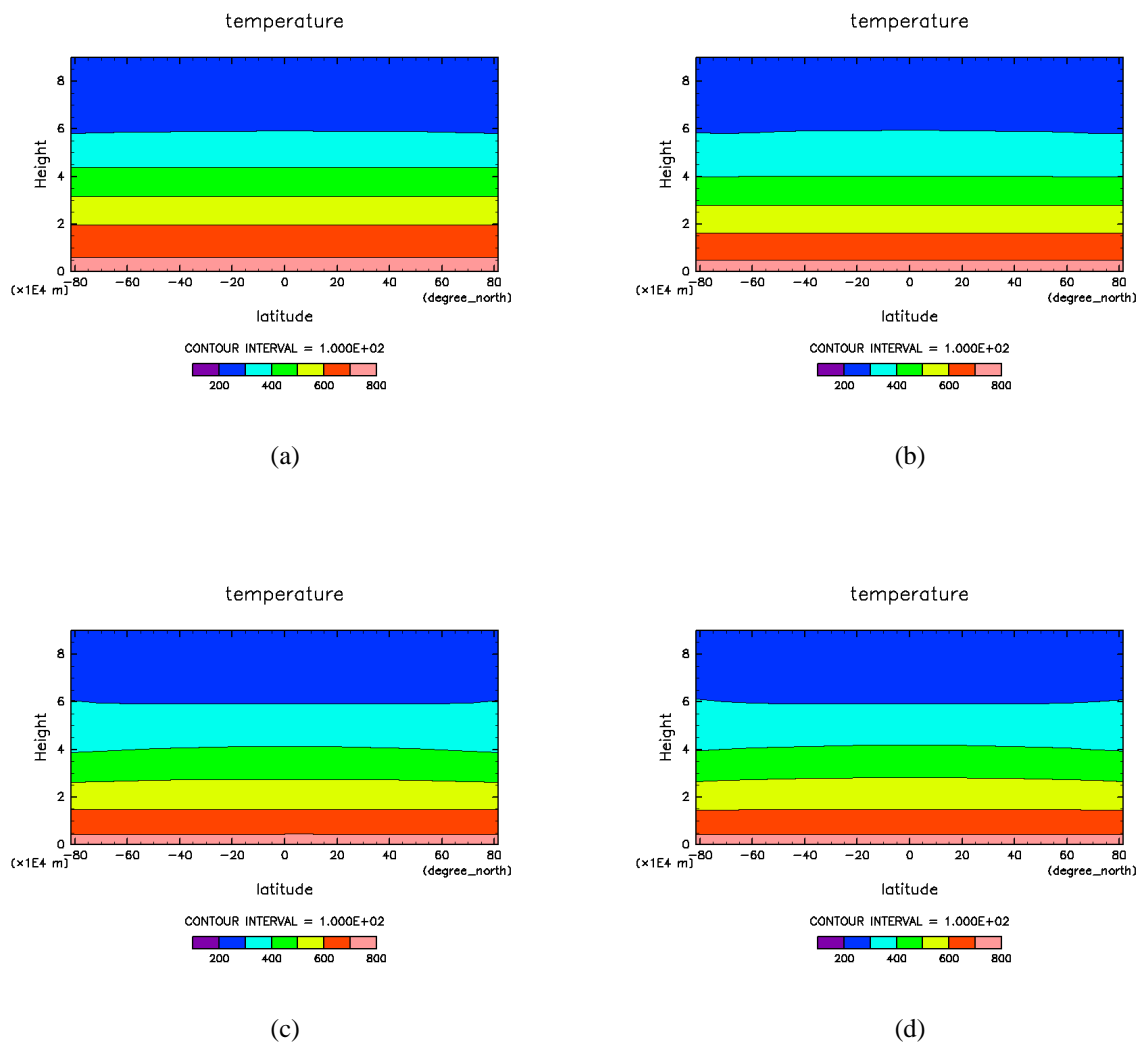


図 3.12: HF1987 の放射平衡温度分布, YT2003 の太陽放射加熱率を用いた実験の温度分布 (a) 0 ~ 5000 日における時間平均 (b) 5000 ~ 10000 日における時間平均 (c) 30000 ~ 40000 日における時間平均 (d) 60000 ~ 70000 日における時間平均

VTEq-YT2003_SHR-KW2007 実験

YT2003 の放射平衡温度分布, KW2007 の太陽放射加熱率を用いた実験における東西風分布, 南北風分布, 鉛直風分布, 温度分布に関して VTEq-YT2003_SHR-YT2003 実験と比較しながらそれぞれ議論する.

まず 図 3.13 東西風に関して記述する. 図 C.13(a) 0 ~ 5000 日においては, 高度 60 ~ 80km に 20 ~ 30m/s の東風が吹いている. 同時刻における VTEq-YT2003_SHR-YT2003 実験と比較した時, 高度は 20km 程高い位置に, 最大風速は 10m/s 程遅い東風が現れている. その後の最大風速の発展の仕方についても VTEq-YT2003_SHR-YT2003 実験と比べ弱く, 定常状態における最大風速は 40 ~ 50m/s 程度である. また, 最大風速が現れる緯度についても, VTEq-YT2003_SHR-YT2003 実験と異なり, 極付近である.

次に 図 3.14 南北風に関して記述する. 0 ~ 5000 日においては, VTEq-YT2003_SHR-YT2003 実験と比べて 10km 程高い高度 60 ~ 70km に 4 ~ 5m/s の極向きの風が吹いている. その後, VTEq-YT2003_SHR-YT2003 実験とは異なり, 南北風は位置を変えずに徐々に弱まっている. 定常状態に達した 30000 ~ 40000 日, 60000 ~ 70000 日には, 高度 60 ~ 70km 付近に 3 ~ 4m/s の極向きの風が向いている.

次に 図 3.15 鉛直風に関して記述する. 0 ~ 5000 日においては, 高度 55 ~ 65km の中緯度から極付近で 0.015 ~ 0.025m/s 程の上昇流, 赤道付近で 0.005 ~ 0.010m/s の下降流が現れている. VTEq-YT2003_SHR-YT2003 実験と比較して, 本実験の鉛直風は鉛直方向に狭い範囲に現れている. その後, 徐々に高度が上がり, 最大風速も大きくなっている VTEq-YT2003_SHR-YT2003 実験の鉛直風とは異なり, 本実験の鉛直風は位置を変えずに徐々に弱まっている.

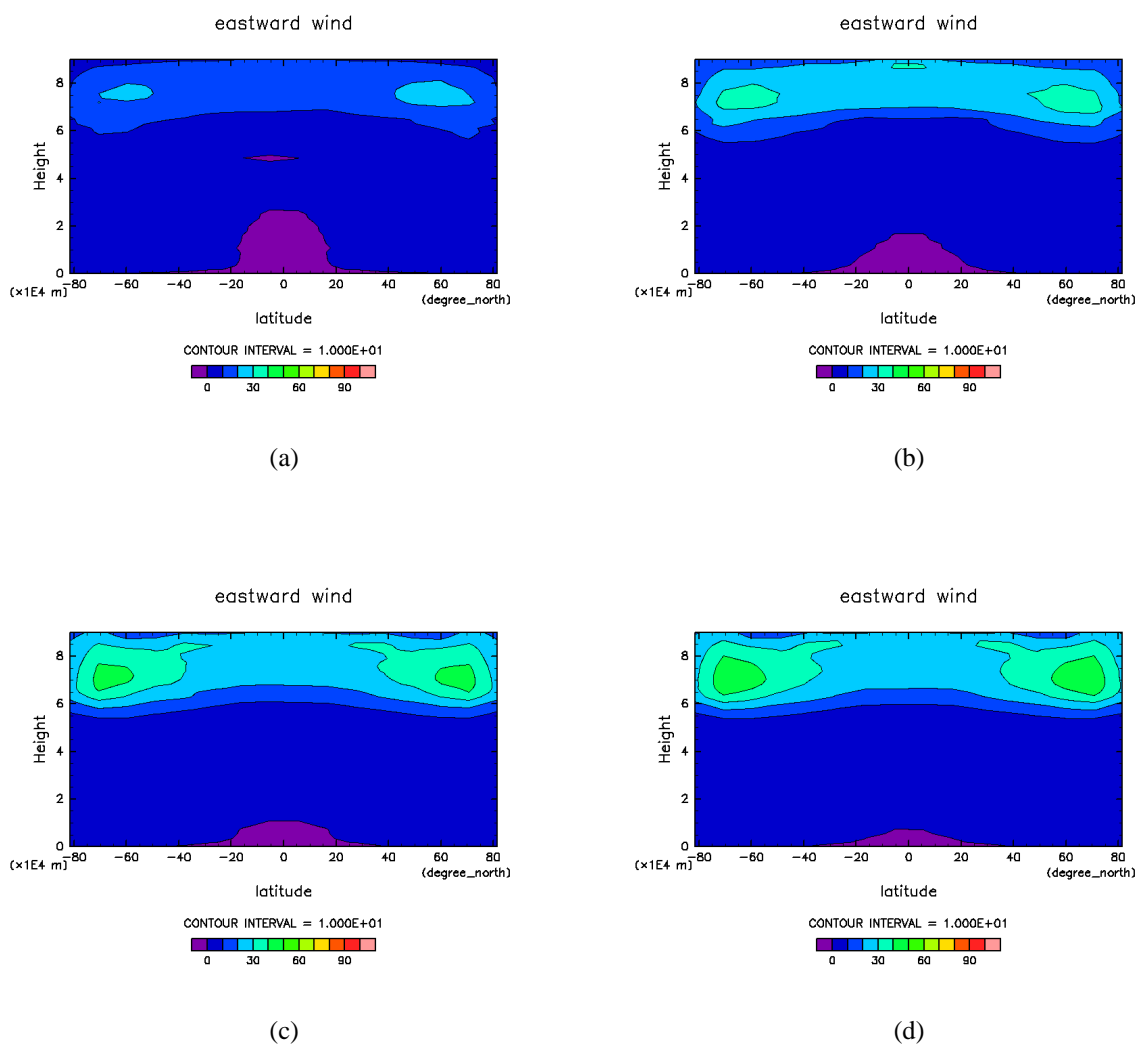


図 3.13: YT2003 の放射平衡温度分布, KW2007 の太陽放射加熱率を用いた実験の東西風分布 (a) 0 ~ 5000 日における時間平均 (b) 5000 ~ 10000 日における時間平均 (c) 30000 ~ 40000 日における時間平均 (d) 60000 ~ 70000 日における時間平均

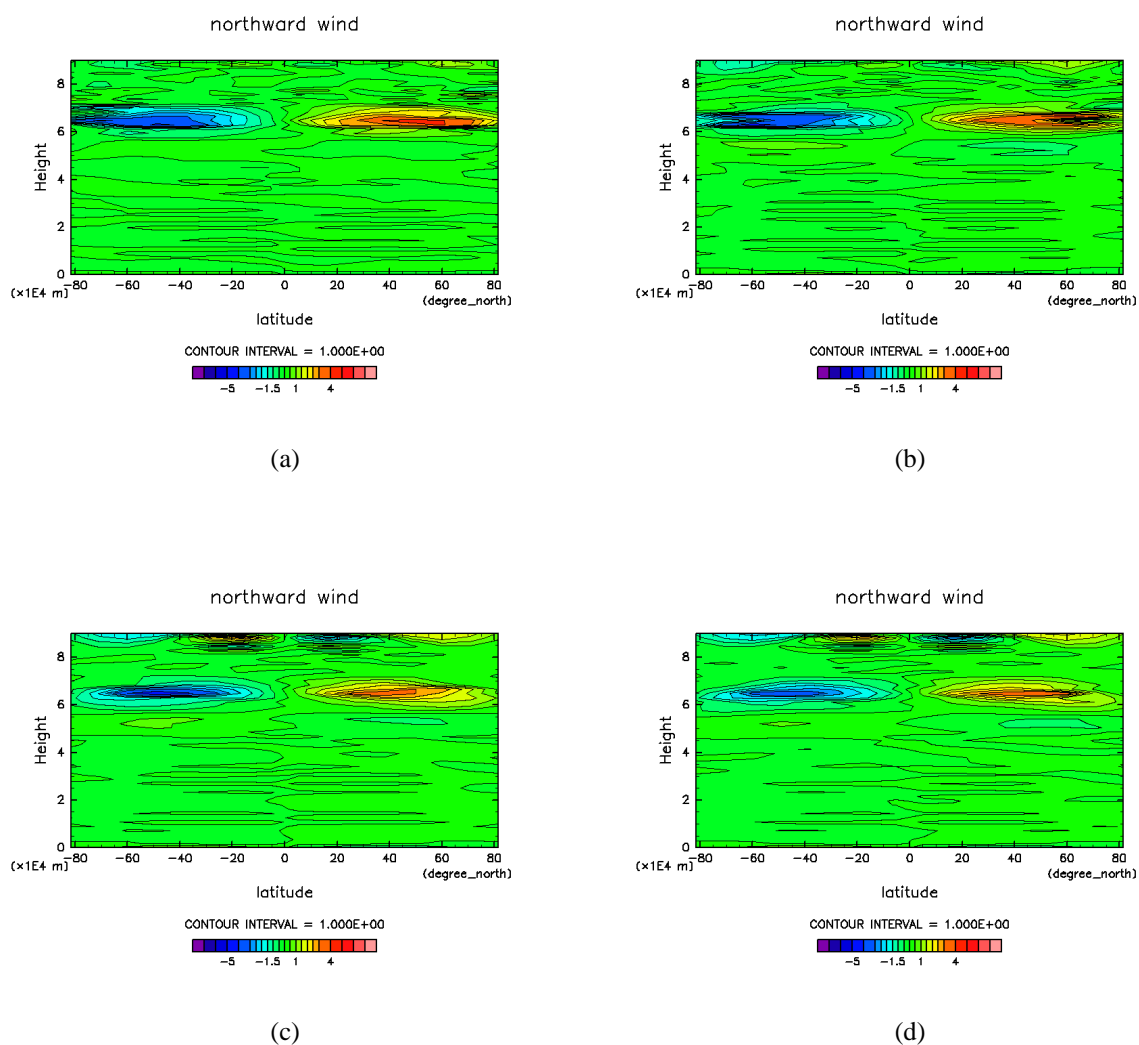


図 3.14: YT2003 の放射平衡温度分布, KW2007 の太陽放射加熱率を用いた実験の南北風分布 (a) 0 ~ 5000 日における時間平均 (b) 5000 ~ 10000 日における時間平均 (c) 30000 ~ 40000 日における時間平均 (d) 60000 ~ 70000 日における時間平均

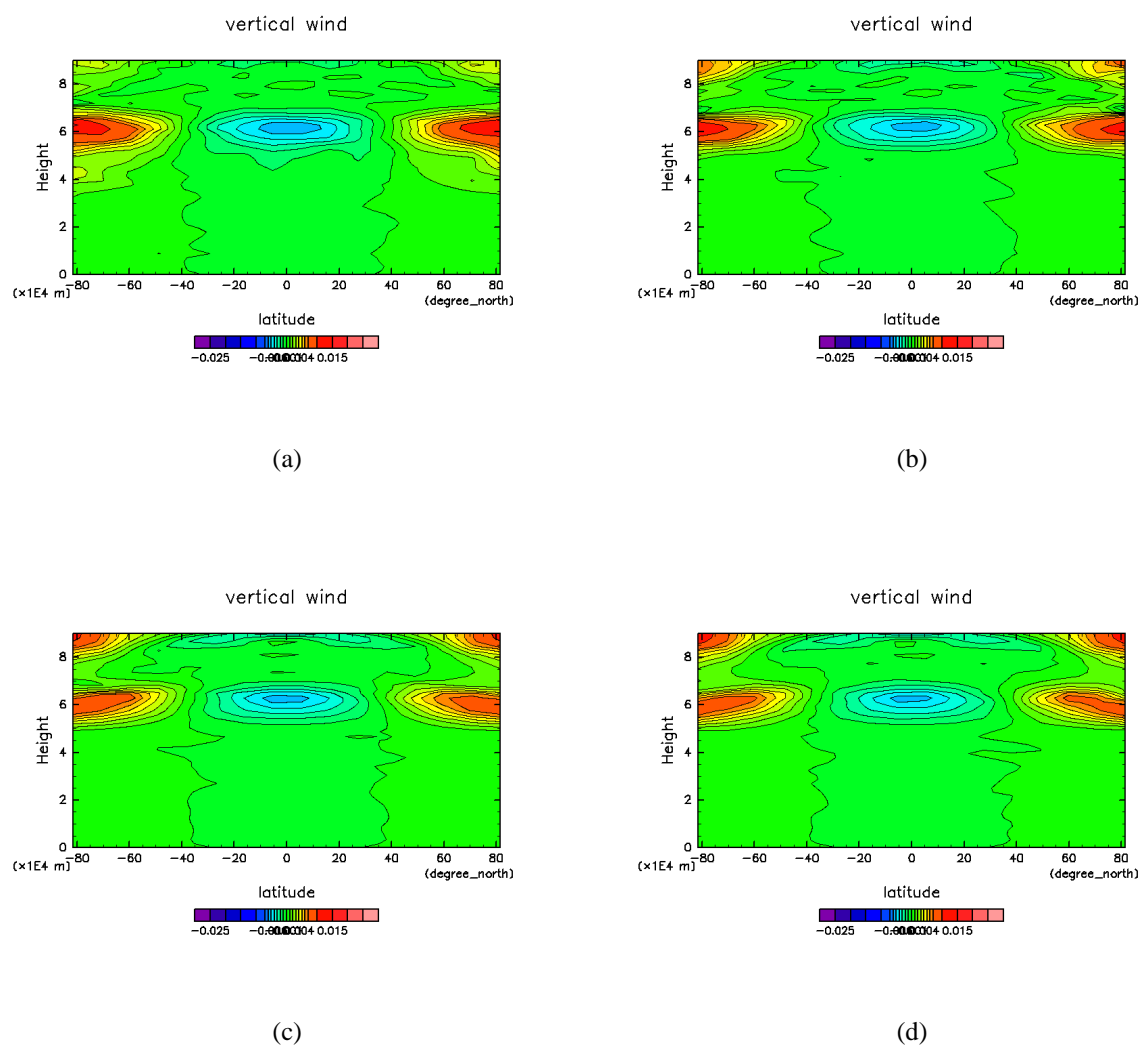


図 3.15: YT2003 の放射平衡温度分布, KW2007 の太陽放射加熱率を用いた実験の鉛直風分布 (a) 0 ~ 5000 日における時間平均 (b) 5000 ~ 10000 日における時間平均 (c) 30000 ~ 40000 日における時間平均 (d) 60000 ~ 70000 日における時間平均

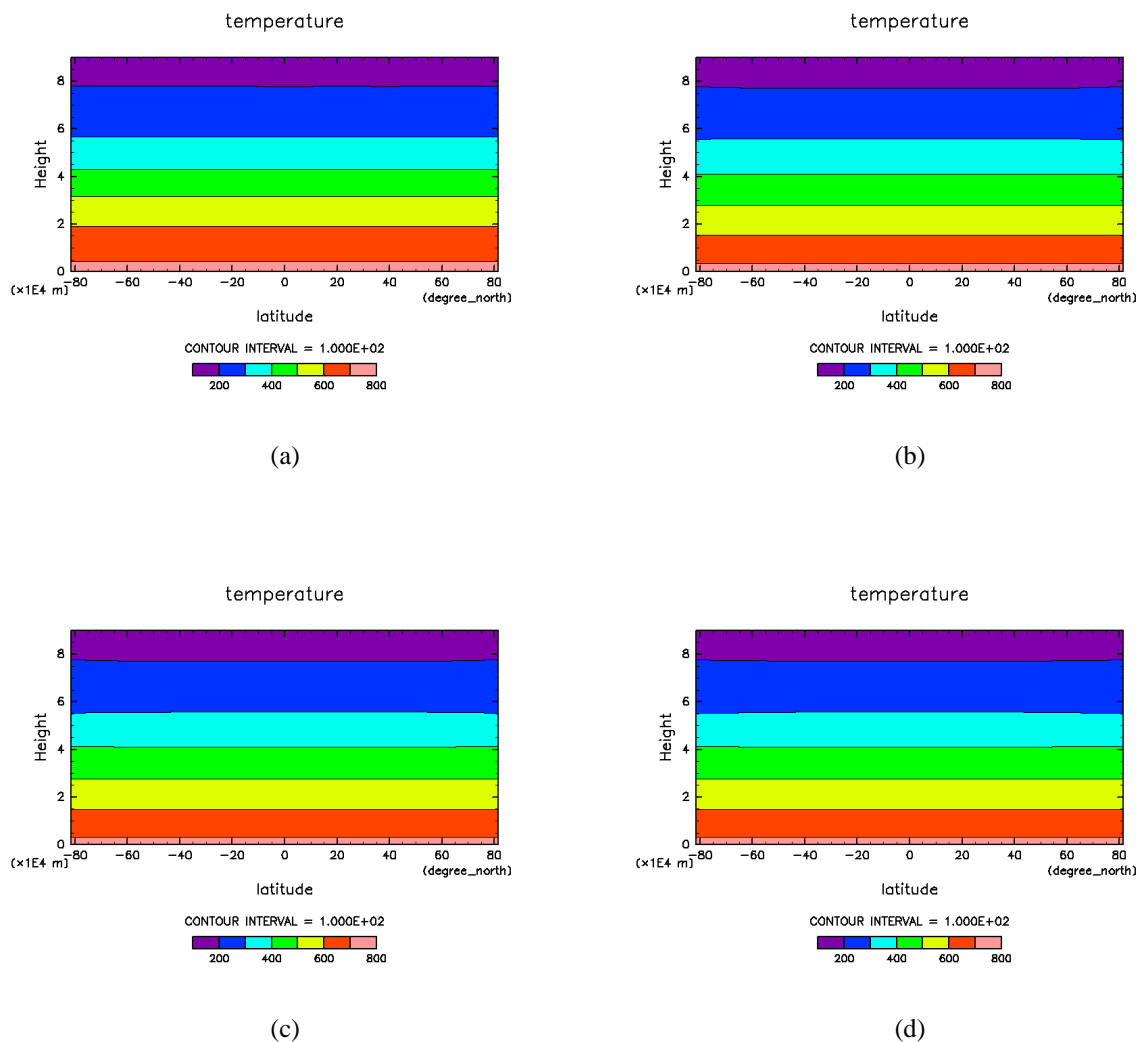


図 3.16: YT2003 の放射平衡温度分布, KW2007 の太陽放射加熱率を用いた実験の温度分布 (a) 0 ~ 5000 日における時間平均 (b) 5000 ~ 10000 日における時間平均 (c) 30000 ~ 40000 日における時間平均 (d) 60000 ~ 70000 日における時間平均

VTEq-KW2007_SHR-KW2007 実験

YT2003 の放射平衡温度分布, KW2007 の太陽放射加熱率を用いた実験における東西風分布, 南北風分布, 鉛直風分布, 温度分布に関して VTEq-KW2007_SHR-YT2003 実験と比較しながらそれぞれ議論する.

図 C 東西風に関して, 図 C.17(a) 0 ~ 5000 日, 図 C.17(b) 5000 ~ 10000 日においては, VTEq-KW2007_SHR-YT2003 実験と大きな違いはない. 定常状態となった図 C.17(c) 30000 ~ 40000 日, 図 C.17(d) 60000 ~ 70000 日では, 40 ~ 50m/s の東西風速が現れている領域が, 高度 60 ~ 80km, 緯度 80 ~ 50 度と VTEq-KW2007_SHR-YT2003 実験と比較してやや狭い.

図 3.18 南北風に関して, 図 C.18(a) 0 ~ 5000 日, 図 C.18(b) 5000 ~ 10000 日においては, VTEq-KW2007_SHR-YT2003 実験と大きな違いはない. 定常状態となった図 C.18(c) 30000 ~ 40000 日, 図 C.18(d) 60000 ~ 70000 日では, 最大南北風速がそれぞれ 2.5 ~ 3m/s と VTEq-KW2007_SHR-YT2003 実験と比較してやや小さい.

図 3.19 鉛直風に関して, VTEq-KW2007_SHR-YT2003 実験と比較して特に特筆すべき事はない.

図 3.20 温度分布に関して, 時間変化はほとんどしていない. 高度 80km 付近における温度分布が, VTEq-KW2007_SHR-YT2003 実験と比較してやや高めである.

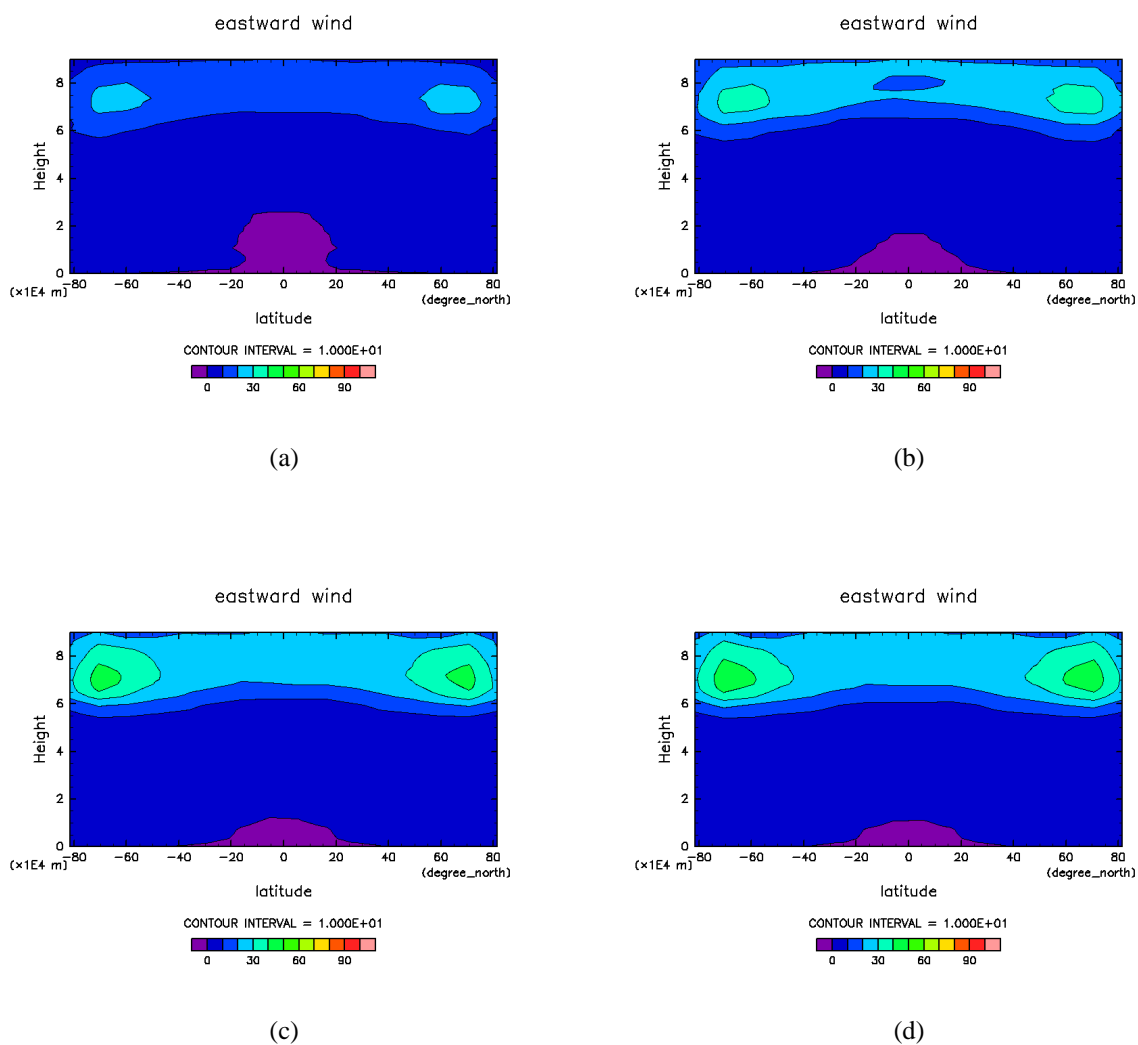


図 3.17: KW2007 の放射平衡温度分布, KW2007 の太陽放射加熱率を用いた実験の東西風分布 (a) 0 ~ 5000 日における時間平均 (b) 5000 ~ 10000 日における時間平均 (c) 30000 ~ 40000 日における時間平均 (d) 60000 ~ 70000 日における時間平均

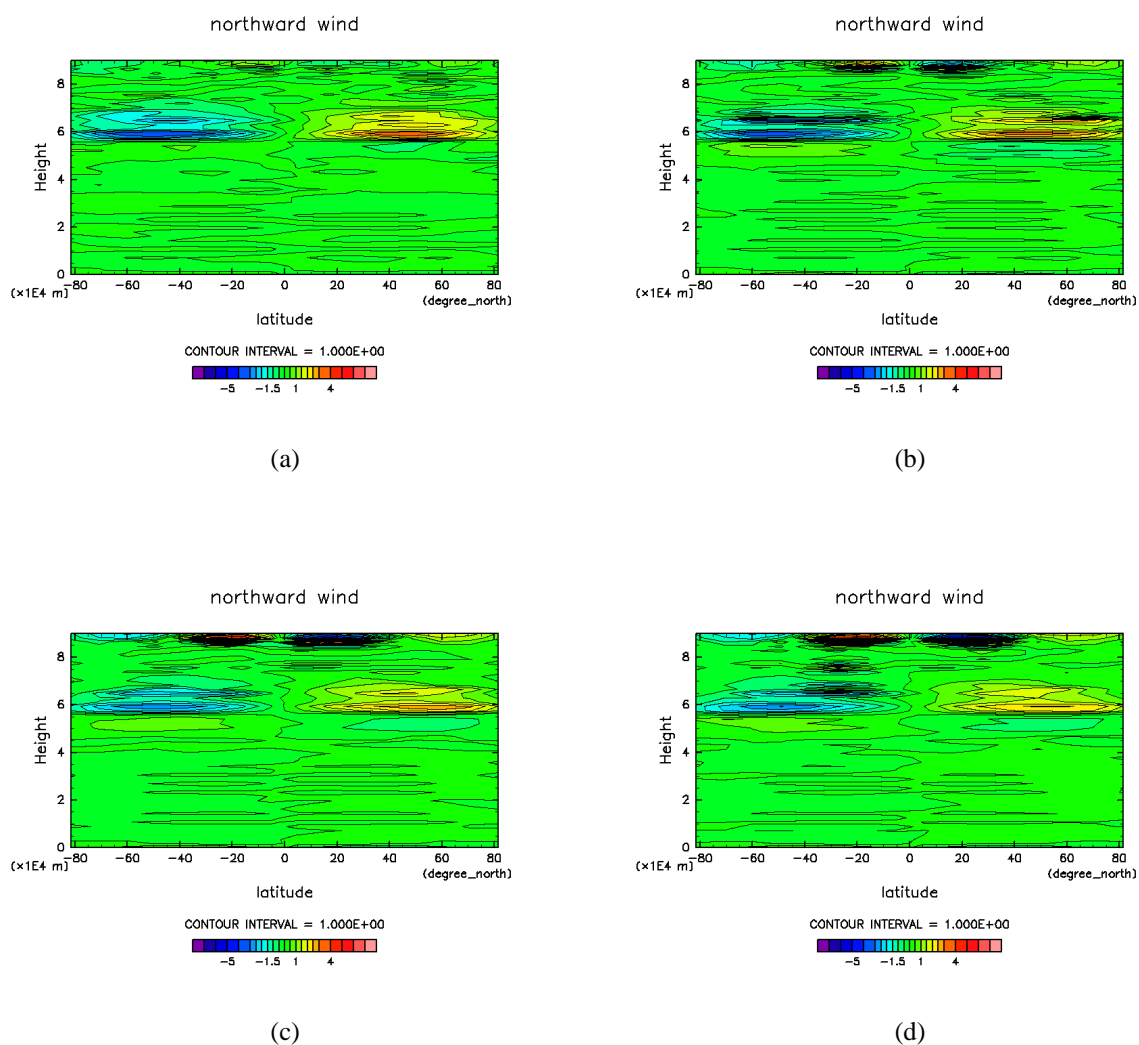


図 3.18: KW2007 の放射平衡温度分布, KW2007 の太陽放射加熱率を用いた実験の南北風分布 (a) 0 ~ 5000 日における時間平均 (b) 5000 ~ 10000 日における時間平均 (c) 30000 ~ 40000 日における時間平均 (d) 60000 ~ 70000 日における時間平均

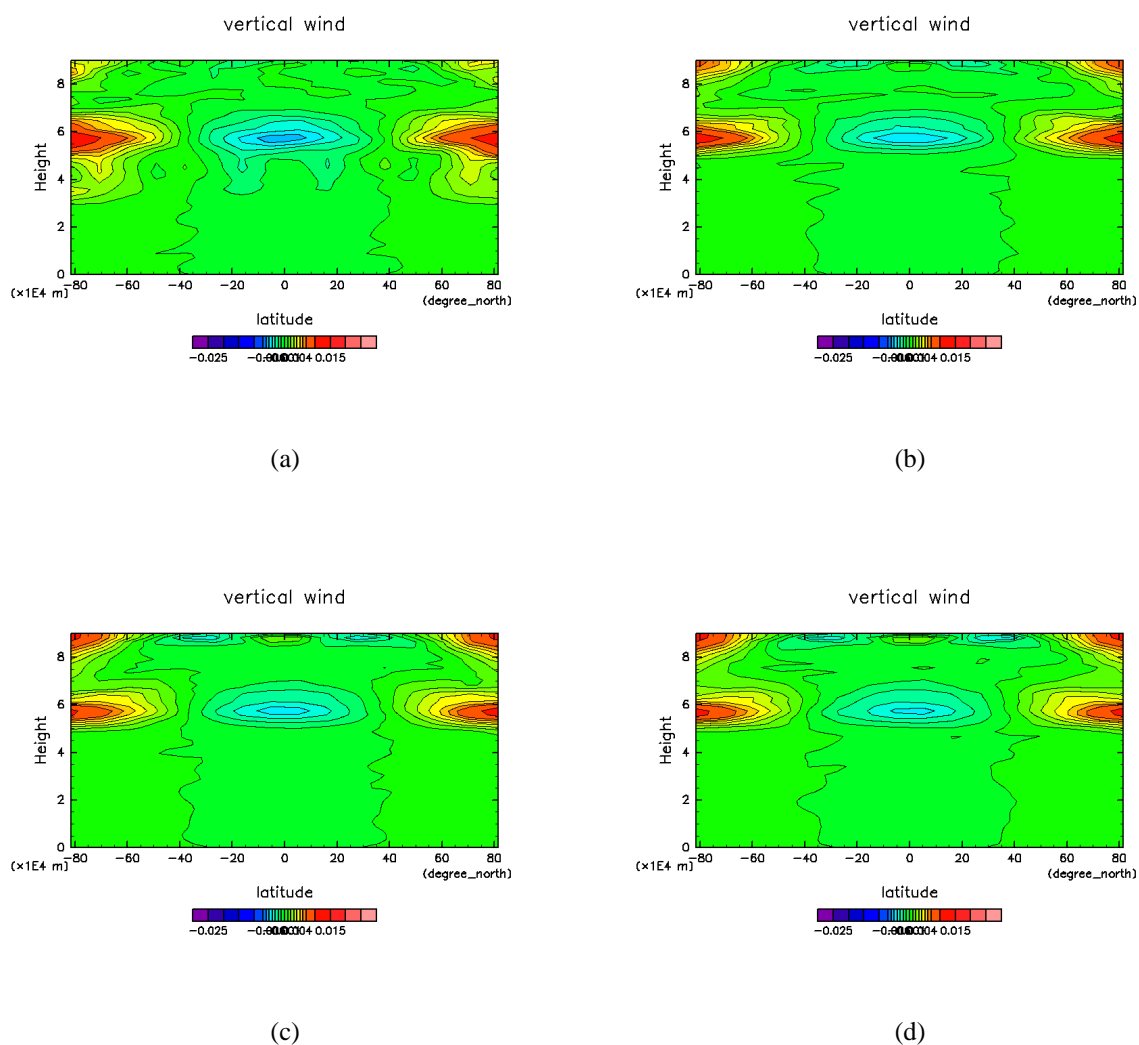


図 3.19: KW2007 の放射平衡温度分布, KW2007 の太陽放射加熱率を用いた実験の鉛直風分布 (a) 0 ~ 5000 日における時間平均 (b) 5000 ~ 10000 日における時間平均 (c) 30000 ~ 40000 日における時間平均 (d) 60000 ~ 70000 日における時間平均

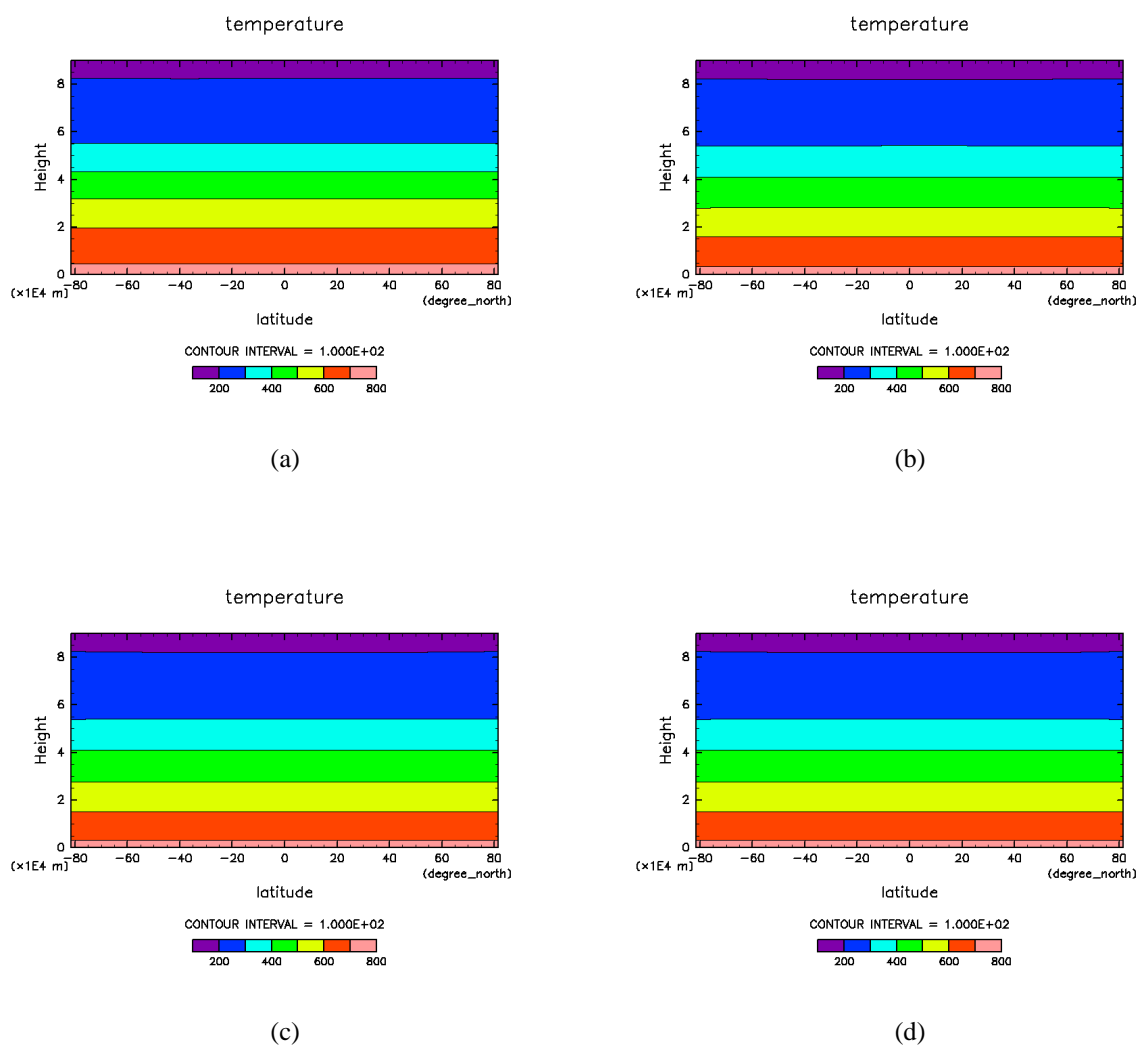


図 3.20: KW2007 の放射平衡温度分布, KW2007 の太陽放射加熱率を用いた実験の温度分布 (a) 0 ~ 5000 日における時間平均 (b) 5000 ~ 10000 日における時間平均 (c) 30000 ~ 40000 日における時間平均 (d) 60000 ~ 70000 日における時間平均

VTEq-HF1987_SHR-KW2007 実験

YT2003 の放射平衡温度分布, KW2007 の太陽放射加熱率を用いた実験における東西風分布, 南北風分布, 鉛直風分布, 温度分布に関して VTEq-KW2007_SHR-YT2003 実験と比較しながらそれぞれ議論する.

図 3.21 東西風に関して, 0 ~ 5000 日, 5000 ~ 10000 日においては, VTEq-KW2007_SHR-YT2003 実験と比較して大きな違いはない. 定常状態となった 30000 ~ 40000 日, 60000 ~ 70000 日においては, 赤道付近, 高度 65 ~ 75km で南北風速 20 ~ 30m/s と周囲よりやや遅めの風速分布となっている点が, VTEq-KW2007_SHR-YT2003 実験と比較して異なっている.

図 3.22 南北風に関して, どの時刻においても, 55 ~ 65km では VTEq-KW2007_SHR-YT2003 実験と比較して南北風速分布はほぼ変わらないが, 高度 80km 以上における赤道方向の南北風が本実験では分布していない. この点が, VTEq-KW2007_SHR-YT2003 実験と比較して異なっている.

図 3.23 鉛直風に関して, VTEq-KW2007_SHR-YT2003 実験と比較して特に特筆すべき事はない.

図 3.24 東西風に関して, 時間変化はほとんどしていない. 高度 80km 付近における温度分布が, VTEq-KW2007_SHR-YT2003 実験と比較してやや高めである.

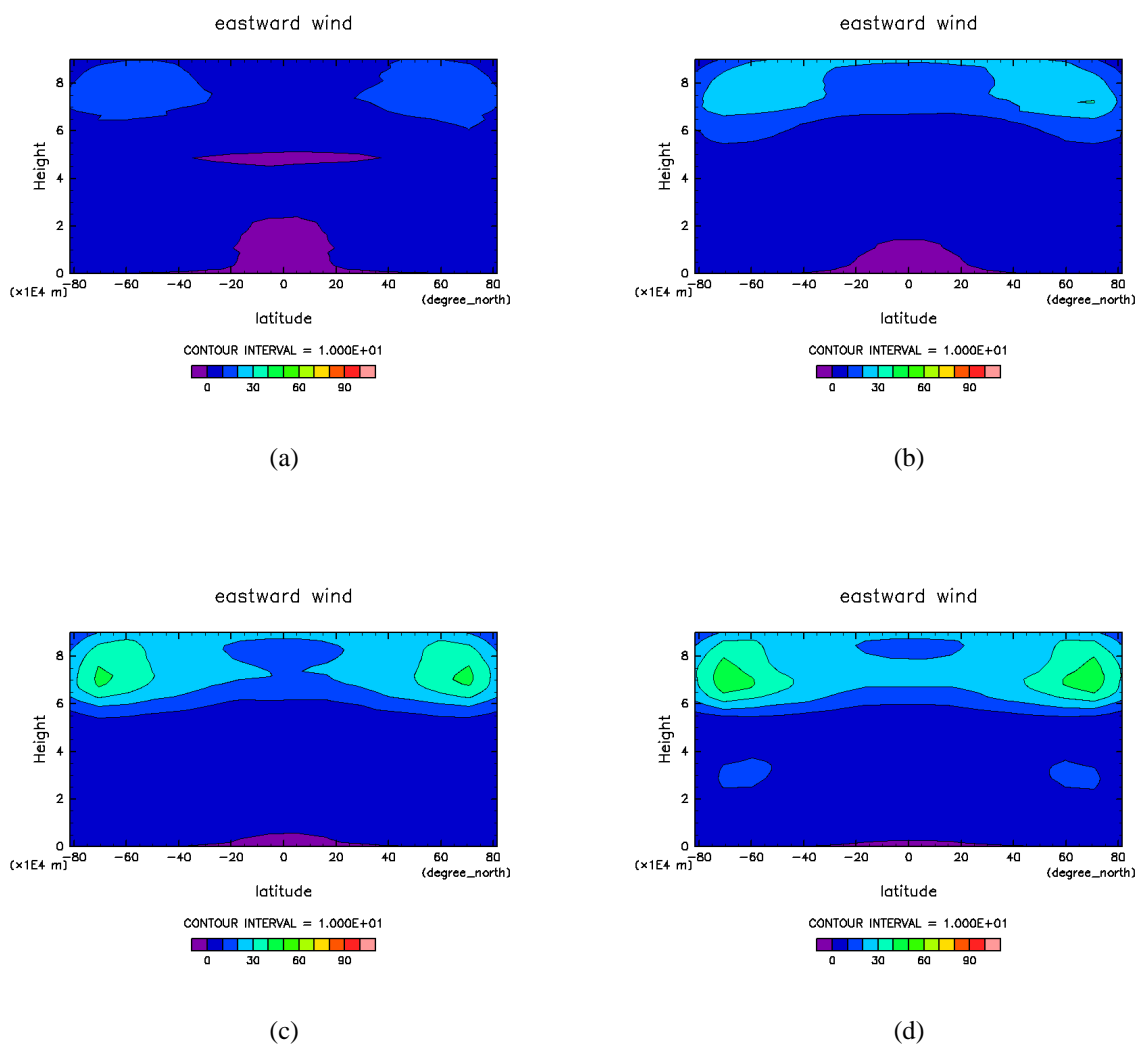


図 3.21: HF1987 の放射平衡温度分布, KW2007 の太陽放射加熱率を用いた実験の東西風分布 (a) 0 ~ 5000 日における時間平均 (b) 5000 ~ 10000 日における時間平均 (c) 30000 ~ 40000 日における時間平均 (d) 60000 ~ 70000 日における時間平均

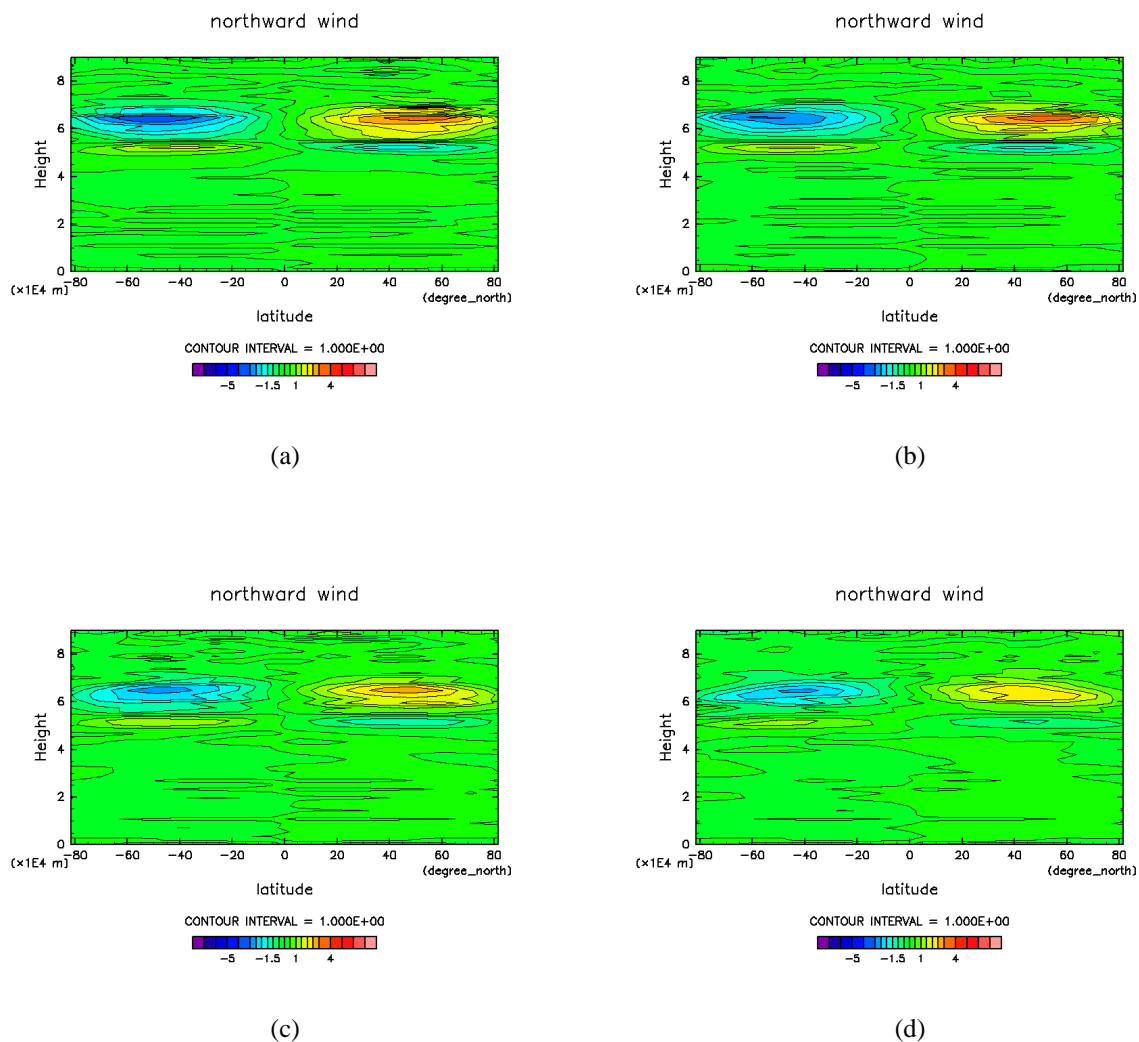


図 3.22: HF1987 の放射平衡温度分布, KW2007 の太陽放射加熱率を用いた実験の南北風分布 (a) 0 ~ 5000 日における時間平均 (b) 5000 ~ 10000 日における時間平均 (c) 30000 ~ 40000 日における時間平均 (d) 60000 ~ 70000 日における時間平均

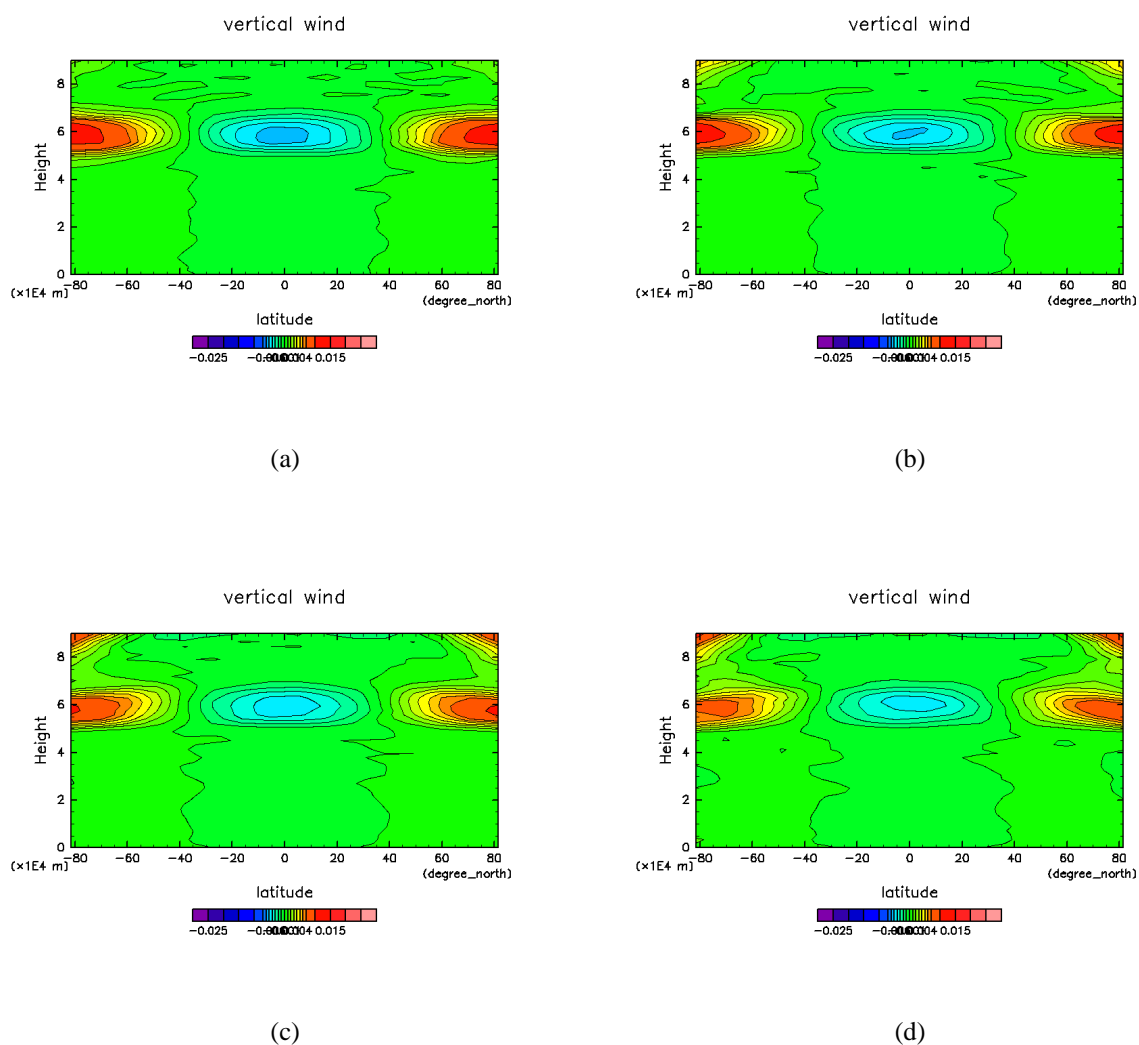


図 3.23: HF1987 の放射平衡温度分布, KW2007 の太陽放射加熱率を用いた実験の鉛直風分布 (a) 0 ~ 5000 日における時間平均 (b) 5000 ~ 10000 日における時間平均 (c) 30000 ~ 40000 日における時間平均 (d) 60000 ~ 70000 日における時間平均

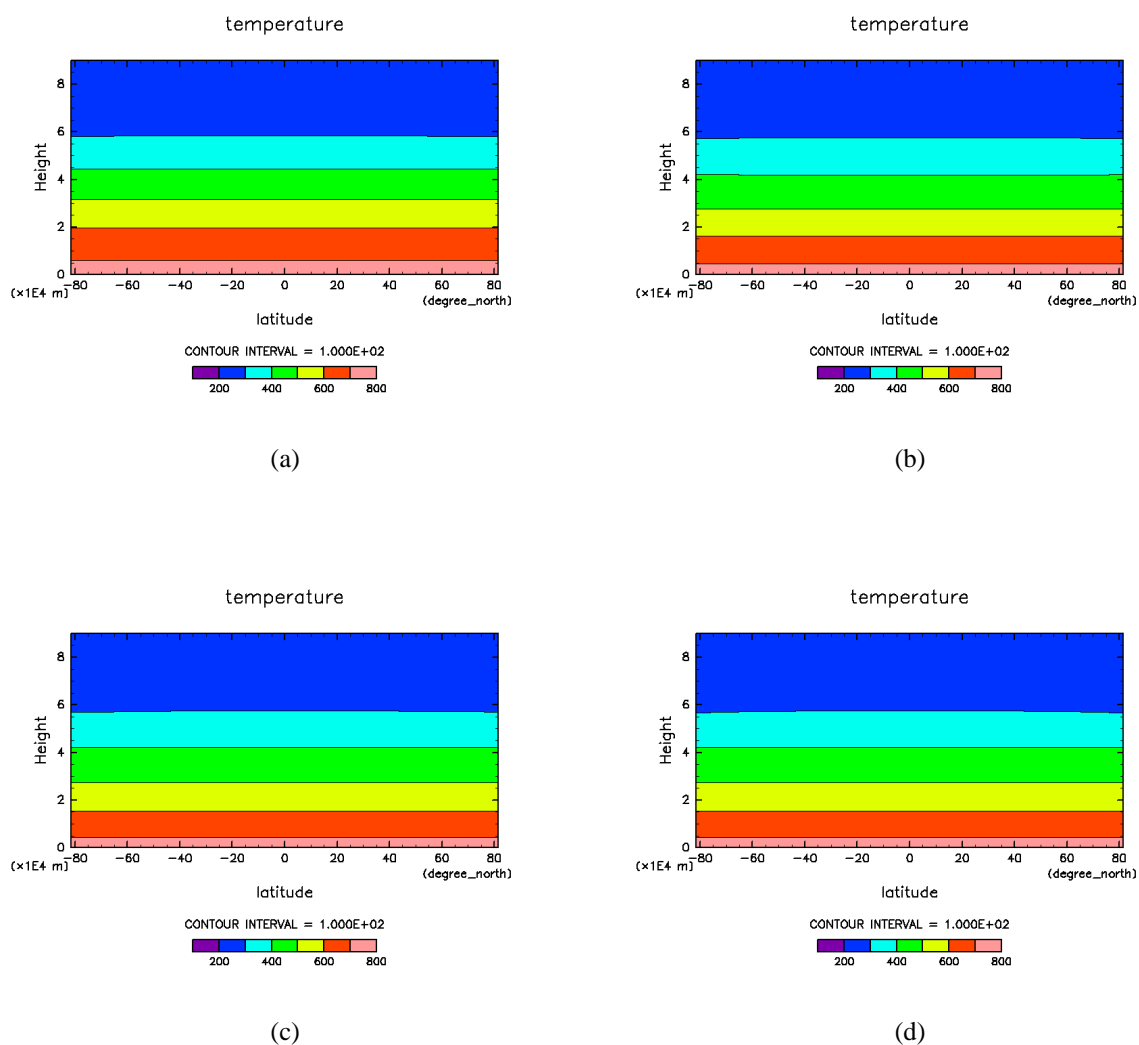


図 3.24: HF1987 の放射平衡温度分布, KW2007 の太陽放射加熱率を用いた実験の温度分布 (a) 0 ~ 5000 日における時間平均 (b) 5000 ~ 10000 日における時間平均 (c) 30000 ~ 40000 日における時間平均 (d) 60000 ~ 70000 日における時間平均

謝辞

本論文を執筆するにあたり様々な方に多大なるご迷惑をお掛けしました。この場を借りて、謝罪すると共に感謝申し上げます。私の指導教官でいらっしゃる石渡正樹准教授は多忙を極める中、不出来な私に対し研究方針から論文指導に至るまで様々な指導をして頂きました。本論文を執筆することが出来たのは石渡准教授の多大なる慈悲があったからに他なりません。また、小高正嗣助教には、研究方針の助言や数値計算技術に関するご指導、数値プログラムのバグ出しに至るまで様々な助力を頂き、また多くの励ましのお言葉も頂きました。杉山耕一朗特任助教は、数値計算技術をご指導下さると共に日頃より私の研究の進み具合を気にかけて下さり、多くの励ましの言葉を頂きました。研究室の先輩である山下達也氏は、数式などに関して私がいまいち分からない点を的確に且つ極めてわかりやすく解説して下さい、きめ細やかで丁寧なご指導をして下さいました。また、数値計算プログラムのバグ出しに関しても、長い時間を割き付き合ってくださいました。研究室の後輩である荻原弘堯氏も、数値計算プログラムのバグ出しに長い時間を割き、付き合ってくださいると共に多くの励ましの言葉を下さいました。その他の地球流体力学研究室のメンバー、惑星宇宙グループのメンバーからも様々なご指導、励ましの言葉を下さった事、本当に感謝しております。

参考文献

Boyer, C. and P. Guerin, 1966: Etude de la rotation retrograde, en 4 jours, de la couche exterieure nuageuse de Venus. *Icarus*, **11**, 338-355.

Edmon, H. J., B. J. Hoskins, M. E. McIntyre, 1980: Eliassen-Palm cross section for the troposphere. *J.Atmos.Sci.*, **37**, 2600-2616.

Gierach, P. J., 1975: Meridional circulation and the maintenance of the Venus atmosphere rotation. *J.Atmos.Sci.*, **32**, 1038-1044.

Holton, J. R., 2004: An introduction to dynamic meteorology(4th Ed.). Elsevier Academic Press. 535pp.

Hou, A. Y. and B. F. Farrell, 1987: Superrotation induced by critical-level absorption of gravity waves on Venus. *J.Atmos.Sci.*, **44**, 1049-1061.

Kido, A., and Y. Wakata, 2007: Multiple equilibrium state appearing in a Venus-like atmosphere general circulation model. *J. Meteor. Soc. Japan*, **86**, 969-979.

Numaguchi, A., M. Takahashi, T. Nakajima, and A. Sumi, 1995: Development of an atmospheric general circulation model, *Climate System Dynamics and Modelling*, vol. 1-3, T. Matsuno, Ed., Center for Climate System Research, 1-27.

Schubert, G., et al. 1980: Structure and circulation of the Venus atmosphere. *J.Geophys.Res.* **85**, 8007-8025.

Yamamoto, M., and M. Takahashi, 2003: The fully developed superrotation simulated by a general circulation model of a venus-like atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 561-574.

地球流体電脳倶楽部, 2011: DCPAM5 支配方程式系とその離散化. 131pp.

地球流体電脳倶楽部, 2011: DCPAM5 支配方程式系の導出に関する参考資料. 32pp.

地球流体電脳倶楽部, 2011: dcpam5 コード解説. 29pp.

地球流体電脳倶楽部, 2005: NumRu::GPhys::EP Flux 数理ドキュメント. pp23.

松田 佳久, 2000: 惑星気象学. 東京大学出版会.