

大気大循環モデルを用いた金星大気大循環の鉛直 粘性依存性に関する研究

服部 蒼紀

神戸大学 理学研究科 惑星学専攻
流体地球物理学教育研究分野

2026/08/07

要旨

金星の雲層上部では、固体金星よりもはるかに速く大気が回転するスーパーローテーションが観測されている。その形成には、平均子午面循環や水平混合などによる角運動量輸送が関係すると考えられている。大気大循環モデルを用いた先行研究では、スーパーローテーション形成の鉛直粘性依存性が調べられている。しかし、これらの研究では放射過程、空間解像度および境界層過程なども異なる。

本研究では、Yamamoto and Takahashi (2003) の計算設定を踏襲した簡略金星大気大循環モデルを用い、他の実験設定を同一にしたまま、鉛直粘性係数を $0.075\text{--}19.2\text{ m}^2\text{ s}^{-1}$ の範囲で変更した実験をおこなった。そして、大気の総相対角運動量、東西平均東西風、平均子午面循環および温度構造を比較した。Yamamoto and Takahashi (2003) と同じ鉛直粘性係数 $0.15\text{ m}^2\text{ s}^{-1}$ を用いた標準実験では、東西風、平均子午面循環および温度の分布形状は同研究と定性的に類似したが、大気の総角運動量は同研究の約半分となった。

鉛直粘性係数を変更した実験では、すべての実験で総相対角運動量が正となったが、大気全体の回転の強さは鉛直粘性係数によって大きく異なった。鉛直粘性係数が 0.075 および $0.15\text{ m}^2\text{ s}^{-1}$ の実験では、全球超回転指数はそれぞれ約 12 および約 8 となったのに対し、 $0.30\text{ m}^2\text{ s}^{-1}$ 以上の実験では 1 以下となった。したがって、鉛直粘性が弱い場合には強いスーパーローテーションが、鉛直粘性が強い場合には比較的弱いスーパーローテーションが形成された。ただし、用いた鉛直粘性係数は離散的であるため、両者の間に明確な臨界値が存在するとは結論できない。

東西風速の最大値は、鉛直粘性係数が大きくなるにつれて小さくなったが、全球超回転指数よりも緩やかに変化した。また、平均子午面循環の強さと、全球超回転指数および東西風速の最大値との間には、単純な対応関係は見られなかった。鉛直粘性が強い実験では、平均子午面循環が強くなる一方で、南北温度差が小さくなり、下層に中立に近い領域が広がった。

以上から、Yamamoto and Takahashi (2003) 型の簡略金星大気大循環モデルでは、鉛直粘性が大気全体の回転、東西風、平均子午面循環および温度構造を大きく変化させることが示された。特に、スーパーローテーションの強さは雲層上部の最大東西風速だけでは評価できず、平均子午面循環の強さとも単純には対応しないことが示された。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	金星大気のスーパーローテーション	1
1.2	本論文の構成	3
第2章	モデルの概要と実験設定	4
2.1	大気大循環モデル	4
2.1.1	力学過程	4
2.1.2	放射過程	4
2.1.3	鉛直粘性	7
2.1.4	水平粘性	7
2.1.5	地表摩擦	7
2.1.6	スポンジ層	8
2.2	実験設定	9
2.2.1	空間解像度	9
2.2.2	時間解像度	9
2.2.3	初期値	11
2.2.4	時間積分	11
第3章	結果	12

3.1	標準実験	12
3.1.1	東西風速の時間変化	12
3.1.2	東西風	14
3.1.3	子午面循環	16
3.1.4	温度	18
3.2	鉛直粘性を変更した実験	20
3.2.1	大気の総相対角運動量	20
3.2.2	東西風	25
3.2.3	子午面循環	29
3.2.4	温度	34
第 4 章	議論	38
第 5 章	結論	41
付録	計算に使った設定ファイル	43
	謝辞	48
	参考文献	49

第1章 はじめに

1.1 金星大気のスーパーローテーション

金星の高度 70 km (雲層上部) では, 低緯度から中緯度にかけて, 自転と同じ向きに 100 m s^{-1} を超える東西風が観測されている (例えば, Sánchez-Lavega et al., 2023). 近紫外線で見られる代表的な模様として, 横倒しの Y 字模様がある. Boyer and Camichel (1961) は, この近紫外線の模様が約 4 日周期で金星を一周することを発見した. その後, パイオニア・ヴィーナスやマリナー 10 号などの探査機による近紫外線画像でも, Y 字模様と, それが約 4 日の周期で一周することが確認された (例えば, Schubert, 1983). ただし, 模様の移動は大気の流れだけでなく, 波の伝播も含まれている可能性があるため, 模様の移動は風速を表すとは限らない. 一方で, ベネラ, パイオニア・ヴィーナス, ベガの降下プローブでは, 大気の流れの鉛直分布が観測された (例えば, Schubert, 1983). 降下プローブによる測定によって, 金星の雲層に強い東西風が存在することが確かめられた.

金星の雲層上部の東西風の特徴は, 風速が 100 m s^{-1} を超えることだけでなく, 大気が固体金星よりもはるかに速く回転していることである. 雲層上部の大気は約 4 日で金星を一周するのに対し, 固体金星の自転周期は約 243 日である. したがって, 雲層上部の大気の自転軸まわりの角速度は, 固体金星の自転角速度の約 60 倍に達する. このように, 大気が固体惑星よりも大きな角速度で回転する状態をスーパーローテーションと呼ぶ (例えば, 松田, 2000).

雲層上部の強い東西風は, 低緯度から中緯度にかけて広く分布しており, この範囲では東西風速の緯度変化は比較的小さい (Rossow et al., 1990). 自転軸まわりの単位質量あたりの絶対角運動量 m_a は

$$m_a = (\Omega a \cos \varphi + u) a \cos \varphi \quad (1.1)$$

と表わされる. ここで, Ω は自転角速度, a は金星半径, φ は緯度, u は東西風速である. 東西風速 u の緯度変化が小さい場合, 自転軸からの距離 $a \cos \varphi$ が大きい低緯度ほど m_a は大きくなる. したがって, 金星の雲層上部では, 単位質量あたりの絶対角運動量は低緯度で最大となる.

金星大気のスーパーローテーションは, 単に大きな東西風速をもつだけでなく, 低緯度に単位質量あたりの絶対角運動量の最大をもつ分布と特徴づけられる. このような分布の形成・維持を理解するためには, 大気中の角運動量が南北・鉛直方向にどのように輸送さ

れ、定常状態でそれらの輸送がどのようにつり合うかを考える必要がある。この角運動量輸送に関連する過程の一つとして、放射加熱の緯度差によって形成される平均子午面循環が考えられている (Gierasch, 1975)。

金星大気が受ける太陽放射加熱は緯度によって異なり、低緯度で強く、高緯度で弱い。この加熱の緯度依存性によって、低緯度で上昇し、高緯度で下降する熱的な循環が形成される。質量保存により、この循環では、上層で低緯度から高緯度へ、下層で高緯度から低緯度へ大気が移動する。東西平均した南北風と鉛直風によって表されるこの循環を平均子午面循環と呼ぶ。

平均子午面循環は、大気とともに角運動量を鉛直・南北方向へ輸送する。摩擦や粘性などの作用を無視できる場合、移動する空気塊は自転軸まわりの単位質量あたりの絶対角運動量 m_a を保存する。低緯度から高緯度へ移動する空気塊は、自転軸からの距離が短くなるため、 m_a を保存するように自転方向の東西風を強める。反対に、高緯度から低緯度へ移動する空気塊は、自転軸からの距離が長くなるため、自転方向の東西風を弱める。

Gierasch (1975) は、平均子午面循環と上層の水平混合が組み合わさることによって、スーパーローテーションが形成・維持されるメカニズムを提案した。定常状態の低緯度上層では、平均子午面循環による下層から上層への角運動量輸送と極向きの角運動量輸送、水平混合による高緯度から低緯度への角運動量輸送、以上 3 つがつり合うことにより、低緯度上層に角運動量が大きい状態が維持される。

金星大気のスーパーローテーションには、平均子午面循環だけでなく、水平混合や熱潮汐を含む波動による角運動量輸送も関係すると考えられている (例えば、Fels and Lindzen, 1974)。これらの過程がスーパーローテーションの形成・維持に果たす役割や、大気循環の実験設定に対する依存性を調べた大気大循環モデルを用いた数値実験がおこなわれてきた。

Yamamoto and Takahashi (2003) (以下 YT03) は、東西一様な太陽放射加熱、ニュートン冷却による赤外放射冷却、大気最下層のみに働くレイリー摩擦、一定の鉛直粘性係数を用いた大気大循環モデルで実験をおこなった。この設定は、太陽放射加熱は東西一様だが緯度依存性があるため、平均子午面循環が形成され、熱潮汐は生じない。彼らは、静止大気から計算を開始し、 100 m s^{-1} を超える東西風を形成した。ただし、このモデルは実際の金星からかけ離れて強い加熱を与えており (Hollingsworth et al., 2007)、現実の金星に対応するとは言い難い。

Hollingsworth et al. (2007) は YT03 に似た放射加熱・冷却を用いる大気大循環モデルによって、放射加熱、地表摩擦および鉛直解像度に対する大気循環の感度を調べた。その結果、観測に近い加熱率を用いた実験では、スーパーローテーションは非常に弱くなった。また、平均子午面循環のセルの深さや数は、鉛直層数によって変化した。

Sugimoto et al. (2019) は現実的な放射加熱の東西平均成分のみを与え、熱潮汐が生じない条件で、スーパーローテーションの形成の鉛直粘性依存性を調べた。鉛直粘性係数を

$0.0015\text{--}0.15\text{ m}^2\text{ s}^{-1}$ の範囲で変更した結果, $0.02\text{ m}^2\text{ s}^{-1}$ 未満では静止大気からスーパーローテーションが形成されたが, それより大きい鉛直粘性係数ではスーパーローテーションが形成されなかった.

YT03 では, 静止大気を初期値として, 鉛直粘性係数 $0.15\text{ m}^2\text{ s}^{-1}$ のもとでスーパーローテーションが形成された. 一方, Sugimoto et al. (2019) の実験では, 同じ鉛直粘性係数 $0.15\text{ m}^2\text{ s}^{-1}$ ではスーパーローテーションは形成されなかった. しかし, 両研究では, 太陽放射加熱と赤外放射冷却, 大気の静的安定度, 空間解像度, 力学過程の計算方法, 境界層過程など, 鉛直粘性係数以外の設定も異なる.

鉛直粘性の効果を明らかにするためには, 他のモデル設定を同一にしたまま, 鉛直粘性のみを変更した実験を比較する必要がある. また, 雲層上部の最大東西風速は局所的な値であり, それだけでは大気全体の回転の強さや, 東西風の鉛直・緯度分布を表すことはできない. 鉛直粘性の変更は, 東西風だけでなく平均子午面循環や温度構造にも影響を与えると考えられる. 本研究では, YT03 の計算設定を踏襲した大気大循環モデルを用い, YT03 と同じ鉛直粘性係数 $0.15\text{ m}^2\text{ s}^{-1}$ を標準実験として, 鉛直粘性係数を系統的に変更した実験をおこなう. そして, 鉛直粘性の強さが大気全体の回転の強さを表す総相対角運動量, 東西平均東西風, 平均子午面循環および温度構造に与える影響を調べる.

1.2 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す. 2 章では, 本研究で用いた大気大循環モデルと実験設定について説明する. 3 章では, 標準実験と YT03 の結果を比較した後, 鉛直粘性係数を変更した実験の結果を示す. 4 章では, 得られた結果に基づいて, 鉛直粘性がスーパーローテーション, 平均子午面循環および温度構造に与える影響について議論する. 5 章では, 本研究で得られた結果をまとめる.

第2章 モデルの概要と実験設定

2.1 大気大循環モデル

本研究は、地球流体電脳倶楽部が開発している大気大循環モデル DCPAM5 (Takahashi et al., 2018: <http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/>) を使用した。実験設定は YT03 を踏襲し、雲物理、地形、日変化する加熱の効果を含まないものとした。

2.1.1 力学過程

力学過程は σ -プリミティブ方程式を用いて地表圧力 p_s 、渦度 ζ 、発散 D 、温度 T の時間発展を計算する。 σ は $\sigma \equiv p/p_s$ で定義され、圧力 p を地表圧力 p_s で割ったものである。水平離散化は球面調和関数を用いたスペクトル法であり、鉛直離散化は差分法である。

2.1.2 放射過程

放射過程による加熱率は以下の式 (Yamamoto and Takahashi, 2003) を用いて計算する。

$$\left(\frac{dT}{dt}\right)_{\text{rad}} = Q - \left(Q_0 + \frac{T - T_0}{\tau_N}\right) \quad (2.1)$$

ここで、 T は温度、 t は時刻、 Q は太陽放射加熱、 Q_0 は全球平均の太陽放射加熱、 T_0 は全球平均の太陽放射加熱が与えられたときの放射平衡温度、 τ_N は放射による温度変化の時定数である。右辺第 1 項は太陽放射加熱、右辺第 2 項はニュートン冷却を表す。 Q_0 、 T_0 、 τ_N は高度の関数として、YT03 が用いたものと同じ値 (図 2.1, 2.2, 2.3) を用いた。

太陽放射加熱 Q は東西一様として、以下の式で計算される。

$$Q(\varphi, z) = Q_0(z) \frac{\cos^{7/5} \varphi}{q_0} \quad (2.2)$$

ここで、 q_0 は赤道における太陽放射加熱を 1 としたときの全球平均の加熱の強さである。緯度依存性は YT03 に記述されていないが、Yamamoto and Takahashi (2006) に $\cos^{7/5} \varphi$

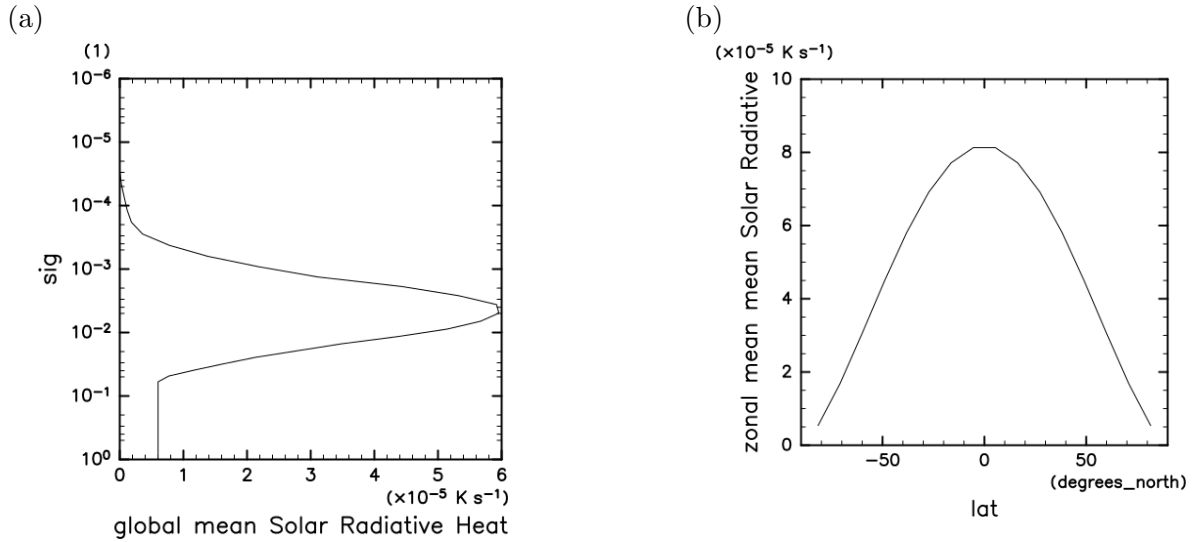


図 2.1: 太陽放射による加熱率. (a) 全球平均太陽放射加熱率の鉛直分布 Q_0 . (b) $\sigma \sim 0.05$ における緯度分布.

と記述されていたので, YT03 も同様の依存性をもつものとした. 緯度依存性を $\cos^{7/5} \varphi$ としたので, q_0 は以下の値になる.

$$q_0 = \frac{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos^{7/5} \varphi \cos \varphi d\varphi}{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos \varphi d\varphi} \simeq \frac{1.4671}{2} \quad (2.3)$$

加熱の鉛直分布は雲層付近で太陽放射加熱が強くなることを表現するために, $\sigma \sim 0.05$ にピークをもった分布になっている (図 2.1(a)). 下層の加熱率 0.52 K day^{-1} は観測から推定される金星の加熱率に比べるとかなり大きい (例えば, Hollingsworth et al., 2007). 金星を模した太陽放射加熱と呼べるものではないが, 本研究ではこの加熱率分布を用いる.

ニュートン冷却は以下の式で計算される.

$$Q_0 + \frac{T - T_0}{\tau_N} \quad (2.4)$$

冷却をこのように与えることで, 全球平均の太陽放射加熱が与えられたとき ($Q = Q_0$ のとき), $T = T_0$ で放射平衡になる.

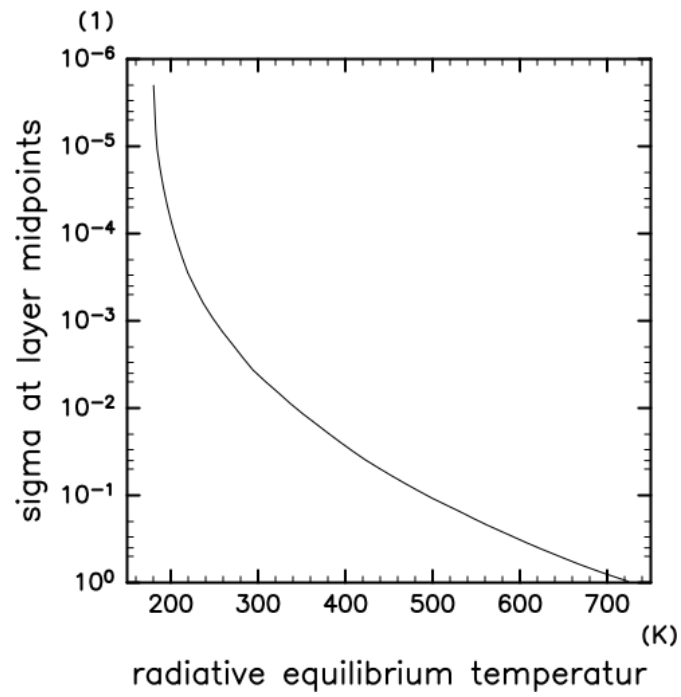


図 2.2: 全球平均太陽放射加熱 Q_0 で加熱したときの放射平衡温度 T_0 .

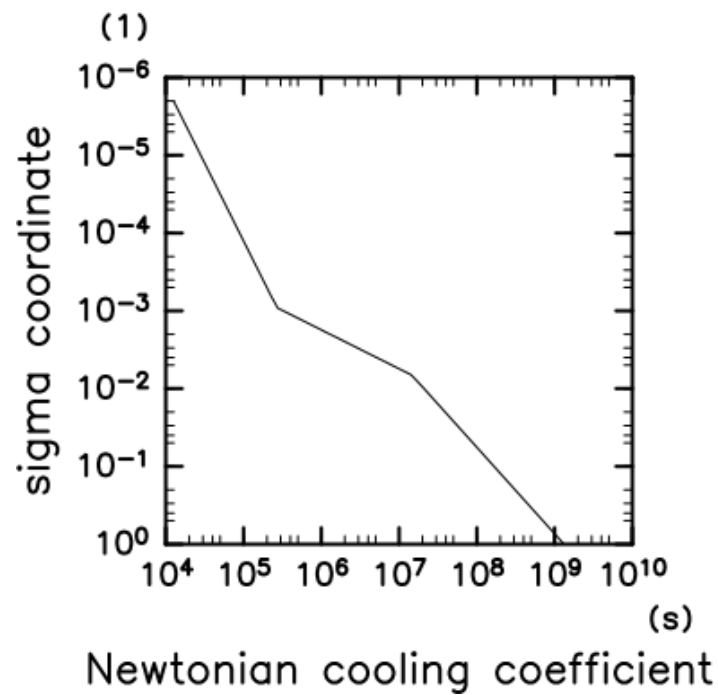


図 2.3: ニュートン冷却の時定数.

2.1.3 鉛直粘性

本研究は YT03 に従って、運動量の鉛直粘性係数と温位の鉛直粘性係数に同一の値を用いた。以降、鉛直粘性の変更は、温位の拡散の変更も含む。

$$\left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)_{\text{diff}} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho K_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2.5)$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial t}\right)_{\text{diff}} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho K_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2.6)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_{\text{diff}} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho K_z \Pi \frac{\partial \theta}{\partial z} \right). \quad (2.7)$$

ここで、 u は東西風、 v は南北風、 z は高度、 ρ は密度、 K_z は鉛直粘性係数である。本研究では、鉛直粘性係数 K_z を時間、場所によらず一定とした。 θ は温位、 Π はエクスター関数であり、

$$\theta = T \left(\frac{p}{p_s} \right)^{-\frac{R_d}{c_p}} \quad (2.8)$$

$$\Pi = \frac{T}{\theta} = \left(\frac{p}{p_s} \right)^{\frac{R_d}{c_p}} \quad (2.9)$$

である。ここで、 R_d は金星大気的气体定数、 c_p は定圧比熱であり、今回の実験では、温度や圧力によらず一定とした。

2.1.4 水平粘性

水平粘性は、4 次の超粘性で、渦度と発散に働き、最大波数に対する緩和の時定数 (e-folding time) は 40 地球日とした。この水平粘性は YT03 と同じものだが、現実の金星に比べると水平粘性が弱い可能性がある (Sugimoto et al., 2023)。水平粘性が弱いと、運動エネルギー Spektral の高波数側でエネルギーが十分に散逸せず、非現実的な大気大循環がシミュレートされる可能性がある。

2.1.5 地表摩擦

地表摩擦は大気最下層にのみ働き、摩擦の大きさは大気最下層の風速に比例するとした。

$$\left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)_{\text{drag}} = -\frac{u}{\tau_{\text{drag}}} \quad (2.10)$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial t}\right)_{\text{drag}} = -\frac{v}{\tau_{\text{drag}}}. \quad (2.11)$$

ここで、 τ_{drag} は地表摩擦の時定数で、30 地球日とした。

2.1.6 スポンジ層

スポンジ層は、モデルの上層に設定される減衰層である。上端で下層から入射する波が反射すると、下層に悪影響が及ぶことがあるため、上層に風速に比例する抗力（レイリー摩擦）を導入し波の反射を軽減する。

スポンジ層の減衰の時定数 τ_S は以下の式によって圧力に依存する形で与えた。

$$\tau_S = \tau_{\text{top}} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{\text{top}}} \right)^\beta \quad (2.12)$$

ここで、 τ_{top} と σ_{top} は最上層の時定数と σ である。 β はスポンジ層の厚さを調節するパラメータで、本研究では 2 を用いた。今回おこなった計算では、最上層の一つ下の層の τ_S は約 10 倍、さらに一つ下の層の τ_S は約 30 倍となっている。

2.2 実験設定

標準実験で用いたパラメタを表 2.1 に示す (計算の実行時に使用したファイルは付録に記した). 標準実験の値は, YT03 に基づいて設定した. YT03 の設定は, おおまかには金星を想定したものとなっている. 大気は CO_2 で構成され, 凝結成分は含まない. 現実金星では, 大気の比熱が温度によって変化するが, この計算では温度によらず一定とした. 鉛直粘性の影響を見る実験では, 鉛直粘性係数を標準実験の 0.5 倍から 128 倍まで, 8 通りの値を用いて計算した.

2.2.1 空間解像度

水平方向は全波数 10 (経度方向の格子点数 32, 緯度方向の格子点数 16) で, 鉛直方向は 50 層 (表 2.2) である. 鉛直方向のグリッドは, 地表から高度 10 km までは 1 km ごと, それより上は 2 km となるように設定した.

2.2.2 時間解像度

時間刻みは, 計算初期の 80,000 日間は 22.5 分, それ以降は 45 分とした. これは, 計算初期には, 短時間で場が変化するためである.

表 2.1: 標準実験で用いたパラメタの値

パラメタ		値
惑星半径	a	6,052.0 km
重力加速度	g	8.90 m s ⁻¹
自転角速度	Ω	-2.993×10^{-7} s ⁻¹
気体定数	R_d	189 J kg ⁻¹ K ⁻¹
定圧比熱	c_p	837 J kg ⁻¹ K ⁻¹
平均地表気圧	p_0	90×10^5 Pa
平均分子量	$\bar{m}$	44 g mol ⁻¹
鉛直粘性係数	K_z	0.15 m ² s ⁻¹
水平粘性の時定数 (最大波数)		40 地球日
地表摩擦の時定数	τ_{drag}	30 地球日
スポンジ層の時定数 (最上層)	τ_S	30 地球日

表 2.2: 鉛直グリッド

層	上端	下端	中心	層	上端	下端	中心
50	0	4.95×10^{-6}	2.01×10^{-6}	25	3.47×10^{-2}	4.34×10^{-2}	3.90×10^{-2}
49	4.95×10^{-6}	8.23×10^{-6}	6.54×10^{-6}	24	4.34×10^{-2}	5.37×10^{-2}	4.85×10^{-2}
48	8.23×10^{-6}	1.36×10^{-5}	1.08×10^{-5}	23	5.37×10^{-2}	6.61×10^{-2}	5.98×10^{-2}
47	1.36×10^{-5}	2.23×10^{-5}	1.78×10^{-5}	22	6.61×10^{-2}	8.07×10^{-2}	7.33×10^{-2}
46	2.23×10^{-5}	3.62×10^{-5}	2.90×10^{-5}	21	8.07×10^{-2}	9.79×10^{-2}	8.92×10^{-2}
45	3.62×10^{-5}	5.81×10^{-5}	4.68×10^{-5}	20	9.79×10^{-2}	1.18×10^{-1}	1.08×10^{-1}
44	5.81×10^{-5}	9.22×10^{-5}	7.46×10^{-5}	19	1.18×10^{-1}	1.42×10^{-1}	1.30×10^{-1}
43	9.22×10^{-5}	1.45×10^{-4}	1.18×10^{-4}	18	1.42×10^{-1}	1.69×10^{-1}	1.55×10^{-1}
42	1.45×10^{-4}	2.24×10^{-4}	1.83×10^{-4}	17	1.69×10^{-1}	2.00×10^{-1}	1.84×10^{-1}
41	2.24×10^{-4}	3.41×10^{-4}	2.81×10^{-4}	16	2.00×10^{-1}	2.36×10^{-1}	2.18×10^{-1}
40	3.41×10^{-4}	5.12×10^{-4}	4.24×10^{-4}	15	2.36×10^{-1}	2.78×10^{-1}	2.57×10^{-1}
39	5.12×10^{-4}	7.56×10^{-4}	6.31×10^{-4}	14	2.78×10^{-1}	3.25×10^{-1}	3.01×10^{-1}
38	7.56×10^{-4}	1.10×10^{-3}	9.24×10^{-4}	13	3.25×10^{-1}	3.79×10^{-1}	3.52×10^{-1}
37	1.10×10^{-3}	1.57×10^{-3}	1.33×10^{-3}	12	3.79×10^{-1}	4.40×10^{-1}	4.09×10^{-1}
36	1.57×10^{-3}	2.21×10^{-3}	1.89×10^{-3}	11	4.40×10^{-1}	5.09×10^{-1}	4.74×10^{-1}
35	2.21×10^{-3}	3.08×10^{-3}	2.64×10^{-3}	10	5.09×10^{-1}	5.46×10^{-1}	5.27×10^{-1}
34	3.08×10^{-3}	4.22×10^{-3}	3.64×10^{-3}	9	5.46×10^{-1}	5.86×10^{-1}	5.66×10^{-1}
33	4.22×10^{-3}	5.71×10^{-3}	4.95×10^{-3}	8	5.86×10^{-1}	6.28×10^{-1}	6.07×10^{-1}
32	5.71×10^{-3}	7.63×10^{-3}	6.65×10^{-3}	7	6.28×10^{-1}	6.73×10^{-1}	6.51×10^{-1}
31	7.63×10^{-3}	1.01×10^{-2}	8.83×10^{-3}	6	6.73×10^{-1}	7.20×10^{-1}	6.97×10^{-1}
30	1.01×10^{-2}	1.32×10^{-2}	1.16×10^{-2}	5	7.20×10^{-1}	7.71×10^{-1}	7.45×10^{-1}
29	1.32×10^{-2}	1.70×10^{-2}	1.51×10^{-2}	4	7.71×10^{-1}	8.23×10^{-1}	7.97×10^{-1}
28	1.70×10^{-2}	2.18×10^{-2}	1.93×10^{-2}	3	8.23×10^{-1}	8.79×10^{-1}	8.51×10^{-1}
27	2.18×10^{-2}	2.76×10^{-2}	2.46×10^{-2}	2	8.79×10^{-1}	9.38×10^{-1}	9.08×10^{-1}
26	2.76×10^{-2}	3.47×10^{-2}	3.11×10^{-2}	1	9.38×10^{-1}	1.00×10^0	9.69×10^{-1}

2.2.3 初期値

初期値は, 静止大気 (東西風, 南北風, 鉛直風, すべてゼロ), 地表面圧力は 90×10^5 Pa で一様, 温度は 400 K で一様とした. ただし, 温度には小さい擾乱を加えた.

2.2.4 時間積分

420,000 地球日の時間積分をおこない, YT03 との比較では解析に 63,063 日から 63,180 日の 117 日間のデータ, 鉛直粘性を変更した実験では解析にほぼ定常に達したと考えられる最後の 10,000 日を用いた (どちらの解析も一日ごとの出力結果を用いた).

第3章 結果

最初に標準実験の結果を示し、その後に鉛直粘性を変更した実験の結果を示す。東西風の風速は、自転と同じ方向に吹く風の風速を正とした。

3.1 標準実験

標準実験の設定は 2.2 節で説明した通りである。実験設定は YT03 の設定とだいたい同じになるようにしたが、YT03 に実験設定の全てが記載されていないため、完全に同じ設定ではないかもしれない。

以下で示すように、標準実験の結果は YT03 と概ね一致したが、標準実験は YT03 に比べて大気の絶対角運動量密度や子午面循環の強度が半分程度であるなど、相違も見られた。

3.1.1 東西風速の時間変化

図 3.1 は、計算開始から 63180 日 (地球日) までの、北緯 5.5 度、高度 61 km と 21 km における東西平均東西風速の時間変化である (標準実験の結果は、計算した結果から求めた全球平均温度と静水圧平衡を仮定して σ 座標から高度座標へ変換し、高度 61 km と 21 km における値を内挿して求めた)。標準実験と YT03 は、いずれも 60,000 日後には準定常状態に達したように見える。ただし、3.2.1 節で述べるように、大気の総角運動量はこの時点で準定常に達していない。高度 61 km の風速は計算開始直後から急速に速くなるのに対し、高度 21 km の風速は最初はあまり速くならず、30,000 日くらい経過してから速くなり始める。高度 21 km の風速が速くなり始めるタイミングで、高度 61 km の風速が急に減速しており (YT03 では風速の急な減速がよく見える、標準実験でも YT03 に比べると小さいが風速の急な減速がある)、高度 21 km の風速が速くなることと関係があるように思われるが、詳細は不明である。風速の短周期変動の振幅は、標準実験と YT03 で異なり、標準実験の方が大きくなっているが、YT03 がどのような風速を図に示したのかわからないため、標準実験と YT03 の短周期変動の振幅に違いがあるのかないのか、確かなことはわからない (標準実験は、24 時間おきの風速を図に示しているが、一日平均を取るなどすれば短周期変動の振幅は小さくなる)。

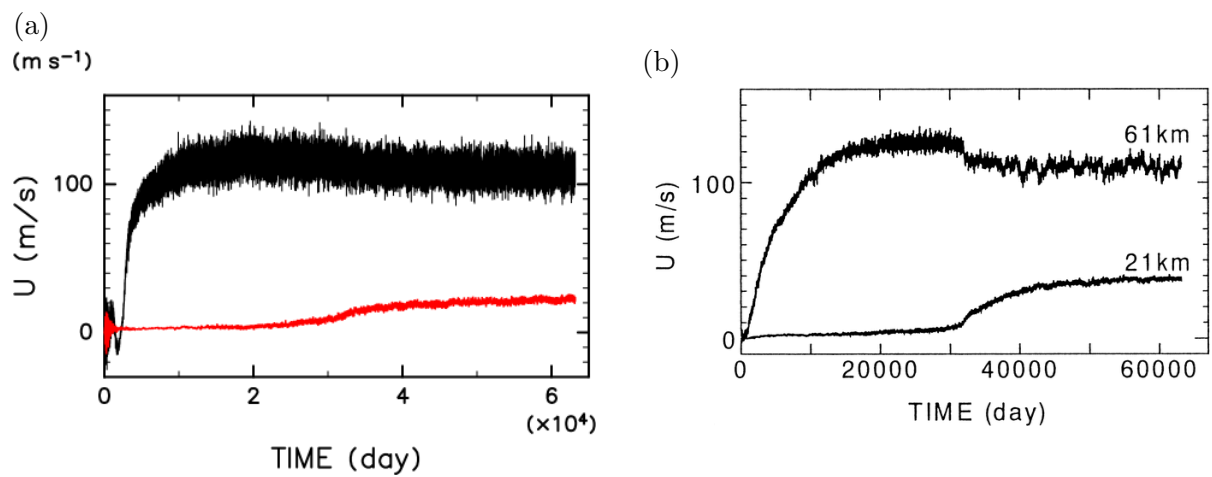


図 3.1: 東西平均東西風速 (北緯 5.5 度, 高度 61 km と 21 km) の時間変化. (a) 標準実験. 黒色は高度 61 km の風速, 赤色は高度 21 km の風速. YT03 と比較するため, 計算した結果から求めた全球平均の鉛直温度分布と静水圧平衡を使って σ 座標を高度座標に変換し, 内挿によって高度 61 km と 21 km の風速を求めた. (b) YT03 (Fig.3).

3.1.2 東西風

図 3.2 は東西平均東西風速の子午面分布である。標準実験と YT03 のいずれにおいても、東西風は基本的にどこでも西風（惑星の自転と同じ方向に吹く風）で、東風が吹くのは低緯度の地表付近のごく狭い領域だけとなっている。西風の速度は高度によって大きく変化し、地表付近の風速は小さく、高度が上がるにつれて西風の速度が速くなり、高度 60 km 付近で風速は最大となり、それより上の風速は遅くなる。風速の最大値は標準実験と YT03 でほとんど変わらないが、地表から高度 60 km 付近までの東西風の鉛直シアの構造は若干異なる。標準実験は YT03 に比べ、地表から高度 30 km くらいまでの鉛直シアが小さく（標準実験の下層の西風速度は YT03 よりも遅く）、高度 30 km から 60 km くらいの高度域で鉛直シアが大きくなっている（高度 60 km 付近で標準実験の西風速度は YT03 と同じくらいになる）。また、東西風速の緯度方向の分布も標準実験と YT03 で異なる。西風速度が最大になる高度 60 km 付近で見ると、標準実験は赤道にジェット（赤道で最も速く、赤道から離れるにつれて遅くなっていく）がある構造になっているが、YT03 は低緯度から中緯度まで風速があまり変わらない幅広なジェットとなっている。

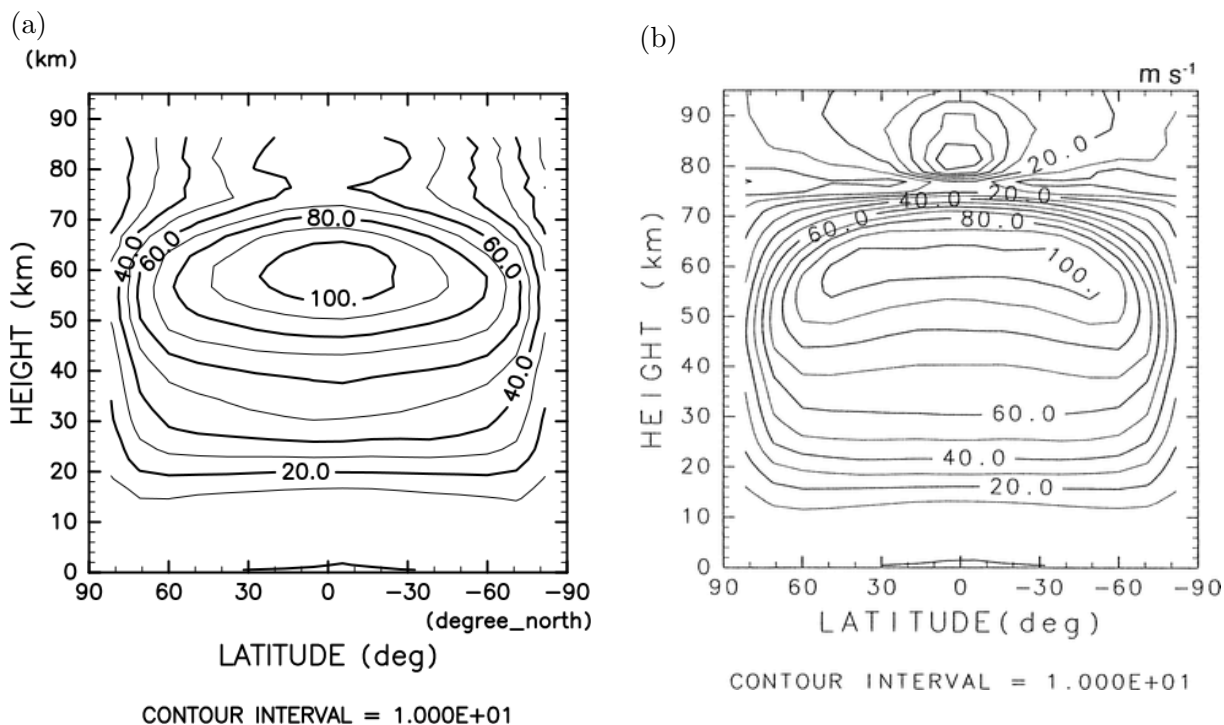


図 3.2: 東西風速の子午面分布. (a) 標準実験. 63,063 日から 63,180 日の 117 日間の時間平均. YT03 と比較するため、計算した結果から求めた全球平均の鉛直温度分布と静水圧平衡を使って σ 座標を高度座標に変換した. (b) YT03 (Fig.4(a)).

図 3.3 は絶対角運動量密度の子午面分布である。絶対角運動量密度 ρ_{AM} は単位体積あたりの角運動量で、以下の式で計算される。

$$\rho_{AM} = \rho (\Omega a \cos \varphi + u) a \cos \varphi. \quad (3.1)$$

ここで、 ρ は大気密度、 Ω は自転角速度、 u は東西風速、 a は惑星半径、 φ は緯度である。絶対角運動量密度は大気密度と風速の掛け算であるため、絶対角運動量密度が最大になる高度は風速が最大になる高度よりも低くなり、標準実験では高度 28 km 付近で最大となった。また、絶対角運動量密度は自転軸からの距離に比例するため、東西風速が赤道で最大になっていたり、風速が緯度に依らない場合に、絶対角運動量密度は赤道で最大となる。標準実験と YT03 では、絶対角運動量密度の子午面分布はおおまかには似た構造となっているが、下層の風速が異なる (図 3.2) ことを反映して、絶対角運動量密度の絶対値は異なり、標準実験の絶対角運動量密度の最大値は YT03 のそれの約 0.45 倍となった。また、絶対角運動量を大気全体で積分した総絶対角運動量についても、標準実験は YT03 のおよそ半分程度になっていると推定される。ほぼ同じ設定で計算したにも関わらず、大気の総絶対角運動量が標準実験と YT03 で同じにならなかった原因は不明である。

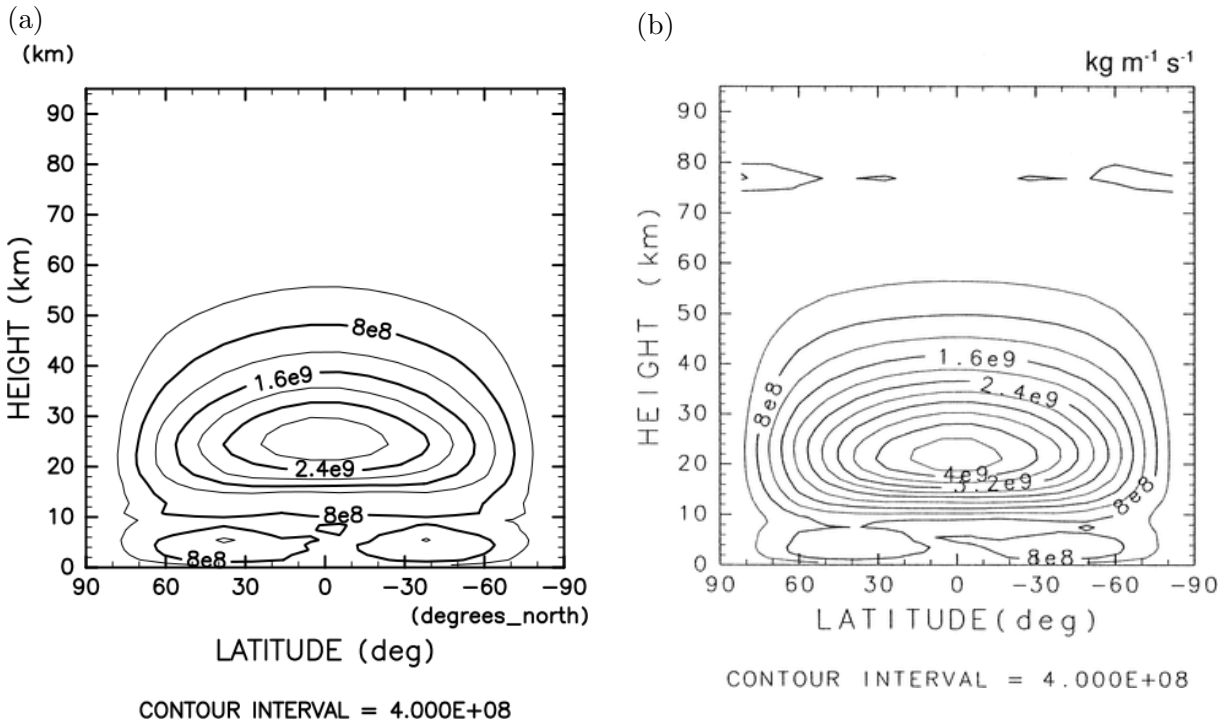


図 3.3: 東西平均絶対角運動量密度の子午面分布. (a) 標準実験. 63,063 日から 63,180 日の 117 日間の時間平均. YT03 と比較するため、計算した結果から求めた全球平均の鉛直温度分布と静水圧平衡を使って σ 座標を高度座標に変換した. (b) YT03 (Fig.4(b)).

3.1.3 子午面循環

図 3.4 は東西平均南北風速の子午面分布である。標準実験の南北風の風向は、地表から高度 5 km で赤道向き、それより上は極向きとなっている (図 3.4(a))。高度 10 km 付近と高度 70 km 付近に流速が周囲より速くなっている領域が存在する。これらの構造は、標準実験と YT03 で変わらないが、標準実験の高度 70 km の極向きの風速は、YT03 のその約 0.25 倍で、標準実験の子午面循環は YT03 のそれよりも弱いと推定される。

図 3.5 は東西平均鉛直風速の子午面分布である。標準実験の鉛直風速は、緯度 40 度あたりを境に低緯度側は上昇流、高緯度側は下降流となった。また、高度 6 km 付近と高度 66 km 付近を中心に、周囲より鉛直風速の速い領域が存在する。高度 66 km 付近にある低緯度の上昇流は、太陽放射加熱の鉛直分布が高度 50-60 km で極大 (2.1.2 節) となっていることによって駆動されたものと推定される。これらの構造は標準実験と YT03 で変わらないが、標準実験の鉛直風速は YT03 のそれよりも遅く、南北風速と同様に標準実験の子午面循環は YT03 のそれよりも弱いことが示唆される。

南北風速 (図 3.4) と鉛直風速 (図 3.5) の子午面分布から、標準実験の子午面循環は、南北半球に 1 つずつ、地表から高度 80 km までつながる 1 セルの循環であると推定される。YT03 も同様の子午面循環になっていると考えられるが、風速から推定したように標準実験の子午面循環は YT03 の子午面循環よりも弱い。

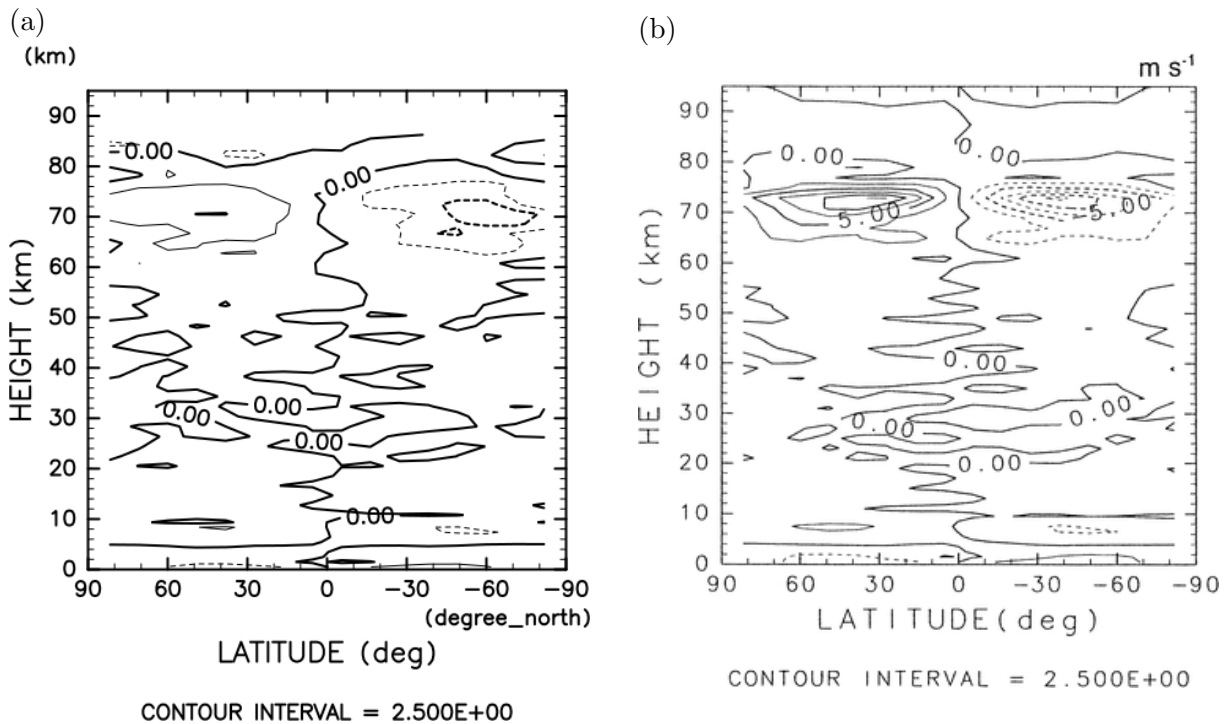


図 3.4: 東西平均南北風速の子午面分布. (a) 標準実験. 63,063 日から 63,180 日の 117 日間の時間平均. YT03 と比較するため、計算した結果から求めた全球平均の鉛直温度分布と静水圧平衡を使って σ 座標を高度座標に変換した. (b) YT03 (Fig.5(a)).

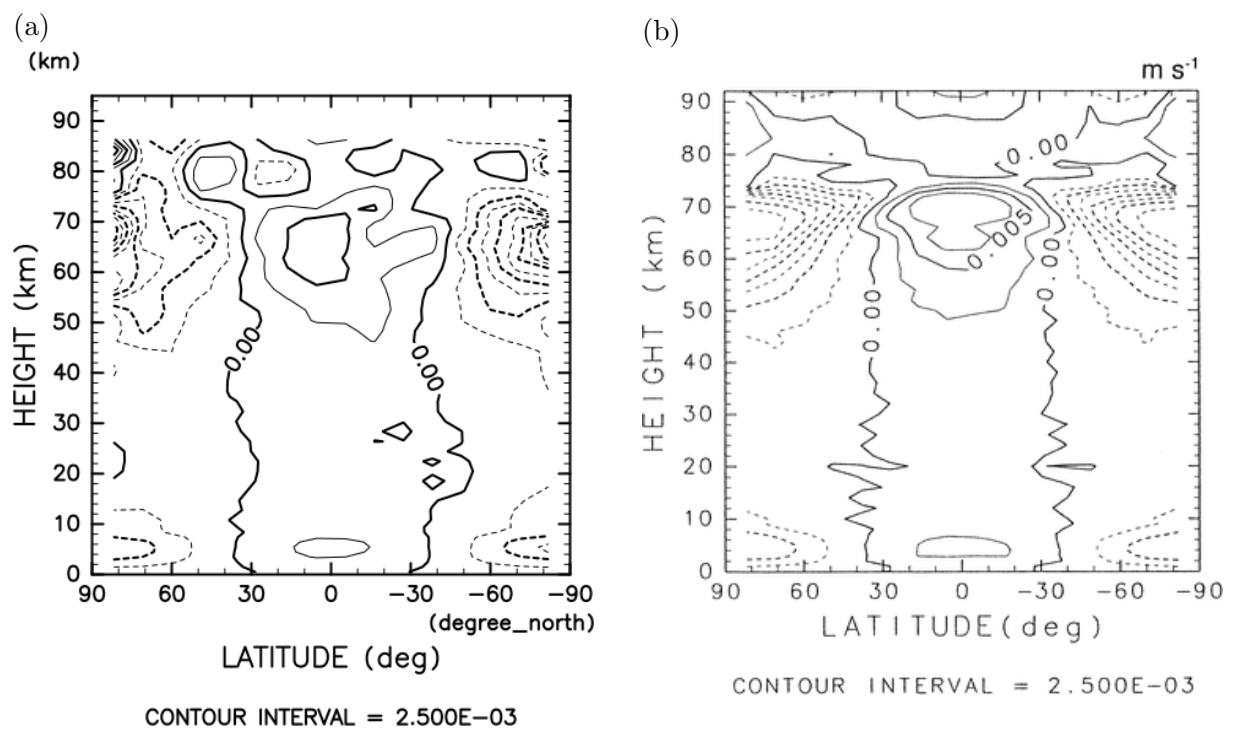


図 3.5: 東西平均鉛直風速の子午面分布. (a) 標準実験. 63,063 日から 63,180 日の 117 日間の時間平均. YTO3 と比較するため, 計算した結果から求めた全球平均の鉛直温度分布と静水圧平衡を使って σ 座標を高度座標に変換した. (b) YTO3 (Fig.5(b)).

3.1.4 温度

図 3.6 は東西平均温度の子午面分布である。標準実験の温度場は、地表付近が最も高温で、高度が上昇するにつれて温度は単調に低下する。下層の温度は緯度方向に比較的一様となっている。高度 50 km 付近は、低緯度の方が高緯度よりも高温になっている。これは、太陽放射加熱の極大がこの高度にあること (2.1.2 節) に関係があると推定される。一方、高度 65 km 付近は、高緯度の方が低緯度より高温になっている。この高度では鉛直風速が他の高度に比べて速くなっている (図 3.5) ので、この温度構造は上昇流・下降流によるものと考えられる。このような構造は標準実験と YT03 で変わらないが、標準実験の南北温度傾度は、YT03 に比べると少し小さい。これは、子午面循環の強度が異なっていること (3.1.3 節) によるものと考えられる。

図 3.7 は東西平均大気安定度の子午面分布である。大気安定度 N^2 は以下の式で計算される。

$$N^2 = \frac{g}{T} \left(\frac{dT}{dz} + \frac{g}{c_p} \right). \quad (3.2)$$

ここで、 g は重力加速度、 c_p は定圧比熱である。標準実験の東西平均大気安定度は全体的には高度が上がるほど安定度が高くなるが、高度 50-65 km 付近には、局所的に安定度が低くなっている領域が存在する。この領域より少し下の高度に太陽放射加熱の極大が存在する (2.1.2 節) ことから、この安定度の低い領域は太陽放射加熱と関係があると推測される。

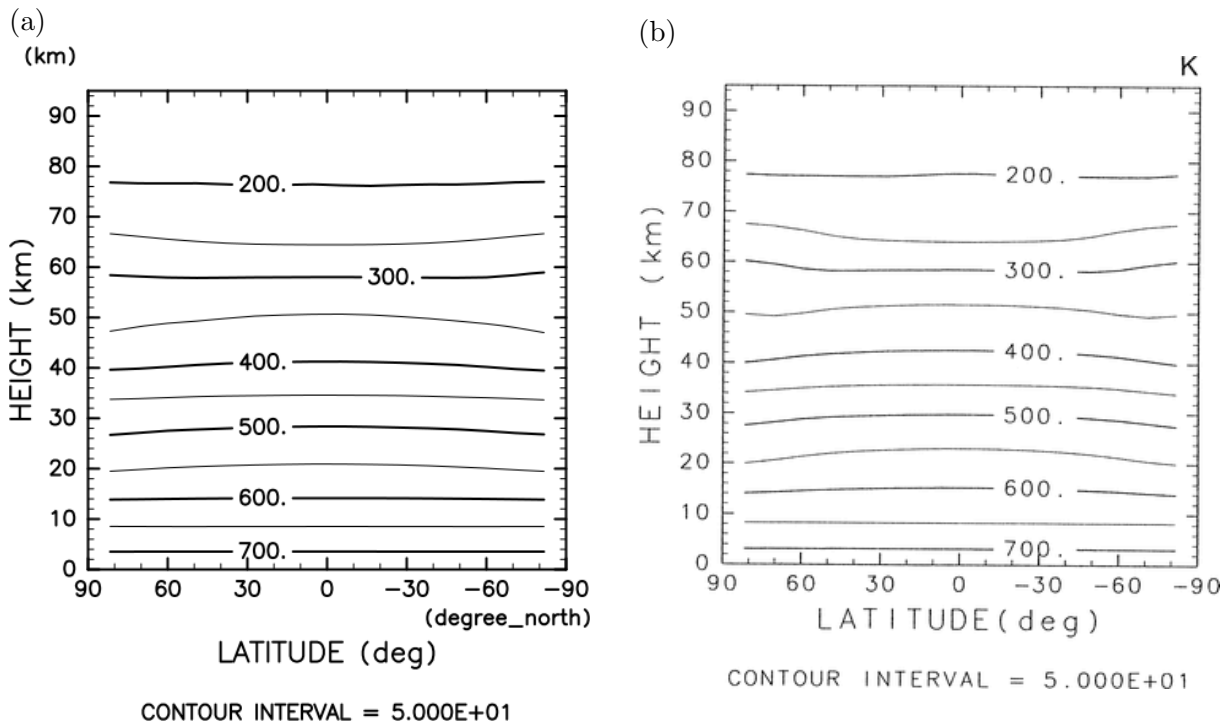


図 3.6: 東西平均温度の子午面分布. (a) 標準実験. 63,063 日から 63,180 日の 117 日間の時間平均. YT03 と比較するため、計算した結果から求めた全球平均の鉛直温度分布と静水圧平衡を使って σ 座標を高度座標に変換した. (b) YT03 (Fig.6(a)).

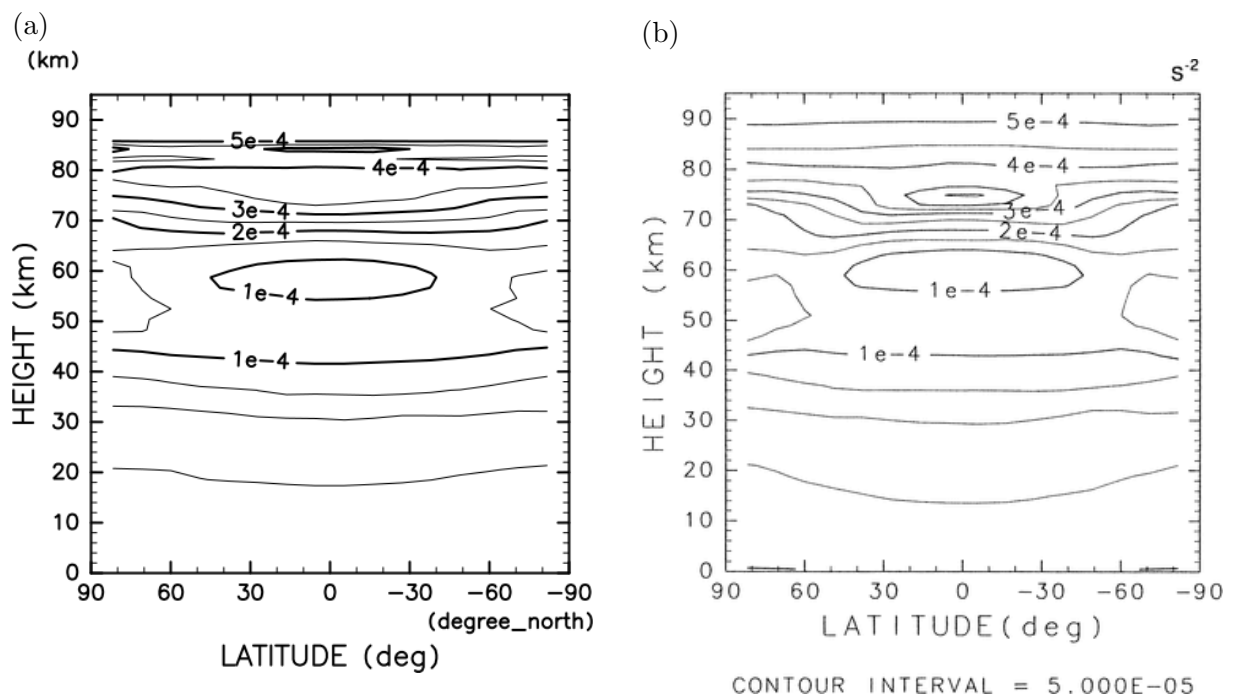


図 3.7: 東西平均大気安定度の子午面分布. (a) 標準実験. 63,063 日から 63,180 日の 117 日間の時間平均. YTO3 と比較するため, 計算した結果から求めた全球平均の鉛直温度分布と静水圧平衡を使って σ 座標を高度座標に変換した. (b) YTO3 (Fig.6(b)).

3.2 鉛直粘性を変更した実験

この節では、鉛直粘性係数を変更して行った実験の結果を示す。

3.2.1 大気の総相対角運動量

相対角運動量は固体惑星表面に対する角運動量であり、大気が地表と等しい速度で運動しているとき（地表から見て静止しているとき）ゼロになる。大気の総相対角運動量は、相対角運動量を大気全体について積分した量で、以下の式で与えられる。

$$M_r = \iiint \rho u a \cos \varphi dV \quad (3.3)$$

ここで、 $dV = a^2 \cos \varphi d\lambda d\varphi dz$ である。 z を σ で書き換えると、

$$M_r = \int_0^1 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} \frac{p_s}{g} u a^3 \cos^2 \varphi d\lambda d\varphi d\sigma \quad (3.4)$$

である。

図 3.8 と 3.9 は大気の総相対角運動量の時間変化である。いずれの実験も、計算開始から 400,000 日経過したら準定常に達していると考えられる（図 3.8）。準定常状態に落ち着くまでにかかる時間は鉛直粘性の大きさによって変わり、鉛直粘性が小さいほど時間がかかる（図 3.9）。

標準実験（鉛直粘性係数 $0.15 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ）は準定常状態に達するまでに 100,000 日以上の間がかかった（図 3.8(b)）。YT03 は、標準実験と同じ鉛直粘性係数の値を用いて実験をおこなっているが、63,180 日で準定常状態に達したとして、それ以降の計算はおこなっていない。完全に同一の設定で計算したものではない可能性があるため確かなことは言えないが、YT03 の結果は準定常状態に達していない可能性がある。

Read (1986a,b) が定義した全球超回転指数 (global super-rotation index) S は以下の式で与えられる。

$$S = \frac{\iiint \rho u a \cos \varphi dV}{\iiint \rho (a \Omega \cos \varphi) a \cos \varphi dV}. \quad (3.5)$$

ここで、 Ω は惑星の自転角速度である。分子は総相対角運動量であるのに対し、分母は地表に対して静止した大気（惑星の自転と同じ角速度 Ω で回転する大気）がもつ角運動量で、全球超回転指数は大気の総角運動量を地表に対して静止した大気を持つ総角運動量で規格化したものとなっている。大気が地表に対して静止（地表と同じ自転の角速度 Ω で回転）しているなら、総相対角運動量はゼロであり $S = 0$ 。大気が地表に対して角速度 Ω で回転（地表の回転と合わせると 2Ω の角速度で回転）しているなら、 $S = 1$ となる。

図 3.10 は準定常状態と考えられる 410,000-420,000 日について平均した、全球超回転指数である。全球超回転指数は鉛直粘性の強さに依存し、鉛直粘性が小さいほど大きくなる。

特に, 鉛直粘性係数が $0.075 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ と $0.15 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ のとき, 全球超回転指数はそれぞれ 12 と 8 であり, 大気は固体惑星の自転角速度の 10 倍に近い角速度で回転している. 一方, 鉛直粘性係数が $0.30 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 以上のとき, 全球超回転指数は正なので大気は固体惑星よりは速く回転しているが, その値はほとんど 1 以下である.

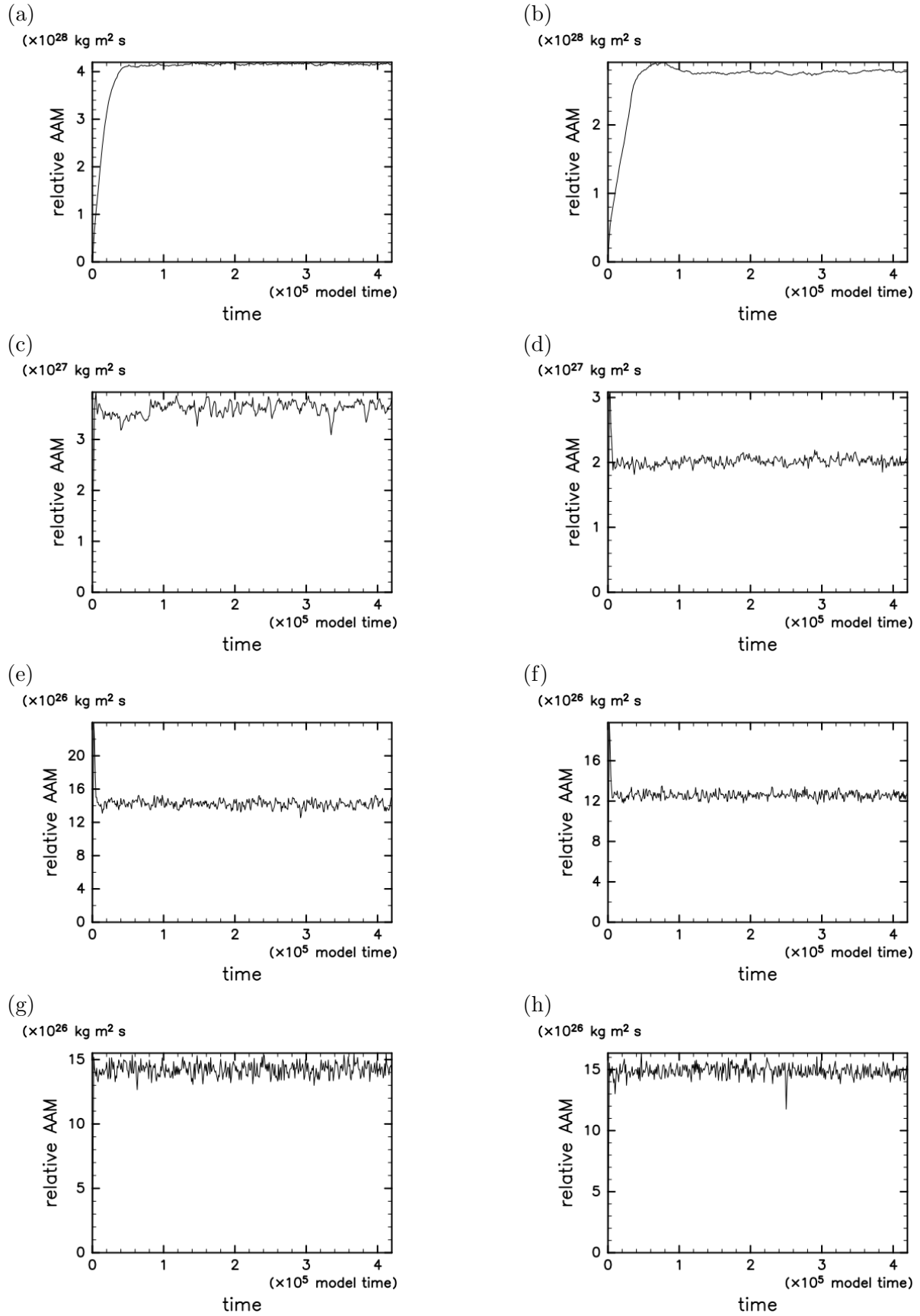


図 3.8: 総相対角運動量の時間変化. 縦軸は相対総角運動量, 横軸は計算開始からの時間 (地球日). (a) $K_z = 0.075 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (b) $K_z = 0.15 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (c) $K_z = 0.30 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (d) $K_z = 0.60 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (e) $K_z = 1.20 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (f) $K_z = 2.40 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (g) $K_z = 9.60 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (h) $K_z = 19.2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

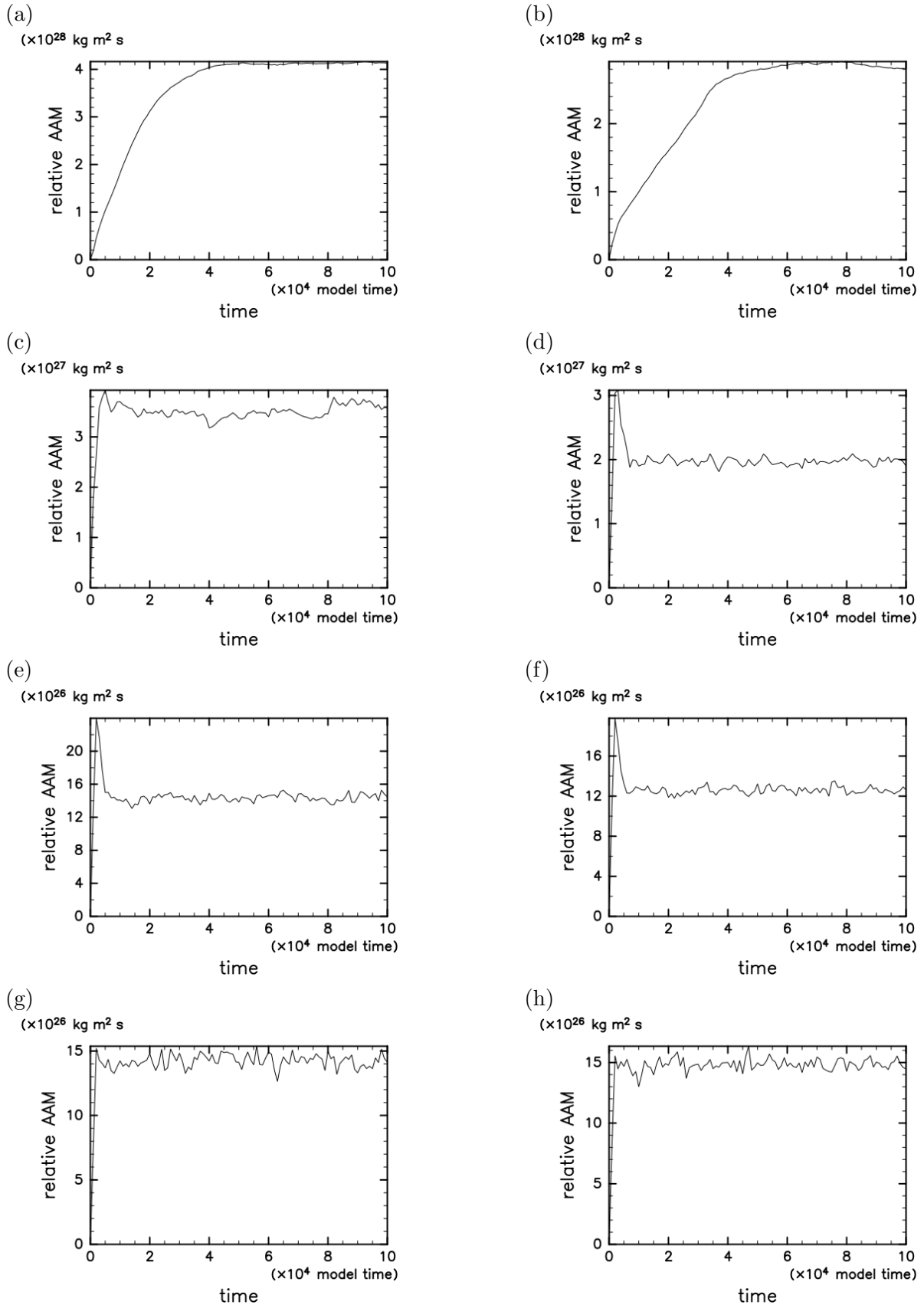


図 3.9: 総相対角運動量の時間変化. 図 3.8 の計算開始から 100,000 日を切り取った. (a) $K_z = 0.075 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (b) $K_z = 0.15 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (c) $K_z = 0.30 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (d) $K_z = 0.60 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (e) $K_z = 1.20 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (f) $K_z = 2.40 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (g) $K_z = 9.60 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (h) $K_z = 19.2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

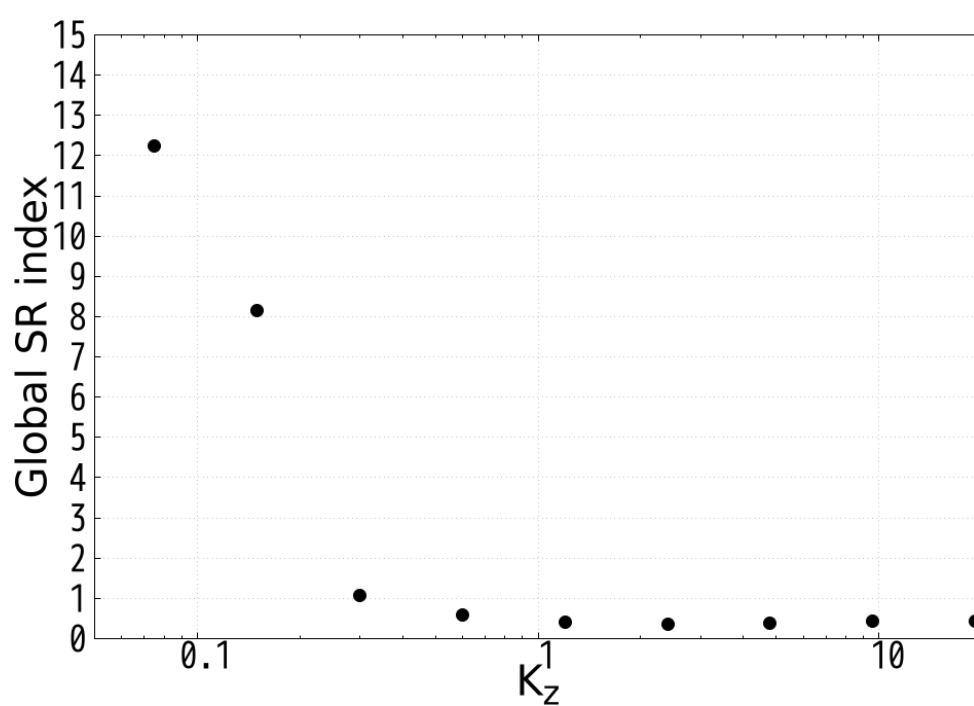


図 3.10: 全球超回転指数の鉛直粘性依存性. 全球超回転指数は 410,000 日から 420,000 日の時間平均.

3.2.2 東西風

図 3.11 は東西風速 (東西平均, 410,000 日から 420,000 日の時間平均) の子午面分布である。鉛直粘性の強さによらず, ほぼ全ての場所で西風 (惑星の自転と同じ方向に吹く風) が吹き, 東風が吹くのは低緯度の地表に近い場所に限られる。鉛直粘性が大きくなると, 東西風速は遅くなる。赤道における東西風の鉛直分布 (図 3.12(a)) は, 鉛直粘性係数が $0.60 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 以下のとき, $\sigma \sim 10^{-3}$ (高度約 62 km) で西風が最大となるが, 鉛直粘性係数が $1.20 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 以上では顕著な西風の極大は見られない。この東西風速が最大になる高度は鉛直粘性係数を大きくするにつれて上に上がるように見える。地表に近いところには, 東西風速が遅い (ほぼゼロの) 領域があり, この領域は鉛直粘性係数を大きくするにつれて上へ広がる。標準実験で西風の風速が最大になった $\sigma \sim 10^{-3}$ (高度約 62 km) における東西風速の緯度分布 (図 3.12(b)) は, 鉛直粘性係数が小さいとき赤道で西風が最も速い分布をしているが, 鉛直粘性を大きくしていくと速度の緯度勾配は小さくなっていき, 鉛直粘性係数が $0.60 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ では中緯度から高緯度にかけて緯度に依らず一定の西風が吹くようになる。さらに鉛直粘性係数を大きくすると, 赤道の西風はさらに減速し, 高緯度に西風のピークをもつ分布に変化する。

図 3.13 は東西風速 (図 3.11) の最大値と, 最大値になった緯度・高度における東西風速の変動の大きさをエラーバーで描いたものである。全体に, 鉛直粘性が強くなると, 風速は遅くなる。鉛直粘性が弱い二つのケース ($K_z=0.075 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ と $0.15 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) は, どちらも 100 m s^{-1} に近い風が吹いている。あまり風速は変わらないが, 鉛直粘性が強い $0.15 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ の風速の方が少し速い。ある程度以上に鉛直粘性が弱くなると, 風速の最大値の鉛直粘性に対する依存性は変わるのかもしれない。鉛直粘性が強くなると風速の変動は小さくなるため, 図 3.13 で鉛直粘性係数が大きいケースではエラーバーがほとんど見えなくなっている。ただし, 鉛直粘性が強いときの方が変動係数は大きくなる傾向がある (表 3.1)。風速変動の大きさが鉛直粘性の強さによって変わる理由は不明である。

全球超回転指数で見たときは, 鉛直粘性が弱い 2 つとそれ以外に分類された (3.2.1 節) が, 東西風速最大値は全球超回転指数に比べると鉛直粘性の変化に対してゆるやかに変化する。全球超回転指数で回転が遅いグループに分類された 6 つのケースのうち, 鉛直粘性係数が $0.30 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ と $0.60 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ の 2 つのケースでは 40 m s^{-1} 以上の風が吹き, それ以外の 10 m s^{-1} 以下の風しか吹かないケースとは異なるグループであると考えられる。全球超回転指数は質量で重みをつけた大気全体の積分であるため, 質量の大部分を占める下層大気の風速の影響を強く受ける。図 3.12(a) で見たように, 下層の風速が遅い層の厚さが鉛直粘性の強さによって変わることが, 全球超回転指数の値に大きな影響を及ぼす。一方, 風速が最大になる上層大気は, 下層大気よりも鉛直粘性に対する依存性が弱く, 鉛直粘性がある程度大きくなっても速く回転することができる可能性がある。

表 3.1: 東西平均東西風速の最大値.

鉛直粘性係数	0.075	0.15	0.30	0.60	1.20	2.40	4.80	9.60	19.2
最大東西風速の時間平均 $\bar{u}$	95.1	106	65.3	46.1	8.81	3.95	2.79	2.71	2.54
最大東西風速の標準偏差 σ_u	4.81	5.03	2.95	3.89	0.820	0.786	0.716	0.692	0.820
変動係数 $\sigma_u/\bar{u}$	0.056	0.0472	0.0451	0.0842	0.0931	0.199	0.257	0.255	0.274

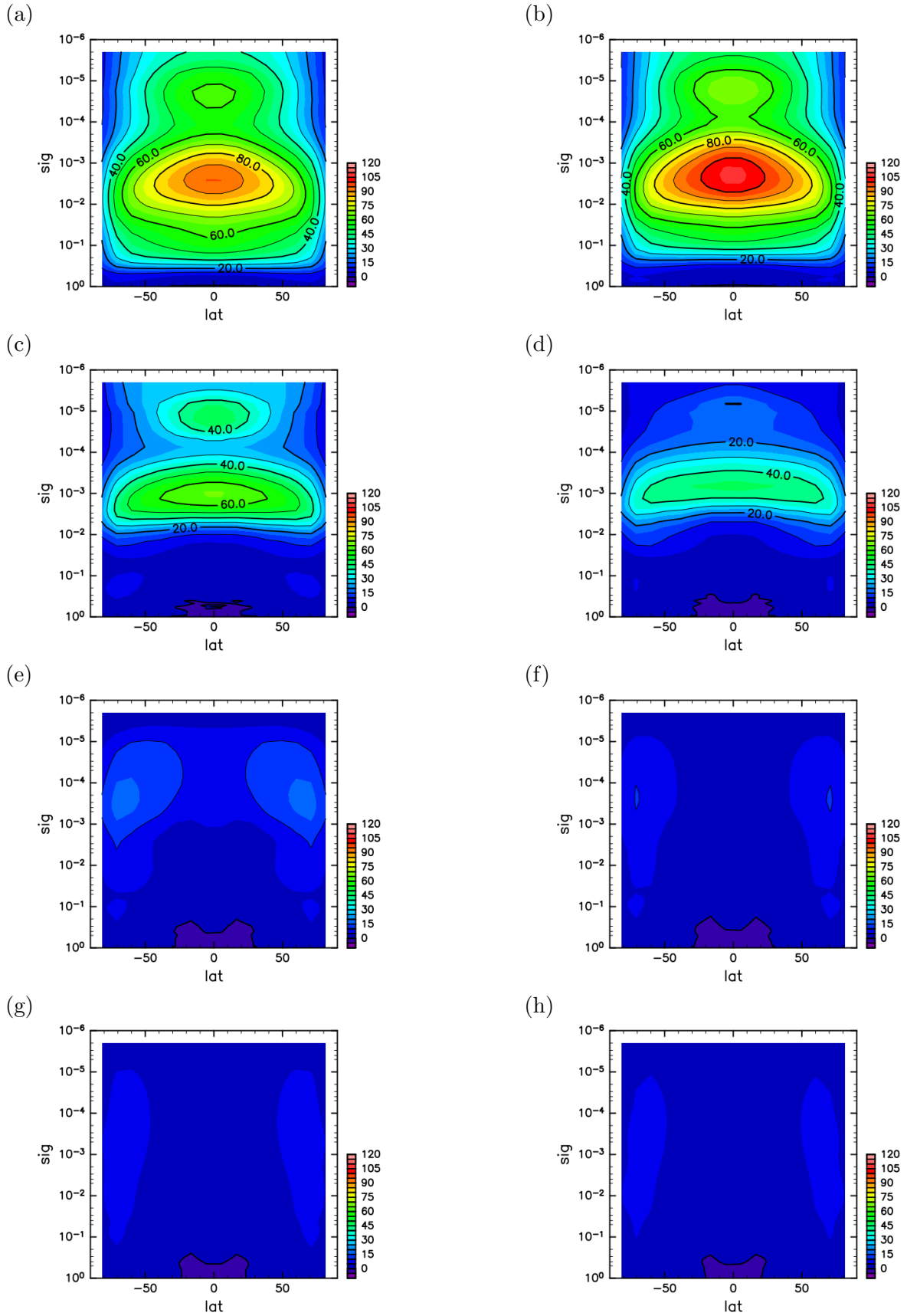


図 3.11: 東西平均東西風速の子午面分布. 410,000 日から 420,000 日の時間平均. (a) $K_z = 0.075 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (b) $K_z = 0.15 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (c) $K_z = 0.30 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (d) $K_z = 0.60 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (e) $K_z = 1.20 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (f) $K_z = 2.40 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (g) $K_z = 9.60 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (h) $K_z = 19.2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

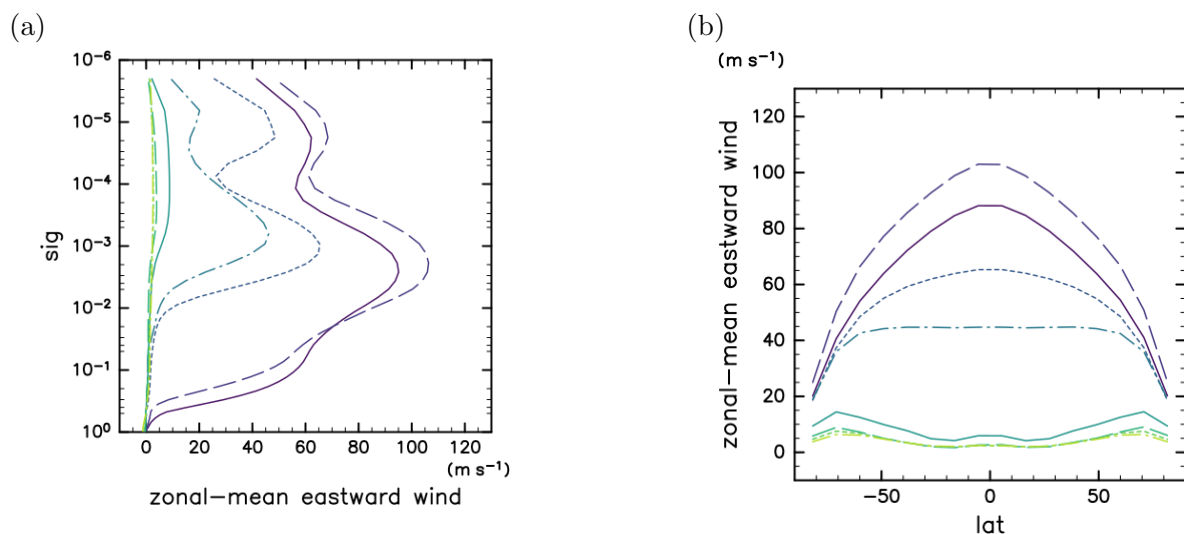


図 3.12: 東西平均東西風速. 410,000 日から 420,000 日の時間平均. (a) 北緯 5.5 度における鉛直分布. (b) $\sigma \sim 10^{-3}$ における緯度分布. 紫実線 $K_z = 0.075 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, 紫破線 $K_z = 0.15 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, 青点線 $K_z = 0.30 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, 青一点鎖線 $K_z = 0.60 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, 緑実線 $K_z = 1.20 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, 緑破線 $K_z = 2.40 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, 黄緑点線 $K_z = 9.60 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, 黄色一点鎖線 $K_z = 19.2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

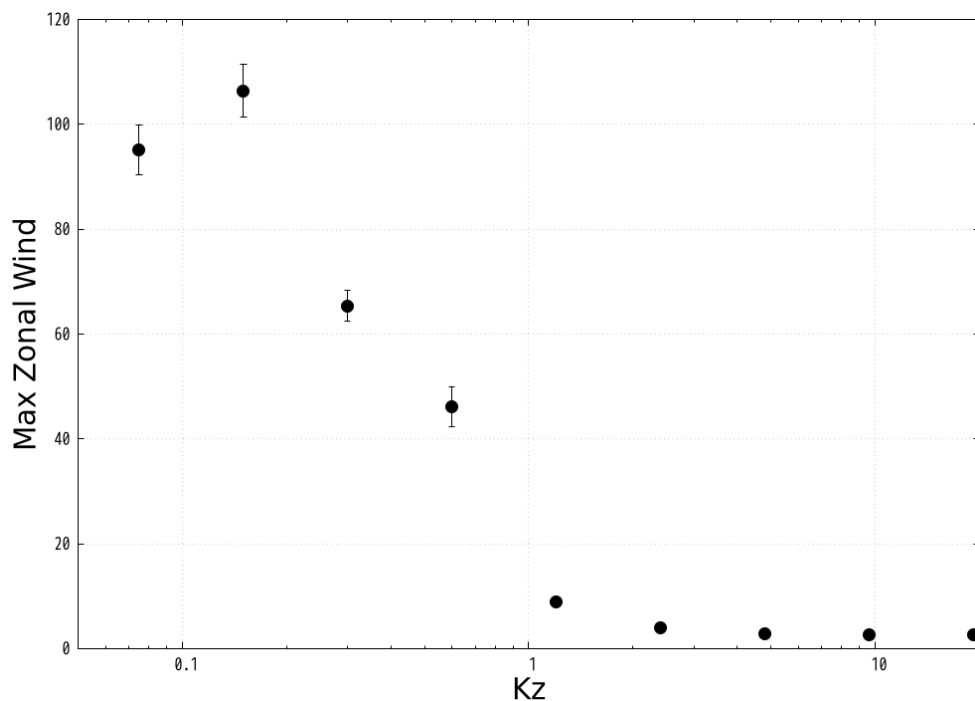


図 3.13: 東西平均東西風の最大値. 410,000 日から 420,000 日の時間平均. エラーバーは標準偏差である.

3.2.3 子午面循環

図 3.14 は質量子午面流線関数である。質量子午面流線関数 Ψ は,

$$\Psi(\varphi, \sigma, t) = 2\pi a \cos \varphi \frac{[p_s]}{g} \int_{\sigma}^1 [v](\varphi, \sigma', t) d\sigma' \quad (3.6)$$

である。ここで, $[p_s]$ は東西平均地表圧力, $[v]$ は東西平均南北風である。

子午面循環の大きな構造は, 南北両半球にそれぞれひとつずつ, それぞれ赤道から極まで, 高さ方向には地表から大気上層までつながる, 1 セルの循環である (図 3.14)。この大きな構造は鉛直粘性の強さを変えても変わらない。また, 鉛直風の子午面分布 (図 3.15) も, 各半球に上昇域と下降域がひとつずつで, 各半球にそれぞれ低緯度で上昇して高緯度で下降する 1 セルの循環であることを示している。南北方向には, 大気の大部分は極向きの流れで, 赤道向きの流れは地表付近の狭い範囲に限定される (図 3.16)。

子午面循環の強さ (質量流線関数の最大値) の鉛直粘性依存性 (図 3.17) は, 鉛直粘性係数が $0.30 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ のとき最小で, それより鉛直粘性を強くすると子午面循環は単調に強くなった。鉛直粘性係数を $0.30 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ より小さくしても, 子午面循環は強くなった。鉛直粘性係数 $0.15 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ と $0.30 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ の間で振る舞いが変わることは, 全球超回転指数 (図 3.10) にも見られており, 子午面循環の強さと全球超回転指数に関係があることが示唆される。

鉛直粘性を中くらいの強さにしたとき ($K_z = 0.3\text{--}9.60 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) には $\sigma \sim 0.02$ のあたりを中心に小さい循環が現れた (図 3.14, 3.18)。これらのケースでは, 南北風の子午面分布 (図 3.16) にも $\sigma \sim 0.03 - 0.04$ を中心とした高度に極から赤道へ向かう流れがある。鉛直粘性の強さに依らず現れる大きな循環に比べると小さく弱い循環ではあるが, 鉛直方向に子午面循環のセルが 2 つになっている (図 3.14)。

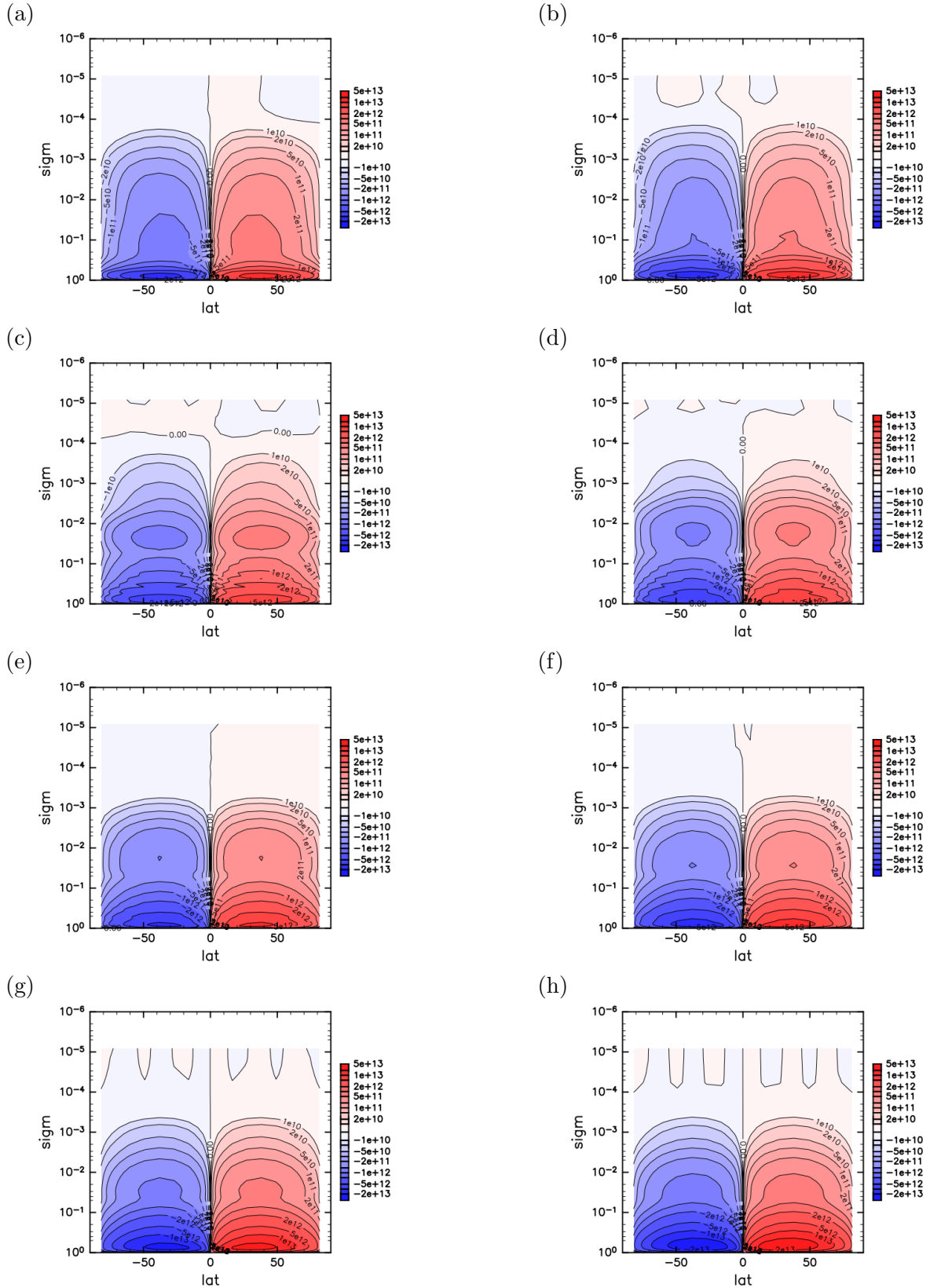


図 3.14: 子午面質量流線関数. 410,000 日から 420,000 日の時間平均. (a) $K_z = 0.075 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (b) $K_z = 0.15 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (c) $K_z = 0.30 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (d) $K_z = 0.60 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (e) $K_z = 1.20 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (f) $K_z = 2.40 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (g) $K_z = 9.60 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (h) $K_z = 19.2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

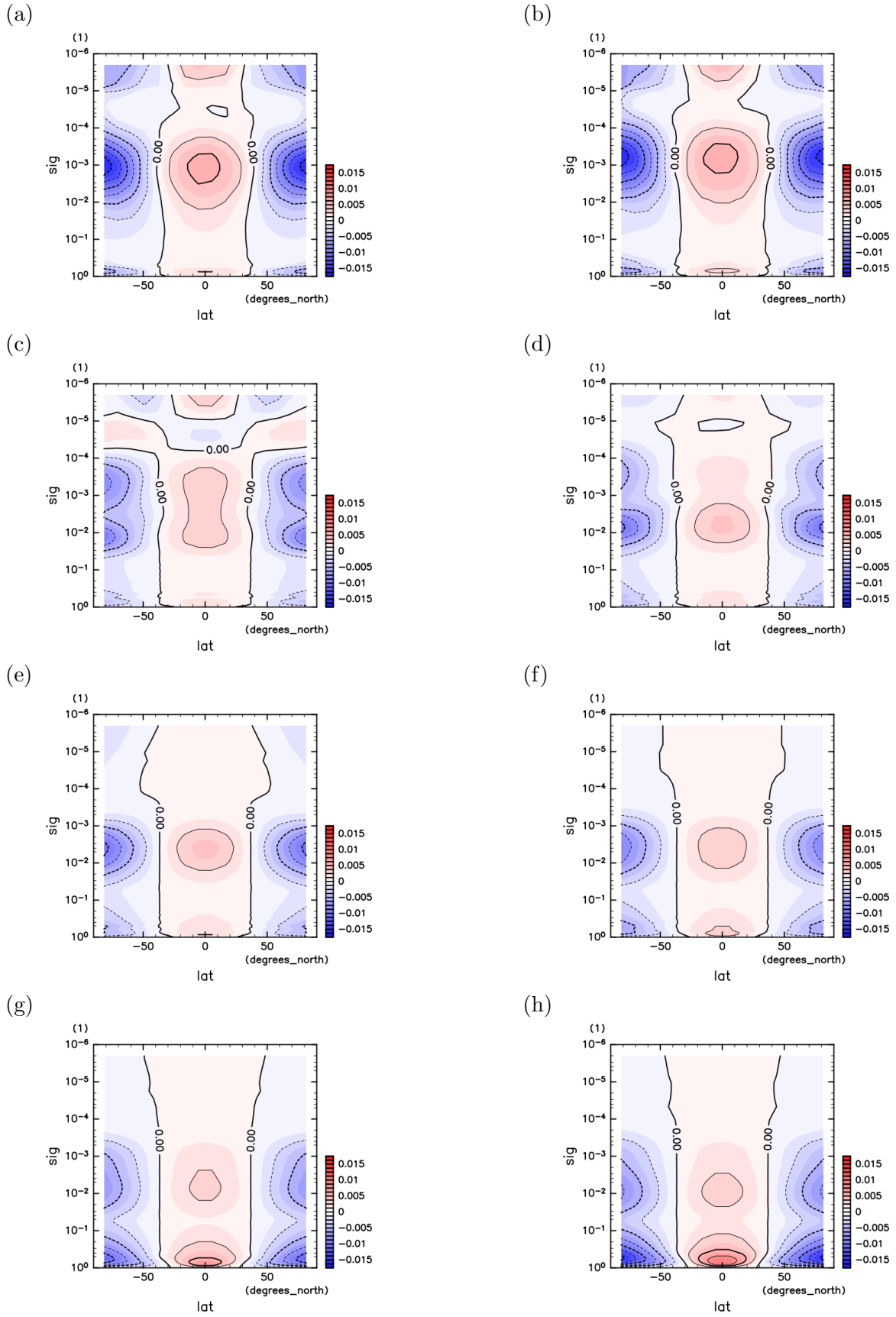


図 3.15: 東西平均鉛直風速の子午面分布. 410,000 日から 420,000 日の時間平均. (a) $K_z = 0.075 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (b) $K_z = 0.15 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (c) $K_z = 0.30 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (d) $K_z = 0.60 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (e) $K_z = 1.20 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (f) $K_z = 2.40 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (g) $K_z = 9.60 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (h) $K_z = 19.2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

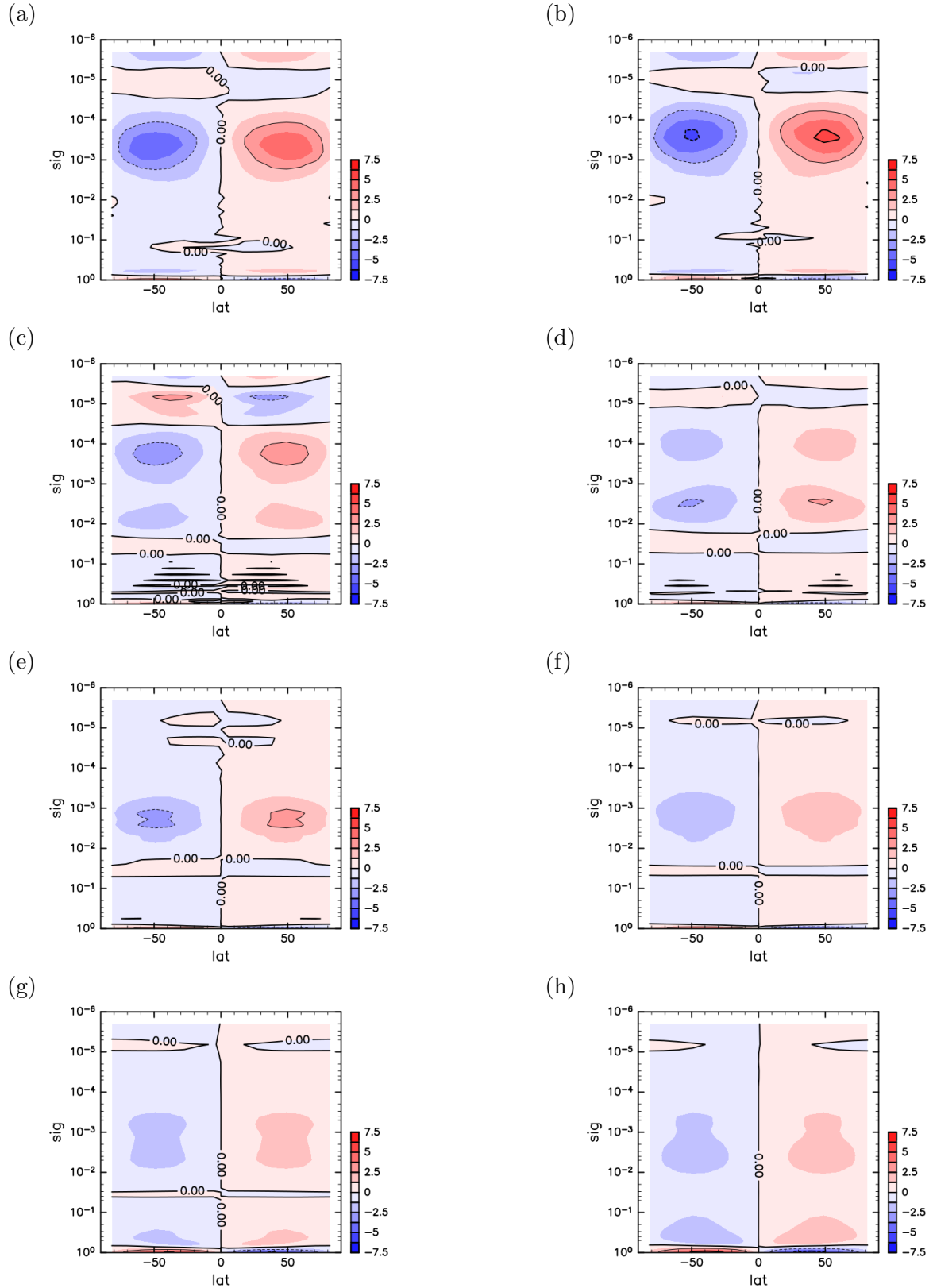


図 3.16: 東西平均南北風速の子午面分布. 410,000 日から 420,000 日の時間平均. (a) $K_z = 0.075 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (b) $K_z = 0.15 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (c) $K_z = 0.30 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (d) $K_z = 0.60 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (e) $K_z = 1.20 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (f) $K_z = 2.40 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (g) $K_z = 9.60 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (h) $K_z = 19.2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

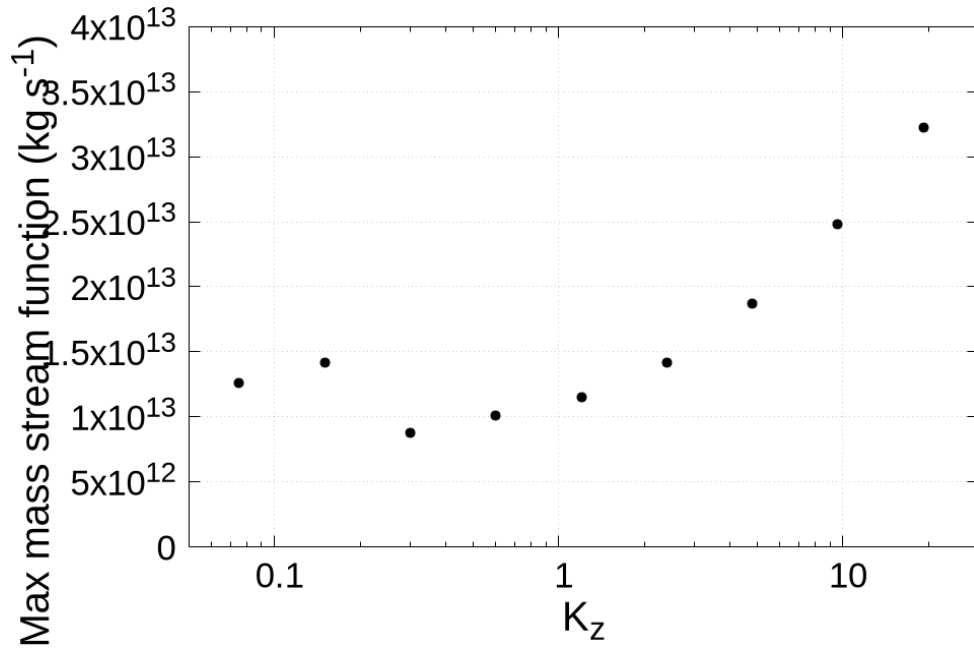


図 3.17: 質量流線関数の最大値. 410,000 日から 420,000 日の時間平均.

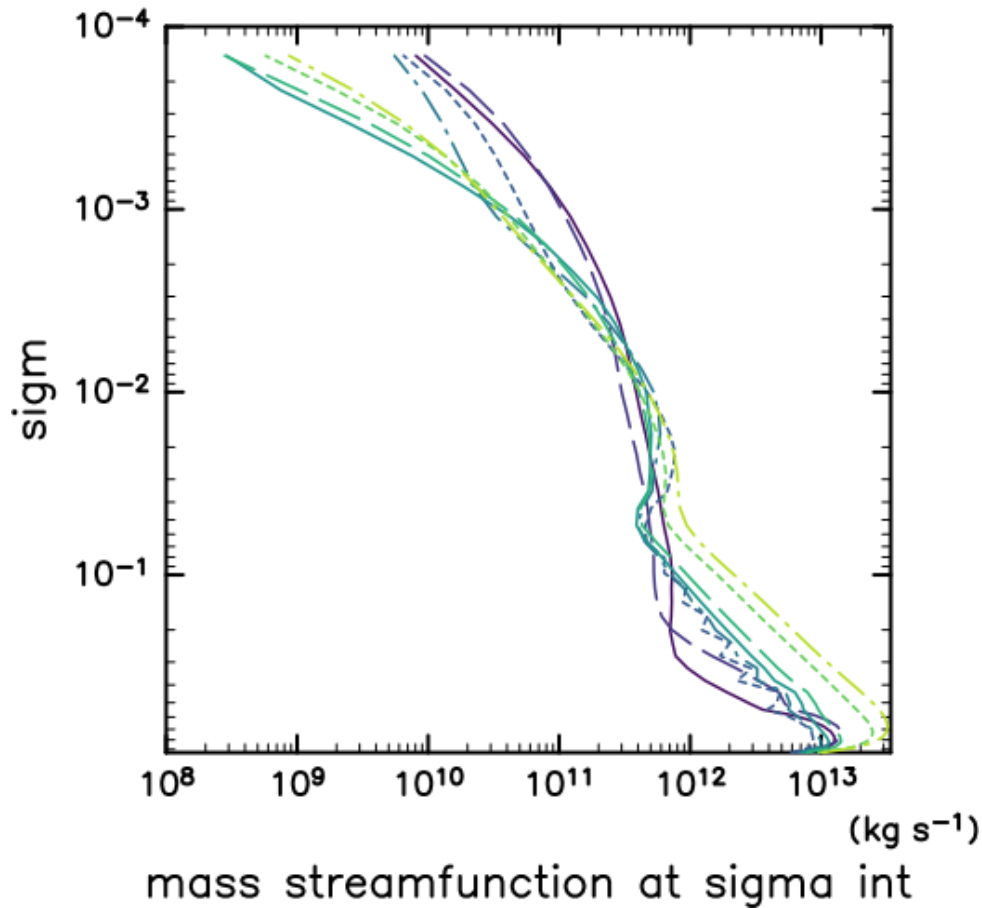


図 3.18: 北緯 38 度における子午面質量流線関数. 410,000 日から 420,000 日の時間平均. $\sigma \sim 0.9$ から $\sigma \sim 10^{-4}$. 紫実線 $K_z = 0.075 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, 紫破線 $K_z = 0.15 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, 青点線 $K_z = 0.30 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, 青一点鎖線 $K_z = 0.60 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, 緑実線 $K_z = 1.20 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, 緑破線 $K_z = 2.40 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, 黄緑点線 $K_z = 9.60 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, 黄色一点鎖線 $K_z = 19.2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

3.2.4 温度

図 3.19 は東西平均温度場である。大きな構造（地表で最も温度が高く、高度が上がるにつれて温度は下がる）がはっきりしているため、鉛直粘性による違いは見えにくいですが、図 3.20 のように温度の偏差を取ると、鉛直粘性の影響が見えるようになる。

温度偏差（全球平均太陽放射加熱を与えたときの放射平衡温度 T_0 からのずれ）の子午面分布は、鉛直粘性の強さによって大きく変わる（図 3.20）。鉛直粘性が弱いときは、温度偏差が正の領域と負の領域が存在し、南北温度傾度もある。一方、鉛直粘性が強いときは、地表に近いところを除いて大気のほぼ全層で温度偏差は負となり、南北温度傾度はほぼゼロになる。また、負の温度偏差の大きさは、鉛直粘性が強いほど大きくなる^{*1}。この温度の構造を反映して、大気安定度（浮力振動数の二乗、図 3.21）も鉛直粘性によって大きく変わる。鉛直粘性が弱いときは緯度によって安定度が変わるのに対し、鉛直粘性が強いときは、安定度は緯度方向にほとんど変わらず、大気下層に安定度の低い中立に近い領域が広く現れるようになる。

^{*1}放射過程による加熱・冷却は式 (2.1) で与えられる。 T_0 は全球平均太陽放射加熱 Q_0 を与えたときの放射平衡温度であり、 T_0 が放射平衡温度となるのは、太陽放射加熱 Q が全球平均太陽放射加熱 Q_0 に一致する緯度 37° だけである。緯度 37° 以外の場所では、 $T < T_0$ であることは放射で冷却していることを必ずしも意味しないことに注意せよ。

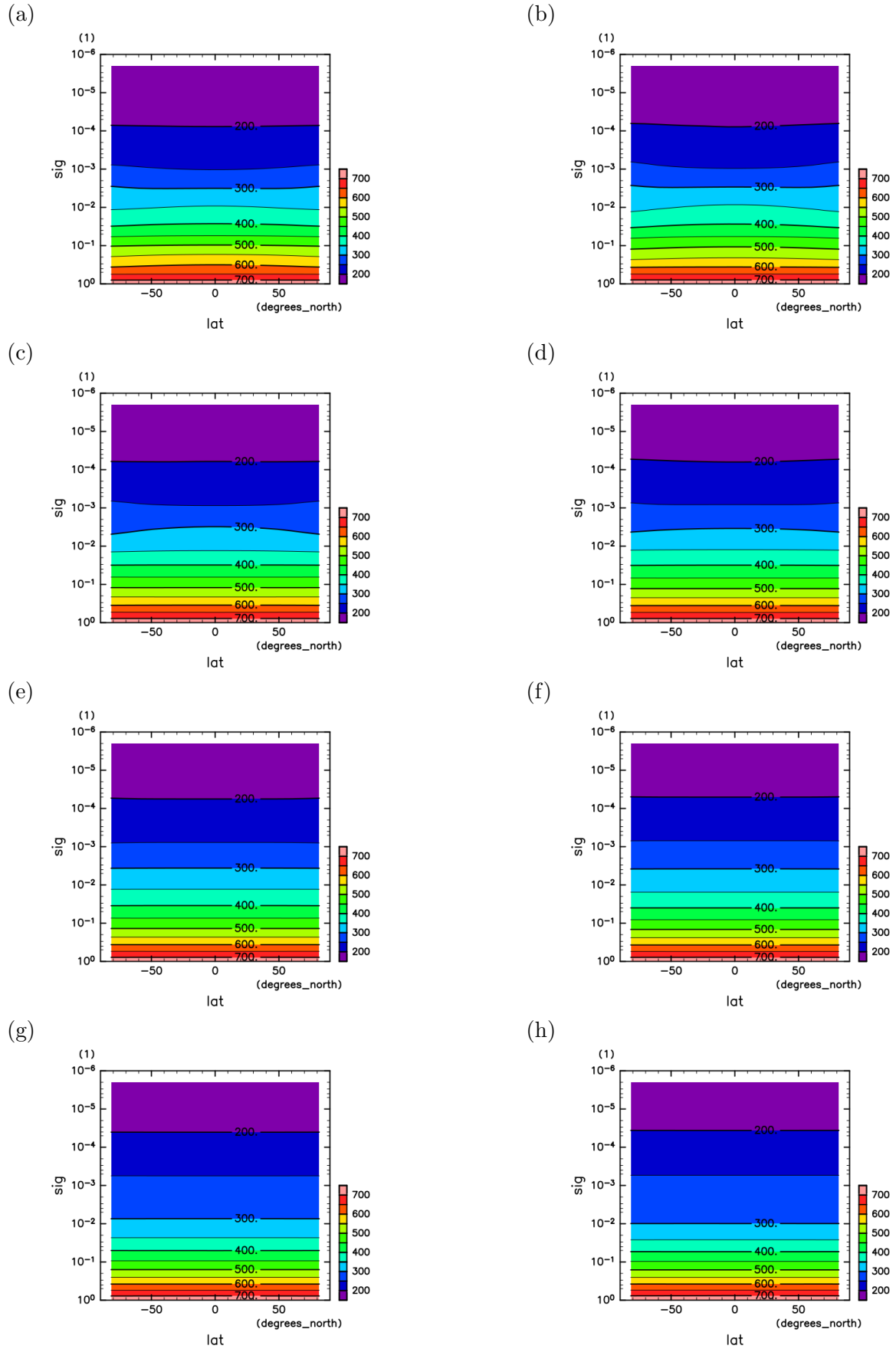


図 3.19: 東西平均温度の子午面分布. 410,000 日から 420,000 日の時間平均. (a) $K_z = 0.075 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (b) $K_z = 0.15 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (c) $K_z = 0.30 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (d) $K_z = 0.60 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (e) $K_z = 1.20 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (f) $K_z = 2.40 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (g) $K_z = 9.60 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (h) $K_z = 19.2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

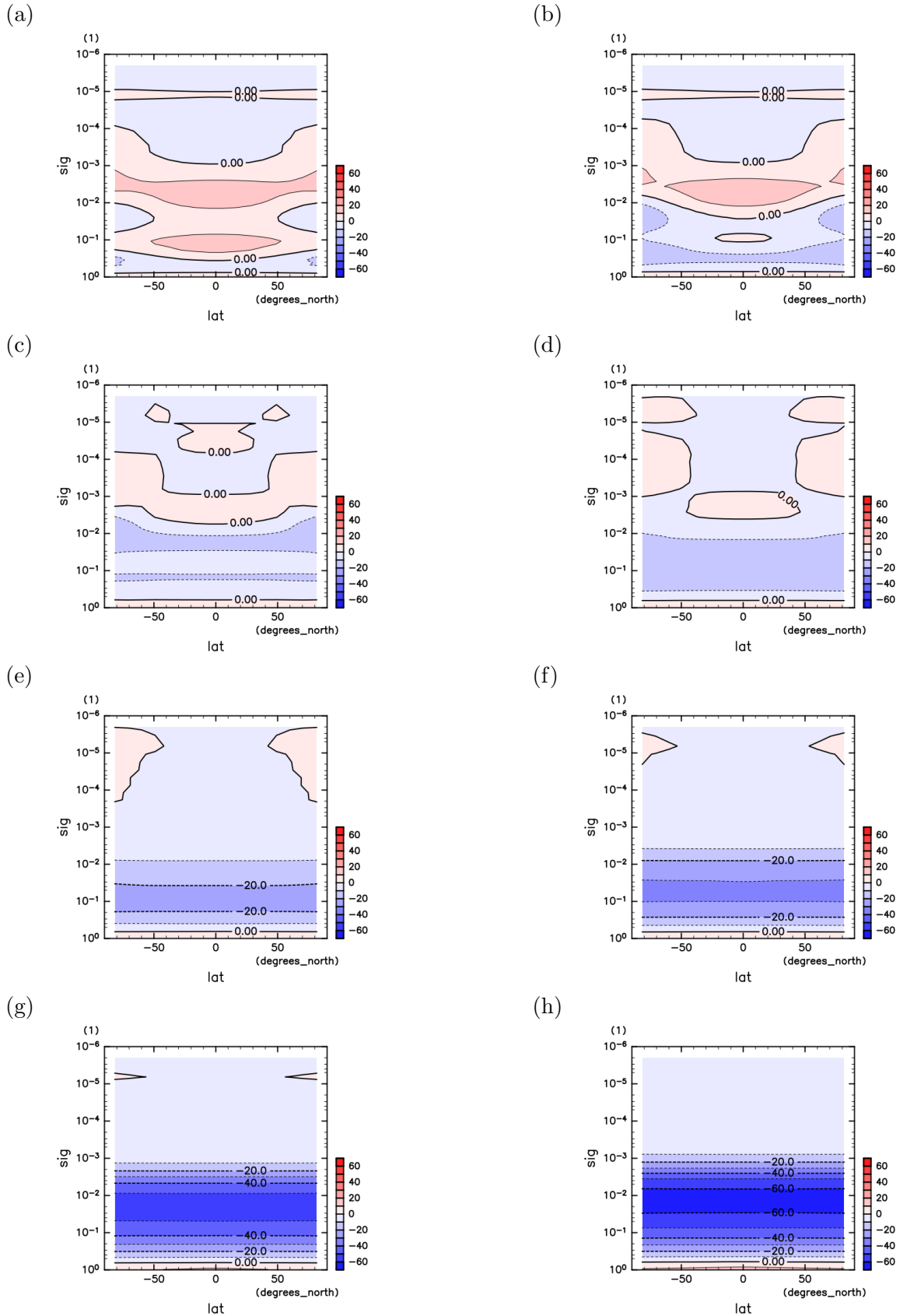


図 3.20: 東西平均温度と放射平衡温度 (図 2.2) の差の子午面分布. 410,000 日から 420,000 日の時間平均. (a) $K_z = 0.075 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (b) $K_z = 0.15 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (c) $K_z = 0.30 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (d) $K_z = 0.60 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (e) $K_z = 1.20 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (f) $K_z = 2.40 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (g) $K_z = 9.60 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (h) $K_z = 19.2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

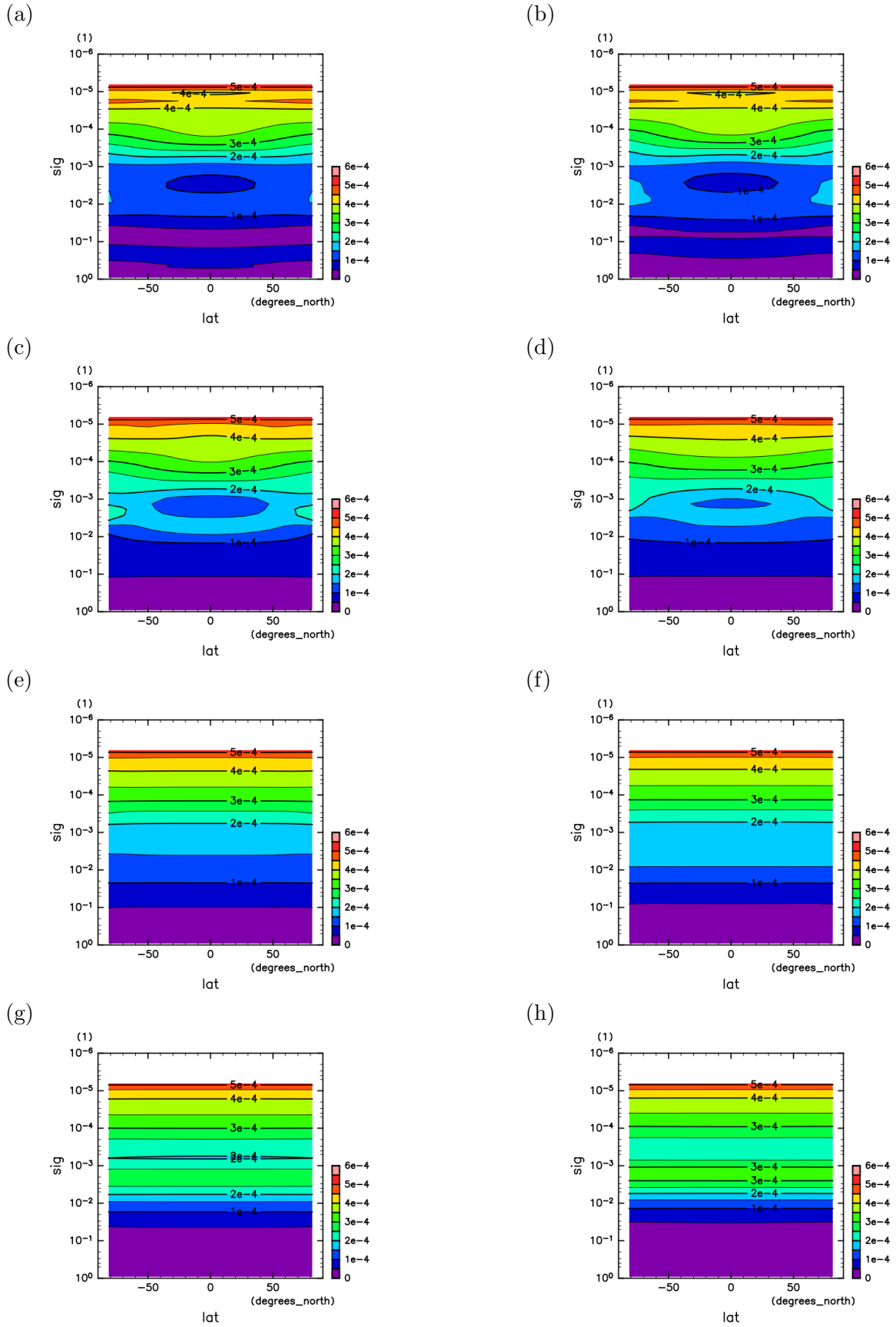


図 3.21: 大気安定度の子午面分布. 410,000 日から 420,000 日の時間平均. (a) $K_z = 0.075 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (b) $K_z = 0.15 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (c) $K_z = 0.30 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (d) $K_z = 0.60 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (e) $K_z = 1.20 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (f) $K_z = 2.40 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (g) $K_z = 9.60 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (h) $K_z = 19.2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

第 4 章 議論

鉛直粘性係数を変更した実験では、鉛直粘性係数 $0.15 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 以下の実験と $0.30 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 以上の実験との間で、全球超回転指数に大きな違いが現れた (図 3.10). 一方、東西風速の最大値は鉛直粘性係数に対して全球超回転指数よりも緩やかに変化した (図 3.13).

鉛直粘性が強くなるにつれて全球超回転指数が大きく減少したことは、地表付近の東西風速の遅い層が上方へ広がったことに対応している. 全球超回転指数は大気全体の相対角運動量を表すため、大気質量の大部分を占める下層の東西風の影響を強く受ける. これに対して、東西風速の最大値は上層の局所的な風速を表す. 大気大循環の特徴を表すためには、全球超回転指数と東西風の最大値、どちらか 1 つだけでは足りず、両方を組み合わせる必要がある.

平均子午面循環の強さが大気全体の回転の強さとどのように対応するかを調べるために、全球超回転指数と質量流線関数の最大値を比較した (図 4.1). 鉛直粘性係数が $0.15 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 以下の場合と、 $0.30 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 以上の場合で、異なるグループを作っていることは分かるが、全球超回転指数と平均子午面循環の強さとの間には、単純な対応関係は見られなかった.

また、東西風速の最大値と質量流線関数の最大値との関係を図 4.2 に示す. 鉛直粘性係数が小さい実験では、質量流線関数の最大値が特に大きくないにもかかわらず、東西風速の最大値は約 100 m s^{-1} に達した. 一方、鉛直粘性係数が大きい実験では、平均子午面循環が強くなる場合でも、東西風速の最大値は小さくなった. したがって、東西風速の最大値についても、平均子午面循環が強いほど大きくなるという単純な対応関係は見られない.

本実験では、平均子午面循環の強さと、大気全体の回転の強さおよび上層の東西風速の最大値との間に、単純な対応関係は見られなかった. したがって、質量流線関数の最大値だけから、スーパーローテーションの強さを説明することはできない.

1 章で述べた Gierasch のメカニズムでは、スーパーローテーションの形成・維持には、平均子午面循環による角運動量輸送だけでなく、上層における低緯度向きの角運動量輸送も必要である. したがって、平均子午面循環の強さだけで、スーパーローテーションの強さは決まらない. 本研究では上層の低緯度向きの角運動量輸送を解析していないため、全球超回転指数および東西風速の最大値が平均子午面循環の強さと単純に対応しなかった原因は特定できない.

また、本研究では運動量と温位に同一の鉛直粘性係数を用いている. したがって、鉛直

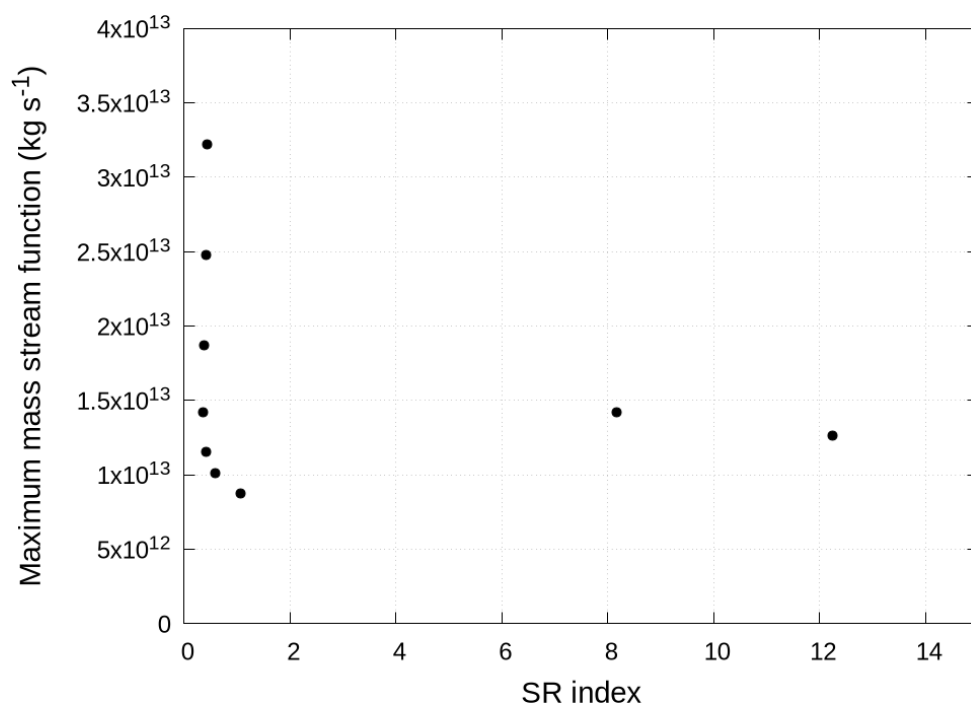


図 4.1: 全球超回転指数と質量流線関数の最大値. 410,000 日から 420,000 日の時間平均.

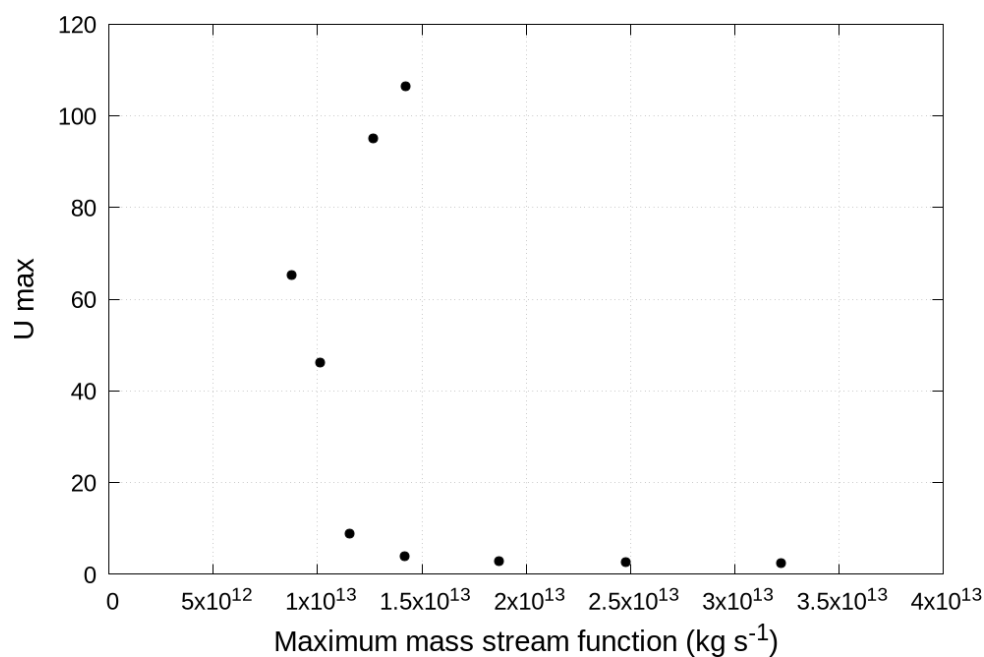


図 4.2: 東西風速の最大値と質量流線関数の最大値. 410,000 日から 420,000 日の時間平均.

粘性係数を変更したときの大気循環の変化には、水平風の鉛直拡散だけでなく、温位の鉛直拡散による温度構造の変化も含まれる。

鉛直粘性が強い実験では、下層に中立に近い領域が広がった。これは、温位の鉛直拡散が強くなったことによる直接的な変化と考えられる。また、鉛直粘性が強い実験では平均子午面循環が強くなるとともに、南北温度差が小さくなった。南北温度差の減少は、平均

子午面循環による南北熱輸送が強くなった結果と考えられる。したがって、鉛直粘性係数の変更は、温位を直接鉛直方向に拡散するとともに、平均子午面循環の変化を通じても温度構造に影響を与えた。

前述のように、鉛直粘性係数 $0.15 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 以下の実験と $0.30 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 以上の実験との間では、大気全体の回転の強さが大きく異なった。ただし、本研究で用いた鉛直粘性係数は離散的であるため、この二つの値の間に明確な臨界値が存在すると結論することはできない。また、すべての実験で大気の総相対角運動量は正であり、固体金星より速く回転する大気が形成された。したがって、この変化はスーパーローテーションの形成・非形成の境界ではなく、強いスーパーローテーションと弱いスーパーローテーションとの間の変化として解釈するのが適切である。

Sugimoto et al. (2019) では、強いスーパーローテーションの形成に本研究よりも約 1 桁小さい鉛直粘性係数が必要であった。しかし、Sugimoto et al. (2019) と本研究では、放射加熱、温度構造、空間解像度、境界層過程および水平粘性などのモデル設定が異なる。そのため、強いスーパーローテーションが得られる鉛直粘性係数の閾値が、何によって規定されているのかわからない。本研究で得られた鉛直粘性依存性は、YT03 型の簡略化された実験設定における結果である。本研究は、YT03 型の設定において鉛直粘性が大気全体の回転、東西風、平均子午面循環および温度構造を大きく変化させることを示したが、その力学的な因果関係を明らかにするためには、平均子午面循環による角運動量輸送、波・渦による角運動量輸送、鉛直粘性および地表摩擦による角運動量収支をそれぞれ評価する必要がある。

第5章 結論

本研究では、YT03 の計算設定を踏襲した簡略金星大気大循環モデルを用いて、鉛直粘性係数を $0.075\text{--}19.2\text{ m}^2\text{ s}^{-1}$ の範囲で変更した実験をおこなった。そして、鉛直粘性係数が大気の総相対角運動量、東西平均東西風、平均子午面循環および温度構造に与える影響を調べた。各実験は静止大気から 420,000 地球日まで時間積分し、最後の 10,000 地球日の結果を用いて比較した。

YT03 と同じ鉛直粘性係数 $0.15\text{ m}^2\text{ s}^{-1}$ を用いた標準実験では、東西風、平均子午面循環および温度の分布形状は YT03 とおおまかに類似していた。一方、標準実験の大気の総角運動量は YT03 の約半分であり、平均子午面循環も YT03 より弱かった。ほぼ同じ設定で計算したにも関わらず、循環の強さや大気全体の角運動量は一致しなかった原因は不明である。

鉛直粘性係数を変更した実験では、すべての実験で総相対角運動量は正となり、固体金星よりも速く回転する大気が形成された。ただし、大気全体の回転の強さは鉛直粘性係数によって大きく異なった。鉛直粘性係数が $0.075\text{ m}^2\text{ s}^{-1}$ および $0.15\text{ m}^2\text{ s}^{-1}$ の実験では、全球超回転指数はそれぞれ約 12 および約 8 となった。一方、 $0.30\text{ m}^2\text{ s}^{-1}$ 以上の実験では、全球超回転指数は 1 以下となった。したがって、本実験の範囲では、鉛直粘性係数が $0.15\text{ m}^2\text{ s}^{-1}$ 以下のときに強いスーパーローテーションが形成され、 $0.30\text{ m}^2\text{ s}^{-1}$ 以上では比較的弱いスーパーローテーションが形成された。ただし、実験に用いた鉛直粘性係数は離散的であるため、両者の間に明確な臨界値が存在するとは結論できない。

東西風速の最大値は、鉛直粘性を強くするにつれて小さくなったが、全球超回転指数よりも緩やかに変化した。また、鉛直粘性が強くなるにつれて、地表付近の東西風速の遅い層が上方へ広がった。雲層上部の最大東西風速だけでは、大気全体の回転の強さを評価できないことが示された。

平均子午面循環の強さと、全球超回転指数および東西風速の最大値との間には、単純な対応関係は見られなかった。鉛直粘性係数が $0.30\text{ m}^2\text{ s}^{-1}$ 以上の実験では、鉛直粘性が強くなるにつれて平均子午面循環は単調に強くなったが、全球超回転指数と東西風速の最大値は大きくならなかった。したがって、平均子午面循環の強さだけでは、スーパーローテーションの強さを説明できないことが示された。また、本研究で中程度の大きさの鉛直粘性係数を用いた実験では、大規模な一セルの循環に加えて上層に小さな循環が形成され、鉛直粘性は平均子午面循環の強さだけでなく、その構造も変化させることが明らかになった。

温度構造と大気安定度も、鉛直粘性の強さによって大きく変化した。鉛直粘性が弱い実験では南北温度差が存在したが、鉛直粘性が強い実験では南北温度差が小さくなり、下層に中立に近い領域が広がった。鉛直粘性係数の強さの変化は、東西風を直接変化させるだけでなく、温度構造を介して平均子午面循環にも影響を与えた可能性がある。

以上から、YT03 型の簡略金星大気大循環モデルでは、鉛直粘性が大気全体の回転の強さ、東西風の鉛直・緯度分布、平均子午面循環の強さと構造、および温度構造を大きく変化させることが明らかになった。特に、強いスーパーローテーションが形成された実験と弱いスーパーローテーションが形成された実験との違いは、雲層上部の最大東西風速だけでなく、質量の大きい下層の東西風に強く表れた。一方、平均子午面循環の強さとスーパーローテーションの強さは単純には対応しなかった。その原因を明らかにするためには、平均子午面循環、波・渦、鉛直粘性および地表摩擦による角運動量輸送を含む角運動量収支を評価する必要がある。

付録 計算に使った設定ファイル

本研究で用いた, DCPAM 5 の設定ファイルを掲載する. このファイルは静止大気から 80,000 日間の計算で用いたものである. 80,000 日から 420,000 日は DelTimeValue = 22.5, を DelTimeValue = 45.0, に変更した. 鉛直粘性を変更する実験では, ConstDiffCoefM = 0.15d0, ConstDiffCoefH = 0.15d0 を 7.5d-2, 0.30, 0.60, 1.20, 2.40, 9.60, 19.2 に変更した.

```
1  #= dcpam_ape プログラム用 NAMELIST ファイル (T10L50 用)
2  #
3  #= NAMELIST file for "dcpam_main"
4  #
5  # Copyright (C) GFD Dennou Club, 2008-2009. All rights reserved.
6  #
7  # Note that Japanese and English are described in parallel.
8  #
9
10 &dcpam_main_nml
11     DynMode           = 'HSPLVAS83',
12     PhysMode          = 'VenusSimple',
13     MCMMethod         = 'None',
14     LSCMethod         = 'None',
15     CloudMethod       = 'None',
16     SfcMoistMethod    = 'None'
17     DCMMethod         = 'None',
18 /
19 &fileset_nml
20     FileTitle = 'Venus-like planet experiments',
21               ! 出力データファイルの表題.
22               ! Title of output data files
23     FileSource = 'dcpam5 $Name: $ (http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam)',
24               ! データファイル作成の手段.
25               ! Source of data file
26     FileInstitution = 'GFD Dennou Club (http://www.gfd-dennou.org)',
27               ! データファイルを最終的に変更した組織個人/.
28               ! Institution or person that changes data files
29     for the last time
30 /
31 &gridset_nml
32     nmax = 10,           ! 最大全波数.
33                       ! Maximum truncated wavenumber
34     imax = 32,          ! 経度格子点数.
35                       ! Number of grid points in longitude
```

```

35     jmax = 16,                ! 緯度格子点数.
36                                ! Number of grid points in latitude
37     kmax = 50                ! 鉛直層数.
38                                ! Number of vertical level
39 /
40 &timeset_nml
41     cal_type      = 'noleap',
42     RestartTimeValue = 0.0,
43                                ! リスタート開始時刻.
44                                ! Restart time of calculation
45     RestartTimeUnit = 'day',
46                                ! リスタート開始時刻の単位.
47                                ! Unit of restart time of calculation
48     IntegPeriodValue = 80000.0,
49                                ! 積分時間.
50                                ! Integral time.
51     IntegPeriodUnit = 'day',
52                                ! 計算開始時刻の単位.
53                                ! Unit of end time of calculation
54     DelTimeValue    = 22.5,
55                                ! $ \Delta t $ . 単位は DelTimeUnit にて指定.
56                                ! Unit is specified by "DelTimeUnit".
57     DelTimeUnit      = 'min',
58                                ! $ \Delta t $ の単位.
59                                ! Unit of $ \Delta t $
60     ! 計算開始日時
61     ! Start date of calculation
62     !
63     InitialYear = 2000, InitialMonth = 1, InitialDay = 1
64     InitialHour = 0, InitialMin = 0, InitialSec = 0.0
65
66     ! 計算終了日時 ("IntegPeriodValue" が負の場合にこちらが使用される)
67     ! End date of calculation (These are used when "IntegPeriodValue" is negative
68     ! )
69     EndYear = 2000, EndMonth = 2, EndDay = 1
70     EndHour = 0, EndMin = 0, EndSec = 0.0
71
72     PredictIntValue = 1.0,
73                                ! 終了予測日時表示間隔.
74                                ! Interval of predicted end time output
75     PredictIntUnit = 'day',
76                                ! 終了予測日時表示間隔 単位().
77                                ! Unit for interval of predicted end time output
78     CpuTimeMoniter = .true.
79                                ! CPU 時間計測のオンオフ
80                                ! On/off of CPU time monitoring
81 /
82 &check_prog_vars_nml
83     TempMax = 800.0
84 /

```

```

85 &restart_file_io_nml
86   InputFile = 'init_T10L50.nc',
87                                     ! 入力する初期値リスタートデータのファイル名/
88                                     ! filename of input initial/restart data
89   OutputFile = 'rst.nc',
90                                     ! 出力するリスタートデータのファイル名
91                                     ! filename of output restart data
92   IntValue = 1000.0,
93                                     ! リスタートデータの出力間隔.
94                                     ! Interval of restart data output
95   IntUnit = 'day'
96                                     ! リスタートデータの出力間隔の単位.
97                                     ! Unit for interval of restart data output
98 /
99 &axesset_nml
100   Sigma = 1.000000e+00, 9.379977e-01, 8.791653e-01, 8.233760e-01, 7.705096e-01,
101           7.204599e-01, 6.731101e-01, 6.283451e-01, 5.860672e-01, 5.461760e-01,
102           5.085631e-01, 4.397404e-01, 3.787941e-01, 3.250310e-01, 2.777815e-01,
103           2.363619e-01, 2.001847e-01, 1.687540e-01, 1.415539e-01, 1.180678e-01,
104           9.789408e-02, 8.067844e-02, 6.606392e-02, 5.372601e-02, 4.337159e-02,
105           3.474169e-02, 2.761360e-02, 2.176732e-02, 1.700703e-02, 1.315972e-02,
106           1.007453e-02, 7.629873e-03, 5.712555e-03, 4.220407e-03, 3.075735e-03,
107           2.214126e-03, 1.572508e-03, 1.099512e-03, 7.564072e-04, 5.119033e-04,
108           3.410327e-04, 2.235434e-04, 1.445215e-04, 9.217955e-05, 5.806703e-05,
109           3.615359e-05, 2.227181e-05, 1.359146e-05, 8.225752e-06, 4.954388e-06,
110           0.0
111                                     ! $ \sigma $ レベル 半整数().
112                                     ! Half $ \sigma $ level
113 /
114 &constants_nml
115   RPlanet      = 6052.0d3,
116                                     ! $ a $ [m].
117                                     ! 惑星半径.
118                                     ! Radius of planet
119   Omega        = -2.993d-7,
120                                     ! $ \Omega $ [s-1].
121                                     ! 回転角速度.
122                                     ! Angular velocity
123   Grav         = 8.90d0,
124                                     ! $ g $ [m s-2].
125                                     ! 重力加速度.
126                                     ! Gravitational acceleration
127   CpDry        = 837.0d0,
128                                     ! $ C_p $ [J kg-1 K-1].
129                                     ! 乾燥大気の定圧比熱.
130                                     ! Specific heat of air at constant pressure
131   MolWtDry     = 44.0d-3
132                                     ! $ ?? $ [kg mol-1].
133                                     ! 乾燥大気の平均分子量.
134                                     ! Mean molecular weight of dry air
135 /

```

```

136 &dynamics_hspl_vas83_nml
137   HDOrder = 4,
138                                     ! 超粘性の次数. Order of hyper-viscosity
139   HDEFoldTimeValue = 40.0,
140                                     ! 最大波数に対する e-folding time.
141                                     ! 負の値を与えると, 水平拡散係数をゼロにします.
142                                     !
143                                     ! E-folding time for maximum wavenumber.
144                                     ! If negative value is given,
145                                     ! coefficients of horizontal diffusion become
146                                     zero.
147   HDEFoldTimeUnit = 'days',
148                                     ! 最大波数に対する e-folding time の単位.
149                                     ! Unit of e-folding time for maximum wavenumber
149   RefTemp          = 500.0d0,
150   FlagSpongeLayer   = .true.,
151   FlagSpongeLayerforZonalMean = .true.,
152   FlagSpongeLayerforHeat = .false.
153   SLEFoldTimeValue   = 30.0d0,,
154   SLEFoldTimeUnit    = 'day',
155   SLOrder            = 2
156 /
157 &vdiffusion_my_nml
158   FlagConstDiffCoef = .true.,
159   ConstDiffCoefM     = 0.15d0,
160   ConstDiffCoefH     = 0.15d0
161 /
162 &check_prog_vars_nml
163   TempMax = 800.0d0
164 /
165 !
166 ! ヒストリデータ出力の全体設定
167 ! Global settings about history data output
168 !
169 &gtool_historyauto_nml
170   IntValue = 1.0,
171                                     ! ヒストリデータの出力間隔の数値.
172                                     ! 負の値を与えると, 出力を抑止します.
173                                     !
174                                     ! Numerical value for interval of history data
175                                     output
176                                     ! Negative values suppress output.
177   IntUnit = 'day',
178                                     ! ヒストリデータの出力間隔の単位.
179                                     ! Unit for interval of history data output
180   Precision = 'float',
181                                     ! ヒストリデータの精度.
182                                     ! Precision of history data
183   FilePrefix = '',
184                                     ! ヒストリデータのファイル名の接頭詞.
185                                     ! Prefixes of history data filenames

```

```
185 /
186 !
187 ! ヒストリデータ出力の個別設定
188 ! Individual settings about history data output
189 !
190 &gtool_historyauto_nml
191   Name = 'U, V, Temp, Ps, QVap',
192 /
193 &gtool_historyauto_nml
194   Name = 'SigDot, OMG'
195 /
196 &gtool_historyauto_nml
197   Name = 'Mass, KinEngy, IntEngy, PotEngy, LatEngy, TotEngy, Enstro'
198   SpaceAverage = .true., .true., .true.,
199   Precision = 'double',
200 /
201 &gtool_historyauto_nml
202   Name = 'VTempEq, VSRadHR, VEquivTempEq, VUBalance'
203 /
```

謝辞

本研究を行うにあたって、多くの方にご協力をいただきました。はしもとじょーじ教授には、地球流体力学の基礎、研究方法、発表資料など多くのご指導をいただきました。特に、研究テーマを決めきれない際に背中を押してもらえました。樫村博基準教授には、英語の読み方やデータの解析手法をご指導いただきました。また、共用計算資源を他の利用者に配慮して使用方法をご指導いただきました。この経験は、今後共同で計算資源を利用する際にも役立つと考えています。林祥介名誉教授には、地球流体力学の基礎や、論文の読み方を多くご指導いただきました。高橋芳幸准教授には、発表資料や金星研究の流れなど修士論文を書く前に知っておくべきことを多く学びました。大淵済特命教授にはセミナーで有用な指摘を多くいただきました。地球および惑星大気科学研究室の学生の皆様には、研究室活動で多くのご協力をいただきました。改めて皆様に感謝します。

本研究では、大気大循環に地球流体電脳倶楽部が開発している DCPAM を使用しました。計算結果の解析には、地球流体電脳倶楽部の gtool5 を、描画には地球流体 Ruby プロジェクトの GPhys を用いました。

参考文献

- [1] Boyer, C., and H. Camichel, 1961, Observations Photographiques de la Planète Vénus. *Annls. Astrophs.*, 24:531-535 <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1961AnAp...24..531B>
- [2] Fels, S. B., and R. S. Lindzen, 1974, The interaction of thermally excited gravity waves with mean flows. *Geophysical Fluid Dynamics*, 6: 149-191. <https://doi.org/10.1080/03091927409365793>
- [3] Gierasch, P. J., 1975, Meridional Circulation and the Maintenance of the Venus Atmospheric Rotation. *J. Atmos. Sci.*, 32: 1038-1044. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1975\)032%3C1038:MCATM0%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1975)032%3C1038:MCATM0%3E2.0.CO;2)
- [4] Hollingsworth, J. L., R. E. Young, G. Schubert, C. Covey, and A. S. Grossman, 2007, A simple-physics global circulation model for Venus: Sensitivity assessments of atmospheric superrotation, *Geophys. Res. Lett.*, 34: L05202. <https://doi.org/10.1029/2006GL028567>
- [5] Read, P.L., 1986a, Super-rotation and diffusion of axial angular momentum: I. ‘Speed limits’ for axisymmetric flow in a rotating cylindrical fluid annulus. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 112: 231-251. <https://doi.org/10.1002/qj.49711247113>
- [6] Read, P.L., 1986b, Super-rotation and diffusion of axial angular momentum: II. A review of quasi-axisymmetric models of planetary atmospheres. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 112: 253-272. <https://doi.org/10.1002/qj.49711247114>
- [7] Rossow, W.B., A.D. Del Genio, and T. Eichler, 1990: Cloud-tracked winds from Pioneer Venus OCPP images. *J. Atmos. Sci.*, 47: 2053-2084. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1990\)047<2053:CTWFO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1990)047<2053:CTWFO>2.0.CO;2)
- [8] Sánchez-Lavega, A., P. Irwin, A. G. García Muñoz, 2023, Dynamics and clouds in planetary atmospheres from telescopic observation. *Astron. Astroph. Rev.*, 31:5. <https://doi.org/10.1007/s00159-023-00150-9>
- [9] Schubert, G., 1983, General circulation and the dynamical state of the Venus atmosphere. In *Venus* (D. M. Hunten, L. Colin, T.M. Donahue, and V. I. Moroz, ed.), University of Arizona Press, Tucson, pp.681-765.
- [10] Sugimoto, N., M. Takagi, and Y. Matsuda, 2019, Fully developed superrotation driven by the mean meridional circulation in a Venus GCM. *Geophys. Res. Lett.*, 46: 1776-1784. <https://doi.org/10.1029/2018GL080917>

- [11] Sugimoto, N., Y. Fujisawa, N. Komori, H. Kashimura, M. Takagi, Y. Matsuda., 2023, Super-rotation independent of horizontal diffusion reproduced in a Venus GCM. *Earth Planets Space.*, 75:44 <https://doi.org/10.1186/s40623-023-01806-7>
- [12] Takahashi, Y. O., H. Kashimura, S. Takehiro, M. Ishiwatari, S. Noda, M. Odaka, T. Horinouchi, Y-Y. Hayashi, DCPAM Development Group, 2018, DCPAM: planetary atmosphere model, <http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/>, GFD Dennou Club.
- [13] 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. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2003\)060%3C0561:TFDSSB%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2003)060%3C0561:TFDSSB%3E2.0.CO;2)
- [14] Yamamoto, M., and M. Takahashi, 2006, Superrotation Maintained by Meridional Circulation and Waves in a Venus-Like AGCM. *J. Atmos. Sci.*, 63: 3296-3314. <https://doi.org/10.1175/JAS3859.1>
- [15] 松田佳久, 2000 「惑星気象学」 東京大学出版会.