

水惑星の大気大循環：
自転角速度依存性に関する研究

41424501

石岡 翔

岡山大学大学院 自然科学研究科 地球科学専攻

2014/02/14

要旨

自転角速度によって大気の大循環と惑星の熱収支がどのように変わるのか大気大循環モデルを用いて調べた。自転角速度の変更はコリオリパラメタを変えるだけでなく、太陽日(日が昇ってまた次に陽が昇るまでの時間)も変える。しかしながら、太陽日の変化が大気にどのような影響を及ぼすのかについてはあまり調べられていない。本研究ではコリオリパラメタの大きさが変わることと、太陽日の長さが変わることの2つの効果を切り分けるために次の3つのケースについて実験をおこなった。(実験A)自転角速度を変える実験(コリオリパラメタと太陽日が変わる)、(実験C)コリオリパラメタを変える実験、(実験D)太陽日を変える実験。それぞれについて自転角速度を地球の4倍から1/16倍まで変える実験をおこなった。その結果、コリオリパラメタを変えた実験Aと実験Cでは大気の大循環は自転角速度によって変化し、自転角速度が速いほどハドレー循環の幅は狭くなった。一方、太陽日を変えた実験Dでは自転角速度を変えてもハドレー循環の幅は変化しなかった。このことからハドレー循環の幅はコリオリパラメタによって決まっており、日変化の影響は小さいと考えられる。一方で、全球平均の地表温度は太陽日を変えた実験Aと実験Dにおいて変化し、自転角速度が速いほど地表温度は高くなった。コリオリパラメタだけを変えた実験Cでは地表温度は太陽日を変えた場合に対してほとんど変わらなかった。全球平均の地表温度は太陽日によって変化し、コリオリパラメタの影響は小さいと考えられる。

A general circulation model (GCM) was used to investigate how the atmospheric circulation and planetary heat balance depend on the planetary rotation rate. The rotation rate determines the Coriolis parameter and the solar day, which is the time between sunrises. Although the effect of the Coriolis parameter on the general circulation has been investigated, the effect of solar day has not been well examined. In order to investigate the influence of the rotation rate on the atmospheric general circulation, we calculated the atmospheric circulation on an aqua planet whose rotation rate is arbitrary given. For each planetary rotation rate, we calculated the following 3 cases: Case A, both the Coriolis parameter and the solar day are changed according to the rotation rate; Case C, only the Coriolis parameter is changed according to the rotation rate (the solar day is fixed regardless of the rotation rate); Case D, only the solar day is changed according to the rotation rate (the Coriolis parameter is fixed regardless of the rotation rate). The extent of the Hadley circulation varied according to the rotation rate in case A and C, though it was not changed in case D. It is likely that the Hadley circulation is controlled by the Coriolis parameter, and is not affected by the length of solar day. On the other hand, the global mean surface temperature varied according to the rotation rate in case A and D, though it was less influenced by the rotation rate in case C. It indicates that not the Coriolis parameter but the length of solar day plays an important role in determining the global mean surface temperature.

目次

第1章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 本研究の目的	4
第2章 モデルと実験設定	5
2.1 モデルの記述	5
2.1.1 座標系と離散化の方法	5
2.1.2 力学過程の支配方程式	5
2.1.3 物理過程	7
2.2 実験設定	8
2.2.1 解像度	8
2.2.2 初期値	10
2.3 実験セット	11
第3章 大気の大循環	12
3.1 質量流線関数	12
3.2 ハドレー循環	12

3.3	東西風速	16
第4章	惑星の熱収支	21
4.1	地表温度	21
4.2	惑星アルベド	23
4.3	大気上端の短波放射	23
4.3.1	緯度分布	23
4.3.2	短波放射加熱の分布の変化	24
4.4	温室効果	29
4.5	雲水	31
4.5.1	雲水量とアルベド	31
4.5.2	雲水の偏差	31
4.6	降水量	37
4.6.1	コリオリパラメタを変えた場合	37
4.6.2	太陽日を変えた場合	38
第5章	まとめ	39
	謝辞	40
A	短波放射加熱の偏差の相関	41
B	日平均日射を与えた実験	46
B-1	実験設定	46
B-2	結果	47

C	Held and Hou (1980) で提示されたハドレー循環の軸対称モデル . . .	52
D	数値実験の設定ファイル	53
E-5	緯度分布	59
E-6	地方時分布	63
E-7	子午面断面	67
E-8	緯度-地方時分布	77
E-9	赤道断面	112
E-10	緯度地方時分布 (偏差)	123
	参考文献	154

目次

1.1	子午面質量流線関数 (Williams, 1988). 横軸は緯度, 縦軸は気圧.	2
1.2	自転角速度とハドレー循環の緯度幅 (Walker and Schneider, 2006). 横軸は自転角速度, 縦軸はハドレー循環の緯度幅	3
2.1	オゾンの子午面分布 [kg/kg]. 横軸は緯度, 縦軸は気圧.	10
2.2	本研究におけるパラメータ空間. 横軸はコリオリパラメタの大きさ, 縦軸は太陽日の長さ. 黒は自転角速度を変えた実験 A, 青はコリオリ パラメタだけを変えた実験 C, 赤は太陽日だけを変えた実験 D.	11
3.1	子午面質量流線関数 [kg/s]. 時間平均, 経度平均. 実験 A. 横軸は緯 度, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.	14
3.2	自転角速度とハドレー循環の緯度幅. 横軸は自転角速度, 縦軸はハ ドレー循環の緯度幅 [degree]. 図中の黒は自転角速度を変えた実験 A,	15
3.3	自転角速度とハドレー循環の強さ.	15
3.4	東西風の子午面分布 [m/s]. 時間平均, 経度平均. 実験 A. 横軸は緯 度, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.	17
3.5	東西風の子午面分布 [m/s]. 時間平均, 経度平均. 実験 C. 横軸は緯 度, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.	18
3.6	東西風の子午面分布 [m/s]. 時間平均, 経度平均. 実験 D. 横軸は緯 度, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.	19
3.7	偏西風ジェット的位置. 横軸は自転角速度, 縦軸は緯度. 図中の黒は 自転角速度を変えた実験 A, 青はコリオリパラメタだけを変えた実 験 C, 赤は太陽日だけを変えた実験 D.	20

4.1	自転角速度と全球平均の地表温度. 横軸は自転角速度, 縦軸は全球平均の地表温度. 図中の黒は自転角速度 (太陽日とコリオリパラメタ) を変えた実験 A, 青コリオリパラメタだけ変えた実験 C, 赤は太陽日だけ変えた実験 D.	22
4.2	自転角速度と惑星アルベド. 横軸は自転角速度, 縦軸は惑星アルベド. 図の中の印はそれぞれ, 黒は自転角速度を変えた実験 A, 青はコリオリパラメタだけを変えた実験 C, 赤は太陽日だけを変えた実験 D である.	23
4.3	大気上端の短波放射フラックス緯度分布. 横軸は緯度, 縦軸は大気上端における短波放射フラックス [W/m^2]. それぞれの図は (a) 自転角速度を変えた実験 A, (b) コリオリパラメタだけを変えた実験 C, (c) 太陽日だけを変えた実験 D.	24
4.4	大気上端の短波放射フラックスの偏差. 実験 A. 縦軸は緯度, 横軸は地方時 (横軸の端は真夜中, 中央は正午) である. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1/2 倍, (d) 1/4 倍, (e) 1/8 倍, (f) 1/16 倍と並んでいる. 自転角速度が地球と同じ場合を基準として, 加熱が増加したところは赤, 減少したところは青で示している.	26
4.5	大気上端の短波放射フラックスの偏差. 実験 C. 縦軸は緯度, 横軸は地方時 (横軸の端は真夜中, 中央は正午) である. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1/2 倍, (d) 1/4 倍, (e) 1/8 倍, (f) 1/16 倍と並んでいる. 自転角速度が地球と同じ場合を基準として, 加熱が増加したところは赤, 減少したところは青で示している.	27
4.6	大気上端の短波放射フラックスの偏差. 実験 D. 縦軸は緯度, 横軸は地方時 (横軸の端は真夜中, 中央は正午) である. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1/2 倍, (d) 1/4 倍, (e) 1/8 倍, (f) 1/16 倍と並んでいる. 自転角速度が地球と同じ場合を基準として, 加熱が増加したところは赤, 減少したところは青で示している.	28
4.7	自転角速度と温室効果係数. 横軸は自転角速度, 縦軸は温室効果係数. 図中の黒は自転角速度を変えた実験 A, 青はコリオリパラメタだけを変えた実験 C, 赤は太陽日だけを変えた実験 D.	29

4.8	地表温度と温室効果係数. 横軸は温室効果係数, 縦軸は全球平均の地表温度. 図中の黒は自転角速度を変えた実験 A, 青はコリオリパラメタだけを変えた実験 C, 赤は太陽日だけを変えた実験 D.	30
4.9	雲水量とアルベド. 実験 A. 横軸は鉛直積分した雲水量 [kg/m^2], 縦軸はアルベド. 太陽天頂角 0 度.	32
4.10	偏差が緯度方向に構造を持つ場合と地方時の方向に構造を持つ場合. 図はそれぞれ横軸は地方時, 縦軸は緯度. 影の付いているところは夜.	33
4.11	鉛直積分した雲水量の偏差の緯度地方時分布 [kg/m^2]. 時間平均. 自転角速度 1 倍を基準とした偏差. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1/2 倍, (d)1/4 倍, (e)1/8 倍, (f)1/16 倍.	34
4.12	鉛直積分した雲水量の偏差の緯度地方時分布 [kg/m^2]. 時間平均. 自転角速度 1 倍を基準とした偏差. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1/2 倍, (d)1/4 倍, (e)1/8 倍, (f)1/16 倍.	35
4.13	鉛直積分した雲水量の偏差の緯度地方時分布 [kg/m^2]. 時間平均. 自転角速度 1 倍を基準とした偏差. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1/2 倍, (d)1/4 倍, (e)1/8 倍, (f)1/16 倍.	36
4.14	降水量の緯度分布. 実験 C. 横軸は緯度, 縦軸は時間平均, 経度平均した降水量 [mm/yr].	37
4.15	降水量の地方時分布. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は時間平均, 緯度平均した降水量 [mm/yr].	38
A-1	自転角速度を変えた実験 A とコリオリパラメタのみを変えた実験 C の短波放射加熱の偏差の関係. 横軸は実験 A の短波放射加熱の偏差 [W/m^2], 縦軸は実験 C の短波放射加熱の偏差 [W/m^2]. 自転角速度 1 倍を基準として偏差をとっている.	43

A-2	自転角速度を変えた実験 A と太陽日のみを変えた実験 D の短波放射加熱の偏差の関係. 横軸は実験 A の短波放射加熱の偏差 [W/m^2], 縦軸は実験 D の短波放射加熱の偏差 [W/m^2]. 自転角速度 1 倍を基準として偏差をとっている.	44
A-3	相関係数. 横軸は自転角速度, 縦軸は自転角速度を変えた場合の短波放射加熱の偏差の相関係数. 図の中の青はコリオリパラメタだけを変えた実験 C, 赤は太陽日だけを変えた実験 D.	45
A-4	回帰係数. 横軸は自転角速度, 縦軸は自転角速度を変えた場合の短波放射加熱の偏差の回帰係数. 図の中の青はコリオリパラメタだけを変えた実験 C, 赤は太陽日だけを変えた実験 D.	45
B-5	大気上端に入射する短波放射の緯度分布. 横軸は緯度, 縦軸は大気上端に入射する短波放射 [W/m^2]. 経度方向には変化しない.	46
B-6	子午面質量流線関数 [kg/s]. 時間平均, 経度平均. 実験 A. 横軸は緯度, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 8 倍, (b)4 倍, (c)2, (d)1 倍, (e)1/2 倍, (f)1/4 倍, (g)1/8 倍, (h)1/16 倍, (i)0 倍.	48
B-7	自転角速度とハドレー循環の緯度幅. 横軸は自転角速度, 縦軸はハドレー循環の緯度幅 [degree]. 黒は本研究, オレンジは Williams (1988).	49
B-8	子午面の東西風分布 [m/s]. 横軸は緯度, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 8 倍, (b)4 倍, (c)2, (d)1 倍, (e)1/2 倍, (f)1/4 倍, (g)1/8 倍, (h)1/16 倍, (i)0 倍.	50
B-9	自転角速度と偏西風ジェット的位置. 横軸は自転角速度, 縦軸は偏西風ジェットが最大となる緯度. 黒は本研究, オレンジは Williams (1988).	51
E-10	大気上端の長波放射フラックス緯度分布. 横軸は緯度, 縦軸は大気上端における長波放射フラックス [W/m^2]. それぞれの図は (a) 自転角速度を変えた実験 A, (b) コリオリパラメタだけを変えた実験 C, (c) 太陽日だけを変えた実験 D.	59

E-11 の短波放射フラックス緯度分布. 横軸は緯度, 縦軸は地表における短波放射フラックス [W/m^2]. それぞれの図は (a) 自転角速度を変えた実験 A, (b) コリオリパラメタだけを変えた実験 C, (c) 太陽日だけを変えた実験 D.	59
E-12 地表の短波放射フラックス緯度分布. 横軸は緯度, 縦軸は地表における短波放射フラックス [W/m^2]. それぞれの図は (a) 自転角速度を変えた実験 A, (b) コリオリパラメタだけを変えた実験 C, (c) 太陽日だけを変えた実験 D.	60
E-13 地表の短波放射フラックス緯度分布. 横軸は緯度, 縦軸は地表における短波放射フラックス [W/m^2]. それぞれの図は (a) 自転角速度を変えた実験 A, (b) コリオリパラメタだけを変えた実験 C, (c) 太陽日だけを変えた実験 D.	60
E-14 地表の短波放射フラックス緯度分布. 横軸は緯度, 縦軸は地表における短波放射フラックス [W/m^2]. それぞれの図は (a) 自転角速度を変えた実験 A, (b) コリオリパラメタだけを変えた実験 C, (c) 太陽日だけを変えた実験 D.	61
E-15 地表温度の緯度分布. 横軸は緯度, 縦軸は地表温度 [K]. それぞれの図は (a) 自転角速度を変えた実験 A, (b) コリオリパラメタだけを変えた実験 C, (c) 太陽日だけを変えた実験 D.	61
E-16 大気最下層気温の緯度分布. 横軸は緯度, 縦軸は大気最下層の気温 [K]. それぞれの図は (a) 自転角速度を変えた実験 A, (b) コリオリパラメタだけを変えた実験 C, (c) 太陽日だけを変えた実験 D.	61
E-17 降水量. 横軸は緯度, 縦軸は降水量 [mm/yr]. それぞれの図は (a) 自転角速度を変えた実験 A, (b) コリオリパラメタだけを変えた実験 C, (c) 太陽日だけを変えた実験 D.	62
E-18 可降水量の緯度分布. 横軸は緯度, 縦軸は可降水量 [kg/m^2]. それぞれの図は (a) 自転角速度を変えた実験 A, (b) コリオリパラメタだけを変えた実験 C, (c) 太陽日だけを変えた実験 D.	62

F-19 大気上端の長波放射フラックス地方時分布. 横軸は地方時, 縦軸は大気上端における長波放射フラックス $[W/m^2]$. それぞれの図は (a) 自転角速度を変えた実験 A, (b) コリオリパラメタだけを変えた実験 C, (c) 太陽日だけを変えた実験 D.	63
F-20 の短波放射フラックス地方時分布. 横軸は地方時, 縦軸は地表における短波放射フラックス $[W/m^2]$. それぞれの図は (a) 自転角速度を変えた実験 A, (b) コリオリパラメタだけを変えた実験 C, (c) 太陽日だけを変えた実験 D.	63
F-21 地表の短波放射フラックス地方時分布. 横軸は地方時, 縦軸は地表における短波放射フラックス $[W/m^2]$. それぞれの図は (a) 自転角速度を変えた実験 A, (b) コリオリパラメタだけを変えた実験 C, (c) 太陽日だけを変えた実験 D.	64
F-22 地表の短波放射フラックス地方時分布. 横軸は地方時, 縦軸は地表における短波放射フラックス $[W/m^2]$. それぞれの図は (a) 自転角速度を変えた実験 A, (b) コリオリパラメタだけを変えた実験 C, (c) 太陽日だけを変えた実験 D.	64
F-23 地表の短波放射フラックス地方時分布. 横軸は地方時, 縦軸は地表における短波放射フラックス $[W/m^2]$. それぞれの図は (a) 自転角速度を変えた実験 A, (b) コリオリパラメタだけを変えた実験 C, (c) 太陽日だけを変えた実験 D.	65
F-24 地表温度の地方時分布. 横軸は地方時, 縦軸は地表温度 $[K]$. それぞれの図は (a) 自転角速度を変えた実験 A, (b) コリオリパラメタだけを変えた実験 C, (c) 太陽日だけを変えた実験 D.	65
F-25 大気最下層気温の地方時分布. 横軸は地方時, 縦軸は大気最下層の気温 $[K]$. それぞれの図は (a) 自転角速度を変えた実験 A, (b) コリオリパラメタだけを変えた実験 C, (c) 太陽日だけを変えた実験 D.	65
F-26 降水量. 横軸は地方時, 縦軸は降水量 $[mm/yr]$. それぞれの図は (a) 自転角速度を変えた実験 A, (b) コリオリパラメタだけを変えた実験 C, (c) 太陽日だけを変えた実験 D.	66

F-27 可降水量の地方時分布. 横軸は地方時, 縦軸は可降水量 [kg/m ²]. それぞれの図は (a) 自転角速度を変えた実験 A, (b) コリオリパラメータだけを変えた実験 C, (c) 太陽日だけを変えた実験 D.	66
G-28 子午面断面の気温分布 [K]. 時間平均, 経度平均. 実験 A. 横軸は緯度, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.	68
G-29 子午面断面の気温分布 [K]. 時間平均, 経度平均. 実験 C. 横軸は緯度, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.	69
G-30 子午面断面の気温分布 [K]. 時間平均, 経度平均. 実験 D. 横軸は緯度, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.	70
G-31 相対湿度の子午面分布 [%]. 時間平均, 経度平均. 実験 A. 横軸は緯度, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.	71
G-32 相対湿度の子午面分布 [%]. 時間平均, 経度平均. 実験 C. 横軸は緯度, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.	72
G-33 相対湿度の子午面分布 [%]. 時間平均, 経度平均. 実験 D. 横軸は緯度, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.	73
G-34 比湿の子午面分布 [kg/kg]. 時間平均, 経度平均. 実験 A. 横軸は緯度, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.	74
G-35 比湿の子午面分布 [kg/kg]. 時間平均, 経度平均. 実験 C. 横軸は緯度, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.	75
G-36 比湿の子午面分布 [kg/kg]. 時間平均, 経度平均. 実験 D. 横軸は緯度, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.	76

H-37 大気上端における短波放射の緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1, (d)1/2 倍, (e)1/4 倍, (f)1/8 倍, (g)1/16 倍.	78
H-38 大気上端における短波放射の緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1, (d)1/2 倍, (e)1/4 倍, (f)1/8 倍, (g)1/16 倍.	79
H-39 大気上端における短波放射の緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1, (d)1/2 倍, (e)1/4 倍, (f)1/8 倍, (g)1/16 倍.	80
H-40 大気上端における長波放射の緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1, (d)1/2 倍, (e)1/4 倍, (f)1/8 倍, (g)1/16 倍.	82
H-41 大気上端における長波放射の緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1, (d)1/2 倍, (e)1/4 倍, (f)1/8 倍, (g)1/16 倍.	83
H-42 大気上端における長波放射の緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1, (d)1/2 倍, (e)1/4 倍, (f)1/8 倍, (g)1/16 倍.	84
H-43 地表面における上向き短波放射フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1, (d)1/2 倍, (e)1/4 倍, (f)1/8 倍, (g)1/16 倍.	86
H-44 地表面における上向き短波放射フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1, (d)1/2 倍, (e)1/4 倍, (f)1/8 倍, (g)1/16 倍.	87
H-45 地表面における上向き短波放射フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1, (d)1/2 倍, (e)1/4 倍, (f)1/8 倍, (g)1/16 倍.	88

H-46 地表面における上向き長波放射フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1, (d)1/2 倍, (e)1/4 倍, (f)1/8 倍, (g)1/16 倍.	89
H-47 地表面における上向き長波放射フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1, (d)1/2 倍, (e)1/4 倍, (f)1/8 倍, (g)1/16 倍.	90
H-48 地表面における上向き長波放射フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1, (d)1/2 倍, (e)1/4 倍, (f)1/8 倍, (g)1/16 倍.	91
H-49 地表面における潜熱フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1, (d)1/2 倍, (e)1/4 倍, (f)1/8 倍, (g)1/16 倍. . .	92
H-50 地表面における潜熱フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1, (d)1/2 倍, (e)1/4 倍, (f)1/8 倍, (g)1/16 倍. . .	93
H-51 地表面における潜熱フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1, (d)1/2 倍, (e)1/4 倍, (f)1/8 倍, (g)1/16 倍. . .	94
H-52 地表面における顕熱フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1, (d)1/2 倍, (e)1/4 倍, (f)1/8 倍, (g)1/16 倍. . .	95
H-53 地表面における顕熱フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1, (d)1/2 倍, (e)1/4 倍, (f)1/8 倍, (g)1/16 倍. . .	96
H-54 地表面における顕熱フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1, (d)1/2 倍, (e)1/4 倍, (f)1/8 倍, (g)1/16 倍. . .	97

H-55 大気最下層の気温の緯度地方時分布 [K]. 時間平均. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1, (d)1/2 倍, (e)1/4 倍, (f)1/8 倍, (g)1/16 倍.	99
H-56 大気最下層の気温の緯度地方時分布 [K]. 時間平均. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1, (d)1/2 倍, (e)1/4 倍, (f)1/8 倍, (g)1/16 倍.	100
H-57 大気最下層の気温の緯度地方時分布 [K]. 時間平均. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1, (d)1/2 倍, (e)1/4 倍, (f)1/8 倍, (g)1/16 倍.	101
H-58 地表温度の緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1, (d)1/2 倍, (e)1/4 倍, (f)1/8 倍, (g)1/16 倍.	102
H-59 地表温度の緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1, (d)1/2 倍, (e)1/4 倍, (f)1/8 倍, (g)1/16 倍.	103
H-60 地表温度の緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1, (d)1/2 倍, (e)1/4 倍, (f)1/8 倍, (g)1/16 倍.	104
H-61 降水量の緯度地方時分布 [mm/yr]. 時間平均. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1, (d)1/2 倍, (e)1/4 倍, (f)1/8 倍, (g)1/16 倍.	105
H-62 降水量の緯度地方時分布 [mm/yr]. 時間平均. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1, (d)1/2 倍, (e)1/4 倍, (f)1/8 倍, (g)1/16 倍.	106
H-63 降水量の緯度地方時分布 [mm/yr]. 時間平均. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1, (d)1/2 倍, (e)1/4 倍, (f)1/8 倍, (g)1/16 倍.	107
H-64 可降水量の緯度地方時分布 [kg/m^2]. 時間平均. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1, (d)1/2 倍, (e)1/4 倍, (f)1/8 倍, (g)1/16 倍.	108

H-65 可降水量の緯度地方時分布 [kg/m^2]. 時間平均. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1, (d)1/2 倍, (e)1/4 倍, (f)1/8 倍, (g)1/16 倍.	109
H-66 可降水量の緯度地方時分布 [kg/m^2]. 時間平均. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1, (d)1/2 倍, (e)1/4 倍, (f)1/8 倍, (g)1/16 倍.	110
H-67 鉛直積分した雲水量の緯度地方時分布 [kg/m^2]. 時間平均. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1, (d)1/2 倍, (e)1/4 倍, (f)1/8 倍, (g)1/16 倍.	111
I-68 気温分布 [K]. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1, (d)1/2 倍, (e)1/4 倍, (f)1/8 倍, (g)1/16 倍.	113
I-69 気温分布 [K]. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1, (d)1/2 倍, (e)1/4 倍, (f)1/8 倍, (g)1/16 倍.	114
I-70 気温分布 [K]. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1, (d)1/2 倍, (e)1/4 倍, (f)1/8 倍, (g)1/16 倍.	115
I-71 相対湿度 [%]. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1, (d)1/2 倍, (e)1/4 倍, (f)1/8 倍, (g)1/16 倍.	117
I-72 相対湿度 [%]. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1, (d)1/2 倍, (e)1/4 倍, (f)1/8 倍, (g)1/16 倍.	118
I-73 相対湿度 [%]. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1, (d)1/2 倍, (e)1/4 倍, (f)1/8 倍, (g)1/16 倍.	119
I-74 比湿 [kg/kg]. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1, (d)1/2 倍, (e)1/4 倍, (f)1/8 倍, (g)1/16 倍.	120

I-75	比湿 [kg/kg]. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自 転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1, (d)1/2 倍, (e)1/4 倍, (f)1/8 倍, (g)1/16 倍.	121
I-76	比湿 [kg/kg]. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自 転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1, (d)1/2 倍, (e)1/4 倍, (f)1/8 倍, (g)1/16 倍.	122
J-77	大気上端における長波放射の緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実 験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1/2 倍, (d)1/4 倍, (e)1/8 倍, (f)1/16 倍.	124
J-78	大気上端における長波放射の緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実 験 C. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1/2 倍, (d)1/4 倍, (e)1/8 倍, (f)1/16 倍.	125
J-79	大気上端における長波放射の緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実 験 D. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1/2 倍, (d)1/4 倍, (e)1/8 倍, (f)1/16 倍.	126
J-80	地表面における上向き短波放射フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自 転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1/2 倍, (d)1/4 倍, (e)1/8 倍, (f)1/16 倍. . .	128
J-81	地表面における上向き短波放射フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自 転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1/2 倍, (d)1/4 倍, (e)1/8 倍, (f)1/16 倍. . .	129
J-82	地表面における上向き短波放射フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自 転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1/2 倍, (d)1/4 倍, (e)1/8 倍, (f)1/16 倍. . .	130
J-83	地表面における上向き長波放射フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自 転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1/2 倍, (d)1/4 倍, (e)1/8 倍, (f)1/16 倍. . .	131
J-84	地表面における上向き長波放射フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自 転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1/2 倍, (d)1/4 倍, (e)1/8 倍, (f)1/16 倍. . .	132

- J-85 地表面における上向き長波放射フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1/2 倍, (d)1/4 倍, (e)1/8 倍, (f)1/16 倍. 133
- J-86 地表面における潜熱フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1/2 倍, (d)1/4 倍, (e)1/8 倍, (f)1/16 倍. 134
- J-87 地表面における潜熱フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1/2 倍, (d)1/4 倍, (e)1/8 倍, (f)1/16 倍. 135
- J-88 地表面における潜熱フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1/2 倍, (d)1/4 倍, (e)1/8 倍, (f)1/16 倍. 136
- J-89 地表面における顕熱フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1/2 倍, (d)1/4 倍, (e)1/8 倍, (f)1/16 倍. 137
- J-90 地表面における顕熱フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1/2 倍, (d)1/4 倍, (e)1/8 倍, (f)1/16 倍. 138
- J-91 地表面における顕熱フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1/2 倍, (d)1/4 倍, (e)1/8 倍, (f)1/16 倍. 139
- J-92 大気最下層の気温の緯度地方時分布 [K]. 時間平均. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1/2 倍, (d)1/4 倍, (e)1/8 倍, (f)1/16 倍. 141
- J-93 大気最下層の気温の緯度地方時分布 [K]. 時間平均. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1/2 倍, (d)1/4 倍, (e)1/8 倍, (f)1/16 倍. 142
- J-94 大気最下層の気温の緯度地方時分布 [K]. 時間平均. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1/2 倍, (d)1/4 倍, (e)1/8 倍, (f)1/16 倍. 143

J-95 地表温度の緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1/2 倍, (d)1/4 倍, (e)1/8 倍, (f)1/16 倍.	144
J-96 地表温度の緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1/2 倍, (d)1/4 倍, (e)1/8 倍, (f)1/16 倍.	145
J-97 地表温度の緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1/2 倍, (d)1/4 倍, (e)1/8 倍, (f)1/16 倍.	146
J-98 降水量の緯度地方時分布 [mm/yr]. 時間平均. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1/2 倍, (d)1/4 倍, (e)1/8 倍, (f)1/16 倍.	148
J-99 降水量の緯度地方時分布 [mm/yr]. 時間平均. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1/2 倍, (d)1/4 倍, (e)1/8 倍, (f)1/16 倍.	149
J-100 降水量の緯度地方時分布 [mm/yr]. 時間平均. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1/2 倍, (d)1/4 倍, (e)1/8 倍, (f)1/16 倍.	150
J-101 可降水量の緯度地方時分布 [kg/m^2]. 時間平均. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1/2 倍, (d)1/4 倍, (e)1/8 倍, (f)1/16 倍.	151
J-102 可降水量の緯度地方時分布 [kg/m^2]. 時間平均. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1/2 倍, (d)1/4 倍, (e)1/8 倍, (f)1/16 倍.	152
J-103 可降水量の緯度地方時分布 [kg/m^2]. 時間平均. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1/2 倍, (d)1/4 倍, (e)1/8 倍, (f)1/16 倍.	153

第1章 序論

1.1 研究背景

太陽系内にある惑星の自転角速度には地球のそれよりも速いものと遅いものがある。例えば、地球の自転周期は24時間であるのに対し、金星は243日であり、また木星は10時間程度である。近年では太陽系外にも惑星が発見されており、それら系外惑星にも太陽系内の惑星と同様に自転角速度の速いものや遅いものが存在すると考えられる。

惑星の自転角速度が変わると大気の流れがどのように変化するかという問題は、大気大循環の基本的な問題としてこれまでも調べられてきた（例えば、Held and Hou, 1980; Williams, 1988; Walker and Schneider, 2006）。Held and Hou (1980) ではハドレー循環の強さと緯度幅についての考察をおこなった。ハドレー循環している緯度帯 $0 < \varphi < \varphi_H$ で熱バランスが成り立つことを仮定してハドレー循環の緯度幅が次の式で与えられるとした。

$$\varphi_H = \left(\frac{5}{3} \frac{gH}{\Omega^2 a^2} \Delta_H \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.1)$$

ここで、 φ_H はハドレー循環の緯度幅、 H 対流圏界面の高度、 Ω は自転角速度、 a は惑星半径、 g は重力加速度、 Δ_H は極と赤道の温度差、 φ は緯度である。この式によると、ハドレー循環の緯度幅は自転角速度の逆数に比例し、自転角速度を速くするとハドレー循環の幅は狭くなる。

Williams (1988) は大気大循環モデルを用いて自転角速度を地球の8倍から0倍まで変えた実験をおこない、自転角速度によって様々な循環のパターンが存在することを示した（図1.1）。Williamsの結果によると自転角速度が速いほどハドレー循環の緯度幅は狭くなる。しかし、様々な循環の構造が存在する原因についての考察は十分になされていない。

Walker and Schneider (2006) は自転角速度を 4 倍から 1/32 倍まで変えて 3 次元計算をおこない、経度方向の擾乱がハドレー循環に及ぼす影響について調べた。その結果、Held and Hou (1980) で示されたよりも自転角速度によるハドレー循環の強さと幅の変化は小さくなることが示された (図 1.2)。

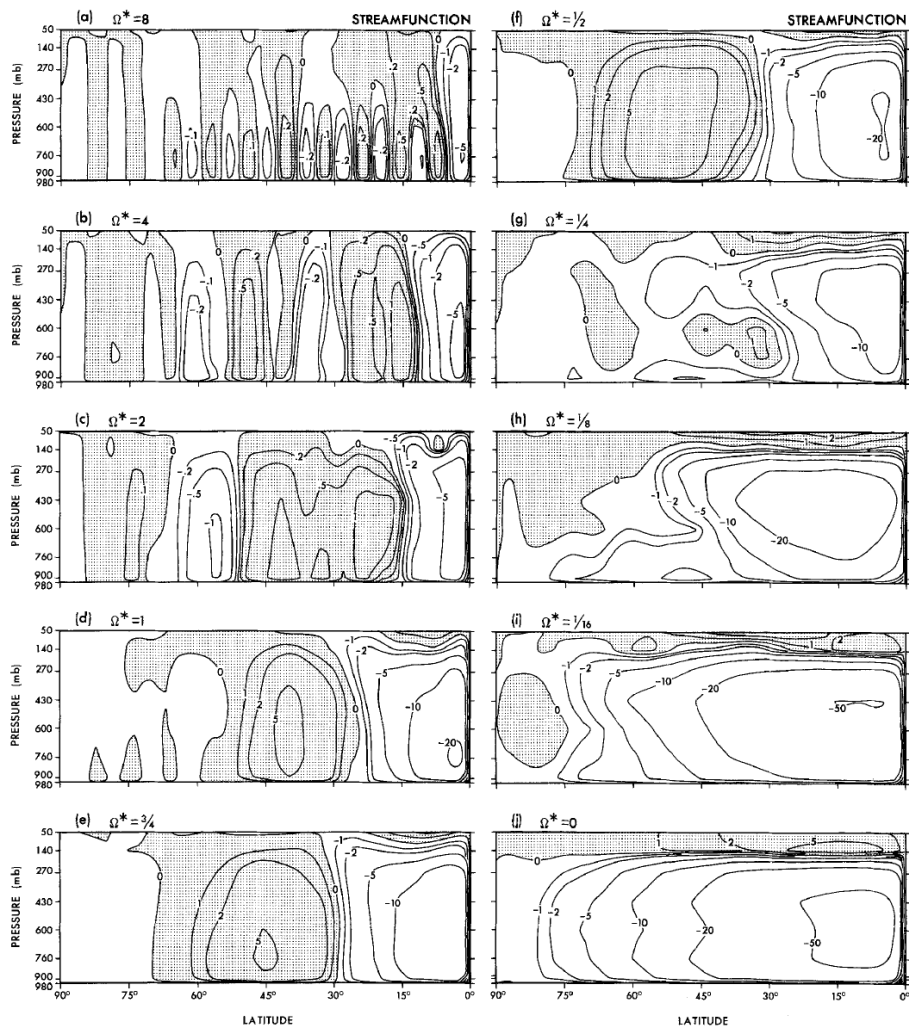


図 1.1: 子午面質量流線関数 (Williams, 1988). 横軸は緯度, 縦軸は気圧.

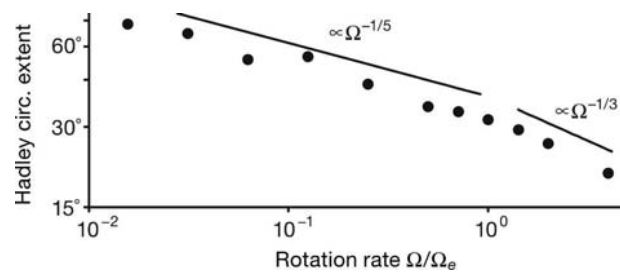


図 1.2: 自転角速度とハドレー循環の緯度幅 (Walker and Schneider, 2006). 横軸は自転角速度, 縦軸はハドレー循環の緯度幅

1.2 本研究の目的

Williams (1988) や Walker and Schneider (2006) の実験の結果として自転角速度によって循環の形態が変わることが示された。ただし、これらの実験では日変化の影響がきちんと議論されていない。また、惑星の熱収支がどう変わるのかについても議論されていない。

現実の世界では昼と夜があり、日射による加熱は日変化する。自転角速度を速くすると短い間隔で昼と夜が訪れるようになる。また、自転角速度を遅くすると長い昼の後に短い夜が訪れるようになる。短い時間間隔で加熱が繰り返される場合と、長い時間に渡って加熱が続くような場合では対流の立ち方が変わることが予想される。

Williams (1988) は雲の分布を外から与え、アルベドを固定した。また、Walker and Schneider(2006) は地表温度を外から与えている。雲の分布は大気の大循環の結果であり、自転角速度によって大気の大循環が変わると雲の分布も変わる。雲はアルベドが大きいいため、雲の分布が変わると惑星アルベドも変わるはずである。その結果、短波放射による加熱も変わり、大気の循環が変わる可能性がある。また、地表温度も短波放射による加熱が変わることで変化する。

本研究では自転角速度が大気の大循環と惑星の熱収支に対してどのような影響を及ぼしているのか大気大循環モデルを用いて数値実験をおこなうことで調べた。実験においては日変化する日射を与え、また、雲の分布と地表温度はモデルの中で計算するようにした。

本研究では自転角速度を変える実験(コリオリパラメタと太陽日のどちらもが変わる)の他に、コリオリパラメタだけを変える実験、太陽日だけを変える実験をそれぞれおこなった。ここで、太陽日とは、陽が昇ってから再び陽が昇るまでの時間である。これら3つの実験の結果を比較することで、コリオリパラメタが変わることによる影響、太陽日が変わることによる影響、コリオリパラメタと太陽日がどちらも変わることによる影響をそれぞれ明らかにすることを目指した。

第2章 モデルと実験設定

2.1 モデルの記述

本研究では地球流体電脳倶楽部で開発されている大気大循環モデルDCPAM5(高橋ほか, 2012; <http://gfd-dennou.org/library/dcpam/>)を使用した. ここではこのモデルの概略について述べる.

2.1.1 座標系と離散化の方法

座標系は, 経度方向に λ , 緯度方向に ψ , 高さ方向に $\sigma \equiv p/p_s$ をとった 3 次元の球面座標系を用いている. ここで, p は気圧, p_s は地表気圧である.

離散化の方法は水平方向には球面スペクトル法, 鉛直方向には Arakawa and Suarez (1983) の差分法を用いている. 力学過程の時間積分は水平拡散の項に後方差分を用い, その他の項には leap frog 法と Crank-Nicolson 法を組み合わせた semi-implicit 法 (Bourke 1988) を用いている. また, 物理過程の時間積分では予報型の物理量の計算に陰解法を用い, 調節型の物理量の計算に陽解法を用いている.

2.1.2 力学過程の支配方程式

力学過程の支配方程式には球面 3 次元のプリミティブ方程式系が用いられている. この方程式系の運動方程式, 静力学平衡の式, 連続の式, 熱力学の式, 水蒸気の式を以下に記す.

- 運動方程式

$$\frac{du}{dt} = fv + \frac{uv}{a} \tan \varphi - \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda} - \frac{R^d T_v}{a \cos \varphi} \frac{\partial \pi}{\partial \lambda} + \mathcal{F}_\lambda, \quad (2.1)$$

$$\frac{dv}{dt} = -fu - \frac{u^2}{a} \tan \varphi - \frac{1}{a} \frac{\partial \Phi}{\partial \varphi} - \frac{R^d T_v}{a} \frac{\partial \pi}{\partial \varphi} + \mathcal{F}_\varphi. \quad (2.2)$$

ここで $\Phi \equiv gz$, $\pi \equiv \ln p_s$, $T_v \equiv T(1 + c_v q)$.

- 静水圧の式

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} = -\frac{R^d T_v}{\sigma}. \quad (2.3)$$

- 連続の式

$$\frac{d\pi}{dt} = -\nabla_\sigma \cdot \mathbf{v}_H - \frac{\partial \dot{\sigma}}{\partial \sigma}. \quad (2.4)$$

ここで,

$$\nabla_\sigma \cdot \mathbf{v}_H \equiv \frac{1}{a \cos \varphi} \left(\frac{\partial u}{\partial \lambda} \right)_\sigma + \frac{1}{a \cos \varphi} \left(\frac{\partial}{\partial \varphi} (v \cos \varphi) \right)_\sigma.$$

- 熱力学の式

$$\frac{dT}{dt} = \frac{R^d T_v}{C_p^d} \left(\frac{\partial \pi}{\partial t} + \mathbf{v}_H \cdot \nabla_\sigma \pi + \frac{\dot{\sigma}}{\sigma} \right) + \frac{Q^*}{C_p^d}. \quad (2.5)$$

- 水蒸気の式

$$\frac{dq}{dt} = S_q. \quad (2.6)$$

u は東西風速, v は南北風速, f はコリオリパラメタ, g は重力加速度, a は惑星半径, Φ は重力ポテンシャル, R^d は乾燥空気の気体定数, T_v は仮温度, C_p^d は乾燥空気の

定圧比熱, q は水蒸気量である. また, F_λ , F_φ はそれぞれ経度方向, 緯度方向の外力, Q^* は外部からの加熱率, S_q は水蒸気の生成消滅率である.

σ 座標系における境界条件について述べる. σ 座標の鉛直速度は大気の上端と下端で 0 になる.

$$\dot{\sigma} = 0 \text{ at } \sigma = 0, 1$$

2.1.3 物理過程

放射過程は短波放射の計算で H_2O , O_3 による吸収, 雲による吸収と散乱, レイリー散乱を考慮している. 長波の計算では H_2O , CO_2 , O_3 による吸収を考慮している. 降水過程では大規模凝結の評価に Manabe (1965) を使用し, 積雲対流の評価に Relaxed Arakawa-Schubert (Moorthi and Suarez, 1992) を使用している. 乱流混合の係数の評価には Mellor and Yamada level 2 (Mellor and Yamada, 1974, 1982) を用いている. 地表面フラックスの計算にはバルク法を用いている. 地面の地表温度は地表における熱収支がつり合うようモデルの中で計算される. また, 地表アルベドは変化せず, 地形も存在しない.

使用している雲モデルについて記述する. 雲水の量は次の式を時間積分することで得られる.

$$\frac{\partial q_{cw}}{\partial t} = P_{cw} + L_{cw} + g \frac{F_{q_{cw}}}{p} \quad (2.7)$$

右辺第 1 項の P_{cw} は雲水の生成率であり, 大気中の水蒸気の凝結率で与えられる. 右辺第 2 項は雲水の消滅率であり, 以下の式で表される.

$$L_{cw} = -\frac{q_{cw}}{\tau_{cw}}$$

ここで, τ_{cw} は雲水の寿命であり, 雲水は時定数 τ_{cw} で指数関数的に減少する. 右辺第 3 項は鉛直拡散である.*¹ また, この雲モデルでは雲量は 1 と仮定している.

このモデルにおける降水率 P は雲水の生成率 P_{cw} を鉛直積算したものである

$$P = \frac{1}{g} \int_0^{p_s} P_{cw} dp.$$

*¹この雲モデルでは雲水の移流は扱っていない. 雲水の寿命が $O(10^3)$ 秒のオーダーであるため, 対流圏内で 100m/s の風が吹いたとしても雲水が移動できる距離は 100km 程度である. そのため赤道の格子点間隔が約 300km であることを考慮すると雲が移流することの影響は小さいと考えられる.

表 2.1: 物理パラメータ

パラメータ	値
惑星半径 [m]	6.371×10^6
重力加速度 [m/s^2]	9.8
乾燥大気の定圧比熱 [J/kg/K]	1004.6
乾燥大気のア平均分子量 [kg/mol]	28.964×10^{-3}
凝結成分(水)の定圧比熱 [J/kg/K]	1810.0
凝結成分のア平均分子量 [kg/mol]	18.01528×10^{-3}
凝結の潜熱 [J/kg]	2.5×10^6
太陽定数 [W/m^2]	1380

2.2 実験設定

惑星半径や大気組成などのパラメータは地球の値を設定した(表 2.1). 地表アルベドは 0.15 に固定した. また, 自転傾斜角は公転面に対して直交させ, 季節変化を取り除いた. 地表面の状態は全球一様な沼地 (swamp) とした. 沼地は熱容量 0, 湿潤度 1 となっている地面である*2.

オゾンの分布(図 2.1)は AMIP II のデータを基にして年平均, 経度平均し, さらに赤道に対して南北対称にしたものを用いている (<http://www.met.reading.ac.uk/>) オゾンの分布は固定されており時間変化しない.

2.2.1 解像度

水平解像度は T42(スペクトル法の三角切断で切断波数 42) とした. この解像度における格子点は緯度方向に 64, 経度方向に 128 ずつ配置されており, 格子点の間隔は約 2.8 度である. 鉛直層の数は 22 層とした. 鉛直層の層境界(半整数レベル)は以下のように設定した(表 2.2). 各層の中心位置は Arakawa and Suarez (1983)

表 2.2: 鉛直層境界の位置

鉛直格子番号	σ 座標値
0	1
1	0.990
2	0.970
3	0.920
4	0.859
5	0.759
6	0.636
7	0.500
8	0.390
9	0.304
10	0.236
11	0.184
12	0.143
13	0.112
14	8.696×10^{-2}
15	6.772×10^{-2}
16	5.274×10^{-2}
17	4.107×10^{-2}
18	3.199×10^{-2}
19	2.491×10^{-2}
20	1.940×10^{-2}
21	1.177×10^{-2}
22	0

に基づいて決められる。^{*3} また、時間ステップの間隔は 10 分とした。

2.2.2 初期値

初期値には 280K の等温静止大気を用いた。ただし、実験 A の自転角速度が地球の 1/16 倍と、実験 D の自転角速度 1/8, 1/16 倍については自転角速度 1/4 倍で 5 年間積分したものを初期値とした。^{*4}

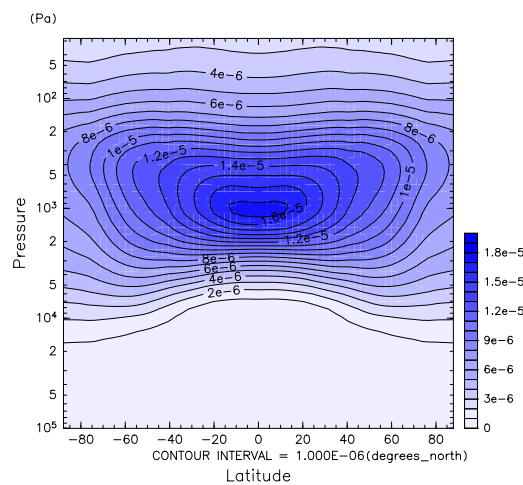


図 2.1: オゾンの子午面分布 [kg/kg]. 横軸は緯度, 縦軸は気圧.

^{*2} 湿潤度について. 地表からの水蒸気フラックス F_q はバルク法によって次のように計算される.

$$F_q = -\epsilon \rho C_q |v| (q - q_s^*)$$

ここで湿潤度は ϵ である (C_q はバルク係数).

^{*3} 鉛直層の各層の中心位置は次の式で計算される.

$$\sigma_k = \left\{ \frac{1}{1 + \kappa} \left(\frac{\sigma_{k-1/2}^{k+1} - \sigma_{k+1/2}^{k+1}}{\sigma_{k-1/2} - \sigma_{k+1/2}} \right) \right\}^{1/\kappa}$$

^{*4} 自転角速度が遅い場合には太陽日の長さが長くなる. 例えば, 自転角速度を地球の 1/16 倍にした場合では太陽日の長さは 384 時間である. この場合, 1 年積分しても 22.5 日にしかならない. そのため, 平衡状態となるまでに時間がかかると予想される.

2.3 実験セット

自転角速度を変えるとコリオリパラメタと太陽日が変わる。以下の3通りの実験をおこなった。

All: 自転角速度を変える実験。この実験ではコリオリパラメタと自転角速度の両方が変わる。

Coriolis: コリオリパラメタの大きさだけを変える実験。この実験で太陽日は地球と同じ24時間に固定される。

Diurnal: 太陽日の長さだけを変える実験。この実験でコリオリパラメタの大きさは地球と同じ値に固定される。

以下では All, Coriolis, Diurnal の実験をそれぞれ実験 A, 実験 C, 実験 D と呼ぶ。それぞれ自転角速度を地球の4倍, 2倍, 1倍, 1/2倍, 1/4倍, 1/8倍, 1/16倍とした場合について計算をおこなった(図 2.2)。それぞれ5年間積分し, 定常状態となったと思われる最後の1年分を解析に使用した。

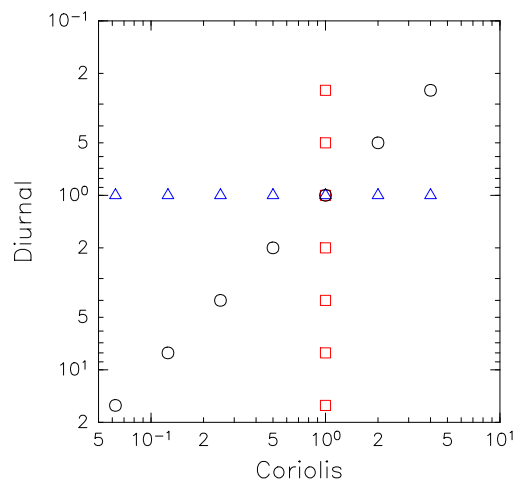


図 2.2: 本研究におけるパラメータ空間。横軸はコリオリパラメタの大きさ, 縦軸は太陽日の長さ。黒は自転角速度を変えた実験 A, 青はコリオリパラメタだけを変えた実験 C, 赤は太陽日だけを変えた実験 D。

第3章 大気の大循環

3.1 質量流線関数

ここでは子午面循環の自転角速度依存性について記述する。子午面断面内の循環は子午面質量流線関数と東西平均した東西風の速度分布で記述される。ここで、子午面質量流線関数は次のように定義される

$$\psi = \frac{2\pi a \cos \varphi}{g} \int_0^{p_s} \bar{v} dp.$$

ここで、 ψ は質量流線関数、 a は惑星半径、 φ は緯度、 g は重力加速度、 \bar{v} は東西平均した南北風速、 p_s は地表気圧、 p は気圧である。質量流線関数は循環の様子を表すもので、空気は質量流線関数の等値線に沿って移動する。また、等値線の幅が狭いほど単位時間あたりに流れる空気の量は多い。

3.2 ハドレー循環

実験 A の子午面循環を図 3.1 に示す。自転角速度が地球と同じ場合、子午面断面内の循環のセルの数は 2 つ存在する。赤道で上昇して亜熱帯で下降するハドレー循環は緯度 30 度付近まで伸びている。自転角速度を地球より速くした場合、ハドレー循環の緯度幅は狭くなり、自転角速度を地球の 4 倍にした場合では緯度 15 度までハドレー循環する。自転角速度を遅くするとハドレー循環の幅は広がり、自転角速度 1/4 倍では緯度 45 度付近までハドレー循環する*¹。また、極側の循環は自転角速度を遅くすると弱くなり、自転角速度が 1/16 倍ときはほとんど循環しない。

図 3.2 は自転角速度とハドレー循環の幅の関係を示したものである。コリオリパラメータだけを変えた実験 C は自転角速度が速いほどハドレー循環の幅は狭くなり、

*¹ハドレー循環の幅は次のように決めた。まず、質量流線関数の最大値 ϕ_{max} を求める。次に各緯度における質量流線関数の最大値 ϕ_{max}^{θ} を求め、 $\phi_{max}^{\theta} = 0.1\phi_{max}$ となる緯度をハドレー循環の緯度幅とした。また、境界層を取り除くため $\sigma = 0.7$ よりも上層の大気のみを扱った。

実験 A と同じような傾向を示した。一方、太陽日だけを変えた実験 D は自転角速度を変えてもハドレー循環の幅の変化は最大でも 3 度程度であり、コリオリパラメータを変えた場合と比べてほとんど変わらなかった。

図 3.3 は自転角速度とハドレー循環の強さの関係を示したものである。コリオリパラメータの大きさを変えた実験 A と実験 C では自転角速度が速いほどハドレー循環の循環強度は弱くなった。太陽日だけを変えた実験 D では自転角速度を遅くすると循環の強さは弱くなった。循環の幅に比べて循環の強度は日変化の影響を受けやすいと考えられる。

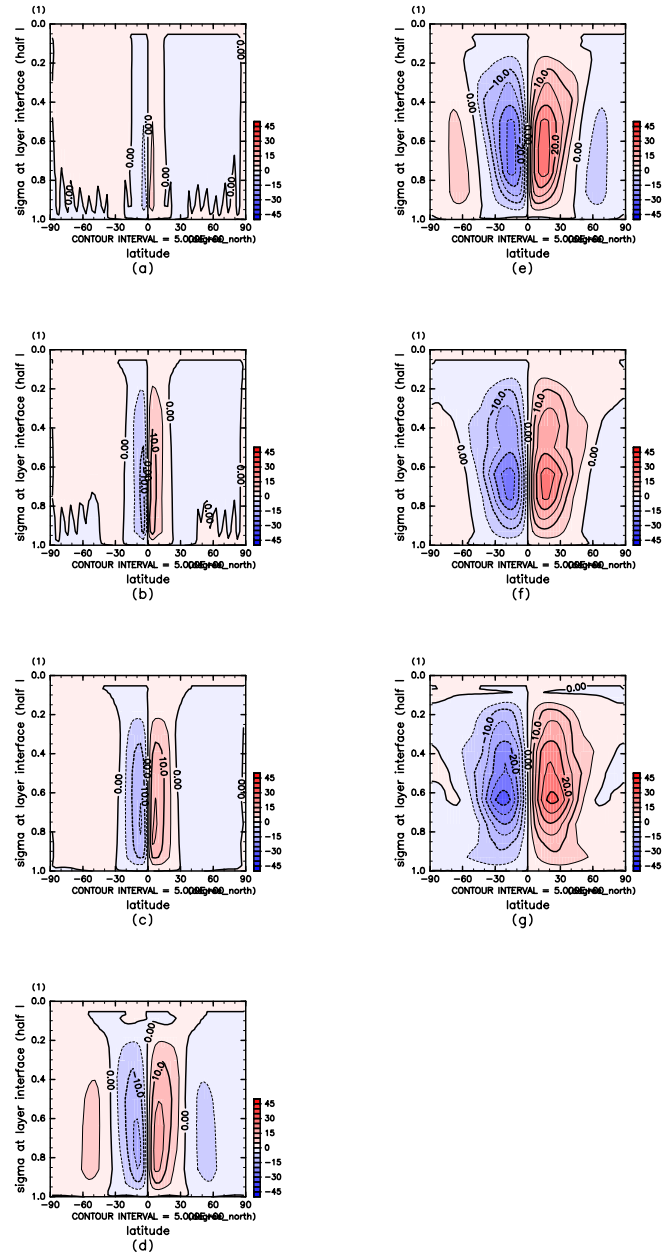


図 3.1: 子午面質量流線関数 [kg/s]. 時間平均, 経度平均. 実験 A. 横軸は緯度, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

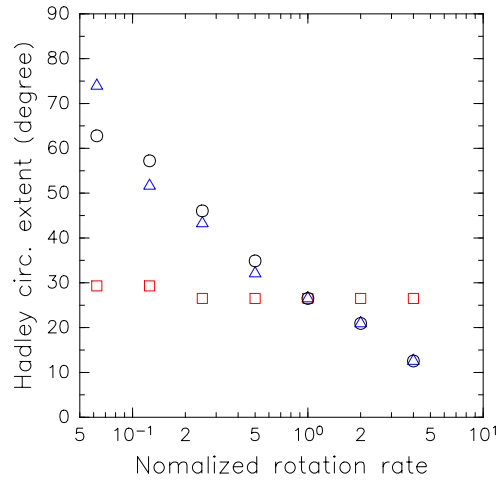


図 3.2: 自転角速度とハドレー循環の緯度幅. 横軸は自転角速度, 縦軸はハドレー循環の緯度幅 [degree]. 図中の黒は自転角速度を変えた実験 A,

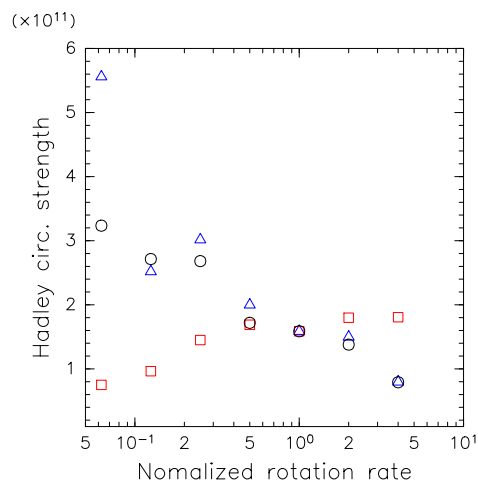


図 3.3: 自転角速度とハドレー循環の強さ.

3.3 東西風速

ここでは経度平均した東西風の速度分布について述べる。地球には中緯度帯に偏西風ジェットと呼ばれる西風の極大が存在する。偏西風ジェットの成因のひとつはハドレー循環による角運動量輸送である。ハドレー循環の上層で大気は赤道から極に向かって流れており、それによって赤道付近の大きな角運動量をもった大気が極方向に移動し、西風が吹く。ハドレー循環の端付近で西風は極大となり、これが偏西風ジェットとなる。

図 3.4 は自転角速度を変えた実験 A の東西風である。自転角速度を速くするとハドレー循環の幅が狭くなるのにしたがってジェットは赤道方向に移動した。また、自転角速度を遅くするとハドレー循環が極方向に広がるのに対応してジェットの位置は極方向に移動した。

コリオリパラメタだけを変えた実験 C では偏西風ジェットの位置は自転角速度が速いほど赤道に近くなった (図 3.7)。これは自転角速度が狭くなるとハドレー循環の幅は狭くなることと整合的である。太陽日だけを変えた実験 D では偏西風ジェットの位置はほとんど変わらなかった。これは実験 D でハドレー循環の幅が変わらなかったことと整合的である。

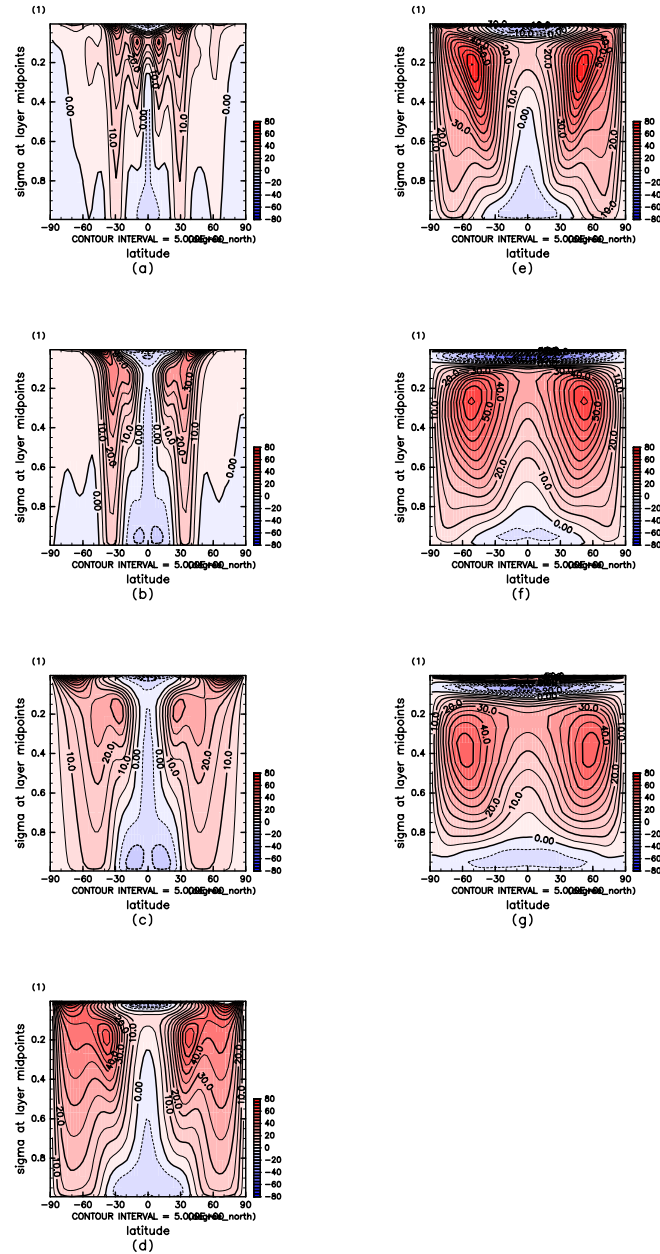


図 3.4: 東西風の子午面分布 [m/s]. 時間平均, 経度平均. 実験 A. 横軸は緯度, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

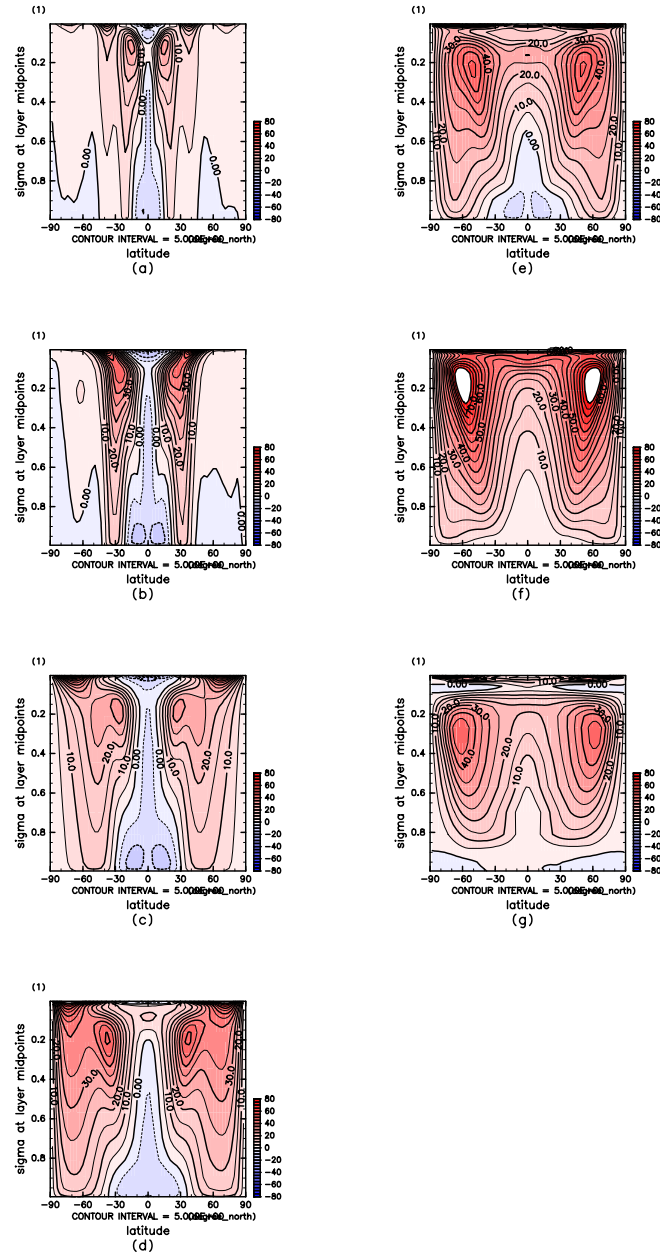


図 3.5: 東西風の子午面分布 [m/s]. 時間平均, 経度平均. 実験 C. 横軸は緯度, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

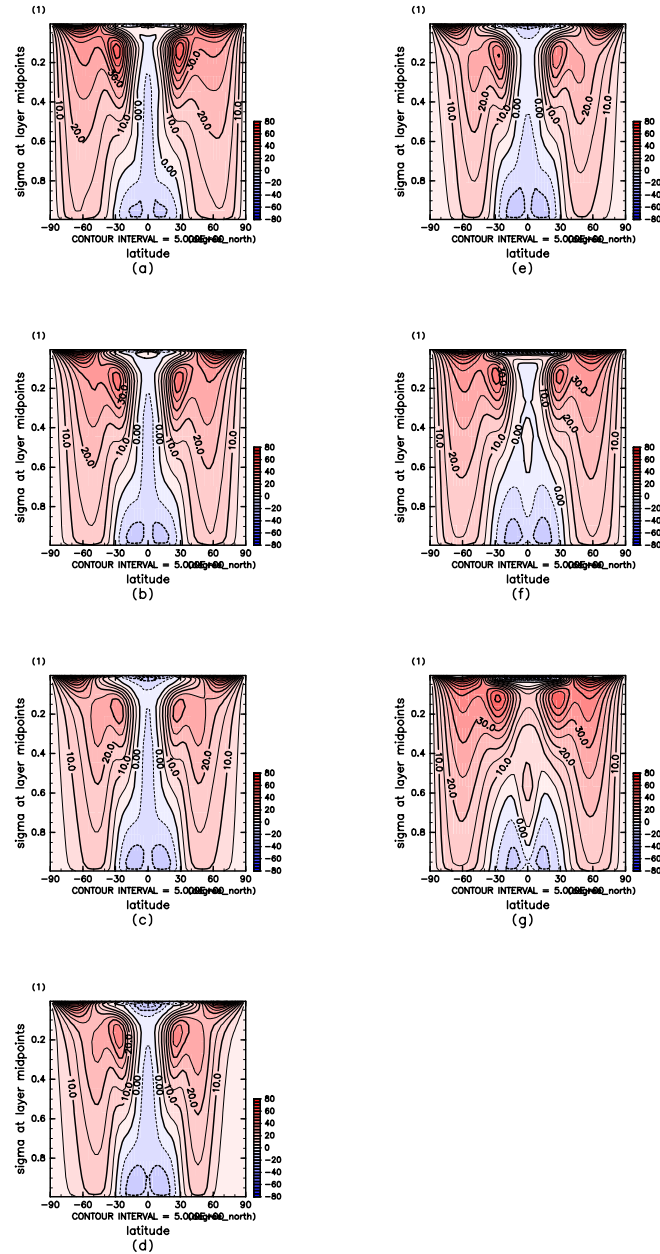


図 3.6: 東西風の子午面分布 [m/s]. 時間平均, 経度平均. 実験 D. 横軸は緯度, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

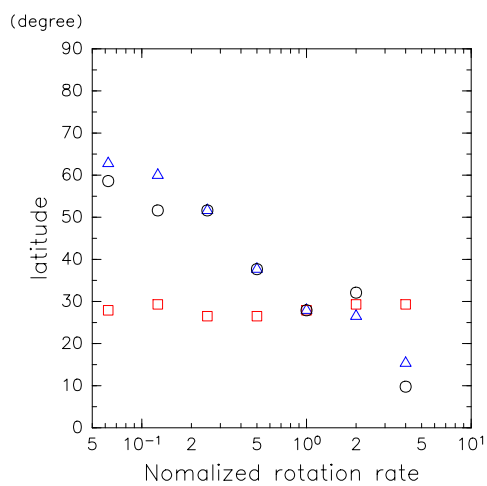


図 3.7: 偏西風ジェット的位置. 横軸は自転角速度, 縦軸は緯度. 図中の黒は自転角速度を変えた実験 A, 青はコリオリパラメタだけを変えた実験 C, 赤は太陽日だけを変えた実験 D.

第4章 惑星の熱収支

4.1 地表温度

まずはじめに自転角速度による地表温度の変化について述べる。図 4.1 は自転角速度と全球平均の地表温度の関係を示している。自転角速度を変えると全球平均の地表温度は変化した (実験 A)。実験 A では自転角速度を地球の 4 倍にすると全球平均の地表温度は自転角速度が地球の場合よりも約 13K 高くなった。また自転角速度を遅くして自転角速度を 1/16 倍にした場合では地表温度は約 11K 低くなった。自転角速度が速いほど地表温度は高いという傾向になった。

コリオリパラメタだけを変えた実験 C では自転角速度を 1/8 倍にすると地表温度は大きく変化し、自転角速度が地球の場合と比べて約 17K 高くなった。自転角速度 1/8 倍以外は自転角速度が地球の場合と比べて地表温度の変化は最大で 3K 程度であった。太陽日だけを変えた実験 D では自転角速度によって地表温度は変化した。自転角速度が地球の場合と比べて自転角速度を 4 倍にした場合では全球平均の地表温度は約 9K 高くなった。また自転角速度を 1/16 倍にした場合では自転角速度が地球の場合と比べて約 5K 低くなった。コリオリパラメタを変えても 1/8 倍以外では全球平均の地表温度は、大きくは変化せず、太陽日を変えると地表温度は変化し、自転角速度が速いほど地表温度は高くなった。

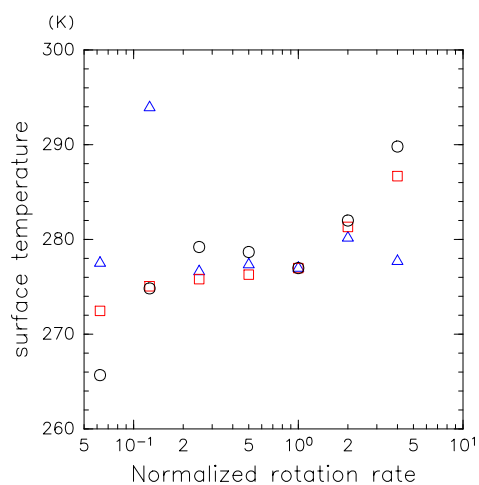


図 4.1: 自転角速度と全球平均の地表温度. 横軸は自転角速度, 縦軸は全球平均の地表温度. 図中の黒は自転角速度 (太陽日とコリオリパラメタ) を変えた実験 A, 青コリオリパラメタだけ変えた実験 C, 赤は太陽日だけ変えた実験 D.

4.2 惑星アルベド

地表温度が変わった理由のひとつは惑星アルベドが変わったためであると考えられる。惑星アルベドが変わると短波放射加熱の量が変化する。図 4.2 は自転角速度と惑星アルベドの関係を示している。太陽日を変えた実験 A と実験 D では自転角速度によって惑星アルベドは変化し、自転角速度が速いほど惑星アルベドは低いという傾向になっている。一方、コリオリパラメタだけを変えた実験 C では自転角速度を地球の 1/8 倍にした場合を除けば惑星アルベドは太陽日を変えた時ほど大きくは変わらなかった。図??は全球平均の地表温度と惑星アルベドの関係を示したものである。惑星アルベドが低いと地表温度が高くなることがわかる。

4.3 大気上端の短波放射

4.3.1 緯度分布

自転角速度を変えると短波放射加熱の空間分布は変化した。図 4.3 は大気上端における短波放射フラックスの緯度分布を示したものである。自転角速度を変えた実験 A では短波放射フラックスの変化は緯度 5 度付近で最も大きく、自転角速

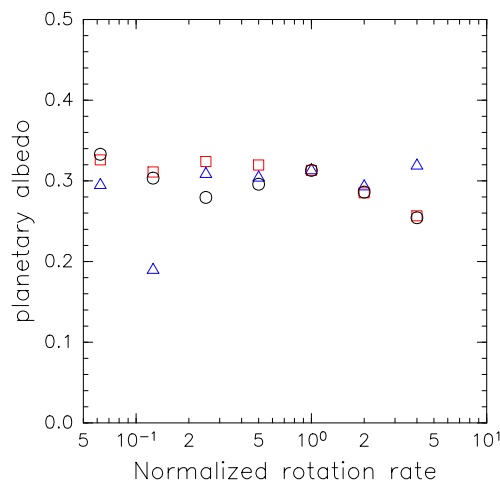


図 4.2: 自転角速度と惑星アルベド。横軸は自転角速度，縦軸は惑星アルベド。図の中の印はそれぞれ、黒は自転角速度を変えた実験 A，青はコリオリパラメタだけを変えた実験 C，赤は太陽日だけを変えた実験 D である。

度 4 倍は自転角速度 $1/16$ 倍と比べて約 $90\text{W}/\text{m}^2$ 増加した (図 4.3a). コリオリパラメタだけを変えた実験 C では自転角速度 $1/8$ 倍を除くと短波放射フラックスの変化は緯度 5 度付近で最も大きく, 自転角速度 2 倍は自転角速度 $1/16$ 倍と比べて約 $60\text{W}/\text{m}^2$ 増加した (図 4.3b). 太陽日だけを変えた実験 D では緯度 10 度付近でもっとも短波放射フラックスは変化しており, 自転角速度 4 倍は自転角速度 $1/16$ 倍と比べて約 $80\text{W}/\text{m}^2$ 増加した (図 4.3c).

4.3.2 短波放射加熱の分布の変化

図 4.4, 4.5, 4.6 は自転角速度を変えたことによる短波放射による加熱量の変化を示したものである. 自転角速度を地球よりも速くした場合, 実験 A では短波放射の加熱量は昼間の緯度 10 度付近で最も増加した. 実験 C では緯度 10 度以内で加熱量は増加し, 緯度 30 度付近の加熱量は少なくなった. また, 実験 D では多くの場所で加熱量が増加し, 特に午後の時間帯の加熱が強くなった.

一方, 自転角速度を遅くした場合, 実験 C では緯度 10 度付近の短波放射加熱は弱くなり, 緯度 30 ~ 40 度付近で加熱量は増加した. また, 実験 D では正午付近で加熱は弱くなった.

コリオリパラメタだけ変えた実験 C は短波放射の加熱が強くなった場所と, 弱くなった場所の両方が存在し, これらがキャンセルし合ったことで惑星アルベドは大きくは変化しなかった. 一方, 太陽日だけ変えた実験 D では自転角速度 4 倍や 2 倍のように全体的に加熱が強くなる場合がある (図 4.6a,b).

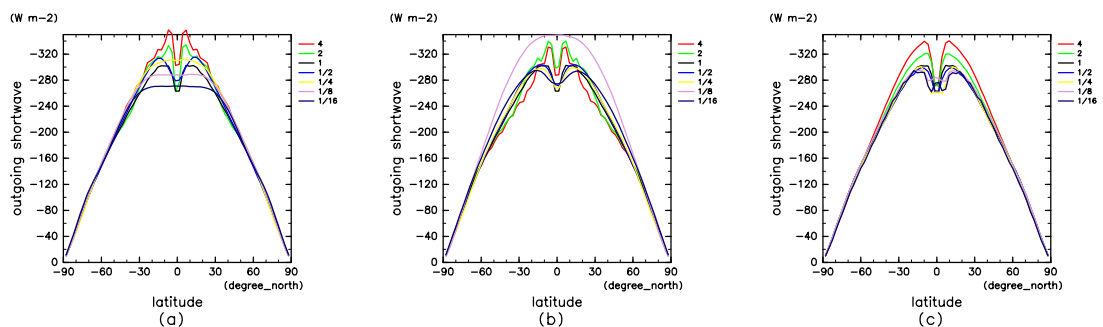


図 4.3: 大気上端の短波放射フラックス緯度分布. 横軸は緯度, 縦軸は大気上端における短波放射フラックス $[\text{W}/\text{m}^2]$. それぞれの図は (a) 自転角速度を変えた実験 A, (b) コリオリパラメタだけを変えた実験 C, (c) 太陽日だけを変えた実験 D.

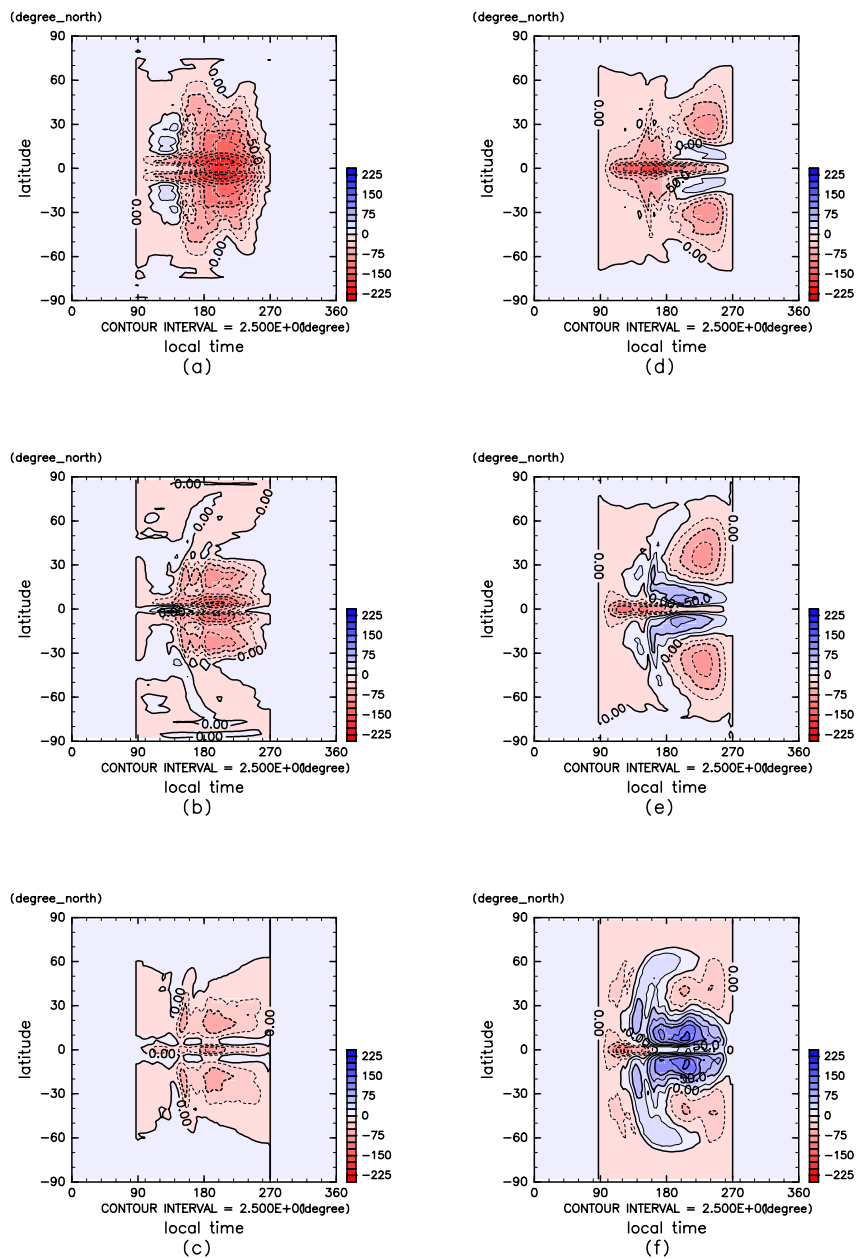


図 4.4: 大気上端の短波放射フラックスの偏差. 実験 A. 縦軸は緯度, 横軸は地方時 (横軸の端は真夜中, 中央は正午) である. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1/2 倍, (d) 1/4 倍, (e) 1/8 倍, (f) 1/16 倍と並んでいる. 自転角速度が地球と同じ場合を基準として, 加熱が増加したところは赤, 減少したところは青で示している.

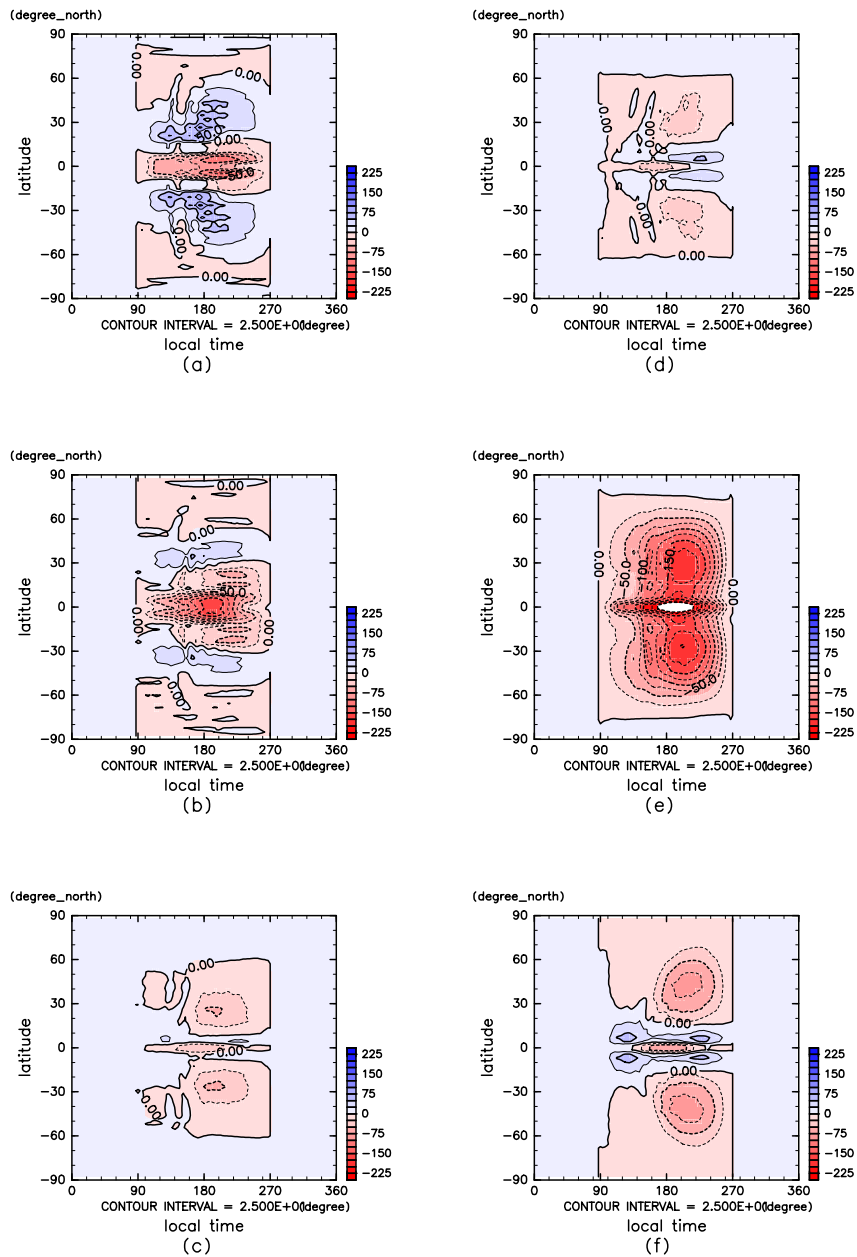


図 4.5: 大気上端の短波放射フラックスの偏差. 実験 C. 縦軸は緯度, 横軸は地方時 (横軸の端は真夜中, 中央は正午) である. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1/2 倍, (d) 1/4 倍, (e) 1/8 倍, (f) 1/16 倍と並んでいる. 自転角速度が地球と同じ場合を基準として, 加熱が増加したところは赤, 減少したところは青で示している.

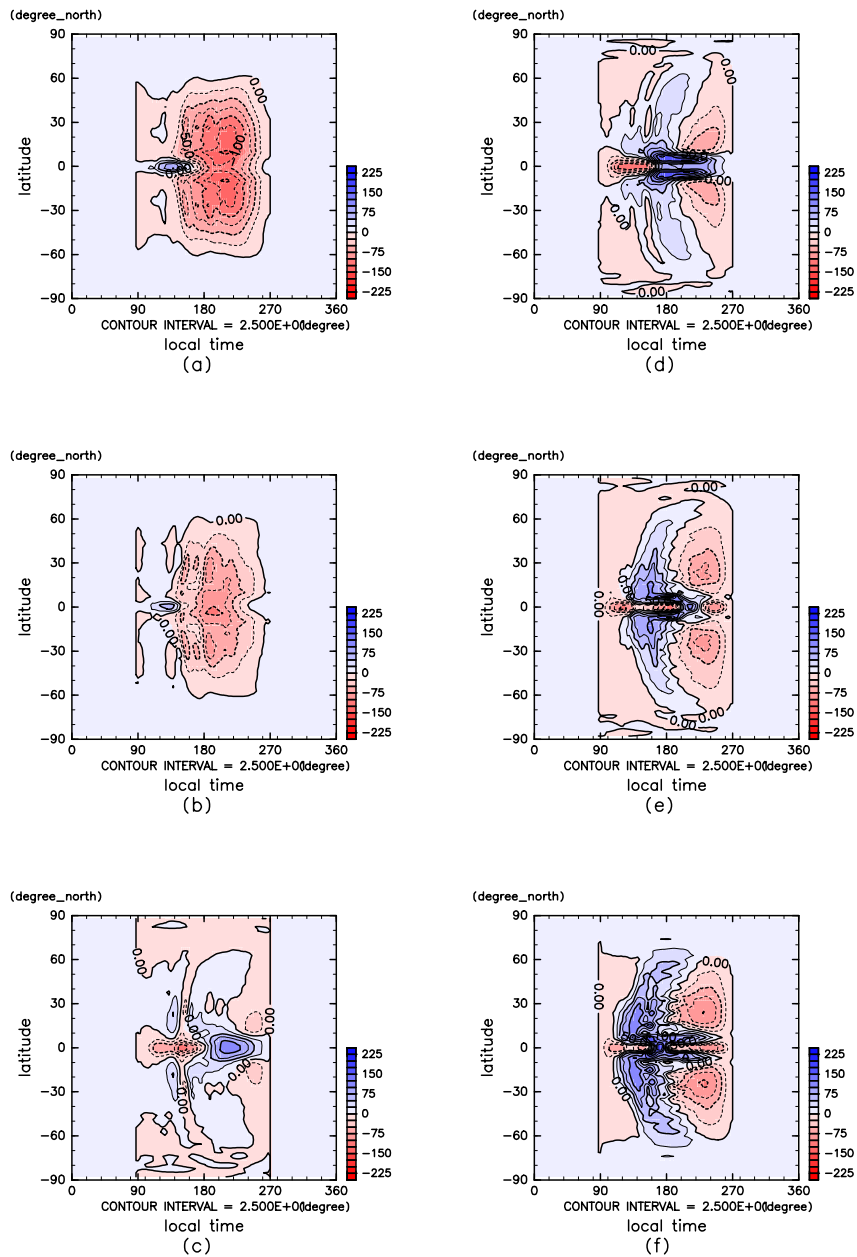


図 4.6: 大気上端の短波放射フラックスの偏差. 実験 D. 縦軸は緯度, 横軸は地方時 (横軸の端は真夜中, 中央は正午) である. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1/2 倍, (d) 1/4 倍, (e) 1/8 倍, (f) 1/16 倍と並んでいる. 自転角速度が地球と同じ場合を基準として, 加熱が増加したところは赤, 減少したところは青で示している.

4.4 温室効果

長波放射によって地面が大気によってどのくらい暖められるかは温室効果の強さによって決まっている。ここでは自転角速度による温室効果の強さの変化について記述する。まず温室効果の強さを表す温室効果係数 G を導入する。

$$G = \frac{T_s}{T_e} \quad (4.1)$$

ここで、 T_s は全球平均の地表温度、 T_e は惑星の放射平衡温度で以下の式で計算される。

$$T_e = \left(\frac{S(1-A)}{4} \right)^{1/4}$$

ここで S は太陽定数、 A は惑星アルベドである。

図 4.7 は自転角速度と温室効果係数の関係の関係である。太陽日を変えた実験 A と実験 D では自転角速度が速いほど温室効果係数は大きいという傾向にある。一方、コリオリパラメタだけを変えた実験 C は自転角速度を変えても温室効果係数はあまり変わらない。図 4.8 は地表温度と温室効果係数の関係を示している。温室効果係数が大きいほど地表温度は高くなっている。

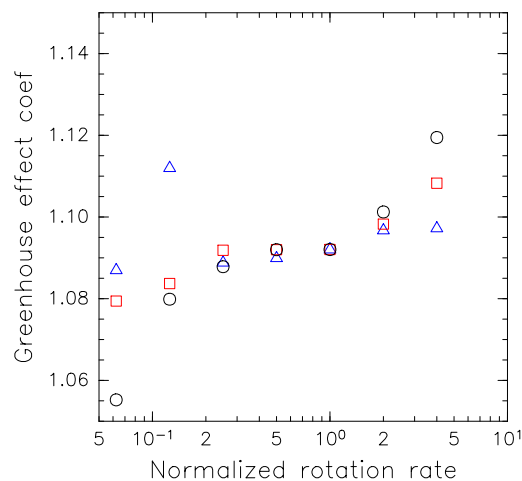


図 4.7: 自転角速度と温室効果係数。横軸は自転角速度、縦軸は温室効果係数。図中の黒は自転角速度を変えた実験 A、青はコリオリパラメタだけを変えた実験 C、赤は太陽日だけを変えた実験 D。

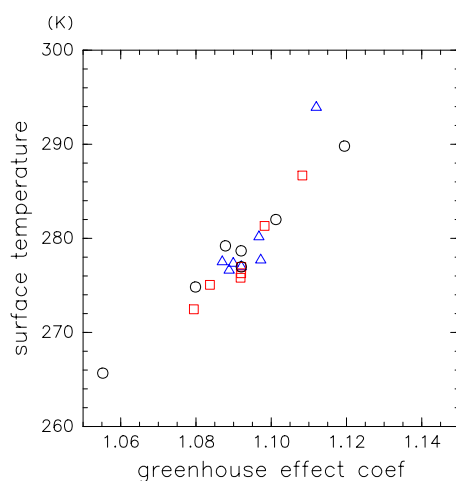


図 4.8: 地表温度と温室効果係数. 横軸は温室効果係数, 縦軸は全球平均の地表温度. 図中の黒は自転角速度を変えた実験 A, 青はコリオリパラメタだけを変えた実験 C, 赤は太陽日だけを変えた実験 D.

4.5 雲水

4.5.1 雲水量とアルベド

本研究では地表アルベドを固定しているため、アルベドの変化は主に雲の分布が変わることによって生じる。図 4.9 は鉛直積分した雲水量とアルベドの関係を示したものである。雲水が少ない時は雲水の増加に従ってアルベドも大きくなる。しかし、雲水が増えてくるとアルベドの変化は緩やかになり、アルベドは約 0.8 で頭打ちとなる。雲水の多い時は雲水の量が変化してもアルベドはほとんど変化せず、雲水の少ない時には雲水の量によってアルベドは大きく変化する。

4.5.2 雲水の偏差

自転角速度が地球の場合を基準として雲水分布の偏差を取った。コリオリパラメータを変えた場合、雲水分布の偏差は緯度方向に構造を持つ (図 4.12)。一方、太陽日を変えた場合、雲水分布の偏差は地方時の方向に構造を持つ (図 4.13)。

雲の分布の変化が緯度方向に構造を持つ場合と、地方時の方向に構造を持つ場合では惑星アルベドの変化に大きな違いが生じ得る。短波放射の降り注ぐ昼間の時間帯のみを考えると、緯度方向に変化の構造を持つ場合は昼間の時間だけ取り出しても正の偏差と負の偏差の両方が存在する (図 4.10)。一方、地方時の方向に偏差の構造を持つ場合には、昼間の時間だけを取り出すと偏差が正または負に偏る可能性がある。偏差が偏ると惑星アルベドは大きく変化する。

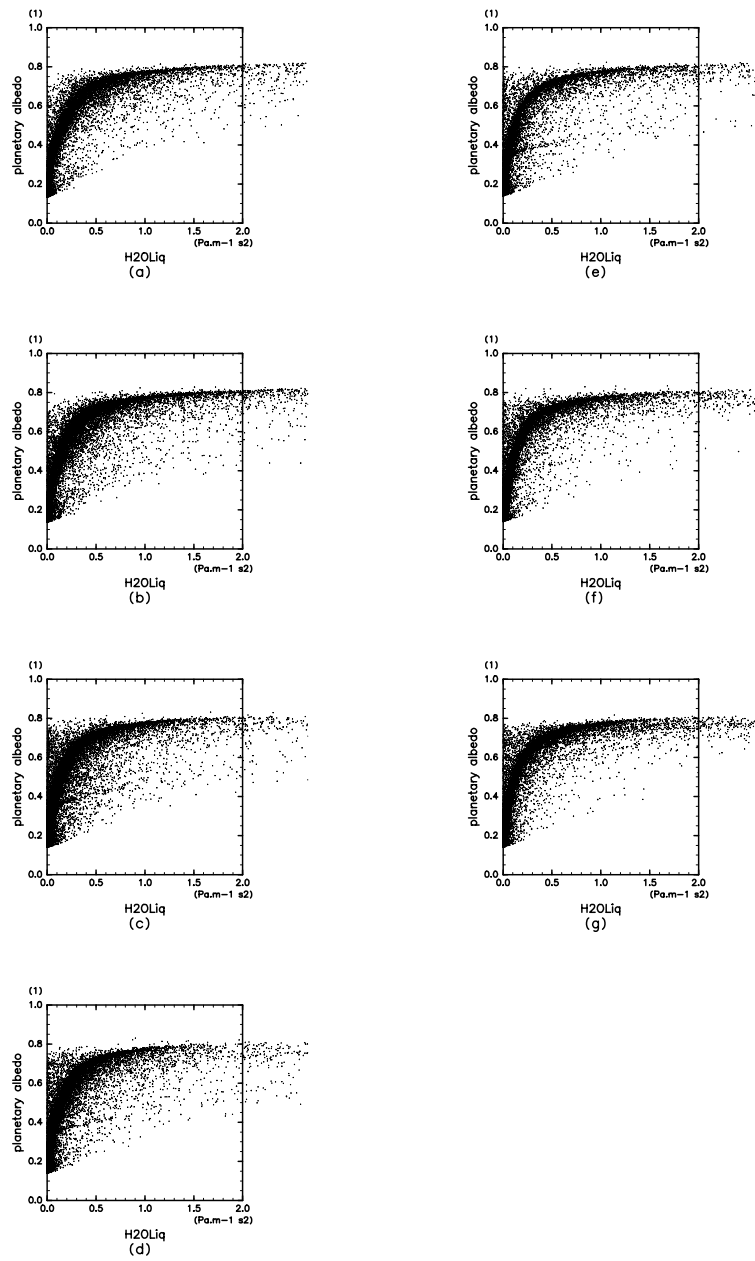


図 4.9: 雲水量とアルベド. 実験 A. 横軸は鉛直積分した雲水量 [kg/m²], 縦軸はアルベド. 太陽天頂角 0 度.

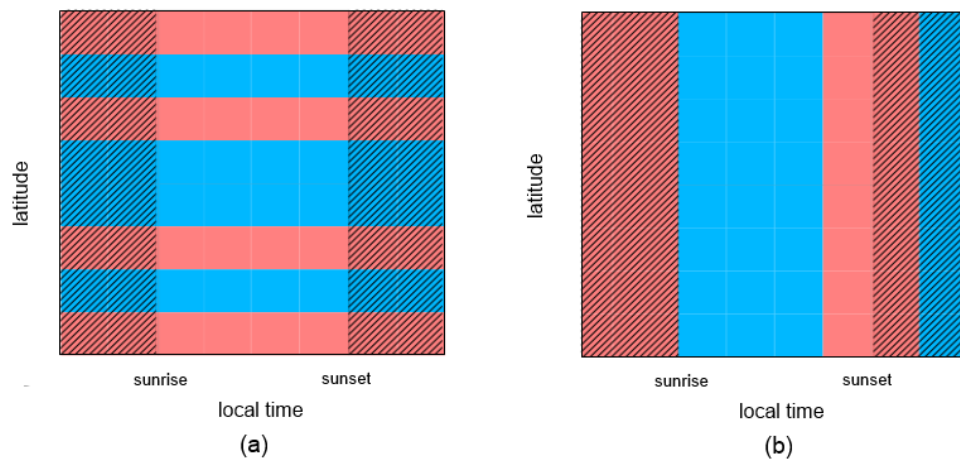


図 4.10: 偏差が緯度方向に構造を持つ場合と地方時の方向に構造を持つ場合. 図はそれぞれ横軸は地方時, 縦軸は緯度. 影の付いているところは夜.

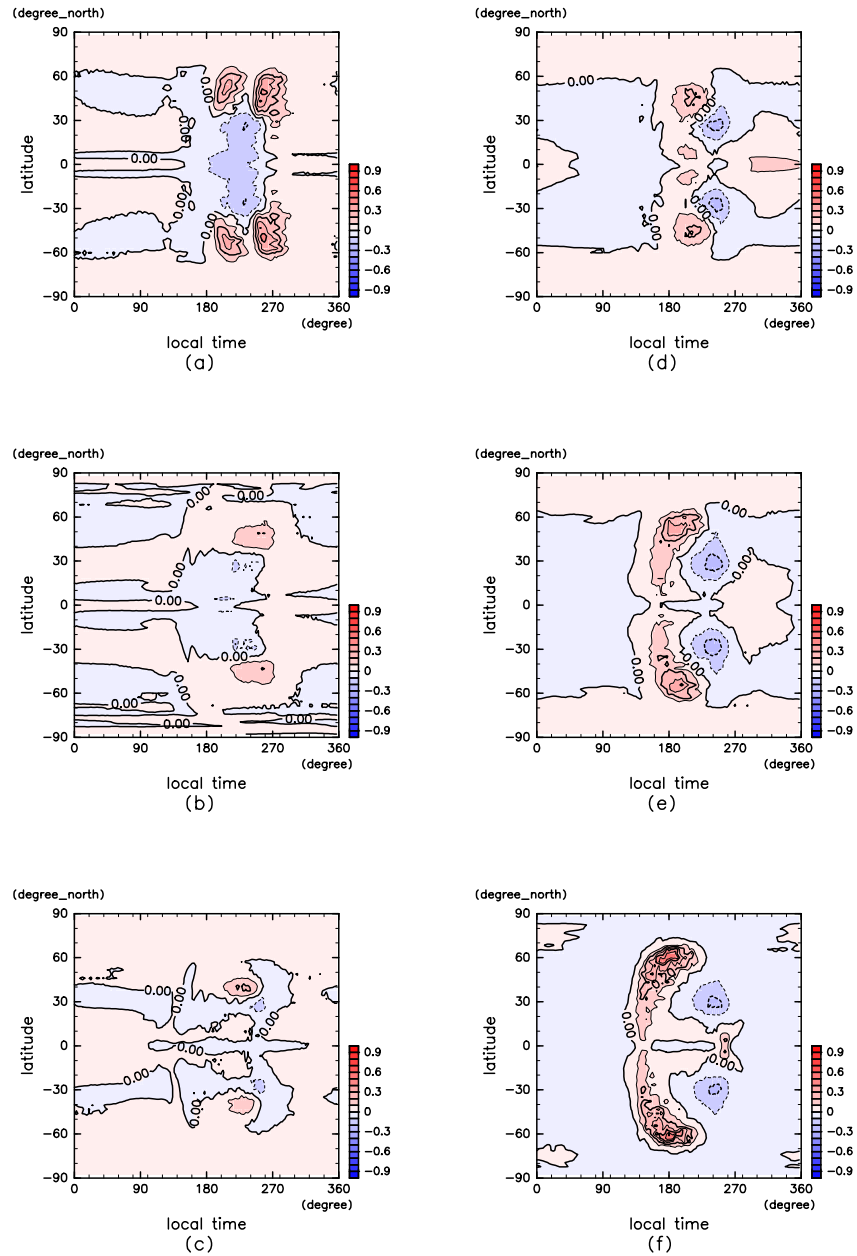


図 4.11: 鉛直積分した雲水量の偏差の緯度地方時分布 [kg/m^2]. 時間平均. 自転角速度 1 倍を基準とした偏差. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1/2 倍, (d) 1/4 倍, (e) 1/8 倍, (f) 1/16 倍.

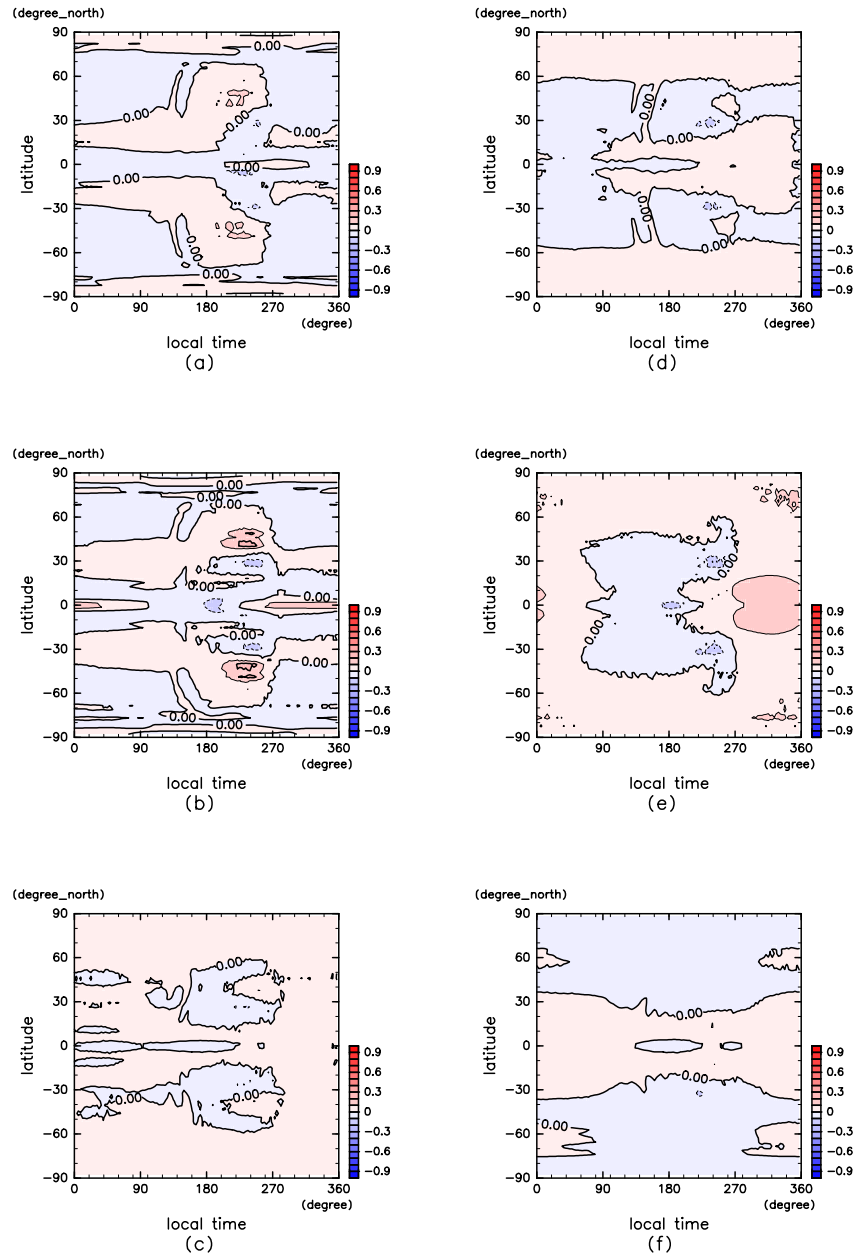


図 4.12: 鉛直積分した雲水量の偏差の緯度地方時分布 [kg/m^2]. 時間平均. 自転角速度 1 倍を基準とした偏差. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1/2 倍, (d) 1/4 倍, (e) 1/8 倍, (f) 1/16 倍.

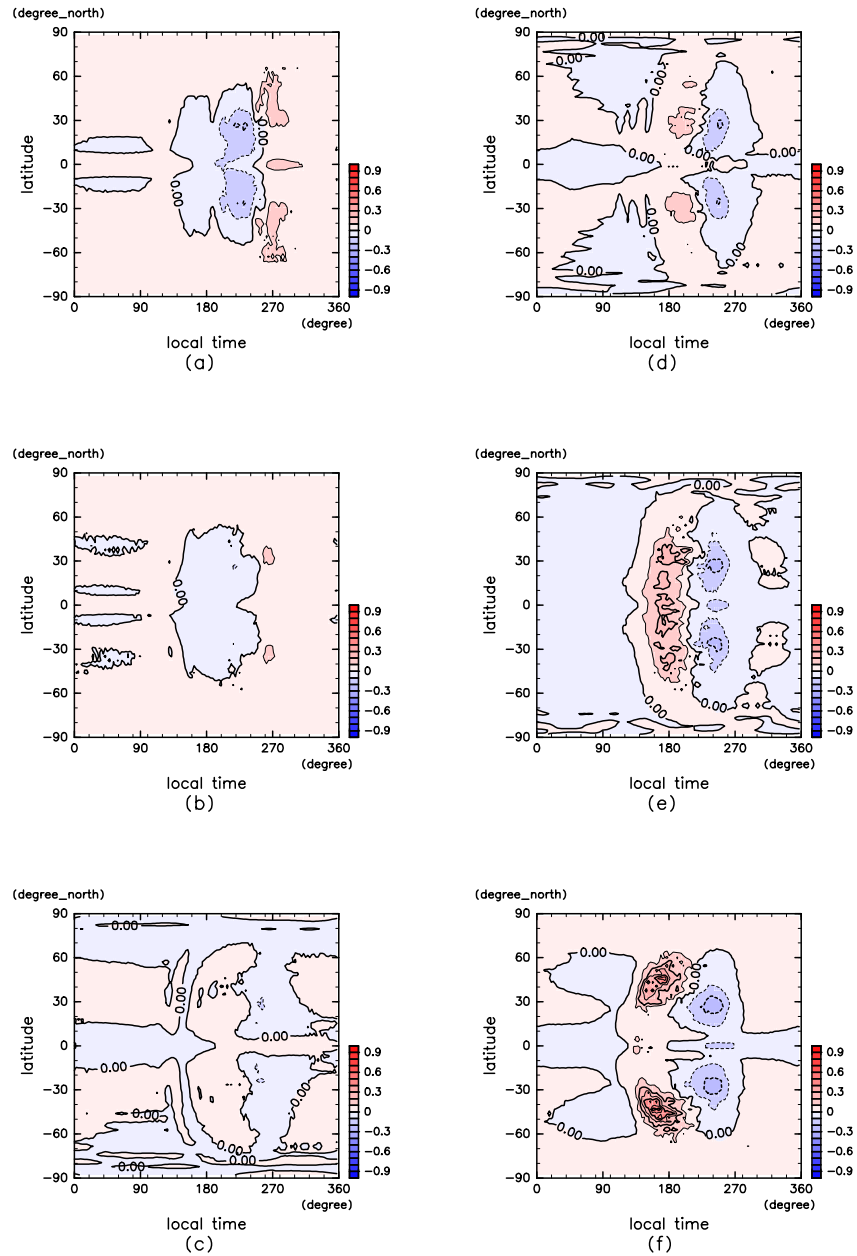


図 4.13: 鉛直積分した雲水量の偏差の緯度地方時分布 [kg/m^2]. 時間平均. 自転角速度 1 倍を基準とした偏差. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1/2 倍, (d) 1/4 倍, (e) 1/8 倍, (f) 1/16 倍.

4.6 降水量

ここでは、コリオリパラメタを変えた場合と太陽日を変えた場合の降水分布の変化について記述する。

4.6.1 コリオリパラメタを変えた場合

コリオリパラメタを変えると降水域が緯度方向に変化する(図 4.14)。ハドレー循環している範囲では、上昇域で雨が降り、下降域で乾燥する。ハドレー循環の緯度幅が変わると乾燥域となる緯度帯が移動する。コリオリパラメタが大きくなるとハドレー循環の幅は狭くなり、乾燥域は赤道方向に移動する。また、自転角速度が遅くなることでコリオリパラメタが小さくなるとハドレー循環の幅は広くなり、乾燥域は極方向に移動する。地球の場合、中緯度帯に降水域が存在する。ここでは傾圧不安定によって雨が降っている。ハドレー循環の緯度幅が変わると南北の温度構造が変わり傾圧不安定となる緯度帯が移動する。ハドレー循環している範囲では大気は南北方向によくかき混ぜられており南北温度傾度は小さい。一方、ハドレー循環の外側はあまり南北に熱が輸送されないため、南北温度傾度が大きくなり傾圧不安定となる。コリオリパラメタによってハドレー循環の緯度幅が変わると傾圧不安定によって雨が降っている領域が緯度方向に移動する。

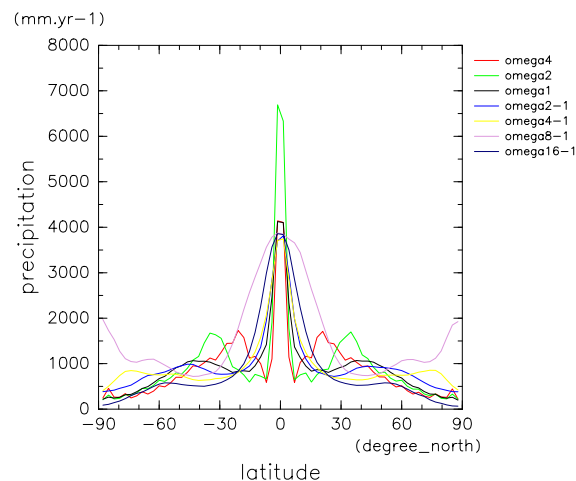


図 4.14: 降水量の緯度分布. 実験 C. 横軸は緯度, 縦軸は時間平均, 経度平均した降水量 [mm/yr].

4.6.2 太陽日を変えた場合

太陽日を変えると降水の時間分布が変化する。図 4.15 は各地方時における降水分布である。自転角速度が速いほど昼間の降水量は少なくなった。太陽日が変わることによる対流活動への影響は次の 2 つのパターンが考えられる。1 つ目は太陽日によって昼間の長さが変わることによる影響である。昼間の長さが変わると日の出から日の入りまでの間に短波放射によって大気が加熱される量が変わる。具体的には、昼の時間が短くなると短波放射によって大気が十分に加熱される前に夜を迎え、昼の時間が長い場合に比べて活発に対流することができないと考えられる。2 つめは、太陽日によって夜の長さが変わることの影響である。夜の間には大気は地表から冷やされ、安定した状態になる。夜の長さが変わると日の入りから日の出までの間に大気が冷やされる量が変わる。具体的には、夜の時間が短くなると大気が放射冷却によって冷やされる量が減り、夜の時間が長い場合に比べて日の出の時に大気が不安定となり、すぐに対流が成長しやすと考えられる。この実験では太陽日によって昼間の時間が変わることの影響が効いて、太陽日が短いほど昼間の降水量は減ったと考えられる。

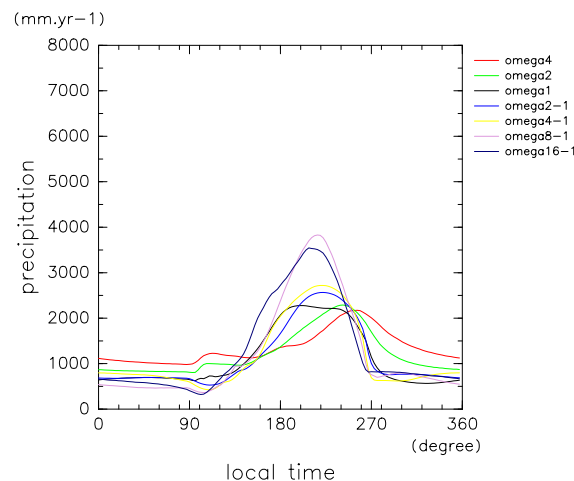


図 4.15: 降水量の地方時分布。実験 D。横軸は地方時、縦軸は時間平均、緯度平均した降水量 [mm/yr]。

第5章 まとめ

自転角速度が大気の大循環と惑星熱収支にどのような影響をおよぼしているのか明らかにするために大気大循環モデルを使用した数値実験をおこなった。実験は自転角速度によって変わるコリオリパラメタと太陽日の2つの影響を切り分けることを考えて、そして、自転角速度がコリオリパラメタと太陽日を通してどのように大気の大循環と惑星熱収支をコントロールしているのか考察をおこなった。

自転角速度を変えると大気の大循環と惑星熱収支は変化した。コリオリパラメタを変えるとハドレー循環の緯度幅は変化し、自転角速度が速いほどハドレー循環の緯度幅は狭くなった。コリオリパラメタと太陽日をどちらも変えた場合とコリオリパラメタだけを変えた場合の自転角速度によるハドレー循環の緯度幅の変化は同じ傾向を示した。一方、太陽日だけを変えた場合はハドレー循環の緯度幅は変化しなかった。ハドレー循環の緯度幅はコリオリパラメタによって変化し、太陽日が変わることによる影響は小さいと考えられる。

全球平均の地表温度は太陽日を変えたことで大きく変わった。地表温度が変わった原因のひとつは惑星アルベドが変わったことである。コリオリパラメタを変えた場合と太陽日を変えた場合では雲水分布の変化の構造が異なり、コリオリパラメタを変えた場合は緯度方向に変化の構造が形成されるのに対して、太陽日を変えた場合は地方時の方向に変化の構造が形成された。緯度方向の変化の構造は空間分布が変わったことによってもたらされた。コリオリパラメタが変わったことでハドレー循環の緯度幅が変化し、その結果、降水域は緯度方向に変化し構造が形成された。地方時方向の変化の構造は太陽日が変わったことで降水の時間分布が変化したことによってもたらされた。降水の時間分布の変化は太陽日が変わったことで昼の長さが変わり、その結果、対流の立ち方が変化したためであると考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり, 多くの方々にお世話になりました. 指導教員であるはしもと じょーじ准教授には, 研究の方針や進め方, 考え方など多くのアドバイスをいただきました. 神戸大学の高橋芳幸准教授には dcpam のコンパイル方法や計算結果に関する意見など数多くいただきました. 北海道大学の石渡正樹准教授には修士1年の夏に集中講義をしていただき, ハドレー循環の軸対称モデルを紹介して頂きました. 神戸大学地球及び惑星大気研究室 OB の納多哲史博士には学部生のときに GCM の使い方に関する基本的なところから丁寧に教えて頂きました. また, dcmodel-ml の皆さまには自分の研究に関する質問に対して多くのコメントをいただきました. 研究室のメンバーには, 日々の話し相手になっていただき, 研究の間の気分転換になりました. なお, 本研究の解析には地球流体電脳倶楽部 Ruby プロジェクトの Ruby-DCL および GPhys を使用しました. この場を借りて, 皆様に心より感謝申し上げます.

A 短波放射加熱の偏差の相関

自転角速度を変えると短波放射加熱の分布は変化した。この偏差の構造はコリオリパラメタと太陽日が変わったことによってもたらされたものである。自転角速度を変えた場合^{*1}の短波放射加熱の変化 A' は、コリオリパラメタだけを変えた場合の短波放射加熱の変化 C' 、は太陽日だけを変えた場合の短波放射加熱の変化 D' 、コリオリパラメタと太陽日を両方変えることによって表れる変化 X' の和として表されるものと仮定する。すなわち

$$A' = C' + D' + X'$$

実験 A, C, D で自転角速度を変えた場合の各緯度、各地方時における短波放射加熱の偏差の相関を求めた。図 A-1 は実験 A(図 4.5) と実験 C(図 4.6)、図 A-2 は実験 A(図 4.5) と実験 D(図 4.7) の短波放射加熱の偏差の分布の相関を示している。

この図の相関係数は偏差の地理的な分布が似ているかどうかを表し(図??)、回帰係数は偏差の大きさがどれだけ近いかわかる(図??)。実験 C または実験 D の短波放射加熱の偏差が実験 A のものと地理的な分布が似ているほど相関係数は 1 に近くなる。また、偏差の大きさが実験 A と近いほど回帰係数は 1 に近くなる。

自転角速度を地球の 4 倍にした場合は太陽日を変えた実験 D の相関係数と回帰係数は 1 に近く、一方、コリオリパラメタを変えた実験 C の相関係数と回帰係数は小さい。すなわち、自転角速度を 4 倍にした時の短波放射加熱の偏差の構造は主に太陽日が変わったことによって作られたと考えられる。

自転角速度を 2 倍にした場合はコリオリパラメタだけを変えた実験 C と太陽日だけを変えた実験 D の相関係数と回帰係数はどちらも 1 に近く、自転角速度を 2 倍にした時の短波放射加熱の変化はコリオリパラメタが変わったことと、太陽日が変わったことの両方が同じくらい効いていると考えられる。

自転角速度を 1/2 倍の場合はコリオリパラメタだけを変えた実験 C の相関係数と回帰係数が 1 に近く、それに対して太陽日だけを変えた実験 D の相関係数と回帰係数は小さい。このことから、自転角速度を 1/2 倍にした場合の短波放射加熱の変化はコリオリパラメタが変わったことによってもたらされたと考えられる。

自転角速度を 1/4 倍にした場合は自転角速度 1/2 倍の時と同じようにコリオリ

^{*1} コリオリパラメタと太陽日どちらも変わる。

パラメタだけを変えた実験 C の相関係数と回帰係数は太陽日を変えた実験 D の場合よりも大きく、1 に近い。このことから、自転角速度を $1/4$ 倍にした場合の短波放射加熱の変化はコリオリパラメタが変わったことによってもたらされたと考えられる。

自転角速度を $1/4$ 倍にした場合はコリオリパラメタを変えた場合と太陽日を変えた場合のどちらも相関係数と回帰係数は小さく、短波放射加熱の偏差の構造はコリオリパラメタと太陽日がどちらも変わったことで作られたと考えられる。

自転角速度を $1/8$ 倍にした場合は太陽日を変えた場合の相関係数と回帰係数が 1 に近い。それに対してコリオリパラメタを変えた場合の相関係数と回帰係数は小さく、短波放射加熱の変化は太陽日が変わったことによってもたらされたと考えられる。

自転角速度を $1/16$ 倍にした場合はコリオリパラメタを変えた場合と太陽日を変えた場合のどちらも相関係数と回帰係数は小さく、短波放射加熱の偏差の構造はコリオリパラメタと太陽日がどちらも変わったことで作られたと考えられる。

実験 A では自転角速度を変えたことで短波放射加熱の分布が変化したが、コリオリパラメタが変わることと、太陽日が変わることのどちらが影響しているのかは自転角速度によって異なった。

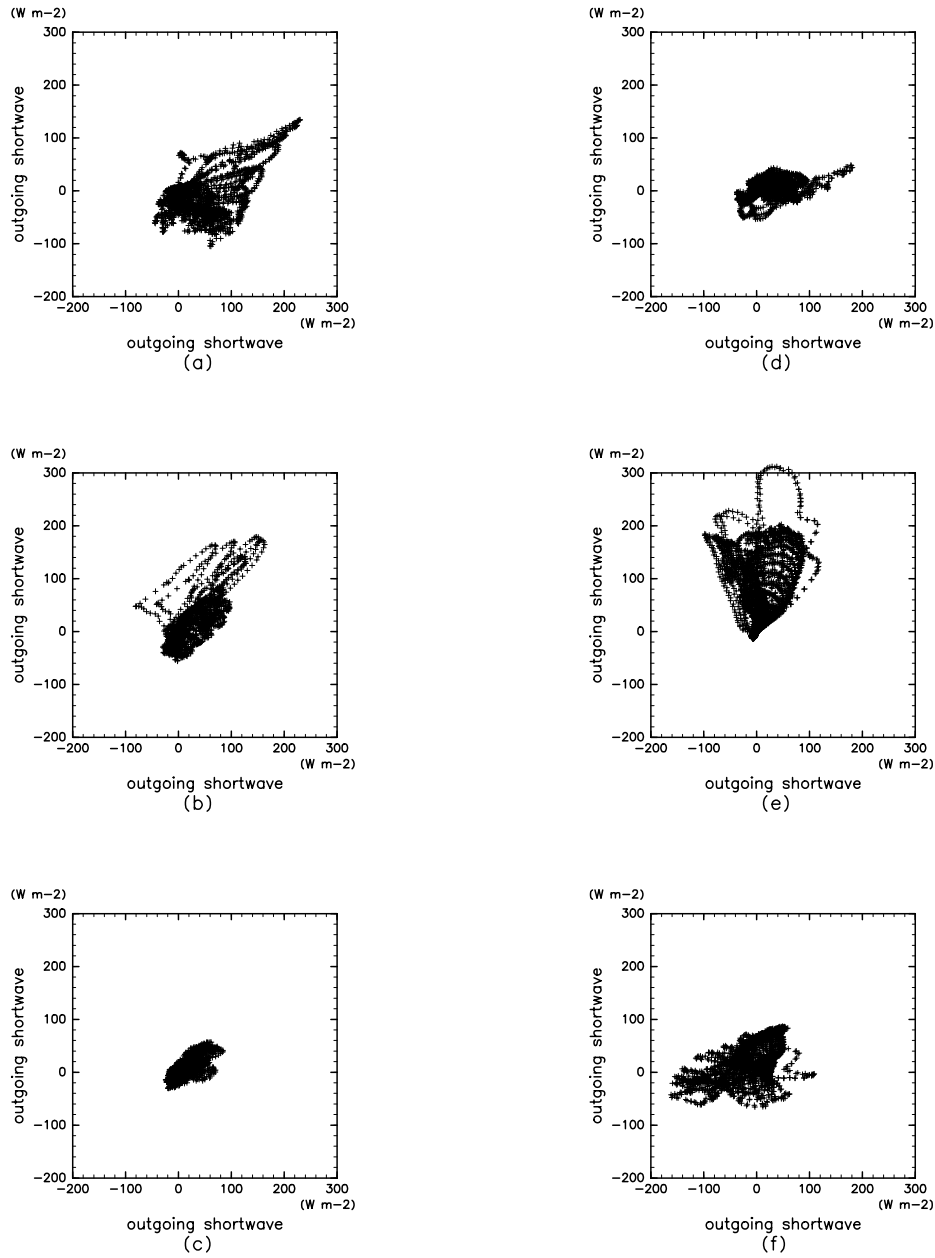


図 A-1: 自転角速度を変えた実験 A とコリオリパラメタのみを変えた実験 C の短波放射加熱の偏差の関係. 横軸は実験 A の短波放射加熱の偏差 [W/m^2], 縦軸は実験 C の短波放射加熱の偏差 [W/m^2]. 自転角速度 1 倍を基準として偏差をとっている.

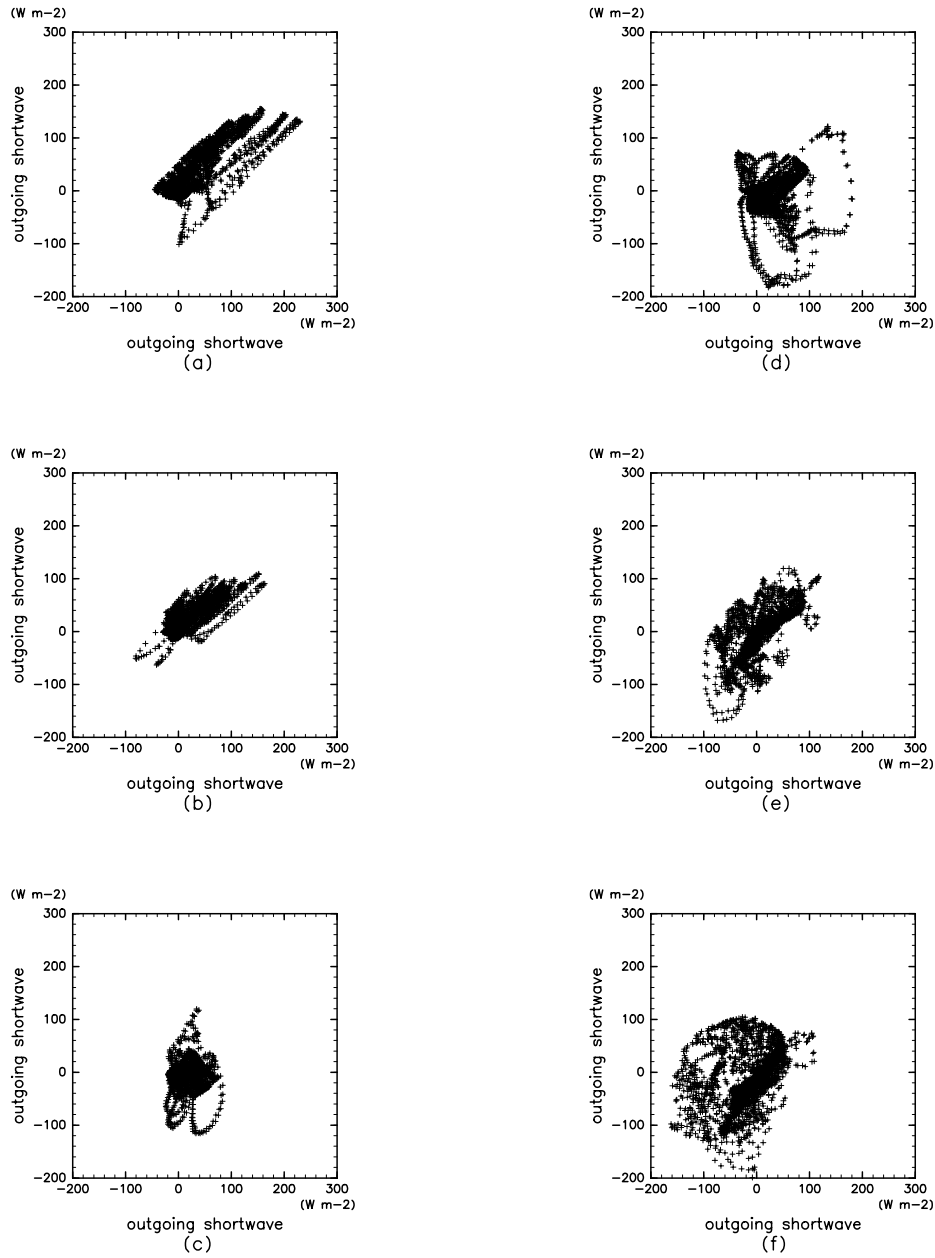


図 A-2: 自転角速度を変えた実験 A と太陽日のみを変えた実験 D の短波放射加熱の偏差の関係. 横軸は実験 A の短波放射加熱の偏差 $[W/m^2]$, 縦軸は実験 D の短波放射加熱の偏差 $[W/m^2]$. 自転角速度 1 倍を基準として偏差をとっている.

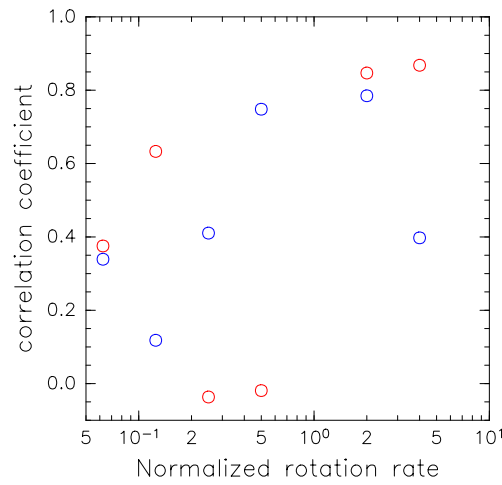


図 A-3: 相関係数. 横軸は自転角速度, 縦軸は自転角速度を変えた場合の短波放射加熱の偏差の相関係数. 図の中の青はコリオリパラメタだけを変えた実験 C, 赤は太陽日だけを変えた実験 D.

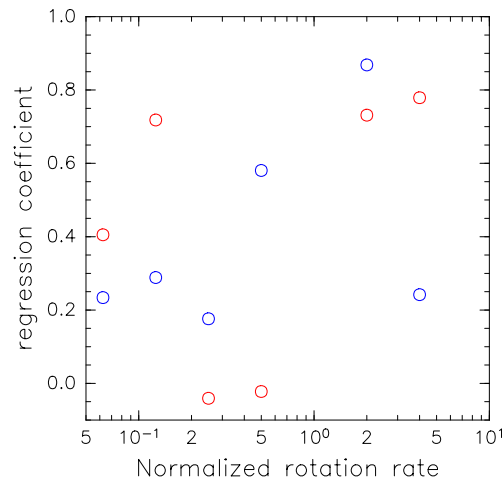


図 A-4: 回帰係数. 横軸は自転角速度, 縦軸は自転角速度を変えた場合の短波放射加熱の偏差の回帰係数. 図の中の青はコリオリパラメタだけを変えた実験 C, 赤は太陽日だけを変えた実験 D.

B 日平均日射を与えた実験

日平均, 年平均日射を与えて実験をおこなった. この実験では自転角速度によってコリオリパラメタの大きさのみが変化する.

B-1 実験設定

実験設定は基本的に第 2 章の 2.2 節と同じであるが, 日射の与え方が異なる. 日射は自転傾斜角を地球と同じ 23.44 度にして日平均, 年平均したものを与えた (図 B-5) ^{*2}.

解像度は水平解像度 T42, 鉛直総数 22 層とした. 時間積分の間隔は自転角速度 8 倍の時は 10 分, それ以外は 12 分とした.

初期値には 280K の等温静止大気を用いた.

自転角速度は地球の 8, 4, 2, 1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 0 についておこなった. この実験では日平均日射を与えているので, 自転角速度によって変化するのはコリオリパラメタのみである. それぞれ 5 年間積分し, 定常状態となったと思われる最後の

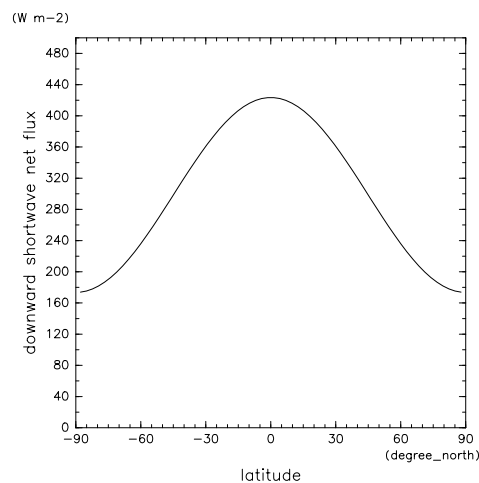


図 B-5: 大気上端に入射する短波放射の緯度分布. 横軸は緯度, 縦軸は大気上端に入射する短波放射 [W/m^2]. 経度方向には変化しない.

^{*2}この日射の分布は Williams (1988) と同じである.

1年分を解析に使用した。

B-2 結果

質量流線関数

図 B-6 は子午面循環を示している。自転角速度によってハドレー循環の緯度幅は変化し、自転角速度が速いほどハドレー循環の緯度幅は狭くなった(図 B-7)。この自転角速度によるハドレー循環の幅の変化は Williams (1988) と同じ傾向を示した。ハドレー循環の強さは自転角速度が速いほど弱くなった。また、循環のセルの数は自転角速度を速くすると増加した。

東西風

図 B-8 は子午面の東西風の分布を示している。自転角速度を速くすると偏西風ジェット的位置は赤道方向に移動した。これは、ハドレー循環の外縁で偏西風ジェットができることと整合的である。

ハドレー循環の上層で赤道から極に向かって大気が流れている場所では赤道付近の大気は大きな角運動量をもっているため極にいくほど強い西風となる。一方、極から赤道に向かって大気が流れているハドレー循環の下層では赤道にいくほど西風は弱くなり、東風になる。自転角速度が8倍から1/8倍の時の下層大気は赤道に近いほど西風は弱くなり、東風を持つようになっているが、1/16倍の場合は中緯度では東風なのに対して、赤道付近では西風となっており、ハドレー循環による角運動量輸送で説明することができない*3。

*3平衡状態に達していないのではないかと考えられる。ちなみに10年積分してもこの東西風分布は変わらなかった。

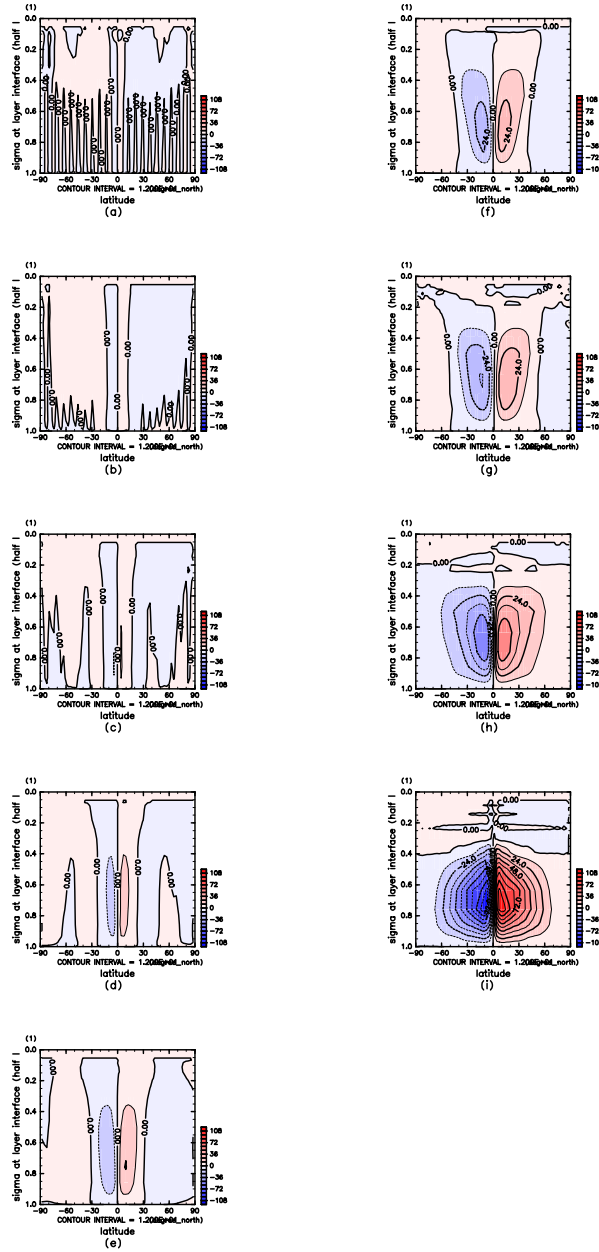


図 B-6: 子午面質量流線関数 [kg/s]. 時間平均, 経度平均. 実験 A. 横軸は緯度, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 8 倍, (b) 4 倍, (c) 2, (d) 1 倍, (e) 1/2 倍, (f) 1/4 倍, (g) 1/8 倍, (h) 1/16 倍, (i) 0 倍.

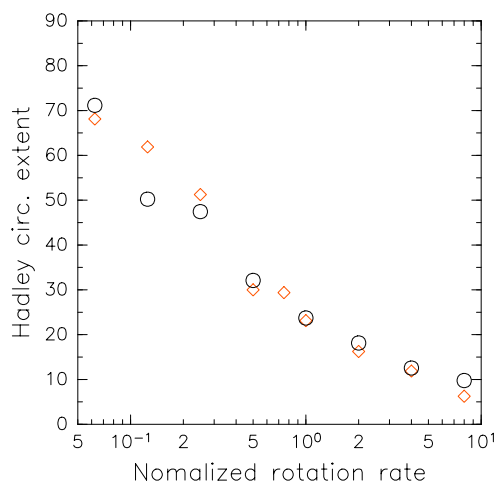


図 B-7: 自転角速度とハドレー循環の緯度幅. 横軸は自転角速度, 縦軸はハドレー循環の緯度幅 [degree]. 黒は本研究, オレンジは Williams (1988).

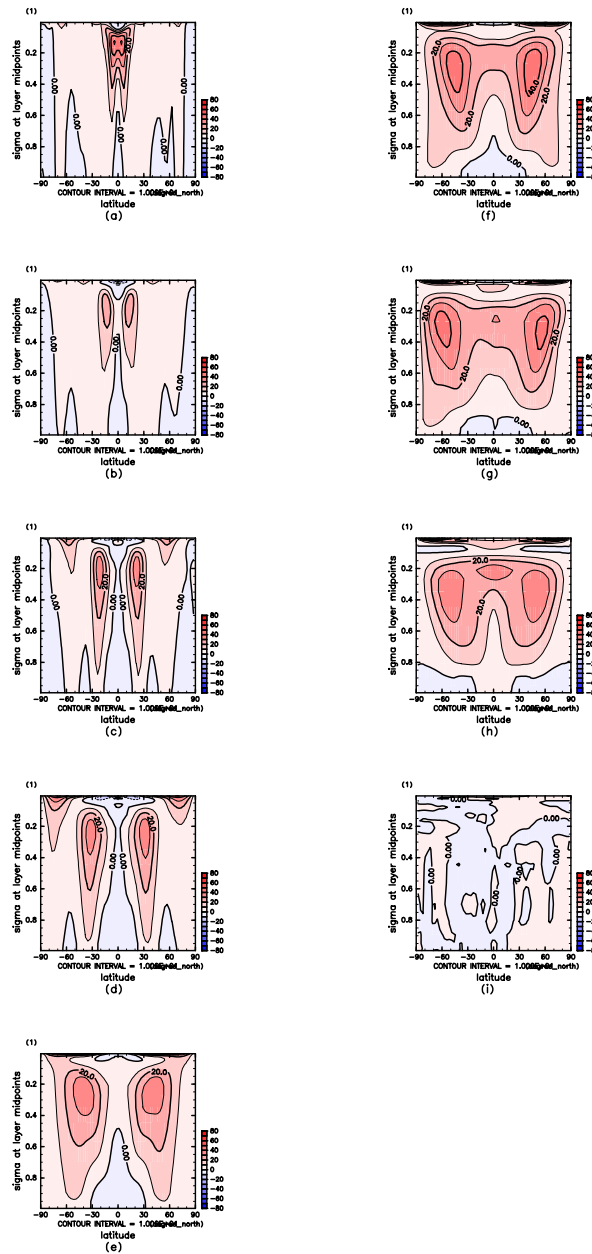


図 B-8: 子午面の東西風分布 [m/s]. 横軸は緯度, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 8 倍, (b) 4 倍, (c) 2, (d) 1 倍, (e) 1/2 倍, (f) 1/4 倍, (g) 1/8 倍, (h) 1/16 倍, (i) 0 倍.

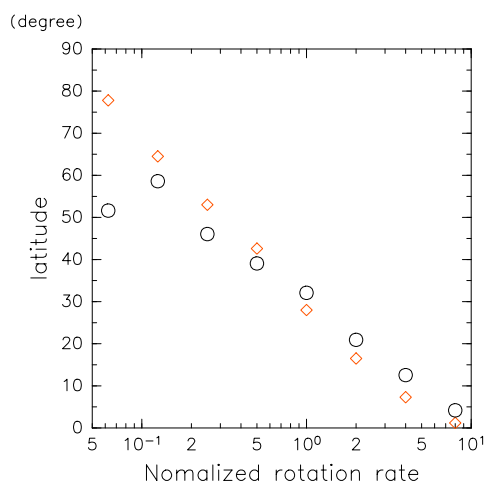


図 B-9: 自転角速度と偏西風ジェット的位置. 横軸は自転角速度, 縦軸は偏西風ジェットが最大となる緯度. 黒は本研究, オレンジは Williams (1988).

C Held and Hou (1980) で提示されたハドレー循環の軸対称モデル

Held and Hou (1980) で提示されたハドレー循環の軸対称モデルについて簡単な説明をおこなう。赤道で上昇して亜熱帯で下降するハドレー循環がどこまで広がるか考える。このとき、大気上層では空気は赤道から極に向かって流れている。赤道で大きな角運動量を持った空気は赤道から極方向に運ばれるにしたがって西風が強くなる。このとき、大気上層では摩擦がなく角運動量は保存されていると仮定する。赤道における赤道風速は 0m/s であるとする。大気上層の東西風を次のように求めることができる。

$$u(H) = \Omega a \frac{\sin^2 \varphi}{\cos \varphi}$$

ここで、 u は東西風速、 H 対流圏界面の高度、 Ω は自転角速度、 a は惑星半径、 φ は緯度である。東西風の速度分布から温度風の式によって気温の分布が決まる。

$$\beta [\bar{T}(\varphi) - \bar{T}(0)] = \frac{\Omega^2 a^2 \sin^4 \varphi}{gH 2 \cos^2 \varphi}$$

ここで \bar{T} 鉛直平均の気温、 g は重力加速度である。次に循環していない場合の気温 T_e の分布を

$$\beta \bar{T}_e(\varphi) = \beta \bar{T}_e(0) - \Delta_H \sin^2 \varphi$$

と与える。ハドレー循環している範囲 $0 < \varphi < \varphi_H$ で熱バランスが成り立つことを仮定する

$$\int_0^{\varphi_H} \bar{T}(\varphi) d\varphi = \int_0^{\varphi_H} \bar{T}_e(\varphi) d\varphi$$

これを解くことでハドレー循環の緯度幅が次のように定まる。

$$\varphi_H = \left(\frac{5}{3} \frac{gH}{\Omega^2 a^2} \Delta_H \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{C-1})$$

Held Hou によって提案されたハドレー循環のモデルではハドレー循環の緯度幅は自転角速度の逆数に比例し、自転角速度を速くするとハドレー循環の幅は狭くなることが示された。^{*4}

^{*4}このモデルでは $\sin \varphi \approx \varphi$ の近似を用いており、近似が成り立たないほどハドレー循環の幅が広がった場合にどのようなようになるのかが明らかではない。

D 数値実験の設定ファイル

ここでは数値実験をおこなう際に用いた namelist ファイルのうち自転角速度 1 倍の場合を記載する。変数の出力に関する部分は省略している。

```
&set_cloud_nml
  CloudLifeTime = 1200.0d0
/
&dcpam_main_nml
  DynMode           = 'HSPLVAS83',
!!$ DynMode         = 'NoHorAdv',
  PhysMode          = 'FullPhysics',
!!$ PhysMode        = 'HS94',
!!$ PhysMode        = 'VenusSimple',
!!$ PhysMode        = 'JupiterSimple',
!!$ PhysMode        = 'NoPhysics',
!!$ RadModel        = 'DennouAGCM',
  RadModel          = 'Earth',
!!$ RadModel        = 'Mars',
!!$ RadModel        = 'SL09',
  PhysImpMode       = '1LayModel',
!!$ PhysImpMode     = 'SoilModel',
!!$ PhysImpMode     = 'SoilModelSO',
!!$ PhysImpMode     = 'AtmOnly',
!!$ MCMMethod       = 'MCA',
  MCMMethod         = 'RAS',
!!$ LSCMethod       = 'None',
  LSCMethod         = 'M65',
!!$ LSCMethod       = 'LL91',
/
&fileset_nml
  FileTitle = 'Swamp Planet Experiments',
              ! 出力データファイルの表題.
              ! Title of output data files
  FileSource = 'dcpam5 $Name: dcpam5-20110615 $ (http://www.gfd-dennou.org/library
              ! データファイル作成の手段.
              ! Source of data file
  FileInstitution = 'GFD Dennou Club (http://www.gfd-dennou.org)'
```

```

人.
! データファイルを最終的に変更した組織/個人.
! Institution or person that changes data files for
/
&gridset_nml
  nmax = 42,
! 最大全波数.
! Maximum truncated wavenumber
  imax = 128,
! 経度格子点数.
! Number of grid points in longitude
  jmax = 64,
! 緯度格子点数.
! Number of grid points in latitude
  kmax = 22
! 鉛直層数.
! Number of vertical level
/
&composition_nml
  ncmax      = 2,
  Names      = 'QVap' 'H2OLiq'
  FlagAdv    = .true. .false.
/
&timeset_nml
  RestartTimeValue = 0.0,
! リスタート開始時刻.
! Restart time of calculation
  RestartTimeUnit  = 'day',
! リスタート開始時刻の単位.
! Unit of restart time of calculation
  IntegPeriodValue = 1440.0,
! 積分時間.
! Integral time.
  IntegPeriodUnit  = 'day',
! 計算開始時刻の単位.
! Unit of end time of calculation
  DelTimeValue     = 10.0,
! $ \Delta t $ . 単位は DelTimeUnit に
! Unit is specified by DelTimeUnit.
  DelTimeUnit      = 'min',
! $ \Delta t $ の単位.
! Unit of $ \Delta t $

```



```

! 計算開始日時
! Start date of calculation
!
InitialYear = 1,    InitialMonth = 1, InitialDay  = 1
InitialHour = 0,    InitialMin    = 0, InitialSec  = 0.0

! 計算終了日時 (IntegPeriodValue が負の場合にこちらが使用される)
! End date of calculation (These are used when IntegPeriodValue is negative)
!
!!$ EndYear = 2011, EndMonth = 1, EndDay  = 1
!!$ EndHour = 0,    EndMin    = 0, EndSec  = 0.0

PredictIntValue = 10.0,
! 終了予測日時表示間隔.
! Interval of predicted end time output
PredictIntUnit = 'day',
! 終了予測日時表示間隔 (単位).
! Unit for interval of predicted end time output
CpuTimeMonitor = .true.
! CPU 時間計測のオンオフ
! On/off of CPU time monitoring
cal_type = 'user_defined'
month_in_year = 12,
day_in_month = 30,
hour_in_day = 24,
! 太陽日はここを変える
min_in_hour = 60,
sec_in_min = 60.0d0
/
&restart_file_io_nml
  InputFile = 'init_data/init_T42L22.nc',
! 入力する初期値/リスタートデータのファイル名
! filename of input initial/restart data
  OutputFile = 'omega1/rst_data/rst1440.nc',
! 出力するリスタートデータのファイル名
! filename of output restart data
  IntValue = 360.0,
! リスタートデータの出力間隔.

```

```

                                ! Interval of restart data output
    IntUnit = 'day'
                                ! リスタートデータの出力間隔の単位.
                                ! Unit for interval of restart data output
/
&restart_surftemp_io_nml
!!$ InputFile = 'omega1/rst_data/rst_sst.nc',
    OutputFile = 'omega1/rst_data/rst_sst1440.nc'
/
!!$&surface_properties_nml
!!$ SurfTempSetting = 'file',
                                ! 地表面温度の設定方法
                                ! Setting of surface temperature
!!$ SurfTempFile = 'sst_T42.nc',
                                ! 地表面温度のファイル名.
                                ! File name of surface temperature
!!$ SurfTempName = 'SurfTemp',
                                ! 地表面温度の変数名.
                                ! Variable name of surface temperature
!!$/
&surface_data_nml
    SurfCond = 1 ,
    Albedo = 0.15d0 ,
/
&constants_nml
    Omega = 0.000072722
                                ! x1
!!$ Omega = 0.000036361
                                ! /2
!!$ Omega = 0.000018181
                                ! /4
!!$ Omega = 0.0000090902
                                ! /8
!!$ Omega = 0.0000045451
                                ! /16
/
!&moist_conv_adjust_nml
! CrtlRH = 0.99d0,
! ItrtMax = 10,
```

```
! AdjustCriterion = 0.01d0, 0.02d0, 0.02d0, 0.05d0, 0.05d0, 0.10d0,
0.10d0, 0.20d0, 0.20d0, 0.40d0
!/
!&dry_conv_adjust_nml
! ItrtMax          = 10,
! AdjustCriterion = 0.01d0, 0.02d0, 0.02d0, 0.05d0, 0.05d0, 0.10d0,
0.10d0, 0.20d0, 0.20d0, 0.40d0
!/
&dryconv_adjust_nml
  flag_dryconv_adjust = .false.
/
&rad_short_income_nml
  FlagAnnualMean      = .false.
  FlagDiurnalMean     = .false.

  EpsOrb               = 0.0,
  Eccentricity         = 0.0,

/
&set_O3_nml
  FlagO3 = .true.,
  O3File = O3/O3_NH00_T042.nc
/
&axesset_nml
  Sigma = 1.0000000000000000 , 0.9900498337491680 , 0.9704455335485082 ,
0.9290099250785387 , 0.8589701834928262 , 0.7594520038794164 ,
0.6361357916470737 , 0.5003923706134736 , 0.3897059700767299 ,
0.3035033146633587 , 0.2363686191245908 , 0.1840840656677380 ,
0.1433648144930023 , 0.1116526297920369 , 8.695515551401997E-02 ,
6.772074320641454E-02 , 5.274096783933317E-02 , 4.107470705321645E-02 ,
3.198901401747353E-02 , 2.491306916649053E-02 , 1.940231777557490E-02 ,
1.176810060037360E-02 , 0.0000000000000000E+00 ,
                                ! $ \sigma $ レベル (半整数).
                                ! Half $ \sigma $ level
/
&dynamics_hspl_vas83_nml
!!$ FlagDivDamp = .true.,          ! 発散を弱める
  HDOrder = 8,
                                ! 超粘性の次数. Order of hyper-viscosity
```

```
HDEFoldTimeValue = 24.0,
! 最大波数に対する e-folding time.
! 負の値を与えると, 水平拡散係数をゼロに
します.
!
! E-folding time for maximum wavenumber.
! If negative value is given,
! coefficients of horizontal diffusion become zero.
HDEFoldTimeUnit = 'hrs'
! 最大波数に対する e-folding time の単位.
! Unit of e-folding time for maximum wavenumber
/
```

図録

E-5 緯度分布

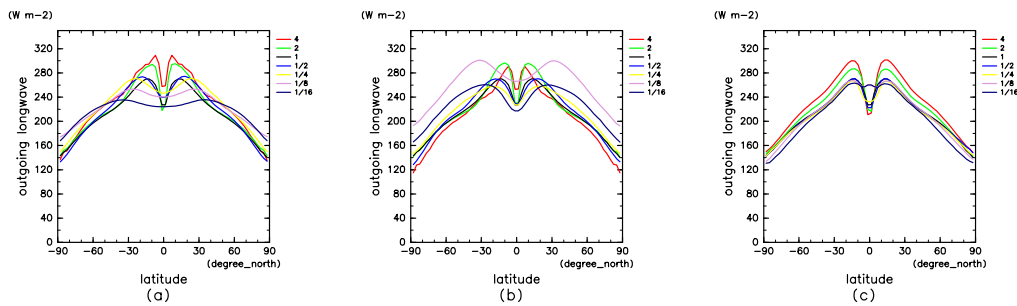


図 E-10: 大気上端の長波放射フラックス緯度分布. 横軸は緯度, 縦軸は大気上端における長波放射フラックス $[W/m^2]$. それぞれの図は (a) 自転角速度を変えた実験 A, (b) コリオリパラメタだけを変えた実験 C, (c) 太陽日だけを変えた実験 D.

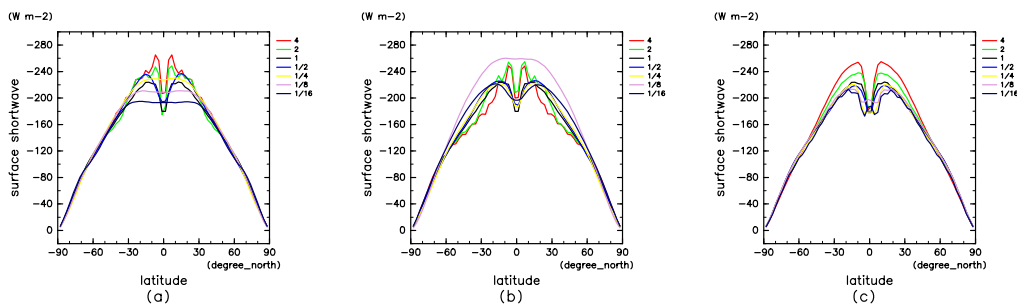


図 E-11: の短波放射フラックス緯度分布. 横軸は緯度, 縦軸は地表における短波放射フラックス $[W/m^2]$. それぞれの図は (a) 自転角速度を変えた実験 A, (b) コリオリパラメタだけを変えた実験 C, (c) 太陽日だけを変えた実験 D.

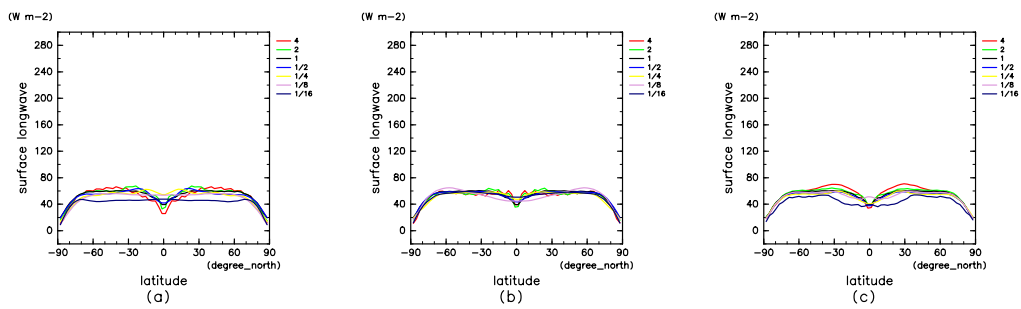


図 E-12: 地表の短波放射フラックス緯度分布. 横軸は緯度, 縦軸は地表における短波放射フラックス $[W/m^2]$. それぞれの図は (a) 自転角速度を変えた実験 A, (b) コリオリパラメタだけを変えた実験 C, (c) 太陽日だけを変えた実験 D.

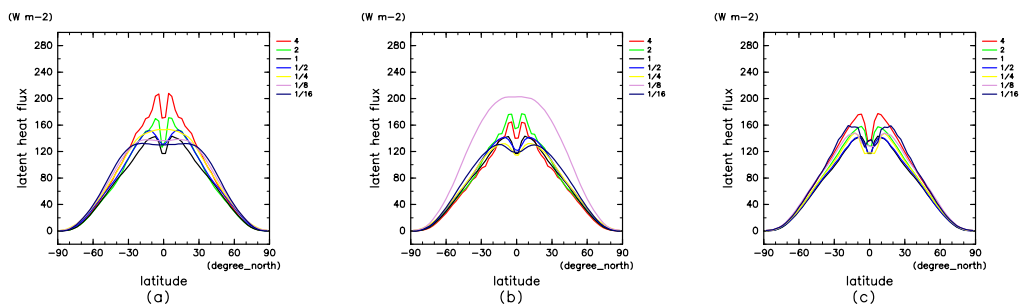


図 E-13: 地表の短波放射フラックス緯度分布. 横軸は緯度, 縦軸は地表における短波放射フラックス $[W/m^2]$. それぞれの図は (a) 自転角速度を変えた実験 A, (b) コリオリパラメタだけを変えた実験 C, (c) 太陽日だけを変えた実験 D.

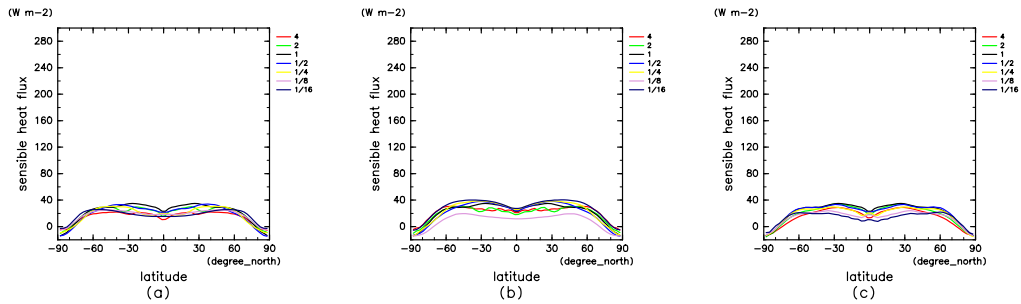


図 E-14: 地表の短波放射フラックス緯度分布. 横軸は緯度, 縦軸は地表における短波放射フラックス $[W/m^2]$. それぞれの図は (a) 自転角速度を変えた実験 A, (b) コリオリパラメタだけを変えた実験 C, (c) 太陽日だけを変えた実験 D.

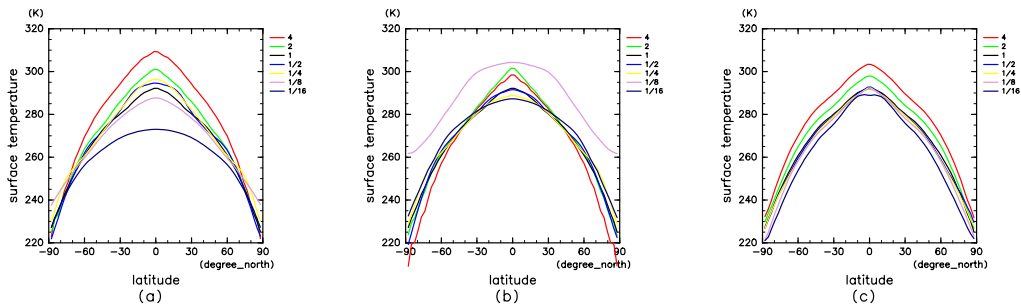


図 E-15: 地表温度の緯度分布. 横軸は緯度, 縦軸は地表温度 $[K]$. それぞれの図は (a) 自転角速度を変えた実験 A, (b) コリオリパラメタだけを変えた実験 C, (c) 太陽日だけを変えた実験 D.

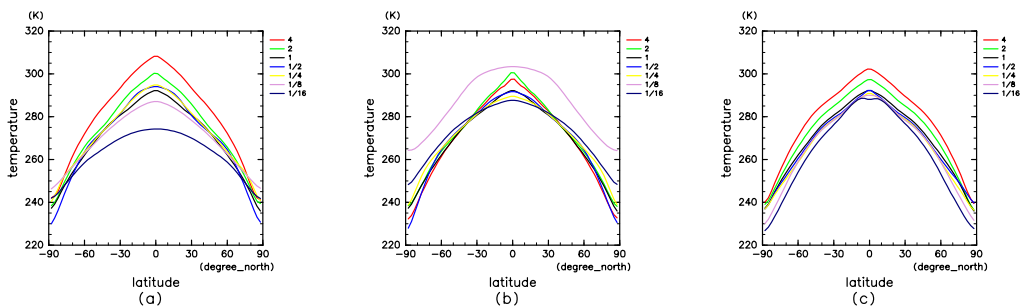


図 E-16: 大気最下層気温の緯度分布. 横軸は緯度, 縦軸は大気最下層の気温 $[K]$. それぞれの図は (a) 自転角速度を変えた実験 A, (b) コリオリパラメタだけを変えた実験 C, (c) 太陽日だけを変えた実験 D.

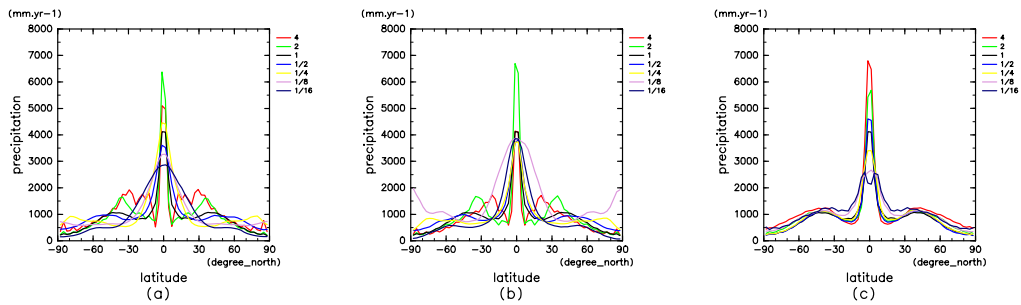


図 E-17: 降水量. 横軸は緯度, 縦軸は降水量 [mm/yr]. それぞれの図は (a) 自転角速度を変えた実験 A, (b) コリオリパラメタだけを変えた実験 C, (c) 太陽日だけを変えた実験 D.

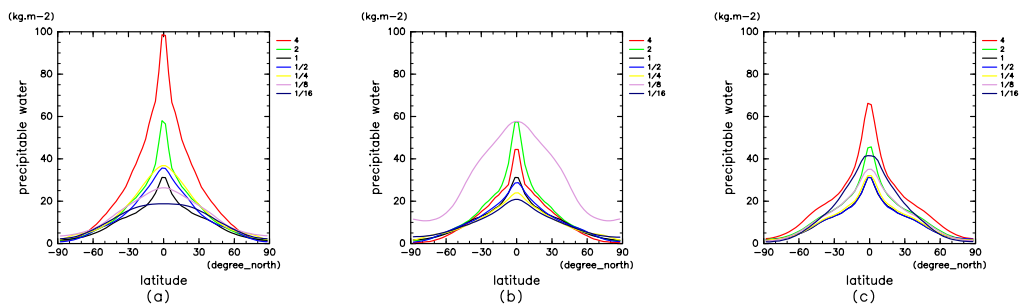


図 E-18: 可降水量の緯度分布. 横軸は緯度, 縦軸は可降水量 [kg/m²]. それぞれの図は (a) 自転角速度を変えた実験 A, (b) コリオリパラメタだけを変えた実験 C, (c) 太陽日だけを変えた実験 D.

E-6 地方時分布

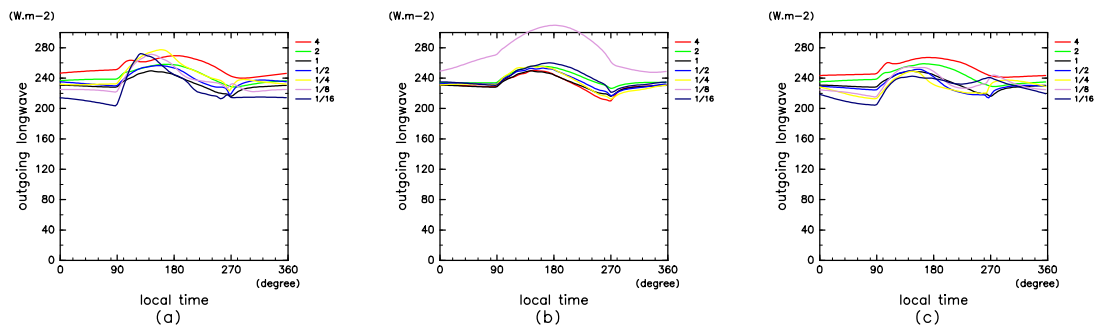


図 F-19: 大気上端の長波放射フラックス地方時分布. 横軸は地方時, 縦軸は大気上端における長波放射フラックス $[W/m^2]$. それぞれの図は (a) 自転角速度を変えた実験 A, (b) コリオリパラメータだけを変えた実験 C, (c) 太陽日だけを変えた実験 D.

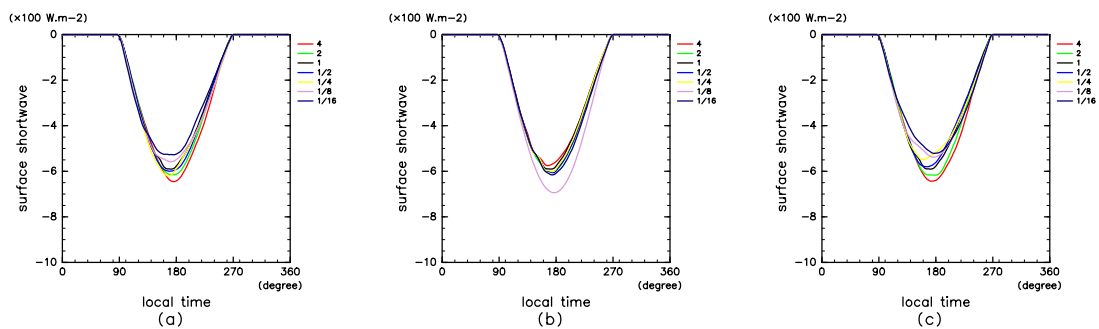


図 F-20: の短波放射フラックス地方時分布. 横軸は地方時, 縦軸は地表における短波放射フラックス $[W/m^2]$. それぞれの図は (a) 自転角速度を変えた実験 A, (b) コリオリパラメータだけを変えた実験 C, (c) 太陽日だけを変えた実験 D.

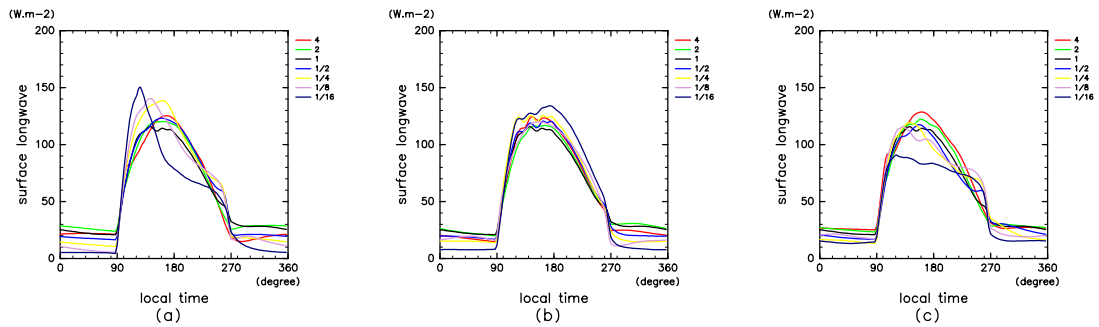


図 F-21: 地表の短波放射フラックス地方時分布. 横軸は地方時, 縦軸は地表における短波放射フラックス $[W/m^2]$. それぞれの図は (a) 自転角速度を変えた実験 A, (b) コリオリパラメタだけを変えた実験 C, (c) 太陽日だけを変えた実験 D.

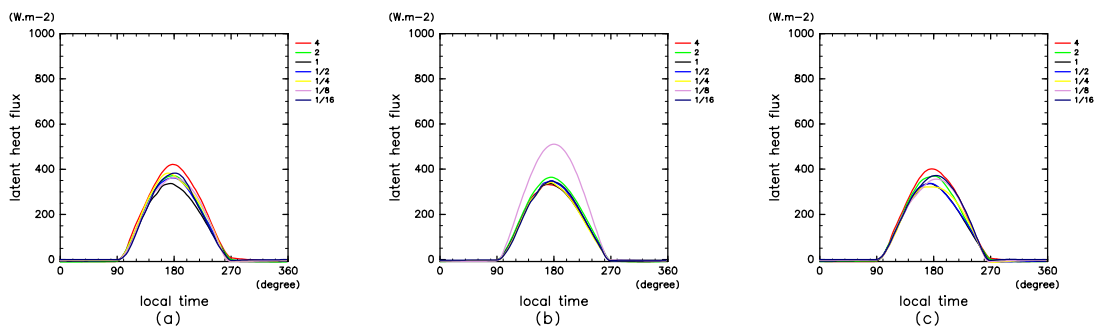


図 F-22: 地表の短波放射フラックス地方時分布. 横軸は地方時, 縦軸は地表における短波放射フラックス $[W/m^2]$. それぞれの図は (a) 自転角速度を変えた実験 A, (b) コリオリパラメタだけを変えた実験 C, (c) 太陽日だけを変えた実験 D.

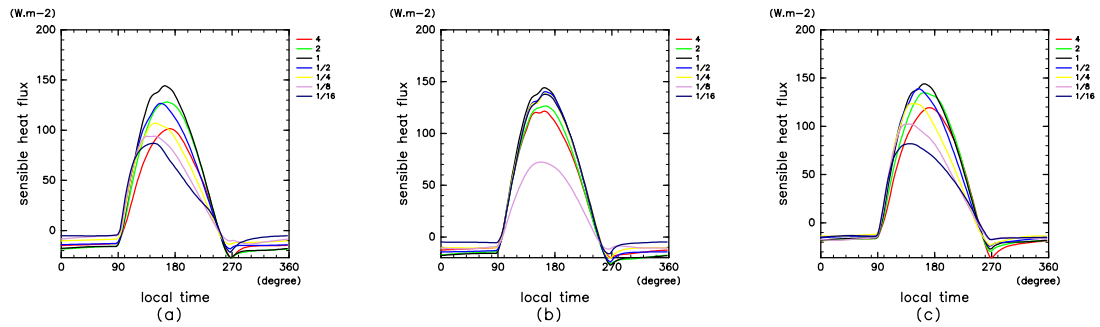


図 F-23: 地表の短波放射フラックス地方時分布. 横軸は地方時, 縦軸は地表における短波放射フラックス $[W/m^2]$. それぞれの図は (a) 自転角速度を変えた実験 A, (b) コリオリパラメタだけを変えた実験 C, (c) 太陽日だけを変えた実験 D.

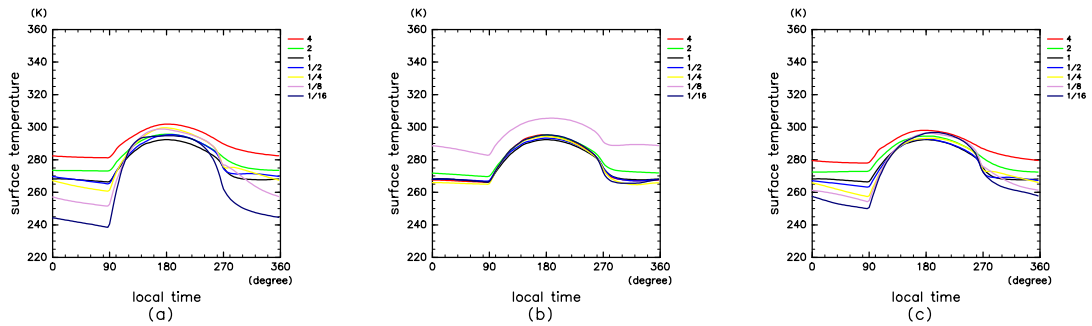


図 F-24: 地表温度の地方時分布. 横軸は地方時, 縦軸は地表温度 $[K]$. それぞれの図は (a) 自転角速度を変えた実験 A, (b) コリオリパラメタだけを変えた実験 C, (c) 太陽日だけを変えた実験 D.

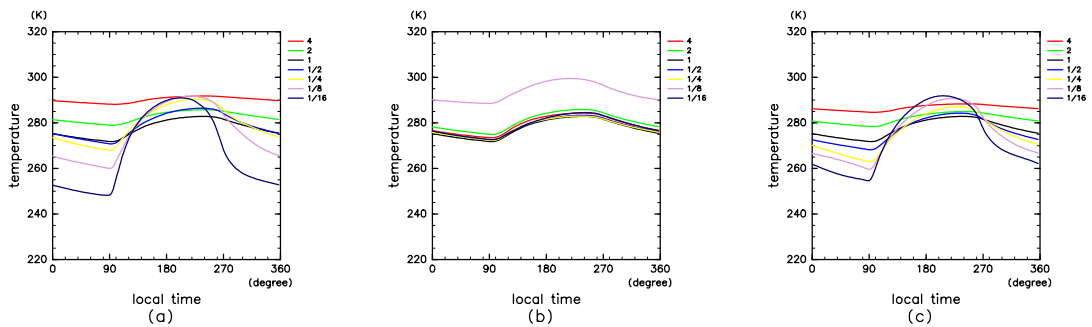


図 F-25: 大気最下層気温の地方時分布. 横軸は地方時, 縦軸は大気最下層の気温 $[K]$. それぞれの図は (a) 自転角速度を変えた実験 A, (b) コリオリパラメタだけを変えた実験 C, (c) 太陽日だけを変えた実験 D.

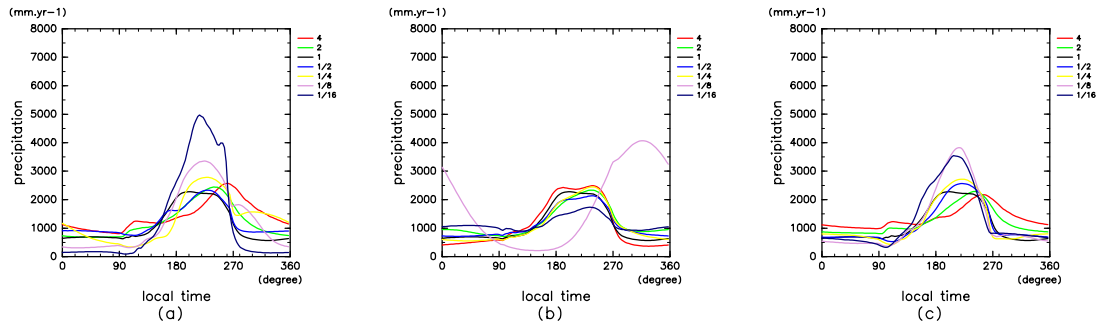


図 F-26: 降水量. 横軸は地方時, 縦軸は降水量 [mm/yr]. それぞれの図は (a) 自転角速度を変えた実験 A, (b) コリオリパラメタだけを変えた実験 C, (c) 太陽日だけを変えた実験 D.

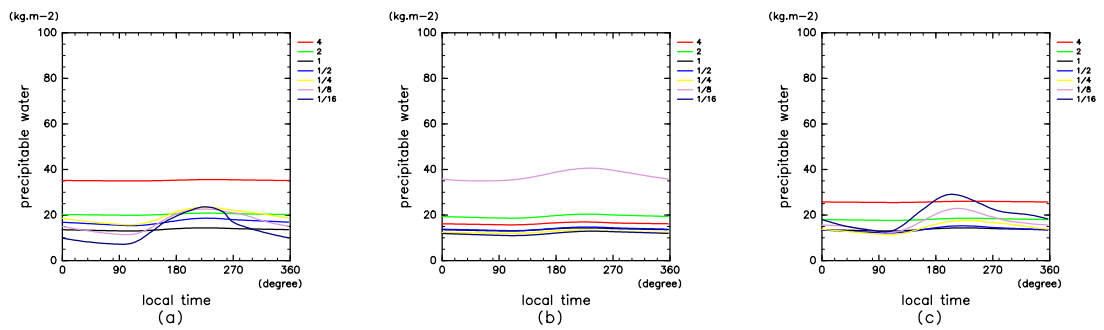


図 F-27: 可降水量の地方時分布. 横軸は地方時, 縦軸は可降水量 [kg/m²]. それぞれの図は (a) 自転角速度を変えた実験 A, (b) コリオリパラメタだけを変えた実験 C, (c) 太陽日だけを変えた実験 D.

E-7 子午面断面

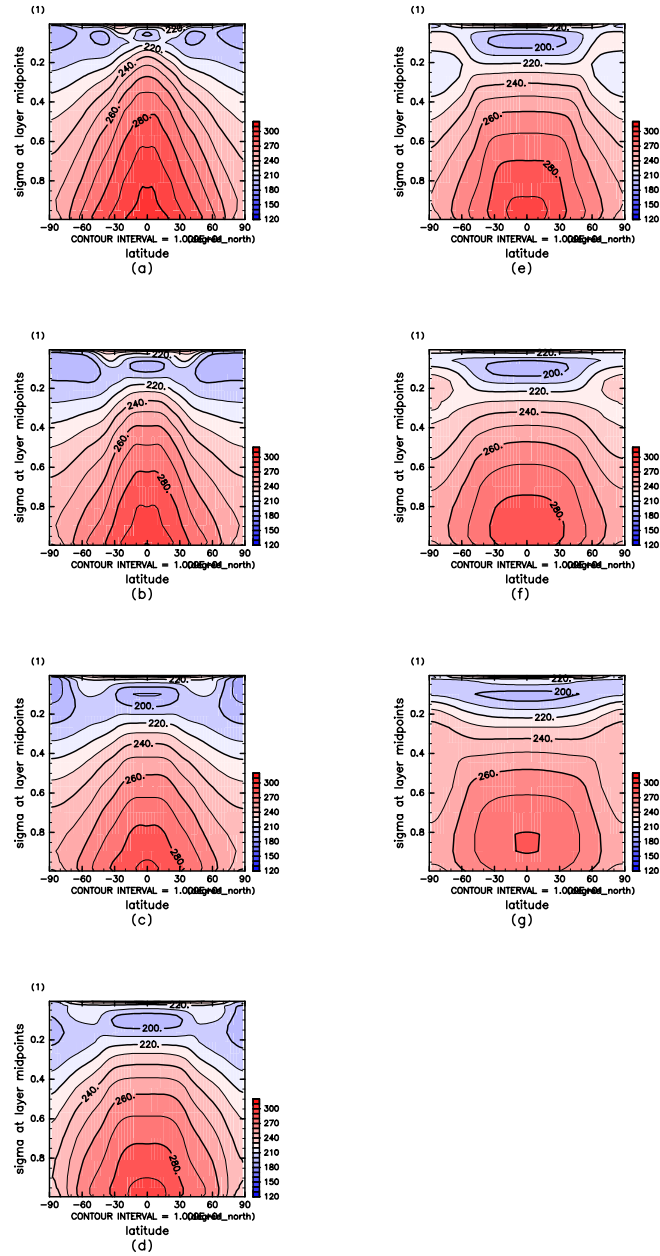


図 G-28: 子午面断面の気温分布 [K]. 時間平均, 経度平均. 実験 A. 横軸は緯度, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

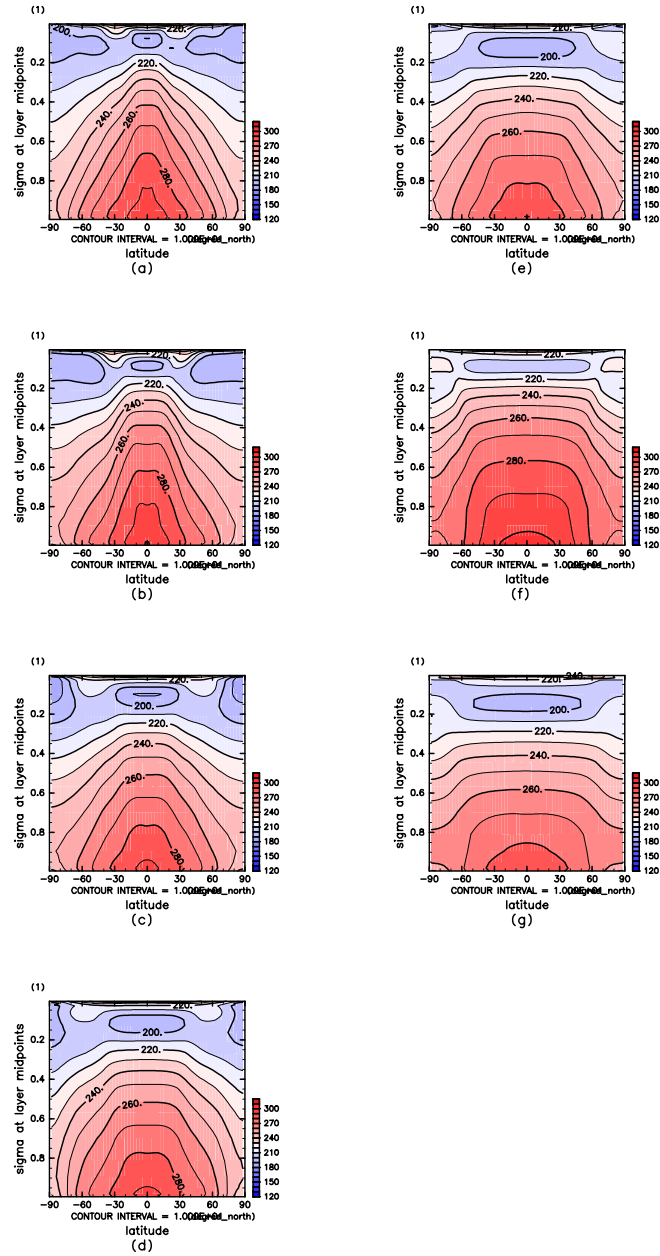


図 G-29: 子午面断面の気温分布 [K]. 時間平均, 経度平均. 実験 C. 横軸は緯度, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

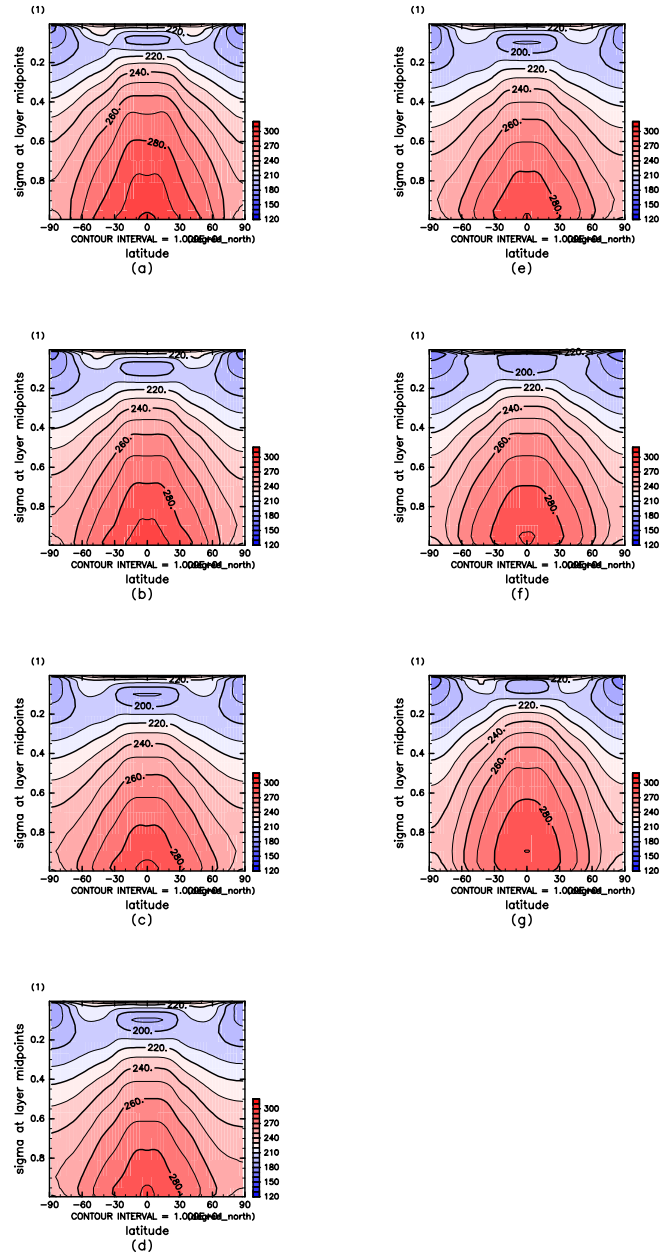


図 G-30: 子午面断面の気温分布 [K]. 時間平均, 経度平均. 実験 D. 横軸は緯度, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

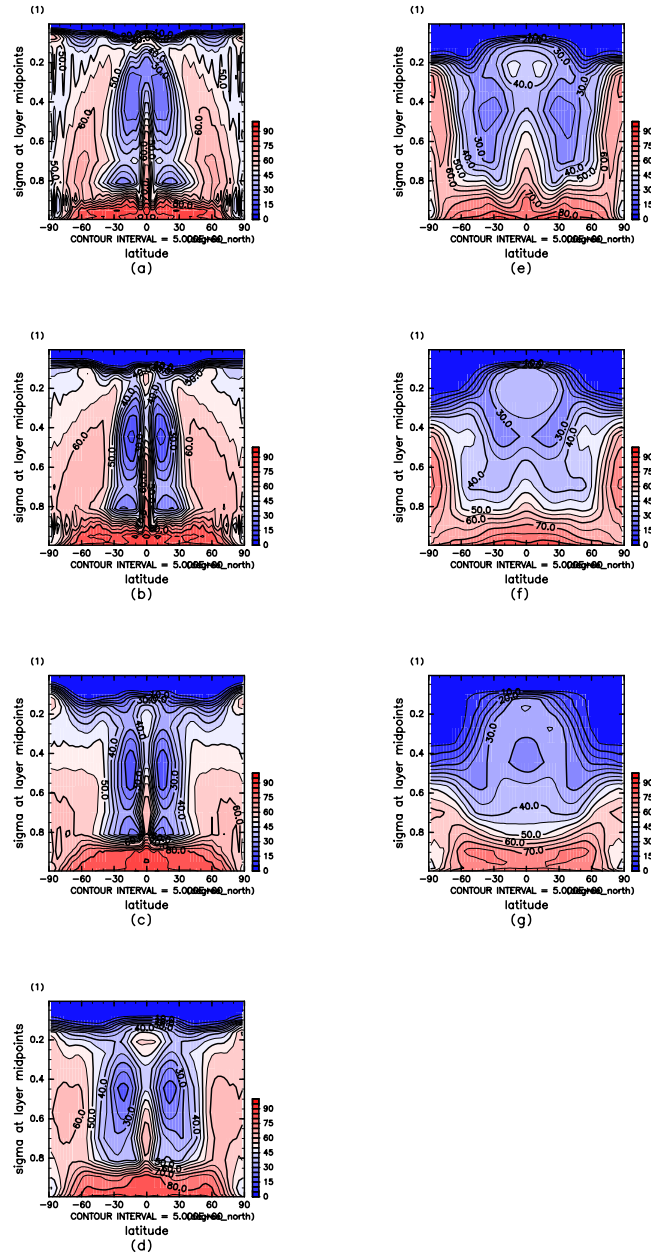


図 G-31: 相対湿度の子午面分布 [%]. 時間平均, 経度平均. 実験 A. 横軸は緯度, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

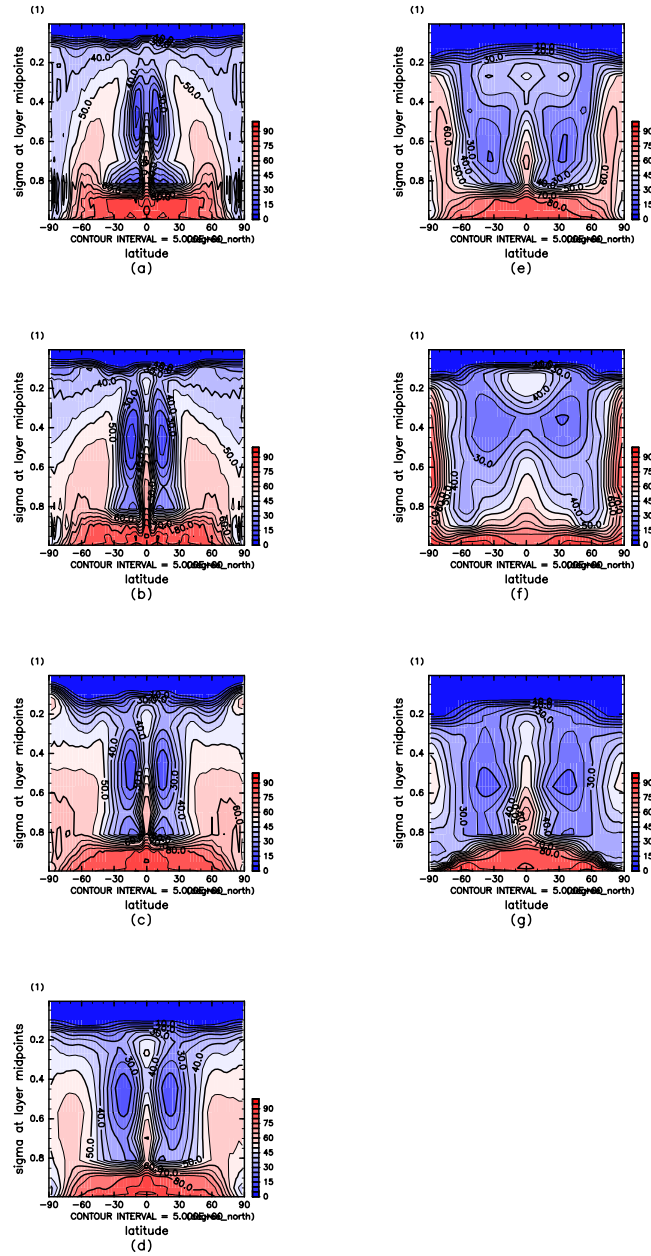


図 G-32: 相対湿度の子午面分布 [%]. 時間平均, 経度平均. 実験 C. 横軸は緯度, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

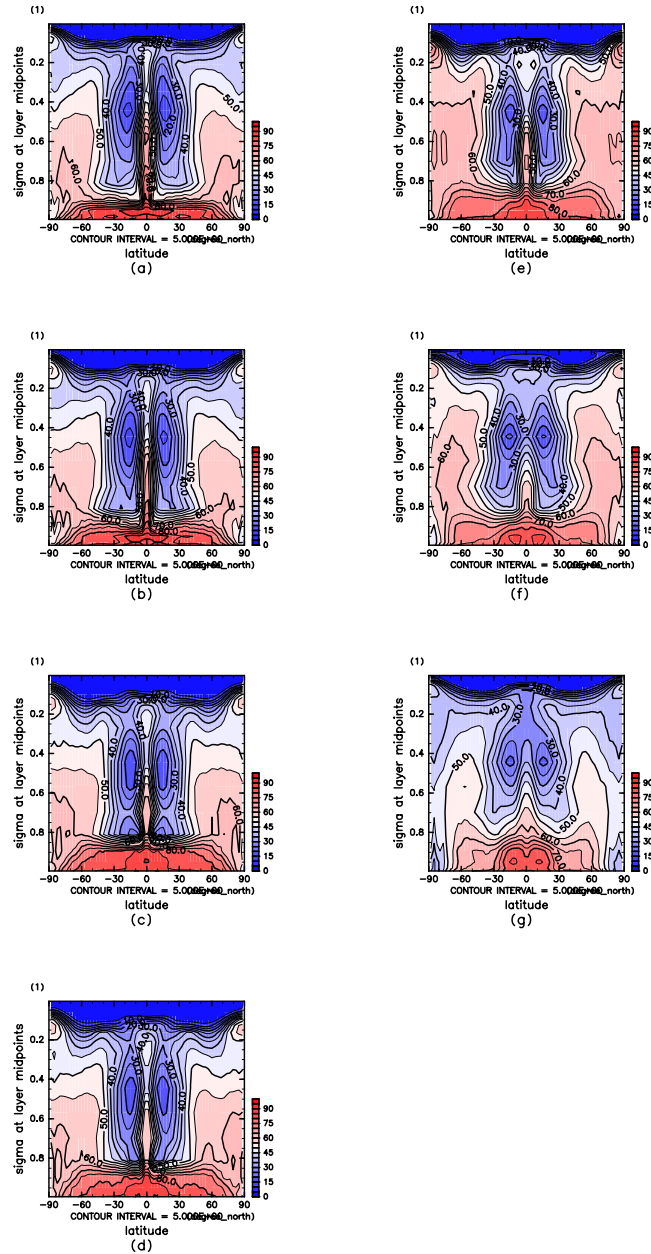


図 G-33: 相対湿度の子午面分布 [%]. 時間平均, 経度平均. 実験 D. 横軸は緯度, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

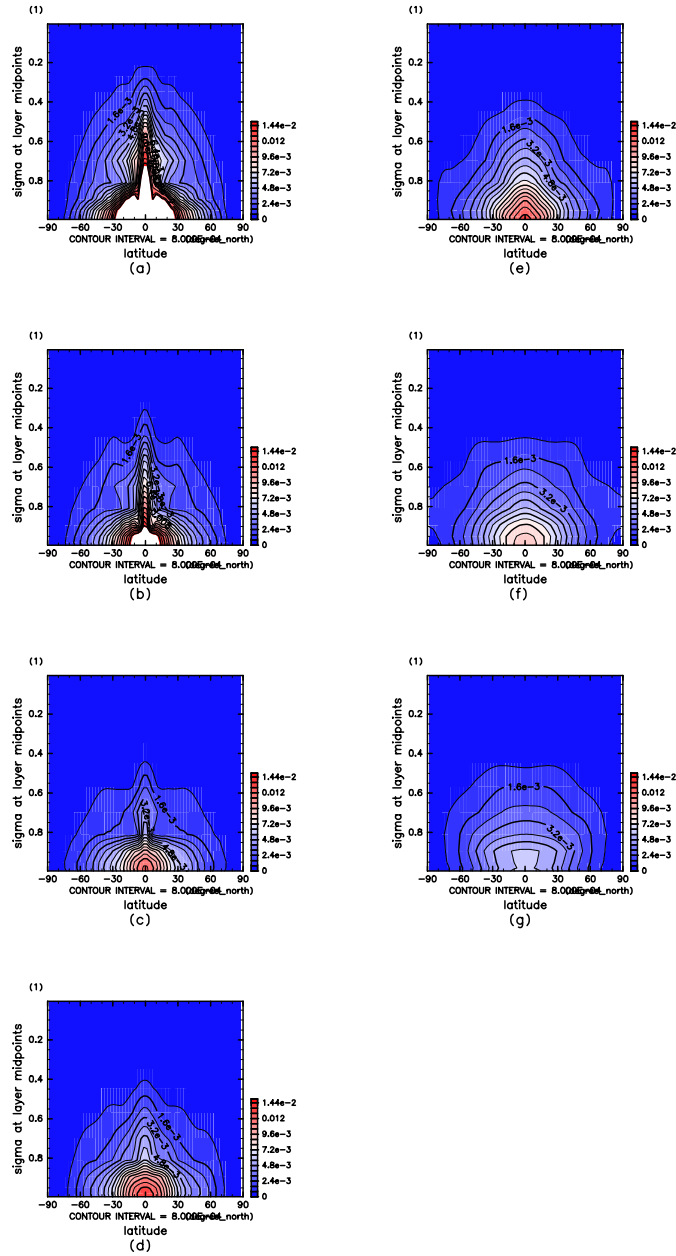


図 G-34: 比湿の子午面分布 [kg/kg]. 時間平均, 経度平均. 実験 A. 横軸は緯度, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

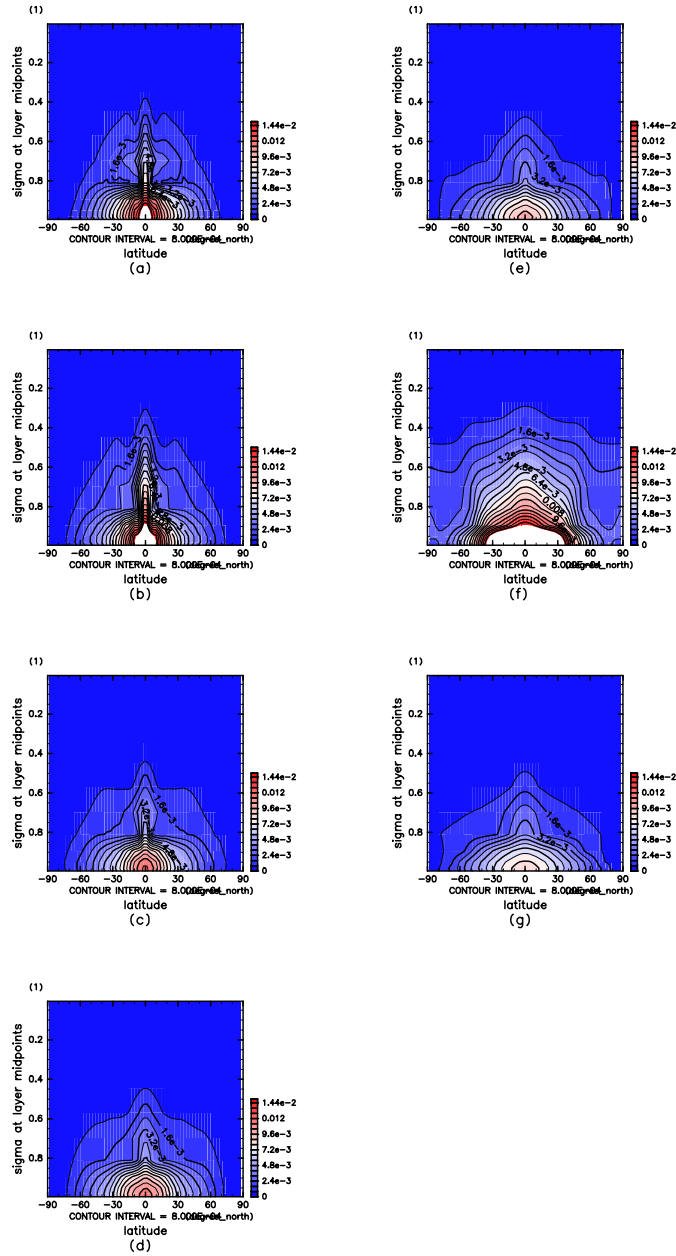


図 G-35: 比湿の子午面分布 [kg/kg]. 時間平均, 経度平均. 実験 C. 横軸は緯度, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

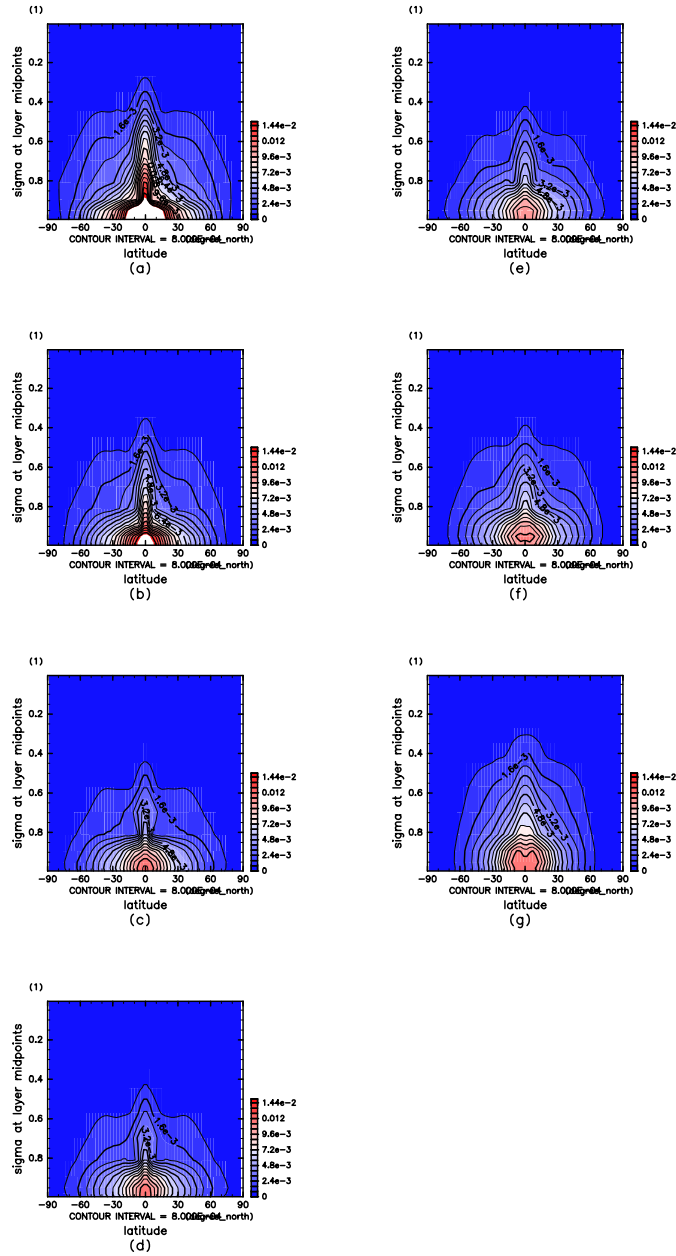


図 G-36: 比湿の子午面分布 [kg/kg]. 時間平均, 経度平均. 実験 D. 横軸は緯度, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

E-8 緯度-地方時分布

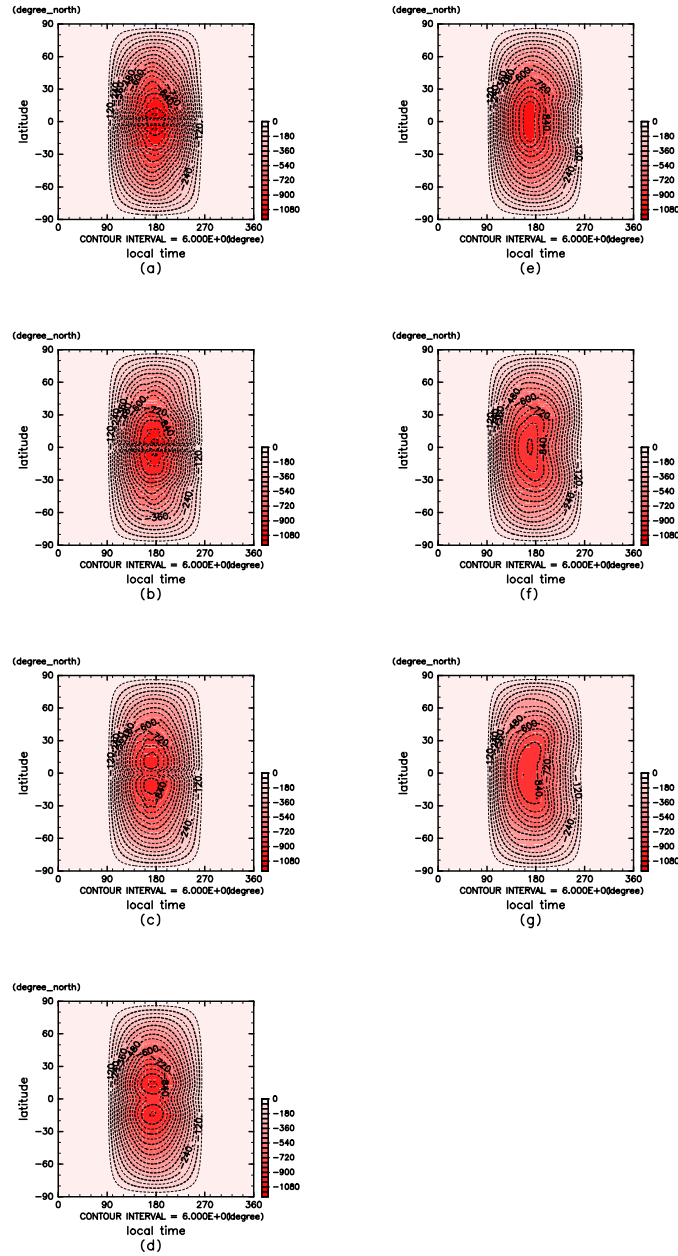


図 H-37: 大気上端における短波放射の緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

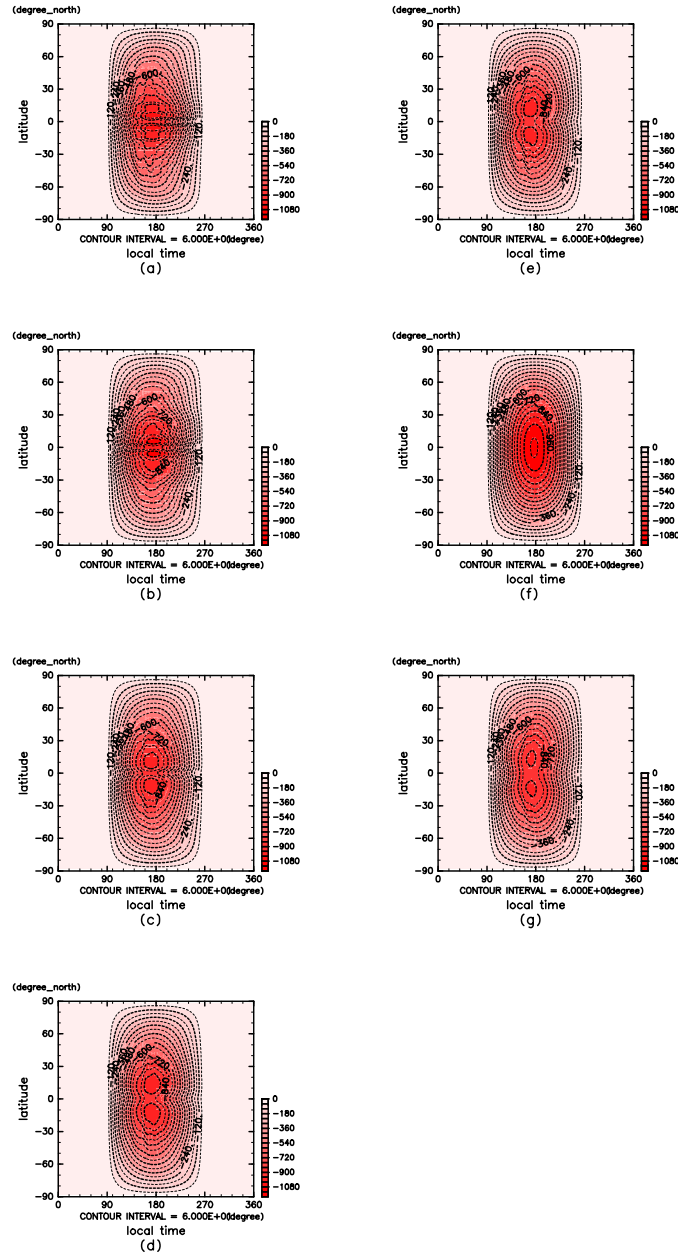


図 H-38: 大気上端における短波放射の緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

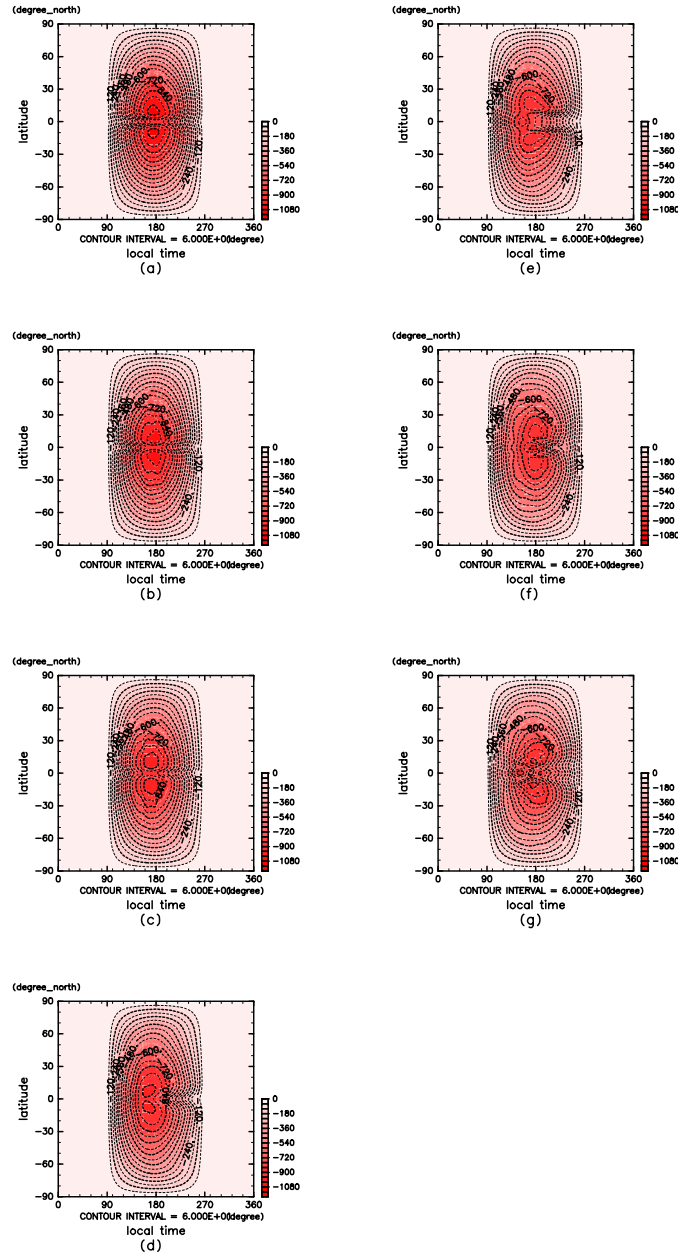


図 H-39: 大気上端における短波放射の緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

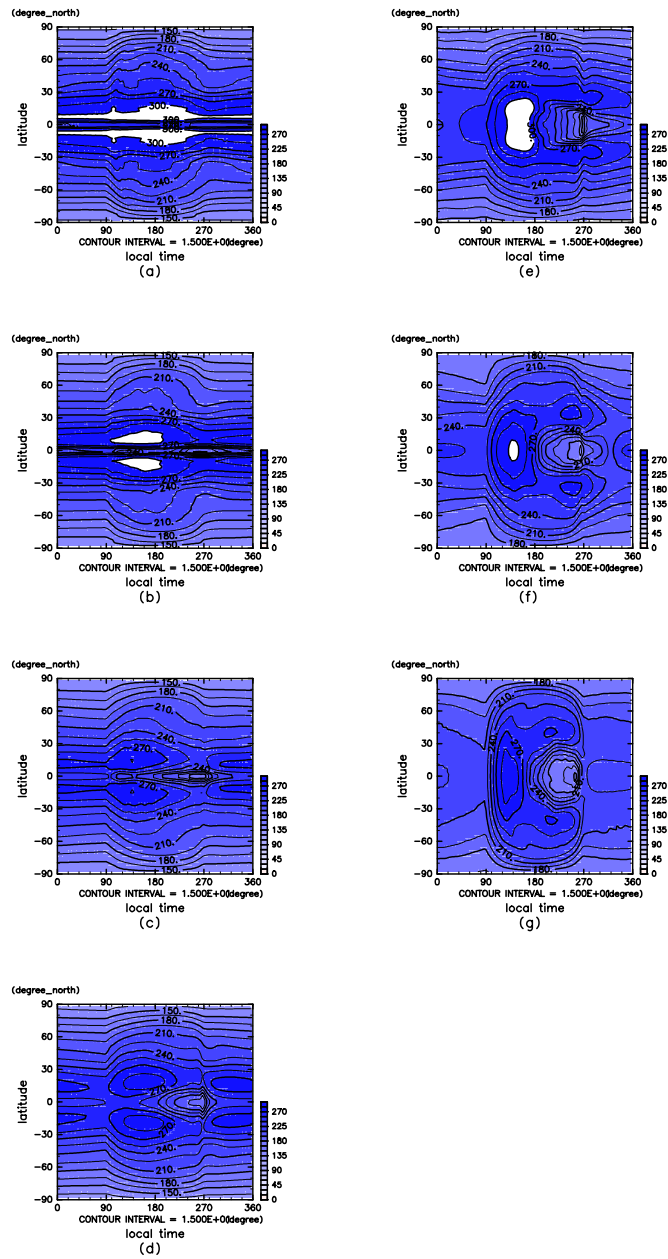


図 H-40: 大気上端における長波放射の緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

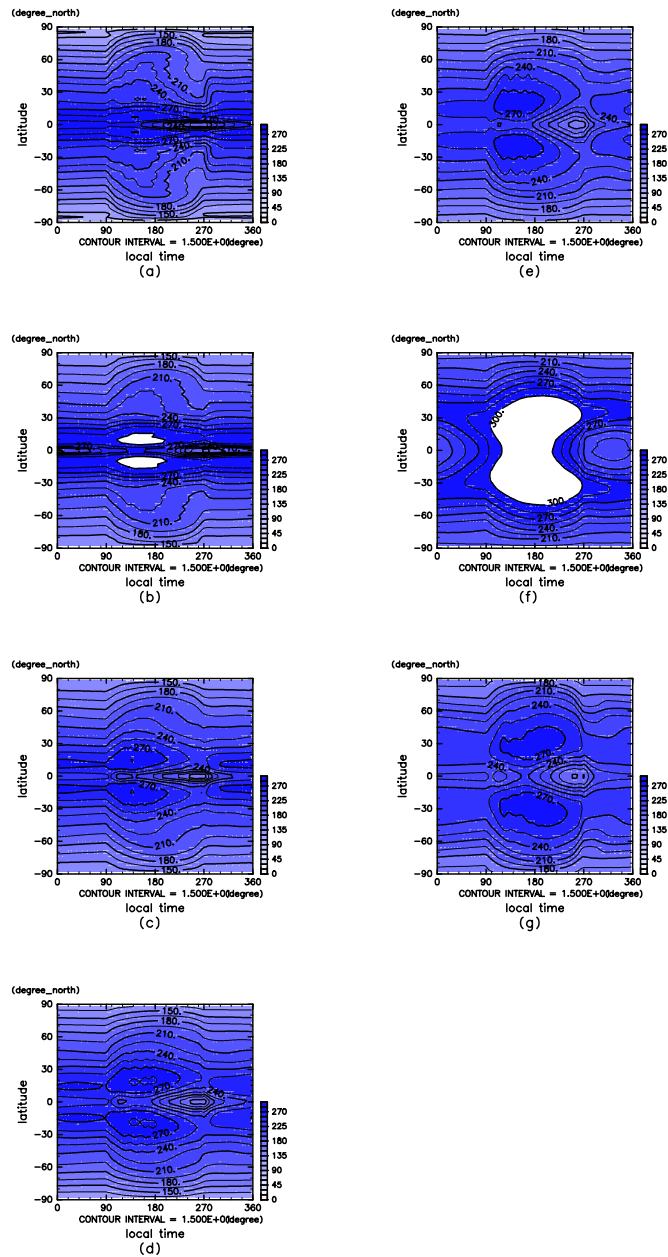


図 H-41: 大気上端における長波放射の緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

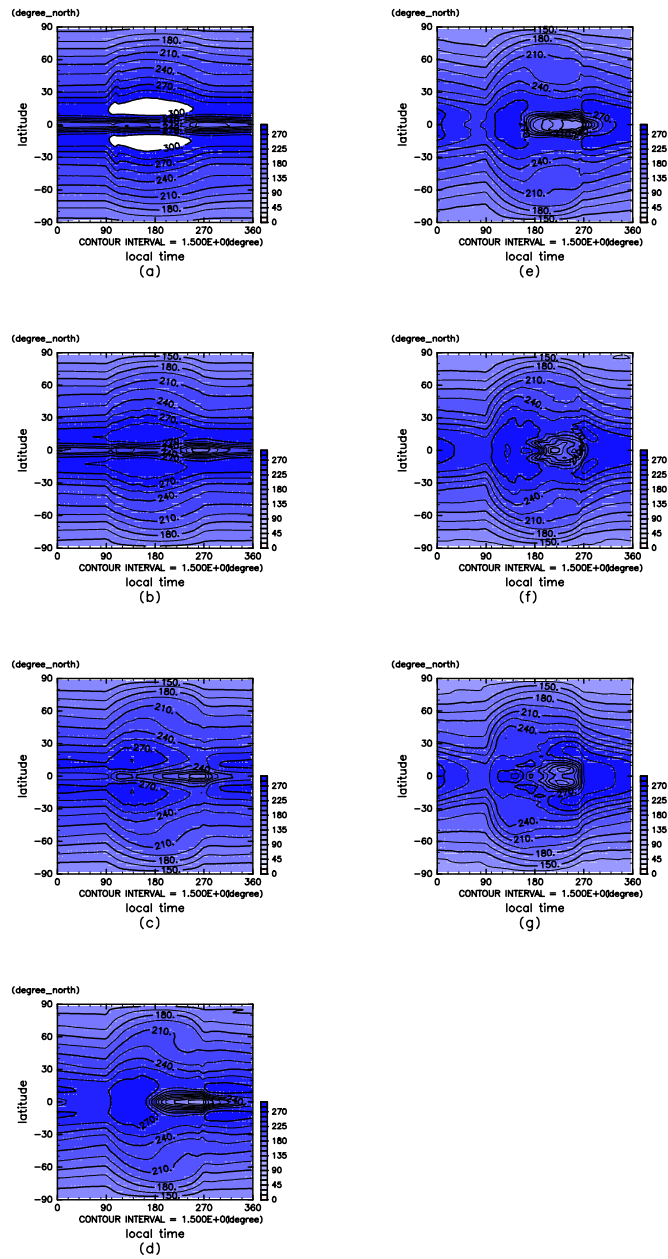


図 H-42: 大気上端における長波放射の緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

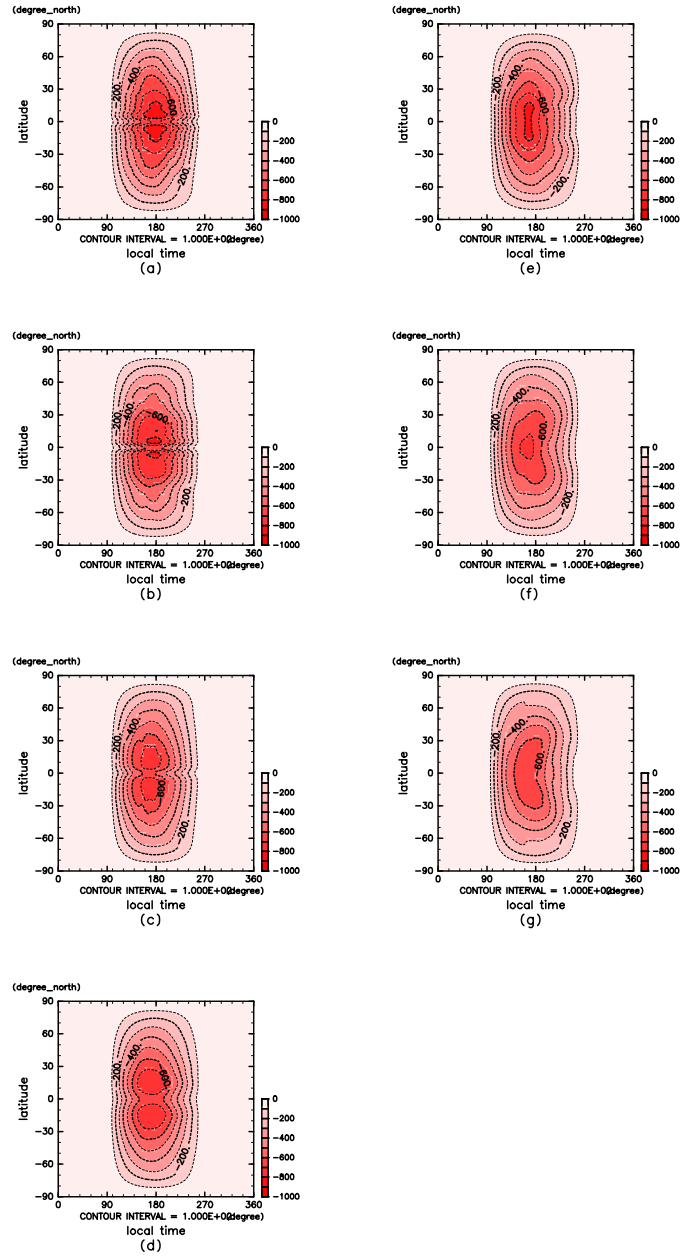


図 H-43: 地表面における上向き短波放射フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

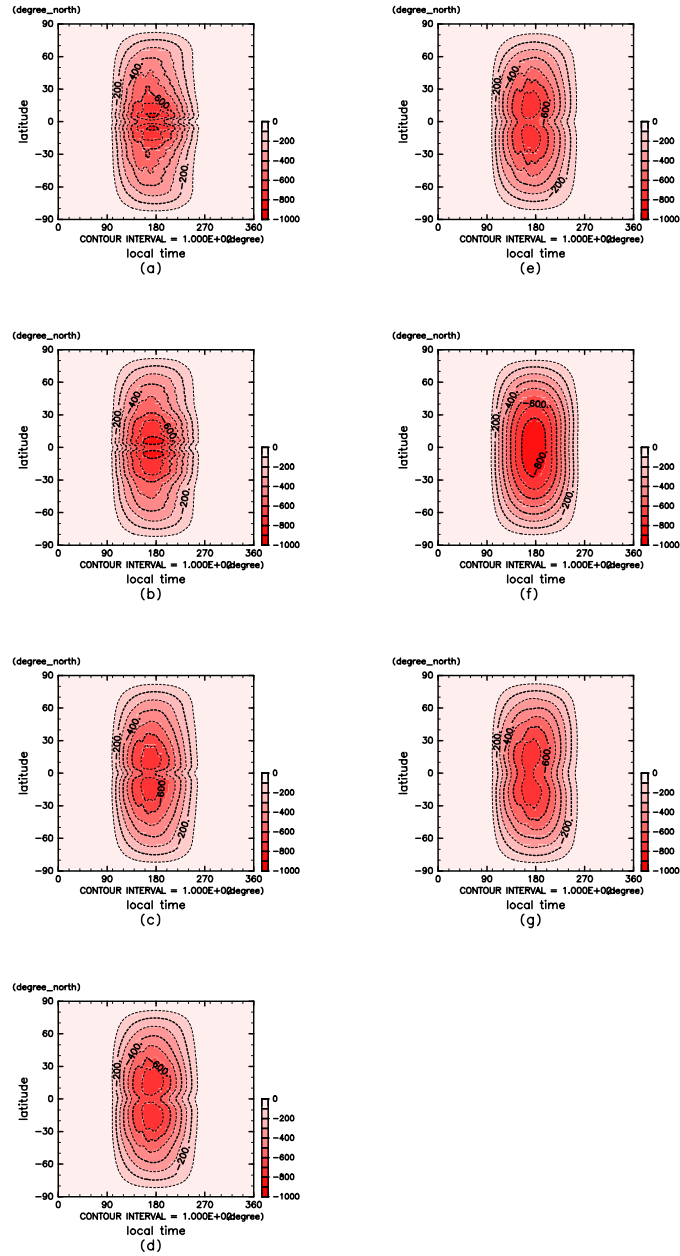


図 H-44: 地表面における上向き短波放射フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

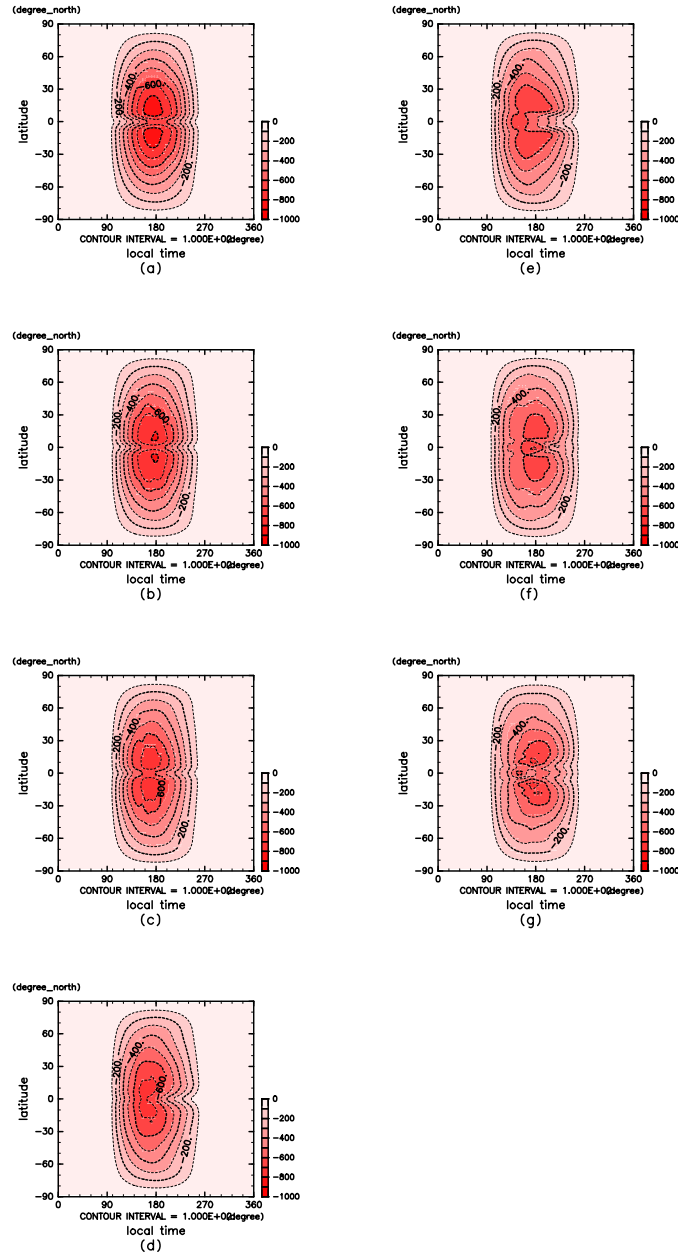


図 H-45: 地表面における上向き短波放射フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

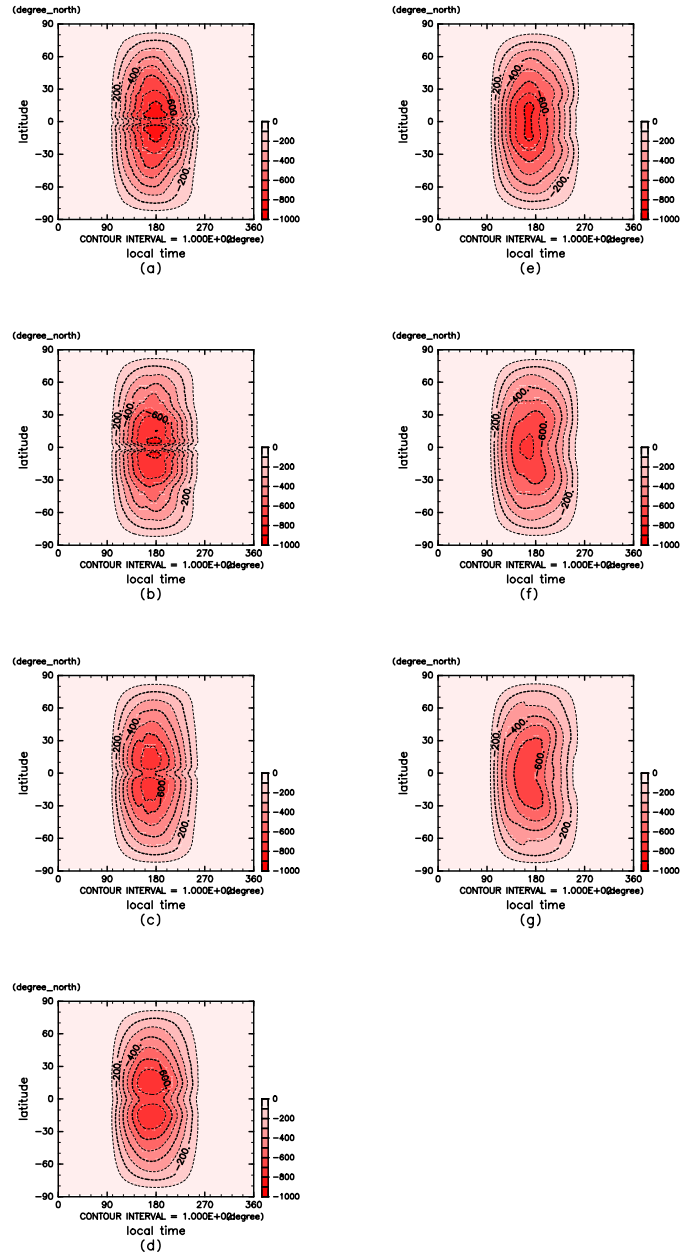


図 H-46: 地表面における上向き長波放射フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

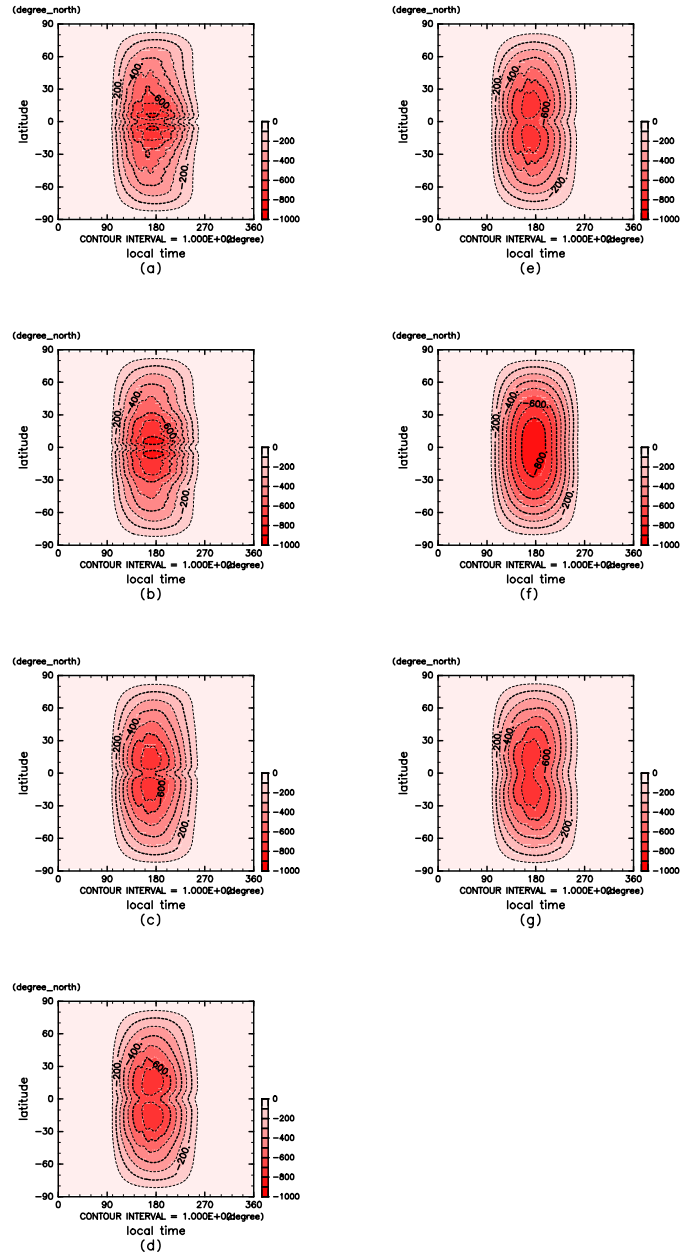


図 H-47: 地表面における上向き長波放射フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

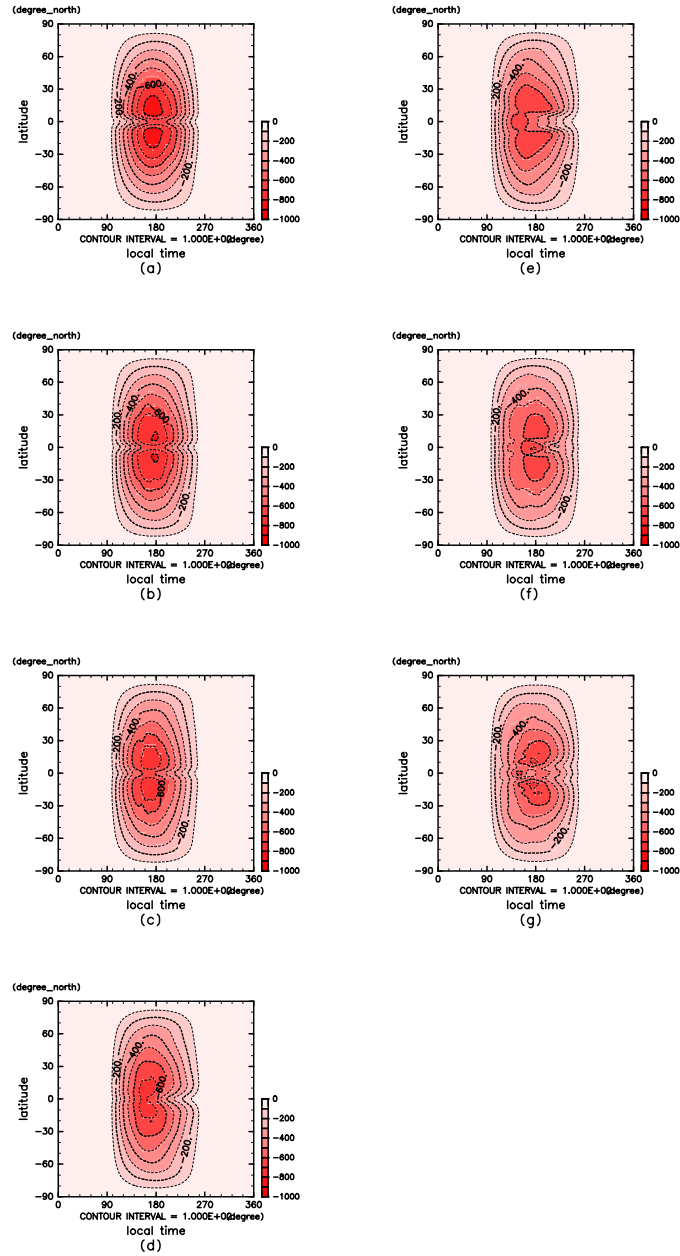


図 H-48: 地表面における上向き長波放射フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

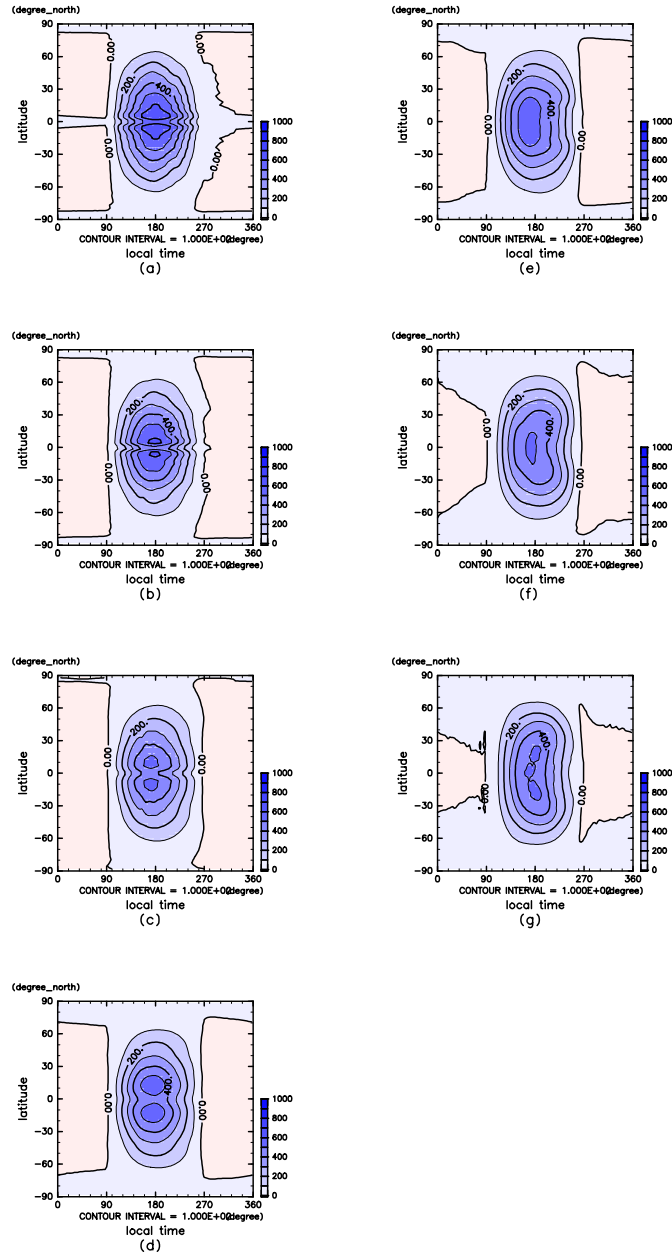


図 H-49: 地表面における潜熱フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

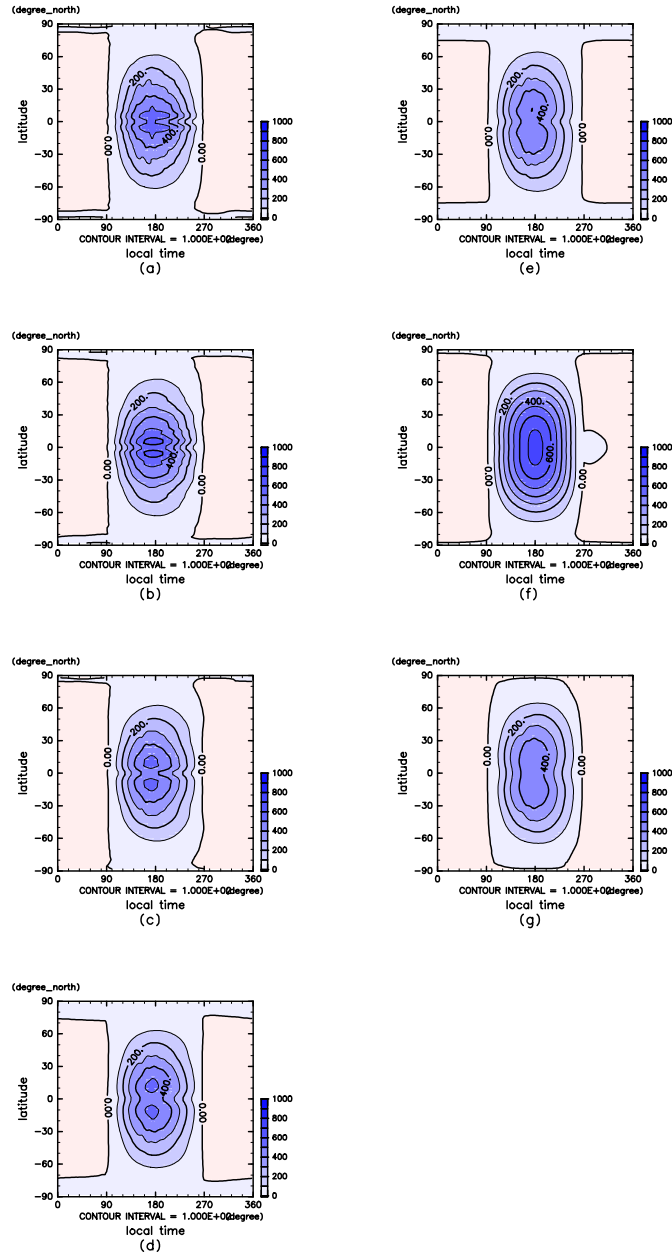


図 H-50: 地表面における潜熱フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

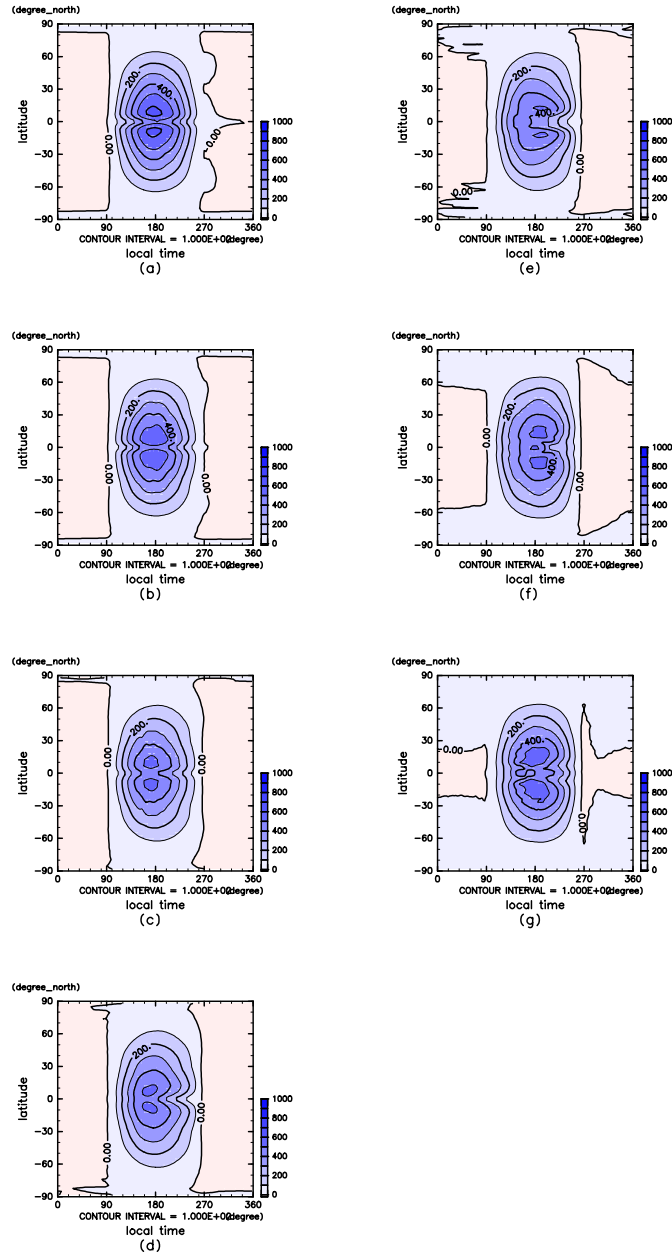


図 H-51: 地表面における潜熱フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

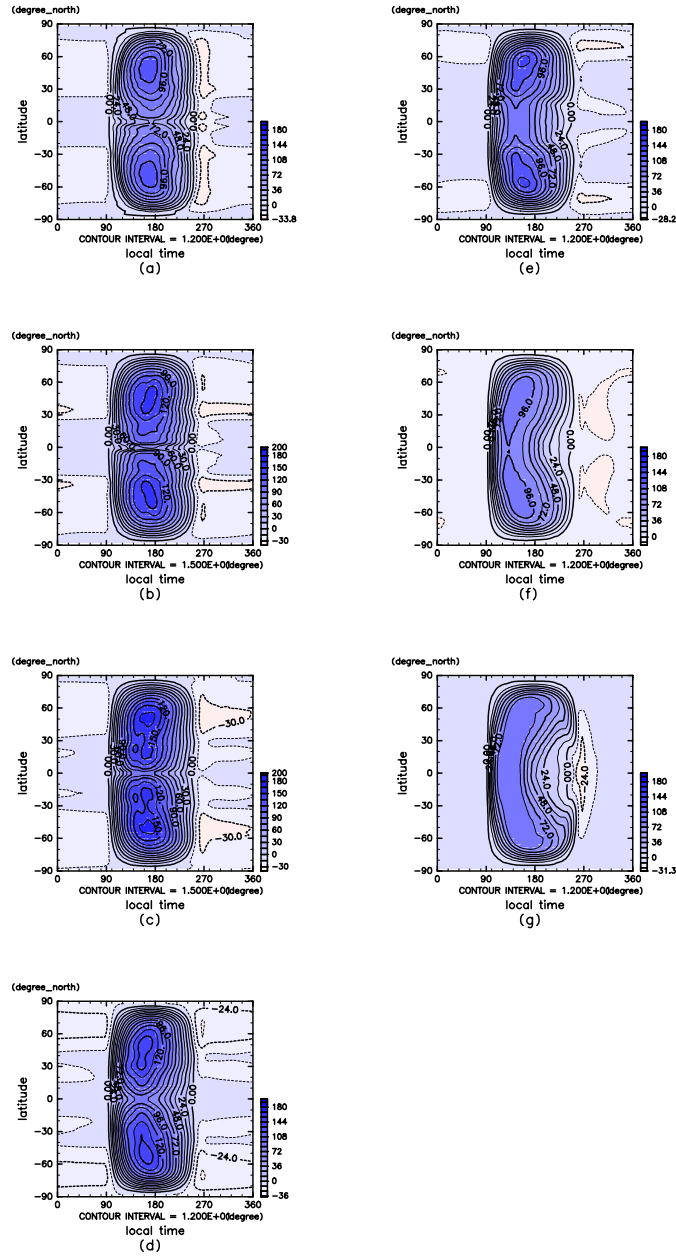


図 H-52: 地表面における顕熱フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

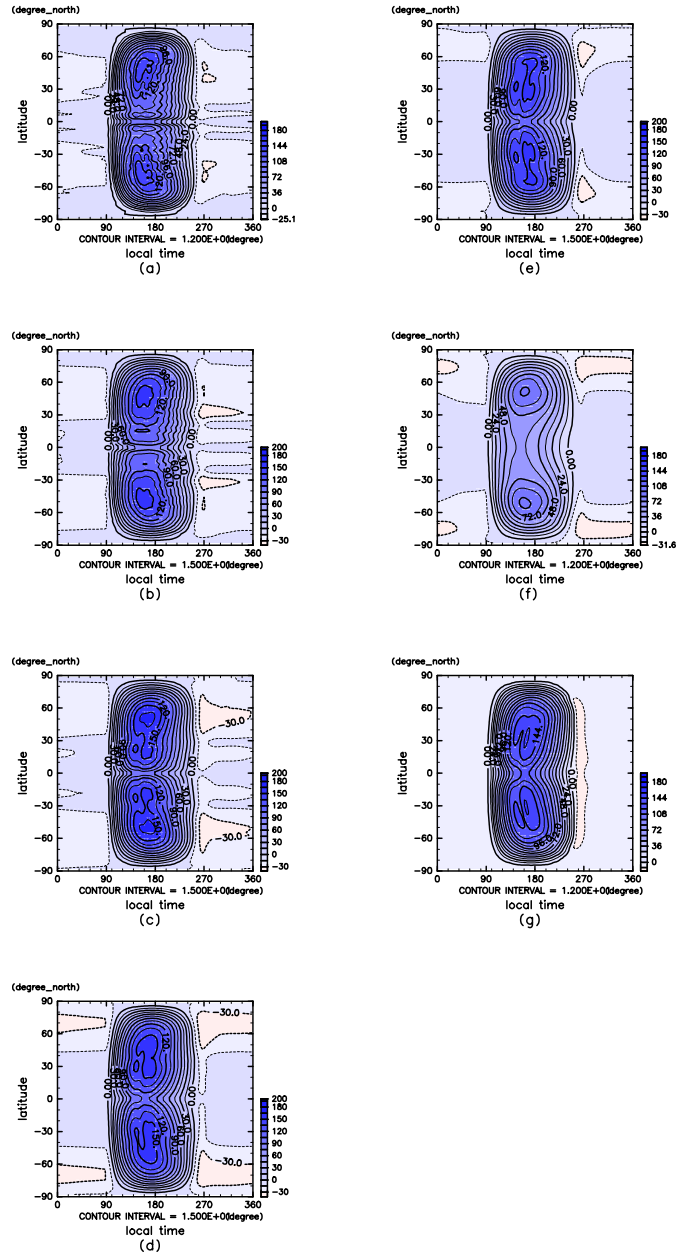


図 H-53: 地表面における顕熱フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

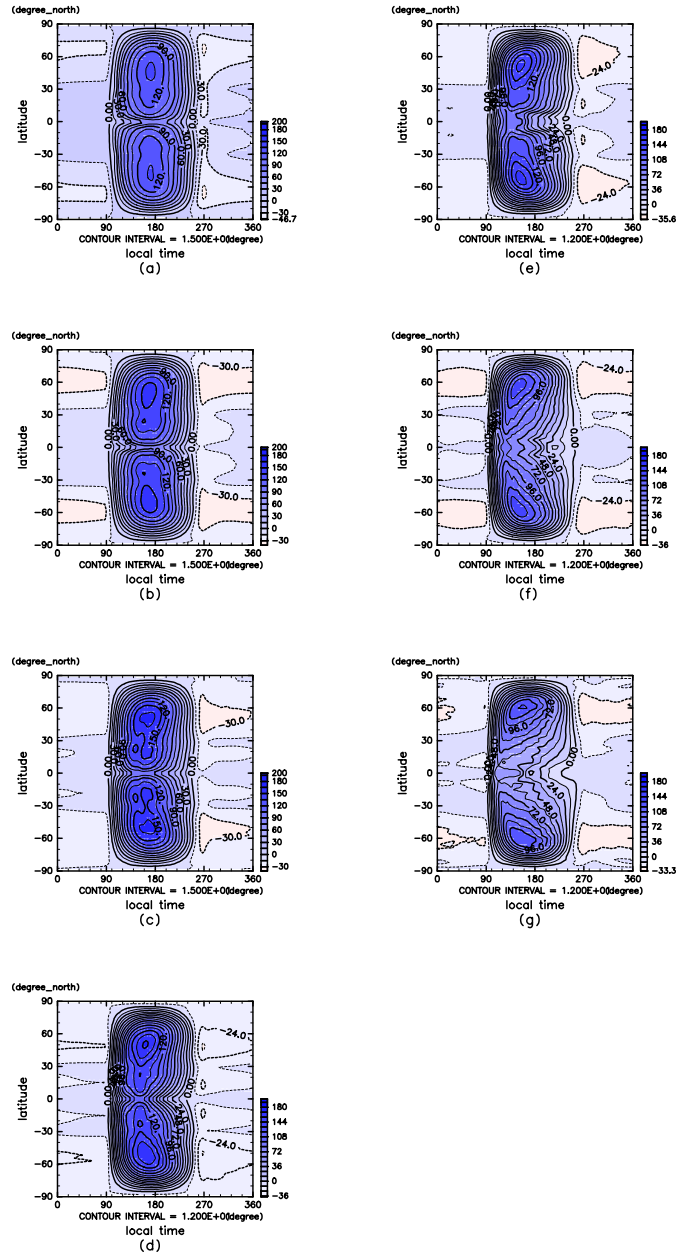


図 H-54: 地表面における顕熱フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

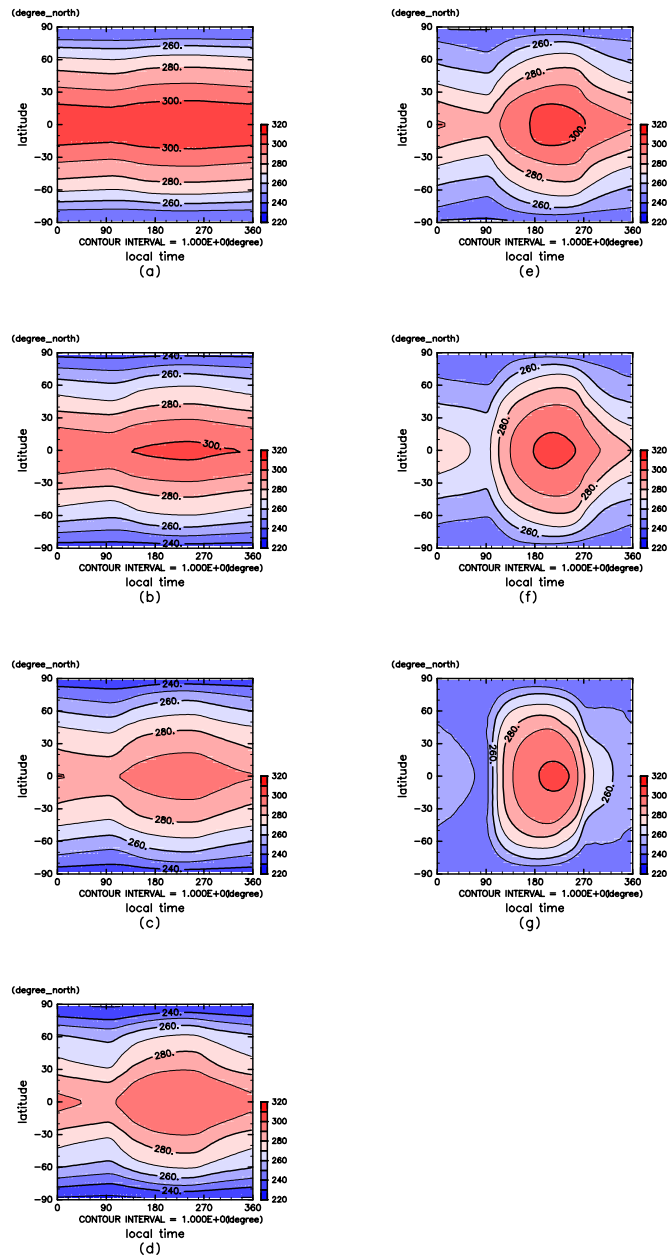


図 H-55: 大気最下層の気温の緯度地方時分布 [K]. 時間平均. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

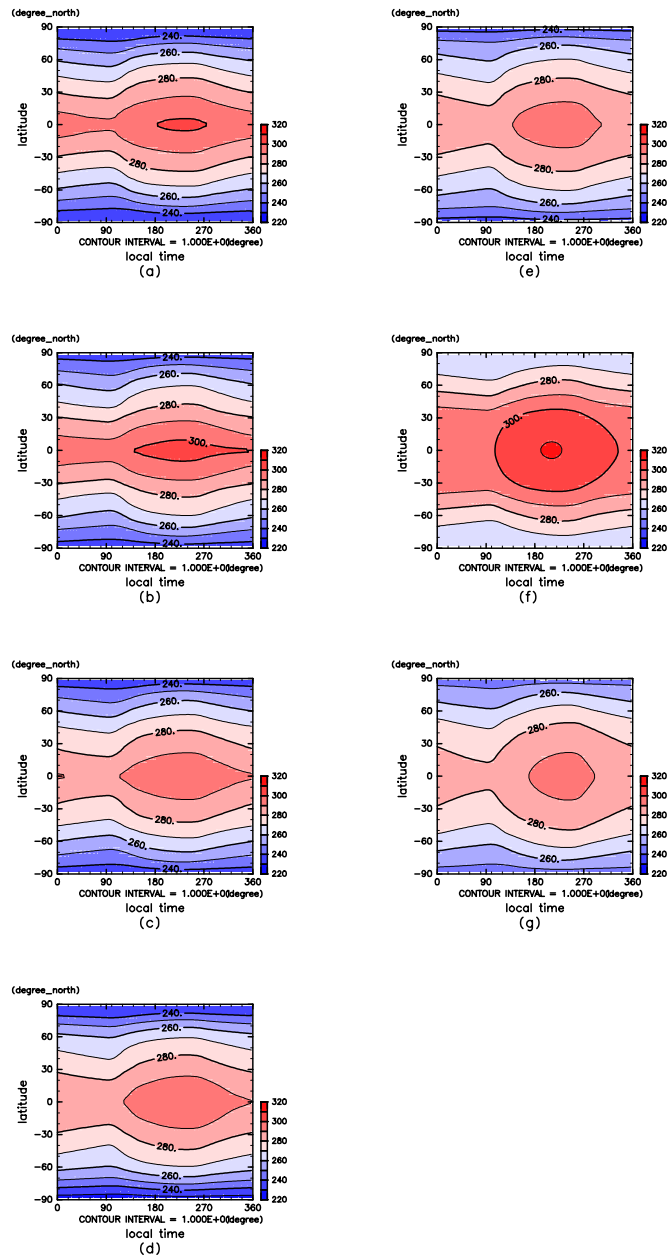


図 H-56: 大気最下層の気温の緯度地方時分布 [K]. 時間平均. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

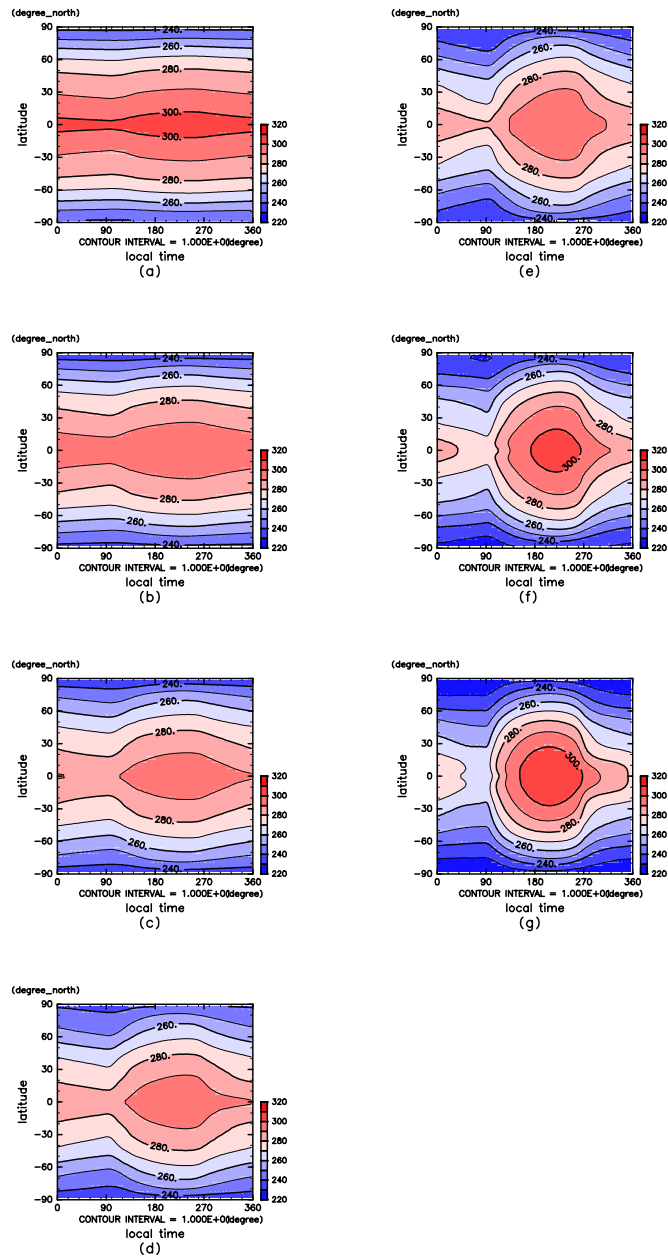


図 H-57: 大気最下層の気温の緯度地方時分布 [K]. 時間平均. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

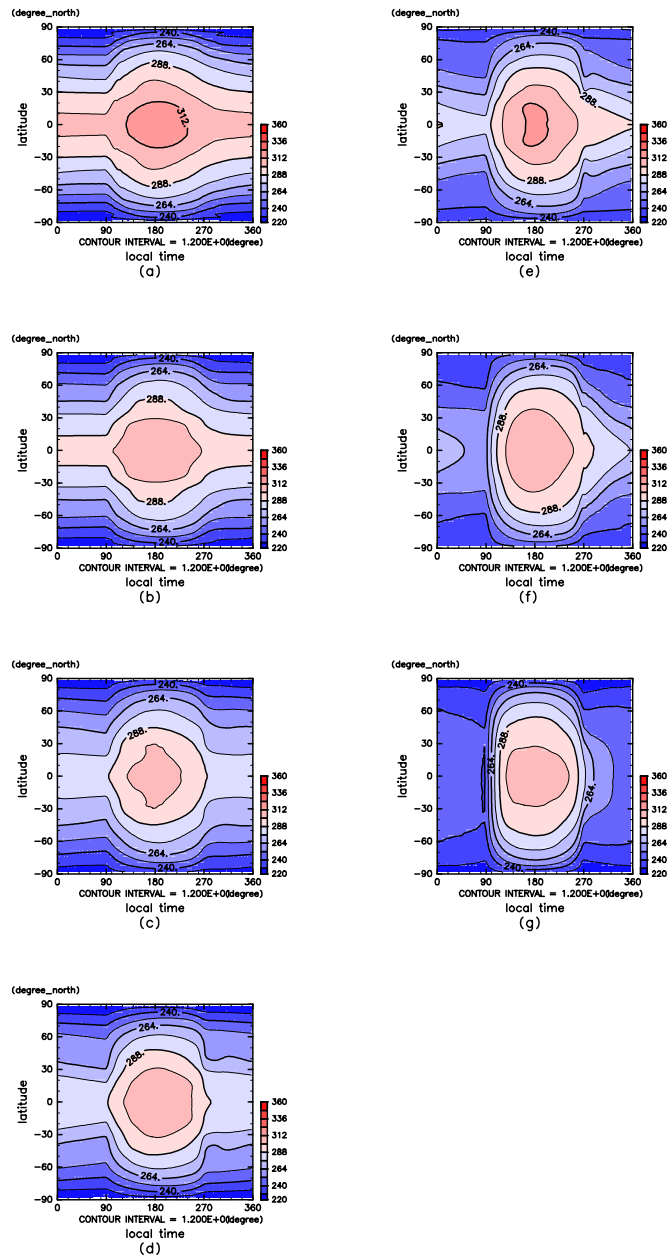


図 H-58: 地表温度の緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

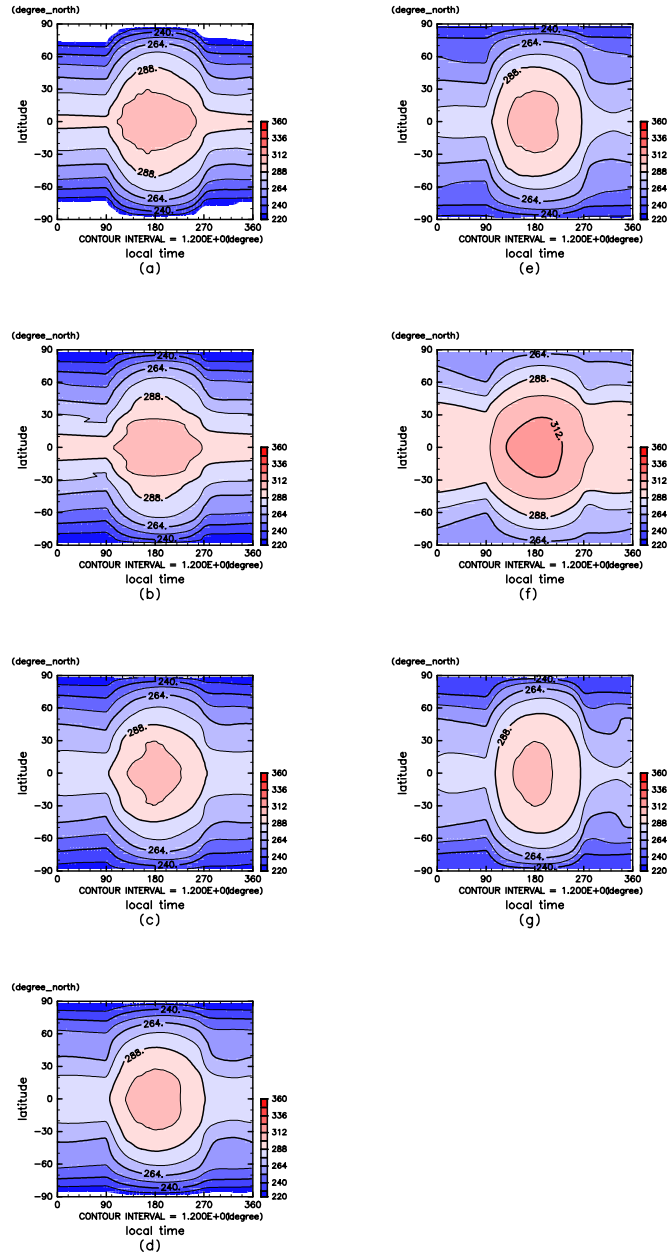


図 H-59: 地表温度の緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

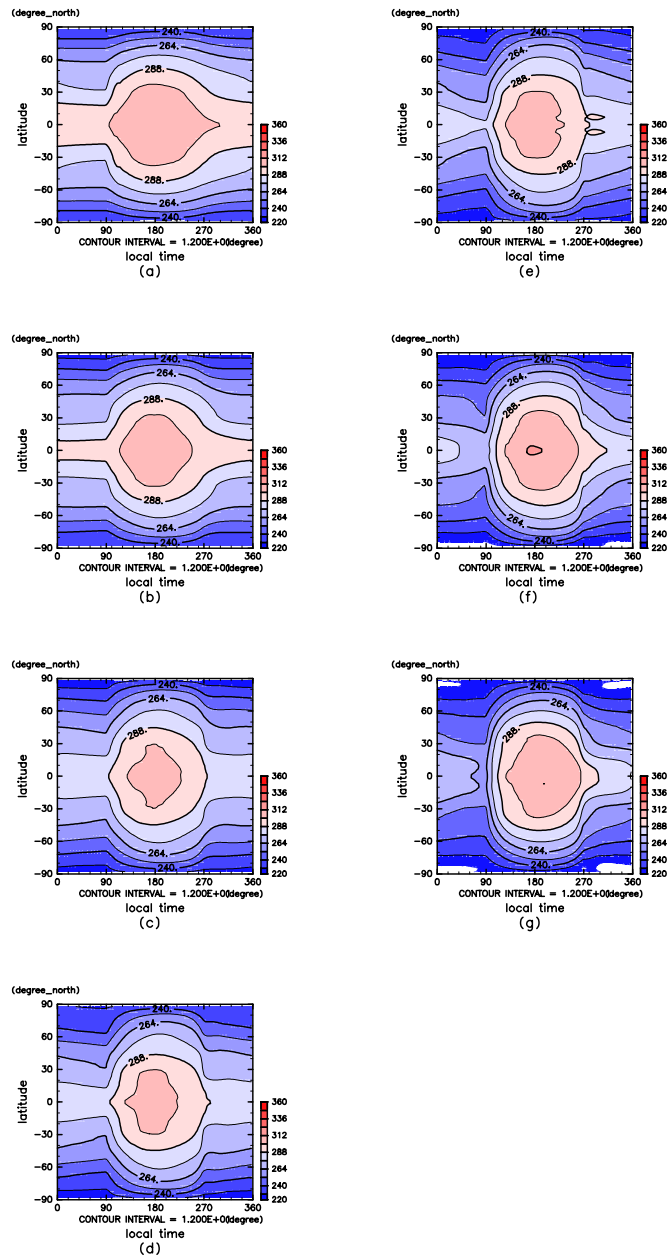


図 H-60: 地表温度の緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

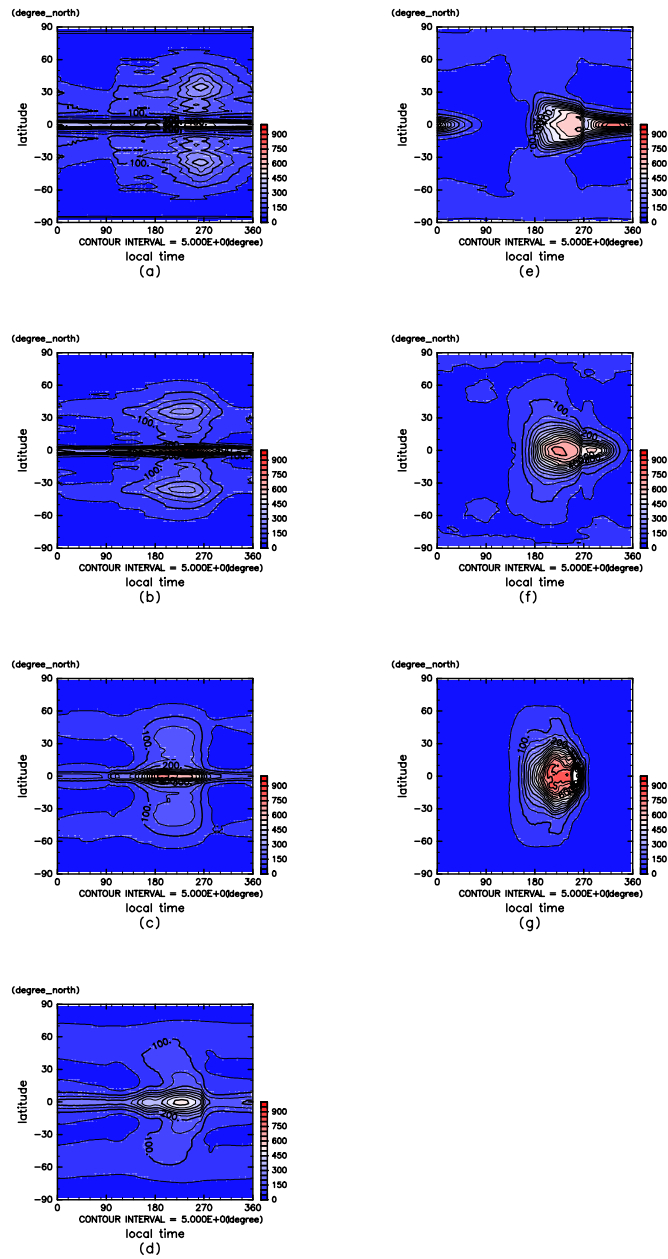


図 H-61: 降水量の緯度地方時分布 [mm/yr]. 時間平均. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

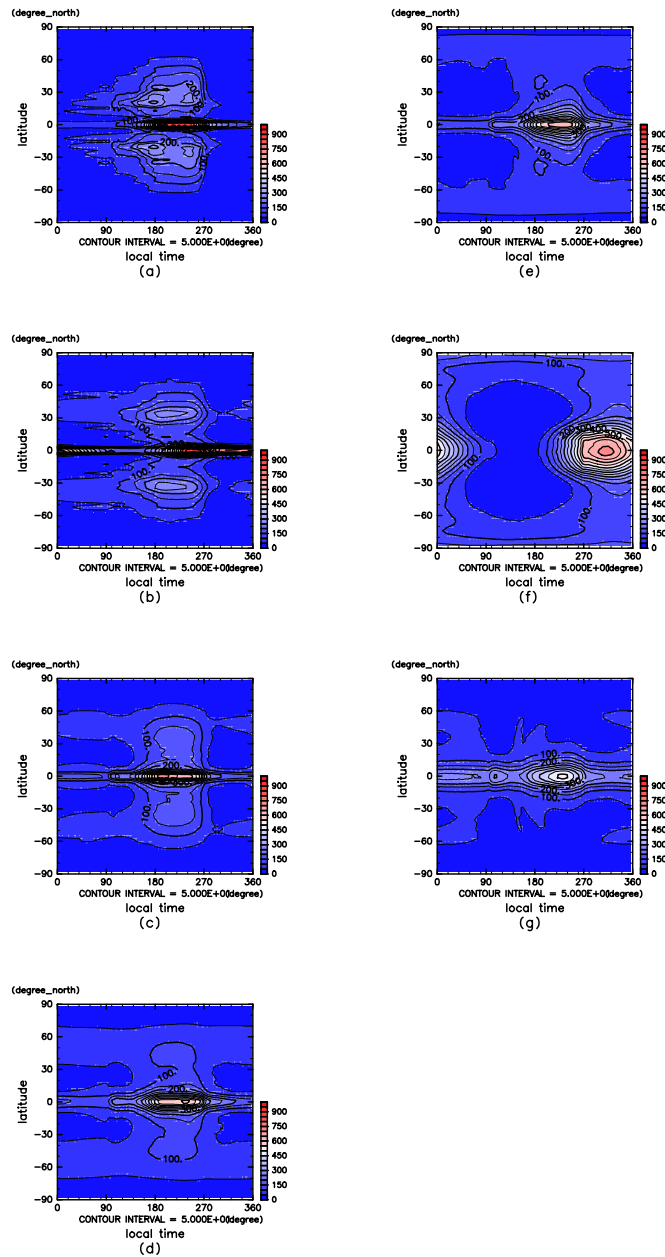


図 H-62: 降水量の緯度地方時分布 [mm/yr]. 時間平均. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

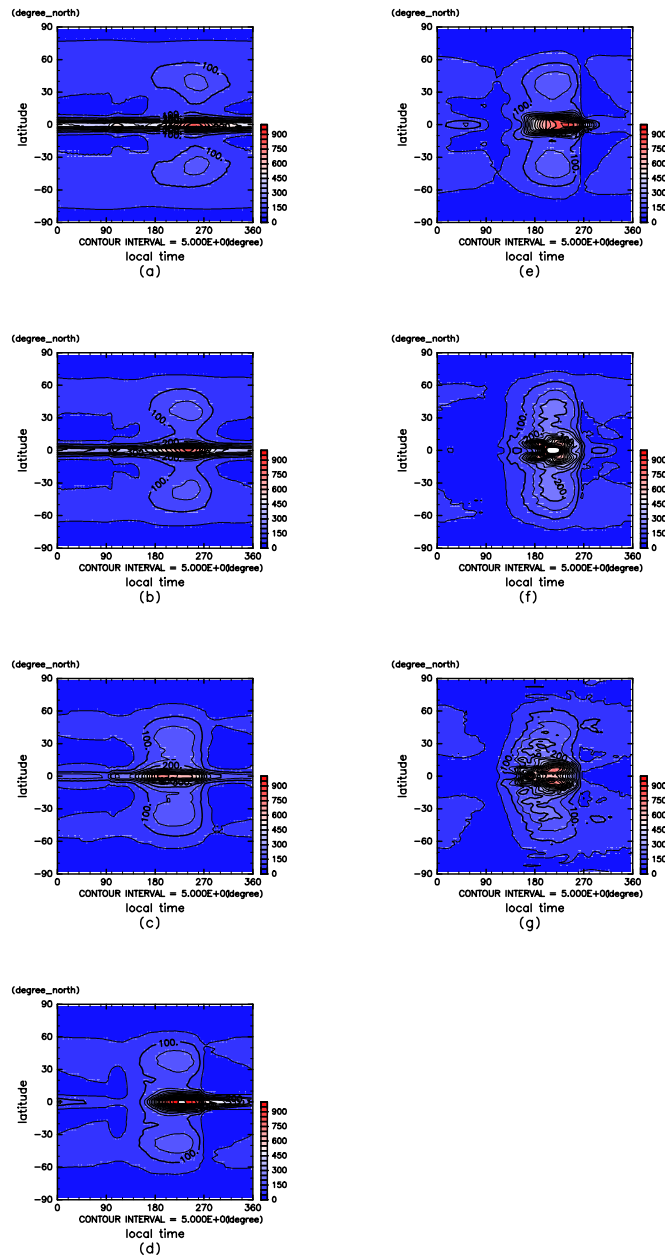


図 H-63: 降水量の緯度地方時分布 [mm/yr]. 時間平均. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

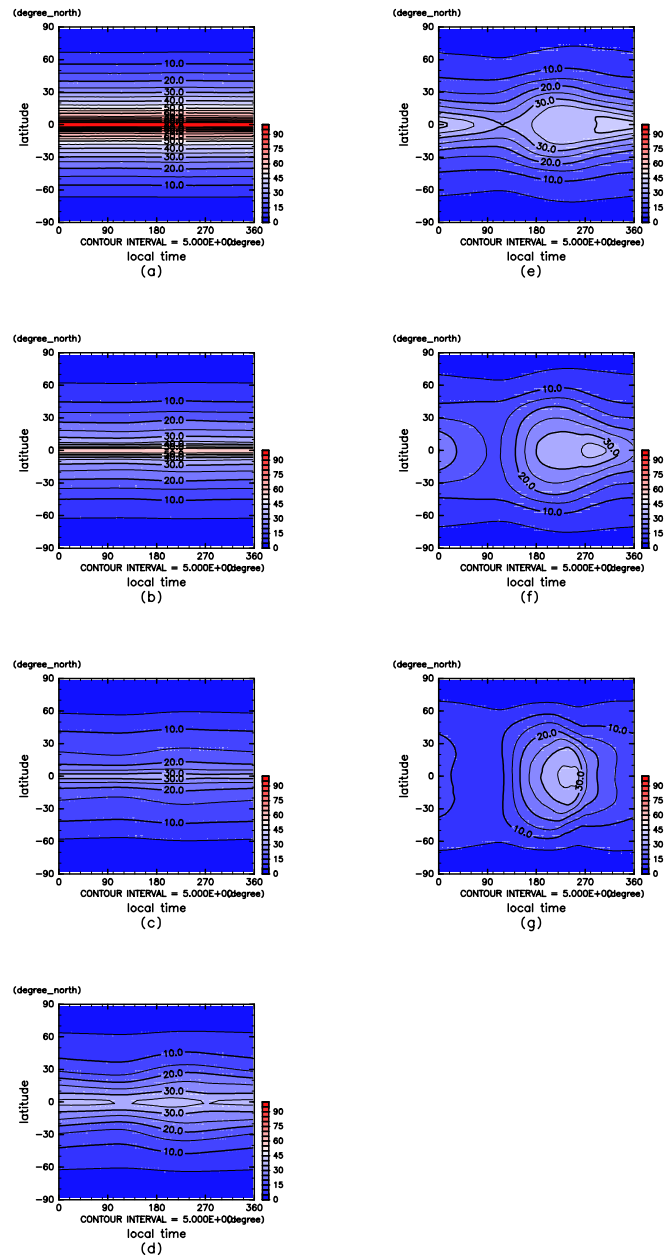


図 H-64: 可降水量の緯度地方時分布 $[\text{kg/m}^2]$. 時間平均. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

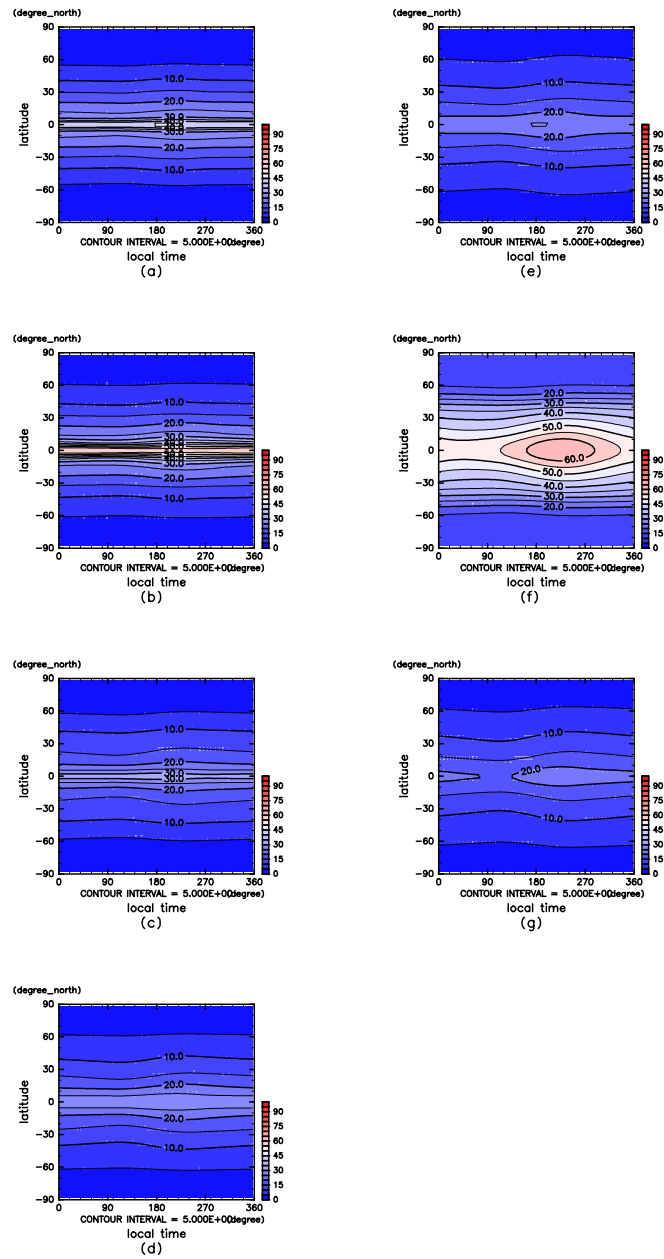


図 H-65: 可降水量の緯度地方時分布 [kg/m^2]. 時間平均. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

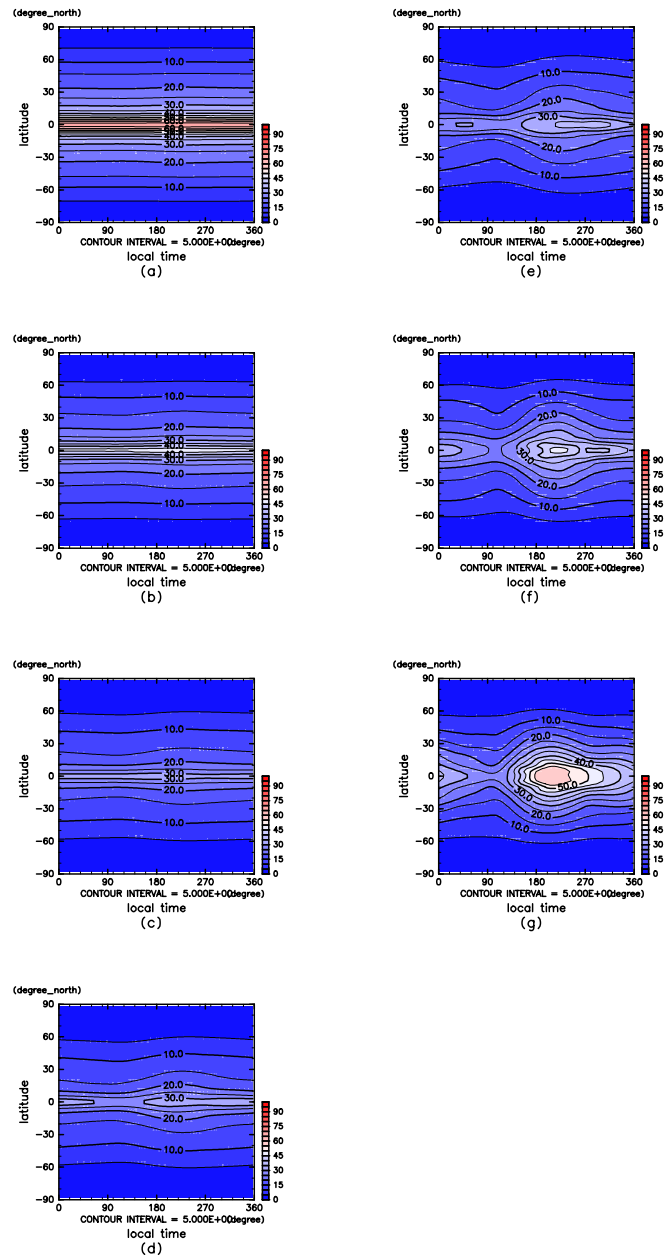


図 H-66: 可降水量の緯度地方時分布 [kg/m²]. 時間平均. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

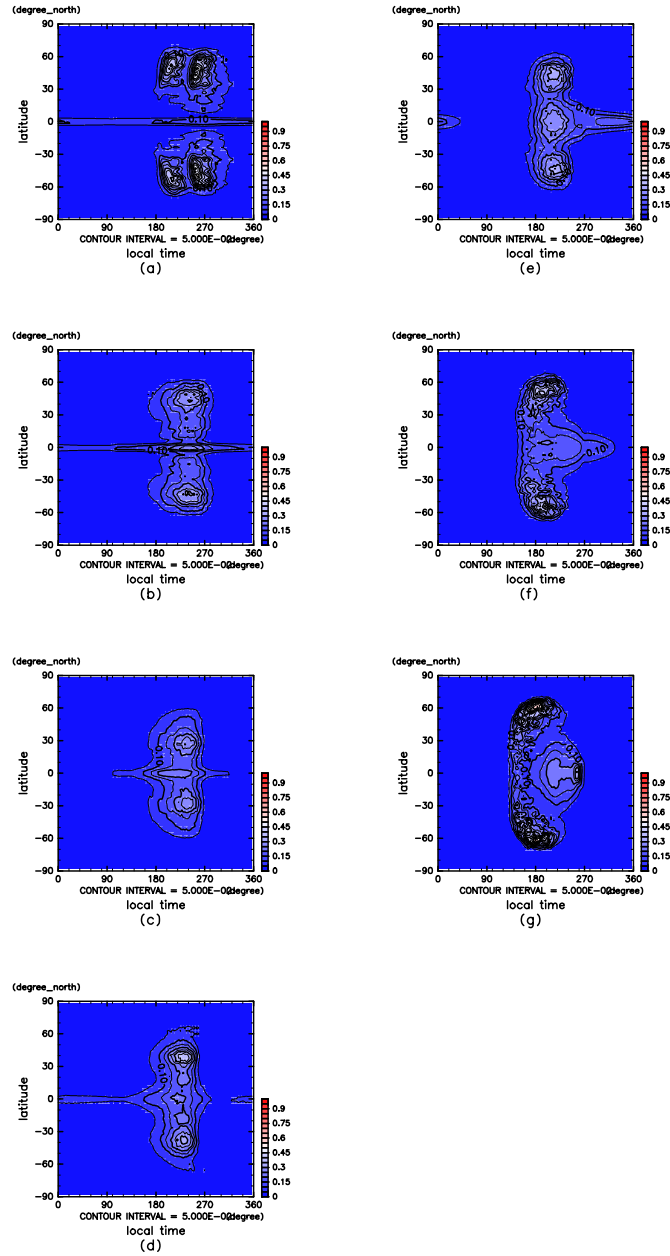


図 H-67: 鉛直積分した雲水量の緯度地方時分布 [kg/m^2]. 時間平均. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

E-9 赤道断面

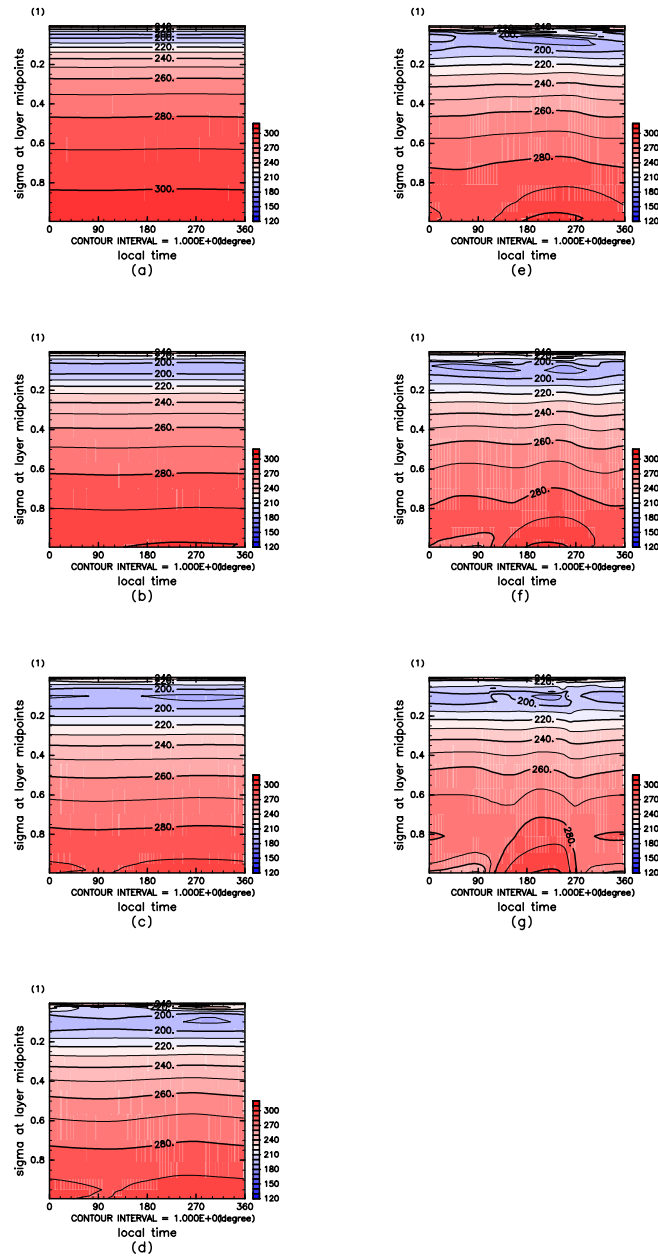


図 I-68: 気温分布 [K]. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

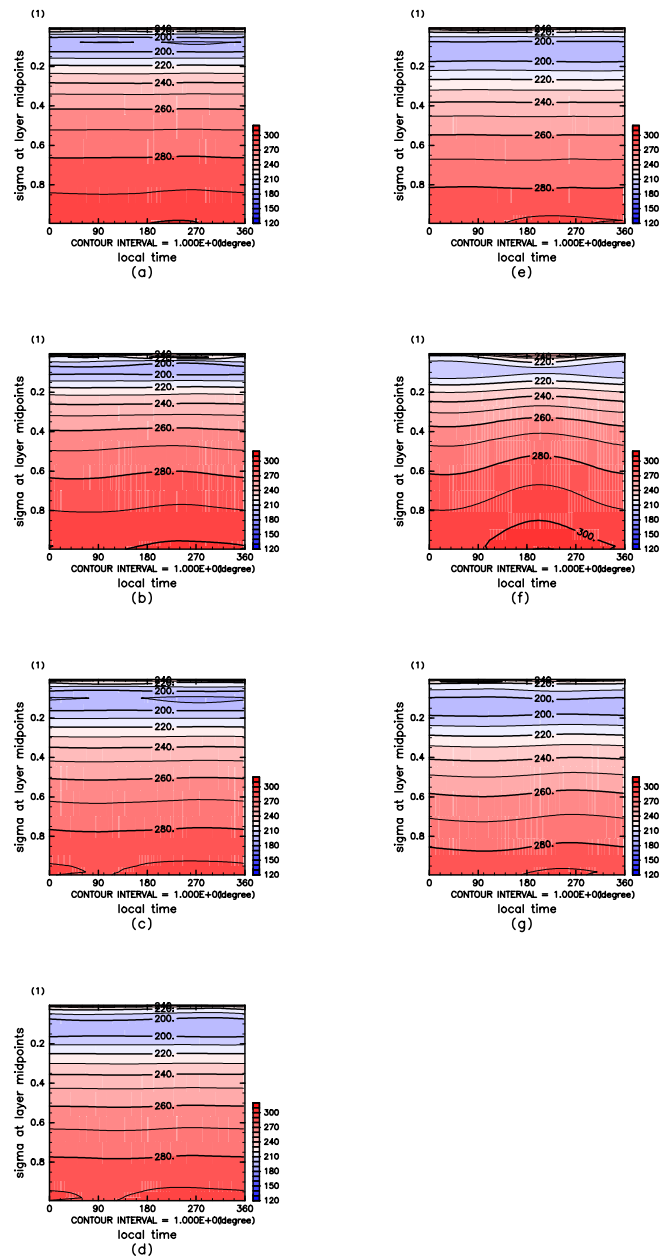


図 I-69: 気温分布 [K]. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

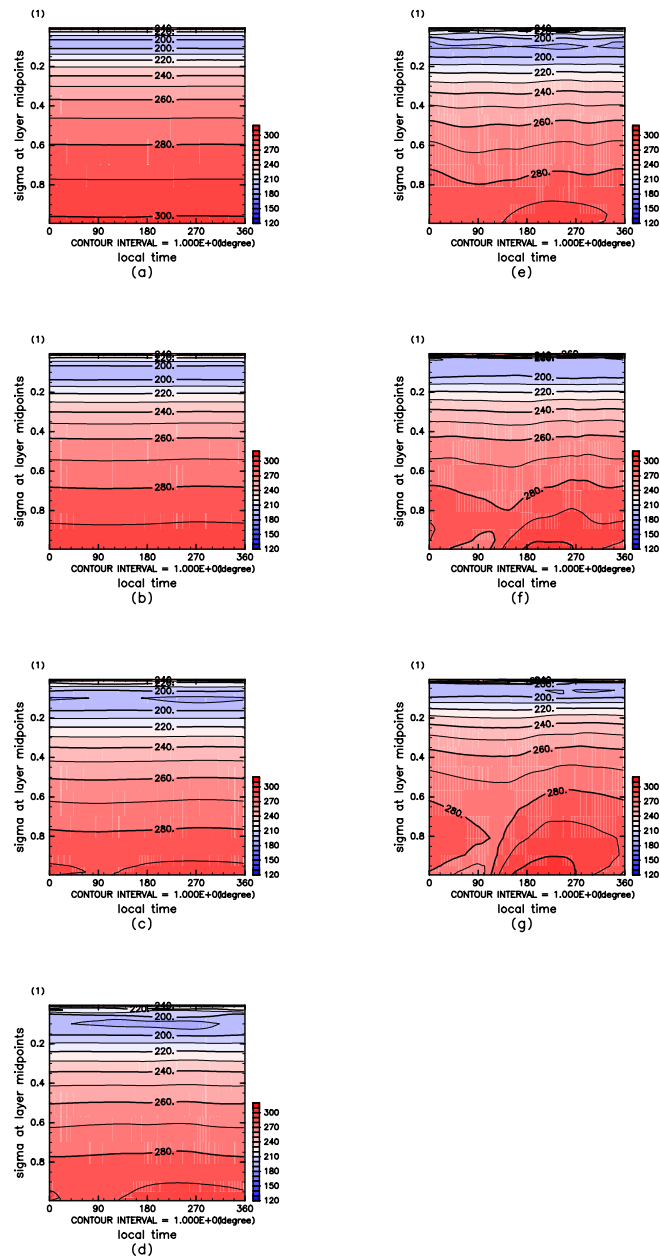


図 I-70: 気温分布 [K]. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

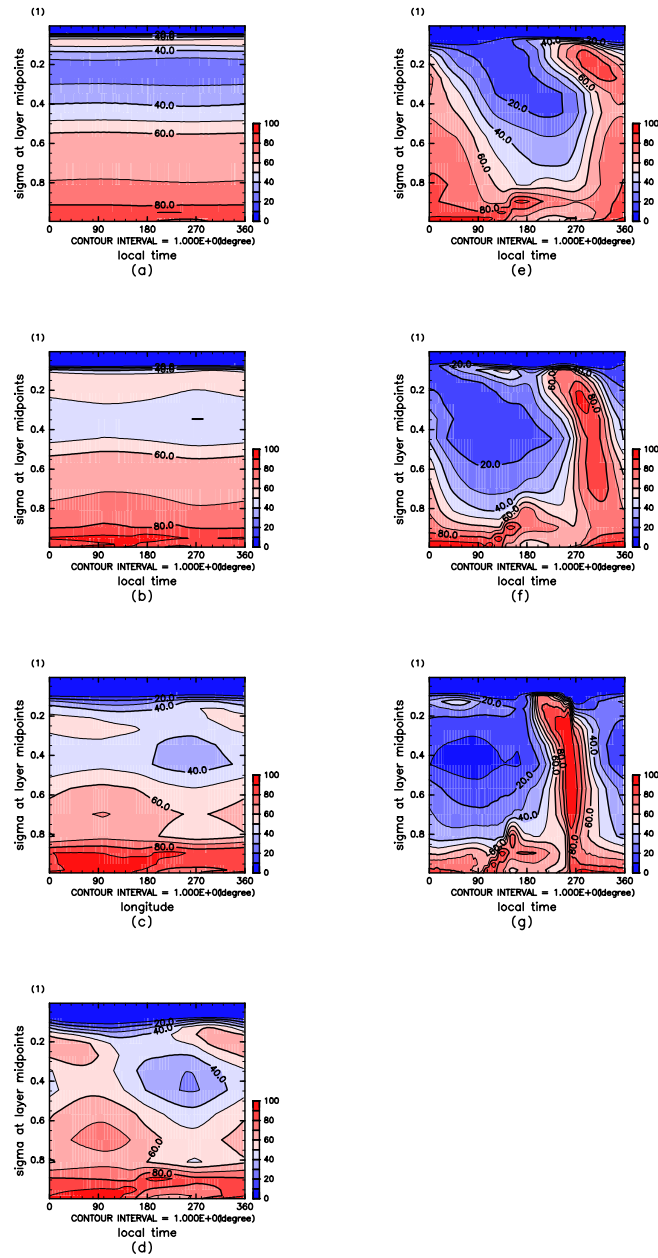


図 I-71: 相対湿度 [%]. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

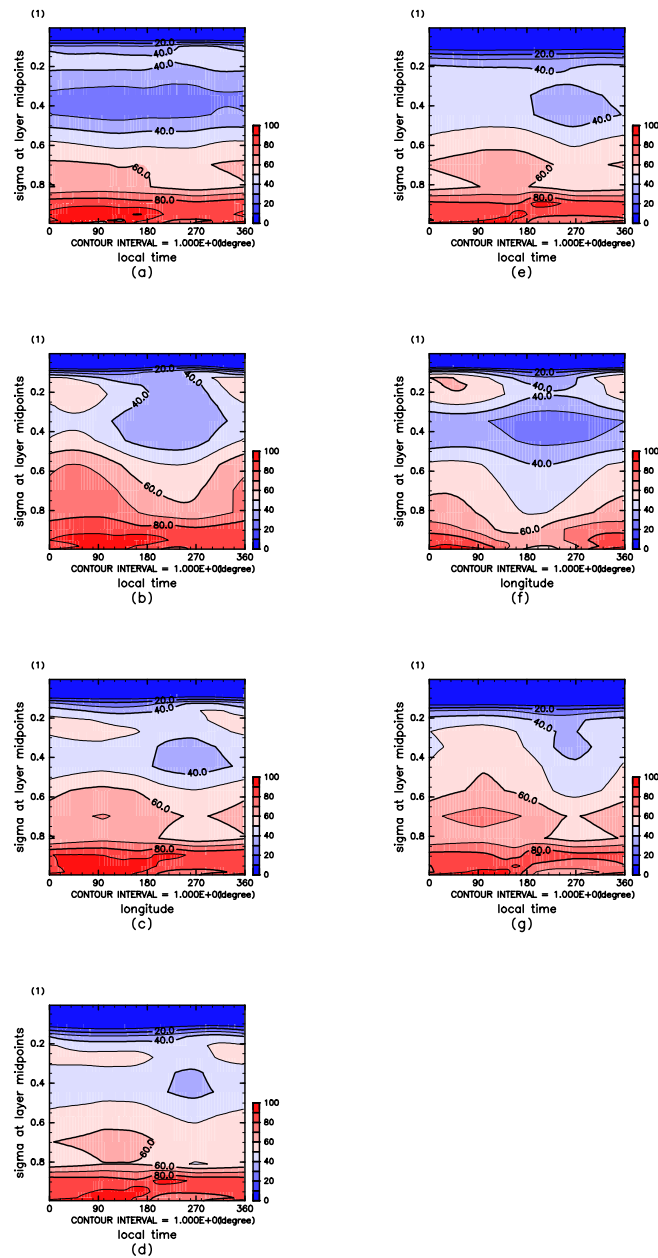


図 I-72: 相対湿度 [%]. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

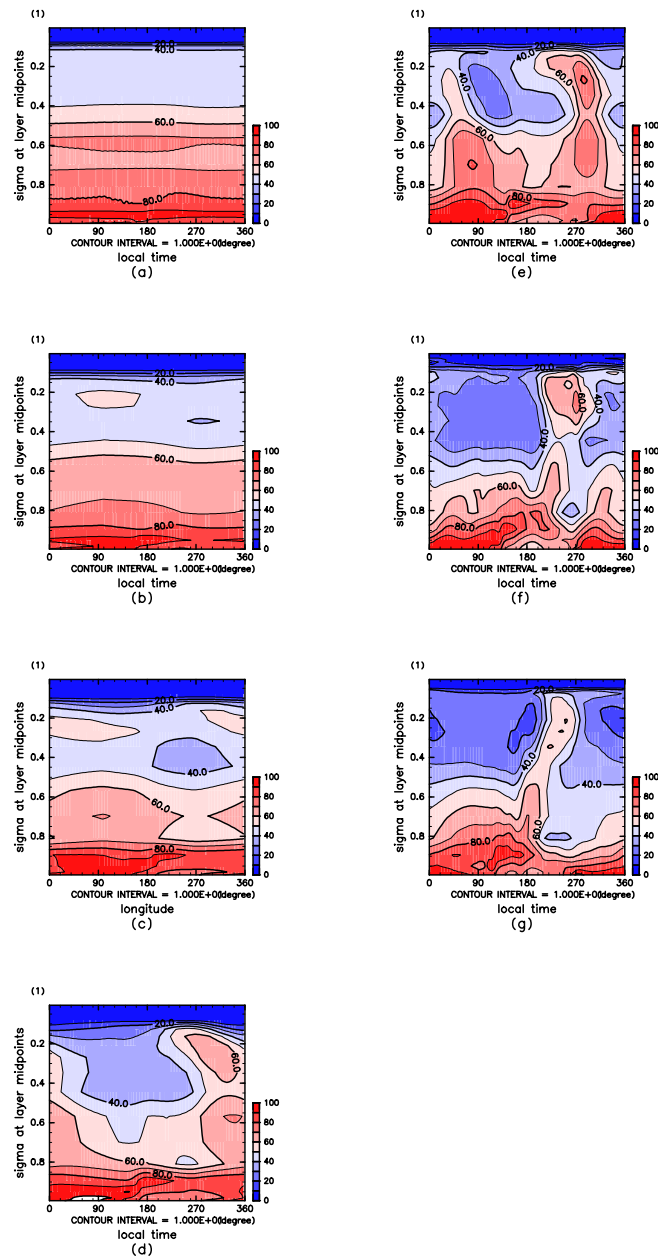


図 I-73: 相対湿度 [%]. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

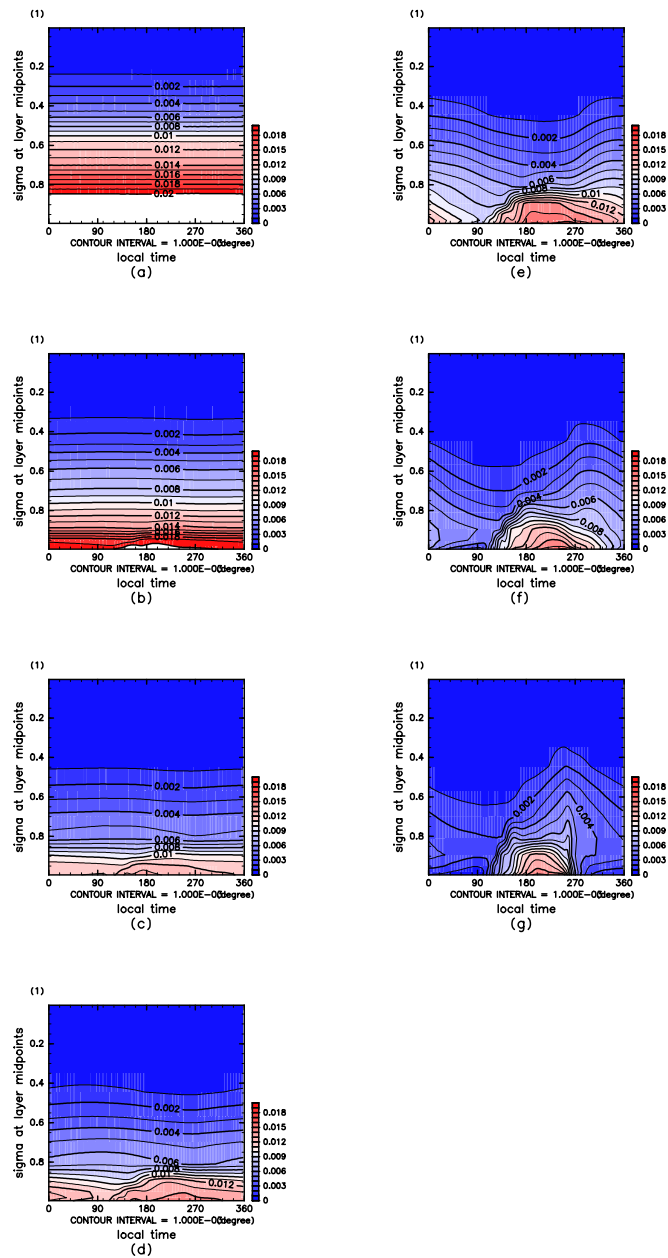


図 I-74: 比湿 [kg/kg]. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

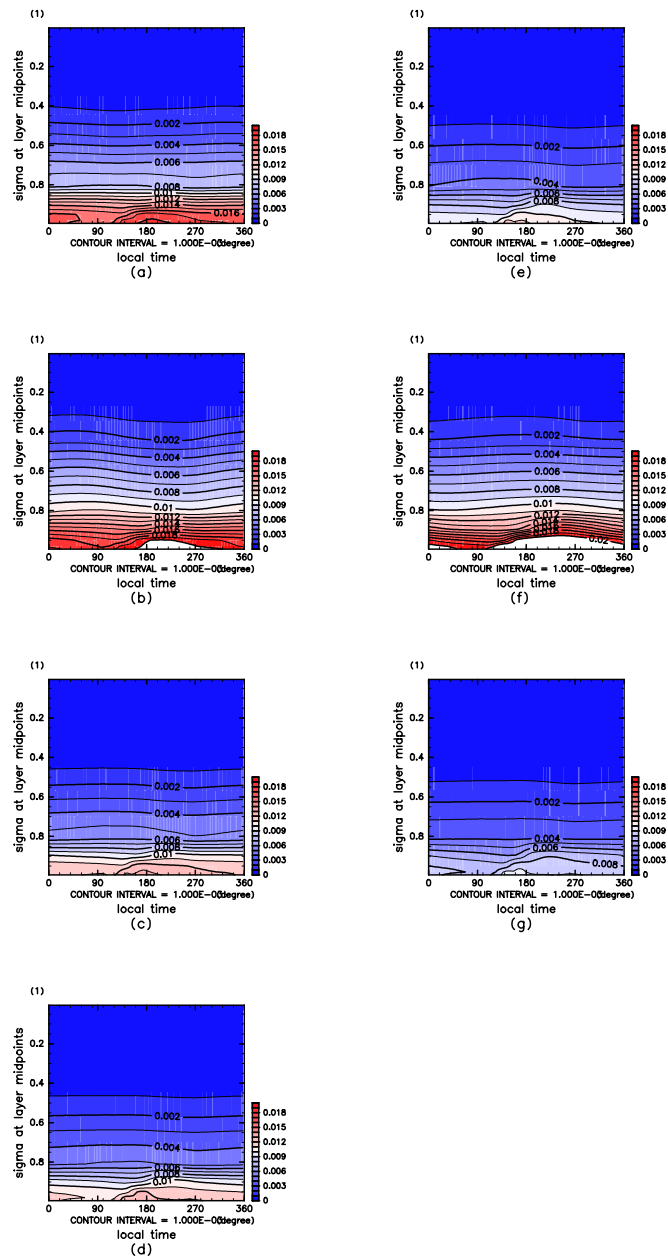


図 I-75: 比湿 [kg/kg]. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

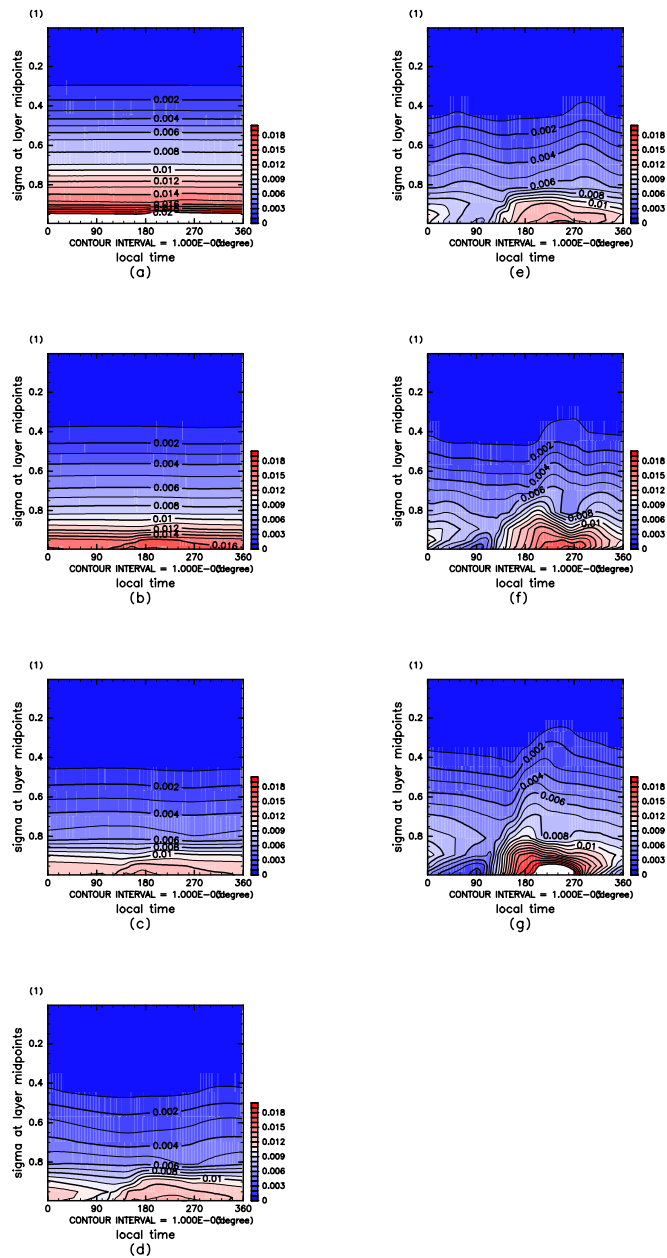


図 I-76: 比湿 [kg/kg]. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は σ . 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1, (d) 1/2 倍, (e) 1/4 倍, (f) 1/8 倍, (g) 1/16 倍.

E-10 緯度地方時分布 (偏差)

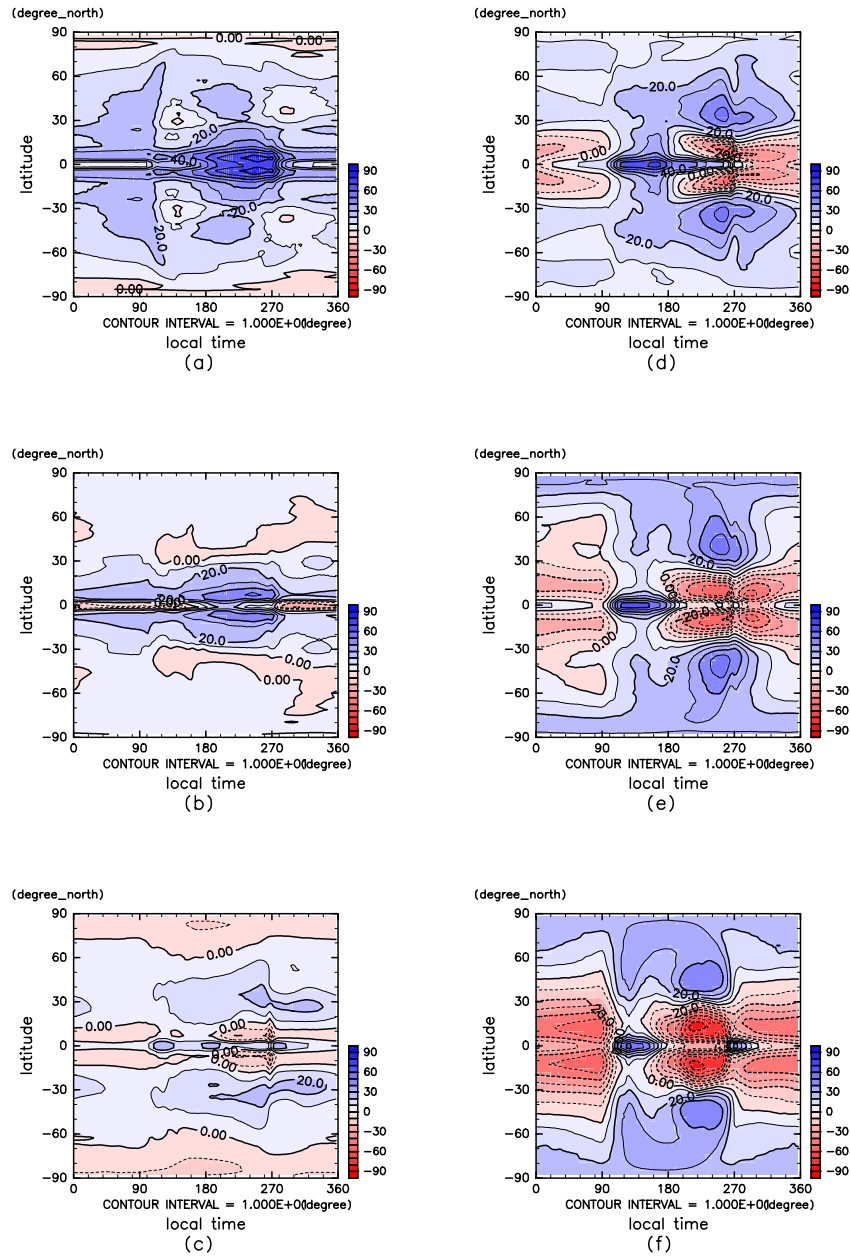


図 J-77: 大気上端における長波放射の緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1/2 倍, (d) 1/4 倍, (e) 1/8 倍, (f) 1/16 倍.

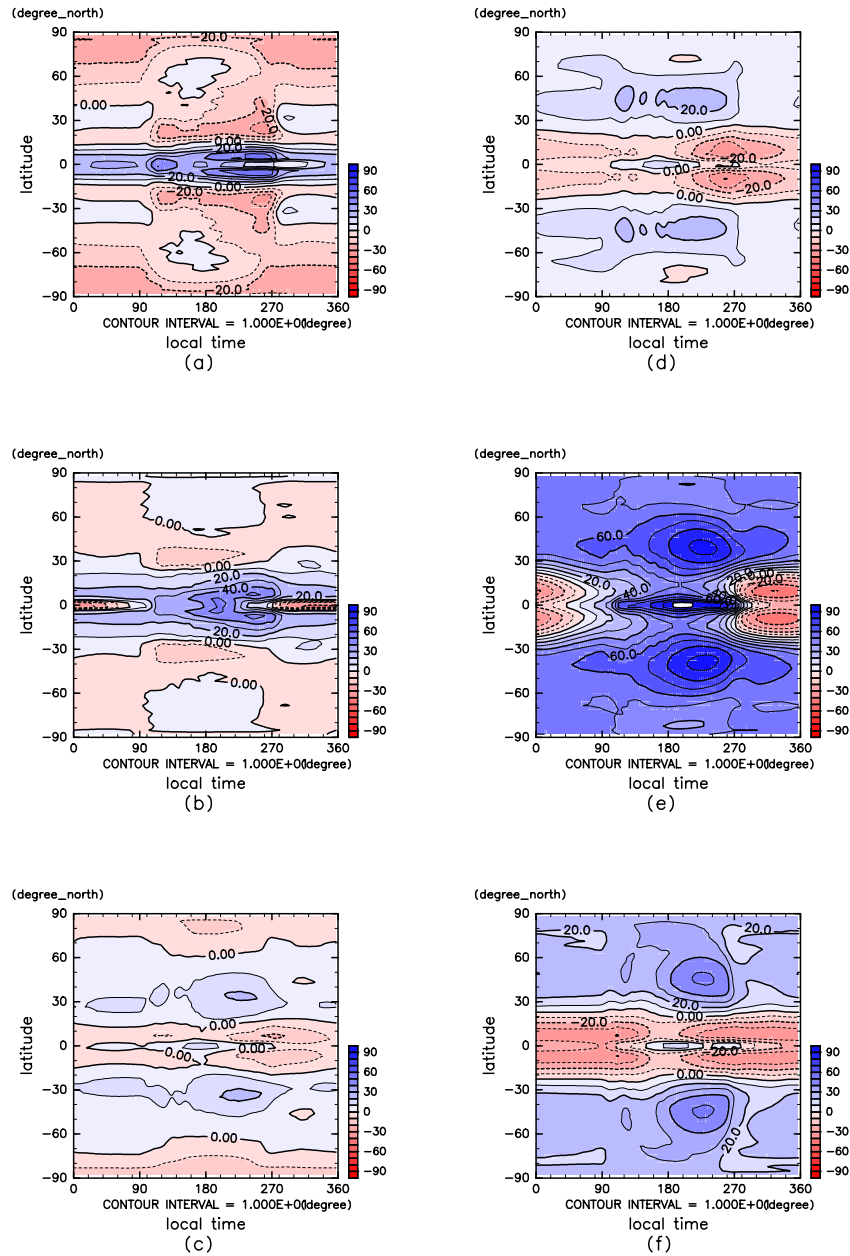


図 J-78: 大気上端における長波放射の緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1/2 倍, (d) 1/4 倍, (e) 1/8 倍, (f) 1/16 倍.

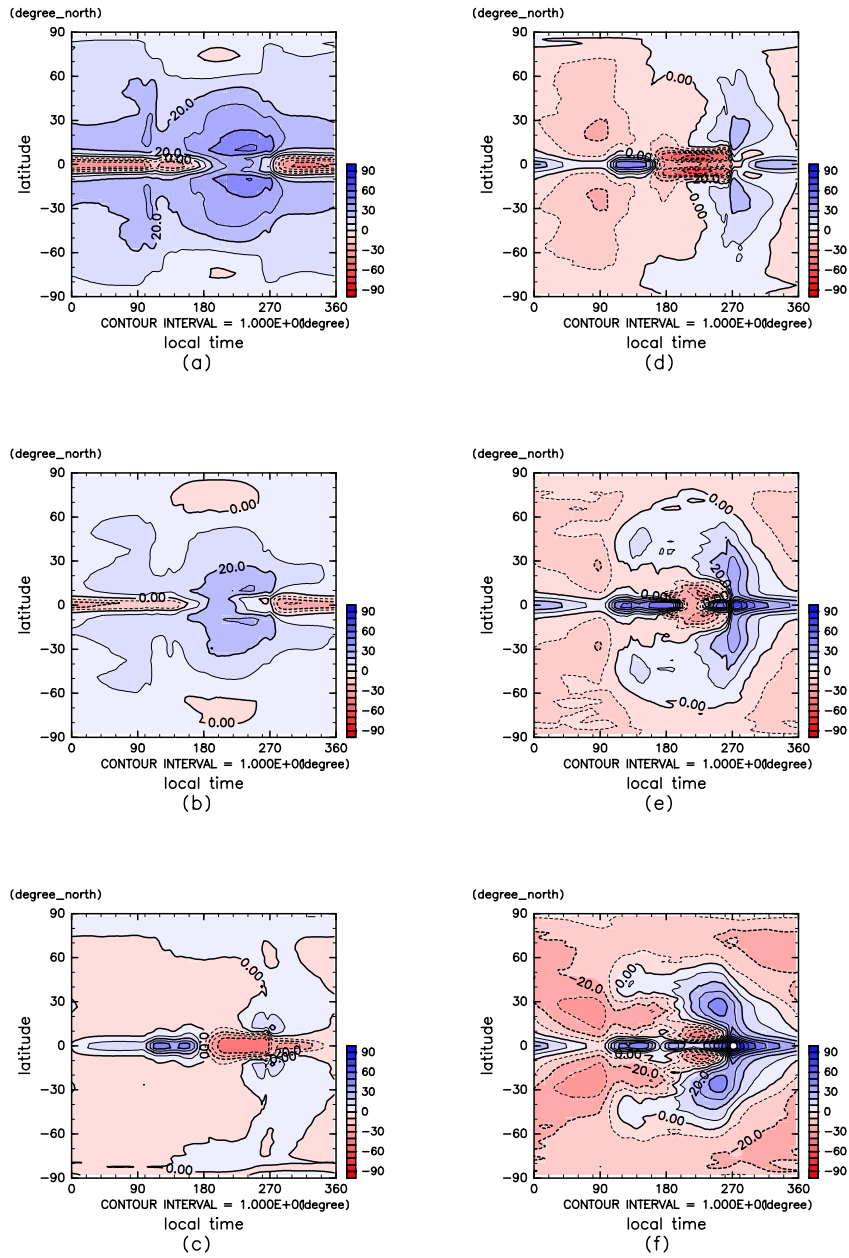


図 J-79: 大気上端における長波放射の緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1/2 倍, (d) 1/4 倍, (e) 1/8 倍, (f) 1/16 倍.

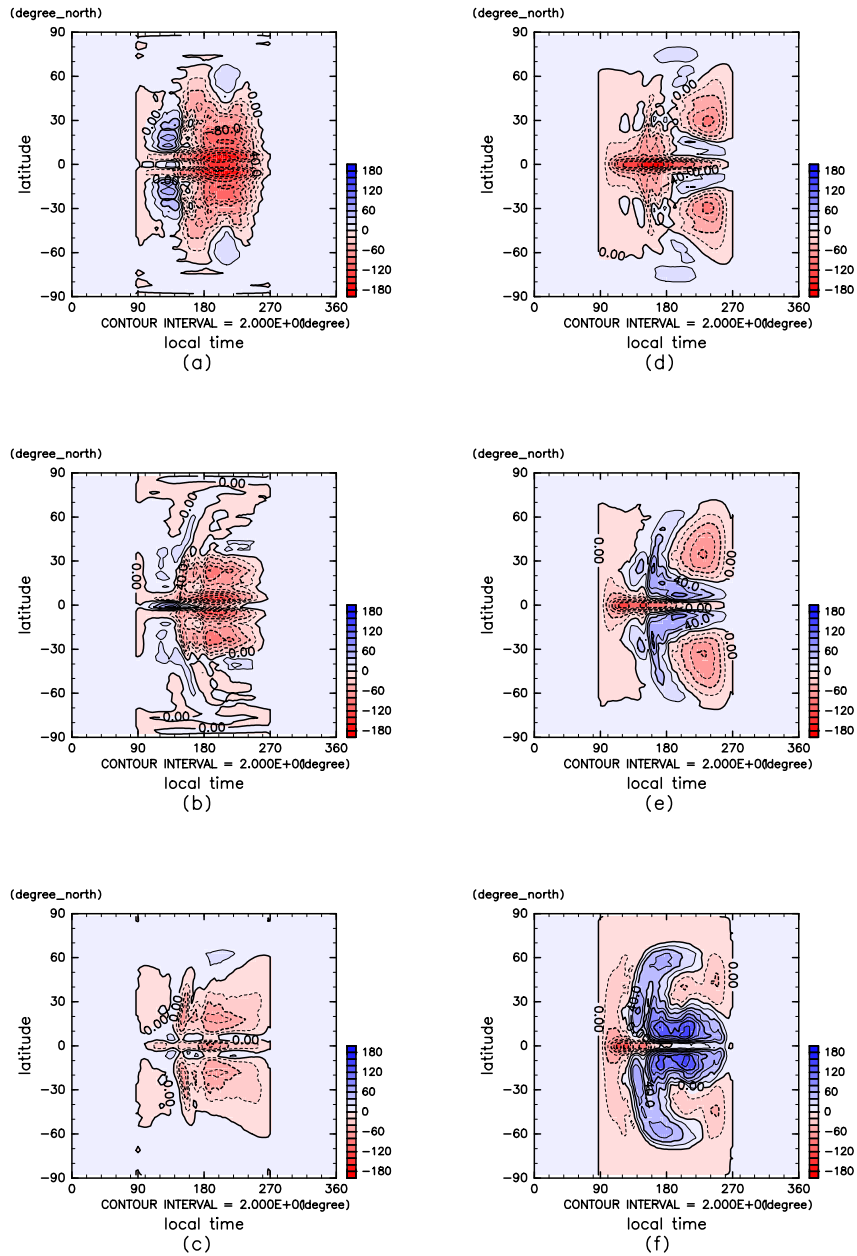


図 J-80: 地表面における上向き短波放射フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1/2 倍, (d) 1/4 倍, (e) 1/8 倍, (f) 1/16 倍.

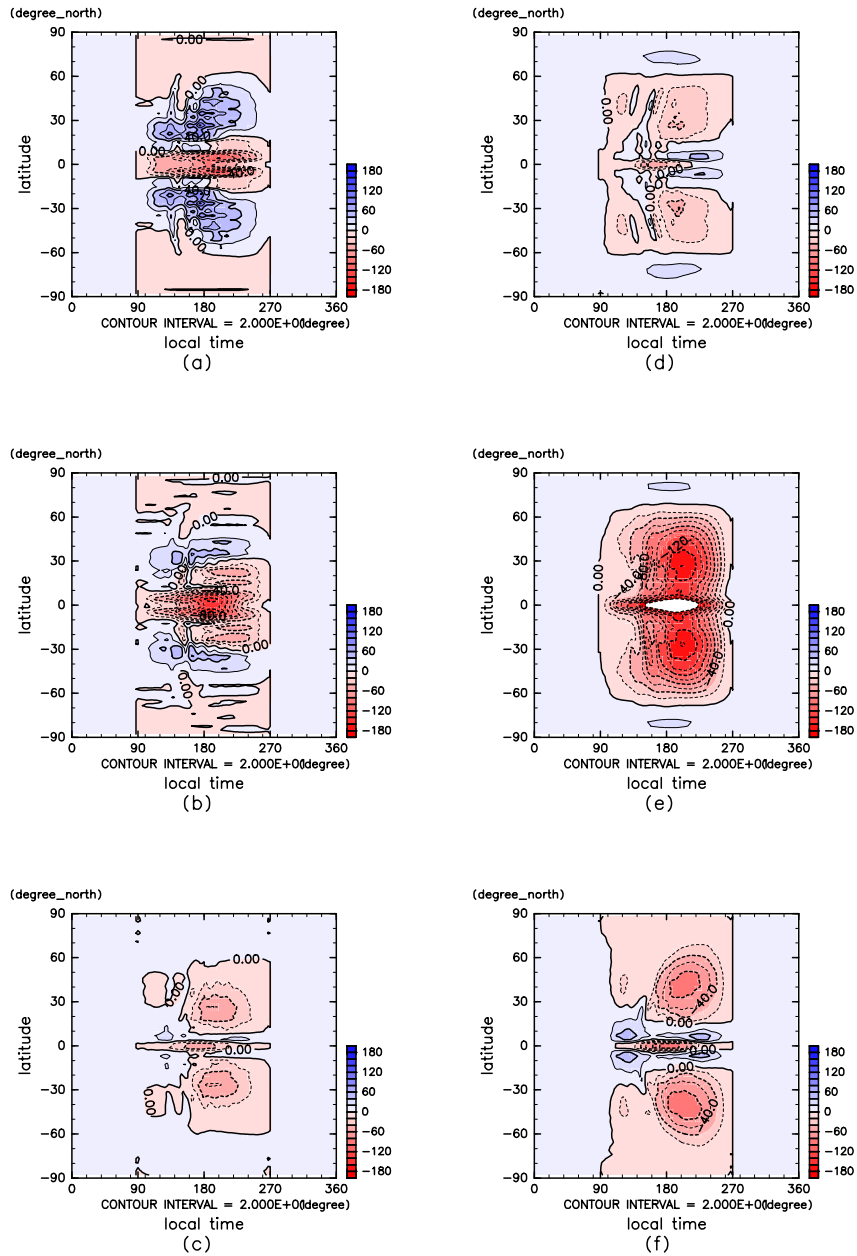


図 J-81: 地表面における上向き短波放射フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1/2 倍, (d) 1/4 倍, (e) 1/8 倍, (f) 1/16 倍.

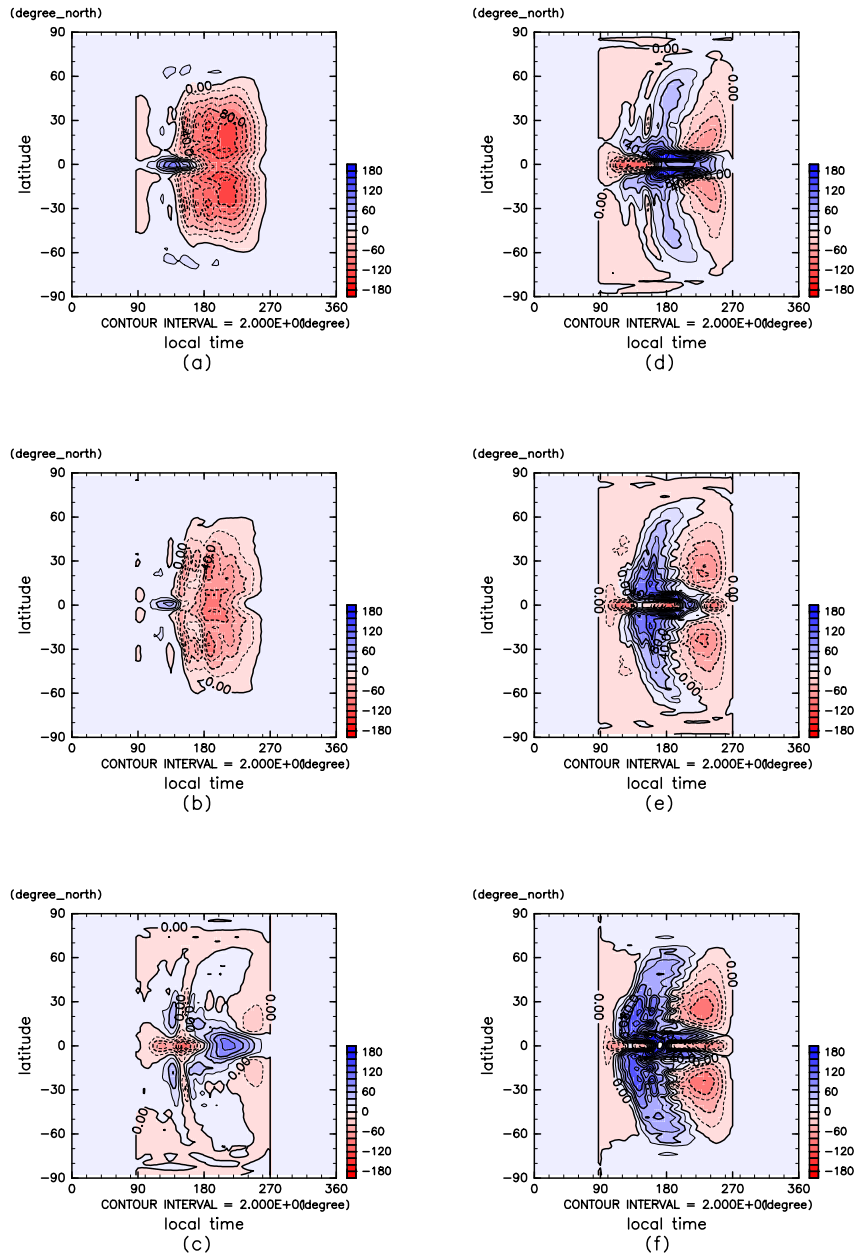


図 J-82: 地表面における上向き短波放射フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1/2 倍, (d) 1/4 倍, (e) 1/8 倍, (f) 1/16 倍.

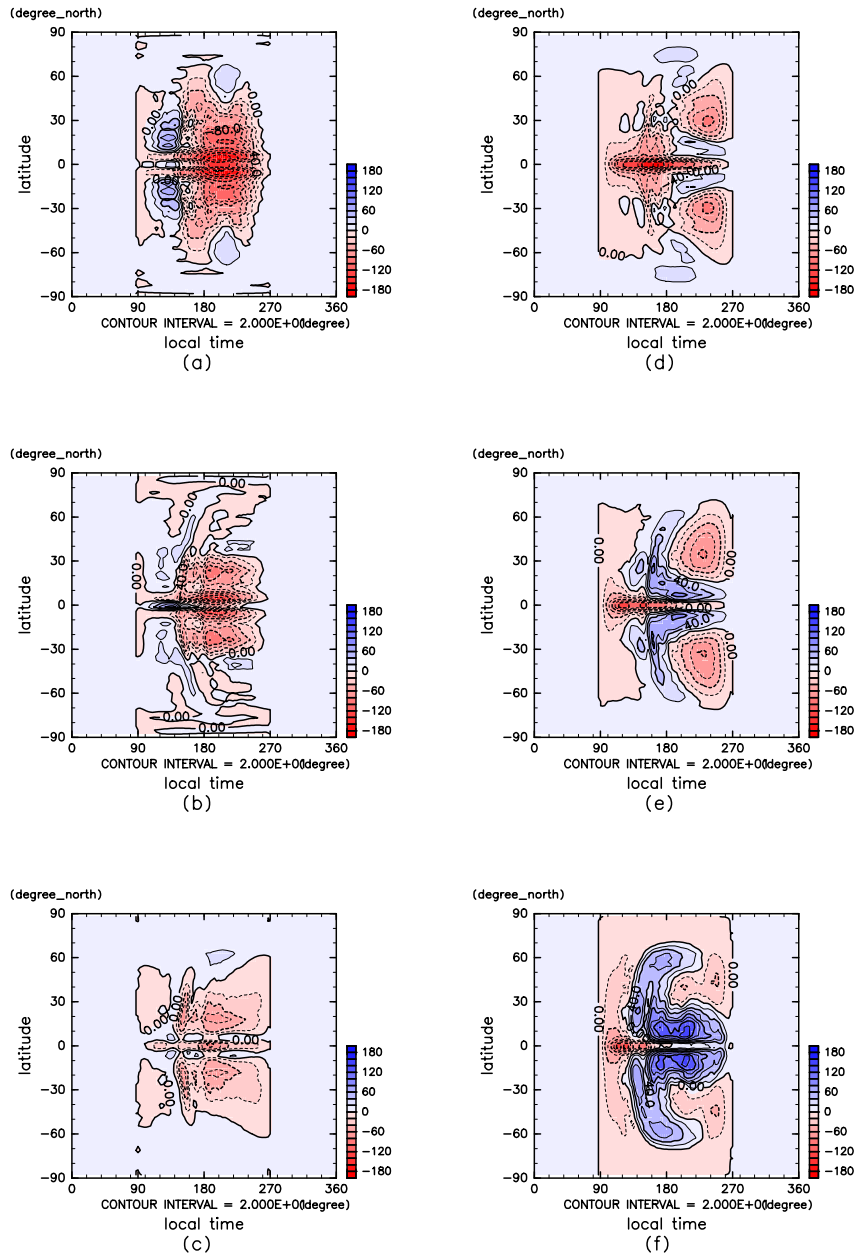


図 J-83: 地表面における上向き長波放射フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1/2 倍, (d) 1/4 倍, (e) 1/8 倍, (f) 1/16 倍.

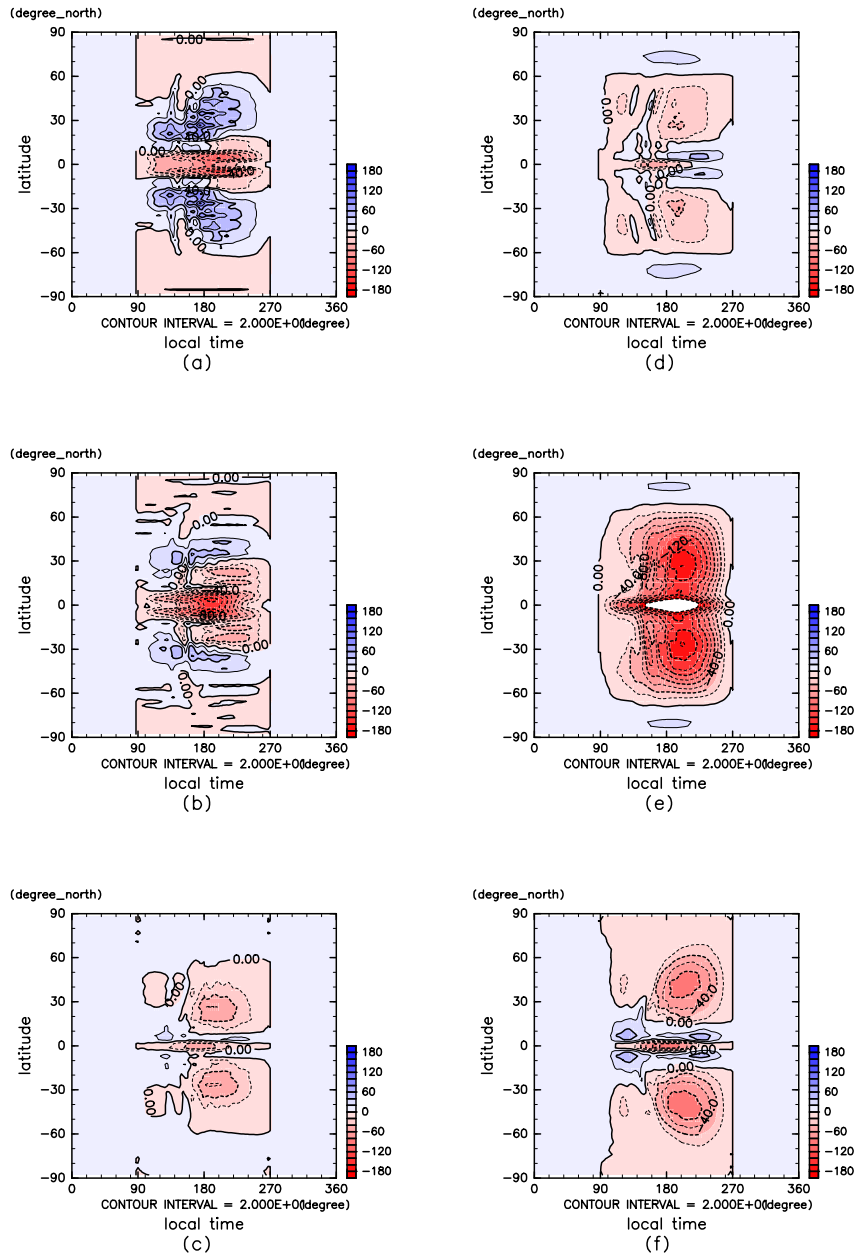


図 J-84: 地表面における上向き長波放射フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1/2 倍, (d) 1/4 倍, (e) 1/8 倍, (f) 1/16 倍.

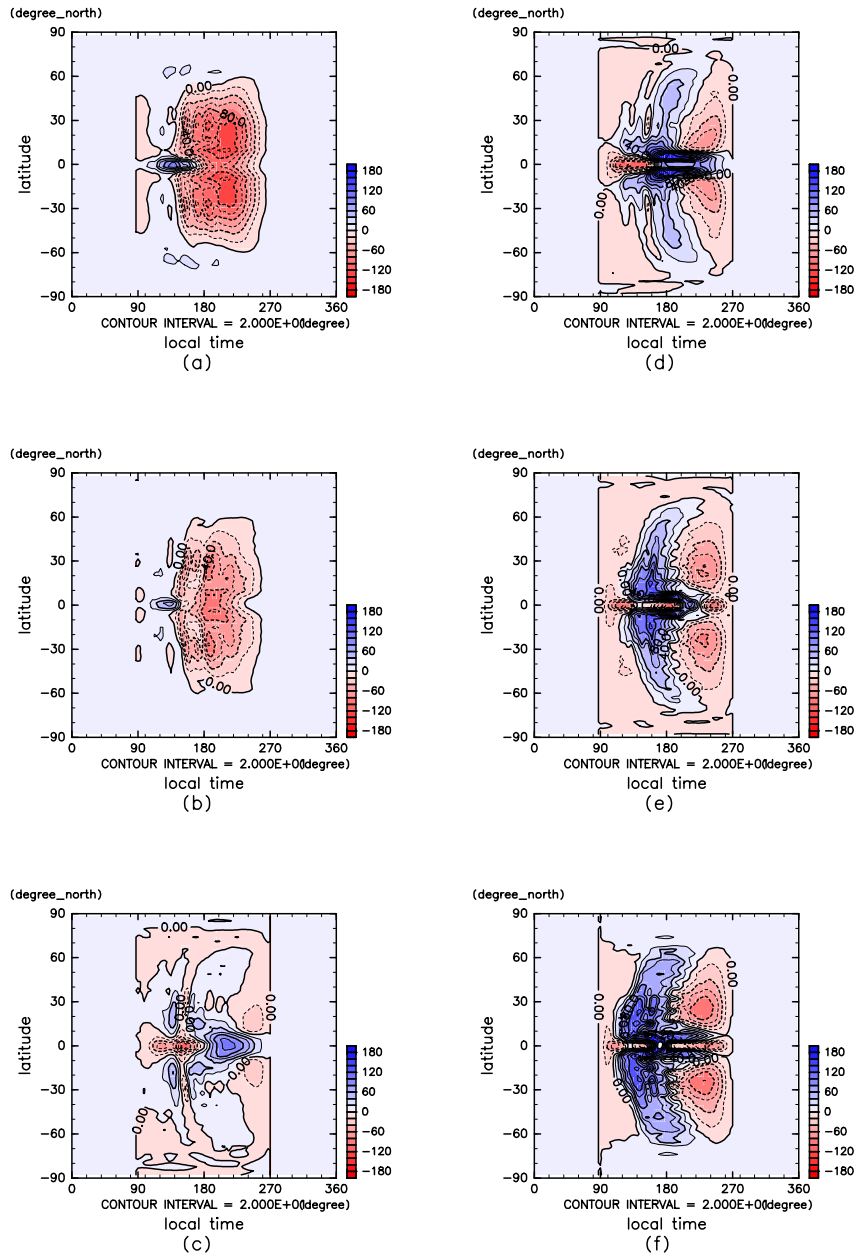


図 J-85: 地表面における上向き長波放射フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1/2 倍, (d) 1/4 倍, (e) 1/8 倍, (f) 1/16 倍.

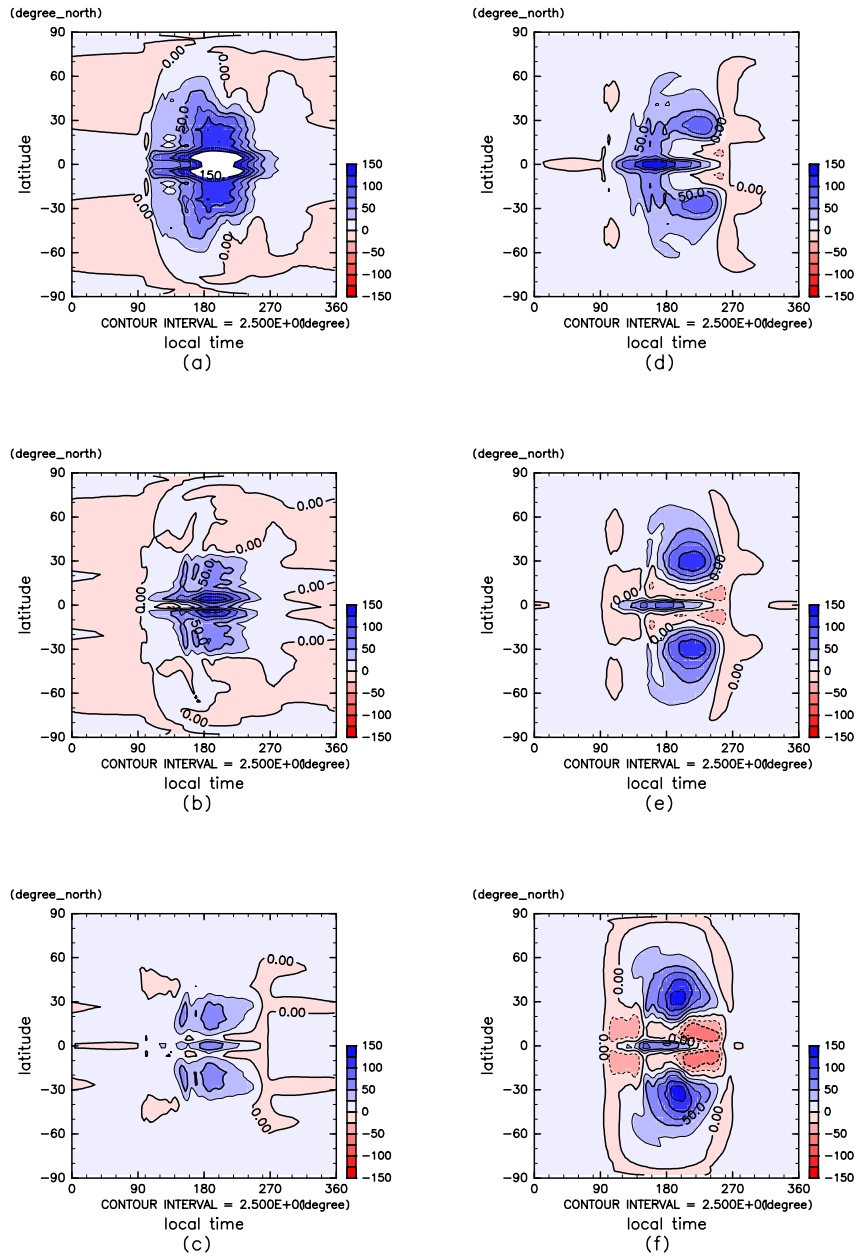


図 J-86: 地表面における潜熱フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1/2 倍, (d) 1/4 倍, (e) 1/8 倍, (f) 1/16 倍.

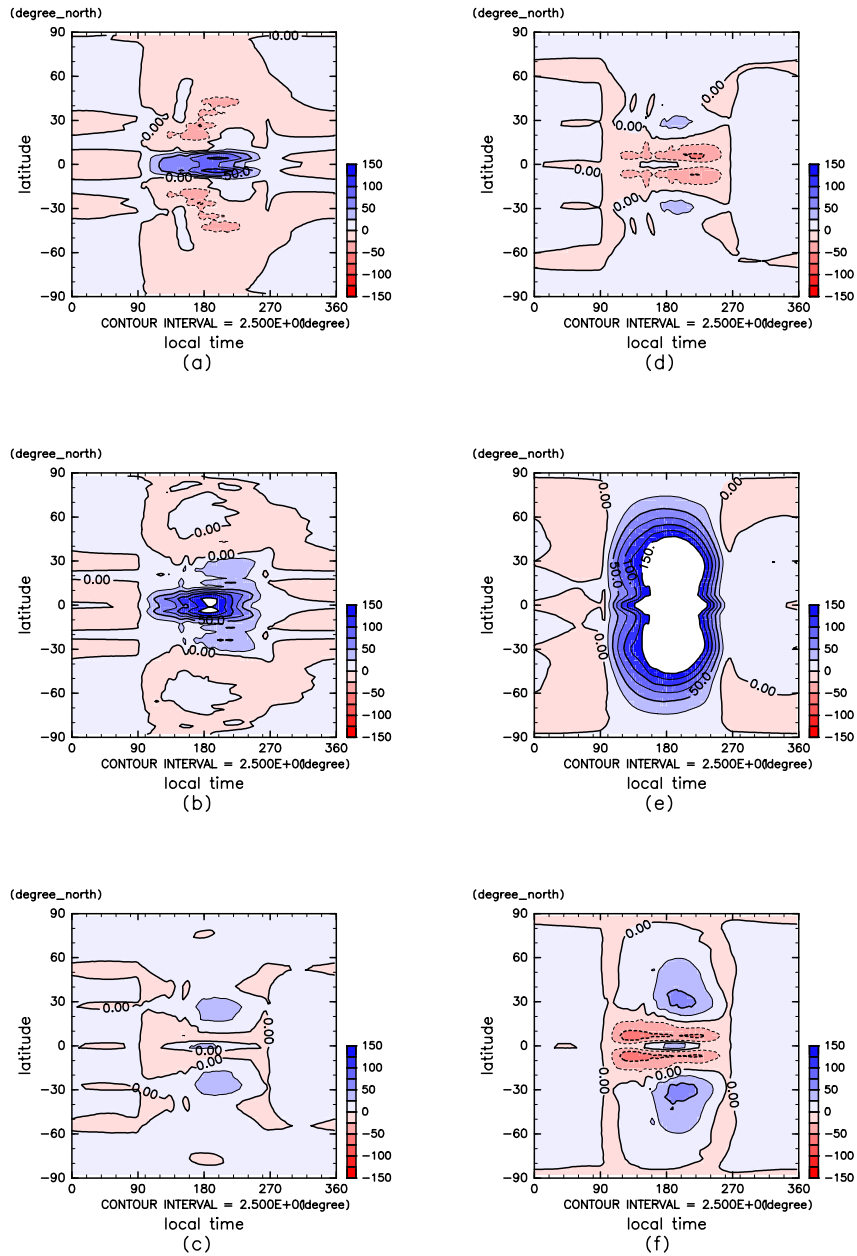


図 J-87: 地表面における潜熱フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1/2 倍, (d) 1/4 倍, (e) 1/8 倍, (f) 1/16 倍.

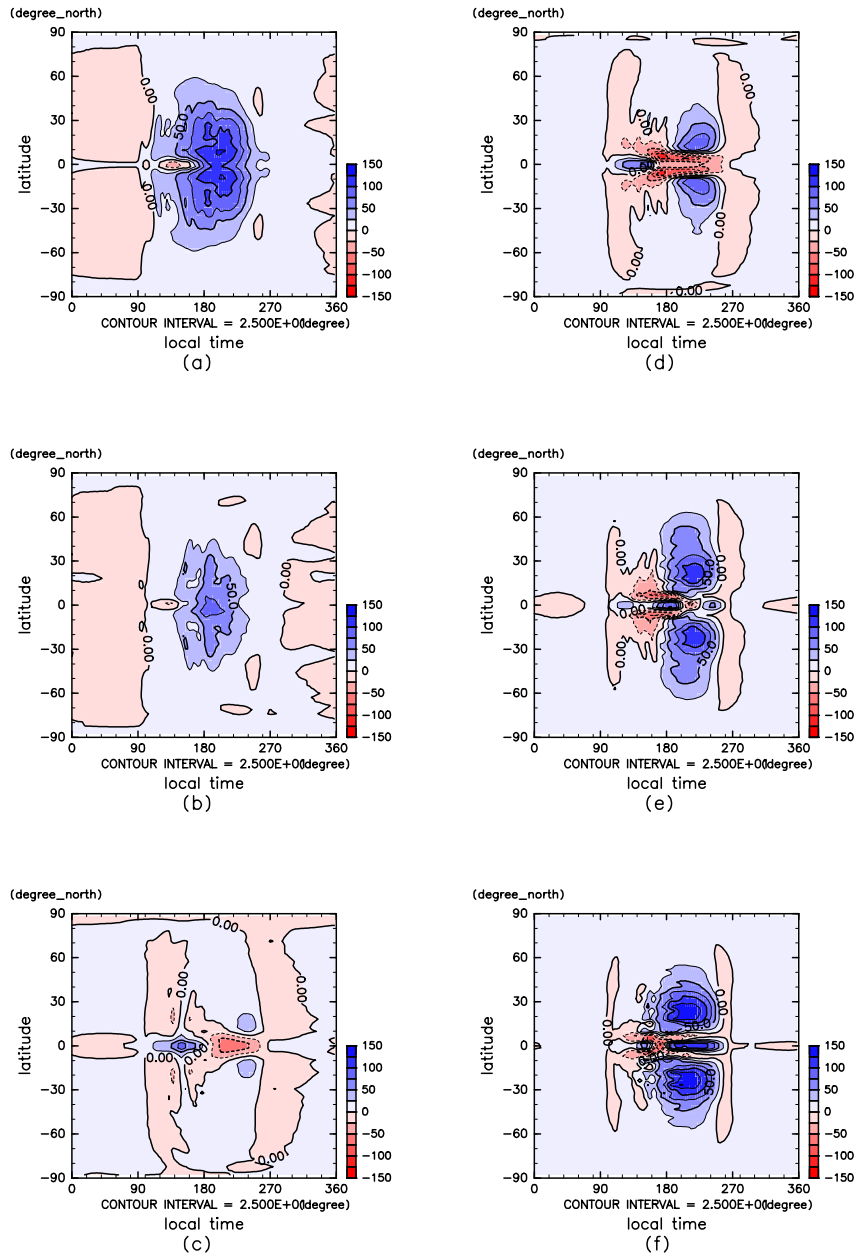


図 J-88: 地表面における潜熱フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1/2 倍, (d) 1/4 倍, (e) 1/8 倍, (f) 1/16 倍.

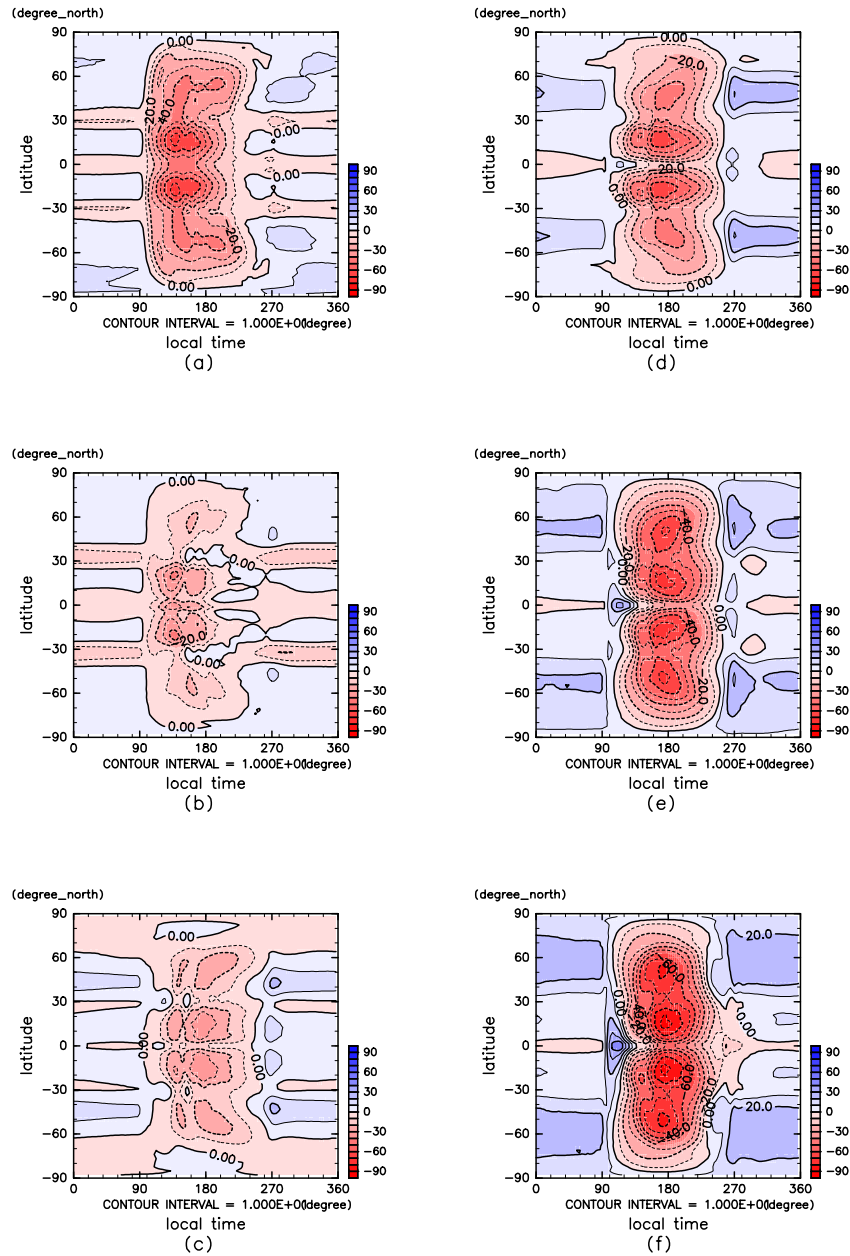


図 J-89: 地表面における顕熱フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1/2 倍, (d) 1/4 倍, (e) 1/8 倍, (f) 1/16 倍.

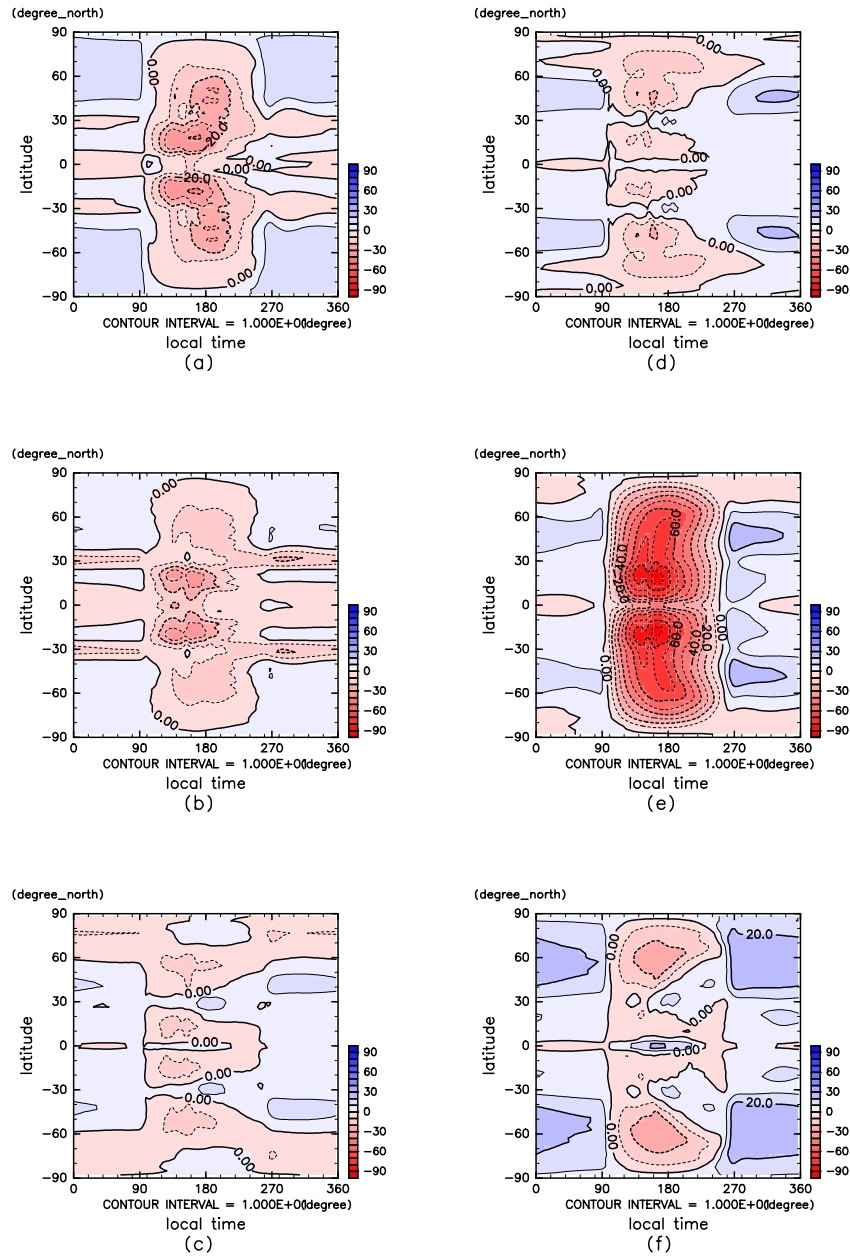


図 J-90: 地表面における顕熱フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1/2 倍, (d) 1/4 倍, (e) 1/8 倍, (f) 1/16 倍.

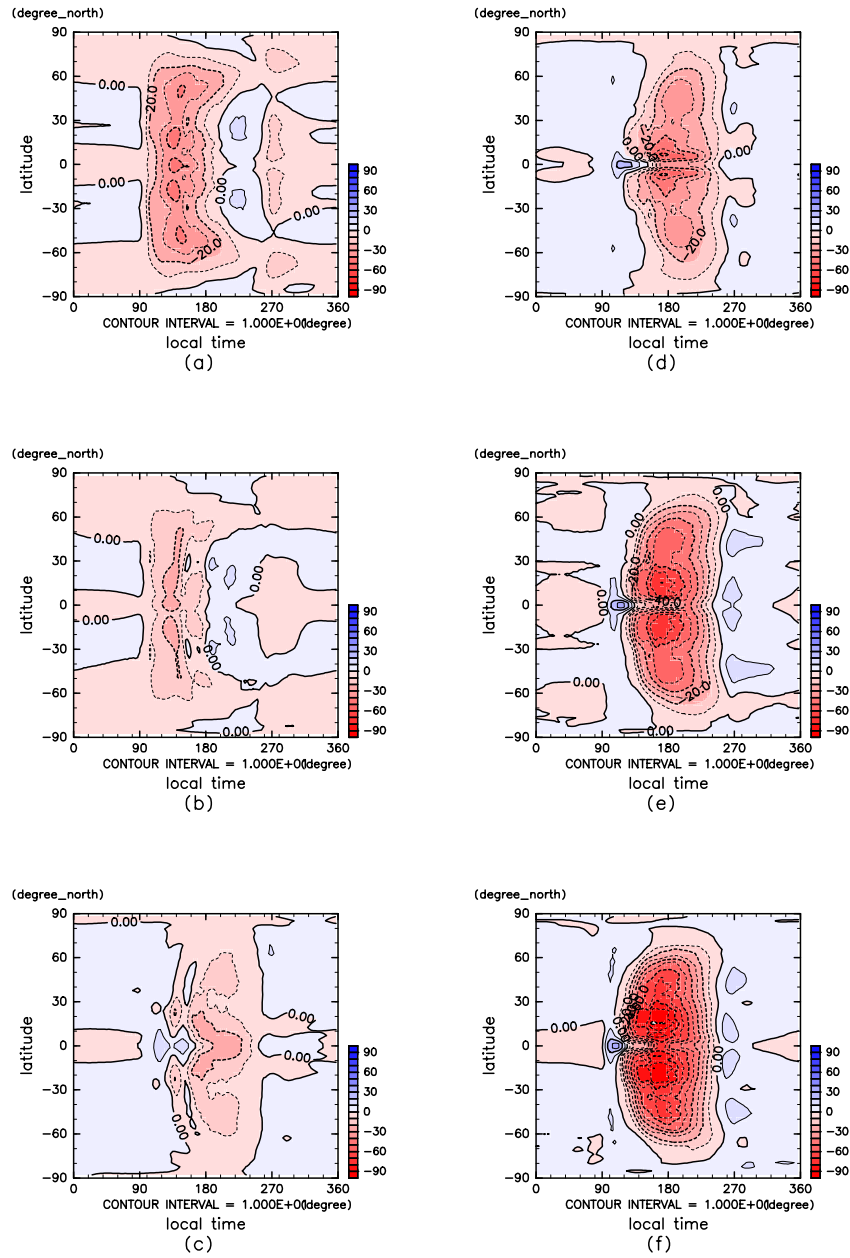


図 J-91: 地表面における顕熱フラックスの緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1/2 倍, (d) 1/4 倍, (e) 1/8 倍, (f) 1/16 倍.

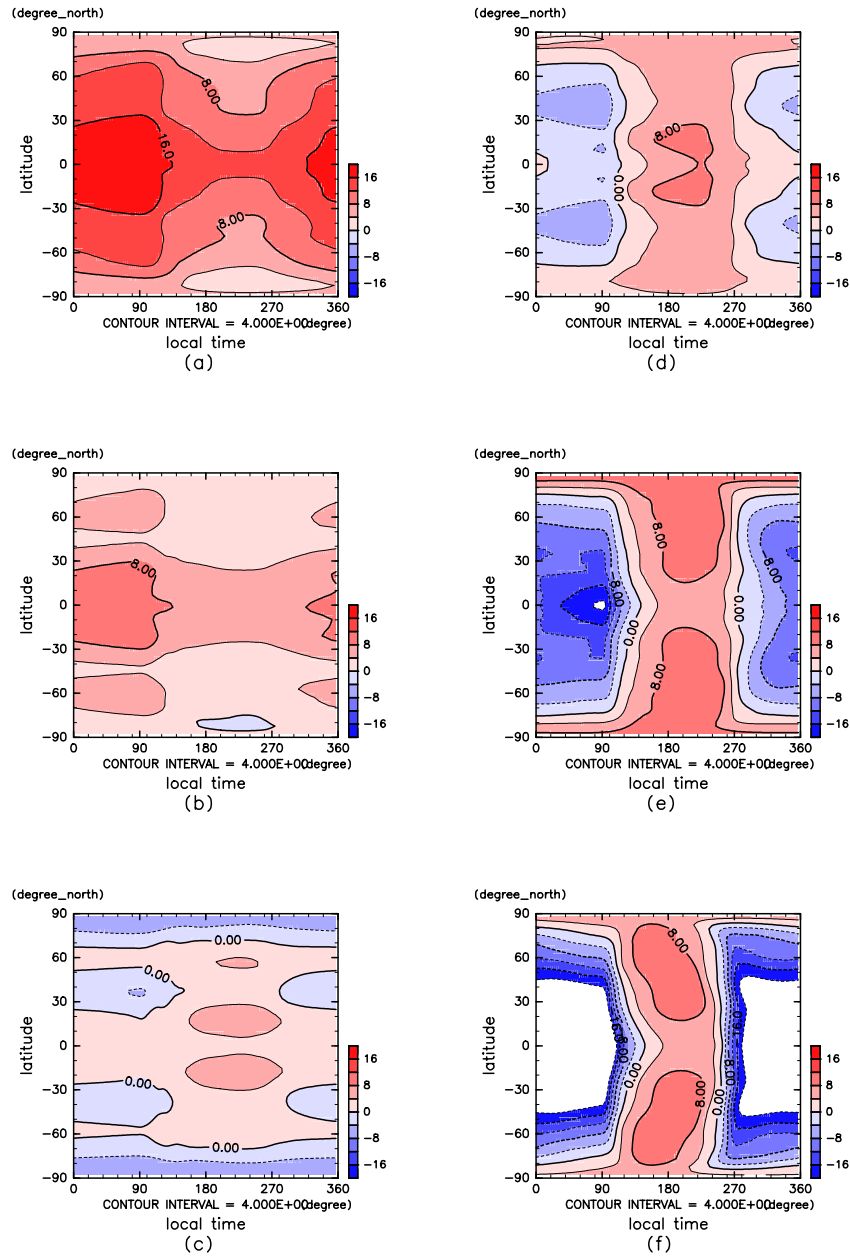


図 J-92: 大気最下層の気温の緯度地方時分布 [K]. 時間平均. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1/2 倍, (d)1/4 倍, (e)1/8 倍, (f)1/16 倍.

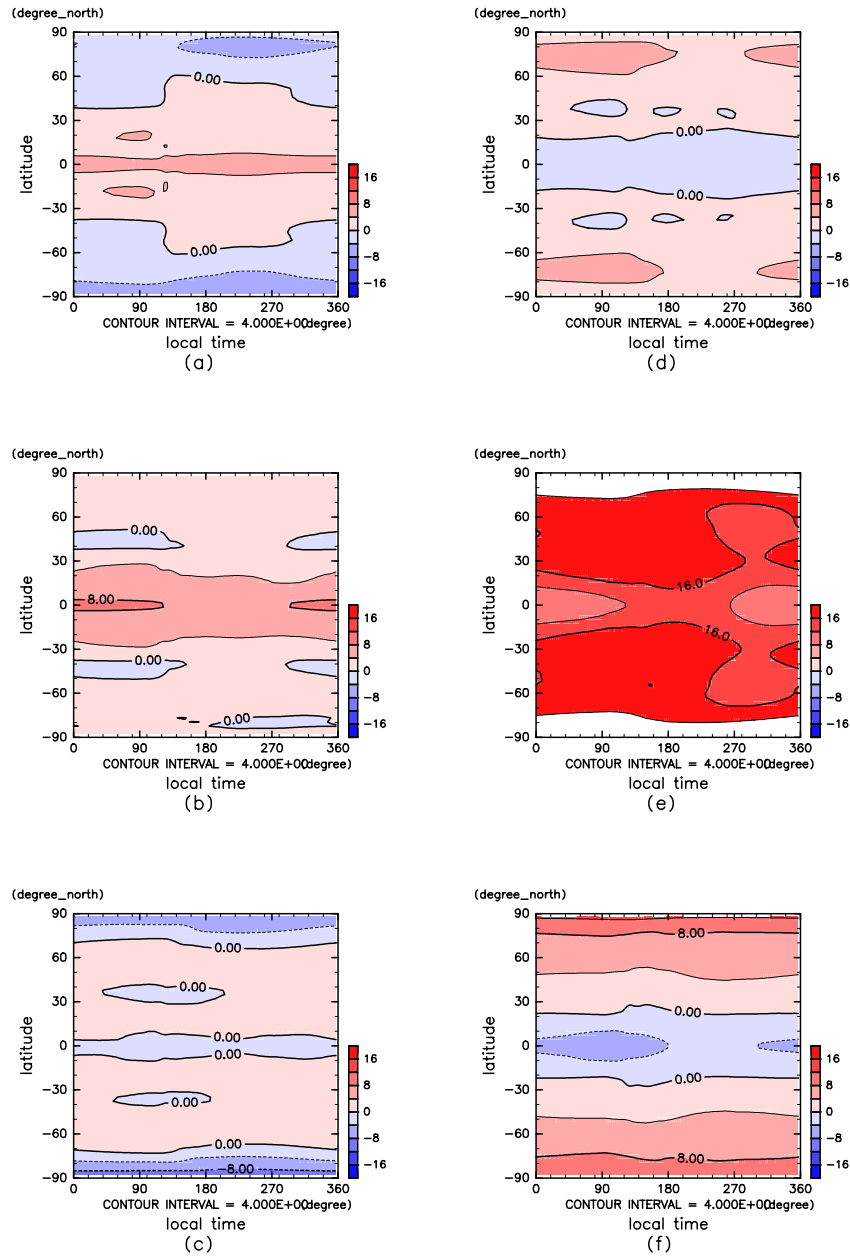


図 J-93: 大気最下層の気温の緯度地方時分布 [K]. 時間平均. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1/2 倍, (d)1/4 倍, (e)1/8 倍, (f)1/16 倍.

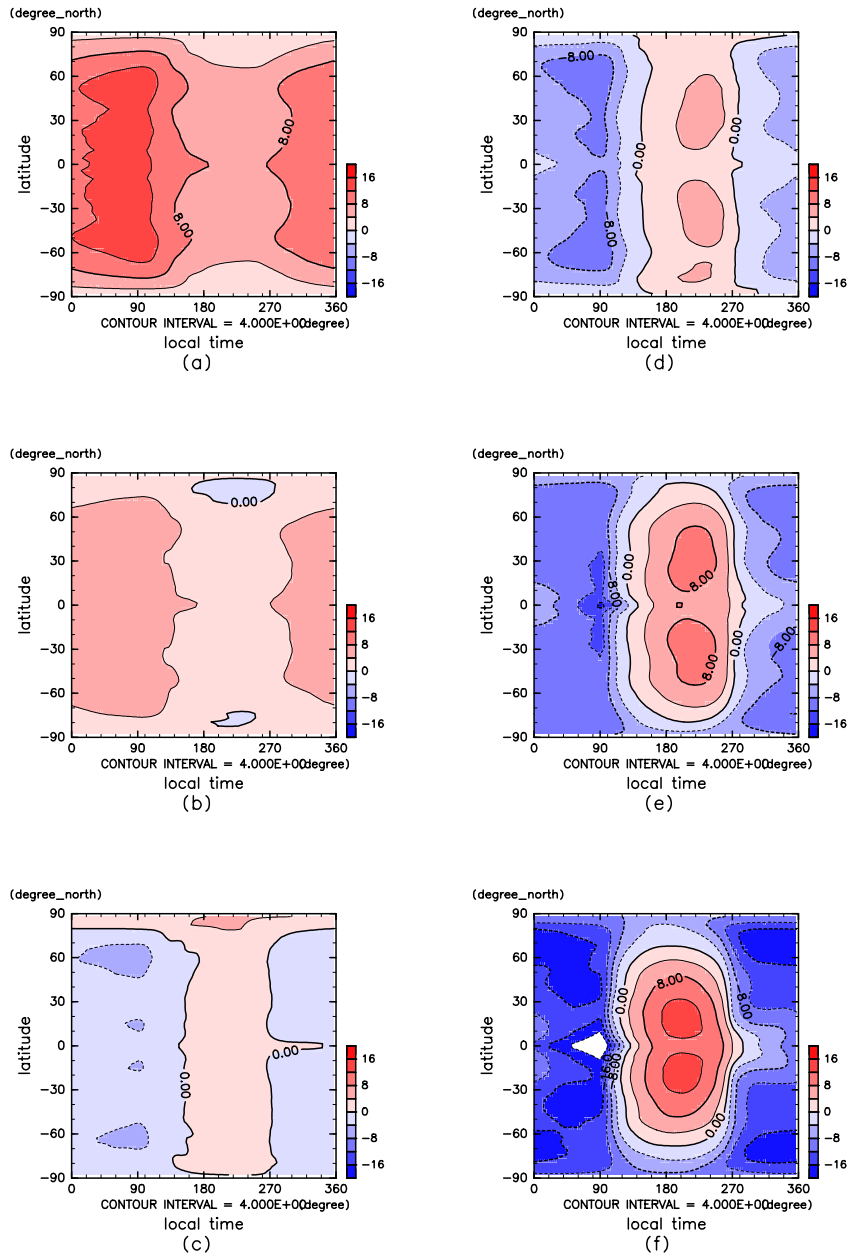


図 J-94: 大気最下層の気温の緯度地方時分布 [K]. 時間平均. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b)2 倍, (c)1/2 倍, (d)1/4 倍, (e)1/8 倍, (f)1/16 倍.

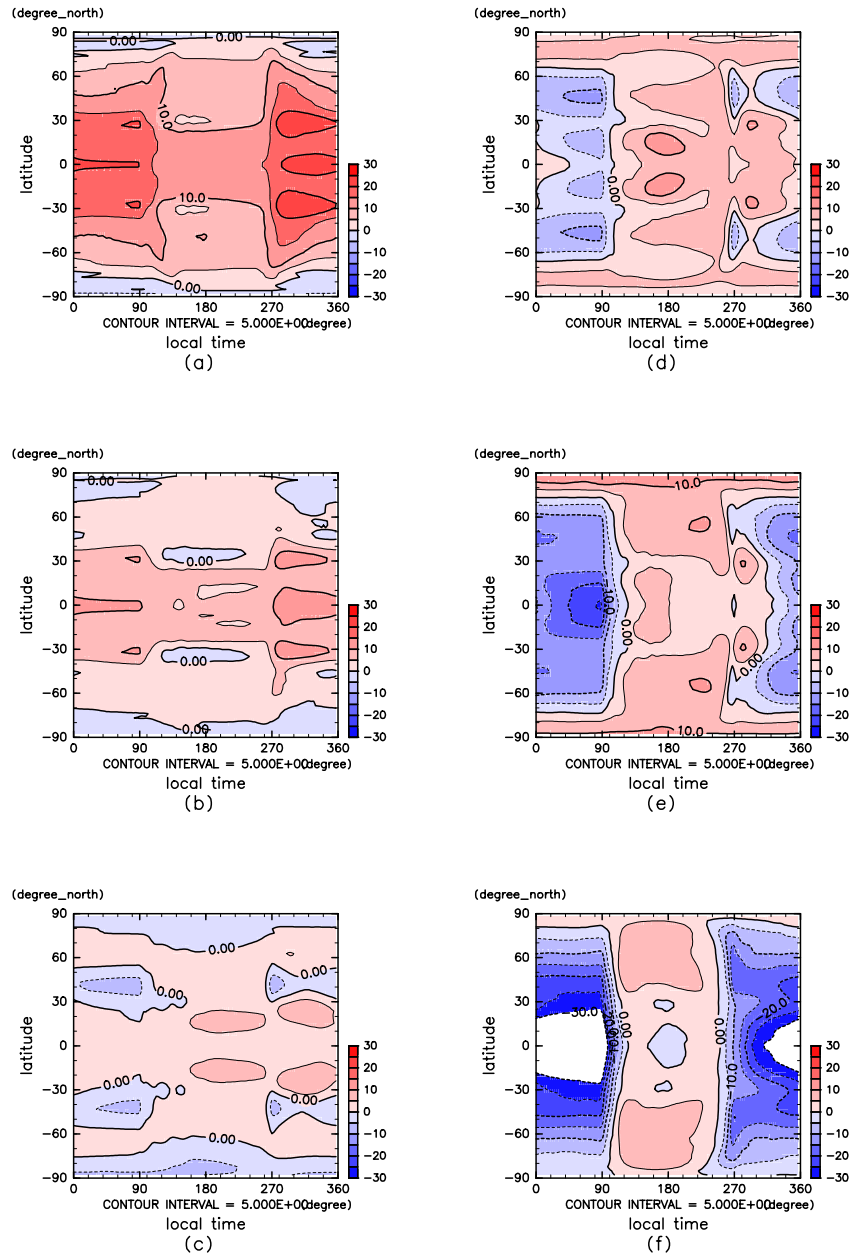


図 J-95: 地表温度の緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1/2 倍, (d) 1/4 倍, (e) 1/8 倍, (f) 1/16 倍.

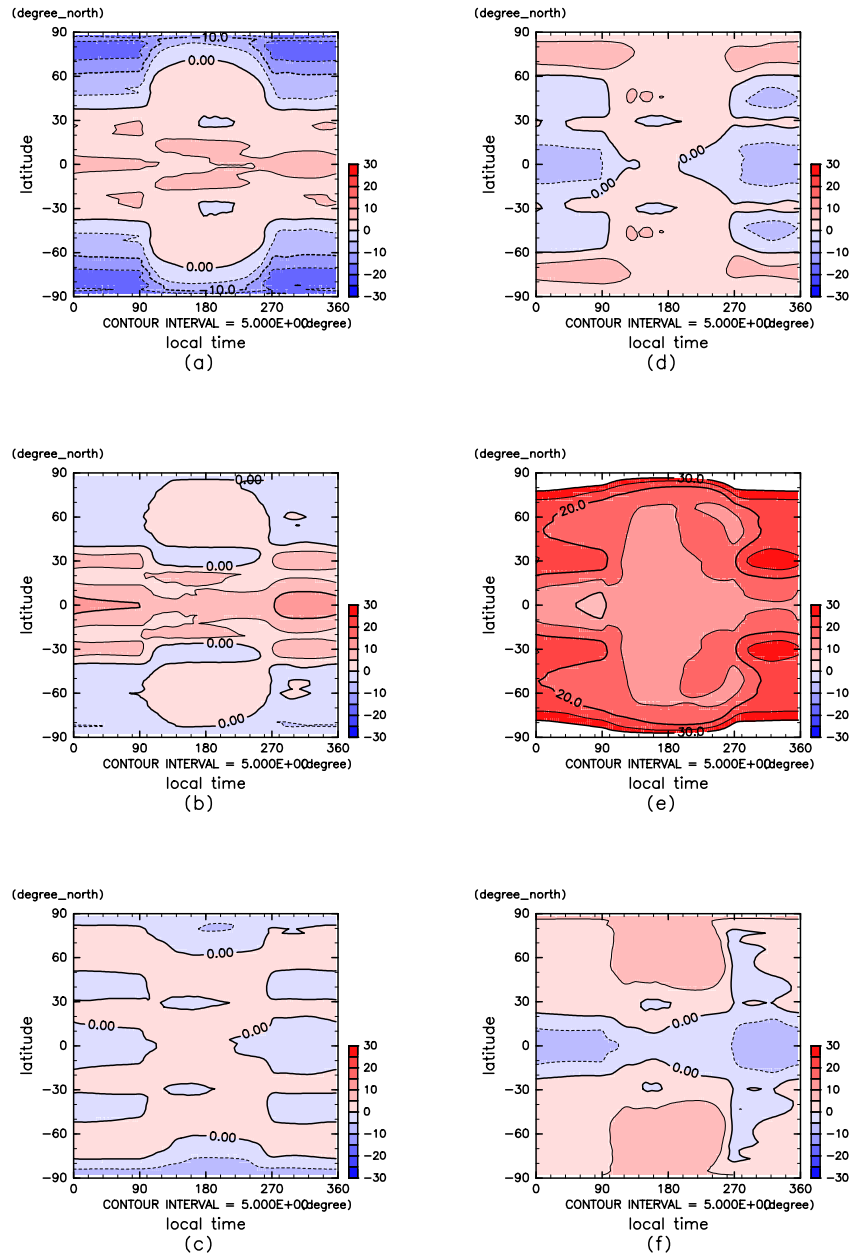


図 J-96: 地表温度の緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1/2 倍, (d) 1/4 倍, (e) 1/8 倍, (f) 1/16 倍.

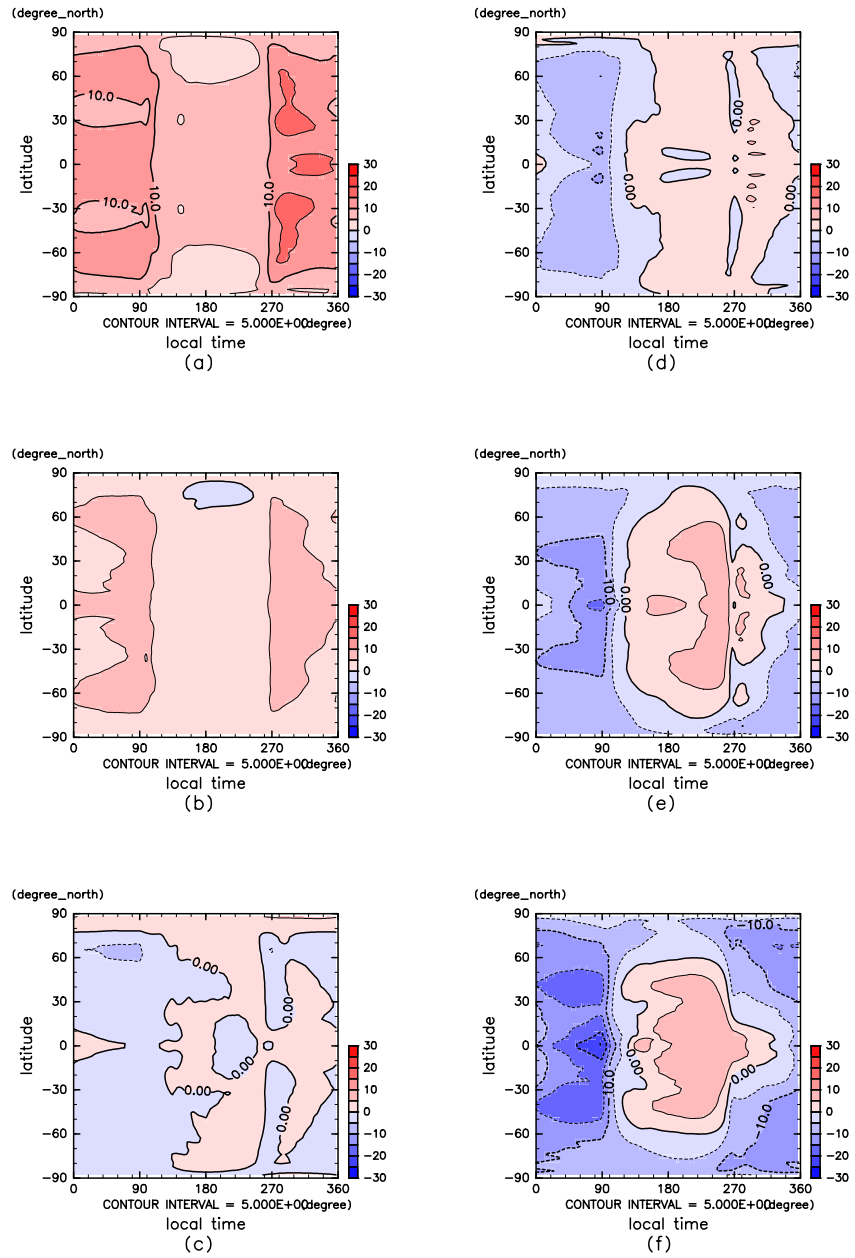


図 J-97: 地表温度の緯度地方時分布 [W/m^2]. 時間平均. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1/2 倍, (d) 1/4 倍, (e) 1/8 倍, (f) 1/16 倍.

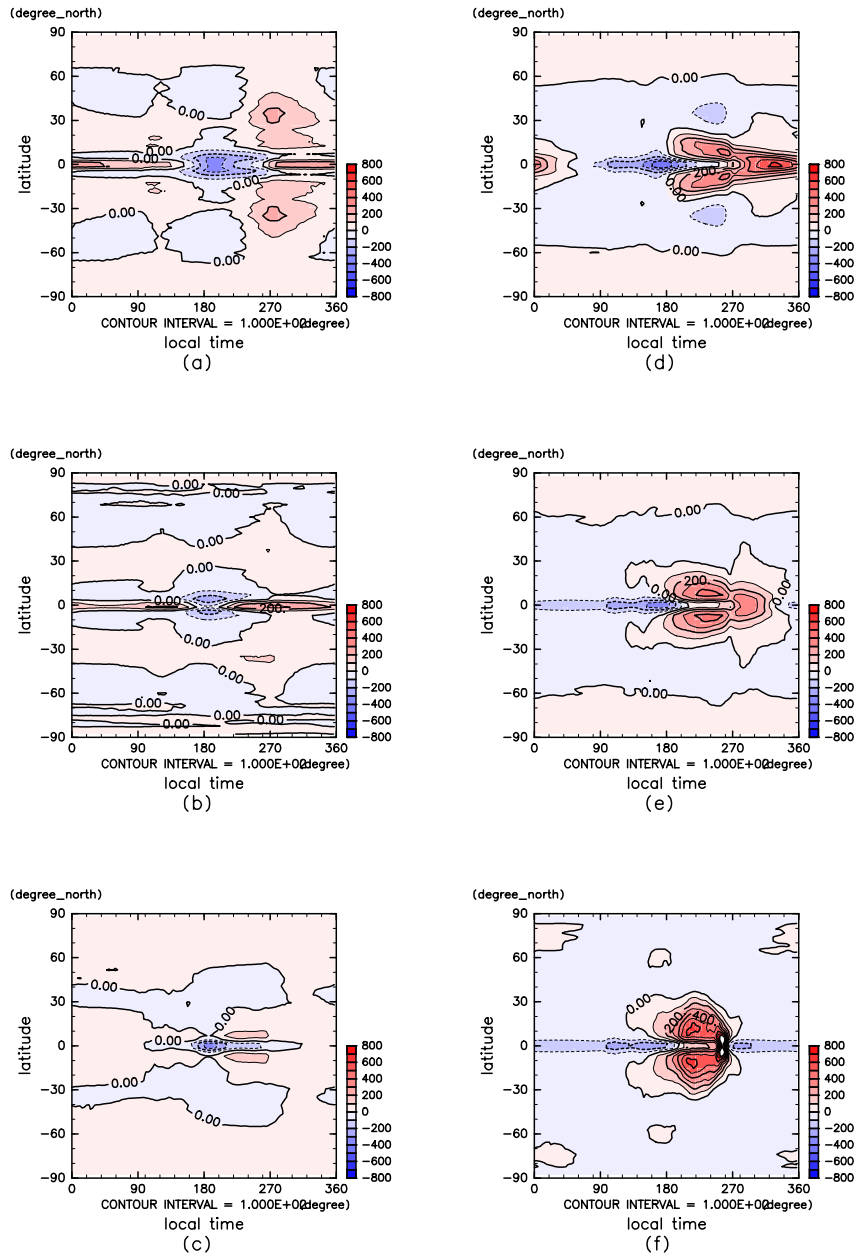


図 J-98: 降水量の緯度地方時分布 [mm/yr]. 時間平均. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1/2 倍, (d) 1/4 倍, (e) 1/8 倍, (f) 1/16 倍.

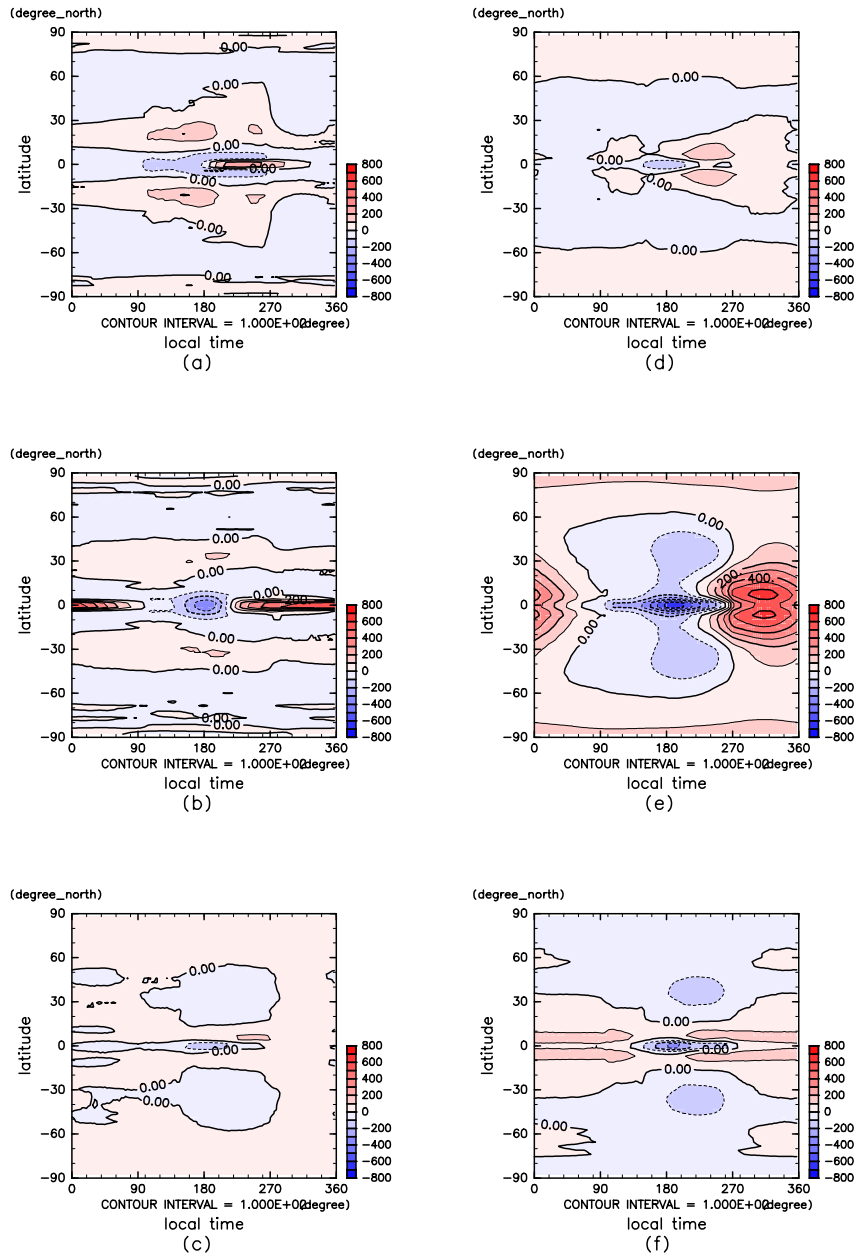


図 J-99: 降水量の緯度地方時分布 [mm/yr]. 時間平均. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1/2 倍, (d) 1/4 倍, (e) 1/8 倍, (f) 1/16 倍.

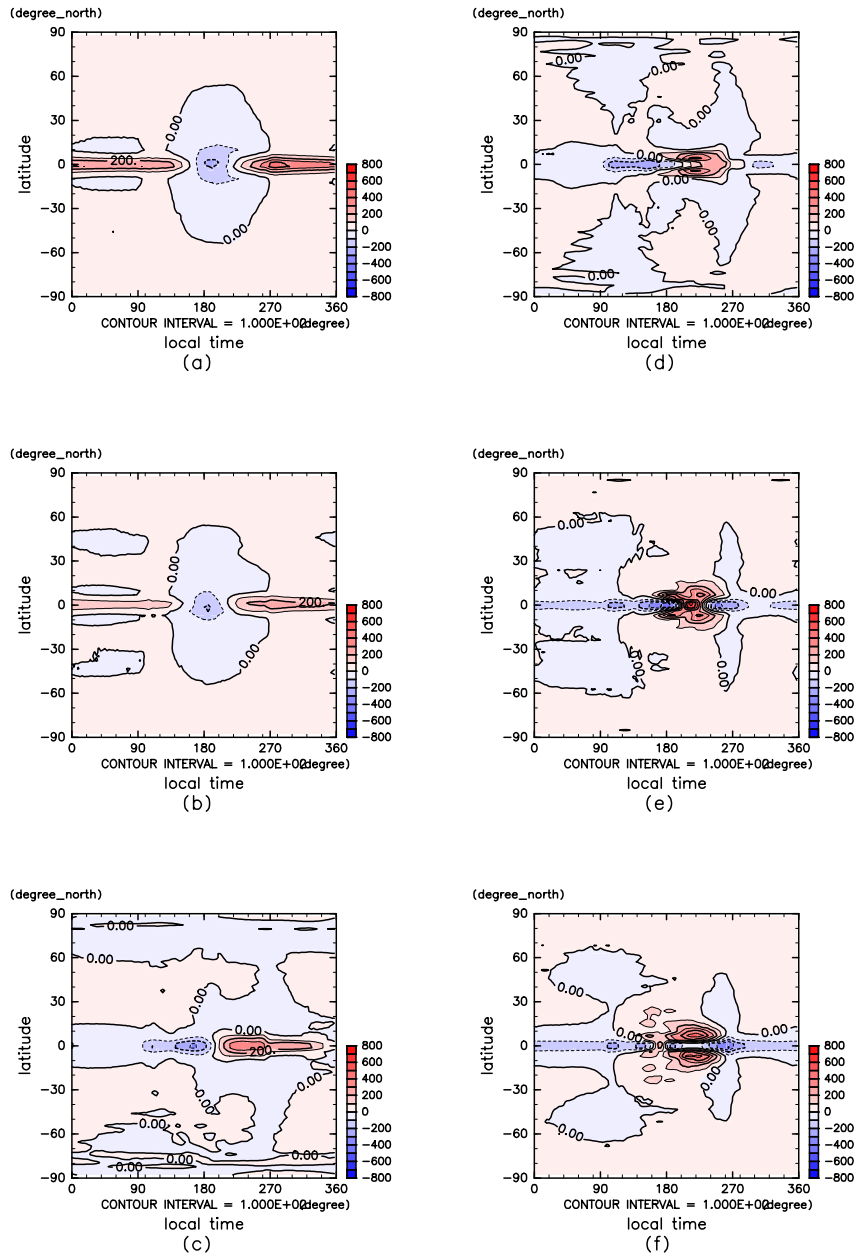


図 J-100: 降水量の緯度地方時分布 [mm/yr]. 時間平均. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1/2 倍, (d) 1/4 倍, (e) 1/8 倍, (f) 1/16 倍.

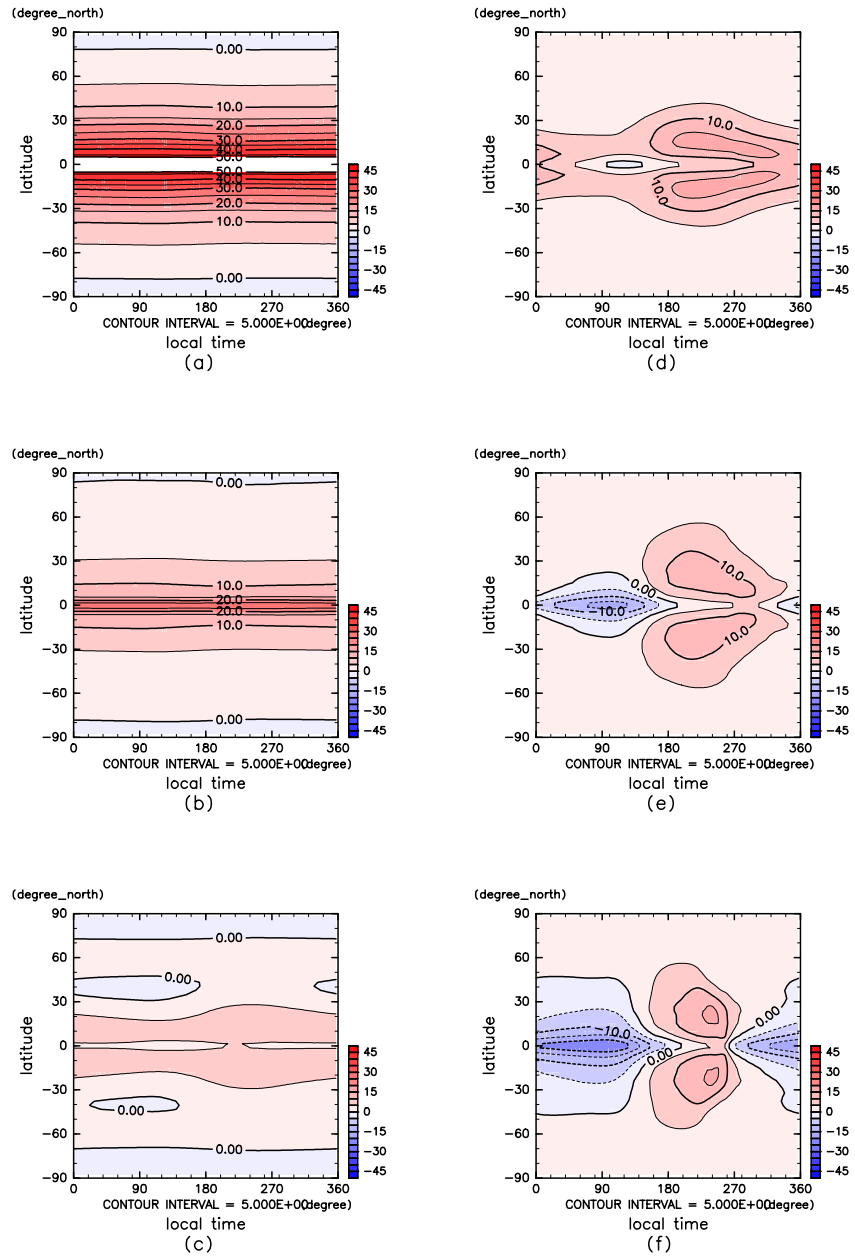


図 J-101: 可降水量の緯度地方時分布 [kg/m²]. 時間平均. 実験 A. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1/2 倍, (d) 1/4 倍, (e) 1/8 倍, (f) 1/16 倍.

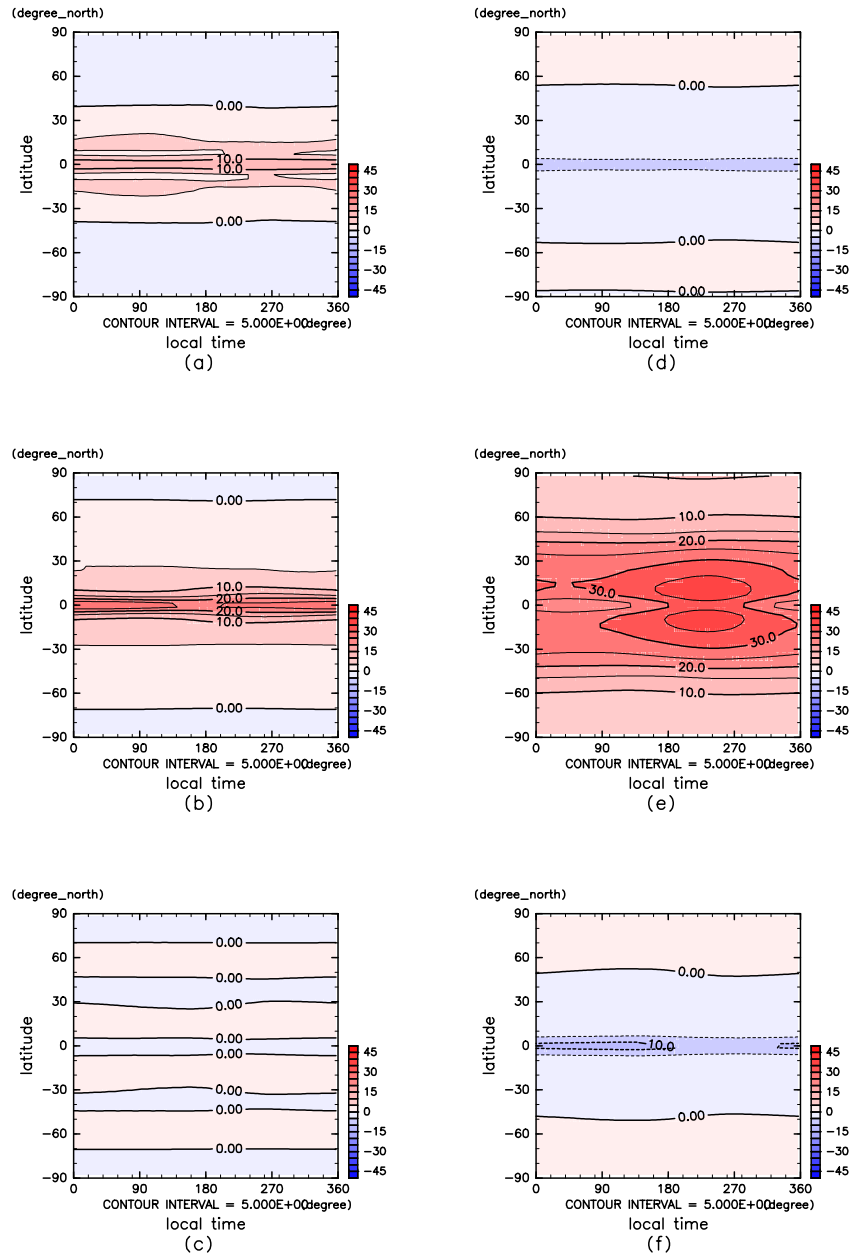


図 J-102: 可降水量の緯度地方時分布 [kg/m²]. 時間平均. 実験 C. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1/2 倍, (d) 1/4 倍, (e) 1/8 倍, (f) 1/16 倍.

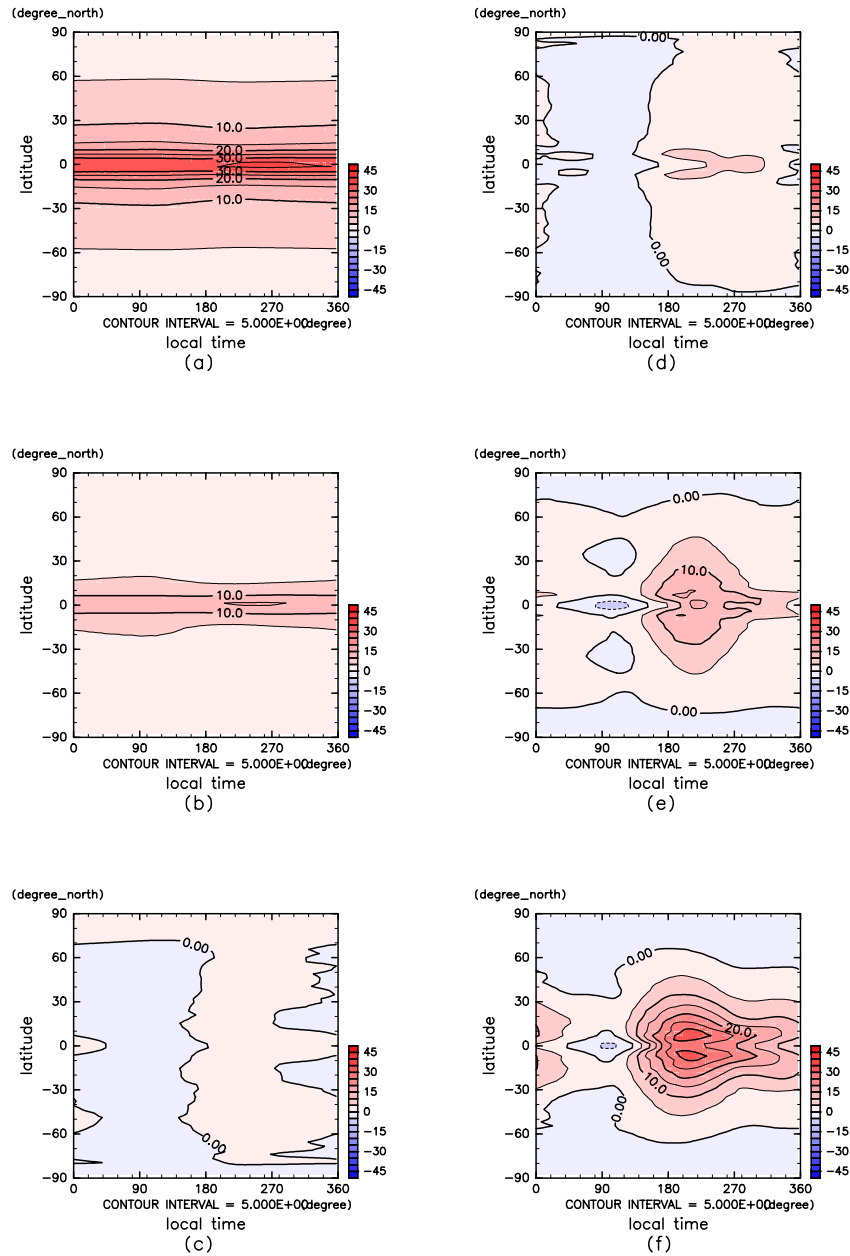


図 J-103: 可降水量の緯度地方時分布 [kg/m^2]. 時間平均. 実験 D. 横軸は地方時, 縦軸は緯度. 図はそれぞれ (a) 自転角速度 4 倍, (b) 2 倍, (c) 1/2 倍, (d) 1/4 倍, (e) 1/8 倍, (f) 1/16 倍.

参考文献

- Held, I.M. and A.Y.Hou, 1980 : Nonlinear axially symmetric circulations in a nearly inviscid atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 37, 515-533.
- 高橋 芳幸, 竹広 真一, 石渡 正樹, 納多 哲史, 小高 正嗣, 堀之内 武, 森川 靖大, 林 祥介, DCPAM 開発グループ, 2011: 惑星大気モデル DCPAM, <http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/>, 地球流体電脳倶楽部.
- Walker, C.C., and T.Schneider, 2006: Eddy Influences on Hadley Circulations: Simulations with an Idealized GCM. *J. Atmos. Soc.*, 63, 3333-3350.
- Williams, G. P., 1988a: The dynamical range of global circulations -I. *Climate Dyn.*, 2, 205-260.
- Williams, G. P., 1988b: The dynamical range of global circulations -II. *Climate Dyn.*, 3, 45-84.