

# 第 1 章 実験結果と考察

## 1.1 雲がある場合の全球平均値の太陽定数依存性

まず最初に、雲がある場合の実験（実験 S1366, S1500, S1600, S1800, S2000）について見る。雲ありの場合について各実験で得られた、全球平均した外向き赤外放射 (OLR) と入射短波放射 (OSR) の時系列図を図 1.1 に示す。この図を見ると、実験 S1366 から S1600（図 1.1a から 1.1e）では、およそ 10 年以上積分をすることで、全球平均の OLR が季節変化しつつも、全球平均 OLR と OSR が  $190 \text{ W/m}^2$  付近でほぼ一致して、大気の状態が平衡になっているように見える。実験 S1800（図 1.1g）でも、OLR と OSR が  $200 \text{ W/m}^2$  付近の値で一致して、大気の状態が平衡になっているよう見える。一方で、S2000（図 1.1i）では、全球平均 OLR が激しく変動している。表 1.1 に OLR と OSR の値の年平均値を示した。実験 S1366 から S1600 では、OLR と OSR の値の差が  $3.0 \text{ W/m}^2$  以下になっていて、この表からも平衡状態に達しているように見える。しかし、実験 S1800 では OLR と OSR の差が  $4.6 \text{ W/m}^2$  と他の実験よりも大きくなっている。また、S2000 では OLR と OSR の差は  $2.0 \text{ W/m}^2$  と大きくはない。

次に、全球平均地表面温度の時系列図を図 1.1 に示す。全球平均地表面温度は、実験 S1366 から S1600（図 1.1b から 1.1f）では地表面温度がそれぞれ  $286 \text{ K}$ ,  $293 \text{ K}$ ,  $298 \text{ K}$  で一定となり、平衡状態に達しているように見える。しかし、実験 S1800 では地表面温度が上昇し続けていて、平衡状態に達していないように見える。また、実験 S2000 では、地表面温度が  $320 \text{ K}$  で一定になっているように見える。

以上のことから、実験 S1366, S1500, S1600 は平衡状態に達しているが、実験 S1800 は全球平均 OLR と OSR に差があり、地表面温度が上昇し続けていて平衡状態に達していない。また、実験 S2000 に関しては、全球平均値を見ただけでは判断できないが、これから示すように平衡状態に

表 1.1: 雲あり各実験での OLR と OSR の年平均値。

実験	OLR [ $\text{W/m}^{-2}$ ]	OSR [ $\text{W/m}^{-2}$ ]	地表面温度 [K]	平均をとった年度
S1366	187.5	186.8	286	41
S1500	190.9	190.4	293	11
S1600	191.1	193.3	298	11
S1800	195.7	200.3	307	11
S2000	184.9	182.9	320	21

なっておらず、大気の状態を正しく表現できていない可能性がある。

次に、雲あり各実験での OLR の東西平均を図 1.2a に、地表面温度の東西平均を図 1.2b に示す。図 1.2a を見ると、実験 S1366 から S1800 までは、OLR の東西平均の南北分布に特徴的なパターンがあるのが見える。低緯度では OLR の値が小さく、中緯度で大きくなり、高緯度で小さくなっている。赤道での OLR の値は、実験 S1366, S1500, S1600, S1800 の順で、 $125 \text{ W/m}^2, 135 \text{ W/m}^2, 145 \text{ W/m}^2, 175 \text{ W/m}^2$  となっていて、中緯度のピークの値はそれぞれ南半球・北半球ともに  $240 \text{ W/m}^2, 250 \text{ W/m}^2, 245 \text{ W/m}^2, 238 \text{ W/m}^2$  となって、そのピークが現れる緯度が高緯度側に移動している。実験 S2000 では他の実験とは違い、低緯度で OLR の値が小さくなっておらず、中緯度にもピークが現れておらず、他の実験とは異なるパターンになっている。このように、OLR の値は実験 S1366 から S1600 までは太陽定数が大きくなるにつれて南北の差が小さくなっている。地表面温度（図 1.2b）を見ると、どの実験でも赤道で地表面温度が高く、極で地表面温度が低くなっている。赤道での地表面温度は、実験 S1366, S1500, S1600, S1800, S2000 の順で、 $296 \text{ K}, 302 \text{ K}, 306 \text{ K}, 314 \text{ K}, 324 \text{ K}$  となっている。極での地表面温度はそれぞれ  $270 \text{ K}, 281 \text{ K}, 288 \text{ K}, 298 \text{ K}, 317 \text{ K}$  となっている。極と赤道の地表面温度の差はそれぞれ、 $14 \text{ K}, 19 \text{ K}, 18 \text{ K}, 16 \text{ K}, 7 \text{ K}$  となっていて、実験 S1366 から S1500 にかけては地表面温度の南北差が一旦大きくなっているが、実験 S1600 では小さくなっている。

以上のことから、実験 S1366, S1500, S1600 に関しては、灰色大気・雲なしのモデルで Ishiwatari *et al.* (2002) が結論したように、非灰色大気・雲ありのモデルでも、太陽定数の増大に伴って、南北に一様になるということが言えよう。

実験 S1800 では、先述したように、OLR と OSR の差が大きく、地表面温度が時間に応じて増大している。したがって、実験 S1800 では暴走温室状態になっていると考えられる。実験 S2000 で OLR の東西平均が他の太陽定数とは異なるパターンを示しているのは、この実験でも暴走温室状態になっており、大気の状態が正しく表現されていないものと想像できる。そのため、実験 S1800, S2000 に関しては、積分時間をさらに延長しなければ詳しく議論をすることはできないだろう。

## 1.2 雲がある場合の大気構造の太陽定数依存性

次に、雲あり各実験で得られた大気構造がどのようにになっているか詳細に見てゆこう。雲あり各実験で得られた子午面構造を図 1.3 から 1.7 に示す。東西風の子午面分布（図 1.3a から 1.7a）を見ると、いずれも南北で対称な分布となっていて、実験 S1366（図 1.3a）では緯度  $30^\circ$ ,  $\sigma = 0.1$  に  $60 \text{ m/s}$  の、実験 S1500（図 1.4a）では緯度  $40^\circ$ ,  $\sigma = 0.1$  に  $70 \text{ m/s}$  の、実験 S1600（図 1.5a）では緯度  $40^\circ$ ,  $\sigma = 0.05$  に  $80 \text{ m/s}$  の、実験 S1800（図 1.6a）では緯度  $50^\circ$ ,  $\sigma = 0.0$  に  $90 \text{ m/s}$  の、実験 S2000（図 1.7a）では緯度  $40^\circ$ ,  $\sigma = 0.0$  に  $80 \text{ m/s}$  の東向きの風が吹いている。このことから、実験 S1366 から S1600 ではジェットが発生していることがわかる。しかし、S1800 と S2000 ではジェットが大気上端に達しており、モデルの高度が足りていない可能性がある。

子午面の循環構造に関する見ても見てゆこう。図 1.3b から 1.7b に南北風の子午面分布を、図 1.3c か

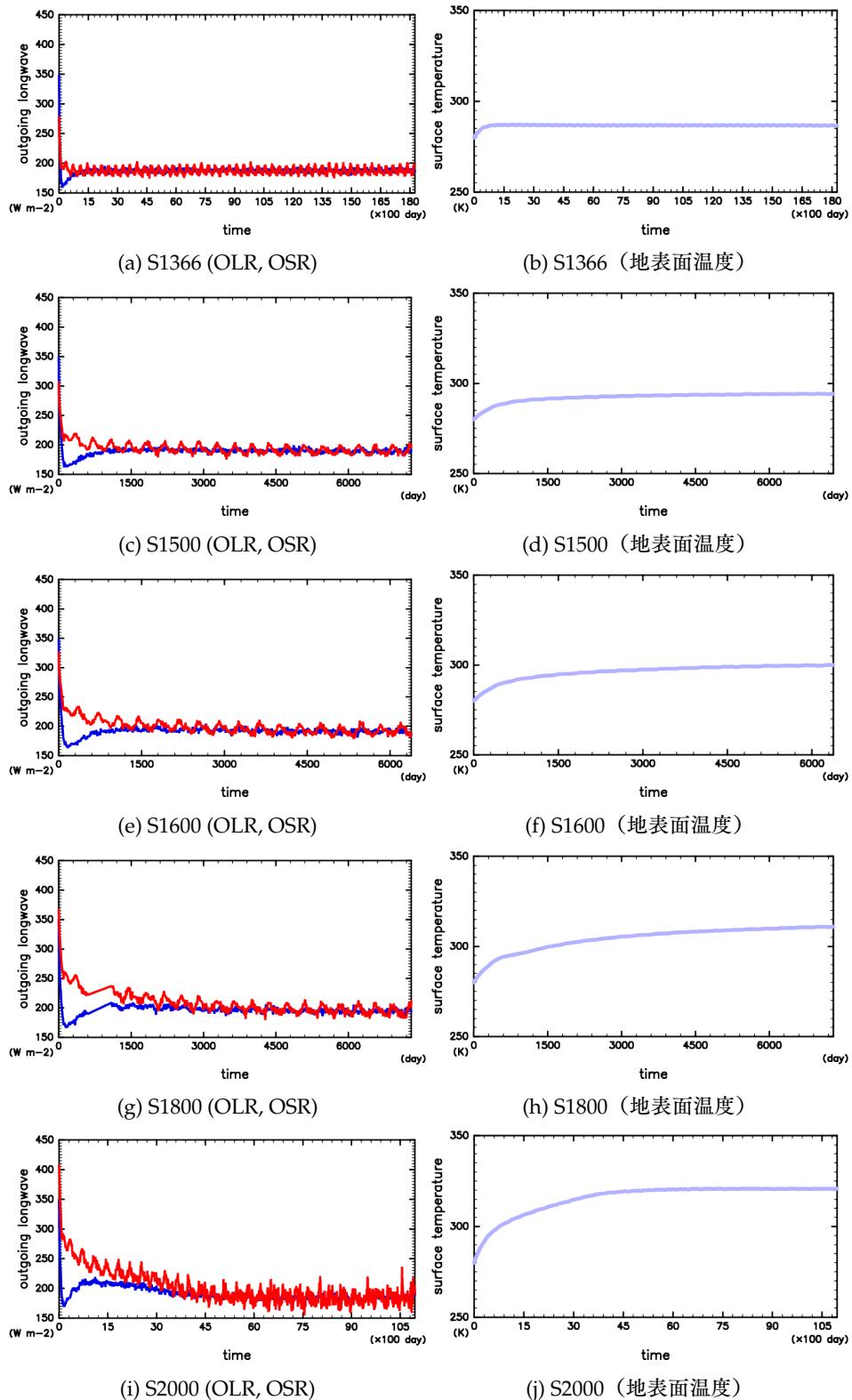


図 1.1: (a, c, e, g, i) 雲あり各実験での全球平均した OLR (赤線) と OSR (青線) の時系列変化。横軸は時刻で、縦軸は OLR, OSR の値 [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]。(b, d, f, h, j) 雲あり各実験での全球平均地表面温度の時系列変化。横軸は時刻で、縦軸は全球平均地表面温度 [K]。

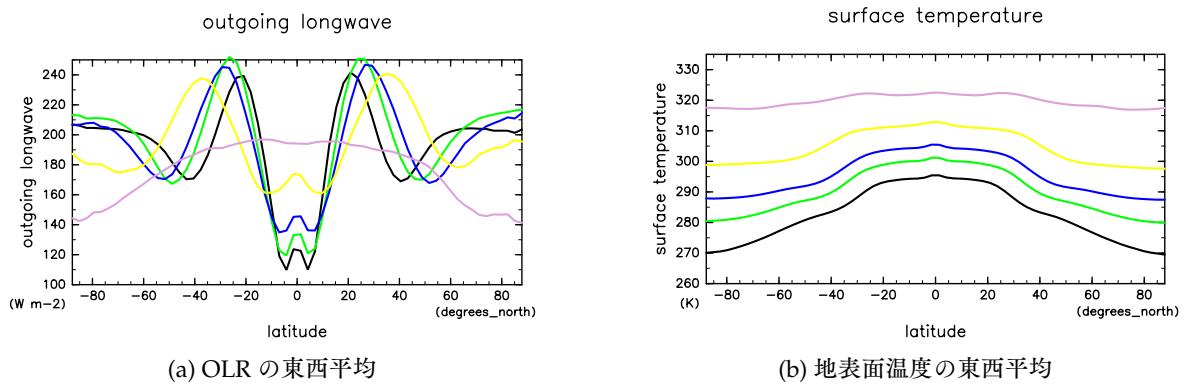


図 1.2: 雲あり各実験での OLR と地表面温度の東西平均の南北分布。それぞれ年平均した値で、黒線: S1366; 緑線: S1500; 青線: S1600; 黄線: S1800; 桃線: S2000 の結果である。横軸は緯度で、縦軸はそれぞれ (a) OLR の東西平均 [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] と、(b) 地表面温度の東西平均 [K] である。

ら [1.7c](#) に質量流線関数の子午面分布を示す。地表面付近の南北風は、いずれも南北で対称な分布となっていて、実験 S1366 ([図 1.3b](#)) では緯度  $10^\circ$  で  $5 \text{ m/s}$  の、実験 S1500 ([図 1.4b](#)) では緯度  $10^\circ$  で  $5 \text{ m/s}$  の、実験 S1600 ([図 1.5b](#)) では緯度  $13^\circ$  で  $4 \text{ m/s}$  の、実験 S1800 ([図 1.6b](#)) では緯度  $20^\circ$  で  $2 \text{ m/s}$  の、実験 S2000 ([図 1.7b](#)) では緯度  $10^\circ$  で  $0.5 \text{ m/s}$  の低緯度向きの風が吹いている。また、実験 S1366 ([図 1.3b](#)) では緯度  $35^\circ$  で  $3 \text{ m/s}$  の、実験 S1500 ([図 1.4b](#)) では緯度  $40^\circ$  で  $3.5 \text{ m/s}$  の、実験 S1600 ([図 1.5b](#)) では緯度  $43^\circ$  で  $4 \text{ m/s}$  の、実験 S1800 ([図 1.6b](#)) では緯度  $50^\circ$  で  $2 \text{ m/s}$  の、実験 S2000 ([図 1.7b](#)) では緯度  $40^\circ$  で  $0.5 \text{ m/s}$  の高緯度向きの風が吹いている。高高度では、実験 S1366 ([図 1.3a](#)) では緯度  $10^\circ$ 、 $\sigma = 0.2$  に  $3 \text{ m/s}$  の、実験 S1500 ([図 1.4a](#)) では緯度  $10^\circ$ 、 $\sigma = 0.2$  に  $2.5 \text{ m/s}$  の、実験 S1600 ([図 1.5a](#)) では緯度  $13^\circ$ 、 $\sigma = 0.1$  に  $2 \text{ m/s}$  の、実験 S1800 ([図 1.6a](#)) では緯度  $15^\circ$ 、 $\sigma = 0.05$  に  $2 \text{ m/s}$  の、高緯度向きの風が吹いているが、実験 S2000 では上空での高緯度向きの風は不明瞭である。このように、実験 S1366 から S1600 では、地表面付近に「低緯度向きの南北風」「高緯度向きの南北風」「低緯度向きの南北風」が低緯度から順に現れていることが読み取れる。質量流線関数をみると、いずれの実験でも南北対称な分布となっていて、実験 S1366 ([図 1.3c](#)) では赤道で上昇流、緯度  $30^\circ$  で下降流、緯度  $45^\circ$  で上昇流が、実験 S1500 ([図 1.4c](#)) では赤道で上昇流、緯度  $30^\circ$  で下降流、緯度  $50^\circ$  で上昇流が、実験 S1600 ([図 1.5c](#)) では赤道で上昇流、緯度  $30^\circ$  で下降流、緯度  $55^\circ$  で上昇流が、実験 S1800 ([図 1.6c](#)) では赤道で上昇流、緯度  $35^\circ$  で下降流、緯度  $70^\circ$  で上昇流が、実験 S2000 ([図 1.7c](#)) では赤道で上昇流、緯度  $30^\circ$  で下降流、緯度  $60^\circ$  で上昇流が現れている。そして、太陽定数が大きくなるにつれて、質量流線関数の等価線の間隔が広くなり、循環が弱くなっているのがわかる。実験 S1366 から S1600 で現れるこのパターンは、ハドレー循環・フェレル循環・極循環に対応していると考えられ、太陽定数が大きくなるにつれて、その循環は弱くなっている。実験 S1800 では、ハドレー循環とフェレル循環は確認することができるが、極循環は無くなっていることがわかる。実験 S2000 では、ハドレー循環とフェレル循環も明瞭ではなくになっている。

比湿 ([図 1.3e](#) から [図 1.7e](#)) や気温分布 ([図 1.3d](#) から [図 1.7d](#)) は、いずれの太陽定数でも低緯度の地表面付近で大きくなっている、太陽定数が大きくなるにつれて大きくなり、南北の差が小さくなっていることがわかる。

### 1.3 雲がある場合の南北熱輸送の太陽定数依存性

ここまで、雲あり各実験でどのような子午面構造が現れているかをみてきた。次からは、雲あり各実験で、どのような南北熱輸送が起きているかを示す。南北熱輸送を  $F_T = F_D + F_L$  と書く。ここで、 $F_L$  は潜熱による南北熱輸送で、 $F_D$  は乾燥静的エネルギーによる熱輸送である。乾燥静的エネルギーはエンタルピーとジオポテンシャルの和であるから、それぞれ式で表せば以下のように

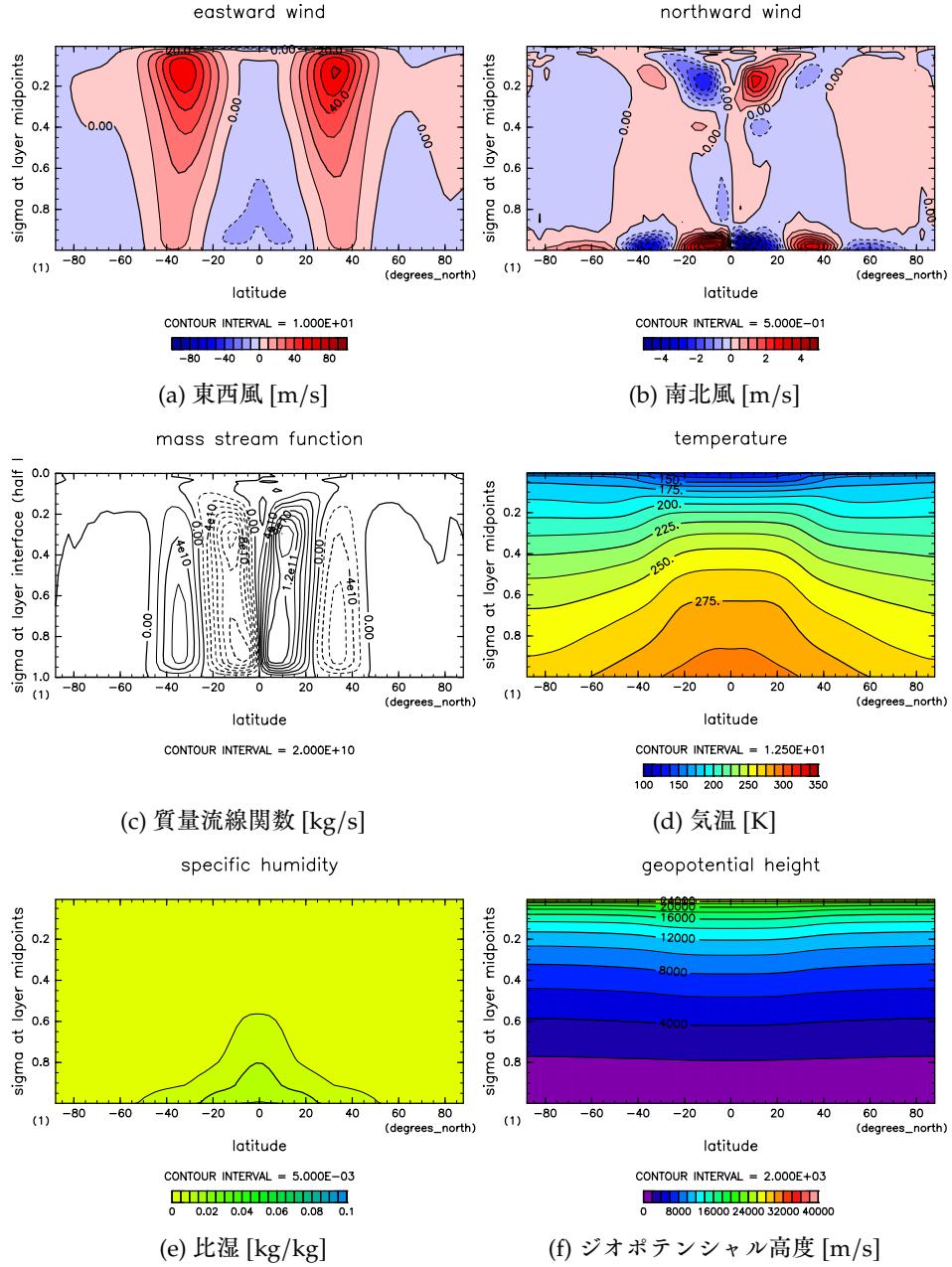


図 1.3: 実験 S1366 の各物理量の子午面分布。いずれも 41 年目の値を緯度平均、時間平均（間隔 0.25 日）した図を示す。(a) 東西風の等値線間隔は  $10 \text{ m/s}$ 、(b) 南北風の等値線間隔は  $0.5 \text{ m/s}$ 、(c) 質量流線関数の等値線間隔は  $2 \times 10^{-10} \text{ kg/s}$ 、(d) 気温分布の等値線間隔は  $12.5 \text{ K}$ 、(e) 比湿の等値線間隔は  $5 \times 10^{-3} \text{ kg/kg}$ 、(f) ジオポテンシャル高度の等値線間隔は  $2000 \text{ m}$  である。

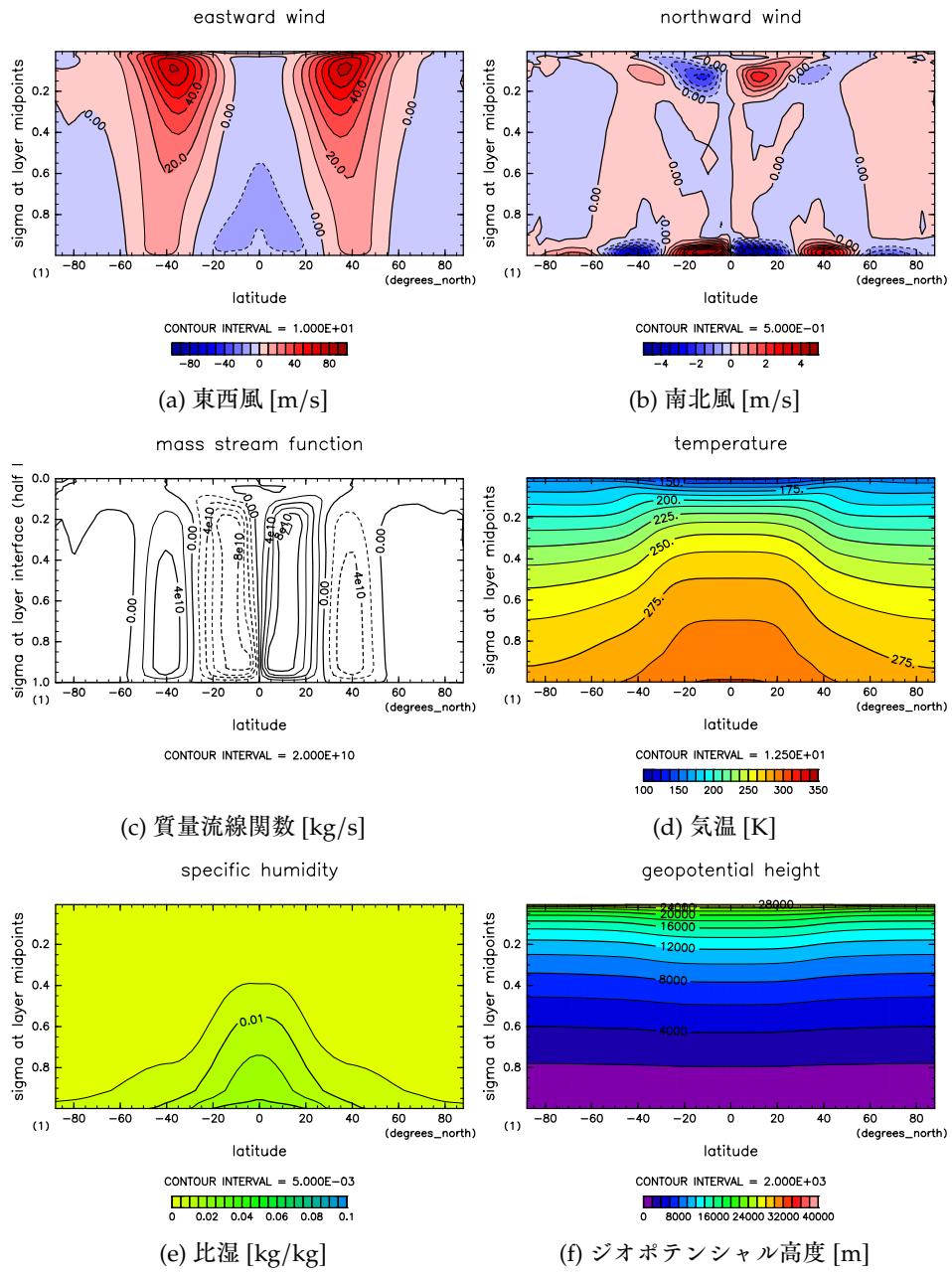


図 1.4: 実験 S1500 の各物理量の子午面分布。図 1.3 と同様の図であるが、11 年目の年平均値である。

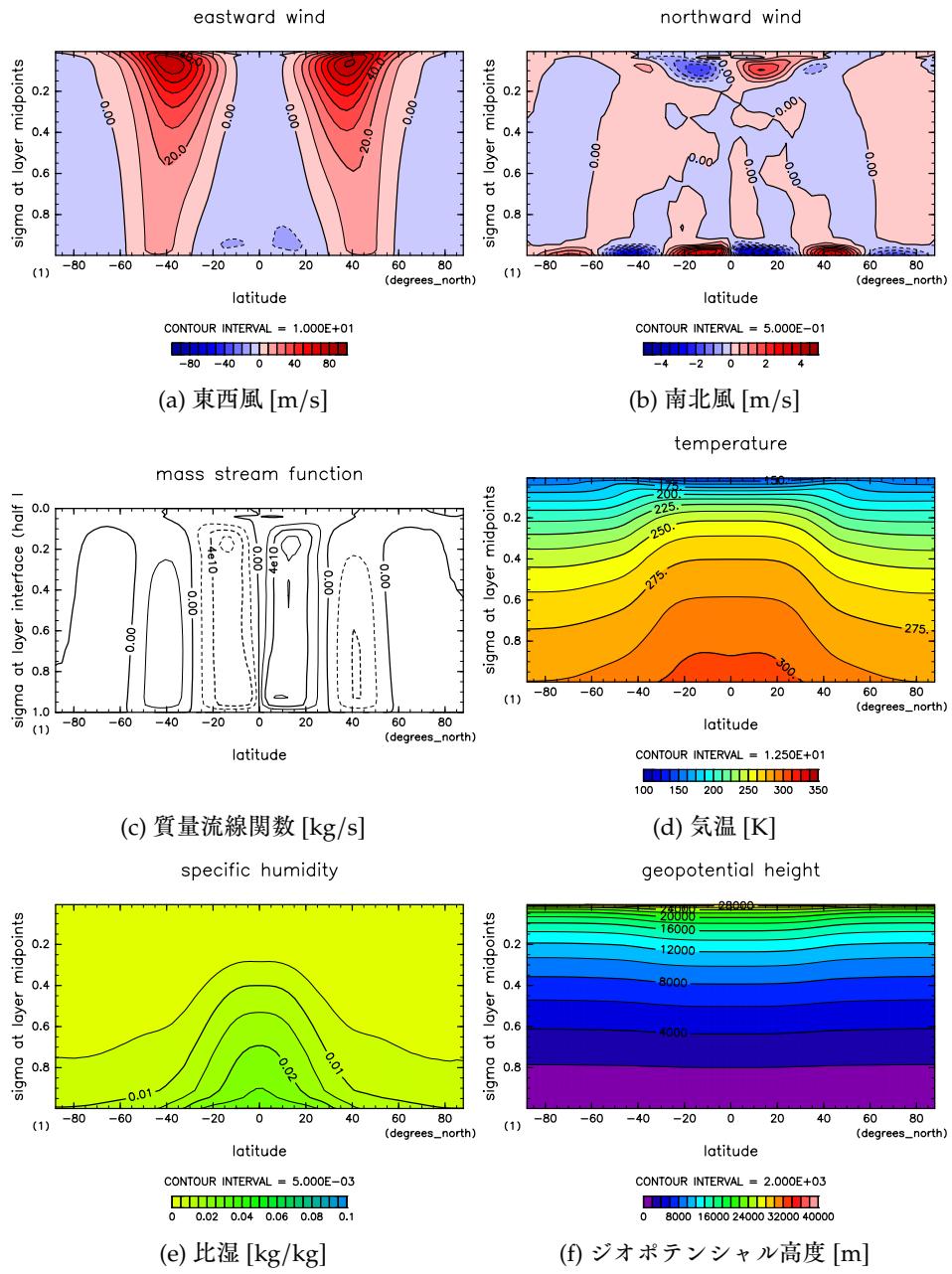


図 1.5: 実験 S1600 の各物理量の子午面分布。図 1.3 と同様の図であるが、11 年目の年平均値である。

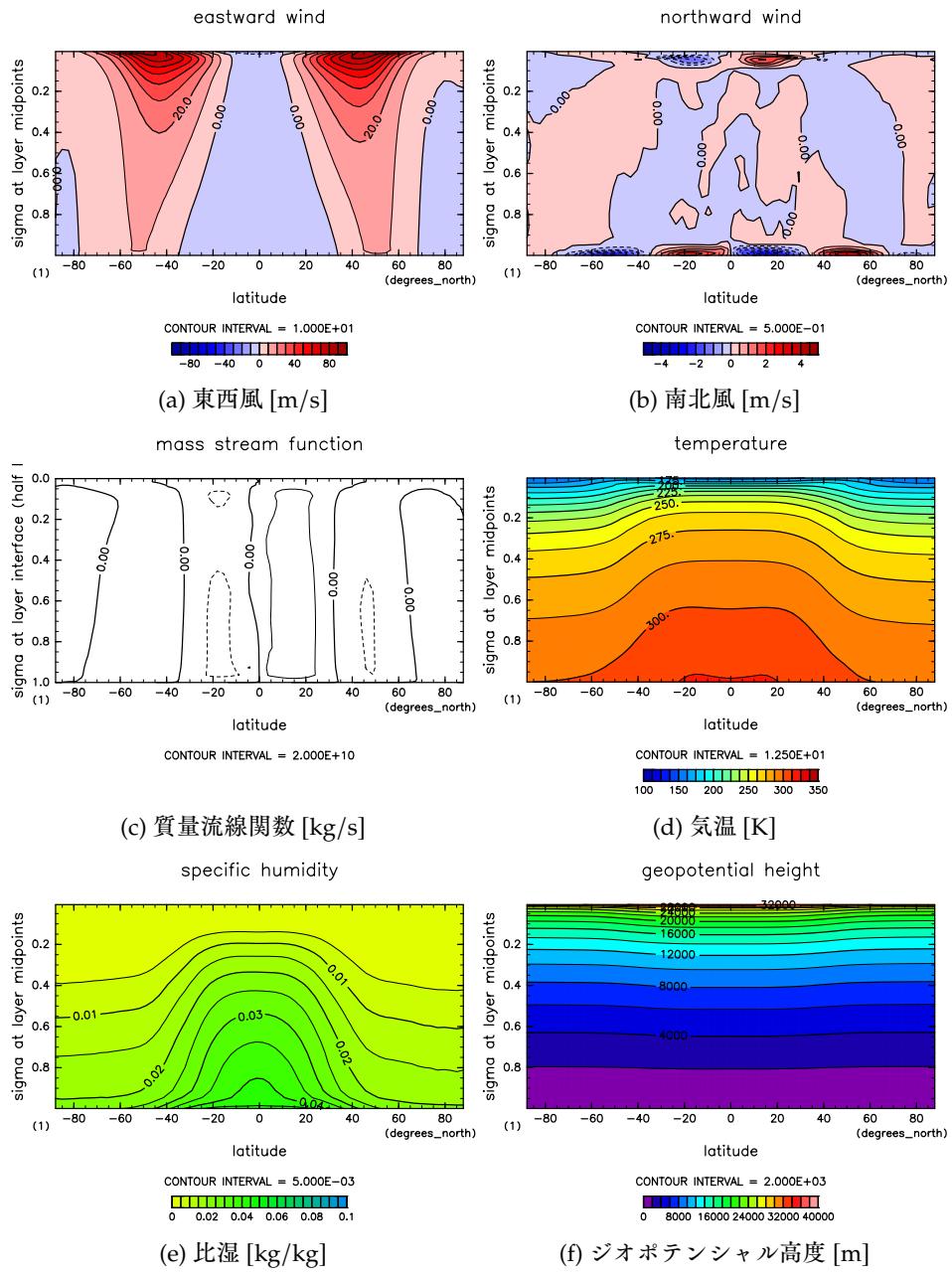


図 1.6: 実験 S1800 の各物理量の子午面分布。図 1.3 と同様の図であるが、11 年目の年平均値である。

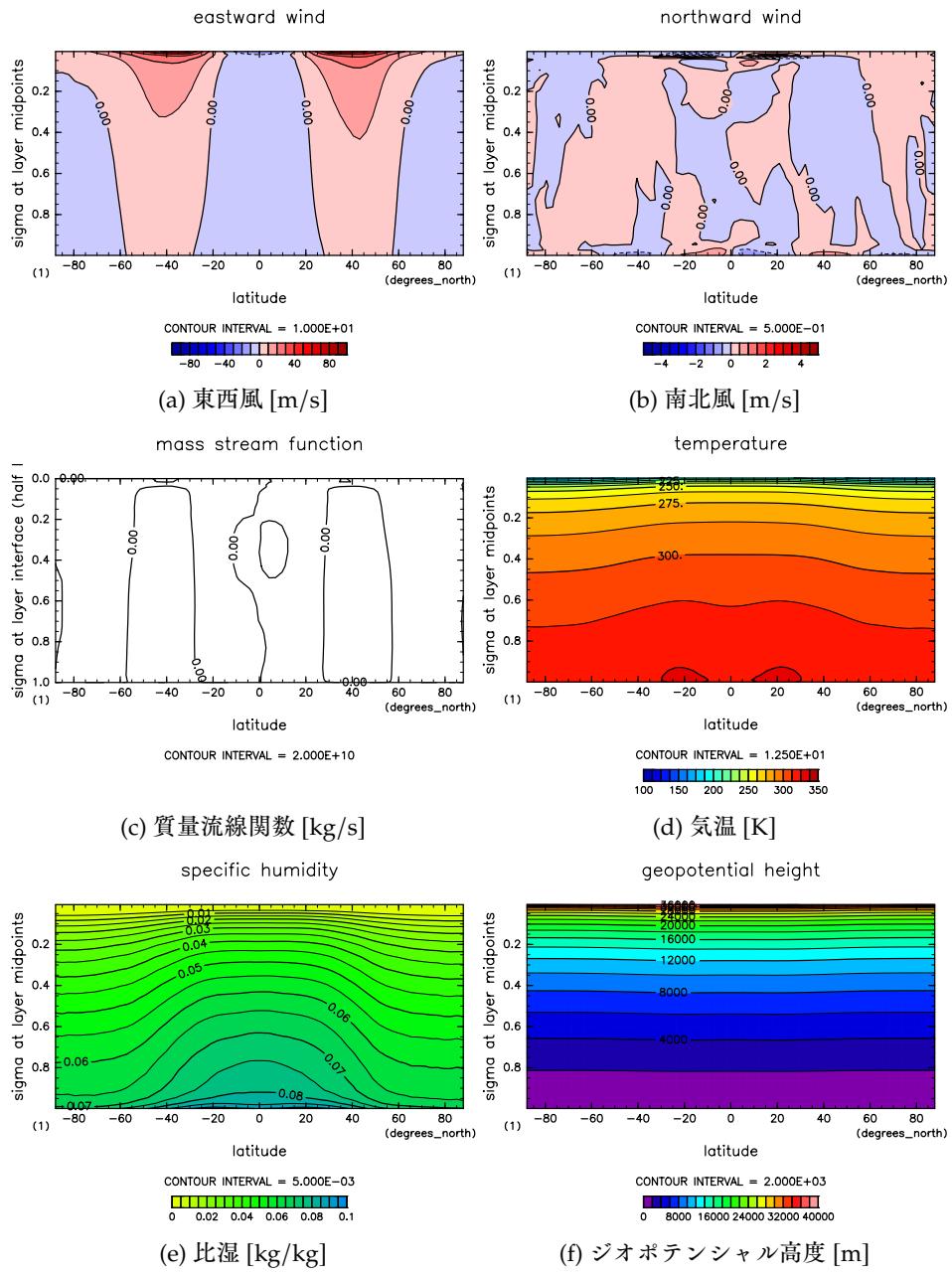


図 1.7: 実験 S2000 の各物理量の子午面分布。図 1.3 と同様の図であるが、21 年目の年平均値である。

なる。

$$F_T = F_L + F_D, \quad (1.1)$$

$$\begin{aligned} F_L &= \overline{\left[ \int_0^{z_{\text{top}}} \rho L q v \, dz \right]} \\ &= \overline{\left[ \int_0^{p_s} \rho L q v \frac{dp}{g} \right]} \\ &= \overline{\left[ \int_0^1 \left( \frac{L q v}{g} p_s \right) d\sigma \right]} \\ &= \int_0^1 \left[ \overline{L q v \frac{p_s}{g}} \right] d\sigma, \end{aligned} \quad (1.2)$$

$$\begin{aligned} F_D &= \overline{\left[ \int_0^{z_{\text{top}}} \rho (c_{pn} T + g z) v \, dz \right]} \\ &= \overline{\left[ \int_0^{p_s} \rho (c_{pn} T + g z) v \frac{dp}{g} \right]} \\ &= \overline{\left[ \int_0^1 \left( \frac{(c_{pn} T + g z) v}{g} p_s \right) d\sigma \right]} \\ &= \int_0^1 \left[ \overline{(c_{pn} T + g z) v \frac{p_s}{g}} \right] d\sigma, \end{aligned} \quad (1.3)$$

ここで、 $[•]$  は東西平均、 $\bar{•}$  は時間平均、 $z_{\text{top}}$  は大気上端である。

図 1.8 に雲あり各実験での南北熱輸送量を示した。まず最初に全熱輸送量（各図の青線）に関して見る。全熱輸送量は赤道に関して対称で、中緯度にピークがある事がわかる。北半球の全熱輸送を見ると、実験 S1366（図 1.8a）では北緯 30° に 4.0 PW、実験 S1500（図 1.8b）では北緯 30° に 4.2 PW、実験 S1600（図 1.8c）では北緯 30° に 4.5 PW、実験 S1800（図 1.8d）では北緯 35° に 5.0 PW、実験 S2000（図 1.8e）では北緯 40° に 3.0 PW の高緯度向きの輸送量のピークがある。このように、実験 S1366 から実験 S1800 までは、太陽定数が増大するにつれて、全熱輸送量のピークの値も増大している。しかし、実験 S2000 では全熱輸送量が減少している。

熱輸送量の合計を見たので、次は潜熱輸送と乾燥静的エネルギー輸送に分けて見る。潜熱輸送は、低緯度で低緯度向きの、中緯度で高緯度向きのピークがある（図 1.8）が、実験 S2000 はパターンが違うようにみえる。低緯度での低緯度向きの輸送量のピークの値は、実験 S1366（図 1.8a）では北緯 10° で 3.0 PW、実験 S1500（図 1.8b）では北緯 10° で 3.0 PW、実験 S1600（図 1.8c）では北緯 10° で 2.5 PW、実験 S1800（図 1.8d）では北緯 10° で 1.5 PW、実験 S2000（図 1.8e）では北緯 20° で 0.5 PW となつていて、太陽定数が増大するに従って高緯度側に移動し減少している。実験 S1800 までは同じパターンを有しており、太陽定数が増大するにつれて、潜熱輸送のピークの緯度が高緯度に移動する。中緯度での高緯度向きの輸送量のピークの値は、実験 S1366（図 1.8a）では北緯 30° で 3.5 PW、実験 S1500（図 1.8b）では北緯 35° で 4.5 PW、実験 S1600（図 1.8c）では北緯 35° で 4.5 PW、実験 S1800（図 1.8d）では北緯 40° で 5.5 PW、実験 S2000（図 1.8e）では北緯 40°

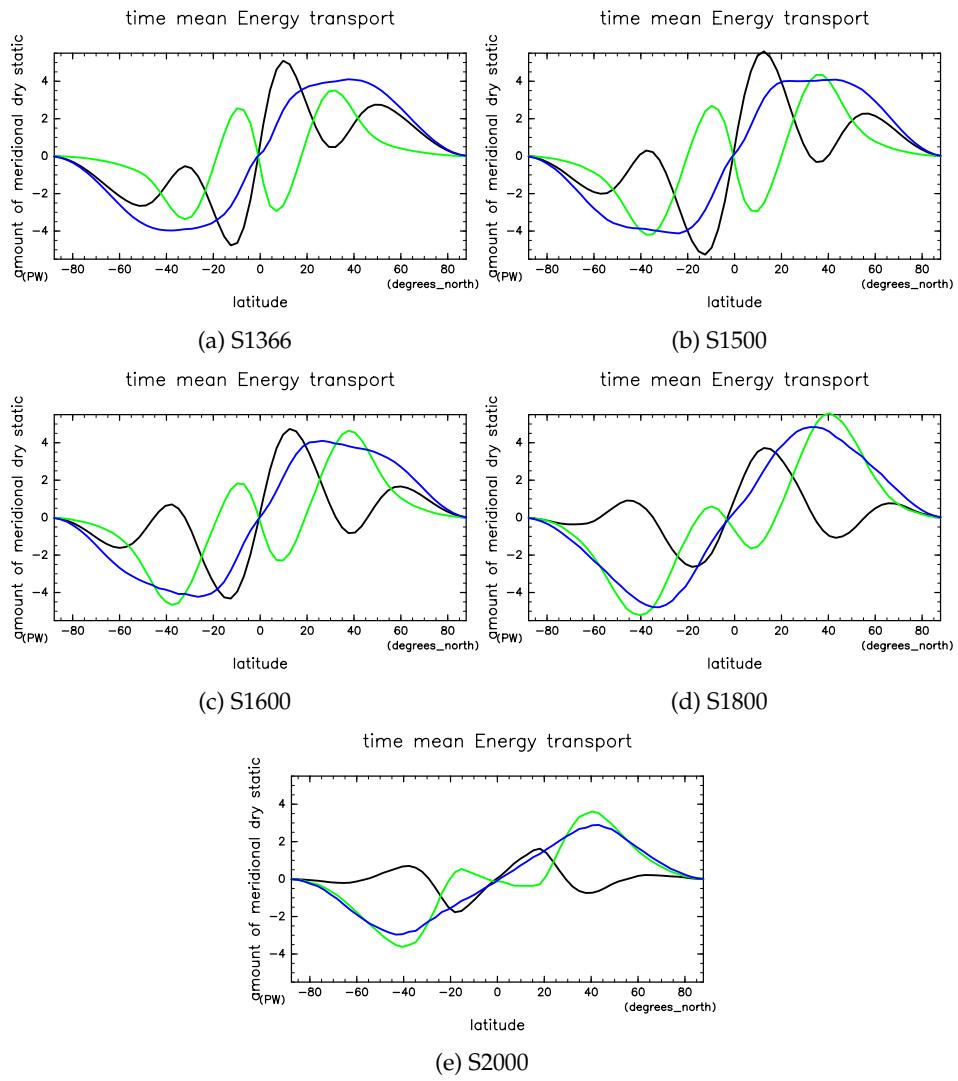


図 1.8: 雲あり各実験での時間平均・東西平均された南北熱輸送量。緑線が潜熱輸送、黒線が乾燥静的エネルギーの輸送、青線が全熱輸送量。横軸は緯度であり、縦軸は北向きの輸送量で、単位は PW。0.25 日間隔で時間平均をとった。

表 1.2: 雲あり各実験での  $10^\circ$  (ハドレー循環域) と  $30^\circ$  (フェレル循環域) での乾燥静的エネルギー (DSE) 輸送と潜熱輸送の値。

実験	北緯	DSE 輸送 [PW]	潜熱輸送 [PW]	全熱輸送 [PW]
S1366	$10^\circ$	4.6	-2.6	2.0
S1500	$10^\circ$	4.9	-2.7	2.2
S1600	$10^\circ$	3.9	-1.8	2.1
S1800	$10^\circ$	1.9	-0.6	1.3
S2000	$10^\circ$	1.1	-0.3	0.8
S1366	$30^\circ$	0.6	3.2	3.8
S1500	$30^\circ$	0.9	3.1	4.0
S1600	$30^\circ$	0.7	3.4	4.1
S1800	$30^\circ$	1.2	3.5	4.7
S2000	$30^\circ$	0.0	2.3	2.3

で  $4.0\text{ PW}$  となっていて、実験 S1366 から 実験 S1800 では太陽定数が増大するに従って、高緯度側に移動し輸送量は増大する。一方で実験 S2000 では輸送量は減少している。

乾燥静的エネルギー輸送は、低緯度で高緯度向きの、中緯度で低緯度向きのピークがある（図 1.8）が、実験 S2000 はパターンが違うように見える。低緯度での輸送量のピークの値は、実験 S1366（図 1.8a）では北緯  $10^\circ$  で  $3.0\text{ PW}$ 、実験 S1500（図 1.8b）では北緯  $10^\circ$  で  $3.0\text{ PW}$ 、実験 S1600（図 1.8c）では北緯  $10^\circ$  で  $2.5\text{ PW}$ 、実験 S1800（図 1.8d）では北緯  $10^\circ$  で  $1.5\text{ PW}$ 、実験 S2000（図 1.8e）では北緯  $20^\circ$  で  $0.5\text{ PW}$  となつていて、太陽定数が増大するに従って高緯度側に移動し減少している。実験 S1800 までは同じパターンを有しており、太陽定数が増大するにつれて、潜熱輸送のピークの緯度が高緯度に移動する。中緯度での輸送量のピークの値は、実験 S1366（図 1.8a）では北緯  $30^\circ$  で  $3.5\text{ PW}$ 、実験 S1500（図 1.8b）では北緯  $35^\circ$  で  $4.5\text{ PW}$ 、実験 S1600（図 1.8c）では北緯  $35^\circ$  で  $4.5\text{ PW}$ 、実験 S1800（図 1.8d）では北緯  $40^\circ$  で  $5.5\text{ PW}$ 、実験 S2000（図 1.8e）では北緯  $40^\circ$  で  $4.0\text{ PW}$  となっていて、実験 S1366 から 実験 S1800 では太陽定数が増大するに従って、高緯度側に移動し輸送量は増大する。一方で実験 S2000 では輸送量は減少している。

表 1.2 に、ハドレー循環域である低緯度と、フェレル循環域である中緯度での熱輸送を示した。この表を見ると、実験 S1500 までは太陽定数が大きくなるとハドレー循環域でもフェレル循環域でも熱輸送が大きくなるが、実験 S1600 まで太陽定数が大きくなると、ハドレー循環域では熱輸送が減り、フェレル循環域では潜熱輸送が増えるのがわかる。したがって、太陽定数が大きくなると、傾圧不安定による熱輸送が大きくなるといえる。

ここからは、どうしてこのような変化が起こるのかを考察する。時間平均・東西平均からの偏差を  $\bullet' = \bullet - \bar{\bullet}, \bullet^* = \bullet - [\bullet]$  と表すことにする。ここで、 $\bullet$  は任意の物理量を表す。 $Lq$  または  $c_{pn} + gz$

を  $x$  と書くことにはすれば、 $F_L$  や  $F_D$  は  $[xv]$  を高度積分したものである。

$$\begin{aligned} \overline{[xv]} &= \overline{[(\bar{x} + x')(\bar{v} + v')]} \\ &= [\bar{x}][\bar{v}] + [\bar{x}^*\bar{v}^*] + \overline{[x'v']} \end{aligned} \quad (1.4)$$

のように変形をすることができる。 $[\bar{x}][\bar{v}]$  は時間平均・東西平均によってもたらされる輸送量になっている、平均流による輸送に対応している。ここでは平均子午面循環による輸送と呼ぶことにする。 $[\bar{x}^*\bar{v}^*]$  は、東西平均からの偏差の時間平均によってもたらされる輸送量になっていて、場所が固定された擾乱による輸送に対応している。ここでは停滯性擾乱による輸送と呼ぶことにする。これは、地形がある場合には山岳波による輸送に対応するが、今回の実験では地形がないため、ほとんど発生しない。 $\overline{[x'v']}$  は、時間平均からの偏差によってもたらされる輸送量になっていて、移動する擾乱による輸送に対応している。ここでは移動性擾乱と呼ぶことにする。これは傾圧不安定による低気圧による輸送に対応する。ここからは、潜熱輸送・乾燥静的エネルギー輸送を平均子午面循環による輸送、停滯性擾乱による輸送、移動性擾乱による輸送の内訳を見て、それぞれがどのように寄与しているか考察する。

図 1.9 に潜熱輸送の内訳を示す。平均子午面循環による潜熱輸送は実験 S1500 で最大になり、それより太陽定数が大きくなると小さくなる。移動性擾乱による潜熱輸送は、太陽定数が大きくなると大きくなるが、実験 S2000 では小さくなる。停滯性擾乱による輸送はどの実験でもほとんど存在していない。これは、モデルに地形が含まれていないため、停滯性擾乱がほとんど発生しないからである。

図 1.10 に乾燥静的エネルギーの輸送の内訳を示した。潜熱輸送の内訳（図 1.9）に関して見ると、どの実験でも太陽定数が増大するにつれて、移動性擾乱が大きくなっていることがわかる。平均子午面循環による乾燥静的エネルギー輸送は実験 S1500 で最大になり、太陽定数が増大するにつれて減少している。移動性擾乱による乾燥静的エネルギー輸送は太陽定数が増大するにつれて減少する。こちらの場合でも、モデルに地形が含まれていないため、停滯性擾乱による輸送はほとんど存在していない。

図 1.12 に潜熱の平均子午面循環による輸送の子午面分布、すなわち  $[\overline{Lq}][\bar{v}]$  の子午面分布を示す。また、図 1.11 に  $[\overline{Lq}]$  の子午面分布も示す。地表面付近では比湿が大きい（図 1.3e から 1.7e）ので、 $[\overline{Lq}]$  の値も大きくなり、地表面付近で平均子午面循環に依る潜熱の輸送が大きいことがわかる。地表面付近の低緯度で高緯度向きの輸送があり、太陽定数が大きくなるとその量が大きくなる。

図 1.13 に潜熱の移動性擾乱による輸送の子午面分布、すなわち  $[(\overline{Lq})^*\bar{v}^*]$  の子午面分布を示す。中緯度域で移動性擾乱による輸送が大きいことがわかる。輸送が大きくなっている高度は、太陽定数が増大するにつれて上昇している。輸送が大きくなっている箇所では、傾圧不安定によって熱が輸送されている。

図 1.14 に潜熱の停滯性擾乱による輸送の子午面分布、すなわち  $[(\overline{Lq})'v']$  の子午面分布を示す。潜熱の停滯性擾乱による輸送は、平均子午面循環による輸送や、移動性擾乱による輸送と比べて値が小さく、特に輸送が大きくなっている領域がない。これは、モデルに地形が含まれていないため、

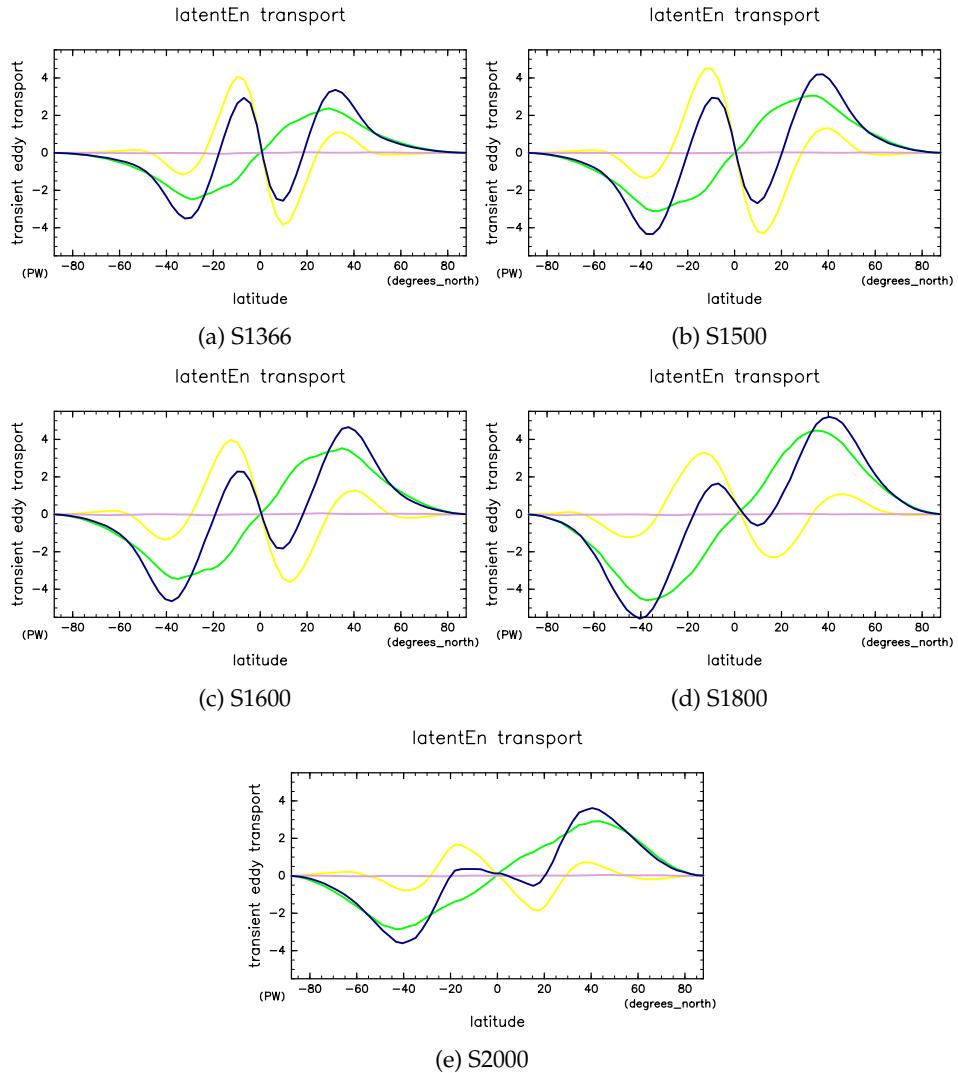


図 1.9: 雲あり各実験での潜熱輸送。青線が全輸送量  $[\overline{Lqv}]$ 、黄線が平均子午面循環による輸送量  $[\overline{Lq}][\bar{v}]$ 、桃線が停滯性擾乱による輸送量  $[(\overline{Lq})^*\bar{v}^*]$ 、緑線が移動性擾乱による輸送量  $[(\overline{Lq})'v']$ 。横軸は緯度であり、縦軸は北向きの輸送量で、単位は PW。

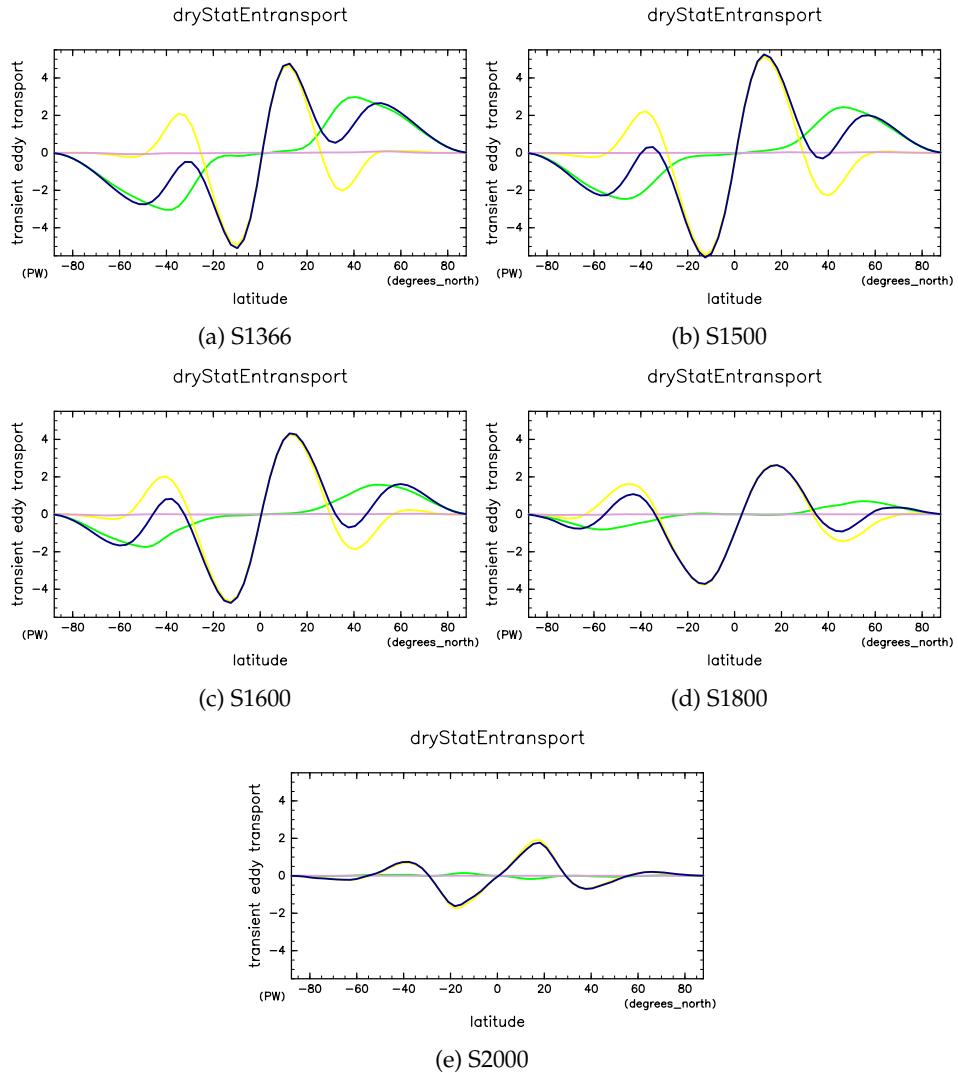


図 1.10: 雲あり各実験での潜熱輸送。青線が全輸送量  $[(\bar{c}_{pn}T + gz)v]$ 、黄線が平均子午面循環による輸送量  $[\bar{c}_{pn}T + gz][\bar{v}]$ 、桃線が停滞性擾乱による輸送量  $[(\bar{c}_{pn}T + gz)^*\bar{v}^*]$ 、緑線が移動性擾乱による輸送量  $[(c_{pn}T + gz)'v']$ 。横軸は緯度であり、縦軸は北向きの輸送量で、単位は PW。

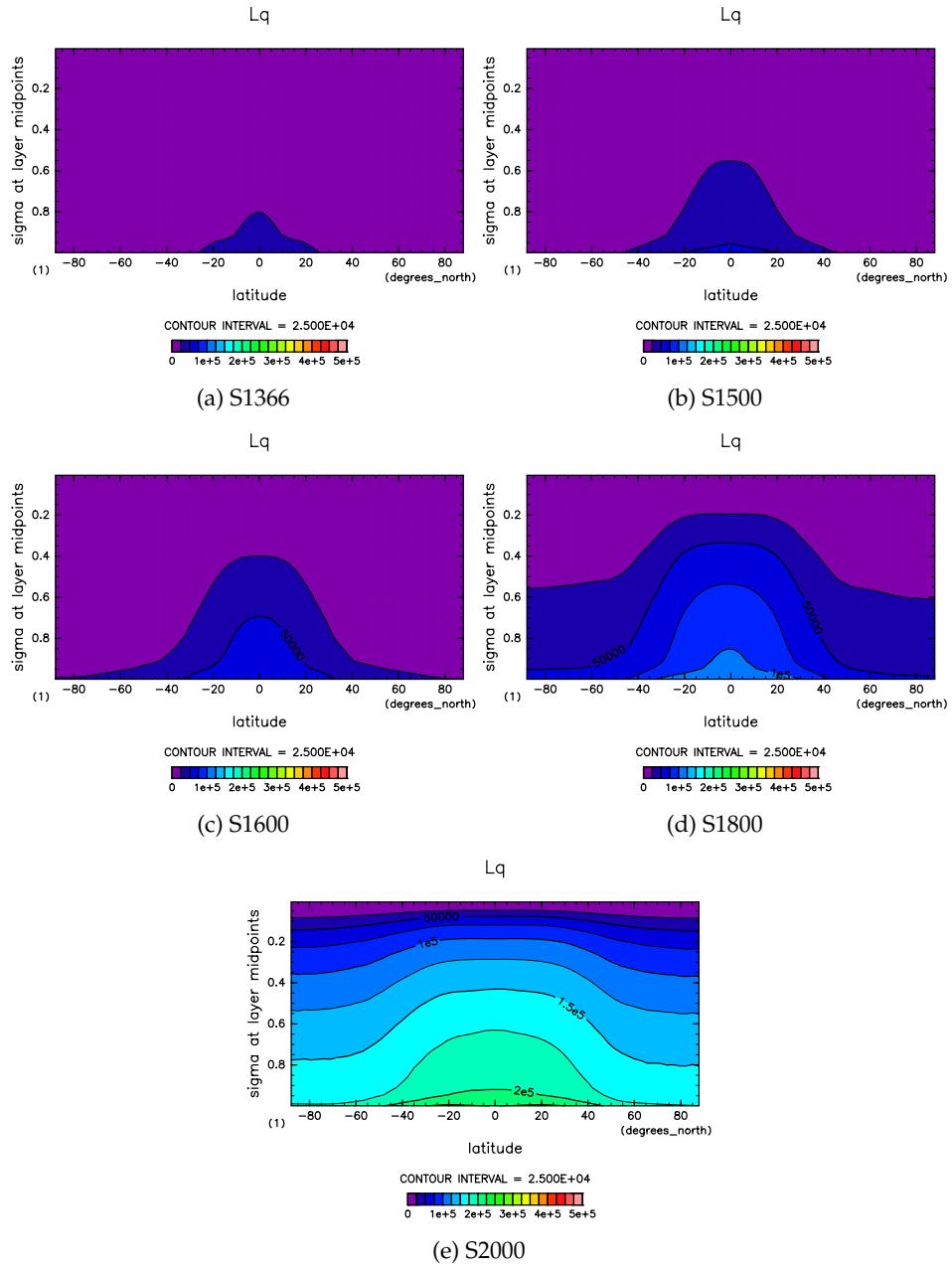


図 1.11: 雲あり各実験での潜熱  $[\bar{L}_q]$  の子午面分布。等値線間隔は全て 25 KJ である。

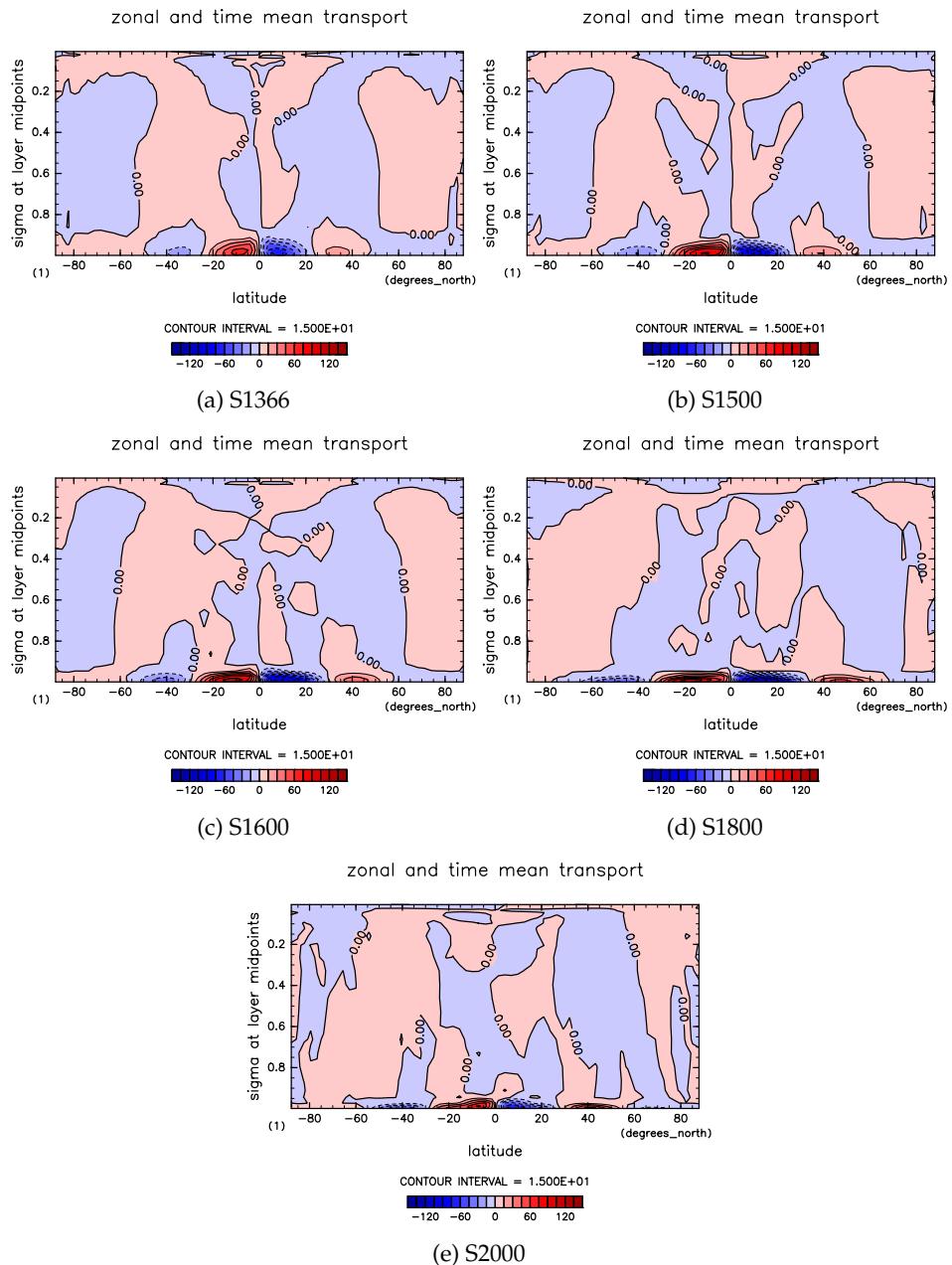


図 1.12: 雲あり各実験での平均子午面循環による潜熱輸送  $[\bar{L}q][\bar{v}]$  の子午面分布。等値線間隔は全て 15 PW である。

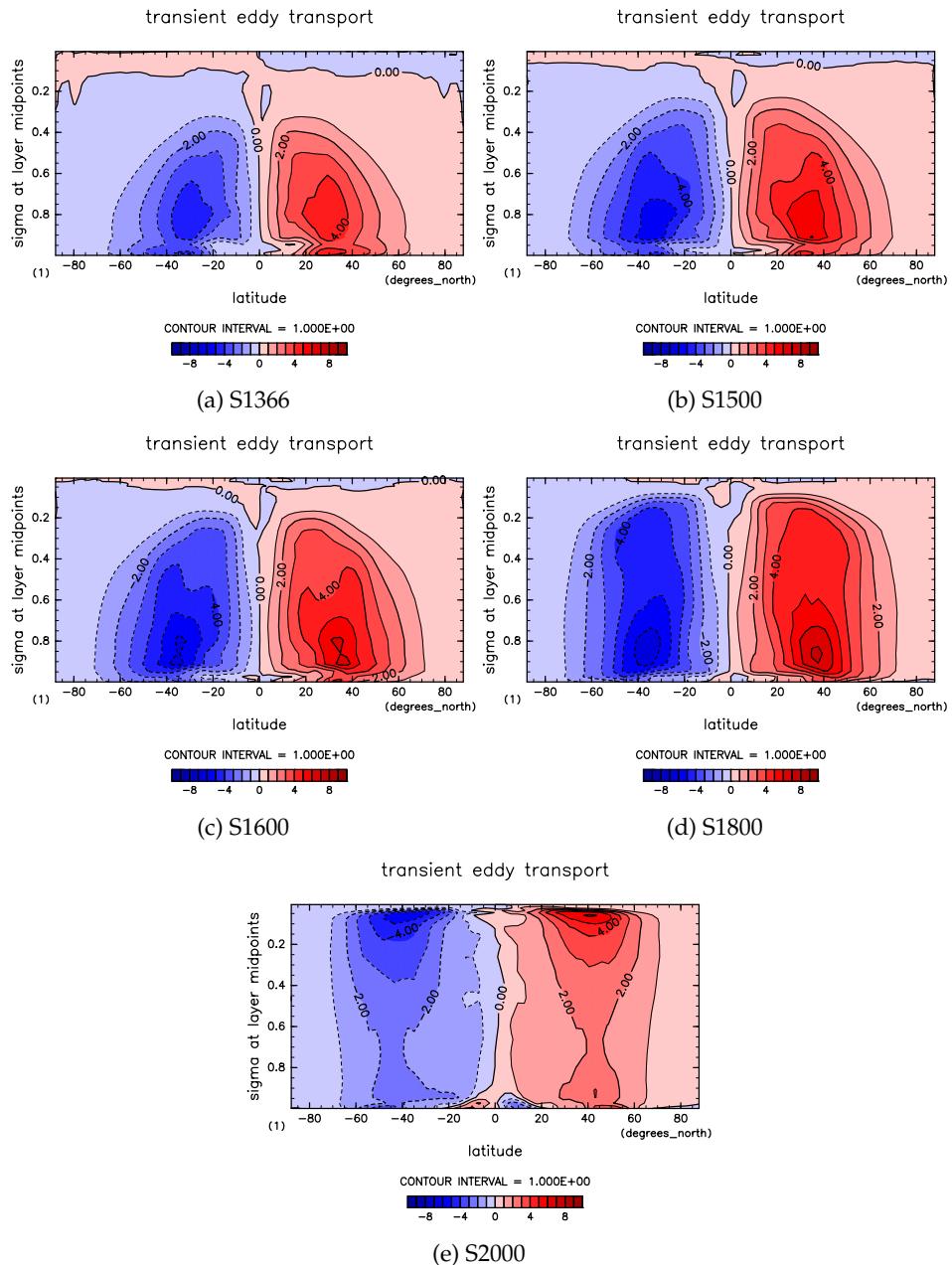


図 1.13: 雲あり各実験での移動性擾乱による潜熱輸送  $\overline{[(Lq)'v']}$  の子午面分布。等値線間隔は全て 1 PW である。

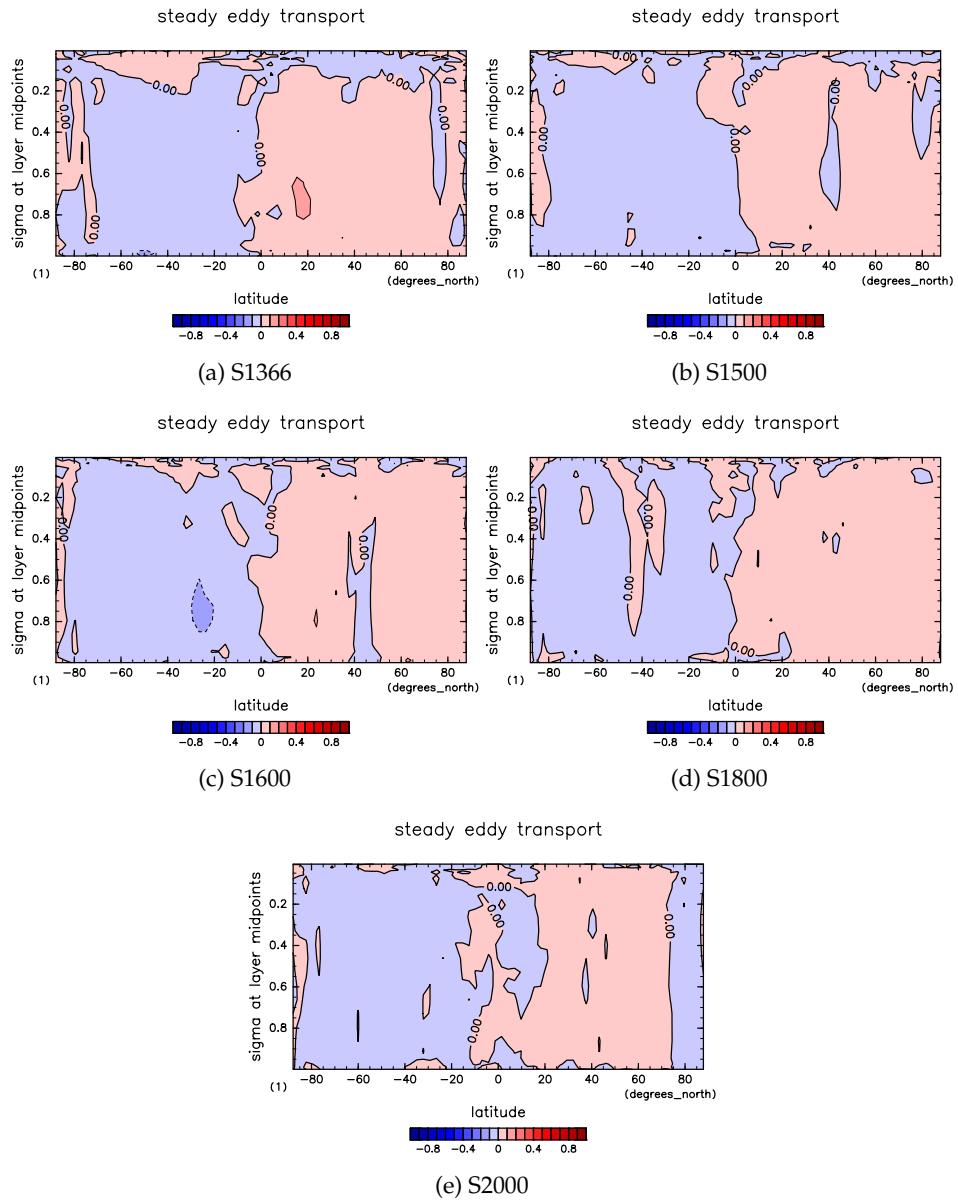


図 1.14: 雲あり各実験での停滯性擾乱による潜熱輸送  $[(Lq)^*\bar{v}^*]$  の子午面分布。等値線間隔は全て 0.1 PW である。

停滞性擾乱がほとんど発生していないことが理由だと考えられる。

図 1.16 に乾燥静的エネルギーの平均子午面循環による輸送の子午面分布、すなわち  $\overline{[(c_{pn}T + gz)][\bar{v}]} \cdot \bar{v}$  の子午面分布を示す。また、図 ?? に  $\overline{[(c_{pn}T + gz)]}$  の子午面分布を示す。いずれの実験でも、地表面付近の低緯度で低緯度向きの輸送があり、地表面付近の中緯度で高緯度向きの輸送がある。また、低緯度の高高度で高緯度向きの輸送がある。地表面付近の輸送は太陽定数が大きくなると小さくなり、上空での輸送の高度は太陽定数が大きくなると上昇する。上空で輸送が大きくなっている高度が高くなるのは、太陽定数が増大するとハドレー循環の高度が高くなるからである。

図 1.17 に乾燥静的エネルギーの移動性擾乱による輸送の子午面分布、すなわち  $\overline{[(c_{pn}T + gz)^*\bar{v}^*]}$  の子午面分布を示す。中緯度域で輸送量が大きくなっている。輸送が大きくなっている高度は、太陽定数が増大するにつれて上昇しているのがわかる。輸送が大きくなっている箇所では、傾圧不安定によって熱が輸送されている。

図 1.18 に乾燥静的エネルギーの停滞性擾乱による輸送の子午面分布、すなわち  $\overline{[(c_{pn}T + gz)'v']}$  の子午面分布を示す。乾燥静的エネルギーの停滞性擾乱による輸送は、平均子午面循環による輸送や、移動性擾乱による輸送と比べて値が小さく、特に輸送が大きくなっている領域がない。これは、モデルに地形が含まれていないため、停滞性擾乱がほとんど発生していないことが理由だと考えられる。

図 1.19 に熱収支の緯度分布を示す。太陽定数が大きくなるにつれて、地表面の正味フラックスが減少し、凝結加熱率と蒸発フラックスが大きくなっているのがわかる。すなわち、太陽定数が大きくなるにつれて、入射量のほとんど全てが潜熱フラックスの形で大気に供給される。

## 1.4 雲がない場合

つぎに、雲がない実験（実験 S1366nc, S1500nc）の結果を見る。

全球平均した OLR と OSR の時系列変化（図 1.25a, 1.25c）を見ると、実験 S1366nc では OLR と OSR の値が一致して平衡状態に達しているように見えるが、実験 S1500nc では OLR が OSR より大きく、平衡状態に達していないように見える。表 1.3 に年平均値を示したが、年平均 OLR と OSR の差が、実験 S1366nc では  $2.0 \text{ W/m}^2$  と小さいのに対し、実験 S1500nc では  $13.8 \text{ W/m}^2$  と大きくなっていて、平衡状態に達していないと判断できる。地表面温度の時系列変化を見ると、実験 S1366nc では  $297 \text{ K}$  でほぼ一定になっているのに対して、実験 S1500nc では上昇し続けていて、やはり平衡状態になっていない。したがって、実験 S1500nc に関しては、積分時間が足りていないと判断できる。

図 1.26a に OLR の東西平均の南北分布を、図 1.26b に地表面温度の東西平均の南北分布を示す。OLR の南北分布は、両方の実験で南北対称で中緯度でピークがある分布をしていて、実験 S1366nc では赤道で  $275 \text{ W/m}^2$ 、緯度  $25^\circ$  で  $300 \text{ W/m}^2$  でピークとなり、極では  $241 \text{ W/m}^2$  となっている。実験 S1500nc では赤道で  $295 \text{ W/m}^2$ 、緯度  $30^\circ$  で  $308 \text{ W/m}^2$  でピークとなり、極では  $280 \text{ W/m}^2$  と

表 1.3: 雲なし各実験での OLR と OSR の年平均値。

実験	OLR [W/m <sup>-2</sup> ]	OSR [W/m <sup>-2</sup> ]	地表面温度 [K]	平均をとった年度
S1366nc	277.2	279.2	297	11
S1500nc	296.7	310.6	313	11

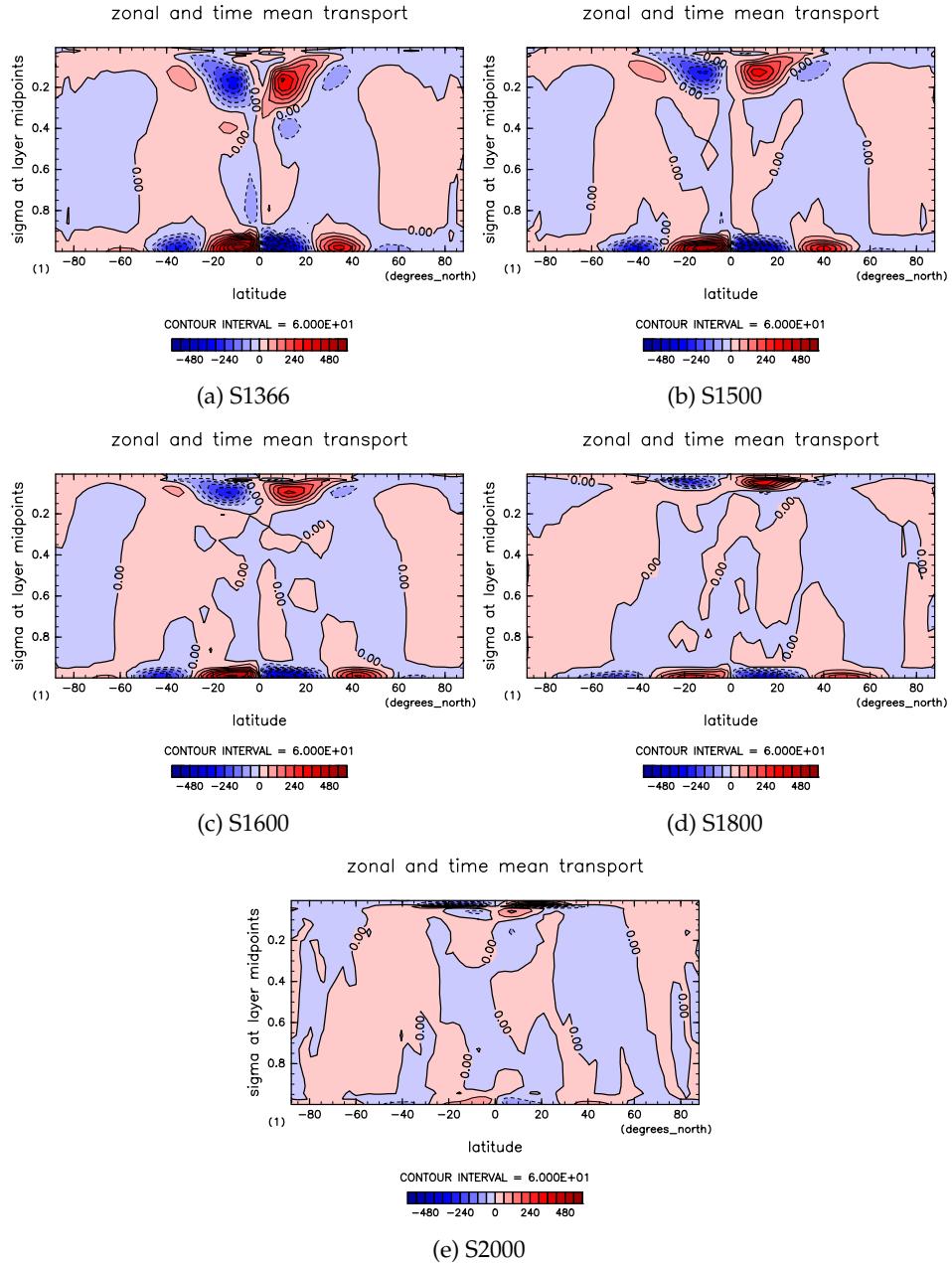


図 1.16: 雲あり各実験での平均子午面循環による乾燥静的エネルギー輸送  $[(c_{pn}T + gz)][\bar{v}]$  の子午面分布。等值線間隔は全て 60 PW である。

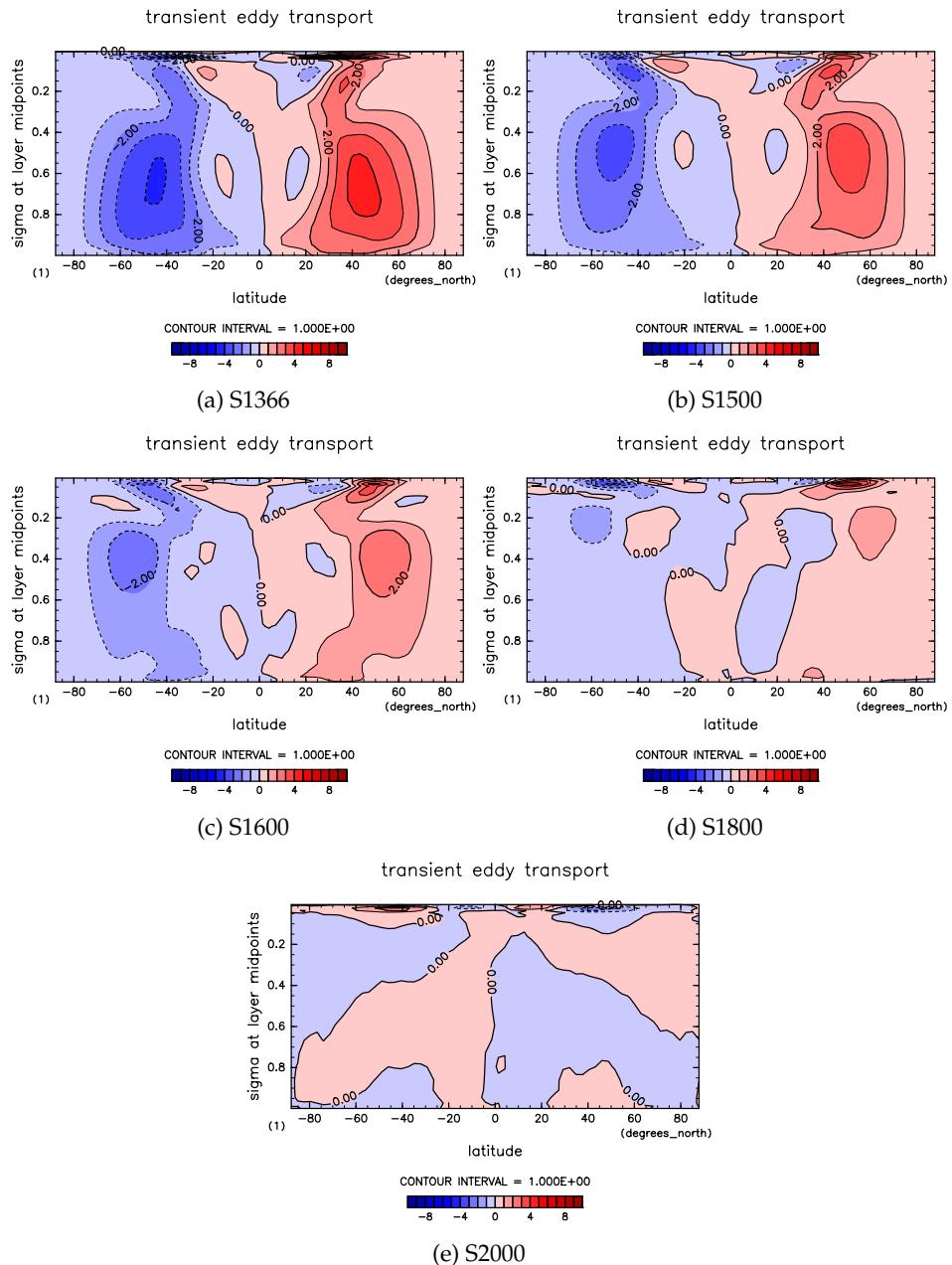


図 1.17: 雲あり各実験での移動性擾乱による乾燥静的エネルギー輸送  $[(c_{pn}T + gz)^* \bar{v}^*]$  の子午面分布。等値線間隔は全て 1 PW である。

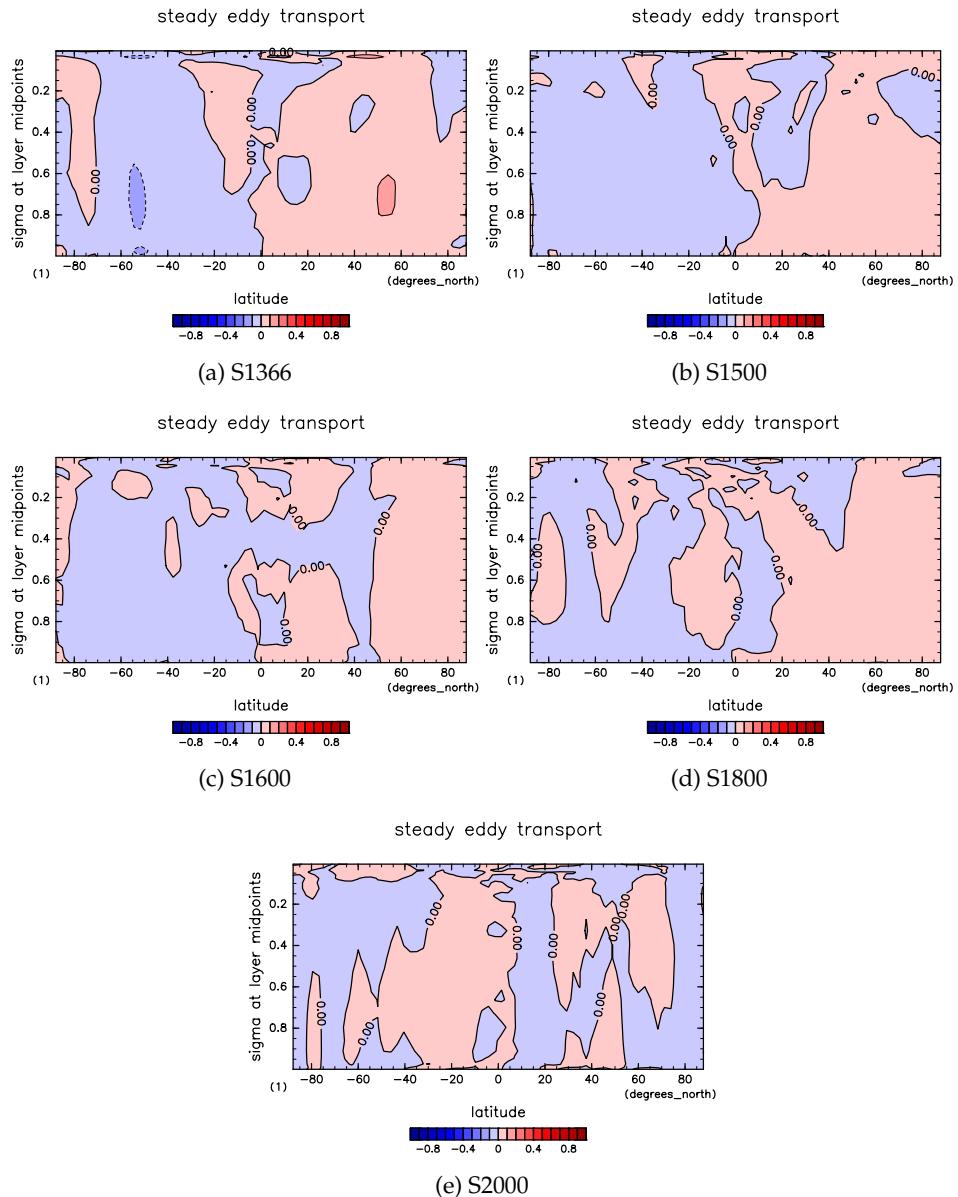


図 1.18: 雲あり各実験での停滞性擾乱による乾燥静的エネルギー輸送  $[(c_{pn}T + gz)^{\gamma}v']$  の子午面分布。等値線間隔は全て 0.1 PW である。

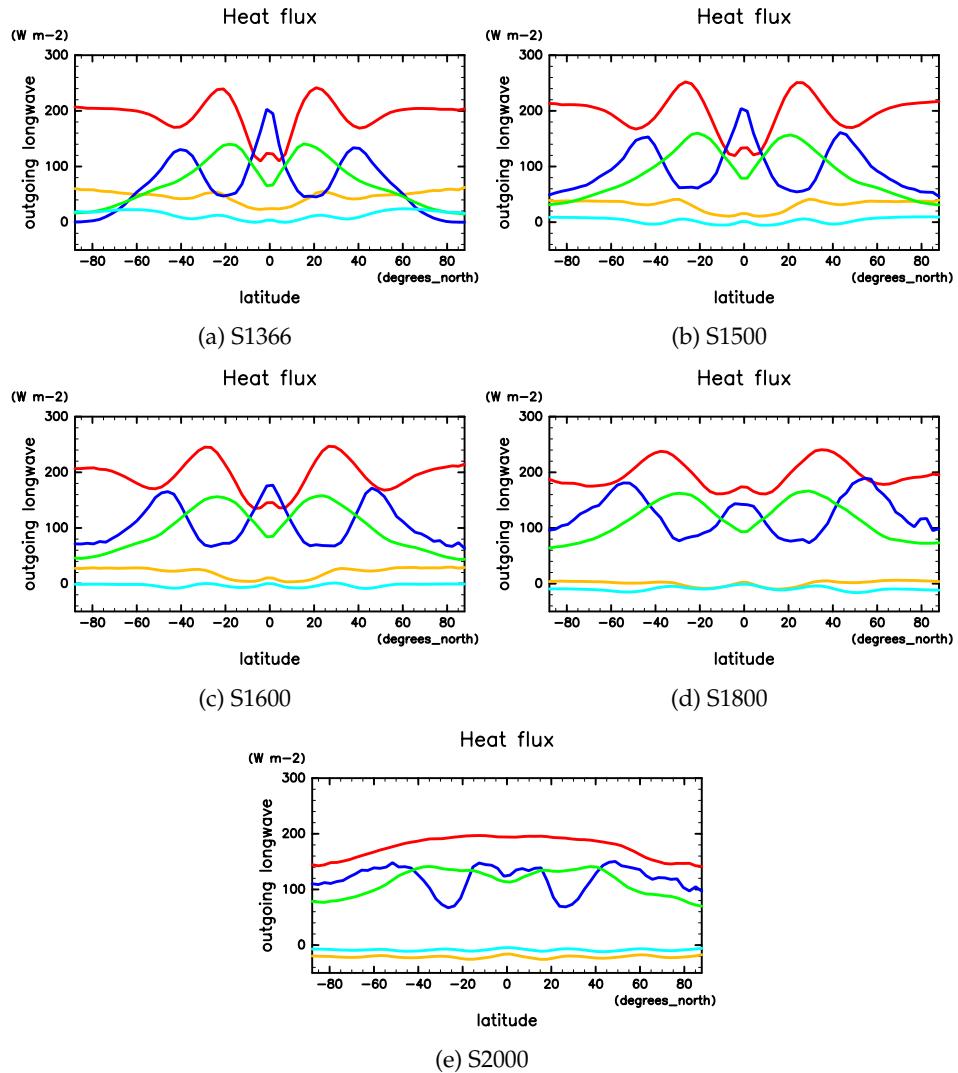


図 1.19: 雲あり各実験でのエネルギーfluxの南北分布。横軸は緯度で、縦軸はエネルギーflux [W/m<sup>2</sup>]。赤線がOLR、黄線が地表面の正味放射flux、青線が凝結加熱率、緑線が蒸発flux、水線が顯熱fluxを示す。

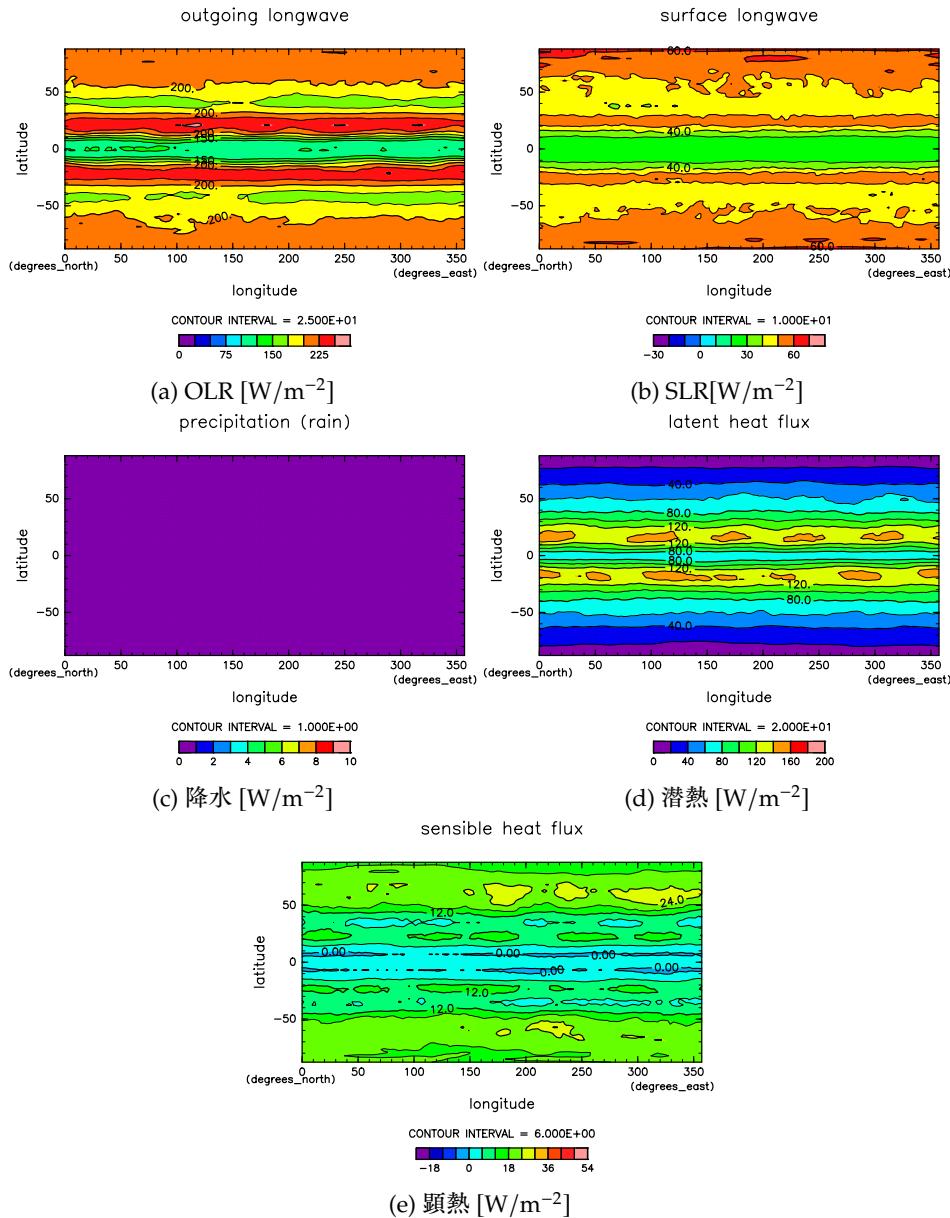


図 1.20: 実験 S1366 でのエネルギーflux の水平面分布。等値線間隔はそれぞれ (a)  $25 W/m^2$ ; (b)  $10 W/m^2$ ; (c)  $25 W/m^2$ ; (d)  $25 W/m^2$ ; (e)  $6 W/m^2$ 。

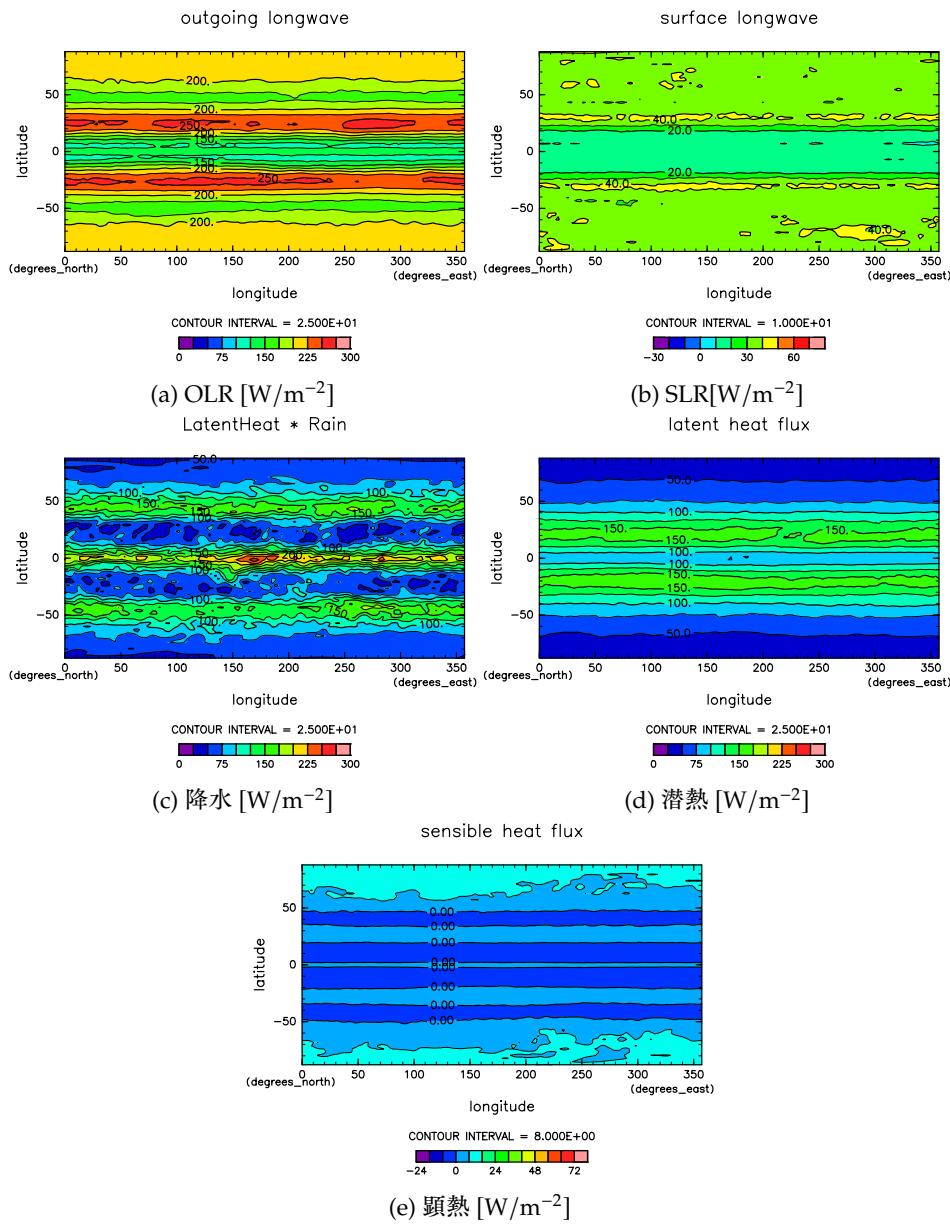


図 1.21: 実験 S1500 のエネルギー フラックスの水平分布。図 1.20 と同様の図。

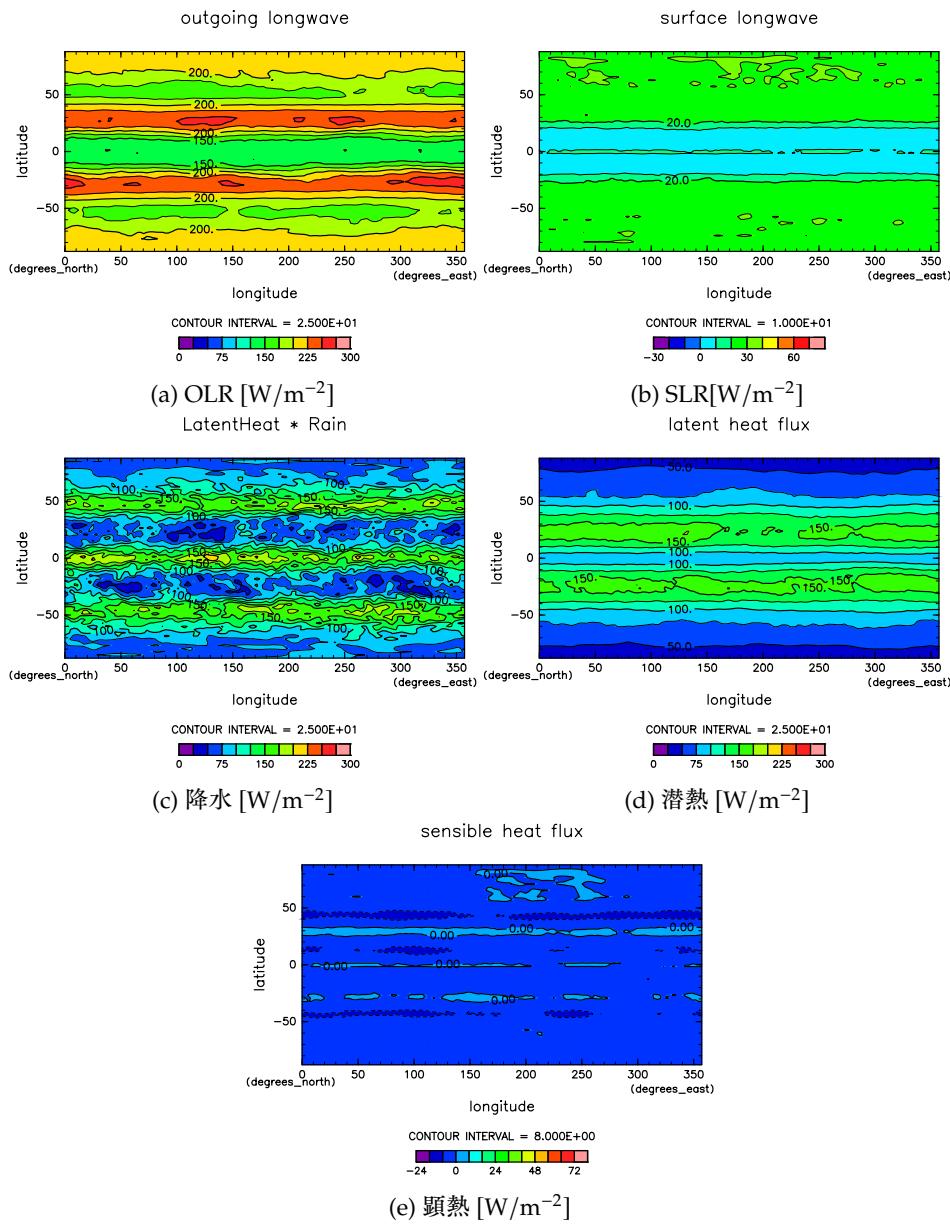


図 1.22: 実験 S1600 のエネルギー フラックスの水平分布。図 1.20 と同様の図。

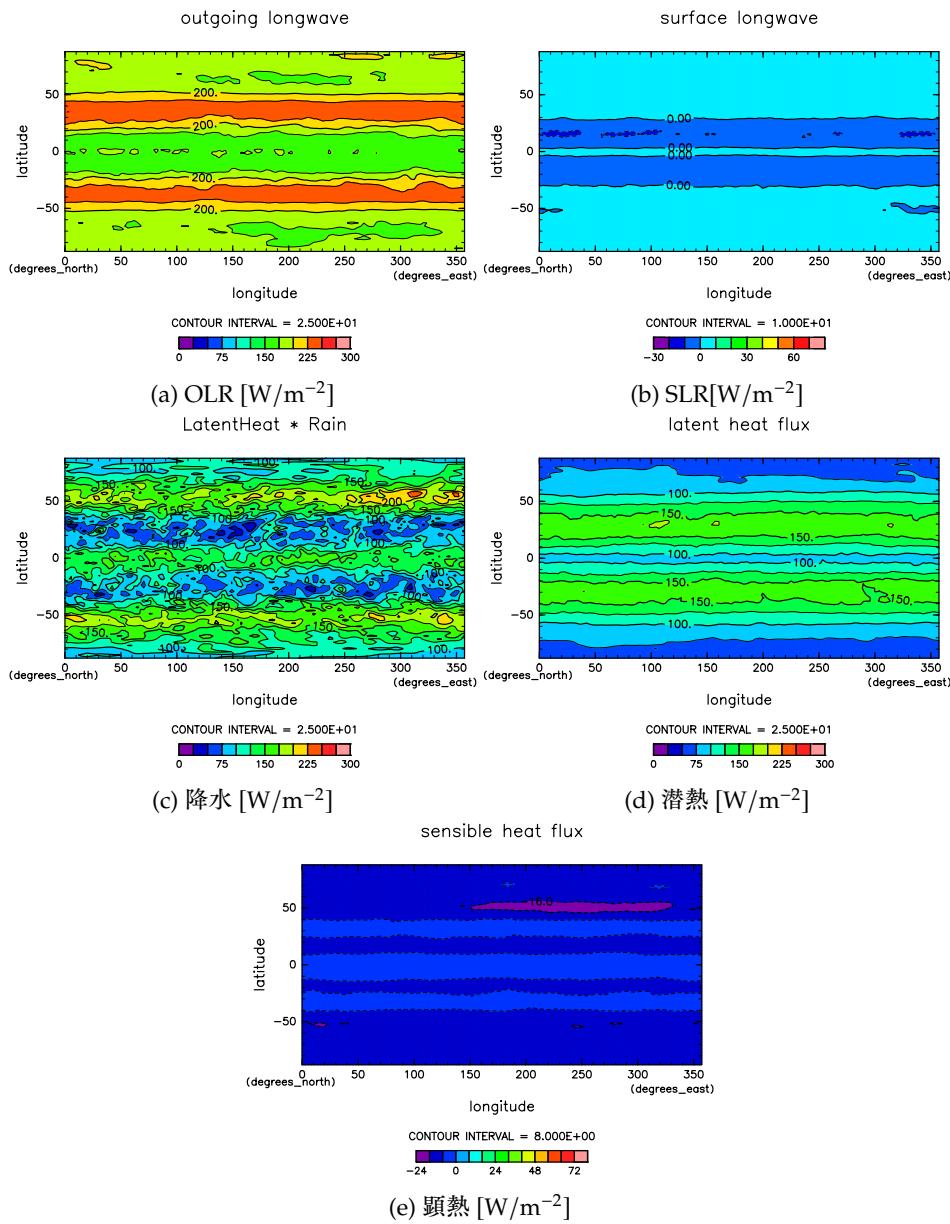


図 1.23: 実験 S1800 のエネルギー フラックスの水平分布。図 1.20 と同様の図。

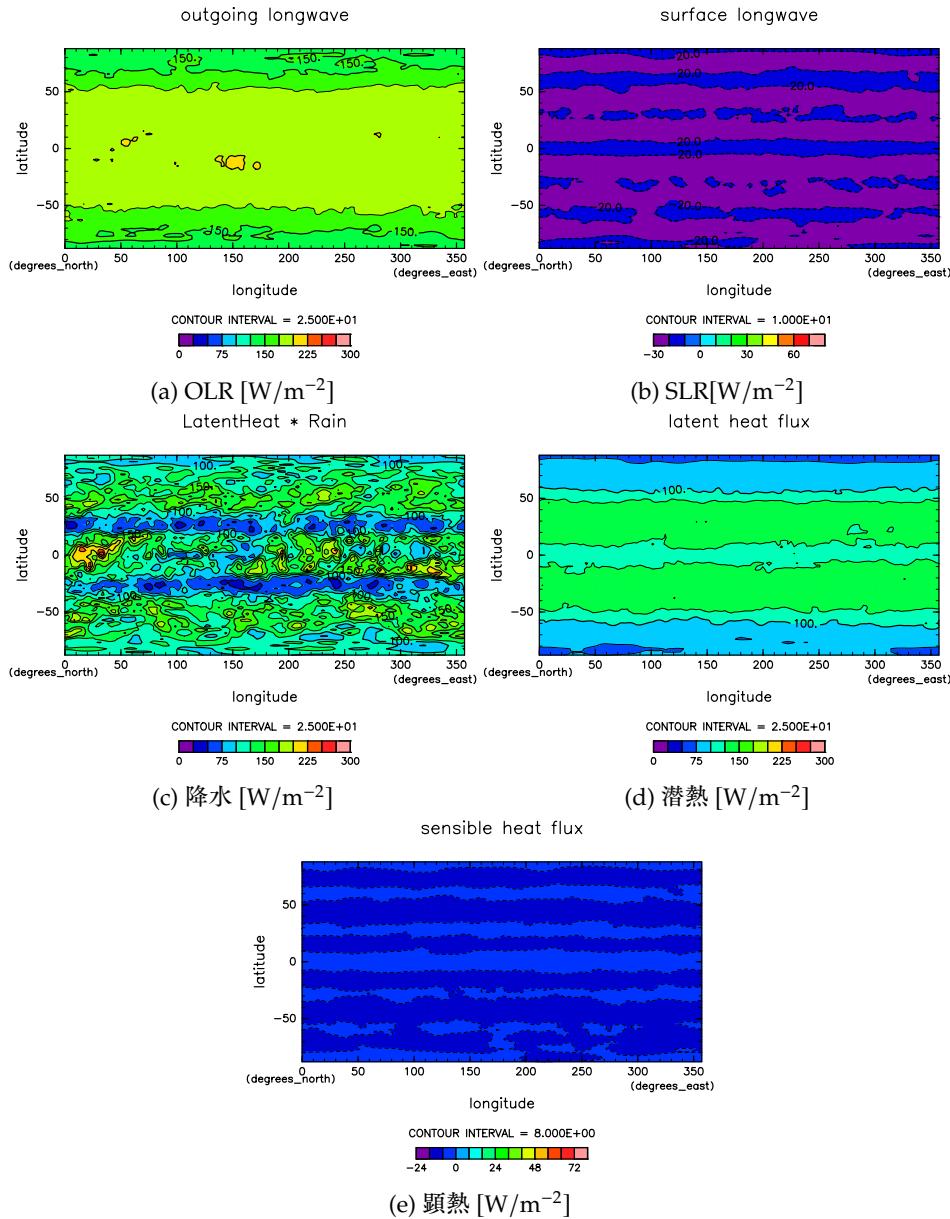


図 1.24: 実験 S2000 のエネルギー フラックスの水平分布。図 1.20 と同様の図。

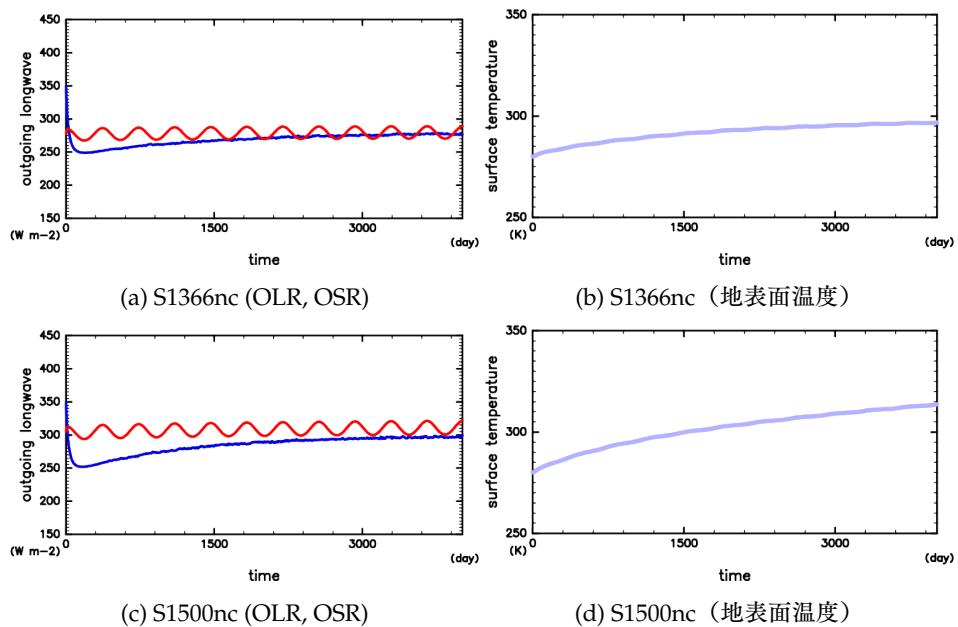


図 1.25: (a, c) 雲なし各実験での全球平均した OLR (赤線) と OSR (青線) の時系列変化。横軸は時刻で、縦軸は OLR, OSR の値 [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]。(b, d) 雲なし各実験での全球平均地表面温度の時系列変化。横軸は時刻で、縦軸は全球平均地表面温度 [K]。

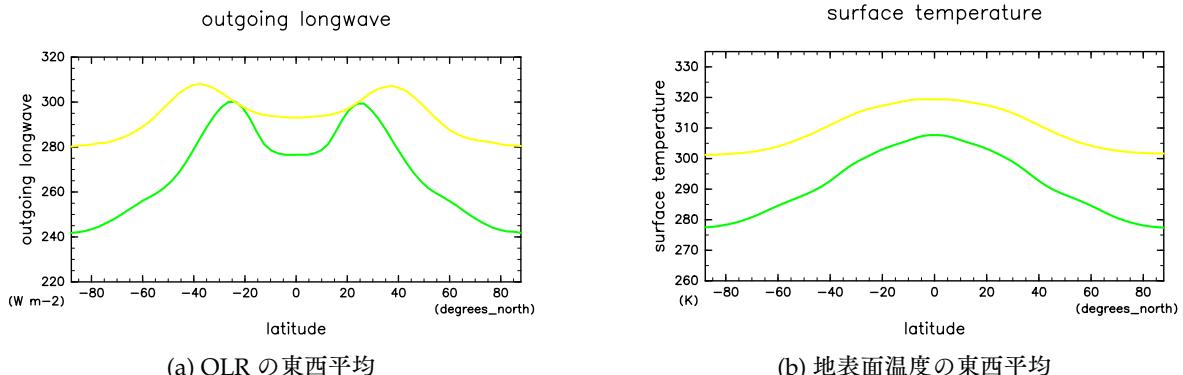


図 1.26: 雲なし各実験での OLR と地表面温度の東西平均の南北分布。それぞれ年平均した値で、緑線: S1366nc; 黄線: S1500nc の結果である。横軸は緯度で、縦軸はそれぞれ OLR の東西平均と、地表面温度の東西平均である。

なっている。地表面温度の南北分布は実験 S1366nc では赤道で 307K、極で 277K になっており、実験 S1500nc では赤道で 320K、極で 302K になっている。このように、雲なしの実験でも、太陽定数が大きくなると南北差が小さくなくなることがわかる。

雲なし実験での子午面構造を図 1.27, 1.28 に示す。実験 S1355nc の東西風（図 1.27a）を見ると南北対象になっていて、緯度 40° の  $\sigma = 0.05$  に 80 m/s の東向きの風が吹いていて、ジェットが現れていることがわかる。実験 S1500nc の東西風（図 1.28a）を見ると南北対象になっていて、緯度 45° の大気上端に 100 m/s の東向きの風が吹いている。これは、大気上端にジェットが到達している状態なので、S1500nc ではモデルの高さが足りていないことが考えられる。実験 S1355nc の質量流線関数（図 1.27c）を見ると、雲ありの実験と同様に、ハドレー循環とフェレル循環が発生していることがわかる。実験 S1500nc の質量流線関数（図 1.28c）を見ると、大気上部で等値線が閉じておらず、ハドレー循環やフェレル循環が明確に見えない。これは、モデルの高度が足りていないことや、平衡状態に達していないことが影響しているかもしれない。

図 1.29 に雲なしの場合での南北熱輸送の緯度分布を示した。実験 S1366nc では潜熱輸送が低緯度では赤道向き、中緯度では極向きにあり、乾燥静的エネルギー輸送は低緯度では高緯度向き、中緯度では低緯度向きにある。実験 S1366 と比較すると、南北熱輸送量が大きくなっていることがわかる。実験 S1500nc でも同様のパターンが現れるが、低緯度での熱輸送は潜熱、乾燥静的エネルギーとも小さくなってしまっており、中緯度での潜熱輸送は 9 PW と大きくなっている。

図 1.30 に潜熱輸送の内訳を示す。実験 S1366nc では平均子午面循環による輸送が多くを占めていて、実験 S1500nc では移動性擾乱による輸送が大きいことがわかる。

図 1.31 に乾燥静的エネルギー輸送の内訳を示す。実験 S1366nc, S1500nc 両方とも平均子午面循環による輸送が多くを占めていることがわかる。

図 1.33 に潜熱の平均子午面循環による輸送の子午面分布、すなわち  $[\bar{Lq}][\bar{v}]$  の子午面分布を示す。地表面付近では比湿が大きい（図 1.27e）ので、地表面付近で平均子午面循環に依る潜熱の輸送が大きいことがわかる。

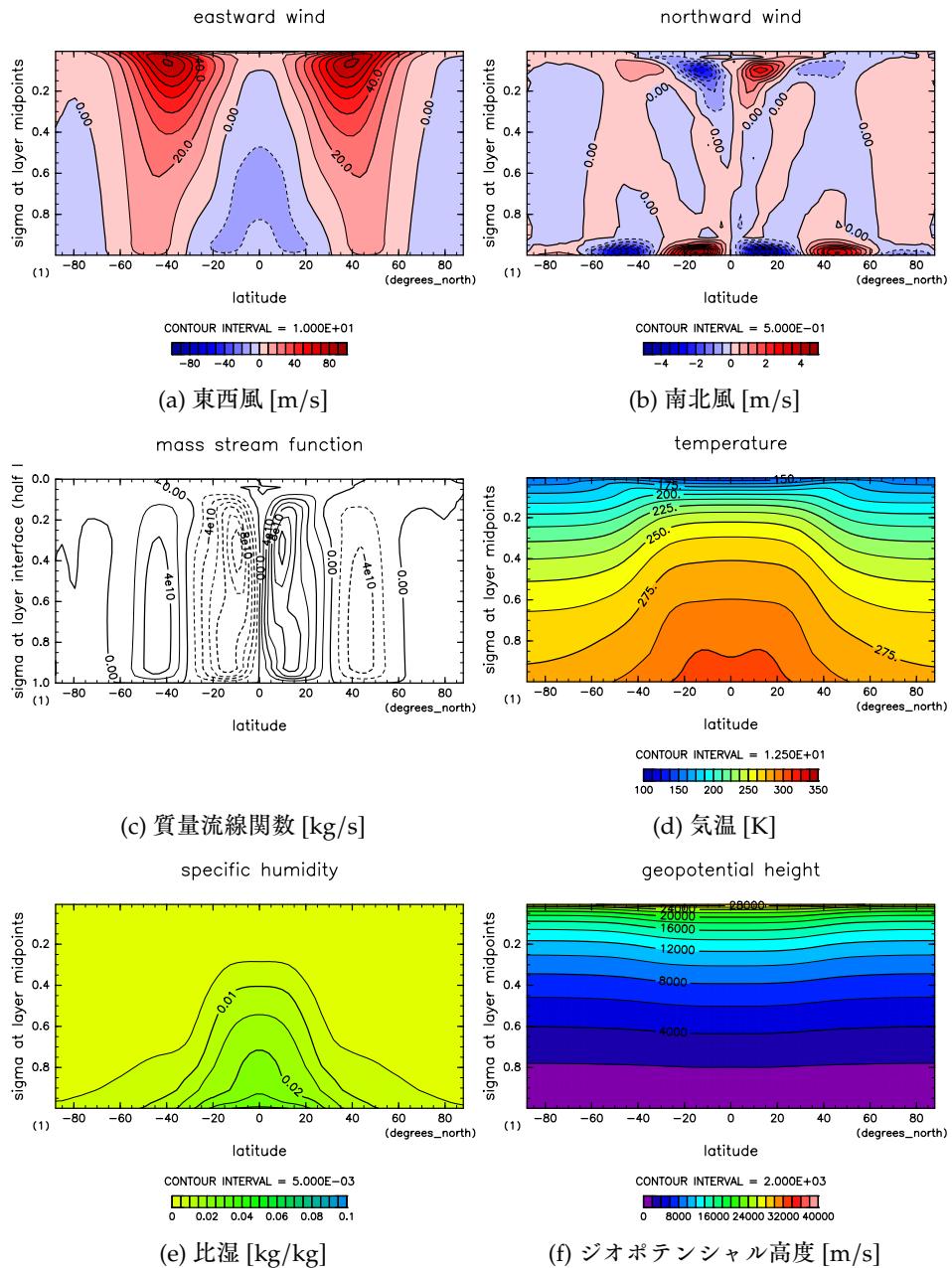


図 1.27: 実験 S1366nc の各物理量の子午面分布。いずれも 11 年目の値を緯度平均、時間平均（間隔 0.25 日）した図を示す。(a) 東西風の等値線間隔は 10 m/s、(b) 南北風の等値線間隔は 0.5 m/s、(c) 質量流線関数の等値線間隔は  $2 \times 10^{-10}$  kg/s、(d) 気温分布の等値線間隔は 12.5 K、(e) 比湿の等値線間隔は  $5 \times 10^{-3}$  kg/kg、(f) ジオポテンシャル高度の等値線間隔は 2000 m である。

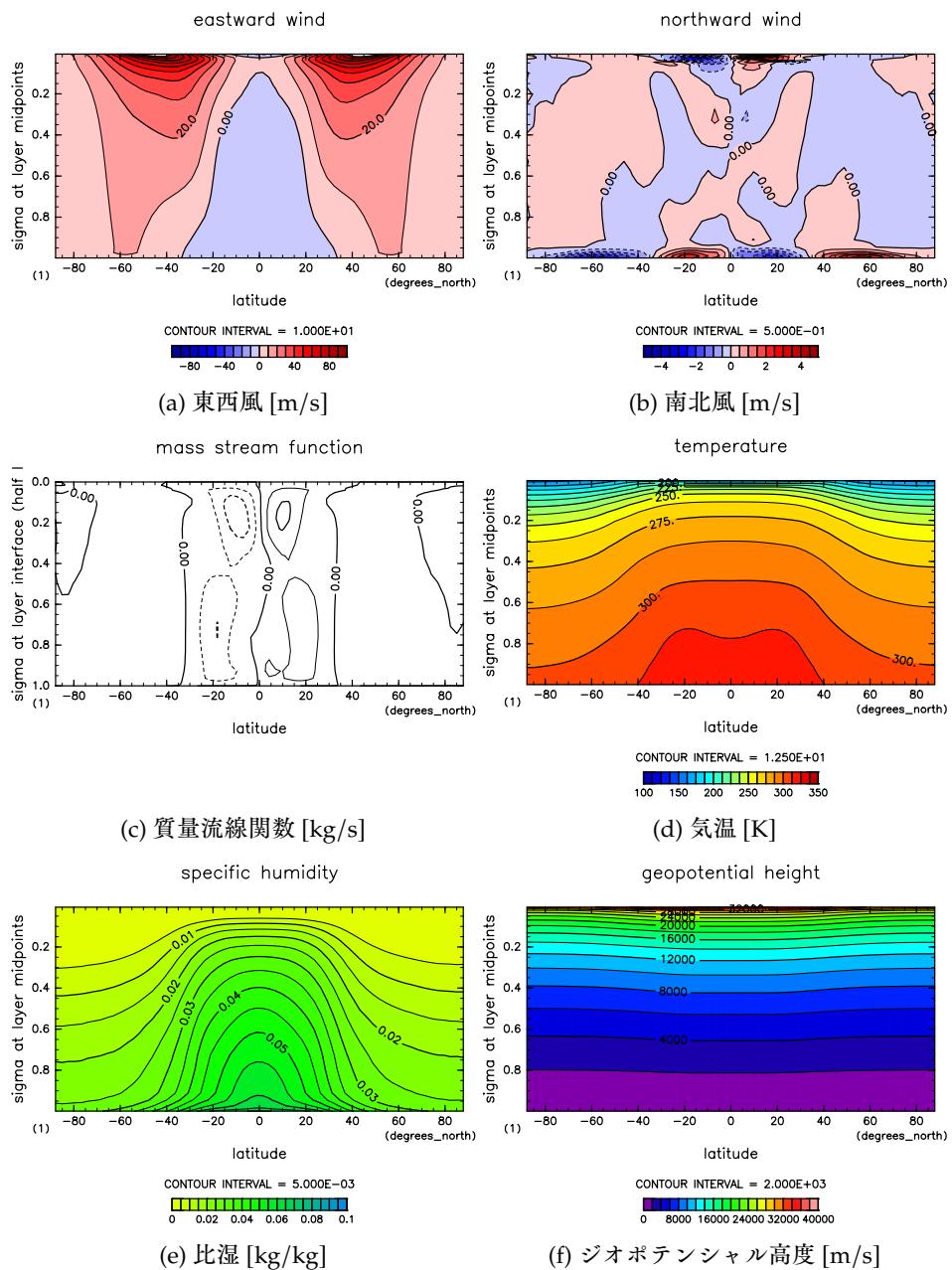


図 1.28: 実験 S1500nc の各物理量の子午面分布。図 1.27 と同様の図。

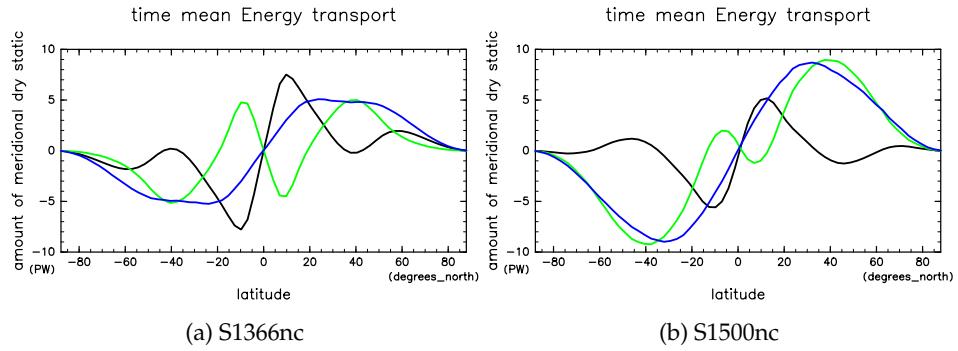


図 1.29: 各実験での時間平均・東西平均された南北熱輸送量。緑線が潜熱輸送、黒線が乾燥静的エネルギーの輸送、青線が全熱輸送量。横軸は緯度であり、縦軸は北向きの輸送量で、単位は PW。0.25 日間隔で時間平均をとった。

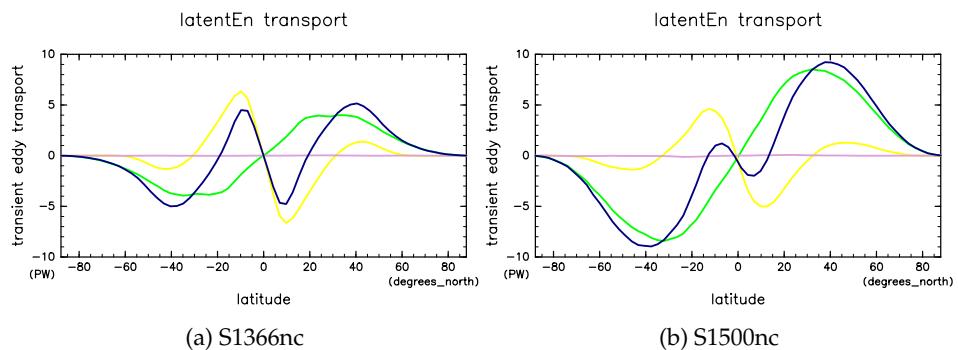


図 1.30: 雲なし各実験での潜熱輸送。青線が全輸送量  $[\overline{Lqv}]$ 、黄線が平均子午面循環による輸送量  $[\overline{Lq}][\bar{v}]$ 、桃線が停滯性擾乱による輸送量  $[(Lq)^*\bar{v}^*]$ 、緑線が移動性擾乱による輸送量  $[(\overline{Lq})'\bar{v}']$ 。横軸は緯度であり、縦軸は北向きの輸送量で、単位は PW。

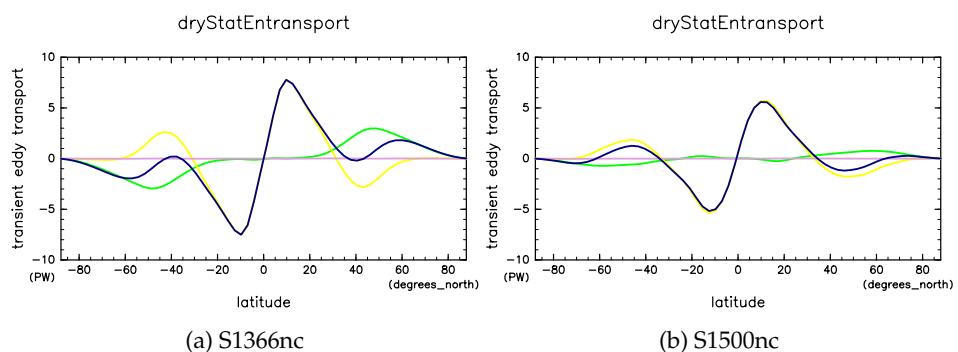


図 1.31: 雲なし各実験での潜熱輸送。青線が全輸送量  $[(c_{pn}T + gz)\bar{v}]$ 、黄線が平均子午面循環による輸送量  $[\overline{c_{pn}T + gz}][\bar{v}]$ 、桃線が停滞性擾乱による輸送量  $[(c_{pn}T + gz)^*\bar{v}^*]$ 、緑線が移動性擾乱による輸送量  $[(c_{pn}T + gz)'\bar{v}']$ 。横軸は緯度であり、縦軸は北向きの輸送量で、単位は PW。

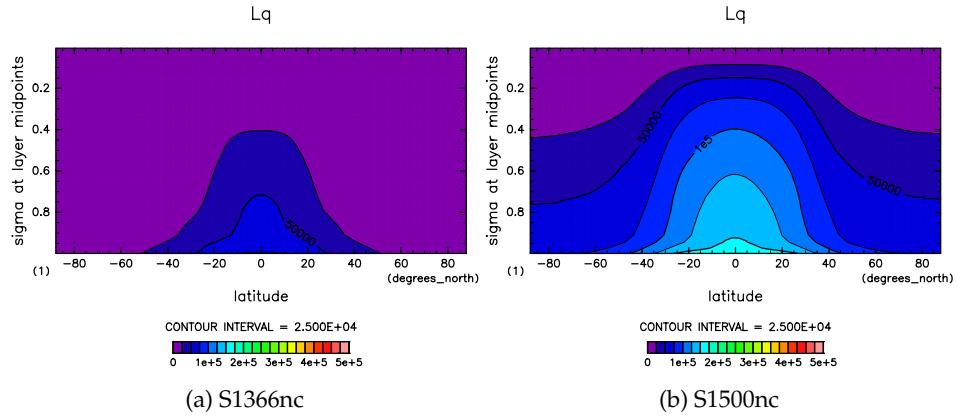


図 1.32: 雲なし各実験での潜熱  $\overline{[Lq]}$  の子午面分布。等値線間隔は全て 25 KJ である。

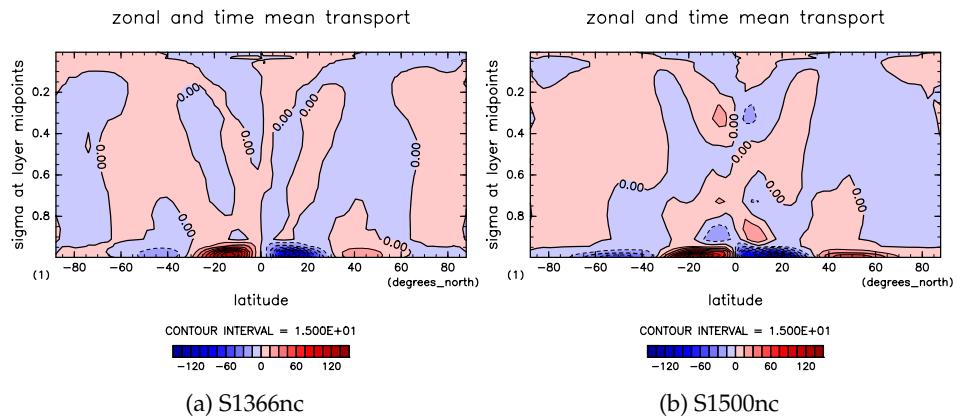


図 1.33: 雲なし各実験での平均子午面循環による潜熱輸送  $\overline{[Lq]}[\bar{v}]$  の子午面分布。等値線間隔は全て 15 PW である。

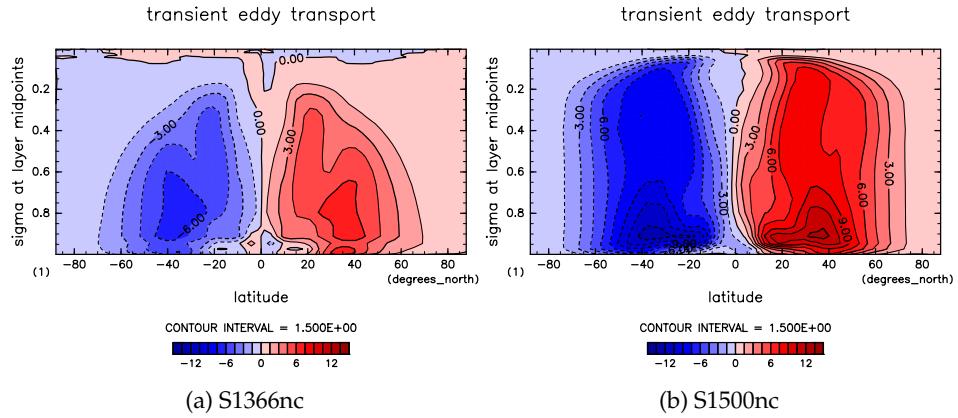


図 1.34: 雲なし各実験での移動性擾乱による潜熱輸送  $[(Lq)'v']$  の子午面分布。等値線間隔は全て 1.5 PW である。

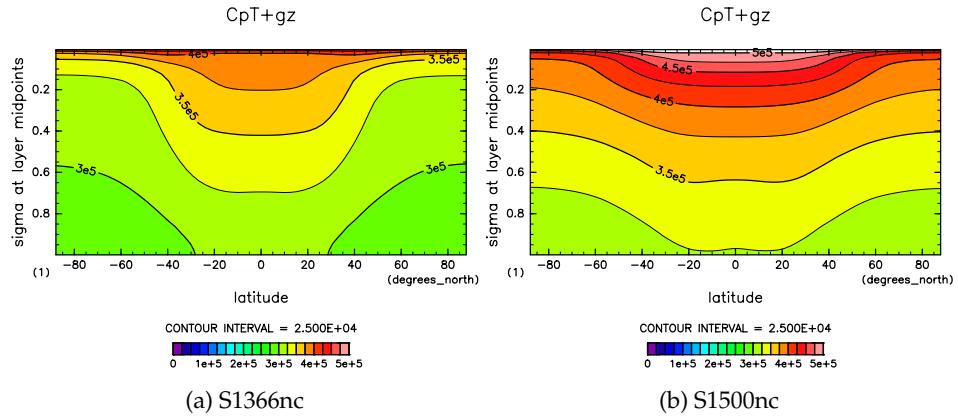


図 1.35: 雲なし各実験での乾燥静的エネルギー  $\overline{[c_{pn}T + gz]}$  の子午面分布。等値線間隔は全て 25 KJ である。

図 1.34 に潜熱の移動性擾乱による輸送の子午面分布、すなわち  $[(Lq)^*\bar{v}^*]$  の子午面分布を示す。中緯度域で移動性擾乱による輸送が大きいことがわかる。輸送が大きくなっている箇所では、傾圧不安定によって熱が輸送されていると考えられる。

図 1.36 に潜熱の停滞性擾乱による輸送の子午面分布、すなわち  $[(Lq)'v']$  の子午面分布を示す。潜熱の停滞性擾乱による輸送は、平均子午面循環による輸送や、雲ありの場合と同じく、モデルに地形が含まれていないため、停滞性擾乱がほとんど発生していないことがわかる。

図 1.37 に乾燥静的エネルギーの平均子午面循環による輸送の子午面分布、すなわち  $[(c_{pn}T + gz)][\bar{v}]$  の子午面分布を示す。いずれの実験でも、地表面付近の低緯度で低緯度向きの輸送があり、地表面付近の中緯度で高緯度向きの輸送がある。また、低緯度の高高度で高緯度向きの輸送がある。

図 1.38 に乾燥静的エネルギーの移動性擾乱による輸送の子午面分布、すなわち  $\overline{[(c_{pn}T + gz)^* \vec{v}]}$  の子午面分布を示す。乾燥静的エネルギーの移動性擾乱による輸送は、雲のない実験でははっきり

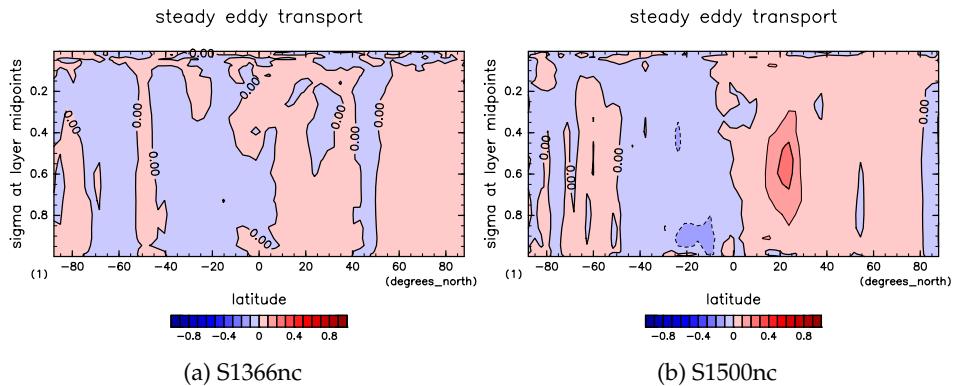


図 1.36: 雲なし各実験での停滯性擾乱による潜熱輸送  $[(Lq)^*\bar{v}^*]$  の子午面分布。等値線間隔は全て 0.1 PW である。

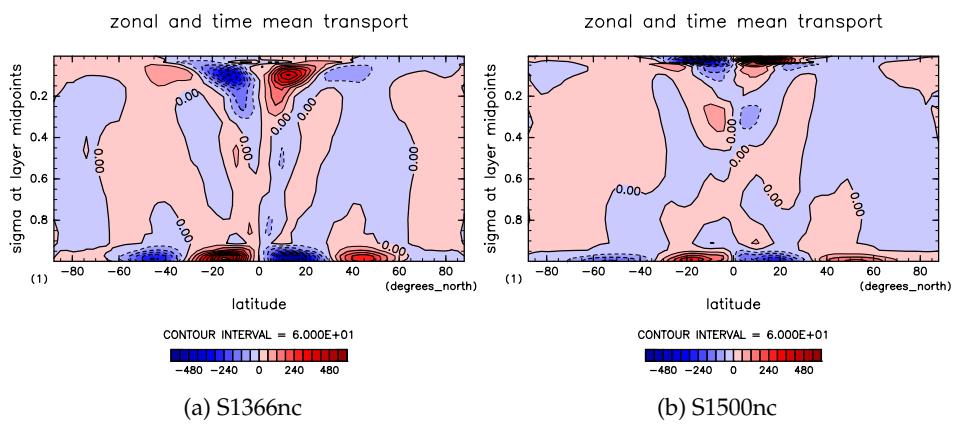


図 1.37: 雲なし各実験での平均子午面循環による乾燥静的エネルギー輸送  $[(c_{pn}T + gz)][\bar{v}]$  の子午面分布。等値線間隔は全て 60 PW である。

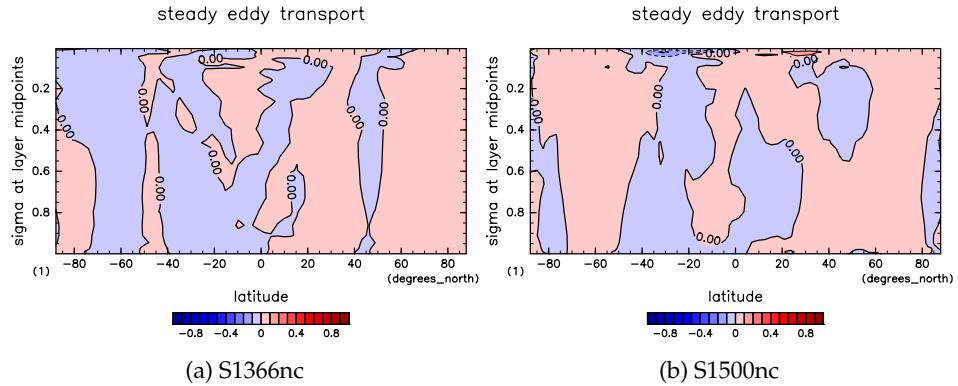


図 1.39: 各実験での停滯性擾乱による乾燥静的エネルギー輸送  $[(c_{pn}T + gz)'v']$  の子午面分布。等値線間隔は全て 0.1 PW である。

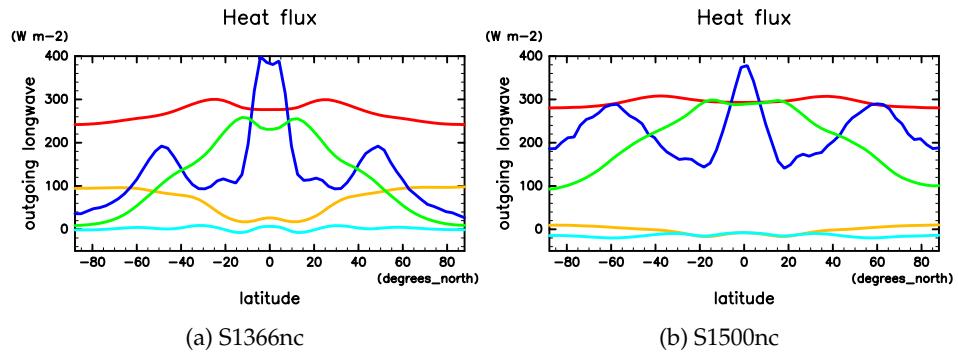


図 1.40: 雲なし各実験でのエネルギーflux の南北分布。横軸は緯度で、縦軸はエネルギーflux [W/m<sup>-2</sup>] 赤線が OLR、黄線が地表面の正味放射flux、青線が凝結加熱率、緑線が蒸発flux、水線が顯熱fluxを示す。

としたパターンが現れないことがわかる。

図 1.39 に乾燥静的エネルギーの停滯性擾乱による輸送の子午面分布、すなわち  $[(c_{pn}T + gz)'v']$  の子午面分布を示す。乾燥静的エネルギーの停滯性擾乱による輸送は、平均子午面循環による輸送や、移動性擾乱による輸送と比べて値が小さく、特に輸送が大きくなっている領域がない。これは、モデルに地形が含まれていないため、停滯性擾乱がほとんど発生していないことが理由だと考えられる。

図 1.40 に熱収支の緯度分布を示す。太陽定数が大きくなるにつれて、地表面の正味flux が減少し、凝結加熱率と蒸発flux が大きくなっているのがわかる。すなわち、太陽定数が大きくなるにつれて、入射量のほとんど全てが潜熱flux の形で大気に供給される。

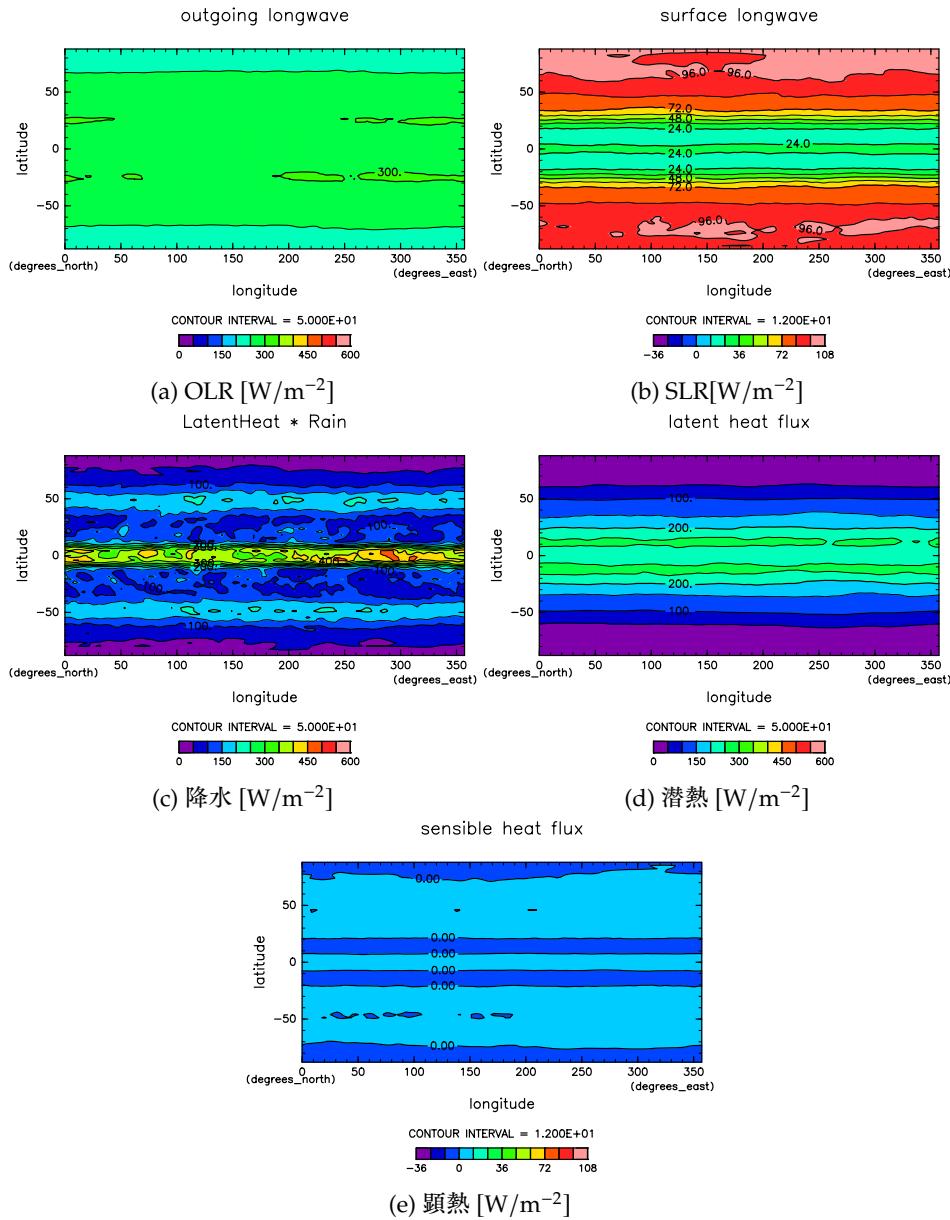


図 1.41: 実験 S1366nc のエネルギーflux の水平分布。等値線間隔はそれぞれ (a)  $50 \text{ W/m}^2$ ; (b)  $12 \text{ W/m}^2$ ; (c)  $50 \text{ W/m}^2$ ; (d)  $50 \text{ W/m}^2$ ; (e)  $12 \text{ W/m}^2$ 。

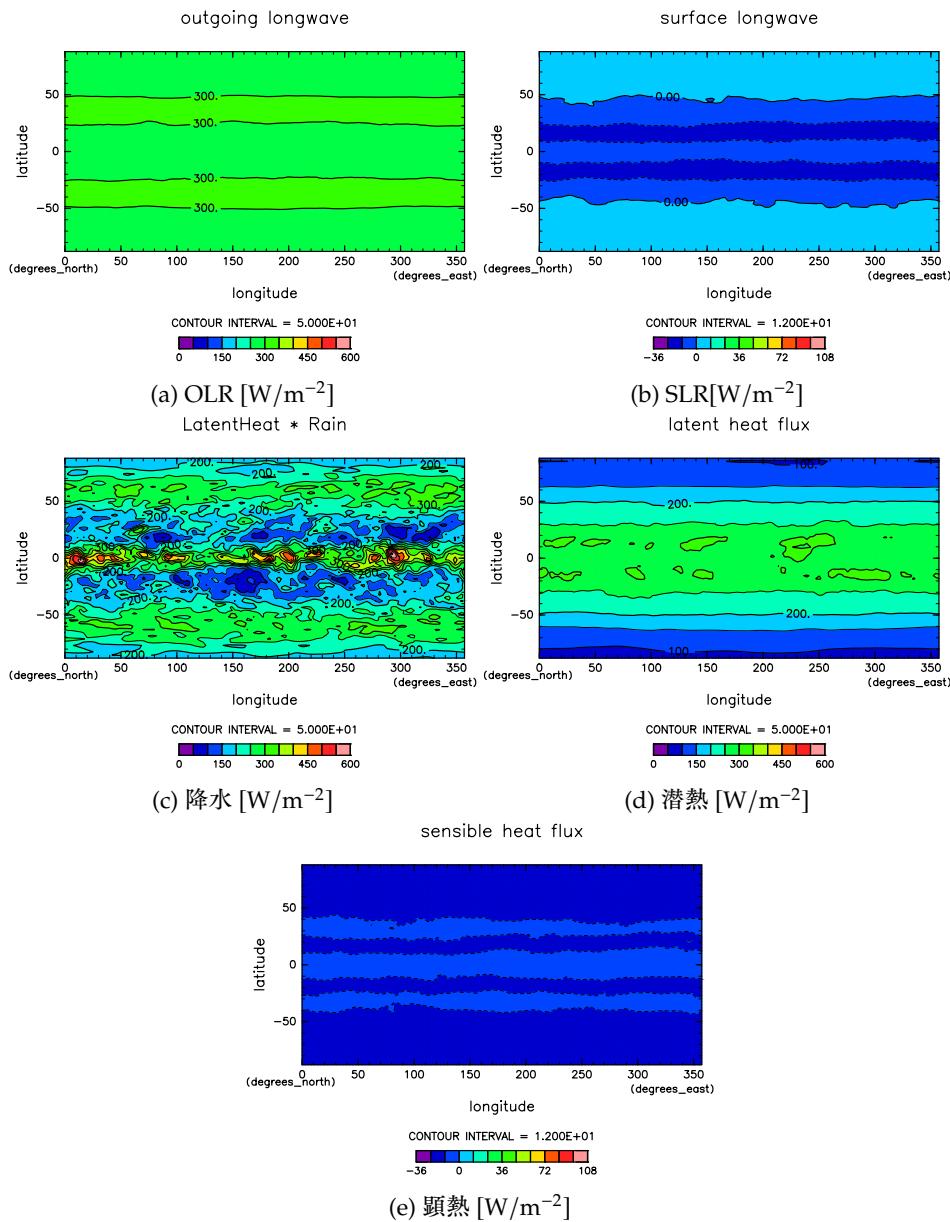


図 1.42: 実験 S1500nc のエネルギー フラックスの水平分布。図 1.41 と同様の図。