

第 1 章 実験結果

1.1 計算結果が平衡状態であるか

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 S1800 (図 1.1a から 1.1d) では、おおよそ 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 がほぼ一致して、大気の状態が平衡になっていることがわかる。一方で、S2000 (図 1.1e) では、全球平均 OLR が激しく変動していて、この図からは平衡状態に達しているかは判断できない。Ishiwatari *et al.* (2002) では、灰色大気での放射上限は 1600 W/m^2 であると結論したが、本研究で得られた結果では、 $S = 1800 \text{ W/m}^2$ でも平衡状態に達しているように見える。これは、Ishiwatari *et al.* (2002) のモデルでは雲がなかったのに対して、本研究では雲があるモデルで計算をしているため、雲によって短波放射が地表面に全ては到達しないからであると考えられる。

次に、各実験での OLR の東西平均を図 1.2 に、地表面温度の東西平均を図 1.3 に示す。この図を見ると、地表面温度も OLR も、太陽定数が増大するにつれて、南北の差が小さくなることが見て取れる。ここから、非灰色大気・雲ありのモデルでも、灰色大気・雲なしのモデルで Ishiwatari *et al.* (2002) が結論したように、モデルでも、太陽定数の増大に伴って、南北に一樣になるということと言えよう。ところで、実験 S2000 では OLR の東西平均が他の太陽定数とは異なっているパターンを示しているように見える。このパターンは、大気が暴走温室状態になったことで現れたと想像できる。しかし、先述したとおり、実験 S2000 で大気が暴走温室状態になっているかは判断ができない。そのため、実験 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 大気構造の太陽定数依存性

次に、各実験で得られた大気構造がどのようになっているか詳細に見てゆこう。各実験で得られた子午面構造を図 1.4 から 1.8 に示す。いずれの実験でも、東西風の子午面分布 (図 1.4a から 1.8a) を確認すると、ジェットが発生しているのがわかる。しかし、S1800 と S2000 ではジェットが大気上端にくっついており、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しても見てゆこう。図 1.4b から 1.8b に南北風の子午面分布を、図 1.4c から 1.8c に鉛直風の子午面分布を示す。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。そして、鉛直風は、低緯度から順に上昇流と下降流が交互に現れるパターンになっている。こ

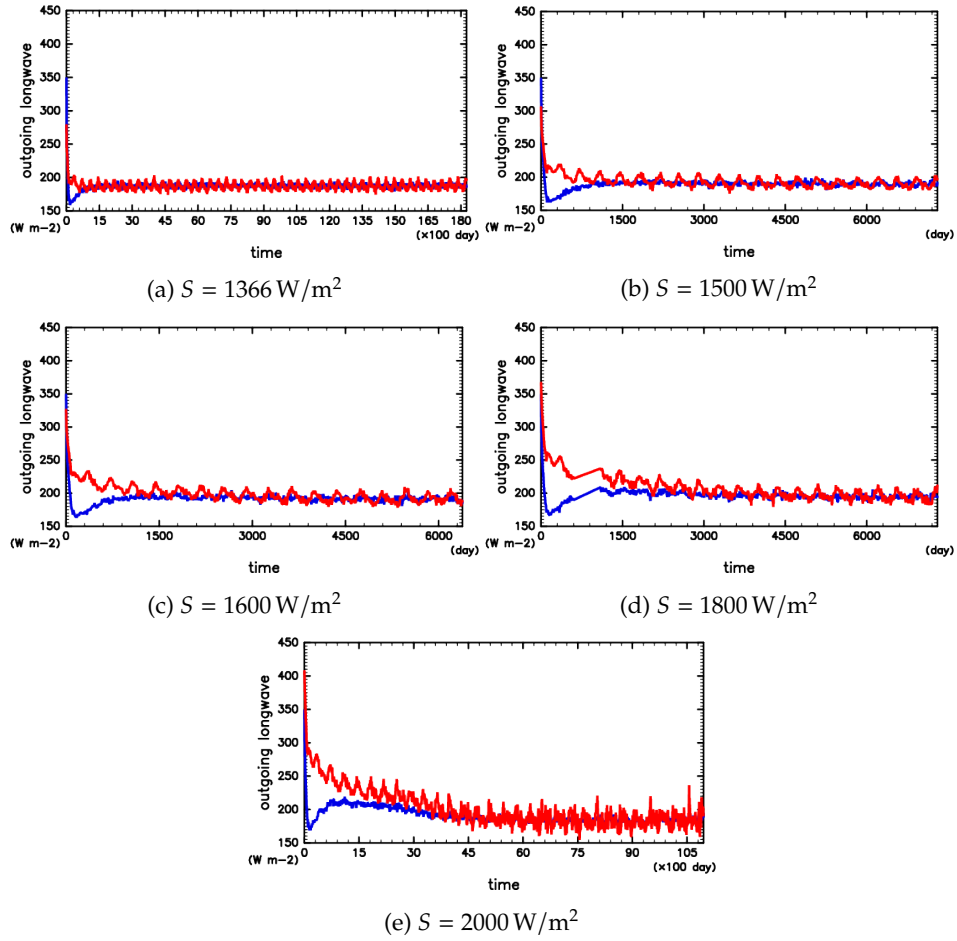


図 1.1: 各実験での全球平均した OLR (赤線) と OSR (青線) の時系列変化

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る。実験 S_{1800} 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 S_{2000} では、ハドレー循環とフェレル循環も明瞭ではなくなっている。また、太陽定数が大きくなるにつれて、鉛直風は小さくなっていくこともわかる。

比湿 (図 1.4e から図 1.8e) や気温分布 (図 1.4d から図 1.8d) 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て、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ゆくことがわかる。

1.3 南北熱輸送の太陽定数依存性

南北熱輸送に関して考察する。南北熱輸送は、潜熱によるもの F_L と、乾燥静的エネルギー F_D によるものとに分類できる。そして、 F_L と F_D の和が全熱輸送量 F_T になる。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ようになる。

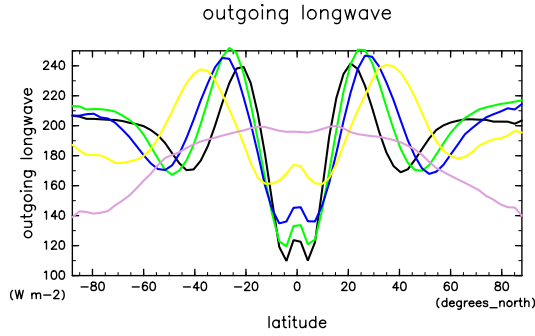


図 1.2: 各実験での OLR の東西平均。それぞれ、黒線: S1366; 緑線: S1500; 青線: S1600; 黄線: S1800; 桃線: S2000 の結果である。

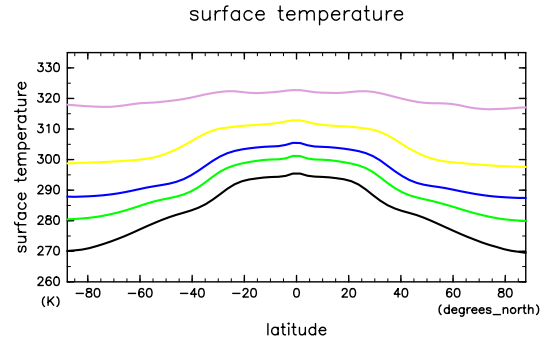


図 1.3: 各実験での地表面温度の東西平均。それぞれ、黒線: S1366; 緑線: S1500; 青線: S1600; 黄線: S1800; 桃線: S2000 の結果である。

$$F_L = \int_{p_s}^0 Lq v dp = \int_1^0 Lq v p_s d\sigma, \quad (1.1)$$

$$F_D = \int_{p_s}^0 (c_{pn}T + gz)v dp = \int_1^0 (c_{pn}T + gz)v p_s d\sigma, \quad (1.2)$$

$$F_T = F_L + F_D. \quad (1.3)$$

図 1.9 に東西平均・時間平均をした各実験での南北熱輸送量を示した。潜熱輸送に関しては、実験 S1800 までは太陽定数が大きくなるに従って、潜熱の南北輸送量は増大していくことが見て取れる。しかし、S2000 では潜熱の輸送量が小さくなっている。実験 S1800 まで太陽定数が大きくなるに従って潜熱輸送が大きくなるのは、太陽定数が大きくなるにつれて比湿の値が大きくなっているからだと考えられる。実験 S2000 で潜熱輸送が小さくなるのは、南北風が小さくなるからだと考えられる。

潜熱輸送は低緯度と中緯度に極値を持っている。これは、それぞれハドレー循環による低緯度向きの輸送と、フェレル循環による高緯度向きの輸送に対応している。比湿の値は太陽定数の増大に伴って大きくなるので、潜熱輸送も太陽定数の増大に伴って大きくなる。しかし、実験 S2000 では、南北風が小さくなっているため、潜熱輸送は小さくなっている。

乾燥静的エネルギーの南北輸送は実験 S1500 で最大になり、それより太陽定数を大きくすると乾燥静的エネルギーの南北輸送は減少してゆくのがわかる。

そして、全熱輸送量は、S1800 までは太陽定数が大きくなるにつれて増大しているが、S2000 では小さくなっている。

乾燥静的エネルギー輸送は中緯度にピークを持っている。

ところで、 $\bar{\bullet}$ で時間平均、 $[\bullet]$ で東西平均、平均からのずれを $\bullet' = \bullet - \bar{\bullet}$, $\bullet^* = \bullet - [\bullet]$ 、と表すこと

にすると、2つの量 x, v の積を時間平均・東西平均した値は、

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

のように変形をすることができる。(1.4)において、 $x = Lq$ とすると、潜熱の南北熱輸送を表す式になり、 $x = c_{pn}T + gz$ とすれば、乾燥静的エネルギーの南北輸送を表す式になるので、南北熱輸送は $[\bar{x}][\bar{v}]$ で表される項、 $[\bar{x}^*\bar{v}^*]$ で表される項、 $[\overline{x'v'}]$ で表される項の3つの和になっていることがわかる。 $[\bar{x}][\bar{v}]$ は平均子午面循環による輸送に対応する。 $[\bar{x}^*\bar{v}^*]$ で表される項は、停滞性擾乱による輸送、例えば山岳派による輸送を表している。 $[\overline{x'v'}]$ で表される項は、移動性擾乱による輸送、例えば低気圧による輸送を表している。図 1.10 と図 1.11 に、それぞれの熱輸送の内訳を示した。

- S1800 までは、比湿が大きくなるので潜熱輸送が大きくなる。
- 太陽定数が大きくなると、上空の南北風が小さくなるので gzv が小さくなり、乾燥静的エネルギーの輸送が小さくなる。
- S2000 は南北風が小さいので南北熱輸送が少ない。
- 地形がないので停滞性擾乱による輸送は小さい。
- 移動性擾乱による潜熱輸送は、どの太陽定数でも中緯度で大きくなり、中緯度での潜熱輸送の大部分を占める。
- 乾燥静的エネルギーの輸送は、低緯度では平均子午面循環によるものが大きく、中緯度・高緯度では移動性擾乱によるものが大きい。

•

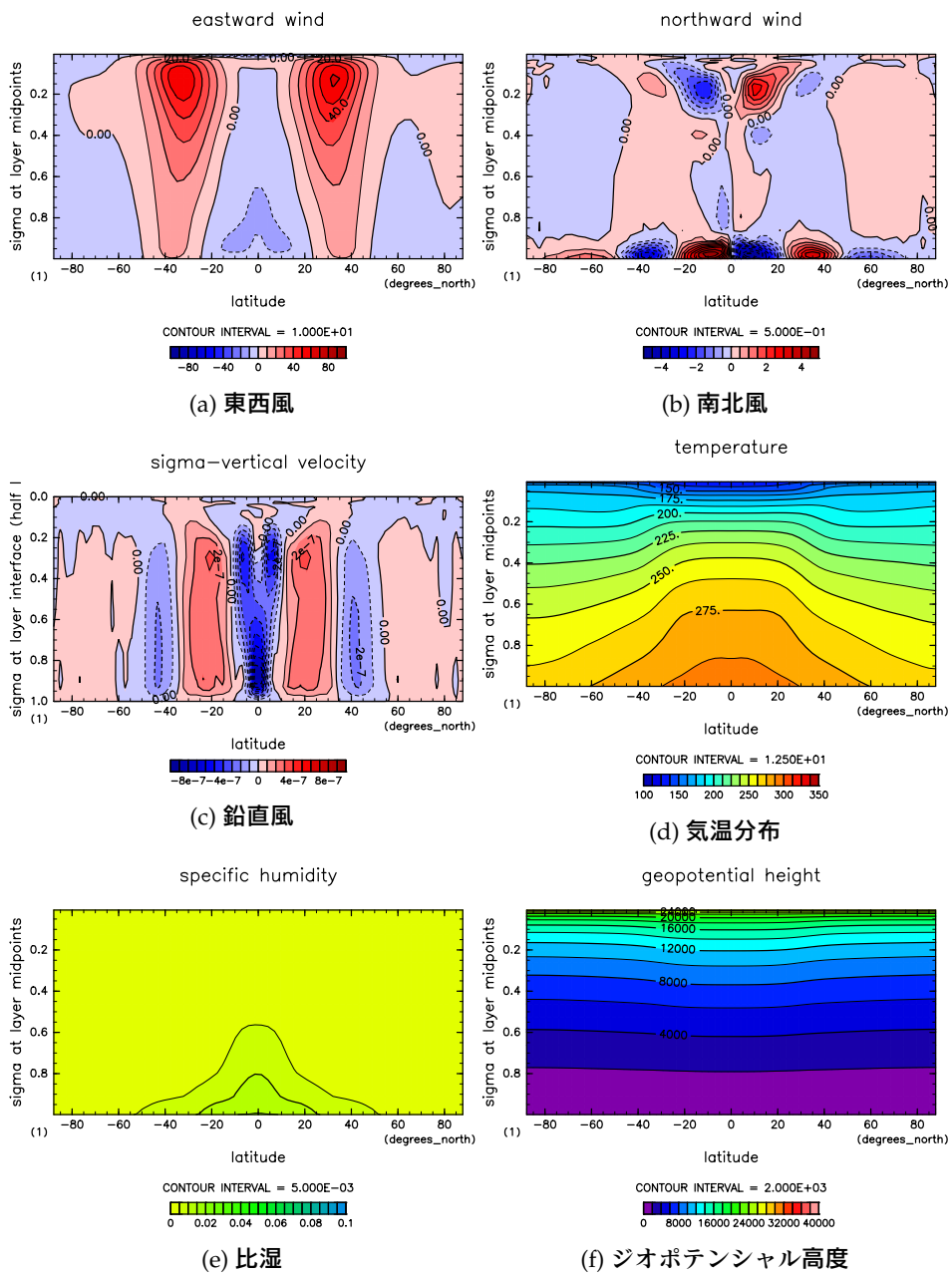


図 1.4: $S = 1366 \text{ W/m}^2$ の結果。11 年目の年平均値。

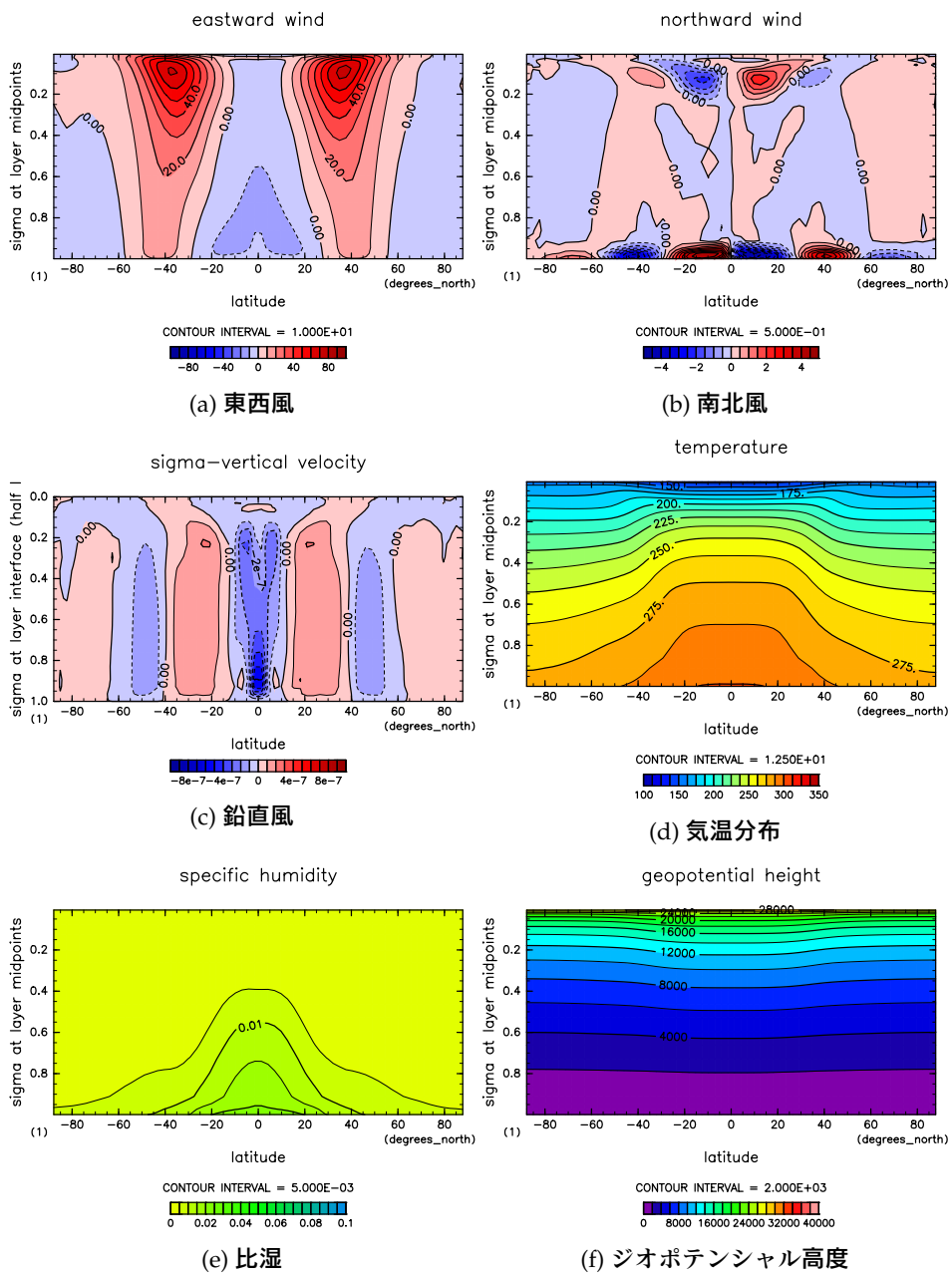


図 1.5: $S = 1500 \text{ W/m}^2$ の結果。11 年目の年平均値。

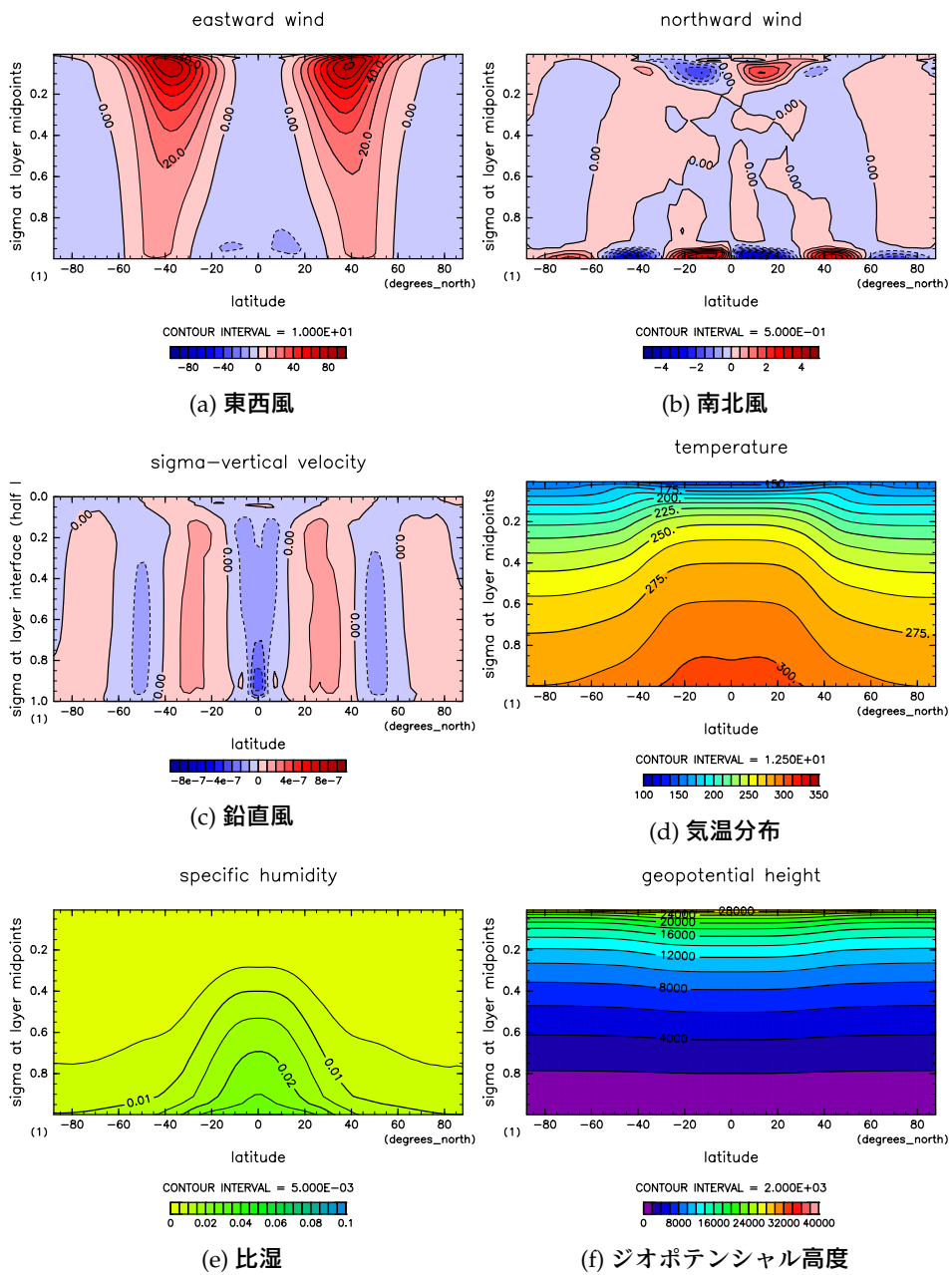


図 1.6: $S = 1600 \text{ W/m}^2$ の結果。11 年目の年平均値。

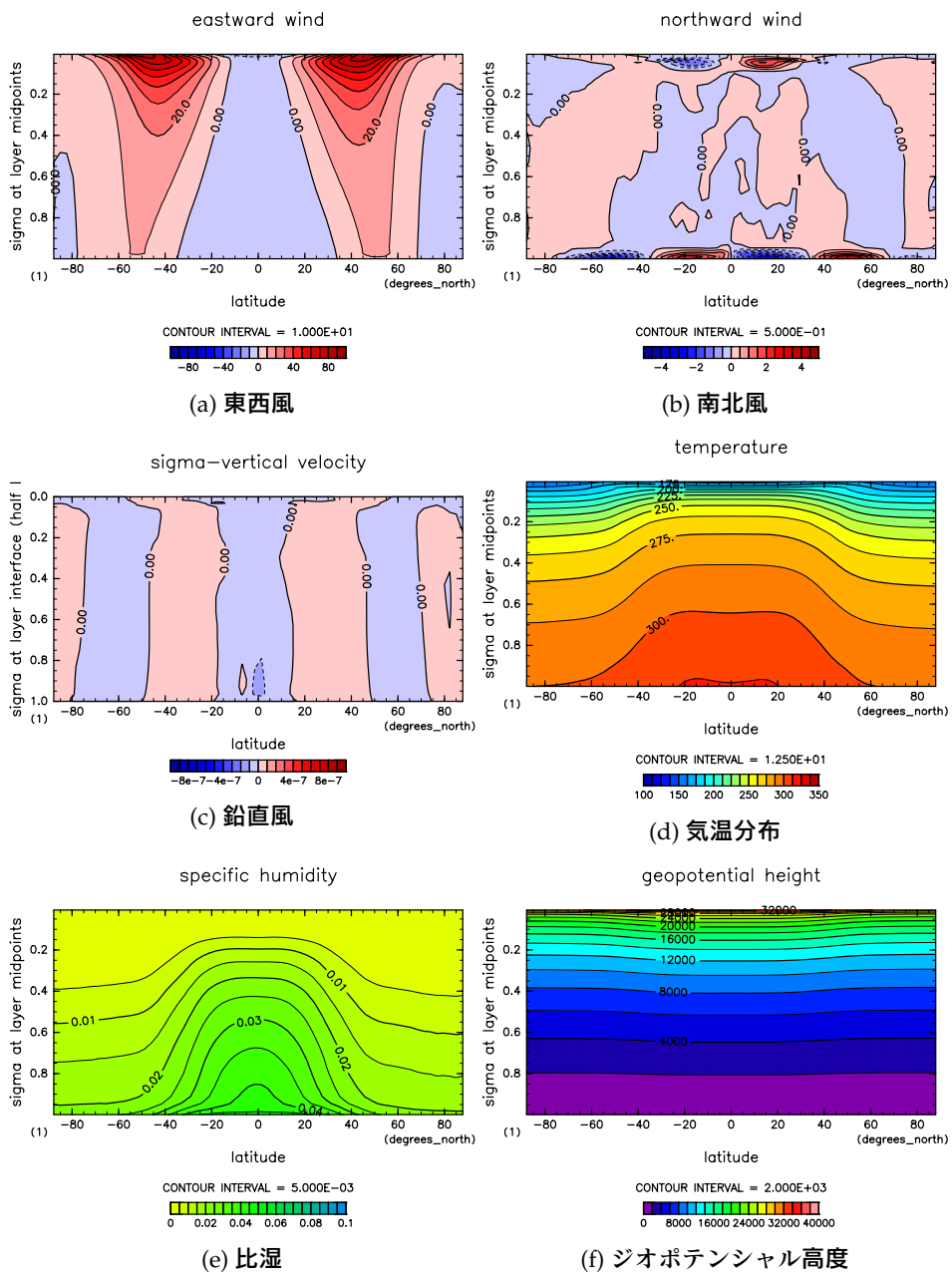


図 1.7: $S = 1800 \text{ W/m}^2$ の結果。11 年目の年平均値。

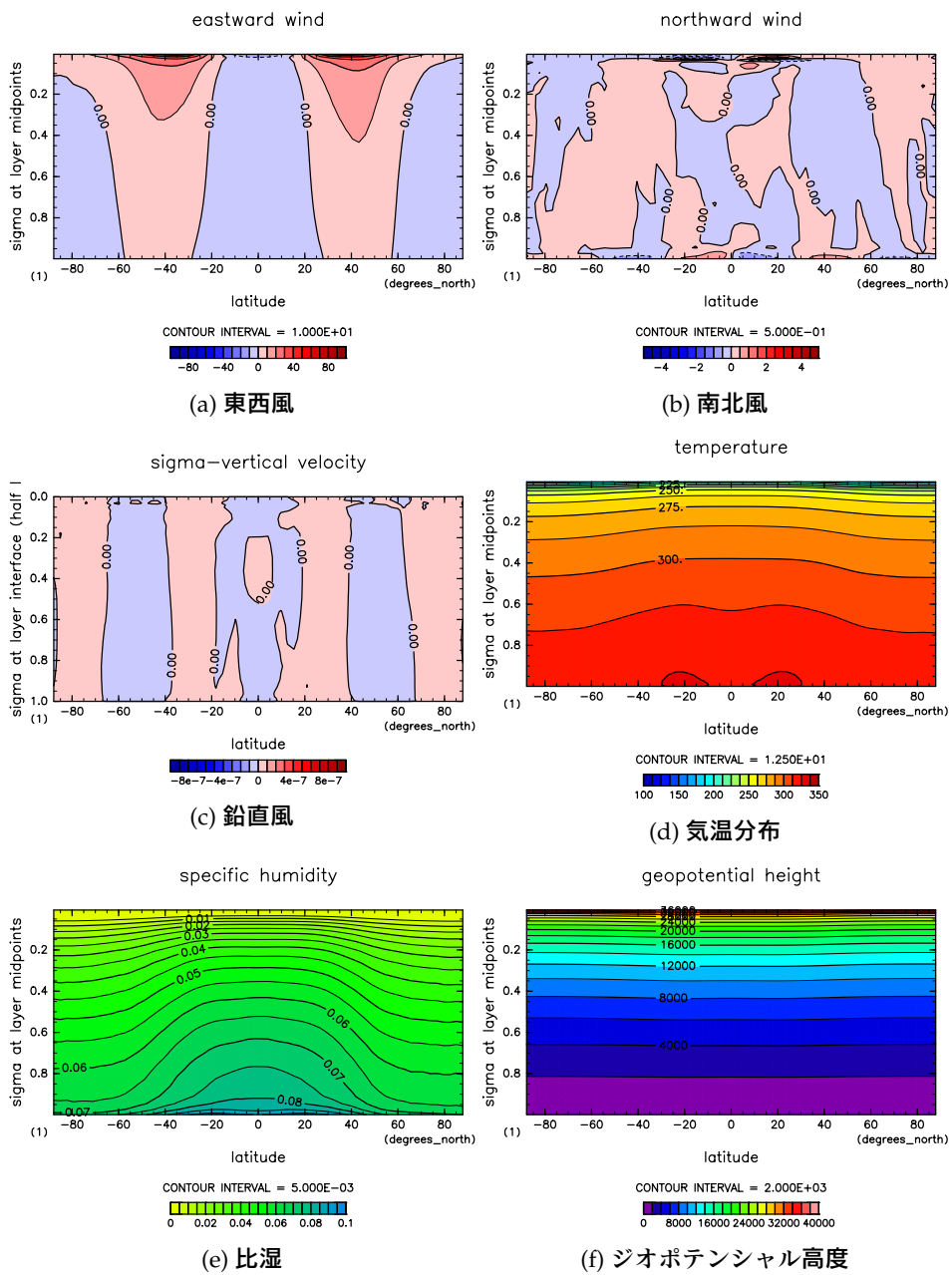


図 1.8: $S = 2000 \text{ W/m}^2$ の結果。31 年目の年平均値。

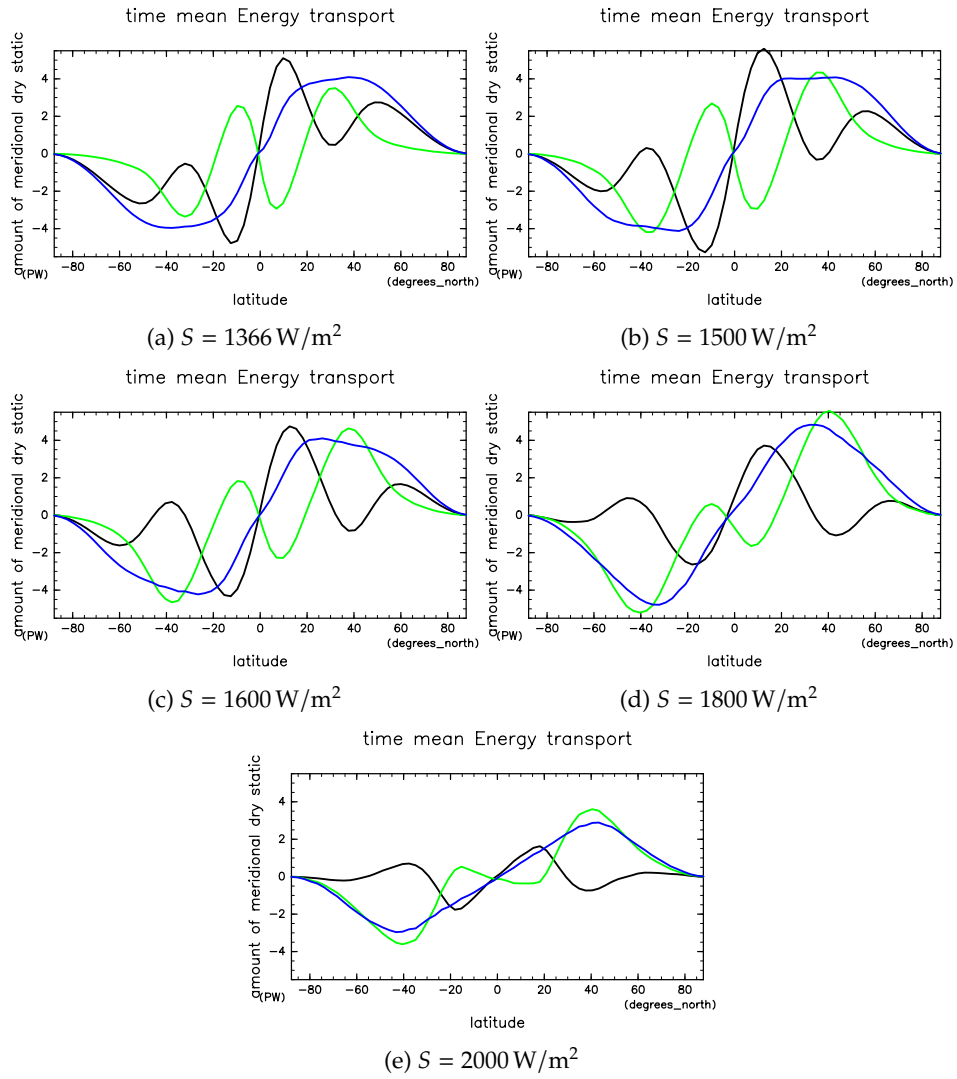


図 1.9: 各実験での時間平均・東西平均された南北熱輸送量。緑線が潜熱輸送、黒線が乾燥静的エネルギーの輸送、青線が全熱輸送量。

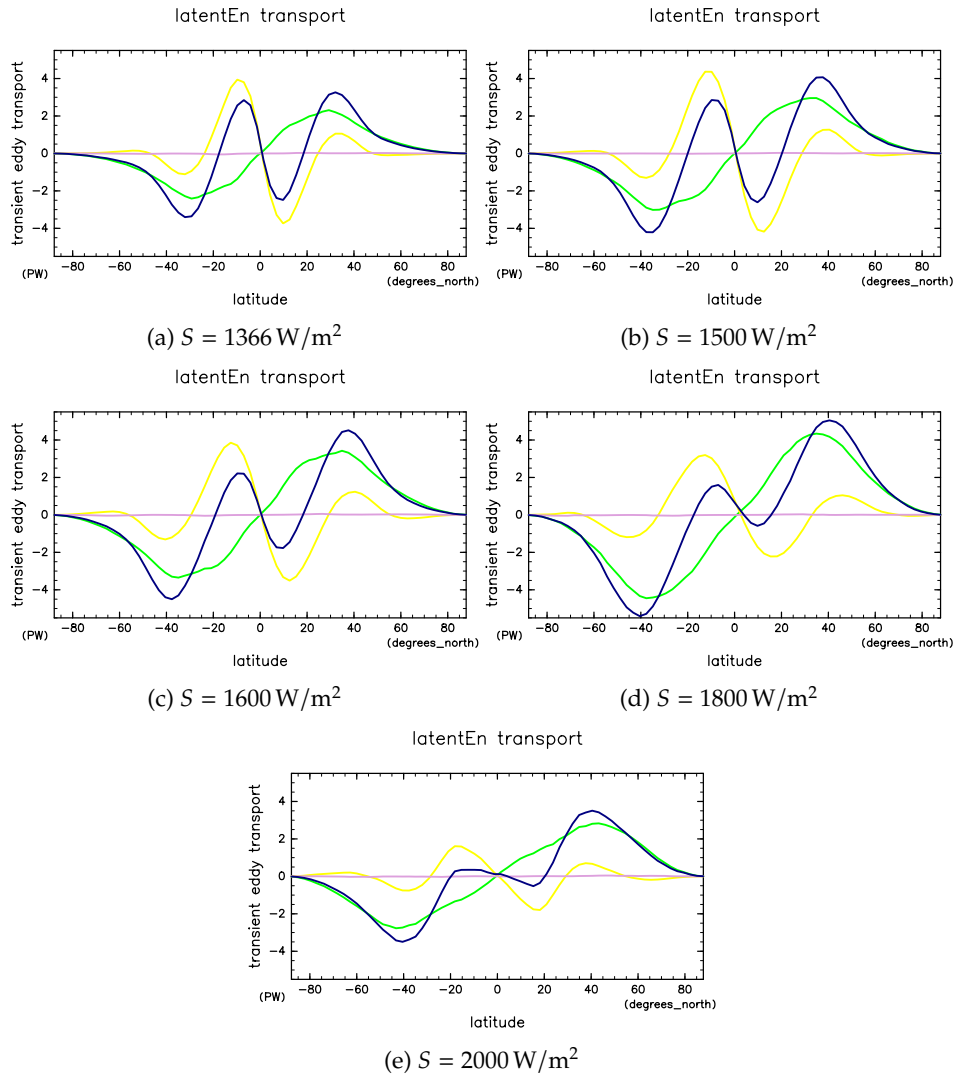


図 1.10: 各実験での潜熱輸送。青線が全輸送量、黄線が平均子午面循環による輸送量、桃線が停滞性擾乱による輸送量、緑線が移動性擾乱による輸送量。

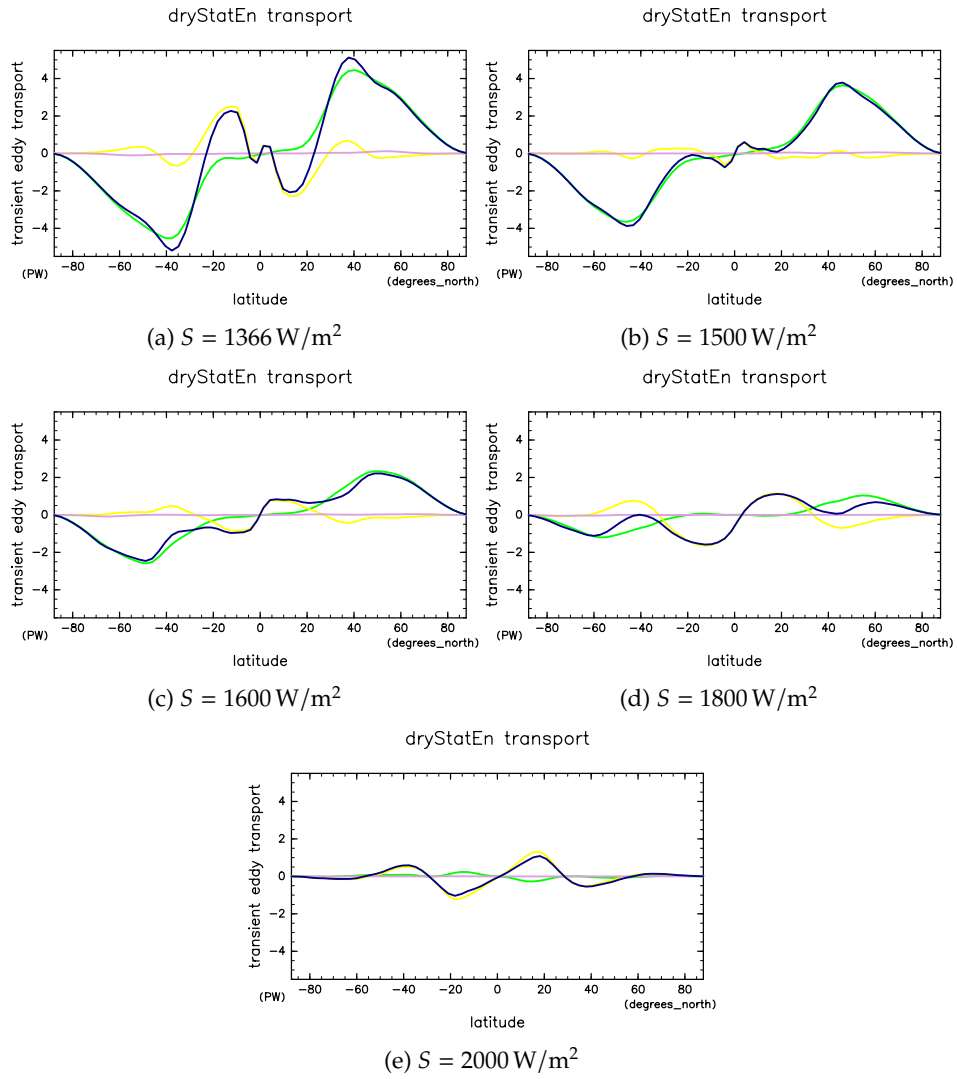


図 1.11: 各実験での乾燥静的エネルギー輸送。青線が全輸送量、黄線が平均子午面循環による輸送量、桃線が停滞性擾乱による輸送量、緑線が移動性擾乱による輸送量。