

熱帯対流圏界面気温の季節・経年スケールにおける変動要因

吉田 康平 (北大・環境)・山崎 孝治 (北大・地球環境)

1. はじめに

熱帯対流圏界面 (高度約 17km, 100hPa; 以下, 熱帯圏界面) は非常に低温な領域である. 空気が, この領域を通過して成層圏へ輸送され, 極で対流圏に戻るため (Brewer-Dobson 循環), その過程で空気は凝結により水蒸気を奪われる (SPARC 2000). このため, 熱帯対流圏界面の低温は成層圏の水蒸気量をコントロールする役割を担い, この熱帯圏界面気温を理解することは重要となる. しかしながら, 熱帯圏界面気温の季節変動や経年変動が起きるメカニズムについての理解が十分ではない.

近年の研究から, 熱帯圏界面気温の季節変動要因として, 中緯度成層圏に伝わるプラネタリー波の収束 (例えば, Holton et al.1995) による 'stratospheric pump' と, 熱帯対流圏での経度非対称凝結熱が生成する大気波動の収束 (Kerr-Munslow and Norton 2006 ; Norton 2006) などが起こす鉛直流による断熱冷却の強さの変動が挙げられる.

しかしながら, 前述した主要な熱帯圏界面気温の変動をもたらす要因は, 再解析データ等を用いた場合, いずれの要因も熱帯圏界面気温に対し鉛直流による断熱冷却の形で影響を及ぼすため, 大きな寄与がどちらなのかについて明瞭な判断を下すのが困難である.

そこで, 本研究は熱帯の海面水温 (SST) 分布が熱帯対流圏での凝結熱分布を与えると考え, 大気大循環モデル (AGCM) を用いてこの作用を増幅あるいは減衰させる境界条件を与え (例えば, 熱帯 SST の経度偏差を大きくし, 水蒸気凝結熱の経度非一様を増幅させる), その作用が熱帯対流圏の温度変動にどのような影響を与えるかを調べた.

2. モデルとデータ

本研究に使用したモデルは, CCSR/NIES AGCM Ver.5.6 で水平解像度 T42, 鉛直解像度 L24 (モデル上端は 0.4hPa), 標準実験として気候値 SST を与えた. モデルは 5 年のスピナップタイムを設け, その後の 15 年分のデータを 1 日単位で出力し, それを解析して月平均化, 気候値化して用いる. 帯状平均温度と残差鉛直流について, モデルの標準実験の気候値と ERA40 の 1979 年 1 月から 2002 年

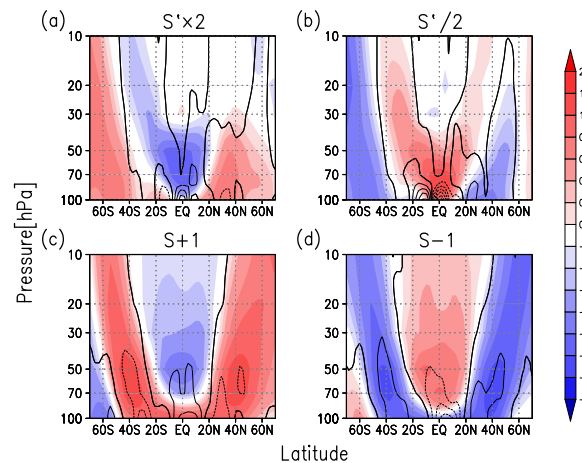


図 1: 各実験においての年平均 (color) 帯状平均温度偏差 [K], (contour) 残差鉛直流偏差 [$5 \times 10^{-5} \text{m/s}$] ※破線が負を示す. (a) $S' \times 2$ (b) $S' / 2$ (c) $S + 1$ (d) $S - 1$

8 月までの気候値の年平均値を比較すると, 熱帯対流圏界面付近で, モデルのほうがやや低温, 残差鉛直流が弱い傾向が見られた. さらに熱帯対流圏界面高度が ERA40 よりもやや高い (90hPa).

実験は以下のように, 月々の熱帯 ($15^{\circ}\text{S} - 15^{\circ}\text{N}$) SST 分布が標準実験と異なる 4 つについて行った.

実験名	実験概要
$S' \times 2$	熱帯 SST の経度偏差を 2 倍する
$S' / 2$	熱帯 SST の経度偏差を半分にする
$S + 1$	熱帯 SST を一様に 1K 増加させる
$S - 1$	熱帯 SST を一様に 1K 減少させる

以降の各実験での結果は全て標準実験からの偏差で表す.

比較のため観測データとして ECMWF ERA40 再解析データを使用した. 期間は 1979 年 1 月から 2002 年 8 月で水平解像度は $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 鉛直方向は 1000hPa から 1hPa の等圧面 23 層である.

3. SST 分布に関する実験結果

先ず 4 つの実験に関して年平均の帯状平均温度と残差鉛直流の標準実験に対する偏差を表す (図 1). $S' \times 2$ で, 熱帯圏界面および下部成層圏で低温偏差, $S' / 2$ では同領域で高温偏差となった. また

S + 1 は S' × 2 と類似した結果となり、熱帯成層圏で S' × 2 よりも上方まで低温偏差となった。しかし、熱帯対流圏界面は高温偏差となり、高温偏差から低温偏差に切り替わる境界が S' × 2 に比べ高い (70hPa 付近)。同様に S - 1 は S'/2 と類似した結果で、熱帯成層圏で上方まで高温偏差が続き、温度偏差が切り替わる境目が S'/2 に比べ高い (90hPa 付近)。

残差鉛直流偏差に関しては S' × 2, S + 1 が熱帯対流圏での上昇流偏差, S'/2, S - 1 が下降流偏差である。そして全ての実験で共通して 50hPa より上層で Brewer-Dobson 循環の変調とその鉛直流偏差による断熱温度変化が卓越している。S + 1, S - 1 は 100hPa から 10hPa まで鉛直方向にほぼ一様な残差鉛直流偏差の構造をしているが、S' × 2, S'/2 は熱帯、90hPa 付近に空間スケールの小さな循環偏差が存在していて、50hPa より上方の熱帯では残差鉛直流偏差が小さい。

熱帯圏界面について S' × 2 で強い EP フラックス収束偏差, S'/2 で強い EP フラックス発散偏差が見られたことから (図略)、この熱帯、90hPa 付近の空間スケールの小さい循環偏差は Kerr-Munslow and Norton(2006) などと言われた波に駆動された残差循環であることが考えられる。

ここで鉛直流以外の作用が熱帯圏界面気温に影響を与えている可能性があるため、影響のある作用を特定する解析を行う必要がある。そこで変形オイラー平均 (Transformed Euler Mean: 以下, TEM) 系熱力学方程式を用いた熱収支解析を行う (式は Andrews et al.(1987) を参照)。

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} = -\frac{\bar{v}^*}{a} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \phi} - \bar{w}^* \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} + \bar{Q} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial z} \left[\rho_0 \left(\overline{v'\theta'} \frac{\bar{\theta}_\phi}{a\theta_z} + \overline{w'\theta'} \right) \right] \quad (1)$$

ちなみに、

$$\begin{aligned} \bar{v}^* &\equiv \bar{v} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho_0 \frac{\overline{v'\theta'}}{\bar{\theta}_z} \right), \\ \bar{w}^* &\equiv \bar{w} + \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\cos \phi \frac{\overline{v'\theta'}}{\bar{\theta}_z} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$\bar{v}^*$ が残差南北流, $\bar{w}^*$ が残差鉛直流である。

(1), (2) の両方で下付きの添字 z は偏微分を表す。

(1) の左辺は温位変化で、右辺第一項から南北移流、鉛直移流、非断熱加熱、渦による南北熱輸送 (南

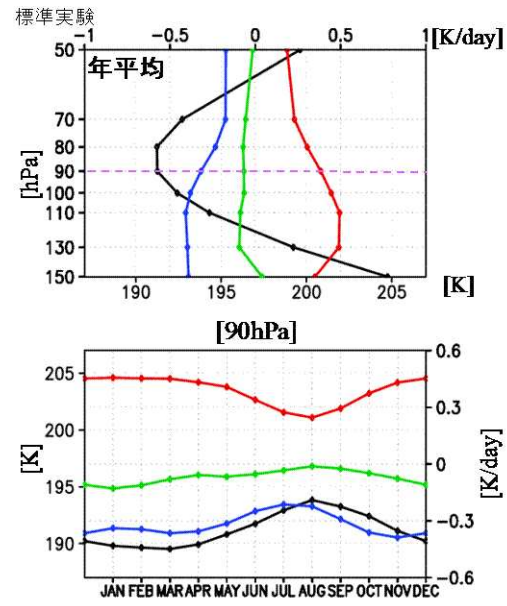


図 2: 標準実験での 10°S - 10°N TEM 系熱力学方程式による (上) 年平均値の鉛直分布 (下) 90hPa の季節変動の熱収支と気温。 (黒: 気温 [K], 青: 鉛直移流 [K/day], 赤: 非断熱加熱 [K/day], 緑: 鉛直渦熱 [K/day])

北渦熱)、渦による鉛直熱輸送 (鉛直渦熱) と呼ぶ。全ての実験で南緯 10 度から北緯 10 度を平均した、年平均場の鉛直分布、90hPa の季節変動について、TEM 系熱力学方程式による熱収支解析を行った。まずは標準実験について示す (図 2)。

ここで温位変化と南北移流、南北渦熱は値が小さいため無視した。

年平均値の鉛直分布から、80, 90hPa がもっとも低温を示す。90hPa では鉛直移流項が冷却、鉛直渦熱が弱い冷却、非断熱加熱が加熱でほぼバランスしている。50hPa に至ると鉛直渦熱はほぼ 0 となり、鉛直移流と非断熱加熱のバランスが成り立つ。この非断熱加熱の加熱効果は、主に気温が放射平衡温度からずれたことで生じる長波放射の変化によるもので、鉛直移流の冷却効果と釣り合うように長波放射の放出が弱まったためと考えられ、この影響は上方でより顕著である。

90hPa の季節変動から、温度と鉛直移流の対応が良いのがわかり、鉛直渦熱もわずかに影響を与え、非断熱加熱と逆の変動をしているのがわかる。

ここから熱帯圏界面気温に関して鉛直移流の寄与が大きく、鉛直渦熱が小さいとわかる。

S' × 2, S'/2 に関して同様の図を示す (図 3)。

年平均値の鉛直分布について、S' × 2 では 90hPa で低温偏差となり、鉛直渦熱の負偏差と非断熱加熱の正偏差がバランスし、50hPa では低温偏差と、

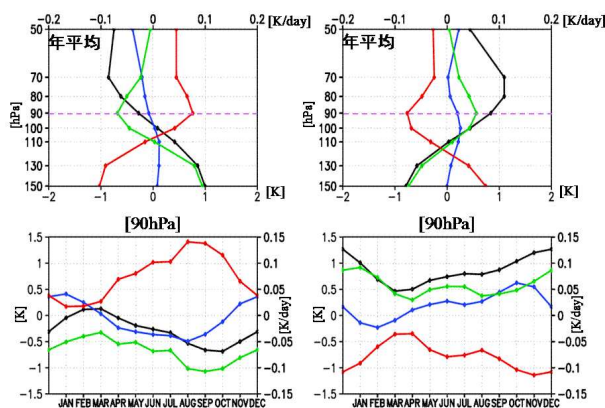


図 3: 図 2 と同様. ただし, (左) $S' \times 2$ (右) $S'/2$ での標準実験からの偏差

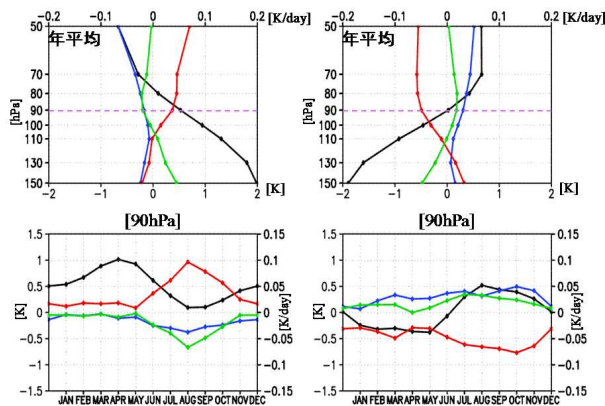


図 4: 図 2 と同様. ただし, (左) $S + 1$ (右) $S - 1$ での標準実験からの偏差

鉛直移流の負偏差と非断熱加熱の正偏差がバランスしている. また $S'/2$ では 90hPa で高温偏差, 鉛直渦熱の正偏差と非断熱加熱がバランスし, 50hPa では高温偏差, 鉛直移流の正偏差と非断熱加熱の負偏差がバランスしている. ここから 90hPa の温度偏差は鉛直渦熱偏差の影響を強く受け, その上方では鉛直移流の効果が卓越するのがわかる.

90hPa の季節変動は $S' \times 2, S'/2$ のいずれも, 温度偏差と鉛直渦熱の対応が良く, 非断熱加熱がその逆になっている. 年平均では影響の小さかった鉛直移流偏差だが, 鉛直渦熱と類似した季節変動をしていて, 気温の季節変動の振幅を大きくしている.

$S + 1, S - 1$ に関して同様の図を示す (図 4).

年平均値の鉛直分布について, $S + 1$ では 90hPa で高温偏差となり, 非断熱加熱の正偏差と鉛直移流の負偏差, 鉛直渦熱の負偏差がバランスしていて, 50hPa で低温偏差, 非断熱加熱の正偏差と鉛直移流の負偏差がバランスしている. $S - 1$ では

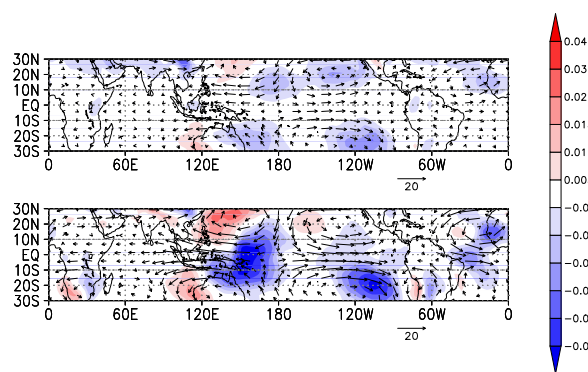


図 5: 標準実験での 12-3 月の (上)70hPa(下)100hPa における鉛直渦熱フラックス ($w'\theta'$) [K·m/s] と水平風 [m/s].

90hPa で温度偏差がほぼ無く, 非断熱加熱の負偏差と鉛直移流の正偏差, 鉛直渦熱の正偏差がバランスしている. 50hPa で高温偏差, 非断熱加熱の負偏差と鉛直移流の正偏差がバランスしている. ここから 50hPa では $S' \times 2, S'/2$ と同様に鉛直移流の効果が卓越しているのがわかる. しかし 90hPa は温度偏差と非断熱加熱偏差が同符号になっており, 前述した温度のずれが起す長波放射の変化の逆の作用が起きている. これは吸収する長波放射の大きさが変わったためと考えられる.

90hPa の季節変動について, $S + 1$ では温度偏差と対応がよいのは鉛直渦熱偏差となるが, 符号が一致していない上に $S' \times 2, S'/2$ ほど変動も一致していない. 非断熱加熱とは同符号でほぼ逆の季節変動をしている. $S - 1$ では鉛直移流偏差, 鉛直渦熱偏差のいずれも対応が悪く, 7-11 月のみ符号が一致する. 非断熱加熱とは 1-5 月に同符号でほぼ逆の季節変動をしている.

ここから熱帯海面水温を一様に変化させた場合, 非断熱加熱の熱帯圏界面気温への寄与が考えられ, 鉛直移流や鉛直渦熱と熱帯圏界面気温の対応が悪くなるのが考えられる.

4. 各作用に関する考察

全ての実験 (特に $S' \times 2, S'/2$) で温度偏差に対して大きな寄与をもたらした, 鉛直渦熱に関して考察するため, 12-3 月での標準実験と特に熱帯対流圏界面付近の温度偏差への影響が顕著だった $S' \times 2$ の 100hPa と 70hPa における鉛直渦熱フラックス ($\overline{w'\theta'}$) と水平風の分布を表す (図 5, 6).

標準実験は 100hPa において赤道, 160°E と 30°W を中心とした負の鉛直渦熱フラックスが現れ, 70hPa

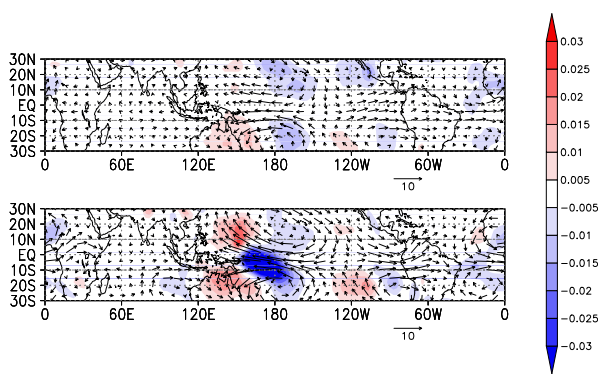


図 6: 図 5 と同様. 但し $S' \times 2$ の標準実験からの偏差.

ではそれが強く減衰している. 他にも 100hPa で大きな鉛直渦熱フラックスは存在するが, $10^{\circ}\text{S} - 10^{\circ}\text{N}$ から外れている上, 70hPa での減衰が弱い. これら負の鉛直渦熱フラックスが上方で減衰することで, この間の領域を冷却する効果を与える. 鉛直渦熱フラックスと水平風の分布とを併せて考えると, その分布は松野-Gill パターン (Matsuno, 1966; Gill, 1980) との類似が見られる. そして 6-9 月は鉛直渦熱フラックスの 100hPa での負の中心が松野-Gill パターンと同様に北東に変位する.

$S' \times 2$ は赤道上の 170°E 付近を中心とした, 鉛直渦熱フラックスの負偏差が 100hPa で見られ, それが 70hPa では弱化している. よってこのフラックスが収束することで熱帯圏界面に低温偏差をもたらしていると考えられる. $S'/2$ では同じ領域に正偏差が 100hPa で現れ, 70hPa で減衰し, 熱帯圏界面に高温偏差をもたらしていると考えられる (図略).

ここから, 熱帯 SST の経度偏差を増幅 (減衰) させたことで熱帯対流圏における凝結熱の経度非対称が強化 (弱化) されパターンが強化 (弱化) したと考えられる.

現実でもこの鉛直渦熱の作用が見られるか確認するため, 熱帯海面水温の経度偏差が大きい顕著な ENSO イベント時 (1996 年-1999 年) に, ERA40 とその時期の海面水温を与えたモデル結果を比較したところかなりの一致が見られ, 現実でも鉛直渦熱の作用は存在し, モデルで再現可能であることが明らかになった (図略).

5. 結論

CCSR/NIES AGCM Ver.5.6 を用いた数値実験で, 熱帯界面水温分布の変化によって熱帯対流圏界面付近の帯状平均温度にどの作用が大きな影響

を与えるかについて調べた.

数値実験について, 南緯 15 度から北緯 15 度までの海面水温の経度偏差を増幅 (減衰) させた実験では, 年平均した熱帯対流圏界面 ($90\text{hPa}, 10^{\circ}\text{S} - 10^{\circ}\text{N}$) の帯状平均温度が下降 (上昇) し, その主な影響が渦による鉛直熱輸送 (鉛直渦熱) の効果だった. 南緯 15 度から北緯 15 度の海面水温を一様に 1K 上昇させた実験では, 非断熱加熱の効果で熱帯対流圏界面気温が上昇した. また一様に 1K 下げた実験では熱帯圏界面気温は変わらず, 鉛直移流と鉛直渦熱の加熱作用と非断熱加熱の冷却作用が釣り合う形となった. 50hPa より上部では全ての実験で Brewer-Dobson 循環の変調による鉛直移流の作用が卓越した.

鉛直渦熱は熱帯で卓越する松野-Gill パターン状の循環場によって生成され, 熱帯海面水温の経度偏差の増幅 (減衰) がその作用の強化 (弱化) をもたらした.

参考文献

- Andrews, D. G., J. R. Holton, and C. B. Leovy, 1987: *Middle Atmosphere Dynamics*. Academic Press.
- Gill, A. E., 1980: some simple solution for heat-induced tropical circulation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 106, 447-462.
- Holton, J. R., P. H. Haynes, M. E. McIntyre, A. R. Douglass, R. B. Rood, and L. Pfister, 1995: Stratosphere-troposphere exchange. *Rev. Geophys.*, 33, 403-439.
- Kerr-Munslow, A. M., and W. A. Norton, 2006: Tropical wave driving of the annual cycle in tropical tropopause temperatures. Part I: ECMWF analyses. *J. Atmos. Sci.*, 63, 1410-1419.
- Norton, W. A., 2006: Tropical wave driving of the annual cycle in tropical tropopause temperatures. Part II: Model results. *J. Atmos. Sci.*, 63, 1420-1431.
- Matsuno, T., 1966: Quasi-geostrophic motions in the equatorial area. *J. Meteor. Soc. Japan*, 44, 25-43.
- SPARC: Assessment of Upper Tropospheric and stratospheric Water Vapor, pp. 215-220, World Climate Research Programme, WCRP-113, WMO/TDNo. 1043, 2000.