

熱帯対流圏循環変動のデータ間比較

吉田康平¹ 山崎孝治²

1:北海道大学大学院環境科学院 2:北海道大学大学院地球環境科学研究院

1. 概要

熱帯対流圏界面付近の気温・循環の変動は熱帯対流圏循環（例えば Hadley 循環や Walker 循環）に強い影響を受けている。現在提供されている再解析データはモデル構造・境界値・同化手法の違いで異なる熱帯対流圏循環を形成することが多くの研究で示されてきた（例えば, Grotjahn [2008], Onogi et al. [2007], Chan and Nigam [2008]）。ECMWF の新しい再解析データ ERA-Interim が提供されたこともあり、熱帯対流圏界面付近の熱帯対流圏循環からの影響を議論するにあたり、熱帯対流圏循環の気候値や ENSO への応答の再解析データ間の差異を理解する必要がある。

そこで本研究では Hadley 循環(熱帯における帯状平均子午面流で示す)の気候値や ENSO に対する応答、熱帯対流圏界面気温、 15°S - 15°N , 100hPa の最低温領域 (Cold-point)の気温の時系列についてデータ間比較を行いデータ間の差異、熱帯圏界面付近への影響を議論する。

2. 使用データ・解析手法

使用する再解析データは以下である(詳細は表 1, 括弧は略称)。

- (1) ECMWF ERA-Interim (ERA-I)
- (2) ECMWF ERA40 (ERA40)
- (3) JRA25/JCDAS (JRA)
- (4) NCEP/NCAR Reanalysis 1 (NCEP1)
- (5) NCEP-DOE Reanalysis 2 (NCEP2)

データ間比較は ERA-Interim が 1989 年以降, ERA40 が 2002 年 8 月までしかデータが提供されていないため, 12-2 月平均 (DJF), 6-8 月平均(JJA)の気候値は比較期間を 1989-2001 年とし, 年変動は 1989 年以降のデータ存続期間について議論する。また顕著な El Niño である 1997/1998 年 DJF の気候値からのずれの比較を行う。熱帯対流圏の循環を議論する際には対流を駆動する非断熱加熱を考慮する必要がある。ので, Chan and Nigam [2008]と同様に熱力学エネルギー方程式の残差から非断熱加熱を診断して用いる(詳細は付録を参照)。

3. DJF 平均の比較

図 1 に 10°S - 10°N 平均, 帯状平均鉛直流の 850-100 hPa における鉛直プロファイルを示す。ERA40 は 150hPa 以外の全ての層で最大の帯状平均鉛直流を示した。熱帯における非断熱加熱についても同様に最大の値を示した。ERA-Interim は 150hPa で最大でその他の層でも比較的大きな値を示している。非断熱加熱も同様に大きな値で ERA40 と空間構造が類似している。JRA25/JCDAS は 300, 250hPa で ERA-Interim より大きな帯状平均鉛直流を示し、他の層は中間に位置する値である。非断熱加熱は 700-250 hPa に密集している。NCEP1 は 500hPa より下層で最も帯状平均鉛直流が弱く、上層でも比較的小さい値を示す。非断熱加熱も同様に下層で特に値

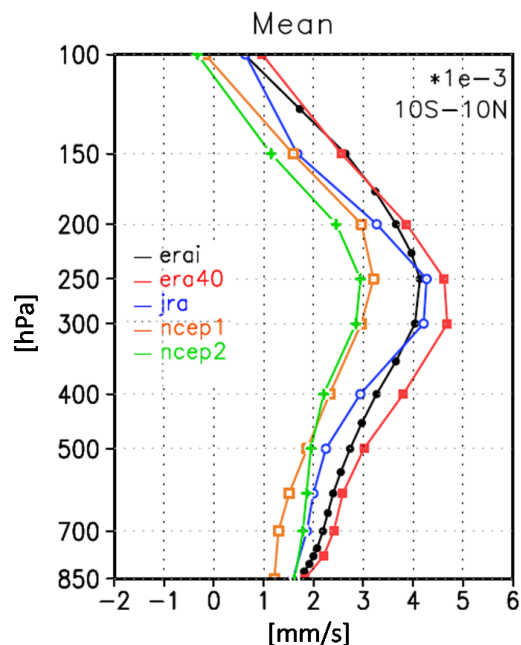


図 1. 各データの 10°S-10°N 平均した帯状平均鉛直流 [mm/s] の DJF 気候値の 850-100 hPa における鉛直プロファイル

の大きさが小さい。NCEP2 の帯状平均鉛直流は下層では JRA25/JCDAS と同程度の大きさだが 400hPa より上層では最小となる。非断熱加熱も同様に上層で小さい。図 2 に鉛直積分した帯状平均南北質量フラックスの最大値で定義した Hadley 循環の強度の時系列を示す。ERA40 が 1990-2002 年で最大の Hadley 循環を形成する。ERA40 のデータが存在しない 2002 年以降は JRA25/JCDAS が最大の Hadley 循環を形成する。最も弱いのが NCEP1 で ERA40 の 7 割程度の大きさである。経年変動の大きさは ERA40, NCEP2 が大きく ERA-Interim が小さい。そして ERA40, JRA25/JCDAS, NCEP1 は明確な Hadley 循環の増加傾向が見られる。そして全てのデータで大きな Hadley 循環の変動が見られるのが 1995 年や 1998 年などの El Niño が顕著な年と一致する。

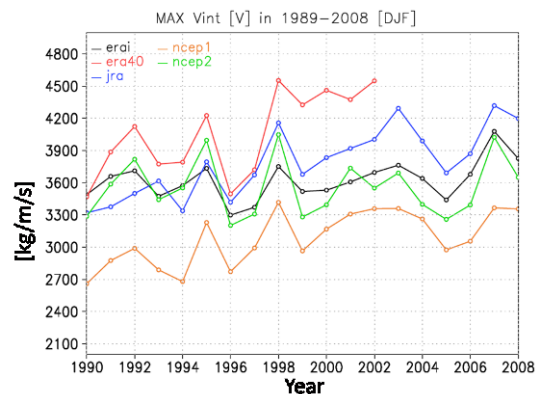


図 2. 各データの鉛直積分した DJF 平均・帯状平均南北質量フラックス [kg/m/s] の大きさの最大値の時系列

その変動が特に大きい 1998 年について 10°S-赤道平均した帯状平均鉛直流の気候値からのずれを図 3 にて示す。全ての層で最も帯状平均鉛直流偏差が大きいのは ERA40 である。非断熱加熱偏差も同様に全ての層で最も大きい。次いで帯状平均鉛直流偏差が大きいのが NCEP2 であり、

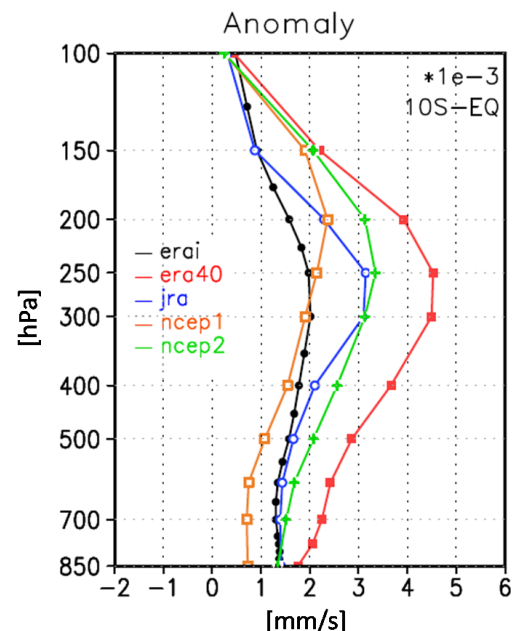


図 3. 各データの 1998 年の 10°S-赤道, DJF 平均した帯状平均鉛直流 [mm/s] の気候値からのずれ

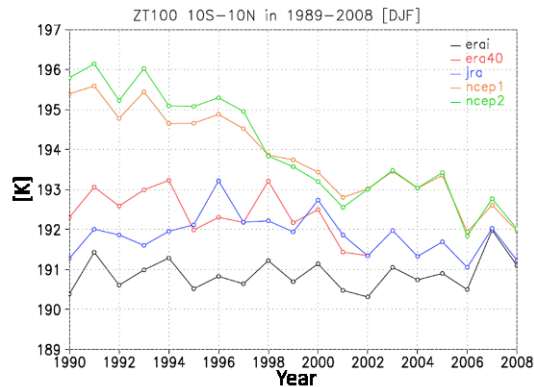


図 4. 各データの DJF, 10°S - 10°N 平均した 100 hPa における帯状平均気温[K]

非断熱加熱偏差も 850hPa より下層を除き 2 番目に大きい. JRA25/JCDAS は 300, 250hPa で NCEP2 に匹敵する帯状平均鉛直流偏差を持つが他の層では比較的小さい, 非断熱加熱は 850hPa 周辺で NCEP2 より大きい. ERA-Interim は 250-200hPa で最も帯状平均鉛直流偏差が小さく他の層でも比較的小さい. 非断熱加熱は JRA/JCDAS と同様に 850hPa 周辺で NCEP2 より大きい. NCEP1 は 300hPa より下層で帯状平均鉛直流偏差が最も小さく他の層でも比較的小さい. 非断熱加熱は全ての層で小さい. 図 4 にて 10°S - 10°N 平均した 100hPa での帯状平均気温の時系列を示す. NCEP1, 2 は他のデータに比べ 1990 年付近の気温が 4 K 程度高く, 明白な気温の減少傾向を持つ.

NCEP1 のデータは 1979 年より気温が 4 K 程度急上昇しており衛星データの気温の鉛直プロファイルを同化した影響で NCEP2 についても同様であると考えられる.

ERA-Interim は最も気温が低く経年変動も小さい. ERA40 は ERA-Interim より 2 K ほど気温が高く経年変動が ERA-Interim と 1998 年を除きよく一致している.

JRA25/JCDAS は ERA-Interim に比べ 1-2

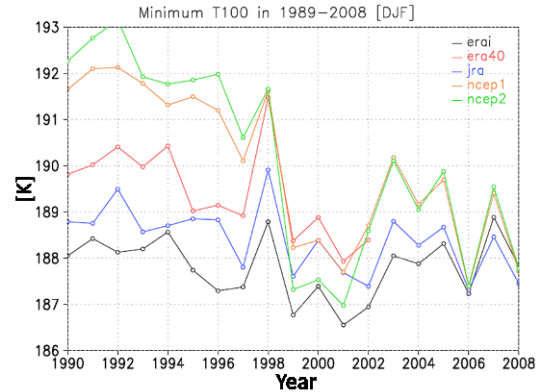


図 5. 各データの DJF 平均した 100 hPa, 20°S - 20°N 内の最低温領域(Cold-point)の気温 [K]

K 気温が高く変動は 1999 年以降よく類似している.

100hPa, 熱帯での最低温領域の気温を図 5 に示す (DJF においては赤道西太平洋付近が最低温領域となる). 図 4 に比べ全てのデータで ENSO の影響が特に El Niño 時の 1998 年の高温と El Niño から La Niña になる傾向がある 1990 年から 2000 年にかけての気温減少傾向などに現れている. NCEP1, 2 は図 4 と同様に 1990 年周辺に明らかに気温が高く明白な減少傾向を持つ.

ERA-Interim は図 4 と同様に最も気温が低く, ENSO の影響が小さい. このことは ERA-Interim が熱帯対流圏において ENSO に伴う変動が小さかった事と対応している. ERA40 は ERA-Interim より 2 K 程度気温が高く ENSO の影響が顕著に現れている. JRA25/JCDAS は ERA-Interim に比べ 0.5-1 K 気温が高く 1997 年以降の変動が 2001 年を除き類似している.

4. JJA 平均の比較

図 6 に JJA, 赤道- 15°N 平均した帯状平均鉛直流を示す. ERA40 は 600-400hPa で最

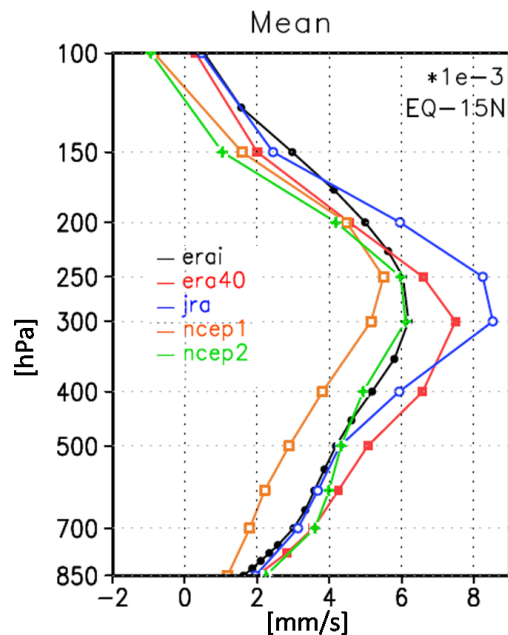


図 6. 各データの赤道-15°N 平均した帯状平均鉛直流 [mm/s] の JJA 気候値の 850-100 hPa における鉛直プロファイル

大の鉛直流を示し、非断熱加熱 700-300 hPa で大きい値を示す。ERA-Interim は 150, 100 hPa で最大の鉛直流を示し、他の層では中間程度の大きさを示す。非断熱加熱の空間分布は ERA40 と類似しているが、250hPa より下層で ERA40 より小さく、上層では大きい。JRA25/JCDAS は 300-200hPa で最大の鉛直流を示し、非断熱加熱は 500-300hPa で高い値を示した。NCEP1 は 250hPa より下層で最小の鉛直流を示し、上層でも比較的小さく 100hPa では負になる。非断熱加熱は全ての層で小さく 100hPa で負になる。NCEP2 は 200hPa より上層で最小の鉛直流を示し 200-400hPa で比較的小さく、それより下層で比較的大きい値を示し、100hPa では負の値を示す。非断熱加熱は 850-400hPa で大きな値を示し 250hPa から上層で小さく 100hPa では負の値を示す。図 7 に JJA

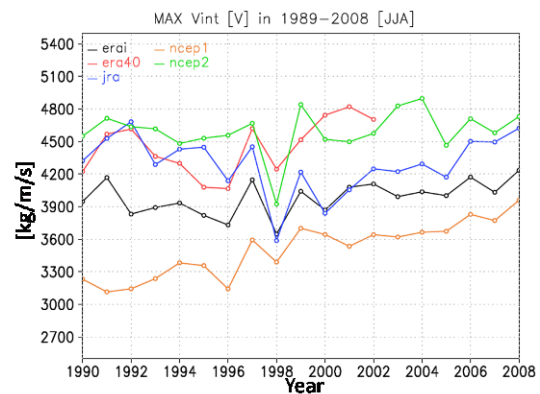


図 7. 各データの鉛直積算した JJA 平均・帯状平均南北質量フラックス[kg/m/s]の大きさの最大値の時系列

平均した Hadley 循環の強度の時系列を示す。最も Hadley 循環が強いのが NCEP2 であり 1998 年を除き最大の値を示す。

ERA40 と JRA25/JCDAS は 1990-1996 年ではほぼ同程度だがそれ以降は ERA40 の方が大きい。最も循環が弱いのが NCEP1 であり NCEP2 の 7 割程度であり、年々循環が強化する傾向にある。ERA-Interim は NCEP1 に次いで循環が弱い。また全てのデータで 1998 年の El Niño 時に循環が弱化しているのがわかり、NCEP2 と JRA25/JCDAS で特に変動が大きい。

図 8 にて 10°S-10°N 平均した 100hPa での帯状平均気温の時系列を示す。NCEP1,2 は図 4,5 と同様の 1990 年周辺の高温とその後の明白な気温減少傾向が現れている。最も気温が低いのは ERA-Interim であり、2007 年を除き最小である。ERA40 は ERA-Interim に比べ 1 K 程度気温が高く、気温の減少傾向が現れている。JRA25/JCDAS も ERA-Interim に比べ気温が 1 K 程度高く、ERA-Interim と変動が類似している。全てのデータで 1999 年の気温上昇とその後の気温低下が現れている。

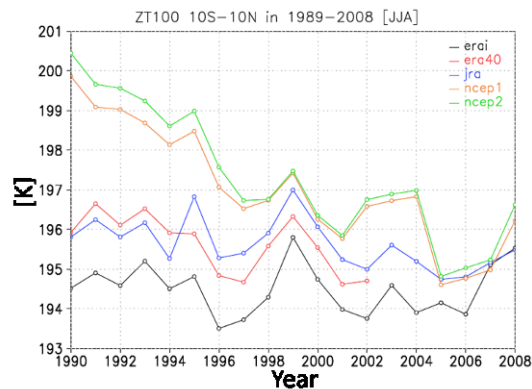


図 8. 各データの JJA, 10°S-10°N 平均した 100 hPa における帯状平均気温[K]

100hPa, 熱帯での最低温領域の気温を図 9 に示す (JJA においては赤道, あるいは 15°N 付近の西太平洋・インド洋付近が最低温領域となる). NCEP1,2 は図 4,5,8 と同様に 1990 年周辺の高温とそれ以降の明白な気温減少傾向がある. 最も気温が低いのは 2002 年までは ERA-Interim でそれ以降は全てのデータでほぼ同程度の気温である. 図 4,5,8 と異なり各々のデータの変動が一致しない傾向がある.

6. まとめと考察

5 つの再解析データについて, DJF, JJA の Hadley 循環, 熱帯の 100hPa 面気温について気候値と経年変動のデータ間比較を行った.

Hadley 循環は気候値については ERA40 が DJF で最も強く, NCEP1 が最も弱い. JJA は NCEP2 が最も強く NCEP1 が最も弱い. ERA-Interim は循環の強さが DJF で中間程度, JJA では比較的弱い. JRA25/JCDAS はいずれの季節も比較的循環が強い.

ERA40 と JRA25/JCDAS, NCEP2 は循環が年々増加し, ERA40 と NCEP2 は経年変動が大きく特に El Niño 時の増加が大きい

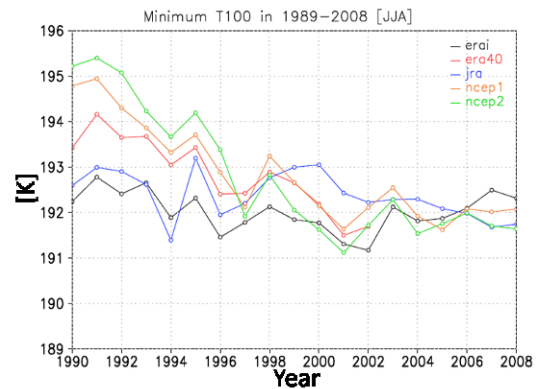


図 9. 各データの JJA 平均した 100 hPa, 20°S-20°N 内の最低温領域(Cold-point)の気温 [K]

(例えば 1998 年). それに対し ERA-Interim は経年変動が小さい. ERA-Interim は熱帯圏界面の最低温領域の気温に関して, DJF では全ての年で最も低温で, JJA でも低い値を示す. また ENSO に対応した経年変動は DJF で特に小さい. ERA40 と JRA25/ JCDAS は ERA-Interim に比べ気温が高く (ERA40:約 2 K, JRA25/JCDAS :約 1 K), ENSO に伴う変動も大きい. これらの結果は各データの熱帯対流圏での Hadley 循環の変動の大きさと整合的である. NCEP1, 2 は熱帯圏界面気温と熱帯圏界面での最低温領域の気温に関して衛星データ同化の影響と考えられる 1990 年周辺の顕著な高温とその後の気温減少傾向が現れた. ERA40, ERA-Interim, JRA25/JCDAS の Hadley 循環の強さの関係は GPCP の降水量と比較して ERA40 が特に熱帯海洋上で降水を過大評価していて, JRA25/JCDAS も ERA-Interim に比べて降水の過大評価が見られるという結果と一致している (Simmons et al. [2006]).

以上のことからデータ間で熱帯対流圏循環, 熱帯の 100hPa 面気温に多くの差異がある

ことが明らかになった。これらの差異は、熱帯対流圏循環とそれに伴う降水の再現性が熱帯圏界面での気温に影響している場合とデータ同化の影響による場合があり、各再解析データを使用する際にこれらの事を考慮することが重要である。

参考文献

Chan, C. S. and S. Nigam, 2008: Residual Diagnosis of Diabatic Heating from ERA-40 and NCEP Reanalyses: Intercomparisons with TRMM.

J. Climate, 22, 414–428.
Grotjahn, R., 2008: Different data, different general circulations? A comparison of selected fields in NCEP/DOE AMIP-II and ECMWF ERA-40 reanalyses. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 44, 108–142
Onogi, K. et al., 2007: The JRA-25 Reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, 85, 369-432.
Simmons A, Uppala S, Dee D, Kobayashi S. 2006. ERA-Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards, *ECMWF Newsletter*, 110, 25–35.

付録

データ名	期間	モデル解像度	格子間隔	同化手法
ERA-Interim	1989 年-現在	T255L60	1.5°×1.5°×37 層	4 次元変分法
ERA40	1957 年-2002 年	TL159L60	2.5°×2.5°×23 層	3 次元変分法
JRA25/JCDAS	1979 年-現在	T106L40	1.25°×1.25°×23 層	3 次元変分法
NCEP1	1947 年-現在	T62L28	2.5°×2.5°×17 層	3 次元変分法
NCEP2	1979 年-現在	T62L28	2.5°×2.5°×17 層	3 次元変分法

表 1. 比較した再解析データの提供期間，モデル解像度，格子間隔，同化手法.

月平均非断熱加熱は熱力学エネルギー方程式の残差により診断的に得ることができる

$$\overline{Q} = \frac{\Delta T}{\Delta t} + \overline{\mathbf{v}} \cdot \nabla \overline{T} + \left(\frac{p}{p_0}\right)^{R/Cp} \overline{\omega} \frac{\partial \overline{\theta}}{\partial p} + \left(\frac{p_0}{p}\right)^{R/Cp} \left[\nabla \cdot \overline{\mathbf{v}'\theta'} + \frac{\partial(\overline{\omega'\theta'})}{\partial p} \right].$$

ここで $(\overline{})$ は月平均値， $()'$ は月平均からのずれを示し， $\mathbf{v}$ は水平風ベクトル， ω は圧力速度， θ は温位， Q は非断熱加熱を示す。