

Hadley 循環強化の力学的解析

佐藤健介 山崎孝治 (北大・地球環境)

1. 背景

近年、様々な研究により Hadley 循環が強化されていることが示されている。Mitas and Clement (2005) は、再解析データ (ECMWF 再解析データ ERA40、NCEP/NCAR 再解析データ、NCEP-DOE AMIP-2 再解析データ)、モデル (SST を外部強制として与えた Community Atmospheric Model による計算結果)、ゾンデ観測データ (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Atmospheric Circulation Tape Library) により、冬 (12,1,2 月: DJF) 子午面質量流線関数の最大値の経年変動を調べた。その結果は再解析データ、モデルにおいて Hadley 循環には強化のトレンドが存在することを示していた。また、Tanaka et al. (2004) は、子午面流線関数の最大値ではなく東西平均した 200hPa 面速度ポテンシャルの極値を Hadley 循環の強さの指標とし、その振る舞いを NCEP 再解析データにより調べた。その結果は DJF の Hadley 循環強化を示唆するものだった。また、夏 (6,7,8 月: JJA) においては顕著なトレンドは見られなかった。

Hadley 循環強化は様々なデータ、指標で示されているが、この Hadley 循環強化の力学的側面を調べた研究はない。本研究の目的は、Hadley 循環の満たすべきバランスを調べることで、Hadley 循環強化がどのような変化によりもたらされているのかを考察することである。

2. 方法

2.1 データ

本研究では ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 40-year 再解析データを用いた。水平解像度 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 、鉛直 23 層、6 時間毎のデータである。また期間は 1957 年 9 月 ~ 2002 年 8 月の 45 年間である。

2.2 診断式の導出

本研究で用いた方程式は次のように導出した。熱帯域でのスケーリングを行い東西平均した運動方程式、熱力学方程式、連続の式は次の通りである。

$$\frac{\partial[\bar{u}]}{\partial t} - f[\bar{v}] = \alpha_x \quad (1)$$

$$f[\bar{u}] + \frac{1}{a} \frac{\partial[\bar{\Phi}]}{\partial \phi} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial[\bar{T}]}{\partial t} + [\bar{\omega}] \frac{\partial[\bar{T}]}{\partial p} - \frac{\kappa}{p} [\bar{\omega}][\bar{T}] = \alpha_T \quad (3)$$

$$\frac{\partial[\bar{\Phi}]}{\partial p} = -\frac{R}{p} [\bar{T}] \quad (4)$$

$$\frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial[\bar{v}]}{\partial \phi} \cos \phi + \frac{\partial[\bar{\omega}]}{\partial p} = 0 \quad (5)$$

ここで、 $[\]$ は東西平均、 $-$ は月平均、 a は地球半径、 f はコリオリパラメータ、 R は地球半径である。また、 C_p を定圧比熱とすると κ は R/C_p を表している。 α_x, α_T は次式のように定義した。

$$\alpha_x = [\bar{X}] - \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} ([\bar{u}^* v^*]) \cos \phi \quad (6)$$

$$\alpha_T = \frac{[\bar{Q}_1]}{C_p} - \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} ([\bar{v}^* T^*]) \cos \phi \quad (7)$$

X は摩擦項、 Q_1 は非断熱加熱、 $*$ は東西平均からのズレを表している。子午面質量流線関数 χ を次のように定義した。

$$[\bar{v}] = \frac{1}{\cos \phi} \frac{\partial \chi}{\partial p} \quad (8)$$

$$[\bar{\omega}] = -\frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial \chi}{\partial \phi} \quad (9)$$

(1) 式と (3) 式の時間変化項を (2) 式と (4) 式を使い消去することで、求める方程式が得られる。

$$f^2 \frac{\partial^2 \chi}{\partial p^2} + \frac{R}{a^2 p} \left\{ \left(\frac{\partial N^2}{\partial \phi} + N^2 \tan \phi \right) \frac{\partial \chi}{\partial \phi} + N^2 \frac{\partial^2 \chi}{\partial \phi^2} \right\} = \frac{R}{ap} \cos \phi \frac{\partial \alpha_T}{\partial \phi} - f \cos \phi \frac{\partial \alpha_x}{\partial p} \quad (10)$$

ここで N^2 は安定度であり次式で表される。

$$N^2 = \frac{\kappa[\bar{T}]}{p} - \frac{\partial[\bar{T}]}{\partial p} = -\frac{\partial \theta}{\partial p} \left(\frac{p}{p_s} \right)^{\kappa} \quad (11)$$

また、本研究では摩擦項 $[\bar{X}]$ が次の形であると仮定した。

$$[\bar{X}] = \begin{cases} -f_r \exp \left[\frac{p-1000}{100} \right] [\bar{u}] & (p > 700 \text{hPa}) \\ 0 & (p < 700 \text{hPa}) \end{cases} \quad (12)$$

$$f_r = 1.5 \times 10^{-5} \quad (13)$$

2.3 非断熱加熱

Q_1 、 Q_2 は Yanai et al. (1973) に従い定義した。 Q_1 は乾燥静的エネルギー s を全微分することにより求めた。

$$\begin{aligned} Q_1 &= \frac{ds}{dt} = \frac{d}{dt} (C_p T + \Phi) \\ &= Q_R + L(c - e) - \frac{\partial}{\partial p} \langle s'' \omega'' \rangle \end{aligned} \quad (14)$$

ここで、 Q_R は放射による加熱、 L は単位質量当たりの凝結による潜熱、 c は単位質量当たりの空気に含まれる凝結量、 e は単位質量当たりの空気に含まれる再蒸発量、 $\langle \rangle$ はデータの格子内での平均、 $''$ は格子内平均からのズレを表している。主に潜熱放出による項からなる Q_2 は、 $-Lq$ を全微分することにより求めた。

$$\begin{aligned} Q_2 &= -\frac{dLq}{dt} \\ &= L(c - e) + L \frac{\partial}{\partial p} \langle q'' \omega'' \rangle \end{aligned} \quad (15)$$

ここで、 q は比湿を表している。さらに、本研究では Q_d を Q_1 と Q_2 の差として定義した。 Q_d は主に放射熱による項からなっている。

$$\begin{aligned} Q_d &= Q_1 - Q_2 \\ &= Q_R - \frac{\partial}{\partial p} \langle h'' \omega'' \rangle \end{aligned} \quad (16)$$

h は湿潤静的エネルギー ($s + Lq$) である。

2.4. 計算結果の再現性

本研究では、 Q_2 、 Q_d 、 N^2 、 $[\overline{v^* T^*}]$ 、 $[\overline{u^* v^*}]$ 、 X に様々な操作したデータを与え (10) 式により χ を計算することで、各パラメータと Hadley 循環強化の関係を調べる。様々な実験を行う前に、各パラメータに操作をしていないデータを与え、(10) 式による計算結果が観測値 ((8) 式を積分し求めた χ をこう呼ぶ) を再現しているかを調べた。この結果が図 1, 2 である。

図 1 は DJF において 12.5°S - 7.5°N の範囲に、JJA において equator- 15°N の範囲に上昇流が存在することを示している。また、DJF において 7.5°N - 30°N の範囲に、JJA において 30°S -equator の範囲には下降流が存在する。JJA において下降流域が上昇流域より広いところ、DJF において上昇流域と下降流域が同じ広さを持っているところ、DJF の下層等、(10) 式により計算された Hadley 循環の形は観測値によるものとよく似ている。さらに、

Meridional stream function (climatology)

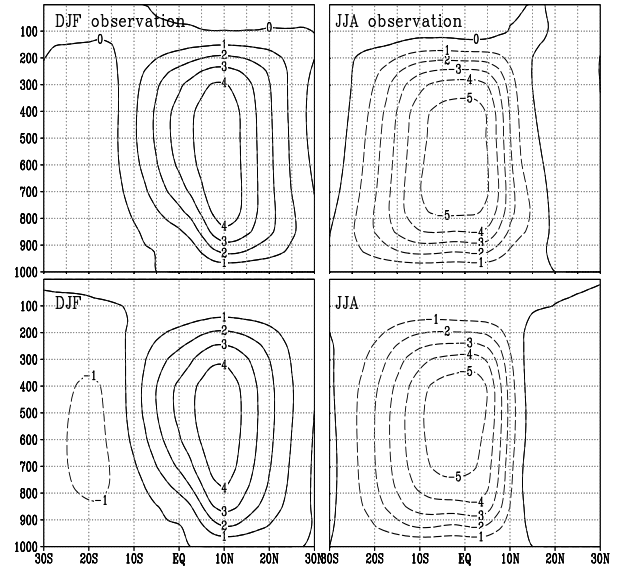


図 1: 子午面質量流線関数の気候値 (1958-2002)。上段は観測値、下段は (10) 式での計算結果である。単位は $10^4 \text{kg}/(\text{s}^3 \cdot \text{yr})$ 。

Max value of stream function
1958-2002

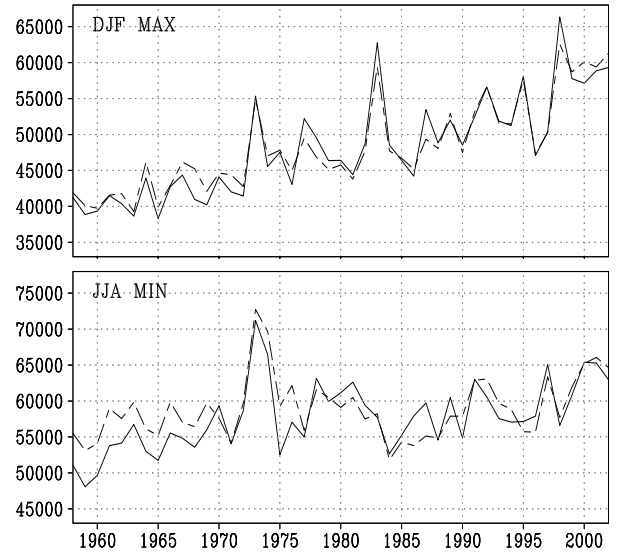


図 2: Hadley 循環の強度 (DJF においては χ の最大値、JJA においては最小値)。それぞれ (10) 式の計算結果 (線)、観測値 (破線) である。単位は $\text{kg}/(\text{s}^3 \cdot \text{yr})$ 。

Hadley 循環の強度 (DJF においては子午面流線関数の最大値、JJA においては最小値) も、JJA における 1970 年までの不一致をのぞき、(10) 式による計算結果は観測値によるものを良く再現している (図 2)。以上の結果より、(10) 式による計算は Hadley 循環を正確に再現すると考える。

DJF の Hadley 循環はデータの全期間において強化しており、このことは Mitas and Clement (2005) の結果と一致している (図 2)。いくつかある鋭いピーク (JJA:1973, DJF:1973,1983,1998) は El Nino によるものである。

2.5 実験方法

本研究では (10) 式を使い次のような実験を行った。

- 注目するパラメータ (Q_2 , Q_d , N^2 , $\overline{[v^*T^*]}$, $\overline{[u^*v^*]}$, X) を決め、そのパラメータ以外のパラメータに気候値を代入し χ を計算する。(実験 1)
- 注目する場所 (子午面内での) を決め、その場所以外の場所のパラメータには気候値を代入し χ を計算する。(実験 2)
- 理想的な加熱 Q_i を Q_1 の気候値に加え χ を計算し、 Q_i を与える場所による Hadley 循環の違いを考察する。(実験 3)

実験を行うに当たって、気候値はデータの全期間を使い計算した。また、子午面質量流線関数の最大値および最小値を Hadley 循環の強度の指標として使用した。ここで、最大値は北半球のセルの強さを表し、最小値は南半球のセルの強さを表す。本研究では各季節で卓越するセルを Hadley 循環と呼ぶ。つまり、DJF の Hadley 循環は最大値、JJA は最小値により強さを表す。この指標は Hadley 循環が運ぶ質量フラックスの総和という意味を持つ。強さの指標は絶対値で記述する。

3. 結果、考察

3.1 実験 1: 各物理量の効果

各パラメータの Hadley 循環強化における効果を調べるために、 Q_2 , Q_d , N^2 , $\overline{[u^*v^*]}$, $\overline{[v^*T^*]}$, X のパラメータのうち一つに注目し、そのパラメータ以外のパラメータに気候値を代入し χ を計算した。この計算結果が図 3 である。DJF の Hadley 循環強化は Q_2 と Q_d によりもたらされている。JJA は DJF のようには Q_2 , Q_d による Hadley 循環強化のトレンドは存在しない。 N^2 , $\overline{[u^*v^*]}$, $\overline{[v^*T^*]}$, X の経年変

化は Hadley 循環の強さに大きな影響を与えていない。また、El Nino の時期の強いピークは Q_2 によりもたらされている。

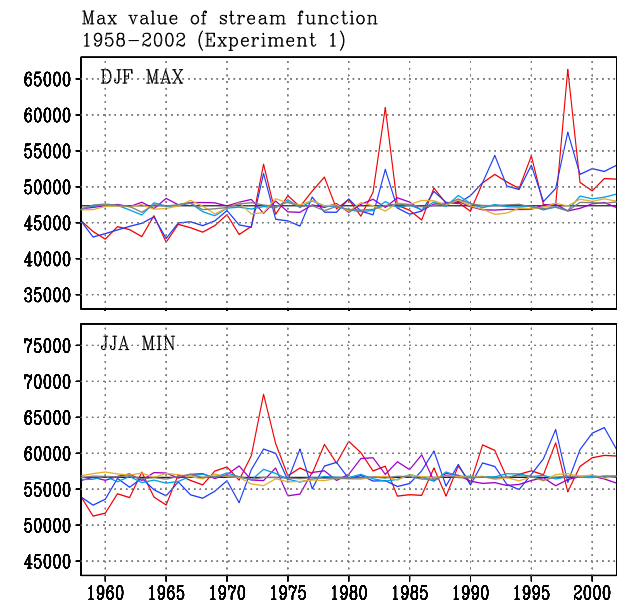


図 3: それぞれ Q_2 (赤)、 Q_d (青)、 N^2 (紫)、 $\overline{[u^*v^*]}$ (水色)、 $\overline{[v^*T^*]}$ (黄色)、 X (灰色) に対して実験 1 を行った結果における Hadley 循環の強度。単位は $\text{kg}/(\text{s}^3 \cdot \text{yr})$ 。

3.2 実験 2: 場所による違い

実験 1 で重要なパラメータであると分かった Q_2 と Q_d に対して実験 2 を行った。 χ を計算する際、子午面を 3 つのエリア; 上昇域 (surface-150hPa, JJA: equator-15°N, DJF: 12.5°S-7.5°N)、下降域 (surface-150hPa, JJA: 30°S-equator, DJF: 7.5°N-30°N)、成層圏 (150hPa より上層) に分け、注目する場所以外ではパラメータに気候値を与えた。また、 Q_2 (または Q_d) について実験を行う場合、それ以外のパラメータには場所を問わず気候値を代入した。

図 4 は上昇域の Q_2 が DJF の Hadley 循環を強化させていることを示唆している。JJA の Hadley 循環は Q_2 により DJF 程は強化されていない。下降域、成層圏の Q_2 は Hadley 循環強化に大きな影響は与えていない。成層圏についての結果は、成層圏の比湿がとても小さいことを考えれば自然な結果である。下降域の Q_d の経年変動は DJF の Hadley 循環強化を伴っている (図 5)。JJA においては、下降域の Q_d は大きなトレンドをもたらしていない。また、上昇域と成層圏の Q_d は Hadley 循環の強度に強い影響を与えない。以上を考えると、DJF の Hadley 循環強化は上昇域の Q_2 と下降域の Q_d の経年変動とバランスしており、DJF と

JJA の Hadley 循環のトレンドの差もこれらによって生まれている。

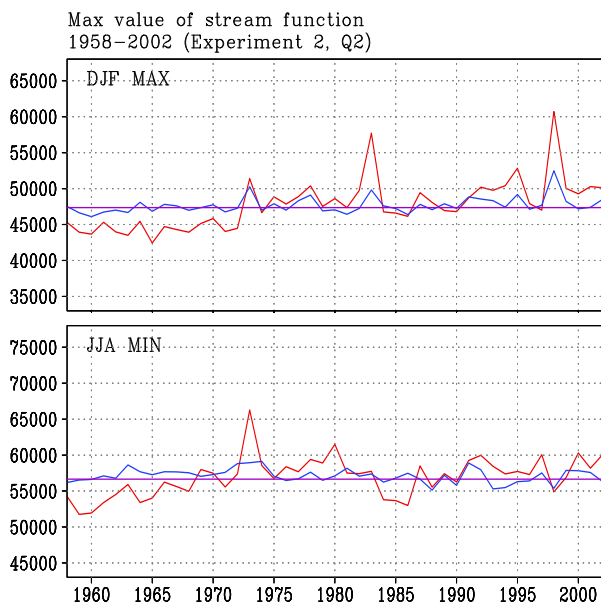


図 4: Q_2 に対して実験 2 を行った結果における Hadley 循環の強度。それぞれ上昇域 (赤)、下降域 (青)、成層圏 (紫) 以外の場所では気候値をパラメータに代入した。単位は $\text{kg}/(\text{s}^3 \cdot \text{yr})$ 。

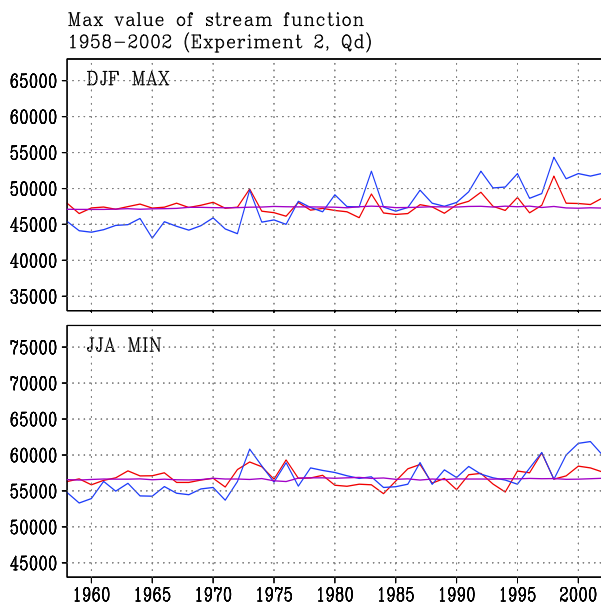


図 5: 図 4 と同じ。正し Q_d に対して実験 2 を行った結果。

3.3 実験 3: 理想的な加熱

この実験では、全てのパラメータに気候値を代入し、さらに理想的な加熱 Q_i を Q_1 に加え χ を計

算した。 Q_i は次のように定義した。

$$Q_i = \pm 0.015 \times \exp \left[- \left(\frac{\phi_c - \phi}{2.5} \right)^2 \right] \exp \left[- \left(\frac{p_c - p}{10^2} \right)^2 \right] \quad (17)$$

ここで、 ϕ_c 、 p_c はそれぞれ ϕ 軸、 p 軸における Q_i の中心を表しており、この値を変えることで Q_i の位置と Hadley 循環の関係を調べた。 Q_i の効果を示したのが図 6、7 である。

(10) 式が線形であることから、計算された χ は

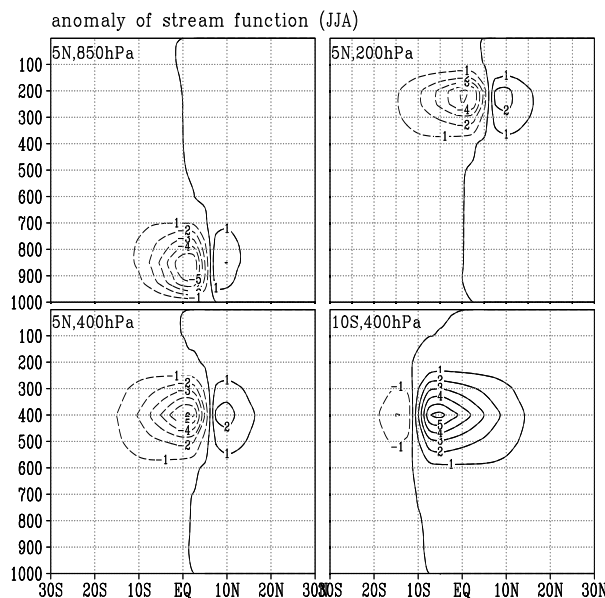


図 6: パラメータに気候値を与え Q_i を加えて計算した χ の気候値のみを与え計算した χ からの偏差。気候値は JJA のものを使い、 Q_i の位置は各図の左上に記述した。単位は $10^3 \text{kg}/\text{m}^3$ 。

気候値によるものと、 Q_i によるものに分けて考えることができる。そのうち Q_i によってつくられた χ が図 6 である。 Q_i を与えると Q_i を与えた位置を中心として一対のセルが作られるが、赤道側のセルの応答が大きく、またセルは対流圏全層には広がらない。

図 7 は、図の座標の位置に Q_i を置いた時、 Hadley 循環の強さが気候値のみを与えた場合に比どの程度変化するのかを示している。この図は上昇域の正の Q_i と下降域の負の Q_i は Hadley 循環を強化させること、逆に上昇域の負の Q_i と下降域の正の Q_i は Hadley 循環を弱めるということを示唆している。また、 Q_i を与える高度による違いも大きく、 DJF では 500hPa、 JJA では 400hPa でその効果は最大になり、それより高い (または低い) 場所では効果は小さくなる。

この強い位置依存性は、気候値によりできる χ

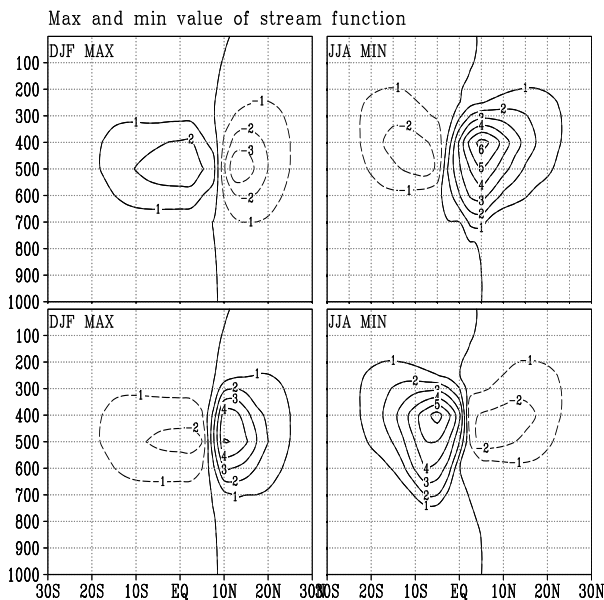


図 7: 図の座標の位置に Q_i を与え計算した Hadley 循環の強度の気候値のみ与えて計算した Hadley 循環の強度からの偏差。上段は正の Q_i 、下段は負の Q_i を与え計算した。単位は 10^3kg/m^3 。

の最大値(最小値)の位置と Q_i の位置を考慮することで理解することができる。気候値によってできる χ の DJF 最大値の位置は (7.5°S , 500hPa)、JJA 最小値の位置は (equator, 400hPa) であり、Hadley 循環の強度に強い影響を与えるためにはこの位置に影響を与えなければならない。今 JJA において正の Q_i を与えることを考える。 Q_i が (5°N , 400hPa) にある時、 Q_i は強い影響を χ の最小値の位置に与える(図 6 左下)。しかし Q_i がその高度より高いまたは低い位置にある場合、 Q_i は χ の最小値の位置に強い影響を及ぼすことはできない(図 6 上段)。また、 Q_i が下降域に存在する場合、 χ の最小値の位置には絶対値を小さくする方向に影響がでる(図 6 右下)。

JJA は DJF よりも Q_i に対して Hadley 循環の強度が敏感に反応する(図 7)。これは、(10) 式の f^2 により、同じ加熱に対して赤道に近い位置の方が χ が大きな値をとることに起因するだろう(図 6)。つまり、JJA の最小値の位置の方が DJF の最大値の位置より赤道に近いので、JJA はより敏感に Q_i に反応するのだろう。

3.4 Q_2 、 Q_d の振る舞い

この章では実験の結果において Hadley 循環強化と密接な関係があることが分かった Q_2 と Q_d の振る舞いを調べる。

東西平均した Q_2 の振る舞いを図 8 に示した。 Q_2

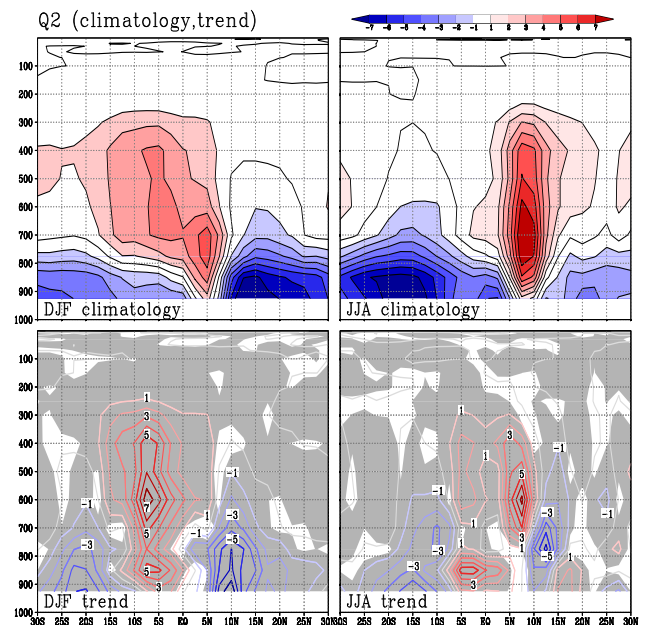


図 8: 上段: 東西平均した Q_2 の気候値。1958-2002 の期間で計算した。単位は $5 \times 10^{-3} \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{s})$ 。下段: 東西平均した Q_2 のトレンド。1958-2002 の期間で計算した。影付きの部分は t -test において信頼度 99% 以上の部分である。単位は $5 \times 10^{-5} \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{s})$ 。

は上昇域で強くなるトレンドをもっている(図 8 下段)。DJF、JJA を比較すると、この正のトレンドは DJF の方が大きい。実験 2、実験 3 の結果と合わせて考えるとこの正のトレンドが Hadley 循環強化をもたらしている一つの要因だろう。また、JJA においては Q_2 により Hadley 循環が大きく強化されていないのは、正のトレンドが DJF ほど大きくはないこと、その位置は Hadley 循環を最も効率よく強化させる高度より低いこと(図 7)によるだろう。下層の負のトレンドは実験 3 の結果により Hadley 循環の強度に大きな影響を与えていない。

Q_2 と同様に、東西平均した Q_d の振る舞いを図 9 に示した。 Q_d は下降域に負のトレンドを持っている(図 9)。DJF、JJA を比較すると、この負のトレンドも DJF の方が大きい。 Q_2 場合と同様に考えると、この負のトレンドは DJF の Hadley 循環強化を伴うものだろう。また、 Q_d による DJF と JJA の Hadley 循環の長期変化の違い(図 5)も、この負のトレンドの大きさにより説明することができる。下降域では対流活動は不活発であることを考えると、この Q_d の負のトレンドは放射冷却の

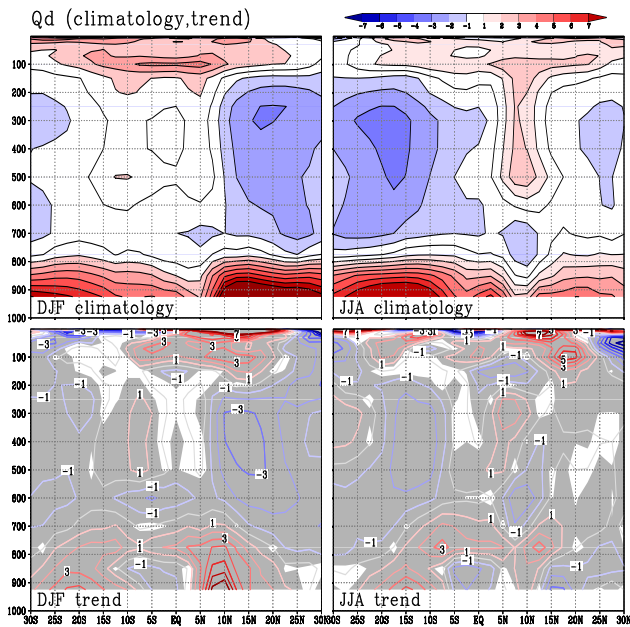


図 9: 図 8 と同様。正し Q_d のものである。

強化だろう。

本研究により、DJF の Hadley 循環がどのような力学的バランスで強化しているかを解明することができた。しかし、Hadley 循環強化の原因を解明したとは言い難い。原因を考察するためには、海洋等さらに系を拡張した研究が必要だろう。

謝辞

本集会参加にあたり、京都大学防災研究所から旅費の援助を受けました。感謝致します。

参考文献

- Mitas, C. M., and A. Clement (2005), Has the Hadley cell been strengthening in recent decades?, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L03809, doi:10.1029/2004GL021765.
- Tanaka, H. L., N. Ishizaki, and A. Kitoh (2004), Trend and interannual variability of Walker, monsoon and Hadley circulations defined by velocity potential in the upper troposphere, *Tellus, Ser.A*, 56(3), 250-269.
- Yanai, M., S. Esbensen, and J. H. Chu (1973), Determination of bulk properties of tropical cloud clusters from large-scale heat and moisture budgets, *J. Atmos. Sci.*, 30, 611-627.