

成層圏が対流圏循環に及ぼす影響：MIROC-AGCMを用いた考察  
 河谷芳雄<sup>1</sup>, Kevin Hamilton<sup>2</sup>, Lesley Gray<sup>3</sup>,  
 Scott Osprey<sup>3</sup>, 渡辺真吾<sup>1</sup>, 山下陽介<sup>2</sup>

1. JAMSTEC, 2. IPRC, Univ. Hawaii, 3. AOPP, Univ. Oxford

1. はじめに

数日～100年規模の気象・気候変動予測の不確実性低減の為には、対流圏 - 成層圏を一つの系として捉えた研究が必須である。気象庁全球モデル(GSM)では成層圏・中間圏まで含まれている。CMIP5では全気候モデルの30%程度が成層圏を含み、CMIP6ではその割合が更に増加するのは確実で、成層圏を含んだ気候変動研究の重要性が増している。

Manzini et al. (2014)はCMIP5モデルを成層圏をフルカバーするモデル(High-top)と、しないモデル(Low-top)に分けて、成層圏の有無が気候変動にどのような影響を与えるか調査した。しかし物理過程や解像度が各モデルで異なり、High-topとLow-topの影響を区別することが難しいと述べている。

本研究は同一の物理過程・パラメータ、水平解像度に設定したMIROC-AGCMを用いて、モデルトップの高度を変えた複数の実験を行い、成層圏の有無が対流圏循環の形成にどのような影響を及ぼすか調べることを目的とする。更に成層圏の鉛直解像度を変えた実験も行い、成層圏解像度が対流圏循環に及ぼす影響も考察する。

2. 使用モデル

使用したモデルはMIROC3.2をベースとした大気大循環モデルMIROC-AGCM(Kawatani et al. 2011)である。水平解像度はT106で、モデル上端と鉛直総数をそれぞれ(a) 28km, L34, (b) 48km, L42, (c) 48km, L72, (d) 95km, L168に設定した4種類のモデルを100年間積分した(図1参照)。対流圏の鉛直解像度は全て同じである。成層圏の鉛直解像度は(c)と(d)で550mに設定しており、QBOが再現されているが、(a)と(b)ではQBOは再現されない。用いた物理過程やパラメータは全て同じに設定している為、(a)と(b)の比較から成層圏、(b)と(c)の

比較から成層圏解像度、(c)と(d)の比較から中間圏が対流圏循環形成に与える影響を、更に(b)と(d)の比較から、モデル高度と成層圏解像度を組み合わせた影響が考察可能になる。

スポンジ層でのレイリー摩擦を渦度・発散に掛けると、その場所で擬似的な角運動量を大気に与えることに相当し、全球角運動量保存が満たされなくなる。本研究ではモデル上端の違いによる影響を調べることを目的とする為、各モデルのスポンジ層でのレイリー摩擦は帯状平均からのズレ成分にのみ作用させた。なお、非定常重力波パラメタリゼーションは用いていない。本稿では全て100年平均したDJFの結果について議論する。

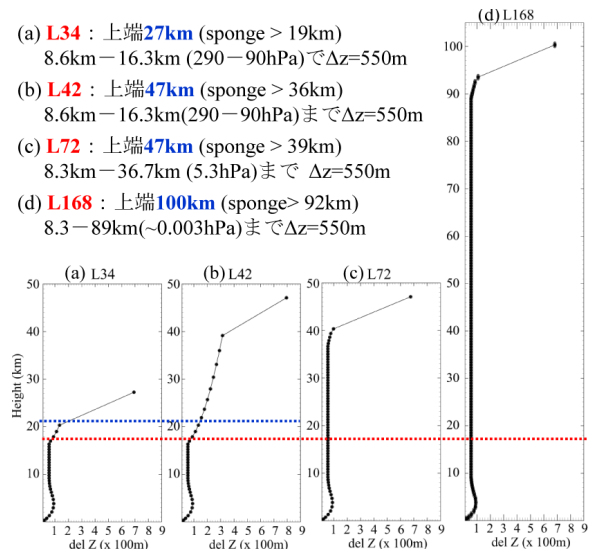


図1. 本実験で用いたモデル上端と鉛直総数。(a) 27km, L34, (b) 47km, L42, (c) 47km, L72, (d) 100km, L168。対流圏の鉛直解像度は全て同じである。成層圏の鉛直解像度は(c)と(d)で550mに設定。

3. 成層圏有無の影響

最初にL34とL42を比較し、成層圏の有無が対流圏循環場に与える影響について

考察する。図 2a は L42 の残差鉛直循環の緯度－高度断面図である。成層圏ではブリューワー・ドブソン循環 (BDC) に伴って低緯度で上昇流、高緯度では下降流になっている。図 2b は L34 から L42 を引いた残差鉛直循環である。L34 は成層圏を殆ど含んでおらず、BDC を表現することができない為、高緯度で正偏差 (上昇流偏差) になっている。成層圏を含まない L34 では高緯度の下降流が弱いことを意味する。

図 3 に帯状平均温度と東西風の差を示す。成層圏が解像されない L34 モデルでは L42 モデルに比べ高緯度の下降流が弱い為、極域成層圏で低温偏差になっている。温度風の関係から、成層圏ジェット領域では西風偏差になる。西風偏差は対流圏下層まで伸びており、対流圏ジェットは高緯度側へのシフトしている。

図 4 は帯状平均した L42 の周期 2－8 日成分  $\overline{u'v'}$  と東西風と、L34 から L42 を引いた  $\overline{u'v'}$  である。 $\overline{u'v'}$  は低緯度から中高緯度へ運ばれるが、成層圏が無い場合 (L34) は、 $\overline{u'v'}$  がより高緯度まで運ばれ、西風の高緯度側へのシフトと対応する。対流圏中上層での西風偏差と  $\overline{u'v'}$  の偏差について、どちらが原因・結果であるかは明確ではないが、 $\overline{u'v'}$  のシフトが地表風の変化を引き起こすと考えられる (ちなみに  $\overline{u'v'}$  について、2－8 日周期のみならず、全変動成分で見た場合も定性的に同じ結果を示す)。

ここで簡単の為、南北の運動量輸送のみの方程式で考察する。

$$\partial \bar{u} / \partial t - f \bar{v}^* = \rho^{-1} \partial / \partial y (-\rho \overline{u'v'}) - \rho_s C_M |\bar{v}| u_s \quad (1)$$

ここで右辺第 2 項は地表フラックスの東西成分を示す。 $C_M$  はバルク係数、 $s$  は地表を示す。その他の文字は気象学の慣例に従う。ここで、(1) 式について気候値且つ緯度円に沿って鉛直積分した場合、(2) 式になる。

$$\int_{z=surface}^{z=top} \left\{ \partial / \partial y (-\rho \overline{u'v'}) \right\} dz - \rho \rho_s C_M |\bar{v}| u_s = 0 \quad (2)$$

この式から、 $\overline{u'v'}$  が高緯度側へシフトすると地表東西風が  $u_s > 0$  になる必要があり、西風が強くなる。

Sakazaki and Hamilton (2017) では、 $C_M$  を大きくしても、上層の帯状平均  $\overline{u'v'}$  は殆ど

変わらず、 $u_s$  が小さくなることで地表フラックスが不変になることを示している。つまり、上層ジェット変化が下層の東西風の変化に対して支配している。

本実験で見られた成層圏－対流圏ジェットの結合は、SSW、AO、QBO などの現象でも見られ、観測データ及び数値実験結果から、経験的には知られている。しかしながらそのメカニズムは明確には理解されていない (Kidston et al. 2015)。

図 5 に L34 から L42 を引いた地表面気圧と降水の偏差を示す。成層圏の有無による対流圏下層の東西風偏差と対応して、地表面気圧分布が変化している。成層圏が無いと (L34)、中緯度で正偏差、高緯度で負偏差となり、AO+ に類似した様相を示している。また L34 ではアリューシャン低気圧が西寄り且つ弱く (図 5a コンター)、L42 の方が再解析データ結果に近い。

降水偏差を見ると、緯度 30 度より極側では、第 0 近似で地表面気圧偏差と対応している。つまり高 (低) 気圧偏差の領域で降水が少 (多) くなっている。一方で熱帯域では成層圏を含む L42 の方が降水が多く、成層圏循環や鉛直安定度と関連していることが示唆される。

以上を北半球の視点でまとめた模式図を図 6 に示す。成層圏が無いモデルでは、(1) BDC が十分に表現されず、高緯度下降流が弱くなり、(2) 高緯度下部成層圏で低温偏差になる。(3) 温度風の関係から成層圏ジェットが強化され、(4) 対流圏ジェットも強化、北へシフトする。 $\overline{u'v'}$  も北へシフトする為、運動量収支の関係から、地表面で西風が強くなる。その結果、(5) 地表風、地表面気圧、降水分布も変化する。

上述した対流圏－成層圏結合は、南半球や北半球の大西洋では明確であるが、北半球太平洋ではより複雑な構造をしている。ちょうど AO レスポンスが太平洋に比べて大西洋で明確なこと類似している。

### 3. 成層圏解像度、中間圏の影響

次に L42、L72、L168 を比較する。紙面の都合上、簡単に記述する。L72 に比べ L42 成層圏鉛直解像度が粗い為、中高緯度成層圏の EP-flux 収束が小さく、BDC に伴う高

緯度下降流が弱い。高度 40km 以上がスポンジである L72 (図 1 参照) は上部 BDC が表現できず、その差が L72 と L168 の差で顕著になる。

図 8 に L42-L72 及び L72-L168 の帯状平均東西風、図 9 に北半球領域を拡大した L42、L72、L168 の帯状平均東西風の気候値を示す。L42→L72→L168 の順に、高度と共に赤道に傾く極夜ジェット、及び極夜ジェットの中心緯度が現実的になる。成層圏高緯度での西風偏差は、L34-L42 と同じ理由で、対流圏の東西風に影響を与えている。成層圏有無 (L34-L42) と比べると差は小さいが、L42-L168 でも対流圏循環場や気圧配置に有意な差が見られ、成層圏の高解像度化と上部成層圏～中間圏の有無も、対流圏に影響を与えていた (図略)。

#### 4. まとめ

同一の力学・物理過程、パラメータ、水平解像度に設定した MIROC-AGCM を用いて、モデルの上端や鉛直解像度を変えた実験を行った。本研究から成層圏の有無・成層圏の解像度が対流圏下層の循環場、気圧配置、降水分布にまで影響を及ぼすことが明らかになった。地球温暖化が進むと、Brewer-Dobson 循環が強化されることが知られている為、成層圏の有無は温暖化レスポンスにも影響を与えると推察される。

謝辞：本研究は (独) 環境再生保全機構の環境研究総合推進費 (2-1503) により実施された。

#### 参考文献

- Kawatani et al. 2011: The Quasi-biennial oscillation in a double CO<sub>2</sub> climate, *J. Atmos. Sci.*, 68, 265-283.
- Kidston et al. 2015: Stratospheric influence on tropospheric jet streams, storm tracks and surface weather, *Nature Geosci.*, 8, 433-440.
- Manzini et al. 2014: Northern winter climate change: Assessment of uncertainty in CMIP5 projections related to stratosphere-troposphere coupling, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1002/2013JD021403
- Sakazaki, T., and K. Hamilton, 2017: Physical Processes Controlling the Tide in the Tropical Lower Atmosphere Investigated

Using a Comprehensive Numerical Model.  
*J. Atmos. Sci.*, 74, 2467-2487

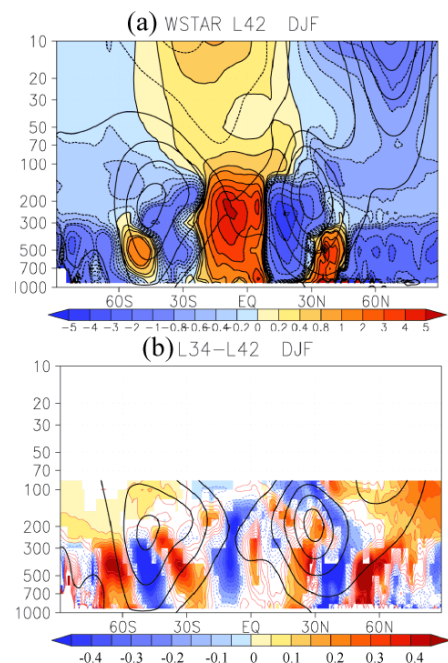


図 2. (a)L42 の残差鉛直循環の緯度-高度断面図 (色)。コンターは L42 の東西風。(b)L34 から L42 を引いた残差鉛直循環。95%以上有意な場所に色。コンターは L34 の東西風。

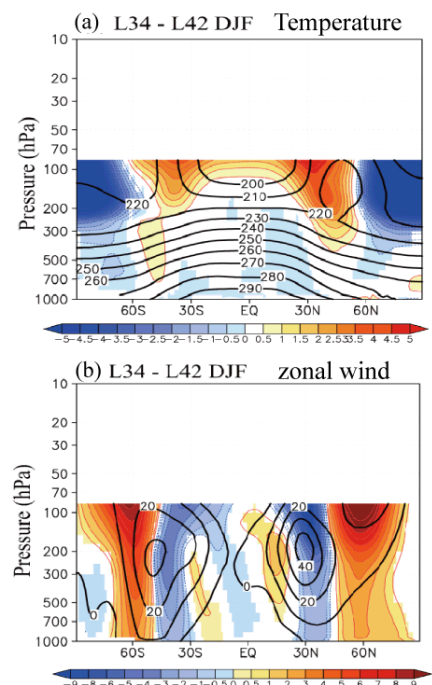


図 3. L34 から L42 を引いた帯状平均(a)温度と(b)東西風の偏差。95%以上有意な場所に色。コンターは L34 の気候値を示す。

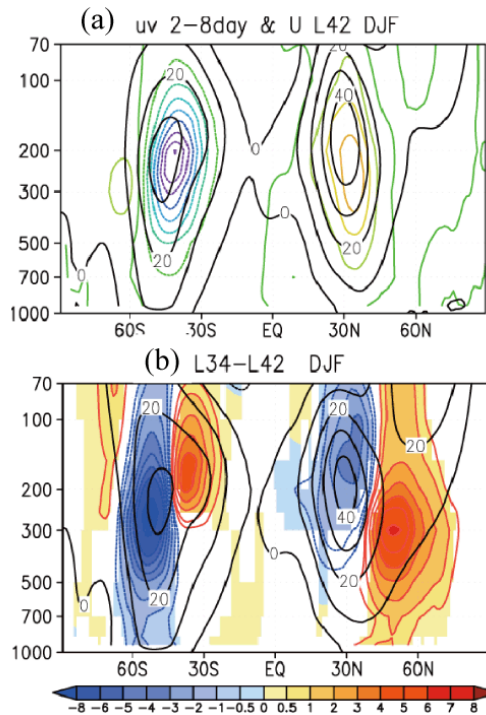


図 4. (a) 帯状平均した L42 の周期 2-8 日成分  $\overline{u'v'}$  (色コンター) と東西風 (黒線)。 (b) L34 から L42 を引いた  $\overline{u'v'}$ 。95% 以上有意な場所に色。コンターは L34 の気候値を示す。

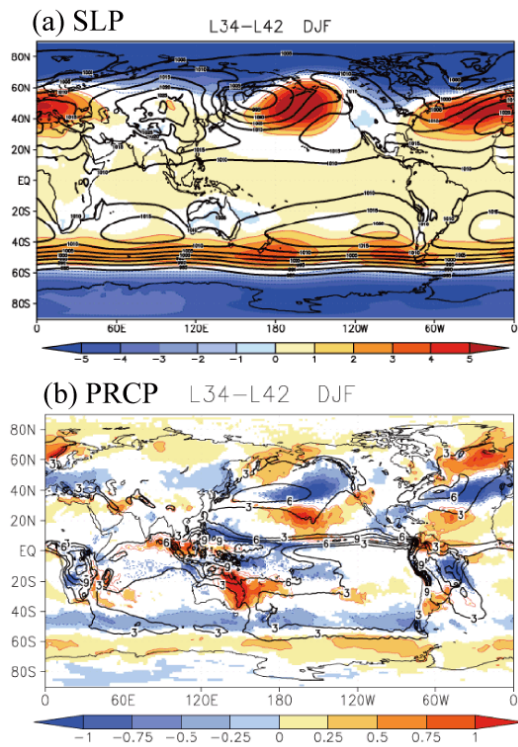


図 5. L34 から L42 を引いた (a) 地表面気圧と (b) 降水の偏差。95% 以上有意な場所に色。コンターは L34 の気候値を示す。

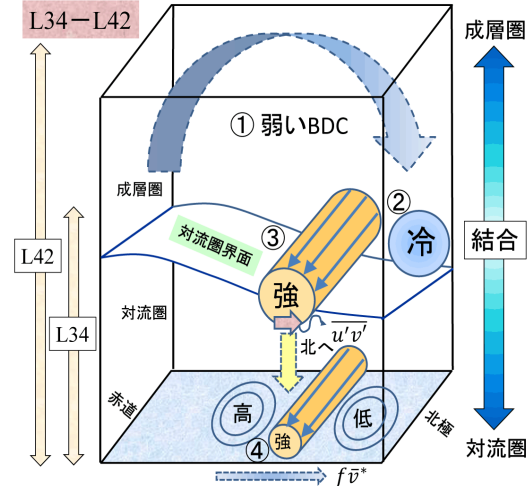


図 6. 北半球における成層圏無から有モデルを引いた各種物理量偏差の模式図。

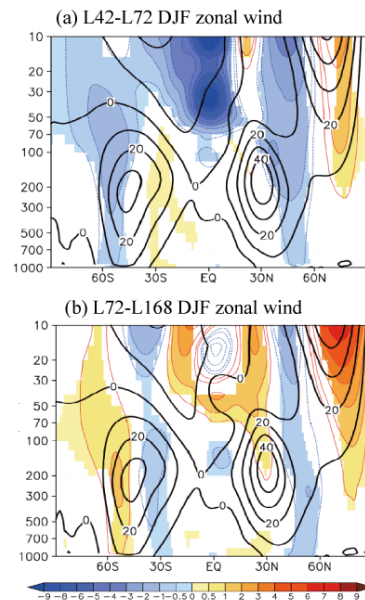


図 8. (a) L42-L72、(b) L72-L168 の帯状平均東西風。

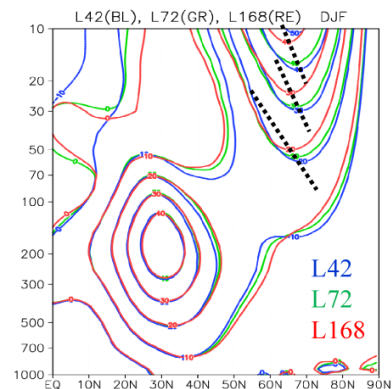


図 9. L42 (青)、L72 (緑)、L168 (赤) の帯状平均東西風の気候値。