

上部対流圏－成層圏の温暖化レスポンス差
が日本周辺の気候場に与える影響
河谷芳雄¹, 堀之内武², 佐藤尚毅³,
1. JAMSTEC, 2. 北大地球環境, 3. 東京学芸大

1. はじめに

気候モデルは、将来の気候変動を考える上で欠かすことのできないツールである。気候モデルは各々異なるバイアスを持ち、気候変動予測もモデル依存性がある。将来の気候変動予測の議論の中で、マルチモデル平均値が頻繁に用いられてきた。

図1に33種類のCMIP5モデルによるDJF降水変化を示す。HistoricalおよびRCP8.5実験について、それぞれ1959-1990年、2068-2099年の11-2月(DJF)平均のデータを用いた。RCP8.5からhistoricalを引いたものを将来変化とする。左上はマルチモデル平均である。マルチモデル平均は、日本の北部と南部でそれぞれ降水量の増加と減少を示している。各モデルは、日本全国で降水量が増加あるいは減少するなど、マルチモデル平均とは大きく異なる降水量の変化を予測している。

モデル間の大きなばらつきを考慮すると、マルチモデル平均が気候変動予測の最良推定値と解釈することはできず(Kunutti et al.2010, 2013)、将来起こりうる変化を見落とす可能性がある。

近年、新たな「ストーリーライン」アプローチがZappa and Shepherd (2017、以下ZS2017)により提案された。成層圏の地表・下層への地域的な影響については、欧州・北米地域で多くの研究が行われている(Scaife et al.2014)。しかし、日本地域を対象とした研究は少ない。その理由として、日本周辺では様々な時空間スケールの現象が複雑に絡み合っているため、成層圏の影響を検出することが困難であることが考えられる。成層圏-対流圏相互作用に重要な役割を果たす北極や北大西洋振動の影響(Baldwin and Dunkerton 2001)も、日本周辺ではヨーロッパほど大きくはない。

本研究はCMIP5モデル群を用いて、各モデルの上部対流圏-成層圏の温暖化レスポンスの差が、特に日本域周辺の対流圏気象現象の変

化に影響があるかどうか、Zappa and Shepherd (2017)らが提唱しているストーリーライン手法を用いて調べることを目的とする。

2. 使用データおよび解析手法

本研究では33種類のCMIP5モデルを用いてDJFの期間を解析した。解析期間等は前節で述べた通りである。

本研究におけるストーリーライン手法の手順は、基本部分はZS2017と同じである。本研究では、リモートドライバーとして2つの指標を選択した。一つは、熱帯増幅と呼ばれる、15°S-15°Nで平均した300hPaにおける赤道上対流圏の気温変化である。

もう一つは、北半球の成層圏の渦の変化に基づく。マルチモデル平均では、historical実験における成層圏極渦の中心緯度は高度10hPaで60°Nに位置する。マルチモデル平均の将来の帯状風の変化は、60°Nの南(北)で正(負)になっており、将来の成層圏極渦は南へシフトすることを示している。各モデルを見てみると、南へシフトするモデル、北へシフトするモデル、極渦全体が強まる・弱まるモデルなど、多様な結果を示している(図2参照)。なお、図2の黒線はhistorical実験の平均値を示すが、モデル間のばらつきが大きく、また再解析データ等との違いも目立つ。成層圏極渦の気候学的な基本構造も、まだ再現性が低いことを示している。

ここで成層圏の渦の強さを表す指標を、10hPa帯状平均東西風偏差について、から60°N-70°Nから50°N-60°Nを引いた値と定義した。すなわち、この指数が正(負)であれば、将来の成層圏極渦が北緯60度より高緯度(低緯度)で強くなることを示す。

この定義は、ZS2017やManzini et al. (2014)が成層圏渦指数を20hPaで70°N-80°N、10hPaで70°N-80°Nの将来の帯状風変化と定義したのとは異なっている。

70°N-80°N の緯度は日本から遠く、日本付近の帯状風と降水量の変化の相関は、彼らの指標よりも我々の指標の方が高い（図略）。なお、熱帯温度増幅と成層圏渦強度の相関は-0.22 であり、5%水準で統計的に有意ではなく、この2つのドライバーの応答は、将来の気候変動に対して独立したソースとして扱うことができる。

これら2つの指標は、いずれも各モデル m における年平均・全球平均の地表付近の大気温暖化 ΔT_m でスケールアップされている。重回帰の式は以下の通りである。

$$\frac{\Delta C_{xm}}{\Delta T_m} = a_x + b_x \left(\frac{\Delta T_{tropical}}{\Delta T} \right)_m + c_x \left(\frac{\Delta U_{vortex}}{\Delta T} \right)_m + e_{xm} \quad (1)$$

ここで、 ΔC_{xm} は地点 x 、モデル m の物理量 C の気候変動応答、ダッシュはマルチモデル平均に対する標準化偏差、 a_x はマルチモデル平均に対するドライバーの応答に異常がない場合の平均応答、 b_x と c_x はリモートドライバーの応答の異常に対する地域応答の感度、 e_{xm} は残差変動であることを表している。係数の推定値は、CMIP5 モデルのデータにフレームワークを通常の重回帰でフィットさせて決定し、 \hat{a}_x 、 \hat{b}_x 、 \hat{c}_x とする。

3. 結果

熱帯の増幅と成層圏の渦の反応を組み合わせて考慮し、4つのストーリーラインを作成した（詳細はZS2017参照）。4つのストーリーは、熱帯圏界面温度上昇が高く、成層圏極渦強度が強くなるモデル（第1象限）、温度が低く極渦が強いモデル（第2象限）、温度が低く極渦が弱いモデル（第3象限）、温度が低く極渦が弱いモデル（第4象限）に分類できる。

日本付近の帯状風変化の成層圏-対流圏関係は、第1象限で最も大きく、その応答は成層圏から地表にまで及び、亜熱帯ジェットの上にも明瞭であった。一方、第2象限ストーリーでは、成層圏と対流圏のつながりが弱く、亜熱帯ジェットもあまり変化しないことがわかる。第3象限ストーリーでは、日本付近の亜熱帯ジェットも南下し

ている（図略）。

本レポートでは、降水変化についてのみ示すことにする。4つのストーリーラインにおける日本周辺の降水量の将来変化を、マルチモデル平均値とともに示したものを図3に示す。第1象限（第3象限）のストーリーラインでは、日本地域の大部分で降水量が増加（減少）している。第2、第4象限ストーリーラインは、日本の北側（南側）の降水量が多い（少ない）という点で、マルチモデル平均とやや類似している。

4. まとめ

対流圏上部と成層圏の反応に関連するDJF シーズンの日本周辺の気候変化を、ZS2017によって最近提案されたストーリーライン・アプローチを、CMIP5モデルによる33のシミュレーション結果に適用して、過去のシナリオとRCP8.5シナリオで検討した。1959年から1990年までと2068年から2099年までの歴史的、RCP8.5気候的DJFデータをそれぞれ算出し、歴史的データからRCP8.5データを差し引くことで気候変動を推定した。

本研究では、2つのリモートドライバーを定義した。一つは、15°S-15°N平均の300hPaにおける気温差で定義される熱帯増幅であり、もう一つは、60-70°Nの10hPaにおける帯状風から50-60°N平均を引いたものによる成層圏の渦強度変化である。

2つのドライバーを組み合わせて、4つのストーリーラインを検討した。

日本付近の降水量の変化は、各ストーリーラインによって大きく異なる。第1象限（第3象限）のストーリーでは、日本のほとんどの地域で降水量が増加（減少）することが予測された。降水量の質的变化は、温暖化の程度に加えて、これら2つのストーリーラインにおけるストーリーライン指数（熱帯の増幅と成層圏の渦の強さの組み合わせで定義される関数）に大きく依存する。一方、第2象限と第4象限のストーリーラインでは、降水量の変化はストーリーラインにはあまり依存せず、地球温暖化に依存することがわかった。

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(JPMEERF20192004)により実施した。

参考文献

Baldwin, M. P., and T. J. Dunkerton, 2001: Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes, *Science*, **294**, 581-584.
 Knutti et al. 2010: Challenges in combining projections from multiple climate models. *J. Climate*, **23**, 2739–2758.
 Knutti et al. 2013: Climate model genealogy: Generation CMIP5 and how we got there. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 1194–1199.

Scaife, A., and co-authors, 2014: Skillful long-range prediction of European and North American winters. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 2514–2519.
 Zappa, G., 2019: Regional climate impacts of future changes in the mid-latitude atmospheric circulation: a storyline view. *Curr. Clim. Ch. Rep.*, **5**, 358-371.
 Zappa, G., and T. G. Shepherd, 2017: Storylines of atmospheric circulation change for European regional climate impact assessment, *J. Climate*, **30**, 6561-6577.

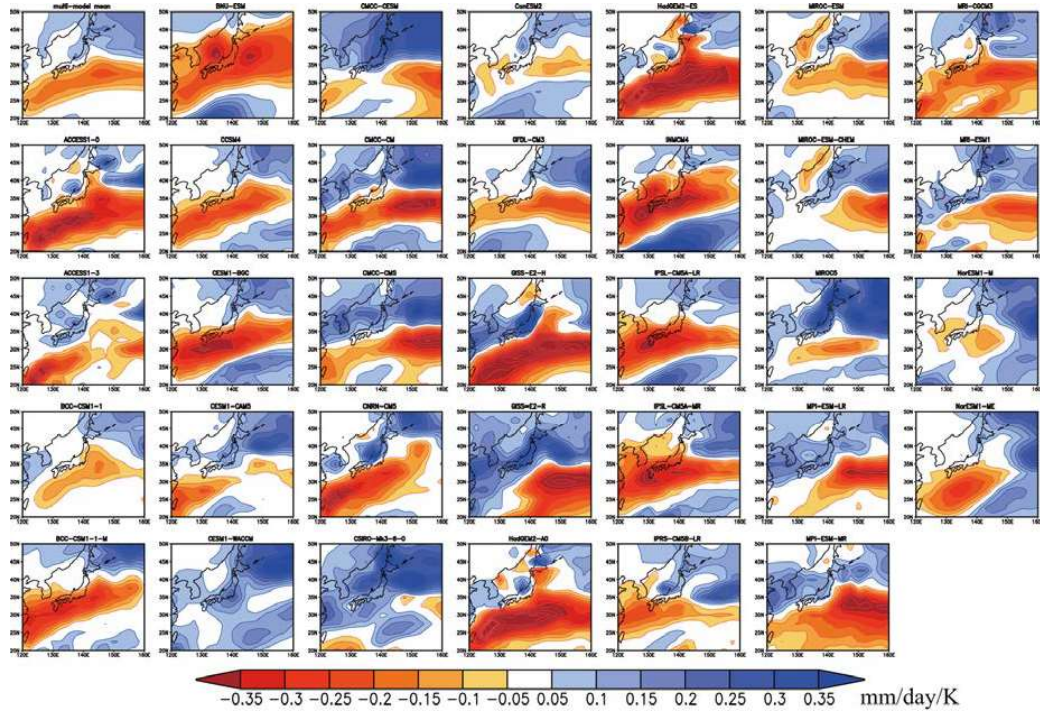


図 1: CMIP5 各モデルによる、RCP8.5 シナリオにおける 2068-2099 年の過去の 1959-1990 年の平均を差し引いた、地球温暖化 1K あたりの 12-1-2 月の降水量の変化。左上はマルチモデル平均。色間隔は 0.05mm/day/K。

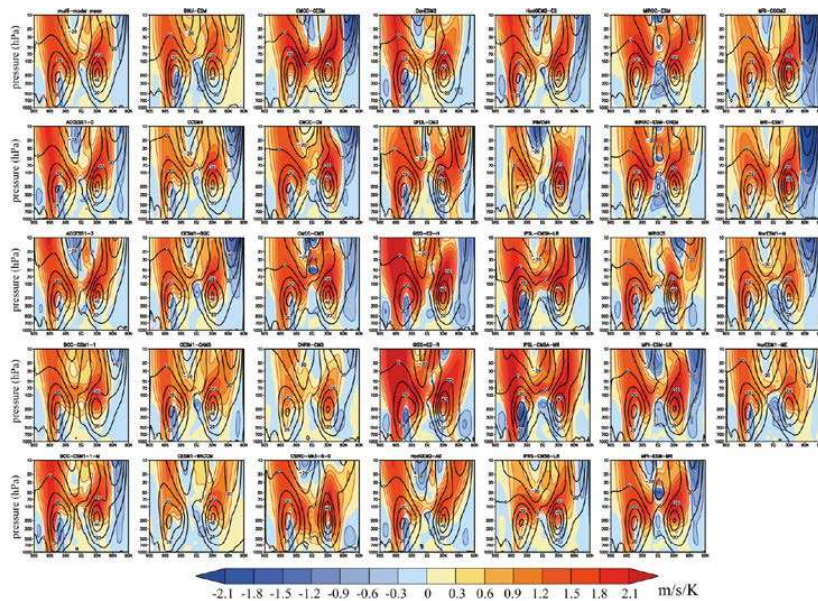


図 2: 図 1 と同じ。ただし帯状平均東西風の緯度—高度断面図。黒線は historical 実験の値で 10m/s 毎に描いている。色間隔は 0.3m/s/K。

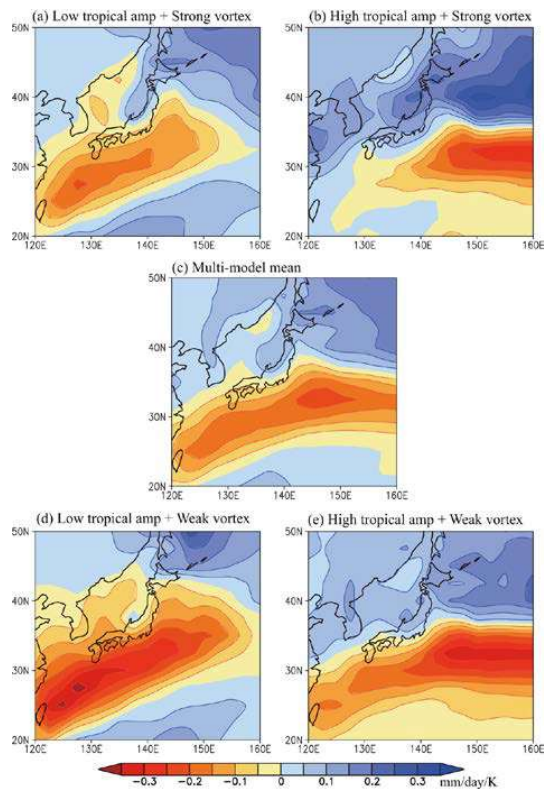


図 3 : 各ストーリーラインにおける日本域 DJF の降水変化。(c)はマルチモデル平均を示す。単位は mm/day/K。(b), (a), (d), (e)は本文中のそれぞれ第 1, 2, 3, 4 象限に相当する。