CMIP5 マルチ気候モデルによる日本付近の季節進行の将来変化予測 原田昌*・平原翔二・大野浩史・萩谷聡・村井博一・ 及川義教・前田修平(気象庁気候情報課)

1. はじめに

日本付近の季節進行は、上空を流れるジェット気流に影響を受ける。例えば、6~7月に雨季をもたらす梅雨前線はジェット軸の南側に形成され(Kodama 1993)、その北上及び解消(梅雨明け)はジェットの季節進行と強く関係している(図1)。そのため、地球温暖化の進展に伴うジェットの季節進行の将来変化を調べることは、防災・農業・水資源管理等の社会的観点から非常に重要である。

これまで、地球温暖化に伴う梅雨明 けの遅れ(Kitoh and Uchiyama 2006; Kusunoki and Mizuta 2012) の要因 として、日本の南海上における下層循 環場の変化が主に注目されてきた (Kimoto 2005; Kusunoki et al. 2011). しかしながら、ジェットのような上層 循環場の変化が及ぼす影響については 十分な調査がなされていない。 Hirahara et al. (2012) はCMIP3モデ ルを用いて夏季のジェットの季節進行 が遅くなることを示し、梅雨明けの遅 れとの関連性を示唆したが、彼らが要 因として挙げた暖気移流 (Sampe and Xie 2010) の変化については定量的な 解析が行われていない。

以上の背景から、本調査では地球温暖化に伴う 21 世紀末のジェットの季節進行の変化、及びそれが梅雨明けの遅れにもたらす影響を、結合モデル相互比較プロジェクト(Coupled Model Intercomparison Project; 以下CMIP)のデータセットを用いて解析する。将来予測の不確実性を低減させるため、モデルによる現在気候の再現性を評価し、選別されたモデルのマルチモデルアンサンブルにより将来予測を行う。

run: obs historical, type: pentad_clim_filter elem: pr_1000(Shade) & ua_250(Contour)

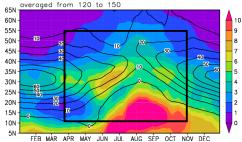


図 1 ジェット及び降水の季節進行(半旬 気候値の時間緯度断面図)

(等値線) 250hPa 面の東西風速(単位は [m/s], JRA-25)、(陰影)降水量(単位は [mm/day], CMAP)。120-150E、1981~2000年で平均。5半旬の移動平均を行っている。四角はスコア評価で使用する領域。

2. 使用データ

本調査で使用したデータは CMIP3 (Meehl et al. 2007) 及び CMIP5 (Taylor et al. 2012) マルチモデルデータセットである。CMIP3、CMIP5 ともに各国の機関から多数のモデルが提供されているが、ここでは主要な要素(降水、風速、気温等)の日別・月別データが揃っているモデル(CMIP3、CMIP5 ともに15モデル;表1)を使用した。モデルにより解像度が異なるが、空間内挿により水平解像度を2.5度(東西144点、南北73点)、鉛直層数を月別17層、日別8層に統一した。

本調査では現在気候を 20 世紀末、将来気候を 21 世紀末で定義し、二つの期間の差を将来変化とした。平均期間や実験シナリオについては表 2 を参照されたい。なお、将来予測において CMIP3 では SRES A1B シナリオ、CMIP5 では RCP4.5 シナリオを使用したが、温暖化の度合は前者の方がやや高い。20 世紀末から 21 世紀末での全球平均気温の変化(マルチモデル平均)は、前者が後者に比べ約 $1 \, \mathbb{C}$ 高い

(Knutti and Sedlacek 2012).

モデルによる現在気候の再現性評価 には、JRA-25 (Onogi et al. 2007) の 再解析データを使用した。

CMIP3

BCCR BCM2.0, CGCM3.1 (T47), CGCM3.1 (T63), CNRM CM3, CSIRO Mk3.0, CSIRO Mk3.5, GFDL CM2.0, GFDL CM2.1, GISS AOM, INM CM3.0, IPSL CM4, MIROC3.2 (hires), MIROC3.2 (medres), MPI-ECHAM5, MRI CGCM3.2

CMIP5

BNU-ESM, CMCC-CM, CNRM-CM5, CSIRO-Mk3-6-0, CanESM2, FGOALS-g2, FGOALS-s2, GFDL-ESM2G, GFDL-ESM2M, MIROC-ESM-CHEM, MIROC5, MPI-ESM-LR, MRI-CGCM3, NorESM1-M, inmem4

表 1 使用したモデルのリスト

	現在気候	将来気候
CMIP3	20c3m	SRES A1B
	(1979-1996年)	(2081-2098年)
CMIP5	historical	RCP4.5
	(1981-2000年)	(2081-2100年)

表 2 平均期間及び実験シナリオ

3. 現在気候の再現性

将来予測の不確実性を低減させるため、スキルスコア (Taylor 2001) を用いて各モデルによる現在気候の再現性評価を行う。ここでは、上層の東西風速 (CMIP3 では 200hPa 面、CMIP5では 250hPa) の南北二階微分について、日別値から算出した半旬気候値の緯度時間断面(図 1 参照)においてスキルスコアを計算した(図 2)。

CMIP5はCMIP3に比べて新しいバージョンのモデル群であるが、日本上空のジェットの再現性についてはやや改善した程度と評価される。マルチモデル平均では、スキルスコアが 0.7 以上のモデルの平均(以下、上位モデル平均)が全モデルの中で最も成績がよい。よって、以下ではこの上位モデル平均を用いて将来予測を行う。

なお、上位モデル平均においてジェットの季節進行は概ね良く再現されているものの、梅雨期の降水については

解析 (CMAP データ; Xie and Arkin 1997) と比較して過小バイアスがある (図略)。ただし、梅雨期の降水のピークの時期は解析とよく一致している。

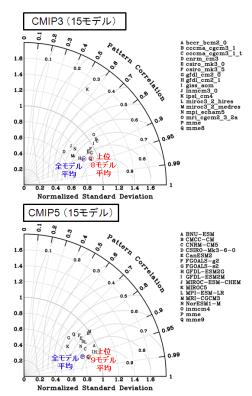


図2 CMIP モデルのスキルスコア

上: CMIP3 モデル、下: CMIP5 モデル。 動径部は規格化標準偏差 (モデルと解析の 標準偏差比)、円周部はパターン相関係数 を表す。

4. 将来予測

4.1 東西風速の変化

上位モデル平均による上層ジェットの季節進行の将来変化を図3に示す。 寒候期においてはジェットが極向きにシフトする (Yin et al. 2005) 一方、5~8 月にかけては現在のジェット軸の南側で風速が強まり、季節進行が遅れる。将来の変化量は、CMIP3(SRES A1Bシナリオ)モデルの方が CMIP5(RCP4.5シナリオ)モデルより大きい。夏季においてジェットが南側で強まるという特徴は、日本付近のみならず西~東アジアで広く見られる(図4)。

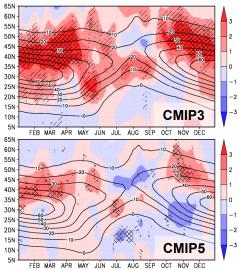
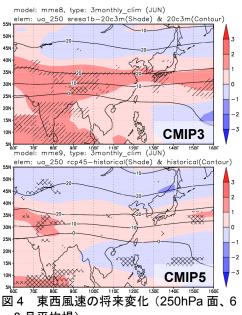


図3 東西風速の将来変化(半旬気候値の 緯度時間断面図)

(上) CMIP3 (SRES A1B シナリオ、 200hPa 面の東西風速)、(下) CMIP5 (RCP4.5 シナリオ、250hPa 面の東西風 速)。等値線は現在気候、陰影は将来気候 と現在気候の差を表す。単位は[m/s]。一 重(二重)ハッチは符号検定で変化が90 (95) %有意な点を表す(以下同様)。



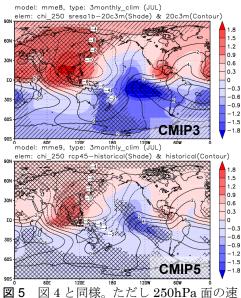
~8 月平均場)

(上) CMIP3 (SRES A1B シナリオ)、(下) CMIP5 (RCP4.5 シナリオ)。等値線は現 在気候、陰影は将来気候と現在気候の差を 表す。単位は[m/s]。

4.2 循環場の変化

Hirahara et al. (2012) は夏季のジ エットの将来変化を、熱帯成層の安定 化 (Frierson 2006) に伴い西太平洋 の上層発散が弱化し、Matsuno-Gill 応答の変化によりチベット高気圧が弱 化するためとした。CMIP3、CMIP5 の夏(6~8月)平均場では、西太平洋 の上層発散とチベット高気圧の弱化が 見られる(図5、図6)。また、東太平 洋における上層収束の弱化も、西~中 部太平洋の中緯度帯における高気圧性 の循環変化によりジェットの南側強化 に寄与していると考えられる。

どちらの予測でも将来変化のパター ンはよく一致しているが、振幅に違い が見られる。温暖化の度合が大きいほ ど成層が安定化し熱帯の循環が弱まる こと、上層の発散弱化が大きいほどチ ベット高気圧の弱化も大きいことから、 予測シナリオの差異が Matsuno-Gill 応答の違いをもたらしていると示唆さ れる。なお、モデルごとに見ると熱帯 上層発散の弱化とチベット高気圧の弱 化の間には比例関係があり(図7)、 Hirahara et al. (2012) の議論をさら に支持する結果となっている。



度ポテンシャルについて。単位は $[10^6 \text{ m}^2/\text{s}]_{\circ}$

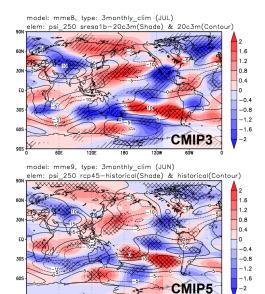


図 6 図 4 と同様。ただし 250hPa 面の流線関数 (帯状平均からの偏差) について。単位は $[10^6\,\text{m}^2/\text{s}]$ 。

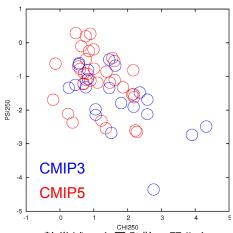


図 7 熱帯域の上層発散の弱化と、チベット高気圧の弱化の関係

横軸は熱帯域 (80E-120E, 10S-20N) で平均した 250hPa 面速度ポテンシャルの将来変化、縦軸はチベット高気圧の北部分 (60E-100E, 30N-50N) で平均した 250hPa 面流線関数 (帯状平均からの偏差)の将来変化。夏(6~8月) 平均場から作成。各点が各モデルに対応。ここでは月別値が利用可能なモデルを使用した。

4.3 暖気移流の変化

Hirahara et al. (2012) は、夏季にジェットの季節進行が遅れるとチベット高原東縁の中層を源とする暖気移流 (Sampe and Xie 2010) が変化し、それに伴い梅雨明けも遅れるという可能性を示唆したが、水平温度移流の解析は行っていない。

本調査の上位モデルによる対流圏中 層の水平温度移流の変化(図8)では、 ジェットの季節進行が遅れることで暖 気移流が現在気候よりも長く続いてお り、その期間は降水量が増加する期間 (現在の梅雨期の降水ピークより後) とよく一致している(図9)。しかしな がら、ジェットの南側強化が比較的小 さい CMIP5 モデルの方が暖気移流の 増加が大きく、また梅雨期の降水変化 も大きい等、水平温度移流の将来変化 のみで単純に理解できない点もある。 これには、他の物理量(気温等)の変 化や、ジェットと熱源(チベット高原) の位置関係、下層循環場の変化等が関 係している可能性があるが、これらの 調査は今後の課題である。

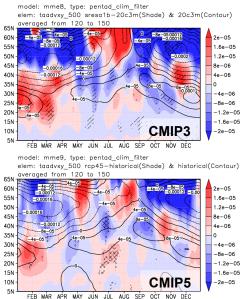
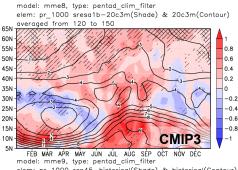


図8 図3と同様。ただし500hPa面における気温の水平移流について。単位は[K/s]。



elem: pr 1000 rcp45-historical(Shade) & historical(Contour) 120 to 150

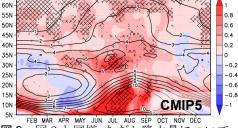


図9 図3と同様。ただし降水量について。 単位は[mm/day]。

5. まとめ

本調査では、CMIP マルチ気候モデ ルデータセットを用いて、地球温暖化 の進展に伴う上層ジェットの季節進行 の将来変化を解析した。SRES A1B シ ナリオの CMIP3、RCP4.5 シナリオの CMIP5 ともに、夏季のジェットが現在 の軸の南側で強まると予測されたが、 その変化量は前者の方が大きかった。

Hirahara et al. (2012) は夏季のジ エットの変化を熱帯成層の安定化に伴 う Matsuno-Gill 応答の変化によるも のとしたが、本調査の結果はそれを支 持するものである。CMIP3、CMIP5 ともに同じメカニズムでジェットは変 化しているが、シナリオによる温暖化 の程度の違いが変化量の違いに寄与し ていると考えられる。

ジェットの季節進行が変化すること でチベット高原東縁を源とする暖気移 流 (Sampe and Xie 2010) も変化し、 それが梅雨明けの遅れに影響を与えて いると示唆されたが、定量的に考える と暖気移流だけでは説明できない部分 もあるため、今後他の要因を含めさら に解析を行っていくことが必要である。

謝辞

本研究は環境省総合研究推進費 (A-1201) により実施された。 高薮縁教 授(東大大気海洋研)、中村尚教授(東 大先端研)、尾瀬智昭室長(気象研)を はじめとする同プロジェクトのメンバ ーに感謝申し上げる。CMIP5 データの 整備においては、廣田渚郎博士(東大 大気海洋研)、荒川理氏(気象研)のお 世話になった。

参考文献

Frierson, D. M. W., 2006: Robust increases in midlatitude static stability in simulations of global warming, Geophys. Res. Lett., 33, L24816,

doi:10.1029/2006GL027504.

Hirahara, S., H. Ohno, Y. Oikawa, and S. Maeda, 2012: Southward strengthening of the jet stream and prolonged Baiu season in future climate. J. Meteor. Soc. Japan, 90, 663-671.

Kimoto, M., 2005: Simulated change of the east Asian circulation under global warming scenario. Geophys. Res.Lett., L16701, **32**, doi:10.1029/2005GL023383.

Kitoh, A. and T. Uchiyama, 2006: Changes in onset and withdrawal of the East Asian summer rainy season by multi-model global warming experiments. J. Meteor. Soc. Japan, 84, 247-258.

Knutti, R., J. Sedlacek, Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. Nature Clim. Change, 1758-6798.

Kodama, Y.-M., 1993: Large-scale common features of subtropical convergence zones (the Baiu frontal zone, the SPCZ, and the SACZ) Part II: Conditions of the circulations for Generating the STCZs. Journal Meteorological Society of Japan, 71. 581-610.

- Kusunoki, S., R. Mizuta, and M. Matsueda, 2011: Future changes in the East Asia rain band projected by global atmospheric models with 20-km and 60-km grid size. *Clim. Dyn.*, **37**, 2481-2493.
- Kusunoki, S., and R. Mizuta, 2012: Comparison of near future (2015-2039) changes in the East Asian rain band with future change (2075-2099) projected by global atmospheric models with 20-km and 60-km grid size. *SOLA*, 8, 73-76.
- Meehl, G. A., C. Covey, K. E. Taylor, T. Delworth, R. J. Stouffer, M. Latif, B. McAvaney, and J. F. B. Mitchell, 2007: The WCRP CMIP3 multimodel dataset: A new era in climate change research. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 88, 1383-1394.
- Onogi, K., J. Tsutsui, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, S. Kadokura, K. Wada, K.Kato, R. Oyama, T. Ose, N. Mannoji, and R. Taira, 2007: The JRA-25 reanalysis. J. Meteor. Soc. Japan, 85, 369-432.
- Taylor, K.E., 2001: Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J. Geophys. Res.*, **106**, 7183-7192.
- Taylor, K.E., R.J. Stouffer, G.A. Meehl, 2012: An Overview of CMIP5 and the experiment design. Bull. Amer. Meteor. Soc., 93, 485-498.
- Sampe, T. and S.-P. Xie, 2010: Large-scale dynamics of the Meiyu-Baiu rainband: environmental forcing by the westerly jet. *J. Climate.*, **23**, 113-134.
- Xie, P. and P. A. Arkin, 1997: Global precipitation: A 17-year monthly analysis based pn gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. *Bull.*

Amer. Meteor. Soc., 78, 2539-2558. Yin, J. H., 2005: A consistent poleward shift of the storm tracks in simulations of 21st century climate. Geophys. Res. Lett., 32, L18701, doi:10/1029/2005GL023684.