# 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)<sub>o</sub> 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℃高い

#### (Knutti and Sedlacek 2012)<sub>o</sub>

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, inmcm4			

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. 将来予测

## 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。 寒侯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)。



(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 ェットの将来変化を、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。



図5 図4と同様。ただし250hPa 面の速 度ポテンシャルについて。単位は [10<sup>6</sup> m<sup>2</sup>/s]。



**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<sup>6</sup> m<sup>2</sup>/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。



ける気温の水平移流について。単位は[K/s]。

elem: pr\_1000 sresa1b-20c3m(Shade) & 20c3m(Contour) d from 120 to 150 65N 601 551 0.8 50N 0.6 45N 0.4 0.2 40N 35N -0.2 301 251 -0.4 20N -0.6 15N -0.8 10N CMIP 5N FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC nodel: mme9, type: pentad\_clim\_filter elem: pr 1000 rcp45-historical(Shade) & historical(Contour) 120 to 150 65N 60N 55N 0.8 501 0.6 45N 0.4 40N 0.2 35N 0 -0.2 30N -0.4 251 -0.6 201 15N -0.8

model: mme8, type: pentad\_clim\_filter

<sup>3™</sup> FÉB WÁR APR MAY JÚN JÚL AÚG SÉP OCT NÓV DĚC 図9 図3と同様。ただし降水量について。 単位は[mm/day]。

CMIP5

-1

# 5. まとめ

10N

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 ェ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.*, **32**, L16701, 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, 2012: 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 of the 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. H. Yamazaki, 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.

251