

## 地球温暖化予測における梅雨期の降水および大気場の変化

### Future Changes of Precipitation and Atmospheric Fields during the Baiu Season under the Global Warming

岡田靖子・竹見哲也・石川裕彦・楠昌司<sup>(1)</sup>・水田亮<sup>(1)</sup>

Yasuko OKADA, Tetsuya TAKEMI, Hirohiko ISHIKAWA, Shoji KUSUNOKI<sup>(1)</sup>, and Ryo MIZUTA<sup>(1)</sup>

(1) 気象庁気象研究所

#### Synopsis

This study focuses on atmospheric circulation fields during the baiu in Japan with global warming under the RCP scenarios. We use projection experimental data conducted using a 20km-, 60km-mesh global atmospheric model (MRI-AGCM3.2). The baiu front indicated by the north-south gradient of moist static energy moves northward in present-day climate, whereas this northward shift in future climate simulations is very slow during May and June. In future late baiu season, the baiu front stays in the northern part of Japan even in August. As a result, the rich water vapor is transported around western Japan and the daily precipitation amount will increase in August.

In the mid-troposphere, the horizontal warm advection roughly corresponds to upward vertical pressure velocity, and shows northward migration as seen in the lower troposphere. Especially, the RCP 8.5 scenario is delayed compared to the RCP 4.5 scenario. This tendency is evident in the north-south term of 500-hPa warm advection in particular.

In conclusion, a late of the baiu rainfall band northward and an increase in precipitation during late of the baiu season are apparent from the point of view of atmospheric fields.

**キーワード:** 気候変動, 梅雨, 温暖化予測実験

**Keywords:** Climate change, Baiu, Global warming prediction experiment

#### 1. はじめに

モンスーンオンセットは 5 月にインドシナ半島で起こり, それから徐々に周辺モンスーン領域に広がる (Matsumoto, 1997; Ueda et al., 2009). これに関連して東アジア, 特に日本では”梅雨”として知られる雨期が始まる. このモンスーン南西風輸送は, 日本列島に豊富な水蒸気をもたらす. 加えて, 上層のジェットはチベット高原で暖められた暖気を輸送する. この暖気移流により, 日本付近で降水を伴う活発な対流活動へと発達する (Sampe and Xie, 2010).

近年の地球温暖化の研究では, IPCC SRES A1B シナリオを元を実施された将来シミュレーション結果を元に, 21 世紀末の梅雨について梅雨入りは特に変化しないが, 明けは 8 月まで停滞すると報告された (Uchiyama and Kitoh, 2004; Kusunoki et al., 2011). その原因は夏季のジェット気流の季節北上の弱体化, およびフィリピン周辺域における対流活動の不活発化が言われている (Hirahara et al., 2012). また, 梅雨後期である 7 月に特に西日本において降水量の増加傾向であることが示される (Kanada et al. 2012; Kusunoki and Mizuta, 2012).

梅雨期の降雨は台風期のそれと共に我々の生活に欠かせない。しかし、しばしば期間中に梅雨前線によるものと思われる激しい雨をもたらす、甚大な被害を及ぼす。近年頻発する梅雨期間中の豪雨と併せて、地球温暖化に伴う梅雨の将来変化への理解は興味を集めるテーマである。

本研究では、IPCC 第 5 次報告書 (AR5) から用いられた代表濃度経路 (RCP; Representative Concentration Pathways) シナリオに基づく将来の梅雨について、大気場の観点から調査する。

## 2. データ

本研究では、気象庁気象研究所で開発された気象研究所大気大循環モデルMRI-AGCM3.2 (Mizuta et al. 2012)の出力変数を用いている。水平解像度は 20km, 60km であり、現在気候実験 (1979~2003 年)、および 21 世紀末気候実験 (2075~2099 年) がそれぞれ実施された。また同モデルは、積雲対流スキーム、Yoshimura (YS; Yoshimura et al. 2014)を用いている。

21 世紀末実験は、IPCC 第 5 次報告書 (AR5) で用いられた代表濃度経路 (Representative Concentration Pathways) シナリオを元に実施された。本研究では主に、2100 年における温室効果ガス排出量の最大排出量に相当するシナリオ、RCP8.5 (高位参照シナリオ)に着目する。また RCP8.5 シナリオの比較として、2100 年までにピークを迎え、それ以降に安定化する RCP4.5 (中位安定化) シナリオを用いる。

降水量データは、1 時間間隔の MRI-AGCM3.2 の 20km, 60km メッシュデータを使用した。

出力された大気場データは、1.25° 格子間隔、鉛直 12 層、6 時間間隔である。下層の水蒸気流入の議論のために、1000~200hPa 積算水蒸気フラックスを作成した。

データは全て daily データに変換しており、現在気候、将来気候共に 25 年平均値を使用している。

## 3. 梅雨期の大気場の解析

### 3.1 梅雨前線帯

地球温暖化に伴う将来の梅雨は、梅雨前線北上の遅延および梅雨明けの遅れが報告されている (Uchiyama and Kitoh, 2004; Kusunoki et al. 2011)。梅雨前線帯はしばしば相当温位の南北傾度の分布により説明される (Matsumoto et al., 1987; Ninomiya and

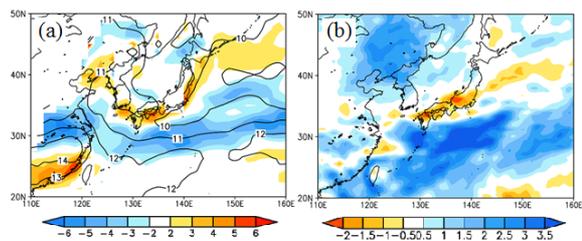


Fig. 1 Future change of (a) meridional gradient in moist static energy (K) at 925 hPa and (b) precipitation in June. Negative value in (a) shows the baiu front, and negative anomaly in (b) shows the increase of precipitation.

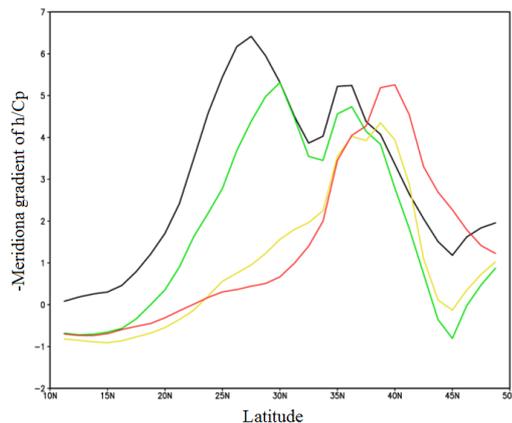


Fig. 2 Seasonal evolution of meridional gradient in moist static energy (K) at 925 hPa. The line is as follows; May (black), June (green), July (yellow), and August (red).

Akiyama, 1992)。Fig. 1に梅雨前期(6月)における925hPa湿潤静的エネルギーの南北勾配および降水量の将来変化分布を示す。湿潤静的エネルギーは定圧比熱 $C_p$  ( $=1004 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ )で割ることで近似的に相当温位と見なされる。湿潤静的エネルギーの負の南北勾配は、6月、現在では季節進行と共に北上するのに対して、沖縄地方を含む $25^{\circ}$ - $30^{\circ}$ Nの緯度帯で停滞する (Fig. 1a)。それと対応するように、6月の降水量の将来変化は同緯度帯で降水量の増加が明瞭である (Fig. 1b)。この前線の季節進行を示したのがFig. 2である。これは将来気候の925hPaの湿潤静的エネルギー南北勾配を日本域 ( $125^{\circ}$ - $142^{\circ}$ E,  $25^{\circ}$ - $42^{\circ}$ N)で領域平均したものである。5月 (black)と6月 (green)はFig. 1aで示されるように、日本列島の南方で前線が停滞している (Fig. 2)。一方梅雨後期である7-8月は、現在気候と比較して日本の北方 ( $35^{\circ}$ - $40^{\circ}$ N)で停滞を示す。8月まで前線の停滞が日本の北方にあることで、南からの水蒸気流入がこの時期まで持続する。このことにより、この停滞が将来、梅雨後期の降水量増加を促すものであることが予想される。水蒸気流入に関しては次章で述べる。

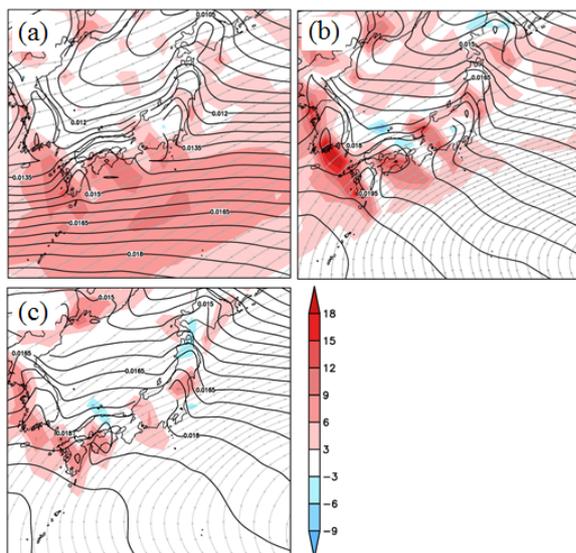


Fig. 3 Future climate of the moisture flux (streamline;  $\text{kg m}^{-1} \text{ day}^{-1}$ ), moisture flux convergence (shading;  $\text{kg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ), and 925-hPa specific humidity (solid contours;  $\text{kg kg}^{-1}$ ). (a) June, (b) July, (c) August.

### 3.2 下層水蒸気フラックス

次に、水蒸気について調べる。水蒸気フラックスは1000-200hPaの積分値を用いる。Fig. 3は水蒸気フラックスとその収束/発散、925hPaの比湿について6月～8月の将来気候の月平均空間分布図である。6月、日本列島の南方は南西風フラックスが卓越しており、それに伴い同領域に収束域が広がる (Fig. 3a)。この南方での停滞は、梅雨前線北進の遅延と対応する (Fig. 1, 2, and 3)。7月になると、西太平洋高気圧の北上と共に、日本列島上では南西風フラックスが卓越し、南からの水蒸気の流入が明瞭である (Fig. 3b)。その結果、収束域は日本海側に集中する。将来気候ではこの西太平洋高気圧は強化する傾向にある (Kusunoki and Mizuta, 2012)。地球温暖化が進むにつれ、下層の気温上昇に伴って日本列島ほぼ全域で水蒸気は増加傾向を示す。さらに8月の平均場では、7月と同様に西太平洋高気圧の西縁の縁辺に伴い、南西風フラックスが明らかである (Fig. 3c)。

### 3.3 大規模場の将来変化

Sampe and Xie (2010)は梅雨前線帯とジェット気流の位置関係から梅雨前線の形成について解析した。彼らはチベット高原上で加熱された暖気が対流圏中上層で卓越するジェット気流によって運ばれ、そこで降水を伴う対流活動へと発達し、正のフィードバックが生じることで総観規模擾乱、梅雨前線が生じることを示した。Fig. 4は500 hPaにおける暖気移流

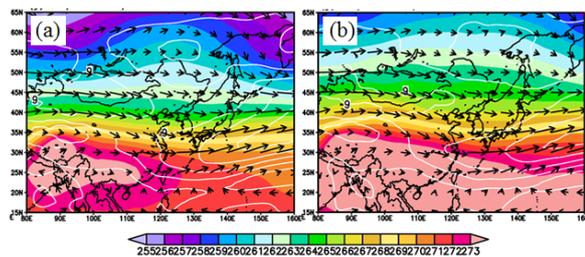


Fig. 4 Mean horizontal wind (arrows;  $\text{m s}^{-1}$ ), horizontal zonal wind (white contour;  $\text{m s}^{-1}$ ), and temperature (color shading;  $\text{K}$ ) at 500 hPa in future mid-June. (a) RCP 4.5 scenario simulation. (b) RCP8.5 scenario simulation.

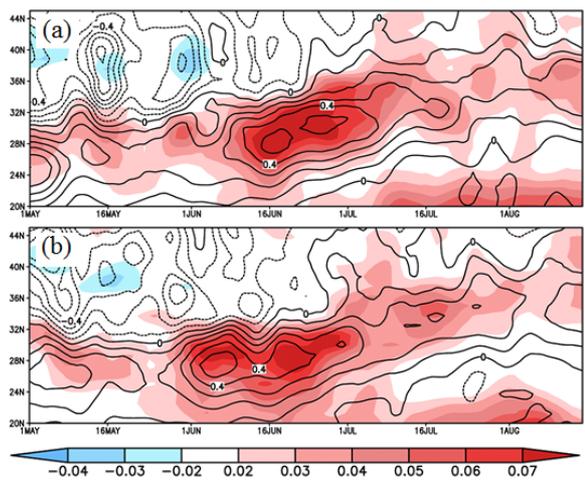


Fig. 5 Time-latitude plots of  $-\omega$  (shading;  $\text{Pa s}^{-1}$ ) and 500-hPa horizontal temperature advection (solid contours; contour interval  $0.2 \text{ K day}^{-1}$ ) averaged over the longitudinal range  $125\text{--}142^\circ\text{E}$ . (a) RCP 4.5 scenario simulation. (b) RCP 8.5 scenario simulation.

と上昇流の季節進行を示す。Sampe and Xie (2010)と同様に、梅雨期間中の500hPaの暖気移流と上昇流はよく対応する。この北進は、RCP4.5および8.5シナリオ共に7月上旬まで日本の南方で停滞する (Fig. 4)。特にRCP8.5シナリオは明瞭であり、また梅雨後期の北日本の停滞も明らかである (Fig. 4b)。

500hPaの水平暖気移流は、先述の通り、チベット高原上の温度上昇に伴う暖気がジェット気流により運ばれることで説明される。つまり、主に東西の関係が重要である。しかし、5月における特に沖縄地方における梅雨については東西よりも南北温度傾度が重要であることが、Okada and Yamazaki (2012)により報告されている。MRI-AGCM3.2Sの結果では、チベット高原上の温度上昇は現在気候より半旬程度早く、季節進行と共にインドシナ半島から台湾・沖縄地方南部まで暖域が広がる。Fig. 5は6月中旬における500 hPaの風と温度の関係を示す。チベット高原上の温度上昇が明瞭であるこの時期、北からの寒気

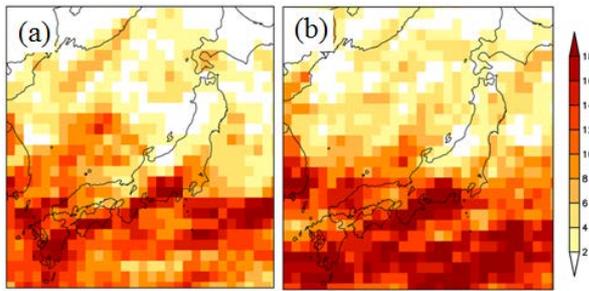


Fig. 6 Frequency distribution of precipitation that exceeds  $100\text{mm day}^{-1}$  (day). (a) RCP 4.5 scenario simulation. (b) RCP 8.5 scenario simulation.

が流入し日本海上空にトラフが形成される。このトラフが存在することで、南北傾度がより強まり、ジェット気流と比べると弱い南風によって南からの暖気の影響が強くなると考えられる (Fig. 5)。

### 3.4 極端な降水の頻度

同モデルの60kmメッシュ降水量データから、6-7月間に日降水量が100mm以上である場合の頻度を Fig. 6に示す。将来気候では現在と同様、西日本や太平洋沿岸域での頻度が高く、特に九州から太平洋沿岸域で非常に高い。RCP4.5, および8.5シナリオを比較すると、RCP8.5シナリオにおいて西日本における頻度が高まる傾向にあることが分かる (Fig. 6a)。

一般に、大雨を伴う梅雨前線帯の南側では湿舌と下層ジェットが見られ、その領域では水蒸気フラックスも大きい。Fig. 3で示したように、中国華南から日本列島に広がる高い比湿分布、また南西風水蒸気フラックスの流入により、九州・太平洋沿岸域では収束域が広がる (Fig. 3a-b)。極端降水も総観場の水蒸気供給より、一部説明することが可能である。また、排出量が増加するにつれ (シナリオが進むにつれ)、極端降水の頻度が高まることが考えられる (Fig. 6)。

## 4. まとめ

本研究では、地球温暖化に伴う梅雨期の降水について、大気条件の観点から調査した。

下層における梅雨前線について、925 hPa 湿潤静的エネルギーを  $C_p$  で割ることにより相当温位と見なし、その南北傾度を調べた (Fig. 1 and 2)。5月中国華南から東シナ海・沖縄地方を中心にその緯度帯で広がる強い南北傾度の領域は、季節進行に伴って北進する (Fig. 2)。しかしながら梅雨前線のこの北進は、5月から6月にかけて、沖縄地方付近を含む緯度帯

( $25^{\circ}$ - $30^{\circ}$ N) で停滞する傾向を示す (Fig. 1 and 2)。7月に入ると  $35^{\circ}$ N 付近まで急激に北上する (Fig. 2)。同時期の梅雨前線の将来変化では、5月・6月のような停滞は見られない。この北上は西太平洋高気圧の北上が一因であると考えられる (Fig. 3)。特に将来気候では7月の西太平洋高気圧の強化は著しく、これにより日本海側の水蒸気フラックスの流入が増加する (Fig. 3b)。梅雨明けを迎えた8月について、将来気候では北日本域において梅雨前線の停滞が持続している (Fig. 2)。

対流圏中層の暖気移流と上昇流の結果からも梅雨の変化を調べた。500 hPa 暖気移流の北進は現在と比較して非常に緩やかであり、シナリオ別の比較では、特にRCP8.5シナリオにて梅雨入りから7月上旬まで  $25^{\circ}$ - $30^{\circ}$ N 付近で明瞭な停滞を示す (Fig. 4)。ジェット気流によってもたらされる暖気はチベット高原上の温度上昇が原因であるが、上昇が著しい8.5シナリオにおいても日本海上空に存在するトラフにより寒気が流入することで、梅雨前線の北進は抑制される (Fig. 5)。

6-7月間における極端降水 (日降水量  $\geq 100\text{mm}$ ) が起こる頻度は、九州および太平洋沿岸域で非常に多い。将来気候では、RCP8.5シナリオにおける極端降水の増加が著しい (Fig. 6b)。この増加は、温度上昇に伴う水蒸気量の増加、また下層循環による湿潤大気の本列島への流入が関係していると考えられる。

これらの結果より、大気場の観点からも温暖化時の梅雨前線の北進の遅れ、また梅雨期後半の降水量の増加が説明可能である。本研究は、降水量、水蒸気フラックスで示された先行研究の結果を大気場の観点から裏付けるものである。

## 謝 辞

本研究は文部科学省委託事業気候変動リスク情報創生プログラム「課題対応型の精密な影響評価」のもとで行われた。

## 参考文献

- Hirahara, S., H. Ohno, Y. Oikawa, and S. Maeda. (2012): Strengthening of the southern side of the jet stream and delayed withdrawal of Baiu season in future climate. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90**, pp.663-371.
- Kusunoki, S., R. Mizuta, and M. Matsueda. (2011): Future changes in the East Asian rain band projected by global atmospheric models with 20-km and 60-km grid size. *Clim. Syn.*, **37**, pp.2481-2493.
- Kanada, S., Nakano, M. and Kato, T. (2012): Projections

- of future changes in precipitation and the vertical structure of the frontal zone during the Baiu season in the vicinity of Japan using a 5-km-mesh regional climate model, *JMSJ*, Vol. 90A, pp. 65-86.
- Kusunoki, S. and Mizuta, R. (2012): Comparison of near future (2015-2039) changes in the East Asian rain band with future (2075-2099) changes projected by Global Atmospheric Models with 20-km and 60-km grid size, *SOLA*, Vol. 8, pp. 73-76.
- Matsumoto, S., Ninomiya, K. and Yoshizumi, S. (1971): Characteristic features of Baiu front associated with heavy rainfall, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 49, pp. 267-281.
- Matsumoto, J. (1997): Seasonal transition of summer rainy season over Indochina and adjacent monsoon region. *Adv. Atmos. Sci.*, **14**, pp.231-245.
- Ninomiya, K., and Akiyama, T. (1992): Multi-scale features of Baiu, the summer monsoon over Japan and East Asia, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 70, pp. 467-495.
- Okada, Y., and Yamazaki, K. (2012): Climatological evolution of the Okinawa Baiu and differences in large-scale features during May and June, *J. Climate*, Vol. 25, pp. 6287-6303.
- Sampe, T., and Xie, S-P. (2010): Large-scale dynamics of the Meiyu-Baiu rainband: Environmental forcing by the westerly jet, *J. Climate*, Vol. 23, pp. 113-134.
- Uchiyama T., and A. Kitoh. (2004): Changes in Baiu-Changma-Meiyu rain by global warming in MRI-CGCM. Proceedings of the International Conference on High-Impact Weather and Climate, March 22-24, Seoul, Korea, pp.218-221.
- Ueda, H., M. Ohba, and S-P. Xie. (2009): Impact factors for the development of the Asian-Northwest Pacific summer monsoon. *J. Climate*, **22**, pp.649-669.
- Yoshimura, H., Ryo Mizuta, and Hiroyuki Murakami. (2015): A Spectral Cumulus Parameterization Scheme Interpolating between Two Convective Updrafts with Semi-Lagrangian Calculation of Transport by Compensatory Subsidence. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, pp.597-621.

(論文受理日 : 2015年6月11日)