

# ハドレー循環で見た季節進行の長期変化傾向

気象庁気候情報課 小林ちあき 前田修平

はじめに

2005年9月の世界の月平均地上気温は1880年の統計開始以来、もっとも高くなった。平年値からの差は+0.85であり、2位の1998年の+0.59を引き離し、大きな値になった。空間的な広がりを見ると、インド北部から東南アジア、中国南部にかけて広く高温域が広がっており、北米大陸東部にも高温域が見られた。特に偏差が大きいという地域的な偏りは見られず、全球的に高温になった。2005年9月の大気循環場の特徴としては、帯状平均OLRの対流活動域の北偏傾向が顕著に見られ、それに関連して、ハドレー循環も北偏傾向がみられた。平年では夏の循環が徐々に弱まる時期にもかかわらず、夏の循環の特徴が残っており、「季節進行が遅い」という表現もされている。

近年の季節進行の遅早の変化傾向について、大気大循環の観点から何か変化傾向(トレンド)が見られるのだろうか? 大気大循環の季節進行の指標として、はじめにハドレー循環について着目する。ハドレー循環のトレンドについてはMitas and Clement(2005)やTanaka et al.(2004)の研究があるが、彼らは年平均や季節平均のトレンドについて調べており、季節進行という視点からは調べられていない。ここでは、季節進行という視

点からみた結果と、関連するほかの要素について、日本の気温との関係を含めて、調査した結果を報告する。

使用したデータと方法の概要

循環場データとして主に使用したものはCDAS1(NCEP/NCAR reanalysis(Kalnay et al.,1996))であるが、CDAS2(NCEP/DOE reanalysis(Kanamitsu et al.,2002))やERA40(Uppala et al.2004)も使用した。降水量としてはCMAP(Xie and Arkin(1997))、OLRデータはNOAA衛星データを使用した。統計期間は、1979-2004年(ERA40は1979-2001年)とした。これは発散風に関して比較的データが均質と考えられる期間である。

手法としては、トレンド解析を行った。これは、線形(直線)回帰を用いており、

$$y_i = a + bx_i + e_i$$

の誤差が最も小さくなるようにa,b(の推定量)を求めると

$$b = \frac{(x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})}{(x_i - \bar{x})^2}$$

$$a = \bar{Y} - b\bar{X}$$

$$s^2 = \frac{(y_i - a - bx_i)^2}{(n-2)}$$

ただし、 $\bar{X} = \sum x_i / n$ 、 $\bar{Y} = \sum y_i / n$ 。

この、bが0であるか否かの検定を行った。有意性の検定も行い、5%の危険率で有意にトレンドが認められるものを本文中で「統計的に有意」としている。

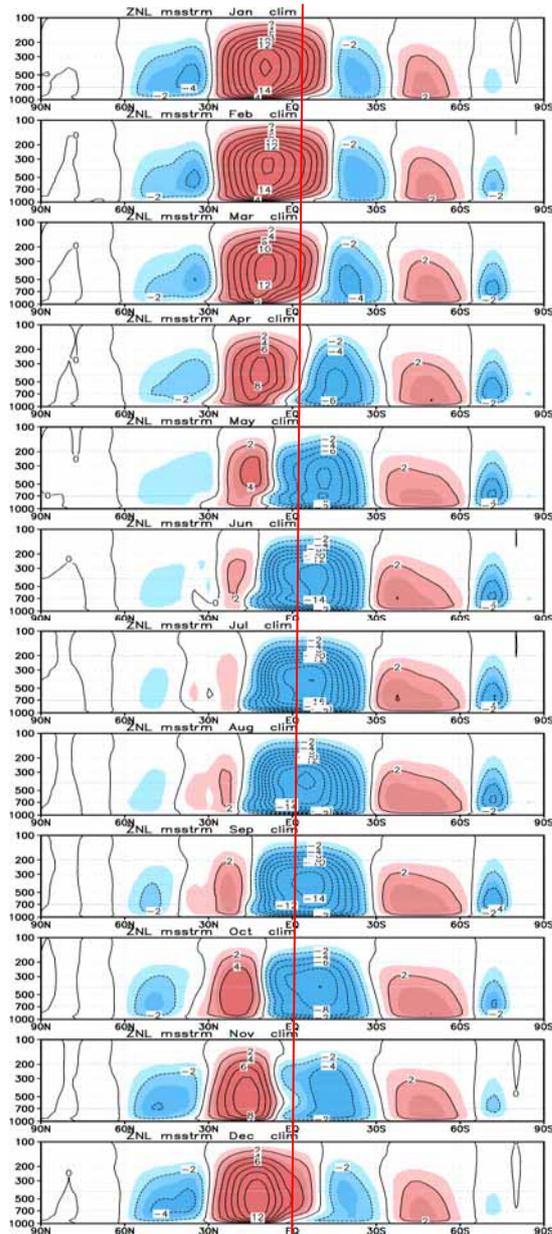


図1 1月から12月の月平均南北風（平年）から求めた質量流線関数（上から1月から12月）向かって左が北極、右が南極（データはCDAS1を使用。コンターは $2 \times 10^{10} \text{kg/s}$ 間隔）北半球側の循環を暖色、南半球側の循環を寒色で示した。

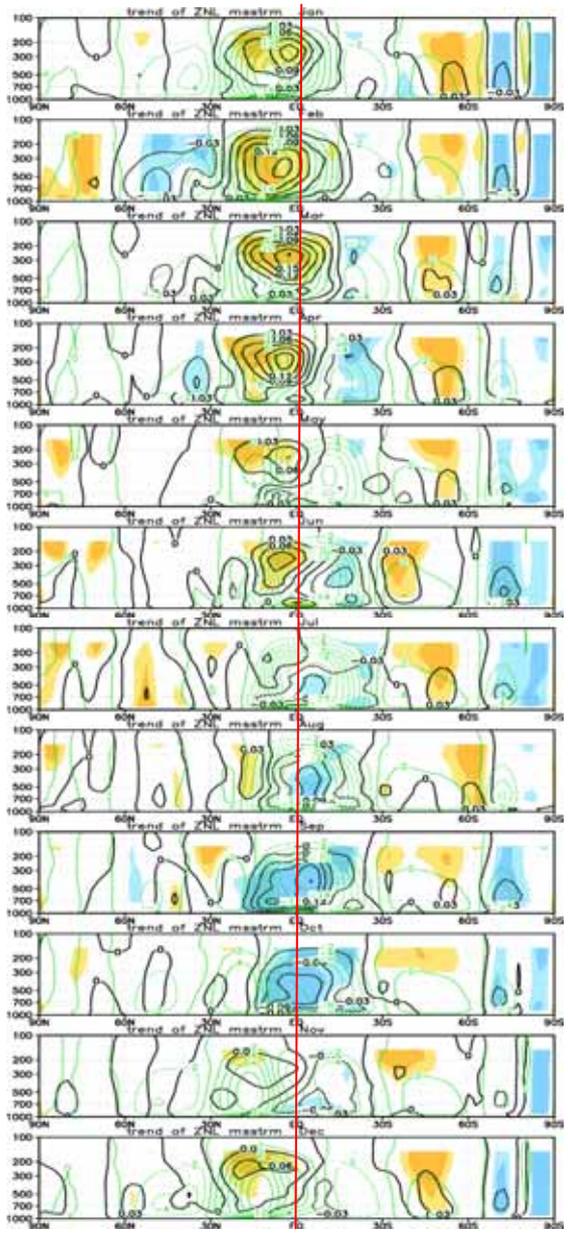


図2 月平均質量流線関数の年々変動の線形トレンド（上から1月から12月。1979年から2004年まで）  
 黒線：トレンド（コンター $0.03 \times 10^{10} \text{kg/s/year}$ 間隔）  
 緑線：平年の質量流線関数（コンターは $3 \times 10^{10} \text{kg/s}$ 間隔）  
 カラー：5%（1%）の危険率でトレンドが有意なところを薄い（濃い）色で示す。（データはCDAS1を使用）

## 結果

### ハドレー循環

図1は、気候値の月平均南北風から計算した質量流線関数である。たとえば、4月の様子を見ると赤道付近で上昇し、北

緯20～30度付近に下降するような循環と南緯20～30度付近で下降するような循環が見られる。この2つの循環がハドレー循環であり、ここではそれぞれ北側のハドレー循環、南側のハドレー循環と呼ぶ。

ほかの月の様子を見ると、この2つの循環は季節によって循環の強さ、循環の及ぼす範囲が変化している。12月、1月、2月では上昇域が南半球側にあり、北側のハドレー循環が強く、範囲も広範囲である。逆に6月、7月、8月の場合、上昇域が北半球側にあり、南側のハドレー循環が強くなっている。

ある月平均の質量流線関数は年々の変動をしているが、その変動に線形トレンドが見られるのか、それぞれの月に対してトレンド解析を行った。その結果を図2に示す。これを見ると2月、3月、4月には、北側のハドレー循環が強まる線形トレンドがみられる。また、9月、10月には、南側のハドレー循環が強まる線形トレンドがみられる。これは3月4月になってもDJFの循環が継続する傾向にあること、また、9月、10月になっても、JJAの循環に近い状態が継続していることを意味し、季節の進行が遅れる傾向があることを示していると考えられる。図は省略するが、CDAS2, ERA40で同様に各月

の線形トレンドを求めた場合も、形やトレンドの強さは異なるが、2月、3月、4月には、北側のハドレー循環が強まる線形トレンドが、9月、10月には南側のハドレー循環が強まる線形トレンドがみられた

この線形トレンドが特定の年の影響で見られるものではないことを示すため、3月と9月のハドレー循環中心付近の流線関数の強さの年々変動を図3に示す。3月は北緯7度、9月は南緯7度の500hPa高度の循環の強さである。3月の様子を見ると、年々の変動が大きい、1990年代後期から循環が強い状態が続いていることがわかり、徐々に変化しているトレンドというよりは、ここ4,5年の傾向が線形トレンドとして計算されたと考えられる。一方、9月の様子を見ると、やはり年々の変動が大きいものの、徐々に値が小さくなり(質量流線関数の向きが逆なので)、南半球側のハドレー循環が強くなっていることがわかる。

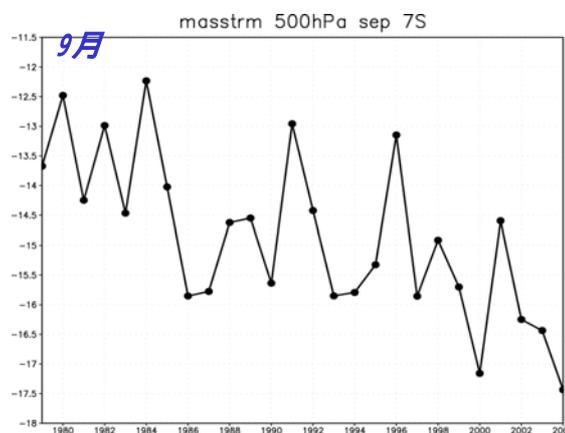
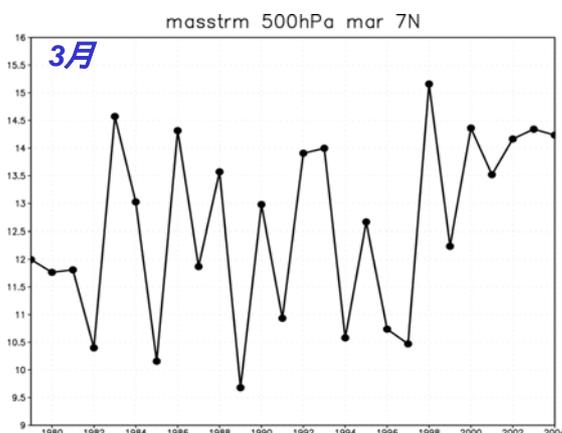
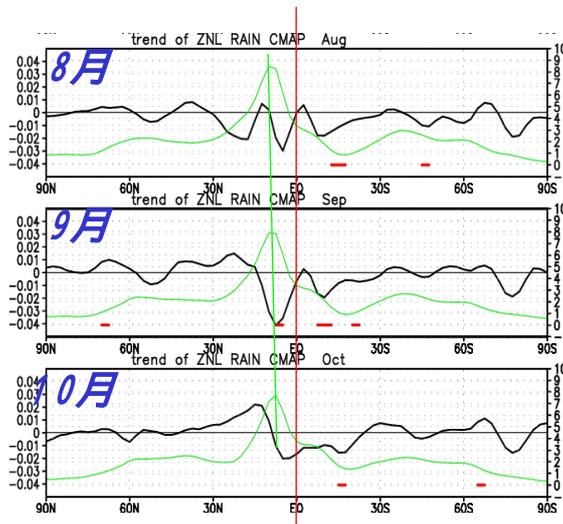


図3 質量流線関数の中心付近の強さの年々変動 (500hPa 3月は北緯7度、9月は南緯7度)  
縦軸の単位  $10^{10}$ kg/s

## 帯状平均降水量

次に、8月から10月の帯状平均降水量の年々変動のトレンドを図4に示す。帯状平均降水量の極大の位置は、気候値としては8月から9月にかけて北緯10度くらいから徐々に赤道寄りの位置に南下する。9月と10月の帯状平均降水量の年々変動の線形トレンドをみると、この最多降水緯度の南側で降水が減る傾向があることがわかる。これは、9月、10月になっても、降水帯が南下せず、季節としての進みが遅れていることを示していると考えられる。この解析にはCMAPを使ったものであり、循環場のデータセットとは独立に解析されたデータセットであり、循環場データで見られた結果と同様な結



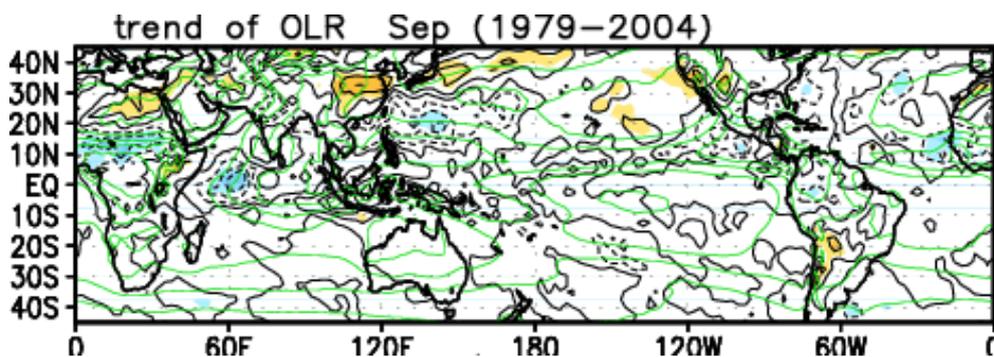
果が得られた。

## 対流活動 (OLR)

つぎに、NOAA衛星によるOLRデータを用いて、9月の対流活動の線形トレンド分布を求めたものを図5に示す。これを見るとフィリピンの北東海上で対流活動が活発になる年々変動の線形トレンドが見られることがわかる。また、北米大陸の南部や、アフリカの北緯10度から20度付近にかけてでも、対流活動が活発になる線形トレンドが見られる。これらは平年のOLR分布で対流活動が活発な地域の北辺にあたる場所であり、対流活動としても、9月の北偏傾向がみられることを示している。

図4 帯状平均降水量分布(緑)と26年間のトレンド(黒線)、赤線はトレンドが統計的に有意な緯度帯

図5 OLRの9月のトレンド(黒線、 $0.3W/m^2/year$  間隔 統計的に有意なところにカラー)および気候値(緑線)。青は対流活発な傾向



### 日本付近の亜熱帯 Jet

対流活動に帯状に北偏傾向が見られることは亜熱帯 Jet の位置にも影響をおよぼしているのだろうか？9月の200hPa高度における東西風の年々変動の線形トレンド分布を図6に示す。これを見ると日本付近では Jet が弱くなっており、バイカル湖付近からオホーツク海にかけての地域で Jet が強まっている様子が見られる。平年 Jet が最も強い緯度帯の北側で Jet の強化が見られ、亜熱帯 Jet が北偏しているようすがみられる。図7は西日本の気温の200hPa東西風への回帰分布であるが、日本付近の東西風の分布の特徴は図6で示した特徴とよく似ている。このように9月の亜熱帯ジェット的位置の線形トレンドは、日本が9月に高温となる時の特徴とよく似た特徴となっている。図には示さないが、200hPa 流線関数偏差では9月の年々変動の線形トレンドとし

て北日本付近に高気圧性循環偏差がみられる。また、850hPa 流線関数偏差でも、有意ではないものの、日本付近の太平洋高気圧が北に張り出すような線形トレンドの分布が見られ、これらの特徴も、日本が9月に高温となる時の循環場の特徴とよく似た分布となっている。

このように9月の循環場の年々変動の線形トレンド分布は、日本付近に高温をもたらす循環場の特徴と一致しており、日本でここ数年、残暑が続いていることとの関係が示唆される。

なお、図6では、地中海付近で Jet が強くなり、スカンジナビア付近で Jet が弱まるトレンドがみられる。このため、帯状平均東西風では顕著な Jet の北偏は見られないのであるが、東経0度から30度付近の Jet の軸は、平年の9月にはアフリカ北部とスカンジナビア付近にあり、それらが北偏していると考えられる。

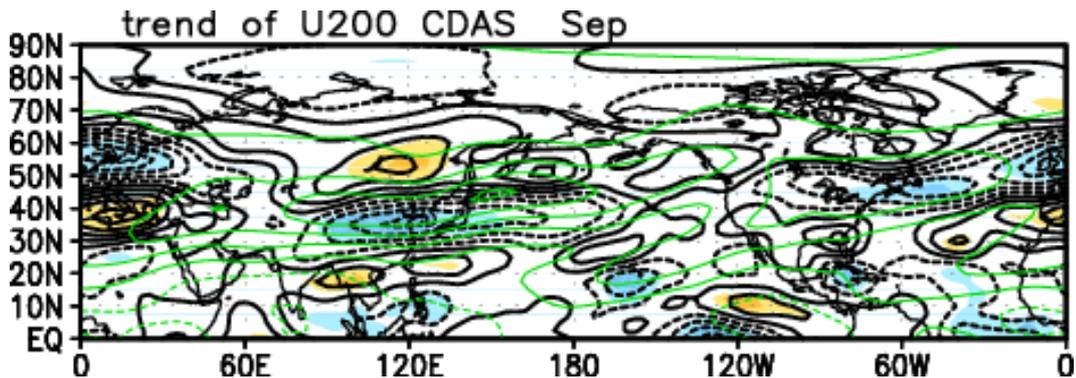


図6 200hPa東西風の9月のトレンド  
(黒線、0.1m/s<sup>2</sup>/year 間隔 統計的に有意なところにカラー) および気候値 (緑線)

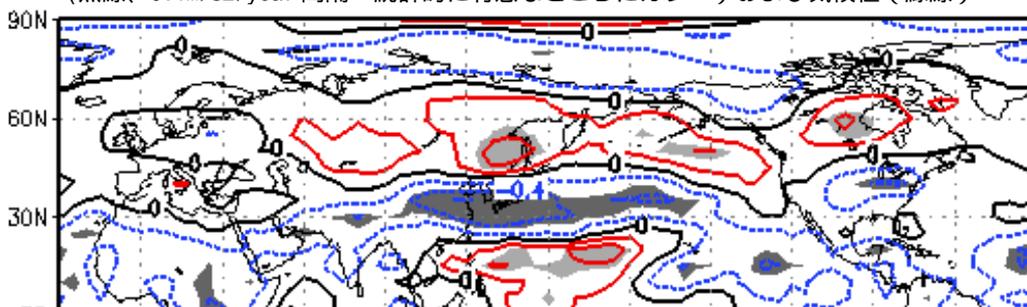


図7 西日本の気温のU200への回帰分布

## まとめと今後の課題

大気大循環場に近年の傾向として季節進行の遅早がみられるのか調査を行った。ハドレー循環は、3月4月5月には冬の傾向が残り、9月10月には夏の傾向が残る傾向がみられ、季節進行が遅くなる様子が見られた。これらは、3つの再解析データに共通していた。9月10月のハドレー循環からみた季節進行の遅れのトレンドは降雨帯の南下の遅れと関係していると思われる。この様子も OLR データ、CMAP データそれぞれで見られた。

これらにともない日本付近では、9月に季節進行にともなう亜熱帯 Jet の南下が遅れる傾向がみられる。日本付近に残暑をもたらす循環場のパターンが9月のトレンドパターンとしてもみられた。これは、日本でここ数年9月に残暑が続いておきていることと関係している可能性がある。

今回は9月について主に調査を行った。春についても今後調べる予定である。統計期間が約26年なので地球温暖化との関係は明らかではなく、数十年規模変動の一部をみているのかも知れない。また、モンスーンの入り明けのタイミングにトレンドがあるのか、についても今後さらに調査する予定である。さらに JRA-25 を使った調査も必要と考えられる。

## 参考文献

Kalnay, E et al. 1996: The NCEP/NCAR 40-Year Re-analysis Project. *Bull.*

*Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 437-471.

Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S-K Yang, J.J. Hnilo, M. Fiorino, and G. L. Potter. 2002: NCEP DOE AMIP-II REANALYSIS (R-2) *Bull. of the Atmos. Met. Soc.*, 1631-1643.

Mitas, M.C., A. Clement, 2005: Has the Hadley cell been strengthening in recent decades? *Geophys.Res.Lett.* **32**,L0389, doi;10.1029/2004GL021765

Tanaka, H.L, N. Ishizaki and A.Kitoh, 2004: Trend and interannual variations of Walker, monsoon, and Hadley circulations defined by velocity potential in the upper troposphere. *Tellus*, **56A**, 250-269.

Uppala, S, P.W.Kallberg, A.Hernandez, S.Saarinen, M.Fiorino, X.Li, K.Onogi, N.Sokka, U.Andrae and V. da Costa Bechtold, 2004 : ERA-40 : ECMWF 45-year reanalysis of the global atmosphere and surface conditions 1957-2002. *ECMWF Newsletter* 101, 2-21.

Xie, P. and P. A. Arkin, 1997:Global Precipitation :A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs, *Bull Amer. Meteorol. Soc.*, **78**, 2539-2558.