

# ハドレー循環でみた季節進行の長期変化傾向

～JRA-25 と温暖化予測実験結果を用いて～

石原幸司（気象研究所気候研究部）

## 1. はじめに

ハドレー循環の長期変化傾向については、12～2 月における北側のハドレー循環が強化されていること (Tanaka et al., 2004、Mitas and Clement, 2005) や、気候モデルを用いた温暖化実験によると、静的安定度が増すために、温暖化時には循環が弱まるか、ほとんど変化しないこと (Knutson and Manabe, 1995、Tanaka et al., 2004) などがこれまでに報告されている。

一方、小林・前田 (2005) では、循環場における「季節進行の遅れ」について、3 つの再解析データを用いた月別のハドレー循環のトレンド解析を行い、3 月から 5 月にかけては 12 月から 2 月にかけての循環が、9 月、10 月には 6 月から 8 月にかけての循環が残る傾向が見られることを示した。このことは、春になっても冬の状態が、秋になっても夏の状態が継続する傾向になっていることを意味する。

そのような中、Mitas and Clement (2006) では、2 つの再解析データと、世界各機関による気候モデルを用いた 20 世紀再現実験結果などから、

- ・ 再解析データにおいては、北半球の冬のハドレー循環は強まっており、これは、ゾンデ観測データに基づいた対流圏中・上層での寒冷化が静的安定度を低下させていることによる。
- ・ 気候モデルを用いた再現実験では、北半球の冬のハドレー循環は弱まるか、ほとんど変わらない。

との結果を示しており、観測データに基づき、その誤差による影響を受けている可能性のある再解析データと、気候モデルを用いた気候

再現結果とでは、ハドレー循環の長期変化傾向が一致しないことを指摘している。

以下では、ハドレー循環の長期変化傾向について、今般整備された JRA-25 のデータを既存の再解析データと比較するとともに、さらに、気象研究所の MRI-CGCM2.3.2 による地球温暖化に伴う変化傾向とも比較した結果を紹介する。

## 2. 使用したデータ

再解析データは、小林・前田 (2005) で用いられた NCEP/NCAR reanalysis (Kalnay et al., 1996)、NCEP/DOE reanalysis (Kanamitsu et al., 2002)、ERA40 (Uppala et al., 2004) に加えて、今般新たにデータが整備された JRA-25 (Onogi et al., 2006) を用いた。解析対象期間は 1979～2004 年 (ERA40 は 1979～2001 年) である。

図 1 は、JRA-25 を用いて、月ごとに月平均南北風から計算した質量流線関数を全期間 (1979～2004 年) にわたって平均した分布図である。これを見ると、12 月から 2 月にかけては上昇域が南半球側にあり、北側のハドレー循環が強くなっている。また、6 月から 8 月にかけては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。このような気候値は定性的、定量的にも他の 3 つの再解析データとほぼ一致している。

また、温暖化予測実験結果としては気象研究所の全球大気・海洋結合モデルである MRI-CGCM2.3.2 (Yukimoto et al., 2001) を用いた。採用したシナリオは SRES A1B で、現在気候 (1850～2000 年)、将来気候 (1990～2100 年) とともに 1 メンバーのみを用いた。月ごとに、

月平均南北風から計算した質量流線関数を全期間（1981～2000年）にわたって平均した分布図を見ると（図2）、再解析データのものとほぼ同

様の分布図となっており、気候値がよく再現されていることが分かる。

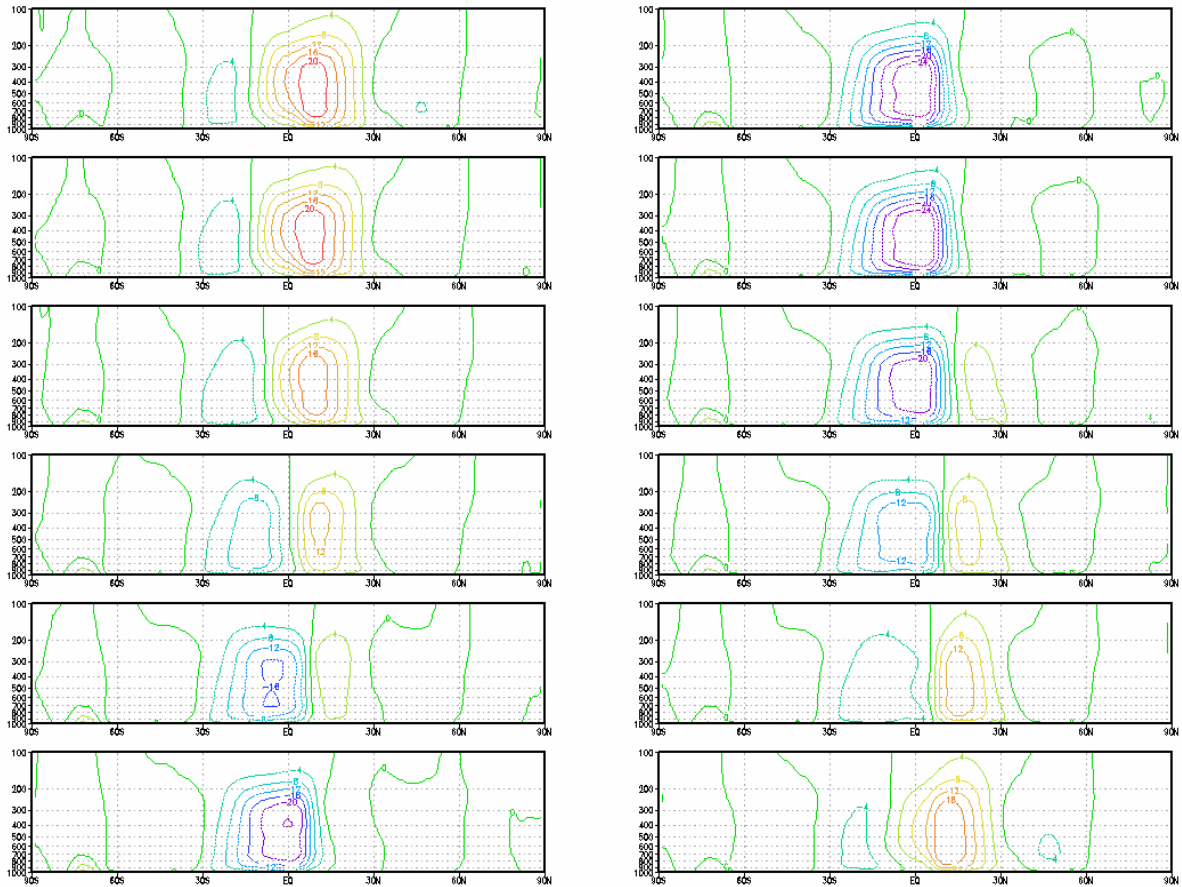


図1 JRA-25の月平均南北風から求めた各月の質量流線関数分布（1979～2004年平均）  
 左上から下に1月から6月、右上から下に7月から12月。各図とも、右端が北極、左端が南極。  
 単位は  $10^{10}$ kg/s。

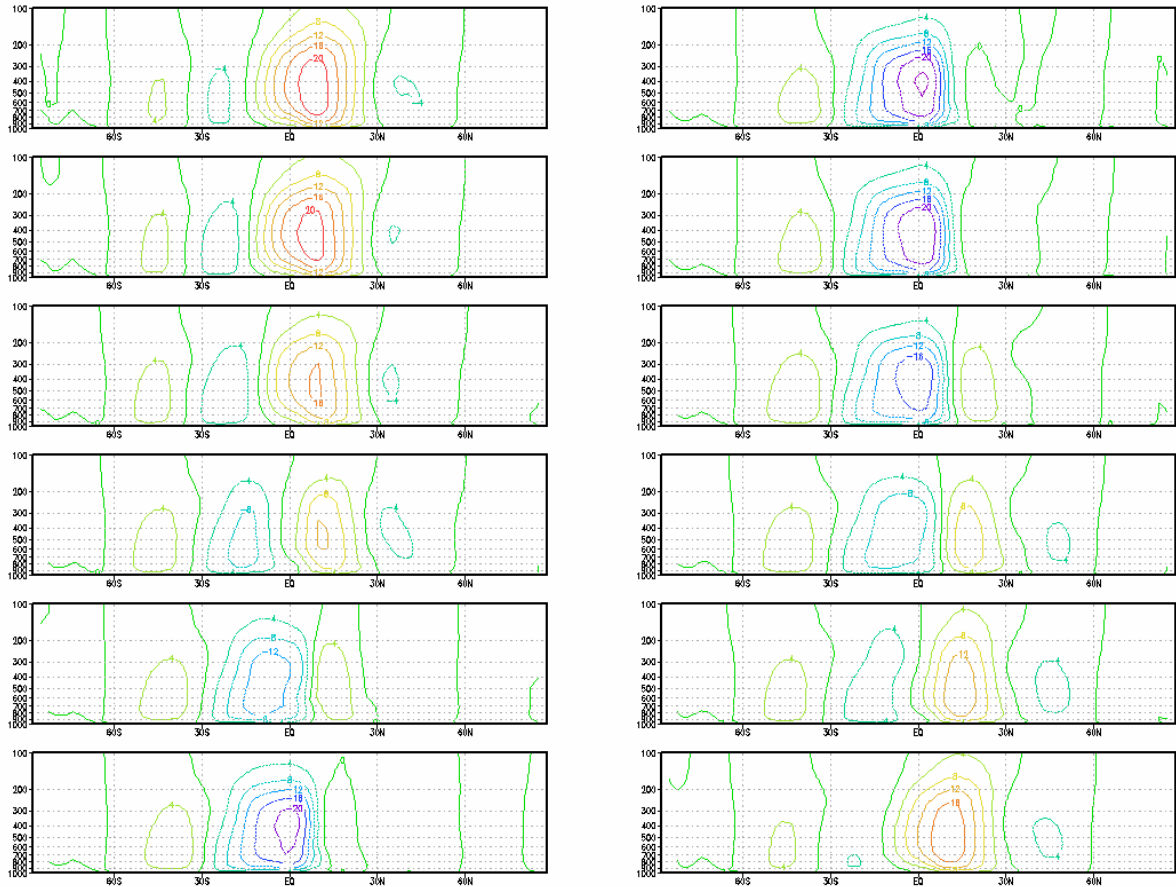


図2 MRI-CGCM2.3.2の月平均南北風から求めた各月の質量流線関数分布(1981~2000年平均) 左上から下に1月から6月、右上から下に7月から12月。各図とも、右端が北極、左端が南極。単位は $10^{10}\text{kg/s}$ 。

### 3. 結果

#### (1) JRA-25による長期変化傾向

図3は、1979~2004年におけるJRA-25のデータを用いた月別の質量流線関数の長期変化傾向を示している。この図を見ると、12月から2月にかけての北側のハドレー循環は強まる傾向が現れていることが分かる。その後も3月から5月にかけては、北側の循環が強い状態が維持されており、季節進行の遅れが明瞭に現れている。しかし、小林・前田(2005)で示された他の再解析データに見られる9月、10月の南側の循環が強まる傾向は見られず、むしろ北側での循環の強化を一貫して示している。

この傾向を確認するために、気候値における1月、3月の北側のハドレー循環、9月の南側のハ

ドレー循環の中心付近の年々変動を見た結果が図4である。1月については1980年代後半に一時的に強まった時期もあったが、長期的には連続した強化傾向を示している。3月についても同様な解釈が可能だが、1990年代中頃までは長期的な変化傾向は見られず、小林・前田(2005)の指摘したとおり、ここ数年の大きな値が強化トレンドを示しているとも考えられる。一方、9月については、特に1990年代後半以降、明らかに南側のハドレー循環が弱まる傾向が見られており、他の再解析データと異なっている。

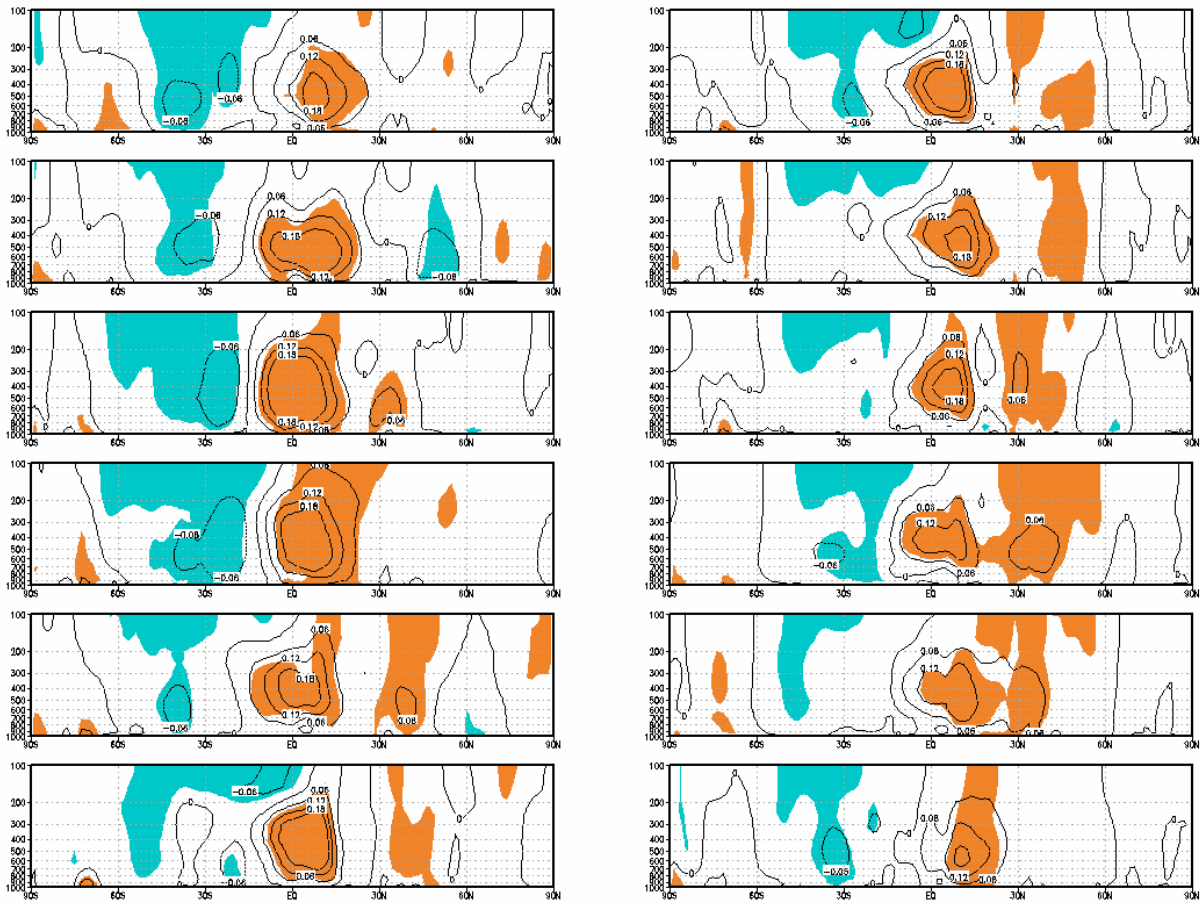


図3 JRA-25の月平均質量流線関数の長期変化傾向(1979~2004年)

左上から下に1月から6月、右上から下に7月から12月。各図とも、右端が北極、左端が南極。単位は $10^{10}\text{kg/s}$ 。危険率5%で有意な正のトレンドのあるところを暖色、負のトレンドがあるところを寒色で示した。

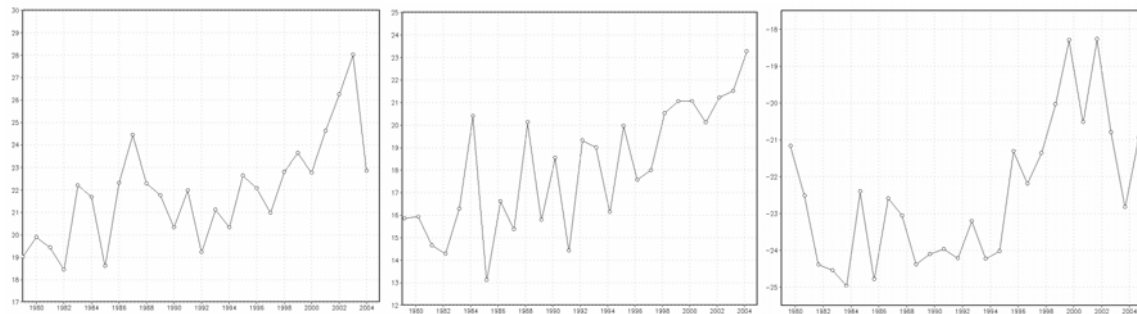


図4 500hPaにおける質量流線関数の中心付近の強さの年々変動

左:1月(北緯 $10^\circ$ )、中:3月(北緯 $10^\circ$ )、右:9月(南緯 $0^\circ$ )。単位は $10^{10}\text{kg/s}$ 。

## (2) 温暖化に伴う変化

図5は、MRI-CGCM2.3.2による地球温暖化に伴う月平均質量流線関数の変化を示している。これを見ると、再解析データにおいて12月から2月にかけて見られた対流圏中・下層での北側の

ハドレー循環の強化は見られないものの、熱帯対流圏上部においてはその強化傾向が現れている。また、3月から5月にかけては、熱帯対流圏において循環の強化が見られる。このことは、小林・前田(2005)で指摘された「季節進行

の遅れ」が現れている可能性もある。

一方、6月から10月にかけては、同じく熱帯対流圏上部において南側の循環の強化が見られ、このことは Tanaka et al.(2004)において指摘された6月から8月にかけて現れた速度ポテ

ンシャルの強度変化と矛盾しない。

こうした対流圏上部に現れた有意な変化は、地球温暖化に伴う圏界面高度の上昇と対応していると考えられる。

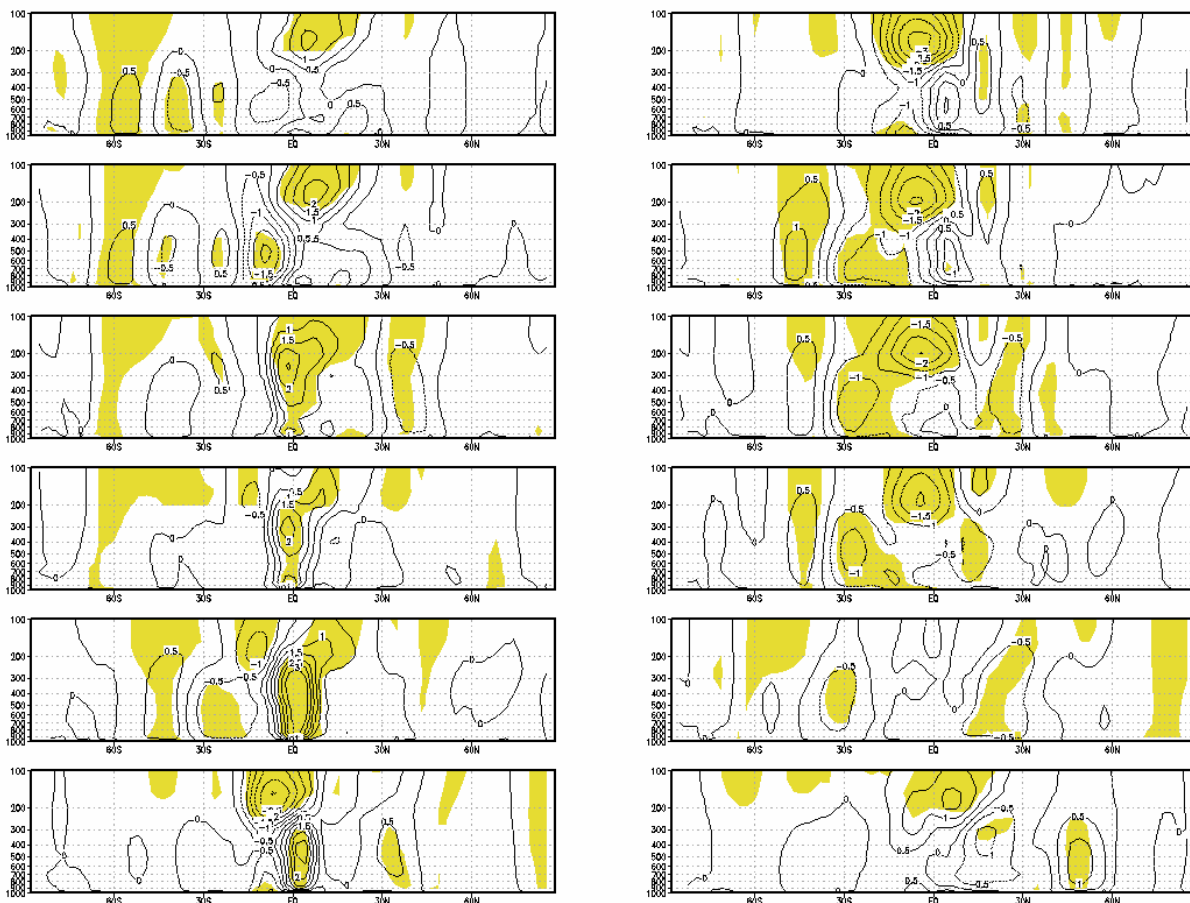


図5 MRI-CGCM2.3.2による、地球温暖化に伴う月平均質量流線関数の変化 (2081~2100年平均) - (1981~2000年平均)

左上から下に1月から6月、右上から下に7月から12月。各図とも、右端が北極、左端が南極。単位は  $10^{10}$ kg/s。Welchの方法による検定にて、危険率5%で有意な変化があるところに色を付けた。

#### 4. まとめと今後の課題

JRA-25を用いて、ハドレー循環の月別の長期変化傾向を解析した結果、他の再解析データと同様に、12月から2月にかけて北側のハドレー循環が強まる傾向が見られたほか、3月から5月にかけては前季節の傾向が残る傾向が見られた。しかし、JRA-25では通年で北側のハドレー循環が強まるような変化傾向を示しており、他の再解析データで見られた9月、10月にかけて前季節の傾向が残る傾向は見られなかった。

今後このような解析を行っていくには、再解析データ間の違いが何によるものなのか、また、各再解析データにおいてどこまで長期連続性が保たれているのかを評価・理解した上で進めていく必要がある。

また、Mitas and Clement (2006)の指摘のように、気候モデルを用いた温暖化予測実験結果と再解析データとは、ハドレー循環の長期変化傾向に大きな違いが生じていることが確認された。このような違いがどこから生じている

のかについても、再解析データ間の比較とともに行っていかなければならない。

#### 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.*, **83**, 1631-1643.

Knutson, T. R., and S. Manabe, 1995: Time-mean response over the tropical Pacific to increased CO<sub>2</sub> in a coupled ocean-atmosphere model, *J. Clim.*, **8**, 2181-2199.

小林ちあき、前田修平、2005: ハドレー循環で見た季節進行の長期変化傾向、第3回「異常気象と長期変動」研究集会。

Mitas, C. M., and A. Clement, 2005: Has the Hadley cell been strengthening in recent decades?, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L03809, doi:10.1029/2004GL021765.

Mitas, C. M., and A. Clement, 2006: Recent behavior of the Hadley cell and tropical thermodynamics in climate models and reanalyses, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L01810, doi:10.1029/2005GL024406.

Onogi, K., H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, J. Tsutsui, H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, S. Kadokura, and K. Wada, 2006: JRA-25: Japanese 25-year re-analysis, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **131**, 3259-3268.

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.

Yukimoto, S., A. Noda, A. Kitoh, M. Sugi, Y. Kitamura, M. Hosaka, K. Shibata, S. Maeda and T. Uchiyama, 2001: A New Meteorological Research Institute Coupled GCM (MRI-CGCM2) - Model Climate and its Variability -. *Pap. Meteor. Geophys.*, **51**, 47-88.