

気象庁現業1か月 EPS、季節 EPS の MJO の予測精度と再現性

久保勇太郎(気象庁気候情報課)

1. はじめに

マッデン・ジュリアン振動 (MJO: Madden-Julian Oscillation, Madden and Julian, 1971, 1972) とは数 1000km スケールの対流活発・不活発域が約 30~60 日周期で熱帯域を東進する季節内時間スケールの現象である。MJO は熱帯から中・高緯度の循環場の変動を介して、日本付近の天候にも影響を与えることが知られており(遠藤と原田, 2008)、その予測は季節予報にとって大変重要である。しかしながら、予測の時間スケールとして 2 週間から 2 か月程度先を対象とした「季節内から季節予測プロジェクト」(S2S; Vitart et al., 2016) で世界の現業機関から集められた予測データを用いて MJO の予測を検証した調査 (Vitart et al., 2015) では、気象庁 1 か月アンサンブル予報システム (1 か月 EPS (V1403); 平井ほか, 2015) の MJO の振幅が、解析や他の現業機関のもの比べて小さいことが指摘されている。したがって、MJO の再現性の向上は気象庁大気モデルの開発課題の一つとなっている。

本研究では、MJO の再現性向上に向けた開発の一環として、U.S. Climate Variability and Predictability (CLIVAR) MJO ワーキンググループ (Gottsechalek et al., 2010) によって開発された MJO 診断ツール (Kim et al., 2009) を使用して、1 か月 EPS (V1403) と、大気海洋結合モデルで構成される季節アンサンブル予報システム (季節 EPS (JMA/MRI-CPS2); 高谷と石川, 2015) の MJO の予測精度の検証を行った。なお、V1403 は 1 か月予報と異常天候早期警戒情報、JMA/MRI-CPS2 は 3 か月予報、暖寒候期予報、エルニーニョ予測の情報を作

成するために現業的に用いられているシステムである。

2. データと MJO 指数の定義方法

検証は 1981~2010 年の 30 年間を対象に行った。また、「冬期」を V1403 では 10/31~4/20 の 18 初期日、JMA/MRI-CPS2 では 10/26~4/11 の 18 初期日とする予測期間として定義した。検証用の解析値のデータセットとして、気象庁 55 年長期再解析 (JRA-55; 古林ほか, 2015; Kobayashi et al., 2015) 及び NOAA の極軌道衛星搭載の可視赤外放射計 AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) による観測を基に作成された外向き長波放射量 (OLR) 解析値 (Liebmann and Smith, 1996) を使用した。予測値として、V1403 と JMA/MRI-CPS2 の再予報のデータを使用した。V1403 と JMA/MRI-CPS2 の再予報の仕様はそれぞれ第 1 表の通りである。

第 1 表 V1403 と JMA/MRI-CPS2 の再予報の仕様

	1 か月 EPS (2014 年 3 月~) V1403	季節 EPS (2015 年 6 月~) JMA/MRI-CPS2
大気モデル	GSM1304	GSM1011C
水平解像度	TL319 (約 55km 格子)	TL159 (約 110km 格子)
鉛直層数	60 層 (最上層 0.1hPa)	60 層 (最上層 0.1hPa)
大気初期値	全球速報解析	JRA-55
陸面初期値	オフライン陸面解析	JRA-55
海面水温	初期偏差持続	海洋モデル
海氷	初期偏差に基づく統計的推定	海氷モデル
アンサンブル手法	BGM 法 (北半球域 + 熱帯域) + 確率的物理過程強制法	BGM 法 (北半球域 + 熱帯域) + 確率的物理過程強制法
メンバー数	5 (12×3 初期時刻) 各月 10, 20, 月末初期値	5 (12×2 初期時刻) 各月中旬と下旬初期値

MJO の定義として、世界的に広く用いられている Wheeler and Hendon (2004) (以下、WH04) の手法を用いた。WH04 で示された MJO 指数は、NOAA の OLR、NCEP/NCAR Reanalysis 1 (Kalnay et al., 1996) の 200hPa 及

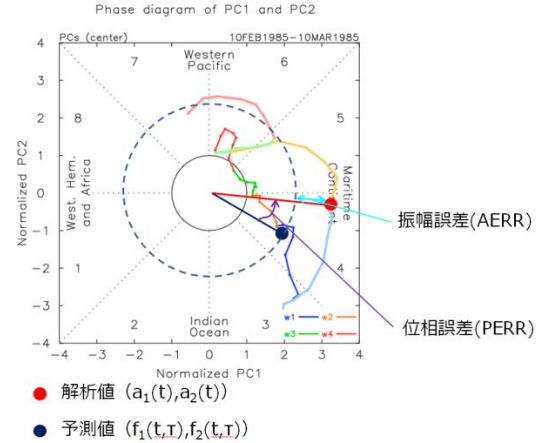
び 850hPa 東西風を基に、予め結合経験的直交関数(EOF)の第1モード(EOF1)と第2モード(EOF2)の固有ベクトルを求め、これに解析値や予測値を投影することで算出されている。当検証でも WH04 の固有ベクトルを使用して MJO 指数を求めた¹。

MJO 指数の求め方は以下のとおりである。まず、解析値を固有ベクトルに投影するにあたり、投影の前に次の処理を施した。季節の時間スケールより長い周期の変動成分を除くため、OLR、200hPa 及び 850hPa 東西風の各要素の日別値に対して、それぞれ日平均気候値及び季節変動成分(波数 1~3)からの差をとり、更にその上で前 120 日平均値からの差をとった²。一方、予測値については、各要素に対して、それぞれ初期日と予報期間ごとに求めたモデル平年値からの差をとり、その上で前 120 日平均値からの差をとった。ただし、予測日数が 40 日間であるため、前 120 日平均値を算出する際、予測対象期間より前については解析値も使用した。更に、解析値・予測値ともに各要素、解析値の分散の全球平均の平方根で規格化した。このように求めたデータを、EOF1 と EOF2 の固有ベクトルに投影し、主成分(Principal Component; PC)時系列 PC1、PC2 を求め、これらを MJO 指数と定義した。

¹ WH04 の固有ベクトルを使用した理由は世界中の多くの現業・研究機関が共通して WH04 のものを使用しており、投影元のベクトルが異なっていると各現業・研究機関の結果を相互に比較することができなくなるためである。

² WH04 では El Niño-Southern Oscillation (ENSO) に伴う変動成分を除去するため、前 120 日平均からの差をとる前に次のような操作を行っている。検証期間内のインド洋~太平洋(55°S~50°N、30°E~70°W)における月平均 SST を回転 EOF 解析したときの第 1 主成分時系列 SST1 (Drosowsky and Chambers, 2001) に対する、各要素の日別値との回帰係数を事前に求めておき、この回帰係数に対応する各月の SST1 との積を除去することとしている。しかし、Gottschalck et al. (2010) では前 120 日平均の除去により、ENSO に伴う変動成分を除去できており、SST1 との回帰成分を除去してもほとんど結果が変わらないことが指摘されている。このことから、本研究では解析値と予測値の両方で SST1 の回帰成分の除去を行っていない。

MJO の振幅は $\sqrt{PC1^2 + PC2^2}$ として定義した。MJO の位相は PC1 と PC2 で張られる位相空間を第 1 図のように 8 等分することで定義した。



第 1 図 MJO の位相空間とそれに MJO 指数を投影した時の例

図中の数字(1~8)は MJO の位相、領域名は対流活動域の存在する領域を表す。MJO 指数を投影した期間は 1985 年 2 月 10 日~3 月 10 日。濃い実線は V1403 の 1985 年 2 月 10 日初期値のコントロールメンバーの MJO の指数、淡い実線は解析の MJO の指数。青線は予測 1~8 日目、黄線は予測 8~15 日目、緑線は予測 15~22 日目、赤線は予測 22~28 日目を表す。赤丸は 1985 年 2 月 18 日(予測 8 日目)の解析の MJO 指数、青丸は V1403 の MJO 指数。水色線は予測 10 日目の振幅誤差、紫線は位相誤差を表す。

MJO 指数の予測精度は以下の式(Matsueda and Endo, 2011)で評価した。

$$RMSE(\tau) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N ((f_1(t, \tau) - a_1(t))^2 + (f_2(t, \tau) - a_2(t))^2)}$$

$$COR(\tau) = \frac{\sum_{t=1}^N (a_1(t)f_1(t, \tau) + a_2(t)f_2(t, \tau))}{\sqrt{\sum_{t=1}^N (a_1(t)^2 + a_2(t)^2)} \sqrt{\sum_{t=1}^N (f_1(t, \tau)^2 + f_2(t, \tau)^2)}}$$

$$PERR(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \tan^{-1} \left(\frac{a_1(t)f_2(t, \tau) - a_2(t)f_1(t, \tau)}{a_1(t)f_1(t, \tau) + a_2(t)f_2(t, \tau)} \right)$$

$$AERR(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (\sqrt{f_1(t, \tau)^2 + f_2(t, \tau)^2} - \sqrt{a_1(t)^2 + a_2(t)^2})$$

ここで、 a_1 と a_2 はそれぞれ解析の PC1 と PC2、 f_1 と f_2 はそれぞれ予測の PC1 と PC2 である。 τ

は予測期間を、 N はサンプル数を表す。サンプル数は検証に用いた予測の事例数であり、アンサンブルメンバー数と検証期間の初期値数の積である。RMSE は二乗平均平方根誤差、COR は相関係数、PERR は位相誤差、AERR は振幅誤差を示す。PERR>0 (<0) は解析に比べて予測の位相速度が速い(遅い)ことを表し、AERR>0 (<0) は解析に比べて予測の振幅が大きい(小さい)ことを表す。これらを模式的に表したものが第1図である。位相空間上で見ると、振幅誤差は水色線の長さ、位相誤差は紫線の角度である。

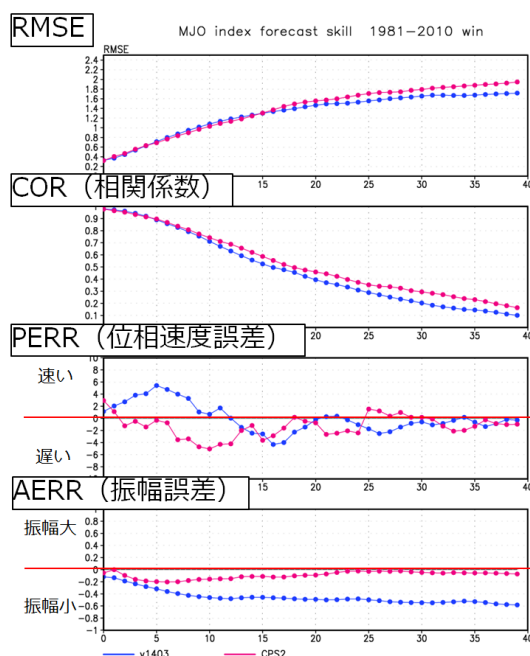
3. MJO 指数の予測精度

冬期の MJO 指数の予測精度を第2図に示す。V1403、JMA/MRI-CPS2 とともに、COR は決定論的な予測精度の目安である 0.6 を予測約 14 日目まで上回っている。JMA/MRI-CPS2 の COR は予測約 10 日目以降で V1403 よりも高い。PERR をみると、予測初期で V1403 は解析よりも早く、JMA/MRI-CPS2 ではやや遅く東進する傾向にある。AERR をみると、Vitart (2015) で指摘されたように、V1403 では予測初期から解析よりも振幅が小さく、予測後半にかけてさらに小さくなる傾向がある。一方、JMA/MRI-CPS2 では予測初期から解析の振幅に近い。RMSE は予測後半ほど V1403 に比べて JMA/MRI-CPS2 の方が大きい傾向である。その理由の一つとして、JMA/MRI-CPS2 の方が V1403 よりも振幅が大きいことが挙げられる。

4. 初期値でインド洋に対流活発な MJO が存在する時の評価

初期値に対流活発な MJO が存在する場合の、冬期の大規模発散偏差の東進の再現性を評価するため、予測で MJO の位相が 3 (インド洋東部で対流活発) であり、かつ MJO の振幅が 1 より大きい事例について、赤道域 (15°S

～15°N) で緯度平均した 200hPa 速度ポテンシャル (CHI200) 平年偏差 (第3図) 及び OLR 平年偏差 (第4図) の経度時間合成図を示す。解析では、CHI200 発散偏差域の中心は、0 日目にインド洋東部にあり、その約 8 日後には海洋大陸付近に達し、約 14 日後には西太平洋に達している (第3図上段)。対応して、OLR 負偏差域も、予測約 8 日目に海洋大陸に達している (第4図上段)。

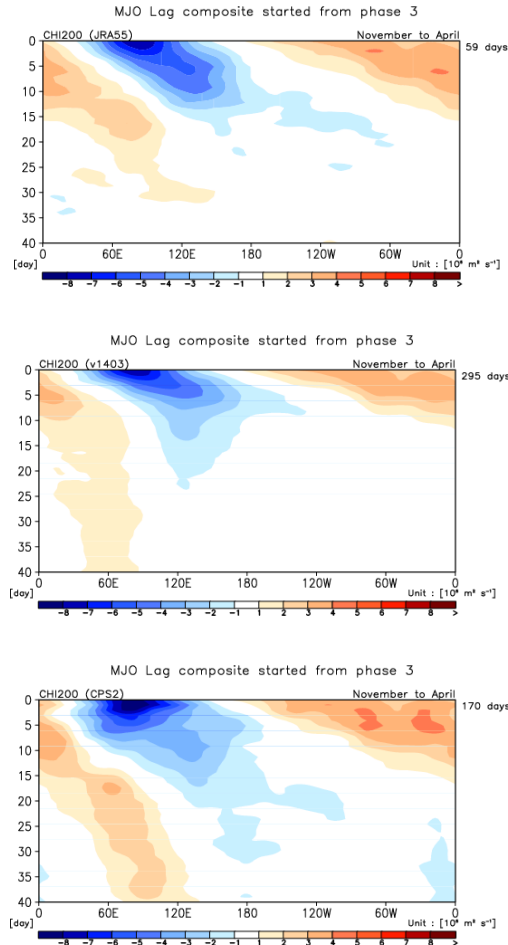


第2図 冬期の MJO 指数の予測精度

V1403 (青) と JMA/MRI-CPS2 (赤) の予測精度。上から RMSE、COR、PERR (単位は度)、AERR。横軸は予測日数。スコアの定義は本文を参照。

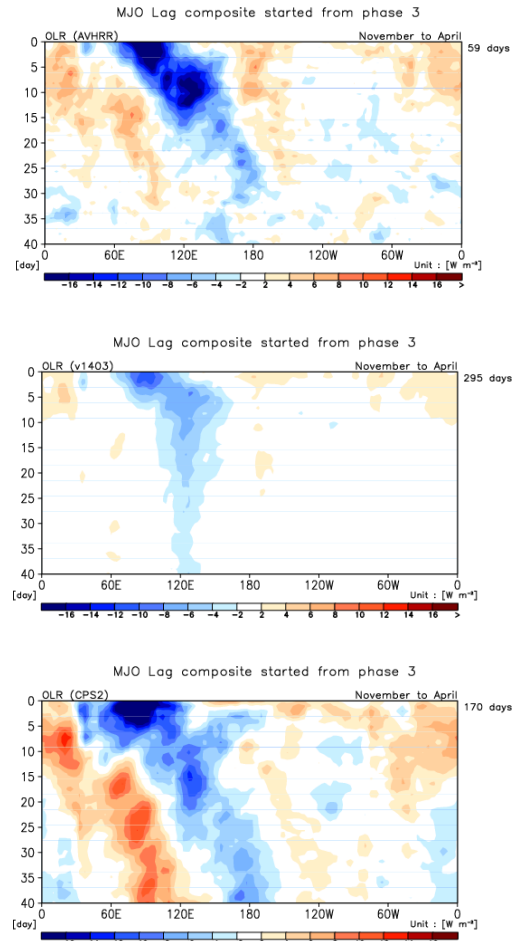
予測をみると、V1403 では CHI200 発散偏差域の中心は解析よりも速く海洋大陸に達し、その後は、解析よりも速く、かつ振幅が解析よりも小さい状態で西太平洋に東進する成分と、解析では明瞭でない海洋大陸にとどまる成分がある (第3図中段)。OLR 負偏差域をみると、予測初期から解析に比べて振幅が小さい (第4図中段)。対流活発域とあまり対応しない東進速度の速い領域が見られることから、この合

成図解析に見られるシグナルには、MJO だけでなくケルビン波も含まれていると考えられる。



第3図 冬の、MJOの初期位相が3(インド洋東部)、かつ振幅が1よりも大きい事例について、赤道域(15°S-15°N)で緯度平均した200hPa速度ポテンシャル偏差の経度時間合成図

上から解析、V1403、JMA/MRI-CPS2。縦軸は対象となる事例を0とした時の日(予測の場合は予測日)。単位は $10^6 \text{ m}^2/\text{s}$ 。右側の値は初期位相が3、かつ振幅が1より大きい事例の日数。



第4図 第3図と同様。ただし、OLR偏差の合成図。

JMA/MRI-CPS2では予測初期のCHI200発散偏差域の海洋大陸への位相速度が解析よりやや遅い傾向である。海洋大陸にとどまる成分はJMA/MRI-CPS2では明瞭ではなく、解析に近い(第3図下段)。また、解析よりも振幅はやや小さいものの、対流活発位相の後面から西太平洋へ東進する不活発位相がJMA/MRI-CPS2では見られる(第3図下段)。OLR負偏差域を見ると、予測約5日目以降の振幅が解析に比べてやや小さいものの、予測約8日目に海洋大陸に達し、西太平洋へ東進する傾向が見られる。一方、対流活発域が西インド洋へ西進する、解析には見られない

成分が見られる。赤道対称の低気圧性循環偏差が見られる(図略)ことから、インド洋に MJO が存在する場合、JMA/MRI-CPS2 では解析よりも赤道ロスビー波がより明瞭に現れる傾向にあると考えられる。

5. MJO の位相毎の評価

MJO の位相毎の再現性を評価するために、予測 10 日目～16 日目で MJO の振幅が 1 より大きい事例について合成図解析を行った。第 5 図は OLR 偏差と 200hPa 風の位相毎の合成図である。V1403 では MJO に伴う OLR 偏差は解析よりも振幅がかなり小さい。一方、200hPa の風のパターンは解析に類似している。JMA/MRI-CPS2 では MJO に伴う OLR 偏差は解析に類似した振幅であり、200hPa の風のパターンも解析に類似している。

MJO の位相毎の中緯度への影響を評価するために、200hPa 流線関数偏差に対して位相別に合成図解析を行った。解析では、インド洋で対流活発(位相 2 及び 3)のときに、MJO による対流活発の熱源応答に対応した、南アジア域での高気圧性循環偏差がみられる。さらに、亜熱帯ジェットに沿った波束伝播、日本付近で高気圧性循環偏差となる傾向である。V1403、JMA/MRI-CPS2 の予測約 14 日目でも、解析で見られる上記の傾向を予測できている。特に JMA/MRI-CPS2 は、より解析に近い。これまで述べたように、V1403 に比べて、JMA/MRI-CPS2 の MJO の振幅が大きく解析に近いことと整合的である。

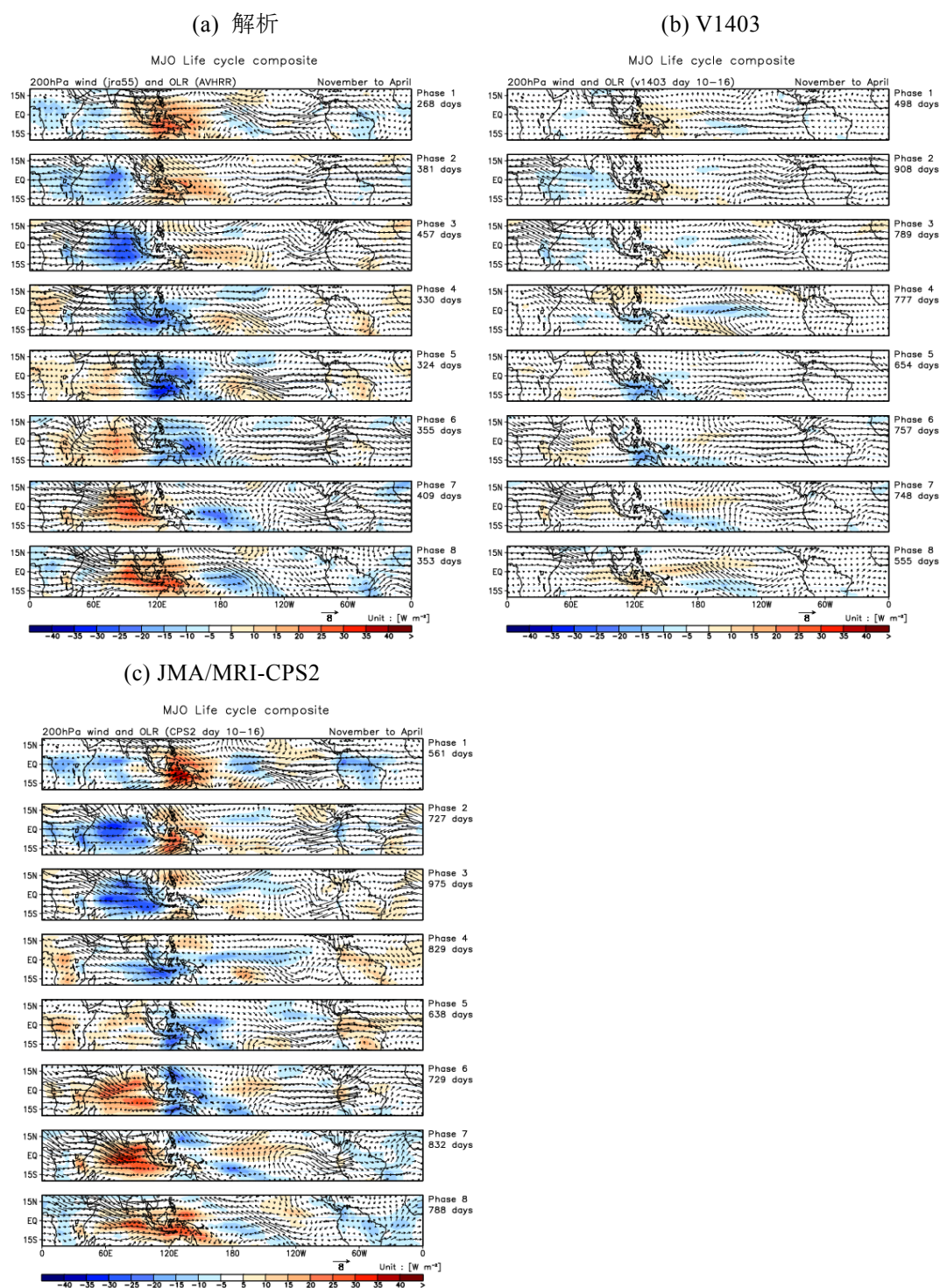
6. まとめ

MJO 指数と再現性の検証を気象庁1か月アンサンブル予報システム(V1403)と季節アンサンブル予報システム(JMA/MRI-CPS2)に対して行った。V1403、JMA/MRI-CPS2 ともに、予測約 14 日目程度までは予測精度が決定論的な予測精度の目安 0.6 を超えていることを確認した。

V1403 では予測初期から解析に比べて MJO の振幅が小さい傾向である。結果として、MJO に対応した熱源応答とそれに伴う中緯度への影響も解析に比べて小さいと考えられる。また、予測初期の MJO の東進速度が解析よりも速い傾向である。対流と結合していない場合が多いため、MJO だけでなく、ケルビン波を表現している可能性がある。

JMA/MRI-CPS2 では、解析に近い MJO の振幅を表現する傾向にある。結果として、MJO に対応した熱源応答とそれに伴う中緯度への影響も解析に近いと考えられる。しかし、予測初期の MJO の東進速度は解析よりもやや遅く、また、解析には見られない赤道ロスビー波と思われる波がインド洋上に表現される傾向がある。

今後は、本調査により明らかになった現業予報システムの MJO の再現性の特徴を踏まえ、さらなる表現の改善に向けて開発を行ってきたい。

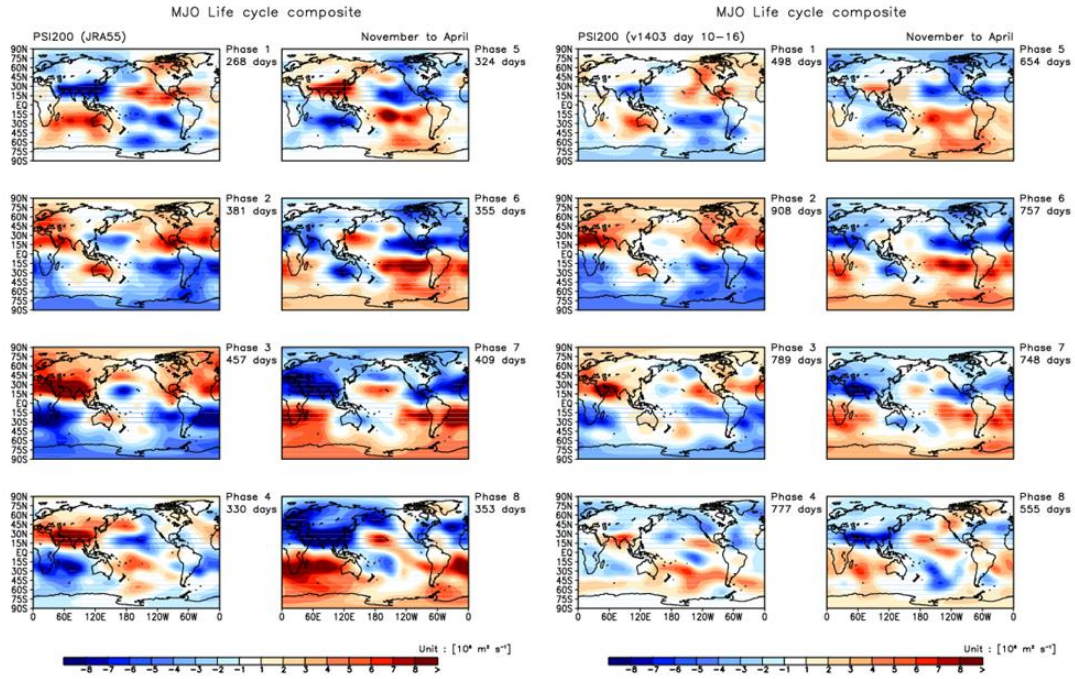


第 5 図 冬期の各位相における OLR 偏差と 200hPa 風偏差の合成図

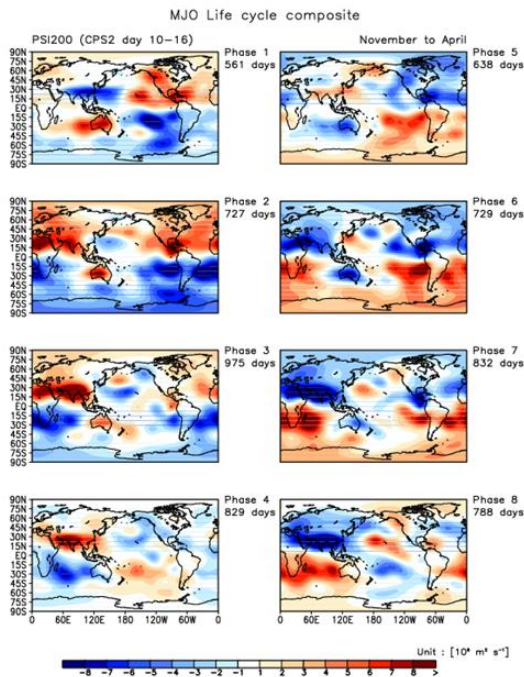
陰影は OLR (W/m^2)、ベクトルは 200hPa 風 (m/s)。ベクトルのスケールは図の下を参照。(a)解析、(b)V1403、(c)JMA/MRI-CPS2。図の右側には各位相の合成に用いた日数を示す。

(a) 解析

(b) V1403



(c) JMA/MRI-CPS2



第 6 図 第 5 図と同じ。ただし、200hPa 流線関数偏差の合成図
陰影は 200hPa 流線関数 ($10^6 \text{ m}^2/\text{s}$)。

参考文献

- Drosowsky, W., and L. E. Chambers, 2001: Near-global sea surface temperature anomalies as predictors of Australian seasonal rainfall. *J. Climate*, **14**, 1677-1687.
- 遠藤洋一, 原田やよい, 2008: マッデン・ジュリアン振動と冬季の日本の天候及び循環場との関係, 天気, **55**, 159-171.
- Gottschalck, J., M. Wheeler, K. Weickmann, F. Vitart, N. Savage, H. Lin, H. Hendon, D. Waliser, K. Sperber, M. Nakagawa, C. Prestrelo, M. Flatau, and W. Higgins, 2010: A framework for assessing operational Madden-Julian Oscillation forecasts: A CLIVAR MJO working group project. *Bull. Amer. Met. Soc.*, **91**, 1247-1258.
- 平井雅之, 宮岡健吾, 佐藤均, 杉本裕之, 南敦, 松川知紘, 高谷祐平, 新保明彦, 2015: 1か月予報システムの変更の概要. 平成 26 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 1-5.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kirtler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, A. Leetmaa, R. Reynolds, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, R. Jenne, and D. Joseph, 1996: The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 437-471.
- Kim, D., K. Sperber, W. Stern, D. Waliser, I.-S. Kang, E. Maloney, W. Wang, K. Weickmann, J. Benedict, M. Khairoutdinov, M.-I. Lee, R. Neale, M. Suarez, K. Thayer-Calder, and G. Zhang, 2009: Application of MJO simulation diagnostics to climate models. *J. Climate*, **22**, 6413-6436.
- 古林慎哉, 太田行哉, 原田やよい, 海老田綾貴, 守谷昌巳, 小野田浩克, 大野木和敏, 釜堀弘隆, 小林ちあき, 遠藤洋和, 宮岡健吾, 高橋清利, 2015: 気象庁 55 年長期再解析 (JRA-55) の概要. 平成 26 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 66-115.
- Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebita, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka, and K. Takahashi, 2015: The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5-48.
- Liebmann, B., and C.A. Smith, 1996: Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 1275-1277.
- Madden, R., and P. Julian, 1971: Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J. Atmos. Sci.*, **28**, 702-708.
- Madden, R., and P. Julian, 1972: Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40-50 day period. *J. Atmos. Sci.*, **29**, 1109-1123.
- Matsueda, M., and H. Endo, 2011: Verification of medium-range MJO forecasts with TIGGE. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L11801.
- 佐藤均, 宮岡健吾, 長澤亮二, 新保明彦, 高谷祐平, 松枝聡子, 杉本裕之, 2015: ハインドキャストによる検証. 平成 26 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 22-45.
- 高谷祐平, 石川一郎, 2015: 季節アンサンブル予報システムの更新. 平成 27 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 1-111.
- Vitart, F., C. Ardilouze, A. Bonet, A. Brookshaw, M. Chen, C. Codorean, M. Deque, L. Ferranti, E. Fucile, M. Fuentes, H. Hendon, J. Hodgson, H.S. Kang, A. Kumar, H. Lin, G. Liu, X. Liu, P. Malguzzi, I. Mallas, M. Manoussakis, D. Mastrangelo, C. MacLachlan, P. McLean, A. Minami, R. Mladek, T. Nakazawa, S. Najm, Y. Nie, M. Rixen, A. W. Robertson, P. Ruti, C. Sun, Y. Takaya, M. Tolstykh, F. Venuti, D. Waliser, S. Woolnough, T. Wu, D.-J. Won, H. Xiao, R. Zaripov, and L. Zhang, 2016: The Sub-seasonal to Seasonal Prediction (S2S) Project Database. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, in press.
- Vitart, F., M. Fuentes, and L. Ferranti, 2015: New S2S database complements TIGGE archive. *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Newsletter*, **144**, 11-12.
- Wheeler, M.C., and H.H. Hendon, 2004: An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 1917-1932.