

気象庁次期季節予測システム (JMA/MRI-CPS3) の開発 ～成層圏過程の検討～

千葉丈太郎¹・米原仁²・松川知紘²・金浜貴史^{1,3}・足立恭将¹・石崎士郎¹
久保勇太郎¹・小森拓也¹・杉本裕之¹・平原翔二¹・吉田拓馬¹
(1:気象庁気候情報課, 2:気象庁数値予報課, 3:欧州中期予報センター)

1. はじめに

気象庁気候情報課では3か月予報、暖・寒候期予報の支援を目的として、大気・海洋結合モデルを用いた季節アンサンブル予報システム JMA/MRI-CPS2 (Takaya et al. 2018、以下 CPS2) を現業運用している。2019年11月現在、気象庁気象研究所・気象庁数値予報課の協力のもと、季節予測の精度向上に向けて、CPS2の後継にあたる次期システム JMA/MRI-CPS3 (以下 CPS3) の開発を行っており、大気モデルと海洋・海氷モデルの高解像度化、海洋同化の高度化、海氷同化の導入などが計画されている。また、大気モデルの鉛直層数が60層から100層へ増強されるに伴い、モデルトップが0.1hPaから0.01hPaへ上がることで、成層圏における現象の再現性向上が期待される。一方、気象庁数値予報課では気象庁全球モデル GSM (米原 2019) の非地形性重力波スキームと境界層スキームの改良が行われ、成層圏準2年振動 (QBO) の再現性が大幅に向上することが示されている。QBOは時間・空間スケールが大きい現象であり、季節予報に有用なシグナルとして注目を集めている。以上を踏まえ、上述のスキームの改良をCPS3の大気モデルに取り込み、QBOの再現性向上による中・高緯度域の季節スケールの予測精度への影響を調査した。さらに本モデルを用いて、QBO-極域のテレコネクションとして提唱されている Holton and Tan (1980、以下 HT80) の関係の検証を行った。

2. 非地形性重力波スキーム

重力波は浮力を復元力とする振動であ

るが、物理過程でパラメタライズする重力波は、その発生源によって大きく2つに分けられる。1つは、山岳など地形の不均一性によって強制される“地形性”重力波で、中・高緯度域において亜熱帯ジェットや極夜ジェットの形成に重要な役割を果たす。もう1つは、積雲対流活動などによって励起される“非地形性”重力波で、主に成層圏・中間圏の大気変動に大きな影響を及ぼし、それに代表される現象のひとつとして QBO が挙げられる。以下で非地形性重力波スキームのコンセプトを述べるが、詳細については Scinocca (2003) や金浜・山田 (2019) を参照して頂きたい。

重力波は運動量を鉛直方向に輸送するため、各高度における水平風 \mathbf{u} の重力波による時間変化は運動量フラックス \mathbf{F} の鉛直収束で表すことができる。

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial z}$$

上式を計算するためには \mathbf{F} が必要であるが、現行のスキームでは射出高度における運動量フラックスの大きさを定数として与え、各高度で見積もられる飽和運動量フラックスをもとに、より上層に運ばれる運動量と背景場に返される運動量を決定している。飽和運動量フラックスは、大気密度の減少に伴って重力波の振幅が大きくなり、碎波する効果を表している。また、背景場の風速が重力波の位相速度より大きい場合にも、運動量が放出される (クリティカルレベル・フィルタリング)。現行のスキームでは、上限値・下限値の間で離散化された位相速度を持つ重

力波を仮定し、それぞれに対してクリティカルレベル・フィルタリングを考慮したあと（※飽和運動量フラックスによるフィルタリングも、離散化された位相速度を持つ個々の重力波に適用される）、それらを積分することで、最終的な運動量フラックス F が求められる。

気象庁数値予報課で施された改良は、射出高度における運動量フラックスの大きさを、低緯度域でより小さくなるように変更することである。併せて、境界層スキームでは対流圏界面の上層で乱流拡散を弱める変更がなされている。これらによって、QBOに伴う下部成層圏の鉛直シアの時間変化がより緩やかになり、変更前では短すぎた周期及び過小な振幅が改善する。

3. 実験方法

1981~2000年の各年の9/28を初期日として、下部境界に海面水温の解析値を与えたハインドキャスト実験を行った。コントロール実験の大気モデルのベースは2017年5月に現業化されたGSM(米原 2017)、テスト実験はそれに前項で示したスキームの改良を加えたものとし、水平・鉛直解像度はCPS3で想定されるTL319(水平格子間隔約55km)、鉛直層数100層に設定した。さらに、成長モード育成法(BGM法)によって作成された南北半球それぞれ5メンバーの初期摂動を用いて、コントロールメンバーを含む計11メンバーのアンサンブルを構成した。大気初期値として気象庁第2次長期再解析JRA-55(Kobayashi et al. 2015)、下部境界として気象庁の現業で使用している海面水温解析値MGD-SST(栗原ほか 2006)を与え、初期月を0か月として6か月目まで積分を行った。比較のための再解析値としてJRA-55を用いた。また、QBOの変動を同定する指標は $5^{\circ}\text{N}\sim 5^{\circ}\text{S}$ で東西平均した30hPaの東西風(以下、QBO指数)とし、予測値及びJRA-55それぞれで算出した。

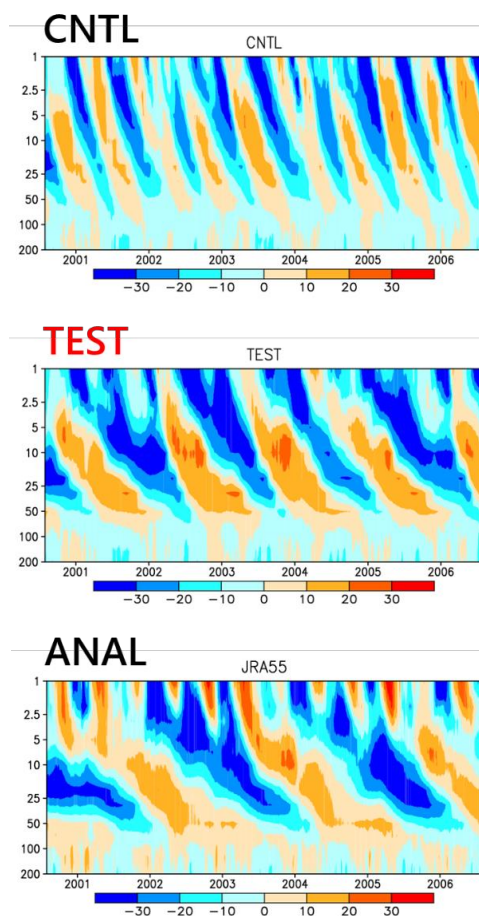


図1 $5^{\circ}\text{N}\sim 5^{\circ}\text{S}$ で東西平均した東西風[m/s]の高度-時間断面図。縦軸の単位は[hPa]。上からコントロール(CNTL)、テスト(TEST)、JRA-55。

4. 結果

4.1. QBOの再現性・予測精度

図1は、前節で述べた大気モデルに海面水温の解析値を与えた、長期積分の結果から描画した東西風の時間変化である。現実よりもQBOの周期が短い傾向は残っているが、テストはコントロールに比べ振幅・周期ともに大きく解析に近づいている。

次に、ハインドキャスト実験の結果から、リードタイム1~6か月の予測へのインパクトを示したのが図2である。実線はJRA-55に対する月平均QBO指数の

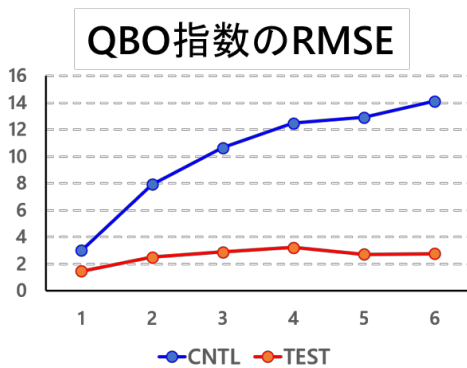


図2 1981~2000年の9/28を初期日としたリードタイム1~6か月のQBO指数のRMSE。縦軸の単位は[m/s]。青実線はコントロール、赤実線はテスト。

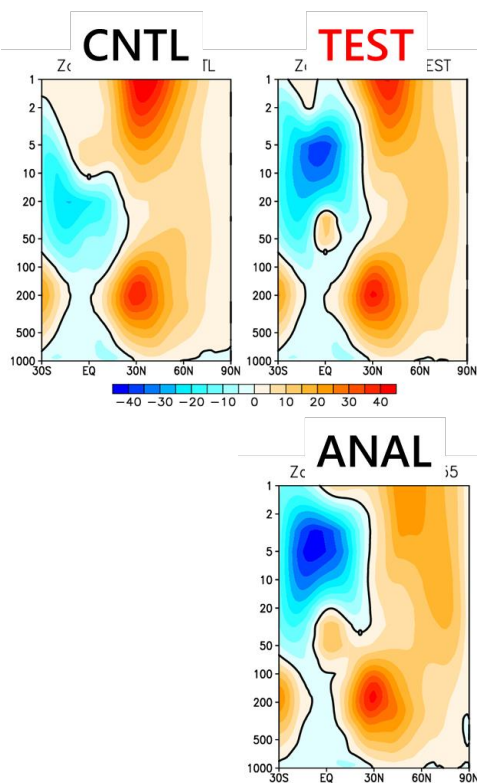


図3 1991年3月の東西平均東西風[m/s]の高度-緯度断面図。9/28初期日からリードタイム6か月。左上はコントロール、右上はテスト、右下はJRA-55。

RMSEで、季節予報の時間スケールでも、テストの予測精度が大幅に改善していることがわかる。また、例として1991年3月(リードタイム6か月)の東西風をみると(図3)、低緯度域の成層圏で誤差が小さく、循環場の空間的構造の表現が良くなっている。

4.2. 中・高緯度域への影響

QBO西風(東風)位相のとき北半球の極夜ジェットが強い(弱い)というテレコネクション(HT80)がモデルで再現されていれば、QBOの再現性の向上により、中・高緯度域に対しても良いインパクトが期待される。しかし、冬季(DJF)の500hPaジオポテンシャル高度のRMSEなどをみても、コントロールとテストで明瞭な違いは確認できなかった(図略)。

そこでHT80の再現性を確認するため、11~3月の月別のQBO指数の正負から西風・東風位相時の合成図を作成し、その差を描画した(図4)。西風位相の時に極夜ジェットが強まる傾向が、コントロール・テストともに再現されていた(コントロールの結果は省略)。しかし、EPフラックスとその発散・収束との対応はJRA-55と比べると不明瞭で、HT80で述べられているプラネタリー波を介したプロセスを再現できているかは不確かである。また、使用した大気モデルには亜熱帯ジェットの北編バイアスがあり、対流圏から成層圏へ伝播するプラネタリー波のピークの緯度にずれがみられることから(図略)、HT80のプロセスが再現されていると断定することは難しい。

5. まとめ

非地形性重力波スキーム・境界層スキームの改良によってQBOの再現性が向上した大気モデル(テスト)と、この改良を加える前の大気モデル(コントロール)を用いて、下部境界に海面水温解析値を与えたハインドキャスト実験を行い、季節スケールの予測精度に対するインパ

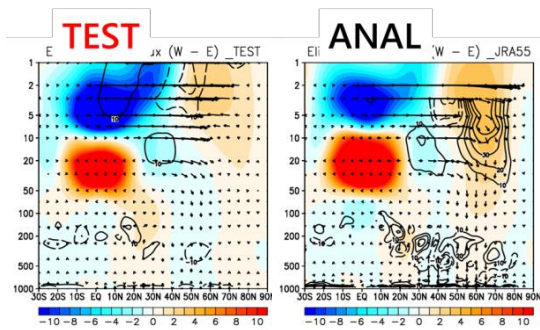


図4 QBO西風位相の合成図とQBO東風位相の合成図との差(西-東)の高度-緯度断面図。陰影は東西平均東西風[m/s]、矢印はEPフラックス[m²/s²]、等値線はEPフラックス発散・収束[m/s²]。実線は正(発散)、破線は負(収束)。左図はテスト、右図はJRA-55。

クトを調査した。その結果、テスト実験では主に低緯度域の下部成層圏で予測精度が向上するが、中・高緯度域の予測精度に対してはほとんどインパクトが無かった。次に、QBO-極域のテレコネクションとして代表的なHT80の関係がモデルで再現されているか検証したところ、QBO西風(東風)位相のときに極夜ジェットが強い(弱い)傾向はみられたが、それが従来から言われている、プラネタリー波を介したプロセスによるものと断定できなかった。使用した大気モデルには亜熱帯ジェットの北偏バイアスがあり、プラネタリー波の表現が不十分な可能性も考えられる。さらに、本調査ではプラネタリー波のみに着目したが、QBOは熱帯の対流活動(MJO)に影響を与えることも示唆されており(Nishimoto and Yoden 2017)、様々な観点からの解析が必要である。

最後に、CPS3の大気モデルにおいては、今回のスキームの改良に加え、モデルトップの更新と鉛直高解像度化が計画されている。これにより、成層圏-対流圏相互作用など、QBO以外の成層圏過程の再現性向上も期待されるため、さらなる検証を進めていきたい。

参考文献

- 金浜貴史, 山田和孝, 2019: 重力波. 数値予報課報告・別冊第65号, 気象庁予報部, 81-86.
- 栗原幸雄, 桜井敏之, 倉賀野連, 2006: 衛星マイクロ波放射計, 衛星赤外放射計及び現場観測データを用いた全球日別海面水温解析. 測候時報, 特別号, 73, S1-S18.
- 米原仁, 2017: 全球数値予報システムの物理過程改良の概要. 平成28年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1-3.
- 米原仁, 2019: 気象庁全球モデルにおける近年の改良. 数値予報課報告・別冊第65号, 気象庁予報部, 1-11.
- Holton, J. R., and H. -C. Tan, 1980: The influence of the equatorial quasi-biennial oscillation on the global circulation at 50mb. *J. Atmos. Sci.*, **37**, 2200-2208.
- Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebata, 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.
- Nishimoto, E., and S. Yoden, 2017: Influence of the Stratospheric Quasi-Biennial Oscillation on the Madden-Julian Oscillation during Austral Summer. *J. Atmos. Sci.*, **74**, 1105-1125.
- Scinocca, J. F., 2003: An accurate spectral nonorographic gravity wave drag parameterization for general circulation models. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 667-682.
- Takaya, Y., S. Hirahara, T. Yasuda, S. Matsueda, T. Toyoda, Y. Fujii, H. Sugimoto, C. Matsukawa, I. Ishikawa, H. Mori, R. Nagasawa, Y. Kubo, N. Adachi, G. Yamanaka, T. Kuragano, A. Shimpo, S. Maeda, T. Ose, 2018: Japan Meteorological Agency/Meteorological Research Institute-Coupled Prediction System version 2 (JMA/MRI-CPS2): atmosphere-land-ocean-sea ice coupled prediction system for operational seasonal forecasting. *Clim. Dyn.*, **50**, 751-765.