

気象庁全球モデルの鉛直層数増強計画

金浜 貴史・中川 雅之・米原 仁・氏家 将志・関口 亮平・古河 貴裕・下河 遼 明（気象庁数値予報課）
長澤 亮二（気象庁気候情報課）・藪 将吉（気象庁気象研究所）・村井 臣哉（気象庁函館海洋気象台）

1 はじめに

気象庁全球モデルは明日明後日の短期予報から中期予報、また防災情報作成のための基礎情報を与える数値予報モデルである。気象庁は2012年6月に計算機の更新を終え第9世代の計算機システムの運用を開始した。本システムの運用期間中に全球モデルは鉛直層数を60層（モデルトップ0.1hPa）から100層（モデルトップ0.01hPa）へ増強する予定である。本報告では、層数増強へ向けた開発の中から、中層大気で重要となる非地形性起源の重力波による運動量輸送のパラメタリゼーションの導入に向けた開発について報告する。また、層数増強に向けた開発と平行して現在ルーチン運用中の60層モデルの改良も進められているところであり、最近の改良項目の中から予報モデルの層積雲スキームと放射過程の改良の概要についても報告する。

2 現業モデルの最近の改良

2.1 層積雲スキームの発動条件への閾値の導入

気象庁全球モデルでは、亜熱帯大陸西岸海洋上の海洋性層積雲を表現するために層積雲スキーム (Kawai and Inoue 2006) を利用している。層積雲スキームの導入により全球の放射収支が改善されたが、一方で、実際には下層雲が発生していない大陸上や日本付近においても過剰に下層雲が表現されるという問題があることが明らかになっていた。

Shimokobe (2012) は、層積雲スキームの発動条件に相対湿度を導入することで、陸上で過大であった下層雲量が抑制され、その結果として放射収支が改善されるとともに、北半球を中心に下層の低温バイアスが改善されることを示した。

2.2 放射過程における定数の更新

短波放射過程で定数として参照しているエアロゾルの光学的厚さの月別気候値と水蒸気吸収係数をそれぞ

れ新しいものに更新した。エアロゾルの光学的厚さの新気候値は気象庁環境気象管理官にて作成され、従来のものと比較して衛星データ利用期間の延長や利用衛星の増加、欠測処理の高度化などの点で改善されている。水蒸気吸収係数については Collins et al. (2006) に基づくものに更新した。

更新前後の地表面下向き晴天短波放射フラックスを CERES 観測 (Wielicki et al. 1996) と比較したところ、熱帯海上を中心として過剰であった放射フラックスが水蒸気吸収係数の更新により改善され、夏季の南極大陸と冬季のサハラ砂漠で過少であった放射フラックスはエアロゾル気候値の更新により改善された。これにより、とくに熱帯を中心として短波放射フラックスの入射量が増加したため、対流圏下層の低温バイアスが減少するなどの改善が見られた。

3 鉛直層数増強計画

3.1 層数増強の目的

鉛直総数の増強にはいくつかの目的がある。まず、モデルトップの中間圏界面付近への引き上げに伴う緩和層の引き上げにより、緩和層の成層圏への影響を少なくすることが出来る点が挙げられる。緩和層は下層から伝播してきた大気波動がモデル上部境界で反射することを防ぐためにモデルトップ付近に置かれているが、人為的な処理であるためなるべく影響を小さくすることが望ましい。現在では緩和層としての処理が下部成層圏から適用されているが、適用開始高度を上部成層圏に引き上げることで成層圏の予測精度向上が期待できる。次に、上層に感度があるチャンネルの衛星観測データをデータ同化へ利用できるようになることが挙げられる。現在では、成層圏上部などに感度があるチャンネルは予報モデルの精度が良くないことや、荷重関数がモデルトップより上層にも広がっていることが原因となり同化利用が出来ていないが、モデルトップの引き上げと成層圏の予測精度向上によりこ

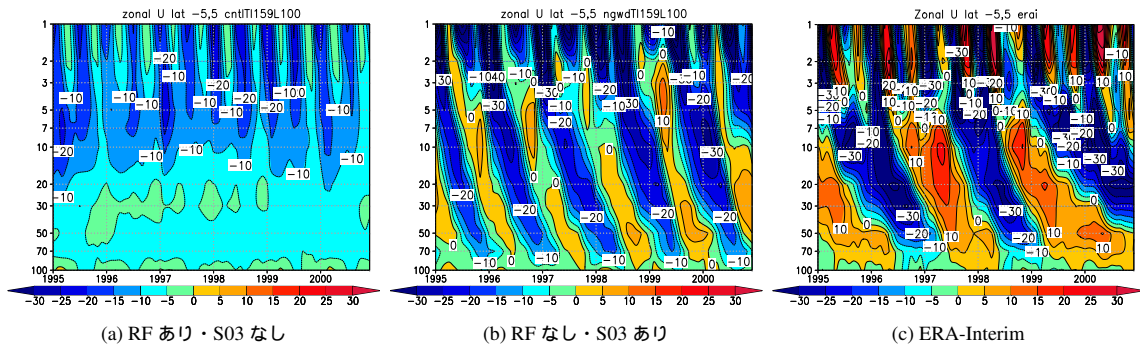


図 1: 南緯 5 度から北緯 5 度で平均した帯状平均東西風 [m/s] の時間-高度断面図。

れが可能となると考えられる。上部成層圏に感度があるチャンネルであっても荷重関数の裾野は対流圏まで広がっているため、同化により対流圏の精度向上も期待できる。最後に、対流圏から成層圏の全層で鉛直解像度を細かくすることによって力学過程によって表現される大気波動の鉛直伝播表現を向上させることが挙げられる。

成層圏や中間圏では、大気の密度が小さくなるために対流圏に比較して相対的に重力波の影響が大きくなるが、重力波を陽に解像するためにはモデルの鉛直解像度が不十分であるため、重力波による運動量輸送をパラメタライズする必要があることが知られている (Alexander et al. 2010)。特に、熱帯下部成層圏での準二年振動 (QBO) や中緯度中間圏界面付近の弱風層の形成には非地形起源の重力波による運動量輸送の寄与が大きい。現行モデルでは、地形起源の重力波による運動量輸送は Iwasaki et al. (1989) に基づくパラメタライゼーションで表現され、非地形性起源の重力波による運動量輸送は Boville (1986) 型のレイリー摩擦 (以降 RF と呼ぶ) として表現されている。しかし、レイリー摩擦では QBO を表現することは出来ない。近年ではより精緻なパラメタライゼーションが知られているため、気象庁では非地形性重力波による運動量輸送の取り扱いを精緻化するために、Scinocca (2003) によるパラメタライゼーション (以降 S03 スキームと呼ぶ) をテスト中である。次項から非地形性重力波抵抗パラメタライゼーションのインパクトについて述べる。

3.2 非地形性重力波抵抗パラメタライゼーションのインパクト

S03 スキームのインパクトを見るために、現行モデルの設定 (RF あり・S03 なし) をコントロール (CNTL)

RF の代わりに S03 スキームを使用 (RF なし・S03 あり) した設定をテスト (TEST) として長期積分を行った。解像度は水平解像度 TL159、鉛直 100 層 (モデルトップ 0.01hPa) であり、実験期間は 1995 年から 2000 年である。以降では、月平均値の 6 年平均をモデル気候値と呼ぶ。

3.2.1 熱帯下部成層圏東西風

熱帯下部成層圏の東西風の時間-高度断面図 (図 1) では、図 1c の ERA-Interim (Dee et al. 2011) に見られる QBO が、CNTL (図 1a) には見られず、現行モデルの鉛直層数を単純に 60 層から 100 層に増強しモデルトップを 0.1hPa から 0.01hPa に引き上げただけでは QBO を表現することが出来ないことが分かる。一方、S03 スキームを導入した TEST (図 1b) では周期がおよそ 14 か月程度の東西風の位相の変化が表われており、QBO 表現の観点からは改善していると言える。しかし、周期が短い点や特に西風位相の振幅が ERA-Interim に比較して 20m/s 程度小さい点は今後の改良が必要である。

3.2.2 モデル帯状平均気候値

帯状平均東西風と気温のモデル気候値を図 2 (1 月) と図 3 (7 月) に示す。

1 月を見ると、CNTL (図 2a) では中間圏界面の弱風層が見られ、図 2c の SPARC 気候値 (Randel et al. 2004) に比較すると弱いものの、夏半球中間圏界面が低温となり冬半球中間圏界面が高温になるという南北温度勾配も表現されている。一方で、TEST (図 2b) では冬半球の西風ジェットに中間圏界面の弱風層は見られず、南北温度勾配も CNTL よりも小さくなっている。

7 月は CNTL (図 3a)、TEST (図 3b) とともに弱風層が

表現され、夏半球から冬半球にかけての南北温度勾配も表現されているが、SPARC (図 3c) に比較して勾配が小さい。また、SPARC に見られる冬半球西風ジェット赤道側への傾きは CNTL、TEST とともに表現されていない。さらに、TEST では冬半球西風ジェットのピーク値が 100m/s 以上と、SPARC に比較して 20m/s 以上も大きな値となっている。

RF の代わりに S03 を導入することで、中緯度の中層大気のジェットの表現と中間圏の温度勾配に課題が残ることが分かった。RF と S03 を併用する、あるいは、適切なパラメータの見直しを含めて、更なる調査と改善が必要である。

3.2.3 高解像度解析予報サイクル実験に向けて

水平低解像度の鉛直層数増強モデルを用いた長期積分から、S03 スキームを使用することで、中間圏の帯状平均場は悪化するが、熱帯下部成層圏を中心に QBO 表現に改善が見られることが分かった。次に、非地形性重力波抵抗スキームの短期予報へのインパクトを見るために、現業モデルと同じ水平解像度 (TL959) の全球モデルを用いて、2012 年 1 月を対象に 1 か月間の解析予報サイクル実験を行った。ただし、100 層モデル用の解析予報サイクル実験環境は構築中であるため、60 層モデルで実施した。また、4 次元変分法データ同化に第一推定値を与えるアウターモデルのみに変更を適用した。長期積分のときと同様に、コントロール (CNTL) は RF あり・S03 なし、テスト (TEST) は RF なし・S03 ありである。

CNTL、TEST の東西風の期間平均帯状平均インクリメント (第一推定値の修正量) を図 4 に示す。CNTL (図 4a) で 1hPa 付近に見られた平均インクリメントが、TEST (図 4b) では小さくなっている。第一推定値を修正する観測データが十分にあるという条件のもとでは、バイアスがない予報モデルであれば十分な期間で平均したインクリメントは小さくなることが期待される。反対に、時間平均した場にインクリメントが表われている場合は、インクリメントの逆符号として予報モデルのバイアスが表われていると考えることができる。したがって、CNTL で見られた平均インクリメントが TEST では減少していることから、非地形性重力波抵抗スキームの導入により特に中高緯度の上部成層圏でモデルのバイアスが減少したと言える。また、上部成層圏での平均インクリメントの減少は、東西風だけではなく、気温 (図 5) にも見えており、風の場

の改善を通じて気温の場も改善しているものと考えられる。

S03 スキームの導入により短期予報においても上部成層圏の予報を改善できる可能性があることが分かった。今後は、4 次元変分法内の予報モデル (摂動予報モデルとその随伴モデル) にも S03 スキームを反映させ効果を見るとともに、100 層での実験環境が構築され次第、解析予報サイクル実験を実施していき、成層圏・中間圏の予報精度を向上させていきたい。

4 まとめ

気象庁全球モデルは層積雲スキームの改良や放射過程のエーロゾル気候値、水蒸気吸収係数の更新により、下層の低温バイアスと放射収支が改善された。更なる高度化のために、鉛直 60 層 (モデルトップ 0.1hPa) から鉛直 100 層 (モデルトップ 0.01hPa) へと層数を増強する予定である。また、鉛直層数を増強した場合においても重力波の運動量輸送が不足しているため、非地形性重力波抵抗スキームの導入に向けた開発を行っている。低解像度長期積分からは、熱帯下部成層圏でこれまで再現することができなかった QBO に似た東西風の周期変化が見られるようになるという改善が得られた。しかし、帯状平均場では、気温、東西風ともに気候場からのずれが大きくなり、今後の改良が必要であることが分かった。短期予報の観点からは、60 層モデルで解析予報サイクルを実施したところ、成層圏界面付近での平均インクリメントが減少するという結果が得られ、予報バイアスが小さくなったと言える。したがって、非地形性重力波抵抗スキームの導入により上部成層圏の予報精度が良くなることが期待される。今後は、変分法データ同化への非地形性重力波抵抗スキームの適用や 100 層モデルにおける解析予報サイクル実験、スキームのパラメータの絞り込みを行い、今回分かった問題の解決も含めて調査を進め、全球モデルの改善を目指したい。

参考文献

Alexander, M.J., M. Geller, C. McLandress, S. Polavarapu, P. Preusse, F. Sassi, K. Sato, S. Eckermann, M. Ern, A. Hertzog, and others, 2010: Recent developments in gravity-wave effects in climate models and the global distribution of gravity-wave momentum flux from observations and models. *Quar-*

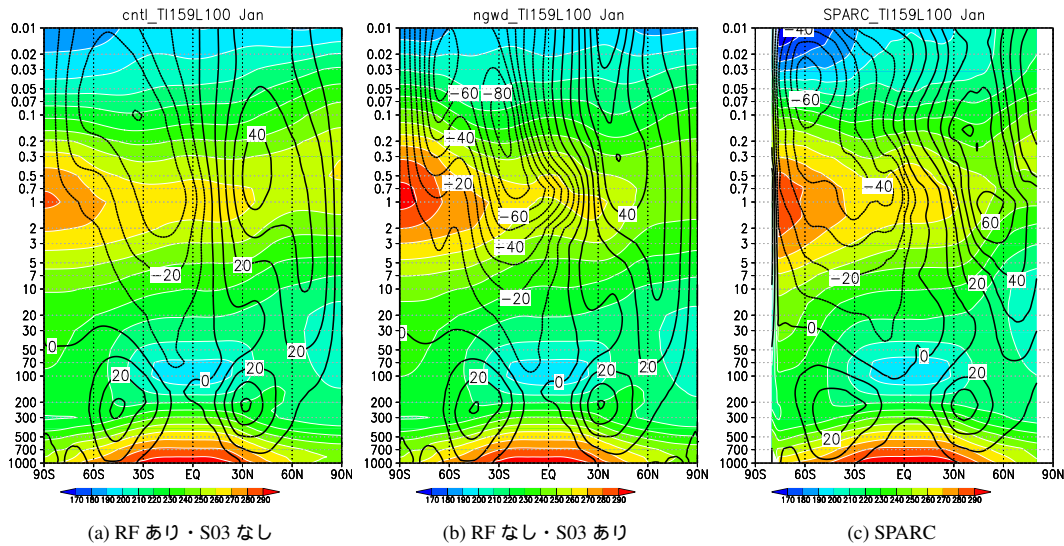


図 2: 1 月の帯状平均モデル気候値と SPARC 帯状平均気候値の気温 (塗り潰し、[K]) と東西風速 (コンター、[m/s])

- terly *Journal of the Royal Meteorological Society*, **136**, 1103–1124.
- Boville, B.A., 1986: Wave-mean flow interactions in a general circulation model of the troposphere and stratosphere. *Journal of Atmospheric Sciences*, **43**, 1711–1725.
- Collins, W.D., J.M. Lee-Taylor, D.P. Edwards, and G.L. Francis, 2006: Effects of increased near-infrared absorption by water vapor on the climate system. *Journal of Geophysical Research*, **111**, D18 109.
- Dee, D.P., S.M. Uppala, A.J. Simmons, P. Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi, U. Andrae, M.A. Balmaseda, G. Balsamo, P. Bauer, and others, 2011: The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **137**, 553–597.
- Iwasaki, T., S. Yamada, and K. Tada, 1989: A Parameterization Scheme of Orographic Gravity Wave Drag with Two Different Vertical Partionings part 1: Impacts on Medium-Range Forecasts. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **67**, 11–27.
- Kawai, H. and T. Inoue, 2006: A simple parameterization scheme for subtropical marine stratocumulus. *SOLA*, **2**, 17–20.
- Randel, W., P. Udelhofen, E. Fleming, M. Geller, M. Gelman, K. Hamilton, D. Karoly, D. Ortland, S. Pawson, R. Swinbank, and others, 2004: The SPARC intercomparison of middle-atmosphere climatologies. *Journal of Climate*, **17**, 986–1003.
- Scinocca, J.F., 2003: An Accurate Spectral Nonorographic Gravity Wave Drag Parameterization for General Circulation Models. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **60**, 667–682.
- Shimokobe, A., 2012: Improvement of the Stratocumulus Parameterization Scheme in JMA's Operational Global Spectral Model. *CAS/JSC WGNE Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*, 04–17.
- Wielicki, B.A., B.R. Barkstrom, E.F. Harrison, R.B. Lee III, G. Louis Smith, and J.E. Cooper, 1996: Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES): An earth observing system experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **77**, 853–868.

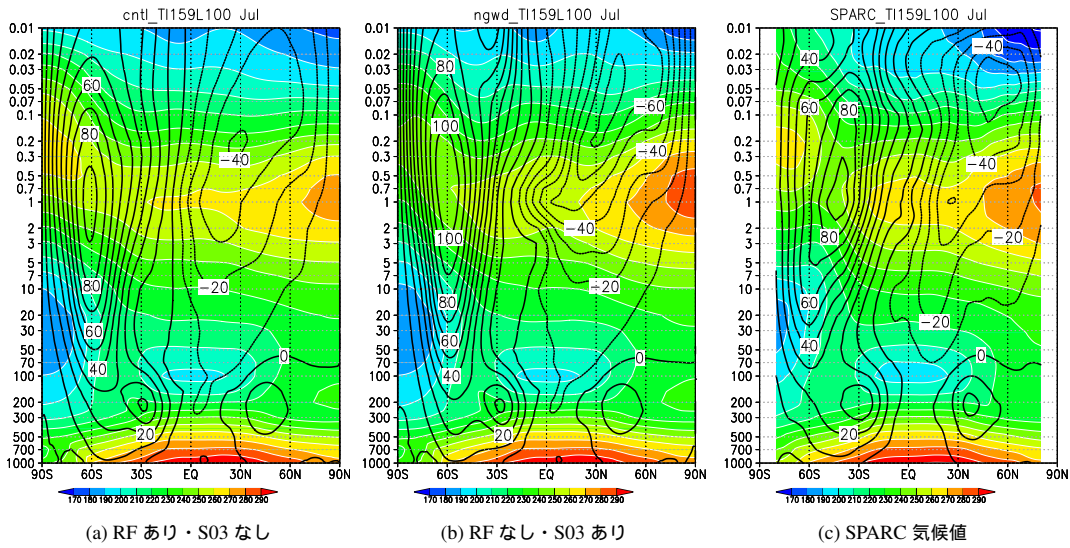


図 3: 7月の帯状平均モデル気候値と SPARC 帯状平均気候値の気温（塗り潰し、[K]）と東西風速（コンター、[m/s]）。

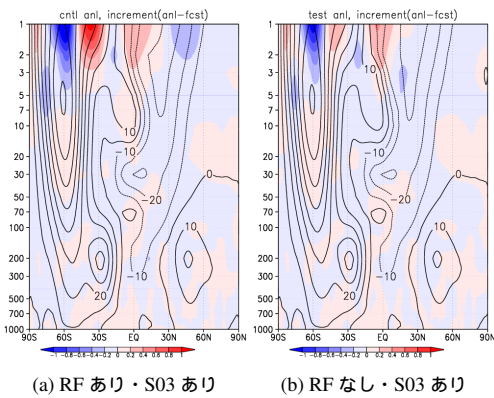


図 4: 第一推定値を与える予報モデルの RF を S03 で置きかえたサイクル実験の東西風の月平均帯状平均インクリメント（塗り潰し）と解析値の月平均帯状平均東西風（コンター）。単位は [m/s]。期間は 2012 年 1 月。

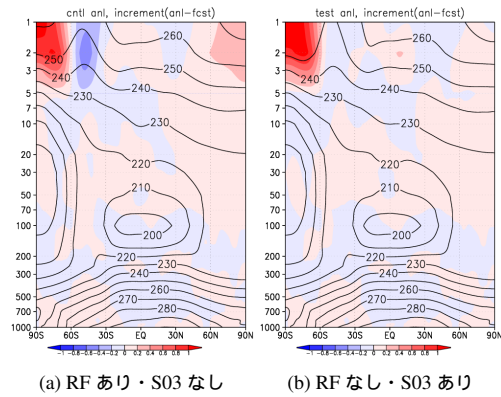


図 5: 図 4 に同じ、ただし気温 [K] に対するもの。