

中層大気の季節内～季節スケール予測

課題責任者

渡辺 真吾

海洋研究開発機構 地球環境部門 環境変動予測研究センター

著者

野口 峻佑^{*1}, 渡辺 真吾^{*1}, 小新 大^{*1,2}, 佐藤 薫^{*2}

^{*1} 海洋研究開発機構 地球環境部門 環境変動予測研究センター, ^{*2} 東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻

モデル上端が高度約 150 km まで拡張された大気大循環モデル JAGUAR を用いて、近年その予測可能性への関心が高まっている中層大気顕著現象を対象とする季節内～季節スケール予測実験を行った。2009 年 1 月に生じた過去最大規模の成層圏突然昇温とその後の成層圏界面上昇イベントに対して、高解像度（水平約 20 km、重力波パラメタリゼーション不使用）と低解像度（水平約 300 km、重力波パラメタリゼーション併用）の 2 つの設定で予測を実施し、比較したところ、高解像度設定の優位性を裏付ける結果が得られた。高解像度設定では、特に成層圏突然昇温後に再形成される成層圏界面が高高度で維持され、その構造がより現実的になっていた。それに対し、低解像度設定では、非地形性重力波パラメタリゼーションによる中間圏・下部熱圏における西風減速および極域残差下降流の強化が過剰であり、分厚い成層圏界面が実際より早いタイミングで形成されていたことがわかった。

キーワード：中層大気, 季節内～季節スケール予測, 高解像度大気大循環モデル, 大気重力波, 予測可能性

1. はじめに

近年、成層圏・中間圏・下部熱圏を含む中層大気における大気現象が、我々の生活に馴染みの深い対流圏にまで影響を及ぼすことが示され、その季節内～季節（S2S）スケールでの予測可能性に高い関心が持たれている。

中層大気の循環駆動においては、惑星規模のロスビー波に加えて、大気重力波が重要な役割を果たすが、後者の時空間スケールは S2S スケールの予測モデルが解像しているスケールと比べて格段に小さいため、伝統的にその作用のみがパラメータ化された形で取り入れられている。また、中間圏・下部熱圏は、通常の数値天気予報に用いられるモデルの上端を超えてしまうため、この領域をカバーする解析値（観測値と予測値をデータ同化により組み合わせ得た最適な推定値、すなわち予測にあたっての初期値）の入手さえ、一般には困難なのが現状である。

本課題では、これまでの課題責任者らによる世界最高レベルの重力波解像設定の大気大循環モデル（KANTO/MIROC-GCM）を用いた一連の研究成果（e.g., Watanabe et al. 2008 [1]; Tomikawa et al. 2011 [2]）を踏まえ、そのようなモデルによる中層大気顕著現象の再現性と予測可能性を明らかにすることを目指す。それにあたり、本年度は、中間圏・下部熱圏で重要となる物理過程が組み込まれ、モデル上端が高度約 150 km まで拡張された大気大循環モデル（JAGUAR: Japanese Atmospheric GCM for Upper Atmospheric Research, Watanabe and Miyahara 2009 [3]）と、その低解像度版を予測モデルとして構築された局所アンサンブル変換カルマンフィルタに基づくデータ同化システム（JAGUAR-LETKF, Koshin et al. 2020 [4]）を用いることで可能となった、実際の事例に対するこれまでで最高レベルの重力波解像設定の S2S スケール予測を実施した。

本稿では、中層大気における顕著現象の代表である、成層圏突然昇温（SSW）とその後の成層圏界面上昇イベントに着目し、なかでも 2009 年の 1 月下旬から 2 月上旬にかけて生じた過去最大規模のイベントを対象とした予測実験の結果について記す。

2. 実験設定

JAGUAR-LETKF システムにより作成した解析値から、高解像度（重力波陽解像設定）および低解像度（重力波パラメタリゼーション併用設定）の 2 つの解像度設定で予測を行い、その差異を対比的に調べられるように実験を設定した。SSW 生起日前後の 4 日（1 月 15、20、25、30 日）を開始日として、期間 30 日の積分を各設定で実施した。海面水温・海氷としては、OISST 日別値を与えた。

JAGUAR-LETKF システムおよび低解像度予測の解像度は T42L124（水平約 300 km、鉛直約 1 km、時間刻み幅 20 分）である。この設定では、地形性および非地形性の重力波パラメタリゼーションとして McFarlane (1987) [5] および Hines (1997) [6] のスキームを使用する。本研究で用いた解析値は、JAGUAR-LETKF システムにおいて、従来型（地上測器、ゾンデ、航空機等による）観測データや衛星観測データを同化することによって得ている。

高解像度予測の解像度は T639L340（水平約 20 km、鉛直約 300 m、時間刻み幅 30 秒）である。この設定では、下層大気で生成され中層大気へ上方伝播してくる重力波（および中層大気内部で発生した重力波）を陽的に解像できていると考えているため、重力波パラメタリゼーションを使用しない。なお、低解像度の解析値から、この設定での予測積分を開始するにあたっては、予測開始日の直前に、モデル格子へ解析値を内挿した場への強拘束（時定数 1 時間のナッジング）積分を 1 日実施して、初期値

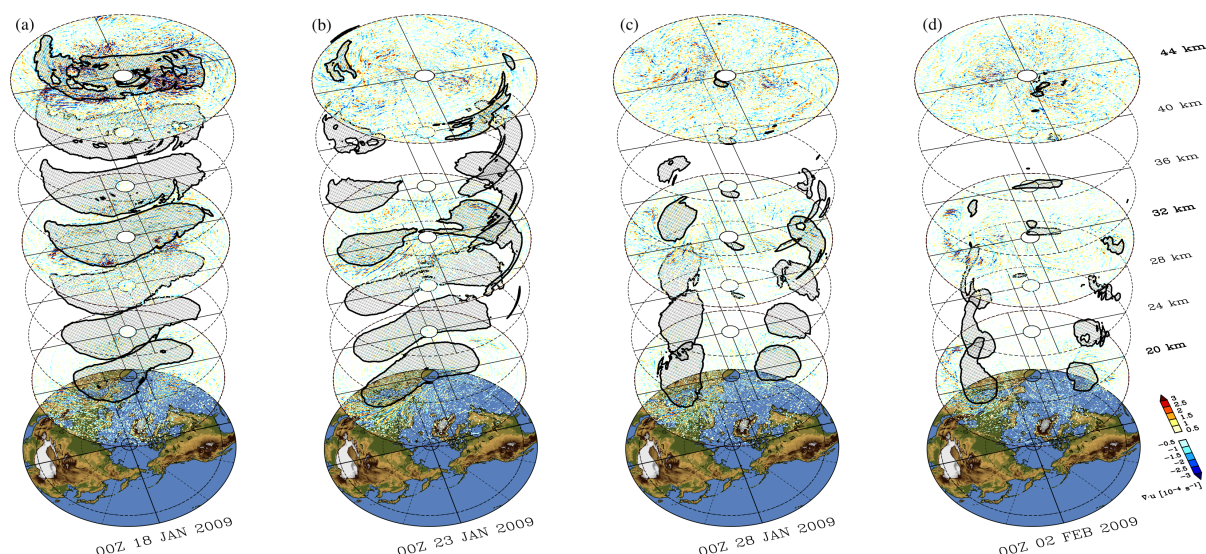


図 1: 2009 年 1 月下旬に生じた極渦分裂型 SSW に伴う重力波活動の変動の様子。5 日おきに実施した高解像度版 JAGUAR による予測の 72 時間積分後の場を描画。黒太線で極渦の縁（鉛直方向に規格化した Ertel 渦位の 38 PVU 等値線、全波数 42 以下の大規模場成分より計算）、陰影で極渦内部領域を表す。色で高度約 20, 32, 44 km における水平風の発散成分（経度緯度方向へ 5 グリッド移動平均処理済み）を示す。

化した（この是非に関しては 4 で後述する）。

3. 結果

対象とした SSW とその直後の中間圏・下部熱圏における大気循環変動は、重力波に関わるモデルの性能を評価するにあたり、最適な題材の 1 つである。惑星規模波の上方伝播・砕波に伴う成層圏周極渦の崩壊（分裂）、すなわち東西風基本場の西風から東風への反転や、その後の極渦回復過程において、重力波の振る舞いが劇的に変化するため、重力波パラメタリゼーションはその設定等の妥当性が試される。図 1 に、高解像度設定の予測において表現されている重力波の例として、SSW 生起に伴い成層圏の重力波活動が変動している様子を示す。SSW 生起直前の上部成層圏（特にアラスカ上空）において大きな活動を示していたもの（図 1a）が、極渦の分裂に伴う激しい基本場の変動により濾過され小さくなる（図 1b）が、ユーラシア大陸上の娘渦の縁に沿って局所的には依然として分布している様子（図 1c, d）などがみとれる。このような重力波の振る舞いは、低解像度設定の予測においては、表現されないため、上空におけるこれら波の作用による風の加減速のみが、パラメタリゼーションによって与えられることになる。なお、このリードタイム（予測開始 3 日目）においては、高解像度と低解像度とで、大規模場の再現性に差異は現れない（図省略）。本稿では以降、高解像度および低解像度の予測における（波の作用の差異の結果として現れる）循環基本場の差異を、主として低解像度の予測の不完全性に着目する立場から記述していく。

解析値および全ての予測値における成層圏界面挙動の概観を、北極域温度の時間-高度断面図として図 2 に示す。

まず、どちらの設定においても、1 月 25 日頃の成層圏界面の下降およびその後の消失（すなわち SSW）は、1 月 20 日に開始した予測より、再現できることがわかる。1 月 15 日に開始した予測では、圏界面が正しいタイミングで下降・消失しておらず、この結果はこの SSW の決定論的な予測の限界を詳細に調べた先行研究の結果（Noguchi et al. 2016 [7]）と整合的である。また、SSW を再現できた 1 月 20 日開始の予測から、どちらの設定でも、2 月上旬の成層圏界面の高高度での再形成（すなわち成層圏界面上昇）を表現できていることがわかる。このことから、成層圏界面上昇は、成層圏の大規模循環場の変動が再現できていれば、一次的には、既存の重力波パラメタリゼーションで十分に表現可能であることが窺える。

ただし、再形成された成層圏界面の構造には、設定間で大きな違いがあることも同時にみとれる。高解像度設定の（特に 1 月 30 日に開始した）予測では、高高度に留まる薄い成層圏界面が表現されているのに対して、低解像度設定の予測では、分厚く、すぐに降下する成層圏界面が表現されている。また、再形成のタイミングも、2 月頭の既存成層圏界面の消失直後であり、実際よりだいぶ早い。これより、より現実的な成層圏界面上昇の挙動を再現するには、低解像度版 JAGUAR による予測の設定には問題があり、特に成層圏界面をより強く形成してしまう傾向があることがわかった。このことは、成層圏界面の再形成期における、（温度偏差の形成と結び付きの強い）極域の残差下降流の予測結果を示した図 3 から確認できる。低解像度予測における下降流は、圏界面形成高度直上の高度 80 km 付近において、高解像度予測の 2 倍もの値を示しており、また、その上の高度 100 km にかけて急激に上昇流へと転じていた。なお、この残差下降流の再現性

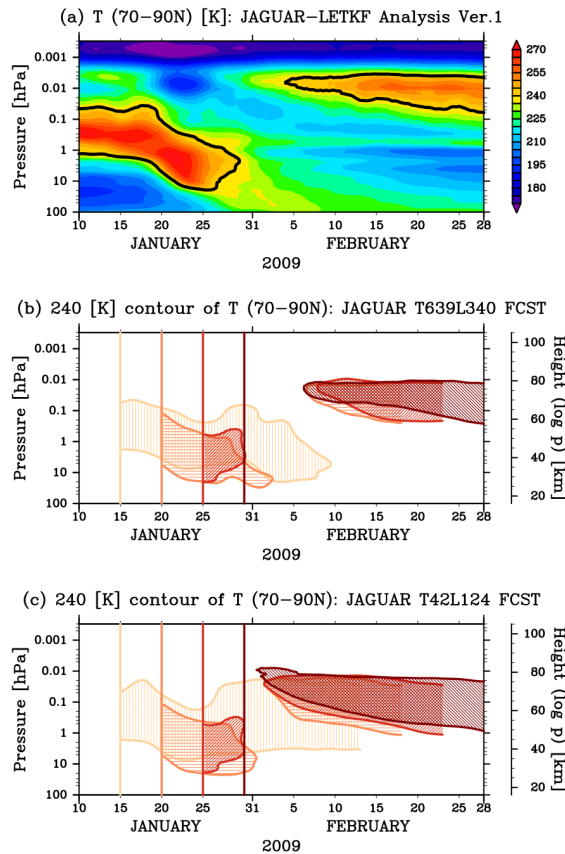


図2: 2009年のSSWおよび成層圏界面上昇イベントにおける北極域(北緯70度以北の領域平均)温度の時間-高度断面図。平滑化(48時間移動平均)処理済み。(a) 低解像度版JAGUARに基づくデータ同化システムにより作成された解析値。黒太線で240 Kの等温線を示す。(b) 高解像度版JAGUARによる予測結果。上記解析値の1月15、20、25、30日より開始した予測値について、240 Kの等温線(それ以上は陰影)を示す。便宜上、この陰影の領域をもって成層圏界面の構造(温度極大の半値高度幅、すなわち厚みなど)を表現する。開始日が進むに従い淡色から濃色になるよう線色を設定。(c) 低解像度版JAGUARによる予測結果を上記と同様に表示。

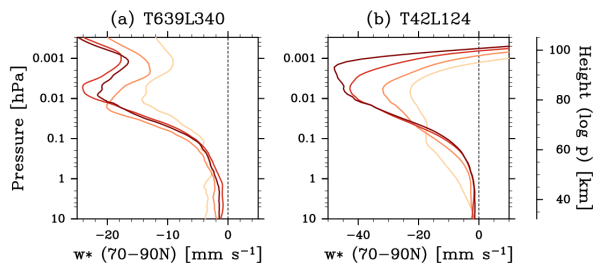


図3: 北極域での残差鉛直流の鉛直プロファイル。2月上旬(2月1日から10日)における期間平均。(a) 高解像度版JAGUARによる予測結果。(b) 低解像度版JAGUARによる予測結果。横軸のスケールが(a)の2倍となっている点に注意。予測開始日毎の線色は図2と同様。

は、オゾン破壊物質等の輸送量を正しく評価するためにも重要である(e.g., Funke et al. 2017 [8])。

この中間圏・下部熱圏領域における物質輸送の質的差異にすら繋がる残差循環の差異は、低解像度設定の予測における、この高度領域での循環を駆動する、重力波の作用が過剰なことによって、引き起こされていることがわかった。図4に、1月30日に開始した予測における帯状平均東西風とその重力波の作用による加減速の時間-高度断面図を示す。高解像度設定の予測では、2月上旬は高度80-100 kmにおいて -20 m s^{-1} 程度の西風減速(西向き加速)が引き起こされている(図4b)のに対して、低解像度設定の予測では、高度100 km付近で -100 m s^{-1} を超える西風減速が非地形性重力波パラメタリゼーションの作用によって生じていた(図4c)。この過剰な西風減速は特に極域において大きい(図省略)。これにより、低解像度設定では、上空で弱い西風を示している観測(図4a)や高解像度設定とは異なり、予測開始直後より上空から東風の領域が出現してしまっていた。

以上のように、高解像度設定との比較によって、低解像度設定の予測においては、上空の重力波パラメタリゼーションによる作用が過剰であることが示された。実際、追加の感度実験を行うことにより、中間圏・下部熱圏における非現実的に大きい西風減速は、非地形性重力波パラメタリゼーションのソース強度を弱めること(および上空における運動量の散逸に関わる水平拡散の調整)によって、軽減できることも確認できた(図省略)。しかしながら、上空における東風の傾向は完全には解決されないことから、現在の重力波パラメタリゼーションの枠組みでは模倣できない、重力波を陽的に解像することによる恩恵が存在していると考えられる。

4. まとめと今後の課題

高解像度(重力波陽解像)および低解像度(重力波パラメタリゼーション併用)の2つの解像度設定のJAGUARによるS2Sスケール予測実験を、JAGUAR-LETKFシステムによって作成した解析値を活用して、実施した。2009年1月に生じた過去最大規模のSSWおよびその後の成層圏界面上昇イベントを対象とする一連の予測を比較したところ、高解像度設定の優位性を裏付ける結果を得た。特に、SSW後に再形成される成層圏界面の構造が、高解像度設定ではより現実的になっていた。それに対して、低解像度設定では、非地形性重力波パラメタリゼーションによる中間圏・下部熱圏における西風減速が過剰であり、高解像度設定と比べて約2倍もの極域残差下降流が生じた結果、分厚い成層圏界面が実際よりも早いタイミングで形成されていた。この結果は、SSW後の上空の物質輸送を予測するにあたっての、重力波陽解像設定の恩恵を明示するものである。

ただし、重力波陽解像設定にも問題が存在することには留意する必要がある。図2(a)と(b)を見比べればわかるように、JAGUARによる予測値では、成層圏界面の再形成高度が80 km以下であり、解析値(80-90 km)と

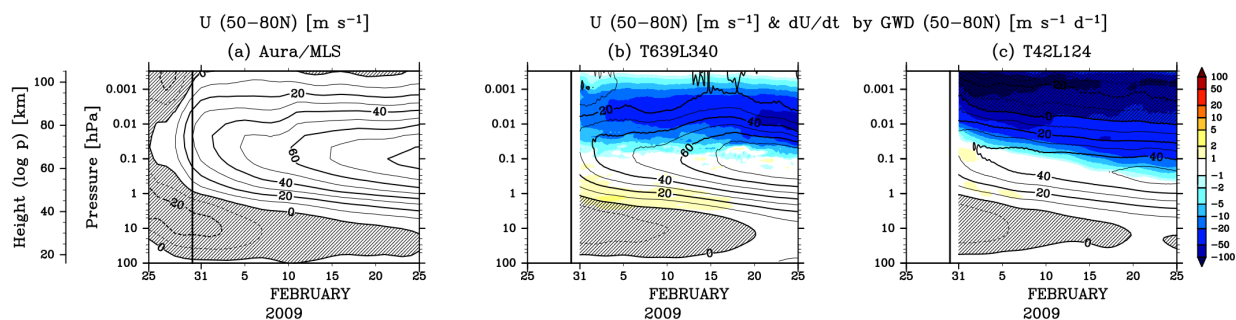


図4: 高緯度域(北緯50–80度での平均)の東西風(等値線: m s^{-1})および重力波に相当する擾乱によるその加減速(色: $\text{m s}^{-1} \text{d}^{-1}$)の時間–高度断面図。(a) 衛星観測データより傾度風平衡を仮定して算出した東西風。(b) 高解像度版および(c) 低解像度版 JAGUAR による1月30日からの予測での東西風とその加減速(重力波による寄与分)。加減速は、前者では高波数(低解像度版 JAGUAR で表現できない、全波数43以上の)成分より Eliassen-Palm flux 収束・発散を計算、後者では重力波パラメタリゼーションによる出力(地形性・非地形性)を合算。陰影で東風領域を表す。太縦線は1月30日を示す。

比べて若干低い。これは JAGUAR における重力波の散逸過程の設定に改善の余地があることを示唆する。そこで、本稿の予測実験の計算完了後、上空の散逸過程のチューニングにも取り組んだ。その結果、水平拡散の強化開始高度を引き上げる等の工夫を施すことにより、再形成高度をより現実的な高度へ引き上げることが可能であることが明らかとなった。

また、再現性の向上のためには、初期値化方法にも改善の余地がある。本稿の実験では、低解像度の解析値に基づき初期値化を行っているため、特に中間圏・下部熱圏の循環挙動は、高解像度モデルが表現する循環挙動と整合していない(すなわち、重力波成分のスピンアップができていない)。このために予測開始直後の場においては不具合が生じており、それは再現性を損なう一因となっている。この問題の解決のために試行錯誤した結果、予測開始の前に数日、低波数成分を拘束しつつも高波数成分を「飼い慣らす」、スペクトルナッジングを活用した初期値化方法の考案・検証・確立に至った。この初期値化方法により、高解像度のモデルと力学的に整合的な場から、予測を開始することが可能となる。

上記の工夫を取り入れ、高解像度設定における再現性をより高めた予測実験を、本年度から次年度にかけて、再度実施する計画である。そして、陽的に解像された重力波による作用の詳細を解析していくことで、中層大気における循環変動の再現性および予測可能性の鍵となる過程への理解を深めていくことに挑戦する。

謝辞

本研究は科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業 CREST「大型大気レーダー国際共同観測データと高解像大気大循環モデルの融合による大気階層構造の解明」(JPMJCR1663)の支援を受けて実施した。計算には JAMSTEC の地球シミュレータおよび DA システムを用い、作図およびデータ加工には地球流体電脳ライブラリおよび GTOOL を用いた。

文献

- [1] Watanabe, S., Kawatani, Y., Tomikawa, Y., Miyazaki, K., Takahashi, M., and Sato, K., “General aspects of a T213L256 middle atmosphere general circulation model”, *J. Geophys. Res.*, 113, D12110, 2008
- [2] Tomikawa, Y., Sato, K., Watanabe, S., Kawatani, Y., Miyazaki, K., and Takahashi, M., “Growth of planetary waves and the formation of an elevated stratopause after a major stratospheric sudden warming in a T213L256 GCM”, *J. Geophys. Res.*, 117, D16101, 2012
- [3] Watanabe, S., and Miyahara, S., “Quantification of the gravity wave forcing of the migrating diurnal tide in a gravity wave-resolving general circulation model”, *J. Geophys. Res.*, 114, D07110, 2009
- [4] Koshin, D., Sato, K., Miyazaki, K., and Watanabe, S., “An ensemble Kalman filter data assimilation system for the whole neutral atmosphere”, *Geosci. Model Dev.*, 13, 3145–3177, 2020
- [5] McFarlane, N. A., “The Effect of Orographically Excited Gravity Wave Drag on the General Circulation of the Lower Stratosphere and Troposphere”, *J. Atmos. Sci.*, 44, 1775–1800, 1987
- [6] Hines, C. O., “Doppler-spread parameterization of gravity-wave momentum deposition in the middle atmosphere. Part 1: Basic formulation”, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 59 (4), 371–386, 1997
- [7] Noguchi, S., Mukougawa, H., Kuroda, Y., Mizuta, R., Yabu, S., and Yoshimura, H., “Predictability of the stratospheric polar vortex breakdown: An ensemble reforecast experiment for the splitting event in January 2009”, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, 3388–3404, 2016
- [8] Funke, B., Ball, W., Bender, S., Gardini, A., Harvey, V. L., Lambert, et al., “HEPPA-II model-measurement intercomparison project: EPP indirect effects during the dynamically perturbed NH winter 2008–2009”, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 3573–3604, 2017.

Sub-seasonal to Seasonal Prediction in the Middle Atmosphere

Project Representative

Shingo Watanabe Research Center for Environmental Modeling and Application, Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Authors

Shunsuke Noguchi ^{*1}, Shingo Watanabe ^{*1}, Dai Koshin ^{*1,2}, Kaoru Sato ^{*2}

^{*1}Research Center for Environmental Modeling and Application, Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ^{*2}Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo

Using the atmospheric general circulation model JAGUAR with its model top extended to an altitude of about 150 km, we conducted a series of sub-seasonal to seasonal prediction experiments targeting the middle atmospheric extreme events, especially the sudden stratospheric warming in January 2009 and the subsequent elevated stratopause event. The comparison between two JAGUAR settings, a high-resolution (about 20 km horizontally, no gravity wave parameterization) setting and a low-resolution (about 300 km horizontally, with gravity wave parameterizations) setting, confirms the high-resolution setting's superiority. In the high-resolution setting, the reformed stratopause after sudden stratospheric warming persists at high altitudes and shows a more realistic structure. On the other hand, in the low-resolution setting, the thicker stratopause is formed at earlier timings due to inappropriate behavior of the non-orographic gravity wave parameterization, which causes excessive deceleration of westerly wind and too strong polar residual downwelling in the mesosphere and lower thermosphere.

Keywords : middle atmosphere, sub-seasonal to seasonal prediction, high-resolution atmospheric general circulation model, gravity wave, predictability

1. Introduction

Recently, atmospheric phenomena in the middle atmospheric region, including the stratosphere, mesosphere, and lower thermosphere, have been shown to affect the troposphere. Consequently, there is a great deal of interest in the predictability of these phenomena on the sub-seasonal to seasonal (S2S) timescale.

In this project, we conduct S2S prediction experiments by using a high-top (extended to an altitude of about 150 km) model named Japanese Atmospheric General circulation model for Upper Atmospheric Researches (JAGUAR, Watanabe and Miyahara 2009 [1]). By investigating the reproducibility of extreme events in various settings of JAGUAR, we attempt to enhance knowledge on the practical predictability in the middle atmosphere.

The target event of FY2019 is a sudden stratospheric warming (SSW) in January 2009 and the subsequent elevated stratopause event, which provides opportunities to check the benefits of a gravity wave resolving setting of JAGUAR.

2. Experimental Settings

We have conducted a series of 30-day prediction experiments with two JAGUAR settings, a high-resolution T639L340 (about 20 km horizontally, about 300 m vertically, no gravity wave parameterization) setting and a low-resolution T42L124 (about 300 km horizontally, about 1 km vertically, with gravity wave parameterizations) setting. In both settings, four predictions are initialized from every five days around the onset date of SSW (15,

20, 25, and 30 January 2009). Initial conditions are prepared by a Local Ensemble Transform Kalman Filter system based on the T42L124 version of JAGUAR (JAGUAR-LETKF, Koshin et al. 2020 [2]), which assimilates conventional and satellite observations.

3. Results

In this report, the reproducibility of the SSW and subsequent elevated stratopause event is examined briefly by overviewing the time evolutions of the stratopause in the JAGUAR-LETKF analysis and all JAGUAR predictions (Fig. 1).

In both settings, the descent and subsequent disappearance of the stratopause around 25 January (i.e., SSW) are reproduced well in predictions initialized after 20 January, while the prediction initialized 15 January does not show such behavior with the correct timing. This short predictable period of SSW is consistent with a previous study (Noguchi et al. 2016 [3]), which examined the details of the deterministic predictable limit of this SSW.

The subsequent reformation of the stratopause at higher altitude in early February is also represented in predictions initialized after 20 January. This fact is reminiscent of the first-order importance of the lower stratospheric large-scale condition (e.g., the filtering effect by the basic state) for the formation of the elevated stratopause, and it was already capable of reproducing such effects even in the T42L124 setting.

However, there are also significant differences in the structure of the reformed stratopause between the T639L340 and T42L124

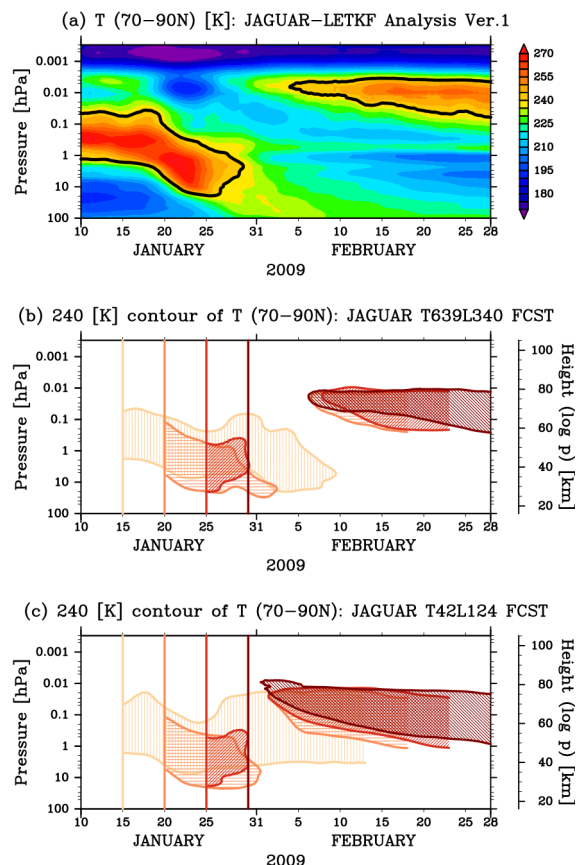


Fig. 1: (a) Time-height cross section of the north polar-cap (70–90°N) temperature represented in the JAGUAR-LETKF preliminary analysis from 10 January to 28 February 2009. The thick black lines show the isolines of 240-K temperature. (b) Time evolutions of the stratopause in all T639L340 JAGUAR forecasts. The regions of north polar-cap temperature higher than 240 K are shaded to represent the shape of the stratopause. The color of the 240-K contour line (and shading) is set to become lighter to darker as the initial date of forecasts progressed. Thick vertical lines show the initial dates of the forecasts (15, 20, 25, and 30 January 2009). (c) Same as (b), except for those in all T42L124 JAGUAR forecasts.

settings. The T639L340 setting (especially the prediction initialized January 30) shows a thin stratopause that persists at high altitude, while the T42L124 setting shows a thicker, quickly returning stratopause. The stratopause reformation timing is also much earlier than that of the analysis and T639L340 predictions, just after the disappearance of the pre-existing stratopause at the beginning of February. This indicates that the T42L124 JAGUAR predictions have problems in reproducing the realistic behavior of the elevated stratopause, and in particular, they tend to form the stratopause more strongly.

Further analyses on the circulation-driving forcing of waves (both resolved and unresolved) revealed that the non-orographic

gravity wave parameterization in the T42L124 setting is excessive over the polar region in the mesosphere and lower thermosphere. As a result, the residual downwelling over the polar region at about 80 km in the T42L124 setting became twice as large as that in the T639L340 setting. Indeed, additional sensitivity experiments also confirmed that this poor reproducibility of the stratopause behavior (due to unrealistically large action of the gravity wave parameterization) could be alleviated by weakening the source intensity of the non-orographic gravity wave parameterization. However, the problem was not completely resolved, which suggests that there is certainly a benefit of explicitly resolving gravity waves that cannot be properly represented by the current framework of gravity wave parameterization.

4. Concluding Remarks

We showed the superior performance of the T639L340 explicit gravity wave resolving setting in reproducing the realistic structure of the reformed stratopause after SSW, compared to the T42L124 setting with gravity wave parameterizations.

However, it should be noted that the T639L340 setting also has a problem. As shown in Figs. 1 (a) and (b), the reformation altitude of the stratopause in JAGUAR is just below 80 km, which is slightly lower than that of the analysis (80–90 km). Although the T639L340 setting of JAGUAR could explicitly simulate the propagation of gravity waves generated from lower layers, there would still be room for improvement in the JAGUAR's settings of the dissipation process in upper layers. Further effort to sophisticate them is desirable.

Acknowledgement

This work was supported by CREST, Japan Science and Technology Agency (JPMJCR1663), “Study of atmospheric hierarchical structure by fusion of observation data from a global radar network and high-resolution general circulation models”. The numerical experiments were conducted on the Earth Simulator and Data Analyzer (DA) system. The GFD-DENNOU Library and GTOOL were used for graphics and data handlings.

References

- [1] Watanabe, S., and Miyahara, S., “Quantification of the gravity wave forcing of the migrating diurnal tide in a gravity wave-resolving general circulation model”, *J. Geophys. Res.*, 114, D07110, 2009
- [2] Koshin, D., Sato, K., Miyazaki, K., and Watanabe, S., “An ensemble Kalman filter data assimilation system for the whole neutral atmosphere”, *Geosci. Model Dev.*, 13, 3145–3177, 2020
- [3] Noguchi, S., Mukougawa, H., Kuroda, Y., Mizuta, R., Yabu, S., and Yoshimura, H., “Predictability of the stratospheric polar vortex breakdown: An ensemble reforecast experiment for the splitting event in January 2009”, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, 3388–3404, 2016