

高解像度中層大気大循環モデルによる成層圏突然昇温のアンサンブル予測実験

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

本課題では、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、中層大気における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ている。本年度は、2009 年 1 月に生じた過去最大規模の成層圏突然昇温 (SSW) を対象とした、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) および低解像度 (水平約 300 km、重力波パラメタリゼーション併用) の 2 つの設定での予測実験をアンサンブル化し、その結果の検証を行った。JAGUAR によるアンサンブル平均予測結果を吟味した結果、高解像度の予測では、SSW 生起後の成層圏での東風/弱風偏差の持続の表現に改善が見られることが確認された。また、中間圏以高の循環の基本場および変動特性の違いも大きく、アンサンブルメンバー間の相関解析の結果、冬極での SSW に伴う夏極上空の高温偏差の出現高度が、高解像度の予測では、低解像度の予測と比べて低くなることも確認された。

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, 成層圏突然昇温, 半球間結合

1. はじめに

本課題「中層大気の内～季節スケール予測」では、地表から中層大気全域を含む広範囲における大気変動を対象とした高解像度予測シミュレーションを行い、高解像度化により享受できる恩恵を明示することを目標の 1 つとしている。これまでに、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 Atmosphere Research, Watanabe and Miyahara 2009 [1]) を用いて、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・比較し、高解像度設定の優位性を裏付ける結果を得てきた。また、高解像度設定においても上空循環場の再現に改善の余地があり、初期値化にも工夫が必要なことから、上空の散逸過程のチューニングやスペクトルナッジング (空間波数帯を限定した循環拘束) を活用した予測開始手法の導入を行い、関連するシミュレーションも実施してきた。

その一方で、初期値誤差の成長による影響から免れられない季節内～季節 (S2S) スケールでの予測の評価にあたっては、初期値の不確実性を考慮したアンサンブル積分の実施が必要であった。そこで、以前にも紹介した、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成層圏突然昇温 (SSW) イベントに対する予測実験をアンサンブル化し、より確かな、設定の違いにより生じる差異を調査した。本稿では、その結果を一部紹介する。ただし、多メンバーでの高解像度積分の実施は計算機資源的に厳しいために、高解像度設定の予測でのアンサンブル数は限定されることに留意されたい。

2. 実験設定

SSW 生起日前後の 5 日 (1 月 10、15、20、25、30 日) を開始日として、JAGUAR による期間 30 日の予測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 (Huang et al. 2021 [2]) を用い、時間変化する気候値に開始日の初期偏差が加わり、持続する形式で与えた。初期値は、予報モデルとして JAGUAR を用いた局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LETKF) に基づくデータシステム (JAGUAR-DAS, Koshin et al. 2020 [3], 2022 [4]) 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た解析値を使用した。

モデルの解像度設定は以前と同様である。JAGUAR-DAS 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。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。

アンサンブル予測にあたり、低解像度では LETKF の各メンバー解析値 50 個を初期値として用いた。一方、高解像度では、開始前に、アンサンブル平均解析値へのスペクトルナッジング (大規模成分のみを拘束) を活用したスピニングアップ期間を 3 日間設けて、重力波成分をある程度馴染ませてから、予測を実施している。その際の拘束波数や拘束に用いるデータのサンプル間隔にいくつかのバリ

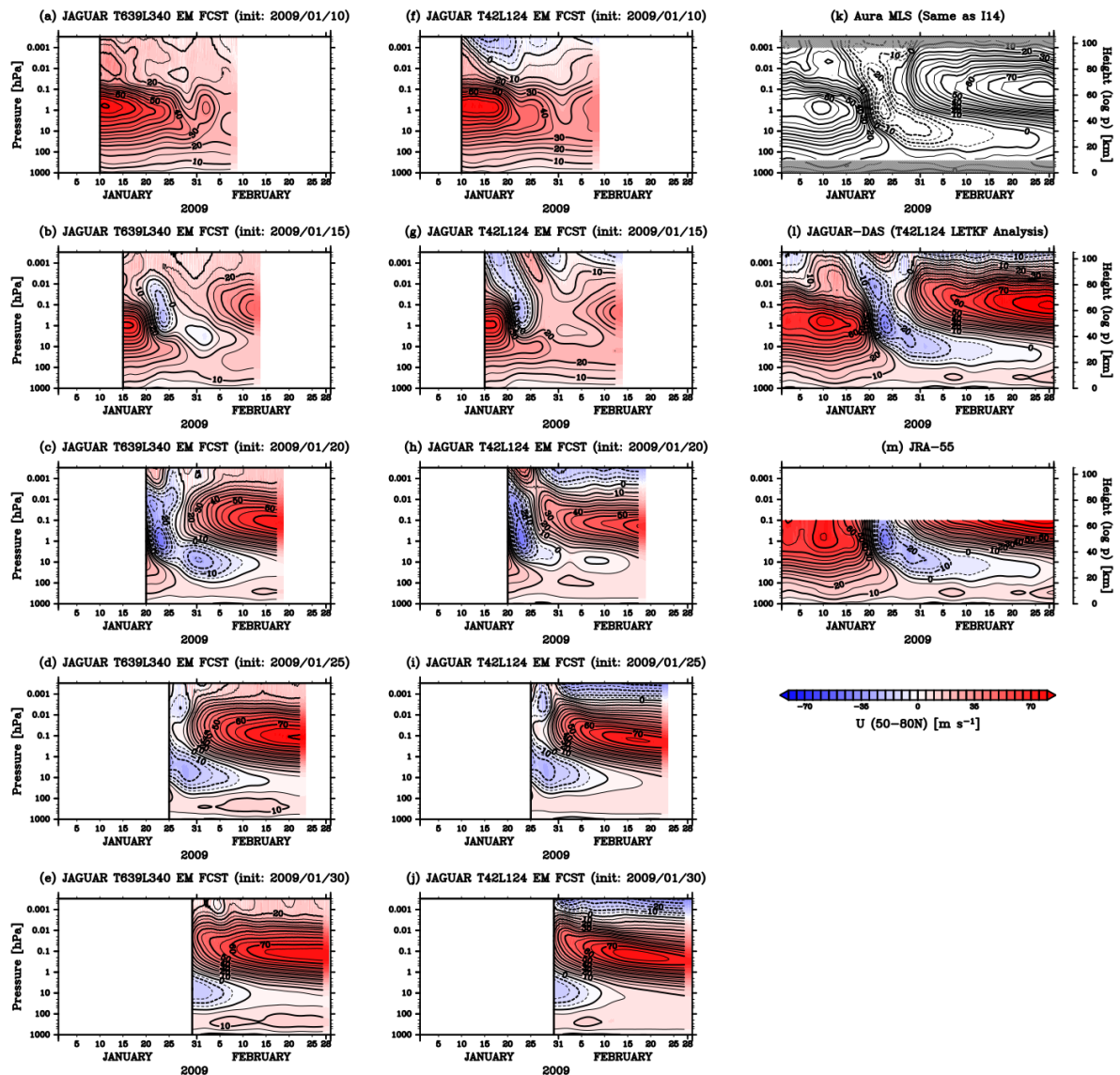


図1: 帯状平均東西風(北緯 50-80 度での平均)の時間-高度断面。色で6時間値、等値線で3日移動平均処理を施した値について示す。(a-e) 高解像度版 JAGUAR による予測結果のアンサンブル平均。(f-j) 低解像度予測結果のアンサンブル平均。それぞれ上段から2009年1月10日、15日、20日、25日、30日開始の予測結果を示す。(k) 衛星観測データ (Aura MLS) より傾度風平衡を仮定して算出した東西風。Iida et al. (2014) [7] と同一。(l) JAGUAR-DAS により作成された解析データ。(m) 気象庁による再解析データ (JRA-55; Kobayashi et al. 2015 [8])。

エーションを持たせて行った調査実験の結果を活用して、6個のアンサンブルを用意した。

3. 結果

予測結果の概観を、高緯度における東西風のアンサンブル平均に、同時期の衛星観測および解析/再解析データを合わせて、図1に示す。高解像度と低解像度のどちらの予測でも、大まかにはSSWの生起(中部成層圏における西風から東風への逆転)およびその後の回復(成層圏から中間圏にかけての強い西風の形成)過程が、1月20日以降に開始した予報から、再現されている様子を見るこ

とができる。なお、この予測傾向は、このSSW生起の捕捉タイミングをより高頻度なアンサンブル予測実験によって確認した先行研究(Noguchi et al. 2016 [9])の結果と整合的である。また、ここでは詳細に触れないが、6時間値を観察することにより、中間圏以上の領域では朝夕変動が大きくなっている様子も確認できる。

SSWの発達に関しては、観測や再解析で見られるような、2月終わりまでの中部-下部成層圏における東風の持続(図1k-m)を、JAGUARによる両予測は再現できておらず、SSWの規模を過小に表現している(図1d,e,i,j)ことがわかる。ただし、高解像度の方が、弱風傾向が若干残

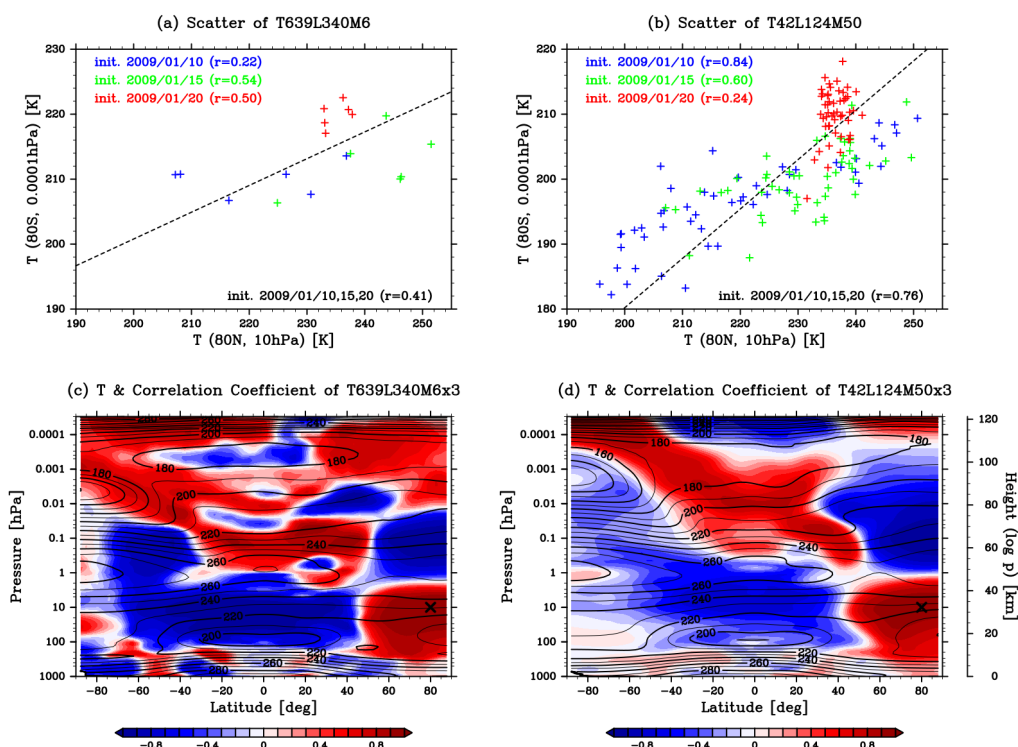


図2: SSW に伴う全球的な温度変動発現の様子。2009年1月27日から2月5日までの期間平均についての、アンサンブルメンバー間の相関解析結果。左/右: 高/低解像度版 JAGUAR による予測結果に基づく、中部成層圏北極域 (北緯80度、10 hPa) 温度に対する1点相関。(a, b) 上部中間圏/下部熱圏南極域 (南緯80度、0.0001 hPa) 温度との散布図。青、緑、赤色でそれぞれ2009年1月10、15、20日に開始した予測について示す。合わせて、枠内右下の黒字で3初期日を合わせたサンプルにより計算した相関係数を示し、点線で回帰直線を示す。(c, d) 3初期日を合わせたサンプルにより計算した相関係数 (色) およびアンサンブル平均 (等値線、10 K 間隔) の子午面。相関計算にあたっての対象点 (北緯80度、10 hPa) をバツ印で示す。

っており、また SSW 生起・発達の捕捉成否が別れる開始日からの予測 (図1b, c, g, h) においても、成層圏での東風が強くなっている。これより、高解像度設定での予測の方が、SSW 後の循環場をより良く再現できていると言える。

通常の再解析 (図1m) ではカバーできない中間圏以上の予測結果に目を向けると、高解像度と低解像度とでだいぶ様相が異なることがわかる。以前の単一予測実験結果の報告と同様に、SSW 生起後の上空の場合、高解像度では弱い西風状態となっているのに対し、低解像度では急激に東風へと転じている。なお、今回の低解像度予測および JAGUAR-DAS では、以前の報告の設定から非地形性重力波パラメタリゼーションを弱めるように調整を施してあるため、上空の東風傾向は以前と比べて若干緩和されているが、それでもなおこの傾向は残っている。このため、JAGUAR-DAS 解析値 (図11) の上空の東風は、依然としてモデルバイアスを反映している可能性が高い。実際、モデルを介さずに衛星観測データより算出した着目高度における風は西風である (図1k)。

上記のような中間圏以上の循環基本場および変動特性の、2つの設定間での大きな差異は、SSW に伴う遠隔影響の発現過程においても確認できる。図2に、SSW 生起前 (1月10、15、20日) に開始した3つの予測をサンプルと

して用いた、SSW に伴う中部成層圏北極域温度との1点相関解析の結果を示す。相関係数の子午面分布 (図2c, d) より、成層圏-中間圏と北極域-熱帯域での、SSW に伴う温度変動の4極子構造は、両解像度ともに明瞭に現れている様子を見ることができ。ここで、高解像度予測のアンサンブル数はわずか6であり、また散布図 (図2a, b) からわかる通り、1月20日開始の予測はほぼ SSW を再現しているため、有効なサンプルが少なく、ノイズが大きいことには留意されたい。しかし、それを差し引いても、中間圏以上の相関の出方は、高解像度予測と低解像度予測とで異なっており、特に南極域上空での温度上昇 (SSW とは反対極への半球間結合) に相当する高相関の発現高度が異なる。低解像度予測では、夏極上空の低温領域より上部の、0.0001 hPa 程の高度に高相関領域が位置している。それに対し、高解像度予測では、より下方の0.001-0.01 hPa 程の、低温領域に差し掛かる高度領域で、高相関が発現している。なお、表現されている温度基本場に注目しても、高解像度予測での夏極上空の低温領域は、低解像度予測のそれよりも若干低いことがわかる。

なお、本研究の低解像度予測と設定に近いモデル (Miyoshi and Fujiwara 2003 [10]) によるシミュレーションを用いた半球間結合の解析 (Yasui et al. 2021

[11]) においては、ここでの低解像度予測の結果と同様に SSW に伴う夏極の高温偏差が高度 110 km 付近で出現しているが、その偏差出現高度は、他の半球間結合の研究 (e.g., Körnich and Becker 2010 [12]) と比べて高めである。偏差出現高度の低い高解像度予測の方が必ずしも正しいとは限らないが、極中間圏雲の減少などの観測事象 (e.g., Karlsson et al. 2007 [13], 2009 [14]) とは結び付けやすいと考えられる。

4. まとめと今後の課題

2009 年 1 月に生じた過去最大規模の SSW を対象に、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 スケールでのアンサンブル予測実験を実施し、その結果を衛星観測・解析/再解析データを用いて検証した。アンサンブル平均により得た描像は、以前に報告した単一予測における描像と同様、高解像度設定の優位性を示すものであった。JAGUAR による予測は、SSW 生起後の東風の持続を過小に表現する傾向があったが、高解像度設定の予測の方がその傾向は弱かった。また、中間圏以上の循環の基本場および変動特性の差異は小さくなく、SSW に伴う遠隔影響の発現においても違いがみられた。特に、アンサンブルメンバー間の相関解析によって確認した夏極上空の高温偏差の出現高度が、高解像度設定の予測では、低解像度設定の予測でのものよりも低くなっていた点は、注目に値する。ただし、現時点では高解像度設定での予測のアンサンブル数は限られるため、慎重な検討および追加計算を要する。

謝辞

本研究の一部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., 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] Huang, B., Liu, C., Banzon, V., Freeman, E., Graham, G., Hankins, B., Smith, T., and Zhang, H. M., “Improvements of the Daily Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (DOISST) Version 2.1”, *J. Climate*, 34, 2923–2939, (2021).
 [3] 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).

[4] Koshin, D., Sato, K., Kohma, M., and Watanabe, S., “An update on the 4D-LETKF data assimilation system for the whole neutral atmosphere”, *Geosci. Model Dev.*, 15, 2293–2307, (2022).
 [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] Iida, C., Hirooka, T., and Eguchi, N., “Circulation changes in the stratosphere and mesosphere during the stratospheric sudden warming event in January 2009”, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 7104–7115, (2014).
 [8] Kobayashi, S., Ota, Y., Harada, Y., Ebata, A., Mori, M., Onoda, H., Onogi, K., Kamahori, H., Kobayashi, C., Endo, H., and Miyaoka, K., “The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics”, *J. Meteor. Soc. Japan.*, 93 (1), 5–48, (2015).
 [9] 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).
 [10] Miyoshi, Y., and Fujiwara, H., “Day-to-day variations of migrating diurnal tide simulated by a GCM from the ground surface to the exobase”, *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1789, (2003).
 [11] Yasui, R., Sato, K., and Miyoshi, Y., “Roles of Rossby Waves, Rossby-Gravity Waves, and Gravity Waves Generated in the Middle Atmosphere for Interhemispheric Coupling”, *J. Atmos. Sci.*, 78(12), 3867–3888, (2021).
 [12] Körnich, H., and Becker, E., “A simple model for the interhemispheric coupling of the middle atmosphere circulation”, *Adv. Space Res.*, 45 (5), 661–668, (2010).
 [13] Karlsson, B., Körnich, H., and Gumbel, J., “Evidence for interhemispheric stratosphere-mesosphere coupling derived from noctilucent cloud properties”, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L16806, (2007).
 [14] Karlsson, B., Randall, C. E., Benze, S., Mills, M., Harvey, V. L., Bailey, S. M., and Russell, J. M., “Intra-seasonal variability of polar mesospheric clouds due to inter-hemispheric coupling”, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L20802, (2009).

Ensemble Prediction Experiments of a Stratospheric Sudden Warming by a High-Resolution Middle-Atmosphere General Circulation Model

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

*¹Research Center for Environmental Modeling and Application, Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology,

*²Department 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 ensemble prediction experiments targeting the middle atmospheric extreme events, especially the sudden stratospheric warming (SSW) in January 2009. Comparisons 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, reconfirm the superiority of the high-resolution setting. The representation of the easterly wind persistence in the stratosphere after the occurrence of SSW is improved in the high-resolution predictions. There were also significant differences in the background fields and variability characteristics of the circulation above the lower mesosphere.

Keywords : middle atmosphere, sub-seasonal to seasonal prediction, high-resolution atmospheric general circulation model, stratospheric sudden warming, interhemispheric coupling

1. Introduction

In this project, we conduct sub-seasonal to seasonal prediction experiments by using a high-top (extended to an altitude of about 150 km) model named Japanese Atmospheric General Circulation Model for Upper Atmosphere Research (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.

In FY2021, we have revisited the benefits of a gravity wave resolving setting of JAGUAR in reproducing a stratospheric sudden warming (SSW) event in January 2009. By adopting the ensemble methodology, we investigate differences stemming from model settings in a more reliable manner.

2. Experimental Settings

We have conducted a series of 30-day ensemble 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, with 6 and 50 members, respectively. In both settings, five sets of ensemble predictions are initialized from every five days around the onset date of SSW (10, 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-DAS, Koshin et al. 2020 [2], 2022 [3]), which assimilates conventional

and satellite observations.

3. Results

The reproducibility of the SSW is examined briefly by overviewing the time evolutions of the zonal-mean zonal wind in JAGUAR predictions (Figure 1). In both the high- and low-resolution predictions, the SSW onset (the reversal of the zonal wind from westerly to easterly in the middle stratosphere) and subsequent development are reproduced in ensemble-mean predictions initialized after 20 January. However, the persistence of easterly winds in the middle and lower stratosphere until the end of February is not reproduced well in both JAGUAR predictions. Nevertheless, the high-resolution predictions still show better representation of the SSW development (stronger easterlies in predictions initialized around 20 January) and recovery (weaker westerlies in predictions initialized after that) compared to the low-resolution ones.

There are also significant differences in the background fields and variability characteristics of the circulation above the lower mesosphere, which is not covered by most reanalysis data. As reported in the previous investigation of deterministic prediction experiments, it is confirmed that the high-resolution predictions show a weak westerly in this region, while the zonal wind in the low-resolution predictions reverses to easterly around the mesopause. Furthermore, it is revealed that the teleconnection patterns associated with the onset of SSW is quite different between the high- and low-resolution predictions by examining the correlative variability among the ensemble members.

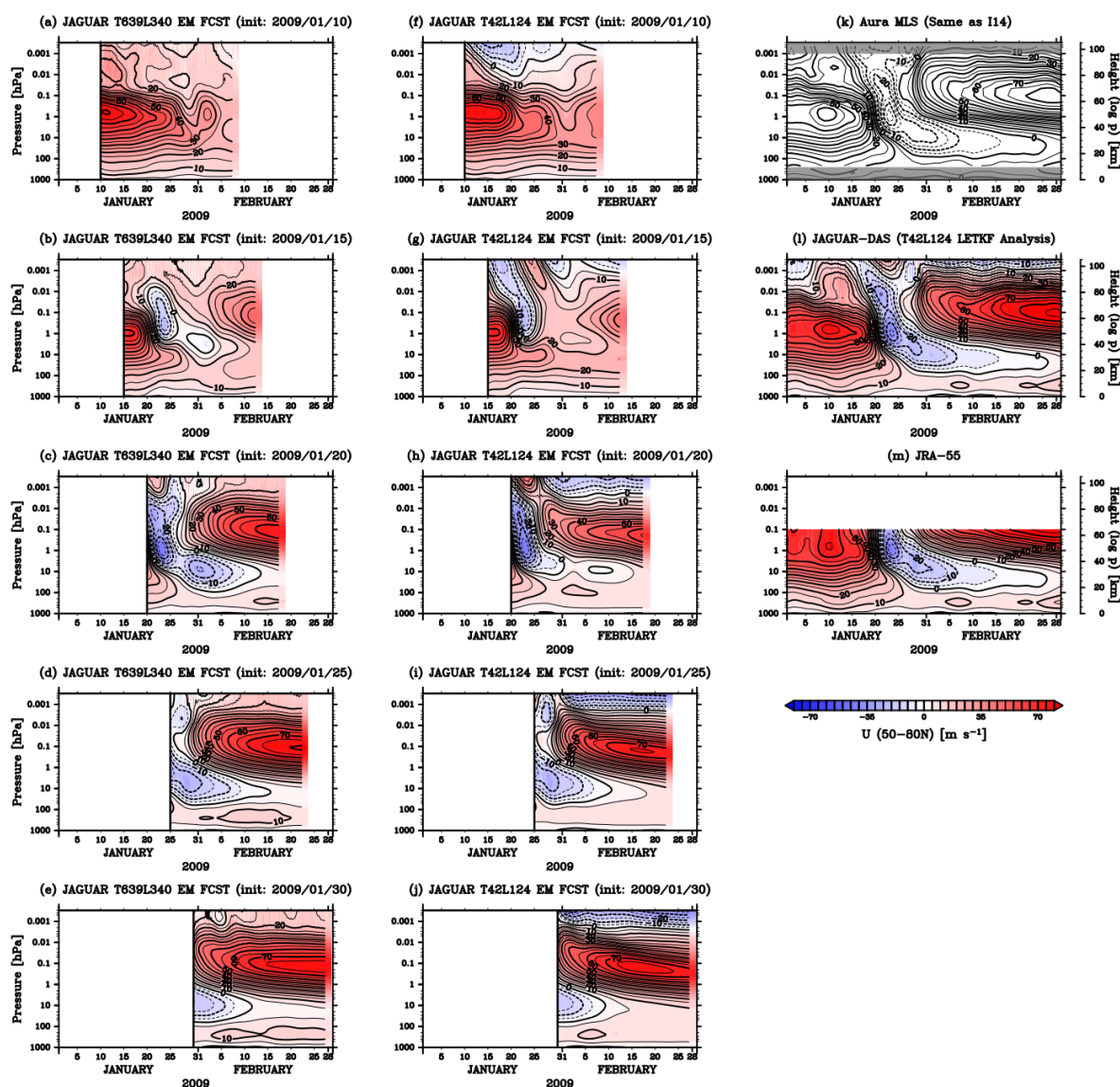


Fig. 1: Time-height cross-sections of the zonal-mean zonal wind (averaged over 50-80°N). Colors indicate 6-hourly values, and contours indicate 3-day running-averaged values. (a-e) Ensemble-mean predictions by the high-resolution JAGUAR and (f-j) those of the low-resolution JAGUAR. The predictions initialized on 10, 15, 20, 25, and 30 January 2009 are shown from top to bottom, respectively. (k) The zonal-mean zonal wind calculated from satellite observations (Aura MLS), assuming the gradient-wind wind balance. (l) The analysis produced by the JAGUAR-DAS. (m) The reanalysis provided by Japan Meteorological Agency (JRA-55).

Acknowledgement

This work was partly 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 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] Koshin, D., Sato, K., Kohma, M., and Watanabe, S., “An update on the 4D-LETKF data assimilation system for the whole neutral atmosphere”, *Geosci. Model Dev.*, 15, 2293–2307, 2022.