

数値天気予報における予測可能性変動メカニズムの解明

課題責任者

松枝 未遠

筑波大学計算科学研究センター

著者

佐藤 和敏*¹, 山崎 哲*²

*¹北見工業大学工学部, *²海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 アプリケーションラボ

地球シミュレータ用に最適化された大気大循環モデル AFES (atmospheric general circulation model for the Earth Simulator)を用いて、様々な時間スケールに対する予測・予報実験を行った。一つ目は、タスマン海の海面水温高温偏差が南極大陸の気候変動に与える影響を調査するための気候予測実験を行った。全球気候値で作成した海面水温に対して、特定の領域だけに現実の海面水温を与える感度実験を行った。すると、タスマン海の高温暖偏差が南極半島の暖冬に寄与することが明らかになった。二つ目は、北半球での異なる場所でのラジオゾンデの観測インパクトを調査するために、それらの観測を取り除いた観測システム実験を行い、その実験で得られた初期値からの週間アンサンブル予報を行った。予報の初期値に与えられた観測インパクトは全ての実験について短期予報（3日以下）の間に増幅し続けることがわかった。さらに、中期予報（4～7日）の期間でも北極観測は最も広範囲に影響が及び、北極域と中緯度北米域に有益な観測インパクトを及ぼすことがわかった。

キーワード：AFES, 全球予測実験, 予測可能性, 観測システム実験

1. はじめに

我々の課題では、地球シミュレータ上で大気大循環モデル AFES [1]やNICAMなどの複数の予報モデルと、アンサンブル大気再解析 ALERA2 データや全球の現業解析、長期再解析データなどを用いて、初期値を交換した「たすき掛け」予報実験を行っている。たすき掛け実験では、予報モデルと初期値に用いる解析データの組み合わせを交換（＝たすき掛け）して予報実験を行い、その予報結果を比較することで、予測可能性変動に対するモデルと初期値の相対寄与を見積もる。地球シミュレータでAFESやNICAMをモデルとするたすき掛け実験を行い、京都大学のスーパーコンピュータシステムを用いてECMWFの地球システムモデルIFSや気象庁の全球モデルGSMを用いた実験を進めている。

今年度は、特にAFESを使った2つの論文についての成果を紹介する。

2. タスマン海の昇温が引き起こす南極半島の異常高温 (Sato et al. 2021 [2])

南極半島は、近年異常高温が観測されており、地球上で気温上昇が顕著な領域の一つである。南極半島の異常高温は、南極氷床の融解を通じて海面上昇を引き起こすことから、世界中で注目されている。南極半島の異常高温を引き起こす原因として、南極大陸の太平洋側に位置するアムンゼン海で低気圧活動が活発になることで強められる低緯度側からの暖気移流が挙げられている。これまでの研究では、エルニーニョ・ラニーニャなどの低緯度の海水面の変動とアムンゼン海の低気圧活動度に関係があると指摘されている。しかし、熱帯でエルニーニョ・ラニーニャのような顕著なイベントが発生していない年でも南極半島で高温が観測されることがあり、熱帯以外の領域からの影響が示唆されていた。特に、中緯度海洋の水温上

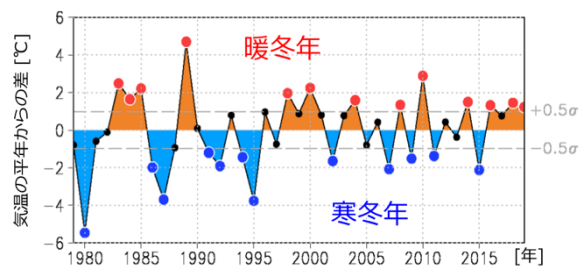


図1:南極半島6観測所の平均気温の偏差の時系列。赤点は暖冬年、青点は寒冬年、黒点はそれ以外の各年の気温偏差を示している。

昇や水温分布が変動は、半球全域の大気循環場に影響し、高緯度側で高温を引き起こすことがある。そこで本研究では、南半球で気温上昇が顕著な中緯度のタスマン海に着目し、タスマン海の水温変動が南極半島の気温にどのように影響しているのか、気象データ解析および数値計算から調べた。

南極半島で異常高温発生時の大気場や海洋場を調べるため、南極半島に常設されている6観測所の冬季(6月～8月)表面気温データを使用し(図1)、平年より暖かい冬の13年分(暖冬年)と寒い冬の12年分(寒冬年)の合成解析を実施した(図2上)。暖冬年では、南極周辺のアムンゼン海に低気圧偏差、南極半島の北側で高気圧偏差が顕著になり、中緯度から南極半島へ暖気移流が強くなることがわかった。そのため、南極半島を含む一部の南極大陸では、高温偏差が見られていた。低気圧の数や活動度の指標となる低気圧の数密度の合成解析では、アムンゼン海を含む南極大陸沿岸で低気圧が多くなっており(図3上)、アムンゼン海の低気圧が活発になることで南極半島の高温が引き起こされると指摘した先行研究と整合的な結果となった。一方、ニュージーランドの東側では、低気圧の数密度が例年より少ないことから、暖冬

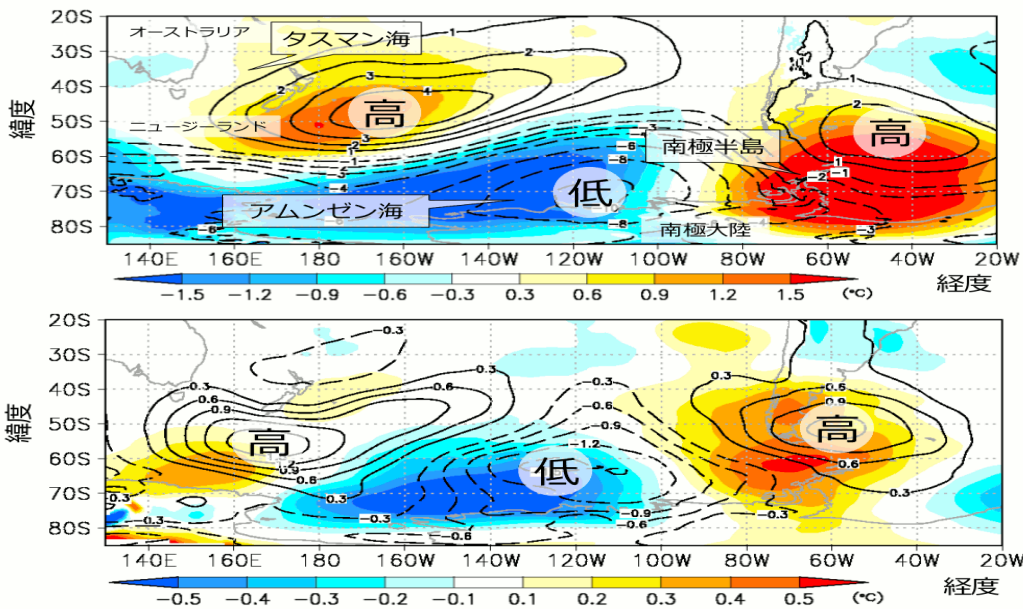


図 2: (上)暖冬年と寒冬年の気圧(線:hPa)と気温偏差(色:°C). (下)CTLexp と TASexp の気圧(線:hPa)と気温の差(色:°C).

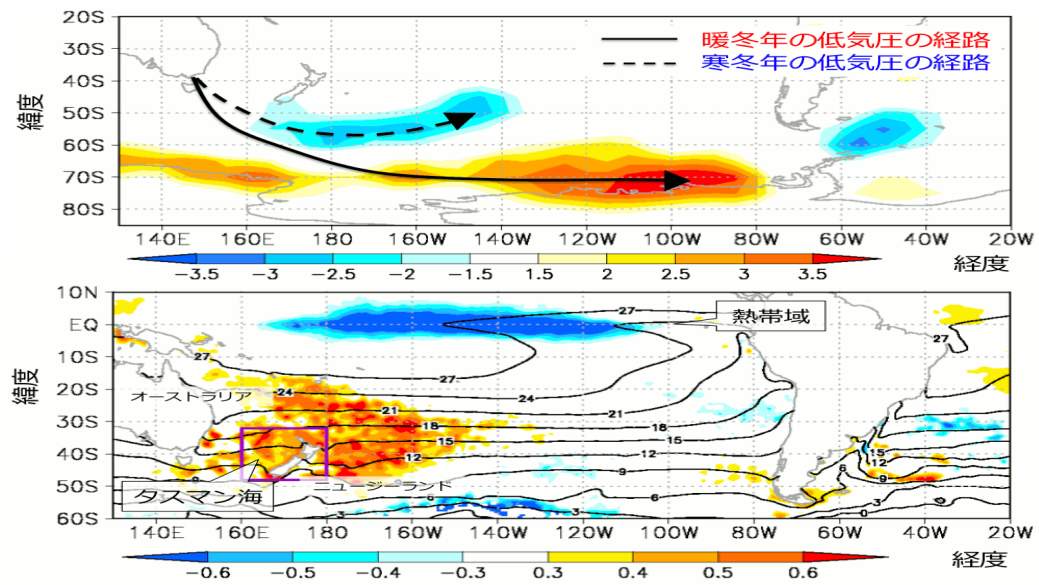


図 3: (上)暖冬年と寒冬年の低気圧の数密度偏差(色)と各年の標準的な低気圧の経路. (下)暖冬年と寒冬年の表面水温(SST)偏差(色:°C)と SST の気候値.

年に中緯度から高緯度へ侵入する低気圧の経路が変化していることが示唆された。

暖冬年の表面水温(SST)は、ニュージーランドの風上側に位置するタスマン海で高温偏差であることがわかった(図 3 下)。タスマン海の SST が上昇することで、タスマン海と南極大陸間の SST 南北勾配が大きくなっていった。そのため、気温の南北勾配も大きくなり、暖冬年はタスマン海の高緯度側で上空のジェットも強くなっていた。タスマン海の風下側であるアムンゼン海での低気圧の高密度偏差とニュージーランド東側の低密度偏差は(図 3 上)、暖冬年のタスマン海水温上昇で高緯度側のジェットが強化されることで、ニュージーランド

東側を通過する低気圧の経路を南極方向へ変化していることを示している。そのため、南極大陸周辺へ侵入する低気圧が増加によりアムンゼン海の低圧偏差を強まり、南極半島の高温を引き起こしている可能性がある。

しかし、アムンゼン海の低気圧偏差を強めるラニーニャに伴う低水温度偏差も熱帯域で見られており、それぞれの海域の水温偏差が大気循環場の変動に与える影響を調べる必要がある。そこで、ラニーニャに伴う熱帯域の低水温とタスマン海の高水温が大気循環場に与える影響を調べるため、AFESを用いて各領域の SST 偏差による大気応答を調べる感度実験を行った。図 4 は、全球の SST 偏差と気候値を示している。

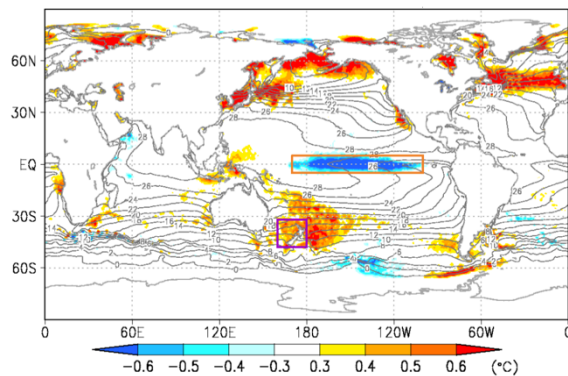


図 4:暖冬年と寒冬年の表面水温 (SST) 偏差(色:°C)と SST の気候値。橙線と紫線は、ENSO と TAS で境界条件の SST に偏差を与えた領域を示している。

CTL ラン(CTL)は、SST の気候値を境界条件として数十年積算計算を行った。次に、全球(Globe)、熱帯域(ENSO)、タスマン海域(TAS)の海域の暖冬年 SST 偏差のみを気候値に足した SST を境界条件とした数十年積算計算をそれぞれ行い、CTL との差を見ることで各海域の SST 偏差に対する大気応答を調べた。

Globe と CTL の気温と気圧の差は、暖冬年と寒冬年の気温・気圧偏差の分布とよく似ており、AFES は SST 偏差に対する大気応答をよく再現できることがわかった。熱帯の低 SST 偏差のみ(図 4 橙線)を与えた ENSO と CTL の気温と気圧の差は、暖冬年と寒冬年の気温・気圧偏差の分布とよく似ており、ラニーニャ現象がアムンゼン海の低気圧を強める先行研究を支持する結果となった。一方、タスマン海の高 SST 偏差(図 4 紫線)のみを与えた TAS と CTL の気温と気圧の差についても、ニュージーランド南側と南極半島北側の高圧偏偏差、アムンゼン海で低圧偏差が見られる。また、南極半島で高温偏差が見られており、タスマン海の高水温偏差のみを与えて実験でも Globe や ENSO と同じような大気応答が見られた。これらの SST 感度実験から、先行研究で指摘されているラニーニャ現象に伴う熱帯域の低水温偏差だけでなく、タスマン海の高水温偏差も南極半島の異常高温を引き起こす大気循環場を強めていることがわかった。合成解析の結果では、冬だけでなく、春や秋にも同じようにタスマン海の昇温と南極半島の異常高温を引き起こす大気循環場に関係が見られた。そのため、南極半島の異常高温や氷床融解の将来予測を行う上で、タスマン海の水温変動は重要であることもこの研究から示唆された。

3. 北半球の様々な場所でのラジオゾンデ観測のインパクト伝播 (Yamazaki et al. 2021 [3])

山崎・佐藤 (2021) [4]では、個々の観測インパクトを観測システム実験せずに推定できる EFSO の実装を行い、その有効性を検証するために、北半球の様々な場所でのラジオゾンデ観測を除去した観測システム実験を行った。本課題では、同じ観測システム実験の初期値を使って、週間予報を行った時に緯度帯ごとに観測インパクトがどの

くらい変化するかを調査した。どの緯度帯での観測が最も大きなインパクトを持ち得るのかを、週間予報の中で調査を行った。合計 12 回のデータ除去(観測システム)実験を行った。実験では、北半球から北極、中緯度、熱帯の 3 緯度帯から各 4 箇所ずつ 3 つの近接したラジオゾンデ観測点を選ばれた。3 つの緯度帯の観測で、短期予報(6 時間~3 日)と中期予報(4 日~7 日)の改善にどれが最も大きなインパクトを持つのかを調査した。

図 5 は、7 日先までの観測インパクトの時間発展を北極・中緯度・熱帯観測に分けて時系列を描いている。観測インパクトは、データ除去実験と標準(除去しない)実験の差で定量化している。短期予報の間は、全ての観測インパクトが有益となり、対象としたラジオゾンデが観測された緯度帯にかかわらず短期予報を必ず改善できることがわかった。特に北極観測は中緯度や熱帯のものよりもより大きなインパクトを持っていた。中期予報の間では、北極観測だけが最も広域に影響を及ぼし、かつ北極域と中緯度北米域に有益な観測インパクトを付与する傾向にあることがわかった。

文献

- [1] Enomoto T., A. Kuwano-Yoshida, N. Komori, W. Ohfuchi, “Description of AFES2: Improvements for high-resolution and coupled simulations,” *In High Resolution Numerical Modelling of the Atmosphere and Ocean*, K. Hamilton and W. Ohfuchi (ed.), chap. 5, pp. 77–97, 2008.
- [2] Sato, K., J. Inoue, I. Simmonds, and I. Rudeva, Antarctic Peninsula warm winters influenced by Tasman Sea temperatures, *Nat. Comm.*, **12**, 1497, March 2021, <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21773-5>.
- [3] Yamazaki, A., T. Miyoshi, J. Inoue, T. Enomoto, and N. Komori: EFSO at different geographical locations verified with observing system experiments. *Wea. Forecasting*, **36**, 1219–1236, August 2021, <https://doi.org/10.1175/WAF-D-20-0152.1>.
- [4] 山崎哲, 佐藤和敏: アンサンブル同化手法を用いた観測システムの最適化に関する研究. *Annual Report of the Earth Simulator April 2020– February 2021*, 2021.

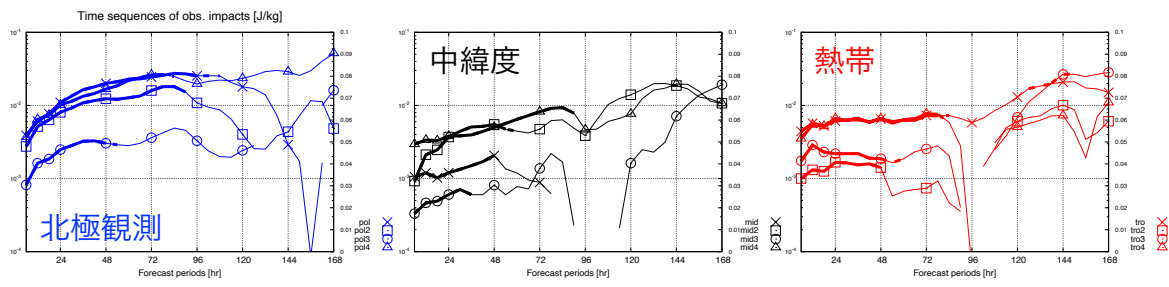


図5: 予報6時間から7日後までの観測インパクトの時間発展. (左)北極, (中央)中緯度, (右)熱帯観測についての実験. 太実線と太点線はそれぞれ91回の予報実験に対する99%, 95%優位水準を示す.

Predictability Variation in Numerical Weather Prediction

Project Representative

Mio Matsueda Center for Computational Sciences, University of Tsukuba

Authors

Kazutoshi Sato*¹, Akira Yamazaki*²

*¹ Faculty of Engineering, Kitami Institute of Technology, *² Application Laboratory, Research Institute for Value-Added-Information Generation, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Using the atmospheric general circulation model for the Earth Simulator (AFES), various-range forecast experiments were conducted: (1) Climate simulation experiments to explore the impact of the warm sea surface temperature anomalies over the Tasman Sea on Antarctic climate variability. It was clarified that the anomalies contribute Antarctic Peninsula warm winters. (2) Weekly ensemble forecast experiments for observing system experiments at different geographical locations in the Northern Hemisphere. It was found that observation impacts for all the experiments keep amplifying during the early periods, and Arctic observations have most influential and have beneficial impacts in Arctic and midlatitude North American areas even in the late periods of the weekly forecast.

Keywords : AFES, global prediction, predictability, observation impacts

1. Introduction

We have conducted weather forecasting experiments using multiple global models and multiple initial atmospheric conditions prepared from operational centers, reanalysis datasets, and our data assimilation system. Each model is run from different initial conditions: we call this approach the “multi-model multi-analysis experiment”. In this project, forecast experiments using two general circulation models, i.e., the Atmospheric general circulation model for the Earth Simulator (AFES [1]) and Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM) from an ensemble analysis that is ALERA2

(AFES-LETKF experimental ensemble reanalysis version 2, where the LETKF stands for the local ensemble transform Kalman filter) have been conducted in order to clarify mechanisms of predictability variations in high-impact weather events found in global numerical weather prediction.

2. Antarctic Peninsula warm winters influenced by Tasman Sea temperatures (Sato et al. 2021 [2])

The Antarctic Peninsula (AP) in West Antarctica experienced dramatic temperature changes with the highest warming rate in winter. The Amundsen Sea Low, the sea level pressure (SLP)

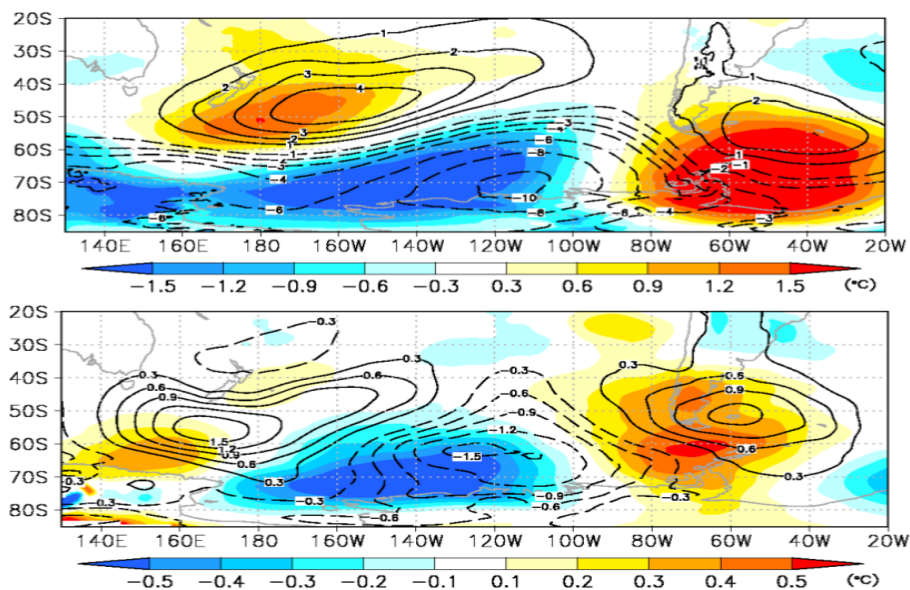


Figure 1: (upper) Difference maps for air temperature at 700 hPa (T700) (°C: shaded) and sea level pressure (SLP) (hPa: contours) for between warm and cold winters. (bottom) Difference maps for simulated air temperature at 700 hPa (T700) (°C: shaded) and sea level pressure (SLP) (hPa: contours) for between TAS and CTL.

structure of which is related to the number and intensity of low-pressure systems over the Amundsen Sea, plays an important role in the West Antarctic warming, particularly during winter. The El Niño-Southern Oscillation (ENSO) is known to modulate the position and strength of the ASL via planetary waves triggered from the tropics to the Antarctic region. However, no previous study has reported the impact of change in SSTs in the Southern Hemisphere mid-latitudes on Antarctic climate variability. In this study, we assess the impact of warming in the Tasman Sea on AP warming using reanalysis data and the Atmospheric general circulation model For the Earth Simulator (AFES).

To understand the connection between interannual variability of SSTs in the mid-latitudes and changes in AP air temperature, we typical warm and cold AP winters from a time series of averaged surface air temperature anomalies for winter (June to August) and the other three seasons over the period 1979–2019 at six stations in the AP. Figure 2a shows the differences in temperature at 700 hPa (T700) and SLP between warm and cold AP winters. A strong SLP gradient over the Drake Passage, which is induced by a cyclonic anomaly over the Amundsen Sea and an anti-cyclonic anomaly off the east coast of Argentina, leads to northerly warm advection over the Weddell Sea and AP. Because the Tasman Sea warming strengthens the meridional SST gradient between the Tasman Sea and the SO, causing poleward shift of cyclone tracks due to change in upper-layer jet in warm AP winters.

To address the atmospheric response to the SST anomalies over the Tasman Sea in warm AP winters, we conducted experiments using the AFES. For the control experiment (CTL), climatological daily SST and sea ice cover data were used as boundary conditions. The SST anomalies over the Tasman Sea regions (48–32°S, 160°–180°E) between warm and cold AP winters superposed on the daily global climatology were used as forcing for a TAS experiment (TAS). Figure 1 (bottom) shows difference maps in atmospheric circulations (T700 & SLP) between the TAS and CTL experiment. The atmospheric response to only Tasman Sea warming is similar to that shown in Figure 1 (upper). Our model experiments show that the increase in SST in Tasman Sea alone produce warming in the AP even

without anomalous tropical SST cooling.

3. Weekly ensemble forecast experiments for OSEs at different geographical locations in the NH (Yamazaki et al. 2021 [3])

We have used AFES and ALERA2 to evaluate impacts of observations obtained in observational campaigns in various regions on weekly forecasts. Using in-house developed data assimilation system, we conducted 12 data denial experiments at 3 adjacent sites of routine radiosonde observations, selected from Arctic, midlatitude, and tropical latitudinal bands in the Northern Hemisphere [4]. In this project, we investigated which is the most important for improving short (12 hour–3 days) and medium (4–7 days) range weather forecasts the Arctic, the midlatitudes, or the tropics.

Figure 2 shows the time sequences of observation impacts quantified through the data-denial experiments for lead times up to 7 days at each latitudinal band (Arctic, midlatitude, or tropical). During short-range forecasts, all observation impacts are beneficial, which suggests that the radiosondes can always improve the subsequent short-range forecasts, irrespective of latitudes. The Arctic observation impact more strongly amplify than the midlatitude and tropical ones. Additional data analyses proved that during the medium-range forecasts, Arctic observations tend to seed the broadest impacts and have beneficial impacts in Arctic and midlatitude North American areas.

References

- [1] Enomoto T., A. Kuwano-Yoshida, N. Komori, W. Ohfuchi, “Description of AFES2: Improvements for high-resolution and coupled simulations,” *In High Resolution Numerical Modelling of the Atmosphere and Ocean*, K. Hamilton and W. Ohfuchi (ed.), chap. 5, pp. 77–97, 2008.
- [2] Sato, K., J. Inoue, I. Simmonds, and I. Rudeva, Antarctic Peninsula warm winters influenced by Tasman Sea temperatures, *Nat. Comm.*, 12, 1497, March 2021, <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21773-5>.
- [3] Yamazaki, A., T. Miyoshi, J. Inoue, T. Enomoto, and

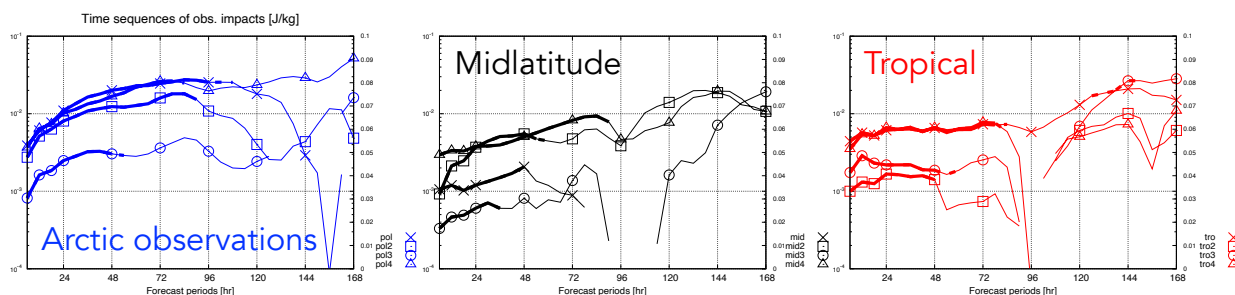


Figure 2: Time sequences of observation impacts from 6-hour to 7-day forecast periods for the Arctic (left), midlatitude (middle), and tropical observations. Thick solid and dashed lines indicate statistical confidence exceeding 99% and 95% significant levels against 91-time forecasts, respectively.

N. Komori: EFSO at different geographical locations verified with observing system experiments. *Wea. Forecasting*, 36, 1219–1236, August 2021, <https://doi.org/10.1175/WAF-D-20-0152.1>.

[4] Yamazaki, A., and K. Sato: Observing System Research using Ensemble-based Data Assimilation Methods. *Annual Report of the Earth Simulator April 2020–February 2021*, 2021.