

ハイブリッド機械学習モデルによる寒波のアンサンブル予測実験 Ensemble Forecast Experiments of Coldwaves with a Hybrid Machine Learning Model

○榎本 剛
○Takeshi ENOMOTO

To investigate the predictability of coldwaves during late December 2020 and early January 2021, deterministic and ensemble forecast experiments were conducted with the ERA5 reanalysis and NeuralGCM, a hybrid machine learning atmospheric general circulation model. NeuralGCM, comprising a spectral dynamical core and physics learned from reanalysis, exhibits significantly smaller bias than the physical counterpart, achieving a temperature error over Japan of only 0.5 K at a 10-day lead time. However, even with a lead time of just one extra day, the deterministic forecast fails to predict the low temperature, displaying +3 K bias, mirroring the limitation of the operational forecast. The ensemble mean forecast reduces this positive bias by half, with most members accurately predicting the cold spell. Furthermore, the ensemble adjoint sensitivity analysis reveals a significant remote effect from the North Atlantic. While the hybrid model demonstrates improved deterministic and ensemble forecasting capabilities with reduced biases, it ultimately remains constrained by the inherent predictability barrier.

1. はじめに

2020 年 12 月末から 2021 年 1 月初め、日本に二度寒波が襲来した。12 月 31 日の事例と比べて、1 月 8 日の寒波は予測が困難であった。気象庁の全球スペクトルモデル (GSM) の予測では、気温低下が 10 日前からは予測されていたものの、11 日前からは予測されていなかった (榎本 2021)。

2022 年頃から機械学習を用いた数値天気予報モデルが予報現業機関の予測と同等ないしは上回る精度を示すとした研究が発表されている。一方で、機械学習モデルは物理的な整合性に欠けるとの指摘もされている (Bonavita 2024)。

NeuralGCM (Kochkov et al. 2024) は機械学習モデルの制約を乗り越えるために、力学コアに従来のスペクトルモデルを採用している。ただし、機械学習モデルフレームワーク JAX で書かれているため、微分可能なモデルであり、データの学習において誤差逆伝播が可能である点が従来のものと異なる。物理的な整合性の改善により、アンサンブル予報や長期積分が可能となった。

本研究では、NeuralGCM を用いて 2021 年 1 月 8 日の寒波事例の予測実験を行い、寒波の予測可能性について検討した。

2. 実験設定

初期時刻は 2020 年 12 月 28 日及び 29 日 0000 UTC で、初期値は ERA5 (Hersbach 2020) の 37 層

の気圧面データを用いた。アンサンブル予報も ERA5 の 10 メンバを初期値とした。解像度 1.4°の摂動なしの学習済物理を用いた。入力データは、水平解像度は 256×128 、切断波数 85 の三角切断、鉛直に等間隔に 32 層 (T85L32) に内挿され、時間積分される。出力は 37 層の気圧面に内挿される。計算は Google Colaboratory の TPU を用いた。10 日程度の予報は約 1 分で終了する。

3. 結果

12 月 29 日からの決定論的な 10 日予報では、1000 hPa の日本域 (120°E – 150°E , 20°N – 50°N) 平均気温の ERA5 (Fig. 1, 青) に対する予報誤差はわずかに -0.5 K である (黒)。気象庁の 2 m 日本域気温の予報誤差は $+1\text{ K}$ を超えている。これに対し、29 日からの 11 日予報 (赤) では、現業予報同様に $+3\text{ K}$ 程度である。バイアスが小さいモデルを用いても、予測できなかったことは、28 日と 29 日の間に予測可能性の壁が存在していることを示唆している。

28 日からのアンサンブル予報では、摂動を加えないコントロール予報 (Fig. 2, 赤、Fig. 1 赤と同じ) は正のバイアスが存在している。これに対し、多くのアンサンブルメンバ (灰) は気温低下を予測しており、その結果アンサンブル平均 (黒) はバイアスを $+1.4\text{ K}$ 程度と半減している。

4. まとめ

スペクトル力学コアと再解析を学習したハイブリッド数値天気予報モデル NeuralGCM を用いて、2021 年 1 月 8 日の寒波事例に対する決定論的及びアンサンブル予報実験を行った。バイアスの少ない NeuralGCM を用いても、気象庁の現業予報同様に 11 日前から日本域の気温低下は十分に予測できなかった。このことは、力学的な予測可能性の限界が存在していることを示唆している。アンサンブル平均予報は、気温の正バイアスを半減して気温低下の予測が改善した。さらに、850 hPa 面における日本域平均気温に対するアンサンブル予報随伴感度解析は、4 日前に北大西洋グリーンランド東岸、2 日前に亜寒帯ジェット沿いの波束伝播及び北極海に感度を示しており、日本域平均気温のアンサンブルスプレッドもこれに対応して 1 月 4 日頃から増大している。このことから、日本域の気温低下の予測精度に対する北西大西洋からの遠隔影響を示している。

参考文献

- Bonavita, M., 2024: On some limitations of current machine learning weather prediction models. *Geophys. Res. Lett.*, **51**, e2023GL107377, doi:10.1029/2023GL107377.
- 榎本剛, 2020/2021 年越し寒波と極超え気流との関係, 日本気象学会 2021 年度春季大会講演予稿集, p. 307.
- Hersbach, H., and Coauthors, 2020: The ERA5 global reanalysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **146**, 1999–2049.
- Kochkov, D., and Coauthors, 2024: Neural general circulation models for weather and climate. *Nature*, **632**, 1060–1066, doi:10.1038/s41586-024-07744-y.

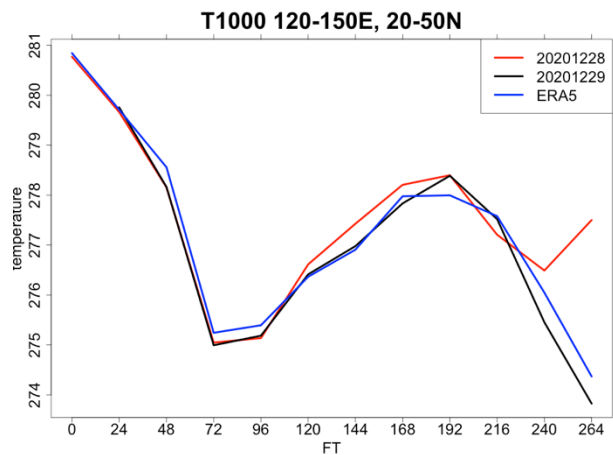


Figure 1 Averaged temperature over Japan (120°E–150°E, 20°N–50°N) at the 1000 hPa surface for the deterministic forecasts from 0000 UTC, 28 (red) and 29 (black) December 2020, and ERA5 analysis (red).

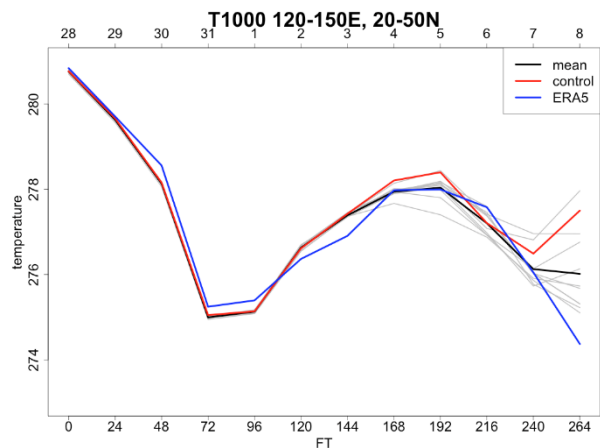


Figure 2 As in Fig. 1 but for the ensemble forecasts from 0000 UTC, 28 December 2020. The black and red lines indicate the ensemble mean and control (unperturbed) forecasts, respectively.