

海洋地球科学への応用に資する画像認識系深層学習の基盤技術開発

課題責任者

松岡 大祐

海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門

地球情報科学技術センター データサイエンス研究グループ

著者

平林 祐太*¹, 松岡 大祐*¹, 坪井 誠司*²*¹ 海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 地球情報科学技術センター データサイエンス研究グループ*² 海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 地球情報科学技術センター

キーワード：データ駆動型予測, Vision Transformer, 拡散モデル, GPU, 並列性能評価

1. はじめに

深層ニューラルネットワークを用いた機械学習である深層学習 [1]は、海洋地球科学の各分野においてもますます活用が進んでいる。特に画像の認識に特化した深層畳み込みニューラルネットワーク (CNN) や Vision Transformer (ViT)は、空間的なパターンを検出するのに優れ、同様に空間的な情報を扱う地球科学においても親和性が高い[2]。一方で、地球科学データを用いた画像認識においては、自然画像とは異なるデータの取り扱いの特殊性や独自のノウハウ等が存在する。本課題は、深層学習を用いた画像認識技術を地球科学分野に導入するとともに、地球科学データならではの課題やノウハウを整理し、分野間で共有することを目的としている。R7 年度の成果として、Vision Transformer を用いたデータ駆動型の気象予測モデル[2]と、GPU の性能評価について紹介する。

2. データ駆動型領域気象予測モデル

近年、データ駆動型気象予測モデルは高い予測精度と計算コスト削減の両立が期待され注目を集めている。しかし、多くのモデルはメソスケールに重要な微細構造や極端現象の強度を過小評価する傾向があった[3]。画像生成 AI の一種である拡散モデルは、確率分布を学習することで高周波成分をもつ構造の再現に適しており、この課題を克服する手法として有望である。そこで本研究では、

ViT と拡散モデルを用いアンサンブル気象予測モデルによってメソスケールの予測性能を検証した。

本研究で構築したデータ駆動型予測モデルの構成図を図 1 に示す。ViT の一種である Swin-Unet を用いて 6 時間先の気象場を予測する **Predictor** と、予測結果に対して高周波成分の欠落を補間する拡散モデルベースの **Corrector** から構成される。決定論的予測結果に対して複数の異なるノイズを与えたデータを **Corrector** への入力として与えることで、アンサンブルを生成することができる。ここで両モデルは独立に学習され、拡散モデルは真値データのみから確率分布を学習するため、決定論モデルを更新しても再学習を必要としない。そのため、GraphCast や FourCastNet 等の異なるモデルと組み合わせることも可能である。モデル構築のための学習および評価には RCDSJRA-55 (5 km 格子) を用いた。

豪雨事例を対象とした解析では、拡散モデルを組み込んだ予測が、決定論モデル単独よりも高い空間スペクトルの構造が再現された他 (図 2)、最大降水強度や水蒸気収束構造をより現実的に再現した。FSS 解析では、特に 20-30 mm/h 以上の強い降水において、大きな空間スケールで

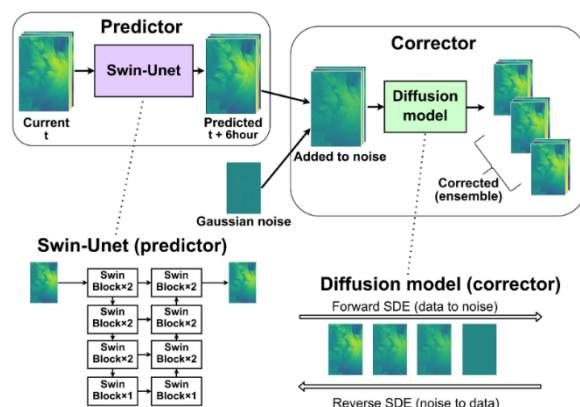


図 1. Vision Transformer と拡散モデルを用いた予測モデルの構成図 ([1]より転載)。

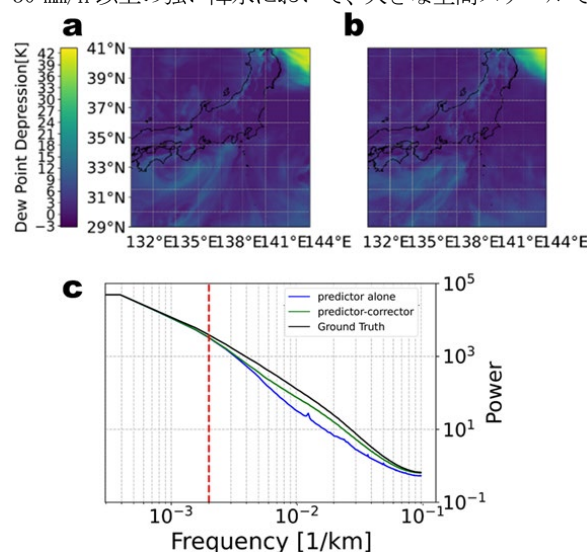


図 2. 850hPa における湿数の(a)真値、(b)predictor-corrector による予測結果、(c)空間スペクトルの比較 ([1]より改編して転載)

予測精度が向上し、100 km スケールでは約 24%の改善が確認された。また、風速や露点温度差など下層大気変数では、高周波成分が回復し、パワースペクトルが真値に近づいた。一方で、RMSE の改善は一部の変数に限定され、位置ずれによるダブルペナルティの影響も示唆された。総じて、本手法はメソスケール現象の表現力を高めつつ、高いモデル柔軟性を維持できることが示された。

3. ES4GPU の性能比較について

ES4 に搭載されている GPGPU (NVIDIA A100) のストロングスケーリングを、GPU ノード内で処理した場合とノードを超えて GPU 数を増やした場合とで、スペクトル要素法による理論地震波形計算用のコードである `specfem3d_globe` を用いて評価した。`specfem3d_globe` は v8.1 を使用し、GPU に対しては CUDA により最適化がなされている。`specfem3d_globe` では、全球をメッシュに分割する際の NEX というパラメタがあり、ここでは、理論地震波形計算の精度が地震波の周期 34 秒に対応する $NEX=128$ の場合について、6MPI プロセスの並列計算を flat MPI で GPU ノード内の 6GPU で計算した場合と、24 MPI プロセスの並列計算を flat MPI で 3GPU ノードの 24GPU を用いて実行時間を比較した。まず 6GPU の場合、1GPU ノードを用いジョブスクリプトで

```
#PBS -b 1
#PBS -custom gpusetnum-lhost=6
mpirun -np 6 ./bin/xspecfem3D
```

等として実行したところ 10 分間の理論地震波形記録を計算するために 18.88 秒の計算時間を要した。次に 24GPU の場合は 3GPU ノードを用いて

```
#PBS -b 3
#PBS -custom gpusetnum-lhost=8
mpirun -np 24 -map-by ppr:2:numa ./bin/xspecfem3D
```

と指定した。ES4 の GPU ノードでは 1 ノード内に 64 コア CPU が 2 台、GPU が 8 台搭載されており、NUMA 構成は 1CPU が 2NUMA ノードで、GPU ノード当たり 4NUMA ノードとなっている。上記の実行時の設定では、NUMA あたり 2MPI プロセスを割り当て、GPU ノード当たり 8MPI プロセスが割り当てられる。この場合の 10 分間の理論地震波形記録を計算するための計算時間は約 6.35 秒となった。したがって、10 分間の理論地震波形記録を計算するために、6GPU では 18.88 秒、24GPU では 6.35 秒となり、24GPU が 2.97 倍速い。GPU 数は 4 倍なので、十分とは言えないもののスケーリング効果が表れていることが分かる。ノード間は Infiniband により接続されており、ノード間の接続がノード内と比べると遅いことが現れている可能性がある。また、NUMA あたりの CPU コアの配置を明示的に指定することができるので、

```
mpirun -np 24 -map-by
    ppr:2:numa:PE=16 ./bin/xspecfem3D
```

として、NUMA (32 コア) に割り当てた 2 プロセスをコア 0 ~15 と 16~31 に配置して実行性能が向上するかを調べてみた。その結果、計算時間は 6.285 ± 0.024 秒となり、

配置を明示的に指定しない場合との性能向上は約 1%で、大きな性能向上は得られなかった。GPU を用いた HPC システムではストロングスケーリングは並列度を大きくするにつれ悪くなる傾向があることが知られており [4]、大規模並列計算を効率よく行うために工夫が必要となることを示している。

なお、参考までに CPU ノードを用いて 1 コアに 1MPI プロセスを割り当てて同じ規模の問題を計算した場合は、96MPI プロセスが 13738.76 秒、384MPI プロセスが 3574.63 秒となり、ストロングスケーリングは約 3.84 倍とほぼ理論値に近い値が得られた。

謝辞

本研究は、JST ムーンショット型研究開発事業 (JPMJMS2389-02-1) および JSPS 科学研究費補助金 (JP22H01316) の支援を受けて実施した。

文献

- [1] Krizhevsky, A., Sutskever, I., Hinton, G. E., “ImageNet classification with deep convolutional neural networks”, Proceedings in Neural Information Processing Systems (NIPS), December 2012
- [2] Bi, K., Xie, L., Zhang, H., Chen, X., Gu, X., Tian, Q., “Accurate medium-range global weather forecasting with 3D neural networks”, Nature 619, 533-538, 2023
- [3] Hirabayashi, Y., Matsuoka, D., “Data-driven Mesoscale Weather Forecasting Combining Swin-Unet and Diffusion Models”, SOLA 21, 516-524, 2025
- [4] Vincent, J. et al., Strong Scaling of OpenACC enabled Nek5000 on several GPU based HPC systems, Proceedings in HPCAsia2022, 94-102, 2022