



2024年8月18日  
第75回東京支部例会

# 機械学習GraphCastと気象予報の将来

日本気象予報士会東京支部

田家 康 (No.3365)

山崎秀樹 (No.9942)



## 全体の構成

I : 気象予報と機械学習 (田家)

II : Lam論文について (山崎)

III : ECMWFの数値予報 (HRES) とGraphCast

IV : Discussion

- 田家
- 山崎



# I . 気象予報と機械学習(田家)



# 気象予報と機械学習 (AI) は新しいテーマではない

## 現在のガイダンスで用いられている手法

### 逐次学習

- 入出力関係の変化 (モデル変更、季節変化等) に対応可能
- 予測特性が変化、不適切な変化が起きる可能性、開発運用のコスト大

### ニューラルネットワーク

- 降雪量、日照率、最小湿度など

説明変数と目的変数の複雑な関係にも対応できるが、ブラックボックス

### カルマンフィルタ

- 気温、風、降水量など

入出力関係が変わるものに対し学習が早い (学習速度はパラメータの設定や現象の頻度に依存)

### ロジスティック回帰

- 発雷確率、乱気流指数、ガスト発生確率など

確率に利用、開発が容易

### 線形重回帰

- 24時間最大降水量など

開発が容易

### 診断手法

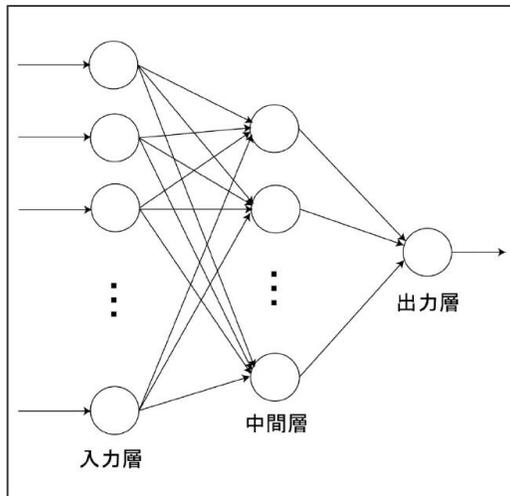
- 視程 (格子形式)、着氷指数など

過去の研究や目的変数の定義に基づき予測式を作成

※ ロジスティック回帰と線形重回帰は逐次学習型としても利用可能、ニューラルネットワークは係数固定型としても利用可能。

気象庁

気象庁 Japan Meteorological Agency



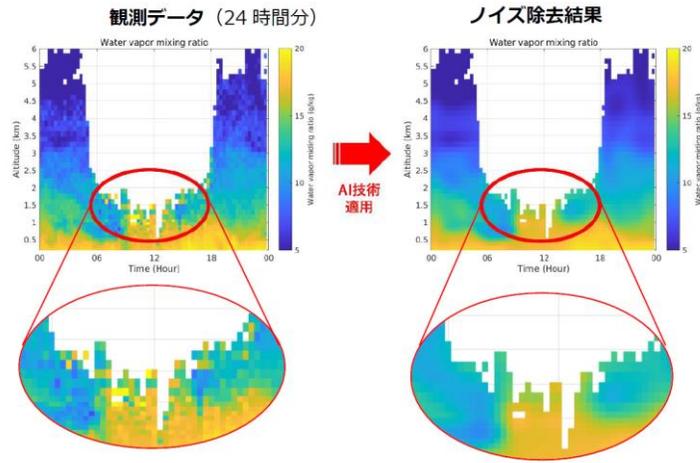
## ニューラルネットワークの手法の中の誤差逆伝播学習法:

- 出力との誤差が少なくなるよう係数を調整するもの。
- 計算ではGPUが威力を発揮。

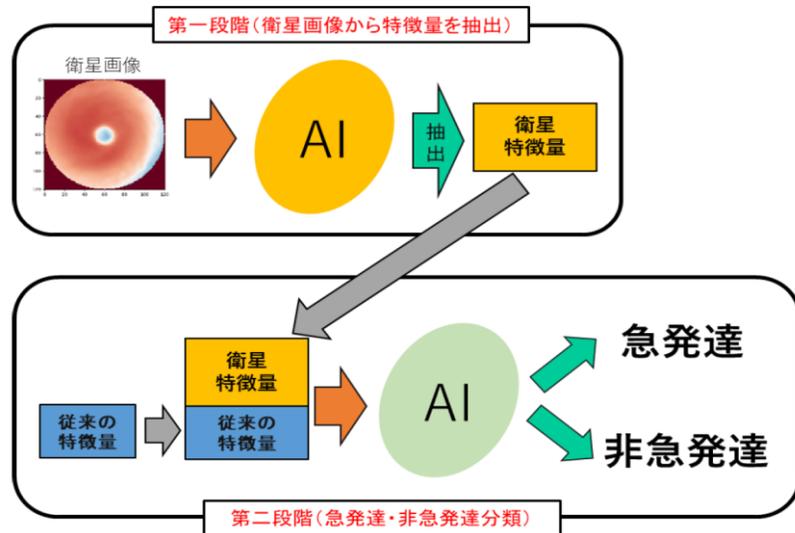
- 30年以上前から、ガイダンスで用いられてきた。
  - 現在の気象庁のガイダンス (ガイダンス基礎編より)
    - ニューラルネットワーク、カルマンフィルタ、ロジスティック回帰、線形重回帰、および診断法
    - ニューラルネットワーク: 神経細胞 (ニューロン) 機能の一部をモデル化した機械学習アルゴリズム。
    - 入力値 (説明変数) と出力値 (目的変数) の関係が非線形である場合にも適用できる。
  - ディープラーニング (深層学習)
    - 現在の AI に利用されているディープニューラルネットワークは、中間層を多層化したもの。
    - 気象庁でのディープラーニング研究: 2023年6月
      - 「気温観測データの品質管理・解析に AI 技術を活用する研究を進め、様々な気象データや標高などの土地情報から、AI (ディープラーニング) により全国 1km メッシュの現在の気温の値を推定する技術 (図 1) を開発した」
- [https://www.jma.go.jp/jma/press/2306/30b/20230630\\_ai.pdf](https://www.jma.go.jp/jma/press/2306/30b/20230630_ai.pdf)  
一般社団法人 日本気象予報士会



# 機械学習 (AI) の用途の拡大



- 関山剛 (気象研究所) 「大気科学におけるAIの利用方法」
- **パターン認識**
  - 畳み込み技術が画像処理にとっても向いているから。大気科学データの多くは画像とし30年以上前から、ガイダンスで実装。
  - 画像パターン認識であり、画面に写っているものとそのタイプの分類について、AI が時に人間を超える精度で判断する。
  - 川下側のガイダンスから、現状は川上側の衛星観測データのリモートセンシングへと展開している。
- **パターン予測 (機械学習による将来予測)**
  - 深層学習は文章や画像、あるいは何らかの数値を (過去の情報に基づいて) 新たに生成することも得意である。
  - 「機械学習のみを使った天気予報：物理学を一切知らなくてもビッグデータとAI の組み合わせだけで天気予報ができる時代が来るかもしれない」
  - 数値シミュレーションモデルの補助：スーパーコンピュータを必要の物理方程式計算の一部をAI が要領よく (=極めて短い計算時間で) 肩代わり。



気象庁(2023)気象観測・予測へのAI技術の活用に向けた共同研究の成果について



# 2022年後半以降の急速な状況変化

ECMWF-ESA Workshop on Machine Learning for Earth Observation and Prediction

Monday, 14 November

Time	Activity	Speaker	Duration
09:30 → 10:30	Registration		1h
10:30 → 10:40	Opening	Speaker: Massimo Bonavita (ECMWF)	10m
10:40 → 10:50	Welcome and introduction - ECMWF	Speaker: Andy Brown (ECMWF)	10m
10:50 → 11:00	Welcome and introduction - ESA	Speaker: Rochelle Schneider (ESA Φ-lab)	10m

ECMWF-ESA Workshop on Machine Learning for Earth Observation and Prediction

プレゼン資料はダウンロード可能です。

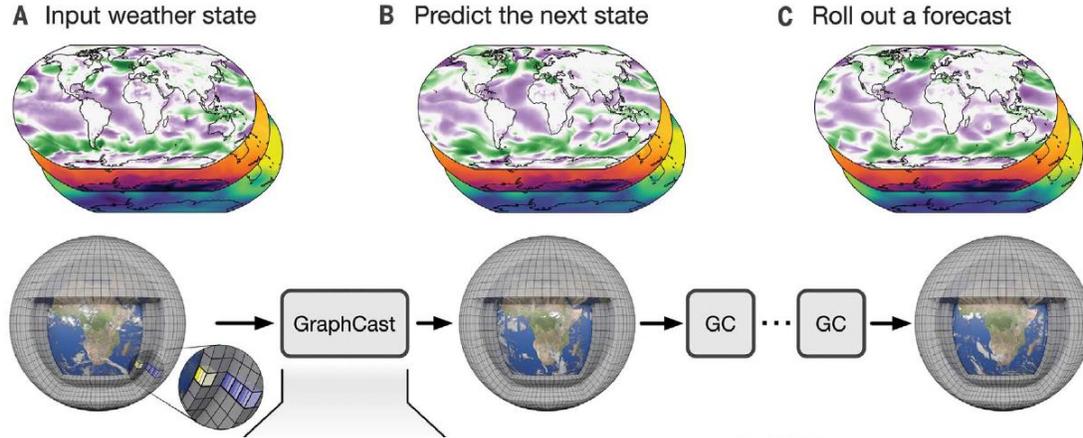
<https://events.ecmwf.int/event/304/timetable/>

- ECMWFではAI活用の計画書を2021年に策定
  - 2022 年内にAI の利用を促進するための技術基盤
  - 2023 年内に現業アプリケーションの一部をAI に置き換え。
  - 2024 年にAI 計算用のスパコンを調達する
  - 2025 年内にAI による予報モデルの高速化技術を導入。
- 2022年後半、幾つかの研究チームが物理数値シミュレーションモデルを使わず完全にAIだけでECMWFを超える精度の天気予報に成功したと報告。
  - 旧来の気象予報機関ではなく巨大IT 企業や中国の大学に所属していることが特徴（関山剛（気象研究所）「大気科学におけるAIの利用方法」）
- 現在でも、ECMWFで積極的にワークショップの開催を実施
  - 数カ月に一度開催。トレーニングプログラムも用意。

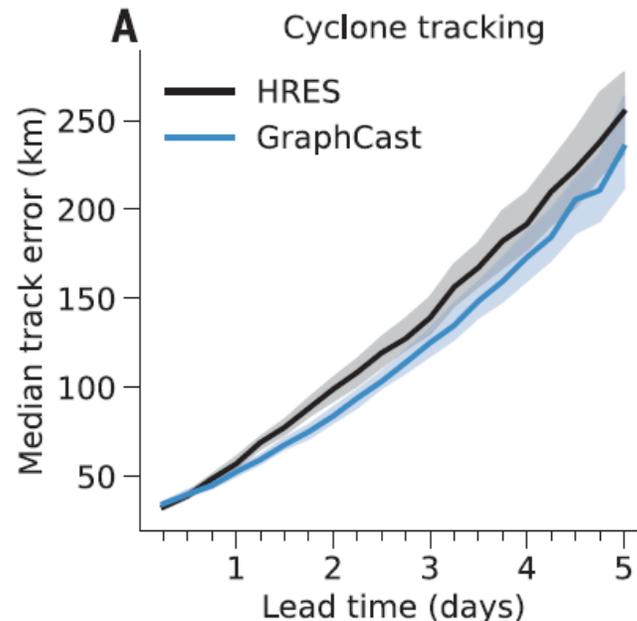
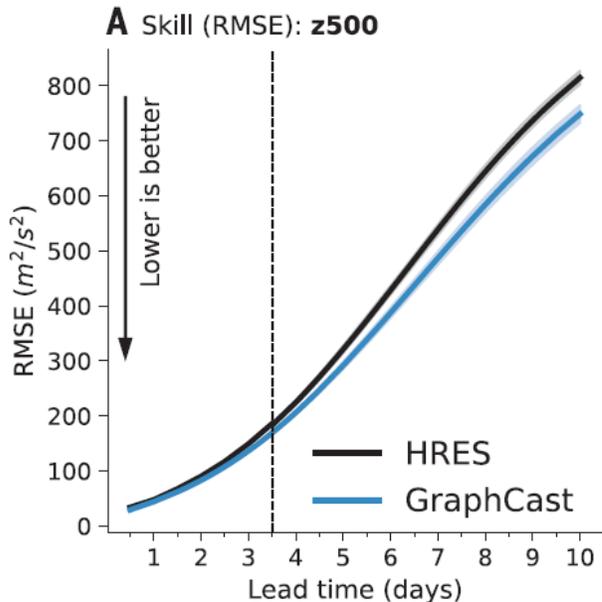
一般社団法人 **日本気象予報士会**



# 機械学習による10日間予報



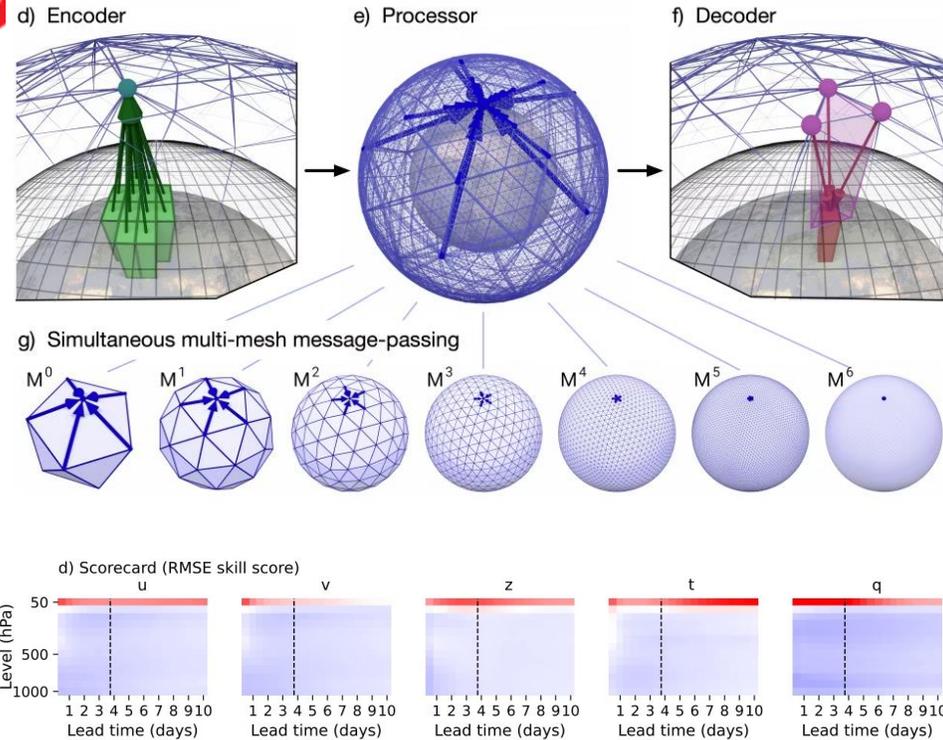
- Lam (2023) 論文：詳細は山崎のパート
- GraphCastの中期予報（10日間予報）
  - GNNを用い、および6時間前の天気図について、1979年以降40年以上の再解析データによる機械学習だけで予測するもの。
  - 数値予報モデルは用いないためPCでも動く。
  - 1380の評価対象変数のうち90%の変数で、ECMWFの数値予報モデル（HRES）の精度を上回った。
  - AIは内挿に強く外挿に弱いとされ、異常現象の予測には不向きとされてきたが、今回の検証では「ハリケーン進路」「極端な高温や低温」といった極端現象の予報でも、ECMWFの数値予報を凌駕。
  - ECMWFではホームページ上で、GraphCastの予報結果の配信を開始。



Lam et al (2023) 一般社団法人日本気象予報士会



# GraphCastとは：某サイトの受け売りです



## ■ 数値予報モデルとGraphCastの比較

- 数値予報モデル計算量を増加させたり、モデルの改善によって精度を向上させる。
  - 計算資源の向上や、熟練の研究者によるモデル・アルゴリズム・近似のうまい方法の改善で精度が向上。
- GraphCast：過去の膨大なデータを使って精度を向上。
  - 方程式では表現できないようなパターン・スケールを捉えることができる。
  - 再解析データの期間が長ければ長いほど、精度は向上。

## ■ 技術のポイント

- モデルとしてGNNを採用。正二十面体（M0）の各面を4分割して、さらに4分割…を6回繰り返した“multi-mesh”構造を使用して学習する。
- ただし、高層の精度はHRESに劣る。
  - 数値予報は決定論的に計算するが、GraphCastでは平滑化の手法を取るためか（？）

【論文解説】「GraphCast: GNNで気象予報(概要編)」

[https://qiita.com/matsuda\\_tkm/items/3d9169c9b24adff172c0](https://qiita.com/matsuda_tkm/items/3d9169c9b24adff172c0)



## Ⅱ. Lam論文について(山崎)



# GraphCastの発表ジャーナル

Science誌のURL (6ページ、2023.12.22)

<https://www.science.org/doi/10.1126/science.adi2336>

(Lam et al, Science 382 1416-1421)



補足資料 (132ページあり、2023.12.22)

[https://www.science.org/doi/suppl/10.1126/science.adi2336/suppl\\_file/science.adi2336\\_sm.pdf](https://www.science.org/doi/suppl/10.1126/science.adi2336/suppl_file/science.adi2336_sm.pdf)



比較分析を含むアーカイブ論文  
(96ページあり、2023.12.28)

[2312.15796 \(arxiv.org\)](https://arxiv.org/abs/2312.15796)



## GenCast: Diffusion-based ensemble forecasting for medium-range weather

Ilan Price<sup>\*1</sup>, Alvaro Sanchez-Gonzalez<sup>\*1</sup>, Ferran Alet<sup>1</sup>, Timo Ewalds<sup>1</sup>, Andrew El-Kadi<sup>2</sup>, Jacklynn Stott<sup>1</sup>, Shakir Mohamed<sup>1</sup>, Peter Battaglia<sup>1</sup>, Remi Lam<sup>1</sup> and Matthew Willson<sup>1</sup>

<sup>\*</sup>Equal contributions, <sup>1</sup>Google DeepMind, <sup>2</sup>Imperial College, London

Science  
AAAS

Supplementary Materials for

Learning skillful medium-range global weather forecasting

Remi Lam *et al.*

Corresponding authors: Remi Lam, remilam@google.com; Alvaro Sanchez-Gonzalez, alvarosg@google.com; Matthew Willson, matthjw@google.com; Shakir Mohamed, shakir@google.com; Peter Battaglia, peterbattaglia@google.com

Science 382, 1416 (2023)  
DOI: 10.1126/science.adi2336

The PDF file includes:

Materials and Methods  
Supplementary Text  
Figs. S1 to S53  
Tables S1 to S4  
References

### RESEARCH

#### WEATHER FORECASTING

## Learning skillful medium-range global weather forecasting

Remi Lam<sup>1\*</sup>†, Alvaro Sanchez-Gonzalez<sup>1\*</sup>†, Matthew Willson<sup>1\*</sup>†, Peter Wirsberger<sup>1</sup>†, Meire Fortunato<sup>1</sup>†, Ferran Alet<sup>1</sup>†, Suman Ravuri<sup>1</sup>†, Timo Ewalds<sup>1</sup>, Zach Eaton-Rosen<sup>1</sup>, Weihua Hu<sup>1</sup>, Alexander Merose<sup>2</sup>, Stephan Hoyer<sup>2</sup>, George Holland<sup>1</sup>, Oriol Vinyals<sup>1</sup>, Jacklynn Stott<sup>1</sup>, Alexander Pritzel<sup>1</sup>, Shakir Mohamed<sup>1\*</sup>, Peter Battaglia<sup>1\*</sup>

Global medium-range weather forecasting is critical to decision-making across many social and economic domains. Traditional numerical weather prediction uses increased compute resources to improve forecast accuracy but does not directly use historical weather data to improve the underlying model. Here, we introduce GraphCast, a machine learning–based method trained directly from reanalysis data. It predicts hundreds of weather variables for the next 10 days at 0.25° resolution globally in under 1 minute. GraphCast significantly outperforms the most accurate operational deterministic systems on 90% of 1380 verification targets, and its forecasts support better severe event prediction, including tropical cyclone tracking, atmospheric rivers, and extreme temperatures. GraphCast is a key advance in accurate and efficient weather forecasting and helps realize the promise of machine learning for modeling complex dynamical systems.



# GraphCastのモデルについて

1. GraphCastのメッシュ：水平方向0.25° (Lam et al, Science 382 1416-1421)

Surface variables (5)	Atmospheric variables (6)	Pressure levels (37)
2-m temperature (2T)	Temperature (T)	1, 2, 3, 5, 7, 10, 20, 30, <b>50</b> , 70,
10-m u wind component (10U)	U component of wind (U)	<b>100</b> , 125, <b>150</b> , 175, <b>200</b> , 225,
10-m v wind component (10V)	V component of wind (V)	<b>250</b> , <b>300</b> , 350, <b>400</b> , 450, <b>500</b> ,
Mean sea level pressure (MSL)	Geopotential (Z)	550, <b>600</b> , 650, <b>700</b> , 750, 775,
Total precipitation (TP)	Specific humidity (Q)	800, 825, <b>850</b> , 875, 900, <b>925</b> ,
	Vertical wind speed (W)	950, 975, and <b>1000</b> hPa

2. 必要となる計算資源（各計算能力データはChatGPTにより調査）

GraphCastは、**TPU v4 (Tensor Processing Unit v4)** にて評価・運用

PC (Intel Core i7) : 1 TFLOPS (CPU) ~ 10 TFLOPS (内蔵GPUを使用時)

**TPU v4** : 275 TFLOPS、Googleが開発した機械学習に特化したプロセッサ

スパコン (気象庁) : 40 900 TFLOPS、富士通「PRIMEHPC FX1000」、ARMベースA64FX CPU

スパコン (富岳) : 442 000 TFLOPS、ARMベースのA64FX CPU、マルチコア並列処理

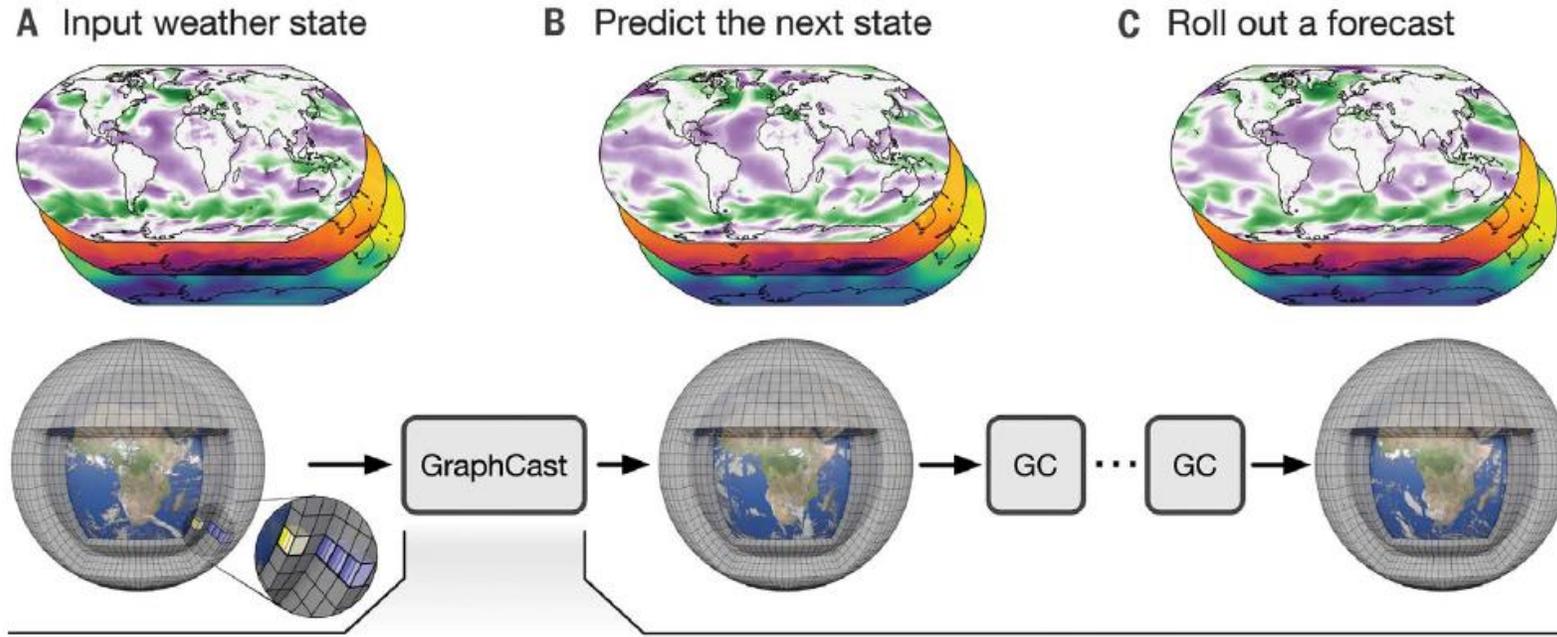
※TFLOPS、浮動小数点演算毎秒

→ GraphCastは、汎用PCでは性能不足だが、スパコンまでは不要で、TPU v4クラスで運用可能。

一般社団法人 **日本気象予報士会**



# モデル(Lam et al, Science 382 1416–1421 Fig.1より)



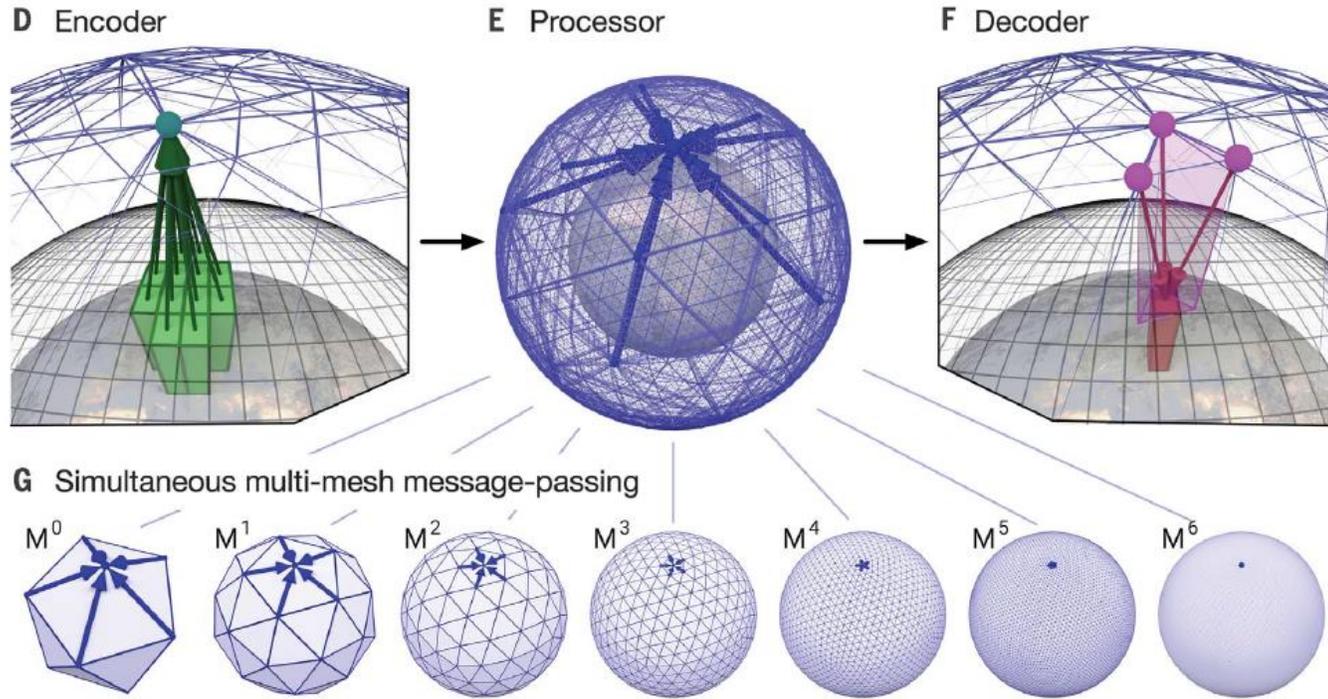
(A)入力気象状態は、合計  $721 \times 1440 = 1,038,240$  ポイントで構成される  $0.25^\circ$  緯度経度グリッドで定義されます。クローズアップポップアウトウィンドウの黄色のレイヤーは5つの表面変数を表し、青色のレイヤーは37の気圧レベルで繰り返される6つの大気変数を表します(合計で1ポイントあたり  $5 + 6 \times 37 = 227$  の変数)。その結果、235,680,480の値の状態表現が実現します。

(B)GraphCastは、グリッド上の気象の次の状態を予測します。

(C)予測は、GraphCast (GC) を以前の予測状態に繰り返し適用して、連続するリードタイムでの気象を表す一連の状態を生成することによって行われます。



# モデル(Lam et al, Science 382 1416-1421 Fig.1より) (続き)



(D) GraphCast アーキテクチャのエンコーダ コンポーネントは、入力のローカル領域 (緑のボックス) をマルチメッシュ グラフ表現のノード (緑、上向き矢印、緑青ノードで終了) にマッピングします。

(E) プロセッサ コンポーネントは、学習したメッセージ パッシングを使用して各マルチメッシュ ノードを更新します (太い青矢印、ノードで終了)。

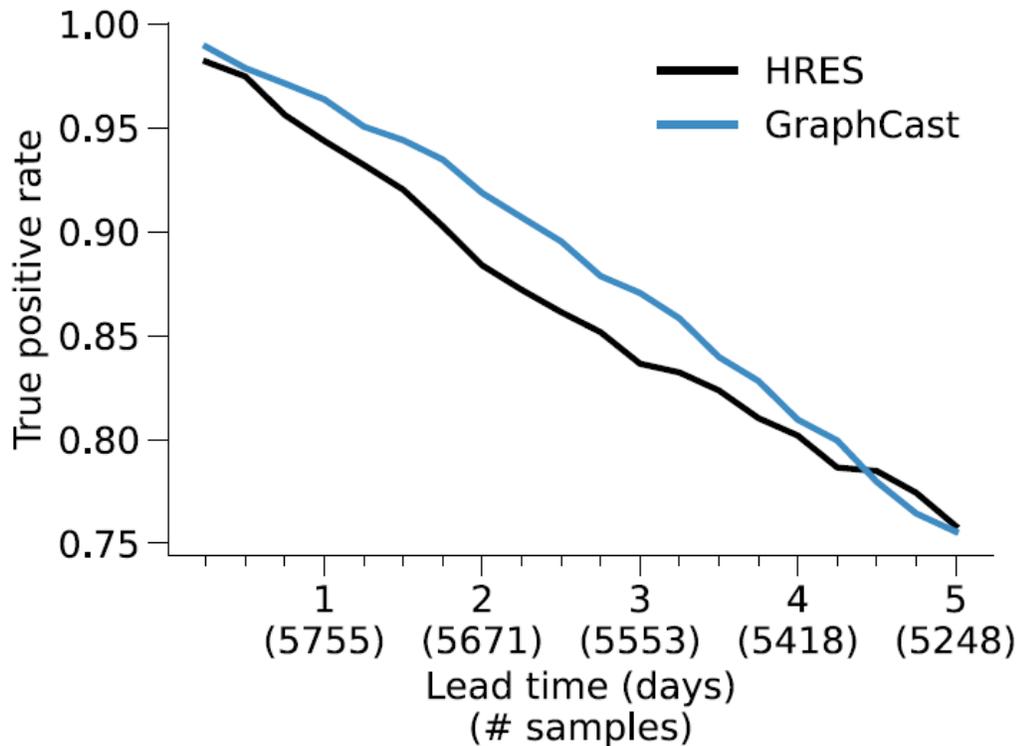
(F) デコーダ コンポーネントは、処理されたマルチメッシュ フィーチャ (紫色のノード) をグリッド表現 (赤、下向き矢印、赤ボックスで終了) にマッピングします。

(G) マルチメッシュは、ベース メッシュ ( $M_0$ 、12 ノード) から最も細かい解像度 ( $M_6$ 、40,962 ノード) まで解像度が増加する20面体メッシュから派生し、地球全体で均一な解像度を持ちます。これには、 $M_6$  のノード セットと、 $M_0$  から  $M_6$  までのすべてのエッジが含まれます。異なるメッシュのエッジを介した学習されたメッセージの受け渡しは同時に行われるため、各ノードはすべての受信エッジによって更新されます。[図の地球テクスチャは、CC BY 4.0 に基づいて使用されています。]



# GraphCastとHRES (High-Resolution Ensemble System: 高解像度アンサンブルシステム)との結果比較

(Lam et al, Supplementary Materials of Science 382 1416 (2023)より)



低気圧の予報について、HRES (High-Resolution Ensemble System : 高解像度アンサンブルシステム) に比較して GraphCastの方が True Positive Rate (TPR) <=感度、予報精度>が高い、との評価結果。

GraphCastが、有効な「**広義の統計的手法**」として期待できる可能性がある。

$$\text{True Positive Rate (TPR)} = \frac{\text{True Positives (TP)}}{\text{True Positives (TP)} + \text{False Negatives (FN)}}$$

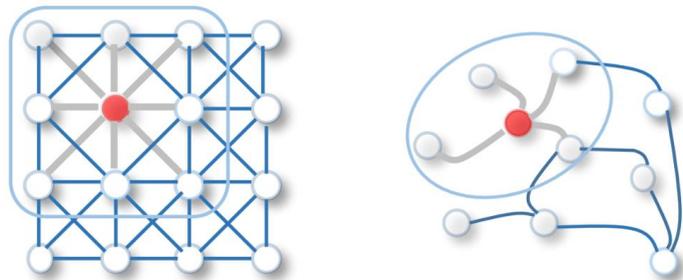
Fig. S41: True positive rate detection of cyclones (*higher is better*) GraphCast and HRES detect a comparable number of cyclones, decreasing as a function of lead time.



# GNN (Graph Neural Network) の概要

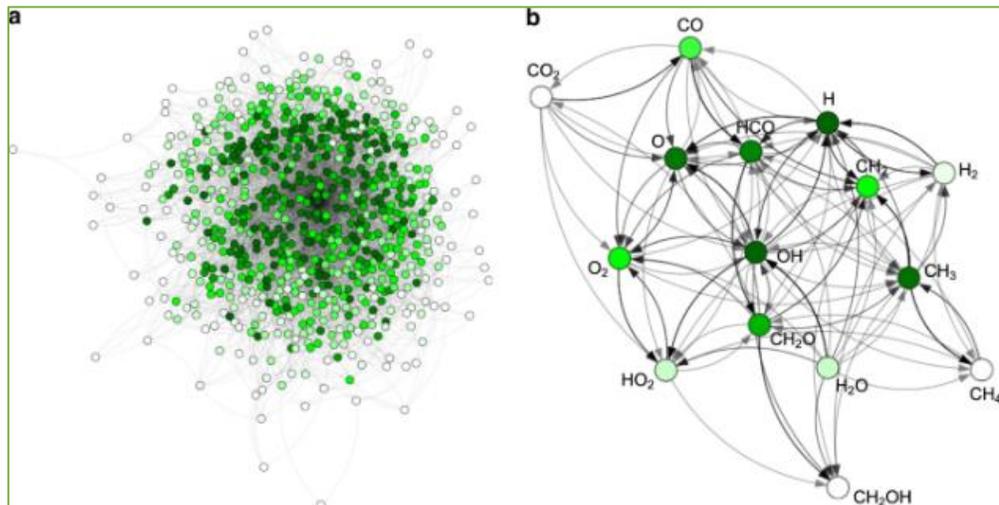
**GNN(Graph Neural Network)**: グラフデータをニューラルネットワークで扱う

- ・応用先としては、
- ・ソーシャルネットワーク
- ・交通ネットワーク
- ・リコメンドモデル
- ・タンパク質間相互関係
- ...



画像引用元: Wu, Z., Pan, S., Chen, F., Long, G., Zhang, C. and Philip, S.Y., 2020, Fig. 1

⇒物理現象、化学現象への適用が進んでおり、  
気象現象への適用に発展してきたもの。

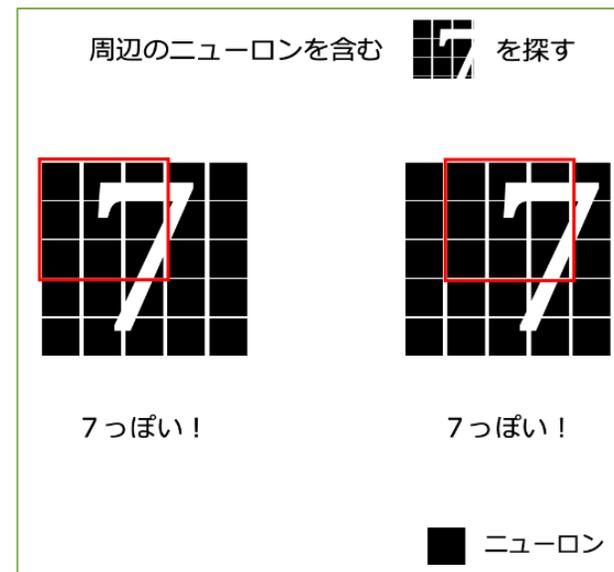


参照HP:  
<https://www.nature.com/articles/s41467-020-19267-x>

<比較>:

**CNN (Convolutional Neural Network)**

- ・畳込みニューラルネットワークと呼ばれ、周辺のニューロンの情報を取り込んでの学習を行うことが特長。
- ・顔認証などの画像分析や音声認識で非常に優れた実績がある。



参照HP: <https://hogetech.info/ml/dl/cnn>

一般社団法人 **日本気象予報士会**



# GraphCastを開発したGoogle社/Rémi LAM氏のチーム



2024年7月、Google社/Rémi LAM氏のチームは、AI 気象モデル **GraphCast** で英国王立工学アカデミーから MacRobert 賞を受賞。

Rémi LAM氏：

h-index = 12 (Google Scholar, 2024.7.13)  
2018年: マサチューセッツ工科大学でPhD取得  
2021年: Google社、Senior Research Engineer  
2022年: Google社、Senior Research Scientist  
2023年: Google社、Staff Research Scientist  
現在に至る。

出典：<https://www.linkedin.com/in/remi-lam/>

一般社団法人 日本気象予報士会

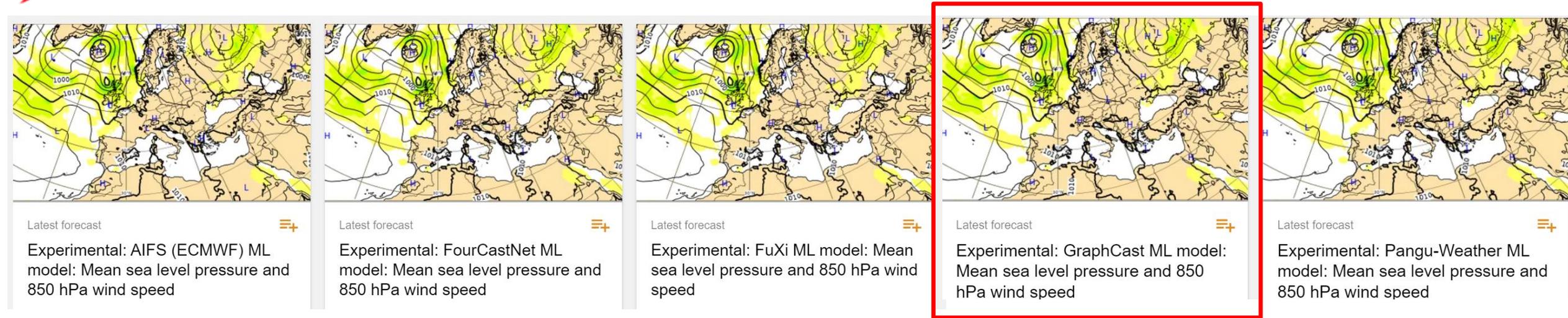


## GraphCastに関するRémi LAM氏とのQ&A

2024年1月5日に、Google社 Rémi LAM先生に質問しましたところ、大変丁寧にメール回答を頂きましたので、ご紹介します。



# Ⅲ.ECMWFでの比較 力学予報(HRES)vs.GraphCast



- ECMWFではExperimentsとして、5つのAIモデル（およびアンサンブルモデル1つを並べて掲示。  
[https://charts.ecmwf.int/catalogue/packages/ai\\_models/](https://charts.ecmwf.int/catalogue/packages/ai_models/)
  - GraphCastは5つのモデルの中の1つ（もう一つ、ECMWFでアンサンブル手法を取り入れたものがある）。
  - 某気象会社は、そのうち「マルチAIモデルアンサンブル」の予報をするかも・・・。
- HRESとほぼ同じ仕様の天気図があり、比較可能。

<https://charts.ecmwf.int/>

一般社団法人 日本気象予報士会

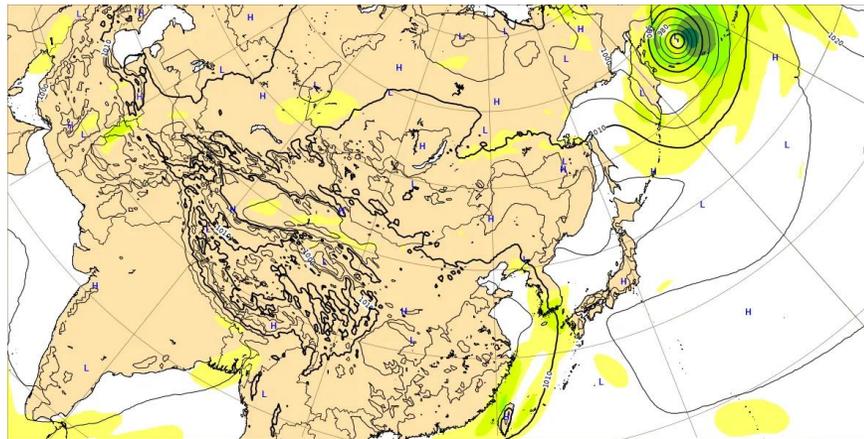
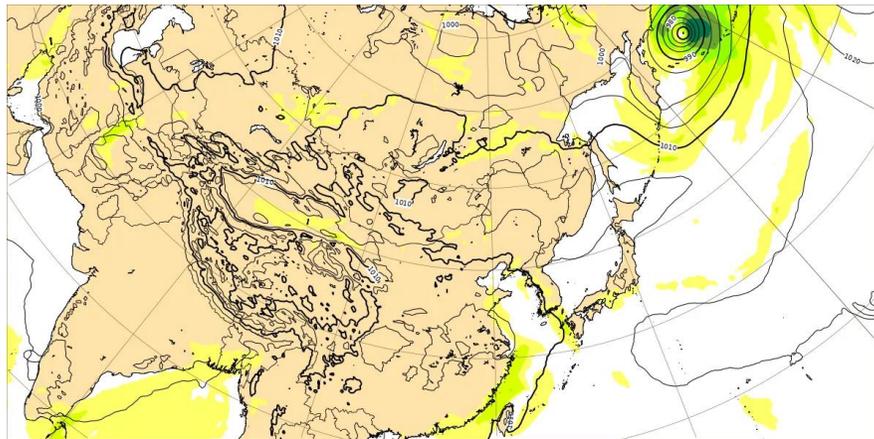
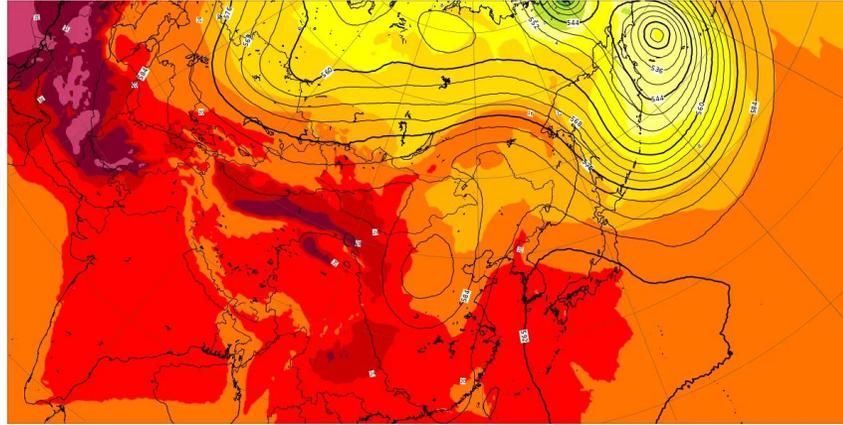
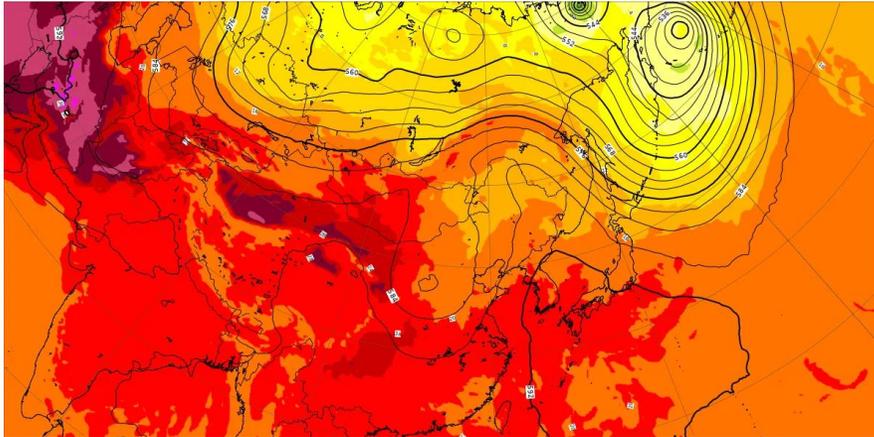


# ECMWFでの比較：数値予報(HRES)vs.GraphCast

数値予報HRES

3日後

GraphCast



- 上図：500hPa高度と850hPa気温
- 下図：海面更生気圧と850hPa風速
- 初期値：2024年8月17日12UTC、
- 予報図：2024年8月20日12UTC
- 両者とも、ほとんど変わらないが、GraphCastの方がSLPで、太平洋高気圧の本州への張り出したやや強い（500hPa高压部は変わらず）。

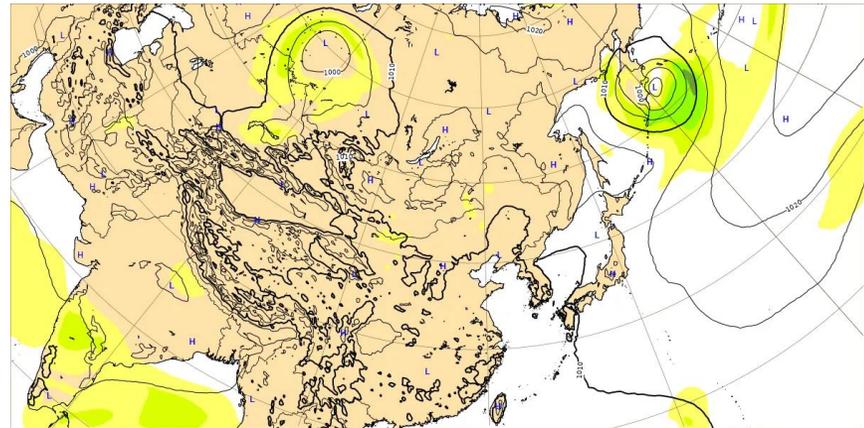
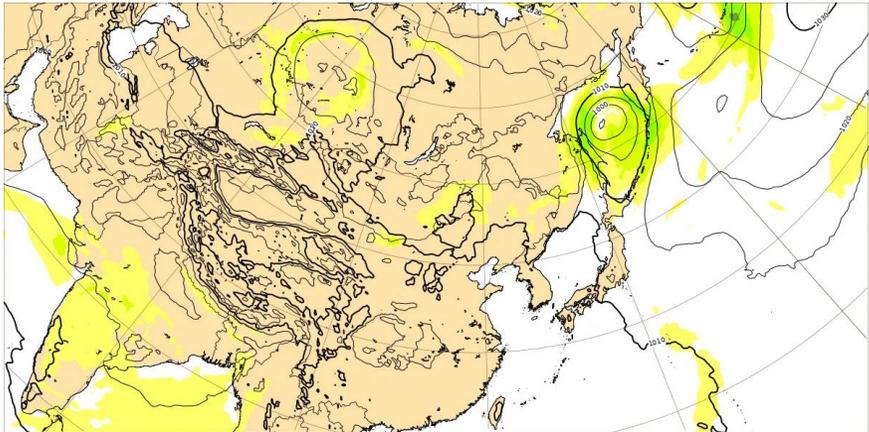
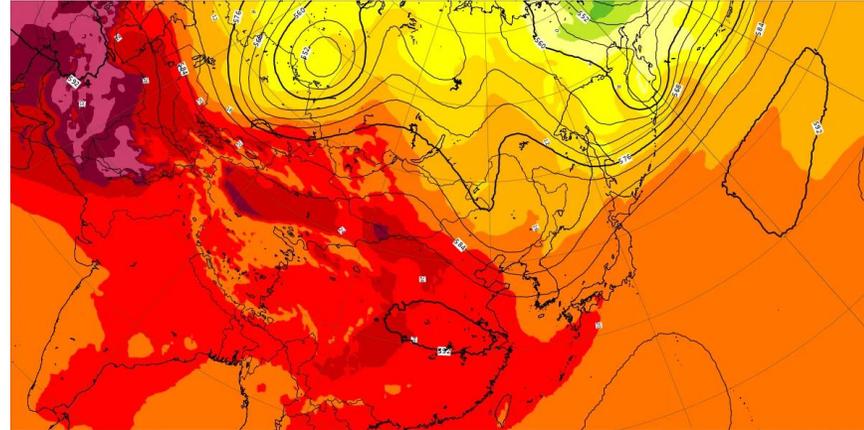
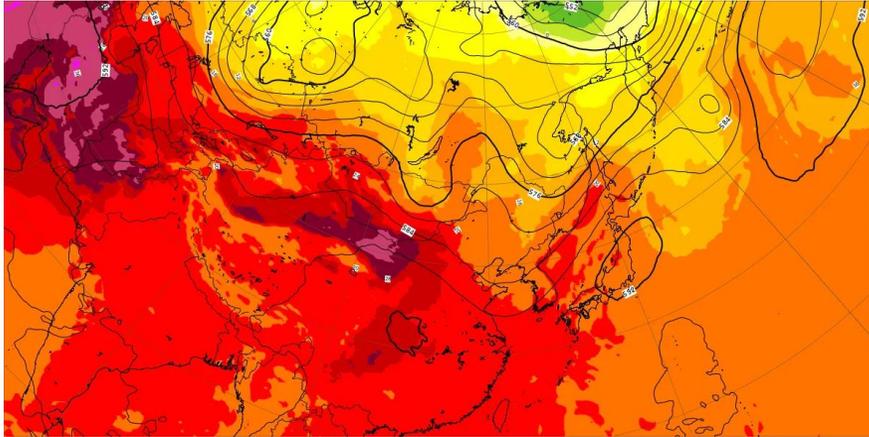


# ECMWFでの比較：数値予報(HRES)vs.GraphCast

数値予報HRES

7日後

GraphCast



- 上図：500hPa高度と850hPa気温
- 下図：海面更生気圧と850hPa風速
- 初期値：2024年8月17日12UTC、
- 予報図：2024年8月24日12UTC
- GraphCastの方が、温帯低気圧の東遷が早い。
- HRESでは、500hPaの5760mのトラフ深い。

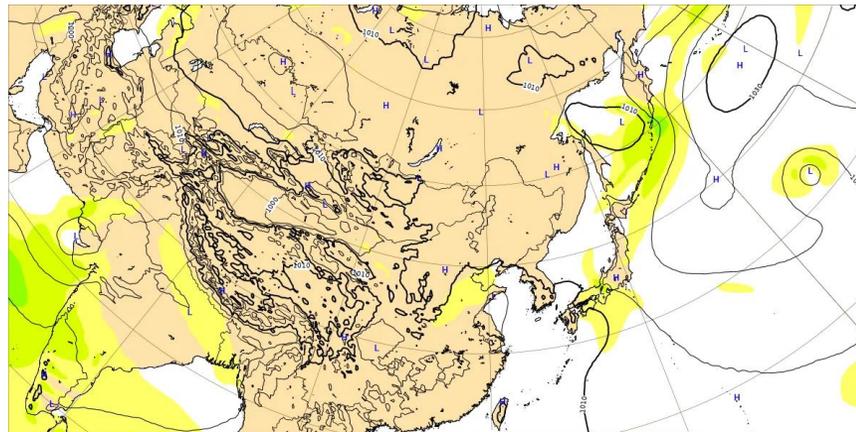
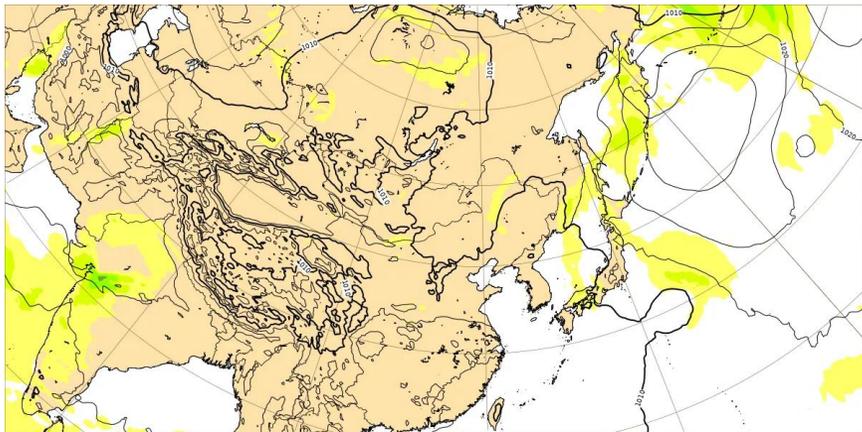
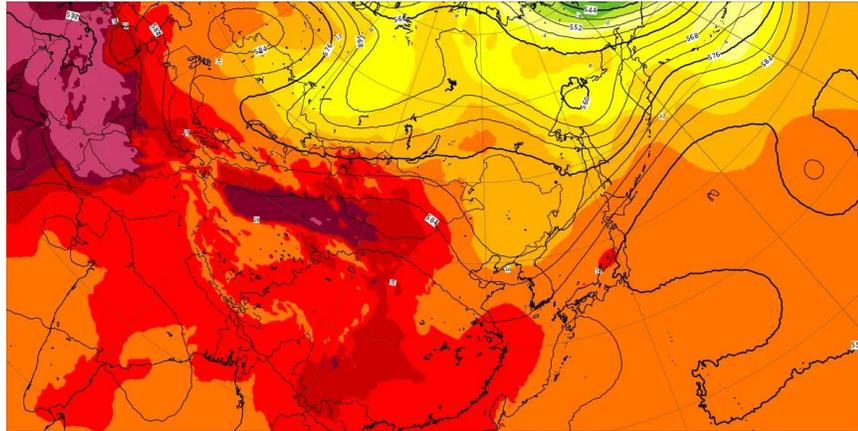
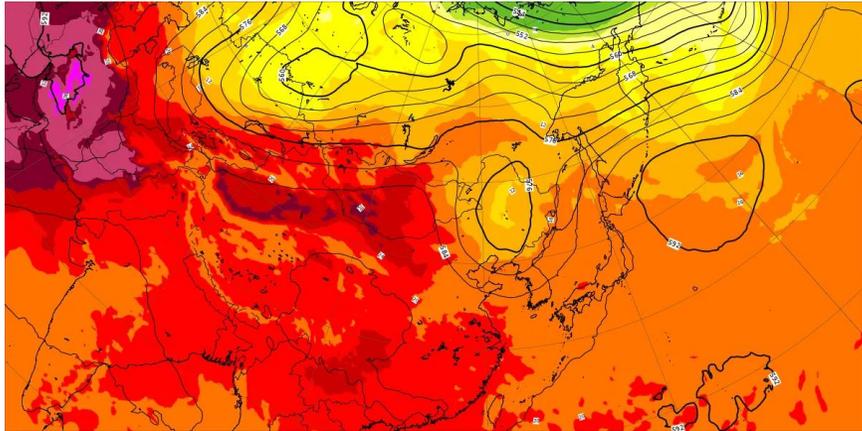


# ECMWFでの比較：数値予報(HRES)vs.GraphCast

数値予報HRES

10日後

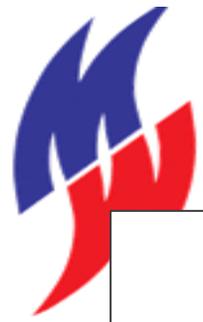
GraphCast



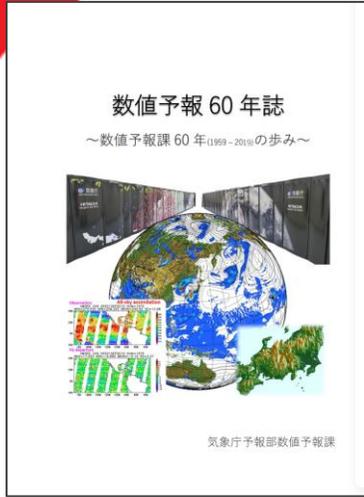
- 上図：500hPa高度と850hPa気温
- 下図：海面更生気圧と850hPa風速
- 初期値：2024年8月17日12UTC、
- 予報図：2024年8月27日12UTC
- 双方とも、500hPaの北緯40°を中心に逆位相になるが、HRESの方が顕著。



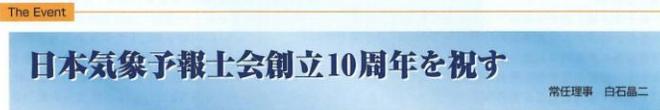
## IV. Discussion (田家・山崎)

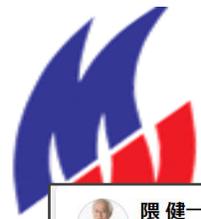


# 数値予報の時代は1980年代以降(田家)



- 大西晴夫：「A I 時代の数値予報と予報官の役割は？」
  - 私が数値予報課（電子計算室）に在籍したのは 1970 年代後半から 80 年代初めで、（中略）毎日、数値予報班から予報課の会報に出向き、数値予報の結果についての解説を行っていましたが、主任予報官からは、「はいご苦労様」の一言で終わり。後は予報官の「経験とカン」が幅を利かす時代でした。
- 永澤義嗣：『気象予報と防災』
  - 天気図に基づく天気予報の時代から、数値予報に基づく天気予報の時代への移行。当初、予報精度は十分ではなく、予報官から相手にされなかった。
- 木村龍治：「天気予報と偶然」
  - 「気象は、原子から地球規模まで、いろいろなスケールが関わった複雑な世界です。そこには、複雑系特有の構造が見られます」
  - 「コンピュータシミュレーションは、かなり、その複雑性を表現していますが、完全に、自然の再現しているわけではありません。この手法（リチャードソンの発想）には、自ずと限界があると思います」
  - 「しかし、第2のリチャードソンというような、それを克服するような別の考え方があるのかどうか、分かりません」





# 気象予報の将来(田家)

**隈健一**  
2023年11月18日 · 公開

AIでの天気予報が話題になっています。私自身、9月のECMWFの再解析セミナーをオンラインで聞いて、とうとうここまで来たのか、と強く印象を受けました。既存の数値予報を凌駕してしまったという記事が多いのですが、この記事では、ECMWFの再解析データERA5を教師データとして使っていることに触れています。

この教師データである再解析データを作成するためには、品質管理された観測データとコンピュータで天気を予測するモデル、そして、観測データから初期値解析を作成するデータ同化技術、そしてこれらを計算するための高性能のスパコンが必要です。これらの多くは、日々の天気予報の精度を上げるために、世界の気象機関が培ってきた技術と社会ニーズに応えるべき獲得してきた予算に基づくものです。

なので、AIですべてができるわけでは全くありません。ただし、気象機関は予報をせずに、ただただ良質な再解析データを作成し、さらに現在時刻まで同じ手法で解析を行えば、あとはAIで予報ができる時代になるのかもしれない。しかし果たして、再解析を行うためだけに、気象機関が膨大な予算を投じてスパコンや数値予報人材を育成確保することができるのだろうか、これが私の最大の懸念でもあります。

これまでの歴史としては、気象機関が天気予報のために磨いてきた技術、資産を活用して良質な再解析データが作成されてきているのです。

隈健一氏FBより

- 気象予報の主役交代の予感
  - 天気図予報⇒数値予報⇒機械学習予報 (?)
  - 1980年代以降の数値予報モデルが主役の座から外れるかも。
    - 2000年頃までは、プロット図による局地解析は行われていた。
  - 自前のスパコンを持たない国で導入進むだろう。
    - **リープフロッグ型発展**（「カエルが一足飛びする」）：既存の技術を経ることなくいきなり最新の技術に到達する現象。
  - **外部強制を考慮する予報**では、数値予報は残るのではないか。
    - **機械学習は内部変動を前提**にすると力を発揮するだろう。
    - 温暖化モデル（温室効果ガス）、大気海洋結合モデル（3か月以上の長期予測）、ENSO予報モデル（遅延振動子）、巨大火山噴火の影響、イベント・アトリビューション
- 隈健一氏（元気象研究所長、2023年11月東京支部例会講演者）：Facebookコメント（2023年11月18日分、公開）
  - 「気象機関は予報をせずに、ただただ良質な再解析データを作成し、さらに現在時刻まで同じ手法で解析を行えば、あとはAIで予報ができる時代になるのかもしれない」
  - 「しかし果たして、再解析を行うためだけに、気象機関が膨大な予算を投じてスパコンや数値予報人材を育成確保することができるのだろうか、これが私の最大の懸念でもある」



# 機械学習へのネガティブな意見について

- 「なぜそのような予測になったのか」の解釈が困難であるのに、防災活動に役立てていいのか。
- 機械学習は、既に気象データの4次元同化でのリモートセンシングおよび予報結果のガイダンスで実績を積んでいる。実況値以後の天気変化の予報だけを特別に考える意味はあるのだろうか。数値予報でも機械学習予報でも、“最後の判断”が人間であることは変わらない。
- 一般の人々にとって、予報図が数値予報モデルであろうと機械学習モデルであろうと、ほとんど気にならない（むしろ「AI利用」と説明した方が納得感があるかもしれない）。
- AIがパターンを見つけるには多くの似た現象の学習が必要で、滅多に起こらない極端な大雨などの確率的な「外れ値」は事例が少なく、精度よく表現することが難しい（某気象予報士のネットコラム）。
  - GraphCastは1979年以降の再解析データを用いており、45年間に相当する。異常気象（30年に一度）なり、Extreme Event（25年に一度）の頻度であれば十分対応できるし、そうした結果も出ている。
- 100年に一度の現象の予測はできないのではないか（気象予報士会の某氏）。
  - 数値予報モデルでは決定論的に100年に一度の確率の現象を示すことができるが、不確実性も大きい。機械学習による予報は学習データが積み上がっていくので、数十年経てば対応できる。
- 数値予報はなくなるのか。
  - 機械学習は実況解析に依存しており、力学的な数値モデルによる実況解析のため当面は必要不可欠。
  - 線状降水帯予報（水蒸気量の異常値監視）、台風モデル（ポーガス埋め込み）は残りそう。
  - ただし、大気海洋混合モデルなど、遠い将来は機械学習予報が威力を発揮するものもあるだろう。



# WMO会合：気象予報へのAI導入検討状況（山崎）

2024.7.18 ペルー時間9:00-11:00（UTC14:00-16:00、日本時間23:00-翌1:00）

## Machine Learning (ML)/ Artificial Intelligence (AI) in Weather Prediction

<p><b>Dr. Arlene Laing</b> WMO RA IV Focal Point on Research and Earth System Modeling (FP-RM)</p> <p>PR of the British Caribbean Territories with WMO and Coordinating Director Caribbean Meteorological Organization (<a href="http://www.cmo.org.tt">www.cmo.org.tt</a>)</p>	
<p><b>Dr. Veronique Bouchet</b> Chair of the WMO Research Board Task Team on AI</p> <p>DG - Canadian Centre for Meteorological and Environmental Prediction (CCMEP), ECCC</p>	
<p><b>Dr. Paul Roebber</b> Distinguished Prof. University of Wisconsin - Milwaukee</p> <p>Program Director, Bachelor of Science in Data Analytics and Master of Science in Data Science Director and Founder, Innovative Weather CIRA Senior Research Associate</p>	

<p><b>Dr. Mark DeMaria</b> CIRA/CSU Senior Research Scientist, Colorado State University American Meteorological Society (AMS) Fellow</p>	
<p><b>Dr. Fernando Pech</b> Researcher and professor from Superior Technological Institute of Los Rios, Tabasco, Mexico</p> <p>Member of the Topic Group AI for Flood Monitoring and Detection at the International Telecommunication Union (ITU).</p>	

2024.7.18のWMO会合資料より抜粋

一般社団法人日本気象予報士会



# WMO会合：気象予報へのAI導入検討状況（山崎）

開発者	モデル名称	特長	評価実施気象機関
NVIDIA	FourCastNet	気象予測のために開発された機械学習もでるで、高解像度予報や短・中・長期予報の実現を目指す	ECMWF
	FourCastNet Ver. 2	FourCastNetに対し気象動力学に関する物理モデリングを強化	ECMWF
Huawei Cloud	Pangu-Weather	気象予測のために開発されたAIモデルで、リアルタイムな気象予報提供を目指す	ECMWF
<b>Google Deep Mind</b>	<b>GraphCast</b>	<b>GNNの強みを活かし、気象要素間の複雑な相互関係をモデル化したディープラーニングモデル</b>	ECMWF、NOAA アメリカ国家気象局 カナダ気象センター
Microsoft	ClimaX	深層学習やトランスフォーマーモデルなどの最新のAI技術により、従来の物理ベースのモデルでは捉えにくい複雑な気象パターンを学習し・予測	NOAA アメリカ国家気象局
Shanghai Artificial Intelligence Laboratory	FengWu	気象予測のために開発されたAIベースのモデルで、大気の大気力学や気象パターンのシミュレーションに特化	中国気象局
Fudan University, Shanghai	FuXi	衛星データ、気象ステーションデータ、過去の気象パターンなどの統合による包括的な予測モデル	ECMWF
Alibaba	SwinRDM	スウィン・トランスフォーマー（Swin Transformer）アーキテクチャを使用した細かな気象パターンの認識と予測実現を目指したモデル	中国気象局 ECMWF
ECMWF	AIFS	衛星データ、地上観測データ、気象モデル出力など、さまざまな種類のデータを統合し、包括的な気象予測を目指したモデル・	ECMWF



# 〈参考〉: AI処理技術と応用先(2024年時点)(山崎)

分類	画像認識	自然言語処理 (NLP)	グラフデータ解析	生成モデル	音声処理	推奨システム
応用 処理技術	画像認識	自然言語処理 (NLP)	グラフデータ解析	生成モデル	音声処理	推奨システム
応用例	物体検出、 画像分類、 顔認識	言語翻訳、 文章生成、 感情分析	ソーシャルネット ワーク分析、化学物 質の構造解析、 気象現象予想	画像生成、 スタイル変換、 データ補完	音声合成、 音声認識	商品の推薦、 映画の推薦
使用技術	畳み込みニューラル ネットワーク (CNN)	リカレントニューラ ルネットワーク (RNN)、 変分オートエンコー ダ (VAE)	グラフニューラル ネットワーク (GNN)	敵対的生成ネット ワーク (GAN)	WaveNet、RNN	行列分解、深層協調 フィルタリング (Deep Collaborative Filtering)
具体的な 処理手法	畳み込み層 (Convolutional Layer) プーリング層 (Pooling Layer) バッチ正規化 (Batch Normalization) ドロップアウト (Dropout) 転移学習 (Transfer Learning)	長短期記憶 (LSTM) 双方向LSTM (BiLSTM) ゲート付きリカレン トユニット (GRU) 注意機構 (Attention Mechanism) トランスフォーマー (Transformer)	グラフ畳み込みネッ トワーク (GCN) グラフアテンション ネットワーク (GAT) グラフサンプリング (Graph Sampling) メッセージパッシン グ (Message Passing)	ジェネレータ (Generator) ディスクリミネータ (Discriminator) 条件付きGAN (Conditional GAN, cGAN) スタイルGAN (StyleGAN) サイクルGAN (CycleGAN)	CNNとRNNの組合せ スペクトログラム変 換 メル周波数ケプスト ラム係数 (MFCC)	行列分解 (Matrix Factorization) 自己回帰ネットワー ク (Autoencoder) 注意機構を用いた協 調フィルタリング

ChatGPT調査結果+a。ただし今後の発展によりドラスチックに変化すると予想される。



# まとめ

## まとめコメント：田家

1. 50年ほど前に「天気図予報から数値予報」へと大きな変革がありましたが、「数値予報から機械学習予報」への転換の“とば口”にいるのかもしれない。数値予報にこだわる気象予報士がいるとすると、1980年頃の天気図予報に対する予報官の思いと類似性があるかもしれません。
2. 欧米日以外の最新鋭のスーパーコンピュータを持たない国で機械学習予報の開発が進み、数値予報を凌駕していく将来があるかもしれません（リープフロッグ型発展）。
3. 数値予報を目的とした力学的モデルは機械学習の実況解析のため必要不可欠ですが、時間積分を要する等の予報の開発については、今後は予算制約を受けることになるかもしれません。

## まとめコメント：山崎

1. AI人工知能技術はここ最近10年で、主に人間相手アプリでブレイクしてきました。
2. 学習を伴う大規模データ処理技術は、気象データなどの各種応用先モデリング手法提案や新たな数学的処理テクニック発見・適用などをベースに「広義の統計的手法」として確立してくと思っています。このような状況をリチャードソン先生はどのような感想を述べられるか？きっと「面白いので、どんどん進めてください！」と言って下さりそうな気がしています。
3. 各予報士の皆様へ（最近合格された方や若手の方を含む）：それぞれ把握されている事例や調査研究内容など、例会の場で発表・共有頂けると嬉しいです。