

物理法則を取り入れた機械学習による 大気現象モデリング

神戸大学理学部惑星学科
流体地球物理学教育研究分野
中澤 恵人

目次・目的

- 機械学習とは
 - 機械学習による天気予報と気候変動予測
 - 教師あり学習を用いた大気科学の先行研究
- 機械学習の弱点について
 - 弱点を補うモデルの先行研究
- まとめ

今回の目的：自分が興味のある分野について、調べたことを伝える

機械学習(Machine Learning)について

- ◆ データからパターンや規則を学習し, 新しいデータに対して予測する
 - 経験を通じて課題の遂行能力を向上させる技術
- ◆ 種類として主に3つ存在する (次ページ図)
 - 教師あり学習(supervised learning)
 - 教師なし学習(unsupervised learning)
 - 強化学習(reinforcement learning)

機械学習の主な種類

	教師あり学習 (supervised learning)	教師なし学習 (unsupervised learning)	強化学習 (reinforcement learning)
学習法	入力データと 正解 を与え、 入力データから正解を導き出すためのパターンやルールを学習させる	入力データのみ与え、 それらのデータから特徴や構造を自動的に学習させる	環境と報酬を与え、 結果として得られる報酬を最大化するように処理を行う
用途	<ul style="list-style-type: none">分類回帰	<ul style="list-style-type: none">クラスタリング次元削減	<ul style="list-style-type: none">最適化
実用分野	<ul style="list-style-type: none">手書き文字認識スパムメール判定	<ul style="list-style-type: none">顧客への商品推薦画像データの圧縮	<ul style="list-style-type: none">ゲームAI自動運転の経路最適化
大気科学での 先行研究	天気予報や台風進路の 精度向上	異常な気象イベント発見	最適な気象観測 ネットワークの配置

教師あり学習を用いた大気科学の先行研究

参考: https://doi.org/10.11517/pjsai.JSAI2019.0_4Rin133, 吉兼 隆生, 芳村 圭, 2024

局地気象予報手法の開発

◆手法

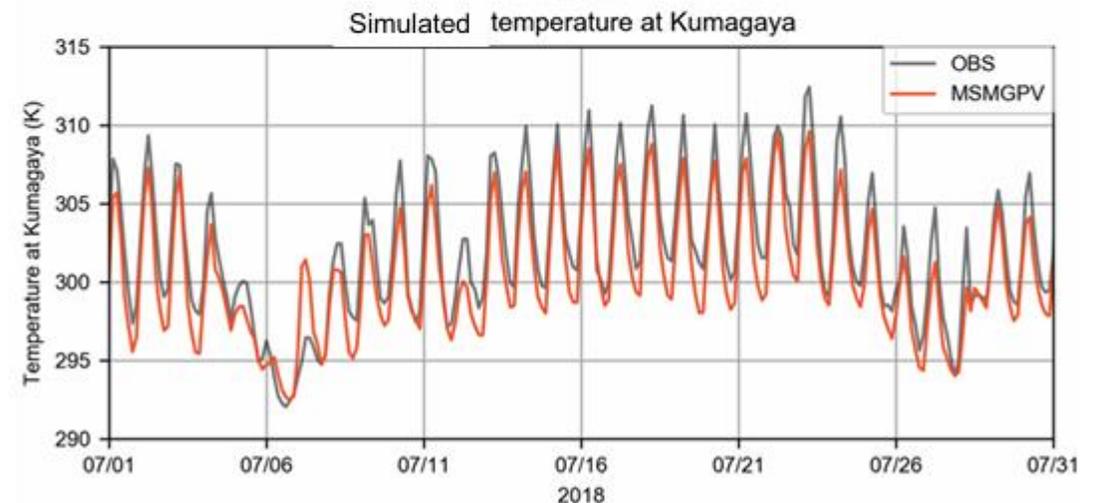
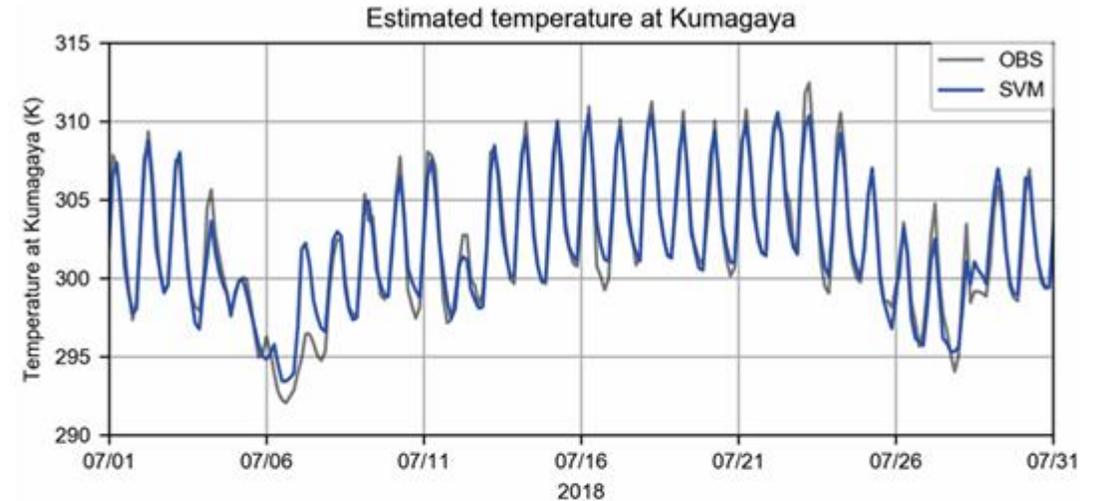
- 教師あり学習 - サポートベクターマシンの回帰モデル (SVR)

◆研究方法

- Input: 過去 8 年間の地上風, 気温
- Output: 2018 年の気温

◆結果

- 数値シミュレーション (MSMGPV) よりも機械学習 (SVM) が精度よく再現.
- 歴代最高気温の7月23日の値の再現は難しく過小評価であった.



機械学習の弱点

参照: <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-conmatphys-043024-114758>, Ching-Yao Lai et al., 2025

◆ 天気予報: 機械学習は**得意**

➤ 統計的な状態 (ex. 平均気温) を一定とみなすことができる

◆ 気候変動予測: 機械学習は**不得意**

➤ 時間スケールが大きく, 統計的な状態を一定とみなすことができない
(Ex. 1980年の年平均気温と2020年の平均気温は同じではない)

非定常性を考慮する場合については,
既存データのみを用いた機械学習だけでは予測が難しい

⇒ **支配方程式を組み込んだ機械学習モデルの開発**

物理法則を組み込んだ機械学習の先行研究

参考 : <https://openreview.net/pdf?id=xuY33XhEGR>, Yogesh et al., 2024

ClimODEモデルの開発

◆手法

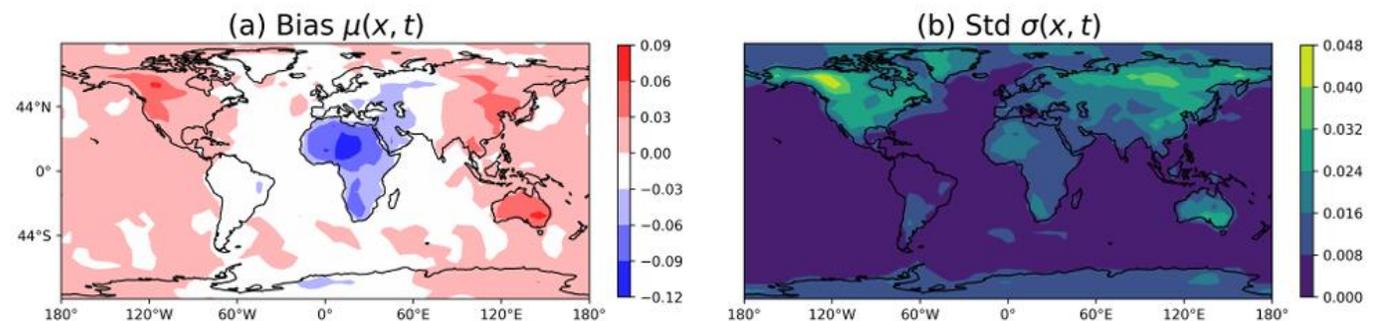
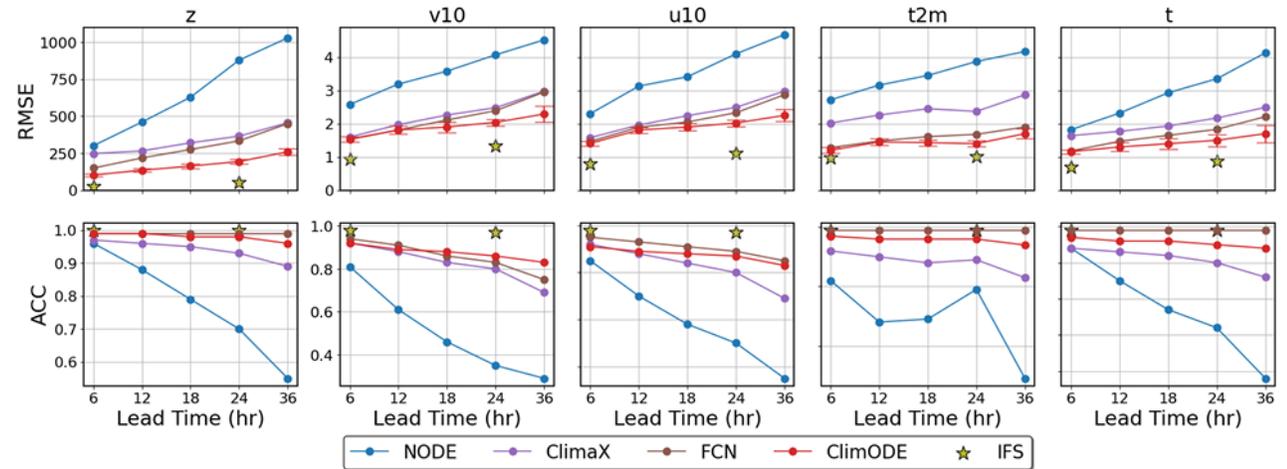
- 機械学習に連続の式を中心とした物理法則を明示的に組み込んだ, ClimODEモデルを用いたシミュレーション

◆研究方法

- 物理法則を組み込んでいないモデルとの間で, 5変数の値を, 二乗平均平方根誤差 (RMSE) と異常相関係数 (ACC) で比較
- 与えるデータは初期条件のみ.

◆結果

- RMSE, ACC とともに精度向上の値を示す
- 予測の不確実性の定量化も可能に



まとめ

- ◆ 最近の研究では機械学習を用いたモデル構築
 - ◆ 定常性があると考えた場合, 高い精度
 - ◆ 非定常性があると考えた場合, 精度が落ちる
- ◆ 物理法則を組み込んだ機械学習の開発
 - ◆ 明示的に連続の式を組み込み, 非定常性を考慮する場合も精度を向上
- ◆ これからの研究の進め方
 - ◆ エネルギー保存則等のさらなる方程式の導入?
 - ◆ ClimODEにおいて解像度を高めた場合の計算?

参考文献

- ◆ Yogesh Verma, Markus Heinonen and Vikas Garg.(2024)
“*CLIMODE: CLIMATE AND WEATHER FORECASTING WITH PHYSICS-INFORMED NEURAL ODES*”.
- ◆ Lai, C.-Y., Hassanzadeh, P., Sheshadri, A., Sonnewald, M., Ferrari, R. and Balaji, V. (2025).
Machine Learning for Climate Physics and Simulations. Annual Review of Condensed Matter Physics, 16(1), 343–365.
- ◆ 吉兼 隆生・芳村 圭 (2019).
機械学習による局地気象予報手法の開発.
一般社団法人 人工知能学会.