

クープマン作用素解析に基づく短期降雨のデータ駆動型予測

山梨大学 学生会員 Zheng Shitao
 山梨大学 正会員 宮本 崇
 防災科学技術研究所 非会員 清水 慎吾, 加藤 亮平, 下瀬 健一, 岩波 越

1. はじめに

降水予測精度の向上は気象学上の主要な課題の一つであり、気象災害の軽減の観点からも重要である。降水予測の2大手法である数値予報手法とナウキャストにおいては、それぞれスピンアップの問題のために短時間のリードタイムでは予測精度が落ちること、定常性の仮定のために雲の発達・衰弱を原理的に表現できないことといった問題があり、両手法の予測精度が落ちる30分から1時間程度のリードタイムでの降水予測精度の向上が特に大きな課題の一つと考えられている。このような背景の下で、データ駆動型手法による降水予測手法の開発が近年の潮流の一つとなっている。本研究では、降雨の予測をラグランジュ座標下での雨自身の変化と大気の移動に分離して捉え、それぞれをクープマン作用素解析とオプティカルフローを通じて予測することによって将来の降雨量を予測するデータ駆動型モデルを提案した(図1)。

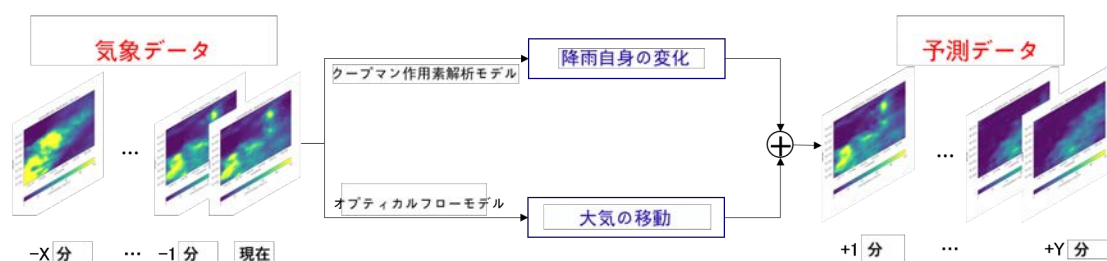


図-1 提案手法の概念図

2. 提案手法

(1) クープマン作用素解析

クープマン作用素解析は、動的な現象の観測データに基づいて、現象の支配方程式の性質の解析や現象の時間発展の予測を行うモデリング手法の1種であり、動的な物理現象に対する有用な性質を有した数理モデル・データ駆動統合型のアプローチとして近年に研究が進んでいる¹⁾。本稿では観測データ系列に対する解析手順を説明する。

ある物理現象について観測データ系列 (x_0, \dots, x_n) が得られており、任意のステップ t について x_t は未知の非線形写像 F によって次の時刻へ推移しているものとする。

$$x_{t+1} = F(x_t) \quad (1)$$

x_t に作用する任意の関数 g に対して、クープマン作用素 \mathcal{K}_F は次のように定義される。

$$\mathcal{K}_F g = g \circ F \quad (2)$$

ここで \mathcal{K}_F の固有関数 ϕ_i を用いると、式(1)から次の式が得られる。

$$g(x_{t+1}) = g(F(x_t)) = \mathcal{K}_F g(x_t) = \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i(x_t) v_i \quad (3)$$

式(3)に基づいて、 $g(x_t)$ は次のように表現できる

$$g(x_t) = \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i(x_t) v_i = \sum_{i=1}^{\infty} \mathcal{K}_F \phi_i(x_{t-1}) v_i = \dots = \sum_{i=1}^{\infty} \mathcal{K}_F^t \phi_i(x_0) v_i = \sum_{i=1}^{\infty} (\lambda_i)^t \phi_i(x_0) v_i \quad (4)$$

Key Words: 短期降水予測, データ駆動モデル, クープマン作用素解析, オプティカルフロー
 〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11

λ_i は ϕ_i に対応する \mathcal{X}_F の固有値であり、式(4)はクープマンモード分解 (Koopman mode decomposition) と呼ばれる。本研究では関数 g を恒等写像として解析する、クープマン作用素解析モデルの1つである動的モード分解²⁾(dynamic mode decomposition)を用いる。

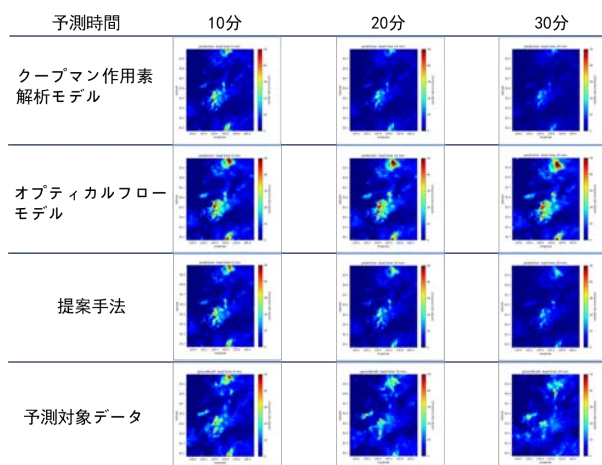
(2) オプティカルフロー

クープマン作用素解析は空間に固定されたモードの時間発展としてデータを表現するため、移流などの大域的な動きを伴う動的な現象には原理的に適用できない。そこで本研究では、降水現象を降雨自身の変化と大気の移動に分離し、前者をクープマン作用素解析モデルによって、後者をオプティカルフローによって予測した。オプティカルフローは2つのスナップショット画像からピクセル単位での速度を得るコンピュータビジョン技術の一つであり、大気の移動を解析するナウキャスト技術としても利用されている³⁾。

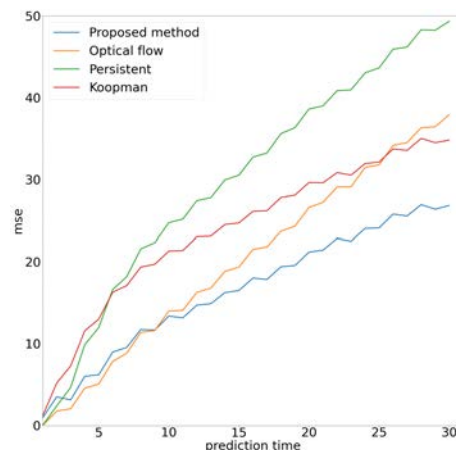
3. 解析結果

1時間単位の降雨観測データの前半30分を入力データとして提案手法による解析を行い、後半30分を予測対象のデータとしてモデルの予測値との比較を行った。精度は対象データと予測データのMSEによって評価を行い、合計45時間のデータに対する精度平均を評価した。また提案手法以外に以下の3つの予測モデルを適用し、精度を比較した。

- 持続予測モデル (Persistent): 現時刻の降雨が移動も変化もしないと仮定して将来の降雨を予測するモデル
- クープマン作用素モデル (Koopman): クープマン作用素解析のみから将来の降雨を予測するモデル
- オプティカルフローモデル (Optical flow): オプティカルフローのみから将来の降雨を予測するモデル



(a) 解析結果例



(b) モデル精度の比較

図-2 モデルの比較.

図2(a)に示すように、提案手法は予測対象データが有する降雨の衰弱と移動の両者を良く表現しており、図2(b)に示すよ精度も最も優れている定量的な結果を得た。

4. おわりに

本研究では降雨予測を降雨自身の変化と大気の移動に分離し、クープマン作用素解析とオプティカルフローを用いてこの2つを独立に解析する提案手法を開発した。提案手法を実際の観測データに適用し、その精度を検証した。

参考文献

- 1) Kutz, J. N., Proctor, J. L. and Brunton, S. L.: Applied Koopman Theory for Partial Differential Equations and Data-Driven Modeling of Spatio-Temporal Systems, Complexity, Online, 2018.
- 2) Tu, J. H., Rowley, C. W., Luchtenburg, D. M., Brunton, S. L. and Kutz, J. N.: Dynamic Mode Decomposition: Theory and Applications, Journal of Computational Dynamics, 1(2), pp.391-421, 2014.
- 3) Ayzel G, Heistermann M, Winterrath T. Optical flow models as an open benchmark for radar-based precipitation nowcasting (rainymotion v0. 1)[J]. Geoscientific Model Development, 12(4): 1387-1402, 2019,