

クープマン作用素解析と運動学的解析の混成手法による短期降水予測

山梨大学	学生会員	Zheng Shitao
山梨大学	正会員	宮本 崇
株式会社 BMC	正会員	阿部 雅人
防災科学技術研究所	非会員	清水 慎吾
防災科学技術研究所	非会員	加藤 亮平
防災科学技術研究所	非会員	岩波 越

1. はじめに

豪雨災害が頻発する我が国において、降水の予測精度を向上させることは気象災害の軽減のために重要である。降水予測の方法には、基礎方程式系を数値的に解く数値予報の手法と、降雨域の移動の運動学的な外挿に基づく手法に加え、近年では深層学習などに代表されるデータ駆動手法の適用も多く試みられている¹⁾。

降水は大気の運動や水滴の凝集過程などの物理現象に従って生じるものであり、その時間的な推移を予測する上では、基礎方程式系の性質を観測データから取得しようとするクープマン作用素解析の手法²⁾が有効に機能することが期待される。本稿では、空間的な移動を伴う動的な現象に対し、クープマン作用素解析と運動学的解析の混成による時間発展予測の手法を新たに提案し、その有効性を降水の実測データに対する適用を通して検証する。

2. クープマン作用素解析と運動学的解析の混成手法

クープマン作用素解析は、動的な現象の観測データから背後の支配方程式の性質を分析する手法である一方で、波動や雲の移流のような過渡的な現象の解析が原理的に難しかった。そこで本稿では、現象の時間発展を大域的な空間移動と状態の実質的な発展・衰弱に分解して考え、前者を運動学的に、後者をクープマン作用素解析によって予測する以下の手法を提案する³⁾。

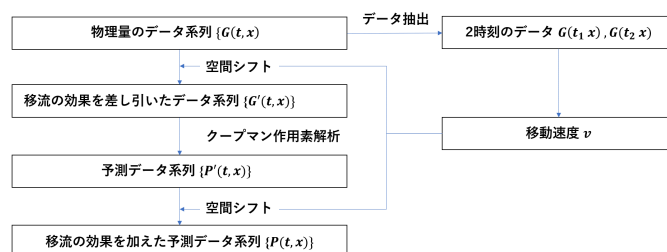


図-1 提案手法の流れ

今、時刻 t における位置 x での物理量の観測データを $G(t, x)$ とおく。このとき、2 時刻 t_1, t_2 間の物理量の平均移流速度 v を、2 時刻間の観測データの相互相関を最大化する量として次のように算出する。

$$v = \arg \max_v \sum_x G(t_1, x) \cdot G(t_2, x + v\Delta t) \quad (1)$$

where $\Delta t = t_2 - t_1$

このようにして算出した v を用いて、物理量の観測データ $G(t, x)$ から移流の効果を差し引いたデータ $G'(t, x)$ を新たに定義する。

$$G'(t, x) = G(t, x + vt) \quad (2)$$

G' のデータ系列に対してクープマン作用素解析による性質の分析と時間発展の予測を行い、得られた予測データ系列を $P'(t, x)$ とおくと、 P' に対して再び移流の効果を以下のように与えることによって、最終的な予測データ $P(t, x)$ を得ることができる。

$$P(t, x) = P'(t, x - vt) \quad (3)$$

このように、観測データに対する前処理と予測データに対する後処理を運動学的に行うことにより、過渡的な空間移動の影響を分離した物質微分としての時間発展の様子をクープマン作用素解析によって分析・予測することを試みた。以上の手続きを、図 1 に模式的に示す。

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, 運動学的解析

〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11

3. 短期降水予測への適用

提案手法の有効性を検証するために、XRAIN を構成する X バンド MP レーダーによる降水分布の時系列データに基づいて、一定時間先までの降水の推移の予測を行った。

降水予測の対象範囲を、東京湾を中心とした 25km 四方の範囲に設定した。対象領域において十分な降水が生じた 2017 年 8 月 1 日の 5:00 より 10:00 までの 5 時間の観測データを用いて、各時刻の 00 – 29 分までの観測データを元に提案手法によって 30 分先までの降水分布を予測し、実測値と比較する試行を 5 時刻分実施した。このとき、 t 分後の予測降水分布 $P(t, \mathbf{x})$ と実測の降水分布 $G(t, \mathbf{x})$ の誤差を、以下に示す正規化 MSE(Normalized MSE:NMSE) によって評価した。

$$NMSE = \frac{\sum_{\mathbf{x}} (G(t, \mathbf{x}) - P(t, \mathbf{x}))^2}{\sum_{\mathbf{x}} G(t, \mathbf{x})^2}$$

(4)

また、クープマン作用素解析のアルゴリズムにおいて観測データに作用させる非線形関数として、表-1 に示す 3 ケースを設定した。各ケースでの予測精度を、予測開始時点から降水分布が変化しないと仮定する持続予測、移流速度を用いた運動学外挿のみによる予測の 2 手法と比較した。

4. 結果と考察

図-2 は、各手法による 30 分先までの予測結果の誤差について、5 時刻に渡る平均値を示したものである。持続予測や運動学的外挿手法において生じている、リードタイムの長時間化に伴う誤差の増大が提案手法では抑えられており、大域的移流だけでは表現されない降水の時間的発達や衰弱が追従されようとしていることが分かる。また、提案手法における各ケース間で比較すると、降水分布の時間微分を利用した EDMD2 のケースがわずかながら最も良い精度を示している。時間微分の導入は、支配方程式に物理量の 2 階微分項が含まれる場合に有効であり、降水の変化もまたそのような方程式系に従うものである可能性が示唆される。

5. おわりに

本研究では、降水の時間的な変化を大域的な空間移動と状態の発展・減衰に分解し、前者を運動学的に、後者をクープマン作用素解析によって予測する手法を提案した。レーダーによる降水の実観測データに対して提案手法を適用することにより、持続予測や運動学的外挿を行う場合に比較して精度良く降水の推移を予測可能であることを示した。

降水の推移は、本来は気温や気圧、比湿などの様々な物理量と関連する現象であることから、こうした変数を計算モデルに組み込むことで予測精度の向上が期待される。また、本研究では表-1 に示した観測量関数 $\mathbf{g}$ を試行錯誤的に設定したが、降水の従う支配方程式系に関する知識に基づいて $\mathbf{g}$ を設計できる可能性がある。こうした課題に対しては支配方程式に基づく理論的な考察や、数値シミュレーションから得られる仮想的な環境下での解析的な検討など、複数のアプローチが有効と考えられる。

参考文献

1) 三好健正：気象学における AI 活用を考える，日本気象学会 2018 年度秋季大会講演予稿集，pp.357，2018.

2) 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.

3) 宮本崇, Zheng Shitao, 阿部雅人, 岩波越：クープマン作用素解析に基づく非線形動的現象のデータ駆動型解析と降水短期予測への適用，土木学会論文集 A2（応用力学），投稿中

表-1 クープマン作用素解析の計算モデル設定

ケース名	観測量関数 $\mathbf{g}$ の構成
DMD	$\mathbf{x}$ (恒等関数)
EDMD1	$\{\mathbf{x}, \mathbf{x}^2\}$
EDMD2	$\{\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}\}$

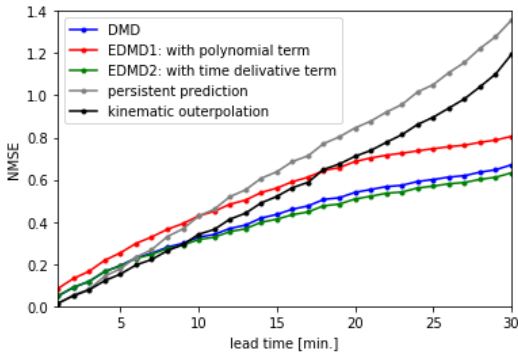


図-2 提案手法による降雨予測誤差の推移