

豪雨制御タイミング最適化問題：重点サンプリングによる最小二乗モンテカルロ法効率化

Optimization of Heavy-rain Control Timing: Efficiency Improvement of Least-Squares Monte Carlo Method via Importance Sampling

○荒木 大・西嶋一欽
 ○Dai Araki, Kazuyoshi Nishijima

Extreme rainfall events have been intensified under climate change, increasing the need for effective mitigation strategies. Cloud seeding has been proposed as a possible method for heavy-rain control. However, its effectiveness depends on uncertain atmospheric conditions, making the timing of intervention a key challenge. This study formulates heavy-rain control as a real-time decision-making problem and applies a Least-Squares Monte Carlo (LSM) approach. To improve computational efficiency in evaluating rare events, an importance sampling technique is incorporated. A simplified cloud-seeding case study shows that the proposed method achieves comparable accuracy with less than one-tenth of the simulation trials required by conventional LSM, demonstrating its potential for efficient real-time decision support (109 words).

1. はじめに

近年、地球温暖化の影響により世界各地で極端現象の発生頻度および強度が増加していることが報告されている^[1]。このような気候変動に対して、従来の防災対策に加え、気象現象そのものを制御する技術への関心が高まっている^[2]。例えば、雲にシーディング粒子を散布して降水過程に影響を与えるクラウドシーディングが挙げられる^[3]。この技術は本来、降雨促進を目的として開発された技術であるが、近年では豪雨を制御する手段としても期待されている。一方で、クラウドシーディングによる効果は大気の状態の不確実性に依存するため、「いつどこでシーディングを実施すべきか」という場所とタイミングの選択が重要となる。豪雨制御における意思決定者は、時々刻々と変化する気象条件のもと、入手可能な観測データと予測に基づいてリアルタイムに判断する必要がある。

本研究では、クラウドシーディングによる豪雨制御をリアルタイム意思決定問題と捉え、意思決定問題を解くためのアルゴリズムを開発する。

2. リアルタイム意思決定問題の定式化

豪雨制御のリアルタイム意思決定問題では、意思決定者の行動が豪雨の時間的進展に影響を与える。また、現在時刻における意思決定は、将来時点で選択できる行動を踏まえて判断するべきである。豪雨制御のリアルタイム意思決定問題は以下の式(1)に示す最大化問題において現在時刻 $t = 0$ における最適な行動を求めるに相当する^[4]。

$$\max_{a \in A_t} E[U(X; a) | e_t] \quad (t = 0, 1, \dots, T) \quad (1)$$

X は不確実な事象を表す確率変数、 $U(\cdot)$ は目的関数、 A_t は時刻 t に意思決定者が選択できる行動の集合、 e_t は時刻 t までに観測で得られた情報、 T は意思決定者が行動を選択できる最終時刻である。簡単のため式(1)では制約条件の表記を省略した。

3. 提案するアルゴリズムの効率化

式(1)で記述される期待値の最大化問題と同じ特徴を有するアメリカンオプションの価格推定に対して、Longstaff and Schwartz^[5]は最小二乗モンテカルロ法(Least-Squares Monte Carlo; LSM)を提案した。LSM は各時刻における継続価値がその時刻の資産価値にのみ依存すると仮定し、モンテカルロシミュレーションにより生成された資産価格の時系列変化のパスを用いて、最小二乗法により継続価値を回帰するという手法である。アメリカンオプションの価格推定問題では意思決定者の行動は資産価格の変化に影響を与えないが、豪雨制御の意思決定問題では意思決定者の行動が豪雨の時間的進展に影響を与える。この相違点を踏まえ、著者らの既往研究^[6]では LSM を基盤として最適な行動を導出するアルゴリズムを提案した。

しかし、通常のモンテカルロ法(Crude Monte Carlo; CMC)を用いた LSM では、確率的に希少な降雨事象を十分にサンプリングすることが難しく、高精度な期待値推定には膨大な試行回数が必要となるという課題がある。アメリカンオプションの

価格推定問題においても LSM に重点サンプリング (Importance Sampling; IS) を導入することで計算効率が向上することが報告されている^[7]。本研究では、計算効率を向上させることを目的として、著者らの既往研究^[6]で提案したアルゴリズムに IS を導入する。本研究では LSM とは独立に、IS における提案分布を決定するため、元の確率分布に従うモンテカルロシミュレーションを事前に実行する。この事前のシミュレーションの結果に従って、提案分布を特徴付けるパラメータ θ を分散最小化法^[8]により推定する。事前のシミュレーションの試行回数の増加に伴い、 θ は希少事象が生起しやすい領域を反映した値へと更新され、LSM における期待値推定の効率向上が期待される。

4. ケーススタディによる検証

3 章で述べた手法の有効性を検証するため、クラウドシーディングによる豪雨制御の意思決定問題を単純化したケーススタディを設定し、CMC を用いた LSM と IS を導入した LSM との比較を行う。本ケーススタディでは豪雨を 1 つの雨雲で表現し、雨雲および飛行機は二次元平面の x, y 座標が 0 以上 9 以下の整数の格子点上を移動する。図 1 左に雨雲および飛行機の初期状態および住宅の位置を示す。雨雲は単位時間ごとに 1 つ隣の格子点に進み、その遷移確率は図 1 中央に示す通りである。図 1 右に IS で用いる提案分布を示す。なお、雨雲の移動先の格子点の x, y 座標のいずれかが -1 以下または 10 以上の場合は、即座に雨雲が消滅するものとする。また、雨雲が住宅の上を通過した場合に被害が発生するものとする。意思決定者は任意の格子点に飛行機を移動させることができ、飛行機が雨雲と同じ格子点に到着すると 2 単位時間後に雨雲が消滅するものとする。ただし、飛行機は単位時間ごとにマンハッタン距離が高々 2 の格子点へ移動することができるものとし、飛行機を飛ばす格子点は一度決定したら変更しないものとする。雨雲による住宅の被害および飛行機を飛ばすコストをそれぞれ -1, -0.1 とし、これらの合計を結果 C とする。意思決定者の目標は、結果 C の期待値を最大化するような現在時刻 $t = 0$ における最適な行動を決定することである。LSM に用いる回帰式は、時刻 t での雨雲の座標 x_t, y_t と時刻 t 時点での結果 C の値 C_t を回帰変数とする線形重回帰モデルとする。

図 2 にケーススタディの解析結果を示す。図中の破線は正解値を示す。IS に用いた提案分布のパラメータ θ は事前のシミュレーションの試行回数

M に依存して推定され、 $M = 10^3, 10^4, 10^5$ に対しそれぞれ 0.840, 0.826, 0.822 となった。 M の増加に伴い、期待値推定における分散がより低減される θ の値が推定され、IS を導入した LSM は CMC と比較して 10% 以下の試行回数で正解値に収束した。

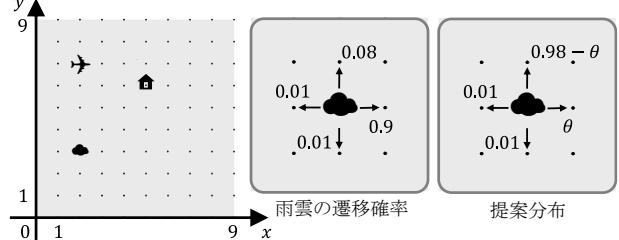


図 1 雨雲および飛行機の初期状態、住宅の位置および雨雲の遷移確率と IS における提案分布

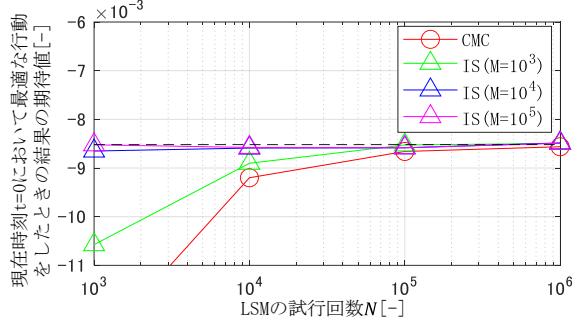


図 2 ケーススタディの解析結果

5. まとめ

本研究では豪雨制御を単純化したケーススタディを通じて、LSM における IS の有効性を検証した。

謝辞

本研究は JST ムーンショット型研究開発事業 JPMJMS2283-07 の支援を受けたものです。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- [1] 環境省. IPCC 第 6 次評価報告書 第 2 作業部回報告書 政策決定者向け要約 B. 1. 2022. <https://www.env.go.jp/earth/ipcc/6th/index.html>. (2026/01/14 参照)
- [2] 内閣府. ムーンショット目標 8 「2050 年までに激甚化しつつある台風や豪雨を制御し極端風水害の脅威から解放された安全安心な社会を実現」. 2024. <https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/sub8.html>. (2026/01/14 参照)
- [3] 佐野遼, 鈴木善晴, 西山浩司, 相馬一義. 線状対流系豪雨の抑制を目的とした Pinpoint Seeding の有効性に関する数値実験. 自然災害科学, 43, 2024, pp. 193-206.
- [4] 西嶋一欽, 李栄茂. 豪雨制御における意思決定支援システムの開発. 日本風工学会誌, No. 182, 2025, pp. 30-36.
- [5] Longstaff F, Schwartz E. Valuing American Options by Simulation Simple Least Squares Approach. Review of Financial Studies, 14, 2001, pp. 113-147.
- [6] 荒木大, 西嶋一欽. Least Squares Monte Carlo 法の拡張: 豪雨制御に関する意思決定最適化への適用に関する考察. 日本風工学会 年次研究発表会梗概集, 2025, pp. 79-80.
- [7] Boire, Francois-Michel, American Option Pricing with Importance Sampling, Journal of Risk and Financial Management, Vol. 14, No. 8, 2021, pp. 1-21.
- [8] 伏見正則, 逆瀬川浩孝. モンテカルロ法ハンドブック. 朝倉書店. 2014.