

逐次重点サンプリングを用いたデータ同化による室内空気流動の  
推定手法とその有効性評価  
Prediction of Indoor Airflow using Data Assimilation  
based on sequential Importance Sampling and Validation of the Method

細川 香音<sup>†</sup> 中村 和幸<sup>†</sup>  
Kanon Hosokawa Kazuyuki Nakamura

## 1. はじめに

新型コロナウイルス感染症の流行以降、リモートワークの普及を含む働き方の多様化が進展し、人々が室内で過ごす時間は著しく増加した。この社会的変化に伴い、快適な室内環境の構築に関する数学的・実験的検討が多方面で行われてきた[1,2]。

室内環境の快適性を決定づける要因としては、温度、照明、空間の広さ、空気の流れなどが挙げられる。これらの要因のうち、本研究では「室内空気流れ」に注目する。快適な空気流れの条件を定量的に評価することは今後の重要な研究課題であるが、その前提となる流速場の正確な把握が不可欠である。そこで本研究では、室内における流速場を高精度に予測する手法の検討を行った。

流速場全体の情報を取得する手段としては、数値流体シミュレーションの適用が考えられる。流体の数値シミュレーションでは、与えられた初期・境界条件が精密であれば、現実の流れ場を比較的高精度に再現可能である。しかし、現実の環境ではすべての条件を完全に把握することは困難であり、数値解と実施あの挙動との間に乖離が生じる可能性がある。

そこで、完全な正確性を得るために、現実世界での部分観測による数値情報を数値シミュレーションに融合することを考える。これを実現できる手法が「データ同化手法」である。

具体的には、データ同化手法の一種である粒子フィルタの枠組みに基づく逐次重点サンプリング法 (Sequential Importance Sampling; SIS) を適用する。SIS によるデータ同化では、多数の数値シミュレーション (粒子) に対して、観測値との整合性に基づいた重みづけを行い、それらの加重平均により現実に即した状態の逐次的推定を行う。

本研究では、提案手法の妥当性及び有効性を検証するため、「双子実験」を実施した。双子実験とは、真の状態として設定された数値シミュレーション結果から擬似的な観測データを生成し、当該観測データを用いてデータ同化を実施することで、推定された状態と真の状態との一致度を定量的に評価する方法である。本研究では、この双子実験を通して、提案手法による流速場の精度向上を確認した。

### 1.1 逐次重点サンプリング (SIS) とは

SIS は、データ同化に用いられるアルゴリズムの一つであり、多数の実現値 (粒子と呼ぶ) を用いて、状態の事後

確率分布を逐次的に近似する方法である。これは、特に時間発展する動的な推定問題に適しており、各時刻で観測データが得られるたびに、粒子の重みを更新して分布を構築していく。SIS は粒子フィルタの一種であるが、他の手法とは異なり、リサンプリング操作を行わず、全ての粒子の重みをそのまま逐次的に更新する点が特徴である。このため、予測ステップの再計算が不要となり、再計算に時間を要するようなモデルに対して逐次的なパラメータ推定を長期間行う場合において、計算負荷を下げることができる点で有効である[3]。

#### 1.1.1 推定値の計算過程

SIS では、ある時刻  $t$  において粒子  $i$  の重み  $w_t^{(i)}$  と、その時刻の観測値に基づく尤度  $p_t^{(i)}$  を用いて、時刻  $t+1$  における重みを以下のように更新する：

$$w_{t+1}^{(i)} = \frac{w_t^{(i)} \cdot p_t^{(i)}}{\sum_i w_t^{(i)} \cdot p_t^{(i)}}$$

尤度の実値は、次の計算式から求められる：

$$p_t^{(i)}(y_t^{(i)} | x_t^{(i)}) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{m}{2}} |\Sigma|^{\frac{1}{2}}} \prod_{j=1}^m \left( -\frac{(y_t^{(i)(j)} - (Hx_t^{(i)}(j)))^2}{2\sigma_{(j)}^2} \right)$$

ここで、 $m$  は観測点数、 $y_t$  は観測データのベクトル、 $x_t$  はシミュレーション結果のベクトル、 $H$  は  $x_t$  から観測点箇所データの取り出す単位行列、 $j$  は観測点番号、 $\sigma_{(j)}^2$  は観測点ごとの分散値である。

この操作を時刻  $t$  まで繰り返し、最終的に各粒子に対応するパラメータの加重平均をとることで、時刻  $t$  での推定値を得る[4]：

$$\hat{x}_t = \sum_i w_t^{(i)} \cdot x_t^{(i)}$$

### 1.2 数値モデル設定

モデルの概要について説明する。シミュレーションを行う部屋は、図1左の6畳ほどの部屋を想定する。部屋の中には、ベッドと棚を設置し、図1右は、窓が設置された壁面のみを取り出した図である。緑色に色付けされている箇所を窓と換気口とし、ここから風が入り出す。設置した左右の窓を通して、室外から  $0.3 \text{ m/s}$  の緩やかな風が600秒間吹き込む設定になっている。右上の換気口では空気が入り出す構造になっている。観測点は5点とし、図1の赤色の点の箇所に設置する。

行った11個のシミュレーションパターンは表1の通りである。各々、home1~home11と名前をつけ、ドアの開ける角度や窓の開く幅を変えている。

<sup>†</sup> 明治大学 Meiji University

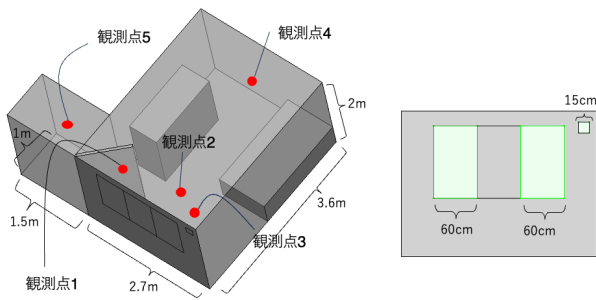


図 1 部屋の設定と、観測点の位置

表 1 シミュレーションパターン

	ドアの角度45度			ドアの角度30度	
	開いている窓の幅			開いている窓の幅	
	左窓	右窓		左窓	右窓
home1	60cm	60cm	home8	60cm	60cm
home2	60cm	30cm	home9	10cm	10cm
home3	30cm	60cm	home10	60cm	10cm
home4	10cm	10cm	home11	10cm	60cm
home5	30cm	30cm			
home6	60cm	0cm			
home7	0cm	60cm			

1.3 初期粒子の生成

本研究では、SIS に基づくデータ同化手法を用い、観測データに基づく状態の事後確率分布を多数の粒子（シミュレーション）で近似し、逐次的な状態推定を行った。

表 1 に示すシミュレーションのうち、home1 を真の状態とし、残りの home2~home11 を基準粒子として用いた。

各基準粒子にランダムな摂動（ノイズ）を加えて、10 個ずつシミュレーションを作成し、合計 110 個の初期粒子を生成した。これらの粒子を用いて、状態空間の多様性を確保しつつ、観測データとの照合により重み付けを行い、事後分布の近似に利用した。

1.4 結果

SIS における粒子ごとの重みの時間変化を図 2 に載せる。

図 2 の結果では、観測との整合性が高い一部の粒子の重みが時間と共に増加し、他の多くの粒子は重みが低下している。これより、推定結果が限られた粒子に収束している様子がみとれる。

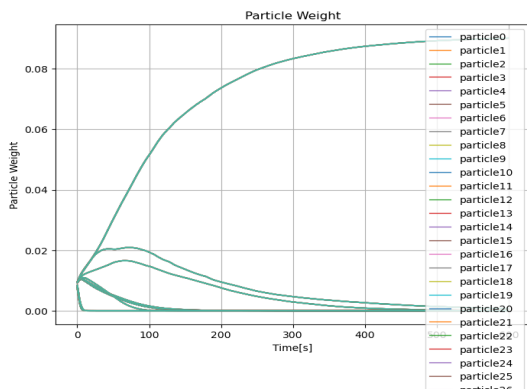


図 2 粒子ごとの重みの時間変化

図 3 には、データ同化を行う前の全粒子の平均場と真の状態との平均二乗偏差（黒色実線）、およびデータ同化後の予測値と真の状態との平均二乗偏差（赤色点線）を示した。

図より、赤線は時間と共に減少しており、データ同化によって推定精度が向上していることが分かる。一方、黒線はほぼ一定で推移しており、同化を行わない場合には精度の改善が見られないことを示されている。

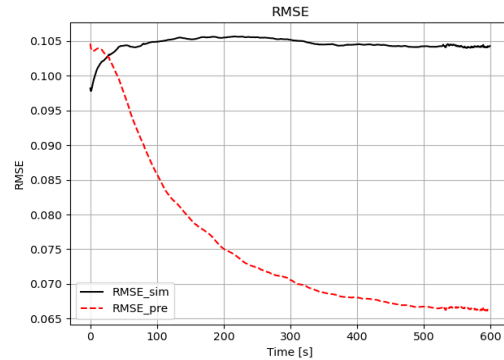


図 3 平均二乗偏差

2. おわりに

本研究では、観測データとシミュレーションを融合するデータ同化により、少数の観測データから効率的かつ高精度に室内空気流動場を推定する手法の適用可能性を検討した。特に、シミュレーション結果に擾乱を加えた複製サンプルに対し、逐次重点サンプリングを適用することで効率性と有効性を確保した。手法の有効性を検証するため双子実験を実施したところ、一定の条件下で本手法が有効であることを見出した。

今後は、より複雑な室内環境や実観測データを用いた検証に取り組むことで、現実環境への適用可能性を高めていく。また、SIS 以外のデータ同化手法との比較にも取り組む。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP23K28047 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 竹部 友久, 中川 優一, 高橋 好斗, “コロナ禍における教室の換気と室内環境に関する研究 (第 1 報) 夏季の運用実態と換気量・室内温熱環境の適正化”, 空気調和・衛生工学会 学術講演論文集, 2021.8 巻, 113-116 (2021).
- [2] 浅尾 慎一, 太田 恭志郎, 山田 雄亮, 吉田 龍, “産業技術短期大学の講義室の換気シミュレーション—第 1 報 321 講義室の室内流れ—”, 産業技術短期大学誌, Vol.55 (2022).
- [3] 樋口 知之, 上野 玄太, 中野 慎也, 中村 和幸, 吉田 亮, “データ同化入門”, 朝倉書店, 2011.
- [4] 西澤 勇祐, 三浦 弘慈, デヴィン グナワン, 五十嵐 乃愛, 曾我部 直樹, 岩前 伸幸, 玉野 慶吾, 中村 和幸, “データ同化技術を用いた橋梁の非線形地震応答モデルの精緻化”, AI・データサイエンス論文集, Vol.5, 42-52 (2024).