

離散液滴モデルとアンサンブルカルマンフィルタによる 噴霧断面計測の拡張

Augmentation of Cross-Sectional Spray Measurements by Discrete Droplet Model and Ensemble Kalman Filter

三坂孝志¹⁾, 高橋俊²⁾, 奈良祥太郎²⁾, 杉山直輝²⁾, 野原徹雄²⁾, 蔵本結樹²⁾, 川本裕樹²⁾,
小原昭²⁾, 長田莉菜²⁾, 菊池飛鳥²⁾, 落合成行²⁾, 大角和生³⁾, 石川直也³⁾

Takashi Misaka, Shun Takahashi, Shotaro Nara, Naoki Sugiyama, Tetsuo Nohara, Yuiki Kuramoto, Yuki Kawamoto,
Akira Obara, Rina Osada, Asuka Kikuchi, Masayuki Ochiai, Kazuo Osumi and Naoya Ishikawa

1) 産業技術総合研究所 (〒135-0064 東京都江東区青海2-3-26)

2) 東海大学 (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目4-1-1)

3) いすゞ中央研究所 (〒252-0881 神奈川県藤沢市土棚8番地)

Spray flows, which contain droplets and particles, play a crucial role in various industrial fields. This study aims to investigate an efficient and reliable approach for predicting droplet spray flow by combining the discrete droplet model (DDM) with ensemble data assimilation. Our objective is to enhance cross-sectional measurements such as particle image velocimetry (PIV) by incorporating fast DDM simulations of droplets. Specifically, we focus on conducting numerical experiments of data assimilation (also known as twin experiments) and discuss how the ensemble Kalman filter integrates cross-sectional measurements and DDM. The results showed that the droplet's position, velocity, and the spray nozzle's state are estimated by assimilating the time-averaged velocity measurements on the cross-section using a carefully prepared ensemble of droplets. Furthermore, the droplet size distribution is estimated through DDM.

Key Words : *Spray Flow, Discrete Droplet Model, Ensemble Kalman Filter*

1. はじめに

液滴や粒子を含む噴霧流は内燃機関をはじめとする様々な産業分野で利用されている。噴霧流において重要な特性として噴霧の広がりや噴霧中の液滴径分布があり、これらは気流との混合や燃焼反応に影響する。

噴霧流は液膜や液滴が相互に作用しながら気流中に分散する多相流であり、その複雑さから多くの研究が行われている。噴霧流の特性評価には粒子画像流速計 (PIV)、レーザードップラー流速計 (LDA)、平面レーザ誘起蛍光などの様々な計測技術が活用されている。数値流体力学 (CFD) としては、気相と液相にそれぞれ非圧縮ナビエ・ストークス方程式と離散液滴モデル (DDM) を適用し、噴霧現象を正確に再現するために、二次微粒化、壁面相互作用が導入されている。近年、これらのモデルは商用ソフトウェアに実装され、CFD-DDM連成解析による尿素選択触媒還元 (SCR) システム[1]やスワールインジェクタ[2]の研究なども行われている。

これら計測・数値計算ツールの成熟を受けて、それらを連携した噴霧流へのアプローチが期待される。ここでは、データ同化の枠組みで利用されるベイズの定理に基づく計測と数値シミュレーションの統合に着目する[3]。データ同化により不確かなモデルパラメータを実測データで推定したり、疎な実測データを数値モデルの予測で外挿したりするような実験と数値シミュレーションの補完関

係強化が期待される。データ同化に関する研究事例としては、風洞計測と数値シミュレーションを統合したハイブリッド風洞[4]、ライダー計測を同化した後方乱気流の予測[5]、粒子追跡速度計測法 (PTV) と直接数値シミュレーションの融合[6]などが挙げられる。

本稿では高速で信頼性の高い噴霧流予測を実現するために、DDM解析とアンサンブルカルマンフィルタ (EnKF) によるDDM-EnKFデータ同化を検討する。これにより、液滴の高速DDM解析を用いた断面計測の拡張を目指す。特にPIVのような断面計測とDDM解析をアンサンブルベースのデータ同化手法によってどのように統合できるかを、DDM解析から得られる疑似的な計測値を用いたデータ同化の数値実験 (双子実験) によって議論する。

2. DDM-EnKFデータ同化手法

本研究ではPIVのような断面計測とDDMの粒子シミュレーションを融合するようなデータ同化を検討するために、事前に特定の条件のDDM解析によって準備された疑似的な時間平均PIV計測を利用したデータ同化の数値実験 (双子実験) を行う。双子実験では観測ノイズの分散やアンサンブルメンバーの数などのデータ同化パラメータが同化結果に与える影響を評価することができる。

データ同化の手順は以下ようになる。DDM解析結果と計測結果を比較するために、DDM解析内でPIV計測プロセスを単純化して模擬する。すなわち、PIVの想定計測

断面内の液滴を抽出し、断面上の液滴速度を平均化して擬似的な時間平均PIVを得る。この処理はデータ同化における観測モデル h_t に相当する。これにより擬似的な時間平均PIV計測を $h_t(\mathbf{x}_t)$ のようにDDM解析の変数 $\mathbf{x}_t$ から求め、実測時間平均PIV計測 $\mathbf{y}_t$ との差に基づき、EnKFによってDDM解析の不確かなパラメータを推定する。ここで変数 $\mathbf{x}_t$ および $\mathbf{y}_t$ はそれぞれ状態および観測ベクトルである。双子実験で使用する計測値は、図-1の右に示すように参照用DDM解析から生成されたものである。この参照ケースに対しては、インジェクタ諸元として噴霧量およびSauter平均径（SMD）をそれぞれ $Q_{inj} = 0.22$ [g/s]、 $d_{32} = 63.5$ [μm]を設定した。本研究では、噴霧ノズルに関するパラメータである噴霧速度や噴霧角に加えて、液滴の粒径分布を推定する。DDM解析およびEnKFの詳細については文献[7,8]を参照されたい。

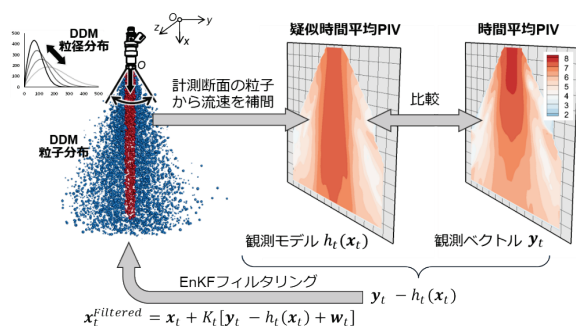


図-1 DDM-EnKFデータ同化の模式図

EnKFでは限られた数のアンサンブルメンバーによって予測状態のガウス分布を規定する平均と分散を近似的に計算する。各アンサンブルメンバーはある条件のDDM解析の1ケースに対応する。EnKFが扱う状態ベクトル $\mathbf{x}_t^m$ は以下のように定義される。まず、各液滴は位置、速度、粒径の情報を持つ。 N_p はDDM解析1ケースで考慮される粒子数である。一方、各DDM解析は直交格子（ $i_{max} \times j_{max} \times k_{max}$ ）で保持される背景気体速度およびノズル条件（噴霧速度と噴霧角パラメータ）の情報を持つ。これらの情報がアンサンブルメンバー数 M だけ必要になる。以上より、状態ベクトルの定義は図-2のようになる。状態ベクトル $\mathbf{x}_t^m$ は標準的なEnKFアルゴリズムによって計測値に基づき更新される[7]。

$$\text{状態ベクトル } \mathbf{x}_t^m = \left\{ \begin{array}{l} \text{粒子速度 } \mathbf{u}_p \\ \text{粒子位置 } \mathbf{x}_p \\ \text{粒径 } d_p \\ \text{背景気体速度 } \mathbf{u}_f \\ \text{噴霧速度 } u_{inj} \\ \text{角度パラメータ } a_{inj} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \text{粒子数 } N_p \\ \text{アンサンブル数 } m = 1 \sim M \end{array} \right.$$

図-2 粒子データ同化のための状態ベクトルの定義

3. データ同化の準備

EnKFによる状態ベクトルの修正方向はアンサンブルの摂動によって決まるため、推定したい量に対して適切

なアンサンブルを生成する必要がある。本事例では、噴霧速度と噴霧角が不確かであると想定して主要な推定パラメータとし、噴射速度と噴霧角パラメータに関して摂動を与える。ノズルにおける噴霧条件はその後の液滴の飛行を支配するため、アンサンブルにおける噴射条件の摂動は、飛行する液滴の位置や速度の摂動にもつながる。本DDM解析では仮想的な空間内に一定数の液滴を準備し、ノズル条件に従って噴霧する。仮想空間内の飛行前液滴が一定数以下に減ったときに、飛行中液滴の古いものからその仮想空間へと再循環させている。そのため、ノズルから噴霧する前の仮想空間内の液滴に関して、位置・速度に関するアンサンブル摂動は考慮しない。図-3は、噴射速度、噴霧角パラメータ、液滴径分布が異なるアンサンブルのメンバーを模式的に示している。ここで液滴の色はその速度を示している。

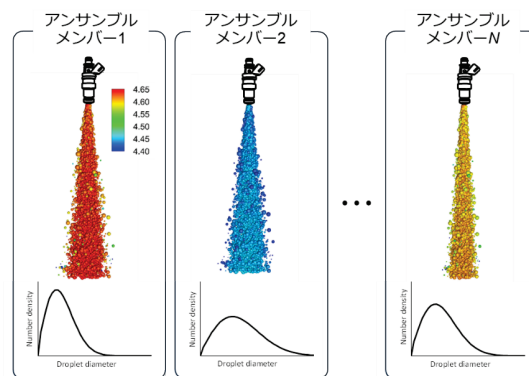


図-3 DDM解析のアンサンブルの例

噴射速度や噴霧の広がりなどの噴霧特性は、断面PIV測定によって部分的に観測される。そのため、断面PIV測定をDDM解析に同化することで、それらを推定することが期待される。一方、液滴の粒径分布はPIV速度分布にも影響を与えると考えられるが、その関係をPIV計測から直接得ることは困難である。しかし、噴射速度と液滴径の関係を何かしらの液滴径分布で関連づけることで、液滴径分布のアンサンブルを考慮し、PIV測定から液滴径分布を推定することが可能となる。具体的には、各アンサンブルメンバーの噴射速度を用いて、Rosin-Rammler分布に基づき液滴径分布を設定する。そして、噴射速度の摂動によって液滴径分布に誘起される摂動を利用して、PIV計測に基づく液滴径分布の推定を行う[7]。

後述の図-5に示すように、液滴のアンサンブルメンバーは基準となるケースを中心に生成される。基準ケースの初期液滴の位置はRosin-Rammler分布に基づいてランダムに生成するgことができるが、各液滴のアンサンブルは基準ケースの液滴を中心に生成されており、アンサンブルメンバーの生成はランダムでない。このように、液滴径分布とPIV断面速度がDDM解析を通して関係づけられたアンサンブルメンバーを用意することで、DDMによる液滴径分布の間接推定を実現することができる。

4. 推定の様子

図-4に推定中の液滴の分布を示す．図-4(a)は擬似PIV計測を生成した参照ケース，図-4(b)および(c)はデータ同化を行った場合（DAあり）と行わなかった場合（DAなし）の予測である．色で示した液滴径は，データ同化後，噴射速度が遅く粒径が大きな液滴が，噴射速度が速く直径が小さなものに修正されていることを示す．また，データ同化によって液滴の広がりも修正されている．液滴は上述のとおり一定時間の飛行後に循環させているため，射出速度が速いほど流れ方向の液滴の分布が長くなっている．EnKFによるフィルタリングを最初に行った際には，すでに飛行している液滴もアンサンブル攪乱の方向に修正されている．このような推定の挙動は，前節で説明したアンサンブルの定義によって実現されている．すなわち，各液滴の位置や速度は個別に修正することはできないが，アンサンブルメンバーが規定する空間内において液滴分布を修正することができる．

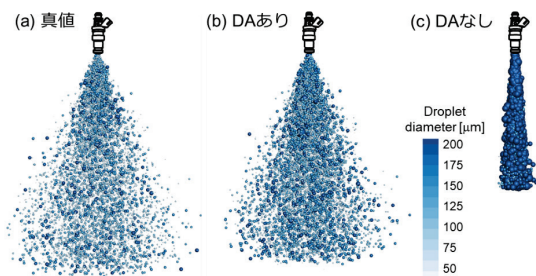


図-4 データ同化前後の液滴分布

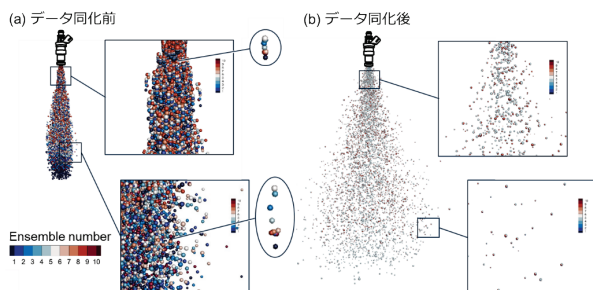


図-5 データ同化前後のアンサンブルの様子

各液滴のアンサンブルメンバーは，噴霧前に互いに近接して初期配置されるので，特定の液滴に関するアンサンブルはまとまって飛行する．図-5はアンサンブル数 $M = 10$ の場合に，アンサンブル番号で色分けした液滴の様子を示す．最初のフィルタリング前は液滴のアンサンブルが飛行方向に広がり，図-5(a)に示すように下流に行くほど広がりが大きくなっていることがわかる．最初のフィルタリングを行った後は図-5(b)のように飛行中の液滴を含めてアンサンブルの広がりが収束する（赤や青の液滴が一つに重なりほぼ白色の液滴になっている）．これにより，EnKFによって噴霧ノズルの条件に加えて，飛行中液滴の速度や位置が修正されていることが確かめられる．

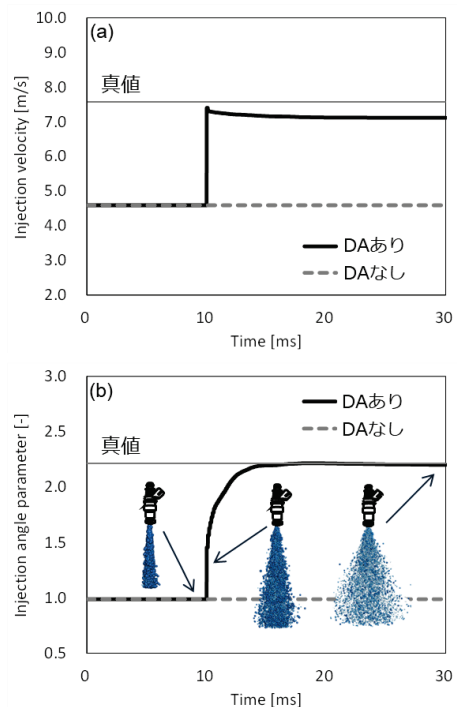


図-6 噴霧速度および噴霧角パラメータの履歴

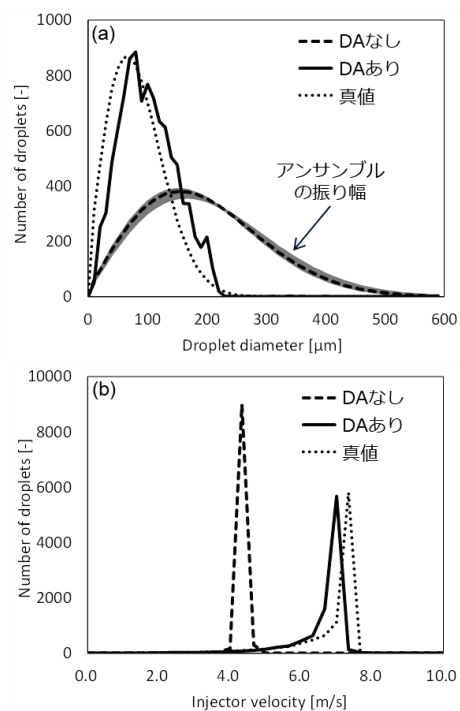


図-7 データ同化前後の液滴径分布および液滴速度分布

図-6は，噴射速度と噴射角パラメータの時刻履歴であり，いくつかの時間における液滴分布も示している．ここで真値とは参照ケースの結果を得るために使用した値である．最初のフィルタリングの後，噴射速度はすぐに真値近くに補正される．噴射角パラメータも同様であり，また，データ同化によりすでに飛行している液滴も修正されることがわかる．これは先に説明したように，噴射速度・噴霧角パラメータだけでなく，飛行中の液滴の位置もアンサンブル摂動により修正されていることを示す．図-7は飛

行中の液滴から評価した液滴径と液滴速度の分布である。液滴径は単一のパラメータではなく、前述したようにアンサンブルとして修正される。図-7(a)では、初期アンサンブルにおける液滴径分布の摂動も灰色の線で示している。これらのアンサンブルで定義された摂動によって真値に近い液滴径分布が推定できている。推定された液滴径分布の振動は、DDM解析とRosin-Rammler分布による推定の非線形性に起因していると考えられる。

5. 推定結果の解釈

EnKFによって液滴径分布の間接的な推定が可能となることに関して、EnKFの推定方式に基づき考察する。まず、状態ベクトルのアンサンブルがどのように更新されるかを確認する。フィルタリング後のアンサンブルは、図-8に示すようにフィルタリング前のアンサンブルに行列 X_5 を掛けたもの、すなわち $A_t' = A_t X_5$ であることが知られている[9]。行列 A_t は状態ベクトルのアンサンブル $A_t = [x_t^1 \cdots x_t^M]$ からなる。一方、 X_5 はアンサンブルメンバー数 M の大きさの正方行列であり、優対角で各列の要素の和が1であるため、EnKFの更新は各アンサンブルメンバー自身を中心とした非対角成分による加重平均になっている。つまり、EnKFの推定値もアンサンブルメンバーの加重平均とみなすことができる。これにより、液滴径とPIV断面速度の関係が何かしらのモデルによって適切に関係づけられていれば、PIV断面速度の測定値から液滴径分布を推定することが可能となる。

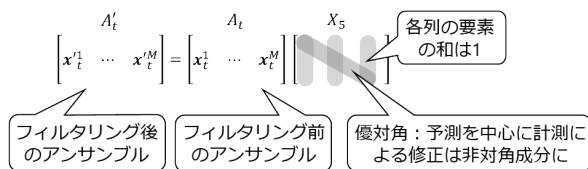


図-8 EnKFによるアンサンブル更新の模式図

図-9に液滴径分布とPIV断面速度の関係を模式的に示す。 X_5 行列において、断面速度 u_{PIV} との比較から断面速度 u_{PIV} に近いアンサンブルメンバー u_2 を優先した結果、 u_2 に対応する液滴径分布 $f(d_2)$ が優先されるように推定が行われる。

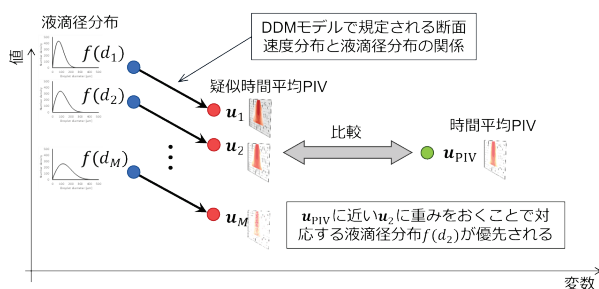


図-9 断面速度計測による液滴径分布推定の模式図

6. おわりに

本稿では高速で信頼性の高い噴霧流予測を目的として、DDM解析におけるアンサンブルデータ同化を検討した。ここでは双子実験を考え、PIV断面計測のような2次元断面計測がDDM解析とEnKFによってどのように拡張されるかを議論した。その結果、適切に準備した液滴のアンサンブルを用いて断面の時間平均速度計測値を同化することにより、液滴の位置や速度、噴霧ノズルの状態を推定できることを示した。さらに、データ同化におけるモデルベースのアプローチを活かし、DDM解析を通した液滴径分布の間接的な推定の可能性を示した。本稿では双子実験の結果について述べたが、実PIV計測値を用いたデータ同化も行っており、詳細は文献[8]を参照頂きたい。

参考文献

- [1] Habchi, C. et al.: Numerical study of deposits formation in SCR systems using urea-water solution injection, *J. of Materials Science and Nanotechnology*, Vol. 6, p. 201, 2018.
- [2] Chen, C. et al.: Investigation of the spray formation and breakup process in an open-end swirl injector, *Science Progress*, Vol. 103, p. 0036850420946168, 2020.
- [3] 大林茂, 三坂孝志, 加藤博司, 菊地亮太: データ同化流体科学 —流動現象のデジタルツイン—, 共立出版, 2021.
- [4] Nisugi, K. et al.: Fundamental study of hybrid wind tunnel integrating numerical simulation and experiment in analysis of flow field, *JSME Int. J. Series B Fluids and Thermal Engineering*, Vol. 47, pp. 593–604, 2004.
- [5] Misaka, T. et al.: Assimilation experiment of lidar measurements for wake turbulence, *J. of Fluid Science and Technology*, Vol. 3, pp. 512–518, 2008.
- [6] Suzuki, T.: Reduced-order Kalman-filtered hybrid simulation combining particle tracking velocimetry and direct numerical simulation, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 709, pp. 249–288, 2012.
- [7] Takahashi, S. et al.: Augmentation of cross-sectional spray measurements with discrete droplet model using ensemble Kalman filter, *Int. J. of Computational Fluid Dynamics*, Vol. 36, pp. 125–137, 2021.
- [8] Takahashi, S. et al.: Estimation of spray flow characteristics using ensemble Kalman filter, *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 88, p. 102247, 2021.
- [9] Evensen, G.: The ensemble Kalman filter: theoretical formulation and practical implementation, *Ocean Dynamics*, Vol. 53, pp. 343–367, 2003.