

# サイクロン型ダスト分離器内のダスト群の挙動解明のための基礎研究

## A Basic Analysis of Dust Clouds in Rotational-Flow Dust Separators

- 三輪 温, 早大, 東京都新宿区大久保 3-4-1, E-mail: atsushi.miwa.tafsm@gmail.com  
乙黒 雄斗, 早大, 東京都新宿区大久保 3-4-1  
滝沢 研二, 早大, 東京都新宿区大久保 3-4-1  
Tayfun E. Tezduyar, ライス大, 早大  
Atsushi Miwa, Waseda University, 3-4-1, Okubo Shinjukuku Tokyo  
Yuto Otaguro, Waseda University, 3-4-1, Okubo Shinjukuku Tokyo  
Kenji Takizawa, Waseda University, 3-4-1, Okubo Shinjukuku Tokyo  
Tayfun E. Tezduyar, Rice University, Waeda University

Cyclone separator is one of the separation devices using rotational flow. Cyclone Separation is known as a highly efficient separation method, but it is not easy to collect all dust with cyclone separator. So a lot of study have been carried out with the aim of improvement for collection efficiency. We can judge whether a particle will be collected or not by tracking the particle. Applying a particle tracking calculation to the cyclone separation, the calculation cost can be enormous in proportion to the number of particles. In this study, we propose a calculation method regarding dust clouds as continuum. We use Burgers equation with source term generated by stochastic resistance for modeling particle velocity. we also calculate particle concentration by applying convection-diffusion equation, and collection efficiency as the time-averaged amount of collected particles.

### 1. 緒言

サイクロン型ダスト分離器は、旋回流による、ダスト（ゴミ）の分離装置である。流体に沿ってダストを回転運動させることで遠心力が作用し、それによりダストを壁側へ押し出す、そして重力により下方にある空間に落とすことで捕集する仕組みである。そのため、主要分離部にフィルターを用いないことからフィルター詰まりによる捕集効率の変化が起きにくいという利点が挙げられている。しかし、対象とする全てのダストを捕集するというのは容易なことではない。そこで、捕集性能を上げるための研究がなされている。あるダストを考え、それらが捕集されるかどうかを調べる際に数値計算は有効である。ダストに働く流体力を時々刻々と求めることにより、粒子追跡をすれば捕集されるかどうかの判断ができる。しかし、サイクロン内部の流れは非定常であるため、粒子の初期位置にそれは依存する。したがって、実際の捕集確率を判断するのは容易なことではない。また、サイクロン内部の総粒子数が1千万個を超えるような場合もある。そしてその振る舞いは粒子密度等によって変化することも実験により明らかにされている。したがって、粒子追跡計算によってすべてのダストの捕集可能性を調べようとすると計算コストが膨大になる。そこで、本研究では、サイクロン内部の粒子群を連続体と捉えることで、粒子の挙動の概要を粒子捕集効率という観点から知ることができる計算手法を構築することを目的とする。

粒子は、ストークス数が大きくなるほど流体に追従しなくなるが知られている。実際、粒子は様々な粒径・密度であることから、ストークス抵抗による湧き出しを有する3次元 Burgers 方程式でモデル化する。計算手順としては、まずサイクロン内部の流体計算を行う。次に、この流速場を用い、前述の Burgers 方程式より粒子群の速度を計算する。得られた粒子群の速度場から移流拡散方程式を用い、粒子の濃度の時間変化を計算する。このようにして捕集される量の時間平均を取り捕集効率とする。また、この方法により異なる粒子径の粒子について計算を行い考察する。

### 2. 解析モデル、解析手法

本研究では isogeometric analysis (IGA) [1] を用いる。IGA では finite element method (FEM) の基底関数に高次の基底関数を用いる計算手法である。本研究では IGA における基底関数には、computer-aided de-

sign (CAD) において広く用いられている non-uniform rational B-spline (NURBS) 関数を使用する。NURBS 関数は要素間に高次の連続性を保つことができ、少ない制御点数で正確な形状を表現できるなど、従来の有限要素法に比べ形状の再現性が高い。また、NURBS 関数は幾何的に優れた性質を持つだけでなく計算上でも優れた性質を有する。本研究の解析手法としては上述の IGA と space-time (ST) 有限要素法を組み合わせた ST-IGA 法 [2,3] を用いる。乱流モデルは Variational Multiscale (ST-VMS) 法 [4,5]。格子生成には [6] を用いる。

### 3. サイクロン型掃除機における流体解析

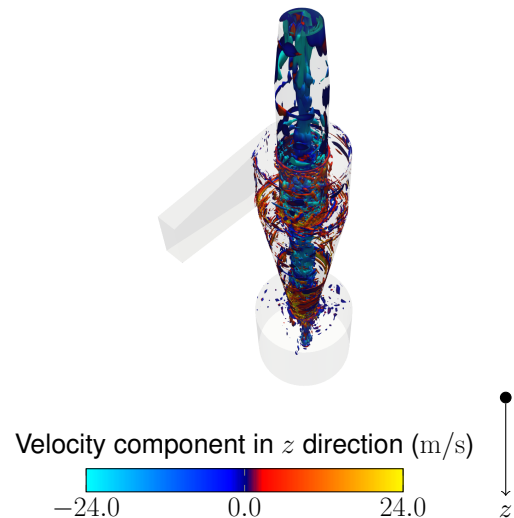


Fig. 1: 速度勾配テンソルの第二不変量の等値面を  $z$  軸（鉛直下）方向速度成分で色付けしたもの

サイクロン内部の流体解析結果について Fig. 1 に示す。Fig. 1 は鉛直下向きの軸を  $z$  軸とし、速度勾配テンソルの第二不変量の等値面を  $z$  軸方向速度成分で色付けすることで渦構造を可視化したものである。Fig. 1 では、サイクロン外周を鉛直下向きへ旋回する渦と、内側を鉛直上

向きへ旋回する渦が観測され、サイクロン内部の流れ場に典型的な渦の二重構造が再現されている。このサイクロン内部の流体解析結果を以降の粒子解析に用いる。

#### 4. 粒子解析手法

粒子は次式に示す無次元数であるストークス数 (Stk) が大きくなるほど、流体の運動に追従しなくなることが知られている。ストークス数は、

$$\text{Stk} = \frac{2\rho_p r^2 U}{9\mu L}, \quad (1)$$

で、 $\rho_p$  は粒子の密度、 $r$  は粒子の直径、 $U$  は流れの代表速度、 $\mu$  は流れの粘性、 $L$  は流れの代表長さを表す。ストークス数が大きい場合、粒子群と媒質である気相では速度に違いが生じる。この違いを考慮するため、流体解析により得られた気相の速度場から粒子群の速度場を求めることを考える。粒子群を連続体とみなし、流体場からの外力を湧き出しとする Burgers 方程式を考えると、

$$\frac{\partial \mathbf{u}_p}{\partial t} + \mathbf{u}_p \cdot \nabla \mathbf{u}_p - \mathbf{f} = \mathbf{0}, \quad (2)$$

となる。ただし、 $\mathbf{u}_p$  は粒子群の速度である。 $\mathbf{f}$  は粒子と流体の抵抗により発生する単位質量あたりの外力を表し、ストークス抵抗を用いて次式のように表される：

$$\mathbf{f} = \frac{6\pi\mu r(\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_p)}{\rho_p \frac{4\pi r^3}{3}}, \quad (3)$$

$$= \frac{9\mu(\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_p)}{2\rho_p r^2}. \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{u}_f$  は流体の速度である。なお、得られた粒子群の速度場を用いて、次に示す移流拡散方程式により粒子群の濃度場を求める：

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}_p \phi) - \nabla \cdot (\nu \nabla \phi) = 0. \quad (5)$$

#### 5. サイクロン型掃除機における粒子解析結果

解析した粒子群の濃度場をサイクロン中心軸を通る断面で可視化すると Fig. 2 のようになる。Fig. 2 における左図と右図はストークス数がそれぞれ  $8.0 \times 10^{-3}$  と  $8.9 \times 10^{-4}$  である同時刻における解析結果となっている。ストークス数の小さい右図の方が、多くの粒子が流体の運動に追従して出口管まで流れていることが観測できる。

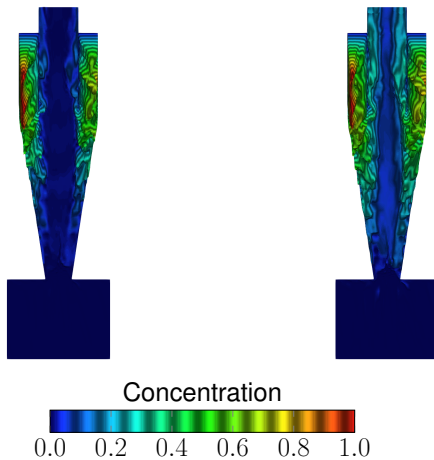


Fig. 2: 粒子群濃度

#### 6. 粒子捕集効率

面  $i$  における流出粒子量  $C_i$  は、面  $i$  の外向き法線ベクトルを  $\mathbf{n}$  とすると、

$$C_i = \int_{\Gamma_i} \mathbf{n} \cdot \mathbf{u}_p \phi \, d\Gamma, \quad (6)$$

となる。入り口を下付き 1、出口を下付き 2 とするとサイクロン分離における粒子の透過率  $P$  は、

$$P = \frac{C_2}{C_1}, \quad (7)$$

となる。これより、サイクロン分離における粒子の捕集効率  $\eta$  は次式のとおりである：

$$\eta = 1 - P. \quad (8)$$

$C_1$  と  $C_2$  の時間変化を Fig. 3 に示す。

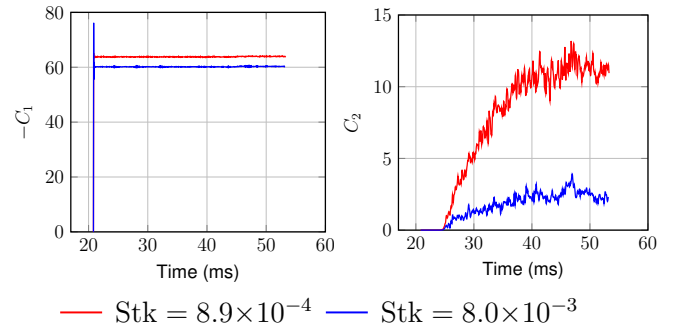


Fig. 3: 単位時間あたりの流入・流出粒子量変化

Fig. 3 において、 $C_2$  の時間変化が準定常的になる 40 ms 以降の時間平均をとることで、捕集効率を求める。ストークス数が  $8.0 \times 10^{-3}$  の場合は、

$$\eta = 95.85 \%, \quad (9)$$

となり、ストークス数が  $8.9 \times 10^{-4}$  の場合は、

$$\eta = 82.56 \%, \quad (10)$$

となる。

#### 7. 結言

本研究では、サイクロン内部の粒子群の速度を Burgers 方程式でモデル化し、サイクロン分離器における流体解析結果を用いて、粒子群を連続体とみなした解析を行った。そして、粒子群の濃度解析結果から粒子の捕集確率の推定を行った。さらに、異なる粒径の粒子群に対して解析を行い、捕集確率等の比較を行った。これは、定性的に合理的な結果を示した。

#### 参考文献

- (1) T.J.R. Hughes, J.A. Cottrell, and Y. Bazilevs, “Isogeometric analysis: CAD, finite elements, NURBS, exact geometry, and mesh refinement”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **194** (2005) 4135–4195.

- (2) K. Takizawa, T.E. Tezduyar, and T. Terahara, “Ram-air parachute structural and fluid mechanics computations with the space-time isogeometric analysis (ST-IGA)”, *Computers & Fluids*, **141** (2016) 191–200.
- (3) K. Takizawa, T.E. Tezduyar, Y. Otaguro, S. Mei, and L. Pan, “Turbocharger-turbine compressible-flow computations with the space-time isogeometric analysis (ST-IGA)”, in preparation, 2016.
- (4) K. Takizawa and T.E. Tezduyar, “Multiscale space-time fluid-structure interaction techniques”, *Computational Mechanics*, **48** (2011) 247–267.
- (5) K. Takizawa, D. Montes, S. McIntyre, and T.E. Tezduyar, “Space-time VMS methods for modeling of incompressible flows at high Reynolds numbers”, *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, **23** (2013) 223–248.
- (6) Y. Otaguro, K. Takizawa, and T.E. Tezduyar, “A general-purpose NURBS mesh generation method for complex geometries”, in T.E. Tezduyar, editor, *Frontiers in Computational Fluid-Structure Interaction and Flow Simulation: Research from Lead Investigators under Forty – 2018*, Modeling and Simulation in Science, Engineering and Technology, 399–434, Springer, 2018.