# Kochi University of Technology Academic Resource Repository

Title         Large Eddy Simulation 流体解析による集塵           ロンの分級性能評価	
Author(s)  小﨑,裕平	
Citation 高知工科大学,博士論文.	
Date of issue	2016-09
URL	http://hdl.handle.net/10173/1424
Rights	
Text version	ETD



Kochi, JAPAN http://kutarr.lib.kochi-tech.ac.jp/dspace/

# Large Eddy Simulation 流体解析による 集塵用サイクロンの分級性能評価

# 2016年9月

小崎 裕平

# 目次

第11	章 序論
1.1	研究の背景と目的1
1.2	本論文の構成5
1.3	参考文献
第2	章 解析条件の妥当性確認及び円錐型サイクロン内の流れ場
2.1	緒言7
2.2	研究で使用したサイクロンモデル7
2.3	内壁面静圧実験の方法9
2.4	LES 流体解析の方法12
2.5	解析条件の妥当性確認の結果及び考察16
2.6	円錐型サイクロン内の LES 流体解析の結果及び考察
2.7	第2章のまとめ
2.8	参考文献
第 3	章 円錐型サイクロンの内部流れの状況と集塵及び分級性能
の関係	系
3.1	緒言
3.2	研究で使用したサイクロンモデル
3.3	集塵及び分級性能実験の方法

3.5	集塵及び分級性能実験の結果	. 42
3.6	各円錐型サイクロン内の LES 流体解析の結果及び考察	. 44
3.7	第3章のまとめ	. 64
3.8	参考文献	. 65

### 第4章 円錐型サイクロン内の粒子軌跡

4.1	緒言	67
4.2	研究で使用したサイクロンモデル	67
4.3	LES 流体解析と粒子追跡による数値シミュレーションの方法	. 69
4.4	数値シミュレーションによる円錐型サイクロン内の粒子軌跡結果及び考察.	74
4.5	第4章のまとめ	.82
4.6	参考文献	.83

## 第5章 結論

5.1	本研究のまとめ	85
5.2	今後の展望	86

謝辞		9
----	--	---

#### 第1章 序論

1.1 研究の背景と目的

サイクロンは内部の旋回流れによって生ずる遠心力を利用して粒子を分離捕集する 集塵及び分級装置の一種である.サイクロンはその構造が比較的単純であるとともに 比較的容易に製作できるため,集塵及び分級が必要とする産業で幅広く利用されてお り,特に空気輸送を利用した集塵プラントにおいて,集塵プロセスの輸送工程中に無 くてはならないものとなっている.

一般的な空気輸送を利用した集塵プラントの構成を図 1.1 に示す. 空気輸送を利用 した集塵プラントは,一般的に輸送工程の中にレシーバータンク(沈降槽)を設け, 比較的粒子径が大きく高密度である粒子に対して,粒子に働く重力を利用して分離捕 集する. レシーバータンクで分離捕集がしづらい粒子径が小さい低密度の粒子,つま り粒子に働く空気力にストークスの法則が適用されるものまでは,次工程のサイクロ ンによって,粒子に働く遠心力を利用して一部分離捕集されるが,サイクロンで捕集



Fig. 1.1 Dust collection plant

できない粒子は、更に次工程のフィルターによって分離捕集され、その後空気流は輸送系の最終端である吸引機(ブロワ)へと導かれ、大気に排気される.このような集 塵プロセスにおいて、サイクロンの集塵及び分級性能は、フィルターの目詰まりの進 行度合いに直接影響し、プラントの処理性能及び作業効率を決定づける重要なパラメ ータである.したがって、フィルターの目詰まりの進行を抑制し、プラントの処理性 能及び作業効率の低下を抑制するため、つまりフィルターへの負荷を低減するため、 サイクロンの集塵及び分級性能を向上させることが求められている.

図 1.2 は集塵プラントにおいて数多く利用されている円錐型サイクロンの構造の典型例である.サイクロンは含塵空気を導入するための入口管部,円筒部,円錐部,粒子を貯蔵するための集塵部及び粒子が取り除かれた空気を排出するための出口管部より構成されている.



Fig. 1.2 Schematic diagram of the conical cyclone

サイクロンの粒子分離の原理は、旋回流れによる遠心力のために粒子が外方向に 分離され、粒子はサイクロン壁面をつたわって落下し、集塵部に収納されるものであ るが、サイクロン内の旋回流れは、自由渦と強制渦の組合せ渦(Rankin 渦)である とともに下降流、上昇流を伴い、中心付近は負圧となって下方向への逆流が生ずるこ ともあり、旋回流れの中心と形状中心の偏心によって接線方向に対する流れの傾斜角 が絶えず変化するなど、非定常的な流れであることが分かっている<sup>(1)(2)</sup>.

したがって,集塵及び分級性能の良いサイクロンの設計を行うには,非定常的な 流れを熟慮した適切な設計が必要となる.しかし,設計の際に,前もって試作を行い, サイクロン内の流れ場を推定するためのピトー管流速計,熱線流速計及び PIV など を用いた計測は,計測及び試作に係る時間・費用などの面から合理的な方法とはいえ ない.

これに対し、本研究では、Computational Fluid Dynamics (CFD)を用いた流体解析 に着目した. CFD を用いた流体解析は、コンピュータを用いて流体現象の解析を行 う方法であり、コンピュータの高速化と低価格化によって工学分野にも応用可能な状 況となってきている.吉田ら<sup>(3)~(6)</sup>は、直接法による3次元シミュレーションでサイ クロン内の流れ及び粒子軌跡の計算を行い、集塵及び分級実験結果と比較検討するこ とで、サイクロン内の流れやサイクロンの集塵及び分級性能について述べている.ま た、近年では更に CFD の発達により、サイクロン内部の非定常な流れ場予測に関し て、秋山ら<sup>(7)(8)</sup>は小型で入口流速が低速であるサイクロン(レイノルズ数3×10<sup>4</sup>~4 ×10<sup>4</sup>程度)を対象にして Large Eddy Simulation (LES)を用いた流体解析により、流 れ場の実験結果と解析結果の比較を通して、サイクロン内の非定常な流れを再現でき ることを確認するとともに集塵及び分級実験結果と比較を行い、集塵及び分級性能に ついて述べている.サイクロンの設計に対して LES 流体解析を用いることで、試作 や計測を行うことなく、非定常的な流れを熟慮した合理的な設計が可能になると期待 できる.

1880 年代後半にサイクロンが発明されて以降,サイクロンに関する研究は数多く なされている.その中で,サイクロンの集塵及び分級性能を向上させるために役立つ 知見が数多く報告されている.例えば,冬木らは形状の大小と性能の関係について述 べている<sup>(9)</sup>. Yoshida らは apex cone と呼ばれる整流部材の形状が性能へ及ぼす影響に ついて述べている<sup>(7)</sup>.秋山らはサイクロン内の渦運動の制御による効果<sup>(8)</sup>について述

べている. Wakizono らは出口管へのリング付加による効果<sup>(10)</sup>について述べている.

実際の集塵プラントにおけるこれまでのサイクロン設計は,集塵及び分級性能の良 いサイクロンを設計するため,前述した過去の知見を基に実機を試作し,実験によっ てサイクロンの構造や構成を検討することがほとんどであった.実際の集塵プラント において数多く使用されているサイクロンは,比較的大型で含塵空気流量が多い(レ イノルズ数 9×10<sup>5</sup> 程度).そのサイクロンの試作や実験に係る費用・コストなどの面 から,試作や実験を用いない合理的な設計手法の確立が望まれている.

本研究では、実際の集塵プラントにおいて数多く使用されている比較的大型で含塵 空気流量の多い(レイノルズ数 9×10<sup>5</sup> 程度)円錐型サイクロンを対象に、LES を用 いた流体解析によりサイクロン設計の方針や手法を示すことを目的としている.

#### 1.2 本論文の構成

第1章では、上述した研究の背景や研究目的について述べた.

第2章では、円錐型及び円筒型の2種類のサイクロンを対象に LES を適用して、 解析結果と実験結果との比較より、解析条件の妥当性を確認している.その後、その 条件の基で、LES 流体解析で求めた円錐型サイクロン内部の流れ場を調べ、流れ場 と分級性能の関係について議論し、サイクロンの設計の方針や手法を提案している.

第3章では,第2章で得られた設計方針を踏まえ,集塵及び分級性能の向上を図 るために逆円錐及びスタビライザーを付加した場合について,LES 流体解析で求め た流れ場の状況と実際の粉体を用いた実験で求めた集塵及び分級性能との関係を調べ, 流れの状況が粒子の運動へ及ぼす影響について議論し,サイクロンの設計の方針や手 法を提案している.

第4章では、LES 流体解析に新たに粒子追跡を加えた数値シミュレーションを行い、サイクロンから排出したり排出しなかったりする粒子径の粒子、つまりサイクロンの分級性能を低下させる粒子径の粒子のサイクロン内における軌跡を調べ、粒子の投入位置との関係について議論し、サイクロンの設計の方針や手法を提案している.

第5章では、本研究の結論と今後の展望をまとめている.

#### 1.3 参考文献

- (1) 井伊谷剛一,集塵装置(新版),日刊工業新聞社,(1972).
- (2) 井伊谷剛一,"サイクロン集じん器内の気流について(サイクロンに関する研究 第2報),日本機械学曾論文集, Vol. 18 (1952), 42-48.
- (3) H. Yoshida, K. Fukui, K. Yoshida and E. Shinoda, "Particle separation by linoya's type gas cyclone", Powder Technology, Vol. 118 (2001), 16-23.
- (4) H. Yoshida, K. Ono and K. Fukui, "The effect of a new method of fluid flow control on submicron particle classification in gas-cyclones", Powder Technology, Vol. 49 (2005), 139-147.
- (5) H. Yoshida, Y. Inada, K. Fukui and T. Yamamoto, "Improvement of gas-cyclone performance by use of local fluid flow control method", Powder Technology, Vol. 193(2009), 6-14.
- (6) H. Yoshida, Y. Nishimura, K. Fukui and T. Yamamoto, "Effect of apex cone shape on fine particle classification of gas-cyclone", Powder Technology, Vol. 204(2010), 54-62.
- (7) 秋山修,加藤千幸,河手大輔,"円筒型サイクロンセパレータの粒子分離メカニズム(第1報,LES 解析の精度検証と流れ構造の詳細検討)",日本機械学会論文集(B編), Vol.78 (2012), 1886-1902.
- (8) 秋山修,加藤千幸,河手大輔,"円筒型サイクロンセパレータの粒子分離メカニズム(第2報,粒子追跡の精度検証と粒子運動の詳細検討)",日本機械学会論文集(B編), Vol.78 (2012), 1903-1918.
- (9) 冬木正,山田幸良,吉田英人,井伊谷剛一,"乾式分級サイクロンのスケールア ップ性能-異なる粒度測定器による性能評価-",粉体工学会誌, Vol.32 (1995), 526-532.
- (10) Y. Wakizono, T. Maeda, K. Fukui and H. Yoshida, "Effect of ring shape attached on upper outlet pipe on fine particle classification of gas-cyclone", Separation and Purification Technology, Vol.141(2015), 84-93.

## 第2章 解析条件の妥当性確認及び円錐型サイクロン内の 流れ場

#### 2.1 緒言

本研究の設計対象である実際の集塵プラントに使用される比較的大型で含塵空気流 量が多い円錐型サイクロン(レイノルズ数 9×10<sup>5</sup> 程度)内部の流れ場を,LES を用 いて流体解析を実施した報告は見当たらない.そこで本研究ではまず円錐型及び円筒 型 2 種類のサイクロンを対象に LES を適用し,サイクロンの内壁面静圧の解析結果 と実験結果との比較より解析条件(格子解像度,初期の流れ場,時間刻み)の妥当性 を確認する.その条件の基で,LES 流体解析で求めた円錐型サイクロン内部の流れ 場を調べ,流れ場と分級性能の関係について議論する.

#### 2.2 研究で使用したサイクロンモデル

本研究で使用した円錐型及び円筒型 2 種類のサイクロンを図 2.1 に示す.座標系は, サイクロンの底面の中心を原点とし,サイクロンの中心軸を y 軸,サイクロンへの流 れの流入方向を z 軸とした.

図 2.1 の左図は胴体が内径 D=385mm の円筒部と円錐部及び集塵部からなる標準的 な形状の円錐型サイクロンである.一方図 2.1 の右図は胴体が D=385mm の円筒部と 集塵部からなる円筒型サイクロンである.研究対象を円錐型及び円筒型 2 種類のサイ クロンとしたのは,双方のサイクロン内の流れ場をシミュレーションできる同一の解 析条件(格子解像度,初期の流れ場,時間刻み)が求まれば,設計対象とする円錐型 サイクロンの形状変更に対しても内部の流れ場を,LES 流体解析を用いて適切にシ ミュレーションできると判断したためである.



Conical cyclone

Cylindrical cyclone

Fig.2.1 Schematic diagrams for each cyclone

#### 2.3 内壁面静圧実験の方法

LES 流体解析の解析条件の妥当性を確認するために,円錐型及び円筒型 2 種類の サイクロンの内壁面静圧を実験で求めた.本節はその内容について述べる.

図 2.2 は実験装置の概略を示す.装置はインバータ駆動方式の吸込ブロワ②によって、サイクロン①入口の平均流速を一定に保ちながら、サイクロン内へ空気を流入させることができる.

サイクロンには、内壁面静圧を計測するため、直径 0.8mm の静圧孔を、流入口の 外壁面から円筒面に沿って角度 θ=13°と 193°の位置で、円筒部上面から集塵部ま で一列に 25 ヶ所、計 50 ヶ所設けてある.

サイクロン入口の平均流速 Uin は次式で定義した.

$$U_{in} = \frac{p_f T_a Q}{p_a T_f A_{in}} \tag{1}$$

ここで、 $p_f$ は渦流量計部の静圧、 $p_a$ は大気圧、 $T_a$ は大気温度、 $T_f$ は渦流量計部の温度、Qは渦流量計で計測した体積流量、 $A_{in}$ はサイクロン入口の管断面積である.

実験は、含塵空気流量の多いサイクロンを想定して、サイクロン入口の平均流速 Uin=35m/s で行った. レイノルズ数 Re は次式で定義した.

Re = 
$$\frac{U_{in}D}{v} = 8.9 \times 10^5$$
 (2)

ここで、vは空気動粘度である.

円錐型サイクロンの内壁面静圧については、平均静圧と変動静圧を計測し、円筒型 サイクロンの内壁面静圧については、平均静圧のみを計測した.

平均静圧の計測は、各静圧孔から切換弁を介して、圧力計を用いて計測し、平均静 圧の記録は、圧力の静定に必要な時間を十分とって行った.変動静圧の計測は、各静 圧孔に圧力センサー(長野計器株式会社製,KP15)を直接取り付けて計測し、変動 静圧の記録は、サンプリング周期 1ms で行った.なお、圧力センサーの直線性誤差 は±0.5%F.S.、フルスケールは 10kPa である.

なお,サイクロンの内壁面静圧 C,は,以下に定義する式で評価した.

$$C_{p} = \frac{p - p_{in}}{(\rho U_{in}^{2})/2}$$
(3)

ここで、pは各静圧孔の静圧、 $p_{in}$ はサイクロン入口の静圧、 $\rho$ は空気密度である.



Fig.2.2 Schematic diagram for the experimental equipment

#### 2.4 LES 流体解析の方法

解析条件の妥当性確認と円錐型サイクロン内の流れ場を調査するため,円錐型及び 円筒型 2 種類のサイクロンの内壁面静圧及び流れ場を LES 流体解析で求めた.本節 はその内容について述べる.

LES 流体解析は,汎用流体解析ソフトである株式会社ソフトウェアクレイドルの SCRYU/Tetra for Windows を用いた<sup>(1)~(4)</sup>.

LES 流体解析に用いた直交座標系で記述された基礎式を以下に示す. (4)式は格子 フィルタにより平均化された連続の式, (5)式は(4)式同様で格子フィルタにより平均 化されたナビエ・ストークス方程式である.

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} = 0 \tag{4}$$

$$\frac{\partial \overline{\rho u_i}}{\partial t} + \frac{\partial \rho \overline{u_i} \overline{u_j}}{\partial x_j} = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left( \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial \rho \tau_{ij}}{\partial x_j} \tag{5}$$

ここで、 $u_i$ は格子フィルタにより平均化された  $x_i$ 方向の速度成分、pは格子フィル タにより平均化された静圧、 $\rho$ は流体の密度、 $\mu$ は流体の粘性係数、 $\tau_{ij}$ は Sub-gridscale(SGS)応力である.

流体すなわち空気の密度 $\rho$ は1.206kg/m<sup>3</sup>,粘性係数 $\mu$ は1.83×10<sup>-5</sup>Pa·sとした. SGS モデルは Wall-adapting local eddy viscosity(WALE)モデル<sup>(5)</sup>を採用した.すなわち,以下の式を用いた.

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \overline{u_i} \overline{u_j} = -2\nu_{SGS} \overline{S}_{ij} \tag{6}$$

$$\nu_{SGS} = \left(C_w \overline{\Delta}\right)^2 \frac{\left(S_{ij}^d S_{ij}^d\right)^{3/2}}{\left(\overline{S}_{ij} \overline{S}_{ij}\right)^{5/2} + \left(S_{ij}^d S_{ij}^d\right)^{5/4}}$$
(7)

$$\overline{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \overline{g}_{ij} + \overline{g}_{ji} \right)$$
(8)

$$S_{ij}^{d} = \frac{1}{2} \left( \overline{g}_{ij}^{2} + \overline{g}_{ji}^{2} \right) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \overline{g}_{kk}^{2}$$
(9)

$$\overline{g}_{ij} = \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial \overline{x}_j} \tag{10}$$

$$\overline{g}_{ij}^{2} = \overline{g}_{ik} \overline{g}_{kj}$$
(11)

ここで、 $v_{SGS}$ は SGS 渦動粘性係数、 $\overline{s}_{ij}$ は格子フィルタにより平均化されたひずみ速度テンソル、 $\overline{g}_{ij}$ は格子フィルタにより平均化された速度勾配テンソル、 $\delta_{ij}$ はクロネッカーのデルタ、 $C_w$ はモデル定数、 $\overline{\Delta}$ はフィルタのサイズである.

モデル定数  $C_w$ は Temmerman らと同様 0.316 とした<sup>60</sup>. またフィルタのサイズ  $\overline{\Delta}$ は コントロールボリュームの容積 Vを用いて次式で定義した.

$$\overline{\Delta} = V^{1/3} \tag{12}$$

基礎式は有限体積法を用いて離散化した.移流項及び拡散項については2次精度中 心差分法を,時間項については次式の3点近似の2次精度陰解法を適用した<sup>(7)</sup>.なお, 計算の安定性向上のため,移流項に対して一次精度風上差分の影響を加えている<sup>(8)</sup>.

$$\phi_{n+1} = \frac{4}{3}\phi_n - \frac{1}{3}\phi_{n-1} + \frac{2}{3}\phi\Delta t f(t_{n+1}, \phi_{n+1})$$
(13)

ここで, φは変数, Δt は時間の刻み幅である.

円錐型及び円筒型 2 種類のサイクロンの解析領域は 2.2 節の図 2.1 に示した通りで ある.入口境界と出口境界は、どちらのサイクロンも便宜上、本体直近の配管部で止 めた.解析格子は、壁面から 3 層はプリズム形状の 5 面体非構造格子、それ以外はテ トラ形状の 4 面体非構造格子で構成した. Rankin 渦を精度良く捉えるため、サイク ロンの中央部を周辺の格子サイズの半分にしてある.

境界条件は、入口境界に一様な流入流速 *U<sub>in</sub>*=35m/s, 出口境界に静圧 *p<sub>out</sub>*=0Pa, 壁 面に速度零を与え,壁面近傍では Werner-Wengle による 2 層モデルを 3 層モデルに 拡張した条件を用いた<sup>(9)</sup>. 表 2.1 に解析を実施した各水準の解析条件を示す.

円錐型サイクロンを対象とした LES 流体解析においては,解析条件が解析精度及 び計算コストへ及ぼす影響を検討する目的で,表 2.1 に示すように格子解像度,初期 の流れ場及び時間刻みを変化させ,解析を行った.

円筒型サイクロンを対象とした LES 流体解析については,後述する円錐型サイク ロンの解析結果と実験結果との比較検討により,解析条件が最良と判断される CASE1 で実施した.

解析はクーラン数 *C*を設定し,各要素幅  $\Delta Li$  と各要素における流速  $u_i$  より次式で 定義された時間刻み  $\Delta t_i$ の最小値  $\Delta t$  で進行させた.

$$\Delta t_i = \frac{\Delta L_i}{u_i} C, \qquad i = 1, 2, \cdots, n$$
(14)

ここで, nは要素数である.

サイクロン入口の平均圧力値が安定しはじめたところから平均化処理を行い,内壁 面静圧及び流れ場を求め,各位置での内壁面静圧は実験同様に 2.3 節の式(3)で定義した.

	格子解像度	初期の流れ場	クーラン数
	(要素サイズ・要素数)		С
CASE1	粗	SST k-ω 乱流モデル <sup>(10)</sup> を用いた定	4
	円錐型サイクロン;	常解析 1000 ステップの計算結果	
	(最大 5mm・2227 万要素)	より得られた流れ場	
	円筒型サイクロン;		
	(最大 5mm・3048 万要素)		
CASE2	粗	SST k-ω乱流モデルを用いた定常	1
	円錐型サイクロン;	解析 1000 ステップの計算結果よ	
	(最大 5mm・2227 万要素)	り得られた流れ場	
CASE3	細	SST k-ω乱流モデルを用いた定常	4
	円錐型サイクロン;	解析 1000 ステップの計算結果よ	
	(最大 4mm・4452 万要素)	り得られた流れ場	
CASE4	粗	SST k-ω 乱流モデルを用いた定常	4
	円錐型サイクロン;	解析 1000 ステップの計算結果よ	
	(最大 5mm・2227 万要素)	り得られた流れ場	

#### Table 2.1 Analysis conditions

#### 2.5 解析条件の妥当性確認の結果及び考察

図 2.3 は円錐型サイクロンにおける内壁面静圧の平均静圧を,表 2.1 の解析条件に おける解析結果と実験結果を比較したもので, *θ*=13°, 193°の場合を示す.図の横 軸はサイクロン内径 D でサイクロン内の円筒部上面中心から壁面に沿った無次元距 離 *L/D*を表している.

*θ*=13°, 193°のどちらも円筒部での圧力変化は小さく,円錐部では圧力が低下し, 集塵部で圧力回復する,流れの加速を伴う典型的な円錐型サイクロンの圧力分布とな っている.いずれの解析条件の場合も,解析結果と実験結果は定量的に一致しており, 解析結果はサイクロン内旋回流れの特徴を捉えていると考えられる.よって,表 2.1 の解析条件の範囲では解析条件が解析結果へ及ぼす影響に大きな差異はないことがわ かる.

表 2.1 の解析条件で内壁面静圧の平均静圧が求まるまでに要した計算時間を図 2.4 に示す.計算時間はインテル製プロセッサー(Xeon, X5675, クロック周波数 3.06GHz) 8 コア用いて並列計算した場合の時間である.

CASE1 が最も短い時間で計算を行うことができる. CASE2 の解析条件が最も長い 計算時間を要する. 特に,時間刻みをクーラン数4とすることでクーラン数1の場合 に対し,計算時間が約四分の一となり,計算時間の短縮効果が大きいことがわかる.

図 2.5 は円錐型サイクロンにおける内壁面静圧の変動静圧を, CASE1 の解析条件 における解析結果と実験結果を比較したもので, *θ*=13°, 円錐部中央付近の内壁面 位置(*L/D*=2.48)の場合を示す. 図の横軸は時刻 *t* を表している. 解析結果は 500 ス テップ(t=0.01s 程度)毎に平均化して求めた. 実験結果は 10 回(t=0.01s)毎に平均 化して求めた.

全体的に解析結果と実験結果は良い一致を示している.実験結果の振幅が解析結果 の振幅より若干小さい.この理由は、実験では静圧孔から圧力センサー受圧面までに 若干の空間があり、圧力が減衰しているためであると考えられる.

以上のことから、円錐型サイクロンを対象とした流体解析では、CASE1 が解析精 度及びコスト面から最良であると判断できる.

円錐型サイクロンを対象とした流体解析では,解析条件の妥当性が確認できたが,

その最良であると判断した CASE1 の解析条件にて円筒型サイクロンについても LES 流体解析を実施し,内壁面静圧の平均静圧の解析結果と実験結果を比較した.

図 2.6 は円筒型サイクロンにおける内壁面静圧の平均静圧を CASE1 の解析条件に おける解析結果と実験結果を比較したもので, *θ*=13°, 193°の場合を示す. 図の横 軸,縦軸は図 2.3 と同様である.

*θ*=13°, 193°のどちらも円筒部では円筒上部から下部にかけてゆるやかに圧力が 低下し,集塵部で圧力回復する,流れの加速を伴わない円筒型サイクロンの圧力分布 となっている. 解析結果と実験結果は,定性的にも定量的にも一致している.

これらのことから,設計の対象とする比較的大型で,含塵空気流量が多いサイクロン(レイノルズ数 8.9×10<sup>5</sup>)内部の流れ場予測に用いる LES 解析の解析条件について, CASE1 は妥当であると考えられる.



Fig. 2.3 Comparisons fluid analysis results and experiment results of mean inner-surface static pressure for the conical cyclone



Fig. 2.4 Calculation time of fluid analysis for the conical cyclone



Fig. 2.5 Comparisons fluid analysis results and experiment results of fluctuating inner surface static pressure for the conical cyclone



Fig. 2.6 Comparisons fluid analysis results and experiment results of mean inner surface static pressure for the cylindrical cyclone

#### 2.6 円錐型サイクロン内の LES 流体解析の結果及び考察

円錐型サイクロン内部の半径方向速度  $u_r$ の解析結果を図 2.7 に示す.半径方向速度  $u_r$ をサイクロン入口の平均流速  $U_{in}$ で無次元化し,その時刻推移を表している.解析 条件は CASE1 を用いた.解析結果は 3,000 ステップ(3,000 ステップ分の時間 T= $\Delta t$ ×3000=0.06s 程度)を 6 分割するよう,500 ステップ( $\Delta t$ ×500=0.01s 程度)毎に平 均化して求めた.半径方向速度  $u_r$ の正の方向はサイクロン中心から外向き方向であ る.

半径方向速度 *u*<sub>r</sub> ついては, xy 断面のコンター図より, 半径方向速度の正負の領域 が時刻の推移とともに変動することがみられる. xz 断面(y =2.20D)のコンター図か らも同様に正負の領域が時刻の推移とともに変動することがみられる.

これら半径方向速度の正負の変動は、旋回流れの中心が時刻の推移とともに移動 し、サイクロンの形状中心との偏心によって、接線方向に対する流れの傾斜角が変化 するためであると考えることができる.図 2.8 に示す、円錐型サイクロン内部の xz 断面(y=2.20D)中心部における流速ベクトルの分布図からも、旋回流れの中心が時 刻の推移とともに移動し、形状中心から 0.02D 程度偏心していることがみられ、接線 方向に対する流れの傾斜角が変化することが確認できる.また、サイクロンの形状中 心を横断する流れがあることが確認できる.

円錐型サイクロン内部の軸方向速度 uy の解析結果を図 2.9 に示す. 軸方向速度 uy は図 2.7 同様にサイクロン入口の平均流速 U<sub>in</sub>で無次元化している. 軸方向速度 u<sub>y</sub>の 正の方向はサイクロンの底面から上向き方向である. さらに, 円錐型サイクロン内部 の xy 断面における流速ベクトルを図 2.10 に示す. ベクトルの長さは, 流れ方向を分 かりやすくするため, 一定長として表している.

軸方向速度 uy については、時間による大きな変化はみられず、円筒部から円錐部 において壁面側と中心側で正負の値を異にする下降・上昇の旋回流れが存在すること が確認できる.中心部では下方向への逆流が存在する.

図 2.10 より,円筒部の上部壁面側では上昇の旋回流れが確認でき,同じく上部出 ロ管の外側壁面では下降の旋回流が確認できる.よって,サイクロン入口から流入し た流れは,旋回を行いながら,一部円筒上部を伝わって,出口管の外壁面に沿って流 れ,直接出口管から流出することが確認できる.

円錐型サイクロン内部の接線方向速度 u<sub>θ</sub>の解析結果を図 2.11 に示す. 接線方向速 度 u<sub>θ</sub>は図 2.7 同様にサイクロン入口の平均流速 U<sub>in</sub>で無次元化している. 接線方向速 度 u<sub>θ</sub>の正の方向はサイクロンへ流れが流入する方向である.

接線方向速度 *u*<sub>θ</sub> については,時間による大きな変化はみられず,内壁面からサイ クロン中心方向に向けてサイクロンの出口管の内径付近まで速度が速くなり,そこか ら中心部に向けて減速する典型的な Rankin 渦が確認できる.

以上のことから,円錐型サイクロン内部の流れ場の LES 流体解析の解析結果は, 従来の研究で示されているサイクロン内の流れの主要な特徴<sup>(11)~(13)</sup>が確認できた.

一般に、旋回流中で遠心力を受けて半径方向へ移動する粒子の移動速度  $u_p$ は、重力場における沈降速度  $u_i$ に関する式で重力加速度 g の代わりに遠心加速度 aを代入した式となる。重力場における沈降速度  $u_i$ は、空気抵抗係数  $C_D$ がストークス、またはアレン抵抗則だと、次式で表せる<sup>(14)</sup>.

$$u_t = \frac{\left(\rho_p - \rho_a\right)D_p^2 g}{18\mu} \tag{15}$$

$$u_t = \sqrt[3]{\frac{4(\rho_p - \rho_a)^2 D_p^3 g^2}{225\mu\rho_a}}$$
(16)

ここで、 $\rho_p$ は粒子密度、 $\rho_a$ は空気密度、 $D_p$ は粒子径、 $\mu$ は空気粘度である.

よって、旋回流れからの粒子の移動速度  $u_p$ は、式(15)(16)の重力加速度 g の代わりに遠心加速度  $\alpha = (u_{\theta p})^2 / r$ を代入し求めると、次式となる.

$$u_{p} = \frac{(\rho_{p} - \rho_{a})D_{p}^{2}u_{\theta p}^{2}}{18\mu r}$$
(17)

$$u_p = \sqrt[3]{\frac{4(\rho_p - \rho_a)^2 D_p^{-3} u_{\theta p}^{-4}}{225 \mu \rho_a r^2}}$$
(18)

ここで, *u*<sub>θ</sub> は粒子の旋回中心に対する接線方向速度(=気流の旋回中心に対する接線 方向速度), *r* は旋回流れ中心から粒子までの距離である.

前述したように、旋回流れの中心は時刻の推移とともに移動するため、旋回流れの

中心から粒子までの距離 r が変動し、旋回流れからの粒子の移動速度 u<sub>p</sub> は、時刻の 推移とともに変動すると考えられる.また、サイクロンの形状中心を横断する流れが あることから、サイクロン中央部の上昇流近傍における粒子は、その流れによって中 央部の上昇流内に移動し、分離されないまま排出することも考えられる.したがって、 旋回流れの中心の変動によって、サイクロンの分級性能が変化することがわかる.

これらのことから、サイクロンの設計においては、形状中心と旋回流れの中心の偏 心を抑制することが必要であることがわかる.

また,サイクロン入口から流入した流れは,旋回しながら,一部円筒上部を伝わって,直接出口管から流出するため,粒子がその流れに混入した場合は,分離されないまま直接排出されることもあるので,この流れを抑制する検討も必要であると考える.



Fig. 2.7 Computed radial velocity in the conical cyclone



Fig. 2.8 Computed fluid velocity distributions at the central part of the conical cyclone in the x-z section (y = 2.20D)



Fig. 2.9 Computed axial velocity in the conical cyclone



Fig. 2.10 Computed fluid velocity distributions of the conical cyclone in the x-y section



Fig. 2.11 Computed tangential velocity in the conical cyclone

#### 2.7 第2章のまとめ

本章では、円錐型及び円筒型 2 種類のサイクロンを対象に LES を適用し、サイク ロンの内壁面静圧の解析結果と実験結果との比較より解析条件(格子解像度,初期の 流れ場,時間刻み)の妥当性を確認した.その条件の基で、LES 流体解析で求めた 円錐型サイクロン内部の流れ場を調べ,流れ場と分級性能の関係について議論した. 以下に主要な結論を述べる.

- (1)壁面から3層はプリズム形状の5面体非構造格子,それ以外はテトラ形状の4面体非構造格子,サイクロン中央部を周辺の格子サイズの半分にした最大 5mm サイズの2227万要素の円錐型サイクロンと,同様のモデリング手法にて構成した3048万要素の円筒型サイクロンにおいて,初期の流れ場,時間刻みの与え方によらず,サイクロンの内壁面静圧のLES流体解析による計算と実験結果が一致したことから,解析条件の妥当性を確認できた.
- (2) 上記(1)の条件の基で,LES 流体解析で求めた円錐型サイクロン内部の流れ場は, 従来の研究で示されているサイクロン内の流れの主要な特徴が確認できた.
- (3) 上記(1)~(2)より、集塵プラントに使用される比較的大型で含塵空気流量が多い (レイノルズ数 9×10<sup>5</sup> 程度)サイクロンの設計において、LES 流体解析を用いた サイクロン内の流れ場予測では、適切に解析条件を設定することで、サイクロン 内の流れ場予測の計算時間短縮が可能であり、設計を合理的にすすめられること がわかった。
- (4) 今回の流れ場調査より、サイクロンの分級性能を向上させるには、形状中心と旋回流れの中心の偏心を抑制するサイクロン構造が必要であることがわかった.また、サイクロン入口から流入した流れは、旋回しながら、一部円筒上部を伝わって、直接出口管から流出する可能性も考えられ、この流れを抑制するサイクロン構造の検討も必要であると考える.

#### 2.8 参考文献

- 株式会社ソフトウェアクレイドル, "SCRYU/Tetra Version 11 ユーザーズガイド (基礎編)",株式会社ソフトウェアクレイドル, (2013).
- (2) 株式会社ソフトウェアクレイドル、"SCRYU/Tetra Version 11 ユーザーズガイド リファレンス(プリ編)"、株式会社ソフトウェアクレイドル、(2013).
- (3) 株式会社ソフトウェアクレイドル、"SCRYU/Tetra Version 11 ユーザーズガイド
   リファレンス(ソルバー編)"、株式会社ソフトウェアクレイドル、(2013).
- (4) 株式会社ソフトウェアクレイドル, "SCRYU/Tetra Version 11 ユーザーズガイド リファレンス(ポスト編)",株式会社ソフトウェアクレイドル, (2013).
- (5) F. Nicoud, F. Ducros, "Subgrid-scale Stress Modeling Based on the Square of the Velocity Gradient tensor", Flow Turbulence and Combustion, Vol.62(1999), 183-200.
- (6) L. Temmerman, M. A. Leschziner, C. P. Mellen and J. Frohlich, "Investigation of wallfunction approximations and subgrid-scale models in large eddy simulation of separated flow in a channel with streamwise periodic constrictions", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol.24 (2003), 157-180.
- (7) J. H. ファーツィガー, M. ペリッチ, (小林敏雄, 谷口伸行, 坪倉誠訳), "コン ピュータによる流体力学", シュプリンガージャパン, (2003).
- (8) H. JASAK, H.G. WELLER and A.D. GOSMAN, "JASAKHIGH RESOLUTION NVD DIFFERENCING SCHEME FOR ARBITRARILY UNSTRUCTURED MESHES", INTERNATIONAL JOURNAL FOR NUMERICAL METHODS IN FLUIDS, Vol.31 (1999), 431-449.
- (9) 稲垣昌英,村田收,安倍賢一,近藤継男,"低マッハ数流れにおける流体共鳴音の数値解析法",日本機械学会論文集 B 編, Vol.66(2000), 2265-2273.
- (10) F. R. Menter, "ZONAL TWO EQUATION k-ω TURBULENCE MODLS FOR AERODYNAMIC FLOWS", AIAA, 93-2906(1993).
- (11) 井伊谷剛一, 集塵装置(新版), 日刊工業新聞社, (1972).
- (12) 井伊谷剛一, "サイクロン集じん器内の気流について(サイクロンに関する研究 第2報)", 日本機械学曾論文集, Vol. 18 (1952), 42-48.

- (13) 秋山修,加藤千幸,河手大輔,"円筒型サイクロンセパレータの粒子分離メカニズム(第1報,LES 解析の精度検証と流れ構造の詳細検討),日本機械学会論文集(B編)", Vol.78 (2012), 1886-1902.
- (14) 粉体工学会,"粉体工学便覧", 日刊工業新聞社, (1986).
# 第3章 円錐型サイクロンの内部流れの状況と集塵及び分 級性能の関係

#### 3.1 緒言

第2章で、サイクロンの分級性能を向上させるには、形状中心と変動する旋回流れ の中心の偏心を抑制するサイクロン構造が必要であること、また、サイクロン入口か ら流入した流れは旋回しながら一部円筒上部を伝わって、直接出口管から流出する可 能性もあり、この流れを抑制するサイクロン構造の検討も必要であることを述べた.

本章では、そのような流れのうち、非定常的な流れに関するものとして、形状中 心と変動する旋回流れの中心の偏心を抑制し、集塵及び分級性能を向上することを目 的として、円錐型サイクロンに逆円錐及びスタビライザーを付加した場合について、 集塵及び分級性能実験と LES 流体解析を実施する.それらの結果を比較検討するこ とで、サイクロン内部の流れの状況と集塵及び分級性能との関係を調べ、流れの状況 が粒子の運動へ及ぼす影響について議論する.

#### 3.2 研究で使用したサイクロンモデル

本研究で使用 4 種類のサイクロンを図 3.1, 図 3.2 に示す. 座標系は, サイクロンの底面の中心を原点とし, サイクロンの中心軸を y 軸, サイクロンへの流れの流入方向を z 軸とした.

図 3.1 の Type-A は胴体が内径 D=385mm の円筒部と円錐部及び集塵部からなる標 準的な形状の円錐型サイクロンである. Type-B は, Type-A において集塵部内の気流 速度を低減し,集塵部に一度流入した粒子の再飛散を抑制するため, Type-A の集塵 部入口に逆円錐<sup>(1)</sup>と呼ばれる気流制御部材を付加させたサイクロンである. 図 3.2 の Type-C と Type-D は, Type-A と Type-B において旋回流れの中心と形状中心の偏心を 抑制した場合の集塵及び分級性能を確認するため, Type-A と Type-B のサイクロン中 心軸にスタビライザーと呼ばれる丸棒形状の気流制御部材<sup>(2)</sup>を付加させたサイクロン



Type-A

Type-B

Fig. 3.1 Schematic diagrams for each cyclone



Type-C

Type-D

Inlet

Outlet

0.34D

1.02D

0.07D

1.32D

a

-b

· c



#### 3.3 集塵及び分級性能実験の方法

前節で述べた4種類のサイクロンの集塵及び分級性能を実験で求めた.本節はその 内容について述べる.

図 3.3 は実験装置の概略を示す.装置はサイクロン①,フィーダ②,フィルタ③及 び吸込みブロワ④から構成されている.また,静電気力の影響を小さくするため,サ イクロンはアースをとった.

試験粉体は、集塵プラントにおけるサイクロンの前工程のレシーバータンクで分離 捕集がしづらい比較的粒子径が小さい低密度の粒子を想定し、図 3.4 に示すような質 量中位径  $\overline{D}_p$ =5µm で粒子径  $D_p$ =1~10µm の範囲に分布した密度  $\rho_p$ =1200kg/m<sup>3</sup>の球形 アクリル粒子(積水化成品工業株式会社製、EXM-5)を用いた.

実験は、インバータ駆動方式の吸込ブロワによって、サイクロン内へ一定の平均流 速で空気を流入させた.また同時に、インバータ駆動かつロータリーバルブ方式のフ ィーダによって、サイクロン内へ一定の粒子体積率で粉体を供給させた.

サイクロン入口の平均流速 Uin は次式で定義した.

$$U_{in} = \frac{p_f T_a Q}{p_a T_f A_{in}} \tag{1}$$

ここで、 $p_f$ は渦流量計部の静圧、 $p_a$ は大気圧、 $T_a$ は大気温度、 $T_f$ は渦流量計部の温度、Qは渦流量計で計測した体積流量、 $A_{in}$ はサイクロン入口の管断面積である.

実験は、含塵空気流量の多いサイクロンを想定して、サイクロン入口の平均流速 *U*<sub>in</sub>=35m/s で行った. レイノルズ数 Re は次式で定義した.

$$Re = \frac{U_{in}D}{v} = 8.9 \times 10^5$$
 (2)

ここで, vは空気動粘度である.

含塵空気の粒子体積率  $\varphi$  は、実際に設計対象とするサイクロンの現状値から 7.5× 10<sup>-7</sup>程度とし、粉体の質量流量は 25g/min である.

ここで、粒子体積率が 10<sup>-7</sup>オーダーでは、粒子間の衝突と粒子運動が流れに与える 影響は無視できることが過去の研究で報告されている<sup>(3)</sup>. 以上の実験条件にて含塵空気をサイクロンへ2時間供給した後,サイクロンの質量 の増加量を測定し,サイクロン及びフィルタで捕集された粉体をサンプリングして粒 度分布を測定した.

これらの測定した質量及び粒度分布から次式で定義する集塵効率 η,部分分離効率 Δη 及び分級精度指数 κ を算出して,各サイクロンの集塵及び分級性能を評価した. なお,粉体の粒度分布測定には,レーザ回折式粒子径分布測定装置(株式会社島津製 作所製,SALD-2200)を用いた.

$$\eta = \frac{m_c}{m} \times 100 \tag{3}$$

$$\Delta \eta = \frac{m_c f_c}{m_c f_c + (m - m_c) f_f} \times 100 \qquad (4)$$

$$\kappa_1 = \frac{D_{p75}}{D_{p25}}$$
(5)

$$\kappa_2 = \frac{D_{p90}}{D_{p10}} \tag{6}$$

ここで、 $m_c$ はサイクロンで捕集された粉体の質量(=サイクロンの質量の増加量)、mはサイクロンへ供給した粉体の質量、 $f_c$ はサイクロンで捕集された粉体の粒子径毎の存在比率、 $f_f$ はフィルタで捕集された粉体の粒子径毎の存在比率、 $D_{px}$ は部分分離効率x%での粒子径である.



Fig. 3.3 Schematic diagram for experimental equipment



Fig. 3.4 Particle size distribution and the scanning electron microscope photograph of the test powder

# 3.4 LES 流体解析の方法

実験と同一形状の 4 種類のサイクロンの流れ場を LES 流体解析で求めた.本節で は、その内容について述べる.ただし、LES 流体解析の方法の詳細は、第 2 章で述 べているため、本節では、方法の概要のみ説明する.後述する解析条件は、第 2 章で 示した比較的大型で含塵空気流量が多いサイクロン (レイノルズ数 9×10<sup>5</sup> 程度)内 の特徴的な流れ<sup>(4)~(6)</sup>を再現できる条件である.

LES 流体解析には、株式会社ソフトウェアクレイドル製 SCRYU/Tetra for Windows を用いた<sup>(7)~(10)</sup>. 基礎式の離散化手法は有限体積法を用いた.格子フィルタにより平均化されたナビエ・ストークス方程式は、移流項及び拡散項については 2 次精度中心差分法を、時間項については 3 点近似の 2 次精度陰解法を適用した<sup>(11)</sup>. なお、計算の安定性向上のため、移流項に対して一次精度風上差分の影響を加えている<sup>(12)</sup>. SGS モデルは WALE モデル<sup>(13)</sup>を採用した.

解析格子の1例として, Type-A のサイクロンの解析格子を図 3.5 に示す.

解析格子は,壁面から 3 層をプリズム形状の 5 面体非構造格子,それ以外を最大 5mm サイズのテトラ形状の 4 面体非構造格子で構成した. Rankin 渦を精度良く捉え るために,サイクロン中央部の格子は,周辺の格子の半分のサイズとしてある. Type-B, Type-C 及び Type-D の解析格子についても Type-A と同様な構成としており, 各サイクロンの要素数は, Type-A で 22,274,926 要素, Type-B で 21,886,136 要素, Type-C で 21,402,791 要素, Type-D で 21,593,363 要素である.

境界条件は、入口境界に一様な流入流速  $U_{in}=35$ m/s、出口境界に静圧  $p_{out}=0$ Pa、壁 面に速度零を与え、壁面近傍では Werner – Wengle による 2 層モデルを 3 層モデルに 拡張した条件を用いた<sup>(14)</sup>. 計算の最初に Shear-stress transport(SST) k- $\omega$  乱流モデル<sup>(15)</sup> による定常解析を 1000 ステップ行って、その結果を LES 解析の初期値とした.

解析は、クーラン数 C を 4 とし、各要素幅  $\Delta L_i$  と各要素における流速  $u_i$  より次式 で定義された時間刻み  $\Delta t_i$ の最小値  $\Delta t$  で進行させた.

$$\Delta t_i = \frac{\Delta L_i}{u_i} C, \qquad i = 1, 2, \cdots, n$$
(7)

ここで, nは要素数である.

サイクロン入口の平均圧力値が安定しはじめたところから平均化処理を行い,流 れ場を求めた.



Fig. 3.5 Mesh for Type-A cyclone

#### 3.5 集塵及び分級性能実験の結果

各サイクロンの集塵効率 η を表 3.1 に示す.

標準的な円錐型サイクロンの Type-A に対し,逆円錐を付加した Type-B では集塵 効率が向上するが,スタビライザーを付加した Type-C では集塵効率が低下する. Type-C に逆円錐が付加された形状である Type-D では Type-C より集塵効率が向上す る.

各サイクロンの部分分離効率を図 3.6 に示す.

Type-A に対し, 逆円錐を付加した Type-B では, 分離可能な粒子径が小さくなるとともに, 各粒子径の部分分離効率が向上するが, スタビライザーを付加した Type-C では広範囲の粒子径で部分分離効率が低下する. Type-C に逆円錐が付加された形状である Type-D では, Type-C に対し, 分離可能な粒子径が小さくなるとともに, 各粒子径の部分分離効率が向上する.

これらのことから、円錐型サイクロンの集塵性能は、逆円錐を付加することで向 上し、スタビライザーを付加することで低下することがわかる.また、スタビライザ ーを付加した状態で、逆円錐を付加すれば、スタビライザーによる集塵性能の低下が 解消されることがわかる.さらに、スタビライザーを付加せず逆円錐を付加した場合 が、最も集塵性能が高くなることがわかる.

各サイクロンの分級精度指数 κ を表 2.2 に示す.分級精度指数は,図 3.6 に示す部 分分離効率の結果から得られ,分級精度指数が1に近いほど分級性能が良いこととなる.

Type-A に対し、逆円錐を付加した Type-B では、 $\kappa_1$ 、 $\kappa_2$ とも1 に近づき、分級性能 が向上するが、スタビライザーを付加した Type-C では分級性能が低下する. Type-C に逆円錐が付加された形状である Type-D では、Type-C より $\kappa_2$ が1 に近づく.

円錐型サイクロンの分級性能は集塵性能と同様に,逆円錐を付加することで向上し, スタビライザーを付加することで低下することがわかる.また,スタビライザーを付 加せず逆円錐を付加した Type-B のサイクロンが,最も分級精度指数が1に近く,分 級性能が良いことがわかる.

以上のことから、含塵空気流量が多い円錐型サイクロン(レイノルズ数 8.9×10<sup>5</sup>) の集塵及び分級性能は、逆円錐を付加することで向上し、スタビライザーを付加する ことで低下することがわかった.また,スタビライザーなしで逆円錐を付加したサイ クロンが,最も集塵及び分級性能が良いことがわかった.スタビライザーを付加する ことは,集塵及び分級性能向上策として有用とはいえないことがわかった.



Table 3.1 Dust collection efficiency for each cyclone

Fig 3.6 Partial separation efficiency for each cyclone

	Type-A	Type-B	Туре-С	Type-D
$\kappa_{l}$ (-)	1.12	1.09	1.14	1.14
$\kappa_2$ (-)	1.26	1.19	1.34	1.30

Table 3.2 Accuracy of classification for eacy cyclone

# 3.6 各円錐型サイクロン内の LES 流体解析の結果及び考察

各サイクロン内部における接線方向速度 u<sub>θ</sub>,軸方向速度 u<sub>y</sub>及び半径方向速度 u<sub>r</sub>の 解析結果をそれぞれ図 3.7~図 3.10,図 3.11~図 3.14,図 3.15~図 3.18 に示す.各方 向速度はサイクロン入口の平均流速 U<sub>in</sub>で無次元化し,その時刻推移を表している. サイクロンの入口圧力が十分に安定した時刻内において,解析結果は 3,000 ステップ

(Type-A, Type-C では 3,000 ステップ分の時間 T= $\Delta t \times 3000$ =0.06s 程度, Type-B, Type-D では 3000 ステップ分の時間 T= $\Delta t \times 3,000$ =0.05s 程度) を 6 分割するよう, 500 ステップ ( $\Delta t \times 500$ =0.01s 程度) 毎に平均化して求めた. なお, 半径方向速度  $u_r$ の正 の方向は, サイクロン中心から外向き方向, 軸方向速度  $u_y$ の正の方向は, サイクロ ンの底面から上向き方向, 接線方向速度  $u_\theta$ の正の方向は, サイクロンへ流れが流入 する方向である.

接線方向速度  $u_{\theta}$ については、図 3.7~図 3.10 より、いずれのサイクロンにおいても、 中央部では強制渦、外周部では自由渦を有する特徴的な Rankin 渦が存在する.また、 スタビライザーの有無にかかわらず、逆円錐が付加された Type-B と Type-D では集 塵部全域で接線方向速度  $u_{\theta}$ が低下している.

軸方向速度 *u<sub>y</sub>* については,図 3.11~3.14 より,いずれのサイクロンにおいても時間に対して大きな変化はみられない.円筒部及び円錐部で,外側が下降流で内側は上昇流となっている.

また,図 3.11~3.14 の線グラフより,スタビライザーの有無にかかわらず,逆円錐が付加された Type-B と Type-D では,逆円錐が付加されていない Type-A 及び Type-C と比較して,集塵部において軸方向速度の絶対値は小さく一様である.

半径方向速度 *u*<sub>r</sub>については,図 3.15~3.18 より, Type-A のみサイクロン中央部で 正負の変動が大きい. Type-A に対し,逆円錐を付加した Type-B やスタビライザーを 付加した Type-C と Type-D では,サイクロン中央部で半径方向速度の変動の大きさ が小さくなっている.

この点を明確にするために, x-y 断面の各サイクロンにおける流速ベクトルの分布 を図 3.19, 図 3.20 に示す. ベクトルの長さは, 流れ方向を分かりやすくするため, 一定長として表している.

図 3.19, 図 3.20 より, 前述したように, いずれのサイクロンにおいても円筒部及

び円錐部で,外側が下降流で内側は上昇流となっている.

Type-A では、円錐部中央における上昇流となる領域の各位置で、上昇流の流れ方向が時刻とともにサイクロン中心方向からその反対方向までの範囲内で広く変化しているが、逆円錐を付加した Type-B では、上昇流の流れ方向はその時間的変動が小さくなるとともに軸方向と平行な向きに近づいている.

さらにスタビライザーを付加した Type-C と Type-D では、上昇流の流れ方向はその時間的変動が顕著に小さく、ほぼ軸方向と平行な向きとなっている.

これら上昇流の流れ方向が時間によってサイクロン中心方向からその反対方向ま での範囲内で変化する度合は、半径方向速度の時間的変動に対応していることから、 逆円錐やスタビライザーを付加することによって、円錐部中央における上昇流となる 領域で半径方向速度 *u*,の変動の大きさは明らかに小さくなっている.

サイクロン中央部の半径方向速度 *u*<sub>r</sub> の変動の大きさが小さくなった理由は,逆円 錐やスタビライザーを付加することによって,サイクロンの形状中心と旋回流れの中 心との偏心が小さくなり,接線方向に対する流れの傾斜角が小さくなったためである と考えることができる.この点を明確にするため,x-z 断面(y=2.20D)の各サイク ロン中心部における流速ベクトルの分布を図 3.21 に示す.

Type-A に対し、スタビライザーを付加した Type-C と Type-D では旋回流れがスタ ビライザー表面の円周方向に沿って流れていることが確認できる.よって、旋回流れ の中心と形状中心がほぼ一致する流れとなり、旋回流れの接線方向に対する傾斜角が 小さくなっている.

また、スタビライザーなしの逆円錐を付加した Type-B においても、Type-A と比較 して明らかに、旋回流れの中心と形状中心の偏心が小さい.

Type-A では、サイクロン中央部付近で、サイクロンの形状中心を横断するような 旋回流れの存在する.

以上のことから,逆円錐を付加することによって流れの状況は,円錐部において は,旋回流れの中心と形状中心の偏心が抑制されることによって,サイクロン中央部 で旋回流れの接線方向に対する傾斜角が小さくなるとともに,サイクロンの形状中心 を横断する旋回流れが抑制され,また集塵部においては,下降・上昇の旋回流れの気 流速度が低下することがわかった.

また、スタビライザーを付加することによって流れの状況は、旋回流れがスタビ

ライザー表面の円周方向に沿って流れ,旋回流れの中心とサイクロンの形状中心がほ ぼ一致する流れとなり,旋回流れの接線方向に対する傾斜角が小さくなることがわか った.

っまり,集塵及び分級実験において,逆円錐を付加することによってサイクロン の集塵及び分級性能が向上した理由やスタビライザーを付加することによってサイク ロンの集塵及び分級性能が低下した理由は,前述したサイクロンの構造及び構成の違 いによる流れの状況が,粒子の運動へ影響を与えたものであると考えることができる. 逆円錐を付加することによってサイクロンの集塵及び分級性能が向上した理由は,以 下の二点が考えられる.

- (1)集塵部における下降・上昇の旋回流れの気流速度が低下することによって、 円錐部で分離され集塵部に集められた粒子が、再度集塵部の旋回流れに巻き 上げられ浮上してサイクロンより排出される頻度が低下するためと考えるこ とができる。
- (2) 円錐部内の旋回流れの中心とサイクロンの形状中心の偏心がある場合は、サイクロンの形状中心を横断する流れがあることから、横断する流れに含まれる粒子は、サイクロン中央部の上昇流によって分離されないまま排出する場合もあるが、旋回流れの中心とサイクロンの形状中心の偏心がない場合は、サイクロンの形状中心を横断する流れの頻度が低下するため、粒子のサイクロンからの排出が抑制されるためと考えることができる.

また,スタビライザーを付加することによって集塵及び分級性能が低下した理由 は,図 3.22 に示すように,x-y 断面(y=2.20D)のサイクロン中央部におけるスタビ ライザーの有り無しによって異なる流れの比較結果から説明できる.

図 3.22 (a)より, Type-A に対し, スタビライザーが付加した Type-C では, スタビ ライザー表面付近で接線方向速度の低下がみられるが, 軸方向速度に顕著な差はみら れない. また, このようなスタビライザーの有り無しによって異なる流れの状況は, 逆円錐を付加した状態でも同様な傾向となることが, 図 3.22 (b)の Type-B と Type-D の比較結果からみてとれる. よって, スタビライザーは, スタビライザー表面近傍の 旋回流の速度が低下することから, 円錐部においてスタビライザー表面に混入した粒 子が、十分な遠心力を得られず、分離されないまま上昇流とともにサイクロンより排 出されるため、集塵及び分級性能が低下すると考えられる.

ここで前述した旋回流れの中心と形状中心の偏心が図 3.22 からみてとれる. Type-A では,時刻とともに移動する旋回流れ中心と形状中心の偏心によって,強制渦が揺動する時間的変動がみられるが,逆円錐が付加された Type-B では,旋回流れの中心と形状中心の偏心が抑制されるため,強制渦が揺動する時間的変動はみられない.また,スタビライザーが付加された Type-C 及び Type-D においても,強制渦が揺動する時間的変動がみられず,旋回流れの中心と形状中心がほぼ一致する流れとなっている.



Туре-А

Fig. 3.7 Computed tangential velocity inside Type-A cyclone in the x-y section



Туре-В

Fig. 3.8 Computed tangential velocity inside Type-B cyclone in the x-y section



Туре-С

Fig. 3.9 Computed tangential velocity inside Type-C cyclone in the x-y section



Type-D

Fig. 3.10 Computed tangential velocity inside Type-D cyclone in the x-y section



Type-A

Fig. 3.11 Computed axial velocity inside Type-A cyclone in the x-y section



Type-B

Fig. 3.12 Computed axial velocity inside Type-B cyclone in the x-y section



Туре-С

Fig. 3.13 Computed axial velocity inside Type-C cyclone in the x-y section



Type-D

Fig. 3.14 Computed axial velocity inside Type-D cyclone in the x-y section



Туре-А

Fig. 3.15 Computed radial velocity inside Type-A cyclone in the x-y section



Type-B

Fig. 3.16 Computed radial velocity inside Type-B cyclone in the x-y section



Туре-С

Fig. 3.17 Computed radial velocity inside Type-C cyclone in the x-y section



Type-D

Fig. 3.18 Computed radial velocity inside Type-D cyclone in the x-y section



Fig. 3.19 Computed fluid velocity distributions inside Type-A and Type-B cyclones in the x-y section



Fig. 3.20 Computed fluid velocity distributions inside Type-C and Type-D cyclones in the x-y section



Fig. 3.21 Computed fluid velocity distributions at the central part for each cyclone in the x-z section (y = 2.20D)



Fig 3.22 Comparisons of the computed fluid velocity distributions in the central parts for each cyclone

# 3.7 第3章のまとめ

本章では,第2章で議論した内容のうち,非定常的な流れに関するものとして,形 状中心と変動する旋回流れの中心の偏心を抑制し,集塵及び分級性能を向上すること を目的として,円錐型サイクロンに逆円錐及びスタビライザーを付加した場合につい て,集塵及び分級性能実験と LES 流体解析を実施し,それらの結果を比較検討する ことで,サイクロン内部の流れの状況と集塵及び分級性能との関係を調べ,流れの状 況が粒子の運動へ及ぼす影響について議論した.以下に主要な結論を述べる.

- (1) 本研究の実験条件においては、スタビライザーなしで逆円錐を付加した場合の円錐型サイクロンの集塵及び分級性能が最も良い.
- (2) 円錐型サイクロンにおいて逆円錐の付加は,集塵部における下降・上昇の旋回流れの気流速度を低下させ,集塵部に集められた粒子が,集塵部の旋回流れによって巻き上げられる頻度を低下させられることで,粒子のサイクロンからの排出を抑制する効果がある.さらに円錐部において,旋回流れの中心と形状中心の偏心が抑制されるため,形状中心を横断する流れの頻度が低下し,その流れに含まれる粒子が,中央部の上昇流によって排出される頻度を低下させられることで,粒子のサイクロンからの排出を抑制する効果がある.
- (3) 円錐型サイクロンにおいてスタビライザーの付加は、旋回流れがスタビライ ザー表面に沿って流れ、旋回流れの中心と形状中心をほぼ一致させるため、 形状中心を横断する流れは存在しないが、スタビライザー表面近傍の旋回流 の速度を低下させるため、円錐部においてスタビライザー表面近傍へ混入し た粒子が、十分な遠心力を得られず、分離されないまま上昇流とともにサイ クロンから排出されることがわかった.
- (4) 上述の(1)~(4)より、適切な解析条件の基で、LES 流体解析を用いてサイク ロン内部の流れ場(旋回流、上昇・下降流)をシミュレーションすることで、 サイクロンの構造及び構成の違いによる集塵及び分級性能を定性的に比較す ることが可能である.円錐型サイクロンの設計においては、スタビライザー を付加せず円錐部の旋回流れの中心と形状中心の偏心を抑え、集塵部の下 降・上昇の旋回流の速度を低下させることを考慮したサイクロンの構造と構 成を、LES 流体解析によって検討することで、集塵及び分級性能が向上する

サイクロンの設計が可能であると考えられる.

#### 3.8 参考文献

- H. Yoshida, Y. Nishimura, K. Fukui and T. Yamamoto, "Effect of apex cone shape on fine particle classification of gas-cyclone", Powder Technology, Vol. 204(2010), 54-62.
- (2) 秋山修,加藤千幸,河手大輔,"円筒型サイクロンセパレータの粒子分離メカニズム(第2報,粒子追跡の精度検証と粒子運動の詳細検討),日本機械学会論文集(B編)", Vol.78 (2012), 1903-1918.
- S. Elgobashi, "Particle-laden Turbulent flows: direct simulation and closure models", Applied Scientific Research, Vol.48 (1991), 301-314.
- (4) 井伊谷剛一, 集塵裝置(新版), 日刊工業新聞社, (1972).
- (5) 井伊谷剛一, "サイクロン集じん器内の気流について(サイクロンに関する研究 第2報)", 日本機械学曾論文集, Vol. 18 (1952), 42-48.
- (6) 秋山修,加藤千幸,河手大輔,"円筒型サイクロンセパレータの粒子分離メカニズム(第1報,LES 解析の精度検証と流れ構造の詳細検討),日本機械学会論文集(B編)", Vol.78 (2012), 1886-1902.
- (7) 株式会社ソフトウェアクレイドル、"SCRYU/Tetra Version 11 ユーザーズガイド
   (基礎編)",株式会社ソフトウェアクレイドル、(2013).
- (8) 株式会社ソフトウェアクレイドル、"SCRYU/Tetra Version 11 ユーザーズガイド
   リファレンス(プリ編)、株式会社ソフトウェアクレイドル、(2013).
- (9) 株式会社ソフトウェアクレイドル、"SCRYU/Tetra Version 11 ユーザーズガイド
   リファレンス(ソルバー編)、株式会社ソフトウェアクレイドル、(2013).
- (10) 株式会社ソフトウェアクレイドル, "SCRYU/Tetra Version 11 ユーザーズガイド リファレンス (ポスト編)",株式会社ソフトウェアクレイドル, (2013).
- (11) J. H. ファーツィガー, M. ペリッチ, (小林敏雄, 谷口伸行, 坪倉誠訳), "コン ピュータによる流体力学", シュプリンガージャパン, (2003).

- (12) H. JASAK, H.G. WELLER and A.D. GOSMAN, "JASAKHIGH RESOLUTION NVD DIFFERENCING SCHEME FOR ARBITRARILY UNSTRUCTURED MESHES", INTERNATIONAL JOURNAL FOR NUMERICAL METHODS IN FLUIDS, Vol.31 (1999), 431-449.
- (13) F. Nicoud, F. Ducros, "Subgrid-scale Stress Modeling Based on the Square of the Velocity Gradient tensor", Flow Turbulence and Combustion, Vol.62(1999), 183-200.
- (14) 稲垣昌英,村田收,安倍賢一,近藤継男,"低マッハ数流れにおける流体共鳴音の数値解析法",日本機械学会論文集 B 編, Vol.66(2000), 2265-2273.
- (15) F. R. Menter, "ZONAL TWO EQUATION k-ω TURBULENCE MODLS FOR AERODYNAMIC FLOWS", AIAA, 93-2906(1993).

# 第4章 円錐型サイクロン内の粒子軌跡

# 4.1 緒言

本章では、集塵及び分級性能の良いサイクロンを設計するための方針や手法を得る ことを目的として、LES 流体解析に新たに粒子追跡を加えた数値シミュレーション を行い、サイクロンから排出したり排出しなかったりする粒子径の粒子、つまりサイ クロンの分級性能を低下させる粒子径の粒子のサイクロン内における軌跡を調べ、粒 子の投入位置との関係について議論する.

# 4.2 研究で使用したサイクロンモデル

本研究で使用した円錐型サイクロンを図 4.1 に示す. 座標系は,サイクロンの底面の中心を原点とし,サイクロンの中心軸を y 軸,サイクロンへの流れの流入方向を z 軸とした.形状は第2章,第3章で用いた標準的な形状のサイクロンと同様であり, 胴体が内径 D=385mmの円筒部と円錐部及び集塵部からなる円錐型サイクロンである.



Fig. 4.1 Schematic diagram for conical cyclone
## 4.3 LES 流体解析と粒子追跡による数値シミュレーションの方法

流体解析と粒子追跡による数値シミュレーションを用いて,サイクロンから排出し たり排出しなかったりする粒子径の粒子,つまりサイクロンの分級性能を低下させる 粒子径の粒子のサイクロン内における軌跡を求めた.本節ではその内容について述べ る.

本研究では、設計対象とするサイクロンの現状値からサイクロン入口における含 塵空気量の粒子体積率 φ が 10<sup>-7</sup> オーダーと低いため、粒子間の衝突と粒子運動が流 れに与える影響は無視できる<sup>(1)</sup>として計算をすすめる. 流体解析により得られたサイ クロン内の瞬時の流れ場を用いて、粒子の運動方程式を時間積分することにより、サ イクロン内の粒子軌跡を求めた.

数値シミュレーションに使用した解析格子を図 4.2 に示す.

格子は,壁面から3層をプリズム形状の5面体非構造格子,それ以外を最大5mm サイズのテトラ形状の4面体非構造格子で構成し,サイクロン中央部の格子は, Rankin 渦を精度良く捉えるために,周辺の格子の半分のサイズとしてある.要素数は22,274,926要素である.

流体解析として, SCRYU/Tetra for Windows(株式会社ソフトウェアクレイドル 製)<sup>(2)~(5)</sup>を用いて LES 流体解析を行った. LES 流体解析の方法の詳細は, 第2章で 述べているため,本節では,方法の概要のみ説明する.

基礎式の離散化手法は有限体積法を用いた.格子フィルタにより平均化されたナ ビエ・ストークス方程式は,移流項及び拡散項については 2 次精度中心差分法を,時 間項については 3 点近似の 2 次精度陰解法を適用した<sup>(6)</sup>.計算の安定性向上のため, 移流項に対して一次精度風上差分の影響を加えている<sup>(7)</sup>. SGS モデルは WALE モデ ル<sup>(8)</sup>を採用した.

LES 流体解析の境界条件として、含塵空気流量の多いサイクロンを想定してサイ クロン入口面に一様な流入流速  $U_{in}$ =35m/s、サイクロン出口面に静圧  $p_{out}$ =0Pa、壁面 に速度零を与え、壁面近傍では Werner–Wengle による 2 層モデルを 3 層モデルに拡張 した条件を用いた<sup>(9)</sup>. 計算の最初に Shear-stress transport(SST) k- $\omega$  乱流モデル<sup>(10)</sup>によ る定常解析を 1000 ステップ行って、その結果を LES 解析の初期値とした.

LES 流体解析は、クーラン数 C を 4 として、各要素幅  $\Delta L_i$  と各要素における流速  $u_i$ 

より式(5)で定義される時間刻み Δt<sub>i</sub>の最小値 Δt で進行させた.

$$\Delta t_i = C \frac{\Delta L_i}{u_i} = 4 \frac{\Delta L_i}{u_i}, \qquad i = 1, 2, \cdots, n$$
(5)

ここで, nは要素数である.

粒子追跡は、サイクロンの入口圧力が安定した時刻以降の時々刻々の瞬時の流れ場を用いて行った.実際には、LES 解析により得られた 90,001~132,501step までの流 れ場データを用いて、粒子の運動方程式を時間積分することにより粒子の時々刻々の 粒子軌跡を求めた.

粒子の運動方程式を式(6)に示す.

$$\frac{d^2 x_p}{dt_p^2} = \frac{1}{2m_p} C_D \rho_a |u_a - u_p| (u_a - u_p) S_p + g$$
(6)

ここで、 $x_p$ は粒子の位置ベクトル、 $t_p$ は粒子追跡を始めた時からの時間、 $m_p$ は粒子の 質量、 $C_D$ は粒子の空気抗力係数、 $\rho_a$ は空気密度、 $u_a$ は流体つまり空気の速度ベクト ル、 $u_p$ は粒子の速度ベクトル、 $S_p$ は粒子の断面積、gは重力加速度ベクトルである.

(6)式の右辺第1項は流体抗力,第2項は重力を示している.固体粒子と空気の密度比が約1000倍であるために,仮想質量,圧力勾配力,Basset力,Saffman 揚力などは考慮していない.また,粒子の自転を取り扱わないためにMagnus 揚力も考慮していない.さらに,壁面に到達した粒子の反発力や付着力も考慮していない.

(6)式中の空気抗力係数 C<sub>D</sub>は式(7)で与えた.

$$C_{D} = \begin{cases} 24(1+0.15 \operatorname{Re}_{p}^{0.687}) / \operatorname{Re}_{p} & (\operatorname{Re}_{p} \le 1000) \\ 0.44 & (\operatorname{Re}_{p} > 1000) \end{cases}$$
(7)

ここで、Repは粒子レイノルズ数を示している.

(7)式において低い粒子レイノルズ数に対するものは Shiller と Naumann の式<sup>(11)</sup>であり、高い粒子レイノルズ数に対するものは Newton 抵抗である. 粒子レイノルズ  $\operatorname{Re}_p$ は次式で定義される.

$$\operatorname{Re}_{p} = \frac{\rho_{a} |u_{a} - u_{p}| D_{p}}{\mu}$$
(8)

ここで、Dpは粒子の直径、µは空気の粘性係数である.

運動方程式の時間積分には、高い精度を得るために、4 次精度のルンゲクッタを用いた.

次に、粒子追跡の解析条件について説明する.

図 4.3 は流体解析より求めた瞬時の流れ場データと粒子追跡より求めた粒子軌跡デ ータとの関係を示す. 図の下段の黒丸は各 step における瞬時の流れ場データを表し ており、上段の黒丸は各 step における粒子軌跡データを表している.

各粒子径における粒子は、その流入速度を y, z 方向に等分割したサイクロン入口 面の格子点 (17×5 個) 中心から、流れ場データの 90,001step から 92,501step まで 500step ( $\Delta t \times 500=0.01s$  程度) おきに 6 回、計 510 個を投入した. その流入速度は、 LES 流体解析同様 35m/s とした. 粒子追跡は、隣り合うステップの流れ場データの時 刻差  $\Delta t_j$  ( $\Delta t_j=2 \times 10^{-5}s$  程度) を 40 分割した粒子追跡の時間刻み  $\Delta t_{pj}=\Delta_{tj}/40$  ( $\Delta t_{pj}=5 \times$  $10^{-7}s$  程度) で進行させた. よって、90,001~90,002step の流れ場間の粒子追跡は、 90,001step の流れ場データを用いて、時間刻み  $\Delta t_{p1}=\Delta t_1/40$  で計算を行い、90,002~ 90,003step の流れ場間の粒子追跡は、90,002step の流れ場データを用いて、時間刻み  $\Delta t_{p2}=\Delta t_2/40$  で計算を行った. 以降のステップ間の流れ場の粒子追跡においても同様な 方法で計算をすすめて、サイクロンから排出する粒子数がほぼ一定となる状態まで計 算を行った.

粒子には,集塵プラントにおけるサイクロンの前工程のレシーバータンクで分離捕 集がしづらい比較的粒子径が小さい低密度の粒子を想定し,第3章の実験で用いた球 形 ア ク リ ル 粒 子 と 同 じ 密 度  $\rho_p$ =1200kg/m<sup>3</sup>,4 種 類 の 異 な る 粒 子 径  $D_p$ (0.5,1.0,1.5,2.0µm)の粒子を用いた.これらの粒子径は,予備計算(粒子径  $D_p$ =0.5,1.0,1.5,2.0,2.5,3.0,3.5,4.0,5.0,7.0,10.0µm における各粒子径の粒子をサイクロン 入口面の 9×3=27 点から,1回のみ投入)を行い,その結果よりサイクロンから排出 したり排出しなかったりする軌跡をもつ粒子の粒子径を確認した上で,決定した.

71



Fig. 4.2 Mesh for the conical cyclone



Fig. 4.3 Relationship between the instantaneous fluid field data and the particle trajectory data

4.4 数値シミュレーションによる円錐型サイクロン内の粒子軌跡 の解析結果及び考察

粒子径 *D<sub>p</sub>*=0.5,1.0,1.5,2.0μm において,各粒子径の粒子のサイクロン内における軌跡の典型例を図 4.4~図 4.7 に示す.

各図の(a)に関しては、サイクロンへ流入した粒子は、旋回しながら下降し、集塵 部に到達する前に反転して中央部を上昇し、上部の出口管から排出する、つまり、サ イクロンで分離捕集されずに、サイクロンから排出する粒子の典型的な軌跡である. 各図の(b)に関しては、サイクロンへ流入した粒子は、旋回しながら下降し、集塵部 に到達して、集塵部で旋回しつづける、つまり、サイクロンで分離捕集され、サイク ロンから排出しない粒子の典型的な軌跡である.サイクロンで分離捕集される粒子は、 サイクロンから排出する粒子に対し、サイクロンへ流入直後スムーズに旋回降下して いる.このことから、サイクロンの分級性能は、サイクロン入口直後の流れによって 左右されると考えられ、粒子の投入位置によってサイクロンの分級性能が左右される と推測される.

図 4.8~図 4.11 は, 粒子径 *D<sub>p</sub>*=0.5,1.0,1.5,2.0µm の各粒子において,各投入位置から 投入されて排出される粒子の軌跡数,また,排出されない粒子の軌跡数を示す.図中 の上側左図は,サイクロン入口面のサイクロン中心軸方向(y 方向)における粒子の 投入位置が同じである 5 ヶ所(*w*=-2/6W~2/6W)の結果を足し合わせたものである. 上側右図は,x 方向における粒子の投入位置が同じである 19 ヶ所(*h*=-8/18W~ 8/18W)の結果を足し合わせたものである.また,図中の下側図は,各投入位置の結 果を表している.

図中の上側左図に示すように、サイクロン入口面の中心軸方向(y 方向)では、中 央部(*h*=0)付近から粒子が投入された場合、他の位置から投入された場合に対し、 サイクロンから排出される粒子の軌跡数は、粒子径全体を通して比較的少なくなって いる.一方、図中の上側右図に示すように、サイクロン入口面における x 方向では、 投入位置の違いによるサイクロンから排出される粒子の軌跡数の違いは、粒子径全体 を通して共通かつ顕著な差がない.

図中の下側の図では、サイクロンから排出する粒子の軌跡数が 1~5 となる投入位 置が数多く存在することがみてとれる.これは、同じ投入位置でも投入時刻の違いに

74

よって粒子がサイクロンから排出したりしなかったりすることを表している.本研究 では、非定常な流れ場データを粒子追跡の入力条件として与えている.よって、投入 時刻を異にしてサイクロンへ投入された同じ粒子径の粒子は、同じ投入位置であって も時間によって異なる大きさ・方向の流体抗力を受け、同じ粒子径の粒子は時間によ って異なる経路を辿り、サイクロンから排出したりしなかったりすると考えられる.

サイクロン入口面のサイクロン中心軸方向(y 方向)中央部(*h*=0)付近から投入 される粒子は,前述したように,他の位置から投入された粒子に対し,サイクロンか ら排出される粒子の軌跡数が比較的少なくなっていることから,サイクロン内の流れ 場の非定常性が分級性能低下へ与える影響が比較的小さいと考えられる.

以上のことから、サイクロンの分級性能の向上には、サイクロン内の流れ場の非 定常性が分級性能低下へ与える影響を少なくするため、サイクロン入口面のサイクロ ン中心軸方向(y 方向)中央部(h=0)付近から粒子を投入するよう誘導するサイク ロン入口の構造を検討することが必要であると考えられる.



Fig. 4.4 Trajectory of a particle with a diameter of 0.5  $\mu m$ 



Fig. 4.5 Trajectory of a particle with a diameter of 1.0  $\mu m$ 



Fig. 4.6 Trajectory of a particle with a diameter of 1.5  $\mu m$ 



Fig. 4.7 Trajectory of a particle with a diameter of 2.0  $\mu m$ 



Fig. 4.8 Number of exhausted and non exhausted particles trajectory for each injection position ( $D_p = 0.5 \ \mu m$ )



Fig. 4.9 Number of exhausted and non exhausted particles trajectory for each injection position ( $D_p = 1.0 \ \mu m$ )



Fig. 4.10 Number of exhausted and non exhausted particles trajectory for each injection position ( $D_p = 1.5 \ \mu m$ )



Fig. 4.11 Number of exhausted and non exhausted particles trajectory for each injection position ( $D_p = 2.0 \ \mu m$ )

#### 4.5 第4章のまとめ

本章では、集塵及び分級性能の良いサイクロンを設計するための方針や手法を得 ることを目的として、LES 流体解析に新たに粒子追跡を加えた数値シミュレーショ ンを行い、サイクロンから排出したり排出しなかったりする粒子径の粒子、つまりサ イクロンの分級性能を低下させる粒子径の粒子のサイクロン内における軌跡を調べ、 粒子の投入位置との関係について議論した.以下に結論を述べる.

- (1) サイクロン入口面のサイクロン中心軸方向中央部付近から粒子が投入された 場合,他の位置から投入された場合に対し、サイクロンから排出される粒子 の軌跡数は比較的少なくなる.
- (2) 同じ投入位置でも投入時刻を異にしてサイクロンへ投入された粒子は、サイ クロンから排出したりしなかったりする.これは、サイクロン内の流れ場の 非定常性に起因するものであると考えられる.
- (3) 上記(1)~(2)より、円錐型サイクロン設計において、サイクロンの分級性能 を向上させるには、サイクロン内の流れ場の非定常性が分級性能低下へ与え る影響を少なくするため、サイクロン入口面のサイクロン中心軸方向中央部 付近から粒子を投入するよう誘導するサイクロン入口の構造を検討すること が必要であると考えられる.
- (4) 上記(1)~(3)より、LES 流体解析と粒子追跡による数値シミュレーションを 用いて、サイクロンから排出したり排出しなかったりする粒子径の粒子の経 路をシミュレートすることで、分級性能の良いサイクロン設計を合理的にす すめられるものと考える.

#### 4.6 参考文献

- S. Elgobashi, "Particle-laden Turbulent flows: direct simulation and closure models", Applied Scientific Research, Vol.48 (1991), 301-314.
- (2) 株式会社ソフトウェアクレイドル、"SCRYU/Tetra Version 11 ユーザーズガイド (基礎編)"、株式会社ソフトウェアクレイドル、(2013).
- (3) 株式会社ソフトウェアクレイドル、"SCRYU/Tetra Version 11 ユーザーズガイド リファレンス(プリ編)"、株式会社ソフトウェアクレイドル、(2013).
- (4) 株式会社ソフトウェアクレイドル, "SCRYU/Tetra Version 11 ユーザーズガイド
   リファレンス(ソルバー編)",株式会社ソフトウェアクレイドル, (2013).
- (5) 株式会社ソフトウェアクレイドル、"SCRYU/Tetra Version 11 ユーザーズガイド リファレンス(ポスト編)",株式会社ソフトウェアクレイドル,(2013).
- (6) J. H. ファーツィガー, M. ペリッチ, (小林敏雄, 谷口伸行, 坪倉誠訳), "コ ンピュータによる流体力学", シュプリンガージャパン, (2003).
- (7) H. JASAK, H.G. WELLER and A.D. GOSMAN, "JASAKHIGH RESOLUTION NVD DIFFERENCING SCHEME FOR ARBITRARILY UNSTRUCTURED MESHES", INTERNATIONAL JOURNAL FOR NUMERICAL METHODS IN FLUIDS, Vol.31 (1999), 431-449.
- (8) F. Nicoud, F. Ducros, "Subgrid-scale Stress Modeling Based on the Square of the Velocity Gradient tensor", Flow Turbulence and Combustion, Vol.62(1999), 183-200.
- (9) 稲垣昌英,村田收,安倍賢一,近藤継男,"低マッハ数流れにおける流体共鳴
   音の数値解析法",日本機械学会論文集 B 編, Vol.66(2000), 2265-2273.
- (10) F. R. Menter, "ZONAL TWO EQUATION k-ω TURBULENCE MODLS FOR AERODYNAMIC FLOWS", AIAA, 93-2906(1993).
- (11) V. L. Schiller and A. Naumann, "Uber die grundlegenden berechnungen bei der scherkraftaufbereitung", Z. Verenines Deutscher Inge., Vol.77 (1933), 318-321.

# 第5章 結言

## 5.1 本研究のまとめ

実際の集塵プラントにおいて数多く使用されている比較的大型で含塵空気流量の多い(レイノルズ数 9×10<sup>5</sup> 程度)円錐型サイクロンを対象に,LES を用いた流体解析 によりサイクロン設計の方針や手法を示すことを目的とした.

第2章から第4章の各章の内容を以下に要約する.

第2章では、まず円錐型及び円筒型2種類のサイクロンを対象に LES を適用し、 内壁面静圧の解析結果と実験結果との比較より解析条件(格子解像度,初期の流れ場、 時間刻み)の妥当性を確認した.サイクロンの内壁面から3層はプリズム形状の5面 体非構造格子、それ以外はテトラ形状の4面体非構造格子、サイクロン中央部を周辺 の格子サイズの半分にした最大 5mm サイズの 2227 万要素の円錐型サイクロンと、 同様のモデリング手法にて構成した 3048 万要素の円筒型サイクロンにおいて、初期 の流れ場、時間刻みの与え方によらず、サイクロンの内壁面静圧の LES 流体解析の 解析結果と実験結果が一致したことから、解析条件の妥当性を確認した.その条件の 基で、LES 流体解析で求めた円錐型サイクロン内部の流れ場を調べ、従来の研究で 示されているサイクロン内の流れの主要な特徴が確認できた.最後に流れ場と分級性 能の関係について議論した.得られた知見は以下の通りである.

- (1) 集塵プラントに使用される比較的大型で含塵空気流量が多い、レイノルズ数 9× 10<sup>5</sup> 程度のサイクロンの設計において、LES 解析を用いたサイクロン内の流れ場 予測では、適切に解析条件を設定することで、サイクロン内の流れ場予測の計 算時間短縮が可能であり、設計を合理的にすすめられることが分かった.
- (2) 今回の流れ場調査より、サイクロンの分級性能を向上させるには、形状中心と 旋回流れの中心の偏心を抑制するサイクロン構造が必要であることが分かった. また、サイクロン入口から流入した流れは、旋回しながら、一部円筒上部を伝 わって、直接出口管から流出する可能性も考えられ、この流れを抑制するサイ クロン構造の検討も必要であると考える.

第3章では,第2章で議論した内容のうち,非定常的な流れに関するものとして, 形状中心と変動する旋回流れの中心の偏心を抑制し,集塵及び分級性能を向上するこ とを目的として,円錐型サイクロンに逆円錐及びスタビライザーを付加した場合につ いて,集塵及び分級性能実験と LES 流体解析を実施し,それらの結果を比較検討す ることで,サイクロン内部の流れの状況と集塵及び分級性能との関係を調べ,流れの 状況が粒子の運動へ及ぼす影響について議論した.得られた知見は以下の通りである.

- (3) 本研究の実験条件においては、スタビライザーなしで逆円錐を付加した場合の 円錐型サイクロンの集塵及び分級性能が最も良い.
- (4) 円錐型サイクロンにおいて逆円錐の付加は、集塵部における下降・上昇の旋回 流れの気流速度を低下させ、集塵部に集められた粒子が、集塵部の旋回流れに よって巻き上げられる頻度を低下させられることで、粒子のサイクロンからの 排出を抑制する効果がある.さらに円錐部において、旋回流れの中心と形状中 心の偏心が抑制されるため、形状中心を横断する流れの頻度が低下し、その流 れに含まれる粒子が、中央部の上昇流によって排出される頻度を低下させられ ることで、粒子のサイクロンからの排出を抑制する効果がある.
- (5) 円錐型サイクロンにおいてスタビライザーの付加は、旋回流れがスタビライザー表面に沿って流れ、旋回流れの中心と形状中心をほぼ一致させるため、形状中心を横断する流れは存在しないが、スタビライザー表面近傍の旋回流の速度を低下させるため、円錐部においてスタビライザー表面近傍へ混入した粒子が、 十分な遠心力を得られず、分離されないまま上昇流とともにサイクロンから排出されることがわかった。
- (6) 上述の(3)~(5)より,適切な解析条件の基で,LES 流体解析を用いてサイクロン 内部の流れ場(旋回流,上昇・下降流)をシミュレーションすることで,サイクロンの構造及び構成の違いによる集塵及び分級性能を定性的に比較することが可 能である.円錐型サイクロンの設計においては,スタビライザーを付加せず円 錐部の旋回流れの中心と形状中心の偏心を抑え,集塵部の下降・上昇の旋回流 の速度を低下させることを考慮したサイクロンの構造と構成を,LES 流体解析 によって検討することで,集塵及び分級性能が向上するサイクロンの設計が可 能であると考えられる.

第4章では、LES 流体解析に新たに粒子追跡を加えた数値シミュレーションを行い、サイクロンから排出したり排出しなかったりする粒子径の粒子、つまりサイクロンの分級性能を低下させる粒子径の粒子のサイクロン内における軌跡を調べ、粒子の投入位置との関係について議論した.得られた知見は以下の通りである.

- (7) サイクロン入口面のサイクロン中心軸方向中央部付近から粒子が投入された場合、他の位置から投入された場合に対し、サイクロンから排出される粒子の軌跡数は比較的少なくなる.
- (8) 同じ投入位置でも投入時刻を異にしてサイクロンへ投入された粒子は、サイクロンから排出したりしなかったりする.これは、サイクロン内の流れ場の非定常性に起因するものであると考えられる.
- (9) 上記(7)~(8)より、円錐型サイクロン設計において、サイクロンの分級性能を向上させるには、サイクロン内の流れ場の非定常性が分級性能低下へ与える影響を少なくするため、サイクロン入口面のサイクロン中心軸方向中央部付近から粒子を投入するよう誘導するサイクロン入口の構造を検討することが必要であると考えられる.
- (10) 上記(7)~(9)より、LES 流体解析と粒子追跡による数値シミュレーションを用いて、サイクロンから排出したり排出しなかったりする粒子径の粒子の経路をシミュレートすることで、分級性能の良いサイクロン設計を合理的にすすめられるものと考える.

#### 5.2 今後の展望

まずサイクロン内の流れ場の非定常性が分級性能低下へ与える影響が少なくする ため、サイクロン入口面のサイクロン中心軸方向において中央部付近から粒子を投入 するよう誘導するサイクロン入口の構造を検討する.

また,実際の集塵プラントに使用されるサイクロンは,使用状況によって,サイ クロン内の粒子濃度が高くなるため,粒子が流れに与える影響が無視できない状況と なる.粒子が流れに与える影響をサイクロン設計に考慮することで,汎用性の高いサ イクロンの開発が可能となると考える.汎用性の高いサイクロンの設計を行うための 役立つデータを得るため、サイクロン内の粒子濃度が高くなる状況についても調査し ていきたいと考える.

# 本研究に関する投稿論文および発表

# 投稿論文

1. 小崎裕平,山中義也,竹島敬志,"サイクロン設計に関する調査研究(第1報, 流体解析によるサイクロン内部の流れ場調査)",設計工学, Vol.49(2014), 589-596.

2. <u>Yuhei Kosaki</u>, Takayuki Hirai, Yoshinari Yamanaka and Keishi Takeshima, "Investigation on dust collection and particle classification performance of cyclones by airflow control for design of cyclones", Powder Technology, Vol.277(2015), 22-35.

3. <u>Yuhei Kosaki</u> and Shigeomi Chono, "Time characteristics of dust collection and particle classification performance of a cyclone", Powder Technology, submitted (2016).

## 発表

 小崎裕平,サイクロン高性能化研究,第36期四国テクノサイエンス研究会総会, 2016年4月.

 小崎裕平,山中義也,竹島敬志,武内秀樹,永橋優純,河野敏夫,伊吹哲,村井 正徳,2013 年度こうち産業振興基金地域研究成果事業化支援事業成果報告会,公益 社団法人高知県産業振興センター,2014年8月

# 謝辞

本研究をまとめるにあたり、ご指導とご鞭撻をいただきました指導教官である高知 工科大学の蝶野成臣教授に深く感謝いたします.ご多忙中にもかかわらず貴重な時間 を割いていただき、ご助言やご指導をいただきました.また研究者としての心構えや 姿勢を教えていただきました.先生に教えていただいた事を胸に、今後も研究、後進 の育成に取り組んでいきたいと思います.

高知工科大学大学院への入学に際して,ご支援とご配慮をいただきました高知工科 大学の楠川量啓教授,高知県工業技術センターの元所長の津嶋貴弘氏に深く感謝いた します.本研究をまとめるにあたり,建設的なご助言をいただきました高知工科大学 の辻知宏教授,野崎理教授,田島昌樹教授に深く感謝いたします.

本研究の最初から最後まで、ご指導とご協力いただきました兼松エンジニアリング 株式会社の山中義也氏に深く感謝いたします.研究に対して、常日頃からご助言やご 指導をいただくとともに、一方ならぬご配慮をいただきました.

本研究の遂行にあたり,懇切なご助言やご指導,多大なご協力をいただきました 高知工業高等専門学校の竹島敬志教授に深く感謝いたします.本研究の実験で多大に ご尽力いただきました元高知工業高等専門学校学生の横谷拓樹氏,平井孝侑氏に深く 感謝いたします.本研究の実験にご協力をいただきました岡林諒氏,公文広樹氏に深 く感謝いたします.

本研究の一部は、高知県産業振興センターの平成 24 年度地域研究成果事業化支援 事業、平成 25 年度地域研究成果事業化支援事業として助成いただきました.ここに 記し、感謝の意を表します.

院生生活を温かく見守り辛抱強く支えてくださいました小﨑智美様に深く感謝い たします.院生生活を支えていただくとともに、私の代わりに息子達の面倒をみてい ただきました小﨑巳喜男様、小﨑富美様、高橋孝斉様、高橋春菜様に深く感謝いたし ます.心が疲弊した時に笑顔で癒していただきました小﨑凛くん、小﨑慶くんに深く 感謝いたします.

最後に,私のため,ご支援とご心配をいただきました兼松エンジニアリング株式会 社の皆様,友人の皆様,親類の皆様に深く感謝いたします.