粗大粒子分級型サイクロンにおいて粒子濃度が分級性能へ及ぼす影響

忍足 輝男^{1,2*}, 山本 一己³, 木村 将貴¹, 深澤 智典¹, 福井 国博¹, 吉田 英人¹

Effect of Solids Loading on the Performance of a Cyclone Type Classifier for Separating Coarse Particles

Teruo Oshitari^{1,2*}, Kazumi Yamamoto³, Masaki Kimura¹, Tomonori Fukasawa¹, Kunihiro Fukui¹ and Hideto Yoshida¹

Received 23 January 2017; Accepted 28 April 2017

We have developed and evaluated a cyclone type classifier with improved collection boxes for classifying particles swilling down near the wall surface in order to separate coarse particles. These studies were performed under low solids loading condition to clarify the classification mechanism. However, the further examination under high solids loading condition is indispensable to the practical application.

In this study, the particles feed rate was increased from 2 g/min up to 100 g/min. The remarkably high concentration of particle provably aggregates particles near the wall at the inlet, causing the saltation flow, targeted for the classification in our study, to transfer into sliding bed flow where the classification is impossible. Therefore, we introduced the secondary flow injected in the upper section of the cyclone. The secondary flow could disperse the particles and minimize the decrease in the classification performance. This result showed that the device is sufficient for practical use.

Keywords: Gas-cyclone, Particle separation, Cut-off size, Particle size classification, Sharpness index, Saltation flow.

1. 緒 言

工業用に用いられる従来のサイクロンは主に粒子の捕集に用いられ、分級精度を要求される分級装置として用いる場合には、サイクロン内の強力な旋回流のため、分級点である D_{p50} は数 μm 以下となっていた。しかし、忍足ら[1]はサイクロンの捕集箱に改造を加え、捕集される粒子をさらに分級できるサイクロン型分級装置 (ACV サイクロン) を開発し、 D_{p50} が数 μm 以上の粒子でも分級できることを見出した。この ACV サイクロンは、内外筒からなる捕集箱の上部に粗大側粒子を分級する傾斜したチャンネル部を有しており、このチャンネル部に改造を加え D_{p50} が数 μm 以上の粒子でも、分級精度指数 $\kappa = 0.92$ と高い分級精度で分級することを可能にした[2]。た

だし、これらの開発では、ACV サイクロンの分級メカニズムを探究するため、低粒子濃度領域で性能を評価してきた。しかし、工業用の分級プロセスでは、生産効率の視点から多量の粉体の分級処理が要求される。したがって、この ACV サイクロンを実用化するためには高粒子濃度領域での評価が必要となる。

従来の粒子捕集を目的とするサイクロンは、粒子濃度が増加するにつれて捕集効率が高くなる特性を有している。この理由を説明するために、多くの研究者が独自の仮説を立てて、捕集効率を推算するモデルを確立している。Trefz と Muschelknecht[3]は配管内の空気輸送時の沈降現象の類似性から、サイクロン入口の遠心力場で大部分の粒子が沈降分離することを根拠として捕集効率の向上を説明した。彼らは、気流に乗って運ばれる沈降分離されない粒子について、限界粒子濃度の概念を導入して、捕集効率を推算するモデルを確立した。このモデルによれば、粒子濃度が増加すると沈降分離される粒子の割合が多くなるため捕集効率が高くなる。実際の現象として、粒子濃度が増加し沈降分離が進むと、粒子は粒子同士が集合した層として挙動するため、粒子の旋回速度は低下し、サイクロン壁面を滑りながら急下降して捕集箱に入るようになる。つまり、これらの粒子の運動エネルギーの損失により捕集効率は高くなる。

一方、Mothes と Löffler[4]は、この沈降分離される理由を粒子間の凝集現象として捉え、大粒子へ向かって移動

1 広島大学大学院 工学研究科 化学工学専攻
(〒 739-8527 広島県東広島市鏡山一丁目 4-1)
Department of Chemical Engineering, Hiroshima University
(1-4-1 Kagamiyama Higashi-hiroshima, Hiroshima 739-8527, Japan)
2 綜研化学株式会社
(〒 171-8531 東京都豊島区高田 3-29-5)
Soken Chemical & Engineering Co., Ltd.
(3-29-5 Takada, Toshima-ku, Tokyo 171-8531, Japan)
3 綜研化学株式会社
(〒 350-1320 埼玉県狭山市広瀬東 1-13-1)
Soken Chemical & Engineering Co., Ltd.
(1-13-1 Hirosechigashi, Sayama, Saitama 350-1320, Japan)
* Corresponding Author oshitari@soken-ce.co.jp

する小粒子の衝突確率と付着確率を計算することを基礎にして、捕集効率のモデルを提案している。実際の現象として、低粒子濃度領域で捕集されない小粒子径の粒子が、高粒子濃度領域になると捕集されるようになる。また、HoffmannとStein[5]は、この沈降分離される理由について、凝集現象とは別の現象として報告している。つまり、彼らは粒子濃度が増加すると粒子が動く空間が狭くなるとともに、他の多くの粒子に囲まれる粒子は気流からの抗力を受けにくくなり、粒子は粒子の集合体として運動するようになることから説明している。彼らは、この現象を粒子によるシールド効果と呼んでいる。

これらの捕集効率が高くなることの説明に類似した現象は、配管内を空気輸送される粒子の流動状態に見られる。田中ら[6]は、直径0.4 mmのポリスチレンビーズを用いて、配管のベンドを通過する固気二相流の流動状態を観察し、粒子濃度と粒子速度から粒子の流動状態を三つのパターンに分類し、それぞれの領域で気流速度に対する粒子速度の減少度を測定している。そのパターンの一つに、粒子濃度が増加すると粒子が分散されずに粒子が集合した層として流れる摺動層流がある。摺動層流は、粒子に作用する気流からの抗力が個々の粒子ではなく、粒子の集合である層に対して作用するため、粒子の旋回速度の低下をまねき、粒子が壁面を粒子の層となって滑るように移動する流れである。

既往の研究に基づいて、サイクロン入口の粒子濃度が増加するにつれて捕集効率が高くなるという現象を説明してきたが、これらの現象はACVサイクロンにとって分級性能を低下させる要因となると考えられる。なぜなら、ACVサイクロンは、分級する捕集箱のチャンネル入口で粒子の強い旋回流を必要とするが、粒子濃度が増加するとサイクロン内で粒子の旋回速度が著しく低下する

ためである。そこで、本研究では、高粒子濃度領域のサイクロン内において起こる沈降分離、粒子間凝集、シールド効果のような摺動層流に関連する現象に対する対策として、ACVサイクロンのサイクロン部の天板近傍に噴流ノズルを設置した。この噴流ノズルから、サイクロン壁面で摺動層流となる粒子を分散し、摺動流である個々の粒子が気流の抗力を受ける状態にする目的で、追加気流を壁面噴流として流せるようにした。秋山ら[7]は、低粒子濃度領域において、天板近傍からの追加気流はサイクロン内のボルテックスの旋回速度を増大する効果があることを報告されている。ACVサイクロンでは、さらに高粒子濃度領域において、この追加気流は摺動層流を分散して摺動流にする効果があるものと考えて、追加気流が分級性能に及ぼす影響を実験により明らかにした。その結果、ACVサイクロンは、高粒子濃度領域でも高い分級性能を示し、工業用の分級プロセスへ適用可能なことがわかったので報告する。

2. 実験装置および方法

ACVサイクロン (Cyclone type separator accelerating the vortex) は、忍足らの研究[2]の分級装置と同じものを用いた。全体図と主流量 Q 、追加気流 Δq 、天板近傍からの追加気流 q' の導入位置を Fig. 1 (a) に示す。図中の各寸法は、内寸基準の値を示している。Fig. 1 (b) は、ACVサイクロン入口部の案内羽根の開口比 G と天板近傍からの追加気流 q' を示したものである。開口比 G を小さくすると、主流量 Q の気流をサイクロンの壁面側に縮流させ、流入する粉体をサイクロン壁面方向に移動させるとともに粒子の旋回速度を大きくする。しかし、 G を0.4よりも小さくすると、圧力損失が急激に増加し、また、サイクロン内の気流の乱れからサイクロン壁面近傍の粉体の

Fig. 1 Structure of the ACV-cyclone and dimensions of the main part

旋回速度を上げる効果がなくなる結果[6]が得られている。本研究では、既報[1][2]と同じ条件である $G=0.4$ を今回も採用した。また、サイクロン天板近傍からの追加気流 q' は、一辺の長さが 5 mm の正方形の構造を有するノズルから接線方向に壁面噴流として流すことができる。

次に、ACV サイクロンの分級部を拡大した図を Fig. 2 (a) に示す。分級部は、内筒捕集箱と外筒捕集箱からなる二重構造からなり、内筒の上部に粉体を分離する切欠いた円錐台形状の部分を設置してある。この部分は、本 ACV サイクロンの主要部であり、スリッターと呼ぶ。スリッターの傾斜部の長さは、既報[2]で分級性能が優れていた長さ $\ell = 23$ mm とした。なお、外筒捕集箱と内筒捕集箱に挟まれたスリッターの上部の領域をチャンネルと呼ぶ。追加気流 Δq の導入部は、外筒捕集箱からの追加気流を一度マニホールドに集めてから、外筒捕集箱の中へ角度 $\theta_q = 20^\circ$ 、口径 $d = \phi 2.8$ mm の 2 箇所の開口部より流入させ、気流を接線方向に吹き上げる構造とした。尚、同図には、分級部において、分級性能に影響を及ぼすと考えられる半径の記号と寸法を示す。スリッターの先端の半径 r 、スロートの半径 r_1 、外筒捕集箱の半径 r_3 は、

それぞれ 18.5 mm, 18.5 mm, 50.0 mm とした。半径 r_2 は、スリッターの先端で、それと垂直な面において、チャンネル入口部の中心を示す半径であり 21.2 mm とした。また、同図には、分級される粒子の経路を示したが、実際の粒子は旋回しながらこの経路を通り分級される。分級点近くの粒子径を有する粒子は、一度チャンネル内に入って、追加気流 Δq によりチャンネル内で反転して、スリッターの先端で粗大粒子側と微小粒子側へ分級される結果が得られている[2]。Fig. 2 (b) は、外筒捕集箱と内筒捕集箱に挟まれたスリッターの上部の領域 A-A 断面を示す。また、同図には、実験に用いた追加気流 Δq の開口部の位置を示す。

Fig. 3 は、ACV サイクロンの基本的な分級原理を模式図化して説明したものである。ここでは、粒子の旋回半径を r_p として説明する。サイクロンの入口部より供給された粉体は、旋回速度 u_0 を有する空気とともに、旋回速度 v_0 でサイクロンのスロート部を通過しチャンネル部に流入する。そこで、粒子はスリッターの先端で粒子径に応じて分級される。気流の抗力 F_D よりも遠心力 F_C が強く作用する粒子径が大きい粒子は、外筒の捕集箱で捕集

Fig. 2 Dimensions of the classifying part and schematic

Fig. 3 Schematic diagram of the principle of separation

Fig. 6 Effect of particle feed rate F on $\Delta\eta$

Fig. 7 Schematic diagram of particles flow pattern in cyclone

状態の模式図 Fig. 7 (a) を、サイクロン内の粒子の流動状態に当てはめて説明する。Fig. 7 (b) に Fig. 7 (a) から類推したサイクロン壁面付近の粒子の流動状態を模式図として示す。Fig. 7 (a) (1) の分散流 (Dispersed flow) は、個々の粒子が気流からの抗力を受け、空間ではほぼ均一の粒子濃度で流れる状態であるが、サイクロン内では粒子に作用する強力な遠心力により粒子は壁近傍を流れるので、均一な分散流とはならない。Fig. 7 (a) (2) の撓動流 (Dispersed biasing flow or Saltation flow) は、サイクロンでは Fig. 7 (b) (I) に示す流れで、分散した個々の粒子が気流からの抗力を受けサイクロンの壁面と衝突しながら壁面近傍を旋回下降する流れである。ACV サイクロンは、この流れを対象としており、サイクロンの壁面に設けたチャンネル (Fig. 2) とスリッターにより粒子を分級する装置である。Fig. 7 (a) (3) の撓動層流 (Sliding bed flow) は、90°バンド配管で粒子濃度が高いときに観察されている流れで、個々の粒子に気流からの抗力が作用せず、粒子群または、粒子層全体として気流から抗力を受けて、壁面を滑るように移動する流れである。サイクロンでは Fig. 7 (b) (II) にその流れを模式図として示した。本研究では、撓動流と撓動層流は区別するものとする。

Fig. 6 の実験結果から、粉体供給速度が 2~20 g/min (c

Fig. 8 Effect of secondary flow injection q' on $\Delta\eta$

Fig. 9 Effect of secondary flow injection q' on sharpness of classification

= 0.0015~0.015 kg-solids/kg-gas) の範囲では、粉体の濃度が小さいので、Fig. 7 (b) (I) に示す撓動流となっており、粒子の分級が可能であったと考えられる。一方、粉体供給速度が 40 g/min ($c = 0.031$ kg-solids/kg-gas) 以上では、分級が不可能になっているのは、Fig. 7 (b) (II) に示す粒子の流れが撓動層流になったためと考えられる。撓動層流では、チャンネルに粒子群または粒子層として入ってくるので、個々の粒子に追加気流の抗力が作用しなくなり、分級ができなくなったものと考えられる。

3.2 天板近傍からの追加気流 q' による粒子の分散効果

天板近傍からの追加気流 q' の効果を確認するため、粉体供給速度 $F = 40$ g/min ($c = 0.031$ kg-solids/kg-gas)、全主流量 $Q_t = Q + q' = 1000$ L/min を一定として、天板近傍の追加気流 q' を 0~200 L/min の範囲で変化させた。このときの追加気流 q' が部分分離効率 $\Delta\eta$ へ及ぼす影響について Fig. 8 に示す。なお、同図には、参考として分級が不可能であった $Q = 800$ L/min, $q' = 0$ L/min の部分分離効率 $\Delta\eta$ を破線で示している。同図より、 $Q_t = Q + q' = 1000$ L/min を一定として天板近傍からの追加気流 $q' = 0$ L/min から 200 L/min へ増加すると部分分離効率 $\Delta\eta$ の勾配は立ち上がり、分級性能が向上することがわかる。次に、Fig. 9 に粉体供給速度 $F = 40$ g/min ($c = 0.031$ kg-solids/kg-gas)、全主流量 $Q_t = Q + q' = 1000$ L/min を一定と

して、天板近傍からの追加気流 q' を 0~200 L/min の範囲で変化させたときの追加気流 q' が分級精度指数 κ に与える影響について示す。ここで、 κ は D_{p25} を D_{p75} で割ったもので、一般に分級の精度を表す指標として広く用いられている。同図より、分級精度指数 κ は、天板近傍からの追加気流 q' を 0 から 200 L/min へ増加すると 0.80 から 0.84 へ高くなることからわかる。一方、Hoffmann と Stein[5] は、サイクロンの分級性能を Eq. (3) の n の値から評価している。同図の分級精度指数 $\kappa = 0.80 \sim 0.84$ は Eq. (3) を用いた計算から $n = 10.0 \sim 12.7$ に相当する。

これらのことから、追加気流 q' は、サイクロン壁面の摺動層流の粒子を分散して摺動流にする効果があるものと考えられる。つまり、摺動流になったため、チャンネルで個々の粒子に追加気流 Δq の抗力が作用し、粒子に作用する遠心力と抗力とのバランスにより意図とする分級ができたものと考えられる。

秋山ら[7]は、粒子供給速度 $F = 2$ g/min ($c = 0.0015$ kg-solids/kg-gas) の低粒子濃度領域において、追加気流 q' はサイクロンのボルテックス内の回転速度を増大する効果があると報告されているが、本研究においては、さらに高粒子濃度領域において、摺動層流を分散して摺動流にする効果があるものと考えられる。社河内ら[9]は、三次元円形凹面壁面における壁面噴流について、流速分布を詳細に測定しているが、同壁面噴流の特徴として、気流は噴流の吹き込み方向と垂直な軸方向に流れが著しく広がることを報告されている。このことから、追加気流 q' は吹き出し近傍で、摺動層流をサイクロンの軸方向下部の壁面上に広げて、粒子の分散を良くしているものと考えられる。

Fig. 8 において、主流量 Q と追加気流 q' の和 Q_t が 1000 L/min と同じならば、 D_{p50} も同じ値となっている。つまり、 $Q = 1000$ L/min で $q' = 0$ L/min のときの D_{p50} と同じになっている。追加気流 q' を流さないときの D_{p50} については、忍足ら[2]は理論的に次式を導き出している。

$$D_{p50} = \sqrt{\frac{18\mu r_2}{\rho_p S \nu_0^2 \sin \theta} \left(\Delta q + \frac{q_0}{1 - \exp(-q^*/(q_0 + \Delta q))} \right)} \quad (4)$$

$$q_0 = 0.275Q \quad (q' = 0) \quad (5)$$

ここで、 q_0 はサイクロンからチャンネルへ入る気流量で、 ν_0 は追加気流 Δq により加速されたチャンネル出口における粒子の回転速度である。忍足らの研究から q^* は 218 L/min の値が得られている。 D_{p50} が追加気流 q' に関わらず同じ値になることから、Eq. (5) の Q を $Q_t = Q + q'$ にすれば、追加気流 q' を流した場合でも Eq. (4) は成立するものとする。以後、実験結果から得られる D_{p50} から Eq. (4) を用いて粒子の回転速度 ν_0 を推定する。

3.3 粉体供給速度 F の分級性能へ及ぼす影響

高粒子濃度領域において、 $Q = 800$ L/min、 $q' = 200$ L/min を一定として、粉体供給速度 F を 40~100 g/min ($c = 0.031 \sim 0.077$ kg-solids/kg-gas) の範囲で変化させたときの、 F が部分分離効率 $\Delta\eta$ に及ぼす影響を Fig. 10 に示す。なお、同図の破線は、粉体供給速度 $F =$

Fig. 10 Effect of particle feed rate F on $\Delta\eta$

Fig. 11 Effect of particle feed rate F or particle concentration c on tangential velocity of particle ν_0

2 g/min ($c = 0.0015$ kg-solids/kg-gas) のときの部分分離効率 $\Delta\eta$ の計算値を示している。この破線の部分分離効率 $\Delta\eta$ は、Eq. (3) の D_{p50} と n の値が分かれば計算から得られる。忍足ら[2]は、 $Q = 800$ L/min ($q' = 0$) のときの n として 24 の値を得ている。 $Q = 900$ L/min のときも、ほぼ同様な 23.6 の値が得られており、この $n = 24$ は ACV サイクロンで得られる最大値と考えられる。したがって、 $Q = 800$ L/min、 $q' = 200$ L/min においても同様な値となるとして、粉体供給速度 $F = 2$ g/min のときの部分分離効率 $\Delta\eta$ を計算した。なお、 D_{p50} は $Q = 1000$ L/min として Eq. (4) と Eq. (5) から計算したものをを用いた。同図より、粉体供給速度が増加すると D_{p50} は、大きくなる傾向があり、部分分離効率 $\Delta\eta$ の傾斜は小さくなった。

次に、Fig. 11 に粉体供給速度 F を 2~100 g/min ($c = 0.0015 \sim 0.077$ kg-solids/kg-gas) の範囲で変化させたときの Eq. (4) より求めた粒子の回転速度 ν_0 を示す。供給粒子速度を増加すると、粒子の回転速度 ν_0 は緩やかに低下している。しかし、粒子に作用する遠心力は、粒子の回転速度の 2 乗に比例するので、分級には著しい影響を及ぼしているものと考えられる。

この理由として、次のことが考えられる。希薄粒子濃度領域でのサイクロン内の粒子挙動は、サイクロンの壁

Fig. 12 Effect of particle flow rate F or particle concentration c on sharpness of classification

面と衝突と反射を繰り返しながら旋回下降する。サイクロンの壁面との衝突による粒子の運動エネルギーの損失は、反射して壁面からある程度離れた位置で主流の気流から受ける抗力により補われる。したがって、粒子は一定の旋回速度で衝突と反射を繰り返しながら旋回下降すると考えられる。一方、粒子濃度を増加させると粒子間の相互作用、粒子の気流に対するシールド効果などの増加により、粒子と壁面との衝突と反射が抑制され、気流から受ける運動エネルギーが減少し、粒子の旋回速度が小さくなったと考えられる。

次に、Fig. 12 に粉体供給速度 F を 2~100 g/min ($c = 0.0015 \sim 0.077$ kg-solids/kg-gas) の範囲で変化させたときの粉体供給速度 F が分級精度指数 κ に与える影響を示す。同図の粉体供給速度 $F = 2$ g/min ($c = 0.0015$ kg-solids/kg-gas) のときの κ の値は、忍足ら[2]の実験から $\kappa = 0.91$ を参考値として用いた。

一般的な分級性能を示す目安[10]から、 $\kappa = 0.5$ 以上では“良い分級”、 $\kappa = 0.7$ 以上では“かなり良い分級”とされている。同図にもその目安を図示する。Fig. 11 より、ACV サイクロンでは粒子供給速度を上げると κ の値は、低下するが、 $\kappa = 0.79$ 以上の値となっており、かなり良い分級性能を示していることがわかる。また、本研究で得られた $\kappa = 0.79$ は Eq. (3) を用いた計算から $n = 9.5$ に相当する。Hoffmann と Stein[5]は、従来のサイクロンの分級精度として $n = 7$ は高い分級性能を示す値であるとし

ており、ACV サイクロンは従来の分級性能の高いサイクロンよりも、はるかに高い分級性能を示すことがわかる。ACV サイクロンでは、チャンネルという局所的な分級場で粒子を分級するため、均一の遠心加速度場と均一な気流の流れ場が得やすく、従来のサイクロンに比べて高い分級精度になるものと考えられる。

本研究では、分級点 D_{p50} の制御については言及していないが、その制御方法としては、次の方法が考えられる。主流量 Q と追加気流 q を決定すれば、 $\Delta q = 0$ L/min のときの D_{p50} は、供給される粒子の粒子径、粒子密度などにより決定され、粒子径が小さくなるほど D_{p50} も小さくなる。この条件で、 Δq により D_{p50} を制御する。 Δq を大きくすれば、その気流の角運動量も大きくなるが、 Δq による角運動量の増加率は Δq のノズルからの噴き出し速度と吹き出し角度を変えることによって、追加気流量 Δq とは独立して設定できる。したがって、粒子に作用する気流からの抗力と遠心力を、 Δq の流量と角運動量により、それぞれ独立に設定することにより、 D_{p50} を制御することができる。

なお、本研究では、分級対象としてメディアン径 25 μm のアクリル粒子を用いたが、密度、粒子径の異なる粒子についても、サイクロン内の壁面近傍を分散して、かつ旋回しながら下降するような粒子であれば、本研究のアクリル粒子の分級と同様に分級が可能であると考えられる。

4. 結 言

高粒子濃度領域において、ACV サイクロンの分級性能を評価し、下記の知見が得られた。

- (1) 追加気流 q を流さない条件では、粒子濃度を増加すると、分級性能が著しく低下する。さらに増加して、粒子供給速度が 40 g/min ($c = 0.031$ kg-solids/kg-gas) 以上にすると分級が不可能になることがわかった。
- (2) しかし、サイクロン天板近傍からの追加気流 q を流すことにより、サイクロン壁面の粒子の運動が摺動層流から摺動流に移行すると考えられ、分級性能の低下を軽減することができた。その結果、粒子供給速度が 2~100 g/min ($c = 0.0015 \sim 0.077$ kg-solids/kg-gas) の範囲で分級精度指数 $\kappa = 0.79$ 以上の分級性能が得られることがわかった。

これらのことから、ACV サイクロンは、工業用の分級プロセスの実用装置として充分用いることが可能であることがわかった。

Nomenclature

a	: Centrifugal acceleration	[m/s ²]	curve	[m]
c	: Particle concentration	[kg-solids/kg-gas]	D_{p75}	: 75% cut-off size of the partial separation efficiency
d	: Inside diameter of the blow-up nozzle	[m]		curve [m]
D_p	: Particle diameter	[m]	E_c	: Yield of coarse particles [-]
D_{p25}	: 25% cut-off size of the partial separation efficiency		F	: Powders feed rate [kg/min]
	curve	[m]	F_c	: Centrifugal force induced by vortex flow [N]
D_{p50}	: 50% cut-off size of the partial separation efficiency		F_D	: Drag force induced by main flow and blow-up flow

$f_c(D_p)$: Frequency of coarse particle size distribution	[1/m]	r_3 : Radius of outside collection box	[m]
$f_f(D_p)$: Frequency of fine particle size distribution	[1/m]	S : Area of CS	[m ²]
ℓ : Length of slit	[m]	u_i : Velocity within blow-up nozzle	[m/s]
m_f, m_c : Mass of total particles within the inside and outside collection boxes	[kg]	u_{in} : Velocity of air flow at cyclone inlet	[m/s]
N : Number of blow-up nozzles	[-]	u_r : Velocity of air flow along channel	[m/s]
n : Exponent in Eq. (3)	[-]	u_t : Velocity of converged air flow by inlet guide vane	[m/s]
Q : Rate of inlet air flow into cyclone (primary flow rate)	[m ³ /s]	u_θ : Tangential velocity of air	[m/s]
Qt : Rate of inlet air flow ($Q+q'$) into cyclone	[m ³ /s]	$u_{\theta 1}$: Tangential velocity of air in throat of cyclone	[m/s]
q_0 : Flow rate of air into channel through throat of cyclone	[m ³ /s]	v_r : Velocity of particle along channel	[m/s]
q' : Secondary flow injection of air	[m ³ /s]	v_θ : Tangential velocity of particle at CS	[m/s]
q^* : Constant parameter in Eq. (4)	[m ³ /s]	Δq : Blow-up flow rate of air	[m ³ /s]
r : Radius of tip of slit from center of cyclone	[m]	$\Delta\eta$: Partial separation efficiency	[-]
r_p : Radius of particle trajectory	[m]	δ : Vertical width of channel	[m]
r_1 : Radius of throat of cyclone	[m]	θ : Inclination angle of slit	[degree]
r_2 : Representative radius of CS from center of cyclone	[m]	θ_q : Inclination angle of blow-up nozzle	[degree]
		κ : Classification sharpness index ($= D_{p25}/D_{p75}$)	[-]
		μ : Viscosity of air	[Pa·s]
		ρ_p : True density of particle	[kg/m ³]

References

- [1] T. Oshitari, M. Kimura, K. Yamamoto, K. Fukui, H. Yoshida, Development and evaluation of a cyclone type classifier for separating coarse particles, J. Soc. Powder Technol., Japan, 52 (2015) 435–444.
- [2] T. Oshitari, K. Yamamoto, K. Fukui, H. Yoshida, Classification characteristics of a cyclone type classifier with improved collection boxes for separating particles near the wall surface, Journal of Chemical Engineering of Japan, 50 (2017) in press.
- [3] M. Trefz, E. Muschelknautz, Extended cyclone theory for gas flows with high solids concentrations, Chem. Eng. Technol., 16 (1993) 53–60.
- [4] H. Mothes, F. Löffler, Motion deposition of particles in cyclones, Ger. Chem. Eng., 8 (1985) 23–33.
- [5] A. C. Hoffmann, E. L. Stein, Gas cyclones and swirl tubes, principles, design and operation, Berlin: Springer (2002) p. 183.
- [6] T. Tanaka, T. Ishibashi, T. Shiratori, Y. Tsuji, Y. Morikawa, Air-solid two-phase flow through a bend, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, 54 (1988) 367–372.
- [7] A. Akiyama, H. Yoshida, K. Fukui, K. Ono, Improvement in classification performance of gas-cyclone by local fluid velocity control, J. Soc. Powder Technol., Japan, 42 (2005) 401–408.
- [8] J. Dirgo, D. Leith, Performance of theoretically optimized cyclone, Filtration and Separation, 22 (1985) 119–125.
- [9] T. Shakouchi, T. Aoki, M. Uesugi, Study on the three-dimensional round-wall jet along a concave surface, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, 59 (1993) 57–64.
- [10] Association of Powder Process Industry and Engineering, Manual of classification technology, Japan (1990) p.38.