

令和 2 年 7 月 2 日現在

機関番号：56401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06136

研究課題名(和文) 集塵プラント用サイクロンの設計に関する調査研究

研究課題名(英文) Research for designing cyclone separator for dust collecting plants

研究代表者

竹島 敬志 (TAKESHIMA, Keishi)

高知工業高等専門学校・ソーシャルデザイン工学科・教授

研究者番号：10179632

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：実際の集塵プラントに使用されている比較的大型で、含塵空気流量が多い円錐型サイクロンの設計に関する基礎データを得ることを目的として、過去の円錐及び円筒型サイクロンの研究で報告されている集塵及び分級性能の向上を図るための構造及び構成について、集塵及び分級実験とOpenFOAMによる流体解析を実施して、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について調査を行い、有用な設計指針が得られた。結果として、分級領域の広さを変えた円錐型サイクロンについて、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明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

サイクロンについて、県内外の企業からの技術相談が継続しており、更なる高性能化についての要望もある。製作コストが安く、またメンテナンスが容易なサイクロンの形状に関する要望も多い。この成果は、設計における試作段階で、流体解析を利用し、その結果をもとに集塵及び分級性能を把握することができるので、サイクロンの設計や試作のコスト削減等に結びつけることができ、地域社会等への還元が期待できる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this paper is to report the useful design guidelines gained by conducting an investigation on the relationship between the flow conditions inside a cyclone and the dust collection and particle classification performance of the cyclone. This task carried out by conducting dust collection and particle classification experiments, implementing Fluid analyses using OpenFOAM and performing comparative analyses on the obtained results. The investigation aimed to gather basic data on the design of relatively large conical cyclones with large amounts of airflow containing dust, which used in actual dust collection plants. As a result, We elucidated the relationship between the flow conditions inside the conical cyclone when the size of the Classification area changed in a cyclone dust collector with and dust collection and particle classification performance.

研究分野：設計工学

キーワード：機械要素 微粒子操作 固気二相流 流体計測 数値シミュレーション

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

集塵プラントにおいて、フィルターへの負荷を低減させるため、比較的大型で含塵空気流量が多いサイクロンの集塵及び分級性能の向上が求められている。

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伝わって落下し、集塵部に収納されるものであるが、サイクロン内部の旋回流れは、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つて下方向への逆流が生ずることもあり、旋回中心と形状中心の僅かな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。集塵及び分級性能は、これらサイクロン内部の流れ場に起因し、近年では、非定常的な流れの挙動により排出される粒子の存在が確認されている。したがって、サイクロンの設計を行うためには、サイクロンの形状から内部の非定常的な流れ場を精度良く予測出来ることが必要となる。

このようにサイクロンの集塵及び分級性能は、サイクロン内の流れ場に起因していることから、高い集塵及び分級性能を得ることができる流れ場を実現するサイクロン形状について詳細に検討する必要がある。同時に集塵及び分級評価試験を実施して評価を行い、集塵プラントのフィルターへの負荷を低減させる低コストでメンテナンスが容易なサイクロンの設計指針の確立に挑む。

2. 研究の目的

空気輸送を利用した集塵プラントにおける粒子の分離捕集において、粒子径が小さい低密度の粒子は、サイクロンによって、一部分離捕集されるが、サイクロンで捕集できない粒子は、更に次工程のフィルターによって分離捕集され、輸送系の最終端である吸引機 (ブロワ) から大気へと排気される。このような集塵プロセスにおいては、フィルターへの負荷を低減させるため、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。

本研究では、集塵プラント用サイクロンの集塵機能の高性能化に関する設計指針について、集塵及び分級性能と流れ場を併用して調査し、最終目的としてフィルターへの負荷が小さくメンテナンスが容易な集塵プラントの開発のための設計指針の確立を目指す。

3. 研究の方法

平成 29 年度：サイクロンの分級領域に関する設計指針を確立することを目的に、集塵及び分級性能実験と壁面静圧の変動特性の計測を行う。レイノルズ数が 4.6×10^5 程度の円錐型サイクロンの分級領域の広さが及ぼす分離・分級性能への影響について、サイクロンの出口管長さ (4 種類、標準型は円筒部と同じ長さで 4 種類中 2 番目に長いサイクロン) と円錐部長さ (2 種類、標準型は円錐角 20° 、円錐部が長いサイクロンは円錐角 13°) を変更し、平均粒子径 $5.0 \mu\text{m}$ のポリエチレン球形粒子 (比重 1.2) を用い、集塵プラントの運転状況を鑑みて 2 時間連続運転における集塵及び分級性能試験と圧力損失の測定を実施し、それらの結果を比較検討する。また、サイクロンの内壁面静圧の時間変動の測定結果と LES による流体解析で得られたサイクロン中心部における流速ベクトル分布の時間変動とを比較し、流体解析の妥当性を検討するとともに静圧変動とサイクロン内の旋回流れの偏心との関連性について検討する。

平成 30 年度：集塵用サイクロンの更なる高性能化を目指し、小型化に着目して集塵及び分級性能の向上について検討を行う。一般に小型化すると遠心力が増すので、集塵及び分級性能は向上する。サイクロン円筒部の内径を 200 mm から 100 mm へと小型化した円錐型サイクロンとそのサイクロン実験用ループを製作し、平均粒子径が $2.5 \mu\text{m}$ と $1.5 \mu\text{m}$ の 2 種類の球形アクリル粒子 (比重 1.2) を用いた集塵及び分級性能実験を行う。また、OpenFOAM による流体解析を行って、サイクロン内部の流れ場を調べ、集塵に適したサイクロン形状を検討する。その第 1 歩として、粒子捕集の理論に基づき、サイクロン内に案内板を取付した場合 (案内板付サイクロン) の集塵性能及びサイクロン内の流れ場へ及ぼす影響について調べた。案内板はサイクロン上部の天板にパイプを取り付け、下端にサイクロン内壁と隙間が 3 mm の中空円板を取り付ける構造にした。供試粉体には集塵プラントで扱う粉体に近い関東ローム ($1.0 \mu\text{m}$ の含有率約 30%) を用いて、集塵及び分級性能実験を実施した。

令和元年度：分級性能の良いサイクロンの設計を行うには、サイクロン内部の流れを熟慮した適切な設計が必要である。そこで、分級領域の広さを変更させたサイクロンについて、集塵性能と流れの評価を詳細に行った。分級領域が最も広くなるように、出口管下端をサイクロン入口面上端の高さに合わせた出口管を装着したサイクロンを用いて、平成 29 年度と同様の方法で集塵及び分級性能試験を実施する。また、OpenFOAM による流体解析を行って、サイクロン出口管近傍の流れ場を詳細に調べ、分級領域の広さが集塵性能へ与える影響を明らかにするとともに、高性能化に向けた設計指針を検討する。さらに、流体解析の結果の検証を目的に、PIV 解析を用いた計測を行う。

4. 研究成果

(1) 出口管長さの違いによる集塵効率と圧力損失の時間変化

4本の長さが異なる出口管を用いて、2時間連続運転における集塵性能実験の結果、集塵効率 は、出口管長さの違いで異なるものの、40分以降からほぼ一定の値となった。120分後の集塵 効率は、出口管が最も短いサイクロンで97.1%、出口管が最も長いサイクロンで93.1%になっ た。出口管を短くして分級領域を広げることで、サイクロン内に粒子が長時間滞在できるよう になり、旋回流によって遠心分離され集塵効率が上がった。

圧力損失は、出口管の長さで値は異なるものの、集塵効率と同様に40分以降からほぼ一定の 値となった。圧力損失の時間変化が小さいほど、高い集塵効率を保つ傾向が見られた。このこと より、集塵効率は圧力損失の低下に関連性があると考えられ、圧力損失も集塵効率の評価に使え る可能性を見出した。

(2) 円錐部長さの違いによる集塵効率と圧力損失の時間変化

円錐部の長さの違いによる集塵効率の時間変化は、円錐部を長くすると30分以降からほぼ一 定の値となった。円錐部が長いサイクロンの120分後の集塵効率が98.5%と最も高く、出口管 長さが短い場合と同様に、分級領域を広げると集塵効率は向上した。圧力損失も円錐部が長いサ イクロンで30分後にほぼ一定の値となった。これより、円錐部を長くしても一定の強い旋回力 が長時間維持され、高い集塵効率が保持できると考えられる。

(3) サイクロンの内壁面静圧の時間変動とLESによる流体解析との比較

標準型サイクロン(出口管長さが円筒部長さと同じ)のLESによる流体解析より得られたサイ クロン中心部における流速ベクトル分布より、サイクロン内旋回流の偏心を確認した。この偏 心の中心部が1周する時間は約0.03秒であった。サイクロンの同じ位置での内壁面静圧の時間 変動をFFT解析した結果、周波数26Hzにピーク振幅があることが分かった。これの周期は 0.038秒であり、LESによる流体解析から得られたサイクロン内における流れの中心変動の1 周期と近い値となる確認できた。内壁面静圧の時間変動測定の結果からサイクロン内の旋回中 心の偏心を確認でき、また偏心の周期及び大きさを推定できると考えられる。

(4) 壁面静圧の変動と集塵性能との関係

標準型サイクロン(出口管長さが円筒部長さと同じ)について、円筒部の同一円周上3点と円 錐部の長手方向3点の壁面静圧変動を同時測定した。FFT解析した結果、円筒部3点における ピーク振幅は、ほぼ同じ周波数であり、26Hz付近でピーク振幅があることが確認できた。円錐 部3点においても、円筒部と同様の傾向が見られた。また、出口管の長さ(3種類)と円錐部長 さ(2種類)に変えて、上述と同様の実験を行った。その結果、いずれもピーク振幅の周波数は 26Hzとなった。出口管の短いサイクロンでは、標準型と比べ、円錐部においてピーク振幅が大 きくなっており、旋回中心の偏心が大きいと考えられる。また、円錐部が長いサイクロンは、他 のサイクロンよりピーク振幅が小さく、旋回中心の偏心が小さい。

円錐型サイクロンの出口管を長くすると、付加したスタビライザーと同様の効果が考えられ、 円錐部で旋回流が出口管表面に沿って流れ、旋回流の偏心を抑制するが、出口管表面近傍の 旋回流の速度を低下させるため、円錐部において、出口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と考えられる。円錐部 が長いサイクロンは、最も振幅が小さく、また円錐部が長くなったことで分級領域も広がり、 98.5%の高い集塵効率を得られた。

(5) 標準型サイクロンと小型サイクロンの集塵性能の比較

標準型サイクロン(サイクロン内径200mm)と小型サイクロン(サイクロン内径100mm) の集塵効率と運転時間との関係を実験で調べた。標準型サイクロンの集塵効率は、平均粒子径 5.0 μm のポリエチレン球形粒子の場合、運転開始直後から運転時間の増加とともにまで低下し、 運転時間120分では、ほぼ97%となった。小型サイクロンでは、平均粒子径2.5 μm のアクリル 球形粒子の場合で、運転時間によらず集塵効率100%が維持できた。また、平均粒子径が小さい 1.5 μm の場合でも、運転開始直後から運転時間の増加とともに若干低下し、運転時間120分 で98%となった。

小型サイクロンの集塵効率が標準型サイクロンの集塵効率に対して、小さい粒子径で高い集 塵効率になることから、小型サイクロンの集塵性能が良いことが分かる。この理由については、 小型サイクロンの円筒部内径が標準型サイクロンの2分の1であることから、小型サイクロン のサイクロン内部の粒子に作用する遠心力は2倍程度となり、粒子を遠心分離する効果が増す ためであると考えられる。

(6) 標準型サイクロンと小型サイクロンの流動性能の比較

標準型サイクロンと小型サイクロンの圧力損失と運転時間の関係を実験で調べた。圧力損失 は、いずれの場合も実験開始直後で最も大きく、徐々に小さくなり、約30分後ほぼ一定となっ た。時間経過による圧力損失の変化の傾向は、標準型サイクロンと小型サイクロンで定性的に類 似していることから、ほぼ同様の流動性能であることが分かった。

(7) サイクロン内に案内板を取付した場合の集塵性能及びサイクロン内の流れ場へ及ぼす影響

案内板付サイクロンは、小型サイクロンの天板に丸パイプを取付け、その下端に中空円板形の案内板を取り付ける構造とした。案内板の取り付け位置は、円筒部下端と円筒中央部の2箇所とした。小型サイクロンと2種類の案内板付小型サイクロンの集塵効率と運転時間の関係を、供試粉体に関東ローム(1.0 μmの含有率約30%)を用いた実験で調べた。小型サイクロンの集塵効率は、運転時間の増加とともに単調に低下している。一方、2種類の案内板付小型サイクロンの集塵効率は、運転開始直後では、運転時間の増加とともに低下しているが、運転時間30分以降では低下しなくなり、45分以降で再び低下している。運転時間15分時点では、小型サイクロンの集塵効率が最も良くなるが、30分以降では、案内板を円筒中央部に取り付け付けたサイクロンの効率が最も良くなる。以上から、案内板を円筒中央部に取り付け付けた小型サイクロンが、比較的長時間運転される集塵プラントに適したサイクロンである可能性があるといえる。

これらのサイクロンについて、OpenFOAMによる流体解析を行って、サイクロン内部の流れ場を調べた。案内板付小型サイクロンの接線方向流速は、小型サイクロンより小さくなった。このことが、運転時間15分時点での小型サイクロンの集塵効率が、案内板付小型サイクロンに比べ良くなる要因のひとつと考えられる。また、案内板付小型サイクロンは、上向き流れの範囲が小型サイクロンより広がっている。サイクロン内部に案内板を取り付けると、円錐部へ流出する際に粒子を最外側へ寄せられる効果はあるが、上向き流れの範囲の広がりにより、出口管に流入する粉体が増える可能性があり、集塵性能が向上しなかった要因と考えられる。さらに、案内板の取り付け位置による流れ場の様相に大きな違いが見られなかったことから、分離領域が広い案内板を円筒中央部に取り付け付けた小型サイクロンの集塵効率が良くなったと考えられる。

案内板付小型サイクロンの圧力損失は、小型サイクロンに比べ小さいため、案内板付小型サイクロンの流動性能が良く、小さなエネルギーで集塵プラントを稼働させることができる。

(8) OpenFOAMによる流体解析の妥当性の検証

OpenFOAMによる流体解析の結果を、標準型サイクロンの内壁面静圧の実験結果から検証した。内壁面静圧の測定位置による静圧変化の傾向がほぼ同じ傾向を示したことから、流体解析の結果はサイクロン内の平均的な流動状態を捉えていると判断した。また、その妥当性をより詳細に検証する目的で、PIVによるサイクロン出口管近傍の流れの可視化を試みたが、サイクロンへの流入速度が速いために鮮明な画像を得ることができなかった。鮮明な画像を得るために、ウォータージャケットの設置等検討をすすめている。また、可視化可能な流入速度やトレーサー粒子についての検討も行っており、来年度以降も継続する予定である。

(9) 集塵性能に及ぼす流れ場の影響

出口管下端をサイクロン入口面上端の高さに合わせた出口管を装着したサイクロンを加えた出口管の長さが異なる5種類の円錐型サイクロンでは、分級領域が広がるにしたがって集塵効率が高くなるが、出口管が最も短いサイクロンの分級領域まで広げると、集塵効率は出口管が円錐部まで達する最も長いサイクロンと同程度にまで低下した。この結果について、サイクロン内部の流体解析の結果をもとに考察した。円錐型サイクロンでは、出口管直下から集塵部入口まで遠心力を発生させる旋回流が存在することが確認できた。これより、出口管が短いほど粒子が遠心力を受ける分級領域が広くなり、集塵効率が高くなると考えられる。集塵性能が最もよかったサイクロンの場合、出口管付近の流れと円錐部内の上昇流は、出口管が最も短いサイクロン以外の3種類と大きな違いはなく、出口管が短いほど広い領域で、粒子が遠心力を受けることが考えられる。また、出口管が最も短いサイクロンの集塵効率が低い要因として、出口管入口部で横切る流れと直接出口管へ流入する流れが見られ、この流れに粒子が含まれることにより、出口管から排出されることが考えられる。また、形状中心から上昇流の中心が大きく偏心し、上昇流の範囲が円錐部内壁面近傍にまで達することで、壁面近傍を下降する粒子がこの上昇流に乗り排出されることが考えられる。

(10) サイクロンの高性能化に関する設計指針

集塵用サイクロンの高性能化に向けた設計指針として、以下のことが確認できた。

サイクロンを小型化すると、集塵及び分級性能は向上し、目標とする1.0 μmの球形粒子(比重1.2)100%集塵に近づく結果となった。

粒子捕集の理論に基づき、サイクロン内に案内板を取り付けたサイクロン(案内板付サイクロン)は、比較的長時間運転される集塵プラントに適したサイクロンの可能性を見出した。サイクロン内の流れ場から集塵効率に及ぼす影響を見出した。接線方向流速が小さくなると集塵効率が低下する。また、上向き流れの範囲の広がりが集塵性能を低下させる要因と考えられる。

流れ場の様相に違いがない場合、分級領域が広がるにしたがって集塵効率は上がる。

集塵性能には、サイクロン内旋回流の偏心の把握と出口管近傍の流れ場の把握が重要であるとの設計指針が得られた。また、内壁面静圧の時間変動測定からサイクロン内の旋回中心の偏心が確認でき、また偏心の周期及び大きさを推定できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 小原千嗣、竹島敬志、小崎裕平
2. 発表標題 集塵用サイクロンにおける分離領域の広さが集塵性能に及ぼす影響について
3. 学会等名 日本設計工学会2018年度秋季大会研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野口尚滉、西森峻平、小原千嗣、小崎裕平、竹島敬志
2. 発表標題 集塵用サイクロンにおける案内板の影響
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部第57期総会・講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小崎裕平、小原千嗣、竹島敬志
2. 発表標題 集塵用サイクロンの集塵性能に及ぼす案内板の影響
3. 学会等名 第25回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小原千嗣、小崎裕平、竹島敬志
2. 発表標題 集塵用サイクロンにおける分級領域の広さが集塵性能に及ぼす影響
3. 学会等名 第25回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----