

## 論文の内容の要旨

論文題目 非定常流れ解析による円筒型サイクロンセパレータの粒子分離メカニズムの解明

氏 名 秋山 修

本研究では、円筒型サイクロンセパレータ（図 1）の内部で遠心力を受けながら搬送される粒子の分離メカニズムを解明している。まず、粒子を搬送する流れ構造を理解するため、サイクロンセパレータ内部の詳細な Large Eddy Simulation（LES）流体解析を行った。そして、Particle Image velocimetry（PIV）で計測した実験データと解析結果を比較して解析精度を検証している。LES の解析結果は、円筒型サイクロンの特徴的なランキン渦の速度分布やらせん渦のすりこぎ運動を精度良く捉えている。また、渦構造を可視化することで、中央の大規模ならせん渦の周りを旋回しながら上向きに移動し、出口に向かう縦渦の存在を明らかにした(図 2)。次に、非定常流れにおける粒子の挙動を把握するために、LES 解析結果を入力条件とした粒子追跡の解析を行い、粒子の捕集効率を実験結果と比較して解析精度を検証している。壁面まで及ぶ縦渦が粒子を内向きに搬送する様子を可視化により明らかにした上で、捕集効率に与える縦渦の影響が大きいことを議論している。

第 1 章では、円筒型サイクロンセパレータにおける粒子の分離メカニズムが遠心力のみで説明することが困難であり、分離メカニズムを解明することが工学的に重要な課題であることを述べている。旋回流れを伴い外側を下降し、内側を上昇するサイクロン内部の流れは、中央に連なる大規模ならせん渦がすりこぎ運動をする複雑な流れ構造であると分かっている。この章では、サイクロンと旋回流れに関する先行研究について述べ、未解決な課題をまとめている。そして、本研究の目的を述べている。

第 2 章では、本研究で用いた LES 流体解析手法とその解析精度について述べている。円筒型サイクロンの解析を安定的に進めるために、出口からの発散を回避するための整流板や、らせん渦を底部に安定させるための圧力解法の工夫が必要なことを述べている。精度の検証はベンチマークによく使われる Stairmand サイクロンを対象として、平均流れ場を文献値と比較している。さらに、サイクロンの流れ場において特徴的ならせん渦のすりこぎ運動が本手法で用いた LES 解析で再現できることも検証している。また、本論文で対象とする円筒型サイクロンについては、直径や軸長が異なる 2 つの円筒型サイクロンの内部流れをステレオ PIV によって計測した結果と比較している。平均流れ場や速度変動の解析結果が実験結果と良く一致することから、第 4 章に続く流体解析は十分な解析精度を有することが保証される。また、計算精度の検証のために行った PIV 計測の手法についても述べている。

3 章では本研究で適用したサイクロンの粒子追跡手法とその解析精度について述べている。本件で対象としたケース(流れのバルクレイノルズ数  $Re=10^4$ , 5~20 $\mu\text{m}$  程度の粒子直径)については、流体中の粒子に作用する力には Stokes Drag と重力のみを考慮して、また、粒子濃度は十分希薄であると仮定して運動方程式を導いている。検証には第 2 章で流れ場の計測手法を説明した内径や軸長が異なる 2 つの円筒型サイクロン

を供試体として用いた。およそ球体とみなせる数ミクロンのシリコン粒子 3 種について、解析結果は精度よく捕集効率  $\eta$  を予測している。

第 4 章では、第 2 章で解析精度が検証された LES 解析手法を用いて、バルクな流れ構造や詳細な渦構造について議論している。これまでの研究で議論されることがなかったサイクロン内部の質量流量の移動を調べており、粒子を搬送する質量がどの程度まで底部に到達するか定量的に示している。さらに、粒子は遠心力によって外側に移動するため、角運動量の受け渡しについて調査し、サイクロンの底部に向かい角運動量が減少する原因を議論している。これらのバルクな流れ構造を理解した上で渦運動の詳細を調べた。中央のらせん渦の周りを旋回しながら出口管に移動する長細い縦渦が存在し、円筒の内壁面近傍に達している様子をサイクロンの研究史で始めて示している (図 2)。この縦渦の運動は内壁面のストリークの運動よりも強く、従って、壁面近傍の粒子を内向きにも強い力で搬送することを説明している。

第 4 章でサイクロン内部の流れ構造を議論した内容に基づいた主要な結論は以下のとおりである。

1. 質量の移動を調べた結果、次のことが分かった。出口管より  $-z$  方向に  $0.5D$  となる入口直後において、CY70 で入口流量に対し 30% もの質量が出口管に移動しており、粒子分離には寄与していないと考える。円筒中央においては、底部と内側に向かう質量流量の比が円筒直径長さ当り 91:9 であり、内向きの流れが微少なことを示した。底部の渦芯受けに到達する流量は入口流量に対し CY70 で 34% となり、渦芯受けでも内向きに強い流れが発生している。
2. 下向きに向かう流れの角運動量が底部に向かい減少するのは、壁面のせん断応力により角運動量が減少することに加えて、上側からもらった角運動量を内側にも渡しているためと分かった。らせん渦の端面が壁面に付着した場合には、その付着高さよりも下側には角運動量を渡さないため、速度場は激的に減衰している。このことより、出口管よりらせん渦の端面までが粒子の分離性能に関わる有効分離長さと考えられる。
3. (a)らせん渦：中央で連なる大規模な渦ですりこぎ運動をする。(b)縦渦：らせん渦の外側を旋回しながら出口管に向かう。長細い縦渦で壁面にまで及ぶため、壁面近くの粒子を内側へ輸送すると予測される。(c)出口管直下の微細渦構造：入口直後の領域で、微細な渦構造が連続的に生成され、出口管に吸い込まれる。(d)渦芯受け上の微細渦構造：渦芯受け上で、微細な渦構造が連続的に生成され、旋回しながら散逸している。(e)内壁面のストリーク構造：旋回しながら底部に向かう内壁面固有のストリーク構造。(b)縦渦は、境界層のストリークを横切るように、壁面に強い渦運動の影響を及ぼしている。(図 2 の(a), (b), (c), (d)は文中と対応している)。

第 5 章では、第 3 章で解析精度が検証された粒子追跡手法を用いて、円筒型サイクロンにおける粒子の分離メカニズムについて言及している。縦渦と粒子の挙動を同時に可視化することで、縦渦により円筒内壁面の近傍から内向きに搬送される粒子の経路を示している。また、排出される粒子の大部分が出口管に近い縦渦に補足された経路であり、円筒型サイクロンの分離メカニズムは遠心力と縦渦で説明されることを示している。

第5章で議論した内容に基づいた主要な結論は以下のとおりである。

粒子の捕集効率  $\eta$  を正確に予測するためには、流れの中にある縦渦の運動を精度良く捉えることが重要であることがわかった。このことは、工学的には広く用いられているレイノルズ平均乱流モデルを利用した流体解析では粒子の捕集効率を正確には予測できないことを意味する。

円筒型サイクロンには次の4つの粒子経路があることがわかった。すなわち、(i)ホルダに捕集される経路：旋回流中にある粒子が受ける遠心力により、粒子が徐々に外側に移動して行き、底部まで到達する。(ii)旋回流に追従するが排出される経路：粒子は約  $r/D = 0.45$  の位置で、半径方向に移動すること無く巡回しながら底部まで到達する。そのまま追従して上昇流により排出される。渦芯受けの近傍では、遠心力で外側に移動しなかった粒子が旋回流れに追従するだけで、バルクな内向き流れや(d)渦芯受け上の微細渦構造が捕集効率に与える影響は小さいと分かった。(i)と(ii)は粒子に作用する遠心力、重力、流体抗力の大小関係に依存して決まる経路である。これにより分離特性は大まかには決定される。(iii)入口部から円筒部に流入した直後に出口管から排出される経路：出口管に沿って周回しながら下方に移動し排出される。この経路の粒子が捕集効率に与える影響は小さい。(iv)縦渦に捕捉されて排出される経路：縦渦が、壁付近を下降する粒子を内向きに搬送して、上向き流れの領域  $r/D < 0.3$  に移動させ、出口管から排出される。排出される粒子の半数以上が(iv)であるため、縦渦の巡回運動は捕集効率に大きな影響を及ぼす。なお、入口直後の  $r/D = -1.22$  までに3割が内向きに折り返す強い流れがあるが、内向きに折り返すバルクな流れではなく、縦渦の運動が粒子を搬送したと考えられる。

円筒型サイクロンの粒子挙動を理解した上で、サイクロンの中央部に円柱を配置する形状を提案した。Cy70の中央に配置した直径  $0.14D$  の円柱によりらせん渦のすりこぎ運動を抑制し、縦渦の運動をも抑制したことで捕集効率を高められた。

第6章では、本論文の結果をまとめている。本研究で対象としたような、バルクレイノルズ数が  $Re = 10^4 \sim 10^5$  の範囲にある円筒形サイクロンでは、平均的な旋回流により粒子が受ける遠心力で分離可能であっても、らせん渦のすりこぎ運動、その周りに存在する縦渦の運動により排出される粒径範囲が広範囲に存在することが分かった。したがって、送風機の出力を増大させて遠心力を大きくするだけでなく、上記の渦の運動を制御することにより粒子の捕集効率  $\eta$  を向上できる可能性があることが示唆された。本研究で対象としたCY70の中央に円柱を付加したことで粒子の捕集効率が向上できた理由は、らせん渦のすりこぎ運動を抑制したためと考えられる。

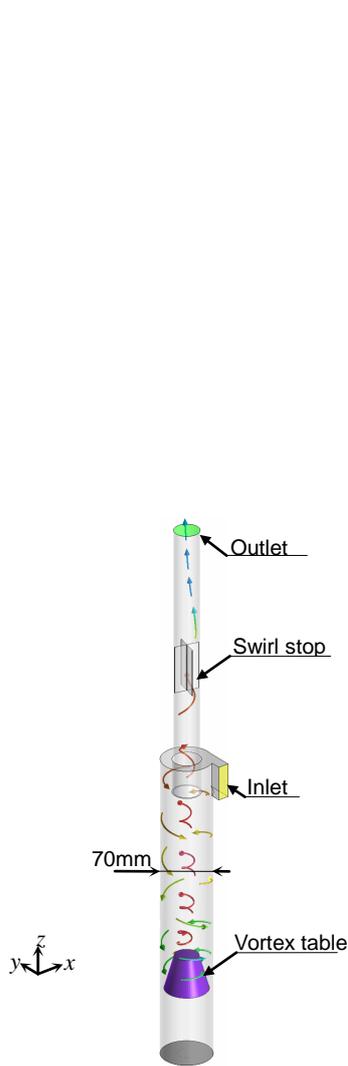


図1 円筒型サイクロンセパレータの解析モデル (CY70)

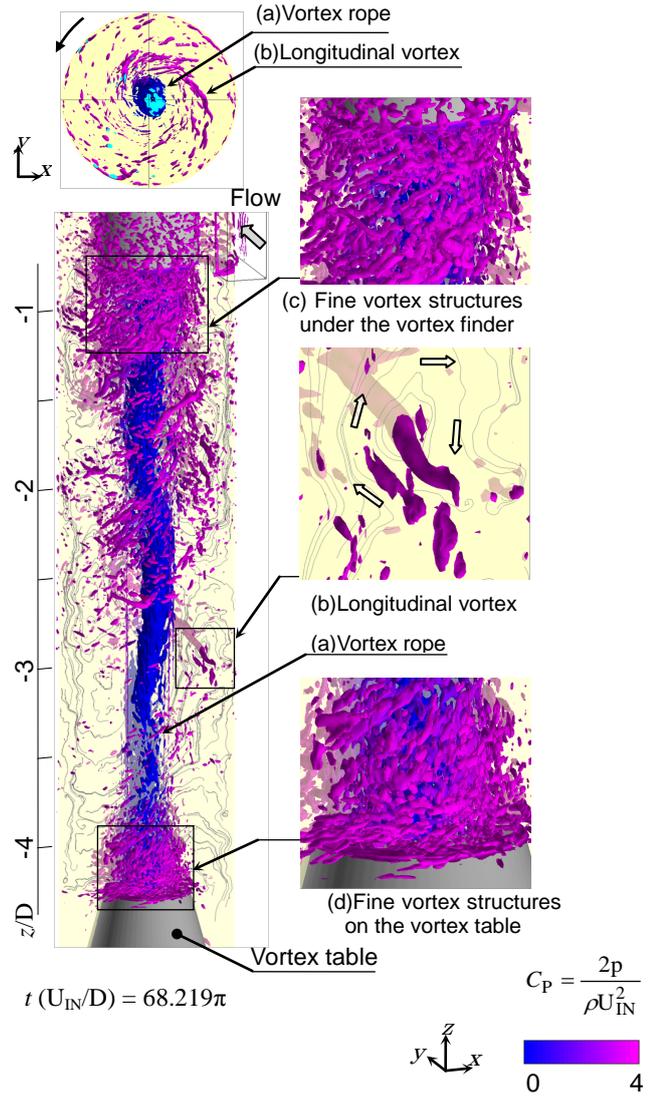


図2. 円筒型サイクロン CY70 の渦構造: 渦構造は  $\nabla^2 C_p = 1200$  の等値面を圧力計数の  $C_p$  で色付けして表示している. 上段には  $z/D = -3.5$  から  $-2.5$  を上面より観察した渦構造を, 下段には  $y=0$  の面における瞬時の流線を重ねて表示している.