

サイクロン分離器内旋回流れに関する研究*
(Large Eddy Simulation の試み)松崎 和愛*¹, 工藤 康人*²
大庭 英樹*¹, 宗像 瑞恵*¹A Study on Swirling Flows in a Cyclone Separator
(Application of Large Eddy Simulation)Kazuyoshi MATSUZAKI*³, Yasuhito KUDO,
Hideki OHBA and Mizue MUNEKATA*³ Department of Mechanical Engineering and Materials Science, Kumamoto University,
2-39-1 Kurokami, Kumamoto-shi, Kumamoto, 860-8555 Japan

Numerical simulation of the swirling flows in a cyclone separator is performed using a large eddy simulation (LES) based on a Smagorinsky model. The validity of the simulation and the complicated flow characteristics are discussed by comparison with experimental results. Moreover, particle motions are treated by a Lagrangian method and are calculated with a one-way method. A performance for particle separation is predicted from the results of the particle tracing. As results of our investigation, it is found that the LES has sufficient accuracy to predict the complicated swirling flows in the cyclone separator.

Key Words: Swirling Flow, Cyclone Separator, Large Eddy Simulation, Particle Motion, Numerical Analysis

1. 結 論

サイクロン分離器は、旋回流による遠心力を利用し粒子の分離を行う装置であり、除塵装置、粉体材料の製造プロセスなど、幅広く利用されている。しかしながら、その粒子分離性能は、近年の粉体材料の粒子設計で要求される分離精度に対して不十分である。したがって、従来の比較的大きな粒子の分離に基づいた設計法ではその要求を満足するのは難しいため、高精度の粒子分離可能な新型のサイクロン分離器を開発することが望まれている。そのためには、小さな粒子の運動は、流れの乱れに大きく影響されると考えられるので、サイクロン分離器内の複雑な旋回流れの乱流構造と粒子運動の関係を明らかにすることが重要である。

そこで、著者らは新しいタイプの接線形のサイクロン分離器⁽¹⁾について、その構造を単純化したサイクロンモデルを用いて、その内部の旋回流れ構造と粒子運動の関連性について実験的に調査してきた^{(1)~(3)}。本報告は、その複雑な旋回流れ場の数値解析に関するものである。過去の研究において、サイクロン分離器

内旋回流れに対しレイノルズ平均に基づく数値解析 (RANS) が適用されてきた^{(4),(5)}。しかしながら、これらのシミュレーションでは、時間平均モデルであるため渦心の振れ回り、渦崩壊現象のような旋回流れ特有の非定常現象を予測することは困難であると考えられる。また、RANSにおいて幅広く利用されている標準的な $k-\varepsilon$ モデルでは、旋回流の平均流れ特性を正確に予測できないことも知られている⁽⁶⁾。

したがって、本研究では近年注目されている Large Eddy Simulation (LES) を複雑なサイクロン分離器内旋回流れに適用し、著者らによる実験結果との比較を通し、本解析の有効性を検討した。また、個々の粒子をラグランジュ的に取り扱い、流体から粒子への影響のみを考慮した One-way method を用いて粒子追跡を行い、サイクロン分離器の粒子分離性能の数値的予測を試みた。

2 おもな記号

A : 粒子の投影面積 ($= \pi d_p^2 / 4$)
 C_1, C_2, C_3 : 粒子に働く粘性トルクに関する定数
 C_D : 抗力係数
 C_{IR} : 揚力係数
 C_T : 無次元定数

* 原稿受付 2004年1月26日。

¹ 正員、熊本大学工学部 (〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)。² 熊本大学大学院自然科学研究科。

E-mail: mzak@gp.kumamoto-u.ac.jp

- C_s : スマゴリンスキー定数 (0.1)
- d_p : 粒子の直径 (5, 10 μm)
- D/Dt : 実質微分
- g : 重力加速度 (9.81 m/s^2)
- H : サイクロン旋回室高さ (340 mm)
- I : 粒子の慣性モーメント ($=\pi\rho_p d_p^5/60$)
- m : 質量
- r, θ, z : 円筒座標系
- q_r : 半径方向のFlux ($=r \times v_r$)
- r_o : サイクロン流出管半径
- R : サイクロン旋回室半径 (72 mm)
- Re_p : 粒子レイノルズ数 ($=d_p \|u_R\|/\nu$)
- Re_R : 粒子の回転レイノルズ数 ($=d_p \|\omega_R\|/4\nu$)
- T : 無次元時間
- u_i : x, y, z 方向速度成分 ($i=1, 2, 3$)
- V_n : 断面平均流入速度 (7.8 m/s)
- v_r, v_θ, v_z : r, θ, z 方向の速度成分
- x_i : x, y, z 座標 ($i=1, 2, 3$)
- η : 粒子の捕集率
- Δt : 無次元時間刻み
- μ_f : 流体の粘度 ($18.22 \times 10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{s}$)
- ν : 流体の動粘度 ($15.12 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$)
- ρ : 密度
- ω : 回転角速度

添 字

- f : 流体の物理量を示す
- n : 時刻を示す
- p : 粒子の物理量を示す
- R : 流体の粒子に対する相対量を示す

3. 数値解析法

3-1 サイクロン分離器モデル 図1に本研究の計算対象であるサイクロン分離器モデルの概略図を示す。これは、著者らが実験で使用したサイクロンモデル⁽³⁾とほぼ同じである。このモデルは半径 R 72 mm, 高さ H 340 mm の旋回室を持ち、気流は旋回室の上部より接線方向に流入し、旋回室の下部に同軸上に設置された半径 r_o 43.2 mm (0.6R) の流出管より流出する。図1に示すように、旋回室内の旋回流れに及ぼす流出管位置の影響を調査するために、流出管を旋回室底部に取り付けた場合 (TYPE-A) および底部より 85 mm (0.25H) 内側へ挿入した場合 (TYPE-B) の2種類の計算を行った。流出管の長さは、TYPE-A の場合 680 mm (2H), TYPE-B の場合 765 mm (2.25H) とした。

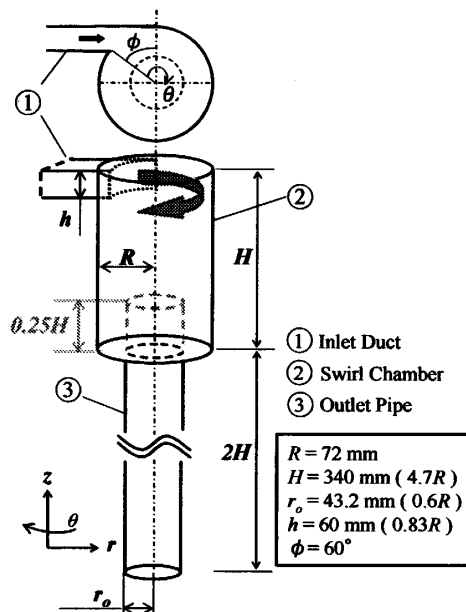


Fig.1 Schematic view of the cyclone separator

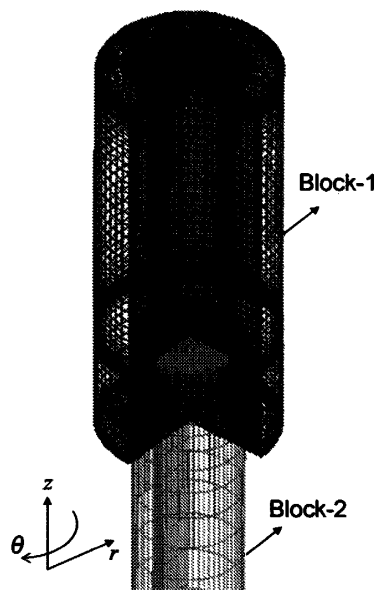


Fig.2 The computational grid for TYPE-B

平均流入速度 V_n (流入流量を流入ダクトの断面積で除して算出した速度) は著者らの実験と同様 7.8 m/s とし、旋回室半径および平均流入速度に基づくレイノルズ数は実験と同様 37,000 とした。図1に示すように円筒座標系が採用され、座標原点は旋回室底面の中心に設定した。

3-2 Large Eddy Simulation 本研究における LES の基礎式は、円筒座標系で記述され、空間フィルターを施された非圧縮粘性流体の連続の式と Navier-Stokes 方程式である。支配方程式の離散化は有限差分法が用いられ、特異点での離散化を容易にす

るため、半径方向の Flux $q_r = r \times v_r$ (v_r は半径方向速度) が変数として導入された⁽⁷⁾。速度と圧力のカップリングには Fractional Step 法が用いられた。Sub-grid Scale (SGS) 応力のモデル化には Smagorinsky モデル⁽⁸⁾が採用され、その壁面近傍の減衰には van Driest 型の damping 関数が用いられた。本計算では Smagorinsky 定数 C_s を 0.1 とした。本研究で用いた計算コードは、基本的には円筒座標系の DNS (Direct Numerical Simulation) のコード⁽⁹⁾に SGS 応力項の部分を付加したものである。ただし、計算の安定のため対流項には 3 次精度修正上流差分法⁽¹⁰⁾が適用された。その他の空間項は 2 次精度中心差分が用いられた。時間積分には、対流項および渦粘性を含む項には 3 次精度 Adams-Bashforth 法、粘性項には 2 次精度 Crank-Nicolson 法が適用された。

変数配置には Staggered Grid System が用いられた。 r , z 方向の格子は、双曲型の関数を用いて壁面近傍で密になるように生成され、 θ 方向には等間隔格子が用いられた。

3・3 粒子運動 微小な剛体球の運動は、以下に示す並進運動と回転運動の方程式で記述される⁽¹¹⁾、⁽¹²⁾。

$$m_p \frac{du_{pi}}{dt} = \frac{1}{2} \rho_f \|u_R\| A \left(C_D u_{Ri} + C_{LR} \frac{(u_R \times \omega_R)_i}{\|\omega_R\|} \right) + 1.61 d_p^2 \sqrt{\mu_f \rho_f} \frac{(u_R \times \omega_f)_i}{\sqrt{\|\omega_f\|}} + m_f \frac{Du_{fi}}{Dt} + \frac{1}{2} m_f \left(\frac{Du_{fi}}{Dt} - \frac{du_{pi}}{dt} \right) + (m_p - m_f) g \delta_{i3} \quad (1)$$

$$I \frac{d\omega_{pi}}{dt} = -C_T \frac{1}{2} \rho_f \left(\frac{d_p}{2} \right)^5 \|\omega_R\| \omega_{Ri} \quad (2)$$

式 (1) の右辺第 1 項は抗力、第 2 項は回転運動による揚力、第 3 項は Saffman 揚力、第 4 項は流体の圧力こう配および粘性応力による力、第 5 項は仮想質量項、最終項は浮力 (重力) 項を示す。抗力係数 C_D 、揚力係数 C_{LR} はそれぞれ以下の式で与えた。

$$C_D = \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}) \quad (3)$$

$$C_{LR} = \min \left[0.5, 0.25 \frac{d_p \|\omega_R\|}{\|u_R\|} \right] \quad (4)$$

ここで、 Re_p は粒子レイノルズ数である。式 (2) の右辺は粒子の回転に対する粘性トルクである。 C_T は無次元定数であり、以下の回転レイノルズ数 Re_R の関数

Table 1 Coefficients for equation (5)

Re_R	C_1	C_2	C_3
0 - 1	0	16π	0
1 - 10	0	16π	0.0418
10 - 20	5.32	37.2	0
20 - 50	6.44	37.2	0
50 - 100	6.45	32.1	0

Table 2 Particle properties used in this study

Material	Lycopodium	
p-p collisions	Without	
The number of particles	100,000	
ρ_p [kg/m ³]	700	
d_p [μm]	5	10
Relaxation time [ms]	0.053	0.21
Volume fraction [$\times 10^{-9}$]	1.18	9.46
Loading ratio [$\times 10^{-6}$]	0.687	5.49
Coefficient of restitution	0.95	
Coefficient of friction	0.3	

として表される⁽¹³⁾。

$$C_T = \frac{C_1}{Re_R^{1/2}} + \frac{C_2}{Re_R} + C_3 \quad (5)$$

ここで、 C_1 , C_2 , C_3 は Re_R の範囲により決まる定数であり、表 1 にその値を示す。

粒子位置での流体速度は、粒子が存在するセルの 8 点の線形補間で計算され、式 (1), (2) の時間積分には 3 次精度 Adams-Bashforth 法が適用され、粒子位置は以下に示す 2 次精度の Crank-Nicolson 法により決定された。

$$x_i^{n+1} = x_i^n + \frac{\Delta t}{2} (u_{pi}^{n+1} + u_{pi}^n) \quad (6)$$

3・4 計算条件および境界条件 図 2 に TYPE-B における計算格子図を示す。図に示すように、計算領域は 2 つの計算ブロックから成り、Block-1 は旋回室の計算領域であり、その格子数は、TYPE-A では r , θ , z 方向にそれぞれ $64 \times 65 \times 64$, TYPE-B では $64 \times 65 \times 84$ 設けた。Block-2 は流出管の計算領域であり、その格子数は TYPE-A, B とともに $32 \times 65 \times 64$ 設けた。これらの格子数は、周方向および z 方向に 2 倍の格子数 (TYPE-A : $64 \times 129 \times 128$, TYPE-B : $64 \times 129 \times 168$, Block-2 は周方向のみ 2 倍) での計算結果と比較検討し、定性的に差がないことを確認した上で、計算時間の都合により決定された。無次元時間刻み Δt は、TYPE-A, B それぞれ 5×10^{-4} , 4×10^{-4} とした。平均流れ場は、流れが十分発達したと思われるところから無次元時間 100 の時間平均より求めた。境界条件は、壁面で速度に滑り無し条件、圧力にノイマン条件を課した。流入境界にはサイクロン旋回室接続方向に一樣流

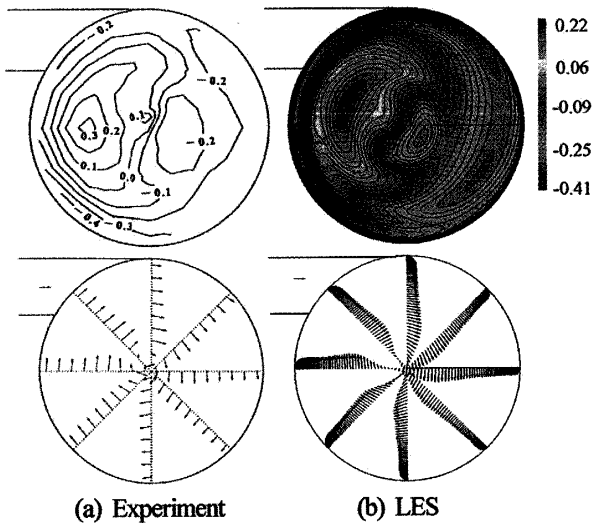


Fig.3 Mean velocity distribution in the $r - \theta$ plane at $z = 170$ mm for TYPE-A, (a) experimental results ($r_o=36$ mm), (b) computational results

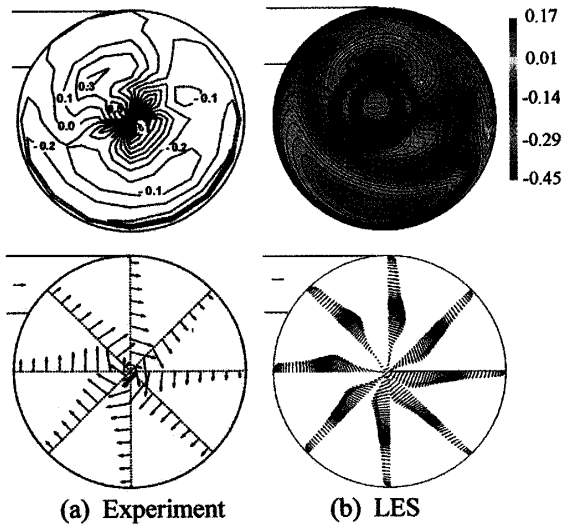


Fig.4 Mean velocity distribution in the $r - \theta$ plane at $z = 105$ mm for TYPE-B, (a) experimental results ($r_o=27$ mm), (b) computational results

を与え、圧力はノイマン条件とした。流出境界では、速度には Sommerfeld の放射条件を与え、圧力は r 方向の運動方程式から Sommerfeld の方程式を差し引いて得られる圧力方程式より求めた⁽¹⁴⁾。計算上の注意事項として、流出管の径 ($r_o=43.2$ mm) をこれ以上小さくして計算を行う場合、サイクロン中央付近の流速が増大し、この領域で非常に複雑な流れ場が形成され、また、本計算では円筒座標系を用いているため、管中心付近の格子の異方向性が大きいと、計算が不安定になることが確認されている。更に小さい流出管の径の計算を行う場合は、更に安定な時間スキーム (陰的なスキーム) や対流項スキームを適用し、流出管の長さ

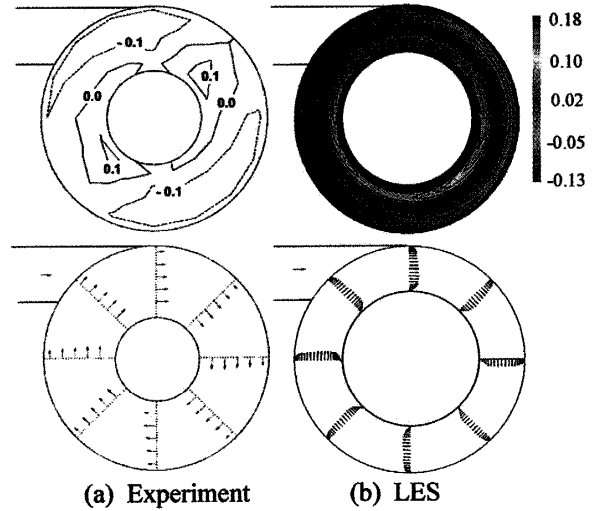


Fig.5 Mean velocity distribution in the $r - \theta$ plane at $z = 20$ mm for TYPE-B, (a) experimental results ($r_o=27$ mm), (b) computational results

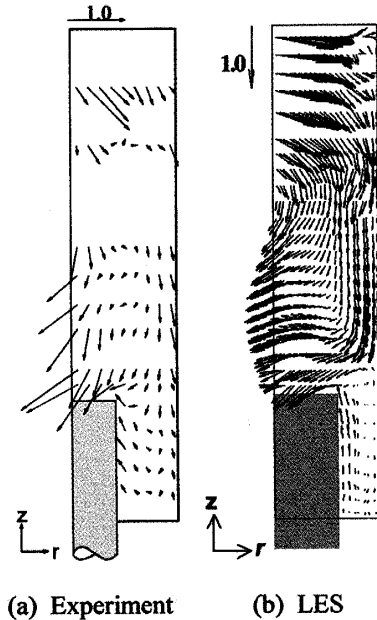


Fig.6 Mean velocity distribution in the $r - z$ plane at $\theta = 150^\circ$ for TYPE-B, (a) experimental results ($r_o=27$ mm), (b) computational results

も更に十分長くする必要がある。このことは今後の課題である。

混入粒子には、密度 700 kg/m^3 、粒子径 5 および $10 \mu\text{m}$ のリコポジウム粒子を用い、十分に発達した流れ場中に 100,000 個の粒子が初期にサイクロン旋回室上部の流入境界部にランダムに配置された。流体と粒子の運動は、One-way method に基づき同時に計算される。本計算では粒子の体積濃度が $0 (10^{-9})$ と非常に希薄な状態であるので、粒子間衝突は考慮しない。壁面と粒子が衝突する場合、衝撃方程式を解くことによ

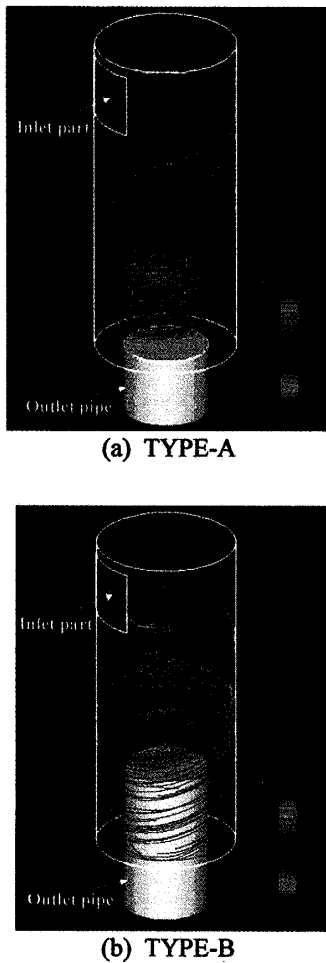


Fig.7 3-D mean flow field in the swirl chamber obtained from the LES; red bold lines display position of the vortex core, color of the streamlines corresponds to the magnitude of the velocity shown in the color bar

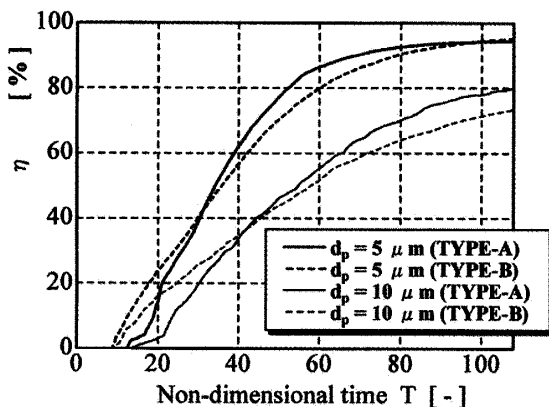


Fig.8 Time history of the collection rate of the particles

り、衝突後の速度、回転速度を算出した⁽¹²⁾。表2に今回用いた粒子の特性をまとめた。なお、表2中の反

発係数および摩擦係数は、粒子と壁面との衝突の衝撃方程式を解く際に用いる。

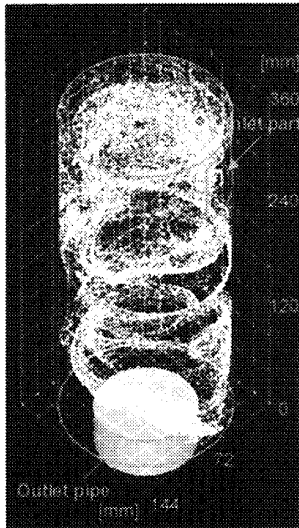
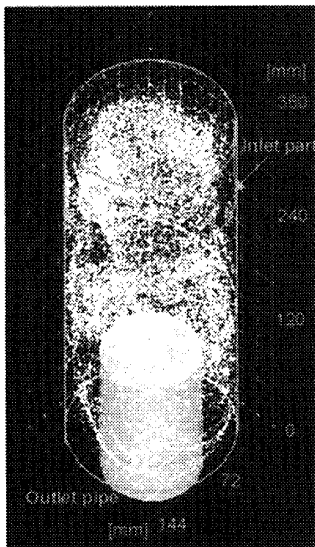
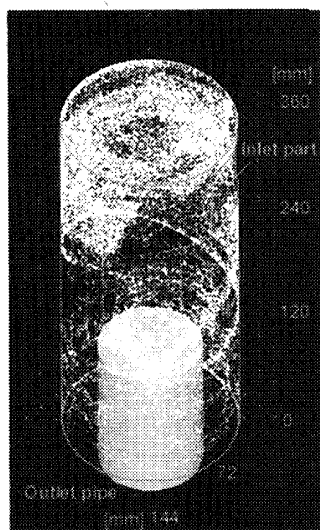
4 計算結果および考察

4・1 平均流れ場の実験値との比較 図3にTYPE-Aにおける $z=170\text{mm}$ の位置の $r-\theta$ 断面の平均流速分布を示す。上図が軸方向速度の等高線図、下図が速度ベクトル図である。実験結果は流出管半径が 36mm に対するものである。この図から、全体的に実験値と本計算結果はよく一致していることが分かる。本計算の軸方向速度分布は、正負の値を示すはっきりした2つの領域を示している。これは、サイクロン内旋回流が螺旋渦構造を持っていることを示しており、この傾向は実験でも示されている。速度ベクトル図を見ると、計算結果は実験結果と同様、ランキンの組合せ渦形速度分布を示していることが分かる。実験値と計算値を比べると、流出管の大きさが若干違うため、計算の強制渦領域は実験に比べわずかに大きくなっていることが分かる。本計算の渦心は偏心しており、その程度は実験値よりも大きいことが確認できる。

図4に、TYPE-Bにおける $z=105\text{mm}$ の位置の図3と同様の平均速度分布を示す。この参照断面は、流出管入口より 20mm 上方に位置する。比較に用いる実験値は、流出管半径が 27mm の結果である。これらの図を見ると、計算結果と実験結果は定性的によい一致を示していることが分かる。実験と計算では流出管の径が異なるため、渦心の位置や軸方向、周方向速度の値に差異が見られるが、計算結果は、図3と同様、サイクロン内旋回流の主要な特徴を十分に捉えていることが確認できる。

図5にTYPE-Bにおける $z=20\text{mm}$ の位置の平均速度分布を示す。計算結果の軸方向速度を見ると、軸方向速度は流出管の近傍で正值を示し、旋回室の内壁近くで負値を示す。この傾向は実験においても見られる。速度ベクトルをみると、半径方向にほとんど一様な回転流れが確認できる。これらの結果から、流出管外壁と旋回室内壁の間の流れは一様な回転を伴って流出管に沿って巻き上がっていることが分かる。このことは図6に示す $r-z$ 断面の平均速度分布からも把握できる。この図から、計算結果および実験結果両方とも、明確にその巻き上がりが確認できる。また、計算結果から得られた流れパターンは、流出管の径が異なるため軸方向速度が旋回室中心付近で小さくなるものの、実験結果と類似の傾向を示す。

前述の議論から、本研究におけるLESの結果は、実験とは流出管の径が若干異なるため厳密な比較はで

(a) $d_p = 5 \mu\text{m}$ (TYPE-A)(b) $d_p = 5 \mu\text{m}$ (TYPE-B)(c) $d_p = 10 \mu\text{m}$ (TYPE-B)Fig.9 Instantaneous particle distributions at $T = 20$

きないが、実験結果が示すサイクロン分離器内旋回流れの主要な特性を精度よく予測したものと考えられる。

図7に本研究のLESから得られた旋回室内の三次元平均流れ場の様子を示す。図中において、赤の中心線は渦心の位置を、流線の色はカラーバーに相当する流速の大きさを示す。流入方向は紙面に向かう方向である。この図から、旋回室内の流れは三次元的な螺旋渦を形成していることが分かる。流入部近傍で渦心は大きく偏心しており、その程度はTYPE-Bの方が大きい。

4・2 粒子分離性能の予測 ここでは、One-way methodによる粒子追跡の結果からサイクロン分離器の粒子分離性能を試みた。図8にTYPE-A, Bの粒子捕集率の時間履歴を示す。粒子捕集率は以下の式で計算された。

$$\eta = \frac{N_{out}}{N_{total}} \times 100 \quad [\%] \quad (7)$$

ここで、 N_{out} は流出管に捕集された粒子の個数、 N_{total} は旋回室内に混入された全粒子個数である。縦軸は捕集率、横軸が無次元時間を示す。この図を見ると、捕集率 η は時間とともに指数的に増加していることが分かる。最終的には、TYPE-Aでは粒子径5, 10 μm においてそれぞれ約90, 80%達成されることが分かる。TYPE-Bでは、それぞれ約90, 70%達成されており、TYPE-Aの方がやや捕集率が高いことが分かる。これはおそらく、TYPE-Bの多数の粒子は直接流出管に捕集されないためであると考えられる。つまり、粒子は旋回室の底へ落ちていき、流出管外壁に沿う巻き上がり流れによって上昇し、流出管に捕集される。このことは図9(a), (b)に示すTYPE-A, Bの瞬間粒子分布の比較により分かる。図9は無次元時間20(粒子を混入した時刻がゼロである)の結果である。また、図9(b), (c)から、粒子径5 μm の粒子は旋回室内に比較的一様に分布しているのに対して、10 μm の粒子は旋回室上部に集積している。これは、サイクロン流入口付近でより大きな粒子が流体の遠心力の影響により管壁側へ移動し、軸方向速度が減少したためだと考えられる。換言すれば、粒子の軸方向速度の減少によりサイクロン旋回室の下部に位置する流出管への到達時間は長くなる。それゆえ、より小さい粒子の捕集率は、大きい粒子のものより高いと考えられる。

本研究が提案する粒子追跡による粒子分離性能の予測法は、実際の粒子数に比べ非常に少ないものの、流出管の挿入高さおよび粒子径の違いに応じた粒子軌跡を精度よくシミュレートでき、粒子分離性能の簡易

モデル構築に大変有効であり、高精度サイクロン分離器の設計に大いに役立つと考えられる。

5 結 論

本研究では、サイクロン分離器内の複雑な旋回流れの乱流特性およびその乱流特性と粒子の挙動の関連性を把握することを目的としている。本報告では、流出管の挿入位置が異なる2種類のサイクロン分離器モデル (TYPE-A, B) の旋回流れ場の数値解析に LES の適用を試みた。加えて、粒子の分離性能が、個々の粒子を One-way method に基づきラグランジュ的に追う粒子追跡により見積もられた。その結果、本研究における LES の結果は、実験結果が示す旋回流れの主要な特性を正確に予測しており、その有効性が確認された。粒子分離性能の予測の結果、TYPE-A の粒子捕集率が TYPE-B のそれよりも高いことが分かった。これは、TYPE-B の多く粒子は旋回室底部に落ちていき、流出管外壁に沿う巻き上がり流れによって上昇し、流出管に捕集されるためであると考えられる。また、本研究が提案する One-way method に基づいた粒子追跡による分離性能の予測法は、流出管の挿入高さおよび粒子径の違いに応じた粒子の軌跡を精度よくシミュレートでき、粒子分離性能の簡易モデル構築に大変有効であると考えられる。

続報では、格子解像度、SGS 応力モデル化などの影響について報告する予定である。

文 献

- (1) 松崎和愛・ほか4名, 機論, 64-618, B(1998), pp. 375-380.
- (2) 松崎和愛・ほか4名, 機論, 64-618, B(1998), pp. 381-388.
- (3) 松崎和愛・ほか3名, 機論, 66-641, B(2000), pp. 89-94.
- (4) 北村修・ほか3名, 機論, 59-562, B(1993), pp. 1959-1964.
- (5) 北村修・山本誠, 機論, 60-580, B(1994), pp. 4002-4009.
- (6) 小林敏雄・依田守生, 機論, 52-481, B(1986), pp. 3230-3236.
- (7) Verzicco, R. and Orlandi, P., *Journal of Comput. Phys.*, 23 (1996), pp. 402-414.
- (8) Smagorinsky, J., *Mon. Weath. Rev.*, 91-3 (1963), pp. 99-164.
- (9) Matsuzaki, K., et al., *Proceedings of the 4th ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference*, (2003), FEDSM2003-45186.
- (10) 梶島 岳夫, 機論, 61-584, B(1995), pp. 1279-1284.
- (11) Maxey, M. R. and Riley J. J., *Phys. Fluids*, 26 (4) (1983), pp. 833-889.
- (12) Yamamoto, Y., et al., *J. Fluid Mech.*, 442 (2001), pp. 303-334.
- (13) Dennis, S. C. R., et al., *J. Fluid Mech.*, 101, part 2 (1980), pp. 257-279.
- (14) Matsuzaki, K., et al., *Proceedings of ASME FEDSM'01 2001 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting*, (2001), FEDSM2001-18003.