

集塵における計算機シミュレーションの応用

吉田 英人*
Hidito Yoshida

1. 緒 言

微粒子を対象とした分級及び粉砕操作は粉体を扱う工業プロセスで重要です。近年、粉体の付加価値を高めるため微粉でかつ粒径分布が制御されたものを要求する傾向が強くなっています。

本報では分級機として広く実用化されているサイクロンを対象とし、内部における気流及び粒子の運動の電算機による3次元解析結果について、筆者の最近の研究結果を解説する。

サイクロンは構造が簡単で、安価に設置できるため、固・気及び固・液分離装置として広く実用化されています。サイクロンの分離径は、一般に数 μm といわれていた。しかしながら近年、粒度測定技術が急激に向上したこと及びサイクロンの各部装置寸法の改良等により、従来不可能とされていたサブミクロン領域の分級がかなり精度よく行なわれる様になってきました。井伊谷ら⁴⁾は装置寸法を適当に選定すれば、サイクロンの50%分離径

が約 $0.4\mu\text{m}$ 程度にまでも小さくなることを実験により確かめています。しかしながらサイクロンの各部最適形状の決定に際しては、操作変量が多いため依然として経験的に決められているのが現状であります。

ここでは従来試みられていなかった、サイクロン内部の流動及び微粒子の挙動に関して、電算機により3次元解析を行なうと共に、単分散及び多分散粒子を利用して部分分離効率を実測し数値解析結果と比較検討し若干の知見を得たので報告致します^{10,11)}。

2. サイクロン実験装置

試験粒子として単分散ラテックス ($D_p=0.33\sim 2.95\mu\text{m}$)を用いた場合の実験装置を Fig. 1 に示す。サイクロンの各部寸法は最近の報文^{3,5)}の実験で分級性能が良かった形状を基にして決定したものであり、粗粉捕集箱入口径が出口管径よりも大きい点が特徴である。部分分離効率を求めるに際して、サイクロン入口、出口部で気流をサンプリングし、光散乱濃度計を用いると共に、

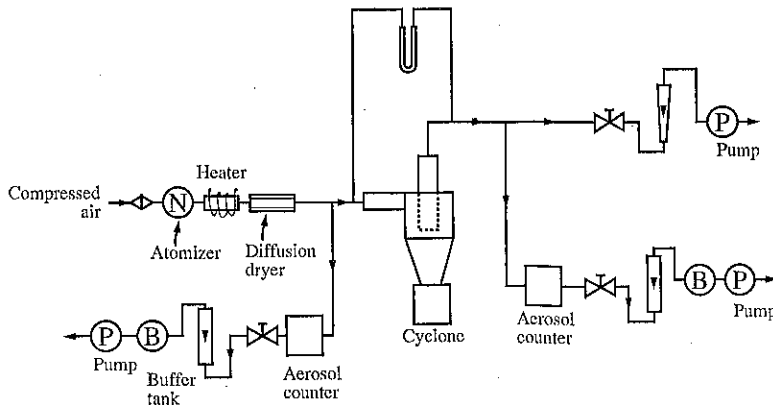


Fig. 1 Experimental apparatus for Latex aerosol

* 広島大学工学部化学工学教室
(〒724 東広島市鏡山1丁目4-1)
Tel. (0824) 22-7111 内 3615

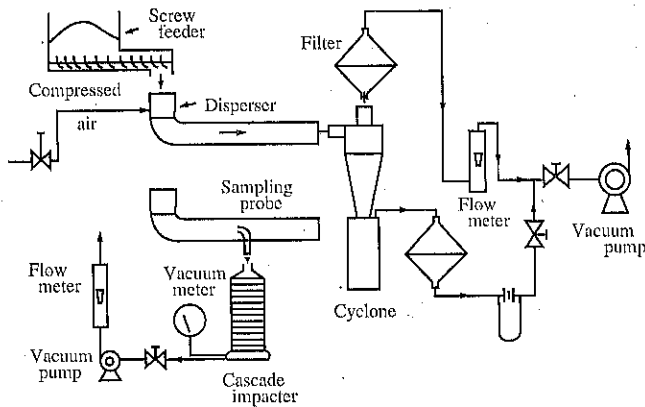


Fig. 2 Experimental apparatus for fine Kanto Loam (JIS, No. 11)

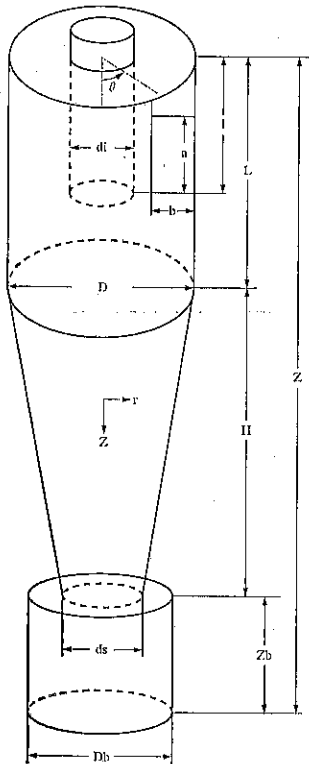


Fig. 3 Cyclone with tangential gas inlet and notations of each dimensions

フィルター上の粒子を計数することにより決定した。

試験粒子として実用粉塵、関東ローム (JIS No. 11, $\bar{D}_p=1.8\mu\text{m}$) を用いた場合の実験装置を Fig. 2 に示す。部分分離効率、粗粉捕集箱及び細粒側フィルタ部の粒子重量を測定し、かつ粒度を遠心沈降式粒度測定装置 (島津, SA-CP 3) を用いて計測することにより求めた。なお粒子の分散性を良くするためリングノズル式分散機⁹⁾を用いた。

Fig. 3 はサイクロン各部寸法を記号表示したものであり、Table 1 にサイクロン内径に対する比率で各寸法を示した。タイプ④は本報で使用したサイクロンであり内径は 40mm である⁹⁾。参考までに示したタイプ⑥は、標準型サイクロンの場合である。

3. 数値解析について

サイクロン内部における流動の数値解析において、従来の報告は軸対称を仮定して解析されているが、この仮定を用いると部分分離効率が正しく推定できない^{1,9)}。本報では Navier-Stokes 式を圧力~速度法を用いて電算機により数値解析した。演算時間及び費用等を節約するため、定常法及び非定常法を交互に利用して収束解を得た。

サイクロンの円錐部壁面は傾斜しているため、物体適合座標系⁷⁾を用いた。この理由は傾斜壁面を階段状の境

Table 1 Cyclone dimensions of two types

Type	$\frac{a}{D}$	$\frac{b}{D}$	$\frac{d_i}{D}$	$\frac{d_s}{D}$	$\frac{D_b}{D}$	$\frac{H}{D}$	$\frac{L}{D}$	$\frac{1}{D}$	$\frac{Z}{D}$	$\frac{Z_b}{D}$	D mm
A	0.38	0.16	0.40	0.45	1.07	2.73	1.33	1.58	6.57	2.50	40
B	0.60	0.20	0.50	0.40	1.0	2.0	1.0	0.85	4.0	1.0	

界で近似すると、壁近傍の流速分布を正しく推定できないためである。対流項と拡散項の評価法として、風上差分と中心差分の両者を考慮してある。Patanker⁵⁾の提案した指数則を用いた。速度場を求めるに際し、以下の条件で計算した。

①直接法による計算 ($R_e = 3000, 5000, 10000$)

②乱流計算 ($k \sim \epsilon$ model)⁶⁾

Table 2 は直接法による計算に利用した Navier-Stokes 式及び粒子の運動方程式を示してある。また Table 3 に乱流計算に用いた基礎式を示す。なお壁近傍の乱流エネルギー及び粘性消散率を求めるには、壁関数による近似式を用いた。

Fig. 4 はサイクロンを上部から見た場合のもので、円周角 $\theta = 45 \sim 90^\circ$ の区間が接線流入部に対応する。部分分離効率は、数値解析により得られた速度場を用い、粒子の運動方程式を数値積分し粒子軌跡を求めることに

Table 2 Equations of fluid and particle motion

$$\frac{\partial}{\partial z}(ru\phi) + \frac{\partial}{\partial r}(rv\phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(rw\phi) = \frac{\partial}{\partial z}(r\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial z}) + \frac{\alpha}{ar} (r\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial \theta}(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial \theta}) + S\phi$$

ϕ	Γ	$S\phi$
u	ν	$-r(\frac{\partial p}{\partial z})$
v	ν	$-r \frac{\partial p}{\partial r} + w^2 - \frac{\nu v}{r} - \nu \frac{2}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta}$
w	ν	$-\frac{\partial p}{\partial \theta} - vw - \frac{\nu w}{r} + \nu \frac{2}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta}$

Particle's Eq. of Motion

$$\phi \left(\frac{d^2 r}{dt^2} - r \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 \right) = - \left(\frac{C_D Re r}{24} \right) \left(\frac{dr}{dt} - v \right)$$

$$\phi \left(2 \frac{d\theta}{dt} \frac{dr}{dt} + r \frac{d^2 \theta}{dt^2} \right) = - \left(\frac{C_D Re r}{24} \right) \left(r \frac{d\theta}{dt} - w \right)$$

$$\phi \frac{d^2 z}{dt^2} = - \left(\frac{C_D Re r}{24} \right) \left(\frac{dz}{dt} - u \right) + G$$

$$\phi = \frac{C \rho_p D_p^2 u_0}{18 \mu D}, \quad G = \frac{C \rho_p D_p^2 g}{18 \mu u_0}$$

Table 3 Equations of fluid motion for turbulent flow

$$\frac{\partial}{\partial t}(r\phi) + \frac{\partial}{\partial z}(u\phi) + \frac{\partial}{\partial r}(v\phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(w\phi) = \frac{\partial}{\partial z}(r\gamma \frac{\partial \phi}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial r}(r\gamma \frac{\partial \phi}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial \theta}(\gamma \frac{\partial \phi}{\partial \theta}) + S\phi$$

ϕ	γ	$S\phi$
u	$\nu + \nu_t$	$\frac{\partial}{\partial z}(r\mu \frac{\partial u}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial r}(r\mu \frac{\partial v}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial \theta}(\mu \frac{\partial w}{\partial \theta}) - r(\frac{\partial p}{\partial z}) - \frac{2}{3} r(\frac{\partial k}{\partial z})$
v	$\nu + \nu_t$	$\frac{\partial}{\partial z}(r\mu \frac{\partial u}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial r}(r\mu \frac{\partial v}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial \theta}(\mu \frac{\partial w}{\partial \theta}) - 2\mu \frac{v}{r} + w^2 - r(\frac{\partial p}{\partial r}) - \frac{2}{3} r(\frac{\partial k}{\partial r}) - \frac{2w}{r}(\frac{\partial v}{\partial \theta}) - \frac{\nu v}{r} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(uw)$
w	$\nu + \nu_t$	$-vw - \frac{\nu w}{r} - \frac{w}{r} - w(\frac{\partial v}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z}(r\mu \frac{\partial u}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial r}(r\mu \frac{\partial v}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial \theta}(\mu \frac{\partial w}{\partial \theta}) + \frac{\partial}{\partial \theta}(\nu \frac{\partial v}{\partial \theta}) - \frac{2w}{r}(\frac{\partial v}{\partial \theta}) - \frac{2}{3}(\frac{\partial k}{\partial \theta}) + (\frac{2v}{r} + \frac{w}{r})(\frac{\partial v}{\partial \theta}) + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\nu v)$
k	$\nu + \frac{\nu_t}{C_k}$	$r(\bar{p} - \epsilon) \quad \gamma$
ϵ	$\nu + \frac{\nu_t}{C_\epsilon}$	$r(C_1 \frac{\epsilon}{k} \bar{p} - C_2 \frac{\epsilon}{k} \epsilon)$

$$\bar{p} = \nu_t \left(2 \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial r} \frac{\partial v}{\partial z} + 2 \frac{\partial v}{\partial r} \frac{\partial v}{\partial z} + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right) \left(\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial w}{\partial r} \frac{w}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} \frac{\partial w}{\partial z} \right)$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \quad \nu = \frac{1}{Re}$$

より求めた。粒子の初期座標位置は Fig. 4 の右図に示す様にサイクロン入口部面内で一様に配置した。

4. 実験及び計算結果

サイクロンの円錐部壁面は傾斜しているため、計算における格子形状として Fig. 5 に示した物体適合座標を用いる場合と、Fig. 6 に示した様に階段状境界とする場合の両者が考えられる。したがって格子の形状の相違が解にどう影響するかを検討した。なお Fig. 5 の物体適合座標を用いた場合、出口管壁及び円錐部内壁近傍では解の精度を向上させるために格子間隔を密にした。

計算結果を Fig. 7 に示す。計算条件として流れレイノルズ数 $R_e = 5000$ の場合の速度場をベクトル表示したものである。ただし円周角は Fig. 4 に記した $\theta = 67.5^\circ$ の場合である。Fig. 7 の(a), (b)は格子形状とし

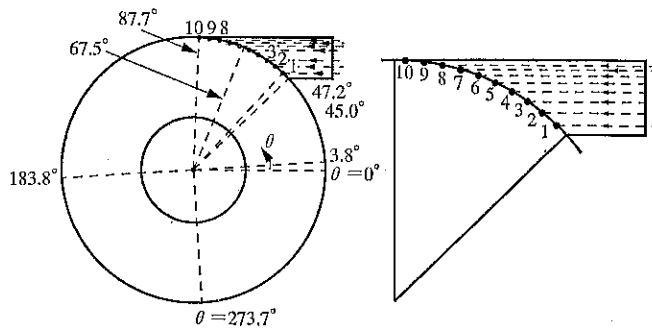


Fig. 4 Top view of the cyclone

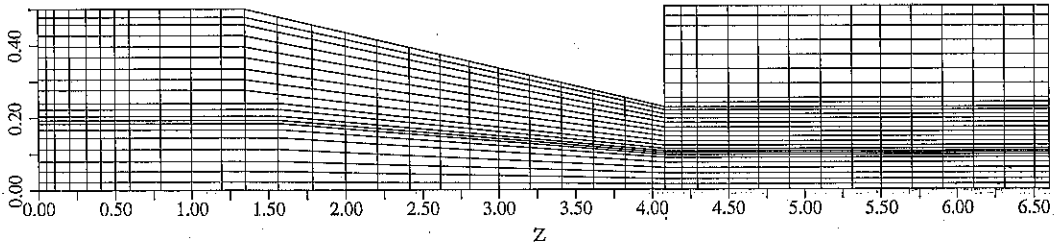


Fig. 5 Coordinate system and grid shape in numerical calculation (Curvilinear coordinate)

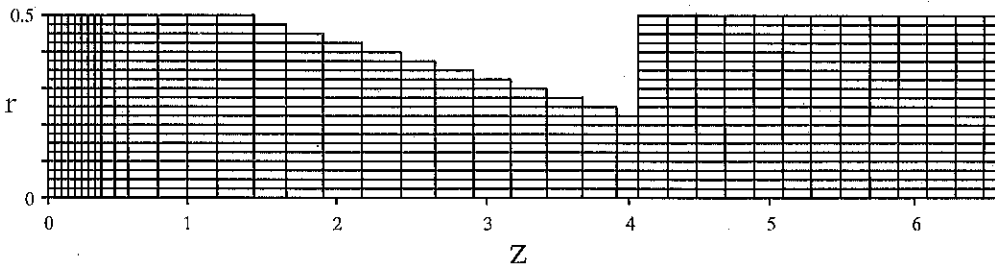


Fig. 6 Grid shape in numerical calculation (conical wall; stepwise shape)

て Fig. 5, 6 を用いた場合である。サイクロン円錐壁部の境界層厚さは Eq. (1) の近似式で推定することができる。

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{R_e}} \quad (1)$$

流れレイノルズ数が $R_e=5000$ の場合、無次元境界層厚さは $\delta=0.014$ 程度となり、Fig. 7, (b)の結果は境界層厚さを大きく評価しすぎることがわかる。よって以後の計算では格子形状として Fig. 5 に記した物体適合座標系を用いた。

計算により得られた気流速度ベクトルの結果を Fig. 8~11 に示す。Figs. 8, 9 は直接法の解を Figs. 10, 11 は乱流解を示しており、また円周角の相違による影響を調べるため、4種類の円周角の面上における速度ベクトルを対比して示してある。

Figs. 8 で $\theta=3.8^\circ$ の場合、出口管下部の速度ベクトルの一部分は中心軸の方向を向いているのに対して、Fig. 9 の $\theta=183.8^\circ$ の場合は逆に外周壁の方向に向いている。よって、これらの結果より当然のことではあるが、サイクロン内の流れは必ずしも軸対称といえないことがわかる。

次に粗粉捕集箱入口近傍の速度ベクトルに注目すると管壁近傍の下降流 (Fig. 8 の㉑) と中心軸近傍の上昇流 (Fig. 8 の㉒) とが合一して、速度分布が急激に変化していることがわかる。これらの結果より実際には一度捕

集された粒子が、円錐管壁を降下してゆく際に、粗粉捕集箱入口近傍で再び上昇流に同伴され、出口管より系外に排出される場合のあることが予想されるため注意する必要がある。分級操作において、細粒側粒子中に粗粒子が混入する場合があるが、これは気流速度ベクトル図から判断して壁部で捕集された粒子が円錐壁部近傍で再飛散することが原因で生ずると考えられる。

Figs. 10, 11 の乱流解の結果もほぼ同様な結果が得られており $\theta=67.5^\circ$ と 273.7° の場合の、出口管下部における速度ベクトルが相違しており、サイクロン内の流れは複雑な3次元流れ場であることがわかる。

Fig. 12 は粒径 $0.8\sim 2.4\mu\text{m}$ の3次元粒子軌跡を2次元面に投影した結果である。粒径 $2.4\mu\text{m}$ の場合は円錐部下端までほぼ粒子が捕集されている。しかしながら粒径が $2.0\mu\text{m}$ と小さくなると、一度粗粉側捕集箱内に入った粒子が再び上昇流に同伴されて出口管から排出されるのが認められる。さらに粒径が小さくなり、 $0.8\mu\text{m}$ 程度になると粒子は出口管周りを旋回した後、サイクロン外へ排出される。

Fig. 13 は粒子径が $1.5\mu\text{m}$ と同一で、粒子初期位置における円周角が異なる場合の粒子軌跡の様子を示したものである。 $\theta=47.2^\circ$ の場合、粒子は粗粉捕集箱入口近くまで下降した後排出される。しかし $\theta=87.7^\circ$ の場合、粒子は円筒部壁面近傍から入射するため、サイクロンの円筒部上部において主に捕集されることがわか

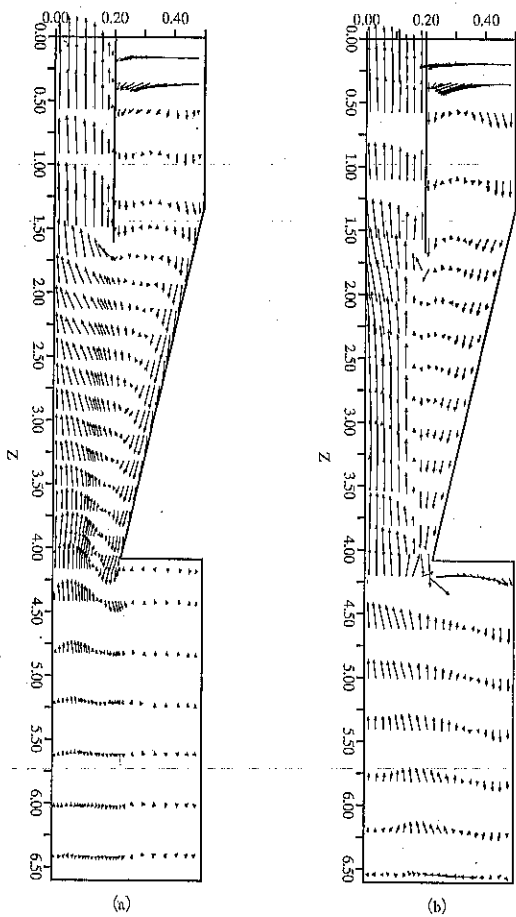


Fig. 7 Effect of grid shape on the flow field of cyclone for different grid coordinate systems ($Re=5000$, $\theta=67.5^\circ$)

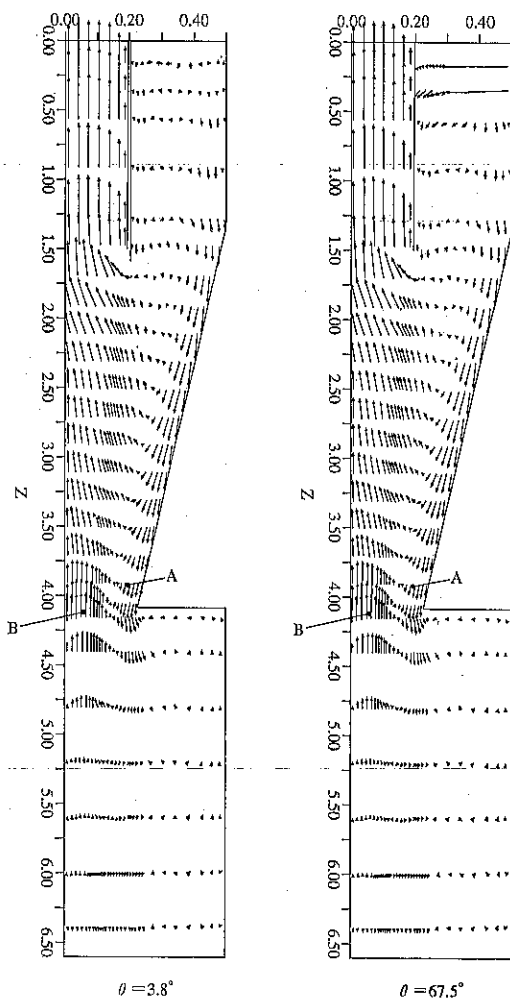
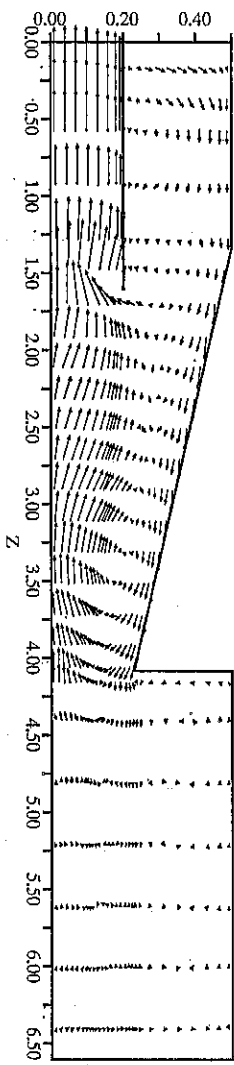
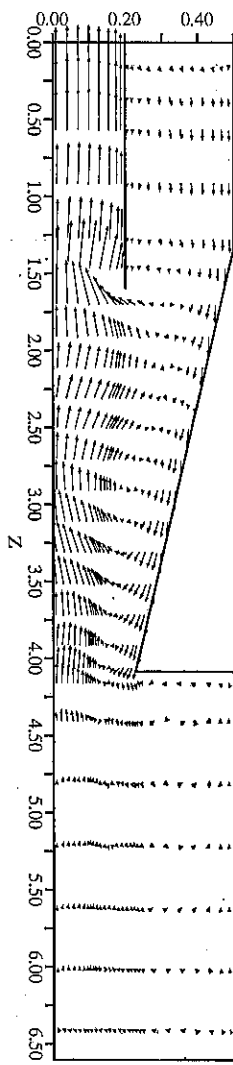


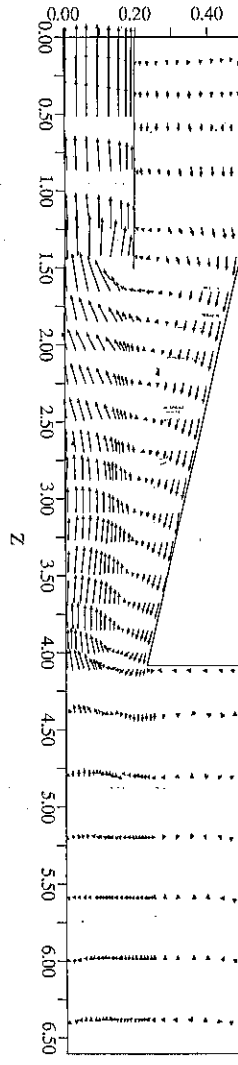
Fig. 8 Fluid velocity distribution (Curvilinear coordinate, $Re=5000$)



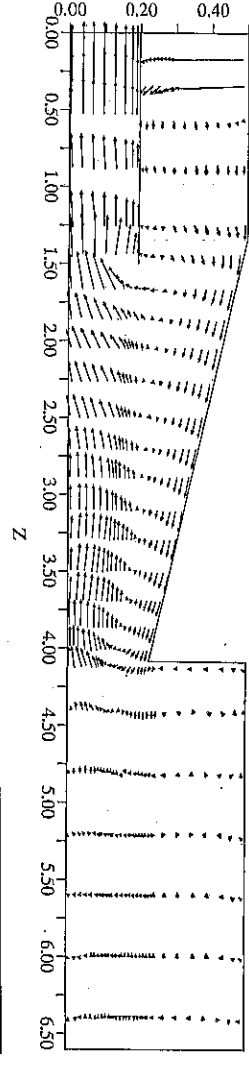
$\theta = 183.8^\circ$



$\theta = 273.7^\circ$



$\theta = 3.8^\circ$



$\theta = 67.5^\circ$

Fig. 9 Fluid velocity distribution for different circumferential angles (Curvilinear coordinate, $Re=5000$)

Fig. 10 Fluid velocity distribution (Curvilinear coordinate, turbulent flow)

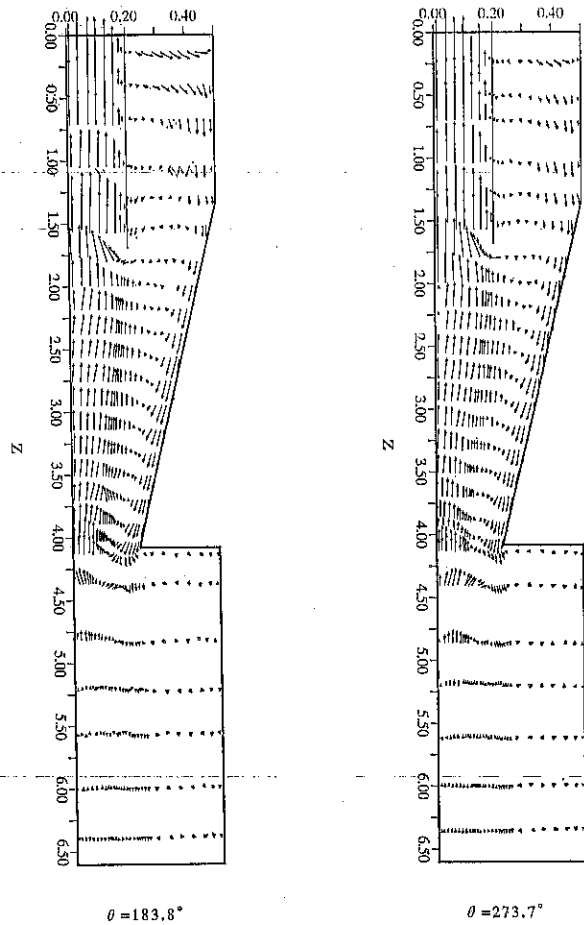


Fig. 11 Fluid velocity distribution for different circumferential angles (Curvilinear coordinate, turbulent flow)

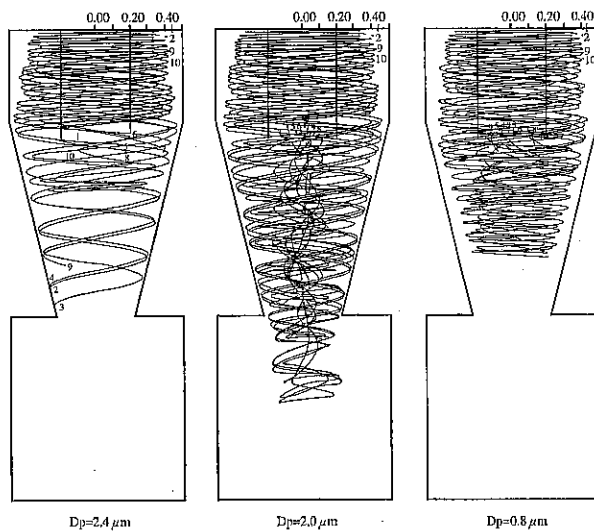


Fig. 12 Particle trajectories (turbulent model, $\theta = 47.2^\circ$)

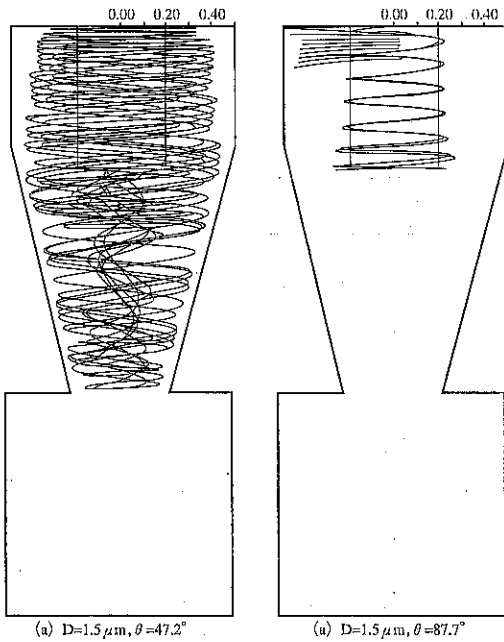


Fig. 13 Effect of circumferential angle of particle starting position on the movement of particle trajectories (turbulent model, $D_p=1.5\mu\text{m}$)

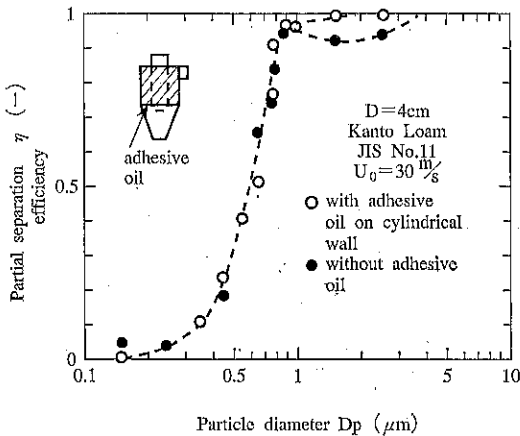


Fig. 14 Experimental results of partial separation efficiency with and without adhesive oil

る。以上で得られた知見は、従来より経験的にいわれていたことではあるが、電算機シュミレーションによってある程度検証されたといえる。

Fig. 14 は円筒部内壁に粘着性油を塗布した場合、及び塗布しない場合における部分分離効率の相違を示したものである。粘着性油を用いない場合、粒径 $1\mu\text{m}$ 以上

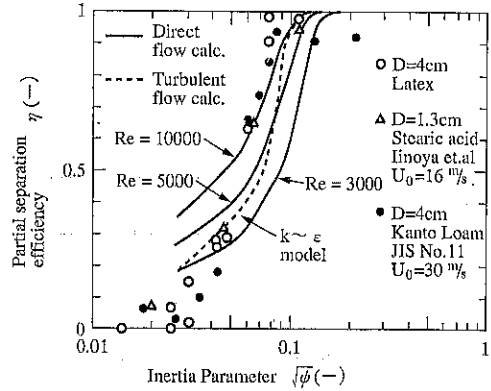


Fig. 15 Experimental results of partial separation efficiency compared with calculated results

の領域で部分分離効率が低下しているが、粘着性油を用いた場合は、効率の低下が生じていない。これは粘着性油を用いることにより粒子の再飛散が防止されるため生じたものである。

部分分離効率の実験値と計算値の比較を Fig. 15 に示す。図中には筆者ら¹⁰⁾のラテックス及び関東ローム (JIS No. 11) を用いた実験値及び井伊谷ら⁹⁾がステアリン酸粒子を超小型サイクロンに用いた実験値も併記してある。ラテックス及びステアリン酸粒子は壁面に付着すると再飛散する確率が低いから、計算に用いた仮定と矛盾しない。

本報での実験条件は、流れレイノルズ数 $Re > 4 \times 10^4$ の領域にある。実線は直接法による解であり、 Re 数の増加と共に部分分離効率は上昇しているが、 $Re=10^4$ の計算値でも粒子慣性の低い領域で実験値と相違している。実験値は破線で示した乱流解の計算値により近いことがわかる。

5. 結 言

3次元電算機シュミレーションにより、従来経験的にいわれていたことが、ある程度検証できた。今後、分級径が制御でき、かつサブミクロン微粒子を高精度で分級可能な分級機の開発及び最適化シュミレーションについてより詳しく検討する必要がある。

引用文献

- 1) Ayers, W. H., F. Boysan, J. Swithernback and B.C.R. Ewan: Filtration and Separation, 22, 1, 39 (1985)
- 2) Iinoya, K., C. Piao, S. Okamoto and K. Takeuchi: J. of the Soc. of Powder Tech., Japan

- 18, [4] 229 (1981)
- 3) Inoya, K. and A. Nakai: J. of the Soc. of Material Sci., Japan, 18, [189] 65 (1969)
- 4) Inoya, K., T. Fuyuki, Y. Yamada, H. Hisakuni and E. Sue: J. of the Soc. of Powder Tech., Japan, 29, [5] 351 (1992)
- 5) Patanker, S. V.: "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", McGraw-Hill, p.80 (1980)
- 6) Spalding, D. B. and B. E. Launder: Comp. Methods Appl. Mech. Eng., 3, 269 (1974)
- 7) Thompson, J. F.: J. Comput. Phys., 24, 274 (1977)
- 8) Yamada, Y., H. Murata and K. Inoya: Proceedings of the Second World Congress, Particle Tech., Kyoto, 48, (1990)
- 9) Zhou, L. X. and S. L. Soo: Powder Technology, 63, 45 (1990)
- 10) Yoshida, H., T. Saeki, K. Hashimoto and T. Fujioka: J. of Chem. Eng. of Japan, 24, [5] 640 (1991)
- 11) Yoshida, H.: Kagaku Kougaku, 56, [2] 138 (1992)

特許一言メモ No. 134

——「チキンラーメン」事件——

即席めんの最大手、日清食品（大阪市）は森永製菓（東京都）の販売しているスナック菓子「おととと・チキンラーメン味」は日清食品の即席めん「チキンラーメン」と名称が類似し、製造者が同じであるなどの混乱を招くとして、不正競争防止法に基づき、森永製菓に対し、名称の使用禁止を求める仮処分を大阪地裁に申請した。日清によると、森永が「おととと・チキンラーメン味」を発売した月から使用禁止について話し合ってきたが、進展がないため仮処分申請に踏み切った。日清は今後、使用禁止や損害賠償などの訴訟を起こす方針だ。

「チキンラーメン」は日清食品が1958年に日本で初めての即席乾燥めんとして発売、延べ30億食の販売実績がある。日清側は「これまで200億円の宣伝費を使い、ブランドとして浸透させた。商標登録は切れたが、現在再出願中、当社の原点で名称使用は認められない」という。また、チキンラーメン味についても「チキンラーメンとは違う味で、大変迷惑している」（同）と訴えの理由を説明する。

一方、森永側は①チキンラーメンの登録商標権は31年に切れている。②即席めんとスナック菓子は商品の種類が異なり、混乱はないと反論し、「あくまでも味の説明として一般名称として使っているだけ。販売前に弁護士にも相談したが、問題はないと判断した。チキンラーメンという言葉に対する思い入れの違いがあるかもしれない」としている。「おととと」は82年に塩味が売り出

され、今年2月発売のチキンラーメン味を含め現在、3種類が出ている。一年間の売上高は60億円のヒット商品。

（朝日 平4.11.13）

これは「便乗商標」の問題と考えられるが、登録商標の更新手続きがきちんとなされ、商標権が確立していればこの問題は生じなかったとみられる。現段階になっては、明確な「アンフェア」がどちらに重く存在するか否か、が判断の決め手になると思う。

（後日談）

朝日 5.3.2の報ずるところによると、「チキンラーメン」の商標をめぐる争っていた日清と森永は1日、森永が商標を使った商品の製造を7月末で中止、日清は訴えを取り下げることで和解した、と発表した。ただ、チキンラーメンの名称については、「商標登録していなくても周知の著名な商標」（日清）「法的にも商道徳的にも味の一般名称」（森永）との主張は、両者とも最後まで譲らないまま、「紛争を長引かせても仕方ない」との点で一致した「大人の解決」という。

大阪地裁からの和解勧告に沿って、1日の審尋で和解した内容は、森永が「チキンラーメン」の長年にわたる販売・営業実績を尊重し、「おととと・チキンラーメン味」の製造を7月で中止すること。日清は、謝罪広告や損害賠償を求めた訴訟を取り下げることとなっている。

（特許室）