

粒体噴流化式自動身体洗淨・入浴装置の開発
粒体挙動のシミュレーション解析

平成13年2月28日

知能機械システム工学科 1010229

山崎敬一

指導教授 横川明

目次

	頁
1. はじめに	1
2. 実験装置及び方法	1
3. 実験結果及び考察	2
3.1 風速分布及び噴流特性	
3.2 噴流中での粒体の密度	
3.3 粒体噴流化式洗浄の洗浄効果	
3.4 衝突速度，角度と洗浄率の関係	
4. 数値解析	4
4.1 粒体の運動方程式	
4.2 噴流の諸条件及びコア内での粒体の挙動	
4.3 解析結果との比較	
5. まとめ	8

1.はじめに

高齢化社会が進む今、小児化傾向や介護施設の増加により介護労働力の不足が生じ、介護労働力の低減が求められている。この介護労働力の中でも入浴に関する労働力が大きな割合を占めている。通常の入浴介護操作は 浴槽内外への移動、洗淨、入浴、乾燥に分けられる。この中でも特に洗淨操作の自動化が遅れている。本研究では洗淨操作を自動化することによって介護労働力の低減をはかることを目標とする。

図1に粒体噴流化式洗淨装置の概略を示す。この装置では粒体を空気噴流によって下から吹き上げ、粒体の衝突、摩擦によって人体を洗淨する。また、粒体が身体に当たることによって血行促進、皮膚の疲労回復などの効果がある。

自動入浴装置の開発を行うに当たって、噴流の特性、粒体噴流化式洗淨の洗淨効果について調べた。

空気噴流に混入させた粒体の衝突や摩擦効果を利用して洗淨を行う場合、人間が痛みを感じない程度の衝突速度、また、最も効果的に摩擦効果が現れる衝突角度で洗淨する必要がある。本研究では通気性膜に塗ったバターを人口垢として粒体の衝突速度及び衝突角度が洗淨率に及ぼす影響について調べた。

また、噴流中の粒体の挙動及び衝突速度、衝突角度を知り、粒体噴流化式洗淨の洗淨効果の予測を行うために、FORTRAN^{(1),(2),(3)}を用いて数値解析を行った。

2.実験装置及び方法

実験装置の概略を図2に示す。インバータ電源 につながれた静圧34.3KPaのルーツブローア により供給された空気は内径50mmの塩化ビニルパイプを通り、オリフィス流量計 (JIS Z8762のD・D/2タイプ)通過後、厚さ32mmの鉄定板 の上に設置された幅600mm、高さ250mm、奥行き1,600mmのバッファータンク に導かれる。バッファータンク上面には終端部を設けてある。その上に浴槽底板に見立てた500×150mm、厚さ30mmのアルミニウム板で開口部を密閉し、その中央部に幅10mm(D)、長さ150mmのスリットを設けてノズル とした。空気はノズルから上方の大気中に噴出される。浴槽底板に見立てたアルミニウム板の上に235×150mm、傾斜角5度の傾斜板をノズル端面より10mmの平面部分を設けて固定した。傾斜角は粒体の転がり摩擦角を測定し定めた。平面部分は粒体を噴流へ垂直に突入させるために設けた。傾斜板の表面及び10mmの平面には粒体が跳ね返らないように厚さ2mmのラバーを張った。

バッファータンク内には拡大部直後に整流を目的とした金網を3ヶ所に設けた。またノズル上流側150mmの位置に設けた温度計 でノズルに流入する空気温度を測定した。

ノズルの概略を図3に示す。ノズルの断面形状は、空気の入り口側にノズル出口での空気速度を一定にするために $R=6\text{mm}^{(4)}$ の丸みを付け、下面には粒体のバッファータンクへの落下防止のために20メッシュの(線形0.3mm、線間隔1.3mm)の金網を設けた。ノズル長手方向の両端には噴流の広がりを押さえて2次元噴流になるように、幅500mm、高さ1000mmの壁面を透明アクリル板で設けた。他の2面は10メッシュの金網で覆い、空気の出入りを自由として噴流の偏向を防止した。

座標軸の概略を図4に示す。座標軸は噴流主流方向をY軸、噴流断面方向をX軸、ノズル長手方向をZ軸とし、ノズル上面、スリット幅の中心を原点とした。

流速測定はノズル出口近傍においてX方向の測定ピッチを小さくした。また、噴流への影響を考慮して外径6mm、2mm、1mmと先端部になるにつれて小さくした全長150mm、測定穴径0.5mmの総圧管 を用いた。これをジグに固定してノズル上方より、トラバース で測定位置に移動させた。トラバースはX方向±225mm、Y方向600mmの移動が可能で特にX方向の移動量はデジタルスケールを取り付けて0.

01mmまでの位置合わせを可能とした。差圧はマノスターゲージ（0-50，0-100，0-300，0-1000Pa）で測定した。

流量調整はインバータの周波数で行い，ノズル出口の流速 V_0 は $Y=10\text{mm}$ の位置での速度とし， $V_0=30\text{m/s}$ （レイノルズ数： $Re=19,400$ ）について噴流特性を調べた。

粒子噴流化式洗浄による洗浄率の測定には，通気性の薄いポリウレタンフィルム（ $24\text{mm} \times 30\text{mm}$ ）をビニール（ $24\text{mm} \times 50\text{mm}$ ）の中心に張った後，人口垢に見立てたバター（脂肪分83%）を塗り，50℃で30分間加熱し，厚さをできるだけ均一にした。これをデシケータの中で一日乾燥させたものをテストピースとして使用した。

洗浄率(%)は以下の式で求めた。

$$\text{洗浄率} = \frac{\text{洗浄前のバターの重量} - \text{洗浄後のバターの重量}}{\text{洗浄前のバターの重量}} \times 100$$

粒子は直径6mmのポリスチレン球（比重1.0，真球度0.042mm）を使用した。粒子の分布及び衝突荷重の測定には直径12mmのロードセルを丸棒に接着したものを使用した。及び粒子の分布はトリガー0.459N，サンプリングタイム200 μs として6.553秒間の衝突回数を求めた。また，粒子の衝突速度は高速ビデオカメラ（誤差2%）で撮影した。

3. 実験結果及び考察

3.1 風速分布及び噴流特性

ピトー総圧管による動圧から風速への変換はベルヌーイの式と状態式から次式で表される。

$$V_0 = \sqrt{\left(\frac{2RT(P - P_0)}{P_0} \right)}$$

ここで， $(P - P_0)$ はマノスターゲージでの差圧すなわち動圧である。

垂直噴流の風速分布を図5に示す。風速分布は $Y=10, 30, 50, 60, 70, 80, 100, 200, 400, 600\text{mm}$ の位置で測定した。風速分布及び噴流特性は浴槽に粒体を混入せず測定した。風速分布の横軸，縦軸はスリット幅 D で割り無次元化したものを使用している。風速はそれぞれの高さでの風速を出口速度で割り無次元化したものである。点線が実測値，実線は新津の理論式によるものである。

新津の理論式は次式で表される。

$$\frac{U}{U_0} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\frac{f(X+1)}{cZ} - \frac{f(X-1)}{cZ} \right]}$$

図5より $Y/D=60$ の位置では理論値と若干ずれが見られるものの，全体としては，実測値と理論値はおおむね合うといえる。これより，噴流の広がりは10度と仮定できる。

噴流中心軸上での風速を表したものを噴流特性とし，図6に示した。噴流特性は浴槽に粒体を混入せず測定した。噴流特性では横軸を高さ Y をスリット幅 D で割ったもの，縦軸はそれぞれの高さの風速 V を V_0 で割ったものである。 $Y/D=5$ の位置での風速はノズル出口風速の96%である。これよりポテンシャル・コアの高さは $Y/D=5$ ， $Y/D=10$ までは遷移域， $Y/D=10$ 以上では拡散域と仮定できる。

3.2 噴流中での粒子の密度

噴流中での粒子の挙動を観察し，その軌跡を3種類に分類した。軌跡の分類の概略を図7に示す。噴流に突入した後，最高到達点が $Y/D=60$ 以下で，噴流軸を越えずに，戻ってきた場合をA，噴流突入後，最高到達点が $Y/D=60$ 以下で，噴流軸を越えた場合をCとし，最高到達点が $Y/D=60$ を超えた場合をすべ

てBとした。

図8には粒体を1つずつ傾斜板から転がした時の軌跡を判別した結果を示した。粒体を転がした位置L(mm)を横軸，それぞれの位置でのA,B,Cの確率を縦軸とした。粒体は傾斜板の下端面から10mmピッチでピンセットを使用して1つの位置につき20個の粒体を転がした。図7よりA,Cと違ってBになる位置が狭いことがわかる。A,B,Cの確率はそれぞれ30,11,59%となった。

噴流中での粒体密度を図9に示す。密度は傾斜板5度，粒体1000個(質量流量比1.34)，高さY/D=20,40のものである。粒体の衝突回数をロードセルの面積，測定時間で割ったものを平均個数 N_c として縦軸とした。

Y/D=20の平均個数分布はX/D= ± 2.4 で大きなピークが現れ，2つに分かれた分布となる。Y/D=40では全体的にフラットな分布となった。この結果は図8の結果とよく一致する。これより，粒体の噴流への突入速度が粒体の噴流中の密度に大きな影響を及ぼすと考えられる。

3.3粒体噴流化式洗浄の洗浄効果

洗浄実験は洗浄時間を5分間，粒体1000個使用して洗浄を行った。洗浄実験に使用した治具を図10に示す。治具は直径12mmの鉄の丸棒に緩衝材として厚さ7mmのゴムを巻き付けた上にテストピースを張り付けたものを浴槽に入れ洗浄を行った後，洗浄率を測定した。

垂直噴流による洗浄結果を図11に示す。洗浄結果はY=200,400mmで計測した。Y/D=20における洗浄ではX/D= ± 2.4 の位置が最も洗浄効果が高く，Y/D=40ではX/D=-48~+48までフラットな洗浄効果が現れた。この洗浄効果と噴流中における粒体の密度はよい相関を持っていると言える。このことより粒体による洗浄では洗浄対象に当たる粒体の数が強い影響を及ぼすと考えられる。

3.4衝突速度，角度と洗浄率の関係

洗浄率に及ぼす衝突速度及び衝突角度の影響を測定するために使用した実験装置の概要を図12に示す。

角度を設定できる精密パイスの上にX,Y方向に1mmピッチで稼動できるテーブルを固定し，その上に緩衝材としてラバー(厚さ10mm)を張り，洗浄率を測定するためのテストピースを張った。

内径7mm，長さ50,250,450mmの透明のアクリルパイプをガイドとして用いた。粒体はテストピースに1mmピッチでひとつずつ落とす。一つのテストピースにつき616個の粒体を落とす。落下距離は衝突角度90度では100,300,500mm，衝突角度60,45,30度では300mmとして洗浄率を求めた。衝突速度は100,300,500mmの位置から粒体を落下させ，粒体の衝突直前の速度を高速度ビデオカメラで計測して求めた。

洗浄率に及ぼす粒体の衝突速度の影響を示すと図13のとおりとなる。横軸は衝突速度，縦軸は粒体1個当たりの洗浄率である。グラフ上の左の点からそれぞれ落下距離100,300,500mmにおける衝突速度である。衝突速度が大きくなると洗浄率は上がることがわかる。

洗浄率に及ぼす衝突角度の影響を図14に示す。横軸は衝突角度，縦軸は1個当たりの洗浄率である。グラフ上の左の点より衝突角度30,45,60,90度における洗浄率である。衝突角度が小さくなるにつれ洗浄率は高くなる。これは粒体がテストピースにななめに当たることにより，粒体がテストピースの上をすべり，その摩擦によってバターが除去される為であると考えられる。この結果より粒体による洗浄では衝突速度が同じであっても衝突角度が小さいほうが洗浄率に影響を与えたと考えられる。

4. 数値解析

4.1 粒子の運動方程式

噴流中の粒子の挙動を数値解析することは噴流中における粒子の分布及び挙動の予測、洗浄効率の予測にとって重要になる。そこで噴流中の粒子の軌跡及び噴流の高さ $Y/D=20, 40$ の位置での衝突速度、衝突角度及び洗浄率を知るために数値解析を行った。数値解析は粒子の運動方程式をルンゲ・クッタ法によって解いた。以下にその式を示す。

粒子の噴流中における並進に関する運動方程式は

$$M \frac{d\overline{U}_s}{dt} = F_D + F_G + F_L + F_{LG}$$

で表される。ここで F_D は粒子に及ぼす流体の推力、 F_L は粒子の回転による揚力、 F_{LG} は速度勾配による揚力、 F_G は重力項である。

回転に関する運動方程式は

$$I \frac{d\overline{\omega}_s}{dt} = -T$$

で表される。

空気噴流が粒子に及ぼす推力は狩野の解析⁽⁵⁾より次式で表される。

$$F_{DX} = \frac{1}{2} C_S A_s r_a |\overline{U}_r| (u_{ax} - u_{sx})$$

$$F_{DY} = \frac{1}{2} C_S A_s r_a |\overline{U}_r| (u_{ay} - u_{sy})$$

U_r は空気と粒子の相対速度である。相対速度 U_r は次式で表される。

$$|\overline{U}_r| = \sqrt{(u_{ax} - u_{sx})^2 + (u_{ay} - u_{sy})^2}$$

抵抗係数の計算は

$$C_S = \frac{24}{Re_s} (1 + 0.15 Re_s^{0.687}) + \frac{0.42}{1 + 4.25 \times 10^4 Re_s^{-1.16}}$$

によって行った。また、レイノルズ数は次式を用いる。

$$Re_s = \frac{r_a |\overline{U}_r| d_s}{\mu}$$

粒子の回転による揚力 F_L は辻の解析^{(6),(7)}より次式を用いる。

$$F_L = \frac{1}{2} C_{LR} A_s r_a |\overline{U}_r| \frac{|\overline{U}_r \times \overline{\omega}_r|}{|\overline{\omega}_r|}$$

X, Y方向に分解すると、

$$F_{LY} = \frac{1}{2} C_{LR} A_s r_a |\overline{U}_r| \frac{(u_{ay} - u_{sy}) \omega_{rz}}{|\overline{\omega}_r|}$$

$$F_{LX} = \frac{1}{2} C_{LR} A_s r_a |\overline{U}_r| \frac{(u_{ax} - u_{sx}) \omega_{rz}}{|\overline{\omega}_r|}$$

式中の ω_r は粒子の空気速度に対する相対角速度である。相対角速度 ω_r は次式で求める。

$$\overline{\omega}_r = \overline{\omega}_s - \nabla \times \overline{U}_a$$

ここで、 ω_s は粒体の角速度、 U は空気速度である。また r_d は、

$$\mathbf{w}_{rz} = \mathbf{w}_s - \left(\frac{\partial u_{ay}}{\partial x} - \frac{\partial u_{ax}}{\partial y} \right)$$

で表される。

揚力係数 C_{LR} は次式によって求める。

$$C_{LR} = \min \left[0.5, 0.25 \frac{d_s |\dot{\mathbf{w}}_r|}{|\bar{U}_r|} \right]$$

速度勾配による揚力 F_{LG} はSaffman揚力を使用し、X方向についてのみ考慮した。速度勾配による揚力は次式で表される。

$$F_{LG} = 1.62 d_s \mathbf{r}_a \sqrt{\mathbf{n} \frac{|d\bar{U}_r|}{|dx|} \frac{d\bar{U}_r/dx}{|d\bar{U}_r/dx|} \bar{U}_r}$$

本実験ではノズル幅に比べて粒体の直径が大きいので、粒体の左右両端での速度差が無視できないほど大きい。よって、粒体の左右両端での相対速度差から速度勾配 dU_r/dx を求める。

重力項 F は粒体にかかる重力及び浮力から求めた。次式に示す。

$$F_G = mg \frac{(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_s)}{\mathbf{r}_s}$$

これらより、粒体の並進に関する運動方程式を求める。

X方向については、

$$\begin{aligned} \frac{du_{SX}}{dt} = & \frac{1}{2M} A_s \mathbf{r}_a |\bar{U}_r| \left(C_S (u_{ax} - u_{sx}) + C_{LR} \frac{(u_{ay} - u_{sy}) \mathbf{w}_{rz}}{\|\mathbf{w}_{rz}\|} \right) \\ & + \frac{1.62}{M} d_s \mathbf{r}_a \sqrt{\mathbf{n} \frac{|d\bar{U}_r|}{|dx|} \frac{d\bar{U}_r/dx}{|d\bar{U}_r/dx|} \bar{U}_r} \end{aligned}$$

Y方向については次式で表される。

$$\frac{du_{SY}}{dt} = \frac{1}{2M} A_s \mathbf{r}_a |\bar{U}_r| \left(C_S (u_{ay} - u_{sy}) + C_{LR} \frac{(u_{ax} - u_{sx}) \mathbf{w}_{rz}}{\|\mathbf{w}_{rz}\|} \right) + \frac{g(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_s)}{\mathbf{r}_s}$$

回転する粒体にかかるトルク T は辻の解析⁽⁸⁾より次式で表される。

$$T = \frac{1}{2} \mathbf{r}_a \left(\frac{d_s}{2} \right)^2 |\dot{\mathbf{w}}_r| \mathbf{w}_r \left(\frac{C_1}{\sqrt{\text{Re}_r}} + \frac{C_2}{\text{Re}_r} \right)$$

式中の係数 C_1, C_2 は表1より求める。

表1 C_1, C_2 の決定

Re_r	C_1	C_2
$10 < \text{Re}_r < 20$	5.32	37.2
$20 < \text{Re}_r < 50$	6.44	32.2
$50 < \text{Re}_r < 100$	6.45	32.1

粒体の回転に関するレイノルズ数 Re_r は次式より求める。

$$Re_r = \frac{|\overline{\mathbf{w}_r}| (d_s/2)^2}{\mathbf{n}}$$

また、球の慣性モーメントIは次式で与える。

$$I = \frac{Md_s^2}{10}$$

これより、粒体の回転に関する運動方程式(粘性減衰)は

$$\frac{d\mathbf{w}}{dt} = -\frac{5}{32M} \mathbf{r}_a d_s^3 |\overline{\mathbf{w}_r}| \overline{\mathbf{w}_r} \left(\frac{C_1}{\sqrt{Re_r}} + \frac{C_2}{Re_r} \right)$$

となる。

粒体は傾斜板を転がり噴流に突入する。粒体は噴流に突入する際、噴流周辺の空気の巻き込みにより加速される。粒体の噴流中への突入速度はその後の粒体の軌跡に大きく影響するため、空気の巻き込みによる粒体の加速を考慮しなくてはならない。そのため、粒体の噴流中への突入速度は高速度ビデオカメラによって測定した値を近似することによって求める。

4.2 噴流の諸条件及びコア内での粒体の挙動

2次元噴流構造は噴流の風速分布及び噴流特性よりポテンシャル・コアの高さY/D=5、噴流の広がりを10度とし、ポテンシャル・コアを三角形で近似した。Y/D=5までのポテンシャル・コア以外の部分を層流拡散領域とし、Y/D=5以上を乱流拡散領域とした。図15に2次元噴流構造の概略を示す。

ポテンシャル・コア内では空気速度を

$$\begin{aligned} u_{ax} &= 0 \\ u_{ay} &= 30 \end{aligned}$$

として解析を行う。

層流拡散領域ではSimsonの式より空気速度を求める。またX方向の空気速度は無しとした。以下に式を示す。

$$\begin{aligned} u_{ax} &= 0 \\ u_{ay} &= U_0 \left\{ 1 - \left(\frac{X_e}{b_e} \right)^{\frac{7}{4}} \right\}^2 \end{aligned}$$

式中の X_e 、 b_e は

$$\begin{aligned} X_e &= \frac{Y - 0.05}{\tan 80} + \frac{Y - 0.05}{10} + 0.01378 \\ b_e &= \frac{10X + Y - 0.05}{10} \end{aligned}$$

で表される。図16に X_e 、 b_e について示す。また、Y/D=5での噴流の半値幅bは次式で表される。

$$b = 1.378 \frac{D}{Y_C} Y$$

Yはポテンシャル・コアの高さである。

乱流拡散領域ではGörtlerの式より空気速度を求めた。以下にその式を示す。

$$u_k = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{\frac{J}{r_a s Y}}$$

$$u_{ax} = \frac{\sqrt{3}}{4} \sqrt{\frac{J s}{r_a Y}} \{2h(1 - \tanh^2 h) - \tanh h\}$$

$$u_{ay} = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{\frac{J}{r_a s Y}} (1 - \tanh^2 h)$$

u_k は噴流中心軸上のY方向の空気速度である。

また、式中の h は

$$h = \left(\frac{1}{s} \right) \frac{X}{Y} \quad s = \frac{1}{7.67}$$

で表される。

空気の運動量 J は次式で表される。

$$J = r_a U_0^2 D H$$

図17, 18にSimson及びGörtlerの式と実測値を比較したものを示す。縦軸はそれぞれの位置での風速を噴流中心軸上におけるそれぞれの高さの風速で割ったもの、横軸は風速が噴流中心軸上の速度の半分になるところの幅で割ったものである。これよりSimson, Görtlerの式ともに実測値と概ね合っているといえる。

図19, 20, 21にポテンシャル・コア内での粒体の挙動を高速ビデオカメラで撮影したものを示す。粒体の軌跡は噴流への突入速度と粒体の回転により左右され、ポテンシャル・コア及び層流拡散領域で決定される。粒体が $Y/D=5$ を越えたとき $X/D>0$ の場合はA, $X/D<0$ の場合はC, $X/D=0$ 付近ではBとなる。粒体は噴流中に突入する際、粒体の回転は噴流によって止まったり、逆回転することなく吹き上げられ、回転による揚力が発生する。これによってX方向の速度が減衰され、軌跡がA, B, Cの3種類となると考えられる。

4.3 解析結果との比較

粒体噴流化式洗浄の洗浄効果の予測を行う上で、粒体1つ1つの挙動を知ることは重要である。そこで、まず粒体1つだけの挙動について解析を行った。

解析条件として、解析の時間刻みは0.0005秒、粒体は1つのみとした。浴槽の壁や傾斜板に当たった粒体は跳ね返らないとした。また、噴流は粒体によって影響を受けないとした。粒体の初期条件は粒体の初期位置をノズル端面 $(X, Y)=(0.005, 0.005)$ とし、X方向の初速度は実際の突入速度、Y方向は粒体の半分にかかる空気抵抗より求めた。また粒体の位置は重心位置とした。

図22, 23, 24に実際の軌跡と解析結果を比較したものを示す。縦軸は高さを、横軸は飛距離をスリット幅で割ったものを使用した。マーカー付きの軌跡は解析による軌跡、実線は実際の軌跡である。実際の軌跡は図7の結果よりA, B, Cの代表として $L=40, 80, 140\text{mm}$ からピンセットを使用して1粒ずつ転がしたものを高速ビデオカメラで撮影したものである。撮影は1コマを1/250秒で行った。解析も同様の条件で行った。実際の軌跡がどれも違うのは粒体の真球度が低く、また、粒体を噴流中にいれるときに噴流への巻き込みを乱すことが原因だと考えられる。

図より解析結果と実際の軌跡は概ね合っているといえる。

図25にL=10～230mmから転がした軌跡の結果を示す。これよりA, B, Cの確率はそれぞれ21.7, 17.4, 60.9%となった。

図26, 27に解析による噴流中での粒体密度及び洗浄率について示す。解析による洗浄率は、縦軸は相対洗浄率、横軸は噴流幅をスリット幅で割ったものである。噴流中での粒体密度は縦軸を相対個数とした。噴流中での粒体密度及び洗浄率は浴槽に粒体を1000個混入し、高速度ビデオカメラで測定した突入速度を初期条件としてX方向の初速度に代入して解析を行った。

洗浄率(%)は以下の式で求める。

$$\text{洗浄率} = \text{衝突角度による洗浄率} \times \frac{\text{衝突速度による洗浄率}}{\text{衝突速度による洗浄率}(Y = 300\text{mm})}$$

式中の分子の衝突速度による洗浄率は図13の近似式より求めたもの、分母は300mmの位置から粒体を落とした場合の洗浄率となっている。また、衝突角度による洗浄率は図14の近似式より求めた。

図より解析による洗浄率及び噴流中での粒体密度は実測値と合い、2つに分かれた形となる。これより、解析によって粒体噴流化式洗浄の洗浄率を予測することができるといえる。

図28に傾斜下端面からの距離Lと粒体の最高到達点の関係を示したもので、図29に解析によるコア内の軌跡を示す。図28よりL=10～30mmでは解析結果は実際の最高到達点より低い。これは図29のAの軌跡を見ると、解析による軌跡は実際の軌跡に比べて噴流中心まで入っておらず、これによりL=10～30mmの最高到達点を実際よりも低くなっていると思われる。

解析による洗浄率の予測で、噴流中心における洗浄率が実際の洗浄結果と比べて若干高いのは上で述べた原因と解析によるBの確率が実際のものより高いことによると考えられる。

噴流中に突入した瞬間を高速度ビデオカメラで撮影し観察した結果、衝突する粒体の割合は1秒間で全体の20.6%であり、また噴流中でも粒体同士が衝突している。噴流中及び噴流に突入する際の粒体の衝突は、粒体の噴流中の密度、洗浄率の予測に影響する。今後の課題として、噴流中及び噴流に突入する際の粒体の衝突を考慮して解析を行いたい。

5. まとめ

衝突速度、衝突角度と洗浄率の関係、数値解析による粒体の軌跡、噴流中の粒体密度及び洗浄率を調べて以下のことが分かった。

- (1) 噴流中での粒体密度は $Y/D=20$ で2つに分かれた分布となる。
- (2) 噴流中での粒体密度と粒体噴流化式洗浄の洗浄率はよい相関があるといえる。
- (3) 粒体の衝突速度が速くなると洗浄率が高くなる。また衝突角度が小さくなると洗浄率は高くなる。
- (4) 解析による軌跡は実際の軌跡と合っているといえる。
- (5) 数値解析による噴流中での粒体密度及び洗浄率は実際のものと概ね合っている。これより解析によって洗浄率は予測できるということがいえる。

おわりに、本研究を行うに当たって、指導教授の横川明教授、高知工業技術センターの本川高男氏、兼松エンジニアリングの山中義也氏、松村次展氏にご指導いただきました。高知工科大学の園山司氏、水口拓也氏、中西良太氏に協力していただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 東京電機大学出版局 学生のためのFORTRAN 電機大出版局(1990)
- (2) 服部雄一 FORTRANによる数値計算(1992)
- (3) 戸川隼人 数値計算法(1981)
- (4) 新津靖, 加藤孝夫 エアカーテンの性能及び設計に関する研究 衛生工業協会
第32巻 第10号(1958) pp 1-9
- (5) 狩野武 粉体粒子の挙動 産業技術センター
- (6) 辻裕 空気輸送の基礎 養賢堂(1984)
- (7) 山本恭史 Matthias POTTHOFF 田中敏嗣 桐島岳夫 辻裕 固気二相チャンネル乱流のLES(粒子間衝突の影響) 日本機会学会論文集 65-629B(1991) pp166-173
- (8) 田中敏嗣 門野啓一郎 辻裕 鉛直管内固気二相流の数値シミュレーション(粒子間衝突の影響について) 日本機会学会論文集 56-531B(1990) pp3210-3216

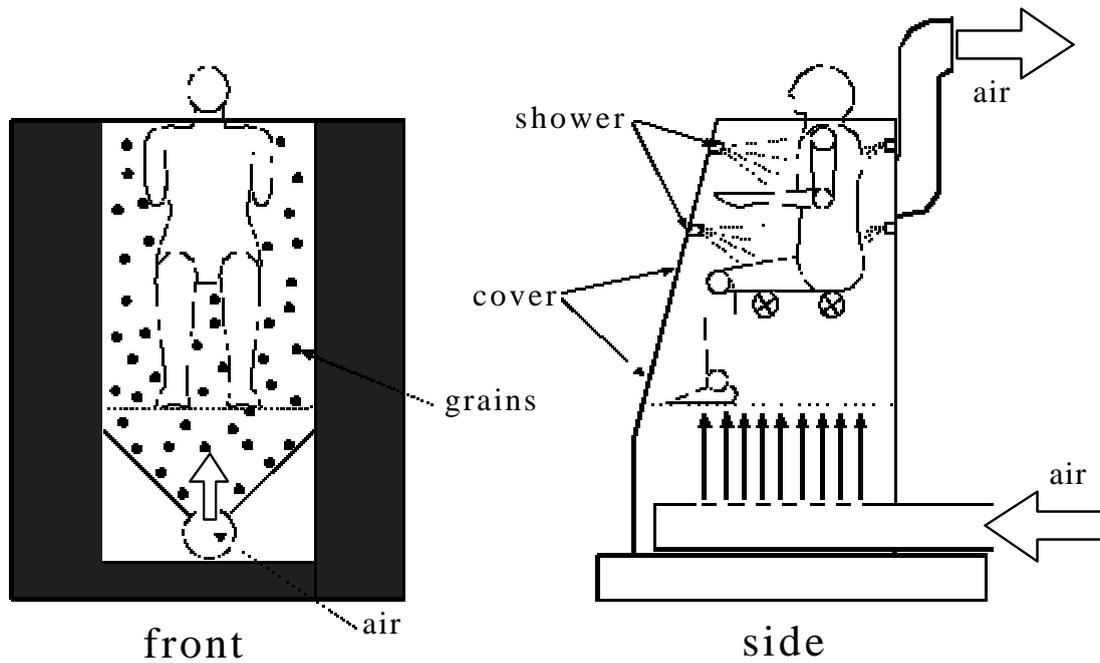
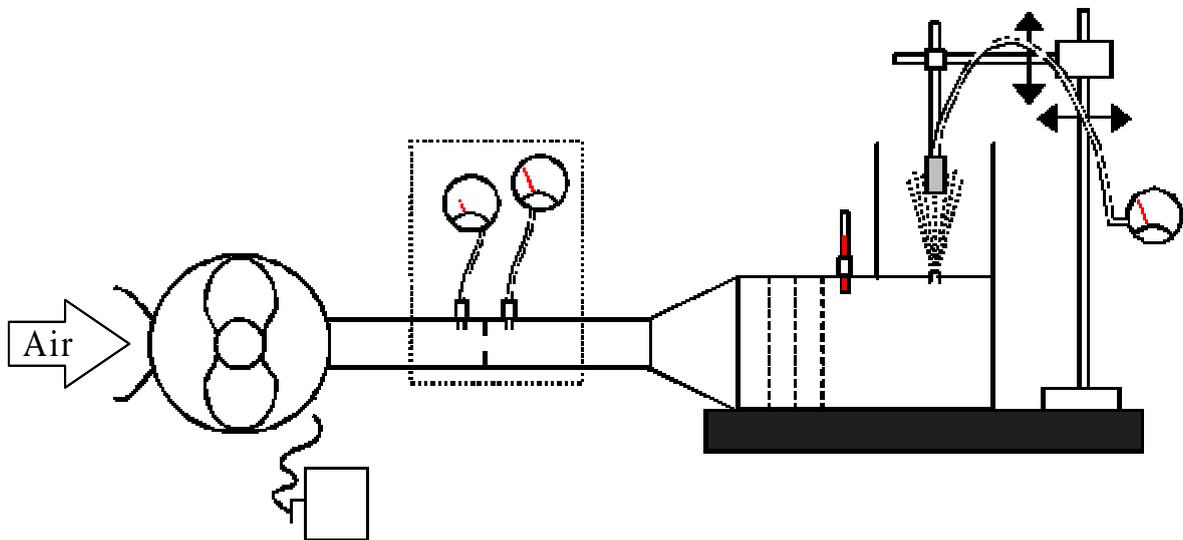


図 1 粒子噴流化式洗浄装置の概略



roots blower inverter power source
 orifice flow meter thermometer buffer tank
 nozzle traverse equipment current meter
 surface plate differential manometer

図 2 実験装置の概略

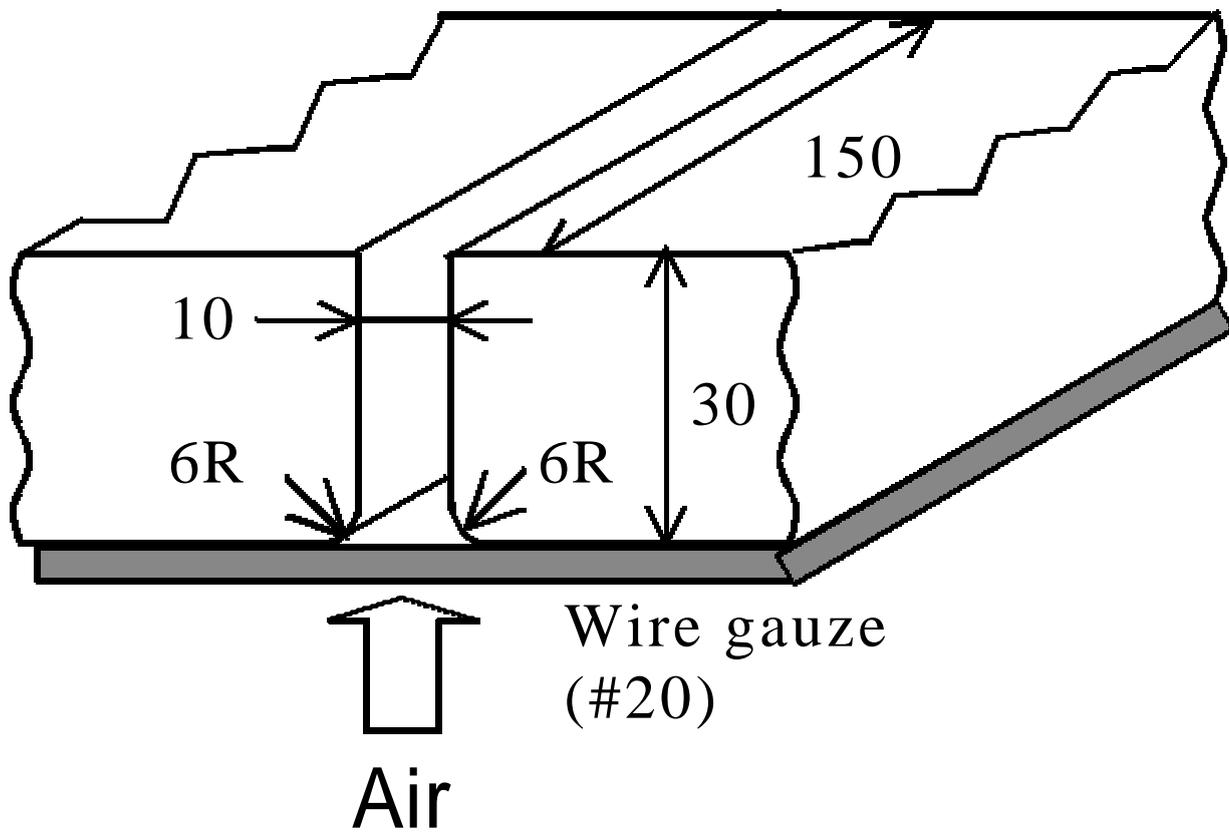


図 3 ノズル

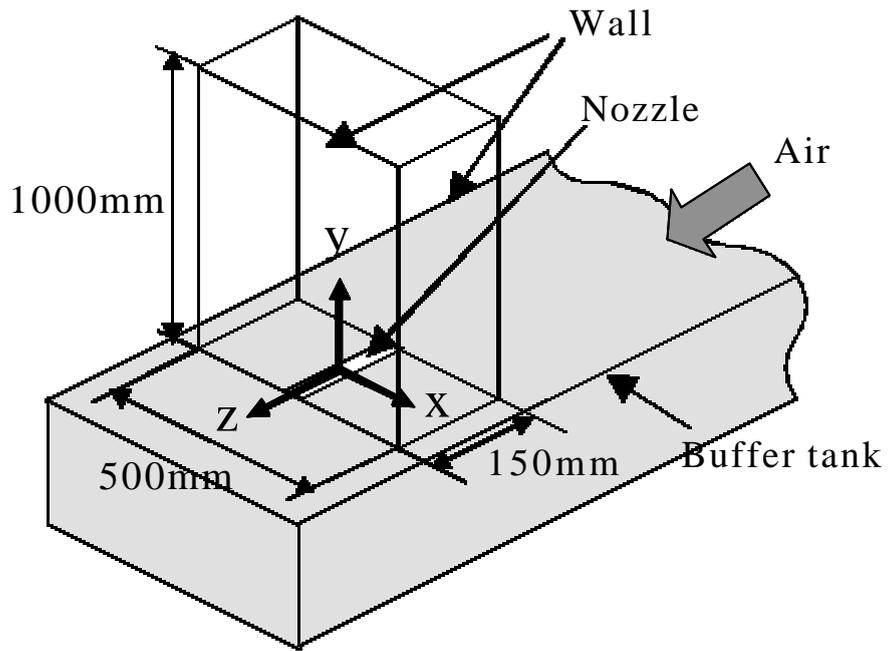


圖 4 座標設定

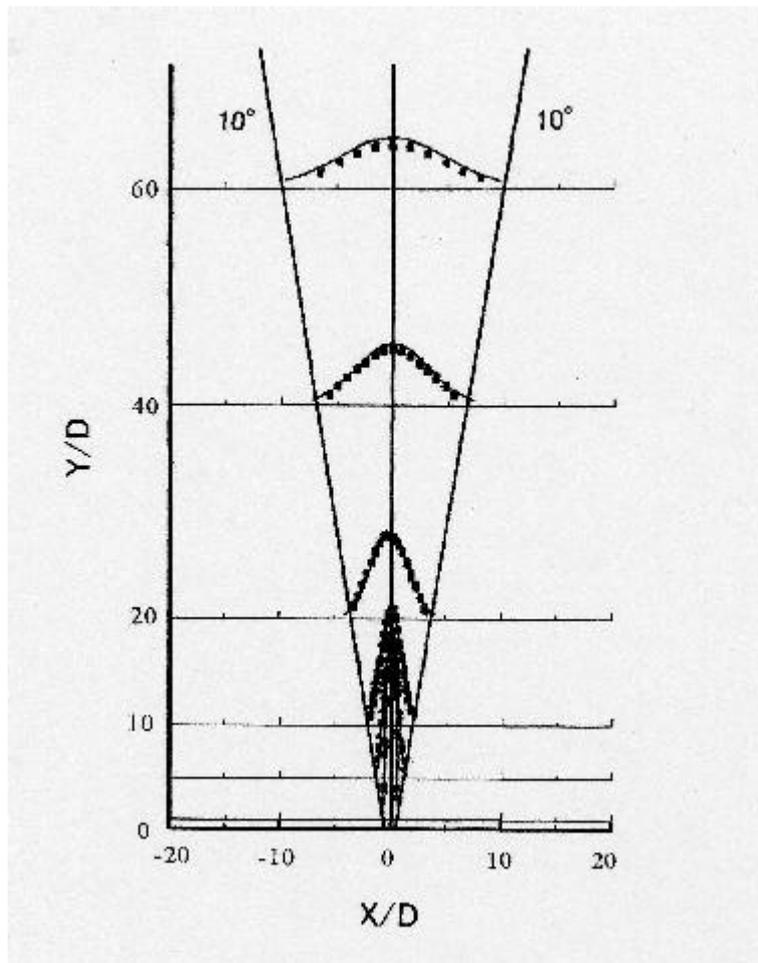


圖 5 風速分布

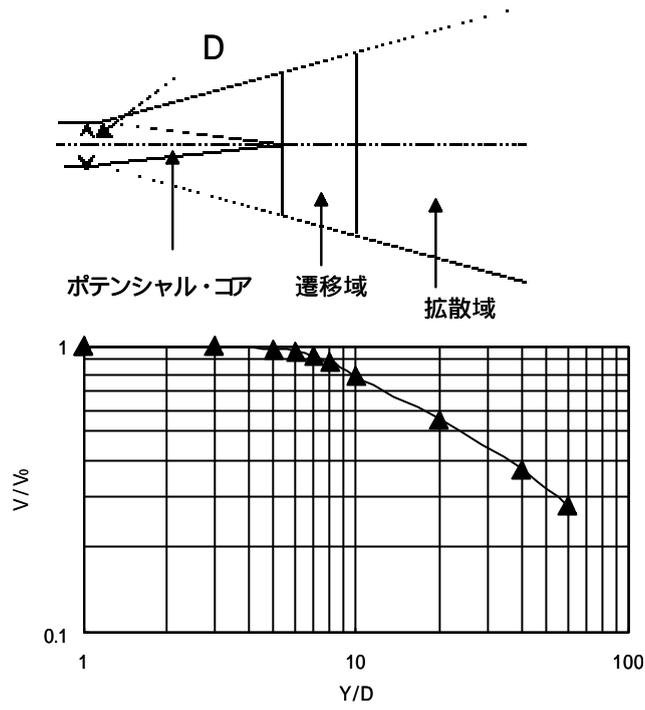


図 6 噴流特性

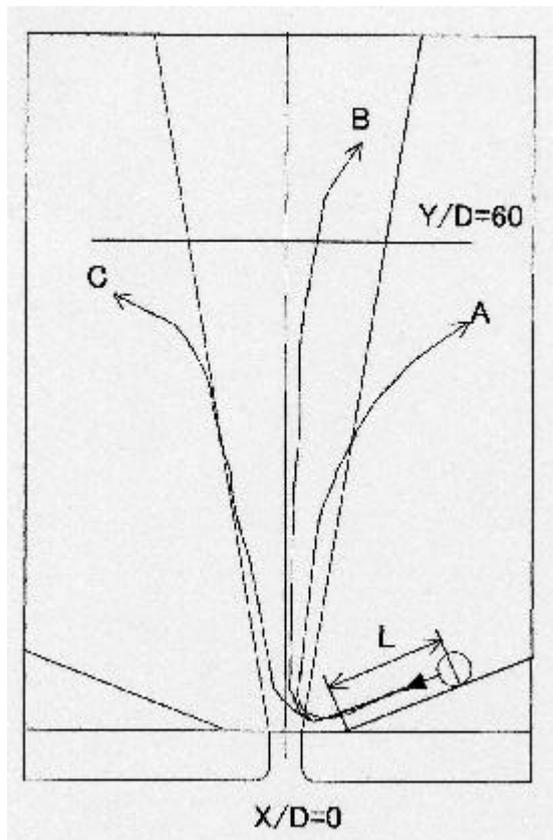


図 7 軌跡の判別

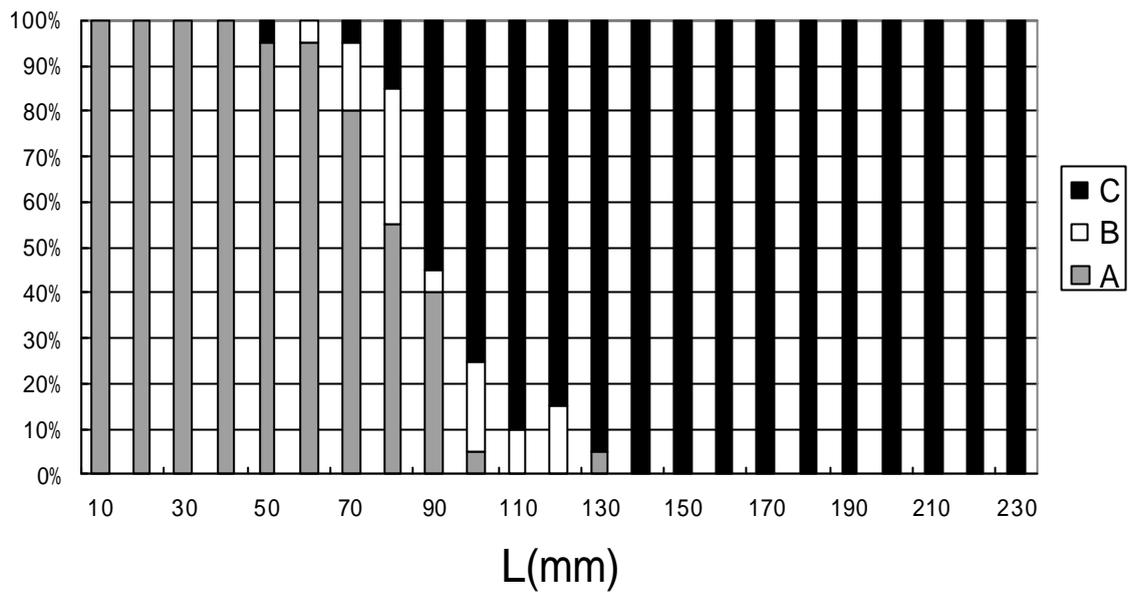


図 8 A,B,C の確率

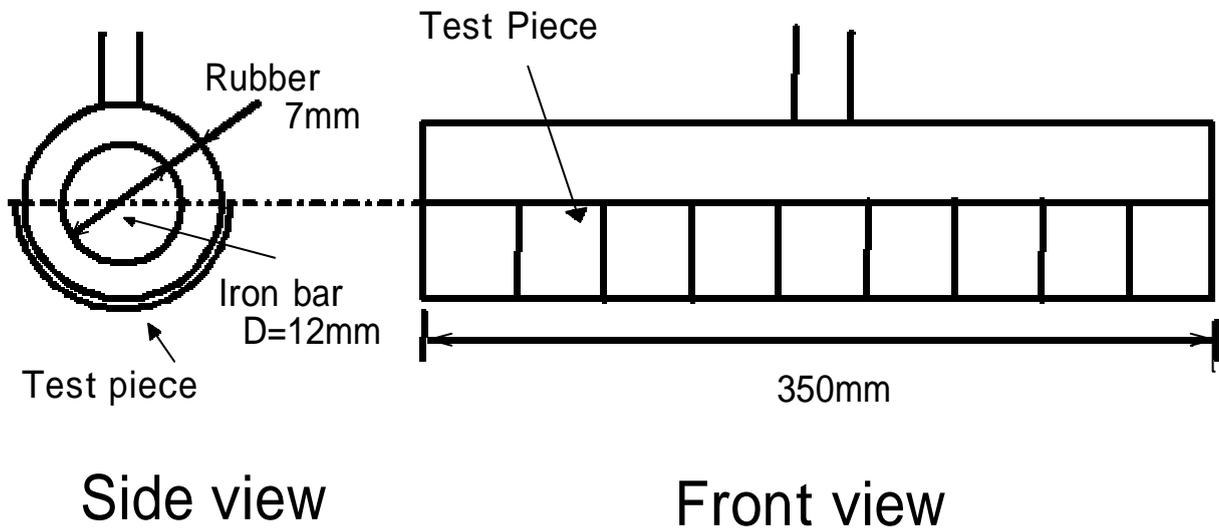


図 9 洗浄用冶具

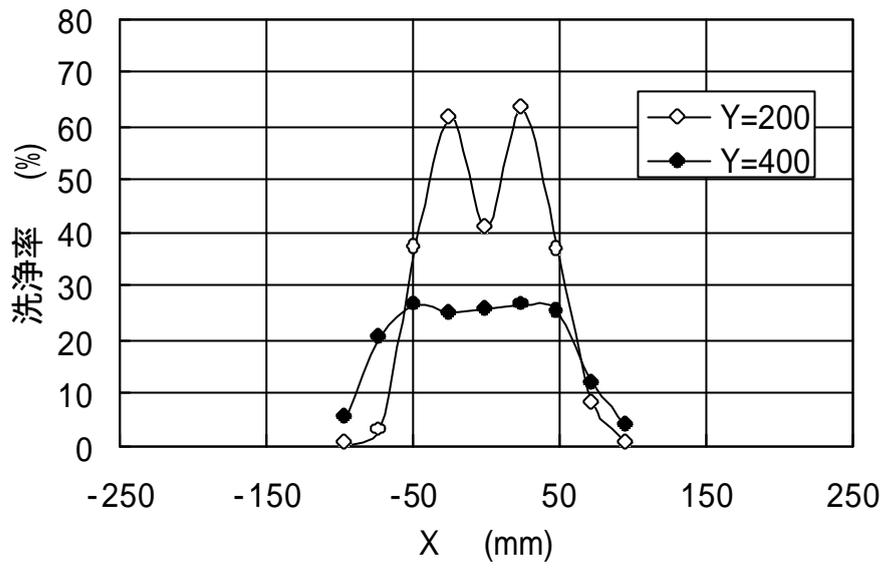


图 10 洗净结果

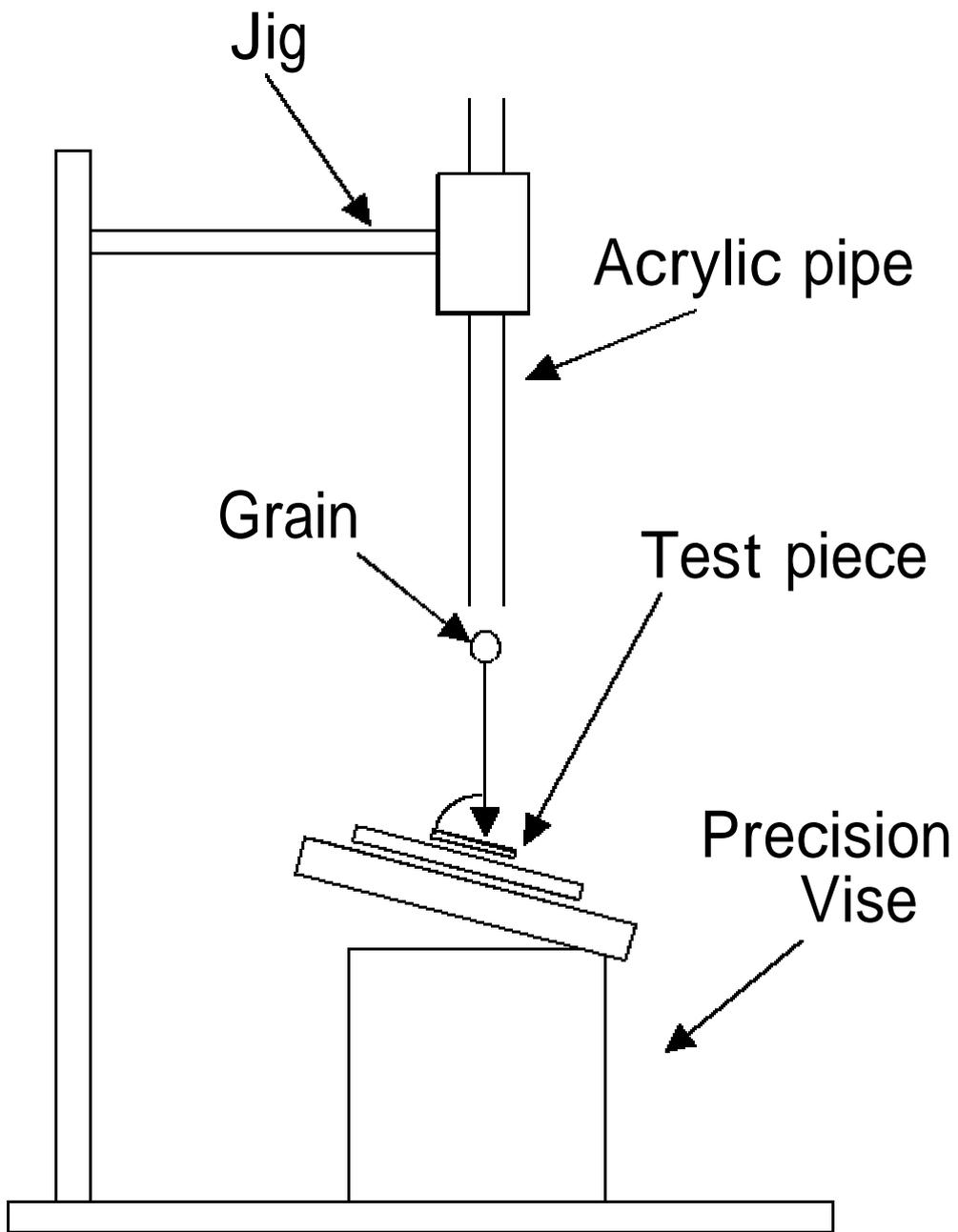


図 11 粒体の衝突速度及び衝突角度による
洗浄実験の実験装置

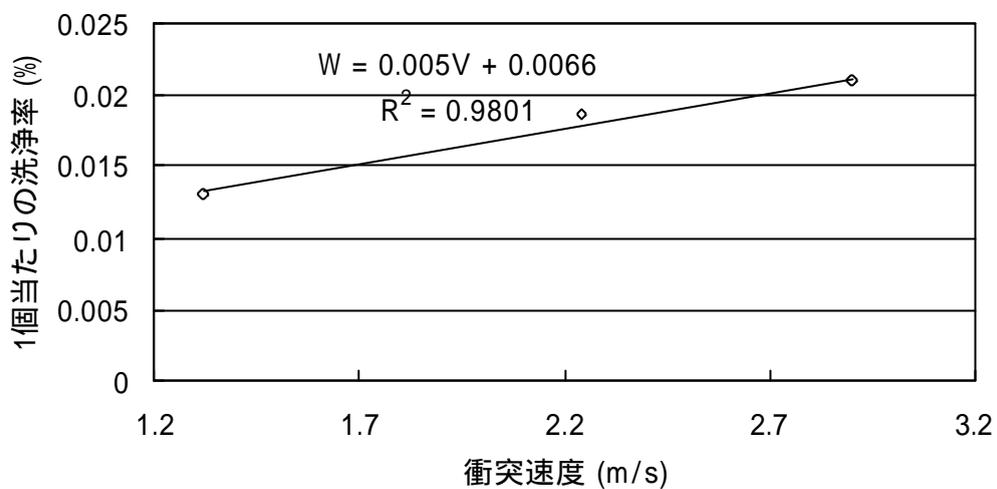


図 12 衝突速度と洗浄率の関係

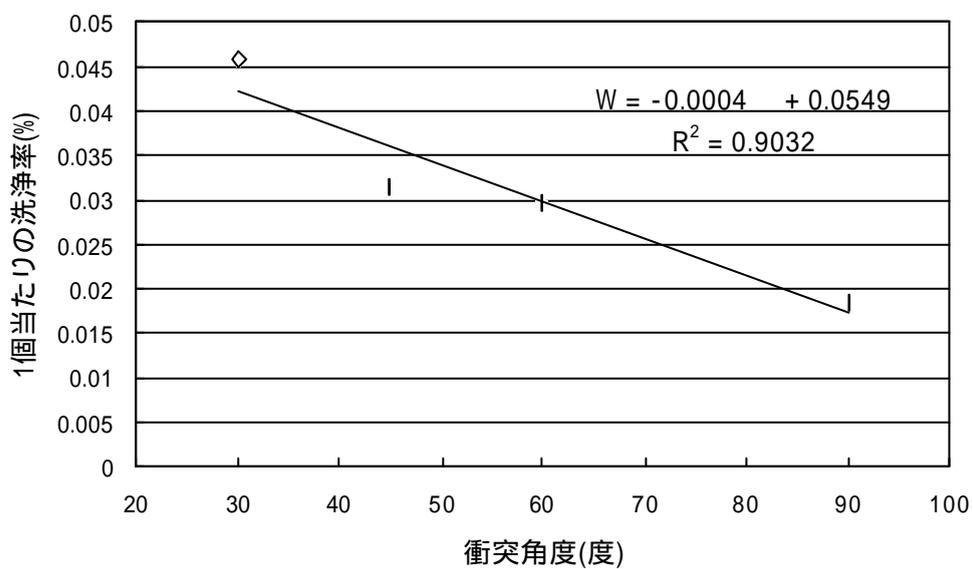


図 13 衝突角度と洗浄率の関係

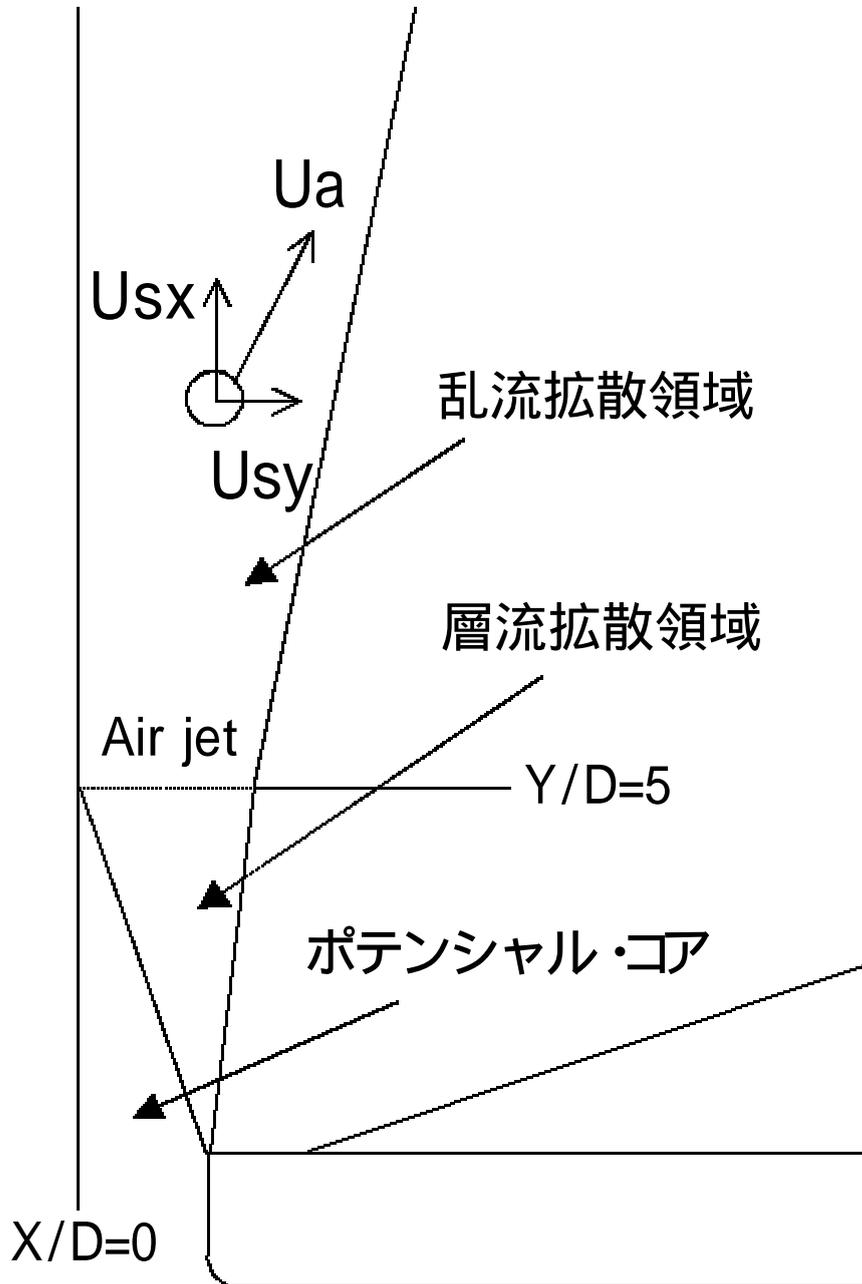
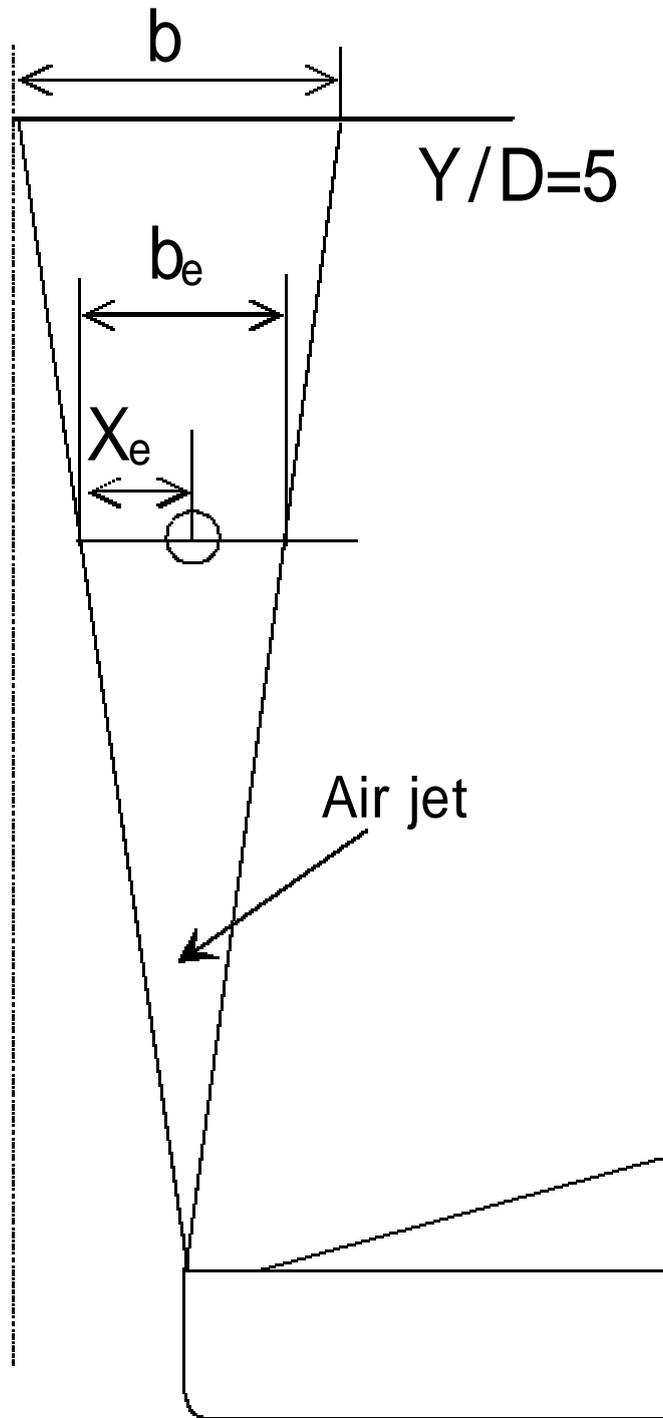


図 14 2次元噴流構造



☒ 15 X_e , b_e

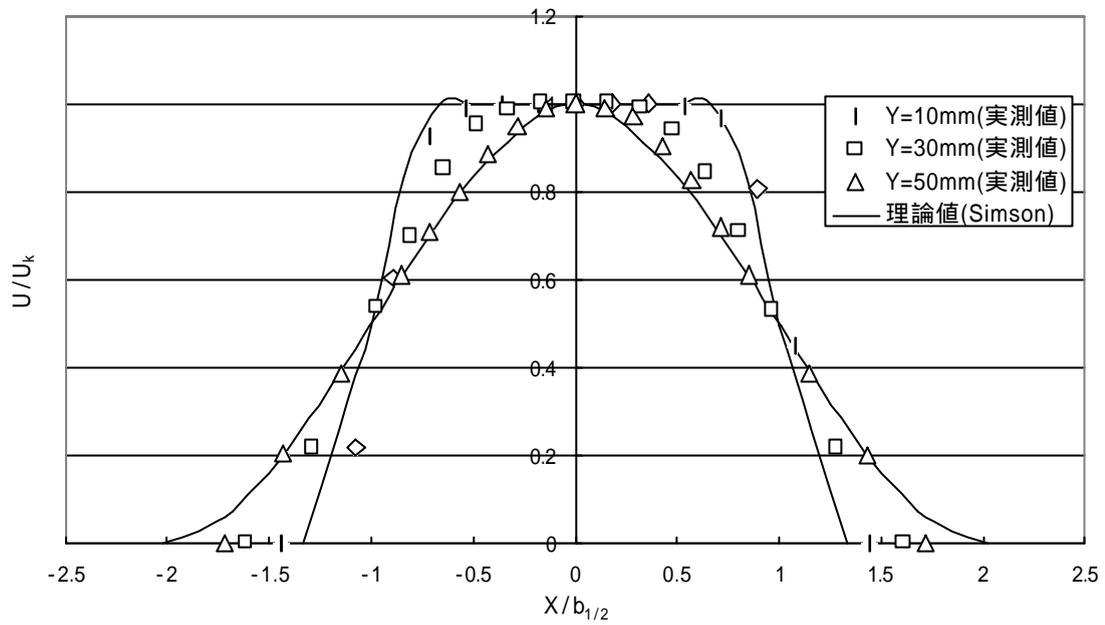


図 16 理論値と実測値の比較 (Simson)

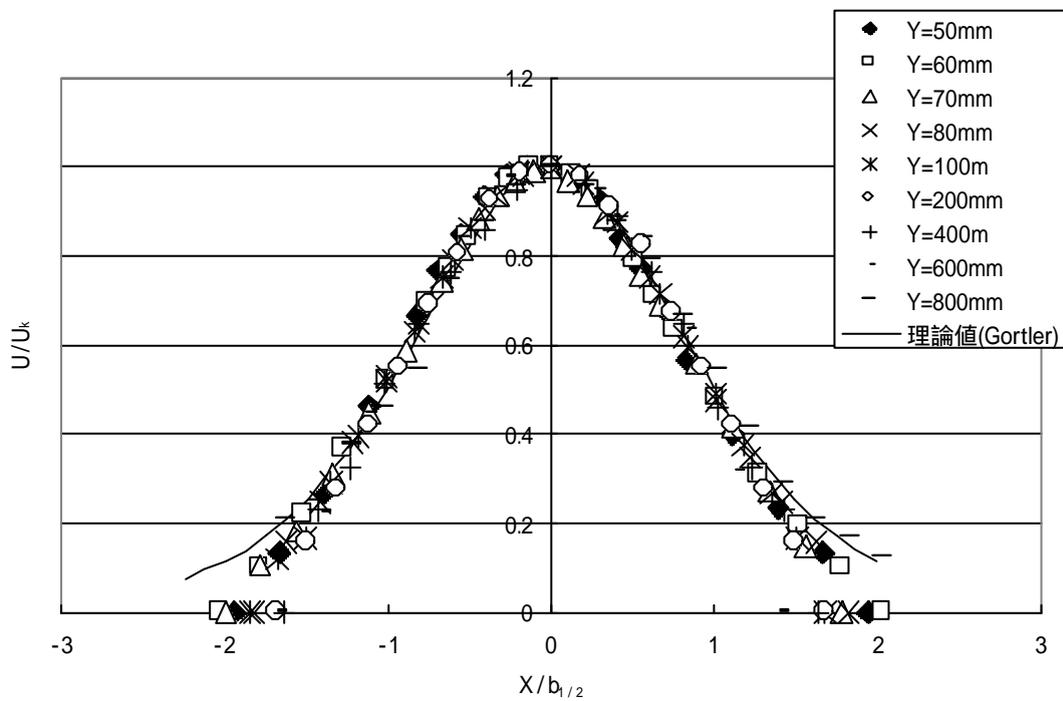


図 17 理論値と実測値の比較 (Görtler)

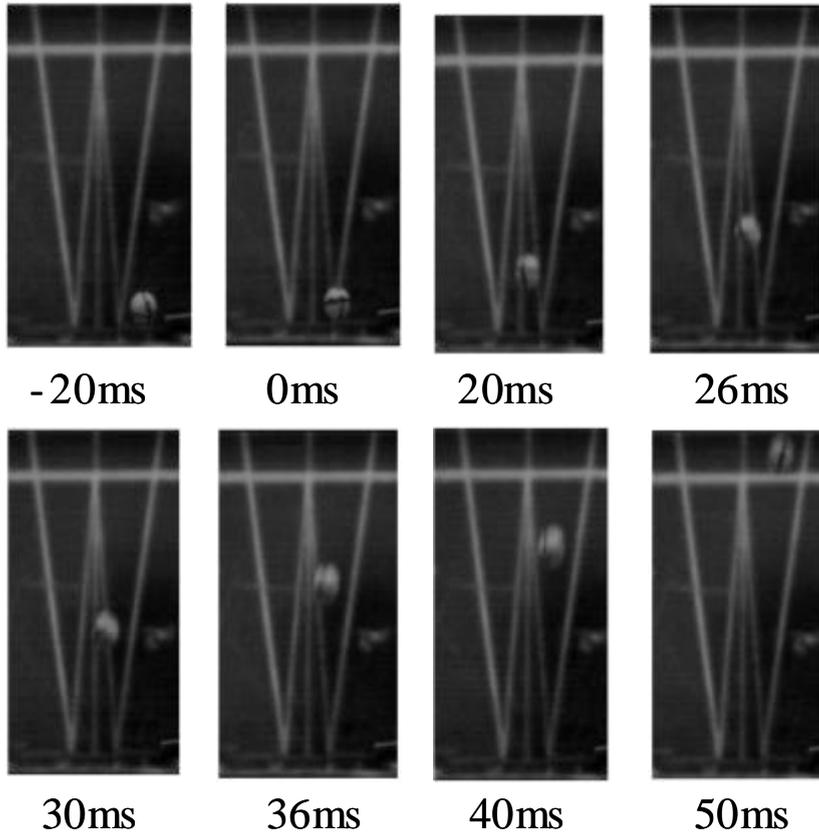


図19 コア内での粒体の挙動(L=40mm)

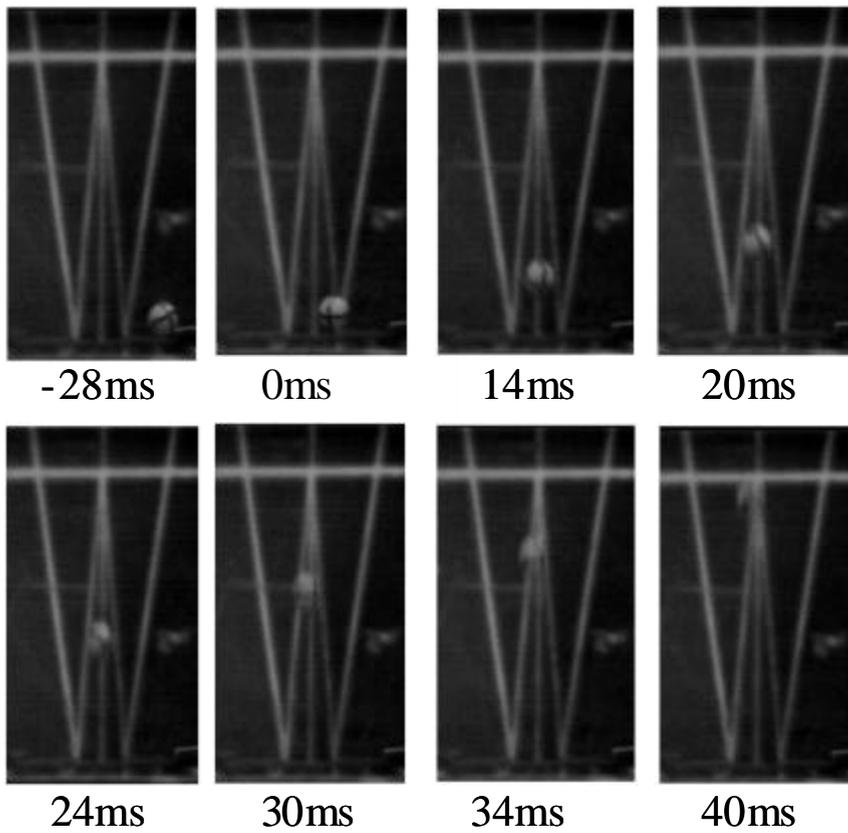


図20 コア内での粒体の軌跡(L=80mm)

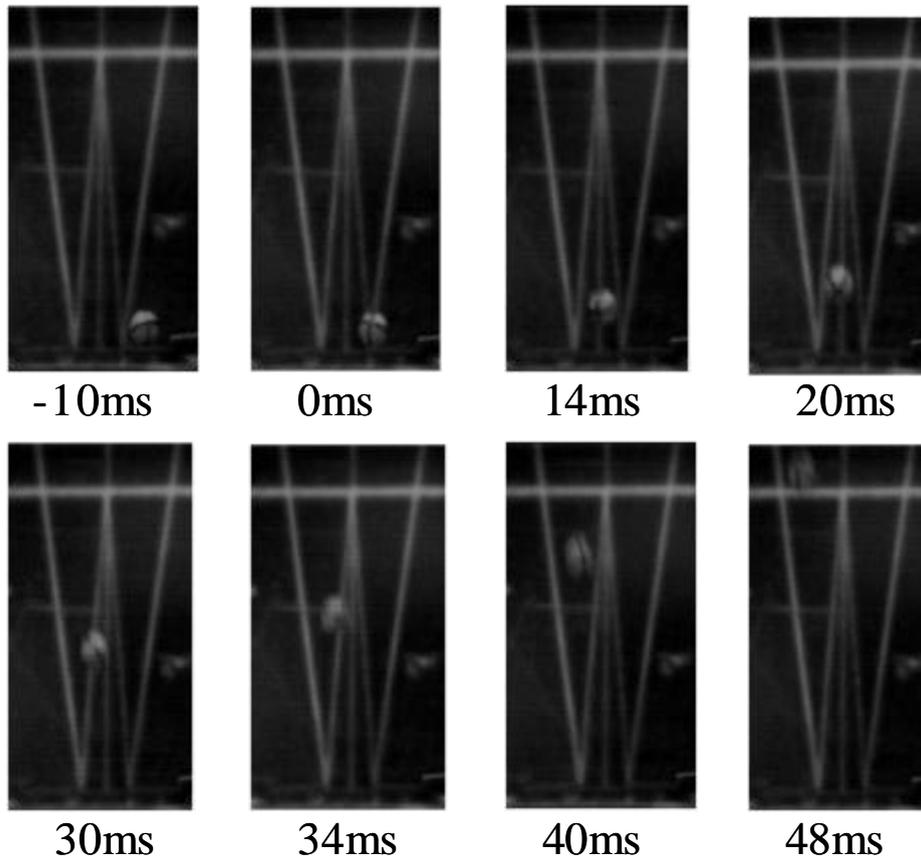


図21 コア内での粒体の挙動(L=140mm)

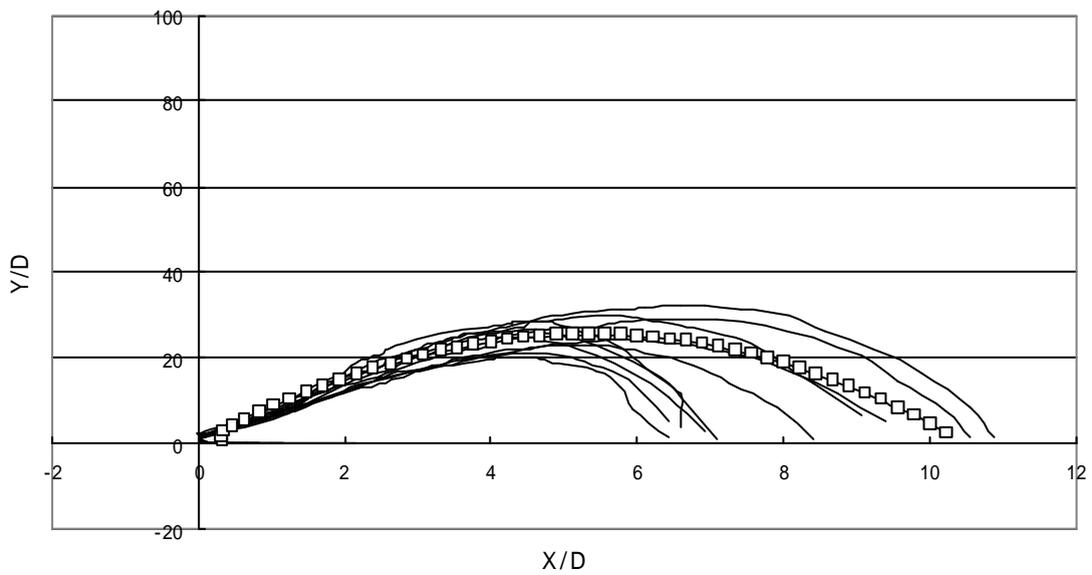


図 22 解析による軌跡と実際の軌跡の比較
(L=40mm)

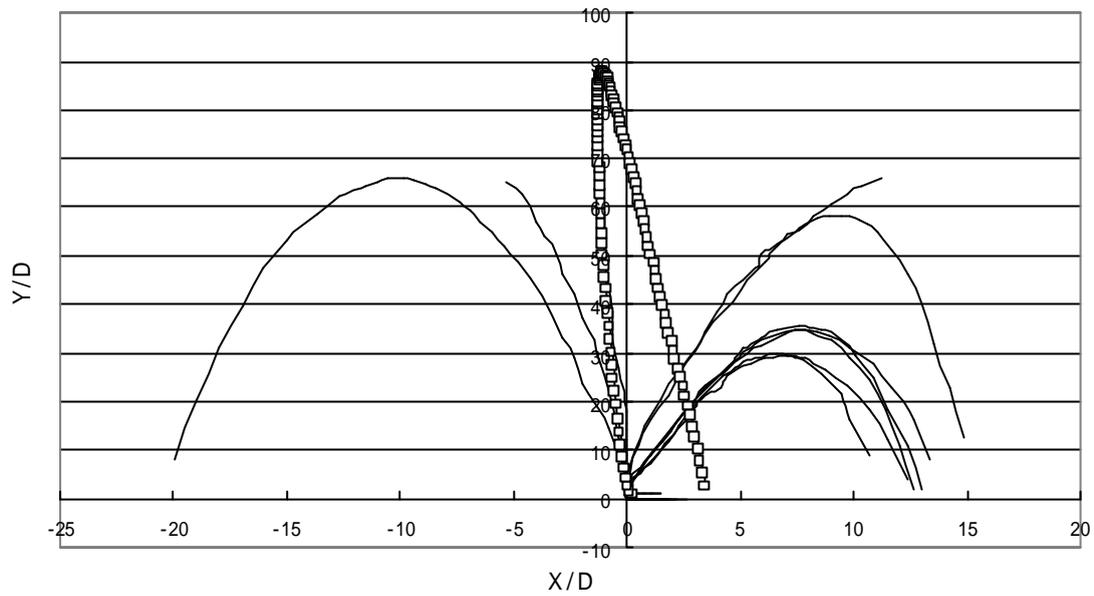


図 23 解析による軌跡と実際の軌跡の比較
($L=80\text{mm}$)

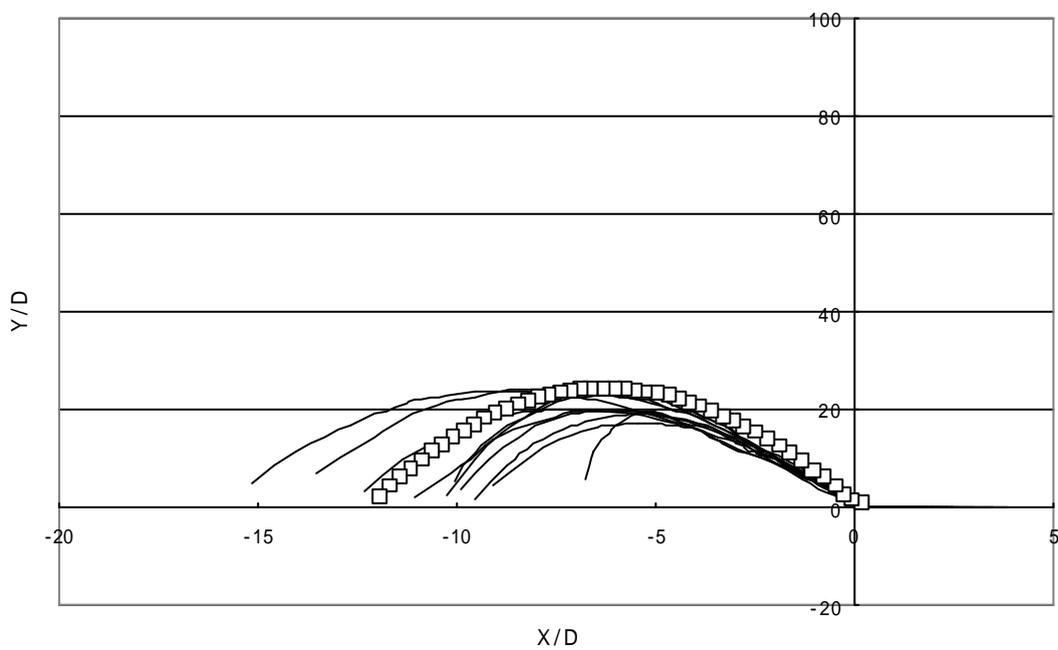


図 24 解析による軌跡と実際の軌跡の比較
($L=140\text{mm}$)

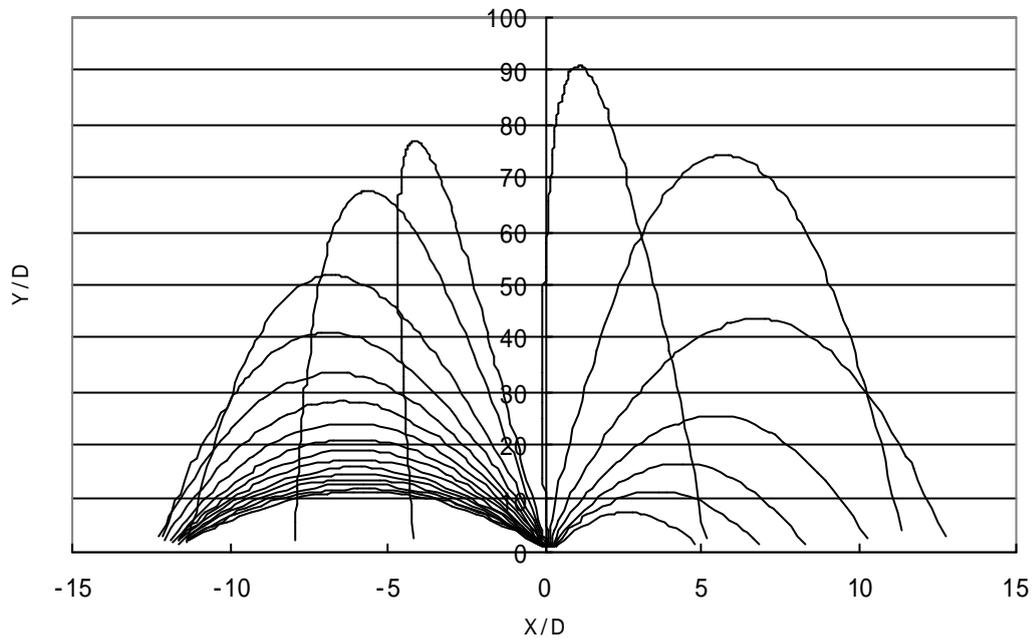


図 25 全体の軌跡(L=10 ~ 230mm)

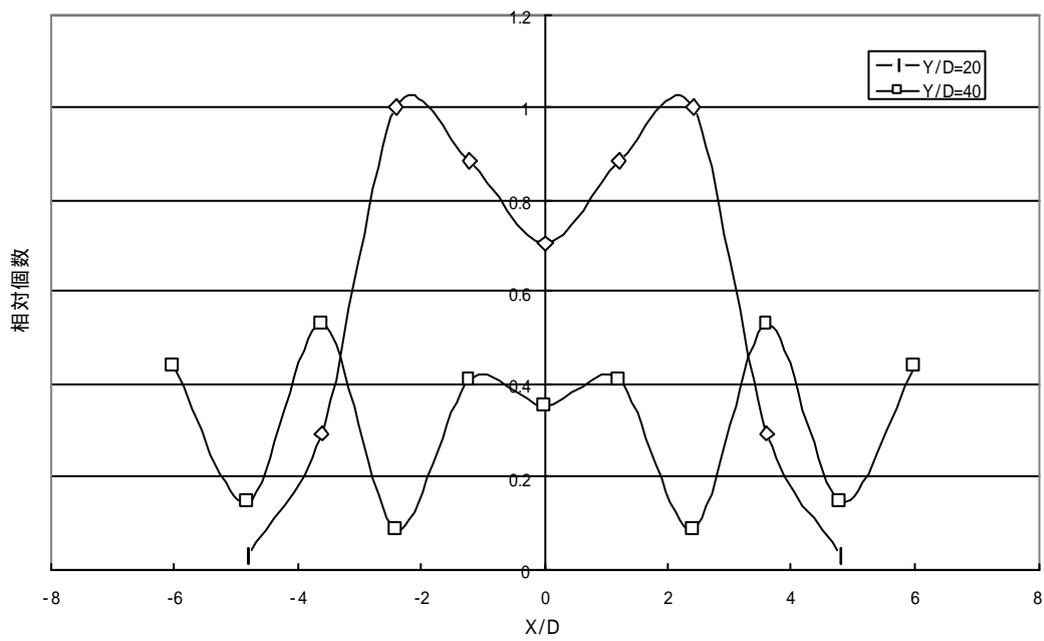


図 26 数値解析による噴流中での粒子密度予測

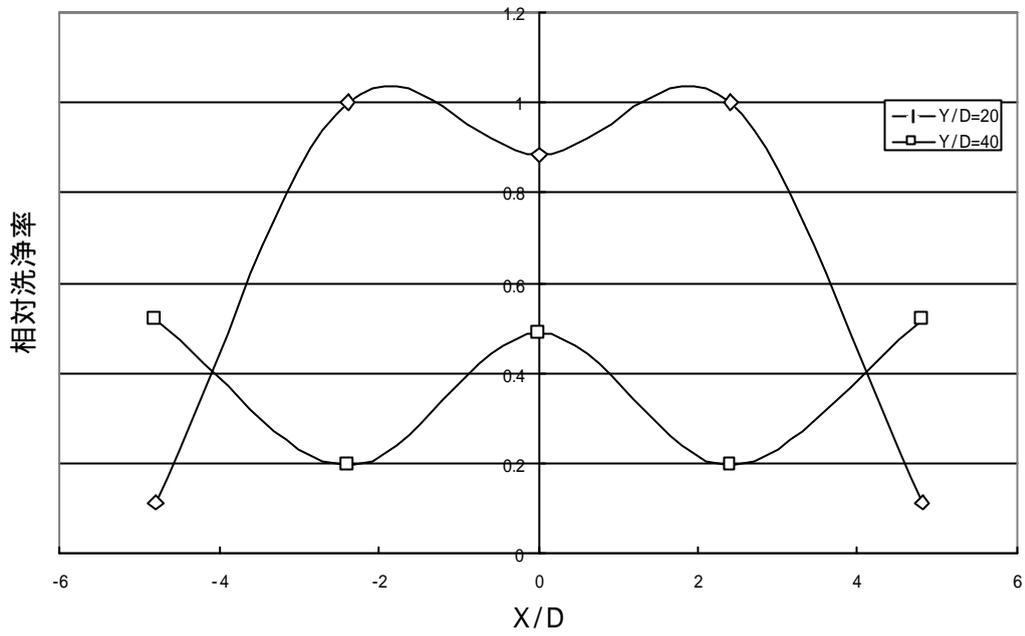


図 27 数値解析による洗浄予測

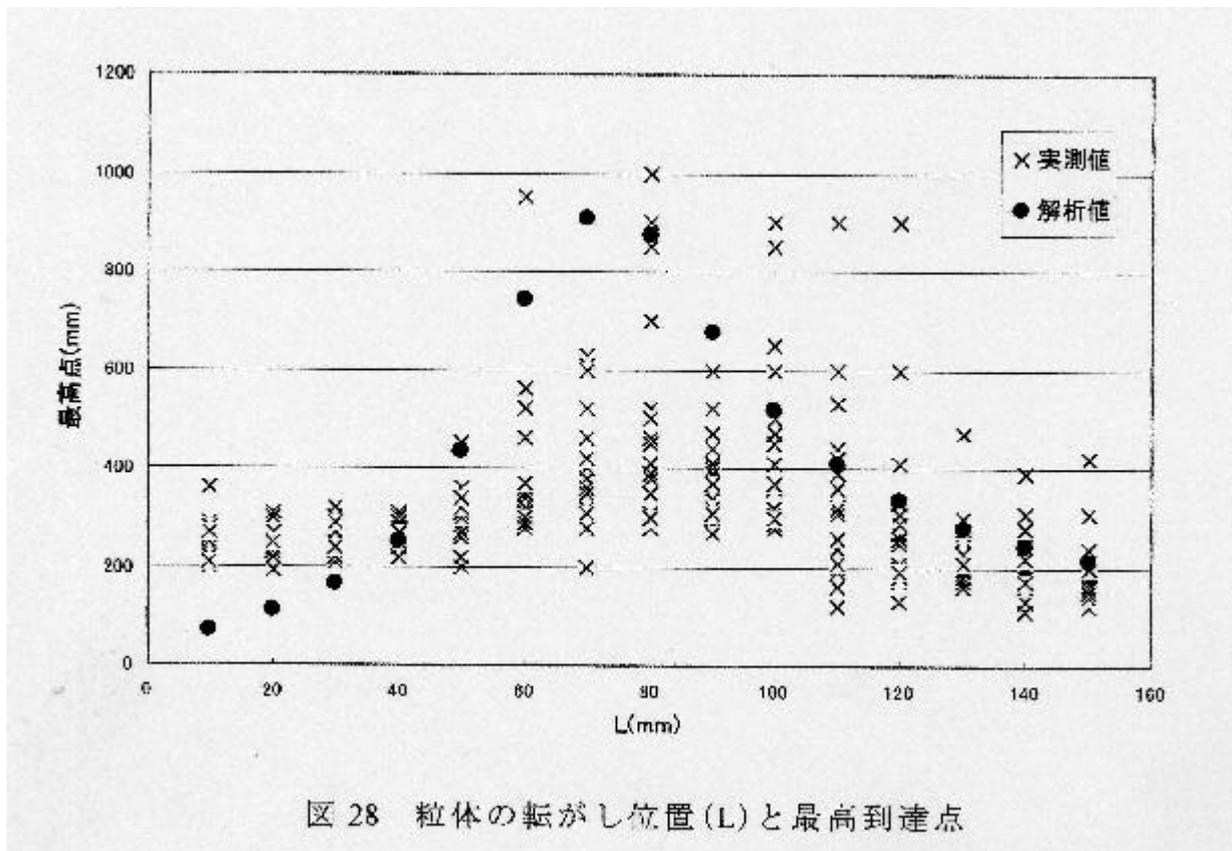


図 28 粒体の転がし位置(L)と最高到達点

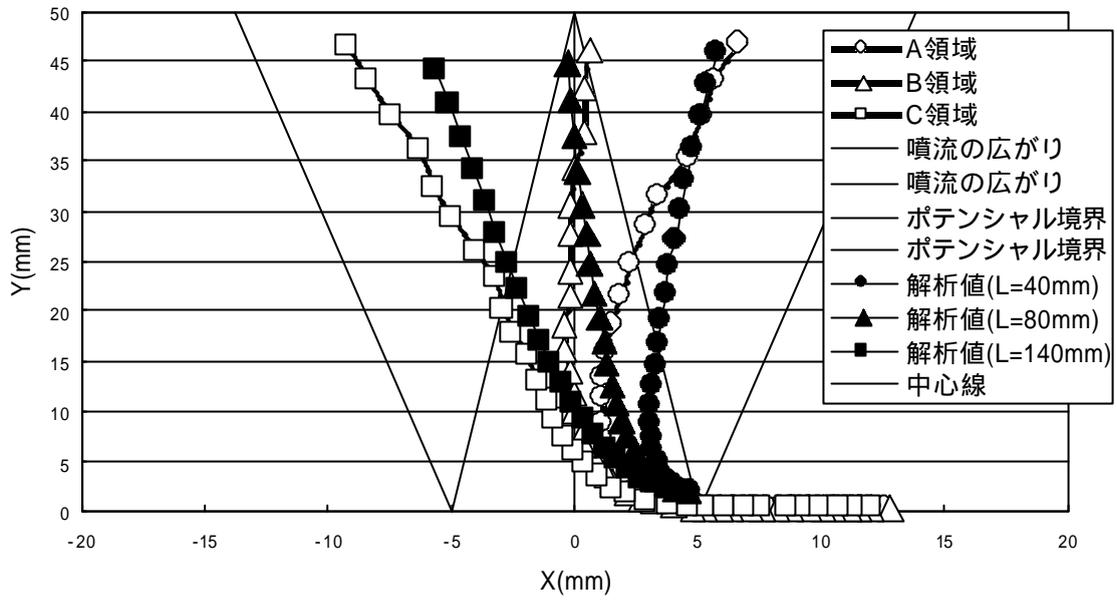


図 29 コア内での軌跡の比較(解析と実際)