

粒体噴流化式自動身体洗淨・入浴装置の開発

- 身体の均一洗淨 -

平成 13 年 2 月 28 日

知能機械システム工学科	1010218	光森琢真
	指導教授	横川 明

目次

1 . 緒言	- 1 -
2 . 実験装置	- 1 -
3 . 実験方法及び結果	- 2 -
3 - 1 . 垂直噴流の構造	
3 - 2 . 壁面噴流の構造	
3 - 3 . 解析シミュレーションにおける制御方法及び揺動の考察	
3 - 4 . 制御噴流の最適化	
3 - 5 . 洗淨実験	
4 . まとめ	- 4 -
記号表	- 5 -
参考文献	- 5 -
添付資料	- 6 -

1. 緒言

高齢者・少子化社会を向かえて、各種介護施設（特別養護老人ホーム、老人保健施設、療養施設、ショートステイ施設、デイケア施設など）が増加を続けている。その様な中で介護現場から介護労力の低減、特に入浴介護の省力化を望む声が高まっている。そこで著者らは、入浴介護の労力を低減すると共に、入浴者にとっても、洗浄のみならず、皮膚の活性化、保温効果が期待できる自動入浴装置の開発を目的としている。洗浄方法としては図1に示すように、温シャワーで体を濡らした後、乾式状態で浴槽底部からの暖かい空気噴流に衝撃の痛みを伴わない緩衝効果のある大きい粒体を混入させ、粒体の衝撃力、摩擦力で洗浄及び皮膚の活性化を行う方法を検討している。しかしながら、本方式による洗浄で均一な洗浄を行うには噴流に粒体を均一に混入させなくてはならない。さらに、四方を壁面で囲まれた空間に空気噴流を流すと、コアンダ効果により噴流は壁面に付着するため、粒体の分布及び速度は不均一となる。

そこで、我々は粒体の分布及び速度にムラがあっても均一な洗浄と広い面積の洗浄が期待できる、揺動噴流による洗浄方法を採用した。噴流の揺動方法としてノズル自体を揺動させるのでは無く、壁面効果を利用し、2次元ノズルからの主噴流に対して、制御用ノズルを左右に配置して主噴流に対して平行に噴出させて主噴流を揺動させた。

2. 実験装置

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のルーツプロ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）を通過後、厚さ32mmの鉄定盤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から525mmの位置に500×170mmの開口部を設けてある。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。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400mm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。

ノズルの断面形状は、噴流の出口風速を均一にするために¹⁾R=6mm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（線径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、長さ1000mmの壁面を透明アクリル板で設け、他の2面も浴槽を想定して、幅150mm、長さ1000mmの透明アクリル板で囲った。

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、2枚の透明アクリル壁面間の中心でノズル上面、スリット幅の中心を原点とした。概要を図3に示す。

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すると、噴流への影響を考慮して外径6mm、2mm、1mmと先端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。これを固定してノズル上方より、トラバース装置で測定位置に移動させた。トラバース装置は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つけて0.01mmまでの位置合わせを可能にした。

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=10mmの位置での速度とし62.5Hzで $V_0=30\text{m/s}$ を得た。レイノルズ数： $Re=19400$ である。

粒体は直径6mmで真球度が0.042mmのポリスチレン球（比重1.0）を用いた。そして洗浄実験を行う時に、粒体がスムーズにノズルへ流れ込むよう浴槽底部に傾斜板を設けた。傾斜角は粒体の転がり摩擦角を測定して 5° と定めた。また粒体の反撥係数が高いので、粒体が反撥するのを抑えるため厚

さ 2mm のラバーシートを傾斜板表面に貼った。

次に主噴流を制御するための制御噴流用ノズルを、X 方向の壁面に穴を開けて両側から挿入した。ノズルは X 軸方向 (X_s) を可動とし、Z 軸方向は $Z=0$ を中心として設置した。ノズル内径は 10.9mm である。またノズル形状は真っ直ぐなものと同 L 字型の 2 種類を用意した。概要を図 4、5 に示す。

制御噴流用には静圧 3.92KPa、流量 1.1m³/min のブロー (Ring Blower) を用い、ブローより取り込んだ空気は、フローセル流量計を通過し、切り換え弁によって、左右の制御噴流用ノズルから噴出できるようにした。

3 . 実験方法及び結果

3 - 1 . 垂直噴流の構造

始めに壁面効果を受けない状態での、空気噴流及び粒体を含む噴流の構造を調べた。空気噴流へ粒体を混入する場合の数量は 1000 個とした (質量流量比=1.34)。粒体噴流の風速分布のグラフを並べて示したものが、図 6 である。粒体が入っているにも関わらず、噴流は図 6 の状態で終始安定していた。

次に図 7 に示すように空気噴流のみの場合と、粒体を混入した場合とで噴流に違いがあるかを調べるため、Y 軸上の風速 V_c の変化をそれぞれ計測した。このグラフから、 $Y/D=5$ までが噴流のポテンシャル・コア、 $Y/D=10$ までが遷移域、 $Y/D=10$ 以降が拡散域と見て取れる。また噴流の傾向は粒体が入っても、流速が少し小さくなる程度で、あまり変わらないことも分かった。

次に $Y/D=20, 40$ での粒体の個数分布を調べた。個数分布測定は直径 12mm の小型ロードセルを丸棒の端面に接着して X 方向に 12mm ピッチで測定することにした。トリガー 0.459N、サンプリングタイム 200 μ s として 6.553 秒間の衝突回数を求めた。粒体の衝突回数をロードセルの面積と測定時間で割ったものを平均個数 N_c とする。結果を図 8 に示す。

粒体の存在している範囲が狭く、さらに $Y/D=20$ では中央部分の粒体密度が低い事が分かった。これでは洗浄効果の範囲は狭く、不均一になってしまう。

3 - 2 . 壁面噴流の構造

ノズルの四方を壁面で囲むと、噴流はコアンダ効果により偏向し、壁面に付着し安定する。その噴流に粒体を混入させた状態で、ノズルからの各断面の風速分布 (V/V_0) を調べた。結果を図 9 に示す。主噴流のノズル出口速度は 30m/s に固定し、粒体を 1000 個混入した状態で速度が 28m/s になっている。グラフの縦軸、横軸共にスリット幅 D で無次元化している。

風速分布の最高点が噴流の中心と考えると、噴流は $Y/D=3$ 辺りから偏向し始め、 $Y/D=40$ 付近で壁面に衝突し、それより下流では壁面噴流となって、粒体が入っているにも関わらず、安定している。

次に洗浄効果に影響を及ぼすと思われる、噴流中の粒体の分布状態を調べた。密度分布測定は直径 12mm の小型ロードセルを丸棒の端面に接着して X 方向に 12mm ピッチで測定することにした。トリガー 0.459N、サンプリングタイム 200 μ s として 6.553 秒間の衝突回数を求めた。粒体の衝突回数をロードセルの面積と測定時間で割ったものを平均個数 N_c とする。ノズル上の各断面上の分布測定から、特徴的な分布を示した断面、 $Y/D=20, 40$ の結果を図 10 に示す。

$Y/D=20, 40$ 共に偏向方向に粒体が多く集まってしまう、均一な洗浄が期待できない。 $Y/D=40$ では粒体の存在している範囲は非常に広いが、粒体密度が低い。全体として、壁面噴流で洗浄を行うと、洗浄効果は低く、不均一になることが予想される。

3 - 3 . 解析シミュレーションによる制御方法及び揺動の考察

図 8、9、10 の結果により、垂直噴流及び壁面噴流での、広範囲かつ均一な洗浄は難しいことが予想される。これは身体洗浄装置にとって重要な問題となる。

しかし、壁面噴流を揺動させることが出来れば、広範囲で均一な洗浄が期待できる。揺動方法とし

ては、まず主噴流を出すノズル自体を揺動することが挙げられるが、ノズルの構造が複雑化し、安価に生産することは難しい。そのため主噴流の左右に制御噴流用ノズルを取りつけて、制御噴流を噴出する事によって、壁面に付着した主噴流を制御することを考えた。

制御噴流によって主噴流を制御する方法としては、図4のようなストレート状の構造を持つノズルを用いて、壁面噴流の湾曲した内側空間部分に、外部より空気を強制導入し、内側空間部分の圧力を高くする方法²⁾、制御噴流を主噴流に衝突させて揺動させる方法³⁾などが挙げられる。実際に、この制御方法で主噴流を揺動させる事が出来るのか流体解析ソフトによるシミュレーションを行った。解析条件を表1に示す。

シミュレーションを行った結果の中で、主噴流を流して4秒後の制御噴流が流入する寸前から、1秒間をZ軸方向から見た速度ベクトル分布と圧力分布で表し、図11、12に示す。

図11の4.0sでは、噴流が右側の壁面の $Y/D=30$ 辺りに付着しているのが分かる。その下部では噴流が渦を巻いており、それが図12の4.0sでの負圧の原因となり噴流を安定させている。また右壁面に沿って、噴流が勢いよく外部に噴出しており、上方では浴槽内部へと空気が流入している。4.2sでは制御噴流が噴出し始めており、それによって主噴流の根元は、反対側の壁面に偏向している。だが浴槽内部全てがほぼ均一の圧力になっており、噴流はきわめて不安定な状態にあるといえる。4.4sの辺りから浴槽の左下部の圧力が低くなり、それによって主噴流は反対側の壁面へと移行して行く。4.0sに右下部にあった渦は、上方へと移動して行き、主噴流の右への傾きを無くしていく。そして、新しい渦が左下部に生まれ、主噴流の左側壁面への偏向を安定させていく。5.0sから10.0sの噴流の速度ベクトル分布及び圧力分布に変化はないので、5.0sで噴流は反対側壁面へほぼ移行したと考えられる。5.0sの速度ベクトル分布及び圧力分布が4.0sと対称的な形にならない理由は、制御噴流を4.0s以降噴出したままだった点が考えられる。

この結果より、この制御方法によって主噴流を揺動させ得ることが分かった。

しかし、この方法では制御噴流による、粒体の分布状態及び速度へ強い影響を与えてしまうことも実際の実験装置により分かった。主噴流や粒体に影響を与えないような制御方法を考える必要があった。

二つの噴流を互いに平行に流すと、噴流間の距離や噴流の強さにもよるが、二つの噴流は互いに引き合うという性質を持っている。よって図5の様に、主噴流が付着している壁面の反対側壁面の方から、制御噴流をL字型のノズルを用いて、Y軸に平行に噴出する事によって、壁面に付着している主噴流を反対側壁面へ引きつけるという制御方法が考えられる。この方法なら粒体への影響はほとんどない。

この制御方法でも主噴流を揺動させる事が出来るのか、先程と同解析条件でシミュレーションを行った。

シミュレーションを行った結果の中で、主噴流を流して4秒後の制御噴流が流入する寸前から、1秒間をZ軸方向から見た速度ベクトル分布と圧力分布で表し、図13、14に示す。

4.00sでの速度ベクトル分布では、制御噴流をまだ噴出していないので、噴流が右側の壁面の $Y/D=30$ 辺りに付着していることが分かる。その下部では噴流が渦を巻いており、それが負圧の原因となり噴流を安定させている。しかし制御噴流を噴出して0.04秒後(4.04s)には、主噴流がノズル出口直後から制御噴流によって引っ張られており、4.08sには主噴流と制御噴流が互いに引き合って衝突してしまう。そして主噴流は再び安定するために最も近い壁面、つまり始めに付着していた壁面とは逆側の壁面に偏向していく。制御噴流も主噴流と合流し、壁面に付着する。そして4.90sには、主噴流は4.00sの時とほぼ対象形となり、反対側壁面に完全に付着し、安定していると言える。

3 - 4 . 制御噴流の最適化

シミュレーションから、制御噴流を使って噴流を反対側の壁面に移行させることが可能であると分

かった。しかし主噴流に対するノズルの位置によって、噴流を制御できる流量が変わることが考えられる。実験装置を用いて壁面噴流を揺動させるのに必要な制御噴流の最低流量を測定した。

質量流量比 1.34、風速 28m/s とし、傾斜板下端位置からの距離 X_s を変化させて、それぞれの揺動に必要な流量 Q_s を測定した。結果を図 15 に示す。この結果からシミュレーションで用いた流量より小さな流量で壁面噴流を揺動できることが分かった。またノズルの位置は Q_s の値を最小にできる最適な位置 (X_s/D) があることが分かった。

3 - 5 . 洗浄実験

図 9 に示した壁面噴流での洗浄実験を行った。洗浄結果を図 16 に示す。

実験方法としては通気性の薄いポリウレタンフィルム (30mm×24mm) をビニルシート (50mm×24mm) に貼った後、その上にバター (脂肪分 83%) を塗り、50 で 30 分間加熱しバターの厚さを均一にして、1 日デシケータで放置したものを人口垢とした。これを直径 12mm の丸棒へ緩衝材として厚さ 7mm のゴムを巻いた上に貼り付け、5 分間粒体を当てて、粒体による洗浄をした後、洗浄前後でのバターの重量差から洗浄効果を調べた。また、洗浄率(W)を(洗浄前のバター重量 - 洗浄後のバター重量) / 洗浄前のバター重量×100、で表した。

噴流が壁面に付着したままでの洗浄は、粒体の分布が偏った方向のみが洗浄され、広い面積での均一な洗浄を行うことはできなかった。この結果から、壁面噴流を制御噴流により揺動させて洗浄すれば、目的である広い面積での均一洗浄が行えると考えられる。噴流の揺動を 5 秒間に 2 回、計 120 回行いながら、5 分間の洗浄を行った。その洗浄結果を洗浄率で表したものを図 17 に示す。

噴流を揺動させた方が、広い面積を均一に洗浄できることが分かった。この結果によって、制御噴流用ノズルを浴槽に取り付けることは、主噴流ノズル自体を揺動させるより構造が安易で、主噴流の流量に比べれば制御噴流の必要最低流量は 10 分の 1 程でよいので、噴流化式身体洗浄においては有効な手段であると考えられる。

4 . まとめ

噴流化式身体洗浄において、壁面噴流の揺動化、そして揺動化における洗浄効果の向上について調べて、次の結果を得た。

- (1) 壁面に付着している噴流を、それと平行に制御噴流を流すことによって、制御噴流側へ引きつけることで主噴流を揺動させることが出来る。安定している壁面噴流が、反対側の壁面に移行し安定するまで、約 1 秒かかる。
- (2) 空気を強制導入するノズルの位置には最適の位置がある。
- (3) 制御噴流を用いて、噴流を揺動化した時の洗浄効果は壁面噴流時と比べて洗浄範囲が広く均一に洗浄できる。

最後に、本実験を行うに当たり、高知工科大学の横川明教授、高知県工業技術センターの本川高男氏、兼松エンジニアリング(株)の山中義也氏、松村次展氏に終始ご指導いただきました。また本学生の水口拓也氏、園山司氏、中西良太氏、坂本顕史氏には数々のご協力をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

記号表

D: width of nozzle (mm)
 V_0 : outlet velocity of nozzle (m/s)
 N_c : average number ($1/\text{mm}^2/\text{s}$)
 X_s : position of control nozzle (mm)
 Q_s : throughput of control nozzle (m^3/s)
W: washing ratio (%)

参考文献

- [1] 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、衛生工業協会誌、第 32 巻、第 10 号 (1958)、587-595
- [2] 鮎川恭三、社河内敏彦：側壁付着噴流に関する研究、日本機械学会論文集、41 巻 348 号(1975)、2391
- [3] 岡本哲史、榎田浩二：二つの乱流二次元自由噴流の直角衝突、日本機械学会論文集(B 編)、47 巻 419 号(1981-7)、1207-1213

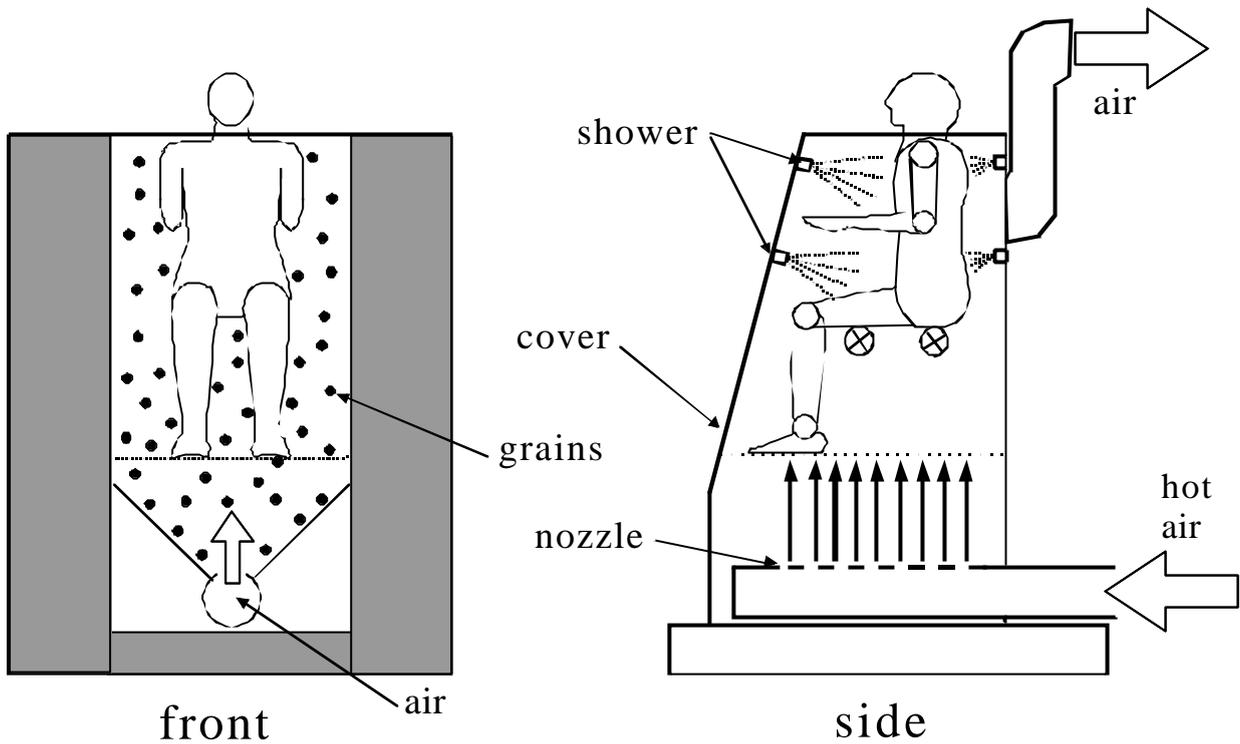
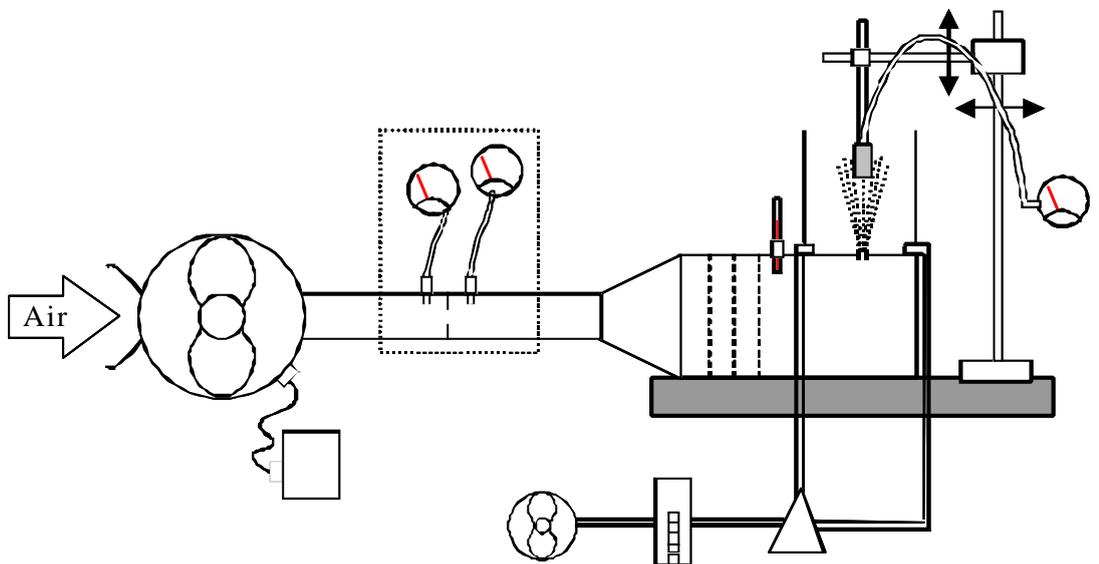


図1 粒子噴流化式自動身体洗浄・入浴装置の概要



- | | | | |
|------------------------|-----------------------|--------------------|----------------|
| roots blower | inverter power source | orifice flow meter | thermometer |
| buffer tank | nozzle | traverse equipment | current meter |
| differential manometer | ring blower | flow meter | change valve |
| | | | control nozzle |

図2 実験装置の概要

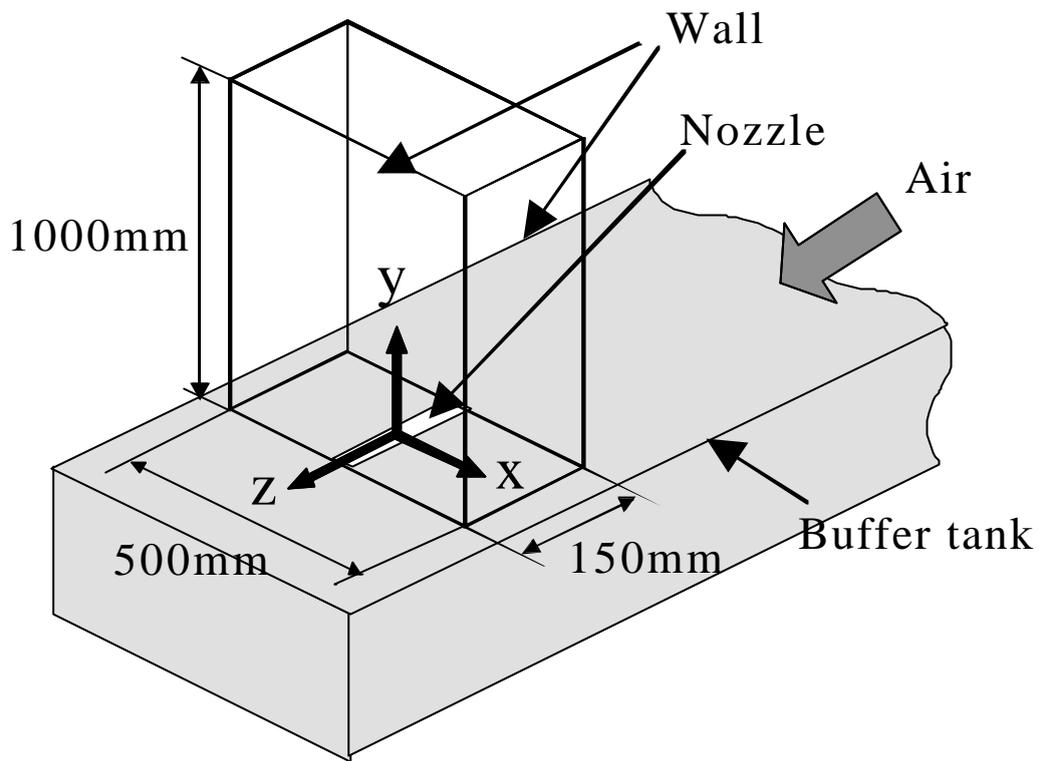


図3 座標軸の設定

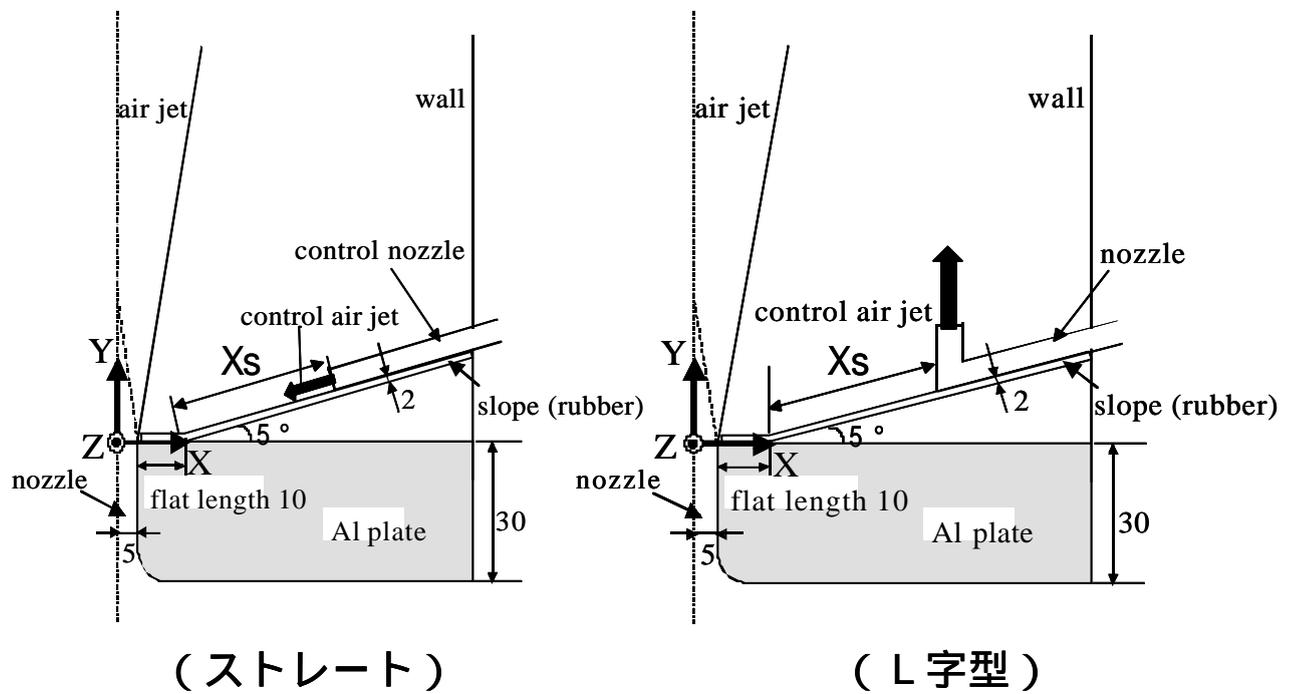


図4、5 制御ノズルの設置

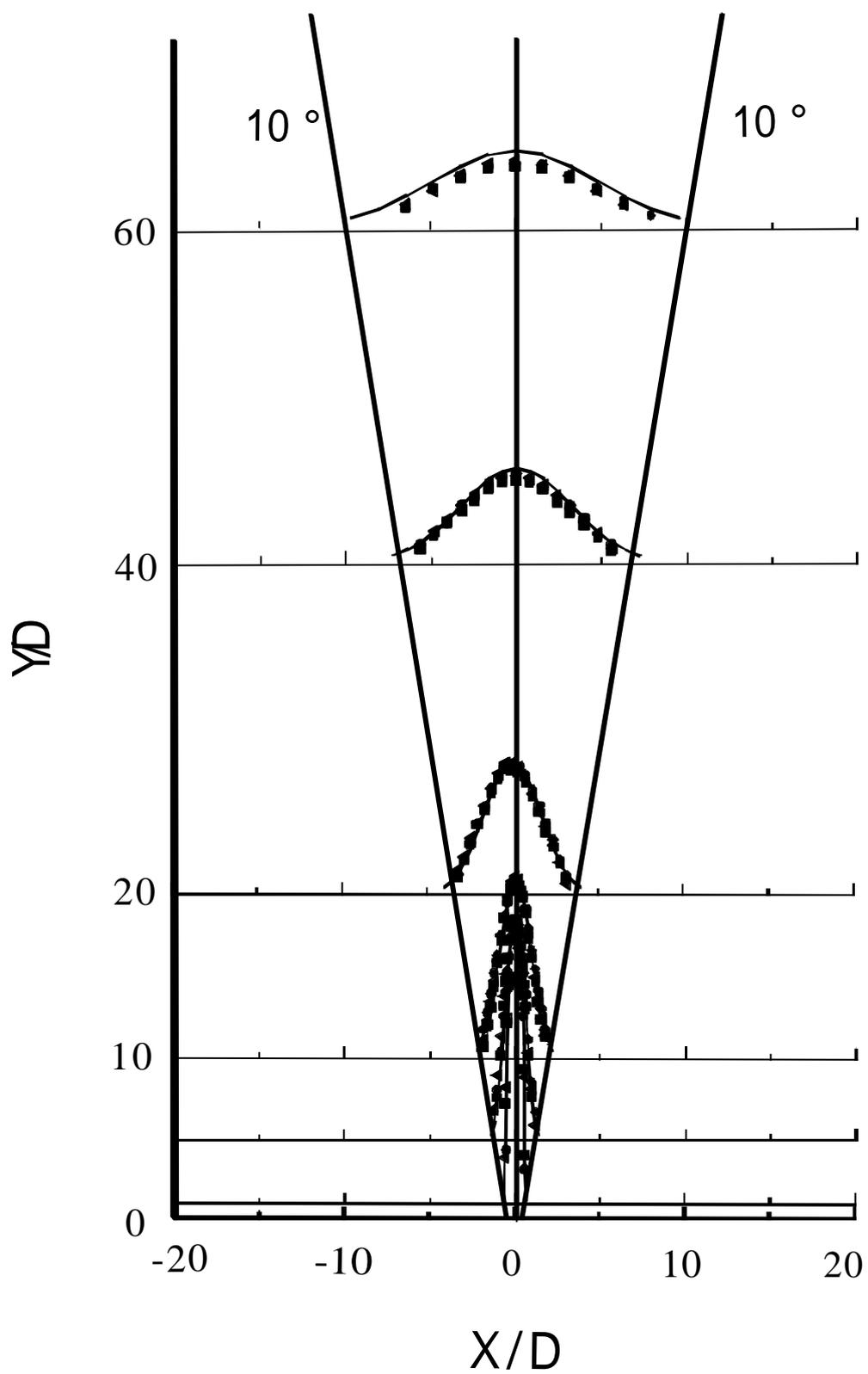


図6 垂直噴流の風速分布

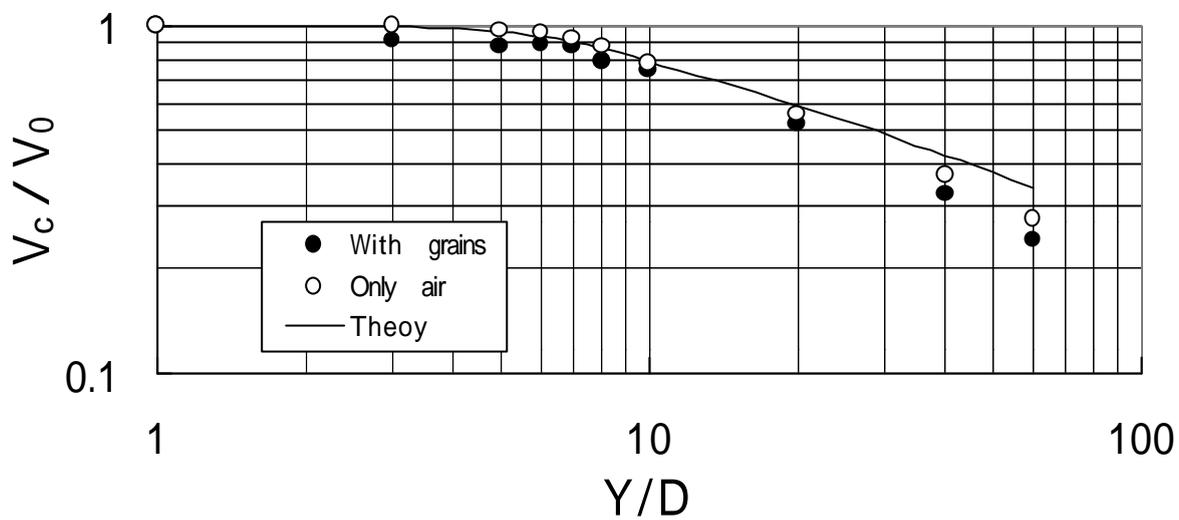


図7 中心軸上の風速分布（垂直噴流）

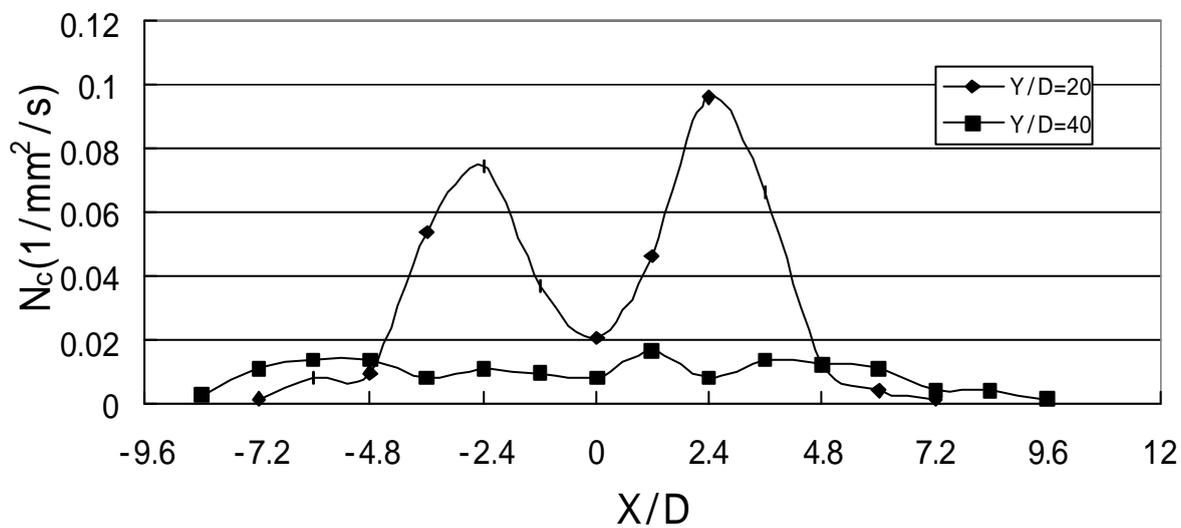


図8 噴流中の粒体分布（垂直噴流）

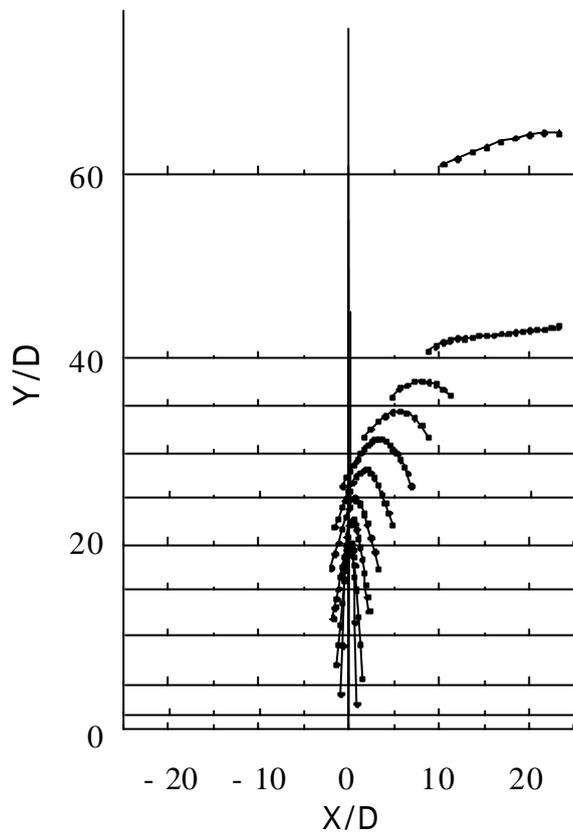


図9 壁面噴流の風速分布

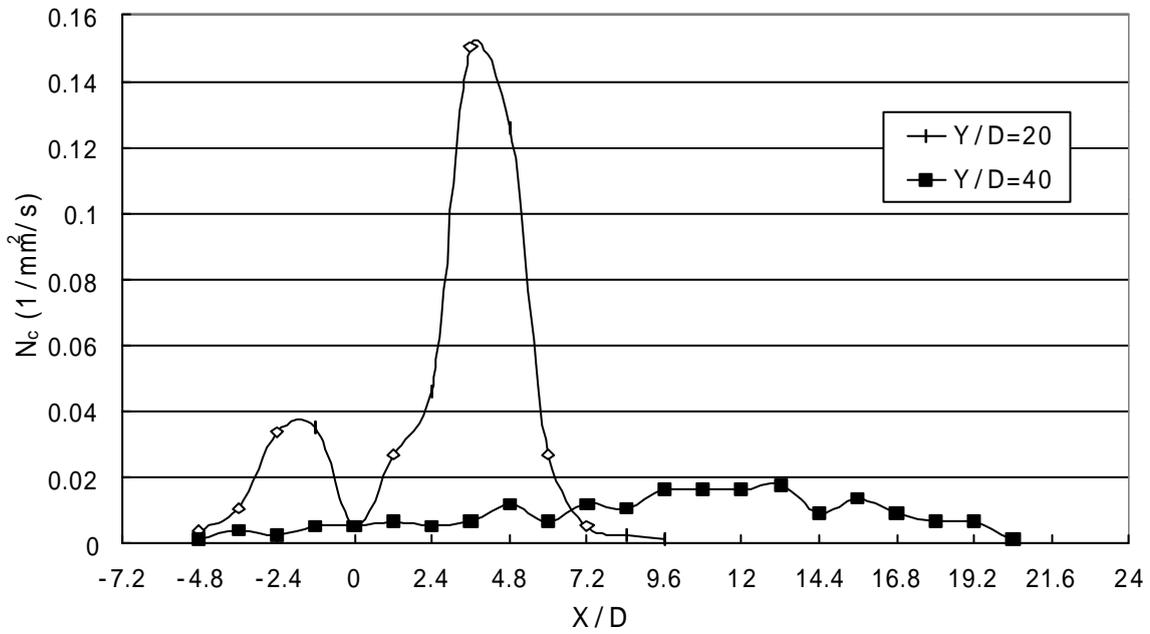


図10 噴流中の粒子分布 (壁面噴流)



4.0s



4.2s



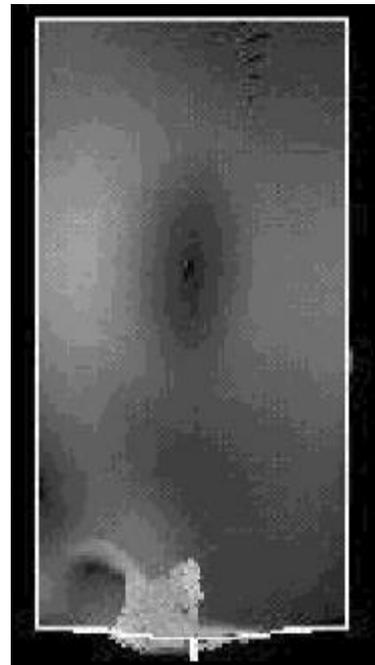
4.4s



4.6s



4.8s



5.0s

図 11 速度ベクトル分布 (ストレートノズル)

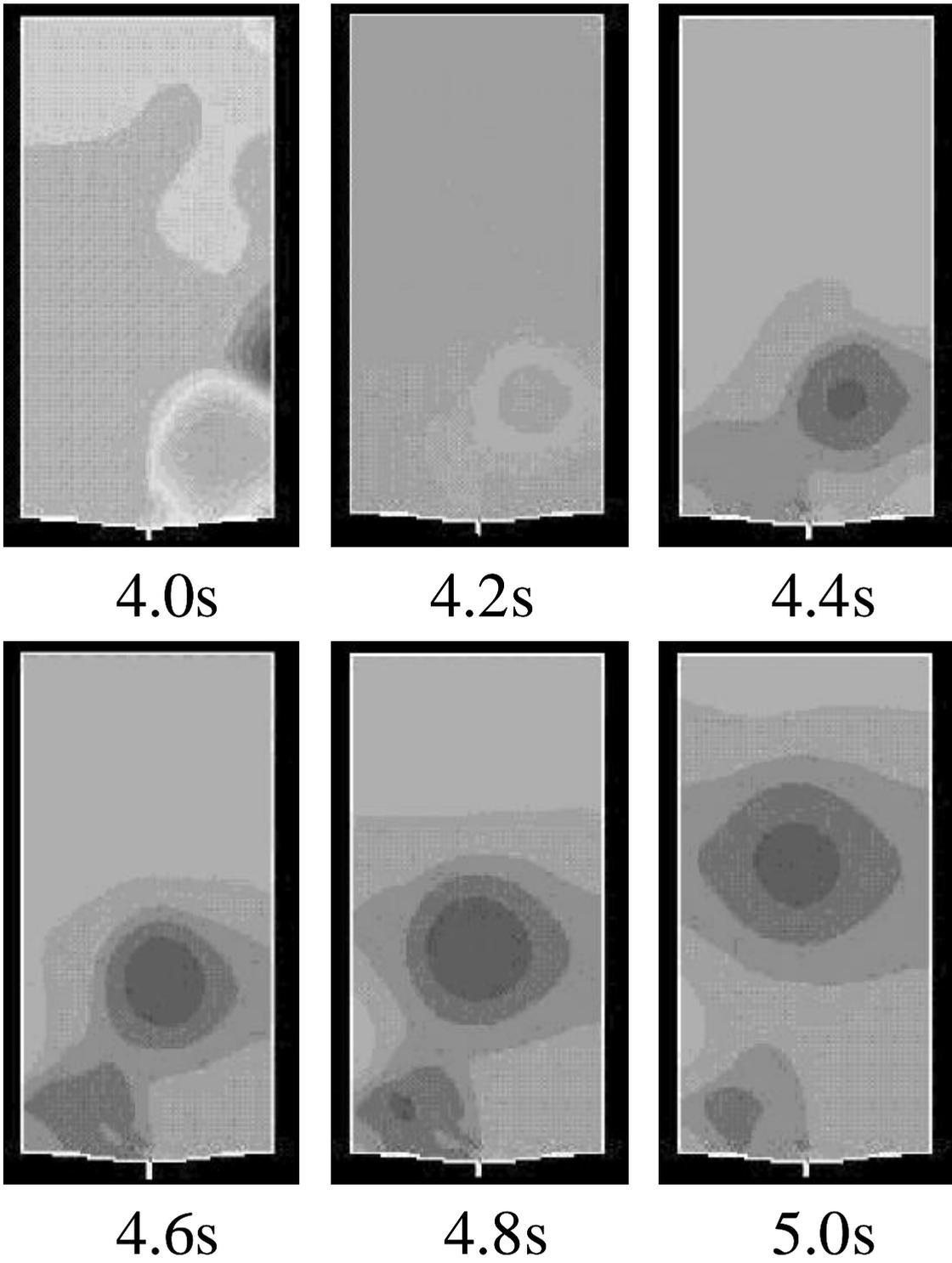
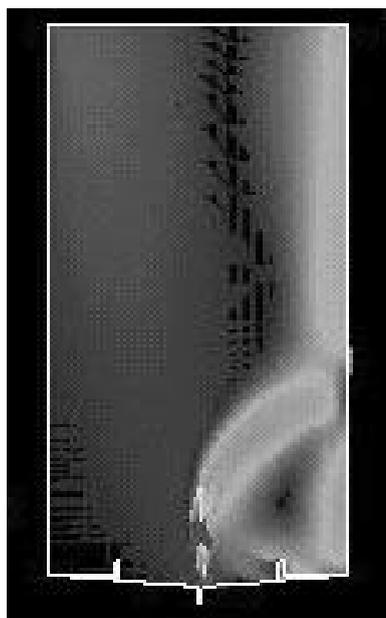


図 12 圧力分布 (ストレートノズル)



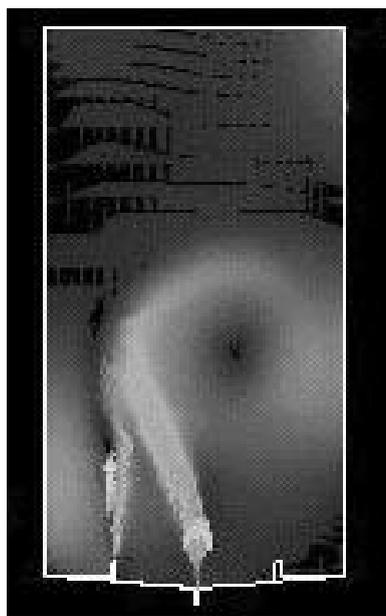
4.0s



4.04s



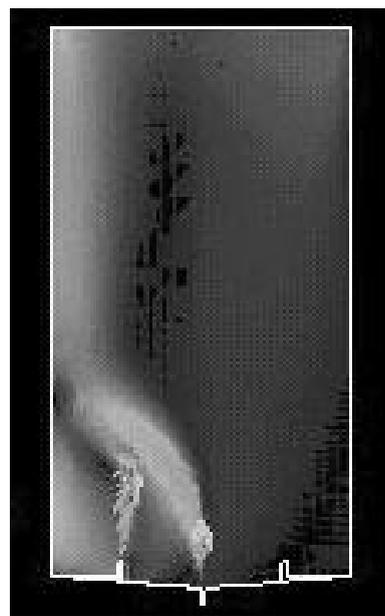
4.08s



4.2s



4.4s

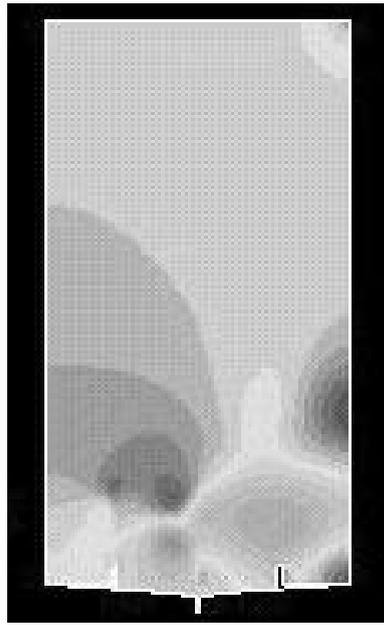


4.9s

図 13 速度ベクトル分布 (L字型ノズル)



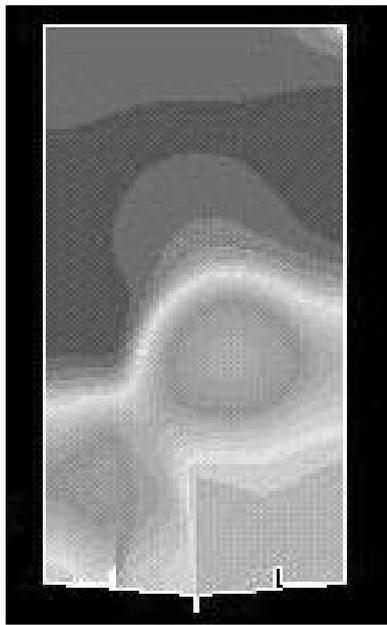
4.0s



4.04s



4.08s



4.2s



4.4s



4.9s

図 14 圧力分布 (L字型ノズル)

表1 解析条件

<p>k- 乱流モデル</p> <p>非定常解析</p> <p>ソルバ - STREAM</p> <p>メッシュ数 490000メッシュ</p> <p>時間間隔 1cycle=0.001s</p> <p>10秒間 (0 ~ 10000cycle)</p> <p>0 ~ 4秒 (0 ~ 4000cycle) 主噴流のみ</p> <p>4 ~ 10秒 (4001 ~ 10000cycle) 主噴流 + 制御噴流</p> <p>主噴流流量 0.042m³/s</p> <p>制御噴流流量 0.0056m³/s</p> <p>境界条件 上方にある520mm × 300mm × 170mm の空間の境界条件のみ自然流出 ,他の 境界条件は全て壁面とする</p>

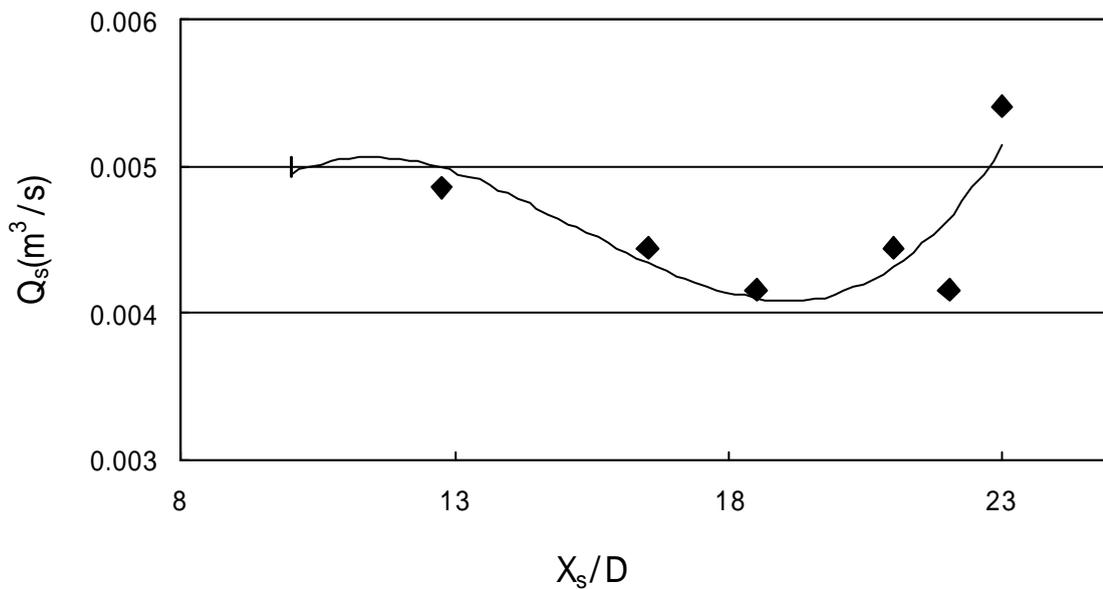
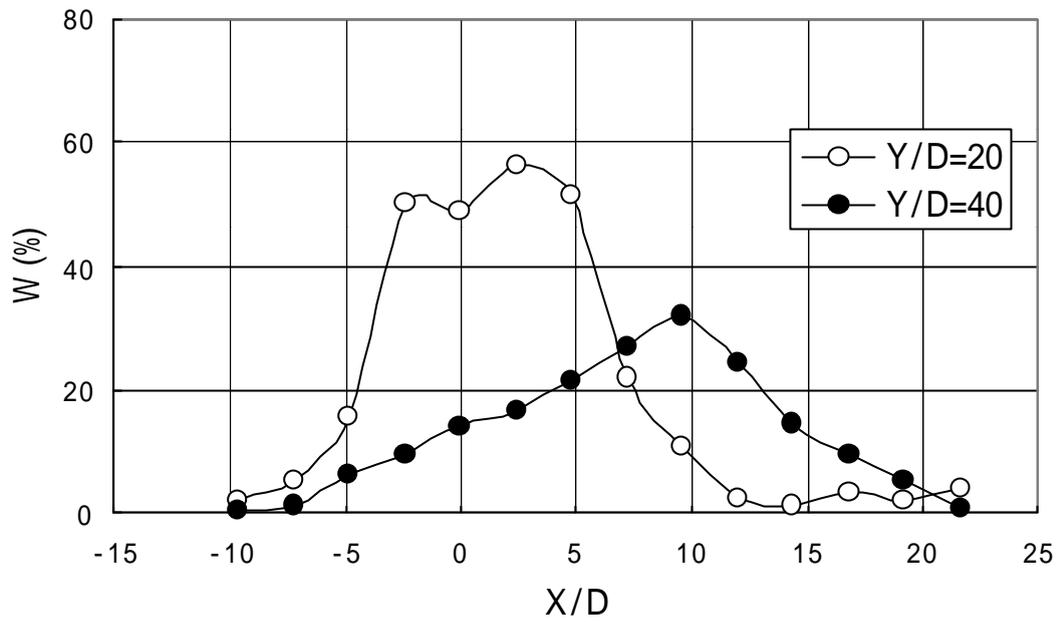
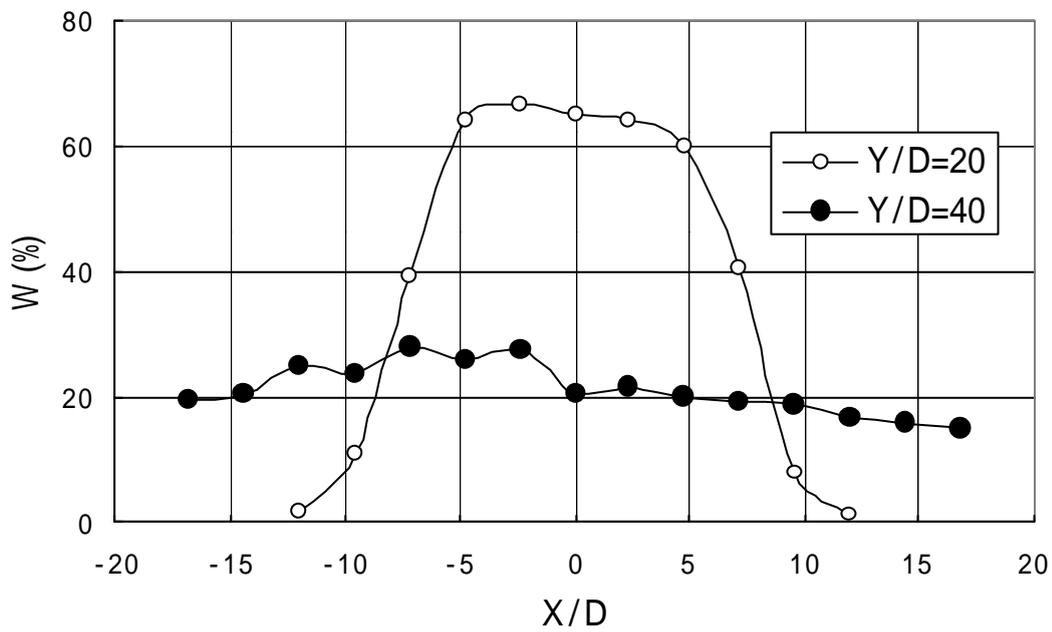


図15 主噴流の揺動に必要な制御流量



(壁面噴流)



(揺動噴流)

図 16、17 洗浄結果