

粒体噴流化式身体洗淨装置の実用化についての研究
(洗淨効果に及ぼす粒体噴流の揺動化制御の影響)

高知工科大学 大学院 工学研究科 基盤工学専攻

1055064 光森 琢真

目次

第1章 緒論

1 - 1	はじめに	1
1 - 2	本研究の背景と目的	1
1 - 3	本論文の構成	3

第2章 粒体噴流化式身体洗淨の噴流構造と粒体分布

2 - 1	緒言	4
2 - 2	実験装置	4
2 - 3	空気噴流の構造と粒体分布	8
2 - 4	壁面噴流の構造と粒体分布	10
2 - 5	結言	10

第3章 制御噴流による粒体噴流の揺動化制御

3 - 1	緒言	12
3 - 2	壁面噴流の揺動シミュレーション解析	12
3 - 3	制御噴流の最適化	14
3 - 4	洗淨実験による比較	15
3 - 5	結言	17

第4章 ドラフトプレートによる粒体噴流の効率化

4 - 1	緒言	18
4 - 2	粒体噴流化に及ぼすドラフトプレートの効果	19
4 - 3	ドラフトプレートの選定	20
4 - 4	ドラフトプレートに関する基礎実験	21
4 - 5	ドラフトプレートを装着した場合の洗淨効果	24
4 - 6	結言	25

第5章 ドラフトプレートによる粒体噴流の揺動化制御

5 - 1	緒言	26
5 - 2	ドラフトプレートによる揺動化制御	26
5 - 3	ドラフトプレートによる揺動化制御を行なった洗淨実験	28
5 - 4	結言	29

第6章 まとめ

記号表	31
参考文献	31
謝 辞	32

第1章 緒論

1-1 . はじめに

噴流層は 1955 年、Mathur らの穀物の乾燥に関する報告¹⁾以来盛んに研究が行なわれ、Mathur の有名な著書²⁾等^{3)~13)}に示されているように、乾燥以外にも混合、造粒、コーティング等のプロセスに使われており、多くの研究報告がなされている^{3)~13)}。噴流層装置は低い操作圧力、粒子の安定した動き、また操作の容易さという点で優れており、1mm 以上の大きな粒子の噴流化に用いられている。しかし、噴流層を用いた物体の洗浄はもとより、身体の洗浄を行なうような研究は、従来は全く見られない。

そこで、本研究では噴流層の新しい応用例として、大きな粒体で粒体の空間密度の小さい噴流層を形成させて、これを身体の洗浄に利用することを試みた。このような噴流層での身体洗浄効果は、噴流層内の粒体の形状、材質、量及びその粒体の噴流の運動などによって決定される。特に洗浄効果を向上させる為には、噴流層内の粒体噴流を揺動させて、粒体を浴槽内に広範囲に分散させることが重要である。本論文はこの噴流層内における粒体噴流の制御法と身体洗浄効果との関係について研究を行なった結果をまとめたものである。

1-2 . 本研究の背景と目的

高齢者・少子化社会を迎えて、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）が増加し続けている。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。その一例として、ある介護施設での入浴介護の現状は表 1-1 に示すように身体の洗浄操作に多くの人手がかかっている。そのため省力化には洗浄操作を自動化することが最も効果的である。過去に開発された自動洗浄装置の洗浄方法は、表 1-2 に示すように回転ブラシのような機械を用いるもの、シャワー洗浄やジェット洗浄など水を用いるものなどいくつかあるが、いずれも洗浄効果が低く、また洗浄むらが大きくなり、洗浄操作を効果的に行なっている装置は見られない。

以上のような背景から、粒体を身体に吹き付ける方法で、自動的・効果的に洗浄を行なう装置の開発を試みた。粒体噴流化式身体洗浄装置の概略図を図 1-1 に示す。この装置における洗浄の原理は、密閉した浴槽内に比較的少量の粒体を入れ、洗浄液で入浴者の身体を濡らした後、浴槽底部に設けられたノズルから暖かい空気噴流を噴出し、粒体を吹き上げて、浴槽内部で噴流化させ、入浴者の身体に当てた際の、衝突、摩擦作用で洗浄を行なうものである。

る¹⁴⁾。

本研究では、粒体噴流の制御操作を行ない、効率的・効果的に入浴者の身体に粒体を衝突させ、大きい洗浄効果を得る方法を見出すことを目的としている。すなわち、小型の模型実験装置を用い、噴流の揺動化制御方法及びその洗浄効果について実験を行なって調べ、その結果をまとめる。そして、これらの研究成果を現在製作中の新しい実証実験装置の設計資料として提供する。

表 1-1 入浴介護現場の現状

ウェルプラザやまだ荘（高知県土佐山田町）

入浴回数(1週間)	2回
入浴者数(1回)	21名
介護者数	7名 (洗浄:3名、脱・着衣:4名)
所要時間	1時間 (19分/入浴者1人当り)

表 1-2 他の身体洗浄装置と本装置との比較

No	自動洗浄法	水量	洗浄効果ほか
1	粒体層の流動化	少	ソフトな洗浄 (皮膚との摩擦・衝突効果)
2	回転ブラシ(多数)	少	1. 隅部の洗浄不可 2. 洗浄強度の調節困難
3	スラリー流動	多	洗浄力が弱い (粒体比重/水比重=小)
4	シャワー(多数)	中	洗浄力が弱い (水の衝突洗浄のみ)
5	ジェット水流	多	洗浄効果が低い
6	旋回水流	多	洗浄効果が低い
7	水の振動	多	洗浄効果なし
8	気泡混合	多	洗浄効果なし

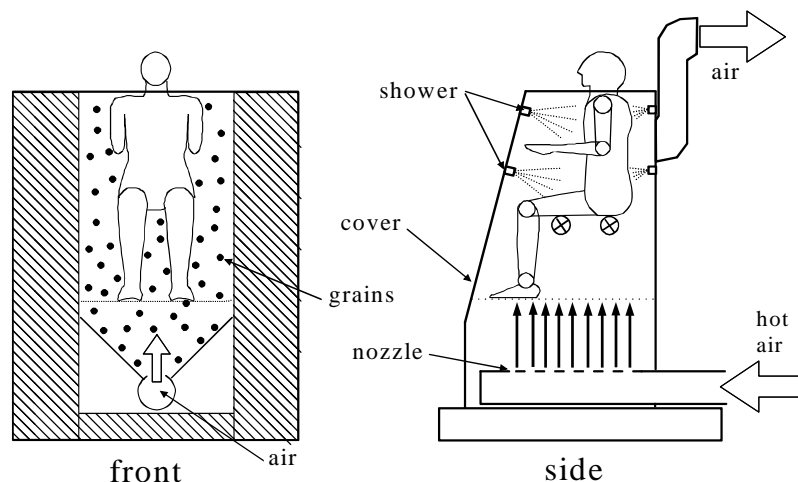


図 1-1 粒体噴流化式身体洗浄装置の概要

1-3 . 本論文の構成

本論文は6章より成る。まず、第1章で本研究の背景や目的を述べ、第2章では、本研究で用いた実験装置の説明及び本研究の基礎となる洗浄装置内の粒子噴流の特性を示す。そして第3章では、粒子噴流をこの噴流とは別に制御用の噴流を用いて揺動化することにより、身体の洗浄効果を広範囲・均一化する方法について、実験を行なって調べた結果を述べる。第4章では、ドラフトプレートを用いて粒子噴流の吹き上げ効果を上げて、身体洗浄効果を高める方法につき、実験研究を行なった結果を述べる。第5章では、ドラフトプレートを揺動させることにより、身体の洗浄効果を広範囲、均一化する方法について行なった研究の結果を述べる。第6章では、以上の研究からみて、ドラフトプレートを揺動制御させる方法が最適であるという結論を得たことを述べる。

第 2 章 粒体噴流化式身体洗淨の噴流構造と粒体分布

2-1 . 緒言

粒体の噴流層で身体を洗淨にするにあたっては、まず噴流の構造を理解しなければならない。本章では壁面効果により変化する噴流構造と粒体分布を実験によって計測し、本研究の基礎とした。

2-2 . 実験装置

実験装置の概略を図 2-1 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。この空気がバッファータンク
へ導入される拡大部の直後には、整流を目的として 3ヶ所に金網を設置した。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 のアルミニウム板を置き、バッファータンクの開口部に
合わせて、アルミニウム板の中央部に幅 10mm(D)、長さ 150mm のスリットを設けてノズル
とした。バッファータンク内の空気はノズルから上方の大気中に噴出される。ノズルには、
図 2-2 に示すように、空気の入り口側に縮流を起こさせないために¹⁵⁾ R=6mm の丸みを付け、
さらにノズル底部には粒体のバッファータンクへの落下防止を目的として、線径 0.3mm、目
の大きさ 0.98mm の金網を設けた。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。

ノズル長手方向の両端にはノズルに対して直角に、幅 500mm、長さ 1000mm の透明アクリル
板を立て、他の 2 面は幅 150mm、長さ 1000mm の透明アクリル板で囲った。また、噴流の偏向
が生じない場合での実験を行なう際には、この 2 面を透明アクリル板の代わりに目の細かい
金網で覆った¹⁶⁾。

座標軸は図 2-3 に示すように、垂直方向、すなわち噴流主流方向を 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。

流速測定には図 2-4 に示すように、ノズル出口近傍における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 $\pm 225\text{mm}$ 、Y 方向 10 ~ 600mm の移動が可能である。特に X 方向の移動量はトラバース装置に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にした。また、差圧はマノスターゲージ（0 - 50、0 - 100、0 - 300、0 - 1000Pa）で測定した。

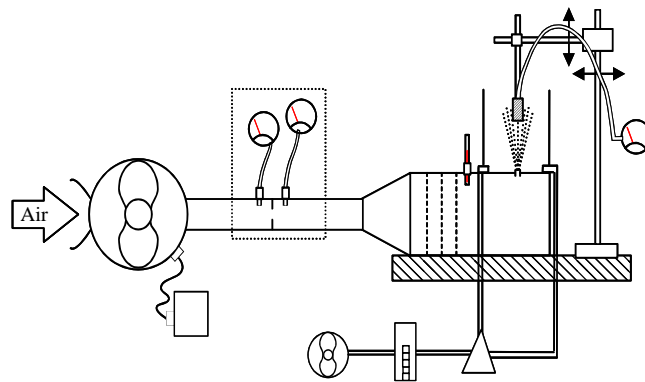
流量調整はルーツブロアの回転数をインバータ制御することによって行なった。ノズル出口の流速 V_0 は測定装置の都合上 $Y=10\text{mm}$ の位置で測定した値を用いた。一例として、このルーツブロアでは 64.2Hz で $V_0=30\text{m/s}$ が得られた。この場合のレイノルズ数： $Re=\frac{DV_0}{\nu}=19400$ である。（ただし代表長さはスリット幅 D 、 ν は空気の動粘性係数である。）

粒子は直径 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なう時に、粒子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。傾斜角は粒子の安息角に合わせて 5 度とした。また、粒子の反撥係数が高いので、粒子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。

次に噴流層を制御するための制御噴流用ノズルの概要を図 2-5 に示す。制御噴流用ノズルは装置底部の両側壁面に穴を開けて挿入した。このノズルは X 軸方向 (X_s) に可動出来るようにし、Z 軸方向は $Z=0$ を中心として設置した。このノズルの断面形状は $10.9\text{mm} \times 10.9\text{mm}$ である。また、ノズルの形状を L 字型にして、噴流方向が Y 軸に平行になるようにした。

制御噴流用には静圧 3.92KPa、流量 $1.1\text{m}^3/\text{min}$ のブロア（Ring Blower）を用い、ブロア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。

次に、粒子の吹き上げ高さを大きくするために用いたドラフトプレートの概要を図 2-6 に示す。ドラフトプレートは高さ (H) は 50mm、100mm、200mm で、幅 20mm、奥行き 150mm の 3 種類を作成し、これを浴槽底部のノズルに差込むことで設置できるようにした。なお、ドラフトプレート下端の位置は浴槽底部 20mm とした。



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

図 2-1 実験装置の概要

浴槽部

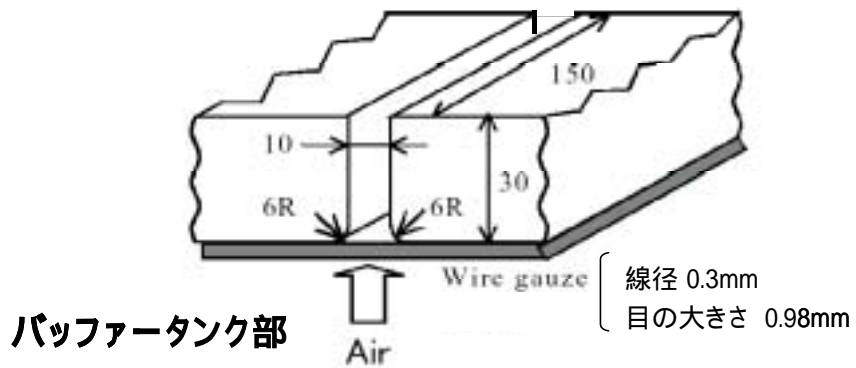


図 2-2 ノズル断面形状

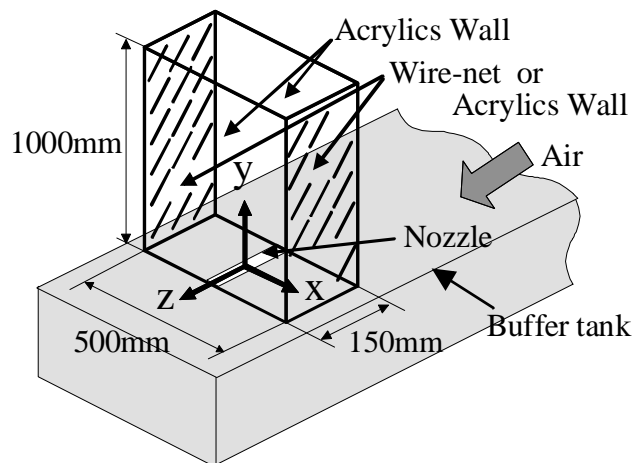


図 2-3 座標軸の設定

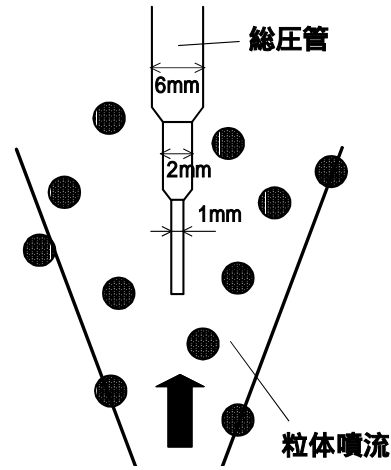


図 2-4 流速測定用総圧管

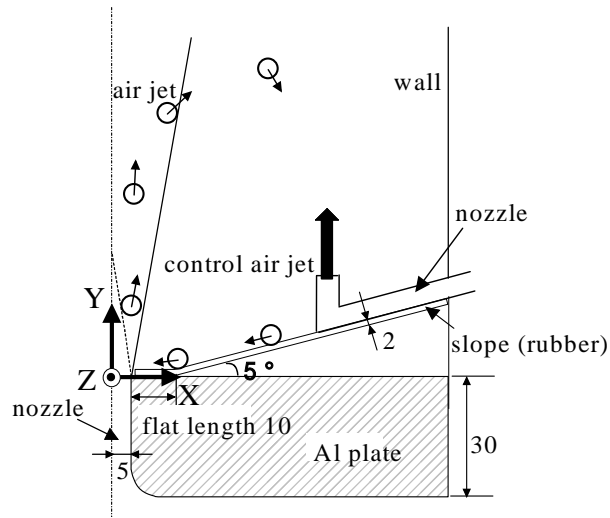


図 2-5 制御噴流用ノズルの設置 (XY 断面図)

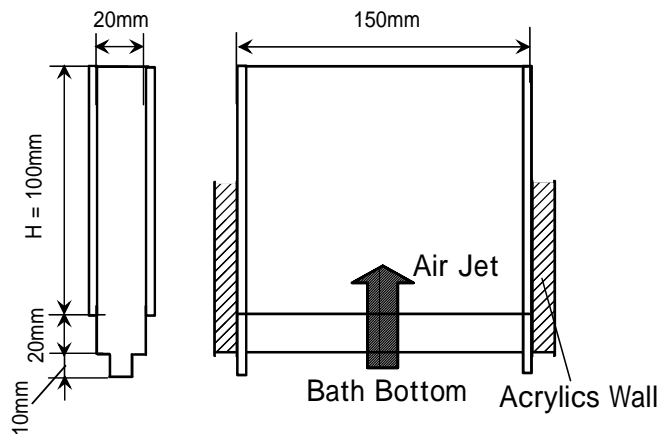


図 2-6 ドRAFTプレートの設置

2-3 . 空気噴流の構造と粒子分布

まず、噴流の性質を知るために、壁面効果を受けない状態での空気噴流及び粒子噴流（垂直噴流）の風速分布及び粒子濃度を調べた。空気噴流へ粒子を混入する場合の数量は 1000 個とした（質量流量比=1.34）。

粒子を含む場合の空気噴流（これを粒子噴流という）の風速分布のグラフを並べて示したものが、図 2-7 である。この図は横軸に X/D 、縦軸に Y/D を取り、各点での速度 V とノズル出口速度 V_0 との比 V/V_0 をパラメータとして表わして、実験値をプロットした結果である。噴流はノズルから約 20 度の拡がりを持って噴出されていることがわかった。また噴流は、粒子が入っているにも関係なく、図 2-7 に示すように垂直な状態で終始安定していた。

次に、空気噴流と、粒子噴流とで噴流構造に違いがあるかを調べるため、 Y 軸上の風速 V_c をそれぞれ計測した。その結果を図 2-8 に示す。横軸には Y/D 、縦軸には V_0 と Y 軸上の速度 V_c との比 V_c/V_0 で表わした。図 2-8 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、 $Y/D=10$ 以降が拡散域であると見て取れる。また、噴流の傾向は粒子が入っても、流速のわずかな減少が見られる程度で、定性的に変化がないこともわかった。

次に、 $Y/D=20, 40$ での粒子の濃度分布を調べた。濃度分布は直径 12mm の小型ロードセルを丸棒の先端面に接着して X 方向に 12mm ピッチで移動させ、小型ロードセルに対する粒子の衝撃回数を測定することで求めた。衝撃力が 0.459N 以上のものを計測し、サンプリングタイム 200 μ s として 6.553 秒間の衝撃回数を求めた。粒子の衝撃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 とした。その結果を図 2-9 に示す。

図 2-9 から、噴流中に粒子が存在している範囲は比較的狭く、さらに $Y/D=20$ では中央部分の粒子濃度が低い事もわかった。この状態では洗浄効果の範囲も狭く、洗浄が不均一になってしまう事が予想される。

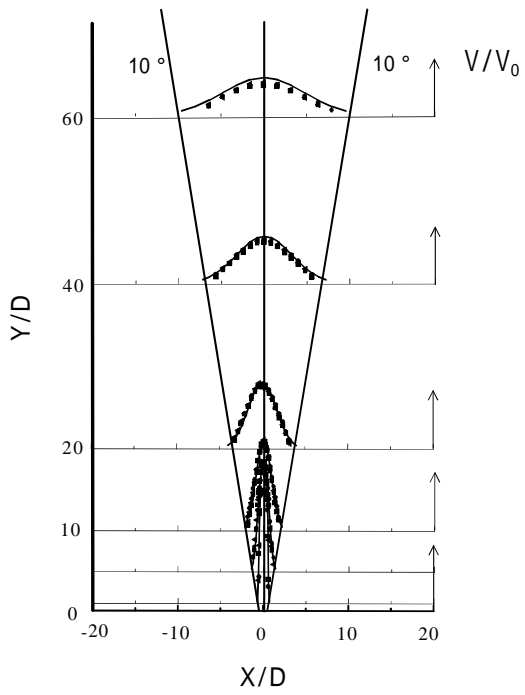


図 2-7 垂直噴流の風速分布

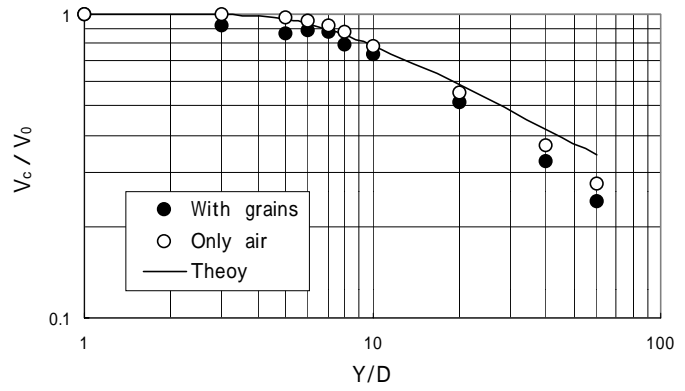


図 2-8 噴流中央断面での風速分布（垂直噴流）

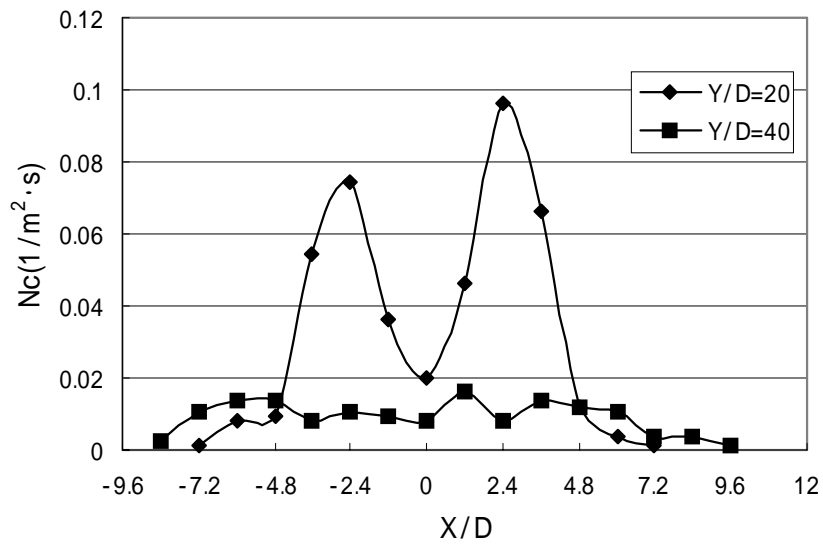


図 2-9 垂直噴流の粒子濃度分布

2 - 4 . 壁面噴流の構造

次に壁面効果を受けた粒体噴流（これを壁面噴流という）の構造を示す。ノズルの四方を壁面で囲むと、噴流は壁面効果により偏向し、図 2-10 に示すように壁面に付着して安定する。この状態での噴流の風速分布を示したものが、図 2-11 である。横軸に X/D 、縦軸に Y/D を取り、各点での速度 V とノズル出口速度 V_0 との比 V/V_0 をパラメータとして表わして、実験値をプロットしている。

噴流は粒体が入っているにも関わらず、図 2-11 の状態で安定しており、噴流の揺れなどは見られなかった。各噴流高さでの風速分布の最高点の位置を噴流中心と考えると、噴流は $Y/D=3$ 辺りから偏向し始め、 $Y/D=40$ 周辺で壁面に付着していることがわかる。

次に $Y/D=20$ 、 40 での粒体の濃度分布を調べた。結果を図 2-12 に示す。横軸に X/D 、縦軸に単位時間、単位面積当りの衝突回数 N_c を取って表わした。

$Y/D=20$ 、 40 共に偏向方向のみ粒体濃度が高くなっている。 $Y/D=40$ では粒体の存在している範囲は非常に広いが、粒体濃度が一様に低い。そのため壁面噴流の状態で洗浄しても、全体として洗浄効果は低く、不均一になることが予想される。しかし垂直噴流の結果（図 2-9）と比べて、偏向している部分の粒体の濃度分布は高くなっており、この部分での洗浄効果は高いことが期待できる。

2 - 5 . 結言

垂直噴流と壁面効果により変化する壁面噴流の噴流構造と粒体分布を実験によって計測し、以下の結果を得た。

空気噴流は粒体を含んでいても噴流構造は変わらず、垂直噴流、壁面噴流共に終始安定した状態にある。

垂直噴流は約 20 度の拡がり度でノズルから噴出される。

$Y/D=20$ では垂直噴流中に粒体が存在している範囲は狭く、中央部分の粒体濃度が低い。

壁面噴流は $Y/D=3$ 辺りから壁面へ偏向し始め、 $Y/D=40$ 周辺で壁面に付着する。

壁面噴流では $Y/D=20$ 、 40 共に偏向方向のみ粒体濃度が高くなっている。 $Y/D=40$ では粒体の存在している範囲は非常に広いが、粒体濃度が一様に低い。



図 2-10 壁面噴流

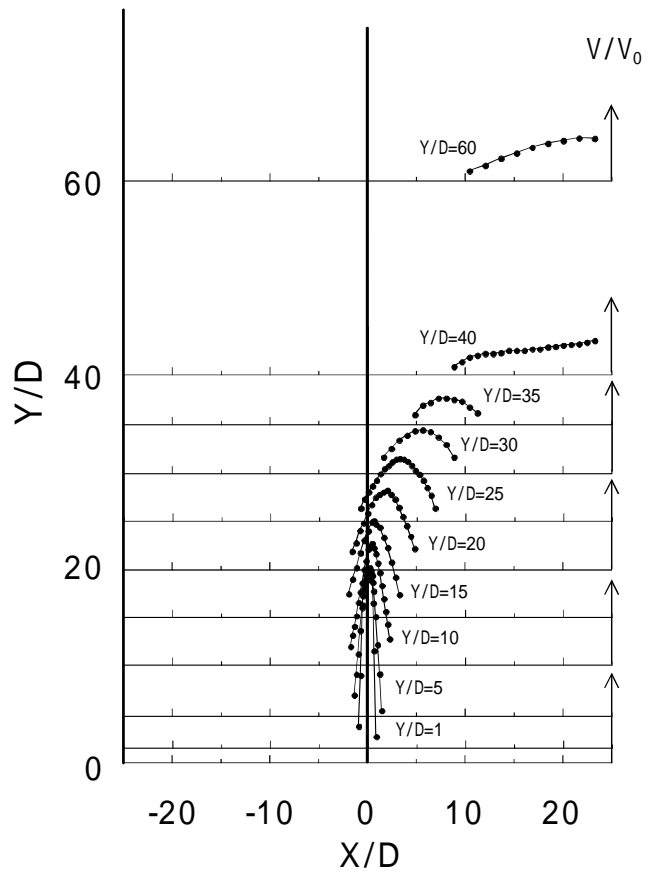


図 2-11 壁面噴流の風速分布

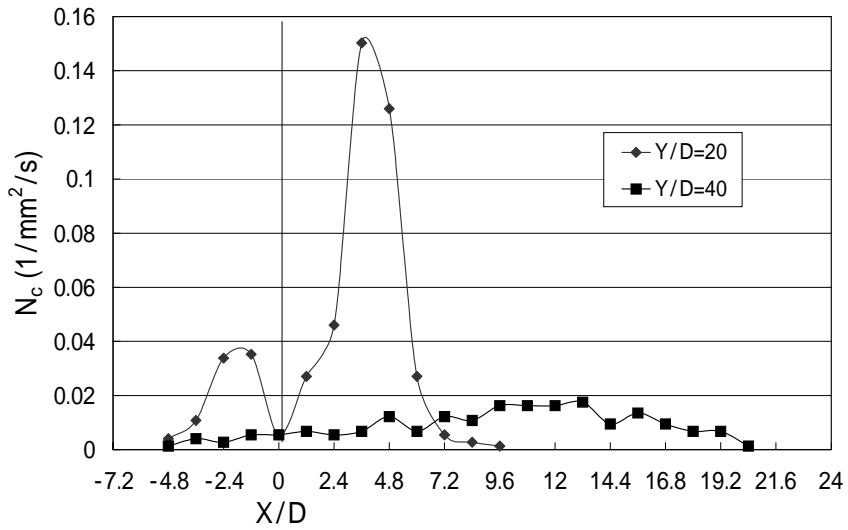


図 2-12 壁面噴流の粒子濃度分布

第3章 粒体噴流の制御噴流における揺動化制御

3-1 . 緒言

第2章での噴流中の粒体濃度分布の測定結果(図2-9、図2-12)から、垂直噴流、壁面噴流共に粒体の存在範囲が狭く、不均一なため、広範囲での均一な洗浄が難しいことが考えられる。これは身体洗浄装置にとって重要な問題点である。

しかし壁面噴流を揺動化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と考え、壁面噴流を揺動化する方法の検討を試みた。

3-2 . 壁面噴流の揺動シミュレーション解析

噴流を揺動化する方法としては、主噴流を出すノズルを機械的に直接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設置して、制御噴流を左右交互に噴出する事により、壁面に付着した主噴流を揺動化制御する方法について検討した。

これは、二つの噴流を互いに平行に流すと、二つの噴流は互いに引き合うという性質を持っていることから、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ことが出来るのではないかと考えたからである。

実際に、この制御方法で主噴流を揺動させる事が可能かどうかを流体解析ソフト(株)ソフトウェア クレイドル、STREAM)によるシミュレーション解析を行なった。解析条件を表3-1に示す。図3-1、3-2はシミュレーション解析を行なった結果の中で、主噴流を流して4秒後に制御噴流が噴出する直前から、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たものである。

図3-1の速度ベクトル分布図を見ると、壁面噴流が制御噴流によって、約1秒間で反対側の壁面へ揺動させられていることがわかる。4.00s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。その下部では噴流が渦を巻いており、それが浴槽下部右側が負圧を生ずる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、主噴流はノズル出口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合流してしまう。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、安定していると考えられる。

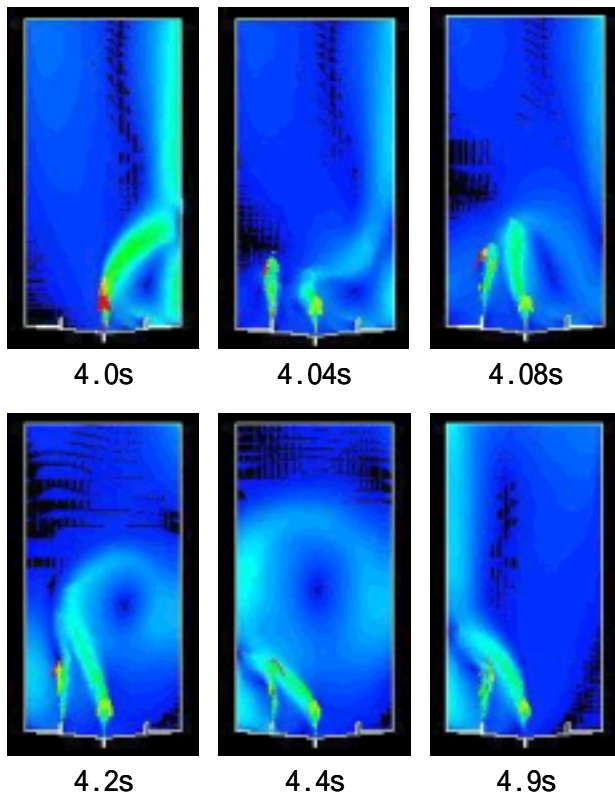


図 3-1 揺動シミュレーション
(速度ベクトル分布)

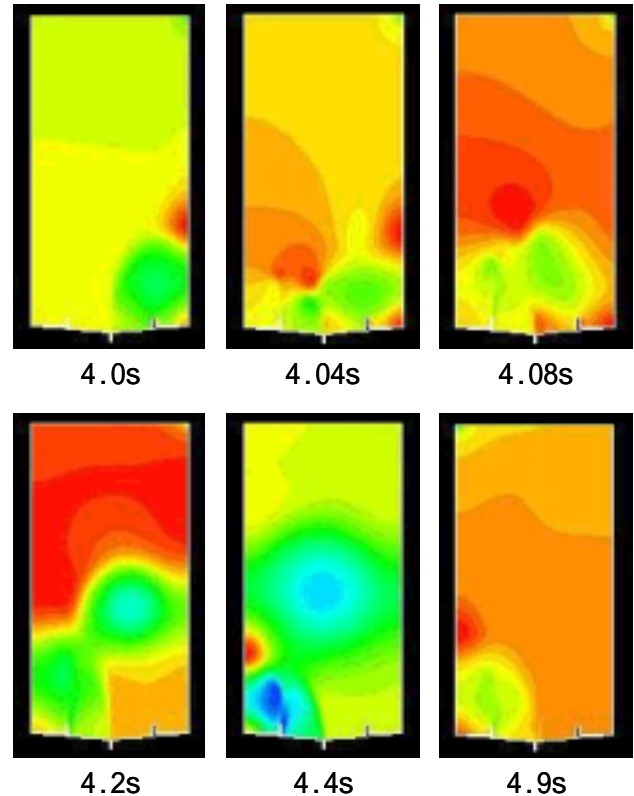


図 3-2 揺動シミュレーション
(圧力分布)

表 3-1 揺動シミュレーション解析条件

K - 乱流モデル
非定常解析
ソルバー STREAM
メッシュ数 490000メッシュ
時間間隔 1cycle = 0.001s
10秒間 (0 ~ 10000cycle)
0 ~ 4秒 (0 ~ 4000cycle) 主噴流のみ
4 ~ 10秒 (4000 ~ 10000cycle) 主噴流+制御噴流
主噴流流量 0.042m ³ /s
制御噴流流量 0.0056m ³ /s
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。

3-3 . 制御噴流の最適化

シミュレーション解析の結果から、流量 $0.042\text{m}^3/\text{s}$ の主噴流を、 $0.0056\text{m}^3/\text{s}$ の制御噴流を使って主噴流を反対側の壁面に移行させることが可能であるとわかった。しかしながら制御噴流の流量は主噴流と制御噴流との距離（ノズルの位置： X_s ）によって変化すると考えられる。そのため主噴流を制御できる制御噴流の流量を、実験装置を用いて測定した。

風速は粒子が 1000 個入った状態で 28m/s とし、制御噴流用ノズルの位置を変更して、それぞれの点で揺動化に必要な流量 Q_s を測定した。その結果を図 3-3 に示す。横軸にはノズルの位置 X_s をノズル幅 D で割り、無次元化したものを取り、縦軸には Q_s を取っている。図 3-3 からシミュレーション解析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わかった。また Q_s の値を最小にできる最適な制御用ノズルの位置 (X_s/D) があることがわかった。

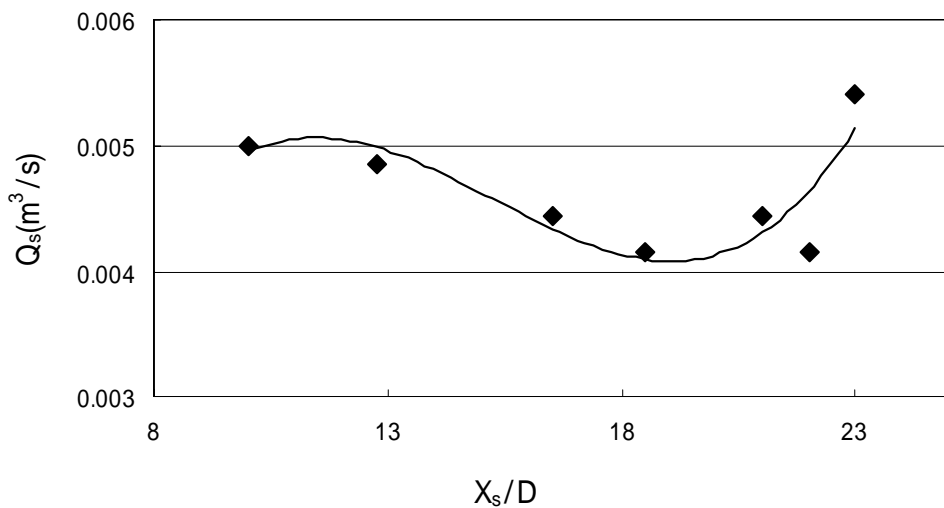


図 3-3 制御噴流流量の最適化

3-4 . 洗淨実験による比較

(a)壁面効果を受けない噴流(垂直噴流)、(b)壁面効果を受ける噴流(壁面噴流)、(c)壁面効果を受けたものを揺動化制御した噴流(揺動噴流) この3種類の粒体噴流を洗淨効果の面から比較するため、洗淨実験を行なった。

実験方法としては図 3-4 に示すように、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、その上に垢に見立てたバター(脂肪分83%)を一様に塗り、1日デシケータ内で放置したものをテストピースとした。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、上記3噴流内に設置し、粒体による洗淨を行なった。

そして、洗淨前後でのバターの重量差から洗淨効果を調べ、洗淨率(W)を、

$$W = \frac{G_0 - G_w}{G_0} \times 100$$

G_0 : 洗淨前のバターの重量
 G_w : 洗淨後のバターの重量

で表した。

また、揺動噴流は壁面噴流を5秒間に2回、計120回の揺動化制御を行ないながら、5分間の洗淨を行なっている。その結果を図3-5、3-6に示す。

垂直噴流と壁面噴流での洗淨率は、それぞれの粒体濃度の測定結果(図2-9、図2-12)と強弱・範囲ともに類似しており、強い相関性を持つことがわかった。よって、垂直噴流では洗淨範囲が狭く、壁面噴流では噴流の偏向側のみの洗淨率が高く、いずれも広範囲で均一な洗淨を行なうことが出来ない。

しかし、この壁面噴流を左右に揺動しながら洗淨を行なうと、図3-6のように洗淨効果は広範囲に拡がり、均一に洗淨される。

この結果から、制御噴流用ノズルを浴槽に取り付け、噴流を揺動化制御することは、噴流化式身体洗淨においては有効な手段であるということがわかった。

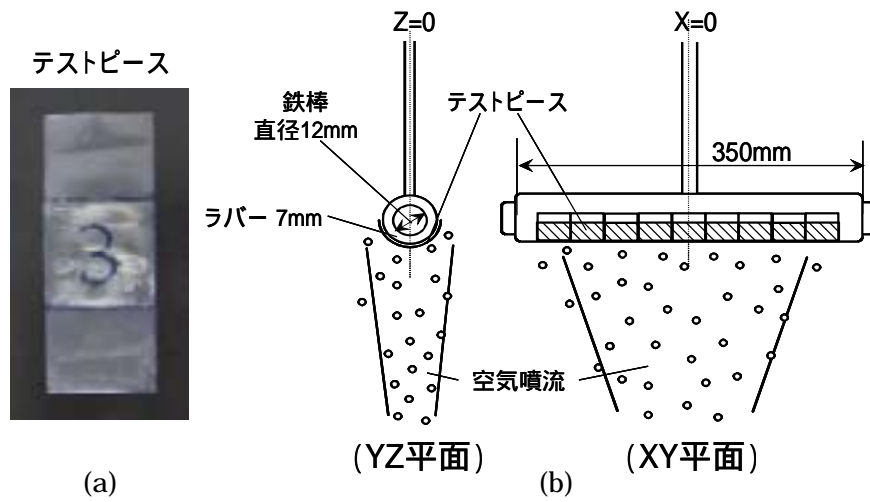


図 3-4 洗浄実験方法

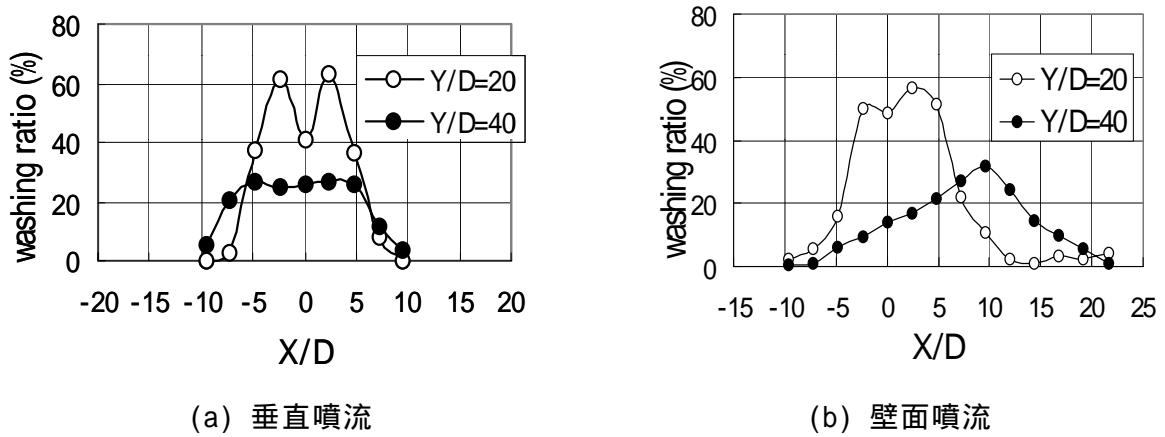


図 3-5 洗浄実験結果

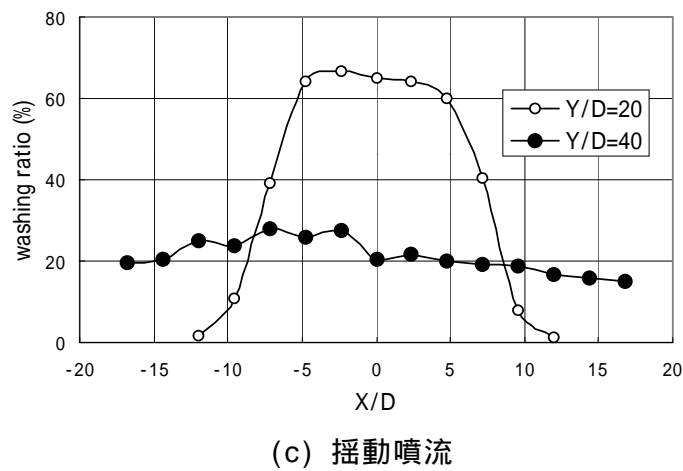


図 3-6 洗浄実験結果

3 - 5 . 結言

壁面噴流を制御噴流によって揺動化する方法の検討を試みて、以下の結果を得た。

主噴流の左右から交互に、主噴流に対して平行に制御噴流を噴出することによって、壁面に付着した主噴流を揺動化制御できる。

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。

主噴流と制御噴流との距離には、揺動化に必要な制御噴流の流量を最小にできる最適な位置が存在する。

第4章 ドラフトプレートによる粒体噴流の効率化

4-1. 緒言

平成13年度、福祉介護施設であるウェルプラザやまだ荘(高知県)の協力を得て、試作機による実証試験を行なった¹⁷⁾。実証試験に使用した試作機について図4-1に示す。この試作機はウェルプラザやまだ荘の脱衣場に設置した。試作機は室内に設置する浴槽部分と室外に設置する室外部分(送風機、ヒーター等)の2つに分けられる。

この実証試験のアンケート結果から、特に装置の小型化の要望があった。装置の小型化については、粒体の吹き上げ高さに効果のあるドラフトプレートをノズル上部に配置する事により、特に室外部分での送風機の小型化が出来るのではないかと考え、ドラフトプレート装着の有無による粒体噴流の特性、洗浄効果の違いについて実験を行なった。



図4-1 実証試験用試作機

4-2 . 粒体噴流化に及ぼすドラフトプレートの効果

粒体の噴流化に対するドラフトプレート装着の効果を定性的に調べるため、装着の有無による噴流状態を目視観察した。ドラフトプレートは図 2-6 に示したもので、高さ 50mm のものを用い、ノズル出口速度、粒体混入量を両者とも同じ条件にして実験を行なった。結果を図 4-2 に示す。ドラフトプレートを装着する事により、400mm 以上の高い位置まで吹き上がる粒体量は装着しない場合より格段に多く、本方式の洗浄に有効と判断される。

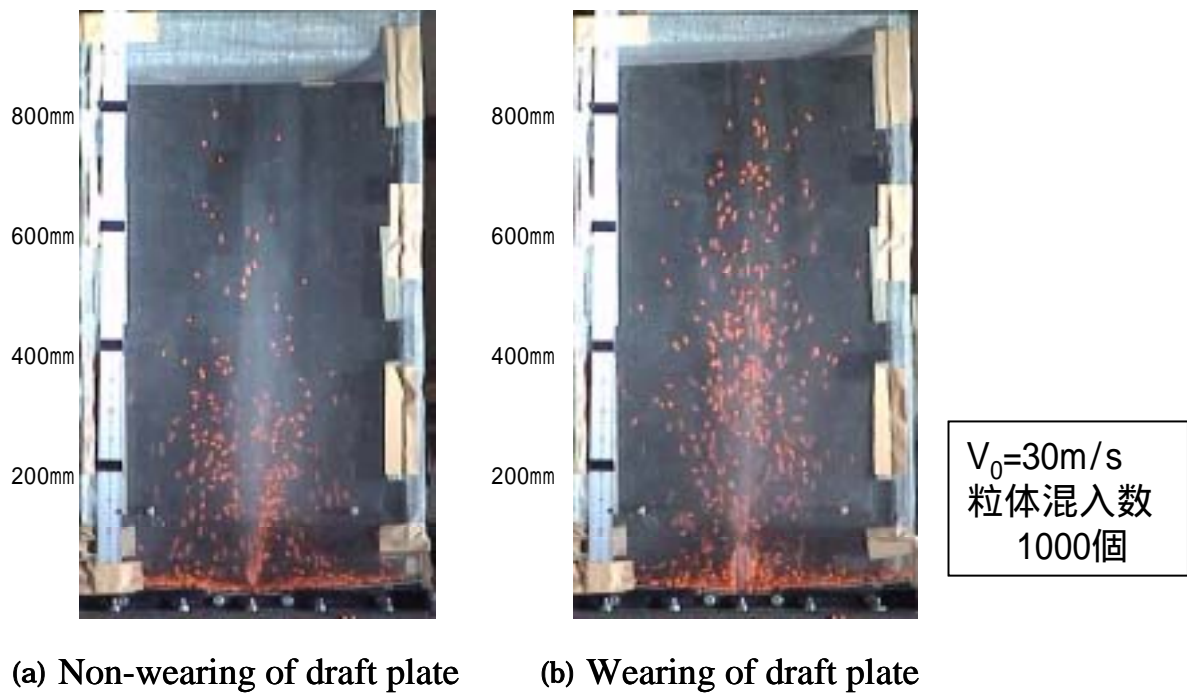


図 4-2 噴流状況に及ぼすドラフトプレートの影響

4-3 . ドラフトプレートの選定

ドラフトプレートの高さについては、50mm、100mm、200mm のものを用意し、実際に XY 断面からの噴流状況を観察することで選定した。噴流状況の違いを示した写真を図 4-3 に示す。

50mm、100mm を比べた場合、ドラフトプレートが高ければ、噴流の高さが明確に違ってくるが、100mm、200mm を比べた場合は、両者にあまり差が見られなかった。ドラフトプレートの選定は、高さは浴槽の小型化の為に出来るだけ低く、しかし噴流の吹き上げ高さには強い効果を及ぼすものを選ぶ必要があることを考慮して、ドラフトプレート高さは 100mm に決定した。

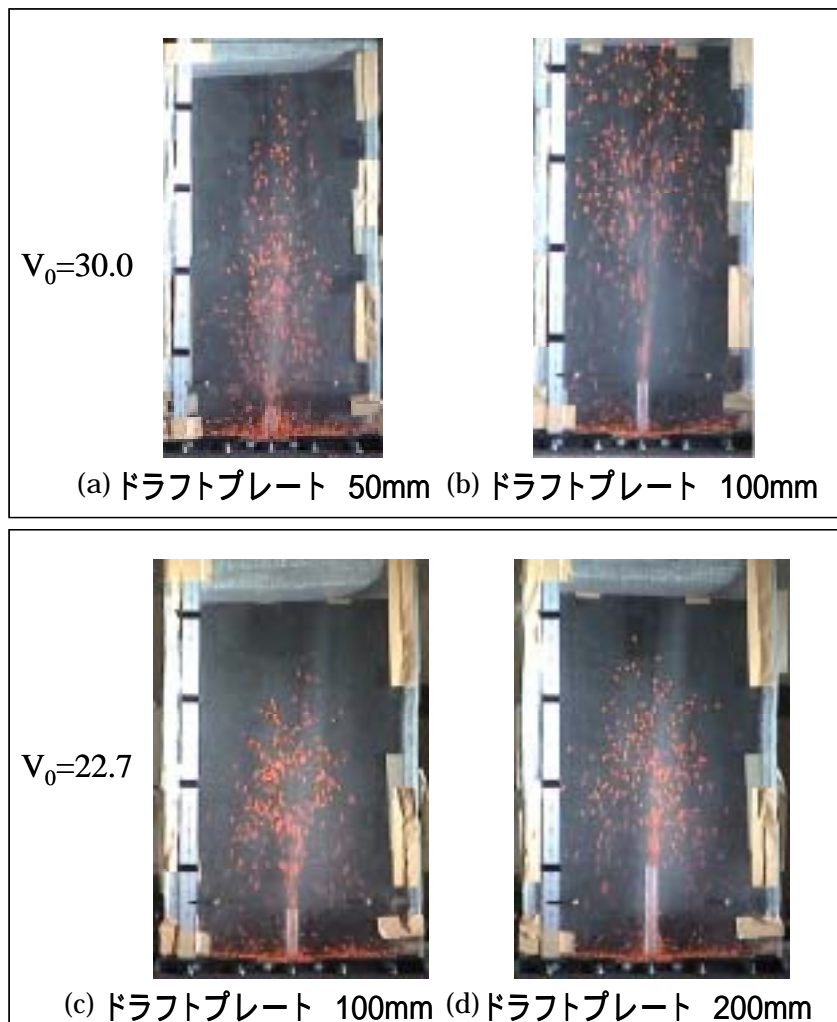


図 4-3 ドラフトプレートの高さによる噴流状況の違い

4-4 . ドラフトプレートに関する基礎実験

次に、ドラフトプレートの有無による垂直噴流の風速の変化を調べることにした。実験方法としては $V_0=30\text{m/s}$ に固定し、総圧管を用いて Y 軸上での風速 V_c の分布を計測した。横軸に Y/D、縦軸に V_c/V_0 を取って、実験結果を表わした。その結果を図 4-4 に示す。

噴流のポテンシャル・コア部分である Y/D=5 までは両者の風速に違いはないが、Y/D=5 以降ではドラフトプレートを装着した場合はドラフトプレートがない場合と比べて、風速の減少がゆるやかになるという現象が見られた。これはドラフトプレートによって、噴流の拡がりが抑えられ、噴流の Y 軸方向の速度成分が増加したためであると考えられる。

次に、XY 断面での垂直噴流の風速分布の相違を横軸に X/D、縦軸に Y/D を取り、各点での速度 V とノズル出口速度 V_0 との比 V/V_0 をパラメータとして表わして、実験値をプロットした結果を図 4-5 に示す。ドラフトプレートを装着することにより、Y/D=12.5 まで噴流の拡がりが抑えられ、それ以降での噴流の拡がりが見られる。そのためドラフトプレートを装着していない噴流と比べて、噴流中心での速度の減少割合が小さく、拡がりの少ない噴流となっている。実際の浴槽内部の幅は狭く、空気噴出用のノズルから、入浴者の座っている椅子まで距離がある為、ドラフトプレートを装着することで、噴流の拡がりを抑え、中央部分の風速を増加させることは、身体洗浄の効率化につながり、送風機を小型化するのに有効であるといえる。

ドラフトプレートの有無による噴流状況の違いを図 4-2 に示したが、これは V_0 を 30m/s に固定し、噴流中に粒体を 1000 個混入して、XY 断面からの撮影を行なっている。ドラフトプレートを装着していない状態では、左右 2 つに分かれた粒体噴流となるため、噴流中央部分及び高い位置での粒体分布が薄くなっている。しかしドラフトプレートを装着することで、噴流は中央へと集中し、中央部分及び高い位置での粒体分布は増加する。これはドラフトプレートによって、粒体が効率良く循環するためであり¹⁸⁾、噴流 Y 軸方向の速度成分が増加したためであると考えられる。

また、この写真で見た粒体分布の違いを数値化する為、Y/D=20、40 での粒体の濃度分布を調べた。横軸に X/D、縦軸に単位時間、単位面積当りの衝突回数 N_c をとって表わした。その結果を図 4-6 に示す。

比較の為、ドラフトプレートを装着していない垂直噴流の粒体濃度分布(図 2-9)も併せて示す。ドラフトプレートを装着した場合の粒体噴流は垂直噴流の粒体濃度と比べて、X 方向の拡がりが少なくなっているが、Y/D=20、40 のいずれも中央部分の粒体濃度の増加が顕著

に見られた。これにより、粒子噴流の中央部分及び高い位置での粒子濃度を増加させるためには、ドラフトプレートの装着が有効であることがわかった。

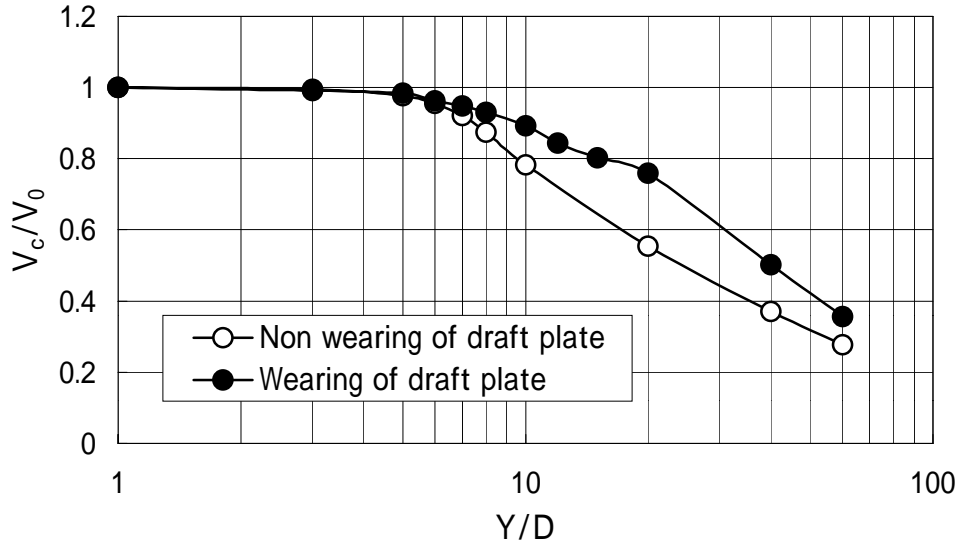


図 4-4 風速分布に及ぼすドラフトプレートの影響

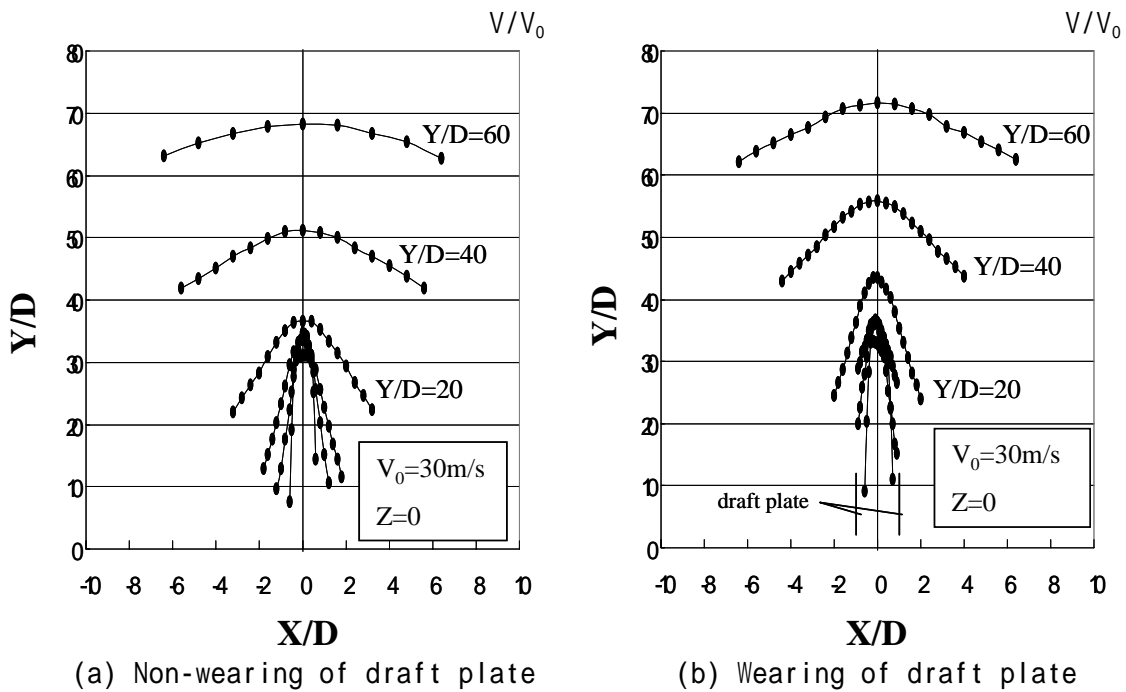
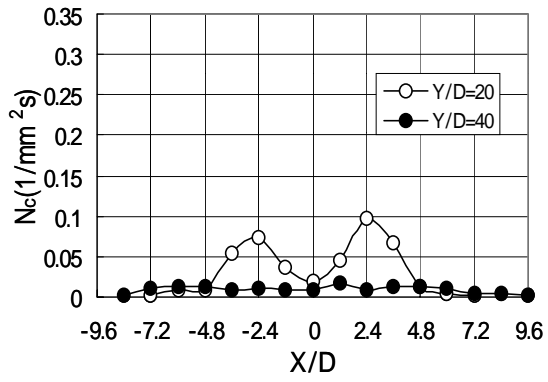
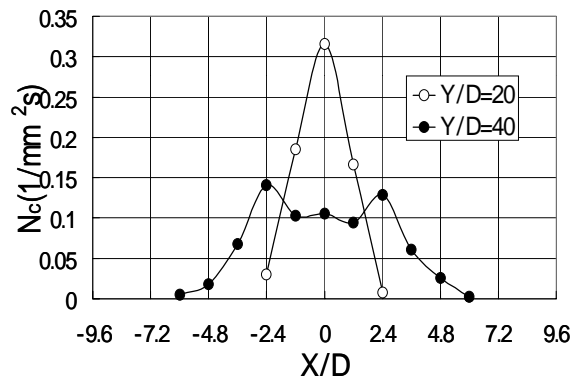


図 4-5 風速分布に及ぼすドラフトプレートの影響



(a) Non-wearing of draft plate



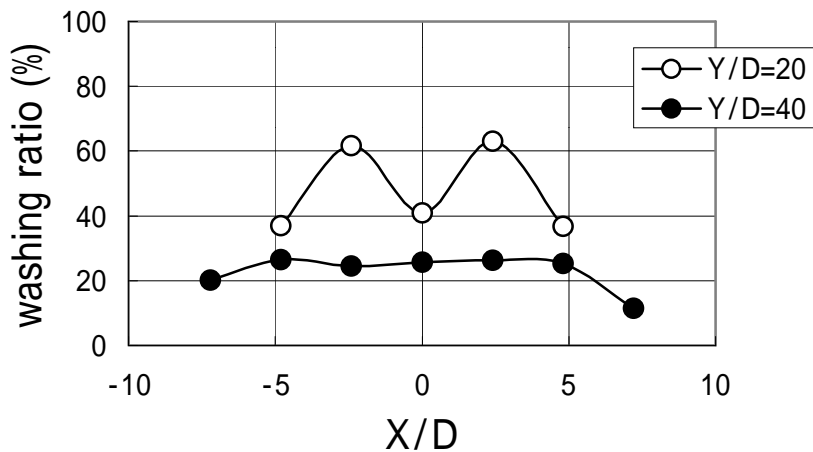
(b) Wearing of draft plate

図 4-6 粒子濃度に及ぼすドラフトプレートの影響

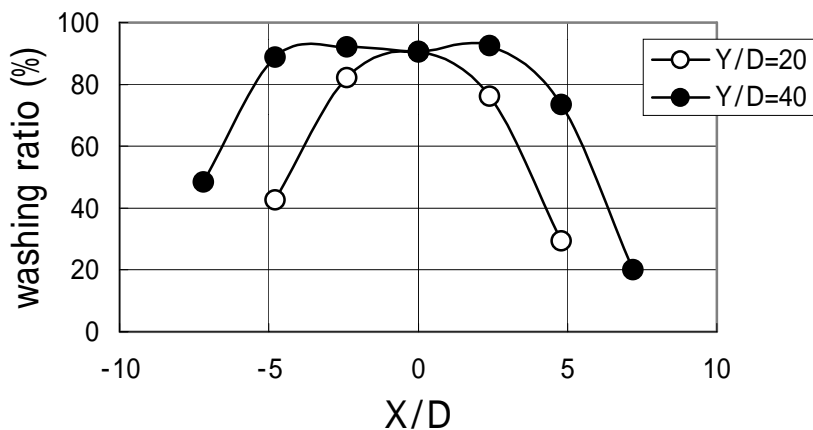
4-5 . ドラフトプレートを着用した場合の洗浄効果

次にドラフトプレートを着用することが、洗浄効果へ与える影響を調べるため、洗浄実験を行なった。実験条件としては V_0 を 30m/s に固定し、噴流中に粒体を 1000 個混入して、5 分間の洗浄を行なっている。横軸に X/D 、縦軸に洗浄率をとって表わした結果を図 4-7 に示す。

ドラフトプレートを着用していない垂直噴流の洗浄率は、図 4-6 の粒子濃度分布と同じく、 $Y/D=20$ の中央部分で低く、 $Y/D=40$ では全体的に低い結果となった。一方、ドラフトプレートを着用した場合の洗浄率は、 $Y/D=20$ 、40 共に、中央部分で 80% を超え、洗浄効果の大幅な向上が見られた。しかし、ドラフトプレートを着用した場合、洗浄範囲が狭くなってしまいう点だけが問題となってしまう。



(a) Non-wearing of draft plate



(b) Wearing of draft plate

図 4-7 洗浄率に及ぼすドラフトプレートの影響

4 - 6 . 結言

ドラフトプレートの選定及びドラフトプレートを設置することによる粒体噴流の特性、洗浄効果の違いについて実験を行ない、以下の結果を得た。

ドラフトプレートの高さは、 $H=100\text{mm}$ ($H/D=10$) に選ぶのが最適である。

ドラフトプレートを装着した場合、 $Y/D=5$ 以降での風速の減少が揺るやかになった。

ドラフトプレートを装着した場合、 X 方向の拡がりが少なくなっているが、 $Y/D=20$ 、 40 のいずれも中央部分での粒体濃度の増加が顕著に見られた。

ドラフトプレートを装着した場合の洗浄率は、 $Y/D=20$ 、 40 共に、中央部分で 80% を超え、洗浄効果の大幅な向上が見られた。しかし、噴流の拡がりが抑えられるため、洗浄範囲が狭くなってしまう。

第5章 ドラフトプレートによる粒子噴流の揺動化制御

5-1 . 緒言

第4章で述べたように、ドラフトプレートの装着は噴流中央部分での粒子濃度及び洗浄効果を向上させることに非常に効果があるが、同時に噴流の拡がりを抑えてしまうため、広範囲の洗浄を行なうことが出来ない。本章では、制御噴流を用いずにドラフトプレート自体を揺動させることによって、噴流の揺動化制御を試みたことを述べる。

5-2 . ドラフトプレートによる揺動化制御

ドラフトプレートを装着した場合、洗浄範囲が狭くなってしまうという問題点を解決するため、粒子噴流を揺動化制御することを考えた。しかし今回は、ポテンシャル・コア部を含む噴流出口部分をドラフトプレートで覆っているため、制御噴流による揺動化制御は難しい。そこで、ドラフトプレートを可動にし、左右に傾斜させることによって、噴流を強制的に揺動することを考えた。風速は $V_0=25\text{m/s}$ 、粒子の混入数は 1000 個で、粒子噴流をドラフトプレートにより揺動を行なっている状態を図 5-1 に示す。

次に、ドラフトプレートをどれだけ傾斜させれば、噴流を揺動出来るかを調べるため実験を行なった。風速は $V_0=20\text{m/s}$ 、 25m/s で行ない、粒子の混入数は 1000 個で、それぞれの角度で 3 回ずつ揺動出来るかどうかの判定を行なった。その結果を表 5-1 に示す。

右から左、左から右への揺動で少々角度にばらつきがあるが、約 10 度傾ければ、噴流を一応揺動させることが出来る。また風速は、多少の違いがあっても、揺動化に必要な角度に影響を与えないことがわかった。

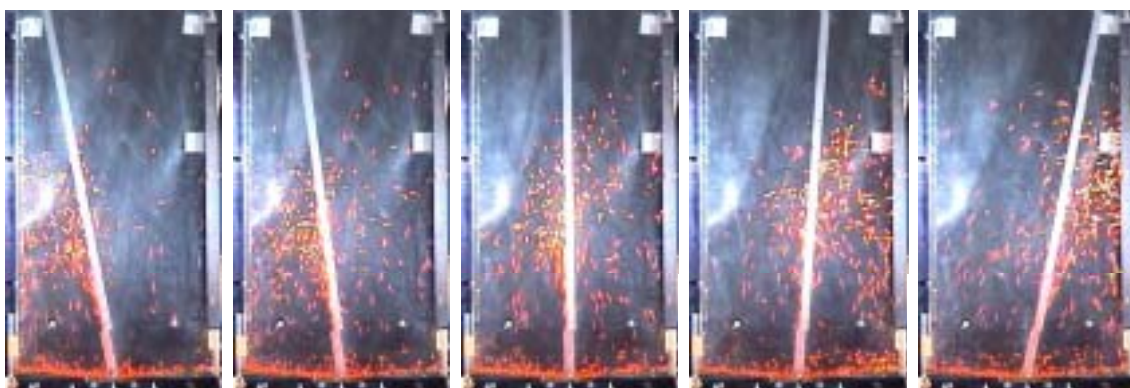


図 5-1 粒子噴流のドラフトプレートによる揺動

表 5-1 揺動可能な角度の測定

ドラフトプレート 100mm							
25m/s	右 左				左 右		
6度			×	8度	×	×	
7度				9度			
20m/s	右 左				左 右		
6度		×	×	9度	×	×	×
7度				10度			

：揺動可能、×：揺動不可能

5-3 . ドラフトプレートによる揺動化制御を行なった洗浄実験

最後にドラフトプレートを用いた揺動化制御を行ないながらの洗浄実験を行なった。実験条件としては V_0 を 30m/s に固定し、噴流中に粒体を 1000 個混入して、噴流を 5 秒間に 2 回、計 120 回揺動を行ないながら、5 分間の洗浄を行なった。結果を図 5-2 に示す。

洗浄効果は高かったが、洗浄範囲が狭く、特に $Y/D=20$ では揺動化制御を行っていない状態と同じ範囲でしか洗浄が出来ていないという結果を得た。これは、ドラフトプレートの揺動化制御を浴槽上部から差し込んだ棒で行なっているため、装置の構造上、左右 15 度程度までしかドラフトプレートを傾斜できないことが原因だと考えられる。しかし $Y/D=40$ では、ドラフトプレートを 15 度左右に振るだけで、揺動化制御を行わない状態での洗浄範囲と比べて約 1.7 倍程度、洗浄範囲が広がっており、広がった部分の洗浄効果も高い。ドラフトプレートの操作方法を検討し、左右 45 度程度まで傾斜できるようにすれば、広範囲で均一な洗浄効果が期待できる。

また粒体噴流の揺動化制御方法にドラフトプレートを採用すれば、制御噴流の必要も無く、揺動化制御の為に何か特別な装置を設ける必要も無くなる為、装置全体の小型化・簡易化に役立つことが考えられる。

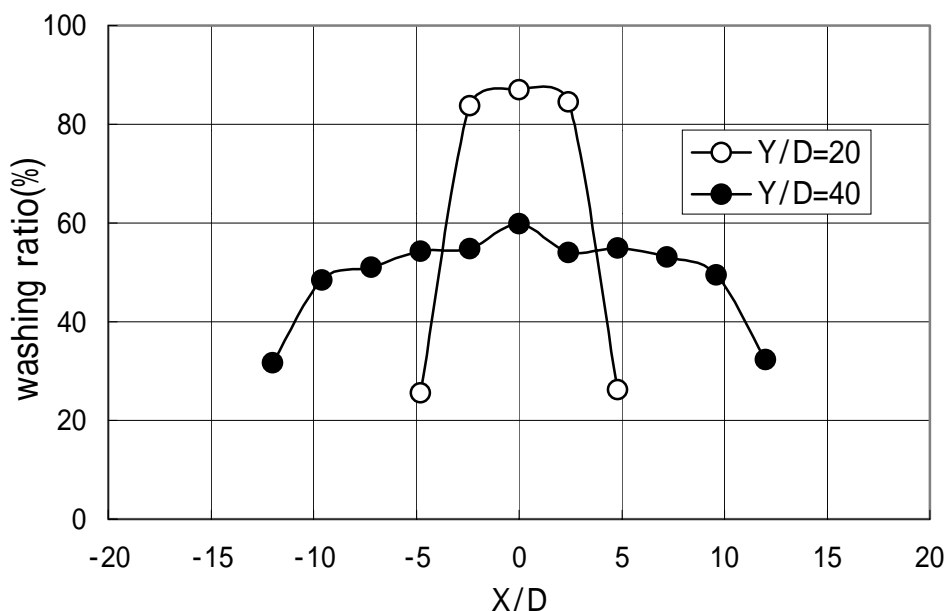


図 5-2 ドラフトプレートで揺動化制御を行なった洗浄率

5 - 4 . 結言

ドラフトプレートを用い噴流の揺動化制御を試みて、以下の結果を得た。

ドラフトプレートを左右に約 10 度傾斜させることによって、噴流を一応揺動化することはできる。

Y/D=40 での洗浄範囲はドラフトプレートを左右に 15 度振るだけでも、揺動化を行わない状態に比べて約 1.7 倍の拡がりを持ち、拡がった部分の洗浄効果も高い。左右 45 度程度まで揺動できるようにすれば、広範囲で均一に洗浄が出来て、しかも高い洗浄効果が期待できる。

粒体噴流の揺動化制御方法にドラフトプレートを採用すれば、制御噴流ノズルの設置も必要が無くなり、また、揺動化制御の為に何か特別な装置を設ける必要も無くなる為、装置全体の小型化・簡易化に役立つと考えられる。

第6章 まとめ

粒体噴流の制御について、実験用の小型浴槽を製作し、粒体噴流の様々な制御方法の検討を行なった。また、粒体噴流の制御が洗浄効果に与える影響を調べるために洗浄実験を行なって、以下の結果を得た。これらの結果は現在製作が進んでいる、新しい実証試験装置の設計に生かされている。

- (1) 壁面に付着している主噴流を、それと平行に制御噴流を流すことによって、制御噴流側へ主噴流を引きつけ、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) 制御噴流を導入するノズルの位置には最適な位置がある。
- (3) 制御噴流を用いて、噴流を揺動化した時に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。
- (4) ドラフトプレートを着用する事で、ドラフトプレートを着用していない場合に比べて、以下のように噴流状況が改善された。
 - 噴流下流での流速の維持
 - 粒体噴流の中央部及び高い位置での粒体濃度の増加
 - 粒体噴流による洗浄効果の向上
- (5) (4)に示したような噴流状況の改善によって、送風機の必要風量を低減させ、送風機を小型化できることが予想される。
- (6) ドラフトプレートを強制的に傾斜させることによって、粒体噴流を揺動させることが出来る。ドラフトプレートによって揺動させるにはドラフトプレートを約10度の傾斜させる必要がある。
- (7) ドラフトプレートを左右に約45度傾斜させて、粒体噴流を揺動させながら洗浄を行うことによって、高い洗浄効果が広範囲に均一に広がることが予想される。また、粒体噴流の揺動化制御にドラフトプレートを用いることによって、装置全体の小型化・簡易化に役立つ。

記号表

- D : ノズル幅 (mm)
H : ドラフトプレート高さ (mm)
 V_0 : ノズル出口風速 (m/s)
 V_c : 噴流中央断面風速 (m/s)
 N_c : 平均個数分布 ($1/\text{mm}^2/\text{s}$)
 X_s : 制御ノズル位置 (mm)
 Q_s : 制御ノズル流量 (m^3/s)

参考文献

- 1) Mathur, K.B. and P.E.Gishler: *AIChE J.*, 1, (1955)157-164.
- 2) Mathur, K.B. and N.Epstein: "Spouted Beds", Academic Press, New York (1974).
- 3) 横川明: 噴流層における気体・粒体流動と化学工業装置、日本学術会議第3回混相流シンポジウム論文集(1984), 205-226.
- 4) 横川明: 噴流層における流動化の状態、日本機械学会論文集、35-277(1969-9), 1903.
- 5) 横川明: 噴流層における圧力降下、日本機械学会論文集、36-283(1970-3), 375.
- 6) 横川明: 噴流層における流動化の条件、日本機械学会論文集、36-283(1970-3), 365.
- 7) 横川明: 噴流層における環状粒子層の粒体の軌跡、日本機械学会論文集、36-287(1970-7), 1117.
- 8) 横川明: オリフィスからの粒体の流出速度、日本機械学会論文集、37-301(1971-9), 1688.
- 9) 横川明: 噴流層における環状粒子層の粒体の降下速度、日本機械学会論文集、37-302(1971-10), 1979.
- 10) 横川明: 噴流層における気柱内部の流体の流れ、日本機械学会論文集、37-301(1971-11), 2135.
- 11) 横川明: 噴流層における環状粒子層の流体の流れ、日本機械学会論文集、38-305(1972-1), 148.
- 12) 横川明: 噴流層における静圧分布とたい積圧力分布、日本機械学会論文集、38-309(1972-5), 1081.
- 13) 横川明: 噴流層底部の穴からの粒体の流出速度、日本機械学会論文集、39-320

(1973-4), 1255.

- 14) 横川明ほか: ヒューマンフレンドリー・ロボット PHASE2、高知工科大学研究報告書(2001) 11-20.
- 15) 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
- 16) 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
- 17) 楠目隆: やまだ荘だより、第6号、社会福祉法人 土佐香美福祉会、(2001.11)、1-4.
- 18) 幡手泰雄、伊地知和也、上村芳三: ドラフトチューブ付噴流層の流動特性と応用技術、粉体工学会誌、Vol.34、No.5(1997) 343-360
- 19) 本川高男、横川明、光森琢真、山崎敬一、山中義也、松村次展: 粒体噴流化式身体洗浄における粒体物性の影響、噴流工学、Vol.18、No.1(2001)、16-22.
- 20) 本川高男、横川明、光森琢真、山崎敬一、山中義也、松村次展: 粒体噴流化式人体洗浄装置の開発(第1報 2次元空気噴流構造と粒体による洗浄効果)、設計工学、Vol.36、No.4(2001.4)、28-34.
- 21) 本川高男、横川明、光森琢真、山崎敬一、山中義也、松村次展: 粒体噴流による身体の均一洗浄について、噴流工学、Vol.18、No.1(2001)、9-15.
- 22) 本川高男、横川明、光森琢真、山崎敬一、山中義也、松村次展: 粒体噴流化式人体洗浄装置の開発(第2報 粒体洗浄における衝突速度及び衝突角度の影響と洗浄効果の予測)、設計工学、Vol.36、No.11(2001.11)、36-42.

謝 辞

終わりに、本研究を進めるに当たって終始懇切なご指導、適切なお助言を頂きました高知工科大学、横川明教授、河田耕一教授、長尾高明教授、高知県工業技術センター、本川高男様、兼松エンジニアリング株式会社、山中義也様、松村次展様、松本泰典様に対しまして、深く感謝の意を表します。また実験において協力していただいた高知工科大学横川研究室の皆様に対して心からお礼を申し上げます。

光森 琢真