

混相流噴流の金属表面加工および身体洗淨  
への応用

2001年

本川高男

# 目 次

	頁
第 1 章 緒論	1
1 . 1 緒言	
1 . 2 従来の研究	
1 . 3 本研究の目的	
第 2 章 合流水噴流による材料加工特性	8
2 . 1 緒言	
2 . 2 実験方法	
2 . 3 合流噴流による加工特性	
2 . 4 結言	
第 3 章 合流噴流の基本特性	18
3 . 1 緒言	
3 . 2 噴流構造の実験方法	
3 . 3 実験結果	
3 . 3 . 1 合流噴流の特性	
3 . 3 . 2 鋼球の加速特性	
3 . 4 結言	
第 4 章 合流水噴流における材料表面加工特性と応用	34
4 . 1 緒言	
4 . 2 実験方法	
4 . 3 実験結果および考察	
4 . 3 . 1 ウォ - タ - ジェットによる壊食特性	
4 . 3 . 2 アブレイブジェットによる壊食特性	
4 . 3 . 3 表面加工への適用	
4 . 4 結言	
第 5 章 粒子噴流化式人体洗浄装置用二次元空気噴流の基本特性	54
5 . 1 緒言	
5 . 2 実験装置および方法	
5 . 3 実験結果	
5 . 3 . 1 風速分布	
5 . 3 . 2 噴流の広がり	
5 . 3 . 3 噴流中の粒子の分布	
5 . 3 . 4 洗浄効果	
5 . 4 結言	

第6章 粒体噴流化式洗浄における洗浄率に与える粒体の衝突速度及び衝突角度の影響と洗浄率の予測	74
6.1 緒言	
6.2 実験方法	
6.3 実験結果	
6.3.1 噴流中の粒体の分布に及ぼす傾斜板角度の影響	
6.3.2 粒体の軌跡	
6.3.3 計算による粒体の軌跡	
6.3.4 洗浄率に与える粒体の衝突速度、角度の影響	
6.3.5 洗浄結果および洗浄予測	
6.4 結言	
第7章 粒体噴流化式人体洗浄装置における均一洗浄	108
7.1 緒言	
7.2 実験方法	
7.3 実験結果	
7.3.1 壁面噴流の風速分布と粒体の分布	
7.3.2 噴流制御のシミュレーション解析	
7.3.3 制御噴流の最適化	
7.3.4 洗浄結果	
7.4 結言	
第8章 粒体噴流化式人体洗浄における粒体物性の影響	120
8.1 緒言	
8.2 実験方法	
8.3 実験結果	
8.3.1 噴流中の粒体の分布	
8.3.2 洗浄結果	
8.3.3 粒体物性の洗浄率への影響	
8.4 結言	
第9章 実用化のための試作機開発	131
9.1 緒言	
9.2 噴流化と粒体選定について	
9.2.1 実験装置	
9.2.2 実験結果	
9.3 試作機概要	
9.4 洗浄効果について	
9.5 官能評価	
9.6 結言	

第10章 結論	146
10.1 2章から4章までのまとめ	
10.2 5章から9章までのまとめ	
10.3 今後の課題	
謝辞	151

## 記 号

- a : 粒体の投影面積
- $b_{1/2}$  : 速度が噴流中心速度の1/2になる点で表した噴流幅
- B : 噴流幅
- $C_D$  : 流体の抵抗係数
- $C_{RL}$  : 回転による揚力係数
- c : Reichardtの拡散係数 0.08
- C : 水の音速
- D : ノズル幅 (スリット幅)
- $D_s$  : 鋼球の直径
- d : ノズル幅の1/2
- $d_s$  : 粒体の直径
- $d_k$  : 鋼球の圧痕直径
- $d_0$  : ノズル内径
- F : 鋼球の押し込み力
- $F_D$  : 流体抵抗
- $F_{RL}$  : 回転による揚力
- $F_{SL}$  : 速度勾配による揚力
- $F_G$  : 重力
- $F_F$  : 浮力
- $F_V$  : 加速抗力
- g : 重力加速度
- H : ノズルの長さ
- h : 合流点から加工表面までの距離 (スタンドオフ距離)
- $h_d$  : 鋼球の圧痕深さ
- J : 噴流の運動エネルギー
- $J_a$  : 空気の質量流束
- $J_w$  : 水の質量流束
- L : 傾斜面上の端からの距離
- m : 質量
- N : 実験模型への粒体の投入数
- $N_c$  : ロ - ドセルのセンサ - 面に単位時間, 単位面積当たりに衝突する粒体の数
- P : 圧力 (Pa)
- $P_0$  : ノズル出口または、合流点における噴流中心圧力
- $P_c$  : 噴流中心軸上の圧力

$P_m$  : 噴流断面上の最大圧力  
 $P_s$  : せき止め圧力  
 $P_w$  : 水の衝撃圧力  
 $Q$  : 空気流量  
 $Q_s$  : 制御噴流の流量  
 $R$  : 気体定数  
 $Re$  : レイノルズ数  
 $Re_r$  : 粒体の回転によるレイノルズ数  
 $Re_s$  : 抵抗係数 $C$ 算出のためのレイノルズ数  
 $r_s$  : 鋼球の半径  
 $T$  : 噴流の絶対温度  
 $u_a$  : 空気噴流速度  
 $u_s$  : 粒体の速度  
 $u_{ax}$  : 空気噴流のX軸方向の速度  
 $u_{ay}$  : 空気噴流のY軸方向の速度  
 $u_{sx}$  : 粒体のX軸方向の速度  
 $u_{sy}$  : 粒体のY軸方向の速度  
 $u_r$  : 粒体と空気速度の相対速度  
 $u_{s0}$  : 粒体の噴流への突入速度  
 $V$  : 速度  
 $V_w$  : 水速度  
 $V_s$  : 鋼球の速度  
 $V_0$  : ノズル出口速度  
 $V_c$  : 噴流中心軸上の速度  
 $V_{co}$  : 粒体の衝突速度  
 $X$  : ノズル出口中心から噴流幅方向の距離  
 $X_g$  : ノズル出口から合流点までの距離  
 $Y$  : ノズル出口中心から噴流主軸方向の距離  
 $Z$  : ノズル出口中心からノズル方向の距離  
 $W$  : 洗浄率  
 $W_0$  : バタ - を塗布する前の白色度または反射率  
 $W_s$  : 洗浄前の白色度または反射率  
 $W_w$  : 洗浄後の白色度または反射率  
    : 4孔合流ノズルからの噴流合流角度および傾斜板の傾斜角  
    : 空気の体積割合 ( 空気の体積 / ( 空気体積 + 水体積 ) )  
 $\mu_a$  : 空気の粘度

- a : 動粘度
- : 水噴流と加工物とのなす角度および粒体の衝突角
- : 密度
- c : 銅の密度
- a : 空気の密度
- s : 鋼球および粒体の密度
- L : 空気と水が混合した状態の噴流の密度
- w : 水の密度
- s : 粒体の角速度
- r : 空気速度に対する相対角速度
- o : 噴流突入時の粒体の角速度
- ( ) : 誤差関数

## 第1章 緒論

### 1.1 緒言

水または空気などの噴流を利用する技術は多方面で応用され実用されている。著者は空気または水噴流に粉体を混入させることによって物体の加工、人体の洗浄などを効率的に行う方法について研究開発を行った。まず、銀口 - で接合した機械部品の余分な銀口 - の除去及びコンクリ - トブロック製作用金型に付着したセメント除去に水噴流に研磨材を混入させたアプレシブウォ - タ - ジェットを適用した。通常のアプレシブノズルは研磨材によるノズル摩耗の問題があるため<sup>(1)</sup>、ノズル摩耗が無く、表面加工に適したノズルの開発を行い、それを金属の表面加工に応用した。

次に、少子高齢化社会を向かえて、介護施設の現場から要望の強い入浴の自動化装置の開発を、暖かい空気噴流に比較的大きな粒体を混入させて温風と共に身体に吹き付け、粒体の衝撃作用や摩擦作用により洗浄を行う全く新しい方式（粒子噴流化方式）で行った。

これらはいずれも、固 - 液、固 - 気二相噴流の応用であり、水及び空気のみ単層噴流では効果が得られにくいものである。

### 1.2 従来の研究

高速の水噴流を工学的に応用する研究は1916年ソ連において石炭採掘への応用研究が最初と言われている<sup>(1)</sup>。そして、1930年代には石炭採掘への実用化が行われている。

日本で最初に高圧の水噴流を切断や穴開け加工に応用したのは、1960年代に今中らが、高速化した航空機の雨食現象にヒントを得て、加工に応用したのが最初である<sup>(2, 3, 4, 5)</sup>。今中らはポンプ圧力数10MPa ~ 1000MPa、ノズル移動速度、1.06mm/sから25mm/sの範囲で金属、ゴム、プラスチック、ガラス、セラミックス、木材など各種材料の切断および穴開けの実験を行っている。それらから、噴流による単位時間、単位面積当たりには供給される加工エネルギーは $1/2 \cdot \rho \cdot U^3$ （ただし、 $\rho$ は水の密度、 $U$ は水の速度）で計算可能であり、単位時間当たりの切断体積はノズル移動速度が一定の場合、 $P^{2/3}$ （ $P$ は水の圧力）に比例するとしている<sup>(5)</sup>。また、各種材料の単位体積を除去するのに要する加工エネルギーは実験範囲内で $2.2 \times 10^3 \text{ J/cm}^3 \sim 3.8 \times 10^3 \text{ J/cm}^3$ の範囲であったとしている。

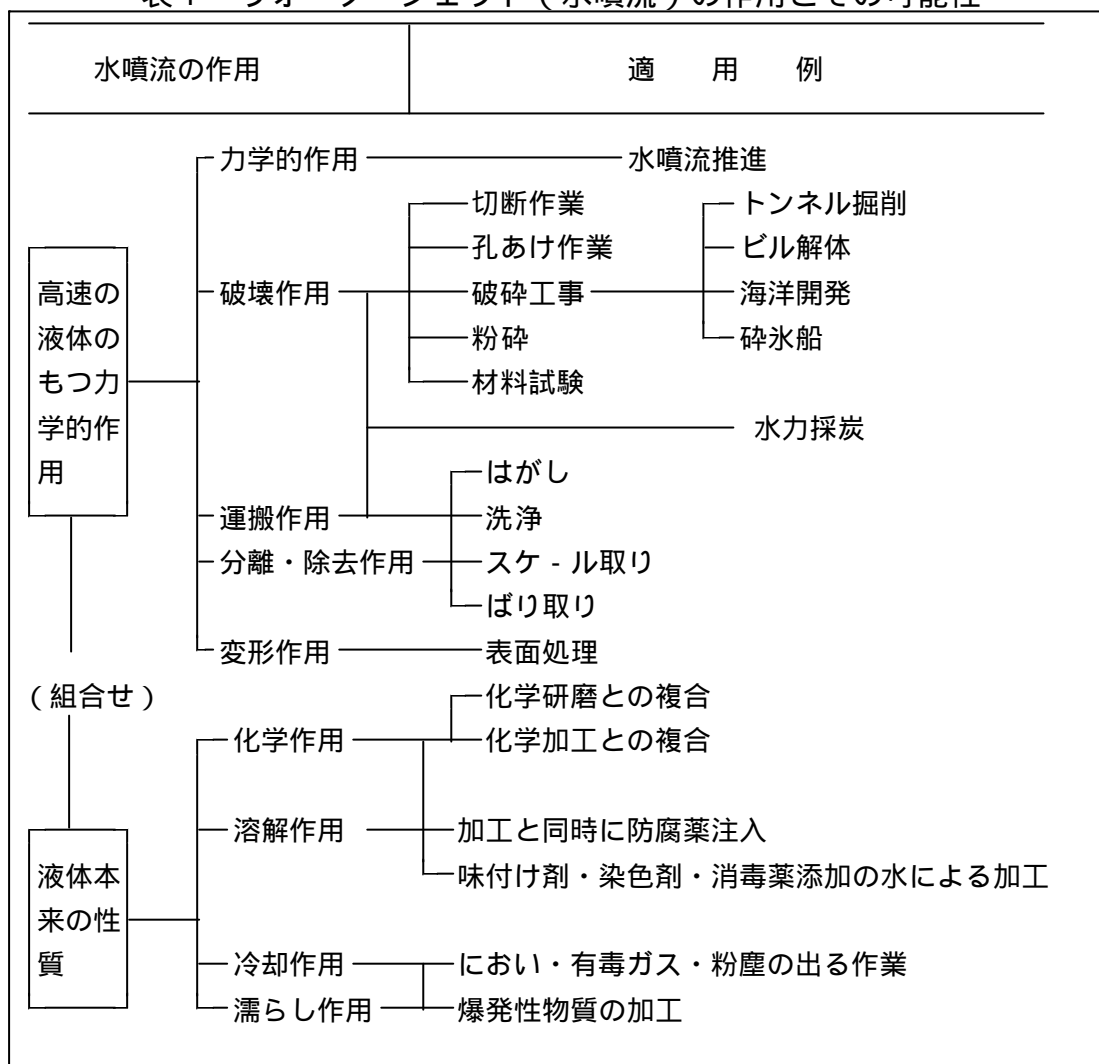
これを機会にウォ - タ - ジェット（水噴流）による各種材料の切断への応用研究が行われた<sup>(6, 7, 8, 9, 10, 11, 12)</sup>。

高圧の水噴流は単位面積当たりの加工エネルギー - がきわめて大きく、加工物に作用する力が局所的、衝撃的であり、加工部所の温度上昇が少ない特徴を持つ<sup>(1)</sup>。この特徴を利用して、ケ - キ<sup>(6)</sup>や布およびダンボ - ル等の紙などの柔らかい物から、金属、セラミックスなどの硬い材料の切断に応用されている。さらには、漁船や漁網についた貝殻の除去や、コンクリ - トのはつりにも利用されている。また噴流は柔らかい材料を優先的に壊食する特徴を持つ事から、肝臓の手術において、血管を傷つけることなく疾患部のみ除去する手術用のメスとして利用されている<sup>(7)</sup>。

表1にはウォ - タ - ジェットの応用範囲を示した<sup>(1)</sup>。



表1 ウォータージェット（水噴流）の作用とその可能性



また、加工特性に大きな影響を与えるノズル形状については、吉沢らが<sup>(13)</sup> レンズ状ノズルを用いて、ノズル長さとお口径の関係および出口傾斜角の影響について最も良い性能を示す関係を求めている。さらに、高速噴流構造について1970年代に柳井田らが<sup>(14、16)</sup> 詳細に調べて、初期区長Xによりノズル性能が判定される事を表した。

1990年代に小林らは<sup>(15)</sup> ノズル内面の加工仕上げ精度が、ノズル内での噴流形成及び噴流の下流方向での崩壊過程に影響を与え、加工特性は大きく変わり、再現性のある壊食特性を得るにはノズル内面にリマ加工を行わなければならないとしている。

高速のウォータージェットの噴流構造については柳井田らが<sup>(14、16、17)</sup> 詳細に調べて、ノズル性能の判定できる範囲、および破碎効果に影響を及ぼす噴流連続長が存在する事を明らかにした。その後、小林らは<sup>(18)</sup> 金属材料の壊食過程を調べて、ノズルからの距離によって、二つのピクが存在し、ノズルに近い第一ピクは噴流の掘削作用が、第二ピクは液塊や液滴の衝突による衝撃破壊が支配するとしている。

また、ウォータージェットに砥粒などの研磨材を混入させて、加工能率を向上させたアプレシブウォータージェットの研究も今中らが最初である<sup>(2、3、4、5)</sup>。比較的軟質の延性

材料・高分子材料の切断や穴開けにはウォータージェットは効果的であるが、脆性材料ではひび割れが生じて加工精度は必ずしも良くないことから、ひび割れを微小破砕に変えることを目的に研磨材を混入させた実験を行っている。その結果、単位加工体積あたりの所要エネルギーは研磨材を添加しない場合より少なくなることを報告している。

アブレシブウォータージェットは加工能率が大きくなる利点がある一方、ノズルが研磨材で摩耗し、切断幅、切断深さなどの加工特性が変化するという欠点がある。小林らは<sup>(19)</sup>、それまでの報告をまとめて、アブレシブノズルをノズル装置中心軸に沿って噴射するウォータージェットの周辺より研磨材を吹き込み、水と研磨材を混合して噴射するタイプと、ノズル装置中心軸に沿って研磨材を噴射すると同時に、その周辺より高速のウォータージェットを噴射して、水と研磨材を混合するタイプに分類できるとしている。そして、このタイプは噴流に研磨材が均一に混合されないこと、またこのタイプはノズルが摩耗される欠点を指摘している。これらの欠点を克服するために、このタイプのノズルを改良し、水ノズルの外筒内面を紡錘形にして、そこに、スラリポンプから流送された研磨材と圧縮空気を紡錘形内面の切線方向に導入して、旋回流をつくり、高圧ジェットと均一に混合させて、ノズルから噴出させる装置を開発している。このノズル装置を用いて、鋼板の切断を行っているが、これでも噴出部のノズルは摩耗すると思われる。

また、濱田らは<sup>(19, 20)</sup>研磨材によるノズル摩耗が無く、かつ噴流中に均一に混合されるノズルとして環状ノズルに着目し、内管から硬球を噴流中心に導入して硬球の加速特性を調べ、同じく内管から研磨材を導入して、噴流中に均一に混入する技術について報告している。

また、研磨材を混入させたアブレシブジェットは研磨材の再利用のための再処理や管理が必要になる。処理費用を軽減し、作業環境改善のため、水を研磨材の代わりに使用する研究も行われている<sup>(21)</sup>。

表面加工や表面洗浄への利用として、スケール除去<sup>(22)</sup>やショットピーニングへの応用<sup>(23, 24)</sup>がある。

一方、空気噴流は水噴流と比べると加工エネルギーが小さいので主に洗浄に利用されているものの、小林らは<sup>(25)</sup>高速空気ジェットおよびアブレシブを混入させたジェットで、ポリスチレン及びアルミニウムの加工を行い、ラバルノズルで空気速度を超音速にすると壊食量は大きくなり、アブレシブエアジェットでは壊食量がアブレシブ速度の3乗に比例すると報告している。工業的には実用されているのは、バリ取り、酸化スケール除去を目的に空気噴流に砂等を混入させたショットブラストの技術が用いられている。空気噴流のみでは、切削の切り粉除去や、クリンルームへの入り口でのエアシャワー洗浄、またネギなどの農作物の洗浄などに利用されている。

### 1.3 本研究の目的

著者が勤務する高知県内の企業からは、熟練した技能が要求される自由曲面の研磨の自動化に対して根強い要望がある。本研究では銀口で接合した機械部品の接合部(幅10mm)に、はみ出した余分な口材除去の自動化と、コンクリートブロック製作用金型(1000mm×1500mm)の再使用のための、金型に付着したコンクリート除去加工の自動化を取り上げた。これらはいずれも母材と除去物質の材質が異なり、また除去加工による母材への影響

を極力少なくする事が要求されるため、アブレシブウォータージェットに着目した。しかし、従来のアブレシブウォータージェットは、高圧のウォータージェットにアブレシブ(研磨材)を混入させてアブレシブノズルから噴出させる方法が取られているため、アブレシブによりノズルが摩耗され、使用時間と共に噴流断面形状が変形し、加工能力、加工幅が変化する問題がある。さらに、銀口除去のように狭い範囲からコンクリート金型の広い面積までの加工を一つのノズルで対応させるには、従来のアブレシブノズルでは不可能である。そのため、ノズル摩耗が無く、かつ広範囲な表面加工に適したノズル開発を行った。

摩耗の無いノズルとして、環状ノズルに内管を装着させ、内管からアブレシブを噴流中心に供給させる方法が有効である。この方法では、内管から空気を吸い込ませた噴流は空気を遮断した場合及び内管が無い場合より、噴流の広がり角は収束し、遠くまで高圧を維持する事が報告されている<sup>(20)</sup>。内管から空気と共にアブレシブを供給すればアブレシブは噴流内に均一に混入される。しかも、環状噴流では噴流の衝突により、噴流内部は負圧になり、この事がアブレシブの吸引作用として働き、外部からのエネルギー供給なしで自動吸引が可能である。しかし、環状ノズルは断面積が比較的大きくなり、高圧噴流を発生させるには、環状スリット幅を小さくするか、大流量のポンプが必要となる。また、単一ノズルの噴流と比べて噴流断面積が大きくなる欠点がある<sup>(26,27)</sup>。

この欠点を克服する方法として、環状ノズルの代わりに、単一ノズルを環状に複数個配置して、下流の一点で複数ノズルからの噴流を衝突させて一つの噴流に合流させ、その合流点に別系統から供給されたアブレシブを噴流に混入させれば、ノズルの摩耗が無く、ポンプ流量も少なく高圧のアブレシブジェットが得られ、均一な表面加工に大きく貢献できるものと考えられる<sup>(28)</sup>。また、合流点から測ったスタンドオフ距離をコントロールする事で、加工幅の調整が可能となる。そのため、本研究においては、同心円上に4個の単一ノズルを配置した(4孔合流ノズル)ノズルを試作して、加工量と表面粗さに及ぼす、合流角度、アブレシブ粒径、ポンプ吐出圧力、スタンドオフ距離、ノズル移動速度、被加工物への噴流衝突角度の影響等について、17~120MPaの範囲で実験的に調べた。そして、鉄板の酸化スケール除去と、銀口除去に応用して、均一な加工が要求される表面加工への4孔合流ノズルの有用性を示した。

2000年の厚生白書による人口予測では、2015年には65歳以上の高齢化比率(全人口に占める65歳以上の人口比率)は25.2%となり、4人に1人は高齢者の社会になる。さらに、2007年から総人口は減少に転じると共に、高齢者が子供と同居する割合も年々減少し、2010年では65~69歳では32.7%、85歳以上においても、54.6%しか同居しない事が予測されている。この事が、少子高齢化社会における介護の問題が社会化している1原因と考える。

こうした人口予測、同居予測から、高齢者の多くは各種の介護施設を利用する事が容易に予想され、また介護施設は年々増加している。実態で示せば各種老人福祉施設は1980年には全国4,610施設であったものが、1998年には19,106施設と4倍に増加している。このように、施設介護が増加する中で、介護現場からは、介護労働力の低減を望む声が増えてきている。高齢者介護の主なものは、食事介護、排泄介護、入浴介護などが上げられるが、その中で重労働であるのは、入浴時の介護である。入浴時の介護を詳しく工程分けすると、脱衣、入浴、体を洗う(洗浄)、乾燥、着衣となる、この中でも最も重労働で

人手を要するのが洗浄工程である。この工程の自動化を図り、省力化を図る事で、厚生省から決められている、週2回の入浴介護を週3回～4回の入浴も可能となる。これは、介護施設にとっても、介護者、高齢者にとっても大きなメリットとなる。

入浴介護機器としては、今まで、温シャワー - 法、バブルジェット法、回転ブラシ法などが開発されているものの、実用的でなかったり、洗浄率が低い問題がある。そこで、洗浄力を向上させ、自動化が容易である、暖かい空気噴流に弾力性のある比較的大きな粒体を混入させて、粒体の衝撃力、摩擦力によって、身体の洗浄を行う自動洗浄装置の開発を産学官で行った。まず、浴槽に見立てた実験模型の浴槽底部にスリットを設けて、模型に投入した粒体を空気噴流で吹き上げ、噴流の基本構造、噴流中の粒体分布と洗浄率の関係を調べた<sup>(29)</sup>。また、二次元噴流の揺動による均一洗浄効果<sup>(30)</sup>、粒体物性の違いによる洗浄効果<sup>(31)</sup>、粒体の噴流中での運動計測と数値計算の比較、及び洗浄率の予測など、実験を中心に行ない、自動洗浄装置の開発に必要な基礎データとした。開発しようとしている自動洗浄装置での入浴順序は、脱衣、椅子に座る、首から下を覆う、温シャワー - と洗浄液で体を濡らす、温風と粒体による洗浄、温シャワー - で洗い流す、温風による乾燥、着衣となる。この特長は通常の浴槽を使う入浴と比べて役1/10の水で済む。さらに、洗浄効果と共に、肌の活性化及び保温効果が期待でき、介護者ともコミニケーションを取りながら入浴可能などの特長がある。さらに、小型化を図れば、浴室でなくても室内で入浴可能となる。

また、粒体の衝撃による皮膚の活性化を利用したエステ機器、保温効果を利用したりハビリ機器などの応用や、柔らかい粒体を用いれば、壊れやすいガラス製品、電子機器、卵、芋類の洗浄にも応用可能と考えられる。

水や空気の流体単独の噴流では無く、それに固体を混入させた、固 - 液二相噴流、固 - 気二相噴流を利用した、金属部品の表面加工や身体洗浄への応用を目的とした一連の研究成果をまとめたものである<sup>(26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38)</sup>。

## 参考文献

- (1) ウォ - タ - ジェット技術辞典：日本ウォ - タ - ジェット学会編、丸善
- (2) 今中治：水を利用した新しい加工法、応用機械工学、No.1 (1968)
- (3) 今中治：新しい噴射加工法、マシニスト、No.1 (1969)
- (4) 今中治：無機材料の精密加工法、機械の研究、第22巻、第5号(1970)
- (5) 今中治、藤野誠二、篠原一好：高速の液体ジェットによる材料加工とその応用、金属材料、第9巻、第9号
- (6) 伊東光一：ウォ - タ - ジェット切断の食品への応用、噴流工学 Vol. 16、No.2(1999)47-48
- (7) 柿田章、吉田宗紀：ウォ - タ - ジェットの医学への応用、噴流工学 Vol.16、No.1 (1999)61-66
- (8) 木下豊弘：高速液噴流技術とその応用、Journal of the J.S.M.E.、Vol. 76、No. 649 (1976) 128-136

- ( 9 ) 中谷正雄、佐竹修一：アプレシブジェットの切断特性について、ウォ - タ - ジェット、Vol.1、No.2(1984)14-22
- ( 1 0 ) 小林良二：アプレシブジェットによる鉄材の切断について、ウォ - タ - ジェット、Vol.1、No.1(1984)16-22
- ( 1 1 ) 幾世橋広：ウォ - タ - ジェットによる高温耐火物の孔明け加工に及ぼす耐火物温度とスタンドオフ距離の影響 ( 2 )、ウォ - タ - ジェット、Vol.11、No.3.4 (1994) 20-35
- ( 1 2 ) 柳内拙郎、吉田正二：チタン材のアプレシブジェット加工、素形材、Vol.9(1985) 25-30
- ( 1 3 ) 吉沢幸雄、川島俊夫、柳井田勝哉：噴流特性によるノズル性能の判定について、日本鋳業会誌、Vol.81、No.930 (1965-10) 913-918
- ( 1 4 ) 柳井田勝哉、大橋昭：気中高速水噴流特性に関する研究 ( 第 1 報 )、日本鋳業会誌、vol.93、No.1072(1977-6)423-428
- ( 1 5 ) 小林陵二、新井隆景：ウォ - タ - ジェット特性に対するノズル仕上げ精度の影響、噴流工学、Vol.15、No.2 (1998)10-13
- ( 1 6 ) 柳井田勝哉、大橋昭：気中高速水噴流特性に関する研究 ( 第 2 報 )、日本鋳業会誌、Vol.93、No.1073(1977-7)489-494
- ( 1 7 ) 柳井田勝哉：噴流の基本特性について、噴流工学、Vol.12 No.2(1995)23-32
- ( 1 8 ) 小林陵二、新井隆景、山田奏司：ウォ - タ - ジェット加工技術における噴流の構造と金属材料の壊食過程、日本機械学会論文集 ( B 編 ) 5 3 巻 4 8 9 号 ( 昭 6 2 - 5 ) 1539-1542
- ( 1 9 ) 濱田聡美、神山新一、山崎堯右、坪田誠：環状噴流による硬球の加速特性に関する研究、日本機械学会論文集 ( B 編 )、5 5 巻 5 1 1 号 ( 1 9 8 9 - 3 ) 670-675
- ( 2 0 ) 濱田聡美、神山新一、山崎堯右、坪田誠、田内一成：環状気液二相噴流とアプレシブ衝突特性、日本機械学会論文集 ( B 編 ) 5 6 巻 5 2 6 号 ( 1 9 9 0 - 6 ) 1665-1668
- ( 2 1 ) 幾世橋広、半田啓二：極低温気流中における水滴の凍結、噴流工学、Vol.15、No.1 (1998)5-11
- ( 2 2 ) 岡田光：高圧水デスク - リングにおけるスケ - ル剥離挙動、噴流工学Vol.16、No.2 (1999)32-38
- ( 2 3 ) 祖山均：キャビテーション衝撃力の作用による水噴流の加工能力の増大とその機械材料のピ - ニングへの利用、噴流工学 Vol.16、No.3 (1999) 22-28
- ( 2 4 ) 祖山均、山内由章、井小萩利明、大場利三郎、佐藤一教、進藤文典、大島亮一郎：高速水中水噴流による顕著なピ - ニング効果、噴流工学、Vol.13 No.1(1996) 25-32
- ( 2 5 ) 小林陵二、福西裕、石川忠：超音速エアジェットによる材料加工、ウォ - タ - ジェット、Vol.10、No.2 (1993) 14-26

( 著者の論文等 )

- ( 2 6 ) 本川高男、南典明、川北浩久、田村光政：環状噴流の表面加工への適用、噴流工学、Vol.12、No.3(1995)29-35
- ( 2 7 ) 本川高男、南典明、川北浩久、濱田聡美、山崎堯右：環状噴流とその応用、ウォータージェット、第9巻、第2号 ( 1992.5 )
- ( 2 8 ) 本川高男、南典明、川北浩久、濱田聡美、山崎堯右：4孔合流ノズルによる表面加工特性、ウォータージェット、第9巻、第2号 ( 1992.5 )
- ( 2 9 ) 本川高男、横川明、山崎敬一、光森琢真、山中義也、松村次展：粒体噴流化式人体洗浄装置の開発、設計工学
- ( 3 0 ) 本川高男、横川明、山崎敬一、光森琢真、山中義也、松村次展：粒体噴流化式身体洗浄における均一洗浄について、噴流工学、Vol.18,No.1(2001) 掲載予定
- ( 3 1 ) 本川高男、横川明、山崎敬一、光森琢真、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) 掲載予定
- ( 3 2 ) 本川高男、南典明、川北浩久、濱田聡美、山崎堯右、神山新一、坪田誠、垣内保夫：環状噴流とその応用、日本ウォータージェット学会、広島講演会で発表 (1990)
- ( 3 3 ) 本川高男、南典明、川北浩久、山崎堯右：4孔合流ノズルによる表面加工特性、日本ウォータージェット学会、第7回研究発表講演会で発表(1991)
- ( 3 4 ) 本川高男、横川明、山崎敬一、光森琢真、山中義也、松村次展：粒体噴流化式人体洗浄における粒体の衝突速度および角度の影響、日本ウォータージェット学会、第15研究発表講演会にて発表、(2000)
- ( 3 5 ) 本川高男、横川明、山崎敬一、光森琢真、山中義也、松村次展：粒体噴流化式人体洗浄における均一洗浄について、日本ウォータージェット学会、第15研究発表講演会にて発表、(2000)
- ( 3 6 ) 本川高男、横川明、山崎敬一、光森琢真、山中義也、松村次展：粒体噴流化式人体洗浄における粒体物性の影響、日本ウォータージェット学会、第15研究発表講演会にて発表、(2000)
- ( 3 7 ) 粒体噴流化式身体洗浄装置、特願2000-228285
- ( 3 8 ) 噴流化洗浄装置、特願2000-346464

## 第2章 合流水噴流における材料加工特性

### 2.1 緒言

第1章において述べたように、ウォータージェットを用いた切断や洗浄の加工においては加工能率を上げるために、ポンプは高圧化すると共に、高圧の水噴流に研磨材などの硬い物質を混入させたアブレシブジェットが用いられるようになってきている。

しかしながら、通常のアブレシブノズルではアブレシブが狭いノズル内を高速で通過するため、アブレシブによるノズル内面の摩耗が大きく、加工時間が長くなるとノズル内面形状が変化し、噴流断面形状も徐々に大きく、変形して、切断幅や切断深さが変化する欠点を持つ<sup>(1)</sup>。

我々は、内管を有する環状ノズルにおいて、内管から空気と共にアブレシブを環状の水噴流中心に混入させる事でノズル摩耗の無い環状噴流の噴流特性を調べた<sup>(2)</sup>。そして、内管から空気を吸い込ませる事で、空気を遮断した噴流より、噴流圧力は下流まで維持され、加工に有利な高周波成分を持ち、アブレシブは噴流断面に均一に分布する事がわかった。しかしながら、環状ノズルで高圧噴流を発生させるには、高圧、大流量のポンプが必要となり、高価となる欠点があった。そのため、環状スリットの代わりに、円形断面を持つ通常の単一ノズルを同心円上に複数個配置し、中心軸上の一点で噴流を衝突させて合流噴流とし、その合流点の直上にアブレシブをスラリ状にして、別システムのポンプで混入させれば、ノズルの摩耗が無く、アブレシブが均一に混入した噴流が得られ、内管を有する環状噴流の利点を具備し、環状ノズルの欠点を克服するノズルの製作が可能となるものと考えられる。

複数のノズルからの噴流を一点で合流させるために、同心円状に単一ノズル4個を配置し、中心軸上にアブレシブ供給パイプを配置したノズルを考案して4孔合流ノズルと称した。これは環状ノズルと比べて、ポンプ流量を少なくできる利点を持つものの、噴流の衝突によるエネルギー損失を伴う。このような、衝突噴流を微粉碎に利用する研究<sup>(3)</sup>は行われているが、加工への利用を目的とした、加工特性などの研究は見あたらない。そこで、高圧ポンプ用の4孔合流ノズルを製作するに当たり、物理的に可能な範囲で合流噴流に種々の大きさの研磨材を混入させて、加工量、表面粗さに及ぼす、噴流合流角度( )、ノズルから合流点までの距離( $X_0$ )、合流点から計ったスタンドオフ距離( $h$ )、研磨材粒度の影響等について高圧のポンプを用いて実験的に調べて、加工特性の優れたノズル設計の基礎データとすると共に、最適な加工条件を見いだす事を目的とした。

### 2.2 実験方法

実験装置の概略を図2-1に示した。の高圧ポンプ(吐出圧力20MPa、流量 $6.31 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{min}$ の3連プランジャ型)から発生した高圧水は高圧ホースでの圧力計を経て、合流噴流を発生させるの4孔合流ノズルに導かれている。4孔合流ノズルの中心には、内径3mmのパイプ先端が噴流の合流点近くまで、差し込まれている。研磨材は水でスラリとしてのポッパから噴流に混入される。スラリの噴流への供給流量を一定にするため、ホッパにピカで一定量供給しながら加工を行った。試料の移動は油圧シリン

ダ - を用いて、流量調整弁で速度を調整した。

また、図 2 - 2 にはノズルの詳細を、図 2 - 3 には合流噴流の様子を示す。合流噴流を発生させる 4 孔合流ノズルは、ノズル内径 1mm の単独ノズル 4 個を円周上に 90° 間隔で配置し、円周の中心軸上の 1 点で噴流を合流させるように固定してある。噴流の合流角度の調整は、それぞれ 180° の位置にある 2 つのノズルを操作して行い、合流噴流が円形になるように、注意を払って合流点の調整を行った。

ノズル出口から合流点までの距離  $X_g$ 、合流点から被加工物までの距離をスタンドオフ距離  $h$  とした。被加工材は SUS304 (厚さ 1mm、表面粗さ  $R_t 1.82 \mu m$ ) を用いた。研磨材は宇治電社製 トサエメリ - AE#2000、#1200、#800 と粒径  $3 \mu m$ 、 $1 \mu m$ 、 $0.3 \mu m$  の純アルミナの粉末を使用した。エメリ - と水は重量比で 1 : 1、純アルミナと水は 1 : 1 から 1 : 3 の重量比で混合してスラリー - とした。噴流への供給方法はノズル上部約 0.5m の位置にあるホッパ - からの自然吸入とした。表 2 - 1 に使用した トサエメリ - の粒度分布を示す。

表 2 - 1 粒度分布 (単位  $\mu m$ )

粒度 AE	最大粒子径	累積高さ 3% 点の粒子径	累積高さ 50% 点の粒子径	累積高さ 94% 点の粒子径	100g 中の最大粒子	粗粒子群 (%)
#800	32 以下	21 以下	11.4 ~ 9.2	4 以下	150 以下	0.1 以下
#1200	23 以下	15 以下	7.0 ~ 5.6	2 以下	"	0.05 以下
#2000	18 以下	10 以下	5.3 ~ 4.1	1 以下	"	0.05 以下

### 2.3 合流噴流による加工特性

ポンプの圧力 17MPa、流量  $0.032 m^3 / min$ 、一定として加工を行った。流量から計算した一つのノズル出口速度は  $169.8 m/s$  となる。これらの 4 個のノズルからの合流噴流も衝撃圧が大きいので、噴流の断面形状を調べるのに、感圧紙等は利用できない。そこで、微粒子は噴流の乱れにも追従した運動を行うため<sup>(4)</sup>、#800 のエメリ - 1kg を水  $0.001 m^3$  でスラリー - とし、噴流に混入させて、被加工材の壊食状態から判断した。また、同時に加工状態から噴流中に均一に混入されているかをも調べた。その結果は図 2 - 4 に示す。合流点直下では、ほぼ円形に深く壊食されているので、噴流断面も円形であり、研磨材は噴流中に均一に混合されているものと判断される。下流になるにつれて壊食量が少なくなり、加工周辺部が不鮮明になる。また、加工形状も円形から崩れていることから、水噴流自体も対象性をなくしていると考えられる。そして、やや中心部の壊食量が多いことから、研磨材も噴流中心部に多く分布していると考えられる。このことは、4 つのノズルからの噴流を一点で合流させる難しさを示唆している。

次に、アブレイブ 1kg 当たりの加工量、および表面粗さに及ぼす合流角度、スタンドオフ距離  $h$ 、ノズルから合流点までの距離  $X_g$ 、噴流と試料との角度、加工速度の影響について調べた。図 2 - 5 にエメリ - およびアルミナ 0.5kg を噴流に混合させて加工した  $h = 50mm$  位置での加工面の SEM 写真を示す。これは、研磨材の衝突による加工状態を良く表すために、表面の凹凸を強調させて写したものである。エメリ - では 50% 累積高さの粒径を平均粒径と考えると、研磨材粒径が小さい程、表面粗さは小さくなっていることがわかる。



これを数値化したものを図2 - 6に示す．噴流の合流角度  $\theta = 30^\circ$  とし、合流噴流を試料に垂直に当てた場合であり、横軸にはエメリ - 累積高さ50%点での粒径を、縦軸には表面粗さを示した．スタンドオフ距離により幅があるものの、これから平均粒径の約1/10の表面粗さを得ることができると考えても良い．この事から、要求された加工表面粗さを得るのに必要なアブレシブ平均粒径を判断する事が可能となる．

図2 - 7にはエメリ - #800と#2000をそれぞれ0.5kgを噴流に混入させて、噴流の合流角度  $\theta$  による、エメリ - 1kg当たりの体積除去量（加工量）と表面粗さへの影響を示した．エメリ - 粒径が大きい程、噴流の合流角度  $\theta = 20^\circ \sim 53^\circ$  において、加工量及び表面粗さ共に大きくなる．粒子径による加工量の違いについては、水噴流のみでの加工量は無視できるので、エメリ - 粒径の違いが原因と考えると良い．大きい粒子ほど、衝突エネルギーが大きい、一つの粒子による研削量が多い事が原因と考えられる．また、合流角度  $\theta$  が小さくなる程、加工量は増加傾向を示した．これは、鋭角な程、噴流の衝突時によるエネルギーロスが小さく、合流噴流速度は大きくなり、粒子速度も大きくなるためと考えられる．

表面粗さは、合流角度によらず図2 - 6と同様に粒子径の約1/10になっている．試作した4孔合流ノズルでは構造上  $\theta = 20^\circ$  より小さい角度で噴流を合流させることが困難であり、また  $20^\circ$  の場合でも合流後の噴流形状が崩れた状態であったので、以下の実験は合流角度  $\theta = 30^\circ$  として行った．

次に、噴流合流角度  $\theta$  を  $30^\circ$  とした場合に、ノズル出口から合流点まで距離  $X_0$  の影響を図2 - 8に示した．縦軸はアブレシブ1kg当たりの除去体積と表面粗さを取り、横軸はノズル出口から合流点までの距離  $X_0$  とノズル内径  $d$  の比で表してある．表面粗さについては  $X_0$  の顕著な影響はみられなく、約  $0.5 \mu\text{m}$  の粗さが得られている．加工量に対しては、 $X_0$  が短い程大きくなる．これは、ノズル近くで合流させる方が、合流後も高い噴流速度を有していると考えられる．よって、できるだけ、近くで合流させる方が加工量が大きく、能率の点で有利となる．

また、合流点を原点として下流方向にスタンドオフ距離  $h$  をとると、加工量は  $h$  が小さい方が大きくなる．また、表面粗さは  $h$  の増加と共にやや大きくなる．これらから、加工量の大きい穴加工や、溝加工には合流点近くで加工する方が、形状精度、粗さ共に有利となる．合流点付近はアブレシブ噴流に混入した直後であり、噴流によって加速途上の状態である<sup>(5, 6)</sup>にも拘わらず、加工量が大きいのは、噴流中でのアブレシブ密度が大きいためと思われる．

次に衝突後、合流した噴流が試料と衝突する角度  $\phi$  の影響について図2 - 10に示す．加工量は試料に垂直 ( $\phi = 90^\circ$ ) の場合に最小になり、傾斜させて  $\phi$  が小さくなると増加している．垂直に衝突させた場合、加工の進行と共に、図2 - 4の  $h=5\text{mm}$  の場合の様に、加工される部分は凹部となる．この状態になると、一旦凹部に入った噴流が凹部から排出する噴流となり、後から凹部に入る噴流とが狭い凹部内で衝突し、研磨材の試料への衝突速度が減少するためと考えられる．試料を傾斜させる事で凹部に入った噴流はスム - ズに排出され、さらに、研磨材は試料表面を研削しながら排出されるので、加工量が増加していると考えられる．表面粗さについても、試料を傾斜させる事で研磨材の切削作用により、粗さは小さくなるものと考えられる．

加工速度の表面粗さへの影響について、図2 - 11に示す．噴流を試料に垂直に当てた

場合と45°傾斜させた場合である。両者共に、移動させる事で粗さは大きくなり、特に、加工速度0.003m/sまでは速度と共に表面粗さが急速に増加し、それ以上では速度に対する粗さの増加割合は減少し、加工速度の影響は小さくなる。また、垂直に当てた場合は45°の場合より、全移動速度範囲で表面粗さは大きい。

## 2.4 結言

内管を有する環状ノズルの加工に有利な特性を具備し、欠点を克服すると考えられる合流噴流を発生させる高圧用合流ノズルの製作に当たり、同心円状にノズル内径1mmの単一ノズル4個を配置し、中心軸上で噴流を衝突、合流させるノズルを試作して、種々の粒径のアブレシブ噴流に混入させ、ステンレスを被加工材として、合流角度、ノズルから合流点までの距離 $X_0$ 、合流点から計ったスタンドオフ距離 $h$ のアブレシブ単位重量当たりの加工体積、表面粗さへの影響について調べた。

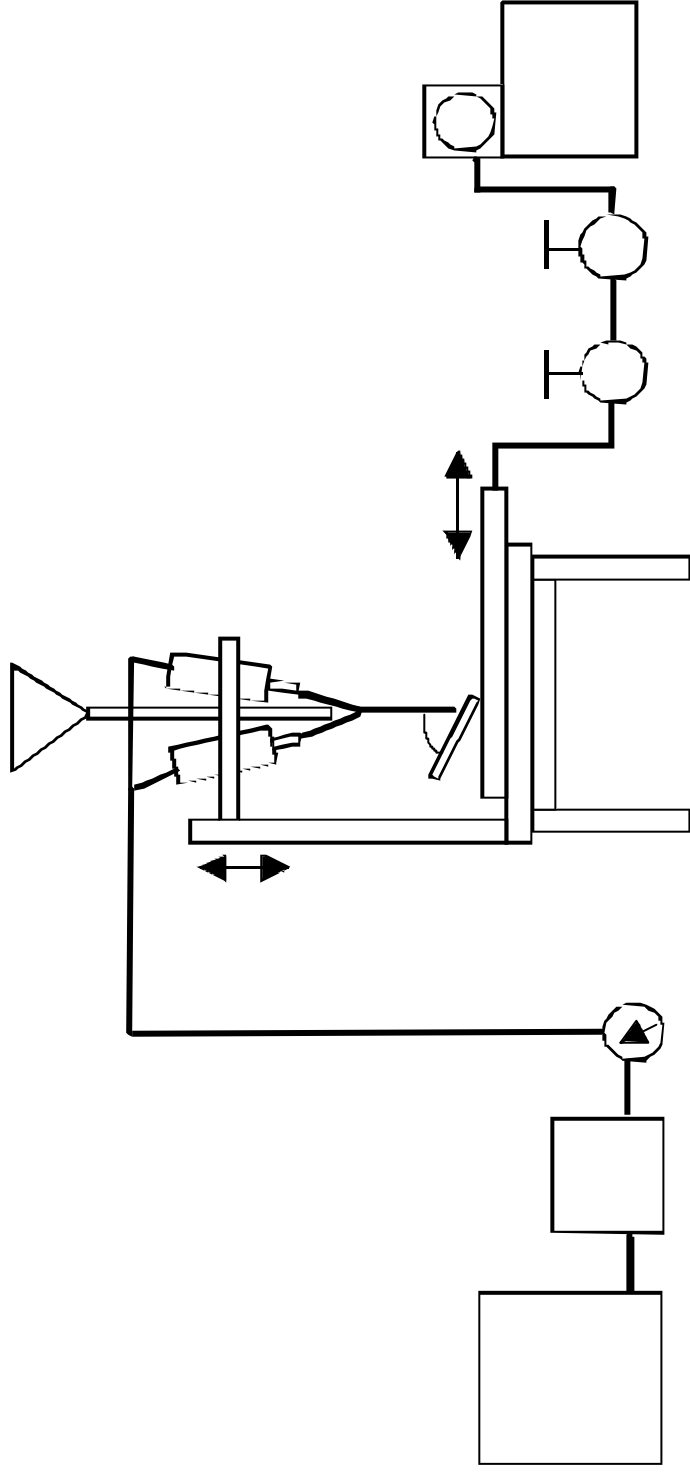
その結果、以下のことがわかった。

- (1) 表面粗さはアブレシブ平均粒径の約1/10となり、加工後の表面状態を予測できる。
- (2) 噴流の合流角度が小さい程加工量は大きく、表面粗さはあまり影響を受けない。
- (3) ノズルから合流点までの距離 $X_0$ は短い方が加工量は大きく、表面粗さへの影響は少ない。
- (4) スタンドオフ距離 $h$ は短い方が、加工量が大きく、表面粗さは小さいので、加工量の多い穴加工や、溝加工などには合流点近くでの加工が有利である。
- (5) 合流噴流を試料に斜めから当てる方が、加工量が大きく、かつ表面粗さも小さくなる。
- (6) 試料を移動させると表面粗さは大きくなる。

これらより、小型化した高圧用ノズルは物理的に製作可能な範囲で合流角度 $\theta = 30^\circ$ 、合流点までの距離 $X_0 = 70\text{mm}$ で制作する事とした。

## 参考文献

- (1) 田村寛仁、谷川吉輝、杉山隆興、井戸章雄：ジェットカッティングマシンの開発、電業社機械、Vol.10 No.1 (1986)
- (2) 本川高男、南典昭、川北浩久、濱田聡美、山崎堯右：環状噴流とその応用、ウォータ-ジェット、第9巻、第2号 (1992)
- (3) 郭楚文、片倉寛、山根隆一郎、大島修造、劉林生：ウォータジェットを利用した粉体の微粉碎に関する研究、噴流工学、Vol. 17、No.2 (2000)
- (4) 社河内俊彦、加藤智宏、安藤俊剛、榊原宏朗：微粉粒子を含む固気二相環状噴流の流動特性とその制御、日本機械学会論文集(B編) 64、627(1998)、3616。
- (5) 濱田聡美、神山新一、山崎堯右、坪田誠：環状噴流による硬球の加速特性に関する研究、日本機械学会論文集(B編)、55巻 511号 (1989-3) 670-675
- (6) ウォータ-ジェット技術辞典：日本ウォータ-ジェット学会編、(丸善)



Water tank    Water Pump    Pressure gauge    four Nozzle    Hopper and slurry pipe  
 Traverse table    Oil tank    Oil Pump    Direction change valve    Speed control valve  
 Specimen

図 2 - 1 実験装置概要

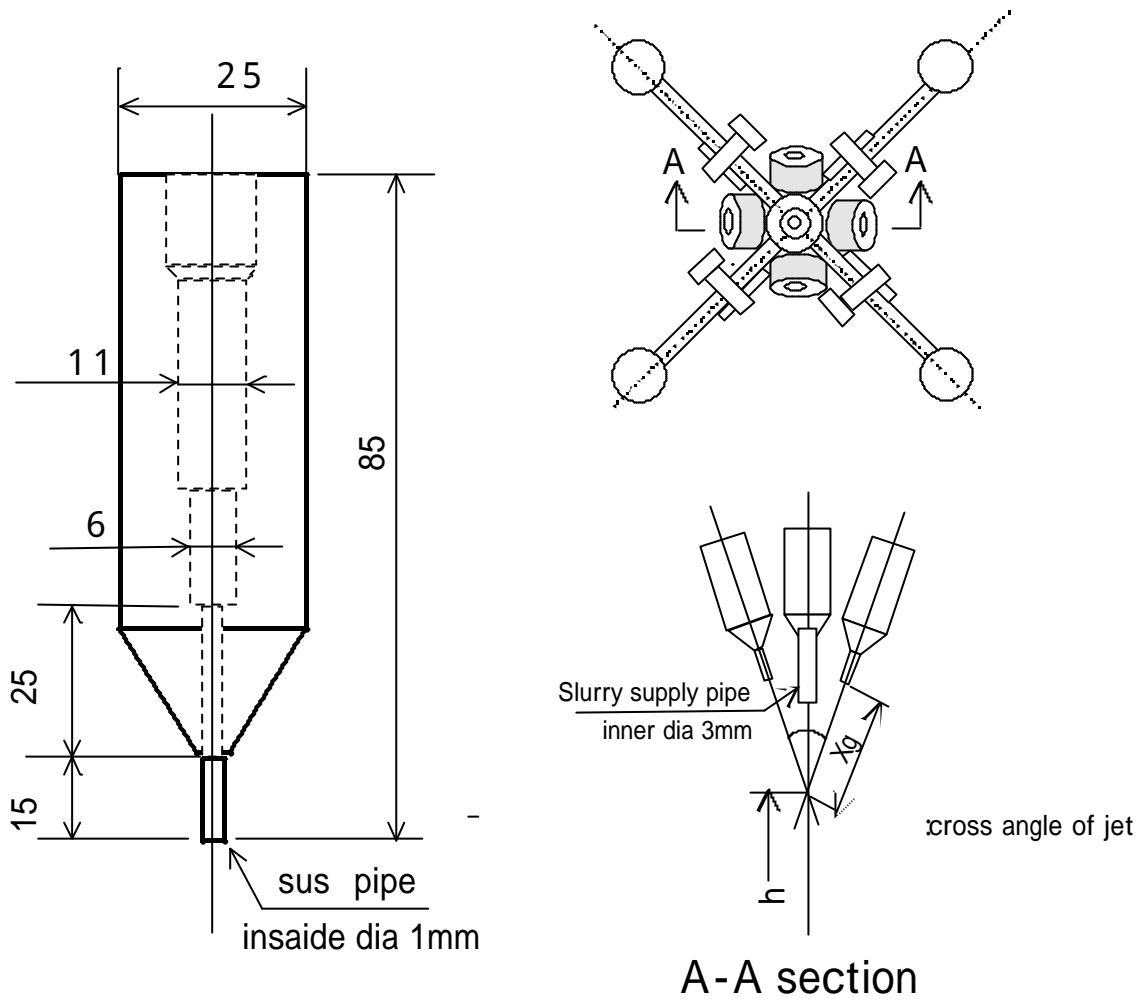


図 2 - 2 4孔合流ノズル概要



図 2 - 3 合流噴流の様子

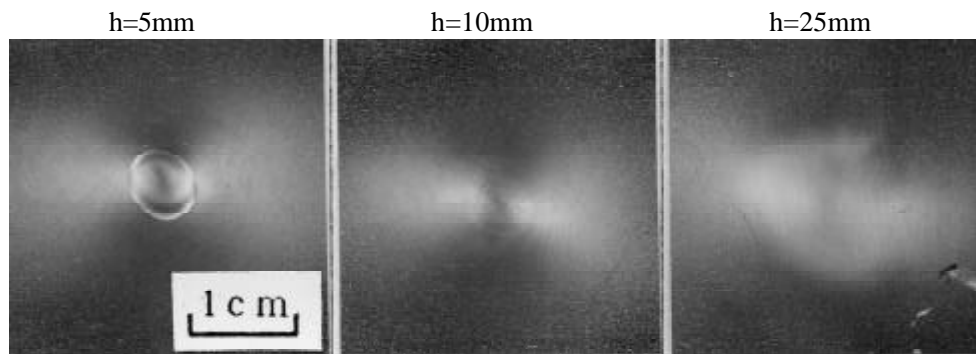


図 2 - 4 合流噴流による加工表面状態

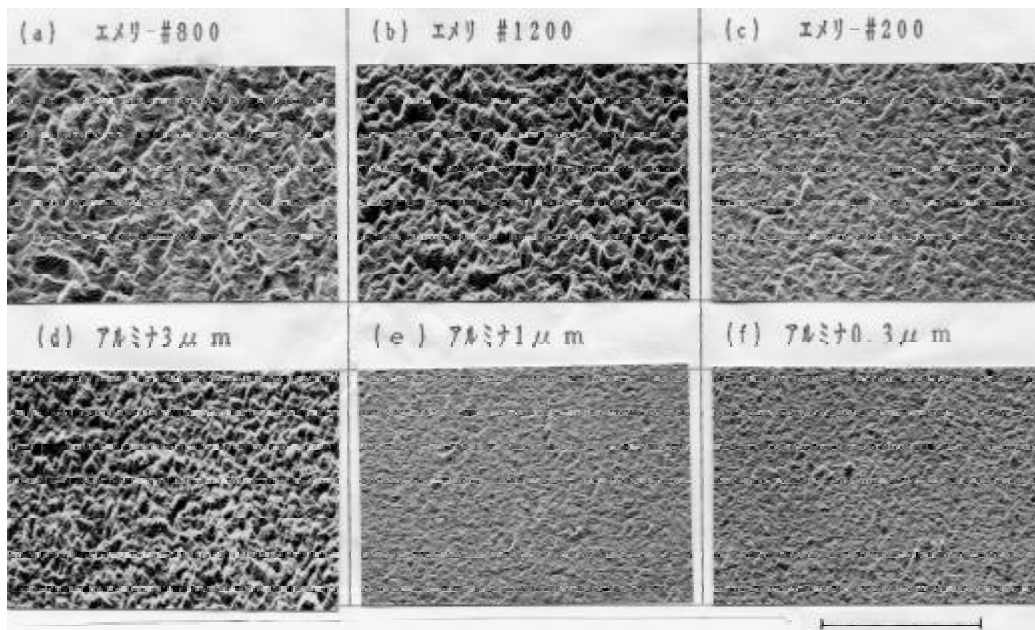


図 2 - 5 加工面のSEM写真

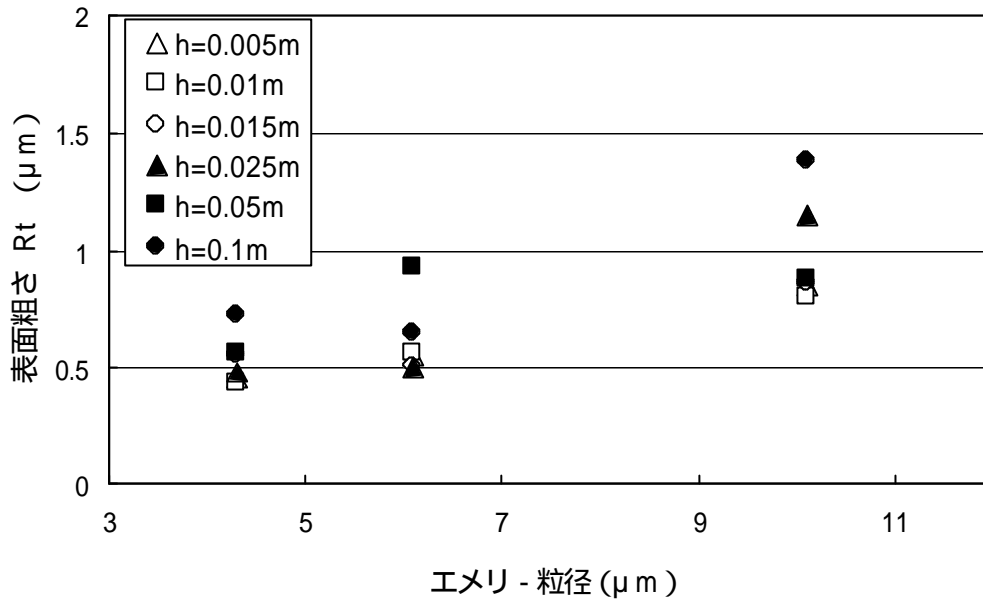


図 2 - 6 研磨剤平均粒径と加工表面粗さの関係

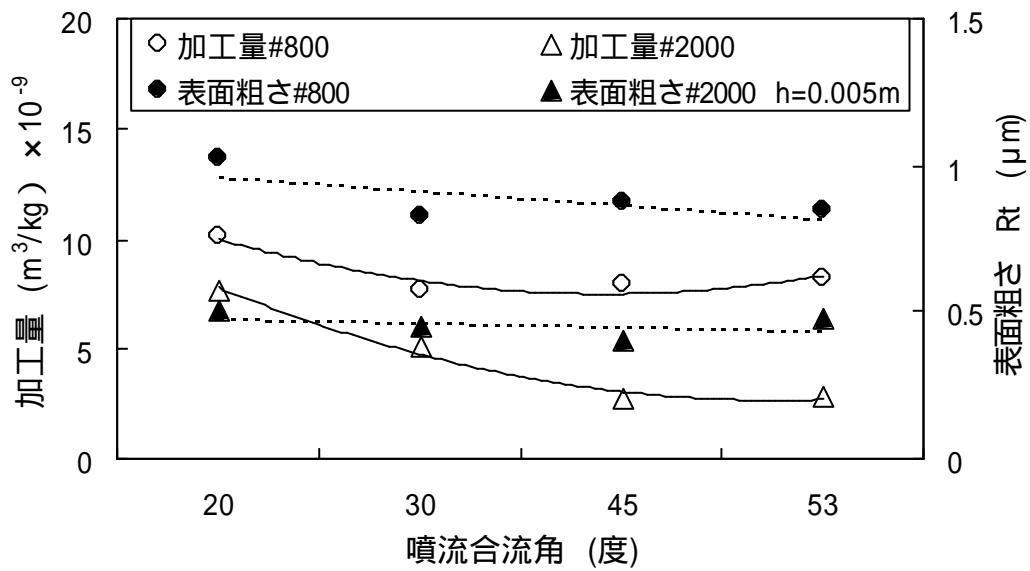


図 2 - 7 加工量及び表面粗さに与える噴流合流角度の影響

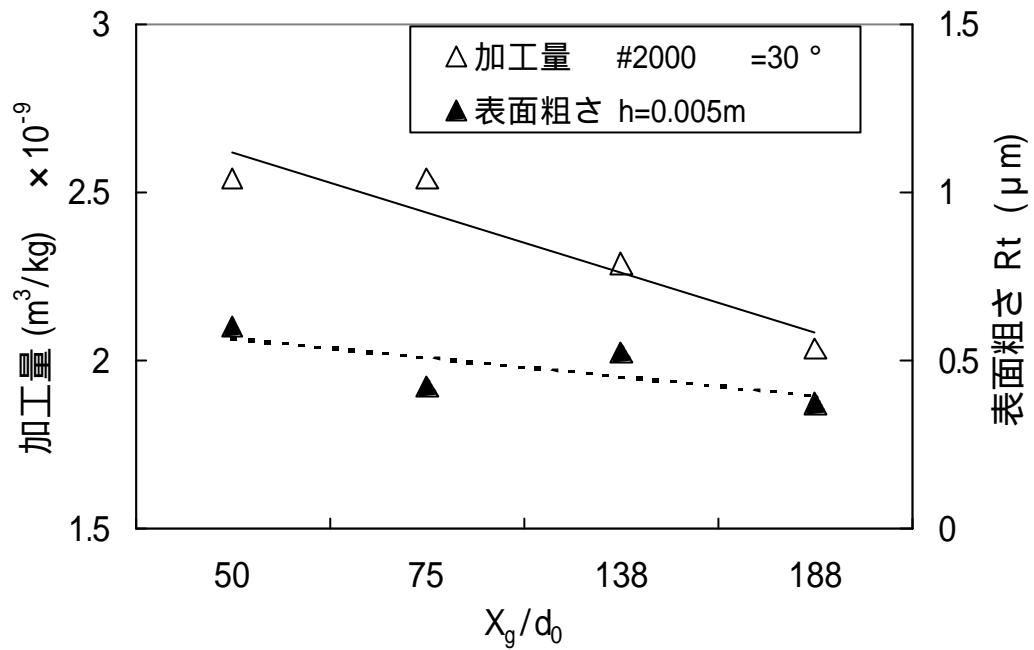


図 2 - 8 加工量，表面粗さに及ぼすノズル出口から合流点までの距離の影響

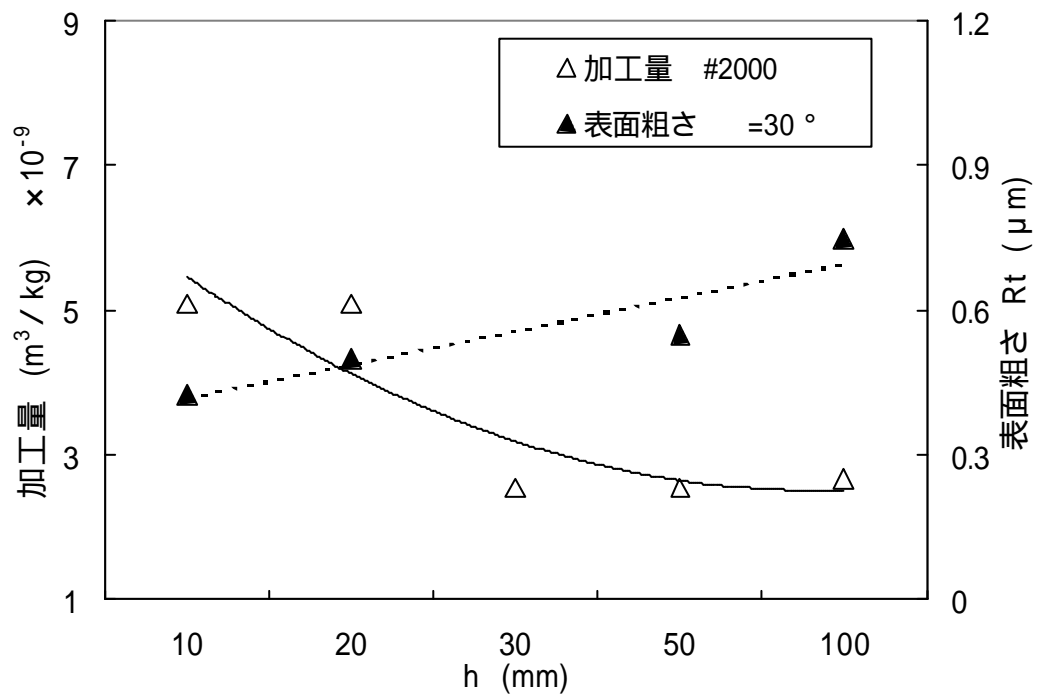


図 2 - 9 加工量，表面粗さに及ぼすスタンドオフ距離の影響

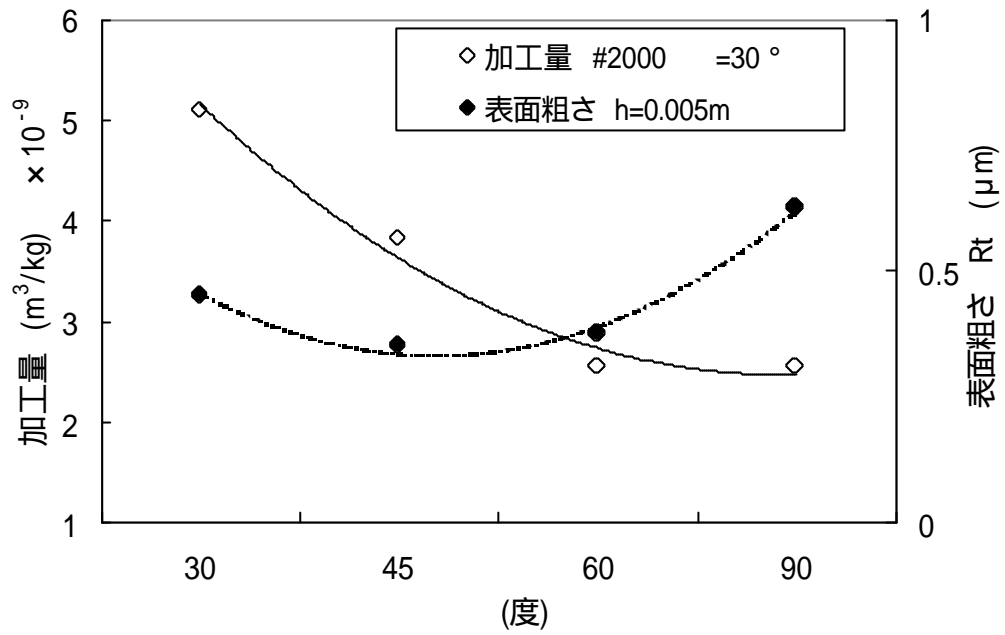


図2 - 10 加工量，表面粗さに及ぼす噴流角度の影響

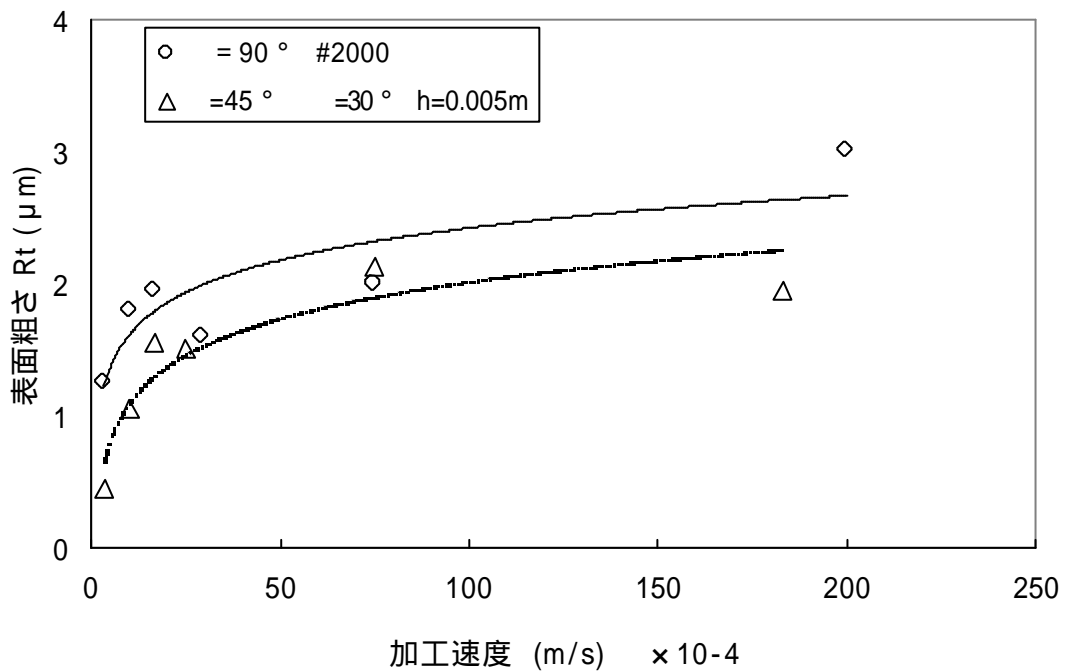


図2 - 11 加工速度と表面粗さの関係



## 第3章 合流噴流の基本特性

### 3.1 緒言

4孔合流ノズルと称したノズルからの噴流は一点で衝突し、一つの噴流になる。この合流点にアプレシブを供給させて、アプレシブウォータージェットとして利用するには、合流後の噴流構造を知る事が重要となる。衝突噴流構造については、二次元空気噴流において岡本らの<sup>(1)</sup>研究があるが、円ノズルからの水噴流の衝突については報告例は見あたらない。また、単一ノズルからの水噴流構造については柳井田ら<sup>(2, 3, 4, 5)</sup>によって詳細に調べられている。本研究では、計測が容易なノズル径が大きく、低速の噴流を用いて、衝突前の単一ノズルから合流するまでの噴流軸方向の全圧分布、合流した後の噴流軸方向の全圧分布、空気と水の容積割合などの噴流構造を実験的に調べた。その結果を用いて鋼球の加速特性について実験と解析及び数値計算から求めた。さらに、アプレシブの加速特性の数値計算から、4孔合流ノズルを金属加工に利用する場合の特徴を調べた。

### 3.2 噴流構造の実験方法

実験装置の概要を図3-1に示した。用いたポンプは吐出圧力5MPa、流量 $27.7 \times 10^{-3} \sim 41.5 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{min}$ のプランジャ型ポンプで脈動を緩和するため、アキュムレタを装備している。総圧管は先端部の外径1mm、内径0.5mm、全長150mmで外径は段階的に2mm、6mmと大きくしてある。これを可動テーブルに垂直に固定し、テーブル上約100mm付き出した状態で測定し、噴流がテーブルに衝突する影響を無くした。4孔合流ノズルからの合流点は、総圧管を上下させて圧力が急増する位置とした。この位置を原点として下流方向をスタンドオフ距離 $h$ とした。噴流中心軸の決定は総圧管と噴流を注意深く平行になるように調整して、目視で決定した。総圧分布は高圧ホースで繋いだフルスケール0.1MPaのブルドン管圧力計を用いて、噴流断面方向に1mmピッチで移動させて測定した。合流した噴流の流量は $9.6 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{min}$ であった。

単一水ノズルの形状及び噴流の衝突角度が $30^\circ$ になるように試作した4孔合流ノズル外観写真を図3-2に示す。水ノズルは内径( $d$ )2mmで入り口側に $60^\circ$ のテーパを設けて、平行部長さ4mmである。流量とノズル径から求めた出口速度は12.7m/s、レイノルズ数 $2.54 \times 10^4$ である。

単一ノズルからの噴流の総圧分布の測定は、4孔合流ノズルの一本を、総圧管に平行になるように取り付け、他の3本からの噴流は総圧管に当たらないようにし、ノズルからの流量を変えない状態で測定した。噴流の様相は空気の巻き込みが無く、気液界面の乱れも見られない軸対象な噴流であった。測定は総圧管による噴流の乱れを最小限に押さえるように注意した。

### 3.3 実験結果

#### 3.3.1 合流噴流の特性

ウォータージェット技術辞典<sup>(6)</sup>から抜粋した、高速水噴流の構造を図3-3に示す。この特性は噴流軸方向にノズル出口流圧が維持される噴流核域 $X_p$ 、ノズル性能評価の基準と

なる初期区長 $X_c^{(2,3,4)}$ 、液体の連続性が維持されて加工などの有効射程距離の基準となる連続区長 $X_c$ 及び下流域の噴霧領域で表される。また、主要区の噴流の広がり $(X)^{0.5}$ に比例する。また液滴層の外側には微細液滴層の流れがある。

単一ノズルからの噴流の様相と合流噴流の状態を図3-4、3-5に示す。単一ノズルからの噴流は透明感のある連続した噴流で噴流の広がりは見られない。これらが合流した噴流では合流点から噴流は大きくなり、白い噴流となって流れる。

合流噴流の圧力測定に先立って、ノズル1個からの噴流の噴流軸方向の総圧(P)分布測定を行った結果を片対数グラフ図3-6に示す。4孔合流ノズルのノズルから合流点までは60mmであるので、この付近まで測定した。縦軸は測定可能な水ノズルからの距離7mmでの圧力をノズル出口圧力( $P_0$ )として $P_0$ で無次元化してある。横軸はノズルからの距離( $X_0$ )をノズル径(d)との比で表した。圧力( $P_0$ )はノズルから遠ざかるにつれて徐々に減少する。合流付近である $Z=60$ mm位置での総圧は0.064MPaであった。この様な圧力特性を持つノズル4個を組み合わせた4孔合流ノズルからの、衝突点から下流方向hの噴流軸圧力( $P_0$ )分布の測定結果を片対数グラフ図3-7に示した。

縦軸は $h=2$ mm位置での圧力 $P_0$  ( $h=2 \times 10^{-3}$ m)との比で表した。合流点付近では圧力の変化が大きいものの、圧力減衰が少ない領域( $h=6$ mm)が存在し、そこから下流は一定の勾配で減衰する。 $h=2$ mm位置での噴流中心圧力は0.073MPaであった。これは単独噴流の衝突点位置における圧力より約14%上昇している。この原因は噴流の衝突による衝撃圧によるものと思われる。図3-8に噴流断面上の総圧分布を示した。縦軸は断面上の最高圧力 $P_0$ との比で表し、横軸は噴流幅Bで表し、スタンドオフ距離hをパラメータにして表した。合流点から $h=10$ mmまでは、衝突した噴流の影響により軸対象な分布となっていない。 $h=25$ mmより下流になるとほぼ軸対象な噴流になっている。これらの事から、合流点直下の噴流( $h=10$ mm以下)は、噴流圧力が大きく加工量が期待できるものの、対象性が悪いため加工深さが不均一になる。そのため表面加工には、対象な噴流となる $h=25$ mmより下流域の方が良いと思われる。

濱田らは<sup>(7)</sup>、内管を有する環状噴流において、内管から噴流に空気を吸い込ませる事で、空気を遮断した噴流よりも加工に有利な高周波のパワースペクトルが発生するとしている。衝突、合流した噴流においても、合流前は空気を含まない透明な噴流であるが、合流噴流では白い噴流になる事から、合流時に空気が巻き込まれていると考えられる。

噴流中に含まれる空気の割合を調べるために、一定時間内に内径0.5mmの総圧管に入る、水と空気の容積を測定した。全容積に占める空気の容積割合を縦軸に、噴流幅Bを横軸に、スタンドオフ距離hをパラメータにして図3-9に表した。合流点付近では噴流中心部の空気の容積割合が高く、下流になるにつれて噴流周辺では高くなる。これは、単独ノズルからの噴流が衝突する際に、同時に周囲の空気を巻き込むため、合流点では中心部に、また、合流した噴流は乱れが大きく下流になるにつれて周辺の空気を巻き込みながら流れるため、下流では噴流周辺に空気が多くなるためと考えられる。

これを、各断面における単位面積当たりの質量流量で表したのが図3-10である。水の単位時間当たりの質量流量Jの分布形状はスタンドオフ距離hによらず、噴流中心が大きく、噴流周辺で小さくなる形になっていて、噴流軸に対してほぼ対象な分布になっている。そして、スタンドオフ距離hが大きくなるにつれて $J_0$ の値は小さくなる。これは噴流

の広がりによるものであると考えられる。空気の単位時間当たりの質量流量 $J$ は、合流点直下の $h=0.002\text{m}$ では分布の変動が激しく、スタンドオフ距離 $h=0.025\text{m}$ では噴流周辺にピークが、 $h=0.1\text{m}$ では噴流幅 $B=\pm 2\text{mm}$ の範囲で変動が少ない分布になる。また下流になるにつれて $J$ の値は増加している事から合流噴流は周囲から空気を巻き込にながら流れている事がわかる。 $h=0.002\text{m}$ 位置での分布の変動は噴流の衝突によるものと思われる。また $h=0.025\text{m}$ では、噴流周辺の空気を含んだ微細な液滴流れによるものと思われる。これらから、空気を含む合流噴流は加工に有利な事が推察される。

### 3.3.2 鋼球の加速特性

4孔合流ノズルをアブレシブジェットとして利用する場合、合流点直上に供給されたアブレシブが噴流で加速される様子を知ることは加工に応用する上で重要である。噴流中のアブレシブ速度を計測する事は困難なため、解析的手法と数値計算から加速状態を推察する事にした。

濱田<sup>(8,9)</sup>らは、内管を有する環状ノズルからの噴流において、内管から直径 $2.5\text{mm}$ の鋼球を混入させ、アルミニウム板に衝突させた窪み深さから衝突直前の速度を評価できるとしている。ここでも、同じ手法を用いて鋼球の加速特性について調べた。

圧縮試験装置(オ-トグラフ)を用いて直径 $2\text{mm}$ の鋼球を厚さ $8\text{mm}$ の純銅板に $1\text{mm}/\text{min}$ の速度で一定荷重まで押し込み、できた圧痕の深さ $h$ を測定して、押し込み荷重 $F$ と圧痕深さ $h$ の関係を求めた。圧痕の深さ $h$ は、圧痕の直径 $d$ から(3-1)式を用いて深さ $h$ に換算<sup>(10)</sup>した値とした。その結果を図3-11に示す。

$$h_d = \frac{D_s}{2} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{d_a^2}{D_s^2}} \right) \quad (3-1)$$

ここで $D$ は鋼球の直径、 $d$ は圧痕の直径である。

図3-11の印は実験結果を、実線は荷重 $F$ と圧痕深さ $h$ の近似直線を表している。

次に、同じ純銅板(縦 $100\text{mm}$ 、横 $100\text{mm}$ 、厚さ $8\text{mm}$ )をテーブルに固定し、合流噴流を垂直に当て、直径 $2\text{mm}$ の鋼球を合流点直上約 $10\text{mm}$ から合流点で噴流中に混入させて、純銅板に衝突させた。

各スタンドオフ距離から10個の鋼球を銅板に衝突させて、銅板に付いた圧痕の直径 $d$ から(3-1)式を用いて、圧痕の深さ $h$ を求めた。衝突で出来た圧痕深さ $h$ から図3-11に示した近似式を用いて衝突による荷重 $F$ を求める。実験で用いた純銅板の質量 $730\text{g}$ に対して鋼球の質量が $m=0.03235\text{g}$ と小さいため、鋼球の衝突による音や熱へのエネルギー損失は無視した。

鋼球は衝突して深さ $h$ で速度が $0\text{m}/\text{s}$ になる。鋼球の質量を $m$ 、衝突直前の速度 $V$ としてエネルギー-方程式より<sup>(11)</sup>、(3-2)式が得られる。

$$mV_s^2/2 = Fh/2 \quad (3-2)$$

(3-2)式から求めた計算結果を、横軸にスタンドオフ距離 $h$ をとり、縦軸に衝突直前の鋼球の速度 $V$ をとって図3-12に示す。ここで、印は(3-2)式による結果で、10個の平均値である。+印は、実験結果のバラツキの範囲を示す。印は鋼球が銅板に衝突してから、停止するまで、鋼球は変形しない、銅板のみ塑性変形するとして、(3-3)

式の運動方程式を用いて、時間 $t=0$ で衝突寸前速度 $V=dh/dt$ を与えて、 $V=0$ となる $h$ をルンゲクッタ法で求めた結果である。

$$\frac{4}{3} r_s^3 \left( \rho_s + \frac{\rho_c}{2} \right) \frac{d^2 h}{dt^2} = F \quad (3-3)$$

ここで、 $r_s$ は鋼球の半径、 $\rho_s$ は鋼球の密度、 $\rho_c$ は銅板の密度である。また、銅板の密度が鋼球の密度以上であるため、付加質量を考慮した<sup>(12)</sup>。

(3-2)式から求めた速度 $V$ が(3-3)式から求められる値より大きい。これは、(3-2)式では衝突によるエネルギー損失を考慮していないためと思われる。

また、図3-12の実線は単一鋼球の運動を、噴流軸中心について一次元流れと考えて、(3-4)式の運動方程式を、ルンゲクッタ法で計算したものである。

$$m \frac{dh^2}{dt^2} = F_D + F_v + F_G + F_F \quad (3-4)$$

ここで、 $F$ は鋼球と水との相対速度による抗力、 $F$ は加速抗力<sup>(14)</sup>、 $F$ は重力、 $F$ は浮力であり、それぞれ、下式で表される。

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_L r_s^2 C_D (V_w - V_s) |V_w - V_s| \quad (3-5)$$

$$F_v = \frac{4}{3} r_s^3 \left( \rho_s + \frac{\rho_L}{2} \right) \frac{d(V_w - V_s)}{dt} \quad (3-6)$$

$$F_G = \frac{4}{3} r_s^3 \rho_s g \quad (3-7)$$

$$F_F = -\frac{4}{3} r_s^3 \rho_L g \quad (3-8)$$

ここで、 $r_s$ は鋼球の半径、 $\rho_s$ は鋼球の密度、 $V$ は噴流の速度、 $V$ は鋼球の速度、 $C$ は球の抵抗係数で、既往のデータに合致するように表3-1に示す近似式を用いた<sup>(13)</sup>。 $\rho$ は(3-9)式から求めた噴流の密度である。

この他、バセット力<sup>(12,15)</sup>が作用するが、濱田<sup>(7,13)</sup>らは、バセット力の影響は少ないとしている事から省略した。

合流噴流は気液二相流れになっているものの、空気と水の相対速度は無く、均質に混合された状態として取り扱い、噴流密度( $\rho$ )は空気と水の容積割合に比例するとして、(3-9)式から求めた。

$$\rho = \alpha \rho_a + (1 - \alpha) \rho_w \quad (3-9)$$

ここで、 $\rho$ は噴流の密度、 $\rho_a$ は空気密度、 $\rho_w$ は水の密度である。

$\alpha$ は実験で求めた噴流中心での空気の容積割合{空気容積/(水の容積+空気の容積)}で、スタンドオフ距離 $h$ を横軸に $\alpha$ を縦軸にして実験結果を表せば図3-13のとおりである。図中の実線は $\alpha$ と $h$ との関係を直線近似したものである。

また、噴流の速度 $V$ は図3-13の $\alpha$ と(3-9)式から計算した噴流中心密度 $\rho$ を用

いて、ベルヌ - イの式より求めた．噴流中心速度 $V$ を縦軸にとり、横軸に $h$ をとって表すと図3 - 14になる．図中の曲線は噴流中心速度 $V$ と $h$ との関係を二次曲線で近似したものである．

図3 - 12の結果より、バラツキを表す+印はスタンドオフ距離 $h$ が大きくなるにつれて広がっていることがわかる．これは下流になるにつれて、噴流が広がり、鋼球が噴流中心から外れた位置で銅板に衝突するためと考えられる．また、(3 - 2)式、(3 - 3)式、(3 - 4)式の結果を比較すると、鋼球を投入した直後では顕著な差は見られないが、スタンドオフ距離 $h$ が大きくなるにつれて、(3 - 4)式から求めた速度が(3 - 2)式、及び(3 - 3)式から求まる速度よりも大きくなる．これは、噴流中心の流れを1次元として取り扱った事に加えて、下流になるにつれて鋼球が噴流中心から離れた位置に衝突する事が原因と考えられる．

しかし、(3 - 2)式、(3 - 3)式、(3 - 4)式共に、鋼球の加速傾向は類似している．すなわち、鋼球はスタンドオフ距離25mmまでの加速度が大きく、それより下流での速度増加は小さい事を示している．この事から、加速度が小さくなる $h=25\text{mm}$ より下流の噴流ではスタンドオフ距離 $h$ の変化に対する鋼球の速度変化が小さいため、一定な加工量を維持するための制御が容易であり、表面加工に有利と推察される．また、加工には最適なスタンドオフ距離が存在すると言える．

次に、研磨材としてトサエメリ - #320 (平均粒径 $20\ \mu\text{m}$ )、#800 (平均粒径 $10\ \mu\text{m}$ )、#2000 (平均粒径 $5\ \mu\text{m}$ )を想定して、噴流中心上での加速特性を(3 - 4)式から計算で求めた結果を図3 - 15に示す．ここで、研磨材の密度として $3700\text{kg}/\text{m}^3$ を用いた．粒径が小さくなる程、粒子速度は短距離で噴流速度まで加速され、それより下流では噴流速度とほぼ同じになる．

これらより、粒径の小さいアブレシブを混入させた場合は合流点直下の数mmまでの噴流位置で行う方が加工量は多くなると予想される．

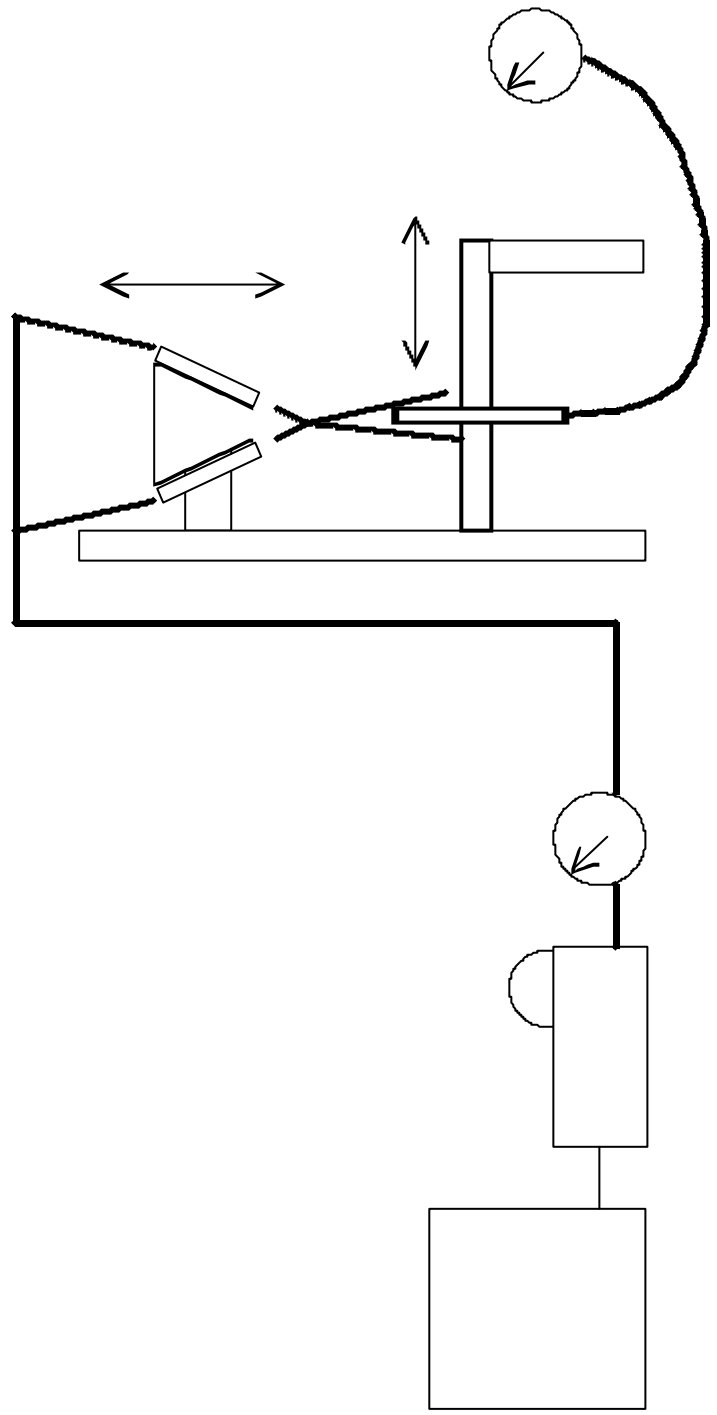
### 3.4 結言

4孔合流ノズルによる合流噴流の総圧分布、空気及び水の容積割合の実験及び、数値計算による鋼球の加速特性から、以下の噴流構造が明らかになり、加工目的に適したスタンドオフ距離の把握ができた．

- (1) 合流点では、単一ノズル噴流の衝突効果により噴流軸上圧力は上昇する．
- (2) 噴流中心軸上の圧力は合流点付近では圧力の減衰が少なく、 $h=6\text{mm}$ 以降ほぼ一定に減衰する噴流である．
- (3) 空気の容積割合は合流点付近では中心部が高く、下流になるにつれて周辺部が高くなる．また、噴流中心では合流点近傍では空気の容積割合の変動が激しものの、下流ではほぼスタンドオフ距離に比例して増加する．
- (4) 鋼球の加速特性から加工に有利なスタンドオフ距離が存在する．また粒径が小さいほど加速度は大きく短い距離で水速度まで達する．これより、アブレシブウォーター - ジェットとして利用するには、加工量の大きな切断、溝加工には合流点近傍の噴流が、それより下流では表面加工に適している．

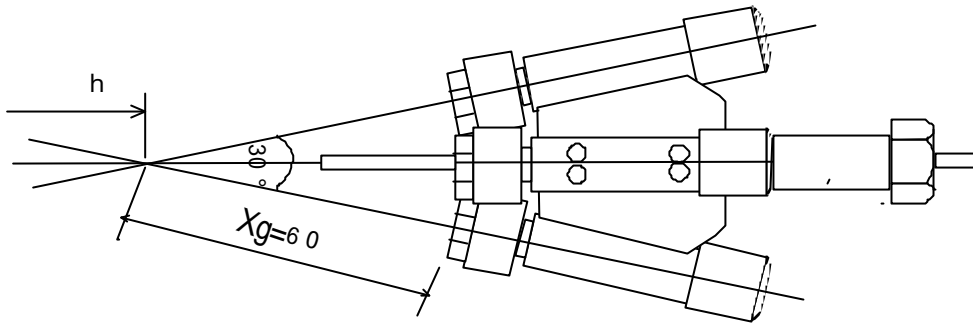
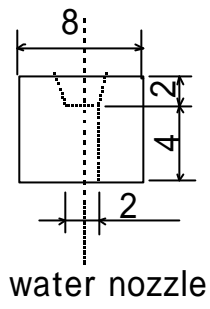
## 参考文献

- ( 1 ) 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)
- ( 2 ) 柳井田勝哉、大橋昭：気中高速水噴流特性に関する研究(第1報)、日本鋳業会誌、Vol.93 No.1072(1977-6)423-428)
- ( 3 ) 柳井田勝哉、大橋昭：気中高速水噴流特性に関する研究(第2報)、日本鋳業会誌、Vol.93 No.1073(1977-7)489-494
- ( 4 ) 柳井田勝哉：噴流の基本特性について、噴流工学、Vol.12 No.2 (1995)23-32
- ( 5 ) 大橋昭、柳井田勝哉：ウォ - タジェットの力学とその応用、噴流工学、Vol.13 No.1(1996) 40-51
- ( 6 ) ウォ - タ - ジェット技術辞典：日本ウォ - タ - ジェット学会編、丸善 (1993) 7
- ( 7 ) 濱田聡美、神山新一、山崎堯右、坪田誠、田内一成：環状気液二相噴流とアプレ - シブ衝突特性、日本機械学会論文集 (B編) 56巻526号(1990-6)1665-1668
- ( 8 ) 濱田聡美、神山新一、山崎堯右、坪田誠：環状噴流による鋼球の加速特性に関する研究、日本機械学会論文集 (B編) 55巻、511号 (1989-3) 670-675
- ( 9 ) 本川高男、南典昭、川北浩久、濱田聡美、山崎堯右：環状噴流とその応用、ウォタ - ジェット、第9巻第2号(1992.5)
- ( 10 ) JIS z 2243 プリネル硬さ試験
- ( 11 ) 多田政忠：物理学概説、学術図書出版社(1970)37
- ( 12 ) 辻裕：固気二層流の数値解析、混相流の数値計算、日本機械学会講習会資料、No. 940-11(1994)2
- ( 13 ) 濱田聡美：混相流噴流による各種材料の加工技術に関する基礎的研究、学位論文
- ( 14 ) ランダウ = リフシツ：流体力学、東京図書出版株式会社 (1970)38
- ( 15 ) Clift、R.、.Grace、J.R.、 and Weber、M.E.、Bubbles、Drops、 and Particles、 Academic Press、 1978



Water tank    Pressure pump    Pressure gauge    Bourdon-tube  
 Pressure hose    Four nozzle    Pitot tube

图 3 - 1 实验装置概要



single nozzle    body  
 slurry pipe    h:standoff distance

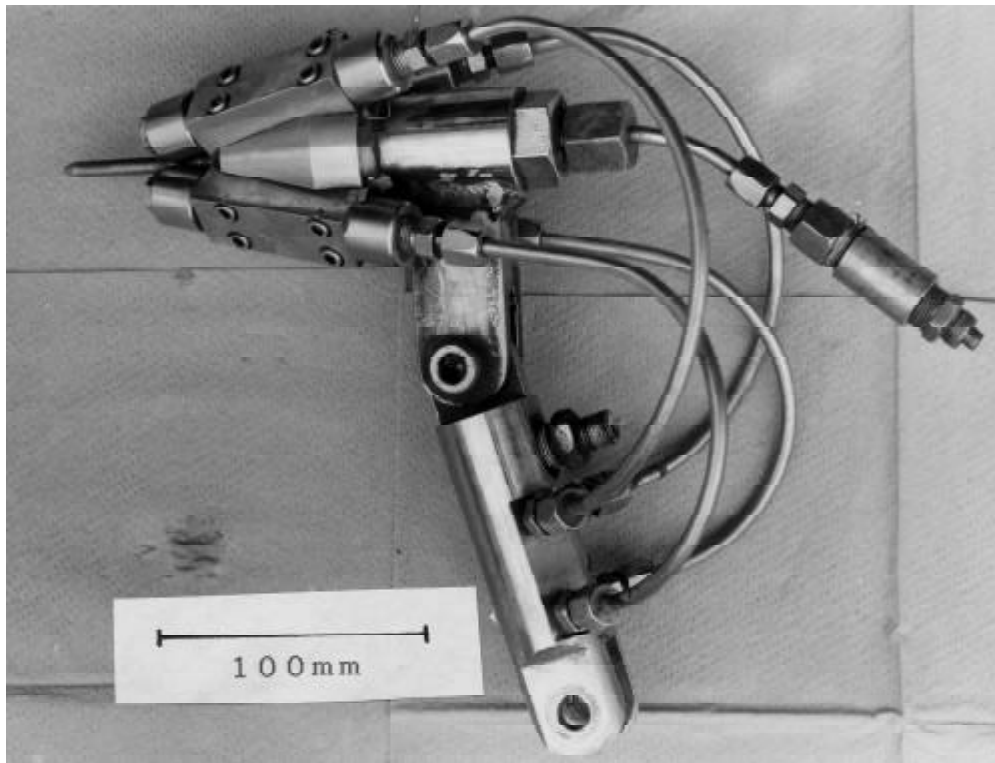


図3 - 2 試作した4孔合流ノズルの概要



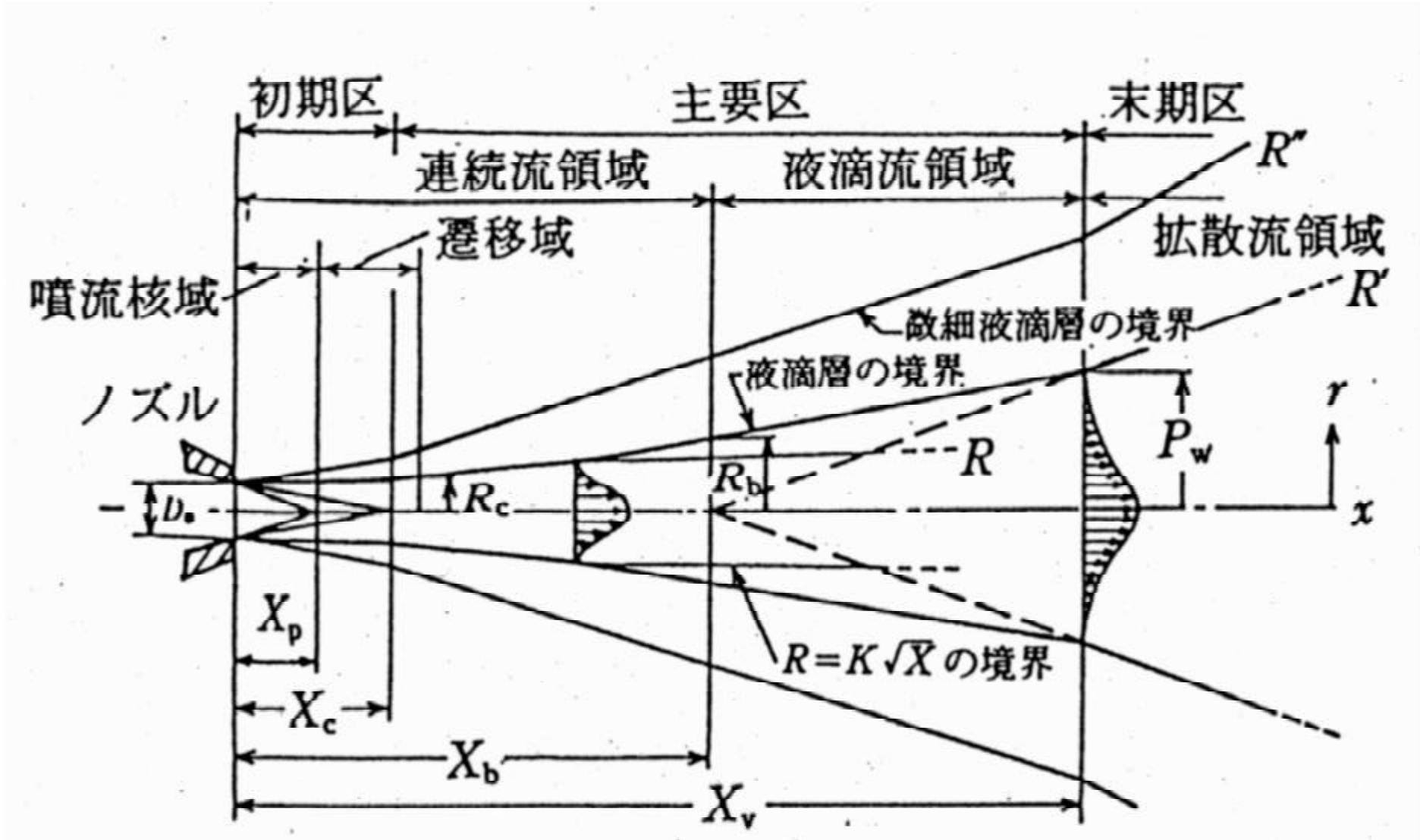


図 3 - 3 気中高速水噴流の構造概念図  
 (ウォーター-ジェット技術事典より抜粋)

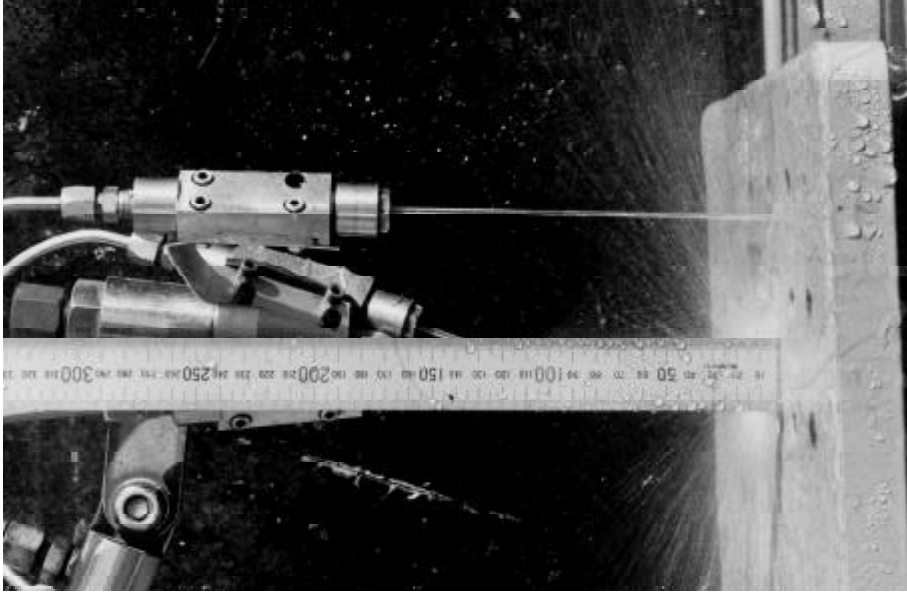


図3-4 単一ノズルからの噴流

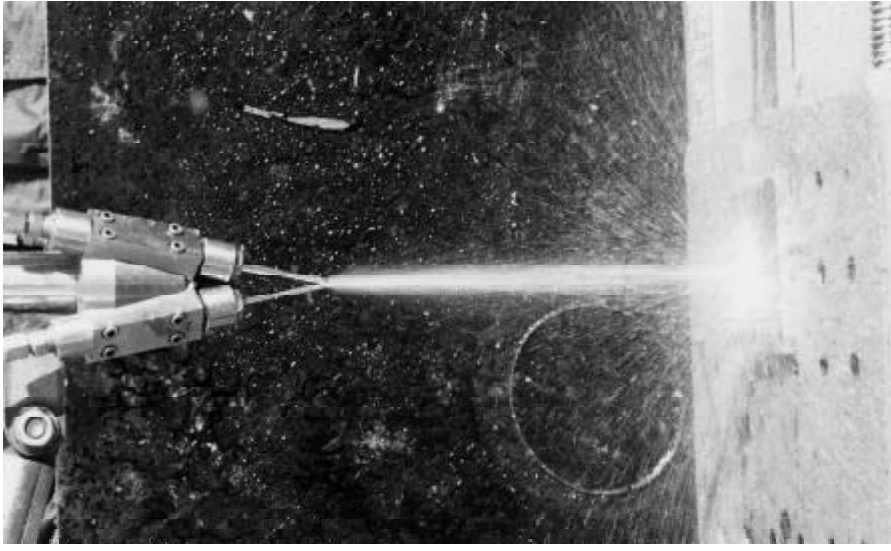


図3-5 4孔合流ノズルからの噴流

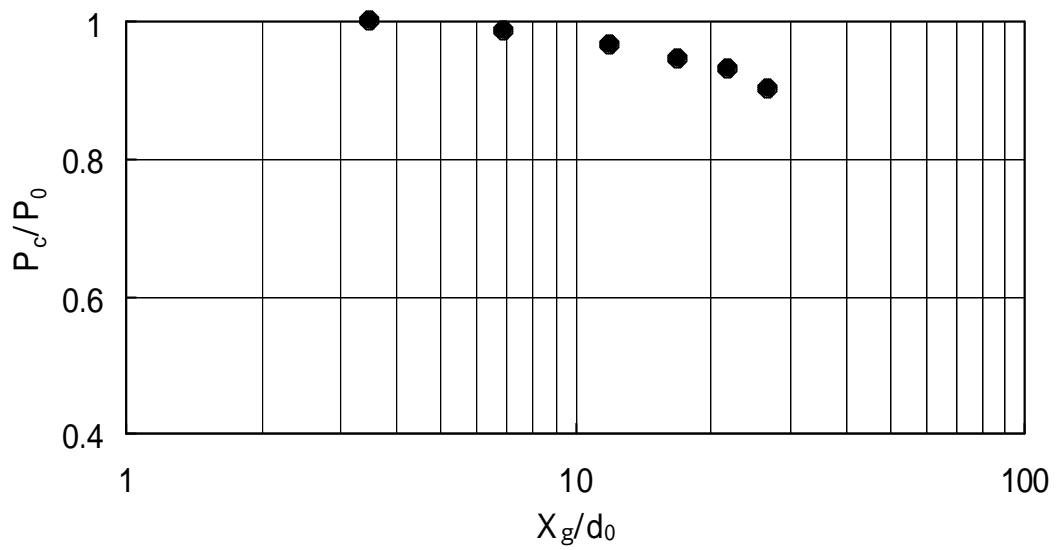


図3 - 6 単一ノズルからの噴流中心軸方向の総圧分布

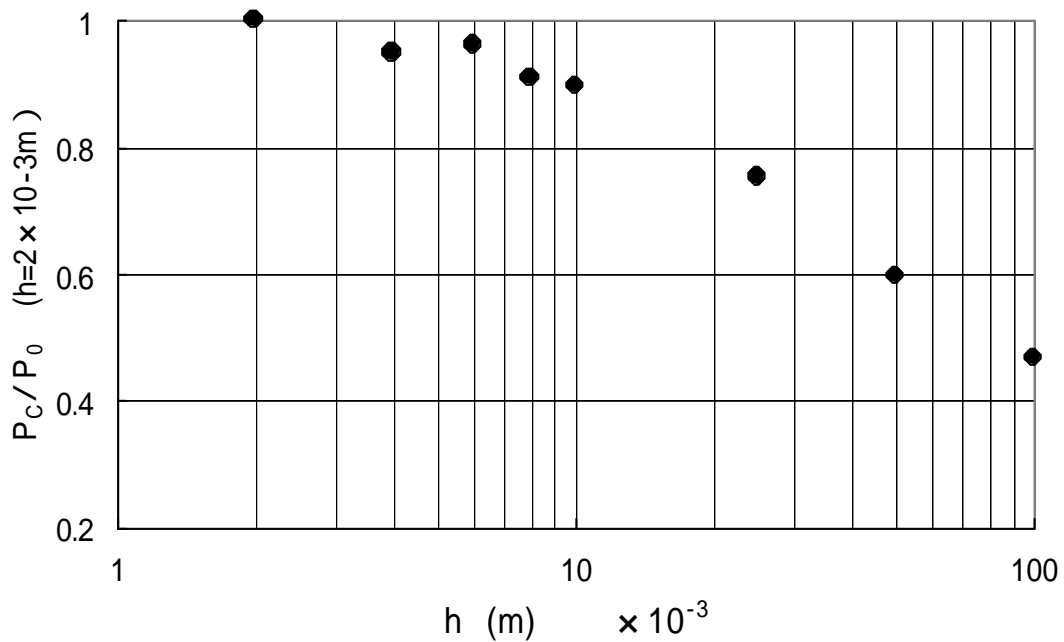


図3 - 7 4孔合流ノズルからの噴流中心軸方向の総圧分布

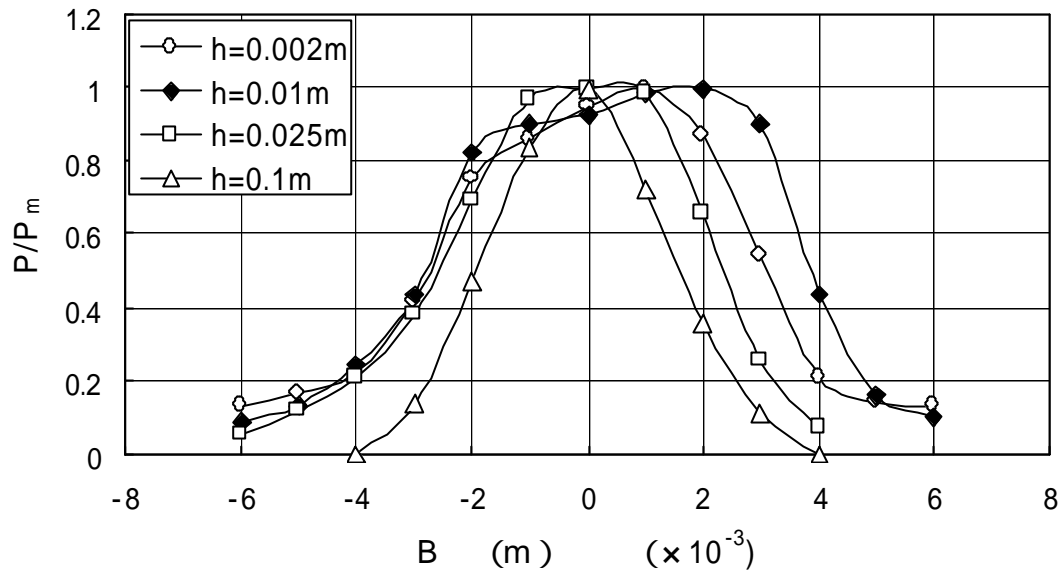


図 3 - 8 合流噴流の噴流断面方向圧力分布

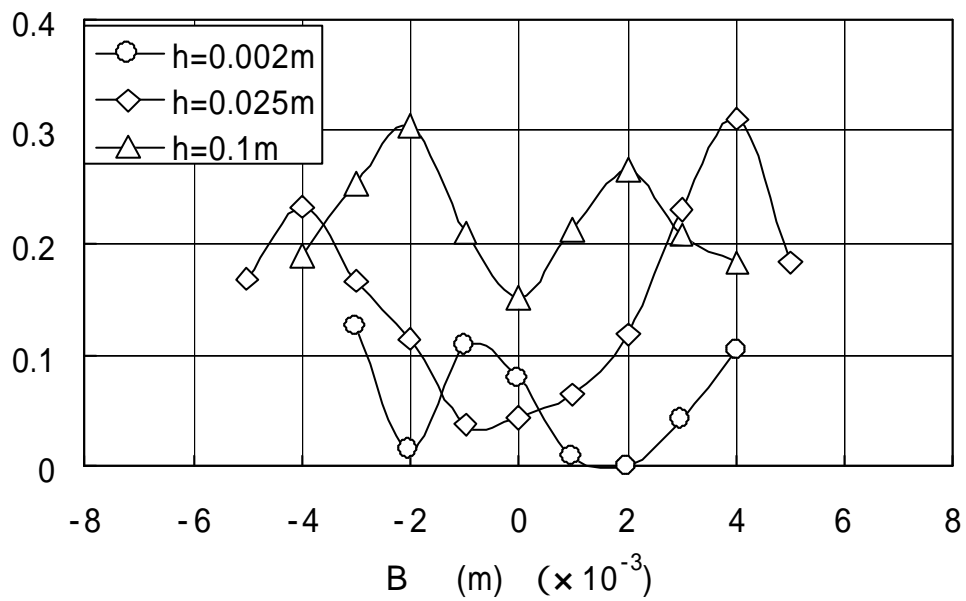


図 3 - 9 合流噴流の空気容積割合

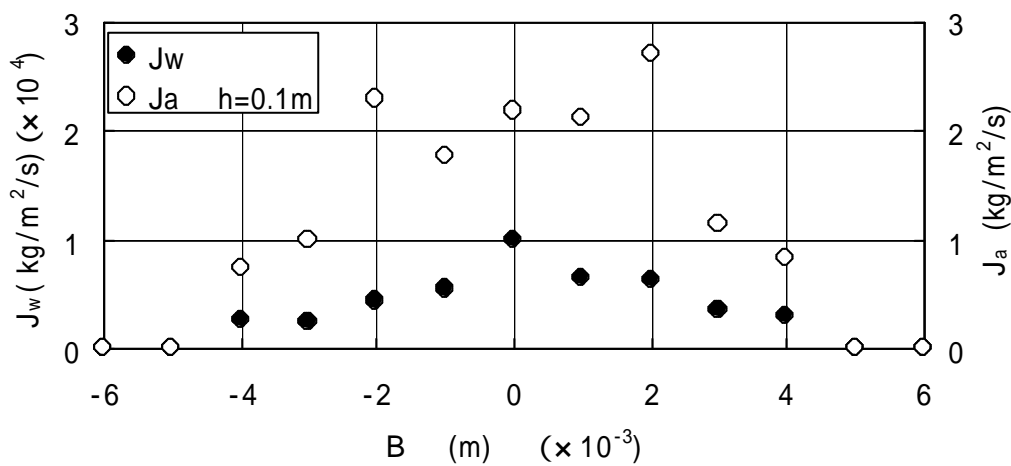
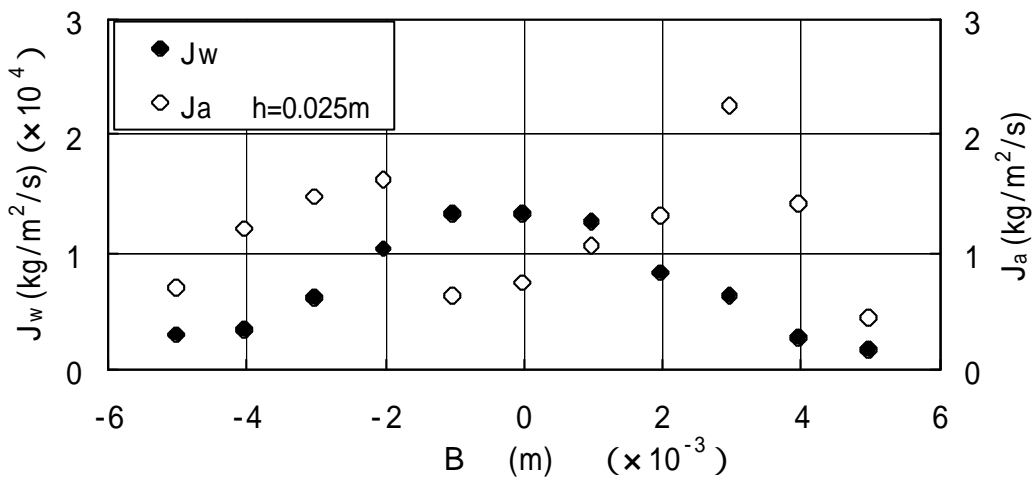
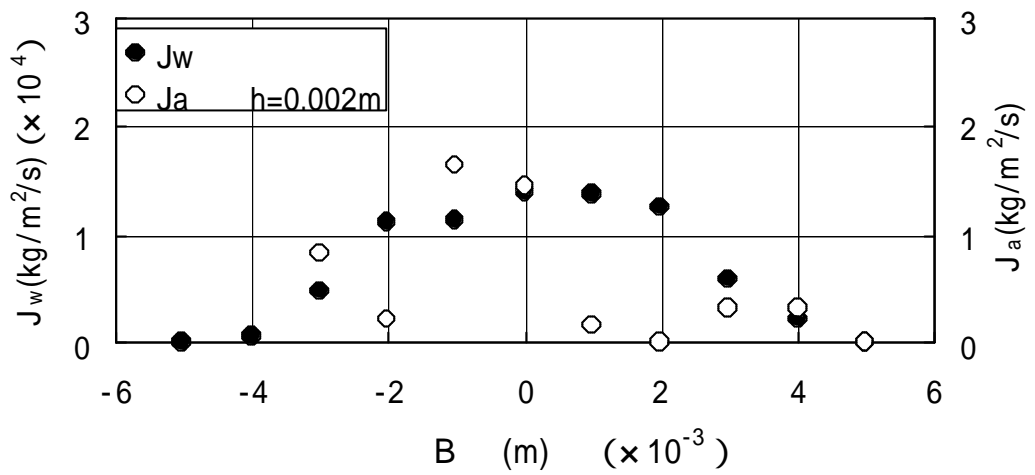


図3 - 10 合流噴流の空気と水の質量流量分布

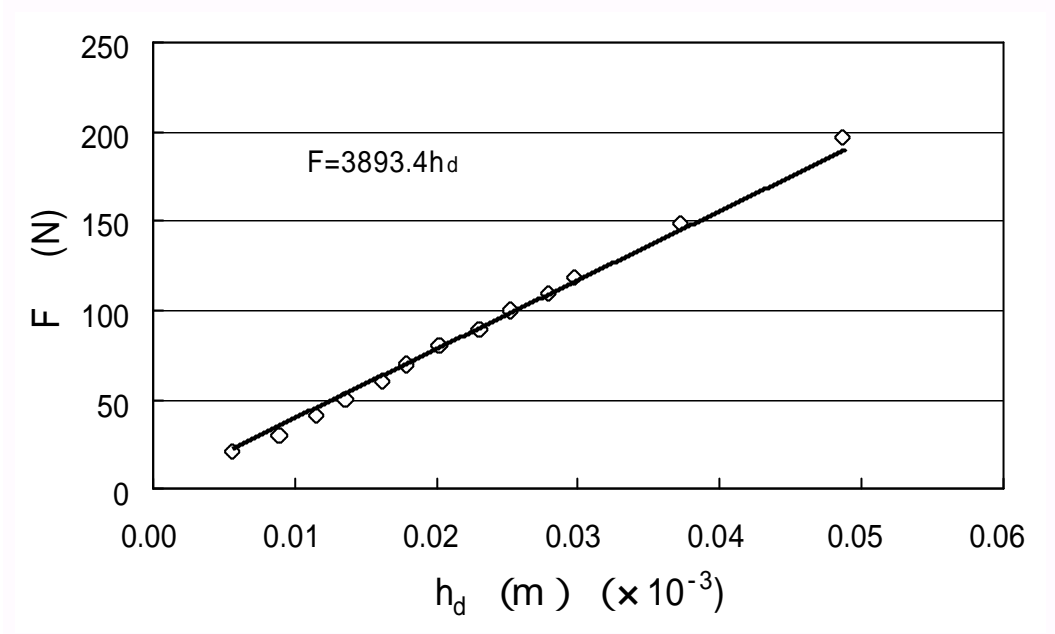


図3 - 1 1 鋼球圧痕深さと荷重の関係

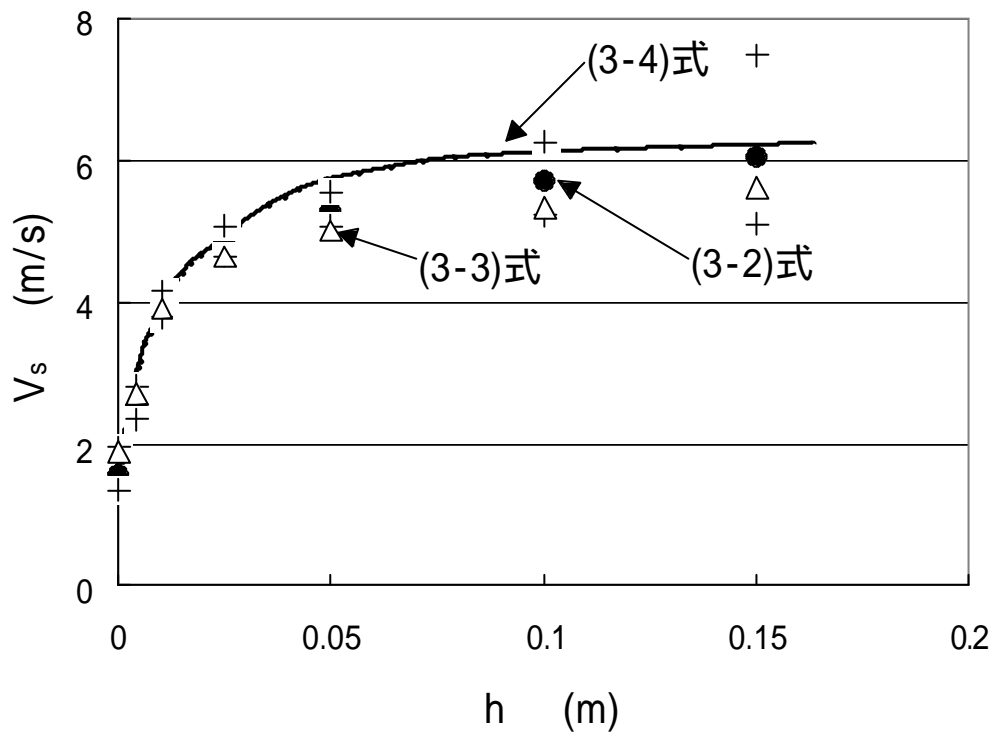


図3 - 1 2 鋼球の加速特性

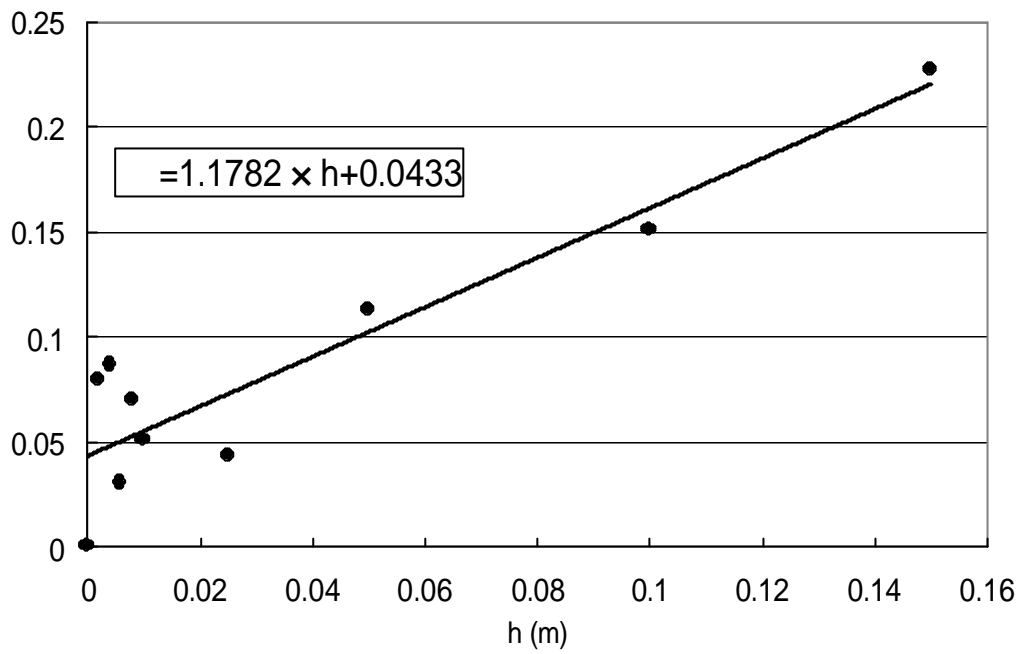


図3 - 1 3 噴流中心の空気容積割合

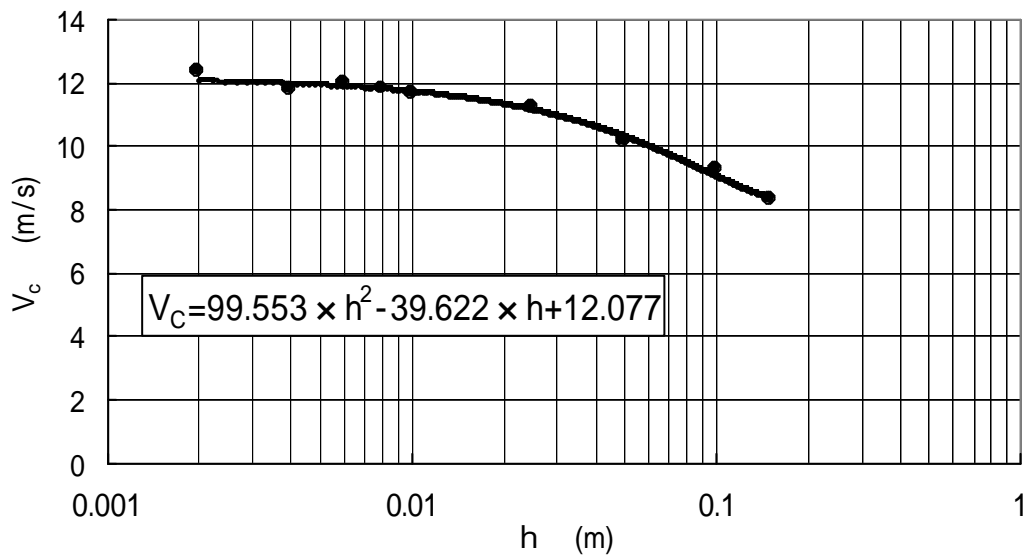


図3 - 1 4 噴流中心速度

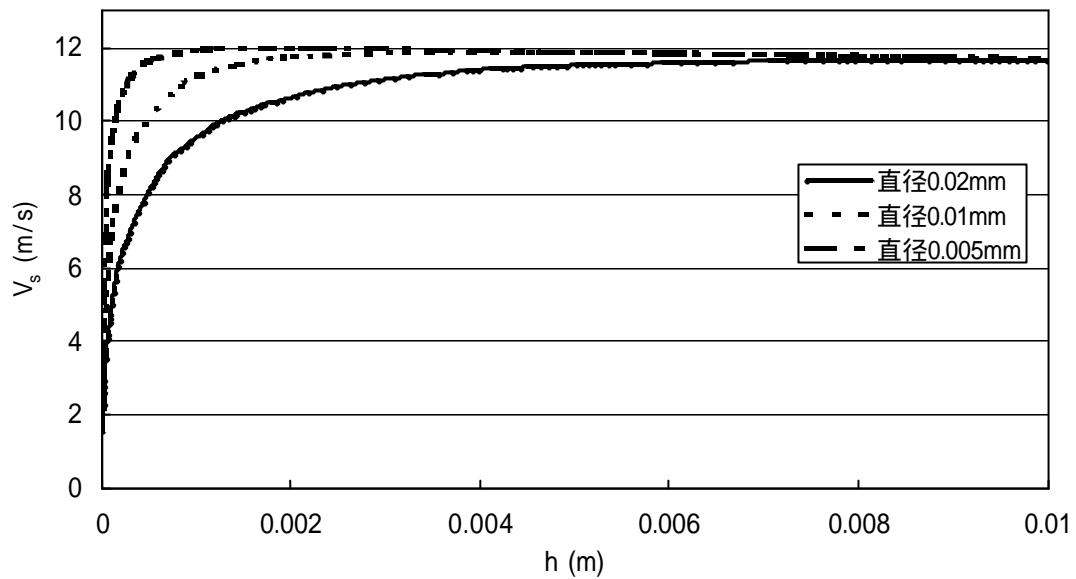


図 3 - 1 5 研磨材の加速特性（合流点付近）

表 3 - 1 ( 3 - 5 ) 式における  $C_d$  の近似式

$Re$	$C_d$
$Re < 0.7$	$24 / Re$
$0.7 < Re < 1$	$3 / 16 + 24 / Re$
$1 < Re < 40$	$24Re^{-0.74}$
$40 < Re < 3 \times 10^2$	$10 / Re^{0.5}$
$3 \times 10^2 < Re < 1 \times 10^3$	$3.85Re^{-0.314}$
$1 \times 10^3 < Re < 5 \times 10^3$	$0.9981Re^{-0.1129}$
$5 \times 10^3 < Re < 2 \times 10^4$	$0.17096 (\log Re)^2 - 1.283 (\log Re) + 2.7974$
$2 \times 10^4 < Re < 1.7 \times 10^5$	$-0.15858 (\log Re)^2 + 1.55923 (\log Re) - 3.33495$
$1.7 \times 10^5 < Re < 2.8 \times 10^5$	$-4.96277 (\log Re)^2 + 51.69868 (\log Re) - 134.157$
$2.8 \times 10^5 < Re < 5.8 \times 10^5$	$1.18747 (\log Re)^2 - 13.56431 (\log Re) + 38.8356$
$5.8 \times 10^5 < Re < 1.7 \times 10^6$	$0.154169 (\log Re) - 0.785542$
$1.7 \times 10^6 < Re$	0.175



## 第4章 合流水噴流における材料表面加工特性と応用

### 4.1 緒言

前章において、内管を有する環状噴流の特長からヒントを得た、アプレシブによるノズルの摩耗が無い4孔合流ノズルを用いて、合流噴流構造の基本特性を把握した。そして、単一ノズルからの噴流と比べて、合流点付近は噴流の衝突により圧力が高く、それより下流では噴流は広がると共に、圧力は一定に減衰する噴流である事が明らかになった。また、アプレシブの加速特性から加工目的に適したスタンドオフ距離がある事がわかった。

本研究では、吐出圧力150MPaのポンプを用いて、4孔合流ノズルによるウォータージェット及びアプレシブジェットによる金属材料の表面加工特性を加工実験から調べた。そして、単一ノズルと4孔合流ノズルによる表面加工の比較実験から、4孔合流ノズルが表面加工に優れた特長を持つ事を見いだした。その特長を生かしてコンクリート用金型のセメント除去を想定した鉄鋼材料の酸化スケール除去や、銀口除去の実験を行い、表面加工の自動化のための基礎データを作成した。

### 4.2 実験方法

実験装置の概要を図4-1に、用いたノズルの概要と、高圧での合流噴流の状態を図4-2、図4-3に示した。用いたノズルは、穴径0.3mmのダイヤモンドの通常の水用ノズルチップを組み込んだ単一ノズル4個を、頂角30°の四角錐形状のボディに固定して、単一ノズルからの噴流は中心軸上の一点で30°の合流角で合流させるようにした。アプレシブはボディ中心に挿入した内径2mmのパイプから、合流点中心に混入させた。また、ダイヤモンドノズルから合流点までの距離 $X_g$ は70mmでノズル内径 $d_0$ との比、 $X_g/d_0$ は約233 ( $X_g=70\text{mm}$ 、 $d_0=0.3\text{mm}$ )であった。柳井田<sup>(1)</sup>らは、水力採炭にとって、有効射程は約 $(400\sim 500) \times d_0$ が連続区長 $X_b$ 付近にあるとしていることから、本実験の4孔合流ノズルでの合流点、および下流域でも破壊力は十分あるものと考えて良い。

用いたアプレシブは宇治電社製トサエメリ-AE#400、#1200で、水との混合比を重量比で1:1としてスラリー状とした。これを密閉タンク内で常時攪拌させて圧縮空気50~100kPaでスラリーを噴流の合流点まで圧送した。アプレシブ供給量は、加工前後のスラリー容積の差から求めた。高圧ポンプは30kW、180rpm、最高吐出圧力150MPa、流量 $8 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{min}$ の3連プランジャ型で、発生する脈圧はノズル上流に設置したアキュムレタで吸収した。

4孔合流ノズルは6軸多関節型ロボットに固定し、ノズル移動および姿勢はロボット側の制御で行った。噴流の合流点を原点として、下流側をスタンドオフ距離 $h$ とした。原点は、10MPaの噴流を被加工物に垂直に当て、0.3mmピッチで上下に移動させて、噴流の反射の状態を目で見て決定した。

被加工材は、純アルミニウム、46黄銅、SUS304、SKD11、SUJ2、SS400として、加工テーブルにボルトで締め付け固定した。加工量は最小目盛り0.1mgの電子天秤で加工前後の重量差から、体積に換算して求めた。また、SS400の酸化スケール除去および銀口除去を目的としたものは、目で見て加工状態の良否判定を行った。

図4 - 3の合流噴流の様子から、圧力10MPaでは直径0.3mmのノズルから出た噴流は、合流点までは透明な噴流である。これら4つの噴流は衝突、合流して一本の噴流となっている。合流した噴流が白く見えるのは衝突後周囲の空気を巻き込んだためである。また、合流噴流の周囲に噴霧がただよっているのは、噴流の衝突によるものと思われる。

圧力100MPaの高圧噴流ではノズル出口直後から、空気を含んだ白い噴流になっている。そして合流後の噴流は約15°の角度の広がっている。この場合の流量とノズル断面積から計算したノズル出口速度は約336m/sとなり、音速に近い噴流となっている。

#### 4.3 実験結果および考察

##### 4.3.1 ウォータージェットによる壊食特性

各種、金属の表面加工への応用を考えて、材料の強度、硬度などが大きく異なる、純アルミニウム、46黄銅、SUS304を被加工材として120MPaのウォータージェットを100秒間当たった場合のスタンドオフ距離 $h$ と壊食量の実験結果を図4 - 4に示した。被加工材の機械的性質を表4 - 1に示す。

また、壊食表面及び、壊食中央断面の状態を図4 - 5、図4 - 6に示す。

壊食量はアルミニウム、黄銅、ステンレスの順に少なくなり、強度が大きいくほど壊食量は少なくなっている。この関係を詳しく見るために、図4 - 7に強度と壊食量との関係をスタンドオフ距離 $h$ をパラメータにして示した。スタンドオフ距離 $h$ によらず、被加工材の強度が小さくなると壊食量は指数的に大きくなる。この事は銀口 - 除去加工において、銀口 - 強度と母材強度に差がある場合に、銀口 - が優先的に除去される事を示唆している。

アルミニウムでは、壊食量は合流点直下の $h=1\text{mm}$ の位置で最大値を示し、 $h$ の増加と共に減少する。 $h=0\text{mm}$ での壊食の表面形状は、ほぼ円形であり、穴周辺も壊食されている。穴周辺の壊食は黄銅やステンレスでは見られないことから、材料強度が低いと思われる。穴断面で見ると、表面より内部に広がりが見られる。これは合流点で衝突する噴流の高い圧力や、複雑な流れが原因と考えられる。壊食量の最大値とほぼ同じ壊食量を示す $h=2\text{mm}$ での加工表面状態は、穴形状は円形から少しくずれて、楕円となる。断面形状では穴は深く、ほぼ真っ直ぐである。また、表面の穴周辺は盛り上がっている。これは、穴に入った噴流が穴からでる際に後続の噴流でせき止められて穴内部の圧力が、アルミニウムの強度以上になる事が原因と考えられる。 $h=4, 6\text{mm}$ になると、表面穴形状は楕円となり、大きくなっている。これは、噴流の広がりのためである。断面形状では穴の深さは徐々に浅く、入り口が大きなおわん型になる。

高速のウォータージェットによる壊食では、ノズルからの距離 $X$ とノズル内径 $d_0$ との比、 $X/d_0=180$ 付近に壊食量の第1ピーク、 $X/d_0=600\sim 700$ 付近に第2ピークが現れる<sup>(2, 3)</sup>。そして、その壊食のエネルギーとなっているのが第1ピークまでは、せき止め圧、 $P_s = V^2/2$  ( $P_s$ はせき止め圧力、 $\rho$ は水の密度、 $V$ は流速) によって、また第2ピーク付近では、噴流の衝撃圧 $P_w = CV$  ( $P_w$ は衝撃圧力、 $\rho$ は水の密度、 $C$ は水の音速、 $V$ は流速) によって壊食が進むとされている<sup>(2, 4)</sup>。

これに、単一ノズル出口速度336m/sを代入すると、せき止め圧は $P_s = 56\text{MPa}$ となり、純アルミニウム強度以下となる。また、水の音速1600m/sとして衝撃圧を計算すると、 $P_w = 538\text{MPa}$ となり、純アルミニウムの強度以上となる。これより、合流点付近では主に、噴流

の衝撃圧によって壊食が進むものと思われる。

高圧の合流噴流では空気を含んだ微細な液滴流となっている。通常一個の円形噴流では液滴流れになる領域は連続流れが途絶えた下流となり、速度低下も著しく、加工には不向きである。しかし、合流噴流では高速の液滴流れとなって、衝撃による破壊力は大きいものと思われる。

ステンレスと黄銅は類似した壊食曲線を示し、黄銅では $h=2\text{mm}$ で極小値を示した後、 $h=4\text{mm}$ で最大の壊食量を示す。ステンレスでは $h=1\text{mm}$ で極小値を示した後、 $h=4\text{mm}$ で最大値を示す。共に、最大壊食量の位置は $h=4\text{mm}$ である。 $h=0$ 、および $h=2\text{mm}$ の壊食状況から、ステンレスでは $h=0$ 、 $2\text{mm}$ において中心部が壊食されない。黄銅では $h=0\text{mm}$ 位置のみ中心部が残っている。これは、単一噴流の壊食において、第一ピーク ( $X/d_0=180$ ) までの噴流で壊食された表面は中心部が残り (3) 周辺のみ壊食れる状態と酷似している。また、合流点直下では第3章において明らかにしたように、噴流中心よりも、周辺の圧力が高くなっている事が予想される。そして、高速の液滴の流れによる衝撃圧により噴流周辺が優先的に壊食されるからだと思われる。強度の弱いアルミニウムでは、加工時間100sで周辺部が深く壊食され、穴に入った噴流圧により中心部分が除去されるために、合流点直下において壊食量のピークが現れたものと考えられる。

次に、直径が $0.6\text{mm}$ のノズル一個を組み込んだ単一ノズルとの壊食量の比較を図4-8に示す。圧力 $120\text{MPa}$ 、流量 $6.1 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{min}$ で共に4孔合流ノズルと同一である。縦軸は単位時間当たりの壊食量、横軸は4孔合流ノズルの合流点からの距離で表した。

単一ノズルではノズルから噴流下流方向にスタンドオフ距離 $h$ を取っており、4孔合流ノズルの場合とスタンドオフ距離 $h$ の取り方が異なるが、壊食量の違いを見るには影響はないものとする。なお、4孔合流ノズルでは参考のために、合流点上流側での壊食量も示した。

単一ノズルの方が壊食量は大きく、図に示した範囲ではノズルからの距離の増加に従って、単調に増加傾向を示す。また、4孔合流ノズルでは合流する前での壊食量が多い。これは、それぞれ4個の単独噴流での壊食量が合計されるからである。また合流点に近づくにつれて壊食量が減少するのは、個々の噴流が試料に衝突した後、壁面噴流となり中心に集まり、壁面噴流同士が中心付近で衝突し、噴流による壊食量を減少させる事によるものと思われる。

これらから、噴流のみによる加工では噴流を衝突させ合流噴流にする事は得策ではないと言える。しかし、アブレイブジェットとして利用するにはノズル摩耗が無い事のメリットは大きい。

次に、本ノズルにアブレイブを供給する場合、水と混合してスラリーで供給する方法と、圧縮空気で乾式で供給する方法が考えられる。

アブレイブの供給方法の違いによる噴流の壊食特性への影響を46黄銅で調べた。アブレイブ供給用パイプより、水および圧縮空気を供給して壊食量を測定した。圧縮空気は圧力 $200\text{kPa}$ で、水は流量 $0.88\text{L}/\text{min}$ 供給した。その結果を図4-9に示す。

いずれもスタンドオフ距離 $h=4\sim 5\text{mm}$ に極大値を持つ壊食曲線となり、圧縮空気を供給した場合は噴流のみと壊食量にほとんど差は見られなかった。水を供給すると、極大値を示す $h=4\sim 5\text{mm}$ までは噴流のみの場合より5~7割、それより下流では8割の壊食量とな

った．これは空気より水の密度が大きく、供給された水を噴流速度まで加速するのにエネルギーが消費され噴流速度が低下するためと考えられる．これより、アプレシブはスラリで供給するよりも、空気で供給する方が加工にとって有利であると考えられる．

#### 4.3.2 アプレシブジェットによる壊食特性

アプレシブとして#1200エメリを用いた場合、図4-10に、ポンプ圧力と壊食量の関係を、図11にアプレシブ供給量と壊食量の実験結果を示す．

本実験範囲ではポンプ圧力、エメリ供給量にほぼ比例して壊食量も増加することから、加工量の制御が容易であると言える．

図4-12には、エメリ-#1200でのアプレシブジェットによるステンレスと46黄銅のスタンドオフ距離 $h$ と壊食量との実験結果を表す．実線は壊食曲線を示す．いずれも一つの極大値を取った後、激減する曲線となる．図4-4のウォータージェットによる壊食曲線と比べて、極大値の位置が1~3mm上流側に移動している．図4-13、図4-14の壊食表面および壊食断面状態を見ると、スタンドオフ距離 $h=4$ mmまでは表面の穴形状はスタンドオフ距離 $h$ により大きく変化しているが、 $h=5$ mm以降では類似した形状の穴に加工されている．また、断面においても $h=1, 2$ mm位置では深く壊食されているものの、下流になるにつれて徐々に浅くなっている．このように、合流点直下ではアプレシブの複雑な挙動がうかがえる．これらから、合流点直下の噴流は表面加工など一定の壊食量を要求される加工ではなく、大きな壊食量が要求される切断および溝加工など、また噴流の衝突効果を利用した破砕などに利用するのが良いと考えられる．

極大値を過ぎると壊食量は急激に減少した後、なだらかな曲線となり、スタンドオフ距離 $h$ による影響が少なくなる．表面加工では元の形状を崩さず表層のみ加工しなくてはならないことから、スタンドオフ距離 $h$ のわずかな違いで壊食量が大きく変化するよりも、スタンドオフ距離 $h$ の影響をあまり受けない噴流が扱いやすく制御も容易となる．このことから4孔合流噴流ではスタンドオフ距離 $h=$ 数mm以上で表面加工に適した噴流と言える．

図4-15に被加工材の硬度と壊食量の関係を示す．縦軸には壊食量を横軸には被加工材の硬度をロックウェル硬度(HRC)で表してある．被加工材はSUJ2(軸受鋼)とSKD11(冷間金型鋼)であり、熱処理で表面硬度を調整してある．

$h=8$ mmの遠方におけば、材質、硬度によらず壊食量約 $2.7 \times 10^{-4} \text{mm}^3/\text{s/g}$ と一定値を示し、多少のノズル位置の変化、加工材の位置変動や硬度変化や材質の違いがあっても、加工量に変化がなく、均一に加工される特長を持つ．この特長は表面加工用ノズルとしては有利な事である． $h=2$ mmと合流点直下ではわずかな位置決め誤差が壊食量に大きく影響し、加工量にバラツキが生じる結果となる．これは図4-13、図4-14において、合流点近傍ではスタンドオフ距離 $h$ のわずかな違いにより加工穴の形状が大きく変化しているが、 $h=5$ mmより下流では形状、深さ共に大きな変化が見られない結果からも推察できる．

#### 4.3.3 表面加工への適用

これまでの壊食特性から、4孔合流ノズルからの噴流にアプレシブを混入させた合流点直下の噴流は壊食量が大きく切断等に利用可能である．また $h=8$ mmより下流の噴流では壊食量が材質、硬度によらずほぼ一定になることから表面加工に利用するのが良い事がわか

った．この特長を生かして、銀口 - の除去加工およびコンクリ - トブロック用の金型に附着した残留セメント除去加工への応用のために、鉄鋼表面の酸化スケ - ルの除去実験を行い、これらの加工への可能性を調べた．

実験に用いたエメリ - は#400、#1200、圧力は30、50、100MPaで酸化スケ - ルを除去した場合に十分な除去ができる加工範囲のスタンドオフ距離 $h$ とノズル移動速度の関係を図4 - 16に示す．また、除去した表面の加工状態を図4 - 17に示した．図4 - 16は縦軸にスタンドオフ距離 $h$ 、横軸にノズル移動速度を取って、目で見ても酸化スケ - ルが良好に除去された点を結び、それよりも左側領域、ノズル移動速度を遅くするか、スタンドオフ距離を小さくする範囲で酸化スケ - ルが良好に除去できる事を表している．

スタンドオフ距離 $h$ を大きく取ると、壊食量が減少するため、ノズル移動速度を遅くしなくてはならない．また、圧力が高くエメリ - 粒径が大きい程、ノズル移動速度は大きく取る事ができる．

図4 - 17に示した加工の表面状態からも、酸化スケ - ルは完全に平滑に除去されているのが確認できる．また、スタンドオフ距離 $h$ の制御により大きく加工幅の変更が可能で、狭い範囲から広い範囲までの加工に適用できる．接合した後のみ出した余分な銀口 - の除去には狭い加工範囲で速度を上げる事で周辺への加工の影響を最小限に押さえる事ができる．またコンクリ - ト用金型など、大きなものを対象とする場合はスタンドオフ距離 $h$ を大きく取って、加工幅を大きくする方が望ましい．

また、加工能率について図4 - 18に示す．縦軸に加工能率を表す、加工面積速度を、横軸にはスタンドオフ距離 $h$ を取った．圧力50MPa以上ではスタンドオフ距離 $h=50\text{mm}$ 以上の加工が最も能率的であり、それよりも低圧になると、上流側の方が能率は上がる．また、アブレシブ粒径が大きい程、加工面積速度は大きくなる．

次に、直径 $d=0.6\text{mm}$ のノズルを装着した単一ノズルに#1200のアブレシブを混入させ、直径 $d=2\text{mm}$ のアブレシブノズル<sup>(5)</sup>を用いて酸化スケ - ル除去の実験結果を図4 - 19に示す．縦軸にはノズルからの距離を取ってある．ウォ - タジェットのための加工で最大壊食量を示した $X=180\text{mm}$  ( $X/d_0=300$ )の距離までは、スタンドオフ距離の影響が無く、ノズル移動速度 $25\text{mm/s}$ で良好な加工ができ、それ以上離れると4孔合流ノズルと同じように、ノズル移動速度を遅くしないと良好な加工ができない．

また、図4 - 11に示したように、壊食量はアブレシブ供給量に比例して増加するため、単位アブレシブ供給量当たりの加工面積速度の比較を、単一ノズルと4孔合流ノズルを用いて行った．その結果を図4 - 20に示す．これより、ノズルからの距離 $200\text{mm}$ 以上では、単一ノズルの方がそれ以下では4孔合流ノズルの方が能率は良い．これは、単一ノズルからの噴流は遠くまで圧力が維持されており、4孔合流噴流は合流後噴流が広がり圧力の低下が大きいためと考えられる．

また、最大の加工面積速度の点で比較すると、4孔合流ノズルの方が単一ノズルより加工能率は約2倍良い事がわかる．

次に、銀口 - 除去加工に適用した実験結果を示す．被加工材の形状は図4 - 21に示す様に、外径 $25\text{mm}$ 、長さ $800\text{mm}$ のパイプ2本を平行に接触させて、リブを介して銀口 - で接合してある．除去部分は、リブとパイプ表面に流れ出した余分な銀口 - である．

加工方法は図4 - 22に示す様に、噴流が試料に当たる角度  $\theta$  を $45^\circ$  にして、パイプ長

手方向に噴流が流れる方向に移動させた。図4 - 23は加工後の表面状態を示す。アブレシブ#2000、ノズル移動速度2mm/s、 $\theta=45^\circ$ 、圧力70MPa、スタンドオフ距離 $h=20\text{mm}$ でリブおよびパイプ表面の酸化スケールと銀口-が同時に除去可能であった。また、パイプ及びリブ素地の表面粗さも、製品として十分満足する状態であった。

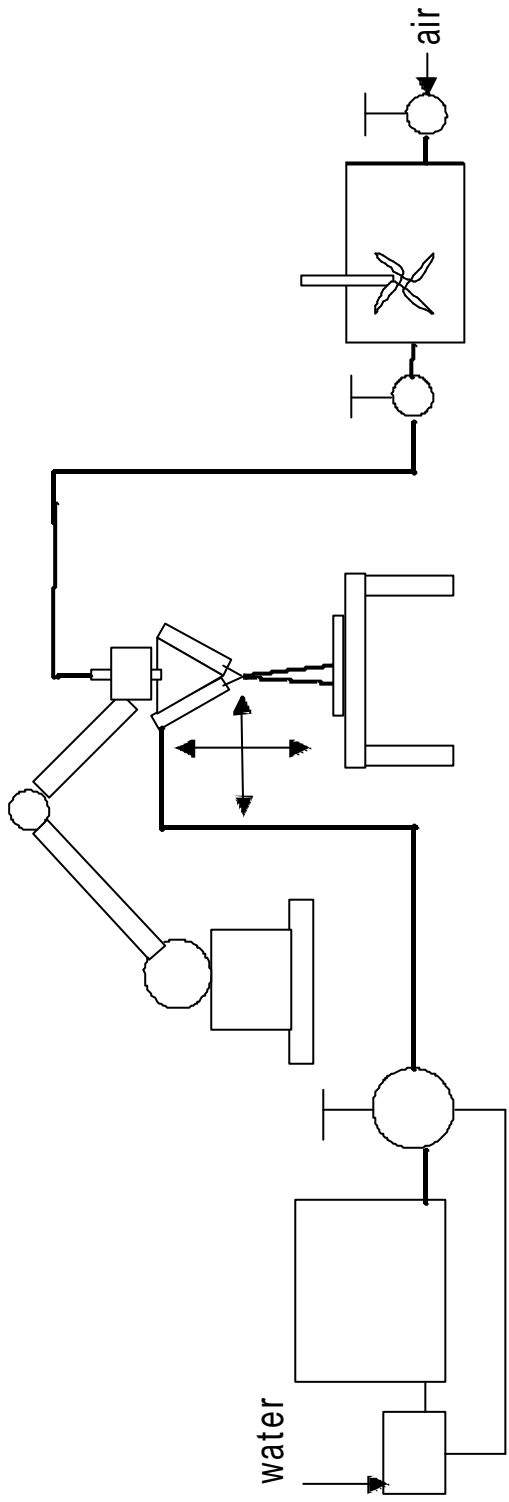
#### 4.4 結言

4孔合流ノズルからの噴流を一点で衝突、合流させた噴流による加工特性、それにアブレシブを混入させたアブレシブジェットでの金属材料の加工特性を調べると同時に、単一ノズルによるアブレシブジェットと加工能率の比較実験を行った。さらに表面加工への応用実験から次の結論を得た。

- (1) 噴流は合流した後、気液2相流の流れになり、一定の広がりを持つ一つの噴流となる。
- (2) ウォ-タジェットでの加工の場合、強度の強い46黄銅やステンレスでは $h=4\text{mm}$ に壊食量の極大値を持ち、強度の弱い純アルミニウムでは、合流点直下に壊食の極大値がある。
- (3) アブレシブジェットによる壊食特性は、合流点直下に加工の極大値があり、数mm以上離れると、スタンドオフ距離 $h$ の影響が少なくなる。また、被加工材SKD11、SUJ2において材質、及び硬度による影響も無くなり、加工量は一定となり、表面加工に適した噴流となる。
- (4) アブレシブ粒径を変えることにより、表面粗さがコントロールでき、ここで取り上げた酸化スケールの除去や、薄板の切断、破砕など幅広い用途に適用し得る特長を持つ。
- (5) スタンドオフ距離によって加工幅を大きく変えることが可能で加工対象が広がる。
- (6) アブレシブジェットを鋼板の酸化スケール除去に適用した場合、30MPa程度でも完全に除去可能であった。また、単一ノズルと比べて約2倍の加工能率が得られた。
- (7) パイプを銀口-で接合した供試体の銀口-除去は十分満足できる状態で加工可能であった。
- (8) 壊食量は噴流圧力及びアブレシブ供給量とリニアな関係となるので、加工制御が容易となる。
- (9) 4孔合流ノズルを用いた表面加工の自動化に必要な基礎データを提供できた。

### 参考文献

- ( 1 ) 柳井田勝哉、大橋昭：気中高速水噴流特性に関する研究（第2報）、日本鋳業会誌、  
Vol.93 No.1073(1977-7)489-494
- ( 2 ) ウォ - タ - ジェット技術辞典：日本ウォ - タ - ジェット学会編、丸善（1993）
- ( 3 ) 小林陵二、新井隆景、山田泰司：ウォ - タジェット加工技術における噴流の構造と  
金属の壊食過程、日本機械学会論文集(B)、53-489(1987)、1539-1542
- ( 4 ) 木下豊弘：高速液噴流技術とその応用、Jouunal of the J.S.M.E.、 Vol.76、No.6  
49（1973）128-137
- ( 5 ) 柳内拙郎、吉田正二：チタン材のアプレシブジェット加工、素形材、Vol.9(1985)  
25-30



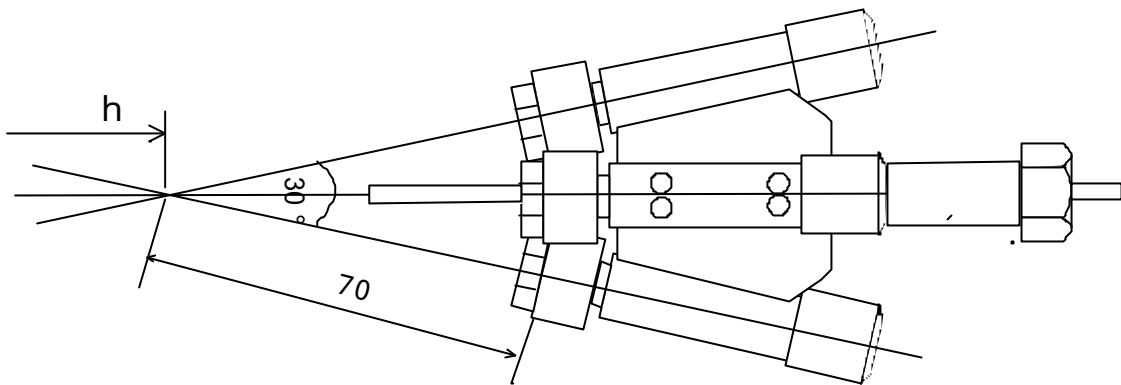
water tank    High pressure pump    pressure control valve    pressure hose

transfer robot    four nozzle    table    specimen    slurry hose

flow control valve    slurry tank    air control valve

図 4 - 1 実験装置概要





single nozzle      body      slurry pipe  
 $\theta = 30^\circ$        $X_g = 70\text{mm}$        $h$ : stand-off distance

図4 - 2    4孔合流ノズル概要

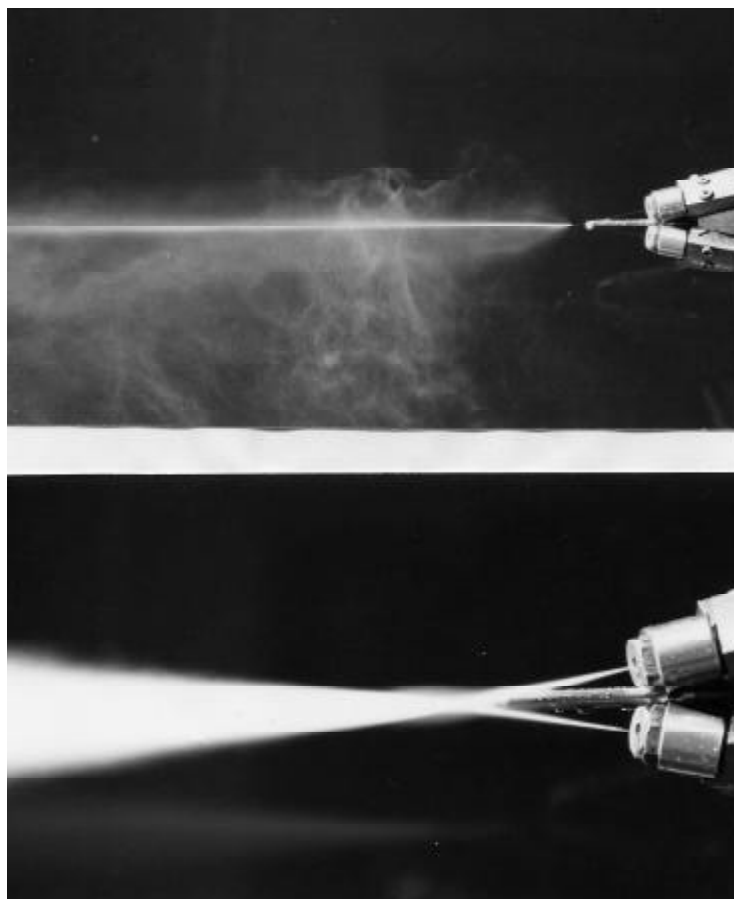


図4 - 3    4孔合流ノズルからの噴流の様子

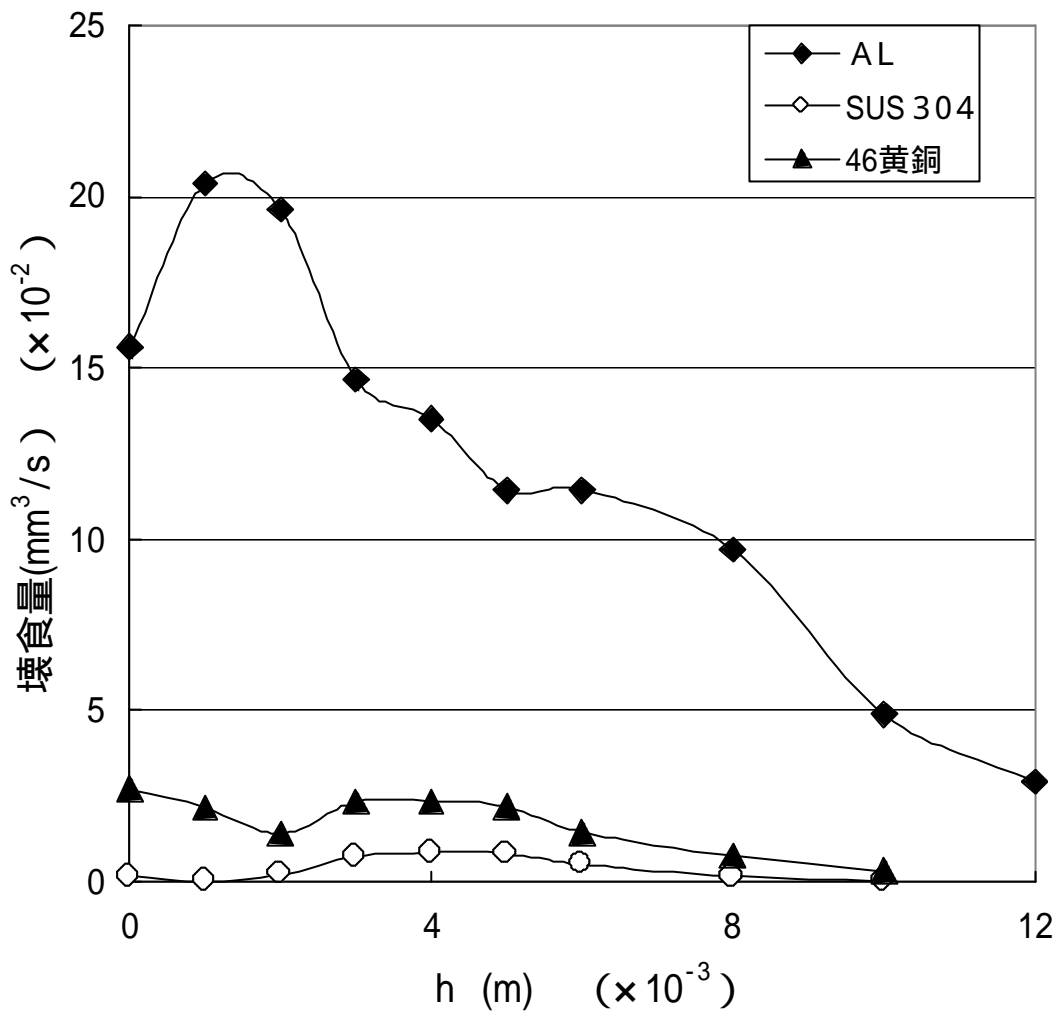


図4 - 4 ウォ - タジェットによる各種材料の壊食曲線

表4 - 1 被加工材料の機械的性質

SPECIMEN	Strength(N/mm <sup>2</sup> )	Strain (%)	Hardness HV
Aluminium	116	29.6	35
Brass	405	25.0	138
Stainless	675	66.1	178

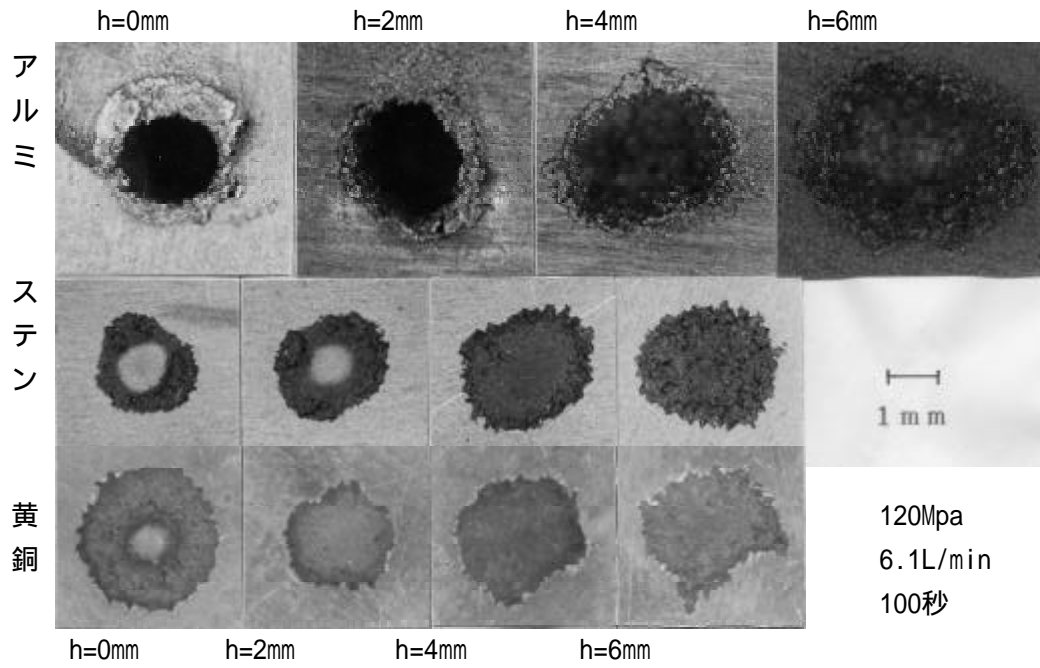


図4 - 5 ウォ - タジェットによる壊食状態 (表面)

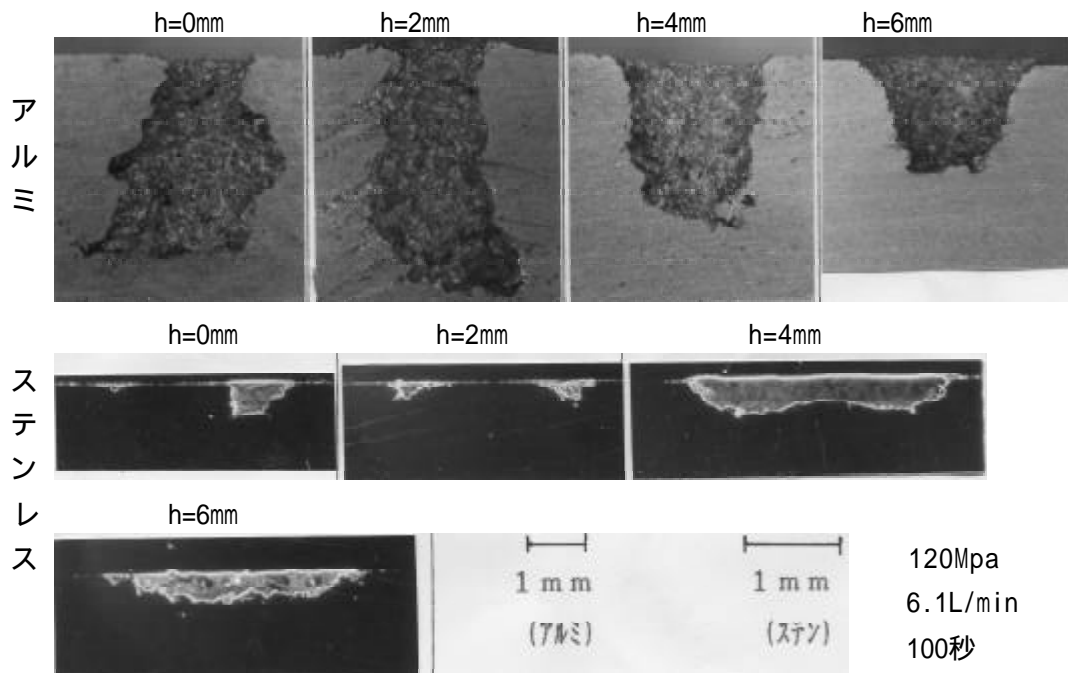


図4 - 6 ウォ - タジェットによる壊食状態 (断面)

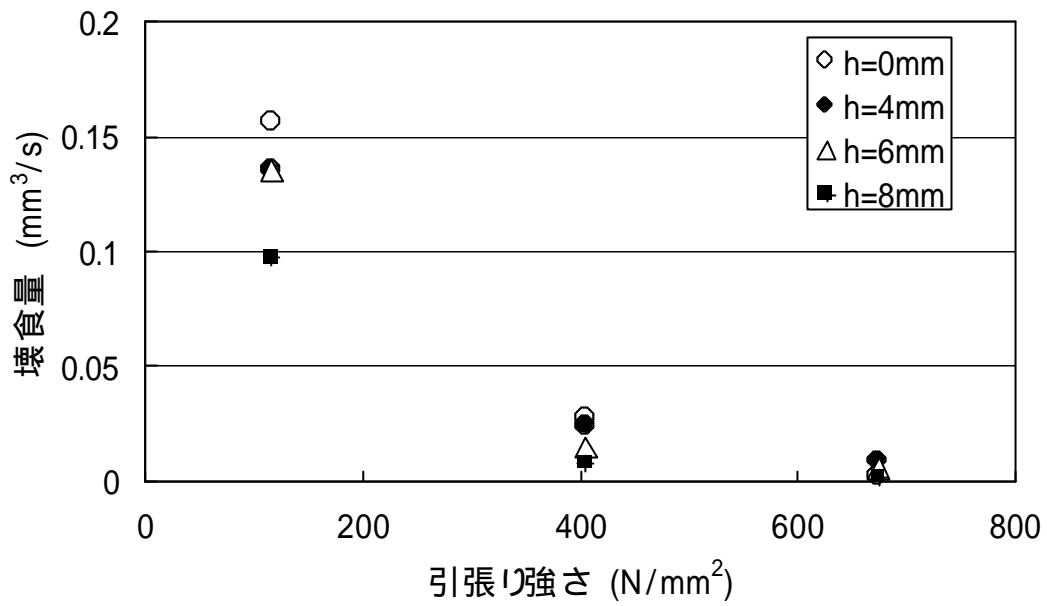


図4 - 7 引張り強さと壊食量の関係

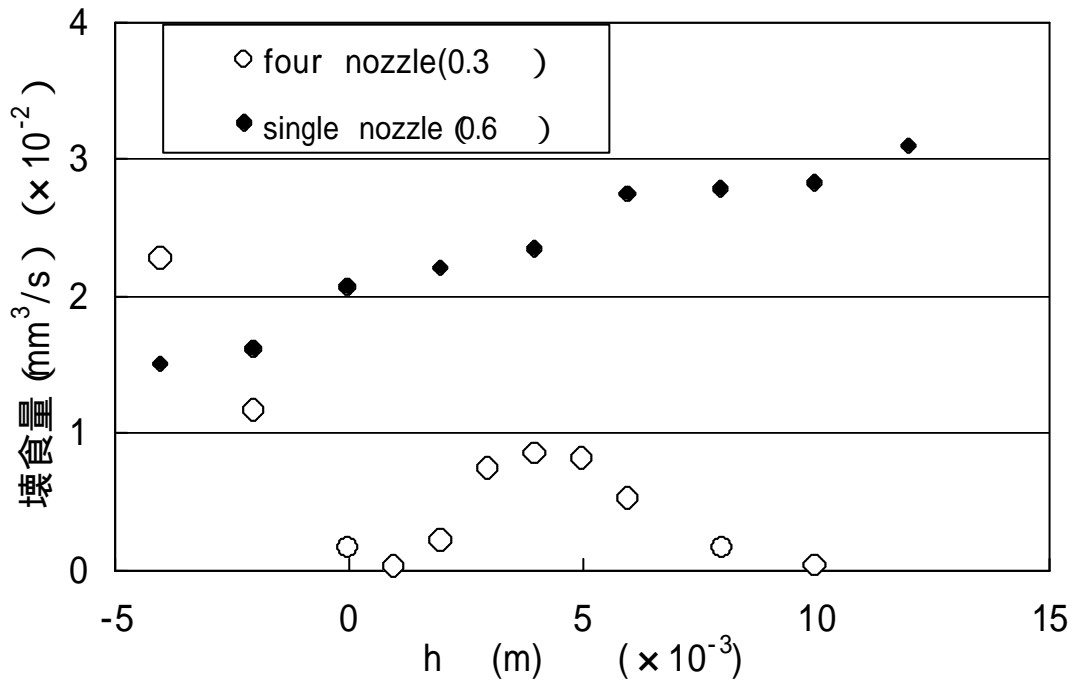


図4 - 8 4孔合流ノズルと単一ノズルによる壊食曲線

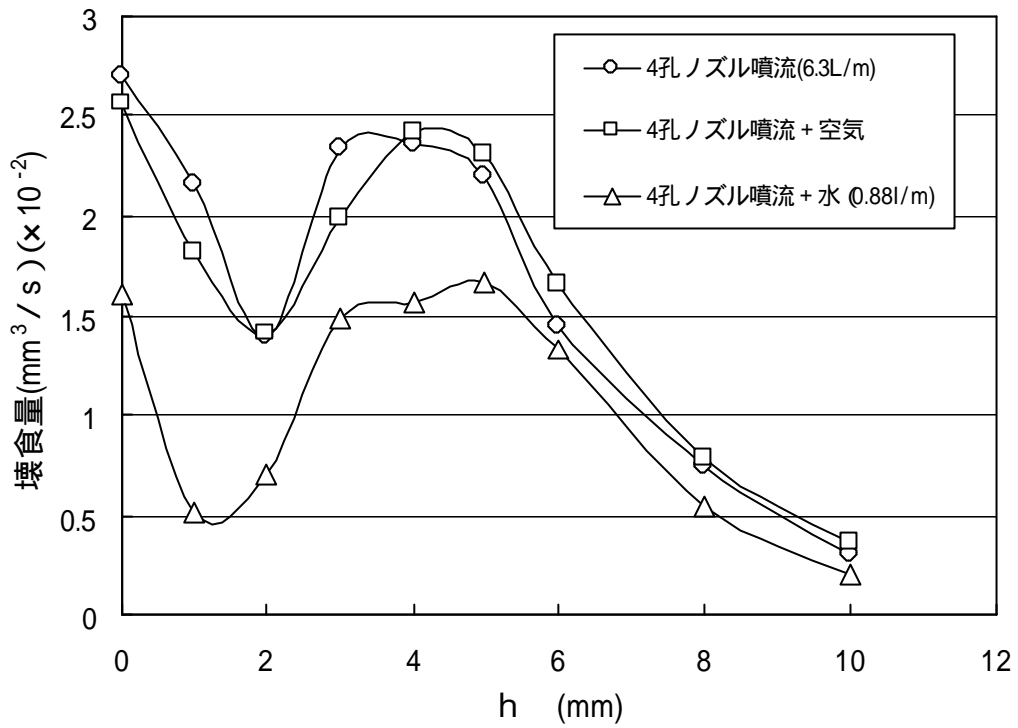


図4 - 9 内管より水および空気を混入させた噴流による壊食量(120MPa)

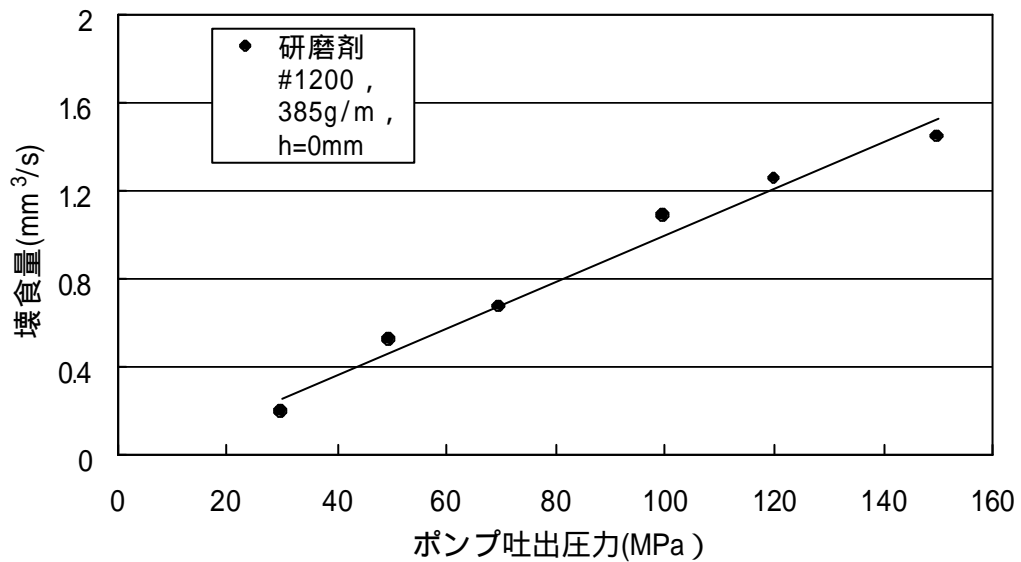


図4 - 10 ポンプ吐出圧力と壊食量の関係(sus304)

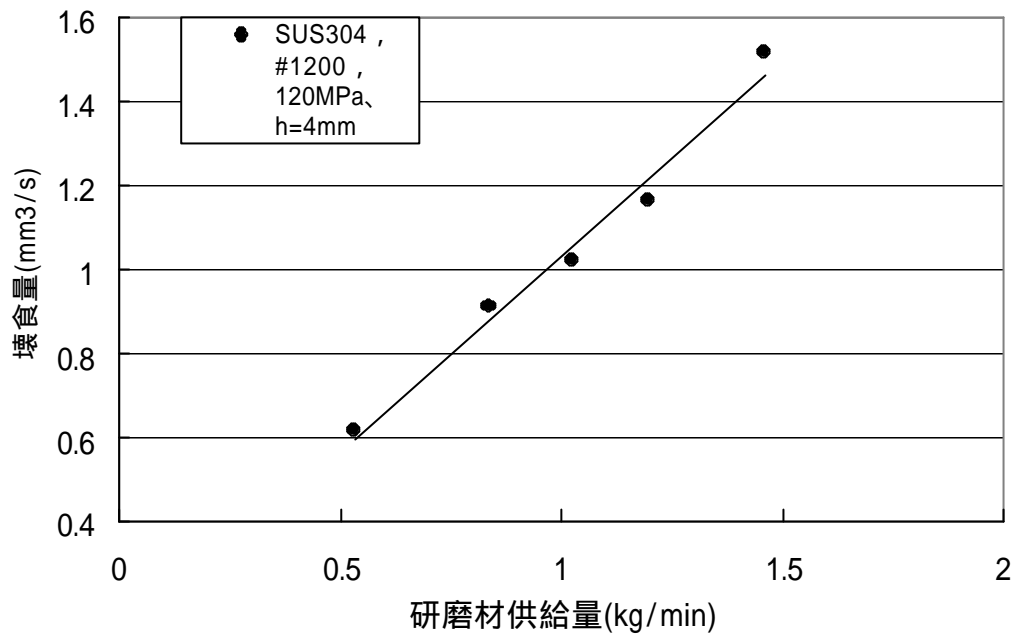


図4 - 1 1 研磨材供給量と壊食量の関係

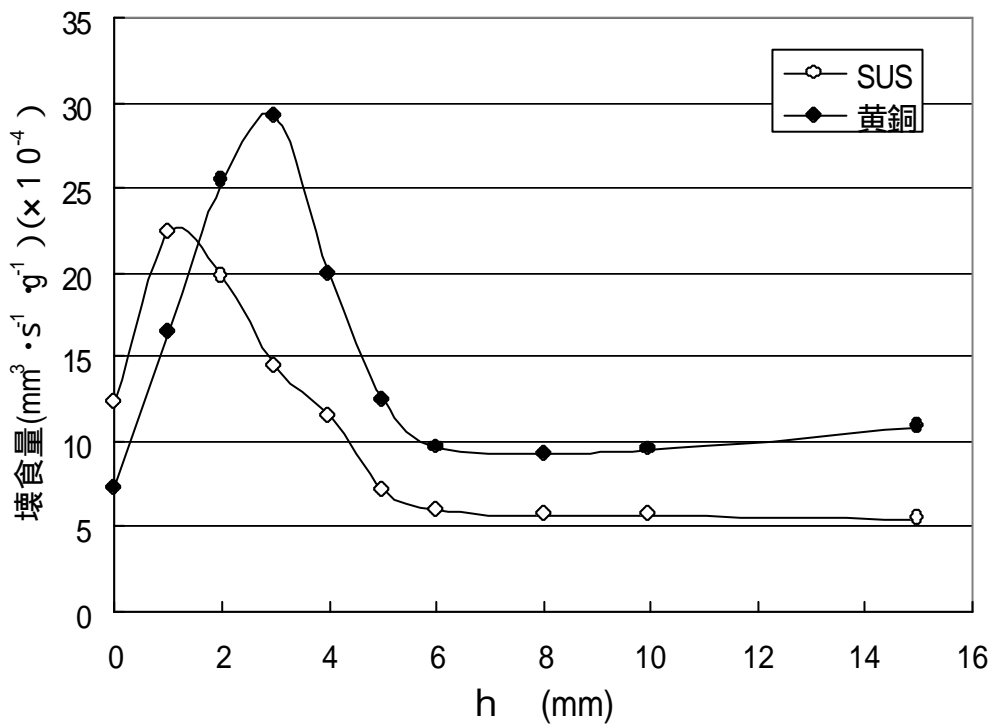


図4 - 1 2 アブレイブジェットによる壊食曲線

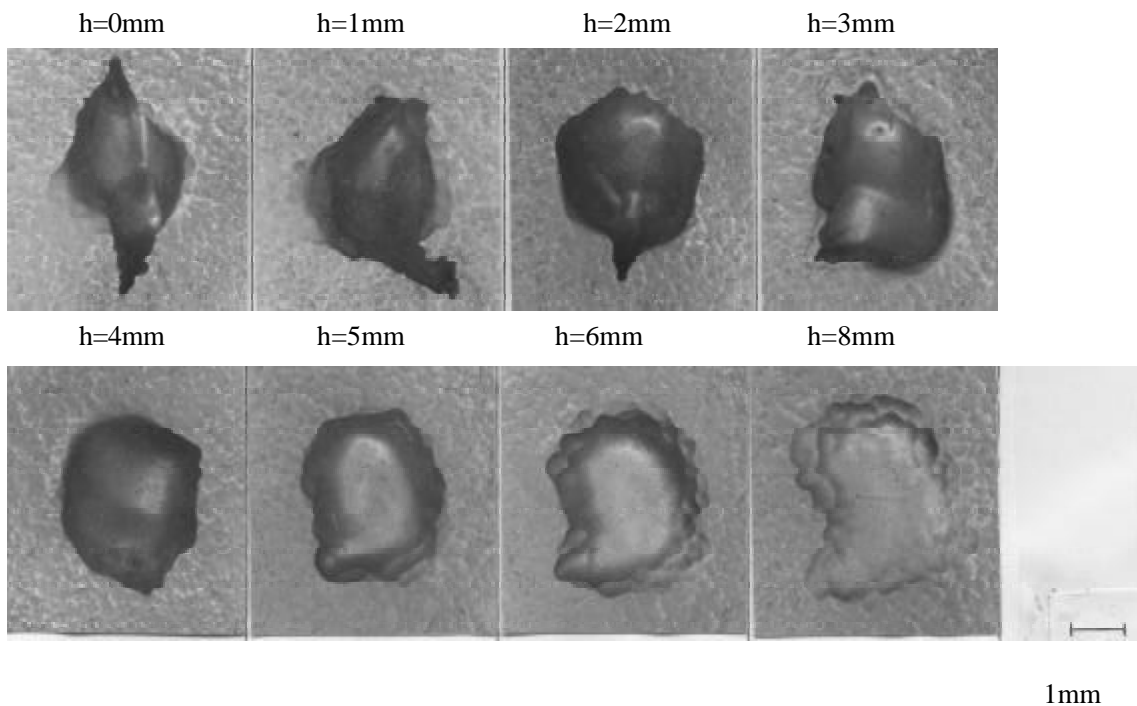


図 4 - 1 3 アブレシブジェットによるステンレスの壊食表面の状態 (120MPa、6.1L/m、#1200、533g/m、10 s )

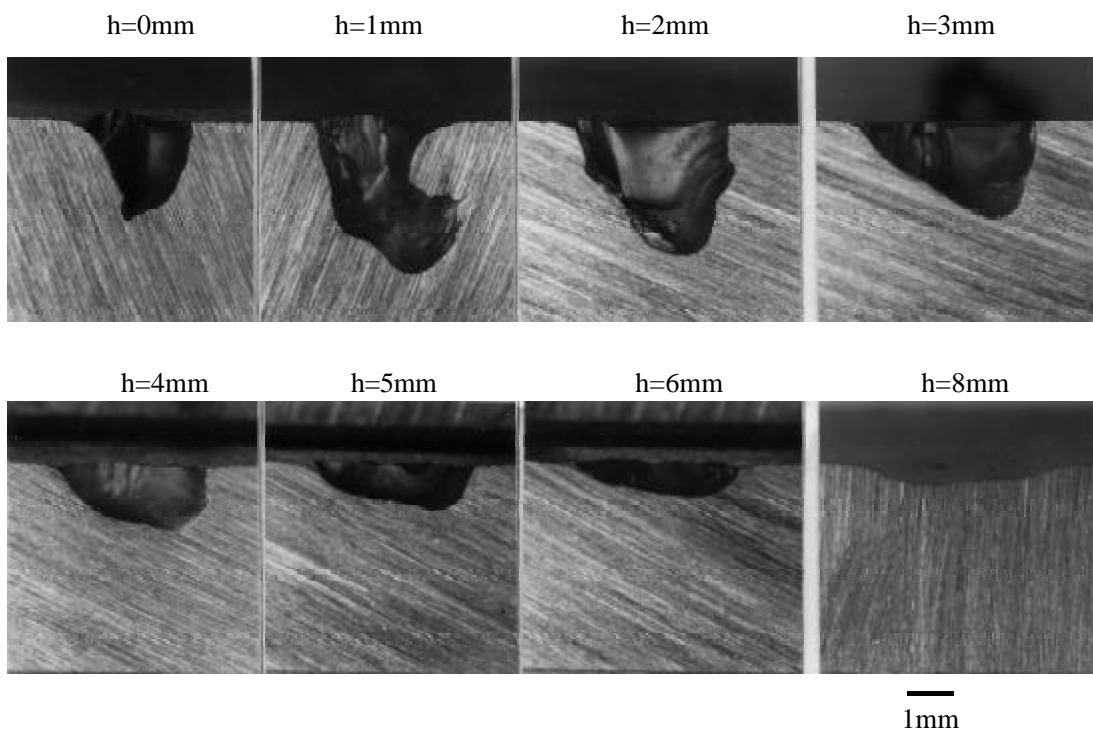


図 4 - 1 4 アブレシブジェットによるステンレスの壊食断面の状態 (120MPa、6.1L/m、#1200、533g/m、10 s )

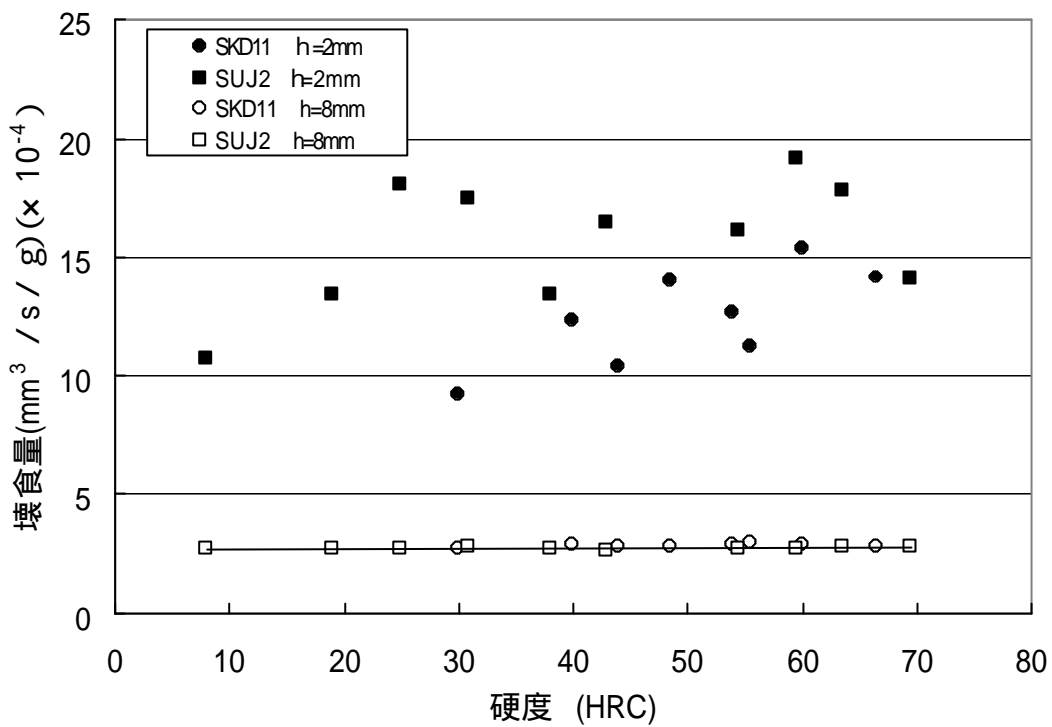


図 4 - 1 5 壊食量におよぼす硬度，スタンドオフ距離の影響

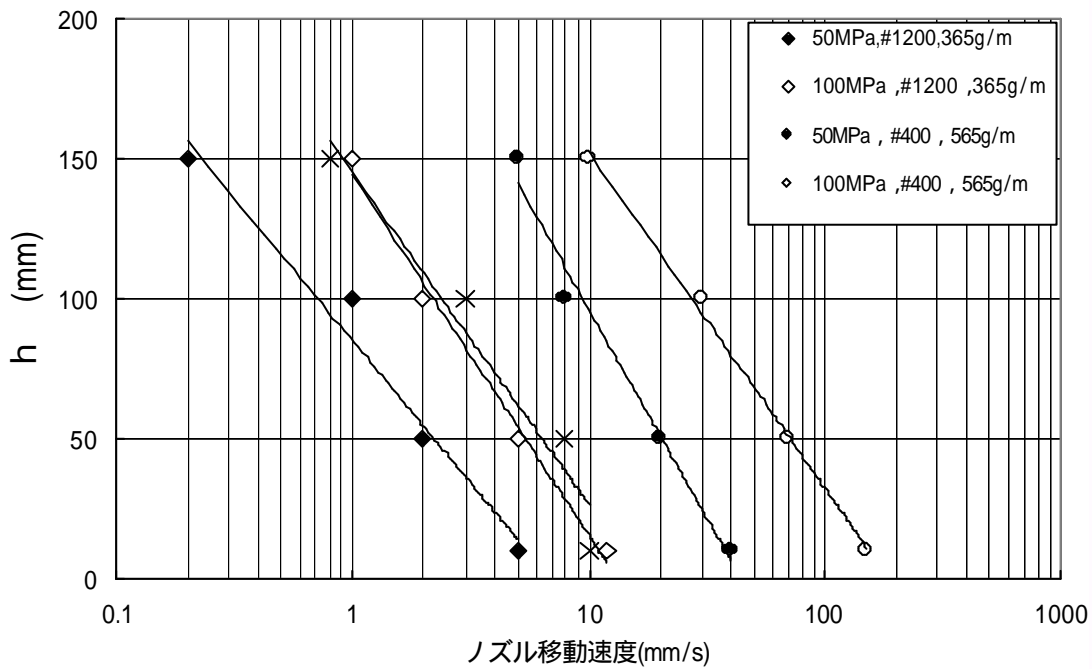


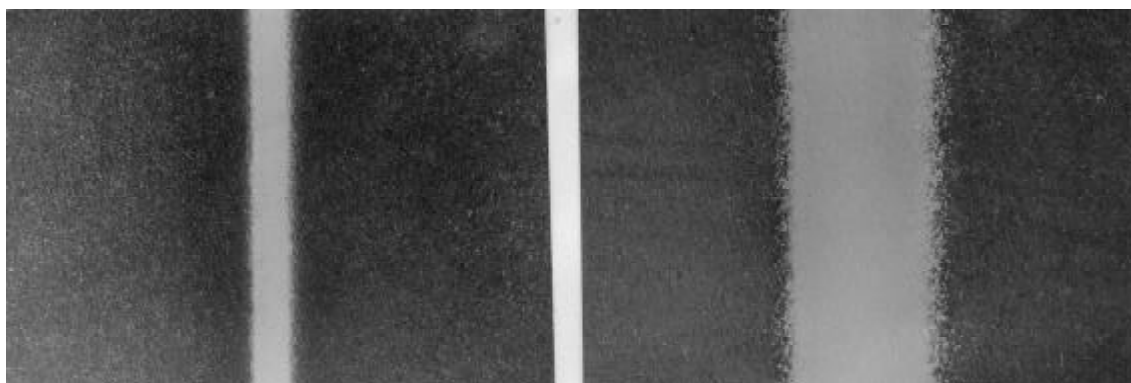
図 4 - 1 6 酸化スケール除去におよぼすノズル移動速度とスタンドオフ距離の関係



10mm

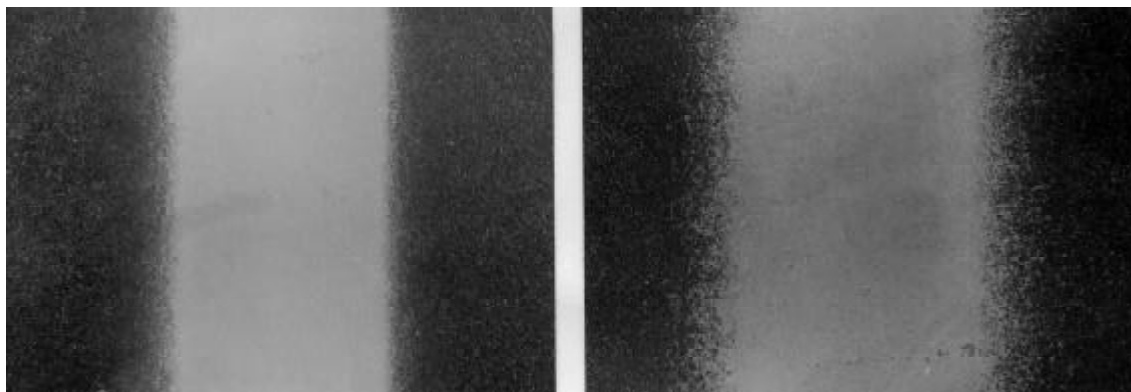
h=10mm V=12mm/s

h=50mm V=5mm/s



h=100mm V=2mm/m

h=150mm V=1mm/s



SS400、100MPa、5.5L/min、#1200、365g/min

図4 - 17 アブシブジェットによる酸化スケール除去後の状態

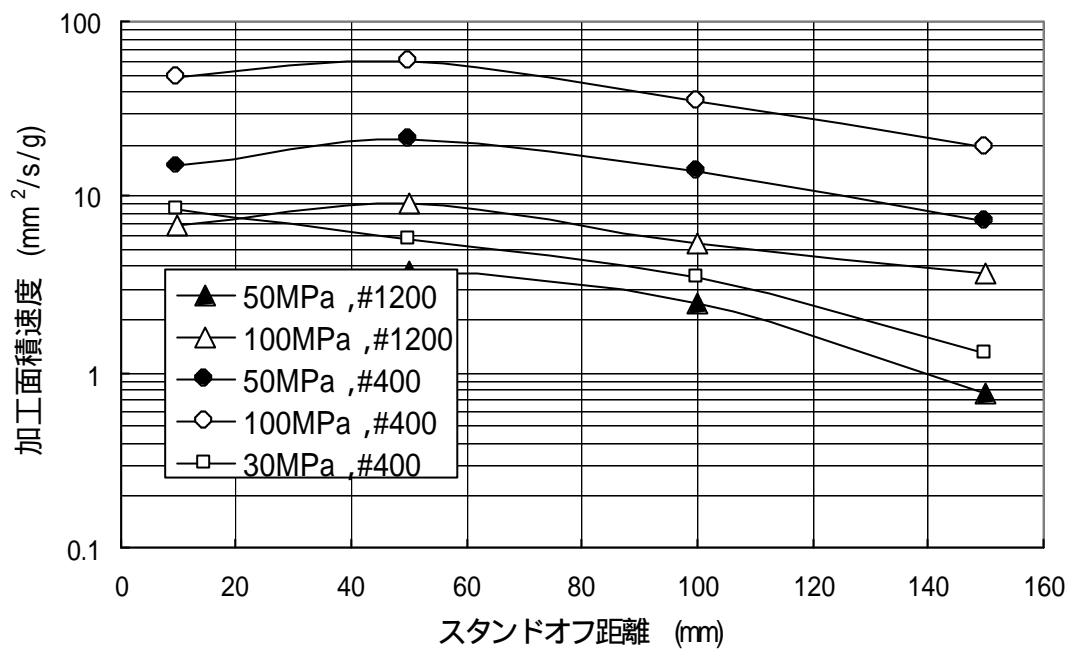


図4 - 18 加工面積速度とスタンドオフ距離の関係

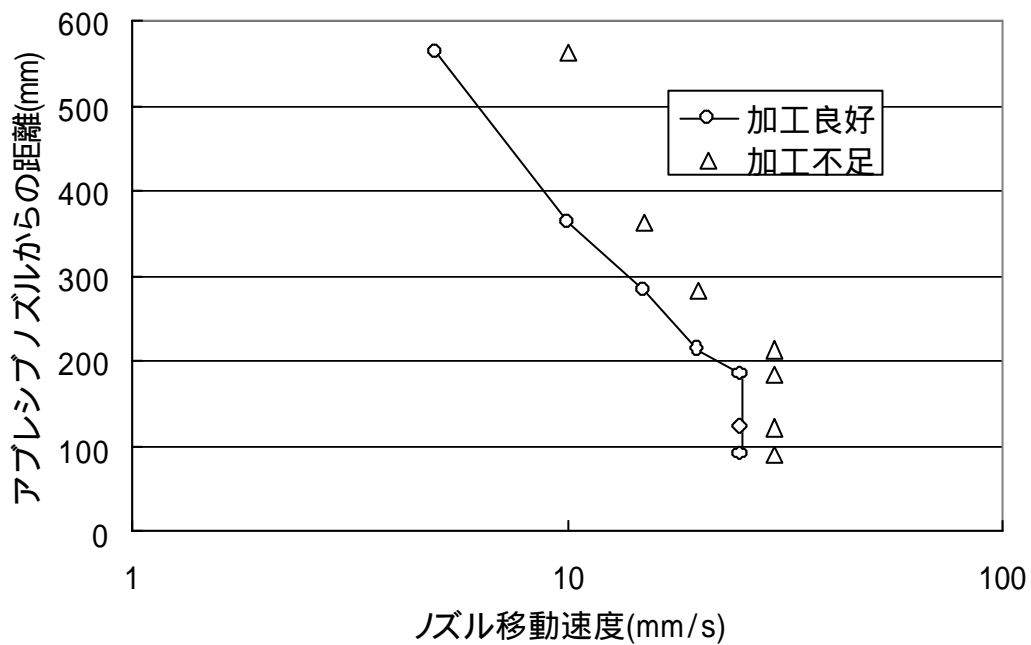


図4 - 19 単一ノズルによる酸化スケール除去結果

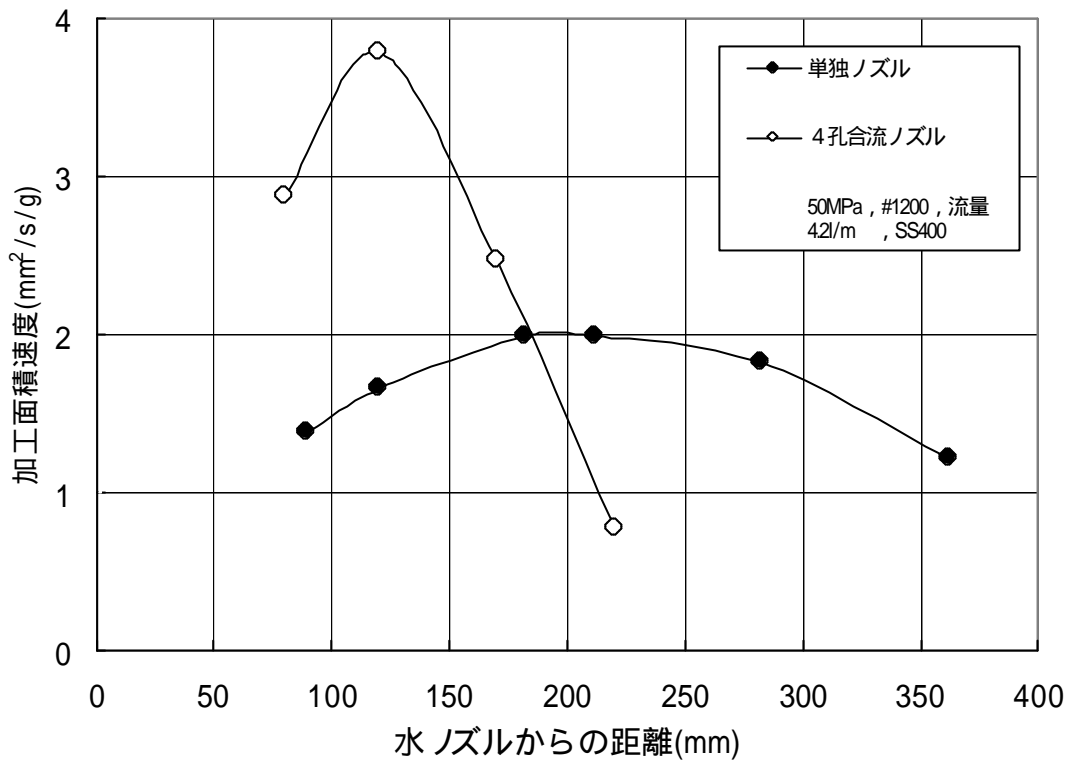


図 4 - 2 0 単一ノズルと4孔合流ノズルでの加工面積速度の比較

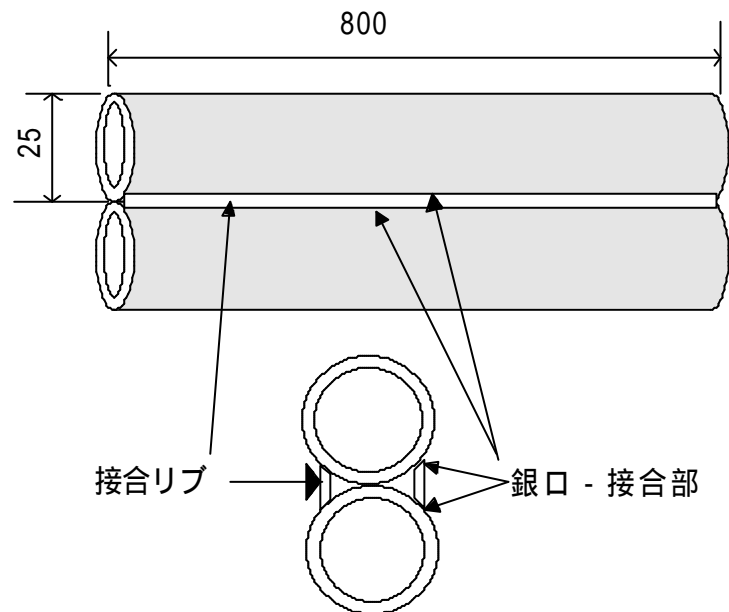


図 4 - 2 1 銀口 - 除去の試料形状



図4 - 2 2 銀口 - 除去の様子

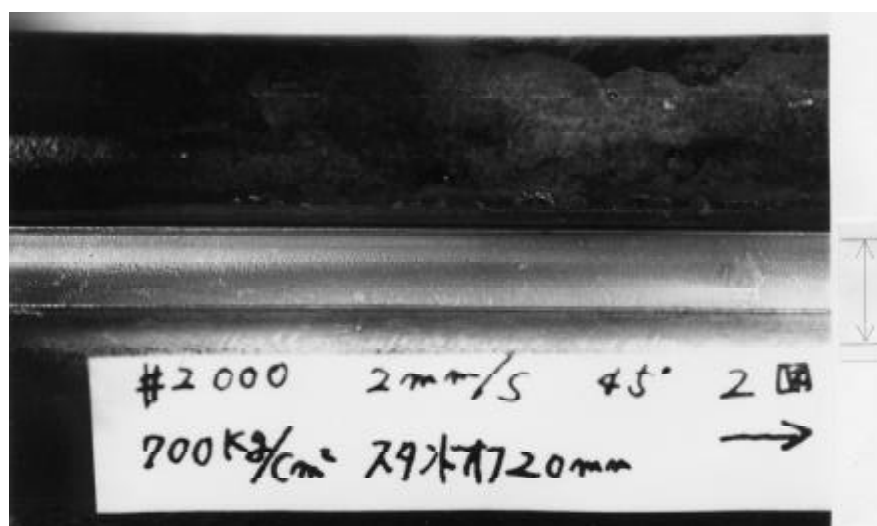


図4 - 2 3 除去後の状態

## 第5章 粒体噴流化式人体洗浄装置用二次元空気噴流の基本特性

### 5.1 緒言

高齢化社会と小児化傾向、さらには介護施設の増加に伴い、介護労働力の不足が生じている。この労働力不足を低減するには介護の省力化となる機器の開発が効果的な一方法と考えられる。

介護労働力の大きなものの一つとして、入浴時の介護がある。通常の入浴操作には浴槽内外の移動、洗浄、入浴、乾燥の工程に分けられる。これらの内、自動化が遅れているのは洗浄操作である。人体の自動洗浄方法としては、多数の回転ブラシによる方法、シャワー法、ジェット水流法、バブル法等が考案されている。しかし、いずれの方法も洗浄効果が不十分であり、洗浄装置としてはほとんど使われていないのが実情である。

本研究では、暖かい空気噴流に比較的大きな粒体を混入させて、身体に吹き付け、粒体の衝撃作用や摩擦作用により、従来よりも洗浄効果が高く、容易に自動化が可能となる図5-1に示すような自動洗浄装置の開発を目的としている。すなわち、入浴者は浴槽内の椅子に座り、カバーを閉めた後、体を濡らすためにカバー内面に設置したノズルからの洗浄液と温水シャワーを浴びる。その後、浴槽底部に設けたスリットから、温風と共に粒体を吹き上げて、粒体と入浴者の肌との摩擦、衝突効果によって身体を洗浄する。そして、再び温水シャワーで体を洗い流した後、温風のみで乾燥させることで身体洗浄を行う。

空気噴流に粒体を混入させた洗浄としては、ショットピーニングやショットブラストのように金属を対象として実用化されているが、いずれも粒体の粒径は小さくかつ高速である。人体の洗浄では、肌への付着、口や鼻からの吸入等を防止するために低速で、かつ比較的大きな直径の粒体を対象となる。また、空気量をできるだけ少なくして、洗浄効果を上げるためには空気の噴出口のスリットの大きさを小さくするのが得策であると考えられる。

この様に、噴出口スリットの大きさに対して比較的大きな粒体を噴流によって吹き上げる場合の粒体の運動や人体への洗浄効果などについて調べた文献は見られない。そこで、著者は本装置の開発に当たり、人体洗浄のために基本的な影響要素になると考えられる、浴槽底部のスリットから吹き上げられる温風と粒体の挙動につき、実験と解析を行って検討した。本研究では、まず二次元空気噴流を発生させるモデルを製作し、この噴流に粒体を混入させた場合の噴流特性および、噴流中の粒体の挙動、分布状態などを測定した。

次に、通気性の膜に付着させたバターを人の垢に見立てて、このバターの付いた膜を模型内の上部に設置し、粒体がこれと衝突、摩擦することによる洗浄効果を調べ、実浴槽製作の基礎データとした。

### 5.2 実験装置および方法

実験装置の概略を図5-2に、座標軸の取り方を図5-3に示す。インバータ電源につながれた吐出圧力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、幅600mm、高さ250mm、奥行き1600mmのバッファタンクに導かれる。

バッファ - タンク上面には終端部から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 - タンク内には拡大部直後に整流を目的として金網を3カ所に設けた。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、空気の入り口側に縮流を起こさせないためにR=6mmの丸みを付け<sup>(1)</sup>、下面には粒体のバッファ - タンクへの落下防止のために20メッシュの金網を設けた。

ノズル長手方向の両端には噴流の広がりを押さえて二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<sup>(2)</sup>。

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。

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図5 - 4に示すように、外径6mm、2mm、1mmと先端部になるにつれて小さくした全長150mm、先端測定部内径0.5mmの総圧管を用いた。これを治具に固定してノズル上方より、トラバ - ス装置で測定位置に移動させた。トラバ - 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 - ゲ - ジ (0-50、0-100、0-300、0-1000Pa) で測定した。

流量調整はインバ - タの周波数で行い、ノズル出口の流速 $V_d$ は $Y/D=1$  (Dはノズル出口幅) の位置での速度とし、 $V_d=10、20、30\text{m/s}$  (レイノルズ数 $Re=6660\sim 19400$ ) について噴流のY方向速度分布を調べた。

粒体は直径6mmのポリスチレン球 (比重1.0、真球度0.042mm、反撥係数0.58) を用いた。

粒体が空気噴流に混入していく様子を図5 - 5に示す。Y-Z面に対して左右対称なので、ノズル中心から半分のみを示している。浴槽底部の平面部分に大量の粒体を入れて、ノズルから空気噴流を出すと、吹き上げられた粒体は徐々にノズルに向かって傾斜面を形成するように浴槽底部に堆積する。堆積した粒体の傾斜角が安息角以上になれば粒体は噴流に向かって傾斜面を転がり噴流で再び吹き上げられて、実験模型内を循環する。本実験装置で安息角以上の傾斜面を形成するのに必要な粒体は5000個であった。粒体5000個および10000個投入した場合の、質量流量比 (粒体の質量流量 / 空気の質量流量) は高速ビデオカメラにて1秒間に250コマの速度でノズル部分を拡大して撮影した画像を、1コマごとにノズルから吹き上がる粒体の数を1秒間カウントして求めた。その結果、実験模型に5000個投入した場合の質量流量比は0.63、10000個では1.33であった。それ以上の粒体を投入した場合は吹き上げられる粒体数が多いため、撮影したビデオカメラの画面上で複数の粒体が重なるため計測不可能であった。

洗浄効果を測定するために次の方法を用いた。通気性の薄いポリウレタンフィルム (40mm×40mm) を非吸湿性の白色紙に張った後、その上にバター (脂肪分83%) を塗り48時間室内で放置したものを人工垢とした。これを直径12mmの丸棒に厚さ7mmのゴムを巻いた上に張り付け、一定時間粒体による洗浄をした後、洗浄前後の絶対反射率 (島津製作所製 MP

C-2200) から洗浄効果を調べた。

### 5.3 実験結果

ノズルから出た空気噴流の概略構造を図5-6に示す。噴流構造は、ノズル出口速度が保存されるポテンシャルコアを持つ噴流核域、それに続く遷移域、噴流が発達した拡散領域、および噴流の広がり角度で表される。これらの値はノズル形状によって異なるため<sup>(3)</sup>、使用ノズルで噴流構造を調べる事が重要である。

空気噴流については、これまで多くの研究者によって噴流構造の理論的、実験的解析が行われている<sup>(1-5)</sup>。そのため、本ノズルからの噴流を過去の解析結果と比較すると共に、粒体が入った場合の噴流構造についても調べた。

#### 5.3.1 風速分布

ピト-総圧管による動圧から風速への変換はベルヌ-イの式と状態式から(5-1)式で表される。

$$V = (2RT(P-P_0) / R)^{1/2} \quad (5-1)$$

ここで、 $(P-P_0)$  は、マノスタゲ-ジでの差圧すなわち動圧である。

実験に先立って、本実験ノズルからの噴流が二次元噴流であることを確認するために、ノズル出口速度を $V_0=10\text{m/s}$  ( $R=6660$ ) として、 $Z=0$  および  $Z=\pm 35\text{mm}$  断面の噴流速度分布測定を行った。その結果を図5-7に示す。縦軸に噴流中心部の速度 $V_c$ と噴出口における空気速度 $V_0$ との比 $V_c/V_0$ をとり、横軸に噴出口からの垂直方向の距離 $Y$ と噴出口のノズル幅 $D$ との比 $Y/D$ をとって、両対数グラフ上で表した。各断面での噴流中心速度の差が最大4%以内であったことから、 $Z=\pm 35\text{mm}$ の範囲で、二次元噴流と見なせると判断した。これより $V_0=20$  および  $30\text{m/s}$  では  $Z=0$  断面のみ噴流速度分布を測定した。その結果を図5-8に示す。ノズル出口速度 $V_0=10, 20, 30\text{m/s}$  において噴流軸上の分布は同じであると見なして良い。また、実線は新津<sup>(1)</sup>らの理論式(5-2)式による計算値をプロットしたものである。 $Y/D=20$  までは本実験結果と良く合っている。次に、粒体を混入させた風速、 $V_0=30\text{m/s}$  ( $R=19400$ ) の場合の結果を図5-9に示した。縦軸に噴流中心部の速度 $V_c$ と噴出口における空気速度 $V_0$ との比 $V_c/V_0$ をとり、横軸に噴出口からの垂直方向の距離 $Y$ と噴出口のノズル幅 $D$ との比 $Y/D$ をとって、両対数グラフ上で実験結果と理論式<sup>(1)</sup>による値を表した。

印は空気噴流のみの場合、および 印は噴流中に粒体を混入(質量流量比1.33)させた場合を表す。空気噴流のみの場合、ノズルから $Y/D=5$ までは出口速度が維持され、 $Y/D=6\sim 8$ で徐々に減衰し、 $Y/D=10$ より下流では直線的に速度が減衰する分布となる。また、 $Y/D=10$ より下流での平均勾配は-0.57であった。

図中の実線は新津<sup>(1)</sup>らの理論式(5-2)式による計算値をプロットしたものである。

$$V/V_0 = ((c_1 - c_2)/2)^{1/2} \quad (5-2)$$

ここで  $c_1: (X+d)/(cY)$   $c_2: (X-d)/(cY)$   $c$ : Reichardtの拡散係数、0.08

ノズル出口から $Y/D=20$ までは3%以内で本実験データと良く合っている。

新津らは、ノズル幅の5倍までをポテンシャルコア長さ<sup>(1)</sup>、また、小松は出口速度の95%になる点までを噴流核域としている<sup>(3)</sup>。本実験では $Y/D=5$ の位置で出口速度の97.6%の速度を持ち、かつノズル幅の5倍になる事から、この点までが噴流核域と考えられ、それに続く $Y/D=5\sim 10$ が遷移域、減速の勾配が一定となる $Y/D=10$ より下流が拡散域と見なせる。

粒子が混入した場合は約5~12%の速度低下が見られ、特にポテンシャルコア領域での減速が大きい。これは、ノズル近傍では空気噴流の速度が大きく、かつ粒子は加速状態にあって噴流との相対速度が大きいため噴流にとって大きな抵抗となるためと考えられる。また、下流域においても、粒子の数は少なくなるが、速度が低下するために噴流の抵抗となるものと思われる。

### 5.3.2 噴流の広がり

縦軸に $Y/D$ をとり、横軸に噴流中心位置からの水平方向の距離 $X$ との比 $X/D$ をとって噴流の広がりの様子を示せば図5-10のとおりになる。図中の印は空気噴流のみ、印は粒子を混入(質量流量比1.33)させた場合の著者の測定結果を $V/V_0$ として表し、実線は(5-2)式をプロットしたものである。

本来、噴流周縁は主流方向の速度が0になる点で表されるべきであるが、乱流噴流の周縁は周囲の静止空気との摩擦により波打つような状態になっていて定常的な周縁は存在しない<sup>(3)</sup>。また総圧管による離散的な測定では周縁を特定するのは困難であるため<sup>(4)</sup>、新津<sup>(1)</sup>らの提案に従って噴流中心速度の5%になる点を周縁とすると、 $Y/D=0\sim 10$ での平均の広がり角度は $9.44^\circ$ 、 $Y/D=10\sim 60$ では $10.92^\circ$ となる。図5-10の $10^\circ$ の線から判断して著者らの測定結果と新津らの理論結果とよく一致していることがわかる。また、粒子による噴流の広がり角度への影響は少ない。

### 5.3.3 噴流中の粒子の分布

実験模型に入れる粒子の量によって、噴流中の粒子の分布、粒子の数、圧力損失などが変わる。そこで、粒子5000~25000個を入れて圧力損失および粒子の運動の観察から投入する粒子の数を決定した。

図5-11は縦軸に空気流量 $Q$ をとり、横軸に粒子投入数 $N$ を取って、プロアの回転数を一定に保持した状態での $Q$ と $N$ との関係の実験結果を示したものである。なお、空気流量はオリフィス流量計を用いてJIS Z 8762に従って測定した。

粒子15000個までは粒子の増加と共に流量は僅かに少なくなる程度である。この範囲では実験模型の噴出口の圧力損失は小さい事がわかる。しかし、20000個以上になれば流量は大きく減少し、圧力損失が急激に大きくなる。

図5-12に、実験模型に粒子10000個(質量流量比1.33)、15000個、20000個投入した場合の噴流で吹き上げられる様子を示す。噴流の観察から、粒子20000個以上では噴流中の粒子密度が上がり、粒子どうしの衝突や摩擦が起こり衝撃力を持つ粒子が減少し、洗浄には適さない状態となる。また、粒子5000個(質量流量比0.64)では、吹き上がり高さは1000mm以上と高いものの噴流に混入する数が少なく、15000個では噴流中の粒子も多く比較的均一な噴流になるが、粒子の最高到達点が600mmと低い。そのため、投入する粒子



の数を10000個（質量流量比1.33）として、以降の粒体分布測定および洗浄実験をおこなった。

10000個投入した場合は、粒体の大部分はノズル両側の平面部分に堆積し、ノズルに向かって傾斜面を形成している。この勾配は約 $14^\circ$ であり、粒体の安息角 $11^\circ$ より大きいため、落下した粒体は傾斜面をノズル出口に向かって転がり、再び噴流で吹き上げられ浴槽内を循環する。

粒体が噴流で吹き上げられるノズル出口近辺の様子を高速ビデオカメラで観察すると、一部の粒体は反対斜面から転がってきた粒体と衝突して噴流に載るものの、大部分は衝突する事なく噴流に吹き上げられている。一旦上昇した粒体は、微粉の様に噴流の僅かな変化に追従するような複雑な運動ではなく<sup>(5)</sup>、ノズル出口での方向と速度によって決まる放物線を描くような運動となる。

次に洗浄にとって重要な噴流中の粒体の分布状態の測定を行なった。

粒体の分布測定には図5-13に示す、直径12mmの小型口-ドセル（共和電業社製、LM-1KA）に、厚さ3mm、直径12mm、硬度HV480の鉄板をあて板として口-ドセル中心部のセンサ部分に接合して、口-ドセル全面で荷重を感知させるように改良した。しかし、あて板中央部のみ接合された状態なので、粒体があて板周辺に衝突すると荷重を感知しなくなる事も考えられる。そのため、ピッカ-ス硬度計を用いて、図5-14に示すように、あて板周辺、中間部分、および中心部分の9カ所に静荷重を負荷して、口-ドセル指示値との比較を行った。その結果、負荷荷重0.98N、2.94N、4.90Nに対してそれぞれ $\pm 10\%$ の誤差で収まった。粒体が当たった事を判別するには、この程度の荷重誤差は問題ないと判断して、本方式により粒体の噴流中での分布測定を行った。

この改良口-ドセルを直径12mmの丸棒端面に接着し、噴流下流側からあて板面をX-Z平面に平行になるように設置しX方向に12mmピッチで測定した。サンプリングタイム500 $\mu$ sとして、16.369秒間の衝突回数を計測した。また、あて板へのポリスチレン球の反撥係数は0.58であった。使用したアンプはNEC omniace RT3424STでその出力例を図5-15に示す。粒体が当たる速度および角度により、口-ドセルが検知する荷重の大きさが異なるが、明らかにベ-スレベル以上のピ-クが検出された場合をカウントした。しかし、粒体が当たった場合の口-ドセル内部のダイヤフラム減衰時間が約25msであり、その間に別の粒体が当たる場合には計測不能となり、数え落としが生じる。そのため、正確性に劣るものの、後の洗浄率との関係を調べるには、この方法で十分であると判断した。その結果は図5-16のとおりである。縦軸には単位面積( $\text{mm}^2$ )当たり、単位時間(s)に衝突する粒体の数Nをとり、横軸にはX/Dをとっている。

粒体の分布は、Y/D=6~20の上流では主流周辺部にピ-クが、下流のY/D=40~60では平坦になる。Y/D=6~20の範囲で、噴流中心よりも周辺部に粒体が多く分布するのは、ノズル出口における粒体の噴流への突入速度の違いによるものと思われる。すなわち、突入速度が遅いと混合領域の噴流に載り、速いと噴流を飛び越し反対斜面に落下する。その中間で主噴流に載れる最適速度が存在するものの、その範囲が狭いために、噴流中心部分を通過する粒体の数が少なくなる。

また、Y/D=40~60でピ-クが消滅するのは、主流周辺の流れに載った粒体は、この高さまで到達せずに落下し、この部分まで到達するのは大部分主流噴流に載る粒体のみとなる

ためと推察される。

図5 - 1 2 の噴流写真からも、ノズル中心のY軸上よりも周辺部に、また、高さ400mm以下に粒体は多く存在しているのが確認できる。

#### 5 . 3 . 4 洗淨効果

皮膚の汚れは新陳代謝による表皮や汗などの内部からのものと外部からのゴミの付着などが主な原因と考えられる。ここでは、汚れの主成分と考えられる無機物質による汚れ、蛋白質による汚れ、脂肪による汚れの内、洗淨されにくい汚れとして人体の肌の脂肪を想定して洗淨効果を調べた。

動物性脂肪としてバター - を非吸湿性の白色紙に貼った通気性のポリウレタンフィルムに塗った後、それを図5 - 1 7 に示す様に、直径12mmの鉄の丸棒に厚さ7mmのゴムを巻いた上に張り付けた。

ゴムは皮膚の柔らかさを考慮して、タクタイル値-360<sup>(6)</sup>のものを用いた。タクタイル値は数値が小さい程柔らかい事を示し、タクタイル値-360は人の頬や腹程度の柔らかさである。これを、特徴的な粒体の分布を示したY/D=20、40で水平に固定しX/D=0、±2.5、±5の位置にバター - を塗ったフィルムを中心を合わせて張り付けた。そして、V=30m/s、質量流量比1.33で5分および10分間洗淨した。洗淨後、試料ごとにズダン 液、20ccで3分間染色し乾燥させた後、入射45°、波長650nmの光の絶対反射率を測定した。洗淨率は洗淨前後の試料の反射率とフィルムの反射率との差から(5 - 3)式から求めた。

$$W = (W_w - W_s) / (W_0 - W) \times 100 \quad (5 - 3)$$

ここで、Wは洗淨率(%)、Wは洗淨後の反射率、W<sub>s</sub>は洗淨前の反射率、W<sub>0</sub>はバター - 塗布前の反射率である。

ズダン 液は、脂肪を染色させるため、ポリウレタンフィルムに塗布されたバター - は橙色に着色され、脂肪の量が多い程、濃く着色されて反射率は低下する。反射率はフィルム中心部15mm×22mmを平均して測定されるため、X軸上の試料中心位置でのマクロ的評価である。縦軸にWをとり、横軸にX/Dをとり、Y/Dをパラメータとして実験結果を示せば図5 - 1 8のとおりになる。

図中、丸印(○)はY/D=20の位置、四角印(□)はY/D=40の位置、白抜き印(○)は5分間、黒抜き印(●)は10分間での洗淨率を表す。

5分間洗淨に注目すれば、Y/D=20、X/D=±2.5の位置で洗淨率は約80%とX/D=0、±5の位置よりも極端に高くなっている。一方Y/D=40ではXの位置による洗淨率の差は少ない。これらの特徴は、図5 - 1 6の粒体の分布と定性的に一致しており粒体密度Nが大きい場所ほど洗淨率は高くなっている。また、Y/D=20、X/D=+5で洗淨率がマイナスを示したのはバター - の塗布量が均一でなかったためと思われる。

10分間洗淨では、5分間洗淨と比べてY/D=20、X/D=±2.5の位置を除いて洗淨時間にほぼ比例して洗淨率は上昇している。Y/D=20、X/D=±2.5の位置では洗淨率は5分間洗淨と変わっていない。これは、粒体の衝突のみではフィルムに塗布したバター - は完全には除去されない事を示唆している。これ以上洗淨率を上げるには水分および界面活性剤等を利用する

事を考えなければならない。

以上から、本方式の洗浄では粒体の密度が洗浄率に大きな影響を及ぼしている事がわかった。これより、洗浄ムラを無くするには粒体の分布を一定にする必要がある。

#### 5.4 結言

噴流化式人体洗浄装置の開発に当たって、質量流量比1.33で粒体を混入させた二次元空気噴流構造および噴流中の粒体の分布、さらにバタ - を人の垢と見立てた場合の定性的な洗浄効果について調べて、次の結果を得た。

- (1) 二次元空気噴流構造は、 $Y/D=5$ までが噴流核域、 $5\sim 10$ が遷移域、 $10$ より下流が拡散域となる。粒体が混入した場合は $5\sim 12\%$  の速度低下を示す。
- (2) 粒体の噴流水平断面分布は $Y/D=20$ までは主流周辺にピークを持ち、 $Y/D=40$ 以上ではフラットな分布となる。また、上流から下流に向かって粒体の空間に占める密度は低下する。
- (3) 粒体による洗浄力は当たる粒体の数と相関があり、多く当たる場所程良く洗浄される。
- (4) 本方式での洗浄効果は十分認められ、分布密度の大きい、 $Y/D=20$ 、 $X/D=\pm 2.5$ の位置ではバタ - であれば5分で十分洗浄できる。

#### 参考文献

- (1) 新津靖、加藤孝夫：エア・カ - テンの性能および設計に関する研究、衛生工業協会誌、Vol.32、No.10(1958)、591。
- (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、Vol.41、No.348 (1975)、2391。
- (3) 小松安雄：噴流の流体力学的研究、日本大学理工学研究所彙報、Vol.36(1970)、79。
- (4) H.B.SQUIRE、M.A、 J.TROUNCER、B.A:Round Jets in a General Stream、A.R.C.Technical Report、1974(1944)、7。
- (5) 社河内俊彦、加藤智宏、安藤俊剛、榊原宏朗：微粉粒子を含む固気二相環状噴流の流動特性とその制御、日本機械学会論文集(B編)、Vol.64、No.627(1998)、3616。
- (6) 尾股定夫：硬さ測定用触覚センサ - 、電気学会論文誌(E編)、Vol.117、No.7(1997)、357。

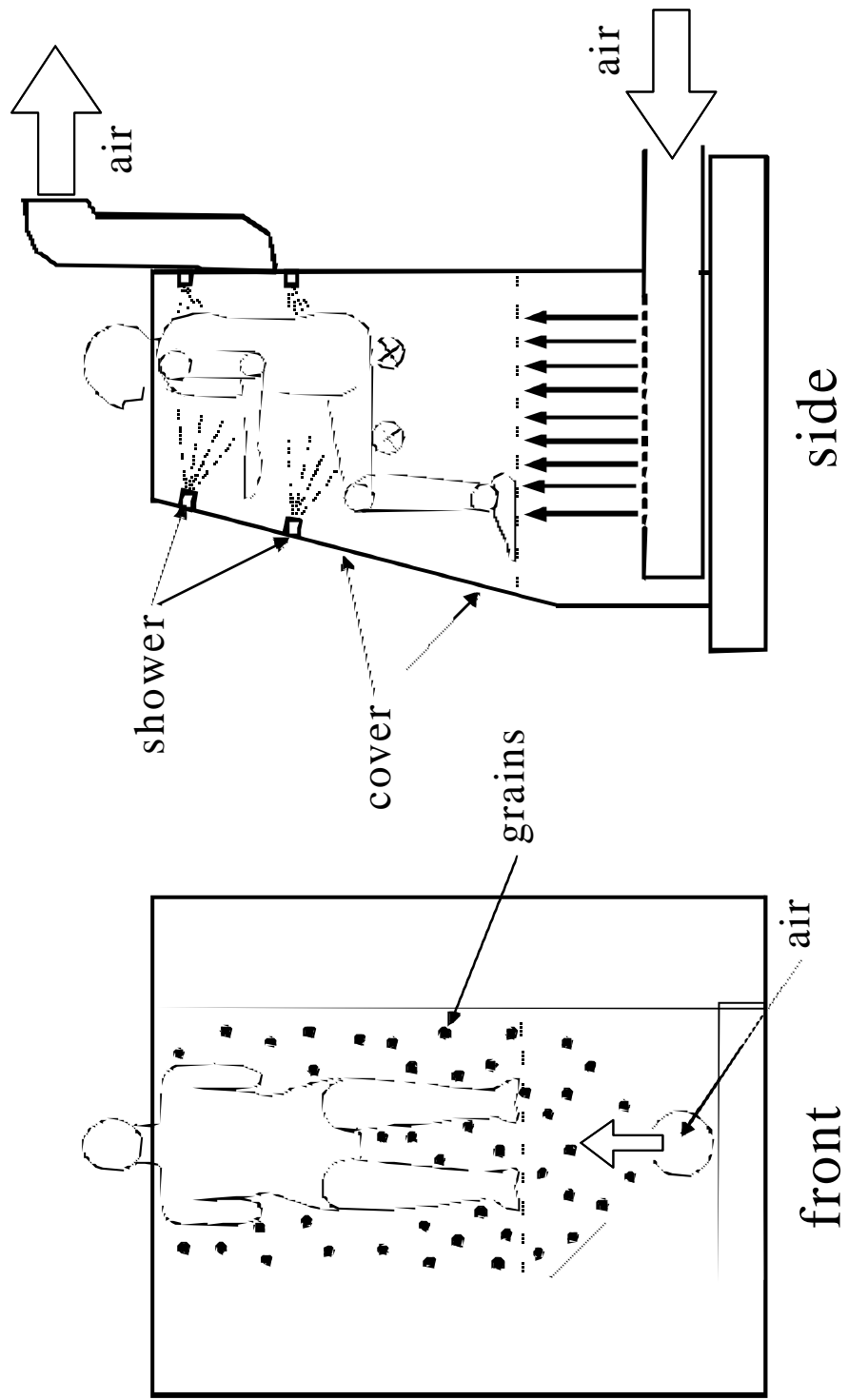
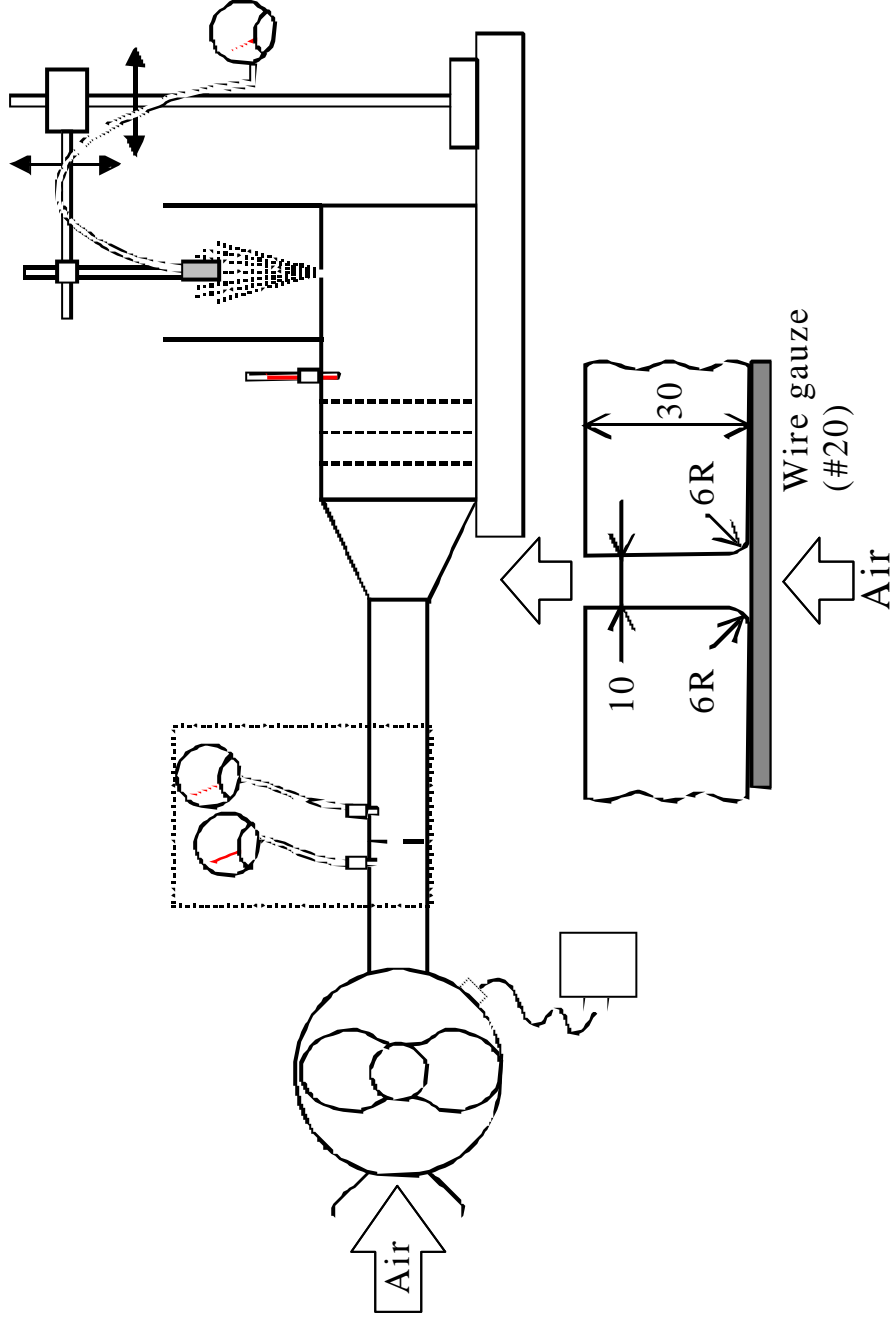


図5-1 粒子噴流化式人体自動洗浄装置の概要



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

图 5 - 2 实验装置概要

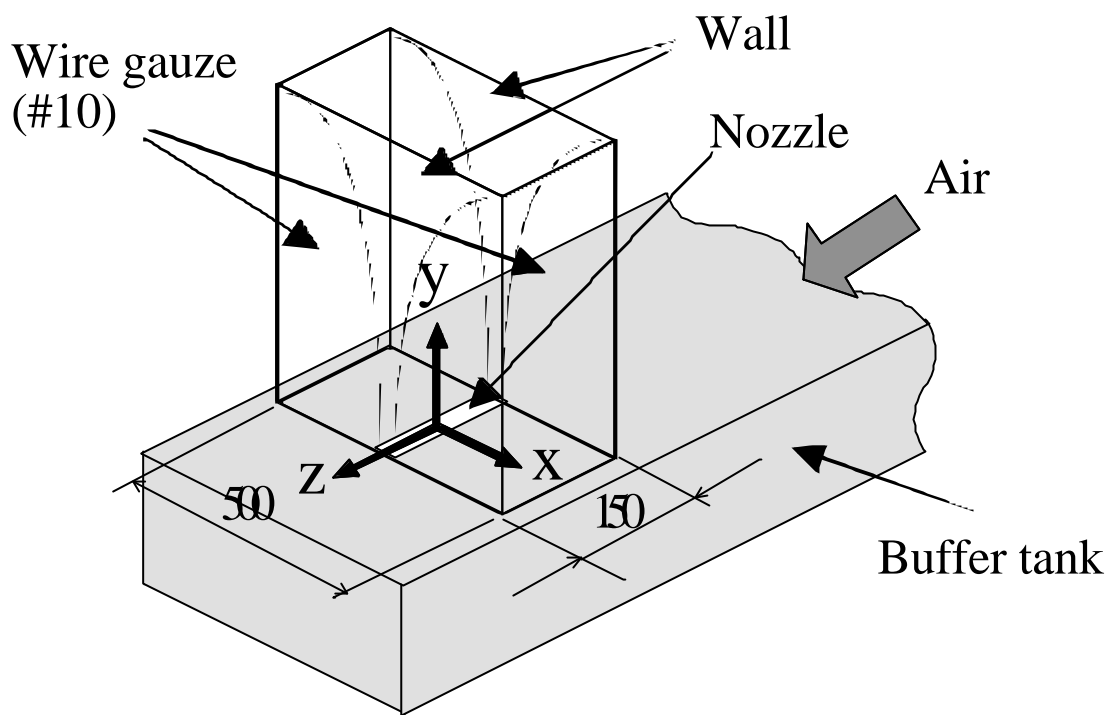


図 5 - 3 座標軸の取り方

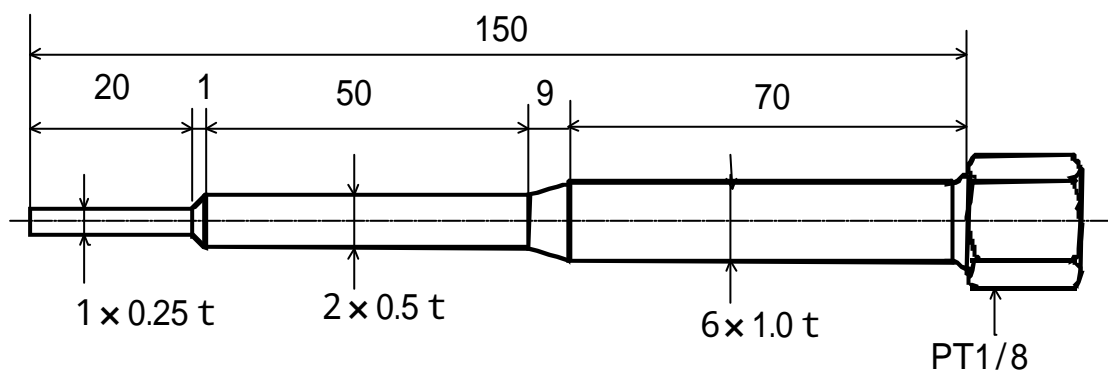


図 5 - 4 総圧管形状

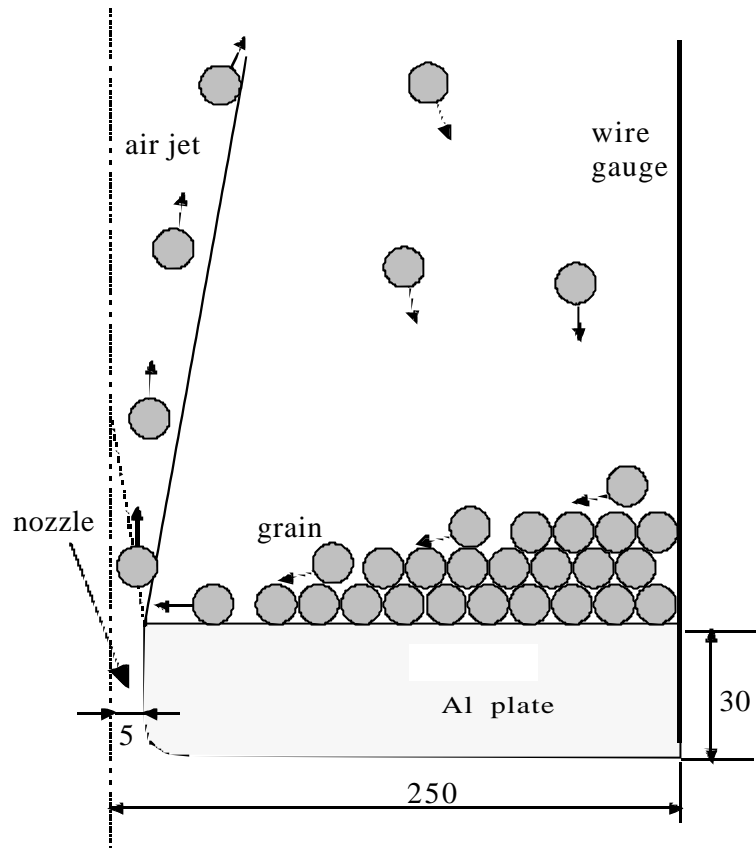


図 5 - 5 噴流への粒子混入方法

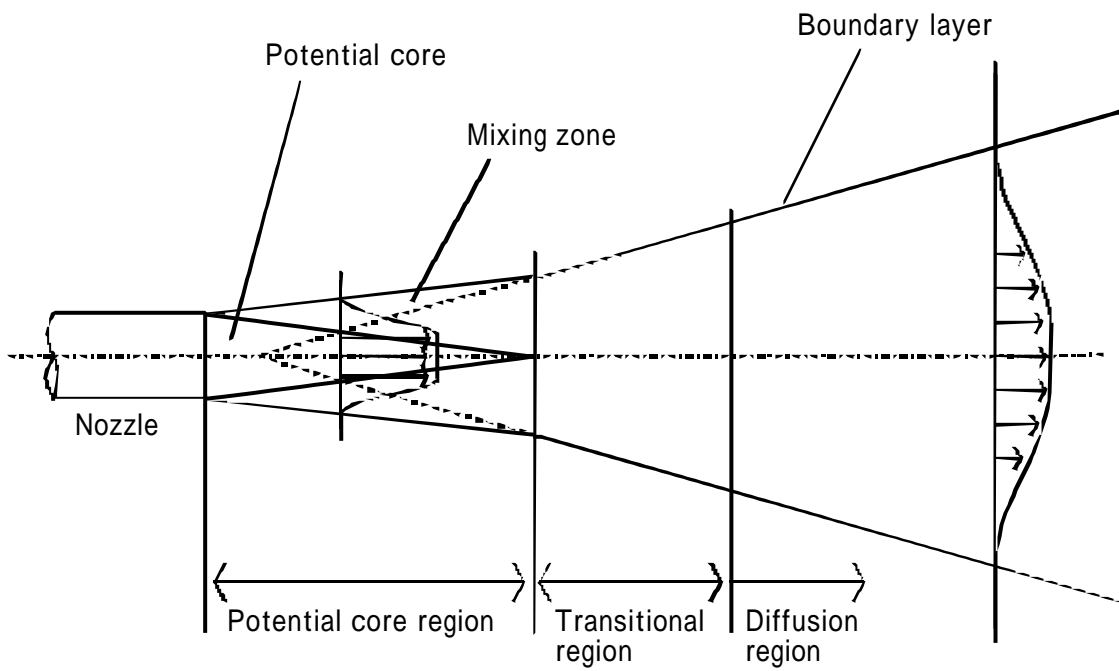


図 5 - 6 空気噴流構造

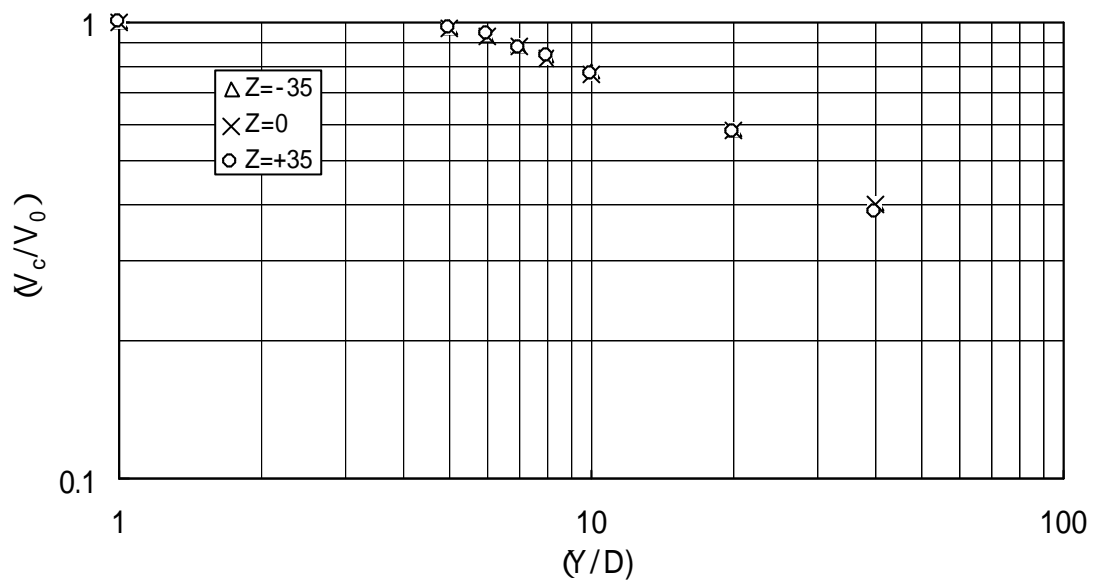


図 5 - 7 Z=0 , Z=±35断面における噴流軸上の風速分布  
( $V_0=10\text{m/s}$ )

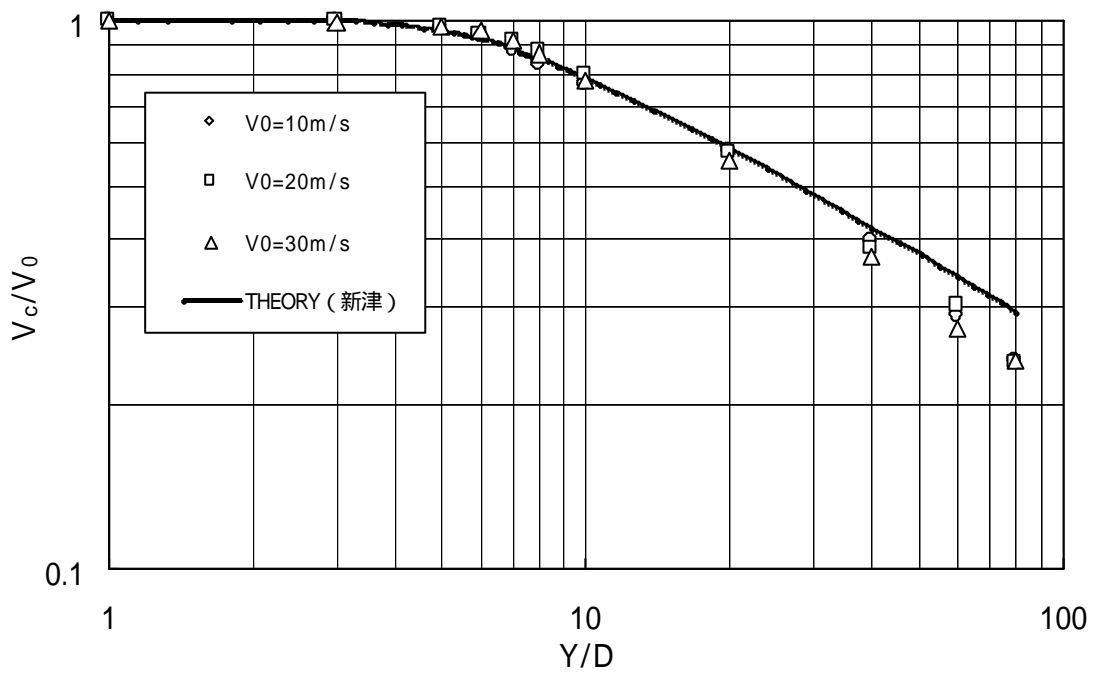


図 5 - 8  $V_0=10, 20, 30\text{m/s}$ における噴流軸上の風速分布



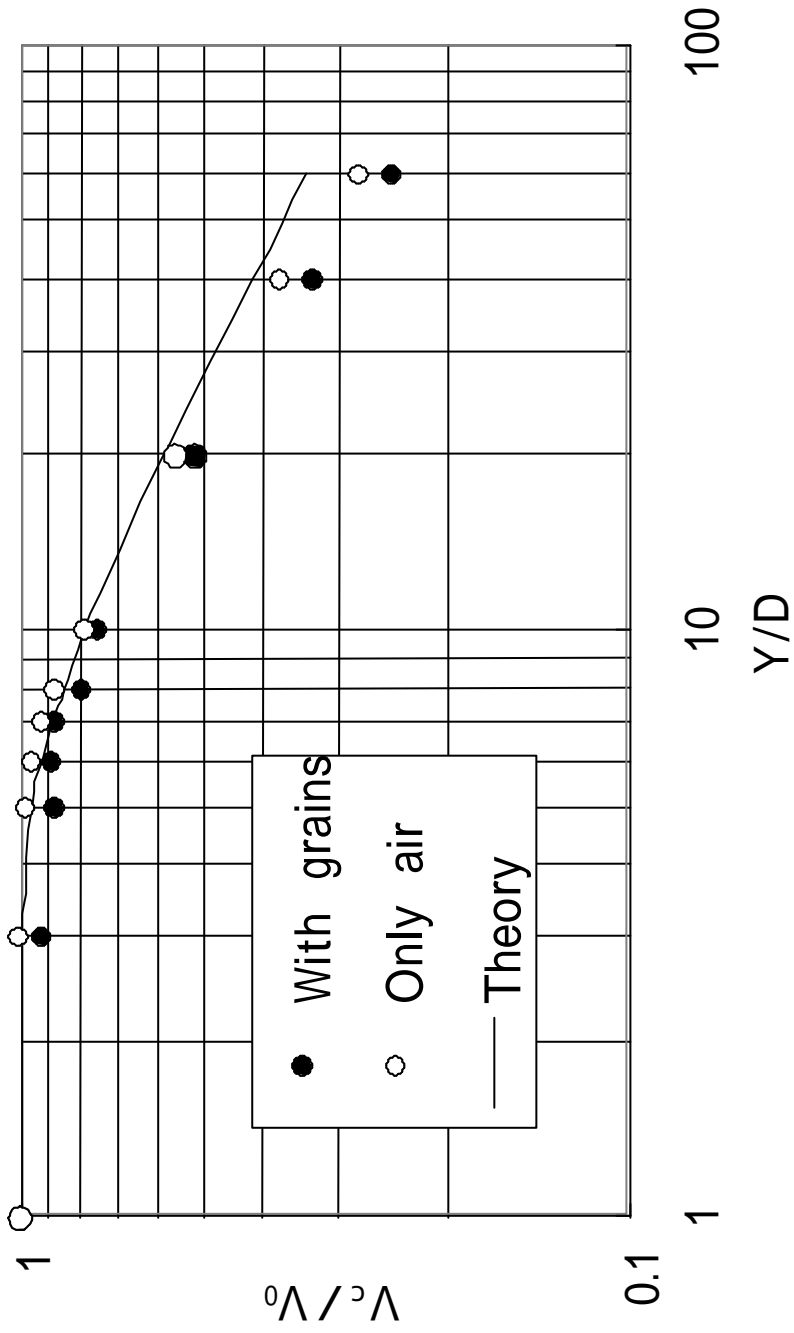


図5 - 9 粒子を含んだ噴流中心軸上の風速分布  
( $V_0=30\text{m/s}$ )

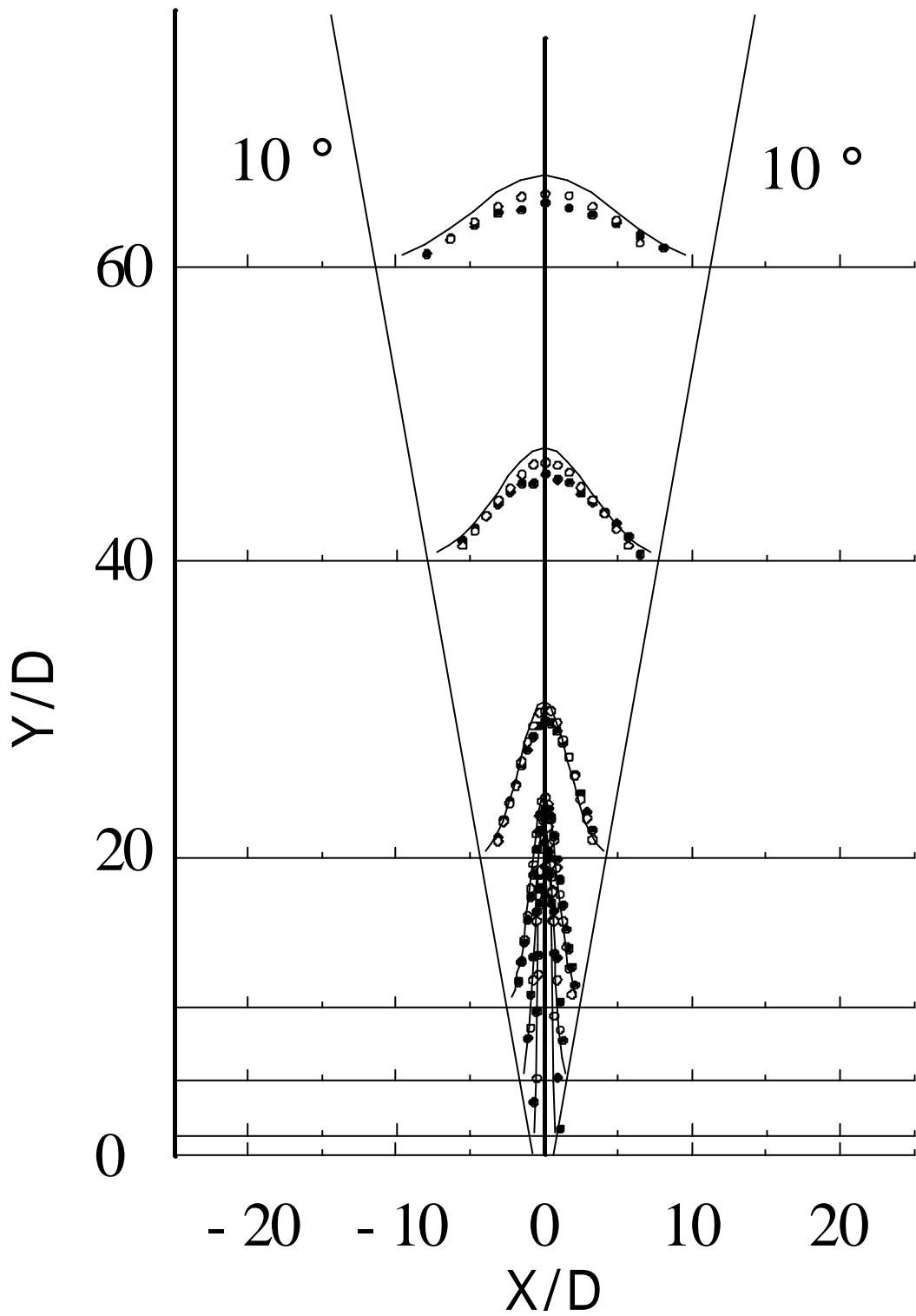


図 5 - 1 0 噴流幅方向の風速分布 ( $V=30\text{m/s}$ )

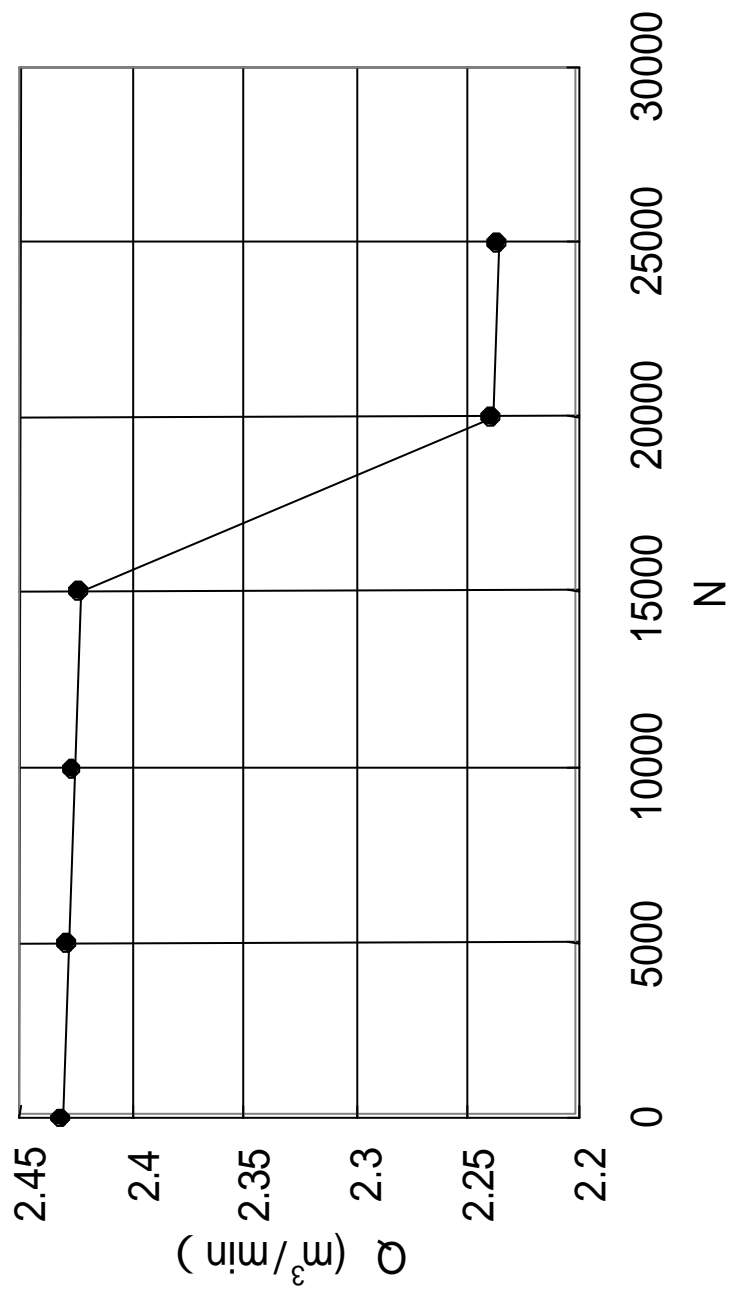


図5 - 1 1 投入粒子数と流量の関係



(10000個)



(15000個)



(20000個)

図 5 - 12 投入粒子数と噴流の様子

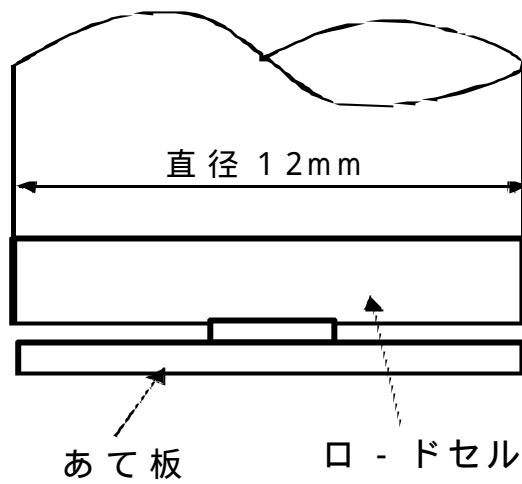
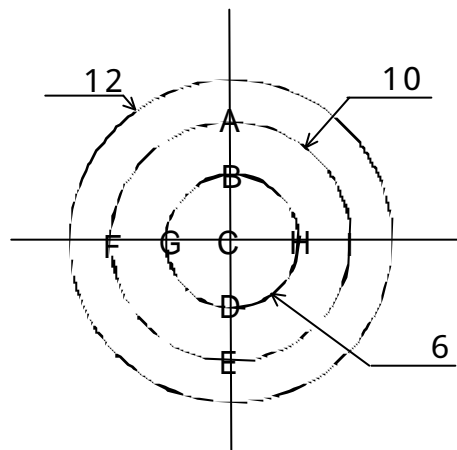


図5 - 13 粒体分布測定用ロードセル形状



測定点	負荷基準荷重		
	0.98N	2.94N	4.90N
A	0.900	2.696	4.553
B	0.927	2.784	4.690
C	0.978	2.931	4.916
D	1.033	3.096	5.200
E	1.065	3.220	5.412
F	1.065	3.211	5.403
G	1.033	3.101	5.187
H	0.923	2.788	4.658
I	0.895	2.715	4.548

図5 - 14 ロードセルへのあて板接合による指示荷重の影響

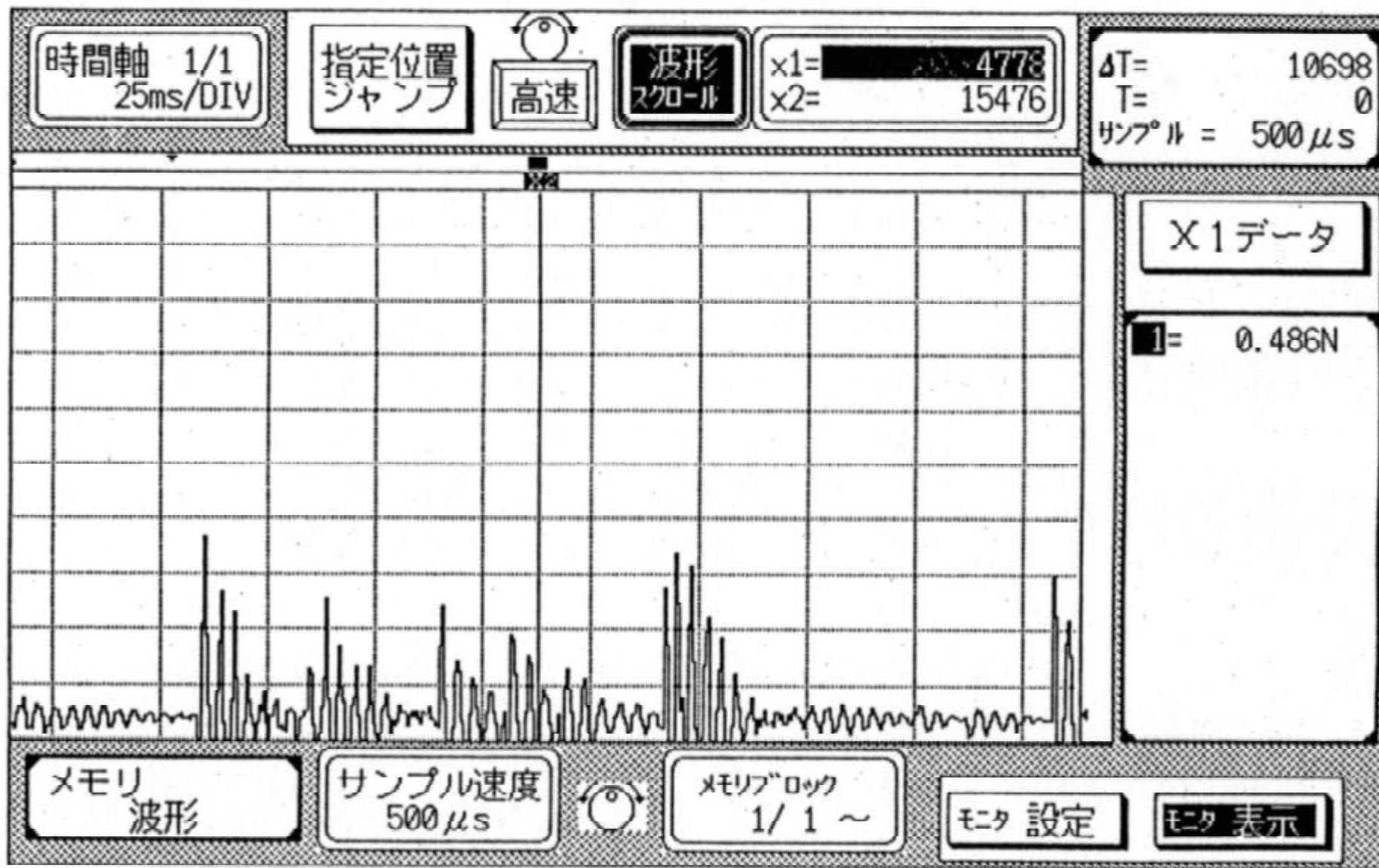


図 5 - 1 5 粒体の衝突によるロードセル指示荷重例  
 (Y/D=6, X/D=1.2)

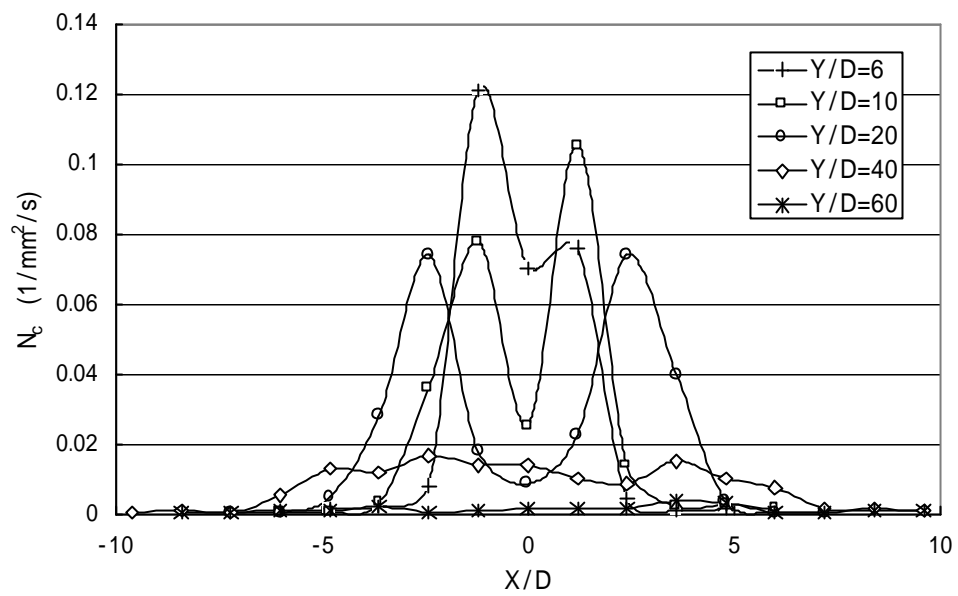


図 5 - 1 6 噴流中の粒子分布



図 5 - 1 7 洗浄実験の様子

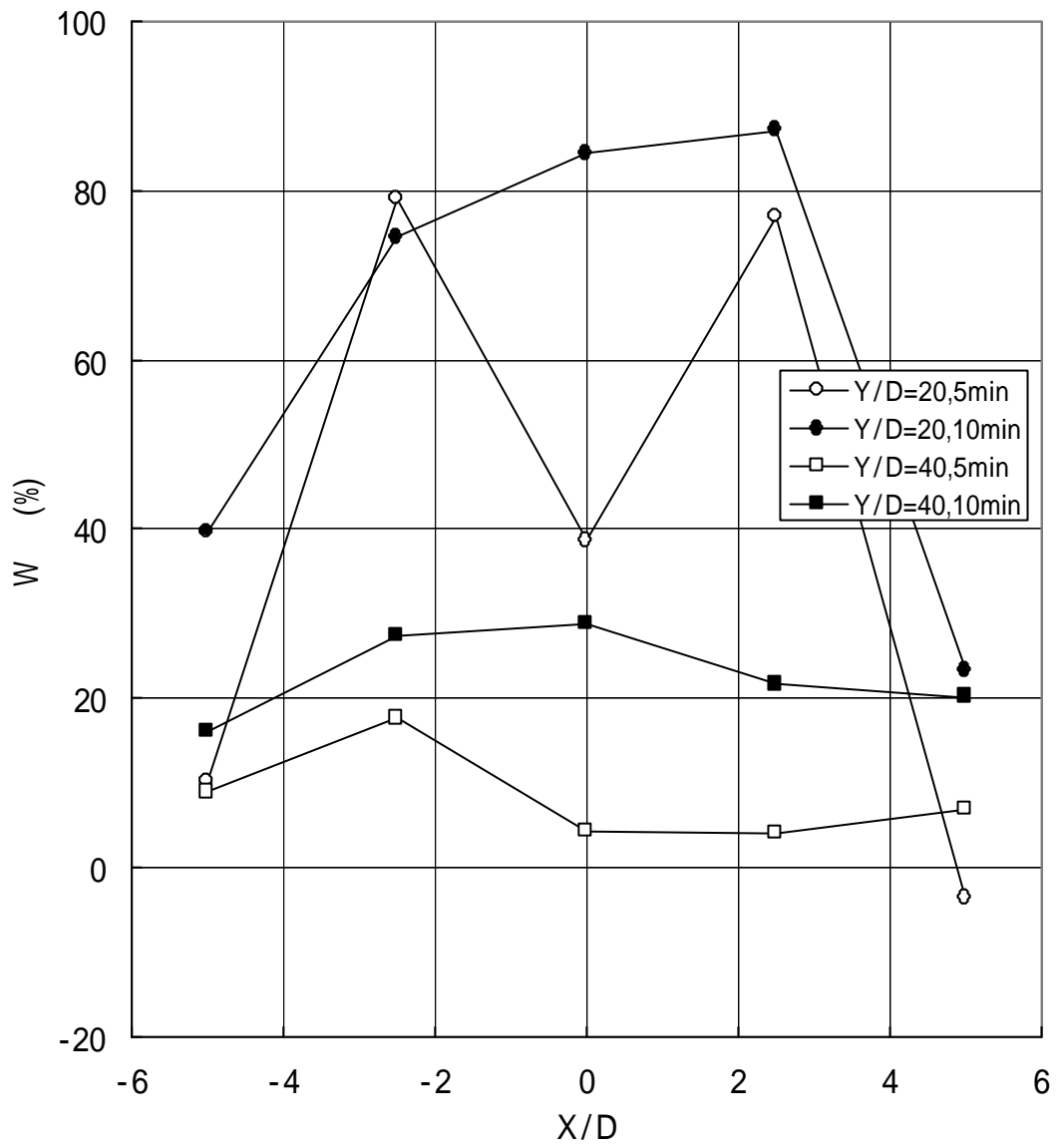


圖 5 - 1 8 洗淨結果



## 第6章 粒子噴流化式洗浄における洗浄率に与える粒子の衝突速度及び衝突角度の影響と洗浄効果の予測

### 6.1 緒言

空気噴流に混入させた粒子の衝突や摩擦による洗浄方式では、洗浄率は噴流中の粒子の分布の影響を受ける。すなわち粒子の密度が高い程洗浄率は高くなる。また、浴槽に見立てた実験模型に大量の粒子を投入して、底部に設けた二次元ノズルからの空気噴流で吹き上げる洗浄方式では、吹き上げられて洗浄に有効に働く粒子は極一部で大部分が傾斜面を形成するために堆積している。この事は使用する側にとっても、また粒子の有効利用の面からも最善の方法とは言えない。

最小限の粒子の数で最大の洗浄率を得るには、浴槽底部に二次元ノズルに向かって傾斜面を作り、吹き上げられ落下した粒子が傾斜面を噴流に向かって転がるようにすれば良い。これで、全ての粒子が空気噴流に混入され洗浄に有効に働く事が可能となる。その結果、浴槽に投入する粒子数は傾斜面が無い場合より大幅に削減できる。

また、本方式による洗浄では、被洗浄物体に当たる粒子の数の他に衝突速度、衝突角度が洗浄率に影響を及ぼす事が考えられる。これらは、噴流で吹き上げられる粒子の運動軌跡によって変わってくる。このため、傾斜面を転がり噴流に突入した粒子の運動の状態を把握する事が大変重要となる。

本研究では5章と同じ、ポリスチレン球を用いて、噴流中の粒子分布測定から分布に及ぼす傾斜板角度の影響について、また噴流中での運動軌跡の測定及び洗浄実験を行った。そして、粒子の運動軌跡の実験値と数値計算値とを比較した結果について述べる。さらに数値計算の運動軌跡から被洗浄体に当たる粒子の数、衝突速度、衝突角度を求めてノズル出口での粒子同士の衝突頻度の少ない噴流による洗浄率の定性的な予測を行ったので、その結果についても述べる。

### 6.2 実験方法

実験装置は、5章と同じものを使用した。吐出圧力34.3kPaのル - ツプロアから送られた空気は、幅600mm、高さ250mm、奥行き1600mmのバッファ - タンクに導かれる。

バッファ - タンク上面の開口部に、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長さ150mmのスリットを設けて二次元ノズルとした。ノズル長手方向の両端には噴流の広がりを押さえ二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。

粒子は直径6mmのポリスチレン球（比重1.0、真球度0.042mm、反撥係数0.58）を用い、ノズル出口風速（ $V_0$ ）は30m/s（レイノルズ数19400）一定とした。粒子を効率的に空気噴流に混入させるため、図6 - 1のように、ノズルの両側にノズルに向かってノズル端面から10mmの水平部分を残して、傾斜板（傾斜角度  $\theta = 5^\circ$  の場合傾斜板長さ235mm）を設けた。

傾斜板の上にはポリスチレン球の反撥を押さえるために、2mmのゴムシートを貼ってある。

ノズル端面から10mmの水平部分を残したのは、傾斜板の角度を変えた場合においても、常に粒体を噴流に垂直に突入させるためである。傾斜角の影響を調べるために、 $\theta = 5^\circ$ 及び $10^\circ$ とした。ポリスチレン球のゴムシート上での静摩擦角度は平均 $4.85^\circ$ であったので、傾斜板の角度 $\theta$ は $5^\circ$ を基準とした。この場合、静摩擦角度とほぼ同じ角度であるため、粒体は滑ることなく、傾斜面を転がり落ちると考えて良い<sup>(1)</sup>。また、実験模型に投入する粒体は1000個とした。その時の質量流量比は高速ビデオカメラでノズル部分を1秒間に250コマの速度で撮影し、1コマごとにノズルから吹き上げられる粒体を1秒間カウントして求めた。粒体の噴流中での分布測定は直径12mmの小型口ドセルを丸棒の端面に接着して、 $Y/D=20$ 、と $Y/D=40$ 断面位置で、噴流中心からX軸方向に12mmピッチで測定した。サンプリングタイム $200\mu\text{s}$ 、測定時間6.553s間の衝突回数から密度分布を求めた。

噴流に混入した粒体の軌跡の測定は、REDLAKE社製の高速ビデオカメラMOTION-SCOPEと(株)ディテクト社製解析ソフトDIPP-MOTIONを用いた。そして、傾斜面上から転がした1個の粒体が、噴流で吹き上げられる様子を撮影し、その画像から粒体の軌跡を計測した。また数値解析を行い、実験値と比較した。

洗浄効果は通気性の薄いポリウレタンフィルム(24mm×30mm)を非吸湿性のビニールに張った後、バター(脂肪分83%)をフィルム上に塗り、 $50^\circ\text{C}$ で30分間加熱して厚さを均一化し、24時間デシケータ内で保管したものを洗浄用試料として用いた。これを図6-28に示すように、直径12mmの丸棒に7mmのゴムを巻いた治具の上に張り、 $Y/D=20$ 、40の位置に水平に設置して、5分間洗浄した。洗浄前後のバターの重量から洗浄率(W)を計算して求めた。

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6-2に示す。角度を設定できる傾斜バイスに緩衝用の厚さ10mmのゴムシートを張ってX-Yテーブルに固定し、その上に、洗浄率を測定するための試料を固定した。

そして、治具に固定した内径7mm、長さ50、250、450mmの透明アクリル樹脂パイプをガイドとして用いて落下させた。同じ位置に衝突するのを避けるため、1mmピッチで粒体1個ずつ落下させ、1つの試料に付き合計616個の粒体を用いた。落下距離は衝突角度 $90^\circ$ では100、300、500mm、衝突角度 $60^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $30^\circ$ では300mmとして洗浄率を求めた。また、高速ビデオカメラを用いて衝突直前の粒体の速度を計測して、衝突速度と衝突角度の洗浄率に与える影響を調べた。

## 6.3 実験結果

### 6.3.1 噴流中の粒体の分布に及ぼす傾斜板角度の影響

粒体投入量2000個、傾斜板角度 $\theta = 5^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $15^\circ$ とした場合の噴流の様子を図6-3に示す。傾斜角度が大きくなるにつれて、噴流中にある粒体の数が増加している。これは、傾斜角度が大きいく程、傾斜板上に落下した粒体は傾斜面を転がる速度が大きく、短時間でノズル出口まで移動するからである。また、傾斜角度が大きくなるにつれて、粒体の吹き上がる高さが低くなっている。これは、傾斜角度が大きいく程、落下した粒体が短時間でノズル出口に移動するために、ノズル出口で粒体同士の衝突が激しく起こっているためと思われる。

また、傾斜角度  $\theta = 5^\circ$  の場合に粒体投入量を変化させた噴流の様相を図 6 - 4 に示す。投入粒体数が多くなるにつれて、噴流中の粒体数が増加し、粒体の吹き上がり高さが低くなる。これも、投入粒体数が多くなる程、ノズル出口に集まる粒体数が増加し、ノズル出口での衝突頻度が増すためと考えられる。

投入粒体数1000個で、傾斜角度  $\theta = 5, 10^\circ$  の場合の質量流量比は、 $\theta = 5^\circ$  の場合1.34、 $\theta = 10^\circ$  の場合1.56であった。これからも、傾斜角度が大きくなると噴流中の粒体数が増加する事がわかる。また、両側の傾斜面から転がってきた粒体が空気噴流で吹き上げられる時に、衝突する回数から衝突頻度（衝突する粒体数 / ノズルに入る粒体数）を調べた。その結果、傾斜角  $\theta = 5^\circ$  の場合（質量流量比1.34）では0.205、 $\theta = 10^\circ$ （質量流量比1.56）の場合は、0.25であった。これより、質量流量比が増加すると、ノズル出口で、両側の傾斜面から転がった粒体の衝突頻度も増加する。

次に、傾斜角度  $\theta = 5^\circ$  及び  $10^\circ$  の場合の粒体の噴流中での密度分布を測定した。その結果は図 6 - 5、図 6 - 6 に示すとおりである。図 6 - 5 は、縦軸に口 - ドセルのセンサ面に単位時間、単位面積あたりに衝突する粒体の数  $N_c$  をとり、横軸に  $X/D$  をとって、傾斜板の角度  $\theta = 5^\circ$  の場合の測定結果を示したものである。また、図 6 - 6 は傾斜板の角度  $\theta = 10^\circ$  の場合の測定結果である。なお、粒体の総数はいずれの場合も1000個とした。  $Y/D=20$ 、40断面位置において、図 6 - 5 と図 6 - 6 を比較すれば  $\theta = 5^\circ$  よりも  $\theta = 10^\circ$  の方が、単位面積、単位時間当たりの粒体数  $N_c$  が多い事がわかる。これは、 $\theta = 10^\circ$  の場合では  $\theta = 5^\circ$  の場合よりも質量流量比が大きいためであると考えられる。また、 $Y/D=20$  の高さにおいて、噴流中心  $X/D=0$  での粒体密度  $N$  を比べると  $\theta = 10^\circ$  の方が密度  $N$  は大きくなっている。また、 $\theta = 10^\circ$  では  $\theta = 5^\circ$  の場合より噴流中心での密度と、 $\pi - \theta$  を示す  $X/D = \pm 2.4$  での密度との差が少なく均一化の傾向になる。この事は傾斜角度  $\theta$  が大きくなると、ノズル出口での衝突頻度が増加し、噴流中心付近を吹き上げる粒体数が増えるためと考えられる。この様に、傾斜板の角度  $\theta$  によって噴流中の粒体密度  $N$  は変わるものの、 $Y/D=20$  断面では噴流周辺に、密度の  $\pi - \theta$  が生じ、 $Y/D=40$  断面では  $Y/D=20$  での断面と比べて、密度は低下するが、密度差が少なくなり広く分布するという傾向は変わらない。

$Y/D=20$  断面において、噴流周辺に粒体の密度の  $\pi - \theta$  ができる原因を探るために、粒体の衝突が無い噴流で、落下した粒体が傾斜面全体から同じ確率で転がり噴流で吹き上げられる場合の粒体の運動を観察した。傾斜面下端位置から傾斜面に沿って計った傾斜面の長さを  $L$  として、下端位置から  $0.01m$  ごとに20個の粒体を1個ずつ自然に転がして噴流で吹き上げられた粒体の最高高さとして落下する位置を観察した。そして、460個の粒体（転がす位置の数  $23 \times 20 = 460$  個）について吹き上げられる高さ及び落下位置から粒体の大まかな軌跡を表 6 - 1 のように分類した。

表 6 - 1 粒体軌跡の分類

区分	状態
A	吹き上がり高さ $0.6m$ 以下で転がった斜面に落下
B	吹き上がり高さ $0.6m$ 以上
C	吹き上がり高さ $0.6m$ 以下で噴流を飛び越して反対斜面に落下

傾斜角度  $\theta = 5, 10^\circ$  の場合の測定結果を図 6 - 7、図 6 - 8 に示す。 $\theta = 5^\circ$  の場合、傾斜面上の低い位置 ( $L=40mm$  以下) から転がした粒体は全て噴流で跳ね返されるように吹き

上げられ、反対に高い位置 ( $L=140\text{mm}$ 以上) から転がした粒体は全て吹き上げられた後、噴流を飛び越して反対斜面上に落下した。それらの中間位置 ( $L=60\sim 120\text{mm}$ ) から転がすと  $600\text{mm}$ 以上高く吹き上げられる粒体があった。高速ビデオカメラによる観察において、 $600\text{mm}$ 以上高く吹き上げられる粒体 (B領域の粒体) は噴流の中心軸近くを上昇しているのが確認できた。また、A及びC領域に区分される粒体はノズルから低い仰角の放物線の軌跡を描く事が確認でき、また高さも図6 - 24に示すように大部分  $200\text{mm}$ 以上あった。

傾斜面下端位置からの距離  $L=70, 80, 90, 100\text{mm}$ ではA、B、Cの全ての領域が現れた。これは、同じ位置から転がしても、粒体の真球度や、噴流に巻き込まれる空気が傾斜面に沿って流れているために、粒体の突入速度や角度が微妙に異なるため軌跡が変わるものと思われる。

図6 - 7の  $\theta=5^\circ$ の場合に、傾斜板の長さ  $L$ の全長についてA、B、Cになる確率を求めると、A:30%、B:11%、C:59%となる。さらに、実験模型に粒体1個のみ投入し噴流で連続300回吹き上げられる状態を観察して、A、B、Cに分類分けした結果、確率はA:31%、B:12%、C:57%となり、斜面から転がした場合とほぼ同じであった。この事から1個の粒体を含んだ噴流 (粒体同士の衝突の無い噴流) では、 $Y/D=20$ 位置において噴流中心を通る粒体 (B領域) は少なく、大部分は噴流中心から離れた位置を通過していると言える。これらの結果から、粒体同士の衝突頻度の少ない  $\theta=5^\circ$ 、粒体投入数1000個の噴流においても、 $Y/D=20$ の高さにおける粒体の分布は噴流主軸周辺部において粒体の分布密度が最も高くなるような分布になるとと思われる。

図6 - 8に示す傾斜角度  $\theta=10^\circ$ の場合、A領域になる確率は18%、Bは2%、Cが80%となる。傾斜角度  $\theta=5^\circ$ と比べて、A、B領域は小さくなり、C領域になる確率が大きくなった。これは、傾斜角度が大きくなると、低い位置から転がしても噴流への突入速度が大きくなるためと考えられる。また、 $\theta=5^\circ$ の場合より、B領域の確率が12%から2%と小さくなった。これは粒体の衝突が少ない噴流において噴流中心を吹き上げる粒体数が減少する事になり、密度分布の測定結果を示した図6 - 5及び図6 - 6から、 $Y/D=20$ 断面の噴流中心  $X/D=0$ 位置で  $\theta=10^\circ$ の方が  $\theta=5^\circ$ の場合より密度  $N$ が大きくなる測定結果と反対になる。これは、傾斜面から転がした場合は粒体同士の衝突が無い状態であり、密度分布を測定した  $\theta=10^\circ$ の噴流では粒体同士の衝突頻度が25%と高いためと考えられる。

粒体噴流化洗浄にとっては、均一な洗浄を行うには分布密度が均一になる必要がある。そのため、噴流中心軸近くを吹き上げる粒体が多い程、洗浄効果は上がり洗浄時間の短縮と送風機の容量を小さくできる点で有利である。これまでの結果より、ノズル出口での衝突頻度が少ない噴流では粒体が高く吹き上がるものの噴流中心を吹き上げる粒体の密度は小さく、衝突頻度の多い噴流では噴流中心の密度は高くなるが、吹き上がり高さが減少する。そのため、粒体噴流化洗浄に最適な衝突頻度となる傾斜角及び投入粒体数が存在する。

実験における噴流の観察から、高く吹き上がる粒体数が多いのを判断基準として概略を示せば、傾斜角  $\theta=5^\circ$ では投入粒体数1000~3000個、 $\theta=10^\circ$ では1000~2000個、 $\theta=15^\circ$ では500~1500個が良いと判断される。

### 6.3.2 粒体の軌跡

これまでの結果から、粒体の軌跡の大まかな挙動は明らかになった。しかし、1個の粒

体が噴流に突入してから、吹き上げられる運動の軌跡を把握する事が均一な洗浄に有効なB領域の粒体の量を多くするためには重要となる。そのため、粒体が傾斜面を転がり、噴流で吹き上げられる様子の詳細な測定を高速ビデオカメラを用いて行った。

傾斜板の角度を  $\theta = 5^\circ$  に設定して、図6 - 7の結果からA領域になる位置として $L=0.04\text{m}$ 、C領域になる位置として $L=0.14\text{m}$ 、そして、A、B、C領域が現れる位置 $L=0.08\text{m}$ を選び、それぞれの位置に1個の粒体を置き、自然に転ばして噴流で吹き上げられる粒体を1秒間に250コマの速さで撮影した画像を、解析ソフトDIPP-MOTIONに取り込んで軌跡を求めた。その結果は図6 - 9に示すとおりである。X軸の正方向に設置した斜面板の $L=0.04\text{m}$ の位置から転がした粒体は、吹き上がった後、全て転がした側の斜面に落下している。そして、その高さは $Y/D=20 \sim 30$ であった。 $L=0.08\text{m}$ の位置から転がした場合にはB領域になるのが4個、残りはA領域であった。 $L=0.14\text{m}$ 位置では全てC領域で、高さは $Y/D=0.15 \sim 0.25$ であった。これらの結果は、図6 - 7の結果と比較的良く一致する。

この様に、転がす位置（突入速度）によって粒体の軌跡が大きく変化するのは、空気速度と速度勾配が大きいポテンシャルコア領域での影響が大きいと考えられる。そこで、噴流への突入直後のポテンシャルコア領域内における粒体の詳しい挙動を1秒間に500コマの速さで撮影した高速ビデオカメラの画像を図6 - 10 ~ 12に示す。図6 - 10において画像の背景に示した中央の縦線は噴流中心軸を示し、水平な白線は $Y/D=5$ のポテンシャル領域を示す。中央の三角形はポテンシャルコア領域、左右に広がる線は噴流の広がりを示す $10^\circ$ の線である。ノズルは画面下中央にある。粒体はXの+方向（右方向）から-方向（左方向）に向かって転がり、吹き上げられる状態を示している。画像の下の数値は、粒体がノズル端面から吹き上がる瞬間を0秒として、 $Y/D=5$ のポテンシャル領域を通過するまでの経過時間を示している。

$L=0.04\text{m}$ から転がした粒体は一旦ポテンシャルコア内に入るものの、粒体の中心は噴流中心を-側に越える事なく押し戻されるように曲線を描いて、 $Y/D=5$ の水平線の+側を通過する。ポテンシャルコアの端部 $Y/D=5$ の位置を通過するまでの時間は約50msである。

$L=0.08\text{m}$ から転がした粒体は、ポテンシャルコア領域に入り、ほぼ噴流中心軸に沿って上昇して、 $Y/D=5$ の水平線を通過する瞬間は約40msである。

$L=0.14\text{m}$ から転がした粒体は、ポテンシャルコア内に入りコアを横断して、 $Y/D=5$ の線の-側を約48ms後に通過している。これらから、噴流中心を吹き上げる粒体（ $L=0.08\text{m}$ の位置から転がした粒体）が、吹き上がりから $Y/D=5$ の高さを通過する時間が短い事から速度が大きい事がわかる。また、いずれの粒体も傾斜面を転がる事による生じた回転が、ポテンシャル領域内でも見られる。

図6 - 10 ~ 12で示した、ポテンシャル領域内の粒体の撮影画像を、解析ソフトDIPP-MOTIONで解析した軌跡を図6 - 13に示した。これより、粒体の運動軌跡はポテンシャル領域内での風速分布、粒体の突入速度、回転などによって大きく影響を受けるものと考えられる。

### 6.3.3 計算による粒体の軌跡

傾斜面を転がった、粒体が噴流に突入して空気噴流で吹き上げられる粒体の運動の解析を行う事は、噴流中での粒体分布の予測や、洗浄率、被洗浄体への衝突速度を推定する上

で重要となる。

本研究では、直径6mmのポリスチレン球を  $\theta = 5^\circ$  の傾斜面から転がして、ノズル出口風速30m/s (レイノルズ数19400) の二次元空気噴流で吹き上げられて落下するまでの運動を FORTRAN<sup>(3, 4)</sup> を用いてRunge-Kutta法<sup>(4, 5)</sup> で数値解析を行って求めた。また、この計算結果と高速ビデオカメラを用いて測定した粒体の軌跡とを比較した。

計算に当たって、解析は二次元とする。空気速度分布は粒体の影響を受けない。粒体は1個のみで粒体の衝突は考慮しないこととした。

噴流中にある粒体は流体から、流体との相対速度による抗力、加速抗力、バセット力、速度勾配による揚力、粒体の回転による揚力、浮力、重力を受ける<sup>(7, 8, 9, 10)</sup>。

しかし、本研究で取り扱う粒体の密度  $\rho_s$  は空気の密度  $\rho_a$  よりはるかに大きく、かつ空気の粘度  $\mu$  は  $1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  より小さいので、加速抗力とバセット力を省略した、擬定常的な解析方法を用いた<sup>(7)</sup>。

粒体の運動は、ベクトル表示を用いれば並進運動に対して、

$$m_s \frac{d\vec{u}_s}{dt} = \vec{F}_D + \vec{F}_{RL} + \vec{F}_{SL} + \vec{F}_G + \vec{F}_F \quad (6-1)$$

で表される。また、回転運動に対しては

$$I \frac{d\vec{\omega}_s}{dt} = -T \quad (6-2)$$

で表される。

ここで、 $m_s$  は粒体の質量、 $\vec{u}_s$  は粒体の速度、 $\vec{F}_D$  は流体抵抗、 $\vec{F}_{RL}$  は回転による揚力、 $\vec{F}_{SL}$  は速度勾配による揚力、 $\vec{F}_G$  は重力、 $\vec{F}_F$  は浮力である。Iは粒体の慣性モーメント、 $\vec{\omega}_s$  は粒体の角速度、Tは回転トルクを表す。

流体抵抗は粒体と空気の相対速度から

$$\vec{F}_D = \frac{1}{2} C_{Da} \rho_a |\vec{u}_r| \vec{u}_r \quad (6-3)$$

(6-3)式で表される<sup>(6, 7, 8, 9, 10)</sup>。ここで  $\rho_a$  は空気密度、 $\vec{u}_r$  は空気の粒体に対する相対速度、 $a_s$  は粒体の流れに垂直な面への投影面積、Cは流体の抵抗係数を表す。抵抗係数はCはClift and Gauvinの近似式(6-4)式を用いた<sup>(10)</sup>。

$$C_D = \frac{24}{Re_s} \left( 1 + 0.15 Re_s^{0.687} \right) + \frac{0.42}{(1 + 4.25 \times 10^4 Re_s^{-1.16})} \quad (6-4)$$

ここでレイノルズ数 $Re_s$ は(6-5)式を用いた<sup>(6, 7)</sup>。

$$Re_s = \frac{a |\vec{u}_a - \vec{u}_s| d_s}{\mu a} \quad (6-5)$$

また、回転に伴う揚力は辻<sup>(7)</sup>の考えに従えば、相対速度  $\vec{u}_r$  と相対角速度  $\vec{\omega}_r$  を用いて(6-6)式で表される。

$$\vec{F}_{RL} = \frac{1}{2} C_{LRA} \rho_a |\vec{u}_r| \left( \frac{\vec{u}_r \times \vec{\omega}_r}{|\vec{\omega}_r|} \right) \quad (6-6)$$

ここで $C_{LR}$ は揚力係数で、次式で与えられる<sup>(7, 8, 9)</sup>。

$$C_{LR} = \min \left( 0.5, 0.25 \frac{d_s |\vec{r}|}{|\vec{u}_r|} \right) \quad (6-7)$$

minは0.5と  $0.25 \frac{d_s |\vec{r}|}{|\vec{u}_r|}$  の小さい方の値をとる。  $d_s$  は粒子の直径である。

ここで、相対速度  $\vec{u}_r$  は  $\vec{u}_a - \vec{u}_s$  で表される。 $\vec{r}$  は粒子の空気に対する相対角速度を表し、粒子の角速度  $\vec{\omega}_s$  と空気速度  $\vec{u}_a$  を用いて(6-8)式で表される<sup>(7, 8, 9)</sup>。

$$\vec{r} = \vec{\omega}_s - \frac{1}{2} \times \vec{u}_a \quad (6-8)$$

また、速度勾配による揚力は、X軸方向のみ作用するとして、Y軸方向の相対速度のX方向の勾配 ( $u_{ry} / X$ ) を用いて、(6-9)式で表される<sup>(7, 8, 9)</sup>。

$$F_{SL} = 1.62 d_s^2 \mu \sqrt{\left| \frac{u_{ry}}{x} \right|} \frac{u_{ry}}{x} \quad (6-9)$$

ここで、 $\mu$  は空気の動粘性係数、 $u_{ry}$  は空気と粒子のY軸方向の相対速度である。

一方、粒子の回転運動に対しては、辻<sup>(7)</sup>の考えに従って、(6-10)式で表した。

$$I \frac{d\vec{\omega}_s}{dt} = -\frac{1}{2} \mu \left( \frac{d_s}{2} \right)^5 |\vec{r}| |\vec{\omega}_s| \left( \frac{C1}{\sqrt{R_{er}}} + \frac{C2}{R_{er}} \right) \quad (6-10)$$

また、粒子の回転によるレイノルズ数 $R_{er}$ は(6-11)式で表される<sup>(7)</sup>。

$$R_{er} = \frac{|\vec{r}| \left( \frac{d_s}{2} \right)^2}{\mu} \quad (6-11)$$

(6-10)式の定数 $C1, C2$ は(6-11)式によるレイノルズ数に対応する表6-2から求めた<sup>(7)</sup>。

また、球の慣性モーメントは

$$I = \frac{m_s d_s^5}{60} \quad (6-12)$$

で表される。また、浮力及び重力はそれぞれ(6-13)式、(6-14)式で表される。

$$\vec{F}_F = \frac{m_s g}{s} a \quad (6-13)$$

$$\vec{F}_G = -m_s g \quad (6-14)$$

(6-3)式、(6-6)式、(6-9)式、(6-13)式、(6-14)式を(6-1)式に代入してX及び、Y方向の運動方程式に整理すると、

X軸方向に対して、

$$\frac{du_{sx}}{dt} = \frac{1}{2m_s} \rho a_s |\vec{u}_a - \vec{u}_s| \left[ C_D(u_{ax} - u_{sx}) + C_{LR} \frac{\{(u_{ay} - u_{sy}) r_z\}}{|\vec{r}|} \right] + \frac{1.62}{m_s} \rho a_s^2 \sqrt{\left| \frac{u_{ry}}{x} \right|} \frac{u_{ry}}{x} \quad (6-15)$$

Y軸方向に対して

$$\frac{du_{sy}}{dt} = \frac{1}{2m_s} \rho a_s |\vec{u}_a - \vec{u}_s| \left[ C_D(u_{ay} - u_{sy}) + C_{LR} \frac{\{(u_{sx} - u_{ax}) r_z\}}{|\vec{r}|} \right] + g \left( \frac{a - s}{s} \right) \quad (6-16)$$

が得られる。ここで、 $r_z$  は(6-17)式で表される<sup>(7, 8, 9)</sup>。

$$r_z = s - \frac{1}{2} \left( \frac{u_{ay}}{x} - \frac{u_{ax}}{y} \right) \quad (6-17)$$

また、回転の運動方程式は(6-8)式および(6-12)式を(6-10)式に代入して整理すると

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{s}{s} \right) = - \frac{15}{16} \frac{a}{s} \left| s - \frac{1}{2} \left( \frac{u_{ay}}{x} - \frac{u_{ax}}{y} \right) \right| \left\{ s - \frac{1}{2} \left( \frac{u_{ay}}{x} - \frac{u_{ax}}{y} \right) \right\} \left( \frac{C1}{\sqrt{R_{er}}} + \frac{C2}{R_{er}} \right) \quad (6-18)$$

となる。

噴流に突入する時の粒体の角速度 $\omega$ は、粒体がゴムシート面上を滑らずに転がるものと仮定して、

$$\omega = 2u_{s0} / d_s \quad (6-19)$$

で表される。ここで、 $u_{s0}$ は粒体の噴流への突入速度を表す。

$u_{s0}$ は、傾斜板上( $\theta = 5^\circ$ )から1個の粒体を転がして、傾斜板下端位置とノズル端面の10mmの水平部分を通過する粒体を高速ビデオカメラで1秒間に500コマの速度で撮影した画像から解析ソフトDIPP-MOTIONを用いて求めた。その結果を図6-14に示す。縦軸には突入速度 $u_{s0}$ をとり、横軸には傾斜板下端位置からの距離Lをとっている。印は実験結果を実線は近似曲線を表している。これより、粒体の突入速度 $u_{s0}$ は傾斜板下端位置からの距離Lを用いて(6-20)式で近似できる事がわかる。

$$u_{s0} = (0.666356 \times L - 0.0000359)^{1/2} + 0.0486106 \quad (6-20)$$

表6-2 (6-10)式における係数

$R_{er}$	C1	C2
$10 < R_{er} < 20$	5.32	37.2
$20 < R_{er} < 50$	6.44	32.2
$50 < R_{er} < 100$	6.45	32.1

次に、数値計算する上で必要となる噴流の速度分布については、今まで多くの研究者によって、理論解や近似式が発表されている<sup>(2, 6)</sup>。本研究での風速分布の測定値を既発表の近似式と比較して、計算で用いる近似式を選定した。5章での噴流軸上の風速分布の



測定結果図5 - 8 から判断して噴流中心軸上のポテンシャルコア終端はY/D=5の位置と見なせる。この位置における $V_0$ と、ノズル出口風速Vとの比は0.976であったので、ポテンシャルコア領域の幅方向についても、 $V/V_0=0.98$ になる位置までをポテンシャルコアと見なして、表示すると、図6 - 15 が得られた。印は実験結果から $V/V_0=0.98$ になる位置の前後の測定値から直線補間して求めた値を示す。実線は、ポテンシャルコア形状を三角形で近似させたノズル出口の幅 $X/D=\pm 0.5$ の点と、噴流中心軸上のポテンシャルコア終端位置 $Y/D=5$ を結んだ直線を示す。印の実験結果と比べてポテンシャルコア形状は、高さ $Y/D=5$ の点とノズル出口端部、 $X/D=\pm 0.5$ の点とを結ぶ三角形で近似できる事がわかる。

また、コア周辺の速度分布の測定結果とSimsonの近似式<sup>(6)</sup>による計算結果とを比較すれば図6 - 16 のとおりになる。拡散領域における測定値(マ - カ印)とGortlerの近似式<sup>(6)</sup>による計算結果(実線)とを横軸に幅方向距離Xを噴流中心速度 $V_0$ の1/2になる噴流幅 $b_{1/2}$ で無次元化して表し、縦軸は噴流中心速度 $V_0$ との比で表して比較すれば図6 - 17 のとおりになる。これらの計算値と測定値とは比較的良く一致している。従って、本研究での数値計算に当たっては、ポテンシャルコア形状は $Y/D=5$ の点を $X/D=\pm 0.5$ の点を結ぶ三角形で近似し、コア周辺の混合領域ではSimsonの近似式を、ポテンシャル領域より下流域ではGortlerの式を用いる事にした。また、噴流の広がり角度は5章の結果から $10^\circ$ とし、噴流の周囲の空気の流れは無いものとした。

これらより、ポテンシャルコア周辺部では、粒体の中心位置の座標を用いて、Simsonの近似式を表せば、X軸方向の空気速度 $u_{ax}$ は(6 - 21)式、またY軸方向の空気速度 $u_{ay}$ は(6 - 22)式となる<sup>(6)</sup>。

$$u_{ax} = 0 \quad (6 - 21)$$

$$u_{ay} = \left\{ 1 - \left[ \frac{10x+y-50}{(3.756y-50)} \right] \frac{7}{4} \right\}^2 \quad (6 - 22)$$

また、ポテンシャル領域内では、風速一定であるから、

$$u_{ax} = 0 \quad (6 - 23)$$

$$u_{ay} = 30 \text{ m/s} \quad (6 - 24)$$

となる。

乱流拡散領域では、Gortlerの近似式を用いると、X軸方向の空気速度 $u_{ax}$ は(6 - 25)式<sup>(6)</sup>、Y方向の速度 $u_{ay}$ は(6 - 26)式となる<sup>(6)</sup>。

$$u_{ax} = \frac{\sqrt{3}}{4} \sqrt{\frac{J}{ay}} \{ 2 (1 - \tanh^2) - \tanh \} \quad (6 - 25)$$

$$u_{ay} = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{\frac{J}{ay}} (1 - \tanh^2) \quad (6 - 26)$$

ここで  $\left[ \frac{1}{y} \right]_x$ 、  $= \frac{1}{7.67}$  とした<sup>(6)</sup>。

またJは噴流の運動エネルギーで、ノズル出口で平均した風速 $U_0$ と、ノズル出口幅D、ノズルの長さHとして、(6 - 27)式から求めた<sup>(6)</sup>。

$$J = \frac{1}{2} \rho U_0^2 DH \quad (6 - 27)$$

数値計算で用いた噴流の風速分布をまとめて、図6 - 18 に示す。

計算の初期条件として、解析時間 $t=0$ で粒体の中心位置は $X=5\text{mm}$ 、 $Y=5\text{mm}$ として、ノズル端

面上にある状態から計算した．そして、X軸方向の速度は(6-20)式から求められる値を初速度とし、Y軸方向の初速度は0m/s、とした．回転は(6-19)式から求められる値を初期値とした．Runge-Kutta法による繰り返し計算の時間きざみは1/2000秒とした．また、粒体の直径が6mmと比較的大きいため、速度勾配による揚力を表す(6-9)式において、速度勾配( $U_{ry}/X$ )は粒体の両端面位置での空気速度差から求めた．

また、計算は粒体の軌跡を実験した場合と同じ、X軸の+方向に設置した傾斜板上から転がすものとした．そのため、X軸の+方向に落下するものをA領域、反対斜面上に落下する場合をC領域として判定した．

傾斜面上のL=40、80、140mmの位置から転がした場合の計算結果を実験値と比較した結果をそれぞれ図6-19、図6-20、図6-21に示す．

実曲線は高速ビデオカメラによる測定結果をマ-カ印は数値計算結果を示す．L=40mm及びL=140mmから転がした場合の計算結果は高速ビデオカメラでの実験値と比べて、方向、高さ、飛距離共に比較的良く一致している．しかし、L=80mmでは計算結果と実験結果が一致しているとは言えない．これは、L=80mmから転がした計算結果は高さがY/D=90近くまで上がるので、A、B、Cの領域に分けるとB領域(Y/D=60以上吹き上がる粒体)になる．しかし、実験結果では10個の粒体の内、B領域になる数は4個で、残りの6個はA領域(Y/D=60以下で転がった側の傾斜面上に落下する粒体)になり、高さ、方向共に異なり同じ軌跡になっていないためである．

図6-22にはL=40、80、140mmの位置から転がした場合のポテンシャル領域内における実験値と計算値の軌跡を示す．計算値は黒塗りマ-カ印で白抜き印は実験値を示す．

印はL=40mmの位置から転がしてA領域になる場合の計算値と実験値の軌跡、印はL=80mmから転がしてB領域となった粒体の軌跡を、印はL=140mmから転がし、C領域となる場合の計算値と実験結果の軌跡を表す．C領域の軌跡は実験値と比較的良く合っているものの、A、B領域については、計算値の方がXの正方向にシフトしている．特にL=40mmから転がした場合に顕著である．これは、回転による揚力が大きからと判断される．

図6-23には傾斜面上のL=10mm位置から10mm間隔で転がした場合の、傾斜面全体について計算した軌跡を示す．

これより、A領域の確率は22%、B領域の確率17%、C領域60%となり、実験結果を示す図6-7の確率、A=30%、B=11%、C=59%とも定性的に一致する．

また図6-24には、傾斜面上10mmピッチから転がした場合の吹き上がり高さの、実験結果と計算結果を示す．×印は実験結果を印は計算結果を示す．実験結果と計算結果はL=40mm~150mm区間では比較的合っている．

#### 6.3.4 洗浄率に与える粒体の衝突速度、角度の影響

洗浄率Wに及ぼす粒体の衝突速度の影響を表す測定結果を示せば図6-25のとおりになる．図6-25の縦軸は粒体1個当たりの洗浄率Wをとり、横軸には粒体の落下距離100、300、500mmにおける衝突速度 $V_{\infty}$ を取っている．粒体の衝突速度 $V_{\infty}$ は高速ビデオカメラで撮影して衝突直前の速度を求めた結果を示している．衝突速度が大きくなると1個当たりの洗浄率Wも高くなる．図6-25に示した実線は衝突速度 $V_{\infty}$ と洗浄率Wの関係を直線近似で表したものである．

落下距離300mmとした場合の洗浄率 $W_1$ に及ぼす衝突角度の影響を表す測定の結果は図6-26に示すとおりである。図6-26において、縦軸は粒体1個当たりの洗浄率 $W$ をとり、横軸は図6-2で示した衝突角 $\theta$ で表した。衝突角度 $\theta$ が小さい程、洗浄率 $W$ は高くなる。これは、衝突角度 $\theta$ が小さくなる程、粒体は試料に斜めに当たる事になる。そのため、衝突効果に摩擦効果が加わるために洗浄力が大きくなるものと推察される。この結果から、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方が洗浄率により一層大きい影響を与えたと考えられる。図6-26の実線は洗浄率 $W_1$ と衝突角度 $\theta$ の関係を直線近似したものである。

### 6.3.5 洗浄結果及び洗浄予測

傾斜板角度 $\alpha=5^\circ$ 、質量流量比1.34の垂直噴流で5分間洗浄した場合の実験結果を図6-27に示す。縦軸は洗浄率を横軸は $X/D$ で示している。また、 $Y/D=20$ の高さでの実験の様子と洗浄試料の取り付け状態を図6-28に示す。実験は洗浄用試料の大きさが24mm×30mmであるため、洗浄用治具に24mmピッチですき間無く張り付けて5分間洗浄を行ない、洗浄前後の重量差から洗浄率を計算した。そして、ノズル中心から24mmピッチで実験結果を表示した。実験結果を示した図6-27から、 $Y/D=20$ 断面位置における洗浄率は $X/D=\pm 2.4$ の位置でピークを示した。また、 $Y/D=40$ では $X/D=-48\sim+48$ の範囲で、洗浄率はほぼ一定であった。この洗浄結果を、図6-5に示した粒体の密度分布と比べると、 $Y/D=20$ 位置で密度のピークとなる位置は $X/D=\pm 2.4$ である事、 $Y/D=40$ の位置では密度差が少ないフラットな分布となる事と、定性的に一致している。この事から粒体による洗浄では洗浄対象に当たる粒体の数が大きな影響を及ぼすことがわかる。また図6-28に示した洗浄実験の様子を見ると、噴流中心よりも、周辺に多くの粒体が吹き上がっている事がわかる。これからも、 $Y/D=20$ 位置において、噴流中心部よりも噴流周辺部が良く洗浄される事が予想される。

次に、数値計算から $Y/D=20$ の位置における洗浄効果の予測を行った。これまでの洗浄実験結果から判断して、衝突する粒体の数、衝突速度、衝突角度が洗浄に影響する事がわかる。その他、洗浄用試料に当たる噴流の流れによる粒体の運動の変化や、摩擦力、粒体の回転の影響なども考えられるが、予測に当たっては粒体の数、衝突速度、衝突角度のみを考慮した。また、傾斜板の角度 $\alpha=5^\circ$ 、粒体投入量1000個(質量流量比1.34)では、両側の傾斜板から転がった粒体が噴流によって、吹き上げられる時に衝突する個数は、ノズルに入る個数の約21%であったので、軌跡の計算においては、ノズル出口での粒体の衝突を考慮しない事とした。また、他の粒体による噴流分布は乱されない事とし、二次元での解析とした。

また、図6-23の計算による粒体の軌跡の結果から、粒体の噴流中での軌跡は噴流に突入する速度によって吹き上がる方向、高さなどが大きく異なる事がわかる。そのため、実験模型に粒体1000個投入して、噴流に突入する粒体の速度を、高速ビデオカメラを用いて、200個の粒体について計測した。その計測結果を図6-29に示す。粒体の突入速度は約、0.037m/sから0.518m/sの広い範囲に分散している事がわかる。その計測結果を計算上の粒体の突入速度 $U_{30}$ として、200個の粒体の軌跡を数値計算から求めた。実験模型は $Y$ 軸に対して左右対称であるので、200個から求めた軌跡を $Y$ 軸を対象軸として折り返して、合

計400個の粒体を対象とした．そして、高さ $Y/D=20$ の位置を通過する粒体の $X$ 軸上の位置、直前の速度及び衝突角度を求めた．そして図6 - 25と図6 - 26に実線で示した、衝突速度及び衝突角度と洗浄率との関係を示す近似式を用いて、1個の粒体が衝突する点における洗浄率を(6 - 28)式から求めた．粒体1個当たりの洗浄率を、実験で用いた洗浄試料の幅24mmごとに積算して、最大洗浄率になる試料との相対的な洗浄率で表した．

$$W_i = \text{衝突角度による洗浄率} \times \frac{\text{衝突速度による洗浄率}}{\text{落下距離300mmでの洗浄率}} \quad (6 - 28)$$

ここで、 $W_i$ は粒体1個の洗浄率を表す．

粒体の密度分布の計算結果を図6 - 30に示す．縦軸は、密度の相対値(12mm区間の累積衝突数 / 衝突数が最も大きい12mm区間の衝突数)で表し、横軸は $X/D$ として、密度分布の実験結果図6 - 5と対比させるために、ロ - ドセルの幅12mmと同じ間隔で計算結果を印で示す．最大密度を示す $X$ 軸上の位置、( $X/D = \pm 2.4$ )と噴流中心の密度が低い事は実験結果と類似するが、実験結果と比べて、噴流中心の密度とピ - ク位置での密度との比で比べると、実験結果では21%~27%であるが、計算結果では70%と高くなった．これは、計算の仮定、ノズル出口での粒体の衝突を無視した事や、粒体による噴流の乱れが無いとした事の影響と考えられる．計算結果と実験結果とは分布状態の傾向、すなわち噴流中心密度が低く、噴流周辺に密度のピ - クがある事は類似しているため、定性的な傾向は把握しているものと考えられる．

次に洗浄の計算結果を図6 - 31に示す．縦軸は最大洗浄率を示す位置との相対的洗浄率で表し、横軸は $X/D$ で表した．最大の洗浄率を示す位置は $X/D = \pm 2.4$ となり、噴流中心部の洗浄率が低くなっている事がわかる．これを、洗浄の実験結果図6 - 27と比較すると、計算結果の方が $X/D = \pm 2.4$ の位置での洗浄率と比べて、噴流中心部の洗浄率が高くなっている．これは、計算では、洗浄試料を固定した直径26mmの治具による噴流の流れを無視している事や、粒体の衝突、噴流分布への影響を考慮していない事や、衝突による摩擦や回転による洗浄効果を考慮していないためと考えられる．しかし、噴流中心部分の洗浄率が低く、周辺( $X/D = \pm 2.4$ )の洗浄率が高くなるという傾向は実験結果と定性的に合っている．これらから、三次元的な噴流の流れや粒体の衝突、被洗浄体に当たる噴流の乱れなど、複雑な計算によらなくても、本研究で用いた二次元的な解析でも、洗浄効果の定性的評価は可能であると言える．

これによって、風速、ノズル幅、粒体の直径、比重などが変化しても、定性的な粒体の分布予測から洗浄予測まで可能な事がわかる．

#### 6.4 結言

ノズルの両側に傾斜面を設置した実験模型のノズルからの風速を30m/s(レイノルズ数19400)一定として、直径6mmのポリスチレン球を質量流量比1.34で混入させた粒体の噴流化の様相を高速ビデオカメラによる測定と数値計算で求めた．また、粒体の衝突速度、角度と洗浄率の関係から、数値計算による軌跡から衝突速度、角度を求めて、洗浄率の予測を行った．その結果は以下の通りである．

- ( 1 ) ノズルの両側に傾斜面を設置する事で、噴流化する粒子数が増加し、傾斜面が無い場合より粒子の数を約1/10に減少させる事ができる .
- ( 2 ) 粒子の衝突の無い噴流では $Y/D=20$ において、噴流周辺に分布密度のピークがある .
- ( 3 ) 粒子の密度分布を均一にするにはノズル出口での粒子の衝突頻度を上げる事が有効である . その方法として投入粒子数を増加する方法と傾斜角を大きくする方法がある .
- ( 4 ) 数値計算で求めた 1 個の軌跡は、吹き上がる方向、高さ共に実験結果と比較的合う .
- ( 5 ) 洗浄率は当たる粒子の数、衝突速度、衝突角度の影響を受ける . 特に、粒子の密度分布との相関がある .
- ( 6 ) 粒子の衝突速度が大きい程、また衝突角度が小さい程洗浄率は高くなる .
- ( 7 ) ノズル出口で粒子の衝突が少ない場合 ( 質量流量比1.34以下 ) では、本研究による数値計算で求めた粒子の数及び衝突速度、角度から、実験で求めた洗浄率と衝突速度、角度の関係を用いれば洗浄率の定性的評価が可能である .

#### 参考文献

- ( 1 ) 多田政忠：物理学概説、学術図書出版社、(1970)
- ( 2 ) 新津靖、加藤孝夫：エア・カ・テンの性能及び設計に関する研究、衛生工業協会誌、Vol.32、No.10(1958)、591
- ( 3 ) 秋富勝、菊池通彦、菅原彪、中村征慧、中村隆一、若山芳三郎：学生のためのFORTRAN、東京電機大学出版局、(1990)
- ( 4 ) 服部雄一：FORTRANによる数値計算、(1992)
- ( 5 ) 戸川隼人：数値計算法、(1981)
- ( 6 ) 狩野武：粉体粒子の挙動、産業技術センター
- ( 7 ) 辻裕：空気輸送の基礎、養賢堂(1984)
- ( 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、日本機械学会論文集 (B編) 56巻 531号(1990-11)
- ( 9 ) 山本恭史、Matthias POTTHOFF、田中敏嗣、梶島岳夫、辻裕：固気二相チャネル乱流のLES、日本機械学会論文集 (B編) 65巻 629号(1999-1)
- ( 10 ) Clift、R.、Grace、J.R.、and Weber、M.E.、Bubbles、Drops、and Particles、Academic Press、1978

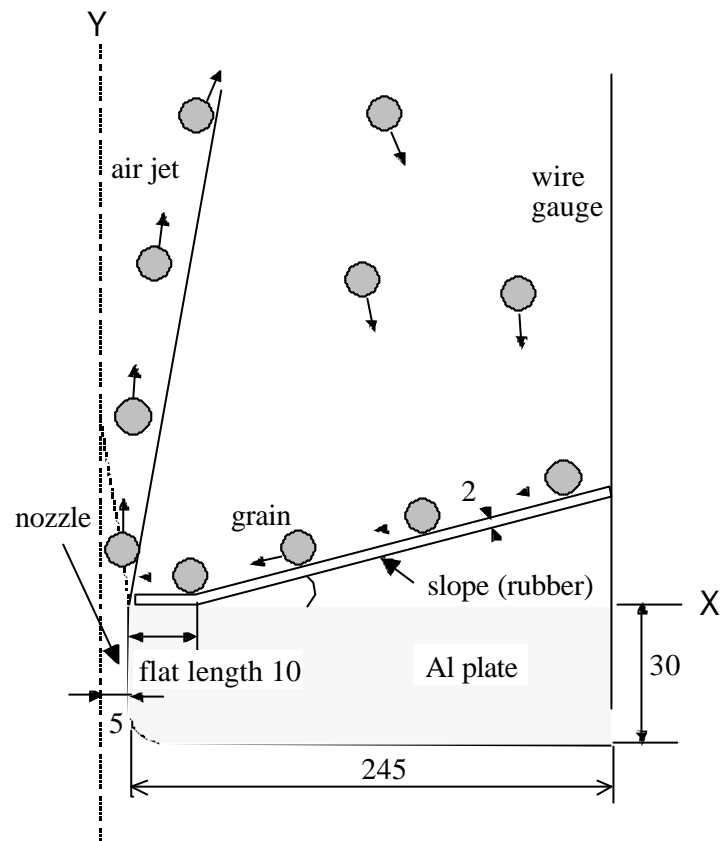


図6 - 1 空気噴流に粒体を混入する方法

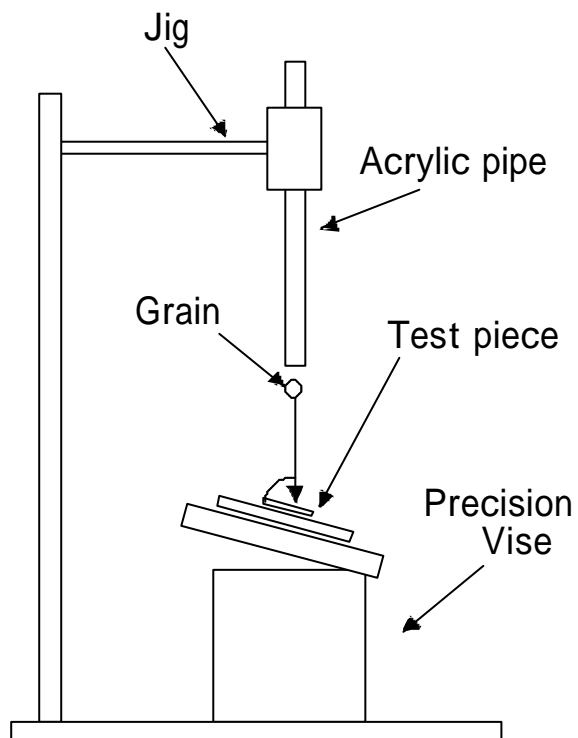
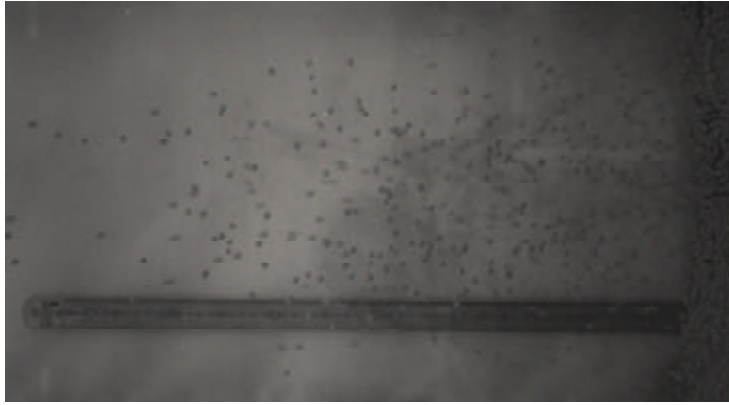


図6 - 2 衝突速度、角度の影響を調べる実験装置



5°

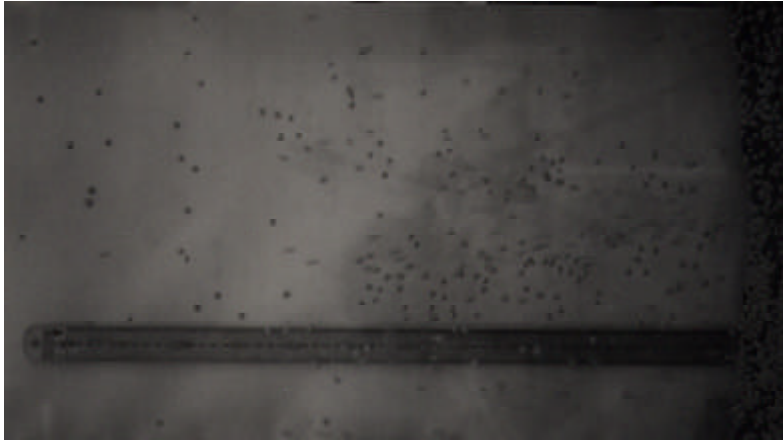


10°



15°

図6-3 傾斜角度による噴流化の様子(2000個)



1000/回



3000/回



5000/回

図6 - 4 粒子数の違いによる噴流化の様子 (  $\theta = 5^\circ$  )



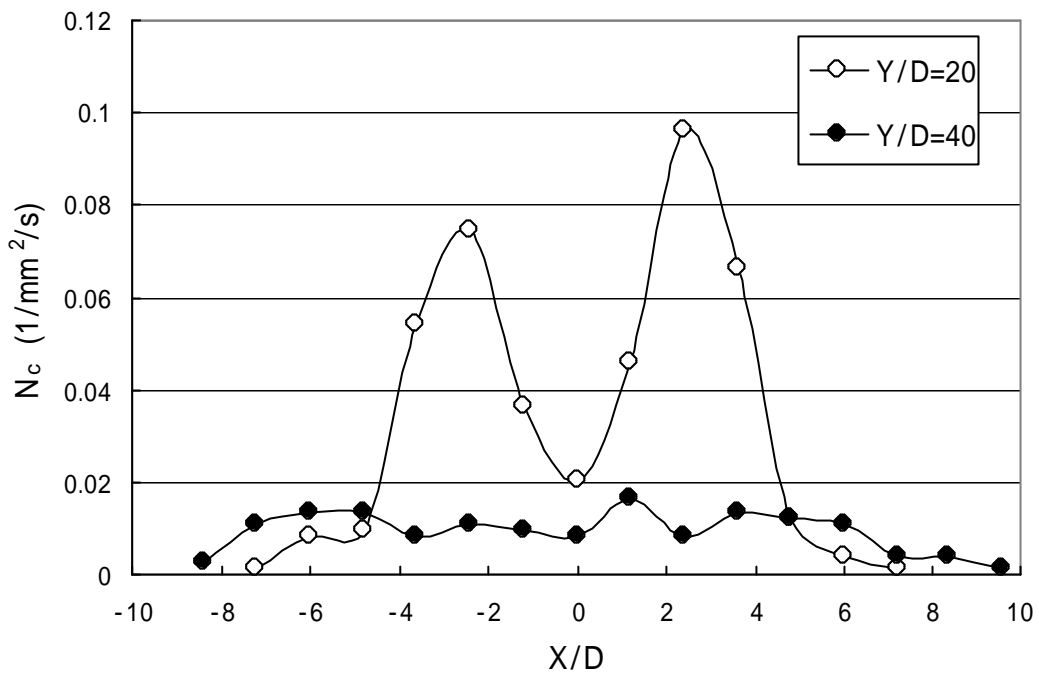


図 6 - 5 噴流中の粒子密度分布 (  $\theta = 5^\circ$  )

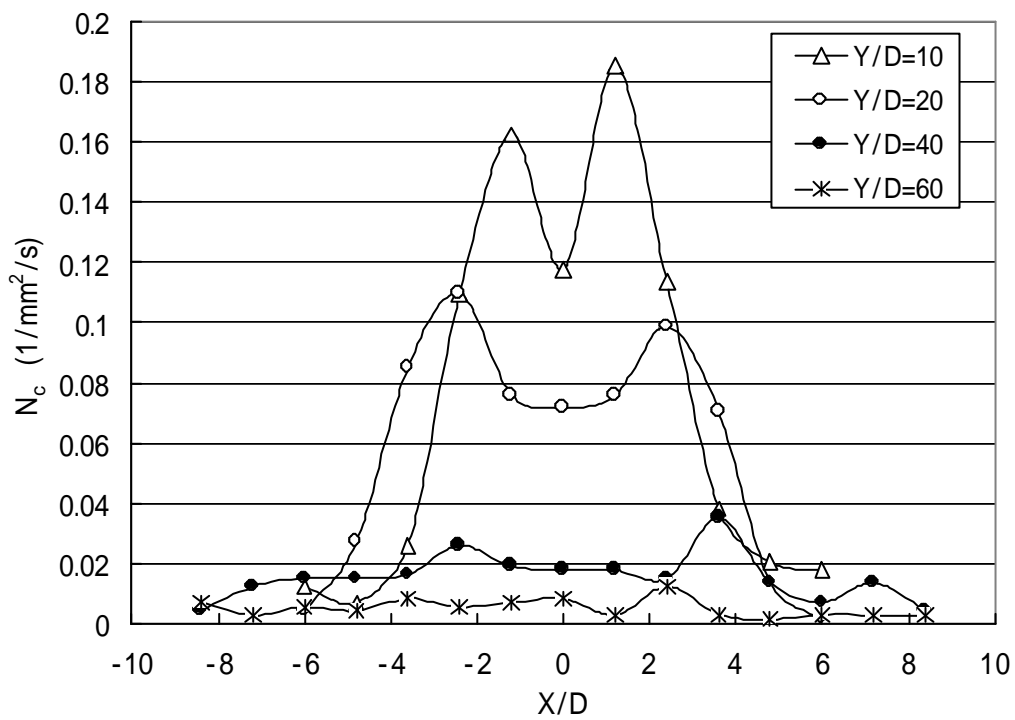


図 6 - 6 噴流中の粒子の密度分布 (  $\theta = 10^\circ$  )

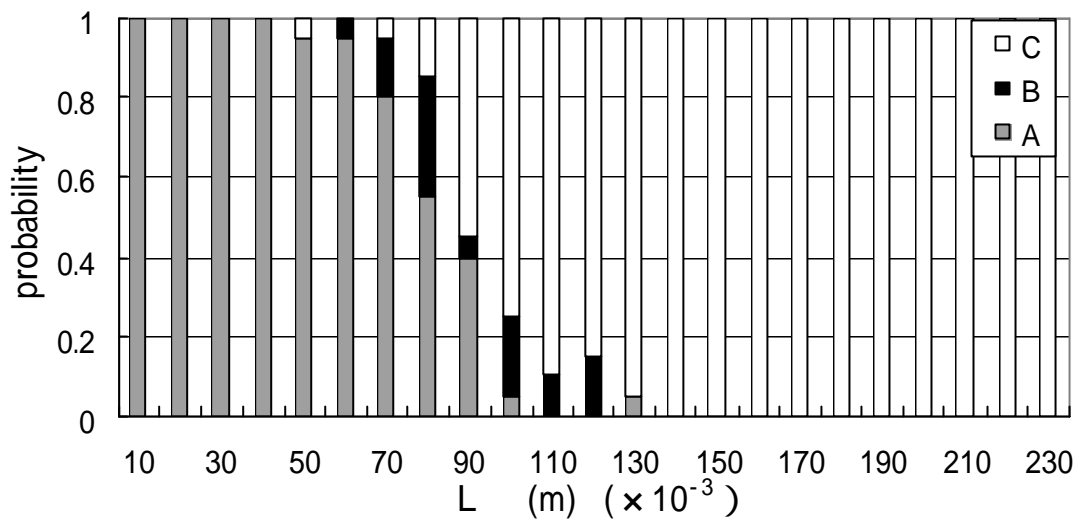


図 6 - 7 A、B、Cの確率 (傾斜角 5 °)

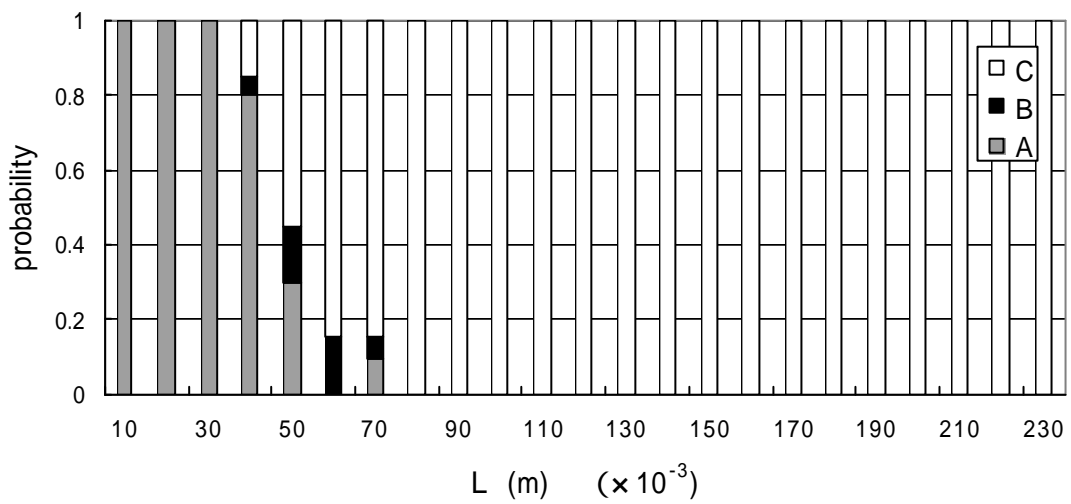


図 6 - 8 A、B、Cの確率 (傾斜角 10 °)

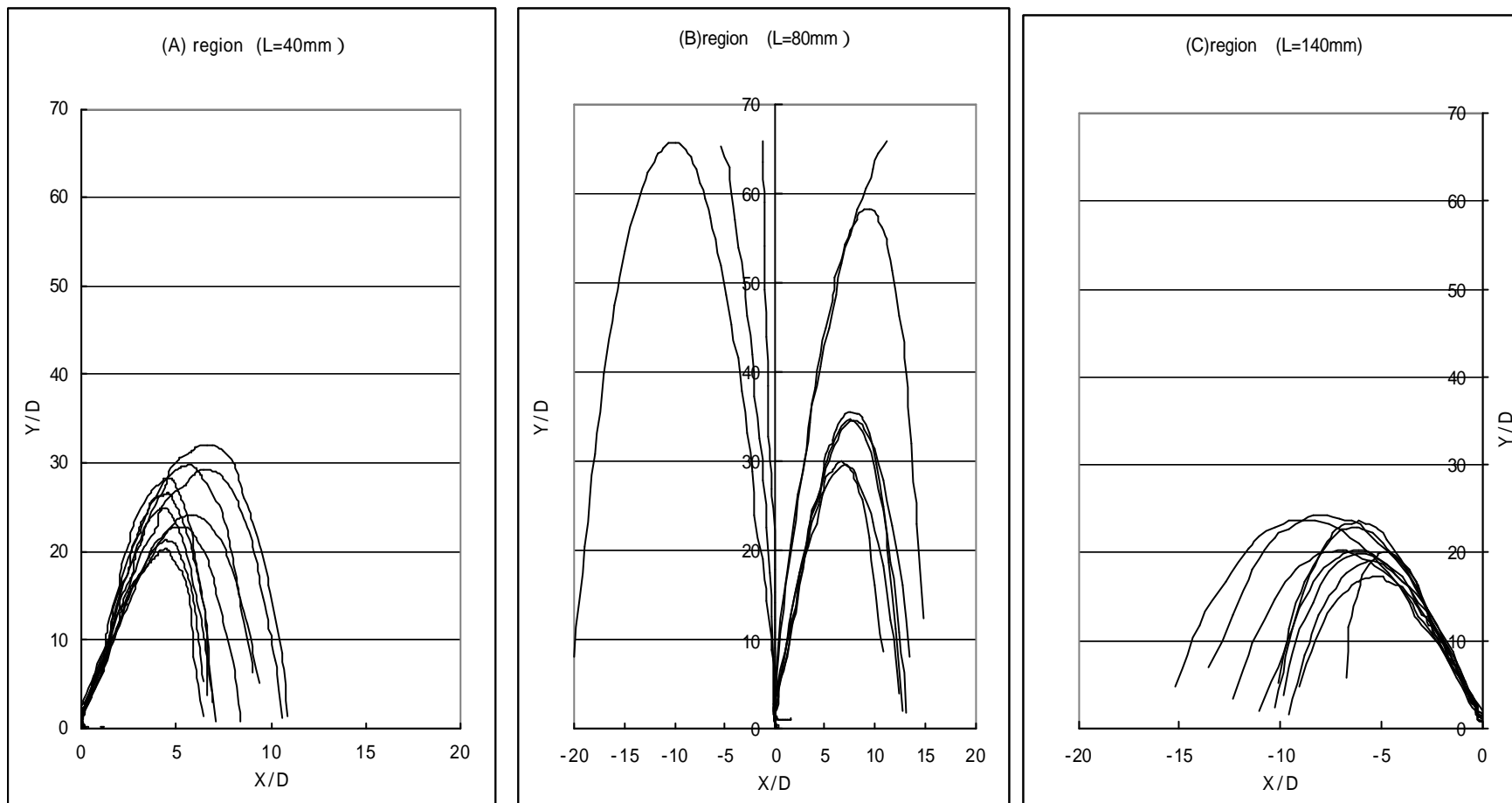


図 6 - 9 L=40,80,140mmから転がした粒体の軌跡

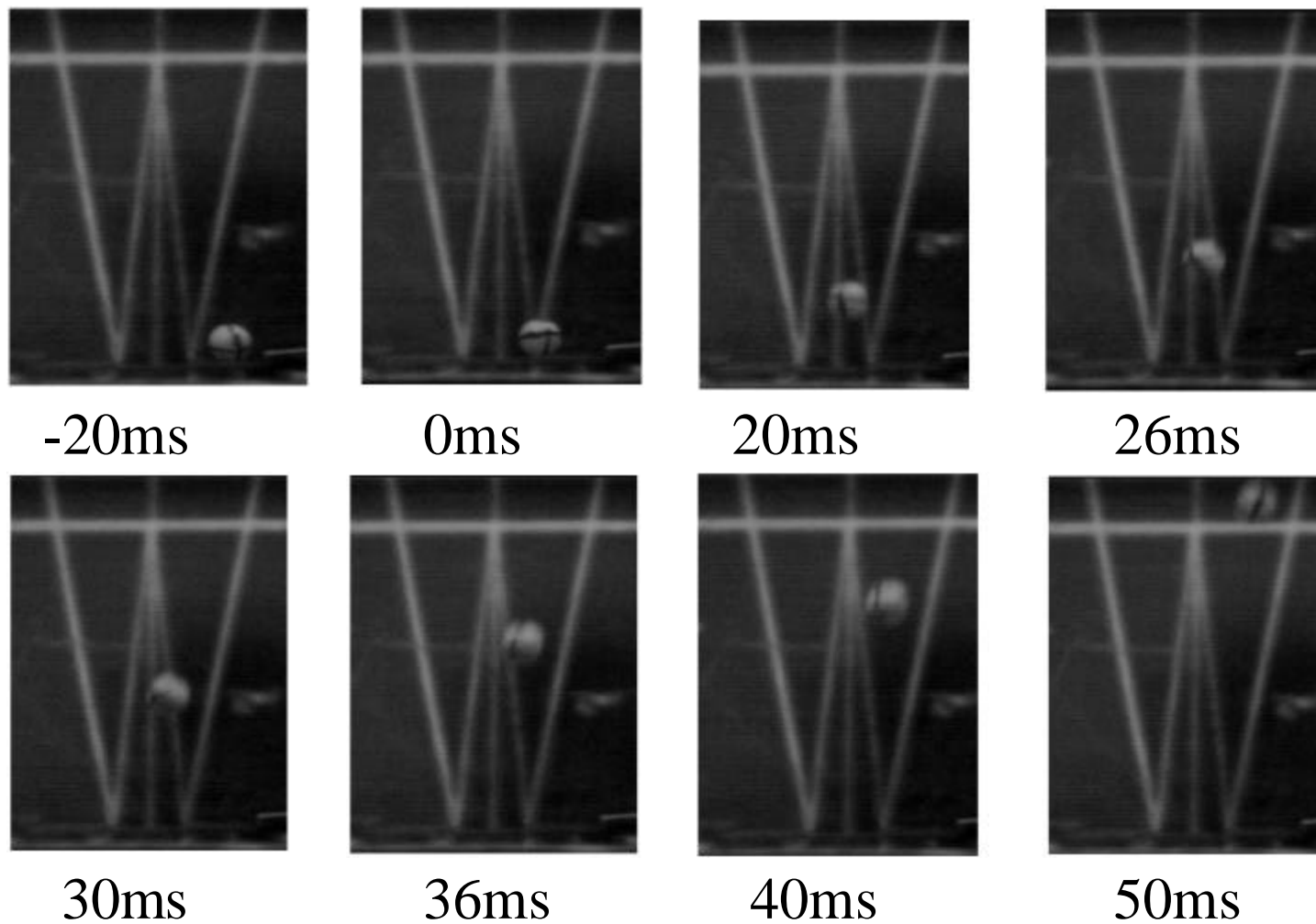


図 6 - 1 0  粒体のコア内での挙動 (A領域)  
( $L=0.04\text{m}$ )

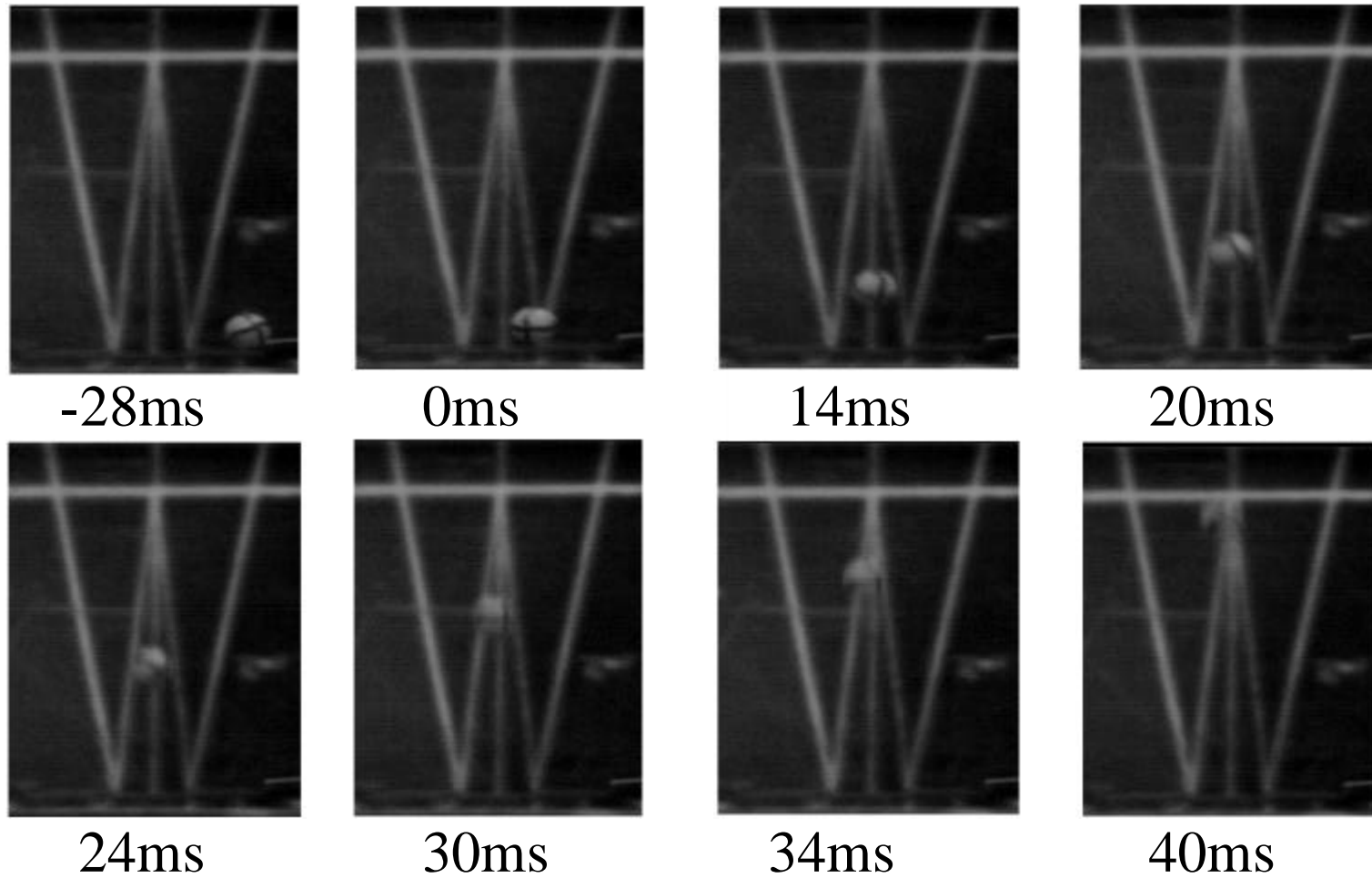
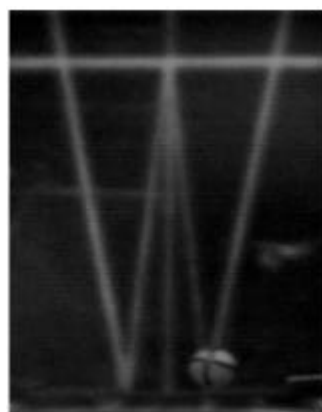


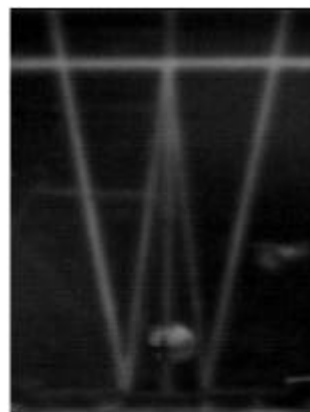
図6 - 1 1  粒体のコア内での挙動 (B領域)  
( $L=0.08\text{m}$ )



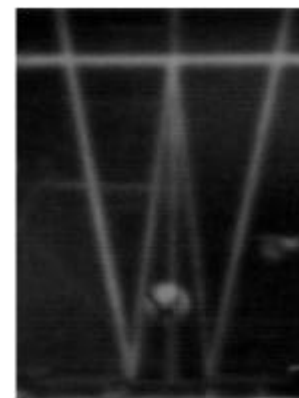
-10ms



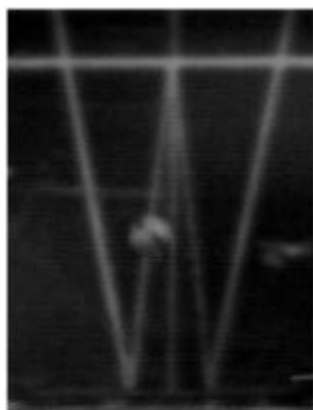
0ms



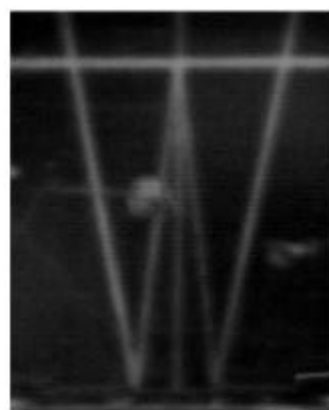
14ms



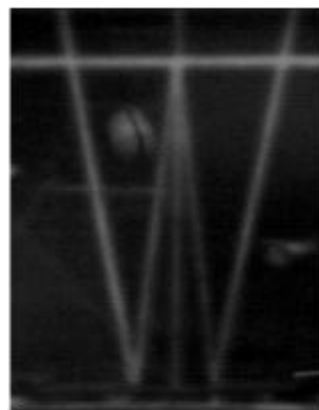
20ms



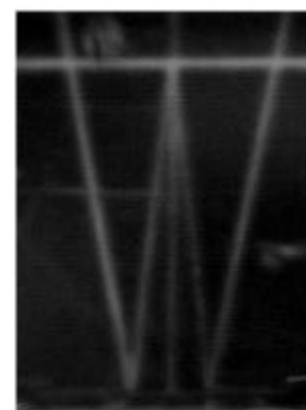
30ms



34ms



40ms



48ms

図 6 - 1 2 粒体のコア内での挙動 (C領域)  
( $L=0.14\text{m}$ )

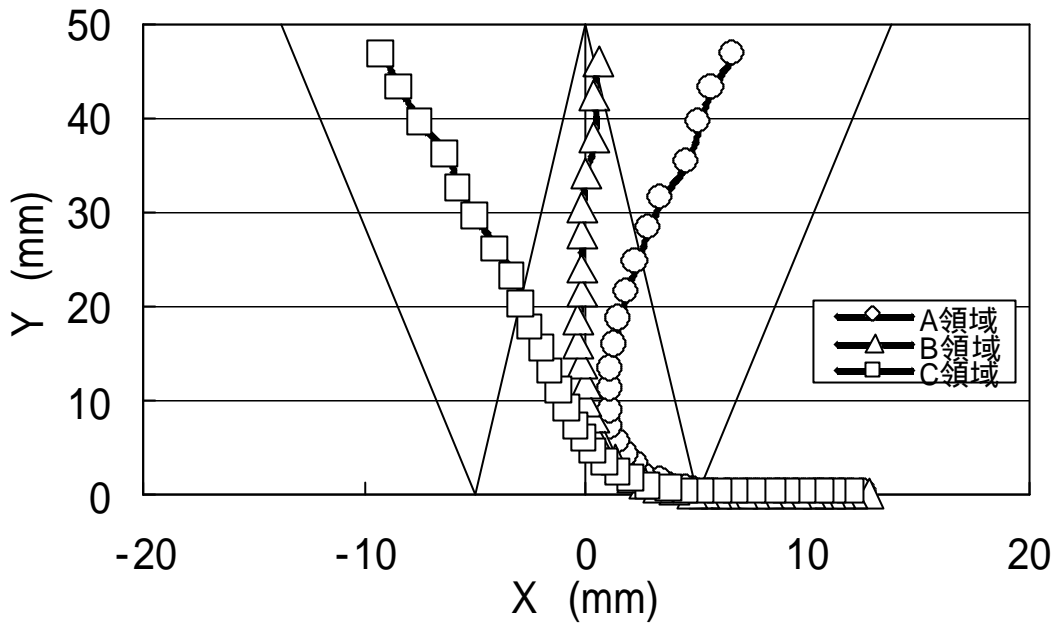


図 1 3 ポテンシャル領域内の軌跡

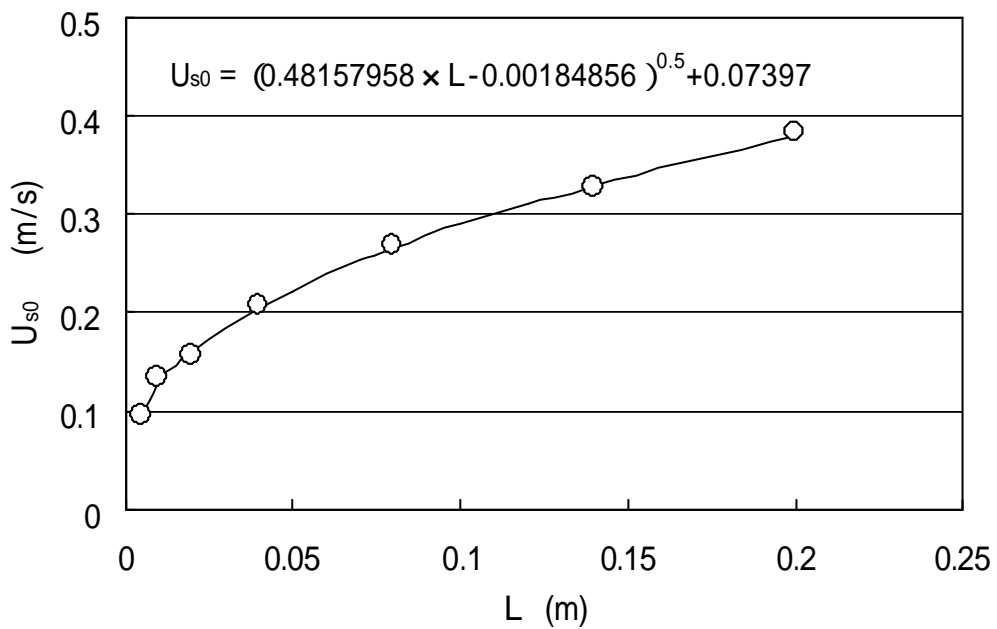


図 6 - 1 4 傾斜面上の転がり位置と突入速度の関係

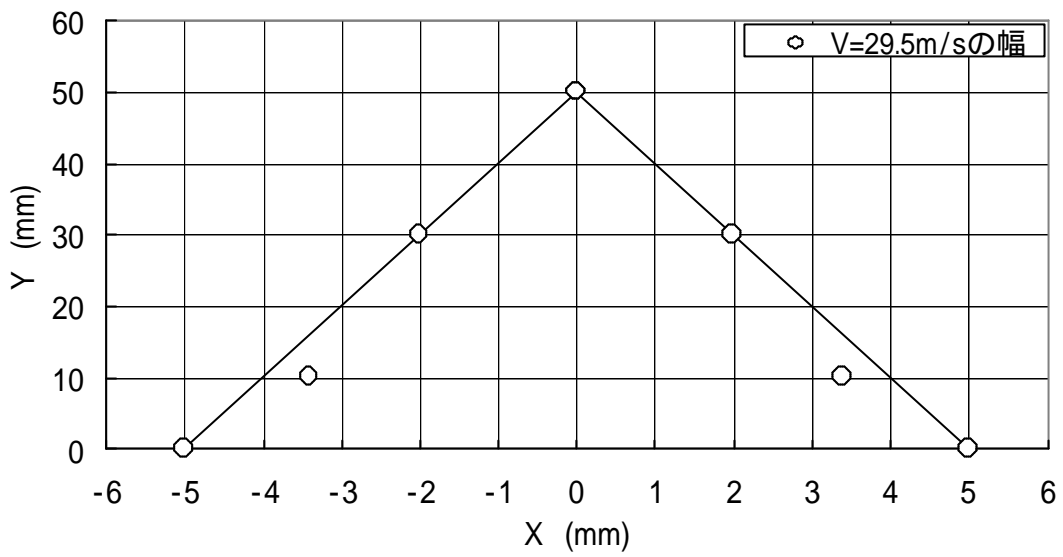


図 6 - 1 5 ポテンシャルコア形状

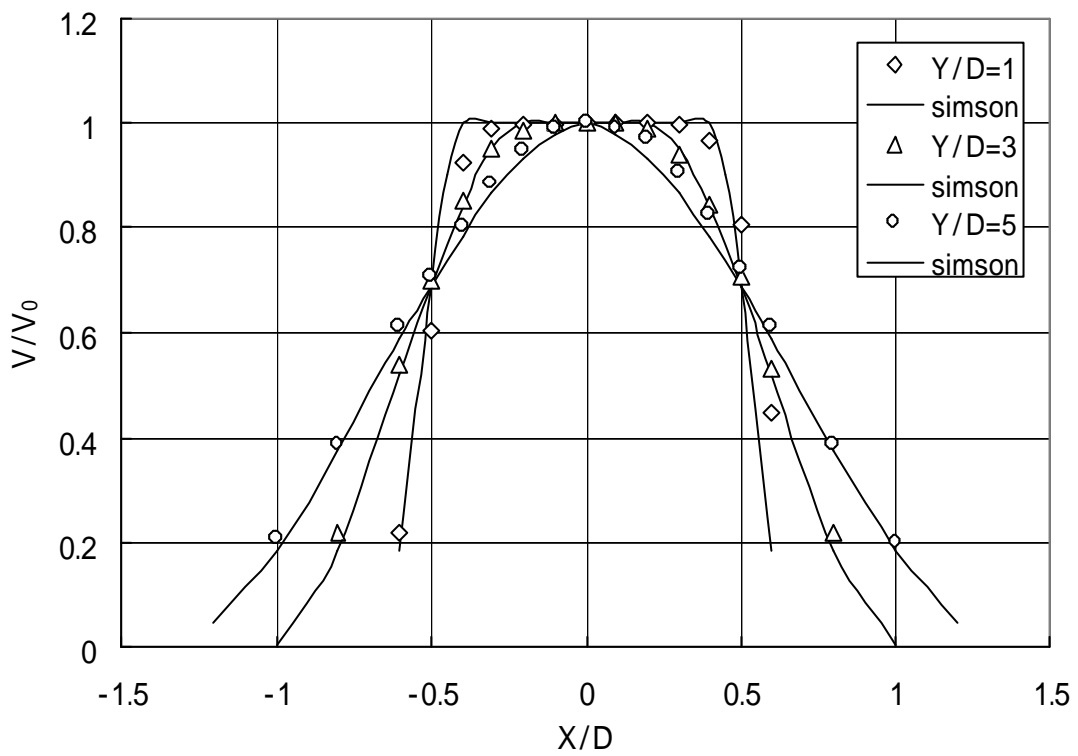


図 6 - 1 6 ポテンシャルコア周辺の風速分布



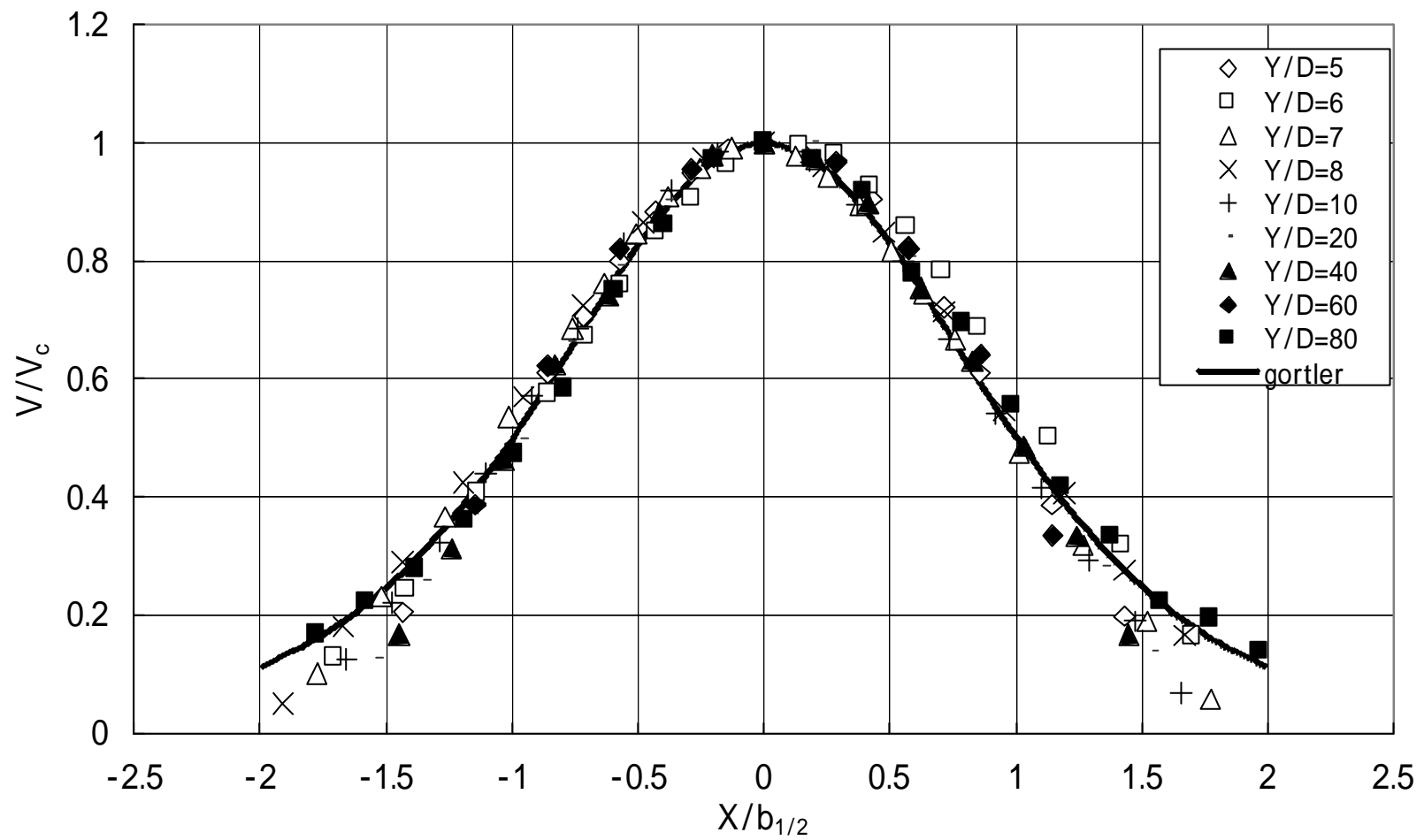


図 6 - 1 7 拡散領域における風速分布 ( $V_0=30\text{m/s}$ )

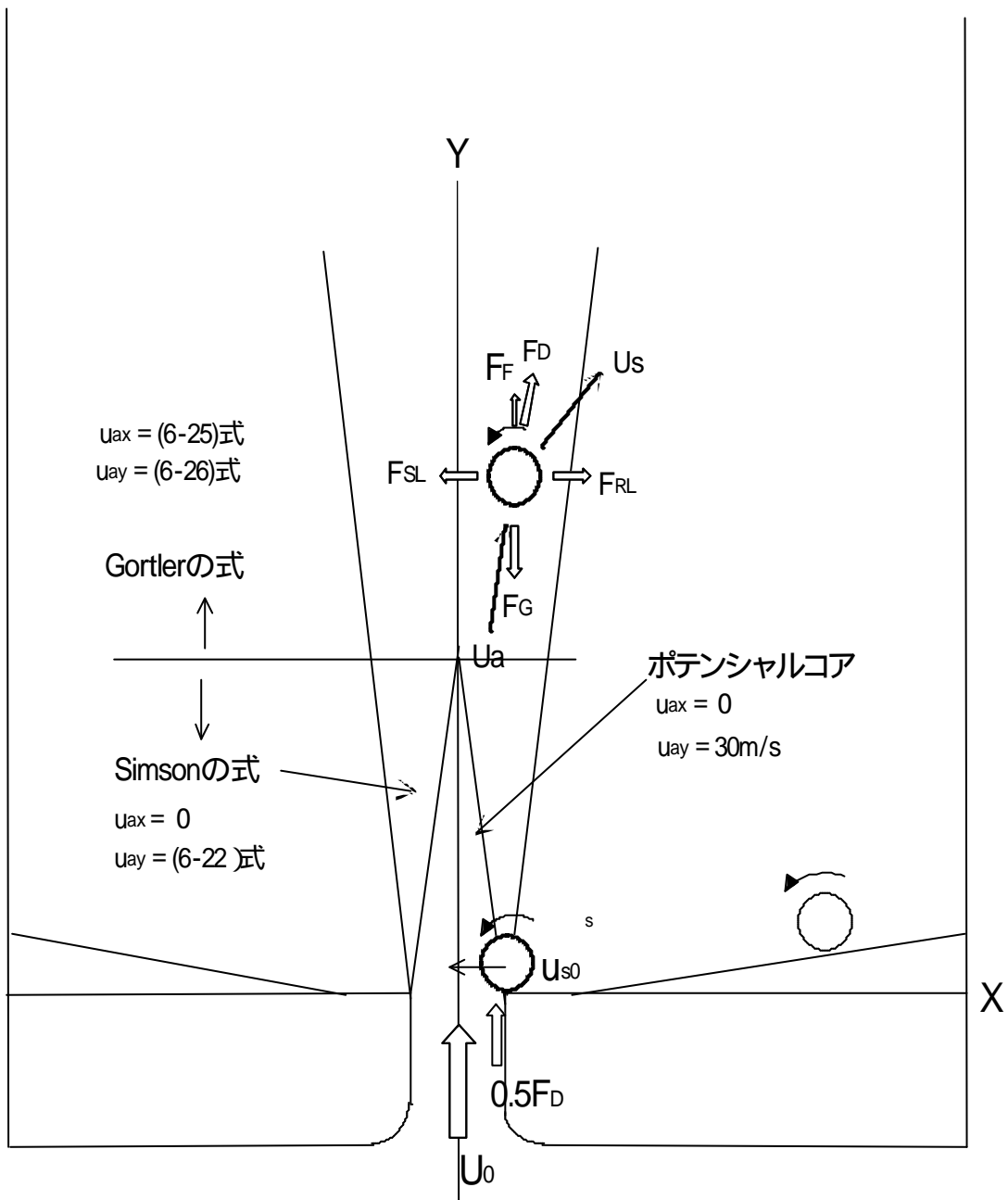


図 6 - 1 8 粒体に働く力と風速分布の近似式適用範囲

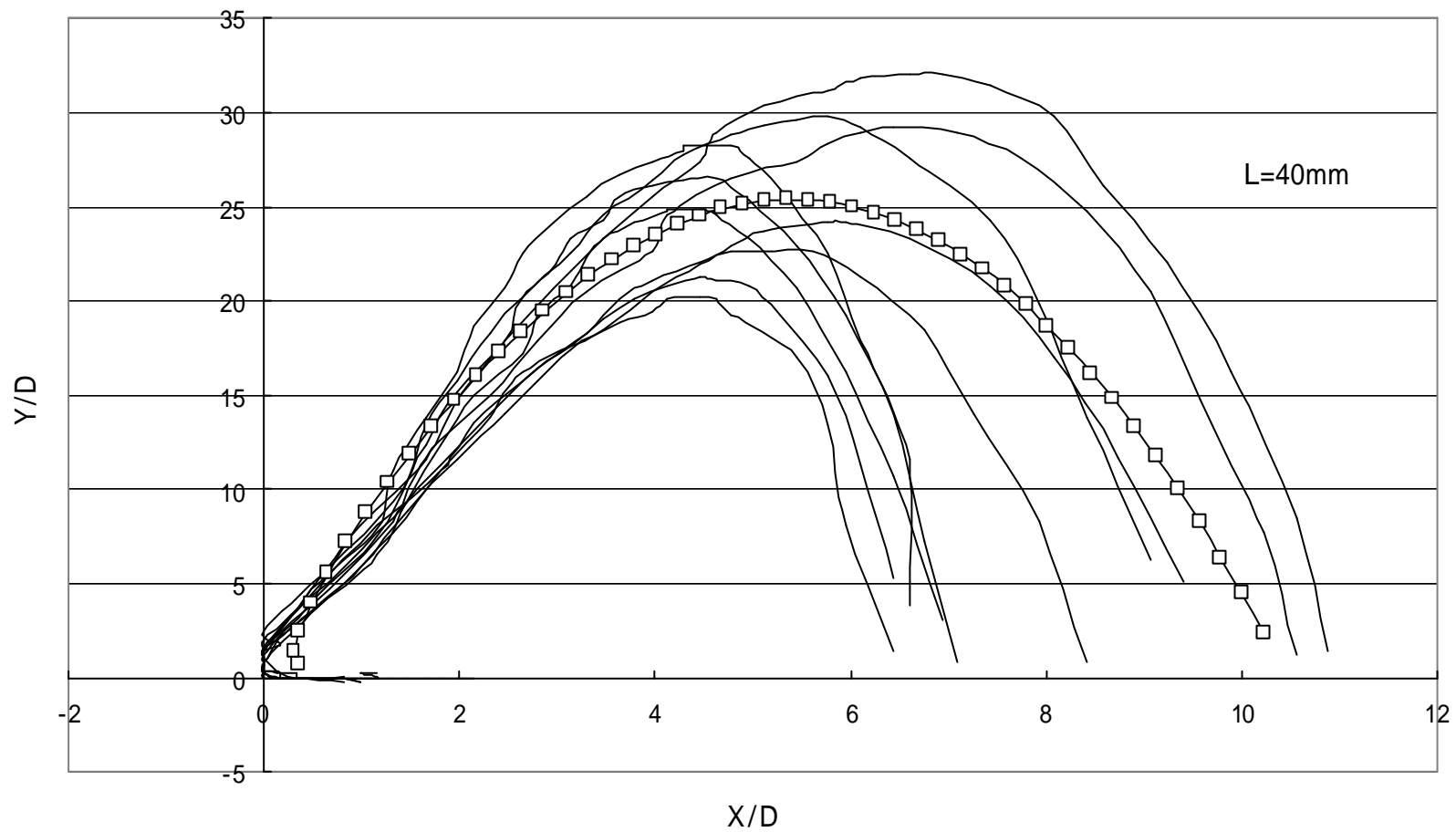


図 6 - 1 9 L=40mm の位置から転がした軌跡の数値計算結果 (A領域)

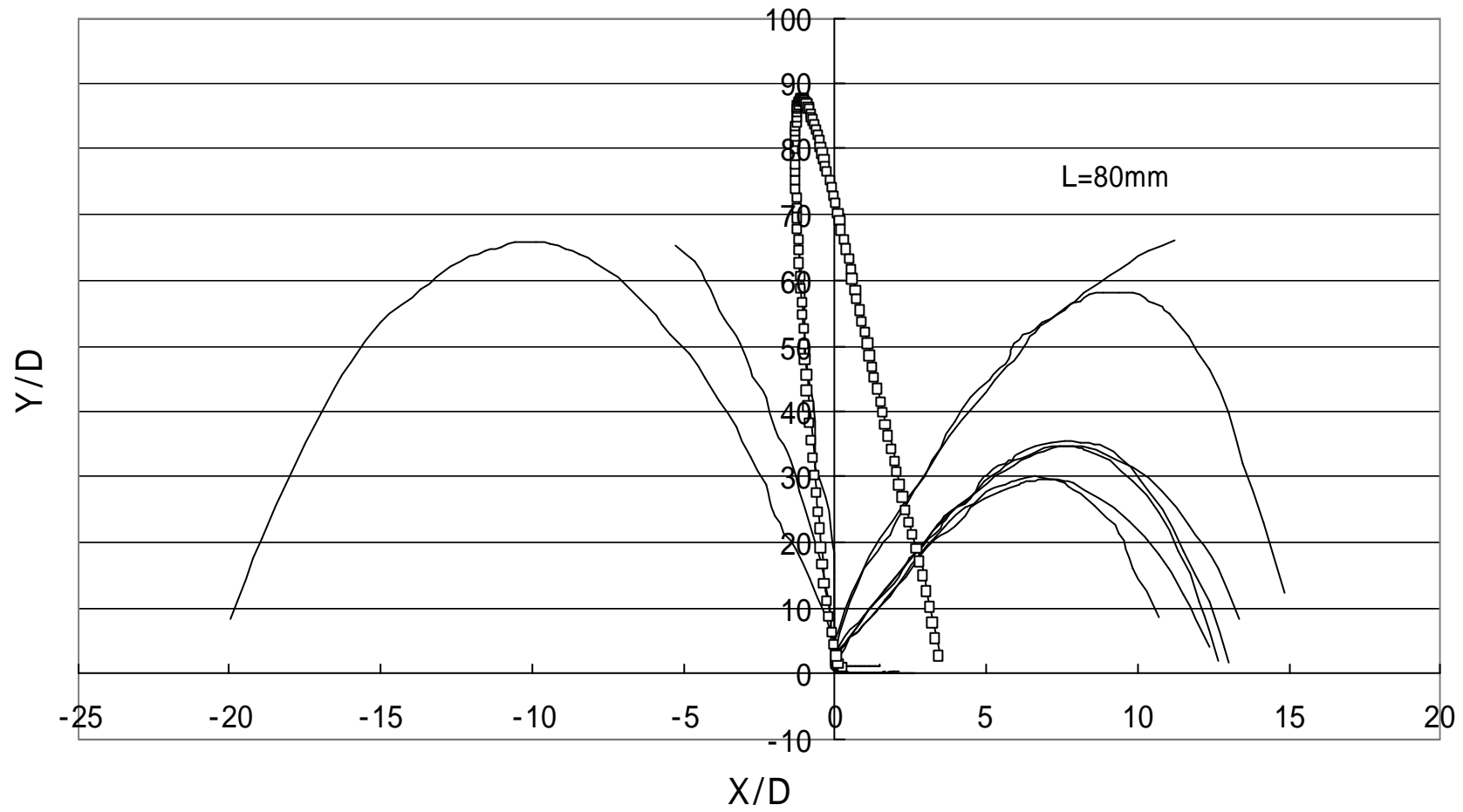


図 6 - 2 0 L=80mm の位置から転がした時の軌跡の数値計算結果 (B領域)

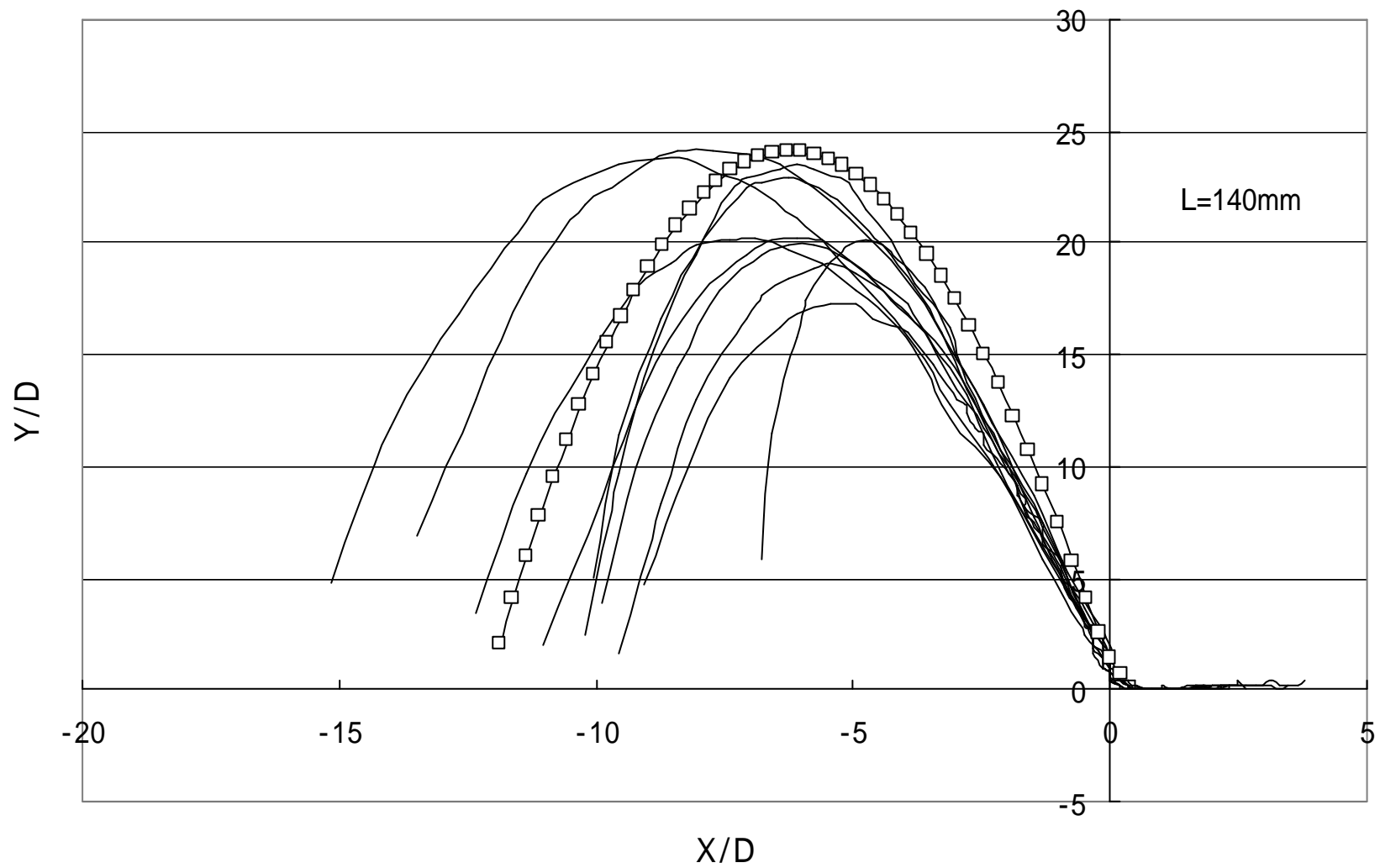


図 6 - 2 1 L=140mm の位置から転がした時の数値計算結果 (C領域)

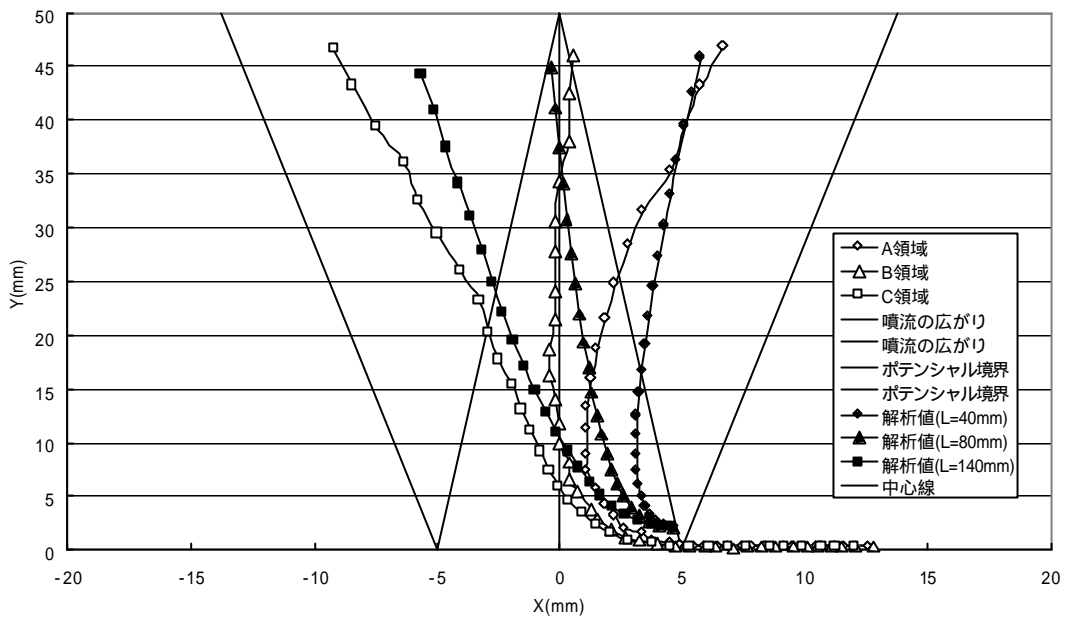


図 6 - 2 2 ポテンシャル領域内の数値計算と実験値の比較

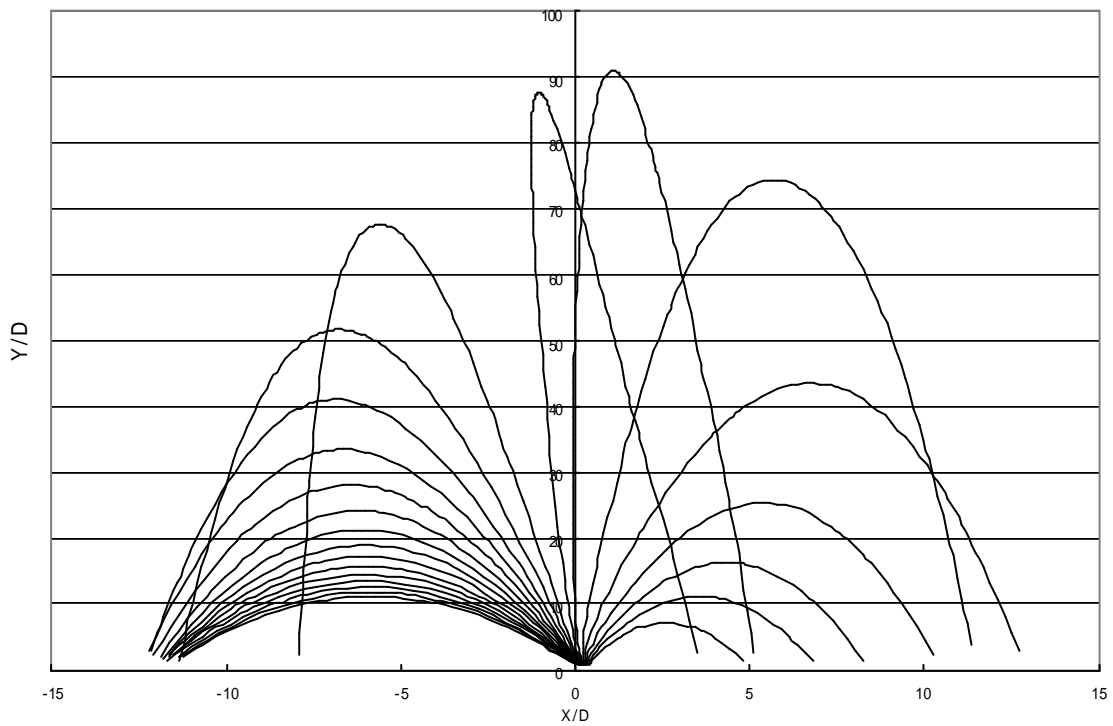


図 6 - 2 3 傾斜面全体から転がした時の計算による軌跡

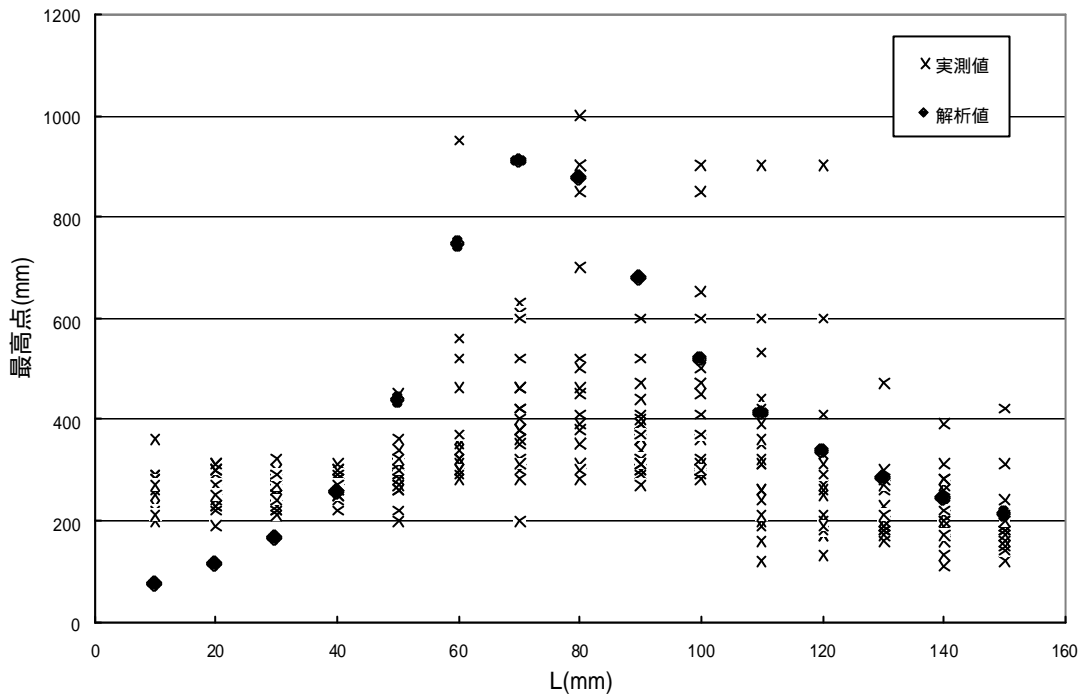


図6 - 2 4 吹き上がり高さの実験値と計算値の比較

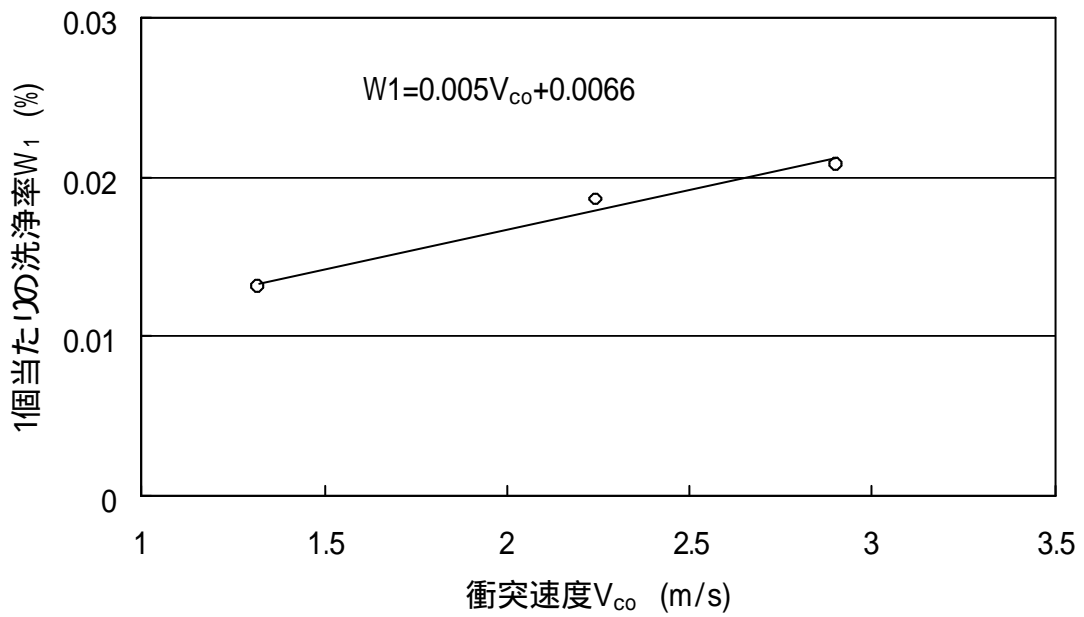


図6 - 2 5 洗浄率に及ぼす衝突速度の影響

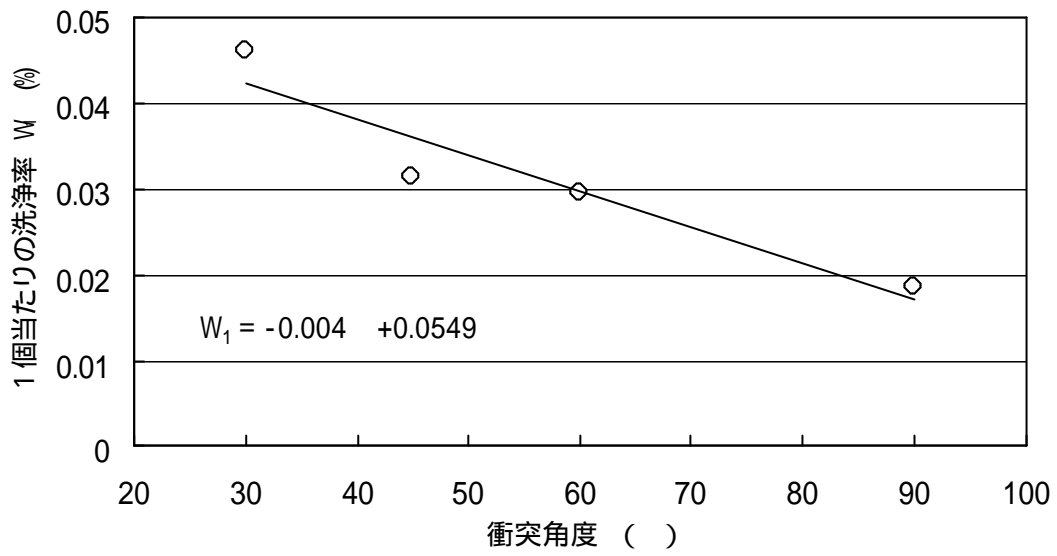


図 6 - 2 6 洗浄率に及ぼす衝突角度の影響

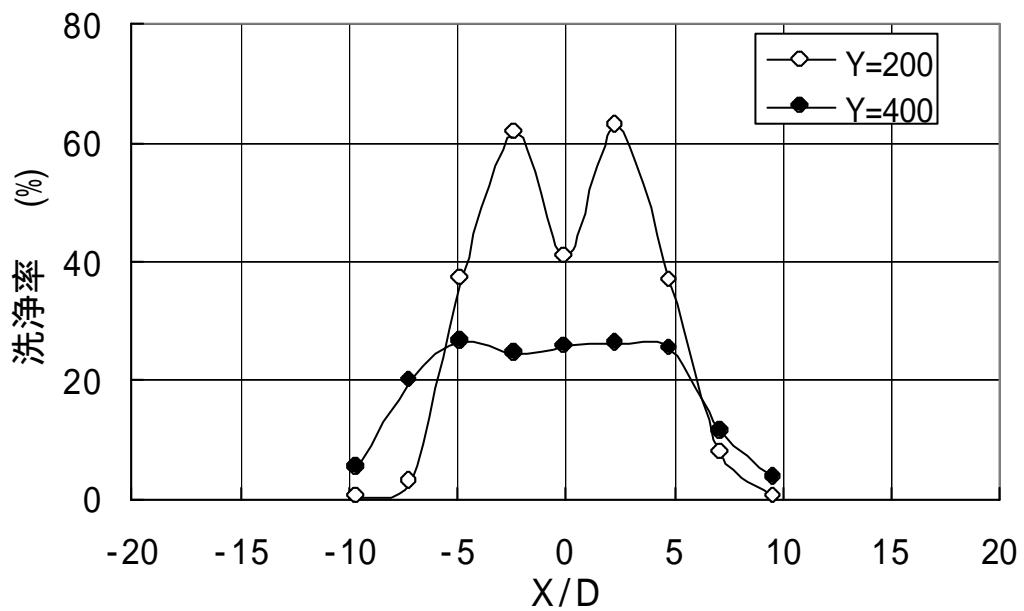


図 6 - 2 7 垂直な噴流による 5 分間の洗浄結果



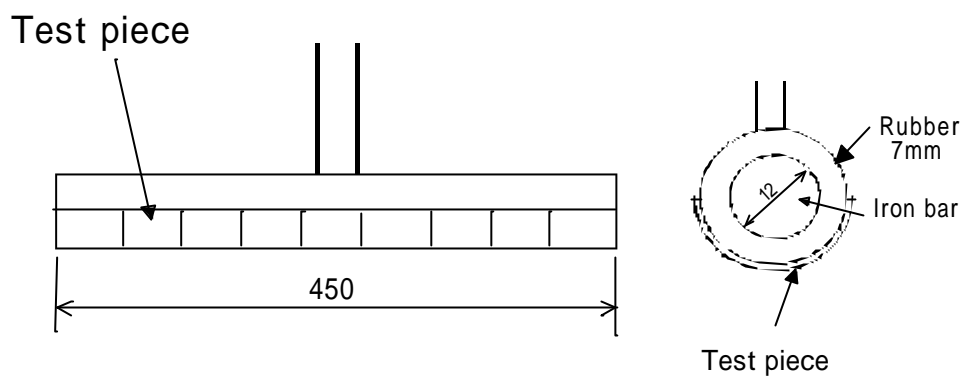


図 6 - 2 8 洗浄用治具及び実験の様子

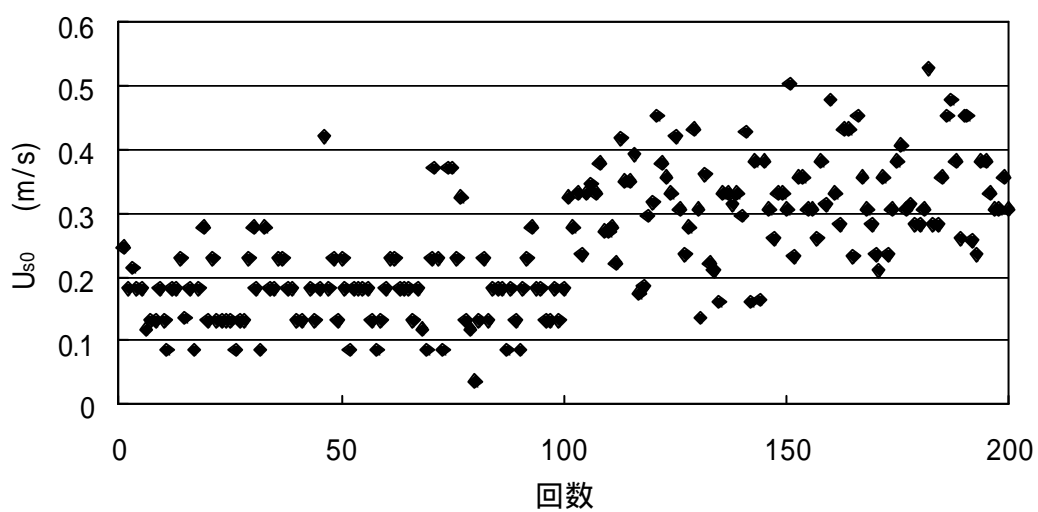


図 6 - 2 9 ノズルへの突入速度の測定結果

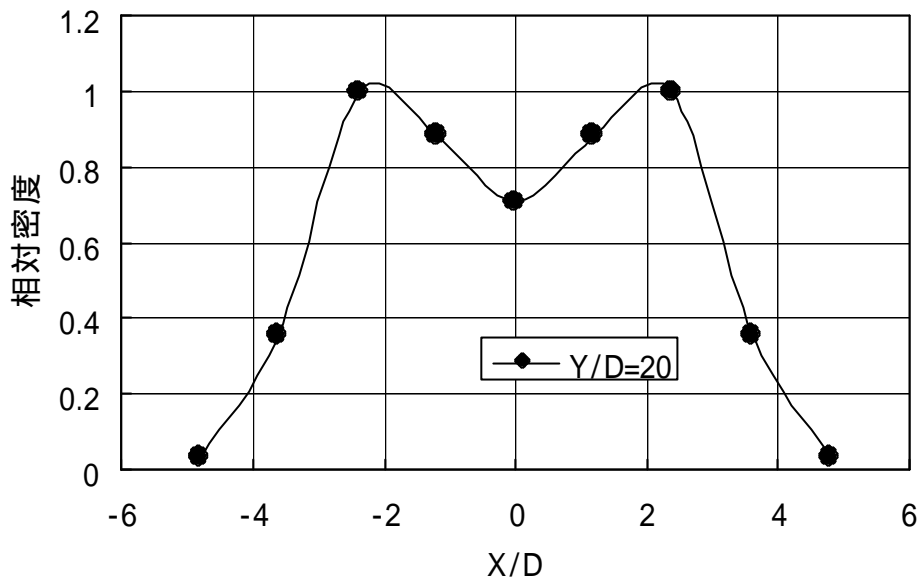


図6 - 30 計算から求めた相対密度分布

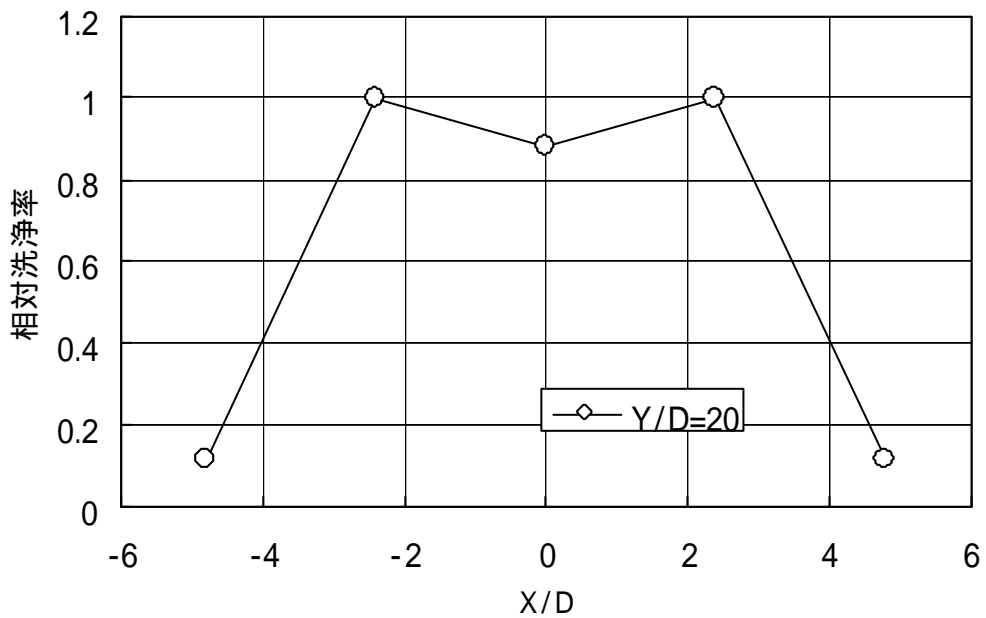


図6 - 31 計算から求めた洗浄率の分布

## 第7章 粒体噴流化式人体洗浄装置における均一洗浄

### 7.1 緒言

人体の自動洗浄装置における重要な課題の一つとして、均一洗浄が上げられる。これまでの研究から、粒体噴流化式洗浄方法では、噴流中の粒体密度と洗浄率に相関があり、粒体が多くあたる場所程、洗浄率が高くなる。そのため、均一な洗浄を行うには噴流中における粒体の密度を一定にする事が最も重要となる。しかし、これまで用いてきた二次元の垂直な噴流では噴流中の粒体の密度に差が生じて、均一な洗浄が行えない。本研究では、例えば粒体の分布が不均一な噴流であっても、広範囲に均一な洗浄が期待できる二次元噴流の揺動化方法についてシミュレーションと実験によって調べた。

噴流を揺動させる方法には、ノズル自体を揺動させる方法が考えられるが、ノズルの駆動装置の設置等によるコスト高や、ノズル回りの機密性の確保など新たな対応が必要となる。そのため、大幅な改造やコスト高にならない方法として、二次元噴流（主噴流）の左右に制御用ノズルを設置して、送風機から分岐させた空気を制御用ノズルから交互に流して主噴流の揺動を行う事とした<sup>(1,2)</sup>。さらに、揺動噴流による洗浄実験を行いその効果を調べた。

### 7.2 実験方法

図7-1に主噴流の揺動化のための実験装置の概略を示す。主噴流用としてのル-ツブローア（静圧34.3KPa、1750RPM）の他に、制御噴流用に静圧3.92KPa、流量1.1m<sup>3</sup>/minのリングブローアを用いてフローセル流量計を通した後、切り換え弁によって二次元ノズルの左右に配置した制御用ノズルから噴出させた。

制御ノズルの配置の状態を図7-2に示す。制御用ノズルは10.9mmの角パイプで製作し、制御噴流の噴出方向が主噴流に対して垂直（X軸方向）及び平行（Y軸方向）になるノズルを用いた。これを、X軸方向の壁面に穴を開けて両側から挿入して斜面上に固定した。ノズルはX軸方向を可動とした。二次元ノズルに向かって5°の傾斜板を設けた実験模型に粒体（直径6mmのポリスチレン球）を1000個投入し、主噴流のノズル出口風速を30m/s（レイノルズ数19400）一定とした。この時の粒体の質量流量比は1.34であった。二次元ノズルの周囲4面は長さ1000mmのアクリル板で囲み壁面として、上部開放部は10メッシュの金網で覆い、粒体の周囲への飛散を防止した。

風速分布は長さ150mm、先端部直径1mm、内径0.5mmの総圧管を用いて、ノズルから高さ600mmまでの噴流の断面方向を測定した。圧力計はマノスタゲ-ジを用いた。

主噴流の揺動シミュレーションは流体解析ソフト（ソフトウェアクレイドル社製STREAM）を用いて、主噴流が壁面噴流になっている状態から制御噴流を流す方法で行い、その非定常解析の結果から、制御可能な最高振動数を把握した。

揺動噴流による洗浄の均一化および洗浄範囲を調べるために、主噴流がコアンダ効果で壁面噴流になった状態で洗浄率の分布を測定した。次に揺動噴流での洗浄率の分布と比較した。

## 7.3 実験結果

### 7.3.1 壁面噴流の風速分布と粒体の分布

浴槽に見立てた、実験模型のノズルの周囲を壁面で囲むと、二次元ノズルからの噴流はコアングダ効果によって左右どちらか一方の壁面に向かって湾曲して壁面噴流となる<sup>(3)</sup>。壁面噴流になった状態に、粒体1000個投入した時(質量流量比1.34)の風速分布を図7-3に示す。縦軸はノズルからの高さ $Y/D$ で、横軸は $X/D$ で表した。また、壁面噴流の状態を図7-4に示す。各断面での速度の最大値を示す位置を結ぶ線を噴流主軸と見なすと、噴流はノズル出口直後から湾曲し始めて、 $Y/D=40$ において速度の最大値を示す位置が不明確になっている事から、この高さで壁面に衝突しているものと思われる。それより下流では壁面付着噴流となって安定している。

次に洗浄効果に影響を及ぼす、噴流中の粒体の分布状態を調べた。分布測定は定格容量9.8Nの直径12mmの小型ロードセルに、直径12mm、厚さ3mmの鉄製のあて板を接着してから、12mmの丸棒の端面に固定してX軸方向に12mmピッチで測定した。トリガー0.459N、サンプリングタイム200 $\mu$ sとして6.553秒間の衝突回数から、ロードセルの面積と測定時間で割ったものを単位時間当たりの密度 $N$ とした。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 $Y/D=20$ 及び $Y/D=40$ 断面での実験結果を図7-5に示す。

$Y/D=20$ 、40共に偏向方向(X軸の+方向)に密度のピ-クがある。特に、 $Y/D=20$ では、偏向方向 $X/D=3.6$ で密度 $N$ の大きなピ-クが、噴流中心では密度 $N$ は小さく、Xのマイナス側 $X/D=-1.2 \sim -2.4$ で小さなピ-クを持つ分布となっている。 $Y/D=40$ 断面では、 $X/D$ の正方向に徐々に密度 $N$ は高くなり、 $X/D=12$ 付近で最大となる。 $Y/D=40$ では $Y/D=20$ 断面より粒体の存在する範囲は広いが、密度は低い。これらより、粒体の分布は噴流の湾曲に大きく影響を受けていることが分かる。

### 7.3.2 噴流制御のシミュレ-ション解析

壁面噴流となった二次元噴流を揺動させる方法としては、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<sup>(3)</sup>、制御噴流を直接主噴流に衝突させる方法<sup>(4)</sup>などがある。

そこで、制御可能と思われる制御噴流を直接主噴流に衝突させる方法について、揺動に掛かる時間、及び必要な制御噴流流量を把握するために、流体解析ソフトによるシミュレ-ション解析を行った。解析条件を表7-1に示す。制御用ノズルの位置は $X/D=\pm 12.5$ の位置、制御流量は実験で用いた制御用送風機で得られる最大流量0.0056 $m^3/s$ (ノズル出口風速47.1 $m/s$ )を与えて、三次元の非定常解析で行った。

噴流の様子をわかりやすく表示するために、主噴流を流して、壁面噴流になり安定した4秒後に制御噴流を流した。制御噴流を流してから約1秒間における、Z軸の正方向からX-Y平面上の速度ベクトル分布を表せば、図7-6に示すとおりである。

主噴流は制御噴流を流すと同時に揺動し始め、約0.4秒で主噴流の一部が反対壁面に到達する。そして約1秒後に噴流全体が反対壁面に到達する事から、制御噴流を壁面噴流に衝突させる方法で壁面噴流は揺動可能である事が分かる。しかし、この方法では、制御噴流が浴槽内部の粒体を加速する事になり、加速された粒体は突入速度が大きくなって主噴流を通過して吹き上がらない。また、制御噴流が主噴流に衝突する場所では主噴流の速度

分布は大きく乱れ、粒体の密度への影響は避けられない事から、本方式の制御方法は最善とは言えない。

環状噴流ではノズルから出たリング状噴流は下流になるにつれて徐々に引き合っ一つの噴流になる<sup>(5, 6)</sup>。また、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性質を持っている<sup>(7)</sup>。この事から、主噴流が付着している壁面の反対側壁面のノズルから、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制御方法が考えられる。この方法では制御噴流が主噴流に直接当たらないので、粒体の分布への影響はほとんどないものと考えられる。

そこで、この制御方法で主噴流を揺動させる事の可能性を調べるために、表7 - 1と同じ解析条件でシミュレーション解析を行った。制御ノズルの位置は $X/D=12.5$ とした。制御噴流を流してから約1秒間における、Z軸の正方向から見たX-Y平面上の速度ベクトル分布と、圧力分布を図7 - 7に示す。制御噴流を流すまでの4秒間で、主噴流は徐々に湾曲して右側( $X=250\text{mm}$ )の壁面、 $Y/D=35$ 付近で付着して壁面噴流となる。これは図7 - 3に示した粒子が混入した状態での風速分布から判断される付着高さ $Y/D=40$ と比較的良好に合う。湾曲した内側では噴流が渦を巻いている様子が分かる。その部分の圧力は周囲より低く、それが壁面噴流を安定させている。そして、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直後から制御噴流によって引き寄せられ、0.08秒後には主噴流と制御噴流が互いに引き合い、 $Y/D=30$ 付近で衝突している様子が分かる。しかし、その衝突は図7 - 6に示した制御噴流を主噴流に直接衝突させる揺動方法と比べて、主噴流の乱れはほとんど見られない。そして主噴流はさらに傾き、最初に付着していた壁面とは反対側壁面に偏向していく。衝突と同時に制御噴流も主噴流と合流し、壁面に付着する。そして0.90秒後には、主噴流は4秒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

表7 - 1 数値解析条件

k - 乱流モデルによる非定常解析
解析ソフト：STREAM
メッシュ数：490000
空気温度：20
時間間隔：1/1000秒
解析時間：10秒
0～4秒：主噴流のみ
4～10秒：主噴流 + 制御噴流
主噴流流量：0.042 $\text{m}^3/\text{s}$
制御噴流流量：0.0056 $\text{m}^3/\text{s}$
制御ノズルの位置： $x=125\text{mm}$
解析領域：500 $\text{mm} \times 1000\text{mm} \times 150\text{mm}$
境界条件：上方開口部は大気圧、自然流出、ノズル部分以外の他の5面は壁面とする。

いる様子が分かる。

この結果から、長さ150mmの二次元ノズルからの主噴流に対して、10.9mm パイプノズルからの噴流で主噴流の揺動が可能であること、また本実験で用いた制御噴流用送風機の容量で十分である事がわかった。さらに、揺動に要する時間は制御噴流を流して約0.9秒である事から、揺動の振動数は最高約0.56Hzであることがわかった。

制御噴流の噴出方向をX軸方向（主噴流に直角方向）とY軸方向とした場合のシミュレーションの結果から、以降の洗浄実験では、粒体への影響が少ないと思われる制御噴流の噴出方向をY軸方向とした。

### 7.3.3 制御噴流の最適化

シミュレーション解析から、主噴流に平行に制御噴流を流す方法により揺動させる事が可能である事がわかった。しかし揺動の原因が平行噴流の相互干渉<sup>(7)</sup>によるものであるとすると、主噴流に対するノズルの位置によって、噴流の制御可能な流量が変わることが考えられる。この事は、送風機の容量にも影響を与えるため、実験模型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実験から求めた。必要制御流量の測定は、主噴流が壁面噴流となった状態で、湾曲した外側の制御ノズルの流量を徐々に増加させて、主噴流が引き寄せられた流量をフロ－セル流量計の目盛りから読みとった。

揺動の判定を容易にするために、粒体を混入させた状態で行った。粒体の質量流量比1.34、主噴流のノズル出口流速28m/sとし、傾斜板下端位置からの距離Lを変化させて、揺動に必要な流量Qを測定した結果を図7-8に示す。制御ノズルを主噴流の二次元ノズルに近づけた場合と壁面に近づけた場合に、揺動させるのに必要な流量Qは多くなり、その中間位置L/D=18.5とL/D=22において最小流量0.0042m<sup>3</sup>/sになった。この結果からシミュレーションで用いた流量よりさらに少ない流量で主噴流を揺動させる事が分かった。またQが最小となる最適な位置(L/D)があり、その位置では主噴流の約1/10の流量で制御可能であることが分かった。

### 7.3.4 洗浄結果

主噴流を揺動させた場合の洗浄効果を、壁面噴流での洗浄と比べて評価した。実験方法は、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%）約0.02gを塗り、バターの厚さを均一にするために50℃で30分間加熱して、24時間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の丸棒に厚さ7mmのゴムを巻いた上に貼り付け、5分間洗浄をした後、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。

壁面噴流での洗浄結果を図7-9に示した。

噴流が壁面に付着したままでの洗浄の場合にはY/D=20、40断面共に、噴流が傾いた方向が良く洗浄されて、広い面積について均一な洗浄を行うことはできない。次に、主噴流を揺動させた場合の結果を示す。噴流の揺動回数はシミュレーション解析の結果から、1往復の時間を5秒として、5分間で60往復させた。その結果を図7-10に示す。

Y/D=20断面では、噴流を揺動させる方が、揺動させない場合と比べて、均一に洗浄でき

る範囲が広がっている。Y/D=40断面においても広い範囲で、20%前後の均一な洗浄率が得られた。この結果、制御噴流用ノズルを浴槽に取り付けて主噴流を揺動させる方が、主噴流ノズル自体を揺動させるより構造が簡単で、さらに必要最低流量は主噴流の流量の10分の1程度でよいため、噴流化式身体洗浄において、均一で広範囲な洗浄を行うための有効な手段であると考えられる。

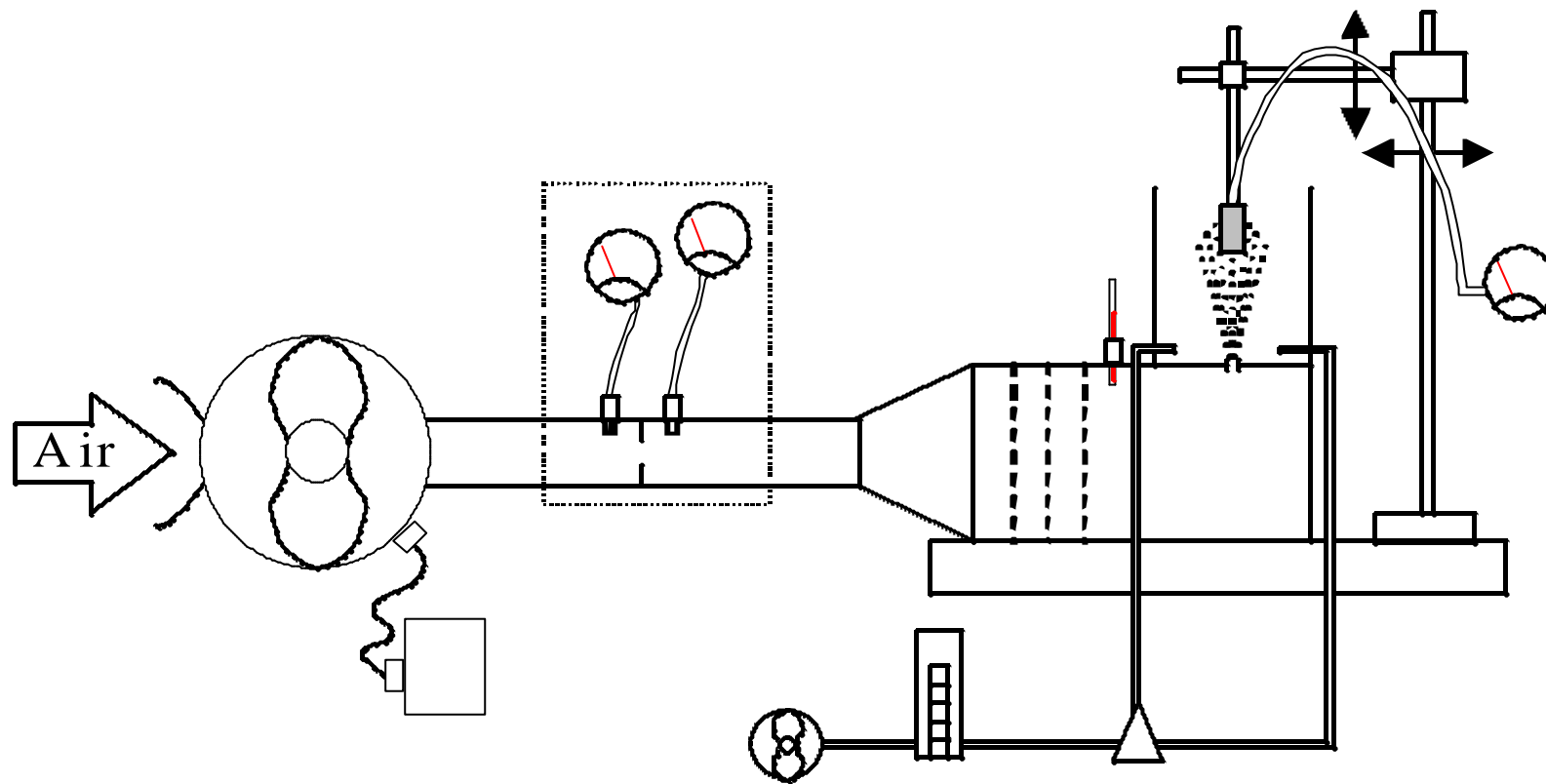
#### 7.4 結言

噴流化式身体洗浄において、壁面噴流の揺動化方法、さらに揺動させた噴流における洗浄効果について調べて、次の結果を得た。

- (1) 壁面噴流の湾曲した内側から制御噴流を壁面噴流に垂直に直接衝突させる方法と、湾曲した外側からY軸方向に制御噴流を流す方法において、両方法共に、壁面噴流の揺動制御が可能であった。
- (2) 制御噴流を壁面噴流に直接衝突させる制御方法は、主噴流の速度分布および粒体の分布に大きな影響がある。
- (3) 制御ノズルの位置には制御可能な必要流量が最小になる位置があり、その位置での流量は主噴流の約1/10であった。
- (4) 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。

#### 参考文献

- (1) 粒体噴流化式身体洗浄装置、特願 2000-2282825号
- (2) 噴流化式洗浄装置、特願 2000-346464号
- (3) 鮎川恭三、社河内敏彦：側壁付着噴流に関する究：日本機械学会論文集、41巻348号(1975)、2391
- (4) 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)
- (5) 赤川浩爾、多賀正夫：環状噴流に関する研究、日本機械学会論文集(第2部)、31巻221号(1965-1)
- (6) 社河内俊彦、加賀智宏：環状噴流の流動特性とその応用、日本機械学会論文集(B編) 63巻614号(1997-10)
- (7) 機械工学便覧：A5流体力学、A5-67



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 7 - 1    噴流揺動化のための実験装置概略図



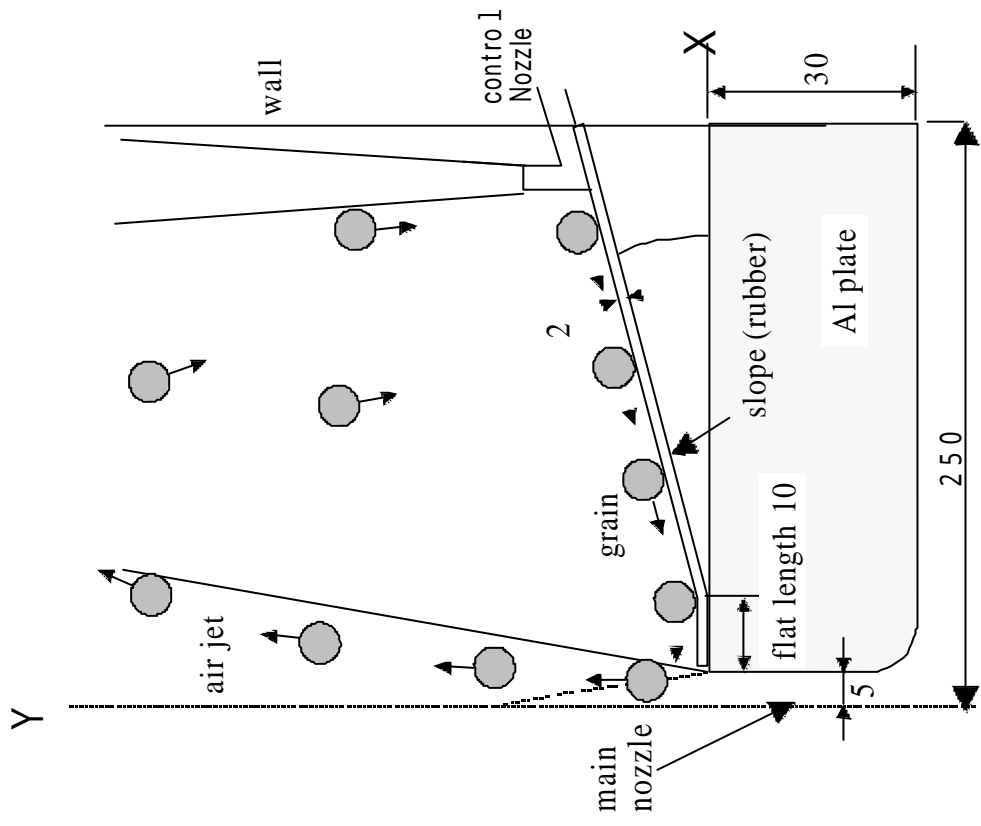


図7-2 制御ノズルの配置方法

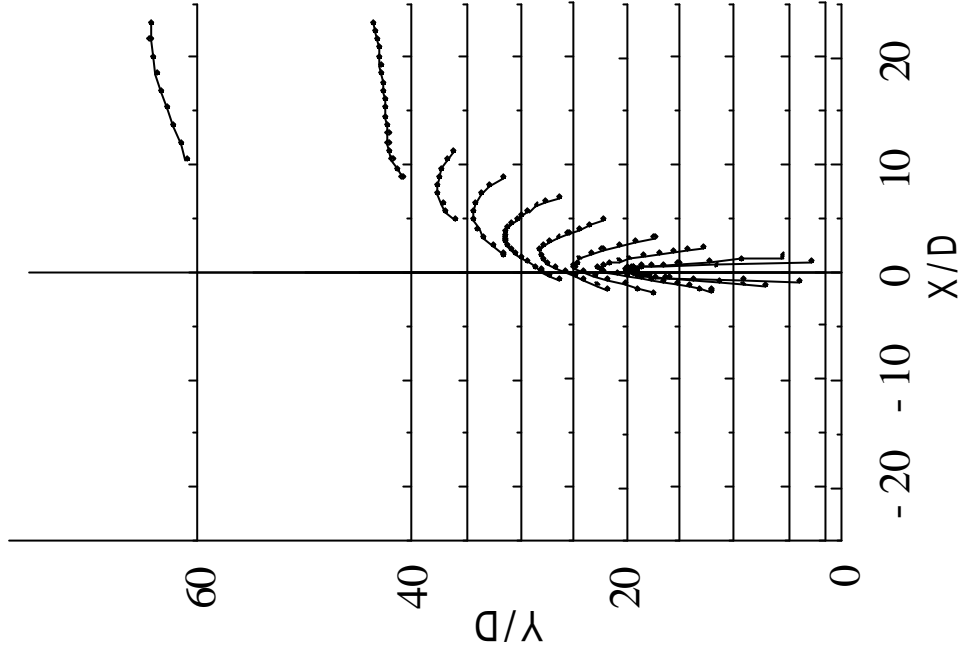


図7-3 壁面噴流の流速分布

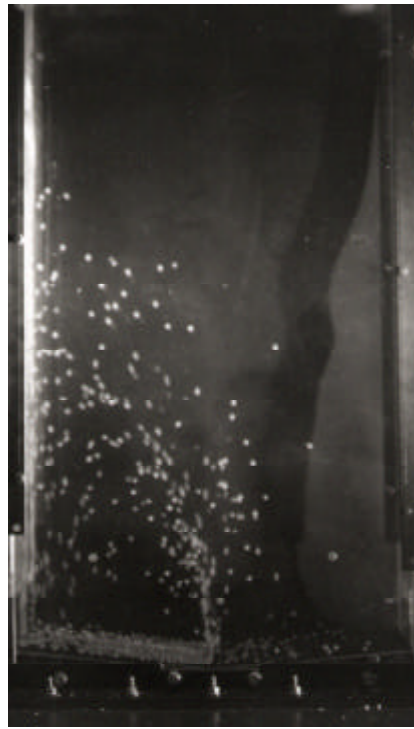


図 7 - 4 壁面噴流の様子

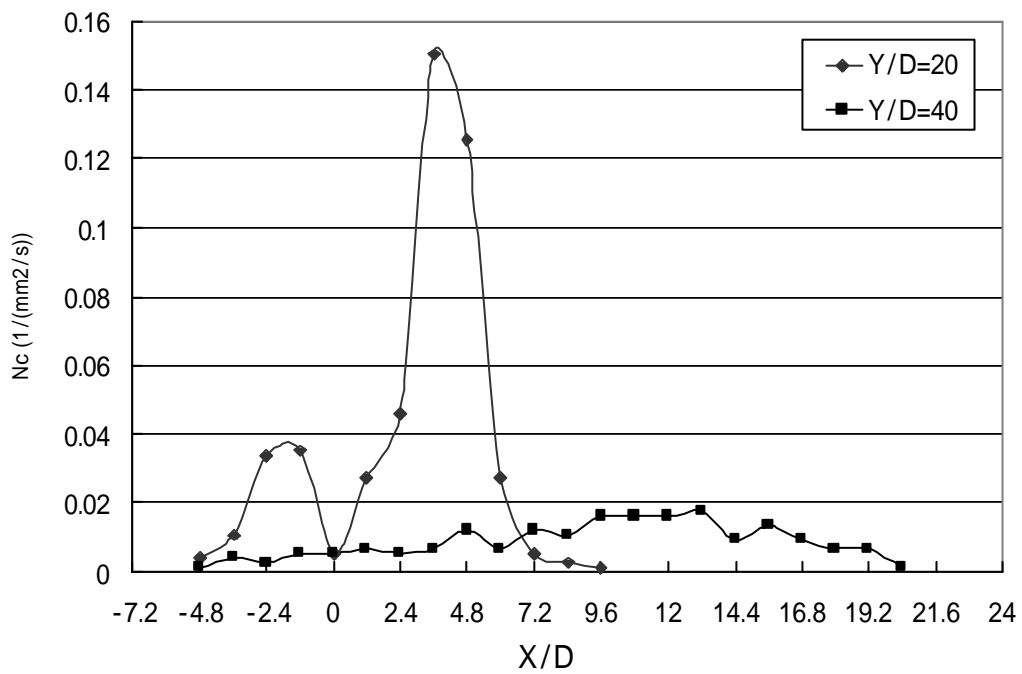


図 7 - 5 壁面噴流中の粒体の分布

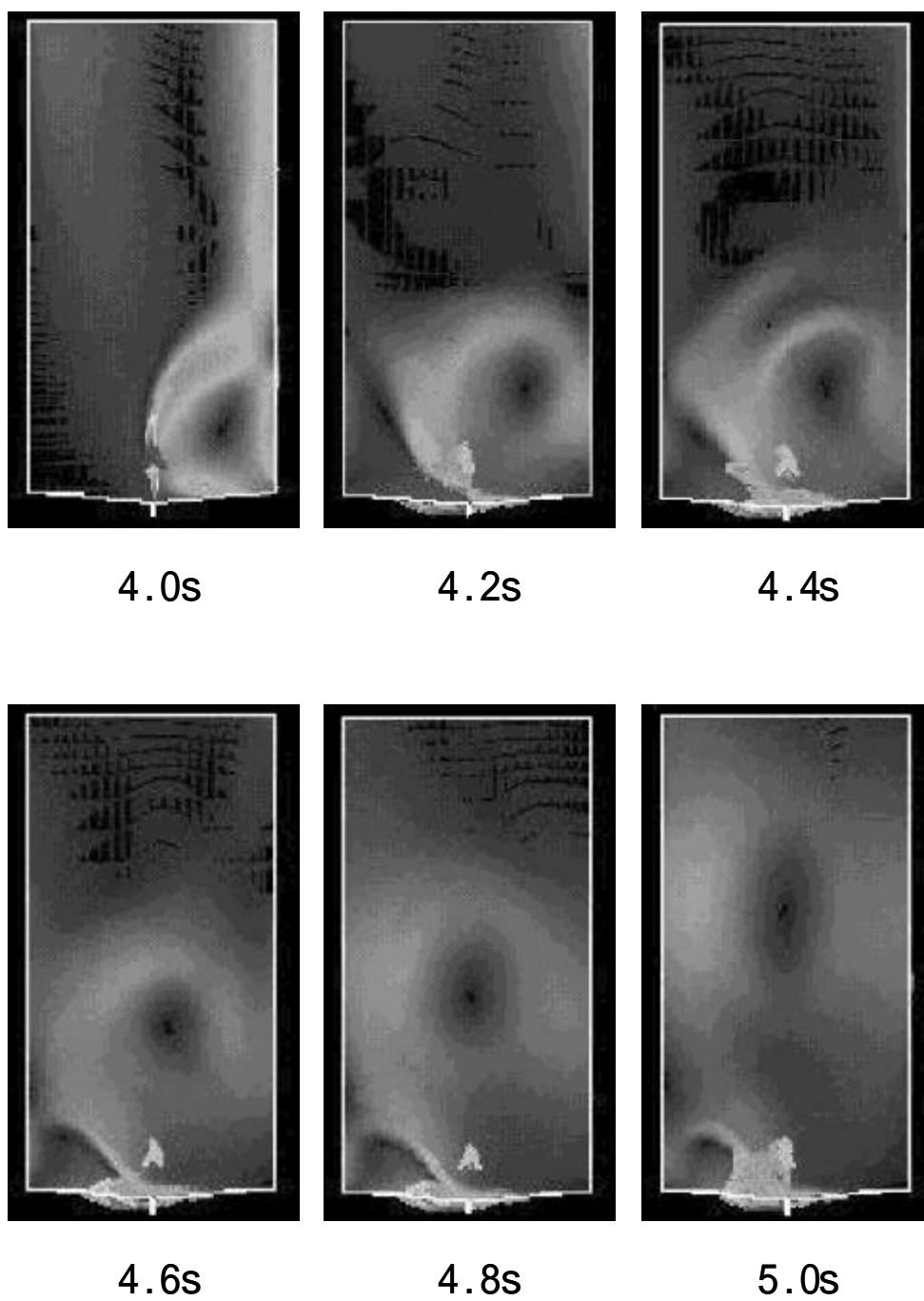


図 7 - 6 噴流の衝突による主噴流の揺動のシミュレーション結果 (速度ベクトル)

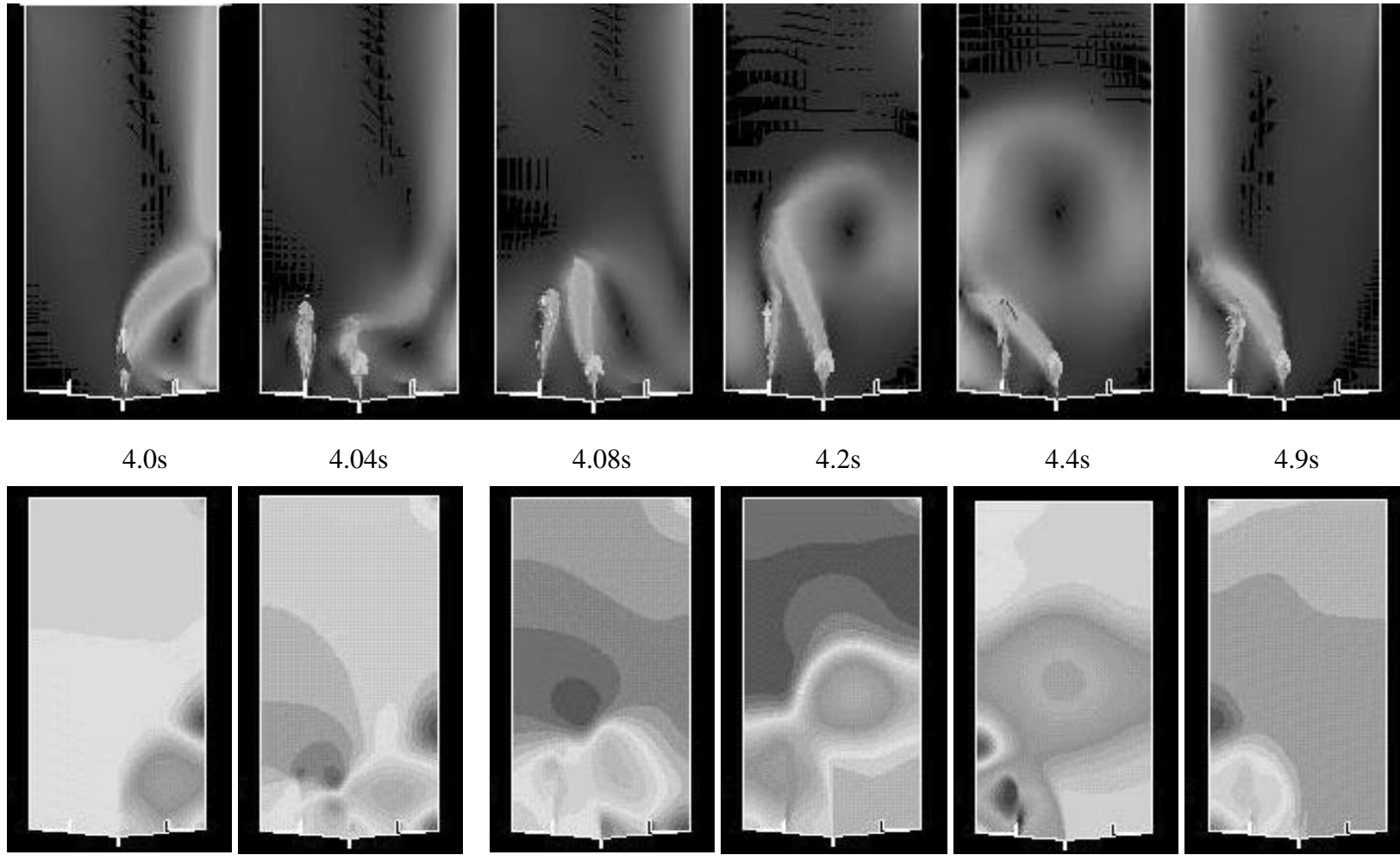


図 7 - 7 垂直制御によるシミュレーション結果  
 ( 上 : 速度ベクトル、下 : 圧力 )

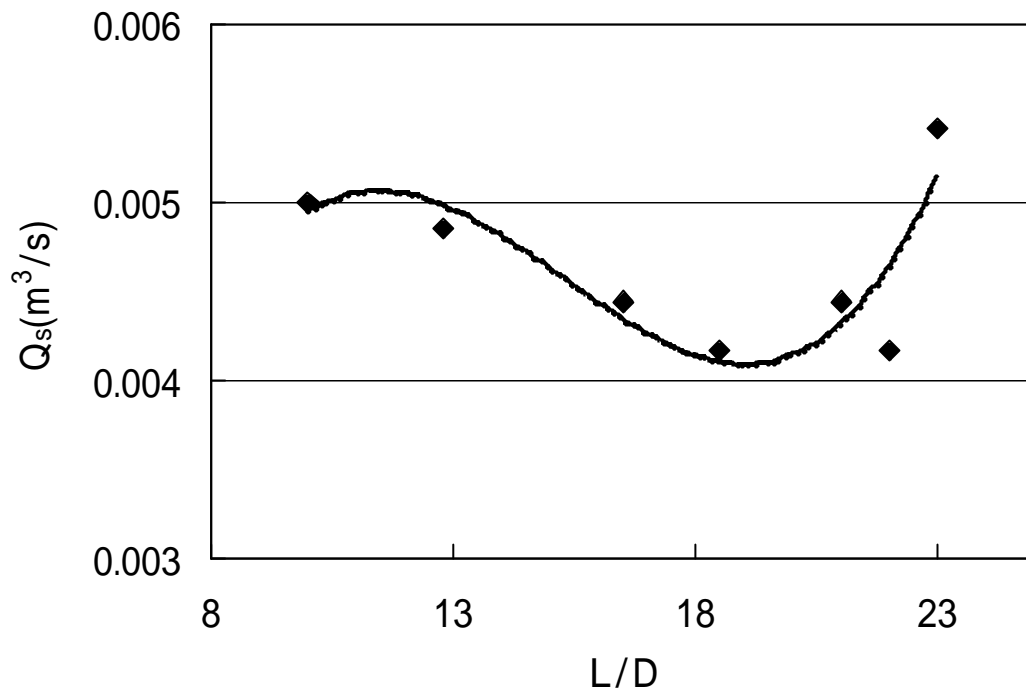


図 7 - 8 主噴流の揺動に必要な制御流量

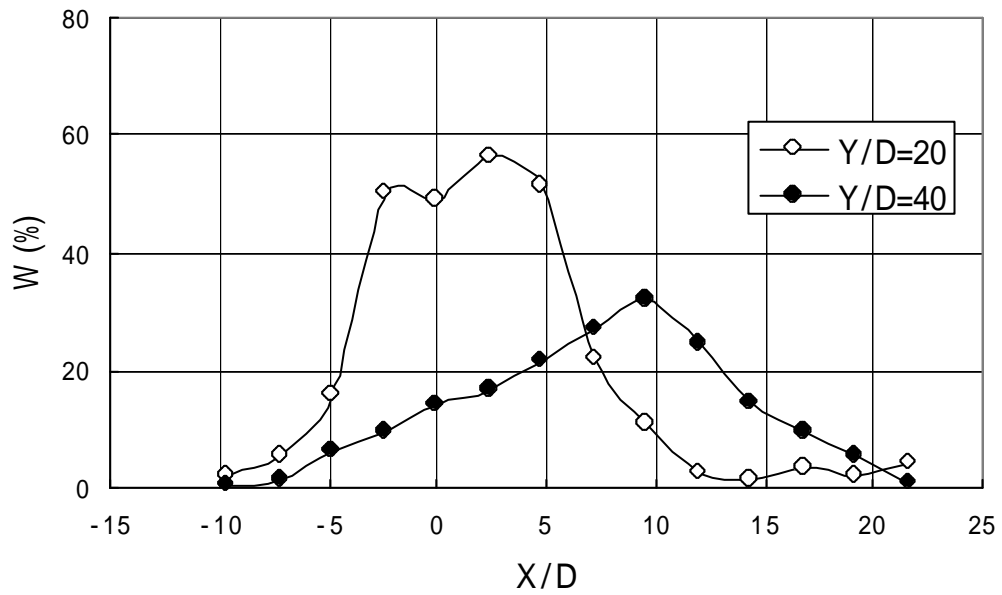


図 7 - 9 壁面噴流での洗浄結果

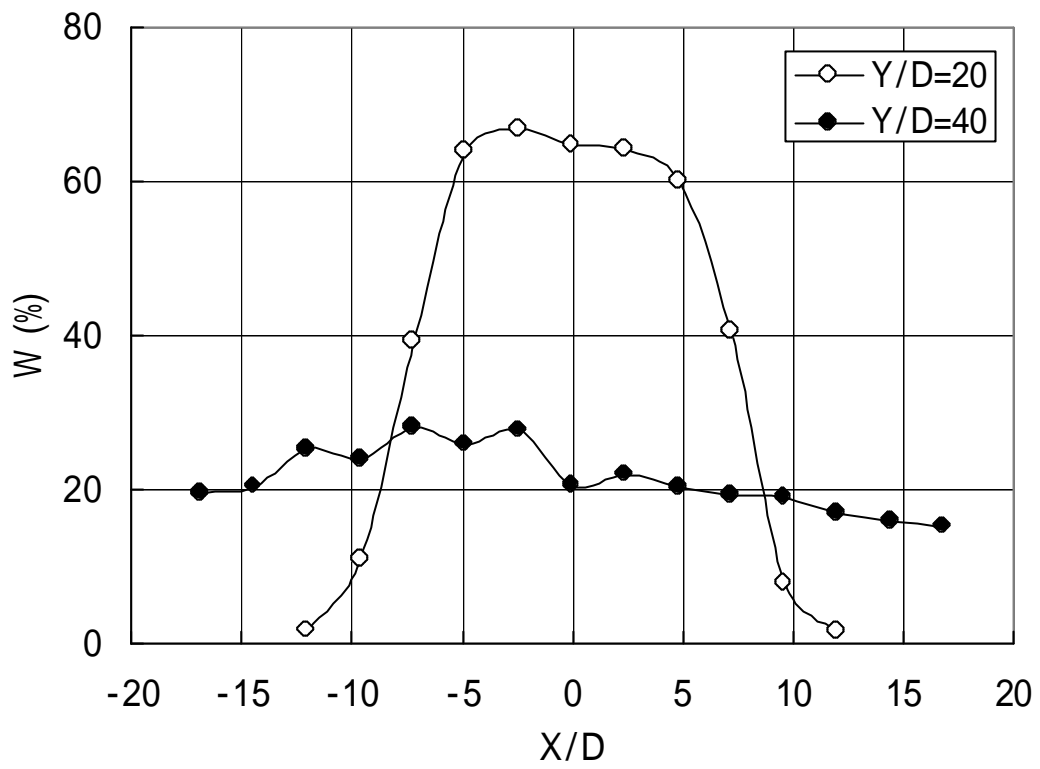


図 7 - 1 0 主噴流を揺動させた場合の洗浄結果

## 第8章 粒体噴流化式人体洗浄における粒体物性の影響

### 8.1 緒言

著者は介護現場から要望の強い、入浴介護の省力化のための、自動身体洗浄装置の開発を行っている。その方法は第5章において述べたように、入浴者は着衣を脱いで、お湯の無い浴槽に設けた椅子に座り、首から下をカバーで覆う。そして、浴槽底部に設けた二次元ノズルから温風と共に、粒体を混入させた噴流を吹き上げ、粒体の衝撃力や摩擦力によって、自動的に洗浄を行う装置である。その開発に必要な基本となる洗浄効果、噴流中での粒体の密度分布、粒体の運動解析、噴流の揺動による均一洗浄方法などについて、直径6mmのポリスチレン球を用いて実験、数値計算、シミュレーション解析より調べてきた。その結果、ポリスチレン球は十分な洗浄力を有しており、本洗浄方式における有力な粒体である事がわかった。しかし、入浴者の皮膚の柔らかさや皮膚の状態により、ポリスチレン球よりも柔らかい粒体を必要とする事が予想される。また装置の小型化により、人体の部分洗浄が可能となれば、足や手を主たる洗浄対象とする場合と柔らかい顔などを洗浄対象とする場合では使用する粒体の物性は異なってくるものと思われる。この様に、粒体噴流化洗浄で人間を対象とする場合に、一種類の粒体で効率良く、全ての人を洗浄するには限界があるものと考えられる。そのためには、粒体の物性の違いによる洗浄効果の特徴を調べる事が必要となる。また、物性による洗浄効果の特徴は、人間以外に適用範囲を広げる事にも繋がる。そのため、本研究では、ポリスチレン球と対照的な柔らかい粒体として、エチレンとスチレンの共重合体で作られた弾力性のある粒体（ゲル球）を選び、ポリスチレン球での洗浄率と比較して主に洗浄効果の違いを実験により調べた。

### 8.2 実験方法

実験装置は第7章の図7-1に示したものと同一装置を用いた。実験に使用したポリスチレン球とゲル球の外観形状を図8-1に、また、洗浄効果に係る物性値を表8-1に示す。両粒体とも金型成形で製造された直径約6mmの球形であり、真球度はポリスチレン球の方が良い。ポリスチレン球の比重は1.0、ゲル球では0.91である。比重の軽い方が空気噴流で加速されやすいものの、衝撃力は少ない。弾力性はポリスチレン球でタクトイル値+318、ゲル球で-207である。この数値が小さい程、弾力性が大きい事を表している<sup>(1)</sup>。ポリスチレン球では木材と同等程度の硬さで、ゲル球ではおよそ人の上腕程度の弾力性がある。反撥係数はゲル球の方が大きい。これが大きい程、浴槽内部の壁に当たった粒体の反撥速度も大きくなるため、それによる洗浄効果が期待できる。また、摩擦係数を示す静摩擦角度はゲル球で6.9°、ポリスチレン球で4.85°で、ゲル球の方が摩擦係数は高い。摩擦係数が大きい程、衝突による摩擦力が大きく、洗浄効果が期待できる。しかし、大きすぎると皮膚や浴槽内部の壁への付着等が生じ、噴流中の粒体数が減少し洗浄率の低下を招く事も考えられる。ポリスチレン球とゲル球による洗浄率の違いと洗浄可能範囲を調べるために、二次元噴流がノズルから垂直に噴出している状態、及び二次元噴流が壁面噴流になった状態、さらに制御噴流を用いて二次元噴流を揺動させた状態で、洗浄率の実験を行った。

表 8 - 1 粒体の主な物性値

	ポリスチレン球	ゲル球
直 径(mm)	5 . 9 3 6	6 . 1 7 7
真 球 度(mm)	0 . 0 4 2	0 . 1 8 3
比 重	1 . 0	0 . 9 1
弾 力 性 (タクタイル値)	+ 3 1 8	- 2 0 7
反撥係数 (対アルミ板)	0 . 5 8	0 . 7 0 5
静摩擦角 (度)(ゴムシ - ト面上)	4 . 8 5	6 . 9

ノズル出口における空気流速は30m/s (レイノルズ数：19400)とした。傾斜板の角度は粒体の静摩擦角以上に設定し、ポリスチレン球では5°、ゲル球では10°とした。また、傾斜板上には粒体の反撥を押し返すために、2mmのゴムシ - トを敷いた。

実験模型に投入した粒体の数はポリスチレン球で1000個、ゲル球では500個とした。ゲル球を1000個投入すると、傾斜板上で粒体同士が粘着して、傾斜板上で堆積、崩壊を繰り返して、噴流に混入する粒体の量が不安定になるため、安定する500個とした。

粒体の空気噴流との質量流量比は、高速ビデオカメラで、ノズルから吹き上げられる粒体を1秒間に250コマの速度で撮影して、1秒間の粒体の数をカウントして求めた。その結果、ノズル出口における質量流量比はポリスチレン球で1.34、ゲル球では0.57であった。

粒体の噴流中の分布測定は直径12mmの小型口 - ドセルに直径12mm、厚さ3mmのあて板を接着したものを丸棒の端面に取り付け、Y軸方向から口 - ドセルあて板面を噴流に向けて、X軸方向に12mmピッチで測定した。サンプリングタイム200 $\mu$ s、測定時間6.553s間の衝突回数から単位面積、単位時間当たりの分布密度を求めた。

洗浄効果は通気性の薄いポリウレタンフィルム(24mm $\times$ 30mm)を非吸湿性のビニ - ルに張った後、バタ - (脂肪分83%)をフィルム上に塗り、50 $^{\circ}$ Cで30分間加熱して厚さを均一化し、24時間デシケ - タ内で保管したものを洗浄用試料として調べた。これを直径12mmの丸棒に7mmのゴムを巻いた上に張り、Y/D=20、40の位置に水平に設置して、5分間洗浄した。そして、洗浄前後のバタ - の重量差から洗浄率Wを計算で求めた。

### 8 . 3 実験結果

#### 8 . 3 . 1 噴流中の粒体の分布

本研究のように、粒体の衝突や摩擦による洗浄方式では、噴流中の粒体の分布密度を把握する事が重要である。

図8 - 2に垂直な噴流で粒体が吹き上げられる噴流化の様子を示す。比重の大きいポリスチレン球では噴流中心より、噴流周辺に沿って吹き上げられている。ゲル球では噴流中心にも多くの粒体が存在する。両粒子共に、噴流中心軸上では高い位置まで吹き上げられている様子がわかる。

図8 - 3にはゲル球を用いた場合の噴流中の粒体分布の実験結果を表したものである。縦軸に口 - ドセルで計測した、単位面積、単位時間当たりの粒体数Nをとり、横軸にはX/Dをとって、Y/Dをパラメ - タとして表してある。なお、ポリスチレン球の実験結果は図6



- 5 に示してある .

これから、ノズルからの高さ $Y/D=20$ の位置では両粒子共に、粒子密度は噴流中心よりも $X/D=\pm 2.4$ の周辺にピークを持つ分布となる . これより上流側においても同じ分布を示した . 噴流中心 $X/D=0$ での密度 $N$ とピーク位置 $X/D=\pm 2.4$ での密度 $N$ を比較すると、ポリスチレン球ではピーク位置 $X/D=\pm 2.4$ での密度は噴流中心 $X/D=0$ での密度よりも約3.7~4.7倍大きいものの、ゲル球では約1.57~1.79倍である . ゲル球の方がその差が少ないため、噴流中心近くを通過する粒子の割合が多い事がわかる .

$Y/D=40$ 断面では両粒子共に、密度は低下するものの、 $X$ 軸方向の密度差は少なくなり、かつ粒子は広がって分布している . これは、噴流が広がる事により粒子も空気の流れに沿って吹き上げられるからである .

噴流中心 $X/D=0$ の位置に注目すれば、実験模型に500個 (質量流量比0.57) 投入したゲル球の方が、1000個 (質量流量比1.34) 投入したポリスチレン球よりも粒子密度 $N$  が大きい . 質量流量比が大きくなると、噴流中での粒子同士の衝突頻度が増加し、密度分布に影響を及ぼす . そのため、衝突の無い状態で噴流中心近くの密度を推定するために、傾斜面の下端位置 $L$ から10mmピッチに粒子を静かに置き、各位置で1個ずつ合計20個転がして噴流で吹き上げられた高さ $Y$ と傾斜面上の位置 $L$ との関係を調べた . その実験結果を図8 - 4に示した .

この結果から、噴流中で粒子同士の衝突が無い状態においても、600mm以上高く吹き上げられる粒子の数はポリスチレン球よりもゲル球の方が多くなる事がわかる . また高く吹き上げられる粒子は噴流中心付近を通過する事から、噴流中心位置 $X/D=0$ における粒子密度 $N$ の差は、噴流中の粒子同士の衝突によるものではなく、比重、反発係数、摩擦係数、真球度など他の原因によるものと考えられる .

### 8.3.2 洗浄結果

図8 - 5には、二次元噴流が垂直な状態で、ゲル球による5分間洗浄の結果を示した . また、ポリスチレン球での洗浄結果は図6 - 27に示してある .

ポリスチレン球では、 $Y/D=20$ において、粒子の密度の高い噴流周辺の洗浄率は高いものの、密度の低い噴流中心では洗浄率が低く、 $X$ 軸方向での洗浄率の差が大きい .  $Y/D=40$ では、 $X/D=\pm 5$ の範囲において洗浄率の差は少なくなるものの、洗浄率は低くなる . この事は $Y/D=40$ の位置まで吹き上がる粒子の数が少ない事や衝突速度の低下が原因と考えられる .

一方、ゲル球では、 $Y/D=20$ 位置において粒子密度の低い噴流中心においても高い洗浄率を示した . これは、噴流中心を通る粒子は高く吹き上がる事から速度が大きく、中心部では高速で粒子が衝突する . そのため、粒子の弾力性により大きく変形し、試料との接触面積が増加する . その結果、粒子一個当たりのバタ - 除去量が大きくなるためと推察される .  $Y/D=20$ の位置において洗浄率と粒子の分布との相関は見られない . これは、洗浄効果が高いため、噴流中心の密度でも5分間で十分洗浄できているためと考えられる .

$Y/D=40$ 断面においては、粒子の密度が $Y/D=20$ 断面と比べて、約1/2と低いにも関わらず、高い洗浄率を示した . この事から、ゲル球では、この位置における速度でも十分な洗浄力を有しているものと考えられる .

垂直な噴流では、ノズルからの位置 $Y/D=20, 40$ の位置において、ゲル球の方が、ポリスチレン球よりも高い洗浄率を示した。

次に壁面噴流がX軸の+方向の壁面に付着している噴流での洗浄結果を図8-6に示す。また、粒体の分布の測定結果は図8-7に示した

$Y/D=20, 40$ 断面において、粒体の分布と洗浄率には明確な相関は見られない。粒体の密度はノズルからの高さにより、大きく異なるものの洗浄率は、ノズルからの高さによる差が少ない。これは、ゲル球では比重が小さく、高い位置まで吹き上がるため、 $Y/D=40$ 位置における速度でも十分な洗浄力を持っている事が原因と考えられる。

ポリスチレン球の壁面噴流での洗浄結果は図7-9に示してある。ゲル球の洗浄結果図8-6と比べると、 $Y/D=40$ 断面では、ゲル球の方が高い洗浄率を示し、 $Y/D=20$ ではポリスチレン球の方がやや高い洗浄率を示した。

次に、第7章と同じ方法で噴流を揺動させて広範囲で均一な洗浄効果を調べた。ゲル球での実験結果を図8-8に示す。なお、ポリスチレン球の場合の結果は図7-10に示している。

ポリスチレン球では、 $Y/D=20, 40$ 共に、垂直噴流での洗浄と比べて、均一で広範囲な洗浄ができています。一方、ゲル球では、図8-5に示した垂直な噴流での洗浄結果と比べて、高さ $Y/D=20, 40$ 共に、広範囲な洗浄ができていないものの、洗浄率は低下している。また、ポリスチレン球の場合と比べて、 $Y/D=20, 40$ 共に、バラツキが見られ、均一性に劣る。これらは、粒体の質量流量比がポリスチレン球の半分以下であり、さらに噴流が揺動する事で一試料に当たる粒体は少なくなる。この事が、洗浄率の低下及び洗浄ムラの原因と考えられる。これらより、粒体の質量流量比は0.57以上が望ましい。

### 8.3.3 粒体物性の洗浄率への影響

実験浴槽では、ポリスチレン球とゲル球での質量流量比及び粒体の分布密度の状態が同じでないため、洗浄効果への影響が明確でない。そこで、図8-9に示す装置を用いて300mmの高さから616個の粒体を洗浄用試料に落下させて、洗浄効果を調べた。

粒体が試料に当たる角度は $45^\circ$ とし、内径7mm、長さ250mmの亚克力樹脂パイプを案内として、同じ位置に当たるのを避けるために2mmピッチで粒体を衝突させた。試料は10mmのゴムシ-ト緩衝材の上に設定した。その実験結果を表8-2に示す。これよりゲル球の方が洗浄効果は高い事がわかる。

また、高さ500mmから落下させた場合にロ-ドセルによる荷重測定では、ポリスチレン球で4.46N、ゲル球では1.64Nであった。この事から洗浄効果の違いは、衝撃作用よりも、衝突時の粒体の変形量の差、摩擦係数、吸着性の差などが考えられるが、本実験結果から

表8-2 粒体による洗浄率の差

粒 体	洗 浄 率
ポリスチレン球	19.3
ゲル球	24.5

は主要原因を特定できなかった。

#### 8.4 結言

粒子噴流化式身体洗浄装置の開発に当たって、硬さ及び摩擦係数の異なるポリスチレン球とゲル球の2種類の粒子による洗浄効果及び均一洗浄の比較を行い、次の結果を得た。

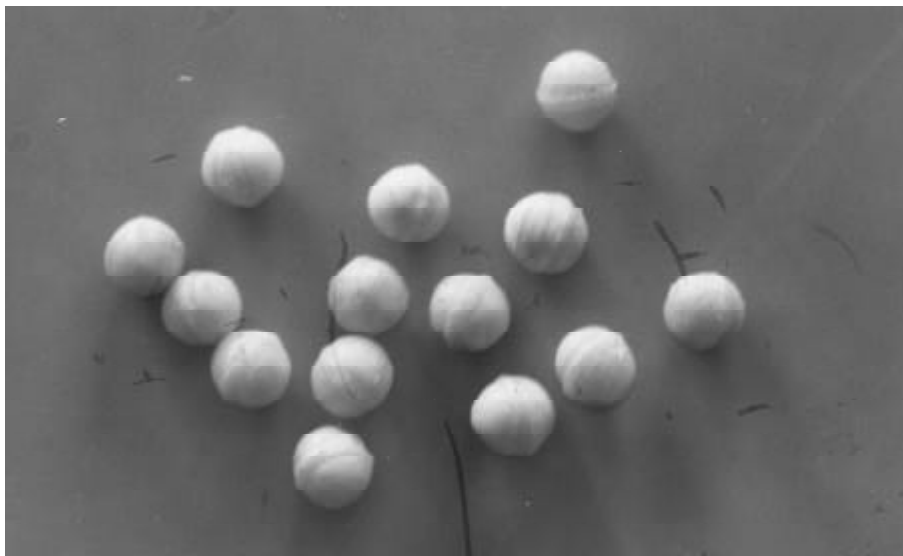
- (1) ポリスチレン球では噴流中の粒子の分布と洗浄率には相関が見られるが、ゲル球では明確な相関が見られない。この原因として、衝突による弾性変形や比重の差による洗浄効果の違いが原因と考えられる。
- (2) ポリスチレン球では噴流を揺動させて洗浄を行うと洗浄範囲が広くなり、かつ均一な洗浄ができた。一方、ゲル球ではバラツキが見られた。バラツキの原因として質量流量比が少ない事が考えられる。
- (3) 弾力性があり、比重の小さいゲル球の方が、ポリスチレン球よりも洗浄効果は高く、かつ洗浄率がノズルからの距離による影響を受けにくいいため、噴流化洗浄にとって有利である。
- (4) 揺動噴流による均一な洗浄にとって粒子の質量 流量比は0.57以上である方が望ましい。

#### 参考文献

- (1) 尾股定夫、硬さ測定用触覚センサ -、電気学会論文誌 (E 編)、117 巻 7 号 (1997)



(ポリスチレン球)



(ゲル球)

図 8 - 1 粒体の形状



ポリスチレン球



ゲル球

図 8 - 2 粒子噴流化の様子

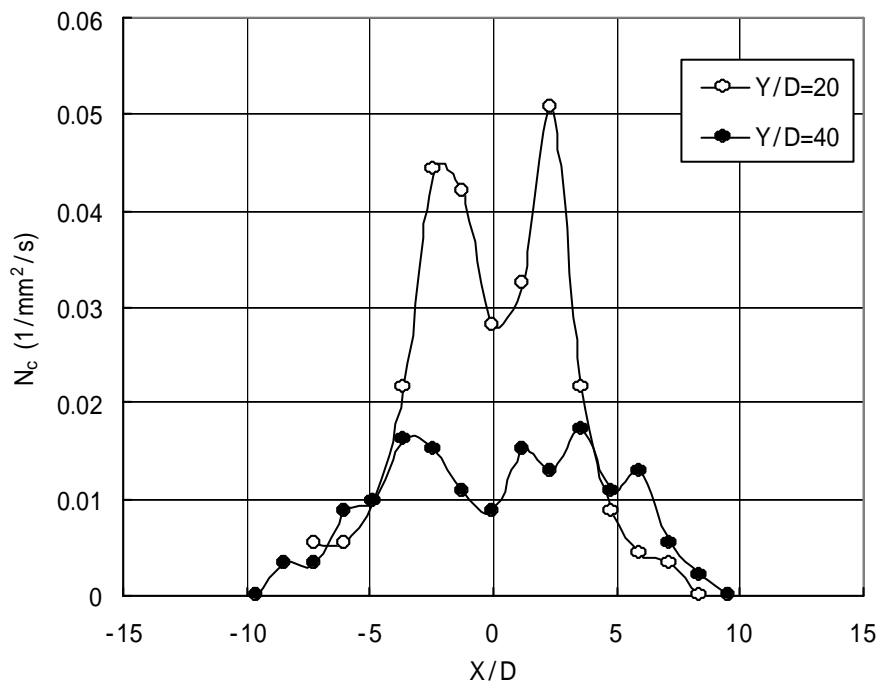
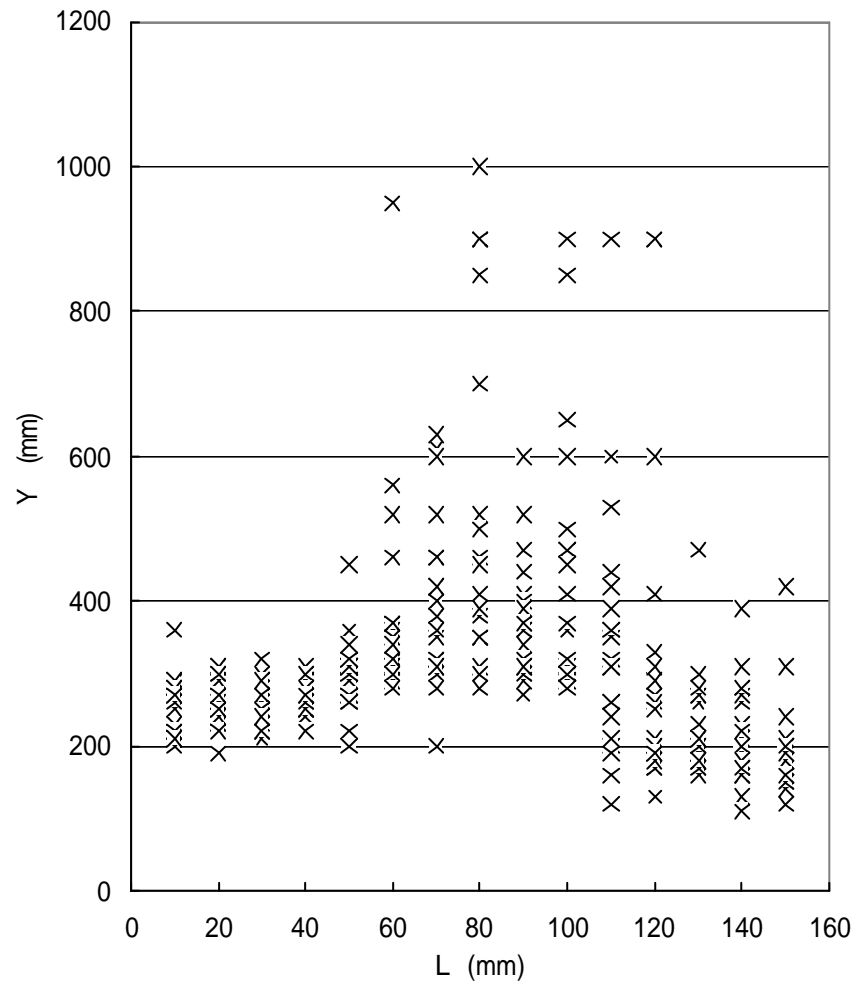
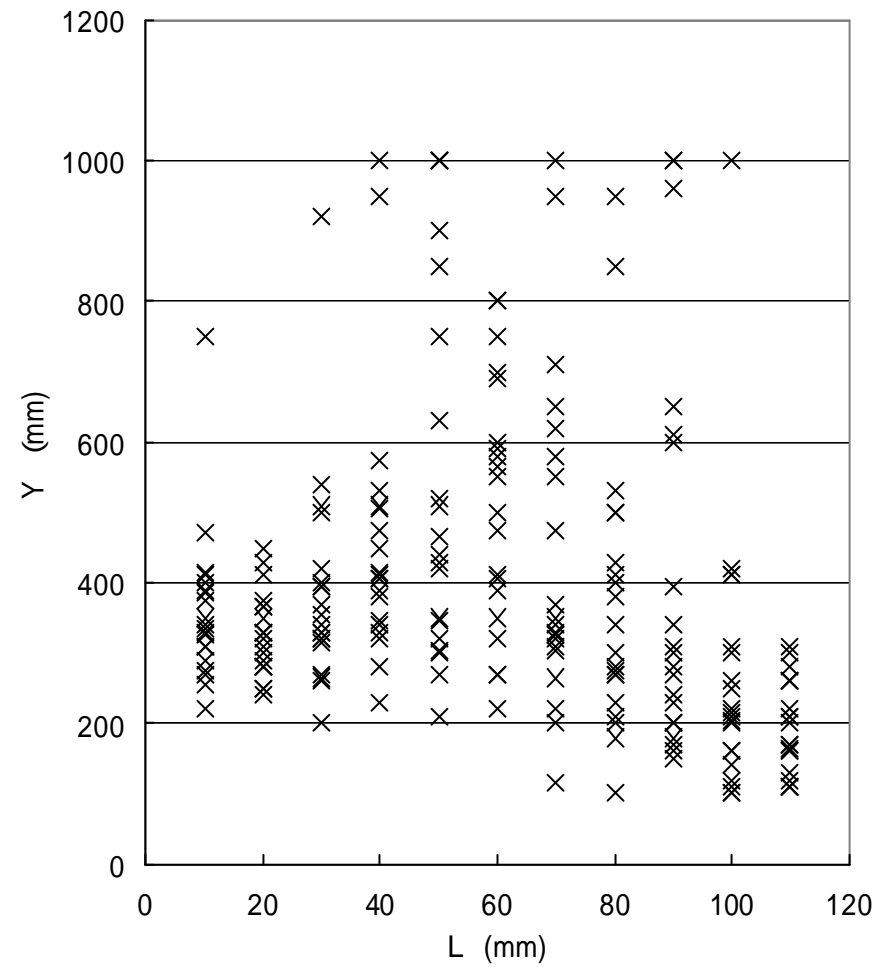


図 8 - 3 噴流中での粒子の分布 (ゲル球)



ポリステレン球 ( 5 ° 傾斜 )



ゲル球 ( 10 ° 傾斜 )

図 8 - 4 傾斜面上の転がり位置と吹き上げ高さ

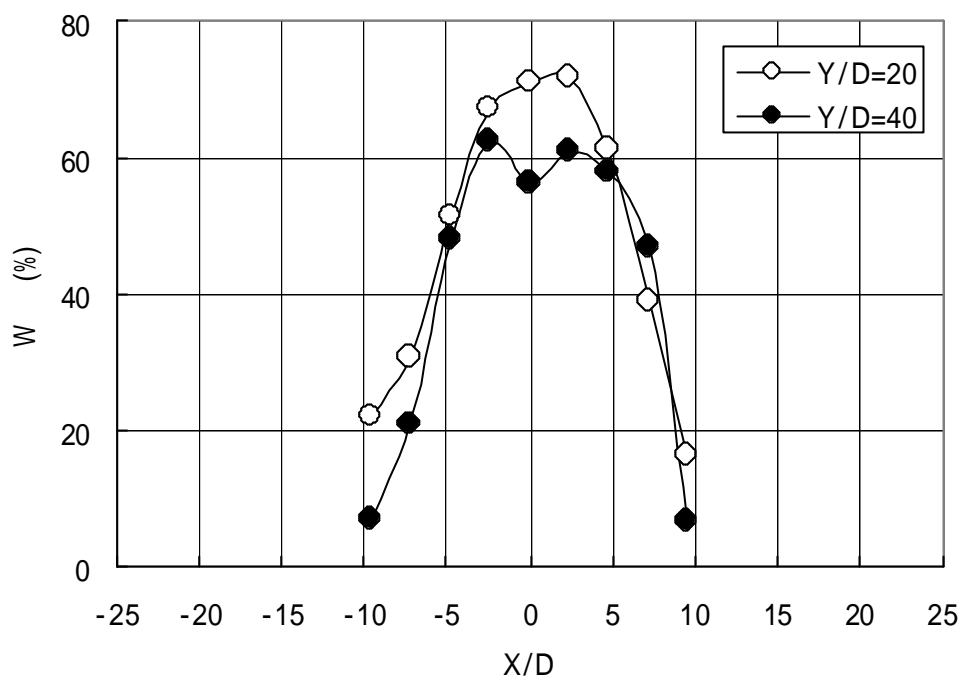


図 8 - 5 垂直噴流での洗浄結果 (ゲル球)

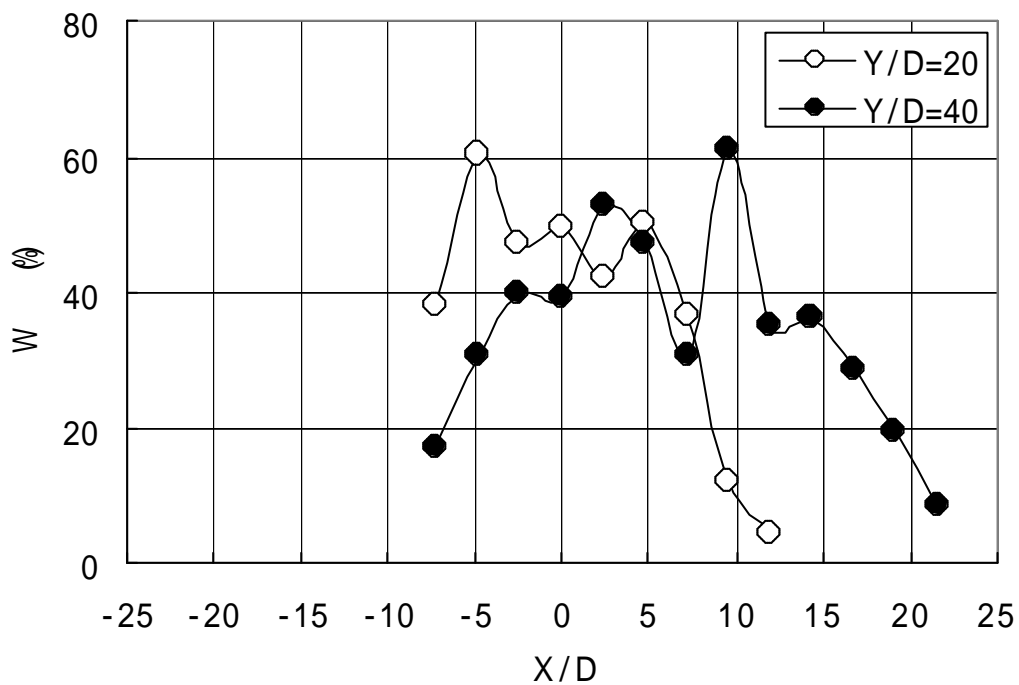


図 8 - 6 壁面噴流での洗浄結果 (ゲル球)

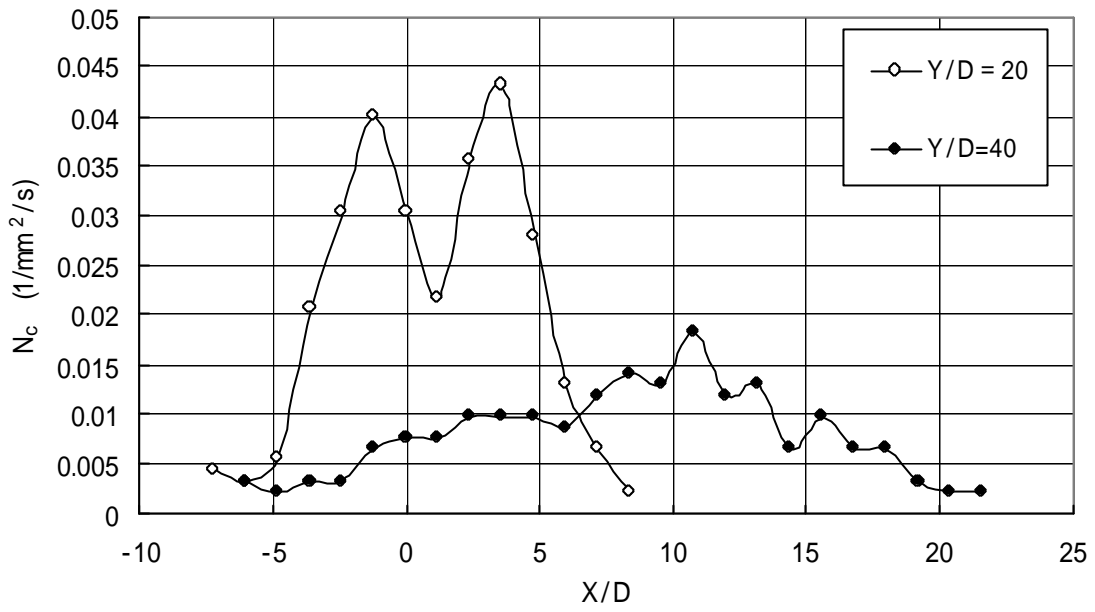


図 8 - 7 壁面噴流での粒体の分布 (ゲル球)

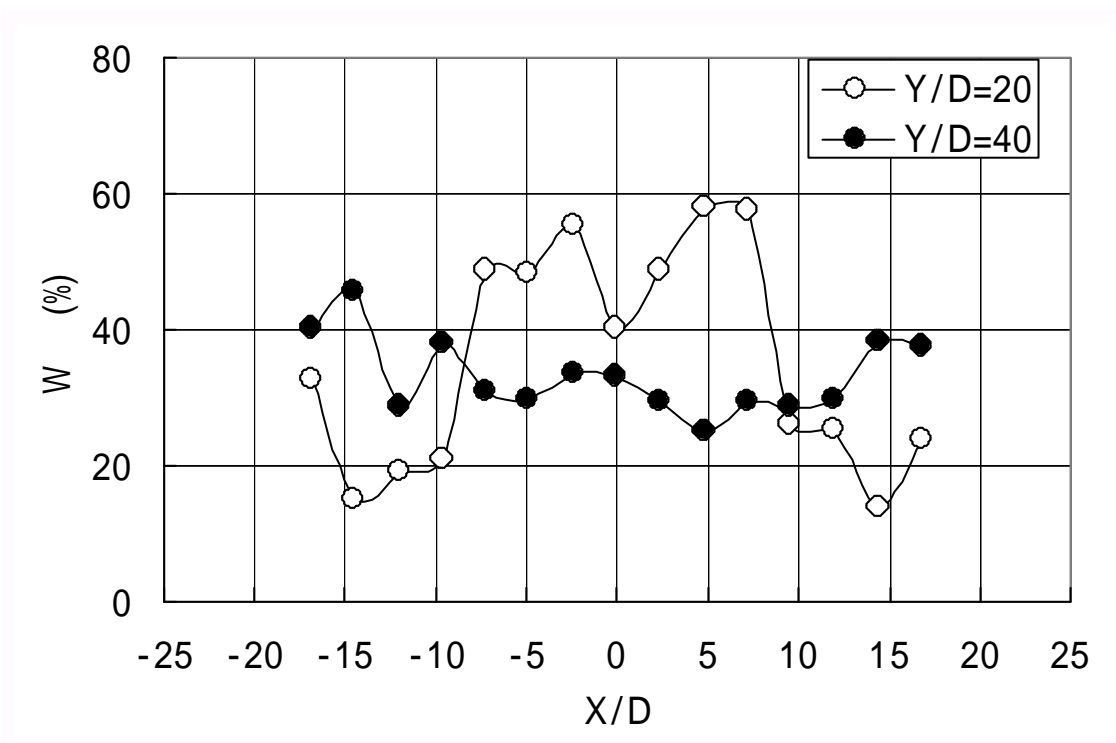


図 8 - 8 揺動噴流による洗浄結果 (ゲル球)



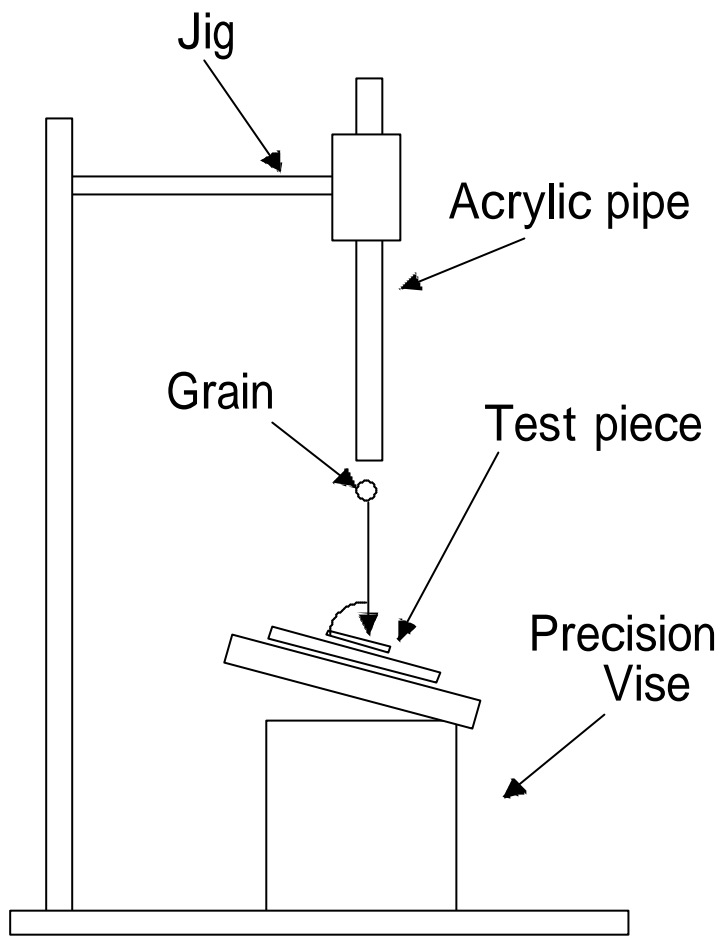


圖 8 - 9 洗淨率比較用實驗裝置

## 第9章 実用化のための試作機開発

### 9.1 緒言

これまで、浴槽に見立てた実験模型を用いて、粒体噴流化による洗浄効果について実験を中心とした研究を行ってきた。しかし、実用スケールの試作機では実験模型と比べて風速、寸法、浴槽形状、空気の排出位置などが異なってくる。そのため、実用機スケールでの粒体の噴流化の状態、人間を対象とした洗浄効果、官能評価など実験模型では測定不可能な部分について、実験を行い、実用機製作の貴重な基礎データ作りが重要となる。

入浴に対して、「暖かい湯船につかり、体を温める」そして浴槽から出た後は「サッパリ感」、「湯上がり感」を楽しむという、固定したイメージがある。本研究で開発する洗浄方式は少量の温シャワーと、暖かい空気噴流に混入させた粒体の衝撃、摩擦力による全く新しい洗浄方式を採用している。そのため、人々に受け入れられるかは、従来の入浴方法と比べて浴槽から出た後の「サッパリ感」、「湯上がり感」を感じられるか、また「湯冷め感」が無いかが、実用化に向けての重要なカギとなる。そこで、本研究では入浴体験による官能評価試験を中心に実験を行い実用化への貴重な基礎データを得る事を目的とした。

### 9.2 噴流化と粒体の選定について

#### 9.2.1 実験装置

実験浴槽の概要を図9-1に示す。浴槽の大きさ幅600mm、長さ1000mm、高さ600mmのブロットタイプの浴槽を製作し、空気の吹き出し面積 $40000\text{mm}^2$ とした。送風機（EL50最大風量 $60.2\text{m}^3$ ）からの空気は直径250mmのパイプによって送られ、浴槽の手前で直径150mmのパイプ3本に分岐されてノズルに導かれている。ノズル出口での最大風速は $25\text{m/s}$ となる。

用いた粒体は 人体に無害である事。再利用が可能で廃棄しても有害なガスを発生しない。噴流化、洗浄力にすぐれたものを基準に選定し、エチレンとスチレンの共重合体をベースに比重調整として石英、酸化チタン、バリウム等を混ぜたり、摩擦係数を減少させるために発砲処理したものを各種準備した。また、比較用としてポリスチレン球を用いた。

これらの粒体4Lを実験浴槽に投入して、圧力損失、噴流化の状況、肌への当たり具合など官能評価から粒体の選定を行った。

#### 9.2.2 実験結果

表9-1に粒体の種類と噴流化の状況の結果を示す。これより噴流化の良好なものはゲル10%発泡体に石英を混ぜた粒体とポリスチレン球であった。比重の軽いゲル10%発泡体、ゲル+酸化チタンなどは、皮膚への衝撃が少なく洗浄力に疑問があった。粘着力のある粒体は人体や浴槽壁面に付着し、噴流化状況は良くなかった。図9-2に噴流化の良いゲル10%発泡体+石英とポリスチレン球及び噴流化の悪いゲル10%発泡体+バリウムの噴流化の状況を示す。噴流化が良好な粒体は浴槽全体に吹き上がっているが、噴流化の悪い粒体は浴槽内部に堆積しているのが分かる。

図9 - 3には各種粒体による圧力損失比（粒体を投入した時の圧力損失 / 空気のみ流した時の圧力損失）を示す<sup>(1)</sup>。ポリスチレン球がやや損失が大きいものの、ゲル粒体の場合には種類、形状による顕著な圧力損失比の差は見られない。

これより、噴流化状態が良く圧力損失が少ないゲル10%発泡体 + 石英を噴流化の粒体として採用する事とした。

### 9.3 試作機概要

試作機は実用機を想定して、人を対象とした洗浄実験、官能試験、稼働実験が可能な構造とした。また各部所の温度表示、浴槽内の噴流化状況モニタ - 表示などを取り付け、データ取りを可能とした。

試作後の主な仕様を表9 - 2に示す。

表9 - 2 試作機の仕様

構成	仕様	備考
洗浄部	縦1002mm、横800mm、高さ1150mm	内部に洗浄用椅子を設置。 底部は格子として、粒体を通過可能とする。
吹き出し部	縦1002mm、横800mm、高さ1150mm	一個のスリットとし、洗浄部に向かって60°の傾斜を付ける。
送風部	縦398mm、横800mm、高さ600mm	
風速	ノズル出口：25m/s、空搭速度：1.6m/s	

表9 - 3 洗浄工程

工程	時間
粒体(4L)を洗浄槽に投入。手動	1分
被洗浄者、洗浄槽に入る。	1分
界面活性剤入りのシャワー - にて身体を濡らす。	1分
噴流化洗浄。送風 + ヒータ + 蒸気	3分
シャワー - にて身体洗浄。	1分
粒体回収。(手動 + 吸引)	1分
身体乾燥。送風 + ヒータ	3分
被洗浄者、洗浄槽から出る。	2分
洗浄槽内、シャワー - にて洗浄	2分

試作機の浴槽概要を図9 - 4に、外観形状及び浴槽内部の状況を図9 - 5に示す。洗浄部（浴槽に相当する）には、洗浄用椅子を設けてあり、底部は格子状として温風と粒

体の通過を可能としている．また、周囲の壁面には多数の温シャワ - ノズルを配置して、体全体にシャワ - が掛かるように配慮してある．

#### 9.4 洗浄効果について

人体洗浄装置にとって、洗浄率のみならず、体の各部所が均一に洗浄される事が望ましい<sup>(2)</sup>。この事を調べるために完成した試作機を用いて洗浄実験を行った。ここでは、蛋白質による汚れと、脂肪による汚れを想定して、蛋白質には卵白を脂肪にはバターを代用した。これらを、通気性のポリウレタンフィルム(40mm×50mm)に塗った後、それを体の肩、胸、背中、太もも(表)、太もも(裏)に張り付け、表9-3に示した条件で洗浄した。洗浄後、試料ごとにズダン液20ccで3分間染色して乾燥させた後、測色色差計(東京電色工業株式会社製 MODEL 1001DP)にて、各試料の白色度から(9-1)式によって洗浄率を求めて評価した。

$$\text{洗浄率(\%)} = \frac{W_w - W_s}{W_0 - W_s} \times 100 \quad (9-1)$$

ここで  $W_0$  : 塗布する前の試料の白色度

$W_s$  : 洗浄前の白色度

$W_w$  : 洗浄後の白色度である。

洗浄結果を図9-6に示す。蛋白質の汚れはシャワ - 洗浄のみでも全部所、高い洗浄率を示し、粒体洗浄との差は見られなかった。脂肪については、粒体噴流化洗浄の方が高い洗浄率を示した。

また、同じ風速であれば粒体投入量の多い方が、粒体投入量が同じであれば風速が大きい方が洗浄率は高くなった。これらより、部所によるバラツキが少なく、洗浄率60%以上が得られる粒体量4L、インバ - タ - 35Hz、風量57m<sup>3</sup>/minの条件が良いと考えられる。

入浴した後の官能評価として、「サッパリ感」、「湯上がり感」、「湯冷め感」などが上げられる。これらは、入浴者にとって重要な要素であると考えられる。

「サッパリ感」では洗浄率との関係があると考えられる。洗浄率が高い程「サッパリ感」を感じる。「湯上がり感」では浴槽から出た直後(入浴直後)の体温と関係があり、表面体温が高い程「湯上がり感」を感じる。また、「湯冷め感」は入浴後の体温の低下の具合に関係するものと考えられる。

粒体噴流化洗浄装置を用いて、「湯上がり感」と「湯冷め感」について入浴後の表面体温をサ - モグラフィック装置(日本電子株) JTG300)で一定時間ごとに測定し、その結果から、これらの定性的評価を行った。入浴直後の表面体温測定では、粒体噴流化洗浄装置の他に、一般家庭用の浴槽による入浴(浴槽入浴)及び、温シャワ - を体の周囲から吹き付けて保温効果があるとされる既製品(温シャワ - )との比較を行った。いずれの場合も湯温40℃で、入浴時間13分として、入浴後の表面体温を測定した。その結果を図9-7に示す。粒体噴流化式洗浄では、最高表面温度は他の入浴方法より高いものの、場所による温度ムラがあった。これは、粒体の当たる速度、数と関係する。温シャワ - と浴槽入浴では体全体の表面温度は均一であり、その中でも温シャワ - の方が高い表面温度が得られた。次に、温シャワ - と粒体噴流化式において、入浴後時間の経過による表面温度の低下の状

況を図9 - 8に示す。保温効果が高いとされる温シャワ - より、粒体噴流化式の方が、高い温度を長時間維持している事がわかる。これは粒体の衝突や摩擦の効果によるものと考えられる。以上の結果から、「サッパリ感」を高い順から並べると、浴槽入浴 粒体噴流化式 温シャワ - となり、「湯上がり感」は高い順から、温シャワ - 粒体噴流化式 浴槽入浴、「湯冷め感」を感じない順に粒体噴流化式 温シャワ - 浴槽入浴となる。

#### 9.5 官能評価

7名の方に、表9 - 3に示した洗浄工程に従って入浴後、 から の各工程について、良い、悪いの2段階評価及び不快から快適までの5段階評価、さらにアンケート調査に回答していただいた。その結果を図9 - 9、図9 - 10に示す。

各工程の2段階評価の結果、良い評価の多い順に、シャワ - 洗浄工程、界面活性剤散布工程、噴流化洗浄工程、身体乾燥工程、粒体回収工程であった。そして全行程を通じて、良い評価の人数が、悪い評価の人数を上回った。良い評価が得られた工程は経験があるシャワ - 洗浄及び、それと類似した界面活性剤散布工程であり、経験の無い、粒体回収及び乾燥工程は悪い評価が多かった。しかし、乾燥工程と類似し、経験の無い噴流化洗浄工程で良い評価を得たことは、初めての体験にもかかわらず、本方式による洗浄方法が好評であったと判断できる。

5段階評価においても、各工程ごとの評価の傾向は同じであるが、全行程の平均値が各工程ごとの平均値より高い評価を受けたのは、評価項目には無い入浴後の「湯上がり感」、「サッパリ感」、「湯冷め感」などの官能的評価が加わったものと思われる。これらより、評価の低い粒体回収工程及び身体乾燥工程についてはアンケート調査の結果を踏まえて改良しており、改良後は高い評価が得られるものと考えている。

#### 9.6 結言

従来に無い粒体噴流化方式による自動身体洗浄装置の開発に当たり、粒体の選定、洗浄効率、入浴効果の比較、さらに入浴後のアンケート調査等を実施して以下の事が明らかになった。

- (1) 粒体の種類はエチレンとスチレンのゲルを10%発泡させたものに石英パウダ - を混ぜたものとポリスチレン球が浴槽内での堆積が無く、噴流化状態が良好であった。
- (2) 浴槽への投入粒体量4Lでは粒体の種類、形状による圧力損失に顕著な差は見られなかった。
- (3) 卵白とバタ - を蛋白質および脂肪の汚れに見たてた洗浄では、蛋白質はシャワ - でも十分洗浄可能で粒体噴流化式との差は見られなかった。脂肪では噴流化方式が洗浄率は高く、明らかな違いが見られた。しかし、体の場所により若干洗浄率にバラツキが見られた。
- (4) 浴槽入浴、温シャワ - 入浴、粒体噴流化式入浴において、入浴直後と時間の経過による表面体温測定から、噴流化式では保温効果が最も高い事がわかった。
- (5) モニタ - 調査から、噴流化洗浄方式の実用性について大きい期待をかけてもらっているという感触を得た。また、貴重な意見から具体的改善点が抽出でき、改良することができた。

#### 参考文献

- ( 1 ) 横川明、本川高男、北条英二、山中義也、松村次展：粒体流動化式人体洗淨装置の研究開発、中小企業産学官技術交流会発表資料、(1999)
- ( 2 ) 噴流化式洗淨装置、特願 2000-346464

表9 - 1 各種粒体の形状と噴流化状況

粒体の種類	形状	噴流化状況	備考
ゲル( IC30)粒 体)	直径：5mm 円柱形：アスペクト比2以下 投入量：3.75L 嵩比重：0.395 安息角：約25°		噴流化は良好。 皮膚への当たりが弱い。 比重が小さい。
ゲル( IC30)10 %発砲体	直径：6mm 円柱形：アスペクト比2以下 投入量：4L 嵩比重：0.27 安息角：約27°		噴流化は良好。 皮膚への当たりが弱い。 比重が小さい。
ゲル( IC30) + 酸化チタン	直径：5mm 円柱形：アスペクト比1以下 投入量：4L 嵩比重：0.491 安息角：約27°		噴流化は良好。 粘着力中程度。
ゲル( IC30)10% 発砲体 + 酸化チ タン	直径：5mm 円柱形：アスペクト比1以下 投入量：4L 嵩比重：0.619 安息角：約37°		粘着力大きく、安息 角が大きいため、浴 槽内および体に堆 積。
ゲル( IC30) + バリウム	直径：5mm 円柱形：アスペクト比1以下 投入量：4L 嵩比重：0.4305 安息角：約30°		粘着力大きく、安息 角が大きいため、浴 槽内および体に堆 積。
ゲル( IC30)10% 発砲体 + バリウ ム	直径：5mm 円柱形：アスペクト比1以下 投入量：4L 嵩比重：0.6135 安息角：約30°		粘着力大きく、安息 角が大きいため、浴 槽内および体に堆 積。
ゲル( IC30) + 石英	直径：5mm 円柱形：アスペクト比1以下 投入量：4L 嵩比重：0.488 安息角：約24.5°		噴流化は良好。 粘着力小さい。
ゲル( IC30)10 %発砲体 + 石英)	直径：5mm 円柱形：アスペクト比1以下 投入量：4L 嵩比重：0.462 安息角：約27°		噴流化良好。体へ の付着なし。浴槽内 への堆積なし。
ポリスチレン 球 ( 対比用)	直径：6mm 球形 投入量：4L 嵩比重：0.6025 安息角：6.5°		

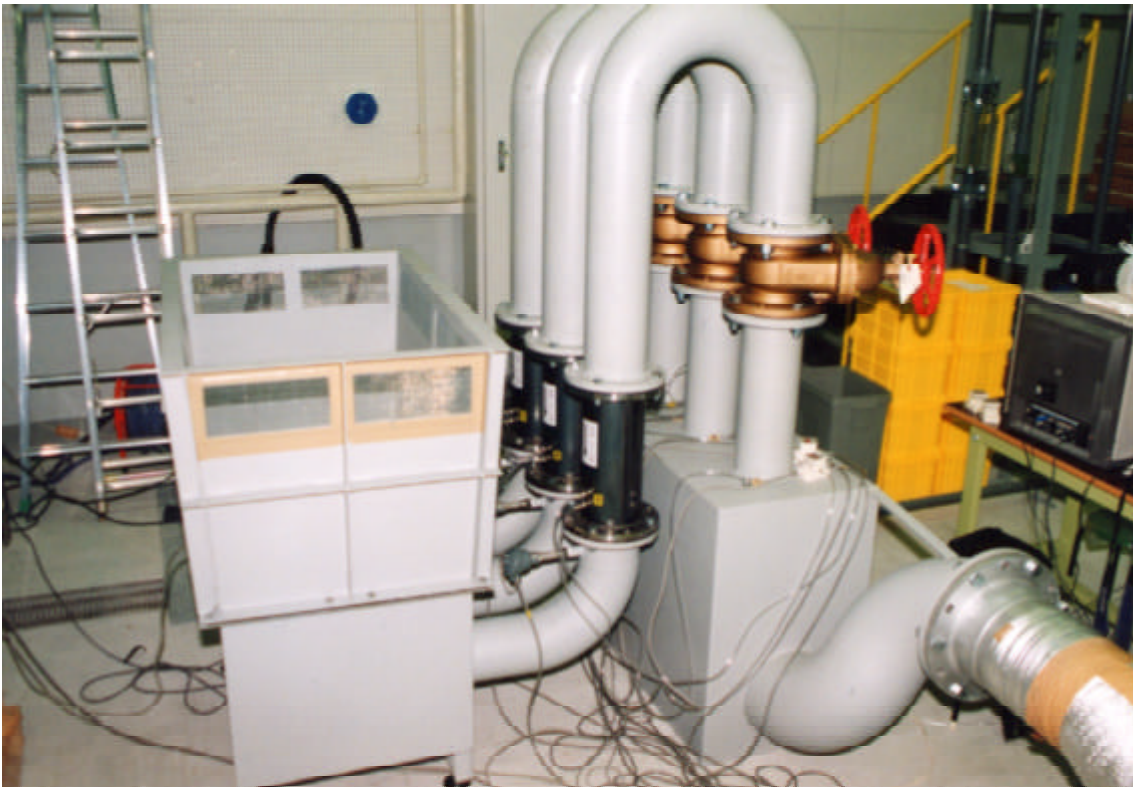


図 9 - 1 実験浴槽及び全体の概要





ゲル (IC30)10%発泡体 + バリウム



ゲル(IC30)10%発泡体 + 石英



ポリスチレン球

図 9 - 2 噴流化の状態

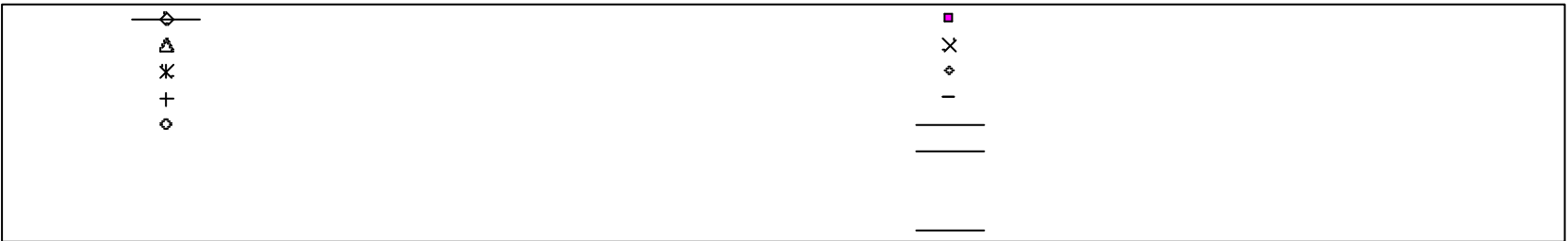
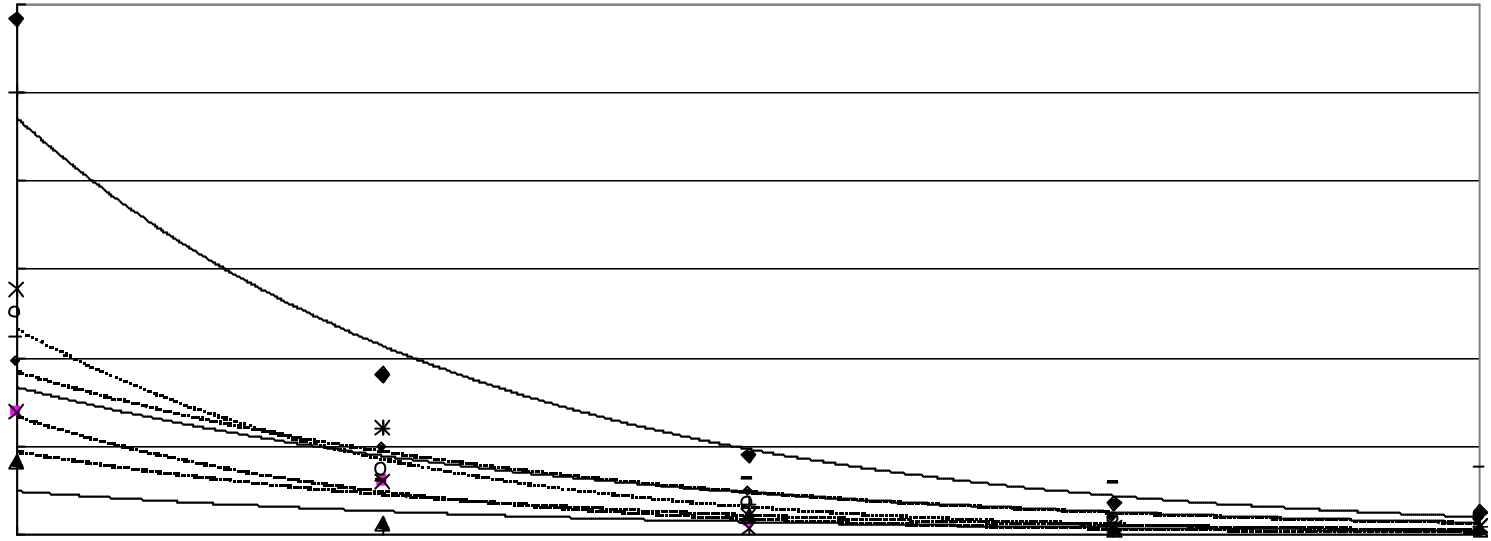


图 9 - 3 压力损失比

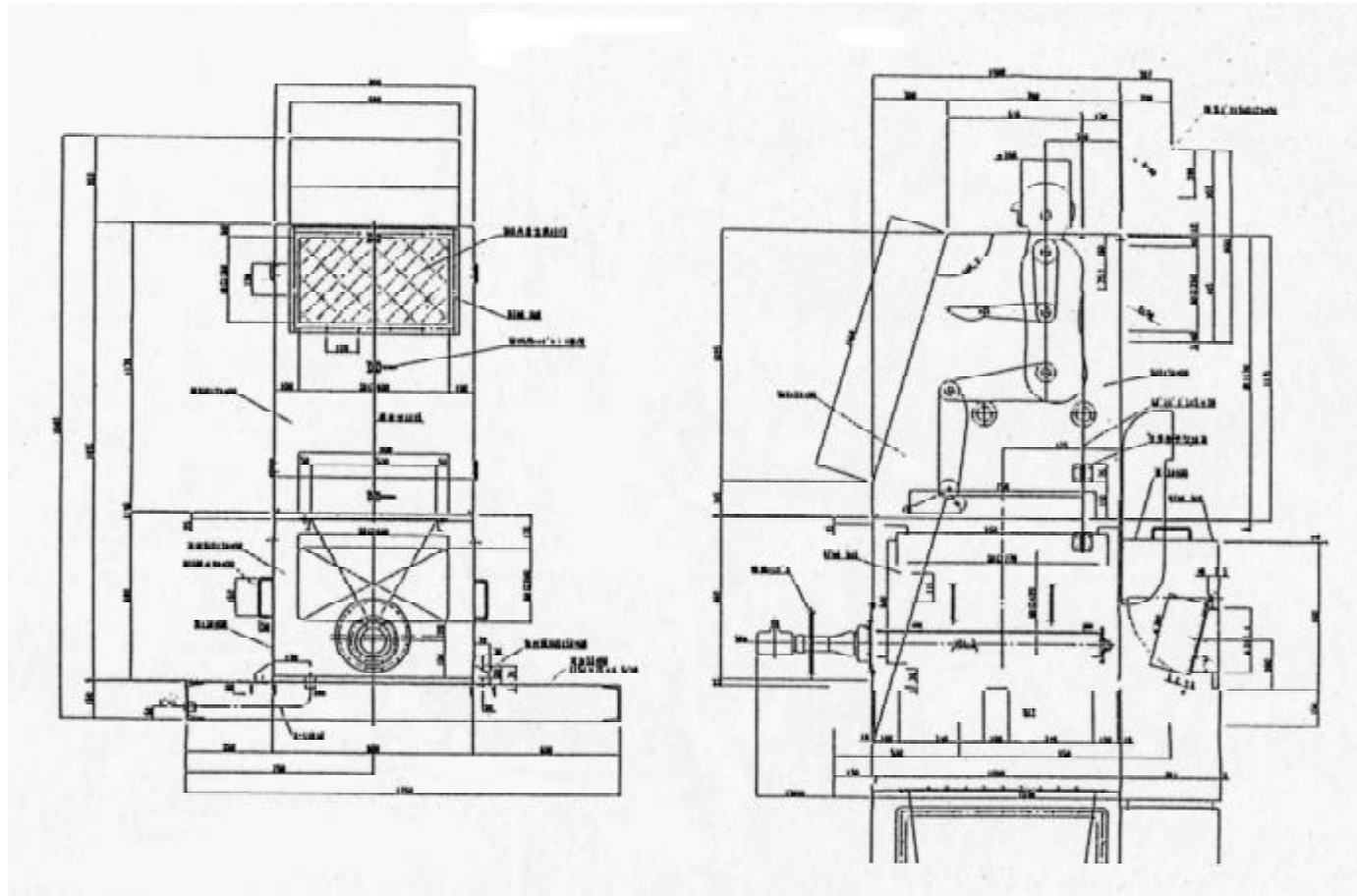
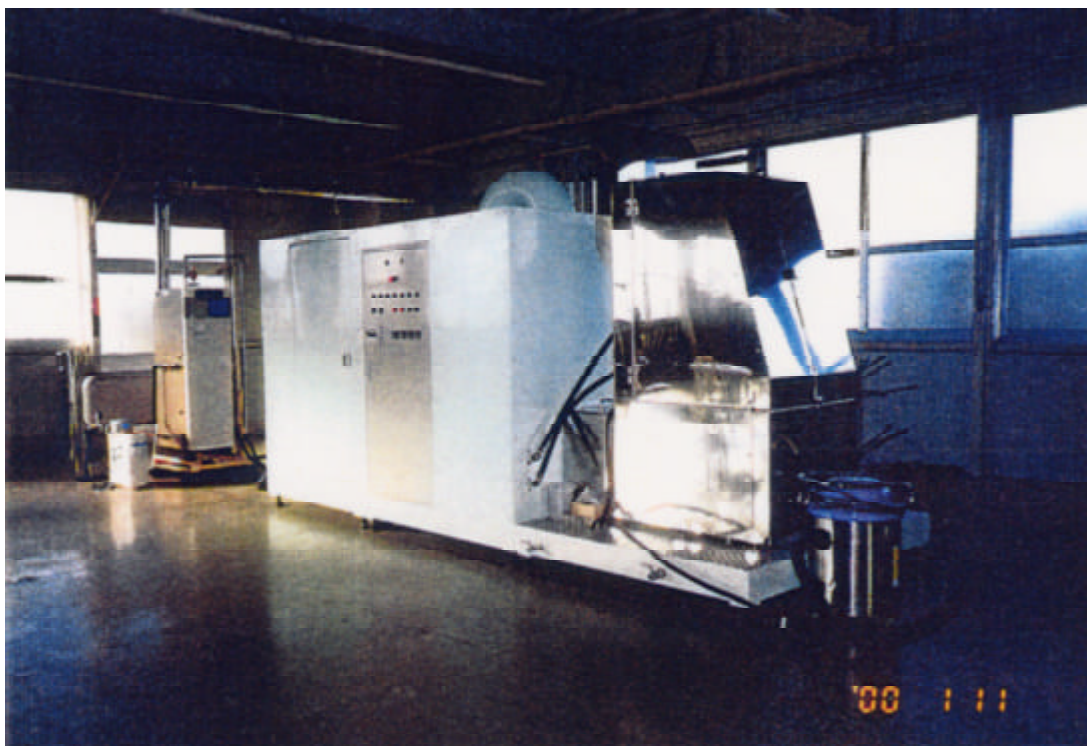


図 9 - 4 試作機の浴槽部概要

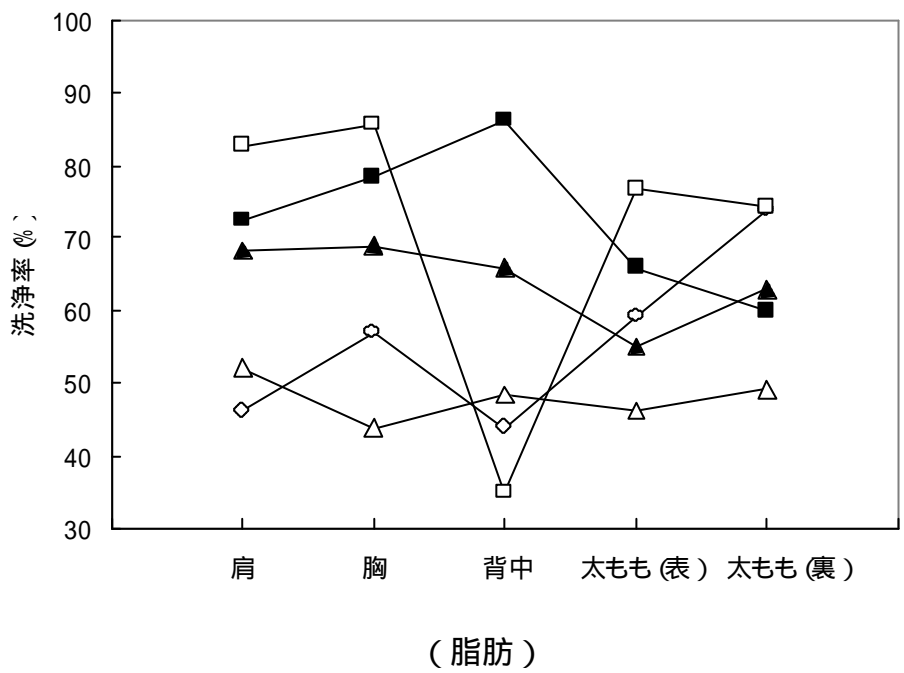
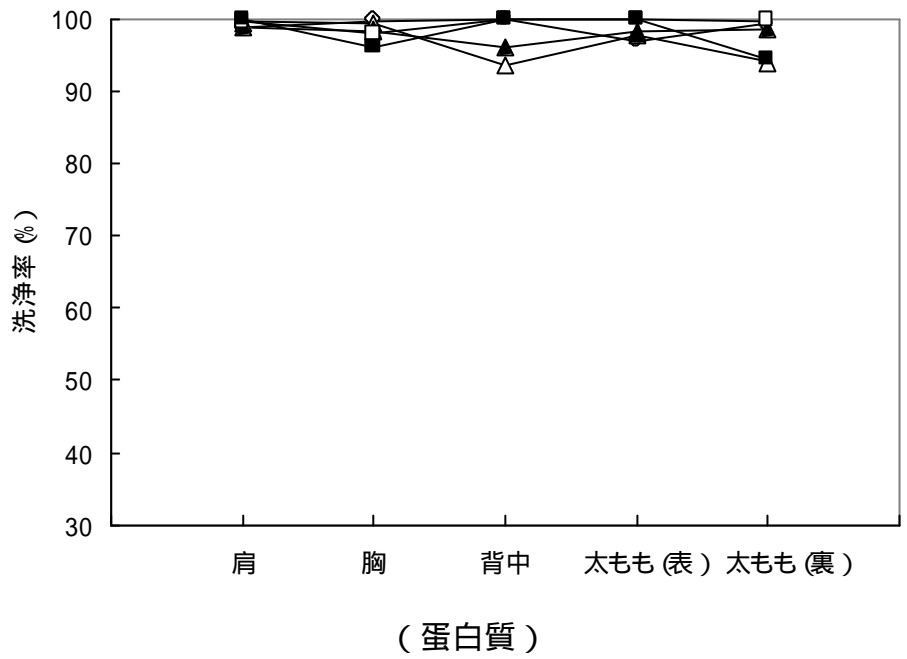


粒子噴流化身体洗浄装置



粒子噴流化身体洗浄装置浴槽内

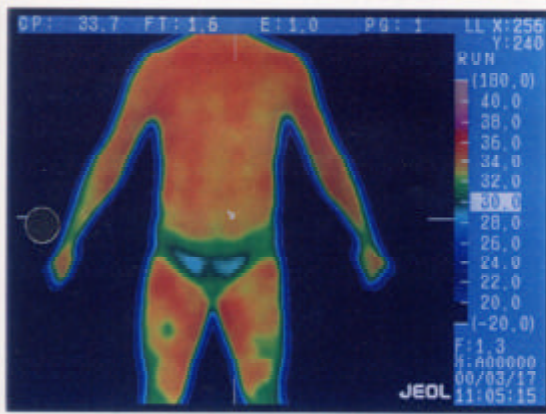
図 9 - 5 試作機全体及び浴槽部外観



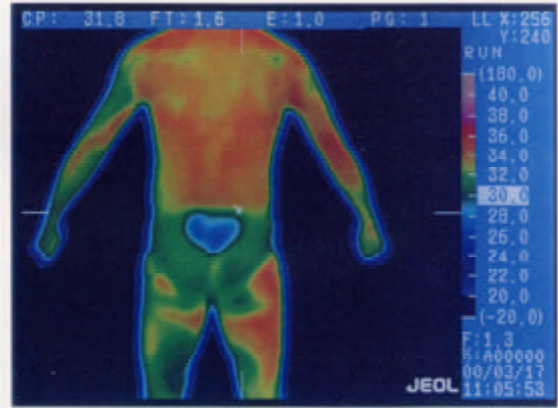
シャワー洗浄  
 噴流化洗浄、粒体4L、流量48m³/min  
 噴流化洗浄、粒体4L、流量57m³/min  
 噴流化洗浄、粒体6L、流量48m³/min  
 噴流化洗浄、粒体6L、流量57m³/min

図9 - 6 人体の各部所による洗浄率の違い



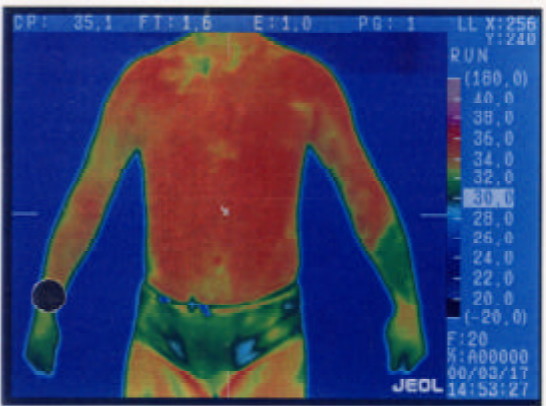


前

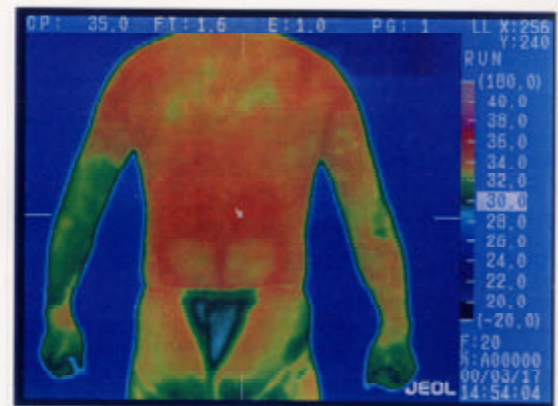


後

粒子噴流化式

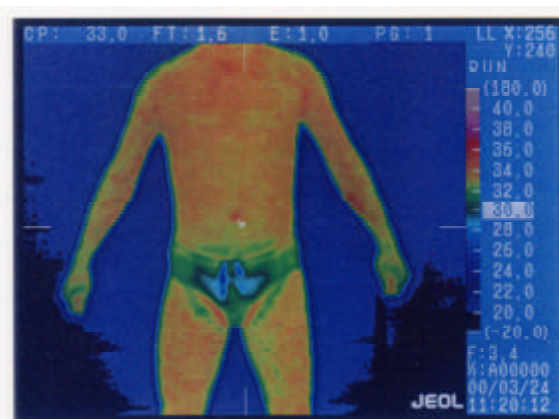


前



後

温シャワー



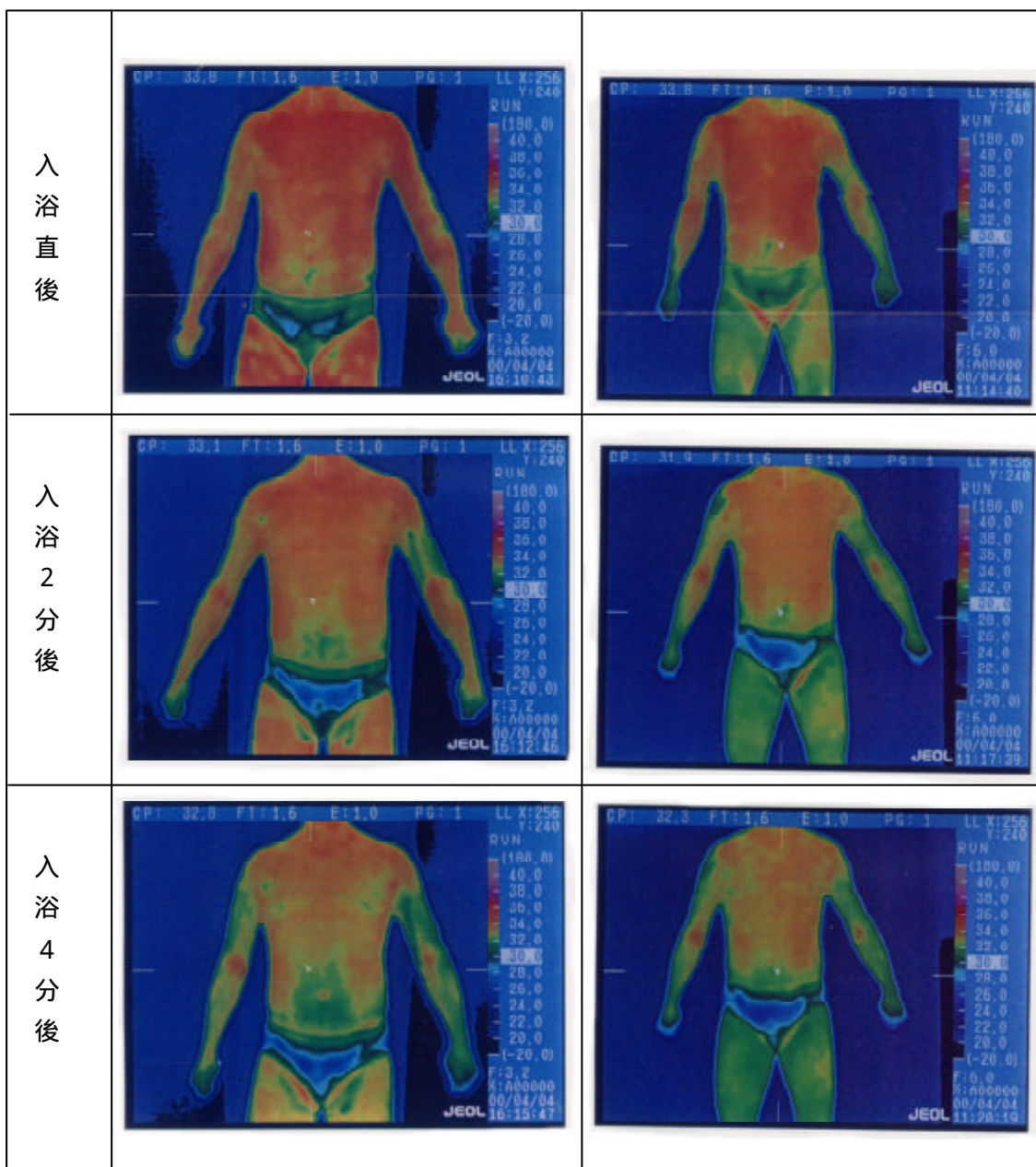
前



後

浴槽入浴

図 9 - 7 入浴後の表面体温結果



粒子噴流化式

温シャワー式

図9 - 8 入浴後の経過時間と表面温度

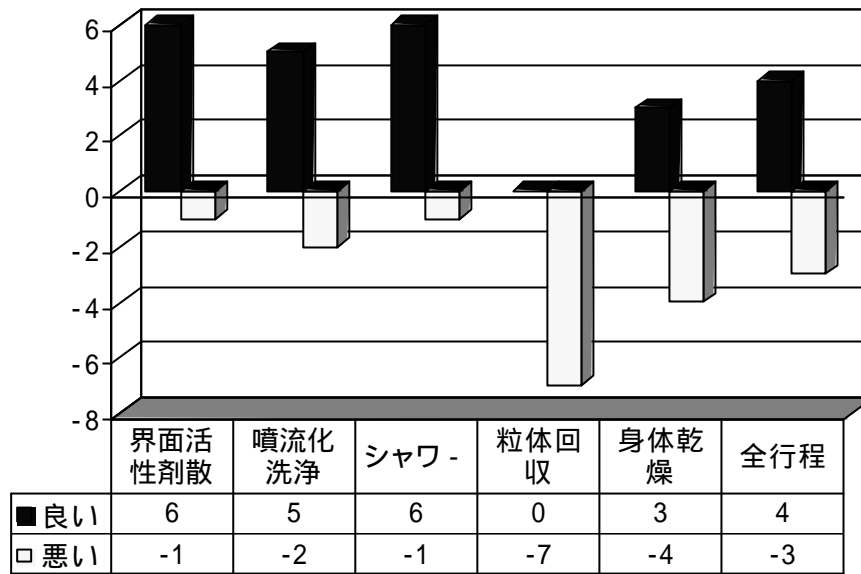


図 9 - 9 各工程の 2 段階評価の結果

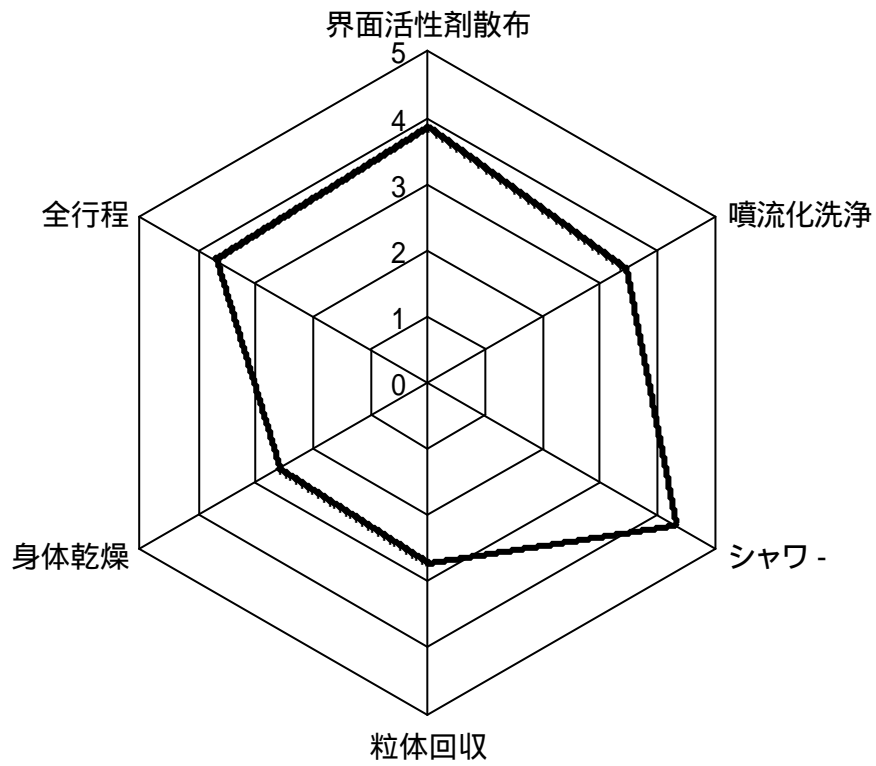


図 9 - 10 各工程の 5 段階評価の結果



## 第10章 結論

水噴流や空気噴流は多方面で利用されているものの、加工分野においては、加工量が小さいために応用範囲は限られている。しかし、単相噴流に研磨剤などの固体を混入させた混相流噴流では衝撃力が増加して加工量が飛躍的に上がる事や、固体の物性による加工特性が異なるため、応用範囲は広がる。本研究では、金属の表面加工に水噴流に研磨材を混入させた噴流を用いて均一な加工を目的に、また身体洗浄に空気噴流に比較的大きな粒体を混入させた混相流噴流を用いて、均一な洗浄方法について実験的に調べて以下の結論を得た。

### 10-1 2章から4章までのまとめ

高圧水にアブレシブを混入させたアブレシブウォ-タジェットを金属の表面加工に利用する場合、アブレシブノズルの摩耗が問題になる。ノズル摩耗が無く、表面加工に適したノズルとして、環状ノズルからヒントを得た、単独ノズル4個を組み合わせた4孔合流ノズルを開発し、その噴流特性、表面加工特性を調べて、以下の事が明らかになった。

2章では研磨材の平均粒径、合流角度、ノズルから合流点までの距離、スタンドオフ距離、試料への噴射角度などを変化させて、加工量、表面粗さへの影響を調べた結果、

- (1) 単独ノズルから合流点までは短く、合流角度は鋭角な方が、加工量は大きくなる。
- (2) 加工表面粗さは研磨材の平均粒径に左右され、おおよそ平均粒径の1/10になる。
- (3) 金属の加工状態から研磨材は噴流中に均一に混合されていると見なせる。
- (4) 加工量は合流点から測ったスタンドオフ距離が短い程大きい。また、研磨材粒径が大きい程加工量は大きくなる。

などの基本的な加工特性を把握した。

3章では低圧の合流噴流を用いて、合流点から下流の噴流軸上圧力分布、空気の容積割合などの合流噴流の特性を実験的に調べ、それらから研磨材の加速状況を解析および数値計算から求めて、合流噴流の加工特性の予測を行った。その結果

- (5) 噴流中心では合流点から数mmまでは、衝突により圧力の高い部分があり、それより下流では一定の割合で減速する噴流となる。
- (6) 合流噴流は空気を巻き込み、合流点付近では中心部に、下流になるにつれて噴流周辺に空気の容積割合が大きい噴流となる。
- (7) 研磨材の噴流中心での加速状態から、粒径が小さい程、短距離で水速度まで加速される。

などの噴流特性を明らかにした。

4章では、150MPaのポンプによる高圧の合流噴流に研磨材を混入させた混相流噴流で金属の表面加工特性を実験的に調べ、コンクリ-ト除去を想定した酸化スケ-ル除去と銀0-除去加工を行い以下の結果を得た。

- (8) 加工量は噴流圧力及び研磨材供給量に比例する。
- (9) 合流点直下の噴流は加工量は大きいものの、被加工材の硬度により加工量に差が見られる。それより下流では硬度の影響が無く、加工量は一定になる。これより、表

面加工に適した噴流である事が明らかになった。

(10) 表面加工の一例として酸化スケール除去に適用した結果、酸化スケールは均一に除去可能であり、スタンドオフ距離50mmでの加工が能率が良いことを明らかにした。

(11) 銀口 - 接合部の余分な銀口 - 除去加工は良好であった。

これら、金属の表面に付着した銀口 - 除去や、コンクリート除去を対象とした混相流噴流による加工では混入させる固体は硬いアブレシブを用いた。研磨材の衝突速度、衝突数が多い程、また衝突角度が小さい程加工量は大きくなる事を明らかにした。さらに、均一な加工を行うには噴流中での固体の分布が均一である事が重要であり、その方法として、固体は噴流中心に混入させる事が重要である事がわかった。

## 10 - 2 5章から9章までのまとめ

少子高齢化社会を向かえて、介護施設の現場から要望の高い介護労力低減を目的に、暖かい空気噴流に比較的大きな粒体を混入させて、人体に吹き付け、粒体の衝撃作用や摩擦作用で洗浄する方法によって、洗浄工程の自動化に取り組んできた。その中で、洗浄率に及ぼす粒体分布、衝突速度、衝突角度の影響や、均一洗浄方法、粒体物性の影響など、基礎的研究から実用スケールでの試作開発まで行い、以下の事が明らかになった。

5章では、噴流化が良好なポリスチレン球を用いて、噴流中の分布と洗浄率の関係を実験的に調べた結果、

(1) 洗浄率は粒体の分布と相関があり、粒体が多く当たる場所の洗浄率が高い。さらにポリスチレン球では5分間の洗浄で80%の洗浄率が得られ、本方式による十分な洗浄力がある事を明らかにした。

6章においては、粒体の噴流中での分布を均一にする方法と、粒体の衝突速度および衝突角度の洗浄効果を実験的に調べた。また、噴流中で粒体の衝突が少ない噴流において、粒体の軌跡の数値計算から、粒体の衝突数、衝突速度、衝突角度の影響のみ考慮した洗浄効果を予測を行い、以下の結果を得た。

(2) 噴流中の粒体の密度分布を一定にする方法として、質量流量比を増加させてノズル出口での粒体同士の衝突頻度を上げる事が有効である。

(3) 衝突速度が多い程、衝突角度が小さい程洗浄効果が高い。

(4) 粒体の噴流中での運動の数値計算からノズル出口において衝突頻度の少ない噴流での洗浄率の定性的予測が可能になった。

7章では、コアング効果で壁面噴流となる主噴流をコスト高にならないように、同じ空気噴流による制御噴流で揺動させる方法で均一かつ広範囲な洗浄実験を行い、その有効性を確認した。そして、

(5) 二次元の主噴流の左右に配置した制御用ノズルから、交互に噴流を吹き出し、コアング効果によって壁面噴流になった主噴流を揺動させて洗浄を行えば、均一かつ広範囲な洗浄が可能となった。

8章では、皮膚の弱い人を考慮した洗浄方法として、弾力性があり比重の軽い粒体での洗浄効果を実験的に調べた結果、

(6) 弾力性が大きいゲル球では衝突時に大きく変形して、接触面積が大きくなりポリス

チレン球よりも洗浄効果が大きい事がわかった。

(7) 噴流の揺動による均一な洗浄を行うには粒体の質量流量比は0.57以上が望ましいことがわかった。

9章では試作による洗浄実験および官能評価を行い次の結果を得た。

(8) 噴流化洗浄では温シャワーによる洗浄よりも高い洗浄効果が得られ、また浴槽入浴および温シャワーによる入浴よりも粒体噴流化式の方が、入浴後の保温効果が高いことが明らかになった。

(9) 当初の官能評価試験では人体乾燥工程、粒体回収工程が不評であったが、最も重要な粒体洗浄工程は好評であった。不評であった工程は容易に改善され、改善後は多くの人から高い評価が得られている。

柔らかい身体を対象に、空気噴流に大きな粒体を混入させた混相流噴流による洗浄効果と均一洗浄について調べた結果、洗浄率を上げるには、粒体の衝突数、衝突速度が大きい程、また衝突角度が小さい程洗浄率は高くなる事を明らかにした。また、弾力性のある粒体の方が弾力性の無い粒体よりも洗浄効果が高い事から、身体洗浄においては衝撃力以外の摩擦力などの物性値が洗浄に効果がある事が明らかになった。また均一な洗浄のため、噴流中の粒体密度を均一にする方法として、質量流量比を上げて噴流中で粒体同士の衝突を起こさせる事が有効となる。さらに、広範囲に均一洗浄を行うためには噴流を揺動させることが有効である事が明らかになった。

### 10-3 結果および考察

本研究での混相流噴流による金属の表面加工と身体洗浄では、いずれも表面に付着した物質の除去加工と見なす事ができる。ここで用いた混入固体の粒径は数 $\mu\text{m}$ から数 $\text{mm}$ まで、硬さはアルミナセラミックスの硬さから身体の皮膚程度までの広い範囲の固体を用いた。このような除去加工では通常、噴流に混入させる固体は除去物質より硬い物質が用いられる。それは混入させた固体の衝撃作用によって加工が進行するために、効率良く加工するには硬い方が有利となるからである。しかし、混入させる固体の物性(硬さ、比重、摩擦係数など)と使用流体、除去対象物性によって加工特性は異なる。これらをまとめる事は、流体と固体の効果的な選定や、除去加工以外の用途への利用へも広がることから重要である。

除去加工の場合、加工量は固体の衝突速度、衝突数、衝突角度の影響を受ける事は本研究結果からも明らかである。これらは混入させる物質と除去対象物との強度や硬度などの相対的な差によって、その程度は異なるものの、衝突速度、衝突数、衝突角度の影響を受ける事は変わらない。これら3つの要素の中で衝突数と衝突角度については使用する固体や流体の性質に依存するものではなく、固体の混入量や加工方法に依存する。噴流流体の影響を受ける固体の衝突速度の観点から見ると、銀口-除去のように付着物質の強度および母材との付着力が大きい場合は、除去は混入固体の衝撃作用によって進行するので混入させる固体は硬く、速度を大きくして固体による衝撃力を大きくする事が必要となる。そのため噴流流体は空気噴流よりも水噴流のように密度の大きな流体を用いる方が固体の推力が大きく、混入物質を短距離で最高速度まで加速できる事や、大きい固体、比重の大きな固体を加速できる点から有利となる。

一方、身体洗浄では、洗浄対象物に弾力性がある。弾力性がある対象物に硬い粒体を用いた場合にも 衝突速度、 衝突数、 衝突角度が除去量に影響を及ぼす事は本研究においても明らかになった。また、柔らかく弾力性のある粒体を用いれば衝撃力と共に衝突時の変形による接触面積の増大や摩擦力の増加などによる洗浄効果が大きい事を明らかにした。この事から、付着物質の強度や母材との付着力が弱い場合の除去加工には、対象物の硬さによらず、衝撃力よりも摩擦力などの固体表面物性や接触面積の増大効果など固体物性の効果を利用する方が有利となる。さらに、低速よりも高速で衝突させる方が固体の変形量が大きく加工能率を上られると考えられる。また、低速で衝突させれば衝撃力もさらに小さくなるので母材を痛めにくい特徴を有する。それゆえ、例えばガラス、陶器類、プラスチック等の壊れやすい対象物や農作物など母材表面を痛めずに付着物質のみ除去しなくてはならない場合には、衝撃力以外の摩擦力などによる洗浄効果が有利に働く。さらに、本研究では取り上げなかったが、金属などの硬い対象物を小さな弾力性のある固体で加工すれば、極小さな除去加工となるため鏡面加工が可能となり、応用範囲はさらに広がる。これらの事から除去対象物質の強度および母材との付着力が大きい場合には硬い固体を密度の大きな流体で高速に加速する方が、除去物質の付着力および母材強度が弱い場合や、母材表面を痛めないためには弾力性のある固体を密度の小さな流体による低速で用いる方が効果的と言える。

次に、混入固体の大きさから見ると、粒子径が大きい程、大きな衝撃力が得られ、付着物質の強度や付着強度が大きい除去加工や大きな加工量が要求される場合および広い面積の加工に有利となる。一方、粒子径が小さくなれば、衝撃力も小さくなるため付着物質の強度および付着力が小さな除去加工に利用される。そして、粒子径が小さい程、噴流の乱れに追従する運動を行う<sup>(1)</sup>事から固体は噴流中に均一に混在し、均一な加工が容易となる。均一に混在する性質を利用して、電解液噴流に混入させて対象物に噴射させながら電解加工を併用すると電気抵抗が均質化され電解電流が加工面全体に均一に流れ、さらに粒子による切削作用も働き表面粗さを小さくできる利点が生まれる<sup>(2)</sup>。このように、大きい粒子は加工量が大きいため密度の大きい流体で高速まで加速して付着強度の大きな物質の除去に、小さな粒子は付着強度の小さな除去加工や均一加工、鏡面加工、またノズル径を小さくできるため微細加工などにも用いる事ができる。

均一加工、均一洗浄に着目すれば、水噴流、空気噴流共に噴流中での分布と相関があるため、いかに均一に混入させるかが重要となる。ノズルなどの摩耗を考慮するならば、噴流外部から固体を混入させなくてはならなくなる。そのため、均一に噴流中に混入させるには 噴流中心に混入させる。 噴流中である程度、衝突を起こさせるような濃度で混入させる。 粒子径を小さくする事が有効であると考えられる。

固体の衝突による効果は表面のみならず内部にも影響を与える。身体洗浄において、粒体に要求される特性は洗浄力とマッサ - ジ効果である。柔らかい粒体では衝撃力が小さいので、マッサ - ジ効果は小さく、血行促進、疲労回復などの入浴効果が少ないと考えられる。マッサ - ジ効果は摩擦力よりも衝撃力によって得られるので、硬い粒体の方がマッサ - ジ効果が大きい。しかし、硬い粒体は皮膚の弱い人には適用しにくい事がある。そのため、洗浄力や、マッサ - ジ効果などの総合的な効果と、入浴者の皮膚の状態などを考慮して粒体を選定しなくてはならない。工業的にはショットピ - ニング処理のように空気や水

噴流に鋼球やガラスの固体を混入させて金属表面に衝突させて表面に圧縮の残留応力を付加させて、金属疲労の寿命を延ばす処理技術にも利用されている。

次に、混相流噴流の除去加工以外の応用として例を上げれば、高温のガス噴流やプラズマ噴流にセラミックスや合金粉末などを混入させて、高温中を通過途中で溶融させて対象物に衝突付着させる溶射方法<sup>(3)</sup>や、真空チャンバ - 内で不活性ガス噴流にセラミックスや金属粒子を混入させて混相流噴流として対象物に衝突させて常温接合させる技術<sup>(4)</sup>、さらには混入固体の材質を徐々に変化させて傾斜機能性材料の創製<sup>(5)</sup>など新しい技術に混相流噴流が応用されている。

以上のように、噴流に混入させる固体の大きさや硬さなどの物性に着目すれば、柔らかい固体や、小さな固体を用いれば衝撃力が小さく、除去量が少ないので鏡面加工や微細加工への応用、また柔らかい物、壊れやすい物までを対象にできるため応用範囲が広がる。また加工以外では、流体の粘性や電気特性、化学反応、熱反応などと固体の特性をうまく考慮すれば混相流噴流による新たな利用、応用が期待され、新しい技術が生まれる可能性がある。

## 参考文献

- (1) 社河内敏彦、加藤智宏、安藤俊剛、榊原寛朗：微粒子を含む固気二層環状噴流の流動特性とその制御、日本機学会論文集(B) 64巻627号(1998)3616
- (2) 本川高男、南典明、川北浩久、田村光政：環状噴流の表面加工への応用、噴流工学、Vol.12、No.3(1995)29-35
- (3) 大谷南海男：金属表面工学、日刊工業新聞社、(1983)207
- (4) 一ノ瀬昇、尾崎義治、加賀誠一郎：超微粒子技術入門、オム社(1988)109
- (5) 鈴木朝夫編集：金属材料活用事典、産業調査会 事典出版センター、(2000)897

## 謝 辞

本研究の水噴流の応用においては、平成元年度の「加速的技術開発支援事業」の委託研究を受け、産学官で構成された「高知県超精密加工共同開発協議会」の活動の一部として取り組んできた事から始まり、空気噴流の応用では平成10、11年度の中小企業総合事業団による「中小企業創造基盤技術研究事業」委託研究及び、高知県研究開発補助金研究として産学官で取り組んできた事までの12年間の研究をまとめたものであります。この間、高知工科大学知能機械システム工学科教授横川明先生および前高知大学農学部教授山崎堯右先生には、一方ならぬご指導、ご鞭撻をたまわりました。ここに、衷心より感謝申し上げます。

また「高知県超精密加工共同開発協議会」の企業メンバーでありました、宇治電化学工業(株)、兼松エンジニアリング(株)、高知精巧メッキ(株)、三共コンクリート(株)、(有)坂本鉄工所、(株)ミロク製作所、(株)橋原ミロク、睦月電機(株)の方々には応用実験のための貴重な試料を提供していただきました。また、協議会の運営および研究開発でご指導いただきました元高知県工業技術センター所長の田内一成氏、また、実験にご協力いただきました、現荏原製作所の濱田聡美さん、高知県工業技術センターの南典昭氏、川北浩久氏、田村光政氏、伊野部健吉氏、島本悟氏、また平成3年に意志なかばで急逝されました溝淵紀夫氏に感謝申し上げます。さらに、4孔合流ノズルの製作に当たり、ご協力いただきました(株)垣内の垣内保会長に感謝申し上げます。

空気噴流の応用におきましては、兼松エンジニアリング(株)開発本部浜口卓三部長、北条英二次長、久米信明課長をはじめ、山中義也係長、松村次展氏には実験装置の提供から、研究に対してご指導、ご協力いただきました。ここに、心より感謝申し上げます。

また実験にご協力いただきました、高知工科大学学生、山崎敬一氏、光森琢真氏、園山司氏、中西良太氏、水口拓也氏、坂本顕史氏に感謝申し上げます。さらに、粒体の材料を提供していただきました、(株)コスモ計器殿にお礼申し上げます。