

5. 木工面取り盤の集塵装置の開発

木 下 鈞 一

New models of wood-shavings collectors for the molding machine with high speed single spindle

by Kinichi KINOSHITA

Effective collector of wood-shavings or dusts has not yet been developed for the molding machines with high speed single-spindles. An obstacle is that works to chamfer and plane the curved surfaces of boards are formed with the machine. This paper describes two models of collecting wood shavings and dusts by purging jet-air and suction air.

The model are shown Fig. 5-1 (Type A) and Fig. 5-7 (Type B).

Evaluating experiments on efficiency of the collecting models were carried out on practical scale, and the computational simulations by the Monte-Carlo method, with aid of experimental data were found to give an estimate of movement of wood shavings on the molder and of efficiency of collecting model.

From the results of study, concluded recommendations for the new models of collectors are as follows; For the type A model,

- i) Dimensions of the outlet of jetting duct and the inlet of collector should be coincident with the scale values in Fig-1.
- ii) Average air velocities at the outlet and the inlet should be 10 and more than 15 m/s respectively.
- iii) The center of the outlet of jetting air should be located at $L=36\sim 40$ cm and $H=13$ cm (see Fig. 5-1).
- iv) Angle φ between the axis of purging air-jet and horizontal surface of the molder should be 30 degree.

and for the type B model,

- i) Dimension of width of the inlet at the table of the molding machine should be 6 cm.
- ii) Average air velocity at the inlet should be more than four tenth as fast as the revolution speed of plane cutter.
- iii) The center of the inlet should be positioned at $L=30$ cm (see Fig. 5-7).
- iv) The purging air jet may be unnecessary.

5.1 まえがき

各種木工機械における集塵装置は一・二の機種を除きよく普及している。しかし、面取り盤や横切り丸鋸盤等では集塵装置が使用されないまま作業が行われている例が見受けられる。面取り盤の場合、直線材加工では、定規と一体となった集塵フードが用意されていて問題はないが、曲面加工のとき、この定規を取り外すため、集塵フードも取り外さなければならない。このため、曲面加工のときは、集塵装置を使用しない状態で作業が行われることになる。

本報では、この面取り木工盤の曲面加工時における集塵方法を2通り考案したものを示している。第1の方法は現在使用されている機械を改造（フード等取り付け用孔等は別）しないで集塵用吸入フードと空気吹き出しダクトを機械に取り付ける方法で、これをAタイプの装置とする。第2の方法は作業盤に集塵用吸入口を設けることのできる場合又は新たに吸入口を設けた機械が製造される場合に行う方法でこれをBタイプの集塵装置とする。

本研究は、これら2つの型の集塵方法に対し、カッターの回転中心から吹き出し口、吸入口までの距離、これらの開口面の開口寸法、空気の流出入速度及び切削方法等と集塵効率との関係を実験によって調べた。とくに、Bタイプのものについては、実験によって得たデータをもとにして、切削屑の運動についてモンテ・カルロ法によるコンピュータ・シミュレーションを実施した。これらの結果から、面取り木工盤の集塵方法について実用に供し得る資料が得られた。

5.2 Aタイプの集塵装置の集塵効率について

5.2.1 Aタイプの集塵装置の概要

実験に先立ち、吹き出しダクト、吸入フードの形状寸法等について、本報に示す他に2種類ほど変えたものを試作し、これらを含めて予備実験を行って集塵効率を比較した。そのうち比較的良好なもの一種を選択したものがFig. 5-1に示すものである。

同図中Aが吹き出しダクトで、開口寸法は15.2cm×8.5cmで、送風能力が取得静圧125mAq、最大流量25m³/min、出力0.75KWのファンに内径12.5cmのダク

トホースで接続している。またダクトホースの中間には流量抵抗係数0.7のオリフィスをはさんで、流量を計測できるようにしている。更に作業盤に対し、20~60°の角度（吹き出し角度φ）で吹きつけられるようにした。

同図中、B部が吸入フードで、開口寸法は24.5cm×10.5cmでダクトホースにより、バッグフィルター（3相、2.2KW、取得静圧200mAq、最大流量40m³/min）に接続している。

この吸入フードの位置は作業の障害とならない範囲で、できるだけ切削点に近い方が好ましい。実際の作業状況から、Fig. 5-1において示す切削角度ψは最大限±25°の範囲で使用されるものとするれば、同図に示

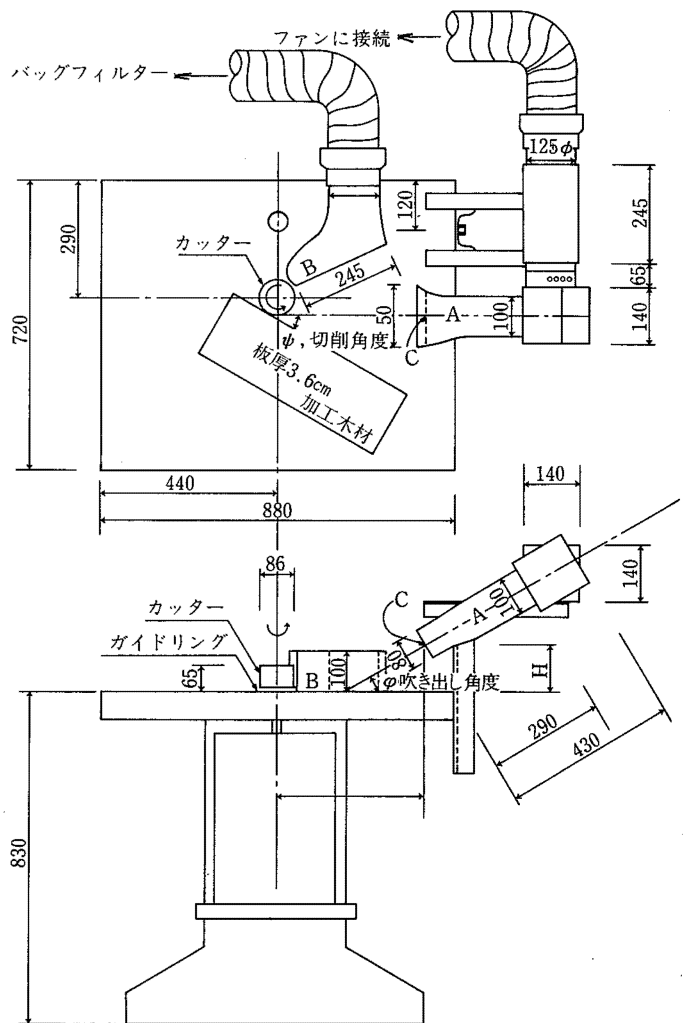


Fig. 5-1 Experimental apparatus for efficiency of wood shavings collector, type A
Aタイプの集塵方法の実験装置

す位置が、ほぼ限界と思われる。

5.2.2 集塵効率についての実験

5.2.2.1 実験の方法

1) 使用した試材と切削方法

実験に使用した木材はスプルースで、十分に乾燥したもので、比重は数個のサンプルから、平均0.43であった。材の厚さは3.6cmで板割に挽いた直線材を使用した。

また、切削屑の重量は、木材の切削速度（木材を切削加工する速度を切削速度と呼ぶことにする。）、切削深さ、カッターの回転数、材の比重等によって変る。したがって、カッターから飛散したときの運動状態も異なることが予想される。このため、実験条件は次のようにした。

まず切削深さについては、Fig. 5-2に示すような2本のねじ付きシャフト（8.0φ、ピッチ1.25mm）を回転させることによって容易に所定の深さに調整できるような送材装置を作り、一連の実験で、切削深さは全て2.5mmとした。加工速度については、手動送りとしたため正確な定速度とすることはできなかった。およその加工速度は、試材の長さを全て50cmとし、切削に要した時間より推定すると約5.5~6.5cm/sである。切削実験作業者は、全て同一作業者が行い、加工速度にむらのないように留意し、ほぼ上記の範囲の加工速度で実験した。上記の加工速度は木工作业場での切削速度を参考に決定した。

次にFig. 5-1に示す切削角度 ψ は、 -7.5° 、 0° 、 10° 、 20° 、 30° に変えた。これは曲面加工の場合を想定したものである。

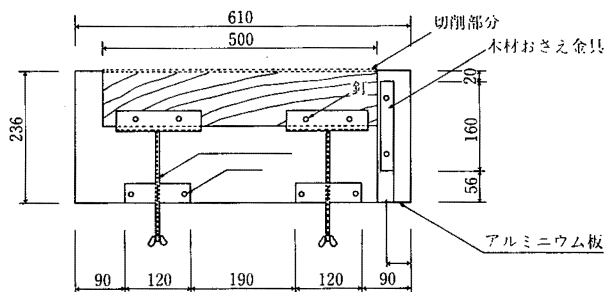


Fig. 5-2 Holder of wood board in planing
送材装置

カッターの回転数は5000r.p.mと10000r.p.mの2通りである。カッターは回転ブロックに4枚の刃を取り付けたもので、カッターの回転中心から刃先までの距離は43mm、刃の高さは60mmで、刃の最下面と作業盤面との間には厚さ5mmのガイドリングをはさんでいる。

2) 吹き出しダクト及び吸入フードの開口面での平均流速

吹き出しダクト及び吸入フードの開口面の流速の概略値を簡易型熱線風速計で計った。吹き出しダクトの場合には開口面で均等開隔で48点、吸入フードの場合には55点、いずれもカッターが回転している状態で行った。この結果、吹き出し及び吸入開口面で必ずしも均等な流速分布とならなかったが、実験ではこの流速分布の状態で行った。また、5000r.p.mと10000r.p.mの場合では両開口面の流速分布の状態はほぼ同程度であった。10000r.p.mの場合の流速分布の一例をFig. 5-3

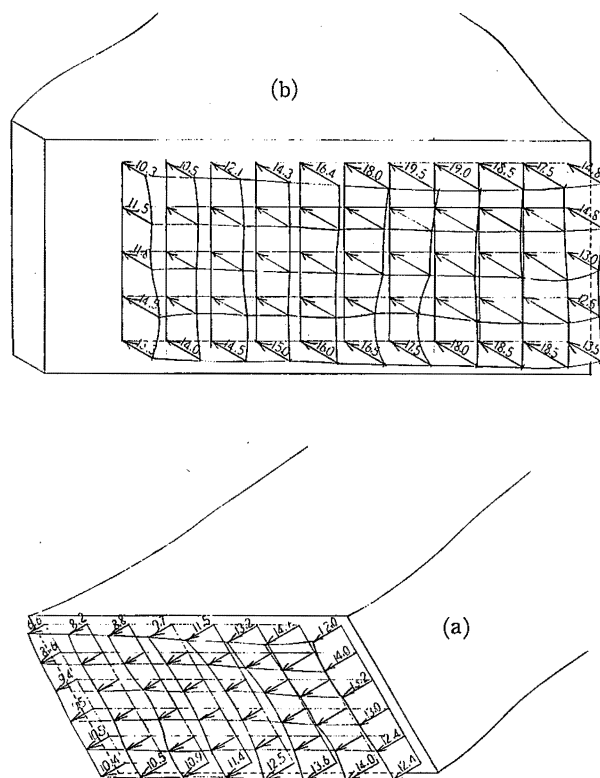


Fig. 5-3 Distribution of air jet velocity at outlet (a) and of suction velocity at in-let (b)
吹き出し口及び吸入口における流速分布

に示す。集塵効率の実験では吸入フード開口面の平均流速 V_{IN} を15.1m/s, 吹き出しダクトの開口面の平均流速 V_{OUT} を6.4, 8.3, 10.4, 12.5m/s の4段階とした。

3) 吹き出しダクトの位置及び水平面に対する吹き出し角度 ϕ

カッターの回転中心軸からの距離及び吹き出し角度を変え、予備的な実験をした結果、集塵効率についての実験の対象とすべき範囲は、ダクトの開口中心点 Fig. 5-1のC点)とカッターの回転軸からの水平距離Lを約25~40cm, 同点と作業盤からの高さHは13cm前後, 吹き出し角度 ϕ を25~40°に絞り、さらに、実験の回数を少なくするため、集塵効率を求める実験ではダクトの開口中心と水平距離Lを36.6, 37.2及び40.0cm, 高さHを13.0cm, 吹き出し角度 ϕ を25, 30及び40°とした。

4) 集塵効率について

まず、集塵装置を停止の状態では切削し、機械周辺に飛散した切削屑を集め、これを20mgの感度の天秤で秤量する。数回繰り返し、平均値を求め、これを切削全量とする。次に集塵装置を稼動状態にして、上記の条件の各組み合わせで2回つづけて切削実験し、吸入フード内に吸入されなかった切削屑を掃き集めて秤量し、その1/2を切削全量から差し引いて集塵量を求め、これと切削全量の重量比より集塵効率を求め、百分率で表わした。ただし局部的に材質が変化する場合には比重が変わるため、一定材質での実験とは言えないが、一定材質での実験とみなした。また、機械周辺にビニールシートを張り廻らし、切削屑を集め易いようにしたが、集塵効率の高い条件のときは、ほぼ完全に集め得た。しかし、効率の低い場合には完全に集めきれず、やや精度が落ちるものと思われる。なお、微粉塵となって室内空气中に逸散した切削屑は、ダストに近く、重量はきわめて微小であるものとして無視した。

Table 5.1 Results of efficiency of wood shavings collection
集塵効率の結果

吹吹吹吹速度 $V_{OUT}(m/s)$	切削角度 $\psi(^{\circ})$	集 塵 効 率 %							
		$\phi = 25^{\circ}$ L = 36.6cm H = 13.0cm		$\phi = 30^{\circ}$ L = 36.6cm H = 13.0cm		$\phi = 30^{\circ}$ L = 40cm H = 13cm		$\phi = 40^{\circ}$ L = 37.2cm H = 13.4cm	
		n = 5000	n = 10000	n = 5000	n = 10000	n = 5000	n = 10000	n = 5000	n = 10000
6.4	- 7.5	94.9	70.9	96.4	95.5	—	90.0	95.0	97.5
	0	83.2	39.3	93.3	75.6	—	80.0	87.2	75.8
	10	81.6	28.2	77.3	58.1	—	60.0	72.1	59.8
	20	64.4	31.0	69.7	43.1	—	56.0	66.1	45.8
	30	70.0	16.0	70.3	25.4	—	50.0	62.4	30.0
8.3	- 7.5	97.1	81.4	96.4	97.4	—	94.0	96.3	97.5
	0	89.2	46.8	94.4	93.7	—	83.5	92.4	87.1
	10	90.1	34.9	95.3	82.5	—	64.9	77.9	76.8
	20	84.0	32.8	88.0	77.6	—	69.4	75.8	67.5
	30	71.8	27.5	71.7	55.8	—	53.9	71.5	62.5
10.4	- 7.5	95.9	78.6	96.4	96.9	—	95.8	96.3	95.8
	0	94.0	56.1	95.4	95.8	—	95.0	93.6	84.1
	10	90.0	45.1	94.4	93.4	—	86.4	90.3	83.6
	20	80.6	45.1	87.6	88.9	—	85.0	87.7	86.6
	30	72.3	39.5	73.2	63.0	—	62.3	76.7	73.1
12.5	- 7.5	96.0	86.2	98.9	94.8	—	97.8	97.5	98.0
	0	94.3	65.0	92.9	83.5	—	97.9	91.8	92.9
	10	93.4	55.4	93.4	81.9	—	95.6	90.0	92.6
	20	83.0	55.9	90.0	77.9	—	91.4	88.2	87.5
	30	71.1	52.4	68.9	71.8	—	59.2	69.2	74.2

5.2.3 実験結果

実験の結果を Table 5-1 に示す。これをもとに等効率の分布図を描いたものを Fig. 5-4 ~ Fig. 5-5 に示す。実験条件である吹き出し角度 ϕ 、吹き出しダクト開口の中心位置 L 及び H 、カッター回転数 n をそれぞれ図中に記入している。

まず、 $n = 10000 \text{ r.p.m}$ の場合 Fig. 5-4(a) ~ (d) につい

てみると、吹き出し角度 ϕ が 25° のもの(a)は他のものに比し著しく集塵効果が劣る。これはカッターから飛散した切削屑を逆方向に吹き飛ばす作用が強すぎるためである。他の3図についても切削角度 ϕ が 20° をこえ、 V_{OUT} が大きい場合にもこのような傾向がある (Fig. 5-6(a))。また、 V_{OUT} が 6.4 m/s 程度になると、カッターから飛散した切削屑は吹き出し気流の中を突き切って作業盤の外に飛散し、吸入口の方に流れにくくなる傾

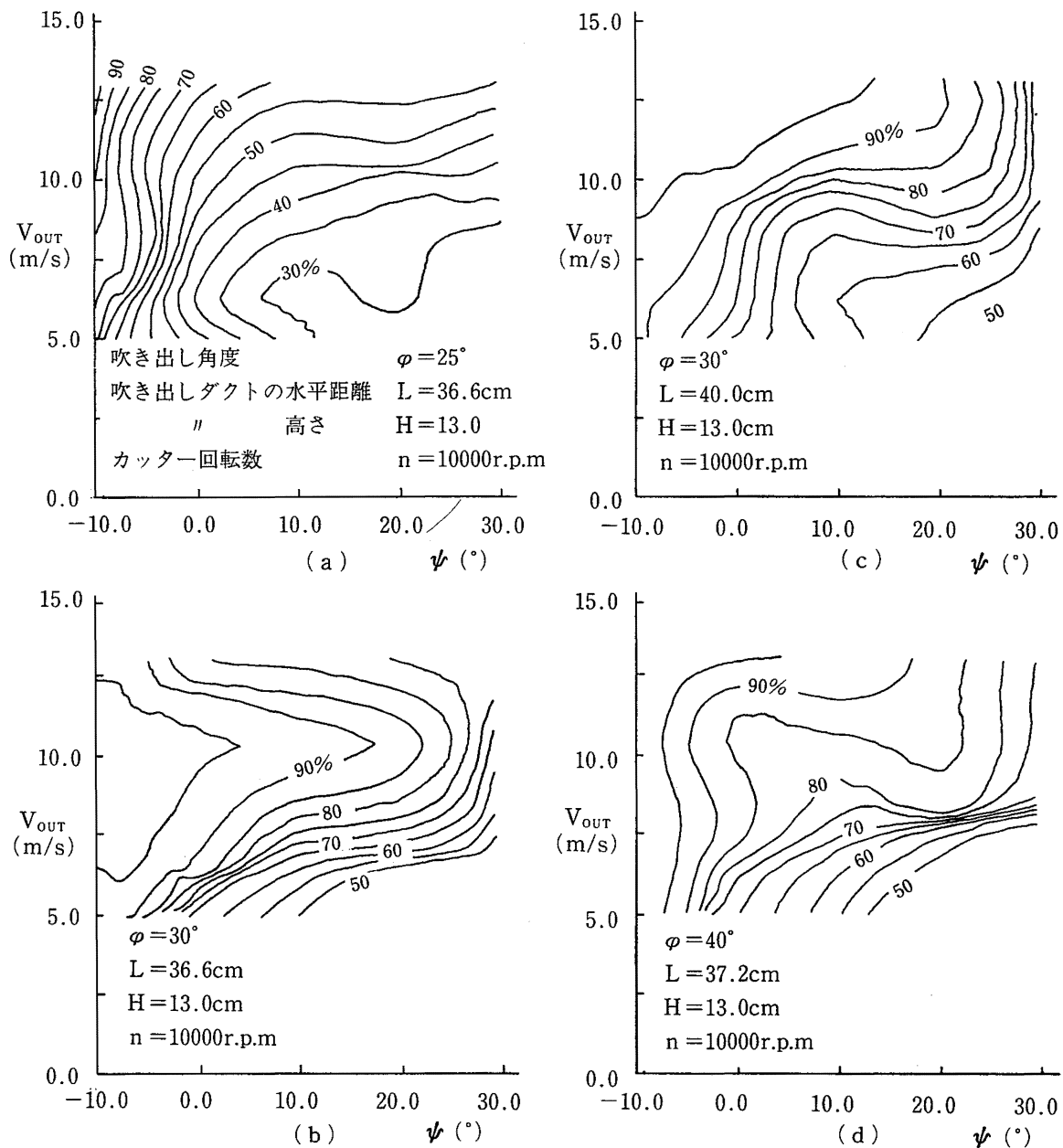


Fig. 5-4 Contour maps of efficiency of shavings collection. ψ ; cutting angle, V_{OUT} ; average velocity at out-let
等集塵効率線 ($n = 10000 \text{ r.p.m}$, $V_{\text{IN}} = 15.1 \text{ m/s}$)

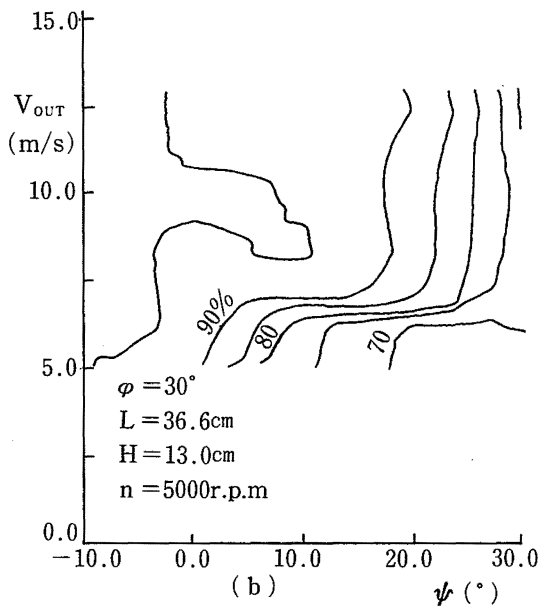
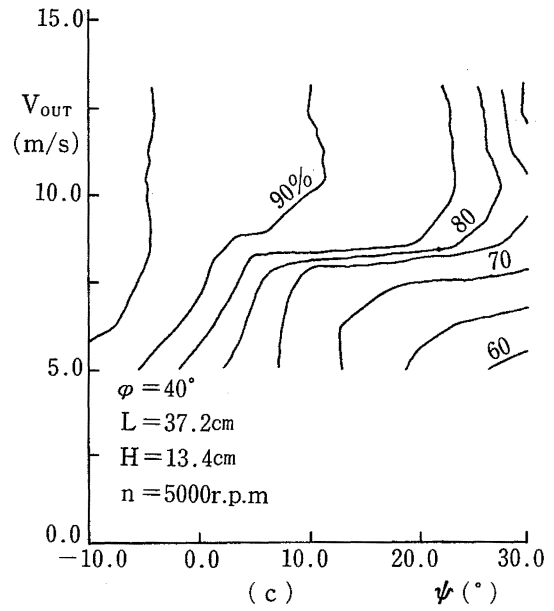
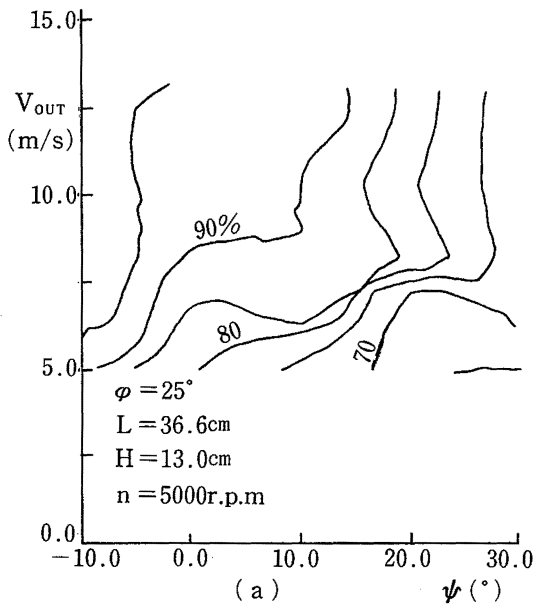


Fig. 5-5 Contour maps of efficiency of shavings collection

等集塵効率線 ($n=5000$ r.p.m,
 $V_{IN}=15.1\text{m/s}$)

向があり、集塵効率もきわめて劣るようになる。よって吹き出し流速はあまり大きくてもよくなく、また小さすぎても効果を減ずる。Fig. 5-4(b)~(d)から約10m/s程度が適当な流速のように思われる。なお集塵効率の高い場合の切削屑の流れの概略図をFig. 5-6(b)に示す。

次に回転数 n が5000r.p.mの場合 (Fig. 5-5(a)~(c))には、カッターの刃面の速度が1/2になるため切削屑の速度が小さくなり集塵効率は前者よりきわめてよくなる。しかし、切削角度 ψ が大きくなると同様に集塵効率は落ちることがわかった。

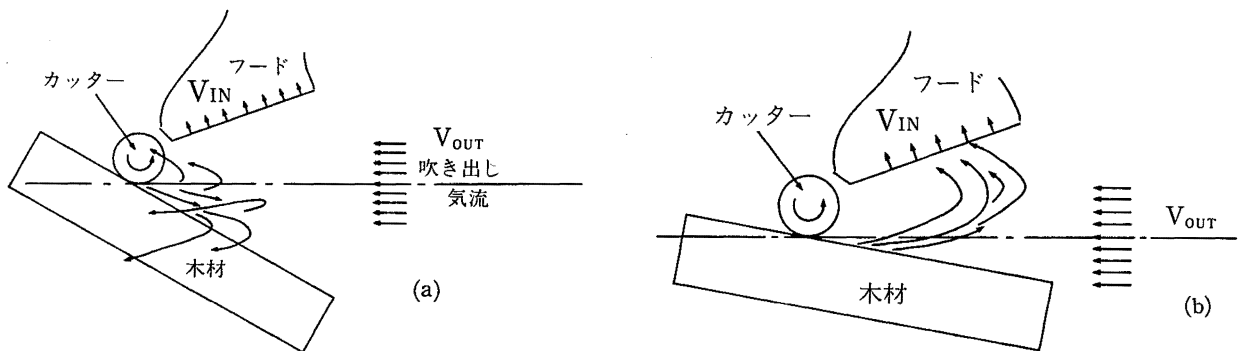


Fig. 5-6 (a) Loci of wood shavings in unsuitable values of V_{IN} , ϕ
 (b) " " in suitable values of V_{IN} , ϕ
 V_{IN} , ϕ が不適切なときの切削屑の軌跡(a), と適切なときの軌跡(b)

これらの図から判断して、切削角度 ψ が $20 \sim 10^\circ$ 程度で、吹き出しダクトの開口の中心位置 L は $36 \sim 40$ cm, H は 13 cm, 吹き出し角度 φ は 30° , 吹き出し平均流速 V_{OUT} は 10 m/s 程度, 吸入平均流速 V_{IN} は 15 m/s 程度の条件を与えれば, 90% 以上の集塵効率を得られ, 実用に供することが出来るものと思われる。ただし, 現実に木工場では, 加工材の材質, 切削速度, 切削深さ, 切削角度など, 本実験で設定した実験条件よりも甚しくずれる場合も想定される。このため, 吸入流速を上記より大きくすることが出来るような余力のある吸入ファンが望ましい。

また, この実験では作業性については, あまり考慮を払わなかった。現実の作業を考えれば, Fig. 5-1 に見られるように吹き出しダクトを支える台は作業の障害になることは予想される。よってこの方式の集塵装置が実用に供されるときには, 障害とならないように, この支持台の位置をずらす必要がある。

さらに, 吹き出しダクトの形状も流体力学的に見て, かなり抵抗の大きい形になっているので, 流れに対して圧力損失の少ないものにするなどの改良が必要である。

5.3 Bタイプの集塵装置の集塵効率について

5.3.1 研究の概要

Aタイプの集塵方法は, 飛び出した切削屑を逆方向の噴流で押しもどしながら吸入口で吸込もうとする発想であった。Bタイプの集塵方法は, 飛び出した切削屑を無理に押し止めるのではなく, プッシュプル型のエヤーカーテンに似た集塵方法で, 切削屑を作業盤下に吸入させようとするものである。その方法の概要は Fig. 5-7 に示す。本研究では, はじめに実験を行って集塵効率を求めた後, 同様な条件でモンテ・カルロ法によるコンピュータ・シミュレーションを行い, 未定係数などを実験値より定める。この係数等を用い, 実験を実施しなかった条件のときの集塵効率について, シミュレーションを繰り返して検討したものである。

記号

R_0 ; 長さの代表値で, カッターの回転中心から刃先までの距離 (4.5 cm)
 $V_{\theta 0}$; 速度の代表値で, カッターの周速

度 (回転数 10000 r.p.m のとき, 47.12 m/s)

R, θ, Z ; 円筒座標 (それぞれ半径方向, 半径に直角な方向, 高さ方向である。 θ は rad で表す。)
 V_R, V_θ, V_Z ; R, θ, Z 方向速度
 v_R, v_θ, v_Z ; 切削屑 (仮想球体) のそれぞれ R, θ, Z 方向の速度
 q ; 乱流エネルギー
 ε ; 粘性逸散率
 π ; 静圧, $\pi = P + 2q/3$
 ν ; 動粘性係数
 ν_t, ν_e ; 渦動粘性係数, $\nu_e = \nu + \nu_t$
 $V_{Z,OUT}$; 吹き出し口における平均気流速度
 $V_{Z,IN}$; 吸入口における平均気流速度
 T ; 流体運動解析における時間
 t ; 球体運動解析における時間
 ρ ; 空気の密度
 ρ_w ; 切削屑を球体と仮想したときの密度
 m ; 同上球体の質量
 $\alpha, \bar{\alpha}, \sigma_\alpha$; 切削屑を球体と仮想したときの補正係数, 同平均値, 同標準偏差
 C_D ; 完全球体の抗力係数
 r, \bar{r}, σ_r ; 仮想球体の半径, 同平均値, 同標準偏差
 ψ ; 切削角度, 角度のとり方は θ と逆まわりにとる
 A ; 同上球体の抗力の基準面積
 \bar{w}, σ_w ; 切削屑 1 個の平均重量及び標準偏差
 E ; 集塵効率
 L ; カッターの回転中心から吸入口の中心までの距離
 d_{IN}, d_{OUT} ; 吸入口の中, 吹き出し口の中
 H ; 吹き出し口の作業盤からの高さ
 h, h_{max}, h_{min} ; カッターから切削屑が飛び出すときの初期高さ, 同最大値, 同最小値

上記の変数及び定数は, 一部を除いて有次元であるが, 無次元表示にするときは, 全てダッシュ記号'を付すものとする。

この他, 切削速度の遅速 2 通り (3 cm/s, 8 cm/s)

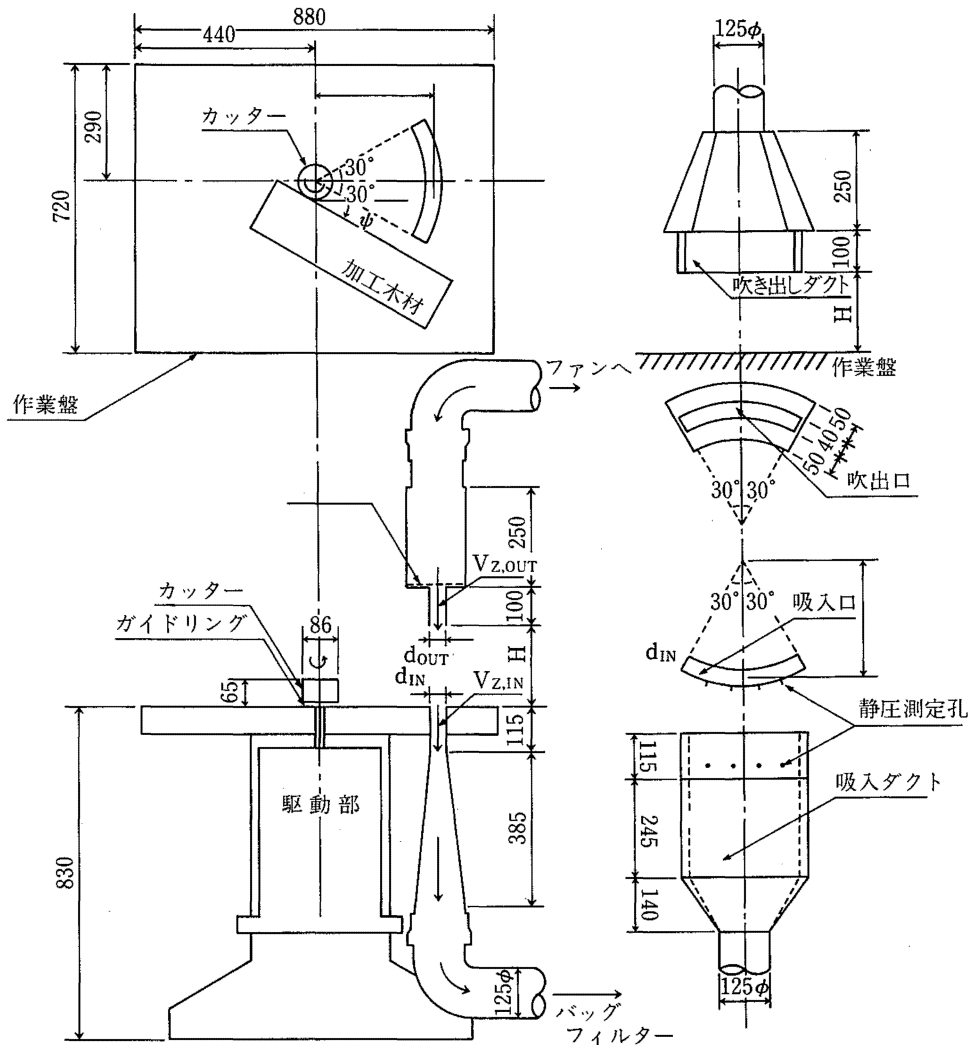


Fig. 5-7 Experimental apparatus for efficiency of wood shavings collector, type B
Bタイプの集塵方法の実験装置

に対する区別はそれぞれ、添字S, Fを付すことにする。

5.3.2 集塵効率についての実験

5.3.2.1 実験の方法

1) 使用した供試材と切削方法

ほぼAタイプの場合と同じとした。ただし、実験を簡略化するため、切削角度 ψ は 20° 、カッターの回転数は1000r.p.mのみとし、その他の実験条件の組み合わせ数も少くした。

また、予備実験を行って、切削屑の運動や集塵効果などを観察してみると、この集塵方法はAタイプのそれよりも、加工材の切削速度によって影響を受けやすいことがわかった。よって切削速度を遅速2通りに分け、遅い方は平均で約3 cm/s、速い方は平均で約8 cm/sとした。この速度もAタイプの場合と同様、50cmの材料の切削に要した時間から算出したものである。一般の作業場における切削速度はおよそ上記の範囲内に入っているものと思われる。

2) 吹き出し口及び吸入口の平均流速

吹き出し側の流速はGTO型サイリスターを使用したインバーターによって、平均流速 $V_{z,OUT}$ を0.0~14.0 m/sの間で4段階に設定する。また、吸入側は管路にダンパーを挿入し、このダンパーの調整によって、 $V_{z,IN}$ を10.0~20.0m/sの間で4段階に設定した。実験は、これらの流速の組み合わせの場合について行った。

3) 集塵効率について

集塵の方法や集塵効率の算出の方法はAタイプの場合と全く同一とした。

4) 実験装置

実験装置はFig. 5-7に示す。吸入口、吹き出し口の中心とカッターの中心との距離は31.2cm、開口巾は、4.0cm、作業盤から吹き出し口まで高さは20cmとした。また、吸入口、吹き出し口の円周方向の開角は、図に示すようにカッターの回転中心を中心として60°とした。

吸入側のダクトには静圧さを測定するための小孔を5ヶ所設け、加工材が吸入口の一部を塞ぐときの静圧を測ることにした。

5.3.2.2 実験の結果

実験の結果はTable 5-2に示す。また等効率線を描くとFig. 5-8(a), 8(b)のようになる。

同図では、横軸に $V_{z',OUT}$ 、縦軸には $V_{z',IN}$ にとって集塵効率を表わしたものである。これらの図は電算機によって描かせたものであるが、実験例が少いためコンタ・ラインが、ややスムーズでないところがある。

これらの図から、切削速度が3 cm/sのとき (Fig. 5-8(b)), $V_{z',IN} = -0.4$ ($V_{z,IN} = 18.8\text{m/s}$)程度で集塵率Eは95%程度となり、実用に供せられると思われる。しかし切削速度が8 cm/s程度となると (Fig. 5-8(a)), $V_{z',IN} = -0.4$ で集塵率は85%前後となり、やや実用上不満が残る。木工作業場で現実に行われている切削速度が約5 cm/sとして、集塵効率を推定すると、上記結果からみて90%程度になると思われる。なお、さらに集塵効率をあげるためには吸入口の巾 d_{IN} を拡大することによって実現出来るものと思われるが、実験を実施せず、後に述べるコンピュータ・シミュレーションで、 $d_{IN} = 4.0\text{cm}$ での実験結果を利用して、その集塵効率を検討した。

次に、吹き出し空気による効果をみると、あまり期待できないようである。吹き出しがなくても

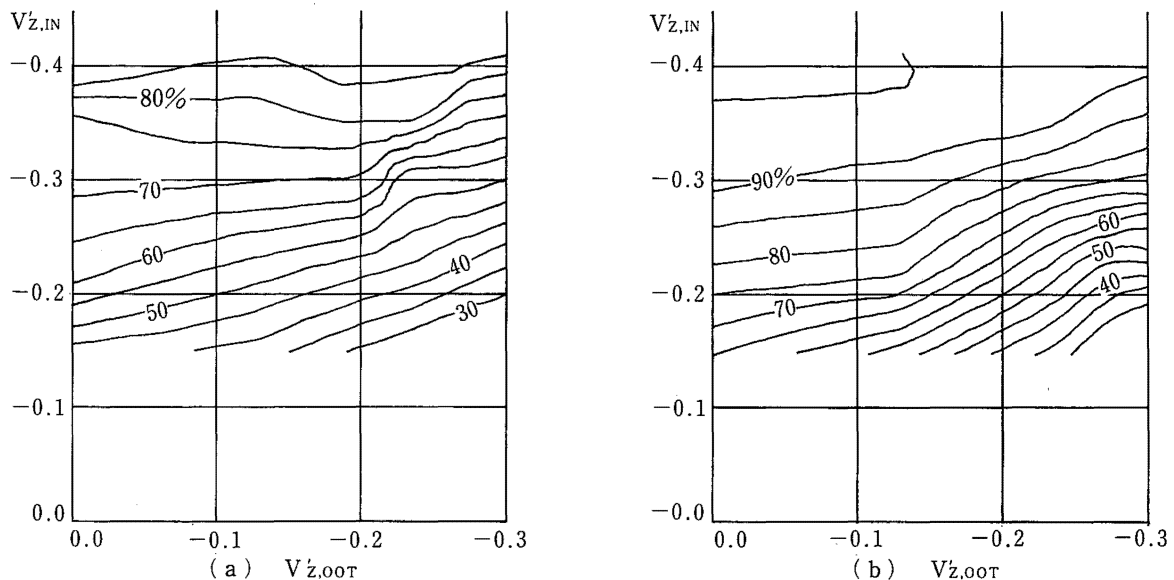


Fig. 5-8 Relations among $V_{z',IN}$, $V_{z',OUT}$, and efficiency of wood shavings collection in planing at a speed of 8 cm/sec (a), 3cm/sec (b)

切削速度, 8 cm/sec, 3 cm/secのときの $V_{z',IN}$, $V_{z',OUT}$ と集塵効率との関係 (気流方向は上向きを正とする)

Table 5.2 Experimental results of efficiency of wood shavings collection
集塵効率の実験の効果

Vz'OUT	Vz'IN	集塵効率 (%)	
		切削速度 F	切削速度 S
0.281	0.417	88.1%	91.2%
0.253	0.408	86.1	92.0
0.191	0.404	88.0	92.3
0.133	0.392	82.1	95.5
0.0	0.382	85.8	97.0
0.275	0.381	77.2	90.2
0.240	0.367	85.0	92.1
0.181	0.352	80.0	93.7
0.142	0.351	78.8	93.8
0.0	0.359	75.3	93.6
0.276	0.309	59.4	78.1
0.232	0.308	59.5	80.6
0.197	0.303	70.0	83.0
0.137	0.300	70.1	88.1
0.0	0.299	72.0	90.8
0.280	0.233	39.4	45.0
0.243	0.233	45.2	53.5
0.195	0.224	47.6	62.8
0.127	0.221	52.5	76.2
0.0	0.216	61.4	78.2

備考 d=4.0cm, L=31.2cm, H=20cm, h=4.1cm,
切削速度 F …約 8 cm/s, 切削速度 S …約 3 cm/s

($V_{z',OUT}=0$ の場合)集塵効率が高い理由は、カッターから飛び出した切削屑が吸入口を飛び越した後、吸入口方向への気流によって押しもどされる場合がかなりあるためである。しかし、吹き出し気流がある場合には、このような現象は少なくなるため、上記の場合のようなUターン現象は少く、集塵効果は高くないものとみられる。このことは吸入口近傍の気流分布図 (Fig. 5-12, 13) からもうかがえる。しかし本実験で使用したカッターの高さは6.0cm, R_0 は4.3cmであり、面取り機用カッターとしてはやや小型であり、しかも加工材の材厚も3.6cmで、十分に厚い材とは言えない。カッターの径が大きい場合や、加工材の厚さが大きいときには、補助的に必要となるかもしれない。

切削屑の運動径路については、切削屑の運動が高速であるため、写真撮影ができなかった。よって実験中に運動径路等を観察した結果の概略図は、およそ Fig. 5-9のようであった。また個々の切削屑の運動についてみると、細長い切削屑の場合、カッターから切り離された直後激しい回転を伴った運動をするが、吸入口に近づくとつれ、回転運動は鈍り、空気抵抗が少く、安定した向き (切削屑の長手方向は運動径路に直角に近い角度で、しかも水平面との角度は水平に近い角度) で運動する傾向が見られた。

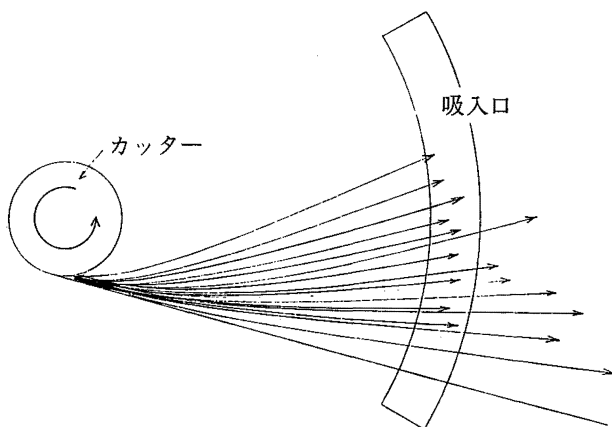


Fig. 5-9 Observation results of loci of wood shavings in planing
実験中における切削屑の飛散径路の概略図

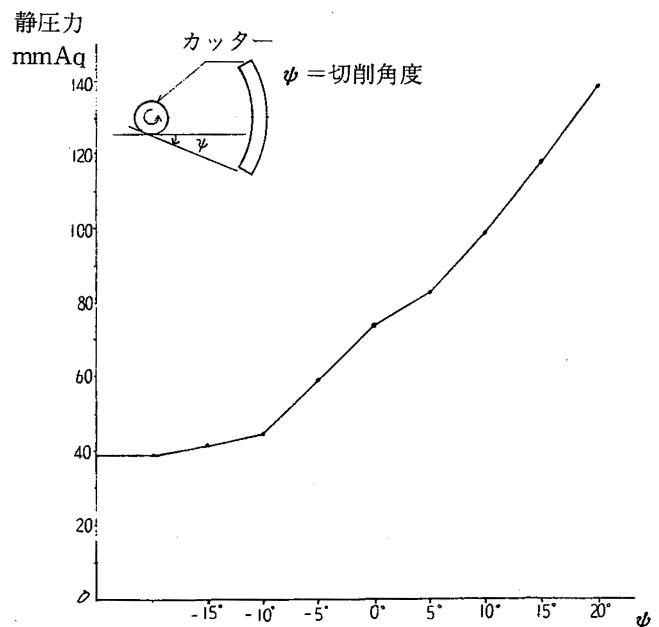


Fig. 5-10 Relations between static pressure in in-let duct and planing angle ψ
吸入ダクト内の静圧と切削角度との関係

最後に、実験では全て切削角度 $\psi=20^\circ$ として行ってきた。現実の作業では、さまざまな作業法があるため、加工材が吸入口の一部を塞ぐ場合が当然予想される。このとき、加工材は大気圧と吸入ダクト内の圧力の差によって作業盤に押しつけられるため、作業盤上を円滑に動きにくくなり、作業により強い力を加える必要があることがわかった。

実験によって吸入ダクト内の静圧を調べたところ、Fig. 5-10のような結果が得られた。このように吸入口を部分的に塞ぐことによりこのように静圧力が変化し塞ぐ度合が大きくなれば、加工材は動きにくくなる。このような効果をできるだけ少なくするため加工材が吸入口を塞ぐときの負圧の増加分に対応して空気の流入を制御する圧力調整弁かまたは補助吸入口が必要となろう。本報では、この弁の仕様について十分に検討するには至らなかったが、簡便で実用的な方法を考慮している。

5.3.3 Bタイプの集塵方法の集塵効率についてのコンピュータ・シミュレーション

5.3.3.1 コンピュータ・シミュレーションの概要

Aタイプの場合には、集塵方法の基本型を決めた後、各部寸法、吸入口、吹き出し口における気流速度、カッターの回転数など変えて、集塵効率の最良のものを選び出すという実験中心の方法で問題を解決しようとしてきた。

しかし、Bタイプの集塵方法の研究では、上記のような実験の他、コンピュータ・シミュレーションによる方法によって切削屑の集塵効率を求める方法を考えた。この方法は、実用的であるとは言えないが実験を実施することができなかった条件を種々想定して集塵効率を推定できる点で有力であり、またカッター、吸入口、吹き出し口の周辺の気流分布と、それによる切削屑の速度との関係を把握できることなど、きわめて有益である。

シミュレーションの方法は、まず初めに、吸入口、吹き出し口の開口寸法、位置、気流速度、カッターの寸法、周速度を設定し作業盤上の気流分布を数値的に求め、切削屑に作用する力を計算するために使用する。次に、カッターと加工材の接点（切削点）を定め、その点から1個の切削屑が飛び出すものとして、その運動径路をシミュレートし、吸入口に吸引された試行回数と全試行回数との比より集塵効率を求めた。

ただし切削屑の形状、寸法、質量等は複雑であるため、完全な理論式を解く方法でなく、切削屑のある質量及び寸法をもった球体に置換した。この球体についての運動方程式の中で、この球体への置換を補正するある係数を導入し、集塵効率や運動径路が実験で得ている結果と相似するように定めた。球体の運動のシミュレーションはモンテ・カルロ法⁹⁾を用いている。

5.3.3.2 作業盤上の気流速度の計算方法

ここで取扱おうとしている問題は、三次元の流体運動で、しかも気固2相流である。この流れの場の流速解析は、きわめて困難であるので、ここでは簡略化し、気流中には切削屑は含まれていないものとした。また完全な三次元流れの問題として解くには膨大な計算時間が必要であるため、カッターの回転中心を軸とする軸対称条件を用いた円筒座標系によって計算した。

このような簡略化は次のような点で問題が残るものと思われる。

1) 切削屑は、ある範囲をもった方向に連続した集団となって高速で運動する。このため、切削屑のもっている運動量の一部が運動経路上の気流に伝達され、気流をその方向に加速する。このため、切削屑の運動を省いた空気のみを考えた解とは差異を生ずるものと思われる。

2) 切削作業中には、作業盤上には木材があり、しかもカッターと接している。このため、周方向の流れを阻害するので木材に近い空間では軸対称として解いた結果とは異なる。とくに、カッター近傍では著しい差が生ずるものとみななければならない。

このような点で大きな問題を含むが、現時点では、実態に近い解を短い時間では解き得ないこと、また、後に述べるように、切削屑の運動についてかなりマクロ的に取り扱うことから、上記の影響については無視することとし、深く究明することは今後の問題とすることにした。

さて、流体の運動の数値解析¹⁾は高速コンピュータの出現でさかんに行われるようになり、とくに乱流流体の数値解析は、古くから提唱されていたプラントルの混合距離理論による渦動粘性係数から、新しい数学モデルによるそれへと開発が進み、これを用いた乱流場の応用解析が盛んになった。渦動粘性係数の数学モデル²⁾には、1方程式モデル、2方程式モデル、マルチ方程式モデルなどが開発されているが、本報の解析ではよく使用されている2方程式^{2), 3), 4)}モデルを用いて

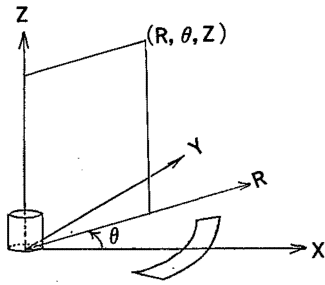


Fig. 5-11 Cylindrical co-ordinate
円筒座標

計算を行ってみた。

まず、座標軸を Fig. 5-11のように円筒座標系にとり、変数は代表値 $R_0, V_{\theta 0}$ を用いて次式のように無次元化する。

i) 連続の方程式

$$\frac{1}{R'} \frac{\partial}{\partial R'} (R' V_R') + \frac{\partial V_Z'}{\partial Z'} = 0$$

ii) 運動方程式

$$\frac{\partial V_R'}{\partial T'} + \frac{1}{R'} \frac{\partial}{\partial R'} (R' V_R'^2) + \frac{\partial}{\partial Z'} (V_Z' V_R') - \frac{V_{\theta}^2}{R'} = -\frac{\partial \pi'}{\partial R'} + \frac{1}{R'} \frac{\partial}{\partial R'} \left(2R' \nu_e' \frac{\partial V_R'}{\partial R'} \right) + \frac{\partial}{\partial Z'} \left\{ \nu_e' \left(\frac{\partial V_Z'}{\partial R'} + \frac{\partial V_R'}{\partial Z'} \right) \right\} - \frac{2\nu_e' V_R'}{R'^2}$$

$$\frac{\partial V_{\theta}'}{\partial T'} + \frac{1}{R'} \frac{\partial}{\partial R'} (R' V_R' V_{\theta}') + \frac{\partial}{\partial Z'} (V_Z' V_{\theta}') + \frac{1}{R'} V_{\theta}' V_R' = \frac{1}{R'} \frac{\partial}{\partial R'} \left\{ R' \nu_e' \left(\frac{\partial V_{\theta}'}{\partial R'} - \frac{V_{\theta}'}{R'} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial Z'} \left(\nu_e' \frac{\partial V_{\theta}'}{\partial Z'} \right) + \frac{\nu_e'}{R'} \left(\frac{\partial V_{\theta}'}{\partial R'} - \frac{V_{\theta}'}{R'} \right)$$

$$\frac{\partial V_Z'}{\partial T'} + \frac{1}{R'} \frac{\partial}{\partial R'} (R' V_R' V_Z') + \frac{\partial V_Z'^2}{\partial Z'} = -\frac{\partial \pi'}{\partial Z'} + \frac{1}{R'} \frac{\partial}{\partial R'} \left\{ R' \nu_e' \left(\frac{\partial V_Z'}{\partial R'} + \frac{\partial V_R'}{\partial Z'} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial Z'} \left(2\nu_e' \frac{\partial V_Z'}{\partial Z'} \right)$$

iii) 乱流輸送方程式

$$\frac{\partial q'}{\partial T'} + \frac{1}{R'} \frac{\partial}{\partial R'} (R' V_R' q') + \frac{\partial}{\partial Z'} (V_Z' q') = \frac{1}{R'} \left(\frac{\nu_e'}{\sigma_1} R' \frac{\partial q'}{\partial R'} \right) + \frac{\partial}{\partial Z'} \left(\frac{\nu_e'}{\sigma_1} \frac{\partial q'}{\partial Z'} \right) + \nu_t S - \varepsilon'$$

$$\frac{\partial \varepsilon'}{\partial T'} + \frac{1}{R'} \frac{\partial}{\partial R'} (R' V_R' \varepsilon') + \frac{\partial}{\partial Z'} (V_Z' \varepsilon') = \frac{1}{R'} \frac{\partial}{\partial R'} \left(\frac{\nu_e'}{\sigma_2} R' \frac{\partial \varepsilon'}{\partial R'} \right) + \frac{\partial}{\partial Z'} \left(\frac{\nu_e'}{\sigma_2} \frac{\partial \varepsilon'}{\partial Z'} \right) + C_1 \frac{\varepsilon' \nu_t S}{q'} - C_2 \frac{\varepsilon' q'}{\nu_t}$$

$$\nu_t = 0.09 q'^2 / \varepsilon', \quad \nu_e' = \nu' + \nu_t \quad (9)$$

$$S = 2 \left\{ \left(\frac{\partial V_R'}{\partial R'} \right)^2 + \left(\frac{V_R'}{R'} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_Z'}{\partial Z'} \right)^2 \right\} + \left(\frac{\partial V_Z'}{\partial R'} + \frac{\partial V_R'}{\partial Z'} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_{\theta}'}{\partial R'} - \frac{V_{\theta}'}{R'} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_{\theta}'}{\partial Z'} \right)^2$$

$$\sigma_1 = 1.0, \quad \sigma_2 = 1.3, \quad C_1 = 1.59, \quad C_2 = 0.18$$

となる。よって V_R', V_{θ}', V_Z' はこれらの方程式を連立させて解くことによって得られる。

解法はMAC法⁴⁾⁻⁷⁾によるため、 $V_R', V_{\theta}', V_Z', q', \varepsilon', \nu_e'$ 等はMAC法の定義に従う。また π' についても同様にMAC法の圧力緩和法を用い、次のように計

$$\left. \begin{aligned} R' &= \frac{R}{R_0}, \quad Z' = \frac{Z}{R_0} \\ V_R' &= \frac{V_R}{V_{\theta 0}}, \quad V_{\theta}' = \frac{V_{\theta}}{V_{\theta 0}}, \quad V_Z' = \frac{V_Z}{V_{\theta 0}} \\ T' &= \frac{V_{\theta 0}}{R_0} T, \quad t' = \frac{V_{\theta 0}}{R_0} t \\ \nu_e' &= \frac{\nu_e}{R_0 V_{\theta 0}}, \quad \pi' = \frac{\pi}{\frac{1}{2} \rho V_{\theta 0}^2} \\ q' &= \frac{q}{V_{\theta 0}^2}, \quad \varepsilon' = \frac{R_0}{V_{\theta 0}^3} \varepsilon \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

数値解析に用いる基礎方程式は、軸対称の条件

$$\frac{\partial}{\partial \theta} = 0 \quad (2)$$

を用いれば、次のように表わされる。✓

算する。

$${}^i D = \frac{1}{R_i'} \left(R_{i+\frac{1}{2}}' {}^i V_{Ri+\frac{1}{2},j} - R_{i-\frac{1}{2}}' {}^i V_{Ri-\frac{1}{2},j} \right) \frac{1}{\delta R'} + \left({}^i V_{Zi,j+\frac{1}{2}} - {}^i V_{Zi,j-\frac{1}{2}} \right) \frac{1}{\delta Z'} \quad (11)$$

によって、連続の方程式の不満足量Dを計算し緩和量 ${}^i\delta\pi'$ を

$${}^i\delta\pi' = -\frac{{}^iD}{\Delta T'} \cdot \frac{1}{R'_i \cdot \delta R'_i} \left\{ \frac{R'_{i+\frac{1}{2}}}{R'_{i+1} - R'_i} + \frac{R'_{i-\frac{1}{2}}}{R'_i - R'_{i-1}} \right\} + \frac{1}{\delta Z'_i} \left\{ \frac{Z'_{j+1} - Z'_{j-1}}{(Z'_{j+1} - Z'_j)(Z'_j - Z'_{j-1})} \right\} \quad (12)$$

によって求め、 π' を

$${}^{i+1}\pi' = {}^i\pi' + {}^i\delta\pi' \quad (13)$$

のように修正する。またこの緩和に伴い、 V_R 、 V_Z と修正を次のようにして行う。

$$\left. \begin{aligned} {}^{i+1}V'_{R\ i+\frac{1}{2},j} &= {}^iV'_{R\ i+\frac{1}{2},j} + \frac{\Delta T'}{\delta R'_i} \cdot {}^i\delta\pi' \\ {}^{i+1}V'_{R\ i-\frac{1}{2},j} &= {}^iV'_{R\ i-\frac{1}{2},j} - \frac{\Delta T'}{\delta R'_i} \cdot {}^i\delta\pi' \\ {}^{i+1}V'_{Z\ i,j+\frac{1}{2}} &= {}^iV'_{Z\ i,j+\frac{1}{2}} + \frac{\Delta T'}{\delta Z'_i} \cdot {}^i\delta\pi' \\ {}^{i+1}V'_{Z\ i,j-\frac{1}{2}} &= {}^iV'_{Z\ i,j-\frac{1}{2}} - \frac{\Delta T'}{\delta Z'_i} \cdot {}^i\delta\pi' \end{aligned} \right\} (14)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} \delta R'_i &= R'_{i+\frac{1}{2}} - R'_{i-\frac{1}{2}} \\ \delta R'_i &= R'_{i-\frac{1}{2}} - R'_{i-\frac{3}{2}} \\ \delta Z'_i &= Z'_{j+\frac{1}{2}} - Z'_{j-\frac{1}{2}} \\ \delta Z'_i &= Z'_{j-\frac{1}{2}} - Z'_{j-\frac{3}{2}} \end{aligned} \right\} (15)$$

$\beta_0 = 1.0 \sim 1.3$ 、 l は反復回数である。

次に境界条件は次のように与える。

i) 作業盤面、カッター上面

$$\begin{aligned} V'_R, V'_\theta, q', \epsilon' &\rightarrow \text{スリップ} \\ V'_Z &= 0 \quad (\text{吸入口は } V'_Z = V'_{Z',in}) \end{aligned} \quad (16)$$

ii) 回転軸

$$V'_R = V'_\theta = \frac{\partial V'_Z}{\partial R'} = \frac{\partial q'}{\partial R'} = \frac{\partial \epsilon'}{\partial R'} = 0 \quad (17)$$

iii) カッター刃先面

$$V'_R = 0, V'_\theta = 1.0, V'_Z, q', \epsilon' \rightarrow \text{スリップ} \quad (18)$$

iv) 吹き出しダクト壁面

$$V'_R = 0, V'_\theta, V'_Z, q', \epsilon', \pi' \rightarrow \text{スリップ} \quad (19)$$

v) 吹き出し口

$$V'_R = V'_\theta = 0, V'_Z = V'_{Z',out} \quad (20)$$

q' 、 ϵ' は全く不明であるので、吹き出しダクト内の乱れ度を3%程度に見込み、また等方性の条件を入れて $q' = 0.2 \times 10^{-3}$ 一定とした。また、 $v_i = 0.2 \times 10^{-3}$ と仮定すると、(9)式を用いて $\epsilon' = 0.18 \times 10^{-4}$ を得る。

vi) 上部自由境界

$$V'_R = V'_Z = V'_\theta = q' = \epsilon' = \frac{\partial \pi'}{\partial Z'} = 0 \quad (21)$$

vii) 下流境界

$$V'_R \text{は(3)式より与える。また,} \\ V'_Z = V'_R = \frac{\partial q'}{\partial R'} = \frac{\partial \epsilon'}{\partial R'} = \frac{\partial \pi'}{\partial R'} = 0 \quad (22)$$

とした。

なおメッシュの数は 45×25 で不等間隔とした。間隔についてはFig. 5-12を参照。

次に定数として与える両ダクト等の各部分の寸法、流速はTable 5-5に示す。同表に示すように数値解析例は、全部で21例行った。

5.3.3.3 計算の結果

完全な収れんまでにはかなりの時間を要するが、反復回数2000~2500回程度で打ち切った。結果の代表例として吹き出しのある場合とない場合の2例をFig. 5-12~13に示す。図中、矢の長さは流速に比例して描いてある。

流速分布は実験がなされていないので比較はできないが、あまり不合理な流速分布となっていないようである。しかし、本数値解析において、境界条件で数値を仮定している部分があること、またカッターの回転刃面での境界での q' 、 ϵ' の値について参考にすべき文献も見当らず、実験も困難であるため、単にスリップ条件で与えていることなどの点で曖昧さが残る。

さらに、安定した解を得易くするため、上部自由境界での空気の流入を零としているため、ダクトの垂直方向の軸とカッターの回転軸との中間帯に弱い循環流が生じている。上部自由境界からの流入を許せば、この循環流は少くなるものと思われる。

以上のように、解の結果については様々な問題を含んでいるが、二次元流れとしては甚しく非現実的ではないものとみなすことにする。

5.3.3.4 切削屑の運動及び集塵効率についてのシミュレーション

1) 運動方程式

以上のように作業盤上における気流状態を前記の簡略化した条件で求めることができた。次にこの結果を利用して切削屑の運動についてのシミュレーションを行い集塵効率について検討した。

切削屑はきわめて雑多な形状、寸法をもったものであり、それぞれの形状、寸法のものについて運動解析することは、不可能に近い。よって本研究では、1個

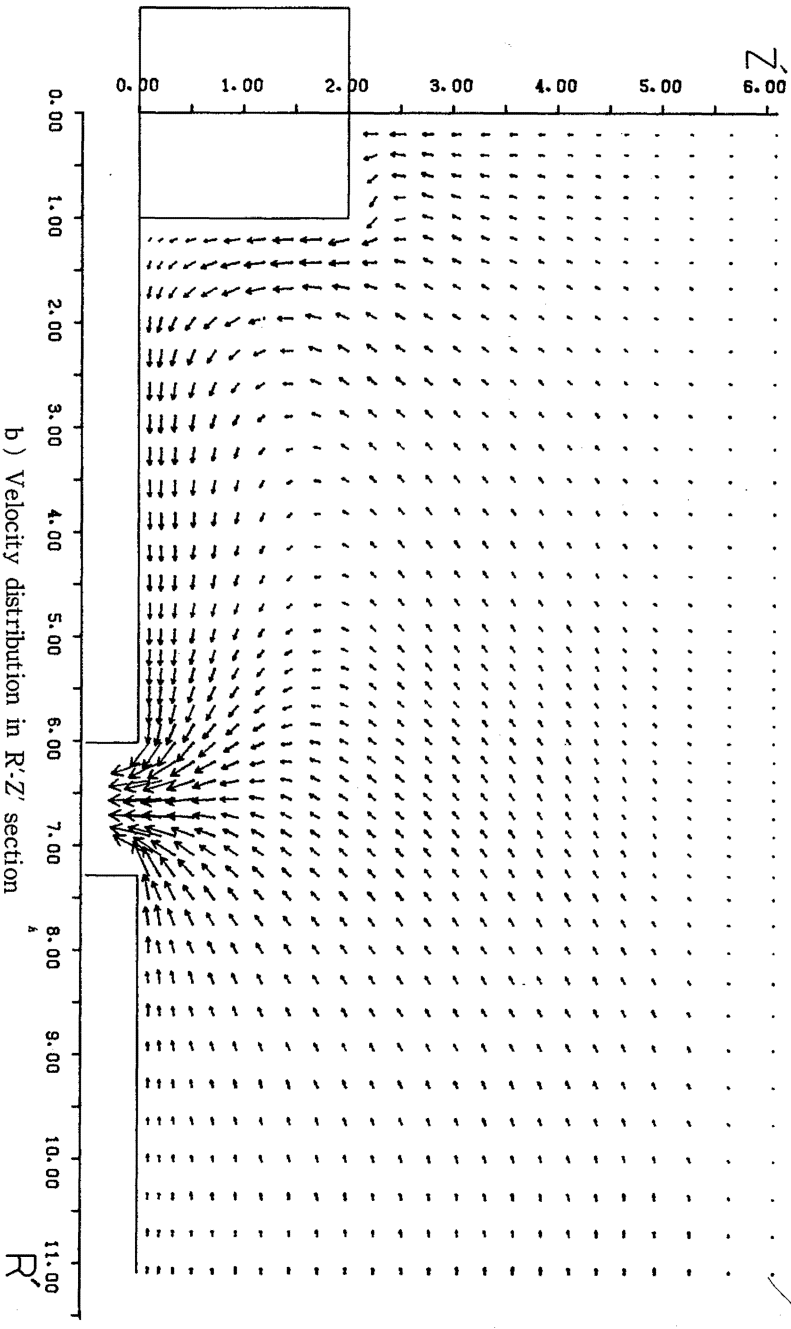
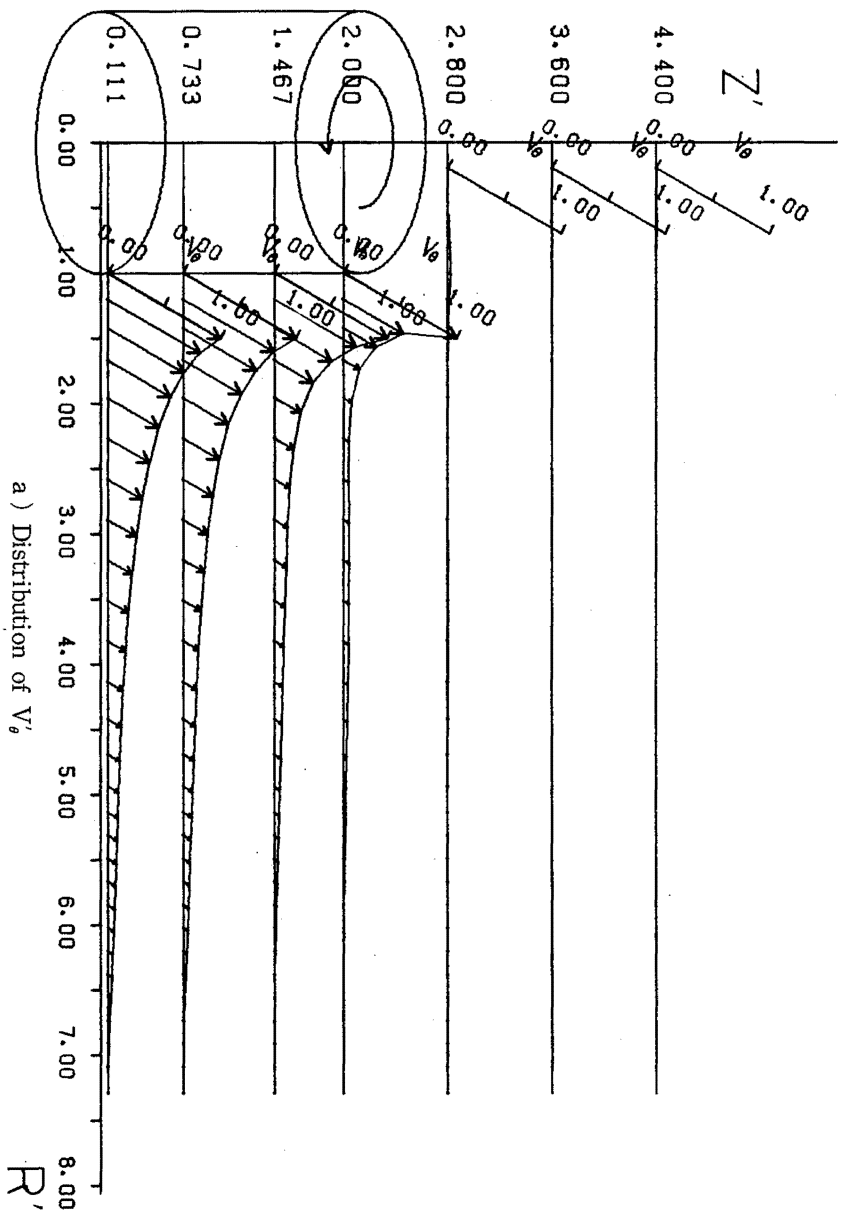


Fig. 5-12 Velocity distribution in $V_{z',in} = -0.4$, $V_{z',out} = 0$, $d_{in} = 5.7$ cm
流速分布

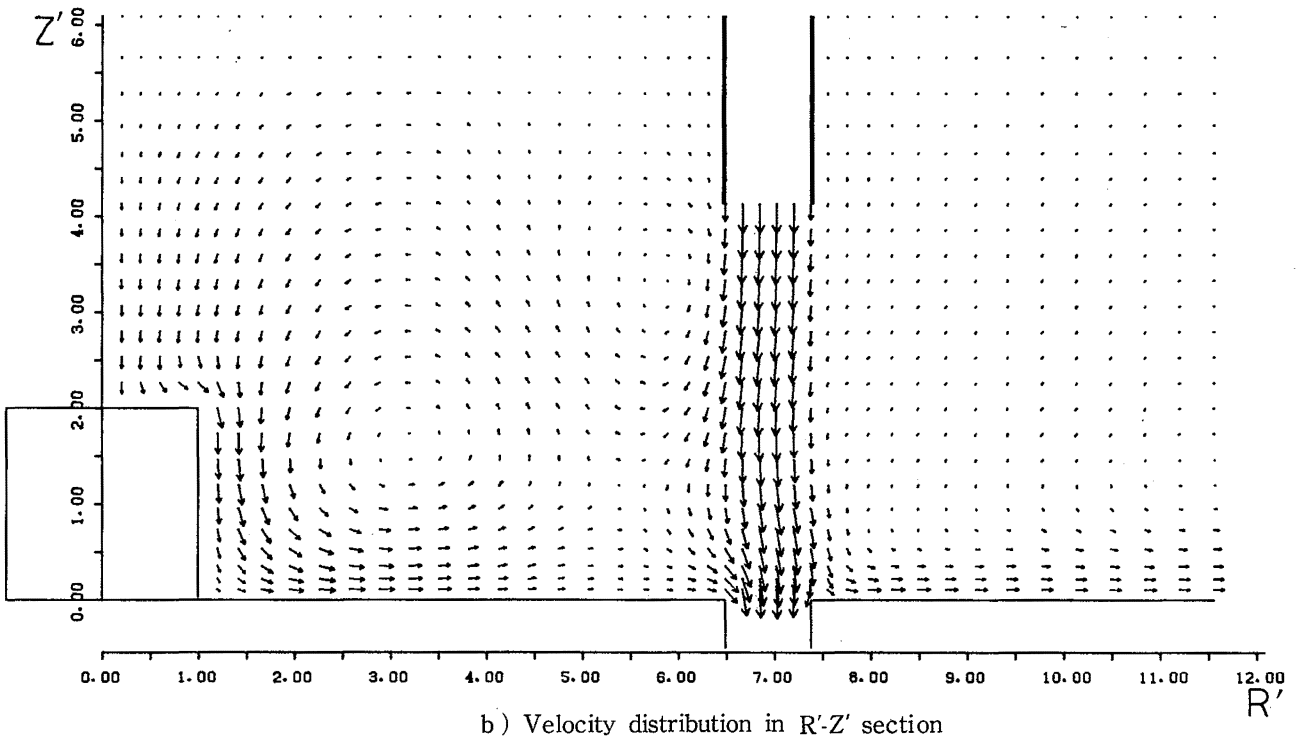
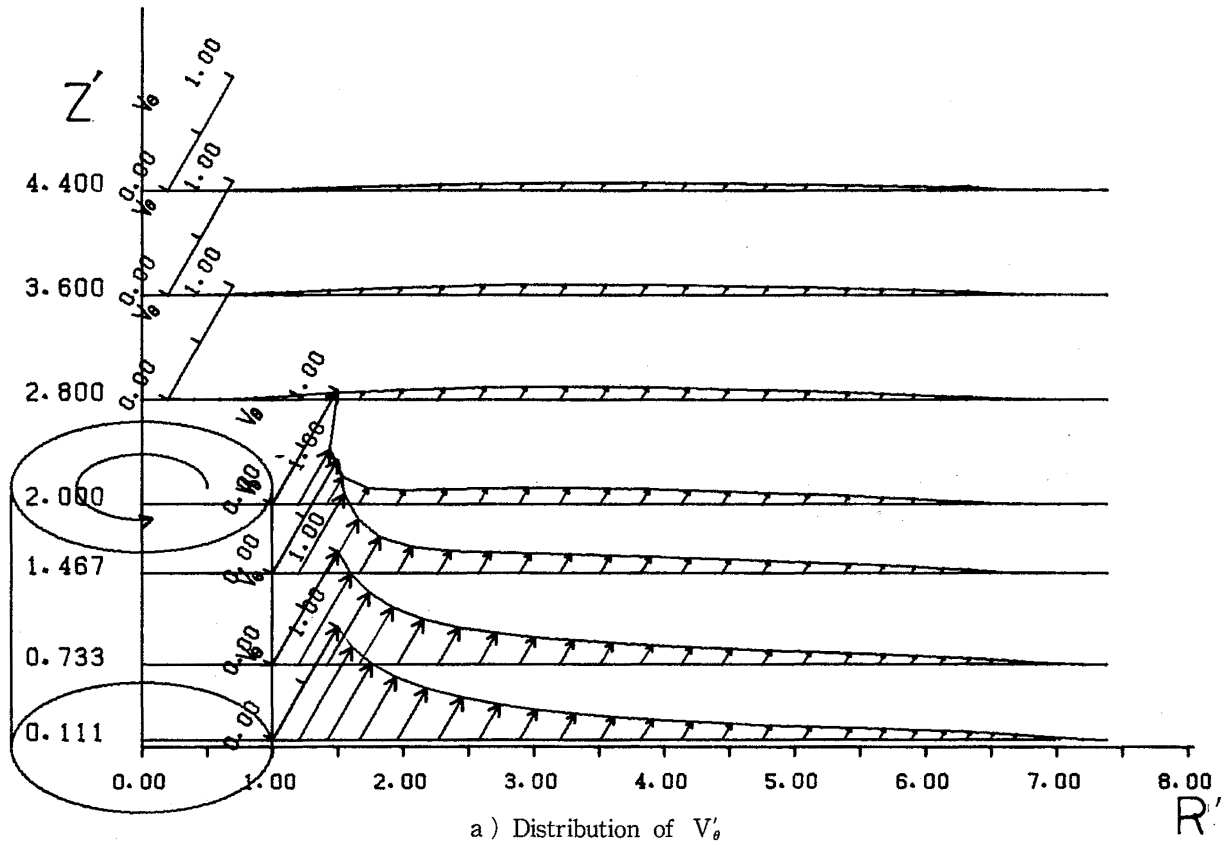


Fig. 5-13 Velocity distribution in $V_{z',IN} = -0.3$, $V_{z',OUT} = -0.3$, $d_{IN} = 4.0$ cm
流速分布

の切削層を均質なる球体に置き換えて考えることにした。

この置き換えが物理的にみて正当なものとは言えないが、ややマクロ的に見て、運動経路や、集塵効率等が実験結果とあまりかけ離れた結果とならなければ、この方法は、実用的なシミュレーション手法として有用ではないかと考えている。

まずここで、円筒座標系で置換球体の運動方程式を考える際に次の仮定をする。

i) 切削層を球体に置換しているの、現実の切削層の形状、寸法とかなり異なる。よって、球体が空気から受ける力を何らかの方法で補正する必要がある。このため、下記の運動方程式の抗力項に α なる係数を乗ずるものとする。この係数は球体の抗力係数、表面積、体積などの影響分を含む総括的な補正係数という意味をもつ。またその数値の大きさは、完全な球体の抗力を基本とし、その倍数として考える。

ii) 球体は局部的に一様流中を運動するものとし、球体の抗力係数についての実験結果から、本研究の場合 R_0 は、 $10^3 < R_0 < 3 \times 10^4$ の範囲に入るものとみなせるので抗力係数の基本値として $C_D = 0.44$ (一定) とする。

iii) 切削層は複雑な回転運動を伴った運動をしているが仮想球体は回転運動をしないものとして扱う。

iv) カッターから離れた1個の仮想球体は吸入口に入るか、飛散してしまうかの判定がなされるまで、 α の値は初期に与えられたままとする。

空気の仮想球体に作用する力の方向は、ある空間上の点における相対速度を成分とする速度ベクトルの方向と一致し、その大きさ F は

$$F = \alpha C_D \frac{1}{2} \rho \left\{ (V_R - v_R)^2 + (V_Z - v_Z)^2 + (V_\theta - v_\theta)^2 \right\} \quad (22)$$

である。よって R, θ, Z 方向の力はその方向余弦で表わされ、仮想球体に作用する浮力を無視すれば三方向の運動方程式は、それぞれ、

$$m \left\{ \frac{d^2 R}{dt^2} - R \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 \right\} = \alpha C_D \frac{\rho}{2} (V_R - v_R) VA \quad (23)$$

$$m \frac{d^2 Z}{dt^2} = \alpha C_D \frac{\rho}{2} (V_Z - v_Z) VA - mg \quad (24)$$

$$m \left(2 \frac{dR}{dt} \frac{d\theta}{dt} + R \frac{d^2 \theta}{dt^2} \right) = \alpha C_D \frac{\rho}{2} (V_\theta - v_\theta) VA$$

————(25)

$$V = \sqrt{(V_R - v_R)^2 + (V_\theta - v_\theta)^2 + (V_Z - v_Z)^2}$$

$$A = \pi r^2$$

である。

この(23)式~(25)式を(1)式の関係を用いて無次元化し、整理すると、

$$\frac{d^2 R'}{dt'^2} R' \left(\frac{d\theta}{dt'} \right)^2 = \frac{3\alpha C_D}{8r'} \frac{\rho}{\rho_w} (V'_R - v'_R) \cdot V' \quad (26)$$

$$\frac{d^2 Z'}{dt'^2} = \frac{3\alpha C_D}{8r'} \frac{\rho}{\rho_w} (V'_Z - v'_Z) V' - g \frac{R_0}{V_{\theta 0}^2} \quad (27)$$

$$2 \frac{dR'}{dt'} \frac{d\theta}{dt'} + R' \frac{d^2 \theta}{dt'^2} = \frac{3\alpha C_D}{8r'} \frac{\rho}{\rho_w} (V'_\theta - v'_\theta) V' \quad (28)$$

となる。ただし $V' = V/V_{\theta 0}$ である。

次に初期条件及び係数等は次のように与えた。

i) $t' = 0$ における速度

$$v'_Z = 0, v'_R = 0, v'_\theta = 1.0$$

v'_θ については削り取られる瞬間における切削層の運動の状態が審らかでないので明確には分らない。最大限カッターの刃の周速と同じと考えられるので1.0として与えた。

ii) 初期角度

切削角度 ψ は全て0.349 (20°, Fig. 5-14) とするが切削深さを考慮し、 $\theta_{t'=0} = -1.83$ (-105°) とした。実験で観察によれば、ある範囲の角度をもって飛び出すものとみられるが、明白でないので上記一定値とした。

iii) 初期高さ

球体の飛び出す高さ h は、加工する材の厚さとガイドリングの厚さの合計を最大値とし、ガイドリングの厚さを最小とする一様乱数で与えた。

iv) 半径方向位置

$$R'_{t'=0} = 1.0 \text{ とした。}$$

v) α, r

運動方程式中の係数 α と球体の半径は2) に述べる値を与えるものとする。

vi) ρ, ρ_w

$\rho = 125 \text{gs}^2/\text{m}^4$, ρ_w は2) で示す方法で求めた。

3.3.2で求めた気流速度は任意の角度 θ における断

面においても同様に分布しているものとして、上記運動方程式は、時間刻み $\Delta t = 0.2618$ (1/4000・秒)として容易に数値積分される。また任意の空間点の空気の流れ速度 V_r, V_θ, V_z はその点を包含する格子上的既知の流速から補間によって求めた。

2) 球体の半径 r 及び係数 α の決定法

r と α は次の b) において述べる考察から正規乱数によって与える。このため、それぞれ平均値 \bar{r} 及び標準偏差 σ_r, σ_α が必要となる。ここで、それらのおよその値について考察する。

a) σ_r について

5.3.2.2の実験で切削速度約 8 cm/s の場合の切削屑及び切削速度約 3 cm/s の場合の切削屑をビニール袋に集め、切削屑が細分化しないように注意して、軽くまぜ、この中から切削屑の重量のサンプルとして一つかみの切削屑をとり出し、個々の重量を 0.01mg の分解能を有する精密天秤で計った。その結果、 $\bar{w}_F = 5.70\text{mg}$, $\sigma_{w,F} = 3.42\text{mg}$ 及び $\bar{w}_S = 3.64\text{mg}$, $\sigma_{w,S} = 2.16\text{mg}$ であった。 σ_r はこれら w 及び \bar{r} より求める。

いま、扱いを簡単にするため、切削屑を密度一様な均質な球体とし、その半径を r 、サンプル数を n 個、 i 個目の切削屑の実測重量を w_i とすると、平均半径 \bar{r} は

$$\bar{r} = \frac{1}{n} \left(\frac{3}{4\pi\rho_w g} \right)^{\frac{1}{3}} \sum w_i^{\frac{1}{3}} \quad (29)$$

で表わされる。また、 i 個目の切削屑の半径と平均半径 \bar{r} との差を Δr_i とするとき、

$$\sum \Delta r_i^2 = \sum \left\{ \left(\frac{3}{4\pi\rho_w g} w_i \right)^{\frac{1}{3}} - \bar{r} \right\}^2 \quad (30)$$

となり、よって

$$\sigma_r^2 = \frac{1}{n} \sum \left\{ \left(\frac{3}{4\pi\rho_w g} w_i \right)^{\frac{1}{3}} - \bar{r} \right\}^2 \quad (31)$$

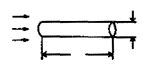
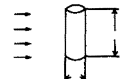




を得る。

よって、 \bar{r} が既知であれば、(29)より ρ_w が決され、(31)より σ_r が決定される。

b) σ_α について

切削屑を球体に仮想することによって α に大きな影響を与えるとみられる抗力係数についてみると、本研究で扱う球体の寸法及び流速の範囲では前記のように 0.44 とみなせる。しかし、任意な形状の物体の抗力係数は様々であって、抗力係数を定めることはできな

Table 5.3 Values of C_D for various shaped bodies
種々な物体の抗力係数

物体	寸法の割合	基準面積 S	$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V^2 S}$
	1/d=1	$\frac{\pi}{4}d^2$	0.91
	2		0.85
	4		0.87
	7		0.99
	1/d=1	dl	0.63
	2		0.68
	5		0.74
	10		0.82
	40		0.98
	∞		1.20
	b/h=1	bh	1.12
	2		1.15
	4		1.19
	10		1.29
	18		1.40
	∞		2.01
	I (凸)	$\frac{\pi d^2}{4}$	0.34
	II (凹)		1.33
	$\alpha = 60^\circ$	$\frac{\pi d^2}{4}$	0.51
	$\alpha = 30^\circ$		0.34
		$\frac{\pi d^2}{4}$	0.12

註 表中の記号はこの表限りとする。

Table 5.4 Relations between the efficiency of wood sbavings collection and the number of the frequency of simulation
シミュレーションの試行回数と集塵効率の関係について

シミュレーション 試行回数 N	集塵効率 (%)				
	V _{zin}	- 0.3	- 0.3	- 0.3	- 0.5
	V _{zout}	- 0.3	0.0	- 0.3	0.0
	L (cm)	31.2	31.2	29.1	30.0
	d _{IN} (cm)	4.0	4.0	4.0	5.7
50		60.0	70.0	54.0	94.0
100		59.0	69.0	55.0	91.0
300		59.3	70.0	53.0	91.0
500		58.0	68.2	51.0	92.0
700		58.9	69.0	51.9	91.9
1000		57.8	67.9	51.4	92.1

註 hmaxは、全て4.1cmとした。

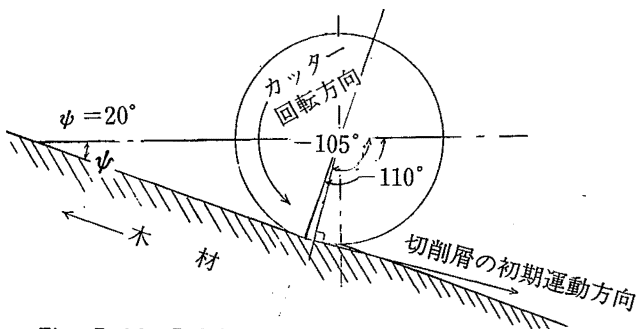


Fig. 5-14 Initial value of θ
θの初期値

い。ある特殊な形状のものについては、実験結果⁹⁾があり、その一部を引用すると Table 5-3に示すような値をもっている。これらを参考にすると、様々な形状の物体の抗力係数は球体のそれのおよそ0.75~3.0倍程度になるのではないかと見積られる。

また、表面積や体積等にも影響分があるものと考えられるが、具体的な根拠となる数値は分らない。しかし上記の理由から大部分の仮想球体のαの値の範囲は1.0~5.0位になると考え、またその確率的頻度も正規分布型になると考えるのが自然ではないかと思われる。よって、上記の考察からαの小さい方の条件として

$$\bar{\alpha} - 2\sigma_{\alpha} = 1.0 \quad (32)$$

とすれば、 $\bar{\alpha}$ が既知であるとき、 σ_{α} を求められる。

c) $\bar{\alpha}$, \bar{r} について

最後に残った $\bar{\alpha}$ と \bar{r} は、以下に示すような数値を仮定し、(26)~(28)式を用い試行錯誤的な試行シミュレーションを行い、その結果として得られる集塵効率が実験でのそれに合致する $\bar{\alpha}$ 及び \bar{r} を見出すことにした。

i) $\bar{\alpha}=2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0$ にえらび、 \bar{r} を0.2cm~0.6cmの間で適当に選び、これらより σ_{α} , σ_r を上記方法により決定する。以下文中では \bar{r} , σ_r , h, d_{IN}, L, V_{Z,IN}, V_{Z,OUT}など有次元数について述べているが計算では無次元数に変換している。

ii) 初期高さhは、h_{max}=4.1cm (加工材の厚さ3.6cm, ガイドリングの厚さ0.5cmの合計), h_{min}=0.5cmを与えて一様乱数を発生させたものとした。

iii) 仮定値($\bar{\alpha}$, σ_{α}), (\bar{r} ; σ_r)より正規乱数を発生させる。

iv) $\bar{\alpha}$ と \bar{r} はV_{Z,IN}, V_{Z,OUT}, d_{IN}, Lと独立であると考えられるので、 $\bar{\alpha}$ と \bar{r} はこれらと関係なく決定されねばならない。実験ではL=31.2cm, d_{IN}=4.0cmと一定値としているが、V_{Z,IN}, V_{Z,OUT}は、Table 5-2のような組み合わせの場合について行っているので、

$$\text{イ. } V_{Z,IN} = -0.3V_{\theta 0} \quad V_{Z,OUT} = 0$$

$$\text{ロ. } V_{Z,IN} = -0.3V_{\theta 0} \quad V_{Z,OUT} = -0.3V_{\theta 0}$$

$$\text{ハ. } V_{Z,IN} = -0.2V_{\theta 0} \quad V_{Z,OUT} = -0.2V_{\theta 0}$$

の3つの場合を代表としてとりあげ、それぞれの場合について試行シミュレーションを行う。

v) V_{Z,IN}, V_{Z,OUT}, d_{IN}, L一定の条件の下でシミュレーションを500回くり返す。 $\bar{\alpha}$ と \bar{r} は1回毎に与えなおす。回数は多い方が好ましいが、長時間を要するので、ある限度にせざるを得ない。いま、この試行回数のみろ変えて、試行してみると Table 5-4のような結果となる。N=300でも充分であると思われるが、N=500回試行するものとした。よって $\bar{\alpha}$, \bar{r} を決定したあとのシミュレーションも同様にN=500とした。

vi) 集塵効率Eは、実験の場合と同様に、N回の試行中、N_{IN}回吸入口に吸入されたと判断されたとき(球体の頂部が作業盤面より低く、かつ球体の中心が吸入ダクトの内に入った場合、吸入されたとみなす)、

$$E = N_{IN} / N \times 100 (\%) \quad (33)$$

で求める。

試行シミュレーションを行った結果のうち切削速度8 cm/sの場合について図に表したものが Fig. 5-15である。この図の例から実験による集塵効率と試行シミュ

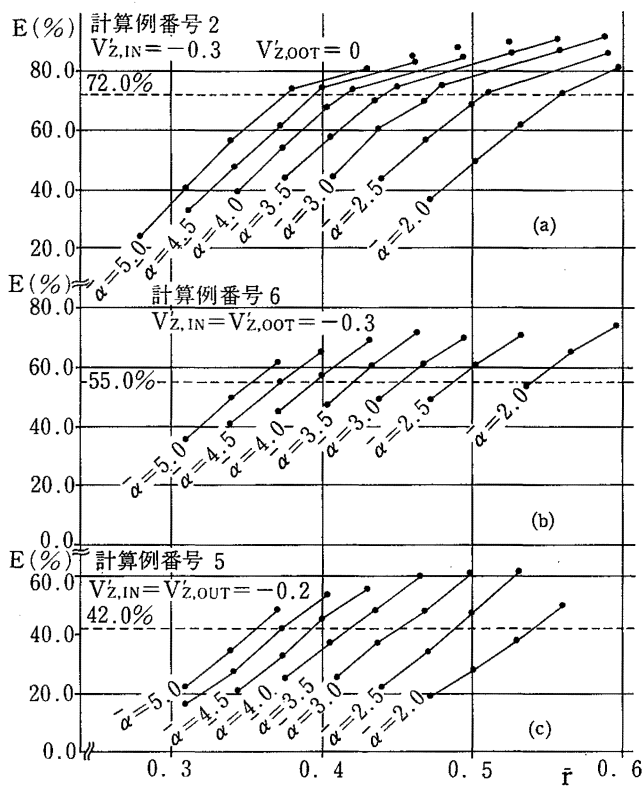


Fig. 5-15 Relations among $\bar{\alpha}$, \bar{r} and efficiency of shavings collection, E
 $\bar{\alpha}$, \bar{r} と集塵効率 E との関係

シミュレーションによる集塵効率が等しくなるように、次の方法で $\bar{\alpha}$, \bar{r} を決定した。いま Fig. 5-15 a), b), c) における水平方向の点線は実験で得られた集塵効率を示す。これと斜めに交わる曲線群はそれぞれ $\bar{\alpha}$ と \bar{r} を適宜仮定して試行シミュレーションを行ったときの集塵効率である。

これらの交点における $\bar{\alpha}$ と \bar{r} を同図より読みとり、 $\bar{\alpha}$ と \bar{r} の関係を図に示すと、Fig. 5-16 のようになる。同図 a) の切削速度 8 cm/s のときは、 $\bar{\alpha}$, \bar{r} と $V_{z,IN}$, $V_{z,OUT}$ との関係は少ないものと見なされる。

また、この図から集塵効率が実験と試行シミュレーションでほぼ合致するときの $\bar{\alpha}$ と \bar{r} は無数に存在することになるが、これまで述べたことから、およその範囲は絞られ、運動経路などを示す図 Fig. 5-17 などと前記の考察から

$$\bar{\alpha} = 3.0$$

と仮定することにする。よって Fig. 5-16 より

$$\bar{r}_F = 0.46 \text{ cm}$$

が得られ、(29), (30)式、及びこの \bar{r}_F より

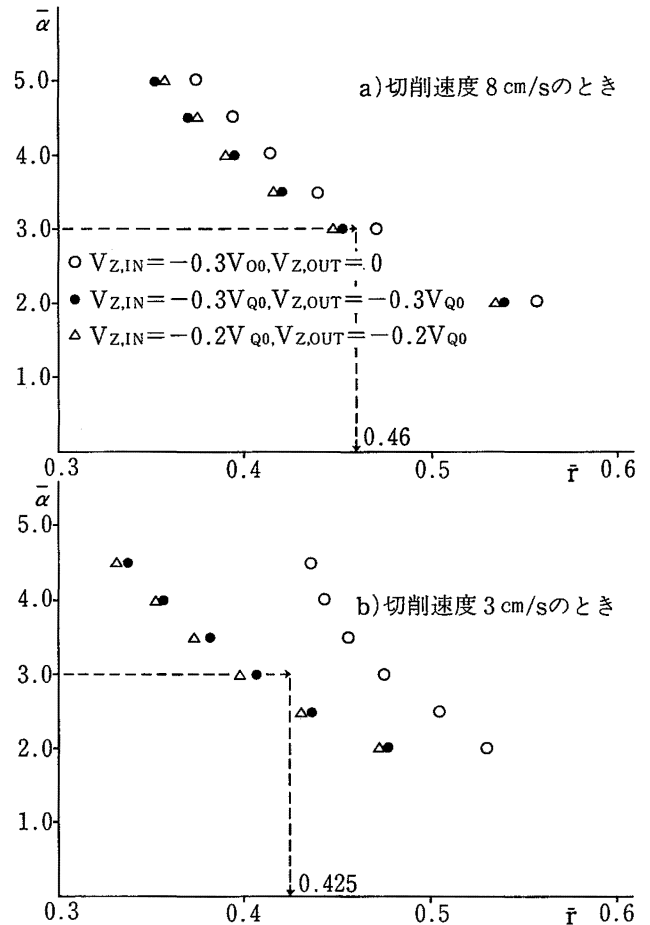


Fig. 5-16 Relation between $\bar{\alpha}$ and \bar{r}
 $\bar{\alpha}$ と \bar{r} の関係

$$\sigma_{r,F} = 0.096 \text{ cm}, \rho_{w,F} = 0.14 \times 10^4 \text{ gs}^2/\text{m}^4$$

となる。

ここで、 $\bar{\alpha}$ のとり方如何によって、球体の運動経路がどのような影響があるかを見るために、Fig. 5-16 a) の関係を満足するように次の組み合わせ

$$\left(\begin{array}{l} \bar{\alpha} = 2.0 \\ \bar{r}_F = 0.55 \end{array} \right) \left(\begin{array}{l} \bar{\alpha} = 3.0 \\ \bar{r}_F = 0.45 \end{array} \right) \left(\begin{array}{l} \bar{\alpha} = 4.0 \\ \bar{r}_F = 0.406 \end{array} \right) \left(\begin{array}{l} \bar{\alpha} = 5.0 \\ \bar{r}_F = 0.366 \end{array} \right)$$

における球体の運動経路を X-Yプロッターに出力したものを Fig. 5-17 a) ~ d) に示す。同図は径路を多数描くと複雑になるので、運動経路はそれぞれ 50 本ずつ描いた。この図から $\bar{\alpha}$ が大きくなると、やや運動径路の周方向のちらばりの中が狭くなる傾向が見られるが、大きな差は認められない。また実験における切削層の運動径路の円周方向のちらばり程度もよく似ている。これらのことから $\bar{\alpha}$ を上記のように定めても大きな誤りとはならないであろう。なお参考のため、 $\bar{\alpha} = 3.0$ とし $\bar{r}_F = 0.26, 0.36, 0.46, 0.56, 0.66$ のように変

えて前記と同様運動径路を描かせると、 $\bar{r}_F=0.26$ や 0.66 のときは現実的でない結果となることがわかる。(Fig. 5-18)

次に切削速度 3.0cm/s の場合である Fig. 5-16b)を見ると、集塵実験の誤差がやや大きいためか、3本の曲線はあまり良く一致していない。止むなく、 $\alpha=3.0$ として、3本の曲線との交点の値の平均値から、

$$\bar{r}_s=0.425$$

とした。よって $\sigma_{r,s}$ 、 $\rho_{w,s}$ は

$$\sigma_{r,s}=0.080\text{cm}, \rho_{w,s}=0.11 \times 10^4 \text{gs}^2/\text{m}^4$$

となった。

3.3.5 シミュレーションの結果

このようにして決定された遅速2通りの $\bar{\alpha}$ と \bar{r} を用いて、仮想球体の運動についてのシミュレーションを行った。ここで上記の $\bar{\alpha}$ 、 \bar{r} を決定するための試行

シミュレーションでは初期高さ、 h'_{\max} は、実験結果と合致させるため、 0.911 としてきた。しかし、任意の初期高さにおける集塵効率等を知るという目的のため、 $h'_{\max}=0.5, 0.95, 1.45, 1.95$ の4通りの値を与え、しかも、切削速度 8cm/s 、 3cm/s の2通りの場合を想定し、また、5.3.3.2において気流速度を求めた計算例の全てについてシミュレーションを行ってみた。この結果は Table 5-5に示す結果となった。

この表から見て、切削速度 3cm/s で90%以上の集塵効率を有するものは、 $V'_{z,IN}$ が 0.5 以上の場合か又は $d_{IN}=5.7\text{cm}$ 以上で $V'_{z,IN}$ が 0.4 以上のものに限られることがわかった。実験では $d_{IN}=4.0\text{cm}$ のみとしたが、これは明らかに狭いことがわかる。しかし、吸入口の巾 d_{IN} が大きいほど効率がよくなる反面、諸々のトラブル、例えば、道具が吸い込まれてしまった、加工材の隅角部が吸入口のところでつかえた、木片が吸い込まれ、ダクトホースのどこかで引掛ってしまった等が

Table 5.5 List of the examples of computational simulations and the results of efficiencies of wood shavings collections.

シミュレーションの計算例のリストと集塵効率の結果

計算例番号	吸入速度 $V'_{z,IN}$	吹出速度 $V'_{z,OUT}$	吸入ダクトの位置 L	吸入ダクトの幅 d_{IN}	集 塵 効 率 E (%)							
					$h'_{\max}=0.50$		$h'_{\max}=0.95$		$h'_{\max}=1.45$		$h'_{\max}=1.95$	
					F	S	F	S	F	S	F	S
1	-0.2	0	31.2cm	4.0	67.4	81.6	51.4	74.2	45.8	71.0	44.6	69.8
2	-0.3	0	"	"	77.8	87.2	68.2	81.0	64.2	81.0	64.6	82.2
3	-0.4	0	"	"	83.4	92.6	78.8	89.0	76.6	87.8	76.6	88.6
4	-0.5	0	"	"	88.4	94.2	82.2	92.4	82.8	91.4	84.4	91.8
5	-0.2	-0.2	31.2	4.0	67.6	81.4	46.0	64.2	31.0	49.8	25.2	45.4
6	-0.3	-0.3	"	"	76.4	87.0	57.8	76.4	48.0	70.4	47.0	69.8
7	-0.4	-0.4	"	"	84.8	92.4	75.0	84.6	68.8	81.0	68.0	82.8
8	-0.3	0	29.1	4.0	72.4	85.6	61.8	80.2	59.0	79.0	60.0	80.0
9	-0.4	0	"	"	81.6	91.2	76.8	87.4	74.0	85.8	74.2	86.0
10	-0.5	0	"	"	85.8	93.6	80.8	91.6	81.4	91.0	82.2	91.4
11	-0.2	-0.2	29.1	4.0	60.2	75.8	37.4	56.2	23.8	42.0	17.2	33.8
12	-0.3	-0.3	"	"	71.6	84.4	51.4	71.2	40.2	62.0	38.2	61.8
13	-0.4	-0.4	"	"	81.0	90.6	67.6	82.0	59.8	80.0	60.6	80.0
14	-0.2	0	30.0	5.7	79.8	88.4	66.4	81.6	63.2	80.4	63.2	81.8
15	-0.3	0	"	"	87.0	93.2	80.2	90.6	78.8	89.4	78.2	89.2
16	-0.4	0	"	"	91.8	94.8	87.2	93.8	85.6	92.8	85.8	91.8
17	-0.5	0	"	"	93.4	96.2	92.0	95.0	90.6	94.6	90.4	95.2
18	-0.2	-0.2	"	5.7	78.6	88.4	58.4	75.4	46.4	66.0	41.4	64.6
19	-0.3	-0.3	"	"	87.2	93.4	76.6	87.8	75.0	85.2	73.6	86.2
20	-0.4	-0.4	"	"	91.8	94.8	83.6	92.6	80.0	91.0	81.4	90.2
21	-0.4	0			93.4	95.4	90.0	94.0	88.0	93.6	88.6	93.4

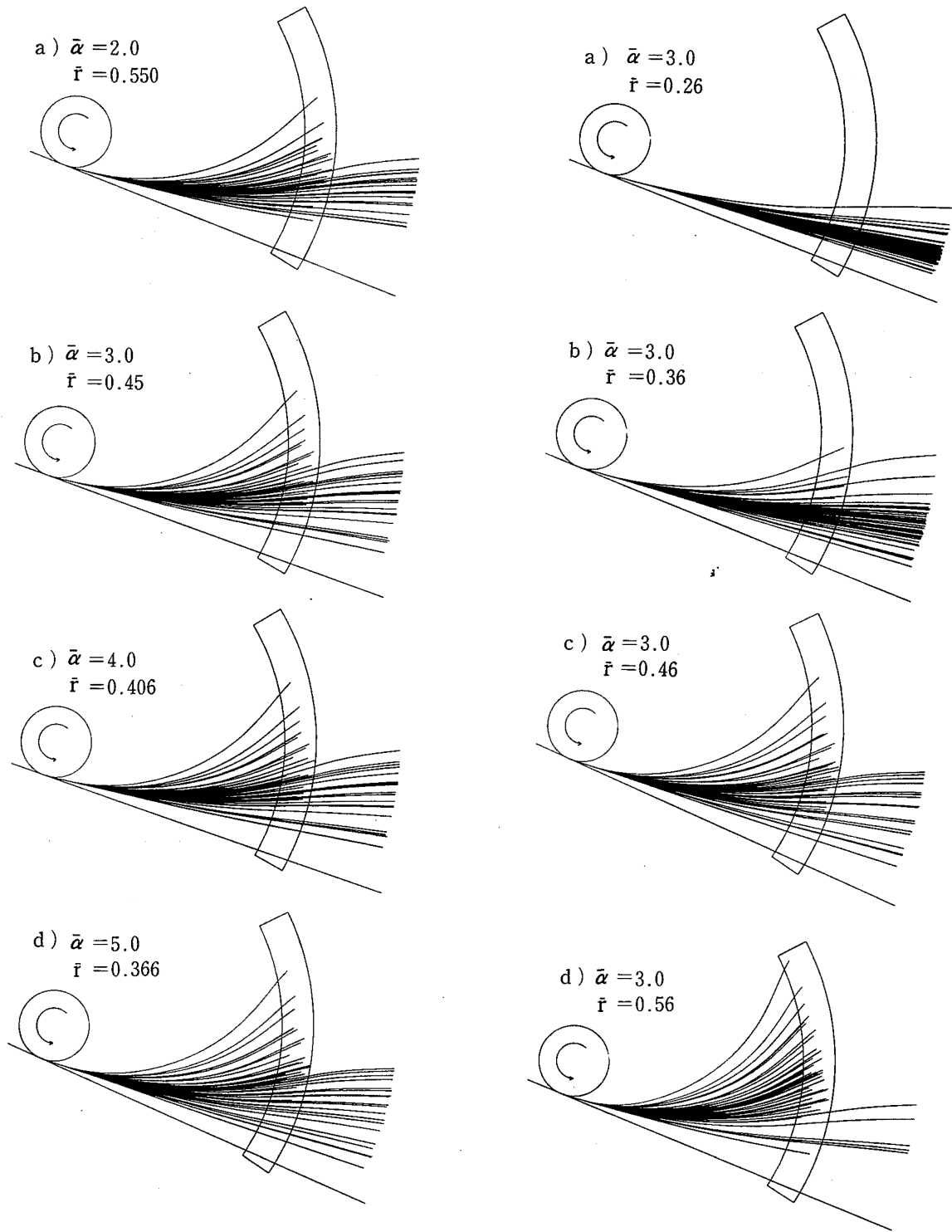
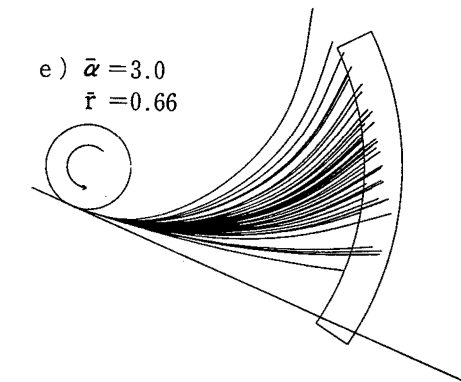


Fig. 17 Loci in some couples of $\bar{\alpha}$ and \bar{r} those satisfied experimental results
 実験結果を満足する $\bar{\alpha}$ と \bar{r} の組合せのときの運動径路

Fig. 5-18 Loci in some couples of α and \bar{r} ($\bar{\alpha}=3.0$)
 $\bar{\alpha}=3.0$, $\bar{r}=0.26\sim 0.66$ のときの運動径路→



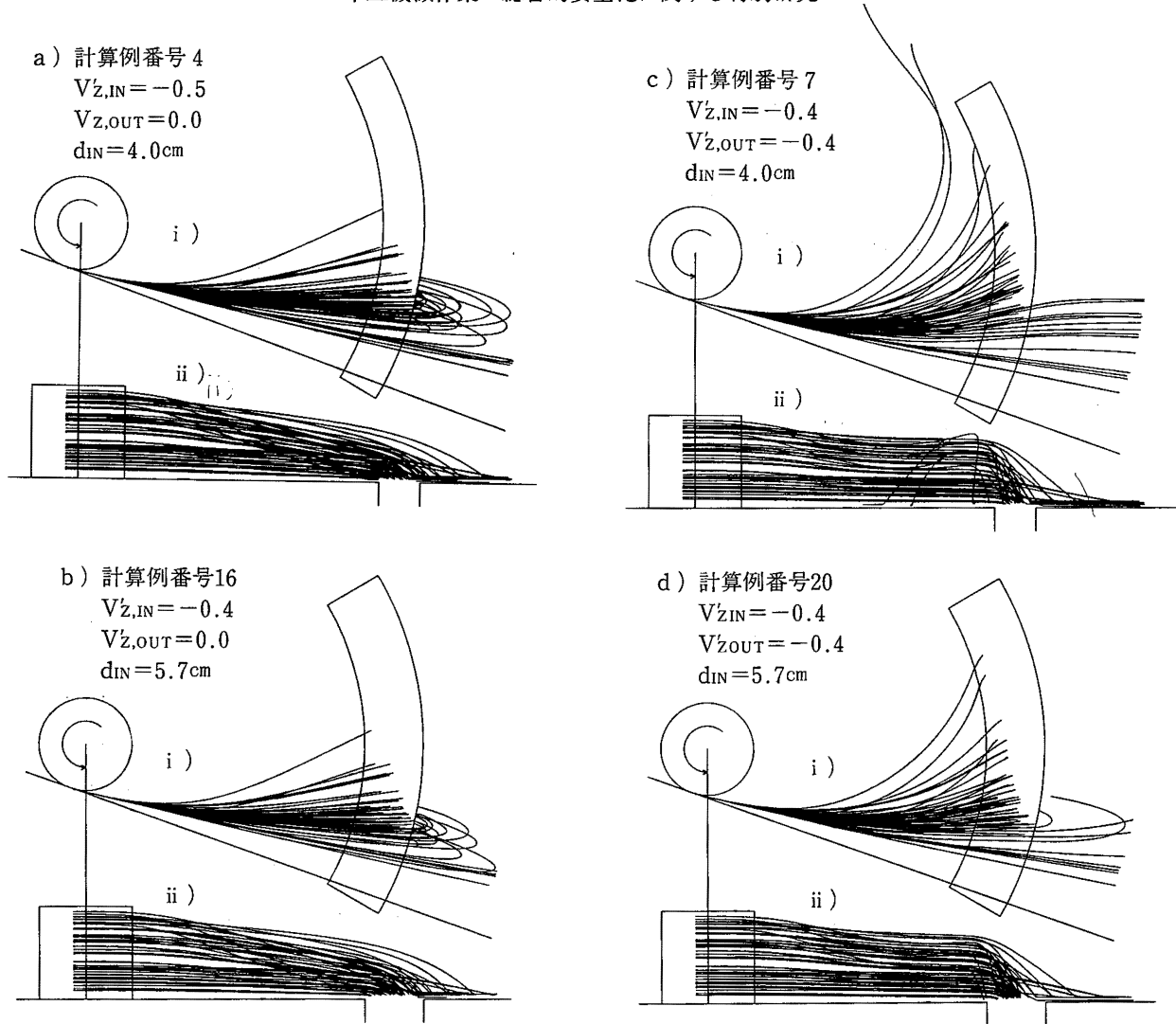


Fig. 5-19 Some examples of loci of wood shavings in computational simulations
シミュレーションの結果，運動径路の例

生じる可能性がある。よって上記の結果から，切削速度が 5 cm/s 程度の通常の作業の状態を想定すると， d_{IN} は 6.0 cm 前後が適当で， $V_{z,IN}$ は 0.4 ($V_{z,IN} = 18.8 \text{ m/s}$) 程度の流速は必要であろうと思われる。

次にシミュレーションによる仮想球体の運動径路を描いた例を Fig. 5-19 に示す。実験結果とよく似てはいるが次の点で実験とは少し異なる。

気流速度の計算では前にも述べたように軸対称，円筒座標系で解析している。しかし，現実には加工材が作業盤にあるため，木材の近辺では周方向の流速は阻害されているので，計算で得た周方向の気流速度 V_θ は現実より大きくなっているはずである。このためであると思われるが，Fig. 5-19 では運動径路が周方向に湾曲しているが実験での観察では Fig. 5-9 のように，

この湾曲はやや少ない。

iii) シミュレーションではカッターから切削屑が離れる瞬間における飛散の方向は全て -105° に一定としたが，実験では，激しい乱れが生じ，切削の飛散する方向は一定でなく，ある範囲内の角度で飛散する。

よって，本研究におけるシミュレーションは局部的には，まだ不満足な点が残るが現段階では止むを得ないであろう。

次に研究に取りかかる段階で，吹き出し装置は集塵効率を高めるのに大いに役立つものと期待し，実験及びシミュレーションともその条件を加えて実施してきた。しかし，シミュレーションの結果からも実験と同様にその有効性は乏しいようである。3.2.2 の実験結果のところでは h_{max} が大きくなると吹き出し噴流は補助

的に必要になるのではないかと述べたが、Table 5-5の結果からみて、その必要はないものとみてよいのではないかと思われる。運動径路について両者の差異をみると Fig. 5-19から、同図の a), b) は吹き出しのない場合で、c), d) は吹き出しがある場合であるが、各図の下側の ii) 図（運動径路の垂直方向の位置を示す図）から、吹き出しのある場合には明らかにその影響によって、飛散しせきた仮想球体は急速に吸入口の方に方向を変えることがわかる。しかし吹き出しのない場合には、a), b) のそれぞれ ii) 図を見ると、運動径路は c), d) のそれに比べ滑らかに吸入口の方に流れるのがわかる。

またカッターの中心から吸入口の中心線までの距離 L はできるかぎり近い方が望ましい。その理由は L が大となれば吸入口の円周方向の中を大きくする必要が生じ、吸入口で所定の流速を得るためには、大きな動力源が必要となるためである。しかしカッターの駆動装置などの機械自身の空間的制約があること、 L が小さいと Table 5-5より集塵効率が落ちること等から $L=30\text{cm}$ 程度が最適ではないかと考えられる。

5.4 結 び

以上のように、実験及びシミュレーションなどの結果をまとめてみると、次のようになる。

- 1) Aタイプの集塵方法では、
 - i) 吹き出しダクトの角 ϕ は 30°
 - ii) カッターの回転中心から吹き出しダクトの開口中心までの水平距離 L は $36\text{cm}\sim 40\text{cm}$
 - iii) 吸入口、吹き出し口の開口断面寸法は Fig. 5-1に図示したもの
 - iv) 吹き出しダクトの中心から作業盤までの高さ H は、 $13\text{cm}\sim 15\text{cm}$
 - v) V_{OUT} が 10m/s 程度、 V_{IN} が 15m/s 程度以上
 - vi) 切削角度 ψ は、 $\pm 10^\circ$ の範囲
 の条件のとき、回転数 10000r.p.m で集塵率 90% 以上、 5000r.p.m では、 95% 程度期待できるものと思われる。ただし、実験では1種類の木材だけであったので木材の種類が異なると、効率も変わってくると思われる。このため吸入口での流速を 15m/s 以上とすることができるよう設計しておくことが望ましい。また、吹き出し側の流速も、あまり強すぎると、逆に集塵効率が劣るようになる。このため吹き出しダクトの管路

中にダンパ等を設け、作業内容によって適宜調整できるようにしておくことが望ましい。

2) Aタイプの集塵装置 (Fig. 5-1) は、吹き出しダクトの保持台が、実際の作業では障害となることが予想される。よって実用化にあたっては、1) において記した条件を満足させつつ、作業の障害にならないように設計する必要がある。また、吹き出し側管路についても空気抵抗の大きい形状となっているので、空気抵抗の少ないものに改める必要がある。

3) Bタイプの集塵方法では、

i) カッターの中心から吸入口の中心までの距離 L は、 30cm 程度

ii) 吸入口の中 d_{IN} は 6.0cm 程度

iii) 吸入口での流速 $V_z'_{\text{IN}}=0.4$ 程度

iv) 切削速度が 5 cm/s 程度の通常の作業

の条件のとき、集塵効率は 90% 以上期待できるものと思われる。研究当初においては吹き出し気流によって集塵効率が高められると考えたが、結果としては不要のようである。

4) 実用にあたっては、吸入口には、切削屑以外の器物の吸入防止の格子を設けること。また、圧力調整弁（バイパス流入口）が必要となる。

参 考 文 献

- 1) P.J. ROACH Computational fluid dynamics, 高橋亮一訳, 構造計画研究所, 1976
- 2) B.E. LAUNDER, D.B. SPAULDING Mathematical models of turbulence, Academic press, 1972
- 3) K. HANJALIC, B.E. LAUNDER A Reynolds stress model of turbulence and its application to thin shear flows, J, Fluid Mech 52, part A, p 609, 1972
- 4) 野村豪他 室内空気分布の数値解法に関する研究 (1)~(9)昭和49, 50年度日本建築学会大会学術講演梗概集
- 5) C.W. HIRT, J.L. COOK, Calculating three dimensional flows around structures and over rough terrain, J of Computational Physics 10, 324, 1972
- 6) B.D. NICHOLS, C.W. HIRT Calculating three dimensional free surface flows in the vicinity of submerged and exposed structure, J of

Computational Physics 12, 234, 1973

- 7) 佐藤正章他 軸対称流の数値解析法, 昭和53年度
日本建築学会大会学術講演梗概集
- 8) 磯田和男他 FORTRAN による数値計算ハンド
ブック, オーム社, 1972
- 9) 機械工学便覧 日本機械学会編, 1968

なお, 本研究においては労働省産業安全研究所電子
計算機システム FACOM M-150 F システムを使用
した。

(昭和57年7月30日受理)