論文

旋回流動研磨法による高硬度ステンレス鋼微細穴の仕上げ加工と端面の面取り*

杉 森 博** 黒 部 利 次*** 広 瀬 四 十 三†

Finishing of the Inner Wall of Tiny Nozzle and Chamfering of Nozzle Edge by Gyration Flow Finishing Method

Hiroshi SUGIMORI, Toshiji KUROBE and Susumi HIROSE

It is necessary that the inner wall of the tiny nozzle used in a water jet cleaner is very smooth and also its nozzle edge is chamfered. Finishing of the inner wall of the tiny nozzle is very difficult by ordinary finishing methods. Gyration flow finishing method recently has been newly developed in which polishing is conducted using polishing fluid suspended peach seeds and grains into olive oil. Present study focuses on the effect of the polishing fluid supplied from the back side of workpiece. It is found that the suck out of polishing fluid from the back side of workpiece is very effective for chamfering of the nozzle edge. Experiments show that the size of the peach seed has an influence on chamfering quantity of the nozzle. It is shown that the jet force of the water jet cleaner of which nozzle is polished by the polishing method is made to increase by 30%.

Key words: water jet cleaner, tiny nozzle, polishing, slurry, gyration

1. 緒　言

近年，水噴流（ウォータジェット）の利用技術は急速な広がりと発展を遂げてきており，機械工業や建設・土木分野ばかりでなく鉱業や食品，医療分野にまで拡大・普及するに至っている[1]．それは，水噴流の有する洗浄能力や表面処理能力，高圧噴流の破砕・切断能力が優れていることによると考えられる[2]．洗浄に関しては，最近その能力の一層の向上を目指して高圧水噴流技術の開発が盛んに行われている．そして，高圧水噴流の噴射エネルギーが高まるにつれて，洗浄だけでなくバリ取りも可能になってきている．バリによるオートマチック車のミッション系のトラブルの防止を図るため，高圧洗浄機が開発された．この水洗浄機は，高圧水を回転させたり偏心ノズルによって噴射させたり複数のノズルによって効率を高めたり多様な形態をとっている[3]．用途に応じて，ノズルも様々な形態（向き，数，大きさ等）のものが開発されている．

洗浄機の性能を決める因子の一つに，ノズルの形がある．ノズル内壁面の研磨とノズルエッジ部の微細バリの除去，丸み付け（R 形状の面取り）が求められている．一般に，微細穴内壁面の研磨は，ダイヤモンドパウダーを練り込んだペーストを特殊な研磨棒（研磨工具）に塗り付けて，それを被研磨穴に挿入して手操作で往復動させることによって行っている．その仕上げ具合は，経験的技能に追うところが多く研磨の自動化は極めて難しいと考えられている．そのため，加工コストも必然高価なものとなる．この難点を解決すべく，最近旋回流動研磨法が開発[4]された．それは，油に砥粒と添加材を懸濁させた研磨液を微細穴中で旋回流動させることによって穴内壁面を研磨する方法である．比較的簡易な装置で，能率良く平滑な研磨面が得られる点に特徴がある．

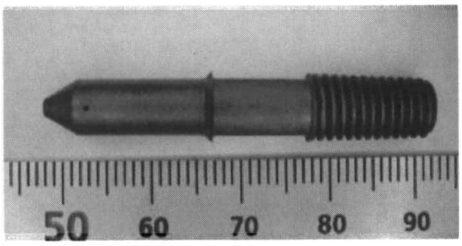
本研究では，旋回流動研磨法を用い洗浄機用ノズル内壁面の研磨とノズル穴裏面側エッジ部の丸み付けを目的として，その研磨方法について検討した．

2. 実 験 方 法

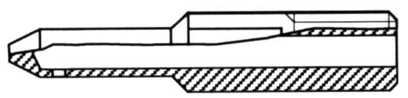
2.1 試料および研磨装置

対象とした洗浄機用ノズルは，図1に示すように一端を閉じた中空円筒に微細な穴が穿たれたものである．穴は，円筒の中心軸に対して垂直にあけられている．ノズルには，高圧水が円筒上方（開放端側）から注送され，水平方向に穿たれている微細穴を通って水が噴射される．噴射の様態は，微細穴内壁面の仕上げ状態と穴エッジ部の丸め度合いに依存する．
まず研磨条件を調べるため，洗浄機用ノズルの微細穴に似せた穴をステンレス鋼板に穿ち，その穴の研磨とエッジの丸めについて検討を行った．被研磨試料（ワークと呼ぶ）を，次の手順で作製した．①NC 型彫り放電加工機を用いて穴加工を行う．②穴をあけたステンレス鋼板を熱処理によって硬化させる．③熱処理によって生じた黒皮をブラスティングによって除去する．ブラスティングは，実機に搭載のノズルを想定して片面（表側）だけ行われた．①~③の操作の後，穴内壁面の研磨を行った．図2に示すように，放電加工によってあけられた微細穴を有するワークを，穴長手方向が水平になるように放電加工機の主軸に取り付ける．その後，研磨液を旋回させるための研磨工具を試料の表側から穴の中に挿入する．研磨工具は，NC 型彫り放電加工機のテーブル上に置かれているブラシレスモータの主軸に取り付けられている．穴の裏面側には，研磨液溜りを設けている．実験に際し，研磨液溜りに所定量の研磨液を入れる．

* 原稿受付 平成14年1月21日
** 正 会 員 富山県工業技術センター（富山市高田383）
*** 正 会 員 金沢大学工学部（金沢市小立野2-40-20）
† ㈱スギノマシン（滑川市栗山2880番地）



(a) Photograph of water jet cleaner nozzle



(b) Schematic view of water jet cleaner nozzle

Fig.1 Water jet cleaner nozzle

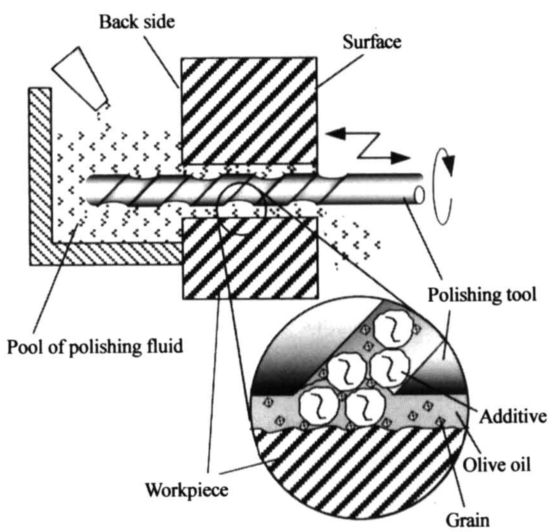


Fig.2 Schematic diagram of polishing method

Table 1 Polishing condition

Workpiece	SUS440C
Hardness	HRC56
Nozzle diameter	ϕ0.52 mm
Thickness	1.5 mm
Polishing tool	SKH51
Diameter	ϕ0.49 mm
Length	7 mm
Groove helix angle	45°
Groove width	0.45 mm
Groove depth	60, 147, 169 μm
Fluid	Olive oil
Grain	WA (Al_2O_3)
Average size	4 μm
Concentration	30 wt.%
Additive	Peach seed
Average size	88, 175, 197 μm
Concentration	5 wt.%
Polishing time	0~20 min
Feed rate	1000 mm/min
Feed length	2 mm
Spindle revolution	30000 min^{-1}

研磨液は，スラリー（オリーブ油に砥粒を懸濁させた液）に添加材（桃の種の粉末）を加えたものから成っている．実験中，適宜研磨液を補充した．研磨は，左ねじれ溝を有した研磨工具を左回転（逆回転）させながら穴から出し入れ（水平方向に移動）して行われた．この操作によって，研磨液は穴の裏面側から表側に流出し穴内壁面を研磨する．

本研磨法の場合，研磨工具の形状が研磨特性に影響を及ぼす．このため，次の手順で研磨工具を作製した．①ϕ1mm の高速度工具鋼製丸棒を，放電加工でϕ0.49mm×長さ 7mm のピンに形成する．次に，②一定のリード角を持った凸形状のブロック電極をワイヤカット放電加工機で作製する．③ピンとブロック電極の間で放電加工を行い，溝を形成して所要の研磨工具に仕上げる．

2.2 実験条件および評価方法

厚さ 1.5mm のステンレス鋼板に，外径 0.5mm×内径 0.2mm のパイプ電極を用いて放電加工によって被研磨用の微細穴を穿孔した．同一条件で数十個の穴を穿孔したが，その平均穴径はϕ0.54mm であった．しかし，熱処理後ブラスト処理を行ったため試料表側の穴形状はいびつになり，平均穴径がϕ0.52mm と小さくなった．実験条件を**表 1** に示す．

研磨後の穴の評価を次の方法で行った．研磨終了後，非接触画像三次元測定機（スマートスコープ：OGP 社製）を用いて穴の寸法測定ならびに穴外観の顕微鏡観察を行った．次に，穴の内壁面を評価するために，穴の中心位置を通るようにワイヤカット放電加工機によって穴のあいたステンレス鋼板を切断した．切断後，十分脱脂洗浄した後，触針式表面粗さ計（ペルトメータコンセプト：マール社製）を用いて穴の内壁面を長手方向に触針を走査させて表面粗さを測定した．測定長さ及びカットオフ値は 0.8mm である．穴の裏面側エッジ部の形状測定には，触針式表面粗さ計を用いて試料を 45° 傾けた状態で測定を行った．また，走査型電子顕微鏡（SEM）によって穴内壁面の観察を行った．

3. 実 験 結 果

3.1 研磨姿勢の影響

従来の旋回流動研磨法は，微細穴（長手方向）を鉛直方向に立て研磨液を穴の上端面から供給して研磨する方法である．しかしながら，今回対象としたノズルは，その穴の長手方向は水平方向になっており，穴内壁面の研磨も研磨液を水平方向に流れるようにして研磨工具を水平方向に駆動するのが実際的であると思われる．この場合，研磨液を鉛直方向から流す方法と水平方向に流動させる方法とでは，研磨機構が幾分異なるのではないかと考えられる．そこで，研磨姿勢（研磨液の流動方向）が研磨特性にどのような影響を及ぼすのか以下に検討した．

ステンレス鋼板に穿った穴を鉛直（縦型と呼ぶ）と水平（横型と呼ぶ）方向にセットして，実験を行った．縦型の場合，穴の裏面側が上になるように配置し研磨液を穴上端面から供給した．横型の場合，研磨液は穴の裏面側から供給した．実験では，スラリーに粒径 88μm の桃の種を添加材として加えた研磨液を用いて研磨を行った．**図 3** に，研磨時間と表面粗さの関係を示す．図 3 から，いずれの研磨姿勢（縦，横の流動）の場合も表面粗さは加工の開始とともに急減し，数分の後一定の値をとることがわかる．粗さの低減に要する時間は，縦型の方が横型よりも幾分長いがその漸減値はほぼ同程度であると思われる．**図 4** に，10 分間研磨した後の裏側の穴の光学顕微鏡写真を示す．図 4 から，横型の場合穴下側エッジ部の黒い輪郭がやや濃く見えるが，縦型と比べて大きな違いは認められない．すなわち，縦型と横型では研磨特性はあまり違わないと言える．そのため，

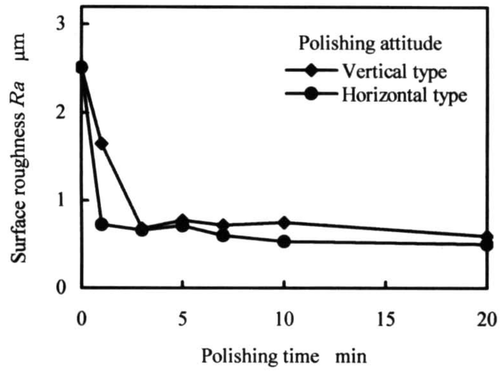
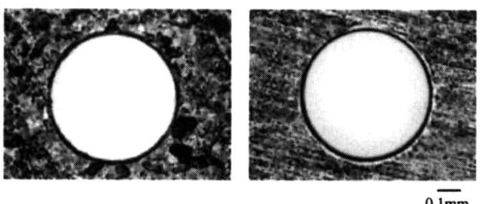
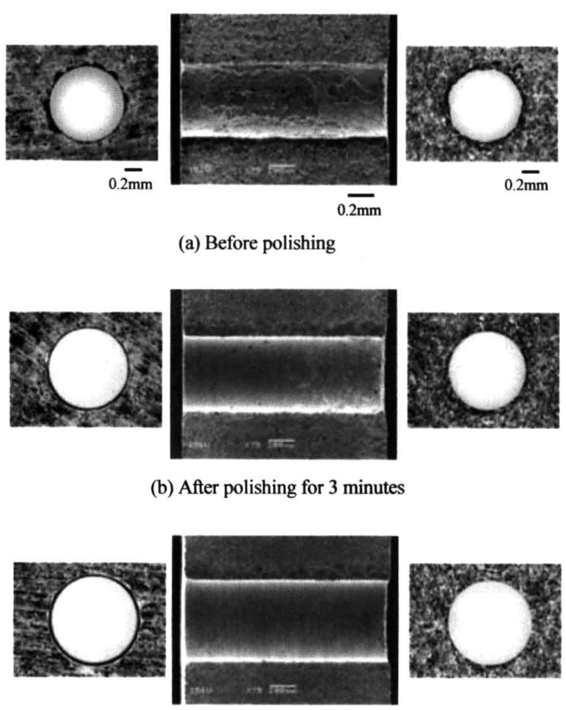


Fig.3 Influence of polishing time on surface roughness for the polishing attitude



(a) Vertical type (b) Horizontal type

Fig.4 Optical micrograph of outside of the nozzle in back side of workpiece



(a) Before polishing

(b) After polishing for 3 minutes

(c) After polishing for 20 minutes

Back side Inner nozzle Surface

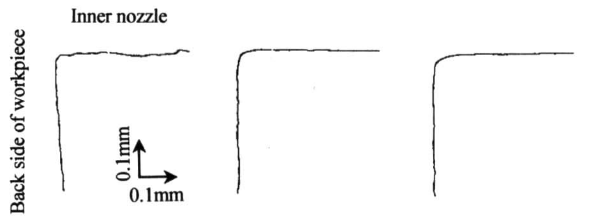
Fig.5 Optical micrographs of outside of nozzle and SEM micrographs of inner nozzle

以後の実験では穴の長手方向を水平にした横型で研磨を行った．

3.2 穴形態の変化

図 5 に，穴長手方向を水平にして研磨したときの穴両端面の光学顕微鏡写真と穴内壁面の SEM 写真を示す．**図 6** に，穴裏面側エッジ部の形状測定の結果を示す．研磨は，前節と同様の条件のもとで行った．図 5，図 6 の(a)に研磨前の表面性状と表面形状を，(b)，(c)に，3，20 分間研磨した後のものを示している．図 5(a)から，研磨前の試料の場合，ブラスティングを施した表側の穴はゆがんだ穴（円）になっており，穴端部は内側へその形状がくずれ込んでいることがわかる．一方，ブラスティングを施さない穴の裏面側には，表面に熱処理による黒皮が残存しているものの穴の形状は良好で，エッジ部のくずれもほとんど見られない．穴の内壁面について見ると，放電加工面特有の放電痕は見られず荒れた面になっていることがわかる．

穴に研磨を施した図 5，図 6 の(b)，(c)を見ると，研磨時間を 3，20 分と長くしていくと穴裏面側エッジ部は角が取れて滑らかに丸まっていくことがわかる．光学顕微鏡像で黒い輪郭が見える部分は，角が丸まった部分だと思われる．さらに，表側の穴エッジ部のダレ（形状のくずれ）は徐々に取れて次第に角が立って（シャープなエッジ）くることがわかる．また，穴のゆがみも取れて丸い円になってくる．そこで，研磨によって表側の穴がどの程度の真円になるのか非接触画像三次元測定機を用いて評価した．真円度は，穴の円周を 8 等分して 8 箇所の点から算出されたものである．**図 7** に，測定結果を示す．図 7 から，研磨開始に伴って急速に真円度の値は小さくなり，その後漸減傾向を示すことがわかる．



(a) Before polishing (b) After polishing for 3 minutes (c) After polishing for 20 minutes

Fig.6 Edge profiles of the nozzle

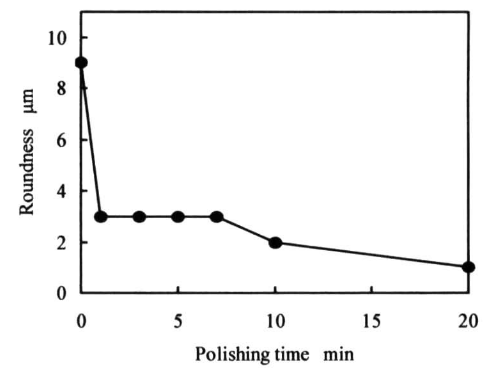


Fig.7 Influence of polishing time on the roundness of nozzle

3.3 エッジ丸めに及ぼす添加材粒径の影響

添加材（桃の種）の粒径が，穴内壁面の表面粗さとエッジの丸めにどのような影響を及ぼすか検討した．添加材として粒径 88，175，197 μm の 3 種類の桃の種を用いて，実験を行った．添加材は，研磨工具の溝に入った状態で穴内壁面に接触する深さにした方が研磨能率が上がる [5] ことが明らかとなっている．そこで，研磨工具を穴に挿入した状態で溝底面から穴内壁面までの距離と添加材の直径がほぼ同一になる様に，研磨工具の溝深さを添加材の粒径によって変化させた．粒径が 88 μm の添加

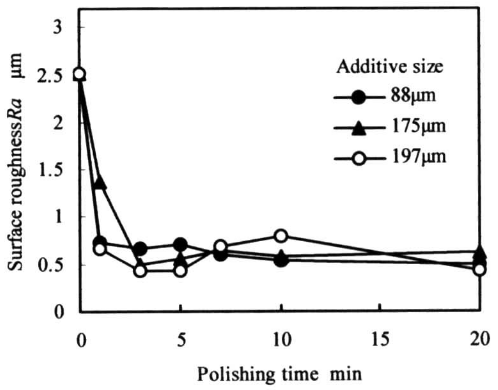
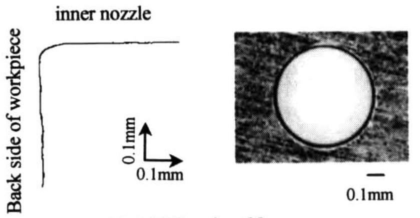
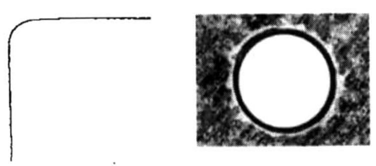


Fig.8 Effect of additive size on surface roughness



(a) Additive size: 88 μ m



(b) Additive size: 197 μ m

Fig.9 Edge profiles of the nozzle and optical micrographs of outside of the nozzle in back side of workpiece

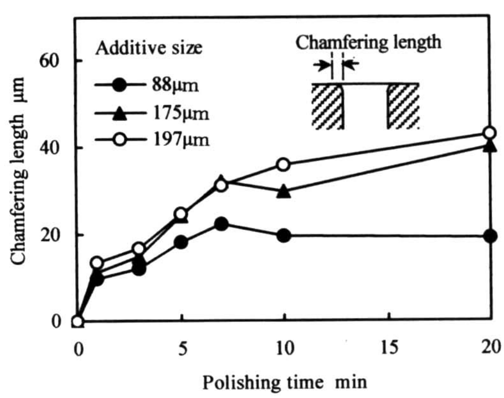


Fig.10 Influence of polishing time on chamfering length for additive size

材の場合，研磨工具の溝深さを60 μ m とし，175 μ m の添加材では147 μ m の溝深さ，197 μ m の添加材の場合は169 μ m の溝深さとした．**図 8** に，研磨時間と表面粗さの関係を示す．図 8 から，いずれの粒径の添加材の場合も研磨直後に表面粗さは急減し，その後ほぼ一定の値を示すことがわかる．表面粗さの値に粒径依存性は認められない．

次に，添加材の粒径による穴裏面側エッジ部の丸めに及ぼす影響について検討した．添加材として粒径 88, 197 μ m の 2 種類の桃の種を用いて，10 分間研磨を行った．**図 9** に，研磨後の穴エッジ部の形状を測定した結果と穴の外観写真を示す．図 9 から，大きい粒径の添加材を用いて研磨した方が小さい粒径の場合よりもエッジ部の丸めが大きいことがわかる．そこで，このエッジ部の形状変化を定量的に評価するため，研磨による裏面側の穴の面取り量（穴端面の穴の半径－穴内面の穴の半径）の変化について検討した．**図 10** に，添加材の粒径を 88, 175, 197 μ m として研磨した時の研磨時間と面取り量の関係を示す．図 10 から，面取り量はいずれの粒径の添加材の場合も研磨時間の経過とともに次第に増加していく．しかしながら，7~10 分経過する辺りで飽和もしくは漸増傾向へと推移する．面取り量の絶対値は，粒径の大きい添加材の方が小さな粒径の場合よりも大きいことがわかる．

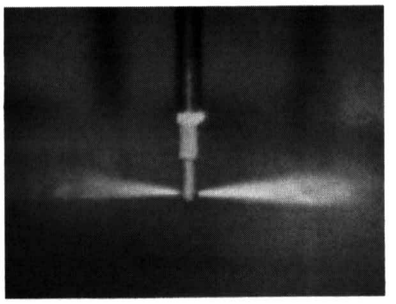


Fig.11 Water jet test

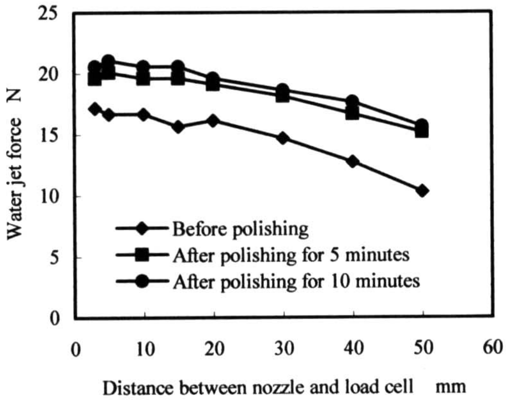


Fig.12 Influence of distance between nozzle and load cell on water jet force

3.4 洗浄機用ノズルへの適用

旋回流動研磨法によって仕上げた洗浄機用ノズルの水の噴射性能について調べた．ノズルは，図 1 に示すもので穴（ϕ 0.52mm）は互いに反対方向に 2 個あけられている．研磨は，これまで検討してきた方法で行った．すなわち中空円筒に研磨液を入れ，微細穴の外側から挿入された研磨工具によって外に研磨液を排出させて研磨を行った．研磨液は，スラリーに粒径 88 μ m の桃の種を加えたものから成っている．研磨時間を 5 分及び 10 分とした．水の噴射性能は，一定圧力（50MPa）の水をノズルから噴射させ，これを ϕ 10mm の円盤（ロードセル）が受ける荷重で評価した．**図 11** に，水をノズルから噴射させたときの様子を示す．ノズルから出た水は，ある程度広がっている．**図 12** に，ノズルとロードセルの距離とロードセルの受けた荷重（噴射力と呼ぶ）の関係を示す．図 12 から，いずれもノズルとロードセルが離れるに従って噴射力が小さくなっているのがわかる．また，研磨後のノズルは研磨前に比べると約 3 割程度噴射力が大きくなっている．しかし，研磨時間による差はあまり大きくないといえる．噴射性能の向上は，研磨によって穴の裏

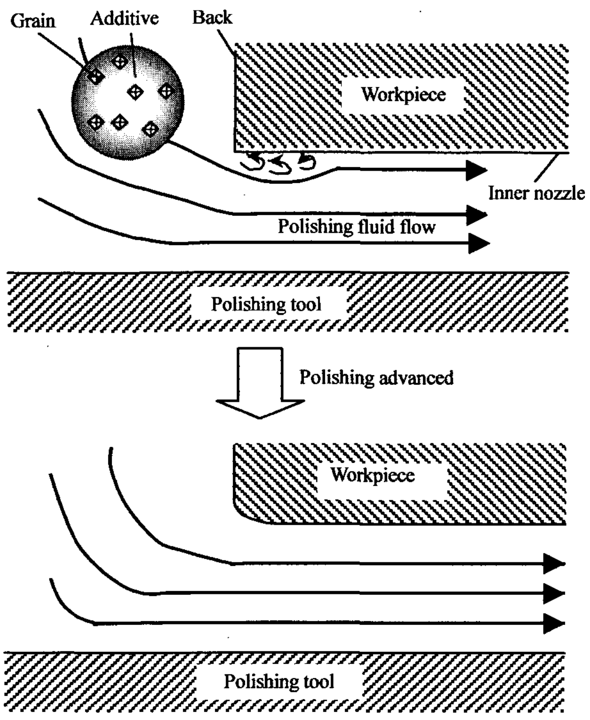


Fig.13 Polishing model

面側に丸み付けがなされ，同時に穴内壁面が平滑になったためにもたらされたものと思われる．

4. 考　察

旋回流動研磨は，ねじれ溝のある研磨工具と穴内壁面で構成される，ねじ型粘性ポンプの作用によって研磨液（スラリーに添加材を加えた液）を穴全域に供給しながら研磨を行う加工方法である．このため，研磨工具を溝のねじれ方向と同じ方向に回転させると研磨液は研磨工具の回転によって穴裏面側の研磨液溜りから研磨工具の溝に沿って穴内壁面に吸入され，穴表側から排出される．この間，研磨工具の回転によって研磨工具のねじれ溝にそって流動する添加材が，研磨工具外周を円周方向に流動している微細砥粒を保持して一種の弾性砥石を形成して研磨を行う．研磨姿勢の影響が少ないのは，本研磨法がこのような研磨機構によって行われるためと考えられる．

次に，穴エッジ部の丸め（形状変化）について考える．**図 13** に，研磨液が研磨液溜りから研磨工具のねじれ溝に沿って穴内壁面に流入する模式図を示す．図 13 から，研磨液は研磨工具の回転によって広い研磨液溜りの空間から狭い研磨工具の溝部分に流入する．その際，研磨液の流れは研磨工具のねじれ溝に沿う方向だけでなく様々の方向から穴入口に向かっており，穴の内部に入ると急激に絞られその場所では流速が速くなる[6]．その際，穴エッジ部近傍を流れる研磨液中の砥粒が激しくエッジ部に衝突し研磨作用を行うとともに，添加材の桃の種も衝突しながら壁面に擦過作用を営む．また，桃の種に食い込んだ砥粒は壁面に対して研削作用を及ぼすものと考えられる．これらの研磨作用が重畳して，次第に穴裏面側エッジ部が丸くなっていくものと思われる．しかしながら，エッジ部が丸くなってくると流れの収縮が少なくなっていき穴エッジ部での流速も研磨開始のときよりも遅くなり安定した流れに変わっていくと考えられる．このため，研磨時間が一定時間に限られている場合には，エッジ部の丸みはある程度のところで飽和すると思われる．一方，研磨液が穴から流出する際，研磨液は主に研磨工具のねじれ溝に沿った方向に流れ，穴エッジ部はあまり削られないものと考えられる．研磨によって穴内壁面は，削られるが穴の表側のエッジ部を丸くする作用は少なく，このため角がシャープになるものと思われる．

最後に，添加材の大きさの影響について考える．穴エッジ部の丸め付けは，前述の通り研磨液が穴内壁面に吸引される際に穴裏側エッジ部で急激に絞られ液中の砥粒や添加材がエッジ部に激しく衝突してなされる．吸引力を一定とすれば，衝突エネルギーは砥粒や添加材の大きさ（粒径）に依存することになる．粒径の大きな添加材を使用して研磨した場合，エッジ部の面取り長さが大きくなるのはこの理由によると思われる．これは図 9 の結果から良くわかる．ここで，穴内壁面の表面粗さ（図 8）の値が粒径にあまり依存しないのは，エッジ部の丸め機構と表面粗さの低減機構が異なることによると言える．

5. 結　論

洗浄機用ノズルの仕上げ加工を想定して，高硬度ステンレス鋼板に穿った微細穴内壁面の研磨と穴エッジ部の丸めを旋回流動研磨法を適用して行った．その結果，次の結論を得た．

(1) 穴内壁面の仕上げ状態に，穴を鉛直もしくは水平にして研磨する研磨姿勢の影響はほとんどみられなかった．
(2) 穴裏面から研磨液を吸入して表側へ排出することで，穴裏面側エッジ部の丸み付けと穴内壁面の平滑化が可能となった．
(3) 添加材の桃の種の粒径を大きくすると，面取り量が増えた．
(4) ノズルを旋回流動研磨法によって仕上げると洗浄機の噴射力が向上した．

謝　辞

終わりに，添加材を提供いただいた新東ブレーター㈱に感謝いたします．

参 考 文 献

1) 清水誠二：滴水穿石，機械学会誌，102，6（1999）342.
2) 高見邦英：水で物を切る，機械学会誌，103，12（2000）796.
3) ウォータジェット学会編：ウォータジェット技術事典，丸善，（1993）126.
4) 杉森博，黒部利次：放電加工微細穴内壁面の高速旋回流動研磨，砥粒加工学会誌，45，2（2001）79.
5) 杉森博，黒部利次：放電加工された微細穴内壁面の高速旋回流動研磨（第 2 報），砥粒加工学会誌，45，12（2001）591.
6) 冨田幸雄：水力学，実教出版，（2000）247.