

# 極細ステンレス鋼管内壁の高速流動研磨 (第2報)\*

— 内径の異なる各種細管の研磨特性 —

山本桂一郎\*\* 黒部利次\*\*\* 山田良穂\*\*\* 三浦毅彦†

High Speed Slurry Flow Finishing of Inner Wall of Stainless Steel Capillary (2nd Report)  
- Polishing Characteristics of Some Different Size of Capillaries -

Keiichiro YAMAMOTO, Toshiji KUROBE, Yoshinori YAMADA and Takehiko MIURA

Stainless steel pipe with fine hole and long size has recently needed for the flow line of pure gas and liquid, which is used in the field of precision machinery. Inner wall of such a pipe should be finished with high precision. Stainless steel pipes with different size of inner diameter are polished by flowing slurry at high velocity through the capillary. Finishing modes are examined in detail by scanning electron microscopy and profilometry. It is found from the experiments that the surface roughness of inner wall of as-received stainless steel pipe is reduced gradually with slurry passes, in which larger inner diameter of pipe has very enormous reduction rate in early stage of finishing. Usage of larger grain becomes to yield higher reduction of surface roughness. It is said that concentration of grain has a great effect on small inner diameter of pipe, but less effect on larger ones. Optical and scanning electron micrographs of the polished surface indicate that texture pattern of the inner wall disappears with slurry pass number, in which texture disappear in early stage of low pass number in small inner diameter of pipe, but not in larger ones.

**Key words:** stainless steel capillary, slurry flow finishing, different size of pipes, surface roughness

## 1. 緒 言

ステンレス鋼極細管（キャピラリー）はその内径が1mm以下であり、かつ、素管長は数十cmから数mに及ぶ長尺管である。ステンレス鋼極細管は、精密機器に組み込まれるガス系の配管や液体系の配管として使用されるため、管内壁は研磨する必要がある。近年、内壁の加工精度に対する要求がますます厳しくなっている。内径が極めて小さく、かつ長尺であるステンレス鋼極細管の研磨には、在来の研磨法<sup>1)~5)</sup>が適用し難い面がある。また、ステンレス鋼極細管の仕上げ面がクリーンでなければならないといった問題もあり、新しい研磨法を模索する必要性に迫られている。

そこで、前報<sup>6)</sup>では溶媒に砥粒を混合した液体(スラリー)を空気圧を介して長尺の細管内に強制流入させ、管の左右端についてそれを交互に繰返し往復動させることによって研磨する方法(スラリー高速流動研磨)を提唱し、そのための研磨装置を制作し、本研磨法の基本特性について検討を行った。その結果、研磨条件を適切に選べば所期の仕上げ面粗さを有する管が得られることを示し、その有効性を明らかにした。しかし、実験は管内径が0.28mmの細管について行ったものであり、径の異なる管について同様の成果が得られるかどうかはわかっていない。そこで、内径の異なる各種細管について高速流動研磨実験を行い、管径と研磨の関係について検討を行った。

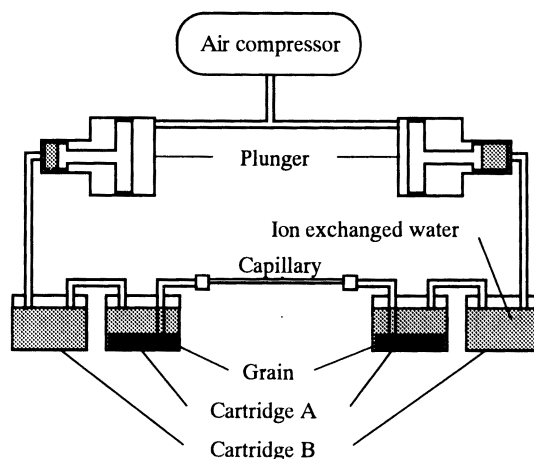
## 2. 実験方法

### 2.1 研磨装置

ステンレス鋼細管内壁の研磨に用いた装置は、前報<sup>6)</sup>と同じ装置であり、その構成についての詳細は前報に述べてあるので、以下に研磨装置の概略について簡潔に記す。図1はスラリ高速流動型研磨装置の概略図を示す。本装置は、エアコンプレッサ、直圧式増圧器、カートリッジ、架台等から構成されている。図に示すように、装置は左右

対称な構成となっており、被研磨管（細管）の左右両端にはそれぞれ2個のカートリッジ（A、B）が配置されている。カートリッジAには、砥粒と溶媒（イオン交換水）が、また、カートリッジBにはイオン交換水のみが入っている。カートリッジAに挿入されている2本の管の内の1本（容器底面近くまで挿入されている管）は被研磨管に、もう1本の挿入管はカートリッジBに連結されている。カートリッジBに挿入されている管は、カートリッジA、直圧式増幅器にそれぞれ接続されている。カートリッジBの役割は直圧式増圧器に砥粒や切りくずが侵入するのを防ぐためのトラップである。

実験に際し、エアコンプレッサからの圧縮空気をフィルタレギュレータで水分を除去し一定の圧力 (0.49MPa) に制御して直圧式増圧器に送気する。直圧式増圧器によってピストン内部のイオン交換水を約 10.28MPa にまで増圧し、カートリッジ A 内の底部にあらかじめ沈殿させておいた砥粒がイオン交換水ごと被研磨管内に注送される。管を通過したスラリーは、管の出口側 (反対側) に設けてあるカートリッジ A に入る。一定時間の停止の後、反対側の増圧器に送気する。ここでの停止動作は、なるべく一定の砥粒濃度とするために、サスペ



**Fig.1** Schematic view of polishing setup

\* 原稿受付 平成9年12月1日

正 会 員 金沢大学大学院（金沢市小立野 2-40-20）

正 会 員 金沢大学工学部

<sup>1</sup> 金沢大学大学院

Table 1 Polishing condition

Capillary	Stainless steel
Inner diameter	0.28 - 0.6 mm
Length	500mm
Grain	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Average grain size	0.6 - 60 $\mu$ m
Concentration	1.66 - 6.32 vol%
Fluid	Ion exchanged water
Pressure	10.8MPa
Number of pass	2 - 50

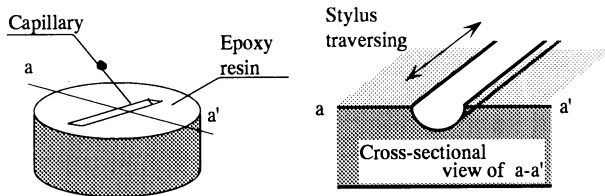


Fig.2 Sample preparation for surface roughness measurement

ンドした砥粒が自重により沈殿するまでの時間である。本操作を繰り返すことにより、研磨が進行し目的とする内面性状を有する管を得る。

## 2.2 研磨実験条件および研磨面評価方法

実験には、長さ500mmで内径が異なる3種類（ $\phi$  0.28, 0.4, 0.6mm）の極細ステンレス鋼管（引抜き管）を供した。研磨には、アルミナ（Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>）砥粒を使用し、砥粒の平均粒径を20～60  $\mu$ mの範囲で種々変えて実験を行った。実験条件を表1に示す。

管の内壁面の研磨状態を評価するための試料の作成については前報に述べた通りであるが、その要点を述べておく。研磨後の管を洗浄後、管中央から左右10mmの位置で切断して20mm長の被観察用試料を切り出した。それを次の手順によって、内壁面の観察が可能のように加工した。まず、包埋用樹脂（Buehler社製）を用いて被観察用試料を包埋し、樹脂が硬化した後、管の断面中心部よりもやや下の位置まで削り込んで図2に示すような形状に加工する。十分洗浄した後、管内を光学顕微鏡（ノマルスキー干渉顕微鏡）および走査型電子顕微鏡（SEM）を用いて観察を行った。また、触針式粗さ計（フォームタリサーフ：Taylor-Hobson社製；カットオフ値は0.8mm）を用いて内壁面の粗さ測定を行った。

管内壁の研磨状態を評価する別の方法として、管内を流れる気体の流量を測定する方法がある。前報<sup>6)</sup>で述べた差圧測定装置を用いて気体の流量測定を行った。研磨後の細管の一部（長さ50mm長）をマスフローコントローラ（質量流量制御装置）と差圧計（微差圧トランスミッタ）の間に設置し、測定用のガス（窒素ガス）を流す。マスフローコントローラで流量が一定（4cm<sup>3</sup>/min）となるように制御されたガスは、試料（差細管）を通して大気中に流出する。流出圧力はダイヤフラム式の差圧で計測される。なお、測定は、室温25℃のクリーンルーム内で行った。

## 3. 実験結果

### 3.1 研磨面の粗さ測定

#### 3.1.1 管径と表面粗さの関係

図3に管径と表面粗さの関係を示す。図には、平均砥粒径20  $\mu$ m、砥粒濃度3.44vol%、スラリー注入圧力10.8MPaの条件で研磨したときの内壁面粗さのパス回数による変化を、各種内径の管の場合について整理してある。ここで、パス回数とはスラリーが細管の右端（左端）から左端（右端）へ移動する回数を表す。研磨前の素管の粗さRaは内径 $\phi$  0.6, 0.4, 0.28mmの管について、それぞれ2.24, 2.11, 0.69  $\mu$ mで

ある。

図3から、いずれの内径の管についてもパス回数の増加とともに粗さが減少していくが、研磨の初期段階（パス回数の少ない段階）で表面粗さが急激に減少し、その後パス回数の増加とともに漸減するようになり、パス回数が15～20回回りで表面粗さはほぼ一定の値となる傾向が認められる。さらに、仔細に見ると研磨の初期段階での表面粗さの低減は内径が大きく、初期粗さの大きい管ほど大きい傾向が認められる。以上の結果は、本研磨法における研磨過程は、研磨によって初期の粗面が除去されていく過程であり、粗い面ほど砥粒の研磨能や作用砥粒数が多いことに相当すると考えられる。この点については後に考察において検討する。

#### 3.1.2 砥粒濃度と表面粗さの関係

表面粗さの低減に砥粒の濃度がいかなる影響を及ぼすか調べた。内径が0.28mmの管の場合に、5.5と20  $\mu$ mとの2種類の平均砥粒径の砥粒を用い、砥粒濃度を1.66～3.44vol%の範囲で変えて実験を行った。その際、パス回数を20回とした。実験結果を図4(a)に示す。内径が0.28mmの管の場合には、砥粒濃度の増加とともに研磨面に作用する砥粒数が増加するため表面粗さの減少する様子が見られる。しかし、ある濃度以上では粗さの低下は見られなくなり、ほぼ一定の粗さとなる傾向がある。ほぼ一定の粗さとなるパス回数は砥粒径の大きい20  $\mu$ mの方が大きいことがわかる。そこで、研磨の効率を考慮して内径が大きい0.6, 0.4mmの管の場合には、内径0.28mmの管の場合よりも平均砥粒径、砥粒濃度の大きい条件として、平均砥粒径が20  $\mu$ mと60  $\mu$ mとの2種類の砥粒を用い、砥粒濃度を3.44～6.32vol%の範囲で変えて実験を行った。

その結果は図4(b)に示すようであって、表面粗さは砥粒濃度の増加とともに幾分低減する様子が見られる。しかし、低減の度合いはどの管も小さいことがわかる。これは、管の内径が大きいため、この程度の砥粒濃度の範囲では研磨面に作用する砥粒数がそれ程増えなかったことによると考えられる。

#### 3.1.3 砥粒径と表面粗さの関係

表面粗さの低減に砥粒径がいかなる影響を及ぼすのか調べた。上述のように研磨効率を考慮して、内径が0.4と0.6mmの管について平均砥粒径20～60  $\mu$ mの砥粒を用い、一方、内径が0.28mmの管については平均砥粒径0.6～30  $\mu$ mの砥粒を使用して行った。実験は、各管についてパス回数を20回とし、また、スラリーの注入圧力を10.8MPa一定として行った。実験結果を図5に示す。図5には、研磨後の管の内径をピンゲージ（新潟精機製：AA型、1/100mmの精度）で測定した結果も併記している。

図5から、いずれの管の場合も砥粒径が増すにつれて表面粗さが減少することがわかる。大きい砥粒径の砥粒程その運動エネルギーが大きいため、研磨作用力も大きく、加工前の粗面が除去されやすいものと考えられる。なお、管の内径は砥粒径が大きくなるにつれて増大することがわかり、粗面の除去に加えて内壁面全面での研磨も幾分なされているものと考えられる。このような研磨は特に0.6mm管で大きいようであり、このため図4の砥粒濃度の変化に対しても粗さ低減の度合いが見かけ上小さかったことが考えられる。

#### 3.2 差圧の測定

研磨面の仕上げ状態を評価する目的で素管および研磨後の管について差圧の測定を行った。その結果を図6に示す。実験は、砥粒濃度3.44vol%、パス回数2～20回の条件で行った。

図6から、内径が0.28, 0.4mmの管の場合、表面粗さが大きくなるにつれて差圧は次第に大きくなることがわかる。一方、内径が0.6mmの管の場合には、表面粗さと差圧の間に明りょうな関係が見られない。一般に、管内を流れるガスの流量は管の内径によって規定されるが、同一の内径であれば管内壁の仕上げ状態（内壁の表面粗さの程度）によって影響を受けると考えられる。表面粗さが大きい程ガスの流れに対して抵抗が大きく、差圧を高める方向に影響し、一方、管径

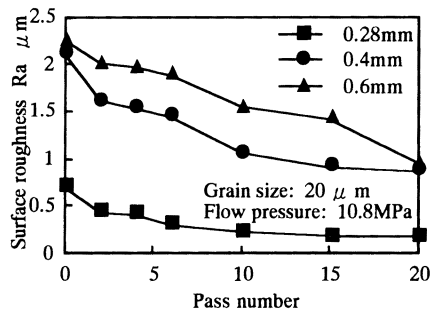


Fig.3 Change of surface roughness with pass number

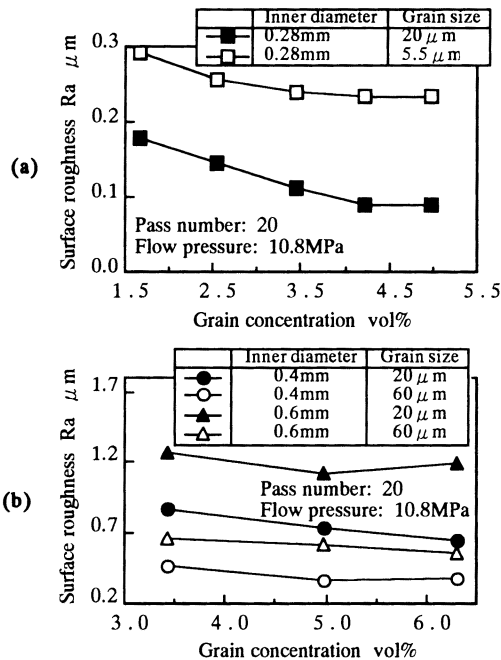


Fig.4 Effect of grain concentration on surface roughness

の増加は差圧を低下させると考えられる。研磨管の差圧は内径と表面粗さとの両者の比によって規定されることになるので、図6に示すような結果が得られたものと推察される。0.6mm管の場合、差圧があまり粗さによらないことは研磨による内径増加の影響もあるためと思われる。

### 3.3 研磨面の観察

管内面の仕上げ状態を光学顕微鏡（ノマルスキー法）および走査型電子顕微鏡（SEM）によって観察した。観察試料は、スラリー注入圧力10.8MPa、平均砥粒径20 μm、砥粒濃度3.44vol%の条件で研磨した試料である。光学顕微鏡観察の結果によると、素管内壁は引抜き管特有の荒れた光の反射も鈍い粗面であるが、研磨管内壁はパス回数が増えるにつれて次第に滑らかな面となり、光沢が生じてくることが確認された。また、これらの定性的な観察結果は触針式粗さ計で測定したプロフィールともよく対応することが知られた。

図7には、光学顕微鏡観察に供した被観察用試料の研磨面をSEMで観察した結果を示す。図から、内径の異なるいずれの管も、N=0の素管内壁面は引抜き管特有のテクスチャ（織目模様の表面の微細凹凸パターン）を有していることがわかる。さらに、そのテクスチャの模様は管内径によって異なっており、内径が大きい程模様が粗いこともわかる。N=2のパス回数後の研磨面を見ると、管径の違いに応じてテクスチャの模様（研磨パターン）がかなり異なることがわかる。0.28mmの管ではテクスチャが著しく消失しているのに対して、0.4、0.6mm管ではまだテクスチャの痕跡が明らかに認められる。パス回

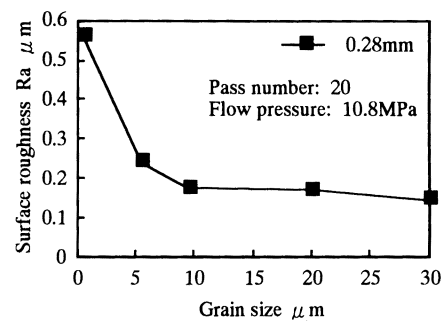


Fig.5 Effect of grain size on surface roughness

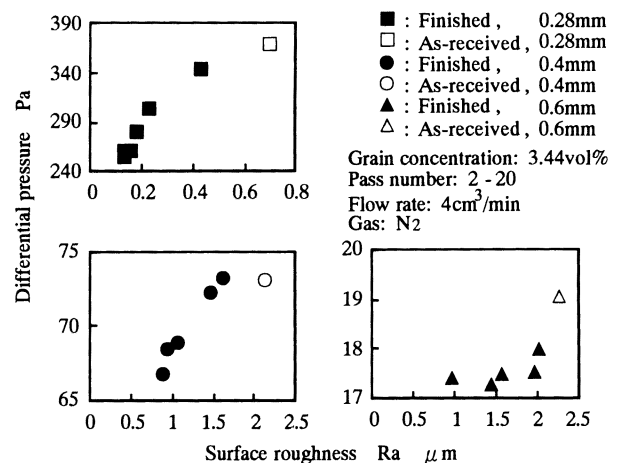


Fig.6 Relationship between differential pressure and surface roughness

数N=4と研磨が進むと、0.28mmの管ではテクスチャは完全に消失しており、0.4mmの管の場合にもほぼ消えている。しかし、最も粗い内壁面を有する0.6mm管では幾分消えるものの依然としてテクスチャが認められる。パス回数がN=10の段階になって、0.6mmの管についてもテクスチャはほぼ消失していることがわかる。これらの研磨パターンは、内径の大きい管程多くのパス回数を必要とすることを物語っている。

## 4. 考 察

3.1.1項の図3に示した結果において、①パス回数の増加とともに表面粗さは次第に低減していくが、とくに初期段階において低減が著しいこと、②この初期段階の低減の様態は管の内径によって異なることがわかった。

まず、管内を流れるスラリーの流動状態について考える。管軸方向に流れるスラリーの流動状態はレイノルズ数Reによって規定され、それは円管内の流れについて次の式で与えられる<sup>7)</sup>。

$$Re = \bar{u} d / \nu \quad (1)$$

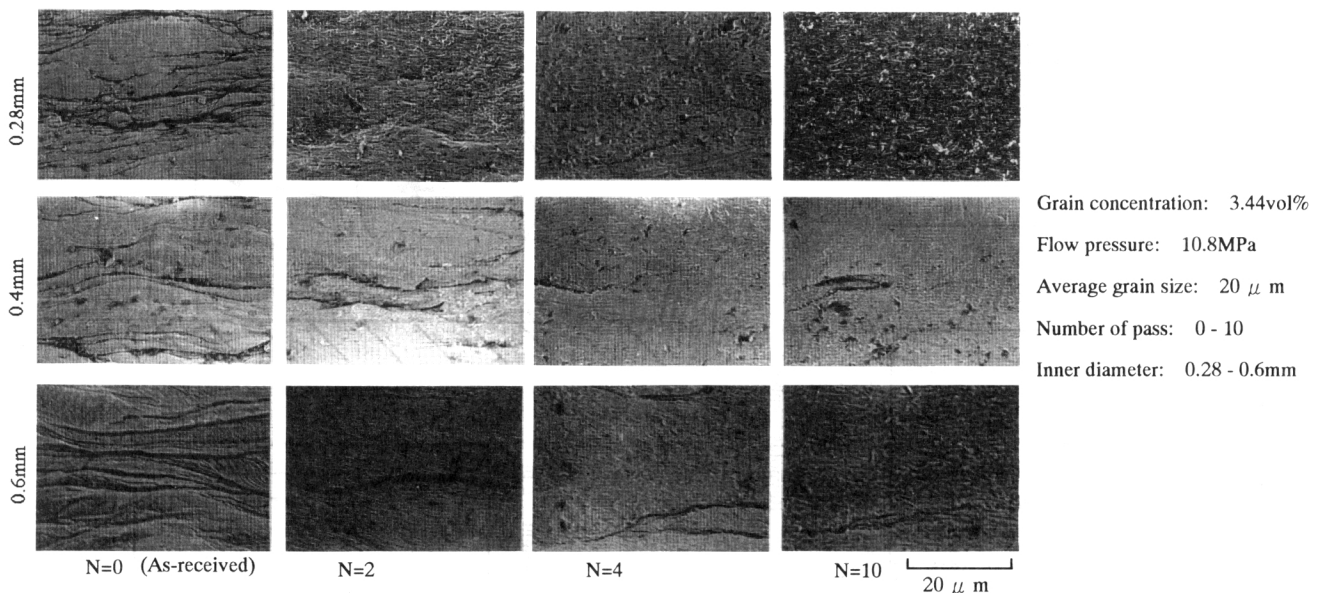


Fig.7 SEM micrographs of inner wall

ここで、 $d$  は管の内径、 $\bar{u}$  はスラリーの平均流速、 $\nu$  は水の動粘度である。管の断面積を  $A$ 、1パス当たりの時間（スラリーが管を通過する時間）を  $t$ 、直圧式増圧器のコラムの容積を  $V$ 、流量を  $Q$  とすると、連続の式より、 $Q = A\bar{u}$  である。ここで、 $Q = V/t$  であるので、スラリーの平均流速  $\bar{u} = V/At$  となる。ここで、 $d$  と  $\nu$  の値は既知であるのでレイノルズ数  $Re$  は  $t$  を実測して  $\bar{u}$  がわかれば求まる。 $t$  はコラム内の液体が完全に空になるまでの時間であるとして、スラリーが管を通過する時間を実測した。その結果を表2に示す。表2によれば、管の内径が大きくなるにつれて、時間  $t$  が次第に短くなることがわかる。水の動粘度  $\nu$  を  $1.004\text{mm}^2/\text{s}$  とし<sup>7)</sup>、測定値  $t$  を用いて計算した  $\bar{u}$  を用いて、各管のレイノルズ数を計算した。その結果を図8にスラリーの平均流速の値と共に示してある。

図8から、管の内径が大きくなるにつれてレイノルズ数は5900～18000の範囲で直線的に増加していくことがわかる。円管内の流れについて、内径  $d$ 、平均流速  $\bar{u}$  を基準とした場合の臨界レイノルズ数は約2300であるので<sup>8)</sup>、いずれの管の場合にも管内の流れは乱流になっていると推測される。なお、スラリーには砥粒が混入されているが、砥粒の混入率は1.7～6.3vol%と非常に小さく、スラリーの動粘度は水のみの場合と大きく変わらないと考えられる。

図8から、砥粒の流動速度は管の内径が大きくなるにつれて大きくなるので、砥粒の運動エネルギーも管の内径の増大とともに大きくなると考えられる。研磨作用の大きさは、砥粒の運動エネルギーに比例するので、内径の大きい管ほど研磨量が大きくなる。このため、内径の大きい（面粗さの大きい）管ほどパス回数の少ない段階で粗さの低減が大きくなったものと推測される。しかし、パス回数の増加とともに粗さの低減の割合が減少していくこと、また、これに及ぼす管径の影響に関しては砥粒の運動エネルギーと作用砥粒数についてのより詳細な検討が必要であり、以下に述べるような検討を行った。

パス回数の増大に伴う表面粗さの低減の様態（研磨の進行状態）を解析的に検討する。研磨前の素管内壁面の微小な凹凸（表面粗さを形成）は、図9に示す三角形の形状（二次元表示）をした突起体の集合から形成されているとする。管内のスラリーは流体圧を受けて管軸方向に流動するが、その流れは乱流となっているため、流体中に分散している砥粒は複雑な形で内壁に衝突すると考えられ、これを理論的に解析することは困難である。そこで研磨特性の検討のために、砥粒は管軸方向の流速をもって内壁面の突起に衝突し、これによって研磨がなされると仮定する。ところで研磨に関与するのは内壁面近傍の流れであり、そこでの流速は管壁に近づくにつれ急速に減少する。

内径  $d$  の管内の乱流において、管軸方向（ $x$  方向）の流速の管径方向（ $y$  軸方向）の分布は次式である<sup>9)</sup>。 $u_{\max}$  は管軸上での流速である。

$$u_1 = u_{\max} \left( \frac{y}{d/2} \right)^{1/7} \quad (2)$$

先に求めた平均流速を用いて、式（2）によって  $u_1(y)$  を求めると、図9のようになる。したがって  $y$  の増加とともに砥粒の衝突速度も増加すると考えられる。このため突起先端程、研磨されやすいものと思われる。しかし、砥粒の速度  $u_g$  を正確に求めることは困難なので、 $u_g$  は  $\bar{u}$  に等しく一定であるとし、先端程研磨が大きいと置き換えてモデル化する。そこで、図9の三角形突起モデルでは、研磨の進行とともに、突起高さ  $c$  が減じ、斜辺の長さ  $a$  が減じていくとする。図に示す三角形の形状（二次元表示）の微視的突起体は、研磨前には斜辺（研磨面）の長さ  $a_0$ 、底辺（凹凸の幅）の長さ  $b_0$ 、高さ（最大粗さ） $c_0$  であるとする。研磨が進行するにつれて、 $a_0$  と  $c_0$  の値は次第に減少していくことになる。なお、 $b_0$  は一定であるとし、 $a$  は、研磨進行途次の三角形の斜辺の長さ、 $c$  は高さである。

ここで、1パス目（ $N=1$ ）の研磨の間に高さ  $c_0$  の突起体の被研磨面に衝突する砥粒の数  $n(1)$  は砥粒濃度に比例するが、砥粒濃度は流体中で一様であると考ええる。次に、加工の進行に伴って突起体の高さが次第に減少していく場合の衝突砥粒数について考える。研磨につれて被研磨面に衝突する砥粒数は、衝突断面積（突起高さ）に比例するとすると、突起体の高さ  $c$  のときには、研磨開始時の値に比して、 $c/c_0$  倍となる。

先に砥粒は研磨面に対して平行に流れていると仮定したので、図9に示すような力  $F_0$ （ベクトル表示）で壁面に衝突し研磨作用を営むと考える。ここで、力  $F_0$  を面に対して垂直の成分  $F_1$  と平行な成分  $F_2$  の2つに分解し、研磨には面に垂直の  $F_1$  の成分が主として作用すると考える。 $F_1$  の値は  $F_0$  の  $c/a$  倍の大きさとなる。

次に、1パス当たりに営まれる研磨量について考える。まず、 $N=1$ （1パス目）の研磨面に対する研磨能力  $P_1$  は、作用砥粒数と砥粒の研磨力との積であり、 $n(1) \times (c_0/a_0) \times F_0$  となるので、それは、

$$P_1 = kn(1) \times \frac{c_0}{a_0} F_0 \quad (k: \text{定数}) \quad (3)$$

で与えられる。ここで  $N=1$  の除去高さをあらかじめ  $y_1$  と設定すると、高さ  $y_1$  を除去後の突起体の高さ  $c_1$  の時の研磨面に対す

Table 2 Slurry folw time		
Inner diameter	mm	Pass time s
0.2		155
0.28		59
0.4		22
0.6		9

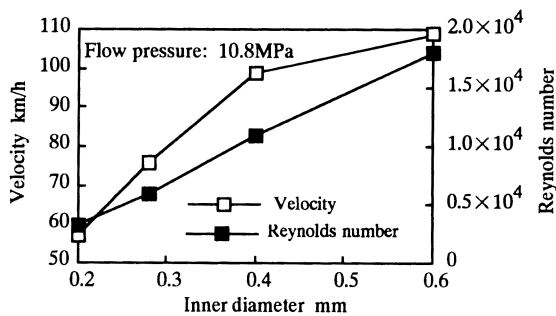


Fig.8 Relationships between inner diameter and velocity, Reynolds number

る研磨能力  $P_2$  は次式で与えられる。

$$P_2 = kn(1) \cdot \frac{c_1}{c_0} \times \frac{c_1}{a_1} \cdot F_0 \quad (4)$$

したがって、 $N = 2$  の時の研磨能力  $P_2$  は、初期の研磨能力に対して、 $(c_1^2/a_1c_0)/(c_0/a_0)$  の割合となるため、 $N = 2$  のときの除去高さ  $y_2$  は  $y_1$  を用いて、次式で表される。

$$y_2 = y_1 \times \frac{P_2}{P_1} = y_1 \times \frac{(c_1^2/a_1c_0)}{(c_0/a_0)} \quad (5)$$

したがって2パス後の突起体の高さは、

$$c_2 = c_1 - y_1 \times \frac{(c_1^2/a_1c_0)}{(c_0/a_0)} \quad (6)$$

で与えることができる。以後この計算を繰り返すことにより、 $N = n$  のときの突起体の高さは、次式となる。

$$c_n = c_{n-1} - y_1 \times \frac{(c_{n-1}^2/a_{n-1}c_0)}{(c_0/a_0)} \quad (7)$$

図10に、この計算結果を示す。計算に際しては、実験における  $Ra$  の変化率を参照して、管径大 (0.6mm) では、 $y_1=0.1$  とし  $c_0$  は最大高さとして  $Ra$  の4倍程度の  $10 \mu m$  とした。また、 $\theta = 15^\circ$  ( $b_0 = 2\sqrt{3}$ ) とした。また、管径小 (0.28mm) の平均流速  $\bar{u}$  は、管径大 (0.6mm) のその0.7倍であったので、研磨エネルギーの比は0.72倍と考えると、管径小では  $y_1$  を0.05とした。また  $c_0 = 3 \mu m$  とした。図10から、パス回数を重ねるにつれて表面粗さが次第に低減していくことがわかる。これは、図3に示す実験結果とも定性的に合うように思われる。

なお、本研磨法の場合、砥粒は固定されていないので目づまりや目つぶれを起こすことなく、常に砥粒の鋭い切れ刃が壁面に接して能率良く研磨作用を営むと推測される。

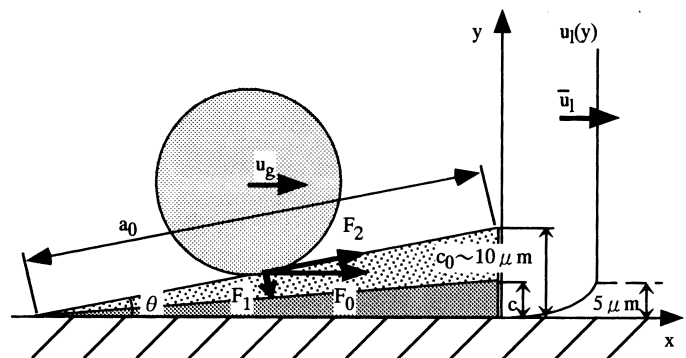


Fig.9 Roughness model of inner wall

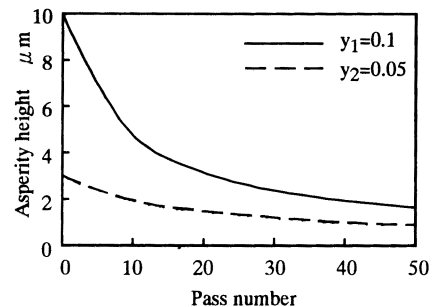


Fig.10 Computer simulation of asperity height decrease with pass number

## 5. 結 言

各種内径の異なる極細ステンレス鋼管内壁を高速流動研磨した結果、次の結論を得た。

- (1) いずれの細管の場合も、表面粗さはパス回数が増えるにつれて次第に低減していく。しかし、低減の度合は内径の大きい管の方が大きい。
- (2) 砥粒濃度を増すと表面粗さは減少するが、0.4, 0.6mmの管では減少の程度は小さく、0.28mm管の場合には大きい。
- (3) 砥粒の平均粒径が大きくなると表面粗さは次第に小さくなる。
- (4) 0.28, 0.4mmの管の場合、表面粗さが大きくなると差圧は増加する。しかし、0.6mmの管では表面粗さと差圧の間に明りょうな関係は認められなかった。
- (5) SEM観察の結果、素管（引抜き管）に見られるテクスチャは、パス回数の増加とともに消失していく。しかし、内径の小さい管程消失が早い。

## 参 考 文 献

- 1) 田中義信, 津和秀夫: 精密工作法 (下), 共立出版, (1982) 33.
- 2) 田島 栄: 表面処理ハンドブック, 産業図書, (1969) 377.
- 3) 進村武男: 磁気研磨法の現状と課題, 機械と工具, **40**, 5 (1996) 16.
- 4) 鴨川昭夫: 実践 機械工作法, 機械技術, **39**, 5 (1991) 106.
- 5) 木本康雄, 矢野章成, 杉田忠彰: マイクロ応用加工, 共立出版, (1986) 67.
- 6) 山本桂一郎, 黒部利次, 山田良穂, 三浦毅彦: 極細ステンレス鋼管内壁の高速流動研磨(第1報)—研磨の基本特性—, 精密工学会誌, **64**, 1 (1998) 126.
- 7) 加藤 宏: 流れの力学, 丸善, (1993) 50.
- 8) 生井武文, 井上雅弘: 粘性流体の基礎, 理工学社, (1978) 185.
- 9) 同上, p. 189.