

光コネクタ用セラミックフェルール 微細穴内壁面の高速流動研磨*

黒部利次** 杉山夏樹***

High Speed Flow Finishing of Inner Wall of Ceramic Ferrule Capillary

Toshiji KUROBE and Natsuki SUGIYAMA

Optical connector ferrule capillary made of zirconium oxide ceramic has been manufactured by sintering method in high temperature atmosphere, in which dimension of ferrule is unstable. In order to obtain a precise dimension of it, high speed flow finishing method developed in our laboratory has been applied to finish a inner wall of capillary. Experiments are conducted under the conditions of high flow rate of slurry suspending the aluminum oxide grains into ion-exchanged water. It is found that the surface roughness of inner wall has decreased drastically in early stage of flow pass number. SEM micrographs indicate that microsurface irregularity of as-received capillary has disappeared in a few slurry flow passes. Measuring the differential pressure between the pressure of Ar gas flowing through the capillary and the atmospheric pressure is proved to have an ability to estimate the finishing condition of inner wall surface.

Key words : ceramic ferrule, inner wall, finishing, high speed flow, surface roughness

1. 緒 言

光通信は、情報伝送の重要な手段の一つであるが、信号を長距離伝送するためには、光コネクタを介してファイバを接続しなければならない。光の伝送損失を極力小さくするためには、光コネクタに用いられるフェルールの加工精度(形状精度と面精度)を向上させる必要がある。フェルールは、熱変形や耐腐食性、被雷性、等を考慮してファインセラミックスで造られる場合が多く加工は一般に難しい。このため、加工コストが高くなるのは避け難い。フェルールには、その中心部に光ファイバを挿入するための微細穴が設けられている。セラミックフェルールは、焼結によって造られるため寸法安定性に欠けるのが普通である。このため、所定の内径と真直度を保証するため、焼結後何らかの方法で加工を行うのが一般である。例えば、極細金属ワイヤ表面に砥粒を散布してそれをフェルール細穴に通し、ワイヤに適度の張力を与えてそれを動かすことによって研磨が行われている。

最近、1mm以下の内径を有する長尺のステンレス鋼製極細管(キャピラリーと呼ばれる)の内壁面をスラリーを高速でその中を往復動させることによって研磨する方法が開発された²⁾。本方法は、高速流動研磨法と命名されている。フェルールの微細穴の内径も1mm以下であるので、本流動研磨法が適用できるのではないかと考えられる。溶媒中に懸濁されている砥粒の運動は、キャピラリーに注入する流体圧によって制御されるので、流体圧を調整することによって加工能率の向上を図ることができる。

本研究では、セラミックフェルール微細穴内壁面の研磨に高速流動研磨法を適用し、高精度高能率な加工が可能かどうか実験的検討を行った。

2. 実験方法

2.1 実験装置

セラミックフェルール微細穴内壁面の研磨は、先に開発された高速流動研磨装置に一部改良を加えて行った。装置の構成と機構を簡潔に記すと次のようである。研磨装置(図1)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1に示すように、被研磨管(フェルール)の左右両端にはそれぞれ2個のカートリッジ(A, B)が配置されており、カートリッジAには、砥粒と溶媒(イオン交換水)が入れている。一方、カートリッジBにはイオン交換水のみが入れている。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)は被研磨管の一端にゴム製のジグを介して接続されている。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の内の1本は直圧式増圧器に接続されている。カートリッジBは直圧式増圧器に砥粒が侵入することを防ぎ、装置の耐久性を向上させるためのトラップである。

図2に、新たに作製したフェルール保持具の詳細図を示す。保持具は、2個のフランジ付きステンレス鋼円筒容器から成っている。左右の容器には、中空の厚肉エポキシ樹脂円筒管(管内をスラリーが流れる)が挿入され、その外側にグランドパツ

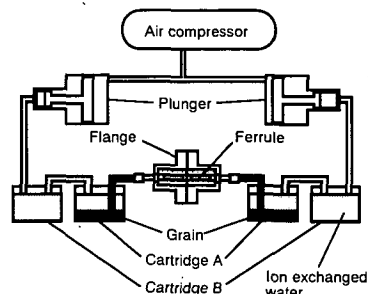


Fig.1 Schematic view of polishing setup

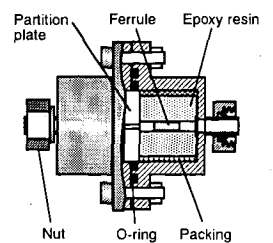


Fig.2 Die holding device

*原稿受付 平成12年2月18日

**正会員 金沢大学工学部(金沢市小立野2-40-20)

***金沢大学大学院

キンが密に詰め込まれる。スラリーが回り込まないように配慮している。実験に際し、セラミックフェルールをエポキシ樹脂管の中に入れ固定する。左右のステンレス円筒を仕切り板を介して向き合わせ、ボルトでフェルールを締めつける。フランジには、高圧の流体圧に耐えスラリーが漏洩しないように二重にOリングが嵌められている。フランジと研磨装置は、配管用の継ぎ手を用いて接続されている。

実験に際し、エアコンプレッサを稼働し圧縮空気をフィルタレギュレータを介して一定の圧力 (0.49MPa) に制御し、直圧式増圧器に送気する。直圧式増圧器によってシリンダ内部のイオン交換水を空気圧の25倍にまで増圧し、カートリッジB内のイオン交換水に流体圧を加える。このため、カートリッジB内のイオン交換水はカートリッジA内に注送され、カートリッジA内のイオン交換水に流体圧を加えることとなる。このことによって、カートリッジA内の底部近くまで挿入されている管を通して、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ことになる。研磨は、スラリーが管内を流動することによって行われる。図1の左(右)側のカートリッジAの容積に相当するスラリーが、右(左)側のカートリッジAに注送されて移動し終わった時を1パスとし、その後スラリーは逆向きに注送される(2パス目)。

2.2 実験条件および評価方法

実験には、焼結した部分安定化ジルコニア(ZrO₂)セラミックフェルールを供した。フェルールの寸法形状は、図3に示すように、内径0.12mm、外形2.5mm、長さ10mmである。実験は、アルミナ(Al₂O₃)砥粒を用い、砥粒の粒径を1~60μm、砥粒濃度を1~5vol%と種々変えて行った。実験条件を表1に示す。

実験終了後、フェルールの内壁面の研磨状態を評価するために観察と粗さの評価を行った。観察用の試験片の作製には既報²⁾に述べたのと同様の方法を用いた。管内壁面を観察するためには、管軸に沿って管の上半分を削って内面を露出させねばならない。フェルールは小さいものであり、削る際にフェルールを傷めないために、樹脂で包埋して削った。研磨後、まずイオン交換水で管内壁面を洗浄した。洗浄後管の両端を粘土で封止し、それを高さ30mm、直径30mmのプラスチック製の容器に入れ、その中に包埋用樹脂を流し込み硬化させた。包埋用樹脂(Buehler社製)は、エポキシ樹脂の主剤に硬化剤を混ぜたものである。完全に硬化させるため樹脂注入後1日放置した。硬化後、包埋材を容器から取り外し、サンドペーパー(#400)で慎重に少しずつ削っていき、細管内壁面が露出するまで(管の断面中心部よりもやや下になるように)削り込んだ。その後、十分洗浄して管内壁面を、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)によって観察した。また、触針式粗さ計(Talyor Hobson社製:フォームタリサーフ;カットオフ値0.25mm)を用いて内面の粗さを測定した。粗さの表示は、特に断らない限りRaの値で行う。測定値は、同一条件で2回計測した値の平均値で表している。

Table 1 Experimental condition

Workpiece	Partially stabilized zirconia
Grain	Al ₂ O ₃
Grain size	1 - 60 μm
Concentration	1, 3, 5vol%
Number of slurry pass	1 - 20pass
Pressure	2.94 - 12.7MPa
Fluid	Ion exchanged water

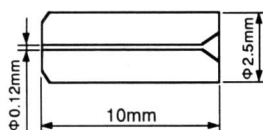


Fig.3 Dimension and configuration of ferrule

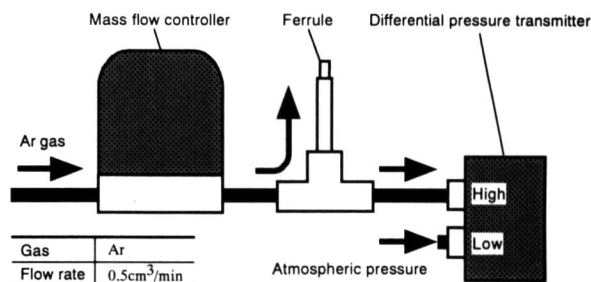


Fig.4 Differential pressure measuring system

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圧力を測定する方法がある。図4に、差圧測定装置の概略図を示す。研磨後のフェルールを、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、アルゴンガスをマスフローコントローラで流量を一定(0.5cm³/min)に制御して流す。ガスはフェルールを流して大気中に流出するときのガスの圧力と大気圧との圧力差がデジタル式の差圧計で計測される。

3. 実験結果

3.1 真円度の測定

フェルールは、ファイバを滑らかに水平方向に挿入する必要があり、加工による穴の仕上がり程度(真円度)が重要視されている。高速流動研磨によって、フェルールの穴がどの程度真円になるのか実験的検討を行った。真円度は、穴の円形部を二つの同心の幾何学的円で挟んだとき、両円の間隔が最小となる両円の半径の差で表示される。真円度が小さい程真円に近い。図5に、粒径と真円度の関係を示す。実験は、注送圧力を12.7MPaし、平均粒径1, 5.5, 20, 60μmの砥粒を用い、砥粒

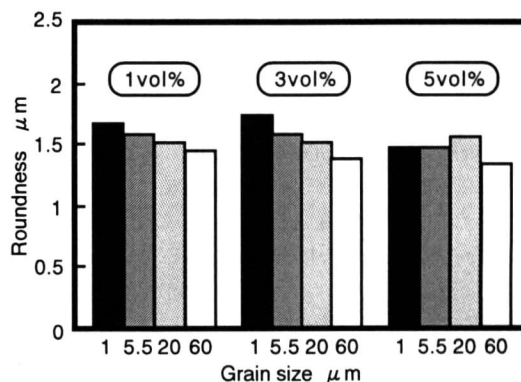


Fig.5 Effect of grain size on roundness

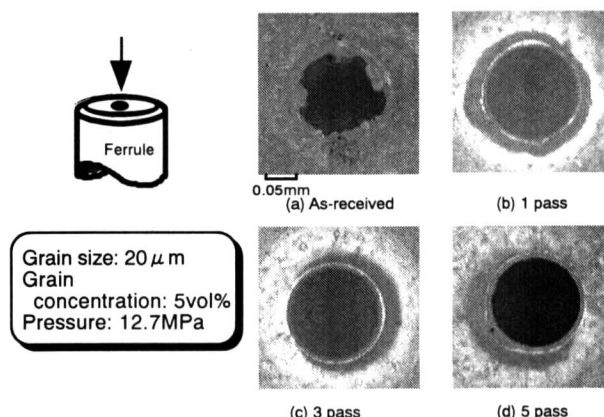


Fig.6 Photomicrographs of hole

濃度を1, 3, 5vol%にして行った。図5から、いずれの砥粒濃度の場合においても粒径が大きい砥粒の方が真円度がよくなるのがわかる。なお、研磨によって穴径も増大するが(図7参照)、砥粒濃度、粒径の違いによる差異は認められなかった。

次に、高速流動研磨を施したフェールの穴の様態について、研磨後の穴の端部の光学顕微鏡観察を行った。図6に観察結果を示す。観察に供したフェールは、平均粒径20 μ mの砥粒を用い砥粒濃度を5vol%、注送圧力12.7MPaとして研磨を行ったものである。図6から、研磨前に見られた不規則な穴の形状が、研磨が進行するにつれて滑らかになり次第に光沢を帯びるようになる様子が見られる。

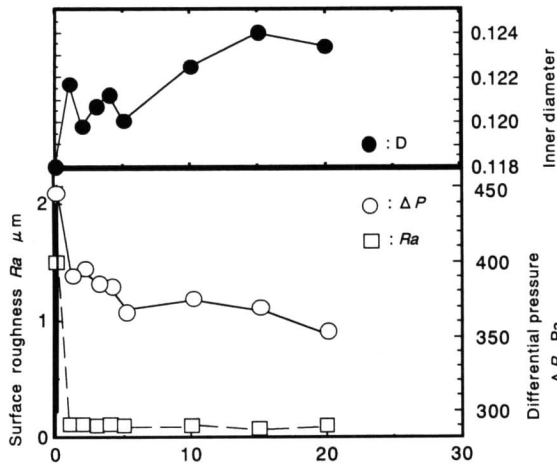


Fig.7 Change of surface roughness with pass number

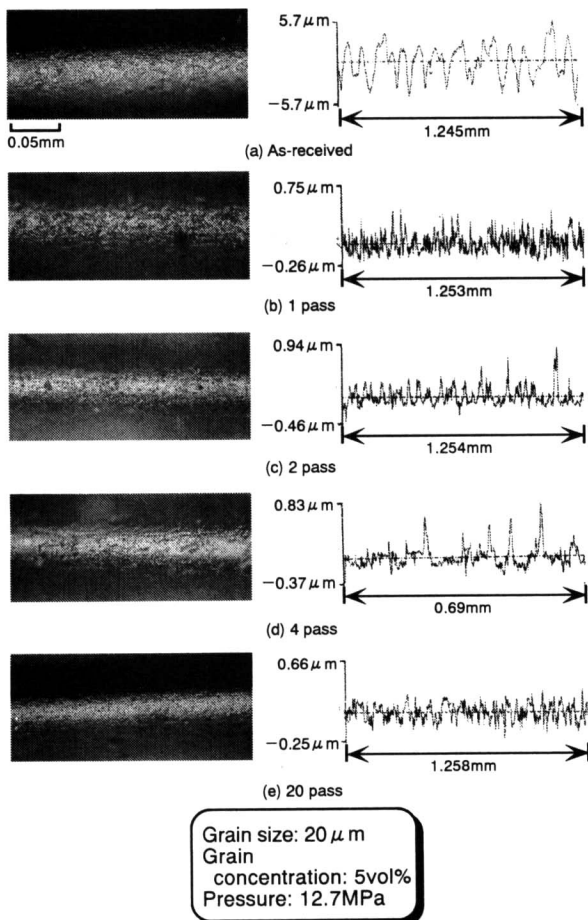


Fig.8 Optical micrographs and profiles of inner wall

3.2 表面粗さの測定と顕微鏡観察

図7に、表面粗さ、差圧、穴径とパス回数の関係を示す。実験は、平均粒径20 μ mの砥粒を用い、砥粒濃度5vol%、注送圧力を12.7MPaとして行った。図7から、パス回数1回で表面粗さが0.1 μ m以下にまで低減する様子がわかる。その後は、パス回数の増加にともなう粗さの低下は小さく、表面粗さはほぼ一定となり飽和している。なお、平均粒径が、1 μ m、5.5 μ mと小さい場合、20 μ mでも砥粒濃度が小さい場合、またスラリー注送圧力が低い場合には粗さの低減の度合は小さく、粗さが飽和するまでに多くのパス回数が必要であった。

図7で、差圧と表面粗さの関係をみると、1パス研磨後に差圧の値が大きく低下しており、内壁面の表面粗さが急激に低減することに対応している。パス回数2回目以降においては、粗さの改善は飽和しているが差圧は漸減することがわかる。図7に示したように穴径は、パス回数の増加とともに徐々に大きくなっており、このため、差圧は減少するものと考えられる。

次に、流動研磨したフェール細管内壁面を光学顕微鏡を用いて観察した。図8に観察結果を示す。図8には、粗さ計で測定した表面プロフィールも併記している。図8から、パス回数が多くなるにつれて表面が滑らかになっていく様子が見られる。また、表面は次第に光沢を示すようになる。プロフィールから、粗さも小さくなっていくことが知られる。

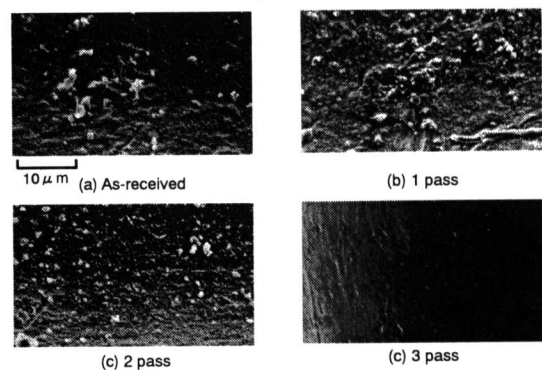
図9に、内壁面のSEM観察の例を示す。この観察例では、パス回数1, 2回ではまだ粗さが幾分大きいように見え、それでもスラリーの流動パス回数が3回程度で極めて平滑な面になることがわかる。

3.3 穴径の測定と差圧

流動研磨を繰り返すと、一般に粗さの低減とともにフェールの内径は次第に大きくなって行く。そこで、内径の大きさと差圧の関係について調べた。図10に測定結果を示す。実験は、平均粒径1, 5.5, 20, 60 μ mの砥粒を用いて、砥粒濃度、注送圧力、パス回数を種々に変えて研磨した結果を整理したものである。内径の増加とともに右下がりの曲線となる。さらに、平均粒径が大きくなるにつれて右下がりの傾きが大きくなるのがわかる。この点については後に考察する。

3.4 砥粒の濃度および粒径と差圧

図11に、砥粒濃度の差圧に及ぼす影響について調べた結果を示す。実験は、平均粒径20 μ mの砥粒を用い、砥粒濃度を1, 3, 5vol%と変え、注送圧力を12.7MPaにして行った。図11から、パス回数が増すと急激に差圧が低下することがわかる。



Grain size: 20 μ m
Grain concentration: 5vol%
Pressure: 12.7MPa

Fig.9 SEM micrographs of inner wall

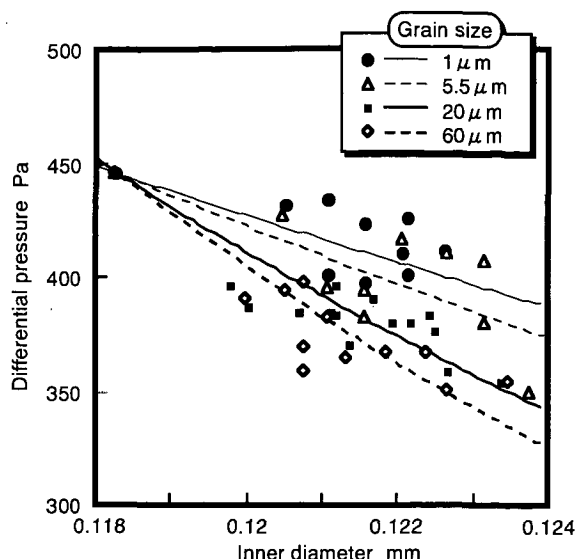


Fig.10 Effect of hole diameter on differential pressure

いずれの砥粒の場合も数パスを経ただけでほぼ一定の値になる。差圧の絶対値について、高濃度で低い傾向があるが、砥粒濃度の違いによる差圧の違いは小さい。図12に示した、粒径60 μmの粗粒の場合には、差圧の値に濃度依存性があることがわかる。濃度が大きい程差圧の値は小さくなる傾向があり、研磨能力の大きい粗粒にあっては、濃度の影響が顕著に現れたものと思われる。しかし、差圧の値はいずれの濃度の場合においても数パスでほぼ一定の値となる。

4. 考 察

4.1 スラリーの流動状態と研磨機構

フェール内壁面の研磨様態は、細管内を流れるスラリーの流動状態と深くかかわっていると思われる。フェール細管内におけるスラリーの流動状態は、レイノルズ数によって規定される。いま、穴の内径を d 、穴の断面積を A 、スラリーの流速を u 、スラリーが試料を通過する時間を t 、流量を Q 、直圧式増圧器のコラムの容積を V とすると、連続の式より、 $Q=Au$ が成り立つ。ここで、 $V=Qt$ であるので、 $u=V/At$ となる。

d は 0.12mm、 t は実測の結果 6.89 秒、 V は $77 \times 10^3 \text{mm}^3$ であるので、フェールを流れる流体の流速は 988m/s となる。スラリーの動粘度を ν とするとレイノルズ数 Re は、 $Re=ud/\nu$ と記される³⁾。ここで、スラリーの砥粒濃度は 5vol% 程度なので、スラリーの動粘度を水のそれで近似できるとして、 ν の値として $1.004 \text{mm}^2/\text{s}$ を用いると、 Re は 118104 となる。臨界レイノルズ数は 2300³⁾ であるので、管内の流体の流れは乱流になっていると推測される。乱流状態で流れるスラリー中の砥粒は、回転等を伴う複雑な運動をしながら管壁に衝突すると思われる。このような砥粒の衝突と引っかかり作用によって内壁面の研磨が行われるものと思われるが、その加工機構は先に行ったステンレス鋼製細管の場合²⁾ とはかなり異なると思われる。セラミックスは硬い材料であるので、砥粒の壁面突起部（表面粗さ）への衝突に伴う加工メカニズムは、図13に示す模式図のように、砥粒が衝突する部位でワーク（加工物）に微視き裂が入り、それが伝播して材料の除去が招来されると考えられる⁴⁾。ステンレス鋼の金属材料の場合のように、流れ型の切りくず生成による除去機構とはその加工メカニズムが異なると思われるが今後の課題である。

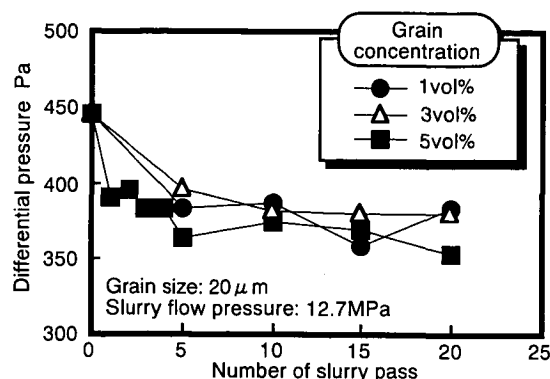


Fig.11 Relationship between pass number and differential pressure

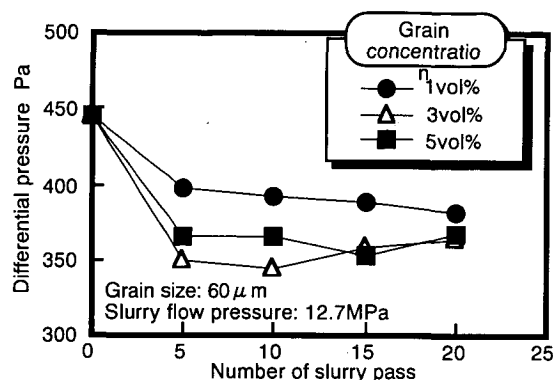


Fig.12 Relationship between pass number and differential pressure

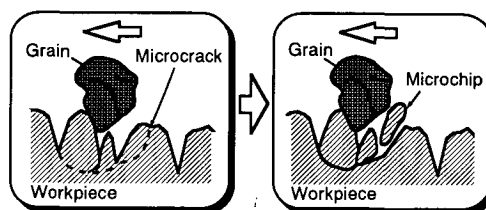


Fig.13 Finishing mechanism of ceramics

4.2 真円度の創成機構

フェール微細穴を加工する場合、内壁面の表面粗さの低減に加えて真円の穴が求められる。図5に示したように、真円の度合いはスラリーに懸濁させる砥粒の粒径に依存する。粒径が大きい砥粒ほど真円度の値は小さくなる。これは次の理由によるものと考えられる。

砥粒は、溶媒（水）に保持されて細管内を流れるが、砥粒の粒径の大きさと管の内径の比によって、管の断面内を通過する砥粒の数は必ず決まる。図14にその様子を模式化して示す。研磨に関与するのは、主に壁面近傍のスラリーの流れと考えられるが、そこではスラリーは、壁面の谷やうねりに沿って流れると考えられる。図14に示すように、粒径が小さい砥粒の場合には、砥粒はスラリー中である程度自由に動くことができ、砥粒は凸部に衝突するだけでなく、凹部分にも入って研磨作用を示すと考えられる。一方、粒径が大きい砥粒の場合には、粒径が大きいため各砥粒が干渉しあいスラリー中で砥粒が自由に動き回れる自由度が小さくなる。したがって、粒径が大きい砥粒の場合には凸部が主に研磨作用を受けるために、また、粗粒自身の研磨能力も細粒に比して大きいため、低パス回数においても良好な真円度が得られるものと考えられる。

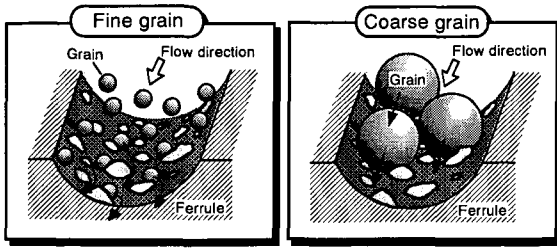


Fig.14 Schematic view of polishing mechanism

4.3 差圧による加工評価

研磨した後の管内壁面の状態は、差圧を測定することによって評価できると思われる。差圧は、ガスのフェール内壁との摩擦によって、管壁から抵抗を受けることによって変化する。管内を流れるガスの流動状態は、レイノルズ数によって規定される。いま、フェールの内径を d 、ガスの流速を u 、ガスの動粘度を ν とすると、レイノルズ数 Re は ud/ν となる。ここで、 d は 0.12mm 、 ν は $13.9 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ 、である。 u の値は、 $Q=Au$ の関係式から求められる。 Q は流量で $0.0083 \times 10^{-6}\text{m}^3/\text{s}$ 、 A は管の断面積で $0.01 \times 10^{-6}\text{m}^2$ であるので、 u の値は 0.83m/s となる。これらの値を式に代入すると、 Re は 7.6 となる。この値は臨界レイノルズ数 (2300) の値に比べて極めて小さいので、管内を流れるアルゴンガスは層流状態で流れていると考えられる。

フェールの内壁面が滑らかなであると仮定すると、フェールの内径が変化した場合の圧力損失(層流状態を想定した場合の差圧)は、ポアズユの式(1)から求められる⁹⁾。

$$Q = \int_0^a 2\pi u r dr = -\frac{dp}{dx} \frac{\pi a^4}{8\eta} \quad (1)$$

ここで、 Q は流量、 u は流速、 a は管の内半径、 r は管断面の中心からの距離、 p は圧力、 x は管軸方向の距離、 η はガスの粘性率である。また差圧 Δp は次式で求められる。

$$\Delta p = \frac{8\eta}{\pi a^4} Q l \quad (1')$$

ここで l は流路長である。(1)' 式を用いて計算した差圧と内径との関係を Fig. 15 に曲線②で示す。当然ながら曲線②は壁面が滑らかな場合に相当する。計算には、 $Q=8.3 \times 10^{-3}\text{m}^3/\text{s}$ 、 $\eta=22.6 \times 10^{-6}\text{Pa} \cdot \text{s}$ 、 $l=10^{-2}\text{m}$ の値を用いた。また Fig. 15 には、各種粒径の砥粒を用いて研磨した結果も示してある。これらの実験曲線①は、Fig. 10 の差圧と内径の関係を両対数プロット上で表して最小二乗法によって求めたものである。Fig. 15 において、実験曲線は理論曲線よりも、全体として高差圧側にある。このことは内壁面粗さが差圧を高めるためである。また、砥粒の粒径によって実験曲線の傾きが異なることは、差圧に対して、粗さと内径との両者の影響が重畳しているためである。そこで差圧 Δp は、次の実験式で表されるものとする。

$$\Delta p = k \left(\frac{1}{a} \right)^\alpha \quad \text{ただし、} \quad k = \frac{8\eta Q l}{\pi} \quad (2)$$

ここで、 α は砥粒径によって決まる定数である。

内壁が滑らかな管の場合には、 α の値は 4 であり (1)' 式となる。しかし、粒径の異なる砥粒で研磨した場合、式(2)における α の値は、Fig. 16 に示すように粒径の増加とともに大きくなる。これは研磨の進行とともに、粗さの低減と内径の増大が並行して生じ、これら両者は差圧の低下をもたらすが、平均粒径

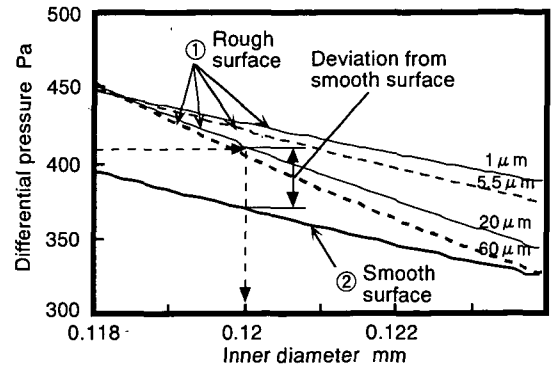


Fig.15 Finishing assessment curve

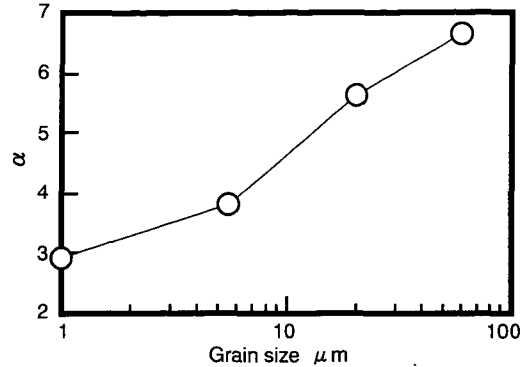


Fig.16 Relationship between α and grain size

が大きいほど粗さの低減が大きく、その影響が差圧の低下に顕著に現れ、見かけ上、内径依存性が大きくなっているものと考えられる。さらに Fig. 15 において同一内径の場合、内壁が滑らかな管の場合の曲線②と実験的に求めた曲線①との差が、管内壁面の性状を表す指標となる。

5. 結 言

高速流動研磨法をジルコニアセラミックフェール細管内壁面の研磨に適用して、次の結論が得られた。

- (1) 本研磨法は、フェール内壁面の研磨に有効である。
- (2) 表面粗さは、砥粒径、スラリー注送圧力の大きいときパス回数 1 回でほぼ飽和する。
- (3) スラリー往復動によって内径は拡大する。
- (4) 真円度は、粒径の大きな砥粒で加工すると向上する。
- (5) 差圧と内径および粗さの間には密接な関係があり、差圧測定によって内径と内壁面の性状を推定できる。

謝 辞

研磨装置は金沢大学工学部工作センターで製作されたものであり、記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 大平文和：光コネクタの加工技術，セラミックス加工研究会第 59 回講演資料，(1996) 11.
- 2) 山本柱一郎，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度流動研磨(第 1 報) - 研磨の基本特性 -，精密工学会誌，64，1 (1998) 126.
- 3) 加藤 宏：流れの力学，丸善，(1993) 50.
- 4) 今中 治：セラミック加工ハンドブック，日刊工業新聞社，(1987) 19.
- 5) 池森亀鶴，黒瀬元雄，越智光昭：水力学，コロナ社，(1992) 120.