

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 —

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 (1st Report)
- Fundamental Polishing Characteristics -

Keiichiro YAMAMOTO, Toshiji KUROBE, Yoshinori YAMADA and Takehiko MIURA

Stainless steel pipe with fine hole and long size has recently been needed for the flow line of pure gas and liquid, which is used in the field of precision machinery. Inner wall polishing of the capillary is very difficult by ordinary finishing methods. In the present study, new polishing method has been developed, in which polishing is performed by flowing slurry at high velocity through the capillary. The developed machine has been proved to have excellent polishing performance. Experiments show that the surface roughness of as-received stainless steel capillary is reduced from $0.7 \mu\text{mRa}$ to about $0.1 \mu\text{mRa}$ within several tens of slurry passes. The roughness of finished surfaces decreases with increase in abrasive grain concentration, and with increase in grain size. Optical and scanning electron micrographs of the polished surface indicate that texture pattern of the inner wall disappears in early stage of low pass number. N_2 gas flow pressure measurement can be applicable for an estimation of the finishing level.

Key words: stainless steel capillary, inner wall polishing, surface roughness, gas flow pressure

1. 緒言

金属製の管は、その内径の大きさに応じて使用される用途が一般に違ってくる。また、内径の大きさによって要求される内壁の仕上げ精度も異なる。内径が数mmから数十cmに及ぶ管は、その内壁を何らかの方法で研磨加工している場合が多い。管の内面を研磨する方法としては、ホーニング¹⁾や電解研磨法²⁾、磁気研磨法³⁾、化学研磨法⁴⁾等があり、目的に応じて使い分けされている。電解研磨に砥粒の擦過作用を複合させた電解複合研磨法⁵⁾も効果があるといわれている。しかしながら、ホーニングや電解研磨法は研磨できる管の長さが数cmと短く、工具等を管内に挿入しなければならないといった問題もあり、研磨できる管の内径も自ずと制約を受けることになる。一方、磁気研磨法や化学研磨法は、研磨媒体として磁性流体や化学薬品を使用するため液の管理が難しく、必ずしも良好な仕上げ面とはならないといった問題もある。

ステンレス鋼極細管は、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、本研究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り返して往復動させることによって研磨する方法について検討した。

2. 実験方法

2.1 研磨装置

実験に供したステンレス鋼管は、その内径が0.28mmと極端に小さく、かつ、素管長が500mmにわたる極細管である。研磨装置を設計するに当たって、特に次の諸点に留意した。(1)スラリーを往復動させる、(2)溶媒と砥粒の懸濁が十分行える、(3)管径や管長が変わっても対応できる。図1に、設計・製作した研磨装置（スラリー高速流動型研磨装置と呼ぶ）の概略図を示す。

研磨装置は、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1に示すように、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

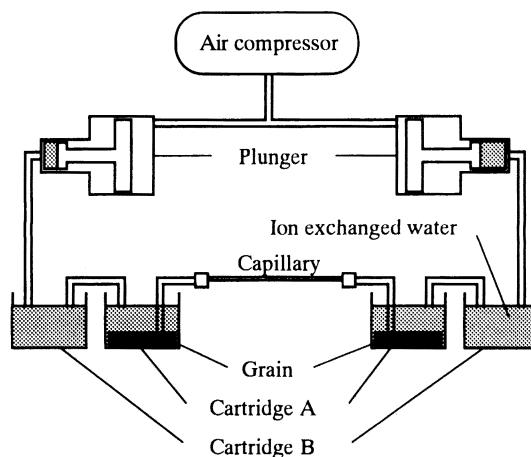


Fig.1 Schematic view of polishing setup

* 原稿受付 平成9年6月13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

† 金沢大学大学院

換水のみが入れられている。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ぐため、換言すれば、装置の耐久性を向上させるためのトラップである。

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約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営まれる。

管を通過したスラリーは、管の出口側に設置しているカートリッジAに入り、そこで砥粒が沈殿する。次に、電磁弁を切り替えて反対側の増圧器に送気する。本操作を数十回繰り返すことにより、所定の内面性状（表面粗さの著しく低減した表面）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、内径φ0.28mm、長さ500mmの極細ステンレス鋼管（引抜き管）を用いた。研磨には、アルミナ（Al₂O₃）砥粒を使用し、砥粒の粒径を0.6~30μm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。

Table 1 Polishing condition

Capillary	SUS316L
Inner diameter	0.28mm
Length	500mm
Grain	Al ₂ O ₃
Average grain size	0.6, 5.5, 9.5, 20, 30 μm
Concentration	1.66 - 4.99vol%
Fluid	Ion exchanged water
Pressure	10.8MPa
Number of pass	2 - 50

実験終了後、管の研磨状態を評価するため研磨後の管を洗浄した。洗浄は次のようにして行った。研磨後の管を装置から取り外し、別途用意している直圧式増圧器に管の一端を接続する。他端は解放状態にしておく。直圧式増圧器にはイオン交換水があらかじめ入れられており、エアコンプレッサからの空気圧を付与することによって、イオン交換水が細管内をジェット流となって一気に噴流する。洗浄はこのジェット流によってなされる。

洗浄後の管の内壁の研磨状態を観察するため、管を、図2に示すB、C、Dの各位置について、その位置を中心に左右に10mm離れた場所を薄刃の鋭利なカッタで切断した。A、Eの位置は管端であり、管端から20mm隔たったところを切断した。切断した20mm長の被観察用試料は、次の手順で測定に都合のよい形に加工した。

始めに、切断分離した20mm長の中空管の両端を粘土で封止する。その後、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る。

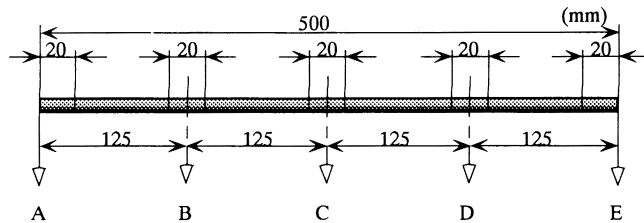


Fig.2 Cutting position of the capillary

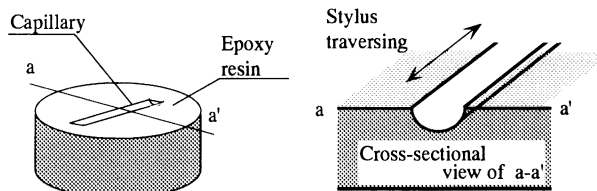


Fig.3 Sample preparation for surface roughness measurement

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、それをサンドペーパー（#400）で慎重に少しずつ削る。そして、管の断面中心部よりもやや下になるように削り込む。その様子を図3に示す。その後、十分洗浄して管内を観察した。観察は、光学顕微鏡（ノマルスキー干渉顕微鏡）、走査型電子顕微鏡（SEM）を用いて行った。また、粗さの測定は触針式粗さ計（フォームタリサーフ：Taylor-Hobson社製；カットオフ値は0.8mm）を使用して行った。

管内壁の研磨状態を評価するもう一つ別の方法として、管内を流れる気体の流量を測定する方法がある。図4に、自作した差圧測定装置の概略図を示す。研磨後の細管の一部（長さ50mm）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（4cm³/min）となるように制御し、制御されたガスは試料（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計で計測される。測定は、室温25℃のクリーンルーム内で行った。

差圧の測定条件を表2に示す。

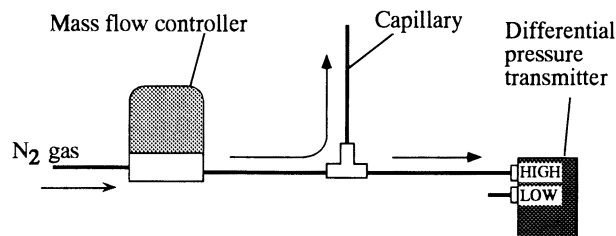


Fig.4 Differential pressure measuring system

Table 2 Differential pressure measuring condition

Gas	N ₂
Flow rate	4cm ³ /min
Capillary length	50 mm

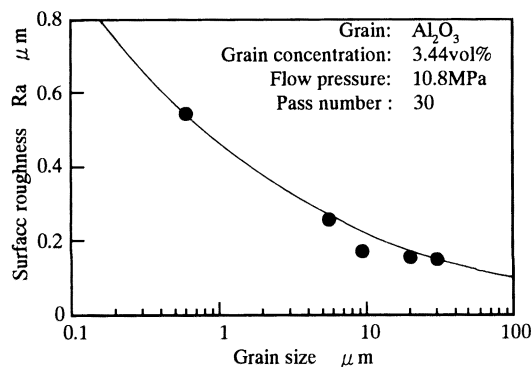


Fig. 5 Effect of grain size on surface roughness

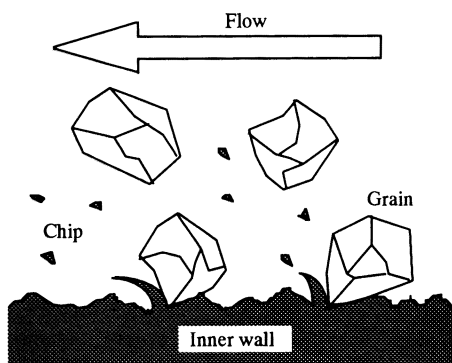


Fig. 6 Polishing model

3. 実験結果及び考察

3.1 研磨面の粗さ測定

3.1.1 砥粒径の影響

図5に、細管内に注入するスラリーの注入圧力を10.8MPa一定とし、砥粒濃度を3.44vol%、パス回数を30回として実験した場合の砥粒の平均粒径と表面粗さの関係を示す。研磨前の素管内壁の表面粗さはRaで0.7μmである。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。

図5から、砥粒の平均粒径が大きくなる程表面粗さが小さくなるのがわかる。これは、通常の研磨加工の場合と異なる結果のように思われる。このため、ここでは研磨量（除去体積）と表面粗さの関係について検討する必要があると考えられる。

まず、管内のスラリーの流れの状態について考える。管軸方向に流れるスラリーの状態は、レイノルズ数によって規定される。いま、管の内径をd、管の断面積をA、スラリーの流速をu、スラリーが管を通過する時間を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、 $Q = V/t$ であるので、 $u = V/At$ となる。dの値は0.28mm、tは実測の結果59秒、Vは $77 \times 10^3 \text{mm}^3$ であるので、管内を流れる流体の流速は21.2m/sとなる。ここで、水の動粘度をνとすると、レイノルズ数 $Re^{(9)}$ は、

$$Re = ud/\nu \quad (1)$$

νの値は $1.004 \text{mm}^2/\text{s}$ であるので、 $Re = 5911$ となる。臨界レイノルズ数は2300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。実際のスラリーには砥粒が混入されているため、この値は水のみの場合とは異なることが予想されるが、砥粒の混入率が1.7~5%と非常に小さく、水のみの場合とほとんど違いがないと考えられる。

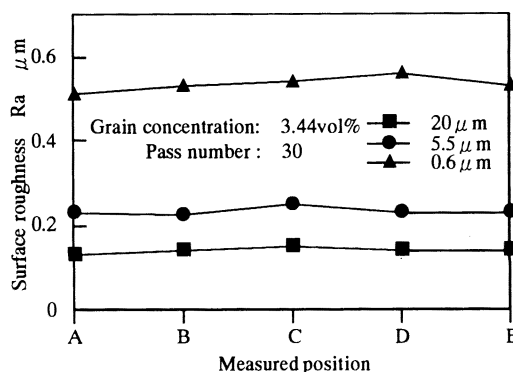


Fig. 7 Distribution of surface roughness along flow path

図6に、砥粒が管内壁に衝突する模式図を示す。管内を流れる砥粒は管軸方向に流体圧を受け、かつ、乱流により複雑な形で内壁に衝突する。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触し能率良く研磨作用を行うと推測される。

砥粒が流体の溶媒から受ける力は、流体が静止していると考えたときの静水圧と溶媒の流動に基づく力がある。しかし、静水圧は研磨作用に直接影響は及ぼさないと考えられるので、この場合は流動による力のみについて考慮すればよい。砥粒が大きくなれば流動による運動エネルギーも大きくなる。研磨は、砥粒の衝突とその後の引っ掻き作用によって営まれると考えられるので、運動エネルギーの大きな粗粒のほうが研磨量が大きくなる。

図5に示すパス回数30回の結果では、前加工面粗さ（凹凸）が除去される途中段階にあり、研磨量の大きな粗粒ほど前加工面の除去速度が大きく、平滑化が早く行われて、見かけ上表面粗さは小さくなったものと考えられる。平均粒径の小さな砥粒でも、パス回数を重ねれば徐々に前加工面の凹凸が平滑化され、表面粗さが小さくなることが予想される。

3.1.2 測定位置と表面粗さの関係

長さ500mmの細管が一樣に研磨されるのかどうかを調べるため、平均粒径20、5.5、0.6μmの3種類の砥粒を使用し、砥粒濃度3.44vol%、圧力10.8MPa、パス回数30回で研磨実験を行った。図7に、図2の測定位置における表面粗さの測定結果を示す。

図7から、いずれの砥粒の場合も管を5等分したA、B、C、D、Eの各位置で表面粗さはほぼ一定値となっている。したがって、管内の軸方向のどの位置においても研磨作用が行われていることが確認できる。しかし、この場合も図5の結果と同様、砥粒径が小さいほど表面粗さは大きくなっており、前加工面粗さの除去段階であることがわかる。

3.1.3 砥粒濃度の影響

図8に、砥粒濃度と表面粗さの関係を示す。実験は、パス回数20回、砥粒の平均粒径5.5、20μmの2種類で行った。図8から、砥粒の濃度が高くなると表面粗さが次第に小さくなるが、その減少度合いは砥粒径にあまり依存しないことがわかる。これは次の理由によると思われる。

砥粒径が一定であると仮定すると、スラリー中の1個の砥粒が持つ研磨能力は定まっているとみてよく、研磨量は、単位時間当たりに研磨面に衝突・引っ掻き作用を行う砥粒の数によって決まると考えられる。砥粒径の場合と同様に、前加工面粗さの低減は研磨量に依存すると考えられるので、研磨面に作用する砥粒数が多いほど、すなわち砥粒濃度が高いほど研磨面の平滑化が早く進行し、表面粗さが小さくなるものと推測される。

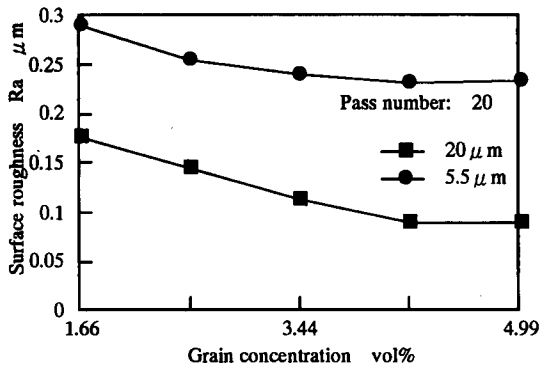


Fig. 8 Effect of grain concentration on surface roughness

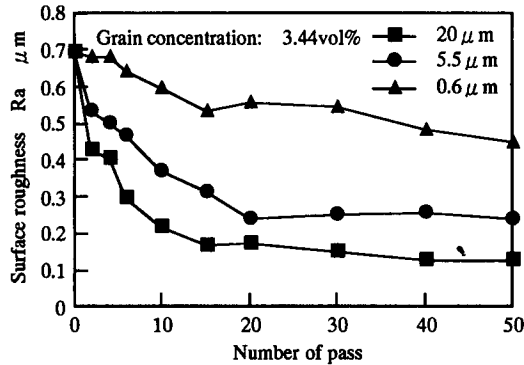


Fig. 9 Change of surface roughness with pass number

3.1.4 パス回数の影響

図9に、パス回数と表面粗さの関係を示す。図9から、平均粒径20および5.5 μmの大きな砥粒の場合、パス回数の増加の初期の段階で表面粗さは急激に小さくなるが、パス回数20回を過ぎる辺りから漸減する傾向に変わることがわかる。これは、前加工面粗さの除去による平滑化にともなって、研磨面の負荷率が徐々に増加するためと考えられる。単位時間当たりの研磨体積が一定とすると、負荷率の増加により、単位時間当たりの研磨深さが次第に減少し、表面粗さの改善傾向は緩和されることになる。一方、平均粒径0.6 μmの砥粒では研磨能力が小さいため、表面粗さはパス回数の初期の段階から漸減傾向にあり、パス回数50回の段階でも研磨面の負荷率の増加があまり大きくないため、表面粗さの低減の傾向がほぼ一定になったものと考えられる。

3.2 差圧の測定

研磨面を評価する目的で研磨後の管の差圧を測定した。図10に差圧の測定結果を示す。実験は、砥粒濃度を3.44 vol%とし、パス回数を2～50回として行った。図10から、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わかる。これは、管内壁の仕上げ状態が悪い(表面粗さが大きい)と、ガスの流れに障害となり抵抗を生じるためと考えられる。

図10を注意深くみると、差圧の増加曲線は2本の直線で近似できるように思われる。表面粗さが、0.1～0.3 μmRaの間で成り立つ直線①と0.3～0.8 μmRaの間に成り立つ直線②の2本であり、明りような傾きの変化がみられる。②の直線は内壁面の仕上げ状態を反映していると考えられるが、①の直線は、面の仕上げ状態の他に研磨による管の内径の拡大の効果も含んでおり、大きく傾きが変化したものと考えられる。

図10から、①の直線に含まれるデータの大部分は、平均粒径

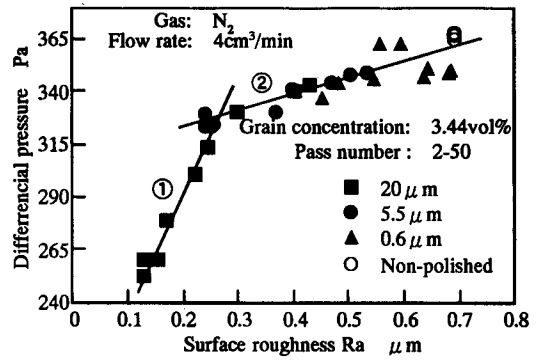


Fig. 10 Relationship between differential pressure and surface roughness

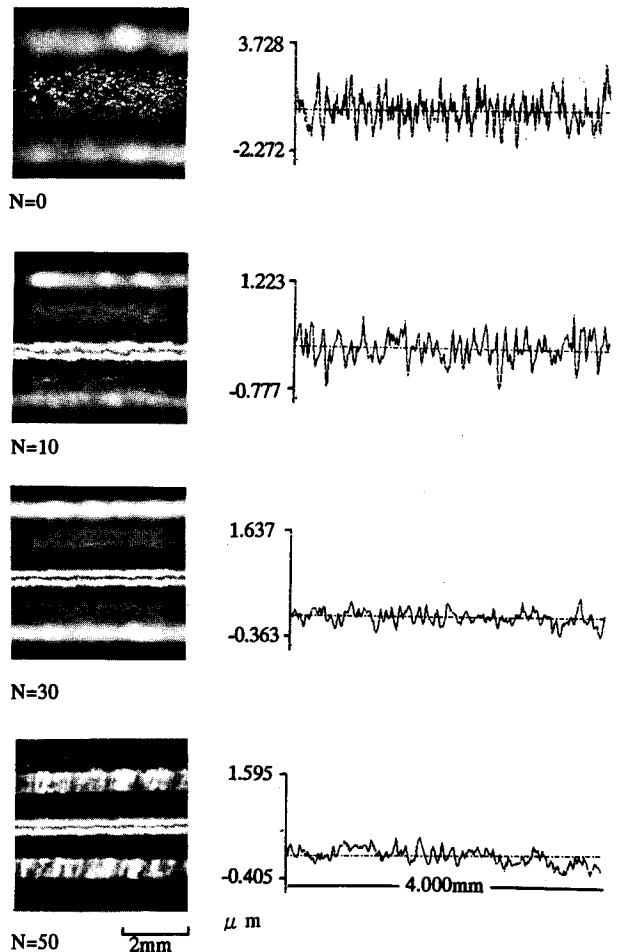


Fig. 11 Optical micrographs and profiles of inner wall

20 μmの砥粒を使用して研磨して得られたデータであることがわかる。このことから、粗粒の方が細粒に比べて研磨能力に優れていることが確認できる。さらに図10は、表面粗さと差圧の関係を表す検量線としても使用できる可能性のあることを示している。すなわち、研磨後に差圧を測定すれば、管を切断することなしに管内壁の表面状態を把握することができることを示唆している。

3.3 研磨面の観察

3.3.1 光学顕微鏡による観察

平均粒径20 μmで研磨した面の光学顕微鏡による観察結果を図11に示す。前加工面(素管)およびパス回数10, 30, 50回の研磨面について示し、触針式粗さ計による表面粗さプロフィール

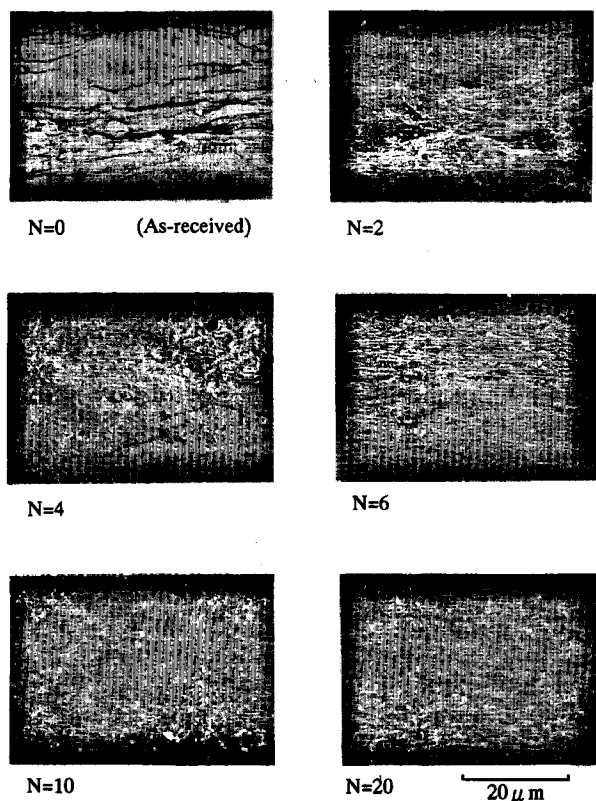


Fig.12 SEM micrographs of inner wall

ルも併記している。観察は、管の中心部にレンズの焦点を当てて行った。中心部の上下両端に見える白色の太線は管の切断面である。

図11の結果から、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ことがわかる。研磨回数が増えると、荒れた面が次第に滑らかな面となり、光沢が生じてくるのが確認できる。パス回数がさらに増加すると内壁の光沢がますます増し、内壁がますます滑らかになってくる。この観察結果は表面粗さのプロフィールともよく一致している。

3.3.2 走査型電子顕微鏡による観察

内壁の仕上げ状態をさらに詳細に観察するために、SEM観察を行った。観察結果を図12に示す。図12は、平均粒径20 μmの砥粒を用い、砥粒濃度を3.44vol%で研磨したときの、素管(N=0)およびパス回数2, 4, 6, 10, 20回の管内壁面状態を示している。

図12から、N=0の素管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。これに対してN=2の場合を見ると、特有のテクスチャはわずかに見られるものかなりの部分が消失している。この場合、研磨は早期の段階で急激に進んでいることがわかる。さらに、N=6の辺りまではテクスチャが多少認められるが、N=10以降はテクスチャが全く認められない。この段階で、前加工面粗さ

(凹凸)がほとんど除去されたことがうかがえる。しかし、砥粒による引っかき痕はパス回数が増えてもなくならなかった。このことは、粗粒により研磨した後、粒径の小さな砥粒での仕上げ研磨を行うことにより、さらに良好な面が得られる可能性があることを示唆している。なお、SEMによる観察結果は触針式表面粗さ計による測定結果とも良く照応している。

3.4 パーティクルの検出

極細ステンレス鋼管内壁の研磨は、ガスや不純粒子の壁面への付着を低減するために行われる。研磨による内壁のクリーン化の評価は、パーティクルカウンタによる粒子の検出等によって行われる。

平均粒径20 μmのアルミナ砥粒を用い、パス回数を10~50として研磨した管についてパーティクルカウンタで粒子の計測を試みた。その結果、直径にして約0.01 μmのパーティクルがわずかに検知されただけであった。しかし、パーティクルの計測は重要であり今後検討すべき課題である。

4. 結 論

内径0.28mm以下の極細ステンレス鋼管内壁を超精密に研磨する方法について検討した結果、次の結論を得た。

- (1) 開発した加工装置は所期の性能を有していることが確認できた。
- (2) スラリーが管内を通過するパス回数が30回以下の場合、使用する砥粒の平均粒径が大きくなるにつれて、内壁の表面粗さは次第に小さくなる。また、砥粒濃度が高くなると表面粗さは低減する。
- (3) 平均粒径20, 5.5 μmの砥粒を使用した場合パス回数の増加の初期段階で表面粗さは急激に小さくなるが、パス回数20回を過ぎる辺りから漸減する傾向に変わる。
- (4) 管内壁の研磨状態を評価する一つの方法として管を通して流出する気体の流出圧力を差圧計で測定する方法がある。この測定において、管内壁の表面粗さが大きくなるにつれて差圧が増大する。増大の度合いは表面粗さの値によって変わり、0.1~0.3 μmRaの範囲と0.3~0.8 μmRaの範囲では変化の勾配が異なる。
- (5) SEM観察の結果、平均粒径20 μmの砥粒による研磨では、引抜き管特有のテクスチャは、パス回数の少ない段階で消失する。

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) 加藤 宏: 流れの力学, 丸善, (1993) 50.