

## 高速流動法によるステンレス鋼管内壁面の研磨\*

黒部 利次\*\* 中森 啓介\*\*\* 青木 一浩†

High Speed Flow Finishing of Inner Wall of Stainless Steel Pipe

Toshiji KUROBE, Keisuke NAKAMORI and Kazuhiro AOKI

High speed flow finishing method has recently developed, which has an excellent performance for polishing an inner wall of stainless steel capillary. Present paper focuses on the finishing characteristics of the inner wall of stainless steel pipe with high speed flow finishing method. It is found that bar-type mandrel inserted into the hole of pipe has great performance in finishing, in which a diameter of mandrel is slightly smaller than inside diameter of the pipe. Experiments indicate that surface roughness of the inner wall of pipe decreases with the number of slurry flow pass. It is shown that both of larger grain size and higher concentration of the abrasive in water solvent, have a greater finishing rate of the pipe. It is described that larger flow pressure of slurry yields greater surface roughness decrease.

**Key words :** stainless steel pipe, inner wall, high speed flow finishing, mandrel, surface roughness

## 1. 緒 言

液体やガスの輸送手段として管（パイプ）が用いられているが、高純度の液体やガスを輸送する場合には管の内壁面を何らかの方法で研磨している場合が多い。研磨の方法としては、ホーニング<sup>1)</sup>や電解研磨法<sup>2)</sup>、磁気研磨法<sup>3)</sup>、化学研磨法<sup>4)</sup>等があり目的に応じて使い分けられている。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<sup>5)</sup>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十cm前後と短く、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。

これらの研磨法以外に、高速流動研磨法と呼ばれる研磨法が近年開発された<sup>6)</sup>。それは、溶媒に砥粒を懸濁した液体（スラリー）を空気圧を介して微細管（キャピラリー）内に強制流入させ、それをキャピラリーの両端間で交互に繰り返し往復動させることによって研磨する方法である。工夫を施せば、本研磨法は内径1mm以上の管の場合にも適用可能ではないかと考えられる。

本研究では、管内に芯棒（マンドレル）を挿入して高速流動研磨を行う方法について実験的検討を行った。

## 2. 実験方法

## 2.1 研磨装置および試料保持具

ステンレス鋼管内壁面の研磨は、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、ステンレス鋼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（水道水）が入れられている。一方、カートリッジBには水道水の

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、新たに製作した試料保持具の詳細図を示す。溶媒に砥粒を懸濁させた液（スラリー）を管内で高速流動させるため、図2に示すように管内に芯棒（マンドレル）を挿入した。マンドレルの外径 $d$ は、管の内径 $D$ よりも僅かに小さい。このため、マンドレルと管内壁との間に極めて小さな隙間（クリアランス）ができる。

スラリーは、この隙間を通ることによって高速で流れることになる。マンドレルの左右両端面には、円錐状の座ぐりが入れている。その円錐穴にキリ状の支え棒を差込み、マンドレルを保持・固定する。マンドレルはステンレス鋼製で、その寸法は外径 $\phi 4\text{mm}$ ×長さ200mmである。マンドレルを支える円錐状の支え棒は、左（右）端の太い丸棒（外側にねじ切りが施されている）と一体成形されて

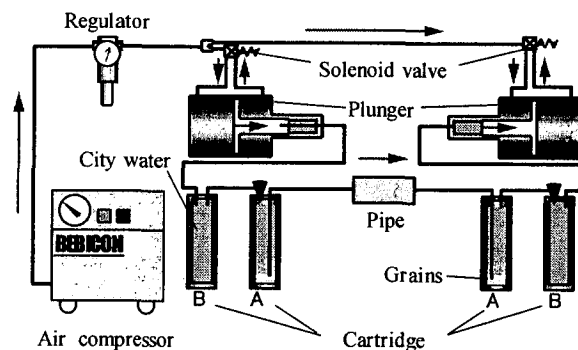


Fig.1 Schematic view of polishing setup

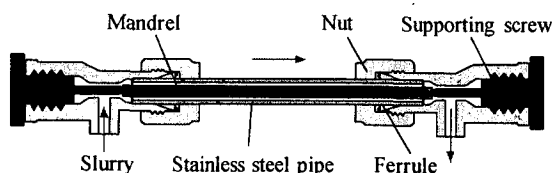


Fig.2 Pipe holding device

\* 原稿受付 平成14年4月26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

† 金沢大学 工学部

Table 1 Experimental condition

Workpiece	SUS316TP
Inside diameter	4.35mm
Length	190mm
Grain	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Grain size	5.5 μm
Concentration	2.03vol%
Number of slurry pass	0-160passes
Pressure	2.9-12.7MPa
Fluid	City water

いる。マンドレルは、外筒に強くねじ締めされスラリーは漏洩することがない。供試材はステンレス鋼製の管で、その呼び寸法は1/4インチで外径6.35mmx内径4.35mm長さ190mmである。外筒は、配管用の継ぎ手を用いて研磨装置に接続されている。

実験に際し、エアコンプレッサを移動し圧縮空気をフィルタレギュレーターを介して一定の圧力(0.49MPa)に制御し、直圧式増圧器によってシリンダ内部の水道水を空気圧の25倍まで増圧し、カートリッジB内の水道水に流体圧を加える。このため、カートリッジB内の水道水はカートリッジA内に注送され、カートリッジA内の水道水に流体圧を加えることになる。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、底部に予め沈殿させておいた砥粒が水道水ごと管内に注送されることになる。研磨は、スラリーがマンドレルと管内壁との隙間を高速で流れ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ときを1パスとする。

## 2. 実験条件および評価方法

ステンレス鋼管内壁面の研磨は、アルミナ砥粒(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)を用いて行った。実験条件を表1に示す。実験は、管の長さおよび管内壁面とマンドレルとの隙間を一定にして、且つスラリーの管内への注送圧力を2.9～12.8MPと変えて行った。研磨には、平均粒径5.5, 20, 57 μmの3種類の砥粒を用い、砥粒濃度を5, 10, 15vol%と変化させて実験を行った。

研磨後、薄刃回転砥石を用いて管をその長手方向に切断し、管内壁面を光学顕微鏡(ニコン製: OPTOPHOTO)で観察した。また、触針式粗さ計(東京精密製: サーフコム 1400A)を用いてプローブを管軸方向にトレースし、粗さ曲線を描画させた。カットオフ値は0.8mmである。

## 3. 実験結果

### 3.1 注送圧力の影響

まず始めに、管にマンドレルを挿入しない状態で研磨を行った。実験は、粒径57 μmの砥粒を用い砥粒濃度を15vol%として、スラリーを160パス流動させて行った。図3に、実験結果を示す。図3には、研磨前(N=0)のバージンパイプの測定結果も併記している。図3から、マンドレルを挿入しないで加工した場合の表面粗さは2.99 μmであり、研磨前(N=0)の供試材の表面粗さ3.35 μmと比較して幾分加工がなされたことがわかる。しかしながら、管にマンドレルを挿入しない加工は大きな効果がないといえる。このことは、写真や粗さプロフィールからも明らかである。

そこで、管にマンドレルを挿入して研磨を行った。実験は、スラリーの注送圧力を2.9, 5.9, 8.8, 12.7MPaと4段階に変えて行っ

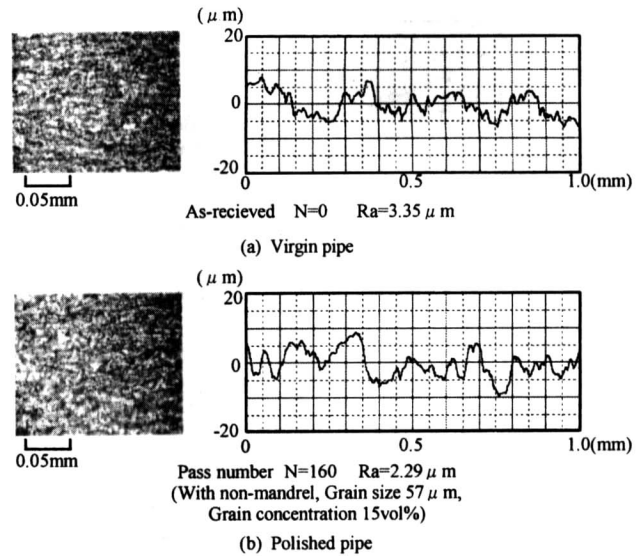


Fig.3 Surface roughness

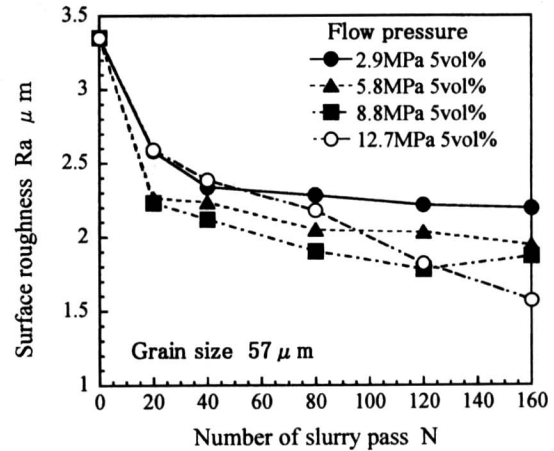


Fig.4 Relationship between surface roughness and pass number

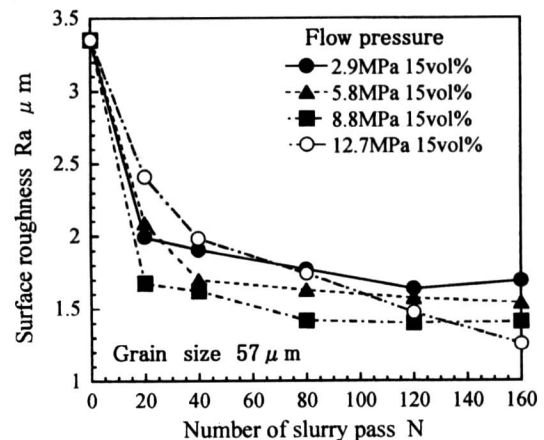


Fig.5 Relationship between surface roughness and pass number

た。図4に、平均粒径57 μmの砥粒を用い、砥粒濃度を5vol%とした場合のパス回数と表面粗さの関係を示す。図4から、パス回数が増えるにつれていずれの注送圧力の場合も表面粗さが急激に減少し、その後漸減状態へと推移することがわかる。注送圧力が最も大きい12.8MPaの場合は、160パス回数に至っても表面粗さはまだ低減する傾向が見られる。表面粗さの絶対値をパス回数160のところで比較すると、2.9, 5.9, 8.8, 12.7MPaの順に小さ

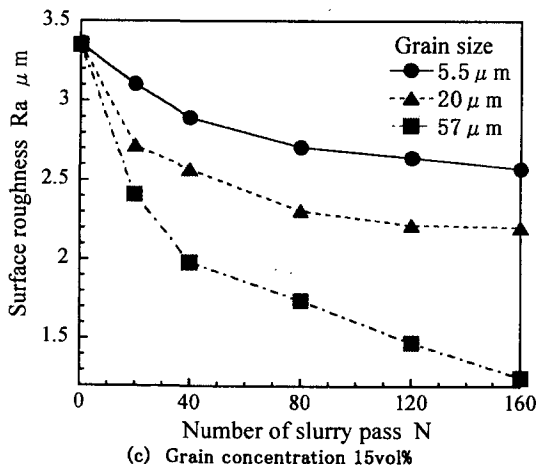
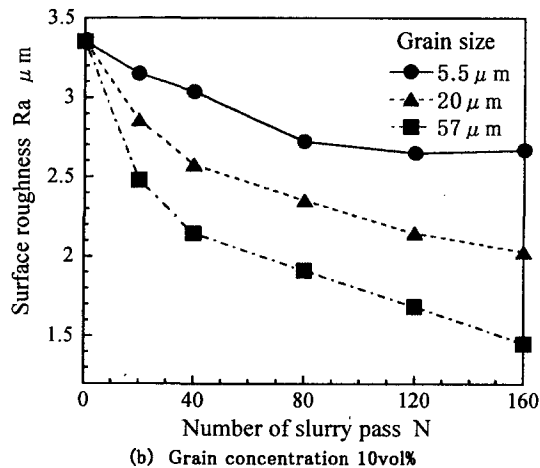
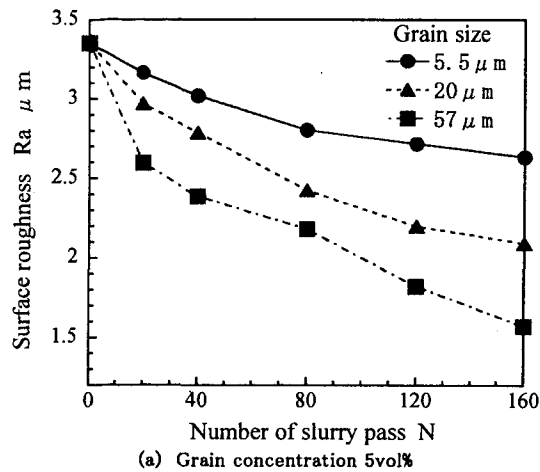


Fig.6 Effect of pass number on surface roughness

な値であることがわかる。

図5に、砥粒濃度を15vol%とした場合の実験結果を示す。図5から、砥粒濃度が15vol%の場合もパス回数が増えるにつれて表面粗さが急激に減少し、その後漸減状態へと推移することがわかる。また、砥粒濃度が15vol%と高い場合には、砥粒濃度が5vol%の場合より表面粗さの絶対値は小さくなることわかる。

### 3. 2 注送圧力一定の結果

I) パス回数と表面粗さ 注送圧力に関する実験(図4, 図5)から、注送圧力を大きくした方が表面粗さの低減に効果があることがわかった。そこで、注送圧力を12.7MPa一定とし、砥粒濃度を5, 10, 15vol%の3通りに変え、さらにそれぞれの濃度について砥粒径を5.5, 20, 57  $\mu\text{m}$ の3通り変えて実験を行った。図6に、パ

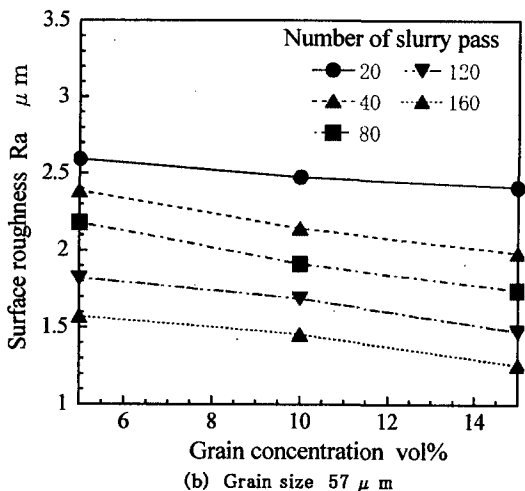
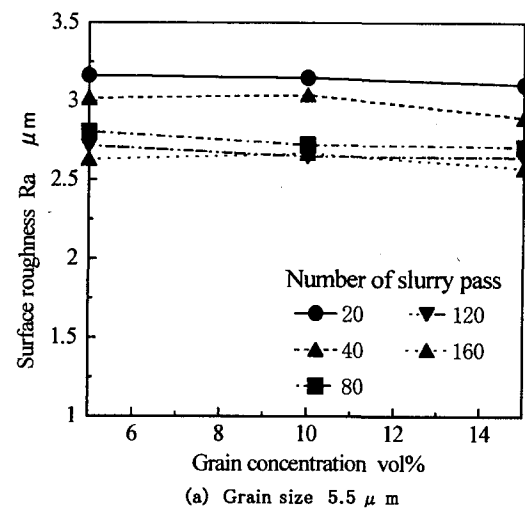


Fig.7 Relation between surface roughness and Grain concentration

ス回数と表面粗さの関係を示す。図6(a), 図6(b), 図6(c)は、砥粒濃度をそれぞれ5, 10, 15vol%とした場合の測定結果を表す。

図6(a)から、砥粒濃度が5vol%の場合、平均粒径が5.5, 20, 57  $\mu\text{m}$ のいずれの砥粒の場合とも、パス回数が増えるにつれて表面粗さがなだらかに減少していく様子がわかる。実験はパス回数160回まで行っているが、160回のパス回数でもまだ表面粗さが減少する傾向が見られる。減少の度合いは、粒径の大きい粗粒ほど大きい。また、表面粗さの絶対値は、細粒の砥粒ほど大きい。

図6(b)から、砥粒濃度が10vol%の場合も砥粒濃度が5vol%の場合と同様なカーブを描くことがわかる。しかしながら、いずれの粒径の場合も表面粗さの絶対値は砥粒濃度5vol%の場合よりも小さな値となる。また、図6(c)から砥粒濃度が15vol%と濃くなった場合も、5, 10vol%の砥粒濃度と同様な曲線を描くことがわかる。平均粒径が57  $\mu\text{m}$ の砥粒に関してみると、表面粗さの低減度合いは他の砥粒径に比べ極めて大きくなることわかる。表面粗さの絶対値は、砥粒濃度が5, 10vol%の場合よりも小さくなる。

このように、図6から砥粒径が大きくなるにつれて表面粗さは小さくなるが、管とマンドレルのクリアランスを考えた場合、表面粗さの低減に最適な粒径が存在するものと考えられる。むやみに砥粒径が大きくなっても逆の効果をもたらすと考えられる。この点に関しては、今後さらに詳細な検討が必要である。

II) 砥粒径と表面粗さの関係 図6の実験結果をもとに、表面粗さと砥粒濃度の関係をパス回数をパラメータとして再整理した。図

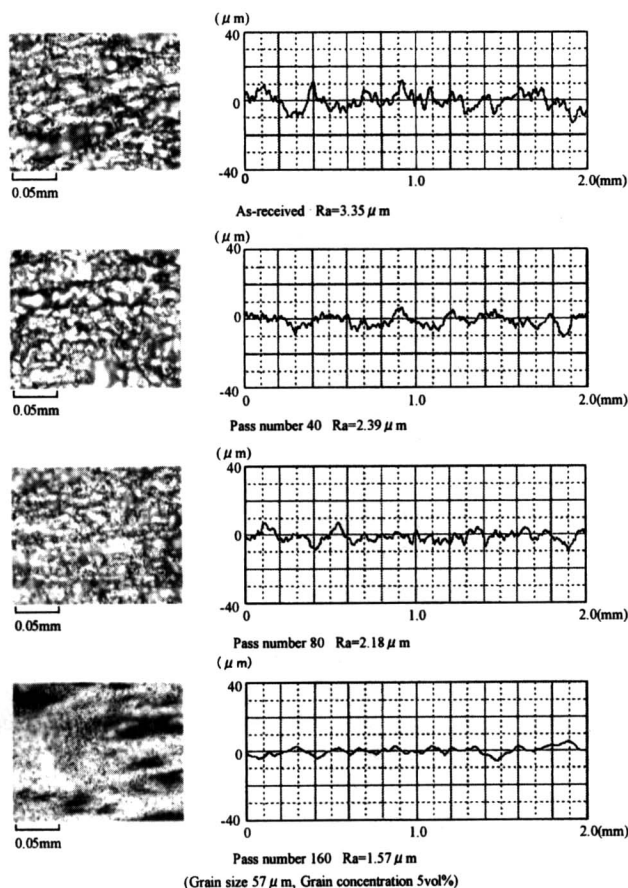


Fig. 8 Optical micrographs of inner wall surface

7に、その結果の一例を示す。図7(a)は平均粒径 $5.5\ \mu\text{m}$ の砥粒に関する結果を、図7(b)は平均粒径 $57\ \mu\text{m}$ の砥粒の結果を表す。図7(a)から、細粒( $5.5\ \mu\text{m}$ )の砥粒に関しては、いずれのパス回数の場合も表面粗さは砥粒濃度にほとんど依存しないことがわかる。一方、図7(b)から粗粒( $57\ \mu\text{m}$ )の砥粒の場合は、砥粒濃度が増えたと表面粗さは直線的に減少することがわかる。減少の度合いは、パス回数に依存しないように思われる。

これは次の理由によるものと考えられる。作用砥粒数が一定であると、1パスあたりの表面粗さの低減量は一定の値になると考えられる。砥粒濃度の増加は作用砥粒数の増加を意味するので、表面粗さの低減量も砥粒濃度に比例して大きくなったものと推察される。

Ⅲ) 光学顕微鏡による観察 研磨後の管内壁面を光学顕微鏡を用いて観察した。図8に、粒径 $57\ \mu\text{m}$ の砥粒を用い砥粒濃度を5vol%にして160パスを繰り返したときの観察結果を示す。図8には、粗さ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粗さは次第に低減していく様子がわかる。しかし、160回パスを繰り返した後でも表面には筋状の模様が未だ幾分残っている。このことから、本研磨条件では平滑な表面を得ることはできないといえる。

図9に、粒径 $57\ \mu\text{m}$ の砥粒を用い砥粒濃度を15vol%と多くして160回パス研磨したときの観察結果を示す。図9から、パス回数が40回でかなり表面が滑らかになる様子がわかる。さらにパス回数を増し160パス流動させると、表面に見られた筋状の模様がほぼ消えてなくなる。表面は、光沢のある平滑な面になる。

#### 4. 考 察

研磨媒体のスラリーは、溶媒(水)に溶質のアルミナ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )砥

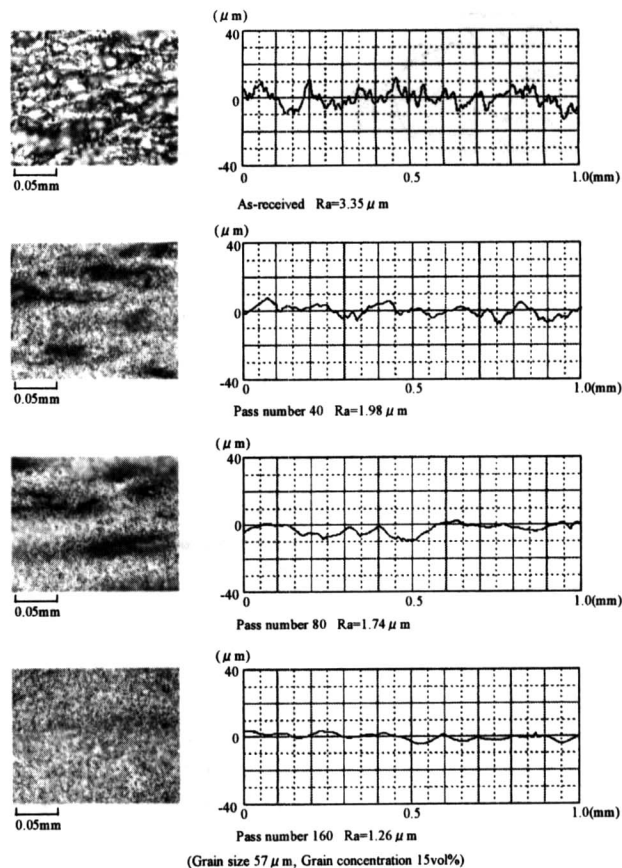


Fig. 9 Optical micrographs of inner wall surface

粒を懸濁した液である。その液は、固体-液体系での単分散系粒子群に属していて、疎液性で高濃度になるまでニュートン流体としての性質を示す。実験には、数ミクロンから数十ミクロンの大きさの砥粒を用いているので、研磨媒体はヒドロゾルと呼ばれる構造流体(粒径:  $1 \sim 50\ \mu\text{m}$ )となっている。実験では、砥粒濃度を最大で15vol%としているので研磨媒体は比重の大きな等質な液体とみなすことができる。

このような研磨媒体(スラリー)を用いてステンレス鋼管内壁面を研磨しているが、以下にその研磨機構について考察する。研磨は、管内にマンドレルを挿入して管内壁面とマンドレルの間に狭隙なクリアランスをつくり行っている。管の軸方向に流れ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、管の内径を $D$ 、マンドレルの外径を $d$ 、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、

$$Q = \pi(D^2 - d^2)u/4 \quad (1)$$

が成り立つ。 $Q = V/t$ であるので、 $u = 4V/\pi(D^2 - d^2)t$ となる。

ここで、 $D$ は $\phi 4.35\text{mm}$ 、 $d$ は $\phi 4\text{mm}$ 、 $t$ は実測の結果6.1秒、 $V$ は $77 \times 10^3\text{mm}^3$ であるので、管の穴の中を流れる流体の流速 $u$ は $5.50\text{m/s}$ となる。ここで、水の動粘度を $\nu$ とすると、レイノルズ数 $Re$ は、 $Re = u(D-d)/2\nu$ で表される。 $\nu$ の値は $1.0064\text{mm}^2/\text{s}$ であるので、 $Re = 956$ となる。臨界レイノルズ数は2300であるので<sup>7)</sup>、管内の流体の流れは層流になっていると推測される。

図10に、管内を流れる流体(スラリー)の流動状態(模式図)を示す。図10は、管の中心を通る軸に関して切断したときの断面を表す。 $u(y)$ は、管内壁からマンドレルに向かって距離 $y$ 隔った位置におけるスラリーの流速を示す。

層流状態で流れる流体中の砥粒は、溶媒から静水圧と軸方向に

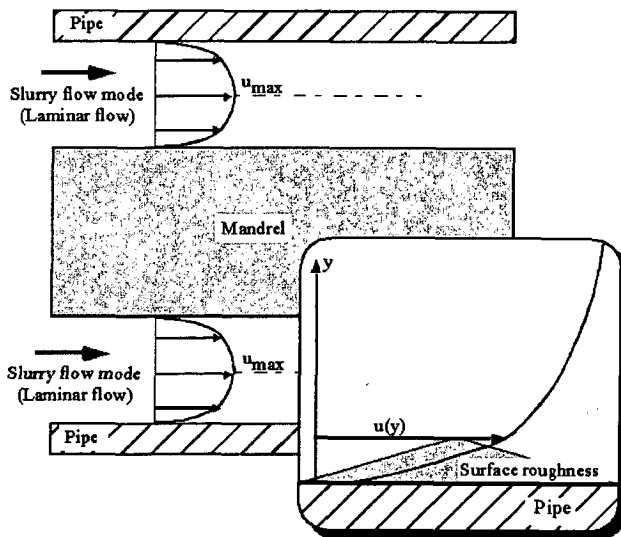


Fig.10 Slurry flow mode

流体圧を受ける。静水圧は研磨作用に影響を及ぼさないで、研磨には軸方向に流れる流体圧だけが関与する。研磨は、砥粒の壁面への衝突と引っ掻き作用によって行われるので、スラリーの流動速度が大きいほど砥粒の運動エネルギーが大きくなる。また、粒径の大きな砥粒ほど運動エネルギーが大きくなる。このため、表面粗さの低減度合いは粗粒ほど大きくなると推察される。図4、図5、図6に示す実験結果は、このことを物語っている。

図6に示すように、表面粗さはパス回数の少ない段階で急激に減少する。そして、その後パス回数が増えるにつれて漸減していく。これは、次の理由によると思われる。研磨前のパイプ内壁面は、微細な凹凸形状を有する粗い面(図10)となっている。この凹凸形状の除去が研磨作用であるので、図4、図5、図6の測定結果は砥粒の壁面突起(凹凸形状)への衝突確率と衝突断面積を考へることによって説明できると思われる。高い突起ほど砥粒に対する衝突断面積は大きい。また、高い突起ほど衝突する砥粒の数が多くなり衝突確率も大きくなる。スラリーは層流状態で流れているので、流速はパイプ内壁面からパイプ中心軸に向かって放物線形状の形で速くなる。すなわち、高い突起ほど研磨作用を強く受けることになる。表面粗さがパス回数の少ない段階で急激に減少したのは、このことが原因していると考えられる。研磨が進み突起の高さ

が低くなってくると、研磨対象となる突起数は増加してくる。すなわち、負荷率が大きくなっていく。しかし、突起高さの減少は衝突確率の減少と衝突断面積の低下をもたらす。このことが、表面粗さの低減が次第に緩やかなものになった原因であると考えられる。

## 5. 結 言

高速流動法を適用してステンレス鋼管内壁面の研磨を行った結果、次の結論を得た。

- (1) 管内壁面を効率よく研磨するために、管内にマンドレルを挿入する新たな高速流動研磨法を開発した。
- (2) 製作したマンドレル保持装置は良好な水密性を有しており、スラリーの繰返し高速流動に対して十分耐えることがわかった。
- (3) 表面粗さは、パス回数が増えるにつれて小さくなる。また、表面粗さの絶対値は粒径が大きいほど小さくなる。
- (4) 砥粒濃度が高くなるにつれて、表面粗さは小さくなる。
- (5) スラリーの注送圧力が大きくなると、表面粗さは小さくなる。

## 謝 辞

高速流動研磨装置およびマンドレル保持具は、金沢大学技術支援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) 田中義信, 津和秀夫: 機械工作法(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)ー研磨の基本特性ー, 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: 粘性流体の力学, 理工学社, (1978) 185.

## 編 集 後 記

本特集では近接場技術の最近の動向と工学応用への展開の方向を知ることができればと企画いたしました。プローブ技術はナノメートル領域の研究手段として大いに期待されている状況です。装置の構成上も、圧電素子を用いた位置決め技術や、制御技術、計測技術、剛性の高い構造等、精密工学に係る技術も多く、注目すべき分野と思います。最近では、本技術の発明者でありノーベル賞を受けたIBM チューリッヒ研究所の Binnig らがデータストレージの「ナノドライブ」プロジェクトにかかわっており、プローブアレイをMEMS技術で製作し、うまく行けば数年後の実用化を目指しているとのこと(Scientific America, Jan. 2003あるいは <http://www.zurich.ibm.com/st/storage/millipede.html>)。科学分野で主に利用されてきたプローブ技術が、産業技術として展開される兆しであります。本特集が読者の関心

の一助となれば幸いです。忙しい中、ご執筆いただいた著者の方々に感謝いたします。

インタビューは、昨年度話題が集中しました田中氏のノーベル賞受賞に関する背景を知るタイムリーな記事となりました。ノーベル賞が身近に感じられ、閉塞感のある日本において、夢を与えてくれました。インタビューを受けていただいた吉田氏をはじめ、島津製作所の社長室広報の中田さん、紹介をいただいた経済産業省の小西氏およびワーキンググループの方々に感謝いたします。

最後に短い時間にもかかわらず本特集を取りまとめたいただいた、学会編集部の方々に感謝いたします。

(羽根一博)