

高速流動法によるステンレス鋼曲がり管内壁面の研磨*

黒部利次** 山田良穂** 守吉信乃*** 森田知之***

High speed flow finishing of inner wall of stainless steel curved pipe

Toshiji KUROBE Yoshinori YAMADA Akino MORIYOSHI and Tomoyuki Morita

High speed flow finishing method has recently developed, which has an excellent performance for polishing an inner wall of stainless steel capillary. However, its method seems to be unable to finish the inner wall of stainless steel pipe. Present paper focuses on the finishing of the inner wall of stainless steel curved pipe with high speed flow finishing method. It is found that an elastic string-type mandrel inserted into the hole of curved pipe has great performance on finishing, in which a diameter of mandrel is slightly smaller than hole size of the pipe. Experiments indicate that surface roughness of the inner wall of curved pipe decreases with the number of slurry flow pass. It is found that surface roughness of the inner wall of a 90° curved pipe decreases with the number of slurry flow pass, however, it increases inversely after 80 passes and peculiar roughness curve is generated. On the other hand, a 180° curved pipe indicates that there is different surface roughness curve compared with 90° curved pipe. SEM micrographs describe that the spacing of grain boundary on the inner wall surface of the pipe extends gradually with the number of slurry flow pass, and it may be related to the variation of surface roughness.

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

1. 緒 言

最近、ステンレス鋼微細管(キャピラリーと呼ばれる)の内壁面を効率良く研磨する方法が開発された^{1,2)}。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(高速流動研磨法と呼ばれる)である。本研磨法によって、引き抜き加工により製造されたキャピラリーの内壁面(粗面)は平滑な面に仕上がる事が明らかとなった。その後、本研磨法は内径の大きなストレートパイプの内壁面の仕上げ加工にも適用可能ではないかと考えられた。研磨は、ストレート管内に棒状(金属製)のマンドレルを挿入し、マンドレルと管内壁面の間に隙間(クリアランス)をつくりその隙間にスラリーを高速で流動させることによって行われる。実験の結果、所期の目的通り管内壁面が良好に研磨されることが明らかになった³⁾。

しかしながら、本研磨法で曲がり管内壁面を磨くことは原理的に不可能である。そのため、曲がり管内壁面を研磨する場合それに対応した研磨法の開発が必要となる。検討すべき課題として、①曲がり管に挿入可能なマンドレルを開発すること、すなわちマンドレルの材質の検討、②マンドレルを保持する治具の開発、特にマンドレルを把持する機構について工夫が必要である。

本研究では、曲がり管内壁面を研磨するために、可撓性を有するゴム紐をマンドレルとした場合の高速流動研磨法について実験的検討を行った。実験では、特に管の曲がり部位における研磨状態について調べた。

2. 実験 方法

2.1 高速流動研磨装置

ステンレス鋼曲がり管内壁面の研磨は、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

に記すと次ぎのようである。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、被研磨試料(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(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

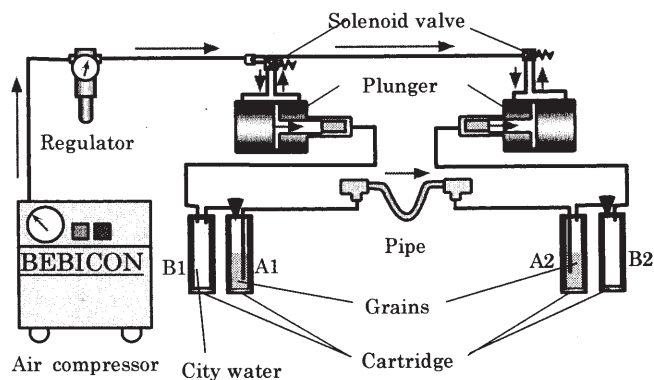


Fig.1 Schematic view of polishing setup

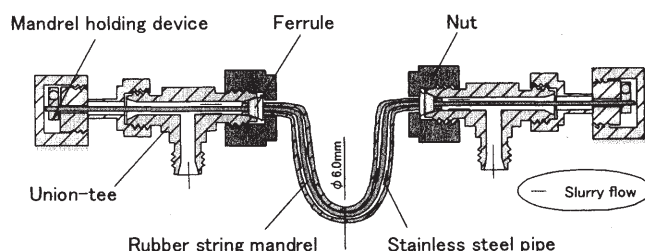


Fig.2 Pipe and rubber mandrel holding devices

* 原稿受付 平成 15 年 3 月 20 日

** 正 会 員 金沢大学工学部 (金沢市小立野 2-40-20)

*** 金沢大学工学部

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。

実験に際し、エアコンプレッサを稼動して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)に制御する。そして、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、底部に予め沈殿させておいた砥粒がイオン交換水ごと被研磨試料(曲がり管)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間(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時を1パスとする。

2.2 マンドレルおよび試料保持具

ステンレス鋼曲がり管内壁面を研磨するために、管内に挿入するマンドレルとして可撓性を有するゴム紐(ゴム紐製マンドレルと呼ぶ)を実験に用いた。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。

図2に、ゴム紐製マンドレルの把持具と研磨部の構成システムを示す。ゴム紐製マンドレルの場合、管内でゴム紐が弛まないように適度な張力を付与する必要がある。このため、張力付与と同時にゴム紐を堅固に把持する治具を新たに開発した。ゴム紐製マンドレルは、図2に示すような止め具を用いて把持した。スラリーは、ユニオン・ティーを通して曲がり管内へと強制流入させられる。

2.3 実験条件および評価方法

被研磨試料は、ステンレス鋼管(SUS316TP)である。その寸法・形状は、外径 $\phi 6.0\text{mm}$ ×内径 $\phi 4.4\text{mm}$ の長尺のストレート管である。試験片は、カッターを用いて長尺のストレート管から切り出した。試験片の長さは190mmである。曲がり管は、チューブベンダー(Swagelok社製)を用いてストレート管を所定の角度(90° , 180°)に曲げて製作した。ステンレス鋼曲がり管内壁面の研磨は、アルミナ砥粒(Al_2O_3)を用いて行った。実験条件を表1に示す。

研磨後、管をワイヤ放電加工機を用いて管軸に垂直に切断(図3)した。そして、触針式粗さ計(Taylor-Hobson社製:S4型)を用いて表面粗さの測定を行った。粗さの測定は、図4に示すよ

Table 1 Experimental condition

Workpiece	SUS316TP
Inside diameter	4.4 mm
Length	190 mm
Grain	Al_2O_3
Grain size	$0.3\ \mu\text{m}$
Concentration	15 vol%
Number of slurry pass	0-160 passes
Pressure	8.82 MPa
Fluid	City water

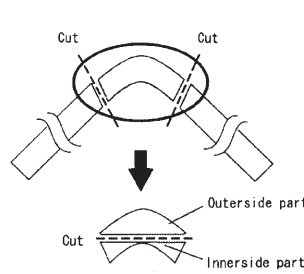


Fig. 3 Electrical discharge wire cutting

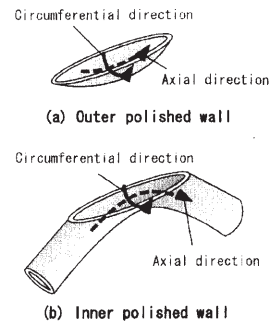


Fig. 4 Stylus trace direction

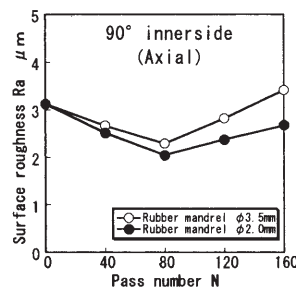


Fig. 5 Relationship between surface roughness and pass number

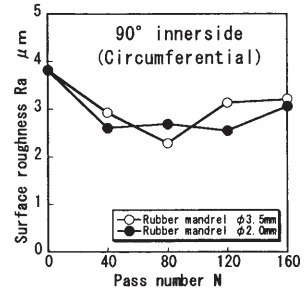


Fig. 6 Relationship between surface roughness and pass number

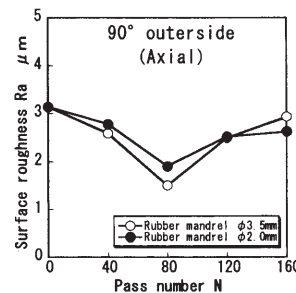


Fig. 7 Effect of pass number on surface roughness

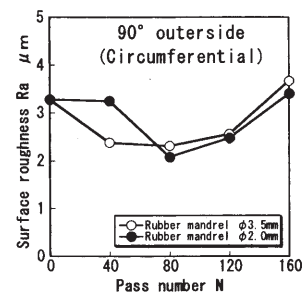


Fig. 8 Effect of pass number on surface roughness

うに管の長軸方向と円周方向の2方向にスタイラスを走査させて行った。さらに、走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて研磨面の観察も行った。

3. 実験結果

3.1 90° 曲がり管内壁面の研磨

図5、図6に、ゴム紐製マンドレルを 90° 曲がり管に挿入して高速流動研磨を行った場合の管内壁面内側の実験結果を示す。図5は、管内壁面軸方向に表面粗さを測定した結果を表す。一方、図6は円周方向の結果を示す。いずれの図も、表面粗さとパス回数の関係を表す。実験は、平均粒径 $0.3\ \mu\text{m}$ の砥粒を用い、砥粒濃度を15vol%, 注送圧力を8.82MPaとして行った。また、管内に挿入するゴム紐製マンドレルとしては、外径 $\phi 3.5\text{mm}$ と $\phi 2.0\text{mm}$ の2種類のゴム紐を用いた。外径 $\phi 3.5\text{mm}$ のゴム紐の場合、管の内径とゴム紐外径との差(クリアランス)は 0.45mm 、外径 $\phi 2.0\text{mm}$ のゴム紐の場合は 1.20mm である。

図5から、いずれの太さのゴム紐の場合も軸方向に測定した表面粗さはパス回数が増えるにつれて当初は低減するが、80パスを

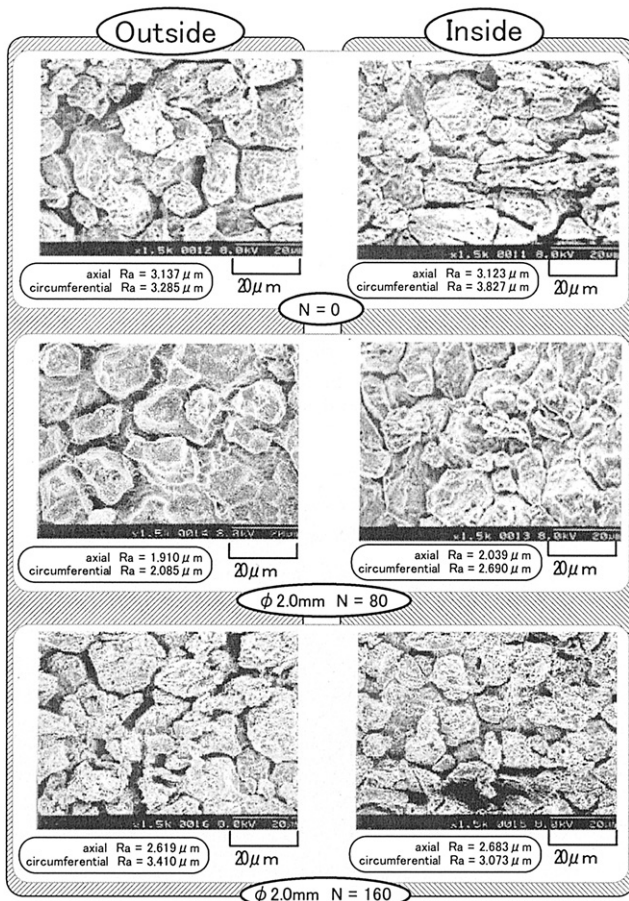


Fig. 9 SEM micrographs of polished wall of 90° pipe

境にその後表面粗さは増加に転ずる様子がわかる。すなわち、表面粗さはV字型曲線を描く。粗さの絶対値は、クリアランスの小さなゴム紐 (φ 3.5mm) の方がクリアランスの大きなゴム紐 (φ 2.0mm) の場合よりも大きい。これは、クリアランスが著しく小さくなると流体(スラリー)が流れ難くなることを物語っている。一方、図6から円周方向にスタイラスを走査させて測定した表面粗さは、パス回数とともに緩やかに低減しその後漸増に転ずる様子がわかる。V字の形は必ずしも明瞭ではない。

このように、研磨によって表面粗さはV字曲線を描くが、実用の視点からは表面粗さが最小値(極値)になったところで研磨加工を止める必要があるといえる。

図7に、90° 曲がり管内壁面外側の研磨結果を示す。図7は、軸方向に測定した表面粗さとパス回数の関係を表す。図7から、いずれの太さのゴム紐の場合も表面粗さはパス回数が増えるにつれて低減する。しかし、80パスを境にその後表面粗さは増加に転じ表面粗さはV字型曲線を描く。粗さの絶対値は、クリアランスの小さなゴム紐 (φ 3.5mm) の方がクリアランスの大きなゴム紐 (φ 2.0mm) の場合よりも大きい。しかし、パス回数が160回のところで逆転する現象が見られる。図8に、円周方向の測定結果を示す。図8から、いずれのゴム紐の場合も80パスまでは表面粗さはなだらかに減少するが、それ以降は逆に増加し下に凸の放物線模様を描く。表面粗さの絶対値は、ゴム紐の径によらずほぼ同じである。

図9に、φ 2.0mmのゴム紐製マンドレルを管内に挿入して研磨した場合の管内壁面のSEM写真を示す。図9には、管内側と外側研磨面のSEM像を併記している。また、図9には研磨前 (N=0) の

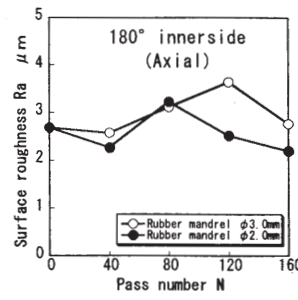


Fig. 10 Relationship between surface roughness and pass number

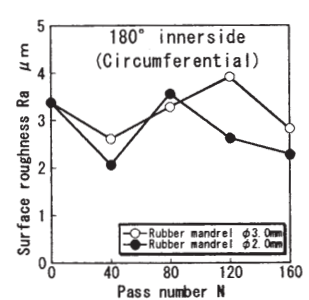


Fig. 11 Relationship between surface roughness and pass number

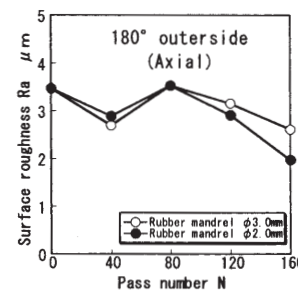


Fig. 12 Effect of pass number on surface roughness

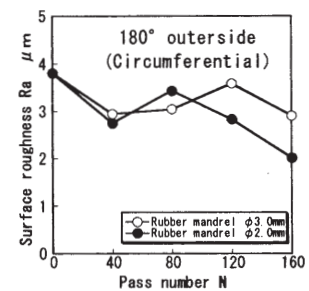


Fig. 13 Effect of pass number on surface roughness

素管内壁面のSEM像も示している。図9から、素管内壁面のSEM像は管内側と外側でかなり異なることがわかる。管内側の壁面は、写真上で結晶粒が水平方向に強制配列させられたようなパターンを示しており、また結晶粒同士が互いに密に詰った状態になっている。一方、管外側壁面は結晶粒同士がある幅をもって離れており結晶粒の詰り具合は粗となっている。これは、ストレート管をベンダーで強制的に曲げて曲がり管を創製したことが起因していると考えられる。

高速流動研磨をパス回数N=80まで行くと、管内側内壁面はかなり研磨されることがわかる。また、管外側内壁面もある程度平滑になる様子がわかる。しかしながら、パス回数がN=160と増えると管内側の内壁面も外側の内壁面も平滑ではなくなりうねりを伴ったような表面となる。

これらの研磨様態は、φ 3.0mmのゴム紐製マンドレルの場合もほぼ同様であった。

3.3 180°曲がり管内壁面の研磨

図10、図11に、ゴム紐製マンドレルを180°曲がり管に挿入して高速流動研磨を行った場合の管内壁面内側についての実験結果を示す。図10は、管内壁面軸方向に表面粗さを測定した結果を表す。一方、図11は円周方向の結果を示す。いずれの図も、表面粗さとパス回数の関係を表す。実験は、90°曲がり管の場合と同じ条件で行った。すなわち、平均粒径0.3 μmの砥粒を用い、砥粒濃度を15vol%、注送圧力を8.82MPaとして実験を行った。管内に挿入したゴム紐製マンドレルは、外径φ 3.5mmとφ 2.0mmの2種類のゴム紐である。

図10から、いずれの太さのゴム紐の場合も、軸方向に測定した表面粗さはパス回数が増えるにつれて当初は低減する。しかし、40パスを境にその後増加に転じ、80パス (φ 2.0mm) ないしは120パス (φ 3.5mm) でピークを示しその後再び減少する。表面粗さの絶対値は、φ 3.5mmのゴム紐製マンドレルの方がφ 2.0mm

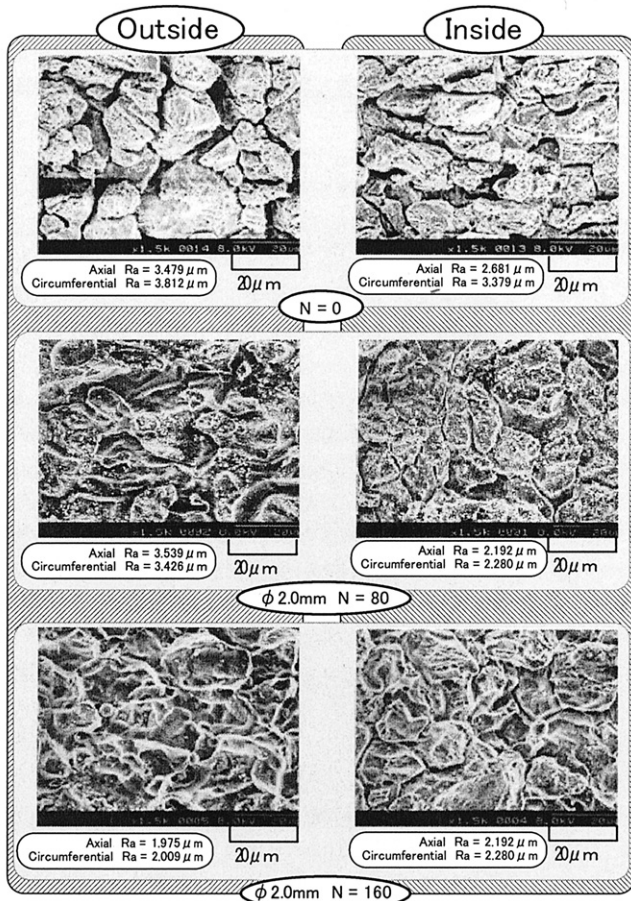


Fig. 14 SEM micrographs of polished wall of 180° curved pipe

のマンデルよりも大きい。この表面粗さのパス回数に伴う変化様態は、V字型曲線を描く90°曲がり管のモードとはかなり異なる。

図11に示す円周方向の表面粗さは、軸方向に測定した表面粗さの測定結果とほぼ同様な変化様態を示すことがわかる。しかし、粗さの変化様態は幾分激しい。

図12に、180°曲がり管内壁面外側の実験結果を示す。図12は、軸方向に測定した表面粗さとパス回数の関係を表す。図12から、いずれの太さのゴム紐の場合も、軸方向に測定した表面粗さはパス回数が増えるにつれて当初は低減する。しかし、40パスを境にその後増加に転じ、80パスでピークを示しその後再び減少する。表面粗さの絶対値は、いずれの径のマンデルの場合もほぼ同じ値を示す。

図13に、円周方向の実験結果を示す。図13から、円周方向の表面粗さも軸方向の場合と同様な変化様態を示す。すなわち、粗さは初期の低減後増加に転じピークを示して再び低減するというモードを示す。

図14に、φ2.0mmのゴム紐製マンデルを使用して研磨した場合の内壁面のSEM写真を示す。図14には、管内側と外側の研磨面のSEM像を併記している。また、図14には研磨前の素管内壁面のSEM像も示している。図14から、素管内壁面のSEM像は管内側と外側で相当に異なることがわかる。管内側の壁面は、写真上で結晶粒が水平方向に強制配列させられたようなパターンを示しており、また結晶粒同士が互いに密に詰った状態になっている。一方、管外側の壁面は結晶粒同士がかなりの幅をもって離れており、結晶粒の詰り具合は粗となっている。これらの内壁面の様態は、90°

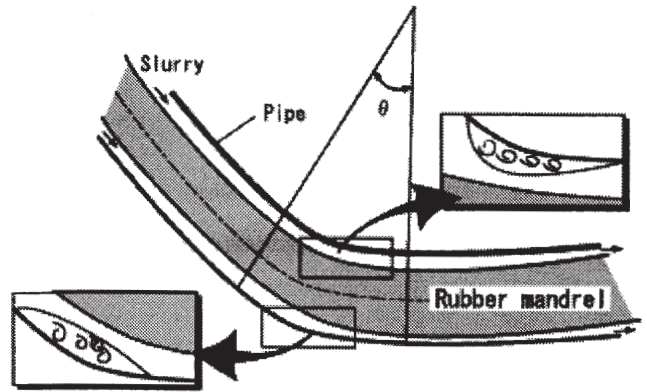


Fig. 15 Slurry flow mode in curved pipe

曲がり管(図9)のそれとはかなり異なる。

図14から、高速流動研磨をパス回数N=80まで行くと、この段階で管外側内壁面も内側内壁面もかなり研磨される様子がわかる。しかしながら、パス回数をN=160と増やすと管内側も外側内壁面もうねったような表面となる。また、結晶粒の形状が明瞭でなくなり、稜も丸味を帯びようになる。これらの研磨様態は、φ3.0mmのゴム紐製マンデルの場合もみられた。

4. 考 察

実験に使用した研磨媒体のスラリーは、水にアルミナ砥粒(Al_2O_3)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る。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、0.3μm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流体となっている。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曲がり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。

図15に示すように、研磨は管内にゴム紐製マンデルを挿入して管内壁面とマンデルの間に狭い空間(クリアランス)を創り出して行っている。研磨機構を考える場合、まず管の軸方向に流れるスラリーの流動状態を把握する必要がある。流動状態は、レイノルズ数によって規定されるのでその値を求める。いま、パイプの内径をD、マンデルの外径をd、スラリーの流速をu、スラリーがパイプを通過する時間を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。ここで、 $Q = V/t$ であるので、 $u = 4V / \pi (D^2 - d^2) t$ となる。

Dはφ4.35mm、dはφ4mm、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5.50m/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は、 $Re = u(D-d) / 2\nu$ で表される。 ν の値は $1.0064 \text{ mm}^2/\text{s}$ であるので⁴⁾、 $Re = 956$ 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層流になっていると推測される。

層流状態で流れるスラリーは、管の曲がり部でその流れのモードが変化すると考えられる。図15に示すように、曲がり部壁面近傍においては流体の流動状態は乱れる。乱れる部位は、管外側内壁面と内側内壁面とは若干異なる。それらの部位では、層流が乱流へと変化する⁵⁾。このため、管曲がり部壁面の研磨はこれら

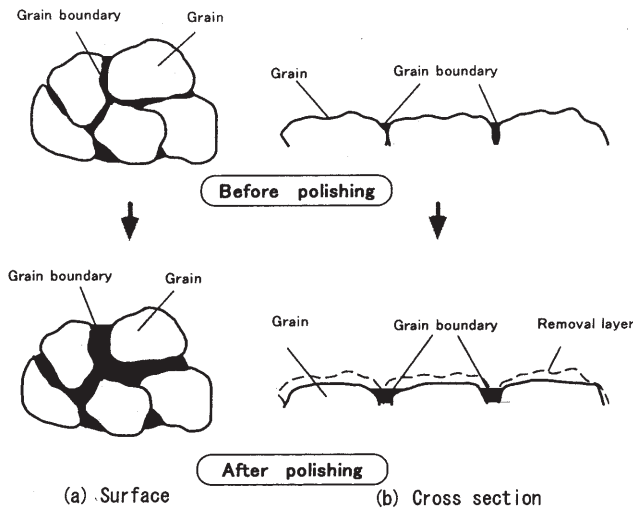


Fig. 16 Schematic illustrations of polishing mechanism

のスラリーの流動状態に強く影響を受けると推察される。実験には90°と180°の2種類の曲がり管を供しているが、スラリーの曲がり部位における流動状態は90°と180°曲がり管ではかなり異なると考えられる。図15に示すスラリーの流動状態から類推して、スラリーの管流入側と流出側における流動モードは管の曲がり具合によって相当に変わると考えられ、90°と180°曲がり管で研磨様態が変化すると考えられる。

90°曲がり管の場合(図5～図8)、表面粗さはパス回数とともに直線的に減少し、80パスで極小値を示した後増加に転じ、V字型曲線を描く。パス回数とともに粗さが減少するのは、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面となっている。この凹凸形状の除去が研磨作用であるので、図5～図8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え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増え衝突確率も大きくなる。流体(スラリー)の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ので、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くる。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る原因であると考えられる。

一方、80パス以降表面粗さが逆に増えるのは、次の理由によると考えられる。管曲がり部内壁面近傍でのスラリーの流れは、図15に示すように乱流になっている。80パス辺りまでにある程度平滑になった表面は、その後のパス繰り返して図16に示すように結晶粒内を研磨すると同時に結晶粒界も研磨(削り出す)するよう

になってくると考えられる。結晶粒界の金属学的性質は結晶粒内のそれとは異なると考えられるので、研磨作用も自ずと違ってくると思われる。所定のパス回数ごとに光学顕微鏡で粒界近傍を撮影した結果、パス回数が進むにつれて粒界近傍が結晶粒内よりも研磨が選択的に進むことがわかった。すなわち、粒界部分が凹む現象が観察された。このことが80パス以降の表面粗さの増大につながったものと考えられる。また、管曲がり部近傍では流体の流れは乱流になっているので、その流れの影響を受けてパス回数が進むにつれて表面にうねりが生じるような研磨作用が働いたものと推察される。このことも、表面粗さの増大をもたらした一因であると考えられる。

一方、180°曲がり管の場合、表面粗さ(図10～図13)はパス回数が増えるにつれて減少→増加→減少と複雑な過程を経る。この理由については今のところ明らかではないが、多分180°と90°曲がり管では曲がり部位におけるスラリーの流動状態がかなり異なることが原因していると考えられる。特に、乱流の発生様態(図15)が研磨に影響していると思われる。この点に関しては今後検討すべき課題と考えている。

5. 結 言

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

- (1) ステンレス鋼曲がり管内壁面の研磨は、ゴム紐製マンドレルを用いることによって行えることがわかった。また、開発したゴム紐製マンドレル把持具は、堅牢でスラリーの漏洩を誘引することはない。
- (2) 90°曲がり管を研磨した結果、曲がり部位の表面粗さはパス回数が増加するとともに低減し80パスの所で極値を示す。その後表面粗さは増加に転じV字型曲線を描く。管外側内壁面と内側内壁面の研磨様態は若干異なる。
- (3) 180°曲がり管の場合、曲がり部位の表面粗さはパス回数の増加とともに低減するが80パスの所で極値を示す。その後表面粗さは増加に転じ、やがてピーク値を示して再び減少する。V字と逆V字が連なった曲線となる。管外側内壁面と内側内壁面の研磨様態は若干異なる。

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) 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.
- 2) 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2報) — 内径の異なる各種細管の研磨特性 —, 精密工学会誌, 64, 8(1998)1186.
- 3) 黒部利次, 中森啓介, 青木一浩: 高速流動法によるステンレス鋼管内壁面の研磨, 精密工学会誌, 69, 2(2003)273.
- 4) 岩柳茂夫: レオロジー, 朝倉書店(1971)174.
- 5) 池森亀鶴, 黒瀬元雄, 越智光昭: 水力学, コロナ社(1995)201.