

極細ステンレス鋼管内壁の高速流動研磨（第3報）*

— ガラスビーズ添加の効果 —

黒部利次** 山田良穂** 山本桂一郎*** 三浦毅彦†

High Speed Slurry Flow Finishing of Inner Wall of Stainless Steel Capillary (3rd Report)
-Effect of Annexed Glass Beads on Finishing Characteristics-

Toshiji KUROBE, Yoshinori YAMADA, Keiichiro YAMAMOTO 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. High speed slurry flow finishing method developed by authors has been proved to have excellent polishing performance, but it has been needed a long time to obtain an acceptable level of surface roughness decrease. In the present study, effect of an annex of the glass beads into the slurry on the efficiency of finishing has been investigated. Experiments show that the medium of the glass beads annexed into the slurry has fine finishing characteristics rather than slurry medium. Surface roughness decreases with slurry flow pass number and its decreasing modes vary due to the property of medium. Optical micrographs of the medium indicate that the glass bead does not crush and not slenderize during finishing processes.

Key words: stainless steel capillary, inner wall polishing, surface roughness, glass beads

1. 緒 言

金属製の細管は、液体や気体の輸送管として精密機器に搭載されている。これらの細管は、通常その内壁を精密に研磨する必要がある。特に、高純度のガスや溶液の流路に使用される管の場合、内壁を高精度に仕上げなければならない。内径が1mm以下で、かつ、素管長が数十cmから数mに及ぶ長尺管のステンレス極細管（キャピラリー）の場合、その内壁面の研磨は在来の研磨法が適用し難い面がある^{1)~5)}。そこで、前報では、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。その結果、本研磨法は細管の研磨に有効なことがわかった⁶⁾。しかし、極細管のため研磨に長時間を要し生産効率の点で問題を内包している。

砂鉄と粗い砂を水中に投入・懸濁させ、その溶液（スラリー）中に金属製の回転円盤を浸し、回転させると金属回転円盤が摩耗するとの報告がある⁷⁾。摩耗の度合いは、砂鉄と粗い砂の混合割合によって変わる。本報告に触発されて、細管研磨用媒体のスラリーにガラスビーズを添加すると研磨能率が向上するのではないかと発想した。

そこで、砥粒よりも寸法形状の大きいガラス球を水中に懸濁させて実験を行った。

2. 実験方法

2.1 実験装置および方法

ステンレス鋼細管内壁の研磨は、前報と同じ装置を用いて行った。以下に、研磨装置の概略について簡潔に記す。図1に、スラ

リー高速流動型研磨装置の概略を示す。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（素管）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、砥粒とガラスビーズ、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ぐための、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

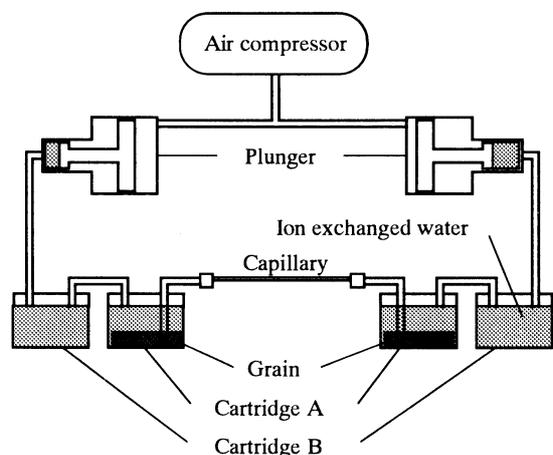


Fig.1 Schematic view of polishing setup

* 原稿受付 平成10年2月20日

** 正会員 金沢大学工学部（金沢市小立野2-40-20）

*** 正会員 金沢大学大学院

† 学生会員 金沢大学大学院

Table 1 Polishing condition

Capillary	Stainless steel
Inner diameter	0.4, 0.6 mm
Length	500mm
Grain	Al ₂ O ₃
Average grain size	20 - 60 μm
Grain concentration	3.44 vol%
Average glass beads size	70 μm
Glass beads concentration	0.52 - 2.60 vol%
Fluid	Ion exchanged water
Pressure	10.8MPa
Number of pass	2 - 20

ギュー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とガラス球（以後、ビーズと呼ぶ）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、ガラスビーズを含んだスラリー（ビーズ入りスラリーと呼ぶ）が管内を流動することによって営まれる。

2.2 実験条件および評価方法

実験には、長さ500mmで内径が異なる3種類（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（Al₂O₃）砥粒を使用し、砥粒の平均粒径を20～60 μmの範囲で種々変えて実験を行った。実験の際、スラリーには平均粒径70 μmのガラスビーズを添加した。しかし、予備実験の結果内径が0.28mmの管の場合、ビーズを添加するとスラリーが連続的に滑らかに流動せず、安定したデータが得られなかった。そこで、実験は主に内径が0.4, 0.6mmの管について行った。

実験条件を表1に示す。

実験終了後、管の研磨状態を評価するためイオン交換水で管内壁を洗浄した。洗浄後、管の中央部を左右10mm離れた場所で薄刃の鋭利なカッタを用いて切断した。切断分離した20mm長の被観察用中空管はそ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、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。その後、十分洗浄して管内壁を観察した。

研磨状態の観察は、光学顕微鏡（ノマルスキー干渉顕微鏡）や走査型電子顕微鏡（SEM）、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）を用いて行った。粗さの表示は、特に断らない限りRaの値で行う。なおRaは、同一条件での3回の実験結果の平均である。

3. 実験結果

3.1 ガラスビーズ添加の効果

実験は、次の3通りの方法で行った。a)イオン交換水にガラスビーズを添加した溶液を研磨媒体として研磨、b)イオン交換水に砥粒を懸濁したスラリーを研磨媒体として研磨、c)スラリーにガラ

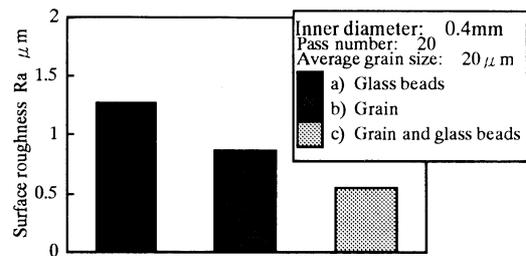


Fig. 2 Effect of glass beads on surface roughness

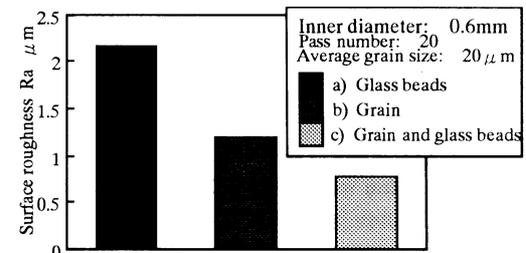


Fig. 3 Effect of glass beads on surface roughness

スを添加したビーズ入りスラリーを研磨媒体として研磨。

は、砥粒濃度を3.44vol%，パス回数を20回として行った。また、細管内に注入するスラリーの注入圧力を10.8MPa一定とした。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。スラリーに添加するガラスビーズの添加量は1.5vol%である。イオン交換水に懸濁する砥粒の濃度のおおよそ1/2である。実験に供した細管（内径0.6, 0.4mm）の内壁面の表面粗さは、Raでそれぞれ2.24, 2.11 μmである。

図2に、内径が0.4mmの細管の実験結果を示す。図2から、a)イオン交換水にガラスビーズを添加した溶液を用いて研磨した場合、表面粗さの値が2.11 μm（素管）から1.27 μmへと低減することがわかる。ガラスビーズは見かけ上研磨剤としての役割を果たしているといえる。b)イオン交換水に砥粒を懸濁したスラリーを用いた場合、表面粗さは0.86 μmとなる。ガラスビーズ単独の場合よりも表面粗さは良くなる。c)ビーズ入りスラリーで研磨した場合、表面粗さは0.54 μmとさらに小さな値となることがわかる。表面粗さの低減にガラスビーズの添加は有効であるといえる。

次に、図3に内径0.6mmの細管の実験結果を示す。図3から、ガラスビーズ、スラリー、ビーズ入りスラリーの順に表面粗さは、それぞれ2.17, 1.24, 0.78 μmと小さな値となることがわかり、内径0.4mmの管の場合と同様の傾向を示している。しかし、粗さの絶対値は管径によって異なり、表面粗さの絶対値は内径が大きいほど大きい。

3.2 パス回数の影響

前報²⁾でも述べたように、管内壁面の表面粗さは、研磨パス回数とともに低減していくが、その低減過程に対して、ビーズ添加が、どのような影響を及ぼすか実験的検討を行った。研磨は、スラリーのみによる場合とスラリーにビーズを添加した場合とについて行った。

図4に内径0.4mmの管についての実験結果を示す。図から、パス回数が増えるにつれて、いずれの研磨媒体の場合も表面粗さが次第に低減し、パス回数が15～20回を過ぎるあたりで表面粗さの値がほぼ一定の値となる傾向が見られる。低減の度合いは、ビーズ入りスラリーの場合の方がスラリーのみの場合よりも大きいことがわかる。

図5に示した内径0.6mmの管の実験結果においても、パス回数が増えるにつれて表面粗さは次第に低減し、その度合いは、ビーズ入りスラリーの場合に大きくなっており、低減の様態には、図

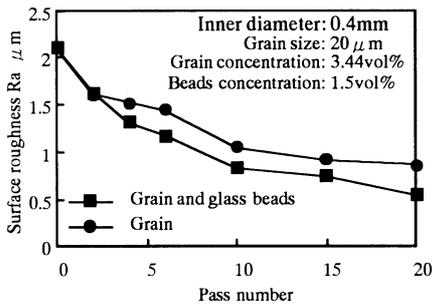


Fig. 4 Change of surface roughness with pass number

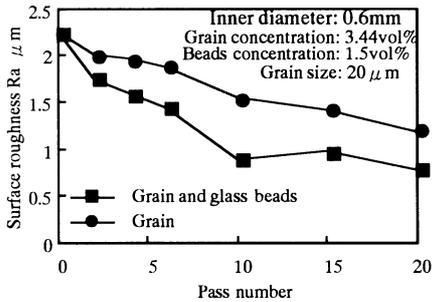


Fig. 5 Change of surface roughness with pass number

4の内径0.4mmの管の場合と同様の傾向が認められる。これらの図4、5の結果は、ビーズ添加は粗さの低減速度を促進する効果を持つことを示している。

3.3 砥粒径の影響

イオン交換水に懸濁する砥粒の粒径を、平均粒径20、30、48、60 μmと種々に変えてビーズ添加の影響について検討した。

実験結果を図6に示す。図6に示した内径0.4mmの管の測定結果から、スラリーのみで研磨した場合には、粒径が大きくなるにつれて表面粗さが次第に低減する様子がわかる。しかし、ビーズ入りスラリーの場合には、粒径が大きくなっても表面粗さはあまり変わらずほぼ一定の値をとる。図6の測定結果を子細に見ると、粒径によってスラリーのみとビーズ入りスラリーとでは表面粗さの値の差は、粒径が20 μmの場合に大きく、粒径が30、48、60 μmと大きくなるとその差は小さい。粒径60 μmの砥粒になるとほとんど差はなくなる。

図7には、内径0.6mmの管の場合の同様の測定結果を示す。図7から、スラリーのみで研磨した場合には粒径が大きくなるにつれて表面粗さが次第に低減すること、さらにビーズ入りスラリーの場合には、粒径の大きさにかかわらず表面粗さはほぼ一定の値となっており、図6の内径0.4mmの管の場合と同様の傾向が見られる。しかし、スラリーのみの場合とビーズ入りスラリーの場合との研磨面粗さの差は、内径0.4mmの管の場合よりもその値は大きく、いずれのサイズの砥粒についても明瞭である。ただし、60 μm砥粒では、スラリーのみの方が粗さが小さくなっている。この理由は不明であるが、ビーズの壁面への衝突によって壁面上の突起の変形も生じたためではないかと思われる。

3.4 ガラスビーズ添加量の影響

前節までの実験から、ビーズ入りスラリーを用いて研磨した場合、研磨効率の向上が図られることが明らかになった。その際、ビーズ添加量を1.5vol%一定として実験を行った。ビーズの添加量が面の創成にいかなる影響を及ぼすのかについて、さらに詳しく調べる必要がある。

図8に、ガラスビーズの添加量と表面粗さの関係を示す。実験は、平均粒径20 μmの砥粒を用い、砥粒濃度を3.44vol%として行った。実験の際、ガラスビーズの添加量を0.52、1.5、2.6vol%と変化させた。図8から、ガラスビーズの添加量を増すにつれて、

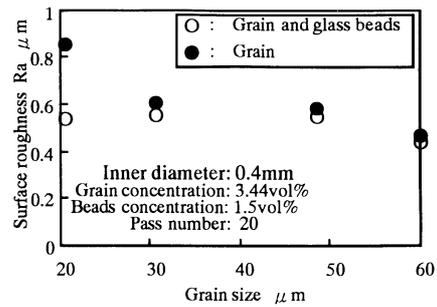


Fig. 6 Effect of grain size on surface roughness

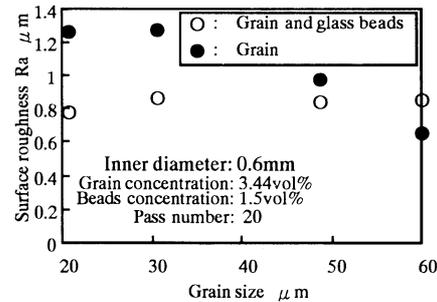


Fig. 7 Effect of grain size on surface roughness

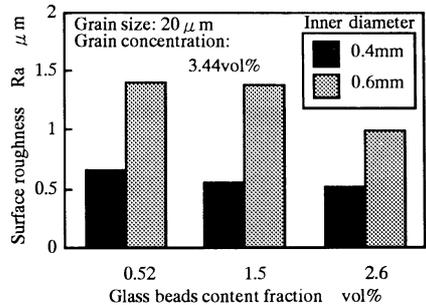


Fig. 8 Effect of annex amount of glass beads on surface roughness

幾分表面粗さが小さくなる傾向が見られる。しかし、変化の度合いは小さく、本実験の範囲から最適な添加量を推量することはできなかった。研磨効率の向上を図る上で、砥粒濃度とガラスビーズ添加量の組合せに関して別途検討する必要があるものと思われる。

3.5 研磨面の観察

3.1節の図2、3および3.2節の図4、5に示すように、ビーズ入りスラリーを用いて研磨した場合、スラリーのみによる研磨の場合よりも研磨効率が向上することが明らかになった。ビーズを添加することによって、どうして表面粗さの低減が促進されるのかを考察するために研磨面の仕上げ状態を光学顕微鏡と走査型電子顕微鏡を用いて詳細に観察した。図9に、内径0.4mmの管の内壁面の光学顕微鏡写真および触針式粗さ計によるプロフィールを示す。観察に供した試料は、図2の測定に用いたものである。図9は、素管と20回（パス回数）研磨した後の内壁面の様子を示す。図中には、スラリーのみで研磨した場合とビーズ入りスラリーで研磨した場合とを併置してある。

図9から、スラリーのみとビーズ入りスラリーの場合とで、研磨のされ方がかなり違うことがわかる。ビーズ入りスラリーの場合、パス回数20回まで研磨すると内面はほぼ平滑になるが、スラリーのみの場合の研磨面にはまだ微小な凹凸の残っている様子がわかる。

図10に、内径0.6mmの管の観察結果を示す。図9の0.4mm管の場合と同様に、20パス後の面の様子はビーズ入りスラリーの方がスラリーのみの場合よりも平滑に仕上がっていることがわかる。

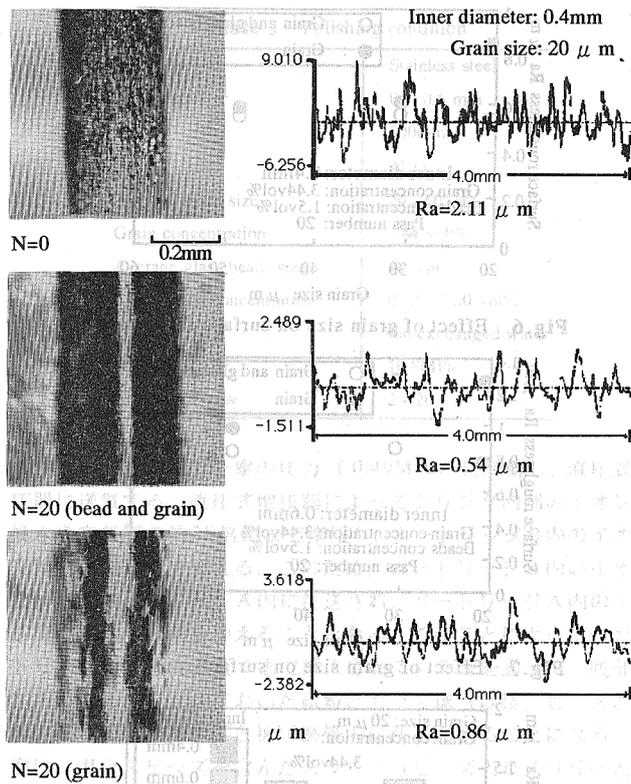


Fig.9 Optical micrographs and profiles of inner wall

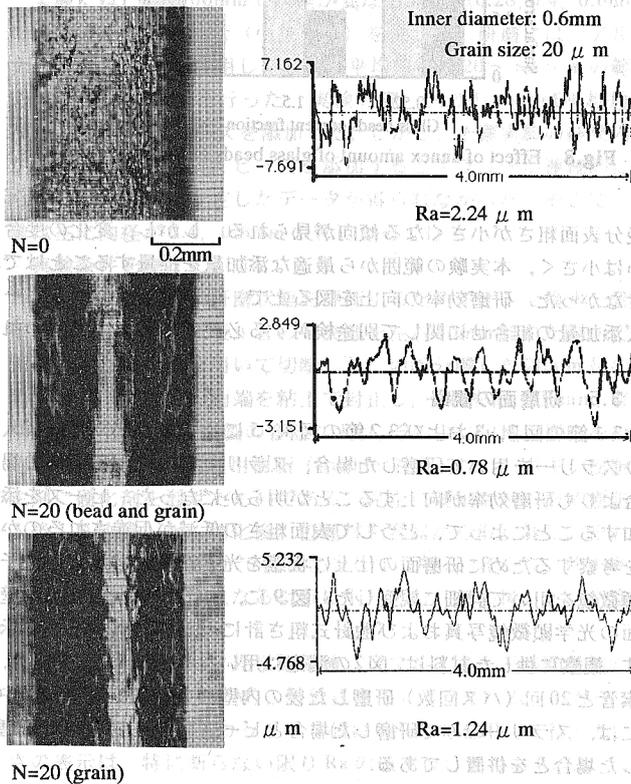


Fig.10 Optical micrographs and profiles of inner wall

しかし、0.4mmの管の場合よりも仕上げ面粗さは大きい。研磨面の状態をさらに詳しく知るために内壁面をSEMによっても観察した。観察の結果、引抜き管特有のテクスチャ（織目模様の微細凹凸パターン）は、いずれの管径の場合も20回経過した段階で消滅することがわかった。しかし、ビーズ添加による仕上げ

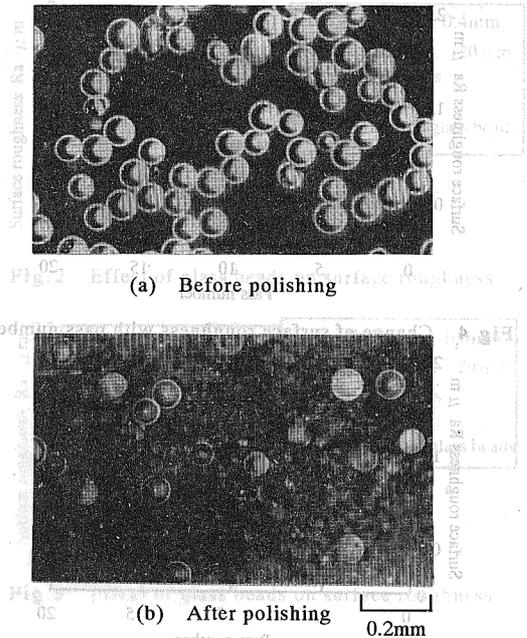


Fig.11 Observation of glass beads

面状態の差異は認められなかったので、研磨は主に砥粒の研磨作用によるものであり、ビーズ添加は砥粒の研磨作用を促進する効果をもつものと思われる。

4. 考 察

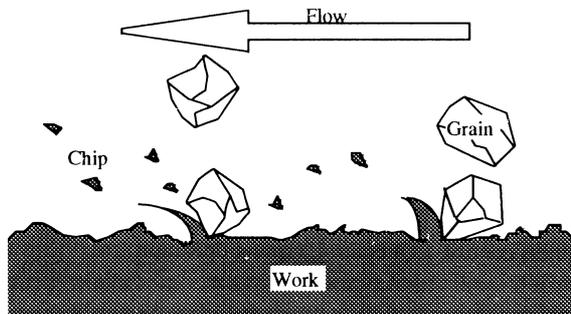
スラリーにビーズを添加した場合、スラリーのみの場合に比して表面粗さの低減の度合いが大きいことが図4、図5から知れる。すなわち、スラリーにビーズを添加することによって、研磨の進行が促進されると言える。以下に、ガラスビーズの添加効果について考えてみる。

ガラスビーズ自身は、切れ刃を有しないので研磨には直接関係しないと思われる。しかし、ビーズが研磨の途中段階で壊れて鋭利な切れ刃を生成し、これが研磨を促進することも考えられる。そこで、研磨前のガラスビーズと研磨後のガラスビーズを光学顕微鏡を用いて観察した。研磨後のビーズの観察は次のように行った。同一条件で3本の管をビーズ入りスラリーで研磨（1本当たり20パス）した後、研磨液をピペットで吸い取り、それぞれ個別の3枚のスライドガラス上にそれを滴下し、自然乾燥の後観察を行った。観察結果の一例を図11に示す。図11から、ガラスビーズはほぼ原型を保持しており、破碎したり痩せ細っている様子も見受けられない。したがって、ビーズ添加による研磨能率の向上は、ガラスビーズの破碎による切れ刃生成によるものとは考えられず、スラリーの流動状態そのものにビーズが影響（砥粒のエネルギーの増大）を及ぼしてもたらされたものと考えなければならない。

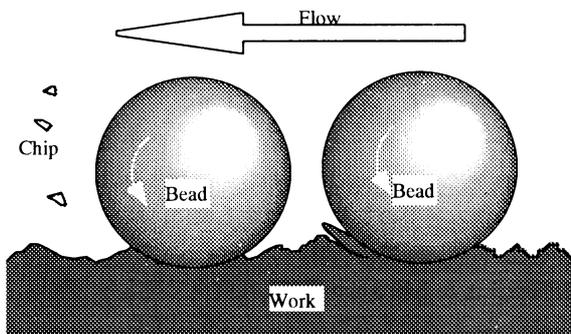
スラリーのみとビーズ入りスラリーとでは研磨の進行態様が異なる。このことは研磨中の管内でのスラリーの流動状態に密接に関連しているものと考えられる。そこでスラリーの流動時間を測定して管内の溶媒の流速（平均流速 \bar{u} ）を求めてみた。また、平均流速と水の動粘度の値⁸⁾を用いてレイノルズ数を計算した。測定結果を表2に示す。内径 d と平均流速を基準とした臨界レイノルズ数は2300であるので⁹⁾、表2からいずれの管においても、また、いずれの溶媒に関しても流れは乱流になっていると考えられる。さらに、表2によれば、いずれの溶媒の場合にも管内の平均流速はそれほど変わらないことがわかる。これは、本実験の範囲内で砥

Table 2 Velocity and Reynolds number

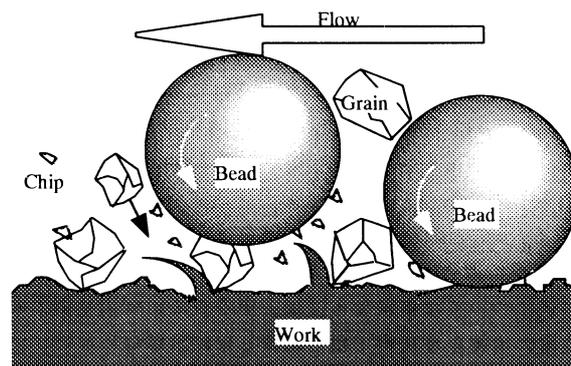
	Bead	Grain	Bead and grain
Inner diameter: 0.4mm			
Velocity m/s	28.7	28.9	29.2
Reynolds number	11417	11519	11637
Inner diameter: 0.6mm			
Velocity m/s	32.9	32.8	32.8
Reynolds number	19638	19620	19591



(a) Polishing with grain



(b) Polishing with glass bead



(c) Polishing with grain and glass bead

Fig.12 Polishing model

粒やビーズをイオン交換水に混入しても、平均流速はあまり変化しないことを意味している。

このような流れ場の中での砥粒やビーズの運動状態はどのようなになっているのか以下に考えてみる。

図12に、(a)イオン交換水に砥粒を懸濁、(b)イオン交換水にビーズを懸濁、(c)イオン交換水に砥粒とビーズを懸濁した場合の研磨様態を模式化して示す。図12において、砥粒を懸濁したスラリーの(a)の場合は、切れ刃稜を持つ砥粒が流体から運動エネルギーを得て、壁面に衝突し切削作用を営みながら管中を流れて行く。ビーズのみの(b)の場合は、凹凸面へのビーズの衝突作用によって凸部先端の変形や破壊が生じ、見かけ上表面粗さが低減するものと思われる。しかし、ビーズの壁面への衝突は、必ずしも粗さの低減に大きくかかわるとは考えにくい。

砥粒とビーズが混在する(c)の場合は、砥粒のみの場合やビーズのみの場合とは、研磨様態がかなり異なることが予想される。すなわち、①ビーズが砥粒と衝突することによって、砥粒がビーズから運動エネルギーを得て研磨を営む力(切削作用力)が増す、②管壁近傍に存在するビーズに注目するとそれは粒体中で回転運動しながら管軸に沿って流れていくので、ビーズの左側面域では、管壁とビーズの間のすきまに流体が吸い込まれる力が働き、その領域では流体圧が高まることと予想される。このためその領域内に存在する砥粒は流体から圧力を受けることになる。すなわち、砥粒は流体から運動エネルギーを得ることになり、その結果として、研磨作用力が増すと考えられる。また、流体が吸い込まれることによって作用砥粒数も増加すると考えられる。以上述べた、①、②の効果が重畳してまた、砥粒のみ、ビーズのみの効果も複合されて研磨が営まれたものと推察される。

5. 結 言

ガラスビーズ入りスラリーをステンレス鋼極細管内に強制流入させ、管の内面を研磨する高速流動研磨法について検討を行った。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 管内壁面の粗さの低減度合いは、ビーズ入り、スラリーのみ、ビーズ入りスラリーの順に大きくなる。
- (2) 表面粗さは、パス回数が増えるにつれて漸減していき、スラリーへのガラスビーズの添加は、粗さの低減速度を高める効果をもつ。
- (3) ガラスビーズは研磨加工中でも破碎することなく、また、痩せ衰えることなくビーズ形状を保持しており、その添加効果も保持している。
- (4) ガラスビーズ添加の効果は、ビーズ自身の壁面への衝突作用と砥粒の運動エネルギーを高めて切削作用力を増す働きをすることによってもたらされるものと推測される。

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) 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) 宮江伸一: 固体輸送によるポンプの磨耗と対策について 配管と装置, **11**, 11 (1971) 4.
- 8) 加藤宏: 流れの力学, 丸善, (1993) 50.
- 9) 生井武文, 井上雅弘: 粘性流体の基礎, 理工学社, (1978) 185.