極細ステンレス鋼管内壁の高速流動研磨

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 山本, 桂一郎 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/30592

極細ステンレス鋼管内壁の高速流動研磨

山　本　桂一郎

平成11年１月

①

博　士　論　文

極細ステンレス鋼管内壁の高速流動研磨

金沢大学大学院自然科学研究科
システム科学専攻
設計・生産工学講座

学　籍　番　号　９６－２２４４
氏　　名　山本桂一郎
主任指導教官名　黒部　利次

極細ステンレス鋼管内壁の高速流動研磨

目　　次

第１章 緒　論 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1

1.1 研究の意義と背景 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1

1.2 本論文の構成 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 4

第１章の参考文献 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 6

第2章　スラリー高速流動研磨装置 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 8

2.1 緒　言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 8

2.2 研磨装置及び実験方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 9

2.2.1 研磨装置の設計仕様と構成 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 9

2.2.2 実験方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 11

2.3 研磨面の評価方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 12

2.4 結　言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 15

第２章の参考文献 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 15

第3章　内径0.28mm管内壁の精密研磨 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 16

3.1 緒　言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 16

3.2　実験結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 16

3.2.1 研磨面粗さの測定 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 16

Ⅰ）砥粒径の影響 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 16

Ⅱ）測定位置と表面粗さ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 19

Ⅲ）砥粒濃度の影響 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 21

Ⅳ）パス回数の影響 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 21

3.2.2 差圧の測定 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 22

3.2.3 研磨面の観察 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 24
Ⅰ）光学顕微鏡による観察 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 24
Ⅱ）走査型電子顕微鏡による観察 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 24
3.2.4 パーティクルの検出 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 28
3.3 スラリーの流動および差圧に関する一考察 ・・・・・・・・・・・・・ 28
3.3.1 管長一様研磨について ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 28
3.3.2 差圧について ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 30
3.4 結　言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 32
第3章の参考文献 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 33

第4章　内径の異なる各種細管の研磨特性 ・・・・・・・・・・・・・・・・・ 34
4.1 緒　言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 34
4.2 実験結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 36
4.2.1 研磨面の粗さ測定 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 36
Ⅰ）管径と表面粗さ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 36
Ⅱ）砥粒濃度と表面粗さ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 38
Ⅲ）砥粒径と表面粗さ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 38
4.2.2 差圧の測定 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 40
4.2.3 研磨面の観察 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 41
Ⅰ）光学顕微鏡による観察 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 41
Ⅱ）走査型電子顕微鏡による観察 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 41
4.3 考　察 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 50
4.4 結　言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 56
第4章の参考文献 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 56

第5章　表面粗さ低減に及ぼす二段階研磨の効果 ・・・・・・・・・・・・・・ 57
5.1 緒　言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 57

5.2 実験結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 58
5.2.1 内径 0.28mm管の研磨 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 58
Ⅰ）第一段階研磨 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 58
Ⅱ）第二段階研磨 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 60
Ⅲ）研磨面の観察 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 61
5.2.2 内径 0.4mm管の研磨 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 63
Ⅰ）二段階研磨 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 63
Ⅱ）研磨面の観察 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 64
5.3 考　察 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 66
5.4 結　言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 68
第5章の参考文献 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 68

第6章　注送圧力の影響 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 70
6.1 緒　言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 70
6.2 実験結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 71
Ⅰ）パス回数と表面粗さ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 71
Ⅱ）研磨面の観察 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 72
6.3 考　察 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 78
6.4 結　言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 79
第6章の参考文献 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 80

第7章　ガラスビーズ添加の効果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 81
7.1 緒　言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 81
7.2 実験結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 82
7.2.1 加工条件 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 82
7.2.2 ガラスビーズ添加の効果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 83
7.2.3 パス回数の影響 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 85

7.2.4 砥粒径の影響 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 87
7.2.5 ガラスビーズ添加量の影響 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 89
7.2.6 研磨面の観察 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 90
I）光学顕微鏡による観察 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 90
II）走査型電子顕微鏡による観察 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 93
7.3 考　察 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 96
7.4 結　言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 100
第7章の参考文献 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 101

第8章 結　論 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 102

謝　辞 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 107

本論文に関する研究論文及び学会講演 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 108

第1章　緒　論

1．1　研究の意義と背景

社会が高度化するに伴って，それを支える基盤技術が益々重要になってきている．21世紀を眼前に控えて，世の中は高度情報化社会・アメニティ社会へとドラスチックに移り変わろうとしているようにみえる．そして，それに対応すべく技術の一層の革新と自然に調和した環境に優しい技術の開発が強く求められてきている．機械技術もこの社会的動態に呼応する形で高度化が図られてきている．近年，高性能・高機能な機械が市場に供され，人間の感性にマッチした諸種の機器が開発されてきている．

例えば，近年急速に普及してきている携帯電話を挙げるまでもなく，情報機器や精密機器，光学機器は最近益々高性能化・小型化してきている．それに伴ってそれら機器に搭載されている各種部品（パーツ）の加工精度に対する要求が益々厳しくなってきており，その中には超精密加工を必要とするパーツも多い．しかし，加工精度の向上は工作機械の高度化と計測技術の発展が相俟ってはじめて図られるものであり，一朝一夕に達成されるものではないことも事実である．しかしながら，技術社会のトレンドはより一層の技術革新を求めており，諸種の分野で地道な努力が払われている．例えば，半導体産業の分野にあっては加工精度の向上と製品コストの低減が同時に求められている．このことが，新たな需要を喚起し情報化社会への移行を促進してもいる．

電子機器や光学機器に搭載されているパーツは，金属材料や高分子材料，セラミックスなど多様な材料で造られている[1.1-2)]．また，形状も多岐に渡っている．このため，加工法も材料の特性を考慮し，パーツの形状ならびに生産個数等を考慮して選定されている．シリコンウエハなどの半導体結晶材料やガラスレンズなどの光学材料の加工では，遊離砥粒を使ったラッピングやポリシングによって行われている．これらの加工物の多くは平面形状をしており，ラップ盤を使用して形状精度の向上と面粗さの改善を図っている．しかしながら，自由曲面を有する加工物（例えば金型）も多くあり，その表面の加工は一般に容易ではない．また，閉曲面を有するパイプ等の内面を高精度に研磨するのは，いわゆる特殊加工法と呼ばれる加工法[1.4-7)]を用いて行わなければな

らない.

パイプと呼び慣わされている管は,内径や長さによって規格が種々定められており,各種の管が市場に供されている.また,材種も金属,プラスチック,セラミックス,ガラスと多岐に渡り用途によって使い分けされている.これらのパイプは,その内径の大きさと使用目的によって内壁を何らかの方法で研磨している場合が多い.研磨は,各社の固有技術を駆使して特殊な方法で行われる場合が多い.一方,最近半導体製造用機械や精密機器には,気体や流体の搬送用に極細の管(キャピラリーと呼ばれる)が使用・搭載されてきている.その場合ステンレス鋼管が多用されている.高純度のガスや溶液を輸送するための管であるため,殊の外その内壁を精密に研磨することが求められている.

管内壁の仕上げに対して次のような項目が求められている.

(1)移送中に気体や液体が管壁から物理的にも化学的にも影響を受けないこと.

(2)管壁にパーティクルやコンタミネーションが吸着したり付着したりしないこと.

(3)移送物質の吸着を防ぐために,管内壁の表面積を出来る限り小さくすること.

(4)置換特性を向上させるため,管の継ぎ手を少なくし溶接部位を減らすこと.

(5)搬送流体の反応速度(腐食速度)を極限まで減少させるため,流体の接触面積を極力少なくすること.

これらの諸要求を満たすには,内壁を高精度に仕上げる必要がある.また,細く長い管を使用することが望ましい.一般に,内径の大きな管で,かつ,管長が比較的短い管の場合には,研磨工具等を管内に直接挿入して磨くことも可能である.このため,面の仕上げ精度を制御することも容易である.しかしながら,内径が1mm以下で全長が数mに及ぶキャピラリーの場合は,在来の加工法が適用し難い面があり,新しい研磨法を模索する必要がある.また,実用的な観点からは研磨に対するコストは小さくなければならない,といった要請もあり新規な加工法の開発が望まれている.以上の事項をふまえた研究の動機ならびに経緯を図1.1に示す.

そこで,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的に流入させ,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,高速流動研磨法について検討することとした.装置を自作し,本研磨法の有効性を確かめるとともに,各種の内径を有する細管について実験的検討を行った.

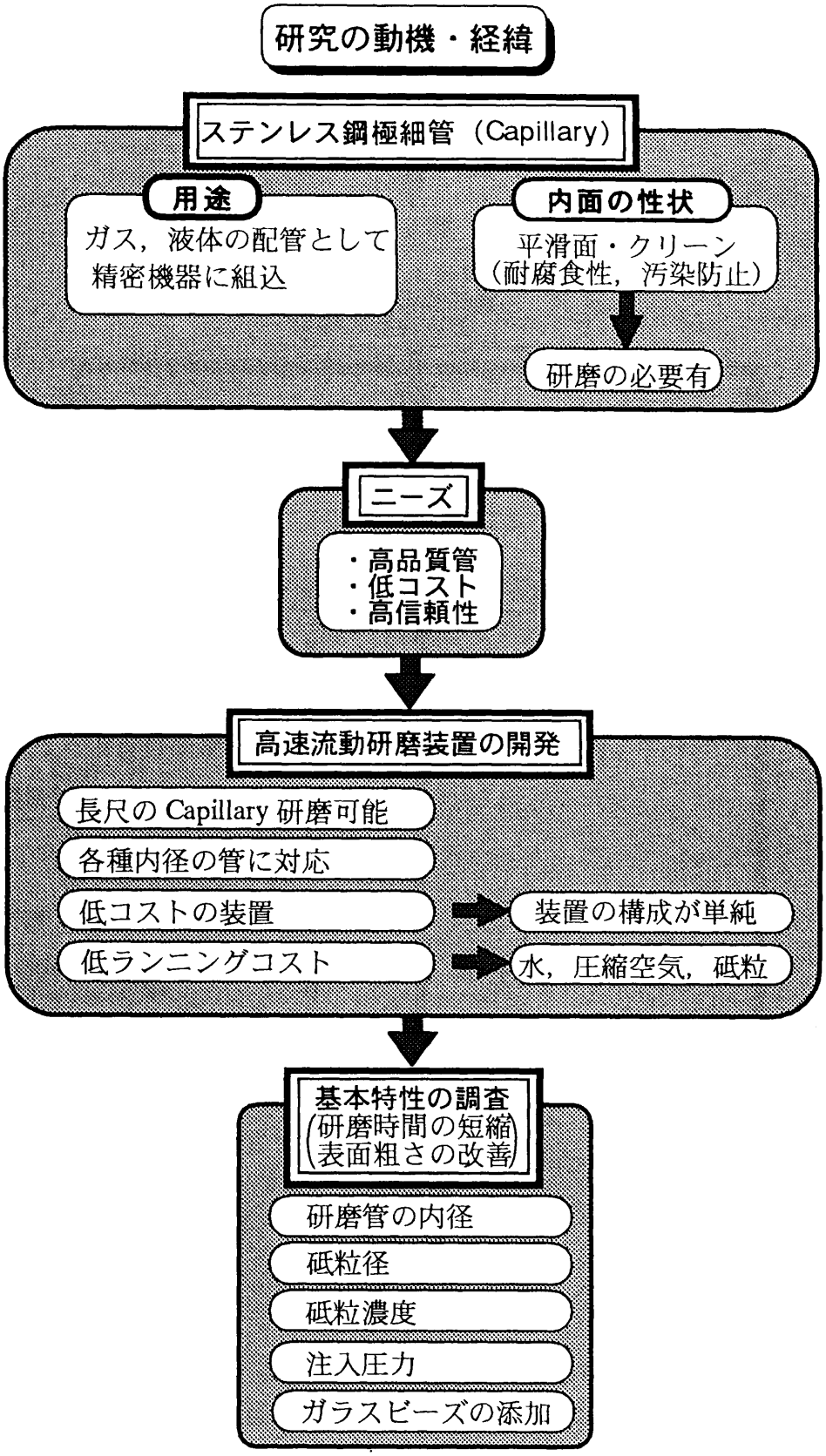


図 1.1　本研究の動機・経緯

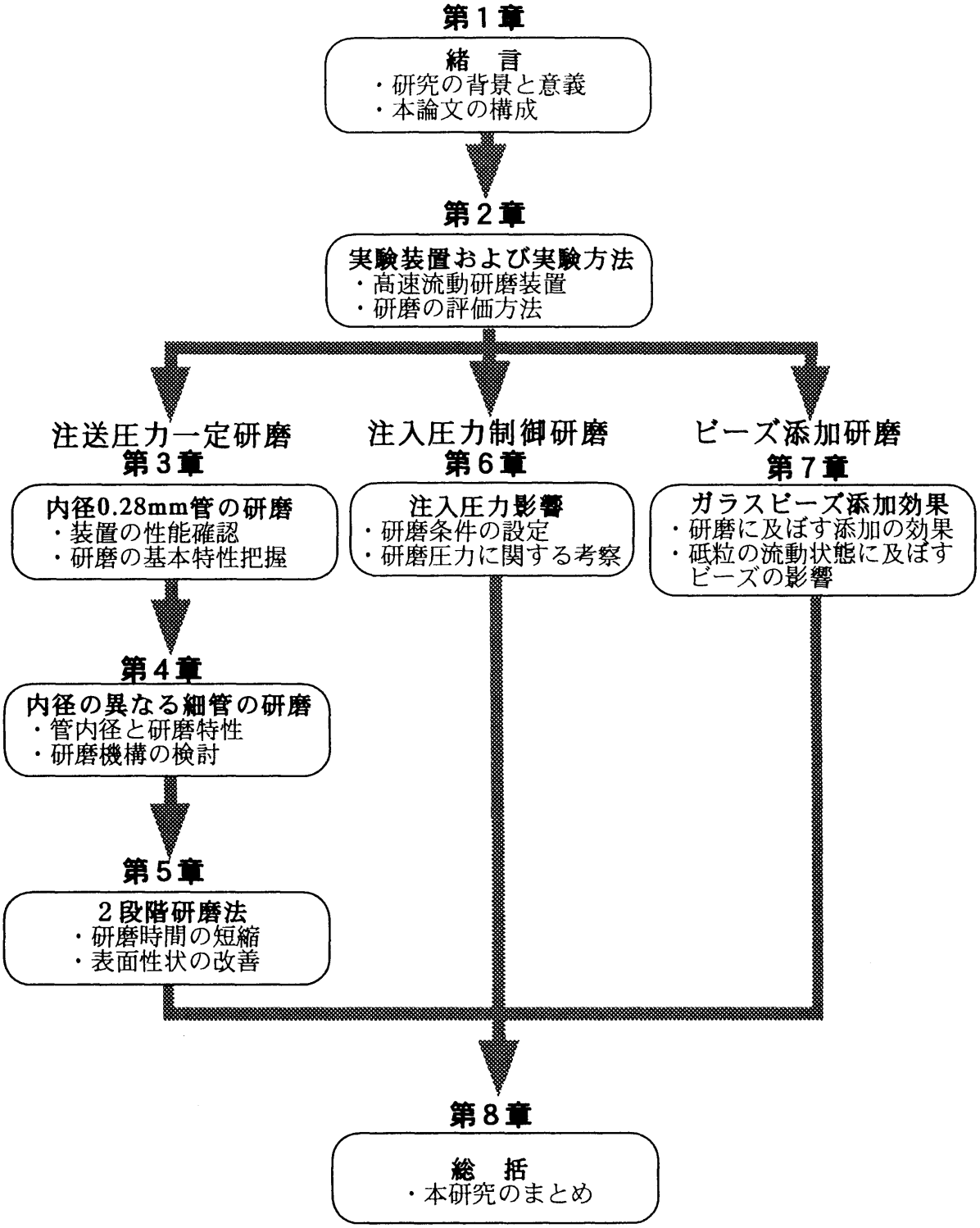


図 1.2　本論文の構成

1．2　本論文の構成

このような状況をふまえ，非常に低コストで極細かつ長尺の管内壁を研磨する方法

を高速流動研磨として提案し，実験的検討を種々行い，本研磨法の有効性について論考を行った．本論文の構成を図1.2に示す．また，各章の概要を以下に記す．

第2章では，高速流動研磨装置の詳細について説明し，本研磨法の特徴と在来の研磨法の違いについて概説している．また，研磨した加工物について，その評価法の仔細についても述べている．

第3章では，ガス流路管として使用されているステンレス鋼製のキャピラリー（内径0.28mm）について，高速流動研磨実験を行った結果について述べている．そして，本研磨装置が所期の性能を有しており，かつ，細管内壁の研磨に十分な効果を発揮することを実証している．本研磨法は，精密機器に搭載されている配管内壁の研磨に広く適用可能であることを指摘している[1.9-10)]．

第4章では，内径の異なる各種細管について高速流動研磨実験を行い，管径と研磨様態との関係を調べている．また，管径が変わると研磨機構がどのように変化するか検討している．本研磨装置は，1mm以下の内径を有する極細ステンレス鋼管の内壁研磨に十分対応できることを明らかにしている．また，溶媒中に懸濁している砥粒の研磨作用について，流体力学の視点から検討し，簡単な計算機シュミレーションを行っている[1.11)]．

第5章では，二段階研磨法について実験的検討を行った結果について述べている．初段の研磨工程（比較的大きめの砥粒を使用）で素管内壁面の表面粗さを相当の程度除去し，次に細粒の砥粒を使用して高速流動研磨を行うと，非常に滑らかな表面が得られることを明らかにしている[1.12)]．

第6章では，スラリーの注送圧力を変化させて，それが面の仕上げに如何なる影響を及ぼすかについて検討した結果について述べている．注送圧力が大きくなるにつれて粗さの低減度合いが強くなり，流動パス回数が少ない段階で面は平滑になることを明らかにしている．

第7章では，研磨能率の向上を図る目的から，スラリーにガラスビーズを添加した媒体を使用して実験した結果について述べている．ガラスビーズの添加が研磨能率の向上を図る上で著効があることを示している．その効果はどのような要因によってもたらされるのか流れ学の視点から考察を行っている[1.13)]．

第8章では，本研究で得られた結果の総括を行っている．

第１章の参考文献

1.1) 谷口紀男：材料と加工，共立出版, (1974) 1.

1.2) 今中　治：セラミック加工ハンドブック，日刊工業新聞社, (1987)111.

1.3) 今中　治：無機材料の精密加工，養賢堂, (1968) 60.

1.4) 田中義信，津和秀夫：精密工作法（下），共立出版, (1982) 33.

1.5) 田島　栄：表面処理ハンドブック，産業図書, (1969) 377.

1.6) 進村武男：磁気研磨法の現状と課題，機械と工具，40，5 (1996) 16.

1.7) 鴨川昭夫：実践　機械工作法，機械技術，39，5 (1991) 106.

1.8) 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.

1.9) 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.

1.10) T.Kurobe,Y.Yamada,K.Yamamoto and T.Miura : High Speed Slurry Flow Finishing of Inner Wall of Stainless Steel Capilary, Int.J.Japan Soc.Prec.Eng., Vol.32,No.1 (Mar.1998) 39.

1.11) 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.

1.12) 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―表面粗さ低減における二段階研磨の効果―, 砥粒加工学会誌, (掲載決定).

1.13) 黒部利次，山田良穂，山本桂一郎，三浦毅彦：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―，精密工学会誌，64，9 (1998)1325.

第２章　スラリー高速流動研磨装置

２．１　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[2.1)]や電解研磨法[2.2)]，磁気研磨法[2.3)]，化学研磨法[2.4)]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[2.5)]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や長さに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きている．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，本極細管は，ガスや液体がその管内を輸送される際に，いかなる物理的化学的影響も受けないことが必須のこととなっている．このため，殊の外管内壁面が平滑でクリーンでなければならないといった問題もある．このような背景から，新規な研磨法を模索する必要があると考えられる．

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．本章では，新しく設計した研磨装置の詳細について述べる．

2．2　研磨装置および実験方法

2.2.1 研磨装置の設計仕様と構成

実験に供したステンレス鋼管は，その内径が1 mm以下と極端に小さく，かつ，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．

これらの諸条件を考慮して開発した研磨装置の概略図を図2.1に示す．また，装置の概観写真を図2.2に示す．装置は，エアーコンプレッサ（日立社製:PB-1.5PV6Z型），直圧式増圧器（太陽鉄工社製:NBH-3-60型），カートリッジ，等々から構成されている．

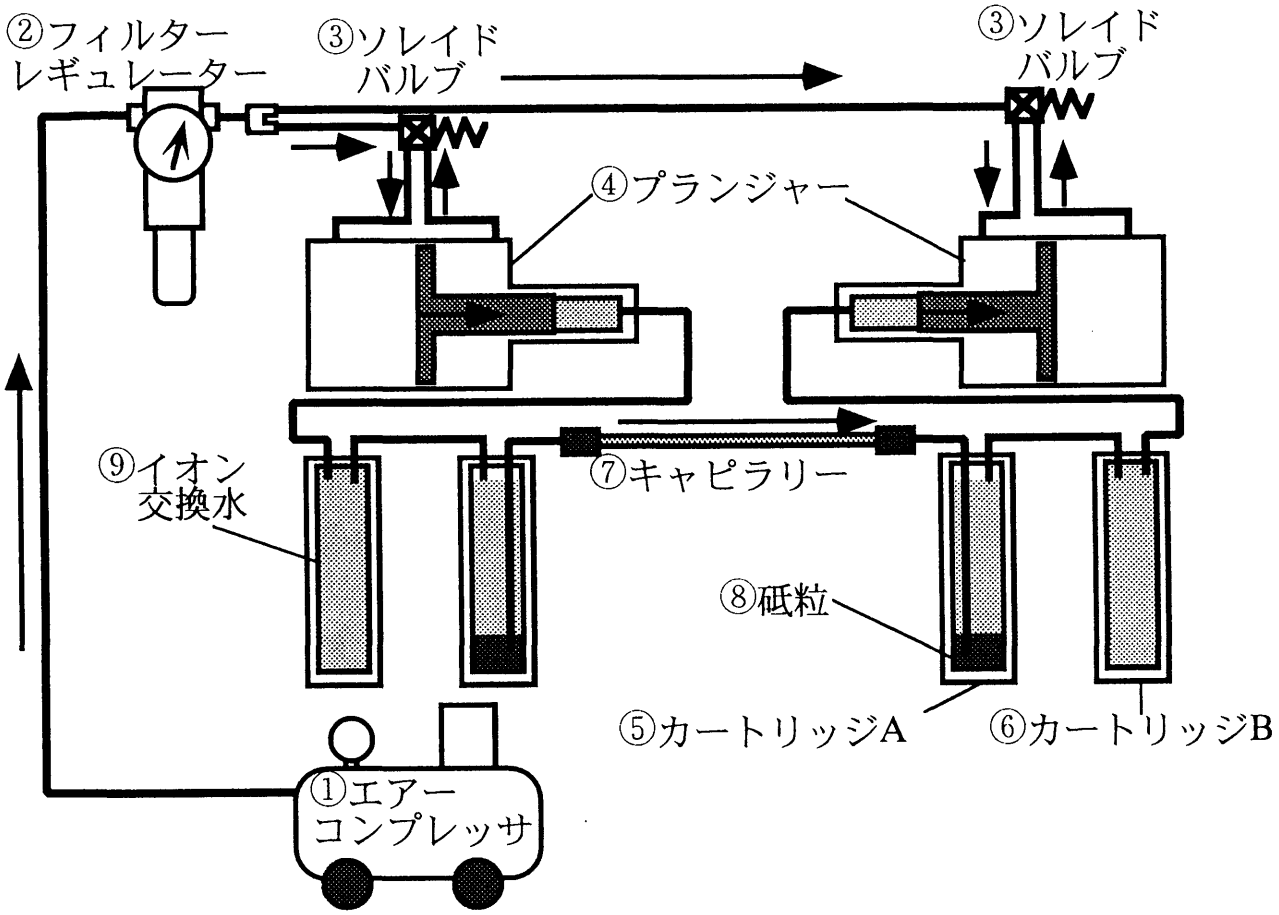


図2.1　研磨装置の概略図

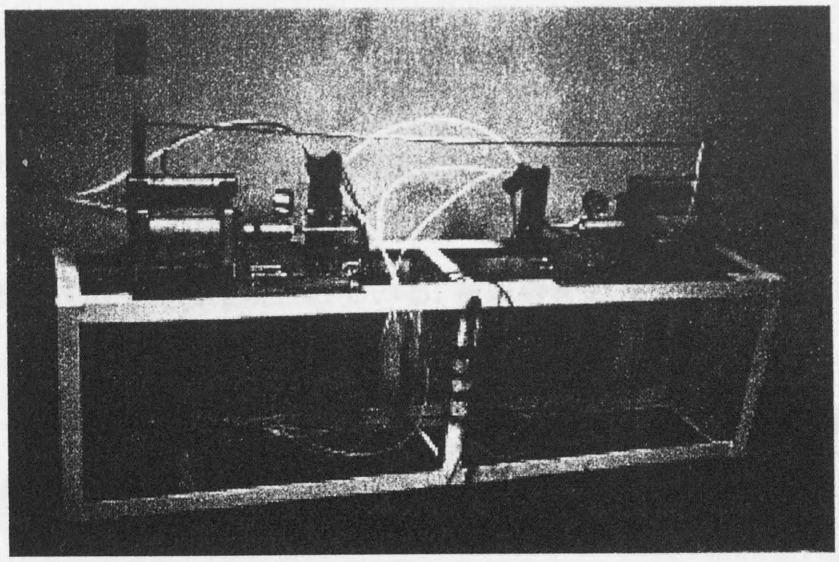


図 2.2　研磨装置の概観写真

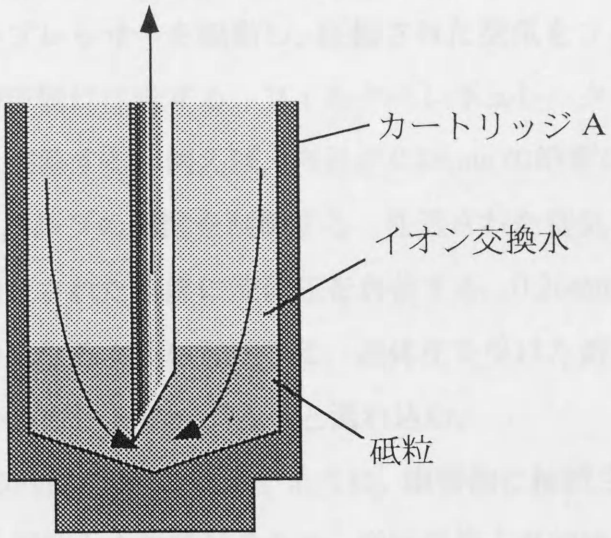


図 2.3　カートリッジ A の内部構造

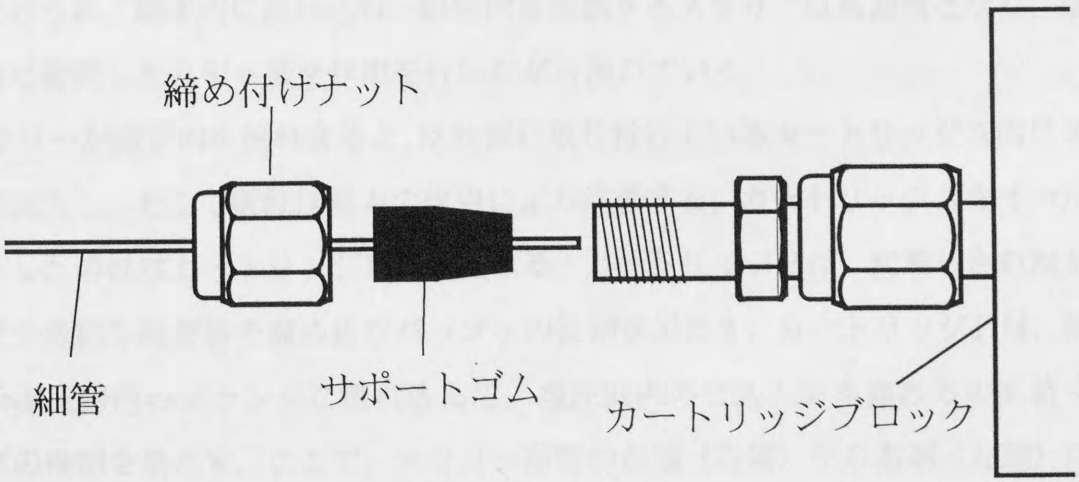


図 2.4　細管の接続方法

図2.1に示すカートリッジAにはイオン交換水と砥粒が入れられている．カートリッジBにはイオン交換水のみが予め入れられている．カートリッジAに挿入されている2本の管の内の1本は，図2.3に示すように，管の底近くまで挿入されている．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．被研磨管のステンレス鋼極細管は，カートリッジに挿入されている管の一端に固定ブロックを介して接続されている．接続は，ゴム製の冶具を用いてそれをボルト締めすることによって行っている．被研磨管の接続の詳細は，図2.4に示す．

2.2.2 実験方法

実験に際し，エアーコンプレッサーを駆動し，圧縮された空気をフィルターレギュレーターを介して直圧式増圧器に注送する．フィルターレギュレーターでは，空気圧が一定の圧力になるように調整する．例えば，内径が0.28mmの細管の場合には5kgf/cm^2(0.49MPa)になるようにバルブの開閉を制御する．注送された空気を直圧式増圧器で増圧し，プランジ内に満たされた溶媒に流体圧を負荷する．0.28mmの細管の場合，110kgf/cm^2(10.8MPa)の圧力になるように加圧する．流体圧を受けた溶媒は，ブロックを通ってカートリッジBからカートリッジAへと流れ込む．

ここでカートリッジAの内部は図2.3に示すように，細管側に接続されている管が，カートリッジの底部近くまで挿入されているため，増圧器側より加圧されて送られた溶媒は，内部に予め沈澱させておいた砥粒といっしょに中央のステンレス管を通って吸い上げられ，細管内に流れ込む．細管内を流動するスラリーは高速流となり，砥粒は壁面に衝突したり引っ掻き作用を行いながら流れていく．

スラリーが細管内を流れきると，反対側に取り付けているカートリッジA内にスラリーが流入し，そこで砥粒は重力の作用により沈澱する．カートリッジAをオーバーフローした溶媒はカートリッジBに流入する．カートリッジBは，沈澱しきれなかった砥粒や微細な研磨屑を溜め込むバッファの役割を果たす．カートリッジBは，溶媒が直接増圧器内のプランジに流れ込んで，増圧器内のピストンを痛めるのを防ぐトラップの役割を果たす．ここで，スラリーが管の左端（右端）から右端（左端）に流動する工程を研磨の素過程（1パス）と定義する．

次に，電磁弁を切り替えて圧縮空気を反対側の増圧器に送る．その結果，スラリーは逆向きの方向に流れる．本操作を繰り返すことによって管内壁の研磨が行われる．大略，数十パス回数で所定の内面性状（表面粗さの著しく低減した表面）を有する管が得られる．

2．3 研磨面の評価方法

研磨した管の評価は次のようにして行った．評価に先だって研磨管の内側をジェット水流で洗浄した．それは，研磨管の一端を別途用意している直圧式増圧器（イオン交換水が予め入れられている）に接続（他端は解放状態）し，エアコンプレッサからの空気圧を直圧式増圧器に付与して行った．空気圧のため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．

洗浄後の管内壁の研磨状態は，次に述べる方法で観察した．観察に先だって，図2.5に示すように管の中央から左右10mm離れた場所を薄刃の鋭利なカッタで切断した．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．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（＃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2.6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．表2.1に，フォームタリサーフの仕様を示す．なお，粗さのデータは3回実験を行ったものを平均して用いている．

管内壁の研磨状態を評価するもう一つ別の方法として，管内に気体を流し，その差圧を測定する方法がある．これは，管内面の性状により，管内のガスの流れの抵抗に差が生じ，結果として差圧が変化するのを測定する方法である．図2.7に，差圧測定装

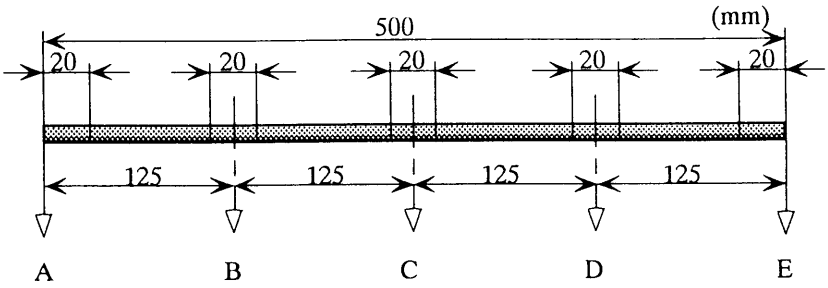


図 2.5　細管の切断位置

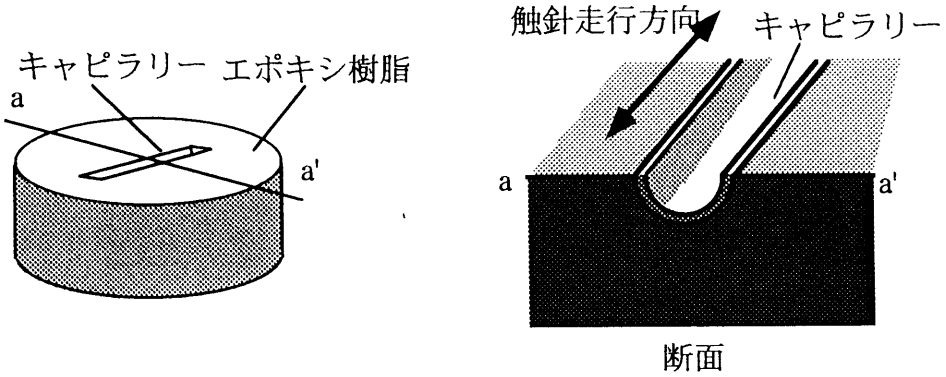


図 2.6　試料観察の前処理

表 2.1　フォームタリサーフの仕様

標準ピックアップ	
検出方法	レーザ干渉計
スタイラス	ダイヤモンド2μmR
スタイラス圧	100mgf
測定範囲	4mm, 8mm
駆動部	
最大駆動距離	120mm
真直度精度	0.5μm/120mm以内
レベリング調整範囲	不要

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：STEC社製）と差圧計（微差圧トランスミッタ：長野計器社製）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）を通っ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 2.2 に示す．

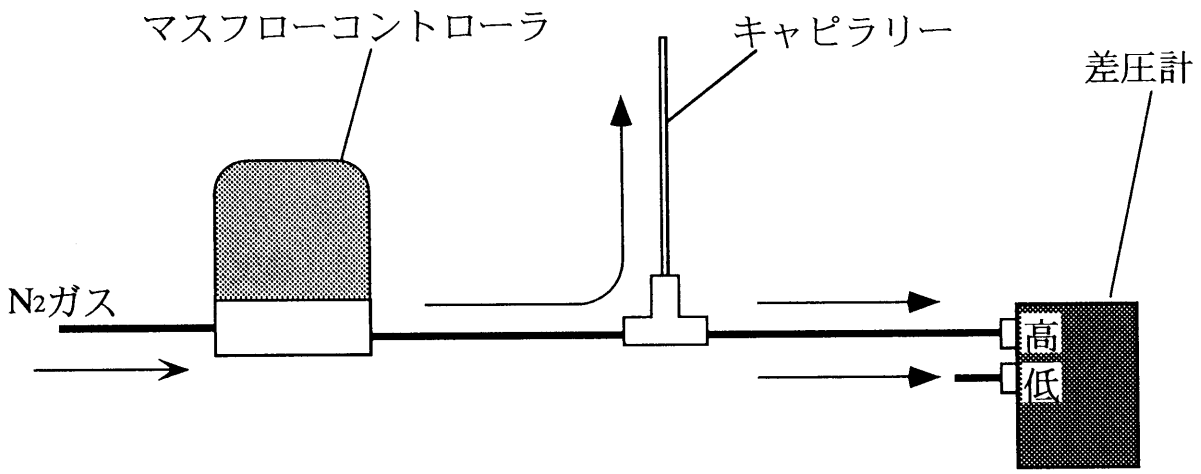


図 2.7　差圧の測定装置の概略図

表 2.2　差圧の測定条件

ガス	N_2
流速	4cm³/min
キャピラリーの長さ	50 mm

2．4　結　言

ステンレス鋼極細管内壁を精密に研磨するため，新規にスラリー高速流動研磨装置を作製し，性能を検討した結果次の結論が得られた．

(1) 新しく設計・開発した研磨装置は，所期の性能を有していることが確認された．

(2) 直圧増圧器を利用した高圧ジェット水流は，研磨後の細管内部を洗浄するのに効果があった．

(3) 研磨後の細管内壁面を観察するため，研磨管をエポキシ樹脂で埋包するテクニックは効果があった．

(4)研磨状態を把握するために開発・自作したガスフロー差圧装置は，ステンレス鋼極細管内壁面の評価に有効であることがわかった．

第２章の参考文献

2.1) 田中義信，津和秀夫：精密工作法（下），共立出版，(1982) 33.

2.2) 田島　栄：表面処理ハンドブック，産業図書，(1969) 377.

2.3) 進村武男：磁気研磨法の現状と課題，機械と工具，40，5 (1996) 16.

2.4) 鴨川昭夫：実践　機械工作法，機械技術，39，5 (1991) 106.

2.5) 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.

第３章　内径0.28mm管内壁の精密研磨

３．１　緒　言

内径0.28mm極細管は，ガスの流路として使用されている．管路を流れるガスは高純度であり，必然管内壁も平滑・クリーンでなければならない．しかし，ステンレス極細管は，引抜き加工によって製造されるため，管内壁は必ずしも平滑ではない．光学顕微鏡で観察すると引き抜き方向に独特のテクスチャ（織り目模様の表面の微細凹凸パターン）を有している．テクスチャの微細凹凸部は，不純物が付着し易く，また，ガスの停留場所となる．そのような管を製品に搭載すると，ときとして不純物が管壁から剥離して予期せぬトラブルを起こしたりする．その他に，素管のまま使用すると，ガスの接触面積も大きく，加工によって生じた残留水分や析出物がガスと反応する恐れもある．

前章でも述べたように，極細長尺な管の内側に研磨媒体を流入させることは至難なことであり，これまで有効な手だて[3.1-5)]が講じられなかったのも首肯されるところである．しかし，内壁の平滑なクリーンな管を求めるニーズは強く，前章に記した高速流動研磨装置を用いて研磨を行った．本章では，市場にすでに供されている内径0.28mm管について検討を行った．そして，その研磨特性について多角的な視点から論考を行った．

３．２　実験結果

3.2.1　研磨面の粗さ測定

Ｉ）砥粒径の影響

図3.1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．本実験での実験条件を表3.1にまとめて示す．

表 3.1　実験条件

キャピラリー	SUS316L
内径	0.28mm
長さ	500mm
砥粒	Al_2O_3
平均砥粒径	0.6, 5.5, 9.5, 20, 30 μm
砥粒濃度	1.66 - 4.99vol%
溶媒	イオン交換水
注送圧力	10.8MPa
パス回数	2 - 50 回

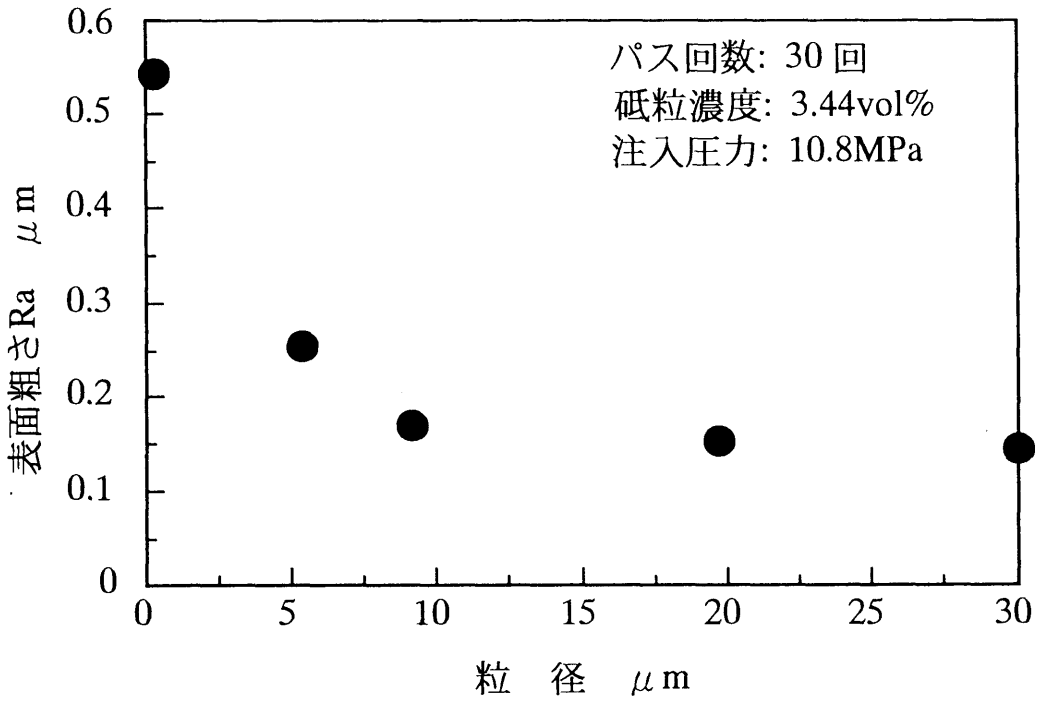


図 3.1　砥粒径が表面粗さに及ぼす影響

図3.1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ことがわかる．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

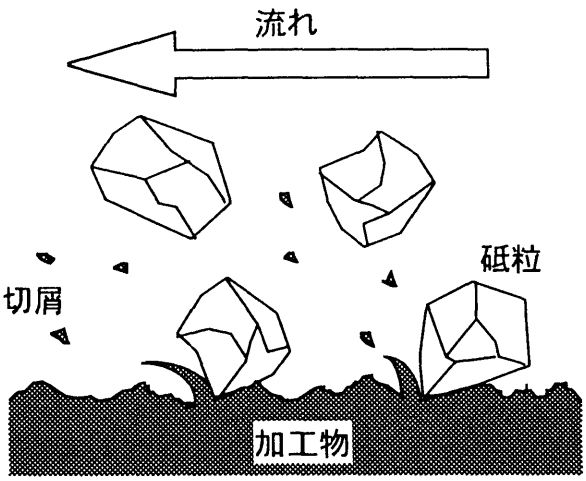


図 3.2　砥粒衝突の模式図

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$77 \times 10^3 mm^3$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[3.6]は，

$$Re = ud/\nu \tag{1}$$

νの値は$1.004 mm^2/s$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．

図3.2に，砥粒が管内壁に衝突する様子の模式図を示す．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もとづく力がある．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方が研磨量が大きくなる．

図3.1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．しかし，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り，他の粒径と同様の表面粗さに到達することが予想される．図3.3に，平滑化過程の模式図を示す．平滑化は，過渡期を経て定常域へと推移して行われる．

Ⅱ）測定位置と表面粗さ

長さ500mmの細管が一様に研磨されるのかどうかを調べるため，平均粒径20，5.5，0.6 μm 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3.5に，図3.4に示す各測定位置における表面粗さの測定結果を示す．

図3.5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同じ値となっていることがわかる．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一様に行われていると推察される．しかし，表面粗さの絶対値は砥粒径が小さいほど大きくなっている．

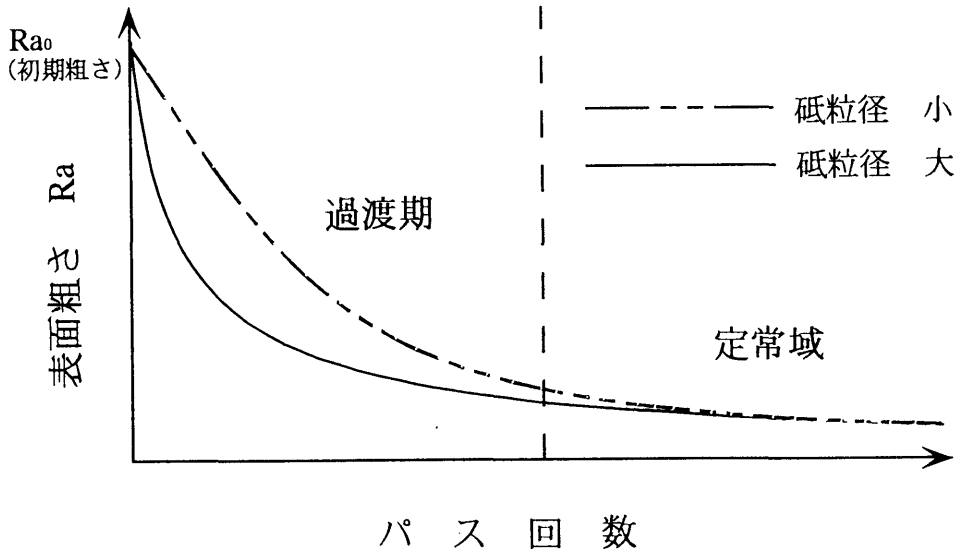


図3.3　平滑化過程の模式図

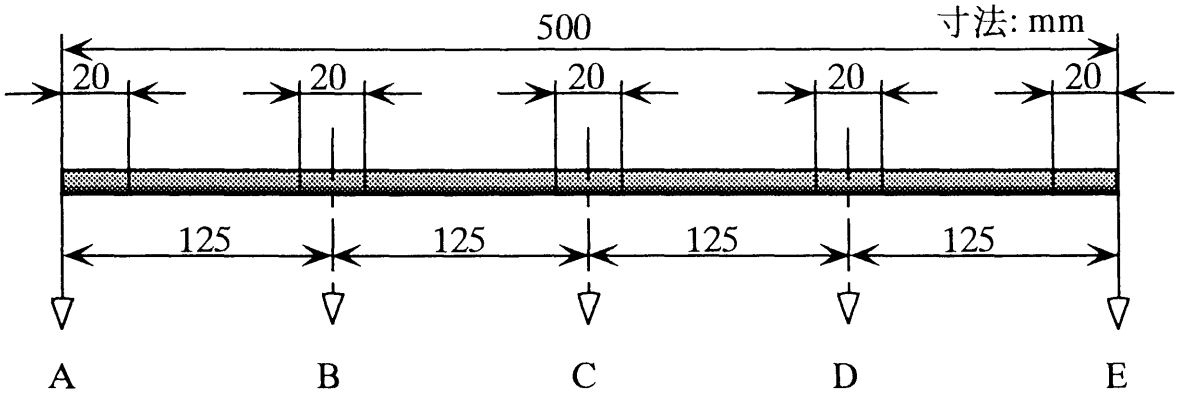


図 3.4　細管の測定位置

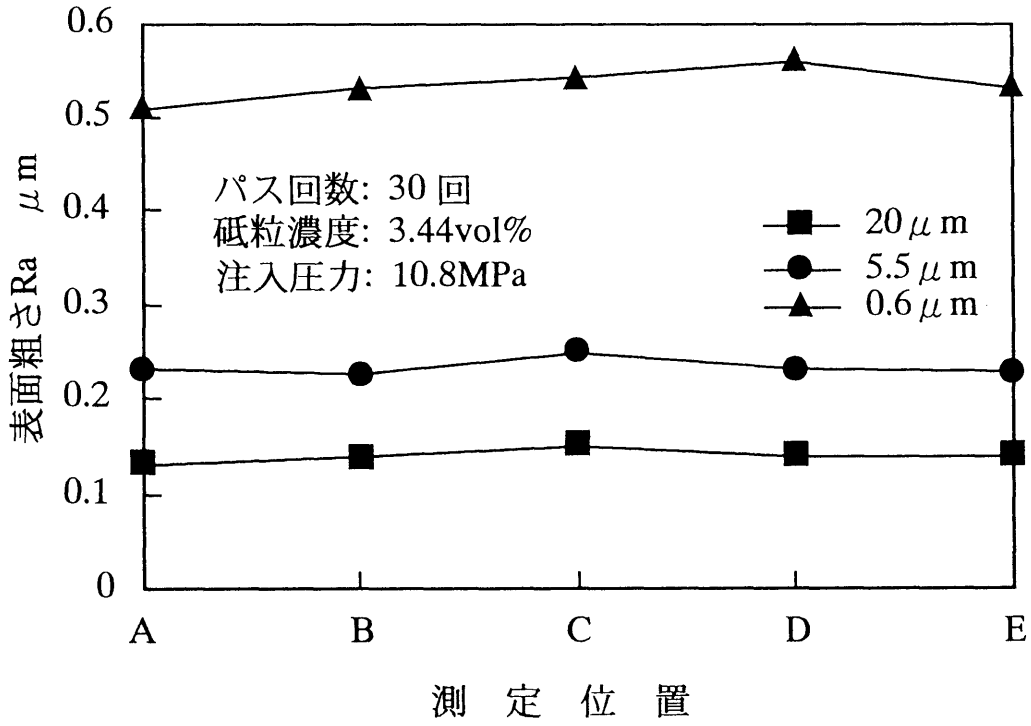


図 3.5　測定位置と表面粗さの関係

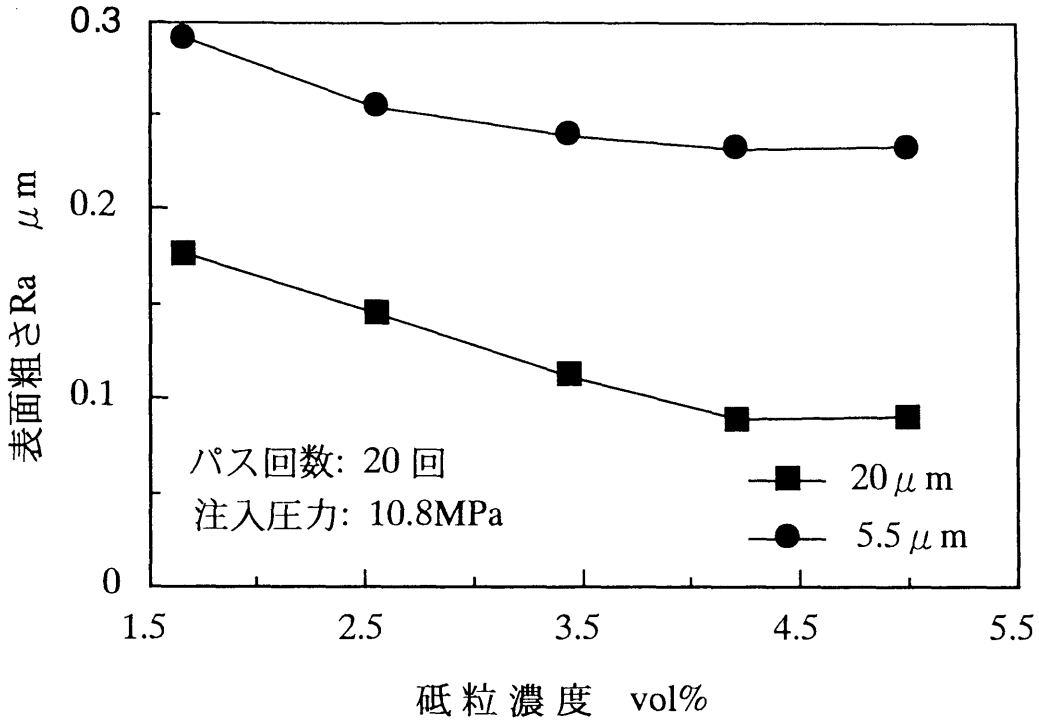


図 3.6　砥粒濃度が表面粗さに及ぼす影響

Ⅲ）砥粒濃度の影響

図3.6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，平均粒径5.5，20 μ m の 2 種類の砥粒を用いて行った．図 3.6 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．しかし，その減少度合いは砥粒径にあまり依存しないようである．これは次の理由によるものと考えられる．

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．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．

Ⅳ）パス回数の影響

図3.7に，パス回数と表面粗さの関係を示す．図3.7から，平均粒径が20 μmと5.5

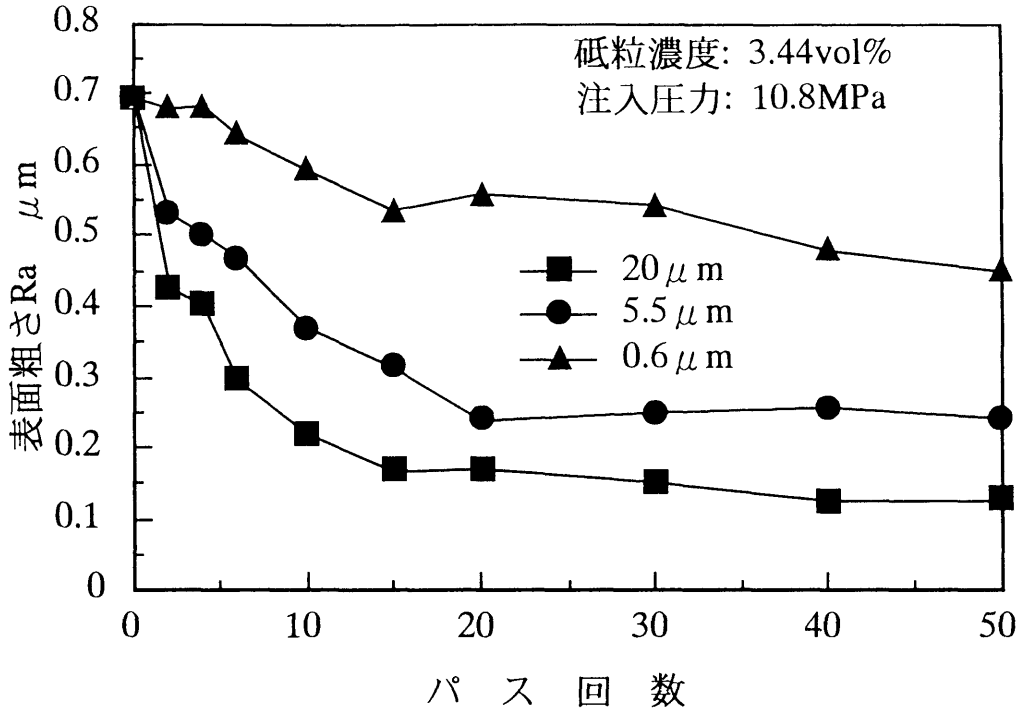


図 3.7　パス回数が表面粗さに及ぼす影響

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様態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であると仮定すると，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，表面粗さの改善度合は緩和されることになる．一方，平均粒径0.6 μmの砥粒では研磨能率が小さいため，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様になったものと考えられる．

3.2.2　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3.8に差圧の測定結果を示す．測定は，砥粒濃度を3.44vol%，パス回数を2～50回として研磨した細管について行った．図3.8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がわかる．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

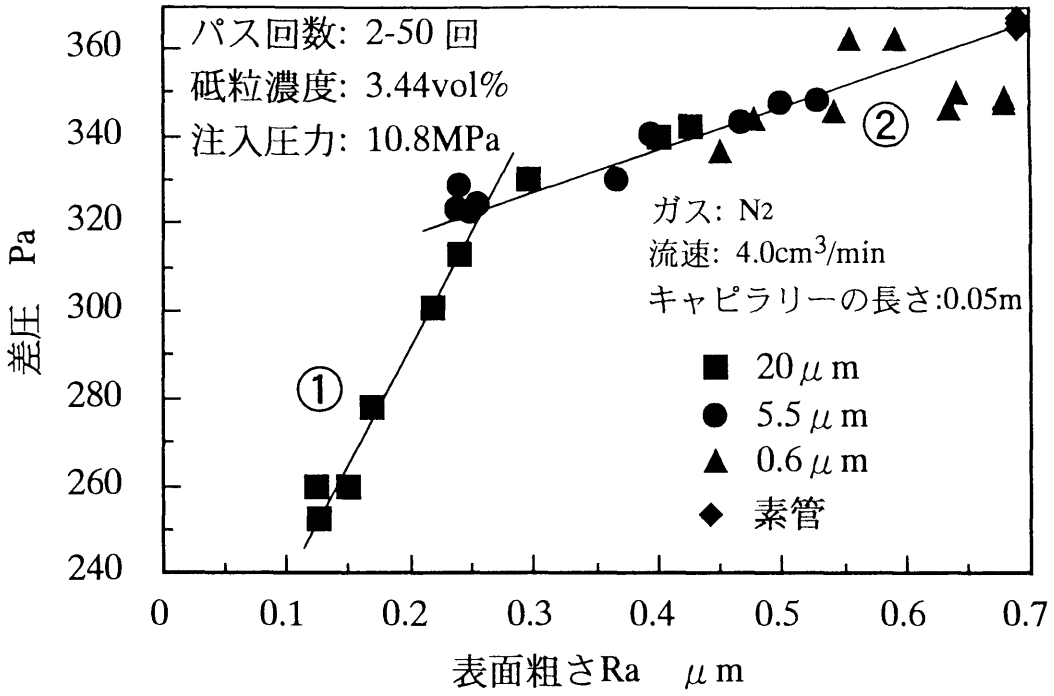


図 3.8　差圧と表面粗さの関係

となり抵抗を生じるためではないかと考えられる．

図3.8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 μ mRaの間で成り立つ直線①と0.3～0.8 μ mRaの間に成り立つ直線②の2本であり，直線の傾きに明瞭な違いがみられる．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まれていると考えられる．このため，傾きが大きく変化したものと考えられる．

図3.8から，①の直線に含まれるデータの大部分は，平均粒径20 μ mの砥粒を使用して研磨して得られたものであることがわかる．この測定結果から，粗粒の方が細粒に比べて研磨能力に優れているといえる．さらに，図3.8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できることを図は示唆している．

3.2.3 研磨面の観察

Ⅰ）光学顕微鏡による観察

平均粒径20 μ m で研磨した面の光学顕微鏡による観察結果を図3.9に示す．図3.9は，前加工面（素管）およびパス回数10, 30, 50回の研磨面を表している．図には，触針式粗さ計による測定結果（粗さプロフィール）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を表す．

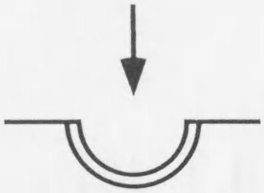
図3.9に示す観察結果から，素管内壁は引抜き管特有の荒れた，光の反射も鈍い粗面であることがわかる．研磨回数が10回になると，荒れた面が次第に滑らかな面となり，光沢が生じてくることが確認される．パス回数がさらに増加すると内壁面の光沢がいっそう増し滑らかになってくる．この観察結果は，図3.10に示す表面粗さのプロフィールともよく照応している．

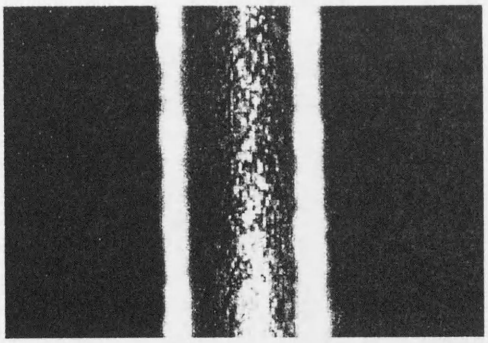
Ⅱ）走査型電子顕微鏡による観察

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3.11に示す．図3.11は，平均粒径20 μ m 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回の管内壁面の状態を示している．

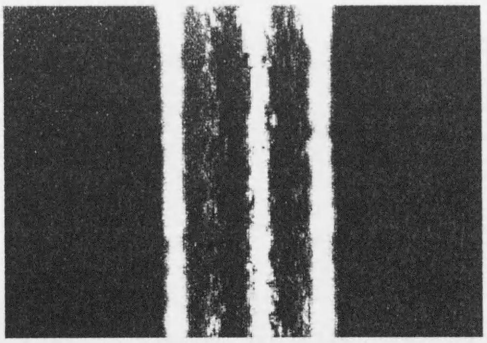
図3.11から，N＝0の素管は引抜き管特有のテクスチャ（織目模様の表面の微細凹凸パターン）を有していることがわかる．これに対してN＝2の場合を見ると，特有のテクスチャはわずかに見られるもののかなりの部分が消失している．この結果から，研磨は早期の段階で急激に進むことがわかる．パス回数をさらに増やし，N＝6の辺りになると，テクスチャが多少認められる程度となる．N＝10以降はテクスチャが全く認められなくなる．この段階で，前加工面粗さ（凹凸）がほとんど除去されたとみなされる．しかし，砥粒による引っ掻き痕はパス回数が増えても消えてなくなることはなかった．このことは，粗粒により研磨した後，粒径の小さな細粒を用いて仕上げ研磨を行うことが，より平滑な引っ掻き痕の少ない面を得るのに良い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．

粒径: 20 μ m
注入圧力: 10.8MPa
砥粒濃度: 3.44vol%

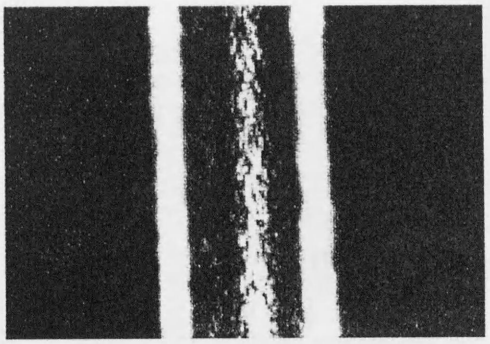




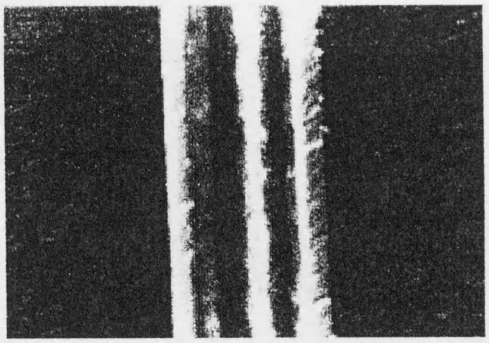
N=0(素管)



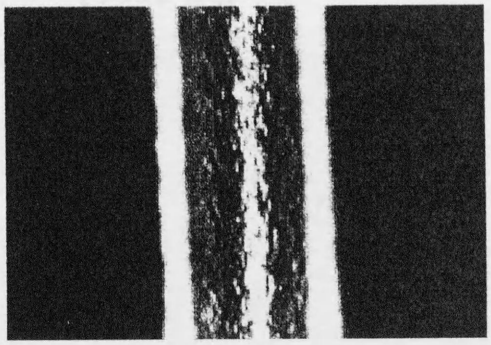
N=6



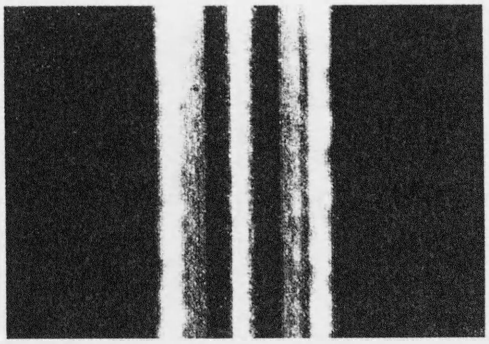
N=2



N=10



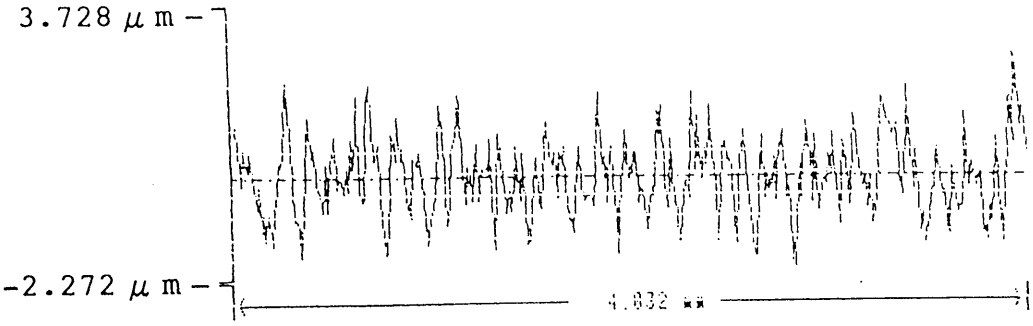
N=4



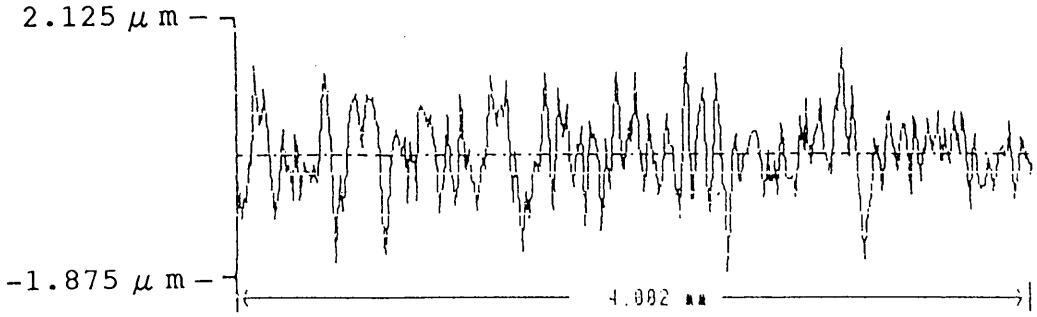
N=20

0.2mm

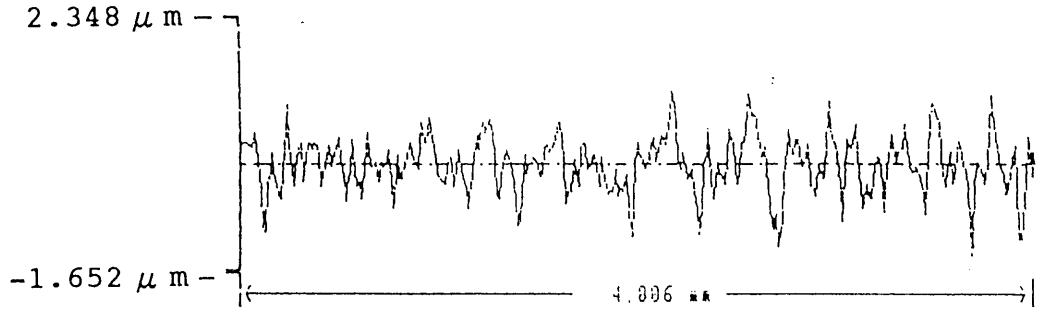
図3.9　細管内面の光学顕微鏡写真



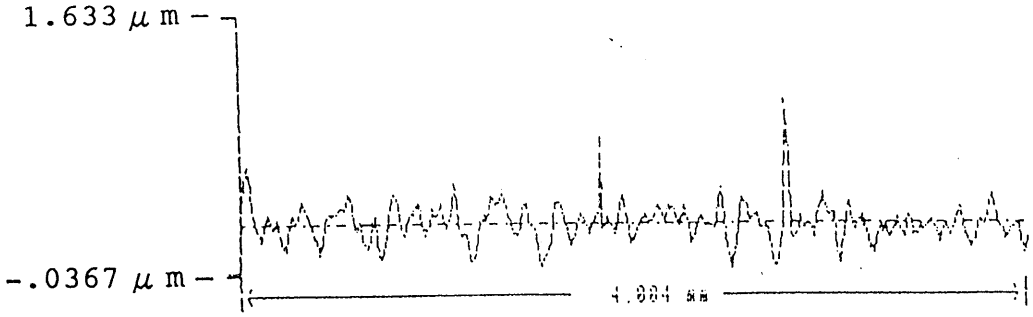
(a) N=0(素管)



(b) N=2



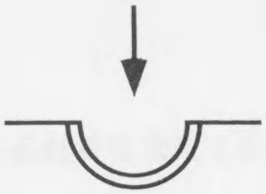
(c) N=4

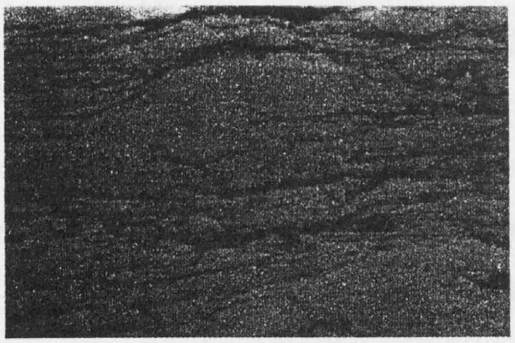


(d) N=20

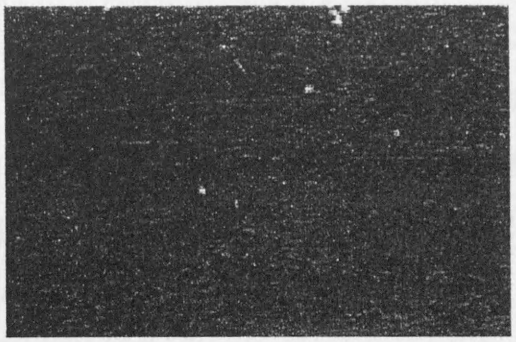
図 3.10　細管内面の表面プロフィール

粒径: 20 μm
注入圧力: 10.8MPa
砥粒濃度: 3.44vol%

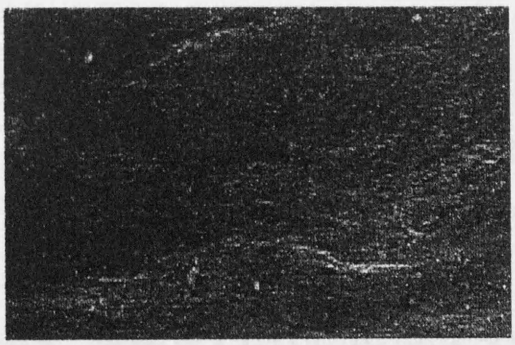




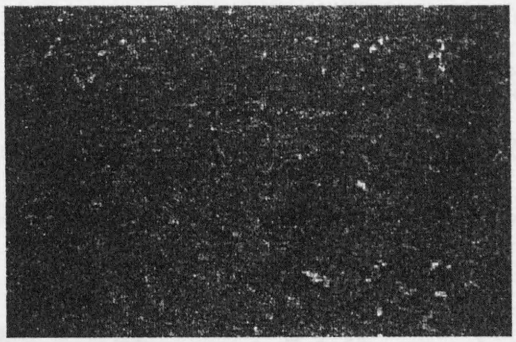
N=0 (素管)



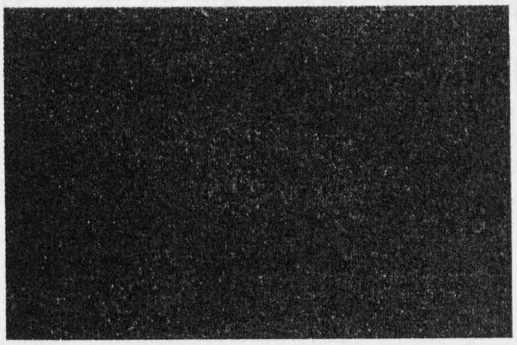
N=6



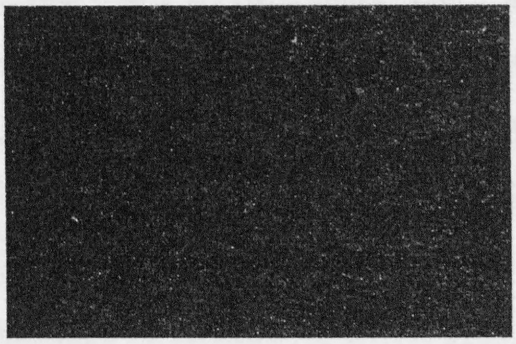
N=2



N=10



N=4



N=20

20 μm

図 3.11　細管内面の SEM 写真

3.2.4 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 μ m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[レーザダストモニタ](日立社製:TS-5100型）で粒子の計測を試みた．その結果，直径にして約0.01 μ m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，この実験の目的でもあるクリーン化という点において非常に重要であり今後検討すべき課題である．

3．3 スラリーの流動および差圧に関する一考察

3.3.1 管長一様研磨について

図3.5から，研磨したステンレス鋼極細管は，測定位置によって研磨状態が変わらないことが確認された．これは，管長に渡って一様な研磨が行われたことを意味している．そこで，何故そのような結果が得られたのか，管内を流れるスラリーの流動状態を考え，検討することとした．

いま，管端(管入り口)におけるスラリーの流れの状態について考える．ここで，図3.12に示すように，大きな水槽に蓄えられている液体が，水槽に滑らかに接続されている真っ直ぐな円管（直径d）を通って流れてゆく場合を想定する．図3.12に示すように，レイノルズ数が極めて小さい値の場合を除き，管入り口から管壁に沿って境界層が次第に発達し，ついには境界層厚さが管中心に達するようになり，やがて管内の流れが境界層によって完全に覆われてしまうようになる．入口からその点までの距離を助走区間といっている．そして，その長さを助走距離（入口長さL）という．助走区間内では，

$$\partial u/\partial x \neq 0 \tag{2}$$

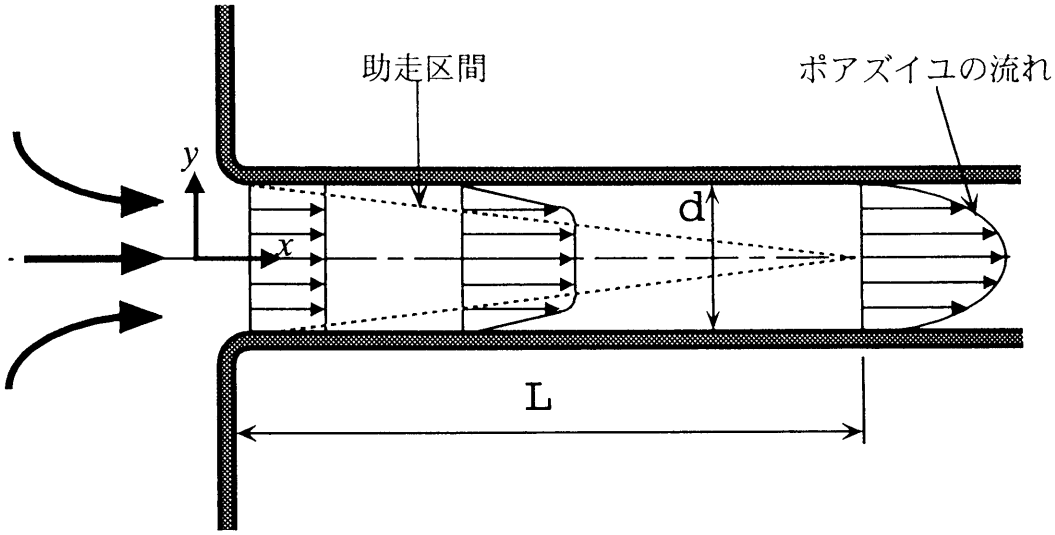


図 3.12　助走区間内の流れ

が成り立つ．ここで，u は y 軸方向の流速を表わす．

助走区間終端から下流の出口付近までの領域の流れを十分に発達した流れと呼ばれている．十分発達した流れの領域では，

$$\partial u/\partial x = 0 \tag{3}$$

が成り立つ．この領域では，速度分布の変化による圧力降下はなく，粘性による圧力損失だけとなるので圧力勾配は一定となる．

助走距離Lの値は，理論または実験より求められていて提案者によって幾分異なり，次の様な式が提示されている．

層流の場合：　$L = (0.026 \approx 0.065)\mathrm{Re}\,d$　(4)

乱流の場合：　$L = 0.693\mathrm{Re}^{1/4}\,d$　（ラッコの理論式）　(5)

$L = (14.25\log_{10}\mathrm{Re} - 46.0)d$　（ボーラスとブライトンの理論式）　(6)

一般に、管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．その値は，全ての管（3.2.1 節）について臨界レイノルズ数の値 2300 を越えており，管の流動状態は乱流になっている．このため，(5), (6)式を適用することによって L の値を

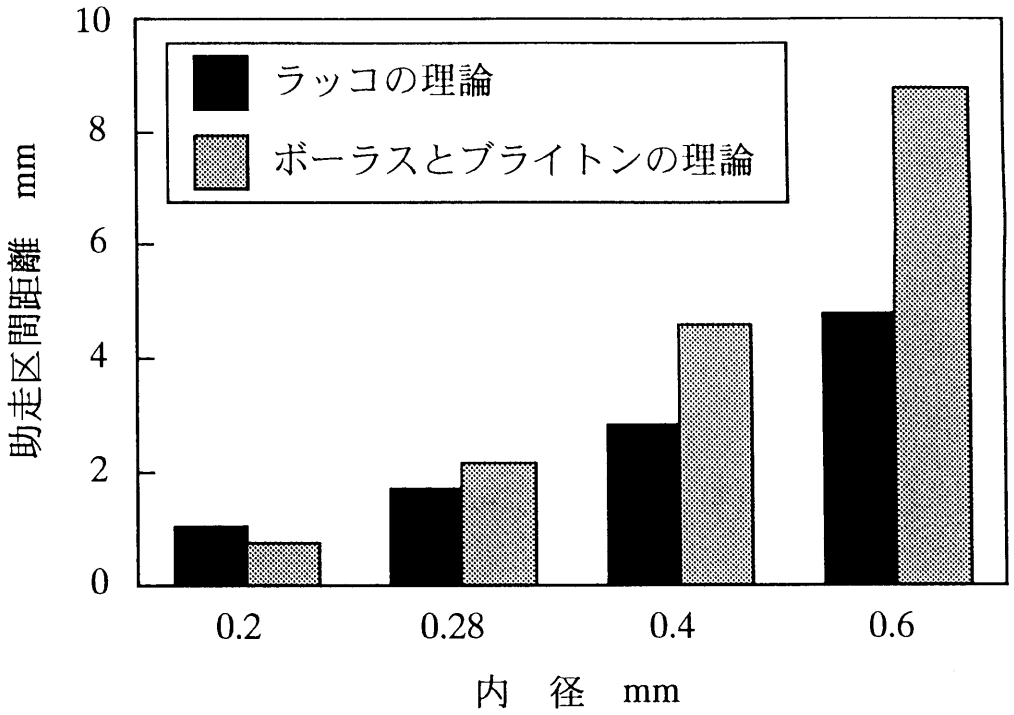


図 3.13　各細管の助走区間距離

求めることができる．求めた結果を図3.13に示す．図3.13から，実験に供した細管の助走区間の距離Lは，内径の異なる各管についていずれも管端から数mm離れた距離の程度となっており，管長（500 mm）に比して著しく小さな値であることがわかる．このため，助走区間を除く所では，速度分布に基づく圧力降下はなくスラリーの流速は一定となっている．このことが原因して，管長のほぼ全域に渡って研磨が一様に行われたものと推察される．これは，図3.5の実験結果とも照応する．

3.3.2　差圧について

図3.8から，差圧の測定線図に明確な折れ点が存在することが確認される．差圧は，管の一端を大気開放状態にして，他端側から分流したガス圧を流し，大気圧との圧力差（圧力降下すなわち圧力損失）を差圧計で計測して求めたものである．差圧は，ガスの管内壁との摩擦によって，すなわち，管からの抵抗を受けることによって変化する．内径が大きく表面が滑らかであると差圧は小さくなる．

差圧の測定から，細管内を流れるガスのレイノルズ数は，先に示した(1)式を用いて求めることができる．

窒素ガスの粘性率ηの値は，気体の粘性率に関する温度換算式((7)式)から求めることができる．温度が20℃ (T_1)のときのηの値(η_1)は17.6×10^{-6}Pa·sであるので(7)式から，測定温度が25℃ (T_2)のときのηの値(η_2)は17.83×10^{-6}Pa·sとなる．

$$\eta_2 = \eta_1 \left(\frac{T_1 + C}{T_2 + C} \right) \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{3/2} \tag{7}$$

ただし，Cは定数（サザランドの定数と呼ばれる）で，窒素ガスの場合，C=104である．

動粘度νの値は、粘度を流体の密度ρで割った量であるので，T_2=298K(25℃)の時のνは15.76×10^{-6}m²/sとなる．したがって，レイノルズ数Reは6.5となる．この値は，臨界レイノルズ数の値に比べて十分小さく，管内を流れる窒素ガスの流れは層流状態で流れているものと考えられる．

いま，管の内面が滑らかであると仮定し，管の内径が変化した場合の圧力損失を計算してみる．その値は，ポアズイユの流れを用いることにより計算することができる．流量Qは，次式（ポアズイユの式）[3.7)]で与えられる．

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

ここで，uは流速，Pは圧力，aは管の内半径，xは管長を表す．流量Qの値は実測でき4.0×10^{-6}m³/min，また，管長xは0.050m，管内半径aは0.00014mであるので，それらの値をおのおの(8)式に代入すると，圧力損失の値は393.97Paと求まる．管の内半径が異なる場合の計算結果を図3.14に示す．

図3.14から，内径が，0.01mm変化するだけで，差圧は大きく変化することがわかる．図3.8に示す結果と比較すると，②で示す領域は，表面粗さの低減による流体抵抗の減少と考えることができる．この領域は，研磨の進行途次の過程にあると推察される．

一方，平均粒径0.6，5.5μmの砥粒を用いて研磨した場合に関しては，管内壁の凹

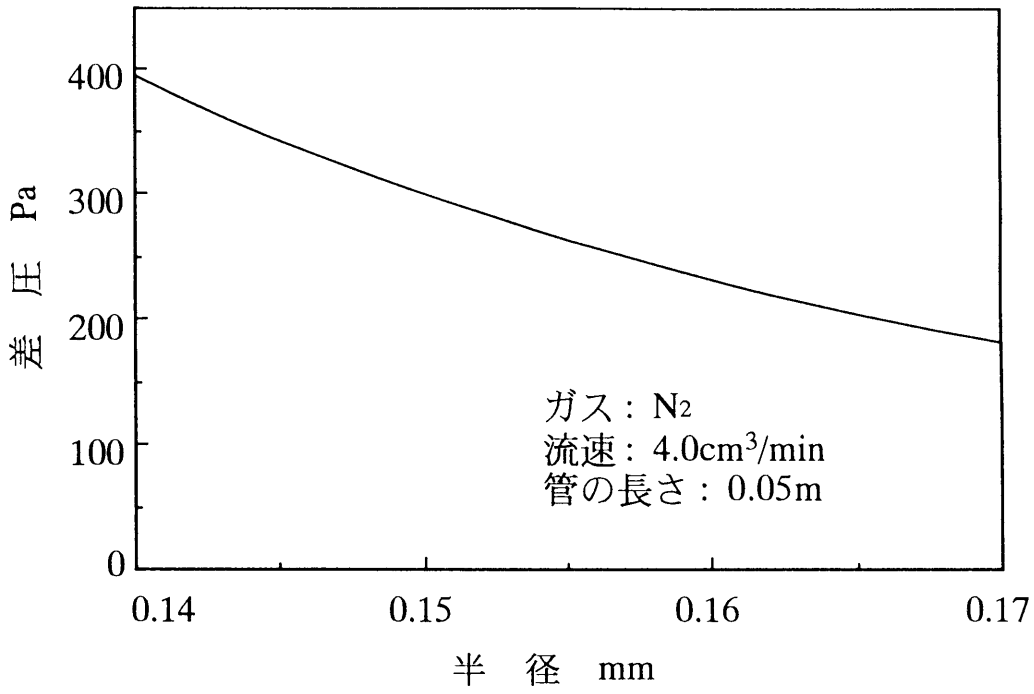


図 3.14　差圧と内半径の関係

凸部分のみが除去されて，表面粗さが低減したものと考えられる．

①で示す直線の領域部分は，平均粒径20 μ mで研磨した測定結果が大部分を占めている．これは，①の直線の領域では，表面粗さの低減（管内壁の凹凸の除去）と，内径の拡大も同時に行われる研磨作用域であると解釈される．

本測定結果から，高速流動研磨法は管内面の平滑化のみならず，内径の拡大を図る研磨法としても利用し得ることがわかる．

3 .4 結　　言

内径 0.28mm の極細ステンレス鋼管内壁を研磨した結果，次の結論を得た．

(1) 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．

(2) 平均粒径20，5.5 μ m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．

(3) 管内壁の研磨状態を評価する一つの方法として管を通っ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 μ mRa の範囲と 0.3～0.8 μ mRa の範囲では変化の勾配が異なる．

(4) SEM 観察の結果，平均粒径 20 μ m 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．

第 3 章の参考文献

3.1) 田中義信，津和秀夫：精密工作法（下），共立出版, (1982) 33.

3.2) 田島　栄：表面処理ハンドブック，産業図書, (1969) 377.

3.3) 進村武男：磁気研磨法の現状と課題，機械と工具，40，5 (1996) 16.

3.4) 鴨川昭夫：実践　機械工作法，機械技術，39，5 (1991) 106.

3.5) 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.

3.6) 加藤　宏：流れの力学，丸善, (1993) 50.

3.7) 加藤　宏：流れの力学，丸善, (1993) 53.

3.8) 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.

3.9) T.Kurobe,Y.Yamada,K.Yamamoto and T.Miura : High Speed Slurry Flow Finishing of Inner Wall of Stainless Steel Capilary, Int.J.Japan Soc.Prec.Eng., Vol.32,No.1 (Mar.1998) 39.

第４章　内径の異なる各種細管の研磨特性

４．１　緒　言

ステンレス鋼細管は，用途に応じて各種の内径を有する管が製作されており市販されている．その一つは，ガス流路管として，また他の用途として溶液などの搬送路管として使用されている．ステンレス鋼は錆びない鋼であるため，工業分野だけでなく医療分野にも広く用いられている．医療分野に関しては，いわゆる注射針として多量に消費されていることは周知のところである．また，最近衛生（サニタリー）に対する関心が高揚するにつれ，細管内壁面のクリーンな管が求められてきている．

前章でも記したように，細管は引き抜きに加工よって作製されるため，管内壁面は独特のテクスチャー模様を有している．この模様は，管の内径の大きさによって変わるのが普通である．管の内径が大きくなるにつれ模様は大まかになり，表面の凹凸も荒くなる．このため，管径に応じてそれに適した研磨の仕方[4.1-5)]を検討し，実施しているのが実状である．ここで，高速流動研磨法が内径0.28mm管の場合以外にも有効に機能するのかどうか検討する必要がある．注入圧力一定とすると，管内径が異なれば流速が異なり，流体の運動，すなわち，砥粒と工作物の作用形態も異なる．実験に供する事ができたのは，内径0.2，0.4，0.6mmの各ステンレス鋼極細管である．研磨前の内壁面の粗さは，図4.1に示すように前章で実験に供した内径0.28mmの管のものに比し全て良くない．本研究では，内径0.2mmの管についても実験を試みたが，内径が小さ過ぎるためか，スラリーの流動がときとしてスムーズに行かない場合があり，安定したデータが得られなかった．そのため，本章では内径0.2mmの表面粗さに関する実験結果は記載していない．

表 4.1　実験条件

キャピラリー	SUS304BA
内径	0.2, 0.4, 0.6mm
長さ	500mm
砥粒	Al_2O_3
平均砥粒径	20, 30, 48. 60 μm
砥粒濃度	3.44 - 6.32vol%
溶媒	イオン交換水
注送圧力	10.8MPa
パス回数	2 - 20 回

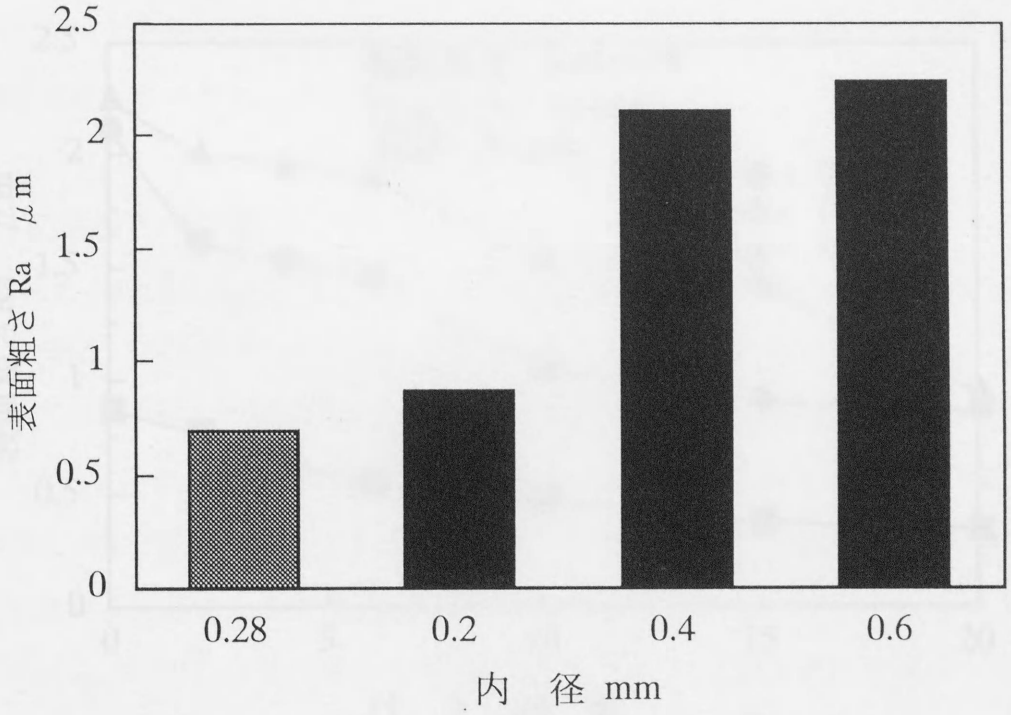


図 4.1　各種素管内壁面の粗さ

4．2　実験結果

4.2.1 研磨面の粗さ測定

Ｉ）管径と表面粗さ

図4.2に管径と表面粗さの関係を示す．図4.2は，平均砥粒径20 μm，砥粒濃度3.44vol%，スラリー注入圧力10.8MPaの条件で研磨したときの内壁面の粗さのパス回数による変化を，内径の異なる各種管について表したものである．研磨前の素管の粗さRaは，内径0.6, 0.4, 0.28mmの管について，それぞれ2.24, 2.11, 0.69 μmである．

図4.2から，いずれの内径の管の場合も，パス回数の増加とともに粗さが次第に減少していく様子がわかる．しかし，研磨の初期段階（パス回数の少ない段階）で表面粗さが急激に減少し，その後パス回数の増加とともに漸減するようになる．また，パス回数が15～20回辺りで表面粗さはほぼ一定の値となる傾向がみられる．図4.2を仔細に見ると，研磨の初期段階での表面粗さの低減の度合いは，内径が大きく初期粗さの大きい管ほど大きい傾向がみられる．以上の測定結果から，内壁面の表面粗さが大

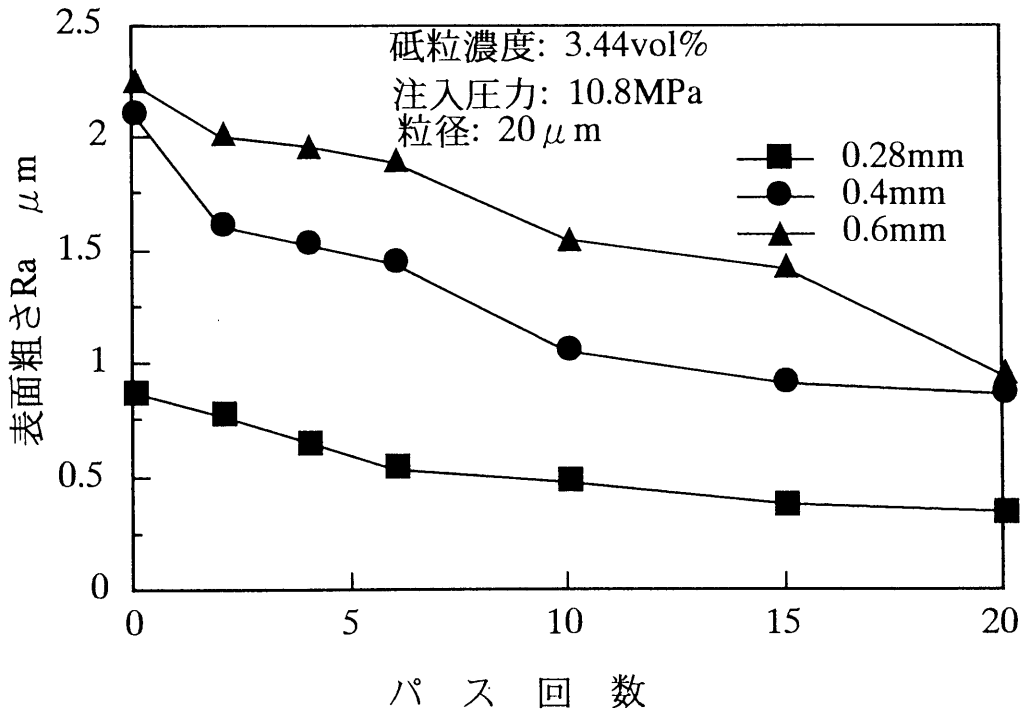


図4.2　管径と表面粗さの関係

きい管ほど研磨による除去量が多いことを示している．これは，内壁面に衝突し引っ掻き作用を営む作用砥粒数が多くなることに起因していると思われるが，この点に関しては後に考察する．

Ⅱ）砥粒濃度と表面粗さ

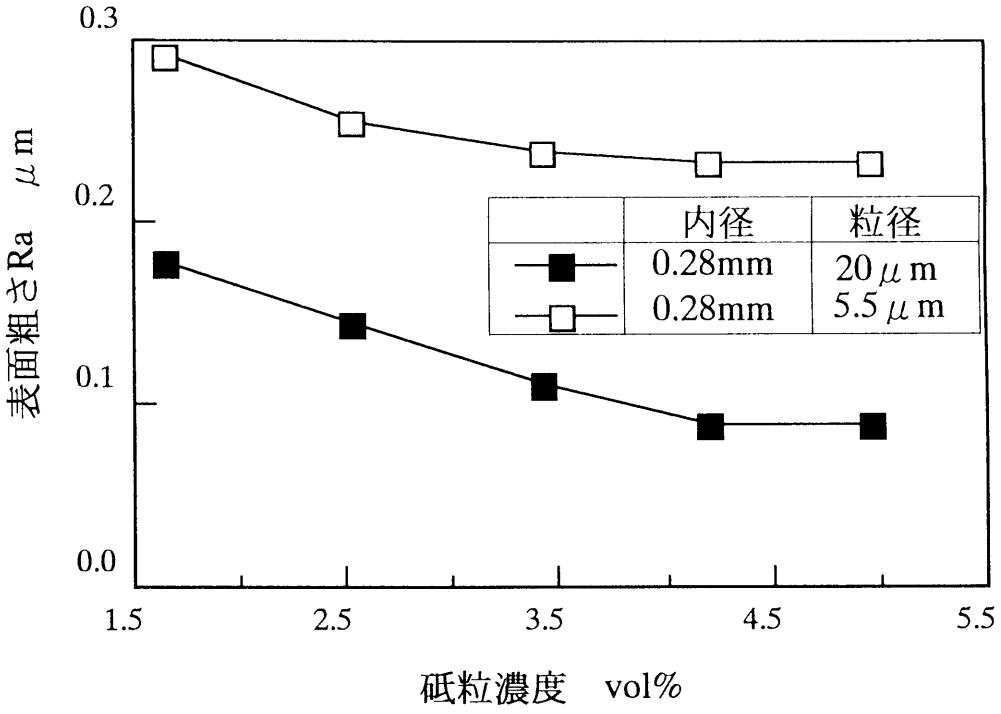
表面粗さの低減に砥粒の濃度がいかなる影響を及ぼすか調べた．内径が0.28mmの管についての測定結果を図4.3(a)に示す．実験は，平均砥粒径5.5と20μmの2種類の砥粒を用い，砥粒濃度を1.66～3.44vol%の範囲で変えて行った．その際，パス回数を20回とした．図4.3(a)から，砥粒濃度が増加するとともに表面粗さは次第に小さくなることがわかる．しかしながら，ある濃度以上になると粗さの低減は見られなくなりほぼ一定の値になる．ほぼ一定の値となるパス回数は粒径に幾分依存するようである．

内径が大きい0.6, 0.4mmの測定結果を図4.3(b)に示す．実験は，平均粒径が20μmと60μmの2種類の砥粒を用い，砥粒濃度を3.44～6.32vol%の範囲に変えて行った．図4.3(b)から，砥粒濃度の増加とともに表面粗さは幾分低減する様子が見られる．しかし，低減の度合はいずれの管も小さいことがわかる．これは，管の内径が0.28mmの管の場合に比して大きいため，この程度の砥粒濃度の範囲では研磨面に作用する砥粒数がそれ程増えなかったことに原因があると考えられる．

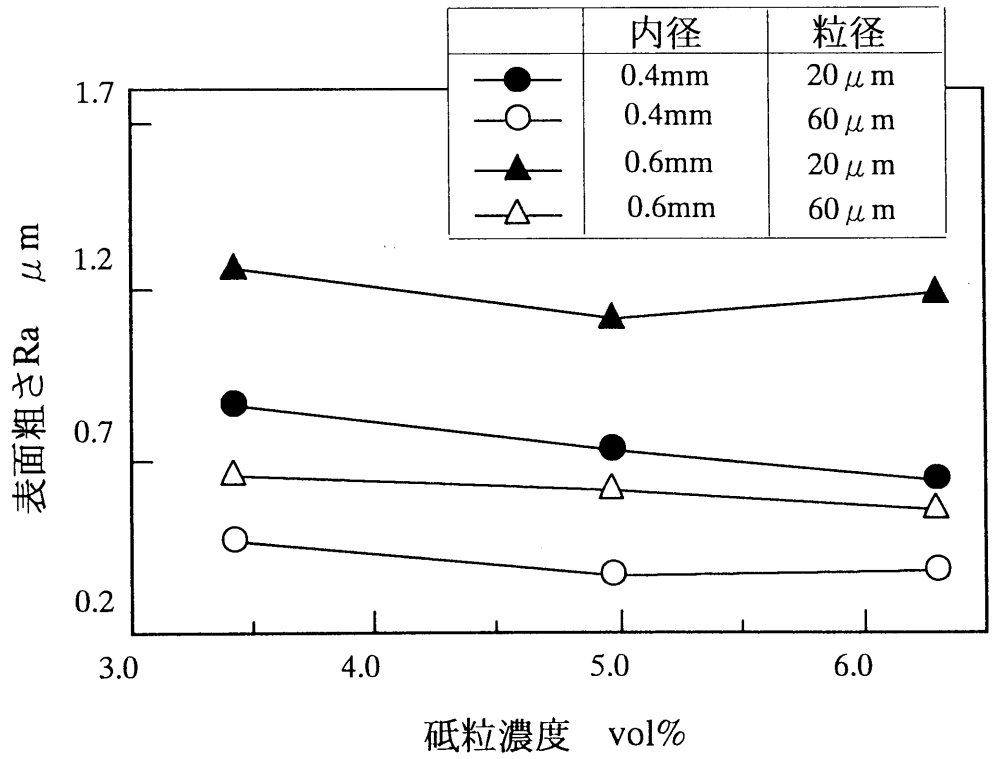
Ⅲ）砥粒径と表面粗さ

表面粗さの低減に砥粒径がいかなる影響を及ぼすのか調べた．実験結果を図4.4に示す．実験は，内径が0.4と0.6mmの管については，平均粒径20～60μmの砥粒を用い，内径が0.28mmの管の場合には平均粒径0.6～30μmの砥粒を使用して行った．また，パス回数を各管について20回とし，スラリーの注入圧力を10.8MPa一定とした．図4.4には，研磨後の管の内径をピンゲージ（新潟精機製：AA型，1/100mmの精度）で測定した結果も参考として併記している．

図4.4から，いずれの管の場合も砥粒径が増すにつれて表面粗さが減少することがわかる．しかし，表面粗さの低減の度合いは0.28mm管とその他の管ではかなり違うことがわかる．使用している砥粒が各管で異なっていることが一因かと思われる．すなわち，大きい粒径の砥粒程運動エネルギーが大きくなり，そのため研磨作用力も大き

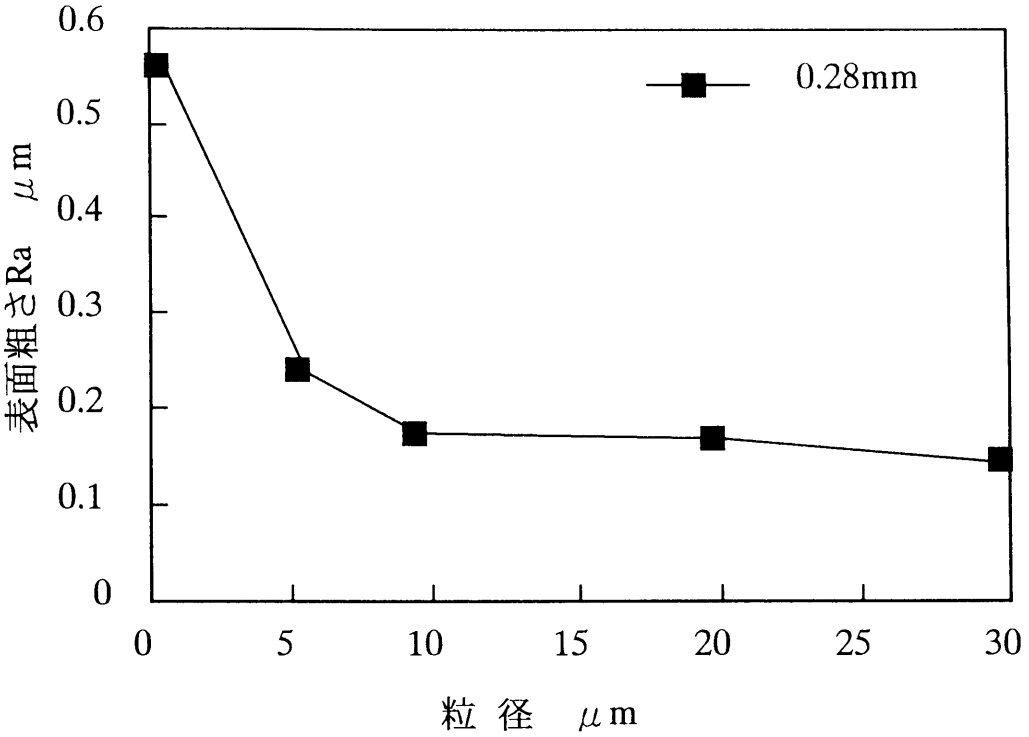


(a) 内径 0.28mm の細管



(b) 内径 0.4mm, 0.6mm の細管

図 4.3 砥粒濃度と表面粗さの関係



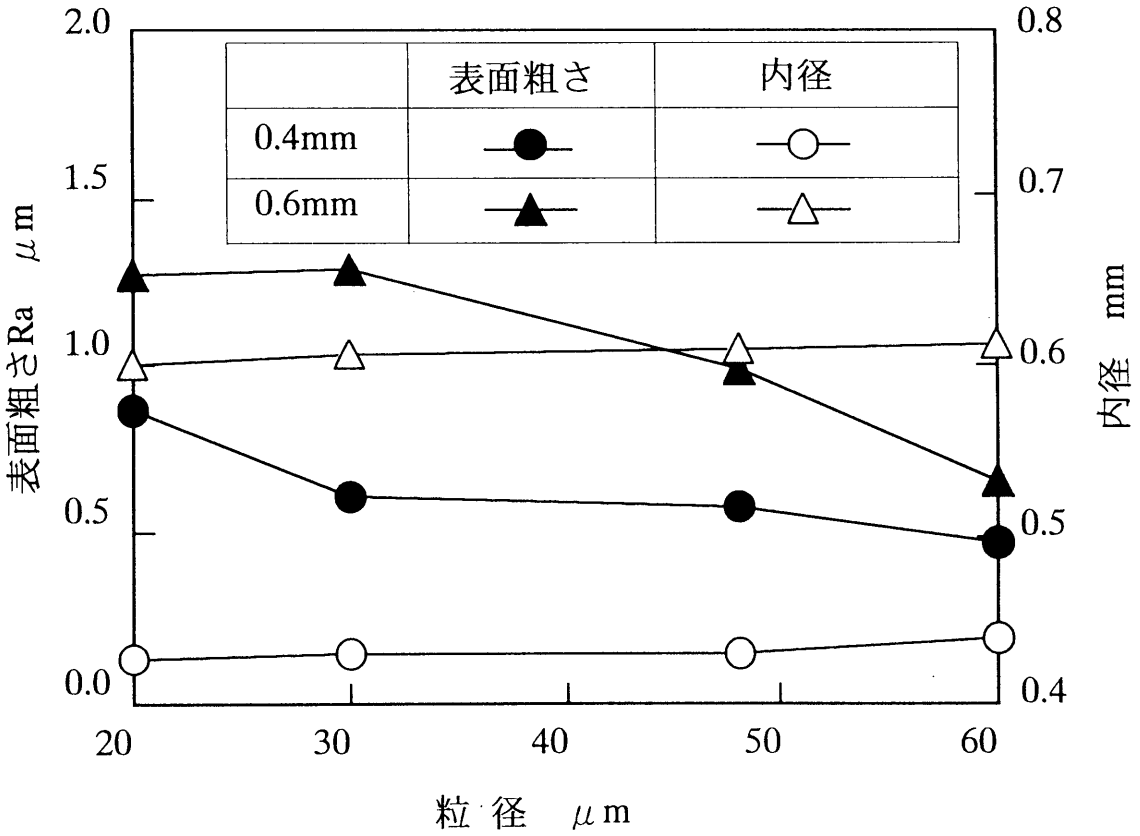


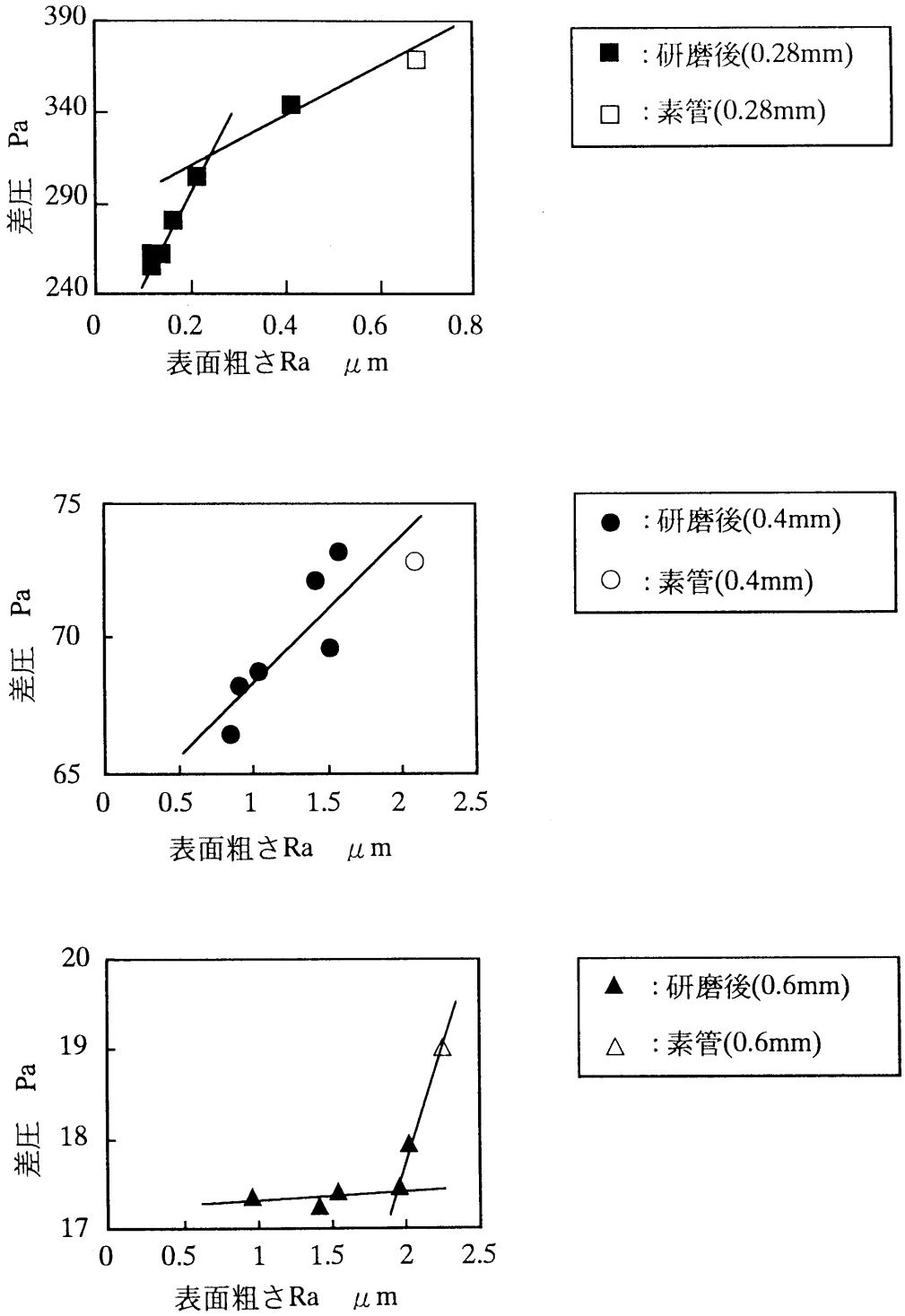
図 4.4　砥粒径と表面粗さの関係

く除去量も増すと考えられる.

4.2.2 差圧の測定

研磨面の仕上げ状態を評価する目的で素管および研磨後の管について差圧の測定を行った．その結果を図4.5に示す．実験は，砥粒濃度3.44vol%，パス回数2～20回の条件で行った．ここで，管内径が異なることから，圧力のオーダーが大きく異なっている.

図4.5から，内径が0.28, 0.4mmの管の場合，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がわかる．一方，内径が0.6mmの管の場合には，表面粗さと差圧の間に明りょうな関係が見られない．一般に，管内を流れるガスの流量は管の内径によって規定されるが，同一の内径であれば管内壁の仕上げ状態（内壁の表面粗さの程度）によって影響を受けると考えられる．表面粗さが大きい程ガスの流れに対して抵抗が大きく，差圧を高める方向に影響し，一方，管径の増加は差圧を低下させると考えられる．研磨管の差圧は内径と表面粗さとの両者の比によって規定されることになるので，図4.5に示すような結果が得られたものと推察される．0.6mm管の場合，差圧があまり粗さによらないことは研磨による内径増加の影響もあるためと思われる.



パス回数: 2-20 回

注入圧力: 10.8MPa

砥粒濃度: 3.44vol%

流速: $4cm^3/min$

ガス: N_2

図 4.5　各種内径の管の表面粗さと差圧の関係

4.2.3 研磨面の観察

Ⅰ）光学顕微鏡による観察

高速流動研磨による管内面の仕上げ状態を，光学顕微鏡（ノマルスキー法）を用いて観察した．観察試料は，スラリーの流動圧力を10.8MPa，砥粒の平均粒径を20 μ m，砥粒濃度を3.44vol%にして研磨したものである．光学顕微鏡観察の結果を，図4.6(a)，図4.6(b)，図4.6(c)にそれぞれ示す．図4.6(a)は内径0.2mm管を，図4.6(b)は0.4mm管を，図4.6(c)は0.6mm管の結果を表す．図4.6から，いずれの管も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．しかし，流動研磨パス回数が増えるにつれて次第に滑らかな面となり，光沢が生じてくることが確認される．また，これらの観察結果は触針式粗さ計で測定したプロフィールともよく対応してる．

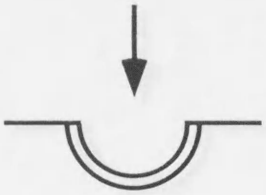
図4.6(a)(b)(c)を仔細にみると，いずれの管もN=0の素管内壁面は引抜き管特有のテクスチャを有していることがわかる．しかし，そのテクスチャの模様は管内径によって異なり，内径が大きい程模様が粗い．N=2のパス回数後の研磨面を見ると，管径によってテクスチャの模様の消滅様態がかなり異なることがわかる．内径0.28mm管の場合には，テクスチャが早いパス回数の段階で早々に消失するのに対して，内径0.4，0.6mm管の場合にはテクスチャの模様がパス回数の少ない段階には未だ明瞭な形で認められる．パス回数がN=4となると，内径0.28mmの管ではテクスチャは完全に消失する．一方，0.4mmの管の場合はほぼ消えたとみえる状況である．しかし，内径0.6mm管の場合には，テクスチャは幾分消えるもののその模様はまだ認められる．パス回数がN=10の段階になって，内径0.6mmの管もテクスチャはほぼ消失する．これらの観察結果から，内径の大きな管程，平滑な面を得るのに多くのパス回数を必要とすることを示唆している．

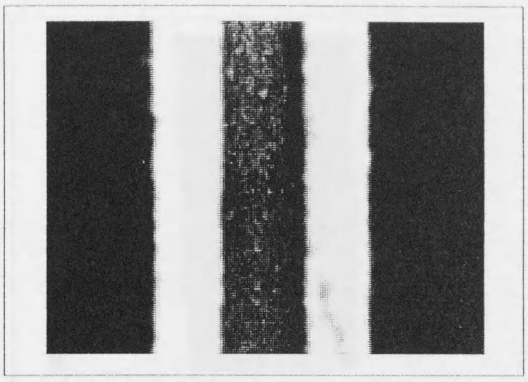
Ⅱ）走査型電子顕微鏡による観察

図4.7(a)(b)(c)に，研磨面を走査型電子顕微鏡(SEM)で観察した結果を示す．被観察試料は光学顕微鏡観察に供した試料と同じである．図4.7(a)(b)(c)から，内径の異なるいずれの管も，光学顕微鏡観察の場合と同様に，N=0の素管内壁面は引抜き管特有のテクスチャを有していることがわかる．研磨前の素管(内径0.6，0.4，0.2mm)の表面粗

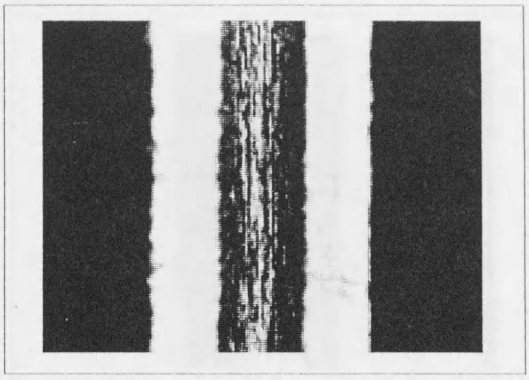
さは，Raでそれぞれ2.24，2.11，0.87 μ mであり，内径0.2mmの管が，内径0.4，0.6mmの管に比べて，かなり初期粗さは小さいが，テクスチャの消失する様子は，他の管とそれほどの違いは見受けられない．むしろやや遅いようにも思われる．これは，内径0.2mmの管は，内面の面積が小さく研磨作用砥粒数が多くなるが，管内を流れる流体の流速が同じ注入圧力の場合，他の管に比べて遅く，そのため砥粒の運動エネルギーが小さくなるため研磨効率が悪くなったと考えられる．

粒径: 20 μm
注入圧力: 10.8MPa
砥粒濃度: 3.44vol%

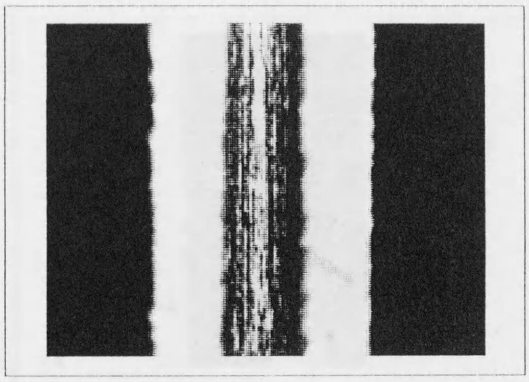




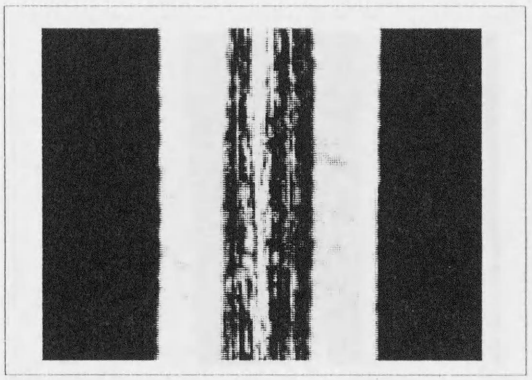
N=0 (素管)



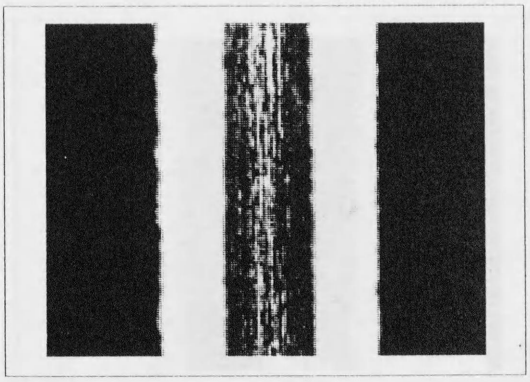
N=6



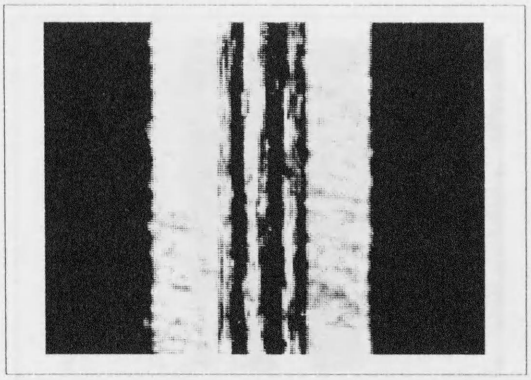
N=2



N=10



N=4

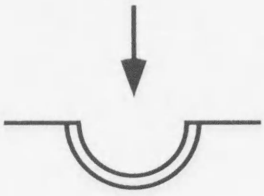


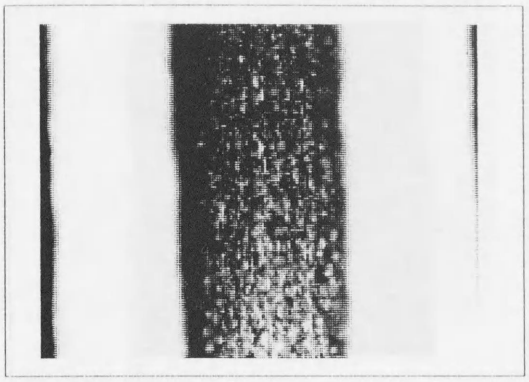
N=20

0.2mm

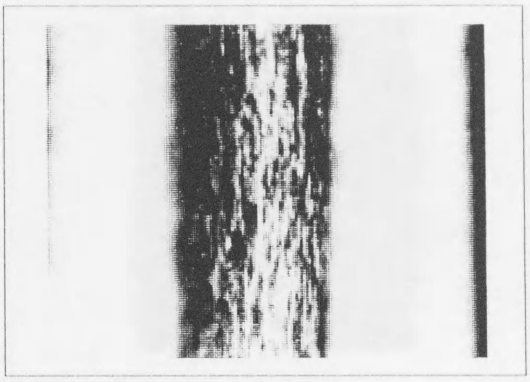
図4.6 (a) 内径0.2mmの細管内面の光学顕微鏡写真

粒径: 20 μm
注入圧力: 10.8MPa
砥粒濃度: 3.44vol%

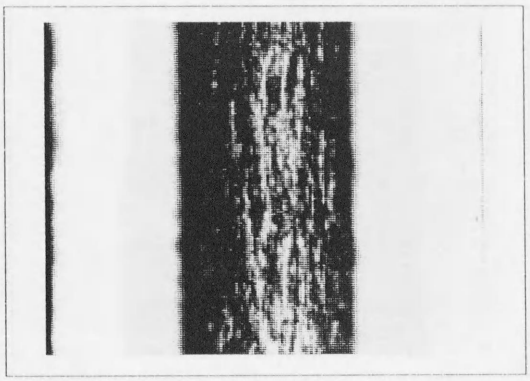




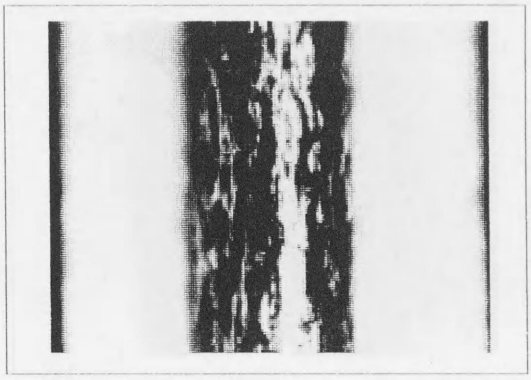
N=0 (素管)



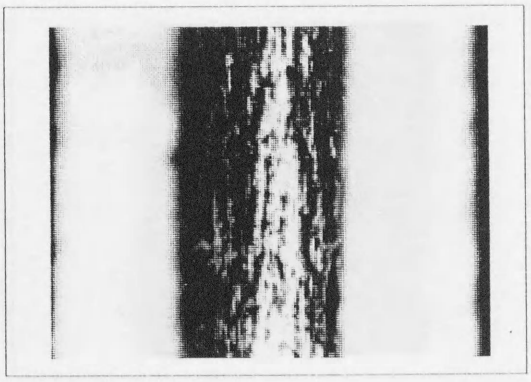
N=6



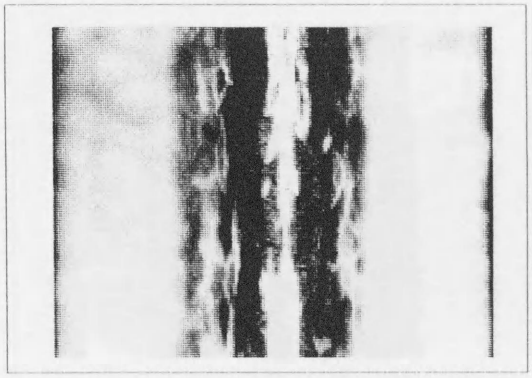
N=2



N=10



N=4

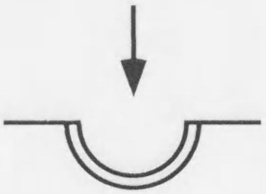


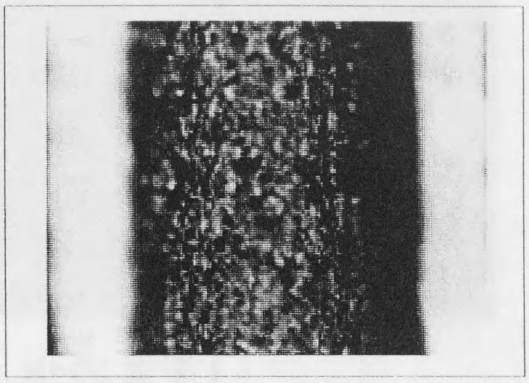
N=20

0.2mm

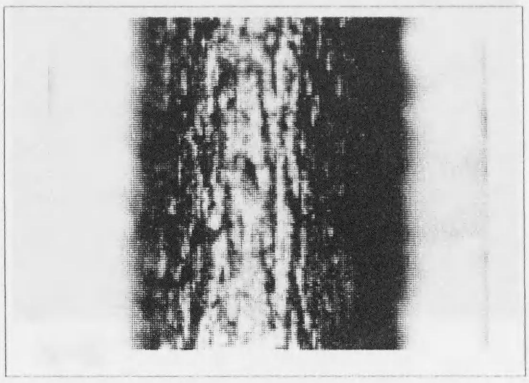
図4.6 (b) 内径0.4mmの細管内面の光学顕微鏡写真

粒径: 20 μ m
注入圧力: 10.8MPa
砥粒濃度: 3.44vol%

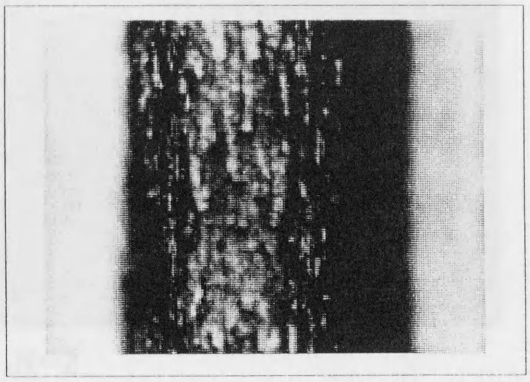




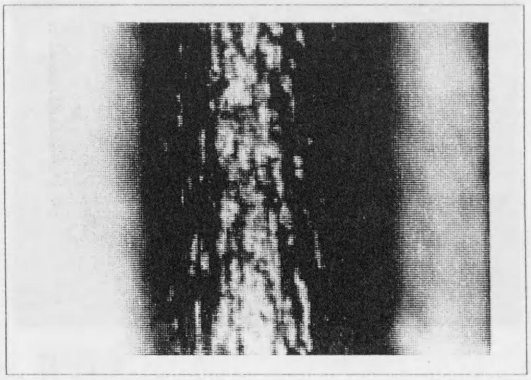
N=0 (素管)



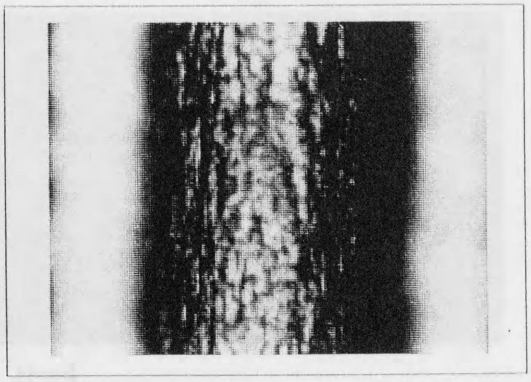
N=6



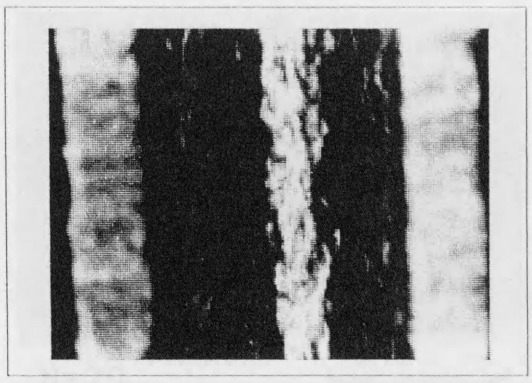
N=2



N=10



N=4

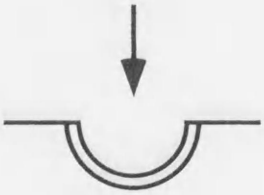


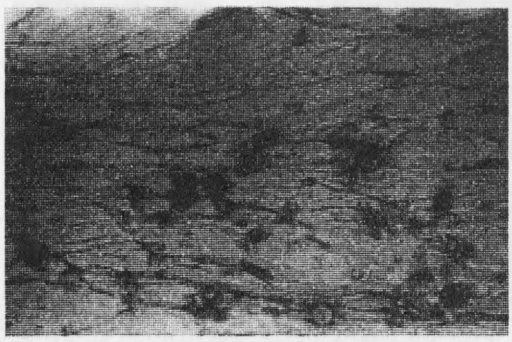
N=20

0.2mm

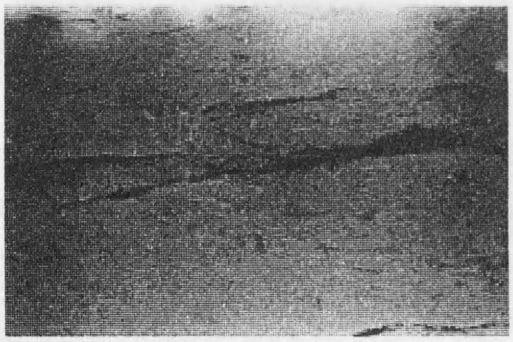
図4.6 (c) 内径0.6mmの細管内面の光学顕微鏡写真

粒径: 20 μm
注入圧力: 10.8MPa
砥粒濃度: 3.44vol%

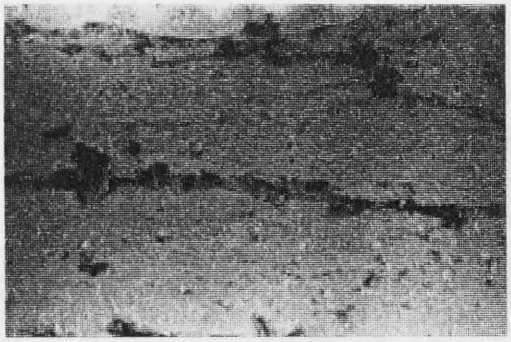




N=0 (素管)



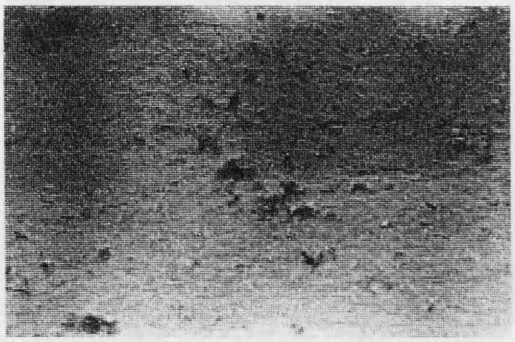
N=6



N=2

N=10

N=4

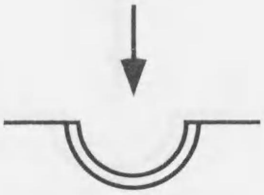


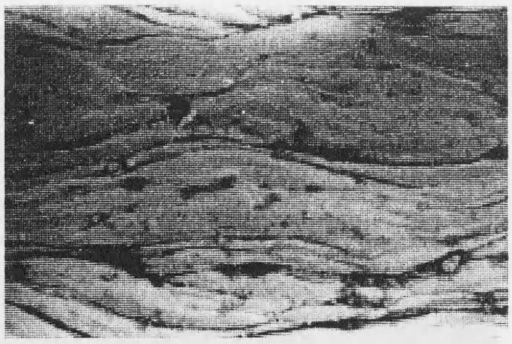
N=20

20 μm

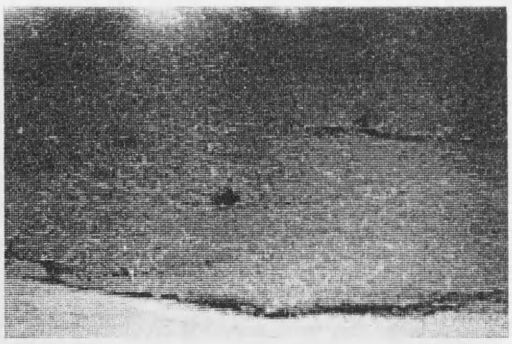
図4.7 (a) 内径0.2mmの細管内面のSEM写真

粒径: 20 μm
注入圧力: 10.8MPa
砥粒濃度: 3.44vol%

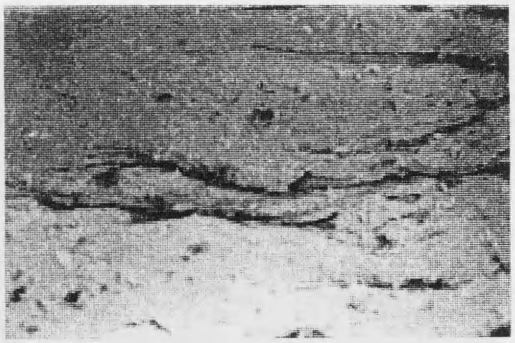




N=0 (素管)

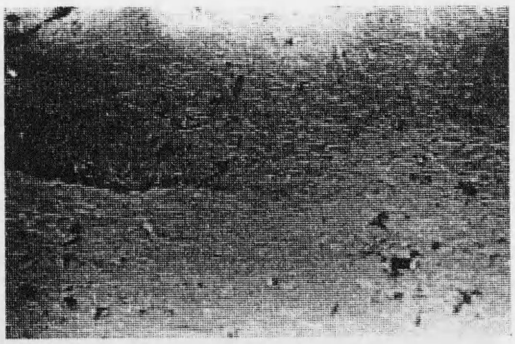


N=6

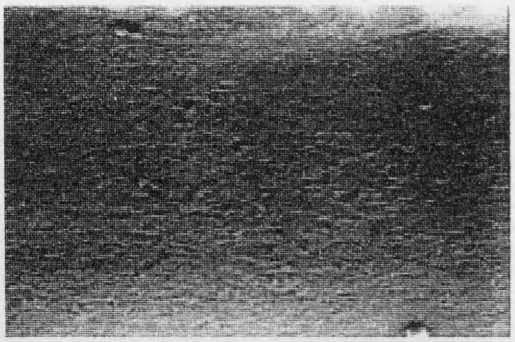


N=2

N=10



N=4

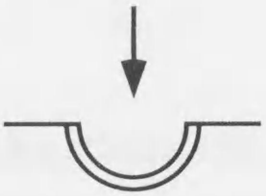


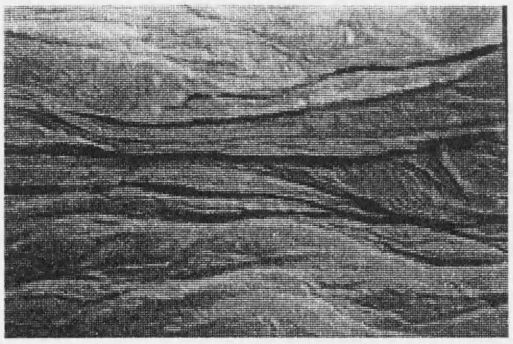
N=20

20 μm

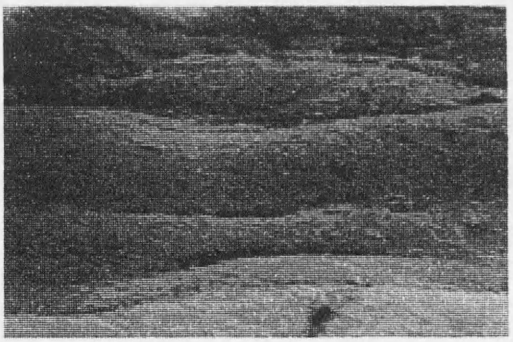
図4.7 (b) 内径0.4mmの細管内面のSEM写真

粒径: 20 μm
注入圧力: 10.8MPa
砥粒濃度: 3.44vol%

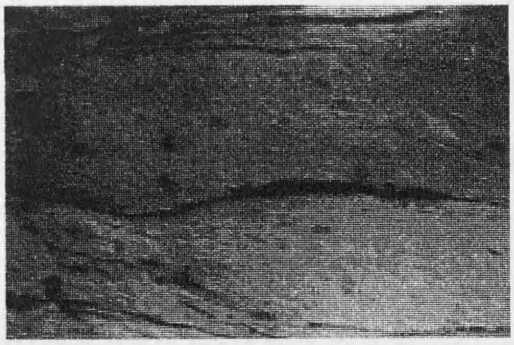




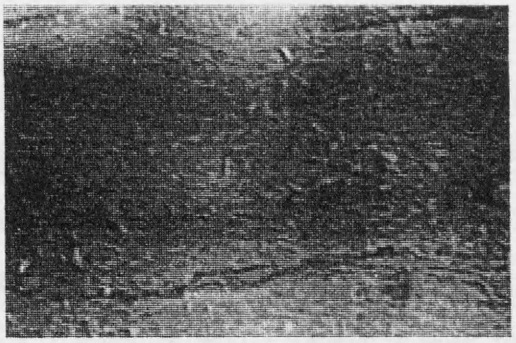
N=0 (素管)



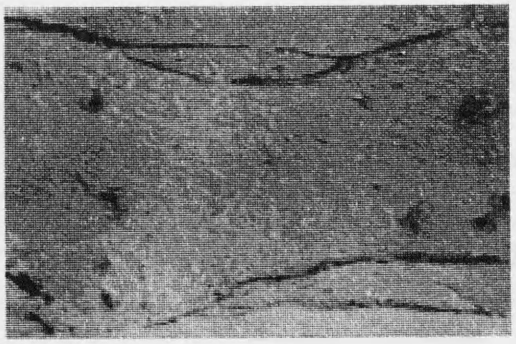
N=6



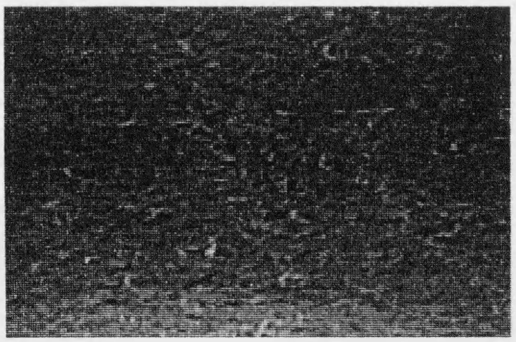
N=2



N=10



N=4



N=20

20 μm

図4.7 (c) 内径0.6mmの細管内面のSEM写真

4．3　考　察

図4.2に示した実験結果から，パス回数の増加とともに表面粗さは次第に低減していくがとくに初期段階において低減が著しいこと，また，初期段階の低減の様態は管の内径によって異なることがわかった．以下に，何故そのような現象が観察されたのか考えてみる．

まず，管内を流れるスラリーの流動状態について考える．第３章でも述べたように，管軸方向に流れるスラリーの流動状態はレイノルズ数Re[4.6)]によって規定され，それは円管内の流れについて次の式で与えられる．

$$Re = \bar{u}\, d / \nu \qquad (1)$$

ここで，d は管の内径，$\bar{u}$ はスラリーの平均流速，ν は水の動粘度である．以下に，説明の都合上３章の記述を再録することにする．

いま，管の断面積をA，１パス当たりの時間（スラリーが管を通過する時間）をt，直圧式増圧器のコラムの容積をV，流量をQとすると，連続の式より，$Q = A\bar{u}$ である．ここで，$Q = V/t$ であるので，スラリーの平均流速 $\bar{u} = V/At$ となる．ここで，d と ν の値は既知であるのでレイノルズ数 Re は t を実測して $\bar{u}$ がわかれば求まる．t はコラム内の液体が完全に空になるまでの時間であるとして，スラリーが管を通過する時間を実測した．その結果を表4.2に示す．表4.2によれば，管の内径が大きくなるにつれて，時間 t が次第に短くなることがわかる．水の動粘度 ν は $1.004 mm^2/s$ であるので，

表4.2　スラリー通過時間

内径　mm	通過時間　sec
0.2	155
0.28	59
0.4	22
0.6	9

tの測定値を利用して計算した$\bar{u}$を用いて，各管のレイノルズ数を計算した．その結果を図4.8示す．図4.8には，スラリーの平均流速の値も併示している．

図4.8から，管の内径が大きくなるにつれてレイノルズ数は5900～18000の範囲で直線的に増加していくことがわかる．円管内の流体の流れに関しては，内径dで平均流速$\bar{u}$とした場合の臨界レイノルズ数は約2300である．したがって，高速流動研磨の流体については，いずれの管の場合にも乱流になっていると推測される．しかし，研磨に供しているのはスラリーであり，水に砥粒を懸濁したものである．水単独の場合と動粘度は異なると考えられる．しかし，砥粒の混入率は1.7～6.3vol%と非常に小さく，スラリーの動粘度は水のみの場合と大きく違わないと考えられる．

図4.8から，砥粒の流動速度は管の内径が大きくなるにつれて大きくなるので，砥粒の運動エネルギーも管内径の増大とともに大きくなると考えられる．研磨作用の大きさは，砥粒の運動エネルギーに比例するので，内径の大きい管ほど研磨量が大きくなる．このため，内径の大きい（面粗さの大きい）管ほどパス回数の少ない段階で粗さの低減が大きくなったものと推測される．しかし，パス回数の増加とともに粗さの低減の度合が減少していくこと，また，これに及ぼす管径の影響に関しては砥粒の運動エネルギーと作用砥粒数に関してより詳細な検討が必要である．そこで，以下に述

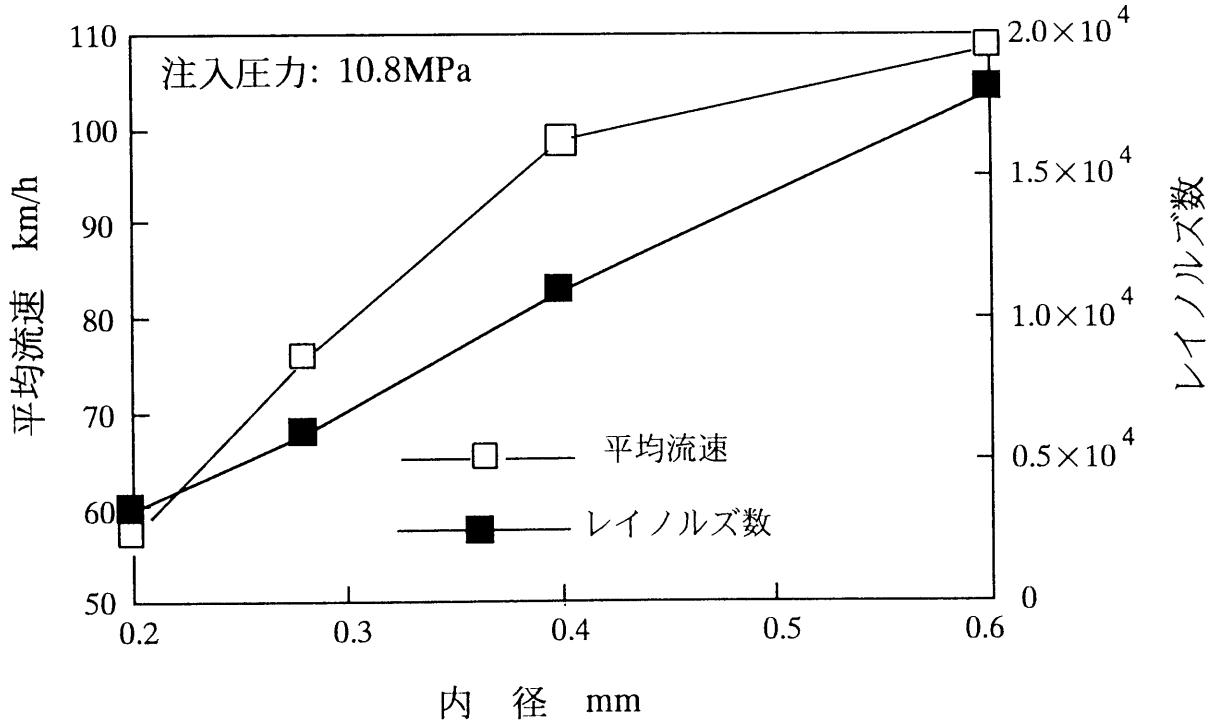


図4.8 各管のレイノルズ数および平均流速

べるような理論的検討を行った.

パス回数の増大に伴う表面粗さの低減の様態（研磨の進行状態）を解析的に検討する.研磨前の素管内壁面の微小な凹凸（表面粗さを形成）は，図4.9に示す三角形の形状（二次元表示）をした突起体の集合から形成されているとする．管内のスラリーは流体圧を受けて管軸方向に流動するがその流れは乱流となっているため，流体中に分散している砥粒は複雑な形で内壁に衝突すると考えられる．しかし，これを理論的に解析することは困難である．そこで，研磨特性の検討のために砥粒は管軸方向の流速をもって内壁面の突起に衝突し，これによって研磨がなされると仮定する．ところで，研磨に関与するのは内壁面近傍の流れであり，そこでの流速は管壁に近づくにつれ急速に減少する.

内径dの管内の流れに関して，管軸方向（x方向）の流速の管径方向（y軸方向）の分布は次式[4.7)]で与えられる．u_{max}は管軸上での流速である.

$$u_1 = u_{max}\left(\frac{y}{d/2}\right)^{1/7} \qquad (2)$$

先に実験で求めた平均流速$\bar{u}$を用いて，式(2)によって$u_1(y)$を求め*1) 図式化すると，図4.9に示すような図形になると思われる．図4.9から，yの値が大きくなる（管壁から離れるにつれて）とともに，砥粒の衝突速度も増加すると考えられる．このため，突起先端程研磨されやすいと推察される．図4.9において，砥粒の速度u_gを正確に求めることは困難なので，u_gは$\bar{u}$に等しく一定であると仮定し，先端程研磨がされ易いとして平滑化のプロセスを置き換えモデル化する．図4.9に示す三角形状突起モデルに関し，研磨の進行とともに，突起高さcが減じ，斜辺の長さaが減じていくとする．図に示す三角形の形状（二次元表示）の微視的突起体は，研磨前には斜辺（研磨面）の長さa_0，底辺（凹凸の幅）の長さb_0，高さ（最大粗さ）c_0であるとする．研磨が進行するにつれて，a_0とc_0の値は次第に減少していくことになる．なお，b_0は一定であるとし，aは，研磨進行途次の三角形の斜辺の長さ，cは高さである.

ここで，1パス目（N=1）の研磨の間に高さc_0の突起体の被研磨面に衝突する砥粒の数n(1)は砥粒濃度に比例するが，砥粒濃度は流体中で一様であると考える．次に，加

*1)平均流速$\bar{u}$に管の半径長を掛けた値は，u_{max}に比例した値となる.

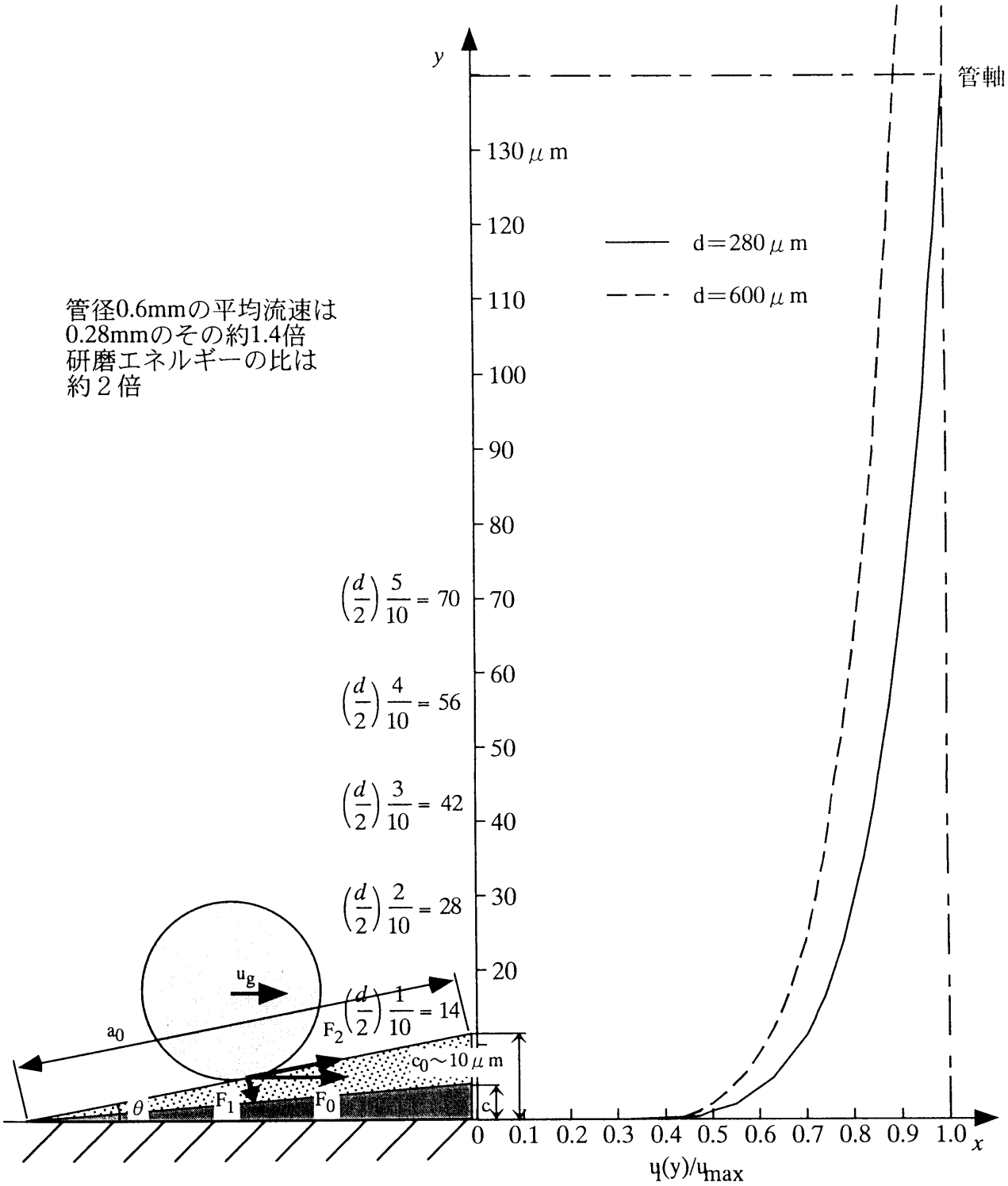


図 4.9　研磨進行状態の模式図

工の進行に伴って突起体の高さが次第に減少していく場合の衝突砥粒数について考える．研磨につれて被研磨面に衝突する砥粒数は，衝突断面積（突起高さ）に比例するとすると，突起体の高さ c のときには，研磨開始時の値に比して，c/c_0 倍となる．

先に砥粒は研磨面に対して平行に流れていると仮定したので，図 4.9 に示すような力 F_0（ベクトル表示）で壁面に衝突し研磨作用を営むと考える．ここで，力 F_0 を面に

対して垂直の成分F_1と平行な成分F_2の２つに分解し，研磨には面に垂直のF_1の成分が主として作用すると考える．F_1の値はF_0のc/a倍の大きさとなる．

次に，１パス当たりに営まれる研磨量について考える．まず，N = 1（1パス目）の研磨面に対する研磨能力P_1は，作用砥粒数と砥粒の研磨作用力との積であり，$n(1)\times(c_0/a_0)\times F_0$となるので，それは，

$$P_1 = kn(1)\times\frac{c_0}{a_0}F_0 = \frac{c_0}{a_0}F_0 \qquad (k：定数) \qquad (3)$$

で与えられる．ここで，N = 1の除去高さをあらかじめy_1と設定すると，高さy_1を除去後の突起体の高さc_1の時の研磨面に対する研磨能力P_2は次式で与えられる．

$$P_2 = kn(1)\cdot\frac{c_1}{c_0}\times\frac{c_1}{a_1}\cdot F_0 \qquad (4)$$

したがって，N = 2の時の研磨能力P_2は，初期の研磨能力に対して，
(c_1^2/a_1c_0) / (c_0/a_0) の割合となるので，N = 2のときの除去高さy_2はy_1を用いて，次式で表される．

$$y_2 = y_1\times\frac{P_1}{P_2} = y_1\times\frac{(c_1^2/a_1c_0)}{(c_0/a_0)} \qquad (5)$$

したがって，2パス後の突起体の高さは，

$$c_2 = c_1 - y_1\times\frac{(c_1^2/a_1c_0)}{(c_0/a_0)} \qquad (6)$$

で与えられる．以後，本計算を繰り返すことにより，　N = nのときの突起体の高さを求めることができ，その値は次式で与えられる．

$$c_n = c_{n-1} - y_1 \times \frac{(c_{n-1}^2 / a_{n-1} c_0)}{(c_0 / a_0)} \tag{7}$$

図4.10に計算結果を示す．計算に際しては，実験におけるRaの変化率を参照して，管径大（0.6mm）の場合y_1=0.1とし，c_0は最大高さとしてRaの4倍程度の10 μ mとした．また，θ =15°（$b_0=2\sqrt{3}$）とした．一方，管径小（0.28mm）の場合は，平均流速$\bar{u}$は，管径大（0.6mm）のそれの0.7倍であったので，研磨エネルギーの比は$(0.7)^2$倍と考えて，y_1を0.05とした．また，同様にc_0=3 μ mとした．図4.10から，パス回数を重ねるにつれて表面粗さが次第に低減していく様子がわかる．これは，図4.2に示す実験結果とも定性的に合うように思われる．

なお，本研磨法の場合，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して能率良く研磨作用を営むと推測される．

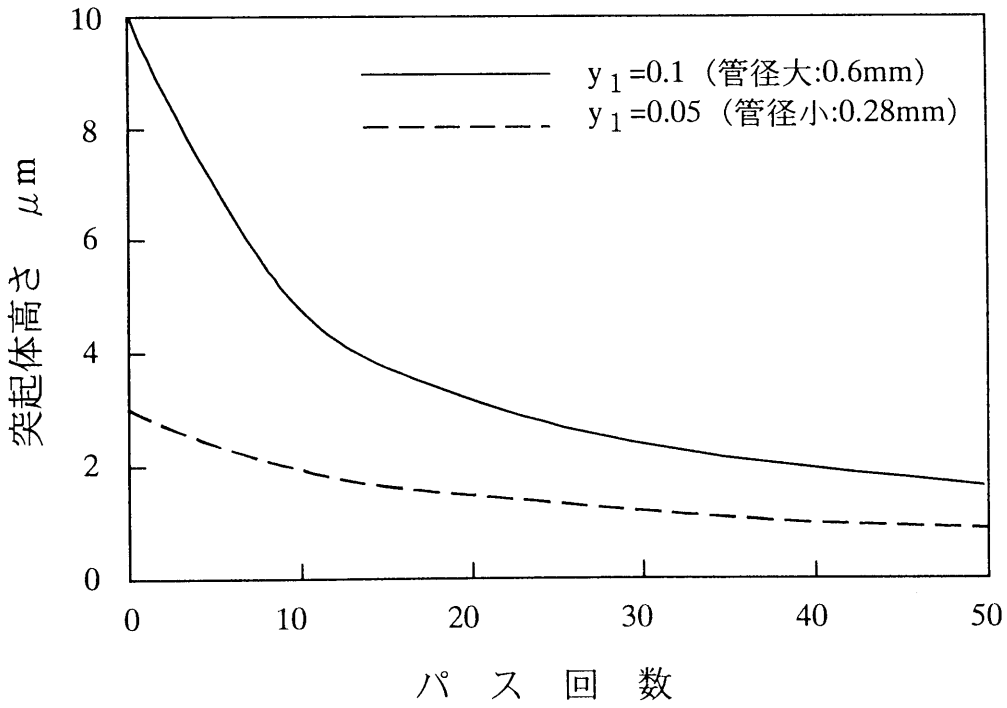


図4.10　突起体の高さ減少のシミュレーション

4．4　結　　言

各種内径の異なる極細ステンレス鋼管内壁を高速流動研磨した結果，次の結論を得た．

(1) いずれの細管の場合も，表面粗さはパス回数が増えるにつれて次第に低減していく．しかし，低減の度合は内径の大きい管の方が大きい．

(2) 砥粒濃度を増すと表面粗さは減少するが，内径0.4，0.6mmの管では減少の程度は小さく，内径0.28mm管の場合は大きい．

(3) 砥粒の平均粒径が大きくなると表面粗さは次第に小さくなる．

(4) 内径0.28，0.4mmの管の場合，表面粗さが大きくなると差圧は増加する．しかし，内径0.6mmの管では表面粗さと差圧の間に明瞭な関係は認められなかった．

(5) SEM観察の結果，素管（引抜き管）に見られるテクスチャは，パス回数の増加とともに消失していく．しかし，内径の小さい管程消失が早い．

第４章の参考文献

4.1) 田中義信，津和秀夫：精密工作法（下），共立出版，(1982) 33.

4.2) 田島　栄：表面処理ハンドブック，産業図書，(1969) 377.

4.3) 進村武男：磁気研磨法の現状と課題，機械と工具，40，5 (1996) 16.

4.4) 鴨川昭夫：実践　機械工作法，機械技術，39，5 (1991) 106.

4.5) 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.

4.6) 加藤　宏：流れの力学，丸善，(1993) 50.

4.7) 生井武文，井上雅弘：粘性流体の基礎，理工学社，(1978)185.

4.8) 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)1186.3.3)

第５章　表面粗さ低減に及ぼす二段階研磨の効果

５．１　緒　言

ＬＳＩ製造用の半導体結晶材料のシリコンウエハは，ラッピングやポリシングの磨き加工工程[5.1)]を経て作製される．先ず，シリコン原料は溶解炉で溶かされ，種結晶をその溶液に接触させてチョクラルスキー法で徐々に引き上げ所定の寸法の単結晶ロッドを造る．その後，ダイヤモンド砥粒を包埋・固定したステンレス製の回転内周刃やダイヤモンドワイヤソーを用いてロッドを薄板（ウエハ）に切断加工する．しかし，ウエハの寸法形状が一定せずバラツクのが普通で，ラッピングによる後加工で形状を整えている．その際，研磨砥粒の大きさを粗粒から細粒へと何段階かに変えて少しづつ削り込んでいく．砥粒の大きさが一定であると，その砥粒で決まる表面粗さにしかならない．

前章で述べたように，極細管内壁の研磨においてはあるパス回数の所で表面粗さが飽和してしまう現象がみられた[5.2-4)]．飽和する点の表面粗さは使用する砥粒の大きさによって決まってしまう．飽和点のパス回数を越えて研磨を続行しても表面粗さは何ら改善しない．また，図4.6等の観察結果を見てもわかる通り，管の内径に対して粒径の比較的小さい砥粒で最初から研磨を続けると，表面にうねりが発生したまま表面が研磨されていくといった問題が生じる．また，粒径の大きな砥粒を用いて研磨を行うと，うねりはあまり発生せず研磨は進行されるが，表面には，研磨の際にできた無数の引っ掻き傷が生成される．

そこで，ラッピング加工に習って表面粗さが飽和した所で，砥粒を粗粒から細粒に変えれば効果があるのではないかと考えた．原理の確認のため，ただ一回砥粒径を変えて実験を行うこととした．

表5.1　二段階研磨の実験条件

キャピラリー	SUS316L,SUS304BA
内径	0.28mm,0.4mm
長さ	500mm
砥粒	Al_2O_3
平均砥粒径 (一段階研磨)	20μm
平均砥粒径 (二段階研磨)	9.5, 4.0μm
砥粒濃度	3.44vol%
溶媒	イオン交換水
注送圧力	10.8MPa
パス回数 (一段階研磨)	20回
パス回数 (二段階研磨)	20 - 40回

5．2　実験結果

5.2.1 内径0.28mm管の研磨

Ｉ）第一段階研磨

図5.1に，内径0.28mm管の第一段階研磨（粗粒での研磨）の表面粗さとパス回数の関係を表す．実験は，平均砥粒径20，5.5，0.6μmの3種類の砥粒を使用して行った．素管（研磨前）内壁の表面粗さはRaで0.7μmである．また，1パスのスラリー流動時間は，内径0.28mmと0.4mmの場合，それぞれ59，22sec（実測）であった．研磨時間は，0.28mm管で90min（50パス）程度である．本章での流動研磨の実験条件を表5.1にまとめて示す．

図5.1から，平均粒径20および5.5μmの大きな砥粒の場合，パス回数の増加とと

もに表面粗さは急減（急減過程）するが，10パスから20パス程度にかけて漸減様態（漸減過程）に変わり．約20パスを越えると表面粗さはほぼ一定の値に収束（飽和過程）することがわかる．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して，研磨面上の突起に対する，砥粒の衝突断面積と衝突確率（頻度）が減少するためと考えられる．しかし，この点に関しては後で考察する．

図5.1において，平均粒径0.6 μ mの砥粒の場合には，表面粗さはパス回数の初期から漸減傾向を示す．これは，平均粒径0.6 μ m砥粒の場合研磨能率が小さいため，研磨面の負荷率の増加も小さいことに起因すると思われる．図5.1から，表面粗さの絶対値は平均粒径が0.6，5.5，20 μ mの順に小さくなることがわかる．

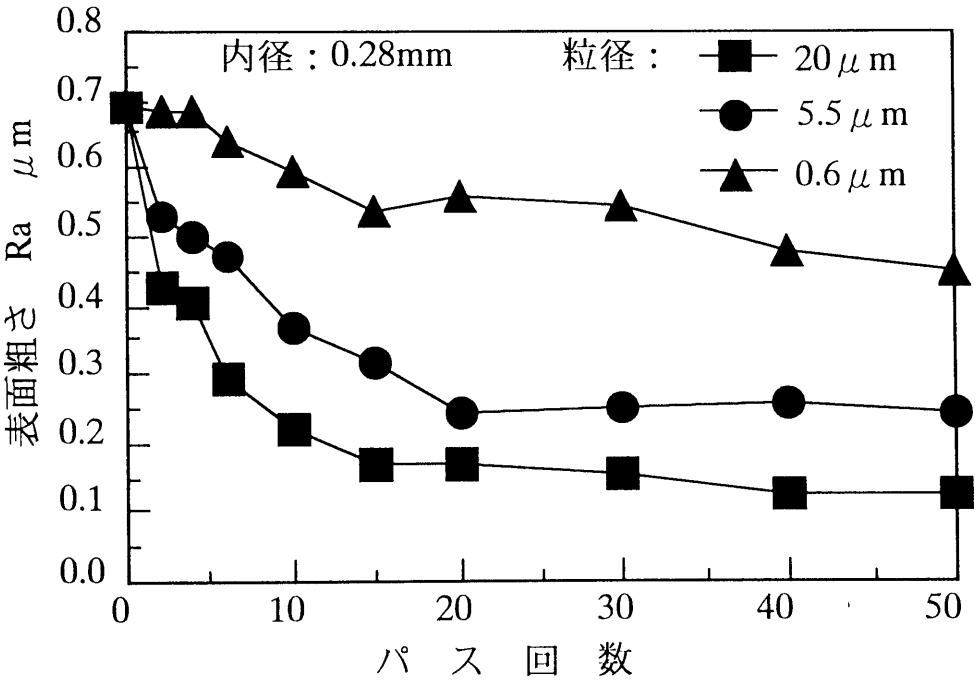


図5.1　パス回数と表面粗さの関係

Ⅱ）第二段階研磨

図5.1から，平均粒径20 μ m と5.5 μ m の場合，パス回数が20回程度を過ぎると表面粗さが飽和することがわかった．このことは，パス回数を重ねても表面粗さの改善を図ることが困難なことを物語っている．そこで，飽和したパス回数のところで第一段階の研磨を止め，カートリッジA内の砥粒（粗粒）を細粒の砥粒に交換して第二段階（細粒）の研磨を続行した．

図5.2に，二段階研磨の実験結果を示す．横軸のパス回数は，第一段階からの累積した総パス回数を表わす．平均粒径20 μ m の砥粒による20パスまでの研磨の後（第一段階），平均粒径9.5，4.0 μ m の砥粒による研磨（第二段階）を継続すると，表面粗さはパス回数の増加とともに再び減少することがわかる．本実験結果は，表面粗さの低減に二段階研磨が有効なことを示している．粗さ低減の度合いは，平均粒径9.5 μ m の砥粒の方が4.0 μ m の場合よりも大きい．図5.2から，平均粒径9.5 μ m の砥粒の場合，パス回数が約50回を過ぎると表面粗さは飽和してほぼ一定の値（0.09 μ m）になることがわかる．一方，平均粒径4.0 μ m の砥粒の場合には，パス回数が約40パスのところで一定の値（約0.13 μ m）に収束する．

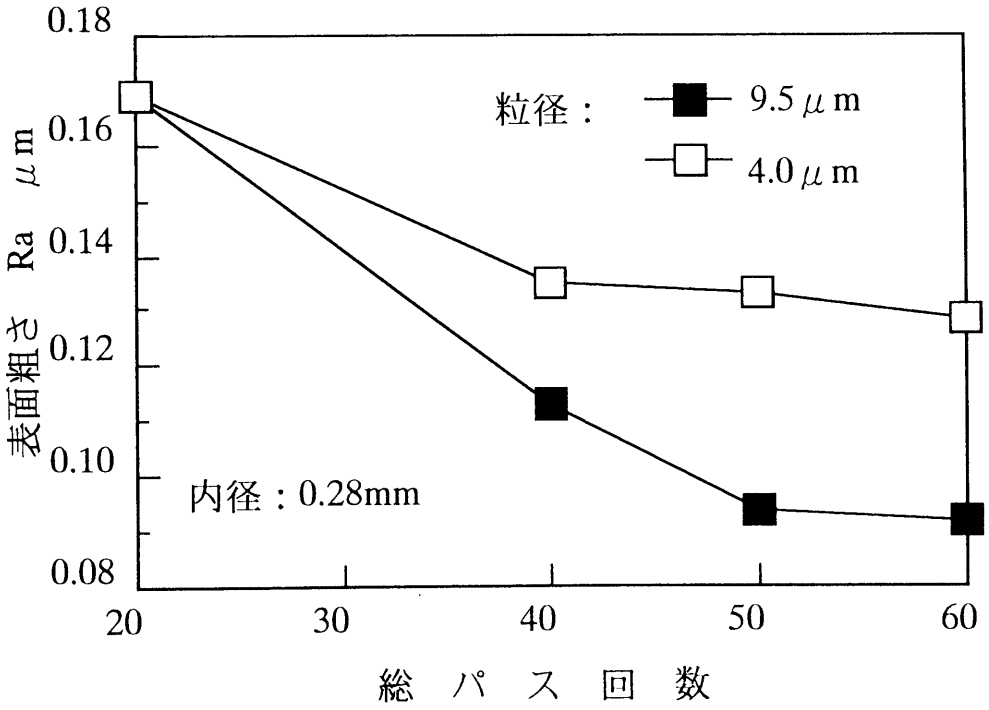


図 5.2　内径 0.28mm の細管の二段階研磨の効果

Ⅲ）研磨面の観察

図5.3の左側に，素管と第一段階研磨管（パス回数20回），第二段階研磨管（パス回数60回）の内壁面の光学顕微鏡写真を示す．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5.3から，素管内壁は引抜き管特有の光の反射も鈍い荒れた粗面であることがわかる．第一段階の研磨管の場合は，光の反射も強くなり管の内面がかなり滑らかになる様子がわかる．第二段階の研磨管の場合は，光の反射がより一層強くなり表面粗さがより低減していることを表している．

研磨面の表面性状をより詳しく調べるために管内面をSEM観察した．観察結果を図5.3の右側に示す．図5.3から，素管に見られる引抜き管特有のテクスチャは，第一段階の研磨でほぼ消失し平滑な面に仕上げられることがわかる．さらに，第二段階の研磨を施すことによって，テクスチャは完全に消失し内面は良好な平滑面となることがわかる．図5.4に，触針式粗さ計で測定した細管内壁面の表面プロフィールを示す．第一段階研磨，第二段階研磨と進むにつれて表面粗さが小さくなっていく様子がわかる．

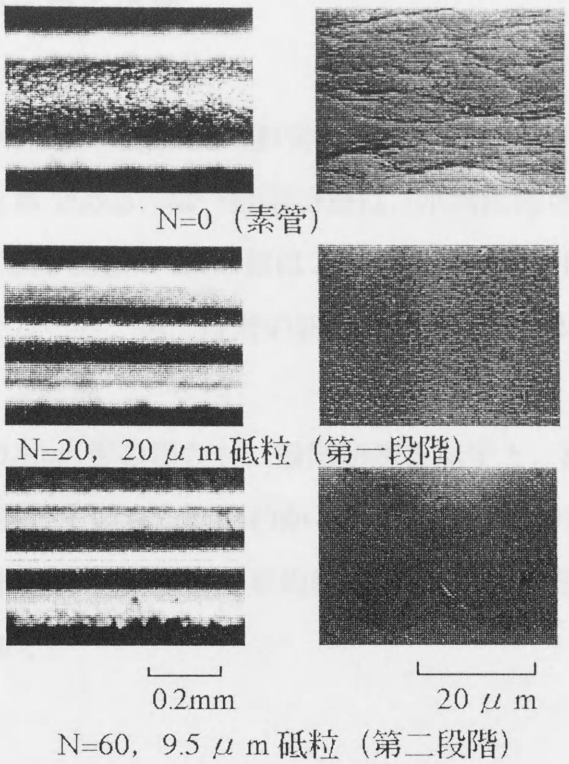


図5.3　内径0.28mmの細管の光学顕微鏡写真およびSEM写真

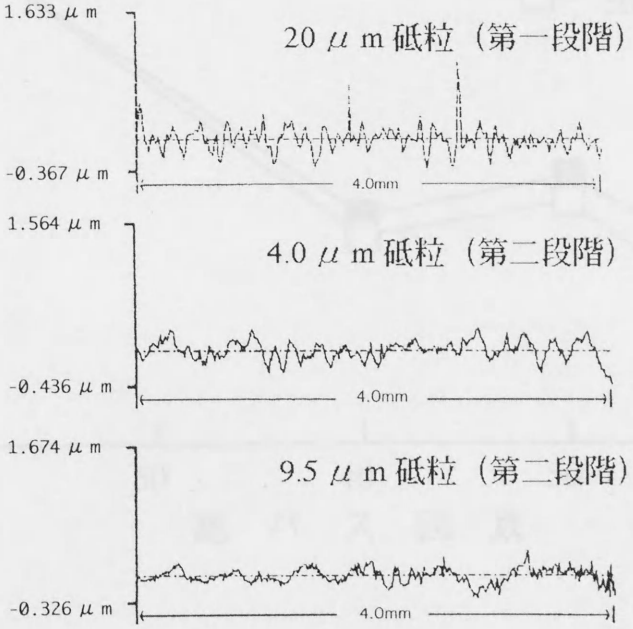


図5.4　内径0.28mmの細管内壁面の表面プロフィール

5.2.2　内径 0.4mm 管の研磨

Ｉ）二段階研磨

図5.5に，内径0.4mm管の二段階研磨の実験結果を示す．実験に供した素管の内壁面の表面粗さは2.1 μ m である．第一段階研磨は，平均粒径60 μ m の砥粒を用い砥粒濃度を3.44vol%として行った．パス回数は20回である．第一段階研磨後，管の表面粗さはRaで0.47 μ m となった．第二段階の研磨は，平均粒径20，30 μ m の砥粒を用いて行った．

図5.5から，内径0.4mm管の場合も二段階研磨を施すと，表面粗さがパス回数の増加とともに次第に低減していくことがわかる．パス回数が40回以降は，粗さの低減は幾分緩やかとなる．粗さの絶対値は，平均粒径20 μ m の砥粒の方が平均粒径30 μ m の場合に比して大きい．

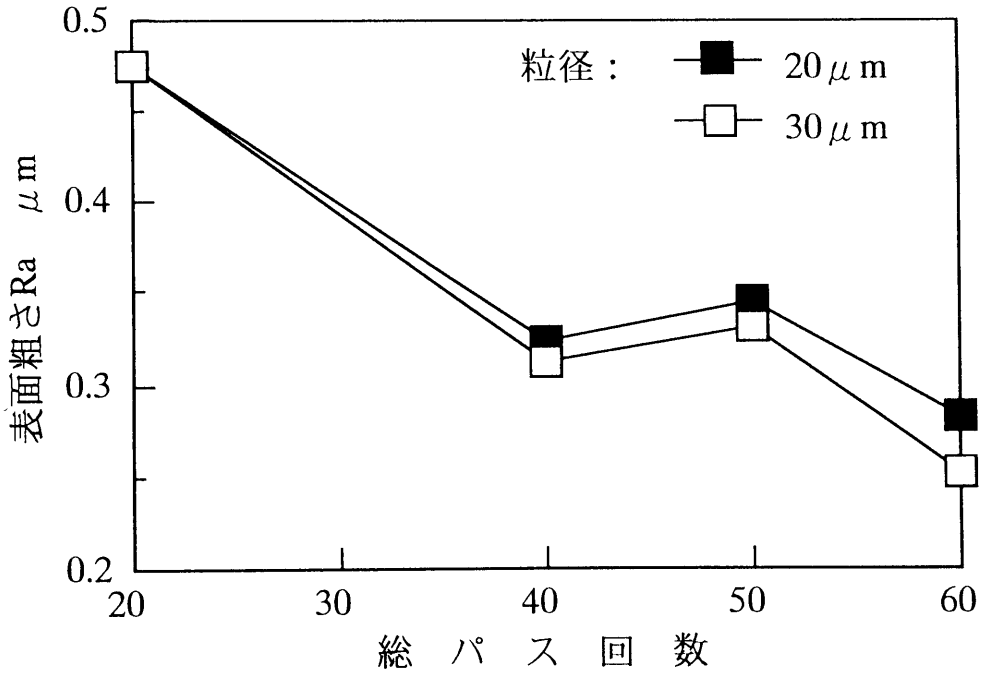


図 5.5　内径 0.4mm の細管の二段階研磨の効果

Ⅱ）研磨面の観察

図5.6に総パス回数60パス後における内壁面の光学顕微鏡写真およびSEM観察像を示す．図5.6から，第一段階後の研磨面を見ると，素管のテクスチャはほぼ消失していることがわかる．しかし，微細な凹凸がこの段階では未だ残っている．二段階研磨を施すと，その微細な凹凸もかなり低減する．内径0.28mmの管の場合と比べると，面の仕上がりは幾分劣るように思われる．これは，0.4mm管の素管の表面粗さが内径0.28mm管のそれに比してかなり大きいことが影響しているように推察される．

図5.7に，触針式粗さ計による細管内面の表面プロフィールを示す．内径0.28mmの管の場合に比して粗さが大きいことがわかる．

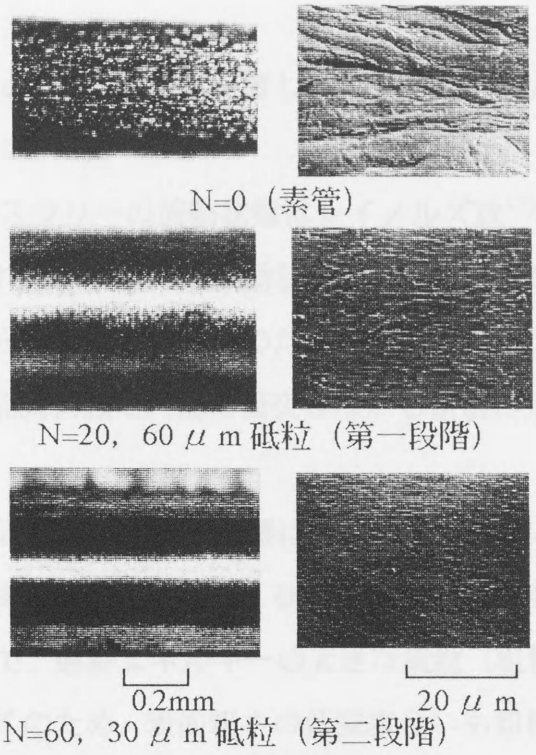


図 5.6　内径 0.4mm の細管の光学顕微鏡写真および SEM 写真

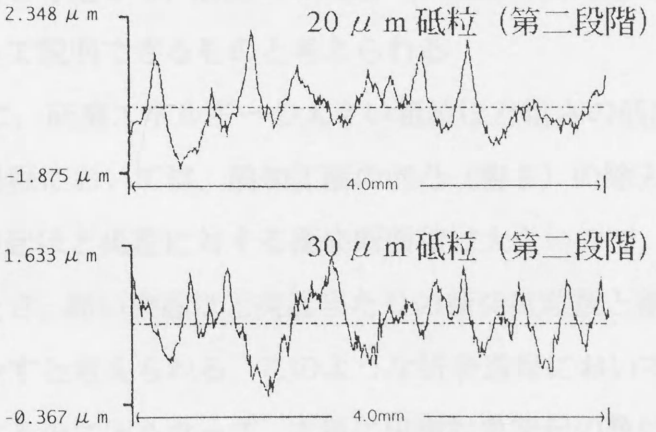


図 5.7　内径 0.4mm の細管内壁面の表面プロフィール

5.3 考　察

二段階研磨を行うと，粗さの低減に著しい効果が見られたが，以下にその理由について考えてみる．

管軸方向に流れるスラリーの流動状態はレイノルズ数[5.5]によって規定される．前章（4章）で細管内を流れるスラリーの流動状態を検討した結果，スラリーは乱流状態で流れていることが明らかになった．このため，砥粒は溶媒から静水圧と管軸方向に流体圧を受けて流れ，乱流状態で内壁に衝突しながら研磨作用を営んでいるものと推察される．

ここで，静水圧は研磨作用に直接影響は及ぼさず，研磨に関与する力は管軸方向に流れる流体圧だけであると考えられる．研磨は，砥粒の衝突とその後の引っ掻き作用によって進行するので，運動エネルギーの大きな砥粒（粗粒）の方が研磨量が大きくなると考えられる．このため，表面粗さの低減度合いも粗粒ほど大きくなるものと推量される．

図5.1に示す実験結果から明らかなように，パス回数が20回を越す辺りから表面粗さの低減は飽和する傾向を示す．これは，図5.8の模式図に示すように，表面の凹凸の幾何学的寸法形状を考慮して，壁面上の突起への砥粒の衝突確率および衝突断面積を考えることによって説明できるものと考えられる．

上述したように，研磨エネルギーの大きい粗粒ほど粗さの低減が大きいことから，本研磨法の研磨過程においては，前加工面の凹凸（粗さ）の除去過程が主であると考えられる．高い突起ほど砥粒に対する衝突断面積は大きいので，一定濃度の砥粒が一様に流れているとき，高い突起ほど突起当たりの衝突砥粒数と衝突確率が大きくなり研磨作用も受けやすと考えられる．このような研磨過程においては，研磨によって突起の高さが減少するのにともなって，次第に研磨対象突起の数は増加してくることになる（負荷率の増大）．このことは，突起当たりの衝突砥粒数の減少（衝突頻度，つまり衝突確率の減少）に相当する．また，研磨の進行とともに突起高さが減少するとき，個々の突起の衝突断面積も減少してくる．したがって，突起への衝突砥粒数が減少して研磨効率が低下するので粗さの低減は次第に緩やかになるものと考えられる．このとき，研磨能が大きい粗粒ほど，粗さの低減が大きく，また，飽和する粗さは小さく

なるが，突起高さのばらつきの大きい（高さ分布の広い）面（図5.8（b））が創成されるものと考えられる．

一方，第一段階研磨を細粒で行った場合には，粗さの飽和時点において，突起が細粒に対して十分な衝突断面積を有するとしても，砥粒の研磨能が小さいため，研磨の進行にともなう負荷率増加の効果が大きく影響して研磨の進行がやはり緩やかになり，このため粗さが飽和するものと考えられる．また，細粒の研磨能は小さいので，粗粒の場合に比して一段階研磨面の粗さは大きいが，突起高さの比較的そろった（高さ分布が狭い），つまり負荷率の大きい面（図5.8（a））が創成されるものと考えられる．

以上のことを考慮して，二段階研磨による粗さの一層の低減についてはつぎのように考えることができる．粗粒による第一段階研磨における粗さの飽和時点では，粗粒の研磨能が十分大きいとしても粗粒に対する衝突断面積が十分小さくなった面状態（図

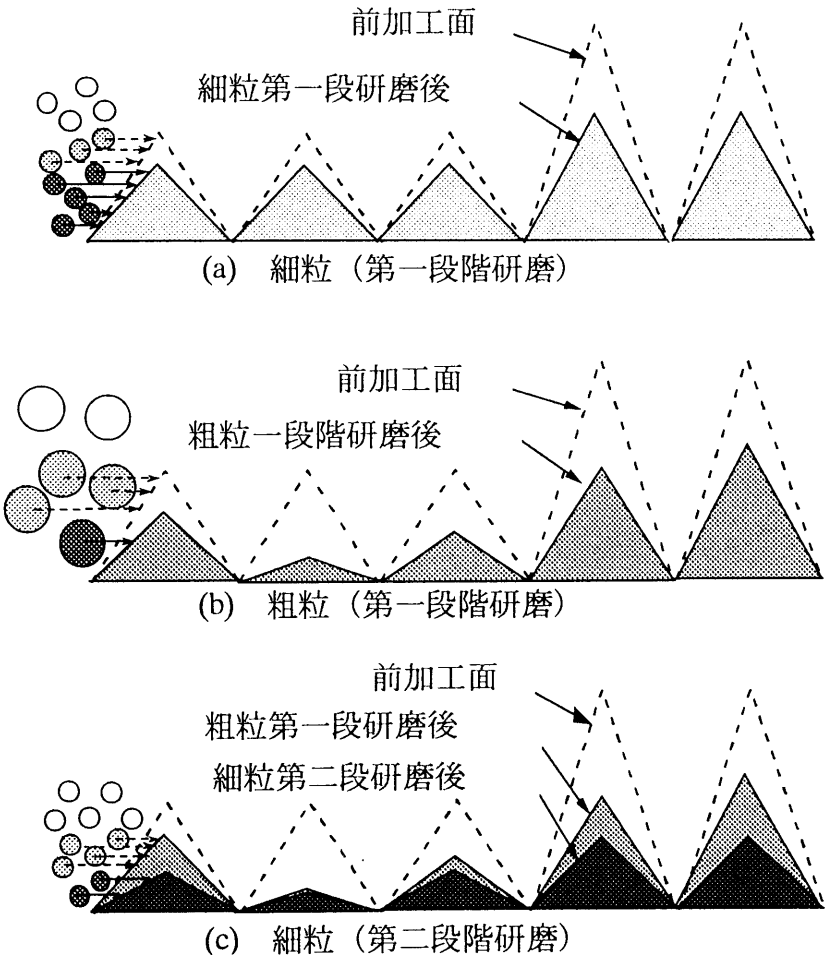


図5.8　研磨過程における砥粒衝突過程のモデル

5.8 (b)) である．しかし，第二段階研磨の細粒に対してはまだ十分大きな衝突断面積を有する粗面（図5.8 (c)）であると考えられる．さらに，粗粒による第一段階研磨の飽和した面に関しては，上述のように細粒に対しては負荷率の十分小さい面になっていると考えられる．これらのため，粗粒による第一段研磨に続いて細粒による第二段研磨を行うと粗さがさらに低減するものと考えられる．なお，図5.8において第二段階研磨でも砥粒径の小さい4.0 μm の場合に飽和傾向が認められるとともに，粗さは粒径の大きい9.5 μm 径砥粒よりも大きくなっている．このことは砥粒の研磨能が小さいために負荷率増大の影響が大きく現われたことによるものと考えられる．

5．4　結　　言

スラリーの高速流動研磨法を用いて極細ステンレス鋼管内壁の二段階研磨を行い次の結論を得た．

(1) 表面粗さが飽和するパス回数（第一段階研磨過程）のところで，砥粒を粗粒から細粒に変えて研磨（第二段階研磨）したところ，さらに表面粗さが低減した．

(2) 内径0.28, 0.4mmのいずれの管も，二段階研磨を施すと表面粗さは一層低減することが明らかになった．

(3) 二段階研磨過程にあっても，使用砥粒が大きい方が面粗さは小さくなる．

(4) SEM 観察の結果，二段階研磨面は一段階研磨面よりも一層平滑な面に創成されることがわかった．

第５章の参考文献

5.1) 谷口紀男：材料と加工，共立出版, (1974) 1.

5.2) 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１報)―研磨の基本特性―，精密工学会誌，64，1(1998)126.

5.3) T.Kurobe,Y.Yamada,K.Yamamoto and T.Miura : High Speed Slurry Flow Finishing of Inner Wall of Stainless Steel Capilary, Int.J.Japan Soc.Prec.Eng., Vol.32,No.1 (Mar.1998) 39.

5.4) 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.

5.5) 加藤　宏：流れの力学，丸善, (1993) 50.

5.6) 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―表面粗さ低減における二段階研磨の効果―, 砥粒加工学会誌, (掲載決定).

第6章　注送圧力の影響

6．1　緒　言

遊離砥粒を用いて硬脆性材料に研磨加工を施す場合，加工圧力は重要な制御パラメータの一つと考えられている．事実，加工圧力が高くなると単位時間当たりに除去される研磨体積も多くなる．しかし，加工圧力が過度に高くなると材料にマイクロクラックを誘起したり，圧縮残留応力を材料内部に発生させたりもする．このため，砥粒の大きさを考慮して最適な加工圧を経験的に選定している場合が多い．条件を限定すれば加工圧と除去体積の関係を理論的に求めることもできる．

高速流動研磨法の場合，砥粒を保持しているのは流体であるので，研磨圧力を砥粒に付与するのも流体を介して行うほかない．加工圧力を高めるにはスラリーの流動速度を大きくすることが効果的と思われる．これまでの実験は，スラリーを被研磨管に注送する圧力を一定[6.1-4)]としたものであり，その圧力を高くしたり低くしたりした場合に，どのような効果が現れるのか検討する必要があると考えられる．

表6.1　実験条件

キャピラリー	SUS304BA
内径	0.28～ 0.6mm
長さ	500mm
砥粒	Al_2O_3
平均砥粒径	20～ 60 μm
砥粒濃度	3.44vol%
溶媒	イオン交換水
注送圧力	4.9～12.7MPa
パス回数	2 - 20 回

6．2　実験結果

Ｉ）パス回数と表面粗さ

実験は，内径の異なる3種類の細管(内径0.28mm，0.4mm，0.6mm)を使用して行った．研磨の進捗状態を調べるため，パス回数を，0，2，4，6，8，10回と種々変えて実験を行った．実験条件を表6.1に示す．

図6.1に，内径0.28mmの管のパス回数と表面粗さの関係を示す．図6.1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，表面粗さはパス回数の増加とともに似た形で次第に減少することがわかる．パス回数が2回目から顕著な変化が現れ，注送圧力が大きいほど表面粗さの低減度合が大きいことがわかる．これは，管内を流れるスラリーの流速が注送圧力が大きいほど大きく，壁面に衝突する作用砥粒数が増し研磨を営む能力が大きくなるためではないかと考えられる．このことが要因して，パス回数が少ない段階から粗さの低減が顕著になったものと思われる．

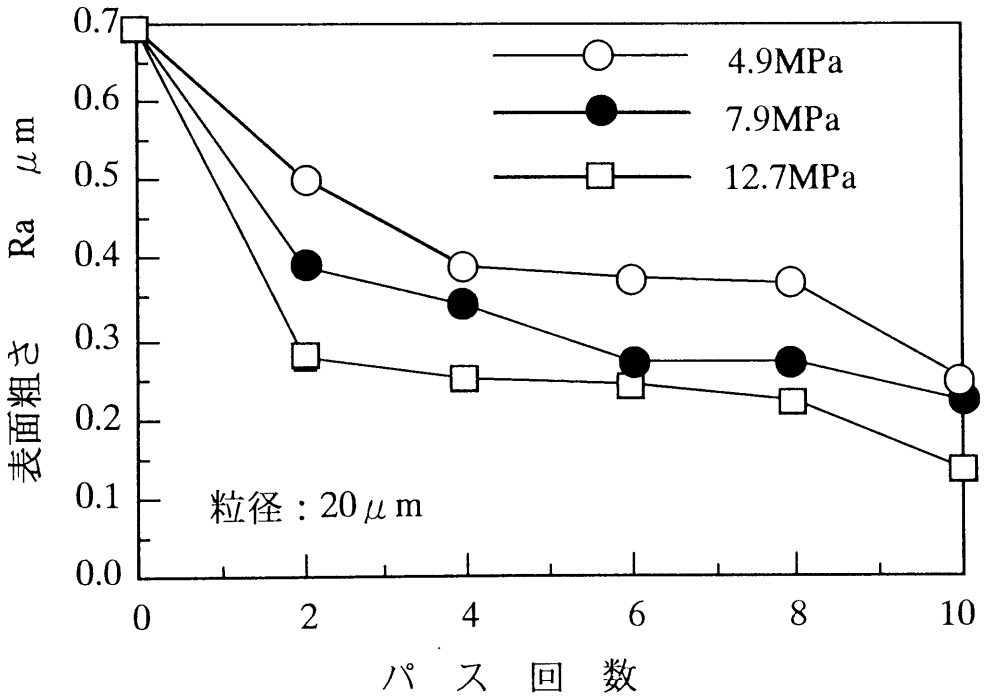


図6.1　パス回数と表面粗さの関係（φ 0.28mm）

同様の実験を，内径0.4mm，0.6mm管についてパス回数20回まで行った．その結果を図6.2，図6.3に示す．図6.2から，内径0.4mmの管の場合は，内径0.28mm管と同様の粗さの低減様態を示すことがわかる．一方，図6.3に示す内径0.6mm管の場合は，内径0.28mm，0.4mm管の場合とは幾分異なった様相を示す．0.6mm管の場合，パス回数の増加に伴って表面粗さは急減する．研磨圧力の影響は，５回以上のパス回数になるとほとんどなくなることがわかる．これは，内径0.6mmの管は，内径0.28mm，0.4mmの管に対して，断面積が大きく同じ注送圧力の場合流速が大幅に大きくなり，それに伴って研磨圧力も大きくなるためと思われる．また，使用砥粒も平均粒径で60μmと大きいことも原因してこのような結果が得られたものと考えられる．

Ⅱ）研磨面の観察

光学顕微鏡を用いて研磨面を観察した結果を図6.4に示す．図6.4(a), (b)は，粒径20μmのアルミナ砥粒を用い，スラリーの注送圧力を4.9，7.9，12.7MPa．パス回数を10回，として研磨した場合の内径0.28mm，0.4mm管の観察結果を表す．また，図6.4(c)には内径0.6mm管の観察結果を示す．この場合，砥粒は60μm径のものを用いた．いずれの図にも触針式粗さ計で測定した粗さのプロフィールも併記している．

図6.4から，内径0.28mm，0.4mm，0.4mm管のいずれの素管内壁面も引き抜き管特有の荒れた粗面になっていることがわかる．光の反射も鈍い．表面粗さのプロフィールを見ると，管径が大きくなるにつれ内壁面の荒れが大きいことがわかる．このよな素管に高速流動研磨を行い，パス回数を10回程度施すと，面が著しく滑らかになることが図6.4からわかる．また，注送圧力が大きいほど滑らかになる度合いが大きいといえる．

図6.5に，各管の内壁面をSEM観察した結果を示す．いずれの管もパス回数を10回繰り返すと素面のテクスチャがほぼ消えることがわかる．しかし，管径が大きいほど完全には消えずその模様が幾分残っている．

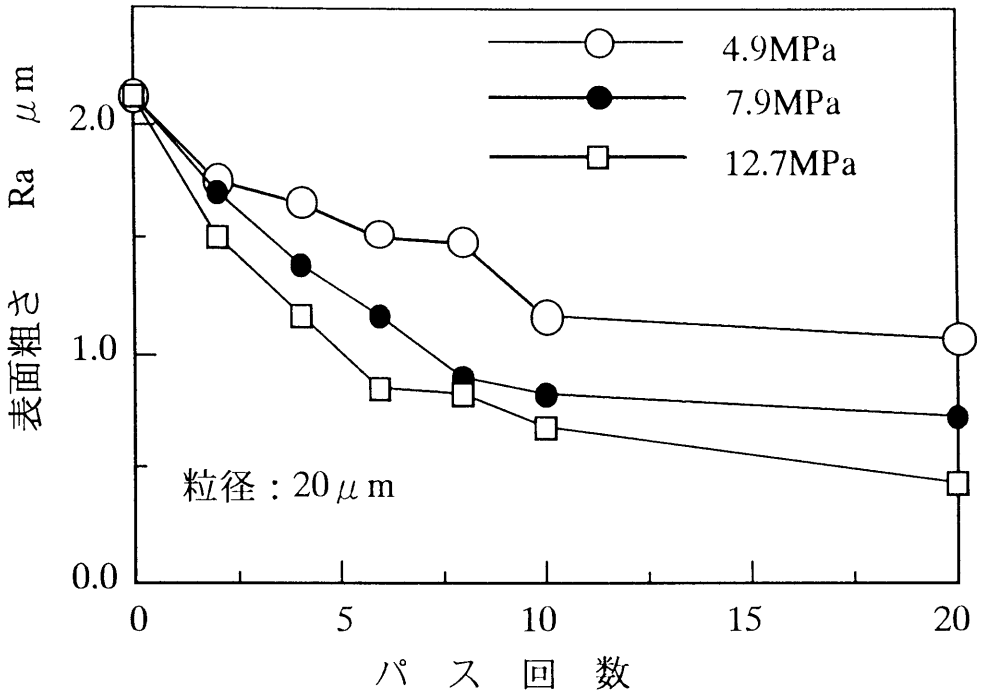


図 6.2　パス回数と表面粗さの関係（φ 0.4mm）

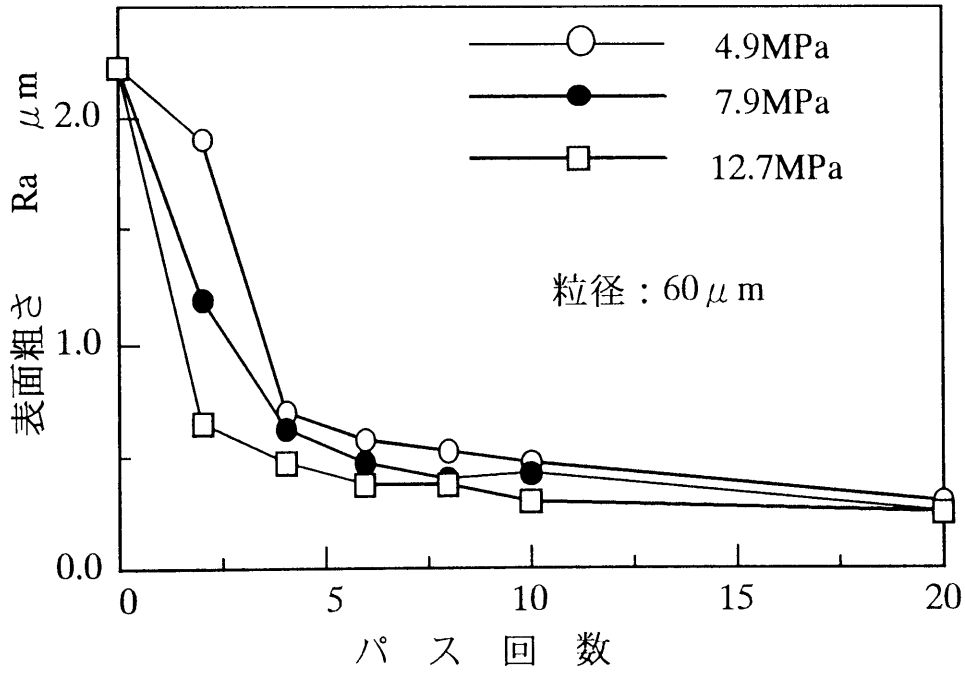


図 6.3　パス回数と表面粗さの関係（φ 0.6mm）

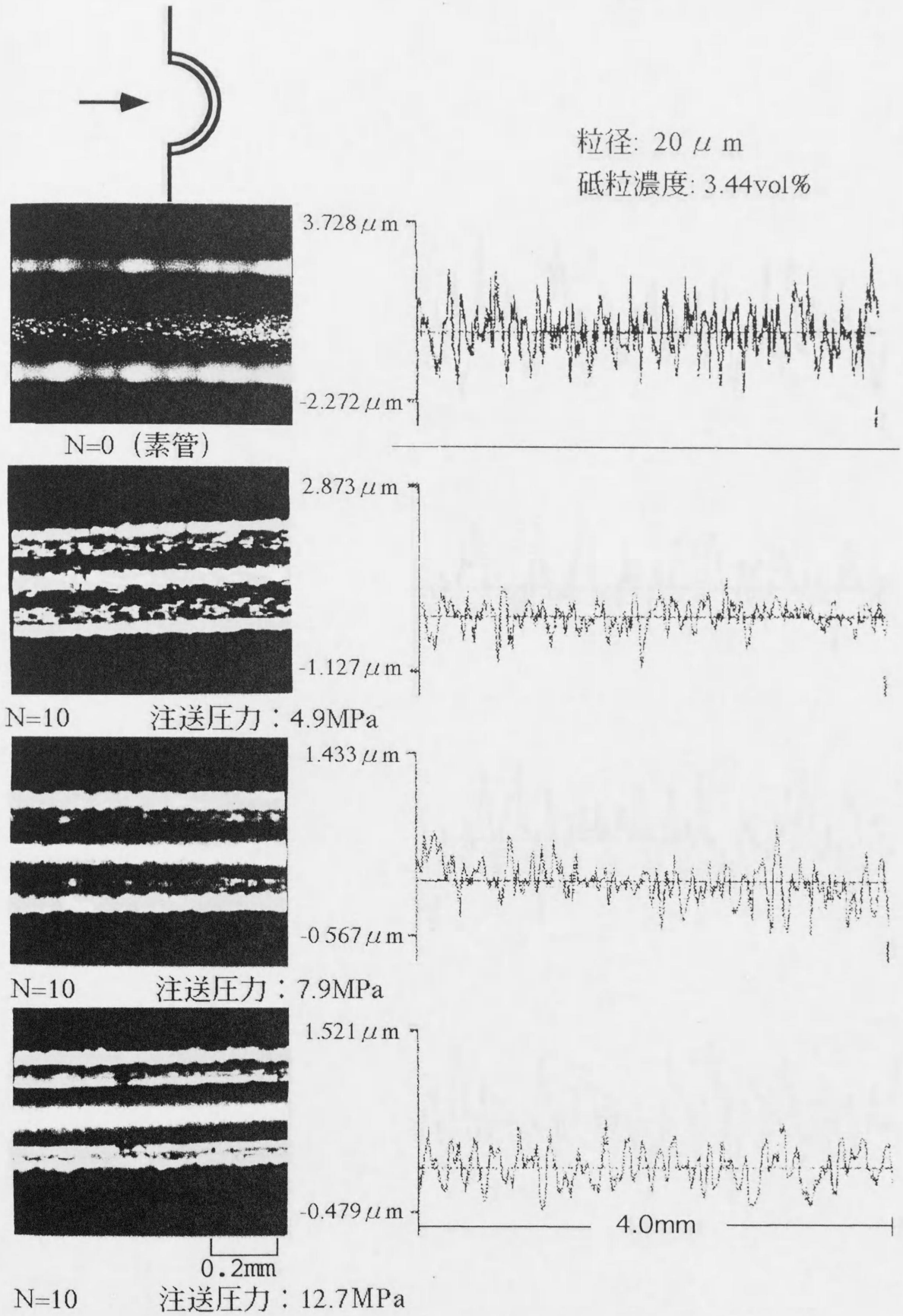


図6.4(a)　内径0.28mmの細管の光学顕微鏡による観察
および表面プロフィール

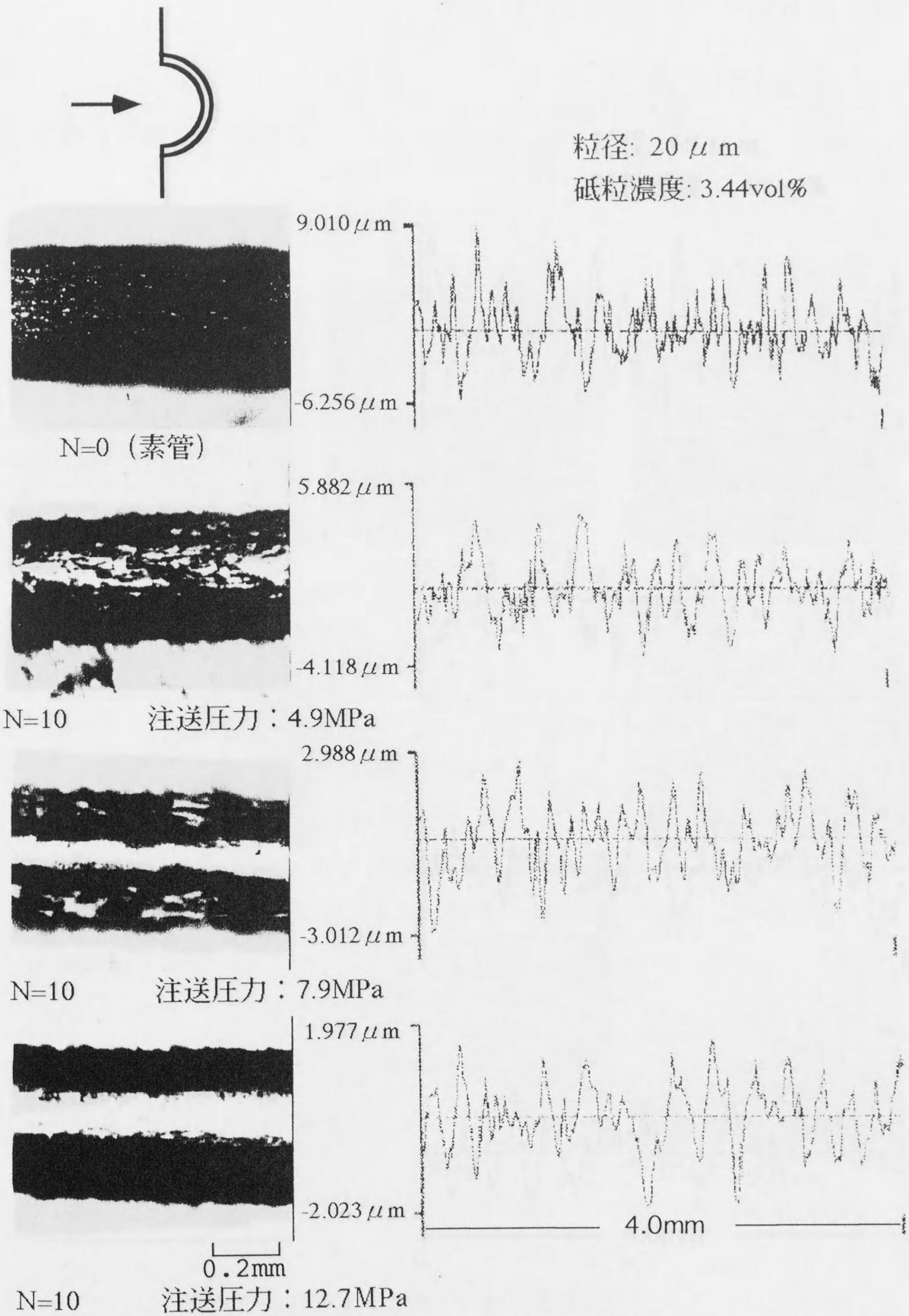


図 6.4(b)　内径 0.4mm の細管の光学顕微鏡による観察
および表面プロフィール

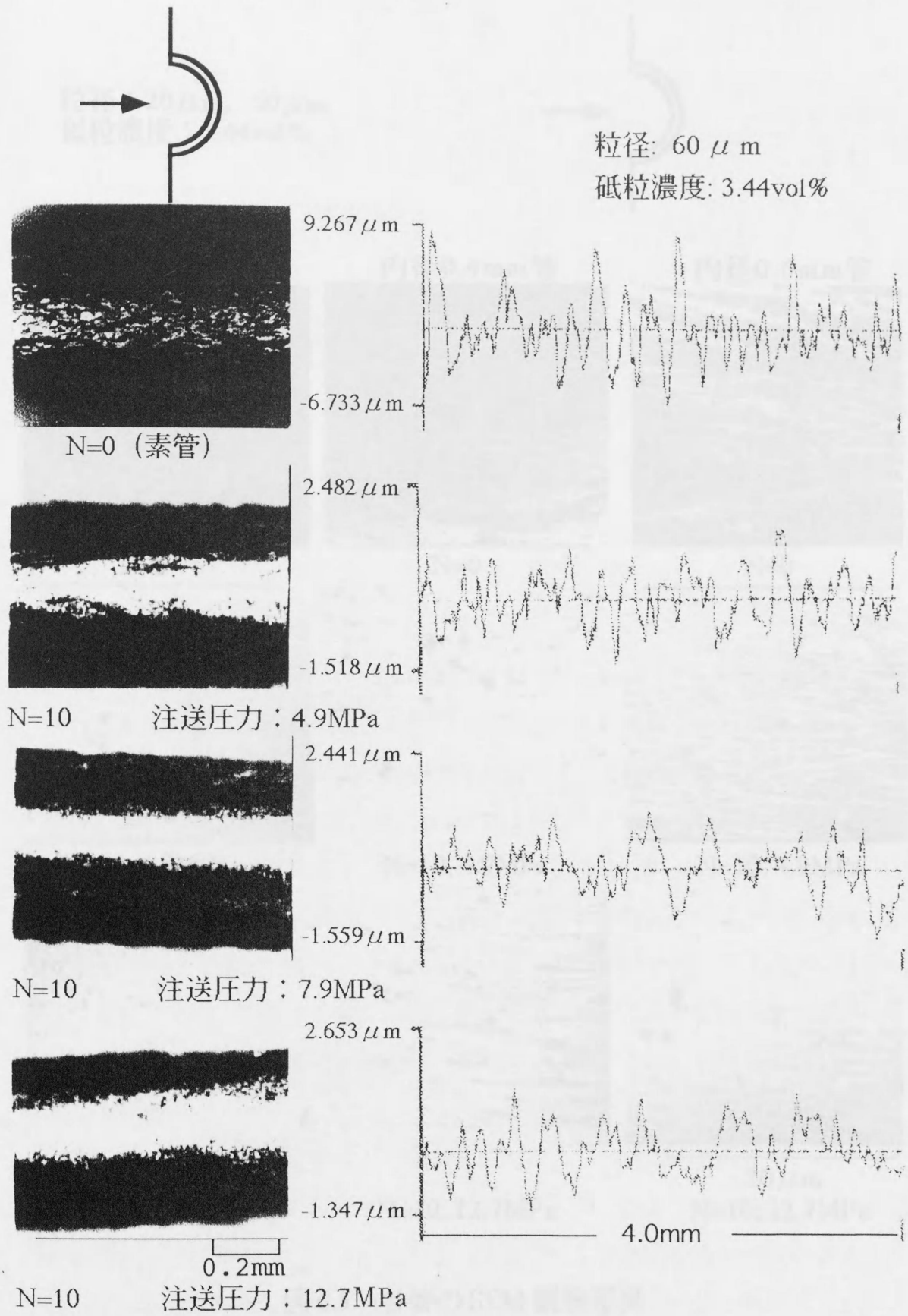


図 6.4(c)　内径 0.6mm の細管の光学顕微鏡による観察
および表面プロフィール

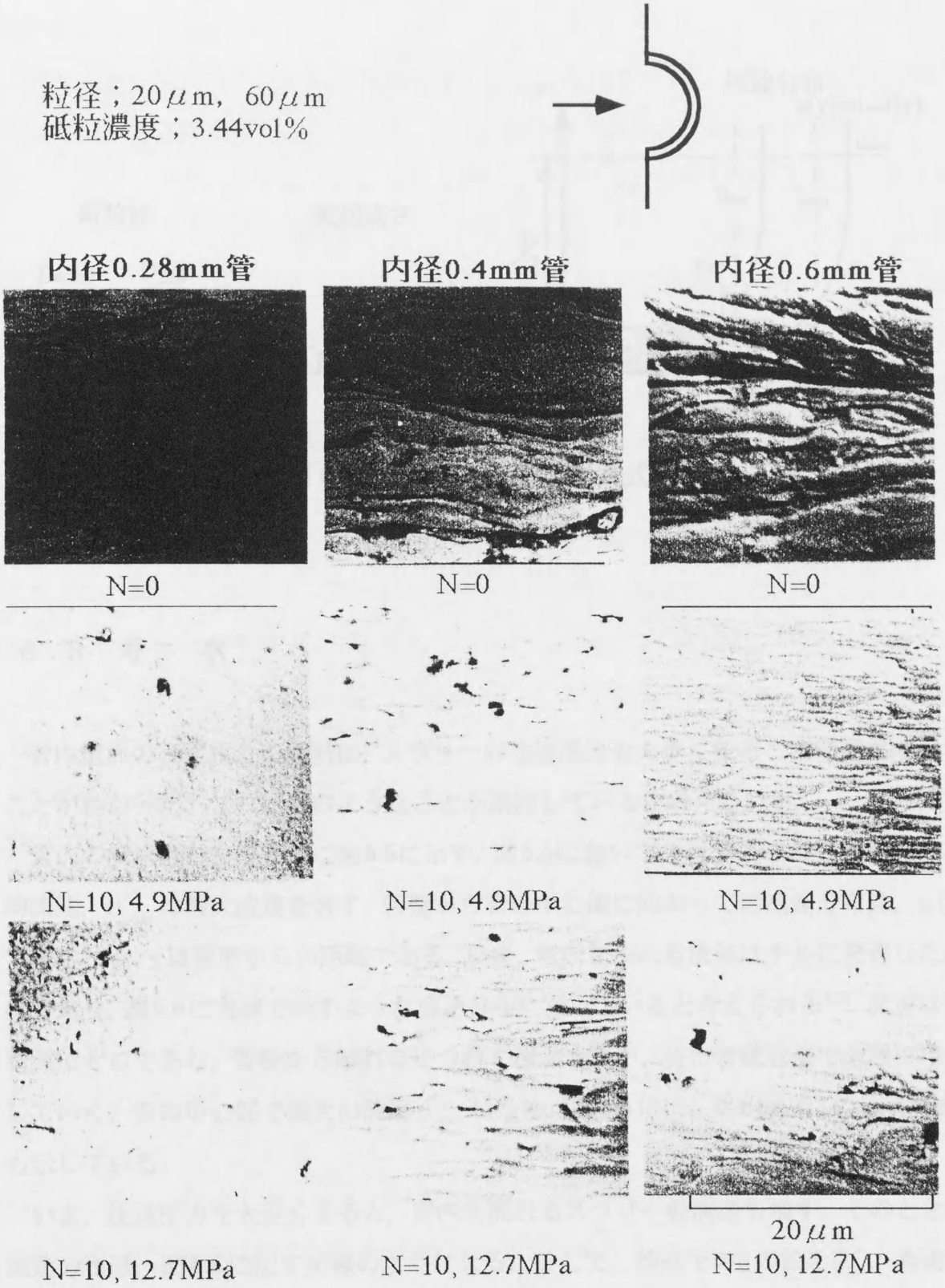


図6.5　各管のSEM観察写真

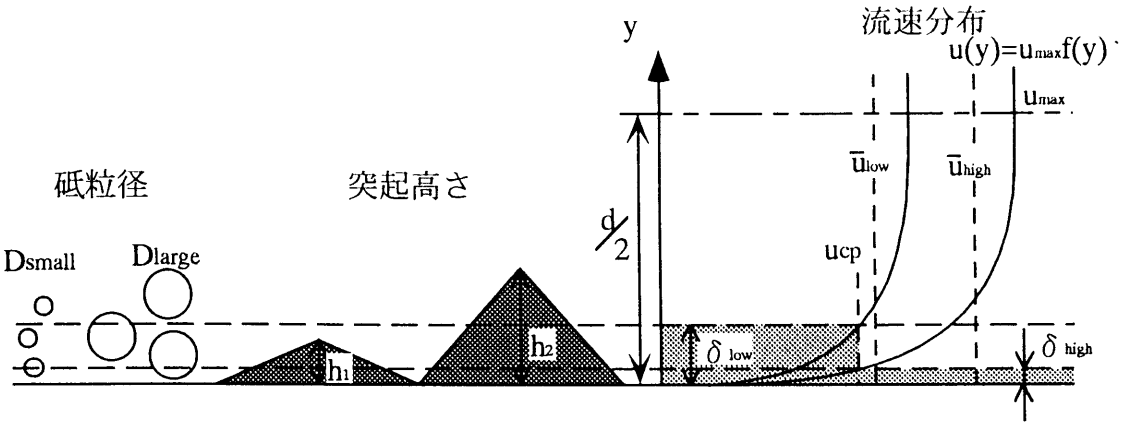


図 6.6　管内の流速分布模式図

6．3　考　　察

管内壁面の表面粗さの低減に，スラリーの注送圧力を大きくすることは効果があることがわかった．これは次のようなことが原因していると考えられる．

管内の流速分布を模式的に図6.6に示す．図6.6において，$\bar{u}$は管内を流れる流体の平均流速，u_{max}は最大流速を表す．管壁から管の中心部に向かっての流速分布は，u(y)で表される．yは管壁からの距離である．いま，管内を流れる流体は十分に発達した流れであり，図6.6に実線で示すような流速分布になっていると考えられる[6.5]．流速は管壁面でゼロであり，管壁から離れるにつれて増加するが，特に管壁近傍で急激に増加していく．管の中心部で最大の流速u_{max}になる．図6.6には，平均流速$\bar{u}$の値（点線）も示している．

いま，注送圧力を大きくすると，管内を流れるスラリーの流速も増す．そのときの流速分布は，図6.6に記す実線のようになる．ここで，低速での$\bar{u}$の値を$\bar{u}_{low}$，高速でのそれを$\bar{u}_{high}$と記すと，$\bar{u}_{high} > \bar{u}_{low}$となる．研磨は，主に壁面近傍の流れによると考えられ，かつ有効な研磨がなされるためには，ある程度以上の流速（砥粒速度）が必要である．研磨の臨界速度をu_{cp}とすれば，壁面近傍で研磨に寄与しない流体層（壁面層厚δ）については，$\delta_{low} > \delta_{high}$である．したがって，流速が大きい程研磨に関与する

流体層は厚くなる.

実験に供しているステンレス極細管は，引き抜き加工によって造られているので，内壁面の面粗さは内径によって決まったものになる．内径が大きいほど面粗さは大きい．このような粗い面をもった管を研磨する場合，溶媒に懸濁している砥粒の運動エネルギーを大きくすることが望ましい．このためには，流速を大きくすることが効果的であるといえる．その際，研磨効率の向上を図るには，図6.6にモデル的に示した様に，流速分布と面の粗さ（微細な凹凸）を考慮し，溶媒に懸濁する砥粒の大きさを推計する必要があると思われる．粗さを凸部の山で表記すると，その山の高さと壁面層厚δの値を顧慮に入れて，最適な砥粒径を推計する必要があると思われる．

管内壁の研磨に流速を大きくすることは表面粗さの低減に非常に効果があることが確認された．しかしながら，流速を大きくすると管の接続部から流体が漏洩する危険性が増し，また，ステンレス製のカートリッジが膨張し破壊応力に達しき裂が入ることもある．注送圧力をむやみに大きくすることは同時に装置に過大な負荷を与えることになる．これは，本研究の目的である，低コストで容易に研磨する点に反するものである．このため，むやみに流速を増すことはできない．許される範囲内で大きな流速にするのが望ましい．

6．4　結　　言

ステンレス極細管内に注送するスラリーの注送圧力を変化させた場合，どのような効果が現れるのか実験的検討を行った．その結果，次のような結論が得られた．

(1) 研磨管に注送するスラリーの圧力が高くなるにつれて，内壁の表面粗さの低減度合いは大きくなる．

(2) パス回数が約10回過ぎる辺りで表面粗さはほぼ一定になる．

(3) 表面観察の結果，素管内壁面の微細凹凸模様（テクスチャ）は，注送圧力が大きいほど早く消失することが明らかとなった．

第 6 章の参考文献

6.1) 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.

6.2) T.Kurobe,Y.Yamada,K.Yamamoto and T.Miura : High Speed Slurry Flow Finishing of Inner Wall of Stainless Steel Capilary, Int.J.Japan Soc.Prec.Eng., Vol.32,No.1 (Mar.1998) 39.

6.3) 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.

6.4) 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—表面粗さ低減における二段階研磨の効果—, 砥粒加工学会誌, (掲載決定).

6.5) 生井武文，井上雅弘：粘性流体の基礎，理工学社，(1978)185.

第７章　ガラスビーズ添加の効果

７.１　緒　言

半導体結晶材料やレンズ等の光学材料の研磨は，遊離砥粒を用いるラッピングやポリシングによって行われる．その場合，加工物（ワークと呼ばれる）とラップ盤，ワークとポリシングパッド，との間に砥粒を散布して研磨する乾式研磨法があるが，それは特殊な場合に限られる．一般には，砥粒を溶媒中に懸濁させて，その混合溶液（スラリー）をワークと研磨盤の間に流して湿式法で研磨する場合が一般である．砥粒は，液中でラップ工具やポリシャに支持された状態でワークに対して研磨作用を行う．

一方，極細管の内壁研磨[7.1-4)]の場合，平面研磨の場合のように，ラップ工具やポリシャを管内に挿入して磨くことは不可能である．スラリー高速研磨の場合，砥粒を支持するのは流体のみである．このため，研磨を制御する制御因子は極めて限られたものになる．そこで，加工効率の一層の向上を図るには何らかの工夫が必要となる．砂鉄と荒い砂を水中に投入・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[7.5)]がある．同文献では，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と記されている．

本研究に触発されて，溶媒に砥粒を懸濁したスラリーの中に，砥粒径よりも大きなガラスビーズを混入すると，研磨作用が促進されるのではないかと考えた．そして，球状のガラスビーズを用いて実験的検討を行った．

7．2　実験結果

7.2.1　加工条件

第4章において，各種内径の異なる細管について研磨実験を行ったが，内径が0.4, 0.6mmといった比較的大きな管に関しては，砥粒の粒径が20μmと小さい場合には必ずしも表面が平滑にならないことが光学顕微鏡観察からわかった．しかし，粒径の大きな砥粒を用いて研磨を行った場合には，20回程度のパス回数で管内面のテクスチャはほぼ消える．

しかしながら，図7.1に示すSEM写真からも明らかなように，粗砥で研磨した場合には，一般に研磨面には大きな引掻き痕が見られる．このため，本研磨管をガスの配管材として用いた場合不具合が生じる．すなわち，ガスが残留したり不純物粒子が付着する恐れがある．

そこで，本実験では比較的粒径の小さい砥粒を用いながら効率良く研磨を行うために，スラリーの中にガラスビーズを添加して実験を行ってみた．実験は，同じ粒径の砥粒を用いた場合についても行い，研磨効率について比較を行った．本章での実験条件を表7.1に示す．

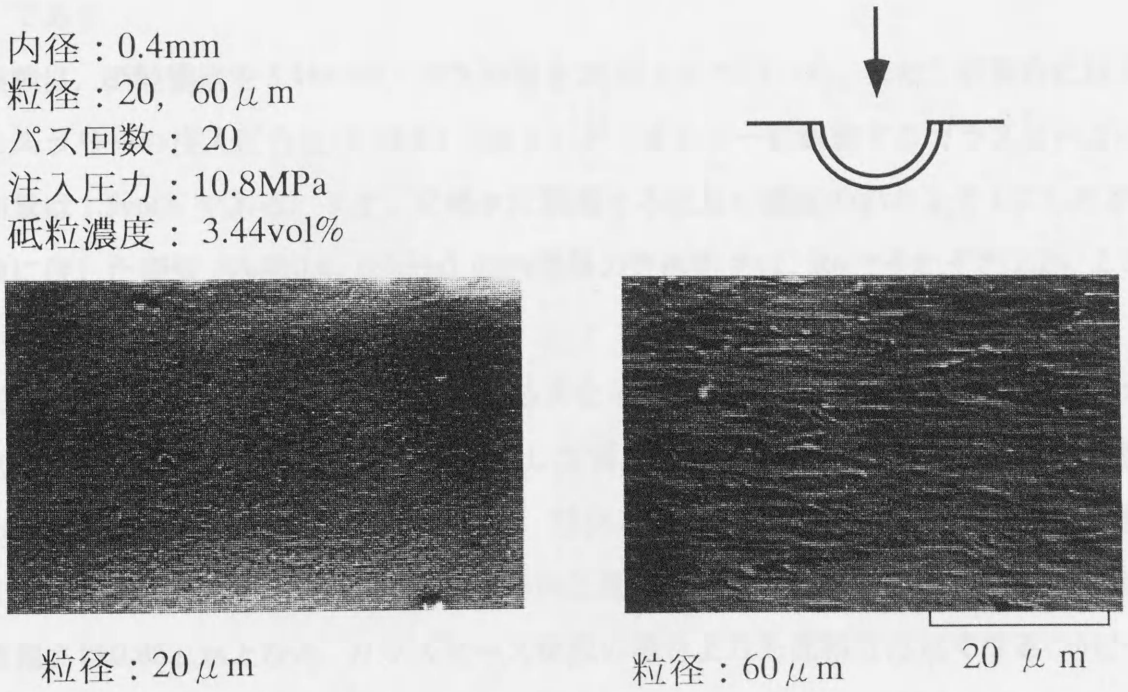


図7.1　内面状態の比較

表7.1　実験条件

キャピラリー	SUS304BA
内径	0.4, 0.6mm
長さ	500mm
砥粒	Al_2O_3
平均砥粒径	20, 30, 48, 60 μm
砥粒濃度	3.44vol%
ガラスビーズ径	0.063 - 0.088 mm ϕ
ガラスビーズ添加量	1, 3, 5g
溶媒	イオン交換水
注送圧力	10.8MPa
パス回数	2 - 20 回

7.2.2 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)スラリーにガラスビーズを添加したビーズ入りスラリーを研磨媒体として研磨，である．

実験は，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．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7.2に，内径が0.4mmの細管の実験結果を示す．図7.2から，a)イオン交換水にガラスビーズを添加した溶媒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，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7.3に内径0.6mmの細管の実験結果を示す．図7.3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．

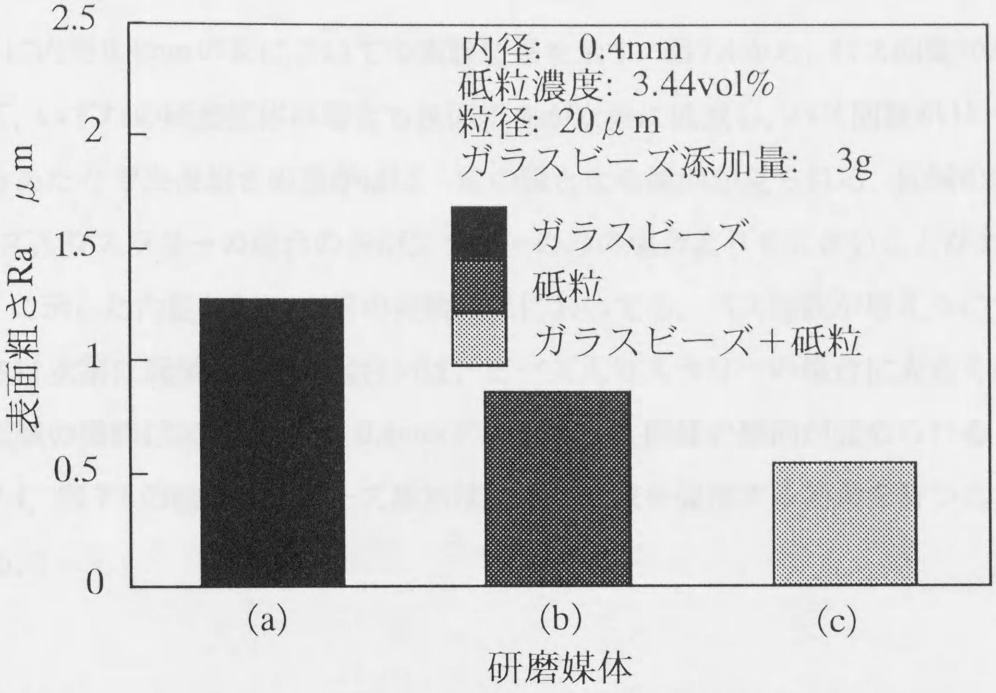


図 7.2　内径 0.4mm 細管内壁の研磨媒体と表面粗さの関係

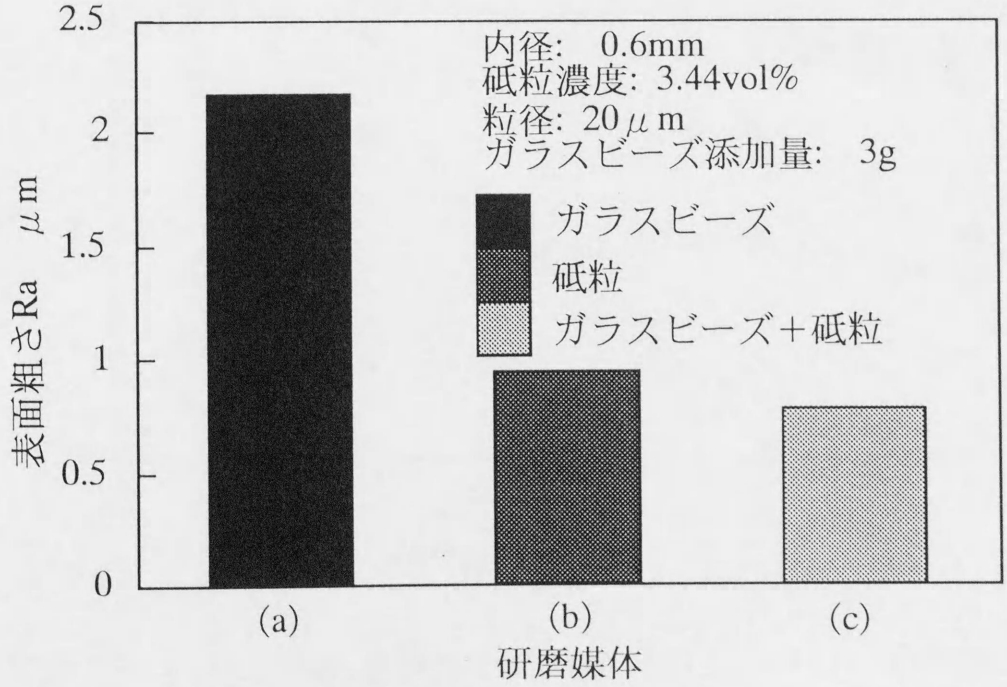


図 7.3　内径 0.6mm 細管内壁の研磨媒体と表面粗さの関係

7.2.3 パス回数の影響

前節で述べたように，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7.4に内径0.4mmの管についての実験結果を示す．図7.4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7.5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，低減の様態は図7.4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7.4，図7.5の結果は，ビーズ添加は粗さの低減を促進する効果を持つことを示している．

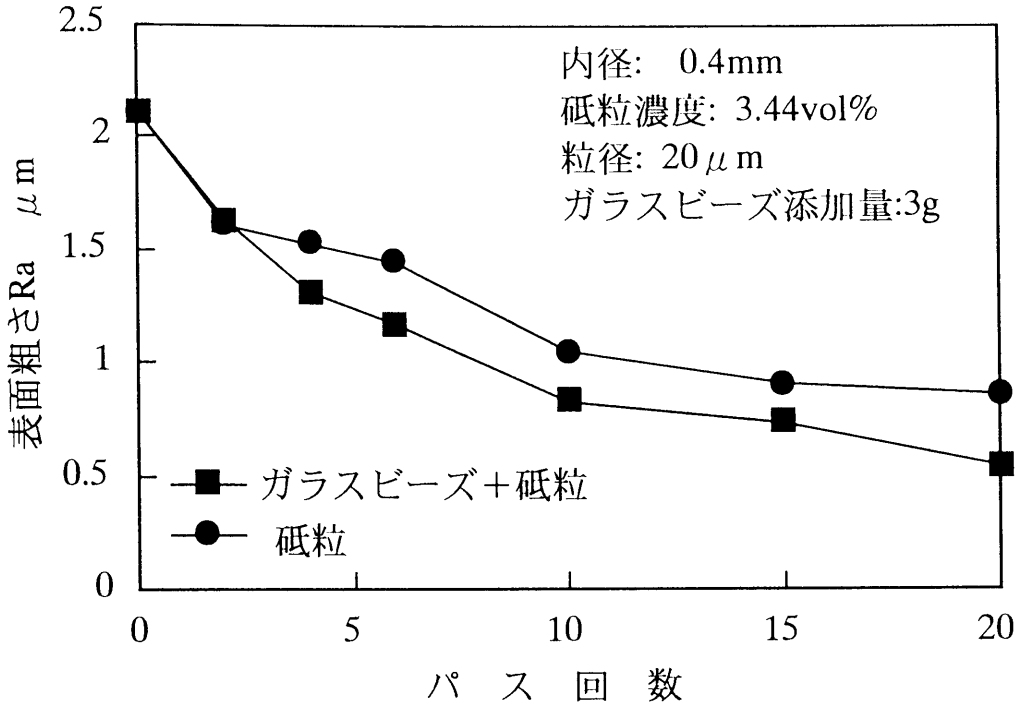


図 7.4　内径 0.4mm 細管内壁のパス回数と表面粗さの関係

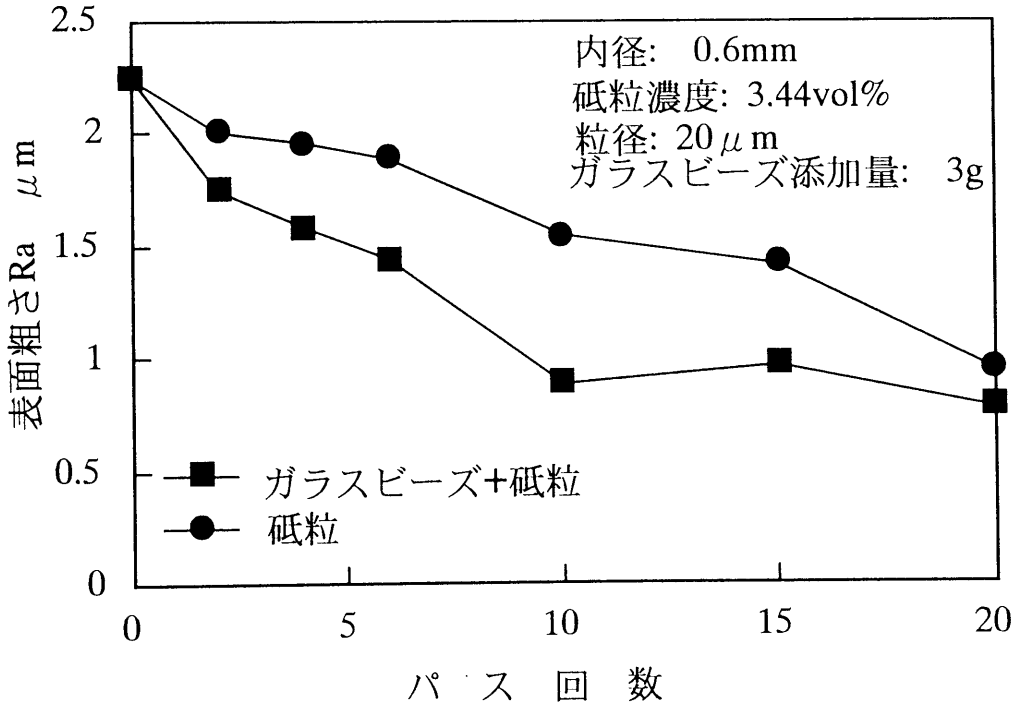


図 7.5　内径 0.6mm 細管内壁のパス回数と表面粗さの関係

7.2.4 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 μ m 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7.6に示す．図7.6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7.6の測定結果を仔細に見ると，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 μ mの場合に大きく，粒径が30，48，60 μ m と大きくなるとその差は小さくなる．粒径 60 μ m の砥粒になるとほとんど差はなくなる．

図7.7には，内径0.6mmの管の場合の同様の測定結果を示す．図7.7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 7.6 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 μ m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．

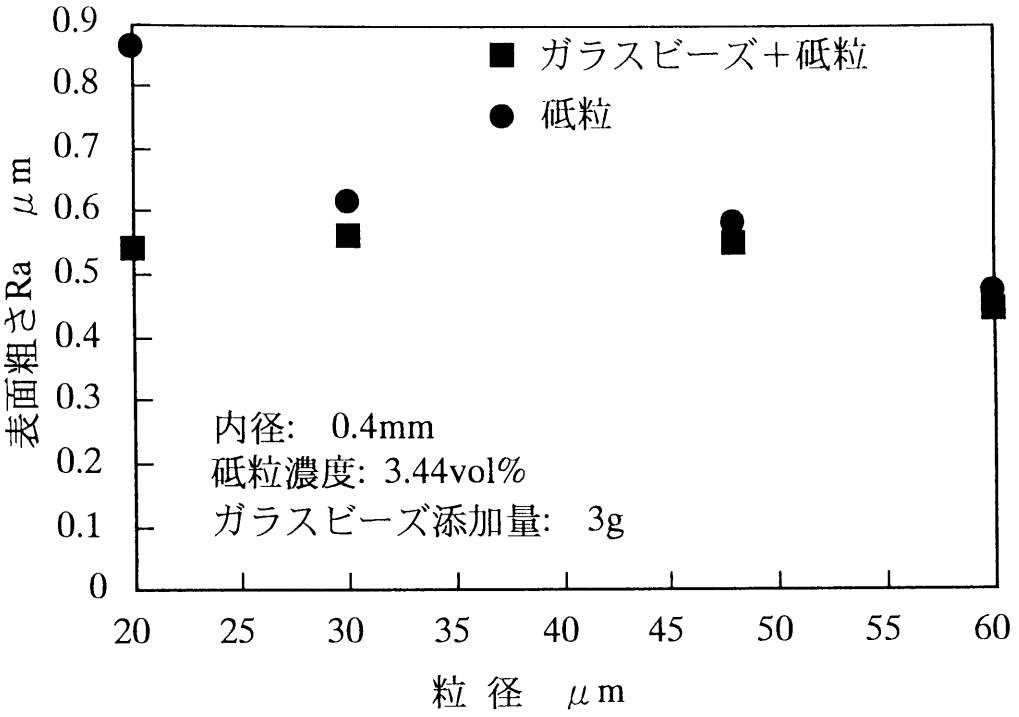


図 7.6　内径 0.4mm 細管内壁の砥粒径と表面粗さの関係

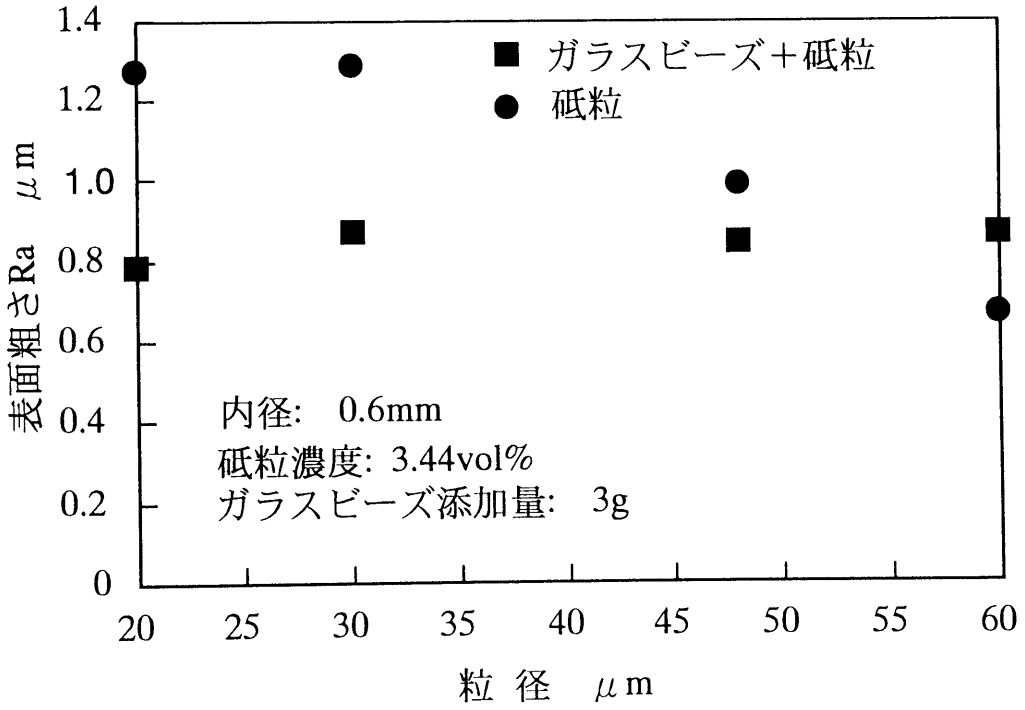


図 7.7　内径 0.6mm 細管内壁の砥粒径と表面粗さの関係

7.2.5 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さらに詳しく調べる必要がある．

図7.8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7.8から，ガラスビーズの添加量を増すにつれて，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．

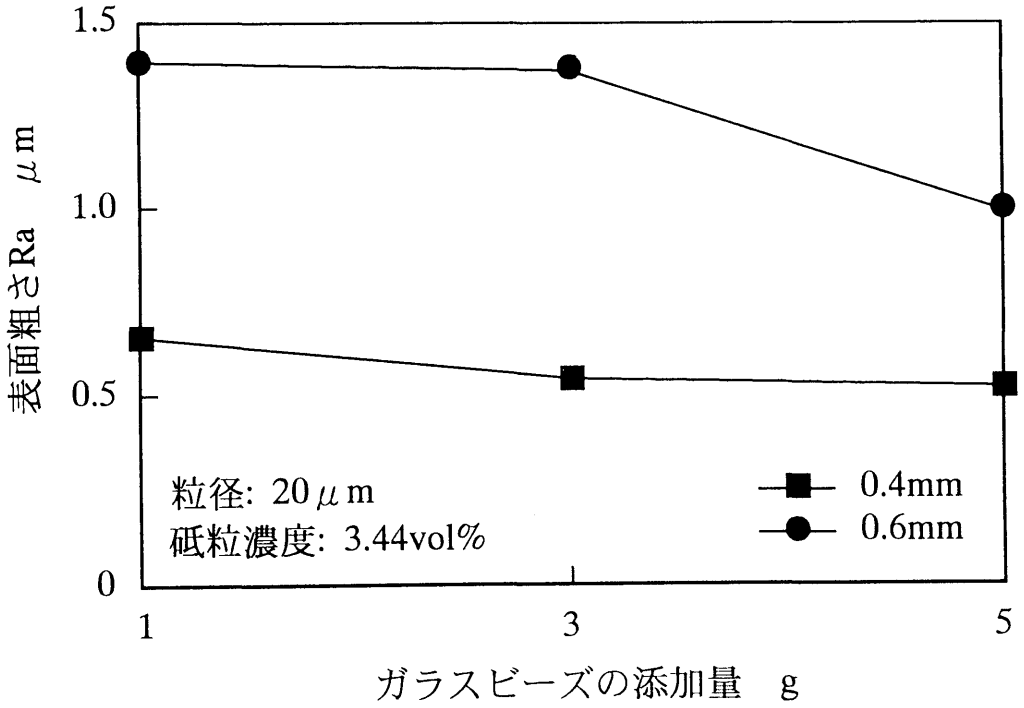


図 7.8 ガラスビーズの添加量と表面粗さの関係

7.2.6 研磨面の観察

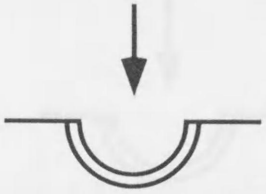
前節の図7.2，図7.3および前節の図7.4，図7.5に示すように，ビーズ入りスラリーを用いて研磨した場合，スラリーのみによる研磨の場合よりも研磨効率が向上することが明らかになった．ビーズを添加することによって，どうして表面粗さの低減が促進されるのか考察するために，研磨面の仕上げ状態を光学顕微鏡と走査型電子顕微鏡を用いて詳細に観察した．

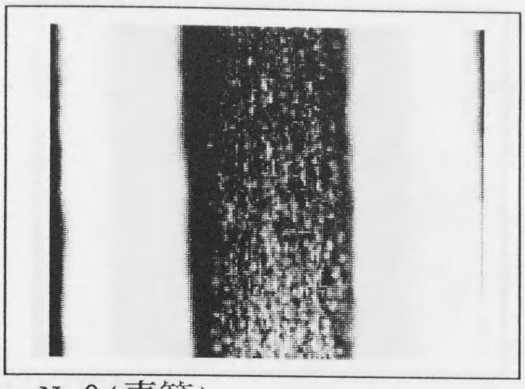
Ｉ）光学顕微鏡による観察

図7.9(a)(b)に，内径0.4，0.6mm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それぞれ示す．観察に供した試料は，図7.4，図7.5の測定に用いたものである．スラリーの流動圧力を10.8MPa，砥粒の平均粒径を20 μ m，砥粒濃度を3.44vol%とし，平均粒径70 μ mのガラスビーズを3g添加して研磨を行った試料について行った．

図7.9(a)から，内壁面に見られる引抜き管特有のテクスチャは，パス回数を重ねるごとに次第に除去されていく様子がわかる．ガラスビーズを添加していない場合の実験結果（観察写真）とガラスビーズを添加した実験結果（実験条件は同じ）を比見すると，スラリーのみとビーズ入りスラリーの場合とでは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が残っている様子がわかる．図7.9(b)の内径0.6mmの管についても同様の比較を行った結果，パス回数２～10回まではそれほど明瞭な違いは認められないが，パス回数20回の時点では，ガラスビーズを添加した場合の仕上げ面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であることがわかる．しかし，0.4mmの管の場合よりも仕上げ面粗さは大きい．

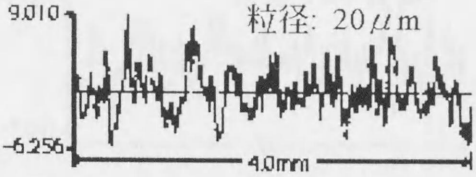
粒径：20μm
ガラスビーズ径：70μm
注入圧力：10.8MPa
砥粒濃度：3.44vol%



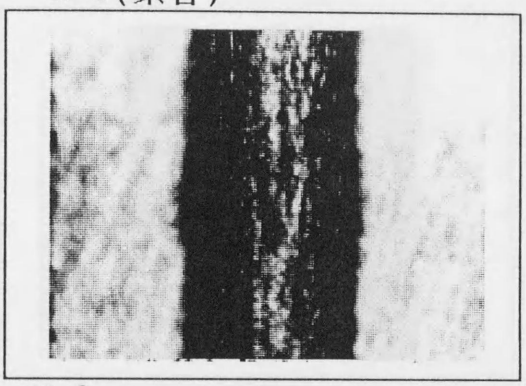


N=0(素管)

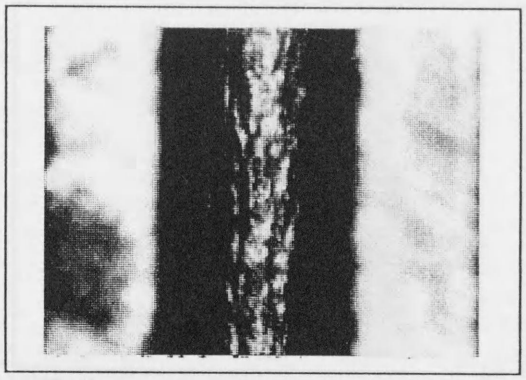
内径: 0.4mm
粒径: 20μm



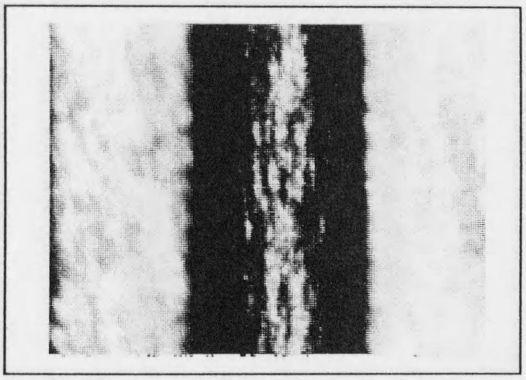
Ra=2.11 μm



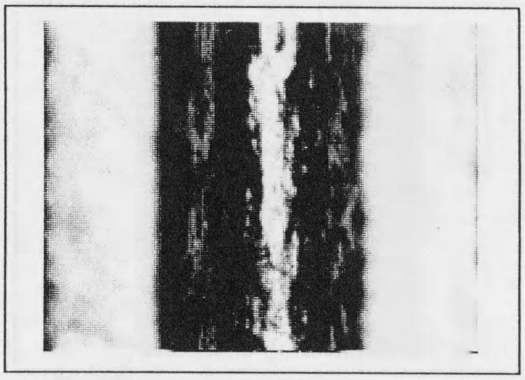
N=2



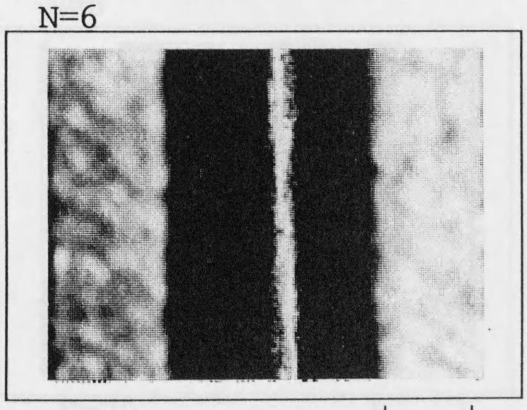
N=4



N=6

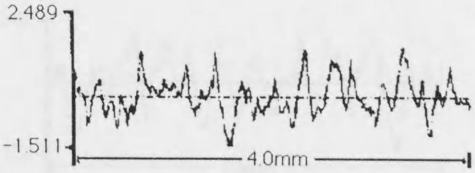


N=10



N=20

0.2mm

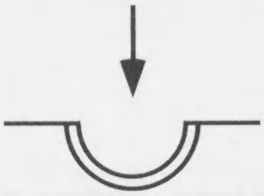


μm

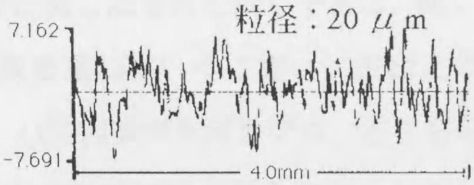
Ra=0.54 μm

図 7.9(a)　内径 0.4mm の細管内壁面の光学顕微鏡写真とプロフィール

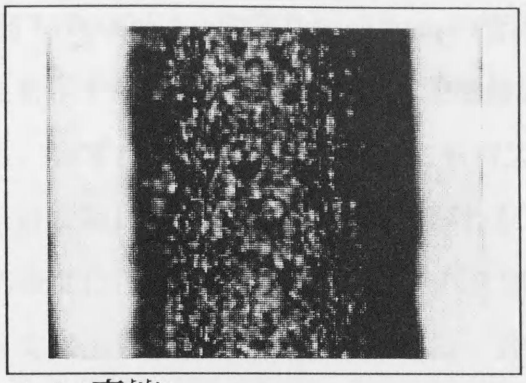
粒径：20μm
ガラスビーズ径：70μm
注入圧力：10.8MPa
砥粒濃度：3.44vol%



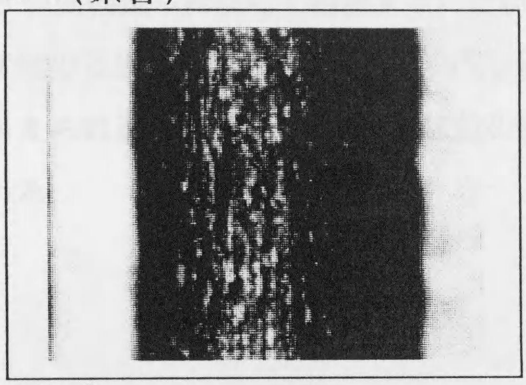
内径：0.6mm
粒径：20 μm



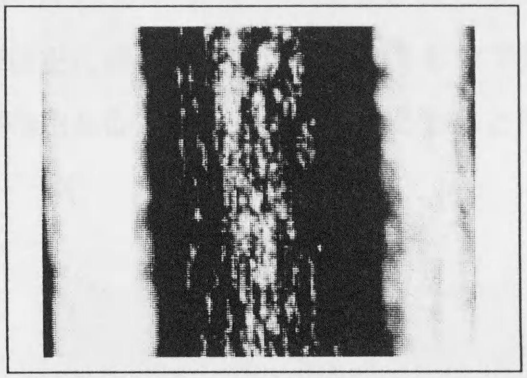
Ra=2.24 μ m



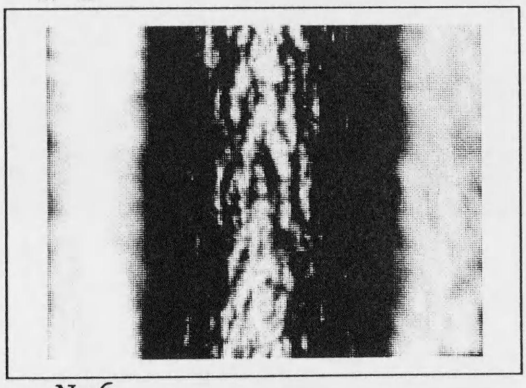
N=0(素管)



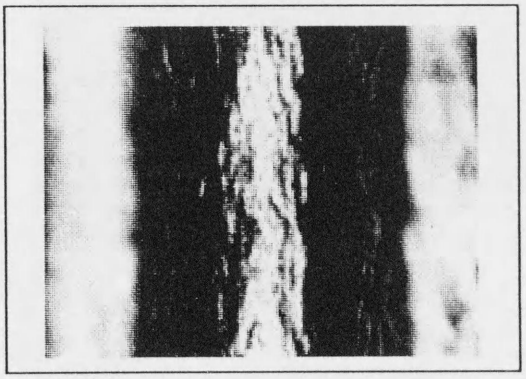
N=2



N=4



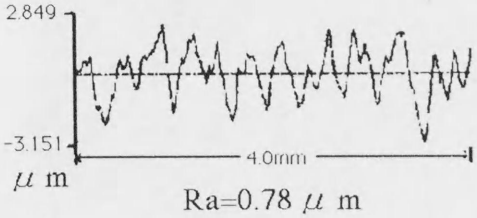
N=6



N=10

N=20

0.2mm



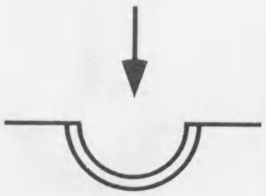
Ra=0.78 μ m

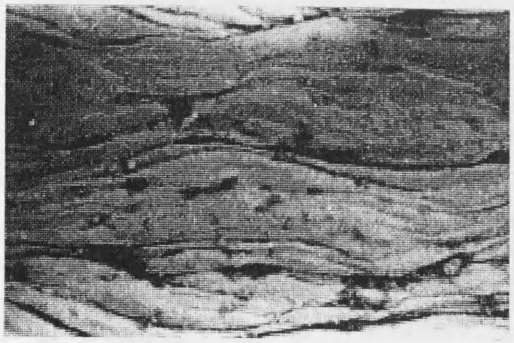
図 7.9(b)　内径 0.6mm の細管内壁面の光学顕微鏡写真とプロフィール

Ⅱ）走査型電子顕微鏡による観察

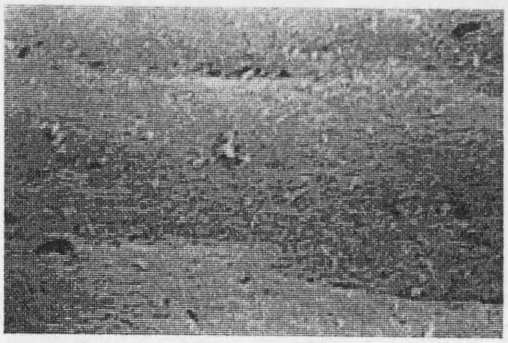
図7.10(a)(b)に，内径0.4，0.6mmの管内壁面の走査型電子顕微鏡（SEM観察）した結果を示す．被観察用試料は光学顕微鏡観察に供したものと同じである．図7.10(a)(b)から，いずれの内径の管の場合にもパス回数を重ねていくに従い，表面上のテクスチャは次第に除去されていく様子がわかる．パス回数が6回までは，どちらの内径の管も表面に凹凸が観察されるが，パス回数10回以降は殆ど見られなくなる．研磨によって除去されたことを示している．引抜き管特有のテクスチャは，いずれの管の場合も20回経過した段階で消滅することがわかった．しかし，ビーズ添加による仕上げ面状態の差異は認められなかったので，研磨は主に砥粒の研磨作用によるものであると考えられる．ビーズの添加は，砥粒の研磨作用を促進する効果を有するものと推察される．

粒径：20μm
ガラスビーズ径：70μm
注入圧力：10.8MPa
砥粒濃度：3.44vol%

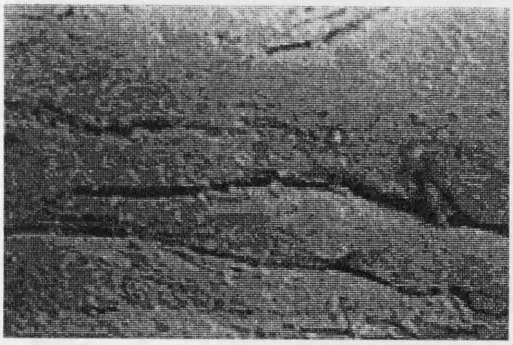




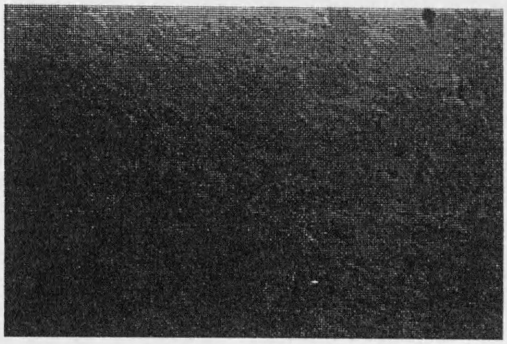
N=0(素管)



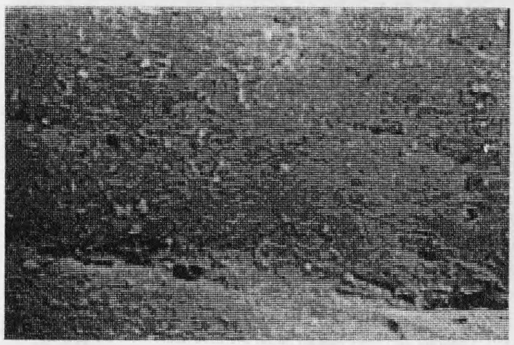
N=6



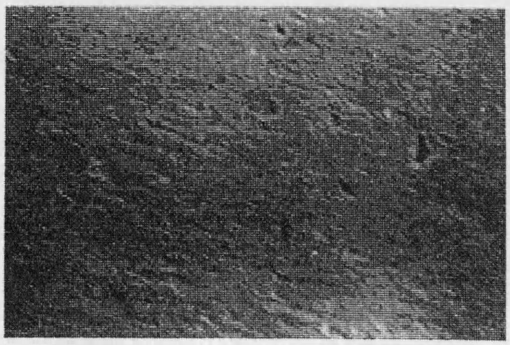
N=2



N=10



N=4

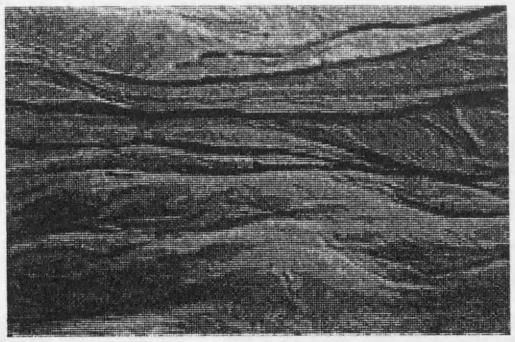


N=20

20 μm

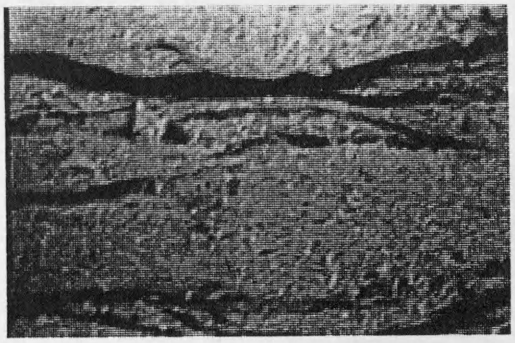
図 7.10(a)　内径 0.4mm の細管内面の SEM 写真

粒径：20μm
ガラスビーズ径：70μm
注入圧力：10.8MPa
砥粒濃度：3.44vol%

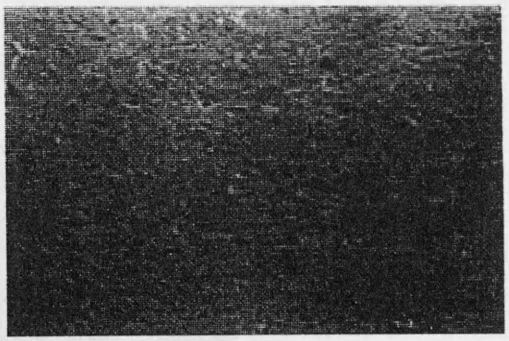


N=0(素管)

N=6

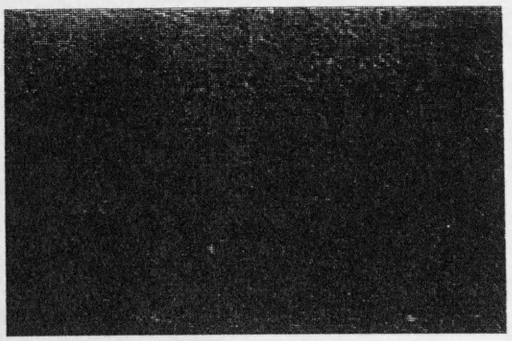


N=2



N=10

N=4



N=20

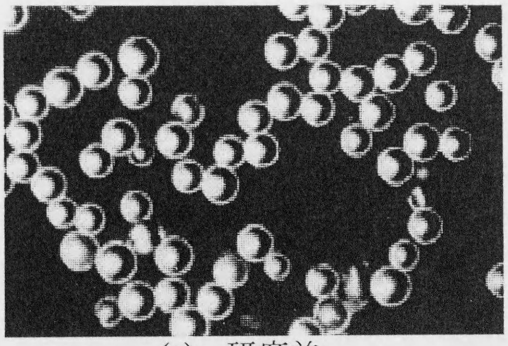
20 μm

図 7.10(b)　内径 0.6mm の細管内面の SEM 写真

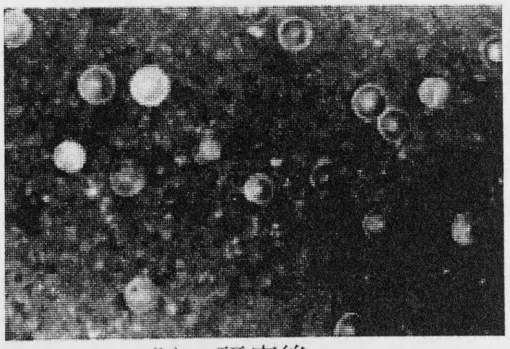
7.3 考 察

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7.4，図7.5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して行った．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7.11に示す．図7.11から，ガラスビーズは



(a) 研磨前



(b) 研磨後

0.2mm

図7.11 ガラスビーズの観察

ほぼ原型を保っており，破砕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，ガラスビーズの破砕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を用いてレイノルズ数[7.7]を計算した．測定結果を表7.2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，表7.2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7.2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違わないことがわかる．これは，本実験の範囲内で砥粒やビーズをイオン交換水に混

表7.2　平均流速とレイノルズ数

	ビーズ	砥粒	ビーズと砥粒
内径：0.4mm			
平均流速　m/s	28.7	28.9	29.2
レイノルズ数	11417	11519	11637
内径：0.6mm			
平均流速　m/s	32.9	32.8	32.8
レイノルズ数	19638	19620	19591

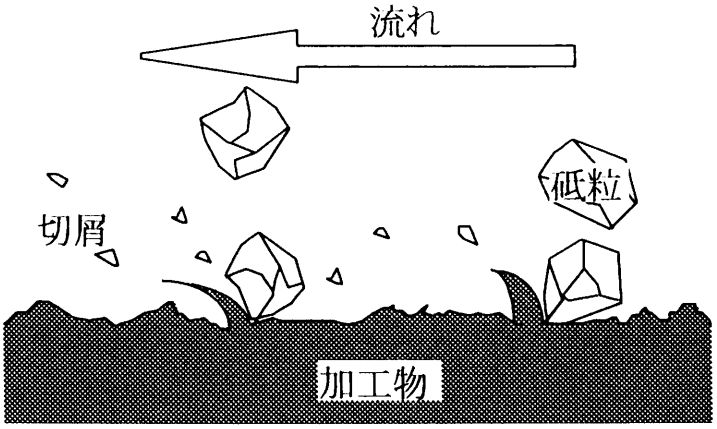
入しても，平均流速はあまり変化しないことを意味している．

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になっているのか以下に考えてみる．

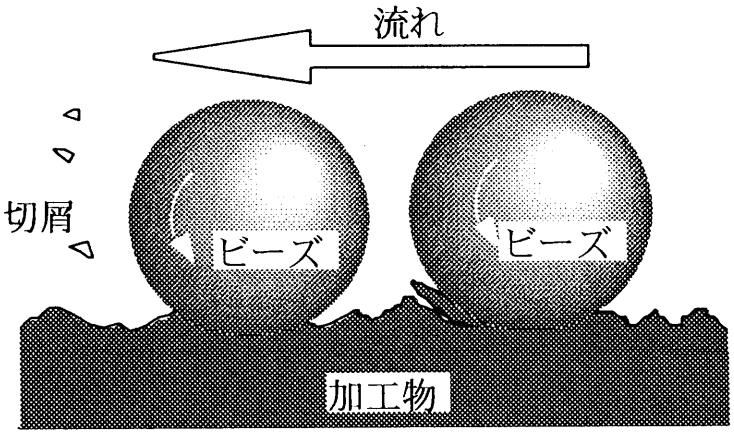
図7.12に，(a)イオン交換水に砥粒を懸濁，(b)イオン交換水にビーズを懸濁，(c)イオン交換水に砥粒とビーズを懸濁した場合の研磨様態を模式化して示す．図7.12において，砥粒を懸濁したスラリーの(a)の場合は，切れ刃稜を持つ砥粒が流体から運動エネルギーを得て，壁面に衝突し切削作用を営みながら管中を流れて行く．ビーズのみの(b)

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．

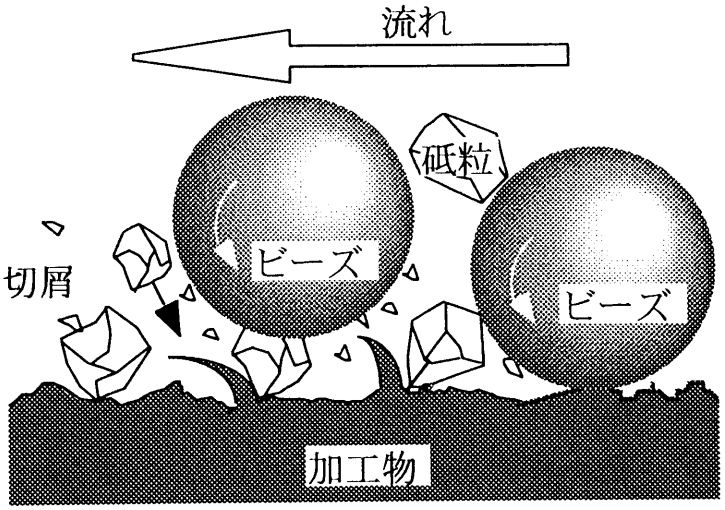
砥粒とビーズが混在する(c)の場合は，砥粒のみの場合やビーズのみの場合とは，研磨様態がかなり異なることが予想される．すなわち，①ビーズが砥粒と衝突することによって，砥粒がビーズから運動エネルギーを得て研磨を営む力（切削作用力）が増す，②管壁近傍に存在するビーズに注目するとそれは粒体中で複雑に回転運動しながら管軸に沿って流れていくので，ビーズの左側面域では，管壁とビーズの間のすきまに流体が吸い込まれる力が働き，その領域では流体圧が高まることが予想される．このためその領域内に存在する砥粒は流体から圧力を受けることになる．すなわち，砥粒は流体から運動エネルギーを得ることになり，その結果として，研磨作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．



(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

図 7.12　研磨状態の模式図

7.4 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砕することなく，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．

第 7 章の参考文献

7.1) 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.

7.2) T.Kurobe,Y.Yamada,K.Yamamoto and T.Miura : High Speed Slurry Flow Finishing of Inner Wall of Stainless Steel Capilary, Int.J.Japan Soc.Prec.Eng., Vol.32,No.1 (Mar.1998) 39.

7.3) 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.

7.4) 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—表面粗さ低減における二段階研磨の効果—，砥粒加工学会誌，(掲載決定).

7.5) 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.

7.6) 加藤　宏：流れの力学，丸善，(1993) 50.

7.7) 黒部利次，山田良穂，山本桂一郎，三浦毅彦：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—，精密工学会誌，64，9 (1998)1325.

第8章 結　論

工学の“工”の字は，瑠璃や紅玉などの貴石に孔を穿ち，宝石に仕上げる作業から生まれたといわれている．工の字の縦の棒は穿った孔を意味する．アジアでは，加工が工学の発祥の起源と考えることもできる．古来，人間は石（脆性材料）や木材に加工を施し，種々の生活用具（道具）を造ってきた．その後，金属材料（延性材料）が発見されるやその加工性の良さから，新しい道具や工具が次々と開発され，今日に脈々とその加工技術が伝承されてきている．

近年の高度産業技術社会は，より精度の高い高級な機械・機器を求めており，それに対応すべく諸種の分野で技術開発が精力的になされている．一般に，機械は各種の部品（パーツ）を組み合わせて作られており，機械の性能は，各部品の加工精度に依存する．機械の高機能化・高精度化が希求されている今日，パーツの加工精度は益々厳しくなってきている．超精密加工を必要とするパーツも多い．表面形状でミクロンの，表面粗さでサブミクロンの加工精度を要請されるケースもしばしばである．半導体産業の分野では技術の日進月歩は激しいものがある．

パーツは種々あり，金属材料や高分子材料，セラミックと多岐な材料から造られている．また，形状も諸々であり，平面，曲面，閉曲面と種々に渡っている．パイプは液体や気体の輸送管として使用されており，管によってはその内壁面を研磨している場合も多い．研磨は，特殊加工法と呼ばれる方法でなされており，各社それぞれ固有の技術を駆使して行っている．一方，管の範疇には，キャピラリー（Capillary tube）と呼ばれる管もある．毛細管ともいい一般的には毛管現象が認められる程度の細い内径を持つ管を指している．この極細管は，内壁面の加工精度を問題にする場合が多く要検討課題となっていた．また，細管を精度の高い工業製造プロセスへ適用いたすため，クリーンな内壁面を得る技術は必須のこととなってきており，キャピラリの研磨技術の確立は，市場からの切望でもあった．

本研究では，こうした状況をふまえ新しく高速流動研磨方法を開発し，これまで研磨加工が極めて困難であった内径1mm以下の細管について，その研磨法の開発と実験的検討を行った．そこでは，本研磨法が精度の高い，簡易にして使い勝手のよい研磨法であること，さらに，研磨装置は合理的コストで製作可能であり，かつ，ランニン

グコストも低いといった特徴を有するよう配慮した.

本研究を通観して得られた主要な事項について，以下にその概要を述べる.

（1）第1章では，最近の研磨技術の開発動向について概説するとともに，本研究の目的とキャピラリーの新研磨法の意義について述べた.

（2）第2章では，高速流動研磨法について詳述した．本研磨法は，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加工法である．本章では，流動研磨を具現化するための方法と，設計・開発した装置について仔細に述べている．また，研磨後の細管の評価方法についても述べている.

新しく高速流動研磨装置を開発するに当たって,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．新しく設計・開発したエアー駆動方式スラリー高速流動研磨装置は，予備実験の結果初期の性能を有していることが確認された.

研磨後，細管内壁に付着・残留するスラリー等の不純物を除去する必要がある．そこで，装置の構成部品である直圧式増圧器を用いて，高圧ジェット水流を細管内に通し洗浄した．観察の結果，洗浄は十分行われていることが確認された．研磨の状態を詳しく把握するために，研磨管をエポキシ樹脂で埋包し，それを内壁面が観察可能な状態になるまでハンドラッピングした．その結果，本方法は殊の外有効であることがわかった.

また，研磨状態を把握するためのもう一つ別の方法として，ガスの差圧を計る方法がある．新しく自作したガスフロー差圧測定装置は，研磨状態を的確にとらえることがわかった.

（3）第3章では，内径0.28mmの極細ステンレス鋼管を用いて，第2章で提唱した流動研磨方法が有効であることを実証するとともに，作成した研磨装置が十分に実用可能な性能を有していることを述べている．そして，研磨特性について流体力学的視点から論考を行った.

まず，研磨装置の基本的な特性を調べるために，パス回数の影響について実験を行った．その結果，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り，また，砥粒濃度が高くなるにつれて表面粗さは低減することが確認された．次に，砥粒の粒径が研磨に及ぼす影響について実験を行った．その結果，平均粒径が20，5.5 μ m の砥粒を使用した場合には，特に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こと，また，パス回数が20回を過ぎる辺りから漸減する傾向に変わることが認められた．この実験結果は，小さな砥粒を用いた場合には，管内壁への砥粒の衝突エネルギーが小さく，研磨作用を営むほどには大きくならないことを物語っている．

管内壁の研磨状態を評価する一つの方法として，管を通って流出する気体の流出圧力を測定する方法がある．本測定法を用いて測定した結果，管内壁の表面粗さが小さくなるにつれて差圧が減少することが観測された．その減少の度合いは表面粗さに依存し，0.1～0.3 μ mRa の範囲と 0.3～0.8 μ mRa の範囲では直線の勾配が異なることがわかった．これは，砥粒が内壁面の平滑化を主として行う場合と，内径の拡大をも併せて行う場合があることを示唆している．

SEM 観察の結果，平均粒径 20 μ m の砥粒による研磨の場合には，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ことが確認された．

（4）第4章では，管の内径が異なる各種細管の研磨特性について検討した．内径が0.6，0.4，0.28mm の各極細ステンレス鋼管について，高速流動研磨実験を行い，これらの管の場合にも本研磨法が有効であることを実証した．

いずれの細管の場合も，表面粗さはパス回数が増えるにつれて次第に低減していく．低減の度合は内径の大きい管の方が大きい．砥粒濃度を変えた実験から，砥粒濃度を増すと表面粗さは減少するが，0.4，0.6mm の管については減少の程度は小さい．一方，0.28mm管の場合に減少度合は大きい．この実験結果は，管の内径が大きいと研磨面に作用する砥粒数がそれ程増えなかったことが原因していると推察される．砥粒の平均粒径を種々変えて行った実験から，砥粒の平均粒径が大きくなるにつれて表面粗さは次第に小さくなることが明らかとなった．

差圧の測定から，内径の大きい0.6，0.4mm の管の場合については，内径0.28mm の

管で観察された差圧特性が認められなかった.

内壁面のSEM観察の結果，素管（引抜き管）に見られるテクスチャはパス回数の増加とともに次第に消失していき，内径の小さい管程その消失の度合が早いことが明らかとなった．流動研磨による粗さの低減は，管内壁面の状態を三角形状突起モデルで表記して，研磨の進行状態を解析的に検討することによって定性的に説明し得ることがわかった.

（5）第5章では，二段階研磨法について実験的検討を行った．表面粗さが飽和するパス回数（第一段階研磨過程）のところで，砥粒を粗粒から細粒に変えて研磨（第二段階研磨）したところ，表面粗さがさらに低減することが明らかとなった．本現象は，内径0.28，0.4mmのいずれの管の場合についても観察された.

SEM観察を行った結果，二段階研磨面は一段階研磨面よりも一層平滑な面に仕上がっている様子が明らかになった．しかしながら，二段階研磨過程においても砥粒径が大きい方が表面粗さは小さくなる傾向がみられた.

（6）第6章では，注送圧力の影響について調べた．管に注送するスラリーの圧力が高くなるにつれて，内壁面の粗さの低減度合いは大きくなる．また，パス回数が約10回を過ぎる辺りで表面粗さはほぼ一定になる．常用していた圧力の場合よりも圧力が高い場合には，表面粗さは早く飽和点に達するようである.

内壁面の観察の結果，素管内壁面のテクスチャは注送圧力が大きいほど早く消失する．これらの結果から，表面粗さの低減に注送圧力の増大が効果があるが，装置の安全性の観点からむやみに増圧することはできない.

（7）第7章では，研磨能率の向上を図るため，スラリーにガラスビーズを混入することを試みた．ガラスビーズの添加効果を確かめるため，ガラスビーズ入りの水，スラリー，ガラスビーズ入りスラリーの3種の溶媒を用いて実験を行った.

実験の結果，粗さの低減度合いはガラスビーズ入りの水，スラリー，ガラスビーズ入りのスラリーの順に大きくなることが認められた．いずれの溶媒の場合とも，表面粗さはパス回数が増えるにつれて漸減していく．ビーズのみの場合はさしたる研磨能

力はないが，スラリーにガラスビーズを混入すると，砥粒が営む研磨作用が促進されること，また，研磨に与える作用砥粒数が増すことが原因していると考えられ，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といえる．研磨後にガラスビーズを観察した結果，ビーズは加工中でも破砕することなく，また，痩せ衰えることなくビーズ形状を保持していることがわかった．

謝　　辞

本研究を遂行するにあたり，終始変わらぬ御指導と絶えざる御鞭撻を賜わりました金沢大学黒部利次教授に深甚なる謝意を表します．また，本論文をまとめるにあたり的確にして有益なる御指摘ならびに御教示を賜わりました金沢大学岡島厚教授，上田隆司教授，山田良穂助教授，細川晃助教授に心より感謝の意を表します．

また，本研究を遂行するに際し，様々な御指導，御協力を頂きました石川県工業試験場の坂谷勝明氏，実験装置制作にご協力賜わりました工作センターの皆様，SEM の使用にご協力賜わりましたトライボロジ研究室の先生方に感謝いたします．　さらに，本研究の機会を与えて頂くと同時に，絶えざる御指導と御鞭撻を賜わりました株式会社エステック今宮弘万常務，上坂博司技術本部長，清水哲夫副部長，石川亨一課長ならびに関係者の方々に厚く感謝致します．

終わりに，本研究の遂行とまとめにあたり，熱心な御協力と御支援を頂いた金沢大学工学部機械システム工学科大学院生三浦毅彦君，笠本秀俊君，関川岳君（いずれも当時）ならびに大学院生町居直人君，久保智君，黒部研究室の学生諸君に対して厚く御礼申し上げます．

本研究に関する研究論文、学会講演

1. 研究論文

題名	掲載誌名	著者名
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)125	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	Int.J.Japan Soc.Prec.Eng. 32, 1(1998)39	Toshiji Kurobe, Yoshinori Yamada, Keiichiro Yamamoto, and Takehiko Miura
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	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3報) —ガラスビーズ添加の効果—	精密工学会誌 64,9(1998)1325	黒部利次, 山田良穂, 山本桂一郎, 三浦毅彦
極細ステンレス鋼管内壁の高速流動研磨 —二段階研磨の効果—	砥粒加工学会誌 (掲載決定)	山本桂一郎, 黒部利次, 山田良穂, 三浦毅彦

2. 本研究に関する学会講演

題名	講演予稿集掲載誌名	著者名
マスフローメーター用極細ステンレス鋼管の超精密研磨(第1報) —加工装置と基本特性—	1997 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (1997)635	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超精密研磨 —研磨面の観察と評価—	1997 年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集 (1997)333	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超精密研磨(第2報) —各種内径の異なる管の研磨特性—	1997 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (1997)573	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	1997 年度精密工学会一般講演会講演論文集 (1998)618	三浦毅彦, 黒部利次, 山本 桂一郎
極細ステンレス鋼管内壁の高速流動研磨 —ガラスビーズ添加の効果—	1998 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (1998)317	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 —圧送圧力の影響—	1998 年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集 (1998)405	山本桂一郎, 黒部利次, 山田良穂, 三浦毅彦