

ダイス微細穴内壁面の高速流動研磨*

黒部利次** 杉山夏樹*** 杉森博***

High Speed Flow Finishing of Inner Wall of Hole Die

Toshiji KUROBE, Natsuki SUGIYAMA and Hiroshi SUGIMORI

Drawing of metal wire has been conducted using a hole die, in which the integrity of hole is very important to warrant the quality of wire. Lapping of inner wall of the hole has been performed usually with hand-finishing using a bar daubed the paste kneaded the diamond powder. Hand working, however, needs long time to finish the hole. High speed flow finishing method developed recently, seems to have an excellent performance of the polishing of the hole die. Setup of the hole die finishing has newly developed. It is found that the surface roughness of inner wall of the hole decreases with the slurry flow passes, but that finishing time is very short. Experiments show that the flow finishing yields the smoothed surface and desirable shape of the hole.

Key words : drawing, hole die, flow finishing, surface roughness, smoothed surface

1. 緒言

引抜き加工は、先細りの穴をもった引抜きダイスを用いて行われる¹⁾。高品位な棒や線、管を製造するには、高精度に加工されたダイスを使用することが必要である。引抜きダイスは、引き抜く製品の種別によって種々の形状のものがあ、ダイス穴内面を精密に研磨することは容易ではない。ダイスは工具鋼や超硬合金で作製されているので、内壁面の研磨は、ダイヤモンドパウダを練り込んだペーストを特殊な研磨棒に塗り付けて手操作で行われている。その仕上げは、経験的技能に負うところが多く研磨の自動化が極めて難しいと考えられている。そのためダイスのコストも必然的に高価なものとなる。

最近、内径1mm以下の長尺のステンレス鋼製極細管（キャピラリーと呼ばれる）内壁面を高速流動研磨法を用いて精密に研磨することが可能となった²⁾。溶媒（水等）に砥粒を懸濁させた媒体（スラリー）を、管内に強制流入させることによって研磨を行わせる方法である。所望の面精度は、スラリーを管の左右端間を往復動させることによって得られる。ダイス穴は、引抜き容易さと加工品質を考慮して、導入部（ベル）、絞り部（アプローチ）、整形部（ベアリング）、逃げ部（レリーフ）、の部位等から成っていて、それぞれの部位の形状は異なっている。直径が1mm以下の金属細線の製造は、ダイスのベアリング部の直径が1mm以下の高精度に研磨されたダイスを用いて行われる。高速流動研磨法は、流体を加工工具としているため、ダイス穴内壁面を満遍なく研磨することが可能であると考えられる。

本研究は、高速流動研磨法がダイス穴内壁面の研磨に適用可能かどうか実験的視点から検討したものである。

* 原稿受付 平成12年2月3日

** 正会員 金沢大学工学部（金沢市小立野2-40-20）

*** 金沢大学大学院

2. 実験方法

2.1 研磨装置

穴ダイス内壁面の研磨には、ステンレス鋼極細管内壁の研磨に用いた装置に一部改良を加えて使用した。装置の構成の詳細については前報で述べているので、改良を加えた点について主として述べる。図1に、スラリー高速流動型研磨装置の概略図を示す。本装置は、エアコンプレッサ、直圧式増圧器、カートリッジ、架台、等から構成されている。図1に示すように、装置は左右対称な構成となっており、被研磨ダイスの左右両端にはそれぞれ2個のカートリッジ(A, B)が配置されている。カートリッジAには、砥粒と溶媒（イオン交換水）が、また、カートリッジBにはイオン交換水のみが入っている。カートリッジAに挿入されている2本の管の内の1本（容器底面近くまで挿入されている管）は被研磨ダイスに、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は、カートリッジA、直圧式増幅器にそれぞれ接続されている。カートリッジBの役割は、直圧式増圧器に砥粒や切りくずが侵入するのを防ぐためのトラップである。

図2に、新たに開発した穴ダイス専用の試料保持具の詳細図を示す。保持具は、2個のフランジ付きステンレス鋼円筒容器

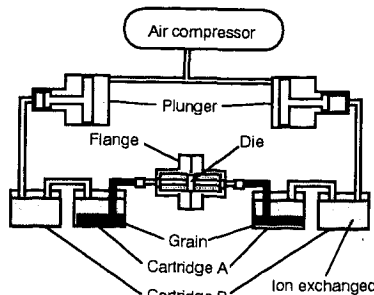


Fig.1 Schematic view of polishing setup

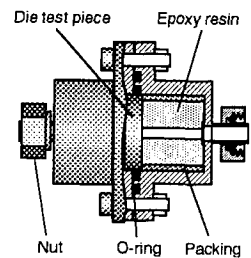


Fig.2 Die holding device

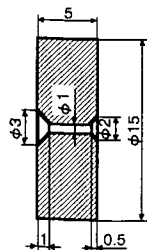


Fig.3 Dimension and configuration of hole die

Table 1 Experimental condition

Workpiece	SKD11
Grain	Al ₂ O ₃
Grain size	20, 60 μm
Concentration	5, 10, 15vol%
Number of slurry pass	40-200 pass
Pressure	12.7MPa
Fluid	Ion exchanged water

から成っている。左右の容器には、中空の厚肉エポキシ樹脂円筒管（管内をスラリーが流れる）が挿入され、その外側にグランドパッキンが密に詰め込まれる。スラリーが回り込まないように配慮している。実験に際し、被研磨用ダイスを円筒容器の中央位置に配し、それを左右に配置したステンレス鋼円筒容器で挟む。スラリーが漏洩しないようにOリングを介してボルトで締め付ける。高压の流体圧に耐え得るようにフランジにはOリングを二重にはめている。フランジと研磨装置は、配管用の継ぎ手を用いて接続している。

加工に際し、エアコンプレッサからの圧縮空気をフィルタレギュレータで一定の圧力（0.49MPa）に制御して直圧式増圧器に送気する。直圧式増圧器によってピストン内部のイオン交換水を約10.28MPaにまで増圧し、カートリッジA内の底部にあらかじめ沈殿させておいた砥粒がイオン交換水ごとダイス内に注送される。ダイスを通過したスラリーは、ダイスの出口側（反対側）に設けてあるカートリッジAに入る。一定時間の停止（砥粒の自然沈降時間）の後、反対側の増圧器に送気する。ここで、スラリーが左（右）のカートリッジから右（左）のカートリッジに移動する動作を1パスとする。研磨は、本操作を繰り返すことにより進行し目的とする内面性状を有するダイスが得られる。

2.2 実験条件および評価方法

一般に、ダイスに使用されている材料はダイヤモンドや超硬合金、工具鋼、等である。実験には主として工具鋼(SKD11)を用いた。また、比較のため市販されている超硬合金ダイス(D3)についても検討した。工具鋼で作製した穴ダイスの寸法形状を図3に示す。ダイスは、外径15mm×内径1mm×厚さ5mmの円筒形状をしている。市販の線引きダイスに似せて、図3に示すように円筒の両端面にディフューザ形状³⁾した非対称の座ぐりを入れている。実験は、焼入れを施さない場合と施したダイスの2種類について行った。実測したダイスの硬さは、HRCで15（焼入れなし）、60（焼入れあり）であった。一方、超硬合金の場合は、HRAで88であった。実験条件を表1に示す。

加工後、ダイス穴内壁面を観察するために、ワイヤカット放電加工機を用いてダイスを穴中心部を通して長手方向に切断した。観察は、光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて行った。また、触針式粗さ計（東京精密製：サーフコム1400A型）を用いて粗さを測定した。一方、形状測定機（Taylor-Hobson社製：フォームタリサーフ）を使用して穴の断面形状を計測した。

3. 実験結果

3.1 工具鋼製ダイスの研磨特性

a) 表面粗さの測定 図4に、焼入れした工具鋼製ダイスの実験結果を示す。実験は、平均粒径20 μmの砥粒を用い砥粒濃

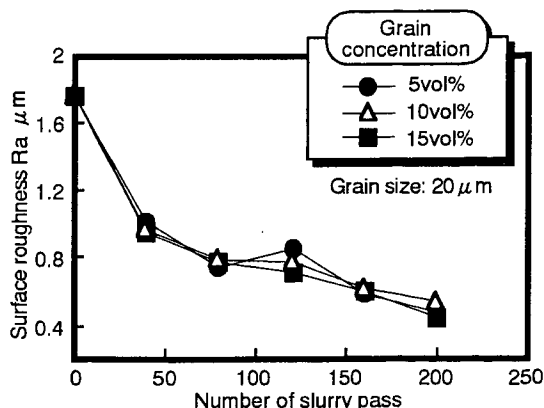


Fig.4 Relation between surface roughness and pass number

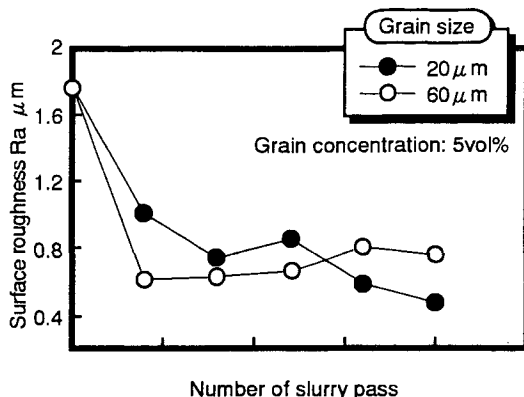


Fig.5 Relation between surface roughness and pass number

度を5, 10, 15vol%の3通りに変えて行った。研磨前のダイス内壁面の表面粗さはRaで1.8 μmである。図4から、表面粗さはパス回数の増加とともに減少していき、200パスに至っても漸減傾向は続くことがわかる。200パスでの表面粗さは約0.5 μmである。また、図4から表面粗さの低減に砥粒濃度はあまり影響を及ぼさないことがわかる。実験は、焼入れを施さないダイスについても行ったが、表面粗さは焼入れを施したダイスの値よりも大きい（200パスで約0.6 μm）。このため、以下の実験は主として焼入れダイスについて行った。

次に、砥粒径の表面粗さ低減に及ぼす影響について調べた。実験は、平均粒径20, 60 μmの2種類の砥粒を用いて行った。実験結果を図5に示す。図5から、パス回数が増えると表面粗さは急減する様子がわかる。平均粒径60 μmの砥粒の場合には、40パス以降ほぼ一定の値となる。しかし、約150パスを超える辺りから逆に表面粗さは幾分増加する傾向が見られる。一方、平均粒径20 μmの砥粒の場合には、粗さの漸減傾向は200パスまで続く。

b) 表面観察 図6に、研磨後のダイス内壁面の光学顕微鏡写真を示す。図6には、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から、研磨前のダイス穴内壁面は相当に荒れた加工面であることがわかる。この面を初期表面と呼ぶことにする。このダイス穴を高速流動研磨すると、パス回数が約40回で初期表面に見られる大きな島状の凹凸模様がほぼ除去されることがわかる。しかし、うねりは残る。その後、パス回数を120, 160と増すにつれて表面が徐々に滑らかになっていく。そして、うねりの周期は次第に長くなり、幾分ではあるがうねりの高さも小さくなる傾向が観察される。

図7に、平均粒径20 μmと60 μmの砥粒で研磨した穴内壁面の電子顕微鏡写真を示す。図7から、いずれの砥粒の場合も、パス回数が40, 120, 200回と増えるにつれて表面が次第

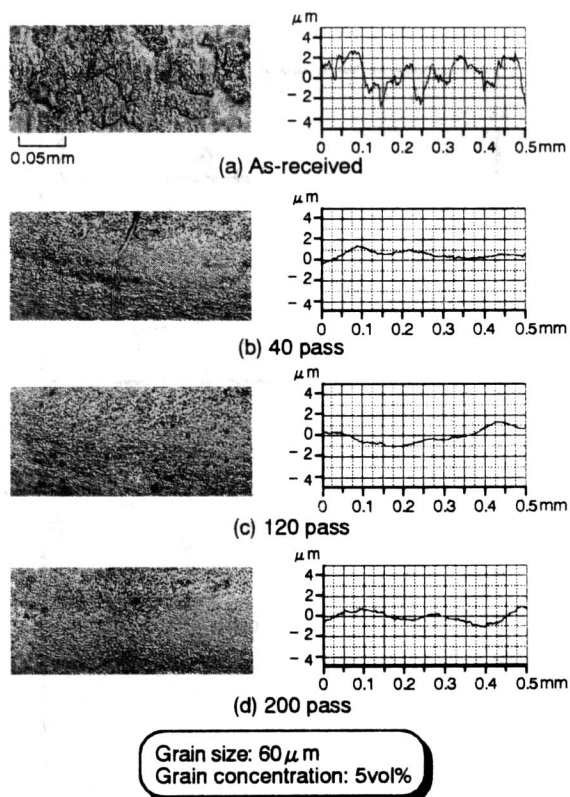


Fig.6 Photomicrographs and profiles of polished surface

に滑らかになって行く様子がわかる。しかし、粒径が小さい20 μmの砥粒の方が60 μmの粗粒の場合よりも表面が平滑であることがわかる。図7の平均粒径20 μmの砥粒の写真を注意深く見ると、表面に長楕円状の微細な穴がスラリーの流動方向に沿って生じているのがわかる。

c) 穴径の測定 スラリー流動研磨を続けると表面粗さが低減するばかりでなく、ダイス穴の径が大きくなることも考えられる。そこで、測微顕微鏡を用いて研磨後の穴径を測定した。図8に、平均粒径20 μmの砥粒を用いて研磨した場合の測定結果を示す。穴径は、研磨前のダイス穴の大きさを1と規格化して表示している。図8から、穴径はパス回数の増加に伴って次第に大きくなるのがわかる。砥粒濃度が10、15vol%の場合はほぼ同程度の穴径になるが、5vol%の場合は前二者に比してその値はかなり小さい。

同様の実験を平均粒径60 μmの砥粒についても行った。測定結果を図9に示す。図9には平均粒径20 μmの砥粒の結果も併記している。図9から、60 μmの砥粒の場合もパス回数が増えるにつれて穴径が次第に大きくなる様子がわかる。穴径の絶対値は、60 μmの粗粒の方が20 μmの細粒の値に比して大きい。

d) ベアリング部位の形状変化 線材を高精度に引抜き加工する場合には、ダイスの穴加工を精密に行う必要がある。高速流動研磨法を、図3に示すダイスの穴加工に適用した場合、スラリーをダイス左端のベル（導入部）から流入させ、細管（穴）内に強制的に注送して右端のレリーフ（逃げ部）に噴流させる。穴と逃げ部の境界（角）は、流体の流れが急変（流力線が曲がる）する部位となる。このため、溶媒（水）に懸濁している砥粒は角を選択的に加工し、パス回数が増すにつれ角は次第に丸くなっていくと考えられる。ここでは、丸みを帯びた領域をベアリング部（整形部）と呼ぶ。

図10に、ベアリング部位の形状を測定した結果を示す。加工は、平均粒径20 μmの砥粒を用い砥粒濃度を15vol%として

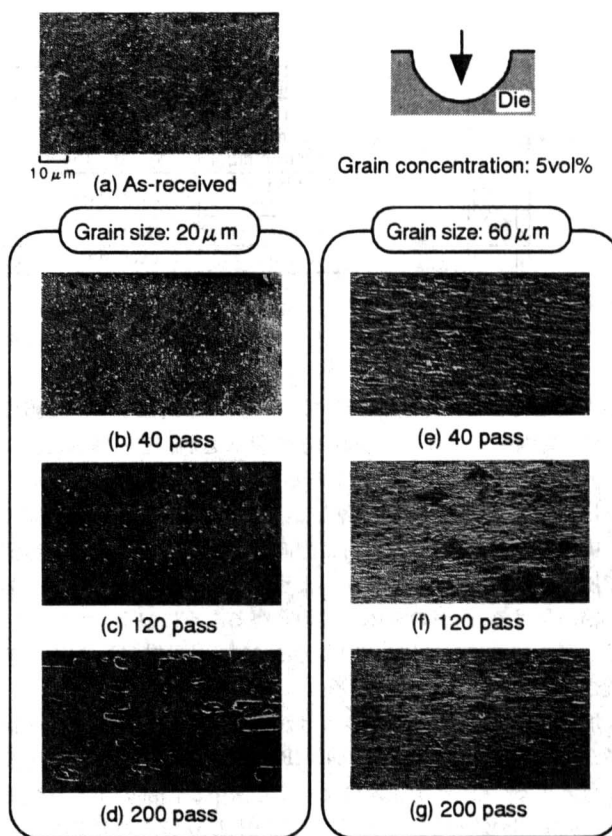


Fig.7 SEM micrographs of polished surface

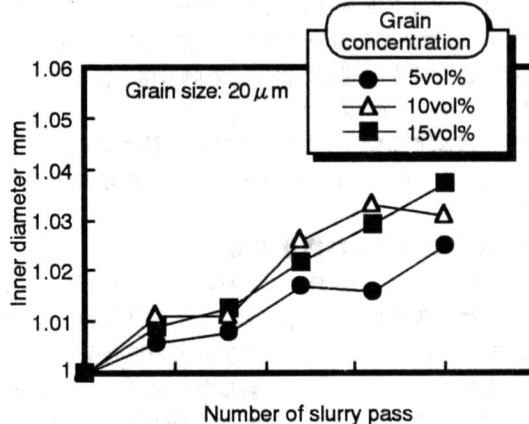


Fig.8 Effect of slurry pass on inner diameter

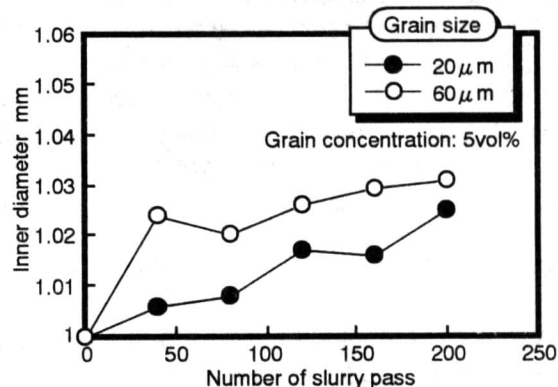


Fig.9 Effect of slurry pass on inner diameter

行った。図10に記す①は、研磨前のダイスの形状を表す。図10から、パス回数が増えるにつれて形状はなだらかな丸みを帯びた形状となるのがわかる。ここで、角の初期高さをhとし、その値が加工とともにどのように減少していくのか測定した。hは、山（角）の頂点と山の裾野が水平になる水平線との間の

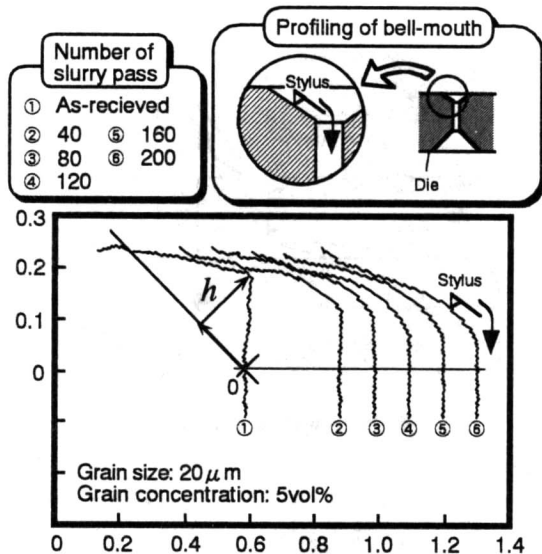


Fig.10 Bearing shape yielded by slurry passing

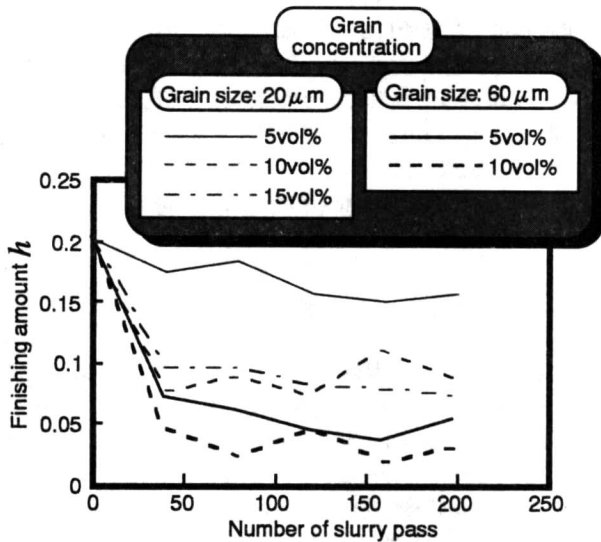


Fig.11 Finishing amount by slurry passing

距離である。図 11 に測定結果を示す。実験は、平均粒径 20 μm と 60 μm の 2 種類の砥粒を用い、砥粒濃度を 5, 10, 15vol% の 3 通りに変えて行った。図 11 から、パス回数が増えるにつれて初期高さ h の値は、急激に減少することがわかる。しかし、パス回数が 50 回辺りで漸減もしくはほぼ一定の値をとるようになる。平均粒径 60 μm の砥粒で、砥粒濃度が 10vol% の場合が h の値が最も小さくなる。 h の値が小さくなることは、ベアリング部の加工量が増え丸みが一層増加したことを意味する。図 11 から、平均粒径 60 μm の砥粒の場合に比して 20 μm の方が加工量が少ないことがわかる。これは、粒径の大きい砥粒の方が研磨力が大きいためではないかと考えられる。

3.2 超合金製ダイスの研磨特性

市販されている超合金製穴ダイス内壁面の研磨が、高速流動研磨法を用いて可能かどうか確かめるために、超合金製穴ダイス (D3) を購入して研磨を試みた。ダイスの寸法・形状は、外形 10mm × 内径 1.0mm × 長さ 10mm である。穴ダイスの両端面には円すい形状の座ぐりが入られている。実験は、平均粒径 20 μm のアルミナ砥粒を用い、砥粒濃度を 15vol% として行った。また、注入圧力を 12.7MPa 一定としパス回数を 200 回とした。

図 12 に、研磨前後の表面粗さと穴径を示す。図 12 から、高

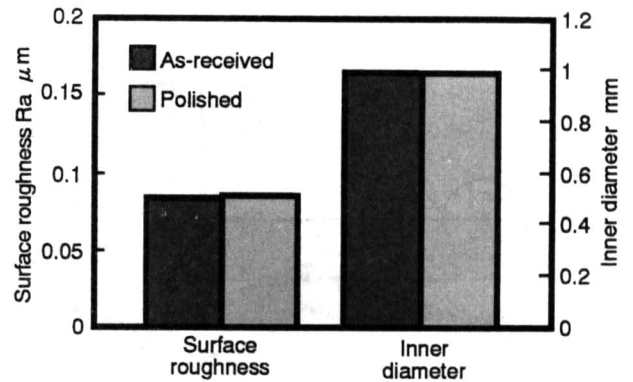


Fig.12 Effect of surface roughness on inner diameter

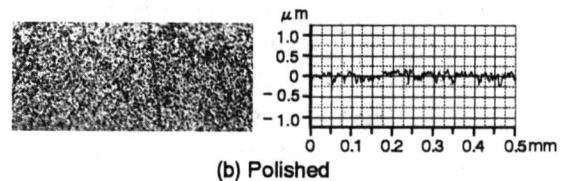
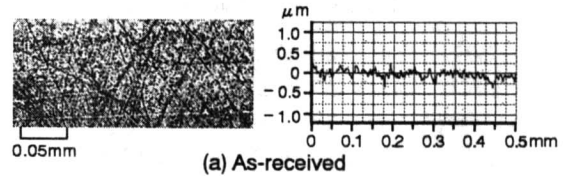


Fig.13 Photomicrographs and profiles of polished surface

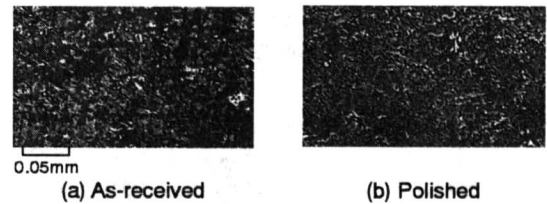


Fig.14 SEM micrographs of inner wall surface

速流動研磨によって表面粗さや穴径が大きく変化することはないように思われる。これは、ダイスの材質が超合金であるため硬く、研磨の効果が顕現するほどには加工されなかったためと考えられる。図 13 に、研磨前後の光学顕微鏡写真と表面プロフィールを示す。図 13 から、研磨前のダイス表面には無数の直線状の加工痕が見られるが、高速流動研磨によってその加工痕は消え失せることがわかる。図 14 に、研磨前後の SEM 写真を示す。図 14 を通観すると、初期表面に存在する荒れた表面が、高速流動研磨によってほぼ完全な平滑面になることがわかる。

超合金製ダイスは工具鋼製ダイスに比べてかなり硬く、砥粒の研削作用力が同一であってもその力の及ぶ範囲は自ずと違ったものとなる。このため、硬度の高い超合金製ダイスの場合には、研磨作用力が表面の極く浅い領域に限られたために、直線状の加工痕が流動研磨によって消え失せたものと推察される。

4. 考 察

4.1 スラリーの流動状態

穴ダイスの内壁面の研磨様態は、スラリーのダイス内での流動状態と深くかかわっている。実験に供した穴ダイスの長さは 5mm と短いため、長尺のステンレス鋼製極細管 (内径 1mm 以下で長さ 500mm) の場合とはスラリーの管内における流動状態が幾分異なるのではないかと考えられる。ダイス穴内におけ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⁴⁾。

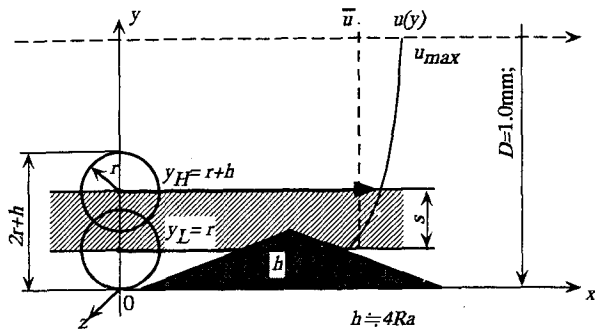


Fig.15 Asperity model and coordinate system for the simulation of polishing process

いま、穴の内径を d 、穴の断面積を A 、スラリーの流速を u 、スラリーが試料を通過する時間を 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 は 1.00mm、 t は実測の結果 6.54 秒、 V は $77 \times 10^3 \text{mm}^3$ であるので、ダイス穴を流れる流体の流速は 15.0m/s となる。ここで、水の動粘度を ν とするとレイノルズ数 Re は、 $Re = ud/\nu$ と記される。 ν の値は $1.004 \text{mm}^2/\text{s}$ であるので、 $Re = 14930$ 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。スラリーは、溶媒の水に砥粒を適量（最大で 15vol%）懸濁させたものであり、水の場合に比べて若干粘度は高い。しかし、 Re の値は 14930 と非常に大きいため、乱流であることに変わりはないと考えられる。

ダイス穴内壁面の研磨は、乱流状態で流れる砥粒の壁面への衝突と引っかき作用によってなされる。図5から、表面粗さがパス回数の少ない段階（平均粒径 $60 \mu\text{m}$ の砥粒の場合）で大きく低減したのは次の理由によるものと思われる。管内のスラリーの流れは乱流であるが、砥粒は管軸方向の流速をもって、図15に示すような三角形の突起（表面粗さ）に衝突し、これによって研磨がなされると考える。内径 d の管内の乱流について、管軸方向（ x 方向）の流速に関する管径方向（ y 軸方向）の分布は次式⁹⁾ で与えられる。 U_{max} は管軸上での流速である。

$$U = U_{\text{max}} \left(\frac{y}{d/2} \right)^{1/7}$$

y の増加とともに流速は増し、砥粒の衝突速度も増加すると考えられる。このため、突起先端ほどまた高い突起ほど研磨されやすいものと思われる。研磨の進行に伴って高い突起から研磨されていくとともに負荷率（研磨対象となる突起数）が増大してくる。これらのために粗さの低減の程度は次第に減少する。

4.2 ベルマウス創成機構

実験に供したダイス（図3）は、ディフューザ形状をした座ぐりを両端に施している。加工の際、スラリーを左端のディフューザを通してダイス穴に強制流入させ、右端のディフューザへと流出させる。研磨は、スラリーの流れを左右端で交互に反転させ、それを繰り返すことにより行われる。スラリーがディフューザから穴に流入するとき、また、穴からディフューザへ流出するとき、穴とディフューザの境界部は強制的に研磨される。そのため、パス回数を重ねるにつれて境界部は次第に丸みを帯びてくると思われる。その形状は、図16に示すようなベルマウス型になり、自ずとベアリング部が創成されること

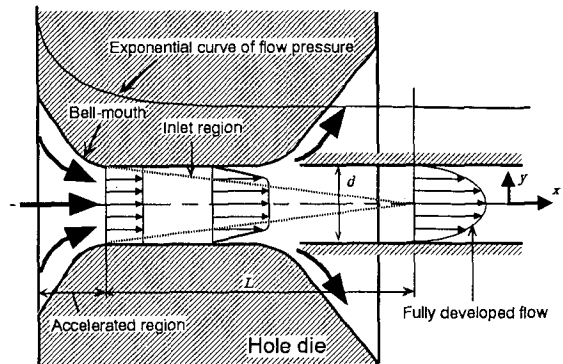


Fig.16 Flow mode within inlet region

になる。

図16に示すベルマウス型の場合について、その助走区間の長さ L は、乱流に対するポーラスとブライトンの解析から 13.5mm である。この値はダイスの研磨区間長さ 5mm よりも大きな値である。このことは、研磨区間内におけるスラリーの運動エネルギーが場所によって異なることを意味する。このため、研磨は管軸長にわたって一様に行われたい懸念がある。しかし、図16から、急激に圧力損失が起こる区間は加速距離区間であることがわかる。この部分はダイスのベル部とレリーフ部に相当する。したがって、穴の直線部分（アプローチ部）の圧力降下はそれほど急激なものではないと考えられ、全体にわたってほぼ一様に研磨がなされていると考えてよい。

5. 結 論

高速流動研磨法を工具鋼製穴ダイスの内壁面の研磨加工に適用し、その有効性について実験的検討を行った。また、市販の超硬合金穴ダイスの内壁面の研磨にも応用して本法の有用性について論考した。その結果、次の結論が得られた。

- (1) 高速流動研磨法を穴ダイス内壁面の研磨に適用するため、耐圧・難漏洩性の試料保持具を新しく開発し、所期の性能を有していることを確認した。
- (2) 工具鋼製穴ダイス内壁面は、スラリーを微細穴に高速で往復流動させることによって研磨できる。表面粗さは、パス回数が増すにつれて低減するが、低減の度合いはパス回数が多くなるにつれて小さくなる。
- (3) ダイスの穴は、パス回数が増えるにつれて増大する。
- (4) スラリーを往復流動させると、ディフューザと穴の境界部位は次第に研磨され丸みを帯びる。自然に穴ダイスにベアリング部位が創成される。
- (5) 高速流動研磨法を超硬合金製穴ダイス内壁面の研磨に適用した場合、表面に残存する引っかき痕は除去され平滑な面になる。

謝 辞

高速流動研磨装置及び被研磨用穴ダイス試料は、金沢大学工学部工作センターで製作されたものであり記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 朝倉健二、橋本文雄：機械工作法 I、共立出版、(1999) 87。
- 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度流動研磨（第1報）—研磨の基本特性—、精密工学会誌、64, 1 (1998) 126。
- 3) 池森亀鶴、黒瀬元雄、越智光昭：水力学、コロナ社、(1992) 194。
- 4) 加藤 宏：流れの力学、丸善、(1993) 50。