超精密加工液の濾過機械の開発に 関する研究*

(故)三橋堅一** 江田 弘*** 貴志浩三*** 小宅孝幸†† 富田洋司**

Development of Filtration Machine of Machining Fluids
with Use of Ultra-precision Processing Machine

Kenichi MITSUHASHI, Hiroshi EDA, Kozo KISHI, Takayuki OYAKE and Youji TOMITA

The elastic grinding wheels with a resistant wear properties are used for mirror abrasive processing of metal molds. And also, the passage efficiency of machining fluids are very high. Keeping our eye on these points, we experimented with use of a binder (PVA+Phenol resin) of elastic grinding wheel for the filter material of the machining fluid for ultra-precision processing. Our experiment produced the following conclusions. (1) PVA and phenol resin functioned sufficiently as filter material for filtration can be achieved at a lower filtration cost compared with the conventional filter material of the cartridge-filter type. (2) We were able to manufacture the filter material whose mean pore diameter was $0.05\text{--}200\text{ }\mu\text{m}$, with a porosity of 65–94%, filter drag of $0.5\text{--}80\text{ mm/Aq}$ and a resistant compressive strength of 50 kgf/cm^2 . (3) The filtration machine has a machining fluid concentration of 0.5 ppm , filtering efficiency of 99.99%, mean particle diameter of the impurity materials of $0.1\text{ }\mu\text{m}$ and a filtrating rate of 5 l/min . (4) Filtration can be performed with both water-soluble type and straight-oil type, but there is a difference in the filtrating rate. (5) The processing accuracies and performance of ultra-precision processing by filtration are not improved to any great extent, but life of machining fluid is increased greatly and stable processing accuracy and performance are able to be obtained.

Key words: development, filtration machine, machining fluids, ultra-precision processing machine, passage efficiency, binder, polyvinylalcohol, phenol resin, elastic grinding wheel

1. ま え が き

超精密切削の精度は、仕上面粗さ $0.01\text{ }\mu\text{m}$ ，うねり $0.1\text{ }\mu\text{m}/100\text{ mm}$ のオーダである¹⁾。

超精密切削の切削液は、白灯油が多く用いられているのに対して、超精密研磨は水道水を用いる場合が多い。当然省資源の立場から言って、循環式で用いることとなるが、問題は、前記精度を劣下させ、歩どまりを落とす濾過機が多いため、超精密加工用として使用できないのが実状と言える。

同時に、アルミニウム磁気ディスク基板のような研磨加工は、水溶液とアルミニウム微小切粉が反応し、水素ガスを発生して、引火爆発する事例も発生している。

そこで、夾雑物の濾過は、最大直径 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ ，捕捉率 90% 以上、しかも濾滓との反応を防止するために固液分離機構として、乾燥状態で回収できる装置を開発することとした。このような仕様が満足できる装置は、現在調査した結果では見当たらない。

2. 濾 過 機 の 開 発

2.1 濾材の製造

金型の鏡面研磨は弾性砥石で行われる。ところで、この結合剤は摩耗が極めて少ないうえに、加工液の通過能率が非常に高いことに着目して、これを濾材に使用することとした。

材質は、PVA（ポリビニルアルコール）とフェノール樹脂を 2:1 で混合し、使用する。その際 PVA は、水溶性の PVA に酸を触媒として、ホルムアルデヒドを結合させるホルマル化反応により、多孔質基質 PVF（ポリビニルホルマル）とする。さらに、高温可溶性の気孔生成剤を加え、気孔形成を行う。

* 原稿受付 昭和 61 年 12 月 23 日、昭和 61 年度精密工学会秋季大会学術講演会（昭和 61 年 10 月 12 日）にて発表

** 正 会 員 鐘紡(株)（茨城県猿島郡総和町北利根 12）

*** 正 会 員 宇都宮大学工学部（宇都宮市石井町 2753）

† 学生会員 宇都宮大学大学院（現、日立金属(株)）

Fig. 1 The pore profile of filter material

気孔形成は、所定時間、常温水槽中で行い、架橋完成後、気孔生成剤を抽出する。図1は、完成したカートリッジ型の濾材構造を示す。

この方式によって、平均気孔径 $0.05 \sim 200 \mu\text{m}$ 、気孔率 $65 \sim 94\%$ 、通気抵抗 $0.5 \sim 80 \text{ mm/Aq}$ 、耐圧縮強度 50 kgf/cm^2 の濾材を作成した。現在 $0.05 \mu\text{m}$ (外国製) のものが最も細径であるが、本濾材に比べ流体抵抗が大きいため、同一濾過面積で濾過流量を比較すると本方式の方が多く濾過できる。

2.2 超精密濾過機械

濾過方法は、大別すると、①濾材によるものと、②外力による分離形式のものがある。①には、重力式、真空式、加圧式、②には、磁力(マグネットセパレータ)、遠心力(遠心分離、液体サイクロン)、重力沈降、浮上分離、静電気力等がある。

本濾過方式は、濾材-真空式-重力沈降-浮上分離を合わせ兼ね備えたような機構をとるように設計した。

設計した装置は、図2に示すような経路を経て、濾過が行われる。

加工廃液は、図2の左側から順に、まず送液と攪拌兼用の水中ポンプが挿入されている 100 l の廃液タンクに送られ、重力、沈殿式で大形濾滓が除去される。

次に廃液は、水中ポンプでカートリッジ濾材装着の真空濾過槽に送り込まれ、まずドラム型濾材表面に吸

Fig. 3 The outline of filtration machine

引された大型濾滓がパイプリータ式ブラシで除去され濾液槽外に排出される。この際円筒ドラム型濾材は、 24 rpm で回転しており、懸濁液は空気と共に濾材を通して、ドラム内に絶えず真空ポンプで吸引される。またパイプリータ式ブラシで取り除かれずに通過した残滓は、カミソリの刃のように鋭利に刃付けされたステンレス製のスクレーパで濾材と共に付着しているケーキ層を除去する。スクレーパの押付力は、油圧アクチュエータで制御される。この過程で、固液分離が終了する。

一応希薄に清澄された加工液は、真空ポンプで吸引され、 30 l の気液分離タンクに送られ、気体は真空ポンプを経て、大気中へ、濾液は送液ポンプでフィルタ内装着のハウジングを経て、再び加工液として注入される。この過程で気液分離が終了する。

真空ポンプの容量は、排気量 $100 \sim 170 \text{ l/min}$ 、自吸能力 7 mm/Aq 以上のエアードポンプである。

以上の装置をコンパクトにまとめると図3に示すように組立てることができる。さらに、パイプリータブラス、スクレーパの押付力等一連の制御機器を装着すると、図4に示すような濾過機械が完成する。

ここでフェノール樹脂とPVAの濾材寸法は外径 $300 \text{ mm} \times$ 内径 $240 \text{ mm} \times$ 長さ 300 mm の円筒型である。また図4の固液分離機の寸法は、間口 1100 mm 、奥行 700 mm 、高さ 1200 mm で、重量は 250 kg である。

3. 超精密加工液の濾過実験

3.1 実機超精密研磨盤による試験

図5は、片面高速平面研磨機(スピードファム(株)製SF24BTAW)に濾過機を取り付けた時の全景を示す。仕様は以下の通りである。

盤 径： 609 mm

Fig. 2 The flow chart of machining fluid with a filtration

Fig. 4 The all overview of filtration machine

Fig. 5 The all overview of set-up of lapping machine connecting a filtration machine

盤回転数：87 rpm
 リング内径：229 mm
 シリンダ径：80 mm
 全リング面積：1 644 cm²
 最大加圧力：119 kgf
 セグメント厚み：25 mm
 モータ（排水冷）：2 HP
 最大加工物径：450 mm
 モータ（水冷）：3 HP

濾材は、平均気孔径 10 μm 、気孔率 69.3% を用い、濾過流量は 6~10 l/min である。なお会社の都合で使用前の加工液の諸分析は遠慮した（ただし水道水）。

図 6 は、PVA 砥石 SiC # 800 を用い、5.25" アルミニウム磁気ディスクを研磨している時の使用直後と、それを濾過した時の液中に混入している粒子の平均直径に対する含有率%と個数（棒グラフ）を示す。ただし、濾過は 1 回である。濾過前（図上）は、最大粒径 9 μm 、しかも 0.60 μm 以上がかなり多いが、濾過後

Fig. 6 Comparison of filtration for an aluminum alloy (JIS 5086) lapping oil

（図下）は最大径 3 μm となり、平均粒径が 0.64 μm から 0.23 μm に向上する。濾過による粒子の含有率は、0.60 μm 以下の場合、40% から 90% と 50% 減少し、また濃度は 2 105 ppm から 16 ppm に改善された。

さらに PVA 砥石の粒径を小さくし、# 1 500（粒径 11 μm ）として、仕上面粗さ $R_a=0.06 \mu\text{m}$ を得た時の濾過の有無による比較を図 7 に示す。濾過によって、含有粒子の重量% で決定する平均粒径は 0.41 μm から 0.22 μm に、粒子濃度は 550 ppm から 22 ppm に、そして 0.60 μm 以下の小粒径粒子は 50% から 90% の含有量に、それぞれが改善された。

次に濾過回数に対する加工液濃度と含有する粒子の平均直径を図 8 に示す。濾材は気孔径 10 μm （MSL-010 型）で条件は図 7 と同一である。

濾過によって、濃度は 550 ppm から 20 ppm、粒径は約 0.4 μm から約 0.2 μm に、ただ 1 回で定常的な値になることがわかる。

比較のために、市販の遠心分離機を用いたところ、濃度は 510 ppm となるが、粒径に対する効果は得られなかった。また、これと 10 μm のペーパーフィルタを併用したところ、濃度 202 ppm で、粒径は 9 μm の大粒まで分布し、余り高い性能ではない。

これまで濾材の気孔径は、いずれも 10 μm であった

Fig. 7 Comparison of filtration for an aluminum alloy (JIS 5086) lapping oil

Fig. 8 Variation of concentration and particle size due to number of filter circulation

が、より大径の $25\mu\text{m}$ とし、気孔率 70.9%, 濾過流量 $8\sim 10\text{ l/min}$ として、PVA 砥石 (SiC # 3 000, 粒径: $5\mu\text{m}$) を用い、他は図 7, 8 と同一条件とした時の結果を以下に記す。

濾過による加工液濃度は $2\,159\text{ ppm}$ から 25 ppm に、捕捉効率 98.83% になった。

また濾材の気孔径を $5\mu\text{m}$ とより小径にした場合、気孔率 68.3%, 濾過流量 $3\sim 5\text{ l/min}$ とし、他は前記と同一条件としたところ、濾過による加工液濃度は $4\,098\text{ ppm}$ から 0.5 ppm , 捕捉効率 99.99%, 重量% による捕捉物の平均粒径は $0.1\mu\text{m}$ であった。

したがって、この濾材を用いれば、まえがきで目標とした濾過が十分に行えることとなる。

3.2 実機超精密旋盤による試験

図 9 は、図 6, 7 で用いたと同一濾材を使用し、市販超精密旋盤について、濾過の有無による効果を比較した例を示す。加工液は、 28°C で粘度 20 cP を有する市販白灯油である。ディスク材も前記と同一である。

加工液は、濾過によって濃度が $1\,200\text{ ppm}$ から 20 ppm に、含有粒子の平均直径は $0.49\mu\text{m}$ から $0.24\mu\text{m}$ に、そして $0.6\mu\text{m}$ 以下の粒子径は 40% から 90% の含有量にそれぞれ改善された。

この時の加工精度は、仕上面粗さ $R_{\text{max}}=0.041$ ($R_a=0.005$, $R_z=0.036$) μm , うねり $0.045\mu\text{m}/10\text{ mm}$ である。また切削条件は、送り速度 $f=30\mu\text{m/rev}$, 切込み $d=10\mu\text{m}$, 切削速度 $V=1\,250\text{ m/min}$, 単結晶天然ダイヤモンド工具 (東京ダイヤモンド工業(株)製の直線バイト) を用いた。

したがって、3.1 節の水溶性液と同様に、不水溶性液

Fig. 9 Comparison of filtration for machining fluid (machine oil)

Fig. 10 Effect of filtration for a surface roughness

Fig. 11 Effect of filtration for a waviness

についても加工精度を保証した状態で、濾過性能が十分に得られることがわかる。

4. 濾過が加工性能に及ぼす影響

図10, 11, 12は、片面高速平面研磨機(SF 24 BTAW)を用いて、砥石加圧力を変えて、濾過有無による仕上面粗さ R_a 、うねり(外周円周あたり)および磁気ディスク基板の除去速度を示した例である。

仕上面粗さ R_a は、 $0.04 \sim 0.06 \mu\text{m}$ の範囲に収束し、濾過による有意差は余り認められないが、時々発生する地疵は大幅に減少する。たとえば、濾過によって、加圧力 $P=183 \text{ gf/cm}^2$ の時発生するきずは $1.2 \mu\text{m}$ から $0.6 \mu\text{m}$ に、 $P=50 \text{ gf/cm}^2$ の時は $0.5 \mu\text{m}$ が 0.3

Fig. 12 Effect of filtration for a metal removal rate

μm といずれも減少する。

濾過の有無によるうねり $W(\text{cm})$ は、加圧力によるほど大きな影響は受けないが、それでも濾過を行った方が全体的に変化が少なく、その値も小さい。

次にディスクの除去速度は、いずれの加圧力 P についても濾過による向上がみられる。一つには砥石面付着物の増加率が、確率的に小さい加工液が注入され続けられることによって、砥石切れ刃の切削減少量が少なくなることによるとみられる。

いずれにしても、濾過によって加工精度や能率が低下しないことが認められる。

最後に、開発した濾過機械の捕集コスト(円/g)を算定すると、図13に示すようになる。算定基準は、濾材の寿命までのコスト(円/g)、および電気料金(円/g)によるとした。その結果、捕集コストは、夾雑物粒子径 $0.2 \mu\text{m}$ から $10 \mu\text{m}$ の範囲で 0.2 円/g から 2 円/g となり、 $10 \mu\text{m}$ から $100 \mu\text{m}$ は、 0.2 円/g から 5 円/g となり、従来のペーパー濾過機やけい藻土濾過機に比べると約数十倍から数千倍も安く捕集できることがわかる。

5. 結 言

金型の鏡面研磨加工に用いる弾性砥石の結合剤は、極めて耐摩耗性が高く、加工液の通過能率が非常に高い。このことに着目して、これを超精密加工液の濾材に使用することを試みた。その結果、次のような結論が得られた。

- (1) PVAとフェノール樹脂は、濾材として十分な機能を持ち、従来のカートリッジ濾材に比べ著しく低捕集コスト(従来の $1/10 \sim 1/1000$)で濾過で

Fig. 13 Comparison of filtering cost for various filtration machine

きる。

- (2) 濾材は、平均気孔径 $0.05 \sim 200 \mu\text{m}$ 、気孔率 $65 \sim 94\%$ 、通気抵抗 $0.5 \sim 80 \text{ mm/Aq}$ 、耐圧縮強度 50 kgf/cm^2 のものが製造できた。

- (3) 濾過機械は、加工液濃度が 0.5 ppm 、捕捉効率が 99.99% 、捕捉物の平均粒径が $0.1 \mu\text{m}$ 、濾過流量が 5 l/min まで可能である。
- (4) 濾過は、加工液が水溶性、不水溶性いずれも可能であるが、濾過流量には差が生ずる。
- (5) 濾過による超精密加工精度および能率は大きな向上はないが、濾過を行うことによって液寿命は大幅に延びると共に、安定した精度と能率が得られる。

吊 辞

三橋堅一君は、「超精密加工用の濾過機械」を数年で完成し、現在好評を受けている成果を見ずして、天に召された。同君の業績が残された子息への深い愛情とならんことを祈願し、ここに論文を完成した。一周忌にあたり深く御冥福を祈る次第であります。

参 考 文 献

- 1) 熊谷記念会編：超精密加工技術，工業調査会（1984）。

工作機械技術振興賞発表

工作機械技術振興財団（東京都千代田区鍛冶町 1-6-15、理事長・和田敏信氏、電話 03-252-2042）は、このほど標記の第 8 次の論文賞と奨励賞の受賞者を決定した。また同時に第 8 次試験研究助成の対象テーマ 6 件も決定し、1 件 100 万円の助成金を交付することになった。

〔工作機械技術振興賞・論文賞〕 ▽回転磁界を利用した磁気研磨法とその加工装置の開発＝進村武男、波田野栄十、高沢孝哉、▽アコースティックエミッションを利用した旋削プロセスの監視＝小島浩二、稲崎一郎、三宅亮一、▽超精密金属鏡加工技術の研究＝新野秀憲、三井公之、▽液体ボンド砥石を用いた高能率研磨法の開発＝谷泰弘、河田研治、▽難削材の切削過程の解析＝臼井英治、帯川利之、白樫高洋、▽エンドミル加工精度に関する研究＝松原十三生、山本久隆、水本洋、▽フライスによる断続的切削における超硬工具の初期欠損開始位置について＝八高隆雄、長谷川正、竹山秀彦、▽ボラゾン CBN ホールの寿命に及ぼす研削条件の影響＝横川宗彦、横川和彦。

〔同・奨励賞〕 ▽切削抵抗の簡易予測法に関する研究＝北海道工業大学、▽回転工具から放射される風切音の研究＝鶴岡工業高等学校、新潟大学、▽コレットチャッ

クホルダの把持力の分布に関する研究＝武蔵工業大学、東京農工大学、▽円筒トラバース研削における支持法の改善＝千葉大学、▽周辺の温度変化による MC 用コラムの熱変形挙動とその制御＝東京農工大学、▽研磨ベルト仕上げ面の二次元微細形状評価に関する研究＝富山工業高等専門学校、▽単粒工具を用いた高送り電解研削の研削機構に関する研究＝大阪大学、摂南大学、▽ニーモニック 80 A の被削性＝徳島大学、▽パソコン制御ドリル研削盤の開発＝九州大学、▽等位相新刃形エンドミルの開発＝福岡工業大学、有明工業高等専門学校。

〔試験研究助成〕 ▽MC 用工具保持具の性能向上＝堤正臣（東京農工大学助教授）、▽数値制御工作機械における自動計測機能の付与による精度診断技術＝藤井義也（新潟大学教授）、▽エンジニアリングセラミックスの精密加工技術＝三嶋忠夫（石川県工業試験場長）、▽機械部品モデルに基づく加工情報の自動生成とシミュレーション＝木村文彦（東京大学助教授）、▽工作機械構造の解析的アプローチ＝岩田一明（神戸大学教授）、▽金型製造工程のためのエキスパートシステム＝斎藤勝政（北海道大学教授）。

（服部 敏夫）