

金型自動みがき加工技術およびみがき装置の開発

日本工業大学 システム工学科

助教授 鈴木 清

(平成2年度研究開発助成 AF - 90001)

1. 緒言

金型製作の最終工程であるみがき工程の自動化率は依然として低い。この問題を解決するため、各種の自動型みがき装置やいわゆる型みがきロボットが開発され、市販されている。これらの自動型みがき装置は、最新のNC技術を取入れているため、データの入力作業やみがき能率が大幅に向上し、一部では相当の成果を上げていると言われている。しかし、装置の価格が比較的高価であることや、肝心のみがき工具部は既存の回転型や往復振動型のみがき工具をそのまま使用しているため適用部位に制約があるなどの問題も指摘されている。本研究者は、みがき作業の自動化、高精度化には、新しい発想に基づくみがき方法およびみがき工具の開発が不可欠と考えている。さらに、これらの型みがき法をMCなどの切削加工機械上で実現できるアタッチメントの開発を目指している。

本研究では、短繊維状磁性研磨材を利用する磁気研磨法および超音波振動を利用する砥石非回転みがき法を新たに開発し、そのみがき特性について調べた。

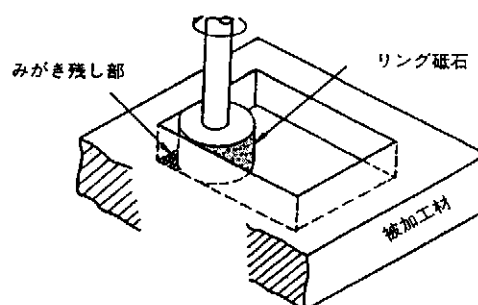
2. 既存みがき法の問題点の検討

(1) 三次元曲面のみがき

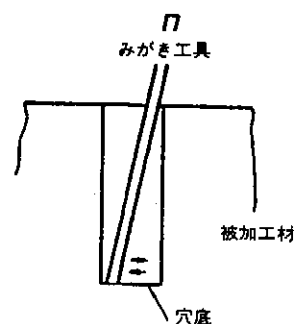
三次元曲面を有する金型のみがき加工では、形状の滑らかさに重点を置く場合が多い。その際、要求されるみがき面性状やみがき能率を考慮して、剛体工具または柔軟体工具が使用される。剛体工具の場合は、工具先端部の移動軌跡をNC制御しながらみがくか、工具支持部を柔構造にしておかなければならない。NC制御方式では、ボール

エンド状砥石などの工具の横移動量を相当小さくしても、いわゆる鏡面みがきを行なうことは困難と思われる。三山砥石に代表される剛体工具の支持部を柔構造とする方法は、制御軸数やみがき能率の点で有利であるものの、曲率半径の小さな自由曲面のみがきには適しているとは言い難い。(2) 従来工具でのみがきが困難な部位

カップ型砥石による型みがき法はみがき能率、みがき面性状などに優れ、型みがきロボットなどに採用されているが、角穴底部や深い穴の底部など(図1)への適用は困難であった。



(a) 回転砥石による角穴底部のみがき



(b) 往復振動形砥石による深穴底部のみがき

図1 既存工具では型みがき困難な部位

(3) 新しいみがき技術の開発

本研究では、従来技術の適用が困難な角穴底部や深いリブ溝の側壁および自由曲面のみがきを実現する目的で、二つの型みがき技術、すなわち、金属短繊維混合磁性研磨材法および超音波ねじり振動砥石法を開発した。また、超音波複合ハンドラッパーのみがき特性についても調べた。

3. 金属短繊維混合磁性研磨材法の開発

3.1 既存磁気研磨法の得失

砥粒と強磁性体とを複合化した粒状磁性研磨材を用いる磁気研磨法は、みがき工具である磁性研磨材自体がみがき面形状に合わせてその形状を自由に変化させるため、剛体研磨工具の適用が困難な複雑形状面のみがき加工に威力を発揮するものと期待される(図2)。また基本的な形状を崩さずに面粗さの改善を図れることも金型みがきに最適と思われる。

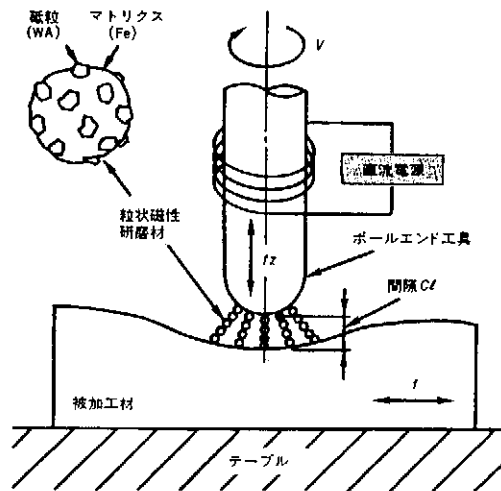


図2 磁気研磨法による3次元自由曲面のみがき法

しかし、みがき能率が低いこと、砥粒寿命が短いこと、工具と被加工材との間隙を大きく取れないこと、強力な磁石が必要であること、などの問題があり、これらを解決しない限り磁気研磨法を型みがきに適用することは困難と思われる。

3.2 新しい磁気研磨法の提案

磁気研磨法を金型自由曲面のみがき加工に適用する場合の上記問題点に対処する手段として、本研究では既存の粒状磁性研磨材に代えて、短繊維状の磁性研磨材を用いる図3 (b, c) のような方法を考案した。

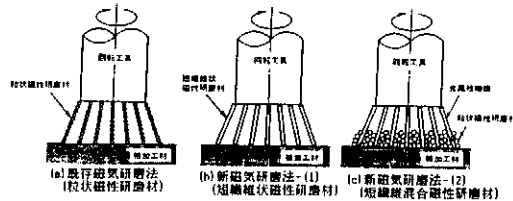


図3 既存磁気研磨法と新磁気研磨法のみがき原理図

この方法によれば短繊維状磁性研磨材が工具と被加工面間の間隙に合わせてその姿勢を半径方向および円周方向で変化させるため、相当広範な許容間隙を持ち得ると期待される(図4)。

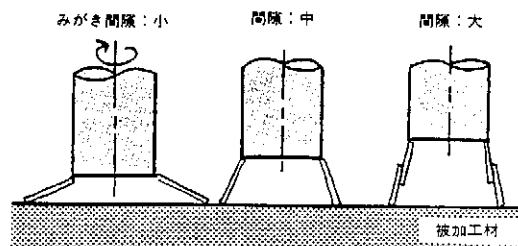


図4 短繊維状磁性研磨材の事故間隙応用機能の様式図

また短繊維状磁性研磨材の場合は、研磨材間での相対すべりが小さく、磁力が繊維の先端部に集中すると考えられるため、研磨能率の低さと砥粒切れ味劣化の問題も解決できるものと思われる。

3.3 短繊維状磁性研磨材の種類

短繊維状磁性研磨材を利用する新しい磁気研磨法で使用する磁性研磨材を大別すると、(1) 短繊維自体が研磨能力を有している場合と、(2) 短繊維が研磨能力を持っておらず研磨補助材としての役目しか担っていない場合になる(図5)。

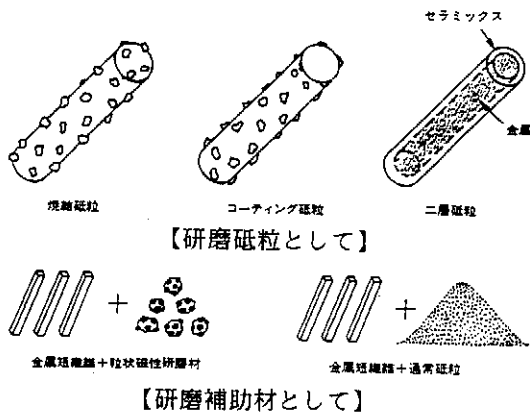


図5 各種短繊維状磁性研磨材の形態

本研究では、後者の金属短繊維を研磨補助材として使用する場合に絞り、本研究者らが先に開発した金属短繊維（びびりファイバ）を既存の粒状磁性磁粒中に混入した混合研磨材を使用して研磨実験を行なった。

3.4 混合磁性研磨材法によるみがき特性

(1) 実験条件

金属短繊維を混合した場合の磁気研磨能力を既存の粒状磁性研磨材のみの場合と比較した。

磁気研磨実験には立形フライス盤の主軸に装着したφ20mmの棒状回転工具を横方向に往復移動させながら行なう方法を採用した（図6）。

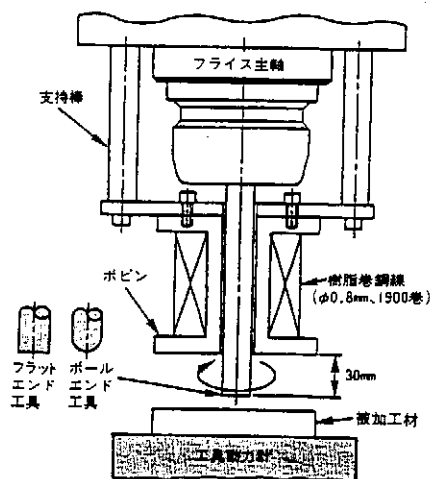


図6 磁気研磨装置の概略

棒状回転工具には周囲に配された電磁石によって所定の磁力を与えた。工具は先端が平坦なフラットエンド工具としたが、先端が半球状のボールエンド工具も一部使用した。

新たに考案し方法では、適度なアスペクト比を有する短繊維状磁性研磨材を使用することを特徴とするが、本研究では既存の粒状磁性研磨材（M-5細粒）と自動車用ディスクブレーキパッド混入材として市販されている直径φ50μm、長さ3mmの軟鋼びびりファイバを使用した。びびりファイバと既存粒状磁性研磨材の混合比は重量比で1:1とした。被加工材は表面粗さRmax≒14μmの研削面をもつSS41材である。磁気研磨時にはみがき加工油を適量滴下した。

図7に混合研磨材を用いて磁気研磨を行なっている状況を示す。

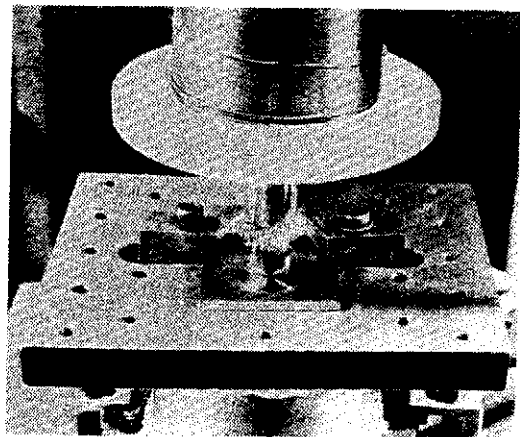


図7 短繊維混合研磨材によるみがき状況

(2) 間隙拡大効果およびみがき能率の向上効果

図8に既存粒状磁性研磨材（2g）のみを用いた場合と、びびりファイバを同量混入した混合研磨材（2g = 1g + 1g）を用いた場合のみがき特性を示す。

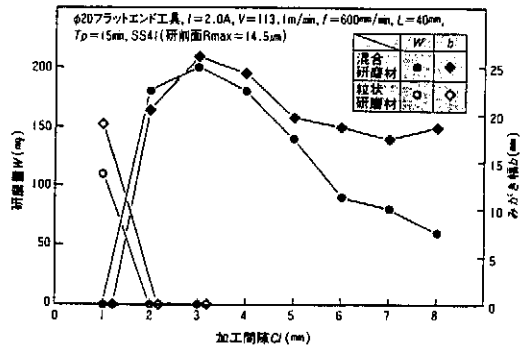


図8 粒状磁性研磨材と短繊維状混合磁性研磨材によるみがき能率の比較

粒状磁性研磨材 (○) の場合、加工間隙が $Cl = 1\text{mm}$ と小さいときには15分間に $W = 110\text{mg}$ の研磨量が得られたのに対し、間隙が $Cl = 2\text{mm}$ のように大きくなるとみがき不能 ($W = 0\text{mg}$) となった。

短繊維混合研磨材 (●) の場合、 $Cl = 1\text{mm}$ では間隙が小さすぎて磁性研磨材が回転せず、みがき不能となった。しかし間隙を広げると急激にみがき能率が增大し、 $Cl = 3\text{mm}$ では15分間に $W = 210\text{mg}$ という極めて高い研磨量が得られた。間隙をそれ以上に拡大すると研磨量は漸減するものの、間隙 $Cl = 8\text{mm}$ の場合でも $W = 60\text{mg}$ という研磨量が得られた。

短繊維混合研磨材でのみがき能率の大幅な向上は、短繊維状砥粒法の場合は砥粒間での相対すべりが小さくなること (図9)、および間隙縮小効果 (図10) により繊維が砥粒を弾性的に押付けて粒状砥粒に対する加工間隙を極限にまで狭めている状態を作り出していることが原因と考えられる。

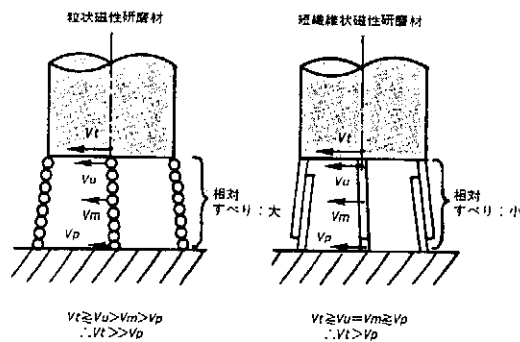


図9 磁性研磨材形状による実みがき速度の相違

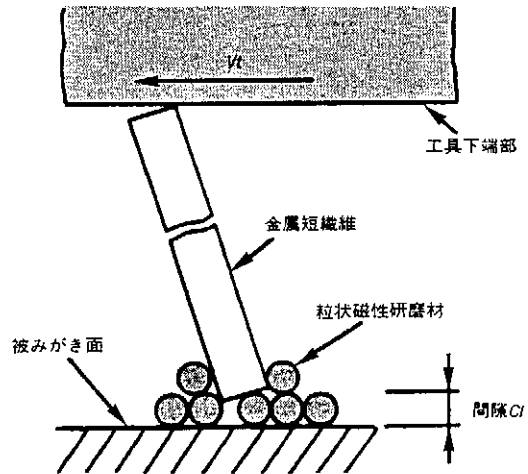


図10 短繊維混合研磨材による間隙縮小効果モデル

粒状磁性研磨材を使用した時のみがき幅 b は、工具直径 ($\phi 20\text{mm}$) とほぼ同じであるのに対し、混合研磨材のそれは $b = 26\text{mm}$ と大きく、間隙が拡大するにつれて漸減している。みがき幅が漸減するのは、前出の短繊維状研磨材による自己間隙適応機能によるものである。図11に短繊維混合研磨材法によるみがき面を示すが、みがき能率が高いにも拘わらずみがき面粗さは良好 (約 $R_{\text{max}} = 0.4 \mu\text{m}$) で、準鏡面を呈している。

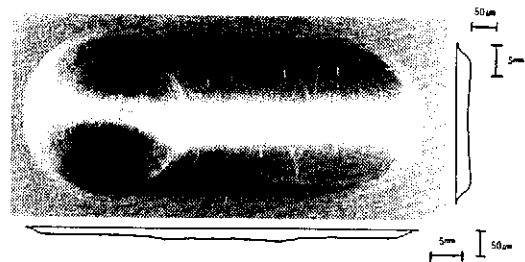


図11 短繊維混合研磨材によるみがき面

(3) 励磁電流の低減効果

図12に混合研磨材を用いたときの励磁電流とみがき能率の関係を示す。

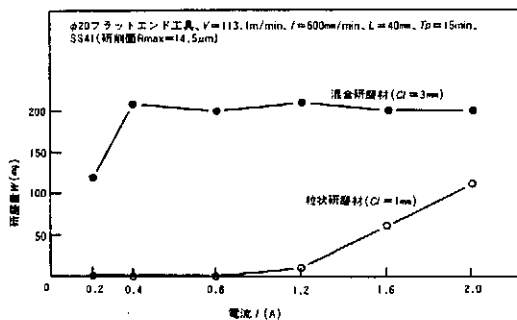


図12 異なる磁性研磨材を使用したときの励磁電流とみがき能率の関係

従来報告されているように、既存粒状磁性研磨材を使用した場合には、みがき間隙を $Cl = 1\text{mm}$ のように小さくしても、 $I = 1.2\text{A}$ 以上の励磁電流を与えないと、みがきは全く行われなかった。また、 $W = 110\text{mg}$ の研磨量を得るには、 $I = 2.0\text{A}$ の励磁電流を要した。

それに対して、短繊維を混入した混合磁性研磨材の場合は、 $Cl = 3\text{mm}$ のようにならかなり大きな間隙を採用しても、粒状磁性研磨材の場合の $1/10$ の $I = 0.2\text{A}$ の励磁電流で $W = 120\text{mg}$ の研磨量を達成できた。また、励磁電流を $I = 0.4\text{A}$ にするだけで、研磨量は大幅に増大し、 $W = 210\text{mg}$ に達し、以後は飽和した。

以上の結果から、短繊維混合磁性研磨材の場合は、極めて小さい電流を流すだけで、すなわち弱い磁力でも十分なみがき能率を達成できることがわかった。

(4) 研磨材寿命の向上効果

既存粒状磁性研磨材を用いる磁気研磨の場合は、長時間一定のみがき能率(除去量)を保つのは困難であると指摘されているが、金属短繊維との混合研磨材の場合は、図13に示すように120分経過後も低下しないことがわかった。

(5) ピックフィード面への適用

ボールエンドミルによる切削面のみがきに短繊維混合研磨材法を適用した結果、ピックフィードピッチが粗い場合でも十分なみがき能力を持っていることが明らかになった。

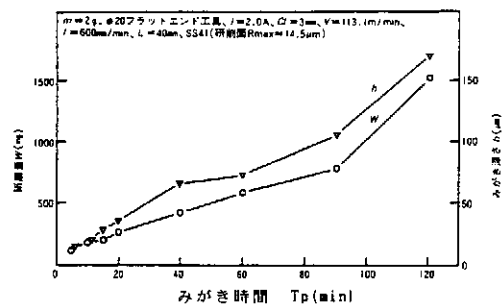


図13 加工時間とみがき能率の関係

3.5 結果のまとめ

金属短繊維(びびりファイバ)を混入した混合研磨材を使用することにより、研磨能率は従来法より大幅に増大した。例えば、直径20mmの棒状回転工具で型材(NAK55材、放電加工面、 $R_{\text{max}} = 3\mu\text{m}$)を研磨した時の最大研磨量は $700\text{mg}/15\text{min}$ であり、これは従来法の数倍の能率に匹敵する(図14)。

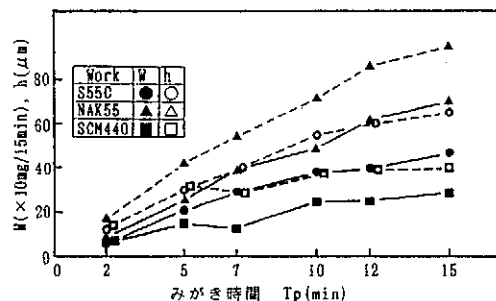


図14 放電加工面に対するみがき能率

短繊維混合研磨材法におけるみがき能率は放電加工面のみならず、かなり粗いピックフィード面の除去にも充分対応可能であることがわかっている。

新たに開発した短繊維状磁性研磨材を使用する磁気研磨法の特長は以下のようである。

- ①みがき能率を大幅に増大させることができた。
- ②砥粒寿命が大幅に増大した(切れ味が2時間以上持続)。

- ③所要励磁電流の大幅な低減が達成できた（従来法の～1/10）
- ④許容加工間隙を大幅に増大できた（従来法の10倍）
- ⑤焼入れ鋼や放電加工面でも同等のみがき能率を達成した。

4. 超音波ねじり振動砥石法の開発

4.1 超音波ねじり振動砥石法の原理

放電加工で創成されたシャープな隅部を有する異形穴底部のみがきを可能にする方法として超音波ねじり振動を利用する方法“超音波ねじり振動砥石法（図15）”を開発した。

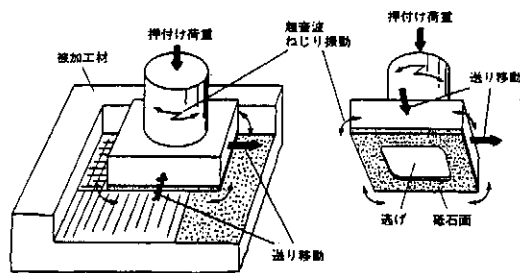


図15 超音波ねじり振動砥石による異形穴底部のみがき加工原理図

この方法は、四角形や三角形底部を有するダイヤモンド砥石を超音波ねじり振動子の先端に取り付け、砥石を回転させずに横方向へ送り移動させるものである。この方法では、砥石が回転せず、ねじりの振幅も極めて小さいため、角穴底部を隅部までみがけるものと思われる。

4.2 超音波ねじり振動みがき装置

(1) みがき装置

図16に示すようなマシニングセンタに装着可能な超音波ねじり振動みがき装置を製作した。

みがき装置の内部には、ねじり振動を発生させるための超音波ねじり振動子（φ45mm）が組込まれている。ねじり振動子は、8枚の台形圧電素子をボルト締めしたBLT（Bolted Langevan

Transducer）型で、共振周波数は19kHz、最大負荷時の超音波出力は200Wである。

(2) みがき工具

みがき工具はホーンと一体化された四角形状砥石（□30mm）を有する電着ダイヤモンド砥石で（図17）、振幅の小さい中心部を深さ1.0mmだけ逃してある。この砥石の振幅は各辺の中央部で、最大 $\delta = 17.5 \mu\text{m} - p$ である。

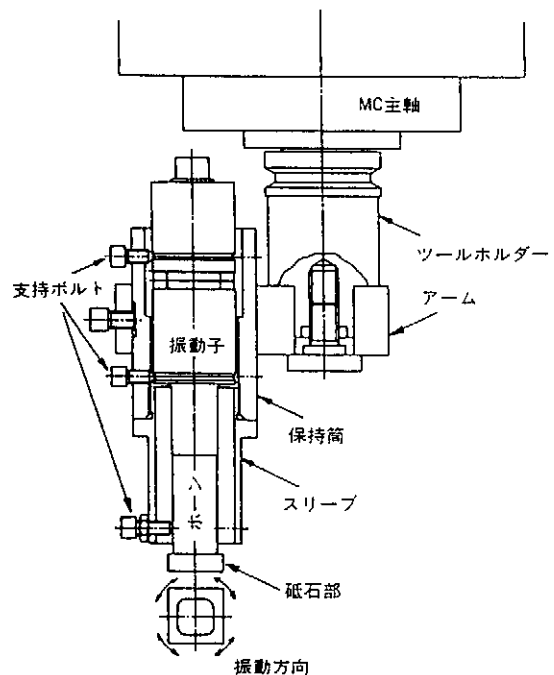


図16 超音波ねじり振動アタッチメントの構造

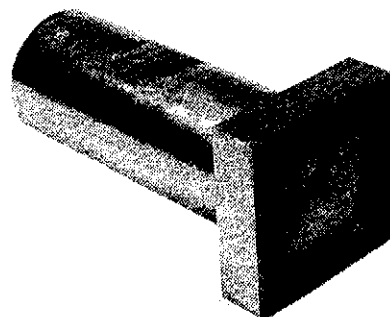


図17 みがき加工用ホーン一体型電着ダイヤモンド砥石

4.3 みがき実験および結果

非回転超音波ねじり振動みがき装置をMCに装着し、湿式で実験を行なった。被加工材は定圧テーブル上に固定した。

(1) 送り移動パターンとみがき特性

図18に示す4種の移動パターン(Aタイプ:横移動、Bタイプ:ブロック移動、Cタイプ:クロス移動、Dタイプ:微細円運動+ブロック移動)でS55C材のみがき加工を行ない、最適な送りパターンを調べた。

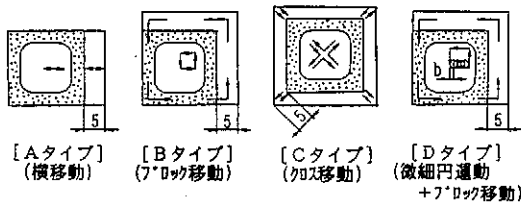


図18 工具の送り移動パターン

4種のパターンに対するみがき面積は、Aを除きほぼ同じである。みがき能率(みがき深さ)は、微細円運動をさせながらブロック移動するDタイプのみがき法が一番良好であった(図19)。

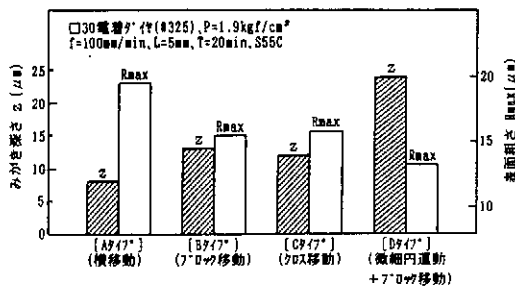


図19 砥石送り移動パターンとみがき特性の関係(#325)

また、横移動のみのAタイプはみがき面積が一番少ないにもかかわらず、能率は一番悪かった。面粗さも同様な傾向となった。これらの結果から、砥粒先端の軌跡を綾目状にすればみがき能率、みがき面性状とも向上できることがわかった。

(2) 押し付け荷重とみがき特性

良好な結果が得られたDタイプの送りパターンを採用して、押し付け荷重Pの影響を調べた(図20)。

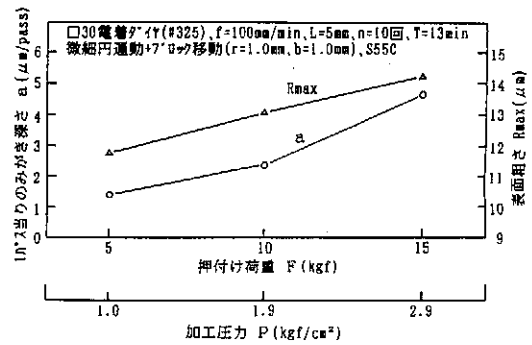


図20 押し付け荷重とみがき特性の関係(#325)

押し付け荷重を増大させるとみがき能率は向上するが、粗さも増大した。

(3) 送り速度とみがき特性

送り速度が速くなるにつれて、1パス当りのみがき深さは漸減するが、みがき面粗さは向上した(図21)。ただし、単位時間当りのみがき深さは、送りが速いほど大きくなっている。

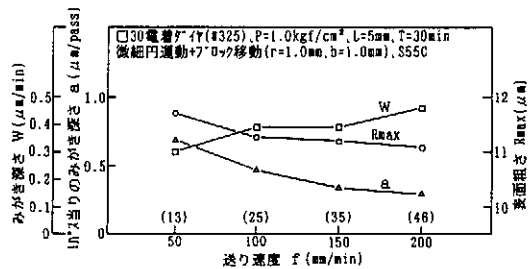


図21 送り速度とみがき特性の関係(#325)

(4) 砥石粒度とみがき特性

粗い電着砥粒(#100)によるみがき特性を調べた(図22)。

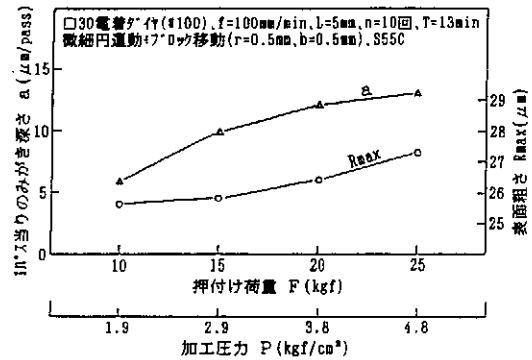


図22 粗い砥石(#100)によるみがき加工特性

同一押付け荷重で比較すると、みがき能率、面粗さとも# 325場合の約2倍となった。

みがき能率を低下させずに面粗さを向上させる方法として、加工終了間際に押付け荷重を低減させる方法を試みた(図23)。

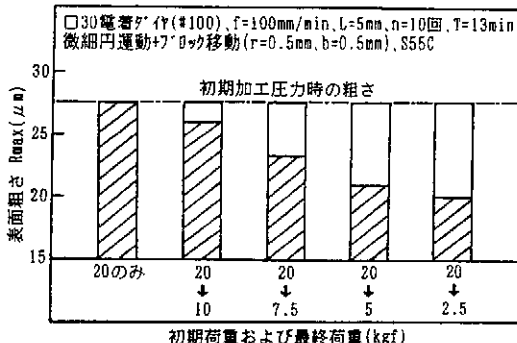


図23 行程終期での押付け荷重低減による面粗さの改善(#100)

押付け荷重を20kgfから2.5kgfに減少させると、面粗さは27.5 μ mから20 μ mに向上した。

4.4 結果のまとめ

角部に丸みの無い角穴底部を隅部までみがく方法として、超音波ねじり振動を利用する砥石非回転研磨加工法を開発し、初期の目的を達成できることを明らかにした。

5. 複合超音波ハンドラッパーの

みがき特性

放電加工により金型に彫り込まれたリブ溝の仕上げ加工には超音波ハンドラッパーが多用されている。しかし、既存ハンドラッパーは放電加工されたリブ溝側面のみがきのように砥石側面を利用するみがき加工では能率が低下するといわれていた。超音波ハンドラッパーの加工特性向上を図るため、砥石を縦およびたわみ方向に超音波振動させる複合振動みがき工具が開発され市販されているが、そのみがき特性は明かにされていない。本研究では、超音波たわみ振動の振幅の異なる2種の超音波複合振動みがき工具を用いて型材のみがきを行ない、たわみ振動重畳の効果および振幅の影響を調べた。

5.1 実験装置および条件

(1) 超音波複合縦振動ハンドラッパー

超音波複合縦振動ハンドラッパーの構造を図24に示す。

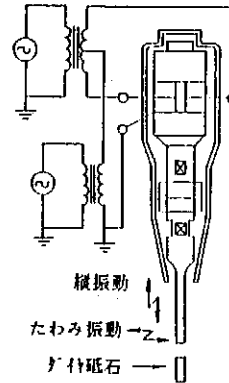


図24 みがき装置の構造

内臓のBLT型振動子の電歪素子は中央で2分割されており、ホーン先端部の平板状メタルボンダイヤモンド砥石を3種の振動モードで振動させる。すなわち矩形断面状の砥石は取付け方向により厚さ方向(Aモード)または幅方向(Bモード)にたわみ振動する。

実験には2種の超音波みがき工具を使用した。縦振動は振動数、振幅とも同一で(28kHz、19 μ m)、たわみ振動のみを変えている。標準型はたわみ振動数 $f_A = 39\text{kHz}/f_B = 38.5\text{kHz}$ 、振幅 $\delta_A = \delta_B = 2\mu\text{m}$ であるのに対し、高振幅型は $f_A = 20\text{kHz}/f_B = 19.5\text{kHz}$ 、 $\delta_A = 19\mu\text{m}/\delta_B = 15\mu\text{m}$ である。

(2) 実験条件

みがき実験はMC上に取り付けた定圧テーブル上で湿式で行なった(図25)。

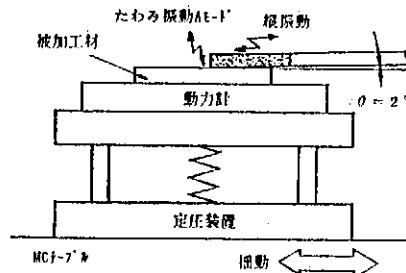


図25 実験装置概略

ワーク上面に対する砥石面の傾き角は $\theta = 2^\circ$ とした。砥石は、粒度 # 200、400、800 の 3 種類のホーン一体型メタルボンドダイヤモンド砥石を使用した。被加工材は NAK55 材で、研削仕上げ（一部、放電加工）により前加工してある。

5.2 実験結果

(1) 振動モードの影響

砥石を横送り移動させながらみがきを行ない、たわみ振幅の影響を調べた。1パス当たりの横送り移動ピッチは 0.2mm/pass 、横移動距離は 10mm （みがき幅に相当）、みがき時間4分で、砥石粒度 # 200、加圧力 $P = 0.5\text{kgf}$ 、移動距離 $L = 20\text{mm}$ 、移動速度 $v_w = 1000\text{mm/min}$ である。結果を図26に示す。

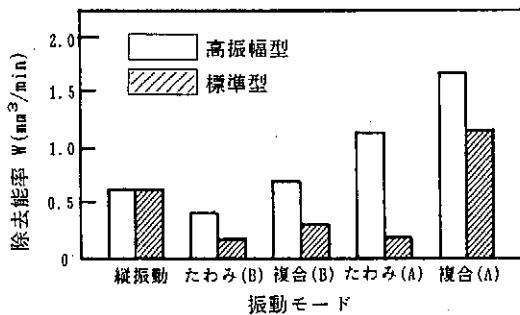


図26 各振動モードによるたわみ振幅の影響

標準型超音波工具（たわみ振幅 $\delta_A = 2\mu\text{m}$ ）のみがき能率は高たわみ振幅型（ $\delta_A = 19\mu\text{m}$ ）に比べ、大幅に低下した。特にたわみ振動 A モードのみを付与した場合の能率の低下は著しく、高振幅型の $1/5$ となった。複合振動（A モード）付与時の能率も標準型では高振幅型の $2/3$ 程度に低下したが、縦振動のみの場合と比較すると 2 倍の能率が得られている。この結果から、被加工面を打撃するように作用するたわみ振動の重畳は、みがき能率向上に極めて効果的であり、振幅が大きいほど能率向上率も大となることがわかった。

(2) 押付け荷重の影響

押付け荷重 P の影響を図27に示す。

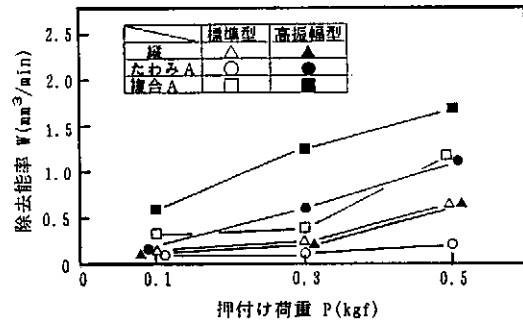


図27 除去能率と押付け荷重の関係

標準型超音波工具のみがき能率はいずれの押し付け荷重でも高たわみ振幅型工具よりも大幅に低下したが、縦振動のみの場合の約 2 倍のみがき能率が得られている。このことは、 P を大きくできない条件でもたわみ振動の振幅を向上させることで能率的なみがきを行えることを意味している。

(3) 砥石粒度の影響

図28、図29に各砥石粒度における振動モードの影響を示す。

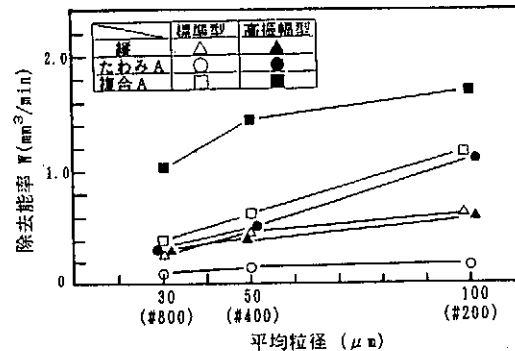


図28 除去能率と砥粒粒径の関係

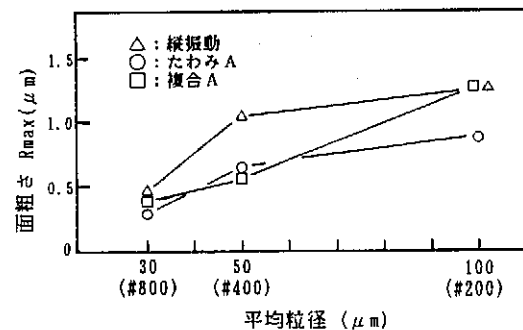


図29 粗さと砥粒粒径の関係（標準型）

たわみの振幅によらず能率は砥粒粒径が大きいほど向上するが、砥粒粒度が細かいほど振幅の大きさの影響が顕著となっている。

(4) 放電加工面への適用

NAK55材の放電加工面 ($R_{max} = 29 \mu m$) および研削加工面 ($R_{max} = 2.4 \mu m$) のみがき結果の比較を図30に示す。

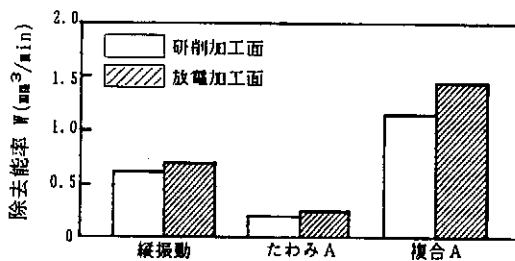


図30 前加工面の影響
(研削面 vs 放電加工面、標準型)

放電加工面においても複合振動付与により縦振動のみの約2倍のみのがき能率となった。また、みがき能率は研削面よりも多少高くなっている。

5.3 結果のまとめ

超音波複合縦振動ハンドラッパーのみのがき能率

に及ぼすたわみ振動重畳の効果を異なる振幅を持つハンドラッパーにより調べた。その結果、振幅が $\delta = 2 \mu m$ のように小さい場合でも縦振動のみの約2倍のみのがき能率を達成できること、振幅が大きい場合には縦振動のみの数倍のみのがき能率を達成できることがわかった。

6. 結 言

既存の型みがき工具の適用が困難な部位の自動みがきを実現する方策として、2種の新しい型みがき技術を開発し、その実用の可能性を調べ、十分実用の可能性があることを明らかにした。また、放電加工されたリブ溝側面のみがき用に最近開発された超音波複合縦振動ハンドラッパーのみがき特性についても調べ、たわみ振動重畳の効果が顕著であることを明らかにした。

また、みがき実験装置は全てマシニングセンタに装着可能なアタッチメント形式としているため、若干の改良でマシニングセンタを利用した自動みがき機械装置が実現するものと思われる。