

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 5 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560110

研究課題名（和文）8の字形3次元工具振動システムによる金型の高能率・高精度鏡面仕上げ

研究課題名（英文）HIGHLY EFFICIENT AND ACCURATE MIRROR FINISH OF METAL MOLDS BY USE OF FIGURE-8 TOOL MOTION GENERATED BY A THREE-DIMENSIONAL TOOL OSCILLATION SYSTEM

研究代表者

水野 雅裕（MIZUNO MASAHIRO）

岩手大学・工学部・教授

研究者番号：40239249

研究成果の概要（和文）：異形状金型の多くは、形彫り放電加工後にハンドラッピングで仕上げられている。金型製作の高能率化と高精度化を目指し、本研究では3次元工具振動研磨加工システムを開発し、その基本的研磨特性を調べた。その結果、8の字形3次元振動により良好な表面粗さが得られるが、被研磨面に大きな形状崩れが生じることが明らかになった。一方、中心軸が工作物送り方向に平行な円振動を用いると被研磨面の形状崩れが小さくなることがわかった。

研究成果の概要（英文）：Complicated shape molds are generally processed by die-sinking EDM and then finished by hand lapping. In order to enhance the efficiency and accuracy in manufacturing metal molds, a lapping machine, which can apply three-dimensional tool motions to a lapping tool, was developed and its fundamental lapping performance was investigated. As a result, the following things became clear. (1) Larger form collapse arises in a lapped surface by three-dimensional figure-8 tool motion while good surface roughness is obtained. (2) Form collapse of a lapped surface becomes small when circular tool motion with a central axis parallel to the work feed direction is used.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：機械工学

科研費の分科・細目：生産工学・加工学

キーワード：金型，放電加工面，鏡面仕上げ，8の字形振動，圧電素子

1. 研究開始当初の背景

切削工具と工作機械の性能向上により、金型の形彫りはこれまでの形彫り放電加工から各種エンドミルを用いた高速直彫り切削加工に置き換えられつつある。しかし、極めて硬度の高い材料の形彫りや、回転工具では加工ができないような異形状金型の形彫りは、今なお放電加工に頼らざるを得ないのが

現状である。一般に、放電加工によって得られる面は、熱影響層を有する梨地面である。熱影響層には引張り残留応力やマイクロクラックが存在し、それらは金型寿命を短くする原因となる。また、金型表面の粗いトポグラフィは、成型品の表面粗さを大きくすると同時に型離れ不良の原因となる。放電加工技術は近年大きく進歩しているが、放電加工後

の研磨加工が依然としてしばしば必要となっている。

放電加工で加工された小形金型の研磨には一般的にハンドラッピングが適用される。しかし、ハンドラッピングには高度な技能と膨大な作業時間が必要であり、金型製作におけるコスト低減と納期短縮の大きな障害となっている。こうした背景から放電加工面を高エネルギー・高精度に研磨する技術の開発が長年の課題となっている。

3年前に応募者は工具の楕円振動とダイヤモンドコンパウンドを用いて研磨を行う装置(図1)を開発し、形彫り放電加工されたSKD11改良材を $3\mu\text{m}$ のダイヤモンドコンパウンドで研磨する実験を行った。実験では、図1のように工具の振動軌跡が作る面と工作物送り方向とが平行になるようにした。この実験では、工作物送り方向の表面粗さを $0.1\mu\text{mRa}$ 以下にすることができたが、それに直角方向の表面粗さは $0.1\mu\text{mRa}$ 以下にすることはできなかった。また、測定方向の違いによる表面粗さの差は研磨圧力の増加に伴って大きくなることがわかった。

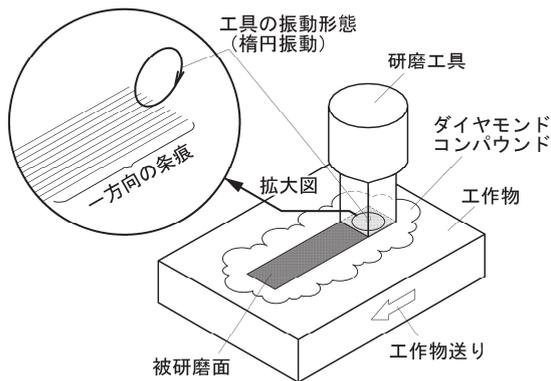


図1 楕円振動による研磨

上述の問題を解決することを目指して、工具に8の字形3次元振動(図2)を与えることができる3次元工具振動システムを開発中である。このような振動を用いることで、被研磨面に微細なクロスハッチを与えるような研磨が可能となる。先に行った楕円振動による研磨の場合、図3(a)のように一方方向の研磨条痕が被研磨面に形成され、多くの砥粒が研磨条痕の谷に沿って移動し、材料除去が行われる。こうした状況下では、粗さの谷の部分により深く除去されるので粗さの改善効率が悪いばかりでなく、異方性の強い表面トポグラフィとなる。これに対し、8の字形3次元振動を用いれば、図3(b)のように砥粒は粗さの山の部分を横切るように移動するので、粗さ改善効率の向上と異方性の低い表面トポグラフィの創成が期待できる。なお、平面的な8の字形振動ではなく、3次元的な

8の字形振動を利用するのは、工具と被研磨面を間欠的に離すことにより、常時新しい砥粒を工具と被研磨面の間に流入させ、できるだけ異なる砥粒を研磨に関与させるためである。図4に工具振動システムの概要を示す。図中のPZT-A, PZT-B, PZT-Cは積層型圧電アクチュエータ(以下、PZTと呼ぶ)である。著者はこれまでに交差角 90° の8の字形3次元振動(100Hz)を用い、形彫り放電加工されたSKD11改良材の表面を $3\mu\text{m}$ のダイヤモンドコンパウンドで研磨する実験を行った。粗さが収束した時点での工作物送り方向とそれに対して直角方向の表面粗さはいずれも $0.1\mu\text{mRa}$ 以下であった。また、それらの値の差は $0.005\mu\text{m}$ 以下となった。この実験結果は提案する研磨方法の高い有効性を示している。

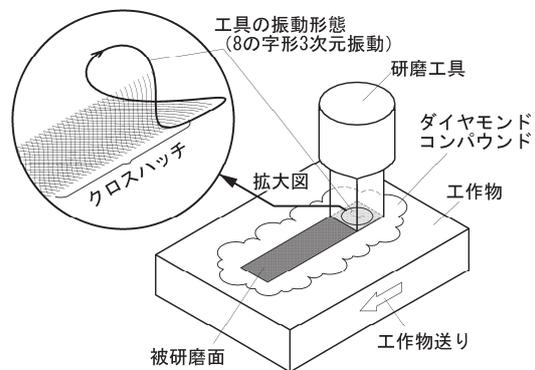
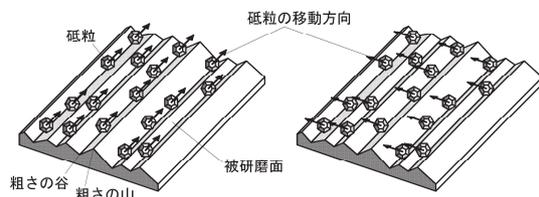


図2 8の字形3次元振動による研磨



(a) 一方向研磨 (b) 多方向研磨
図3 一方向研磨と多方向研磨の違い

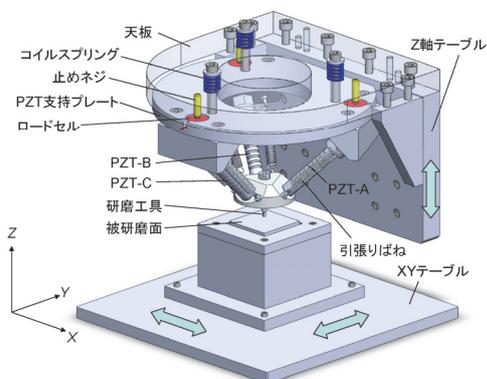


図4 3次元工具振動システム

2. 研究の目的

3次元工具振動システムを用いた研磨加工では、研磨パラメータ（8の字形3次元振動の3軸方向の振幅、工具の振動周波数、研磨圧力、砥粒サイズ、工具の研磨面の形状やサイズなど）が非常に多いため、本研磨方法の基本的研磨特性を未だ十分には把握できていない。そこでより多くの研磨条件で研磨実験を行い、以下の点について明らかにすることを研究目的とする。

- (1) 各研磨パラメータが砥粒の挙動にどのような影響を与えるかについて観察を行って明らかにする。
- (2) 各研磨パラメータが被研磨面の表面粗さや表面テクスチャにどのような影響を与えるかについて明らかにする。
- (3) P Z Tドライバをデジタル化し、工具振動形態を現在よりも自由に変えられるようにする。その上で、被研磨面に対して垂直方向の工具振幅を大きく保ったまま振動1周期当りの研磨距離が長くなるような8の字形3次元振動を発生できるようにし、その振動を用いて上記(1)項と(2)項について明らかにする。

3. 研究の方法

(1) マイクロ스코ープを用いた砥粒挙動の観察

8の字形3次元振動の3軸方向の振幅、工具の振動周波数、研磨圧力、砥粒サイズ、工具の研磨面のサイズなどが、工具と工作物間での砥粒挙動に与える影響を調べるため、工作物としてガラス板を用い、図5のようにガラス板の下側からマイクロSCOPEを用いて砥粒の挙動を観察する。

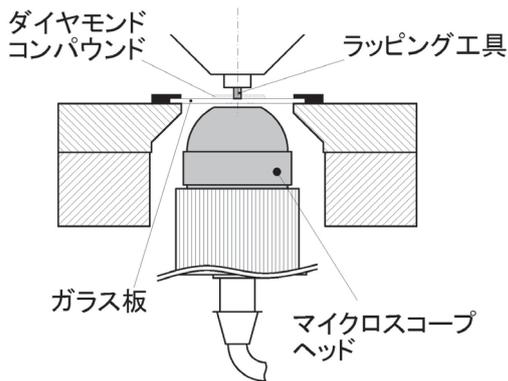


図5 砥粒挙動の観察方法

(2) 研磨条件が被研磨面の表面粗さや表面テクスチャに与える影響を調べる実験

形彫り放電加工されたSKD11改良材を被研磨面として用い、8の字形3次元振動の3軸方向の振幅、工具の振動周波数、研磨圧力、砥粒サイズ、工具の研磨面の形状やサイズな

どの研磨条件を変えて研磨実験を行う。この実験では研磨時間に伴う表面粗さの変化と所定の時間研磨した後の被研磨面の表面テクスチャを調べる。表面粗さは工作物送り方向とそれに直角な方向に測定し、両者の差についても評価する。また、被研磨面の表面テクスチャはマイクロSCOPEを用いて観察する。ここで得られた実験結果は(1)の砥粒の挙動の観察結果と比較して考察する。

(3) P Z Tドライバのデジタル化

現在使用しているP Z Tドライバには4つの発振器が内蔵されており、それらからの出力 ($\sin \omega t$, $\cos \omega t$, $\sin 2\omega t$, $\cos 2\omega t$; ω は角速度, t は時間) とパソコンからDAコンバータを介してP Z Tドライバに供給される11のDC電圧(指令電圧)をアナログ回路で合成して3つのP Z Tに与える電圧波形を出力する。この方式では、パソコンからの指令電圧により、8の字形3次元振動の各軸方向の振幅を変えたり、振動形態の向きを3次元空間で回転させたりすることは自由に行えるが、振動形態そのものを大きく変えることはできない。現在の8の字形3次元振動の基本振動形態の詳細を図6に示す。この振動形態では、振動1周期中に工具が被研磨面を研磨する研磨距離(以下、1周期当り研磨距離と呼ぶ)が非常に短い。実際には研

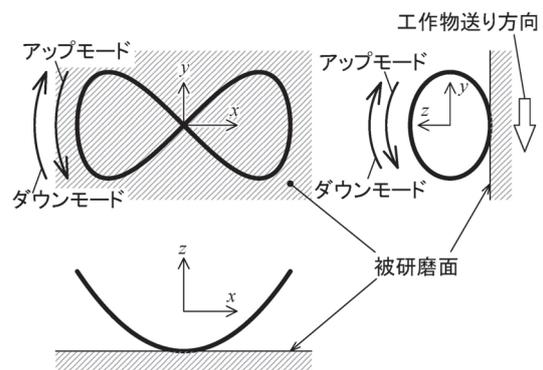


図6 従来の8の字形3次元振動の基本振動形態

磨荷重によって工具や振動システムが弾性変形するので、1周期当り研磨距離は図に示すよりも長くなると考えられるが、それを考慮してもわずかである。従来の基本振動形態で1周期当り研磨距離を長くするには、被研磨面に対する垂直方向の工具振幅を小さくするしか方法はない。そのようにした場合、工具と被研磨面間の最大すき間が小さくなるので流入する新しい砥粒の数が減ってしまう。工具と被研磨面間の最大すき間を小さくせずに、1周期当り研磨距離を長くするため、図7に示すような新しい8の字形3次元振動を提案する。このような8の字形3次元振動を実現するには、P Z Tドライバを

デジタル化し、PZTに供給可能な電圧波形を自由に変えられるようにする必要がある。それを実現するため、DA変換ボードの機能（DA変換ボードに内蔵されたメモリに予め波形1周期分のデータを書き込んでおき、それを高速に連続出力する機能）を利用する。

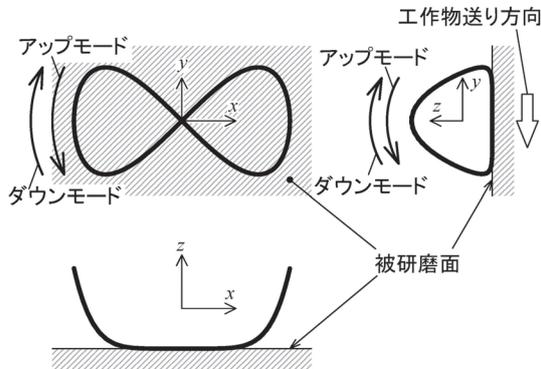


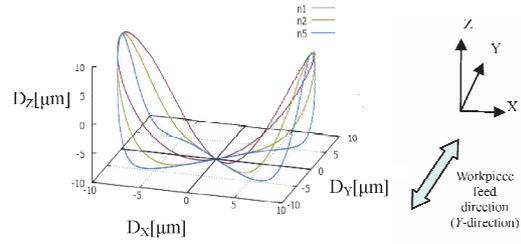
図7 1周期当り研磨距離を長くした8の字形3次元振動の基本振動形態

4. 研究成果

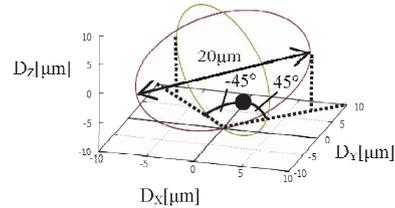
(1) 振動形態が研磨効率に与える影響

使用したPZTの推奨駆動電圧は0-100Vである。PZTに48Vの電圧が印加されたときのPZTの長さを中立長さとし、全てのPZTが中立長さであるときの工具先端位置をXYZ座標系の原点とする。工具先端の座標を(D_x , D_y , D_z)として、図8に本実験に用いる工具振動の詳細を示す。図8(a)は8の字形3次元振動の平坦化を示している。歪係数 n が大きくなるほど平坦化の度合いが大きくなる。図8(b)の円振動1は工作物送り方向に対して中心軸がZ軸回りに45°傾いた円振動である。研磨実験では工作物に往復送りを与えるが往路と復路で振動平面の傾きの正負を変えることで被研磨面にクロスハッチを与えるような研磨を行う。図8(c)の円振動2は中心軸が工作物送り方向に平行な円振動である。

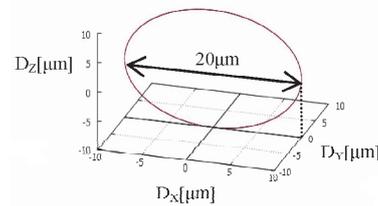
実験では、被研磨面にダイヤモンドペーストを塗布した後、3次元振動を与えた工具で放電加工面を研磨する。研磨時の工作物往復送り方向はY軸方向とし、ストロークを4[mm]とした。また工作物送り速度は4[mm/min]とした。工作物材料は合金工具鋼であるSKD11改良材（大同特殊鋼㈱製，DC53）であり、被研磨面は形彫り放電加工された平面である。初期面の算術平均粗さ R_a は約1.3[μm]であった。研磨工具は、㈱スリーボンド社製のエポキシ系樹脂の主剤2023と硬化剤2105Cを2:1の重量比で混ぜ合わせて作製した。研磨工具の端面形状は2[mm]×2[mm]の正方形とした。振動形態は前述の通りであり、振動周波数は100[Hz]とした。研磨剤として砥粒サイズ3[μm]と1[μm]のオイルベースダイヤモンドペースト（日本エンギス㈱製）を使用した。なお、8



(a) 一部平坦化した8の字形3次元振動



(b) 円振動1



(c) 円振動2

図8 実験に用いた工具振動形態

の字形3次元振を用いた研磨実験では水ベースのダイヤモンドペースト（日本エンギス㈱製）も使用した。研磨力は4[N], 6[N], 8[N]の3種類を用いた。表面粗さと断面プロファイルの測定には東京精密㈱製の触針式粗さ計（サーフコム1400）を用いた。表面粗さの測定にあたっては、測定長さを1[mm]、カットオフ値を0.25[mm]とし、フィルタの種類としてガウシアンタイプを用いた。測定位置は被研磨面(2[mm]×6[mm])の中央部とし、X方向とY方向の表面粗さを測定した。いずれの方向の測定も測定位置を横に0.1[mm]間隔でずらして計5回行い、その平均値を評価値として使用した。断面プロファイルの測定方向はX方向とし、測定長さを3[mm]とした。

(2) 実験結果

図9に研磨力6[N]で90分間研磨したときの各振動形態における R_a の変化を示す。また図10に各条件において R_a が最小になったときの粗さの異方性を示す。8の字形3次元振動では砥粒サイズ3[μm]のダイヤモンドペーストを用いたとき歪係数 n が大きいほど粗さおよび粗さの異方性が低減した。これは振動軌跡の平坦化によって工具が研磨面に接触する時間が長くなり、砥粒の塊が崩れやすくなって滞留が生じ難くなったためであると考えられる。8の字形3次元振動と円振動1を用いたとき、X方向の粗さがY方向の粗さより

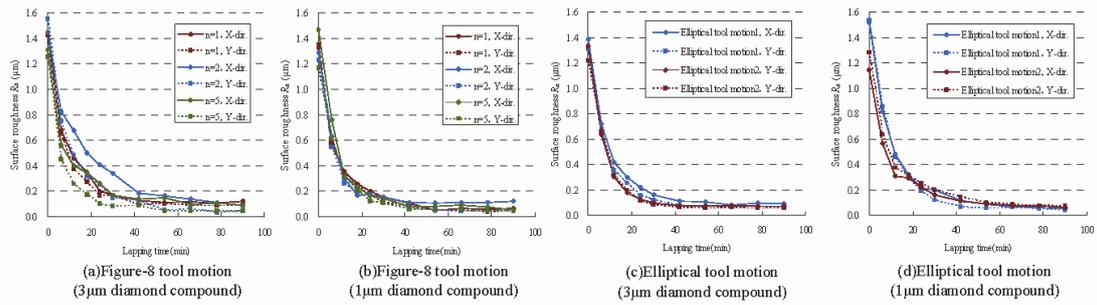


図9 研摩時間に伴う表面粗さの変化 (研摩力 6N)

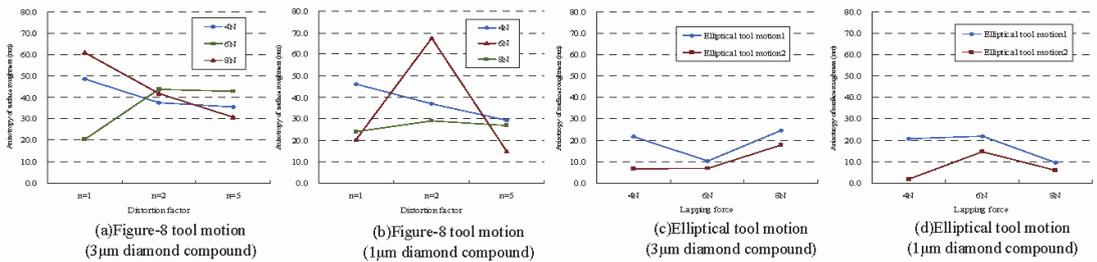


図10 表面粗さの異方性の違い

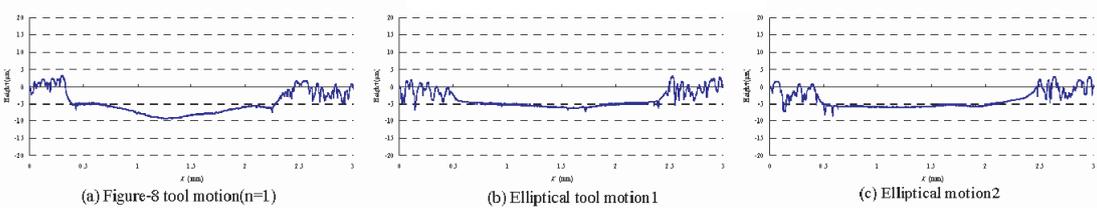


図11 断面プロファイルの違い (研摩力: 6N, 砥粒サイズ 1 μm)

も大きくなっている。これは樹脂工具に固着した砥粒によってY軸方向に条痕が形成されたためであると考えられる。一方、円振動2を用いたときに粗さの異方性が大きく低減している。円振動2ではX方向への砥粒の流動が大きくなり、多くの砥粒がY軸方向に形成された条痕を横切る。その結果、X方向の粗さが低減し、粗さの異方性も小さくなったと考えられる。図11に研摩力6[N]、砥粒サイズ1[μm]のダイヤモンドペーストを用いたときの各振動形態の90分後の断面プロファイルを示す。8の字形3次元振動の断面プロファイルにおいて中央部が凹む形状となった。この傾向はどの歪係数においても同様であった。8の字形3次元振動の、被研磨面に対して垂直方向の振動成分により、図12のように砥粒は工具中央部に集まる。さらに8の字形3次元振動により、砥粒は工作物送り方向にジグザグに移動する。したがって、工具中央部の砥粒量が多くなり断面プロファイルの中央部が深く削られると考えられる。一方、円振動1と円振動2を用いたとき、比較的平

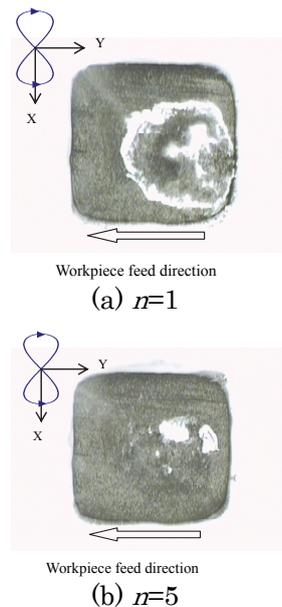


図12 ダイヤモンドペーストの流動観察 (研摩力: 6N, 砥粒サイズ 1 μm)

平坦な断面プロファイルが得られた。この結果は研磨荷重4[N], 8[N]においてもほぼ同様であった。いずれの円振動も工作物送り方向に対して直角方向の速度成分を持つように砥粒を流動させる。そのために平坦な断面プロファイルが得られたと考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計7件)

- ① M.Mizuno, T.Iyama, N.Nishikawa, H.Miune, Lapping of EDM processed tool steel surfaces using three-dimensional figure-8 tool motion, conference proceedings of euspen, Vol.1, pp.130-133, 2009.
- ② 阿部祐貴, 水野雅裕, 井山俊郎, 西川尚宏, 三船英伸, 8の字形3次元振動を利用した小型金型の研磨に関する研究(螺旋溝を有する貫通穴内面の研磨), 2009年度精密工学会東北支部学術講演会, pp.37-38, 2009.
- ③ 田中大介, 水野雅裕, 井山俊郎, 吉原信人, 西川尚宏, 8の字形3次元振動を用いた金型材料の研磨(振動形態の局所的平坦化が研磨効率に与える影響), 2010年度精密工学会東北支部学術講演会講演論文集, pp.24-25, 2010.
- ④ 田中大介, 水野雅裕, 井山俊郎, 吉原信人, 西川尚宏, 8の字形3次元工具振動を利用した研磨加工におけるダイヤモンドペーストの流動観察, 2011年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 CD, C23, pp.201-202, 2011.
- ⑤ M.Mizuno, D.Tanaka, T.Iyama, N.Yoshihara, N.Nishikawa, Lapping of EDM processed tool steel surfaces using modified figure-8 tool motion, conference proceedings of euspen, Vol.2, pp.196-199, 2011.
- ⑥ 田中大介, 水野雅裕, 井山俊郎, 吉原信人, 西川尚宏, 3次元工具振動による放電加工面の鏡面仕上げ, 2011年度精密工学会東北支部学術講演会講演論文集, No36, 2011.
- ⑦ 佐藤統隆, 柏崎真克, 水野雅裕, 井山俊郎, 吉原信人, 西川尚宏, 8の字形3次元工具振動を利用した金型材料の研磨(研磨ペーストの自動供給および基礎実験), 2011年度精密工学会東北支部学術講演会講演論文集, No37, 2011.

[産業財産権]

○出願状況 (計3件)

名称: 研磨方法

発明者: 水野雅裕, 近江憲仕

権利者: 国立大学法人岩手大学, 株式会社エ

ンプラス

種類: 特許

番号: 特願 2009-094720

出願年月日: 2009年4月9日

国内外の別: 国内

名称: 研磨方法

発明者: 水野雅裕, 近江憲仕

権利者: 国立大学法人岩手大学, 株式会社エ

ンプラス

種類: 特許

番号: 特願 2009-269694

出願年月日: 2009年11月27日

国内外の別: 国内

名称: 研磨方法

発明者: 水野雅裕, 近江憲仕

権利者: 国立大学法人岩手大学, 株式会社エ

ンプラス

種類: 特許

番号: 特願 2010-03340

出願年月日: 2010年2月18日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

水野 雅裕 (MIZUNO MASAHIRO)

岩手大学・工学部・教授

研究者番号: 40239249