

平成 21 年 6 月 8 日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19560121
 研究課題名（和文） 電磁力励振式超音波スピンドルの試作とそれを用いる小径内面の精密研削技術の開発
 研究課題名（英文） Development of an Electromagnetic Force Induced Ultrasonic Spindle and Its Application in Internal Grinding of Small Holes
 研究代表者
 吳 勇波（WU YONGBO）
 秋田県立大学・システム科学技術学部・教授
 研究者番号：10302176

研究成果の概要：まず超音波回転体や電磁石を中心に電磁力励振超音波スピンドルを設計・製作した。励振試験の結果、共振現象が確認され、最大振幅が $0.2\mu\text{m}$ 程度と得られた。次に耐摩耗性に優れ、また鏡面研削に適しているメタルボンド微粒ダイヤモンド砥石を小径内面研削に適用する際のツルーイング・ドレッシング条件の最適化を検討した。最後に既設内研機を適宜に改造し、市販の圧電式ロータリ超音波スピンドルを搭載して比較実験を行い、超音波援用研削の加工特性を詳細に調査した。得られた知見が次のように要約される：(1)メタルボンドダイヤモンド砥石のツルーイングで超音波を援用するとツルーイング効率と精度が高くなり、特にボンドテールの発生が抑制され、作用砥粒数が増える；(2)砥石を超音波微振動させながら研削すると研削特性（研削抵抗、表面粗さ、内径真円度、研削比）が向上する；(3)研削特性に及ぼす超音波振動、回転数、切込み速度、砥石種類影響を明らかにした；(4)#5000 微粒砥石目づまりなしで使用可能になり、Ra20nm 程度の鏡面を得ることができた。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2008 年度	800,000	240,000	1,040,000
総 計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：研削加工，超音波振動，内面研削盤，超音波スピンドル，高周波スピンドル

1. 研究開始当初の背景

自動車エンジンの燃料噴射装置の内面加工に見られるように、直径数 mm 程度の小径内面を精密に加工する需要が多い。これら小径内面の研削加工では、砥石直径が数 mm 程度であるため、砥石軸に研削能率と表面粗さを考慮して数万～十数万 min^{-1} の高速スピンドルを用いるのが主流である。最近、更なる小径化や高精度化に対応するために、20 万 min^{-1} 以上の超高速スピンドルが求められる

ようになった。しかし、このように超高速なスピンドルはまだ開発中にあり、それを備える加工機は極めて高価になるであろう。また、高速回転による振動や軸受部の発熱などの問題がスピンドルの性能の発揮を妨げることが予想される。このような情勢の下で、低速のスピンドルを用いても高速の場合と同等あるいはそれ以上の加工特性を得ることができる新しい技術の開発が強く求められている。

砥石側あるいは工作物側に周波数 20kHz 以上振幅数十 μm の超音波振動を付加すると、研削抵抗の低減や砥石のセルフドレッシング効果および研削点での冷却促進などの利点があるため、加工能率と表面粗さが向上するだけでなく、残留応力が小さく研削損傷の少ない加工面も得られる。この点に着目し、小径内面の精密加工技術の新たな開発を目的に、数年ほど前より圧電励振式超音波スピンドルを備えた平面研削実験装置を試作して、加工力と表面粗さに対する超音波微振動の効果などを調べていた。その成果より、小径内面の精密研削に超音波スピンドルを用いると、回転数が従来の十分の一程度と低くても要求加工特性が得られ、特に微粒砥石が使えるために従来技術でできない鏡面レベル内面加工が実現されるとの見通しを得た。

しかし、供試超音波スピンドルは、圧電励振式であり、構造が複雑でメンテナンス性は良くないだけでなく、接触式給電装置における接触不良や摩耗および発熱が発生するなど問題点がある。これら問題は、非接触給電磁歪式超音波スピンドルを使用すれば解決されると考えられるが、高周波損が大でエネルギー変換効率が悪い。そこで、全く新しい超音波発生法を提案し、接触式給電装置が不要でエネルギー変換効率のよい超音波スピンドルを開発することが急務になっている。一方、供試砥石は、従来の高速スピンドルによる内研に慣用されているビトリファイドボンド砥石で、低速研削時の高い研削抵抗や超音波微振動による大きな衝撃力によって摩耗が激しく実用の点では寿命が短すぎる。したがって、耐摩耗性に優れた砥石を導入する必要がある。

2. 研究の目的

上に述べたような背景で電磁力励振という新しい励振方法を考案し、圧電素子と磁歪材料を使用せずに構造がシンプルないわゆる電磁力励振式超音波スピンドルの開発に着手した。また、メタルボンドダイヤモンド砥石が耐摩耗性に優れているが、それを小径内面研削に適用したときのツルニング・ドレッシング特性や研削特性を体系的に明らかにする必要がある。本課題研究では、電磁力励振式超音波スピンドルを設計・試作しその動作特性を確認すること、またメタルボンドダイヤモンド砥石をツルニング・ドレッシングする条件の最適化および直径数 mm 程度の内面研削に用いるときの加工特性の体系的把握を研究目的とする。

3. 研究の方法

上述目的を達成するために次の各項目についてそれぞれの手法で研究を進めていた。

- (1) 電磁力励振式超音波スピンドルの設計、製作と動作特性試験
超音波回転体を中心要素とした電磁力励

振式超音波スピンドルの構成と励振原理を図 1 に示す。すなわち、超音波回転体は軸受とそのハウジングを介して左右二つのフランジでベースプレート上に支持固定し、カップリングを介してモータによって回転駆動される。超音波回転体の共振モードを 3 つの節点（振幅がゼロの点）を有する縦 3 次振動（L3 モード）とし、超音波振動が拘束されないように左右のフランジをそれぞれ左右の節点に設ける。一方、中央節点の左右に超音波回転体と同一の強磁性材料で一体化したディスク状磁石ターゲットをそれぞれ 1 個設け、この 2 つのディスクに向き合って電磁石を取り付けた 2 つのホルダをベース上に固定する。いま、信号発生器と電力増幅器からなる電源装置から周波数が L3 モード振動数の近傍にある交流電圧を電磁石に印加すると、ディスクに変動磁気引力が働き、超音波回転体が励振される。印加電圧の周波数と振幅、そして電磁石とディスク間のギャップおよび電磁石の配置数と容量を変えることによって励振パワーが調整され、回転体の超音波振幅が増減する。

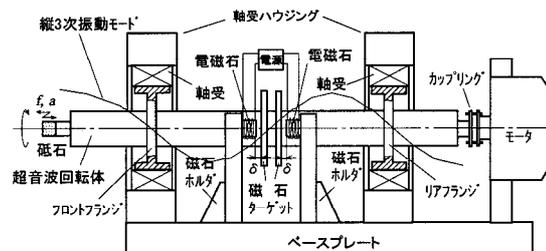


図 1 電磁力励振式超音波スピンドルの構成と励振原理

超音波回転体の構造と寸法は、次の点を考慮して設計した：a) 通常の超音波援用加工における振動数が 15 ~ 60kHz であることから回転体の振動数を 20kHz 以上；b) 回転体を安定に支持するため、また超音波振動が拘束されないように L3 モードの左右二つの節点に支持用フランジを設ける；c) 電磁石からの電磁力を受けるために駆動ディスクを L3 モードの腹部に設ける。これら条件を満たすように、FEM 構造解析によってフランジや駆動ディスクおよび回転軸を一体化した回転体の構造寸法を求めた。なお、回転体の材料として超音波振動が励起されやすい磁性材の S45C とした。以上のように設計した回転体は S45C 棒材を削りだすことによって製作した。

次に、実際に製作した超音波回転体の縦 3 次振動の周波数を知るために、図 2 に示す方法でハンマリングテストを行った。超音波回転体は、吊り下げて自由状態とする。端面をインパルスハンマで加振し、汎用振動計を介して FFT アナライザに打撃信号を入力する。また、片端面にはレーザドップラー振動計を用いてレーザビームを当て、振動振幅を FFT アナライザに出力し、出力信号の周波数

分布を求める。

さらに鉄心などにコイルを巻きつけた構造をもつ電磁石の設計・製作を行った。強い磁場（ついで電磁力）を得るには鉄心に透磁率 μ の高い純鉄を選定し、また同じ観点からコイル材を選定した。さらに磁石の発熱による特性の低下を防ぐために冷却措置もとるようにした。寸法は、設置スペースを考慮した上、またこれまでの予備実験の知見に基づいて設計した。なお製作は外注で行った。

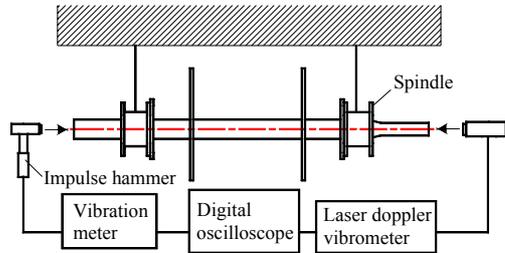


図2 ハンマリングテスト方法

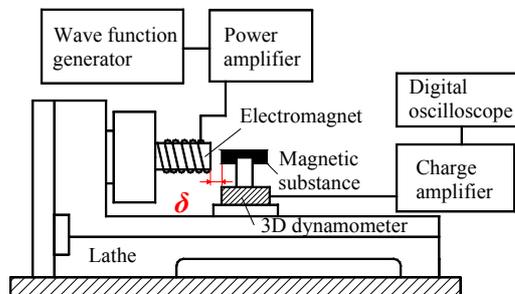


図3 電磁石動作試験の概念図

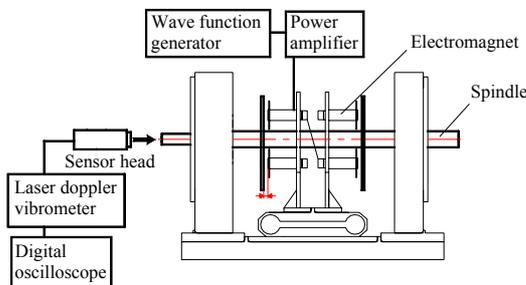


図4 励振試験の概念図

最後に軸受とそのハウジング・ベースプレートおよびモータとカップリングなどは、要求回転精度と機械的強度および最高回転数を考慮して設計・選定した。

以上で設計製作した各部品でスピンドルを組み立て、電磁石の動作試験と超音波回転体の励振試験を行った。図3と図4にそれぞれ電磁石動作試験と回転体励振試験の方法を示す。電磁石動作試験では、信号発生器とバイポーラ電源を接続した電磁石を卓上旋盤のチャックに固定し、ツールヘッド上に三分力動力計を介して磁性体を取り付ける。電磁石に電流を流すと、磁性体に電磁力を作用され、その大きさと周波数は動力計とチャー

ジアンブからなるシステムで検出される。

一方励振試験（図4）では、一枚の駆動ディスクにつき直列に接続している4つの電磁石を対向配置する。交流電圧を印加すると、電磁石からの変動磁気力が駆動ディスクに作用して回転体の超音波振動が引き起こされる。回転体先端の振幅と周波数の測定は、レーザードップラー振動計とFFTアナライザによって行う。電磁石端面と駆動ディスク側面の距離 δ は、すべての電磁石について同じにする。実験では、初めに励振周波数をハンマリングテストで特定した共振周波数の近傍に変化させながら回転体の縦3次振動の周波数特性を測定し、その共振点を特定する。そして、励振周波数をこの共振点に固定し、印加電圧が回転体先端の振幅に及ぼす影響を調べる。

(2)メタルボンドダイヤモンド砥石のツルーイング・ドレッシング条件の最適化検討

GCカップ砥石を用いたツルーイング・ドレッシングにおいて、ツルーイング精度と効率の向上を狙って砥石に超音波微振動を与えるときのツルーイング特性を調べツルーイング条件の最適化検討を行った。図5にツルーイング原理を示す。即ち、超音波微振動を砥石軸方向に与えながら回転数 n_g で回転する研削砥石を、回転数 n_d で回転するカップ砥石に速度 V_r で往復運動させながら1往復運動するごとに切込み深さ δ を与えて行う。実験は、圧電式超音波スピンドルを備えたNC内面研削盤を用いて行った。またツルーイング抵抗は、スピンドルの下に設置した動力計によって測定した。供試砥石は、微粒(#3000)のメタルボンドダイヤモンド砥石(5mm)で、GCカップ砥石の粒番は#80で内外径は30mmと20mmであった。実験条件としては、超音波無し(振幅 $A=0$)か有り(振幅 $A=8\mu\text{m}$)、周波数 $f=40\text{kHz}$ 、 $n_g=3000, 6000\text{rpm}$ 、 $n_d=3000, 4700\text{rpm}$ 、 $V_r=0.1\text{m/min}$ 、 $\delta=1.5\mu\text{m}$ にした。なお、実験は水溶性研削液を供給しながら行った。これら条件でのツルーイング抵抗や得られた砥石の形状精度および砥石表面トポグラフィについて評価し、最適ツルーイング条件を特定した。

そして、ツルーイングや研削時に超音波を援用するかしないかによって加工特性がどう変化するかについて実験調査した。図6に超音波援用内面研削の概念図を示す。回転数 n_w で回転する工作物に対し、超音波微振動を砥石軸方向に付加させながら回転数 n_g で回転する研削砥石を切込み速度 V_c で加工を行なう。なお、研削中水溶性研削液を供給した。以上の条件での研削抵抗や研削後の工作物表面粗さと真円度などについて比較する。表1に超音波の援用パターンを示す。またツルーイング条件は、 $A=0, 8\mu\text{m}$ 、 $f=40\text{kHz}$ 、 $n_g=3000\text{rpm}$ 、 $n_d=4700\text{rpm}$ 、 $V_r=0.1\text{m/min}$ 、 $\delta=1.5\mu\text{m}$

mにし、研削条件は、 $A=0, 8\mu\text{m}$ 、 $f=40\text{kHz}$ 、 $n_g=4000\text{rpm}$ 、 $V_c=0.1\text{m/min}$ 、工作物回転数 $n_w=300\text{rpm}$ にした。なお工作物は SUS440C 製リング状（内径 8mm 外径 25mm）であった。

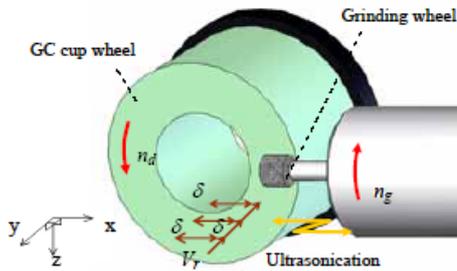


図5 超音波援用ツルージング・ドレッシング原理

表 3-2 超音波の援用パターン

Grinding	×	×		
Truing / dressing	×		×	

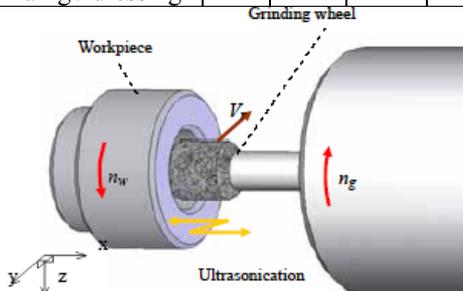


図6 超音波援用内面研削の概念図

(3)小径内面の研削における加工特性の体系的調査

超音波援用の有無について研削実験を行ない、諸加工パラメータが加工特性にどのような影響及ぼすかを体系的に調査した。加工は、前出の図6に示した方法に砥石のオシレーション運動を加えることによって行った。工作物も3-2節と同じものを使用し、それを研削盤の三つ爪式チャックに取り付け、取付けの際にダイヤルゲージで工作物内径部の振れを $2\mu\text{m}$ 以内になるように調整した。

実験内容としては、(a)砥粒粒度の違う砥石を用いるときの超音波援用の効果を調査する；(b)粒度#1000の研削砥石を用いて研削砥石と工作物の回転数の影響を調べ、両者の最適値を特定する；(c)形状精度の向上を図るために研削砥石切込み速度やオシレーション運動の影響を調査する；(d)#5000の微粒砥石を使用するときの到達加工精度を調査する。

ツルージング条件を $A=8\mu\text{m}$ 、 $f=40\text{kHz}$ 、 $n_g=3000\text{rpm}$ 、 $n_w=4700\text{rpm}$ 、 $V_g=0.1\text{m/min}$ 、 $\delta=1.5\mu\text{m}$ 、#80GC カップ砥石に固定し、研削条件を $A=0, 8\mu\text{m}$ 、 $f=40\text{kHz}$ 、 $n_g=2000 \sim 6000\text{rpm}$ 、 $V_c=6 \sim 140\mu\text{m/min}$ 、 $n_w=150 \sim 450\text{rpm}$ にした。なお工作物は3-2と同じものを使用した。

4. 研究成果

(1) 設計・製作したスピンドルの特性

図7に設計製作した超音波回転体の写真を示す。超音波回転体の寸法は、全長 330mm、駆動ディスクの直径 96mm、フランジの直径 50mm、超音波回転体先端の径 12mm であった。また共振周波数は、ハンマリングテストの結果 22.48kHz で設計値の 22.06kHz にほぼ一致する。また製作した電磁石の作り出す磁気力は、印加電圧の直流分を 5V に固定し、変動分の振幅を増加することによって行った動作試験の結果、変動分振幅の増加に伴い直線的に大きくなることがわかった。さらに、 δ が小さいほど磁気力が大きくなる傾向も見られた。



図7 設計・製作した超音波回転体の写真



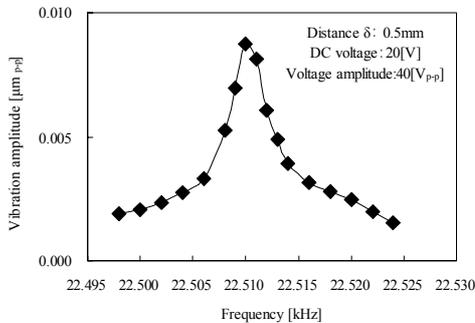
図8 組み立てたスピンドルの外観写真

図8に、設計・製作した各部品を組み立ててできたスピンドルの全体イメージを示す。このスピンドルについて図4に示した方法と条件 ($\delta=0.5\text{mm}$ 、印加の電圧直流分 25V と変動分振幅 4 ~ 50V、周波数 22.49kHz ~ 22.525kHz) で励振実験を行った。図9にその結果を示す。同図(a)よりわかるように、22.585kHz で振幅が最大になり、この点が実際の共振で前出の設計値やハンマリングテスト結果にほぼ同じである。一方、同図(b)より、振幅が印加電圧にほぼ比例していることもわかる。

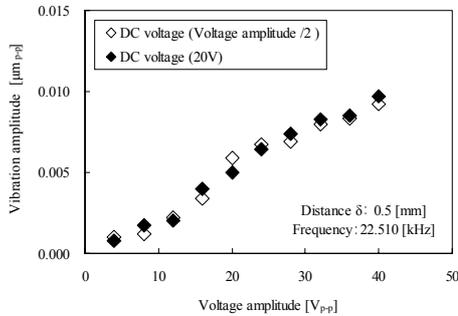
(2) メタルボンドダイヤモンド砥石のツルージング・ドレッシング特性

図10にツルージング抵抗 F はに及ぼす超音波振幅の影響を示す。 F は、振幅の増大とともに減少し、超音波を援用しない場合と比べ援用した場合は約 26%減少したことがわかる。図11(a)と(b)に、それぞれ超音波援用なしとありでツルージングした後の研削砥

石表面観察結果を示す。同図(a)と(b)を比較すると、超音波を援用しなければ、砥粒後方に結合剤が長く尾を引いたようにボンドテールとして残留しその占める面積が広く、砥粒分布密度が低いことがわかる。砥粒の分布密度は、超音波を援用すると26%増大している。上述の他に以下の結果と知見も得られている：(a)超音波を援用しない場合と比べ、援用したほうは研削砥石振れが約36%減少し、その円筒度も改善する；(b)ボンドテールの発生が超音波の援用によって抑制される；(c)超音波を援用すると砥粒分布密度が約26%向上する；(d)工作物表面粗さは、研削砥石回転数 $n_g=3000\text{rpm}$ 、研削砥石切込み量 $\delta=1\mu\text{m}$ 、カップ砥石回転数 $n_d=3000\text{rpm}$ で最良であった；(e) 研削抵抗は、 $n_g=6000\text{rpm}$ 、 $\delta=10\mu\text{m}$ 、 $n_d=4150\text{rpm}$ で最小になった；(f)工作物真円度は、 $n_g=4500\text{rpm}$ 、 $\delta=1\mu\text{m}$ 、 $n_d=4700\text{rpm}$ で最良になった；(g)工作物円筒度は、 $n_g=6000\text{rpm}$ 、 $\delta=5\mu\text{m}$ 、 $n_d=4150\text{rpm}$ で最もよかった。



(a)周波数特性



(b)振幅に対する印加電圧の影響
図9 励振試験の結果

(3) 小径内面の研削における加工特性

図12に砥石回転数が工作物表面粗さに及ぼす影響を示す。図中、 \blacklozenge は超音波援用なし、 \blacklozenge は超音波援用ありを表す。同図より、超音波援用なしの場合、砥石回転数の低下とともに表面粗さが悪化するが、超音波援用ありでは砥石回転数を4000rpmまで低下させても表面粗さは保たれているのが確認できる。これは、低速領域であるほど砥粒が工作物表面上に描く正弦波状の研削痕の波長が増長し、超音波の効果がより効率的に得られるためであると考えられる。また、2000rpmまで減速

すると表面粗さは改悪する。これは、ボンドテールと工作物との干渉によるものであると考えられる。

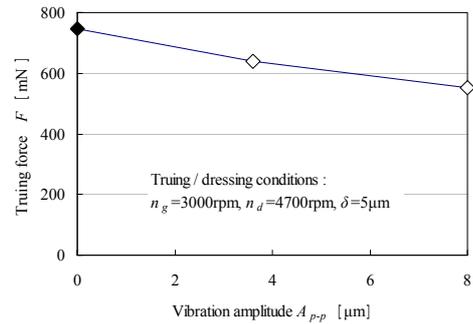


図10 ツルイーグ抵抗 vs.超音波振幅

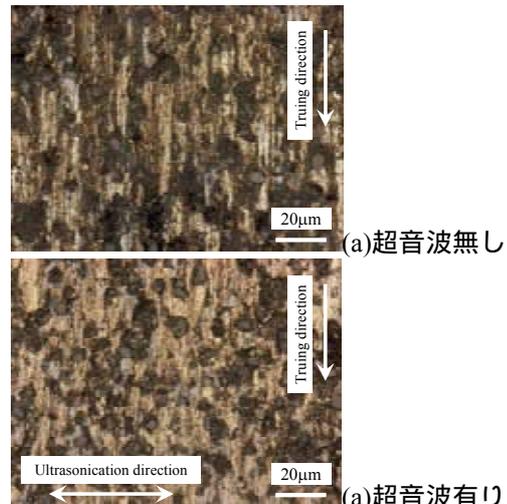


図11 砥石表面の砥粒分布

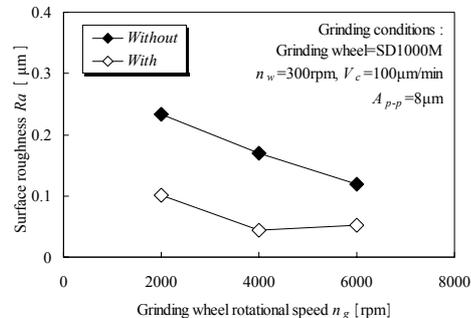
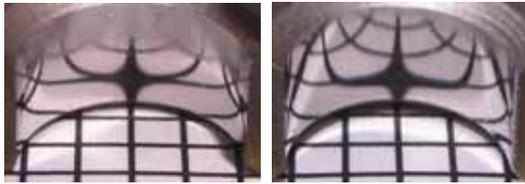


図12 超音波援用の有無における砥石回転数の表面粗さへの影響

図13(a),(b)に、それぞれSD5000M、 $n_g=4000\text{rpm}$ 、 $n_w=300\text{rpm}$ 、 $V_c=60\text{mm/min}$ 、 $A_{p-p}=8\mu\text{m}$ の研削条件で得られた超音波援用なし・ありにおける研削後の工作物表面写真を示す。超音波援用なしの場合と比較し、援用ありのほうは、格子模様の写り込みがよく、良い表面状態が得られていることがわかる。上述の他に、超音波の援用によって以下の効果も確認されている：(a)研削抵抗は法線方向で最大51%、接線方向で最大55%低減した；(b)表面粗さは最大で82%向上した；(c)真円度と円筒度は最大でそれぞれ48%と

84%改善した；(d)材料除去能率は最大で600%増大した；(e)本実験条件範囲内においてSD5000M， $n_g=4000\text{rpm}$ ， $n_w=300\text{rpm}$ ， $V_f=60\text{mm/min}$ ，オシレーション速度0.1m/minの条件で最も良い加工特性が得られ，表面粗さ $R_a 0.088\mu\text{m}$ ，真円度0.235 μm ，円筒度0.553 μm となった。



(a) 超音波なし (b) 超音波あり
図13 超音波援用なし(a)・ありで得られた加工面写真

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)

[雑誌論文](計4件)

M. Nomura, Y. Wu, 他3名, Effects of Grain Size and Concentration of Grinding Wheel in Ultrasonically Assisted Grinding, Key Engineering Materials, 査読有り, 389-390 (2009), pp. 283-288.

野村光由, 呉勇波, 他3名, 小径内面の超音波援用研削に関する基礎研究—小径砥石のツルイーグ・ドレッシングにおける超音波振動の効果—, 超音波 TECHNO, 査読無し, 20, 3 (2008), pp.85-88.

M. Nomura, Y. Wu and T. Kuriyagawa, Investigation of internal ultrasonically assisted grinding of small holes: effect of ultrasonic vibration in truing and dressing of small CBN grinding wheel, J. of Mech. Sci. & Tech., 査読有り, 21, 10 (2007), pp.1605-1611.

Y. Wu, M. Tamano and M. Kato, Inducing a Machine Spindle to Ultrasonically Vibrate by Fluctuating Electromagnetic Force, Int. J. of Applied Electromagnetics and Mechanics, 査読有り, 25, 1-4 (2007), pp.621-626.

[学会発表](計10件)

高橋康夫, 呉勇波, 他2名: 超音波援用研削による小径内面の研削, 2009年 JSME 東北学生卒業発表会, 2009.3.6 in 秋田県立大.

M. Nomura, Y. Wu, 他3名, Study of Ultrasonically Assisted Internal Grinding of Small Holes: The effect of Grain Size of CBN Grinding Wheel, AMPT2008, 2008.11.4 in Manama, Bahrain.

S. Yokoyama, Y. Wu, 他3名, Development of a New Rotary Ultrasonic Spindle for Precision Ultrasonically Assisted Grinding, AMPT2008, 2008.11.3 in Manama, Bahrain.

横山将太, 呉勇波, 野村光由, 他3名: 小径

内面の超音波援用精密研削に関する研究 小径超砥粒ホイールのツルイーグ・ドレッシングについて, 2008年度 JSPE 秋季大会, 2008.9.19 in 東北大川内キャンパス.

横山将太, 小松勇氣, 呉勇波, 林 偉民, 野村光由, 岳 将士: 小径内面の超音波援用精密研削に関する研究 微粒砥石による鏡面研削の試み, 2008年度 JSPE 春季大会, 2008.3.18 in 明治大学生田キャンパス.

小松勇氣, 野村光由, 呉勇波, 岳 将士: 超音波援用小径内面の精密研削における砥石粒度の加工特性への影響, 2007年度 JSPE 東北支部学術講演会, 2007.12.1 in 八戸工大.

M. Nomura, Y. Wu and T. Kuriyagawa, Investigation of internal ultrasonically assisted grinding of small holes: effect of ultrasonic vibration in truing and dressing of small CBN grinding wheel, AMPT2007, 2007.10.8 in Daejeon, Korea.

野村光由, 呉勇波, 他2名: 超音波援用小径内面研削に関する研究 加工特性に及ぼすcBN 砥石粒度の影響—, 2007年度 JSPE 秋季大会, 2007.9.13 in 旭川市勤労者福祉会館.

横山将太, 呉勇波, 野村光由, 立花 亨: 電磁力励振式超音波スピンドルの製作に関する研究, 2007年度 JSPE 秋季大会, 2007.9.12 in 旭川市勤労者福祉会館.

野村光由, 呉勇波, 他3名: 小径内面の超音波援用研削に関する基礎研究 研削抵抗における小径cBN 砥石の粒度と集中度の効果—, 2007年度 JSPE 春季大会, 2007.3.21 in 芝浦工大豊洲キャンパス.

[産業財産権]

出願状況(計1件)

名称: 回転軸に超音波振動を発生させる装置

発明者: 呉勇波, 立花 亨

権利者: 呉勇波, ミクロン精密(株)

番号: 特開 2007-268505 (特願 2006-101222)

出願年月日: 2006年3月31日

公開年月日: 2007年10月18日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1)研究代表者

呉勇波 (WU YONGBO)

秋田県立大学・システム科学技術学部・教授
研究者番号: 10302176

(2)研究分担者(～2007.12)

野村光由 (NOMURA MITSUYOSHI)

秋田県立大学・システム科学技術学部・助教
研究者番号: 70325942

(3)連携研究者(2008.1～現在)

野村光由 (NOMURA MITSUYOSHI)

豊橋技術科学大学・工学部・特任助教
研究者番号: 70325942