

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 25 年 5 月 27 日現在

機関番号：32407

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560120

研究課題名（和文） 極微細径工具による切削特性解明および超音波振動切削システムの開発

研究課題名（英文） Investigation of Cutting Characteristics of Micromilling and Development of Ultrasonic Micromilling System

研究代表者

神 雅彦（JIN MASAHIKO）

日本工業大学・工学部・教授

研究者番号：80265371

研究成果の概要（和文）：金型加工，自動車部品加工，あるいは携帯情報機器の部品加工に対して，極微細径工具による切削特性の向上が要求されている．それに対して，本研究では，極微細径工具による切削特性の解明と，切削能力を向上させるための研究を行った．その結果，極微細径工具による切削特性解明に関する研究では，直径 30 μm および 10 μm といった工具に対して，工作機械主軸の動バランスと切削特性との関係を明らかにした．それにより，極微細径工具により切削特性を向上させるための方策を明らかにすることができた．

研究成果の概要（英文）：High cutting performance using micro-end mills has been demanded in the manufacture of injection molds, several automotive parts and mobile information equipment. In this study, the author investigated cutting characteristics of micromilling and developed an ultrasonic micromilling system. As a result of the former study, it was clarified that the relationship between cutting accuracy and dynamic balance of main spindle in micro-milling operation using micro-end mills with diameters of 30 μm and 10 μm . Then, the author proposed the dynamic balance condition to obtain effective cutting accuracy in the micromilling.

On the latter study, the author newly developed an ultrasonic spindle system, which has the main spindle rotated with a speed of 20,000min⁻¹ and vibrated with a frequency of 41kHz and an amplitude of 2 μm . Several cutting tests were experimented, such as single scratch tests of grass for the mobile information terminal and micromilling of hardened steel by using cBN end mills. Then, the author clarified that this ultrasonic micromilling system is advantaged to the manufacture of fine injection mold and several parts.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	2,600,000	780,000	3,380,000

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：切削・極微細・エンドミル・超音波・超音波振動・単粒引掻き試験

1. 研究開始当初の背景

研究背景として，自動車インジェクタノズル，燃料電池，液晶ガラス，あるいは電子部

品金型などに対し、直径が 30 μm 以下の極微細の回転切削工具（エンドミル、ドリルあるいは軸付砥石）による極微細加工の要求がますます増えている。

しかしながら、問題点として、それらの極微細工具による切削現象が通常工具と大きく異なっており、その切削特性は十分に解明されていない。したがって、工業的には従来の経験に頼るのみで、効果的な利用法が確立されていないのが現状である。

2. 研究の目的

(1) 極微小径工具の切削挙動の解明：このテーマでは、極微小径工具の切削挙動に関して、まず基本的に、直径 30~10 μm の超硬スクエアエンドミルを用い、同切削挙動に対して、最も影響度が大きい工作機械の主軸回転動バランスと歩行現象との関係について検討し、極微小径工具における切削現象を解明する。

(2) 極微小工具の効果的な切削法の提案：このテーマでは、極微小工具の効果的な切削法に関して、超音波振動を利用する対策法を研究する。超音波振動を細長い小径エンドミルに作用させることにより、パルス切削の原理により、工具の歩行現象を抑制できることが解明されている。本研究では、その方法を極微小工具に適用することを研究する。具体的には、極微小工具を振れ回り無く保持でき、主軸動バランスを調整して、かつ工具に超音波振動させることが可能な工作機械を開発し、同工作機械による切削法を提案する。

3. 研究の方法

(1) 極微小径エンドミル切削特性解明に関する基礎研究

概要：直径 100 μm 10 μm の極微小径超硬ないしは cBN エンドミルを用い、無酸素銅や焼入鋼に対する溝加工実験を行い、主軸動バランス、振れ回りおよび工具回転数と切削された溝の性状との関係を調査し、切削挙動に関して解析する。これによって、極小径超硬エンドミルにおける切削挙動を明らかにする。

実験：工作機械には、空気静圧軸受、V-V 転がり案内による超精密加工機械（東芝機械 ULG-100CH3）を用いる。超精密工作機械により、実験に対する工作機械による誤差要因をなくす。工具には、直径 30 μm 超微粒子超硬ボールエンドミル（2 枚刃）、および同 10 μm エンドミル（1 枚刃）および直径 100 および 30 μm の cBN エンドミルを用いる。工作物には、結晶ひずみ等のばらつきが少ない無酸素銅ないしはステンレス焼入鋼を使用する。切削条件として、工作機械主軸の動バランスは 10~1nm の範囲で変化させる。主軸回転数は 10,000~50,000 min^{-1} の範囲で変化させる。工具の振れ回りは 0~3 μm の範囲で変化させる。

評価：切削された溝形状、切削表面および切りくず形態の変化、切削抵抗波形の変化により切削特性を評価する。

(2) 極小径細長工具による良好な切削を可能とする超音波スピンドル装置の開発
概要：極微小径でアスペクト比（工具長/直径）が 5 以上のエンドミルやドリルなどの工具による良好な切削を可能とするために、超音波振動を発生させることができるスピンドル装置を新たに開発し、極小径細長工具による良好な切削加工を可能とする技術を開発する。

開発：
空気軸受付超音波振動主軸の開発：振動素子をビルトインした超音波振動スピンドルを製作する。はじめに、スピンドル単体の振動駆動テストを実施し、振動特性を評価および調整する。次に、スピンドルとしての回転特性（特に動バランス）を評価し調整する。

高速超音波スピンドルの試作：前記要素を具備する高速超音波スピンドルを製作し、スピンドルとしての総合性能を評価する。

(3) 直径数 mm のアスペクト比（工具長/直径）が 5 以上の研削砥石などの工具による良好な切削を可能とするために、超音波振動を発生させることができるスピンドル装置による切削機構を明らかにする。

開発：開発は (a) と (b) の方法で実施する。

(a) 単粒モデルによる超音波振動研削機構の解明：振動素子をビルトインした超音波振動スピンドルによる単粒の引掻き試験を実施し、振動特性や切削特性を評価する。(b) 高速超音波スピンドルによる加工実験：前記要素を具備する高速超音波スピンドルを製作し、総合性能を評価する。具体的には、超硬合金、焼入鋼、あるいはセラミックスやガラスなどの高硬度および脆性材料を微小切削し、その切削特性を評価する。

評価：切削された溝形状などの変化により、超音波振動の効果および試作スピンドルによる加工結果を評価する。

4. 研究成果

(1) 極微細径工具による切削特性解明
微細径エンドミル加工における加工誤差要因の考察および修正法の検討

微細径エンドミル加工における系統的な加工誤差の発生要因を図 1 に示す。

この中で、主軸のアンバランス振動は、主軸端でのチャックおよび工具の取付状態により、主軸の重心が回転中心からずれることによって発生する振動であり、一般的に、回転数の増加によって、その振幅が増大してくる。すなわち、主軸のアンバランス振動が加工精度に敏感に影響することが知られている。

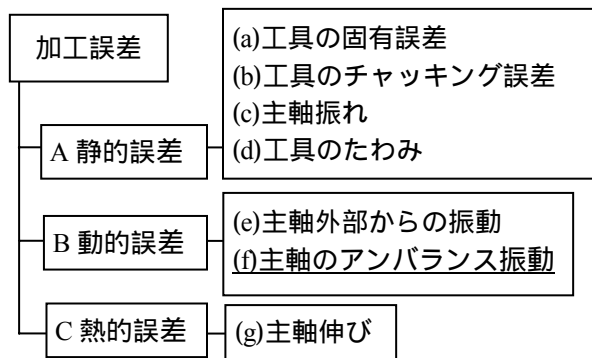


図1 微細径エンドミル加工における主要誤差要因の分析

本研究では、高速主軸のアンバランス振幅を、 $1\text{nm} \sim 100\text{nm}$ 程度に変化させて、アンバランスと微細径エンドミル加工における加工精度との関係に関して調査した。

アンバランスの修正位置を図2に示す。使用した工作機械の主軸の第1次危険速度は、 $55,000\text{min}^{-1}$ 程度であり、今回の実験では、それ以下の回転数を利用しているので、主軸は剛体ロータとみなすことができる。

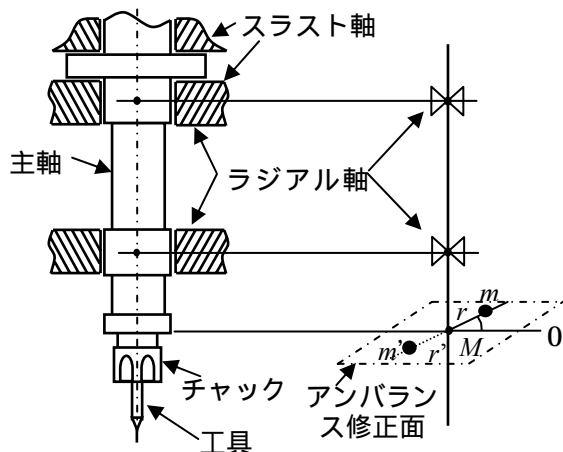


図2 空気静圧軸受主軸の主軸端でのアンバランス修正

(m : アンバランス質量, r : アンバランス距離, m' : 修正質量, r' : 修正距離, M : 主軸質量)

そこで、主軸端側におけるアンバランスによる振動加速度を測定し、測定値を演算によりアンバランス振幅 ($=mr/M$) を求め、修正バランス $m'r'$ によりつり合わせを行なった。

各アンバランス修正レベルおよび回転数の条件下で加工した溝の形状及びばりの状態

主軸アンバランスを精密修正した場合および無修正の場合、および主軸回転数が低速および高速回転させた場合の溝形状を SEM で観察した結果を図3に示す。

図(a)は低速回転条件($n:20000\text{min}^{-1}$)で、か

つアンバランスを精密修正($\delta:1\text{nm}$)した場合である。溝幅は、工具の刃径に一致する $30\mu\text{m}$ となっており、ばりもほとんど発生していないことがわかる。すなわち、ほぼ理想的な微細溝加工が実現できている。

それに対して、図(b)は高速回転条件($n:40000\text{min}^{-1}$)とした場合である。この場合は、アンバランスの増加は $\delta:2\text{nm}$ 程度に収まっており、溝幅の拡がりは認められない。ばりは若干増加しているが、十分に小さいレベルであり、この場合でも、精密な微細溝加工が実現できているといえる。

それらに対して、図(c)は低速回転条件で、アンバランスを修正していない($\delta:8\text{nm}$)場合である。溝幅は、若干拡がり $30.8\mu\text{m}$ 程度となっている。一方、ばりは工具の進行方向に対して右側にあたる一刃における切削が終了して切れ刃が材料から抜ける側に大きく発生するといった結果となった。

さらに、図(d)は高速回転条件とした場合である。この場合は、アンバランスの増加は $\delta:0.169\mu\text{m}$ となり、極めて大きい。その結果、溝幅は大きく拡がり $38\mu\text{m}$ 程度となり、ばりも増加している。溝内部には送りマークがはっきり確認され、さらに原因不明の直線溝の発生が認められる。

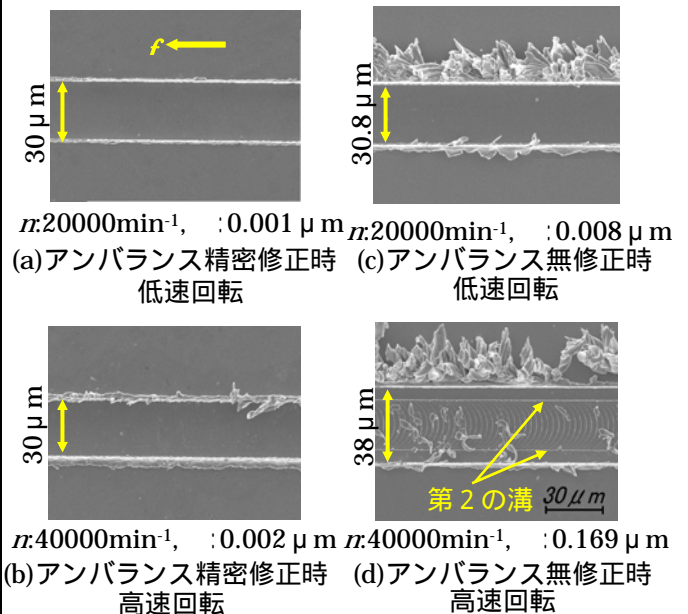


図3 各アンバランス修正レベルおよび回転数の条件下で加工した溝形状およびばりの状態

アンバランス、主軸回転数および加工溝幅との関係

主軸アンバランス振幅と加工した溝幅の拡がりとの関係に関して整理した結果を図4に示す。その結果、加工された溝幅はアンバランス振幅と比例関係にあり、アンバランス

振幅が数 nm と微小になるように調整した場合には、工具径とほぼ等しい $30\mu\text{m}$ の溝加工が実現するが、アンバランス振幅が大きくなるほど溝幅が拡大されていくことがわかる。この関係は、主軸回転数に関らず、単純にアンバランス振幅のみに依存しているといえる。

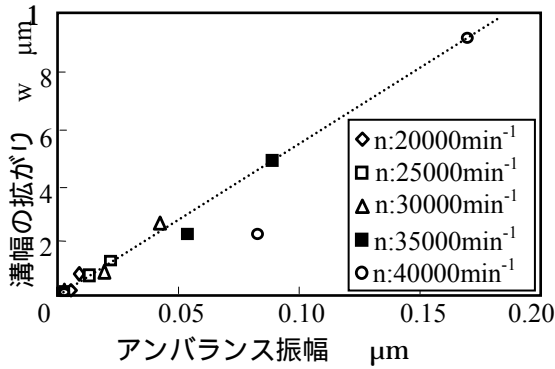


図4 アンバランス振幅と溝幅との関係

(2) 超音波振動切削システムの開発
超音波振動単粒切削における切削機構の解析

基本的な単粒引掻き試験において、超音波振動を付与した場合の幾何学的な切削機構は図5のように示すことができる。振動方向は、右下図に示すように、背分力方向 (f, a_t) および送り分力方向 (f, a_f) の2方向とした。

図(a)は、超音波振動なしの場合であり、切込み d_c と切削幅 w_c は一定である。それに対して、図(b)は、背分力方向振動の場合であり、切込み d_f と切削幅 w_f は振動数 f と切削速度 v との関係により正弦波的に変化する。一方、図(c)は送り分力方向振動の場合であり、切込み d_f は一定であり、切削幅 w_f は与えた超音波振動の振幅 a の分だけ広がる。また、切削痕は振動数と切削速度との関係により蛇行する軌跡となる。

超音波スピンドルシステムの開発および切削実施例

開発した超音波スピンドル装置を図6に示す。すなわち、工具には圧電セラミックスを内蔵しており、工具全体が、振動数 $f=43\text{kHz}$ および波長 1.5λ で共振する。工具には、ダイヤモンド電着軸付砥石を用い、電着砥粒の一つを単粒として利用している。加工機械には、分解能 $0.1\mu\text{m}$ のリニアモータ駆動3軸ステージを用いている。

超音波振動引掻き試験結果例

背分力方向振動切削による引掻き痕の性状を観察した結果を図7に示す。慣用切削では、図(a)に示すように、被削材表面の貝殻割れとともに、内部割れも多く発生している。すなわち、表面に見える欠陥と見えない内部欠陥とが発生しやすいことが加工上の

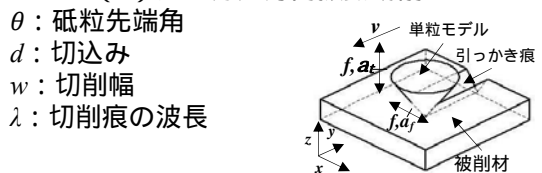
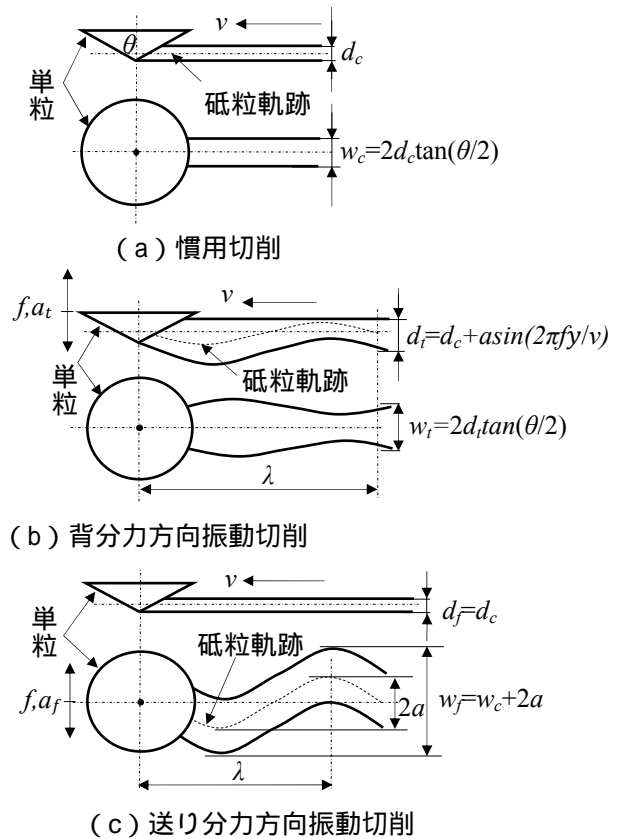


図5 超音波単粒引掻き試験における幾何学的切削機構

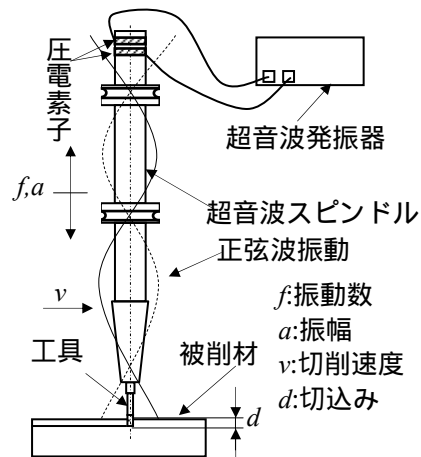


図6 超音波スピンドル装置(主軸部)

問題となる。それに対して、超音波振動を付加した場合には、図(b)および(c)に示すように、微細なクラックの累積により溝が形成されていることがわかる。すなわち、クラックを伴っているため、先に解析したような

幅が変化する切削溝にはなっていないが、慣用切削に比べて平滑な溝が形成されている。

同様に送り分力方向振動切削による場合を図 8 に示す。この場合も慣用切削では、図(a)に示すように、前述と同様の傾向を示すが、超音波振動を付加した場合には、図(b)および(c)に示すように、クラックサイズが、より微細化されていることがわかる。

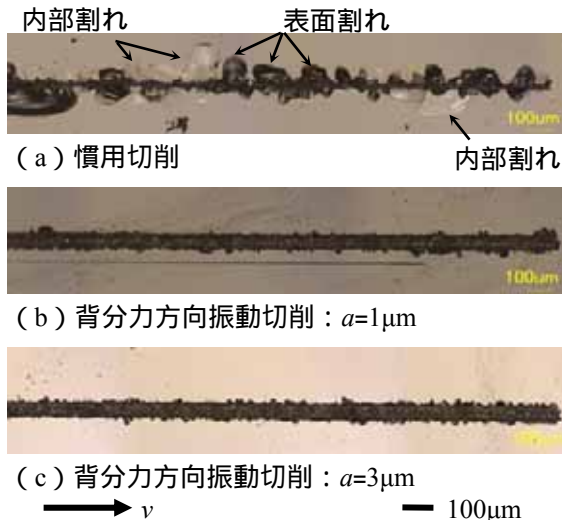


図 7 背分力方向振動切削における引掻き痕の状況
($v=20\text{mm/min}$, $f=43\text{kHz}$, $a=0\sim 3\mu\text{m}$, SD#230)

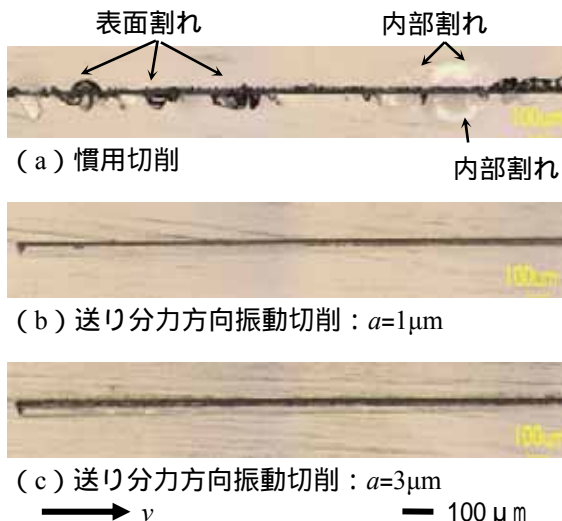


図 8 送り分力方向振動切削における引掻き痕の状況
($v=20\text{mm/min}$, $f=43\text{kHz}$, $a=0\sim 3\mu\text{m}$, SD#230)

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 6 件)

金井秀生, 神雅彦, 超音波高速スピンドルの開発および金型材料や高脆材料の微細・精密加工に関する研究, プラスチ

ック成形加工学会誌, 査読無, Vol. 24, 2012, 259~262.

神雅彦, 金井秀生, 小型/高速/超音波スピンドルによる微細金型形状の精密切削/研削加工, 塑性と加工, 査読無, Vol. 53, 2012, 26~30.

神雅彦, 金井秀生, 超音波振動研削法による高硬度脆性材料の精密加工, 機械と工具, 査読無, 8月号, 2012, 65~71.

神雅彦, 超音波振動を利用した精密切削および塑性加工技術 - 最近の研究の紹介 -, 超音波 TECHNO, 査読無, Vol. 23, 2011, 52~57.

神雅彦, 後藤隆司, 渡辺健志, 微細径エンドミル加工における主軸アンバランスと加工精度との関係(第1報) - 刃径 $30\mu\text{m}$ の 2 枚刃スクエアエンドミルの場合 -, 砥粒加工学会誌, 査読有, Vol. 54, 2010, 22~26.

神雅彦, 後藤隆司, 渡辺健志, 金井秀生, 超音波振動を援用した極微細エンドミル加工 - 刃径 $30\mu\text{m}$ の cBN エンドミルによる焼入れ金型鋼の切削 -, 超音波 TECHNO, 査読無, Vol. 22, 2010, 50~53.

〔学会発表〕(計 29 件)

金井秀生, 神雅彦, 高速超音波スピンドルによる脆性材料の精密加工, 日本塑性加工学会超音波応用加工分科会第 39 回超音波応用加工セミナー, 2013 年 2 月 28 日, 日本大学(東京都)

神雅彦, 藤家広大, 金井秀生, 湯原正籍, 星野誠, 和田修, 磯幸男, 高速超音波スピンドルによる硬脆材料の精密・微細研削に関する研究(第 4 報) - 研削面の解析 -, 2012 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2012 年 9 月 15 日, 九州工業大学(福岡県)

藤家広大, 神雅彦, 金井秀生, 高橋一彰, 高速超音波スピンドルによる硬脆材の微細加工, 2012 年度砥粒加工学会学術講演会, 2012 年 8 月 30 日, 同志社大学(京都府)

藤本正和, 呉勇波, 金井秀生, 神雅彦, 超音波援用精密研削による微細 3D 構造の加工製作における基礎研究, 2012 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2012 年 3 月 15 日, 首都大学東京南大沢キャンパス

神雅彦, 高橋一彰, 金井秀生, 高速超音波スピンドルによる硬脆材料の精密・微細研削に関する研究(第 3 報) 単粒引掻き試験による研削機構の考察, 2012 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2012 年 3 月 15 日, 首都大学東京南大沢キャンパス

金井秀生, 高橋一彰, 神雅彦, 高速超音

波スピンドルによる硬脆材料の精密・微細研削に関する研究(第2報) サファイアの研削特性, 2011年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2011年9月21日, 金沢大学角間キャンパス
金井秀生, 高橋一彰, 神雅彦, 超音波スピンドルによる硬脆材の微細加工第2報: ガラスおよびサファイアの研削特性, 2011年度砥粒加工学会学術講演会, 2011年9月9日, 中部大学
金井秀生, 高橋一彰, 神雅彦, 超音波高速スピンドルの開発および微細金型加工への適用に関する研究, プラスチック成形加工学会第22回年次大会, 2011年6月23日, タワーホール船橋
神雅彦, 超音波振動を応用した加工技術, 2011年度精密工学会春季大会学術講演会(招待講演), 2011年3月14日, 東洋大学白山キャンパス
金井秀生, 高橋一彰, 神雅彦, 高速超音波スピンドルによる硬脆材料の精密・微細研削に関する研究(第1報) - ガラスの研削特性 -, 2011年度精密工学会春季大会学術講演会, 2011年3月14日, 東洋大学白山キャンパス
神雅彦, 超音波振動を援用した生産加工技術, 日本音響学会 2011年春季研究発表会(招待講演), 2011年3月9日, 早稲田大学西早稲田キャンパス
神雅彦, 超音波振動を援用した切削加工, 塑性加工および関連技術, 次世代モビリティ・エリアマネジメント研究会第5回分科会(招待講演), 2010年12月17日, 本庄早稲田リサーチパーク
神雅彦, 金井秀生, 小玉満, 切削・研削加工用超音波スピンドルの開発および加工効果, 電子情報通信学会超音波研究会, 2010年12月16日, 東京工業大学すずかけ台キャンパス
渡辺翔, 岩部洋育, 大井卓磨, 神雅彦, 金井秀生, 主軸方向の超音波振動を用いたエンドミル加工に関する基礎研究 - 側面加工における切削機構と切削特性 -, 2010年度精密工学会北陸信越支部学術講演会, 2010年11月6日, 長岡技術科学大学
金井秀生, 高橋一彰, 神雅彦, 超音波スピンドルによる硬脆材の微細加工, 2010年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2010年9月27日, 名古屋大学東山キャンパス
神雅彦, 超音波振動切削技術のはじまりと進化, 2010年度精密工学会秋季大会学術講演会(招待講演) 2010年9月27日, 名古屋大学東山キャンパス
金井秀生, 高橋一彰, 神雅彦, 超音波スピンドルによる硬脆材の微細加工, 2010

年度砥粒加工学会学術講演会, 2010年8月28日, 岡山大学工学部
金井秀生, 高橋一彰, 神雅彦, 超音波エンドミル加工法による微細金型加工, プラスチック成形加工学会年次大会, 2010年6月2日, タワーホール船堀(東京都江戸川区総合区民ホール)

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

神 雅彦 (JIN MASAHIKO)
日本工業大学・工学部・教授
研究者番号: 80265371

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: