

平成 22 年 5 月 7 日現在

研究種目：基盤研究(B)
研究期間：2007 ～ 2009
課題番号：19360057
研究課題名（和文） 超高速切削過程の高表面活性と塑性衝撃波による高静水圧を用いた先駆的機能面創成
研究課題名（英文） Investigation of the formation of an innovative machined surface by high surface-active and high hydrostatic stresses induced by the plastic shock waves under ultra high-speed cutting conditions
研究代表者 篠塚 淳（ SHINOZUKA JUN ） 国立大学法人横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授 研究者番号：30282841

研究成果の概要（和文）：切削速度が被削材の塑性波伝播速度を超える超高速切削過程の切削機構の解明と、超高速切削により新しい切削加工仕上げ面を創成できる可能性について検討した。アルミニウム合金の高速切削過程では、切削速度を高速にすればするほど良好な仕上げ面を創成できること、鉛を用いた超高速切削実験では、切削力は高くなるが、せん断面せん断応力がほぼ 0 になるという常用の切削理論では説明できない新しい現象が発現することが分かった。

研究成果の概要（英文）：This research clarified a cutting mechanism of an ultra high-speed cutting that the cutting speed is faster than the speed of the plastic waves of a workpiece material, investigating a possibility that an innovative machined surface is obtained by the ultra high-speed cutting process. The high-speed cutting tests for aluminum alloy revealed that the more high-speed cutting produces the better quality surface as long as the cutting speed does not exceed the plastic wave speeds of the aluminum alloy. A new cutting phenomenon that the shear stress on the shear plane vanishes though the cutting forces and the normal stress on the shear plane rise high appeared in the ultra high-speed cutting of pure lead.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	7,400,000	2,220,000	9,620,000
2008 年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
2009 年度	2,800,000	840,000	3,640,000
年度			
年度			
総計	15,200,000	4,560,000	19,760,000

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：超高速切削，塑性衝撃波，応力波，静水圧，切削機構，仕上げ面性状，切りくず生成，切削力

1. 研究開始当初の背景

申請者は、動的 FEM 切削シミュレータを開発し、切削過程において、被削材内部の応

力波の伝播形態が切削機構に及ぼす影響を検討してきた。これより、切削速度が被削材の塑性波伝播速度を越えると、せん断塑性域

に塑性衝撃波が発生するため、図1に示すように刃先前方のせん断域全域に数~数十 GPa の非常に高い静水圧が発生し、さらに、この領域では、非常に高いひずみ速度で弾塑性変形していることが分かった。切削過程における塑性衝撃波の伝播は、現状の切削理論では全く考慮されていない現象である。

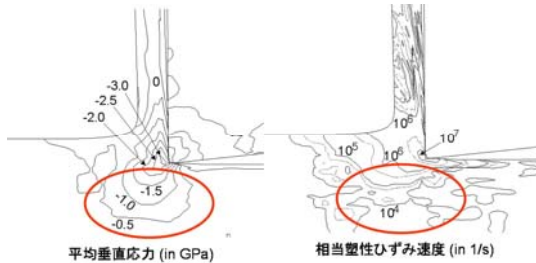


図1 超高速切削過程のせん断域の弾塑性変形の FEM シミュレーション結果の例

超高速切削過程の塑性衝撃波による高静水圧下での高ひずみ速度変形は、材料のすべり変形機構に大きな影響を与え、延性の増加、組織の超微細化、相変態、動的回復や動的再結晶など結晶組織を改質し、機械的特性に大きな影響を与えると考えられる。被削材が単結晶金属の場合は、超高速切削によって内部構造や表面性状が大きく変化し、機械的特性の向上のほか、化学的あるいは光学的に新しい機能を有する表面を創成できる可能性がある。被削材がポーラス材である場合は、見かけの塑性波速度はバルク材よりも非常に小さいため、超高速切削の塑性衝撃波が仕上げ面に与える影響はかなり大きくなると考えられる。また超高速切削による仕上げ面創成直後の新生面の活性は非常に高いと考えられるので、周囲のガス分子が吸着する、あるいは、仕上げ面表面の原子と周辺ガス分子が化学反応を起こし、仕上げ面の表面性状や界面特性を変化させるとも考えられる。

以上より、切削雰囲気制御した環境で超高速切削をすると、通常の切削加工法では創成できないような、機械的、化学的、光学的に優れた先駆的な機能表面を創成できる可能性があると考えられる。

2. 研究の目的

本研究は、超高速切削過程の塑性衝撃波による高静水圧下での高い塑性ひずみ速度変形と、高い表面活性に着目し、超高速切削により通常の切削加工では創成できない新しい機能表面を創成することができる可能性について検討することを目的とする。

また、超高速切削過程の切削現象について実験的に検討することで、切削速度が被削材の塑性波伝播速度を超え、せん断域に塑性衝撃波が伝播する状態での切削機構を定量的

に解明することも目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、超高速切削過程の基礎的知見を得るために、申請者が開発した図2に示す環境制御型高速切削試験機を使用して、高速・超高速切削過程の切削現象を検討した。本試験装置は、図3に示す微小な切削工具を内蔵した飛翔容器を、大気と隔離した管路に装填し、発射装置から圧縮ガスにより高速に移動させ、チャンバー内に設置した被削材の一部を削ることで超高速・高速切削過程を実現するものである。チャンバーと管路は真空対応であり、内部は特定ガスを特定圧力に制御できる。切りくずは飛翔容器内に捕獲される。切削後の飛翔容器には、減速装置から圧縮ガスを噴射させて停止させる。これにより、切りくずと工具を損傷させずに採取できる。最大切削速度は 150~200m/s である。本試験機は、低剛性の材料も高速・超高速切削速度領域で切削試験が行うことができ、また切削雰囲気の影響も体系的に調べることができる。

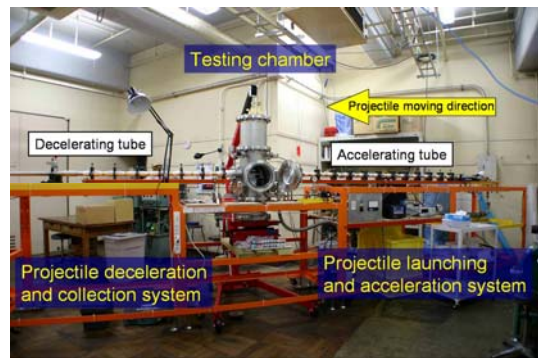


図2 環境制御型高速切削試験機



図3 微小切削工具内蔵型飛翔容器

被削材は低融点・低剛性の純鉛、アルミニウム合金 A2017-O (510℃で 3 時間保持し、その後、炉冷)、空孔率 20 %の Fe 焼結金属を用いた。被削材は幅 60 mm、厚さ 1.5~2.0 mm の板状である。切削距離は 60 mm と短いため、切削速度が 200 m/s の場合、切削時間は 300 ns と非常に短い。極短時間での切削力の動的波形を高精度に計測するためには、周波数応答特性が極めて高い動力計が必要となる。研究当初は、固有振動数が単体で

10 kHz 程度の三軸の圧電型力センサを動力計に組み込んだが、動力計の各軸の固有振動数は3~5 kHzに低下してしまい詳細な計測は出来なかった。そこで図4に示すような、センサ単体の固有振動数が40 kHz程度の一軸の圧電型力センサを3個一対で組み込んだ動力計を新たに開発した。この動力計は6~7 kHz程度でゲインの低下が見られるが、コヒーレンスは15~20 kHz程度まで追従する。しかしながら、これでも十分な周波数応答特性とは言えないため、インパクトハンマ試験により伝達関数を求め、得られた関数を用いて、FFT解析により動力計から得られる出力信号（出力波形）から実際の入力波形（実際の切削力波形）を推定する手法で、より精度の高い切削力波形を得るようにした。

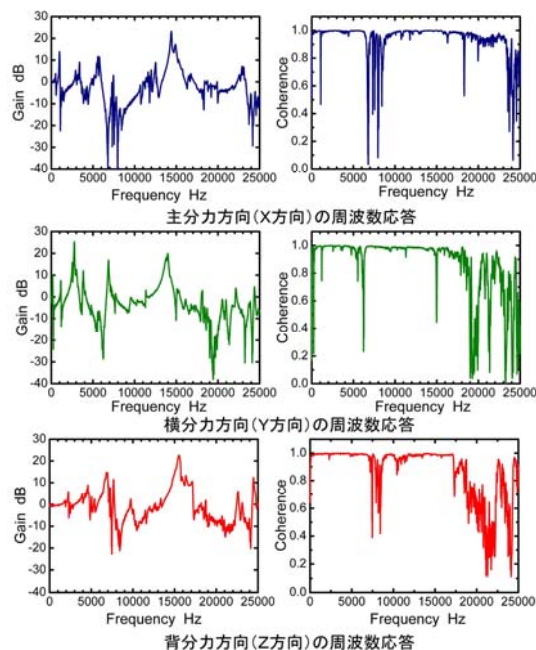
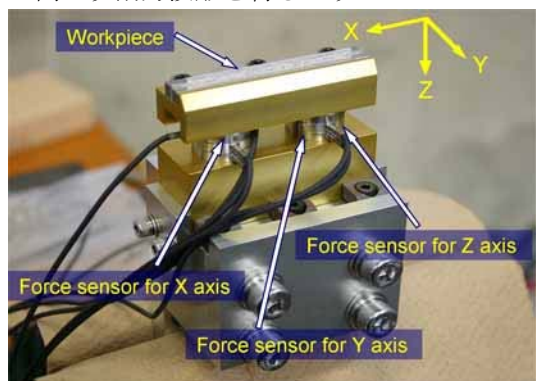


図4 開発した切削動力計と周波数応答特性

切削は二次元切削状態でを行い、設定切込み深さは0.1 mmとした。実験では、切削前の被削材の形状と切削後の被削材の形状をレーザー変位形で計測し、その差分より、真実切取厚さを算出した。環境制御型切削試験機では、切削中の飛翔容器の速度変化（切削速

度変化）を計測できるシステムになっているため、切削時間に対する真実切取厚さ後の解析で算出できる。これより、切削時間に対する比切削抵抗の変化を算出できる。各種被削材を用いた実験では、切削速度に対する、切りくず生成状態、切りくず厚さあるいは切りくず長さから算出したせん断角、上記の手法で算出した比切削抵抗と比切削抵抗を基に算出した摩擦角、単純せん断面モデルを仮定して算出したせん断面上の応力から、高速・超高速切削機構を検討した。また、仕上げ面表層の観察、仕上げ面断面の組織観察より、高速・超高速切削過程の仕上げ面生成特性を検討した。さらに、ポーラス体の切削状態をシミュレートするFEM切削シミュレータを開発し、ポーラス体の高速切削試験とともにシミュレーションから空孔が高速・超高速切削機構に及ぼす影響を検討した。

4. 研究成果

(1) アルミニウム合金 A2017-0 の高速切削実験結果

アルミニウム合金 A2017-0 を切削速度 60 ~150 m/s の切削速度領域で実験を行った。図5に仕上げ面表層の様子と切りくず形状を示す。A2017-0 の塑性波伝播速度は、240~300 m/s 程度と推測できるため、この切削速度領域は、塑性衝撃波は発生しない高速切削過程となる。図6は、切削速度に対する、比切削抵抗、せん断角、摩擦角、切りくず幅、仕上げ面のサイドフロー幅の関係を示したものである。実験範囲においては、切削速度の上昇に伴い、比切削抵抗は減少し、切削速度 120 m/s 程度以降は僅かに上昇する。これは熱軟化による減少と、せん断域での慣性力の増加の影響により切削力が上昇に転じると説明できる。せん断角は切削速度の上昇につれて、ほぼ線形的に高くなり、切削速度 150 m/s で40°程度に至るが、摩擦角は切削速度 60 m/s にかけて減少し、その後、僅かながら上昇する傾向にある。切りくず幅もサイドフロー幅も切削速度 20 m/s 程度までに急激に減少し、その後は一定となることより、高速切削過程では良好な仕上げ面が得られることが分かる。図7は、工具すくい面上の応力と、二次元単純せん断面モデルを仮定して算出した、せん断面の応力である。切削速度の上昇により、これら応力は徐々に上昇する。これはせん断角の増加と慣性力の増加によるものと理解できる。図8は仕上げ面断面の組織写真である。切削速度 60 m/s 程度では表層に塑性流動層が確認できるが、切削速度 100 m/s 以上では見られない。仕上げ面の切削方向の表面粗さも切削速度が高速になるほど小さくなる。これらの傾向は一般的な切削理論どおりであり、A2017-0 では切削速度が A2017-0 の塑性波伝播速度を超えない限り、

切削速度を高速にすればするほど良好な仕上げ面となることが分かった。

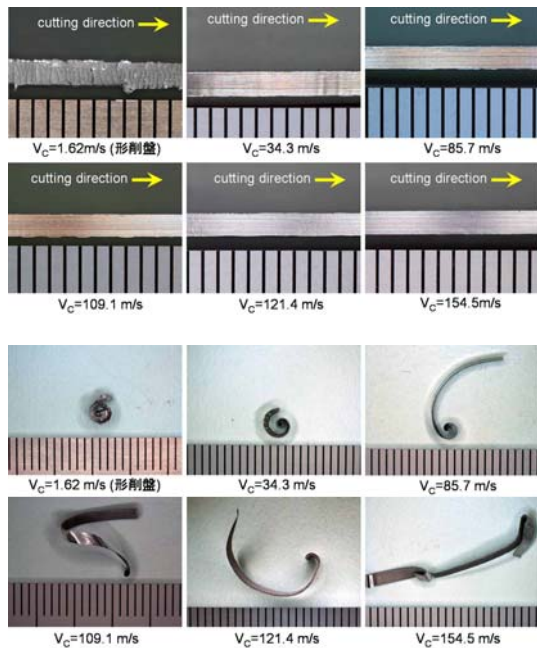


図5 A2017-0の切削速度に対する仕上げ面と切りくず生成の変化

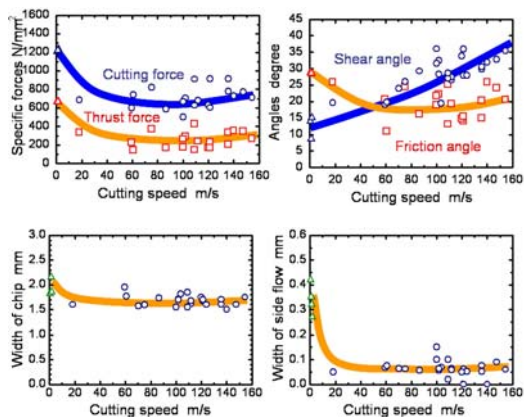


図6 切削速度に対する、比切削抵抗、せん断角、摩擦角、切りくず幅、サイドフロー幅の変化

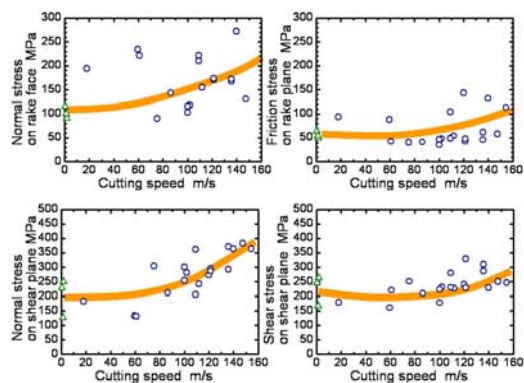


図7 切削速度に対する工具すくい面上の応力とせん断面上の応力の変化

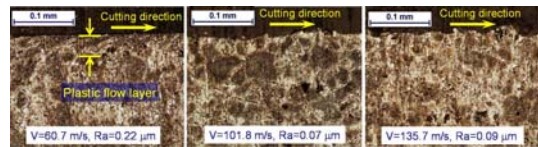


図8 切削速度に対する仕上げ面表層の塑性流動層の厚さの変化

(2) 純鉛の高速・超高切削実験結果

塑性波速度が 80 m/s 程度である純鉛を用いて、切削速度 60~150 m/s で切削実験を行った。図 9 に切削速度に対する仕上げ面と切りくずの状態を示す。純鉛の場合、極低速では極めて良好な仕上げ面となるが、切削速度 30~60 m/s 程度で仕上げ面が縮緬状になり、切削速度が 100 m/s を超えると、仕上げ面表層が熔融し凝固したような痕跡となる。図 10 に切削速度に対する、比切削抵抗、せん断角、摩擦角、切りくず幅、サイドフロー幅、切削距離に対する切りくず長さの比の変化を示す。比切削抵抗は、切削速度が 100 m/s を超えた付近から急激に増加する。また、せん断角はアルミニウム合金と同じくほぼ線形的に増加するが、摩擦角は切削速度 100 m/s を超えた付近から急激に上昇し、切削速度 150 m/s 付近では、両者は共に 45° を超えるような状態となることが分かる。切削速度 100 m/s は超高速切削領域である。図 9 と 10 より、超高速切削過程では、サイドフロー幅も切りくず幅も急激に大きくなるが、切りくず長さは変化しなくなる、または逆に短くなる。これは、塑性衝撃波がせん断域に伝播し、せん断域には非常に高い静水圧が発生し、この高い静水圧を解放するために、せん断域の材料が切削幅方向に流動したためであると解釈することができる。切りくず暑さは薄くなるため、せん断角は高くなる。図 11 は、工具すくい面上の応力状態と、せん断面の応力状態である。切削速度が 100 m/s を超えると、せん断面垂直応力は急激に増加し、極低速切削過程の 10 倍程度に至ることが分かる。一方、せん断面せん断応力は切削速度 100 m/s を超えた付近から急激に低下し、ほぼ 0 に至ることが分かる。せん断面垂直応力の急上昇は塑性衝撃波による高静水圧の発生のためと理解でき、せん断面せん断応力の低下は材料の熔融とも理解できる。以上より、超高速切削過程では、せん断面せん断応力が 0 となる、せん断角と摩擦角が共に上昇し 45° を超える、というような常用切削速度域の切削モデルでは説明できない切削現象が発現することが分かった。

アルミニウム合金の場合においても、切削速度をさらに上昇させ超高速切削状態になれば、純鉛の場合と同様な現象が発現するものとする。

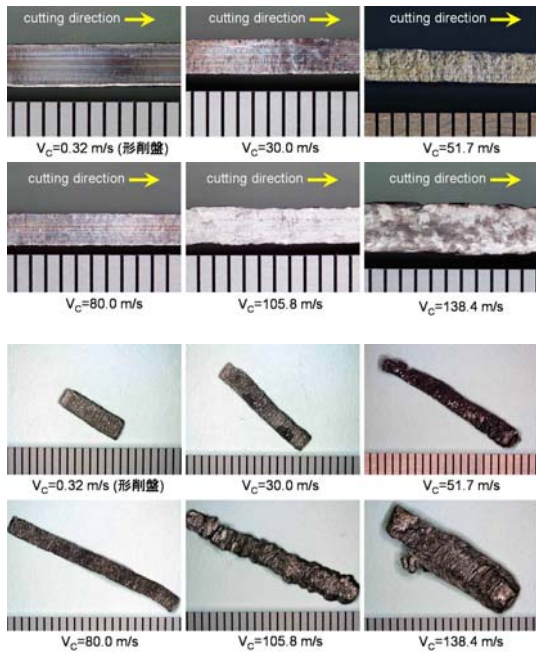


図9 純鉛の切削速度に対する仕上げ面と切りくず生成の変化

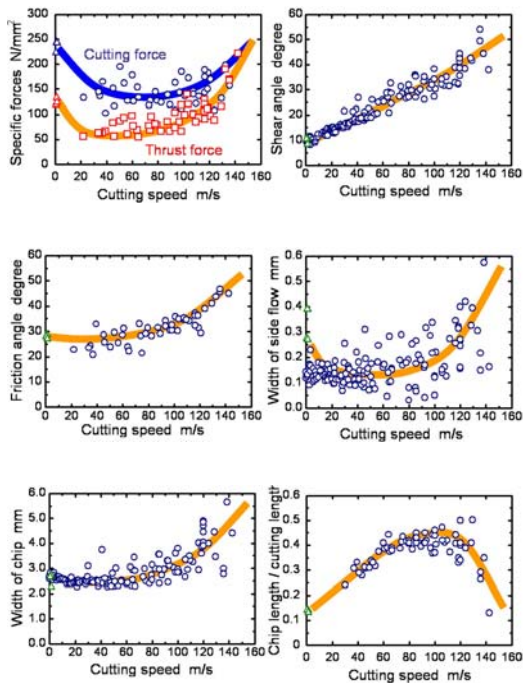


図10 切削速度に対する、比切削抵抗、せん断角、摩擦角、切りくず幅、サイドフロー幅、切削距離に対する切りくず長さの比の変化

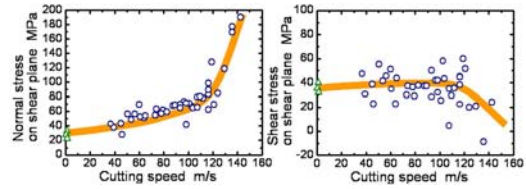
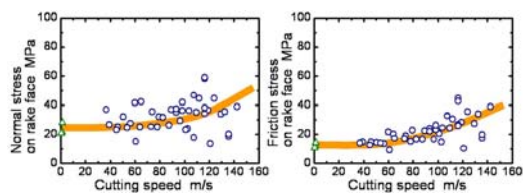


図11 切削速度に対する工具すくい面上の応力とせん断面上の応力の変化

(3) ポーラス体の高速切削機構の解明

素材中の空孔が高速・超高速切削機構に及ぼす影響を予測するためのポーラス体（不均質体）の FEM 切削シミュレータを開発した。図 12 は、解析結果の一例である。

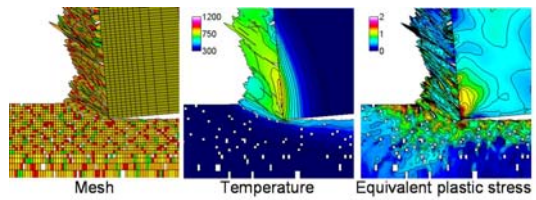


図12 ポーラス体の FEM 解析結果の例

空孔率 20% の Fe 焼結材を切削速度 70~130 m/s で切削実験を行った結果を図 13 に示す。

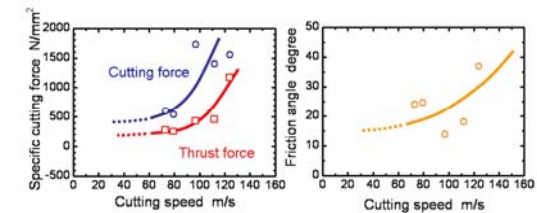
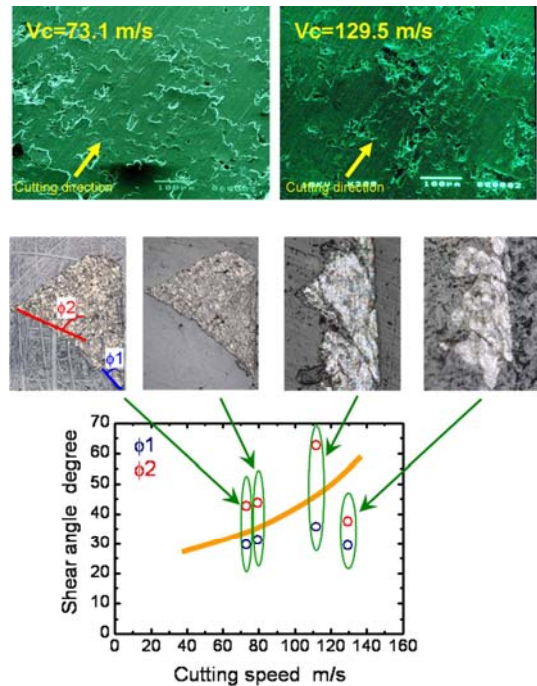


図13 切削速度に対する仕上げ面性状、せん断角、摩擦角、比切削抵抗の変化

同図より、切削速度が 100 m/s を超えると、塑性流動層は無くなり空孔が表面に露出した状態となり、また比切削抵抗が急激に増加する。比切削抵抗とこれに伴う摩擦角の上昇は、高速切削速度域では、せん断域の空孔が圧縮され、材料特性が、空孔が無いバルク材に近い物性になるためと推測できる。

以上の各種材料の高速・超高速切削実験より、超高速切削過程では、常用の切削速度域での切削現象とは異質の現象が発現することが分かり、超高速切削により常用切削速度過程では創成できない仕上げ面が創成する可能性があることが分かった。超高速切削現象の定量的な解析には切削温度の把握が不可欠であるが、切削温度測定のためのセンサ等の開発は今後の課題とする。

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)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Jun Shinozuka, Fabrication of multiple micro-grooves by ultrasonic machining with a tool that laminated thin hard-material and thin soft-material, *Advanced Materials Research*, 76-78 (2009) 577-582. (査読有)
- ② T. Obikawa, Y. Takemura, Y. Akiyama, J. Shinozuka, H. Sasahara, Microscopic phase-dependent residual stresses in the machined surface layer of two-phase alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 209 (2009) 4496-4501. (査読有)
- ③ Ali Basti, Toshiyuki Obikawa and Jun Shinozuka, Tools with Built-in Thin Film Thermocouple Sensors for Monitoring Cutting Temperature, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47 (2007) 793-798. (査読有)
- ④ Toshiyuki Obikawa, Ali Basti and Jun Shinozuka, Finite Difference Modeling of Cutting Temperature in Machining of A6061-T6 Aluminum Alloy at Ultra High Cutting Speeds, *Key Engineering Materials*, 329 (2007) 681-686. (査読有)

[学会発表] (計 8 件)

- ① 篠塚淳, 構造材料設計のための FEM 切削シミュレーション, 第 3 回横幹連合コンファレンス, 2009 年 12 月 3-5 日, 東北大学
- ② 篠塚淳, 不均一材の FEM 切削シミュレーション, 2009 年度砥粒加工学会学術講演会 (2009), 2009 年 9 月 2-4 日, ものつくり大学
- ③ 篠塚淳, 薄硬質材-薄軟質材サンドウィッチ工具を用いた超音波加工による微細溝

郡の創成, 2009 年精密工学会春季大会学術講演会, 2009 年 3 月 11-13 日, 中央大学

- ④ Jun Shinozuka, Takeshi Hatta, Shigekazu Ito, Hiroaki Yoshida, Sachihito Isogawa, Fem Cutting Simulation with a Drucker-Prager Yield Criterion in High-speed and Ultra High-speed Cutting, 8th Asia-Pacific Conference on Materials Processing, 2008 年 6 月 15-20 日, 中国 (査読有)
- ⑤ 篠塚淳, 堀江丞, 切削環境を制御できる高速衝撃切削試験装置の開発, 2008 年精密工学会春季大会学術講演会, 2008 年 3 月 17-19 日, 明治大学
- ⑥ 篠塚淳, 堀江丞, 環境制御型衝撃切削試験機の開発, 2007 年度茨城講演会, 2007 年 9 月 28 日, 茨城大学工学部
- ⑦ 篠塚淳, 堀江丞, 動的熱弾塑性 FEM 切削シミュレーションによる高速・超高速切削過程の仕上げ面特性の検討, 2007 年度砥粒加工学会学術講演会, 2007 年 9 月 5-7 日, 東京工業大学
- ⑧ J. Shinozuka, T. Obikawa, High Levels of Hydrostatic Stress at Shear Zone Induced by Plastic Shock Waves under Ultra High-speed Cutting Conditions, 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations, 2007 年 8 月 27-28 日, イタリア (査読有)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 超音波加工用工具

発明者: 篠塚淳

権利者: 国立大学法人横浜国立大学

種類: 特願

番号: 2008-0282520

出願年月日: 2007 年 10 月 31 日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 1 件)

名称: 高速切削試験装置

発明者: 篠塚淳

権利者: 国立大学法人茨城大学

種類: 特許

番号: 4171808

取得年月日: 2007 年 8 月 22 日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://www.shinozuka.me.ynu.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

篠塚 淳 (SHINOZUKA JUN)

国立大学法人横浜国立大学・大学院工学研究

院・准教授

研究者番号: 30282841