

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 22 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289022

研究課題名(和文) 切削力フィードバックによる能動切込制御型マイクロ・ナノ切削加工システムの実証研究

研究課題名(英文) Study on micro-nanometer scale cutting system by using elastic cantilever-type tool holder with force feedback

研究代表者

芦田 極 (ASHIDA, Kiwamu)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・製造技術研究部門・研究グループ長

研究者番号：10356363

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：従来の高剛性の切削工具に替えて、柔軟なカンチレバー型工具ホルダを用いて加工力をフィードバック制御することで切込み深さを制御する切削加工システムを構築した。駆動機構の運動誤差や、加工面に傾斜・湾曲があっても、一定の切込み深さで切削加工が可能であり、新たな微細加工技術として応用できる。また、ガラスなどの割れやすい硬脆材料に対して従来よりも深い切込みで割れを生じない延性モード切削が可能であることを見出した。材料内部のせん断応力場の観察により、柔軟な切削機構によって最大せん断応力が減少することを見出した。

研究成果の概要(英文)：A novel cutting system, which uses elastic cantilever-type tool holder instead of ordinal ridged cutting tool, has been developed. The system can control normal cutting force by applying feedback control system with displacement sensor and fine positioning PZT actuator, so that the cutting depth can be controlled in constant even cutting for curved or inclined surface, moreover on stage with motion error. The function make it possible to fabricate micro grooves as secondly profiling cutting on a prepared surface e.g. made by polishing. Another advantage of the system is deeper grooving on a brittle material such as glasses, about three times than the best results so far. In order to investigate the mechanism of ability for such ductile mode cutting, the stress field inside of the cut specimens in situ were observed by photo elastic effect, and then it is found the reason that the elastic tool holder can reduce the maximum shear stress.

研究分野：マイクロナノ機械加工、マイクロファクトリ

キーワード：切削加工 硬脆材料 延性モード切削 加工力制御 柔軟カンチレバー構造 ダイヤモンド工具 臨界切込み深さ

1. 研究開始当初の背景

切削加工は幅広い加工スケールに対応でき、高効率かつ高精度な除去加工として普及している。加工精度を極限まで追求するために加工機械、駆動制御機構、工具など、様々なアプローチでマイクロ・ナノメータスケールの切込み制御技術の研究が行われている。中でも原子間力顕微鏡 (AFM: Atomic Force Microscope) 機構を利用したナノスケール切削では、一般的な送り量を基準とした切込み制御に替えて、切れ刃に作用する垂直荷重を制御することで、ナノメータスケールの切込みで切削加工を行うことができる。硬脆材料である単結晶シリコンを被削材として、数十ナノメートルの切込み深さで、割れや欠けを伴わない延性モード切削を行うことができる。しかしながら、AFM 機構では加工領域が最大でも 100 μm 四方の領域に限定され、また 100nm を超える切込み深さを付与することは不可能であった。

そこで本研究では、この AFM の荷重制御メカニズムをベースに、柔軟なカンチレバー型工具を用いて深さ 1~10 μm の単一溝切削加工を行う切削加工システムを構築した。切削加工では、一般に高剛性な工具ホルダが要求されるのに対し、容易に変形する柔軟なカンチレバー型の工具ホルダを用い、変位センサでそのたわみを測定、圧電素子を用いた微動機構によりたわみ量を一定にフィードバック制御することで切込み量を一定に制御する。この工具ホルダを一般の工作機械と同様の直交三軸ステージ駆動機構に搭載することで、AFM 機構と比べて実用に近いスケールの切削加工を行うことができる。

2. 研究の目的

開発した柔軟な切削工具による加工システムを用いて各種材料に対して切削加工実験を行ったところ、ガラスや単結晶シリコンなどの硬脆材料において、従来は延性モード切削が不可能とされていた切込み深さで、延性モード切削が可能な条件が見出された。本研究の第一の目的は、柔軟な切削工具を用いた切削加工において特有の加工現象と、その発現メカニズムを合理的に説明するための基礎データの収集することである。その上で、現象の再現性を高めるための機構改良の指針を明らかにする。

また、本切削加工システムは被加工面の傾斜や湾曲、および駆動機構の運動誤差を、垂直荷重制御によりキャンセルすることができる。すなわち、あらかじめ研磨などで一次加工で創成された平面や曲面に対して、二次加工として溝の切削加工を行うことで、微細な表面形状による機能性表面を創成することができる。その新たな微加工技術としての機能の実証を第二の目的とする。

3. 研究の方法

前述のように、本研究では AFM 機構にヒン

トを得た柔軟カンチレバー型工具を用いて切削加工システムを構築する。図 1 はその構成図である。並行板ばねカンチレバーの先端に工具切れ刃を固定し、そこに作用する垂直荷重を静電容量変位センサによってたわみ量として検出し、ばね乗数を乗じて荷重に換算する。変位センサからの出力はフィードバック制御器を経て、圧電素子を用いた微動機構の制御電圧として出力され、垂直荷重 F_N が一定になるように制御される。図 2 は工具ホルダとそれを搭載する 3 軸ステージである。

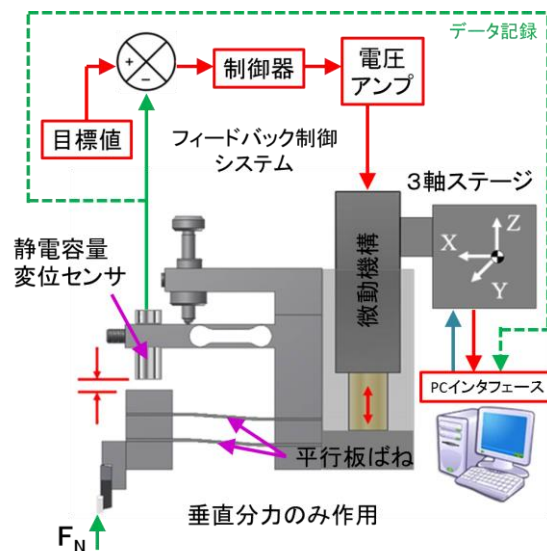


図 1 柔軟なカンチレバー型工具を用いた切削加工システムの構成

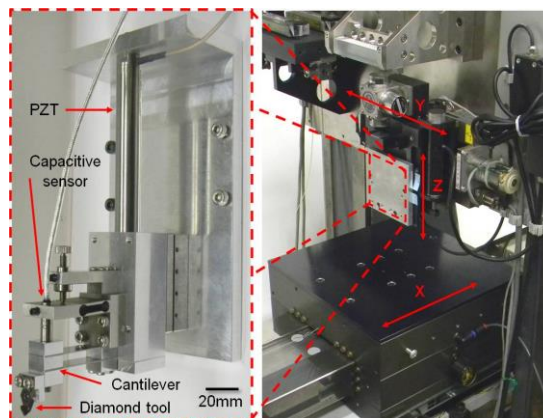


図 2 柔軟カンチレバー型工具ホルダと搭載する 3 軸ステージ

基本となる切削実験では、先端角 90° (先端 R なし) の V 溝を切削するダイヤモンド工具を装着し、傾斜を与えた被加工面に対して直線の溝加工を行う。図 3 は黄銅に V 溝切削を行った時の加工中の切削距離と変位センサ出力のグラフである。フィードバックの有無による切込み制御の違いを模式図で示す。

フィードバック制御を行わない場合、工具の送りに伴って傾斜により加工面が近づくため、カンチレバーが上方にたわみ、垂直荷重が大きくなり、切込み深さは大きくなる。

センサ出力から換算される加工力も大きくなっていることがグラフに示されている。

フィードバック制御を行うことで、カンチレバーの傾斜面に沿って工具切れ刃高さが制御されるため、垂直分力は一定に保たれ、切込み深さも一定のV溝が形成される。図4に加工されたV溝を真上から電子顕微鏡(SEM)で観察した写真と、溝幅を示す。フィードバックにより溝幅がほぼ一定になっていることがわかる。

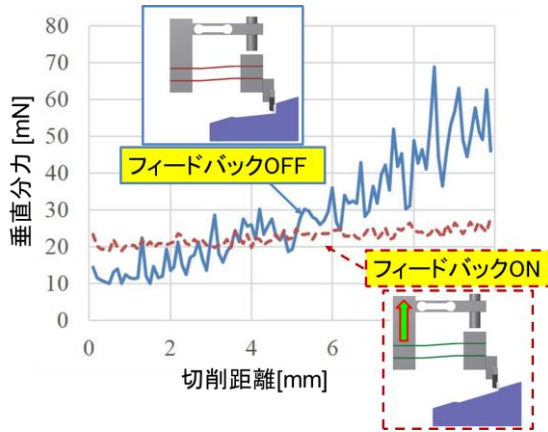


図3 V溝切削加工中の切削距離と垂直分力の関係と、フィードバック ON/OFF の違いを表した模式図

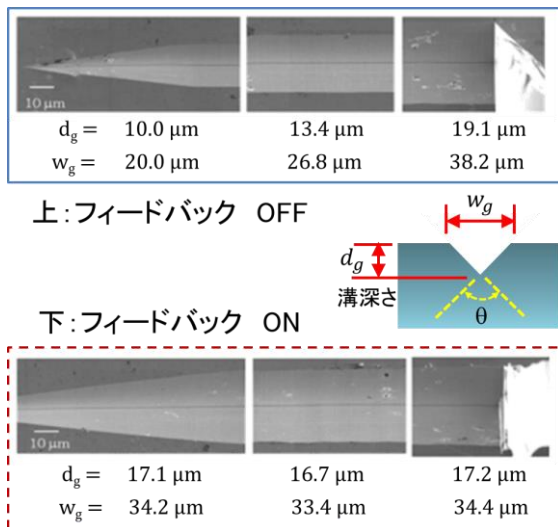


図4 V溝の真上からのSEM観察像と溝幅のフィードバック有無での比較

本研究では、上記の切削加工システムを用いた実験を、ガラスなどの硬脆材料に対しても行い、基礎データの取得および工具の剛性を変化させた場合の現象の観測を行った。

4. 研究成果

硬脆材料とはガラスのように割れやすい材料を指し、一般には切削加工の適用が難しい。しかしながら、切込み深さが一定値よりも小さくなり、およそ100nm以下になると延性モード、図5に示すように割れや欠けを生じずに切削加工が可能な条件を見出すこ

とができる。本研究で用いる加工システムでは、一定の条件下でガラスに対して深さ3μmを超えるV溝切削でも延性モード切削が可能であった。

図6はクラウンガラスに対して溝深さ約1μm(従来の数倍)の深さで延性モード切削を行った際のV溝と切りくずのSEM観察像である。このメカニズムを明らかにするために、各種の硬脆材料に対して加工実験を行った。図7はクラウンガラス、ソーダライムガラス、石英ガラスに対して、フィードバック制御を行わずに傾斜面の切削を行った結果である。脆性モードに遷移するV溝深さに違いはあるものの、最も溝深さが小さい石英でも、1μmを超える深さで延性モード切削が行われている。

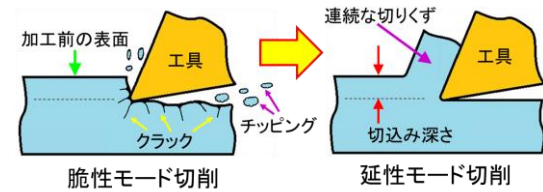


図5 脆性モード切削と延性モード切削

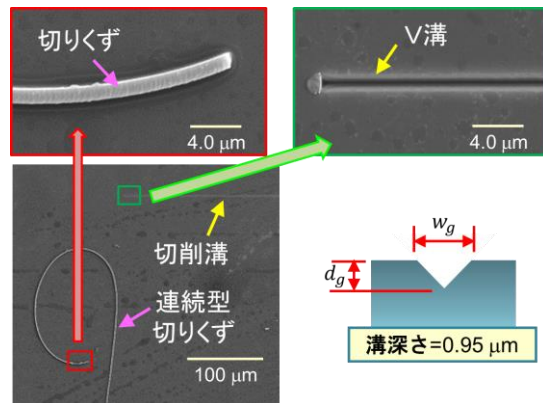


図6 ガラスに深さ約1μmのV溝を延性モード切削した際のV溝と切りくずのSEM像

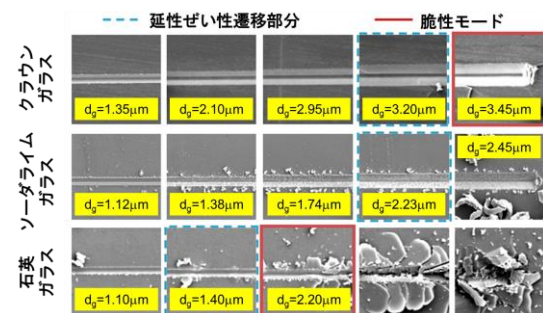


図7 各種のガラス材料に対してV溝切削加工を行った際のV溝のSEM像

本システムの特徴である柔軟な工具ホルダが、従来よりも大きな切込み深さでの延性モード切削を可能にした主因と考え、カンチレバー構造をアルミブロックに置き換えた高剛性な工具ホルダを製作し、両者を比較するV溝切削加工実験を行った。図8は工具ホ

ルダの外観と、V溝切削実験の結果である。高剛性な切削機構の方が、V溝の側部にクラックを生じる深さ（延性－脆性遷移深さ）が小さくなる傾向が確認された。

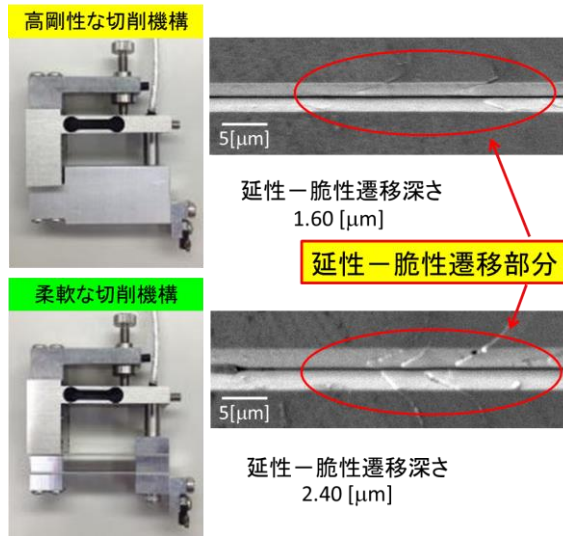


図8 剛性の異なる工具ホルダでV溝切削を行った際の延性－脆性遷移深さ

剛性の高い工具ホルダで脆性破壊を生じやすくなる理由として、材料内部に生じる応力場が、柔軟な工具ホルダに比べて大きくなることを考えた。そこで、材料の内部応力の観察を行い、両者で比較した。図9は光弾性を用いて透明材料の内部に生じるせん断応力を可視化できる偏光高速カメラを切削システムに搭載した実験装置である。被削材は薄いガラス板で、その端面を切削するように固定されている。偏光板を通した光源からの光が側面から照射され、材料内部の歪によって生じる位相差をカメラで検出する。

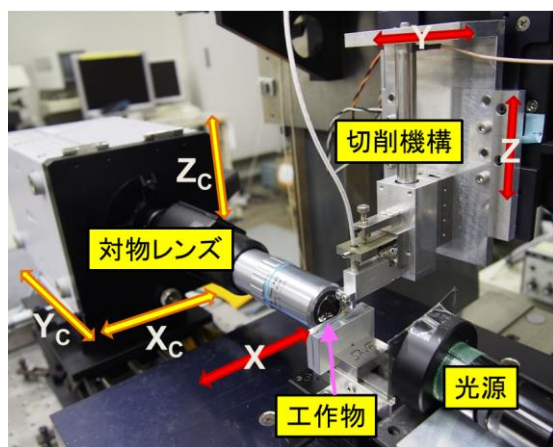


図9 光弾性により材料の内部応力を可視化するカメラを設置した切削実験装置

図10はカメラで撮影した明暗像と偏光像から算出した位相差像である。光学像の工具切れ刃の下側にはクラックが観察される。せん断応力の大きな領域が赤く示される。クラックの発生場所に応じた色の変化も観察で

きる。高剛性な工具と柔軟な工具を比較すると、高剛性な工具の方がせん断応力の大きな領域が大きく、最大値も高いことが確認できる。剛性の高い工具では、ステージの駆動に伴う運動誤差により切込みが大きくなると、それに伴って材料内部の応力も増加し、破壊応力を超えるとクラックを生じる。一方、柔軟な工具の場合、同様の誤差を生じて、弾性変形により応力の増加が抑制され破壊応力に至らないため、クラックを生じない効果があると考えられる。

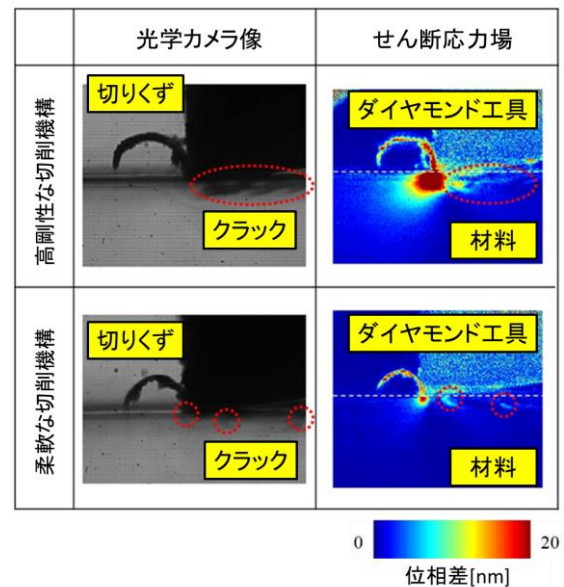


図10 偏光カメラで撮影された切削加工中の光学像と光弾性から計算した位相差

本研究で開発した柔軟な切削工具と加工力フィードバック制御を用いたマイクロスケール切削加工システムにより、傾斜面や曲面に対しても一定の切込み深で切削を行える新たな削加工技術として活用できる。その機能を確認するために、直径3mmのガラス球の表面に、深さ約1μmのV溝加工を行い、球面に微細構造を形成した。図11に加工面の観察像を示す。直交三軸ステージの制約から、工具すくい面を球面に対して垂直に保つ制御ができないため、加工領域が限られたが、約200μm四方の領域に延性モードで複数の溝加工を行うことができた。

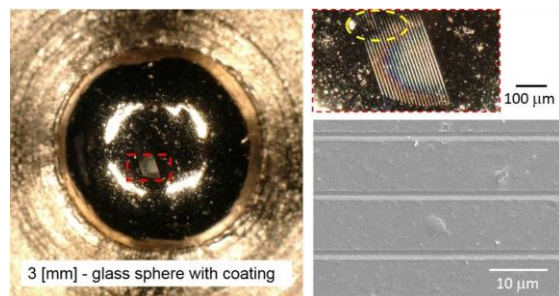


図11 ガラス球の表面に切削加工で形成された複数のV溝(右下:溝のSEM拡大像)

<引用文献>

- ① Kawasegi N., et al. Nanomachining of Silicon Surface Using Atomic Force Microscope With Diamond Tip. J. Manuf. Sci. Eng. Vol. 128 (2006), Issue 3, pp. 723-729.
- ② W. Gao, R. J. Hocken, J. A. Patten and J. Lovingood. Experiments using a Nano-machining Instrument for Nano-Cutting Brittle Materials. CIRP. Vol. 49, Issue 1 (2000), pp. 439-442.
- ③ S. Matsusaka, G. Mizobuchi, H. Hidai, A. Chiba, N. Morita and T. Onuma. Observation of Crack Propagation Behavior and Visualization of Internal Stress Field during Wheel Scribing of Glass Sheet. Journal of the Japan Society for Precision Engineering. Vol. 81, No. 3 (2015), pp. 270-275.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計3件)

- ① G. Herrera-Granados, K. Ashida, I. Ogura, Y. Okazaki, N. Morita, H. Hidai, S. Matsusaka, A. Chiba. Development of a Non-Rigid Micro-Scale Cutting Mechanism Measuring the Cutting Force Using an Optical Lever. Int. J. of Automation Technology, Vol. 8 No. 6, pp. 903-911. November 2014.
doi.org/10.20965/ijat.2014.p0903
- ② G. Herrera-Granados, N. Morita, H. Hidai, S. Matsusaka, A. Chiba., K. Ashida, I. Ogura, Y. Okazaki. Experimental stress analysis of glass cutting using a non-rigid cutting mechanism. Manufacturing Letters, Vol. 6, pp. 14-18. October 2015.
doi.org/10.1016/j.mfglet.2015.11.003
- ③ G. Herrera-Granados, N. Morita, H. Hidai, S. Matsusaka, A. Chiba., K. Ashida, I. Ogura, Y. Okazaki, Development of a non-rigid micro-scale cutting mechanism applying a normal cutting force control system, Precision Engineering, Vol. 43, pp. 544-553. January 2016.
doi.org/10.1016/j.precisioneng.2015.09.021

[学会発表] (計6件)

- ① German Herrera-Granados, Kiwamu Ashida, Ichiro Ogura, Yuichi Okazaki, Noboru Morita, Hidai Hirofumi, Souta Matsusaka, Akira Chiba, Estimation of the cantilever beam bending of a non-rigid

cutting mechanism used for the fabrication of micro-grooves, 15th International Conference on Precision Engineering, (2014.7), Kanazawa, Japan

- ② German Herrera-Granados, Kiwamu Ashida, Ichiro Ogura, Yuichi Okazaki, Noboru Morita, Hidai Hirofumi, Souta Matsusaka, Akira Chiba, Effect of cutting angles during the micro-groove fabrication process using a non-rigid cutting mechanism, 9th International Workshop on Microfactories, (2014.10), Honolulu, Hawaii, USA
- ③ German Herrera-Granados, Kiwamu Ashida, Ichiro Ogura, Yuichi Okazaki, Noboru Morita, Hidai Hirofumi, Souta Matsusaka and Akira Chiba, Fabrication of micro-scale grooves in glass using a non-rigid cutting mechanism, 2015 年度精密工学会秋季大会学術講演会, (2015.9), 東北大学 (仙台市)

- ④ 本郷舜也, 水原和行, 栗田恒雄, 芦田極, German Herrera-Granados, レーザインプリント複合加工によるガラスへの微細形状転写, 2015 年度精密工学会秋季大会学術講演会, (2015.9), 東北大学 (仙台市)

- ⑤ Herrera-Granados German, Ashida Kiwamu, Ogura Ichiro, Okazaki Yuichi, Morita Noboru, Hidai Hirofumi, Matsusaka Souta and Chiba Akira, Advantages of using a non-rigid cutting mechanism for the machining of glass, 4M/IWMF2016 Conference, (2016.9), Copenhagen, Denmark

- ⑥ German Herrera-Granados, Kiwamu Ashida, Ichiro Ogura, Yuichi Okazaki, Noboru Morita, Hirofumi Hidai, Souta Matsusaka and Akira Chiba, Fabrication of micro-scale grooves in glass using a non-rigid cutting mechanism -Application of a force feedback control system-, 2017 年度精密工学会春季大会学術講演会, (2017.03), 慶應義塾大学 (横浜市)

[その他]

カンチレバー工具によるマイクロナノスケール切削加工
http://www.aist.go.jp/digbook/openlab/2013/#page=391

6. 研究組織

(1) 研究代表者

芦田 極 (ASHIDA, Kiwamu)

産業技術総合研究所・製造技術研究部門・

研究グループ長

研究者番号：10356363

(2)研究分担者

森田 昇 (MORITA, Noboru)

千葉大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60356714

小倉 一郎 (OGURA, Ichiro)

産業技術総合研究所・製造技術研究部門・

主任研究員

研究者番号：30239660

(3)研究協力者

エレラ-グラナドス ヘルマン

(HERRERA-GRANADOS, German)