

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630017

研究課題名(和文) レーザ援用ナノ精度マイクロ切削のためのダイレクト導光型ダイヤモンド工具の開発

研究課題名(英文) Development of diamond tool for Laser assisted nano-precision micro-cutting

研究代表者

厨川 常元 (Kuriyagawa, Tsunemoto)

東北大学・医工学研究科・教授

研究者番号：90170092

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、Ni-Pの超精密切削時に発生する欠陥の抑制法としてレーザ援用マイクロ切削法(以下、LAM)、並びに導光型ダイヤモンドバイトを提案し、LAMにおける欠け抑制効果の最大化を目的として、LAMに関する実験および解析を行った。その結果、レーザによる工具前方部の加熱がすべり変形の抑制に有効であり、その結果工具離脱部分での欠けが抑制されることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This study addresses firstly each experimental phenomenon under cutting and laser irradiation individually, then combined them for revealing the effect of Laser-Assisted Machining (LAM). The experimental results indicate laser irradiation can reduce the defect generation caused by shear localization, but also can deteriorate the form accuracy by melting and polycrystallization. LAM experiments reveal the effective condition for defect reduction.

研究分野：ナノ精度機械加工学

キーワード：切削加工 ダイヤモンドバイト レーザ援用 マイクロ加工 バリ デバリング

1. 研究開始当初の背景

既存の光学フィルムであるプリズムシートやレンチキュラーレンズシートなどは、数マイクロメートルから数十マイクロメートルピッチの1方向にV溝が形成された金型を用いて転写加工にて製作される。通常、この金型の加工には、NiPメッキ金型に対する単結晶ダイヤモンドバイトを用いた超精密切削が用いられる。さらに再帰反射シートのように3方向の切削溝が交わった構造である場合、より精密な3軸同期切削加工が要求される。これら3方向の溝の交点がずれると、不要な方向への反射が発生する問題がある。また、一般的にバイト送り速度が遅いため、加工時に図1に示すようなバリが発生しやすいなどの問題がある。逆に、バリ発生抑制のために、1度に切削する切り込み量を低減すると、加工時間が増大するという課題が生じる。

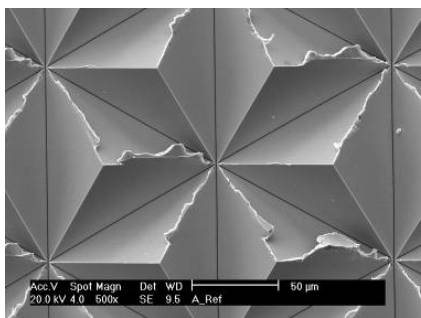


図1 マイクロ切削によって発生したマイクロバリ

近年、このような溝加工において、溝幅への要求が細線化してきており、数マイクロメートル以下のいわゆるマイクロ溝加工や、光の波長程度のサブミクロンオーダーの周期構造体加工へのニーズが高まっている。このように溝幅が小さいマイクロ溝加工の場合は、上述したバリ発生とバイト形状の転写性劣化に起因して光学性能が劣化し、非常に大きな問題となる。

上記のようなマイクロバリの発生を代表とする微細構造創成時の欠陥に対する解決策としてレーザーによる材料の局所軟化による被削性の向上が有効ではないか、ということが本研究の当初の背景である。

2. 研究の目的

レーザーによる局所加熱の方法として、本研究では透光性バイナドレス多結晶ダイヤモンドを工具刃先とし、光ファイバとファイバ先端集光レンズを用いて、ダイヤモンド工具に直接レーザー光線を導き、刃先すくい面と接触しているマイクロ領域にレーザー光線の焦点を

形成した。これにより刃先先端部分の材料だけ局所加熱することが可能となり、硬質金属材料をナノ精度でマイクロ切削加工することが可能となることが期待される。このようなレーザーダイレクト導光型ダイヤモンド工具(以下、単に導光バイトと称す)を開発する(図2参照)。短波長レーザーを導光して局所加熱することにより、切削抵抗低減、刃先形状転写性能の向上、エッジ先端部のバリ低減、発生したマイクロバリのサーマルデバリング作用を期待する。そしてNiPメッキの大型金型表面に、サブミクロンピッチの溝加工やピラミッド加工をバリレスでナノ精度切削加工することを目的とした研究である。

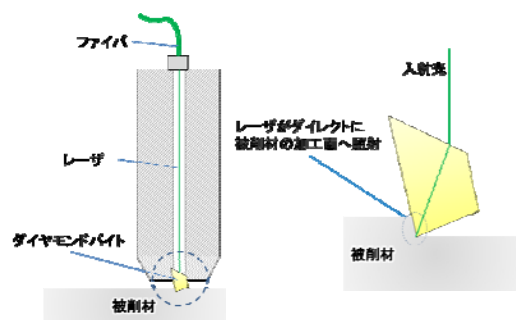


図2 開発した導光バイト

3. 研究の方法

切削実験に関しては、ダイヤモンドバイトを用いた通常の切削実験(以下、通常切削)、外部からレーザーを照射して切削した場合(以下、外部照射切削)、そして導光バイトによる切削実験(以下、導光バイト切削)を検証した。とくにレーザー照射条件の選定においては出力等に制限の少ない外部照射切削によって行った。切削実験に対しては既設の門型5軸超精密加工機(最小割出し分解能:0.1 nm XYZ軸)を用い、切削工具をXY平面に対して水平に送ることで平面切削実験を行った。工作物には金型材料として用いられるアモルファスニッケルリン(a-(Ni-P))めっきのめっき層を用いた。

またレーザー照射に伴う温度上昇状態をシミュレーションするとともに、局所加熱することによる切削抵抗低減、刃先形状転写性能の向上、エッジ先端部のバリ低減効果に関して検討した。具体的には解析には汎用有限要素法(FEM)解析ソフトウェア COMSOL Multiphysics を用いて移動熱源解析を行いレーザーの強度と温度上昇の関係を可視化した。また移動熱源解析から得られた温度上昇を入力値として用いて、切削解析ソフトウェア

AdvantEdge により解析を行い、レーザの効果について検証を行った。

4. 研究成果

(1) 有限要素法による熱伝導解析

レーザ照射による影響を検証するために、COMSOL Multiphysics による熱伝導解析を行った。本研究ではレーザ照射による影響を局所的な加熱現象としてのみ扱い、パルスレーザ照射による流入熱流束 q_{in} の平均出力 Q 、吸収率 ε 、楕円スポットの短軸 w_x 、長軸 w_y 、ビームモード M^2 、走査速度 V として、式(1)で表した。

$$q_{in} = \frac{2Q\varepsilon}{\pi w_x w_y M^2} \exp\left\{-\frac{2}{M^2} \left[\left(\frac{x-x_0}{w_x} \right)^2 + \left(\frac{y-Vt}{w_y} \right)^2 \right]\right\} \quad (1)$$

また、材料内の各位置・各時刻における温度は式(2)によって表現した。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = q_{in} \quad (2)$$

工作物は厚さ 1 mm の母材 (SUS304) の上に厚さ 0.1 mm の a-(Ni-P)めっき層を配置することで、現実のものを再現した。また照射面と空間の境界条件は空気との熱伝達を行われるものとし、その他の面は断熱条件とした。材料物性値は表 1 の通りである。

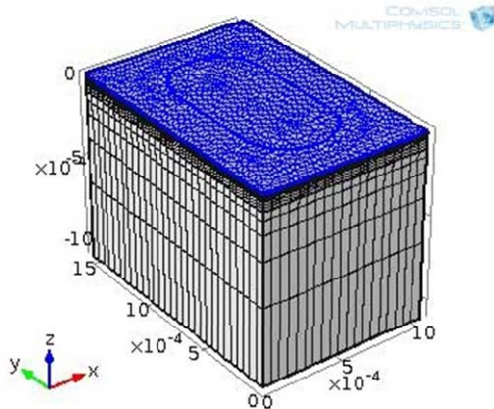
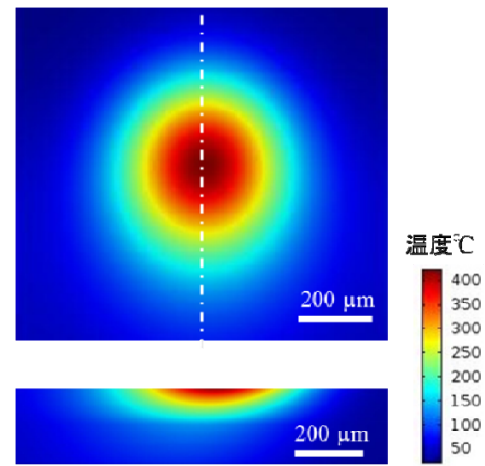


図 3 解析の境界条件とメッシュ作成方法

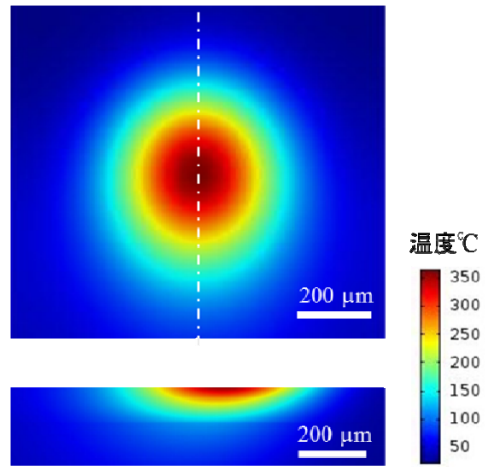
表 1 解析に用いた材料物性 (20°C)

	a-(Ni-P)	SUS304
熱伝導率 W/(m·K)	5.02	15.0
密度 g/cm ³	7.9	8.03
比熱 J/(g·K)	0.48	0.502

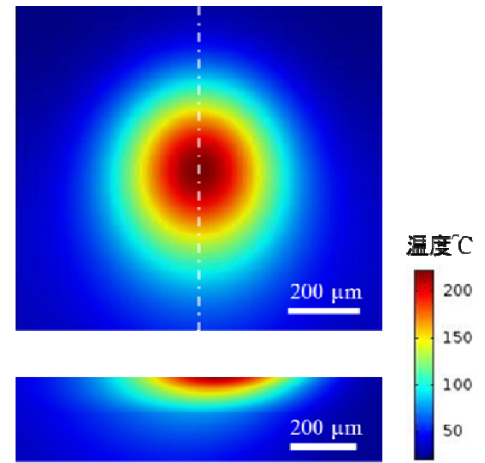
続いて解析結果を示す。図 4 は各レーザ強



(a) $Q = 4.0$ W



(b) $Q = 3.4$ W



(c) $Q = 2.0$ W

図 4 各レーザ出力における表面および照射中心断面の温度分布

度における表面および中心部断面での温度分布を示している。いずれの条件においても照射点の直径 100 μm 程度の範囲に最高到達温度範囲が分布していることがわかる。また $Q = 4.0$ W では表層 20 μm 程度まで Ni-P の多結晶化温度 350°C を超えており、 $Q = 3.4$ W でも極表層においては 350 °C を超えているこ

とが確認された。一方, $Q=2.0\text{ W}$ の場合には照射領域全体において 350°C を下回っている。多結晶 Ni-P は a-(Ni-P) と比較して被削性が悪くバリや割れを生じさせやすくなるため, 避けるべき条件であると考えられる。またピラミッドアレイのような急峻な構造を有する場合, 熱集中により局所的な温度は3倍となることがあることが報告されており, 熔融する恐れもある。

(2) 有限要素法による切削現象の解析

切削現象に対しては汎用有限要素法解析ソフトウェア AdvantEdge を用いて解析を行った。熱伝導解析において予想された加熱温度を被削材の初期温度に設定することで, 熱による影響を模擬するものとして解析を行った。先の解析を参考として, 初期温度は 20° , 200° , 400° と設定した。解析の結果を図5に示す。初期温度が高い場合ほど, 最大せん断応力 (MSS) の高い領域が縮小している。これは温度上昇により降伏応力が低下したことに起因する。また創成した構造の欠けは構造端部のすべり変形によるものであり, 高い MSS の領域を抑制することにより局所的な欠けを抑制できる。

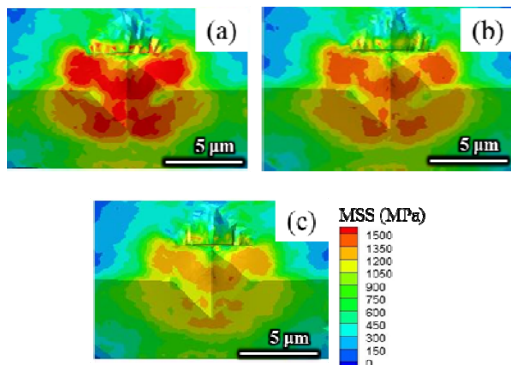


図5 最大せん断応力 (MSS) の分布
(a) 20°C , (b) 200°C , (c) 400°C

(3) 外部照射切削実験

まず外部からレーザーを照射した場合の実験を行い, その効果を検証した。加工は切削速度 1000 m/min , 切込み深さ $2.4 + 2.3 + 0.3\ \mu\text{m}$ の3回切削により合計 $5\ \mu\text{m}$ とした。加工後の表面の走査型電子顕微鏡像を図6に示す。

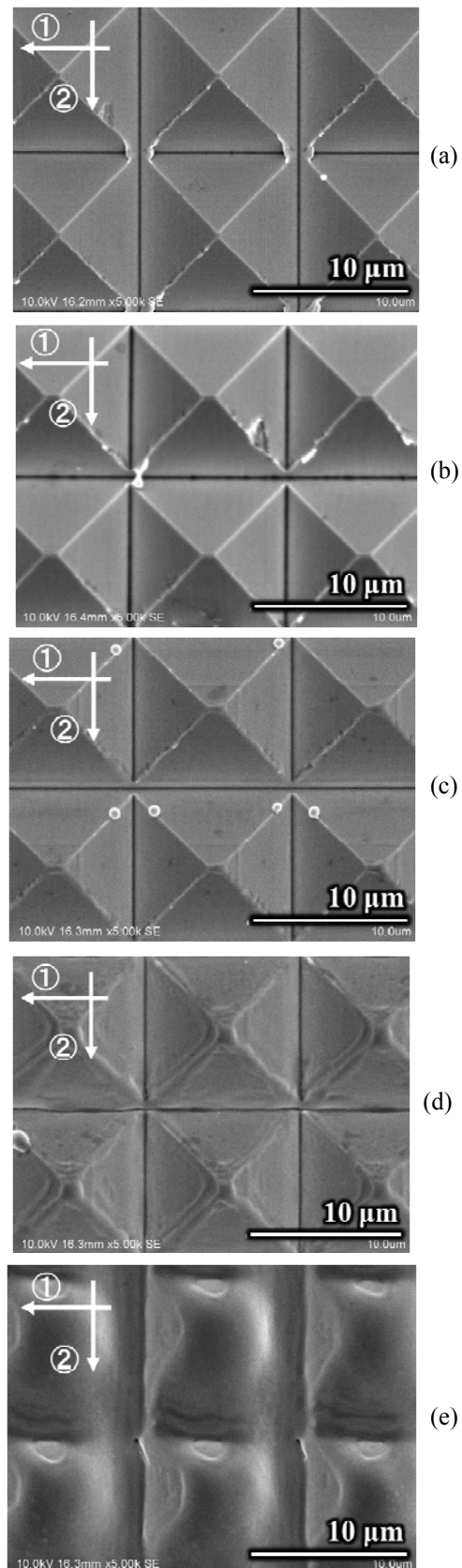


図6 ピラミッド形状創成結果:(a) 通常切削,
(b) 1.2 W , (c) 2.0 W , (d) 3.4 W , (e) 4.0 W

(a)や(b)で確認される欠けが(c)~(e)では確認されることがわかる。一方, (d)と(e)では構造のエッジ部が熔融していることも確認で

きる。したがって、熔融と多結晶化の観点から本実験では 2.0 W が最適であることが分かった。

(4) 導光バイト切削実験

導光バイトによる実験では開発した装置について、出力に制限があり、またすくい角が負であるなどの制限があった。しかしレーザー光の散乱を考慮しなくてよいため、オイルミストや通常の冷却液による冷却が可能となる。加工条件の詳細について表 2 にまとめる。

表 2 導光バイト切削条件

レーザー波長 nm	-	405	976
レーザー出力 W	-	0.4	0.6
工具先端角度 °	150		
工具すくい角 °	-45		
工具逃げ角 °	5		
切込み深さ μm	1		
溝ピッチ μm	3.732		
切削速度 mm/min	50		
溝本数	30 本		
切削環境	オイルミスト供給		

実験結果が図 7 である。いずれの場合もバリの減少に効果があることを確認するとともに、波長 976nm よりも 405nm のほうが効果的であることを見いだした。しかしすくい角が負であるために切り屑の排出性が悪く、溝構造を潰してしまった箇所もあった。一方、バリの発生形態は異なっており、通常切削で

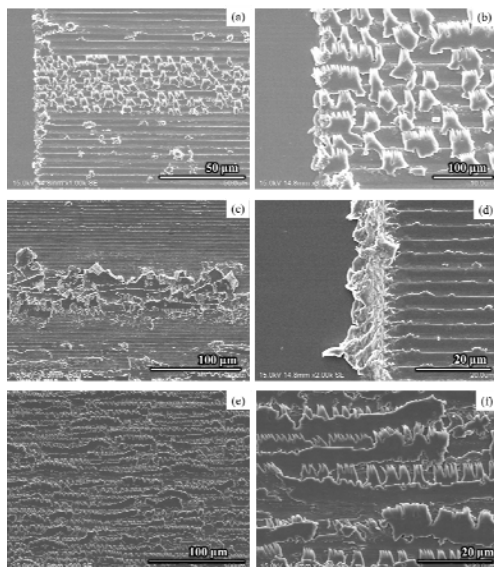


図 7 レーザ導光型バイトの加工結果：(a) レーザ援用なし低倍率 (b) レーザ援用なし高倍率 (c) $\lambda = 405 \text{ nm}$ 低倍率 (d) $\lambda = 405 \text{ nm}$ 高倍率 (e) $\lambda = 976 \text{ nm}$ 低倍率 (f) $\lambda = 976 \text{ nm}$ 高倍率

はバリ発生個所ではある程度規則的に発生しているが、導光バイト切削では切り屑が凝集して毛羽立ったように見える。とくに 976 nm の場合には顕著であり、全面的に荒れていることが確認できる。今回のレーザー出力は外部照射切削では影響を与えないレベルであるため、導光バイト切削では、低エネルギーであっても影響を与える可能性が示唆された。

今後は、負ではないのすくい角を持ち、かつ高出力エネルギーの照射が可能な導光バイトの開発が必要である。ただし、照射エネルギーに関しては、外部照射切削と比較し、低エネルギーであっても効果がある可能性が示唆された。

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 1 件) (査読有り)

- ① 益子直人, 小林龍一, 寺岡祥平, 高柳俊, 嶋田慶太, 水谷正義, 厨川常元: “微細構造金型加工に対するレーザー援用マイクロ切削法に関する研究”, 砥粒加工学会誌, 59, 10, (2015), 588-593.

[学会発表] (計 3 件)

- ① 小林龍一, 柴田章広, 寺岡祥平, 嶋田慶太, 水谷正義, 厨川常元: “超精密切削におけるマイクロバリ生成メカニズム”, 2015 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2015 年 9 月 6 日, 東北大学 (仙台) .
- ② 益子直人, 小林龍一, 寺岡祥平, 高柳俊, 嶋田慶太, 水谷正義, 厨川常元: “レーザー援用旋削におけるデバリング効果の検証”, 2015 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2015 年 3 月 19 日, 東洋大学 (東京) .
- ③ 益子直人, 小林龍一, 寺岡祥平, 嶋田慶太, 水谷正義, 厨川常元: “レーザー援用切削による高品位微細構造創成に関する研究”, 2014 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2014 年 9 月 16 日, 鳥取大学 (鳥取) .

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等 該当なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

厨川 常元 (KURIYAGAWA, Tsunemoto)

東北大学・大学院医工学研究科・教授
研究者番号：90170092

(2)研究分担者
該当なし

(3)連携研究者
該当なし