

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：34316

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560141

研究課題名(和文) 機上レーザー焼入れシステムを用いた複雑形状極小刃物の高精度化に関する研究

研究課題名(英文) HIGH PRECISION MACHINING OF MICRO-CUTTING EDGE USING ON-MACHINE LASER HARDENING SYSTEM

研究代表者

小川 圭二 (OGAWA, Keiji)

龍谷大学・理工学部・講師

研究者番号：80405232

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：各種機能フィルム等の打抜き加工に使用される極小刃物には、耐摩耗性が要求され、耐摩耗性を向上させるために焼入れ硬化処理が行われる。新工法として、機上レーザー焼入れシステムを用いて、機械加工で刃先創成した後で刃先部のみをレーザー焼入れする「刃形創製後レーザー焼入れ法」を開発した。しかし、機械加工後の刃先部の熱容量が小さいために良好に焼入れできるレーザー照射条件範囲が狭いなどの課題が残った。そこで、さらなる新工法として機械加工と焼入れの工程を逆転させた「レーザー焼入れ後刃形創製法」を提案し、曲線形状極小刃物を用いて提案工法の効果を実証した。

研究成果の概要(英文)：Micro-cutting edges are often used for die cutting of such as functional films. A hardening process is needed because the ridgelines of micro-cutting edges require not only wear resistance, but also sharpness and shape accuracy. A method of laser hardening after machining for the micro-cutting edge fabrication was developed. This process uses laser hardening after shape fabrication of the micro-cutting edge in a pre-hardened steel workpiece. However, edge melting due to overheating during laser irradiation is likely to occur because the heat capacity is very small. Hence, a novel method to overcome these issues is needed. Therefore, a novel method such as micro-cutting edge shape formation after laser hardening was proposed and demonstrated its effects for micro-cutting edges. Effects of this method was investigated comparing with the method of laser hardening after machining. Some experiments results revealed applicability of the method to curve-shaped micro-cutting edges.

研究分野：工学

キーワード：生産工学・加工学 特殊加工 レーザ加工 表面改質 焼入れ 高精度

1. 研究開始当初の背景

各種機能フィルム、シート、電子部品、紙器等の打抜き加工には、刃幅 1 mm 程度以下の極小刃物が用いられており、その用途から刃先部の耐摩耗性が要求される。そこで、耐摩耗性を向上させるために焼入れ硬化処理が行われている。現在は、鉄鋼材工作物を電気炉などで全体焼入れした後に、機械加工で刃形を創製する工法(図 1(a))がとられている。焼入れ硬化した領域を機械加工するため工具摩耗が促進されて工具寿命の低下を招き、ひいては加工コスト増大の要因となり得る。しかし、刃物として耐摩耗性が必要なのは刃先部だけである。また本工法では、機械加工と焼入れ硬化処理の 2 工程を 2 設備で行う必要がある。

そこで研究代表者らは先ず、焼入れにレーザを用いることで刃先部のみを硬化処理し、さらに機械加工と焼入れ硬化処理の 2 工程を 1 設備に集約できる機上レーザ焼入れシステムを用いた「刃形創製後レーザ焼入れ法」(図 1(b))を開発した。これは、焼入れ硬化処理前の工作物(生材)に機械加工で刃形を創製した後、同一の工作機械上で刃先部だけにレーザ焼入れする工法である。しかし、刃先部の熱容量が小さいために良好に焼入れできるレーザ照射条件範囲が狭い上に、刃の断面形状によって良好に焼入れできるレーザ照射条件範囲が変化すること、さらに刃先稜線が複雑曲線形状の場合は、工作機械の実送り速度と運動精度の影響で良好に焼入れできるレーザ照射条件範囲が一層狭くなる(指令送り速度を遅くして低能率化せざるを得ない)ことなど解決すべき課題が残った。

そこで新たに、機械加工とレーザ焼入れの工程を逆転させた「レーザ焼入れ後刃形創製法」を提案した(図 1(c))。本工法では、十分な熱容量を持った工作物平面にレーザ照射するために安定した焼入れが可能である上に、照射面が熔融する条件も適用できる可能性が高いなど多くのメリットが期待できた。

2. 研究の目的

本研究課題では、これまでに開発した機上レーザ焼入れシステム(レーザ熱処理機能を具備した多機能工作機械システム)を用いて、極小刃物などの複雑かつ微細な形状を有する製品に対して、必要な箇所だけに均一な高硬度分布を高精度に形成する技術を確立することを全体構想とする研究の一旦を担うものである。そのために、本研究課題では、刃形創製前の平面素形材に対して、機械加工により刃形を創製する前に、将来刃先稜線になる付近を先行してレーザ焼入れ処理する新工法「レーザ焼入れ後刃形創製法」を提案し、本手法により、極小刃物の刃先稜線に沿って均一な高硬度分布を高精度に実現することを目的とした。

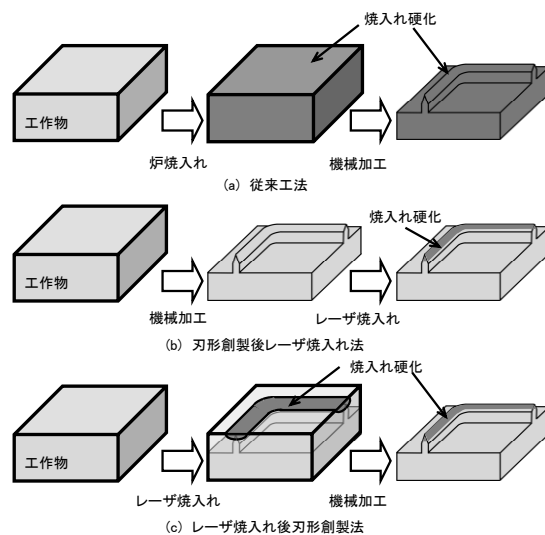


図1 極小刃物の工法

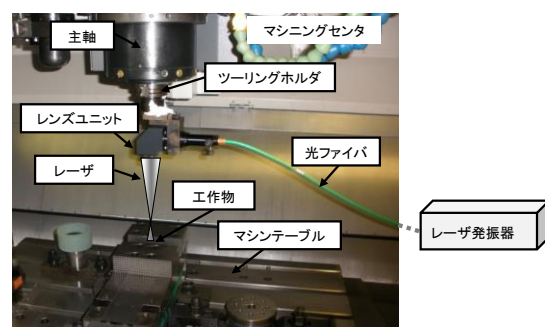


図2 機上レーザ焼入れシステム

3. 研究の方法

本研究課題では、研究目的を達成するために、(a)複雑形状を有する極小刃物の最適レーザ照射条件の探索、(b)レーザ焼入れした極小刃物の性能評価、(c)レーザ焼入れ後刃形創製法の有効性の実証、(d)機上レーザ熱処理システムの環境負荷の定量評価を実施したが、本報告書では(a)および(d)の結果を中心に報告する。

(1) 機上レーザ焼入れシステムの概要

レーザ焼入れは、高温加熱後の工作物を急速冷却するための冷却液を必要としないため、廃液を伴わない低環境負荷かつクリーンなプロセスである。さらに、スポット熱源により必要な個所に必要なだけの入熱を行うオンデマンド型のプロセスでもあることから、省エネルギー化が期待できる。研究代表者らは、金型や試作品など多品種少量型製品の加工において工程集約の課題となっていた熱処理をレーザで行うことで、機械加工から熱処理までのプロセスを同一工作機械で完結できる多機能工作機械システムを開発した(図 2)。本システムでは、従来の切削・研削といった機械加工や機上計測に加えて、光ファイバにてマシニングセンタ主軸に伝送した YAG レーザを、ツーリングホルダが把持するレンズユニット内のミラーおよび集光レンズを介して工作物に垂直照射することで機上熱処理(焼入れ)ができる。レーザ照

射条件として、レーザー出力、送り速度、レーザースポット径（レーザービーム形状）などがあり、これらを適正に組合せた条件で照射することで焼入れ硬化処理ができる。なお、レーザーの種類としては、光ファイバ伝送ができれば良いので半導体レーザーやファイバレーザーなども適用可能である。

本システムを用いることで、高形状精度化（部分的な熱処理のため熱ひずみレス）、リードタイム短縮（機械加工と熱処理を工作物の脱着なしに実施可能）、低コスト化（同一工作機械上での処理のため移送費が不要、かつ熱ひずみレスのため熱処理後の仕上げ加工が不要）の実現が期待される。

(2) レーザ焼入れ後刃形創製法の概要

研究代表者らが開発した「刃形創製後レーザー焼入れ法」は、以下の課題のために良好な刃形の創製が容易ではなかった。

- ・ 刃先部は熱容量が小さいために良好に焼入れできるレーザー照射条件範囲が限られている。
- ・ しかも、刃の断面形状によって入熱量および熱容量が変わるために良好に焼入れ可能な条件範囲が変化する。そのため、適正なレーザー照射条件の設定が容易ではない。
- ・ さらに、刃先稜線に沿わせてレーザーを照射するために、刃先稜線が複雑曲線形状を有する極小刃物の場合は、適用できるレーザー照射条件が一層限定される。さらに、工作機械の運動精度や加減速特性を予め詳細に把握しておき、運動指令の補正をする必要がある場合がある。

一方、研究代表者らが新たに提案した「レーザー焼入れ後刃形創製法」は、レーザー焼入れが容易ではない刃形創製後ではなく、安定してレーザー焼入れが可能な平面形状で十分な熱容量を有する工作物（生材）に対して刃先稜線予定線を含む領域を先に部分焼入れ（プレ部分焼入れ）しておき、その工作物を機械加工で仕上げて刃形創製する工法である。本工法では、以下のような利点が期待された。

- ・ 良好に焼入れ可能なレーザー照射条件範囲が広く、安定した焼入れが可能である。
- ・ 刃の断面形状が異なる場合でも、同一のレーザー照射条件で良好な焼入れが可能である。
- ・ 刃先稜線予定線に対して所定幅を有する硬化領域を平面部に生成するため、工作機械の運動精度の詳細把握や運動指令の

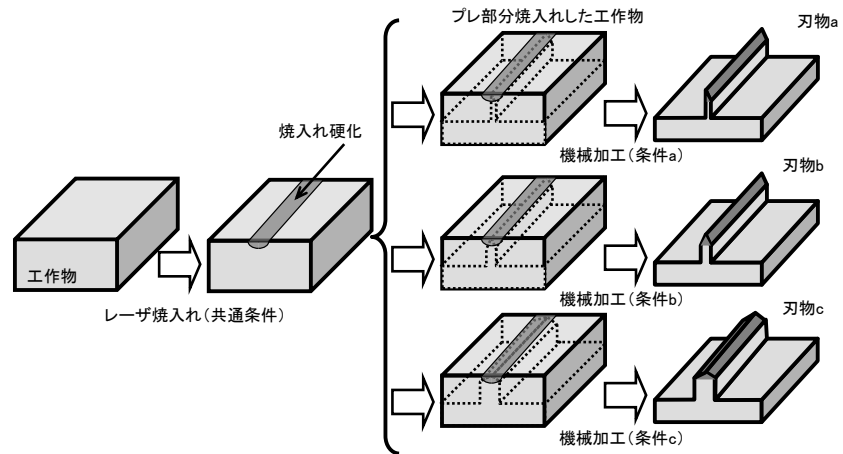


図3 レーザ焼入れ後刃形創製法の効果 (断面形状が異なる刃物への適応)

補正を必要としない。

以上により、刃形創製後レーザー焼入れ法での課題が解決されると考えられた。

- ・ また、レーザー焼入れと機械加工の工程は同一工作機械上で行われることから、機上レーザー熱処理システムがそのまま使用できる。
- ・ さらに、図3に示すように、プレ部分焼入れした工作物を準備することで、刃先の断面形状が異なる場合や複雑形状を有する場合でも、容易に所望の硬度や硬度分布を有する極小刃物の創製が可能になる。

(3) レーザ焼入れおよび刃形創製実験の方法

工作物材質は炭素工具鋼 SK105 とし、10 mm × 50 mm × 60 mm サイズの直方体工作物を供試材とした。レーザー焼入れには、YAG レーザ（波長 1.06 μm, 最大出力 250 W）を用いた。立形 3 軸制御マシニングセンタの主軸に取り付けたレンズユニットに光ファイバにてレーザーを伝送し、レンズユニットを介して工作物に照射した。刃形の創製には、超硬合金製ボールエンドミル（φ0.5 mm, 2 枚刃）を用いた。刃形創製後に刃先部の断面観察を行い、刃先形状と硬さで良否判定を行った。刃先部で 500 HV 以上の硬さが確認できたものを焼入れ硬化したと判断し、（刃先半径 < 5 μm）かつ（硬さ ≥ 500 HV）のものを良好に創製できた刃物と判定した。

4. 研究成果

(1) 研究の主な成果

① 直線形状極小刃物での基礎実験

まずは、「刃形創製後レーザー焼入れ法」で直線形状刃物を創製した場合について、種々のレーザー出力 P および送り速度 F （レーザースポット径 S_d は照射面上で 2.0 mm に固定）にてレーザー照射した場合の結果を図 4 に示す。刃先部の状態は、以下の三通りに分類された。

(a) 刃先は溶融鈍化しているが、硬化領域を有する (■)

(b) 刃先は溶融鈍化しておらず、硬化領域を有する (●)

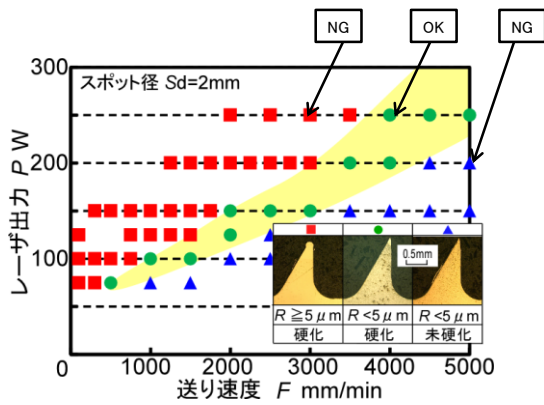


図4 レーザ照射条件が刃先部の状態に及ぼす影響 (刃形創製後レーザー焼入れ法)

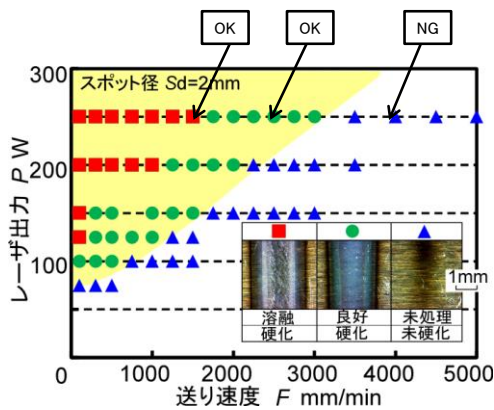


図5 レーザ照射条件が照射部の状態に及ぼす影響 (レーザー焼入れ後刃形創製法)

(c) 刃先は溶解鈍化しておらず、硬化領域を有さない (▲)

高レーザー出力・低送り速度条件では過加熱により刃先が溶解鈍化 (■印) し、低レーザー出力・高送り速度条件では加熱不足により硬化領域が形成できない (▲印) ため、良好な刃物の創製 (●印) には適切なレーザー出力と送り速度の組合せが必要であることがわかる。すなわち、送り速度を速くする (高能率化する) に伴ってレーザー出力を高くする必要があることがわかる。

つぎに、「レーザー焼入れ後刃形創製法」の効果を検証するために、まずは直方体工作物平面 (平面研削後の $50 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 面) に対してレーザー照射試験を行った。種々のレーザー出力および送り速度 (レーザースポット径は照射面上で 2.0 mm に固定) でレーザーを直線状に走査照射したときの照射条件が照射部の状態に及ぼす影響を図5に示す。照射部の状態は、刃形創製後レーザー焼入れ法の場合と類似して、以下の三通りに分類された。

- 表面は溶解しているが、硬化領域を有する (■)
- 表面は溶解しておらず、硬化領域を有する (●)
- 表面は溶解しておらず、硬化領域を有さない (▲)

ここで、本工法を用いた場合は、刃先の溶解が発生し得ないので、硬化領域を有する条

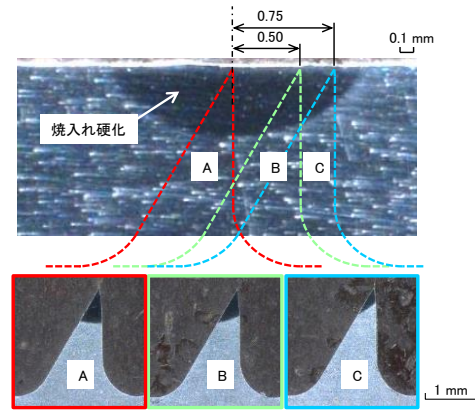


図6 レーザ焼入れ後刃形創製法による極小刃物の創製 (硬化領域の制御)

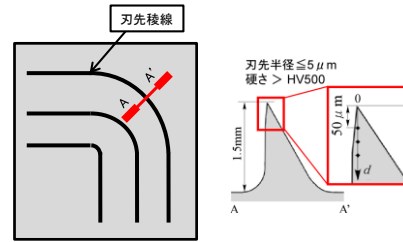


図7 直線-円弧-直線からなる曲線形状極小刃物の評価

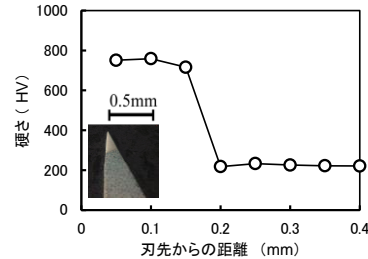


図8 曲線形状極小刃物刃先部の硬さ分布 (円弧半径1 mm)

件、すなわち図5において、●印の条件だけでなく■印を含む広いレーザー照射条件範囲で、良好な刃物の創製ができると考えられる。そこで、レーザー出力 200 W 、送り速度 200 mm/min (図5の■印) の照射条件にて、レーザー焼入れ後刃形創製法により刃物を製作した。刃先部は 800 HV と十分な硬さで焼入れされており、刃先半径 $< 5 \mu\text{m}$ であったことから、良好な刃物を創製できたと判定できた。刃の断面写真 (ナイタル腐食後) を図6に示す。レーザー照射位置を変えることで、刃先の硬化領域分布を制御できていることも確認できる。

② 曲線形状極小刃物での応用実験

直線形状極小刃物での基礎実験結果を踏まえて、直線-円弧-直線からなる曲線形状極小刃物への適応性試験を実施した。円弧半径は $1 \sim 10 \text{ mm}$ とし、図7に示す円弧部 45° 付近の刃部断面を評価対象とした。レーザー照射条件は、実用性を考慮して送り速度 2000 mm/min と高速にし、レーザー出力 250 W (最高出力) とした。図8は、作製した曲線形状極小刃物 (円弧半径 1 mm のとき) の断面写真と刃先から深さ方向の硬さ分布を示す。刃形創製後レーザー焼入れ法では適応が困難であった円弧半径が 1 mm と小さな場合でも、良好な刃物の創製ができていることがわかる。

また、硬化深さは刃先から 0.15 mm 程度であることも確認できる。なお、他の円弧半径の場合も同様の結果が得られたことを確認した。以上により、「レーザー焼入れ後刃形創製法」では、直線形状極小刃物を良好に焼入れ可能なレーザー照射条件範囲の大部分で円弧部の焼入れが可能であり、曲線形状極小刃物の場合でも低送り速度の条件に変更する（能率を低くする）必要なく、良好な刃物の創製ができることが実証された。

(2) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

レーザー焼入れは、廃液を伴わない低環境負荷かつクリーンなプロセスであり、省エネルギー化も期待できることが産業界で認識されはじめたこともあり、これまでの発表を通じて高い関心を得ることができ、企業からの技術相談や共同研究の打診が複数あった。また、後掲の〔学会発表〕④でベストポスタープレゼンテーション賞を受賞できたことから、ある一定のインパクトを与えることができたと考えている。今後さらに提案手法の研究を推進し、情報発信していくことで国内外の研究者や技術者に強いインパクトを与えられると考えている。

(3) 今後の展望

本研究助成により、提案手法の効果に関する基礎的な研究の遂行ができた。今後は、本研究を通じて明らかになった提案手法の利点を生かし、応用研究に向けて、高機能フィルム材だけでなく紙類などを含めて多種の材料での切断評価試験を実施する予定をしている。また本工法は、極小刃物に限らず、ピンアレイのように形状が複雑で熱容量が小さいために、形状創製後レーザー焼入れ法の適用が困難（形状精度維持かつ硬化処理が困難）なものにも適応できると考えている。そこで、本工法の用途拡大に向けた取り組みも積極的に実施していく予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 1 件）

- ① K. Ogawa, H. Tanabe and H. Nakagawa, A Proposal of Process Strategy for Micro-cutting Edge Fabrication: Effects of Shape Formation after Laser Hardening, Key Engineering Materials, 査読有, Vol. 625, 2014, pp. 545-549.

DOI : 10. 4028/www. scientific. net/KEM. 625. 545

〔学会発表〕（計 6 件）

- ① 山本修平, 小川圭二, 田邊裕貴, 高松徹, 中川平三郎, レーザ焼入れ後刃形創製法の曲線形状極小刃物への適応性, 精密工学会春季大会学術講演会, 2015 年 3 月 19 日, 東洋大学白山キャンパス(東京都・文京区).
- ② 小川圭二, 田邊裕貴, 高松徹, 山本修平,

中川平三郎, 機上レーザー焼入れシステムを用いた複雑形状極小刃物の高精度化, 第 16 回国際工作機械技術者会議ポスターセッション, 2014 年 11 月 1 日~2 日, 東京ビッグサイト(東京都・江東区).

- ③ K. OGAWA, H. TANABE and H. NAKAGAWA, Effects of Shape Formation after Laser Hardening in Fabrication of Micro-cutting Edge, The 15th International Conference on Precision Engineering, 2014 年 7 月 24 日, ホテル日航金沢(石川県・金沢市).

- ④ 山本修平, 小川圭二, 田邊裕貴, 高松徹, 中川平三郎, 機上レーザー焼入れシステムを用いた複雑形状極小刃物の高精度化—レーザー焼入れ後刃形創製法の曲線刃物への適応について—, 精密工学会関西地方定期学術講演会, 2014 年 7 月 4 日, 近畿大学東大阪キャンパス(大阪府・東大阪市).

- ⑤ K. Ogawa, H. Tanabe and H. Nakagawa, A Proposal of Process Strategy for Micro-cutting Edge Fabrication: Effects of Shape Formation after Laser Hardening, 5th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology, 2013 年 11 月 12 日~15 日, Haward Civil Service International House (Taipei (Taiwan)).

- ⑥ 小川圭二, 田邊裕貴, 中川平三郎, 機上レーザー焼入れシステムを用いた複雑形状極小刃物の高精度化—レーザー焼入れ後刃形創製法の提案—, 精密工学会関西地方定期学術講演会, 2013 年 6 月 14 日, 大阪工業大学大宮キャンパス(大阪府・大阪市).

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小川 圭二 (OGAWA, Keiji)

龍谷大学・理工学部・講師

研究者番号：80405232

(変更：平成 26 年 4 月 1 日)

(2) 研究分担者

中川 平三郎 (NAKAGAWA, Heisaburo)

滋賀県立大学・工学部・教授

研究者番号：50033345

(削除：平成 26 年 3 月 20 日)

田邊 裕貴 (TANABE, Hirota)

滋賀県立大学・工学部・准教授

研究者番号：00275174