

令和元年5月30日現在

機関番号：34316

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06028

研究課題名（和文）ダミー照射法による薄物小型部品の高精度レーザ焼入れに関する研究

研究課題名（英文）High precision laser hardening method using dummy irradiation for small and thin parts

研究代表者

小川 圭二（OGAWA, Keiji）

龍谷大学・理工学部・准教授

研究者番号：80405232

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、エッチング刃やミニチュアガイドレールなどの薄物小型部品に対して、刃先部や転動体接触部など必要な個所だけに均一な高硬度分布を形成することと部品としての高形状精度を両立すること、そしてこれを低環境負荷で製造する工法を確立することを目的とした。そのために、薄物小型部品の場合に課題となるレーザ焼入れ時の熱変形を相殺するための“ダミー照射”を行うことで高精度化を実現する新工法を開発し、その環境負荷低減効果を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題で提案した工法では、従来工法における足かせとなっていた機械的な変形矯正工程が削減されるため、薄物小型部品であっても工作機械1台で機械加工とレーザによる熱処理・形状矯正が実現される新工法であり、独創性が高い。さらに、レーザ焼入れは廃液を伴わないドライプロセスであるため、クリーンな作業環境と大幅な環境負荷の低減が実現され、ものづくりの省エネ化・グリーン化が期待できる。

研究成果の概要（英文）：This research subject aimed to form uniform high hardness distribution only at the parts demanded such as the blade edge or rolling element contact parts and high shape accuracy for thin and small parts such as etched blades and miniature guide rails. Moreover, another purpose is to establish the manufacturing method with low environmental burden. Therefore, a new method that achieves high accuracy by performing “dummy irradiation” to offset the thermal deformation during laser hardening was proposed and developed. Moreover, environmental burden reduction effect was shown.

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

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

鋼鉄材料を用いた工業製品は、焼入れ硬化処理をすることで強度や耐摩耗性を向上させることが多い。焼入れ硬化処理法として、電気炉を用いた焼入れや高周波焼入れがあるが、いずれの場合も熱処理後に変形が生じるため、これを取り除くための機械的な矯正が必要となったり、熱処理後の機械加工での除去を見越して大きな取り代を設けておく必要があるなどの課題がある。ここで、レーザ焼入れは、硬化が必要な箇所のみへの部分的な焼入れが可能であり、上記の方法と比べて格段に変形が小さいことや、自己冷却作用によって冷却液なしに焼入れが実現できるという長所を有することから、その実用が進んでいる。しかし、レーザ焼入れを用いた場合でも、刃物、ブレーキディスク、ミニチュアガイドレールなどの薄物小型部品に関しては、工作物の変形が課題となる場合がある。そこで、焼入れ硬化処理と変形矯正の両方をレーザのみで実現する手法として、ダミー照射法を用いた新工法を提案した。そして、マルテンサイト系ステンレス鋼製ミニチュアガイドレールを模した転動体軌道部への高精度焼入れを想定して、提案するダミー照射法の適応可能性を示唆する結果を得た。そして、炭素鋼製平板を用いて、レーザ照射条件が工作物の変形と硬化に及ぼす影響について検討を行い、ダミー照射法の適応性について評価することにした。

2. 研究の目的

本研究課題では、エッチング刃(極小刃を有する薄板部品)やミニチュアガイドレールなどの薄物小型部品に対して、刃先部や転動体接触部など必要な個所だけに均一な高硬度分布を形成することと部品としての高形状精度を両立すること、そしてこれを低環境負荷で製造する工法を確立することを目的とした。そのために、これまでに開発したレーザ焼入れ後刃形創製法を応用しつつ、薄物小型部品の場合に課題となるレーザ焼入れ時の変形を相殺するための“ダミー照射”を行うことで高形状精度化を実現する新工法を開発した。そして、本工法の環境負荷低減効果を示すことを目的とした。

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)レーザ照射条件が硬度分布および変形量に及ぼす影響の明確化、(b)均一な高硬度分布形成と変形レスを両立するレーザ照射条件パラメータの組合せ最適化、(c)ダミー照射法を用いた提案工法の有効性の実証、(d)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(b)の結果を中心に報告する。

3-1 提案するダミー照射法について

薄物小型部品に対してレーザを照射すると、工作物の一部が焼入れ硬化だけでなく工作物全体が塑性変形することがある。そこで、必要な箇所を焼入れ硬化しつつ、変形を矯正(形状制御)する方法として、レーザ特有の表面改質能力(局所焼入れ)と形状制御能力(塑性変形)をハイブリッド化した新工法(ダミー照射法と称す)を提案する。高硬度化が必要な箇所にレーザ焼入れした後で、製品性能上問題のない箇所にレーザを照射して、焼入れ時に生じた塑性変形を相殺する、あるいは焼入れ硬化のためのレーザ照射による塑性変形を予測して、それを相殺するためのレーザ照射を予め行って逆変形させておくという工法である。この原則2回のレーザ照射により、レーザ加工工程後の高硬度分布形成と変形矯正(形状制御)を両立する。これにより、レーザ焼入れ時に塑性変形が生じる場合でも後工程での機械的矯正を省略できる可能性がある。なお、図1は、本工法概念図であり、焼入れ硬化のためレーザ照射の後に、その照射面と反対の面に変形矯正のためのレーザ照射(ダミー照射)を行う場合を示している。

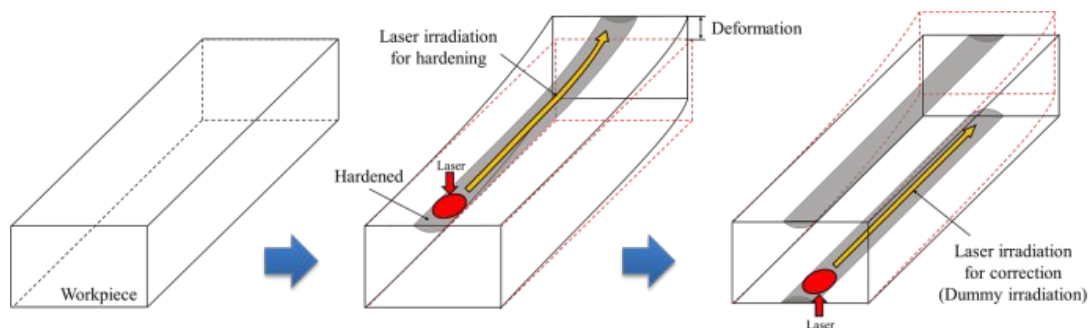


Fig.1 Schematic of proposed method

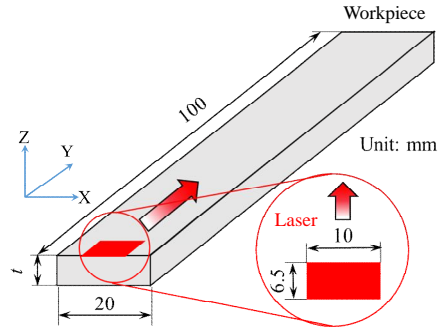


Fig.2 Laser irradiation method

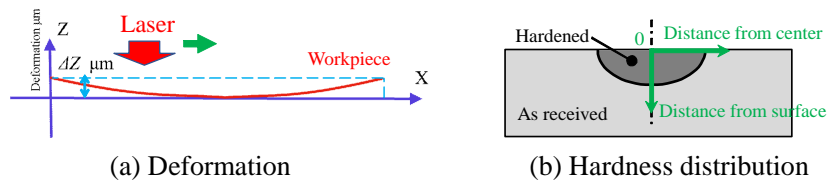


Fig.3 Evaluation methods

3-2 レーザ照射実験

工作物材質は、焼入れ硬化が必要とされる製品に広く使用される機械構造用炭素鋼 S50C とした。工作物形状は、図 2 に示す平板 (20 mm × 100 mm × t mm) とし、板厚の影響を評価するために $t=2.5, 5, 10$ とした。半導体レーザー (波長 940 nm, 連続発振, 最高出力 3000 W) を光ファイバでレンズユニット (2 軸ビームホモジナイザ内蔵) に伝送してトップハット分布矩形レーザーに整形して工作物に照射した。工作物幅 (20 mm) の約半分の範囲の焼入れを想定し、ビームサイズは 6.5 mm × 10 mm で一定とし、工作物の中心とビームの中心を一致させて、工作物長手方向 (図 2 の Y 方向) に、レーザーを直線走査照射した。レーザー出力 P (W) と送り速度 F (mm/min) を種々変化させて、レーザー焼入れ特性を評価した。

3-3 評価方法

工作物形状の測定には、触針式表面粗さ・輪郭形状測定機 (ミットヨ製 CS-H5000CNC) を用い、工作物長手方向に測定した。レーザー照射開始部 10 mm と終了部 10 mm (工作物両端部) を除く長さ 80 mm を評価対象とし、図 3(a) に示すように、測定点データを用いた傾き補正 (水平補正) 後の Z 座標値について、その最大差を变形量 Z と定義した。図 2 において、工作物を X 軸方向に見たときに、工作物が凹状に変形している場合は、 Z の符号は正 (凸状に変形している場合は負) とした。

硬さの測定には、マイクロピッカース硬さ試験機 (島津製作所製 HMV-2) を用いた。試験荷重は 0.98 N で、保持時間は 10 秒とした。

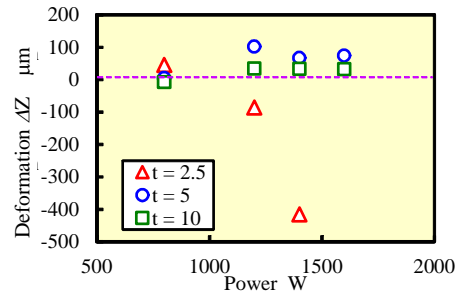


Fig.4 Difference of deformation behavior due to plate thickness ($F=400$ mm/min)

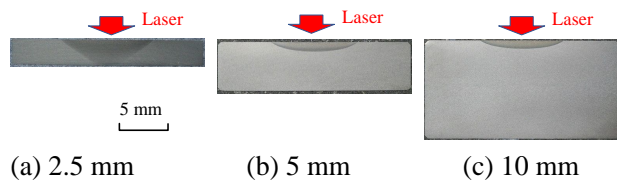


Fig.5 Section images after nitriding treatment

($P=1400$ W, $F=400$ mm/min)

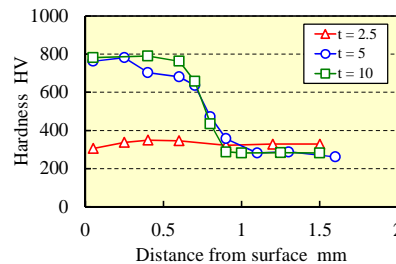


Fig.6 Difference of hardness distribution in thickness direction due to plate thickness ($P=1400$ W, $F=400$ mm/min)

4. 研究成果

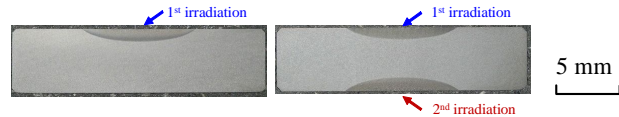
4-1 レーザ照射条件が硬化と変形に及ぼす影響

図4は、レーザ照射後の変形を測定した結果の一例である。工作物厚さ t が 10 mm と厚い場合の変形量は、約 30 μm 以下(レーザ照射前とほぼ同じ)であり、レーザ焼入れの特長である変形レスな熱処理が行われていることがわかる。 $t=5$ の場合の変形量は、図4中のいずれの照射条件の場合も $t=10$ の場合より大きく、最大で 100 μm 程度である。また、いずれの条件でも凹状に変形していることがわかる。 $t=2.5$ と薄い場合の変形量は、約 -400 ~ 10 μm であり、 $t=5$ に比べて絶対値が大きいだけでなく、照射条件によって凹状と凸状の両方の変形が確認できた。 $t=10$ および $t=5$ の場合の傾向は、他の送り速度の条件の場合でも同様であったが、 $t=2.5$ と薄い場合の変形挙動は、不規則であった。

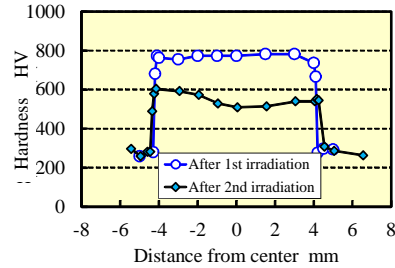
図5は、工作物断面のナイトル腐食処理後の光学顕微鏡観写真の一例である。 $t=10$ および $t=5$ の場合は、レーザ照射部直下に半楕円状に組織変化している領域(黒っぽく見える箇所)が確認でき、その大きさはほぼ同じである。しかし、 $t=2.5$ の場合は、組織変化領域が、 $t=10$ および $t=5$ の場合より深く、工作物裏面(レーザ照射面と反対の面)まで達していることがわかる。図6は、深さ方向に硬さを測定した結果である。 $t=10$ および $t=5$ の場合は、ともに表面から約 0.5 mm までの硬さが HV800 程度で焼入れ硬化されていることがわかる。一方、 $t=2.5$ の場合は、焼入れ硬化されていないことがわかる。以上により、工作物厚さによって、変形挙動及び硬化領域の生成が異なることがわかった。

4-2 ダミー照射方法及び条件

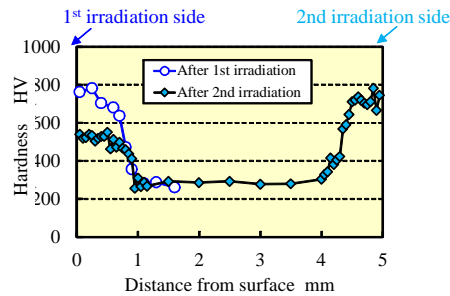
前節で、薄板ほど変形挙動が複雑で焼入れ硬化が難しいことが示された。本節では、本研究で提案しているダミー照射の効果をも明らかにするために、 $t=5$ の場合を対象にする。図7は、同じ条件で、工作物両面にレーザ照射した際の工作物断面写真と硬さ測定結果を示す。1回目の照射で形成された焼入れ硬化領域が、2回目の照射(1回目に照射した面の反対面への照射)の影響を受けて熱軟化していることがわかる。しかし、2回目の照射によって形成された焼入れ硬化領域は、1回目の硬化領域とほぼ同等で良好である。したがって、本実験のように、ダミー照射と本照射を工作物対面に同じ照射方法で実施する場合は、1回目の照射をダミー照射として用い、2回目の照射を本照射とすることが望ましいと考えられる。そこで、1回目の照射(ダミー照射)で工作物を逆変形させておき、2回目の照射(本照射)で、製品仕様に必要な硬化領域を形成するとともに変形を強制することを試みた。ここで、先行研究より、2回目の照射によって1回目の照射で生じた変形を抑制することができるが、1回目の照射による影響が工作物に残っているため、変形は完全には相殺されないことが明らかになっているため、ダミー照射条件の適正化が必要である。図8は、ダミー照射条件(出力)が最終変形量に及ぼす影響を示す。なお、2回目の本照射条件は $P=1200\text{ W}$ 、 $F=400\text{ mm/min}$ で一定とし、1回目のダミー照射条件として出力を変えた場合($F=400\text{ mm/min}$ で一定)の結果を示している。図より、最終変形量が0になる条件が存在することがわかる。そのためのダミー照射条件は2回目の本照射条件よりわずかに低出力である。



(a) Section images after nital treatment



(b) Width direction: at 1st irradiation side



(c) Thickness direction: from 1st irradiation side

Fig.7 Hardness distribution before and after both-side irradiation

($t=5\text{ mm}$, $P=1400\text{ W}$, $F=400\text{ mm/min}$)

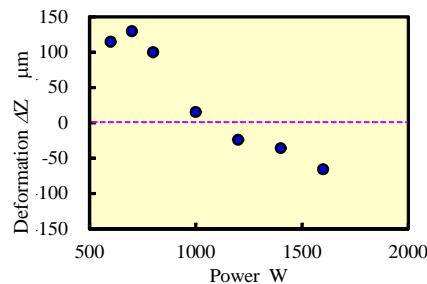


Fig.8 Effect of dummy irradiation for correction

($t=5\text{ mm}$, $P=1200\text{ W}$, $F=400\text{ mm/min}$)

以上により、以下のことが明らかになった。(1)板厚が薄いほど、変形挙動と組織変化が複雑になる。(2)工作物対面に同じ照射方法でダミー照射を行う場合は、1回目の照射をダミー照射とし、1回目の照射を本照射とすることが望ましい。

なお、本提案工法の環境負荷について検討した結果、熱処理時の消費電力量だけでなく処理時以外の消費電力量も含めたトータルでの環境負荷は、競合する焼入れ技術である炉焼入れや高周波焼入れに比べてレーザー焼入れの方が低く、本工法は低環境負荷で製品製造できる技術であることが示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

Keiji Ogawa, Hiroataka Tanabe, Heisaburo Nakagawa and Mitsuhiro Goto, High Precision Laser Hardening Method Using Dummy Irradiation for Small and Thin Parts: Fundamental Study on Hardening and Deformation, Advances in Materials and Processing Technologies, 査読有, Vol.5, No.1, 2019, 162-171
DOI: 10.1080/2374068X.2018.1540128

〔学会発表〕(計3件)

Keiji Ogawa, Hiroataka Tanabe, Mitsuhiro Goto and Heisaburo Nakagawa, Study on Hardening and Deformation in Laser Hardening for Small and Thin Parts: Effects of Dummy Irradiation method, Advances in Material & Processing Technologies Conference 2018, 2018

小川圭二, 田邊裕貴, 後藤光宏, 中川平三郎, 上田遼介, ダミー照射を用いた薄物小型部品の高精度レーザー焼入れ法-炭素鋼製平板材での硬化と変形に関する基礎的検討-, 精密工学会秋季大会学術講演会, 2018

須田晃平, 小川圭二, 田邊裕貴, 中川平三郎, ダミー照射を用いた薄物小型部品の高精度レーザー焼入れ法-硬化と変形に関する基礎的検討-, 精密工学会春季大会学術講演会, 2017

〔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)研究分担者

研究分担者氏名: 田邊 裕貴

ローマ字氏名: TANABE, Hiroataka

所属研究機関名: 滋賀県立大学

部局名: 工学部

職名: 教授

研究者番号(8桁): 00275174