

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：34316

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K04116

研究課題名（和文）高速重畳スキャンにより空間強度分布を最適成形したレーザによる隅角部焼入れ法の開発

研究課題名（英文）Development of Laser Hardening Method for Convex and Concave Corners by Optimally Shaped Spatial Intensity Distribution by High-speed Laser Scanning

研究代表者

小川 圭二 (Ogawa, Keiji)

龍谷大学・先端理工学部・教授

研究者番号：80405232

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：レーザ焼入れは、必要箇所のみを硬化させることが可能で、強度向上はもちろん、ひずみレス、クリーンな作業環境も実現できるため、産業界で急速に利用が進んでいる注目技術である。本研究課題では、隅角部（凹部と凸部）を有する鉄鋼材部品を対象とし、多種多様な隅角部に応じて適切に硬化領域を形成するためのレーザ焼入れ技術の確立に向けて、実験と解析の両面から取り組んだ。その結果、凹部と凸部の熱容量の違いにもとづく工作物表面付近温度の時間変化を解析的に予測し、これに基づいて適正なレーザ照射条件を設定する手法を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

レーザ焼入れ時の現象について、非定常熱伝導解析によるレーザ照射後の工作物表面付近の温度履歴に基づいて金属組織の変化を予測したことに学術的意義がある。そして、この知見を応用することで、部品形状および寸法に応じた適切かつ迅速なレーザ照射条件設定が実現され、これまで試行錯誤的な条件設定に悩まされた現状から脱却することができ、レーザ焼入れ技術の産業応用が一層拡大することが期待される。これにより、環境にやさしいものづくり技術の発展に寄与できることから社会的にも意義がある。

研究成果の概要（英文）：Laser hardening makes it possible to harden only the necessary areas. It is a remarkable technology that is rapidly being used in industry because it not only improves strength, but also realizes a strain-free and clean working environment. In this research project, steel parts with corner angles (concave and convex) were targeted. Both experiments and analysis were conducted to establish a laser hardening technique to form hardened areas appropriately for a wide variety of corner angles. As a result, a method was found for analytically predicting the time variation of the temperature near the workpiece surface based on the difference in heat capacity between the concave and convex surfaces, and setting appropriate laser irradiation conditions based on the results.

研究分野：生産工学・加工学

キーワード：レーザ 空間強度分布 焼入れ 硬度分布 高精度

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

レーザー焼入れは、必要箇所のみを硬化させることが可能で、強度向上はもちろん、ひずみレス、クリーンな作業環境も実現できるため、産業界で急速に利用が進んでいる注目技術である。一方、工業製品には隅角部（凹凸部）を有する部品が多用されるが、隅部（凹部）と角部（凸部）でレーザー照射時の温度変化が全く異なるため、隅角部のレーザー焼入れは極めて困難であり、特に部品の破損や破壊といった致命的欠陥の起点となる隅部への確実なレーザー焼入れ法の確立は、安全・安心なものづくりに求められる喫緊の課題である。そこで本研究では、熱シミュレーション援用迅速レーザー照射条件導出システムと、超高速重畳スキャンにより空間強度分布を最適成形したレーザーを用いた画期的焼入れ法を開発し、これらを統合することにより、多種多様な隅角部に確実に硬化領域を形成する技術を確認することとした。

2. 研究の目的

本研究における真直シャフトの全周均一レーザー焼入れ技術に関する検討において、ガルバノスキャナと筒状内面鏡を利用したシャフト部品の全周焼入れ方法を提案した。提案手法の有効性について検討するため、半導体レーザー、ガルバノスキャナ、筒状内面鏡、多関節ロボットからなる実験装置を構成し、提案したレーザー照射法によるレーザー照射実験を行った。その結果、シャフト表面において、従来法で課題となっていたソフトゾーンの発生を伴うことなく、シャフト全周に硬化領域の形成が可能であることが確認できた。これらの要素技術をもとに、段付きシャフトに対するレーザー照射法を検討した。その方法の一つとして、筒状内面鏡の形状を改善したレーザー照射法を考案した。考案したレーザー照射法を図 1 に示す。シャフト全周に対するレーザー照射を行う場合を図 1 (a)、段付きシャフトの隅角部に対するレーザー照射を行う場合を図 1 (b) に示す。リングビームが内面鏡で反射する位置を変化させることで、反射する角度を変化させることができる。そのため、図 4. 1 のレーザー照射法により、段付きシャフトの隅角部にも、ほぼ一様な硬化領域を形成することができると考えられる。

そこで次に、段付きシャフトの隅角部全体への均一レーザー焼入れ技術に関する検討の前段階として、階段形状物に対してレーザー照射実験を行うことにした。

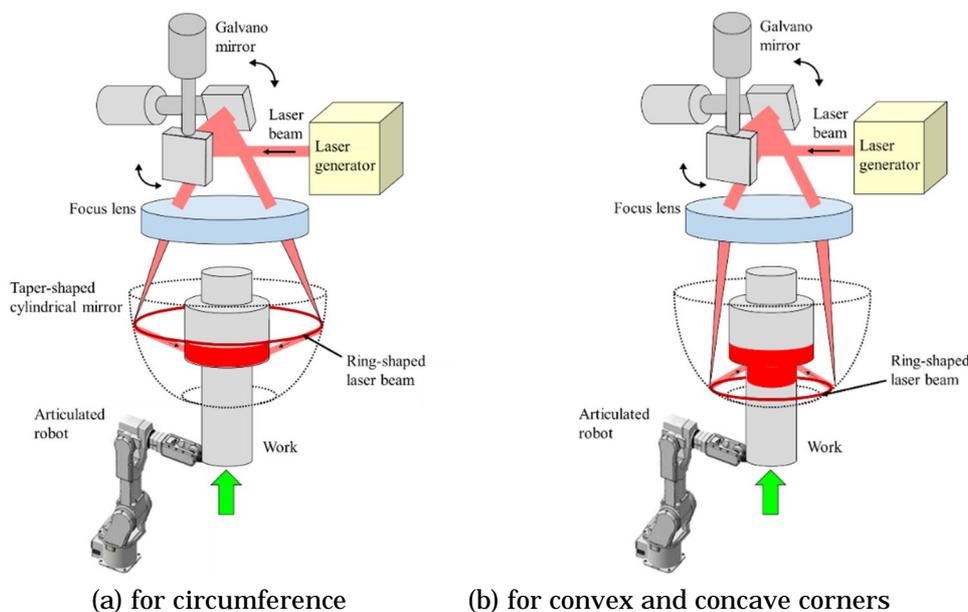


Fig. 1 Laser-hardening system for stepped shaft

3. 研究の方法

段付きシャフトの隅角部全体への均一レーザー焼入れ技術の確立に向けて基礎的検討を行った。段付きシャフトの隅角部へのレーザー照射の前段階として、段付きシャフトの隅角部を単純化した階段形状物に対する取り組みを実施した。

3 - 1. 実験方法

供試材には、機械部品の材料として多用される機械構造用炭素鋼 S50C を用いた。図 2 に、本研究で使用した階段形状物の寸法および形状を示す。外形寸法は 20 mm、階段部の寸法は 5 mm とし、隅部半径 R は 0mm、0.5 mm、2 mm の 3 種類とした。

レーザーの照射方法を図 3 に示す。半導体レーザー照射装置 (Laserline、LDF5000-60) を用いて、トップハット型の矩形レーザー (2.8mm × 10mm) を送り速度 200mm/min で直線走査照射した。予備実験として、一定出力かつ一定送り速度でレーザー照射したところ、角部では過加熱で溶融してし

まう傾向、また隅部では加熱不足で焼入れに至らない傾向が確認された。そこで本研究は、角部や隅部での熱容量の違いを考慮し、その違いに合わせてレーザー出力(入熱量)を変更するレーザー照射法を考案し、その有効性について検討を行った。レーザー照射条件の設定法を図4に示す。角部の熱容量を基準とする場合、中間部、隅部では、熱容量が2倍、3倍になると考えられる。そこで本実験では、角部への入熱量を基準として、中間部、隅部では、入熱量が2倍、3倍となるようにレーザー出力を変更してレーザー照射実験を行うことにした。

硬さ分布の測定位置を図5に示す。点D(角部)、点E(中間部)、点A(隅部)、点B(中間部)の4箇所について、表面から深さ方向に硬さを測定し硬さ分布を得た。なお、硬さHV450以上の領域を硬化領域とした。

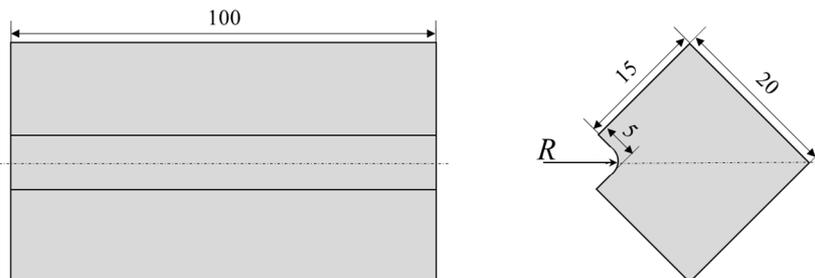


Fig . 2 Shape and dimensions of workpiece

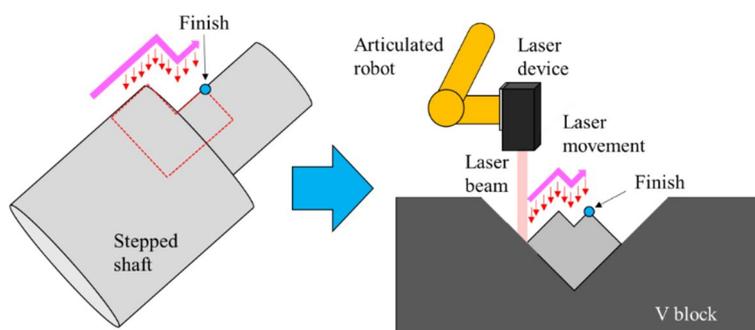


Fig . 3 Laser beam creation method

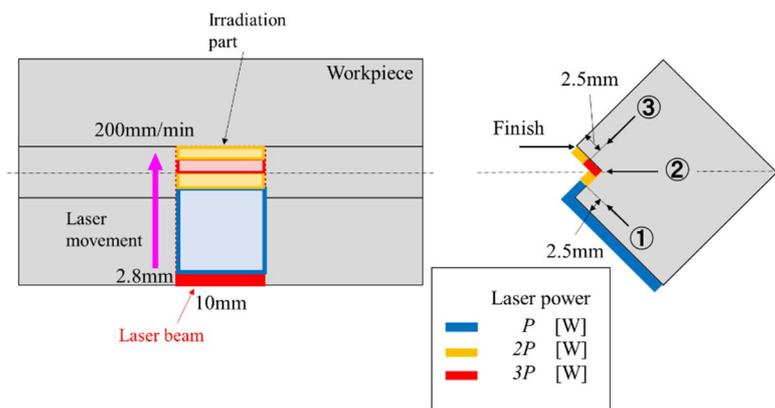


Fig . 4 Laser irradiation condition

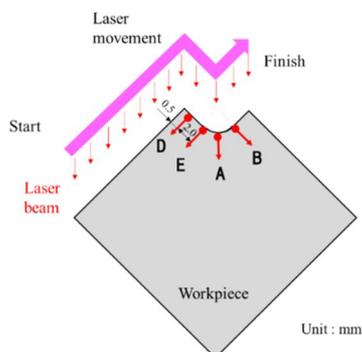


Fig . 5 Measuring method of hardness

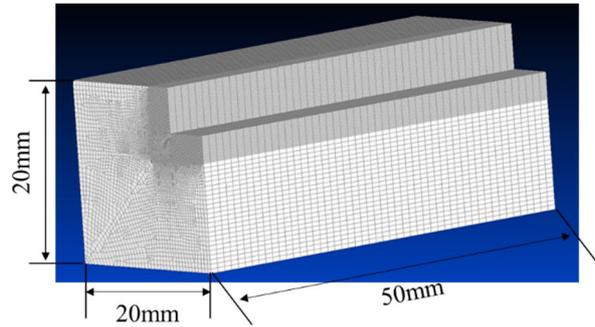
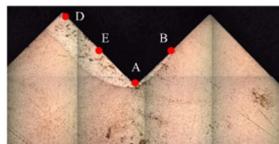
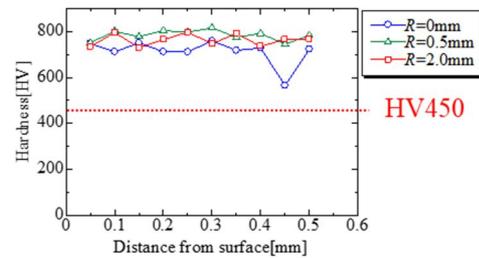


Fig . 6 Overall view (Corner radius 0mm)

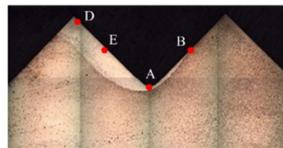
Corner radius
0mm



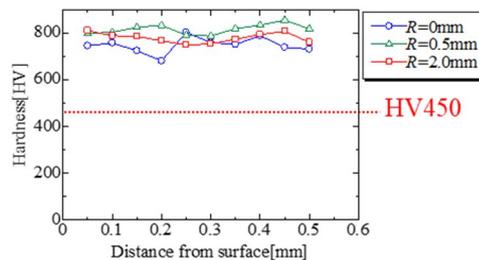
Point D



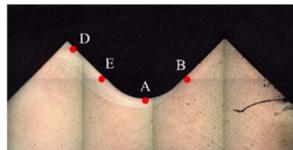
0.5mm



Point E



2.0mm



Point A

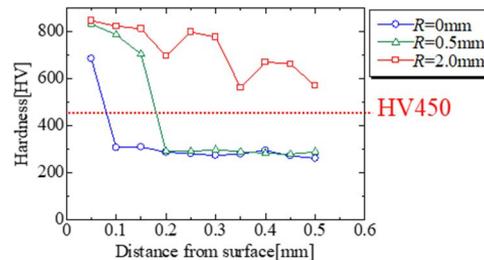


Fig . 7 Results of hardness measurement

3 - 2 . 解析方法

レーザー照射による影響を温度履歴の観点から考察するために、有限要素法を用いた非定常熱伝導解析を実施した。解析にはFEMAP with NX NASTRANを使用した。

有限要素モデルを図6に示す。温度分布を詳細に評価する階段部のみを0.1mmと細かくメッシュ分割し、その他の部分のメッシュ分割は0.5mmとした。境界条件は、すべての面において断熱とした。炭素鋼 S50C の熱物性値は、密度 7830 kg/m^3 、温度拡散率 $11 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 、熱伝導率 $50 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 、比熱 $420 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ 、吸収率 0.5 とし、比熱と熱伝導率は温度依存性も考慮した。また、初期温度は $25 \text{ }^\circ\text{C}$ とし、潜熱の影響は無視した。

レーザー照射実験と同様にトップハット型の矩形熱流束を移動させ、硬さ分布測定箇所に対応した位置における温度変化を評価した。ビームサイズは $2.8 \times 10 \text{ mm}$ 、走査速度を 200 mm/min とした。S50C の焼入れ温度である $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上に達した後、臨界冷却速度 ($250 \text{ }^\circ\text{C/s}$) 以上の速度で、マルテンサイト変態開始温度 ($320 \text{ }^\circ\text{C}$) まで冷却される領域を硬化領域と推定した。

Point B

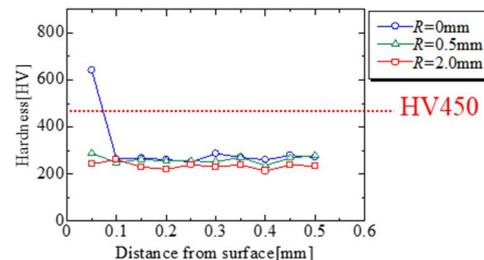


Fig . 8 Results of hardness measurement

4. 研究成果

P = 600 Wとしてレーザー照射して、断面をナイタル腐食処理した写真を図7に示す。隅部半径が小さくなると、隅部での硬化深さが小さくなる傾向が認められた。また、いずれの条件でも、図7のD(角部)、E(中間部)の位置では、硬化領域の形成が認められた。硬さ分布の測定を行った結果を図8に示す。角部でも隅部でも硬化領域の形成が認められた。なお、角部での溶融はなかった。したがって、考案した手法の有効性が実証された。なお、A(隅部)では、隅部半径Rが小さくなるほど、硬化領域が形成される範囲が小さくなることがわかり、隅部半径の大きさによっても適正な照射条件が存在する可能性が示唆された。

まずは、レーザー照射実験と同じ条件で解析を行った。硬さ評価した各位置について、深さ0.5mmの位置における温度変化を調べた。その結果、D(角部)、E(中間部)の箇所では、いずれの条件でも、最高温度が焼入れ温度以上に達しているが、A(隅部)、B(中間部)の箇所では、焼入れ温度までの温度上昇が確認されず、硬化領域を形成できないと推定された。エネルギー密度が低く、熱が拡散しやすい隅部への入熱が不十分になると考えられたため、エネルギー密度を高くするために、ビームサイズを2.0×10mmに小さくした解析を実行することにした。隅部に十分な硬化領域の形成が認められる条件を検討するため、隅部半径Rが0mmの有限要素モデルを使用した。

レーザー出力条件として、P = 600、700、800 Wで実施した。なお、隅部に十分な硬化領域の形成が認められる条件を検討するため、隅部半径Rが0mmの有限要素モデルを使用して、表面(深さ0mm)と深さ0.5mmの位置における温度変化を調べた。その結果、レーザー照射P = 800 Wの場合は、表面で1400以上の温度上昇が確認できる箇所が存在することから、表層で溶融が生じると推定された。一方、P = 600 Wでは、A(隅部)での深さ0.5mmの温度分布から、焼入れ温度(800)までの上昇は確認できなかった。そのため、入熱不足により、隅部への十分な硬化領域は形成されないと推定された。P = 700Wの場合は、表層での溶融の発生や各位置での入熱不足が確認できなかったことから、隅角部全体に一樣な硬化領域を形成できる可能性が確認された。各箇所(D、E、A、B)の深さ0.5mm位置での解析結果および冷却速度の計算結果を図9にまとめた。いずれの箇所においても、最高温度が焼入れ温度(800)以上に達しており、臨界冷却速度(250 /s)以上の冷却速度が確認できた。このことから、隅角部全体にほぼ一樣な硬化領域が形成できると予想された。

以上により、段付きシャフトの隅角部全体への均一レーザー焼入れ技術の確立に向けた基礎的検討を行った結果、FEM解析結果より、本実験で使用した階段形状部の隅角部では、熱容量が異なる角部、中間部、隅部に合わせて、レーザー出力(入熱量)を変更することで、隅角部全体に、ほぼ一樣な硬化領域を形成することが可能であることが示唆された。

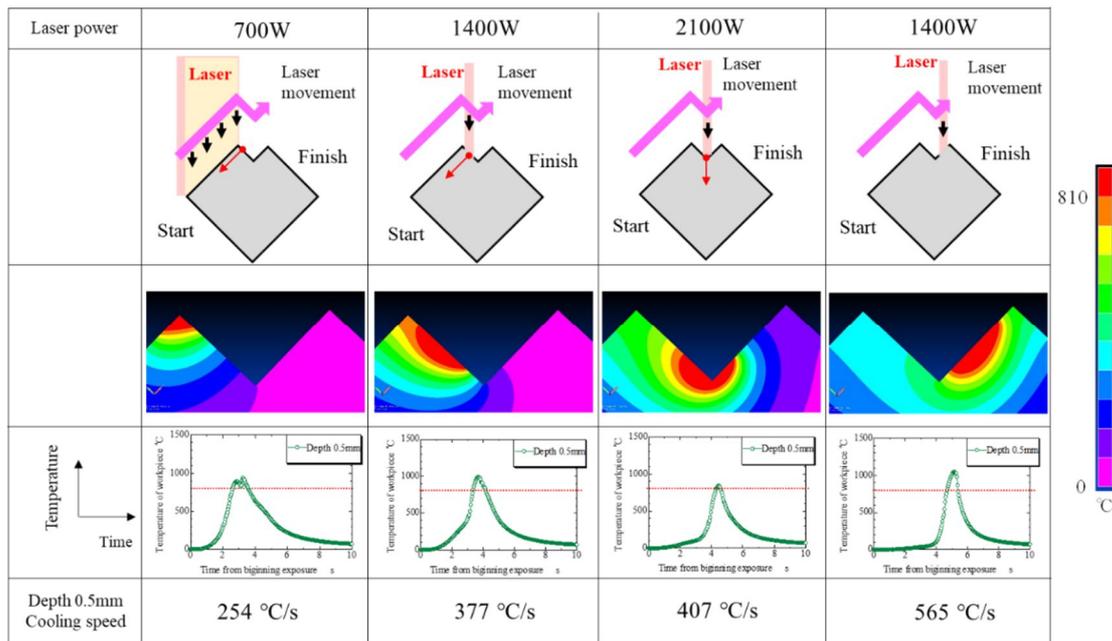


Fig. 9 Result of analysis by FEM analysis

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Keiji Ogawa, Hirotaka Tanabe, Masanori Fuwa, Heisaburo Nakagawa, Hirohito Tsukada and Yuki Goto	4. 巻 -
2. 論文標題 A Study for Uniform Laser Hardening of Steel Parts with Convex and Concave Corners	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 eProceeding of The 10th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hirotaka Tanabe, Keiji Ogawa, Heisaburo Nakagawa, Hirohito Tsukada, Yuki Goto	4. 巻 -
2. 論文標題 PROPOSAL OF HIGH-QUALITY LASER HARDENING SYSTEM FOR SHAFT PARTS USING CYLINDRICAL MIRROR AND RING-BEAM SHAPED BY HIGH-SPEED LASER SCAN SYSTEM	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the JSME 2020 Conference on Leading Edge Manufacturing/Materials and Processing	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 不破雅教, 田邊裕貴, 小川圭二, 中川平三郎, 塚田悠人, 後藤雄輝
2. 発表標題 高速スキャンレーザと筒状内面鏡を用いたシャフト部品の全周焼入れに関する基礎的検討
3. 学会等名 砥粒加工学会学術講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	田邊 裕貴 (Tanabe Hirotaka) (00275174)	滋賀県立大学・工学部・教授 (24201)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------