

# 博士学位論文審査要旨

2021年1月19日

論文題目：小出力レーザを用いた薄鋼板のレーザ焼入れフォーミングと  
折り紙工学への応用に関する研究

学位申請者：眞鍋 裕輝

審査委員：

主査：理工学研究科 教授 廣垣 俊樹

副査：理工学研究科 教授 青山 栄一

副査：理工学研究科 教授 宮本 博之

要 旨：

日本の生産システムにおいて、多機能化した工作機械を用いた工程集約技術の研究開発が求められている。その中で、熱処理とプレス加工は工程分散化されている現状の典型例で、その工程集約技術のニーズが高まっている。そこで本論文では、小出力の半導体レーザ熱源をコンパクト工作機械に搭載して機上で、薄鋼板を対象としてレーザ焼入れとレーザフォーミングをハイブリッドに遂行する超工程集約技術としてレーザ焼入れフォーミングを提案し、さらにその応用展開で折り紙工学に向け複雑形状の板バネを創成する手法にも取り組んでいる。

本論文は全8章で構成され、第1章において本研究の背景および目的とその意義について述べている。第2章では焼入れレーザ照射のエネルギーを温度勾配に基づく熱応力によるフォーミングにも同時活用する提案手法の省エネルギー性を評価している。第3章では薄鋼板の熱容量に着目することで提案手法の加工能率および生産品質を検討している。第4章ではレーザ照射制御中にフォーミングをリアルタイムモニタする手法を構築して、プロセスの基本原則を考察している。第5章では弾性ヒンジのフォーミングに適用することでフォーミングの変形制御方法を検討している。第6章では提案するレーザ焼入れフォーミング後の仕上げ工程について検討している。第7章では残留応力をモニタして考察しながら、折り紙工学に向けての板バネ創成を遂行している。第8章では得られた結果とその要点および結論を総括し、今後の展望について述べている。これらの成果は、次世代のセル生産システムと工程集約技術の向上に資するものであり、さらにその応用展開として折り紙工学との融合に対する指針を示すものである。よって、本論文は、博士(工学) (同志社大学) の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

## 総合試験結果の要旨

2021年1月19日

論文題目：小出力レーザーを用いた薄鋼板のレーザー焼入れフォーミングと  
折り紙工学への応用に関する研究

学位申請者：眞鍋 裕輝

審査委員：

主査：理工学研究科 教授 廣垣 俊樹

副査：理工学研究科 教授 青山 栄一

副査：理工学研究科 教授 宮本 博之

要 旨：

本論文の提出者は、2018年4月に本大学院理工学研究科機械工学専攻博士課程（後期課程）に入学し、現在在籍中である。

本論文の主たる内容は、International Journal of Automation Technology, Vol.10, No.6, pp.923-933, および Vol.13, No.2, pp.207-220, および Vol.14, No.4, pp.592-600, 砥粒加工学会誌, Vol.62, No.1, pp.26-32, および Vol.62, No.11, pp.571-577, に掲載され、既に十分な評価を受けている。

2020年12月19日15時30分より約2時間にわたり、提出論文に関する博士論文公聴会が開かれ、種々の質疑応答が行われたが、提出者の説明により十分な理解が得られた。さらに公聴会終了後、審査委員より、論文に関する諸問題につき口頭試問を実施した結果、本人の十分な学力を確認することができた。なお、語学に関しては英語の語学試験に合格しており、さらに多数の国際会議発表の実績も有することから、十分な語学力を有しているものと認められる。以上より、本論文提出者の専門分野に関する学力および語学力は十分であることが確認できた。よって総合試験の結果は合格であると認める。

# 博士學位論文要旨

論文題目：小出力レーザを用いた薄鋼板のレーザ焼入れフォーミングと折り紙工学への応用に関する研究

氏名：眞鍋 裕輝

要旨：

近年、地球環境問題の意識の高まりにより、Sustainable development（持続可能な発展）という考え方が重要視されてきている。Sustainable developmentとは、「将来の世代におけるニーズを満足させるための能力を危機にさらすことなく、今日の時代ニーズを満たす発展」と定義されている。これは環境保全を考慮した今日および将来の「時代のニーズを満たす」ことが重要であるという考え方である。この概念を工作機械にあてはめると、加工物に適したサイズに工作機械をダウンサイジングし、小さな部品を小さな工作機械で加工することにより、生産時の無駄を省き、省エネルギー化や省資源化、コストの削減につなげることが考えられる。工作機械の小型化については、近年マイクロファクトリという新しい生産の概念が提案されており、さまざまな研究が進められている。

さらに、消費者ニーズの多様化や製品ライフサイクルの短命化が進んでいる。その結果、小型薄鋼板の複雑板バネ部品などを対象に、生産システムに対しては生産する品物の種類や量の変動に柔軟に即応可能な変種変量生産に対応することが求められており、この変種変量生産を実現する生産方式として小型セル生産システムが注目されている。セル生産の掲げる目標は機械の小型化のみでなく、工程集約による工作機械の削減も含まれる。

また、2020年には新型コロナウイルス COVID-19の世界的な大流行に伴い多くの企業で働き方改革が実施された。その中で主要な役割を占めたのがリモート操作・無人化である。

以上より、これからの社会のニーズを満たす製品の加工には機械の小型化・工程集約・無人化（リモート）作業を達成しなければならない。

そこで、現在加工現場で注目を集めるのがレーザ加工である。レーザを用いた加工は様々研究されており、その活用法は多岐にわたる。1960年代にはレーザ切断、1970年代にはレーザ溶接・レーザ焼入れ、1990年代には薄板のレーザフォーミングと、除去加工や成形から熱処理まで幅広く活用されている。さらに、近年では工作機械に搭載されるほど小型なレーザも登場しており、SDGs（Sustainable Development Goals）や縮小社会でも言及されている省エネルギー・省資源化という人類に課せられた宿命に立ち向かうための重要な役割を担うポテンシャルを有している。

その一方で近年、折り紙工学という日本初の新しい工学が注目を集めている。折り紙工学とは、“折る”ことにより対象に様々な性能を付与する工学である。現在活用される性能の付与の一例として、省スペース化、剛性の付与、弾性の付与、自由度の付与が挙げられる。たとえば、折り紙工学の代表例とされるソーラパネルのミウラ折りは人工衛星に活用される。またハニカムコアのように、折ることによる「剛性の付与」は構造工学分野に適され、パイプの折りたたみでは省スペース化と自由度の付与が適用されている。すなわち、日本の伝統技術に基づく国際競争力ある技術革新を具現化できる可能性を有するものである。

本研究では、上述の背景を受けてレーザ加工に着目した。特に機械部品の製造の主たる工程である熱処理と成形加工に着目した。従来法を用いた熱処理技術は炉を用いた加熱処理が必要であり、大気を加熱し、その大気で対象を加熱する工程をとる。このためエネルギー効率が悪く、さら

に消防法の観点から無人での運用が禁止されている。また、従来のプレス機を用いた成形加工も、金型を製造したのちに製品を押し付けるという2段階加工となっており、金型製造によるコストは Sustainable development の考えに反する。本論文では、製造工場の無人化を達成する上で特に自動化が困難である熱処理と成形技術の自動化を目的とする。特に、半導体レーザを用いた薄板鋼部品のクリーンで高効率な熱処理手法と省スペース・短時間で安価な成形およびこれらを同時に達成する新手法の考案に取り組む。すなわち、レーザを用いた熱処理と成形の同時ハイブリッド加工の新技術をレーザ焼入れフォーミングとして提案する。

レーザ熱処理およびレーザ成形は多く研究がなされており、数値制御と組み合わせることによって理論的には自動制御が可能である。一方で、制御性や安定性などの基礎的問題と、実用先などの応用的問題のため産業化例は少ない。

基礎的問題は主に変形制御の課題である。レーザ成形の変形原理は二つ存在し、原理の切り替わり条件付近での制御性が悪い。特に、板厚が1 mm以下の薄板の場合で変形原理の切り替わりが生じやすい。加えて、熱処理と成形を同時に達成する目的上、熱処理による組織変態に起因する変態膨張のために変形角度にばらつきが生じる可能性がある。ただし、従来法における熱処理による変形は大きく、とくに薄板で複雑形状の部品における変形を制御し熱処理を施すことが可能であれば大きなアドバンテージとなる。

応用的問題は量産性能の低さが問題となる。従来手法であるプレス・炉での加工はエネルギー効率が著しく悪いものの、提案手法と比較すると大量生産における時間効率が極めてよい。一方で、従来法の工程分割された熱処理・プレス加工は古くから活用され、加工を行う技術者の経験値に依存する度合いも高く、暗黙知化している範囲が多く、安定した量産になるまでのリードタイムや技術伝承に多くの時間を要し、総合的な量産性能が高いとは言えない可能性がある。すなわち、生産の垂直立ち上げや技術伝承に向け、デジタル制御で形式知化できるレーザ焼入れフォーミングはその問題点を払拭できる可能性が期待される。

以上の観点から、本論文ではレーザを用いた熱処理と成形の同時ハイブリッド現象の基礎的な制御に関して有限要素法やサーモカメラによる撮影、プロセスモニタリングなどを用いて解明を試みる。さらに、レーザ焼入れフォーミングの具体的な適用先を模索することとした。具体的な適用先として、先述の折り紙工学に着目した。このうち、平板（2次元形状）を折ることによって生じる3次元形状の弾性に着目した。すなわち、折り紙工学の弾性の付与とレーザ焼入れフォーミングを統合した板バネ製造を試みる。

目的を達成するための本論文の構成を以下に示す。

第1章では、緒論としてヒトの用いてきた道具の歴史から加工技術の複雑化について述べ、現代のニーズと従来法の限界について概説する。また、新しい加工技術としてのレーザ加工についてまとめ従来法と比較する。レーザ熱処理とレーザフォーミングを取り扱う本研究の工学的位置づけをおこない、その上で応用先である折り紙工学との関係より、研究の目的について述べる。

第2章では、薄鋼板にレーザ熱処理を施す際の熱処理能力と変形に関して調べる。レーザの走査速度と焼入れ能力の関係と、走査速度と変形の大きさの関係を調べる。さらに、薄鋼板の上面と下面の両面から焼入れを遂行することによりレーザを用いた薄鋼板の全体焼入れの可能性を明示する。また、焼入れ能力と変形、および消費エネルギーの間にあるトレードオフ問題について明らかにする。

第3章では、前章で述べた変形を積極的に活用し、薄鋼板に対してレーザ熱処理とレーザフォーミングを同時に達成するレーザ焼入れフォーミングを提案する。レーザ焼入れフォーミング遂行の際の繰り返しレーザ走査による蓄熱が、熱処理と成形に与える影響に関して述べる。熱処理では焼入れ後の加熱による焼戻しを考察し、レーザフォーミングでは蓄熱による降伏応力の低下に起因する変形角度の増加を明らかにする。

第4章では、レーザフォーミングの複雑な変形原理を解明するために変形のリアルタイムプロ

セスモニタを用いた考察をおこなう。変形原理の遷移の解明のためにプロセスモニタが有用であることを示す。

第5章では、変形の線形増加を阻害する要因の解明をおこなう。レーザ走査の数に伴う変形量の線形的な増加は制御性の観点から好ましいものと考えられるが、これを阻害する主要因がレーザ走査方向の意図しない面外方向のそりであることを明らかにする。また、断面形状を変更したレーザ焼入れフォーミングも遂行して提案手法の原理の一般化を試みる。

第6章では、レーザ焼入れフォーミング後の最終処理として研磨加工を遂行する手法を提案する。本研究の大目標である小型化・工程集約について検討し、セル生産システムに向けた小型多機能な工作機械を目指した研磨加工を考察する。すなわち超工程集約型の小型工作機械において切削・成形・熱処理・表面仕上げの一連の工程を具現化した遂行例を示す。さらに前章までの課題であった変形レスな焼入れ薄鋼板の製造の場合についても検討を加える。

第7章では、レーザ焼入れフォーミング後の残留応力と表面溶融の抑制方法についても考察する。さらに薄板鋼の複雑形状創成と焼入れを同時に求められる対象を検討した上で、レーザ焼入れフォーミングの具体的な適用先として折り紙工学を提案し、折り紙工学を適用した小型板バネを試作を遂行して、本手法の有効性を示す。

第8章では、本論文により得られた結果を簡潔にまとめ、今後の方針を示した。

本論文では基礎研究を重ねることにより熱処理と成形を同時達成する新技術、レーザ焼入れフォーミング技術の問題点を明らかにするとともに、実現可能性を示すことができた。さらに、実用面を考慮した表面仕上げや具体的な適用先としての折り紙工学との統合化の可能性を示し、本技術の特徴を明らかにできた。これにより、提案する新加工手法であるレーザ焼入れフォーミングが、日本発の国際競争力を有する次世代の有望な技術であることを明確化することができた。