

氏 名	なか さき かず ゆき 中 崎 一 之
学位(専攻分野)	博 士 (エネルギー科学)
学位記番号	論 エ ネ 博 第 29 号
学位授与の日付	平成 15 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 2 項該当
学位論文題目	レーザー焼入れにおける鋼の特性変化に関する実験とその変態・熱・力学的解析
論文調査委員	(主 査) 教授 井上達雄 教授 松本英治 教授 宮崎健創

### 論 文 内 容 の 要 旨

本研究は、レーザー焼入れについて、照射部位の組織観察と硬さ測定を行うとともに、変態・熱・力学的解析を実施することによって、温度、組織および応力/変形などを把握して、レーザーの照射条件や材料の選定が焼入れ後の特性変化に及ぼす影響と種々の問題について考察したものであって、以下の各章から成っている。

第 1 章では、本研究の位置づけと技術課題ならびに研究の目的を述べている。レーザー加工技術の概要として、レーザー光の発振原理・特徴、各種レーザー加工機の種類、レーザー加工法の特徴・種類などを現在までに報告されている事例と比較検討しながら、レーザー焼入れの位置づけと問題点を明確にしている。この結果、レーザー焼入れされた鋼の特性変化を実験と数値解析から検討することが必要であることを指摘している。数値解析の手段として、組織—温度—応力の速成を考慮した、変態・熱・力学的解析を有限要素法の汎用熱処理シミュレーションコードで行うこととし、その基礎式、CAE 環境、材料特性データなどについて述べている。

第 2 章では、パルス YAG レーザビームを炭素量の異なる 4 種類の炭素鋼表面に照射し、硬化部の形状と硬さに及ぼす材料の化学成分とくに炭素量の影響について、実験によって調査を行っている。さらに、中間組織の生成の有無について炭素量がどのように関わるかを調べ、これが生成した場合、硬さ試験および組織観察結果から、その特性について比較検討している。

第 3 章では第 2 章と同様の方法で、炭素量の異なる 3 種類の Cr-Mo 鋼にパルス YAG レーザ焼入れを施し、得られた照射部の形状や組織、硬さに炭素やその他の元素が及ぼす影響について調べている。また、焦点はずし距離などの照射条件を変えたときに各鋼種が受ける影響についても考察している。さらに、中間組織の生成状況を調べ、その特性を明らかにした。

第 4 章では、CO<sub>2</sub> レーザを Cr-Mo 鋼の表面に複数回照射し、照射条件と加工断面の形状との関係、表面からの距離と硬さや組織との関係について検討している。その結果、レーザー出カや照射回数等の照射条件を変えることによって、照射部の形状や硬さを調整できることを示している。

第 5 章では、観察が不可能に近いとされる鋼のパルス YAG レーザ焼入れ過程について、解析を実施し、その有用性を検証している。また、レーザーの発振エネルギーおよび焦点はずし距離が熱処理中の温度、組織、応力に及ぼす影響について解析によって評価し、これらを変化させることによって、焼入れに最も適した照射条件が得られることを示唆している。

第 6 章では、炭素鋼の熱源移動を伴う CO<sub>2</sub> レーザ焼入れ過程を 3 次元有限要素法モデルで解析している。時間や熱源移動によって変化する温度、組織、力学場などの様子をシミュレートし、焼入れ後の材料の局所的な特性について考察している。さらに、第 5 章のパルス YAG レーザ照射の場合と異なり、実験および解析結果とも、硬化部 3 中間組織、基地組織は連続的であり、それぞれの境界は明確にあらわれないことを見出ししている。

第 7 章では、第 3 章の実験条件に基づいて解析を行い、熱処理中の鋼の温度、組織、応力などの変化に炭素量が及ぼす影響を調べている。照射条件が同じでも炭素量によって熱処理中の温度分布や相変態、変形の進行に明確な違いが表れることから、化学組成の依存性が大きいことを確認している。

第8章では、パルス YAG レーザ焼入れを施す試料表面が、円柱形の凹凸形状になっている炭素鋼の処理過程についての解析を行い、試料形状の違いが温度、組織、応力などの分布に及ぼす影響について比較検討している。その結果、試料形状の違いは、入熱および熱拡散に影響を与え、硬化部形状や残留応力分布に変化を及ぼすことを明らかにした。

第9章では、試料の表面上の微小な円錐形および球状形凹凸部に施したパルス YAG レーザ焼入れ過程についての解析から、照射面の形状や勾配が、温度、組織、応力などに与える影響を検討し、さらに第8章の円柱形凹凸部に対する結果とも比較している。円錐形や球状形凸部をもつ試料では、その底辺半径や定位置によってレーザー照射部の深さは大きく変わることや、円錐形や球状形凹部をもつ試料では、中間組織の硬化部近傍に極めて大きな残留応力が生じ、底辺半径の影響も大きいことを示している。

第10章では本研究で得られた結果ならびに成果を総括している。

## 論文審査の結果の要旨

本研究は、レーザー焼入れについて、実験および変態・熱・力学的解析を実施することによって、レーザー照射条件や材料選定が焼入れ後の特性変化に及ぼす影響と、関連する種々の問題について考察したものであり、得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1)パルス YAG レーザを炭素量の異なる炭素鋼および Cr-Mo 鋼の表面に照射して得られたマルテンサイト硬化部の硬さは炭素量に依存し、とくに Cr-Mo 鋼では、さらに Cr, Mo の含有量によって焼入れ性が向上することを明らかにした。また、亜共析鋼及び過共析鋼には中間組織が生成し、その厚さは、Fe-Fe<sub>3</sub>C 系準安定系状態図の A<sub>1</sub> 線と A<sub>3</sub> 線、A<sub>cm</sub> 線の温度差に比例するが、Cr-Mo 鋼では Cr や Mo などの含有量にも影響されることを指摘した。亜共析鋼の中間組織に含まれるマルテンサイトの硬さは、基地近傍の方が硬化部近傍に比べて大きい、過共析鋼では場所によらずほぼ一定であることを明らかにした。
- (2)CO<sub>2</sub> レーザを Cr-Mo 鋼の表面に複数回照射する場合、レーザー出力 1100W で 1 次照射すると、700~800HV0.1 のマルテンサイト組織が生成した。これに 600W 以上で 2 次照射を行うと、1 次硬化部は 2 次硬化部、焼戻し部、再生パーライトに変わるが、1000W で 2 次照射を行うと、さらに硬化して約 800HV0.1 の 2 次硬化が起きる。以上から、レーザー出力や照射回数等の照射条件を変化することによって、レーザー照射部の形状や硬さを調整できることを示唆している。
- (3)鋼のパルス YAG レーザ焼入れ過程について、変態・熱・力学的解析を実施したところ、オーステナイト変態は試料表面から進行し、マルテンサイト変態は熱拡散による自己冷却効果によって基地組織近傍から開始することを明らかにした。解析においても、硬化部と基地組織の間にマルテンサイト+パーライトの中間組織が発生したが、中間組織はその冷却過程において試料の全体で最も高いせん断残留応力集中があること、発振出力の増加は組織の形状を大きくするが、残留応力も増加することを明らかにした。以上から、発振出力および照射面積を変化させることによって焼入れに最も適した照射条件が得られることを示唆している。
- (4)熱源移動を伴う CO<sub>2</sub> レーザ焼入れ過程をシミュレートしたところ、温度分布の移動と、オーステナイト組織の発生場所はほぼ一致するが、マルテンサイト組織の発生はそれよりも遅れることを明らかにした。加熱中のオーステナイトには圧縮応力が生じ、冷却後のレーザー照射部ではマルテンサイトの体積分率の高い中心付近では引張応力が、基地近傍では圧縮応力が残留した。熱源移動の始点および終点付近の組織や応力は、中間部分と著しく異なった様子を呈することがわかった。CO<sub>2</sub> レーザを移動照射した場合、実験及び解析とも、硬化部、中間組織、基地組織の分布は連続的に変化し、それぞれの境界は明確にならないことも明らかにした。
- (5)(1)の実験条件に基づいた解析を行い、熱処理中の鋼の温度、組織、応力などの変化に炭素量が及ぼす影響を調べた。炭素量の多い鋼ほど加熱・冷却速度が大きく、オーステナイト変態も早く起きるが、マルテンサイト変態は開始時刻が遅く、低温で起こることがわかった。レーザー焼入れでは加熱冷却および相変態に伴って処理中の局部応力は著しく変化するが、最終的な残留応力は炭素量の多い材料ほど大きかった。
- (6)以上の結果を工学的に適用する例として、試料表面に凹凸などを有する炭素鋼に対して、パルス YAG レーザ焼入れ過程の解析を行った。凸部をもつ試料で円柱半径の小さい試料では凸部のレーザー照射面全体に硬化部が見られ、微小な円柱形凹

凸部をもつ試料の場合、その近傍に極めて大きな残留応力が発生した。円錐形や球状形凸部をもつ試料では、その底辺半径などの形状によってレーザー照射部の深さは大きく変わった、円錐形や球状形凹部をもつ試料では、中間組織の硬化部近傍に非常に高い残留応力が生じ、底辺半径の影響もかなり大きい。以上から試料の形状は焼入れ過程における入熱および熱拡散に影響を与え、硬化部形状や残留応力分布に変化を及ぼすことを明らかにした。

以上のように、本研究は、レーザー焼入れにおける各種の鋼の特性変化を、実験と変態・熱・力学的解析によって明らかにし、熱処理過程における問題解決に大きな寄与を成したもので、得られた知見は工業的および工学的意義を有している。

よって本論文は博士（エネルギー科学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成15年1月9日、論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。