



Y. Funada

## 高出力空冷半導体レーザの開発と 熱処理への応用

舟田 義則\*

### 1. はじめに

レーザ加工は、光エネルギーを高密度に集中して照射することで材料の局所的な加熱・溶融・蒸発を生じさせ、これを利用して切断や溶接、表面熱処理を可能とする。ガス溶断やアーク溶接、高周波加熱など従来の熱加工方法に比べ、熱影響や歪みが少ないことや生産性が高いことを特徴としている<sup>1)</sup>。

しかしながら、様々な加工分野での利用が可能であるにも関わらず、溶接や表面熱処理などへの適用は大手企業など一部に限られているのが現状である。その理由として、装置の価格やランニングコストが高いこと、煩雑な定期保守が必要であることが挙げられる。これらを解決するため、工業試験場では、安価で電力変換効率が高い高出力半導体レーザに着目し、これまでに精密溶接など材料加工への応用が可能であることを示した<sup>2),3)</sup>。しかし、当時の高出力半導体レーザは水冷式が主流であり、微細な流路に冷却水を流す必要があるため、詰まりによるオーバーヒートを招き、故障するという問題があった<sup>4)</sup>。

そこで本研究では、空冷式の半導体レーザ装置開発を目的に、まずは、本体とヘッドが一体構造を成す最大出力100Wの半導体レーザ装置を開発した。そして、小径鋼材ピンに対するレーザ加熱表面熱処理実験を行い、その実用性を検証した。次に、さらなる高出力を図るため本体とヘッドが分離した高出力半導体レーザを開発し、微細溶接での適用性を検証した。以下にその内容を示す。

## 2. 一体型高出力空冷半導体レーザ装置の開発

### 2.1 本体構造

試作したレーザ装置の概観および概略図を図1に示す。同装置は、レーザ光発振部と集光光学部、冷却部から構成されている。レーザ光発振部には発振波長が808nmで最大出力50Wの半導体レーザ素子が2個組み込まれ、合計で100Wのレーザ光を照射可能とした。そして、素子の発熱にともなう

装置内の温度上昇を防ぐため、ペルチェ素子と自励振動式ヒートパイプ「ヒートレーン」<sup>5)</sup>製放熱器で構成される空冷ユニットを備えた。なお、素子近傍に温度センサを取り付け、レーザ光照射時も常に温度が一定となるよう温調器を介してペルチェ素子駆動電源を制御する仕組みとした。

### 2.2 性能評価

図2は、レーザ光の出力特性を測定した結果である。投入電流10A以上でレーザ光が照射され、電流量が増加するに従い、出力は直線的に増加する。そして、投入電流52Aにて最大出力96Wが得られ、この場合の電力-光変換効率は51.3%に達した。一方、出力のばらつきはほとんどなく、装置への投

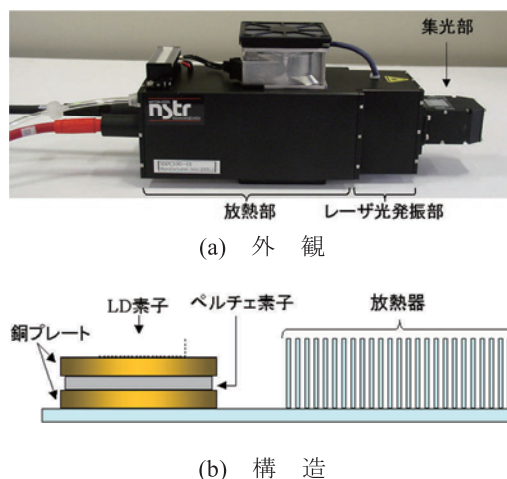


図1 一体型高出力空冷半導体レーザ

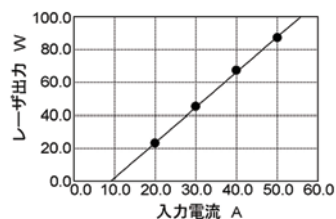


図2 一体型高出力空冷半導体レーザの電流-出力特性

\*石川県工業試験場機械金属部 研究主幹

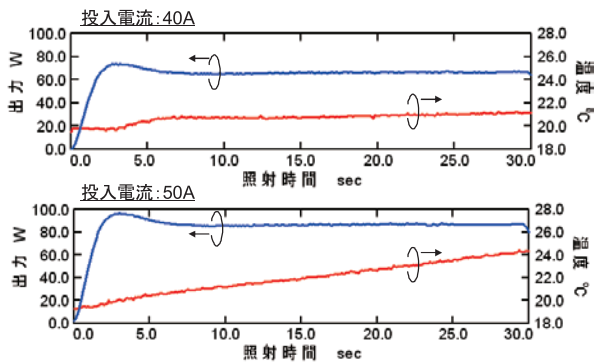


図3 一体型高出力空冷半導体レーザーの温度特性

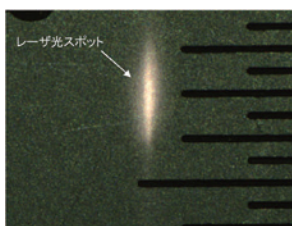


図4 一体型高出力空冷半導体レーザーの集光形状

入電流を精密に制御すれば、レーザー光の出力を精密に設定できる。

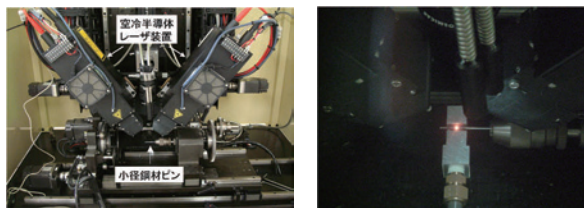
図3は、室温が24℃の下で30秒間レーザー光を連続照射した時のレーザー素子の温度変化を測定した結果である。投入電流40Aでは、レーザー光出力は67Wに達し、レーザー素子の温度は20℃±1℃の範囲で安定して制御できている。一方、投入電流50Aでは87Wのレーザー光が出力され、その間、レーザー素子の温度は0.13℃/秒で上昇し、24℃に達した。試作した冷却ユニットによる放熱性能が限界に近い状態であるが、レーザー光の出力変動は±1%以内であり、実用上問題ない。

図4は、装置端から50mm離れた位置にある焦点位置でのレーザー光の集光形状をCCDカメラで観察した結果である。レーザー光は、長径が2mmで短径が0.2mmの細長い楕円に集光されることがわかる。

### 3. 小径鋼材ピンのレーザー表面熱処理

#### 3.1 レーザー加熱実験装置の製作

表面熱処理に対する一体型高出力空冷半導体レーザーの適用性を検証するため、図5(a)に示すようなレーザー加熱実験装置を製作した。2台のレーザー装置をV字に配置することで最大200Wでの加熱実験が可能である。これを用いて小径鋼材ピンの表面加熱実験を行った。実験に使用した試料は、全長が40mmで直径が1.5mmのSKH51製小径ピンである。アルゴンガスでシールドしながら、回転する試料にレーザー光を照射した。図5(b)は、回転速度2rps、合計出力100Wの条件でレーザー光を照射した時の様



(a) 装置外観 (b) 加熱中の様子

図5 熱処理用レーザー加熱実験装置

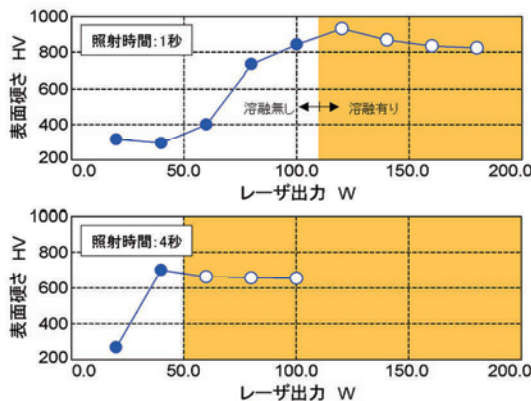


図6 表面硬さ

子である。レーザー光照射部が局所的に赤熱し、加熱されている。

#### 3.2 レーザー加熱後の表面硬さ

回転速度2rpsの下、出力や照射時間を変えて鋼材ピン表面にレーザー光を照射し、その部分のマイクロピッカース硬さを測定した。結果を図6に示す。照射時間1秒の場合、出力80W以上で表面硬さが大きく増加し、出力120Wで表面に僅かな溶融が見られるものの最高硬さHV900を得た。さらに、レーザー光の出力を高くすると表面硬さは徐々に減少し、出力180WではHV800まで低下した。一方、照射時間4秒の場合、より低い出力で表面硬さが増加するが、その値はHV700に留まった。レーザー光の出力が高過ぎたり、照射時間が長過ぎたりすると、照射部周辺の温度が全体的に上昇し、表面硬化に必要な自己冷却能が失われるためと考えられる。よって、適度なレーザー光出力で短時間加熱することによって、周囲の温度を上げることなく照射部のみの表面温度を上昇させることができ、表面硬化に必要な冷却速度が得られる。

#### 3.3 レーザー加熱部の硬化深さ

レーザー加熱によって硬化した鋼材ピンの軸に平行な断面を組織観察した。その結果を図7に示す。これは、出力100Wのレーザー光を1秒間照射して加

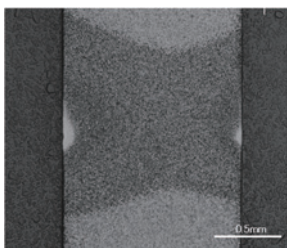


図7 レーザ加熱した小径鋼材ピン断面

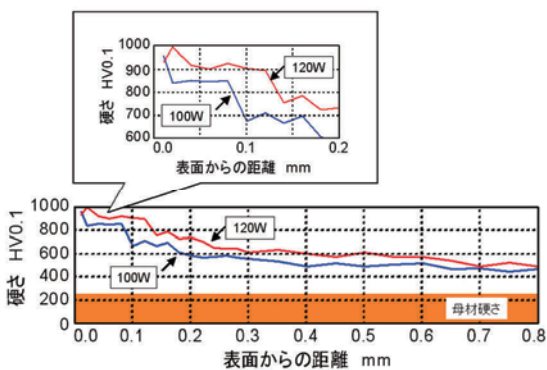


図8 硬さ分布

熱した断面である。表面から中心に向かって組織変化が見られ、レーザ加熱の際の急加熱急冷により表面焼き入れされていると判断できる。その範囲はレーザ光照射位置近傍に限られており、レーザ加熱に伴う硬化範囲が局所的であることがわかる。

図8は、1秒間のレーザ光照射によって表面を硬化した部分について、軸に直角な断面での半径方向に硬さ分布を測定した結果である。出力120Wの場合、硬さがHV800以上を示す深さが0.14mmであり、出力100Wの場合よりも深くまで硬化できることがわかる。しかしながら、いずれの場合も中心付近の硬さは、加熱前の母材硬さHV250に比べて、HV500以上に硬化している。中心付近の母材硬さに影響を与える事なく表面のみを硬化させるには、より高い出力のレーザ光をより短い時間で照射して極表面のみを加熱することが必要であり、今後の課題である。

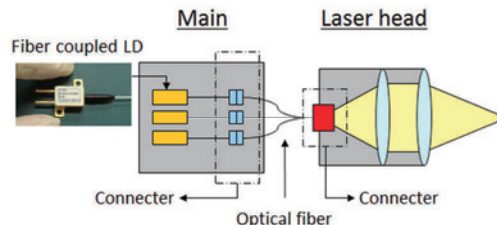
#### 4. 分離型高出力空冷半導体レーザの開発

##### 4.1 本体構造と性能評価

さらなる高出力を図るため、図9に示すように光ファイバを結合したレーザ素子を複数用いた本体およびヘッド分離型の高出力空冷半導体レーザを開発した。これは、光ファイバによって導光される各素子からの複数のレーザ光を専用のレーザ加



(a) 外観



(b) 構造

図9 分離型高出力空冷半導体レーザ

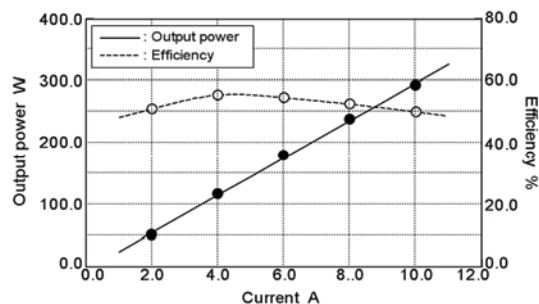


図10 分離型高出力空冷半導体レーザの出力特性および効率

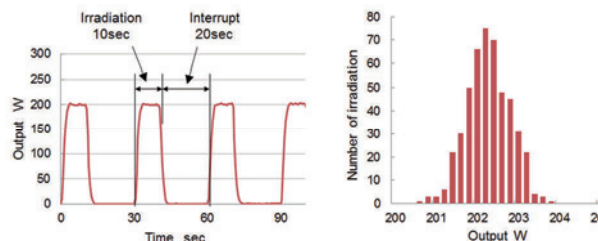


図11 分離型高出力空冷半導体レーザの繰り返し照射における出力安定性

工ヘッドによって一点に集光して照射することでレーザ光の高出力化を図っている。図10は、新規に開発した分離型高出力空冷半導体レーザの出力特性を調べた結果である。投入電流2A以上でレーザ光が照射され、その出力は、投入電流に応じて直線的に変化し、投入電流10Aで300Wに達する。また、同図には、電力-光変換効率が示されており、投入電流によって僅かに変化するものの動作範囲内では50%以上を維持している。



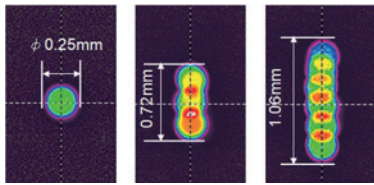


図12 分離型高出力空冷半導体レーザーの集光形状可変機能

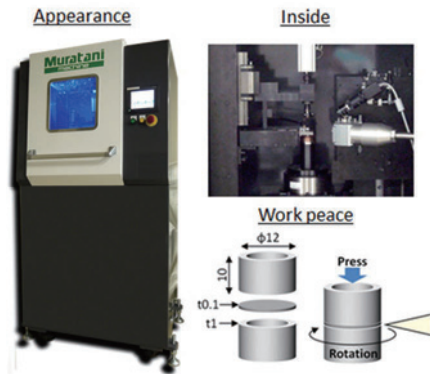


図13 ダイアフラムシーム溶接実験装置

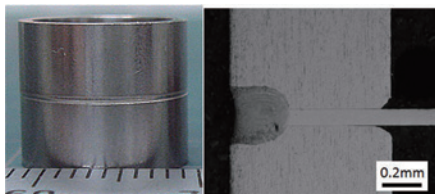


図14 ダイアフラムシーム溶接実験サンプル

図11は、200W程度のレーザー光を10秒間照射し、その後20秒間休止する動作を繰り返したときの出力変動を調べた結果である。変動幅は出力平均202Wを中心に±0.5Wであり、その割合は±0.25%である。変動幅が1%程度あるYAGレーザーなど従来のレーザー装置に比べて、レーザー光の出力安定性は高い。

#### 4.2 集光形状調整機能

加工ヘッドには、導光される複数のレーザー光を全て一点に集光して照射するだけでなく、図12に示すように、各集光スポットを直線的に並べて配置するなど、その位置を自在に調整できる機能が備えられている。疑似的ではあるが、集光形状を点や直線に、また、その長さを自由に変更することができる。レーザー加工では、レーザー光の集光形状は重要なパラメータであり、加工品質や生産性向上には有用な機能であると考えられる。

## 5. 微細溶接における実用性の検証

### 5.1 レーザ溶接実験装置の製作

新規に開発した分離型高出力空冷半導体レーザーの実用性を検証するため、微細溶接に注目し、図13に示すようなレーザー溶接実験装置を製作した。これは、ダイヤフラム式圧力センサの製造を念頭においた実験装置であり、2つのパイプ材(SUS304)の間に厚さ0.1mmのダイヤフラムを挿入して本機にセットすると、自動で部材の位置合わせが行われる。その後、押しジグが降下して溶接部を確実に密着させながら回転し、レーザー光が照射されることでダイヤフラムの全周シーム溶接が行われる。

図14は13mm/secの周速度で回転するワークに対し、φ0.25mmの点状に集光したレーザー光を出力200Wの条件で照射したときの結果である。溶接部はアルゴンガスによりシールドされ、高温酸化にともなう変色の全くない高品質な溶接部が得られている。溶け込みは0.3mmの深さまで到達し、その内部には空隙や割れなどの欠陥は見当たらない。圧力センサ向けのダイヤフラム溶接機として十分な性能を有し、現在、実際の圧力センサ製品を対象とした試験生産を実施している。

## 4. おわりに

本研究では、2種類の高出力空冷半導体レーザー装置を開発し、それぞれ、小径鋼材ピンの表面熱処理や微細溶接への応用を検討した。結果は以下の通りである。

- (1) 本体とヘッドを一体とする最大出力100Wの高出力空冷半導体レーザー装置を開発した。そして、これをV字に2台配置した実験装置を製作した。
- (2) SKH51製小径鋼材ピン(φ1.5mm)の表面硬化熱処理が可能であり、その硬さは、高出力レーザー光の短時間加熱により上昇し、出力が120Wのとき最大HV900に到達した。
- (3) ファイバ結合レーザー素子を用い、最大出力300Wの本体ヘッド分離型高出力空冷半導体レーザー装置を開発した。そして、これを搭載した精密溶接機を製作した。
- (4) 厚さ0.1mmのダイヤフラムに対し、シーム溶接を試みた結果、出力が200Wのとき、溶け込みが0.3mmに達し、高品質で信頼性の高い溶接を可能にした。

## 謝辞

本研究では、空冷式小型半導体レーザー装置の試作開発において、「レーザープロセッシング助成事業」により研究助成頂いた財団法人天田金属加工機械技術振興財団(現公益財団法人天田財団)に深謝します。

### 参考文献

- 1) レーザ学会編. レーザプロセッシング応用便覧. エヌジーティー, 2006, p. 145-269.
- 2) 舟田義則, 廣崎憲一, 中島明哉. 半導体レーザーによる超薄板溶接技術の開発. 石川県工業試験場研究報告. 2006, no. 55, p. 9-14.
- 3) 舟田義則, 廣崎憲一, 中島明哉. 超薄板製品の三次元溶接技術の開発. 石川県工業試験場研究報告. 2008, no. 57, p. 1-4.
- 4) Georg Treusch, Raman Srinivasan, Dennis Brown, Robert Miller, Jim Harrison. Reliability of water cooled high power diode laser modules. Proc. SPIE. 2005, vol. 5711, p. 132-141.