

集光形状可変半導体レーザーによる ニッケル基耐熱合金製溶接ベローズの開発

舟田義則* 坂谷勝明* 根田崇史* 谷内大世* 目木憲一** 長井久雄*** 阿部信行****

発電プラントや半導体製造装置業界において、耐熱性や耐腐食性の高いニッケル基耐熱合金製溶接ベローズが必要とされている。しかし、通常のステンレス製ベローズの溶接で使用されるパルスNd:YAGレーザーでは、割れを原因とする溶接部からの漏れを防ぐことができず、課題となっている。そこで本研究では、集光形状を点や直線に可変できる半導体レーザーを開発し、これを用いてニッケル基耐熱合金製溶接ベローズを安定的に製造するための溶接方法を検討した。その結果、ニッケル基耐熱合金製ベローズ素材を不良率0%で溶接することを可能にした。また、試作した溶接ベローズについて伸縮疲労試験を実施し、伸縮回数1000万回後でも漏れを生じずに使用できることが明らかになった。

キーワード：半導体レーザー，集光形状，溶接ベローズ，ニッケル基耐熱合金，伸縮疲労

The Development of Welded Nickel Based Alloy Bellows using Direct Diode Laser having a Variable Focused Spot Shape

Yoshinori FUNADA, Katsuaki SAKAYA, Takashi KONDA, Taise YACHI, Norikazu MEKI, Hisao NAGAI and Nobuyuki ABE

In Industries of a power plant and a manufacturing apparatus for semiconductors, welded nickel based alloy bellows are needed to improve heat and corrosion resistances of them. However, pulsed Nd:YAG laser used for manufacturing ordinary welded bellows made of stainless steel is difficult for preventing a leak from a crack in weld bead. In this study, a direct diode laser having a variable focused spot shape was developed, and the optimum welding condition was considered to manufacture welded nickel based alloy with high stability. As the results, bellows sheets made of nickel based alloy were able to be welded with no defect. Furthermore, it was found that test samples of welded nickel based alloy bellows had high endurance in expansion and contraction above a hundred million times from fatigue cycle tests.

Keywords : direct diode laser, focused spot shape, welded bellows, nickel based alloy, expansion and contraction cycle fatigue

1. 緒 言

大きな伸縮性を特徴とする溶接ベローズは、発電プラントや半導体製造装置などの重要配管部品として多く用いられている。近年、発電プラントの高効率化のため使用する蒸気の高圧化が進み¹⁾、溶接ベローズの耐熱性向上が求められている。また、国際的価格競争の激しい半導体製造装置の分野では、塩素系ガスなど高腐食性ガスの使用に耐え得る安価な溶接ベローズが必要とされている。このような要求に応えるには、高温強度や耐腐食性が高いニッケル基耐熱合金(インコネル718やインコネル625LCFなど)を素材とする溶接

ベローズを安価に製造する必要がある。

溶接ベローズは、厚さ0.1mm程度のドーナツ状の金属製薄板を幾重にも重ね、図1に示すようにその内周と外周を交互に溶接することで製造される。その際、Nd:YAGレーザーを用いたパルスレーザー溶接が適用されることが多い。しかしながら、溶接ベローズの素材に

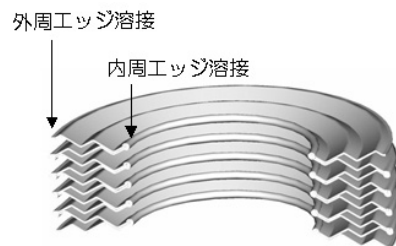


図1 溶接ベローズの構造

*機械金属部 **株式会社ベローズ久世

株式会社村谷機械製作所 *大阪大学

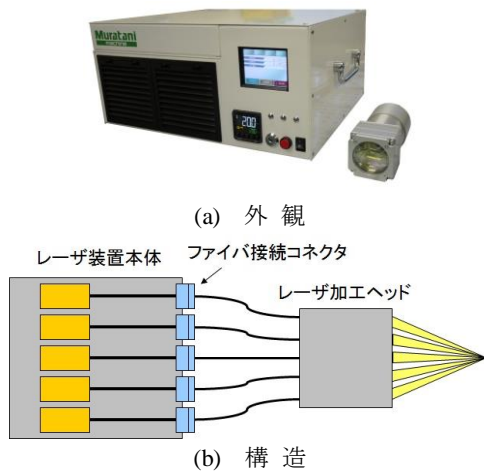


図2 集光形状可変半導体レーザー

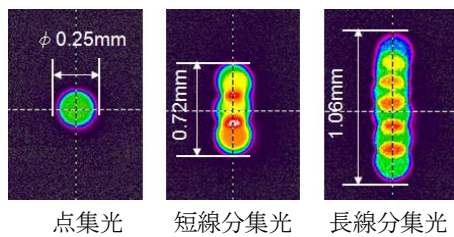


図3 集光形状の変更例

難溶接材であるニッケル基耐熱合金を使用する場合、溶接部に割れを生じやすく²⁾、不良率が70%と高い。そのため、標準的なステンレス鋼製に比べて製造コストが5倍以上高く、製品化が難しいのが現状である。

そこで本研究では、ニッケル基耐熱合金製のベローズ素材を漏れが無く安定して溶接することを目的とした半導体レーザー装置を開発するとともに、これを搭載したベローズ溶接機を製作し、不良率0%でのニッケル基耐熱合金製溶接ベローズ製造を試みた。

2. ベローズ溶接機の開発

2.1 集光形状可変半導体レーザー

Nd:YAGレーザーを用いたパルスレーザー溶接など集光形状を点のみとする従来のレーザー溶接では、溶接部周辺が急加熱・急冷となり、割れの原因となることが多い。これを回避するには、集光形状を溶接方向に長い直線にするなど、集光形状の最適化が有効である³⁾。

図2は、開発した最大出力300Wの半導体レーザー装置の外観と内部構造である。装置本体に組み込んだ複数の半導体レーザー素子からのレーザー光は、それぞれ各光ファイバでレーザー加工ヘッドまで導光され、内部のレンズにて集光される。

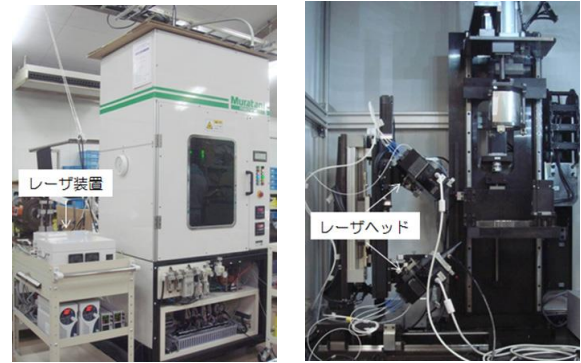


図4 ベローズ溶接機

図4 ベローズ溶接機

図3は、焦点位置でのビームプロファイルを測定した結果である。各集光スポットを全て重ねたり、直線的に並べたりすることによって、集光形状を最小φ0.25mmの点や幅を同じくする線分に変更可能である。また、線分に集光したときはその長さを調節することができる。

2.2 ベローズ溶接機

ベローズ素材の内周および外周溶接を専用ジグの交換のみで一台で可能とするベローズ用溶接機を製作した。図4にその外観と内部構造を示す。溶接機には開発した集光形状可変半導体レーザーを2台搭載し、レーザー加工ヘッドをV型に配置することで2方向から同時にレーザー光を照射できる構造となっている。

また、溶接時の高温酸化による変色(溶接焼け)を防ぐため、内周溶接時にはレーザー加工ヘッドに取り付けた同軸ノズルから、外周溶接時には専用に作製したノズル部品からアルゴンガスを流して、溶接部をシールドも可能となっている。

3. 数値解析による溶接条件の検討

3.1 溶け込み形状解析

薄いベローズ素材を溶接する場合、しばしば図5に示すようなコブ状の不連続な溶接ビードを形成することがあり、強度不足や漏れの原因になっている。これは、板厚に対してレーザー光の集光が不適切であるためと考えられる。そこで、熱伝導解析と流体解析を組み合わせたAA&S社製シミュレーション解析コードを用いて薄板レーザー溶接時の溶け込み形成過程における集光径の影響を定量的に解析した。

図6は、集光径を変えて厚さ0.1mmのニッケル基耐



図5 コブ状溶け込み

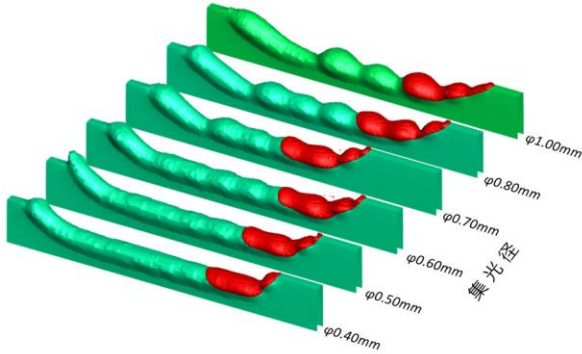


図6 集光径と溶け込み形状の関係 (板厚0.1mm)

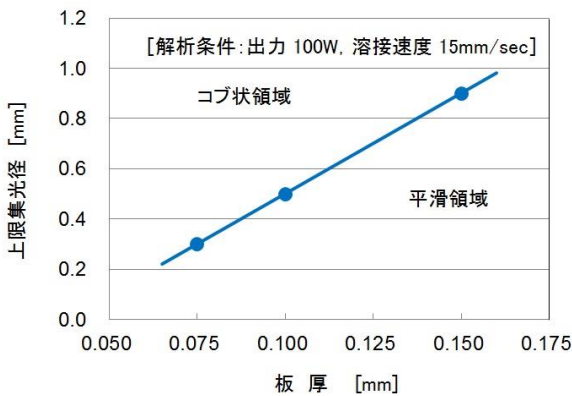


図7 溶接部平滑化のための集光径と板厚の関係

熱合金製ペローズ素材を溶接する際の溶け込み形状を解析した結果である。集光径が $\phi 0.5\text{mm}$ 以下では平滑な溶け込みであるが、それより大きいと、熔融部が表面張力によって凝集し、コブ状の溶け込みが形成される。他の厚さのペローズ素材についても同様な解析を行い、溶け込みが不連続になる集光径を求めた。その結果を図7に示す。平滑な溶け込みを得るには、素材の厚さに応じた集光径を設定する必要があることが明らかになった。

3. 2 応力分布解析

平滑な溶接部であっても内部に割れがあると溶接ペローズの漏れの原因となる。これを防止するには、溶接部周辺の引張応力を低減する必要がある。そこで、

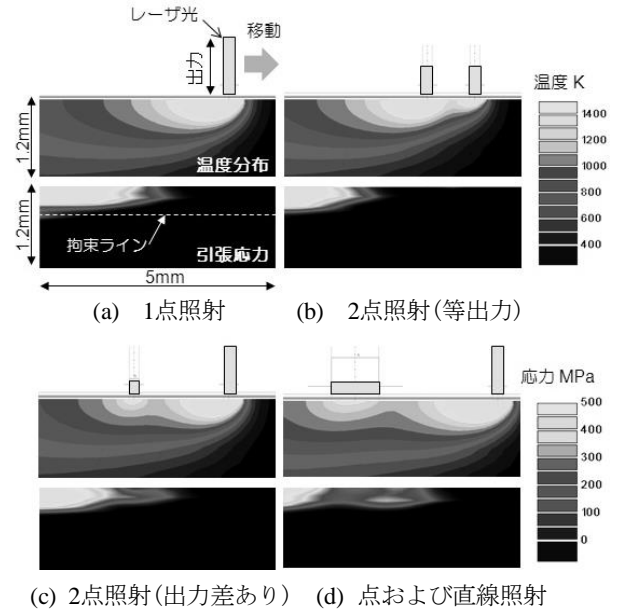


図8 応力分布に及ぼすレーザ光照射方法の影響

薄板レーザ溶接時の引張応力分布を計算力学センター社製溶接用熱伝導弾塑性解析コード(Quick Welder)を用いて解析し、溶接時の応力を低減するレーザ光照射方法を検討した。その結果、図8に示すように、2つの集光点をタンデムに並べたレーザ溶接では、出力が等しい場合、応力分布は集光点が1つの通常のレーザ溶接と変わらない。一方、前方集光点に対して後方集光点の出力を小さくして適度な間隔を設けると溶接直後の急冷を防止でき、周辺の応力が低下した。後方の集光形状が線分の場合、応力低減範囲はさらに広がった。

以上のことから、厚さ 0.1mm のペローズ素材に割れを生じさせずに平滑な溶接を行うには、集光径が $\phi 0.5\text{mm}$ より小さな点状のレーザ光と、その後方に集光形状を線分とするレーザ光を組み合わせる照射することが有効であることが明らかになった。

4. ペローズ溶接実験とその結果

4. 1 実験方法

解析結果をもとに、試作した溶接機を用いてペローズの溶接実験を行った。溶接速度を 20mm/sec とし、2台ある加工ヘッドのうち1台を前方用に点集光に、他方を後方用に線分集光に調節して同時にレーザ光を照射した。また、後方のレーザ光の出力を前方のレーザ光に比べて小さくした。実験に使用したペローズ素材の材質は、インコネル718とインコネル625LCFの2種類のニッケル基耐熱合金であり、厚さは 0.1mm である。

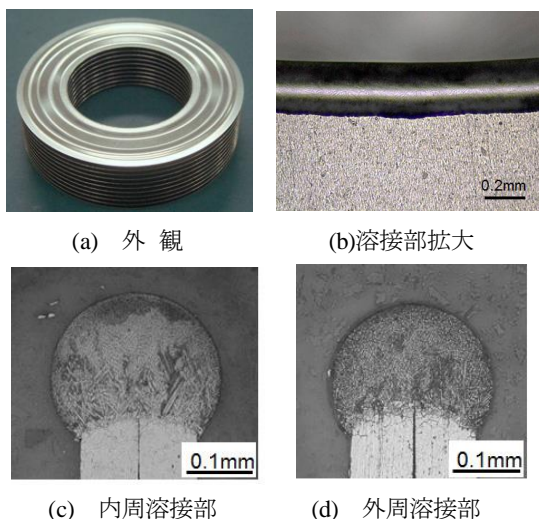


図9 インコネル718製溶接ベローズ試作結果

表1 気密性評価結果

材質	溶接部	溶接回数	漏れ数
インコネル718	内周	2000	0
	外周	50	0
インコネル625LCF	内周	20	0
	外周	100	0

4. 2 実験結果

ベローズ素材の内周および外周溶接実験を行い、2種類のニッケル基耐熱合金を用いた溶接ベローズを試作した。図9はインコネル718製溶接ベローズの試作結果である。いずれの溶接部も表面は滑らかであり、高温酸化による変色は生じていない。溶接部断面を組織観察した結果、溶接部内部に空隙や割れは見当たらない。インコネル625LCF製溶接ベローズの試作についても同様の結果が得られた。

試作した溶接ベローズについて、ヘリウムガスリークテストにより溶接部の気密性を評価した。その結果、表1に示すようにいずれの材質についても内周、外周溶接部ともに漏れは検出されなかった。集光形状可変半導体レーザ装置を用いることによって漏れのない安定した溶接が可能となり、これまで70%であった溶接不良率が0%となった。

長期使用における耐久性を評価するため、インコネル625LCF製溶接ベローズについて自由長に対して+20%から-40%の伸縮疲労試験を実施した。その結果、伸縮回数1000万回後でもリークテストにおいて漏れは

検出されず、長寿命で信頼性の高いベローズであることが明らかになった。

従来技術では製造が困難であった高信頼性のニッケル基耐熱合金製溶接ベローズを、集光形状可変半導体レーザ装置の開発とこれを利用した溶接方法によって安定して製作できる技術を開発できた。

5. 結 言

集光形状可変の半導体レーザ装置を開発し、これを搭載した溶接機を用いてニッケル基耐熱合金製溶接ベローズの製造を試みた。その結果を以下に示す。

- (1) 集光形状が最小 ϕ 0.25mmの点から直線、またその長さを自由に可変できる最大出力300Wの半導体レーザ装置を開発した。
- (2) 薄板レーザ溶接における溶け込み形成をシミュレーション解析した結果、板厚が薄くなる程、平滑な溶接部を得るには集光サイズを小さくする必要があることを定量的に明らかにした。
- (3) レーザ溶接時の応力分布を解析した結果、点集光と直線集光の組み合わせによって熔融部周辺の応力を低減できることを明らかにした。
- (4) 伸縮回数1000万回後でも漏れないニッケル基耐熱合金製溶接ベローズを不良率0%で製造することを可能にした。

謝 辞

本研究は、戦略的基盤技術高度化支援事業にて実施され、その成果である。関係各位に感謝します。

参考文献

- 1) 福田雅文. A-USC 先進超々臨界圧火力発電技術. 日本機械学会誌, 2011, vol. 114, No. 1109, p. 244-247.
- 2) 篠崎賢二, 羅湘軍, 有吉秀文, 黒木英憲, 白井誠. Inconel 718レーザ溶接性に及ぼす溶接条件の影響-Ni基耐熱超合金のレーザ溶接性に関する研究(第1報)-. 溶接学会論文集, 1998, vol. 17, No. 2, p. 279-285.
- 3) 西本和俊, 才田一幸, 宋宇鉉, 一色一希. タンデムビームを用いたステンレス鋼と銅の異材レーザブレイジング. 溶接学会全国大会講演概要, 2005, vol. 77, p. 218-219.