超高出力 100 kW ファイバーレーザー加工システムの導入と溶接研究

Introduction of Ultra-High Power 100 kW Fiber Laser Processing System and Welding Research

長谷川 博*・住森 大地*・芦田 洋三*

Hiroshi HASEGAWA, Daichi SUMIMORI and Youzou ASHIDA

Key Words: High Power Laser, Laser Welding, Laser Processing Head, Deep Penetration

1. はじめに

世界最大出力のファイバーレーザー発振器である 100 kW ファイバーレーザー加工システムの導入から 3 年余りが経過した。当初は全て手探りの状態でこの超高出力に対応する周辺機器開発や工法開発を進めてきたが、現在では汎用出力帯のレーザー加工システムとほぼ同様のシステム運用が可能になっている。

100 kW ファイバーレーザーは、その出力の大きさから、圧力容器や船舶、大型機械設備等に使われる超厚板の溶接や切断加工への適用が期待されている。従来の多層盛アーク溶接工法に比べ、高速加工、省エネルギー、工数削減といったメリットがあり、従来工法に代わる次世代工法として適用検討が進められている。また、低真空環境でガス置換して溶接を行う雰囲気制御溶接においては、高品質な超深溶込み溶接が可能になるという特性が大出力領域で特に顕著になることが確認されており¹⁾、電子ビーム溶接に代わる溶接工法として注目を集めている。

このような大出力レーザー加工を行うため、ハード面としては、レーザー発振器はもとより加工ヘッドとそれをハンドリングするためのロボット、また機器を冷却するための冷却装置等の周辺装置に至るまで大出力に対応した機器整備が必要となる。これらの機器に安全装置を加え、条件管理手法の確立などのソフト面を組み合わせ、実用的な超高出力ファイバーレーザー加工システムを構築した。

本稿ではこれまでの超高出力対応の機器開発の経緯を含め、最新の研究成果を紹介する。

2. 100 kW レーザー発振器の導入

IPG Photonics 社製 100 kW ファイバーレーザー発振器の主要諸元を Table 1 に示す。レーザー発振器筐体内に 1.2 kW のレーザーモジュールを 90 個内蔵し、それらを結合して、ファ

イバーカプラを介して直径 0.5 mm のプロセスファイバーから 100 kW のレーザーが BPP (Beam Parameter Product) 25 mm·mrad のビーム品質で出射される。プロセスファイバーの長さは大型構造物の加工に対応するため 50 m とした。

この超高出力ファイバーレーザーの出荷検査は、ドイツの IPG Photonics 社で行われた。以下、引用文献²⁾からの抜粋を交えてメーカーでの検査の概要について説明する。

100 kW のレーザーパワーとビーム品質を直接測定できる装置は存在しないため、Fig.1 に示す測定ステージが設けられた。

この測定ステージはインターロック機能を持つ安全筐体内部に、4 台の 25 kW パワーメータと 1 台の 8 kW パワー

Table 1 Specifications of YLS-100000 fiber laser.

Optical Characteristic	
Polarization	Random
Operation Mode	CW / Modulated
Nominal Output Power	100000 W
Switching ON/OFF time	typ: 80 μsec
Power Stability	typ: ±1 %
Wave Length	1070 nm – 1080 nm
Optical Output	
Feeding Fiber Core Diameter	0.3 mm
Process Fiber Core Diameter	0.5 mm
BPP of Feeding Fiber	max: 15 mm·mrad
BPP of Process Fiber	max: 25 mm·mrad
Process Fiber Length	50 m
General Characteristic	
Dimensions	3587 × 806 × 1856 mm
Weight	3750 kg

*株式会社ナ・デックスプロダクツ ナ・デックスレーザー R&D センター R&D グループ (〒914-0141 福井県敦賀市萌生野 62 号 31 番 2) NADEX PRODUCTS Co., Ltd. NADEX LASER R&D Center, R&D Group (62-31-2 Azono, Tsuruga City, Fukui, 914-0141 Japan)

Fig.1 Power measurement stage.

Fig.2 Output confirmation screen by multi-monitoring.

メータが設置され、計4枚のビームスプリッターを経由したビームをそれぞれ同時に分割測定する仕組みである。各測定器の数値がモニタ用PCに送られ、マルチモニタ (Fig.2) にて観察記録が行えるシステムである。また、最大8 kWに分割された一光路のみ、410 mmの焦点距離を持つフォーカシングレンズで集光し、ビームプロファイルデータも同時に取得できる構成になっている。

この測定ステージにて出力パワー測定とビーム品質の測定が行われた。また、加工ヘッド開発に必要な連続照射時の特性変化データを得るため、レーザ照射開始時の“Cold”と30分間連続照射後の“Hot”の出力値およびビームプロファイルが測定記録された。さらに出力安定性についても測定開始から30分間連続照射し、メーカー公称値と測定器メーカー公表誤差のいずれにおいても合格値であることが確認された。

Fig.3 Focusing situations and profiles for cold (left) and hot (right) laser beams.

Fig.3は集光位置付近のビームプロファイルデータをモニタ上に可視化するものである。左が“Cold”、右がHot (30分照射後) である。設計スポット径 0.569 mm に対して測定表示値 0.589 mm から 0.581 mm と数値的には設計値より若干小径化した値となっている。連続照射によりビーム品質 BPP は 25.32 mm・mrad から 26.68 mm・mrad に増大したが、これは測定ステージ内に設置された自然空冷のビームスプリッターとコリメート／フォーカシングの各レンズ収差の影響も含んでいるため、参考値と見るべきである。

以上がメーカーサイドで行われた出荷前検査の概要である。レーザ発振器の仕様に関して電力消費量や設置寸法などいずれも問題無く、30分温間後のビーム品質についてもメーカーの協力により測定を実施し、想定範囲内であることが確認された。

3. 周辺機器開発

レーザ発振器同様、周辺機器についても一般市販品が入手できないため、自前で揃える必要がある。100 kW ファイバーレーザ発振器の周辺機器として、最低限必要な機器はレーザパワーメータとレーザ加工ヘッドがある。100 kW レーザ発振器の導入に先立ち、これらの機器開発が進められた。

レーザパワーメータは日常の性能検証や出力確認の他にビームプロファイル測定やレーザ加工ヘッド開発の際に必要な機器である。100 kW の近赤外レーザ出力を直接測定できるパワーメータは存在しないため、市場に多く流通している信頼性の高いメーカ (OPHIR 社) に依頼してトレーサビリティを確保することとした。

パワーメータへの要求仕様として、計測機器としての測定精度と再現性に加え、レーザ加工ヘッド開発や発振器調整時に必要となる長時間の連続照射を受け止めるレーザアブソーバーとしての役割を担うだけの十分なキャパシティを備えることが必須である。また、超高出力に対応するため、筐体前後にガスパーズポートを設けることで、内部への粉塵混入による焼き付き等による不具合を防止する構成とした。レーザ吸収コーティングの組成改良や受光板形状変更等の技術開発を行い、試行錯誤を経て最終的に仕様を

Fig.4 Power meter (left) and laser processing head (right).

満たすパワーメータ（Fig.4）が完成した。

一般的に大出力用のパワーメータはレーザからの照射熱量をパワーメータ内で全て吸収させてレーザ出力値を吸収した熱量で表示するカロリカウンタ方式が用いられており、測定時間中はパワーメータに供給する冷却水の温度を一定精度で安定供給する必要がある。そのための冷却装置として、日常点検が行われる間の短時間のみ効率よく冷却できる2タンク方式の冷却装置をメーカーと共同開発した。2タンク化することによって、100 kW のレーザ照射を 10.8 kW の冷却装置で冷却することが可能になった。パワーメータとの組合せで実機評価を行い、計測器として十分な再現性を持つことが確認された。

ファイバーレーザ発振器からプロセスファイバーで導かれたレーザビームはそのままでは加工には使用できないため、加工点付近で加工に適したビーム形状に集光するためのレーザ加工ヘッドが必要となる。当社では 100 kW ファイバーレーザ発振器の導入が決定した当初から 100 kW 対応のレーザ加工ヘッドの開発に取り組んできた。

レーザ加工ヘッド開発において重要な課題は、レーザ光を集光した際のビーム集光特性と安定性である。中でも、熱レンズ効果による焦点シフトの問題は、レーザ加工品質を左右する重要な課題である。熱レンズ効果は加工ヘッドの光学系をレーザ光が通過する際に光学系がそのエネルギーを吸収して発熱することによりレンズが屈折率変化および形状変形を起こして焦点位置が変化する現象である。

熱レンズ効果の原因として、レーザ光が透過していく透過光学系（保護ウィンドウ）に起因するものと、レーザ光を反射させる反射光学系（ミラー）に起因するものの2種類が存在し、その変化は時間的にも量的にも異なる変化を示し、それらの合成がレーザ加工ヘッドのダイナミックな焦点変動として出現する。

熱レンズ効果を抑制する手法として、2つのアプローチ

Fig.5 Processing head for 100 kW fiber laser.

Fig.6 Focussing situation and mode of laser beam through processing head.

Table 2 Specifications of laser processing head

Specifications	
Power Rating	Up to 100 kW
Focal Lengths of Collimation	500 mm
Focal Lengths of Focusing	1000 mm
Clear Aperture	φ100 mm
Fiber Connections	IPG HLC-24
Dimensions	730 x 700 x 320 mm
Weight	60 kg

で対策を進めた。一つは機械的にミラーを変形させて焦点位置を制御する方法であり、もう一つはレーザからの熱吸収を最大限に抑制する光学システムの開発である。現在では、プロトタイプに改良を重ね、コリメーションとフォーカシングを兼用したワンミラータイプの軽量加工ヘッド（Fig.5）を採用している。加工ヘッドのビームプロファイルおよび主要スペックをそれぞれ Fig.6 および Table 2 に示す。ワンミラー化することで反射光学系でのレーザビームの熱吸収を半減させ、さらに特殊コートされた高精度非

球面ミラーと低熱吸収の保護ガラスを採用することで焦点シフト量を最小限に抑えることに成功した。

また、100 kW を出力し加工を行う際に発生するスパッタやヒューム、ブルームから光学系を保護するため、加工ヘッド前面で圧縮エアによりそれらを吹き飛ばすエアカッターや、加工部を不活性ガス等でシールドするシールドガスノズルについても専用に開発した。

4. 超高出力ファイバーレーザーによる深溶込み特性

これまでの当社での超高出力レーザーによる厚板溶接への取組みを大別すると、①大気中での突合せ溶接、②雰囲気制御溶接、③ビード整形方法の3つに分類される。

大気中での突合せ溶接においては、厚さ 90 mm のステンレス鋼の2パス溶接を実現し、従来工法であるアーク溶接と比較検証した結果、溶接速度 170 倍、省エネルギー効果 40 %、工数削減効果 30 %、といった優位点があることが確認された。また、開先加工や歪取りの作業が不要になり溶接品質の向上も見込める。

ステンレス鋼について、レーザー出力 4 水準、加工速度 7 水準のメルトラン（ビード・オン・プレート）溶接を行い、それらの中からレーザー出力 50 kW 以上、溶接速度 3 m/min 以下の条件での断面写真を Fig.7 に示す³⁾。溶込み深さは溶接速度が速くなれば浅くなり、レーザー出力が大きくなれば深くなる傾向にあることがわかる。溶接速度が 0.5 m/min 以下では溶融幅が表面より緩やかに減少する逆三角形の溶込み形状であるが、1 m/min 以上の速度ではあまり幅に変化のない直線状の溶込みとなっている。また、高速、高出力の場合、溶接ビード外観等からスパッタの増大による減肉現象やハンピング現象が生じており、レーザー出力と溶接速度の間に最適な溶接条件が存在することを確認した。これらは溶融金属の湯流れに起因しているものと考えられる。

Fig.7 Cross-sectional macrostructures of laser weld beads produced at various powers and welding speeds.

溶接加工点の雰囲気低真空状態にすることで、加工時のブルームやスパッタの発生が抑制され、大気中では得られない高品質な深溶込みが得られることが知られている。雰囲気制御溶接は超高出力レーザーの工法開発において最も顕著な効果が見られた工法であると言える。

低真空環境下では大気中に比べ約 2 倍の超深溶込みが高品質に実現できる可能性があることがわかった。低真空環境下で実際に大出力レーザーを用いて 150 mm 厚のステンレス鋼での開先なしの突合せ 2 パス溶接を行い、その溶接接合部の健全性評価を実施した。断面写真を Fig.8 に示す。評価試験は米国の圧力容器の溶接部評価試験規格「ASME Section IX 2013 Edition」に準じて、第 3 者機関での評価を含め外部検査機関に委託して行われ、得られた結果は全ての項目において合格であった。

厚板の溶接加工には、深溶込みが必要となり、そのため必然的に入熱量も多くなるため、材料表面の溶融池が荒れ、内部欠陥も増加する傾向がある⁴⁾。この問題を解決する方法として前出の雰囲気制御はたいへん有効な工法であるが、低真空状態を作り出すためのチャンバーが必要になるという短所もある。そこで、大気圧中での溶接加工において、溶融池を制御することで溶込み形状を安定化させる工法として、ビード整形方法を考案した⁵⁾。

試験体としてオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 を使用した例を Fig.9 に示す。低速度領域の大出力レーザー溶接では溶融表面が広がる傾向を示すが、当て材で溶融幅を規制することで溶融形状は安定化した。また、ビード整形ありではビード整形なしに比べてビード幅は減少し、溶込み深さが増加する傾向が認められた。

ビード整形方法により溶融池表面を安定させることで、溶接部の欠陥を防止する効果があり、厚板レーザー溶接の適

Fig.8 Cross-sectional macrostructure of 2 passes laser weld made under low vacuum.

Fig.9 Cross sections of laser weld beads, showing effects of laser power and bead molding method on bead geometry and weld penetration.

用拡大と品質安定化に向けた研究を継続している。

5. おわりに

超厚板の溶接加工において常に課題になるのは溶融金属の湯流れの改善である。大気中での突合せ溶接においては、レーザー入射角や焦点位置、レーザー出力、溶接速度等に対し、いくつかの水準でデータ収集を行い、最も湯流れの良い条件を見つけ出す作業を進めてきた。これらの超高出力ファイバーレーザーによる厚板の実験結果は溶接中に起こる溶融

現象をデフォルメした形で現れるため、溶接現象究明の手掛かりになることが多い。これらの実験から導出された溶接技術を比較的薄い被溶接材に適用することで、従来工法として主流であるアーク溶接からレーザー溶接への工法転換の一助としたい。

雰囲気制御溶接は、よりアクティブに溶接中の湯流れを改善する工法である。被溶接金属を効率よく溶融させ、余分な湯流れを起こさず理想的な超深溶込みと欠陥の無い溶接を実現できる可能性を持つ工法である。今後、薄板から厚板まで、電子ビーム溶接に匹敵する溶接工法として基礎技術開発を推進していきたい。

謝 辞

末筆ながら支援・ご指導頂いている福井県と大阪大学接合科学研究所へ改めて感謝の意を述べさせていただきます。

引用文献

- 1) 川人洋介他：溶接学会全国大会講演概要 平成 27 年度春季全国大会、**408** (2015).
- 2) 伊藤晋吾：溶接技術、産報出版株式会社、**63-1** (2015) 78-84.
- 3) 片山聖二他：溶接学会全国大会講演概要 平成 27 年度春季全国大会、**407** (2015).
- 4) 角博幸他：溶接学会全国大会講演概要 平成 27 年度秋季全国大会、**223** (2015).
- 5) 住森大地他：溶接学会全国大会講演概要 平成 28 年度春季全国大会、**101** (2016).