

熱間圧延連続化用45kW炭酸ガスレーザー溶接システムの開発

Development of 45kW Laser Welding System for Continuous Finish-Rolling

城戸 基^{*(1)} 杉橋 敦史^{*(1)} 山本 博之^{*(2)} 前田 勝宏^{*(3)}
 Motoi KIDO Atsushi SUGIHASHI Hiroyuki YAMAMOTO Katsuhiro MAEDA
 浜田 直也^{*(4)} 南田 勝宏^{*(5)} 菊間 敏夫^{*(6)}
 Naoya HAMADA Katsuhiro MINAMIDA Toshio KIKUMA

抄 録

近年、レーザー装置の高出力化はめざましく、様々な応用開発が進められている。新日本製鐵においては、45kW炭酸ガスレーザーを用いた溶接システムを開発し、熱間圧延仕上げ工程に導入し完全連続圧延を実現した。レーザー溶接システムの全体概要と、ライン機側においたレーザー発振機より移動台車上の加工点まで約50mレーザービームを伝送し集光する光学システムの特長、ならびにレーザー誘起プラズマを2次熱源として有効利用することにより従来法に比べ約30%溶け込み深さを改善したプラズマ有効利用溶接法の特長について報告した。

Abstract

High power laser welding system for continuous finish-rolling has been developed. Two stabilized 45kW laser oscillators are placed just beside a hot rolling mill. The laser beams propagate about 50m to a flying-welder that has beam focusing head and claspers for fixing the bars. With an automatic mirror alignment system, the laser beam position error is suppressed less than 1mm. We also introduced new laser welding method which uses the laser induced plasma as a secondly heat source to improve the bead depth about 30% compare to the conventional welding method.

1. はじめに

レーザーは発明されて以来約40年の間に、レーザープリンタ、光ファイバーなどの情報処理や光通信分野、レーザー距離計、レーザー顕微鏡等の計測分野、レーザーメス、がん治療等の医療分野、さらにレーザー切断・溶接に代表されるレーザー加工分野等の多岐に亘る領域で急速にその応用範囲を広げている。レーザー加工には、レーザー切断、穴明け、マーキング等、高いエネルギー密度で一気に蒸発気化させる除去加工、溶接、はんだ付け等、加工対象部を溶融させ再凝固させる溶接・接合加工、表面肉盛り、焼き入れ等の表面改質加工、紫外線硬化、化学蒸着等の化学反応加工などがあり、レーザー波長、照射時間、エネルギー密度などレーザーの特性である自由な照射制御性を生かしてCO₂レーザー¹⁾、YAGレーザー²⁾、エキシマレーザー³⁾等が使い分けられている。特に、CO₂レーザーは近年45kW級の発振器が商品化され⁴⁾、その高出力性と安定性により、様々な応用開発が進められている。

新日本製鐵においては、方向性電磁鋼板の磁区制御、冷間圧延鋼板コイル継ぎ溶接を皮切りとして、数多くの実用化を推進し^{5,6)}、近年薄鋼板製造工程における熱間圧延仕上げ工程の完全連続化に向け

てレーザー溶接技術を適用する開発を行った。本稿においては、レーザー発振器、レーザー長距離伝送系を含めた溶接システムの概要とそれを用いた溶接特性について報告する。

2. 熱間圧延ライン連続化用45kW級レーザー溶接機の構成

本レーザー溶接システムは現時点で産業上用いることができる世界最大の45kW CO₂レーザーを2台用いており、その概要は大きく分けて以下の4つの部位より構成される(図1)。

コイルボックス：粗圧延機を出た粗バー(厚さ30mm~40mm、温度：1000~1100)を巻き取り保熱し、溶接機が必要とするタイミングで巻き戻すことができる装置。

クロップシャー：先行材の後端と、後行材の先端を切り揃え溶接に必要な開先形状を形成する装置。

溶接台車：仕上げスタンドでの粗バーの圧延速度(最大90m/min)に追従可能。先行材後端と後行材先端をクランプし、2つのレーザートーチを圧延方向と直角方向に開先に自動倣いしながら移動し、速度3m/min~10m/minでレーザー溶接を実施する装置。

レーザー発振器(図示せず)：圧延ラインの両側の地上に1台ずつ固定配置されており、接合台車との間は伸縮可能なビーム導波路で

*⁽¹⁾ 環境・プロセス技術開発センター 計測・制御研究開発部 主任研究員
 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL(0439)80-2863

*⁽²⁾ (株)日鐵テクノロジー 技術主幹

*⁽³⁾ 大分製鐵所 設備部 マネジャー

*⁽⁴⁾ 環境・プロセス技術開発センター 計測・制御研究開発部 部長

*⁽⁵⁾ (株)日鐵テクノロジー レーザー技術センター 所長

*⁽⁶⁾ 顧問

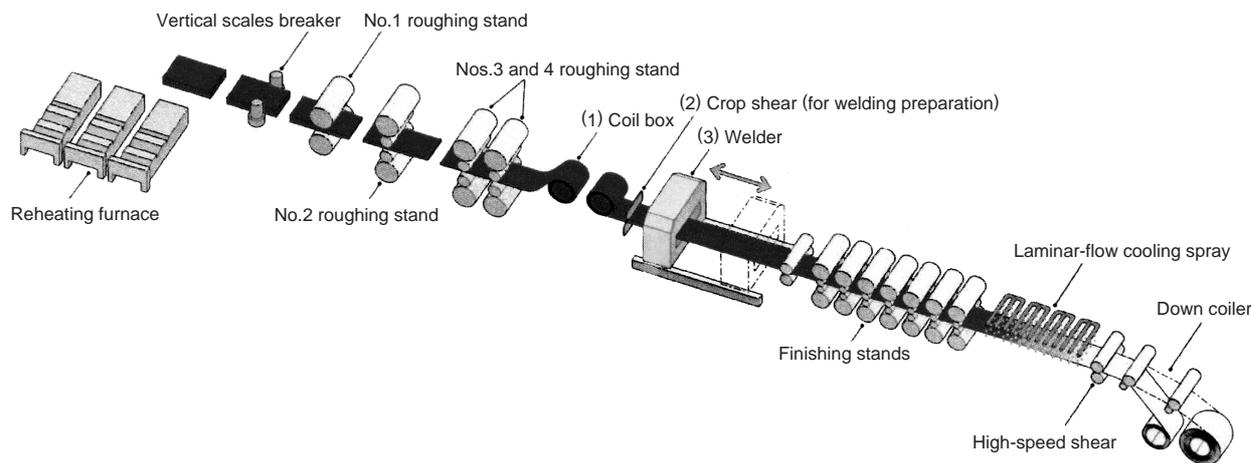


図1 連続化用45kW炭酸ガスレーザー溶接システムの概要

結ばれている。この導波路を通じてレーザービームは最大50m導波され開先に照射される。レーザービーム幅は約4mm、溶け込み深さは約30mmである。

3. レーザ発振器とレーザー伝送・集光系の概要

3.1 レーザ発振器

本システムで採用した定格出力45kW(米国Convergent Prima社製)CO₂レーザー発振器は、圧延ライン近傍の高温、多湿環境に設置する必要があるため、一定温度、湿度に維持された屋内に設置した。24時間/日の連続安定操業を達成するためには、放電部により発生する熱歪み対策と共に、放電部部品の経時変化により発生確率が増すアークを事前予測する必要がある。そのため、発振器内熱交換器等の冷却部品の強化による熱歪み対策を行い安定出力を実現すると共に、放電電圧、電流等をオンライン監視する設備診断システムを構築し、これに基づくメンテナンス方案を確立し安定操業を実現している。

3.2 レーザ伝送・集光システム

レーザー発振器は圧延ラインの機側に1台ずつ固定配置され、接合台車との間は伸縮可能なビーム導波路で結ばれている。これを通じてレーザービームは導波され開先に照射される(図2)。

導波路内は常時乾燥空気を供給することによって清浄に保たれて

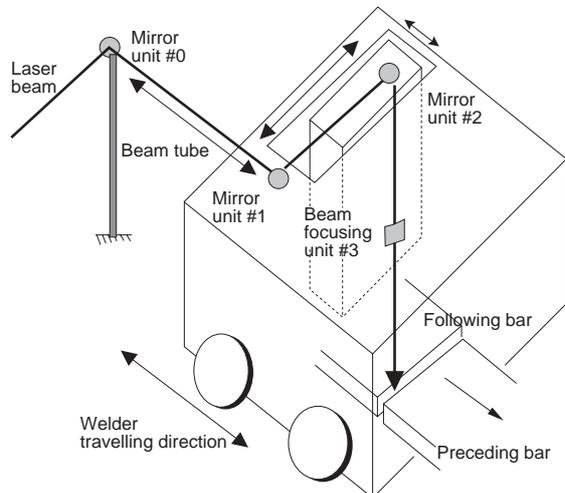


図2 レーザ伝送・集光光学システムの概略図

いる。伝送路中には2枚の凹面コリメートミラーを採用してビーム径と発散角の制御を行うことにより、最大50mの伝送を可能としている(図3)。

また、伝送距離に依存し、集光特性が変化するため、集光ビーム径が変化しない点を照射条件として採用した(図4中、横軸0mmの条件)。

さらに、4本のHe-NeレーザーをCO₂レーザーで包みこむ様に同軸状に配置し、He-Neレーザーの位置偏差を伝送ミラー(0)の角度制御で補正するビーム位置安定化システムを構築した(図5)。また、撮像型の開先食い装置(図6)を設けることでシステムの熱歪み変形に対して安定導光を可能とし、突き合わせ開先部での位置偏差が±1mm以下の照射精度を達成している。実溶接時の開先食い制御でのレーザービームの位置誤算分布を図7に示す。3σ=0.33mmであった(n=1217)。

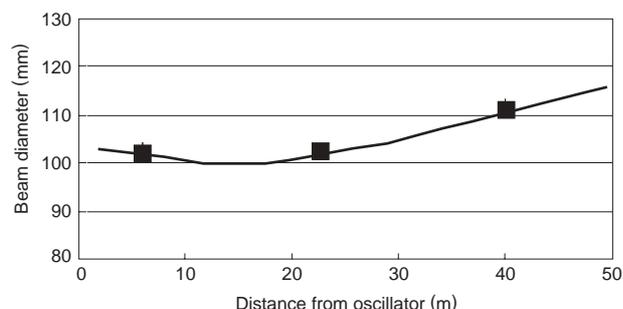


図3 長距離伝送時のレーザービーム径

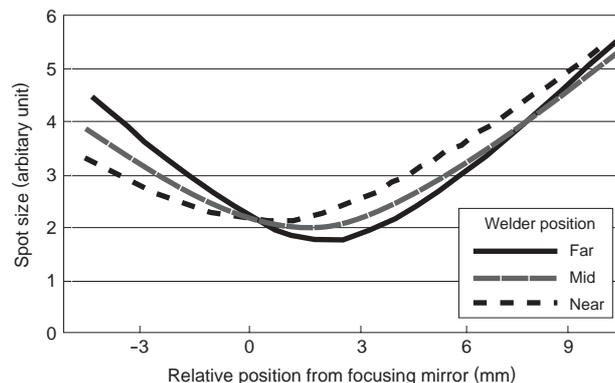


図4 伝送距離変更時の集光点付近におけるビーム径

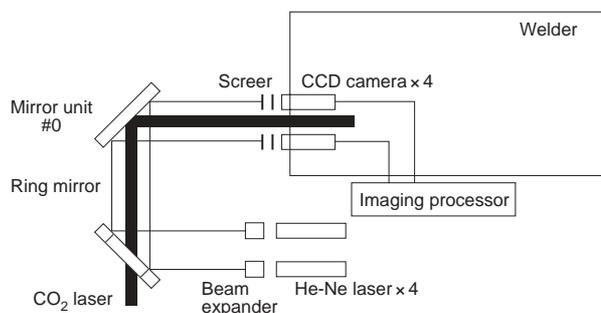


図5 ビーム位置安定化システム

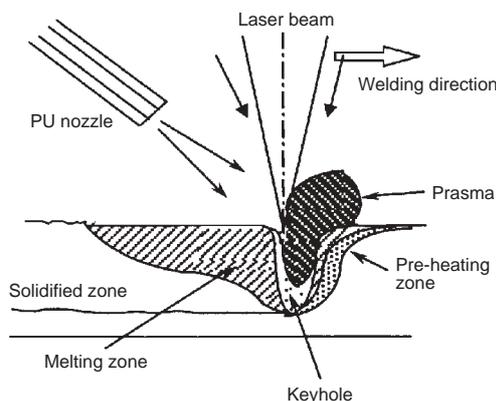


図8 プラズマ有効利用溶接法の原理

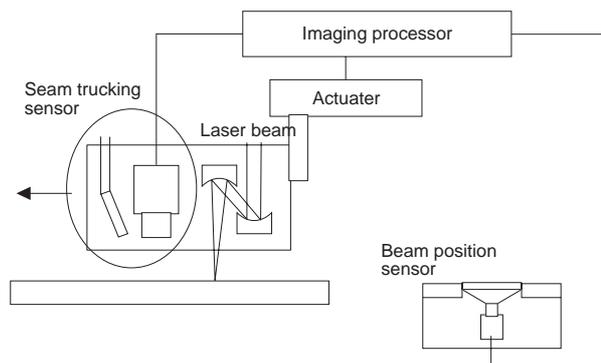


図6 撮像型開先倣い装置

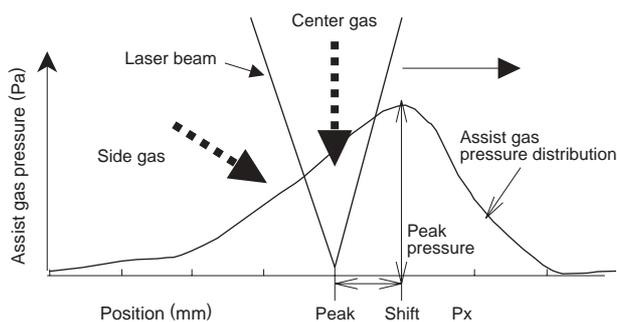


図9 PU法におけるアシストガス圧分布

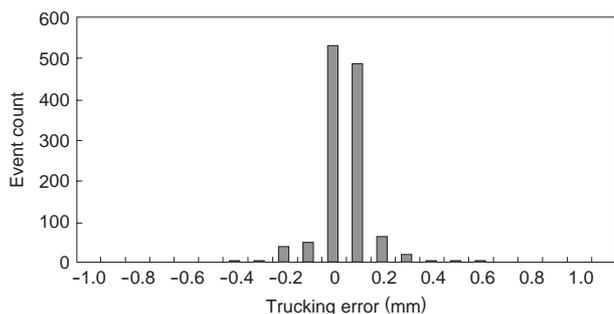


図7 開先倣い時の位置誤差評価結果

由電子密度が増加するため、その除去が充分でなく熱効率の改善が困難であった。

これに対しPU法では、サイドノズルを溶接方向後方に配置する事で、図9に示すように、レーザー光と同軸のセンターノズルのアシストガスと合成し、発生するプラズマをレーザー照射点の直近の未溶接部に押し付ける構成としている。さらに、ポロシティ対策のためフィラーを供給する場合、一般の溶接法ではワイヤをレーザー照射位置に供給する必要があり、このため溶接性能が大きく劣化する難点があった。しかし、PU溶接法においてはプラズマがキーホール前方に高い温度で存在するため、プラズマの熱エネルギーを用いてフィラーワイヤを溶かすことができる。従って、溶接性能を劣化させずにフィラー添加ができる利点もある。これは、酸化物のつきやすい熱間鋼材の溶接では大きな利点となる。

4. レーザ溶接法とその溶接特性

4.1 プラズマ有効利用溶接法

レーザー溶接においてはレーザー照射の際のビームパワー密度と発生するレーザー誘起プラズマの制御が重要であり、この2つを制御する事で溶接特性を変化させることが可能となる。特に、熱間鋼材をレーザー溶接する場合は、既に融点に近い温度にあるため、蒸発、プラズマ化し易くそのプラズマ中の自由電子密度は常温加工時に比べ高くなる事が予想される。特にCO₂レーザー溶接の場合、逆制動輻射過程による入射ビーム吸収が大きくなるため、単純な常温レーザー加工条件の適用では、鋼材温度の高さという熱的な利点を十分に享受できない可能性がある。そこで本システムではこのプラズマの熱量に注目し、これをレーザー溶接の2次熱源として用いるプラズマ有効利用溶接法(以下PU溶接法と呼ぶ)を用いた。

図8にPU溶接法の原理説明図を示す。一般的なレーザー溶接法においては斜め前方からのアシストガスを用いてプラズマを強く押し流すことにより、プラズマによる吸収影響を抑制した溶接が主であった。しかし、熱間鋼材溶接においては、上述の如くプラズマ中の自

4.2 レーザ溶接特性

開発したレーザー溶接装置を用い、1000℃に加熱した熱間サンプル(材質:SS400)にビードオンプレート試験を行った。集光には焦点距離381mmの金めっき放物面鏡(軸はずし角:22.5°)を用いた。アシストガスとしては、センターガス、PUガスともヘリウムを用い流量は後述の実験条件に対応して60~200L/minの範囲で適宜設定した。PU溶接法パラメータの内、ピークアシストガス圧を事前評価によって導出した最適値である400Paで一定とした。背圧ピークシフト量を変化させた時の溶け込み深さの変化を図10に示す。

レーザー出力は45kW、サンプル移動速度は2m/minとし、焦点はずし量は0mmとした。背圧ピークシフト量3mmで最大溶け込み深さが得られた。背圧位置を1mm変化させると10%以上溶け込み深さが低下した。最適背圧シフト量について過大側と過小側を比較すると、過大側が溶け込み深さが若干優位となった。過小側では、照射点近傍に滞留するプラズマ成分が増加するためその吸収により加工

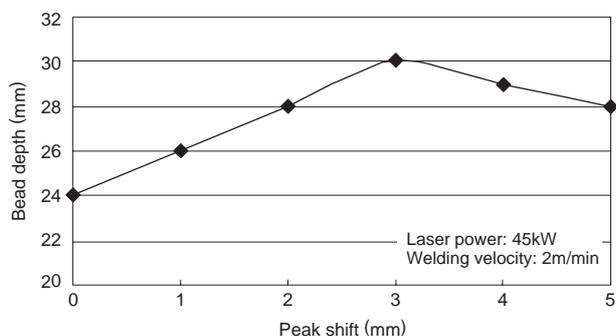


図10 アシストガス圧のピーク位置に対する溶け込み深さ

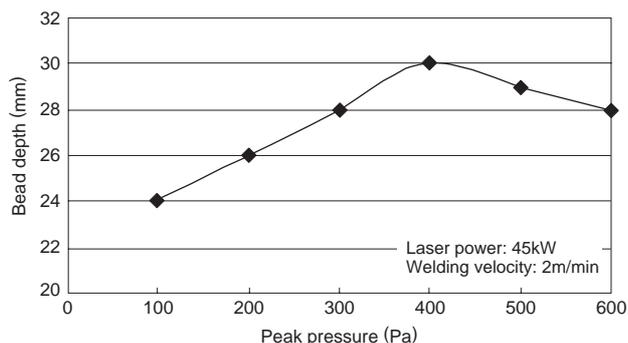


図11 アシストガス圧に対する溶け込み深さ

効率が低下し、過大側ではプラズマが溶接部より大きくシフトし、従来法と同様な現象となった。これは溶接域先端部の予熱効果が低下したためと考えられる。

図11に背圧ピークシフト量を3mmで固定し、ピーク圧力を変化させた時の溶け込み深さ特性を示す。他の条件は上記背圧シフト量変更試験時と同一とした。溶け込み深さは400Paの点で最大となった。最適点より圧力を100Pa変化させると約5%溶け込み深さが低下した。この実験においても過大側の方が過小側より優れた結果となった。この理由は、過小側では図8において記述した考察と同様に、被加工材表面上のレーザー入射軸近傍に滞留するプラズマによる吸収成分の増加に起因すると考えられる。また、過大側ではプラズマはキーホール内部に押し込められるが、キーホール上部での吸収が増加する結果、ビード断面形状は中膨れとなり、溶け込み深さとしてはむしろ低下したと推察される。

図10, 11から導出された最適PU溶接条件において溶接速度を変化させた際の溶け込み深さとビード幅の挙動を図12に、ビード形状の代表例を図13に示す。溶け込み深さは、溶接速度1m/min時に最大38mmが得られ、その時のビード幅は4.0mmとなった。溶け込み深さは、冷間サンプルの場合に対し約30%の増加が達成された。従来のプラズマ除去法では、高温材のレーザー加工では溶け込み深さが冷間材加工とほぼ同じかむしろ低下した結果が得られたことと比較して、PU法での加工効率の向上が確認された。

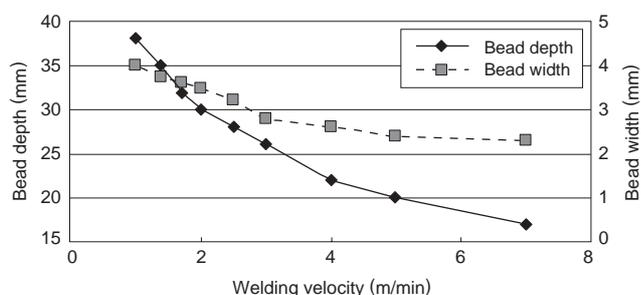


図12 45kW溶接装置の溶接特性評価結果

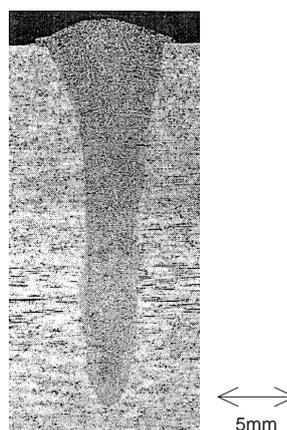


図13 溶接ビード断面写真(45kW, 3m/min)

5. おわりに

レーザー長距離伝送・集光システム、PU溶接法の開発と、レーザー発振器の安定化により、24時間/日の熱間圧延連続化レーザー溶接システムを実現した。本システムは1998年4月より、新日本製鐵大分製鉄所の熱間圧延仕上げ工程において操業開始し、生産性の向上、形状・板厚精度の向上が達成されている。

参考文献

- 1) 軽部:ここまでのレーザー切断・レーザー加工. 溶接学会誌. 65(8), 664-667(1996)
- 2) 石出 他:高出力YAGレーザーの加工への応用. レーザ研究. 22, 870-879(1994)
- 3) 大家 他:レーザーハイブリッド溶接法の開発. 溶接技術. 46(11), 78-82(1998)
- 4) Fukuda, N., et al.: Study on High Quality Welding of Thick Plates with a 50kW CO₂ Laser Processing System. Proc. ICALEO '97. Vol.83, Part 2, Section E, 1997, SPIE, p.11-20
- 5) Minamida, K., et al.: High Power Laser Applications in Nippon Steel Corporation. Proc. LAMP '92, Laser Advanced Material Processing. Vol.53, No.3, Part 2, 1992, p.969-974
- 6) Minamida, K.: High Power Laser Applications in Nippon Steel Corporation. Proc. AHPLA '99, High-Power Lasers in Manufacturing. Vol.3886, 1999, SPIE, p.533-542
- 7) 松縄 他: レーザ研究. 26(11), 783-787(2000)
- 8) Minamida, K., et al.: ICALEO'82, Vol.31, 1982, LIA, p.65-72