

大出力真空レーザー溶接技術の鉄鋼製造工程への適用

Application of High-Power Vacuum Laser Welding Technology to Steel Plate Production Process

木谷 靖 KITANI Yasushi JFE スチール スチール研究所 接合・強度研究部 主任研究員 (副部長)・博士 (工学)
松下 宗生 MATSUSHITA Muneo JFE スチール スチール研究所 接合・強度研究部 主任研究員 (副部長)・Ph. D.
深堀 友晃 FUKAHORI Tomoaki JFE スチール 西日本製鉄所 (福山地区) 厚板部 厚板技術室 主任部員 (副課長)

要旨

10 kW 以上の大出力の厚鋼板レーザー溶接では、溶接中のスパッタ発生やアンダーフィルなどの溶接欠陥が問題となる。レーザー溶接は一般的に大気中で行われるが、真空中のレーザー溶接ではスパッタの発生が低減され、溶接欠陥が防止でき、また、溶込み深さが増加し、大出力でも良好なレーザー溶接継手を得ることができる。この真空レーザー溶接のメリットを活用して、圧延クラッド鋼板製造工程におけるスラブ組立て溶接技術を開発した。熱レンズ効果によるビーム焦点位置変動を抑制する集光光学系の最適化設計などを行い、世界初となる 30 kW 級大出力真空レーザー溶接設備を圧延クラッド鋼板製造ラインに導入した。

Abstract:

In high-power laser welding of thick steel plates with over 10 kW laser power, problems such as spatter formation during welding and weld failures including underfill sometimes occur. Laser welding, which is generally carried out in the atmosphere, performed in vacuum reduces spatter formation and avoids weld failures. Moreover it increases penetration depth and provides satisfactory welded joints. As an application to fully utilize the advantage of laser welding in vacuum, slab assembly welding technology in a rolled clad plate production process was developed. By applying optimally designed focusing optics to reduce focus shift caused by thermal lens effect, the world-first 30 kW class high-power vacuum laser welding system was installed at the rolled clad plate production line in JFE Steel.

1. はじめに

レーザー溶接は、レーザービームを小径のスポットに集光し高エネルギー密度の熱源として利用する溶接方法で、アーク溶接などに比べて高速、深溶込み、高品質などのメリットを有する。1970 年代に kW クラスの出力の CO₂ レーザ発振器が市販されて以降、レーザー発振器の高出力化が進み、様々な産業分野においてレーザー溶接が普及してきた。鉄鋼製造工程においては、1980 年代後半から連続冷間圧延ラインなどでのコイル継ぎ溶接^{1,2)}にレーザー溶接が適用され、その後鋼管の溶接³⁾、熱間圧延ラインの粗バーの溶接⁴⁾などに 10~45 kW の高出力の CO₂ レーザ溶接が適用されてきた。2000 年以降は、溶接に適用されるレーザー発振器の主流が、気体レーザーである CO₂ レーザからファイバーレーザー、ディスクレーザーなどの固体レーザーに変わり、レーザー発振器の高出力化が加速し、100 kW のファイバーレーザーが市販され溶接への適用が検討されるようになった^{5,6)}。このような大出力のレーザー発振器を溶接に適用することにより、従来よりも大きな板厚の鋼板の深溶込み溶接が可能となると期待され

たが、大出力レーザーの使用に耐える光学系などの周辺装置の整備、あるいは溶接スパッタおよび欠陥の防止などの品質管理上の課題があり、10 kW を超える出力のレーザー溶接の適用はごく一部に限定されていた。

大出力レーザー溶接における溶接スパッタおよび欠陥発生の問題に対しては、真空雰囲気での溶接を行うことが有効であると知られている⁷⁻⁹⁾。同様の高エネルギービーム溶接である電子ビーム溶接に対し、レーザー溶接は大気中の溶接が可能というメリットを有すると認識されていたが、100 kW までの大出力レーザー溶接における溶接品質の向上を目的として、真空レーザー溶接技術が注目されるようになってきた。本報告では、厚鋼板の大出力真空レーザー溶接の特徴およびメリットについて解説し、30 kW 級の大出力レーザーを使用した真空レーザー溶接の世界初の実用化例として、圧延クラッド鋼板製造工程におけるクラッドスラブ組立て溶接技術の開発および真空レーザー溶接設備の導入について紹介する。

2. 大出力レーザー溶接の問題点と真空溶接のメリット

写真 1 に大出力ファイバーレーザー溶接の例として、レー

ザ出力 25 kW, 溶接速度 1 m/min の条件で炭素鋼 (JIS G 3106: SM490B) のメルトランを行った結果⁶⁾を示す。溶接表面の外観を見ると溶接ビード周辺に多数のスパッタが付着しており、断面マクロ組織観察ではそのスパッタ飛散の影響により溶接金属表面が欠損したアンダーフィルが発生していることが確認できる。このように大気中で大出力レーザによる厚鋼板の深溶込み溶接を行うと、レーザビーム照射直下で鋼が急激に蒸発しその蒸気圧により熔融金属が飛散するため、写真2に示すように多量のスパッタが発生する。スパッタの発生は溶接金属のアンダーフィルなどの溶接欠陥の原因となるため、大出力レーザ溶接において欠陥のない高品質の溶接部を得ることは非常に困難になる。

このスパッタ発生の問題に対する解決策の1つが、大出力レーザ溶接を真空あるいは減圧雰囲気で行うことである。真空中では、鋼の蒸発により発生する金属蒸気が気圧で抑制されることなく瞬時に拡散し、レーザビーム照射直下で蒸気圧が急激に上昇することがなくなる。そのため、蒸気圧によるスパッタ飛散が抑止でき、アンダーフィルなどの欠陥を生じることなく良好な深溶込み溶接を行うことが可能にな

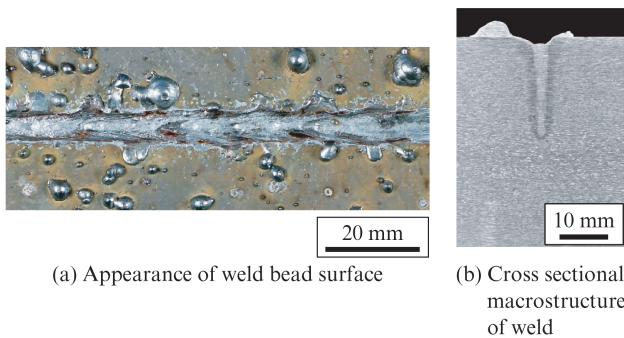


写真1 大出力ファイバーレーザによる溶接例
 (レーザ出力 25 kW, 溶接速度 1 m/min, メルトラン)

Photo 1 Example of high-power fiber laser welding
 (Laser power: 25 kW, Welding speed: 1 m/min, Melt run)



写真2 大出力ファイバーレーザ溶接におけるスパッタ発生
 Photo 2 Spatter formation of high-power fiber laser welding

る。写真3に、真空中での大出力レーザ溶接例として、雰囲気圧 100 Pa (大気圧の 1/1 000) のチャンバー内でファイバーレーザ出力 25 kW, 溶接速度 0.5 m/min の条件のメルトランを行った結果を示す。溶接表面外観では溶接ビード周辺へのスパッタの付着が見られず、溶接部断面マクロ組織ではアンダーフィルなどの溶接欠陥がない良好な品質の溶接部が得られていることが確認できる。

図1に、レーザ出力 10~50 kW, 溶接速度 0.5 m/min の条件で炭素鋼 (JIS G 3106, SM490B) のメルトランを行った場合の大気中 (100 kPa) および真空中 (100 Pa) での溶込み深さの比較を示す。どちらの雰囲気条件でもレーザ出力の増加とともに溶込み深さは増加するが、大気中よりも真

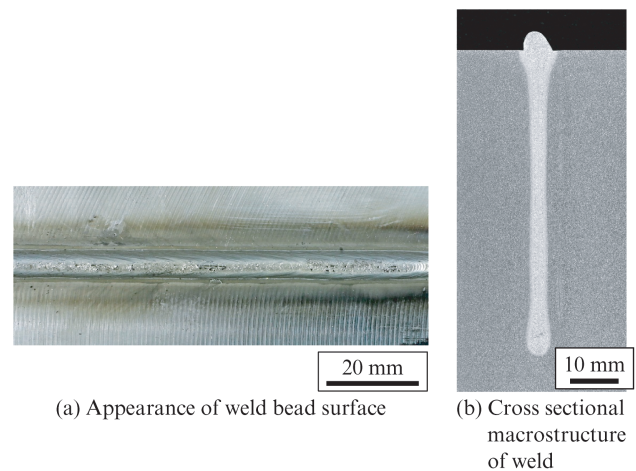


写真3 真空中での大出力ファイバーレーザ溶接例
 (雰囲気圧 100 Pa, レーザ出力 25 kW, 溶接速度 0.5 m/min, メルトラン)

Photo 3 Example of high-power fiber laser welding in vacuum
 (Atmospheric pressure: 100 Pa, Laser power: 25 kW, Welding speed: 0.5 m/min, Melt run)

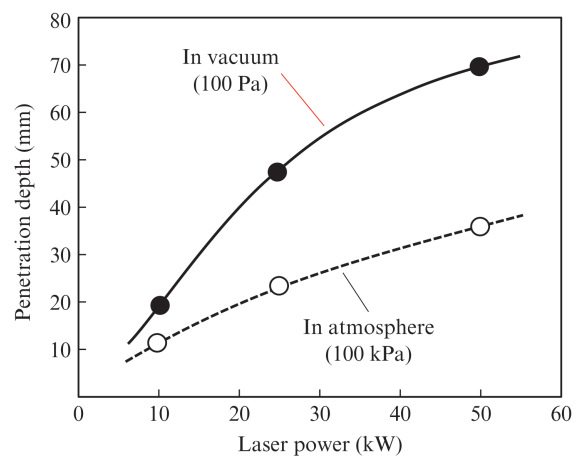


図1 大気中および真空中におけるレーザ溶接溶込み深さの比較
 (溶接速度 0.5 m/min, メルトラン)

Fig. 1 Comparison of penetration depth of laser welding between in atmosphere and in vacuum
 (Welding speed: 0.5 m/min, Melt run)

空中の溶接で溶込み深さが大きくなる傾向がある。大気中ではレーザー出力が 10 kW から 50 kW と 5 倍に増加しても、溶込み深さは約 10 mm から約 30 mm と 3 倍しか増加しない。一方真空中では、レーザー出力の増加に対する溶込み深さの増加の割合が大きく、レーザー出力が 10 kW から 50 kW と 5 倍に増加すると、溶込み深さは約 20 mm から約 70 mm まで 3.5 倍に増加する。真空中のレーザー溶接では、大気中に比べて 2 倍以上の溶込み深さが得られ、高効率で厚板深溶込みの溶接が可能であるというメリットがある。

以上のように、真空中でのレーザー溶接は、大気中で問題となるスパッタ発生が防止でき、また同じレーザー出力で大気中よりも大きい溶込み深さを得ることができる。この特徴はより大きなレーザー出力および溶込み深さで顕著となり、10 kW 以上の大出力レーザー溶接での溶接品質低下の問題を解消する大きなメリットである。またこのメリットは、100 Pa 程度の真空度で発現することから¹⁰⁾、一般的に電子ビーム溶接が必要とされる 0.001 Pa 程度の真空度に比べてかなり低い真空度で高い品質の溶接が実現できる。真空中でのレーザー溶接は大気中のレーザー溶接では不要な真空設備が必須であるため、設備構成が煩雑になり、また設備コストが増加するというデメリットはあるが、電子ビーム溶接よりは低い真空度で簡便な溶接が可能である。そのため、高真空装置が制約となる電子ビーム溶接よりも汎用性が高く、より広範囲の用途に適用できることが期待される。

3. 圧延クラッド鋼板製造工程への大出力真空レーザー溶接適用

前述した大出力真空レーザー溶接のメリットを活用できる適用対象として、JFE スチールでは圧延クラッド鋼板製造ラインにおけるクラッドスラブ組立て溶接技術の開発を進めてきた。クラッド鋼板とは、炭素鋼または低合金鋼の鋼板（母材）の表面全面に他の金属が被覆された複合鋼板で、鋼板と被覆される金属との境界面が金属組織的に接合されているものを指す。被覆される金属（合せ材）には、ステンレス鋼、ニッケル合金、銅合金といった耐食性、耐熱性など炭素鋼あるいは低合金鋼にはない特性を有する金属が選択される。クラッド鋼板の製造方法には、圧延法、肉盛溶接法、爆着法などがあり¹¹⁾、当社では熱間圧延ラインを利用した圧延法（図 2）によるクラッド鋼板を製造している。クラッド鋼板用のスラブの組立て方法には、図 3 に示すオープン方式とサンドイッチ方式があり、オープン方式では母材と合せ材の重ね面を、サンドイッチ方式では母材とスペーサーの重ね面をそれぞれ溶接して圧延用のスラブを組み立てる。スラブ組立てを含む圧延クラッド鋼板の製造手順は以下のとおりである。

- (1) クラッドとして組合せる母材と合せ材を前工程の熱間圧延にて製造する。
- (2) オープン方式では、母材と合せ材の重ね面を仕上げた状態で重ね合わせて仮付けする。サンドイッチ方式で

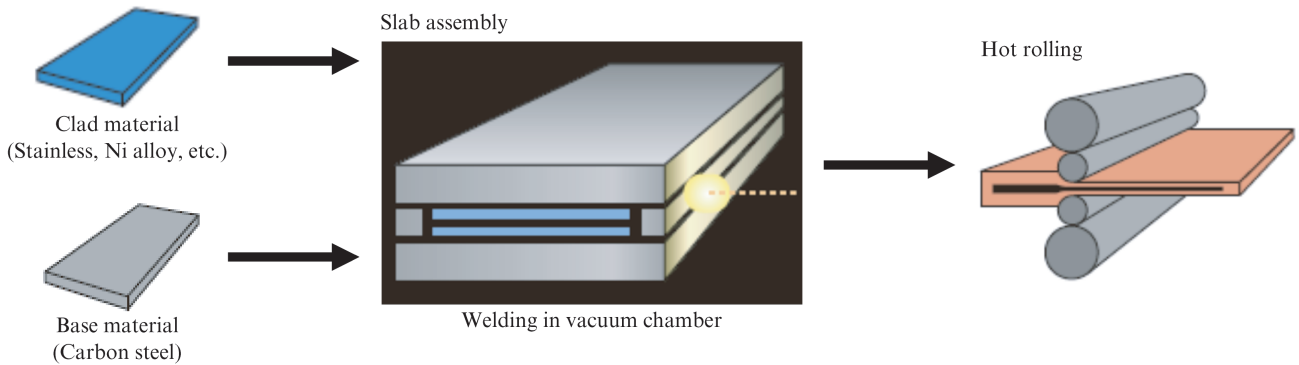


図 2 圧延型クラッド鋼板の製造工程概略

Fig. 2 Outline of production process of hot rolled clad steel

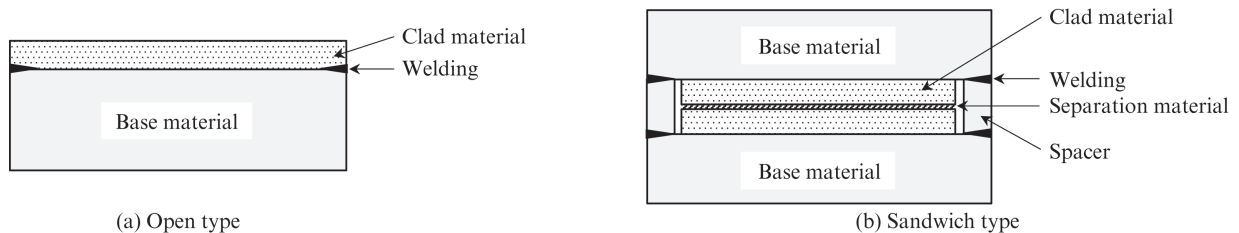


図 3 圧延型クラッド鋼板製造におけるスラブ組立方式

Fig. 3 Slab assembly types of hot rolled clad steel production

は、2組の母材と合せ材を上下に背中合わせで積層し、合せ材が内包される形で上下の母材間の隙間にスペーサーを挿入して母材とスペーサーを仮付けする。

- (3) 仮付けされたスラブは大型チャンバー内で真空雰囲気となった状態で母材と合せ材の接合面（オープン方式）または母材とスペーサーの接合面（サンドイッチ方式）の四辺を溶接し、接合面が密閉された状態の圧延用組立てスラブを作製する。
- (4) 溶接された組立てスラブを再び熱間圧延し所定の製品板厚に調整するとともに、母材と合せ材の界面を金属組織的に接合し、圧延クラッド鋼板が完成する。

上記 (3) のステップにおけるスラブ組立て溶接では、後の (4) の熱間圧延の際の加熱～圧延プロセスに耐える溶接継手特性が要求される。すなわち、線膨張係数の異なる母材と合せ材の界面で発生する熱応力による合せ材の剥離を防止し、かつ圧延中に母材と合せ材の界面に酸素が侵入する酸化による接合不良部の生成を回避するため、所定の溶込み深さを維持して溶接強度を確保するとともに溶接部に欠陥を発生させずに封止性を保証することが必要となる。

スラブ組立て溶接に適する溶接法として、従来から大型の真空チャンバー内での電子ビーム溶接が適用されていた。しかし、オープン方式のクラッドスラブの組立て溶接は母材と合せ材の異種金属溶接となるため、電子ビーム溶接では溶接中に発生する熱起電力の電磁気的影響により電子ビームが偏向する¹²⁾という現象が生じる。このビーム偏向により、一部のクラッドスラブ組立てで所定の溶込み深さが得にくい、合せ材の組合せごとにビーム偏向を考慮した溶接条件の設定が必要になるなどの問題が発生し、溶接不良や溶接能率の低下の原因となることがあった。

一方レーザー溶接は、光であるレーザービームを熱源とするため、異種金属溶接でも熱起電力の発生などの影響を受け

ず、母材と合せ材の組合せによる溶接条件変動がない安定した深溶込み溶接が可能というメリットがある。さらに、前述した真空レーザー溶接のメリットから、電子ビーム溶接に代わるクラッドスラブ組立て溶接方法として大出力真空レーザー溶接が非常に有望であると期待される。ただし、大出力真空レーザー溶接を製造工程で実用化する際には課題があった。重要な課題の一つが大出力レーザー溶接での溶接安定性、すなわち大出力で長時間の溶接を行う際に安定した一定形状の溶込みが得られることである。図4にレーザー出力20 kW、溶接速度0.5 m/minで炭素鋼（SM490B）の真空溶接（雰囲気圧100 Pa）を行った場合の溶接時間経過にともなう溶込み形状の変化を示す。溶込み形状は溶接開始からの距離すなわちレーザー照射時間の増加にしたがって変化し、徐々に溶込み深さが増加し溶融幅が減少している。この溶込み形状の変化は、レーザービームを集光するレンズにレーザービームエネルギーの吸収による熱変形が生じる熱レンズ効果¹³⁾によるもので、熱レンズ効果によって起こるレーザービーム焦点位置の移動（フォーカスシフト）の影響で安定した溶込み形状を維持することが困難となる。特に20 kW以上の大出力レーザー溶接では、ビーム透過率の高いレンズを使用した場合でも吸収されるビームエネルギーが大きくなることに加え、空冷効果がない真空中では大気中よりも集光レンズの温度上昇が起こりやすいことから、大出力真空レーザー溶接では熱レンズ効果による溶込み形状変化がより深刻な問題になる。

この熱レンズ効果を低減するために、大出力真空レーザー溶接用の集光光学系としてレンズ構成、レンズ材質・コーティング、水冷機構などの最適化を行った。レンズ構成については、一般的にコリメーションレンズ、集光レンズなど複数枚のレンズで構成される集光光学系を1枚のレンズで集光できる構成とし、熱レンズ効果によるフォーカスシフト

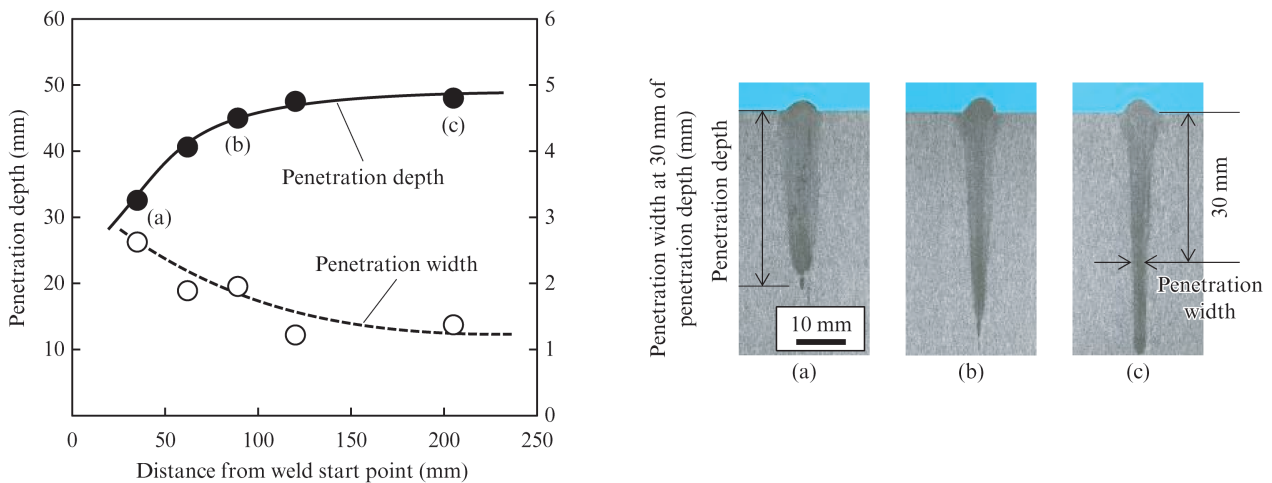


図4 溶接時間の経過にともなう溶込み形状変化（雰囲気圧100 Pa，レーザー出力20 kW，溶接速度0.5 m/min，メルトラン）

Fig. 4 Penetration shape change with elapsed welding time
(Atmospheric pressure: 100 Pa, Laser power: 20 kW, Welding speed: 0.5 m/min, Melt run)

量を極力抑制できる光学系を製作した。図5に集光光学系の最適化前後のレーザー出力 20 kW 照射時のフォーカスシフト量測定結果を示す。集光光学系の最適化によりレーザー照射時間 120 秒でのフォーカスシフト量が約 30 mm から約 4 mm まで大幅に低減されたことを確認した。図6に、最適化された集光光学系を用いた大出力真空レーザー溶接における溶込み形状変化を示す。30 kW という大出力のレーザー溶接でも溶込み形状変化は大幅に抑制され、安定した溶込み形状が得られた。

以上の熱レンズ効果対策に加え、クラッドスラブの組立て溶接に必要な溶込み深さと溶融幅を得るためのレーザー出力、溶接速度およびレーザービーム焦点位置などの適正溶接条件の設定、真空中の長時間の溶接で集光光学系が溶接ヒュームによって汚染されないように保護するためのシール

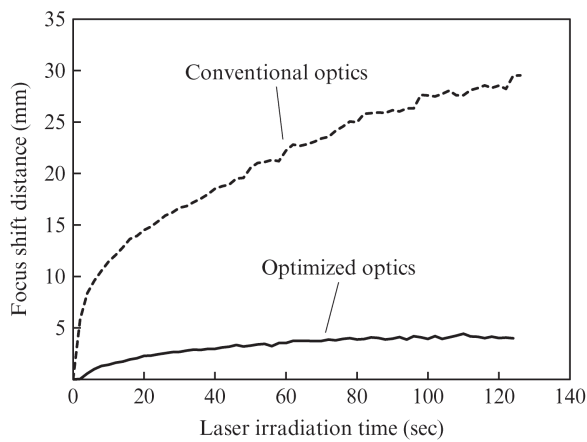


図5 集光光学系最適化前後のレーザービームフォーカスシフト量比較 (レーザー出力 20 kW)

Fig. 5 Comparison of laser beam focus shift distance between before and after optimization of focusing optics (Laser power: 20 kW)

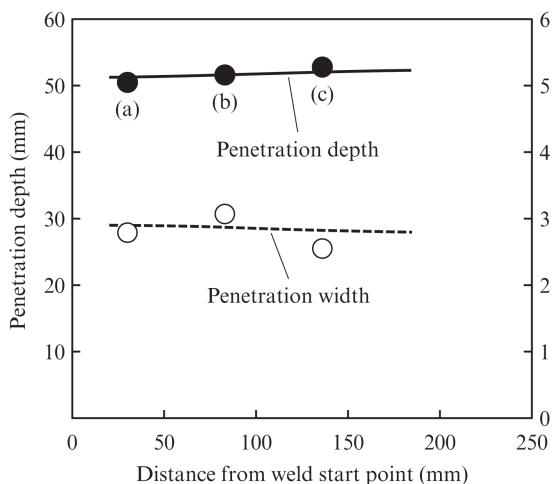
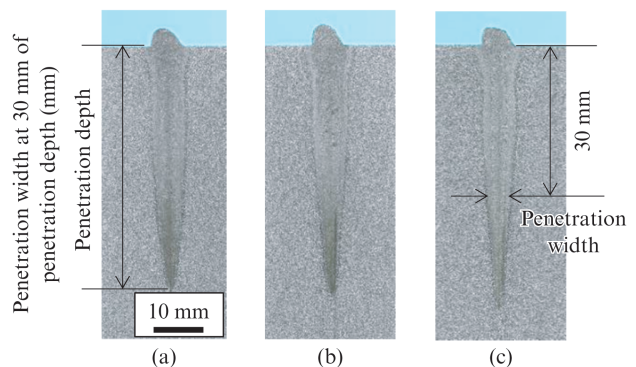


図6 集光光学系最適化後の溶接時間の経過ともなう溶込み形状変化 (雰囲気圧 100 Pa, レーザー出力 30 kW, 溶接速度 0.5 m/min, メルトラン)

Fig. 6 Penetration shape change with elapsed welding time after optimization of focusing optics (Atmospheric pressure: 100 Pa, Laser power: 30 kW, Welding speed: 0.5 m/min, Melt run)

ドガス機構の設置など、真空中での大出力レーザー溶接特有の多数の課題を解決した。その成果として、当社西日本製鉄所(福山地区)厚板工場の圧延クラッド鋼板製造工程に、世界初となる 30 kW 級大出力ファイバーレーザーを使用した真空レーザー溶接システムを導入した。図7に導入したシステムの構成概要を、写真4にシステムの真空チャンバーに組立てスラブが挿入されている状況を示す。30 kW 級ファイバーレーザー発振器からビーム伝送用のプロセスファイバーを介して大型真空チャンバー内のレーザー溶接ヘッドにレーザービームを導光する。溶接ヘッドには熱レンズ効果を極小化した集光光学系などの最適化した機構が組み込まれており、溶接ヘッドが組立てスラブの周囲四辺を移動して母材と合せ材、あるいは母材とスペーサーの重ね面を水平横向き姿勢で溶接する。真空雰囲気のままクラッドスラブの四辺を溶接することで、接合面が真空状態で密閉された組立てスラブが作製される。組立てスラブの四辺の周長は 10 m 以上になるものもあり、数段重ねたクラッドスラブの溶接を行う場合、総溶接時間は数時間になる。

写真5に、大出力真空レーザー溶接システムを用いて作製したオープン方式のクラッド組立てスラブの溶接ビード表面外観および断面マクロ組織観察例を示す。この例では母材が炭素鋼(写真下側)、合せ材がステンレス鋼(写真上側)の組合せであり、レーザー出力 30 kW、溶接速度 0.5 m/min で溶接ビード表面の溶融幅は 10 mm、溶込み深さは 56 mm となっている。溶接ビード外観では、真空レーザー溶接の特徴であるスパッタ発生のない美しいビードが確認でき、断面マクロ組織では、ビーム偏向および溶接欠陥がない重ね面に沿った深い溶込みの良好な溶接部が確認できる。このように、大出力真空レーザー溶接はクラッドスラブ組立てに好適な溶接方法であり、実生産工程において極めて有用なプロセスであることが実証された。この大出力真空レーザー溶接



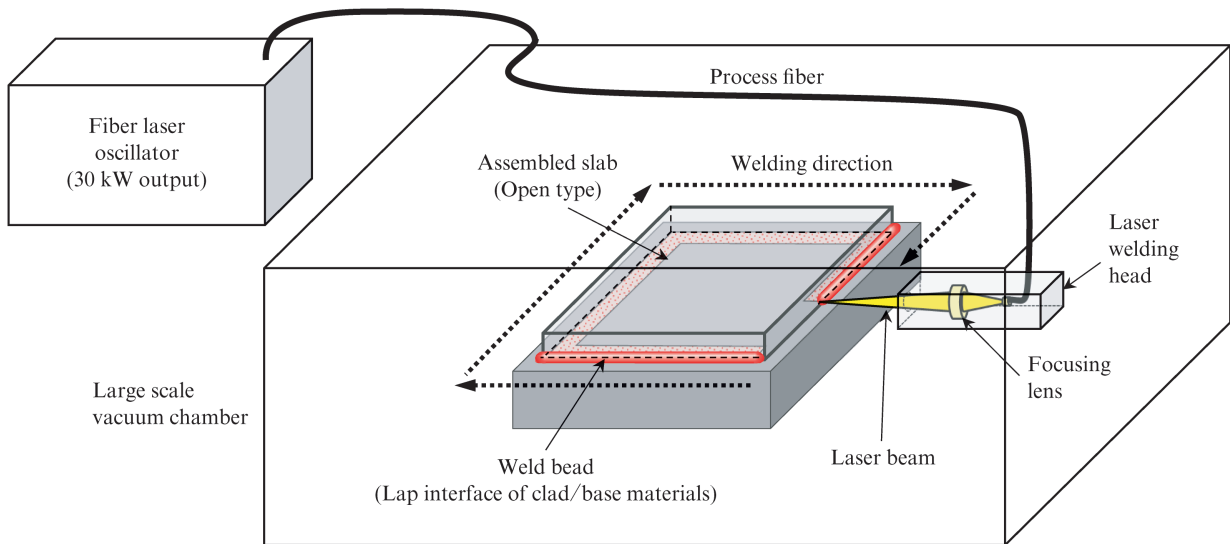


図7 クラッドスラブ組立て真空レーザー溶接設備の模式図

Fig. 7 Schematic illustration of vacuum laser welding system for clad slab assembly

システムは、従来の電子ビーム溶接を上回る溶接能率で操業され、種々の合せ材の組合せで安定した溶接品質を保証しており、圧延クラッド製品の製造効率向上およびクラッド新製品の開発に大きく貢献している。

4. おわりに

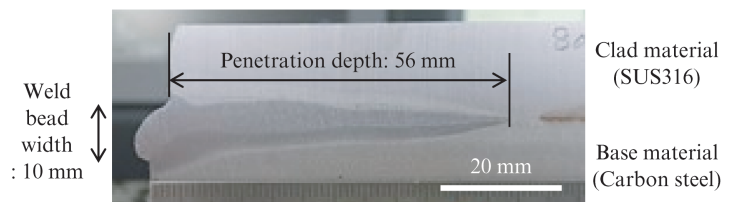
大出力レーザー溶接の課題を解決できる真空レーザー溶接技術について解説し、厚鋼板の深溶込みかつ高品質の溶接を実現するために有望な溶接方法であることを示した。当社では、これまで積極的にレーザー溶接技術の開発を進めてきたが、圧延クラッド鋼板製造工程のスラブ組立て溶接という大出力真空レーザー溶接のメリットを最大限活用できるニーズに適合する技術開発を行ったことにより、世界初となる30 kW級大出力真空レーザー溶接システムの実機化が実現できた。圧延クラッド鋼板製造工程への導入は、大出力レーザーによる厚鋼板の深溶込み溶接を生産ラインで実用化したという象徴的な事例であり、実生産で多大な効果が得られた成功例であるといえる。今後レーザー発振器の高出力化と



写真4 クラッドスラブ組立てラインの真空チャンバー入口
Photo 4 Entrance of vacuum chamber of clad slab assembly line



(a) Appearance of weld bead surface



(b) Cross sectional macrostructure of weld

写真5 クラッドスラブ組立て真空レーザー溶接部のビード外観および断面マクロ組織例 (レーザー出力 30 kW, 溶接速度 0.5 m/min)
Photo 5 Examples of weld bead appearance and cross sectional macrostructure of vacuum laser weld in clad slab assembly (Laser power: 30 kW, Welding speed: 0.5 m/min)

低価格化が進み、また光学系などの周辺装置の開発も推進されるが、大出力レーザーを実用的な溶接方法として使いこなす選択肢として真空レーザー溶接技術は有望である。

当社では、この圧延クラッド鋼板製造工程への大出力真空レーザー溶接適用をステップとして、今後も大出力レーザーを利用した革新的溶接技術の開発を行い、鉄鋼製造プロセスの進歩に寄与して行きたいと考える。

謝辞

圧延クラッド鋼板製造工程での大出力真空レーザー溶接技術の実機化に際しては、最適化集光光学系を含むレーザー溶接ヘッドおよびレーザー溶接システム全体の設計・製作について、三菱重工工作機械株式会社殿に多大なる協力をいただいた。この場を借りて感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) 河合義人, 中原久直, 横沢二男, 緑川雅之, 小松富夫, 小林泰夫. 連続冷間圧延ラインにおける高出力レーザー溶接機. 川崎製鉄技報. 1988, vol. 20, no. 3, p. 236-237.
- 2) 木谷靖, 安田功一, 片岡義弘, 福原明彦. 連続圧延ラインにおける高炭素鋼レーザー溶接継手の後熱処理. レーザ熱加工研究会予稿集. 1996, no. 37, p. 73-79.
- 3) Ono, M.; Shiozaki, T.; Shinbo, Y.; Sekine, Y.; Iwasaki, K.; Takahashi, M. Development of High Power Laser Pipe Welding Process. Quarterly Journal of The Japan Welding Society. 2001, vol. 19, no. 2, p. 233-240.
- 4) 城戸基, 杉橋敦史, 山本博之, 前田勝宏, 浜田直也, 南田勝宏, 菊間敏夫. 熱間圧延連続化用 45 kW 炭酸ガスレーザー溶接システムの開発. 新日鉄技報. 2003, no. 379, p. 80-83.
- 5) 片山聖二, 水谷正海, 川人洋介, 河野渉, 牧野吉延, 住森大地, 伊藤晋吾, 鈴木啓市. 100 kW 出力レーザーの溶接性の可能性. 溶接学会全

- 6) 角博幸, 木谷靖, 大井健次, 住森大地, 水谷春樹, 伊藤晋吾, 川人洋介, 片山聖二. 100 kW 出力レーザーを用いた厚鋼板の溶接における溶込み特性. 溶接学会全国大会講演概要. 2015, no. 97, p. 148-149.
- 7) Katayama, S.; Abe, Y.; Mizutani, M.; Kawahito, Y. Deep Penetration Welding with High-Power Laser under Vacuum. Transactions of JWRI. 2011, vol. 40, no. 1, p. 15-19.
- 8) 川人洋介, 水谷正海, 片山聖二, 河野渉, 牧野吉延, 住森大地, 伊藤晋吾, 鈴木啓市. 30 kW 出力を超える大出力レーザー溶接における低真空の効果. 溶接学会全国大会講演概要. 2015, no. 96, p. 164-165.
- 9) Francis, J. A.; Holtum, N.; Olschok, S.; Roy, M. J.; Vasileiou, A. N.; Jakobs, S.; Reisgen, U.; Smith, M. C. Vacuum laser welding of SA508 steel. Journal of Materials Processing Technology. 2019, no. 274-116269, p. 1-11.
- 10) 片山聖二, 井戸諒治, 西本浩司, 水谷春樹, 川人洋介. 低真空中における高出力ディスクレーザー溶接による高張力鋼厚板の貫通溶接. 溶接学会論文集. 2015, vol. 33, no. 3, p. 262-270.
- 11) 深井英明. 圧延型クラッド鋼板. までりあ. 1996, vol. 35, no. 9, p. 976-982.
- 12) 渡辺潔, 志田朝彦, 鈴木宗伸, 岡村久宣, 妹島五彦. 電子ビーム溶接の欠陥発生および防止に関する研究 (第2報). 溶接学会誌. 1975, vol. 44, no. 2, p. 121-127.
- 13) 野田修, 村上敦, 殖栗成夫, 片山聖二. ファイバーレーザーとディスクレーザーを用いた加工ヘッドの熱レンズ解析. レーザ加工学会論文集. 2010, no. 73, p. 49-52.



木谷 靖



松下 宗生



深堀 友晃