

レーザ・アークハイブリッド溶接実証実験

内野 一成*

Issei Uchino



レーザ・アークハイブリッド溶接とは、歪みが少なく深溶け込み溶接が可能なレーザ溶接の利点と、開先裕度が大
きいアーク溶接の利点を足し合わせた溶接法であり、客船を主力とする海外造船所や国内造船所の一部で既に適用さ
れている。しかし、光エネルギーを熱源とするレーザ溶接は厚板溶接に対する課題が多く、実際に適用できる板厚は
13 mmまでと言われている。¹⁾よって、主に 13 mm よりも厚い板を使用する一般商船を主力とする国内造船所への適用は
まだ進んでいないのが現状である。

2012 年度から 2014 年度にかけて(一財)日本船舶技術研究協会が主導する「船舶建造高品質化・効率化技術の調査
研究」の枠組みの中、レーザ・アークハイブリッド溶接の調査研究委員会が発足し、大阪大学での溶接条件出し、造
船各社による溶接継手性能調査が実施された後、九州大学と共同で実施工に近い条件での溶接性能確認を目的とした
実証実験が弊社伊万里事業所にて行われた。本稿ではその内容を紹介する。

1. 緒言

レーザ・アークハイブリッド溶接とはその名の通りレー
ザ溶接とアーク溶接を組み合わせた溶接方法である。熱源
にレーザ光を用いることで局所的に高密度なエネルギーを
与えるため、すみ肉溶接においては完全溶け込みを有した
高強度な溶接継手を得ることができる。また、突合せ溶接
においては、開先加工が容易な I 開先の溶接が可能で、溶
着量が少ないビードを形成できる。レーザ・アークハイブ
リッド溶接によるすみ肉溶接断面を写真 1 に、突合せ溶接
断面を写真 2 に示す。

鋼板の加熱範囲が狭く、溶着量を少なくできることから



写真 1 すみ肉溶接断面



写真 2 突合せ溶接断面

溶接による熱歪みの低減や溶接材料費を削減できるメリッ
トが期待されているが、一方で開先のギャップや切断精度
に対する裕度が小さく、レーザ溶接特有のポロシティと呼
ばれる気孔欠陥やアンダーフィルと呼ばれる余盛不足が発
生するという欠点もあるため、一般商船を主力とする国内
造船所への導入は進んでいないのが現状である。そこで、
船舶建造工程における本施工法適用に向けた基礎研究とし
て、厚板における溶接条件の確立を目的に本研究が進めら
れた。

2. 実験装置及び供試材

2. 1 レーザ発振器

レーザ発振器は IPG 社製 20kW のファイバーレーザが用い
られた。(写真 3) 光ファイバーを増幅媒質とするファイバ
ーレーザは、高出力化が可能で、高品質なビームを得るこ
とができる。また、レーザは可視光ではないが、反射光で
人体の目や皮膚に影響を与える可能性があるため、衝立で
実験装置を覆っている。(写真 4)



写真3 レーザ発振器



写真6 溶接ヘッド



写真4 実験装置全体像

2. 2 門型走行台車

本実証実験はより実施工に近い状況を再現することが目的であるため、5mの溶接施工を実現できる門型走行台車が愛知産業により製作された。(写真5) この走行台車は供試材を固定・加圧するための機構を有している。溶接ヘッドにはHighYAG社製のレーザ溶接トーチとFronius社製のアーク溶接トーチが搭載されている。(写真6) 尚、本実証実験に用いるアーク溶接は造船所において広く普及している炭酸ガスアーク溶接法が採用されている。



写真5 門型走行台車

2. 3 供試材料

実験には一次防錆処理（プライマー処理）が施された船体用36キロ級高張力鋼を使用した。溶接条件出しを目的に大阪大学で実施されたプロセス実験では、複数の板厚による溶接条件出しが行われたが、本実験では板厚14mm、板幅200mm、板長5,000mmの2枚の鋼板の突合せ溶接、並びに板厚14mm、板幅200mm、板長5,000mmのウェブ材と板厚21mm、板幅400mm、板長5,000mmのフランジ材のすみ肉溶接を実施した。また、アーク溶接にはワイヤ径1.6mmのソリッドワイヤ（JIS Z3312：YGW11）を用いている。

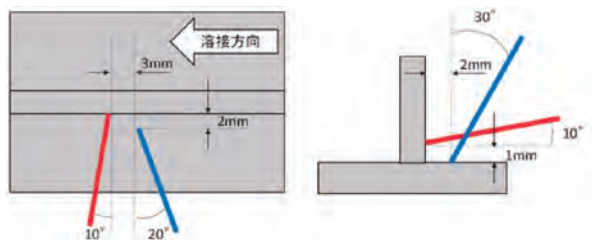
3. 溶接条件

溶接条件は弊社の実証実験が行われる前のお阪大学によるプロセス実験において確立された条件にて施工されている。溶接条件を第1表に示す。

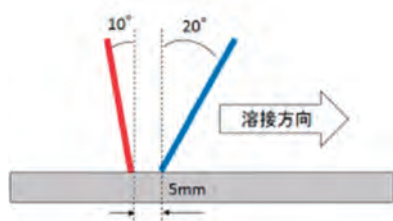
第1表 溶接条件

	電流 (A)	電圧 (V)	レーザ出力 (kW)	溶接速度 (mm/min)
すみ肉溶接	450	29.0	8.0	1,000
突合せ溶接	450	26.1	8.0	1,800

レーザヘッドとアーク溶接トーチの位置関係を第1図及び第2図に示す。図において赤線はレーザトーチを、青線はアークトーチを表している。すみ肉溶接においては溶接方向に対してレーザを先行させ溶融させた後に、アーク溶接にて余盛を形成する配置となっている。一方、突合せ溶接においてはギャップがあるとレーザ光が隙間を通過し、鋼板を効率的に溶融することができないため、アークを先行させるトーチ配置となっている。



第1図 すみ肉溶接におけるトーチ配置



第2図 突合せ溶接におけるトーチ配置

すみ肉溶接は、1.2mmのフラックスワイヤ（JIS Z 3313 : T 49J 0 T1-1 C A-U）を使用した炭酸ガスアーク半自動溶接にて、700mmから1,000mmの間隔で仮付け溶接を行った。突合せ溶接の製作においては0.5mmのギャップを設けるために0.5mmのスペーサを500mm間隔で埋め込み、レーザ溶接にて仮付けを行った。（写真7）また、終端部の回転変形を抑制するためにエンドタブを取り付けている。（写真8）

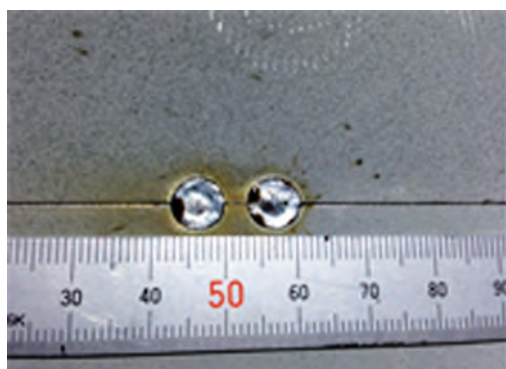


写真7 レーザ溶接による仮付けビード



写真8 エンドタブ

4. 溶接結果

4. 1 外観試験

造船所のロンジ先付工程に適用される自動すみ肉溶接は立板の両側を同時に施工する機構を有しているが、本実験装置は1組の溶接ヘッドで構成されているため、片側を溶接後、ヘッドを反転させて反対側を施工している。

製作したすみ肉溶接継手の全景を写真9に、ビード外観を写真10に示す。外観試験の結果、溶接線全線に渡り良好なビードが得られていることが確認できた。



写真9 すみ肉溶接継手の全景

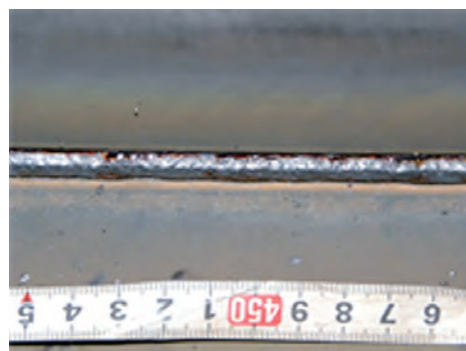


写真10 すみ肉溶接継手のビード外観

製作した突合せ溶接継手の全景を写真11に、ビード外観を写真12及び写真13に示す。すみ肉溶接と同様に全線に渡り良好なビードが得られた。



写真11 突合せ溶接継手の全景

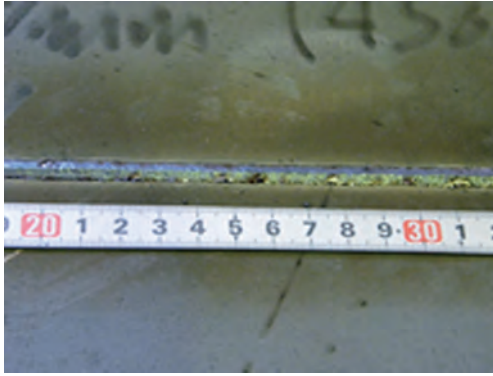


写真12 突合せ溶接の表ビード外観

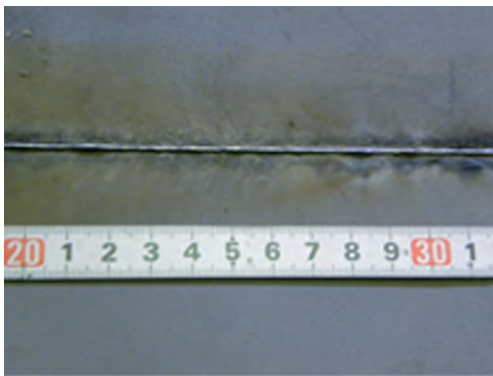


写真13 突合せ溶接の裏ビード外観

4. 2 非破壊検査結果

製作したすみ肉溶接継手及び突合せ溶接継手は、超音波探傷試験及び放射線透過試験を実施している。すみ肉溶接継手は完全溶け込みを有していることを確認できたもののJIS Z3060（鋼溶接部の超音波探傷試験方法）で規定されるL線を超える欠陥エコーが確認された。この内部欠陥に関しては、引き続き九州大学にて調査が行われている。

突合せ溶接継手の超音波探傷試験の結果、仮付け溶接部においてL線を超える欠陥エコーが検出され、放射線透過試験の結果も同様に仮付け部に融合不良とみられる内部欠陥が確認されたが、その他の溶接部には有害と判断される内部欠陥は観察されなかった。仮付け部に発生した融合不良を写真14に示す。



写真14 仮付け部に発生した融合不良

4. 3 開先状態の影響

本実証実験では溶接する開先状態による優位性を調べるために、切断面が機械加工とレーザ切断によるもの、またプライマを施したままの試験体とプライマを除去した試験体にて施工された。その結果、開先の状態による優位性は見られず、それ以上に仮付けをした際のギャップにより溶接の良し悪しを左右することがわかった。造船所における鋼板の切断で主に適用されているのはガス切断やプラズマ切断であるが、レーザ・アークハイブリッド溶接は高精度な開先が必要となるため、既に適用が進んでいる欧州の造船所では、機械加工によって開先を加工する工法が採用されている。しかし、機械加工では膨大な工数を要することになるため、比較的加工が容易なレーザ切断のままだでも5mの試験体の溶接施工が可能と確認できたことは大きな成果となった。

5. 今後の課題

前述の通り、実証実験の結果、5mの溶接継手においても良好な溶接ビードが得られることを確認できたが、実施工に適用するにあたり課題となるトラブルが発生した。

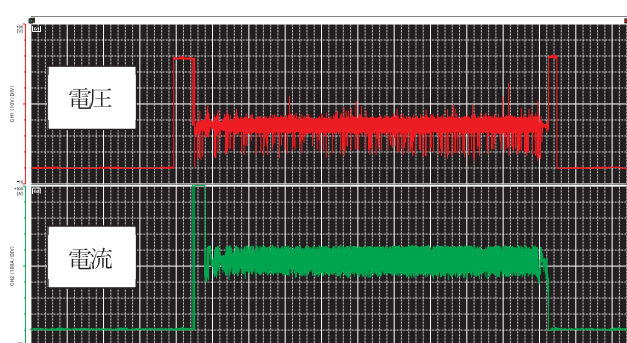
5. 1 アーク切れによるトラブル

実証実験としてすみ肉溶接継手を7体、突合せ溶接継手を8体、合計15体の継手の製作を行ったが、このうち4体の施工中にアークが途切れるトラブルがあった。写真15は溶接中にアークが止まり、送給されるワイヤがレーザ熱源によって糸状に熔融してしまった状況である。

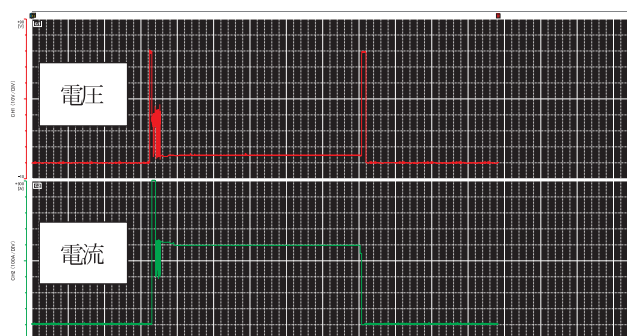


写真15 アーク切れによるトラブル

健全な溶接時の電流と電圧の波形を第3図に、アーク切れが発生した溶接時の電流と電圧の波形を第4図に示す。



第3図 健全な溶接時の電流/電圧波形



第4図 アーク切れが発生した溶接時の電流/電圧波形

溶接機の基盤を交換することでこのトラブルを回避することができたが、アーク熱源として使用している炭酸ガスアーク溶接の溶接条件が単体で使う場合よりも、電圧が低く、ワイヤ送給過多（アークが途切れる状態）になりやすい状態である。あくまで推察の域をでないが、この電圧が低い状態がアーク切れを引き起こす一因として考えられ、アーク溶接の条件も更に追求を求められる。

5. 2 目違いやギャップに対する裕度

レーザ・アークハイブリッド溶接は局所的に高エネルギーな溶接をすることができるという利点を持つ反面、目違いやギャップに対する裕度が小さくなる。当初、すみ肉溶接継手に関しては写真16に示すように、押さえ装置にて加圧しながら溶接するよう検討されていたが、倣い中に試験体とローラの摩擦で架台と溶接ヘッドが振動し、溶接中の狙い位置が微妙に変動することがわかったため、仮付けのまま溶接するように変更した。本実験では供試材が高精度に加工されていたため、仮付けのままでもほとんどギャップのない状態を作ることができたが、実施工に適用する場合は、長尺の溶接体でもギャップがない状態を作り出せる機構が必要になると考える。また、突合せ溶接においても多様なギャップ状態に対応できるよう溶接条件のテーブルを拡大する必要がある。

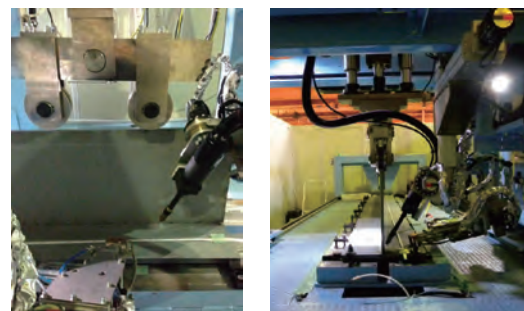


写真16 すみ肉溶接における押さえ装置と溶接ヘッド

また、今回実験で使用した装置は開先を倣う機能を有しておらず、備え付けられているCCDカメラでモニタリングしながら溶接部が開先中心を狙うように数点ティーチングしている。実施工に適用する場合、この方法では仮付けからティーチングまでに多くの時間を要し、レーザ・アークハイブリッド溶接のメリットである高速溶接性を生かすことができない。装置に搭載されているカメラで開先を検知し、リアルタイムで溶接条件をコントロールできるシステムが構築されれば、さらに高品質、高速度な溶接が実現できると考えている。

6. 結言

船舶建造工程においてレーザ・アークハイブリッド溶接を適用する場合、最も考えられる適用箇所は、単板工法におけるロンジ先付け工程及び片面サブマージアーク溶接による板継工程だと思われる。この工程はブロック建造における上流であるため、後工程への精度確保を求められる上、溶接量も群を抜いて多い。現状のアーク溶接からレーザ・アークハイブリッド溶接へ転向した場合、写真17のように溶け込み形状が変化する。

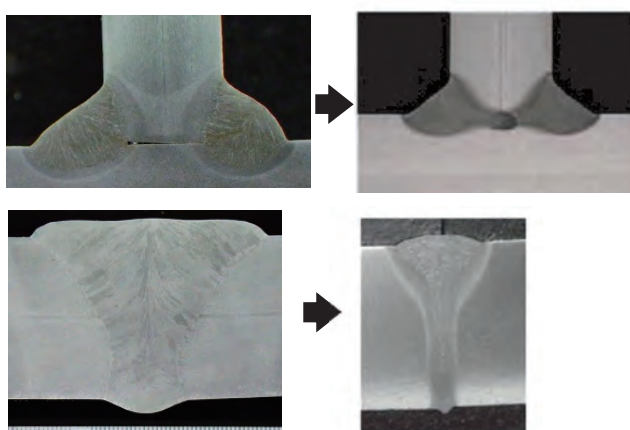


写真17 現状のビード形状とレーザ・アークハイブリッド溶接によるビード形状の比較

弊社におけるロンジ先付工程は 20 電極高速すみ肉溶接装置を適用しており、溶接完了後に加圧式の矯正機で溶接による熱歪みを矯正している。指示脚長は 4 mm~8 mmであるが、レーザ・アークハイブリッド溶接により、完全溶け込み溶接が実現できれば、規定脚長を小さくすることができ、結果として矯正機を必要としない歪みの少ない溶接が可能となる。また単板工法の板継工程においては弊社のみならず、国内造船所の多くが RF 法や FCB 法といったサブマージアーク溶接を採用している。サブマージアーク溶接は高速溶接が可能な反面、非常に大きな入熱となり、鋼板の劣化や大きな熱歪みが問題となっている。これをレーザ・アークハイブリッド溶接へ置き換えた場合、写真 17 のように非常に少ない溶着量による溶接が可能になり、歪みが少なく鋼板への熱影響範囲も少ない高品質な溶接が実現できる。

一般商船に適用される厚板鋼板に対するレーザ溶接技術は現時点では課題も多いが、造船所に適用するにあたり、期待できるメリットも数多くある。本研究を契機として、船舶建造工程の課題である高品質化・効率化を達成する技術として浸透していくことが期待される。

謝辞

本研究は、(一財)日本船舶技術研究協会において、日本財団助成事業として 2012~2013 年度に実施された「船舶建造高品質化・高効率化の調査研究(レーザ溶接技術の調査研究)」の研究成果の一部であり、研究助成を頂きました日本財団及び、本内容の公表を許可頂きました関係各位に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 古賀宏志, 郷田徳積, 他: レーザ・アークハイブリッド溶接の初的一般商船への適用 三菱重工技法 Vol.147 No. 3 (2010), pp. 86-91