製造を支える技術の紹介

株式会社名村造船所

船体平行部板継ぎ工程への レーザ・アークハイブリッド溶接導入に向けた諸検討

内野　一成*
Uchino Issei

レーザ・アークハイブリッド溶接（以下ハイブリッド溶接と称する）とは，レーザ溶接とアーク溶接を組み合わせた溶接技術であり，溶接後の熱変形が小さく，溶接の高速度化が図れることから次世代の溶接法として期待されている．客船や艦艇等を主力とする欧州造船所では実船への適用が公知のものとなっているが，商船を主力とする国内造船所における適用事例はごく僅かである．その理由として商船の船体構造に用いられる比較的厚板に対する適用方法が確立していないこと，ハイブリッド溶接を適用するために高精度の開先を準備しなければならないことが挙げられ，造船へのハイブリッド溶接適用を見据えた研究事例が少ないことが背景にある．これを踏まえて，船体建造工程へハイブリッド溶接を適用するための課題を抽出し，導入を見据えた各種検討を行った．数年に亘る研究は九州大学の博士後期課程生として実施しており，その内容は卒業論文として，また溶接学会への寄稿論文として纏めているため，実験のプロセス，詳細の溶接条件等はそちらを参照頂きたい．本書では研究成果に関する論述は概略のみとし，ハイブリッド溶接の歴史や造船所での適用事例，ハイブリッド溶接が期待される理由などを論じた上で，造船所の一技術者として客観的にハイブリッド溶接を鑑みた将来像を括りとする．

1．緒言

ハイブリッド溶接はレーザとアークを組み合わせる溶接方法であり，それぞれの欠点を補う方法として期待されている．アークとは通電した電極間に発生する高温を伴う放電現象を指し，アーク熱を利用するアーク溶接法は1900年頃から使用されている．その長い歴史の中で蓄積された膨大な研究結果と技術的経験により，様々な工業発展に寄与した技術である．その特徴として比較的安価な装置によって接合ができ，接合する開先，溶接姿勢，設定する溶接条件の裕度も広く，自由度の高い施工をすることができる[1]．

一方，レーザ溶接は1970年頃から研究が始まった比較的新しい溶接技術であり，集光した熱源を用いることで局所的に高エネルギーを付与することができる．熱伝導型のアーク溶接に比べれば，相対的に入熱が低減され，熱変形を抑制できるほか，溶接による溶込みは狭く深い形状となり，高速溶接性にも優れている．しかし，厚板を溶接するためには大出力のレーザを要し，装置コスト面で不利になるだけでなく，気孔欠陥や余盛り不足といったレーザ溶接特有の欠陥が生じやすいとされている[2]．

このレーザ溶接の欠点を補うために，アーク熱源を加えた技術がハイブリッド溶接である．ハイブリッド溶接の始まりは1980年頃のCO2レーザとTIG溶接を組み合わせたSteen（英）らの研究が最初とされているが，世界的に注目されたのは1994年Bayer（独）らの研究発表以降であり，その後欧州を中心として盛んに研究が行われている[3]．最近ではレーザ発振器の大出力化・低価格化が進んでいることで国内の研究事例や実適用事例の報告が増えてきており，幅広い工業分野で注目されている新技術である．

原稿受理日：July 31, 2021
*株式会社名村造船所　船舶海洋事業部　生産管理部　生産技術課

2．造船におけるハイブリッド溶接適用事例

造船分野におけるハイブリッド溶接の適用事例を第1表に示す[4)5)6)]．ハイブリッド溶接は艦艇や客船を主力とする海外造船所がいち早く導入しており，1990年代から実船への適用が進められている．特にドイツのMeyer Werftでは1995年頃にレーザ溶接によるサンドイッチパネル製作を開始して以降，積極的な設備投資を進め，造船所におけるレーザ溶接およびハイブリッド溶接技術を牽引している．

第1表　造船所のハイブリッド溶接適用事例

造船所	国	適用年	船型
Meyer Werft	ドイツ	1995年	客船
Fincantieri	イタリア	1996年	客船
Blohm + Voss	ドイツ	1990年代後半	艦艇
Odense steel shipyard	デンマーク	2000年	コンテナ船
Aker yards	フィンランド	2006年	客船
三菱重工業	日本	2010年	商船
三井造船	日本	2015年	巡視船

同社では船体建造工程の上流に位置するパネルライン（船体平行部ブロックの板継ぎおよびロンジと呼ばれる縦通補強材を取り付ける工程）に，12kWのCO2レーザ発振器を有するハイブリッド溶接ラインを備えており，20m四方のパネル製作を行っている．またハイブリッド溶接による突合せ継手の開先はミーリング装置を用いた機械加工を施しており，大型のクランプ装置で密着固定した状態で溶接をしている．このように莫大な資金を投じてでもハイブリッド溶接を導入した理由は，客船を主力とし，薄板における熱変形の抑制を課題とする欧州造船所特有の背景があったと考えられる[7)]．

一方，国内造船所のハイブリッド溶接適用事例を見ると2010年の三菱重工業による一般商船への適用，2016年の三井造船による大型巡視船への適用が公知となっているが，先に述べたMeyer Werftと比較すると以下のような違いが見受けられる．

- 開先には機械加工を用いずにレーザ切断を適用
- 工作中の防錆を目的とした一次防錆塗料を塗布したままの鋼板を溶接
- 溶接中の継手固定にはクランプ装置等は用いずにタック溶接（仮付け溶接）を行う
- 大型のガーダ機構を有する装置は用いずに可搬が容易な自走式台車にハイブリッド装置を保持させて溶接する

このように莫大な設備投資を行って溶接環境を整える海外造船所とは違い，既存の設備，施工要領を活かしながらコスト競争力を極限まで高める思想が国内造船所のハイブリッド溶接適用方針の特徴とも言える．

3．研究のターゲット

前述の通り，一部の造船所ではハイブリッド溶接を用いた船体建造を行っているが，特にタンカーやバルクキャリア等の一般商船を主力とするアジア圏の造船所は，ほぼ全てアーク溶接を適用していると言っても過言ではない．アーク溶接は扱いが容易であることが何よりのメリットであるが，一方で溶接入熱によって変形が生じ，ブロックの精度不良を招くだけでなく，写真1に示すような“歪取り”と呼ばれる修正作業による作業時間の増加や，写真2に例示するように，溶接変形の結果，開先の取合いに不整が生じるため，直交する後工程の溶接において中断を余儀なくされ，補修溶接を必要とする場合も多々ある．溶接変形に関連する工作精度不良問題は造船技術者にとって永遠の課題として認識されている．

写真1　熱変形の修正（歪取り）

写真2　前工程の熱変形によって中断した箇所

従って，従来のアーク溶接と比較して溶接変形が格段に少ないハイブリッド溶接を船体建造工程に適用できるとなれば，ハイブリッド溶接の利点の一つである高速溶接施工による溶接作業自体の能率向上だけでなく，溶接変形の低

減による修正作業，開先精度改善の結果としての後工程の作業性向上など大きなメリットを享受できることになる．

すなわちハイブリッド溶接を適用する場合，建造工程上流に位置するほど溶接変形低減という恩恵を受けることができることを背景に，本研究のターゲットとしてパネルラインの板継ぎ溶接を施工している高速多電極サブマージアーク溶接装置に置き換えることを前提とした突合せ継手を対象に研究を行うこととした．国内造船所のほとんどが平行部板継ぎに採用している高速多電極サブマージアーク溶接装置外観を写真３に示す．

写真３　高速多電極サブマージアーク溶接装置

置き換えを検討する対象の施工法は船体構造に用いられる板厚であれば１パスで施工が可能という高能率な側面を持つ一方で，溶接入熱が高い故に，生じる熱変形も大きい．実際に生じている溶接終端部の変形の一例を写真４に示す．上甲板や船側外板など船体平行部板継ぎの大部分を施工する本工法をハイブリッド溶接に置き換えることができれば，熱変形低減によるメリットは計り知れないものがあると期待される．

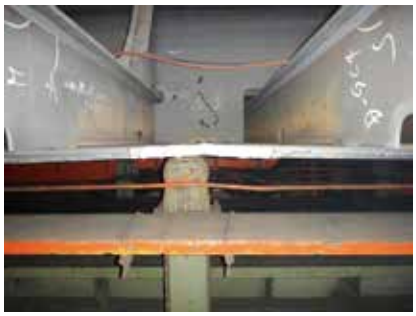


写真４　サブマージアーク溶接終端部に生じる変形

また，レーザ光を用いるハイブリッド溶接を生産現場に導入する場合，作業場所を限定し，衝立等の保護策を設けなければならない安全に関する課題もある．本研究の対象としたパネルラインは既にコンベアライン等が設置され，独立したレイアウトとなっており，導入コストや安全対策の容易さを考慮しても，より実現性の高い施工場所である．本工法への置き換えを前提として研究ターゲットを以下で設定した．

- 機械加工やレーザ切断といった高精度な開先加工方法を用いずに造船所で一般的に適用されるプラズマ切断によって加工した開先においても良好な継手が製作できる条件，施工法を検討する
- 開先裕度として既存のサブマージアーク溶接でも許容できる 3mm 程度のルートギャップ変動に対応できる高裕度な条件を目指す
- 一般商船の船体平行部に多く用いられる板厚20mm程度までの施工条件を検討する

４．実験装置

本研究は九州大学のハイブリッド溶接装置にて実施している．装置の概要を以下に示す．

レーザ熱源にはファイバーレーザ発振器（IPG フォトニクス：YLS-20000-S2）を用いており，最大出力 20kW のレーザを発振可能である．ファイバーレーザは発振効率が高く，高品質なビーム品質を得られることに加えて，光ファイバーで伝送することができるため，出力装置の自由度が高く，レーザ加工技術としても広く採用され始めている[8)9)]．レーザ発振器およびレーザヘッドは発熱するため，冷却装置（オリオン：RKE18000A-VW）が併設されている．レーザ発振器と冷却装置の外観を写真５，写真６に示す．

アーク電源にはデジタルインバータ制御の溶接機（ダイヘン：WB-P500L）を用いており，レーザヘッドおよびアークトーチの動作のため多関節型マニピュレータ（安川電機：MH80Ⅱ）に保持させた形である．マニピュレータ先端に取り付けられた CCTV カメラによって溶接位置をティーチングしている．装置外観を写真７に示す．

写真５　ファイバーレーザ発振器外観

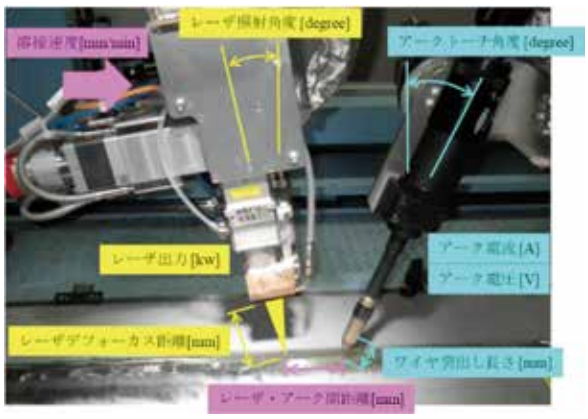
写真６　冷却装置外観

写真７　レーザヘッドおよびアークトーチ

５．研究成果

５．１　開先充填材と裏当て材を用いた施工法の検討

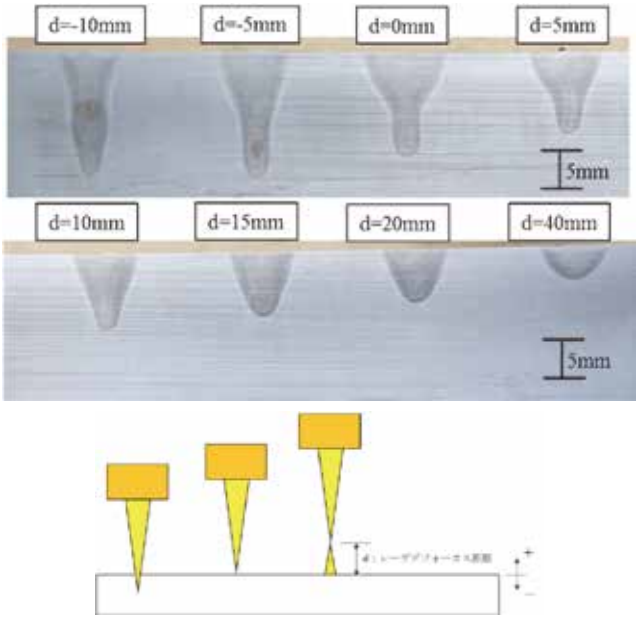
ハイブリッド溶接は第１図に示すようにレーザ溶接の設定条件とアーク溶接の設定条件，また両者を組み合わせることによる設定条件が複雑に絡み合うため，被溶接体の状態に対応する適正条件の導出は困難を極める．



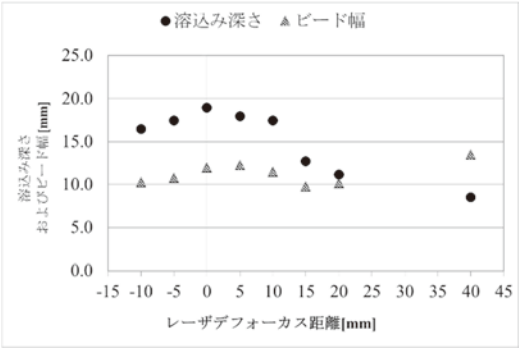
第１図　ハイブリッド溶接　溶接条件組み合わせ

本研究の最終到達目標は造船所で一般的に適用されているプラズマ切断によって加工された開先に対して高い裕度をもつ条件を確立することが目的であるが，まずはビードオンプレート溶接によって，それぞれの溶接条件がどのように溶込み形状に影響を与えるのか調査することとした．

様々な条件でビードオンプレート溶接を繰り返すことで，レーザ出力が溶込み深さ（ある板厚を貫通させるための適正条件）の主たる要素となること，溶接方向に対してアーク溶接を先行させた方が溶融幅の広い溶込みとなること等，多くの知見を得たが，高裕度条件の確立を目的とした本研究においてはレーザデフォーカス距離の影響に注目した．レーザデフォーカス距離とはレーザヘッドのレンズによって集光された焦点と母材表面との距離を意味している．他の条件を固定値として，デフォーカス距離のみを可変させた場合の溶込み形状の変化を第２図および第３図に示す．



第２図　溶込み形状（レーザデフォーカス距離可変）



第３図　デフォーカス距離可変による溶込み形状変化

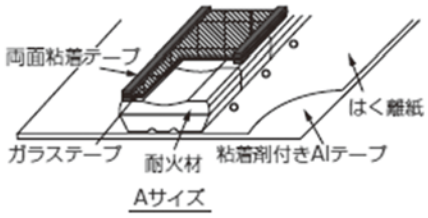
通常，ハイブリッド溶接はレーザ光によってキーホール（溶融池の先端で熱源が母材裏側へ貫通して形成される円孔）を形成する思想が一般的であるため，レーザ出力をロス無く利用できるよう，フォーカス位置を母材表面近傍に位置させることが多い．本実験においてもデフォーカス距

離が 0mm，すなわち焦点位置と母材表面が一致したレーザ配置で溶込み深さが極大となった．しかし，第3図で注目したのは，デフォーカス距離-10mm から 10mm の範囲において，溶込み深さとビード幅の増減が似た傾向を示すのに対し，デフォーカス距離が 15mm を超えてくると溶込み深さが減少する一方で，ビード幅が増加する傾向である．デフォーカス距離を大きくすることでエネルギー密度が低下するため，溶込み深さが減少することは当然であるが，キーホールを形成するハイブリッド溶接とは異なる思想で，高裕度な条件を設定できるのではないかと考察した．

一方，実際の船舶建造工程では時に 20m を超える長尺な突合せ継手となることもあり，開先加工時の切断誤差や熱変形の結果としてルートギャップ（開先の隙間）が設計値から変動する場合がある．ルートギャップ変動のある継手に対してハイブリッド溶接を適用する場合，レーザ光が被溶接体に吸収されずにそのまま通過する可能性，あるいはアーク溶接のワイヤ径よりも大きな隙間が空き，溶接開始時にアークを発生することが難しくなることも懸念される．そこで前述のレーザデフォーカス距離を大きくすることで，広い溶融幅を持たせる思想に加えて，過大ギャップ部分に写真8に示すようなメタルパウダーと呼ばれる鉄粉状の開先充填材を充填させる新しい工法を検討した．

写真8　メタルパウダー

メタルパウダーは細かい粒状であることから，ギャップを有する継手に対して充填するためには，裏側の抑えが必要となる．また溶接時のビード形状を保持する効果も期待し，造船所においても片面溶接時に用いられるセラミック製の裏当て材を裏側に貼り付けることとした．様々な裏当て材を用いて実験した結果，第4図に示すようなガラステープ付きのタイプでなければ良好な裏ビードを得られないことも明らかとなった．



第4図　ガラステープ付き裏当て材概略図[10)]

造船所で多用しているフラックス入りワイヤは，ワイヤ中のフラックスがスラグとなり，溶接金属を保持する役割があるが，ソリッドワイヤ（中空でない断面同質のワイヤ）を用いる場合，スラグが生成されないため，セラミックのみの裏当て材では良好な裏ビードが形成できない．そこで適用されるのがガラステープ付き裏当て材である．本研究は過去からの検討事例で多かったソリッドワイヤを中心に実験していたことから，溶接時にガラステープが溶融し，スラグを発生させるガラステープ付きのタイプと相性が良かったと言える．造船所で一般的に使用されるセラミック製裏当て材を用いた場合の裏ビード外観を写真9に，ガラステープ付き裏当て材を用いた場合を写真 10 に示す．ガラステープ付きを用いることで止端が滑らかで美麗な裏ビードを形成できていることが確認できる．

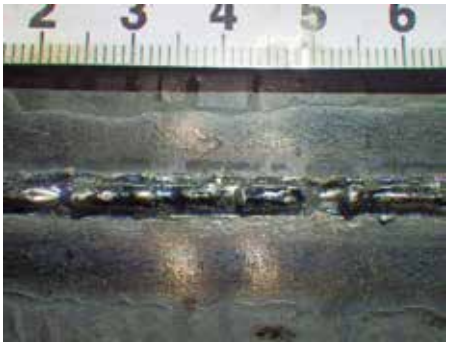


写真9　セラミック製裏当て材を用いた裏ビード外観

写真10　ガラステープ付裏当て材を用いた裏ビード外観

本工法を用いて，プラズマ切断によって開先加工した板厚16mm，ギャップ1.5mmの突合せ継手に対して溶接を行ったところ，写真11のように良好なマクロ断面を得られた．

写真11　板厚16mm／ギャップ1.5mm溶接体の断面

従来報告されているハイブリッド溶接における突合せ溶接は非常に高精度な開先を用いたものであり，許容ギャップは0.5mm程度に抑えられているものが多い．メタルパウダーとガラステープ付き裏当て材という補助材料を用いて，レーザデフォーカス距離の調整により溶融幅の広い溶込みを作り出すことで過大ギャップに対する施工の可能性を示すことができた．

5．2　Λ形開先を用いた施工法の検討

前述のメタルパウダーと裏当て材を用いた工法によって高裕度な施工の可能性が示唆されたが，これには避けられない欠点がある．一点目は，デフォーカス距離を大きくする結果，レーザ出力を有効に利用できないという点である．仮に20m程度の溶接長に対して，一様なルートギャップを有する継手として施工できるのであれば本工法は有効である．しかし，実際の継手では，開先加工時の切断誤差に起因してルートギャップの変動が生じ，特にギャップが狭い箇所にはレーザ出力を大きくしなければ板厚を貫通できないと懸念される．また必要なレーザ出力が大きくなれば，より高出力のレーザ発振器を導入する必要があるため，必然的に装置導入コストが高くなってしまう．

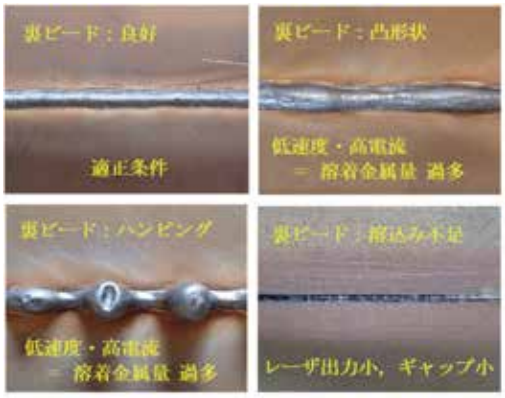
二点目は，ルートギャップ調整，裏当て材貼付，メタルパウダー充填等の付帯作業が多いという点である．本研究のターゲットとしている船体平行部パネル板継ぎラインは，一日に十数本もの継手を溶接する屈指の溶接量を誇る工程であり，これらの付帯作業は能率の低下を招いてしまう．特に溶接長20m，幅4mにもなる大型の鋼板を所定のルートギャップに調整する作業は時間を要するため，切断した鋼板を単純に加圧した状態で仮付けし，溶接するという施工法が望ましい．

従来のハイブリッド適用事例の多くは開先を真っ直ぐに切断するＩ形の開先が用いられていたこともあり，本研究もＩ形開先を前提に進めていた．しかし，プラズマ切断によって加工された開先は，切断の誤差により直線上の開先に仕上がらず，仮付け状態において開先の表側あるいは裏側に若干の隙間を有する試験体が出来ていた．当初，意図していない隙間に対しても高裕度な条件を確立することを目的としていたが，これらの試験体を溶接する内に，裏側に隙間を有している試験体の方が良好な裏ビードを得やすい傾向があることを体感的にわかってきた．

そこでNCプラズマ切断機により微小な切断角度を設定し，溶接表側から一回で切断することができるΛ形の開先（溶接裏面の開先が開いた逆形のＶ形開先）を設けることとした．切断角度は切断機の設定情報として板厚15mmの場合は3°，板厚20mmの場合は2°とした．実際に切断した15mmの供試材を突合わせた断面を写真12に示す．

写真12　板厚15mm　Λ形開先の断面

裏側に隙間を有するΛ形開先に対する溶接を行うと溶接条件によって裏ビードの外観に第5図のような変化が見られた．

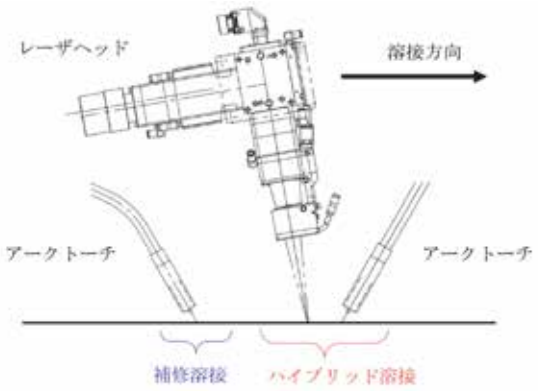


第5図　溶接条件による裏ビード外観の変化

裏ビード外観が良好となる溶接条件として，裏側に 1.0～1.5㎜ の開きを有し，比較的アーク電流が低く溶接速度が早い，すなわち溶着金属量が少ないことが有効であることが明らかとなった．開先をΛ形とすることで裏面に空間ができ，また溶着金属量を減少させることで凸形状，あるいはハンピングを呈する余剰の金属が減少する結果，良好な裏ビードを得るのだと考えられる．しかし，空間を有する開先に対して溶着金属量を少なくするということは写真 13 に示すような表ビードの余盛り不足を招くことが弊害であった．

写真 13　表ビードの余盛り不足

一方で，表ビードの余盛り不足は第 6 図のように，ハイブリッド溶接後方に補修用のアーク溶接トーチを設置すれば簡単に対処できると考え，本研究ではハイブリッド溶接完了後，ハイブリッド溶接と同じ速度に設定したアーク溶接で補修することとした．



第 6 図　将来的な溶接装置構想

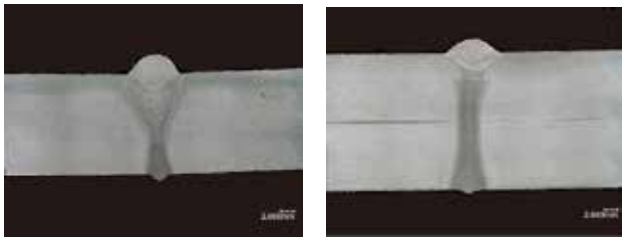
導出した条件を用いて，板厚 15㎜（鋼種：AH32）および 20㎜（鋼種：AH36），溶接長 1,000㎜ の継手に対してハイブリッド溶接を施工し，炭酸ガスアーク溶接にて表ビードの補修をした後に継手性能評価試験を行った．得られたビード外観を写真 14 および写真 15 に，マクロ断面を写真 16 に，継手性能の概略を第 2 表に示す．

(a) 表ビード　　(b) 裏ビード

写真 14　板厚 15㎜／溶接長 1,000㎜ 試験体の外観

(a) 表ビード　　(b) 裏ビード

写真 15　板厚 20㎜／溶接長 1,000㎜ 試験体の外観



(a) 板厚 15㎜　　(b) 板厚 20㎜

写真 16　溶接長 1,000㎜ 試験体のマクロ断面

第 2 表　継手性能評価試験の概略

	TP No.	鋼種	板厚	溶接姿勢	溶接材料
試験詳細	TP-1	AH32	15㎜	下向	MG-50
	TP-2	AH36	20㎜	下向	MG-50

非破壊検査	TP No.	外観検査	超音波探傷試験 (PT)	放射線透過試験 (RT)
	TP-1	合格	始終端部に欠陥有り	始端部に欠陥有り
	TP-2	合格	終端部に欠陥有り	欠陥有り

		TP No.	試験片No.	規格値・判定基準	結果
機械試験	引張試験	TP-1	1T1	引張強さ≧440N/mm2	558 N/mm2
			1T2		556 N/mm2
		TP-2	2T1	引張強さ≧490N/mm3	590 N/mm2
			2T2		588 N/mm2
	曲げ試験	TP-1	1B1～4	有害な欠陥がないこと	欠陥無し
		TP-2	2B1～4		融合不良による割れ ⇒ 予備材から採取した再試験にて合格
	硬さ試験	TP-1	1H	ビッカース硬さ≦350HV	170～295 HV
		TP-2	2H		182～285 HV
	衝撃試験	TP-1	1A	試験温度0℃※にて最小平均吸収エネルギー≧23J ※規則上は20℃	Ave. 89 J
			1B		Ave. 40 J
			1C		Ave. 35 J
		TP-2	2A		Ave. 63 J
			2B		Ave. 49 J
			2C		Ave. 30 J

プラズマ切断によって加工した開先は精度が悪く，仮付け状態で試験体中央のギャップが開き，始終端が閉じた形状となっていた．本実験では試験体の開先変動に対する条件の調整は行っておらず，同一条件にて施工をしていたこともあり，特に始終端には融合不良と思われる欠陥が内在していたが，強度やじん性といった継手性能は実船に適用するために必要となる船級協会のガイドラインの規格値を満足する結果が得られ，本工法の妥当性を評価することができた．

6．結言

船体平行部の板継ぎを施工するサブマージアーク溶接からハイブリッド溶接に置き換えることで，板継ぎの溶接工数削減だけでなく，熱変形を低減でき，後工程のブロック精度向上などによって多大なメリットが期待される．しかし，国内造船所の多くが建造する一般商船は板厚が厚いだけでなく，ガス切断やプラズマ切断といった溶断設備が主であることから時に20mを超える溶接線に対して一様な開先を維持することが難しい．より高裕度で安定した施工を実現するために，メタルパウダーとガラステープ付き裏当て材を用いた新工法，裏ビードを安定化させるため，開先形状に着目した研究に取り組んだが，現時点ですぐに船舶建造工程に適用出来る施工法になったとは言い難いのが現状である．しかし一方で，レーザ発振器自体も価格が下がってきていることから，従来に比べれば高精度なレーザ切断機を導入しやすくなっており，また画像認識やレーザセンサを用いて変動する開先を認知し，インプロセスで条件を調整する技術も続々と開発され始めている[11) 12)]．

造船は長い歴史の中で，木造船から鋼船に変わることで船体の大型化が進み，リベット接合からアーク溶接に工作法が移り変わり，ブロック建造法が考案されたことで生産性の向上を遂げた．しかし，そこから半世紀以上は，建造工程を覆すような大きな技術革新はなく，良く言えば成熟した，悪く言えば成長の乏しい産業となっている．

AI・IoT・DX ・・・ 日々進化するデジタル技術と溶接技術が組み合わさることで，近い将来にアーク溶接からハイブリッド溶接へ，生産工程のブレイクスルーをこの目で見届けたいと切に願っていると同時に，当社が新技術の先陣を切れるよう準備していく所存である．

最後に

本研究は九州大学 後藤浩二 教授の御指導の下に行われたものであります．御指導，ご助言を賜りましたことに深謝申し上げます．

また社会人でありながらも大学での研究という活動を支えて頂いた上司・同僚の各位には感謝の念に堪えません．

仕事と研究の両立という苦労もありましたが，数年間の社会人博士としての研究活動は通常の業務では味わえない多くの経験をもたらしてくれました．技術者として研鑽できる環境を与えられたことに感謝し，更に後進の技術者が育っていくことを祈念しております．

参考文献

1) 手塚敬三 ：溶接のおはなし，日本規格協会 1981

2) 川口勲：レーザ・アークハイブリッド溶接技術の現状と今後の課題，IIC REVIEW No.42,2009

3) 片山聖二：レーザ・アークハイブリッド溶接はどう進んでいるか，溶接技術 Vol.56，2008

4) Flemming Ove Olsen： Hybrid laser arc welding, Woodhead publishing in materials，2009

5) 古賀宏志ら：レーザ・アークハイブリッド溶接の初の一般商船への適用，三菱重工技報Vol.47 No.3，2010

6) 木村陵介ら：レーザ・アークハイブリッド溶接の海上保安庁向け大型巡視船への適用，三井造船技報 No.216，2016

7) R. Moeller, S. Koczera：”Shipyard uses laser-GMAW hybrid welding to achieve one-sided welding - New system reforms prefabrication in shipbuilding” the fabricator, November 20, 2003, https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/arcwelding/shipyard-uses-laser-gmaw-hybrid-welding-to-achieve-one-sided-welding (accessed on 8 July 2021).

8) 宮本勇：ファイバーレーザの応用，溶接学会誌 Vol.72 No.8，2003

9) 辻正和：高出力・高ビーム品質ファイバーレーザの特徴と応用例，レーザ研究 33 (Supplement)，2005

10) 神戸製鋼所：神鋼溶接綜合カタログ- 溶接材料・システム ，https://www.kobelco.co.jp/welding/catalog/

11) 門屋輝慶：インプロセスでのレーザ溶接溶け込み深さ計測技術，溶接学会誌Vol.84 No.3，2015

12) 山根敏：画像処理による溶接線倣い制御技術，溶接学会誌 Vol.84 No.4，2015