

# 溶接・接合技術がもたらす造船建造のブレークスルー

Breakthrough of Shipbuilding Brought by Joining and Welding Technology

大阪大学 接合科学研究所 中田 一博

古い話になるが第2次世界大戦末期にアメリカは、リスク覚悟で当時はまだ新しく開発中の接合技術だった電気溶接、今のアーク溶接を造船建造に積極的に導入し、建造期間の大幅な短縮と大量建造を可能にした。一方、わが国では、アーク溶接の利点は認めながらもリスクを担保する考え方がなく、以前からのリベット接合にこだわった。新しい技術はその揺籃期には色々の問題点を抱えているのが常であり、リスクを取ってその技術を実用技術に育てるかどうかの判断には、戦略的な思考が必要とされよう。

造船は労働集約型の代表的な業種であり、特にその組み立てにおける溶接工程（溶接前準備・後処理工程を含む）は、多くの作業者が長時間仕事に従事する所である。したがって、溶接工程における低コスト・高品質の生産技術開発は極めて重要である。

この観点において今日までのわが国におけるアーク溶接技術の目覚ましい進歩・発展は、造船大国日本を支えたまさに基幹技術といえる。現在も国際競争力を維持するためにアーク溶接の自動化、ロボット化を通じた省人化、低コスト化、工期短縮化等に日々努力が払われている。一方、溶接・接合技術として広い視野で世界を見ると、アーク溶接を凌ぐ能力を有する新しい溶接・接合法が出現している。

本稿では、溶接・接合技術における新しいプロセスとして摩擦攪拌接合法とレーザー/アークハイブリッド溶接法を取り上げ、造船建造への最新の適用例とその効果について、現状技術であるアーク溶接法と比較して紹介する。

## 1. レーザ/アークハイブリッド溶接技術の適用

既存の造船溶接の主力であるアーク溶接は、電気の放電のエネルギーを利用して鉄板と溶接棒との間で温度が2万℃にも達する高温のプラズマガスを作り、この熱で鉄板と溶接棒・ワイヤを共に溶かして接合する方法である。

一方、新しい熱源として注目されてきたのが、レーザービームを用いるレーザー溶接である。レーザービームは電磁波であり、その波長によって特性は全く異なるが、一般に波長が長い赤外領域のレーザービーム（炭酸ガスレーザー：波長10.6 $\mu\text{m}$ 、ヤグレーザ：波長1.06 $\mu\text{m}$ ）は、金属に照射されるとそのエネルギーが熱エネルギーに変化して金属を溶かすことができる。もちろん金属を溶かすためにはそれなりのエネルギーが必要であり、通常は数kW以上である。

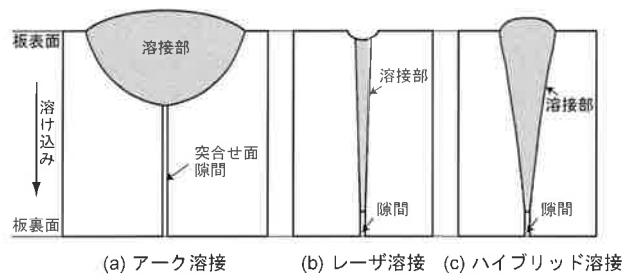


図1 溶接部断面の溶け込み形状の比較模式図

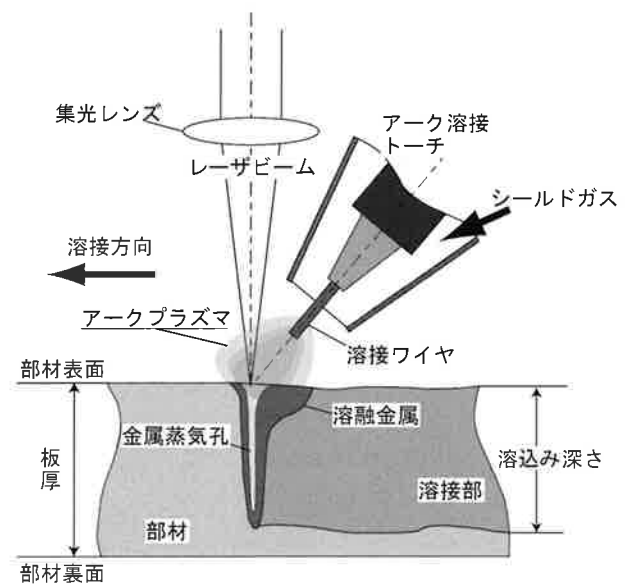
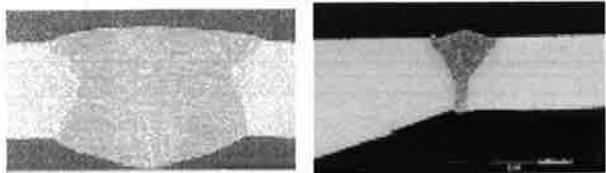


図2 レーザ/アークハイブリッド溶接原理図

レーザービームはレンズにより細く絞られており、直径は0.5~1mmであり、これに対してアーク溶接ではプラズマ熱源の直径は10~15mmである。したがって、単位面積あたりのエネルギーはアーク溶接の100倍以上の強力なものとなり、融点が約1500℃の鉄であってもレーザー照射部は瞬時に溶融する。また、その中心部はさらに蒸発して、ビーム径相当の穴が板表面から板厚内部まで一定の深さまで貫通して開く（図2参照）。このため図1に示すようにレーザー溶接では溶融幅が狭く、かつ深溶け込みの溶接部が得られる。このような特徴により、溶接変形が小さく、溶接速度を高速化できる長所があり各方面で使用されている。

しかし、欠点として、溶接する板を突き合わせたときに、その接合面に隙間があるとそこからビームが板裏まで抜けてしまい、板をうまく溶かすことができなくなる。このた



(a) アーク溶接 (b) ハイブリッド溶接

図3 アーク溶接とハイブリッド溶接部断面溶け込み形状の比較  
(文献1より編集)

め突合せ部の隙間はビーム径よりも小さく、0.3~0.5mm程度以下にしなければならない。実際の船殻ブロックでは溶接長が10~20mにも及ぶために、このような制御は現実的には困難であり、大型部材への適用は制限されてきた。

この技術的課題のブレークスルーがハイブリッド溶接と呼ばれるものであり、図2はその原理図を示す。アーク溶接では突合せ部で2mm程度の隙間が開いていても問題なく溶接が可能であることから、アーク溶接中に同時にレーザービームを照射しながら溶接を行う方法である。レーザー溶接特有の深い溶け込みを維持しつつ、かつアーク溶接による隙間充填効果を利用する。溶接速度はレーザー単独の場合よりも遅くなるが、アーク溶接の3倍程度の高速化は可能である。図3<sup>1)</sup>はアーク溶接とハイブリッド溶接部の断面形状の比較であり、アーク溶接では板厚を完全に溶かすために板の表と裏の両面からそれぞれ1回ずつの溶接を行っているが、ハイブリッド溶接では表からの1回の溶接で板裏まで達している。また全体に溶接入熱が少ないために溶融部の幅が狭く、溶接部材の変形も小さくなる。ドイツのMEYER WERFT社ではこのような特徴を生かして実際の船殻溶接に適用している。図4<sup>2)</sup>はその適用例で、ハイブリッド溶接により工場内で製作した薄板軽量パネルを用いた画期的な造船工作を行い、工期短縮、コスト削減、さらに船体の軽量化に成功している。

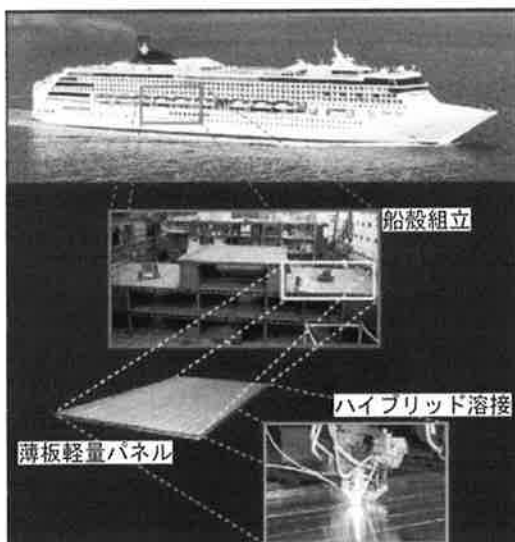


図4 ハイブリッド溶接の適用例  
(MEYER WERFT社(ドイツ)ホームページより)

## 2. アルミ船への摩擦攪拌接合技術の適用

巡航速度の高速化や燃費向上の観点から、造船においても船体の軽量化が積極的に図られるようになり、船体構造材料として鉄に代わってアルミ合金が使用されるようになってきた。アルミ合金の溶接もアーク溶接が主体であるが、特に酸化され易いため溶接が難しく、熟練溶接作業者の存在が欠かせない。また熱膨張係数が大きいために溶接変形が鉄の場合よりもさらに大きい欠点がある。

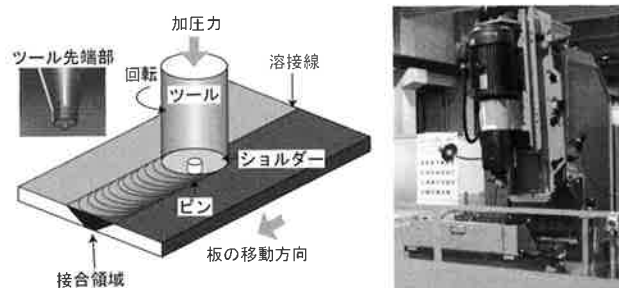
摩擦攪拌接合法は英語の略称でFSW<sup>3,4)</sup>とも呼ばれるが、1990年代当初にイギリスで開発された全く新しい接合法である。現在はアルミ合金構造物の最先端の接合法として実用化が進められており、わが国でも鉄道車両に実用化されている。船舶への適用はEUを中心に実用化されており、すでに多くの実績がある。わが国ではアルミ船への需要が少ないこともあり、これまで実用化例は限定されていた。

しかし本誌<sup>5)</sup>にも紹介された図5に示す超高速船テクノスーパーライナーOGASAWARAにおいて、その上部構造の組み立てに初めて本格的にこの摩擦攪拌接合法が取り入れられた。



図5 スーパーライナー OGASAWARA 模式図(三井造船(株)提供)

図6は摩擦攪拌接合法の原理図と著者研究室の装置外観を示す。鉄鋼製の棒の一端にピンと呼ばれるネジ付きの突起をもつツールを、毎分1000~2000回転で高速回転させながら2枚の板の突合せ面上に押しつけると、板とツールとの間で発生する摩擦熱によりアルミ板は軟化し、ピン



(a) FSW原理図

(b) FSW装置

図6 摩擦攪拌接合(FSW)の原理図及び装置外観  
(ヘッド固定、部材移動型)(著者研究室所有)

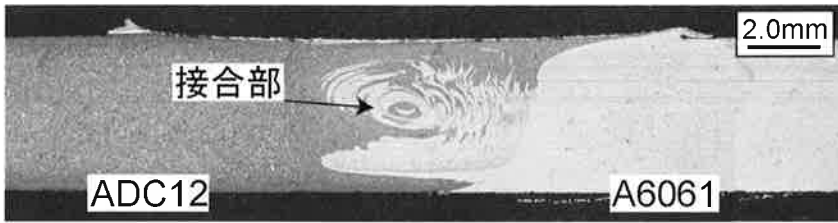


図7 摩擦攪拌接合部断面組織例

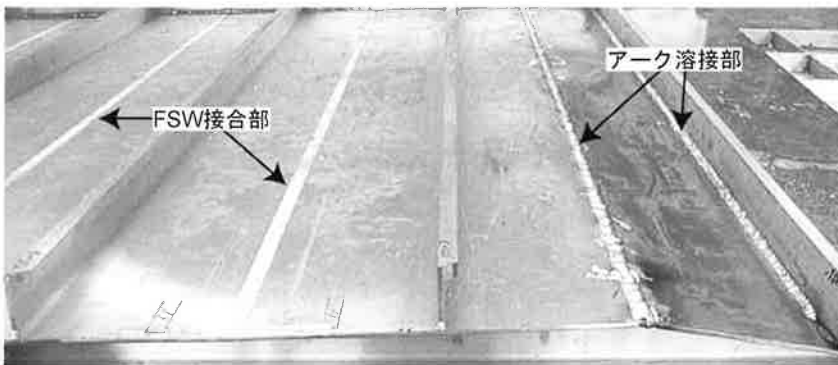


図8 アルミ合金押出型材接合パネルにおける摩擦攪拌接合部とアーク溶接部の比較 (三井造船 (株) 提供)

は板内部に挿入される。棒端（ショルダーと呼ばれる）が板表面に達すると摩擦発熱はさらに大きくなり、温度は400～500℃程度にまで上昇する。これによりアルミ合金は、例えば水飴のようにピンの周りを塑性流動するようになる。この段階でツールを突合せ面に沿って移動させると、2枚のアルミ板はお互いにピンの回転により攪拌混合されて、ピン通過後は完全に一体化して接合される。図7はこの攪拌状態を示す組織写真であり、異なる種類のアルミ合金の突合せ接合部断面を示すが、左右の合金が混ざり合ってタマネギを輪切りにしたような組織（オニオンリングと呼ばれる）を呈している。摩擦攪拌接合の特徴は、接合部は溶融しないことであり、アーク溶接と比べると入熱は格段に少なく、このため溶接変形はほとんど発生しない。また接合速度もアーク溶接と同等かむしろ速くなる。



図9 FSW接合パネル製隔壁 (三井造船 (株) 提供)

図8はアルミ合金の押出型材を、摩擦攪拌接合法で突合せ接合して製作したFSW接合パネルの接合部外観を示す。摩擦攪拌接合部とアーク溶接部を比較したものである。左側の白い部分が摩擦攪拌接合部であり、表面は滑らかで変形もほとんどないが、右側のアーク溶接部はその表面には余盛と呼ばれる盛り上がりができ、熱変形が発生している。図9は船室の側壁として組み付けられたFSW接合パネルであり、接合部表面が滑らかなためにそのままの状態を組み付けることができる。一方、アーク溶接では溶接後も変形・ひずみ矯正やグラインダーなどによる余盛部の削除などの手作業に頼らなければならない「後工程」が必要である。図10はFSW接合パネルを用いた上部構造の大組立状況であり、使用されたFSW接合パネルの摩擦攪拌接合部の総延長は約16kmに達している。

図11はテクノスーパーライナーOGASAWARA建造に用いられた大型摩擦攪拌接合装置外観であり、最大幅12m、

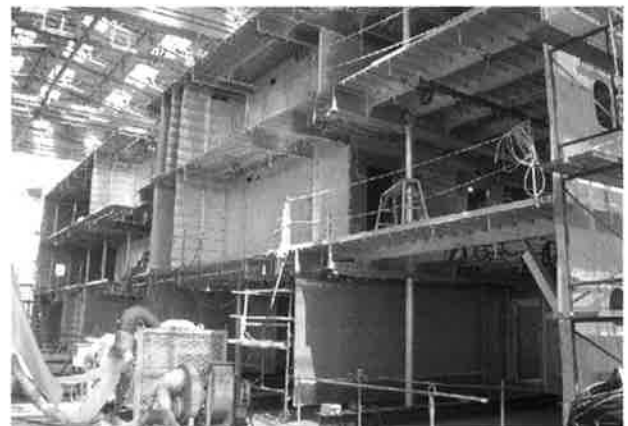


図10 FSW接合パネルを用いた上部構造の大組立状況 (三井造船 (株) 提供)

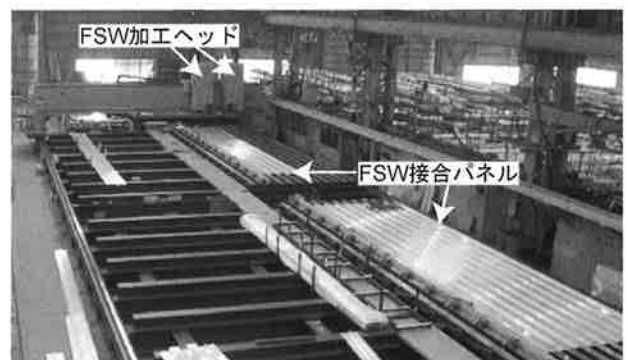


図11 ツインヘッド式大型摩擦攪拌接合装置 (ヘッド移動型) (三井造船 (株) 提供)

表1 アルミ合金製パネル製作におけるアーク溶接と摩擦攪拌接合のコスト比較 (三井造船(株)提供)

		アーク溶接に占める コスト比率	アーク溶接 (MIG)	摩擦攪拌接合 (FSW)
工費	溶接前処理	3.2%	1.00	0.00
	配材・仮付け	28.8%	1.00	0.50
	接合 (7-クタイム)	9.6%	1.00	0.88
	ビード整形・歪取り	49.6%	1.00	0.10
用役・材料		4.6%	1.00	0.41
消耗品		4.2%	1.00	1.19
合計		100%	1.00	0.35

長さ60mのパネルを製作できる。また2本の接合ヘッド(図6参照)により平行して2カ所の接合を同時に行うことで接合時間の短縮に大きく貢献した。また、摩擦攪拌接合装置は、基本的にフライス盤に類似した工作機械ととらえることができ、特殊技能は不要である。実際、女性オペレータもFSWパネル製造に携わった。さらにアーク溶接では、強烈な紫外線、熱、ヒュームと呼ばれる煙や、スパッタと呼ばれる飛散する小さな熔融金属粒から作業者を保護するために、作業者は保護マスクなどを含めた重装備を余儀なくされるが、摩擦攪拌接合ではそのような問題は一切なく、作業環境も極めてクリーンである。

表1はアーク溶接と摩擦攪拌接合とのコストを、アーク溶接を1として比較したものである。ほぼ全ての項目で摩擦攪拌接合は有利であり、全体としてアーク溶接のわずか35%のコストで済んでおり、実に65%のコスト削減となっている。また工期の大幅な短縮も可能であった。このように摩擦攪拌接合法の適用は、アルミ合金船建造の現場を一新できることを示している。

レーザ/アークハイブリッド溶接や摩擦攪拌接合ではいずれも装置コストが問題とされ、特にレーザ溶接装置の高コストがネックとなっているが、今後熟練溶接技能者が急減することを考えると、このような新しい溶接・接合技術に対して造船業界全体としてのまとまった長期的な取り組みが必要と思われる。

なお、摩擦攪拌接合は、現状の鉄鋼製ツールではその適用は軟質金属であるアルミニウム合金、マグネシウム合金、及び無酸素銅などに限定されており、鉄鋼への適用は不可能である。この理由は、鉄鋼材料で塑性流動を起こすためには、加熱温度は約1000℃の高温が要求されるために、鉄鋼製(工具鋼)ツールではその温度に耐えられないためである。

このような高温での強度を維持し、かつ高温の鉄鋼と接


触しても化学的な反応を起こさないツール材料に対する開発研究も進められており、セラミックスツールがその対象となっている。

ツール材料の中でも高温強度に優れ、かつ鉄との耐接触反応性にも優れている立方晶窒化ボロンセラミックスは最も有望とされており、セラミックス特有のもろさを克服するために、焼結条件などのセラミックス製造技術とともに、摩擦攪拌接合装置からのセラミックスツールを使いこなすための制御技術や、ツール形状の最適化などの開発研究が進められている。もし一般の鉄鋼材料の接合にこの摩擦攪拌接合が適用可能になれば、すでにテクノスーパーライナーへの適用でその有効性が実証されたように、いわゆる3K職場として嫌われる業種であるアーク溶接現場の環境は一新され、さらに、省エネルギー、省資源に大きく貢献できる未来接合技術として、造船をはじめ、わが国のものづくり業界に大きく貢献できるものである。

最後に貴重な資料をご提供いただいた三井造船(株)をはじめ関係各位に感謝申し上げます。

〈参考文献〉

- 1) R.Miebach and H. Lembeck: Schw. Und Schn, DVS 225(2003),187-191.
- 2) MEYER WERFT社ホームページ
- 3) W.M.Thomas et al: International Patent Application No. PCT/GB92/02203 and GB Patent Application no. 9125978.86 Dec.1991.
- 4) C.J.Dawes and M.W.Thomas: Friction Stir Process Welds Aluminum Alloys, Welding Journal, 75-3, (1996) 41-45.
- 5) 本誌, 11 (2005冬季号), 71.



**中田一博 (なかた かずひろ)**  
 1972年 大阪大学工学部溶接工学科卒  
 大阪大学 接合科学研究所 教授 [加工システム研究部門 エネルギープロセス学分野]  
 専門: 溶接・接合プロセス、材料科学