特集

第Ⅲ部 ニュー溶接・接合プロセスによる構造化への展開

造船・重工業分野へのニュー溶接・接合プロセスの適用*

北側 彰一^{**}, 浅井 知^{***}
牧野 吉延

北側 彰一

浅井 知

牧野 吉延

Application of New Welding and Joining Processes to Shipbuilding and Heavy Industries*

by KITAGAWA Akikazu^{**}, ASAI Satoru^{***} and MAKINO Yoshinobu^{***}

キーワード レーザ, レーザハイブリッド, FSW, 造船, 発電プラント

1. はじめに

造船・重工業分野で使用されている接合技術は主にアーク溶接技術であり, これらは19世紀末から20世紀初頭にかけて発明されたものである。その後アーク溶接技術そのものはおよそ1970年代に完成の領域に達し, 1980年代以降はプロセス制御技術やCAD, CAM, CIMといったコンピュータを駆使した高生産性技術の開発へその重点はシフトしていった。

一方, 20世紀後半になり開発された新しい溶接施工法にレーザ溶接, レーザハイブリッド溶接, 摩擦攪拌溶接(FSW) および界面接合法がある。これらはちょうどアーク溶接の揺籃期と同様の状況にあると考え, 10から20年後にはこれらの溶接法が至極当然の施工法となっていることも予想される。これらの溶接法の特徴としては, 必ずしも開先を必要とせず, 熱影響が少なく, 低歪, 低入熱な溶接が可能であることで, これらを利用することで, 高精度, 高剛性, 軽量化, 異材構造などの新しい構造化技術を提供できると考えられる。

ここでは, これらの技術革新をもたらすと期待されるニュー溶接・接合プロセスの造船・重工分野での適用の現状と今後の展開を構造化技術の視点から述べる。

2. 造船分野におけるニュー溶接・接合プロセスの適用

2.1 レーザ溶接

レーザ発振はメイマンにより1964年に実現され, その直後から, レーザ溶接の適用検討がはじめられ心臓ペースメーカーの溶接などでは1970年代初頭に実用化されてい

る¹⁾。しかしながら, 造船分野で用いられる厚板を溶接するには少なくとも10kWの出力が必要であり, 溶接研究には1980年代初頭に販売された米国AVCO社の15kWCO₂レーザの出現を待つ必要があった。これには, 大出力レーザ装置の開発には多額の費用が必要なることもあり, 米ソ超大国の軍需関係機関でしか開発できなかったことと, 技術的には連続波の大出力レーザを安定に取り出すことのできる空力窓(Aero dynamic window)が未開発であったことも関係していると思われる。当時の研究開発の最先端はもちろん米国海軍研究所であり, 日本においても重工・鉄鋼会社が共同でAVCO社へサンプル実験を依頼するなどレーザ溶接の基礎性能調査を実施している²⁾。その後, 1990年代にユナイテッドテクノロジー社が45kWの大出力レーザを販売し, TWI, フランス溶接研究所, AMPI(日本)などで大出力CO₂レーザ溶接の基礎技術確立が図られた。

TWIやフランス溶接研究所での研究開発は欧州統合準備期間と符合し, 欧州全体の産業競争力を高めるため実施された欧州プロジェクトでは, 基礎研究開発から実用までを一貫して見据えた研究開発が立案され多額の予算

図1 フィンカンツェリ造船所での板継溶接

*原稿受付 平成14年11月6日

**正 員 日立造船株式会社 Member, HITACHI ZOUSEN CORPORATION

***正 員 株式会社 東芝 Member, TOSHIBA CORPORATION

が継続的に注入された。この成果として、欧州船級協会（フランス、ノルウェー、ドイツ、イギリスおよびイタリア）は1997に Guidelines for the approval of CO₂-Laser Welding を作成し、レーザ溶接を造船分野で実用化させる端緒を開いた²⁾。

これらのプロジェクトの成果として、図1に示すフィンカンツエリ造船所（イタリア）での板継溶接³⁾、マイヤー造船所（ドイツ）でのサンドイッチパネル製造（図2）がある⁴⁾。

フィンカンツエリ造船所が採用した板継溶接は構造化技術という点からは新しい展開ではないが、世界の造船所ではじめてレーザ溶接が採用された画期的なものである。レーザ溶接の採用理由は、客船建造では中厚板が採用されるが、美観の要求が厳しいためサブマージ溶接を採用した場合、後工程での手直し費用が莫大となっていたためである。

マイヤー造船所が開発・適用しているサンドイッチパネルの応用も客船等を対象としたものであるが、これは薄板を溶接変形の少ないレーザ溶接でサンドイッチ構造とし軽量で剛性の高いパネルを製造するという新しい構造化技術である。これは船舶の設計において軽量化が最大の目的であるとともに軽量近代的な客船では乗客が集まる劇場、レストランなどの部分では大きな金属の支持構造が好まれないためサンドイッチパネルが有効となった。サンドイッチパネルを船舶に用いた場合のメリットは艦船への適用を検討した Bird および Furio⁵⁾により、軽量、高剛性、断熱性、および耐火性能に優れることがすでに報告されているが、変形が少なく目違いあわせ作業が不要など生産性の向上にも寄与するとされている。同社では、1995年より34隻のデッキやバルクヘッドなどに適用され、その面積はすでに 25,000 m² に達しているとのことである。また、最近、内部に種々な材料を注入した複合サンドイッチパネルのプロジェクト（SANDWICH）がはじめられ、更なる軽量化が達成されるとされている。サンドイッチパネルに代表される軽量化技術に対して、フィンランドでも数年にわたる軽量パネル開発のプロジェクトが金属産業省を中心行なわれており、図3に示すようなパネルをはじめ、種々なパネル性能の向上に関する開発が推進されている⁶⁾。今後、これらのサンドイッチパネルは軽量化が要求される船舶以外の広い分野にも適用が広がると思われる。

図2 マイヤー造船所のパネル製造ライン

2.2 レーザハイブリッド溶接

レーザとアークのハイブリッド溶接はレーザ溶接の弱点である開先精度の要求を緩和できるメリットがある。したがって、造船などの大型部材の溶接でつきまとう部材精度の不足およびそれが原因となる表面欠陥などの防止には溶着金属の添加が必須となる。現在ハイブリッド溶接を実用化している造船所は先に述べたマイヤー造船所と Blohm+Voss 造船所の2箇所であり、前者は部材を機械加工し、後者は無酸素切断により部材を加工しているところが相違している。対象の船種はマイヤーが客船、遊覧船およびガスタンカーであり Blohm+Voss は艦船である。ここでは、マイヤーからの詳しい報告⁷⁾があるので紹介する。マイヤー造船所では増大する受注に対応するため、大型客船の納期を10ヶ月から6ヶ月とする必要が生じ、実現のためのボトルネックがパネルとウェブの製造ラインであることが分かった。この実現のため、4台の 12kWCO₂ レーザと MIG のハイブリッド溶接装置を開発し、突合せ溶接装置とスチフナーを自動位置決めし、すみ肉溶接を行うことができる装置を構成している（図4）。突合せ溶接ラインでは材料のハンドリング、機械加工による開先加工および溶接が全自動で行なわれ 20 m × 20 m のパネルが製造されている。スチフナーのすみ肉溶接では、20 m 長さのスチフナーの位置決めは 10 min、パネルへの溶接が 20 min のタクトとして計画された。

レーザハイブリッド溶接が採用された理由は

- ・アーク溶接や単純なレーザ溶接より高速溶接ができる。
- ・溶接ヘッド数が少なく、占有面積が少なくてすむ。
- ・溶接変形が少なく高精度品が生産できるため、取り付けや矯正時間が少なくなる。
- ・レーザハイブリッド継手の冶金および疲労特性が優れ、デッキの板厚を減少させ船体重量を軽減できる可能性を持つ。

図3 フィンランドで検討されているサンドイッチパネルの一例

図4 レーザハイブリッド溶接を採用したすみ肉溶接装置外観

- ・12mmt までの突合せ溶接とすみ肉溶接を1パスでできる。(施工能力が高い)
- ・高精度が要求される他工程へ展開できる可能性があげられている。

しかしながら、これを成就させるためには正確な開先加工およびプロセス承認などの課題があった。

開先加工法については、プラズマ切断やレーザ切断、グラインディング法なども比較検討し、最終的に機械加工が選択されている。これは、プレート端部の熱影響が小さいこと、溶接プロセスの制御に重要なエッジの形状のばらつきがないこと、船級で要求されている面取りを同じ装置でできる可能性を持つこと、開先加工、面取りおよび溶接を一つのマシンに組み込むこと、およびレーザ切断機とレーザ溶接機の複合機より初期投資が少ないことから決定された。

プロセス承認作業では、従来の溶接法に求められる硬さ試験、引張り試験、衝撃試験、曲げ試験、十字引張り試験などすべてに十分な性能を示したが、より信頼性のあるデータと製造時の試験量を低減する目的で追加試験が要求された。(Det Norske Veritas)。生産条件で製造された試験体の疲労試験が承認機関で行われた。この結果レーザハイブリッド溶接は2001年に完全承認され、実用化されている。

日本では、造船の部材を機械加工することがコスト的に成立しないとの判断が下されることが多いが、付加価値が高い客船事業においては成立するところが興味深い。

図5 ハイδροマリソ社のFSWによるプレファブパネルの製造状況

図6 FSWプレファイブパネルが採用された双胴船

マイヤー造船所の建造量はここ数年で増加しつづけているようであり、国際競争の激しい造船業ではこのような技術を駆使する造船所が勝ち残ると考えられる。近い将来国内にもこのような新しい生産技術を駆使した21Cタイプの造船所が現れることを期待したい。

2.3 FSW

FSWは1991年にTWIで開発された技術であり、もっとも新しい溶接法である。特に、6000系のアルミニウムの溶接性が優れることから、車両をはじめとする薄板分野から適用がはじめられている。造船への適用はノルウエーのハイδροマリソ社、フェストランド造船所、およびDNV(ノルウエー船級協会)の協力により達成されている⁷⁾。図5はハイδροマリソ社のFSWによるパネル製造状況を示す。ハイδροマリソ社では1.8mmから15mmの6000系アルミ合金材パネルを製造し、累積溶接長さは150,000m以上に達している。世界初の適用は、同社により製造された6082-T6の6mm⁸⁾パネルがフェストランド造船所へ輸送され、図6に示す双胴船の上部構造に適用したものである。なお、FSWの造船への応用に関してはすでに沖田⁹⁾により詳細に報告されており、こちらをご参照願いたい。

残念ながら、国内での船舶への適用例は未だないが、最近川崎重工業(株)よりの超高速客船、超高速カーフェリーへの適用およびLNGアルミタンクの製造へ適用していくことが報告¹⁰⁾され、近い将来実用化される見込みである。

3. 重工分野におけるニュー溶接・接合プロセスの適用

重工分野は、広範囲にわたるが、造船に比べ溶接線長は短いが板厚が厚く、適用材料の種類も多い。ここでは重工分野として代表的な発電プラント機器を主体にニュー溶接・接合プロセス適用の現状と今後の展開をのべる。

3.1 レーザ溶接

発電プラント機器においては、原子力及び火力分野を主体に早くからレーザ溶接の高品質、高能率性に着目しCO₂レーザ、YAGレーザの適用がはかられてきた。レーザ溶接を構造化に生かす上での特徴としては、低歪みで入熱の低いプロセスであることから、熱影響が少なく、高精度な構造物の製作が可能である。従来、出力の制約からも高精度かつ品質要求の厳しい薄板分野への適用が主流であった。

図7 レーザ溶接の原子力炉内機器への適用例

図7は、レーザ溶接の原子力炉内機器への適用例を示したものである。炉内機器である制御棒は原子力压力容器内の核反応を制御する重要な機器であり、板厚1mm程度のステンレス鋼の内側に中性子を吸収する材料が組込まれており、このステンレス鋼は制御棒の中央で溶接により接合されている構造となっている¹⁰⁾。板厚が1mm程度と非常に薄いことから溶接による熱変形を抑えるためにTIG溶接に代え、レーザ溶接の適用が図られている。レーザ溶接の採用により溶接変形を低減し精度の高い製造を実現した例である。また、図8も同様に炉内機器部品へのレーザ溶接の適用例を示したものである。マグネットを収納するステンレス容器は溶接にて形成されるが、溶接部近傍に強い磁界が存在するため、アーク溶接や電

図8 炉内機器部品への適用例

図9 中性子遮蔽体の構造

図10 中性子遮蔽体のレーザ溶接断面

子ビーム溶接などの溶接方法は適用することが難しい。そこで、磁力の影響を受けないレーザ光を利用したレーザ溶接技術が適用されたものである。

図9に、再処理機器への適用として、レーザ溶接の低入熱である特徴をいかして構造化した例を示す。曲率半径約1200mmの箱状のプレート1(板厚1mm)にカドミウム(板厚1mm)を入れて、更にプレート2(板厚3mm)でふたをして全周溶接する中性子遮蔽体にレーザ溶接を適用したもので、融点が約310℃と低いカドミウム板を溶融することなく、ステンレス鋼を完全に封止し、かつ溶接後の寸法精度が確保されている。レーザ溶接後の溶接部の断面を図10に示すが、レーザ溶接特有の幅の狭い溶接となっており、カドミウムに熱影響が及んでないことが分かる。

一方、火力プラント機器では、精密部品であるガスタービン燃焼器にレーザ加工が多く活用されている。これらは、高温にて使用されることから、Ni基合金やCo基合金などの難加工材である耐熱合金が多数使用されていることや高速、高精度な製造技術の要求からレーザによる孔あけ加工、切断、溶接が行われている。図11に板厚1.2~1.6mmの薄板円筒体である燃焼器ライナーのレーザ溶接の状況を示す。

また、図12に示すように、核融合機器において、真空容器として超伝導コイルを内蔵し蓋を重ね溶接するパネル構造などが検討され、低入熱であるレーザ溶接が試験されている。

図11 燃焼器ライナのレーザ溶接

図12 レーザ溶接の応用例

以上のように、高精度かつ低入熱である特徴を生かした構造化が、薄板分野において幅広く適用されてきたが、厚板複雑構造物への適用は、ミラー伝送などの問題からCO₂レーザでは限定されていた。これに対し、近年の光ファイバによる伝送が可能なYAGレーザの高出力化がすすめられており、厚板分野への適用が一挙に拡大されるものと期待できる。

3.2 レーザハイブリッド溶接

レーザハイブリッド溶接の利点は、前に述べた通りであるが、厚板でかつ開先精度が十分でない重工製品には、非常に有効であり、従来レーザ溶接の適用が困難であった部位へ適用拡大できる可能性が高い。図13は、CO₂レーザ・MIGハイブリッド溶接の例を示したもので、6KWCO₂レーザにて突合せ溶接で1パス板厚15mm貫通溶接が実現されている。また、ステンレス製压力容器板厚16mm角継手へ実用化され、高品質溶接（低歪、ポロシティ低減）が実現されている¹²⁾。さらに、YAG・MAGアークハイブリッド溶接のパイプライン配管溶接への適用例もTWIから報告されており、今後、重工分野の中厚板溶接の高効率化、低歪による高品質化を狙ったレーザハイブリッド溶接(CO₂/YAGレーザ・TIG/MIGアーク)の適用推進が飛躍的にすすむと考えられる。

3.3 FSW及び界面接合法

現状、重工分野の発電等のプラント機器におけるFSWの適用事例はほとんど報告されていない。これは、プラント機器の材料が、鋼が主体であり、FSWが得意とするアルミ合金や銅の材料が少ないためである。近年、片側炭素鋼やステンレス鋼のFSW技術が開発されてきてはい

るが、アルミ合金への適用に比べ、レーザやアーク溶接をしのぐ特徴を見出し、応用化できるかが課題である。最近、銅やアルミ合金ではあるが、下板にあらかじめ溝を設けておき蓋をFSWで接合することで内部に冷却用となる水路を形成する集積配管等が報告されており¹³⁾、FSWの構造化への応用例として注目される。また、異種金属の接合法としても有望であり、アーク等の融接で困難な材料組み合わせの構造化が可能かもしれない。

一方、界面接合法については、拡散接合等の固相接合が特殊材料や異材の接合として部品レベルで広く応用化がはかられてきている。構造化に関しては、内面に冷却溝を有する構造体やコルゲート構造の製作に液相拡散接合やHIP接合が適用されている。図14は、内部に冷却溝を有した長さ2000mm、径750mmの2層円筒構造の発電機部品にHIP接合を適用した例を示したものである¹⁴⁾。このように、難溶接材の接合や大断面積を接合できる利点があるものの、装置の問題から製品寸法が制約をうけることから、今後、重工分野の大型部材への適用拡大には、局所的に施工が可能な界面接合法の開発が必要である。

4. おわりに

造船および重工業へのニュー溶接・接合プロセスの適用の現状と今後の展開について述べた。造船および重工業では、新しい溶接施工法を採用するには船級協会の承認取得や各種法規に従った施工法の承認が必要であり、実用化まで長期間を有するのが通常である。しかしながら、先の実用例などが示すように新しい施工法の信頼性が確保できることが示されつつあり、今後かなりの勢いで実務応用がなされてくるものと予想される。今後、関係各位のご努力により新施工法が導入され、溶接業界の活性化と発展がすすむことを期待している。

参考文献

- 1) 日本溶接協会 HPL 委員会報告書
- 2) International conference, Exploitation of Laser Processing in Shipyards and Structural Steelwork, May, 1996, Glasgow, UK
- 3) Yamaoka: Welding technique, 2000, vol. 48, No11, 99-100
- 4) F. Roland: IIW International Conference, June 2002, Denmark
- 5) J. Bird: 20 March 1997, Southampton
- 6) J. Lasslia]: Private communication
- 7) O. T. Midling: Journal of light metal welding & construction, vol. 59, (2001), No1, 32-36.
- 8) K. Elik: Welding journal, September, 1997, 55-57
- 9) Okita: Journal of light metal welding & construction, vol. 59, (2001), No10, 1-15
- 10) http://www.khi.co.jp/khi_news
- 11) 東芝レビュー Vol. 55, NO. 10 (2000)
- 12) K. Minami, et al: Laser-MIG Hybrid Welding Process for Stainless Steel, IIW Doc. No. XII-1704-02, 2002
- 13) NIKKEI MECHANICAL, 2001. 8, No. 563, P 44-45
- 14) 浅井 知他: 成形・接合技術の実際, 本誌, 65-8 (1996), P 18-22

突合せ溶接
(1パス板厚15mm貫通溶接
: 6KWCO₂レーザ+MIG

ステンレス压力容器角継手への適用
(2パス: レーザ+レーザハイブリッド溶接)

図13 レーザ・MIGアークハイブリッド溶接の例

図14 2層円筒構造を有した発電機部品のHIP接合