

レーザ・アークハイブリッド溶接の一般商船への適用

三菱重工業株式会社
坪田 秀峰、郷田 穂積

工場内で製作した船殻ブロックを組合せて大型の船舶を建造する造船工作においては、ブロックの仕上り精度がドック搭載時の他ブロックとの合せ作業工数を大きく左右し、建造期間やコストに大きな影響を及ぼす。当社では、ブロック精度を向上した高精度建造法確立を目的に種々の取組みを行っている。その一つとして、低入熱溶接により変形を抑制するレーザ・アークハイブリッド溶接の開発を行い、一般商船に適用を図った。本報では、その概要を紹介する。

1. はじめに

高精度建造法は、建造期間の短縮と品質向上への大きな寄与が期待できることから、今後、日本の造船メーカが韓国や中国等のアジア諸国の造船所との競争していく際の有効な工作法と考えられる。高精度なブロック建造には、溶接変形低減が必須であり、その打ち手として低入熱溶接により変形を抑制するレーザ・アークハイブリッド溶接の適用を検討した。

レーザ・アークハイブリッド溶接は、従来のアーク溶接と比較して熱源の集中性が高く、深溶込み溶接や高速溶接が可能で溶接入熱を低減し、変形を抑制することが期待される (図 1)。その反面、小径に集光したレーザビームを用いることから、高精度な開先加工、開先合せが求められる溶接法であり、従来は日本の造船所では適用が困難とされてきた。これに対し、欧州の造船所では船級協会と共同でレーザ溶接の適用検討を行い、1990年代には比較的板厚の薄い客船を中心として実用化している¹⁾。この差異は、日本の造船所では、熱的切断による開先加工した部材を大型のクランプ装置を用いることなく溶接施工してきたのに対し、レーザ溶接やレーザ・アークハイブリッド溶接には、溶接装置に加え、開先の機械切削装置やクランプ装置といった大掛かりな専用設備を初期投資する必要があるため、従来から開先を機械加工してきた欧州の造船所と比較して、技術導入への障壁が高かったことによると思われる。

これに対し、機械加工装置やクランプ装置等の大掛かりな専用装置を必要とせず、従来施工法と同様の要領で施工可能なアーク・レーザハイブリッド溶接法を開発した。開発した溶接法は船級協会の承認を取得し、実船に適用している。

2. レーザ・アークハイブリッド溶接

アーク溶接、レーザ溶接、レーザ・アークハイブリッド溶接の各溶接法について、長所・短所の概要を図 2 に示す。アーク溶接は、従来から用いられてきた溶接法で、開先精度に対する裕度が大きく、溶接材料を供給することから、継手特性に対して母材の影響が小さいという長所を有する反面、入熱が高く溶接変形が大きい短所があった。これに対し、レーザ溶接は、入熱が低く溶接変形が小さい長所を有する反面、開先精度に対する裕度が小さく、また溶接材料を供給しないことから、継手特

性に対して母材の影響が大きく、レーザ溶接用に成分規定を設ける等の対応が必要となるなどの短所があった。両者の長所を活かし、短所を補うため、組合せ溶接プロセスとして開発されたのが、レーザ・アークハイブリッド溶接である。アーク溶接特有の開先裕度を活かしつつレーザ特有の低入熱溶接が行える溶接法であり、造船工作に適した新しい溶接法と言える。

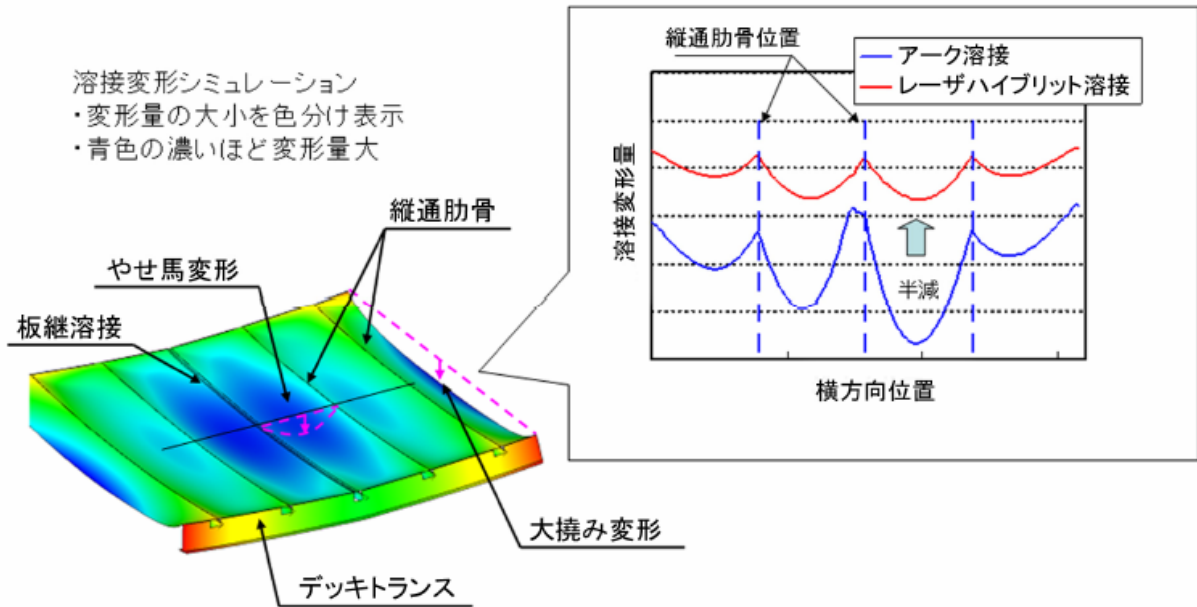


図1 レーザ・アークハイブリッド溶接適用による溶接変形低減効果の試算例

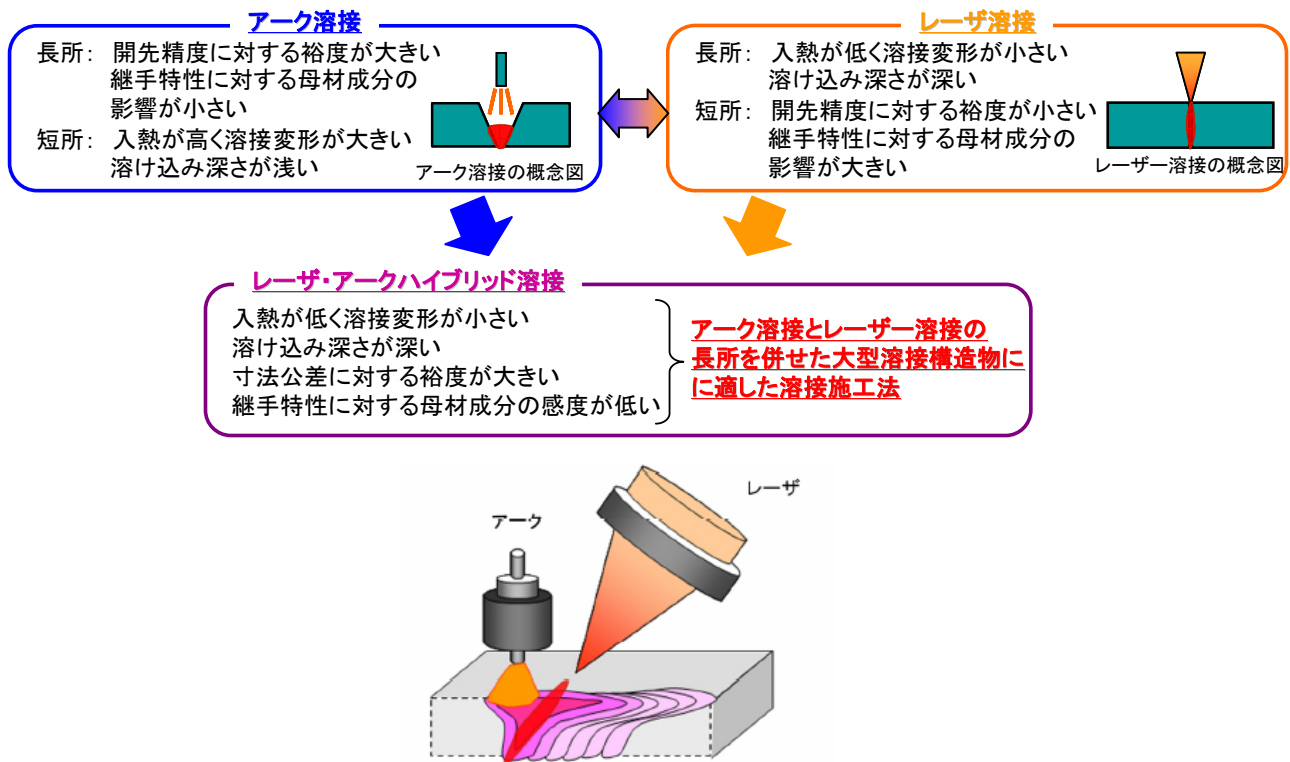


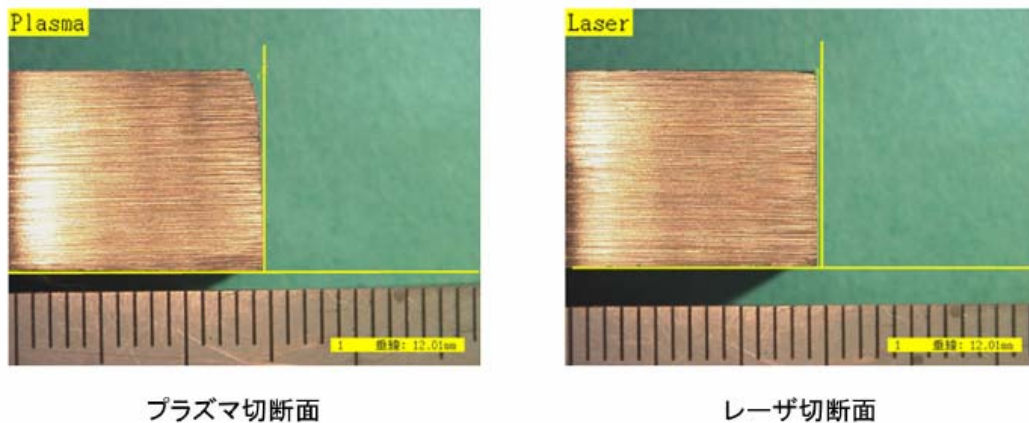
図2 レーザ・アークハイブリッド溶接概念図と各溶接法との比較

3. 新溶接法の開発

従来、レーザー溶接やレーザーアークハイブリッド溶接は厳しい開先精度を要求されるだけでなく、溶接中の高精度な狙い設定も品質を確保する上で重要であり、開先の機械切削やワークのクランプ機構等の大掛かりな装置が必要と考えられてきた。これに対し、設備投資を最小化しつつ高精度な溶接組立を実現する観点で溶接法の開発を行った。ここでは、実船適用を可能とした主要項目について紹介する。

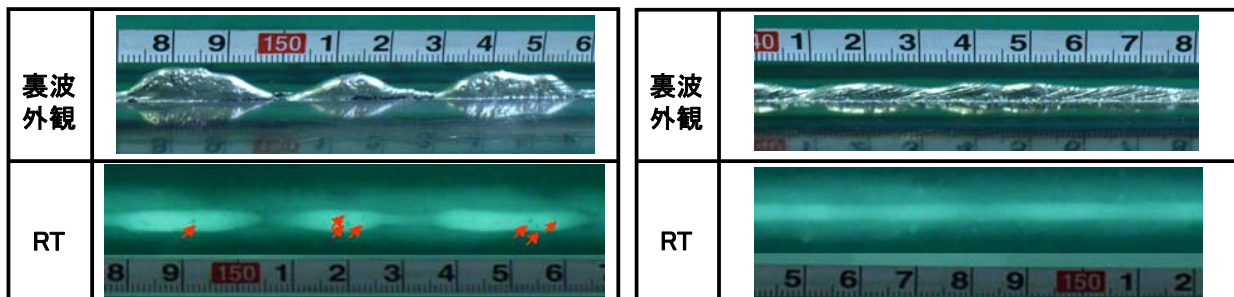
(1) 開先加工

開発法では、切断能率とコストの観点から開先加工には熱切断の適用を念頭において加工法を検討し、レーザー切断を選定した。プラズマ切断とレーザー切断による開先面の差異を図 3 に示す。プラズマ切断では、エッジダレが発生しているのに対し、レーザー切断では、ほぼ直角のエッジが得られており、機械加工と比較しても遜色のない直角度が得られている。熱切断適用時のもう一つの問題点は切断後の開先面に附着した酸化膜の影響である。切断したままで溶接した場合には、図 4(a)に示すように裏面側に垂れ落ち、不安定化するため、裏波制御がほぼ不可能である。また、放射線透過試験により不安定化した箇所でのブローホール発生が認められた。これは、酸化膜にレーザーが照射されることで異常燃焼し過熱したことによると考えられ、対策として回転型ワイヤブラシによる酸化膜除去を試みた。図 4(b)に酸化膜を除去した開先の溶接ビード裏面を示す。垂れ落ちが抑制され良好なビードが得られており、放射線透過試験でも欠陥は認められない。



切断面の平坦度はプラズマ切断よりレーザー切断の方が良好

図 3 プラズマ切断とレーザー切断による開先面の差異



(a) 切断したまま

(b) 酸化膜除去

図 4 開先面酸化膜の裏波安定性への影響

(2) ワーク固定

ワーク寸法が大型であることから、通常の造船板継溶接では、仮付け溶接とマグネットによる定盤への吸着にて鋼板を固定している。大規模な装置導入をすることなく適用するとの観点で、開発法では、欧州の造船所²⁾に見られる大型のクランプ装置によるワーク固定ではなく、従来と同等のワーク固定要領の適用を検討した。

仮付けは、半自動の CO₂ アークによるスポット溶接を用いた。仮付け部外観を図 5 に示す。仮付け部を含んだ本溶接後のビード外観を図 6 に示す。仮付け部は直径 6~7mm 程度であり、本溶接（ビード幅 8mm 程度）にて十分に再溶融されるため、仮付けの影響を受けることなく本溶接施工可能である。なお、仮付け部については、放射線透過試験でも欠陥が発生していないことを確認している。



図 5 仮付け部外観

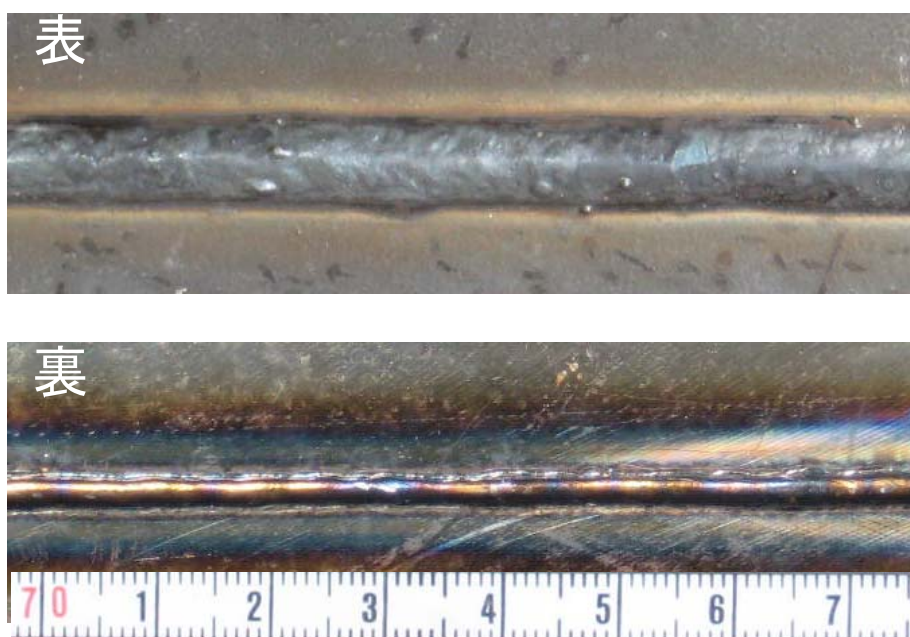


図 6 仮付け部を含んだ本溶接後のビード外観

(3) 開先做い

溶接歪による溶接線移動の対策、狙い位置合せ作業の簡便化、等を目的として、溶接線の做い機構を導入している。ワーク寸法が大きいことからギャップ量も一定であるとは限らず、開先位置とギャップ量をリアルタイムで検出し、狙い位置及び溶接条件に反映するシステムを開発した。図 7 に開先做い状況例を示す。

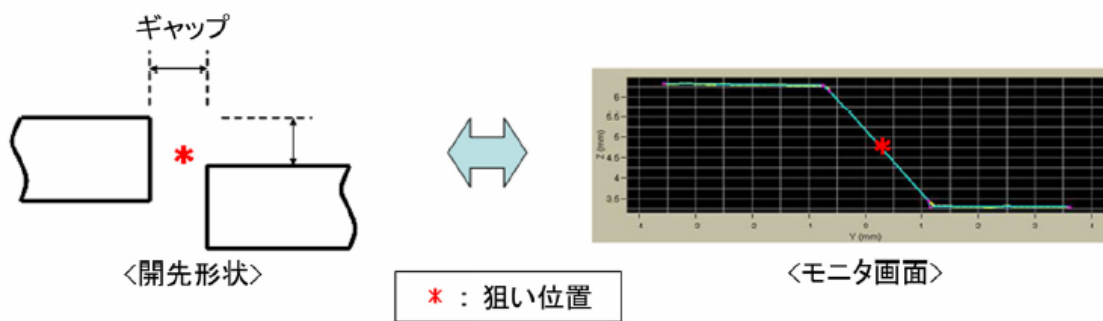


図7 開先倣い状況例

(4) 溶接施工法

開発法では、レーザ・アークハイブリッド溶接用熱源として、ファイバレーザと CO₂ アーク溶接を組合わせて用いている。レーザは集光性（小スポットに集光できる性能）と出力の観点からファイバレーザを選定している。CO₂ アーク溶接は、ハイブリッド溶接プロセスとして検討された事例はほとんど見受けられないが、溶接長が膨大であることを考慮し、コストミニマムとの観点で選定した。なお、プロセス開発過程では Ar+CO₂ の混合ガスや Ar ガスを用いた MAG/MIG アーク溶接についても評価し、品質要求を満足できるとの判断から CO₂ アーク溶接を選定している。

レーザ・アークハイブリッド溶接のパラメータとして溶接電流、溶接電圧、レーザ出力、溶接速度といった溶接入熱に関係する因子に加え、レーザビームの径や角度、アークとの相対位置等の因子を適正化し、開先精度のばらつき（ギャップ量 0~1mm、最大目違い 1mm 程度）に対応する溶接施工条件を確立した。選定条件による各板厚の施工結果例を図 8 に示す。

実船に適用するに当たり、確立条件の溶接継手品質を検証した。検証においては、船級協会の溶接施工承認取得に必要な全ての試験³⁾を行い（目視検査、非破壊検査、引張試験、曲げ試験、硬度試験、金相試験、シャルピ衝撃試験に加え、疲労試験、大型破壊靱性試験も実施）、良好な継手性能が得られていることを確認した（表 1、図 9、10）。

4. 実船への適用

開発法は、船級承認を取得後、船主殿の了承を頂き、2010 年 2 月より一般商船への適用を開始している。適用対象船は、大型原油タンカー（VLCC）、コンテナ船、深冷船（LNG 船、LPG 船）などで、船体上部構造や機関室の壁材など板厚 13mm 以下の比較的薄い鋼板の突合せ溶接を対象（図 11）としている。上部構造の板継溶接施工状況を図 12 に示す。

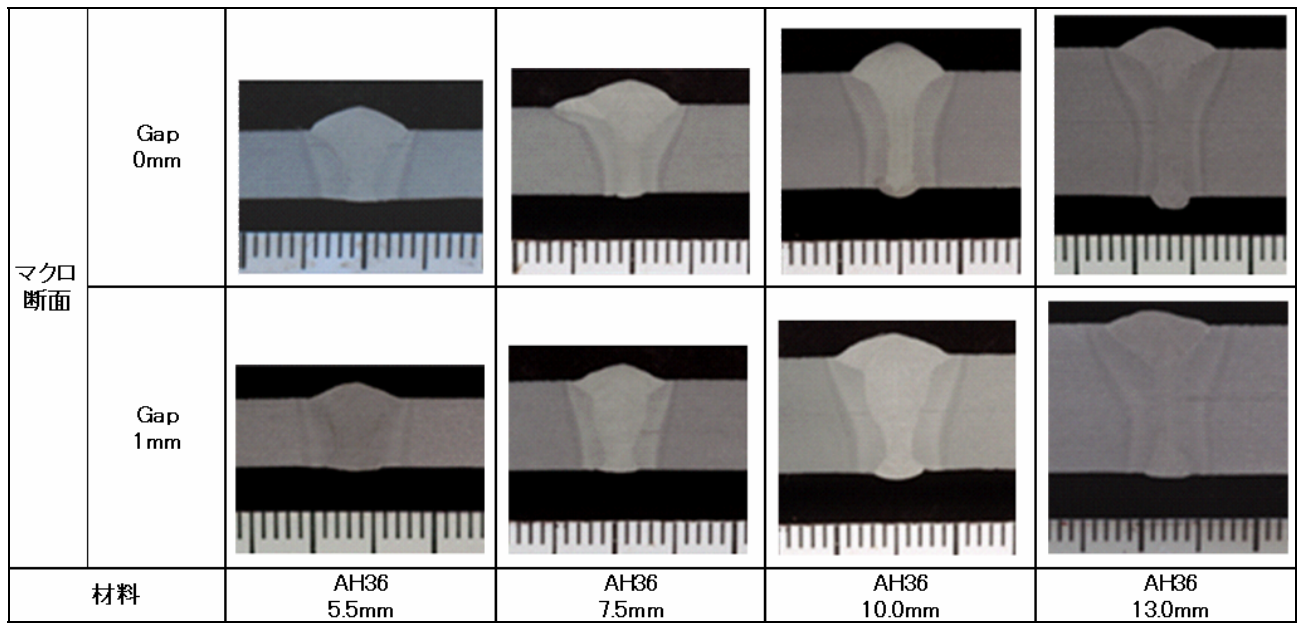


図 8 各板厚の施工結果例

表 1 引張試験、曲げ試験、硬度試験結果

	要求	AH36 5.5mm	AH36 7.5mm	AH36 10.0mm	AH36 13.0mm
引張	\geq 490N/mm ²	591,595 N/mm ²	570,572 N/mm ²	549,550 N/mm ²	551,551 N/mm ²
曲げ	3mm 以上の割れ無し	良	良	良	良
硬さ※	\leq 380	236(WM) 227(FL) 206(HAZ)	235(WM) 254(FL) 210(HAZ)	242(WM) 236(FL) 207(HAZ)	225(WM) 234(FL) 220(HAZ)

※各位置の最大硬さを記載。(ピッカース硬さ)

(WM : 溶接金属、FL : ボンド部、HAZ : 熱影響部)

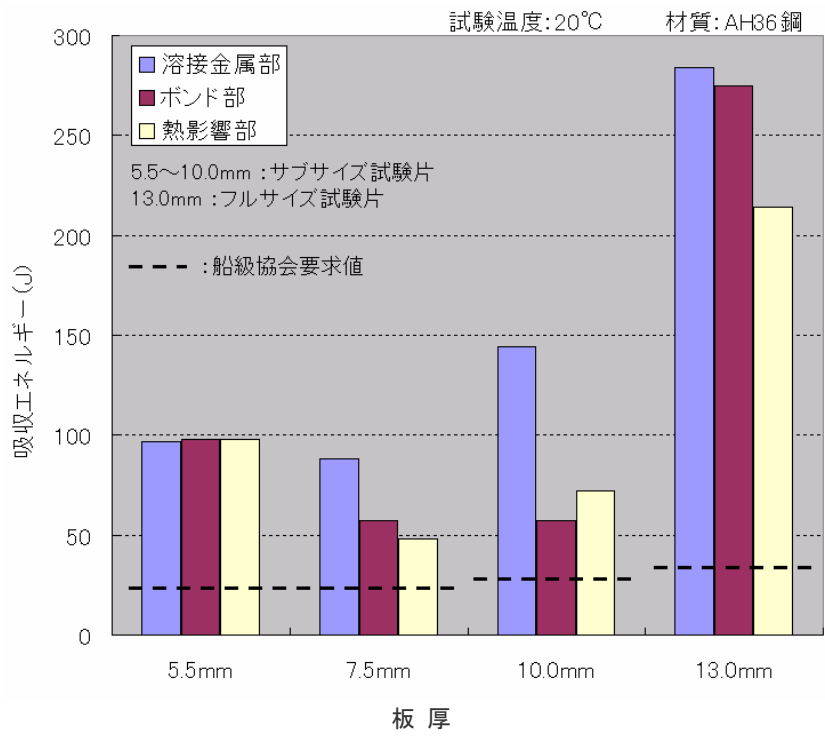


図9 シャルピ衝撃試験結果

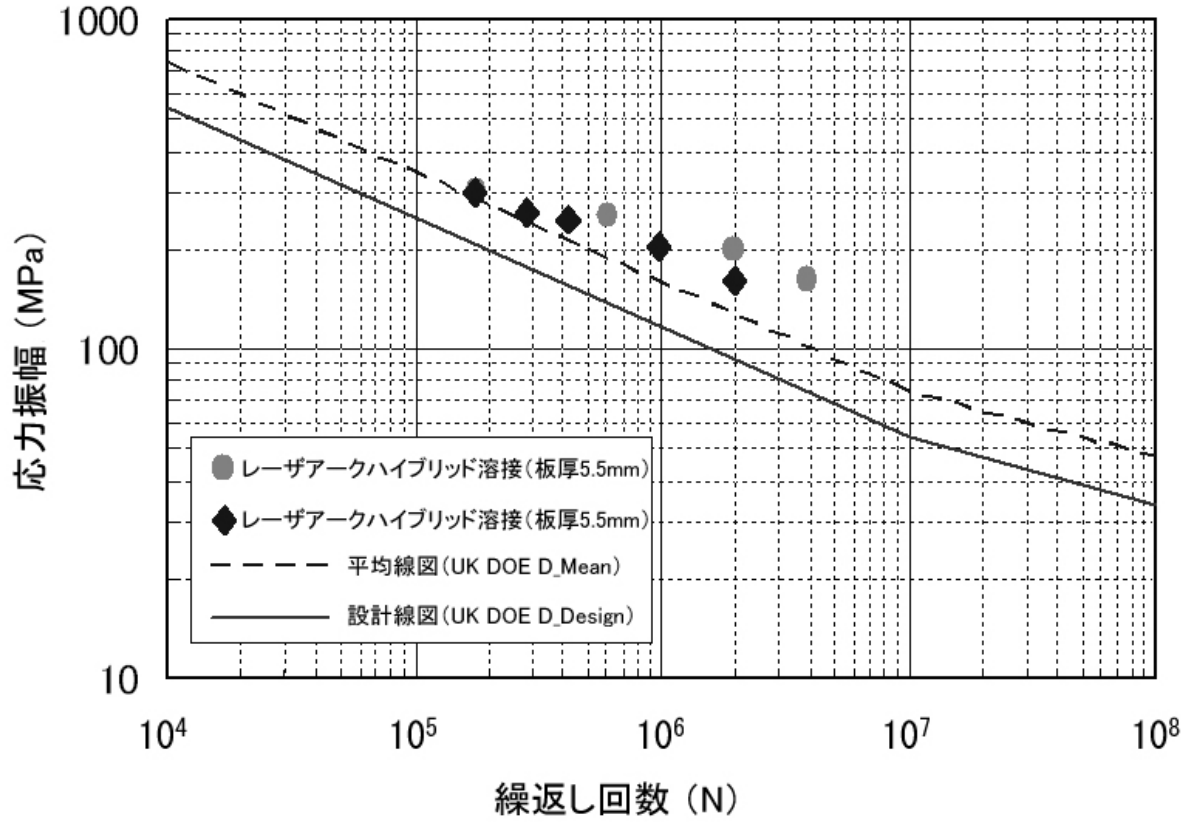
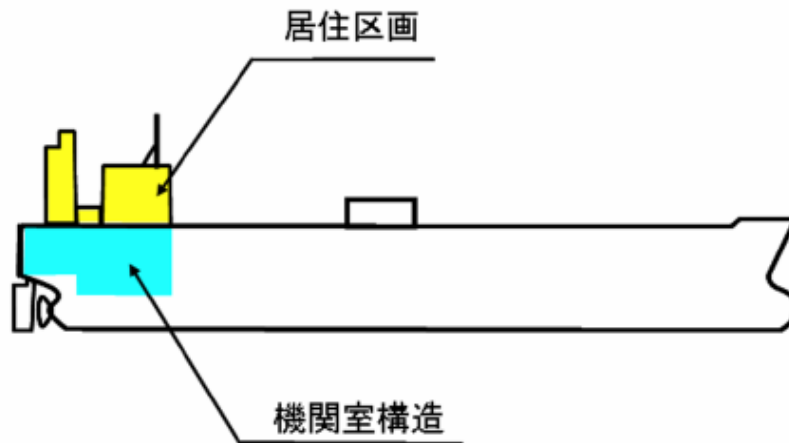


図10 疲労試験結果



居住区画や機関室構造など比較的板厚の薄い鋼板の突合せ継手を対象

図 11 実船適用箇所



溶接施工状況



溶接後の状況

図 12 板継溶接施工状況

5. まとめ

有効性は認められながらも、初期設備投資と部材要求精度から適用が困難であったレーザー・アークハイブリッド溶接を一般商船に適用すべく開発し、実船適用を開始した。開発法は従来の溶接施工法の延長として適用可能な方法である。突合せ溶接による実績を積み上げつつ、すみ肉溶接を含めて適用拡大を図ることで、溶接変形を抑制しブロック精度を向上した高精度建造法の確立につなげていく予定である。

参考文献

- 1) Gerritsen et al : A Review of the Development and Application of Laser and Laser-Arc Hybrid Welding in European Shipbuilding, 11th CF/DRDC International Meeting on Naval Applications of Materials technology (2005)
- 2) 例えば、Meyer Werft ホームページ <http://www.meyerwerft.com>
- 3) 例えば、(財)日本海事協会、レーザーアークハイブリッド溶接ガイドライン(2009)