

LNG 船の新しい構造用異材継手の開発

Structural Transition Joint Developed for LNG Carrier

技術本部 河野 隆之^{*1} 井上 好章^{*2}
井上 克明^{*3}
長崎造船所 川市 克己^{*4}
九州工業大学 西尾 一政^{*5}

モス型 LNG 船には、アルミニウムとステンレスをつなぐため、爆着法により製作された構造用異材継手 STJ (Structural Transition Joint) が使用されている。爆着法は製作コストが高く、経済性に優れた STJ の開発が望まれていた。本研究では、アルミニウムと SUS 304 を 10^{-4} Torr の真空チャンバに設置し、高周波加熱により約 500°C に加熱後、アルミニウムとステンレスを圧延することで直接接合する技術を開発した。

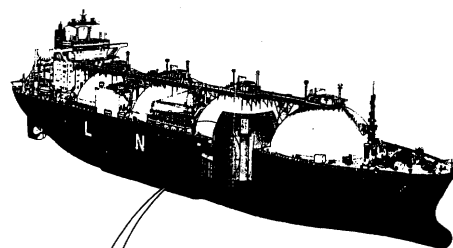
Moss LNG carriers use a dissimilar metal joint of an aluminum alloy and stainless steel called a Structural Transition Joint (STJ) produced using 3 explosive bondings requiring many hours and incurring a high manufacturing cost. We developed an STJ involving placing the aluminum alloy and SUS304 stainless steel in a vacuum chamber at 10^{-4} Torr, and high-frequency-heated to 500°C. The result is subsequently rolled, to produce a directly bonded Al alloy/stainless steel clad-bonded joint.

1. 緒 言

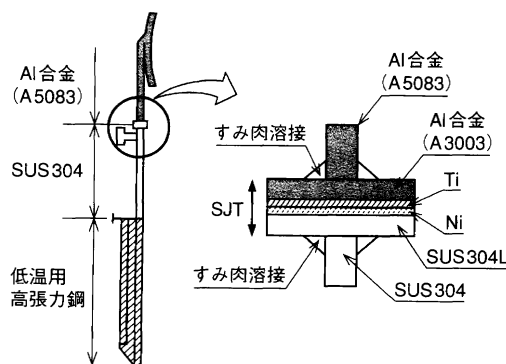
LNG 船 Al 球形タンクは Al/SUS の構造用異材継手、いわゆる STJ (Structural Transition Joint) を介して、船体に固定している。

図 1 にモスタイプ LNG 船 Al 球形タンクスカート部の構造を示す。図 1 に示すようにスカート部の構造は、Al 合金とスカート下部の低温用高張力鋼の間に、ステンレス鋼 (SUS 304) を介在させている。これは、ステンレス鋼の熱伝導率の低さ (鋼の約 1/3) を利用して、異材接合部の位置をスカート上部に移し、タンク材料や防熱範囲の軽減を図るためである。このためには、Al と SUS 304 の異材接合部が必要で、現状、図 1 に示すように Al と SUS 304 の間に Ti と Ni を介在させた STJ を用いている。この STJ は、現状、爆着法により製作されたものを用いている。図 2 に爆着法の原理図を示す⁽¹⁾。爆着法は、図 2 に示すように接合する 2 種類の材料 (図中の母材と合せ材) を、一定のすきまを持たせて配置し、合せ材の上に火薬を載せる。この火薬を一端から起爆すると合せ材は図 2 (b) に示すように、ある角度を持って母材に衝突し、このときに金属ジェットが発生する。この金属ジェットによって、接合金属の接合表面に存在する酸化物、窒化物等が除去され、活性面を得ることができる。爆着法は、この活性面を火薬の衝撃エネルギーによって接合する手法である。図 1 (c) に示した Al/Ti/SUS 304 L の爆着継手は、上述の爆着を 3 回施して製作している。

この爆着法は溶融接合が困難な材料の組合せに対して接合することが可能であるが、圧延法に比べて製作コストが高いことや、火薬を使用することから限定された広い場所を必要とするなどの課題がある。そこで、爆着法に代る工業的な異材接合法を種々検討してきたが、従来の圧延法では継手強度



(a) モスタイプ LNG 船の外観



(b) Al 球形タンクスカート部 (c) 爆着法による 4 層 STJ

図 1 LNG 船 Al 球形タンクスカート部に使用される STJ
現状の STJ は、爆着法により製作された Al, Ti, Ni, SUS 304 の 4 層クラッド板が用いられている。
Structural transition joint (STJ) for LNG tank skirt

を満足する STJ の製作が困難であった。

本研究では、前記背景の中、圧延法においても高い継手強度が得られる手法を検討し、高周波加熱による真空圧延法⁽²⁾を開発した。そして、この新しい STJ の信頼性を検証するため、引張試験、側曲げ試験、十字すみ肉溶接継手の熱サイクル

*1 長崎研究所材料・溶接研究室主幹

*4 造船設計部船殻設計課長

*2 長崎研究所強度研究室主席 工博

*5 工学部物質工学科助教授 工博

*3 長崎研究所第一実験課

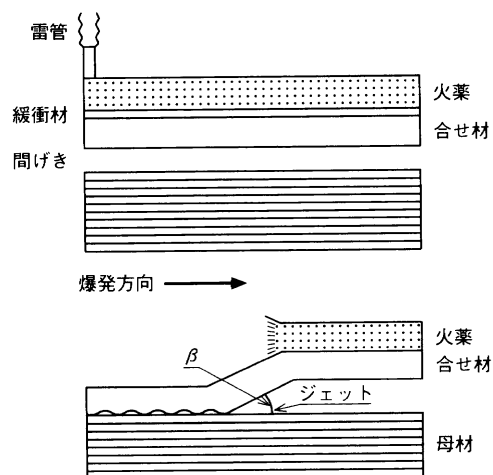


図2 爆着法の原理 接合する2種類の材料を一定のすきまを持たせて配置し、爆薬の衝突エネルギーを利用して接合する手法である。
Method of explosive bonding

ル後 ($-190^{\circ}\text{C} \leftrightarrow \text{R.T.}$) の引張試験等を実施したので、本報ではその結果について報告する。

2. 高周波加熱真空圧延技術

従来の熱間における圧延圧接法では、高温で接合するときAlに酸化皮膜が生じ、爆着継手と同等以上の界面強度を得ることができなかった。

したがって、Al/SUSを高温で接合するためには、何らかの方法でこの Al_2O_3 の皮膜を破壊するか、もしくは Al_2O_3 の皮膜が形成されないようにしなければならない。 Al_2O_3 皮膜は圧延時に破壊されAlの新生面が露出するが、熱間で接合する場合にはその新生面が再び酸化されないようにしなければならない。

前記観点から、STJの製作装置として以下の条件を満たすようにした。

- (1) STJ製作の工業的な観点(量産化、経済化)から、圧延法を採用する。
- (2) 接合容器内は新生面を保護するために真空雰囲気とする。
- (3) 金属の塑性変形を容易にするために、試験体を圧延前に加熱できるようにする。
- (4) (3)の加熱は、高温保持時間を短くできるように(金属間化合物の生成抑制)極力急速加熱とする。

図3は、上記基本仕様を設計した装置の構成図である。接合手順を次に示す。

試験片は装置内で排気した後、送りローラで移動させながら圧延機(Roller)手前の高周波誘導加熱コイルにより加熱される。試験片の温度計は放射温度計により測定する。所定の温度に加熱後、圧延機により連続的に圧延接合し、装置右側の装置内で冷却する。

3. 新STJの製作と界面強度の評価

図3に示した高周波加熱真空圧延装置を用いて、ステンレス鋼とアルミニウムのSTJを製作した。

ステンレス鋼はSUS 304, アルミニウムはA 3003 P-O材を

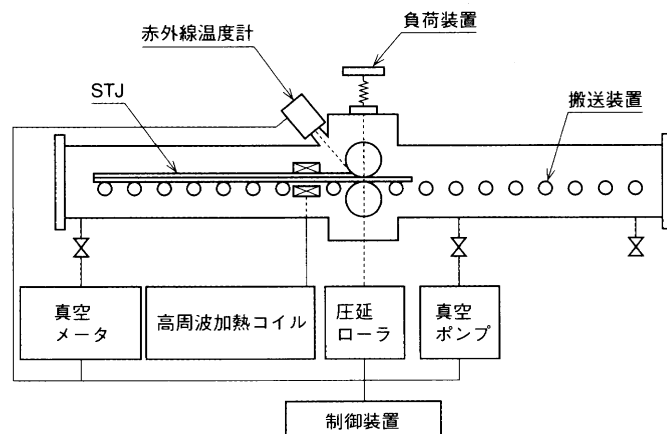


図3 高周波加熱真空圧延装置の構成 真空環境において、試験片温度、圧延荷重、搬送速度がコントロール可能な圧延接合装置である。
Outline of vacuum roll bonding equipment

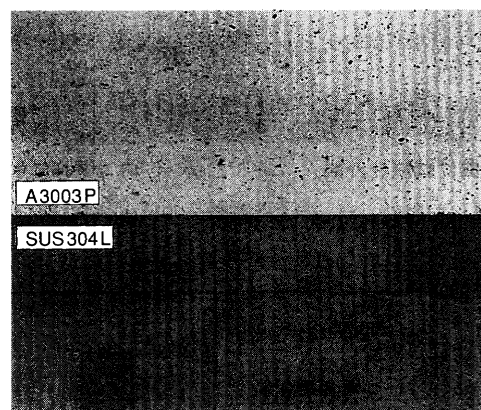


図4 界面のマイクロ写真 接合界面は直線上に接合されており、異物や空孔は見られない。
Microscopic view of STJ boundary

供試した。STJの製作寸法は、長さ1000×幅135×板厚37 mmである。接合後の界面状況のマクロ観察を図4に示す。A 3003 P-O材とSUS 304の界面は直線状に接合されており、異物や空孔は観察されなかった。

このように、図1(c)に示した爆着継手では、アルミニウムとステンレス鋼を接合するのに中間材としてTiとNiを必要としたが、本法ではアルミニウムとステンレスを直接接合することが可能である。次にこの界面の強度調査を行った。

まず、室温及び -196°C にて側曲げ試験(50 mmR)を実施した。図5に代表的な側曲げ試験後の外観を示す。同図に見られるように、側曲げ試験後の界面においてき裂等は認められなかった。

次に、接合界面の室温及び -196°C における丸棒引張試験($\phi 10$ mm)を実施した。図6に丸棒引張試験結果、図7に丸棒引張試験後の破面を示す。破面調査の結果、破断位置は界面近傍のAl側であり、界面強度は母材のアルミニウムより高いことが分かった。

図6に示すように、室温及び -196°C での引張強度は船級規格値(NK)を満足しており、 -196°C での引張強度は室温で

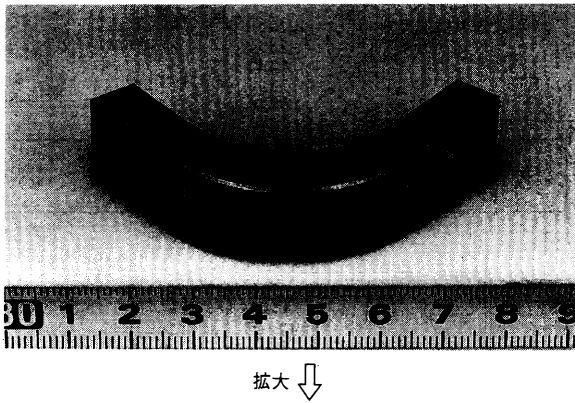


図5 側曲げ試験片外観 側曲げ試験後の接合界面にき裂は認められない。
Results of bend test

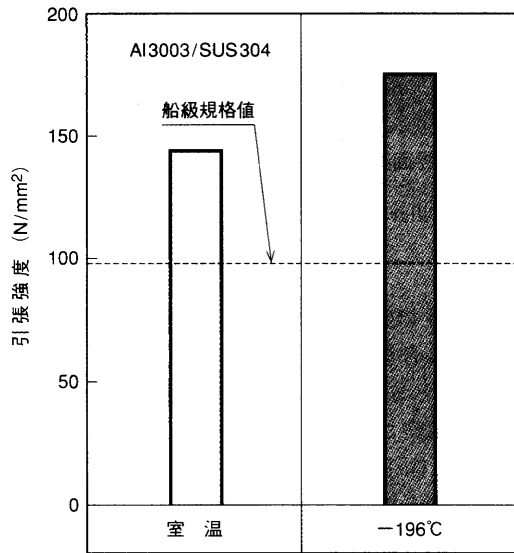


図6 丸棒引張試験結果 接合材の丸棒引張強度は室温、-196°C共に船級規格値を上回る強度を有している。
Results of tensile test

のそれより高いことが分かる。これは、破断位置がAl側で生じていることによる（アルミニウムの強度は、室温に比べて-196°Cの方が高い）。

4. 十字すみ肉継手部の強度評価

図1に示したように、Al球形タンクにSTJを使用するときはAl側とSUS側に十字すみ肉溶接を施す。本章では、STJ

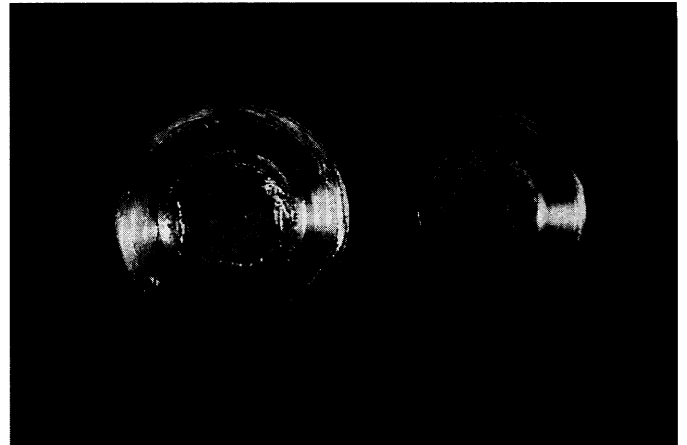


図7 丸棒引張試験片破面 破面調査の結果、破断位置は界面近傍のAl材側であり、界面強度はAl母材よりも強いことが分かる。
Fracture surface of tensile test specimen

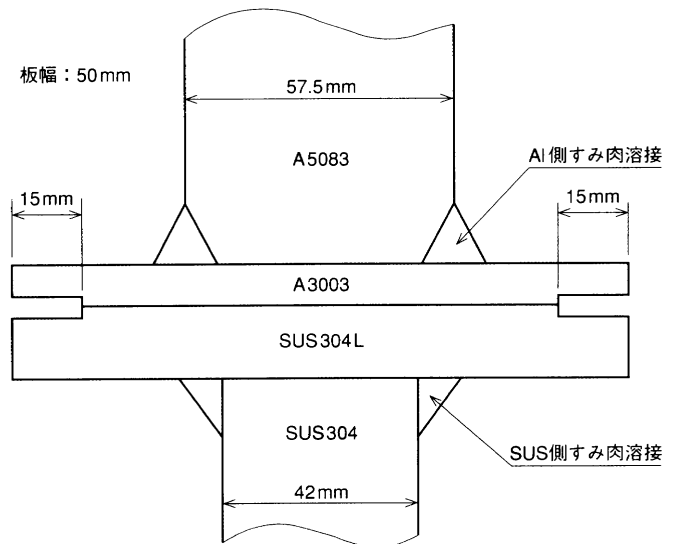


図8 STJの十字すみ肉試験継手 STJの上下面にAl材（A5083）とSUS材（SUS304L）をすみ肉溶接により十字継手を製作した。また、接合界面部には欠陥を模擬した長さ15mmのノッチを両側より挿入した。
Fillet welding of STJ

の十字すみ肉溶接を施した後の継手強度を調査した。

図8に試験片形状を示す。STJに十字すみ肉溶接を当社長崎造船所で実際に用いられている溶接施工条件で実施した。その後、AlとSUSの界面に13mmの機械ノッチを入れ、そのノッチ先端には0.5mm厚さのダイヤモンドカッタで約2mmのソウノッチを施した。

これは、界面に接合時の欠陥を想定して人工切欠きを施したものであり、切欠き長さ13.5mmは、UT検査の検出限界寸法2mmに比べて十分大きい値を設定した。おな、LNG船に使用されるSTJは、全品UT検査が実施される。

また、LNG船アルミスカート部のSTJは、極低温のLNGによる熱サイクルが負荷される。

そこで、新STJの室温から液体N₂温度-196°Cの熱サイクル試験を実施した。液体N₂中（-196°C）に試験体を10min間保持した後、室温に戻した。この過程（15°C～-196°C）を

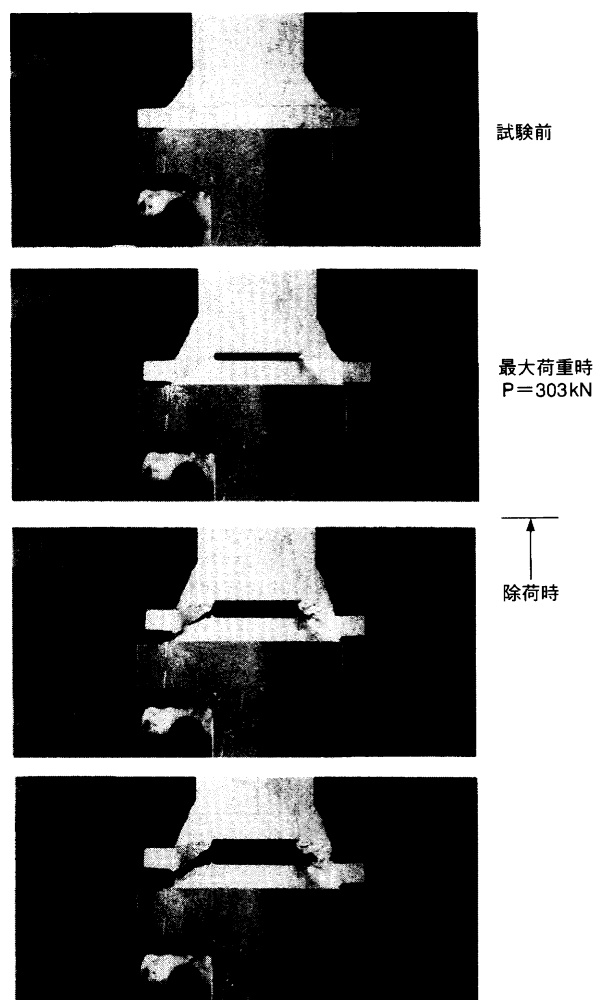


図9 STJの十字すみ肉溶接継手の引張試験 十字すみ肉継手の引張試験での破断位置はAl材側のすみ肉溶接部であり、接合界面部が構造要素において最弱部でないことが分かる。
Tensile test of STJ with fillet welding

10回繰返した。

次に、熱サイクル負荷後の十字すみ肉継手の引張試験を実施した。

試験状況を図9に示す。図9に示すように、熱サイクル負荷後の十字すみ肉継手の破断位置はAl側のすみ肉溶接部であり、STJの界面強度が構造要素において最弱部でないことが分かる。

また、別途実施した十字すみ肉溶接継手の疲労試験⁽³⁾においても破断位置はAl側のすみ肉溶接部であり、今回開発したSTJは、極低温のLNGによる熱サイクルや静的な疲労モードに対しても十分優れた信頼性があることを検証した。

対象機種	継手構造	材料系
LNG船 Al球形タンク スカート部		Al/SUS
高速艇 上部構造		Al/鋼
LNGの配管		Al/SUS

図10 STJの適用例 本研究で開発したSTJは、高速艇やLNGの配管等にも応用することができる。
Application of STJ

5. あ と が き

本研究では、LNG船Al球形タンクスカート部のSTJを対象に、経済性に優れた圧延法によるSTJの製作手法を開発し、その構造信頼性を検証した。現在、本研究成果を踏まえた新STJを製作し、LNG船を対象とした船級承認も取得し、実船適用の段階に至っている。

また、高周波加熱真空圧延技術は、図10に示すように、高速艇の上部アルミニウム構造と船体とを接合するAl/鋼や、LNGの配管継手にも応用が可能であり、Al/鋼の材料系に対しても、その構造信頼性を検証している。

本接合技術は、従来、溶融接合が困難であった異材継手の製作が広範囲の材料系で可能であること、かつ、経済性に優れていることの利点を生かし、新しい応用展開も図ってきたい。

参 考 文 献

- (1) 久保田彰，爆発溶接の現状と応用，溶接技術 Vol.33 No.5 (1985)
- (2) 西尾一政ほか，アルミニウムクラッド鋼の界面反応に及ぼす製造方法と素材成分の影響—真空圧延接合法によるクラッド材の製造とその特性(第3報)—，溶接学会論文集 Vol.18 No.1 (2000) p.18~25
- (3) 井上ほか，新しい構造用異材継手の開発，第4回日本造船学会構造強度専門委員会 (1999)