

真空圧延接合法による A3003/SUS304L クラッド材の LNG 船への適用

正員 佐藤 宏 一* 夢谷 元 希**
正員 吉田 泰 三***

The Application of A3003/SUS304L Clad Material Produced Using Vacuum Roll Bonding to LNG Carrier

by Koichi Sato, *Member* Motoki Tatani
Taizo Yoshida, *Member*

Summary

Tanks of a spherical tank type LNG carrier are supported by the cylindrical shells by the name of "skirt". In the skirt, aluminum alloy A5083 having good low temperature properties is used for the upper part of the skirt connected to stainless steel SUS304 having low thermal conductivity is used for the lower part. In the connection, STJ (Structural Transition Joint) is necessary since the two materials cannot be directly welded. In the previous studies, A3003/SUS304L Clad Material Produced using Vacuum Roll Bonding has been proposed for the STJ and static strength and fracture strength have been investigated. In this paper, the new STJ is further studied for practical application to LNG Carrier, including fatigue test and installation in a ship in service. As a result, long-term integrity of the new STJ with lower manufacturing cost has been confirmed.

1. 結 言

エネルギー需要のグローバル化に伴い、LNG の輸送に関しても安全性を維持した上でのコスト低減が要求されている。MOSS 型球形タンク方式 LNG 運搬船は安全性とコストの両面において優れたシステムであるが、アルミタンクと船体を接合する構造用異材継手 (STJ: Structural Transition Joint) の製造コストが高く改善の余地がある。そこで本研究では、従来使われている爆着材と同等の強度を持ち、より製造コストの低い真空圧延接合法による新型 STJ を製造、実機に搭載し、その健全性を実証した。強度、施工面の検討を含めて以下報告する。

2. 真空圧延接合法による A3003/SUS304L クラッド材

球形タンク方式 LNG 運搬船は、 -163°C の液化天然ガス (Liquid Natural Gas 以下、LNG と記す) を貯蔵するアルミニウム合金製の球形タンクを搭載し、LNG を輸送する。この球形タンクは、スカートと称される円筒殻によって支持されている。Fig. 1 に LNG 運搬船タンクスカート部の構成と構造

用異材継手 (Structural Transition Joint, 以下 STJ と記す) を示す。このスカートの上部には、タンク材料と同じアルミニウム合金 A5083 が使用されているが、下部は熱伝導率の小さいステンレス鋼 SUS304 を介して、船体に固定されている。アルミニウム合金とステンレス鋼は溶融溶接ができないために、A5083 と SUS304 の間に A3003/SUS304L クラッドタイプの STJ が使用されている。

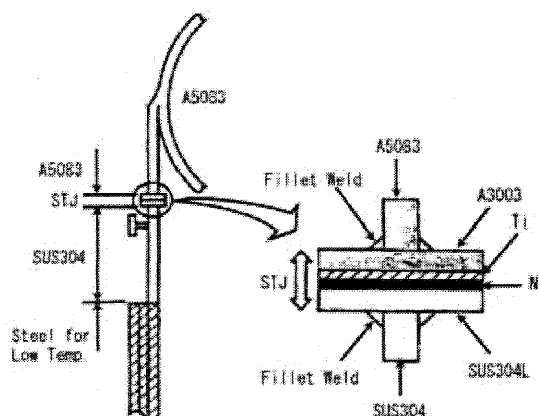


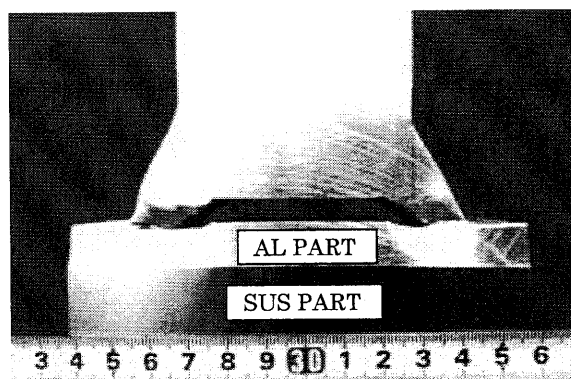
Fig. 1 AL/SUS clad steel for application to STJ of steel skirt in LNG carrier

この STJ には A3003/Ti/Ni/SUS304L の爆着法による 4 層クラッド材 (Fig. 1) が適用されているが、製造コストが高価であり、爆着法に代わる信頼性の高い低価格な A3003/SUS304L タイプの STJ 製造技術の確立が待たれてい

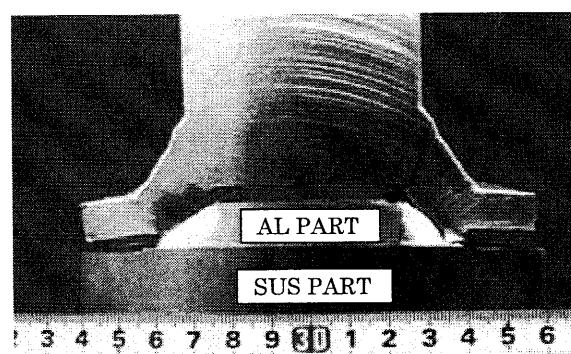
* 三菱重工業 (株) 長崎造船所
** 大阪ガス (株)
*** 日本郵船 (株)

原稿受理 平成 18 年 2 月 21 日

切欠きのない試験片の疲労き裂は、Fig.5(a)に見られるように A3003 側の隅肉溶接部のルート部先端からき裂が発生し、隅肉溶接金属の熱影響部に沿って進展している。切欠きのある試験片の疲労き裂は、Fig.5(b)に見られるように A3003 側の隅肉溶接部のルート部先端と、切欠きスリットの先端の両方からき裂が発生し、A3003 母材を進展した後、両き裂が合体して破断している。これらのことは、接合界面における欠陥の有無にかかわらず接合界面の疲労強度が構造要素部において最弱部ではないことを示している。



(a) Specimen without notch (specimen No.1)



(b) Specimen with notch (specimen No.5)

Fig.5 Crack in specimen after test

疲労試験結果を Table 1 に示す。結果はアルミ板の公称応力範囲で整理した。いずれの試験片においても疲労き裂は接合界面を進展しておらず、疲労荷重に対して接合界面は最弱部とはならないことがわかる。

Fig.6 に、真空圧延接合法による A3003/SUS304L クラッド材と爆着材との十字隅肉溶接継手の疲労試験結果を比較して示す。爆着材については文献⁹⁾の疲労試験データを使用した。ただし、爆着材の試験片形状は Fig.4 のものとは異なり、隅肉溶接の未溶着部の長さが短い。今回の試験との比較のために、疲労強度が溶接ルート部の応力拡大係数に比例すると考え、未溶着部の長さの比の平方根で爆着材の試験結果を修正した。

真空圧延接合法による A3003/SUS304L クラッド材の切欠

き試験片では、切欠き深さにより疲労強度が低下しているが、上述したように疲労き裂は接合界面を進展しなかったことから、疲労荷重に対して接合界面は健全であることが明らかとなった。切欠きのない試験片では、真空圧延接合法による A3003/SUS304L クラッド材と爆着材とは同等の疲労強度を示している。これは両者共、破断経路が A3003 隅肉溶接の溶接熱影響部であったことによる。すなわち、真空圧延接合法による A3003/SUS304L クラッド材と爆着材の十字隅肉溶接継手は同等の疲労強度を有していると言える。

Table 1 Results of fatigue test of new STJ

No.	Notch	Stress range N/mm ²	Fractured cycles $\times 10^4$	Fractured part
1	Without notch	78.4	0.093	Fractured line
2	Without notch	39.2	97.16	Fractured line
3	Without notch	49.0	14.30	Fractured line
4	Without notch	58.8	4.85	Fractured line
5	L=15mm	49.0	2.31	Fractured line
6	L=20mm	49.0	2.35	Fractured line
7	L=30mm	49.0	0.0383	Fractured line

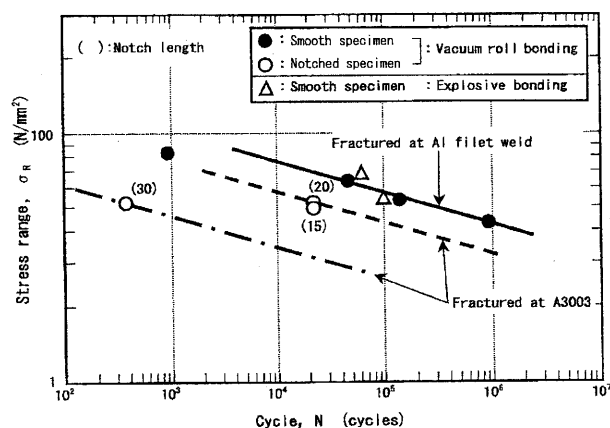


Fig.6 Result of fatigue test of STJ

4.3 疲労被害度の評価

疲労試験結果 (Fig.6 実線) に対し、実働荷重による疲労被害度の推定を行い、構造部材としての STJ の疲労強度を評価した。STJ に作用する応力レベルは各々の船の設計によって異なるがここでは作用応力として文献³⁾に示されている応力レベル (最大応力振幅 17N/mm^2 程度) を仮定した。応力の長期分布として指数分布を仮定し、マイナー則により疲労被害度を推定した結果を Table 2 に示す。STJ にはタンク満載時には圧縮応力が作用するが、安全側の評価として平

均応力影響は考慮に入れていない。IGC コードの基準は疲労被害度 0.5 以下であるが、推定値は基準値より十分小さく、実働荷重に対して新 STJ は十分な疲労強度を有していることを確認した。

Table 2 Estimation of damage factor of new STJ

Applied SN curve	$\Delta\sigma = 243.8 \text{ N}^{-0.1331} \text{ N/mm}^2$ (Stress ratio R=0)
Assumed stress range at STJ (AL plate nominal stress)	$\Delta\sigma = 34 \text{ N/mm}^2$ (at $Q=10^{-3}$)
Assumed long-term stress distribution	Exponential distribution
Estimated damage factor	0.0001

5. 実機搭載による新型 STJ の強度検証

5.1 実機搭載状況

開発された新型 STJ の信頼性を実機ベースで実証するために、Fig. 7 に示す 135,000m³ 型 LNG 運搬船に部分搭載した。上述の疲労試験結果より、疲労強度については前述の通り十分な就航実績を有する爆着材と同等である旨確認している。そこで、実機搭載による検証は、波浪による最大荷重および、Load/Unload による荷重履歴に対して、新型 STJ の強度健全性を確認することを主目的とする。

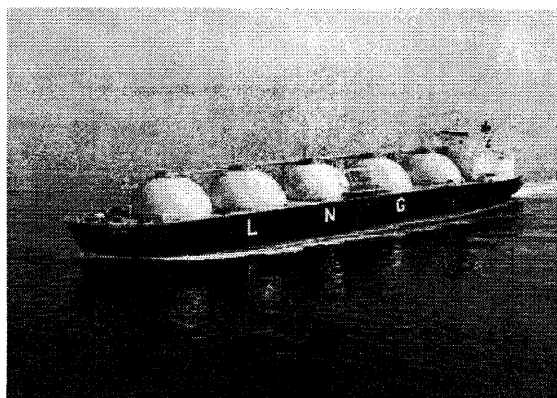


Fig.7 LNG carrier with new STJ

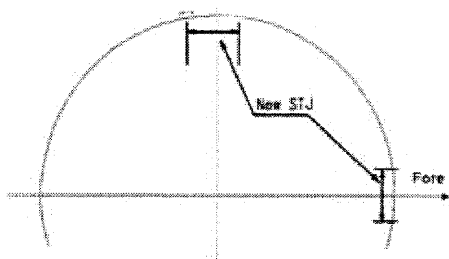


Fig.8 Location of new STJ (No.1 and No.2 tank)

Fig. 8 に新型 STJ の搭載位置を示す。荷重の厳しい No. 1 タンクと、それに次ぐ No. 2 タンクを対象とした。適用本数は、No. 1 および No. 2 タンクとも、タンクの左舷側の位置に 6 本、

船首側の位置に 6 本の合計 24 本である。この内左舷側の位置はタンクの水平加速度と垂直加速度が重畳する最も厳しい位置として選択した。船首側の位置は、STJ に作用するせん断応力が最も大きくなる位置として選択した。

5.2 建造時検査

新型 STJ の 24 本すべてに欠陥がないことを確認した後、タンクスカートのブロックに溶接し、総組工程に送られアルミニウム合金球形タンクの赤道帯ブロックと接合した。Fig. 9 に新型 STJ 溶接後の建造状況、および十字隅肉溶接後の浸透探傷検査の状況を示す。A3003/SUS304L クラッド材の STJ 端面の A3003 と SUS304L との接合界面には、欠陥指示模様は認められず、健全な状態でタンクスカート部の STJ として組立てた。

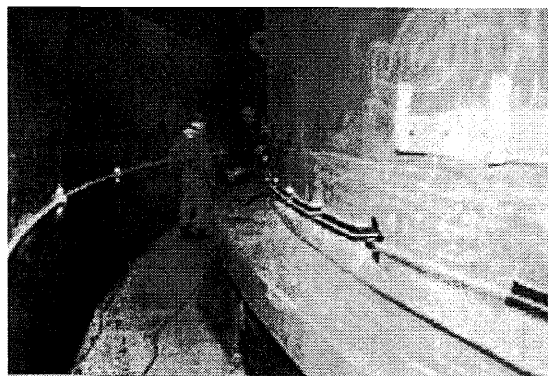


Fig.9 Dye penetrant test during construction

5.3 就航後検査

約 3 年間就航後の初回ドックにて部分搭載された新型 STJ を点検した。Fig. 10 に A3003/SUS304L クラッド材の STJ の浸透探傷検査結果を示す。浸透探傷検査は、No. 1 と No. 2 のタンクの船首側と左舷側位置の各 3 本ずつ合計 12 本分の A3003/SUS304L クラッド材の STJ に対して行った。いずれの STJ ともに A3003 と SUS304L との接合界面には欠陥指示模様は認められず、健全な状態であることを確認した。

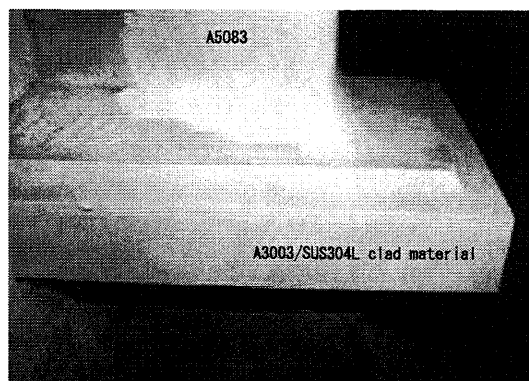


Fig.10 Dye penetrant test after three years service

5.4 作用荷重レベルの評価

先述の検査前の 3 年間の就航中に受ける最大荷重の累積超過確率レベルは $Q=10^{-7}$ 以上でありほぼ設計最大荷重に近い値に遭遇していると考えられる。

新型 STJ が搭載された LNG 船には Fig. 11 に示す応力モニタリングシステムが取り付けられている⁷⁾。Fig. 12 に No. 2 タンクのスカート左舷の STJ 取り付け位置下方の STEEL 部 (Fig. 1 参照) の応力レンジの計測値を示す。図中に最大荷重と計測期間中の荷重の関係を示す。ここに長期分布は直線 (指数分布) で表現できると仮定した。

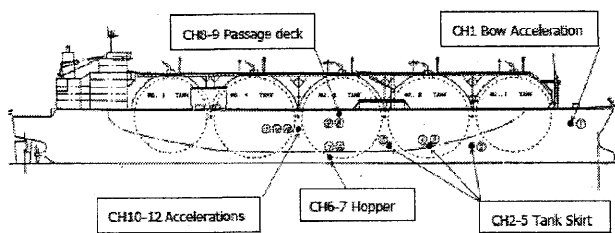


Fig. 11 Stress Monitoring system

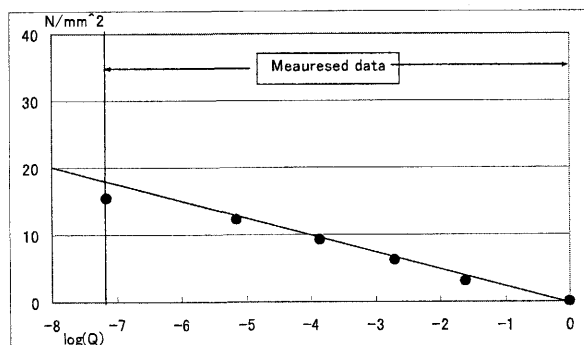


Fig. 12 Long-term distribution of stress range in skirt (steel part)

Fig. 12 から分かるように、検証期間中の最大荷重と、設計期間中の最大に対応する確率レベル ($Q=10^{-8}$) における外挿値との差は約 1 割程度と小さい。すなわち、計測期間中に本船に推定される最大値の 9 割の荷重に遭遇しており、本研究により新 STJ の十分な実証が行われたと考えられる。

6. 結 言

本研究では真空圧延接合法による新しい LNG タンクスカート用 STJ を開発、実機に搭載し、主に下記の知見を得た。

- 1) 試作用の大型真空圧延接合装置の能力、および適用される実機の条件を考慮し、新型 STJ の寸法を設定した。
- 2) 新型 STJ に対し、十字隅肉溶接継手の疲労試験を実施し、疲労強度が従来の爆着材と同等であることを確認した。試験片の観察により、STJ の疲労き裂は接合界面を進展

しない、すなわち、十字隅肉溶接継手では疲労荷重に対して接合界面が溶接継手の最弱部とはならないことを確認した。

- 3) 新型 STJ を部分的に実機に搭載、就航 3 年後の検査により、新型 STJ の健全性を確認した。これにより、波浪による最大荷重、Load/Unload による荷重履歴など、実働荷重に対する強度が十分であることを確認した。
- 4) スカートの応力モニタリングにより計測期間中に推定最大荷重の 9 割の荷重を受けていることが確認された。これより、上記検査にて十分な実証が行われたと考えられる。
- 5) 上記により、真空圧延接合法による LNG タンクスカート用新型 STJ の有用性が実証された。

謝 辞

本論文の作成にあたり、長崎総合科学大学大学院工学研究科の矢島浩教授、渡邊栄一教授に貴重な助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 迎, 西尾, 加藤他: 真空圧延接合装置の試作とクラッド材の製造—真空圧延接合法によるクラッド材の製造とその特性 (第 1 報)—, 溶接学会論文集, 第 9 巻, 第 1 号 (1991), pp.17-23.
- 2) 河野, 松井, 西尾他: A3003/SUS304L クラッド材接合部の微細観察—真空圧延接合法による A3003/SUS304L クラッド材の接合部特性 (第 1 報)—溶接学会論文集, 第 22 巻, 第 2 号 (2004), pp.291-299.
- 3) 河野, 井上, 矢島他: 高周波加熱真空圧延接合 AL/SUSSTJ の強度 (その 1)—十字隅肉溶接継手の強度—, 西部造船会会報, 第 102 号 (2001), pp.241-246.
- 4) 川市, 河野, 矢島他: 高周波加熱真空圧延接合 AL/SUSSTJ の強度 (その 2)—十字隅肉溶接継手の破壊強度解析—, 西部造船会会報, 第 102 号 (2001), pp.247-253.
- 5) Yoshihiro Suetake, et al, Proposal of technical improvement for future LNG carriers, GASTECH96
- 6) 中山他: LNG 船用のアルミ合金と鋼の爆着継手の材料強度特性について, 西部造船会会報, 第 66 号 (1983), pp.183-189.
- 7) Koichi Sato, Hiroyuki Ohira, Motoki Tatani, Taizo Yoshida, Long-term Fatigue Monitoring For LNG Carrier, GASTECH2005