

【工学】

研究論文

ケミカルタンカー用二相ステンレスクラッド鋼板の
強度特性・溶接性・耐食性に関する一考察岡田 公一*¹, 木村 俊介*², 緒方 洋典*³,
春山 雄介*⁴, 福井 努*⁵, 矢島 浩*⁶A Study on Strength Characteristics, Weldability and Corrosion Resistance
of Duplex Stainless Clad Steel Plate for Chemical Tanker ConstructionOKADA Koichi*¹, KIMURA Shunsuke*², OGATA Hironori*³,
HARUYAMA Yusuke*⁴, FUKUI Tsutomu*⁵ and YAJIMA Hiroshi*⁶

Summary

Duplex stainless (SUS329J3L) clad steel plate is newly developed and commercialized in 2016. The fundamental problem to be solved for the utilization of SUS329J3L clad steel plate in chemical tanker construction is to secure the strength and reliability on the bonded interface of SUS329J3L clad steel plate. In this study, the fracture toughness, fatigue crack propagation characteristics of the bonded interface of SUS329J3L clad steel plate and fatigue strength of the welded joints of the clad steel plates were investigated and also the weldability and corrosion resistance of the clad steel plate were evaluated. The results can be summarized as follows.

- ① From the results of fracture toughness tests using cruciform welded joint specimens and CT type specimens of the bonded interface of SUS329J3L clad steel plate and fatigue crack propagation tests using CT type and CCT type specimens of that, we concluded that duplex stainless (SUS329J3L) clad steel plate can be sufficiently utilized in chemical tanker construction.
- ② The fatigue strength of cargo tank structure of chemical tanker using a combination of SUS329J3L clad steel plates and SUS329J3L solid steel plates is equal or superior to that of cargo tank structure using a conventional combination of austenitic stainless (SUS316L) clad steel plates and SUS316LN solid steel plates.
- ③ Through the evaluation of the weldability of tested clad steel plates, we clarified the fact that SUS329J3L clad steel plates are equal or superior to SUS316L's in the various strength characteristics and weldability.
- ④ In terms of the corrosion resistance, it was clarified that the cladding material of SUS329J3L steel plate is equal or superior to that of SUS316L steel plate.

Keywords : duplex stainless clad steel plate, fracture toughness of bonded interface, fatigue crack propagation characteristics of bonded interface, fatigue strength of welded joint, corrosion resistance, chemical tanker

*¹ 大学院 工学研究科 准教授 *² 工房 狐 (研究当時 大学院 工学研究科) *³ 株式会社 白杵造船所 博士(工学)

*⁴ 株式会社 白杵造船所 *⁵ 一般財団法人 日本海事協会 技術研究所 博士(工学) *⁶ 矢島材料強度研究所 工博

2019年9月27日受付

2019年11月14日受理

1. 緒言

ケミカルタンカーのカーゴタンクは、極めて過酷な腐食環境と、高比重の積荷や波浪による厳しい荷重条件に耐えねばならない。したがって、その建造には、耐食性に優れたステンレス鋼板やステンレスクラッド鋼板が要求される。

2016年に開発・製品化された、二相ステンレス SUS329J3L クラッド鋼板をケミカルタンカーに採用できれば、カーゴタンク内の船殻材を全て SUS329J3L 鋼板で構成することができ、耐食性に優れた、合理的な船体建造が実現する。

近年、カーゴタンク内の全ての船殻材を、SUS329J3L ソリッド鋼板で構成したケミカルタンカーが就航しているが、SUS329J3L ソリッド鋼板と SUS329J3L クラッド鋼板とで構成できれば、より合理的なケミカルタンカーの建造が可能になる。

SUS329J3L クラッド鋼板を使用したケミカルタンカー建造に際して、二重底の SUS329J3L クラッド鋼板と、カーゴタンク隔壁の SUS329J3L ソリッド鋼板との十字溶接継手部には、非常に高い耐食性や強度信頼性が要求される。

本論文では、SUS329J3L クラッド鋼板を使用したケミカルタンカー実船建造にあたり、重要課題である、接合界面の破壊靱性、接合界面に沿っての疲労亀裂伝播特性、溶接継手の疲労強度をはじめ、溶接性や耐食性について検討・評価した結果について述べる。

2. SUS329J3L クラッド鋼板接合界面の破壊靱性

2.1 供試鋼板

供試した SUS329J3L ソリッド鋼板および SUS329J3L クラッド鋼板合せ材・母材の化学成分を Table 1 に、機械的性質を Table 2 に示す。

Table 1 Chemical composition of test steel plates

Test Steel Plate	(mass %)									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	
SUS329J3L (t:16)	0.013	0.55	1.81	0.026	0.000	22.55	5.75	3.10	0.17	
SUS329J3L -Clad (t:3+13)	SUS329J3L (t:3)	0.013	0.31	0.97	0.025	0.002	22.55	5.42	3.10	0.17
	Mild Steel (t:13)	0.054	0.29	1.36	0.014	0.003	—	—	—	—

Table 2 Mechanical properties of test steel plates

Test Steel Plate	Thick (mm)	0.2% Proof Stress (N/mm ²)	Tensile Strength (N/mm ²)	Elongation (%)
SUS329J3L	16	594	771	35
SUS329J3L-Clad*	16 (3+13)	433	554	23

*Full-Thickness Tensile Test(16mm)

2.2 接合界面の破壊靱性試験およびその結果

SUS329J3L クラッド鋼板接合界面の破壊靱性値を把握した^{1)~4)}。

供試した十字溶接継手引張破壊靱性試験片の形状・寸法を、Fig.1 に、CT 型試験片の形状・寸法を、Fig.2 に示す。

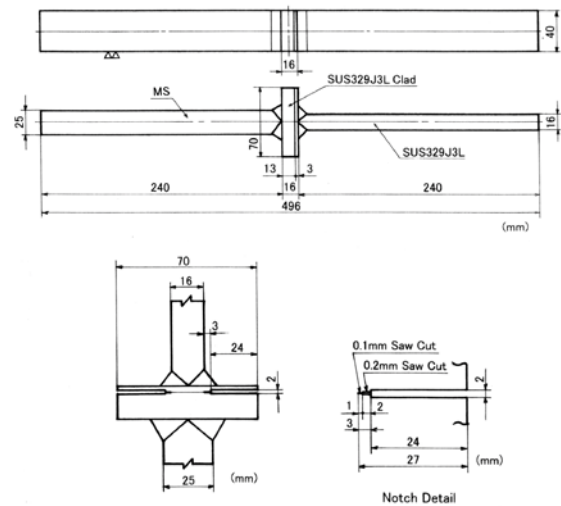


Fig. 1 Shape and size of cruciform welded joint specimen for tensile fracture toughness test

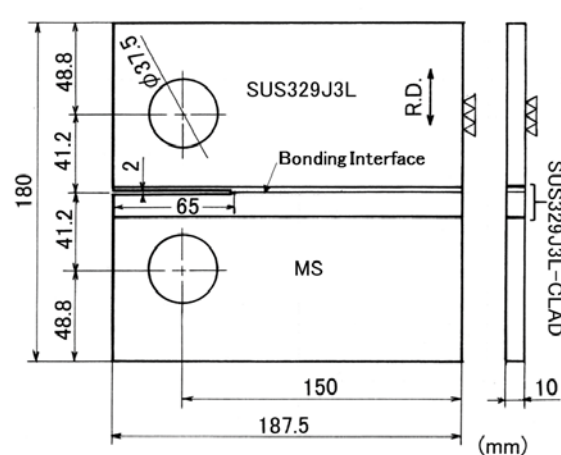


Fig. 2 Shape and size of CT type specimen for fracture toughness test

十字溶接継手引張破壊靱性試験片による破壊靱性試験結果を **Table 3** に、また、CT 試験片による破壊靱性試験結果を **Table 4** に示す。

Table 3 Results of cruciform welded joint tensile fracture toughness tests

Specimen Number	Width 2W (mm)	Notch Length a _{eff} (mm)	Temperature			Fracture Load P (kN)	Kc (N/mm ^{3/2})
			(°C)	(K)	1/T _K (K ⁻¹)		
CF-1	40.9	13.1	-106	167	5.99×10 ⁻³	275	1.37×10 ³
CF-2	42.3	14.2	-119	154	6.49×10 ⁻³	338	1.75×10 ³
CF-3	41.9	14.5	-166	107	9.35×10 ⁻³	293	1.58×10 ³

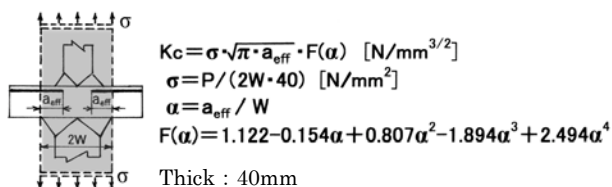


Table 4 Results of CT type fracture toughness tests

Specimen Number	Fatigue Crack Length l _f (mm)	l _f + a (a:27.5) (mm)	Temperature			Fracture Load P (kN)	Kc (N/mm ^{3/2})
			(°C)	(K)	1/T _K (K ⁻¹)		
CT-1	39.2	66.7	-116	157	6.37×10 ⁻³	132	8.80×10 ³ *
CT-2	40.1	67.6	-144	129	7.75×10 ⁻³	115	7.77×10 ³ *
CT-3	23.2	50.7	-105	168	5.95×10 ⁻³	48.2	2.46×10 ³
CT-4	25.3	52.8	-159	114	8.77×10 ⁻³	49.1	2.61×10 ³
CT-5	4.4	31.9	-173	100	10.00×10 ⁻³	69.5	2.95×10 ³

* : Invalid

また、破壊靱性試験結果を **Fig.3** に示す（ただし、**Table 4** 中の試験片番号 CT-1 および CT-2 の試験結果は Invalid と判断されたため除外した）。なお、**Fig.3** には、2009 年に実施された、SUS329J3L ソリッド鋼板（板厚 9mm）の、TIGW（Tungsten Inert Gas Welding）と FCAW（Flux-Cored Arc Welding）による突合せ溶接継手溶接金属中央部の、試験片幅 100mm の中央切欠付引張試験結果⁵⁾も示した。

試験結果より、SUS329J3L クラッド鋼板接合界面の破壊靱性値は、SUS329J3L ソリッド鋼板の TIGW および FCAW による突合せ溶接継手溶接金属の破壊靱性値と

-100°C~-170°C程度でほぼ同じであると言える。

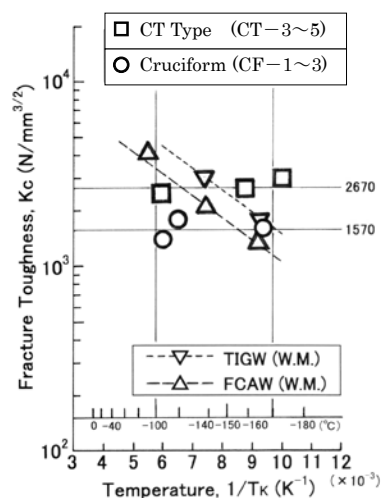


Fig. 3 Relation between Kc and temperature [Interface of SUS329J3L-clad steel plate]

2016 年に開発・製品化された SUS329J3L クラッド鋼板接合界面の破壊靱性値は、ケミカルタンカーのカーゴタンク構造に適用可能な水準であることが確認された。

3. SUS329J3L クラッド鋼板接合界面に沿っての疲労亀裂伝播特性

3.1 供試鋼板

供試鋼板は、上述の **Table 1** および **Table 2** に示した鋼板と同じである。

3.2 接合界面に沿っての疲労亀裂伝播試験 およびその結果

SUS329J3L クラッド鋼板接合界面に沿っての室温・大気中での疲労亀裂伝播特性を、CT 型試験片 (**Fig.2** 参照) と CCT 型試験片（中央切欠付引張試験片）によって把握した。

供試した CCT 型試験片の形状・寸法を、**Fig.4** に示す。

CT 型試験片による疲労亀裂伝播試験条件を **Table 5** に示し、疲労亀裂進展状況を **Photo 1** に示す。**Photo 1** から明らかなように、疲労亀裂はクラッド鋼板接合界面に沿って真っ直ぐに進展している。

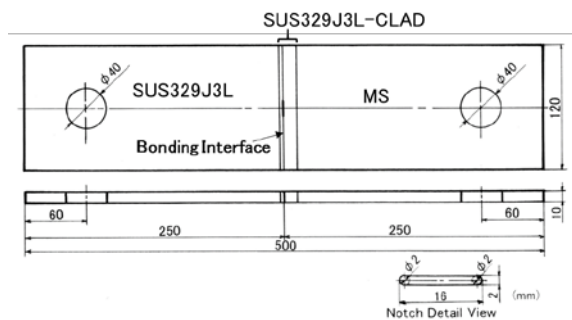


Fig. 4 Shape and size of CCT type specimen for fatigue crack propagation test

Table 5 Test conditions of CT type fatigue crack propagation tests

Specimen Number	Width W (mm)	Thick. t (mm)	Test Load	
			P _{max} (kN)	P _{min} (kN)
PCT-1	150	10.06	36	3.6
PCT-2	150	10.08	36	3.6

Room temp. , In air.



(1)PCT-1



(2)PCT-2

Photo 1 Fatigue crack pass after fatigue crack propagation tests (CT type)

また、試験結果の疲労亀裂伝播速度 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK との関係を示す Fig. 5 に示す。同図には、SM570Q 鋼板（引張強さ 570 N/mm² 級の高張力鋼板）および WES-HW685 鋼板（引張強さ 780 N/mm² 級の高張力鋼板）母材の CT 型試験片による疲労亀裂伝播試験結果⁶⁾もあわせて示した。

Fig. 5 から明らかなように SUS329J3L クラッド鋼板接合界面に沿っての疲労亀裂伝播特性は、高張力鋼板（SM570Q 鋼板および WES-HW685 鋼板）母材の疲労亀裂伝播特性とほぼ同等であり、ケミカルタンカーのカーゴタンク構造に適用可能な水準であることが確認された。

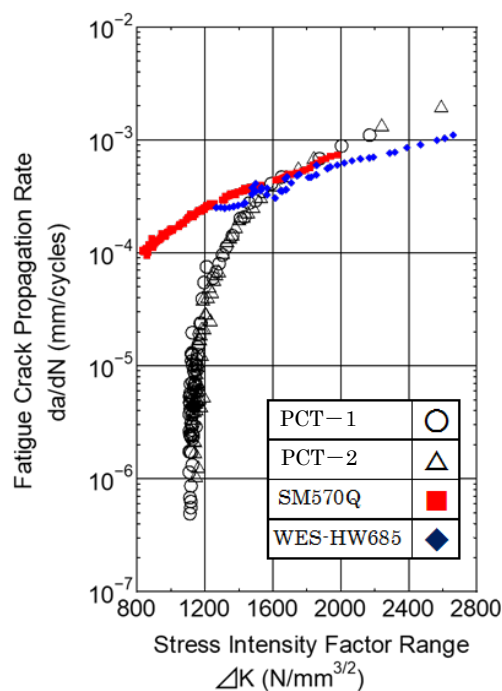


Fig. 5 Relation between da/dN and ΔK (CT type)

また、CCT 型試験片による疲労亀裂伝播試験条件を Table 6 に示し、疲労亀裂進展状況を Photo 2 に示す。Photo 2 から明らかなように、疲労亀裂はクラッド鋼板接合界面に沿って真っ直ぐに進展している。

Table 6 Test conditions of CCT type fatigue crack propagation tests

Specimen Number	Width W (mm)	Thick. T (mm)	Cross-Section Area A (mm ²)	Test Load		Test Stress	
				P _{max} (kN)	P _{min} (kN)	σ_{max} (N/mm ²)	σ_{min} (N/mm ²)
PCCT-1	121	8.0	968	110	11.0	114	11.4
PCCT-2	121	7.9	956	110	11.0	115	11.5



(1)PCCT-2 Surface



(2)PCCT-2 Back Surface

Photo 2 Fatigue crack pass after fatigue crack propagation tests (CCT type)

試験結果の疲労亀裂伝播速度 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK との関係を示す。また、2010年に実施された、SUS329J3L ソリッド鋼板母材（板厚 10 mm）の試験片幅 160 mm の CCT 型試験片（中央切欠付引張試験片）による疲労亀裂伝播試験結果⁷⁾も同様に、Fig.6 に示した（図中 BP-1 および BP-2）。

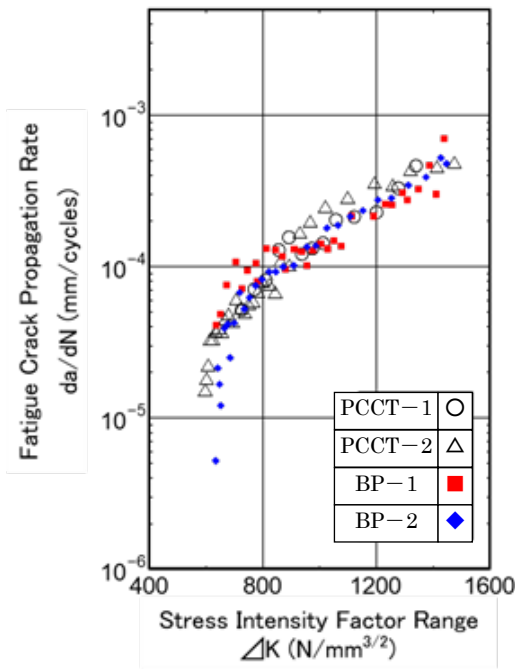


Fig.6 Relation between da/dN and ΔK (CCT type)

Fig.6 から明らかなように、 ΔK が大きい領域では、SUS329J3L クラッド鋼板接合界面に沿っての疲労亀裂伝播速度は、SUS329J3L ソリッド鋼板母材の疲労亀裂伝播速度より若干速いが、 ΔK が小さい領域では若干遅く、両者は概ね同等であると見做せる。したがって、SUS329J3L クラッド鋼板は、クラッド鋼板接合界面に沿っての疲労亀裂伝播特性の観点からも、ケミカルタンカーのカーゴタンク構造に適用しても問題ないことが確認された。

4. 溶接継手の疲労強度

SUS329J3L クラッド鋼板同士の突合せ溶接継手や、SUS329J3L クラッド鋼板と SUS329J3L ソリッド鋼板との荷重伝達型・荷重非伝達型 完全溶け込み十字溶接継

手の疲労強度を把握し、従来、実績の多い SUS316L クラッド鋼板の同種溶接継手の疲労強度と比較・検討・評価した^{8)~10)}。

4.1 供試鋼板

供試したSUS329J3Lクラッド鋼板の化学成分を先に示した Table 1 に、機械的性質を Table 2 に示し、SUS316Lクラッド鋼板の化学成分を Table 7 に、機械的性質を Table 8 に示す。

Table 7 Chemical composition of test steel plates

Test Steel Plate		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
SUS316L-Clad (t3+13)	SUS316L (t3)	0.009	0.52	0.72	0.028	0.004	16.82	12.18	2.73	0.03
	Mild Steel (t13)	0.150	0.24	1.07	0.014	0.004	—	—	—	—

Table 8 Mechanical properties of test steel plate

Test Steel Plate	Thick (mm)	0.2% Proof Stress (N/mm ²)	Tensile Strength (N/mm ²)	Elongation (%)
SUS316L-Clad*	16 (3+13)	286	476	35

*Full-Thickness Tensile Test(16mm)

4.2 供試試験片の形状・寸法

4.2.1 クラッド鋼板同士の突合せ溶接継手

SUS329J3Lクラッド鋼板同士および SUS316Lクラッド鋼板同士の、溶接のままの突合せ溶接継手の疲労試験を実施した。なお、すべての供試溶接継手において、溶接方法はCO₂ 溶接 (FCAW)、溶接姿勢は下向き、CO₂ 流量は18 l/min、パス間温度は150℃ 以下にて溶接を施工した。

SUS329J3Lクラッド鋼板（板厚：16 mm）同士と、SUS316Lクラッド鋼板（板厚：16 mm）同士の、突合せ溶接継手疲労試験片の形状・寸法を Fig.7 に示す。

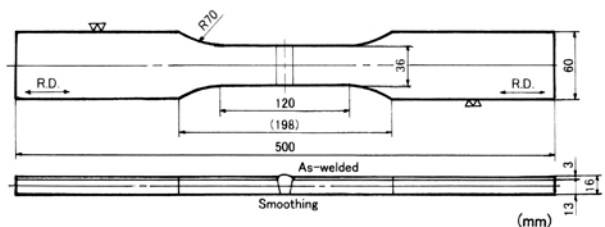


Fig.7 Shape and size of fatigue test specimen (Butt welded joint)

4.2.2 荷重伝達型 完全溶け込み十字溶接継手

SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との荷重伝達型 完全溶け込み十字溶接継手、および SUS316Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との荷重伝達型 完全溶け込み十字溶接継手の疲労試験を実施し、S-N線図の把握・比較を行った。なお、溶接のままのみを供試した。溶接方法はCO₂ 溶接 (FCAW)、溶接姿勢は下向き、CO₂ 流量は18 ℓ/min、パス間温度は150℃以下にて溶接を施工した。

荷重伝達型 完全溶け込み十字溶接継手疲労試験片の形状・寸法を、Fig.8に示す。

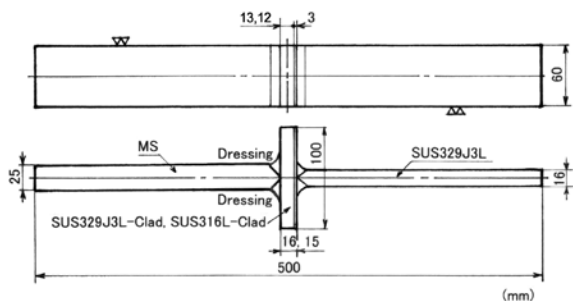


Fig.8 Shape and size of fatigue test specimen (Load-carrying full penetration cruciform welded joint)

4.2.3 荷重非伝達型 完全溶け込み十字溶接継手

SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との荷重非伝達型 完全溶け込み十字溶接継手（溶接のまま、溶接止端部グラインダーによるドレッシング処理）、およびSUS316Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との荷重非伝達型 完全溶け込み十字溶接継手（溶接のまま、溶接止端部TIGアークによるドレッシング処理）の疲労試験を実施し、S-N線図の把握・比較を行った。

すべての供試溶接継手において、溶接方法は CO₂ 溶接 (FCAW)、溶接姿勢は下向き、CO₂ 流量は18 ℓ/min、パス間温度は150℃以下にて溶接を施工した。

荷重非伝達型 完全溶け込み十字溶接継手疲労試験片の形状・寸法を、Fig.9に示す。

SUS329J3Lクラッド鋼板同士およびSUS316Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手（溶接のまま）では、軟鋼板側の余盛を平滑に仕上げて供試したために、疲労亀裂はステンレス鋼板側余盛止端部から発生し、良好なデータが得られたと言える。

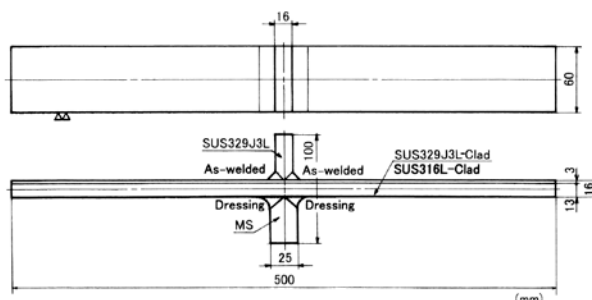


Fig.9 Shape and size of fatigue test specimen (Non-load-carrying full penetration cruciform welded joint)

4.3 疲労試験結果 および その評価

4.3.1 クラッド鋼板同士突合せ溶接継手の疲労試験結果

突合せ溶接継手疲労試験結果を Fig.10 に示す。

また、参考として、溶接止端部形状による応力集中係数の影響を排除し、材料としての疲労強度を比較すべく、疲労試験後の各試験片での疲労亀裂発生箇所の応力集中係数 K_t を求め、応力集中によって平滑材 ($K_t = 1.0$) から低下したであろう疲労強度の比 (切欠き係数: K_f) を補正した。 K_t が3.0以下の場合、切欠き係数 K_f は、 $K_f \approx K_t$ であると仮定し、 K_t が3.0以上の場合、 $K_f \approx 3.0$ と仮定して、疲労試験結果の応力範囲 σ_R を補正 ($K_t \cdot \sigma_R$) した。

Fig.10 中には、突合せ溶接継手疲労試験結果の $K_t \cdot \sigma_R - N_f$ 線図も示した。

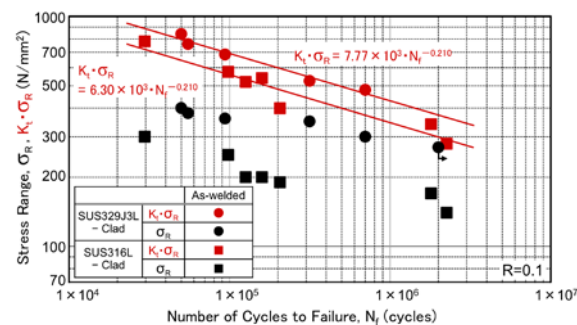


Fig.10 Results of fatigue test for butt welded joint ($K_t \cdot \sigma_R - N_f$ curves)

Fig.10 に示した K_t による補正の結果では、SUS329J3Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手の疲労強度は、SUS316Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手の疲労強度の約1.2倍であった。

4.3.2 荷重伝達型 完全溶け込み十字溶接継手の疲労試験結果

SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との荷重伝達型 完全溶け込み十字溶接継手、および SUS316Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との荷重伝達型 完全溶け込み十字溶接継手を供試したが、軟鋼板側の溶接金属をグラインダーでドレッシング処理して供試したために、疲労亀裂はSUS329J3Lソリッド鋼板溶接止端部から発生し、良好なデータが得られたと言える。

SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との荷重伝達型 完全溶け込み十字溶接継手（溶接のまま）の疲労試験結果を Fig.11 に示し、SUS316Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との荷重伝達型 完全溶け込み十字溶接継手（溶接のまま）の疲労試験結果を Fig.12 に示す。

また、参考として、突合せ溶接継手の疲労試験結果同様、応力集中係数 K_t を考慮した疲労強度の補正を行った。疲労試験結果の $K_t \cdot \sigma_R - N_f$ 線図を Fig.11 および Fig.12 に示す。

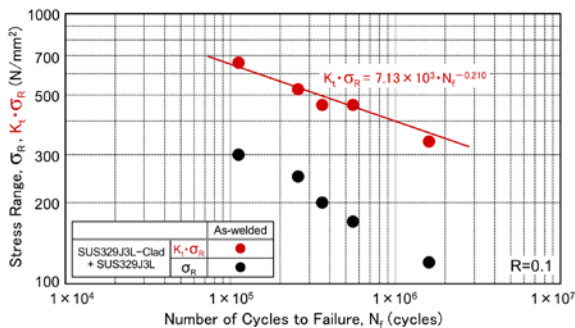


Fig.11 Results of fatigue test for load-carrying full penetration cruciform welded joint ($K_t \cdot \sigma_R - N_f$ curve)

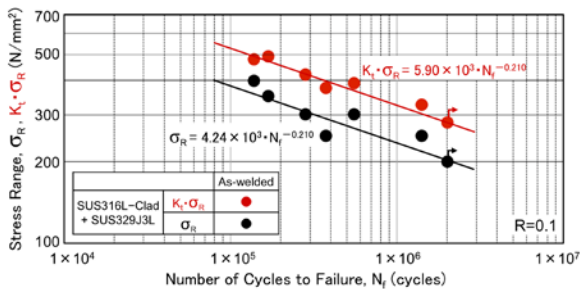


Fig.12 Results of fatigue test for load-carrying full penetration cruciform welded joint ($\sigma_R - N_f$ curve, $K_t \cdot \sigma_R - N_f$ curve)

ここで、Fig.11 に示したSUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との荷重伝達型 完全溶け込み十字溶接継手の疲労強度と、Fig.12 に示したSUS316Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との荷重伝達型 完全溶け込み十字溶接継手の疲労強度を比較する。

両継手の疲労試験結果とも、SUS329J3Lソリッド鋼板溶接止端部から疲労亀裂が発生していたにもかかわらず、 $K_t \cdot \sigma_R - N_f$ 線図による比較では、Fig.11 に示したSUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との十字溶接継手の方が、Fig.12 に示したSUS316Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との十字溶接継手より、約1.2倍高い疲労強度を示していた。

上述の理由として、両継手の溶接が同時に施工されなかったために、溶接条件の相違によって疲労亀裂発生部の金属組織に差があった可能性が考えられるが、SUS329J3Lクラッド鋼板の疲労強度としては特段問題無いと言える。

また、Fig.11 に示したSUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との十字溶接継手の方が、溶接止端部の応力集中係数が大きく、継手形状としては良くなかったと言える。従来からの知見と同様、SUS329J3Lソリッド鋼板の溶接に際しては止端部形状に注意を要する。

以上により、応力集中部となる溶接止端部に適正なドレッシング処理を施すことにより、SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との組み合わせで建造されるカーゴタンク構造の疲労強度は、従来のSUS316Lクラッド鋼板とSUS316LNソリッド鋼板との組み合わせで建造されたカーゴタンク構造と比較して同等以上と言える。

4.3.3 荷重非伝達型 完全溶け込み十字溶接継手の疲労試験結果

SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との荷重非伝達型 完全溶け込み十字溶接継手（溶接のまま、溶接止端部グラインダーによるドレッシング処理）および、SUS316Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との荷重非伝達型 完全溶け込み十字溶接継手（溶接のまま、溶接止端部TIGアークによるドレッシング処理）を供試した。なお、軟鋼板側の溶接金属をグラインダーでドレッシング処理して供試したために、疲労亀裂

はSUS329J3L鋼板側溶接止端部から発生し、良好なデータが得られたと言える。

SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との荷重非伝達型完全溶け込み十字溶接継手（溶接のまま、溶接止端部グラインダーによるドレッシング処理）の疲労試験結果を Fig.13 に示す。また、SUS316Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との荷重非伝達型完全溶け込み十字溶接継手（溶接のまま、溶接止端部TIGアークによるドレッシング処理）の疲労試験結果を Fig.14 に示す。

さらに、参考として、突合せ溶接継手の疲労試験結果と同様に、応力集中係数 K_t を考慮した疲労強度の補正を行った。Fig.13 および Fig.14 中に、各疲労試験結果の $K_t \cdot \sigma_R - N_f$ 線図をそれぞれ示す。

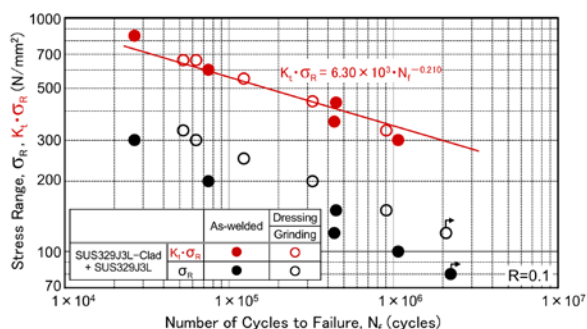


Fig.13 Results of fatigue test for non-load-carrying full penetration cruciform welded joint ($K_t \cdot \sigma_R - N_f$ curve)

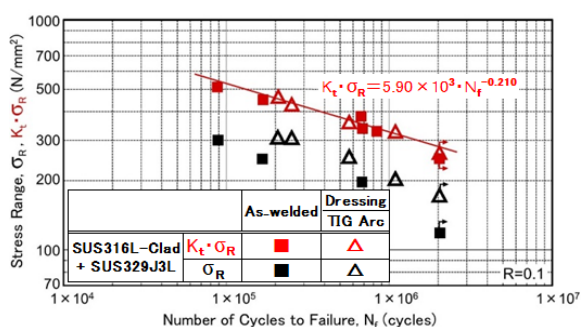


Fig.14 Results of fatigue test for non-load-carrying full penetration cruciform welded joint ($K_t \cdot \sigma_R - N_f$ curve)

Fig.13 および Fig.14 から、以下のことが言える。

$K_t \cdot \sigma_R - N_f$ 線図を比較すると、SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との荷重非伝達型完全

溶け込み十字溶接継手の疲労強度は、SUS316Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との荷重非伝達型完全溶け込み十字溶接継手の疲労強度と比較して、約1.1倍の水準であった。すなわち、溶接止端部形状による応力集中係数の影響を排除した材料の疲労強度の観点からは、SUS329J3Lクラッド鋼板溶接継手部の疲労強度は特段問題ないと言える。

また、Fig.13 に示したSUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との十字溶接継手の方が、溶接止端部の応力集中係数が大きく、疲労強度の観点から溶接止端部の形状としては良くなかったと言える。SUS329J3Lクラッド鋼板の溶接についても、従来からの知見と同様、止端部形状に注意した溶接施工および適正なドレッシング処理が重要となる。

以上により、十字溶接継手の応力集中部となる溶接止端部に適正なドレッシング処理を施すことによって、SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との組み合わせで建造されるカーゴタンク構造は、実績の多いSUS316Lクラッド鋼板とSUS316LNソリッド鋼板またはSUS329J3Lソリッド鋼板との組み合わせで建造されたカーゴタンク構造と比較して、同等以上の疲労強度を確保することができる。

5. 溶接性に関する検討・評価

5.1 過剰溶接入熱の影響度把握試験 および その結果

SUS329J3L鋼板の溶接では、一般に40kJ/cm以上の入熱の溶接は避けるべきとされている。しかし、SUS329J3Lクラッド鋼板溶接部に及ぼす入熱量の影響を確認した。

すなわち、入熱量を変化（FCAW：20kJ/cm、44kJ/cm、および、SAW：30kJ/cm、50kJ/cm）させて、溶接欠陥、引張強度、靱性、溶接部組織に及ぼす影響を確認した。

外観試験においては、溶接欠陥は認められなかった。X線探傷試験によれば、FCAW 44kJ/cmでは、溶接継手全長にわたって溶接欠陥が生じていた。合せ材と母材との接合界面の溶接金属部分にスラグ巻き込みがあることが確認された。SAW 50kJ/cmでは、始端部および終端部に欠陥が確認されたが、定常部には欠陥はなかった。

供試突合せ溶接継手部の断面マクロ組織を Photo 3 に示す。

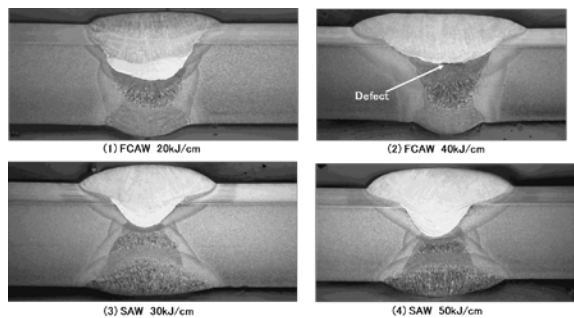


Photo 3 Results of macroscopic test of welded section for butt welded joints

FCAW 44 kJ/cmを除く溶接条件では、定常部に欠陥は確認されなかった。

供試溶接継手の室温・大気中での引張試験結果を Fig.15 に示す。

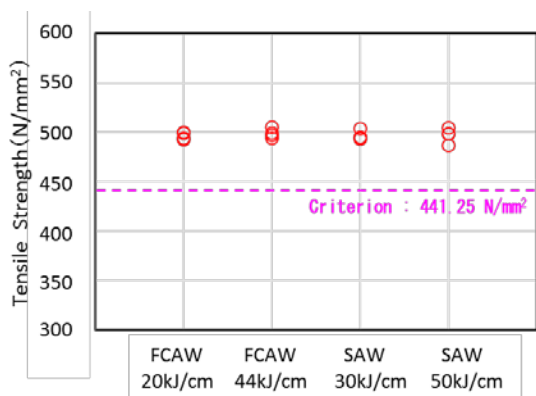
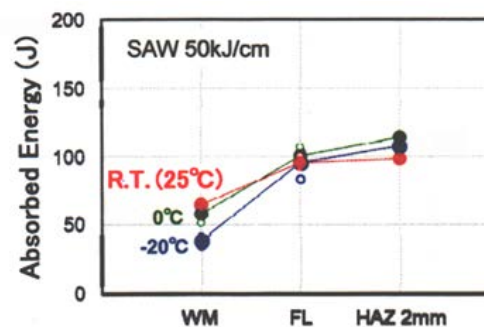
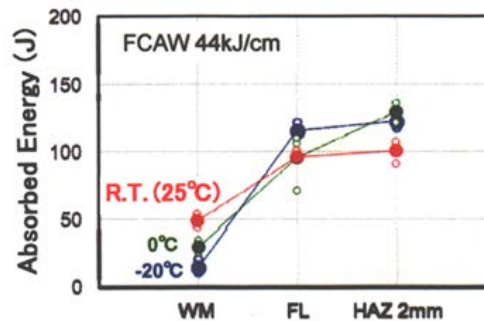
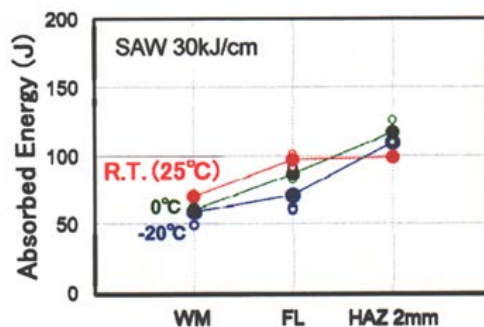
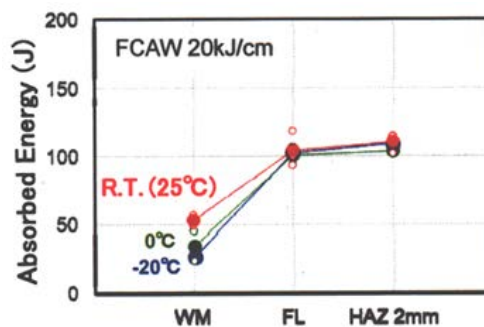


Fig.15 Results of tensile tests for welded joints

いずれの溶接条件においても、NK鋼船規則K編3章の規定により算出されたSUS329J3Lクラッド鋼板の規格最小引張強さである441.25 N/mm²を上回る優れた強度特性を有し、入熱量による差異は確認出来なかった。

供試溶接継手のV-ノッチシャルピー衝撃試験を、試験温度25℃(室温)、0℃、-20℃で実施した。V-ノッチシャルピー衝撃試験片は5mmサブサイズとし、ノッチ処理は、溶接金属中央、Fusion Line, HAZ 2mmとした。試験結果を Fig.16 に示す。



(Open Mark : Every, Solid Mark : Average)

Fig.16 Results of V-notch Charpy impact tests

Fig.16 から明らかなように、4条件の入熱量が吸収エネルギーに与える影響はほとんどないと言える。

Photo 4 に示す位置のビッカース硬さを測定した。測定結果を Fig.17 に示す。

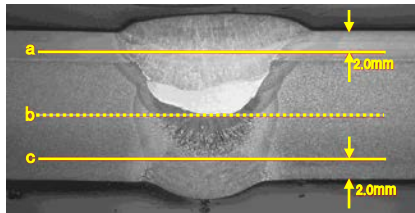
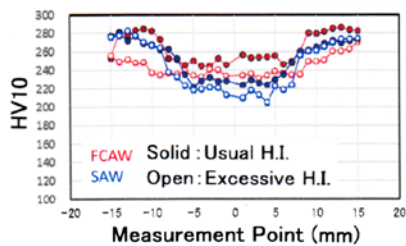
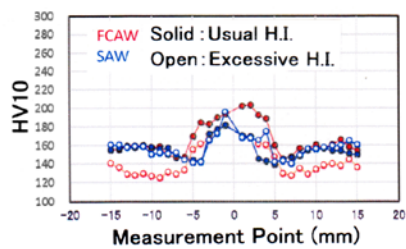


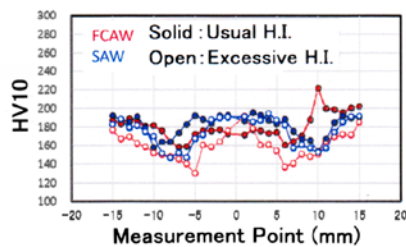
Photo 4 Measurement line of Vickers hardness



(a) 2mm from surface of SUS329J3L



(b) SUS329J3L/M.S. root



(c) 2mm from surface of M.S.

Fig.17 Vickers hardness distributions of butt welded joints

Fig.17 から明らかなように、4条件の入熱による溶接継手部のビッカース硬さ分布に差異はないと言える。

さらに、フェライトスコープを用いて、溶接金属のフェライト量を測定した結果を Table 9 に示す。測定は、NKの二相ステンレス鋼の溶接に関するガイドライン¹¹⁾に従って行った。すなわち、同一箇所において5回測定を行い、測定値の中で最も高い値を測定値とした。

Table 9 Ferrite content of butt welded joints

Steel Plate	Welding Variable	Ferrite content (%)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
SUS329J3L -clad	FCAW 20kJ/cm	45	42	41	39	39	39	43	48
	FCAW 44kJ/cm	37	35	42	32	32	39	30	34
	SAW 30kJ/cm	39	35	34	35	34	37	33	36
	SAW 50kJ/cm	23	21	20	21	21	18	21	19

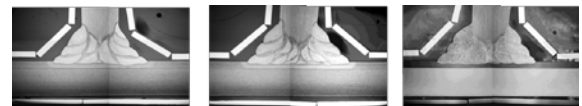
SAW 50kJ/cm 以外の溶接条件においては、フェライト量の基準値である 30% 以上 70% 以下を満足していた。

5.2 再溶接完全溶け込みT継手強度把握試験 およびその結果

就航後何らかの原因で補修が必要になった場合を想定した。すなわち、SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との完全溶け込みT継手を供試して、溶接部を除去後、再溶接を行った試験片を作製した。溶接1回、溶接部除去後再溶接（溶接2回）、再溶接部再除去後再々溶接（溶接3回）の3種類の継手の強度を把握した。

外観試験においては、溶接欠陥は認められなかった。また、JIS Z 2343 に準拠した浸透探傷試験においても、全ての供試体に欠陥は認められなかった。

供試T継手のマクロ組織を Photo 5 に示す。

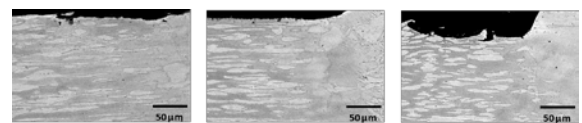


(1) Repair Welding:0 (2) Repair Welding:1 (3) Repair Welding:2

Photo 5 Results of macroscopic test of welded section for T welded joints

マクロ組織に顕著な差は認められなかった。

繰り返し入熱の影響を受けた合せ材溶接止端部のミクロ組織を Photo 6 に示す。



(1) Repair Welding:0 (2) Repair Welding:1 (3) Repair Welding:2

Photo 6 Results of microscopic test of welded section for T welded joints

析出物等は確認されず、手直し回数による顕著な差は確認されなかった。

供試溶接継手の始端部および終端部から採取した試験片による室温・大気中の引張試験結果を Fig.18 に示す。

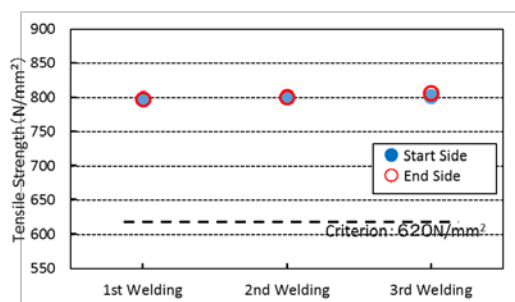


Fig.18 Results of tensile tests for T welded joints

いずれの溶接条件においても引張強さの判定基準である“620 N/mm² (SUS329J3L鋼板の規格最小引張強さ)”を十分上回る優れた強度特性を有していた。また、クラッド鋼板接合界面に、異常は確認されなかった。

T継手断面でのビッカース硬さを測定した。測定位置を Photo 7 に、測定結果を Fig.19 に示す。

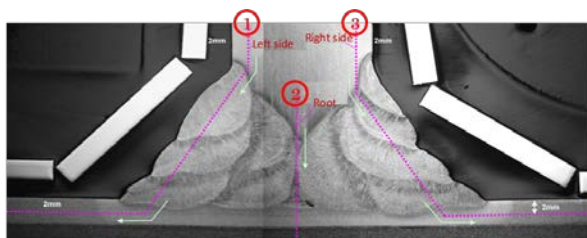
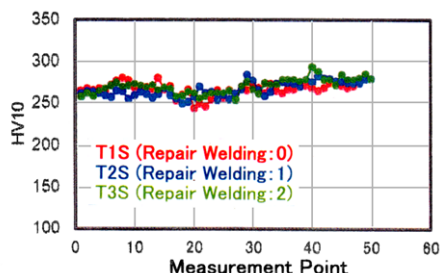


Photo 7 Measurement lines of Vickers hardness test

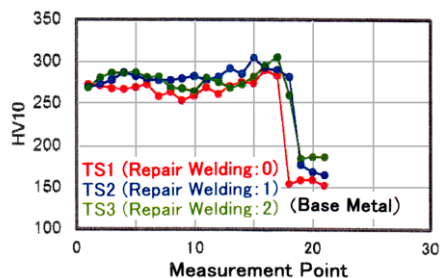
Fig.19 から明らかなように、ビッカース硬さの測定値は、手直し回数によらず、ほぼ同等の値であった。

さらに、フェライトスコープを用いて、溶接金属のフェライト量を測定した結果を Table 10 に示す。測定は、先述のNKガイドライン¹¹⁾に従い、同一箇所において5回測定を行い、測定値の中で最も高い値を測定値とした。

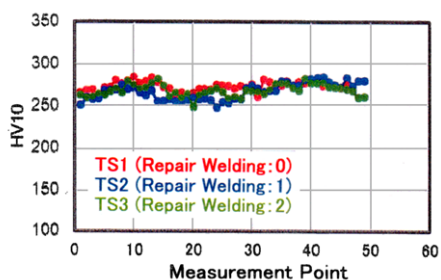
手直し回数によらず、フェライト量測定結果は、基準値である 30% 以上 70% 以下を満足していた。



(1) Measurement Line ①



(2) Measurement Line ②



(3) Measurement Line ③

Fig.19 Vickers hardness distributions of T welded joints

Table 10 Ferrite content of T welded joints

Repair Welding	Ferrite content (%)					
	1	2	3	4	5	6
1st Welding (Repair Welding:0)	58	49	54	53	49	53
2nd Welding (Repair Welding:1)	51	52	50	52	49	47
3rd Welding (Repair Welding:2)	58	51	50	52	53	54

6. 耐食性評価

SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS316Lクラッド鋼板の、母材ならびに溶接継手部の耐食性に及ぼす溶接入熱量の影響を把握するために、腐食環境下で種々の試験を実施した¹²⁾。

6.1 耐孔食性試験 および その結果

供試した突合せ溶接継手の耐孔食性試験片採取要領を **Photo 8** に、T継手の耐孔食性試験片採取要領を **Photo 9** に示す。

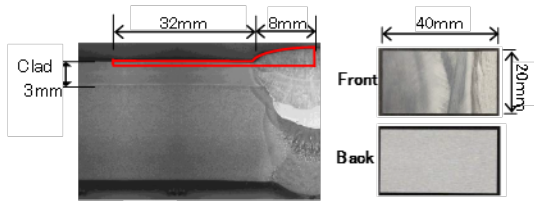


Photo 8 Cut-off plan of test piece for pitting corrosion resistance test

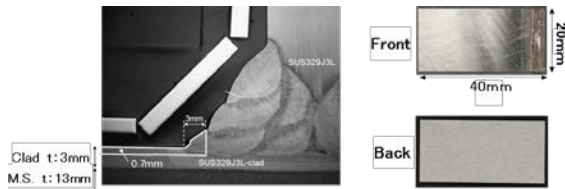


Photo 9 Cut-off plan of test piece for pitting corrosion resistance test

耐孔食性試験結果を **Table 11** に示し、試験後の試験片外観を **Photo 10** に示す。

Table 11 Results of pitting corrosion resistance tests

Steel Plate	Welding Variable	Temperature (°C)							CPT (°C)
		5	10	20	25	30	35	40	
SUS329J3L	FCAW 20kJ/cm	/	/	/	/	/	/	/	40
	FCAW 44kJ/cm	/	/	/	/	/	/	/	40
	SAW 30kJ/cm	/	/	/	/	/	/	/	30
	SAW 50kJ/cm	x x x	x x x	/	/	/	/	/	≤5
SUS329J3L (T-Joint)	1st welding	/	/	/	/	/	/	/	35
	2nd welding	/	/	/	/	/	/	/	30
	3rd welding	/	/	/	/	/	/	/	35
SUS316L	FCAW 20kJ/cm	/	/	/	/	/	/	/	10
	FCAW 44kJ/cm	x x x	/	/	/	/	/	/	≤5
	SAW 30kJ/cm	/	/	/	/	/	/	/	10
	SAW 50kJ/cm	x x x	/	/	/	/	/	/	≤5

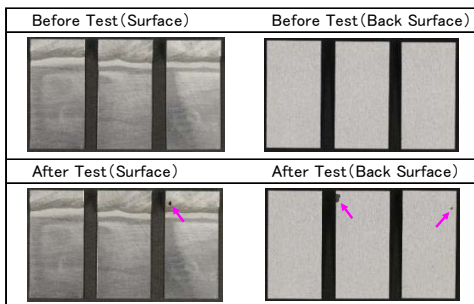


Photo 10 Results of pitting corrosion resistance tests (SUS329J3L-clad steel plate FCAW 44kJ/cm : 40°C)

Table 11 から SUS329J3L クラッド鋼板溶接継手部の CPT (臨界孔食温度) は、SAW 50kJ/cm を除いて、30°C 以上の値であり、良好な耐孔食性を有している。SAW 50kJ/cm では成分希釈の影響などにより、耐孔食性が劣化したものと考えられる。

6.2 耐粒界腐食試験 および その結果

JIS G 0572 に準拠した、沸騰硫酸・硫酸第二鉄溶液に120時間浸漬する耐粒界腐食試験を実施した。本試験では、SUS329J3L クラッド鋼板合せ材と SUS316L クラッド鋼板合せ材、および SUS329J3L ソリッド鋼板を供試した。

耐粒界腐食試験片の採取要領を **Photo 11** に示す。

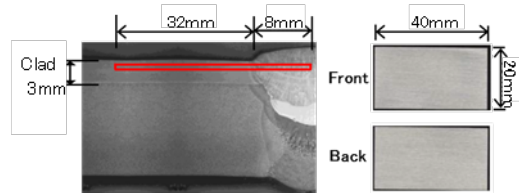


Photo 11 Cut-off plan of inter-granular corrosion test piece

耐粒界腐食試験結果を **Fig.20** に示す。

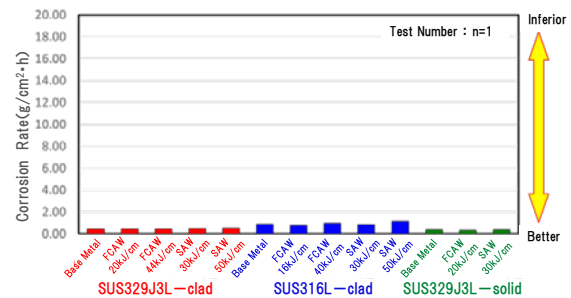


Fig.20 Results of inter-granular corrosion resistance tests

Fig.20 から明らかなように、SUS329J3L クラッド鋼板合せ材と SUS329J3L ソリッド鋼板の腐食速度は、ほぼ同等であり、SUS316L クラッド鋼板合せ材の耐粒界腐食性より優れていると言える。

6.3 耐全面腐食試験 および その結果

JIS G 0591 に準拠した、沸騰5%硫酸溶液に6時間浸漬する耐全面腐食試験を実施した。また、積荷を想定し

た、98%硫酸（工業用，50℃，20時間浸漬），95%硫酸（試薬特級，50℃，20時間浸漬）および、りん酸溶液（50℃，120時間浸漬）の耐全面腐食試験も実施した。沸騰5%硫酸腐食試験結果を Fig.21 に示す。

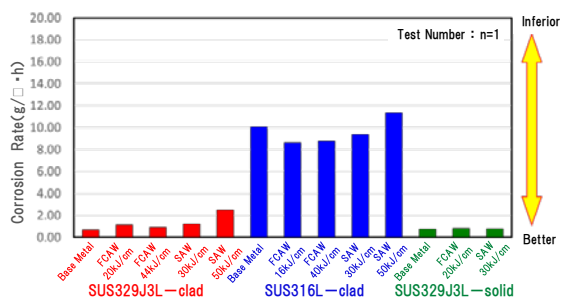


Fig.21 Results of boiling 5% sulfuric acid corrosion tests

Fig.21 に示したように、SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板の沸騰5%硫酸中における腐食速度はほぼ同等であった。ただし、SAW 50kJ/cm は若干大きい腐食速度を示した。また、SUS329J3Lクラッド鋼板では溶接金属やボンド部を含めて、局部的に著しく腐食された部分は認められなかった。

また、98%工業用硫酸腐食試験結果を Fig.22 に示す。

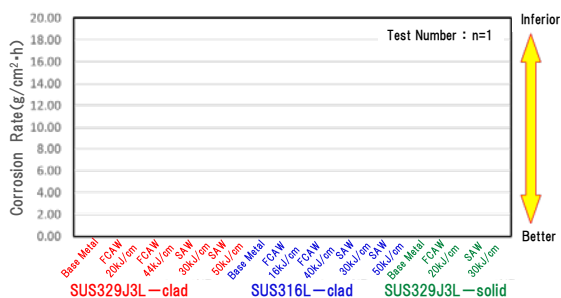


Fig.22 Results of concentrated sulfuric acid corrosion tests (Industrial sulfuric acid)

Fig.22 に示したように、溶接部を含め、供試材の種類によらず98%硫酸中における腐食速度はほぼゼロであった。

さらに、95%硫酸腐食試験結果を Fig.23 に示す。

Fig.23 から明らかなように、SUS329J3Lクラッド鋼板の95%試薬特級硫酸中における腐食速度は、SUS316Lクラッド鋼板およびSUS329J3Lソリッド鋼板とほぼ同等

であった。

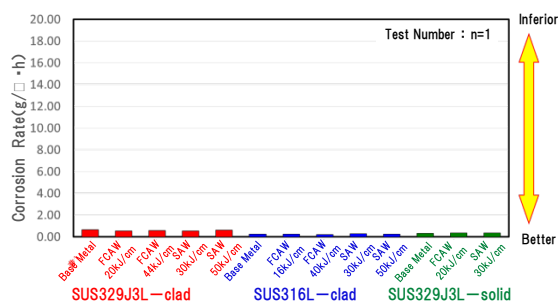


Fig.23 Results of concentrated sulfuric acid corrosion tests (Reagent sulfuric acid)

さらに、りん酸腐食試験結果を Fig.24 に示す。

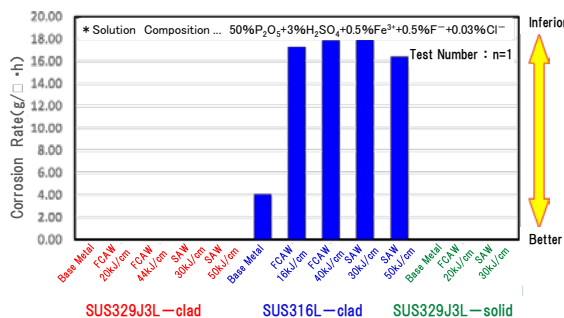


Fig.24 Results of phosphoric acid corrosion tests

SUS329J3Lクラッド鋼板および、SUS329J3Lソリッド鋼板のりん酸溶液中における腐食速度はほぼゼロであった。SUS316Lクラッド鋼板の腐食速度は大きいことが明らかになった。

以上の結果から、溶接部を含め、SUS329J3Lクラッド鋼板の耐全面腐食性は、SUS316Lクラッド鋼板と同等以上であり、SUS329J3Lソリッド鋼板とほぼ同等であることが明らかになった。

6.4 応力腐食割れ試験 および その結果

JIS G 0576 に準拠し、沸騰42% MgCl₂ 溶液中の応力腐食割れ試験として、引張り応力 280 N/mm² で破断までの時間による評価を行った。本試験では、SUS329J3Lクラッド鋼板合せ材と、SUS316Lクラッド鋼板合せ材およびSUS329J3Lソリッド鋼板を供試した。

試験片の形状・寸法を Fig.25 に示す。

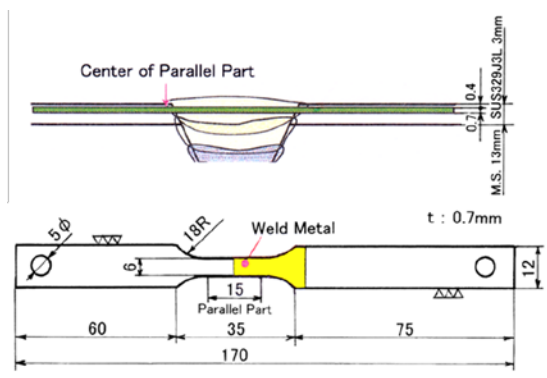


Fig.25 Shape and size of test specimen for stress corrosion cracking test

応力腐食割れ試験結果を **Fig.26** に示し、試験後の外観の例を **Photo 12** に示す。

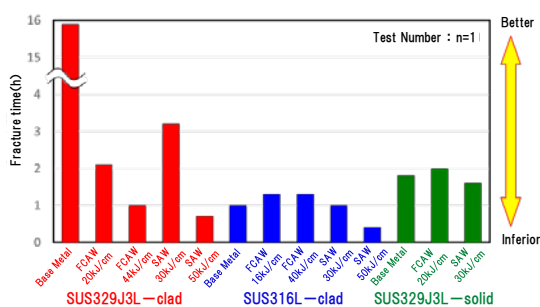


Fig.26 Results of stress corrosion cracking tests

	Test Specimen of After S.C.C. Test	Fracture Time (h)	Cracking Position
FCAW 20kJ/cm		2.1	Base Metal
FCAW 44kJ/cm		1.0	Bond
SAW 30kJ/cm		3.2	Weld Metal
SAW 50kJ/cm		0.7	Weld Metal

Photo 12 Results of stress corrosion cracking tests (Butt welded joints of SUS329J3L-clad steel plate)

Fig.26 に示したように、SUS329J3Lクラッド鋼板の非溶接部および FCAW 20kJ/cm, SAW 30kJ/cm の破断時間は、SUS316Lクラッド鋼板よりも優れており、SUS329J3Lソリッド鋼板と同等以上であった。

7. まとめ

SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板

とを組み合わせ使用したケミカルタンカーの建造にあたり、接合界面の破壊靱性、接合界面に沿っての疲労亀裂伝播特性、さらに、SUS329J3Lクラッド鋼板同士の溶接継手部および SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との溶接継手部の疲労強度、さらに、耐食性、腐食特性を把握した。それらの結果と、これまでケミカルタンカーの建造に多用されてきたSUS316Lクラッド鋼板およびその溶接継手部の諸特性とを比較検討して、評価した。

得られた知見は以下の通りである。

- ① SUS329J3Lクラッド鋼板接合界面の破壊靱性は、SUS329J3Lソリッド鋼板突合せ溶接継手溶接金属の破壊靱性とほぼ同じであり、SUS329J3Lクラッド鋼板をケミカルタンカーのカーゴタンク構造に適用して問題無いことが確認された。また、SUS329J3Lクラッド鋼板接合界面に沿っての疲労亀裂伝播特性は、高張力鋼板 (SM570Q鋼板およびWES-HW685鋼板) の母材や、二相ステンレス (SUS329J3L) ソリッド鋼板母材とほぼ同じであった。これにより、ステンレスクラッド鋼板をケミカルタンカーのカーゴタンク構造に実用する上での最重要課題である、接合界面の強度・信頼性の観点からSUS329J3Lクラッド鋼板を実船に適用可能であることが確認された。
- ② 溶接性に関する検討・評価では、SUS329J3Lクラッド鋼板は、SUS316Lクラッド鋼板と諸強度特性・溶接性の面で同等以上であることが明らかになった。すなわち、SUS329J3Lクラッド鋼板は、SUS316Lクラッド鋼板と同様に、ケミカルタンカーへ実船適用可能であることが確認された。ただし、溶接欠陥発生の問題から、CO₂ 突合せ溶接 (FCAW) の過剰入熱 (44 kJ/cm) は避ける必要がある。
- ③ SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との組み合わせで建造されるケミカルタンカーカーゴタンク構造の疲労強度は、SUS316Lクラッド鋼板とSUS316LNソリッド鋼板との組み合わせによって建造されるカーゴタンク構造の疲労強度に比べて同等以上であると言える。
- ④ 耐食性については、SUS329J3Lクラッド鋼板合せ材

また、SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との十字継手の溶接止端部に対するドレッシング処理は、疲労強度向上のために不可欠である。

は、SUS316Lクラッド鋼板合せ材に比べて同等以上であることが明らかになった。すなわち、SUS329J3Lクラッド鋼板はSUS316Lクラッド鋼板と同様に、ケミカルタンカーへ実船適用可能であることが確認された。ただし、耐食性のうち、特に耐孔食性劣化の問題から、突合せSAWの過剰入熱（50 kJ/cm）は避ける必要がある。

謝 辞

本研究開発を進めるにあたり、ご支援、ご協力を戴いた方々に、心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 梶田 剛，座間正人，井上好章，平田隆明，多田益男，伏見 彬，矢島 浩：船体構造用ステンレスクラッド鋼板接合界面強度に関する一考察，西部造船会会報，第83号，（1992.3.），pp.227-236.
- 2) 恩澤忠男，福田 隆，大尾和彦，原 修一，亀山隆一郎：ステンレスクラッド鋼の接合強度評価法について，圧力技術，第29巻，第5号，（1991），pp.37-54.
- 3) 藤井一申，鎌田 岳，萩森保彦，内村秀之：船殻強度部材として使用するステンレスクラッド鋼板の要求性能に関する検討，西部造船会会報，第98号，（1999.8.），pp.223-230.
- 4) 勝田順一，山下 晋，緒方洋典，春山雄介，深井英明，黒沼洋太，矢島 浩：ケミカルタンカー用二相ステンレスクラッド鋼板接合界面の破壊靱性および疲労亀裂伝播特性，圧力技術，第57巻，第1号，（2019.1.），pp.4-12.
- 5) 藤井滋博，作田 実，矢島 浩，高 允宝，渡邊栄一，谷野忠和，王 融，吉本浩輔：二相ステンレス鋼溶接継手部の破壊靱性評価，長崎総合科学大学 新技術創成研究所 所報，第5号，（2010.3.），pp.77-84.
- 6) 宮崎大地，勝田順一：強度と伸びが異なる鋼材の疲労亀裂伝播特性とその評価，溶接学会九州支部講演論文集，第12号，（2015.7.），pp.54-55.
- 7) 藤井滋博，作田 実，矢島 浩，高 允宝，渡邊栄一，谷野忠和，山下 晋：二相ステンレス鋼溶接継手部の疲労亀裂伝播特性評価，長崎総合科学大学 新技術創成研究所 所報，第6号，（2011.3.），pp.13-17.
- 8) 矢島 浩，座間正人，平田隆明，斉藤正洋，末岡英利，森 俊哲，梶田 剛：船舶に使用されるステンレス鋼・ステンレスクラッド鋼の疲労強度に関する考察，西部造船会会報，第75号，（1988.3.），pp.224-230.
- 9) 緒方洋典，堺田和昌，篠崎賢二，山本元道，谷野忠和，福井 努，矢島 浩：二相ステンレス鋼板・オーステナイト系ステンレスクラッド鋼板溶接継手部の疲労強度に関する一考察，圧力技術，第55巻，第3号，（2017.5.），pp.8-16.
- 10) 山下 晋，勝田順一，緒方洋典，春山雄介，深井英明，黒沼洋太，矢島 浩：ケミカルタンカー用二相ステンレスクラッド鋼板溶接継手部の疲労強度に関する一考察，溶接学会九州支部講演論文集，第15号，（2018.7.），pp.31-37.
- 11) 一般財団法人 日本海事協会：二相ステンレス鋼の溶接に関するガイドライン，（2014.1.），pp.1-19.
- 12) 座間正人，斉藤正洋，矢島 浩，末岡英利，三好章夫，森 俊哲，梶田 剛：船舶におけるステンレス鋼の耐食性に関する考察，日本造船学会論文集，第162号，（1987.12.），pp.474-479.