

二相ステンレス クラッド鋼板の
諸強度特性把握・評価
に関する研究

2019年2月

長崎大学 大学院 工学研究科

山下 晋

目 次

第 1 章 緒 言	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 本論文の概要	3
参考文献	5
図	7
第 2 章 二相ステンレス クラッド鋼板接合界面の 破壊靱性	8
2.1 はじめに	8
2.2 供試鋼板, 供試試験片および溶接条件	8
2.3 接合界面の破壊靱性試験結果	9
2.4 破壊靱性試験後の破断面および破壊径路の調査結果	10
2.5 オーステナイト系ステンレスクラッド鋼板接合界面の 破壊靱性との比較	11
2.6 二相ステンレスソリッド鋼板突合せ溶接継手溶接金属の 破壊靱性との比較	14
2.7 ケミカルタンカーカーゴタンクのトランスバルクヘッドと 二重底との十字溶接継手部の強度信頼性評価	17
2.8 まとめ	18
参考文献	19
図 表	21
第 3 章 二相ステンレス クラッド鋼板接合界面に 沿っての疲労亀裂伝播特性	54
3.1 はじめに	54
3.2 供試鋼板, 供試試験片および溶接条件	54
3.3 接合界面に沿っての疲労亀裂伝播試験結果 および考察	55

3.4	まとめ	56
	参考文献	57
	図表	58
第4章	二相ステンレスクラッド鋼板溶接継手部の 疲労強度	72
4.1	はじめに	72
4.2	供試鋼板	72
4.3	突合せ溶接継手の疲労強度	73
4.3.1	供試試験片および溶接条件	73
4.3.2	突合せ溶接継手の疲労試験結果および考察	74
4.3.2.1	クラッド鋼板同士の突合せ溶接継手	74
4.3.2.2	ソリッド鋼板同士の突合せ溶接継手	76
4.4	荷重非伝達型完全溶け込み十字溶接継手の疲労強度	77
4.4.1	供試試験片および溶接条件	78
4.4.2	荷重非伝達型完全溶け込み十字溶接継手の 疲労試験結果および考察	78
4.5	各種溶接継手疲労強度に関する評価	81
4.6	まとめ	82
	参考文献	83
	図表	85
第5章	結 論	109
	謝 辞	111/111

第1章 緒言

1.1 研究の背景と目的

ケミカルタンカーは、液体化学薬品や食物油など約700種類の液体貨物を輸送できるように建造されている。

したがって、ケミカルタンカーのカーゴタンクは、多種多様な有害性や汚染原因となる液体貨物の積載や、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。そこで、その建造には、耐食性がよく、高強度であるオーステナイト系ステンレス鋼板やオーステナイト系ステンレスクラッド鋼板が使用されている^{1.1)~1.3)}。しかも、食用油、糖蜜や石油精製品などの積荷の品質維持も求められるため、オーステナイト系ステンレス鋼板やオーステナイト系ステンレスクラッド鋼板を使用すれば、好都合である。

クラッド鋼板は、1930年代初期に、ステンレス鋼のニッケル(Ni)によるコスト低減と強度を補う目的で、INCO社とLUKENS社がニッケルクラッド鋼を共同で工業化し、販売したのが始まりである。その後、1943年には、ステンレスクラッド鋼板がASTMに規定された^{1.4)}。日本では、1950年9月に日本鉄鋼協会の講演会で阿部富美夫らが「不銹鋼合せ鋼の研究」^{1.5)}を発表しており。工業化されたのは1957年である。

ケミカルタンカーカーゴタンク構造の例を、Fig.1.1に示す。Fig.1.1で、両面が液体貨物に接する部材[例えば、横隔壁(トランスバルクヘッド)]には、ステンレスソリッド鋼板が使用されるが、片面だけ液体貨物と接する部材、例えば、カーゴタンクと隣接するバラスタタンクや、その他区画との隔壁には、ニッケル(Ni)など希少資源節約の面から、ステンレスクラッド鋼板が使用される場合が多い。したがって、カーゴタンクに関連した全ての場所にステンレスソリッド鋼板を使用した場合に比べて、ステンレス鋼板の使用量が少なくて済むため、コストを低減することができる。

また、バラスタンクやその他区画には、防錆のために塗装が施されているが、塗膜の密着性は、軟鋼板に比べて、ステンレス鋼板は劣るので、塗装品質の維持にも寄与しているといえる。

ケミカルタンカーに使用されるステンレスクラッド鋼板は、ステンレス鋼板(合せ材)と軟鋼板(母材)とを合せて一枚の鋼板にしたもので、ステンレス鋼板(合せ材)の厚さは、一般的に約3mmに統一されている^{1.6)}。

近年、ヨーロッパでは、フェライト/オーステナイト二相系ステンレスソリッド鋼板を用いたケミカルタンカー建造が増加している。Ni含有量が多いオーステナイト系ステンレス(SUS316LN)鋼板よりも、Ni含有量が少ない、フェライト/オーステナイト二相系ステンレス(SUS329J3L)鋼板の使用が増加してきたのである。

SUS316LN鋼板のNi含有量は11～14%程度であるのに対して、SUS329J3L鋼板のNi含有量は5～6%程度と少ない。SUS329J3L鋼板をケミカルタンカー建造に適用出来れば、希少資源節約効果が大きい。

また、Ni含有量が少ない分、Niの国際価格変動に対して影響されにくくなると言える。

さらに、SUS329J3L鋼板の0.2%耐力は、SUS316LN鋼板の0.2%耐力の約1.5倍であり、SUS329J3L鋼板を採用すれば、船体構造の軽量化が可能になる^{1.7), 1.8)}。したがって、船体重量軽減による原価低減を図ることができる。

耐力腐食割れ性は、SUS316LN鋼板よりもSUS329J3L鋼板の方が良好であることは周知のことであり、ケミカルタンカー就航後の管理・維持の面からみても、SUS329J3L鋼板を適用した方が優位であると言える。

我が国独自の技術で、2016年に開発・製品化されたSUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板とを組み合わせることで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、耐食性がよく、合理的な船体建造が実現すると考えられる。

SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板とを使用したケミカルタンカー建造に際して、上甲板や二重底のSUS329J3Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手部や、二重底のSUS329J3Lクラッド鋼板と縦横隔壁のSUS329J3Lソリッド鋼板との十字溶接継手部には、非常に高い強度信頼性や耐食性が要求される。

本研究では、SUS329J3Lクラッド鋼板をケミカルタンカーカーゴタンク構造に実用する上での基本的な最重要課題である、接合界面破壊靱性値の把握・検討・評価、接合界面に沿っての疲労亀裂伝播特性の把握・検討・評価、および溶接継手部疲労強度の把握・比較・検討・評価などを目的とした。

1.2 本論文の概要

フェライト／オーステナイト二相系ステンレス SUS329J3Lクラッド鋼板を、ケミカルタンカーカーゴタンク構造に実用する上での基本的な最重要課題である、接合界面の破壊靱性値、接合界面に沿っての疲労亀裂伝播特性、および溶接継手部疲労強度の把握・比較・検討・評価を行った^{1.9)~1.11)}。

第1章“緒言”では、研究の背景と目的、および本論文の概要について述べる。

第2章“二相ステンレスクラッド鋼板接合界面の破壊靱性”では、十字溶接継手引張破壊靱性試験片とコンパクトテンション(CT)型試験片を供試して、SUS329J3Lクラッド鋼板接合界面の破壊靱性値(K_{IC} 値)を把握・検討・評価した結果について述べている。

オーステナイト系ステンレス(SUS316L, SUS317L)クラッド鋼板接合界面の破壊靱性値(K_{IC} 値)に対して、SUS329J3Lクラッド鋼板接合界面

の K_c 値は、勝るとも劣らないと言えること。また、SUS329J3Lクラッド鋼板接合界面の K_c 値は、SUS329J3L鋼板 TIG溶接および FCA 溶接突合せ溶接金属の K_c 値と略同等であることなどから、SUS329J3Lクラッド鋼板をケミカルタンカーカーゴタンク構造に適用して、何等問題ないことを明らかにしている。

第3章“二相ステンレスクラッド鋼板接合界面に沿っての疲労亀裂伝播特性”では、コンパクトテンション(CT)型試験片および中央切欠付引張(CCT型)試験片を供試して、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把握・検討・評価した結果について述べている。

すなわち、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, WES-HW685)母材や、SUS329J3Lソリッド鋼板母材と同等であり、SUS329J3Lクラッド鋼板をケミカルタンカーカーゴタンク構造に適用して、何等問題ないことを明らかにしている。

第4章“二相ステンレスクラッド鋼板溶接継手部の疲労強度”では、SUS329J3Lクラッド鋼板同士、SUS329J3Lソリ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、使用実績の多いSUS316Lクラッド鋼板やSUS316LNソリッド鋼板の同種溶接継手の疲労強度と比較・検討・評価した結果について述べている。

すなわち、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、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より優れていることを明らかにしている。

第5章“結論”では、本研究で得られた成果について述べている。

参 考 文 献

- 1.1) 稲垣博己, 坂本 徹, 末岡英利, 斉藤正洋:ケミカルタンカー用高強度耐食ステンレス鋼, 製鉄研究, 第323号(1986).
- 1.2) 日本鋼管:ケミカルタンカー用ステンレス鋼ーNSL317LNおよびCR22ー, 船の科学, 1986年11月号.
- 1.3) 座間正人, 斉藤正洋, 矢島 浩, 末岡英利, 三好章夫, 森 俊哲, 椛田 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.
- 1.4) ASTM A265-43T (NICKEL AND NICKEL-BASE ALLOY CLAD STEEL PLATE).
- 1.5) 阿部 富美夫, 木村 熊太郎, 齋藤 利生:不銹鋼合せ鋼の研究 (I), 鐵と鋼, 38巻, 第4号(1952), pp.214-219.
- 1.6) 座間正人, 斉藤正洋, 矢島 浩, 椛田 剛, 関 信博, 須賀正孝, 本田正春, 永元隆一:TMCP型ステンレスクラッド鋼板のケミカルタンカーへの適用, 日本造船学会論文集, 第163号(1988.6.) pp.407-414.
- 1.7) 緒方洋典, 堺田和昌, 松田隆明, 西村公宏, 田中雅之, 森 俊哲, 矢島 浩, 谷野忠和, 菅 勇人, 福井 努:二相ステンレス鋼板のケミカルタンカーへの適用に関する研究開発(第1報), 日本海事協会会誌, No.311(2015), pp.21-30.
- 1.8) 堺田和昌, 緒方洋典, 松田隆明, 西村公宏, 田中雅之, 森 俊哲, 矢島 浩, 谷野忠和, 菅 勇人, 福井 努:二相ステンレス鋼板のケミカルタンカーへの適用に関する研究開発(第2報), 日本海事協会会誌, No.315(2016), pp.21-27.

- 1.9) 山下 晋, 中村聖三, 勝田順一, 緒方洋典, 岡田公一, 谷野忠和, 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およびオーステナイト系ステンレスクラッド鋼板の接合界面破壊靱性に関する一考察, 溶接学会九州支部講演論文集(論文発表), 第16号(2019.6.20.), pp.37-43.
- 1.10) 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.
- 1.11) 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(論文発表), 第15号, (2018.7.7.), pp.31-37.

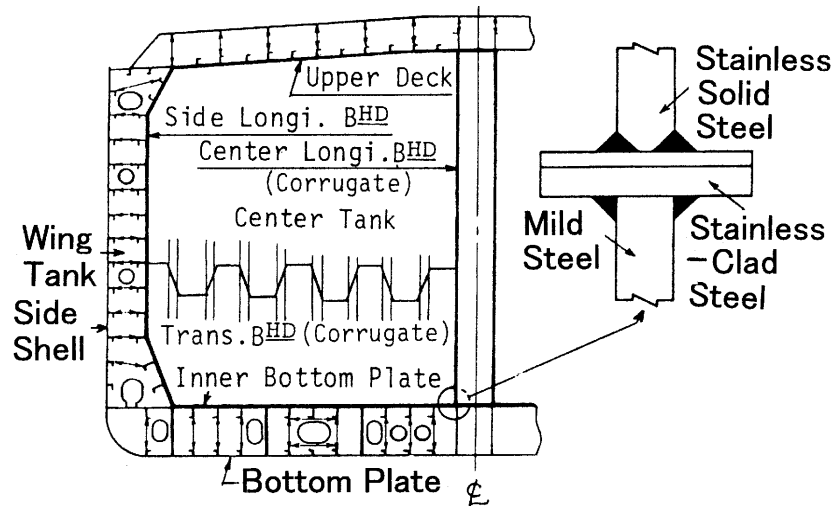


Fig. 1.1 Example of structural section for chemical tanker

第2章 二相ステンレスクラッド鋼板接合界面の破壊靱性

2.1 はじめに

ケミカルタンカーカーゴタンク構造用として、2016年に開発・製品化された二相ステンレス(SUS329J3L)クラッド鋼板について、その接合界面の破壊靱性を、把握・検討・評価した。

ケミカルタンカーカーゴタンク構造用としてのステンレスクラッド鋼板は、合せ材としてのステンレス鋼の厚さは3mmに統一されている^{2.1)}。

SUS329J3Lクラッド鋼板を、ケミカルタンカーカーゴタンク構造に使用する上で、最重要課題の一つが、接合界面の破壊靱性把握である。何故なら、厚さ3mmの合せ材表面に直接構造部材を、完全溶け込み溶接、部分溶け込み溶接、あるいは隅肉溶接で接続し、接合界面を引き剥がすような大きな負荷が予想されるからである。

本章では、十字溶接継手引張破壊靱性試験片およびコンパクトテンション(CT)型試験片を供試して、SUS329J3Lクラッド鋼板接合界面の破壊靱性を把握し、使用実績の多いオーステナイト系ステンレス(SUS316L, SUS317L)クラッド鋼板の以前把握されたデータや、数年前に把握されたSUS329J3Lソリッド鋼板の突合せ溶接金属のデータと、比較・検討・評価した結果^{2.2)}について述べる。

2.2 供試鋼板, 供試試験片 および 溶接条件

SUS329J3Lクラッド鋼板接合界面の破壊靱性の把握に供試した試験片に使用した鋼板の化学成分をTable 2.1に、機械的性質をTable 2.2に示す。

また、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.2.1に示す。さらにCT型試験片の形状・寸法を、Fig.2.2に示す。

十字溶接継手引張破壊靱性試験片とCT型試験片の製作において、SUS329J3Lクラッド鋼板の合せ材であるSUS329J3L鋼板側表面にSUS329J3Lソリッド鋼板を、また、SUS329J3Lクラッド鋼板の母材である軟鋼板側表面に軟鋼板を、それぞれ溶接した。SUS329J3L鋼板の溶接条件をTable 2.3 およびTable 2.4 に示す。

2.3 接合界面の破壊靱性試験結果

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 2.5 に、また、CT型試験片による破壊靱性試験結果をTable 2.6 に示す。なお、Table 2.5の下欄外には、十字溶接継手引張破壊靱性試験結果の K_C 値計算式^{2.3), 2.4)}、すなわち、Eq.(2.1)

$$K_C = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a_{\text{eff}}} \cdot F(\alpha) \quad (\text{N/mm}^{3/2}) \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

$$\sigma = P/(2W \cdot 40) \quad (\text{N/mm}^2)$$

$$\alpha = a_{\text{eff}}/W$$

$$F(\alpha) = 1.122 - 0.154\alpha + 0.807\alpha^2 - 1.894\alpha^3 + 2.494\alpha^4$$

W, a_{eff} : Table 2.5下欄外参照

を示した。

また、Table 2.6に示したCT型試験片による破壊靱性試験結果の K_C 値算出には、ASTMの式^{2.5)}を使用した。

さらに、Table 2.5に示した破壊靱性試験結果の K_C 値と温度との関係を、Fig.2.3に示す。同様に、Table 2.6に示した破壊靱性試験結果の K_C 値と温度との関係を、Fig.2.4に示す。さらに、Fig.2.3とFig.2.4とを同一グラフに示したものが、Fig.2.5である。

なお、 K_C 値と温度との関係の表示は、1963年頃から合理的な表示法として、Eq.(2.2)

$$K_C = K_0 \exp(-T_0/T_K) \quad (\text{N/mm}^{3/2}) \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

K_0 : 材料定数 $(\text{N/mm}^{3/2})$

T_0 : 材料定数 (K)

が提案され^{2.6)~2.8)}, その後, Eq.(2.2)による表示で多くのデータが蓄積されてきているので, Eq.(2.2)による表示で整理した。

なお, Table 2.5 に示した十字溶接継手引張破壊靱性試験片による破壊靱性試験後の破断面を, Fig.2.6~Fig.2.8 に示す。

Fig.2.6~Fig.2.8 から明らかなように, 脆性不安定亀裂がほぼ接合界面で発生し, 接合界面に沿って進展している。

また, Table 2.6 に示したCT型試験片による破壊靱性試験後の破断面とクラック進展状況を, Fig.2.9~Fig.2.13 に示す。

また, Fig.2.9 および Fig.2.10 から明らかなように, 疲労亀裂の先端が接合界面から逸れたためか, 接合界面での脆性不安定亀裂が発生する前に, 延性不安定破壊とも見られる現象が起こっており, そのために破壊荷重もかなり大きく(Table 2.6 参照)なっている。

さらに, Fig.2.11~Fig.2.13 から明らかなように, 脆性不安定亀裂がほぼ接合界面で発生し, 接合界面に沿って進展している。

したがって, Table 2.6 に示した試験片 FTI-1 および FTI-2 の K_C 値は, 接合界面の破壊靱性値としては“正しい値ではない(Invalid)”と判断せざるを得ない。そこで, 先に示した Fig.2.4 中 および Fig.2.5 中に“* : Invalid”と記載した。

2.4 破壊靱性試験後の破断面および破壊経路の調査結果

先に, Fig.2.6 に示した十字溶接継手引張破壊靱性試験片(TCI-2)による, 破壊靱性試験後の破断面および破壊経路について調査した。

調査対象にした、TCI-2の破断面を再度 Fig.2.14 に示す。また、破断面のSEM観察点(A～G)を、Fig.2.15 に示す。さらに、各観察点のSEM観察結果を、Fig.2.16 および Fig.2.17 に示す。

Fig.2.16 および Fig.2.17 から明らかなように、合せ材(SUS329J3L鋼板)も母材(軟鋼板)もへき開破面を呈しており、脆性不安定破壊によって形成された破面である。

一方、破壊経路を調査するために、Fig.2.18 に示すA-A断面とB-B断面のマクロ組織およびミクロ組織を調査した。

Fig.2.19 にA-A断面のマクロ組織を示す。また、Fig.2.20 にB-B断面のマクロ組織を示す。さらに、Fig.2.21 にA-A断面のミクロ組織を、Fig.2.22 にB-B断面のミクロ組織を示す。以上の結果から明らかなように、破壊経路すなわち破断面は、接合界面あるいは、接合界面に極く近い合せ材(SUS329J3L鋼板)または母材(軟鋼板)であった。

以上により、調査対象にした十字溶接継手引張破壊靱性試験片(TCI-2)による試験は、接合界面の破壊靱性把握試験としての目的を、十分達成出来ているものと判断できる。したがって、TCI-4, TCI-5も、接合界面の破壊靱性把握試験としての目的を十分達成出来ていると言える(Table 2.5, Fig.2.3 参照)。

2.5 オーステナイト系ステンレスクラッド鋼板接合界面の破壊靱性との比較

以前把握された、使用実績の多いオーステナイト系ステンレスクラッド鋼板接合界面の破壊靱性値^{2.9)}と、上述のデータとを比較する。

供試されたオーステナイト系ステンレスクラッド鋼板合せ材の化学成分を Table 2.7 に、クラッド鋼板全板厚試験片による機械的性質を Table 2.8 に示す^{2.9)}。

先に述べた通り、ケミカルタンカー用クラッド鋼板合せ材，すなわち，オーステナイト系ステンレス鋼板の厚さは3mmに統一されている。

Table 2.7 から明らかなように，SUS316L鋼板およびSUS317L鋼板共に，Ni含有量は約13～15%である。

供試された十字溶接継手引張破壊靱性試験片の形状・寸法を，**Fig.2.23** に示す。さらに，供試されたASTM規格^{2.5)}に準拠したCT型試験片の形状・寸法を，**Fig.2.24** に示す。

なお，十字溶接継手試験片も，CT型試験片も，供試オーステナイト系ステンレスクラッド鋼板の表裏面に，それぞれ同種鋼板の引張補助板が溶接されて，試験片が加工されている。

十字溶接継手試験片もCT型試験片も室温で試験されたが，供試した全試験片で，不安定破壊現象を示している。

十字溶接継手試験片の K_C 値算出モデルを，**Fig.2.25** に示す。また，算出に使用された計算式を**Eq.(2.3)**^{2.10)}に示す。

$$K_C = \sigma_{eq} \cdot \sqrt{\pi a} \cdot F(a/B) \quad (\text{N/mm}^{3/2}) \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

$$F(a/B) = \frac{1.122 - 0.561(a/B) - 0.205(a/B)^2 + 0.471(a/B)^3 - 0.190(a/B)^4}{\sqrt{1-a/B}}$$

ただし， σ_{eq} : 等価引張応力 (N/mm²)

$$\sigma_{eq} = \frac{P}{t_{sus} \cdot W} \times \frac{t_{sus}}{t_{sus} + h_1 + h_2 - C} \quad (\text{N/mm}^2)$$

B : 試験片有効半幅 (mm)

2B = $t_{sus} + h_1 + h_2$ (mm)

a : 有効切欠き長さ (mm)

- $a = (a_1 + a_2) / 2$ (mm)
 P : 破壊荷重 (N)
 W : 引張補助板の幅 (mm)
 t_{sus} : ステンレス鋼引張補助板の板厚 (mm)
 h_1, h_2 : ステンレス鋼引張補助板側の隅肉溶接脚長 (mm)
 C : ステンレス鋼引張補助板側の未溶着部長さ (mm)
 a_1, a_2 : ステンレス鋼引張補助板側の隅肉溶接止端
 からの切欠き長さ(試験片中心に向かって) (mm)

また、Fig.2.24に示したCT型試験片による K_C 値算出には、ASTMの式^{2.5)}が使用された。

Fig.2.23に示した十字溶接継手試験片と、Fig.2.24に示したCT型試験片による、室温での破壊靱性試験結果の K_C 値を、Fig.2.26に示す。十字溶接継手試験片によるSUS316Lクラッド鋼板接合界面の K_C 値は、1255～1700N/mm^{3/2}であり、SUS317Lクラッド鋼板接合界面の K_C 値は、550～810N/mm^{3/2}である。

なお、Test Steel Plate No.4のSUS317Lクラッド鋼板の十字溶接継手試験片による K_C 値は、切欠き先端部が若干塑性変形したために、Validな値ではないと判断された。

一方、CT型試験片によるSUS316Lクラッド鋼板接合界面の K_C 値は、1620～3040N/mm^{3/2}であり、SUS317Lクラッド鋼板接合界面の K_C 値は、1520～1750N/mm^{3/2}であった。

十字溶接継手試験片による室温での破壊靱性試験後の破断面を、Fig.2.27に示す。接合界面に沿った脆性不安定破壊によって破断していることが明らかである。

先に、Fig.2.5に示した、二相ステンレス(SUS329J3L)クラッド鋼板接合

界面の破壊靱性試験結果と、**Fig.2.26**とを同一グラフに示すと、**Fig.2.28**のようになる。ただし、**Fig.2.5**および**Fig.2.26**のInvalidのデータは除いた。

先に述べたように、**Fig.2.5**に示したSUS329J3Lクラッド鋼板接合界面の十字溶接継手試験片による K_C 値と、**Fig.2.26**に示したSUS316LおよびSUS317Lクラッド鋼板接合界面の十字溶接継手試験片による K_C 値とは、算出に使用された計算式が異なるが、共にValidな K_C 値であるとみなして、比較・検討した。

Fig.2.28から明らかなように、室温から -180°C 程度の温度範囲では、接合界面の K_C 値は略一定になるものとみなせば、SUS329J3Lクラッド鋼板接合界面の K_C 値は、SUS316LおよびSUS317Lクラッド鋼板接合界面の K_C 値に対して、勝るとも劣らないと言える。

SUS316LおよびSUS317Lクラッド鋼板のケミカルタンカーカーゴタンク構造への使用実績が多いことから、接合界面破壊靱性の観点からは、SUS329J3Lクラッド鋼板は、ケミカルタンカーカーゴタンク構造に適用して何等問題無いと言える。

2.6 二相ステンレスソリッド鋼板突合せ溶接継手溶接金属の破壊靱性との比較

数年前に把握された、SUS329J3L鋼板(板厚9.4mm)の、TIG溶接(Tungsten Inert Gas Welding)とFCA溶接(Flux-Cored Arc Welding)による突合せ溶接継手溶接金属中央部の破壊靱性値(K_C 値)^{2.11)}と、先に**Fig.2.5**(*:Invalidのデータを除く)に示した K_C 値とを比較する。

供試されたSUS329J3Lソリッド鋼板の化学成分を**Table 2.9**に、機械的性質を**Table 2.10**に示す。さらに、使用された溶接材料のJIS規格値を、**Table 2.11**および**Table 2.12**に示す。

また、供試試験片のTIG溶接とFCA溶接の溶接条件を、**Table 2.13**に

示す。なお、両溶接とも層間温度は150°C以下としている。

破壊靱性試験に供試された中央切欠付引張試験片の形状・寸法、ならびに切欠形状・寸法を、**Fig.2.29**に示す。中央切欠先端部は、厚さ0.2mmの金鋸で加工されたシェブロン型切欠きとし、さらに、シェブロン型切欠き先端に疲労亀裂切欠きが、試験片表裏面で約2mm加工された。

また、疲労亀裂切欠き加工にあたっては、切欠き先端の応力拡大係数範囲(ΔK値)が、後述する低温引張試験によって得られる破壊靱性値(K_C値)の60%以下の値^{2.12)}になるように、できる限り低い荷重(応力)条件で行われた。

疲労亀裂切欠き加工結果を、**Table 2.14**に示す。**Table 2.14**中には、**Eq.(2.4)^{2.4)}**で算出された応力拡大係数範囲(ΔK値)が示してある。

$$\Delta K = \sigma_g \cdot \sqrt{\pi a} \cdot F(a/B) \dots\dots\dots(2.4)$$

ここで、

$$\sigma_g = P / (2B \cdot t)$$

$$F(a/B) = \{1 - 0.025(a/B)^2 + 0.06(a/B)^4\} \times \sqrt{\sec(\pi a / 2B)}$$

ただし、

ΔK : 応力拡大係数範囲 (N/mm^{3/2})

σ_g : グロス応力 (N/mm²)

a : 切欠き長さの1/2 (mm)

B : 試験片半幅 (mm)

t : 試験片厚さ (mm)

P : 疲労亀裂作製時の最大荷重 (N)

F(a/B) : 有限幅の補正係数

低温にて実施された中央切欠付引張試験片による破壊靱性試験結果を、Table 2.15 に示す。Table 2.15 中に示した K_C 値は、Eq.(2.5)^{2,4)}で算出された値である。

$$K_C = \sigma_g \cdot \sqrt{\pi a} \cdot F(a/B) \dots\dots\dots(2.5)$$

ここで、

$$\sigma_g = P / (2B \cdot t)$$

$$F(a/B) = \{1 - 0.025(a/B)^2 + 0.06(a/B)^4\} \times \sqrt{\sec(\pi a/2B)}$$

ただし、

K_C : 破壊靱性値 (N/mm^{3/2})

σ_g : グロス応力 (N/mm²)

a : 切欠き長さの1/2 (mm)

B : 試験片半幅 (mm)

t : 試験片厚さ (mm)

P : 破断荷重 (N)

$F(a/B)$: 有限幅の補正係数

さらに、 K_C 値と温度との関係を、Fig.2.30に示す。

先に Fig.2.5 に示した、SUS329J3Lクラッド鋼板接合界面の破壊靱性試験結果と、Fig.2.30とを同一グラフに示すと、Fig.2.31 のようになる。ただし、Fig.2.5 の Invalid のデータは除いた。

Fig.2.31 で明らかなように、-100℃～-170℃程度の温度で、全ての試験結果は略同じ範囲にバラツキている。

換言すれば、SUS329J3Lクラッド鋼板接合界面の K_C 値は、SUS329J3L 鋼板 TIG 溶接および FCA 溶接突合せ溶接金属の K_C 値と、-100℃～-170℃程度で略同じであるということである。

したがって、SUS329J3Lクラッド鋼板接合界面の破壊靱性は、ケミカルタンカーカーゴタンク構造に適用して何等問題無いと言える。

2.7 ケミカルタンカーカーゴタンクのトランスバルクヘッドと二重底との十字溶接継手部の強度信頼性評価

上述の、SUS329J3Lクラッド鋼板接合界面の K_C 値、すなわち、十字溶接継手引張破壊靱性試験片による試験結果3点の平均値、すなわち、 $1.57 \times 10^3 \text{ N/mm}^{3/2}$ (Table 2.5, Fig.2.3, Fig.2.5参照)と、CT型試験片による試験結果3点(Invalidの2点を除く)の平均値、すなわち、 $2.67 \times 10^3 \text{ N/mm}^{3/2}$ (Table 2.6, Fig.2.4, Fig.2.5参照)とを使用して、ケミカルタンカーカーゴタンク構造のトランスバルクヘッドと二重底との交差部の十字溶接継手部(Fig.2.32参照)の強度信頼性について検討する。

Fig.2.32は、SUS329J3L鋼板製トランスバルクヘッドの板厚を16mm、SUS329J3Lクラッド鋼板製二重底の板厚も16mm[SUS329J3L鋼板(合せ材):3mm、軟鋼板(母材):13mm]と想定した場合である。

トランスバルクヘッド側(SUS329J3L鋼板側)の脚長を13mm(バルクヘッド板厚の80%)とすると、二重底の溶接止端部間の長さは42mm(13+16+13(mm))になる。

二重底のクラッド鋼板接合界面に、万一欠陥が存在し、繰り返し負荷による疲労現象などによって欠陥から疲労亀裂が成長すると想定した場合、接合界面に沿っての疲労亀裂の寸法が、最大42mm($2a \doteq 42 \text{ mm}$)になるまで、接合界面が脆性不安定破壊しなければ、カーゴタンク構造として成り立つものと考えられる。

すなわち、 $2a \doteq 42 \text{ mm}$ になれば、二重底クラッド鋼板の厚さ3mmのSUS329J3L鋼板が剪断破壊してしまい、カーゴタンク構造そのものが成り立たなくなるからである。

そこで、Fig.2.33に示すような無限板の中央に、接合界面に沿って長さ(2a)42mmのクラックが存在している状況を想定し、接合界面の K_C 値が、 $1.57 \times 10^3 \text{ N/mm}^{3/2}$ の場合と $2.67 \times 10^3 \text{ N/mm}^{3/2}$ の場合について、脆性不安定破壊を発生する限界応力(接合界面に垂直方向応力) σ をEq.(2.6)によって求めた。

$$\left. \begin{array}{l} K_C = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \\ \sigma = K_C / \sqrt{\pi \cdot a} \end{array} \right\} \dots\dots\dots(2.6)$$

σ は、約 190 N/mm^2 および約 330 N/mm^2 となる。

換言すれば、接合界面の垂直方向応力が、最も安全側で、約 190 N/mm^2 以下であれば、接合界面に沿っての脆性不安定破壊を発生することは無いと考えられる。また、約 260 N/mm^2 (190 N/mm^2 と 330 N/mm^2 の平均値)以下であれば、カーゴタンク構造として略成り立つものと考えられる。

2.8 まとめ

十字溶接継手引張破壊靱性試験片およびCT型試験片を供試して、SUS329J3Lクラッド鋼板をケミカルタンカーカーゴタンク構造に使用する上での最重要課題の一つである、接合界面の破壊靱性値を把握した。

破壊靱性試験後の代表例に対して、破断面のSEM観察や破壊経路についてのマクロ組織とミクロ組織を調査した結果、接合界面の破壊靱性値はValidな値が得られたものと判断される。

この値と、以前把握された、使用実績が多いオーステナイト系ステンレスクラッド鋼板接合界面の破壊靱性値と比較・評価して、勝るとも劣らないことを明らかにした。

さらに、上述のSUS329J3Lクラッド鋼板接合界面の破壊靱性値と、

SUS329J3L鋼板TIG溶接およびFCA溶接突合せ溶接金属の破壊靱性値とが略同じであることを明らかにした。

したがって、SUS329J3Lクラッド鋼板接合界面の破壊靱性は、ケミカルタンカーカーゴタンク構造に適用して何等問題ないものと考えられる。

参 考 文 献

- 2.1) 座間正人, 斉藤正洋, 矢島 浩, 梶田 剛, 関 信博, 須賀正孝, 本田正春, 永元隆一: TMCP型ステンレスクラッド鋼板のケミカルタンカーへの適用, 日本造船学会論文集, 第163号(1988.6.) pp.407-414.
- 2.2) 山下 晋, 中村聖三, 勝田順一, 緒方洋典, 岡田公一, 谷野忠和, 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およびオーステナイト系ステンレスクラッド鋼板の接合界面破壊靱性に関する一考察, 溶接学会九州支部講演論文集(論文発表), 第16号(2019.6.20.), pp.37-43.
- 2.3) 川市克己, 藤原直昭, 矢島 浩, 西川和人, 山本元道, 森 誠一郎: 爆発圧着接合型5層 Al/SUS STJ の強度, 西部造船会会報, 第103号(2002.3.), pp.159-166.
- 2.4) Murakami Y., Aoki S., Hasebe N., Itoh Y., Miyata H., Miyazaki N., Terada H., Tohgo K., Toya M., Yuuki R.: STRESS INTENSITY FACTORS HANDBOOK, Volume 1, Committee on Fracture Mechanics, The Society of Materials Science, Japan, Pergamon Press (1987).

- 2.5) ASTM Standards : Standard Test Method for PLANE-STRAIN FRACTURE TOUGHNESS OF METALLIC MATERIALS, E399-1974.
- 2.6) 越賀房夫, 今沢 理, 竹花 莊治: 鋼板における脆性亀裂の停止遷移現象, 造船協会論文集, 第114号(1963.12.).
- 2.7) 矢島 浩, 永元隆一, 山内英和: 鋼材の脆性亀裂伝播特性におよぼす低サイクル疲労の影響, 造船協会論文集, 第120号(1966.12.).
- 2.8) 吉識雅夫, 金沢 武, 町田 進, 多田 洋, 山内英和, 永元隆一, 矢島 浩: 鋼材の脆性破壊発生特性におよぼす疲労の影響, 造船協会論文集, 第121号(1967.6.).
- 2.9) 椛田 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.
- 2.10) H. TADA, P. PARIS, G. IRWIN: THE STRESS ANALYSIS OF CRACKS HANDBOOKS, DEL RESEARCH CORPORATION, (1973).
H. Tada, P. Paris and G. Irwin: The Stress Analysis of Crack Handbook 3rd Edition, The American Society of Mechanical Engineers, (2000).
- 2.11) 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 大学院 新技術創成研究所 所報, 第 5 号(2010.3.), pp.77-84.
- 2.12) ASTM : Standard Method of Test for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, E399-72(1973).

Table 2.1 Chemical composition of test steel plates

Test Steel Plate	(wt %)								
	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)	0.013	0.31	0.97	0.025	0.002	22.55	5.42	3.10	0.17

* SUS329J3L Steel Plate (3mm)

Table 2.2 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)

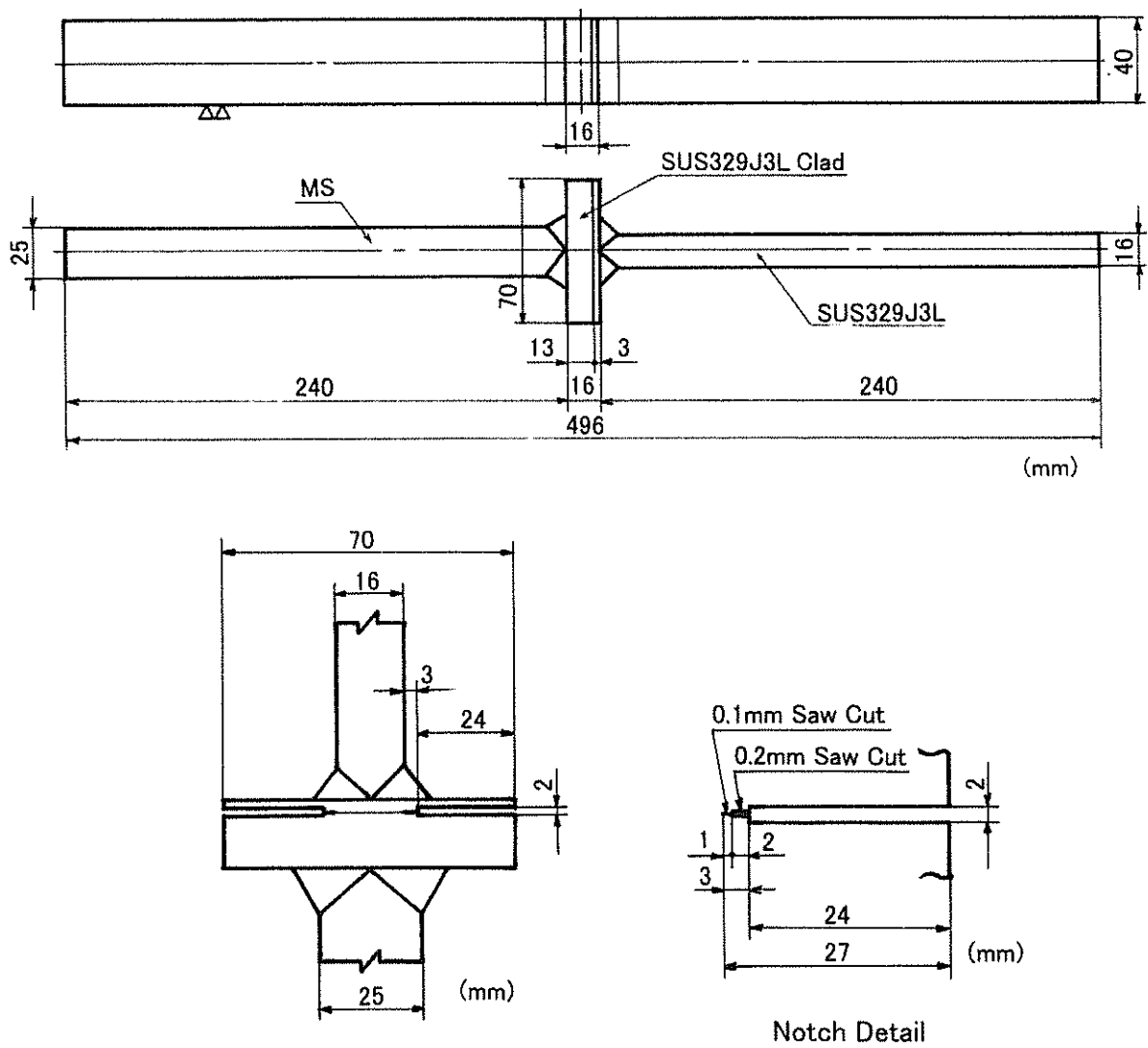


Fig.2.1 Shape and size of cruciform welded joint specimen for tensile fracture toughness test

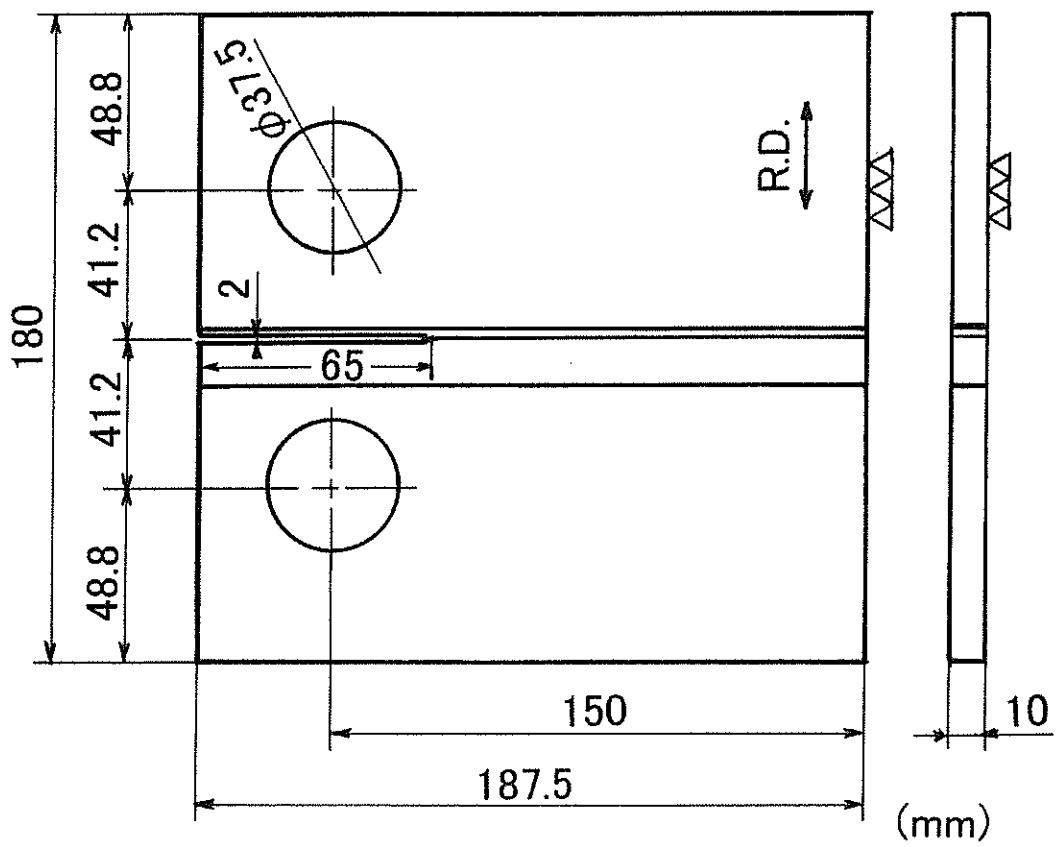


Fig.2.2 Shape and size of CT type specimen for fracture toughness test

Table 2.3 Welding parameters of cruciform welded joint tensile fracture toughness test specimen (FCAW)

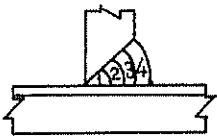
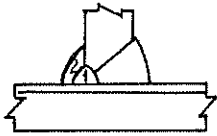
Test Steel Plate	Build-up Sequence	Welding Current (A)	Arc Voltage (V)	Travel Speed (cm/min)	Heat Input (kJ/cm)	Welding Consumables (JIS)
SUS329J3L-Clad Steel Plate + SUS329J3L Steel Plate		200 ~240	32 ~36	24.7 ~32.0	12.0 ~21.0	TS2209 -FCO
		240	36	23.1 ~24.2	21.4 ~22.4	TS2209 -FCO

Plate Thickness : 16 mm, Gas Flow Rate : 18 l/min, Interpass Temperature $\leq 150^{\circ}\text{C}$

Table 2.4 Welding parameters of CT type specimen (FCAW)

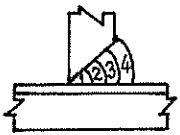
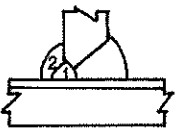
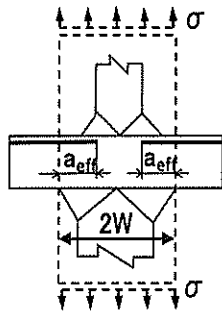
Test Steel Plate	Build-up Sequence	Welding Current (A)	Arc Voltage (V)	Travel Speed (cm/min)	Heat Input (kJ/cm)	Welding Consumables (JIS)
SUS329J3L-Clad Steel Plate + SUS329J3L Steel Plate		200 ~240	32 ~36	27.9 ~31.5	12.2 ~18.6	TS2209 -FCO
		240	36	30.6 ~31.9	16.3 ~16.9	TS2209 -FCO

Plate Thickness : 16 mm, Gas Flow Rate : 18 l/min, Interpass Temperature $\leq 150^{\circ}\text{C}$

Table 2.5 Results of cruciform welded joint tensile fracture toughness tests

Specimen Number	Width 2W (mm)	Notch Length a_{eff} (mm)	Temperature			Fracture Load P (kN)	K_c (N/mm ^{3/2})
			(°C)	(K)	1/Tk (K ⁻¹)		
TCI-1	-	-	-	-	-	-	-
TCI-2	40.9	13.1	-106	167	5.99×10^{-3}	275	1.37×10^3
TCI-3	-	-	-	-	-	-	-
TCI-4	42.3	14.2	-119	154	6.49×10^{-3}	338	1.75×10^3
TCI-5	41.9	14.5	-166	107	9.35×10^{-3}	293	1.58×10^3



$$K_c = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a_{eff}} \cdot F(\alpha) \quad [\text{N/mm}^{3/2}]$$

$$\sigma = P / (2W \cdot 40) \quad [\text{N/mm}^2]$$

$$\alpha = a_{eff} / W$$

$$F(\alpha) = 1.122 - 0.154\alpha + 0.807\alpha^2 - 1.894\alpha^3 + 2.494\alpha^4$$

Table 2.6 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)	K_c (N/mm ^{3/2})
			(°C)	(K)	1/Tk (K ⁻¹)		
FTI-1	39.2	66.7	-116	157	6.37×10^{-3}	132	8.80×10^3
FTI-2	40.1	67.6	-144	129	7.75×10^{-3}	115	7.77×10^3
FTI-3	23.2	50.7	-105	168	5.95×10^{-3}	48.2	2.46×10^3
FTI-4	25.3	52.8	-159	114	8.77×10^{-3}	49.1	2.61×10^3
FTI-5	4.4	31.9	-173	100	10.00×10^{-3}	69.5	2.95×10^3

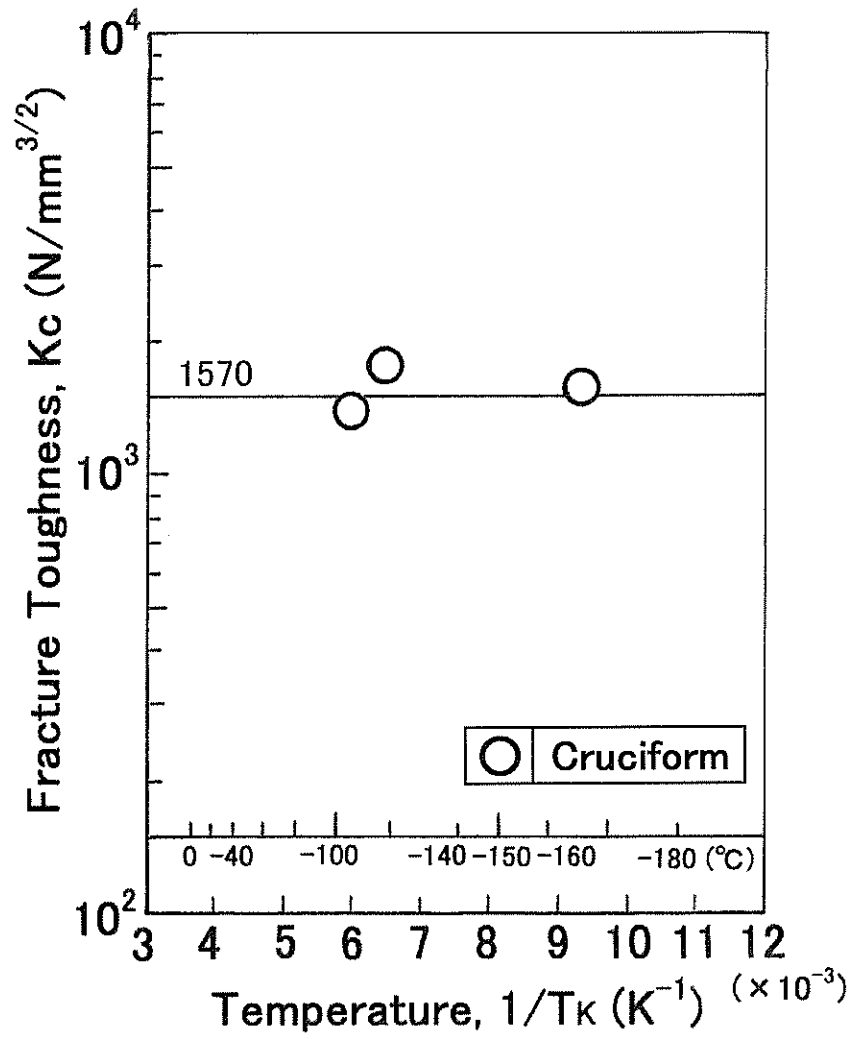


Fig.2.3 Relation between K_c and temperature
[Interface of SUS329J3L-clad steel plate]

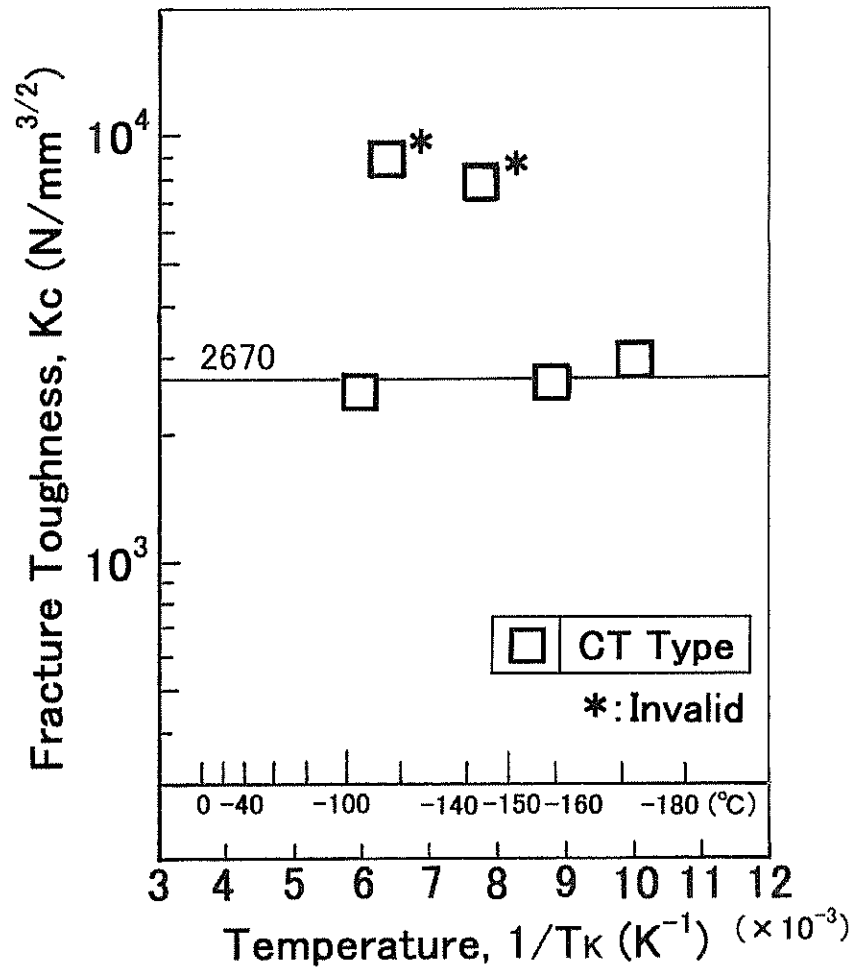


Fig.2.4 Relation between K_c and temperature
[Interface of SUS329J3L-clad steel plate]

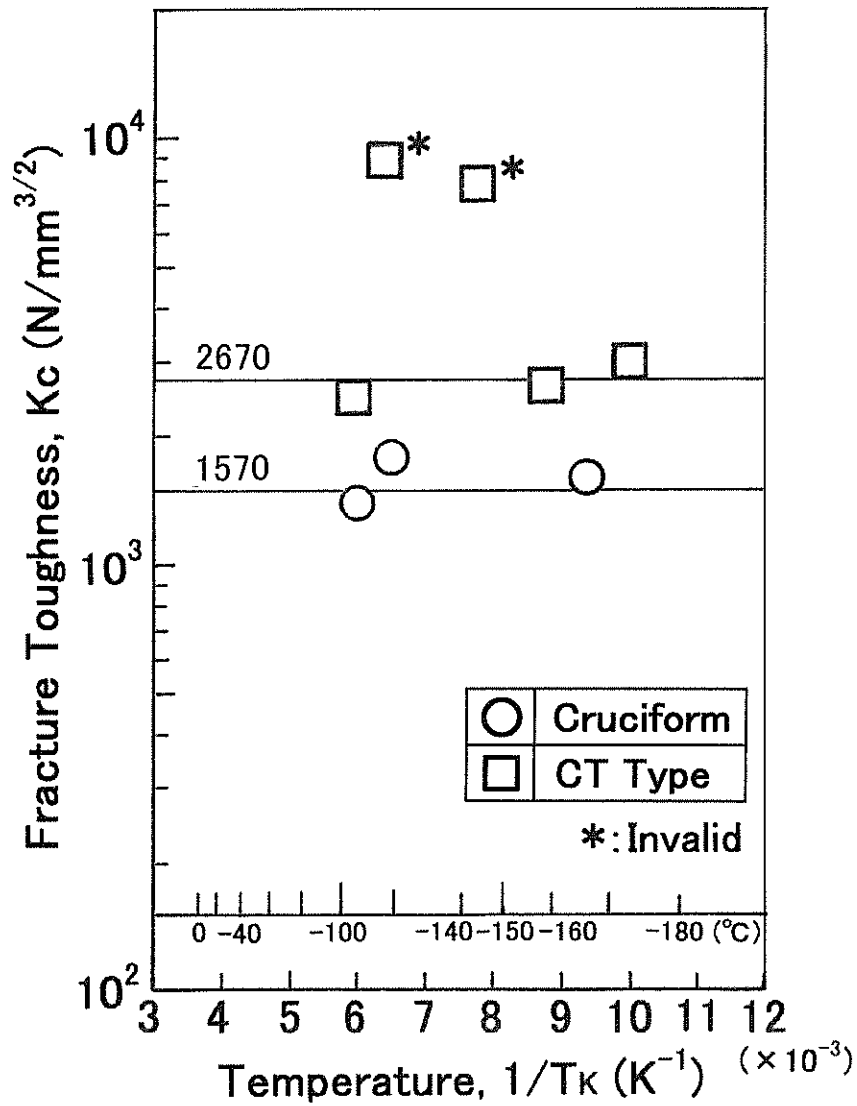


Fig.2.5 Relation between K_c and temperature
 [Interface of SUS329J3L-clad steel plate]

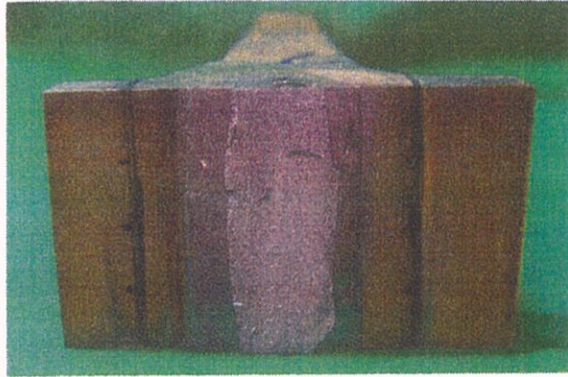


Fig.2.6 Fracture surface after tensile fracture toughness test (TCI-2, -106°C)

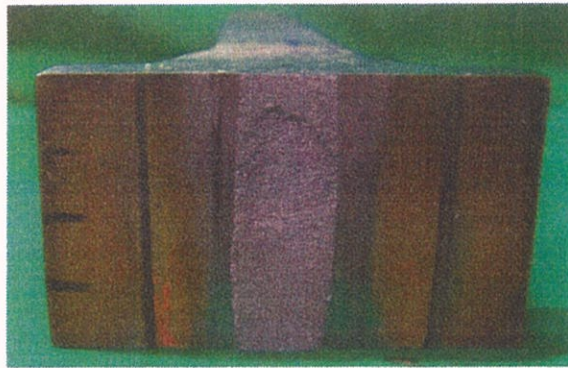


Fig.2.7 Fracture surface after tensile fracture toughness test (TCI-4, -119°C)

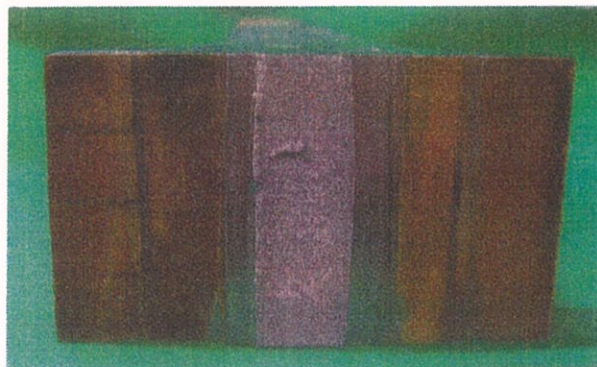


Fig.2.8 Fracture surface after tensile fracture toughness test (TCI-5, -166°C)

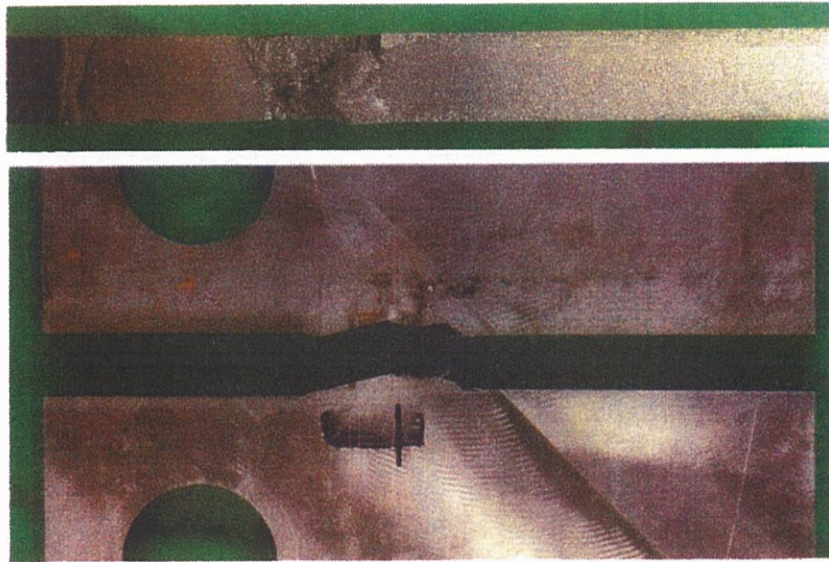


Fig.2.9 Fracture surface and pass after fracture toughness test (FTI-1, -116°C)



Fig.2.10 Fracture surface and pass after fracture toughness test (FTI-2, -144°C)

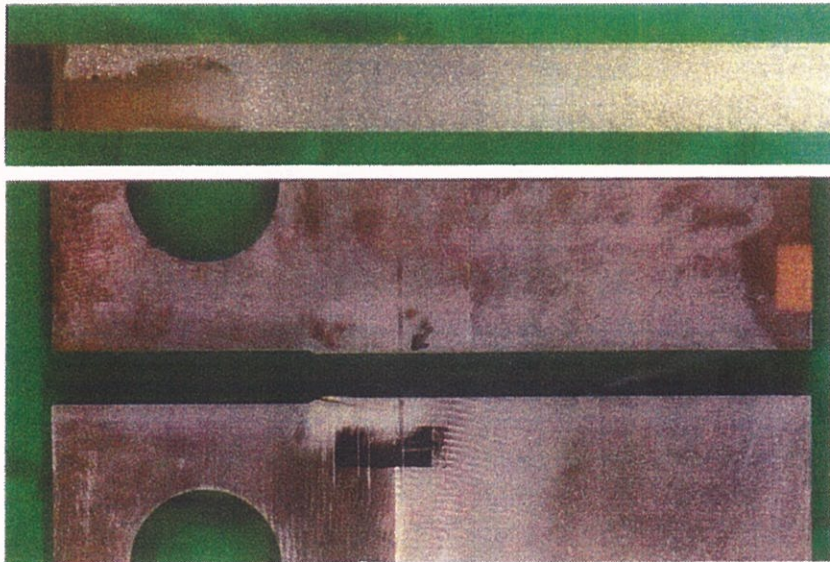


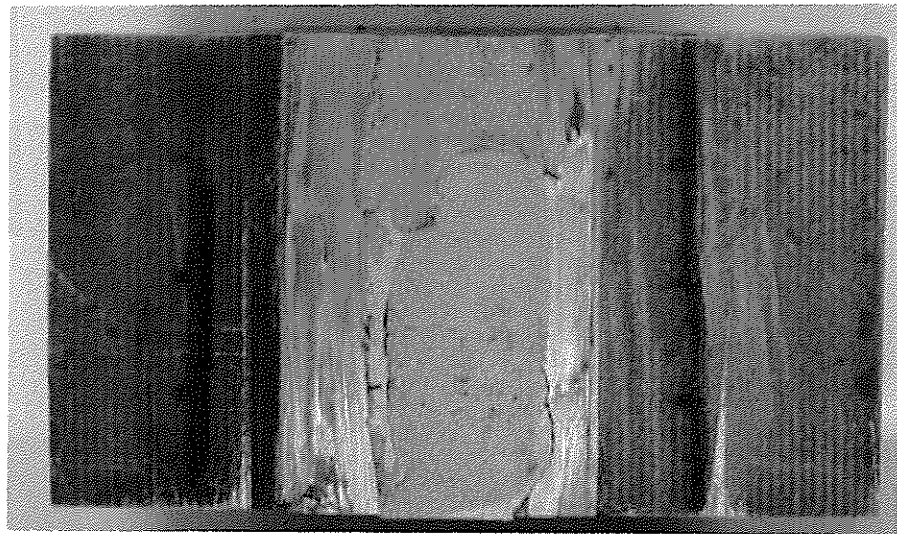
Fig.2.11 Fracture surface and pass after fracture toughness test (FTI-3, -105°C)



Fig.2.12 Fracture surface and pass after fracture toughness test (FTI-4, -159°C)

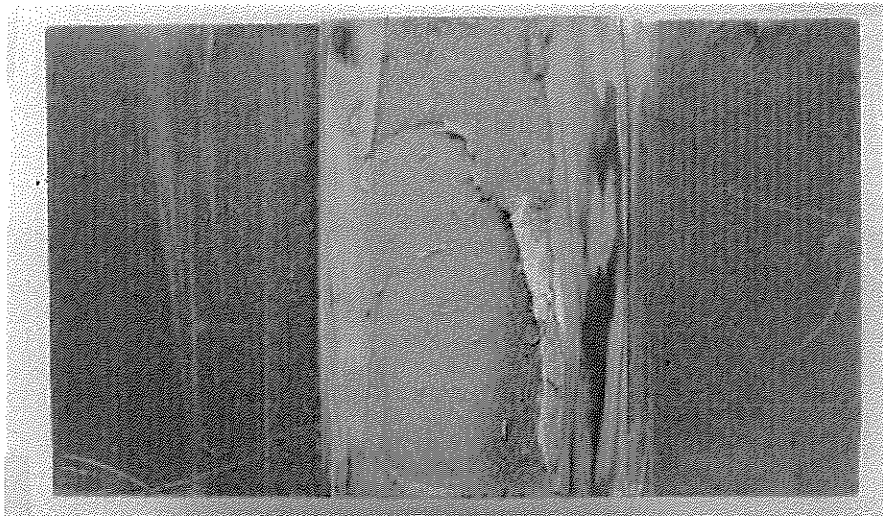


Fig.2.13 Fracture surface and pass after fracture toughness test (FTI-5, -173°C)



← 70mm →

Mild Steel Side



SUS329J3L Steel Side

Fig.2.14 Fracture surface after tensile fracture toughness test (TCI-2, -106°C)

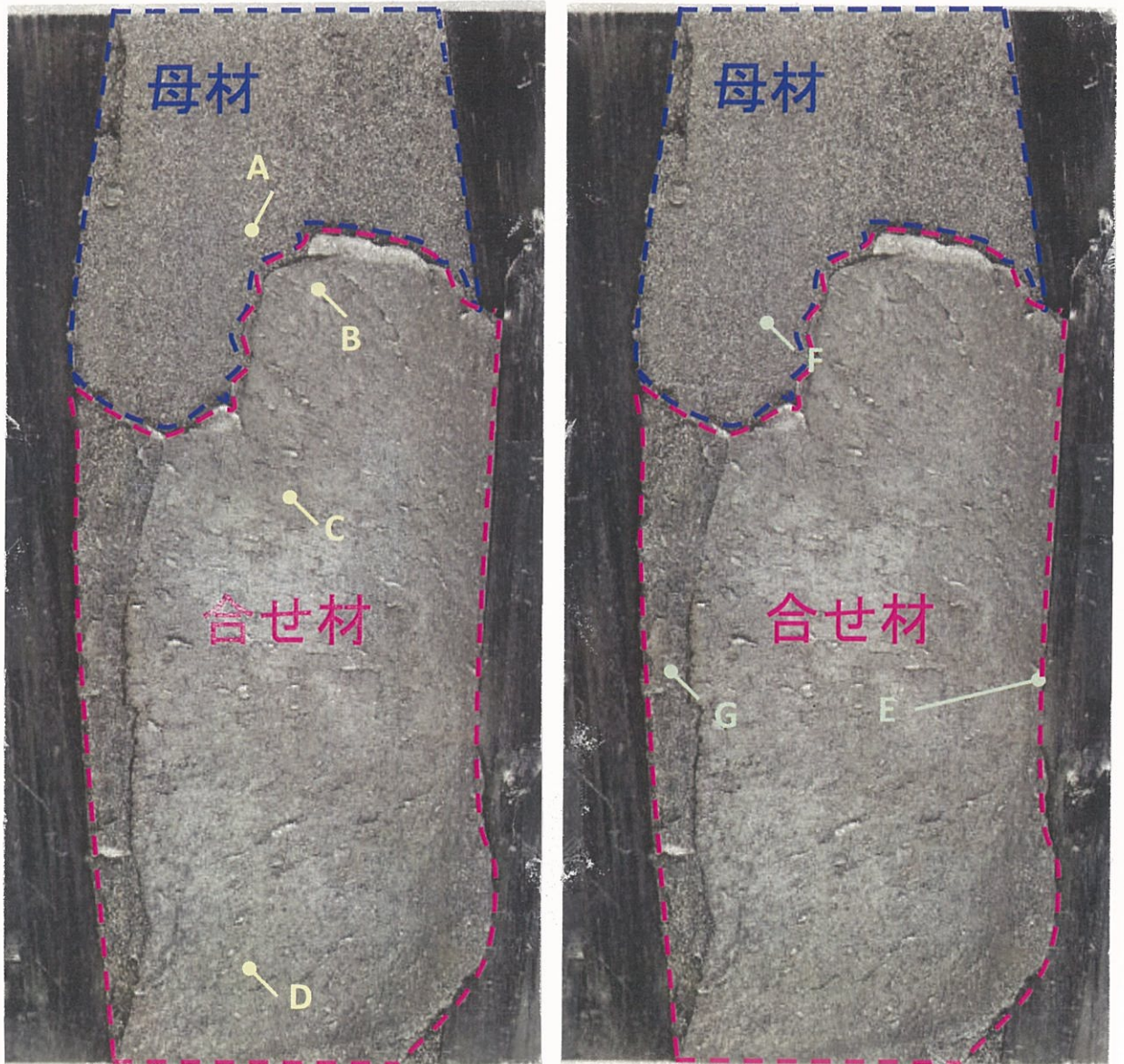


Fig.2.15 Fracture surface at mild steel side
(SEM observation points)
(TCI-2, -106°C)

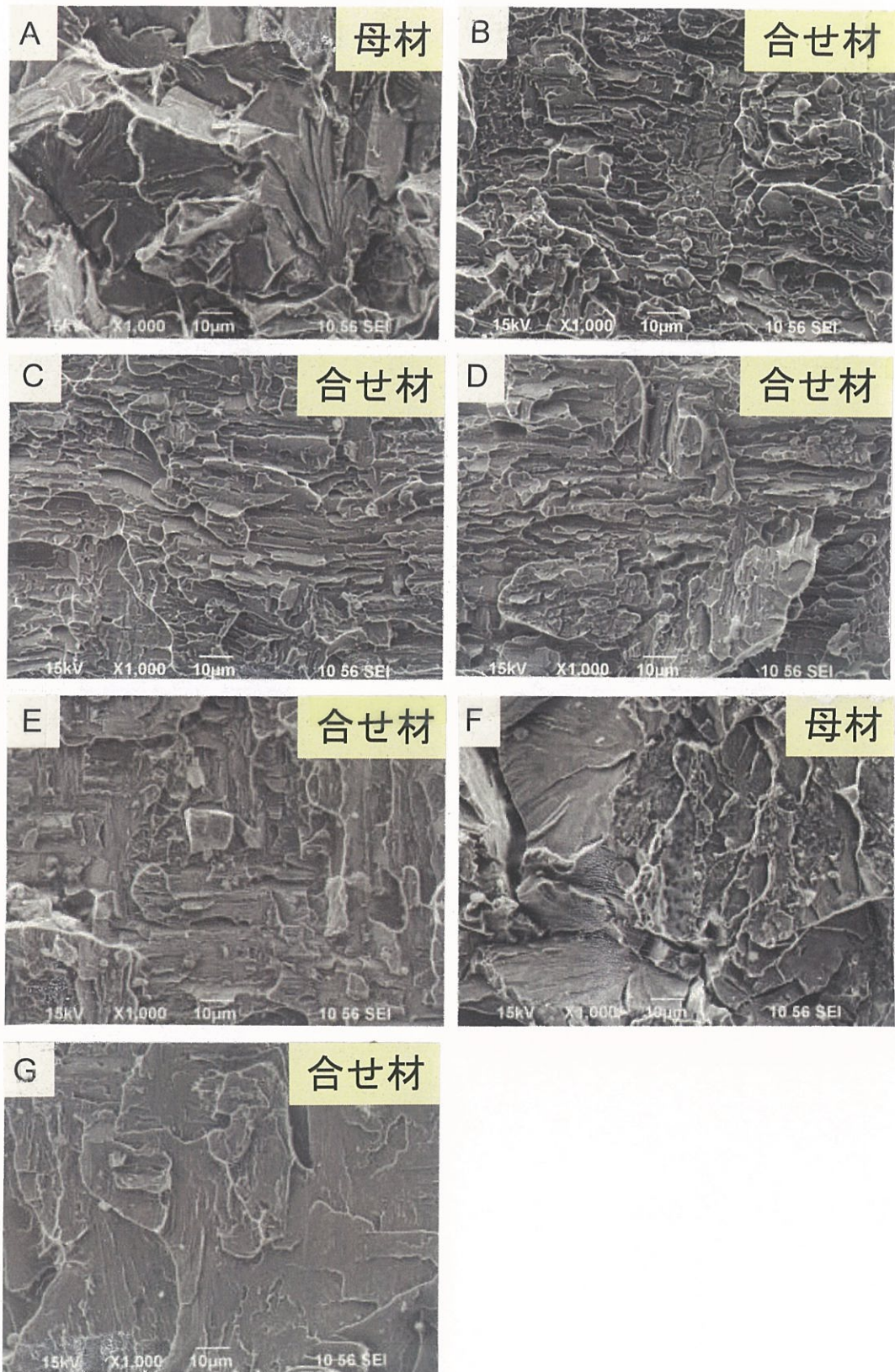


Fig.2.16 Fracture surface at mild steel side
 (SEM, × 1,000)
 (TCI-2, -106°C)

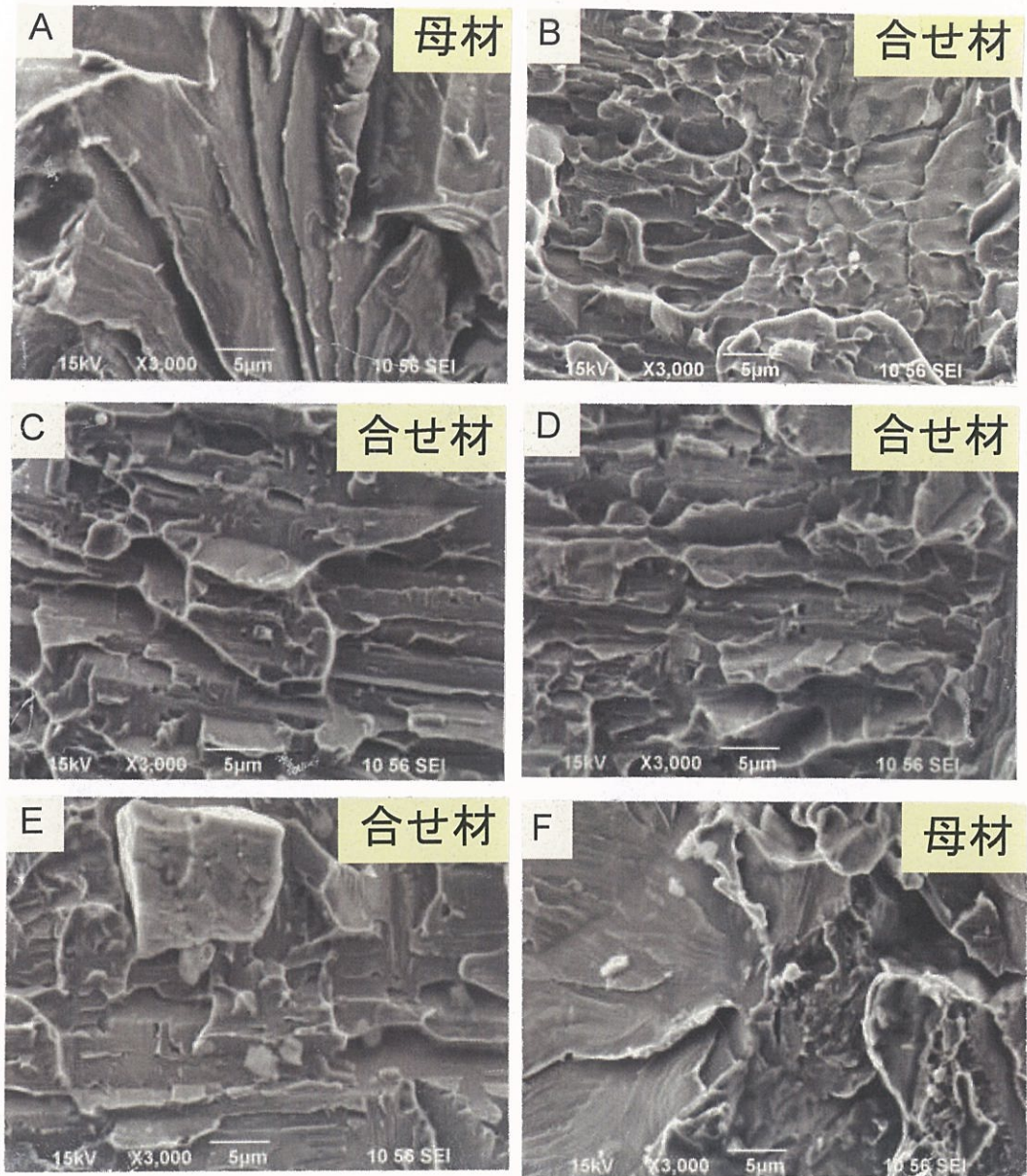
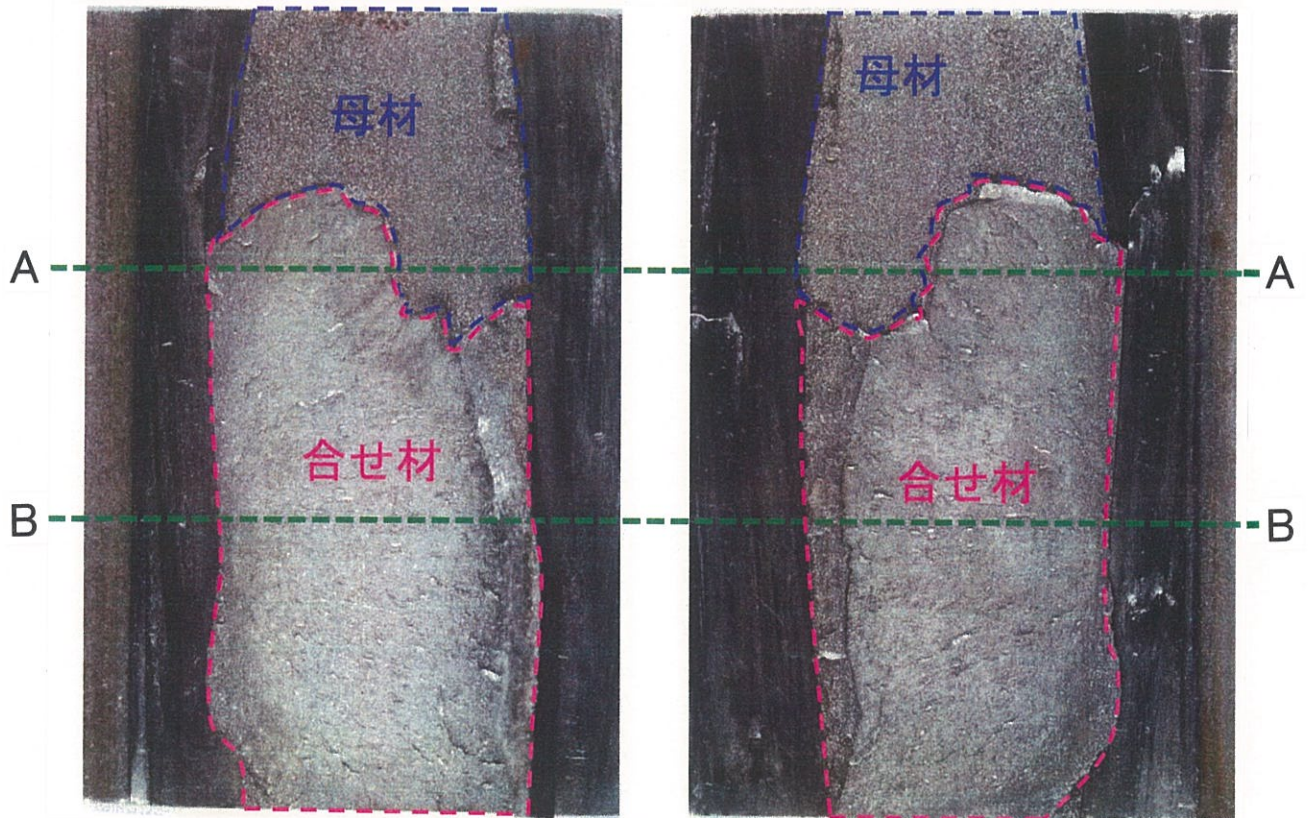


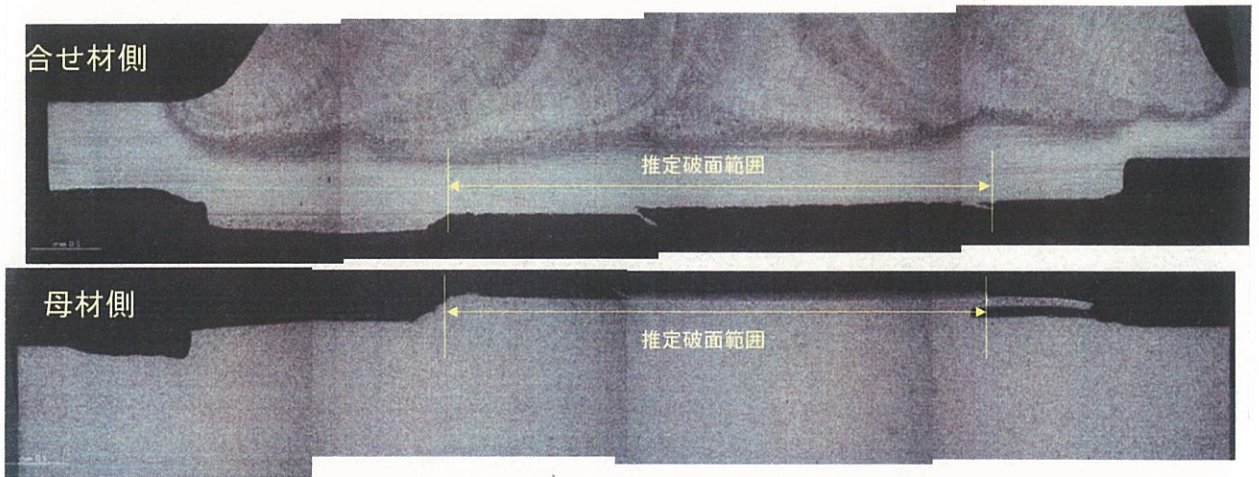
Fig.2.17 Fracture surface at mild steel side
 (SEM, × 3,000)
 (TCI-2, -106°C)



SUS329J3L Steel Side

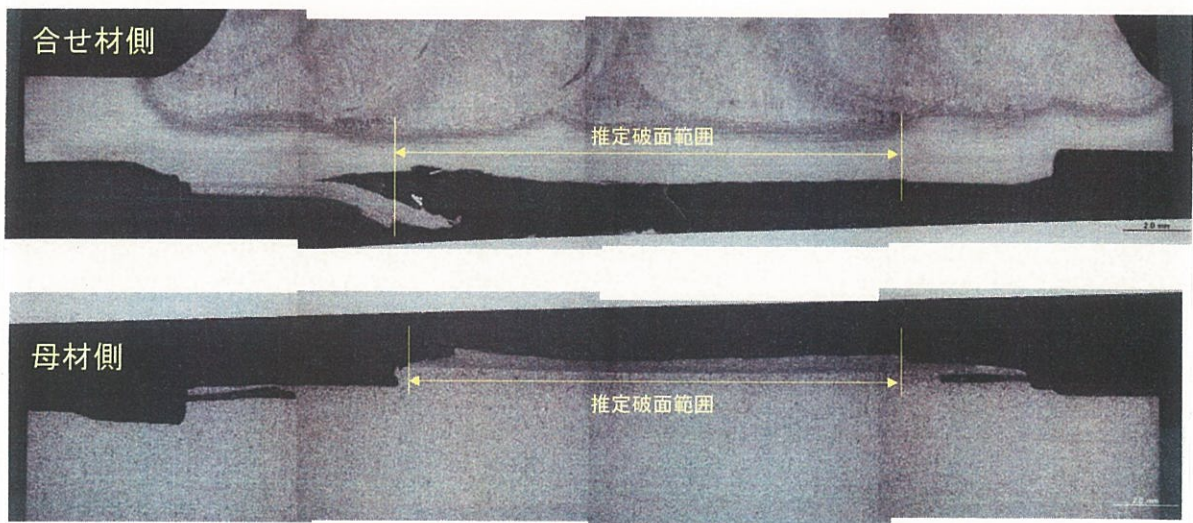
Mild Steel Side

Fig.2.18 Macro-structure observation section (A-A, B-B)
(TCI-2, -106°C)



A-A Section

Fig.2.19 Macro-structure of fracture section (A-A)
(TCI-2, -106°C)



B-B Section

Fig.2.20 Macro-structure of fracture section (B-B)
(TCI-2, -106°C)

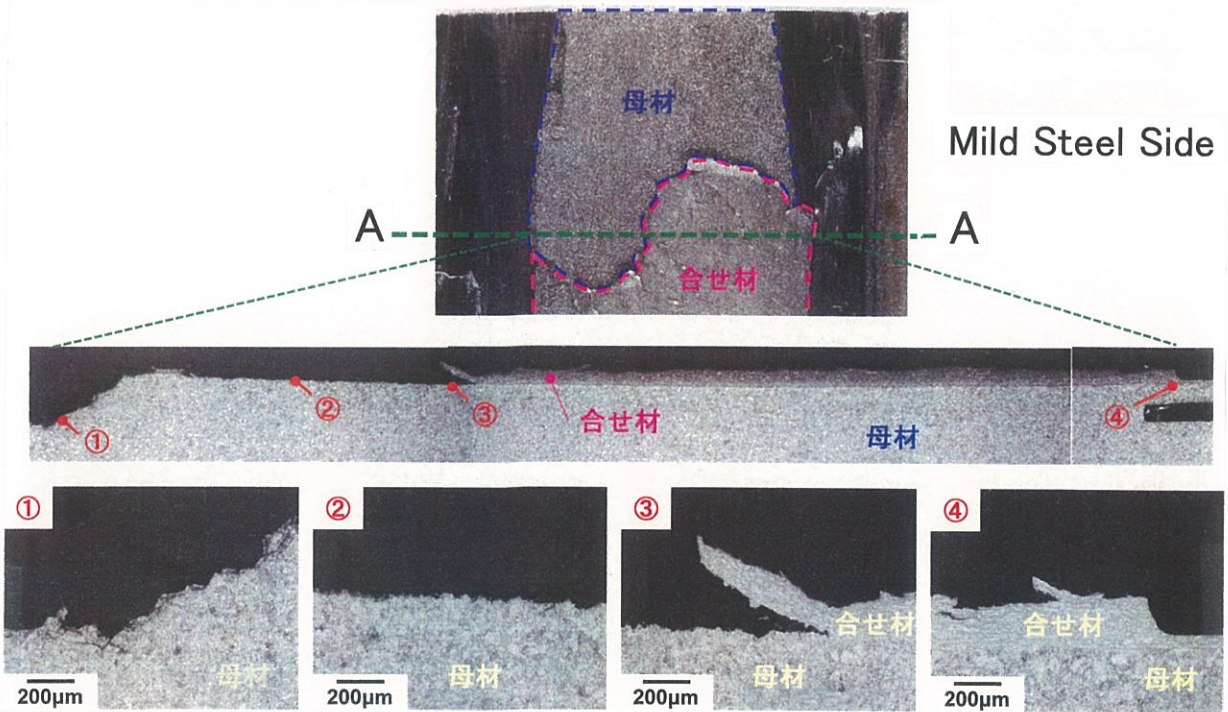


Fig.2.21 Macro and micro-structure of fracture section (A-A) (TCI-2, -106°C)

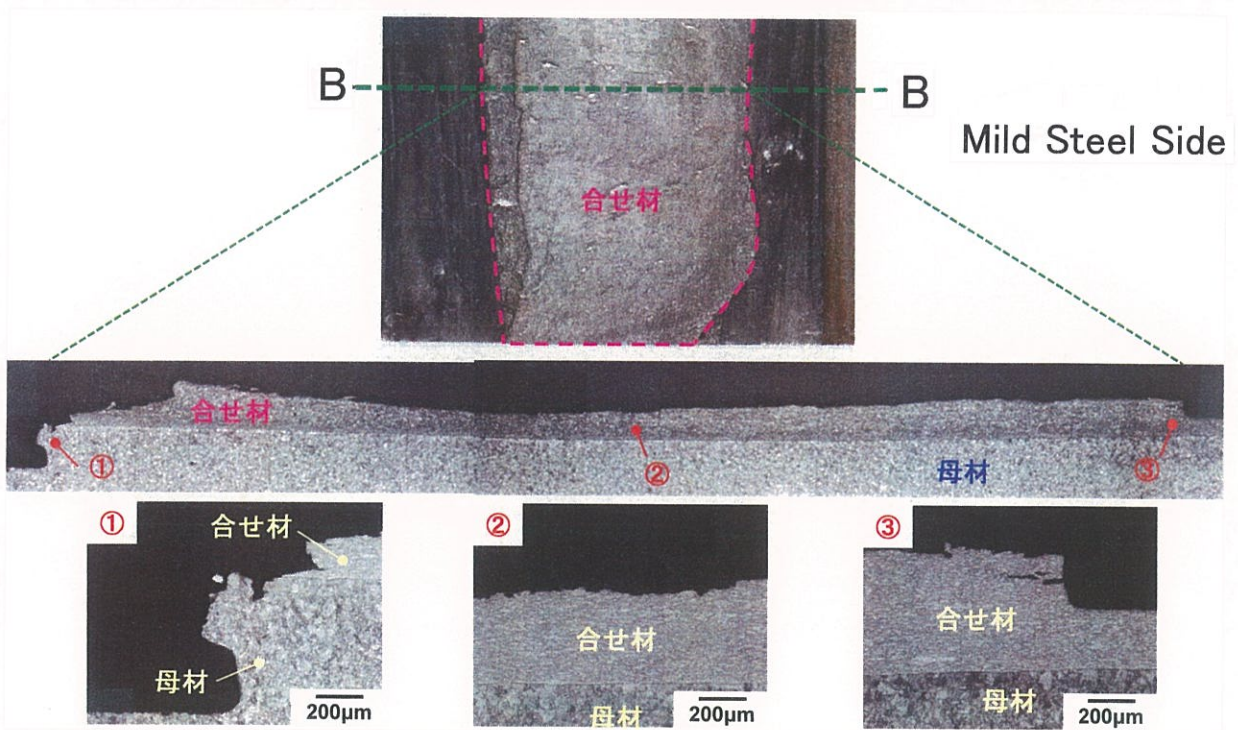


Fig.2.22 Macro and micro-structure of fracture section (B-B)
(TCI-2, -106°C)

Table 2.7 Chemical composition of austenitic stainless-clad steel plate

Test Steel Plate		(wt %)							
No.	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	
SUS316L -Clad (t:3+9)	1	0.017	0.66	1.54	0.037	0.002	16.65	13.21	2.09
	2	0.017	0.58	0.97	0.027	0.006	16.81	13.16	2.26
SUS317L -Clad (t:3+12)	3	0.015	0.26	1.86	0.024	0.005	18.41	14.71	3.29
	4	0.02	0.36	0.50	0.025	0.003	18.06	13.81	3.19
	5	0.021	0.29	1.87	0.025	0.001	18.19	14.08	3.05

Table 2.8 Mechanical properties of austenitic stainless-clad steel plates

Test Steel Plate	No.	Thck. (mm)	0.2% Proof Stress (N/mm ²)	Tensile Strength (N/mm ²)	Elongation (%)
SUS316L -Clad (t:3+9)	1	12 (3+9)	—	516	27.0
	2	12 (3+9)	276	473	34.3
SUS317L -Clad (t:3+12)	4	15 (3+12)	294	445	31.8
	5	15 (3+12)	286	485	20.5

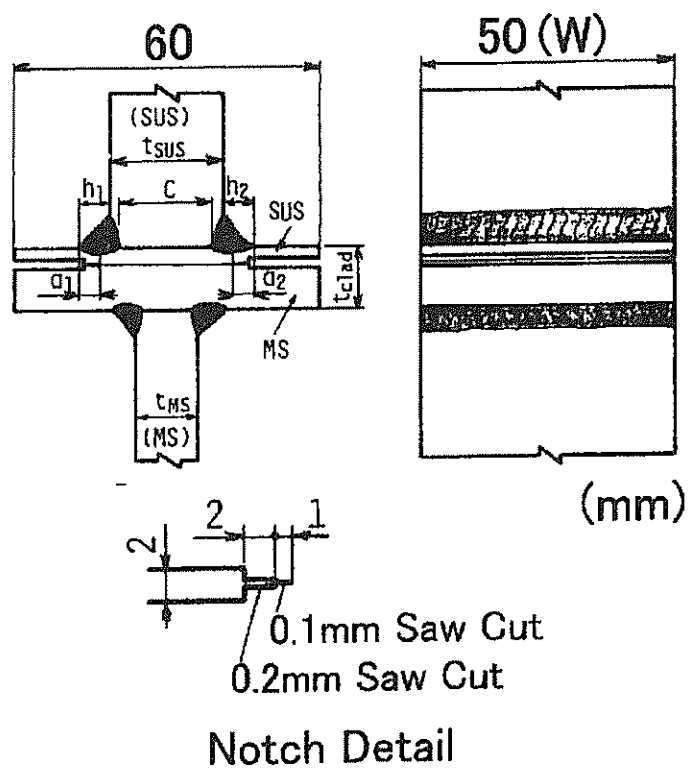


Fig.2.23 Shape and size of cruciform welded joint specimen for tensile fracture toughness test (Cruciform Type)

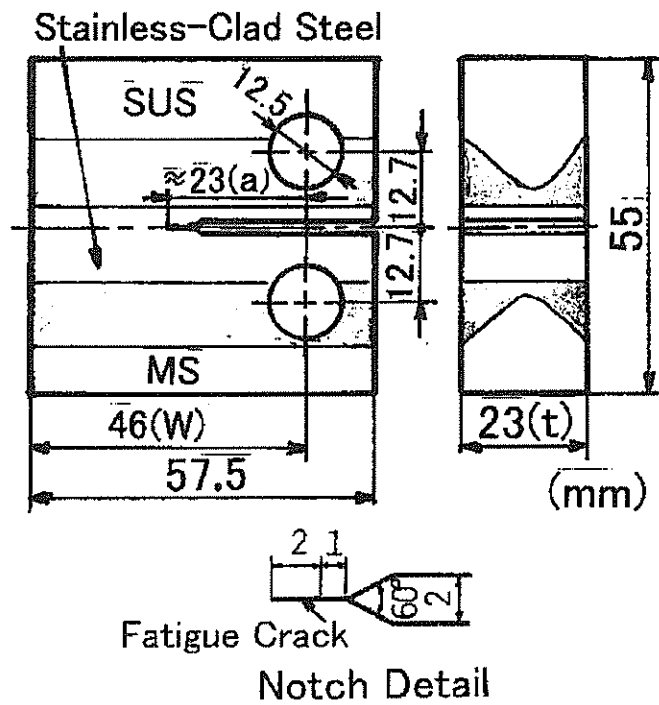
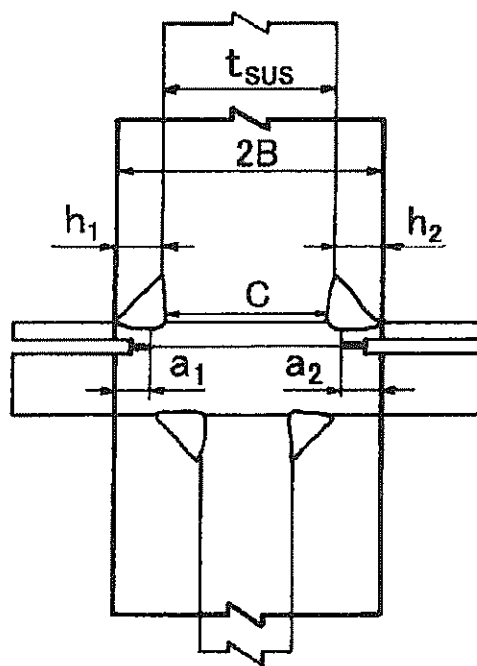


Fig.2.24 Shape and size of compact tension (CT) specimen for fracture toughness test (CT Type)



$$2B = t_{sus} + h_1 + h_2$$

$$a = \frac{(a_1 + a_2)}{2}$$

Fig.2.25 Model for calculation of K_c
(Cruciform Type)

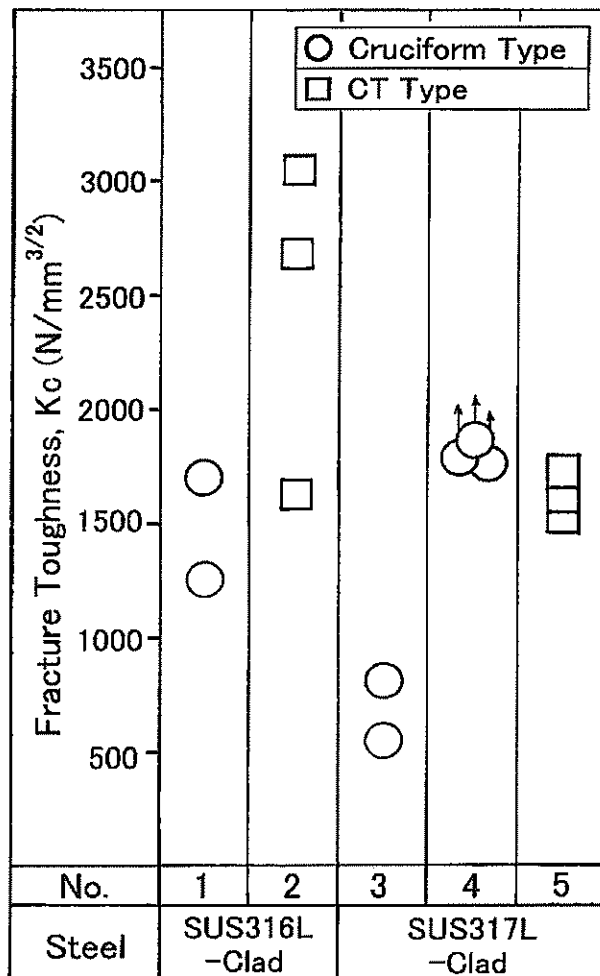


Fig.2.26 K_C at bonded interface of austenitic stainless-clad steel plates (R.T.) (SUS316L-clad, SUS317L-clad)

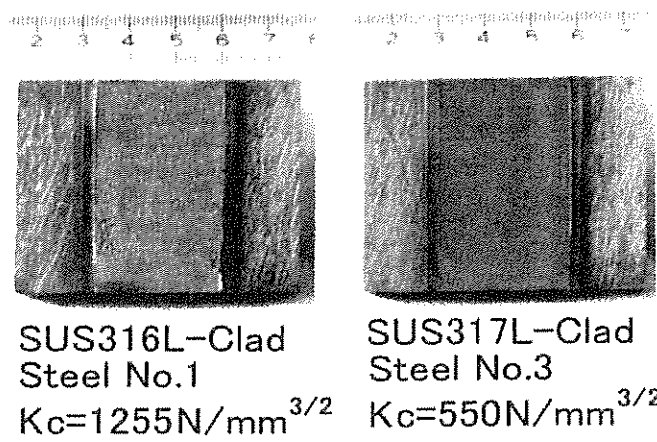


Fig.2.27 Fracture surface at bonded interface of cruciform type specimen (R.T.)

	SUS316L -Clad	SUS317L -Clad	SUS329J3L -Clad
Cruciform Type	●	◐	○
CT Type	■	◑	□

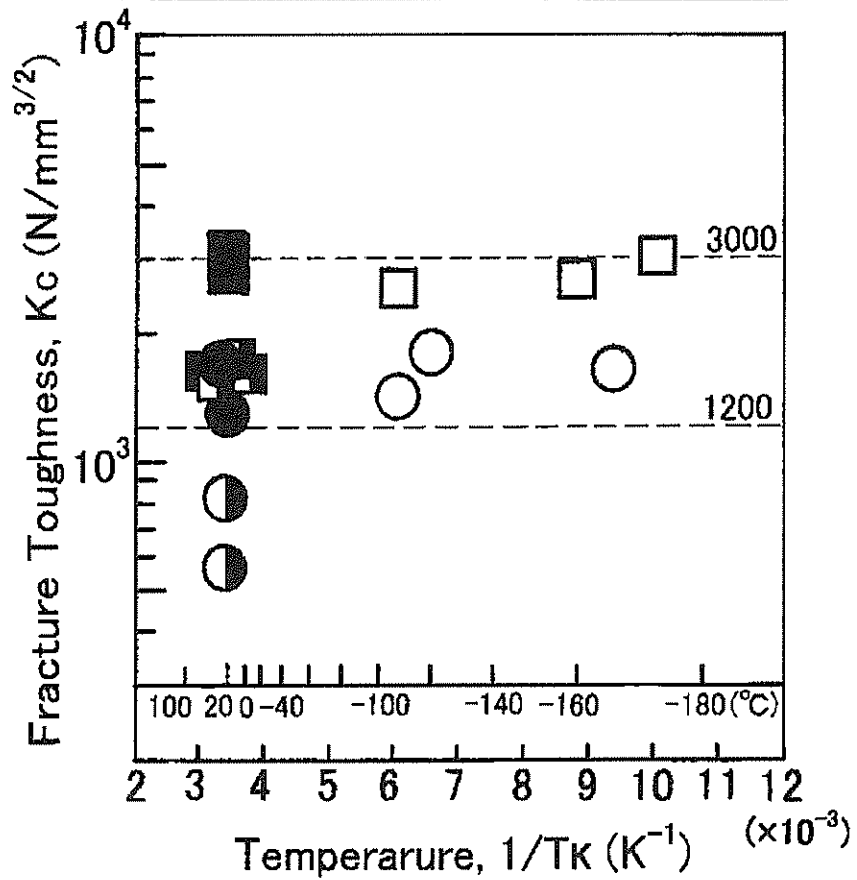


Fig.2.28 K_C at bonded interface of austenitic and duplex stainless-clad steel plates
 [SUS316L-clad, SUS317L-clad]
 [SUS329J3L-clad]

Table 2.9 Chemical composition of base plate

Material	(wt%)								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N
SUS329J3L (ASTM-S31803)	0.019	0.44	1.39	0.022	0.001	5.68	22.4	3.15	0.18
JIS	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	4.50 ~6.50	21.00 ~24.00	2.50 ~3.50	0.08 ~0.20

Table 2.10 Mechanical properties of base plate

Material	Yield Point (N/mm ²)	Tensile Strength (N/mm ²)	Elongation (%)
SUS329J3L (ASTM-S31803)	563	789	37
JIS	≥450	≥620	≥18

Table 2.11 Chemical composition of welding material (JIS)

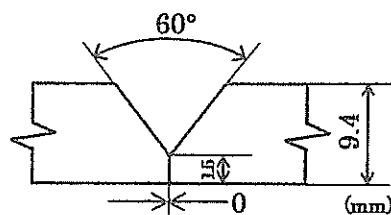
Material	(wt%)								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N
SUS329J4L	≤0.030	≤1.00	≤1.50	≤0.040	≤0.030	5.50 ~7.50	24.00 ~26.00	2.50 ~3.50	0.08 ~0.30

Table 2.12 Mechanical properties of welding material (JIS)

Material	Yield Point (N/mm ²)	Tensile Strength (N/mm ²)	Elongation (%)
SUS329J4L	≥450	≥620	≥18

Table 2.13 Welding parameters of FCAW and TIGW

Welding Method	Thick. (mm)	Welding Material	Shielding Gas	Current (A)	Voltage (V)	Welding Speed (mm/min)	Heat Input (kJ/mm)	Pass	
								F	B
FCAW	9.4	MT-329J4L (φ1.2)	CO ₂ 100%	200	29	400	0.9	3	2
TIGW		WEL-329J4L (φ2.4)	Ar 100%	150	17	130	1.2	5	4



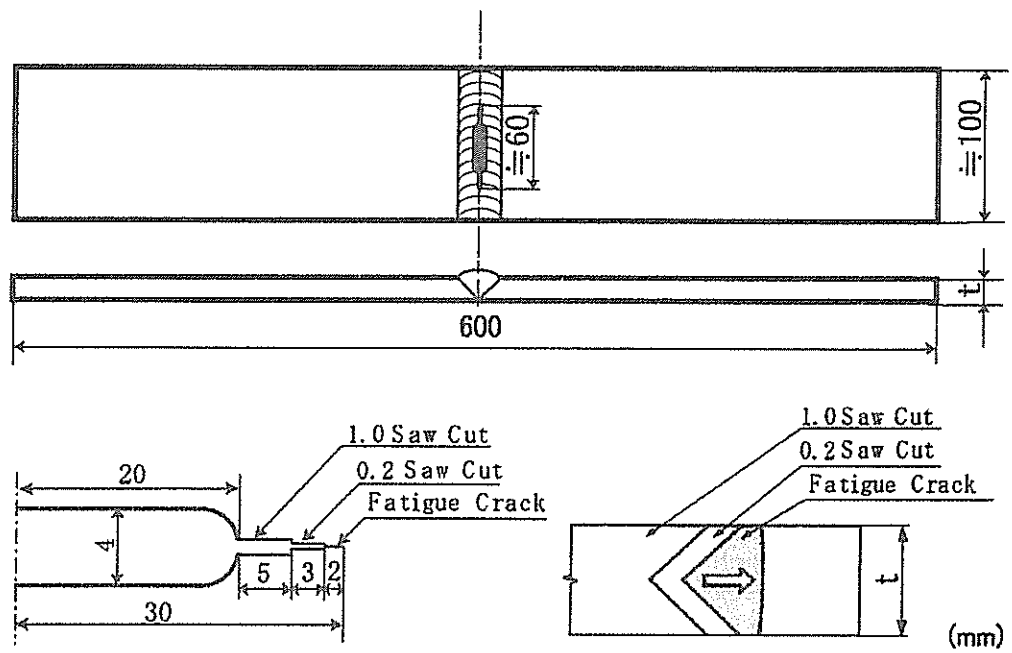


Fig.2.29 Shape and size of center notched tensile fracture toughness test specimen

Table 2.14 Processing conditions of fatigue cracked notch (W.M.)

Speci.	Width 2B (mm)	Thick. t (mm)	Notch Length 2a (mm)	Freq. (Hz)	Test Load P (kN)		Number of Cycle N (cycles)	Number of Cycle N _t (cycles)	Gross Stress σ _g (N/mm ²)	Stress Intensity Factor Range ΔK (N/mm ^{1.5})
					①	②				
F-1	100.2	9.8	64.1	6	① 93.7	19,152	2.8×10 ⁴	95	—	
					② 49.3	8,918		50	685	
F-2	100.3	9.7	62.7	6	① 93.7	17,115	6.6×10 ⁴	96	—	
					② 48.8	48,803		50	665	
F-3	100.4	9.7	62.3	6	① 68.2	27,465	7.0×10 ⁴	70	—	
					② 48.7	42,546		50	660	
F-4	100.6	9.6	60.4	6	48.0	121,229	1.2×10 ⁵	50	635	
T-50	100.3	10.5	63.0	6	52.6	76,091	7.6×10 ⁴	50	669	
T-51	100.4	10.3	57.7	6	51.7	81,606	8.2×10 ⁴	50	604	

Table 2.15 Results of center notched tensile test (W.M.)

Speci.	Width 2B (mm)	Thick. t (mm)	Notch Length 2a (mm)	Test Temp.		Fracture Load P (kN)	Fracture Stress		Fracture Toughness K _c (N/mm ^{1.5})
				T (°C)	10 ³ /T _k (K ⁻¹)		Gross σ _g (N/mm ²)	Net σ _n (N/mm ²)	
F-1	100.2	9.8	64.1	-89	5.43	294	299	831	4.10×10 ³
F-2	100.3	9.7	62.7	-187	11.63	77	79	211	1.05×10 ³
F-3	100.4	9.7	62.3	-138	7.41	155	159	419	2.10×10 ³
F-4	100.6	9.6	60.4	-164	9.17	101	105	262	1.33×10 ³
T-50	100.3	10.5	63.0	-138	7.41	239	227	610	3.04×10 ³
T-51	100.4	10.3	57.7	-165	9.26	152	147	346	1.78×10 ³

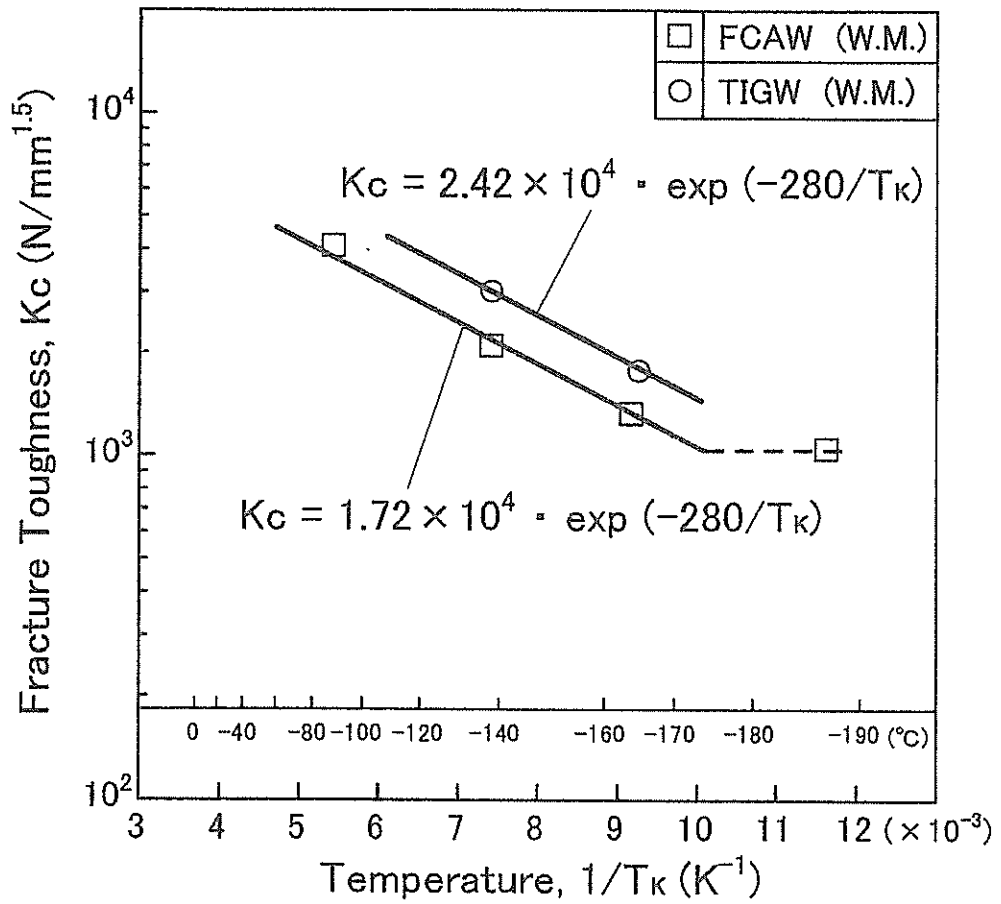


Fig.2.30 Relation between K_C and temperature

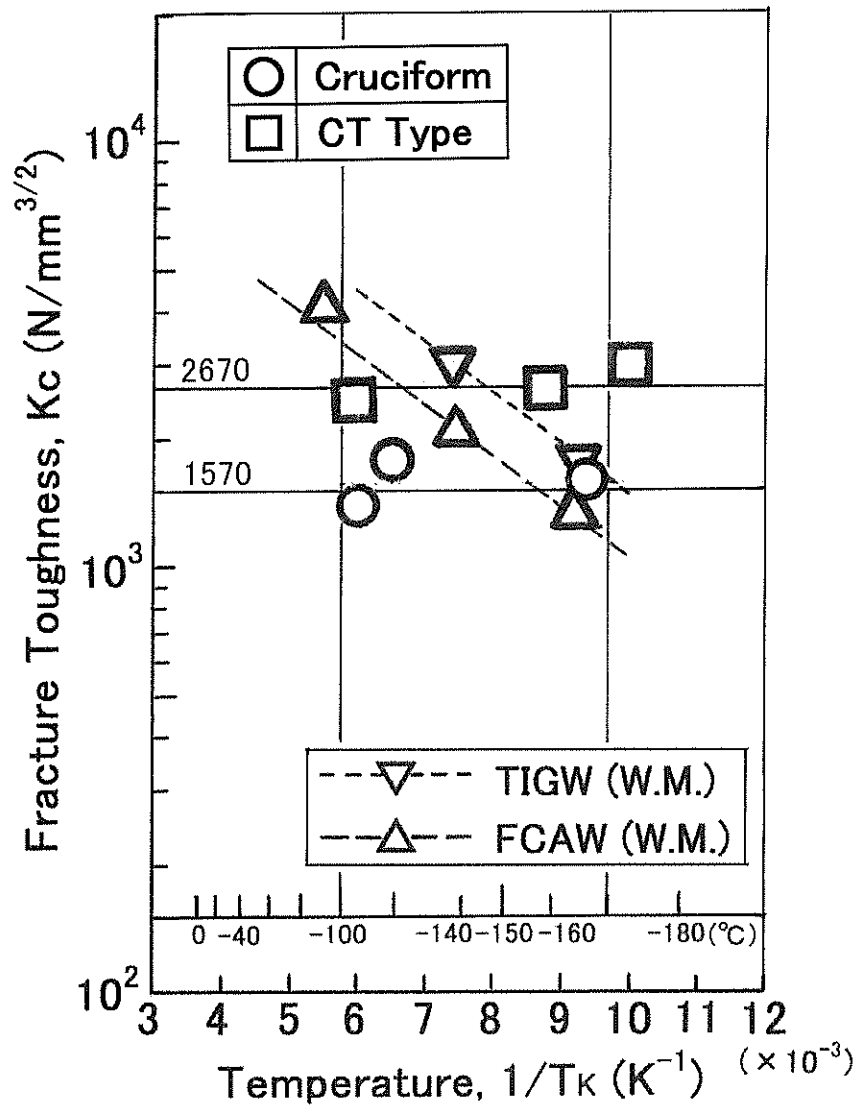


Fig.2.31 Relation between K_c and temperature

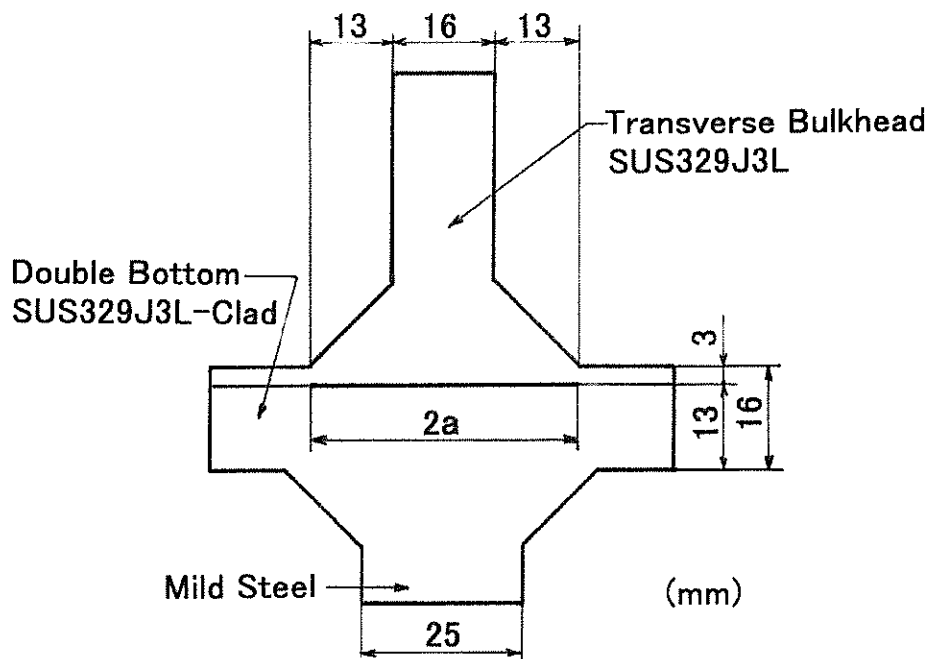


Fig.2.32 Cruciform welded joint between transverse bulkhead and double bottom

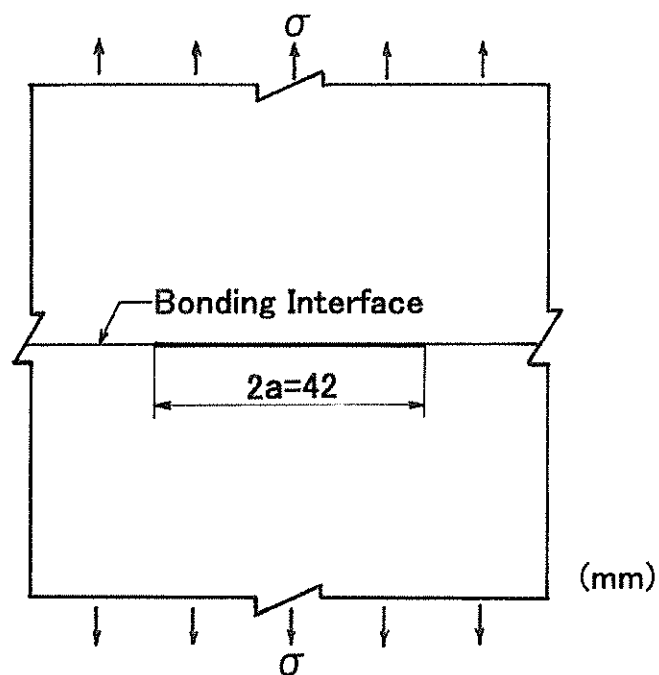


Fig.2.33 Center notched infinitely plate

第3章 二相ステンレス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 はじめに

ケミカルタンカーカーゴタンク構造用として、2016年に開発・製品化された二相ステンレス(SUS329J3L)クラッド鋼板接合界面に沿っての疲労亀裂伝播特性を、把握・検討・評価した。

SUS329J3Lクラッド鋼板をケミカルタンカーカーゴタンク構造に使用する上で、最重要課題の一つが、接合界面に沿っての疲労亀裂伝播特性の把握である。

何故なら、クラッド鋼板両表面に直接構造部材を溶接によって接続し、接合界面を引き剥がすような大きな負荷が予想されるからである。万一、接合界面に微小な欠陥が存在した場合、繰り返し負荷により疲労亀裂として成長すると想定すると、接合界面の強度信頼性を確保するためには、接合界面に沿っての疲労亀裂伝播特性を把握しておくことは、最重要課題である。

本章では、コンパクトテンション(CT)型試験片および中央切欠付引張(CCT型)試験片を供試して、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把握・検討・評価した結果について述べる。

3.2 供試鋼板、供試試験片および溶接条件

供試鋼板は、前章、Table 2.1およびTable 2.2に示した鋼板と同一である。

供試したCT型試験片とCCT型試験片の形状・寸法を、Fig.3.1およびFig.3.2に示す。

また、CT型試験片とCCT型試験片の製作において、SUS329J3Lクラッド鋼板のSUS329J3L鋼板側表面にSUS329J3Lソリッド鋼板を、また、

SUS329J3Lクラッド鋼板の軟鋼板側表面に軟鋼板を溶接したが、前者の溶接条件は、先に **Table 2.4** に示した通りである。

3.3 接合界面に沿っての疲労亀裂伝播試験結果 および考察

CT型試験片による室温・大気中での疲労亀裂伝播試験結果を **Table 3.1** に、また、CCT型試験片による室温・大気中での疲労亀裂伝播試験結果を **Table 3.2** に示す。さらに、CT型試験片およびCCT型試験片による疲労亀裂伝播試験結果の、疲労亀裂長さ a と荷重(応力)繰返し数 N との関係を示す、**Fig.3.3**～**Fig.3.6**に示す。

さらに、**Table 3.1**、**Fig.3.3** および **Fig.3.4** に示した、CT型試験片による疲労亀裂伝播試験結果の、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.3.7** および **Fig.3.8** に示す。さらに、**Fig.3.7** と **Fig.3.8** とを同一グラフに示したものが **Fig.3.9** である。

また、**Table 3.2**、**Fig.3.5** および **Fig.3.6** に示した、CCT型試験片による da/dN と ΔK との関係を示す、**Fig.3.10** および **Fig.3.11** に示す。さらに、**Fig.3.10** と **Fig.3.11** とを同一グラフに示したものが **Fig.3.12** である。

なお、**Table 3.1**、**Fig.3.3**、**Fig.3.4**、**Fig.3.7**～**Fig.3.9** に示した、CT型試験片による疲労亀裂伝播試験後の疲労亀裂進展状況を **Fig.3.13** に示す。疲労亀裂はSUS329J3Lクラッド鋼板接合界面に沿って真っ直ぐ進展している。

また、**Table 3.2**、**Fig.3.5**、**Fig.3.6**、**Fig.3.10**～**Fig.3.12** に示した、CCT型試験片による疲労亀裂伝播試験後の疲労亀裂進展状況を **Fig.3.14** に示す。**Fig.3.14** から明らかなように、疲労亀裂はSUS329J3Lクラッド鋼板接合界面に沿って真っ直ぐ進展している。

最近実施された、高張力鋼板すなわち、SM570Qの母材とWES-HW685の母材(**Table 3.3**参照)のCT型試験片による疲労亀裂伝播試験

結果^{3.1)}と、先に示した **Fig.3.9** とを同一グラフに示したものが **Fig.3.15** である。

Fig.3.15から明らかなように、供試した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は、高張力鋼板(SM570Q, WES-HW685)母材の疲労亀裂伝播特性と比べて、勝るとも劣らない。

換言すれば、SUS329J3Lクラッド鋼板接合界面の疲労亀裂伝播特性は、高張力鋼板(SM570Q, WES-HW685)母材と同等であり、ケミカルタンカーカーゴタンク構造に適用して何等問題無いものと考えられる。

一方、数年前に実施された、SUS329J3L鋼板母材(板厚10mm)の試験片幅160mmのCCT型試験片による疲労亀裂伝播試験結果^{3.2)}と、先に示した **Fig.3.12** とを同一グラフに示したものが、**Fig.3.16**である。

Fig.3.16から明らかなように、 ΔK が大きい領域では、供試した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。

換言すれば、SUS329J3Lクラッド鋼板接合界面の疲労亀裂伝播特性は、二相ステンレス(SUS329J3L)鋼板母材と同等であり、SUS329J3Lクラッド鋼板をケミカルタンカーカーゴタンク構造に適用して、何等問題無いものと考えられる。

3.4 まとめ

CT型試験片およびCCT型試験片を供試して、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把握した。

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, WES-HW685)母材や、SUS329J3Lソリッド鋼板

母材と同等であり，SUS329J3Lクラッド鋼板をケミカルタンカーカーゴタンク構造に適用して，クラッド鋼板接合界面疲労強度の観点からは，何等問題ないものと考えられる。

参 考 文 献

- 3.1) 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.
- 3.2) 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，長崎総合科学大学大学院 新技術創成研究所 所報，第6号(2011.3.)，pp.13-17.

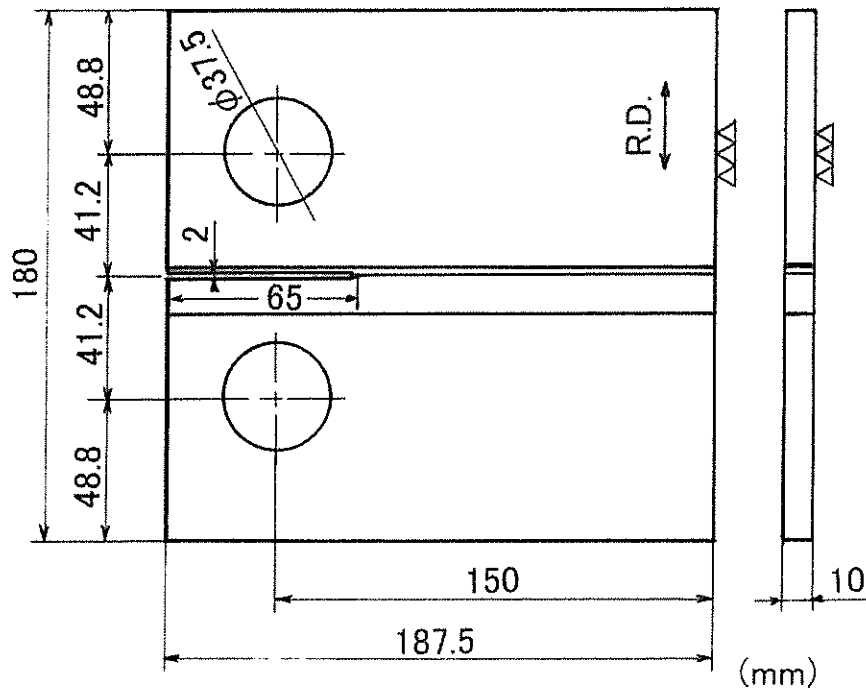


Fig.3.1 Shape and size of CT type specimen for fatigue crack propagation test

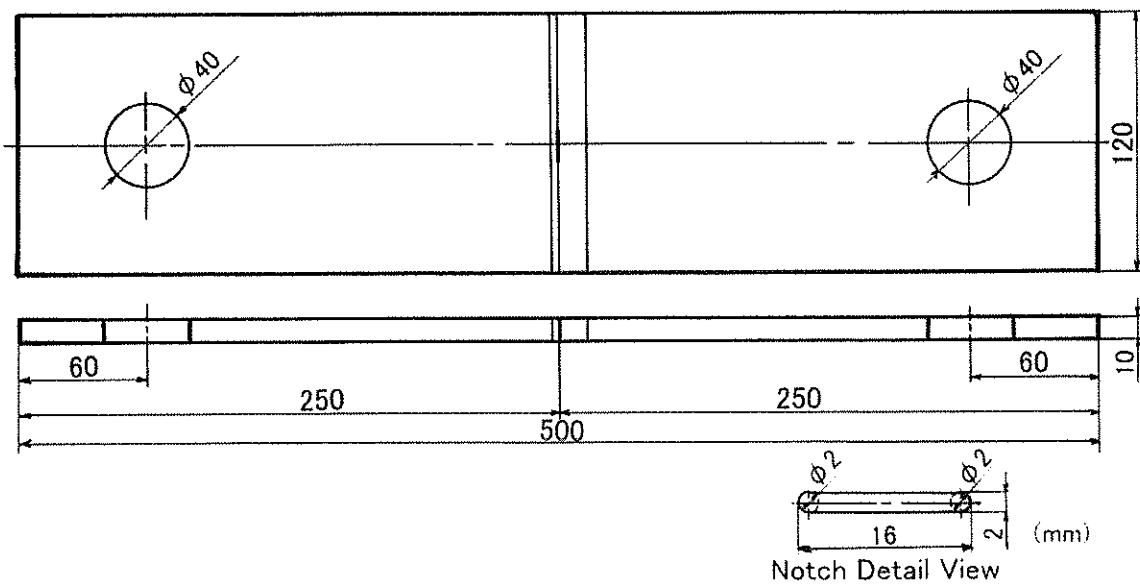


Fig.3.2 Shape and size of CCT type specimen for fatigue crack propagation test

Table 3.1 Results of CT type fatigue crack propagation tests

Specimen Number	Width W (mm)	Thick. t (mm)	Cross- Section Area A (mm ²)	Term	Test Load		
					Max. P _{max} (kN)	Min. P _{min} (kN)	Range P _R (kN)
FPI-1	150	10.06	1509	A	36	3.6	32.4
				B			
				C			
				D			
FPI-2	150	10.08	1512	A	36	3.6	32.4
				B			
				C			
				D			

Test Stress			Freq. F (Hz)	Number of Cycles N (ΣN) (cycles)	Crack Length a (mm)
Max. σ _{max} (N/mm ²)	Min. σ _{min} (N/mm ²)	Range σ _R (N/mm ²)			
23.86	2.39	21.47	10	685,606	36.23
				68,203 (753,809)	42.65
				42,912 (796,721)	55.37
				20,683 (817,404)	73.9
23.81	2.38	21.43	10	488,217	39.6
				52,202 (540,419)	49.1
				32,544 (572,963)	64.4
				9,160 (582,123)	82.0

Table 3.2 Results of CCT type fatigue crack propagation tests

Specimen Number	Width	Thick.	Cross-Section Area	Test Load		
				Max.	Min.	Range
	W (mm)	t (mm)	A (mm ²)	P _{max} (kN)	P _{min} (kN)	P _R (kN)
PCI-1	121	8.0	968	110	11.0	99.0
PCI-2	121	7.9	956	110	11.0	99.0

Test Stress			Freq.	Number of Cycles	Average Half Crack Length a (mm)
Max.	Min.	Range			
σ_{max} (N/mm ²)	σ_{min} (N/mm ²)	σ_R (N/mm ²)	F (Hz)	(cycles)	
114	11.4	103	10	160,960	36.3
115	11.5	104	10	280,670	37.9

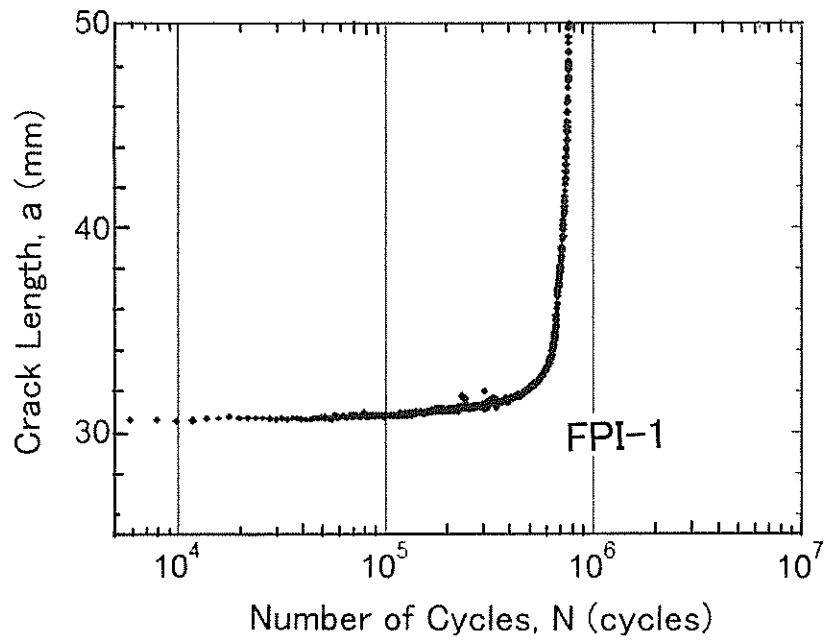


Fig.3.3 Relation between a and N (CT type : FPI-1)
[Interface of SUS329J3L-clad steel plate]

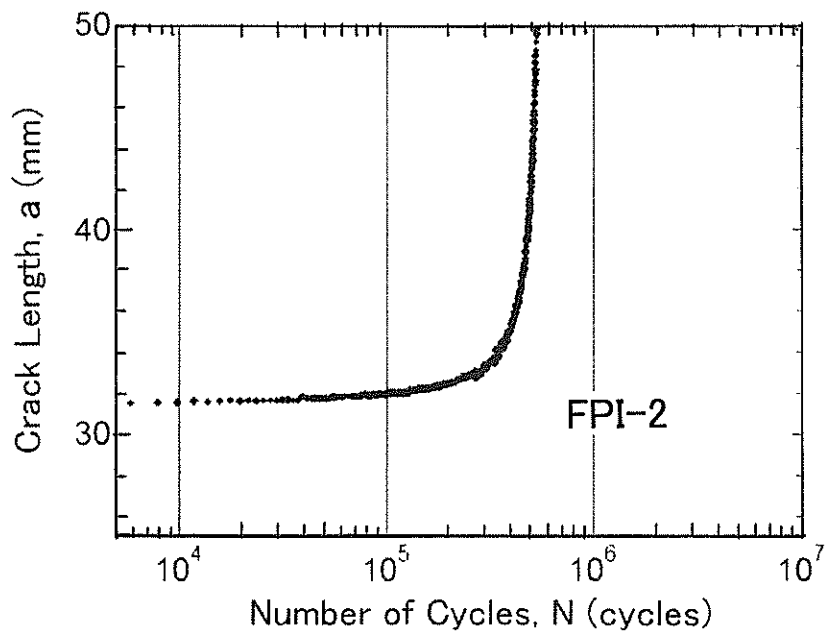
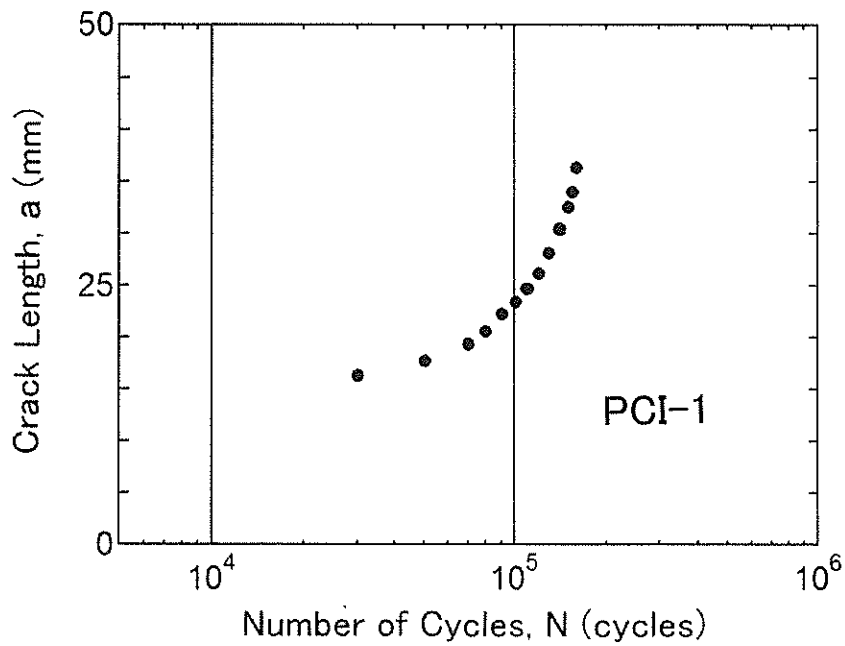
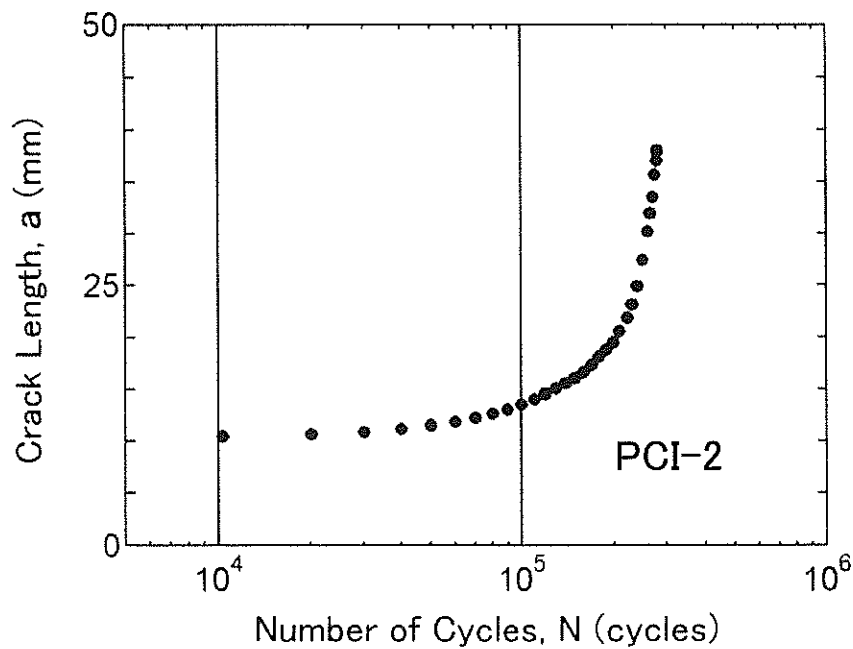


Fig.3.4 Relation between a and N (CT type : FPI-2)
[Interface of SUS329J3L-clad steel plate]



**Fig.3.5 Relation between a and N (CCT type : PCI-1)
[Interface of SUS329J3L-clad steel plate]**



**Fig.3.6 Relation between a and N (CCT type : PCI-2)
[Interface of SUS329J3L-clad steel plate]**

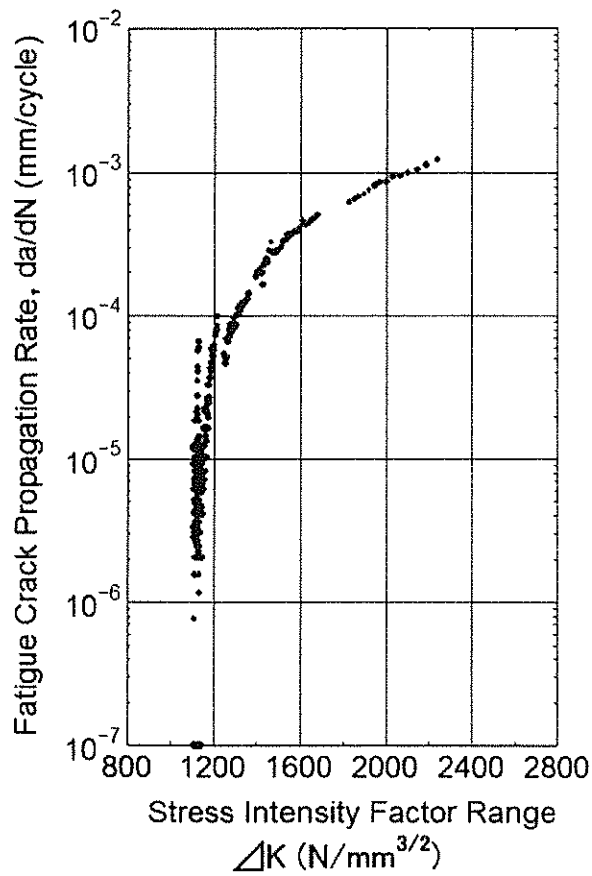


Fig.3.7 Relation between da/dN and ΔK
 (CT type : FPI-1)
 (Interface of SUS329J3L)
 (-clad steel plate)

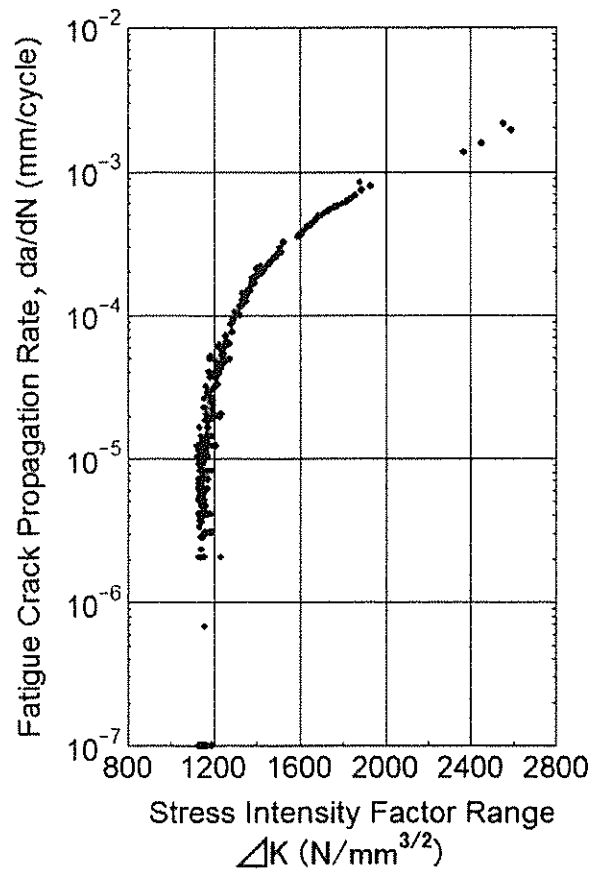


Fig.3.8 Relation between da/dN and ΔK
 (CT type : FPI-2)
 (Interface of SUS329J3L)
 (-clad steel plate)

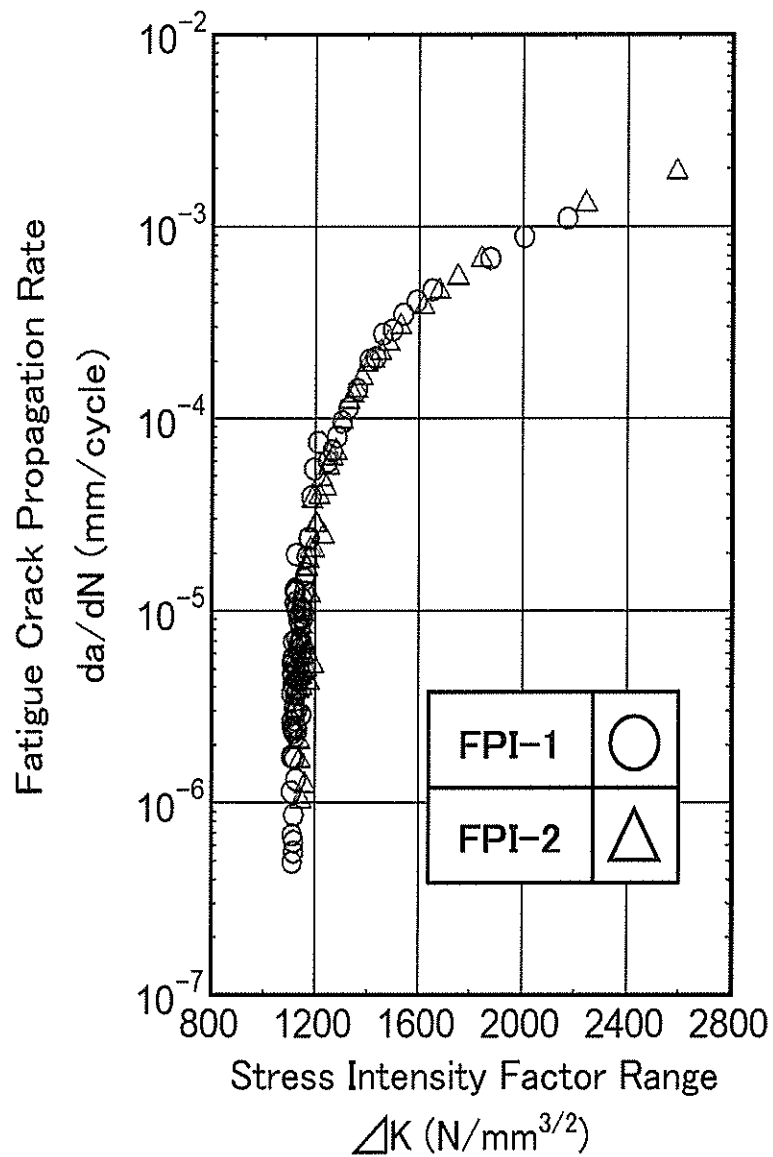


Fig.3.9 Relation between da/dN and ΔK
 (CT type : FPI-1, FPI-2)
 [Interface of SUS329J3L-clad steel plate]

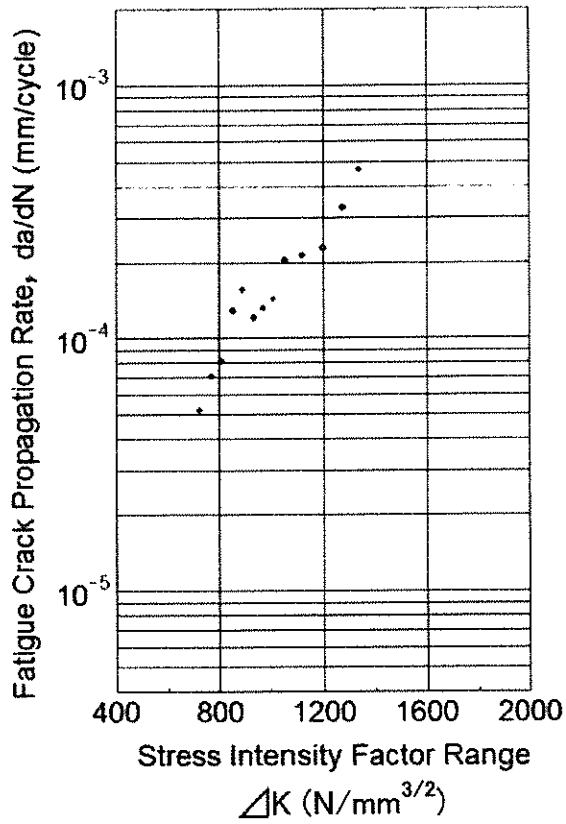


Fig.3.10 Relation between da/dN and ΔK
 (CCT type : PCI-1)
 (Interface of SUS329J3L
 -clad steel plate)

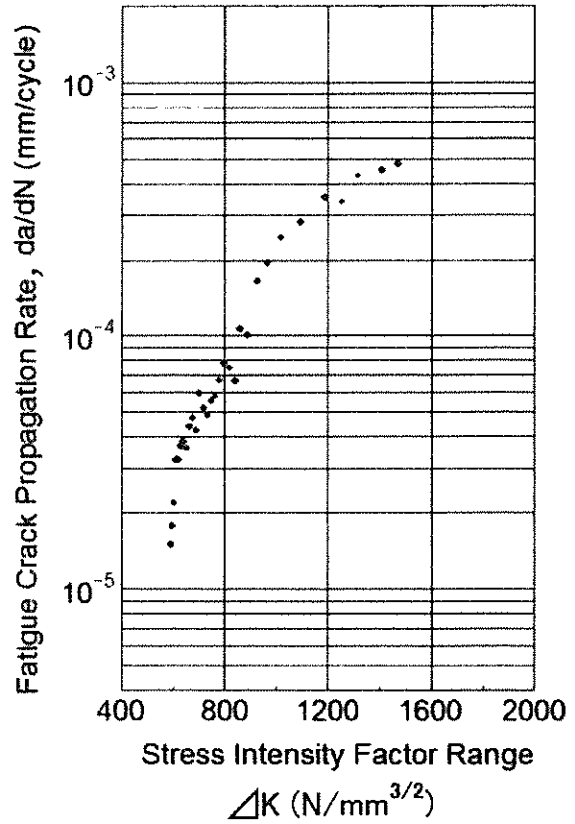


Fig.3.11 Relation between da/dN and ΔK
 (CCT type : PCI-2)
 (Interface of SUS329J3L
 -clad steel plate)

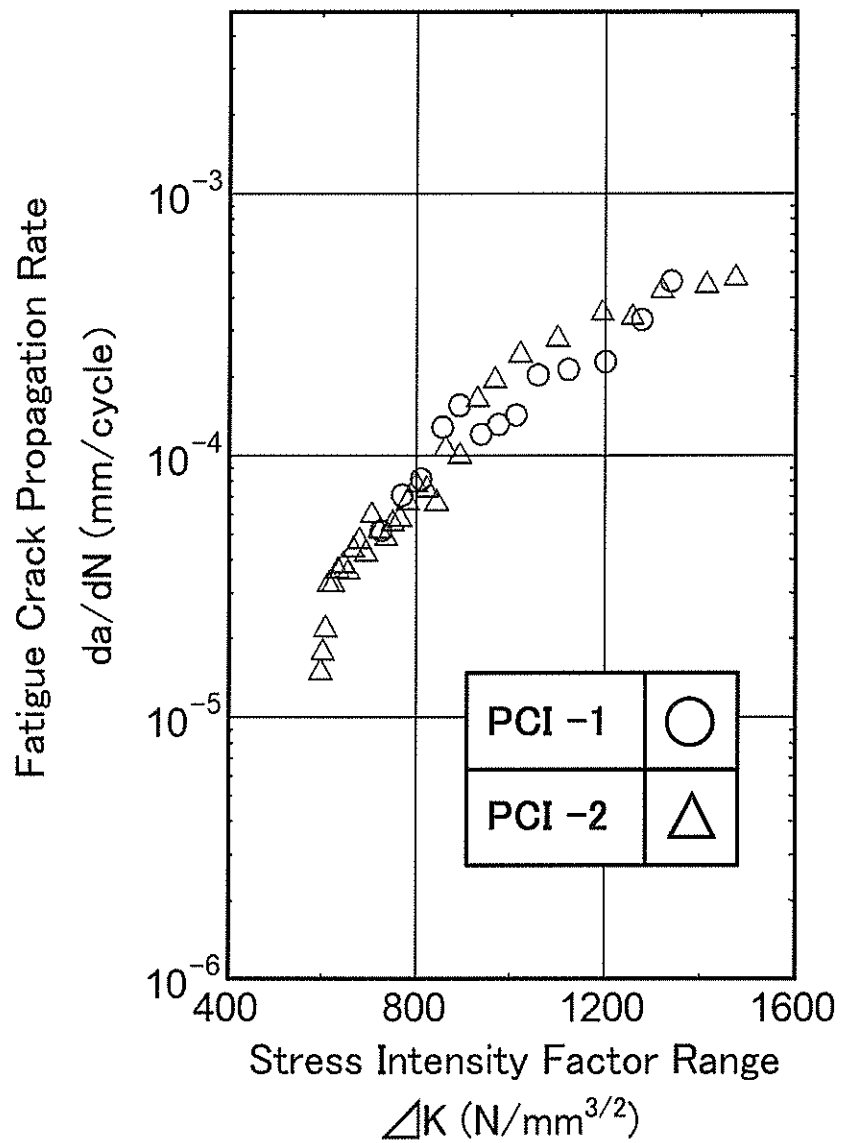


Fig.3.12 Relation between da/dN and ΔK
 (CCT type : PCI-1, PCI-2)
 [Interface of SUS329J3L-clad steel plate]

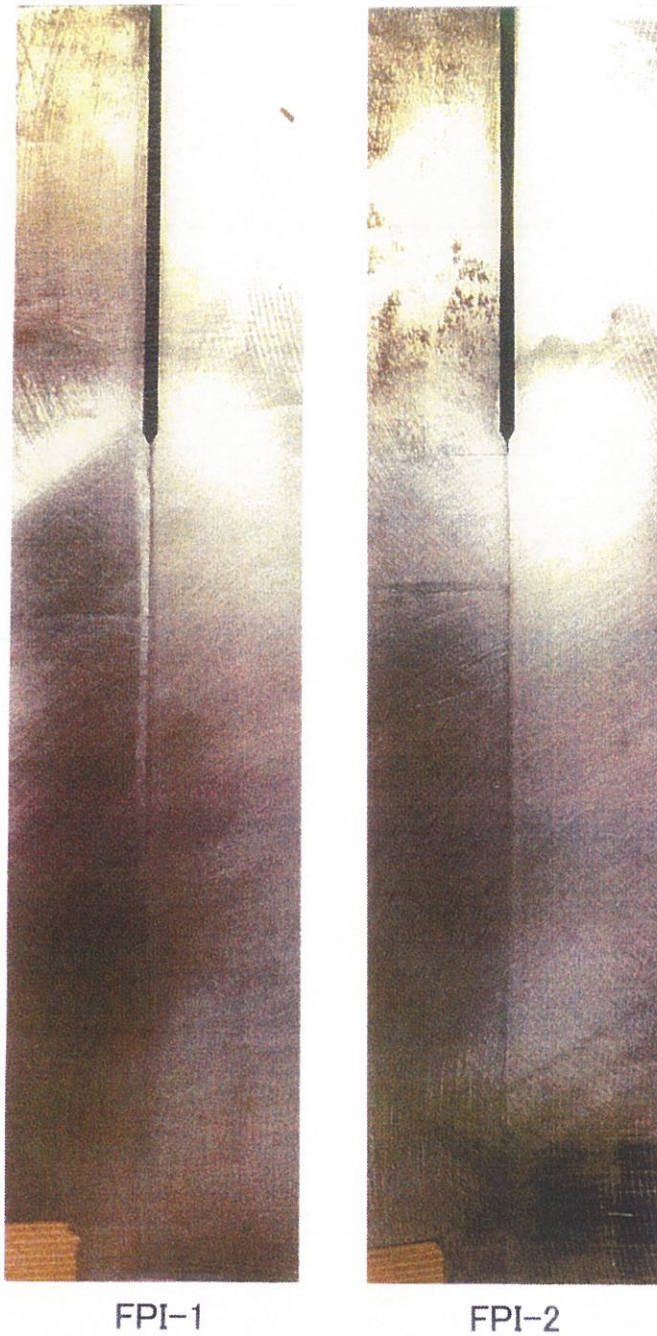
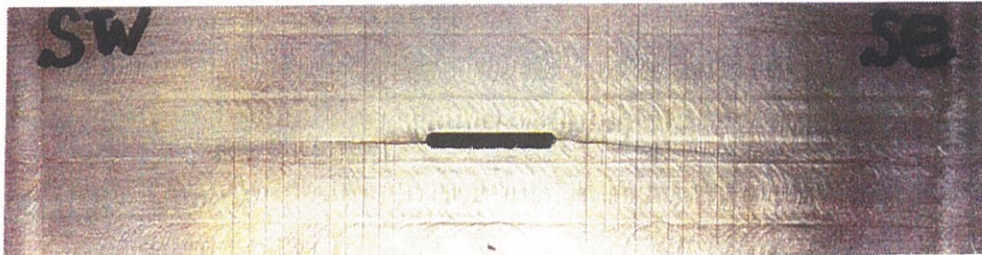
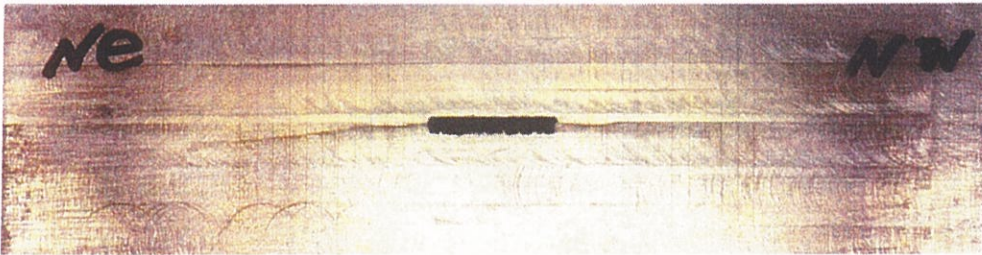


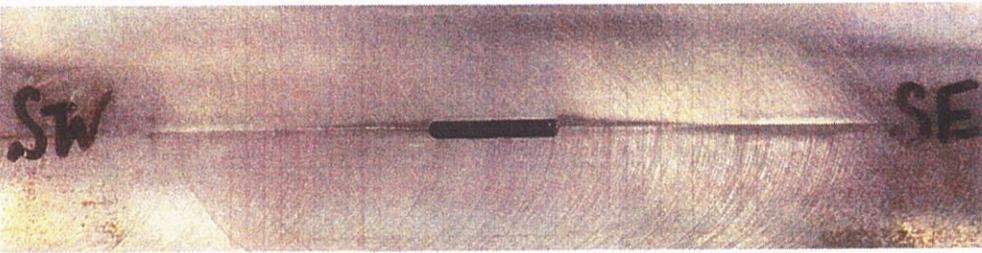
Fig.3.13 Fatigue crack pass after fatigue crack propagation tests (CT type)
[Interface of SUS329J3L-clad steel plate]



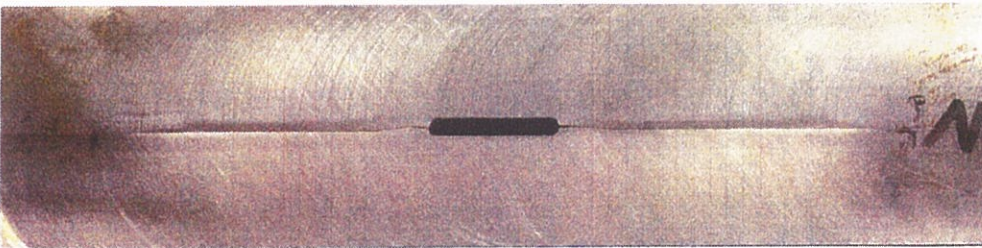
PCI-1 Surface



PCI-1 Back Surface



PCI-2 Surface



PCI-2 Back Surface

Fig.3.14 Fatigue crack pass after fatigue crack propagation tests (CCT type)
[Interface of SUS329J3L-clad steel plate]

Table 3.3 Chemical composition and mechanical properties of steel plates for comparison

Steel Plate	Chemical Composition (wt %)				
	C	Si	Mn	P	S
SM570Q	0.17	0.18	1.25	0.015	0.004
WES-HW685	0.16	0.25	1.54	0.012	0.002

Steel Plate	Yield Point (N/mm ²)	Tensile Strength (N/mm ²)	Elong. (%)
SM570Q	587	682	39
WES-HW685	758	839	22

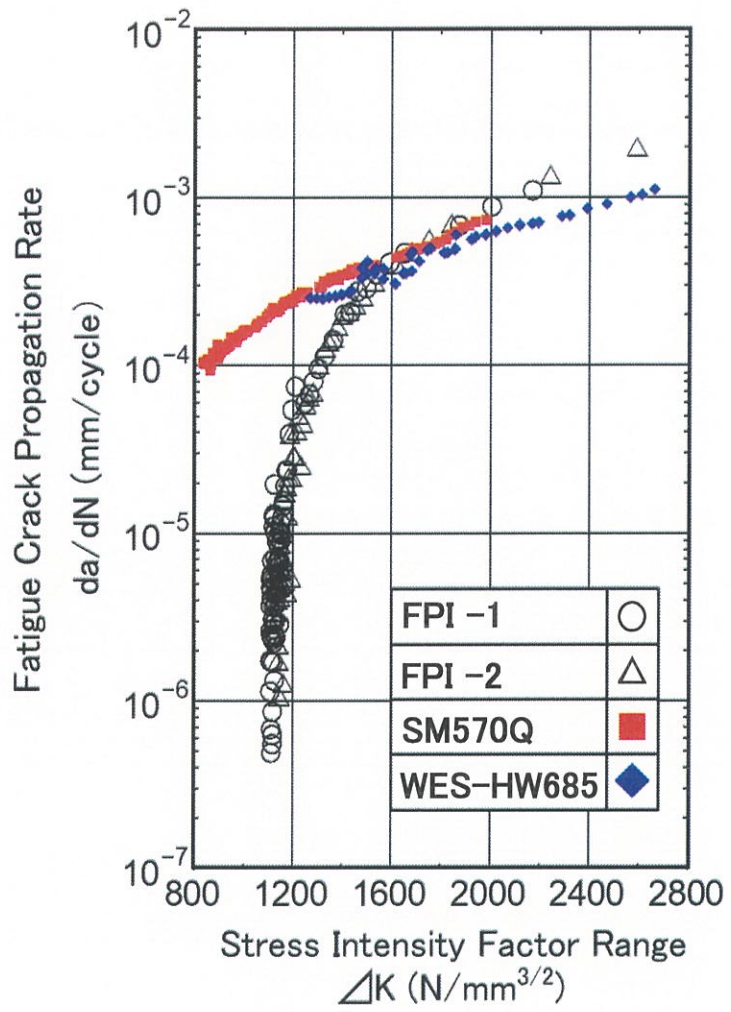


Fig.3.15 Relation between da/dN and ΔK (CT type)

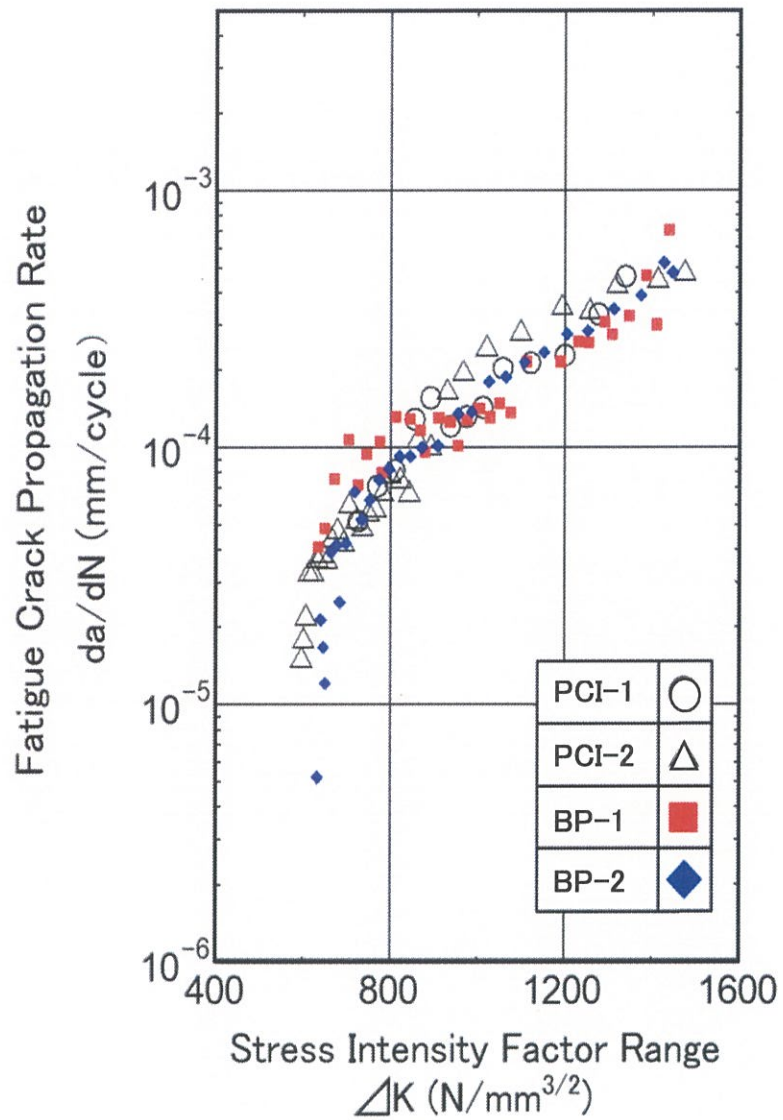


Fig.3.16 Relation between da/dN and ΔK (CCT type)

第4章 二相ステンレスクラッド鋼板溶接継手部の疲労強度

4.1 はじめに

従来、ケミカルタンカー建造に多用されて来たオーステナイト系ステンレス(SUS316L, SUS316LN)鋼板(Ni含有量11~14%)と、二相ステンレス(SUS329J3L)鋼板(Ni含有量5~6%)とを比較すると、SUS329J3L鋼板のNi含有量はSUS316L鋼板やSUS316LN鋼板の1/2程度である。SUS329J3L鋼板をケミカルタンカー建造に適用できれば、希少資源節約効果が大きい。

しかも、SUS329J3L鋼板の0.2%耐力は、SUS316LN鋼板の0.2%耐力の約1.5倍であり、SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板とを組み合わせるケミカルタンカーカーゴタンク建造に使用すれば、船殻重量軽減に貢献出来る可能性がある。

ケミカルタンカーカーゴタンク構造への適用のためには、SUS329J3Lクラッド鋼板やSUS329J3Lソリッド鋼板の溶接継手部の疲労強度が、従来、実績の多いSUS316Lクラッド鋼板やSUS316LNソリッド鋼板の同種溶接継手の疲労強度^{4.1), 4.2)}と同等以上であることが望まれる。

本章では、2016年に開発・製品化されたSUS329J3Lクラッド鋼板と、SUS329J3Lソリッド鋼板とをケミカルタンカーカーゴタンク構造に実用することを目的として、SUS329J3Lクラッド鋼板同士、SUS329J3Lソリ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クラッド鋼板やSUS316LNソリッド鋼板の同種溶接継手の疲労強度^{4.3)~4.6)}と比較・検討・評価した結果について述べる。

4.2 供試鋼板

疲労試験に供試した突合せ溶接継手や完全溶け込み十字溶接継手に

使用した, SUS329J3Lクラッド鋼板, SUS329J3Lソリッド鋼板, および比較のために使用したSUS316Lクラッド鋼板, SUS316LNソリッド鋼板の化学成分を**Table 4.1**に, 機械的性質を**Table 4.2**に示す。なお, **Table 4.2**中のSUS329J3Lクラッド鋼板の引張強さ(σ_B)に対する船級協会(日本海事協会:NK)規格値は, **Eq.(4.1)**

$$\sigma_B \geq \frac{t_1 \cdot \sigma_{B1} + t_2 \cdot \sigma_{B2}}{t_1 + t_2} = 441.25 \approx 440 \quad (\text{N/mm}^2) \cdots \cdots (4.1)$$

ただし,

t_1 : 母材(軟鋼板)の板厚 = 13 mm

t_2 : 合せ材(SUS329J3L鋼板)の板厚 = 3 mm

σ_{B1} : 母材の引張強さの規格最小値 = 400 N/mm²

σ_{B2} : 合せ材の引張強さの規格最小値 = 620 N/mm²

となっている。

4.3 突合せ溶接継手の疲労強度

SUS329J3Lクラッド鋼板同士およびSUS329J3Lソリッド鋼板同士, さらに比較のために, SUS316Lクラッド鋼板同士およびSUS316LNソリッド鋼板同士の, 突合せ溶接継手の疲労強度を把握した。

4.3.1 供試試験片および溶接条件

供試したクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手試験片の形状・寸法を**Fig.4.1**に示す。また, ソリッド鋼板同士の突合せ溶接継手試験片の形状・寸法を**Fig.4.2**に示す。

また, クラッド鋼板同士の突合せ溶接(ワンサイド溶接)条件を**Table 4.3**

に、ソリッド鋼板同士の突合せ溶接(ワンサイド溶接)条件を**Table 4.4**に示す。なお、**Table 4.3**および**Table 4.4**に示した溶接条件は、造船現場での溶接条件に合わせたものである。

4.3.2 突合せ溶接継手の疲労試験結果および考察

疲労試験には、500kN電気油圧式疲労試験機を使用して、軸力・荷重制御方式、応力比(R)0.1の正弦波、荷重繰返し速度3~10Hz、室温・大気中で実施した。

4.3.2.1 クラッド鋼板同士の突合せ溶接継手

SUS329J3Lクラッド鋼板同士と、SUS316Lクラッド鋼板同士の、突合せ溶接継手(溶接のまま)疲労試験片形状・寸法は、先に**Fig.4.1**に示した通りであるが、炭素鋼板側溶接止端部から疲労亀裂が発生しないように、炭素鋼板側余盛りをグラインダーで平滑に仕上げ、供試した。

突合せ溶接継手(溶接のまま)の疲労試験結果を、**Table 4.5**~**Table 4.8**に示す。

疲労試験結果の応力範囲(σ_R)と破断繰返し数(N_f)との関係、および溶接止端部応力集中係数(K_t)を考慮した、 $K_t \cdot \sigma_R$ と N_f との関係を、**Fig.4.3**および**Fig.4.4**に示す。

なお、**Fig.4.3**中の右向きの矢印を付けた実験点は、未破断の試験片の結果である。

当然のことながら、破断した全ての実験点で、疲労亀裂はステンレス鋼板側から発生している。

また、溶接止端部応力集中係数(K_t)を考慮した疲労試験結果の整理方法とは、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)を補正して, 疲労試験結果の疲労強度が, 溶接継手部の理想的な仕上げ加工によってどの程度向上するかを推定した結果である。

なお, K_tが約3.0以下の場合, K_fは, K_f≐K_tであると仮定し, K_tが3.0以上の場合は, K_f≐3.0と仮定して^{4.7)}, 疲労試験結果の応力範囲(σ_R)を補正(K_t・σ_R)した。

また, 突合せ溶接継手の K_t 計算式 [Eq.(4.2)] を以下に示す^{4.8),4.9)}。

$$K_t = 1 + (\alpha - 1) \cdot f(\theta) \dots\dots\dots (4.2)$$

$$\alpha = 1 + C \times \left[\frac{H}{R} / \left(2.8 \cdot \frac{t + 2H}{t} - 2 \right) \right]^K$$

$$C = 1 - 0.48 \times \exp \left(-0.74 \cdot \frac{B}{t} \right)$$

$$K = 0.65 - 0.1 \times \exp \left(-0.68 \cdot \frac{B}{t} \right)$$

$$f(\theta) = \frac{1 - \exp \left(-0.9 \cdot \sqrt{\frac{t + 2H}{2H}} \cdot \pi \cdot \frac{\theta}{180} \right)}{1 - \exp \left(-0.9 \cdot \sqrt{\frac{t + 2H}{2H}} \cdot \frac{\pi}{2} \right)}$$

ただし, R : 止端部半径

θ : フランク角

H : ビード高さ(突起高さ)

B : ビード幅(突起幅)

t : 板厚

Fig.4.3 に示したように, SUS329J3Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手の K_t・σ_R-N_f 線図は, Eq.(4.3)

$$K_t \cdot \sigma_R = 7.77 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.210} \dots\dots\dots (4.3)$$

で、また、**Fig.4.4**に示したように、SUS316Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手の $K_t \cdot \sigma_R - N_f$ 線図は、**Eq.(4.4)**

$$K_t \cdot \sigma_R = 6.30 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.210} \dots\dots\dots (4.4)$$

で、表わせることが明らかになった。

Eq.(4.3)および**Eq.(4.4)**から、SUS329J3Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手は、SUS316Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手より、疲労強度は、約1.2倍強いと言える。

疲労試験後の破断面および破断位置の代表例を、**Fig.4.5**に示す。ステンレス鋼板側表面から疲労亀裂が発生・進展して破断している。

4.3.2.2 ソリッド鋼板同士の突合せ溶接継手

SUS329J3Lソリッド鋼板同士の突合せ溶接継手3種類(溶接のまま、継手止端部グラインダーによるドレッシング処理、継手止端部TIGアークによるドレッシング処理)の疲労試験結果を、**Table 4.9**～**Table 4.14**に示す。

疲労試験結果の、 σ_R と N_f との関係、および $K_t \cdot \sigma_R$ と N_f との関係を、**Fig.4.6**に示す。

また、SUS316LNソリッド鋼板同士の突合せ溶接継手1種類(継手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、**Table 4.15**および**Table 4.16**に示す。

疲労試験結果の、 σ_R と N_f との関係、および $K_t \cdot \sigma_R$ と N_f との関係を、**Fig.4.7**に示す。

Fig.4.6中および**Fig.4.7**中の右向きの矢印を付けた実験点は、未破断、母材破断、および溶接欠陥から破断した試験片の結果である。

なお、 K_t は、前項のEq.(4.2)により求めた。

また、疲労試験後の破断面および破断位置の代表例を、Fig.4.8に示す。疲労亀裂は、試験片表面と板厚面との角部ではなく、試験片表面から発生・進展しており、理想的な破断形態であると言える。

Fig.4.6に示したように、SUS329J3Lソリッド鋼板同士の突合せ溶接継手(3種類)の $K_t \cdot \sigma_R - N_f$ 線図は、Eq.(4.5)

$$K_t \cdot \sigma_R = 5.90 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.210} \dots\dots\dots (4.5)$$

で、また、Fig.4.7に示したように、SUS316LNソリッド鋼板同士の突合せ溶接継手(1種類)の $K_t \cdot \sigma_R - N_f$ 線図は、Eq.(4.6)

$$K_t \cdot \sigma_R = 5.20 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.210} \dots\dots\dots (4.6)$$

で表わせることが明らかになった。

Eq.(4.5)およびEq.(4.6)から、SUS329J3Lソリッド鋼板同士の突合せ溶接継手は、SUS316LNソリッド鋼板同士の突合せ溶接継手より、疲労強度は、約1.1倍強いと言える。

4.4 荷重非伝達型完全溶け込み十字溶接継手の疲労強度

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を把握した。

この疲労強度と、ケミカルタンカーでの実績が多い、SUS316Lクラッド鋼板とSUS316LNソリッド鋼板との同種溶接継手の疲労強度とを比較すべきであるが、ケミカルタンカーで実績がある、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を把握して比較した。疲労亀裂発生箇所が、SUS316Lクラッド鋼板のステンレス鋼板側溶接止端部になるので、実質的には大きな問題は無いと考えられる。

4.4.1 供試試験片および溶接条件

供試した荷重非伝達型完全溶け込み十字溶接継手試験片の形状・寸法を Fig.4.9 に示す。

Fig.4.9 に示したように、炭素鋼板側溶接止端部から疲労亀裂が発生しないように、全ての試験片で炭素鋼板側止端部をグラインダーでドレッシング処理した。

また、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溶接条件を、Table 4.17 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の溶接条件を、Table 4.18 に示す。全ての継手の溶接姿勢は下向き、パス間温度は150℃以下で溶接した。なお、Table 4.17 および Table 4.18 に示した溶接条件は、造船現場での溶接条件に合わせたものである。

4.4.2 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 および考察

疲労試験には、500kN 電気油圧式疲労試験機を使用して、軸力・荷重制御方式、応力比(R)0.1の正弦波、荷重繰返し速度3～10Hz、室温・大気中で実施した。

SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板の荷重非伝達型完全溶け込み十字溶接継手は、溶接のまま、継手止端部グラインダーによるドレッシング処理の2種類を供試した。

また、SUS316Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との十字溶接継手は、溶接のまま、継手止端部TIGアークによるドレッシング処理の2種類を供試した。

SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との十字溶接継手

2種類の疲労試験結果を、Table 4.19～Table 4.22に示す。

疲労試験結果の σ_R と N_f との関係、および K_t を考慮した、 $K_t \cdot \sigma_R$ と N_f との関係を、Fig.4.10に示す。

また、SUS316Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との十字溶接継手2種類の疲労試験結果を、Table 4.23～Table 4.26に示す。

疲労試験結果の σ_R と N_f との関係、および $K_t \cdot \sigma_R$ と N_f との関係を、Fig.4.11に示す。

Fig.4.10中およびFig.4.11中の右向きの矢印を付けた実験点は、未破断の試験片である。

当然のことながら、破断した全ての実験点(含ドレッシング処理)で、疲労亀裂はステンレス鋼板側から発生している。

なお、完全溶け込み十字溶接継手溶接止端部応力集中係数(K_t)を考慮した疲労試験結果の整理に使用した K_t 計算式を以下に示す^{4.10)～4.12)}。

$$K_t = 1 + CQ^{0.467} \cdot f(\theta) \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

$$C = 1.348 + 0.397 \cdot \ln \left(\frac{B + 2hp}{t} \right)$$

$$Q = 1 / \left(2.8 \cdot \frac{t + 2h}{t} - 2 \right) \times \left(\frac{h}{R} \right)$$

$$f(\theta) = \frac{1 - \exp \left(-0.9 \cdot \sqrt{\frac{t + 2h}{2h}} \cdot \pi \cdot \frac{\theta}{180} \right)}{1 - \exp \left(-0.9 \cdot \sqrt{\frac{t + 2h}{2h}} \cdot \frac{\pi}{2} \right)}$$

- ただし、 R : 止端部半径
- θ : フランク角
- h : 垂直脚長
- hp : 水平脚長

B : 突起幅(縦板の厚さ)

t : 板厚

Fig.4.10に示したように、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2種類(溶接のまま、継手止端部グラインダーによるドレッシング処理)の $K_t \cdot \sigma_R - N_f$ 線図は、Eq.(4.8)

$$K_t \cdot \sigma_R = 6.30 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.210} \dots\dots\dots (4.8)$$

で、また、Fig.4.11に示したように、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2種類(溶接のまま、継手止端部TIGアークによるドレッシング処理)の $K_t \cdot \sigma_R - N_f$ 線図は、Eq.(4.9)

$$K_t \cdot \sigma_R = 5.90 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.210} \dots\dots\dots (4.9)$$

で表わせることが明らかになった。したがって、SUS316Lクラッド鋼板とSUS316LN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 $K_t \cdot \sigma_R - N_f$ 線図は、Eq.(4.9)と略同等とみなして良いであろう。

Eq.(4.8)およびEq.(4.9)から、SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との組み合わせの方が、SUS316Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板(あるいはSUS316LNソリッド鋼板)との組み合わせより、疲労強度は約1.1倍強いと言える。

疲労試験後の破断面および破断位置の代表例を、Fig.4.12～Fig.4.15に示す。疲労亀裂は、ステンレス鋼板側の試験片表面から発生・進展し、破断している。

4.5 各種溶接継手疲労強度に関する評価

以上述べて来たように、SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板とをケミカルタンカーカーゴタンク建造に実用することを目的として、SUS329J3Lクラッド鋼板同士、SUS329J3Lソリ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クラッド鋼板やSUS316LNソリ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。

先に述べた各種溶接継手部の、応力集中係数(K_t)を考慮した補正後の $K_t \cdot \sigma_R - N_f$ 線図をまとめると、**Fig.4.16**のようになる。

前にも述べたが、**Fig.4.16**から以下のことが明らかである。

- ① SUS329J3Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手の疲労強度(**Fig.4.16**中①)が一番強く、SUS316Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手の疲労強度(**Fig.4.16**中②)の約1.2倍強い。
- ② SUS329J3Lソリッド鋼板同士の突合せ溶接継手の疲労強度(**Fig.4.16**中③)は、SUS316LNソリッド鋼板同士の突合せ溶接継手の疲労強度(**Fig.4.16**中④)の約1.1倍強い。
- ③ 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(**Fig.4.16**中②)は、SUS316Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板(あるいはSUS316LN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(**Fig.4.16**中③)の約1.1倍強い。

以上を総括して、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ケミカルタンカー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より優れていると言える。

なお、SUS329J3Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手の疲労強度 (Eq.(4.3), Fig.4.16中①)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 (Eq.(4.8), Fig.4.16中②)とでは、共に、SUS329J3Lクラッド鋼板の二相ステンレス鋼板側表面から疲労亀裂が発生しているにもかかわらず、疲労強度は、突合せ溶接継手の方が約1.2倍強いという結果であった。その理由としては、溶接継手部の形状が異なることから、疲労亀裂発生部の応力分布が異なっていることや、溶接条件が異なることから疲労亀裂発生部の材質が異なっていること、などが考えられる。

さらに、各種溶接継手部共、継手止端部をグラインダー、またはTIGアークによってドレッシング処理すると、疲労強度は20%程度以上強くなることが明らかになった。

4.6 まとめ

SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板とをケミカルタンカーカーゴタンク建造に実用することを目的として、SUS329J3Lクラッド鋼板同士、SUS329J3Lソリ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クラッド鋼板やSUS316LNソリッド鋼板の同種溶接継手の疲労強度と比較・検討・評価し、以下の結論が得られた。

すなわち、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で建造されたカーゴタンク構造より優れていることが確認された。

参 考 文 献

- 4.1) 矢島 浩, 座間正人, 平田隆明, 斉藤正洋, 末岡英利, 森 俊哲, 椛田 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.
- 4.2) 内村秀之, 宅野正夫, 村上幸治, 後藤浩二: ケミカルタンカーに使用されるオーステナイト系ステンレス鋼板の疲労強度に関する一考察, 日本船舶海洋工学会論文集, 第16号(2012.12.), pp.89-97.
- 4.3) 緒方洋典, 堺田和昌, 森 俊哲, 角田二郎, 福井 努, 谷野忠和, 高 允宝, 矢島 浩: 二相ステンレス鋼板溶接継手部の疲労強度に関する一考察, 長崎総合科学大学大学院新技術創成研究所所報, 第9号(2014.3.), pp.83-86.
- 4.4) 緒方洋典, 堺田和昌, 森 俊哲, 角田二郎, 福井 努, 谷野忠和, 高 允宝, 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の十字溶接継手疲労強度に関する一考察, 長崎総合科学大学大学院新技術創成研究所所報, 第9号(2014.3.), pp.87-92.
- 4.5) Hironori Ogata, Kazumasa Sakaida, Takaaki Matsuda, Kimihiro Nishimura, Masayuki Tanaka, Toshiaki Mori, Hiroshi Yajima, Tadakazu Tanino, Hayato Suga and Tsutomu Fukui: Research and Development on Utilizing Duplex Stainless Steel Plates for Chemical Tankers(Report 1), Class NK TECHNICAL BULLETIN, Vol.33(2015.12.), pp.85-96.

- 4.6) 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.
- 4.7) 石橋 正: 金属の疲労と破壊の防止, (1958増訂第3版), pp.53-62.
- 4.8) Kunihiro Iida, Yunbo Kho, Juichi Fukakura, Masatoshi Nihei, Tadao Iwadate and Hideharu Nagai: Bending Fatigue Strength of Butt Welded Plate with Uranami Bead, IIW Doc.No.XIII-1202-86 (1986.7.12-19.).
- 4.9) 西田正孝: 応力集中, 森北出版株式会社(増補版第1刷)(1973), pp.47-54, pp.648-653.
- 4.10) 本田 尚, 佐々木哲也, 山口篤志, 吉久悦二: 赤外線法による溶接継手止端部の応力集中係数評価, 日本機械学会論文集(A編), 73巻, 732号(2007.8.), pp.837-843.
- 4.11) 辻 勇: 非荷重伝達型すみ肉溶接継手の止端部の応力集中係数の推定式, 西部造船会会報, 第80号(1990.8.), pp.241-251.
- 4.12) 熊谷一男, 島田平八: 突出部を有する板の引張りにおける応力集中係数, 日本機械学会論文集(第1部), 34巻, 258号(1968.2.), pp.249-254.

Table 4.1 Chemical composition of test steel plates

(wt %)

Test Steel Plate	Thick. (mm)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
SUS329J3L-Clad*	16 (3+13)	0.013	0.31	0.97	0.025	0.002	22.55	5.42	3.10	0.17
SUS316L-Clad*	16 (3+13)	0.008	0.58	0.78	0.021	0.001	17.14	12.17	2.75	—
SUS329J3L	16	0.008	0.56	1.80	0.025	0.001	22.50	5.80	3.10	0.16
SUS316LN	17.5	0.019	0.69	0.60	0.027	0.001	18.22	10.60	2.83	0.17

* SUS329J3L, SUS316L Steel Plate (3mm)

Table 4.2 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-Clad*	16 (3+13)	433	554	23
SUS316L-Clad*	16 (3+13)	290	480	27
SUS329J3L	16	615	772	38
SUS316LN	17.5	399	679	48

* Full-Thickness Tensile Test (16mm)

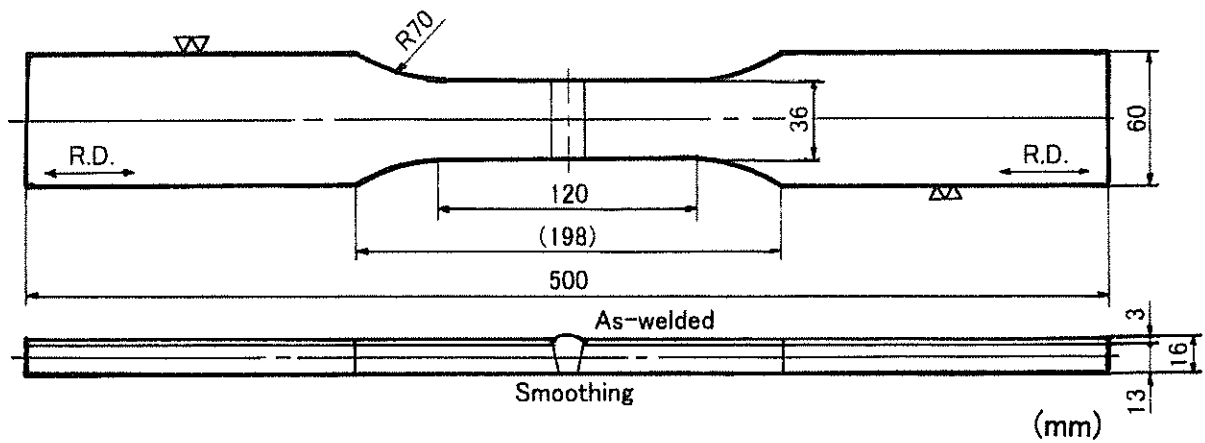


Fig.4. 1 Shape and size of fatigue test specimen
(Butt welded joint of clad steel plate)

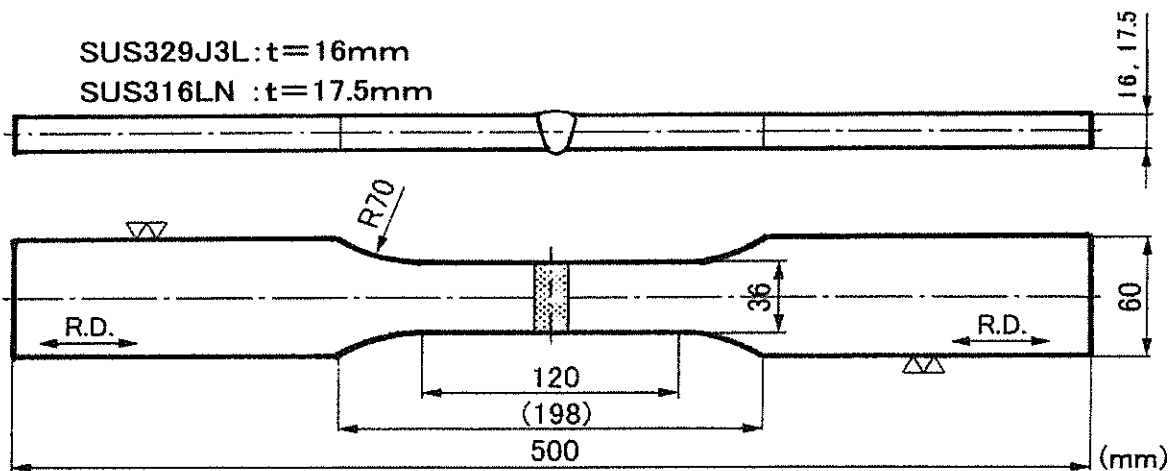


Fig.4.2 Shape and size of fatigue test specimen
(Butt welded joint of solid steel plate)

**Table 4.3 Welding parameters of butt welded joints
(FCAW) (Clad steel plate)**

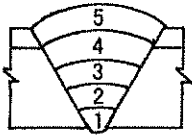
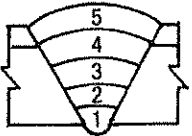
Test Steel Plate	Build-up Sequence	Welding Current (A)	Arc Voltage (V)	Travel Speed (cm/min)	Heat Input (kJ/cm)	Welding Consumables (JIS)	
SUS329J3L-Clad Steel Plate + SUS329J3L-Clad Steel Plate		4, 5 Stainless	200	32 ~33	16.8 ~17.8	22.2 ~22.9	TS2209 -FCO
		1~3 Mild Steel	200 ~280	24 ~32	17.5 ~28.3	15.4 ~19.0	T49J0T1 -1CA-UH5
SUS316L-Clad Steel Plate + SUS316L-Clad Steel Plate		4, 5 Stainless	200 ~220	34	13.9 ~26.0	19.4 ~23.6	TS309LMo -FBO
		1~3 Mild Steel	200 ~300	25 ~34	19.0 ~21.0	19.4 ~23.7	T49J0T1 -1CA-UH5

Plate Thickness : 16 mm, Gas Flow Rate : 18 ℓ/min, Interpass Temperature ≤ 150°C

**Table 4.4 Welding parameters of butt welded joints
(Solid steel plate)**

Test Steel Plate	Plate Thick. (mm)	Welding Method	Gas Flow Rate (ℓ/min)	Welding Current (A)	Arc Voltage (V)	Travel Speed (cm/min)	Heat Input (kJ/cm)
SUS329J3L + SUS329J3L	16	FCAW	18	170 ~200	32 ~34	16.1 ~25.7	15.9 ~24.6
SUS316LN + SUS316LN	17.5	FCAW	18	180 ~200	32 ~33	18.2 ~21.4	17.0 ~20.0

**Table 4.5 Results of fatigue test for butt welded joint
(SUS329J3L-clad steel plate. As-welded)**

R=0.1

Specimen Number	Width w (mm)	Thick. t (mm)	Cross-section Area A (mm ²)	Test Load			Test Stress			Freq. f (Hz)	Number of Cycles to Failure N _f (cycles)	Remark
				Max. P _{max} (kN)	Min. P _{min} (kN)	Range P _R (kN)	Max. σ _{max} (N/mm ²)	Min. σ _{min} (N/mm ²)	Range σ _R (N/mm ²)			
9-1 S29J-1	36.0	16.6	598	233	23.3	209	389	38.9	350	5	3.15 × 10 ⁵ 314,609	Failure of SUS329J3L Toe
9-2 S29J-2	36.0	16.7	601	200	20.0	180	333	33.3	300	7	7.00 × 10 ⁵ 700,057	Failure of SUS329J3L Toe
9-3 S29J-3	36.0	16.6	598	266	26.6	239	444	44.4	400	3	5.00 × 10 ⁴ 50,033	Failure of SUS329J3L Toe
9-4 S29J-4	36.0	16.6	598	239	23.9	215	400	40.0	360	5	9.37 × 10 ⁴ 93,667	Failure of SUS329J3L Toe
9-5 S29J-5	36.1	16.5	596	179	17.9	161	300	30.0	270	7	>2.00 × 10 ⁶ >2,000,778	Non-Failure
9-6 S29J-6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
9-7 S29J-7	35.9	16.5	592	250	25.0	225	422	42.2	380	5	5.51 × 10 ⁴ 55,079	Failure of SUS329J3L Toe

**Table 4.6 Results of fatigue test for butt welded joint
(Correct by K_t)
(SUS329J3L-clad steel plate. As-welded)**

R=0.1

Specimen Number	Width w (mm)	Thick. t (mm)	Toe Radius R (mm)	Flank Angle θ (°)	Height of Bead H (mm)	Width of Bead B (mm)	Stress Concentration Factor K _t	Stress Range σ _R (N/mm ²)	K _t · σ _R (N/mm ²)	Number of Cycles to Failure N _f (cycles)	Remark
9-1 S29J-1	36.0	16.6	1.73	32.2	1.75	22.7	1.5	350	525	3.15 × 10 ⁵ 314,609	
9-2 S29J-2	36.0	16.7	1.27	28.5	2.00	21.3	1.6	300	480	7.00 × 10 ⁵ 700,057	
9-3 S29J-3	36.0	16.6	0.39	27.1	1.70	21.8	2.1	400	840	5.00 × 10 ⁴ 50,033	
9-4 S29J-4	36.0	16.6	0.74	35.3	1.65	22.2	1.9	360	684	9.37 × 10 ⁴ 93,667	
9-5 S29J-5	36.1	16.5	—	—	—	—	—	270	—	>2.00 × 10 ⁶ >2,000,778	Non-Failure
9-6 S29J-6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
9-7 S29J-7	35.9	16.5	0.43	30.2	1.25	21.1	2.0	380	760	5.51 × 10 ⁴ 55,079	

**Table 4.7 Results of fatigue test for butt welded joint
(SUS316L-clad steel plate. As-welded)**

R=0.1

Specimen Number	Width w (mm)	Thick. t (mm)	Cross-section Area A (mm ²)	Test Load			Test Stress			Freq. f (Hz)	Number of Cycles to Failure N _f (cycles)	Remark
				Max. P _{max} (kN)	Min. P _{min} (kN)	Range P _R (kN)	Max. σ _{max} (N/mm ²)	Min. σ _{min} (N/mm ²)	Range σ _R (N/mm ²)			
6-1 S16J-1	36.0	16.8	605	202	20.2	182	333	33.3	300	5	2.96 × 10 ⁴ 29,573	Failure of SUS316L Toe
6-2 S16J-2	35.9	16.8	603	168	16.8	151	278	27.8	250	5	9.82 × 10 ⁴ 98,179	Failure of SUS316L Toe
6-3 S16J-3	35.9	16.7	600	133	13.3	120	222	22.2	200	8	1.59 × 10 ⁵ 159,379	Failure of SUS316L Toe
6-4 S16J-4	36.0	16.7	601	133	13.3	120	222	22.2	200	7	1.26 × 10 ⁵ 125,768	Failure of SUS316L Toe
6-5 S16J-5	36.0	16.4	590	124	12.4	112	210	21.0	190	7	2.06 × 10 ⁵ 206,245	Failure of SUS316L Toe
6-6 S16J-6	36.0	16.6	598	93	9.3	83.7	156	15.6	140	9	2.25 × 10 ⁵ 2,248,737	Failure of SUS316L Toe
6-7 S16J-7	36.0	16.8	605	114	11.4	103	189	18.9	170	8	1.80 × 10 ⁶ 1,800,494	Failure of SUS316L Toe

**Table 4.8 Results of fatigue test for butt welded joint
(Correct by K_t)
(SUS316L-clad steel plate. As-welded)**

R=0.1

Specimen Number	Width w (mm)	Thick. t (mm)	Toe Radius R (mm)	Flank Angle θ (°)	Height of Bead H (mm)	Width of Bead B (mm)	Stress Concentration Factor K _t	Stress Range σ _R (N/mm ²)	K _t · σ _R (N/mm ²)	Number of Cycles to Failure N _f (cycles)	Remark
6-1 S16J-1	36.0	16.8	0.33	37.1	2.85	21.3	2.6	300	780	2.96 × 10 ⁴ 29,573	
6-2 S16J-2	35.9	16.8	0.44	35.7	2.80	21.5	2.3	250	575	9.82 × 10 ⁴ 98,179	
6-3 S16J-3	35.9	16.7	0.35	46.0	2.85	21.1	2.7	200	540	1.59 × 10 ⁵ 159,379	
6-4 S16J-4	36.0	16.7	0.43	49.6	2.95	21.7	2.6	200	520	1.26 × 10 ⁵ 125,768	
6-5 S16J-5	36.0	16.4	0.68	47.0	3.00	20.6	2.1	190	399	2.06 × 10 ⁵ 206,245	
6-6 S16J-6	36.0	16.6	0.75	39.6	3.05	21.8	2.0	140	280	2.25 × 10 ⁵ 2,248,737	
6-7 S16J-7	36.0	16.8	0.67	40.0	2.20	20.9	2.0	170	340	1.80 × 10 ⁶ 1,800,494	

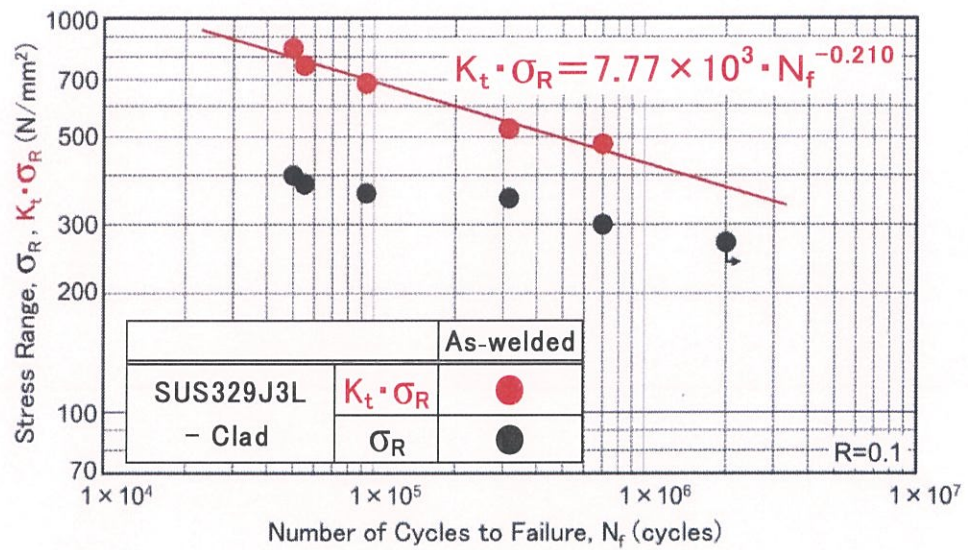


Fig.4 3 Results of fatigue test for butt welded joint
 $\sigma_R - N_f, K_t \cdot \sigma_R - N_f$ curve
 SUS329J3L-clad steel plate

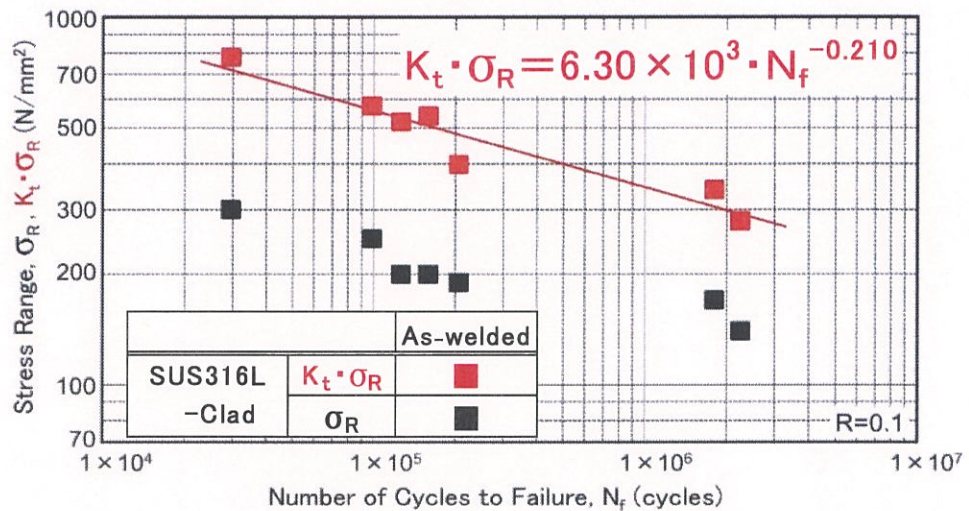


Fig. 4.4 Results of fatigue test for butt welded joint
 $\sigma_R - N_f, K_t \cdot \sigma_R - N_f$ curve
 SUS316L-clad steel plate



Fig.4 5 Fracture surface and pass after fatigue test
[SUS329J3L-clad steel plate, As-welded
S29J-1, 350N/mm², 3.15 × 10⁵ cycles]

**Table 4.9 Results of fatigue test for butt welded joint
(SUS329J3L steel plate. As-welded)**

R=0.1

Specimen Number	Width w (mm)	Thick. t (mm)	Cross-section Area A (mm ²)	Test Load			Test Stress			Freq. f (Hz)	Number of Cycles to Failure N _f (cycles)	Remark
				Max. P _{max} (kN)	Min. P _{min} (kN)	Range P _R (kN)	Max. σ _{max} (N/mm ²)	Min. σ _{min} (N/mm ²)	Range σ _R (N/mm ²)			
BW5-1	36.0	16.4	590	131	13.1	118	222	22.2	200	10	>2.05 × 10 ⁶ >2,048,799	Non-Failure
BW5-2	36.0	16.4	590	197	19.7	177	333	33.3	300	5	>1.11 × 10 ⁶ >1,112,459	Base Plate Failure
BW5-3	36.0	16.5	594	264	26.4	238	444	44.4	400	5	1.95 × 10 ⁵ 195,295	
BW5-4	36.0	16.5	594	297	29.7	267	500	50.0	450	5	9.90 × 10 ⁴ 98,953	Failure from Uranami-Toe
BW5-5	36.0	16.5	594	231	23.1	208	389	38.9	350	5	2.12 × 10 ⁵ 211,516	Failure from Uranami-Toe
BW5-6	36.0	16.4	590	185	18.5	167	314	31.4	283	7	1.06 × 10 ⁶ 1,062,674	Failure from Uranami-Toe
BW5-7	36.0	16.5	594	165	16.5	149	278	27.8	250	7	1.17 × 10 ⁶ 1,173,459	Failure from Uranami-Toe

**Table 4.10 Results of fatigue test for butt welded joint
(Correct by K_t)
(SUS329J3L steel plate. As-welded)**

R=0.1

Specimen Number	Width w (mm)	Thick. t (mm)	Toe Radius R (mm)	Flank Angle θ (°)	Height of Bead H (mm)	Width of Bead B (mm)	Stress Concentration Factor K _t	Stress Range σ _R (N/mm ²)	K _t · σ _R (N/mm ²)	Number of Cycles to Failure N _f (cycles)	Remark
BW5-1	36.0	16.4	3.4	28.6	2.4	14.0	1.3	200	260	>2.05 × 10 ⁶ >2,048,799	Non-Failure
BW5-2	36.0	16.4	7.7	11.3	0.7	20.9	1.1	300	330	>1.11 × 10 ⁶ >1,112,459	Base Plate Failure
BW5-3	36.0	16.5	4.8	13.7	0.8	18.9	1.1	400	440	1.95 × 10 ⁵ 195,295	
BW5-4	36.0	16.5	2.4	16.6	0.9	20.8	1.2	450	540	9.90 × 10 ⁴ 98,953	Failure from Uranami-Toe
BW5-5	36.0	16.5	3.3	12.5	0.8	19.1	1.2	350	420	2.12 × 10 ⁵ 211,516	Failure from Uranami-Toe
BW5-6	36.0	16.4	3.6	8.1	0.6	18.9	1.1	283	311	1.06 × 10 ⁶ 1,062,674	Failure from Uranami-Toe
BW5-7	36.0	16.5	3.1	11.6	0.8	19.0	1.2	250	300	1.17 × 10 ⁶ 1,173,459	Failure from Uranami-Toe

**Table 4.11 Results of fatigue test for butt welded joint
(SUS329J3L steel plate. Dressing by grinding)**

R=0.1

Specimen Number	Width w (mm)	Thick. t (mm)	Cross-section Area A (mm ²)	Test Load			Test Stress			Freq. f (Hz)	Number of Cycles to Failure N _f (cycles)	Remark
				Max. P _{max} (kN)	Min. P _{min} (kN)	Range P _R (kN)	Max. σ _{max} (N/mm ²)	Min. σ _{min} (N/mm ²)	Range σ _R (N/mm ²)			
BW2-1	36.2	15.6	565	220	22.0	198	389	38.9	350	5	2.64 × 10 ⁵ 263,803	
BW2-2	36.1	15.7	567	189	18.9	170	333	33.3	300	7	5.10 × 10 ⁵ 510,382	
BW2-3	36.2	15.7	568	284	28.4	256	500	50.0	450	5	1.03 × 10 ⁵ 102,778	
BW2-4	36.1	15.7	567	252	25.2	227	444	44.4	400	5	2.08 × 10 ⁵ 207,960	
BW2-5	36.1	15.7	567	158	15.8	142	278	27.8	250	10	>2.00 × 10 ⁶ >2,000,005	Non-Failure
BW2-6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
BW2-7	36.0	15.7	565	176	17.6	158	312	31.2	280	8	>2.07 × 10 ⁶ >2,073,007	Non-Failure

**Table 4.12 Results of fatigue test for butt welded joint
(Correct by K_t)
(SUS329J3L steel plate. Dressing by grinding)**

R=0.1

Specimen Number	Width w (mm)	Thick. t (mm)	Toe Radius R (mm)	Flank Angle θ (°)	Height of Bead H (mm)	Width of Bead B (mm)	Stress Concentration Factor K _t	Stress Range σ _R (N/mm ²)	K _t · σ _R (N/mm ²)	Number of Cycles to Failure N _f (cycles)	Remark
BW2-2	36.1	15.7	5.4	16.0	1.5	20.2	1.2	300	360	5.10 × 10 ⁵ 510,382	
BW2-3	36.2	15.7	7.5	14.8	1.4	20.0	1.1	450	495	1.03 × 10 ⁵ 102,778	
BW2-4	36.1	15.7	5.7	17.7	1.6	19.1	1.2	400	480	2.08 × 10 ⁵ 207,960	
BW2-5	36.1	15.7	11.8	22.1	1.4	19.6	1.1	250	275	>2.00 × 10 ⁶ >2,000,005	Non-Failure
BW2-6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
BW2-7	36.0	15.7	21.4	11.2	1.2	19.0	1.0	280	280	>2.07 × 10 ⁶ >2,073,007	Non-Failure

**Table 4.13 Results of fatigue test for butt welded joint
(SUS329J3L steel plate. Dressing by TIG arc)**

R=0.1

Specimen Number	Width w (mm)	Thick. t (mm)	Cross-section Area A (mm ²)	Test Load			Test Stress			Freq. f (Hz)	Number of Cycles to Failure N _f (cycles)	Remark
				Max. P _{max} (kN)	Min. P _{min} (kN)	Range P _R (kN)	Max. σ _{max} (N/mm ²)	Min. σ _{min} (N/mm ²)	Range σ _R (N/mm ²)			
BW3-1	36.0	15.7	565	220	22.0	198	389	38.9	350	5	>2.36 × 10 ⁵ >235,635	Base Plate Failure
BW3-2	36.0	15.7	565	283	28.3	255	500	50.0	450	5	7.79 × 10 ⁴ 77,891	
BW3-3	36.1	15.7	567	189	18.9	170	333	33.3	300	6	>7.24 × 10 ⁵ >723,956	Base Plate Failure
BW3-4	36.0	15.7	565	169	16.9	152	300	30.0	270	8	>2.07 × 10 ⁶ >2,066,002	Non-Failure
BW3-5	36.1	15.7	567	208	20.8	187	367	36.7	330	5	3.12 × 10 ⁵ 312,136	
BW3-6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
BW3-7	36.1	15.7	567	189	18.9	170	333	33.3	300	6	>5.89 × 10 ⁵ >588,906	Base Plate Failure

**Table 4.14 Results of fatigue test for butt welded joint
(Correct by K_t)
(SUS329J3L steel plate. Dressing by TIG arc)**

R=0.1

Specimen Number	Width w (mm)	Thick. t (mm)	Toe Radius R (mm)	Flank Angle θ (°)	Height of Bead H (mm)	Width of Bead B (mm)	Stress Concentration Factor K _t	Stress Range σ _R (N/mm ²)	K _t · σ _R (N/mm ²)	Number of Cycles to Failure N _f (cycles)	Remark
BW3-1	36.0	15.7	16.0	20.6	1.8	20.1	1.1	350	385	>2.36 × 10 ⁵ >235,635	Base Plate Failure
BW3-2	36.0	15.7	6.4	19.6	1.2	19.2	1.2	450	540	7.79 × 10 ⁴ 77,891	
BW3-3	36.1	15.7	8.3	22.9	1.5	19.5	1.1	300	330	>7.24 × 10 ⁵ >723,956	Base Plate Failure
BW3-4	36.0	15.7	13.9	22.5	1.5	18.8	1.1	270	297	>2.07 × 10 ⁶ >2,066,002	Non-Failure
BW3-5	36.1	15.7	3.1	20.7	1.5	18.8	1.3	330	429	3.12 × 10 ⁵ 312,136	
BW3-6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
BW3-7	36.1	15.7	4.9	11.0	0.7	18.7	1.1	300	330	>5.89 × 10 ⁵ >588,906	Base Plate Failure

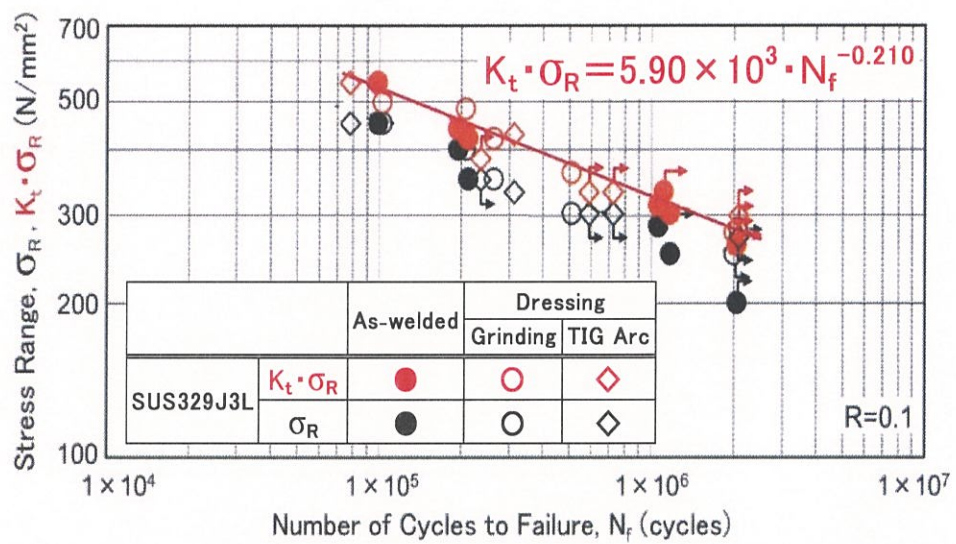


Fig.4.6 Results of fatigue test for butt welded joint

$\sigma_R - N_f, K_t \cdot \sigma_R - N_f$ curve
 SUS329J3L-solid steel plate

**Table 4.15 Results of fatigue test for butt welded joint
(SUS316LN steel plate. Dressing by grinding)**

R=0.1

Specimen Number	Width w (mm)	Thick. t (mm)	Cross-section Area A (mm ²)	Test Load			Test Stress			Freq. f (Hz)	Number of Cycles to Failure N _f (cycles)	Remark
				Max. P _{max} (kN)	Min. P _{min} (kN)	Range P _R (kN)	Max. σ _{max} (N/mm ²)	Min. σ _{min} (N/mm ²)	Range σ _R (N/mm ²)			
BW4-1	36.0	16.4	590	230	23.0	207	389	38.9	350	5	>2.08 × 10 ⁵ >207,931	Base Plate Failure
BW4-2	36.1	16.4	592	296	29.6	266	500	50.0	450	5, 3	>5.65 × 10 ⁴ >56,493	Failure from Weld Defect
BW4-3	36.1	16.5	596	199	19.9	179	334	33.4	300	6	3.83 × 10 ⁵ 383,059	
BW4-4	36.1	16.5	596	265	26.5	239	444	44.4	400	4	6.67 × 10 ⁴ 66,633	
BW4-5	36.1	16.5	596	198	19.8	178	333	33.3	300	5	5.48 × 10 ⁵ 547,527	
BW4-6	36.1	16.5	596	166	16.6	149	278	27.8	250	7	>2.05 × 10 ⁶ >2,053,146	Non-Failure
BW4-7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

**Table 4.16 Results of fatigue test for butt welded joint
(Correct by K_t)
(SUS316LN steel plate. Dressing by grinding)**

R=0.1

Specimen Number	Width w (mm)	Thick. t (mm)	Toe Radius R (mm)	Flank Angle θ (°)	Height of Bead H (mm)	Width of Bead B (mm)	Stress Concentration Factor K _t	Stress Range σ _R (N/mm ²)	K _t · σ _R (N/mm ²)	Number of Cycles to Failure N _f (cycles)	Remark
BW4-2	36.1	16.4	17.8	12.4	2.7	19.4	1.1	450	495	>5.65 × 10 ⁴ >56,493	Failure from Welded Defect
BW4-3	36.1	16.5	13.5	12.3	2.4	19.8	1.1	300	330	3.83 × 10 ⁵ 383,059	
BW4-4	36.1	16.5	12.7	13.6	2.1	18.8	1.1	400	440	6.67 × 10 ⁴ 66,633	
BW4-5	36.1	16.5	14.9	13.8	2.2	19.2	1.1	300	330	5.48 × 10 ⁵ 547,527	
BW4-6	36.1	16.5	15.8	8.8	1.9	19.0	1.1	250	275	>2.05 × 10 ⁶ >2,053,146	Non-Failure
BW4-7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

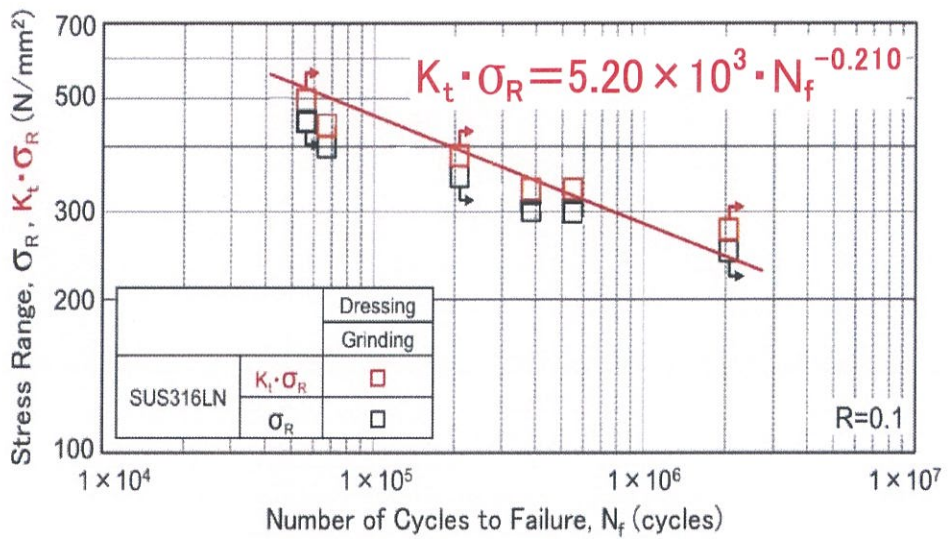


Fig.4.7 Results of fatigue test for butt welded joint
 $\sigma_R - N_f, K_t \cdot \sigma_R - N_f$ curve
 SUS316LN-solid steel plate

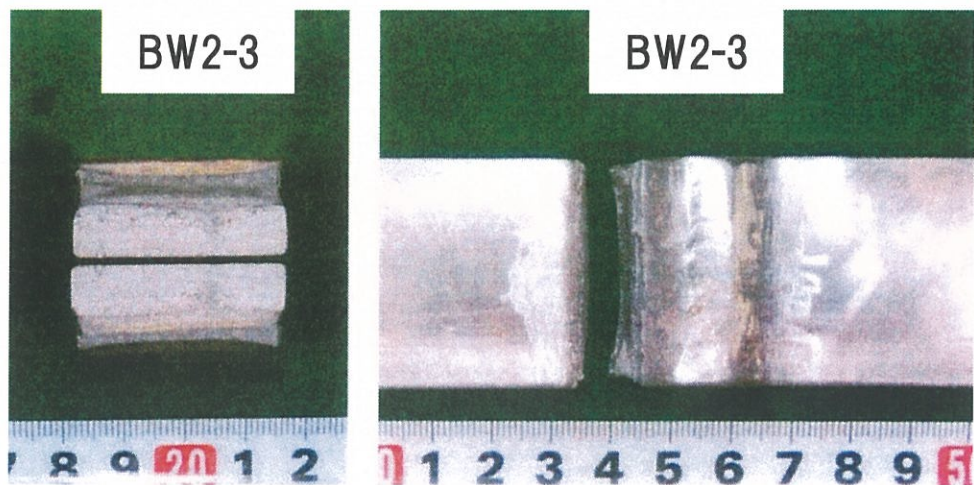


Fig. 4.8 Fracture surface and pass after fatigue test
 SUS329J3L-solid steel plate
 Dressing by grinding, BW2-3
 $450\text{N/mm}^2, 1.03 \times 10^5$ cycles

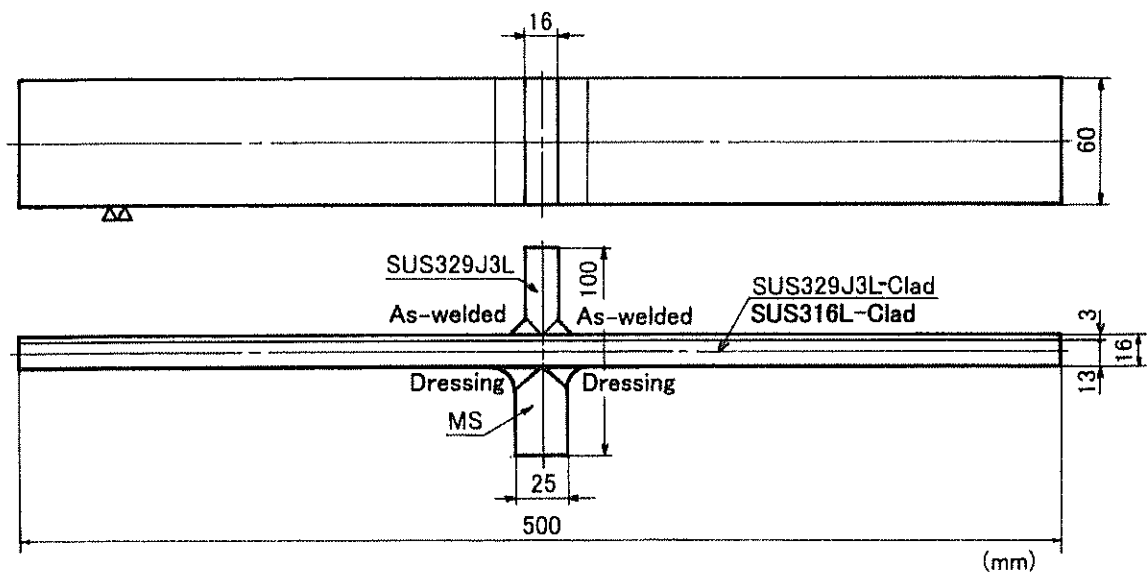


Fig.4.9 Shape and size of fatigue test specimen
 (Non-load-carrying full penetration cruciform welded joint)
 (As-welded)

Table 4.17 Welding parameters of full penetration cruciform welded joints (FCAW)

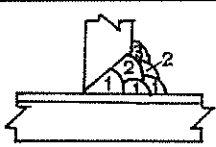
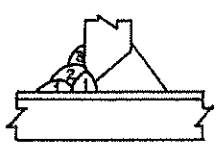
Test Steel Plate	Build-up Sequence	Welding Current (A)	Arc Voltage (V)	Travel Speed (cm/min)	Heat Input (kJ/cm)	Welding Consumables (JIS)
SUS329J3L-Clad Steel Plate + SUS329J3L Steel Plate		180 ~200	30 ~32	17.0 ~28.2	13.6 ~22.6	TS2209 -FCO
		200	32	15.7 ~28.3	13.6 ~24.5	TS2209 -FCO

Plate Thickness : 16 mm, Gas Flow Rate : 18 ℓ/min, Interpass Temperature $\leq 150^{\circ}\text{C}$

Table 4.18 Welding parameters of full penetration cruciform welded joint

Test Steel Plate	Welding Method	Gas Flow Rate (ℓ/min)	Welding Current (A)	Arc Voltage (V)	Travel Speed (cm/min)	Heat Input (kJ/cm)
SUS316L-Clad +SUS329J3L	FCAW	18	170 ~200	29 ~32	20.1 ~45.0	6.7 ~17.8

Table 4.19 Results of fatigue test for non-load-carrying full penetration cruciform welded joint (SUS329J3L-clad+SUS329J3L steel plate. As-welded)

R=0.1

Specimen Number	Width w (mm)	Thick. t (mm)	Cross-section Area A (mm ²)	Test Load			Test Stress			Freq. f (Hz)	Number of Cycles to Failure N _f (cycles)	Remark
				Max. P _{max} (kN)	Min. P _{min} (kN)	Range P _R (kN)	Max. σ _{max} (N/mm ²)	Min. σ _{min} (N/mm ²)	Range σ _R (N/mm ²)			
A-1 SNCA-1	60.0	16.7	1002	334	33.4	301	333	33.3	300	5	2.66 × 10 ⁴ 26,601	Failure of SUS329J3L Toe
A-2 SNCA-2	60.0	16.6	996	166	16.6	149	167	16.7	150	8	4.48 × 10 ⁵ 447,647	Failure of SUS329J3L Toe
A-3 SNCA-3	60.0	16.6	996	132	13.2	119	133	13.3	120	8	4.37 × 10 ⁵ 436,586	Failure of SUS329J3L Toe
A-4 SNCA-4	60.1	16.6	998	222	22.2	200	222	22.2	200	7	7.49 × 10 ⁴ 74,907	Failure of SUS329J3L Toe
A-5 SNCA-5	60.1	16.6	998	88.7	8.9	79.8	88.9	8.9	80	10	>2.23 × 10 ⁶ >2,232,866	Non-Failure
A-6 SNCA-6	60.0	16.7	1002	111	11.1	100	111	11.1	100	9	1.07 × 10 ⁶ 1,071,265	Failure of SUS329J3L Toe
A-7 SNCA-7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

Table 4.20 Results of fatigue test for non-load-carrying full penetration cruciform welded joint (Correct by K_t) (SUS329J3L-clad+SUS329J3L steel plate. As-welded)

R=0.1

Specimen Number	Width w (mm)	Thick. t (mm)	Toe Radius R (mm)	Flank Angle θ (°)	Vertical Leg Length h (mm)	Horizontal Leg Length hp (mm)	Projection Width B (mm)	Stress Concentration Factor K _t	Stress Range σ _R (N/mm ²)	K _t · σ _R (N/mm ²)	Number of Cycles to Failure N _f (cycles)	Remark
A-1 SNCA-1	60.0	16.7	1.18	47.7	13.3	11.8	16.4	2.8	300	840	2.66 × 10 ⁴ 26,601	
A-2 SNCA-2	60.0	16.6	1.06	49.9	15.3	12.4	16.3	2.9	150	435	4.48 × 10 ⁵ 447,647	
A-3 SNCA-3	60.0	16.6	0.61	46.0	14.7	12.9	16.5	(3.4) 3.0	120	360	4.37 × 10 ⁵ 436,586	
A-4 SNCA-4	60.1	16.6	0.68	38.9	15.0	13.0	16.6	(3.1) 3.0	200	600	7.49 × 10 ⁴ 74,907	
A-5 SNCA-5	60.1	16.6	—	—	—	—	—	—	80	—	>2.23 × 10 ⁶ >2,232,866	Non-Failure
A-6 SNCA-6	60.0	16.7	0.70	49.9	15.1	12.0	16.4	(3.4) 3.0	100	300	1.07 × 10 ⁶ 1,071,265	
A-7 SNCA-7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

Table 4.21 Results of fatigue test for non-load-carrying full penetration cruciform welded joint (SUS329J3L-clad+SUS329J3L steel plate. Dressing by grinding)

R=0.1

Specimen Number	Width w (mm)	Thick. t (mm)	Cross-section Area A (mm ²)	Test Load			Test Stress			Freq. f (Hz)	Number of Cycles to Failure N _f (cycles)	Remark
				Max. P _{max} (kN)	Min. P _{min} (kN)	Range P _R (kN)	Max. σ _{max} (N/mm ²)	Min. σ _{min} (N/mm ²)	Range σ _R (N/mm ²)			
B-1 SNCG-1	60.1	16.6	998	333	33.3	299	333	33.3	300	5	6.30 × 10 ⁴ 62,953	Failure of SUS329J3L Toe
B-2 SNCG-2	60.1	16.7	1004	168	16.8	151	167	16.7	150	8	9.05 × 10 ⁵ 904,505	Failure of SUS329J3L Toe
B-3 SNCG-3	60.0	16.6	996	221	22.1	199	222	22.2	200	6	3.22 × 10 ⁵ 322,267	Failure of SUS329J3L Toe
B-4 SNCG-4	60.0	16.5	990	132	13.2	119	133	13.3	120	8	>2.09 × 10 ⁶ >2,086,000	Non-Failure
B-5 SNCG-5	60.0	16.5	990	275	27.5	247	278	27.8	250	6	1.23 × 10 ⁵ 123,427	Failure of SUS329J3L Toe
B-6 SNCG-6	60.0	16.4	984	361	36.1	325	367	36.7	330	3	5.26 × 10 ⁴ 52,594	Failure of SUS329J3L Toe
B-7 SNCG-7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

Table 4.22 Results of fatigue test for non-load-carrying full penetration cruciform welded joint (Correct by K_t) (SUS329J3L-clad+SUS329J3L steel plate. Dressing by grinding)

R=0.1

Specimen Number	Width w (mm)	Thick. t (mm)	Toe Radius R (mm)	Flank Angle θ (°)	Vertical Leg Length h (mm)	Horizontal Leg Length hp (mm)	Projection Width B (mm)	Stress Concentration Factor K _t	Stress Range σ _R (N/mm ²)	K _t · σ _R (N/mm ²)	Number of Cycles to Failure N _f (cycles)	Remark
B-2 SNCG-2	60.1	16.7	2.79	43.8	16.4	13.1	16.7	2.2	150	330	9.05 × 10 ⁵ 904,505	
B-3 SNCG-3	60.0	16.6	3.04	48.6	16.0	11.7	16.4	2.2	200	440	3.22 × 10 ⁵ 322,267	
B-4 SNCG-4	60.0	16.5	—	—	—	—	—	—	120	—	>2.09 × 10 ⁶ >2,086,000	Non-Failure
B-5 SNCG-5	60.0	16.5	3.14	53.5	15.7	11.5	16.4	2.2	250	550	1.23 × 10 ⁵ 123,427	
B-6 SNCG-6	60.0	16.4	3.54	42.5	15.3	11.9	16.4	2.0	330	660	5.26 × 10 ⁴ 52,594	
B-7 SNCG-7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

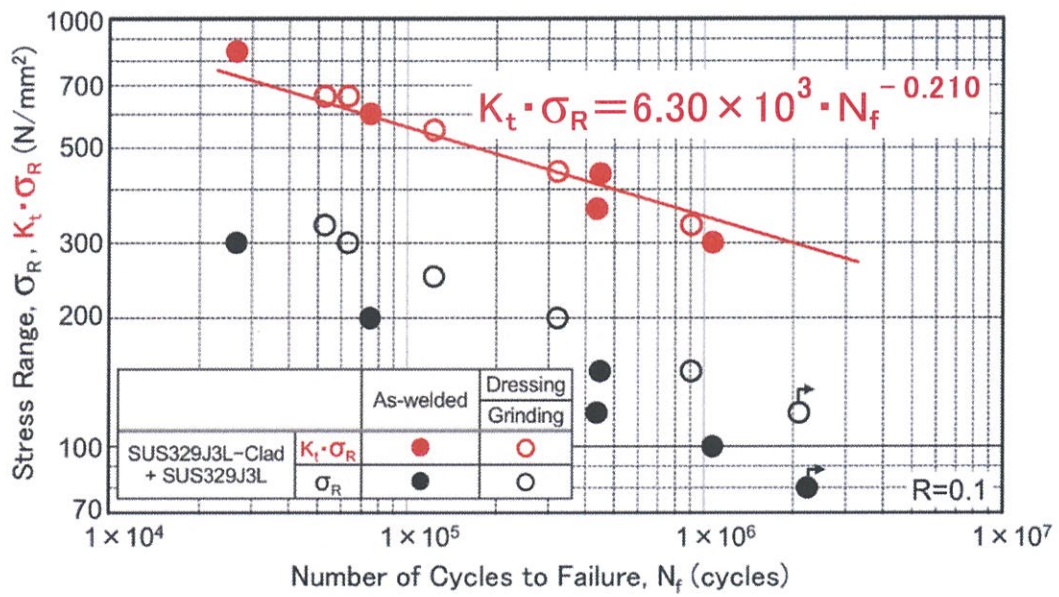


Fig.4.10 Results of fatigue test for non-load-carrying full penetration cruciform welded joint

$\sigma_R - N_f, K_t \cdot \sigma_R - N_f$ curve
 SUS329J3L-clad + SUS329J3L-solid steel plate

**Table 4.23 Results of fatigue test for non-load-carrying full penetration cruciform welded joint
(SUS316L-clad+SUS329J3L steel plate. As-welded)**

R=0.1

Specimen Number	Width w (mm)	Thick. t (mm)	Cross-section Area A (mm ²)	Test Load			Test Stress			Freq. f (Hz)	Number of Cycles to Failure N _f (cycles)	Remark
				Max. P _{max} (kN)	Min. P _{min} (kN)	Range P _R (kN)	Max. σ _{max} (N/mm ²)	Min. σ _{min} (N/mm ²)	Range σ _R (N/mm ²)			
FPLN1-1	60.0	16.2	972	324	32.4	292	333	33.3	300	5	8.76 × 10 ⁴ 87,589	Failure of SUS316L Toe
FPLN1-2	60.0	16.3	978	163	16.3	147	167	16.7	150	10	8.31 × 10 ⁵ 831,223	Failure of SUS316L Toe
FPLN1-3	60.2	16.2	975	217	21.7	195	222	22.2	200	7	6.77 × 10 ⁵ 676,983	Failure of SUS316L Toe
FPLN1-4	60.1	16.2	974	271	27.1	244	278	27.8	250	7	1.66 × 10 ⁵ 166,382	Failure of SUS316L Toe
FPLN1-5	60.0	16.2	972	130	13.0	117	134	13.4	120	8	>2.02 × 10 ⁶ >2,022,206	Non-Failure
FPLN1-6	60.0	16.2	972	216	21.6	194	222	22.2	200	7	6.66 × 10 ⁵ 666,317	Failure of SUS316L Toe
FPLN1-7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

**Table 4.24 Results of fatigue test for non-load-carrying full penetration cruciform welded joint (Correct by K_t)
(SUS316L-clad+SUS329J3L steel plate. As-welded)**

R=0.1

Specimen Number	Width w (mm)	Thick. t (mm)	Toe Radius R (mm)	Flank Angle θ (°)	Vertical Leg Length h (mm)	Horizontal Leg Length hp (mm)	Projection Width B (mm)	Stress Concentration Factor K _t	Stress Range σ _R (N/mm ²)	K _t · σ _R (N/mm ²)	Number of Cycles to Failure N _f (cycles)	Remark
FPLN1-1	60.0	16.2	4.5	29.7	14.7	13.7	16.5	1.7	300	510	8.76 × 10 ⁴ 87,589	
FPLN1-2	60.0	16.3	1.4	26.9	16.4	15.5	16.5	2.2	150	330	8.31 × 10 ⁵ 831,223	
FPLN1-3	60.2	16.2	4.9	33.4	14.7	14.6	16.5	1.7	200	340	6.77 × 10 ⁵ 676,983	
FPLN1-4	60.1	16.2	3.4	30.5	14.6	13.7	16.5	1.8	250	450	1.66 × 10 ⁵ 166,382	
FPLN1-5	60.0	16.2	2.5	34.8	16.2	14.0	16.5	2.1	120	252	>2.02 × 10 ⁶ >2,022,206	Non-Failure
FPLN1-6	60.0	16.2	3.2	35.8	18.0	14.1	16.5	1.9	200	380	6.66 × 10 ⁵ 666,317	
FPLN1-7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

Table 4.25 Results of fatigue test for non-load-carrying full penetration cruciform welded joint (SUS316L-clad+SUS329J3L steel plate. Dressing by TIG arc)

R=0.1

Specimen Number	Width w (mm)	Thick. t (mm)	Cross-section Area A (mm ²)	Test Load			Test Stress			Freq. f (Hz)	Number of Cycles to Failure N _f (cycles)	Remark
				Max. P _{max} (kN)	Min. P _{min} (kN)	Range P _R (kN)	Max. σ _{max} (N/mm ²)	Min. σ _{min} (N/mm ²)	Range σ _R (N/mm ²)			
FPLN3-1	60.0	16.1	966	268	26.8	241	278	27.8	250	7	5.69 × 10 ⁵ 569,200	Failure of SUS316L toe
FPLN3-2	60.0	16.1	966	215	21.5	194	222	22.2	200	8	1.09 × 10 ⁶ 1,091,605	Failure of SUS316L toe
FPLN3-3	60.1	16.0	962	182	18.2	164	189	18.9	170	8	>2.03 × 10 ⁶ >2,031,203	Non-Failure
FPLN3-4	60.0	16.1	966	322	32.2	290	333	33.3	300	7	2.53 × 10 ⁵ 252,848	Failure of SUS316L toe
FPLN3-5	60.0	16.1	966	322	32.2	290	333	33.3	300	7	2.10 × 10 ⁵ 210,452	Failure of SUS316L toe
FPLN3-6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
FPLN3-7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

Table 4.26 Results of fatigue test for non-load-carrying full penetration cruciform welded joint (Correct by K_t) (SUS316L-clad+SUS329J3L steel plate. Dressing by TIG arc)

R=0.1

Specimen Number	Width w (mm)	Thick. t (mm)	Toe Radius R (mm)	Flank Angle θ (°)	Vertical Leg Length h (mm)	Horizontal Leg Length hp (mm)	Projection Width B (mm)	Stress Concentration Factor K _t	Stress Range σ _R (N/mm ²)	K _t · σ _R (N/mm ²)	Number of Cycles to Failure N _f (cycles)	Remark
FPLN3-2	60.0	16.1	6.6	31.3	16.9	15.3	16.5	1.6	200	320	1.09 × 10 ⁶ 1,091,605	
FPLN3-3	60.1	16.0	11.9	36.9	16.3	16.2	16.5	1.5	170	255	>2.03 × 10 ⁶ >2,031,203	Non-Failure
FPLN3-4	60.0	16.1	12.6	30.0	15.1	14.7	16.5	1.4	300	420	2.53 × 10 ⁵ 252,848	
FPLN3-5	60.0	16.1	9.6	33.5	16.2	14.1	16.5	1.5	300	450	2.10 × 10 ⁵ 210,452	
FPLN3-6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
FPLN3-7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

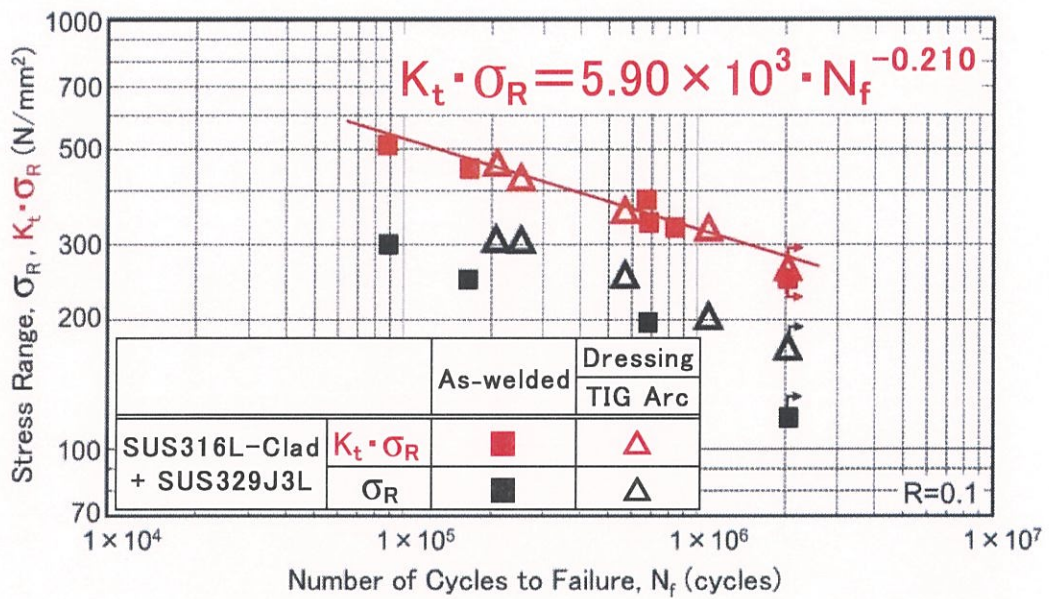


Fig.4.11 Results of fatigue test for non-load-carrying full penetration cruciform welded joint
 $\sigma_R - N_f, K_t \cdot \sigma_R - N_f$ curve
 [SUS316L-clad + SUS329J3L-solid steel plate]

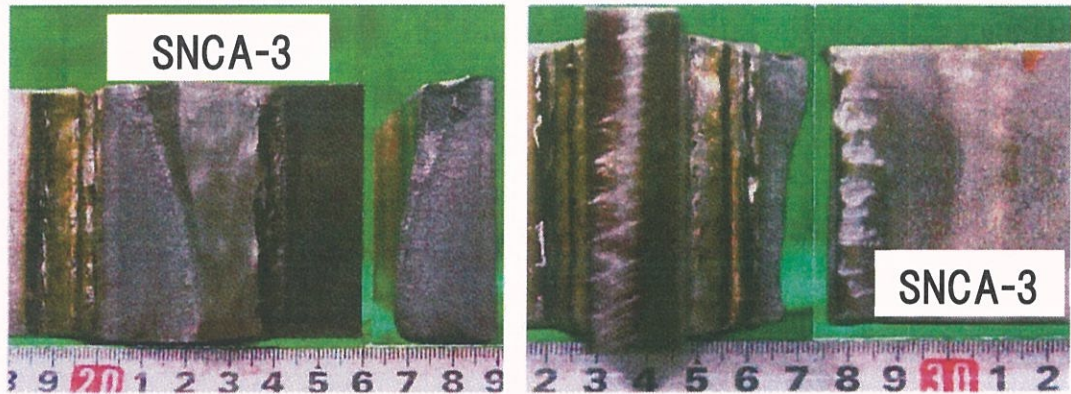


Fig.4. 12 Fracture surface and pass after fatigue test
 SUS329J3L-clad+SUS329J3L-solid
 steel plate, As-welded
 SNCA-3, 120 N/mm², 4.37 × 10⁵ cycles

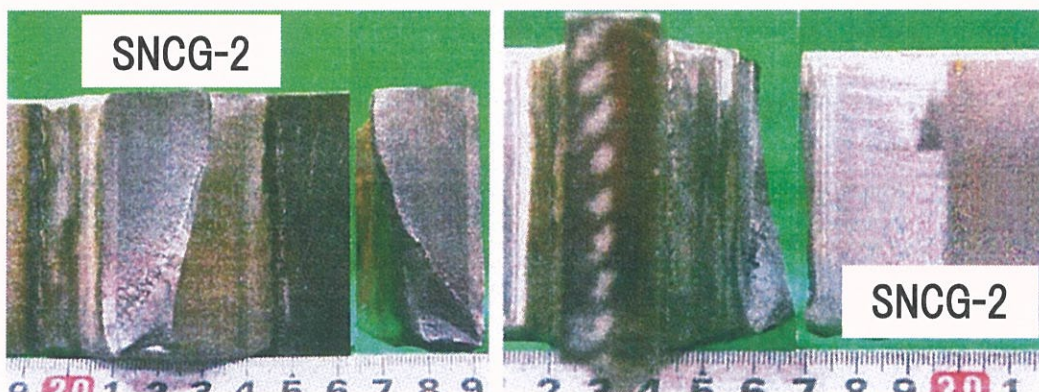


Fig.4 13 Fracture surface and pass after fatigue test
 SUS329J3L-clad+SUS329J3L-solid
 steel plate, Dressing by grinding,
 SNCG-2, 150N/mm², 9.05 × 10⁵ cycles



Fig.4.14 Fracture surface and pass after fatigue test
 [SUS316L-clad + SUS329J3L-solid
 steel plate, As-welded,
 FPLN1-4, 250N/mm², 1.66×10^5 cycles]

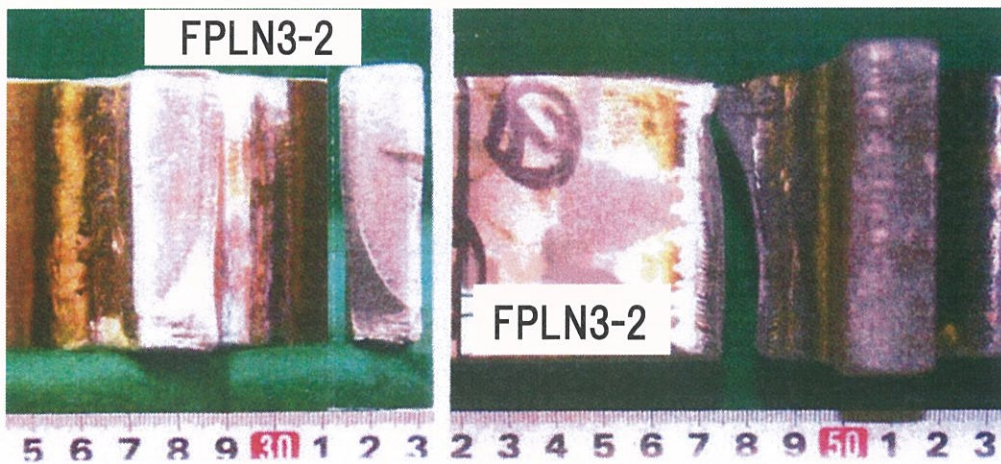


Fig.4.15 Fracture surface and pass after fatigue test
 [SUS316L-clad + SUS329J3L-solid
 steel plate, Dressing by TIG arc,
 FPLN3-2, 200N/mm², 1.09×10^6 cycles]

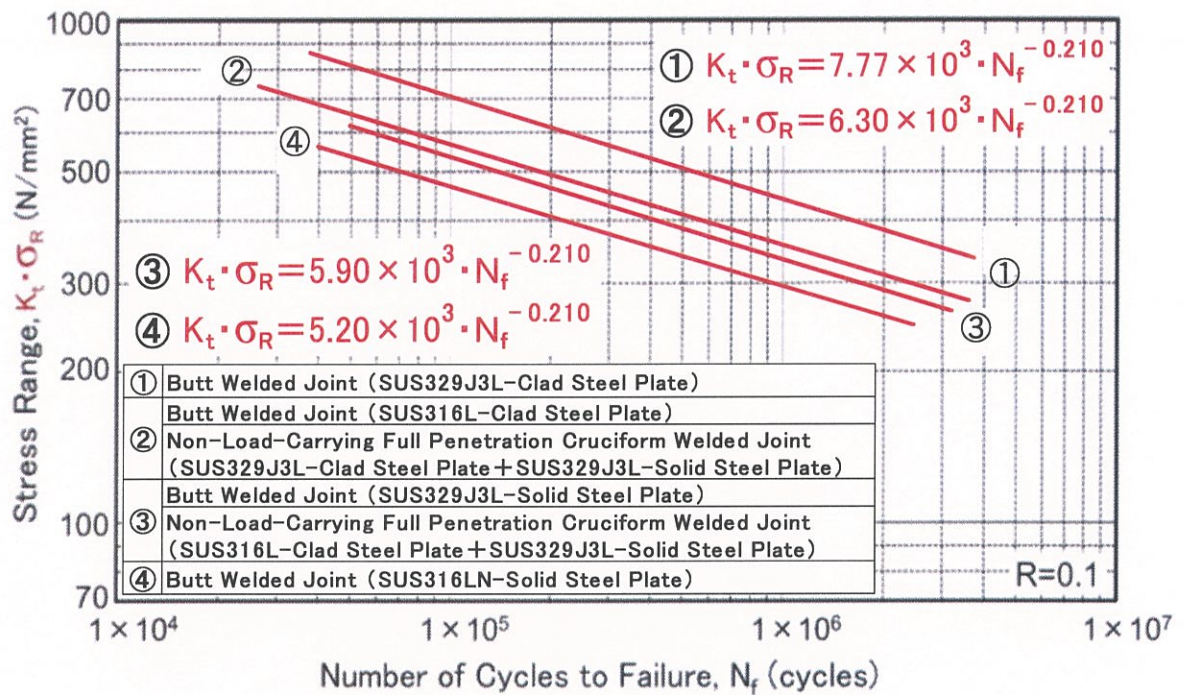


Fig.4.16 Fatigue strength of butt welded joints and non-load-carrying full penetration cruciform welded joints ($K_t \cdot \sigma_R - N_f$ curves)

第5章 結論

二相ステンレス(SUS329J3L)クラッド鋼板とソリッド鋼板とを組み合わせ、ケミカルタンカーカーゴタンク構造建造に実用できれば、希少資源(ニッケル: Ni)節約と船殻重量軽減に貢献できる。

本報では、2016年に開発・製品化されたSUS329J3Lクラッド鋼板を、ケミカルタンカーカーゴタンク構造に実用する上で、最重要課題である、接合界面の破壊靱性値把握・検討・評価、接合界面に沿っての疲労亀裂伝播特性把握・検討・評価、および溶接継手部疲労強度の把握・比較・検討・評価を実施した。得られた結論は以下のとおりである。

- ① SUS329J3Lクラッド鋼板接合界面の破壊靱性値を、十字溶接継手引張試験片とCT型試験片によって把握し、以前把握された、使用実績が多いオーステナイト系ステンレスクラッド鋼板接合界面の破壊靱性値と比較・評価して、勝るとも劣らないことを明らかにした。

さらに、数年前に実施された、SUS329J3L鋼板突合せ溶接(TIG溶接とFCA溶接)継手溶接金属中央部の破壊靱性値と比較・検討・評価し、SUS329J3Lクラッド鋼板接合界面の破壊靱性値が、SUS329J3L鋼板突合せ溶接継手溶接金属中央部の破壊靱性値と略同じであることを明らかにした。

以上により、SUS329J3Lクラッド鋼板をケミカルタンカーカーゴタンク構造に適用して何等問題無いことが確認された。

- ② 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型試験片とCCT型試験片(中央切欠付引張試験片)によって把握し、これまでに実施された高張力鋼板(SM570Q, WES-HW685)や、SUS329J3Lソリッド鋼板などの母材の疲労亀裂伝播特性と比較・検討・評価した。

すなわち、SUS329J3Lクラッド鋼板接合界面の疲労亀裂伝播特性は、高張力鋼板(SM570Q, WES-HW685)母材や、二相ステンレス(SUS329J3L)鋼板母材と同等であり、ケミカルタンカーカーゴタンク構造に適用して何等問題無いことが確認された。

- ③ SUS329J3Lクラッド鋼板同士、SUS329J3Lソリ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クラッド鋼板やSUS316LNソリ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。

すなわち、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で建造されたカーゴタンク構造より優れていることが確認された。

今後SUS329J3Lクラッド鋼板のケミカルタンカーカーゴタンク構造への適用が拡大され、より安全で耐食性がよく、合理的な船体の建造実績が積み重ねられることで、日本のケミカルタンカーの価格競争力と希少資源節約効果が発揮されることを望む。

謝辞

本論文の執筆にあたり、真に多くの方々の御支援をいただきました。ここに深甚なる感謝の意を表します。

本論文を詳細に御検討頂き、また、論文審査の主査の労を取って戴きました 長崎大学 大学院 工学研究科 中村 聖三 教授に深く感謝の意を表します。

また、親切な御指導をいただき、論文審査の副査を務めて下さいました 才本 明秀 教授、小山敦弘 准教授に厚く御礼申し上げます。

取り纏め全般にわたり、格別なご指導を賜りました 矢島材料強度研究所 代表 矢島 浩 博士 に深く感謝の意を表します。

実験ならびに考察を共同で行い、貴重な御助言を多々頂きました、愛媛大学 大学院 理工学研究科 勝田 順一 教授に厚く御礼申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、種々御協力戴きました 株式会社 臼杵造船所 緒方 洋典 本部長 ならびに 関係者各位に謝意と敬意を表し、厚く御礼申し上げます。

供試試験片をご提供戴き、種々御協力戴いた JFEスチール株式会社 深井 英明博士、黒沼 洋太様に厚く御礼申し上げます。

最後に、常に私を温かく見守り続けて下さった両親、よき理解者である 妻 由貴には、深甚なる感謝の意を表します。