

二相ステンレス クラッド鋼板・  
ソリッド鋼板を用いた  
ケミカルタンカー建造に関する  
基礎研究

Fundamental Study on the Construction of Chemical Tanker  
Utilizing Combination of Duplex Stainless Clad Steel Plate  
and Solid Steel Plate

平成30年1月

緒方洋典

## 目 次

第 1 章 緒 論	1
1.1 本研究の背景と目的	3
1.2 ケミカルタンカーとは	5
1.3 本研究の取り組み	9
参考文献	12
図 表	14
第 2 章 二相ステンレス クラッド鋼板 接合界面の 強度・信頼性	17
2.1 はじめに	19
2.2 供試鋼板	19
2.3 接合界面の破壊靱性	19
2.4 接合界面に沿っての疲労亀裂伝播特性	22
2.5 まとめ	24
参考文献	26
図 表	28
第 3 章 二相ステンレス クラッド鋼板・ソリッド鋼板 の溶接性に関する検討・評価	56
3.1 はじめに	59
3.2 供試鋼板	59
3.3 T 継手初層高温割れ確認試験結果および考察	60
3.4 過剰溶接入熱の影響度確認試験結果および考察	61
3.5 SUS329J3L クラッド鋼板 過剰溶接入熱 突合せ溶接継手 の組織観察結果と継手引張試験結果および考察	63
3.6 完全溶け込み十字溶接継手引張試験結果および考察	65
3.7 まとめ	66
参考文献	68
図 表	69

第 4 章 二相ステンレス クラッド鋼板・ソリッド鋼板 溶接継手部の疲労強度に関する検討・評価	85
4.1 はじめに	88
4.2 二相ステンレス (SUS329J3L) ソリッド鋼板同士の 突合せ溶接継手の疲労強度	88
4.3 二相ステンレス (SUS329J3L) クラッド鋼板同士の 突合せ溶接継手の疲労強度	92
4.4 二相ステンレス (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	94
4.5 二相ステンレス (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	97
4.6 二相ステンレス (SUS329J3L) ソリッド鋼板同士の 荷重非伝達型 十字隅肉溶接継手の疲労強度	99
4.7 $2 \times 10^6$ 回疲労強度に及ぼす十字溶接継手 止端半径の影響	101
4.8 二相ステンレス (SUS329J3L) クラッド鋼板および SUS329J3L ソリッド鋼板の溶接継手部疲労強度に 関する総合評価	102
4.9 まとめ	104
参考文献	105
図 表	107

第 5 章 カーゴタンク内トランスバルクヘッドと 二重底との十字溶接継手部の静的 FEM 解析 による応力集中の検討・評価	157
5.1 はじめに	159
5.2 解析モデルおよび解析条件	159
5.3 同軸十字溶接継手止端部の応力集中	164

5.4	目違い十字溶接継手止端部の応力集中	170
5.5	まとめ	178
	参考文献	179
	図表	181
<b>第6章 二相ステンレスクラッド鋼板・ソリッド鋼板</b>		
	溶接継手部の耐食性に関する検討・評価	201
6.1	はじめに	203
6.2	供試鋼板	203
6.3	溶接条件	203
6.4	突合せ溶接継手に対する各種基本試験および その結果	204
6.5	突合せ溶接継手の腐食試験片採取要領	207
6.6	突合せ溶接継手に対する各種腐食試験および その結果	207
6.7	応力腐食割れ試験およびその結果	211
6.8	T溶接継手に対する各種基本試験およびその結果	212
6.9	T溶接継手に対する耐孔食性試験およびその結果	213
6.10	まとめ	213
	参考文献	217
	図表	218
<b>第7章 ケミカルタンカー建造への二相ステンレス</b>		
	クラッド鋼板・ソリッド鋼板適用に関する 総合評価	244
7.1	はじめに	247
7.2	本研究成果の総括	247
7.3	ステンレス鋼板適用範囲と使用するステンレス鋼板の 留意点	254
7.4	溶接継手の適用範囲	255
7.5	溶接における留意点	258

7.6 溶接施工の条件	259
7.7 品質管理	259
7.8 まとめ	260
参考文献	261
図表	262
第8章 結論	269
8.1 結言	271
8.2 研究成果実用化の現状	271
図表	273
謝辞	274~275

# 第 1 章

## 緒 論

## 第 1 章 目 次

1.1 本研究の背景と目的	3
1.2 ケミカルタンカーとは	5
1.2.1 ケミカルタンカーの分類	5
1.2.2 カーゴタンクに使用される材料	6
1.2.3 ステンレスソリッド鋼板・クラッド鋼板の 適用範囲	7
1.2.4 荷役の方法	8
1.2.5 カーゴタンク構造の特徴	8
1.2.6 溶接施工の注意点	9
1.3 本研究の取り組み	9
参考文献	12
図 表	14

## 1.1 本研究の背景と目的

一般に、ケミカルタンカーは、大量少品種の液体貨物を輸送するオイルタンカーとは異なり、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<sup>1.1)</sup>。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。

一方、ケミカルタンカーは、工業生産の発展と開発途上国の工業化に比例して増加している。

主要な航路として、メタノール・パラキシレン・アクリロニトリルなどの液体貨物は、北米、中南米、極東、東南アジア、ニュージーランド、北アフリカなどの地域を相互に結ぶ多様なルートがある。りん酸、苛性ソーダ、硫酸などの液体貨物は、北アフリカ、欧州、インド、北米、中南米、極東、東南アジアなどが主な航路となっている。動植物油は、東南アジア、中南米、アフリカ、東欧などの農業地域と世界中の消費地域が主な航路となっている<sup>1.2),1.3)</sup>。

現在、国内の造船所においては、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用いたケミカルタンカーの建造が主流である<sup>1.4),1.5)</sup>。

国外においては、ステンレスクラッド鋼板は生産されていないばかりか、我が国から輸出もされていないことから、海外の造船所で建造されているケミカルタンカーには、ステンレスソリッド鋼板のみが使用されている。

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である<sup>1.6)</sup>。



ステンレスクラッド鋼板は、カーゴタンクと隣接するバラストタンクや、その他区画との隔壁に使用されている。これにより、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、バラスト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。

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鋼板(SUS316LN-315M, 以下SUS316LN鋼板と称す)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, 以下SUS329J3Lと称す)鋼板の使用が増加してきたのである。

また、韓国や中国においても、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ヨーロッパ向けのケミカルタンカーが、最近建造されている。

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。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、採用すれば、船体構造の軽量化が可能になる。したがって、SUS329J3L鋼板を採用することにより、Niの国際価格変動に対する競争力アップ・価格低減に加えて、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。

温度管理等の点で製造することが困難であるとされていた、SUS329J3Lクラッド鋼板が、2016年に製造できるようになった<sup>1.7)</sup>。そこで、我が国独自の技術である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。また、同時に国際競争力に対しても寄与できるものとする。

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。

本研究は、SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板とを使用して、ケミカルタンカー建造を実現するための基礎的課題を解明し、ケミカルタンカー建造の基礎技術確立を目的とした。

すなわち、SUS329J3Lクラッド鋼板接合界面の強度特性（破壊靱性・疲労亀裂伝播特性）、溶接性、溶接継手部疲労強度、などを把握・検討・評価し、さらに、SUS329J3Lクラッド鋼板の二重底と、SUS329J3Lソリッド鋼板の縦横隔壁との十字溶接継手止端部の応力集中係数に関する検討・評価を実施して、SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板を適用したケミカルタンカーの建造を実現すると共に、就航後の技術トラブルを回避すべく、耐食性（特に溶接継手部）を把握・検討・評価して、設計・建造技術を確立することを目的とした。

## 1.2 ケミカルタンカーとは

### 1.2.1 ケミカルタンカーの分類

化学薬品や食物油などは、流出すれば人や生物、環境への被害、汚染を引き起こす危険性がある。海上における人命の安全のための国際条約（International Convention for the Safety of Life at Sea:略称SOLAS）・IBCコード（International Bulk Chemical Code:危険化学品のばら積輸送のための船舶の構造および設備に関する国際規則）では、環境や安全に対する危険性の度合いにより、Type-I、Type-II、Type-IIIを規定している<sup>1.3)</sup>。

### (1) Type- I

危険度が非常に高い物質(アルキルジメチルアミン, ノニルフェノール, トリクロロベンゼンなど約19種類)について, 貨物の流出に対し最高の予防措置が要求される。カーゴタンクの配置に対して, 船側部については, 船側外板から,  $[B(\text{船体の幅})/5]$  m または 11.5 m の内, いずれか小さい方の値, タンク壁(ロンジバルクヘッド)を離すよう要求されている(ダブルハルの幅)。船底部については, 船体中心線における船底外板の上面から,  $[B(\text{船体の幅})/15]$  m または 6 m の内, いずれか小さい方の値以上, 上方に配置するよう要求されている(ダブルボトムの深さ)。

### (2) Type- II

危険度が比較的高い物質(ニトロベンゼン, 硝酸, 食物油など約 415 種類)について, 貨物の流出に対し最高の予防措置が要求される。カーゴタンクの配置については, 船側部については, いかなる箇所においても, 外板から 760mm以上 タンク壁を離すよう要求されている(ダブルハルの幅)。船底部については, Type- I と同様とするよう要求されている(ダブルボトムの深さ)。

### (3) Type- III

危険度が低い物質(りん酸, クロロホルム, 硫酸など約 298 種類)について, 貨物の流出に対しある程度の規制が要求される。カーゴタンク構造に対する制約は無い。

**Table1.2.1**に, Class NK 2016 鋼船規則 S編, 一体型重力式タンク(一般的なケミカルタンカーの構造)の最低要件一覧表に記載がある品数(カーゴ数)を示す。

## 1.2.2 カーゴタンクに使用される材料

カーゴタンクに使用される材料は一般的に以下に分類される。

- (1) カーゴタンクを炭素鋼板で構成
- (2) カーゴタンクをステンレス鋼板で構成

(1) は、炭素鋼板表面を、合成樹脂系の特殊塗装で保護する場合である。メタノール、アルコール類、ナフサなどの石油製品を積む場合に適用される。

(2) は、1.2.1項で示した、多品種の液体貨物を積載可能となる。

液体貨物 または その蒸気に曝されるタンクの構造材料や配管系統の材料は、腐食を考慮した場合、炭素鋼板の特殊塗装では、安全性維持は不可能である。ステンレス鋼板やステンレスクラッド鋼板が使用されるのが一般的である。国内で建造されるケミカルタンカーは、主に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多用されている。

ステンレスクラッド鋼板を使用する理由として、コスト低減と、その他区画の塗装品質維持(炭素鋼板の方が、ステンレス鋼板より塗膜の密着性が優れている)のためである。

### 1.2.3 ステンレスソリッド鋼板・クラッド鋼板の適用範囲

Fig.1.2.1 にケミカルタンカーの外観と中央部付近の横断面を示す。Fig.1.2.1 に示す通り、カーゴタンク同士の隔壁にはステンレスソリッド鋼板が使用され、カーゴタンクとバラスタタンクや暴露部等の区画との隔壁には、ステンレスクラッド鋼板が使用されている。

また、Table1.2.2 に、適用される溶接継手の種類を示す。

SUS329J3L鋼板を適用したケミカルタンカーは、以下の2種類に分類される。

- (1) SUS316Lクラッド鋼板 と SUS329J3Lソリッド鋼板とを組み合わせたハイブリッドカーゴタンクタイプ。
- (2) SUS329J3Lクラッド鋼板 と SUS329J3Lソリッド鋼板とを組み合わせたオール二相ステンレス鋼板カーゴタンクタイプ。

(1) は、SUS329J3Lクラッド鋼板が製造されていなかった時期に建造されたカーゴタンクタイプであり、コスト削減や薄肉軽量化を目的として、SUS316LNソリッド鋼板を使用する部材をSUS329J3Lソリッド鋼板に変更したものである。

(2) は、SUS329J3Lクラッド鋼板を実用して、SUS329J3Lソリッド鋼板と組み合わせてカーゴタンクを構成し、ヨーロッパの動向に合わせた、国際競争力向上を目的とした、世界初の新しいタイプのケミカルタンカー開発・建造を想定したものである。

本研究の目標は、上記(2)の開発・建造を実現することである。

#### 1.2.4 荷役の方法

ケミカルタンカーは、大量少品種の液体貨物を輸送するオイルタンカーとは異なり、少量多品種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、各カーゴタンクに独立したカーゴポンプが設置されており、貨物移送管も、一つのカーゴタンクに対し1ラインとなっており、非常に高度な荷役設備となっている。

積荷によっては、引火爆発の可能性があるので、カーゴタンク内の液体貨物上部に窒素を封入する必要がある。そのため、窒素発生装置を装備している。

また、液体貨物によっては、常温で粘性が高いものがあるので(例えば糖蜜等)、荷役に支障を与えないよう、約150℃まで加熱できる、昇温のための配管が施されている。昇温は、高温水、蒸気、熱媒油などによって行われている。

#### 1.2.5 カーゴタンク構造の特徴

ケミカルタンカーは、約700種類の液体貨物が積載可能であるため、荷役前後のカーゴタンクの洗浄はコンタミネーションを防ぐために重要となる。

通常はカーゴタンクに配置された、カーゴタンクマシンで洗浄される。洗浄時のシャドー箇所が極力なくなるように、カーゴタンク内には骨部材が存在しないようにしている。

したがって、バルクヘッドは、コルゲート(波板)構造、上甲板部の骨部材はカーゴタンクの外側、すなわち上甲板上側に配置されている。

また、比重の大きな積荷(例えば硫酸:1.84)や波浪による厳しい荷重条件に耐えられる強度を持つよう設計・建造されている。

### 1.2.6 溶接施工の注意点

カーゴタンクをステンレス鋼板で構成するケミカルタンカーにおいて、カーゴタンクの品質を維持するために、溶接施工においては以下の点に留意する必要がある。

#### (1) 規則・WPSの順守

ステンレス鋼板は入熱の影響を受けやすいので、決められた電流、電圧、パス数およびパス間温度を順守し溶接する必要がある。

#### (2) ビードの仕上げ

溶接表面に、凹凸、アンダーカット および オーバーラップ等があると、腐食性の強い液体貨物がわずかに残り局所的な腐食や、コンタミネーションの可能性があるので、溶接表面は滑らかにする必要がある。

また、カーゴタンク洗浄は、80℃海水で行い、その後清水でリンシングが行われる。リンシングが不十分な場合、溶接表面に、凹凸、アンダーカット および オーバーラップ等があると、この部分に海水が残り、孔食の原因となる。実際にこの孔食を起点としたクラックも発生している。そこで、溶接表面は滑らかにする必要がある。

#### (3) 疲労強度向上のための処置

比重の大きい積荷や波浪による厳しい荷重条件に耐えられる強度を持つよう設計されているが、溶接表面の状況により疲労亀裂が発生する可能性がある。特にカーゴタンク内のコルゲートバルクヘッド下部のコーナー部十字溶接継手部は高応力部となるため、完全溶け込み溶接とする必要がある。溶接表面は滑らかな形状とし、溶接止端部は、ドレッシング処理（グラインダー もしくは TIGなめ）する事が重要である。

## 1.3 本研究の取り組み

国内で建造されているケミカルタンカーは、従来、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ていた。

本研究では、新たな取り組みとして、SUS316Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との組み合わせ、さらに、SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との組み合わせでケミカルタンカー建造を実現すべく、以下の

項目を検討した。

#### (1) SUS329J3Lクラッド鋼板接合界面の強度・信頼性

2016年に新しく製造出来るようになった SUS329J3Lクラッド鋼板を、ケミカルタンカーに実用する上で最重要課題である、接合界面の強度・信頼性を把握・確認・評価することである<sup>1.8)</sup>。

すなわち、SUS329J3Lクラッド鋼板接合界面の破壊靱性の把握・検討・評価を行う。

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の把握・検討・評価を行う。

#### (2) SUS329J3Lクラッド鋼板およびSUS329J3Lソリッド鋼板の溶接性に関する検討・評価

T継手初層高温割れ・過剰溶接入熱の影響・引張強さに及ぼす十字溶接継手開先角度の影響などに関する検討・評価を行う。

#### (3) 溶接継手部の疲労強度に関する検討・評価

SUS329J3Lソリッド鋼板同士、および、SUS329J3Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手の疲労強度の把握・検討・評価を行う。

また、SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との荷重伝達型・非伝達型 完全溶け込み十字溶接継手の疲労強度の把握・検討・評価を行う。

また、SUS329J3Lソリッド鋼板同士の荷重非伝達型十字隅肉溶接継手の疲労強度の把握・検討・評価を行う。

さらに、 $2 \times 10^6$ 回疲労強度に及ぼす溶接継手止端半径の影響についての検討・評価を行う。

さらに、SUS329J3Lクラッド鋼板 および SUS329J3Lソリッド鋼板の溶接継手部疲労強度に関する総合評価を行う<sup>1.9)~1.11)</sup>。

#### (4) カーゴタンク内トランスバルクヘッドと二重底との交差部 十字溶接継手止端部の応力集中係数に関する検討・評価

従来、国内の造船所においては、ケミカルタンカーのカーゴタンク構造には、コルゲートバルクヘッドにSUS316LNソリッド鋼板、二重底頂板に

SUS316Lクラッド鋼板が使用されてきた。

前述のように、コルゲートバルクヘッドにSUS329J3Lソリッド鋼板を適用すれば、SUS316LNソリッド鋼板に比べて高強度であるため、コルゲートバルクヘッドの設計応力を大きくすることが期待できる。しかし、コルゲートバルクヘッドと二重底頂板との十字溶接継手部の応力が高くなると、溶接継手止端部の疲労強度が懸念される。また、十字溶接継手に対する、二軸引張荷重下の疲労強度が検討された研究報告例は少ない<sup>1.12)~1.16)</sup>。

そこで、十字溶接継手部の疲労強度検討の基礎とすべく、一軸・二軸引張荷重条件での静的引張弾性解析(FEM解析)を実施し、脚長寸法・形状や溶接条件の異なる種々の十字溶接継手の各溶接止端部の応力集中係数の把握を試み、各溶接継手部の応力集中について相対的な比較を行う<sup>1.17), 1.18)</sup>。

#### (5) SUS329J3Lクラッド鋼板およびSUS329J3Lソリッド鋼板溶接継手部の耐食性に関する検討・評価

就航後に、万一、耐食性に関するトラブルが発生すると、ケミカルタンカーの管理・維持の面で大きな問題に発展することが予想されるため、耐食性に関する検討・評価は重要課題である。

そこで、SUS329J3Lクラッド鋼板およびSUS329J3Lソリッド鋼板の、特に溶接継手部の孔食試験・粒界腐食試験・硫酸腐食試験・りん酸腐食試験・応力腐食割れ試験、およびそれらの結果の検討・評価を行う。

また、手直し(0回、1回および2回)溶接部についても検討・評価を行う。

#### (6) ケミカルタンカー建造へのSUS329J3Lクラッド鋼板・ソリッド鋼板適用に関する総合評価

以上の検討・評価結果を総括して、SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板とを、カーゴタンク構造に適用したケミカルタンカー建造に関する総合評価を行う。



## 参 考 文 献

- 1.1) 座間正人, 齊藤正洋, 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.
- 1.2) 高濱龍一郎: ケミカルとケミカルタンカー = 基礎入門編 = (1987.12.), pp.25-65.
- 1.3) 恵美洋彦: 液化ガス/ケミカルタンカーの基礎, 株式会社 成山堂書店(1988.), pp.22-28.
- 1.4) 矢島 浩, 座間正人, 平田隆明, 齊藤正洋, 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.
- 1.5) Masataka Suga, Masaharu Honda, Moriyasu Nagae, Nobuhiro Seki, Tohru Izawa and Tasuhiro Kaneko: The newly Developed Stainless Clad Steel Plate for the Hull Structure of Chemical Tankers, NKK TECHNICAL REVIEW, No.55(1989.), pp.64-72.
- 1.6) 座間正人, 齊藤正洋, 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) JFEスチール(株) スチール研究所 鋼材研究部: 二相ステンレスクラッド鋼の開発 ~継手特性評価結果~ (2017.3.), 社内資料.
- 1.8) 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.
- 1.9) 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.

- 1.10) Hironori Ogata, Kazumasa Sakaida, Kenji Shinozaki, Motomichi Yamamoto, Tadakazu Tanino and Hiroshi Yajima: A Study on the Fatigue Strength of Welded Joints of Duplex Stainless-Clad Steel Plates for Application in Chemical Tankers, Welding Letters of The Japan Welding Society, Vol.1(2018.), pp.1-3.
- 1.11) 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.
- 1.12) 北川英夫, 川井忠彦, 岡村弘之, 結城良治, 大平壽昭, 松原季男: 面内二軸荷重下の疲労き裂成長の破壊力学的研究(第1報) —高サイクル二軸荷重疲労試験機の開発—, 東京大学 生産研究, 30巻9号(1978.9.), pp.348-351.
- 1.13) 北川英夫, 結城良治, 東郷敬一郎: 面内二軸荷重下の疲労き裂成長の破壊力学的研究(第2報) —十字形試験片中のき裂の応力拡大係数の解析—, 東京大学 生産研究, 30巻10号(1978.10.), pp.395-398.
- 1.14) 結城良治, 北川英夫, 東郷敬一郎: 二軸荷重下の疲労き裂成長の下限界条件と開閉口挙動, 日本機械学会論文集(A編), 47巻422号(1981.10.), pp.981-989.
- 1.15) 高橋一比古, 高田篤志, 秋山 繁, 牛嶋通雄, 前中 浩: 2軸繰り返し荷重下における角回し溶接継手の疲労挙動, 日本造船学会論文集, 第184号(1998.12.), pp.321-327.
- 1.16) 高橋一比古, 高田篤志, 秋山 繁, 牛嶋通雄, 前中 浩: 2軸繰り返し荷重下における角回し溶接継手の疲労挙動(第2報) —2軸荷重レンジ比および横方向繰り返し圧縮荷重の影響—, 日本造船学会論文集, 第188号(2000.12.), pp.599-607.
- 1.17) 谷野忠和, 緒方洋典, 堺田和昌, 森 俊哲, 山本元道, 安藤 翼: 十字溶接継手止端部応力集中係数のFEM解析による一考察, 日本船舶海洋工学会論文集, 第24号(2016.12.), pp.309-315.

- 1.18) 谷野忠和, 緒方洋典, 堺田和昌, 森 俊哲, 山本元道, 安藤 翼:  
目違いのある十字溶接継手止端部応力集中係数のFEM解析に  
よる一考察, 日本船舶海洋工学会論文集, 第26号(2017.12.),  
pp.145-155.

**Table 1.2.1 Cargo quantity of cargo requirement list**

Requirement	Pollution category	X			Y			Z			Total
		S/P	S	P	S/P	S	P	S/P	S	P	
Ship type	Type-I	9	0	7	3	0	0	0	0	0	19
	Type-II	25	0	48	186	0	144	11	1	0	415
	Type-III	0	0	1	82	0	84	40	1	90	298

\*Pollution category (Annex II of MARPOL73/78)

X : Major hazard to either marine resources or human health.

Y : Hazard to either marine resources or human health.

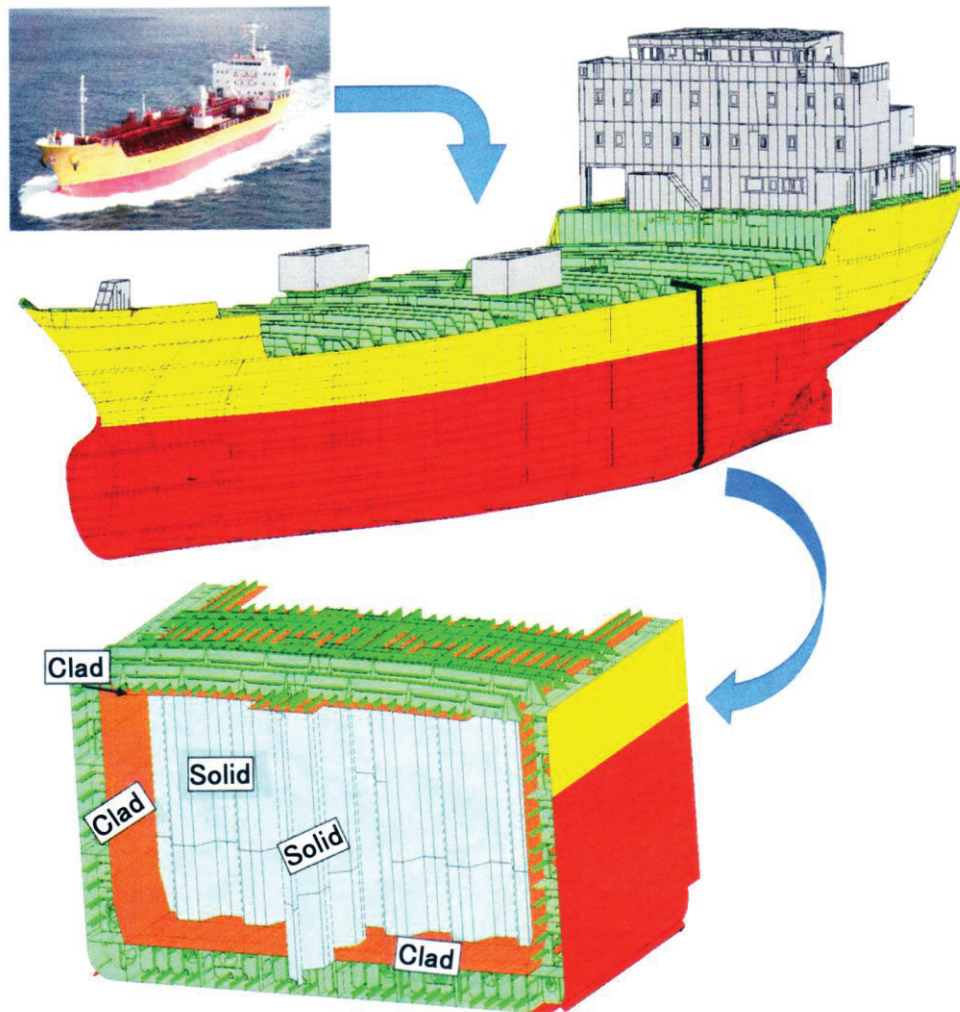
Z : Minor hazard to either marine resources or human health.

\*Hazards

S : That the product is included in this Part because of its safety hazards.

P : That the product is included in this Part because of its pollution hazards.




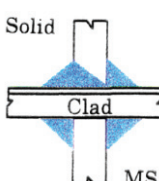
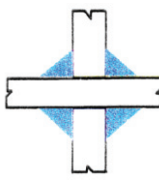
S/P : That the product is included in this Part because of both its safety and pollution hazards.



Clad : Stainless-Clad Steel Plate  
Solid: Stainless Solid Steel Plate

Fig.1.2.1 General view and cargo tank internal structure of chemical tanker

**Table 1.2.2 Type of welded joints used in cargo tank structure of chemical tanker**

Welded Joint	Combination of Plate	Welding Process	Welding Position
	SUS329J3L Solid + SUS329J3L Solid	FCAW or FCAW+SAW	FCAW : Flat, Horizontal, Vertical Upward FCAW+SAW : Flat
	SUS329J3L-Clad + SUS329J3L-Clad or SUS316L-Clad + SUS316L-Clad	FCAW or FCAW+SAW	FCAW : Flat, Horizontal, Vertical Upward FCAW+SAW : Flat
	SUS329J3L-Clad + SUS329J3L-Clad or SUS316L-Clad + SUS316L-Clad	FCAW	Flat, Horizontal, Vertical Upward
	SUS329J3L-Clad + SUS329J3L Solid or SUS316L-Clad + SUS329J3L Solid	FCAW	Flat, Horizontal, Vertical Upward
	SUS329J3L Solid + SUS329J3L Solid  ( Fillet Weld, Partial Penetration )	FCAW	Flat, Horizontal, Vertical Upward

## 第 2 章

# 二相ステンレス クラッド鋼板 接合界面の強度・信頼性

## 第 2 章 目 次

2.1 はじめに .....	19
2.2 供試鋼板 .....	19
2.3 接合界面の破壊靱性 .....	19
2.3.1 供試試験片および溶接条件 .....	20
2.3.2 接合界面の破壊靱性試験結果および考察 .....	20
2.4 接合界面に沿っての疲労亀裂伝播特性 .....	22
2.4.1 供試試験片および溶接条件 .....	23
2.4.2 接合界面に沿っての疲労亀裂伝播試験結果 および考察 .....	23
2.5 まとめ .....	24
参考文献 .....	26
図 表 .....	28

## 2.1 はじめに

従来、ステンレスクラッド鋼板は、我が国でのみ製造され、しかも、ケミカルタンカー用としては、オーステナイト系ステンレスクラッド鋼板（合せ材：SUS316L鋼板，母材：軟鋼板）が主であり，実績も多い<sup>2.1)</sup>。

フェライト/オーステナイト二相系ステンレス(SUS329J3L)鋼板のケミカルタンカーカーゴタンク構造への適用が，近年，ヨーロッパで始まった。Niなど希少資源節約や，Niの国際価格変動に対する競争力アップなどから，SUS329J3L鋼板のケミカルタンカーへの適用が進んできた<sup>2.2)~2.5)</sup>。

SUS329J3L鋼板をケミカルタンカーカーゴタンク構造に適用するに当り，SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板とを組み合わせ使用すれば，合理的な設計による，世界初の新しいタイプのケミカルタンカーの建造が可能になる。

2016年に新しく製造出来るようになったSUS329J3Lクラッド鋼板を，ケミカルタンカーに実用する上での最重要課題は，接合界面の強度・信頼性を把握・確認・評価することであるといえる。

本章では，SUS329J3Lクラッド鋼板接合界面の破壊靱性の把握・検討・評価を行い，また，同接合界面に沿っての室温・大気中疲労亀裂伝播特性の把握・検討・評価を行って，ケミカルタンカーカーゴタンク構造に適用した場合，十分な強度・信頼性を有していることについて述べる。

## 2.2 供試鋼板

SUS329J3Lクラッド鋼板接合界面の破壊靱性，ならびに，同接合界面に沿っての疲労亀裂伝播特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 2.2.1に，機械的性質をTable 2.2.2に示す。

なお，SUS329J3Lクラッド鋼板は，2016年にJFEスチール(株)で製造されたものである。

## 2.3 接合界面の破壊靱性

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た。



### 2.3.1 供試試験片および溶接条件

供試した十字溶接継手引張試験片の形状・寸法を、**Fig.2.3.1**に示す。また、CT型試験片の形状・寸法を、**Fig.2.3.2**に示す。

また、十字溶接継手引張試験片とCT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、それぞれ溶接したが、前者の溶接条件を**Table 2.3.1**および**Table 2.3.2**に示す。

### 2.3.2 接合界面の破壊靱性試験結果および考察

十字溶接継手引張試験片による破壊靱性試験結果を**Table 2.3.3**に、また、CT型試験片による破壊靱性試験結果を**Table 2.3.4**に示す。なお、**Table 2.3.3**には、十字溶接継手引張試験片による $K_C$ 値計算式<sup>2.6), 2.7)</sup>を示した。

さらに、**Table 2.3.3**に示した破壊靱性試験結果の $K_C$ 値と温度との関係を示す。**Fig.2.3.3**に示す。同様に、**Table 2.3.4**に示した破壊靱性試験結果の $K_C$ 値と温度との関係を示す。**Fig.2.3.4**に示す。さらに、**Fig.2.3.3**と**Fig.2.3.4**とを同一グラフに示したものが、**Fig.2.3.5**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、

$$K_C = K_0 \exp(-T_0/T_K) \quad [\text{N/mm}^{3/2}] \quad \dots\dots\dots (2.3.1)$$

$K_0$  : 材料定数  $[\text{N/mm}^{3/2}]$

$T_0$  : 材料定数  $[\text{K}]$

が提案され<sup>2.8)~2.10)</sup>、その後、**Eq. (2.3.1)**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. (2.3.1)**による表示で整理した。

なお、**Table 2.3.3**に示した十字溶接継手引張試験片による破壊靱性試験後の破断面を、**Fig.2.3.6**~**Fig.2.3.8**に示す。

また、**Table 2.3.4**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.2.3.9**~**Fig.2.3.13**に示す。

**Fig.2.3.6**~**Fig.2.3.8**から明らかのように、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、**Fig.2.3.9** および **Fig.2.3.10** 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 2.3.4** 参照) になっている。

さらに、**Fig.2.3.11**～**Fig.2.3.13** 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 2.3.4** に示した試験片 FTI-1 および FTI-2 の  $K_{IC}$  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.2.3.4** 中 および **Fig.2.3.5** 中に“\* : INVALID”と記載した。

数年前に実施された、SUS329J3L 鋼板 (板厚 9.4 mm) 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 100 mm の中央切欠付引張試験結果<sup>2.11)</sup>と、先に示した **Fig.2.3.5** (\* : Invalid のデータを除く) の試験結果を同一グラフに示したものが **Fig.2.3.14** である。

**Fig.2.3.14** で明らかなように、 $-100^{\circ}\text{C}$ ～ $-170^{\circ}\text{C}$  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破壊靱性値は、SUS329J3L 鋼板 TIGW および FCAW 突合せ溶接金属の破壊靱性値と、 $-100^{\circ}\text{C}$ ～ $-170^{\circ}\text{C}$  程度で略同じであるということである。

新しく製造された 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。

また、**Table 2.3.3** に示した十字溶接継手引張試験片による試験結果 3 点の  $K_{IC}$  値の平均値は、 $1.57 \times 10^3 \text{ N/mm}^{3/2}$  である。同様に **Table 2.3.4** に示した CT 型試験片による試験結果 3 点 (Invalid の 2 点を除く) の  $K_{IC}$  値の平均値は、 $2.67 \times 10^3 \text{ N/mm}^{3/2}$  である。これらの値は、**Fig.2.3.14** 中に記載した通りである。

そこで、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.2.3.15** 参照) を対象に検討する。

Fig.2.3.15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、疲労現象などにより成長すると想定した場合、接合界面に沿っての欠陥の寸法が、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うと考えられるからである。

そこで、Fig.2.3.16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） $\sigma$ をEq.(2.3.2)によって求めた。

$$\left. \begin{array}{l} K_C = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \\ \sigma = K_C / \sqrt{\pi \cdot a} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (2.3.2)$$

$\sigma$ は、約190N/mm<sup>2</sup>および約330N/mm<sup>2</sup>となる。

換算すれば、接合界面の垂直方向応力が、最大約330N/mm<sup>2</sup>以下、最小約190N/mm<sup>2</sup>以下、平均約260N/mm<sup>2</sup>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、カーゴタンク構造として充分成り立つものと考えられる。

## 2.4 接合界面に沿っての疲労亀裂伝播特性

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）によって把握した。

#### 2.4.1 供試試験片および溶接条件

供試したCT型試験片とCCT型試験片の形状・寸法を、**Fig.2.4.1**および**Fig.2.4.2**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 2.3.2**に示した通りである。

#### 2.4.2 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 2.4.1**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 2.4.2**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、**Fig.2.4.3**～**Fig.2.4.6**に示す。

さらに、**Table 2.4.1**、**Fig.2.4.3**および**Fig.2.4.4**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 $\Delta K$ との関係を、**Fig.2.4.7**および**Fig.2.4.8**に示す。さらに、**Fig.2.4.7**と**Fig.2.4.8**とを同一グラフに示したものが、**Fig.2.4.9**である。

また、**Table 2.4.2**、**Fig.2.4.5**および**Fig.2.4.6**に示した、CCT型試験片による $da/dN$ と $\Delta K$ との関係を、**Fig.2.4.10**および**Fig.2.4.11**に示す。さらに、**Fig.2.4.10**と**Fig.2.4.11**とを同一グラフに示したものが、**Fig.2.4.12**である。

なお、**Table 2.4.1**、**Fig.2.4.3**、**Fig.2.4.4**、**Fig.2.4.7**～**Fig.2.4.9**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.2.4.13**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 2.4.2**、**Fig.2.4.5**、**Fig.2.4.6**、**Fig.2.4.10**～**Fig.2.4.12**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.2.4.14**に示す。**Fig.2.4.14**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、SM570の母材とWEL-TEN780E

の母材(**Table 2.4.3** 参照)のCT型試験片による疲労亀裂伝播試験結果<sup>2.12)</sup>と、先に示した**Fig.2.4.9**とを同一グラフに示したものが**Fig.2.4.15**である。

**Fig.2.4.15** 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 (SM570, WEL-TEN780E)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 (SM570, WEL-TEN780E)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と言える。

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(中央切欠付引張試験片)による疲労亀裂伝播試験結果<sup>2.13)</sup>と、先に示した**Fig.2.4.12**とを同一のグラフに示したものが、**Fig.2.4.16** である。

**Fig.2.4.16** から明らかなように、 $\Delta K$ 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、 $\Delta K$ 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、何等問題無いと言える。

## 2.5 まとめ

新しく製造された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の最重要課題である、接合界面の強度・信頼性、特に接合界面の破壊靱性と疲労亀裂伝播特性を把握・検討・評価した。得られた結論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、数年前に実施された、SUS329J3L鋼板 突合せ溶接(TIGWとFCAW)継手 溶接金属中央部

の破壊靱性値と比較・検討・評価した。

すなわち，SUS329J3Lクラッド鋼板 接合界面の破壊靱性は，SUS329J3L鋼板突合せ溶接継手溶接金属中央部の破壊靱性と略同じであり，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と言える。

- 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（SM570，WEL-TEN780E）や，SUS329J3L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（SM570，WEL-TEN780E）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と言える。

## 参 考 文 献

- 2.1) 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.
- 2.2) 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(Ⅱ号)), pp.21-30.
- 2.3) 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.
- 2.4) 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(Ⅱ号)), pp.21-27.
- 2.5) Kazumasa Sakaida, Hironori Ogata, 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 2), Class NK TECHNICAL BULLETIN, Vol.34(2016.12.), pp.87-93.
- 2.6) 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.

- 2.7) Murakami Y., Aoki S., Hasebe N., Itoh Y., Miyata H., Miyazaki N., Terada H., Tohgo K., Toya M., Yuuki R.: STRESS INTENSITY FACTORS HANDBOOK, Committee on Fracture Mechanics, The Society of Materials Science, Japan, Pergamon Press(1987.).
- 2.8) 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.).
- 2.9) 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.).
- 2.10) 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.).
- 2.11) 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 新技術創成研究所 所報, 第5号(2010.3.), pp.77-84.
- 2.12) 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.
- 2.13) 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.



**Table 2.2.1 Chemical composition of test steel plates**

(wt %)

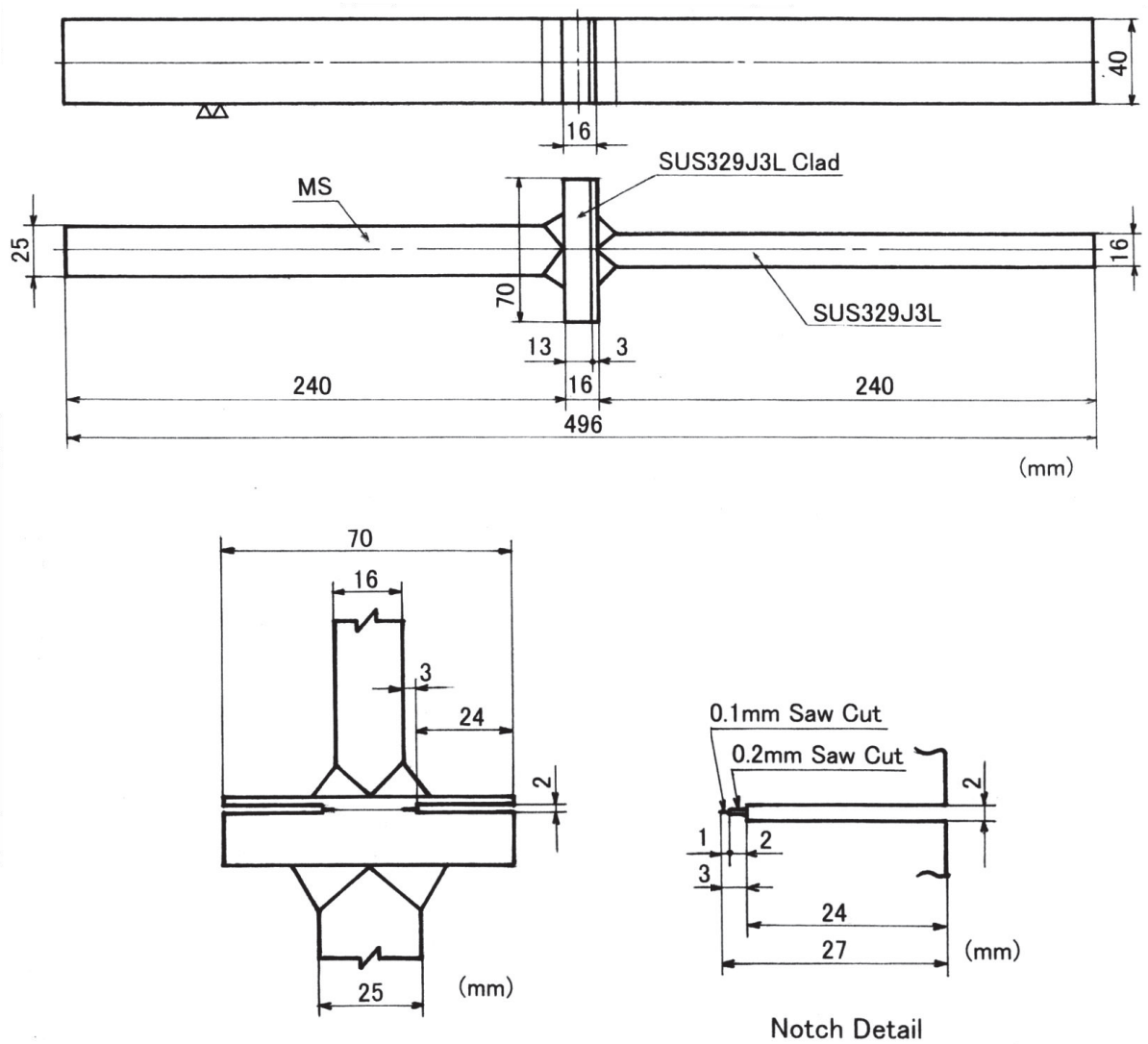
Test Steel Plate	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
SUS329J3L (t: 16)	0.013	0.55	1.81	0.026	0.000	22.55	5.75	3.10	0.17
SUS329J3L- Clad* (t: 3+13)	0.013	0.31	0.97	0.025	0.002	22.55	5.42	3.10	0.17

\* SUS329J3L Steel Plate (3mm)

**Table 2.2.2 Mechanical properties of test steel plates**

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

\* Full-Thickness Tensile Test (16mm)



**Fig.2.3.1 Shape and size of cruciform welded joint specimen for tensile fracture toughness test**

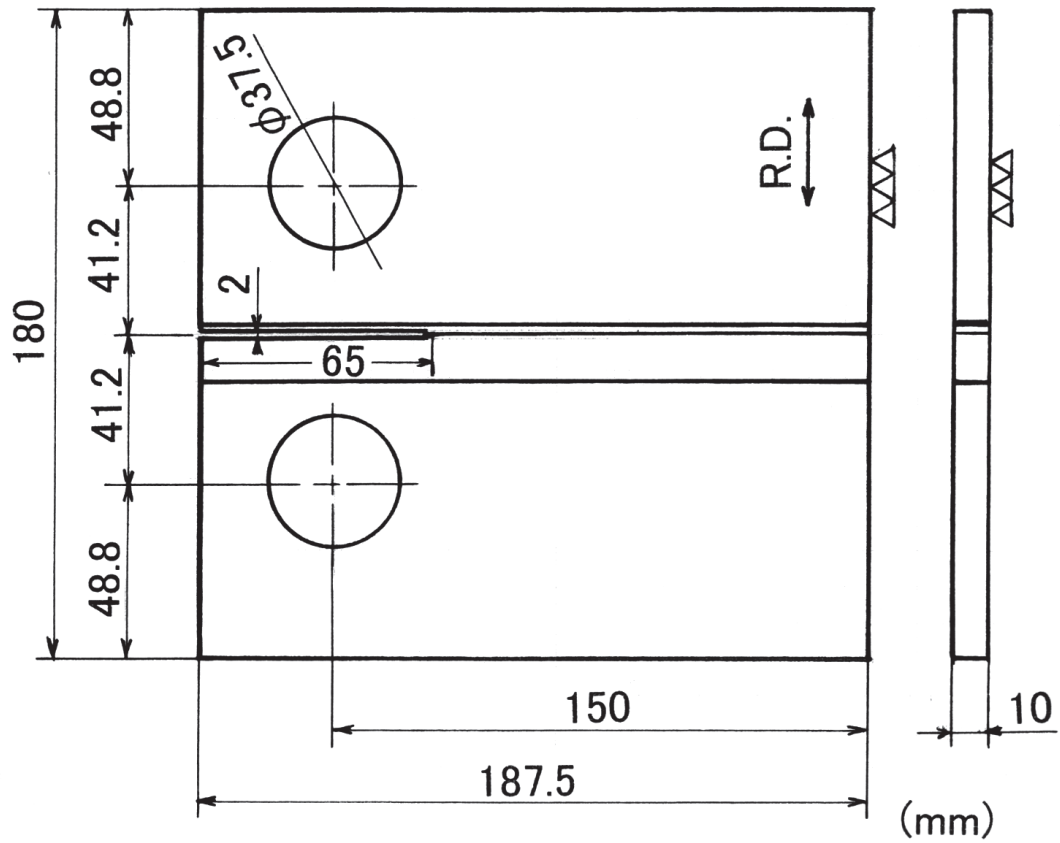


Fig.2.3.2 Shape and size of CT type specimen for fracture toughness test

**Table 2.3.1 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 2.3.2 Welding parameters of CT type specimen (FCAW)**

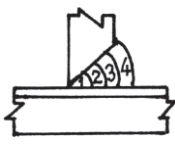

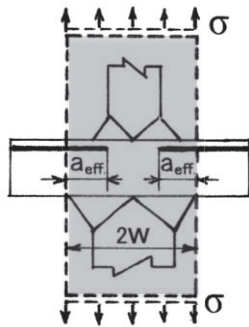
Test Steel Plate	Build-up Sequence	Welding Current (A)	Arc Voltage (V)	Travel Speed (cm/min)	Heat Input (kJ/cm)	Welding Consumables (JIS)
SUS329J3L-Clad Steel Plate + SUS329J3L Steel Plate		200 ~240	32 ~36	27.9 ~31.5	12.2 ~18.6	TS2209 -FCO
		240	36	30.6 ~31.9	16.3 ~16.9	TS2209 -FCO

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

**Table 2.3.3 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 <sup>3/2</sup> )
			(°C)	(K)	1/Tk (K <sup>-1</sup> )		
TCI-1	-	-	-	-	-	-	-
TCI-2	40.9	13.1	-106	167	$5.99 \times 10^{-3}$	275	$1.37 \times 10^3$
TCI-3	-	-	-	-	-	-	-
TCI-4	42.3	14.2	-119	154	$6.49 \times 10^{-3}$	338	$1.75 \times 10^3$
TCI-5	41.9	14.5	-166	107	$9.35 \times 10^{-3}$	293	$1.58 \times 10^3$



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

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

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

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

**Table 2.3.4 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 <sup>3/2</sup> )
			(°C)	(K)	1/Tk (K <sup>-1</sup> )		
FTI-1	39.2	66.7	-116	157	$6.37 \times 10^{-3}$	132	$8.80 \times 10^3$
FTI-2	40.1	67.6	-144	129	$7.75 \times 10^{-3}$	115	$7.77 \times 10^3$
FTI-3	23.2	50.7	-105	168	$5.95 \times 10^{-3}$	48.2	$2.46 \times 10^3$
FTI-4	25.3	52.8	-159	114	$8.77 \times 10^{-3}$	49.1	$2.61 \times 10^3$
FTI-5	4.4	31.9	-173	100	$10.00 \times 10^{-3}$	69.5	$2.95 \times 10^3$

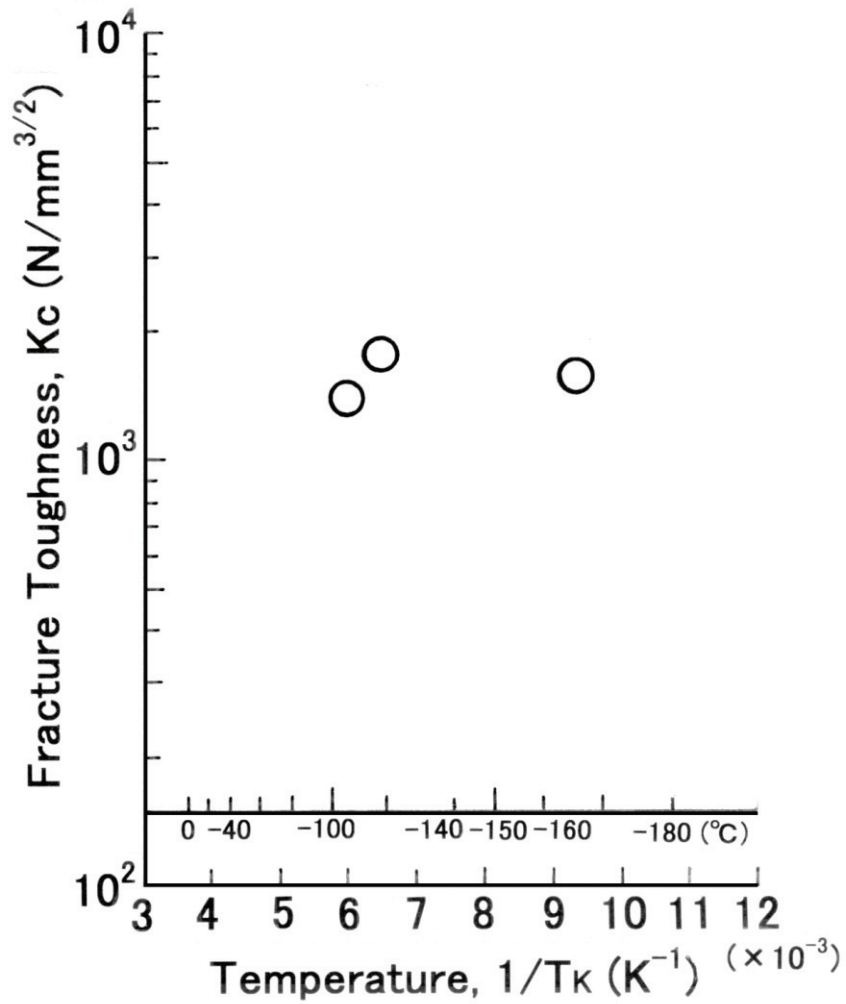


Fig.2.3.3 Relation between Kc and temperature  
[Interface of SUS329J3L-clad steel plate]

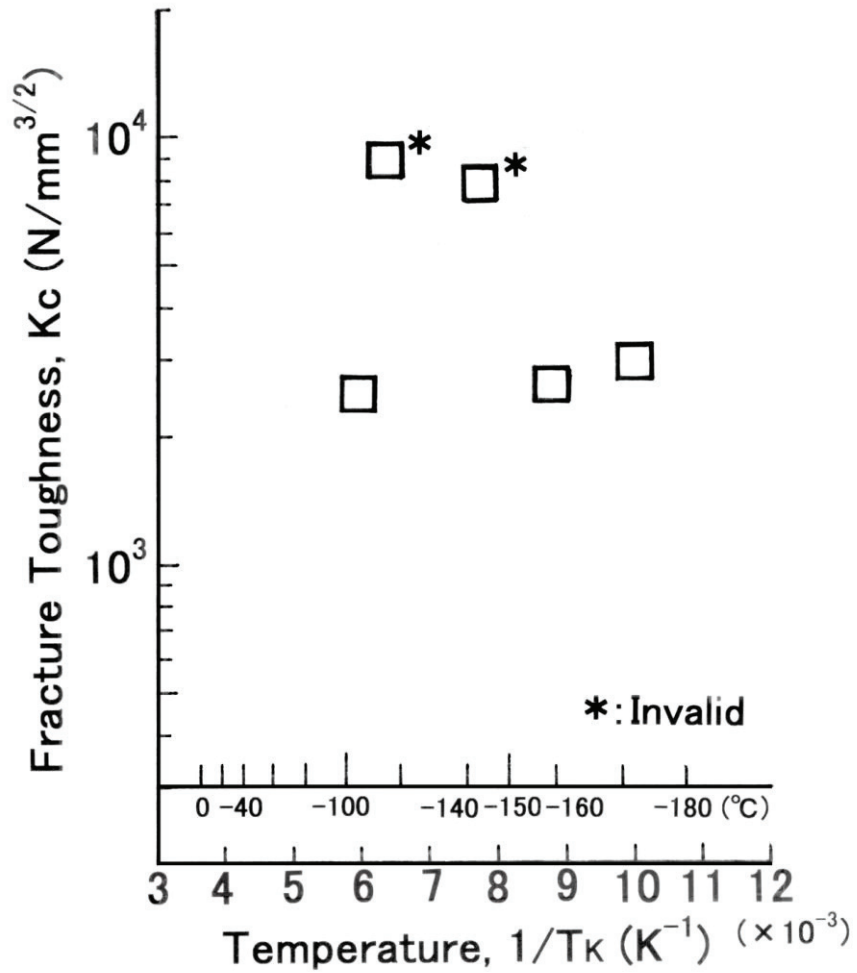


Fig.2.3.4 Relation between  $K_c$  and temperature  
[Interface of SUS329J3L-clad steel plate]

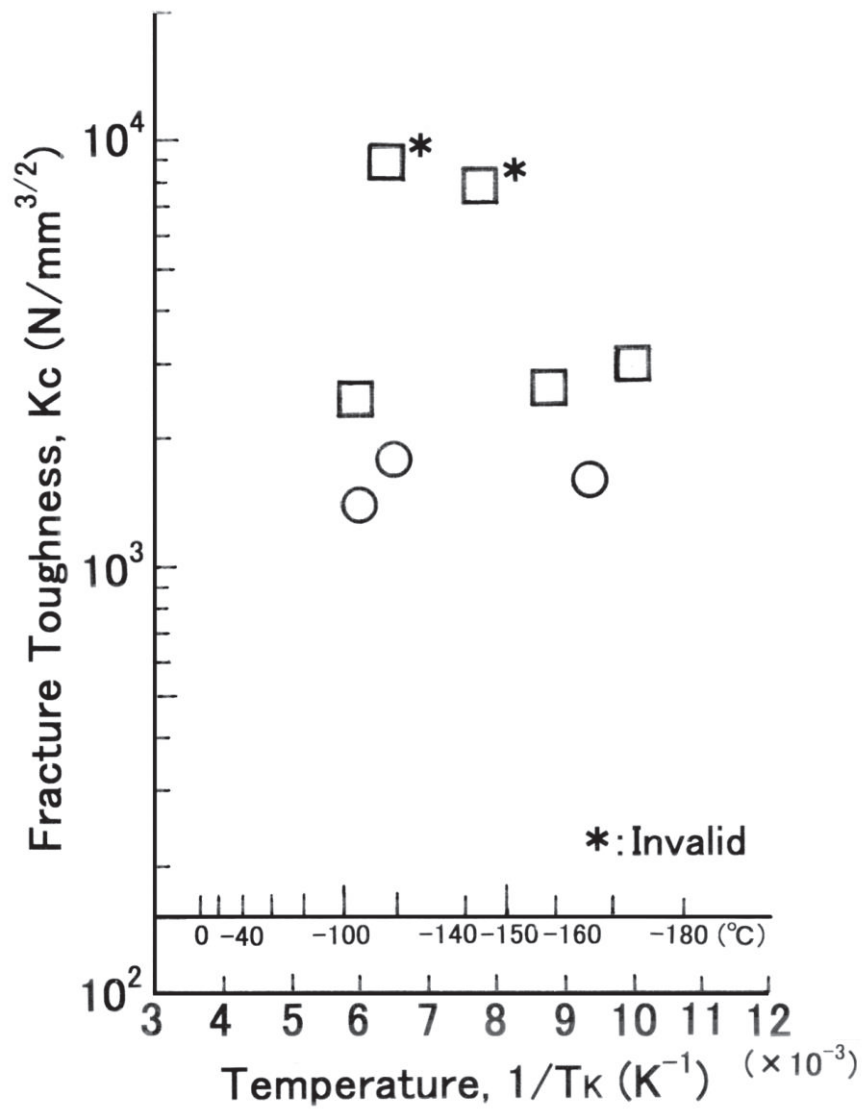
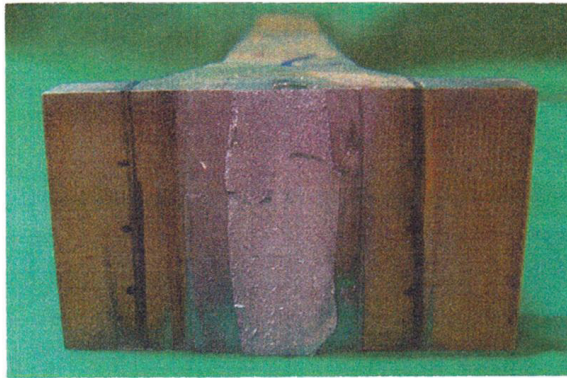
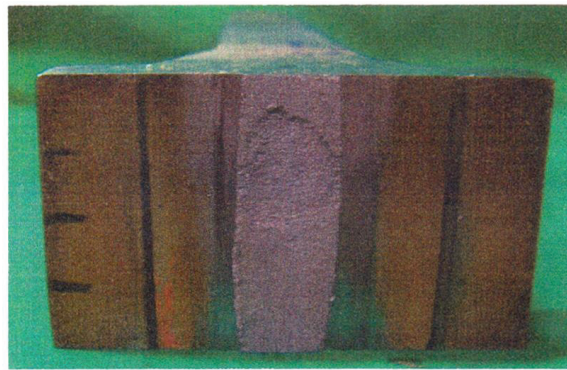


Fig.2.3.5 Relation between  $K_c$  and temperature  
[Interface of SUS329J3L-clad steel plate]

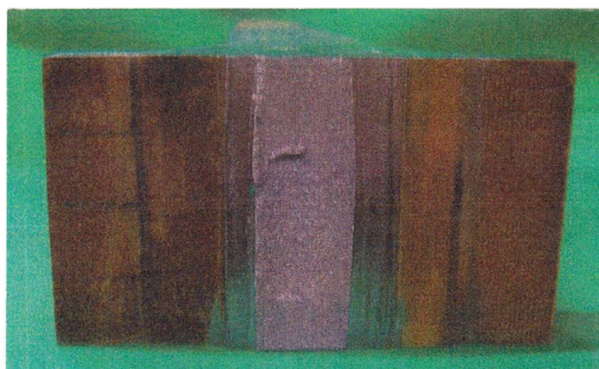




**Fig.2.3.6** Fracture surface after tensile fracture toughness test (TCI-2,  $-106^{\circ}\text{C}$ )



**Fig.2.3.7** Fracture surface after tensile fracture toughness test (TCI-4,  $-119^{\circ}\text{C}$ )



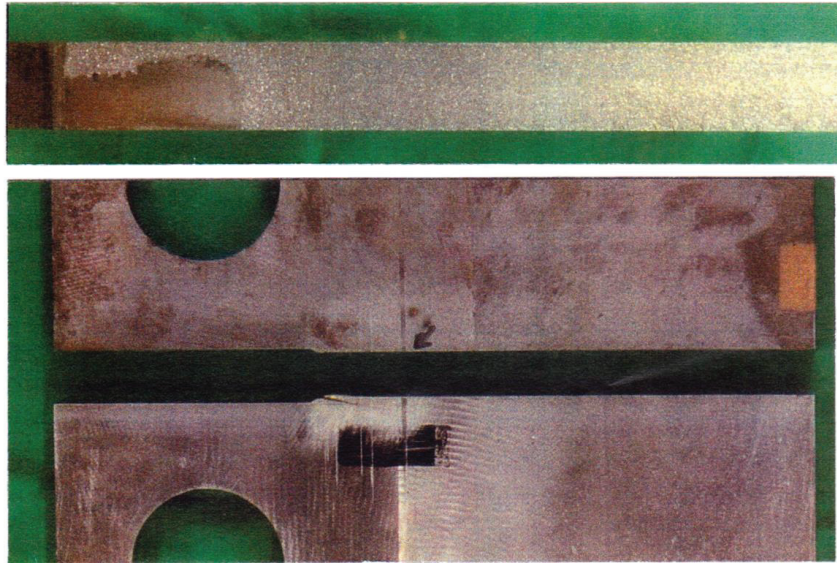
**Fig.2.3.8** Fracture surface after tensile fracture toughness test (TCI-5,  $-166^{\circ}\text{C}$ )



**Fig.2.3.9** Fracture surface and pass after fracture toughness test (FTI-1,  $-116^{\circ}\text{C}$ )



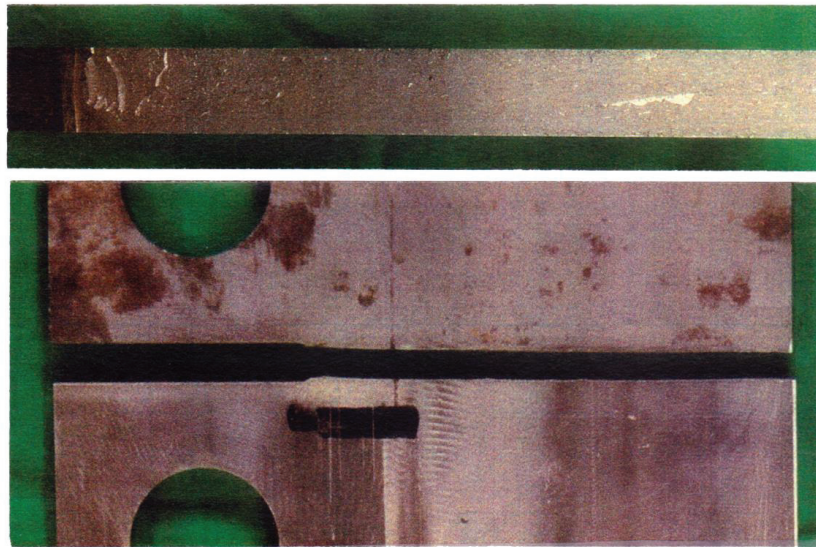
**Fig.2.3.10** Fracture surface and pass after fracture toughness test (FTI-2,  $-144^{\circ}\text{C}$ )



**Fig.2.3.11** Fracture surface and pass after fracture toughness test (FTI-3,  $-105^{\circ}\text{C}$ )



**Fig.2.3.12** Fracture surface and pass after fracture toughness test (FTI-4,  $-159^{\circ}\text{C}$ )



**Fig.2.3.13** Fracture surface and pass after fracture toughness test (FTI-5,  $-173^{\circ}\text{C}$ )

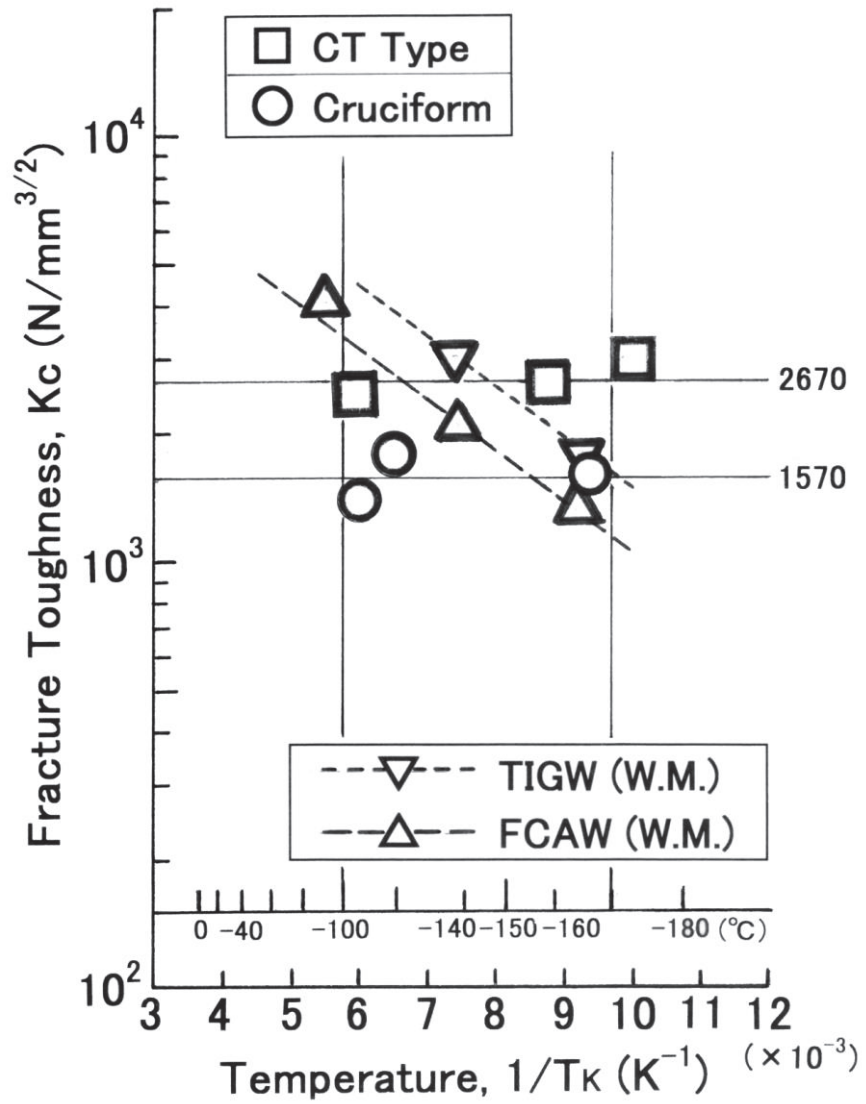


Fig.2.3.14 Relation between  $K_c$  and temperature  
[Interface of SUS329J3L-clad steel plate]

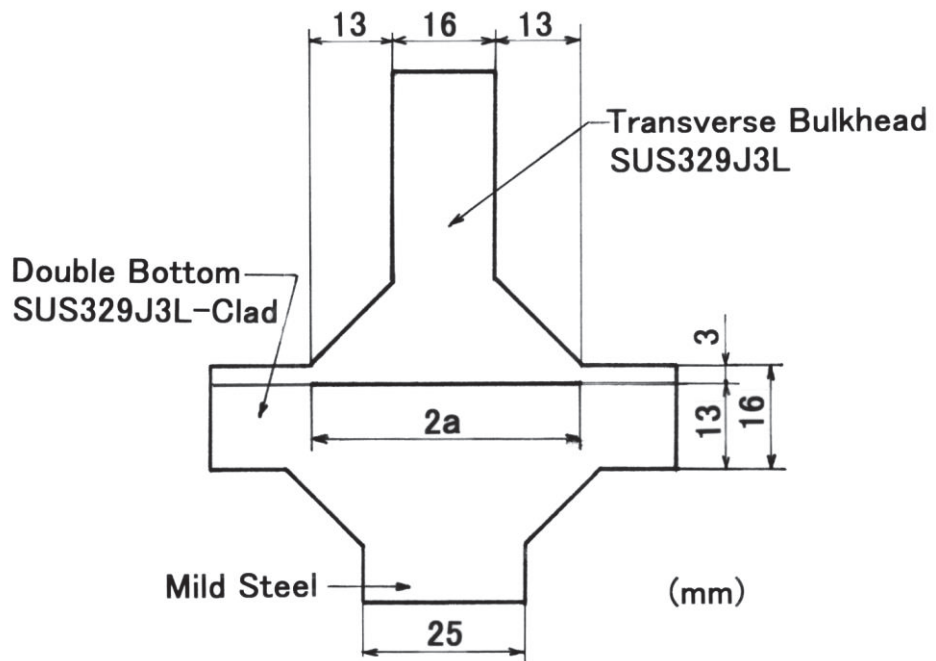


Fig.2.3.15 Cruciform welded joint between transverse bulkhead and double bottom

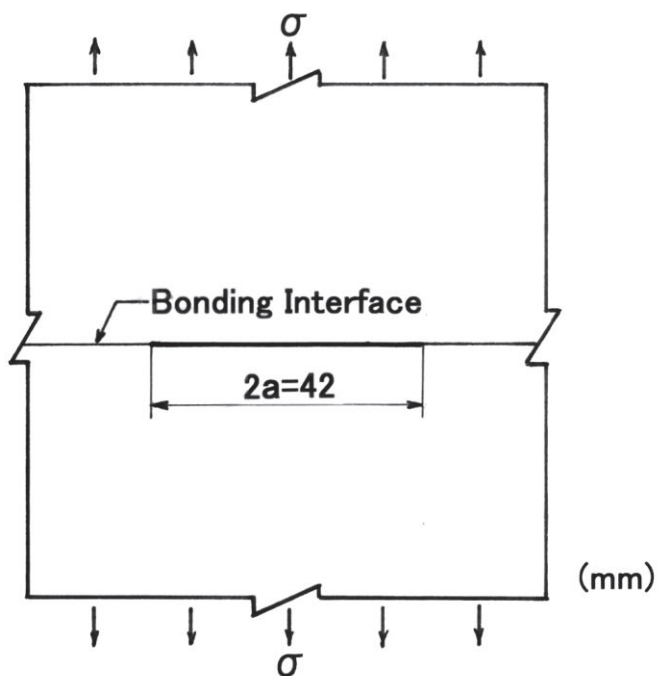
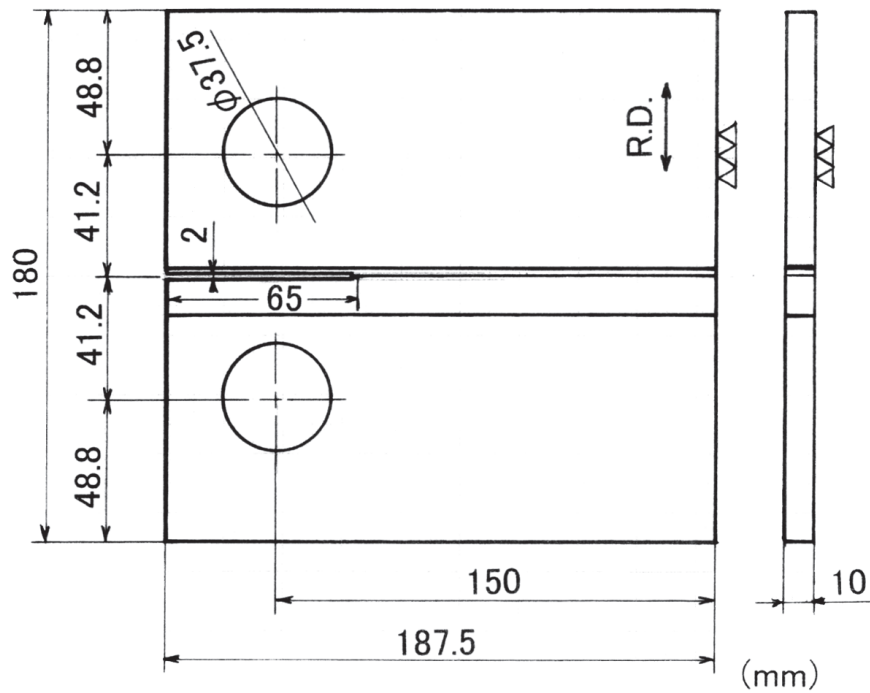
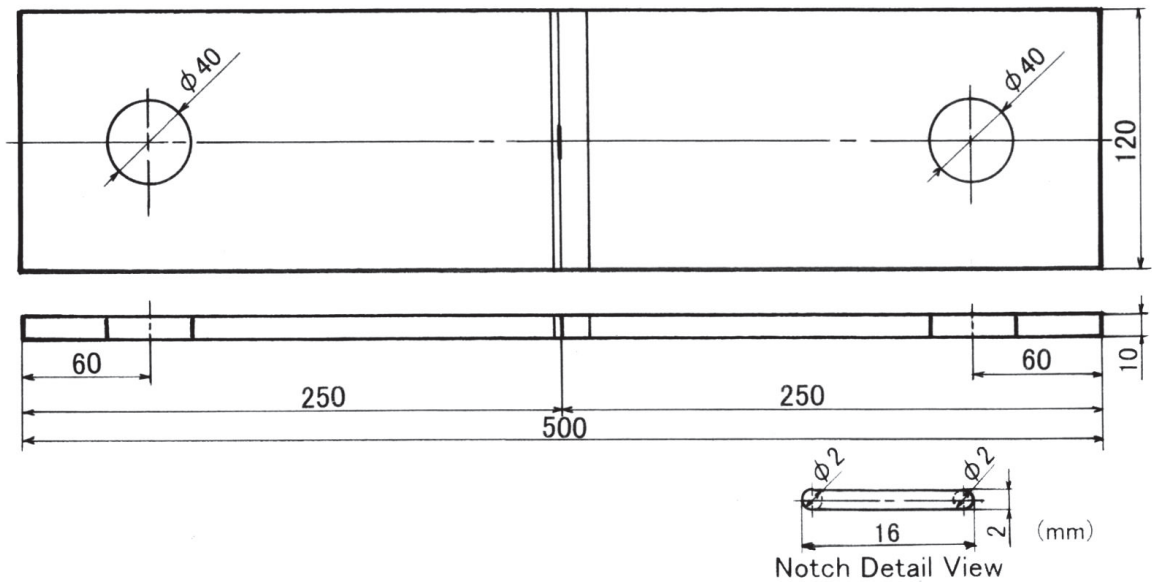


Fig.2.3.16 Center notched infinitely plate



**Fig.2.4.1** Shape and size of CT type specimen for fatigue crack propagation test



**Fig.2.4.2** Shape and size of CCT type specimen for fatigue crack propagation test

**Table 2.4.1 Results of CT type fatigue crack propagation tests**

Specimen Number	Width W (mm)	Thick. t (mm)	Cross- Section Area A (mm <sup>2</sup> )	Term	Test Load		
					Max. P <sub>max</sub> (kN)	Min. P <sub>min</sub> (kN)	Range P <sub>R</sub> (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			

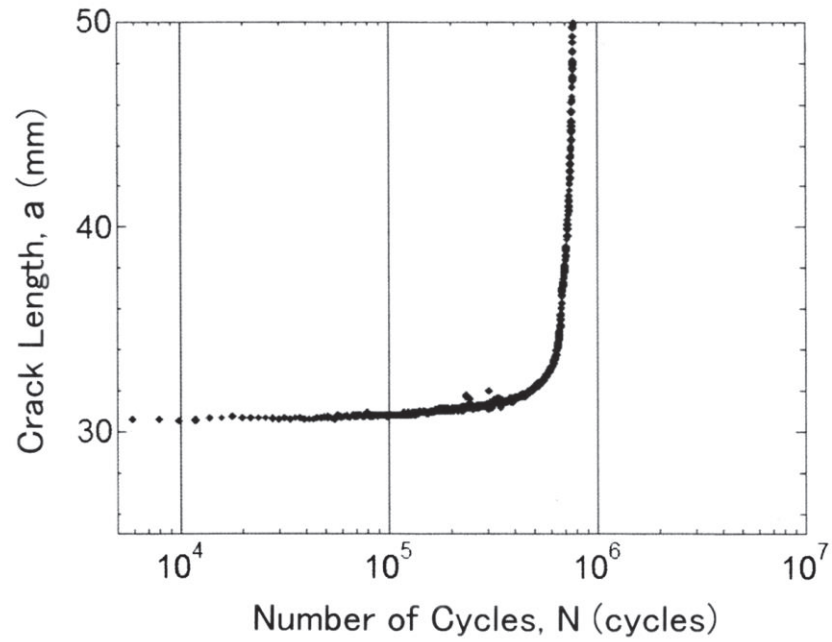
Test Stress			Freq. F (Hz)	Number of Cycles N (ΣN) (cycles)	Crack Length a (mm)
Max. σ <sub>max</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Min. σ <sub>min</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Range σ <sub>R</sub> (N/mm <sup>2</sup> )			
23.86	2.39	21.47	10	685,606	36.23
				68,203 (753,809)	42.65
				42,912 (796,721)	55.37
				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



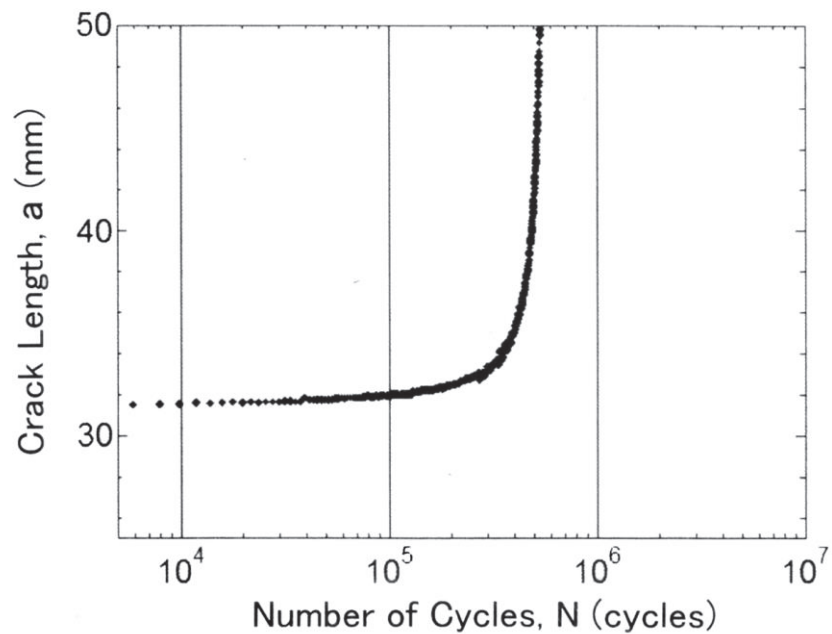
**Table 2.4.2 Results of CCT type fatigue crack propagation tests**

Specimen Number	Width W (mm)	Thick. t (mm)	Cross- Section Area A (mm <sup>2</sup> )	Test Load		
				Max. P <sub>max</sub> (kN)	Min. P <sub>min</sub> (kN)	Range P <sub>R</sub> (kN)
PCI-1	121	8.0	968	110	11.0	99.0
PCI-2	121	7.9	956	110	11.0	99.0

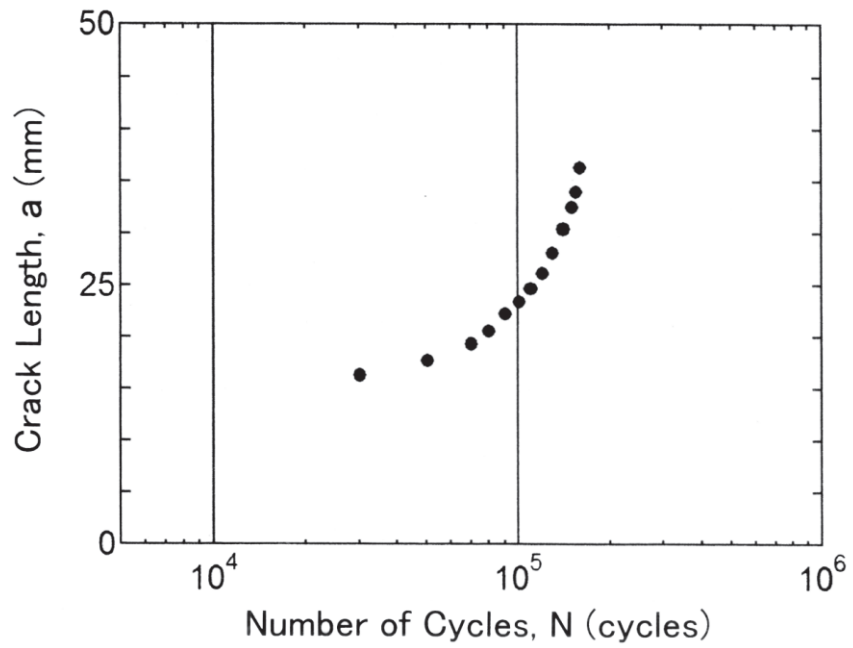
Test Stress			Freq. F (Hz)	Number of Cycles (cycles)	Average Half Crack Length a (mm)
Max. σ <sub>max</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Min. σ <sub>min</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Range σ <sub>R</sub> (N/mm <sup>2</sup> )			
114	11.4	103	10	160,960	36.3
115	11.5	104	10	280,670	37.9



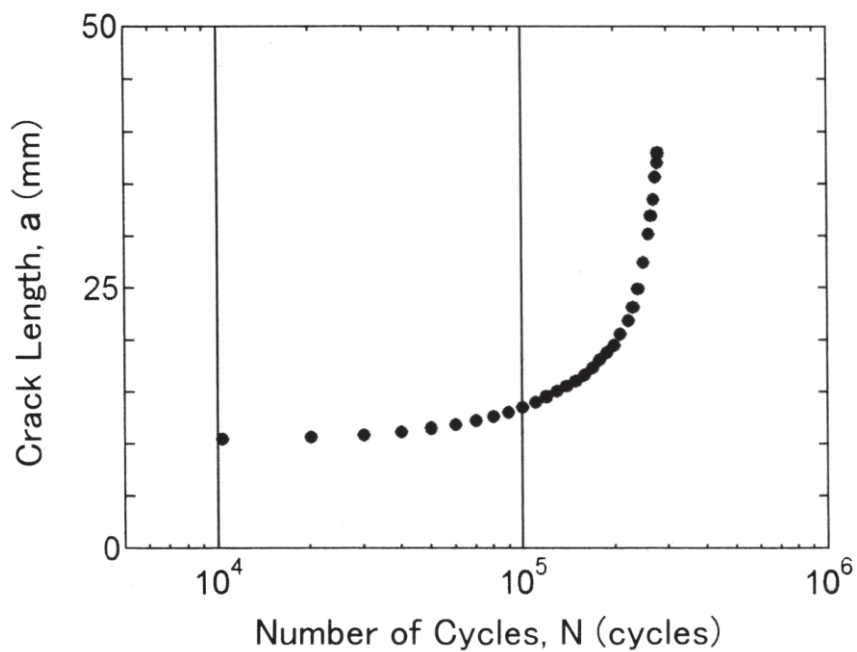
**Fig.2.4.3 Relation between  $a$  and  $N$  (CT type : FPI-1)  
[Interface of SUS329J3L-clad steel plate]**



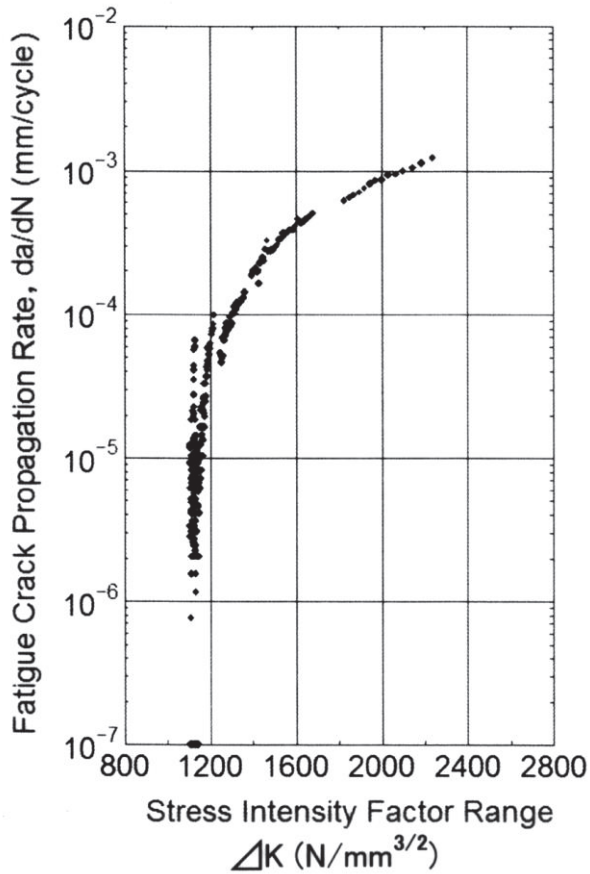
**Fig.2.4.4 Relation between  $a$  and  $N$  (CT type : FPI-2)  
[Interface of SUS329J3L-clad steel plate]**



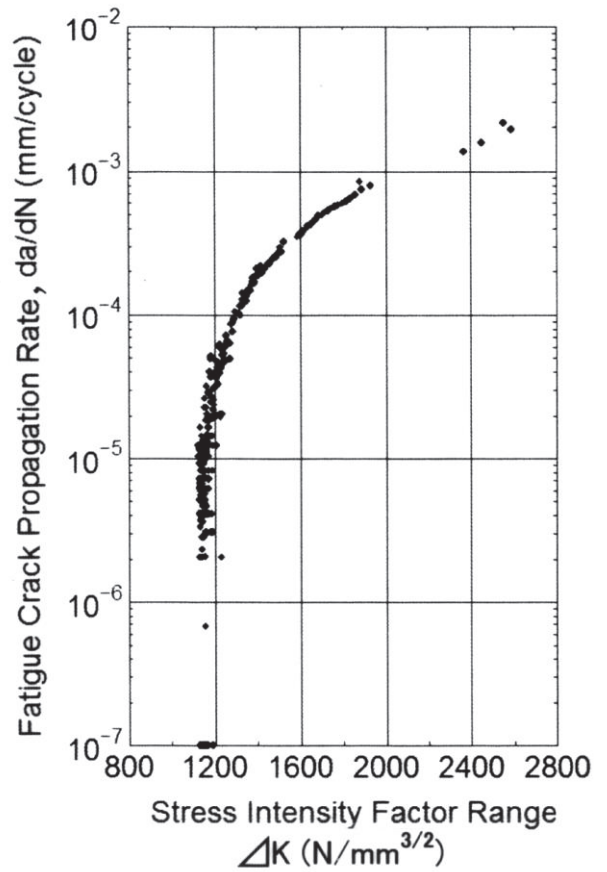
**Fig.2.4.5 Relation between  $a$  and  $N$  (CCT type : PCI-1)  
[Interface of SUS329J3L-clad steel plate]**



**Fig.2.4.6 Relation between  $a$  and  $N$  (CCT type : PCI-2)  
[Interface of SUS329J3L-clad steel plate]**



**Fig.2.4.7 Relation between  $da/dN$  and  $\Delta K$   
(CT type : FPI-1)  
(Interface of SUS329J3L  
-clad steel plate)**



**Fig.2.4.8 Relation between  $da/dN$  and  $\Delta K$   
(CT type : FPI-2)  
(Interface of SUS329J3L  
-clad steel plate)**

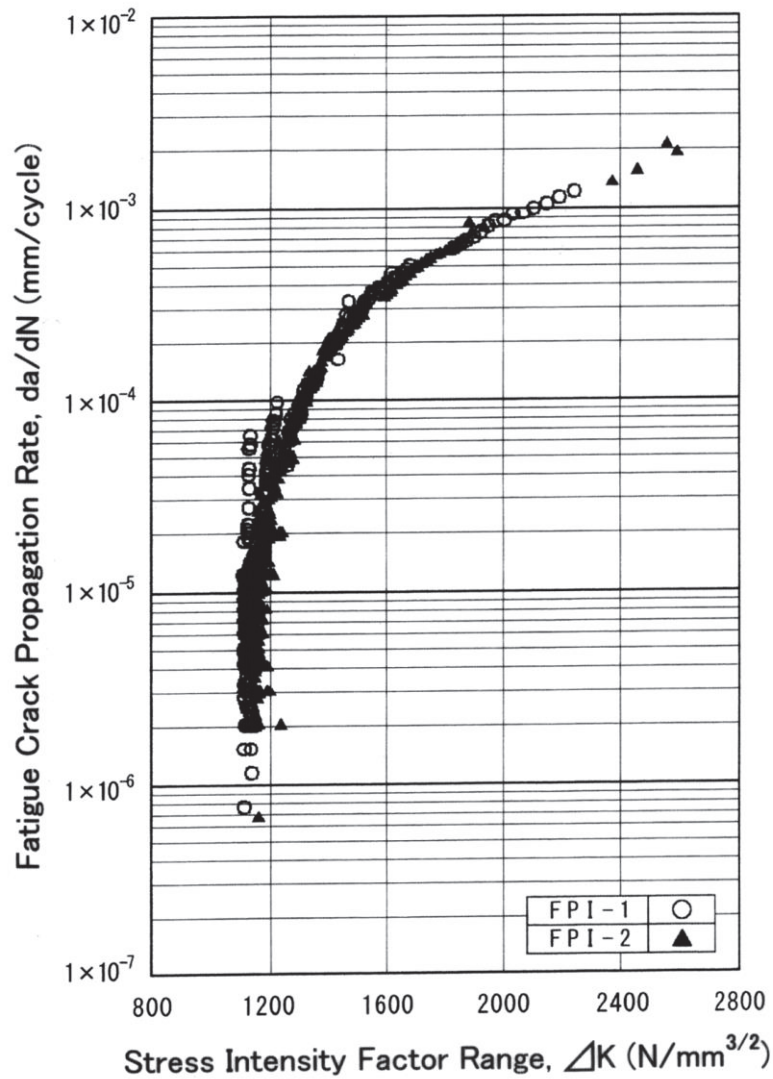
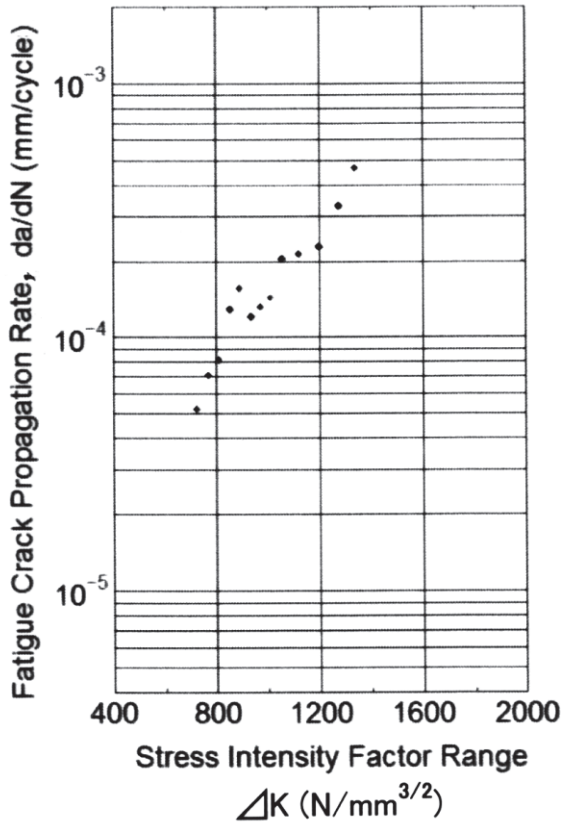
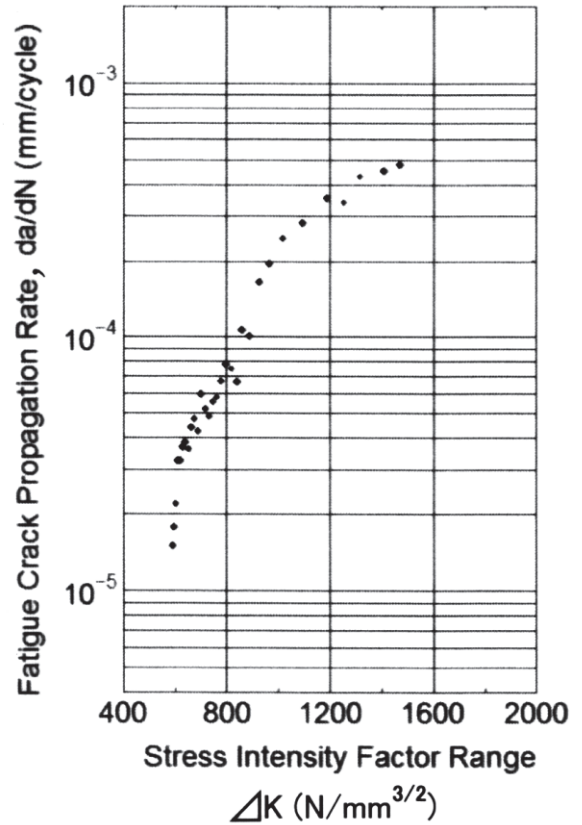


Fig.2.4.9 Relation between  $da/dN$  and  $\Delta K$   
 (CT type : FPI-1, FPI-2)  
 [Interface of SUS329J3L-clad steel plate]



**Fig.2.4.10** Relation between  $da/dN$  and  $\Delta K$   
 (CCT type : PCI-1)  
 (Interface of SUS329J3L  
 -clad steel plate)



**Fig.2.4.11** Relation between  $da/dN$  and  $\Delta K$   
 (CCT type : PCI-2)  
 (Interface of SUS329J3L  
 -clad steel plate)

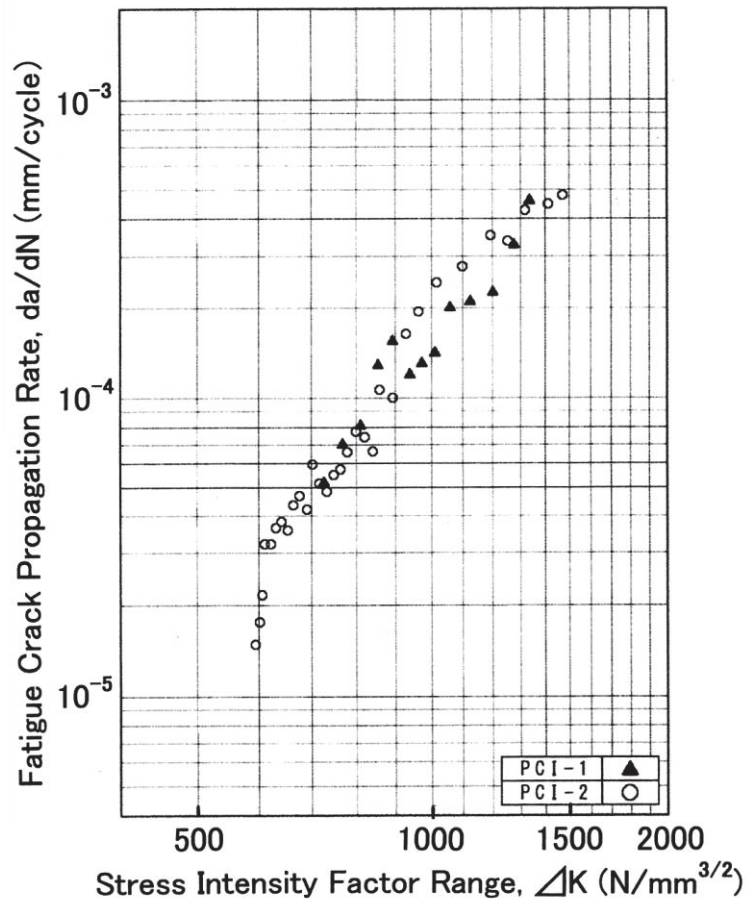
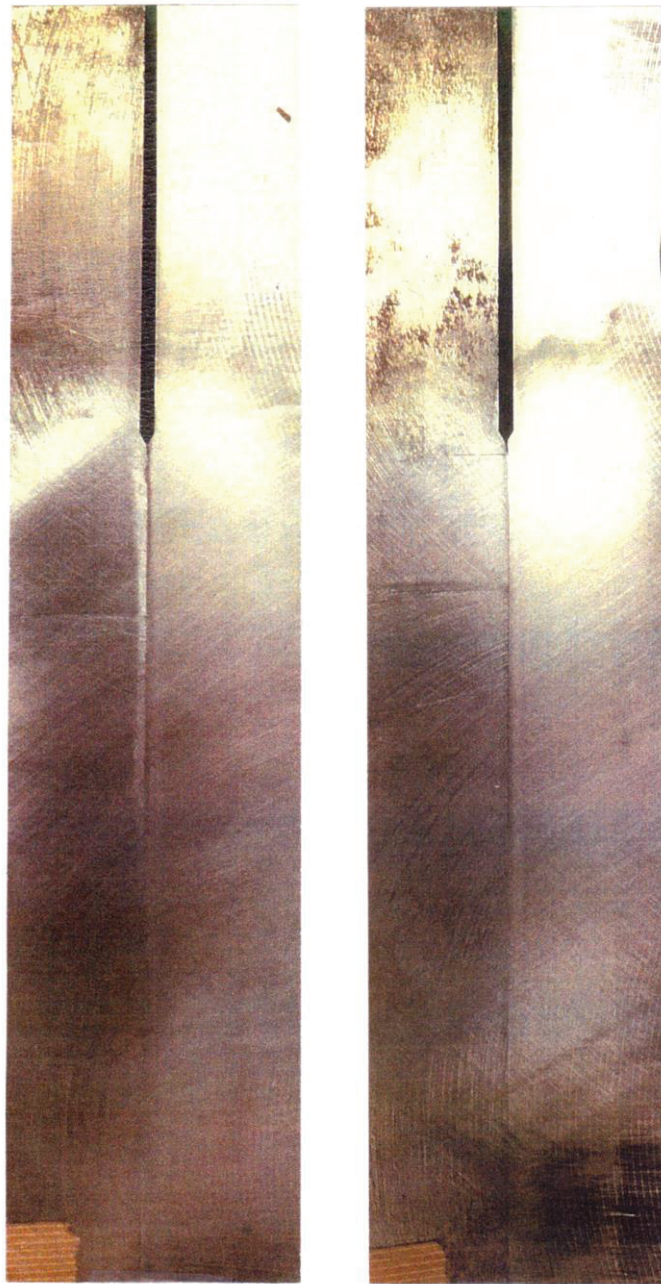


Fig.2.4.12 Relation between  $da/dN$  and  $\Delta K$   
 (CCT type : PCI-1, PCI-2)  
 [Interface of SUS329J3L-clad steel plate]

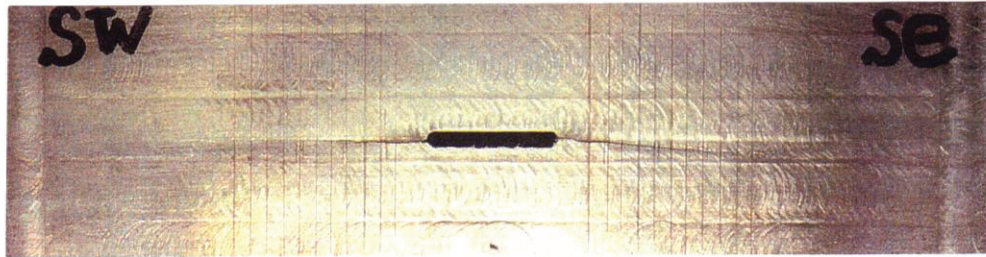


FPI-1

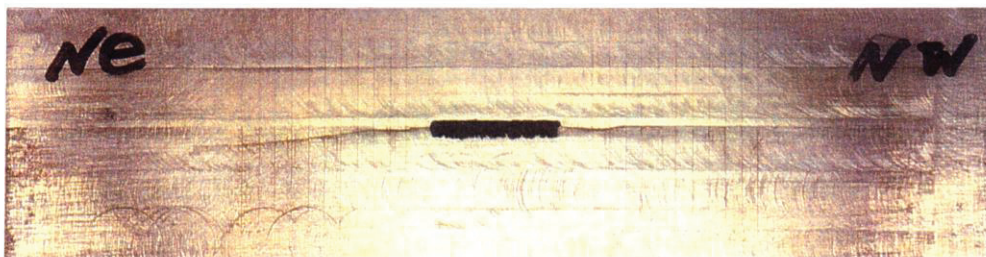
FPI-2

**Fig.2.4.13** Fatigue crack pass after fatigue crack propagation tests (CT type)  
[Interface of SUS329J3L-clad steel plate]

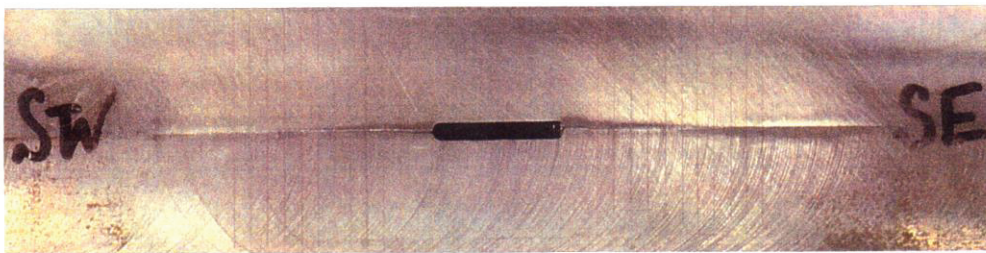




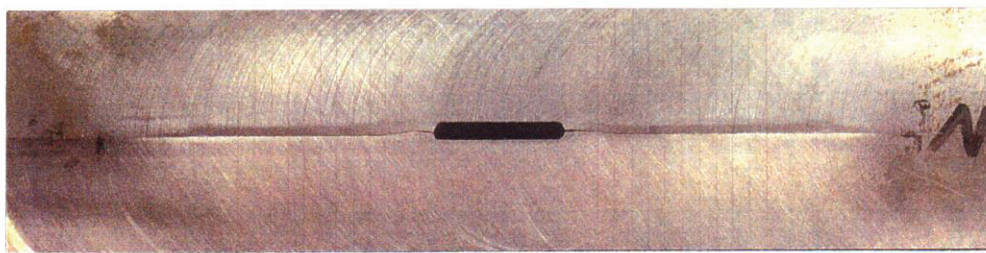
PCI-1 Surface



PCI-1 Back Surface



PCI-2 Surface



PCI-2 Back Surface

**Fig.2.4.14** Fatigue crack pass after fatigue crack propagation tests (CCT type)  
[Interface of SUS329J3L-clad steel plate]

**Table 2.4.3 Chemical composition and mechanical properties of steel plates for comparison**

Steel Plate	Chemical composition (wt %)				
	C	Si	Mn	P	S
SM570	0.17	0.18	1.25	0.015	0.004
WEL-TEN780E	0.16	0.25	1.54	0.012	0.002

Steel Plate	Yield Point (N/mm <sup>2</sup> )	Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Elong. (%)
SM570	587	682	39
WEL-TEN780E	758	839	22

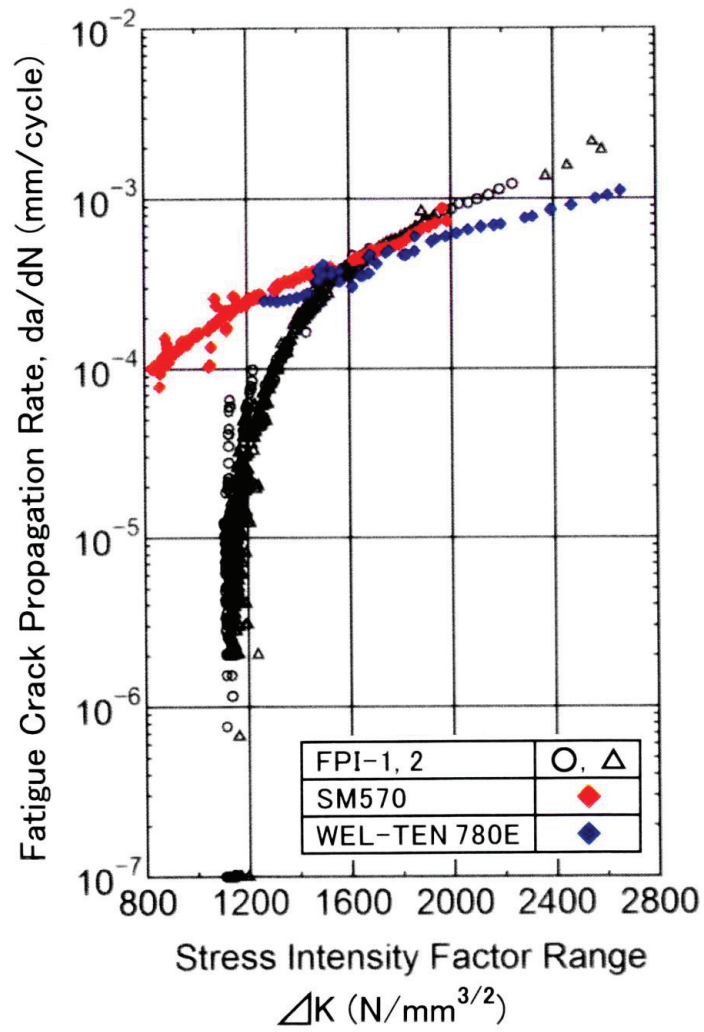


Fig.2.4.15 Relation between  $da/dN$  and  $\Delta K$  (CT type)

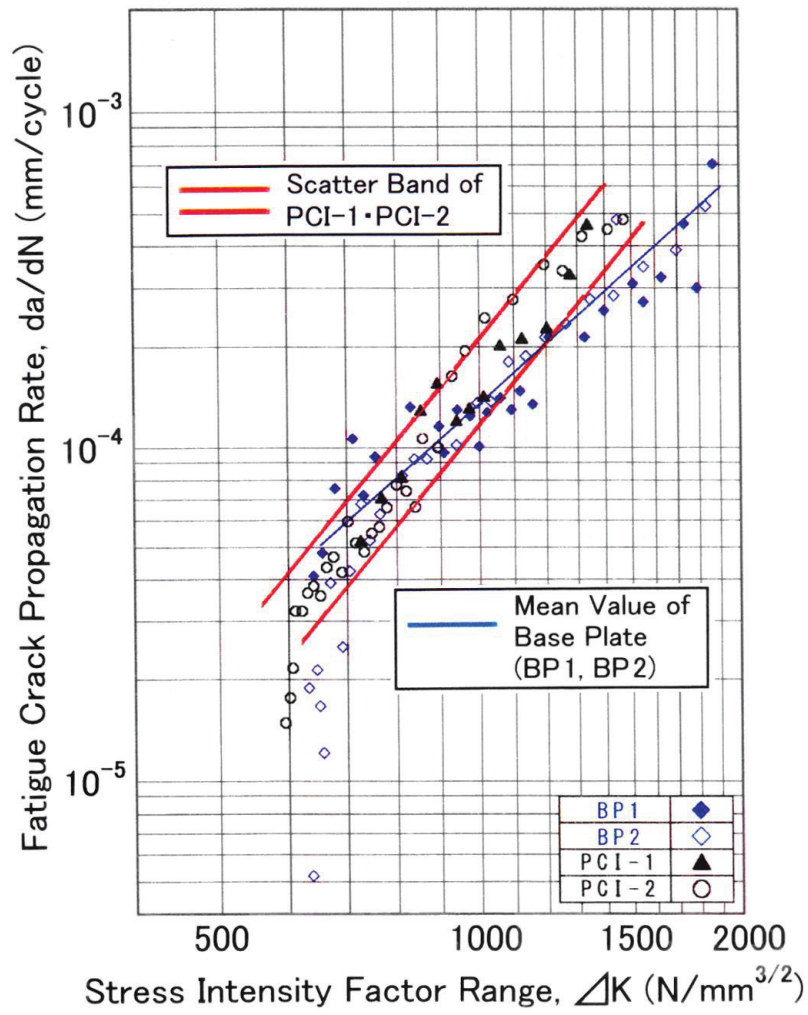


Fig.2.4.16 Relation between  $da/dN$  and  $\Delta K$  (CCT type)

## 第 3 章

# 二相ステンレス クラッド鋼板・ ソリッド鋼板の溶接性に関する 検討・評価

## 第 3 章 目 次

3.1 はじめに	59
3.2 供試鋼板	59
3.3 T継手初層高温割れ確認試験結果および考察	60
3.3.1 目的および試験内容	60
3.3.2 供試試験体および溶接条件	60
3.3.3 試験結果および考察	60
3.4 過剰溶接入熱の影響度確認試験結果および考察	61
3.4.1 目的および試験内容	61
3.4.2 供試溶接継手の溶接条件	62
3.4.3 継手引張試験結果および考察	62
3.4.4 継手V-ノッチシャルピー衝撃試験結果 および考察	62
3.4.5 マクロ組織観察・硬さ分布測定結果および考察	63
3.4.6 溶接金属の化学成分分析・フェライト量測定結果 および考察	63
3.5 SUS329J3L クラッド鋼板 過剰溶接入熱 突合せ溶接継手 の組織観察結果と継手引張試験結果および考察	63
3.5.1 目的および試験内容	63
3.5.2 供試突合せ溶接継手の溶接条件	64
3.5.3 継手断面のマクロ組織・ミクロ組織観察結果 および考察	64
3.5.4 継手引張試験結果および考察	65
3.6 完全溶け込み十字溶接継手引張試験結果および考察	65
3.6.1 目的および試験内容	65
3.6.2 供試試験体の溶接条件および引張試験片	66
3.6.3 溶接継手のマクロ組織観察・硬さ分布測定結果 および考察	66
3.6.4 十字溶接継手引張試験結果および考察	66

3.7 まとめ .....	66
参考文献 .....	68
図表 .....	69

### 3.1 はじめに

一般に、ケミカルタンカーには、Ni含有量が11～14%のオーステナイト系ステンレス(SUS316LN)鋼板が使用されている。また、オーステナイト系ステンレス(SUS316L)クラッド鋼板とSUS316LNソリッド鋼板とを使用したケミカルタンカー建造実績はかなり多く、当該鋼板溶接継手部の疲労強度、クラッド鋼板接合界面強度、さらに、耐食性に関する検討例などはかなり多い<sup>3.1)～3.6)</sup>。

一方、二相ステンレス(SUS329J3L)鋼板は、Ni含有量が5～6%程度であり、SUS329J3L鋼板をケミカルタンカーへ適用することは、希少資源節約効果大きい。

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鋼板をケミカルタンカーに適用すれば、船殻重量低減に貢献する。

本章では、SUS329J3L鋼板を適用したケミカルタンカー建造を実現するために、SUS329J3Lソリッド鋼板同士およびSUS329J3Lソリッド鋼板とSUS316Lクラッド鋼板、さらに、SUS329J3Lクラッド鋼板同士の溶接性に関して、特に現場施工上問題になる事項について、調査・確認した結果を報告する。

すなわち、完全溶け込みT継手初層高温割れ確認試験結果、過剰溶接入熱の影響度確認試験結果、および完全溶け込み十字溶接継手引張試験結果などについて報告し、現場施工上、SUS329J3L鋼板およびSUS329J3Lクラッド鋼板を適用したケミカルタンカーの建造が十分可能であることを確認した結果について述べる。

### 3.2 供試鋼板

供試したSUS329J3Lクラッド鋼板[板厚16mm:SUS329J3L鋼板(合せ材)3mm+軟鋼板(母材)13mm]、SUS316Lクラッド鋼板[板厚15mm:SUS316L鋼板(合せ材)3mm+軟鋼板(母材)12mm、および板厚16mm:SUS316L鋼板(合せ材)3mm+軟鋼板(母材)13mm]、ならびにSUS329J3L



ソリッド鋼板の化学成分を **Table 3.2.1** に示す。また、機械的性質を **Table 3.2.2** に示す。

### 3.3 T継手初層高温割れ確認試験結果および考察

#### 3.3.1 目的および試験内容

SUS329J3Lソリッド鋼板とSUS316Lクラッド鋼板との完全溶け込みT継手の、初層高温割れ確認試験を実施した。

完全溶け込みT継手初層の溶接においては、SUS329J3L鋼板の凝固モードは、 $\alpha$ 単相で凝固が完了する $\alpha$ 単相凝固モード（Fモード、Cr当量/Ni当量 $\geq 1.95$ ）である。

Fモードであっても割れが発生する可能性はあるが、それには開先角度が関与すると言われている。

そこで、開先角度を $30^\circ \cdot 40^\circ \cdot 50^\circ$ として、溶接入熱量を $12\text{kJ/cm}$ として、初層溶接金属の断面マクロ組織から、断面割れの評価を行った。

#### 3.3.2 供試試験体および溶接条件

供試した試験体は、**Fig.3.3.1**に示すような、SUS329J3Lソリッド鋼板（**Table 3.2.1** および **Table 3.2.2** に記したSUS329J3L $\text{\textcircled{C}}$ ）と、SUS316Lクラッド鋼板（**Table 3.2.1** および **Table 3.2.2** に記したSUS316L-Clad $\text{\textcircled{A}}$ ）との初層ビードだけを溶接した、完全溶け込みT継手である。

完全溶け込みT継手溶接条件を **Table 3.3.1** に、開先形状を **Fig.3.3.2** に示す。

#### 3.3.3 試験結果および考察

初層高温割れの評価・確認は、供試体の5断面で観察し、“有害と認められる欠陥がないこと”を評価基準とした。さらに、溶接金属の化学成分分析を行った。化学成分分析結果を、**Table 3.3.2** に示す。

溶接は、溶接材料として、フラックス入りワイヤである GFW329J3L ( $1.2\text{mm}\Phi$ )を用いて、溶接入熱  $12\text{kJ/cm}$  で実施した。溶接金属の化学

成分は、開先角度によって母材の希釈率が若干変わるためか、元素によっては多少変化しているものの、いずれの場合も22Cr-9Ni-3Mo-N系の標準成分になっていることが確認された。

開先角度30°・40°・50°のT継手各々の初層溶接金属の5断面からマクロ試験片を採取し、高温割れ発生の有無を観察した。試験結果を**Table 3.3.3**に示す。断面マクロ組織の代表例を**Fig.3.3.3**に示す。

**Table 3.3.3**に示したように、観察した15断面全てのマクロ試験片において、割れの発生は無かった。開先角度30°～50°の範囲では、良好な溶接性を示した。

一方、ステンレス鋼の凝固割れ感受性に及ぼす(P+S)量とCr当量/Ni当量との関係を調べた Kujanpaa, V. 等の結果<sup>3.7)</sup>に、**Table 3.3.2**に示した化学成分分析結果をプロットして、**Fig.3.3.4**に示す。

**Fig.3.3.4**で明らかのように、開先角度によらず凝固割れ感受性はないと言える。したがって、初層高温割れの発生は無いと考えられる。

### 3.4 過剰溶接入熱の影響度確認試験結果および考察

#### 3.4.1 目的および試験内容

二相ステンレス鋼板の溶接では、溶接熱サイクルによりσ相が析出して靱性が劣化(σ相脆化)することがある。したがって、入熱の上限を厳しく管理することが重要であり、一般に25 kJ/cm以下に管理することが目安になっている。また、パス間温度は150°C以下に管理することが目安になっている。

現場工作において、万一溶接入熱の管理値を超え、過剰入熱になってしまった場合のことを想定して、継手引張強さ、切欠き靱性、マクロ組織、硬さ分布、溶接金属の化学成分、溶接金属のフェライト量などに及ぼす溶接入熱量の影響を調査した。

### 3.4.2 供試溶接継手の溶接条件

先に、Table 3.2.1 および Table 3.2.2 に記した、SUS329J3L(©)鋼板（板厚16mm）同士の突合せ溶接継手（FCAWとFCAW+SAW）を供試した。供試溶接継手の溶接条件をTable 3.4.1に示す。すなわち、過剰溶接入熱継手の代表例として、入熱量40kJ/cmの立向き上進FCAW継手と、入熱量50kJ/cmの下向きFCAW+SAW継手を供試した。供試溶接継手の代表例をFig.3.4.1に示す。

### 3.4.3 継手引張試験結果および考察

各供試溶接継手の始端部と終端部から、試験片幅30mm、平行部長さ45mmのNK U2A号試験片を採取して、室温・大気中で引張試験を実施した。引張試験結果をFig.3.4.2に示す。

Fig.3.4.2から明らかなように、4溶接条件で溶接した突合せ溶接継手共、評価基準である引張強さ620N/mm<sup>2</sup>以上を十分満足している。なお、引張試験による破断位置は、FCAW継手では溶接部、FCAW+SAW継手では母材であった。

供試した、入熱量50kJ/cmのFCAW+SAW継手も40kJ/cmのFCAW継手も、継手引張強さに対しては全く問題ないことが明らかになった。

### 3.4.4 継手V-ノッチシャルピー衝撃試験結果および考察

各供試溶接継手の切欠き靱性を把握するために、継手部のV-ノッチシャルピー衝撃試験を実施した。すなわち、各供試溶接継手から、溶接金属（Weld Metal）3本、Fusion Line（F.L.）3本、熱影響部（HAZ）（F.L.+2mm）3本のV-ノッチシャルピー衝撃試験片を採取して、-20℃で試験した。

試験結果をFig.3.4.3に示す。

Fig.3.4.3から明らかなように、入熱量35kJ/cmのFCAW+SAW継手のFusion Line部の吸収エネルギーが、他溶接継手当該部より若干小さな値であるが、特に問題ないと言えよう。

### 3.4.5 マクロ組織観察・硬さ分布測定結果および考察

各供試溶接継手のマクロ組織を観察した。観察結果を **Fig.3.4.4** に示す。**Fig.3.4.4** から明らかなように、4溶接条件で溶接した突合せ継手共、亀裂などの有害と認められる欠陥は確認できなかった。

上述のマクロ組織観察後の試験片を使用して、硬さ分布を測定した。測定位置を **Fig.3.4.5** に示す。すなわち、ライン a・b・c 上の硬さを測定した。また、溶接金属および母材の測定間隔は 1mm ピッチとした。溶接熱影響部の幅が小さかったため、熱影響部の硬さは各ライン上周辺で、溶接金属境界に沿った位置で測定した。

硬さ分布測定結果を **Fig.3.4.6** に示す。**Fig.3.4.6** から明らかなように、4溶接条件で溶接した突合せ継手共、硬さ分布に特別な差異はないようである。

### 3.4.6 溶接金属の化学成分分析・フェライト量測定結果 および考察

各供試溶接継手溶接金属の化学成分分析とフェライト量測定を行った。

化学成分分析結果を **Table3.4.2** に、フェライト量測定結果を **Table 3.4.3** に示す。

**Table 3.4.2** から明らかなように、溶接金属の化学成分分析結果は、全て JIS 規格を満足している。さらに、**Table 3.4.3** から明らかなように、溶接金属および熱影響部のフェライト量測定結果では、4 溶接条件で溶接した突合せ継手共、測定値に大きな差は無かった。

## 3.5 SUS329J3Lクラッド鋼板過剰溶接入熱 突合せ溶接継手の 組織観察結果と継手引張試験結果および考察

### 3.5.1 目的および試験内容

SUS329J3Lクラッド鋼板同士の、現場工作における突合せ溶接において、万一過剰入熱になってしまった場合を想定して、通常入熱と過剰入熱の溶接継手を供試して、断面の組織観察と、全厚の継手引張

試験を実施した。

### 3.5.2 供試突合せ溶接継手の溶接条件

先に、Table 3.2.1 および Table 3.2.2 に記した、SUS329J3L-Clad 鋼板 [板厚16mm:SUS329J3L 鋼板(合せ材) 3mm+軟鋼板(母材)13mm] を供試した。

供試溶接継手の溶接条件を Table 3.5.1 に示す。すなわち、FCAW では、最終パスの通常入熱を約 20kJ/cm とし、過剰入熱を約 44kJ/cm とした。また、SAW では、最終パスの通常入熱を約 30kJ/cm とし、過剰入熱を約 50kJ/cm とした。

供試した突合せ溶接継手の外観を Fig.3.5.1 に示す。

### 3.5.3 継手断面のマクロ組織・ミクロ組織観察結果 および考察

供試した突合せ溶接継手断面のマクロ組織を、Fig.3.5.2 に示す。

供試継手の X線探傷試験結果により、以下のことが明らかになった。

- ① 通常入熱 20 kJ/cm の FCAW 継手：定常部には欠陥は無かった。断面ミクロ組織観察においても、欠陥は確認されなかった。
- ② 過剰入熱 44kJ/cm の FCAW 継手：溶接継手全長にわたって溶接欠陥が確認された。特に合せ材 (SUS329J3L 鋼板:板厚 3mm) と母材 (軟鋼板:板厚 13mm) 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。
- ③ 通常入熱 30 kJ/cm の SAW 継手：定常部には欠陥は無かった。断面ミクロ組織観察においても、欠陥は確認されなかった。
- ④ 過剰入熱 50kJ/cm の SAW 継手：始端部、終端部に欠陥が確認されたが、定常部には欠陥は無かった。断面ミクロ組織観察においても、欠陥は確認されなかった。

表層部 Fusion Line 近傍のミクロ組織を Fig.3.5.3 に、合せ材 (SUS329J3L 鋼板:板厚 3mm) 板厚中央部 Fusion Line 近傍のミクロ組織を Fig.3.5.4 に、さらに、合せ材 (SUS329J3L 鋼板) 溶接金属のミクロ組織を Fig.3.5.5 に示す。

### 3.5.4 継手引張試験結果および考察

各供試突合せ溶接継手の始端部と終端部から，試験片幅 30mm，平行部長さ 37 mm，全長 450 mm の NK U2A 号 全厚引張試験片を採取して，室温・大気中で引張試験を実施した。引張試験結果を **Table 3.5.2** に示す。

SUS329J3L クラッド鋼板母材の引張強さに対する規格値は，

$$\sigma_B \geq \frac{t_1 \cdot \sigma_{B1} + t_2 \cdot \sigma_{B2}}{t_1 + t_2} = 441.25 \text{ [N/mm}^2\text{]} \dots\dots\dots (3.5.1)$$

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

$\sigma_{B1}$ ：母材の引張強さの規格最小値＝400 N/mm<sup>2</sup>

$\sigma_{B2}$ ：合せ材の引張強さの規格最小値＝620 N/mm<sup>2</sup>

となっている。この値を突合せ溶接継手に適用すると，**Table 3.5.2** に示した通り，全て合格であった。継手引張強さに対しては，供試した 4 種類の突合せ溶接継手とも，全く問題無いことが明らかになった。

なお，引張試験後の試験片を **Fig. 3.5.6** に示す。全て母材で破断している。

## 3.6 完全溶け込み十字溶接継手引張試験結果および考察

### 3.6.1 目的および試験内容

バルクヘッド (**Table 3.2.1** および **Table 3.2.2** に記した SUS329J3L © ソリッド鋼板) と二重底 (**Table 3.2.1** および **Table 3.2.2** に記した SUS316L クラッド ④ 鋼板 と SUS329J3L © ソリッド鋼板の 2 種類) との完全溶け込み十字溶接継手部を対象に，継手引張強さに及ぼす開先角度 (40°・50°・60°) の影響を確認した。

### 3.6.2 供試試験体の溶接条件および引張試験片

バルクヘッドと二重底との完全溶け込み十字溶接継手部を対象にした，供試試験体の溶接条件を**Table 3.6.1**に示す。

また，供試した完全溶け込み十字溶接継手引張試験片の内容を**Table 3.6.2**に示す。なお，試験片溶接後，目視検査においても，染色浸透探傷検査においても，溶接欠陥は皆無であった。

### 3.6.3 溶接継手のマクロ組織観察・硬さ分布測定結果および考察

開先角度 $40^\circ$ の試験片溶接継手の断面マクロ写真の例を **Fig.3.6.1** に示す。

また，開先角度 $60^\circ$ のSUS329J3L鋼板とSUS316Lクラッド鋼板との継手断面のビッカース硬さを測定した。測定位置を **Fig.3.6.2** に示す。すなわち，ビード表面から2 mm，溶接金属中央部，ルート部(板の中心)から2 mmの位置の，溶接金属および熱影響部のビッカース硬さを測定した。測定結果を **Fig.3.6.3** に示す。

### 3.6.4 十字溶接継手引張試験結果および考察

供試した完全溶け込み十字溶接継手の始端部と終端部から引張試験片を採取して，室温・大気中で引張試験を実施した。

引張試験結果を **Fig.3.6.4** および **Fig.3.6.5** に示す。また，引張試験後の試験片の外観の例を， **Fig.3.6.6** に示す。

十字溶接継手引張試験結果では，いずれの開先角度においても，破断位置は全てSUS329J3L鋼板母材であった。また，引張強さも，全て  $750 \text{ N/mm}^2$  以上であり，判定基準である“ $620 \text{ N/mm}^2$ 以上”を大幅に上回る優れた強度特性を有することが確認された。

## 3.7 まとめ

SUS329J3Lクラッド鋼板およびSUS329J3Lソリッド鋼板を適用したケミカルタンカー建造を実現するために，SUS329J3Lソリッド鋼板同士およびSUS329J3Lソリッド鋼板とSUS316Lクラッド鋼板，さらに，

SUS329J3Lクラッド鋼板同士の溶接性に関して、特に現場施工上問題になる事項について調査・確認し、以下の結論が得られた。

- ① SUS329J3Lソリッド鋼板とSUS316Lクラッド鋼板との完全溶け込みT継手では、開先角度 $30^{\circ}$ ～ $50^{\circ}$ の範囲では、良好な溶接性を示し、初層高温割れ発生は確認されなかった。
- ② 過剰溶接入熱の影響度確認試験結果、すなわち、SUS329J3Lソリッド鋼板（板厚16mm）同士の突合せ溶接継手では、入熱量 $14\text{kJ/cm}$ ・ $40\text{kJ/cm}$ のFCAWも、入熱量 $35\text{kJ/cm}$ ・ $50\text{kJ/cm}$ のFCAW+SAWも、継手引張強さ、継手V-ノッチシャルピー衝撃試験結果、硬さ分布測定結果、溶接金属の化学成分分析結果・フェライト量測定結果全てにおいて、問題無いことが確認された。

さらに、SUS329J3Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手では、入熱量 $20\text{kJ/cm}$ 、 $44\text{kJ/cm}$ のFCAWも、入熱量 $30\text{kJ/cm}$ 、 $50\text{kJ/cm}$ のFCAW+SAWも、継手引張強さには全く問題無いことが確認された。しかし、入熱量 $44\text{kJ/cm}$ のFCAWでは、溶接継手全長にわたって、合せ材（SUS329J3L鋼板）と母材（軟鋼板）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。

したがって、過剰入熱での溶接は避けるべきである。

- ③ SUS329J3Lソリッド鋼板（バルクヘッドを想定）とSUS316Lクラッド鋼板（二重底を想定）、およびSUS329J3Lソリッド鋼板同士の完全溶け込み十字溶接継手（開先角度 $40^{\circ}$ ・ $50^{\circ}$ ・ $60^{\circ}$ ）の引張試験結果では、全ての試験片において破断位置はSUS329J3L鋼板母材であり、引張強さも全て $750\text{N/mm}^2$ 以上で、優れた強度特性を有することが確認された。

以上により、SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板を適用したケミカルタンカー建造は、これまでに実績の多いSUS316LNソリッド鋼板や、SUS316Lクラッド鋼板を使用した場合と略同等に、現場施工が可能であることが確認された。



## 参 考 文 献

- 3.1) 矢島浩, 座間正人, 平田隆明, 齊藤正洋, 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.
- 3.2) Masataka Suga, Masaharu Honda, Moriyasu Nagae, Nobuhiro Seki, Tohru Izawa and Tasuhiro Kaneko : The newly Developed Stainless Clad Steel Plate for the Hull Structure of Chemical Tankers, NKK TECHNICAL REVIEW, No.55 (1989.), pp.64-72.
- 3.3) 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.
- 3.4) 恩澤忠男, 福田 隆, 大尾和彦, 原 修一, 亀山龍一郎: 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.
- 3.5) 藤井一申, 鎌田 岳, 萩森保彦, 内村秀行: 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 (1998.8.), pp.223-230.
- 3.6) 座間正人, 齊藤正洋, 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.
- 3.7) Kujanpaa, V., Suutala, N., Takalo, T. and Moisio, T. : Correlation between Solidification Cracking and Microstructure in Austenitic and Austenitic-Ferritic Stainless Steel Welds, Welding Research Int., 9 (2) :55 (1979.).

**Table 3.2.1 Chemical composition of test steel plates**

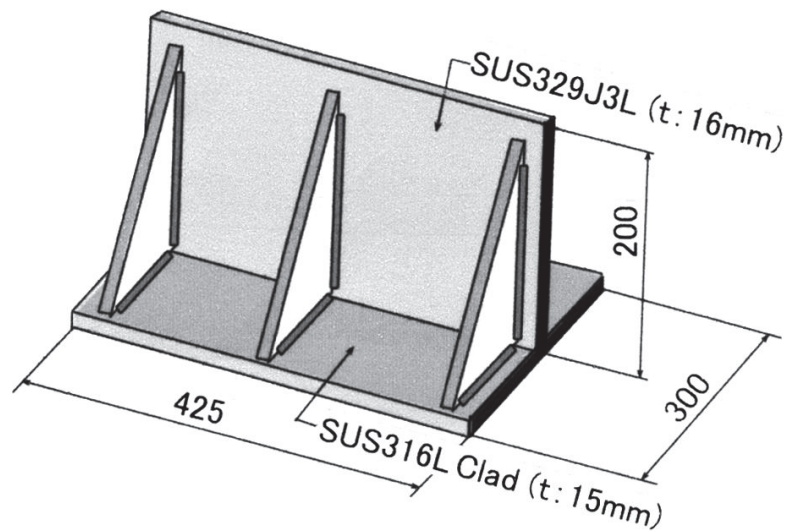
Test Steel Plate	Thick. (mm)	(wt %)								
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
SUS329J3L -Clad*	16 (3+13)	0.013	0.31	0.97	0.025	0.0015	22.55	5.42	3.10	0.17
SUS316L -Clad*	Ⓐ 15 (3+12)	0.008	0.54	0.77	0.024	0.001	16.94	12.11	2.84	—
	Ⓑ 16 (3+13)	0.009	0.52	0.72	0.028	0.0004	16.82	12.18	2.73	0.03
SUS329J3L	Ⓒ 16	0.01	0.56	1.80	0.025	0.001	22.50	5.80	3.10	0.16
	Ⓓ 20	0.01	0.51	1.84	0.025	0.0006	22.30	5.85	3.00	0.17

\* SUS329J3L-SUS316L Steel Plate (3mm)

**Table 3.2.2 Mechanical properties of test steel plates**

Test Steel Plate	Thick. (mm)	0.2% Proof Stress (N/mm <sup>2</sup> )	Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
SUS329J3L -Clad*	16 (3+13)	433	554	23
SUS316L -Clad* Ⓐ	15 (3+12)	—	476	35
SUS329J3L Ⓒ	16	615	772	38

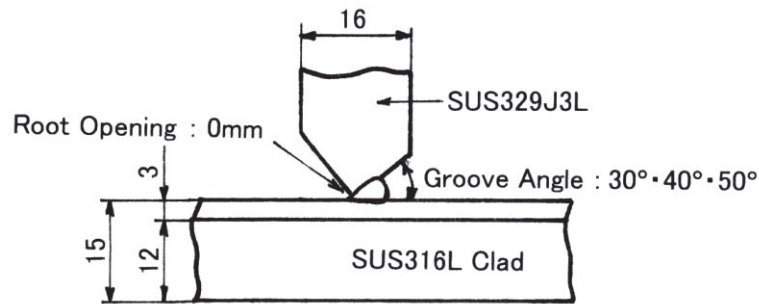
\* Full-Thickness Tensile Test (16mm, 15mm)



**Fig.3.3.1 Shape and size of test model**

**Table 3.3.1 Welding parameters of T joint full penetration weld**

Welding Process	CO <sub>2</sub> Arc Welding (FCAW)
Welding Position	Horizontal
Heat Input (Target)	10~13 kJ/cm (12 kJ/cm)
Current·Voltage (Target)	190~220 A·28~31 V (200 A·30 V)
Welding Speed (Target)	30~40 cm/min (30 cm/min)
CO <sub>2</sub> Gas Flow Rate (Target)	15~20 l/min (20 l/min)
Interpass Temperature	< 150 °C
Welding Consumables	GFW329J3L (1.2mm φ) (NKY-2965)



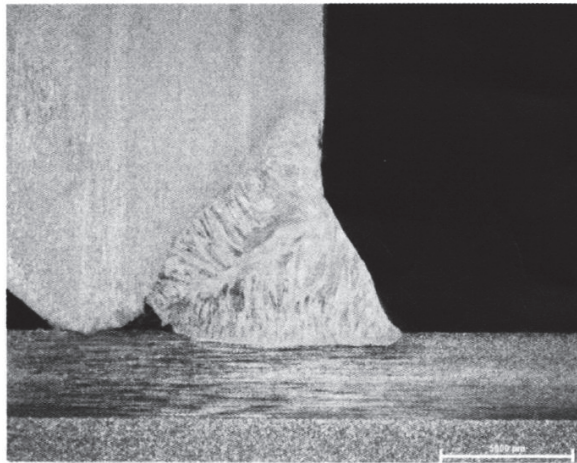
**Fig.3.3.2 Shape and size of T joint weld groove**

**Table 3.3.2 Chemical composition of weld metals**

Groove Angle	Welded Joint No.	(mass%)								
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
30°	30	0.025	0.53	1.10	0.025	0.003	0.11	8.33	22.56	3.10
40°	40	0.021	0.57	1.06	0.025	0.003	0.10	8.78	22.80	3.12
50°	50	0.024	0.55	0.94	0.020	0.002	0.06	9.02	22.21	3.03
		V	Nb	Ti	Al	B	O	N		
		0.082	0.011	0.020	0.004	0.0002	0.11	0.13		
		0.080	0.012	0.028	0.004	0.0002	0.12	0.13		
		0.059	0.012	0.024	0.005	0.0002	0.12	0.12		

**Table 3.3.3 Results of root pass hot cracking tests**

Welded Joint No. (Groove Angle)	Sectioning Macro No.	Test Results
30	30-1	No Crack
	30-2	No Crack
	30-3	No Crack
	30-4	No Crack
	30-5	No Crack
40	40-1	No Crack
	40-2	No Crack
	40-3	No Crack
	40-4	No Crack
	40-5	No Crack
50	50-1	No Crack
	50-2	No Crack
	50-3	No Crack
	50-4	No Crack
	50-5	No Crack



40-3, Groove Angle: 40°

Fig.3.3.3 Sectioned macroscopic test result

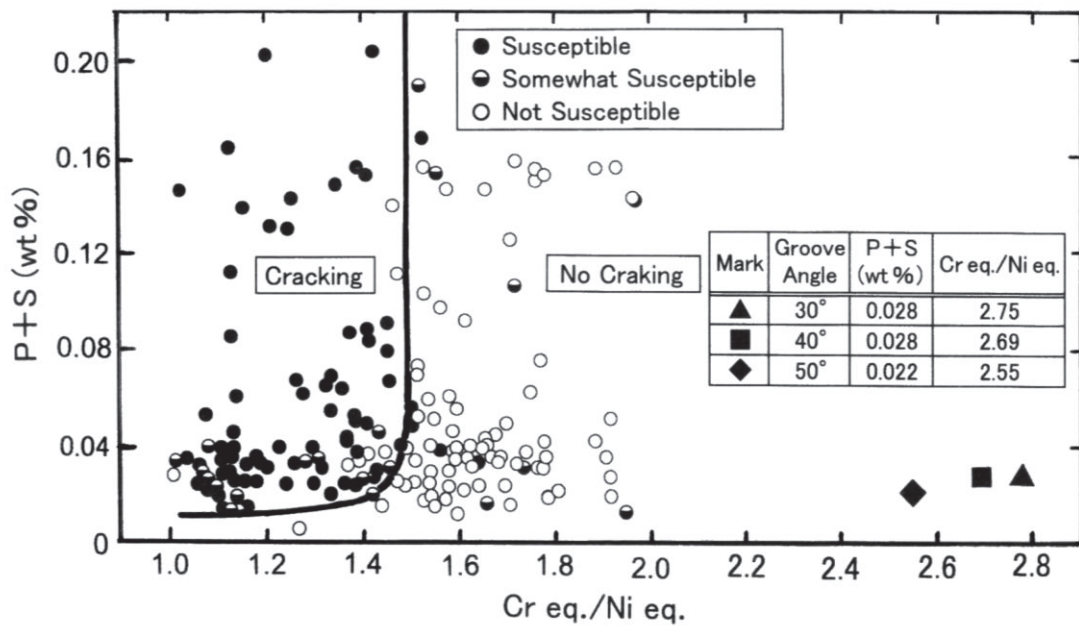
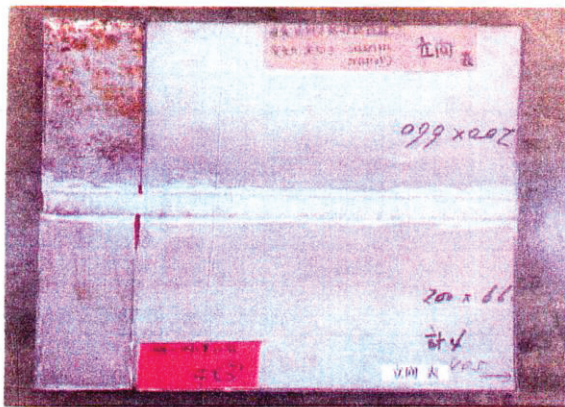


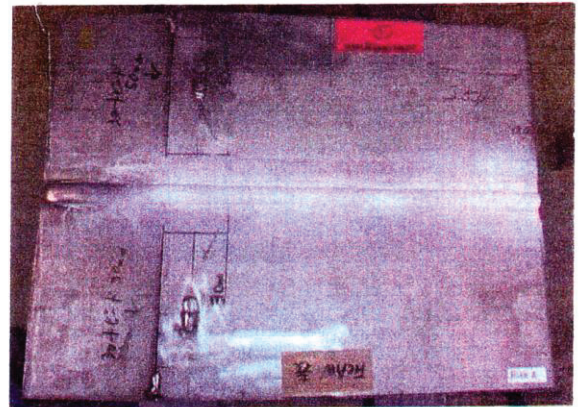
Fig.3.3.4 Effect of (P+S) content and Cr equivalent/Ni equivalent on solidification crack susceptibility

**Table 3.4.1 Welding parameters for test butt welded joints**

Butt Welded Joint	Welding Process	Heat Input · Welding Position	Interpass Temp.
SUS329J3L-SUS329J3L (t: 16mm-t: 16mm)	FCAW	14 kJ/cm · Flat 40 kJ/cm · Vertical Upward	< 150°C
	FCAW+SAW	35, 50 kJ/cm	< 150°C

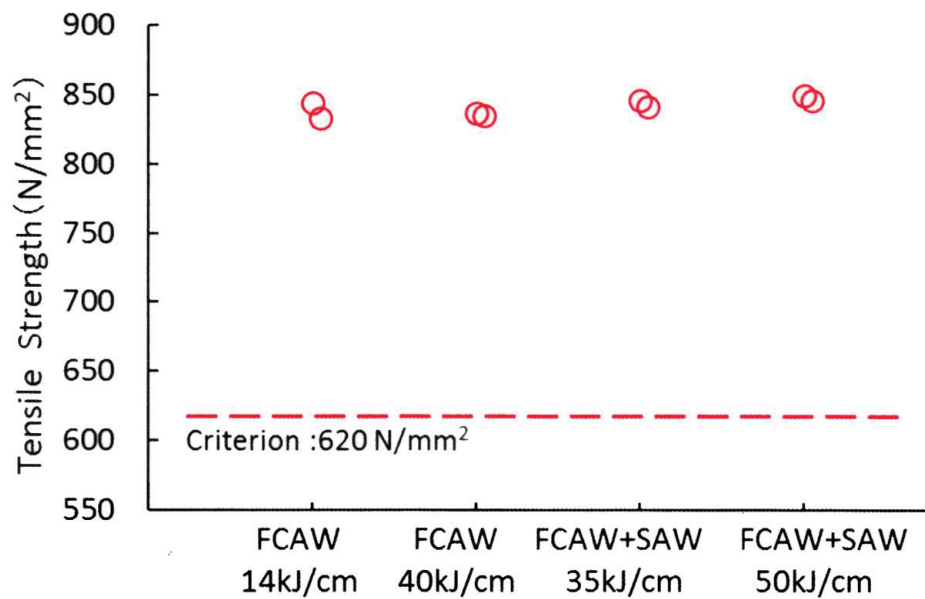


(1) FCAW, 40 kJ/cm

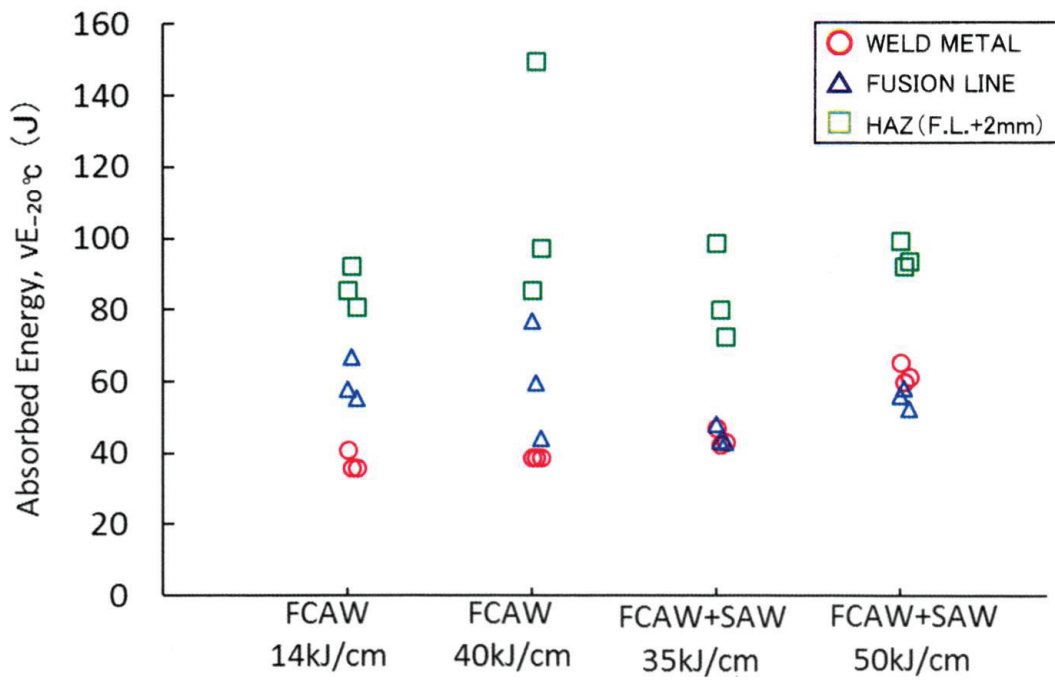


(2) FCAW+SAW, 35 kJ/cm

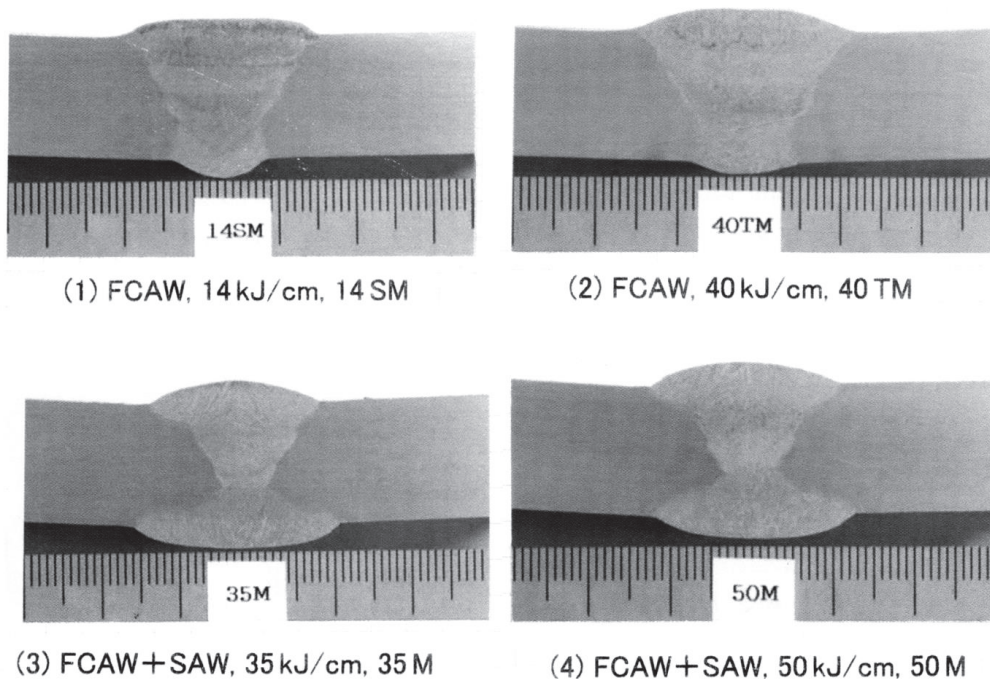
**Fig.3.4.1 Penetrant test results of test butt welded joints (SUS329J3L)**



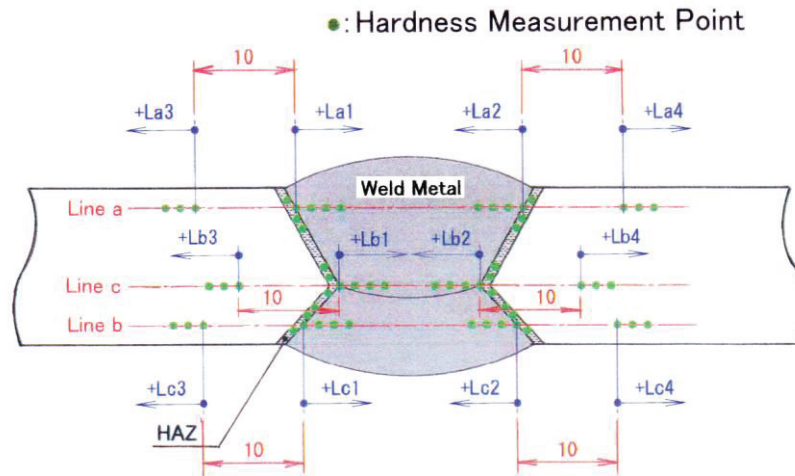
**Fig.3.4.2 Results of tensile tests for welded joints (SUS329J3L)**



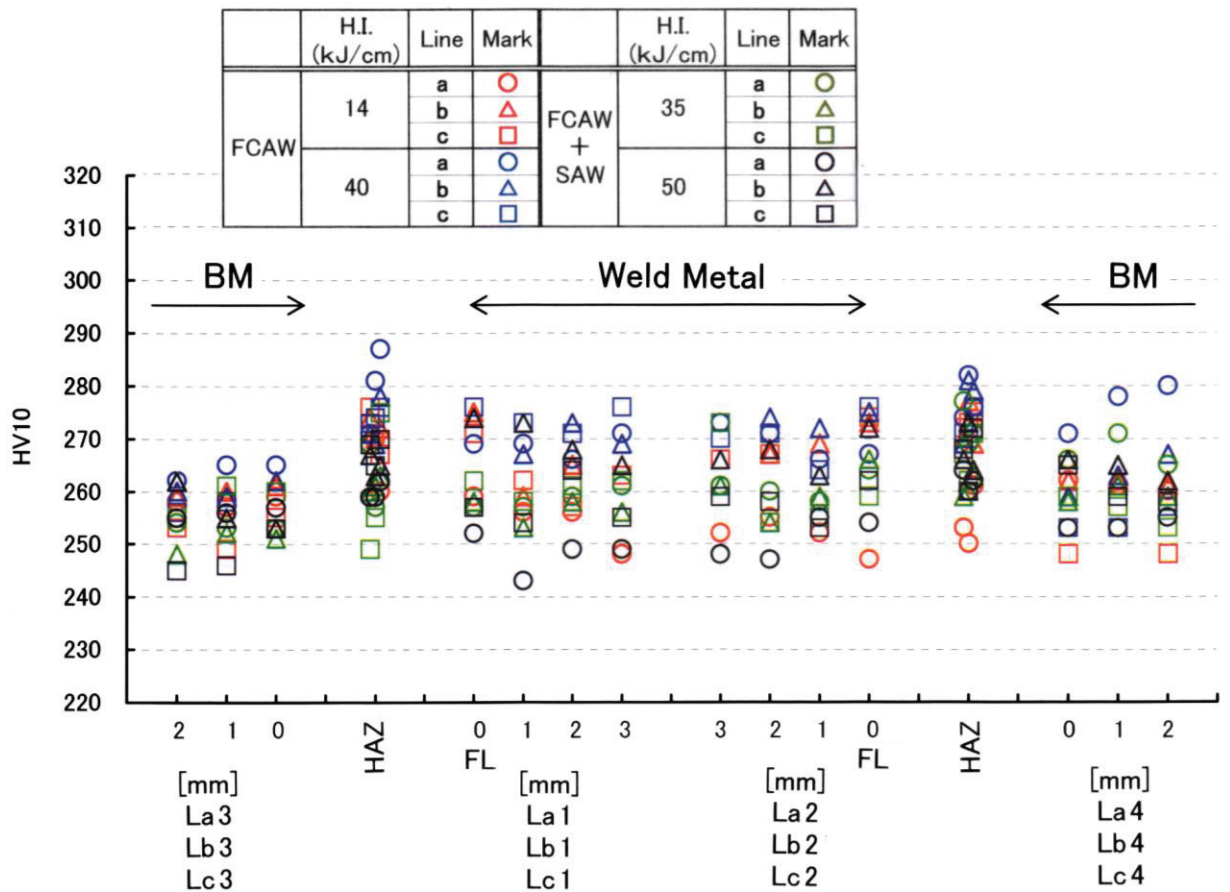
**Fig.3.4.3 Results of V-notch Charpy impact tests for welded joints (SUS329J3L)**



**Fig.3.4.4 Macrograph of test butt welded joints (SUS329J3L)**



**Fig.3.4.5** Hardness measurement points of test butt welded joint (SUS329J3L)



**Fig.3.4.6** Hardness distribution of test butt welded joints (SUS329J3L)



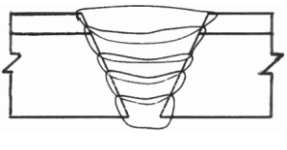
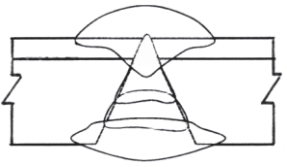
**Table 3.4.2 Chemical composition of test butt welded joints**

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	N	O
FCAW 14 kJ/cm	0.028	0.35	0.69	0.018	0.004	0.03	9.19	23.26	3.32	0.148	0.121
FCAW 40 kJ/cm	0.024	0.50	0.80	0.024	0.004	0.08	9.15	23.44	3.25	0.134	0.114
FCAW+SAW 35 kJ/cm	0.028	0.49	1.10	0.022	0.004	0.07	8.68	23.23	3.25	0.145	0.079
FCAW+SAW 50 kJ/cm	0.025	0.50	1.08	0.033	0.004	0.08	8.64	23.16	3.17	0.139	0.078
JIS	≤0.04	≤1.0	0.5~ 2.0	≤0.04	≤0.03	≤0.5	7.5~ 10.0	21.0~ 24.0	2.5~ 4.0	0.08~ 0.20	—

**Table 3.4.3 Ferrite content of butt welded joints**

	Ferrite Content (%)					Mean
	HAZ	HAZ	W.M.	W.M.	W.M.	
FCAW 14 kJ/cm	32	32	32	32	29	31
FCAW 40 kJ/cm	32	34	34	32	34	33
FCAW+SAW 35 kJ/cm	33	33	31	33	35	33
FCAW+SAW 50 kJ/cm	36	33	32	34	34	34

Table 3.5.1 Welding parameters of test butt welded joints

Butt Welded Joint	Build-up Sequence	Welding Process	Heat Input [Final Layer] (kJ/cm)
SUS329J3L -Clad (t: 16mm) + SUS329J3L -Clad (t: 16mm)		FCAW	20
			44
SUS329J3L -Clad (t: 16mm)		FCAW + SAW	30
			50

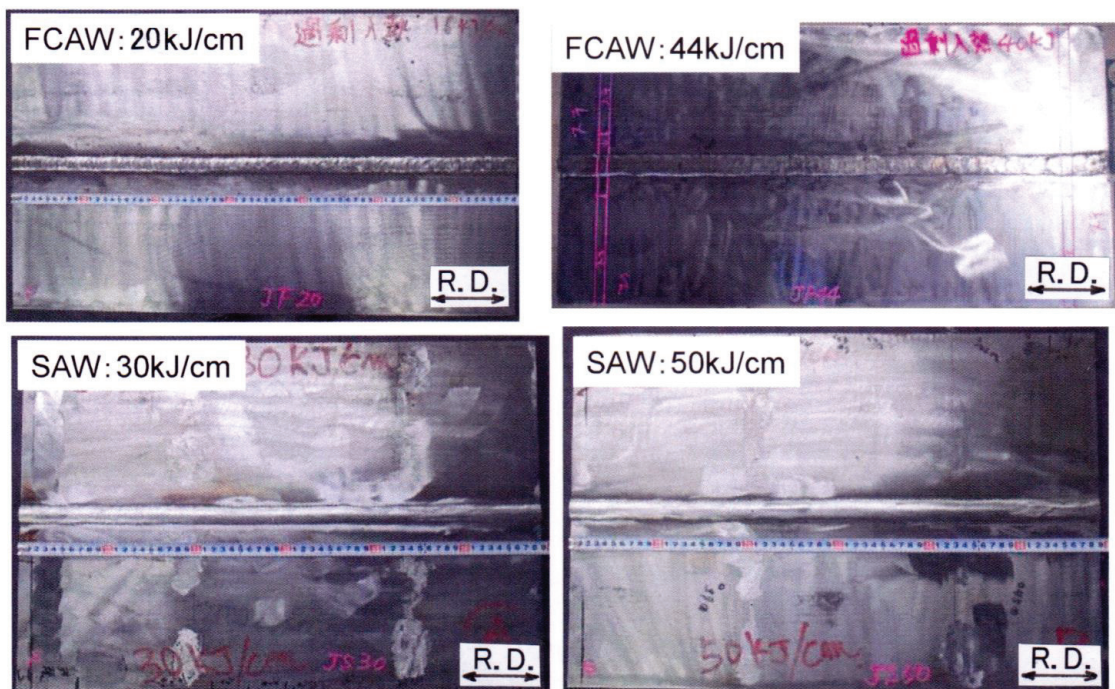
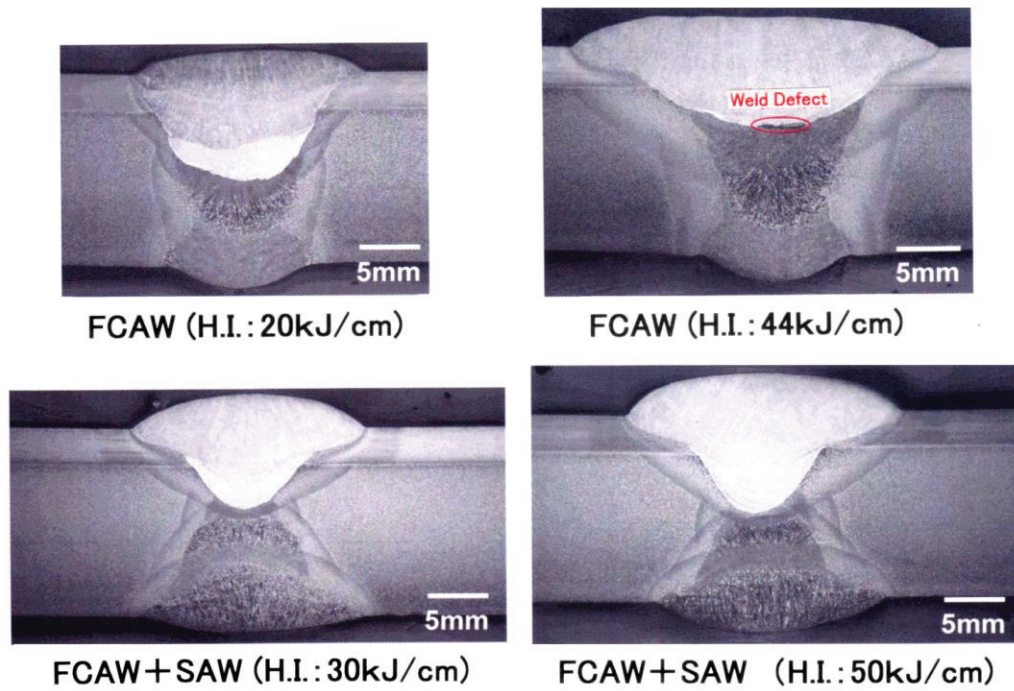


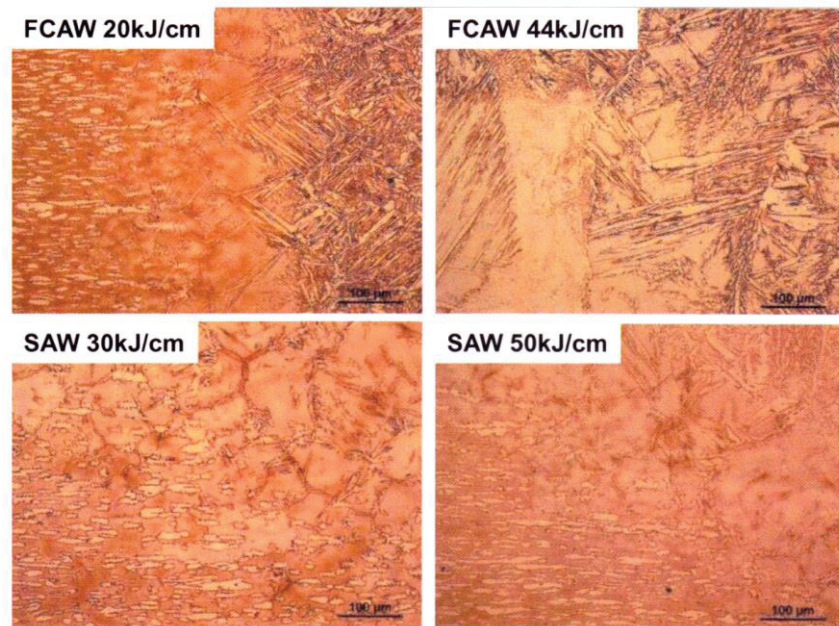
Fig.3.5.1 Appearance of butt welded joints (SUS329J3L-Clad)



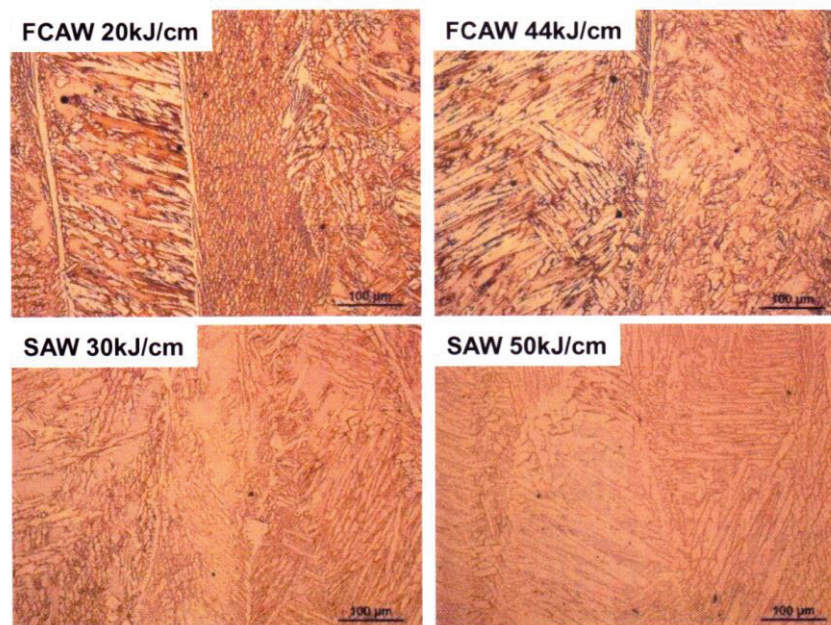
**Fig.3.5.2 Results of macroscopic test of welded section for butt welded joints (SUS329J3L-Clad)**



**Fig.3.5.3 Results of microscopic test of welded section for butt welded joints [Fusion line] (SUS329J3L-Clad)**



**Fig.3.5.4 Results of microscopic test of welded section for butt welded joints [1/2t. SUS329J3L. Fusion line] (SUS329J3L-Clad)**

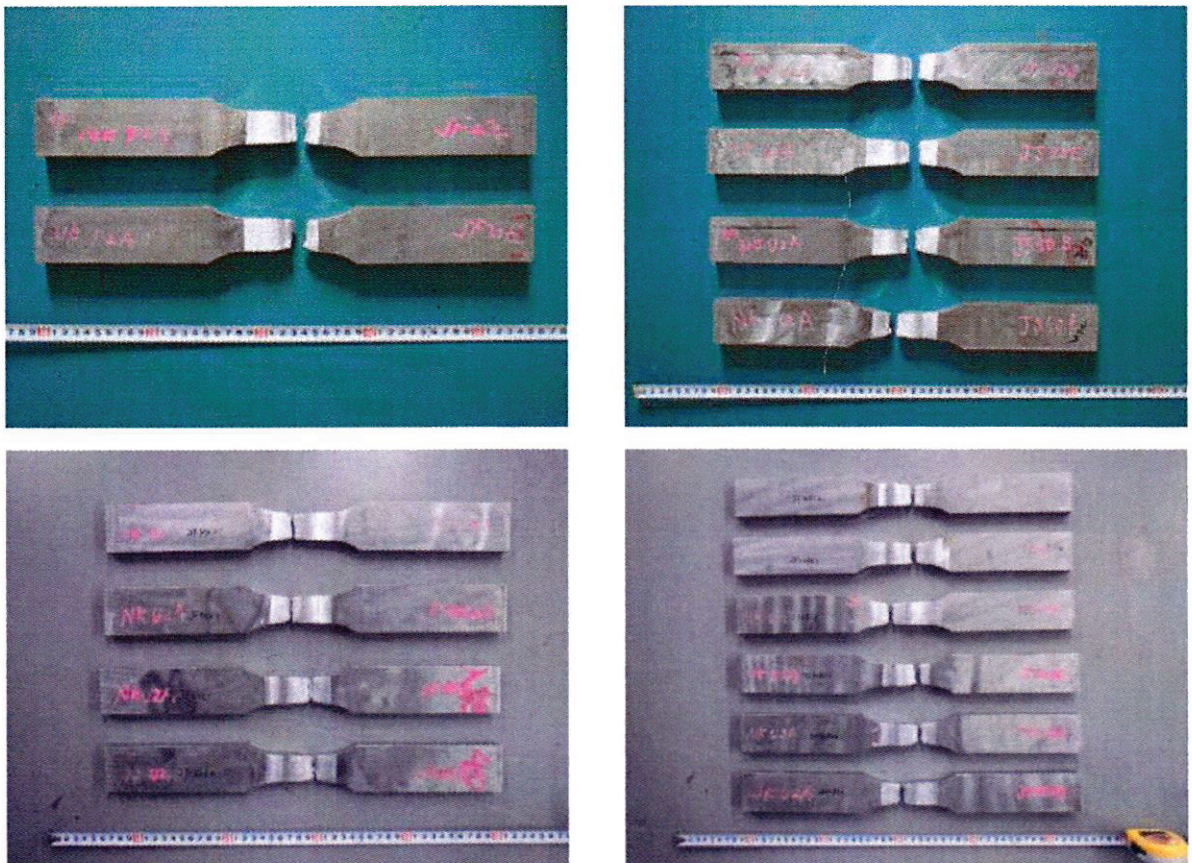


**Fig.3.5.5 Results of microscopic test of welded section for butt welded joints [Weld metal of SUS329J3L] (SUS329J3L-Clad)**

**Table 3.5.2 Results of tensile tests for butt welded joints (SUS329J3L-Clad)**

	Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )					Judge.
	Start Side ①	Start Side ②	End Side ①	End Side ②	Ave.	
<b>FCAW 20kJ/cm</b>	500	494	500	493	497	○
<b>FCAW 44kJ/cm</b>	506	500	497	495	499	○
<b>SAW 30kJ/cm</b>	495	494	495	504	497	○
<b>SAW 50kJ/cm</b>	499	505	499	487	498	○

Full-Thickness Tensile Test (16mm), NKU2A



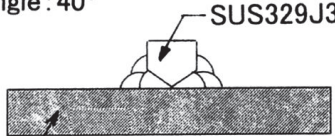
**Fig.3.5.6 Appearance of test specimens after tensile tests (SUS329J3L-Clad)**

**Table 3.6.1 Welding parameters of cruciform welded joints**

Welding Process	CO <sub>2</sub> Arc Welding (FCAW)
Welding Position	Flat
Heat Input (Target)	10~13kJ/cm (12kJ/cm)
Current·Voltage (Target)	190~220A·28~31V (200A·30V)
Welding Speed (Target)	30~40cm/min (30cm/min)
CO <sub>2</sub> Gas Flow Rate (Target)	15~20ℓ/min (18ℓ/min)
Interpass Temperature	<150℃

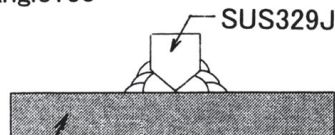
Groove Angle: 40°



SUS329J3L

SUS316L Clad or SUS329J3L

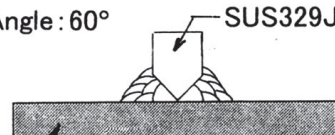
Groove Angle: 50°



SUS329J3L

SUS316L Clad or SUS329J3L

Groove Angle: 60°



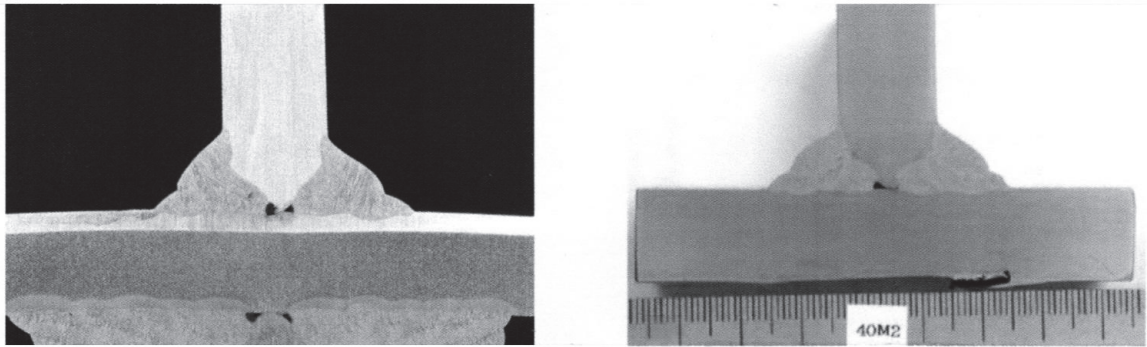
SUS329J3L

SUS316L Clad or SUS329J3L

Welding Material: GFW329

**Table 3.6.2 Tensile test specimens of cruciform welded joints**

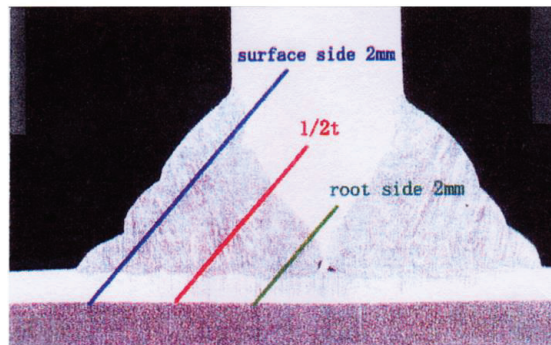
Test Specimens	Joint Type	Groove Angle
SUS329J3L + SUS316L-Clad (16mm) (15mm)	Full-penetration Cruciform Joint (FCAW)	40°
SUS329J3L + SUS329J3L (16mm) (16mm)		50°
		60°



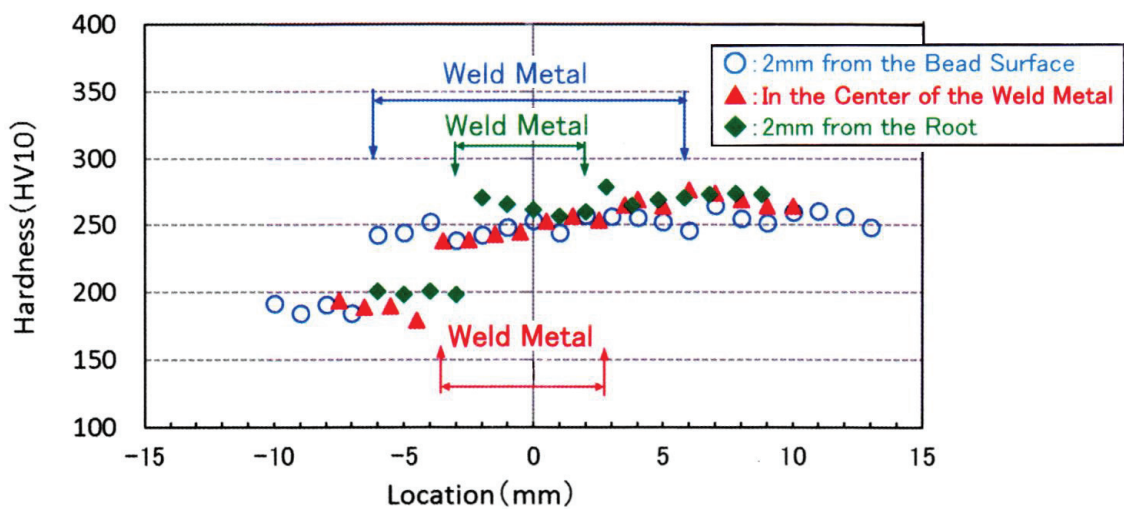
(1) SUS329J3L+SUS316L Clad

(2) SUS329J3L+SUS329J3L

**Fig.3.6.1 Macrograph of cruciform welded joints (Groove angle : 40°)**



**Fig.3.6.2 Vickers hardness measurement points (SUS329J3L+SUS316L Clad)**



**Fig.3.6.3 Vickers hardness distribution of cruciform welded joint (Groove angle : 60°), (SUS329J3L+SUS316L Clad)**

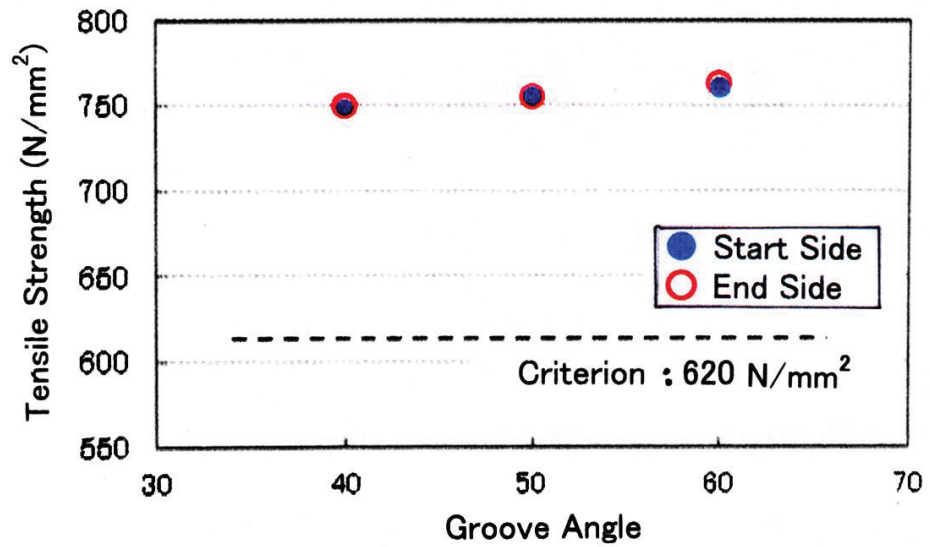


Fig.3.6.4 Tensile test results of cruciform welded joints (SUS329J3L+SUS316L Clad)

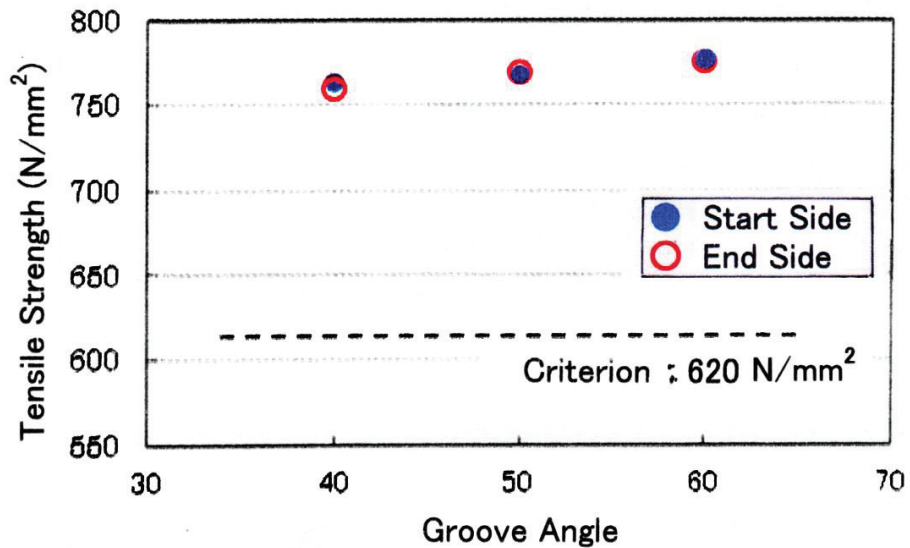
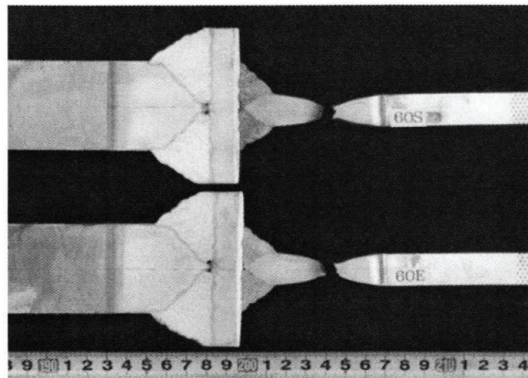
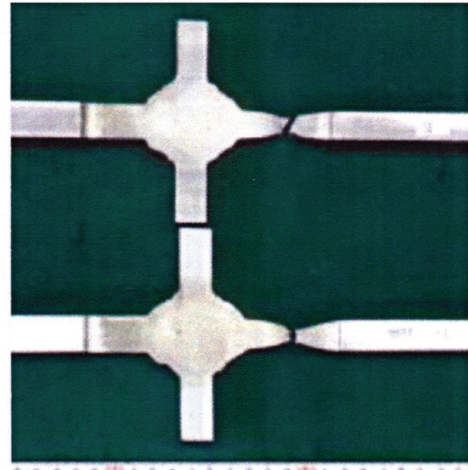


Fig.3.6.5 Tensile test results of cruciform welded joints (SUS329J3L+SUS329J3L)





(1) SUS329J3L+SUS316L Clad



(2) SUS329J3L+SUS329J3L

**Fig.3.6.6 Appearance of test specimens after tensile test  
(Macroscopic images of cruciform welded joints)**

## 第 4 章

# 二相ステンレス クラッド鋼板・ ソリッド鋼板 溶接継手部の 疲労強度に関する検討・評価

## 第 4 章 目 次

4.1 はじめに	88
4.2 二相ステンレス (SUS329J3L) ソリッド鋼板同士の 突合せ溶接継手の疲労強度	88
4.2.1 目的および試験内容	88
4.2.2 供試鋼板・溶接条件・供試試験片	89
4.2.3 試験結果および考察	89
4.2.4 応力集中係数を考慮した疲労強度の補正	90
4.3 二相ステンレス (SUS329J3L) クラッド鋼板同士の 突合せ溶接継手の疲労強度	92
4.3.1 目的および試験内容	92
4.3.2 供試クラッド鋼板・溶接条件・供試試験片	92
4.3.3 試験結果および考察	93
4.4 二相ステンレス (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	94
4.4.1 目的および試験内容	94
4.4.2 供試クラッド鋼板・溶接条件・供試試験片	94
4.4.3 試験結果および考察	95
4.4.4 応力集中係数を考慮した疲労強度の補正	95
4.5 二相ステンレス (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	97
4.5.1 目的および試験内容	97
4.5.2 供試クラッド鋼板・溶接条件・供試試験片	97
4.5.3 試験結果および考察	98

4.6	二相ステンレス (SUS329J3L) ソリッド鋼板同士の 荷重非伝達型 十字隅肉溶接継手の疲労強度	99
4.6.1	目的および試験内容	99
4.6.2	供試鋼板・溶接条件・供試試験片	100
4.6.3	試験結果および考察	100
4.7	$2 \times 10^6$ 回疲労強度に及ぼす十字溶接継手 止端半径の影響	101
4.7.1	目的および内容	101
4.7.2	調査・検討対象にした十字溶接継手	101
4.7.3	調査・検討結果および考察	102
4.8	二相ステンレス (SUS329J3L) クラッド鋼板および SUS329J3L ソリッド鋼板の溶接継手部疲労強度に 関する総合評価	102
4.9	まとめ	104
	参考文献	105
	図表	107

## 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。

二相ステンレス鋼板は、フェライト( $\alpha$ 相)とオーステナイト( $\gamma$ 相)との二相混合組織であり、オーステナイト系ステンレス鋼板が有する良好な延性・靱性と、フェライト系ステンレス鋼板が有する優れた耐力腐食割れ(耐SCC)性とを兼ね備えたステンレス鋼板であるといえる。

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とケミカルタンカーに使用すれば、船殻重量軽減に貢献する。

したがって、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<sup>4.1), 4.2)</sup>より強いことが望まれる。

本章では、SUS329J3Lクラッド鋼板およびSUS329J3Lソリッド鋼板をケミカルタンカー建造に実用することを目的として、SUS329J3Lソリッド鋼板同士、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、さらに、SUS329J3Lソリッド鋼板同士の荷重非伝達型十字隅肉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・評価した結果について述べる<sup>4.3)~4.10)</sup>。

## 4.2 二相ステンレス(SUS329J3L)ソリッド鋼板同士の突合せ溶接継手の疲労強度

### 4.2.1 目的および試験内容

SUS329J3Lソリッド鋼板同士と、オーステナイト系ステンレス(SUS316LN)ソリッド鋼板同士の突合せ溶接(ワンサイド溶接)継手の疲労強度を把握

する。なお、ケミカルタンカーでの実績の多い、SUS316LNソリッド鋼板同士の突合せ溶接継手を供試したのは、比較・検討するためである。

なお、SUS329J3Lソリッド鋼板同士の突合せ溶接継手は、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、および継手止端部TIGアークによるドレッシング処理の3種類を供試した。

また、SUS316LNソリッド鋼板同士の突合せ溶接継手は、継手止端部グラインダーによるドレッシング処理の1種類を供試した。

#### 4.2.2 供試鋼板・溶接条件・供試試験片

供試したSUS329J3Lソリッド鋼板(板厚16mm)およびSUS316LNソリッド鋼板(板厚17.5mm)の化学成分をTable 4.2.1に、機械的性質をTable 4.2.2に示す。

さらに、供試した突合せ溶接(ワンサイド溶接)継手の溶接条件をTable 4.2.3に示す。なお、全ての溶接姿勢は下向き、パス間温度は150℃以下で溶接した。

供試したSUS329J3Lソリッド鋼板(板厚16mm)同士と、SUS316LNソリッド鋼板(板厚17.5mm)同士の、突合せ溶接継手疲労試験片形状・寸法を、Fig.4.2.1に示す。

#### 4.2.3 試験結果および考察

SUS329J3Lソリッド鋼板同士の突合せ溶接継手の疲労試験結果を、Table 4.2.4～Table 4.2.6 および Fig.4.2.2に示す。さらに、SUS329J3Lソリッド鋼板同士 および SUS316LNソリッド鋼板同士の、グラインダーによるドレッシング処理した突合せ溶接継手の疲労試験結果を、Table 4.2.5, Table 4.2.7 および Fig.4.2.3 に示す。なお、Fig.4.2.2 中 および Fig.4.2.3 中の右向きの矢印を付けた実験点は、未破断、母材破断 あるいは 溶接欠陥より破断した試験片である。疲労試験後の破断面および破断位置の代表例を、Fig.4.2.4～Fig.4.2.7に示す。

Fig.4.2.3 で明らかなように、溶接継手止端部をグラインダーでドレッシング処理した、SUS329J3Lソリッド鋼板同士の突合せ溶接継手とSUS316LN

ソリッド鋼板同士の突合せ溶接継手とでは、疲労強度は約10% SUS329J3Lソリッド鋼板同士の方が強いという結果であった。

#### 4.2.4 応力集中係数を考慮した疲労強度の補正

溶接継手部の疲労強度を向上させる目的で、継手止端部の応力集中係数を、溶接のままの継手より小さくするための、現場での仕上げ加工を考慮して、本研究では、グラインダーによりドレッシング処理した継手と、TIGアークによりドレッシング処理した継手を供試した。

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位向上するかを推定した。

すなわち、 $K_t$  が約 3.0 以下の場合、 $K_f$  は、 $K_f \doteq K_t$  であると仮定し、また、 $K_t$  が 3.0 以上の場合は、 $K_f \doteq 3.0$  と仮定して<sup>4.11)</sup>、疲労試験結果の応力範囲  $\sigma_R$  を補正 ( $K_t \cdot \sigma_R$ ) した。

なお、疲労亀裂発生箇所の  $K_t$  は、以下の手順によって求めた。

- ① 疲労試験実施前に、供試試験片溶接継手部の型取りを、シリコンを用いて行った。
- ② 疲労試験後、破断面から疲労亀裂発生箇所を特定し、シリコンの型を疲労亀裂発生位置で切断した。
- ③ 切断したシリコンの型を、マイクロ스코プ [Dino-Lite(AD4113T)] を用いて撮影し、パソコンで、マイクロ스코プ画像撮影編集ソフト [Dino Capture 2.0] を用いて、亀裂発生位置の止端半径  $R$  と、フランク角  $\theta$  を計測した。マイクロ스코プの倍率は 52 倍とした。

突合せ溶接継手の  $K_t$  計算式を以下に示す<sup>4.12), 4.13)</sup>。

$$K_t = 1 + (\alpha - 1) \cdot f(\theta) \dots\dots\dots (4.2.1)$$

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

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

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

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

なお、亀裂発生位置の溶接部のビード高さ（突起高さ） $H$ と、ビード幅（突起幅） $B$ は、シリコンの型からノギスを使って計測した。また、供試試験片から板厚  $t$  を計測した。

先に、Table 4.2.4～Table 4.2.7 および Fig.4.2.2, Fig.4.2.3 に示した、4種類の突合せ溶接継手疲労試験結果の、疲労亀裂発生位置の応力集中係数  $K_t$ 、ならびに応力範囲  $\sigma_R$ ・補正応力範囲  $K_t \cdot \sigma_R$ （ただし、 $K_f \doteq K_t \leq 3.0$ ）、破断繰返し数  $N_f$  を、Table 4.2.8～Table 4.2.11 に示す。また、 $\sigma_R$ - $N_f$  線図、 $K_t \cdot \sigma_R$ - $N_f$  線図を Fig.4.2.8～Fig.4.2.11 に示す。

Fig.4.2.8～Fig.4.2.10 から明らかなように、 $K_t$  を考慮して応力範囲を補正すると、SUS329J3Lソリッド鋼板同士の突合せ溶接継手3種類、すなわち、溶接のまま、グラインダーによるドレッシング処理、およびTIGアークによるドレッシング処理 全て同一の  $K_t \cdot \sigma_R$ - $N_f$  線図、すなわち、

$$K_t \cdot \sigma_R = 5.90 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.210} \dots\dots\dots (4.2.2)$$

で表わせることが明らかになった。

したがって、Eq.(4.2.2)は、SUS329J3Lソリッド鋼板同士の平滑仕上げ加工された突合せ溶接継手の  $\sigma_R$ - $N_f$  線図であるといえる。

同様に、Fig.4.2.11から明らかなように、 $K_t$  を考慮して応力範囲を補正すると、SUS316LNソリッド鋼板同士の、グラインダーでドレッシング処理した突合せ溶接継手の  $K_t \cdot \sigma_R$ - $N_f$  線図は、

$$K_t \cdot \sigma_R = 5.20 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.210} \dots\dots\dots (4.2.3)$$

で表わすことが出来る。したがって、Eq.(4.2.3)は、SUS316LNソリッド鋼板



同士の平滑仕上げ加工された突合せ溶接継手の  $\sigma_R-N_f$  線図であるといえる。

上述の Eq.(4.2.2) と Eq.(4.2.3) から、

$$5.90 \times 10^3 / 5.20 \times 10^3 = 1.13 \doteq 1.1$$

すなわち、平滑仕上げ加工された突合せ溶接継手では、SUS329J3Lソリッド鋼板同士の方が、SUS316LNソリッド鋼板同士より、疲労強度は約1.1倍高いといえる。

### 4.3 二相ステンレス (SUS329J3L) クラッド鋼板同士の突合せ溶接継手の疲労強度

#### 4.3.1 目的および試験内容

2016年に新しく開発・製造された二相ステンレス(SUS329J3L)クラッド鋼板同士の突合せ溶接(ワンサイド溶接)継手の疲労強度を把握する。さらに、ケミカルタンカーでの使用実績が多い、オーステナイト系ステンレス(SUS316L)クラッド鋼板同士の突合せ溶接(ワンサイド溶接)継手の疲労強度と比較・検討する。

なお、両クラッド鋼板同士の突合せ溶接継手共、溶接のままの継手を供試した。

#### 4.3.2 供試クラッド鋼板・溶接条件・供試試験片

供試したSUS329J3Lクラッド鋼板 [板厚16mm:SUS329J3L鋼板(合せ材)3mm+炭素鋼板(MS)(母材)13mm]と、SUS316Lクラッド鋼板 [板厚16mm:SUS316L鋼板(合せ材)3mm+炭素鋼板(MS)(母材)13mm]との化学成分をTable 4.3.1に、機械的性質をTable 4.3.2に示す。なお、Table 4.3.1に示した化学成分は、板厚3mmの合せ材(SUS329J3L鋼板、SUS316L鋼板)の化学成分であり、Table 4.3.2に示した機械的性質は、板厚16mmのクラッド鋼板全厚引張試験結果である。

さらに、供試した突合せ溶接(ワンサイド溶接)継手の溶接条件をTable 4.3.3に示す。なお、全て溶接姿勢は下向き、パス間温度は150℃以下で溶接した。

供試した、SUS329J3Lクラッド鋼板[板厚16mm]同士と、SUS316Lクラッド鋼板[板厚16mm]同士の、突合せ溶接継手疲労試験片形状・寸法を、**Fig.4.3.1**に示す。なお、**Fig.4.3.1**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、炭素鋼板側余盛をグラインダーで平滑に仕上げた。

#### 4.3.3 試験結果および考察

SUS329J3Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手(溶接のまま)の疲労試験結果を**Table 4.3.4**および**Table 4.3.5**に示す。さらに、SUS316Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手(溶接のまま)の疲労試験結果を**Table 4.3.6**および**Table 4.3.7**に示す。

なお、**Table 4.3.5**および**Table 4.3.7**は、前節で述べた、疲労亀裂発生箇所の応力集中係数 $K_t$ を考慮した疲労強度の補正值を示したものである。

**Table 4.3.4**～**Table 4.3.7**に示した、応力範囲 $\sigma_R$ と破断繰返し数 $N_f$ との関係、および補正応力範囲 $K_t \cdot \sigma_R$ と破断繰返し数 $N_f$ との関係、さらに $K_t \cdot \sigma_R$ - $N_f$ 線図を、**Fig.4.3.2**に示す。

**Fig.4.3.2**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。疲労試験後の破断面および破断位置の代表例を、**Fig.4.3.3**および**Fig.4.3.4**に示す。

**Fig.4.3.2**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 $K_t \cdot \sigma_R$ - $N_f$ 線図は、

$$K_t \cdot \sigma_R = 7.77 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.210} \dots\dots\dots (4.3.1)$$

で、また、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、

$$K_t \cdot \sigma_R = 6.30 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.210} \dots\dots\dots (4.3.2)$$

で表わせることが明らかになった。

したがって、**Eq.(4.3.1)**および**Eq.(4.3.2)**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、

$$7.77 \times 10^3 / 6.30 \times 10^3 = 1.23 \div 1.2$$

疲労強度は約1.2倍高いといえる。

#### 4.4 二相ステンレス(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

##### 4.4.1 目的および試験内容

2016年に新しく開発・製造された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(溶接のまま1種類)の疲労強度を把握する。また、比較のために、ケミカルタンカーでの実績がある、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、継手止端部グラインダーによるドレッシング処理、および継手止端部TIGアークによるドレッシング処理の3種類)の疲労強度を把握した。

##### 4.4.2 供試クラッド鋼板・溶接条件・供試試験片

供試したSUS329J3Lソリッド鋼板(板厚16mm)、SUS329J3Lクラッド鋼板[板厚16mm:SUS329J3L鋼板(合せ材)3mm+炭素鋼板(MS)(母材)13mm]、およびSUS316Lクラッド鋼板[板厚15mm:SUS316L鋼板(合せ材)3mm+炭素鋼板(MS)(母材)12mm]の化学成分を**Table 4.4.1**に、機械的性質を**Table 4.4.2**に示す。なお、**Table 4.4.1**に示したクラッド鋼板の化学成分は、板厚3mmの合せ材(SUS329J3L鋼板、SUS316L鋼板)の化学成分である。また、**Table 4.4.2**に示したクラッド鋼板の機械的性質は、全厚引張試験結果である。

さらに、供試した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溶接条件を、**Table 4.4.3**に示す。また、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溶接条件を、**Table 4.4.4**に示す。全て溶接姿勢は下向き、パス間温度は150℃以下で溶接した。

供試した、荷重伝達型完全溶け込み十字溶接継手疲労試験片形状・寸法を、**Fig.4.4.1**に示す。なお、**Fig.4.4.1**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。

#### 4.4.3 試験結果および考察

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試験結果を、Table 4.4.5 および後述する Fig.4.4.7 に示す。さらに、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結果を、Table 4.4.6～Table 4.4.8 および Fig.4.4.2 に示す。なお、Fig.4.4.2 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 溶接ビードより破断した試験片である。

Table 4.4.7 に示したように、SUS316Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との、継手止端部をグラインダーによってドレッシング処理した荷重伝達型完全溶け込み十字溶接継手の疲労試験結果では、母材破断した試験片が2本ある。したがって、Fig.4.4.2 に示した当該  $\sigma_R-N_f$  線図は、理想的に仕上げられた当該溶接継手の  $\sigma_R-N_f$  線図に近い(後述するが、約90%であった)ものと推測される。

疲労試験後の破断面 および 破断位置の代表例を、Fig.4.4.3～Fig.4.4.6 に示す。

#### 4.4.4 応力集中係数を考慮した疲労強度の補正

先に、突合せ溶接継手の場合を 4.2 節で述べたが、疲労亀裂発生箇所の応力集中係数  $K_t$  を求め、疲労試験結果の応力範囲  $\sigma_R$  を補正した。

突合せ溶接継手の場合と同様に、完全溶け込み十字溶接継手の  $K_t$  計算式を以下に示す(4.14)～(4.16)。

$$K_t = 1 + CQ^{0.467} \cdot f(\theta) \dots\dots\dots (4.4.1)$$

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

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

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

なお、疲労亀裂発生位置の垂直脚長  $h$ 、水平脚長  $hp$  は、シリコンの型からノギスを使って計測した。また、突起幅  $B$  は縦板の厚さとした。さらに、供試試験片から板厚  $t$  を計測した。

先に、Table 4.4.5～Table 4.4.8, Fig.4.4.7 および Fig.4.4.2 に示した疲労試験結果の、疲労亀裂発生位置の応力集中係数  $K_t$ 、ならびに応力範囲  $\sigma_R$ 、補正応力範囲  $K_t \cdot \sigma_R$  (ただし、 $K_f \doteq K_t \leq 3.0$ )、破断繰返し数  $N_f$  を、Table 4.4.9～Table 4.4.12 に示す。また、 $K_t \cdot \sigma_R - N_f$  線図を Fig.4.4.7～Fig.4.4.10 に示す。

Fig.4.4.8～Fig.4.4.10 から明らかなように、 $K_t$  を考慮して応力範囲を補正すると、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3種類、すなわち、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、および継手止端部 TIG アークによるドレッシング処理 全て同一の  $K_t \cdot \sigma_R - N_f$  線図、すなわち、

$$K_t \cdot \sigma_R = 5.90 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.210} \dots\dots\dots (4.4.2)$$

で表わせることが明らかになった。

また、Fig.4.4.7 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(溶接のまま)の  $K_t \cdot \sigma_R - N_f$  線図は、

$$K_t \cdot \sigma_R = 7.13 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.210} \dots\dots\dots (4.4.3)$$

で表わせることが明らかになった。

上述の Eq.(4.4.2) と Eq.(4.4.3) から、

$$7.13 \times 10^3 / 5.90 \times 10^3 = 1.21 \doteq 1.2$$

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の方が，SUS316Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との組み合わせより，疲労強度は約1.2倍強いと言える。

また，Fig.4.4.2 および Fig.4.4.9 から明らかなように，SUS316Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との，継手止端部をグラインダーによってドレッシング処理した荷重伝達型 完全溶け込み十字溶接継手の疲労試験結果は，理想的に仕上げられた当該溶接継手の疲労強度の，

$$5.20 \times 10^3 / 5.90 \times 10^3 = 0.88 \doteq 0.9$$

約90%であったと言える。

#### 4.5 二相ステンレス(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

##### 4.5.1 目的および試験内容

2016年に新しく開発・製造された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疲労強度を把握する。また，比較のために，ケミカルタンカーでの実績がある，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た。

なお，SUS329J3L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，継手止端部グラインダーによるドレッシング処理，および継手止端部TIGアークによるドレッシング処理の3種類を供試した。

##### 4.5.2 供試クラッド鋼板・溶接条件・供試試験片

供試したSUS329J3Lソリッド鋼板(板厚16mm)，SUS329J3Lクラッド鋼板[板厚16mm:SUS329J3L鋼板(合せ材)3mm+炭素鋼板(MS)(母材)13mm]，

および SUS316Lクラッド鋼板 [板厚16mm:SUS316L鋼板(合せ材)3mm+炭素鋼板(MS)(母材)13mm] の化学成分を **Table 4.5.1** に、機械的性質を **Table 4.5.2** に示す。なお、**Table 4.5.1** に示したクラッド鋼板の化学成分は、板厚3mmの合せ材(SUS329J3L鋼板, SUS316L鋼板)の化学成分である。また、**Table 4.5.2** に示したクラッド鋼板の機械的性質は、全厚引張試験結果である。

さらに、供試した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 4.5.3** 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 4.5.4** に示す。全て溶接姿勢は下向き、パス間温度は150°C以下で溶接した。

供試した、荷重非伝達型 完全溶け込み十字溶接継手疲労試験片形状・寸法を、**Fig.4.5.1** および **Fig.4.5.2** に示す。なお、**Fig.4.5.1** および **Fig.4.5.2** 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。

#### 4.5.3 試験結果および考察

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試験結果を、**Table 4.5.5**～**Table 4.5.8** および後述する **Fig.4.5.3** に示す。さらに、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の疲労試験結果を、**Table 4.5.9**～**Table 4.5.14** および **Fig.4.5.4**～**Fig.4.5.6** に示す。なお、**Fig.4.5.3**～**Fig.4.5.6** 中の右向きの矢印を付けた実験点は、未破断および炭素鋼板側より疲労亀裂が発生して破断した試験片である。

**Table 4.5.6**, **Table 4.5.8**, **Table 4.5.10**, **Table 4.5.12**, **Table 4.5.14**, および **Fig.4.5.3**～**Fig.4.5.6** に示した、応力集中係数  $K_t$  を考慮した補正は、先に 4.4.4 項に示した Eq.(4.4.1) を用いて算出した  $K_t$  値によって補正したものである。

**Fig.4.5.3** から、 $K_t$  を考慮して応力範囲を補正すると、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2種類, すなわち, 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は同一の  $K_t \cdot \sigma_R - N_f$  線図, すなわち,

$$K_t \cdot \sigma_R = 6.30 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.210} \dots\dots\dots (4.5.1)$$

で表わせることが明らかになった。

また, Fig.4.5.4～Fig.4.5.6 から,  $K_t$ を考慮して応力範囲を補正すると, 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3種類, すなわち, 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, および継手止端部 TIGアークによるドレッシング処理は, 同一の  $K_t \cdot \sigma_R - N_f$  線図, すなわち,

$$K_t \cdot \sigma_R = 5.90 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.210} \dots\dots\dots (4.5.2)$$

で表わせることが明らかになった。

上述の Eq.(4.5.1) と Eq.(4.5.2) から,

$$6.30 \times 10^3 / 5.90 \times 10^3 = 1.07 \doteq 1.1$$

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の方が, SUS316Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との組み合わせより, 疲労強度は約1.1倍高いといえる。

疲労試験後の破断面 および破断位置の代表例を, Fig.4.5.7～Fig.4.5.10 に示す。

## 4.6 二相ステンレス(SUS329J3L)ソリッド鋼板同士の荷重非伝達型 十字隅肉溶接継手の疲労強度

### 4.6.1 目的および試験内容

SUS329J3L鋼板同士の荷重非伝達型 十字隅肉溶接継手の疲労強度を把握する。

なお, SUS329J3L鋼板同士の荷重非伝達型 十字隅肉溶接継手は, 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, および継手止端部TIGアークによるドレッシング処理の3種類を供試した。



#### 4.6.2 供試鋼板・溶接条件・供試試験片

供試したSUS329J3L鋼板(板厚16mm)の化学成分を **Table 4.6.1** に、機械的性質を **Table 4.6.2** に示す。

さらに、供試したSUS329J3L鋼板同士の荷重非伝達型 十字隅肉溶接継手の溶接条件を、**Table 4.6.3** に示す。全て溶接姿勢は下向き、パス間温度は150℃以下で溶接した。

供試した、荷重非伝達型 十字隅肉溶接継手疲労試験片形状・寸法を、**Fig.4.6.1** に示す。

#### 4.6.3 試験結果および考察

SUS329J3L鋼板同士の荷重非伝達型 十字隅肉溶接継手(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 4.6.4**～**Table 4.6.6** および **Fig.4.6.2** に示す。**Fig.4.6.2** 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。

供試した3種類の十字隅肉溶接継手の疲労強度は、

溶接のまま

$$\sigma_R = 6.95 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.273} \dots\dots\dots (4.6.1)$$

継手止端部グラインダーによるドレッシング処理

$$\sigma_R = 1.01 \times 10^4 \cdot N_f^{-0.273} \dots\dots\dots (4.6.2)$$

継手止端部TIGアークによるドレッシング処理

$$\sigma_R = 1.18 \times 10^4 \cdot N_f^{-0.273} \dots\dots\dots (4.6.3)$$

で表わせることが明らかになった。

したがって、継手止端部をグラインダーでドレッシング処理すると、**Eq.(4.6.1)** と **Eq.(4.6.2)** から、

$$1.01 \times 10^4 / 6.95 \times 10^3 = 1.45 \doteq 1.5$$

疲労強度は約1.5倍強くなる。また、継手止端部をTIGアークでドレッシング処理すると、**Eq.(4.6.1)** と **Eq.(4.6.3)** から、

$$1.18 \times 10^4 / 6.95 \times 10^3 = 1.7$$

疲労強度は約1.7倍強くなる。

疲労試験後の破断面 および 破断位置の代表例を, Fig.4.6.3～Fig.4.6.5に示す。

先に, 4.4.4項に示した, Eq.(4.4.1)によって算出した応力集中係数  $K_t$  を考慮して補正した疲労試験結果を, Table 4.6.7～Table 4.6.9 および Fig.4.6.6～Fig.4.6.8に示す。

Fig.4.6.6～Fig.4.6.8から,  $K_t$ を考慮して応力範囲を補正すると, SUS329J3L 鋼板同士の荷重非伝達型十字隅肉溶接継手3種類, すなわち, 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, および継手止端部 TIGアークによるドレッシング処理は, 同一の  $K_t \cdot \sigma_R - N_f$  線図, すなわち,

$$K_t \cdot \sigma_R = 1.44 \times 10^4 \cdot N_f^{-0.273} \dots\dots\dots (4.6.4)$$

で表わせることが明らかになった。

## 4.7 $2 \times 10^6$ 回疲労強度に及ぼす十字溶接継手止端半径の影響

### 4.7.1 目的および内容

SUS329J3Lクラッド鋼板, SUS329J3Lソリッド鋼板, SUS316Lクラッド鋼板, および SUS316LNソリッド鋼板などを使用して建造するケミカルタンカーのカーゴタンク構造溶接継手部の, 工作現場での品質管理の参考にするために, 本研究で実施した各種十字溶接継手部の疲労試験結果から,  $2 \times 10^6$ 回疲労強度  $2 \times 10^6 \sigma_R$  (N/mm<sup>2</sup>)と, 溶接継手止端半径 R(mm)との関係を, 調査・検討・把握する。

### 4.7.2 調査・検討対象にした十字溶接継手

先に, 4.4節に示した, 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(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, および継手止端部 TIGアークによるドレッシング処理の3種類), 4.5節に示した, 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，継手止端部グラインダーによるドレッシング処理，および継手止端部 TIGアークによるドレッシング処理の3種類)，さらに，4.6節に示した，SUS329J3L鋼板同士の荷重非伝達型 十字隅肉溶接継手(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，および継手止端部 TIGアークによるドレッシング処理の3種類)の，計9種類の十字溶接継手を調査・検討対象にした。

#### 4.7.3 調査・検討結果および考察

上述したように，4.4節に示した Table 4.4.10～Table 4.4.12, Fig.4.4.8～Fig.4.4.10, および 4.5節に示した Table 4.5.10, Table 4.5.12, Table 4.5.14, Fig.4.5.4～Fig.4.5.6, ならびに 4.6節に示した Table 4.6.7～Table 4.6.9, Fig.4.6.6～Fig.4.6.8 などから調査・検討した結果を，Table 4.7.1 および Fig.4.7.1に示す。

なお，Table 4.7.1 および Fig.4.7.1に示した  $2 \times 10^6 \sigma_R$  (N/mm<sup>2</sup>)は，各十字溶接継手の  $\sigma_R$ - $N_f$ 線図の実験式から算出した  $2 \times 10^6$ 回の疲労強度 ( $R=0.1$  に対する応力範囲)である。また， $R$  (mm)は，各十字溶接継手の  $\sigma_R$ - $N_f$ 線図の決定に有効であったと判断される疲労試験結果での疲労亀裂発生箇所の止端半径の平均値である。

Fig.4.7.1 から明らかなように， $2 \times 10^6 \sigma_R$  (N/mm<sup>2</sup>)と  $R$  (mm)との関係式は，

$$2 \times 10^6 \sigma_R = 9 \cdot R + 115 \dots\dots\dots (4.7.1)$$

となる。したがって，止端半径  $R$ が10mm 以上になるようなドレッシング処理をすれば，応力比0.1の条件で， $2 \times 10^6$ 回疲労強度 ( $2 \times 10^6$ 回応力範囲)  $2 \times 10^6 \sigma_R$ は，200N/mm<sup>2</sup>程度以上確保できるものと考えられる。

#### 4.8 二相ステンレス (SUS329J3L) クラッド鋼板 および SUS329J3L ソリッド鋼板の溶接継手部疲労強度に関する総合評価

以上述べて来たように，本章では，SUS329J3Lクラッド鋼板 および SUS329J3Lソリッド鋼板をケミカルタンカー建造に実用することを目的として，SUS329J3Lソリッド鋼板同士，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, さらに, SUS329J3Lソリッド鋼板同士の荷重非伝達型十字隅肉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, 4.2節・4.3節・4.4節 および 4.5節で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.4.8.1 のようになる。なお, 4.6節で述べたSUS329J3Lソリッド鋼板同士の荷重非伝達型 十字隅肉溶接継手の  $K_t \cdot \sigma_R - N_f$  線図の勾配が異なったため, Fig.4.8.1 には入れていない。

Fig.4.8.1 より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.4.8.1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.4.8.1中③)の

$$7.77 \times 10^3 / 6.30 \times 10^3 = 1.23 \div 1.2$$

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.4.8.1中④)は, SUS316LNソリッド鋼板同士の突合せ溶接継手の疲労強度(Fig.4.8.1中⑤)の

$$5.90 \times 10^3 / 5.20 \times 10^3 = 1.13 \div 1.1$$

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伝達型完全溶け込み十字溶接継手の疲労強度(Fig.4.8.1中②)は, 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(Fig.4.8.1中④)の

$$7.13 \times 10^3 / 5.90 \times 10^3 = 1.21 \div 1.2$$

約1.2倍強い。

- ④ 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.4.8.1中③)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(Fig.4.8.1中④)の

$$6.30 \times 10^3 / 5.90 \times 10^3 = 1.07 \div 1.1$$

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、各種溶接継手共、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。

また、十字溶接継手では、止端半径が10mm以上になるようなドレッシング  
処理をすれば、応力比0.1の条件で、 $2 \times 10^6$ 回疲労強度( $2 \times 10^6$ 回応力  
範囲)は、 $200 \text{ N/mm}^2$ 程度以上確保できることが明らかになった。

#### 4.9 まとめ

SUS329J3Lクラッド鋼板 および SUS329J3Lソリッド鋼板 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、各種突合せ溶接継手や、  
各種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。

## 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) 緒方洋典, 堺田和昌, 高 允宝, 谷野忠和, 矢島 浩, 吉崎嗣人, 福井 努: ステンレス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11号(2014.7.18.), PP.44-47.
- 4.6) 緒方洋典, 堺田和昌, 森 俊哲, 福井 努, 矢島 浩, 谷野忠和: 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ついて, 溶接学会全国大会講演概要, 第97集(2015.9.), pp.188-189.
- 4.7) 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), 日本海事協会誌, No.311(2015(Ⅱ号)), pp.21-30.

- 4.8) 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.
- 4.9) 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.
- 4.10) Hironori Ogata, Kazumasa Sakaida, Kenji Shinozaki, Motomichi Yamamoto, Tadakazu Tanino and Hiroshi Yajima: A Study on the Fatigue Strength of Welded Joints of Duplex Stainless-Clad Steel Plates for Application in Chemical Tankers, Welding Letters of The Japan Welding Society, Vol.1 (2018.), pp.1-3.
- 4.11) 石橋 正: 金属の疲労と破壊の防止, (1958増訂第3版), pp.53-62.
- 4.12) 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. X III-1202-86 (1986.7.12-19.).
- 4.13) 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.
- 4.14) 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.
- 4.15) 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.
- 4.16) 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 4.2.1 Chemical composition of test steel plates**

Test Steel Plate	(wt%)								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
SUS329J3L (t:16)	0.008	0.56	1.80	0.025	0.001	22.50	5.80	3.10	0.16
SUS316LN (t:17.5)	0.019	0.69	0.60	0.027	0.001	18.22	10.60	2.83	0.17

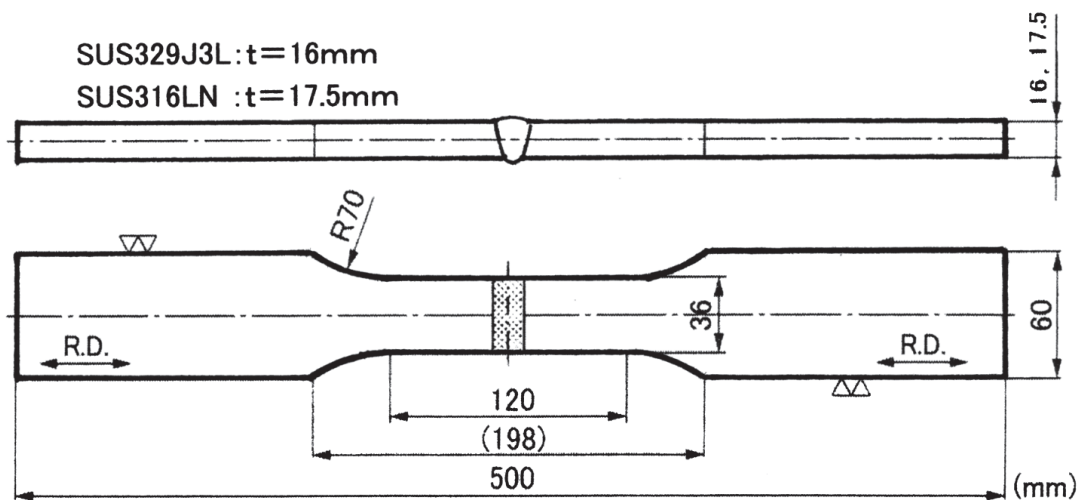
**Table 4.2.2 Mechanical properties of test steel plates**

Test Steel Plate	Thick. (mm)	0.2 % Proof Stress (N/mm <sup>2</sup> )	Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Hardness (HV)
SUS329J3L	16	615	772	38	255
SUS316LN	17.5	399	679	48	194



**Table 4.2.3 Welding parameters of butt welded joints**

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



**Fig.4.2.1 Shape and size of fatigue test specimen (Butt welded joint)**

**Table 4.2.4 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 <sup>2</sup> )	Test Load			Test Stress			Freq. f (Hz)	Number of Cycles to Failure N <sub>f</sub> (cycles)	Remark
				Max. P <sub>max</sub> (kN)	Min. P <sub>min</sub> (kN)	Range P <sub>R</sub> (kN)	Max. σ <sub>max</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Min. σ <sub>min</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Range σ <sub>R</sub> (N/mm <sup>2</sup> )			
BW5-1	36.0	16.4	590	131	13.1	118	222	22.2	200	10	>2.05 × 10 <sup>6</sup> >2,048,799	Non-Failure
BW5-2	36.0	16.4	590	197	19.7	177	333	33.3	300	5	>1.11 × 10 <sup>6</sup> >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 <sup>5</sup> 195,295	
BW5-4	36.0	16.5	594	297	29.7	267	500	50.0	450	5	9.90 × 10 <sup>4</sup> 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 <sup>5</sup> 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 <sup>6</sup> 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 <sup>6</sup> 1,173,459	Failure from Uranami-Toe

**Table 4.2.5 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 <sup>2</sup> )	Test Load			Test Stress			Freq. f (Hz)	Number of Cycles to Failure N <sub>f</sub> (cycles)	Remark
				Max. P <sub>max</sub> (kN)	Min. P <sub>min</sub> (kN)	Range P <sub>R</sub> (kN)	Max. σ <sub>max</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Min. σ <sub>min</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Range σ <sub>R</sub> (N/mm <sup>2</sup> )			
BW2-1	36.2	15.6	565	220	22.0	198	389	38.9	350	5	2.64 × 10 <sup>5</sup> 263,803	
BW2-2	36.1	15.7	567	189	18.9	170	333	33.3	300	7	5.10 × 10 <sup>5</sup> 510,382	
BW2-3	36.2	15.7	568	284	28.4	256	500	50.0	450	5	1.03 × 10 <sup>5</sup> 102,778	
BW2-4	36.1	15.7	567	252	25.2	227	444	44.4	400	5	2.08 × 10 <sup>5</sup> 207,960	
BW2-5	36.1	15.7	567	158	15.8	142	278	27.8	250	10	>2.00 × 10 <sup>6</sup> >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 <sup>6</sup> >2,073,007	Non-Failure

**Table 4.2.6 Results of fatigue test for butt welded joint  
(SUS329J3L steel plate. Dressing by TIG arc)**

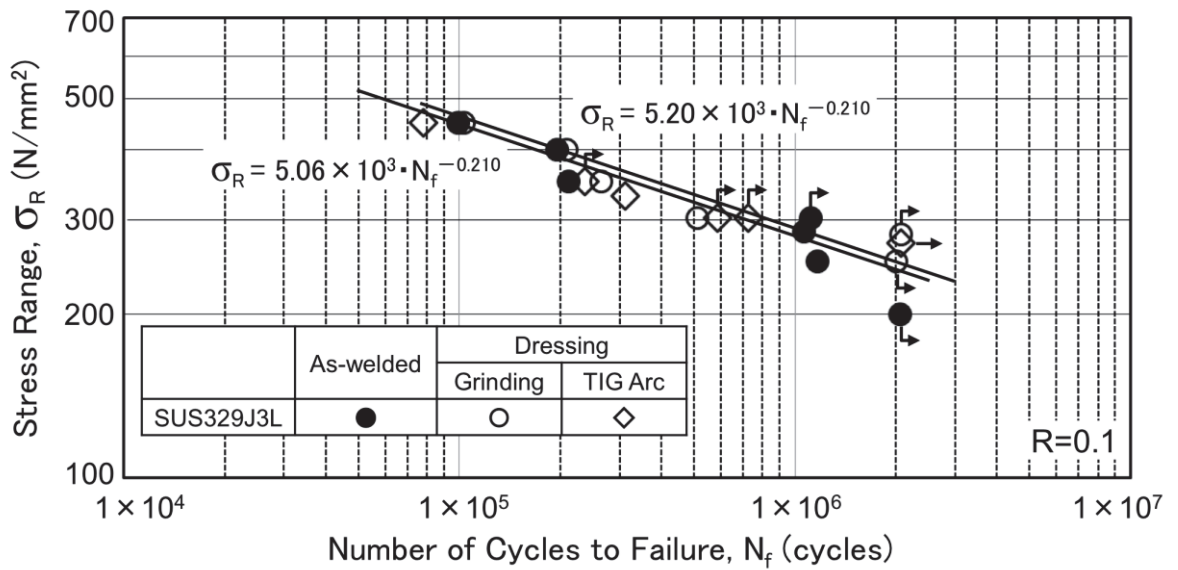
R=0.1

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

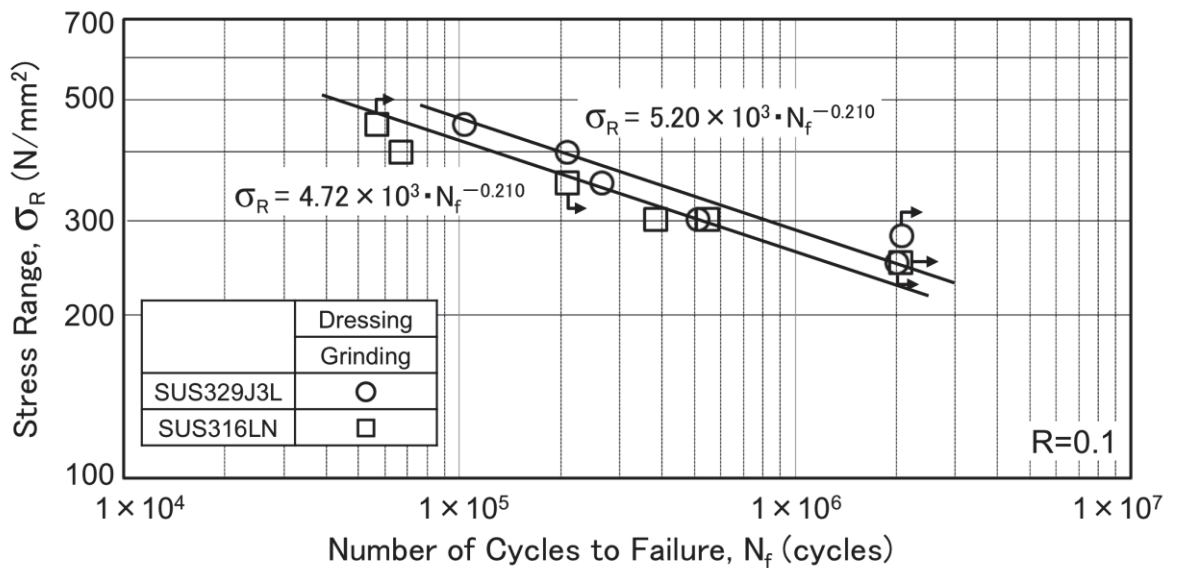
**Table 4.2.7 Results of fatigue test for butt welded joint  
(SUS316LN steel plate. Dressing by grinding)**

R=0.1

Specimen Number	Width w (mm)	Thick. t (mm)	Cross-section Area A (mm <sup>2</sup> )	Test Load			Test Stress			Freq. f (Hz)	Number of Cycles to Failure N <sub>f</sub> (cycles)	Remark
				Max. P <sub>max</sub> (kN)	Min. P <sub>min</sub> (kN)	Range P <sub>R</sub> (kN)	Max. σ <sub>max</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Min. σ <sub>min</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Range σ <sub>R</sub> (N/mm <sup>2</sup> )			
BW4-1	36.0	16.4	590	230	23.0	207	389	38.9	350	5	>2.08 × 10 <sup>5</sup> >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 <sup>4</sup> >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 <sup>5</sup> 383,059	
BW4-4	36.1	16.5	596	265	26.5	239	444	44.4	400	4	6.67 × 10 <sup>4</sup> 66,633	
BW4-5	36.1	16.5	596	198	19.8	178	333	33.3	300	5	5.48 × 10 <sup>5</sup> 547,527	
BW4-6	36.1	16.5	596	166	16.6	149	278	27.8	250	7	>2.05 × 10 <sup>6</sup> >2,053,146	Non-Failure
BW4-7												



**Fig.4.2.2 Results of fatigue test for butt welded joint ( $\sigma_R$ - $N_f$  curves)**



**Fig.4.2.3 Results of fatigue test for butt welded joint ( $\sigma_R$ - $N_f$  curves)**

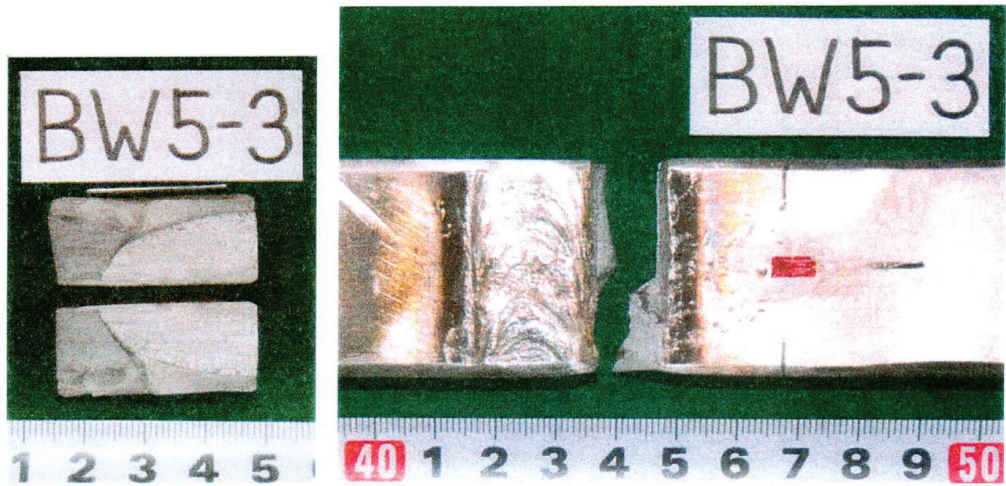


Fig.4.2.4 Fracture surface and pass after fatigue test (BW5-3, 400 N/mm<sup>2</sup>,  $1.95 \times 10^5$  cycles)

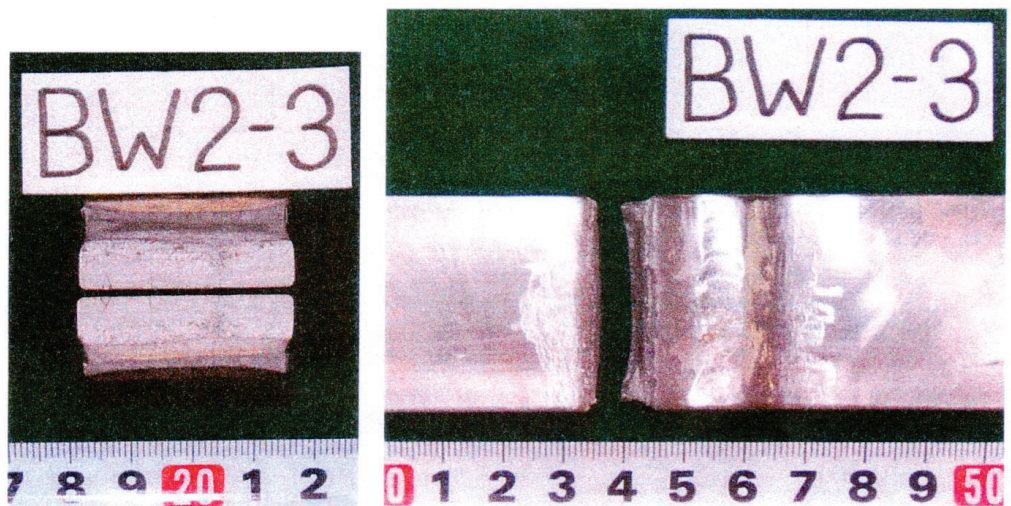


Fig.4.2.5 Fracture surface and pass after fatigue test (BW2-3, 450 N/mm<sup>2</sup>,  $1.03 \times 10^5$  cycles)

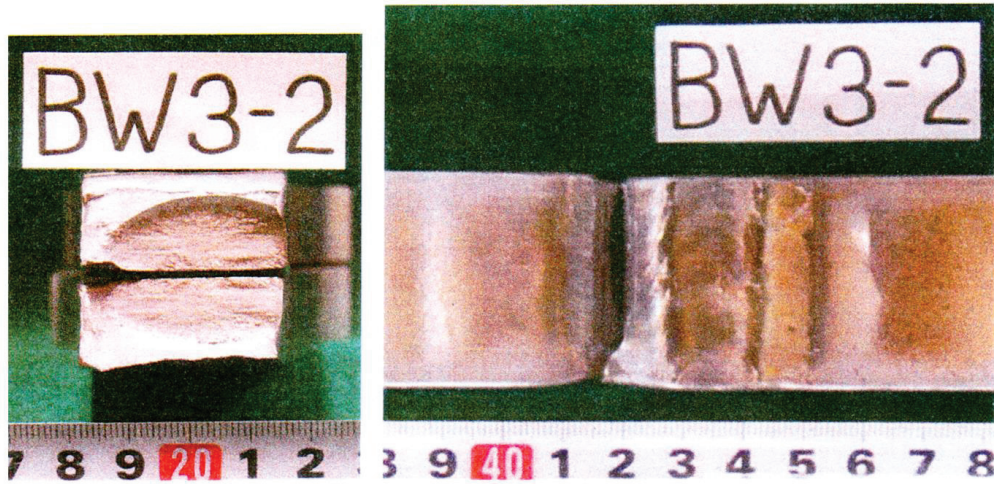


Fig.4.2.6 Fracture surface and pass after fatigue test (BW3-2, 450 N/mm<sup>2</sup>, 7.79 × 10<sup>4</sup> cycles)

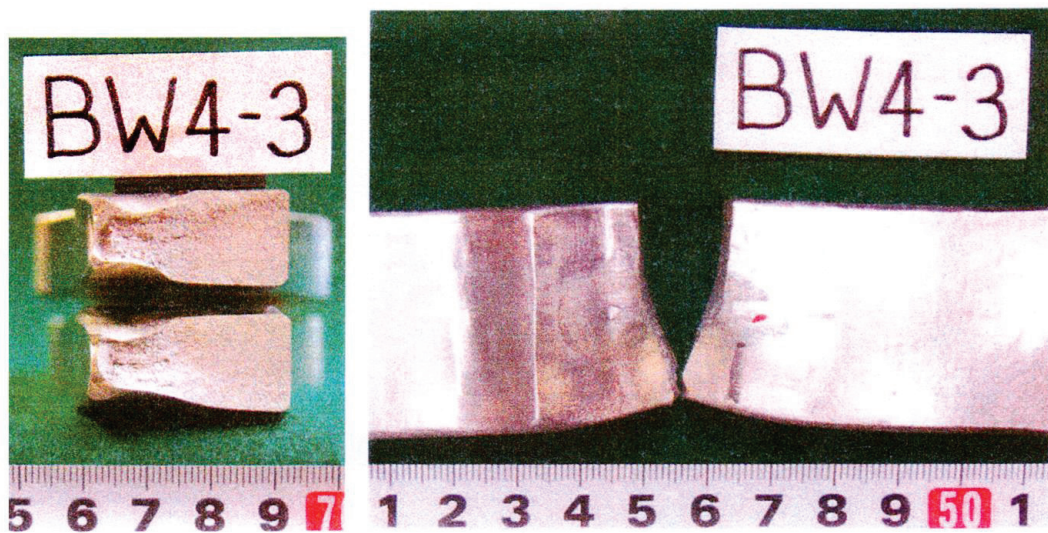
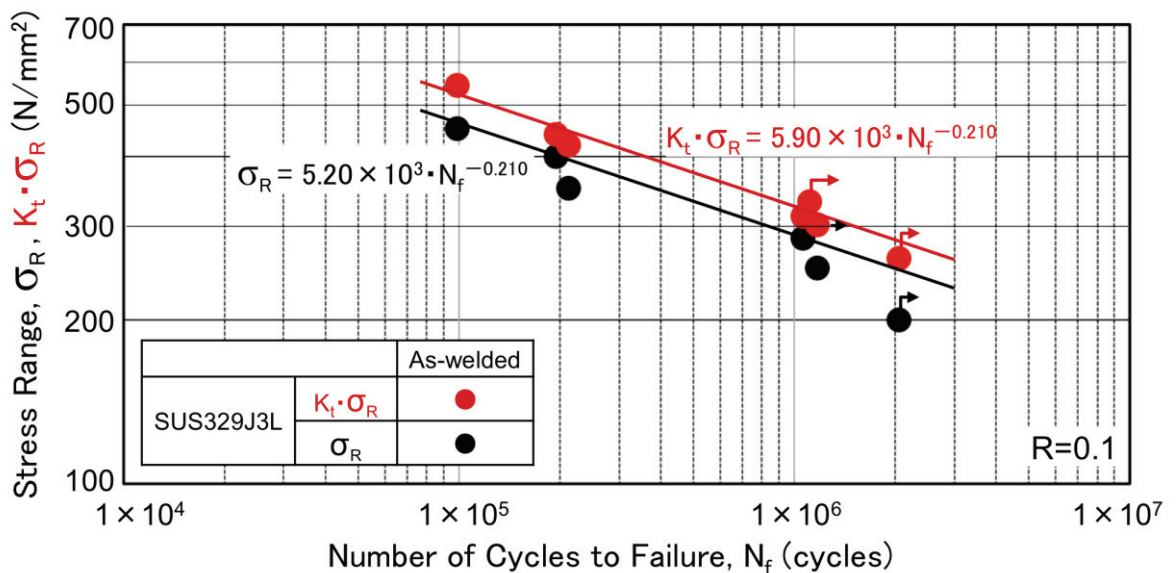


Fig.4.2.7 Fracture surface and pass after fatigue test (BW4-3, 300 N/mm<sup>2</sup>, 3.83 × 10<sup>5</sup> cycles)

**Table 4.2.8 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 $\theta$ (°)	Height of Bead H (mm)	Width of Bead B (mm)	Stress Concentration Factor $K_t$	Stress Range $\sigma_R$ (N/mm <sup>2</sup> )	$K_t \cdot \sigma_R$ (N/mm <sup>2</sup> )	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	$>2.05 \times 10^6$ $>2,048,799$	Non-Failure
BW5-2	36.0	16.4	7.7	11.3	0.7	20.9	1.1	300	330	$>1.11 \times 10^6$ $>1,112,459$	Base Plate Failure
BW5-3	36.0	16.5	4.8	13.7	0.8	18.9	1.1	400	440	$1.95 \times 10^5$ 195,295	
BW5-4	36.0	16.5	2.4	16.6	0.9	20.8	1.2	450	540	$9.90 \times 10^4$ 98,953	Failure from Uranami-Toe
BW5-5	36.0	16.5	3.3	12.5	0.8	19.1	1.2	350	420	$2.12 \times 10^5$ 211,516	Failure from Uranami-Toe
BW5-6	36.0	16.4	3.6	8.1	0.6	18.9	1.1	283	311	$1.06 \times 10^6$ 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	$1.17 \times 10^6$ 1,173,459	Failure from Uranami-Toe

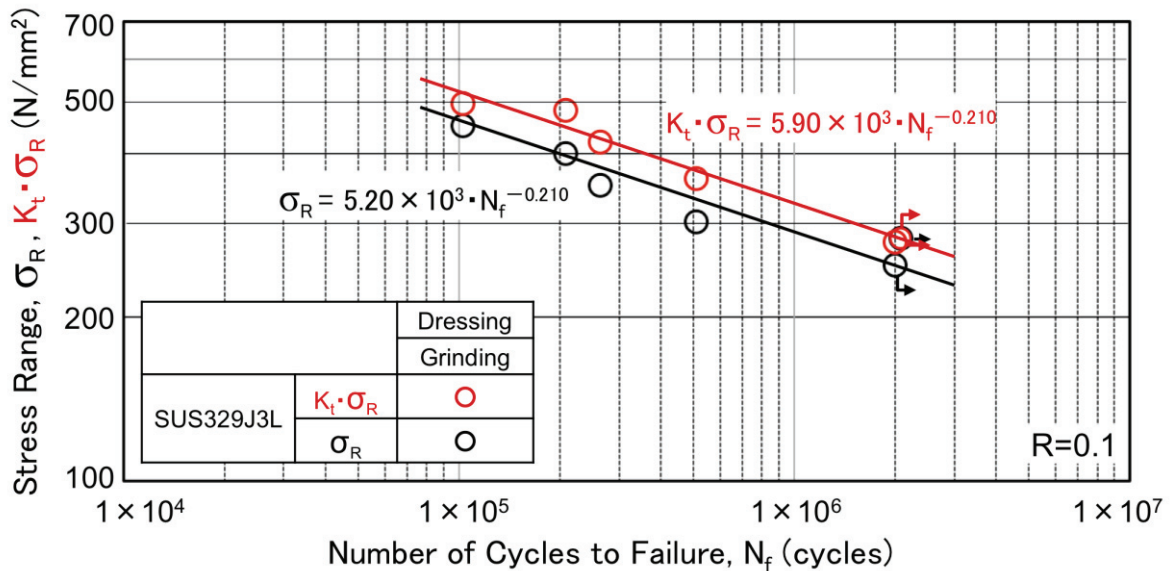


**Fig.4.2.8 Results of fatigue test for butt welded joint  
( $\sigma_R-N_f$  curve,  $K_t \cdot \sigma_R-N_f$  curve)**

**Table 4.2.9 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 $\theta$ ( $^\circ$ )	Height of Bead H (mm)	Width of Bead B (mm)	Stress Concentration Factor $K_t$	Stress Range $\sigma_R$ (N/mm <sup>2</sup> )	$K_t \cdot \sigma_R$ (N/mm <sup>2</sup> )	Number of Cycles to Failure $N_f$ (cycles)	Remark
BW2-1	36.2	15.6	3.5	11.4	1.4	20.0	1.2	350	420	$2.64 \times 10^5$ 263,803	
BW2-2	36.1	15.7	5.4	16.0	1.5	20.2	1.2	300	360	$5.10 \times 10^5$ 510,382	
BW2-3	36.2	15.7	7.5	14.8	1.4	20.0	1.1	450	495	$1.03 \times 10^5$ 102,778	
BW2-4	36.1	15.7	5.7	17.7	1.6	19.1	1.2	400	480	$2.08 \times 10^5$ 207,960	
BW2-5	36.1	15.7	11.8	22.1	1.4	19.6	1.1	250	275	$>2.00 \times 10^6$ >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	$>2.07 \times 10^6$ >2,073,007	Non-Failure



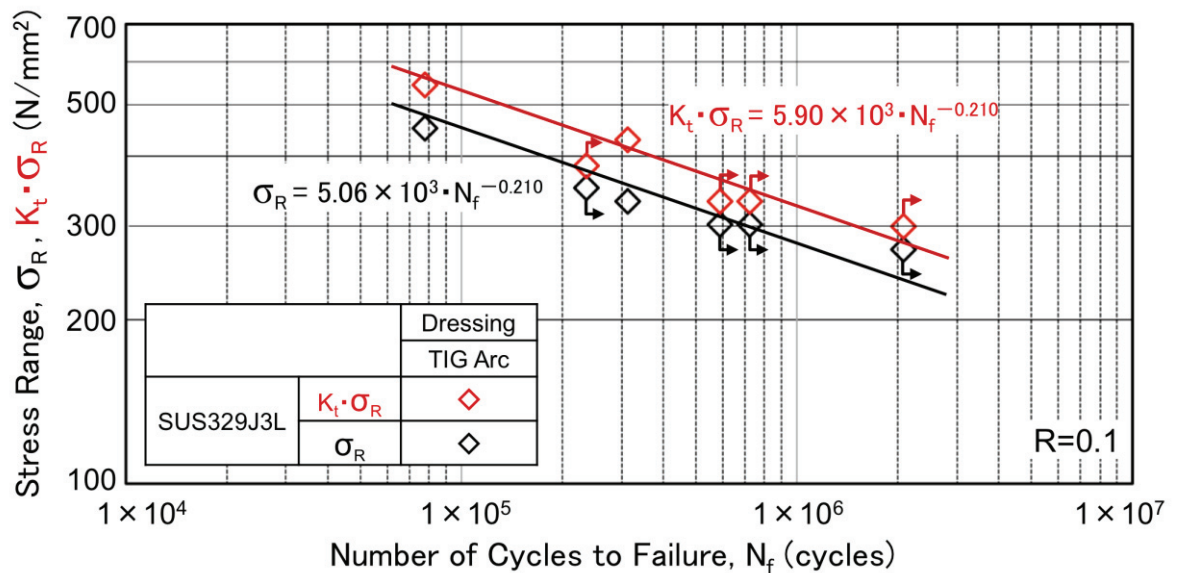
**Fig.4.2.9 Results of fatigue test for butt welded joint  
( $\sigma_R$ - $N_f$  curve,  $K_t \cdot \sigma_R$ - $N_f$  curve)**



**Table 4.2.10 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 $\theta$ ( $^\circ$ )	Height of Bead H (mm)	Width of Bead B (mm)	Stress Concentration Factor $K_t$	Stress Range $\sigma_R$ (N/mm <sup>2</sup> )	$K_t \cdot \sigma_R$ (N/mm <sup>2</sup> )	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	$>2.36 \times 10^5$ $>235,635$	Base Plate Failure
BW3-2	36.0	15.7	6.4	19.6	1.2	19.2	1.2	450	540	$7.79 \times 10^4$ 77,891	
BW3-3	36.1	15.7	8.3	22.9	1.5	19.5	1.1	300	330	$>7.24 \times 10^5$ $>723,956$	Base Plate Failure
BW3-4	36.0	15.7	13.9	22.5	1.5	18.8	1.1	270	297	$>2.07 \times 10^6$ $>2,066,002$	Non-Failure
BW3-5	36.1	15.7	3.1	20.7	1.5	18.8	1.3	330	429	$3.12 \times 10^5$ 312,136	
BW3-6											
BW3-7	36.1	15.7	4.9	11.0	0.7	18.7	1.1	300	330	$>5.89 \times 10^5$ $>588,906$	Base Plate Failure

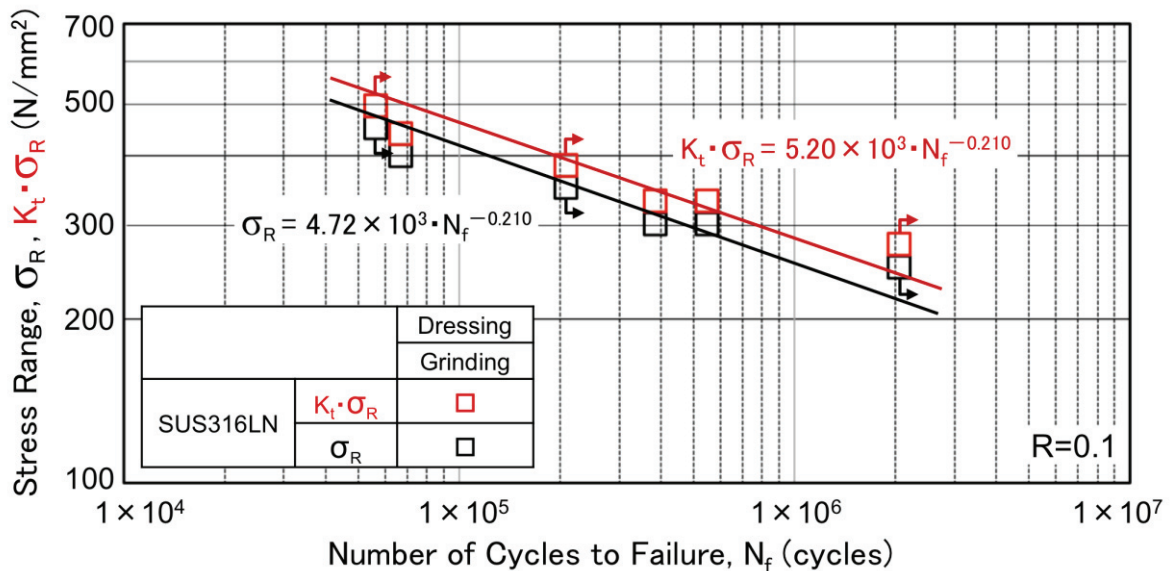


**Fig.4.2.10 Results of fatigue test for butt welded joint  
( $\sigma_R$ - $N_f$  curve,  $K_t \cdot \sigma_R$ - $N_f$  curve)**

**Table 4.2.11 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 $\theta$ ( $^\circ$ )	Height of Bead H (mm)	Width of Bead B (mm)	Stress Concentration Factor $K_t$	Stress Range $\sigma_R$ (N/mm <sup>2</sup> )	$K_t \cdot \sigma_R$ (N/mm <sup>2</sup> )	Number of Cycles to Failure $N_f$ (cycles)	Remark
BW4-1	36.0	16.4	11.4	7.1	2.3	20.9	1.1	350	385	$>2.08 \times 10^5$ $>207,931$	Base Plate Failure
BW4-2	36.1	16.4	17.8	12.4	2.7	19.4	1.1	450	495	$>5.65 \times 10^4$ $>56,493$	Failure from Welded Defect
BW4-3	36.1	16.5	13.5	12.3	2.4	19.8	1.1	300	330	$3.83 \times 10^5$ 383,059	
BW4-4	36.1	16.5	12.7	13.6	2.1	18.8	1.1	400	440	$6.67 \times 10^4$ 66,633	
BW4-5	36.1	16.5	14.9	13.8	2.2	19.2	1.1	300	330	$5.48 \times 10^5$ 547,527	
BW4-6	36.1	16.5	15.8	8.8	1.9	19.0	1.1	250	275	$>2.05 \times 10^6$ $>2,053,146$	Non-Failure
BW4-7											



**Fig.4.2.11 Results of fatigue test for butt welded joint  
( $\sigma_R$ - $N_f$  curve,  $K_t \cdot \sigma_R$ - $N_f$  curve)**

**Table 4.3.1 Chemical composition of test steel plates**  
(wt%)

Test Steel Plate	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
SUS329J3L- Clad* (t: 3+13)	0.013	0.31	0.97	0.025	0.002	22.55	5.42	3.10	0.17
SUS316L- Clad* (t: 3+13)	0.008	0.58	0.78	0.021	0.001	17.14	12.17	2.75	—

\* SUS329J3L, SUS316L Steel Plate (3mm)

**Table 4.3.2 Mechanical properties of test steel plates**

Test Steel Plate	Thick. (mm)	0.2% Proof Stress (N/mm <sup>2</sup> )	Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
SUS329J3L- Clad*	16 (3+13)	433	554	23
SUS316L- Clad*	16 (3+13)	290	480	27

\* Full-Thickness Tensile Test (16mm)

**Table 4.3.3 Welding parameters of butt welded joints (FCAW)**

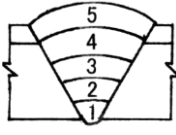
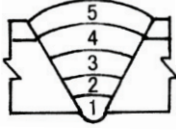
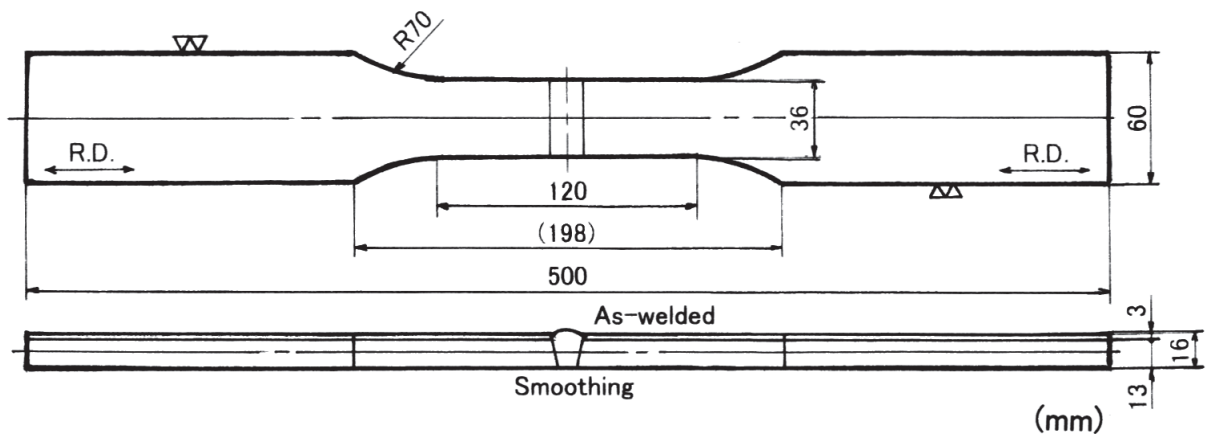
Test Steel Plate	Build-up Sequence	Welding Current (A)	Arc Voltage (V)	Travel Speed (cm/min)	Heat Input (kJ/cm)	Welding Consumables (JIS)	
SUS329J3L-Clad Steel Plate + SUS329J3L-Clad Steel Plate		4, 5 Stainless	200	32 ~33	16.8 ~17.8	22.2 ~22.9	TS2209 -FCO
		1~3 Mild Steel	200 ~280	24 ~32	17.5 ~28.3	15.4 ~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  $\leq 150^{\circ}\text{C}$



**Fig.4.3.1 Shape and size of fatigue test specimen (Butt welded joint of clad steel plate)**

**Table 4.3.4 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 <sup>2</sup> )	Test Load			Test Stress			Freq. f (Hz)	Number of Cycles to Failure N <sub>f</sub> (cycles)	Remark
				Max. P <sub>max</sub> (kN)	Min. P <sub>min</sub> (kN)	Range P <sub>R</sub> (kN)	Max. σ <sub>max</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Min. σ <sub>min</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Range σ <sub>R</sub> (N/mm <sup>2</sup> )			
9-1 S29J-1	36.0	16.6	598	233	23.3	209	389	38.9	350	5	3.15 × 10 <sup>5</sup> 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 <sup>5</sup> 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 <sup>4</sup> 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 <sup>4</sup> 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 <sup>6</sup> >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 <sup>4</sup> 55,079	Failure of SUS329J3L Toe

**Table 4.3.5 Results of fatigue test for butt welded joint  
(Correct by K<sub>t</sub>)  
(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 <sub>t</sub>	Stress Range σ <sub>R</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	K <sub>t</sub> · σ <sub>R</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Number of Cycles to Failure N <sub>f</sub> (cycles)	Remark
9-2 S29J-2	36.0	16.7	1.27	28.5	2.00	21.3	1.6	300	480	7.00 × 10 <sup>5</sup> 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 <sup>4</sup> 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 <sup>4</sup> 93,667	
9-5 S29J-5	36.1	16.5	-	-	-	-	-	270	-	>2.00 × 10 <sup>6</sup> >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 <sup>4</sup> 55,079	

**Table 4.3.6 Results of fatigue test for butt welded joint  
(SUS316L-clad steel plate. As-welded)**

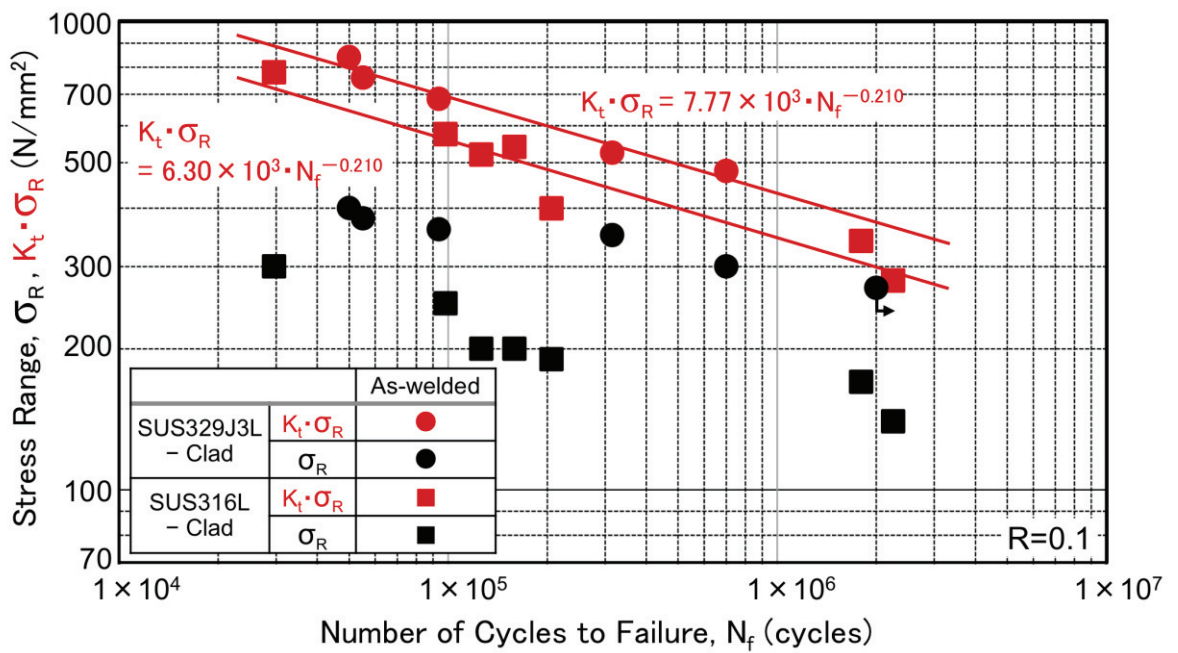
R=0.1

Specimen Number	Width w (mm)	Thick. t (mm)	Cross-section Area A (mm <sup>2</sup> )	Test Load			Test Stress			Freq. f (Hz)	Number of Cycles to Failure N <sub>f</sub> (cycles)	Remark
				Max. P <sub>max</sub> (kN)	Min. P <sub>min</sub> (kN)	Range P <sub>R</sub> (kN)	Max. σ <sub>max</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Min. σ <sub>min</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Range σ <sub>R</sub> (N/mm <sup>2</sup> )			
6-1 S16J-1	36.0	16.8	605	202	20.2	182	333	33.3	300	5	2.96 × 10 <sup>4</sup> 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 <sup>4</sup> 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 <sup>5</sup> 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 <sup>5</sup> 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 <sup>5</sup> 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 <sup>6</sup> 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 <sup>6</sup> 1,800,494	Failure of SUS316L Toe

**Table 4.3.7 Results of fatigue test for butt welded joint  
(Correct by K<sub>t</sub>)  
(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 <sub>t</sub>	Stress Range σ <sub>R</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	K <sub>t</sub> · σ <sub>R</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Number of Cycles to Failure N <sub>f</sub> (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 <sup>4</sup> 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 <sup>4</sup> 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 <sup>5</sup> 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 <sup>5</sup> 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 <sup>5</sup> 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 <sup>6</sup> 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 <sup>6</sup> 1,800,494	



**Fig.4.3.2 Results of fatigue test for butt welded joint ( $K_t \cdot \sigma_R - N_f$  curves)**



Fig.4.3.3 Fracture surface and pass after fatigue test (S29J-1, 350 N/mm<sup>2</sup>, 3.15 × 10<sup>5</sup> cycles)



Fig.4.3.4 Fracture surface and pass after fatigue test (S16J-4, 200 N/mm<sup>2</sup>, 1.26 × 10<sup>5</sup> cycles)



**Table 4.4.1 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
SUS316L- Clad* (t:3+12)	0.008	0.54	0.77	0.024	0.001	16.94	12.11	2.84	—

\* SUS329J3L, SUS316L Steel Plate (3mm)

**Table 4.4.2 Mechanical properties of test steel plates**

Test Steel Plate	Thick. (mm)	0.2% Proof Stress (N/mm <sup>2</sup> )	Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
SUS329J3L	16	594	771	35
SUS329J3L- Clad*	16 (3+13)	433	554	23
SUS316L- Clad*	15 (3+12)	—	476	35

\* Full-Thickness Tensile Test (16mm, 15mm)

**Table 4.4.3 Welding parameters of full penetration cruciform welded joints (FCAW)**


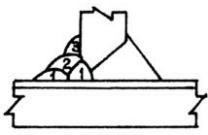
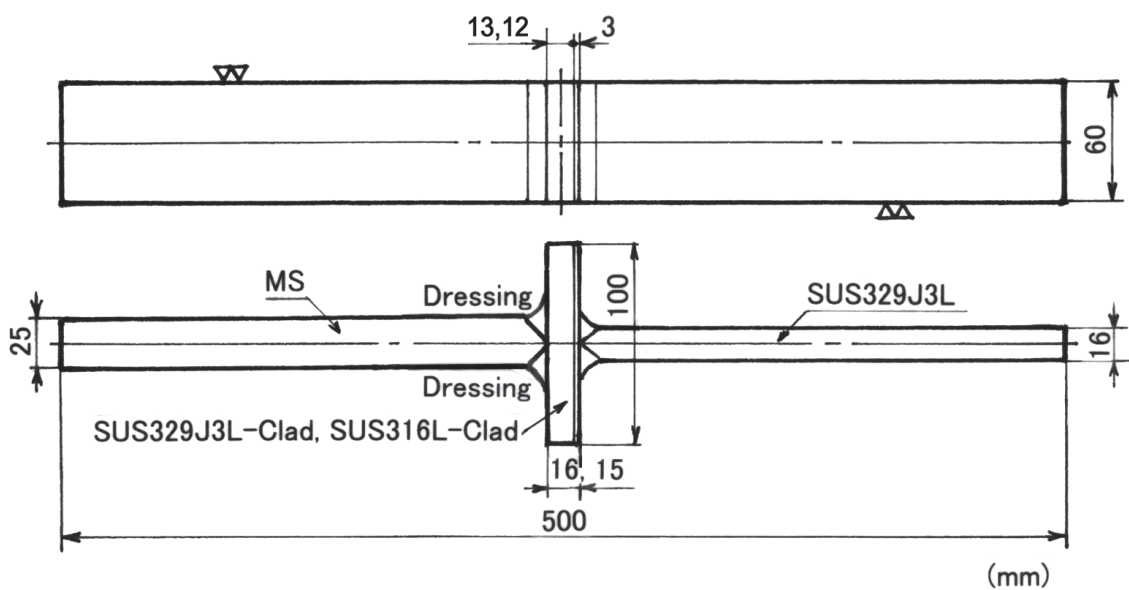
Test Steel Plate	Build-up Sequence	Welding Current (A)	Arc Voltage (V)	Travel Speed (cm/min)	Heat Input (kJ/cm)	Welding Consumables (JIS)
SUS329J3L-Clad Steel Plate + SUS329J3L Steel Plate		180 ~200	30 ~32	17.0 ~28.2	13.6 ~22.6	TS2209 -FCO
		200	32	15.7 ~28.3	13.6 ~24.5	TS2209 -FCO

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

**Table 4.4.4 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



**Fig.4.4.1 Shape and size of fatigue test specimen (Load-carrying full penetration cruciform welded joint)**

**Table 4.4.5 Results of fatigue test for 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 <sup>2</sup> )	Test Load			Test Stress			Freq. f (Hz)	Number of Cycles to Failure N <sub>f</sub> (cycles)	Remark
				Max. P <sub>max</sub> (kN)	Min. P <sub>min</sub> (kN)	Range P <sub>R</sub> (kN)	Max. σ <sub>max</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Min. σ <sub>min</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Range σ <sub>R</sub> (N/mm <sup>2</sup> )			
P-1 SCCA-1	60.1	16.3	980	327	32.7	294	334	33.4	300	5	1.12 × 10 <sup>5</sup> 111,915	Failure of SUS329J3L Toe
P-2 SCCA-2	60.1	16.3	980	218	21.8	196	222	22.2	200	8	3.59 × 10 <sup>5</sup> 358,921	Failure of SUS329J3L Toe
P-3 SCCA-3	60.1	16.5	992	276	27.6	248	278	27.8	250	6	2.56 × 10 <sup>5</sup> 255,990	Failure of SUS329J3L Toe
P-4 SCCA-4	60.2	16.4	987	187	18.7	168	189	18.9	170	8	5.53 × 10 <sup>5</sup> 553,320	Failure of SUS329J3L Toe
P-5 SCCA-5	60.1	16.4	986	131	13.1	118	133	13.3	120	8	1.60 × 10 <sup>6</sup> 1,598,826	Failure of SUS329J3L Toe
P-6 SCCA-6												
P-7 SCCA-7												

**Table 4.4.6 Results of fatigue test for 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 <sup>2</sup> )	Test Load			Test Stress			Freq. f (Hz)	Number of Cycles to Failure N <sub>f</sub> (cycles)	Remark
				Max. P <sub>max</sub> (kN)	Min. P <sub>min</sub> (kN)	Range P <sub>R</sub> (kN)	Max. σ <sub>max</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Min. σ <sub>min</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Range σ <sub>R</sub> (N/mm <sup>2</sup> )			
FPL02-1	60.0	16.5	990	330	33.0	297	333	33.3	300	5	2.82 × 10 <sup>5</sup> 282,300	
FPL02-2	60.0	16.5	990	220	22.0	198	222	22.2	200	8	>2.01 × 10 <sup>6</sup> >2,010,003	Non-Failure
FPL02-3	60.0	16.6	996	440	44.0	396	442	44.2	398	3	1.38 × 10 <sup>5</sup> 138,150	
FPL02-4	60.0	16.5	990	275	27.5	248	278	27.8	250	7	1.41 × 10 <sup>6</sup> 1,405,029	
FPL02-5	60.0	16.6	996	387	38.7	348	389	38.9	350	4	1.68 × 10 <sup>5</sup> 168,245	
FPL02-6	60.0	16.5	990	330	33.0	297	333	33.3	300	5	5.51 × 10 <sup>5</sup> 551,072	
FPL02-7	60.0	16.6	996	277	27.7	249	278	27.8	250	7	3.74 × 10 <sup>5</sup> 374,079	

**Table 4.4.7 Results of fatigue test for load-carrying full penetration cruciform welded joint  
(SUS316L-clad+SUS329J3L steel plate. Dressing by grinding)**

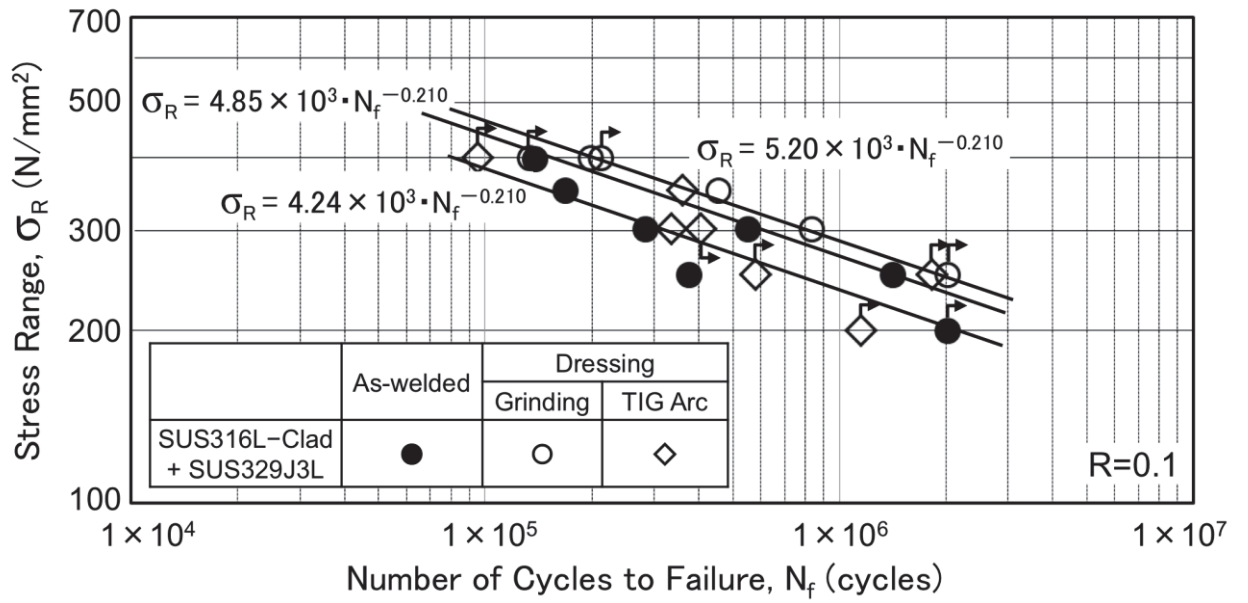
R=0.1

Specimen Number	Width w (mm)	Thick. t (mm)	Cross-section Area A (mm <sup>2</sup> )	Test Load			Test Stress			Freq. f (Hz)	Number of Cycles to Failure N <sub>f</sub> (cycles)	Remark
				Max. P <sub>max</sub> (kN)	Min. P <sub>min</sub> (kN)	Range P <sub>R</sub> (kN)	Max. σ <sub>max</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Min. σ <sub>min</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Range σ <sub>R</sub> (N/mm <sup>2</sup> )			
FPL01-1	60.0	16.5	990	275	27.5	248	278	27.8	250	7	>2.01 × 10 <sup>6</sup> >2,009,046	Failure from Carbon Steel
FPL01-2	60.0	16.5	990	330	33.0	297	333	33.3	300	5	8.32 × 10 <sup>5</sup> 832,461	
FPL01-3	60.0	16.6	996	443	44.3	399	444	44.4	400	3	>2.11 × 10 <sup>5</sup> >210,573	Base Plate Failure
FPL01-4	60.0	16.7	1002	390	39.0	351	389	38.9	350	4	4.54 × 10 <sup>5</sup> 453,601	
FPL01-5	60.0	16.8	1008	448	44.8	403	444	44.4	400	3	>1.33 × 10 <sup>5</sup> >133,461	Base Plate Failure
FPL01-6	60.0	16.7	1002	445	44.5	401	444	44.4	400	3	1.98 × 10 <sup>5</sup> 198,255	
FPL01-7												

**Table 4.4.8 Results of fatigue test for 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 <sup>2</sup> )	Test Load			Test Stress			Freq. f (Hz)	Number of Cycles to Failure N <sub>f</sub> (cycles)	Remark
				Max. P <sub>max</sub> (kN)	Min. P <sub>min</sub> (kN)	Range P <sub>R</sub> (kN)	Max. σ <sub>max</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Min. σ <sub>min</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Range σ <sub>R</sub> (N/mm <sup>2</sup> )			
FPL03-1	60.0	16.5	990	440	44.0	396	444	44.4	400	3	>9.50 × 10 <sup>4</sup> >94,972	Failure from Weld Bead
FPL03-2	60.0	16.5	990	385	38.5	347	389	38.9	350	4	3.60 × 10 <sup>5</sup> 360,078	
FPL03-3	60.0	16.6	996	332	33.2	299	333	33.3	300	5	>4.05 × 10 <sup>5</sup> >405,251	Failure from Weld Bead
FPL03-4	60.0	16.7	1002	278	27.8	250	278	27.8	250	7	>5.78 × 10 <sup>5</sup> >578,362	Failure from Weld Bead
FPL03-5	60.0	16.7	1002	334	33.4	301	333	33.3	300	5	3.35 × 10 <sup>5</sup> 334,854	
FPL03-6	60.0	16.7	1002	223	22.3	201	223	22.3	200	10	>1.15 × 10 <sup>6</sup> >1,150,848	Failure from Weld Bead
FPL03-7	60.0	16.7	1002	278	27.8	250	278	27.8	250	7	>1.83 × 10 <sup>6</sup> >1,825,765	Failure from Weld Bead



**Fig.4.4.2 Results of fatigue test for load-carrying full penetration cruciform welded joint ( $\sigma_R$ - $N_f$  curves)**

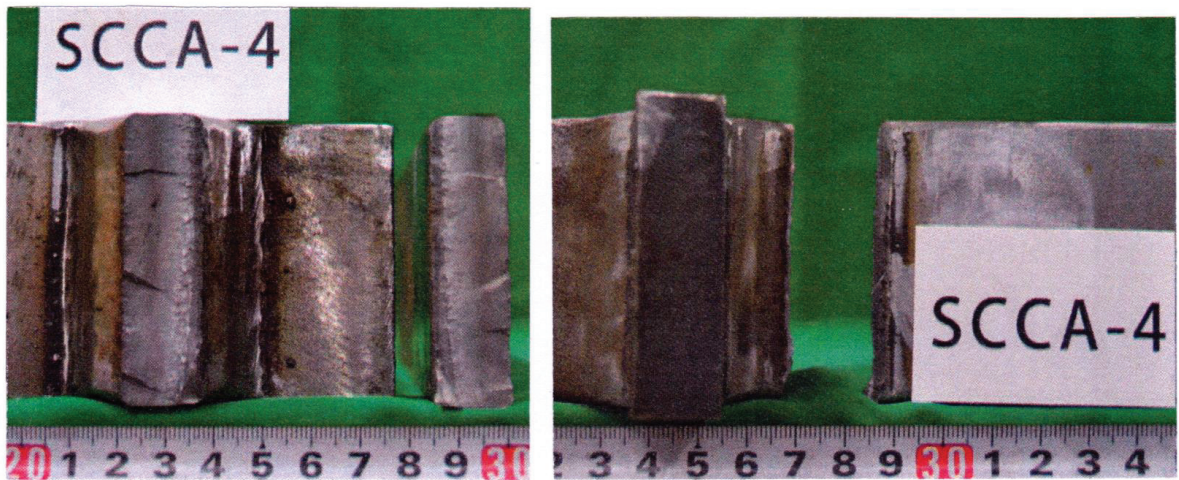


Fig.4.4.3 Fracture surface and pass after fatigue test (SCCA-4, 170 N/mm<sup>2</sup>, 5.53 × 10<sup>5</sup> cycles)



Fig.4.4.4 Fracture surface and pass after fatigue test (FPL02-3, 398 N/mm<sup>2</sup>, 1.38 × 10<sup>5</sup> cycles)

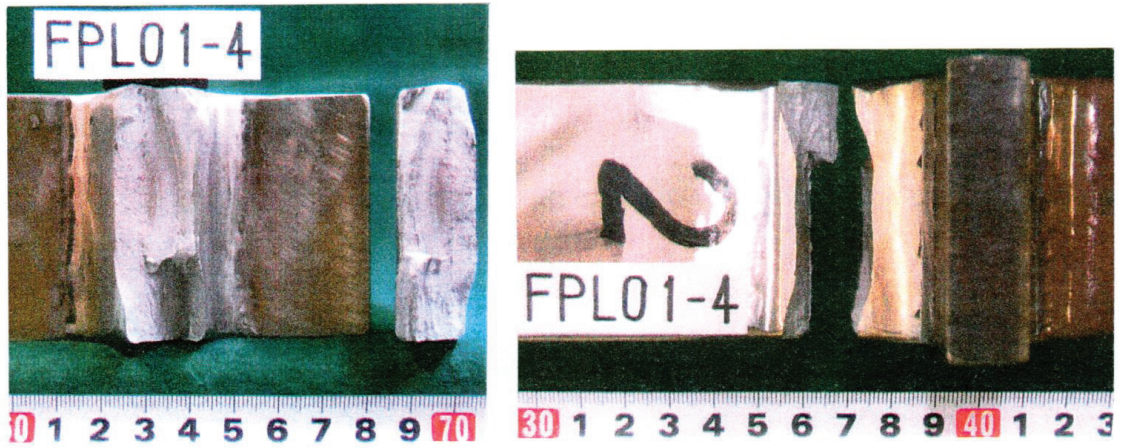


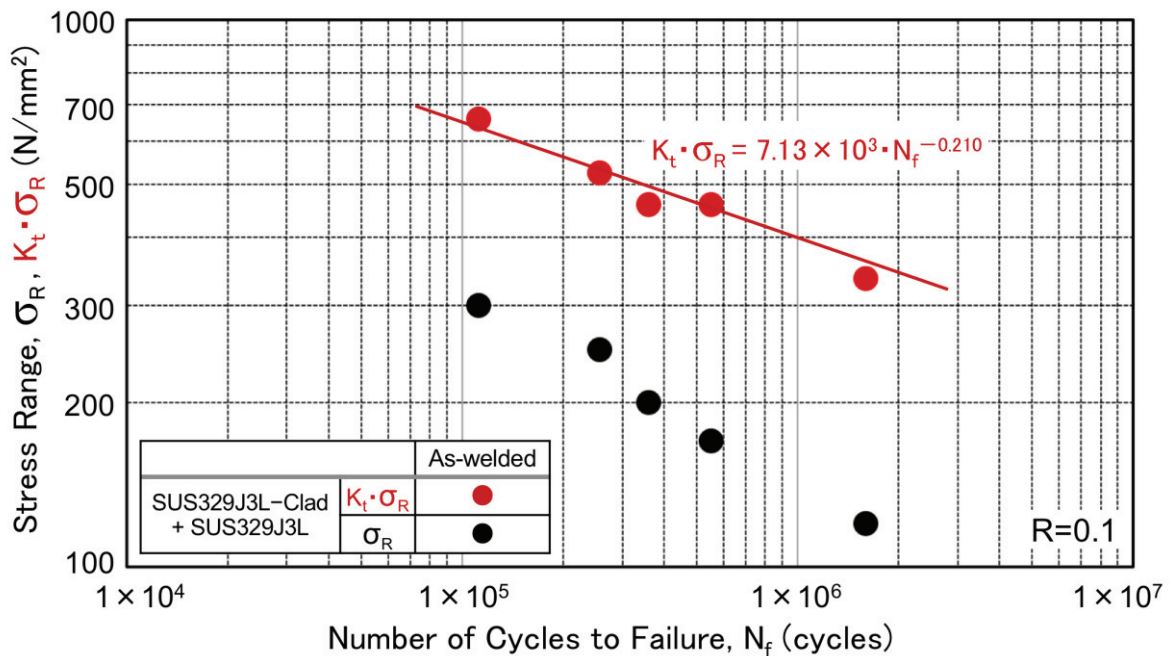
Fig.4.4.5 Fracture surface and pass after fatigue test (FPL01-4, 350 N/mm<sup>2</sup>, 4.54 × 10<sup>5</sup> cycles)



Fig.4.4.6 Fracture surface and pass after fatigue test (FPL03-2, 350 N/mm<sup>2</sup>, 3.60 × 10<sup>5</sup> cycles)

**Table 4.4.9 Results of fatigue test for load-carrying full penetration cruciform welded joint (Correct by  $K_t$ ) (SUS329J3L-clad+SUS329J3L steel plate. As-welded)**

Specimen Number	Width w (mm)	Thick. t (mm)	Toe Radius R (mm)	Flank Angle $\theta$ ( $^\circ$ )	Vertical Leg Length h (mm)	Horizontal Leg Length hp (mm)	Projection Width B (mm)	Stress Concentration Factor $K_t$	Stress Range $\sigma_R$ (N/mm <sup>2</sup> )	$K_t \cdot \sigma_R$ (N/mm <sup>2</sup> )	Number of Cycles to Failure $N_f$ (cycles)	Remark
P-1 SCCA-1	60.1	16.3	2.46	43.6	11.6	14.7	16.9	2.2	300	660	$1.12 \times 10^5$ 111,915	
P-2 SCCA-2	60.1	16.3	2.46	46.0	13.7	14.2	17.0	2.3	200	460	$3.59 \times 10^5$ 358,921	
P-3 SCCA-3	60.1	16.5	2.69	38.7	13.0	15.2	17.2	2.1	250	525	$2.56 \times 10^5$ 255,990	
P-4 SCCA-4	60.2	16.4	1.32	45.8	13.6	13.0	16.9	2.7	170	459	$5.53 \times 10^5$ 553,320	
P-5 SCCA-5	60.1	16.4	1.25	47.0	13.3	14.4	16.8	2.8	120	336	$1.60 \times 10^6$ 1,598,826	
P-6 SCCA-6												
P-7 SCCA-7												



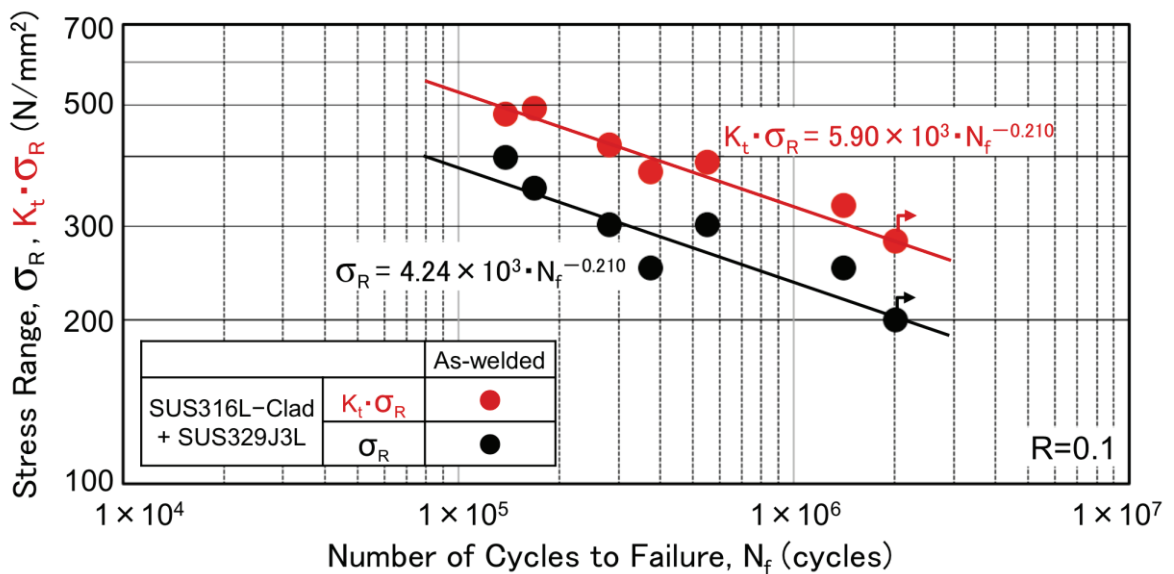
**Fig.4.4.7 Results of fatigue test for load-carrying full penetration cruciform welded joint ( $\sigma_R-N_f$ ,  $K_t \cdot \sigma_R-N_f$  curve)**



**Table 4.4.10 Results of fatigue test for 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 $\theta$ ( $^\circ$ )	Vertical Leg Length h (mm)	Horizontal Leg Length hp (mm)	Projection Width B (mm)	Stress Concentration Factor $K_t$	Stress Range $\sigma_R$ (N/mm <sup>2</sup> )	$K_t \cdot \sigma_R$ (N/mm <sup>2</sup> )	Number of Cycles to Failure $N_f$ (cycles)	Remark
FPLO2-1	60.0	16.5	5.7	18.4	14.9	15.9	16.5	1.4	300	420	$2.82 \times 10^5$ 282,300	
FPLO2-2	60.0	16.5	5.8	18.4	14.5	16.9	16.5	1.4	200	280	$>2.01 \times 10^6$ $>2,010,003$	Non-Failure
FPLO2-3	60.0	16.6	10.4	12.5	12.6	17.2	16.5	1.2	398	478	$1.38 \times 10^5$ 138,150	
FPLO2-4	60.0	16.5	10.6	18.2	14.9	16.6	16.5	1.3	250	325	$1.41 \times 10^6$ 1,405,029	
FPLO2-5	60.0	16.6	6.0	18.8	13.9	15.8	16.5	1.4	350	490	$1.68 \times 10^5$ 168,245	
FPLO2-6	60.0	16.5	7.6	15.6	12.3	17.7	16.5	1.3	300	390	$5.51 \times 10^5$ 551,072	
FPLO2-7	60.0	16.6	4.8	18.9	13.0	17.2	16.5	1.5	250	375	$3.74 \times 10^5$ 374,079	

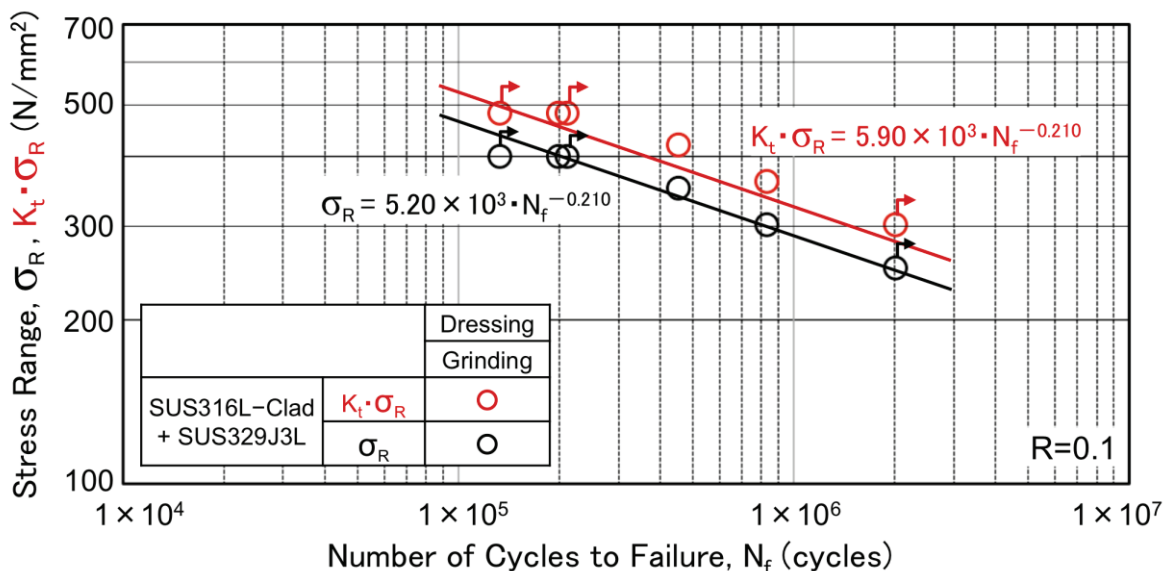


**Fig.4.4.8 Results of fatigue test for load-carrying full penetration cruciform welded joint ( $\sigma_R$ - $N_f$  curve,  $K_t \cdot \sigma_R$ - $N_f$  curve)**

**Table 4.4.11 Results of fatigue test for load-carrying full penetration cruciform welded joint (Correct by  $K_t$ ) (SUS316L-clad+SUS329J3L steel plate. Dressing by grinding)**

R=0.1

Specimen Number	Width w (mm)	Thick. t (mm)	Toe Radius R (mm)	Flank Angle $\theta$ ( $^\circ$ )	Vertical Leg Length h (mm)	Horizontal Leg Length hp (mm)	Projection Width B (mm)	Stress Concentration Factor $K_t$	Stress Range $\sigma_R$ (N/mm <sup>2</sup> )	$K_t \cdot \sigma_R$ (N/mm <sup>2</sup> )	Number of Cycles to Failure $N_f$ (cycles)	Remark
FPLO1-1	60.0	16.5	15.3	14.1	13.3	17.6	16.5	1.2	250	300	$>2.01 \times 10^6$ $>2,009,046$	Failure from Carbon Steel
FPLO1-2	60.0	16.5	14.9	13.0	16.6	21.0	16.5	1.2	300	360	$8.32 \times 10^5$ 832,461	
FPLO1-3	60.0	16.6	14.7	15.1	14.9	19.6	16.5	1.2	400	480	$>2.11 \times 10^5$ $>210,573$	Base Plate Failure
FPLO1-4	60.0	16.7	14.4	14.2	14.8	18.2	16.5	1.2	350	420	$4.54 \times 10^5$ 453,601	
FPLO1-5	60.0	16.8	15.1	14.8	13.5	21.0	16.5	1.2	400	480	$>1.33 \times 10^5$ $>133,461$	Base Plate Failure
FPLO1-6	60.0	16.7	14.8	14.8	13.7	16.0	16.5	1.2	400	480	$1.98 \times 10^5$ 198,255	
FPLO1-7												

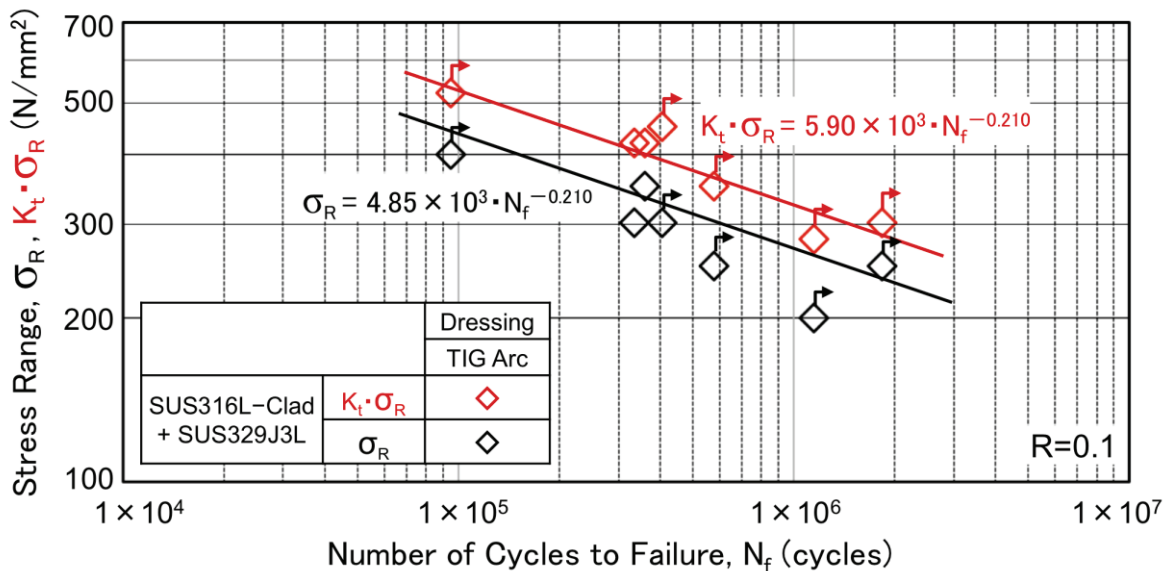


**Fig.4.4.9 Results of fatigue test for load-carrying full penetration cruciform welded joint ( $\sigma_R$ - $N_f$  curve,  $K_t \cdot \sigma_R$ - $N_f$  curve)**

**Table 4.4.12 Results of fatigue test for 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 $\theta$ ( $^\circ$ )	Vertical Leg Length h (mm)	Horizontal Leg Length hp (mm)	Projection Width B (mm)	Stress Concentration Factor $K_t$	Stress Range $\sigma_R$ (N/mm <sup>2</sup> )	$K_t \cdot \sigma_R$ (N/mm <sup>2</sup> )	Number of Cycles to Failure $N_f$ (cycles)	Remark
FPLO3-1	60.0	16.5	12.1	19.7	10.3	21.7	16.5	1.3	400	520	$>9.50 \times 10^4$ $>94,972$	Failure from Weld Bead
FPLO3-2	60.0	16.5	15.5	14.7	10.5	22.3	16.5	1.2	350	420	$3.60 \times 10^5$ 360,078	
FPLO3-3	60.0	16.6	10.2	30.7	12.9	21.1	16.5	1.5	300	450	$>4.05 \times 10^5$ $>405,251$	Failure from Weld Bead
FPLO3-4	60.0	16.7	12.9	25.6	11.5	20.8	16.5	1.4	250	350	$>5.78 \times 10^5$ $>578,362$	Failure from Weld Bead
FPLO3-5	60.0	16.7	12.4	27.1	15.4	15.0	16.5	1.4	300	420	$3.35 \times 10^5$ 334,854	
FPLO3-6	60.0	16.7	10.1	18.8	13.1	22.0	16.5	1.4	200	280	$>1.15 \times 10^6$ $>1,150,848$	Failure from Weld Bead
FPLO3-7	60.0	16.7	16.8	15.6	12.5	22.8	16.5	1.2	250	300	$>1.83 \times 10^6$ $>1,825,765$	Failure from Weld Bead



**Fig.4.4.10 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)**

**Table 4.5.1 Chemical composition of test steel plates**

(wt%)

Test Steel Plate	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
SUS316L- Clad* (t:3+13)	0.008	0.58	0.78	0.021	0.001	17.14	12.17	2.75	—

\* SUS329J3L, SUS316L Steel Plate (3mm)

**Table 4.5.2 Mechanical properties of test steel plates**

Test Steel Plate	Thick. (mm)	0.2% Proof Stress (N/mm <sup>2</sup> )	Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
SUS329J3L	16	594	771	35
SUS329J3L- Clad*	16 (3+13)	433	554	23
SUS316L- Clad*	16 (3+13)	290	480	27

\* Full-Thickness Tensile Test (16mm)

**Table 4.5.3 Welding parameters of full penetration cruciform welded joints (FCAW)**

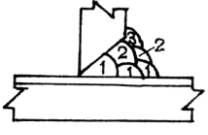

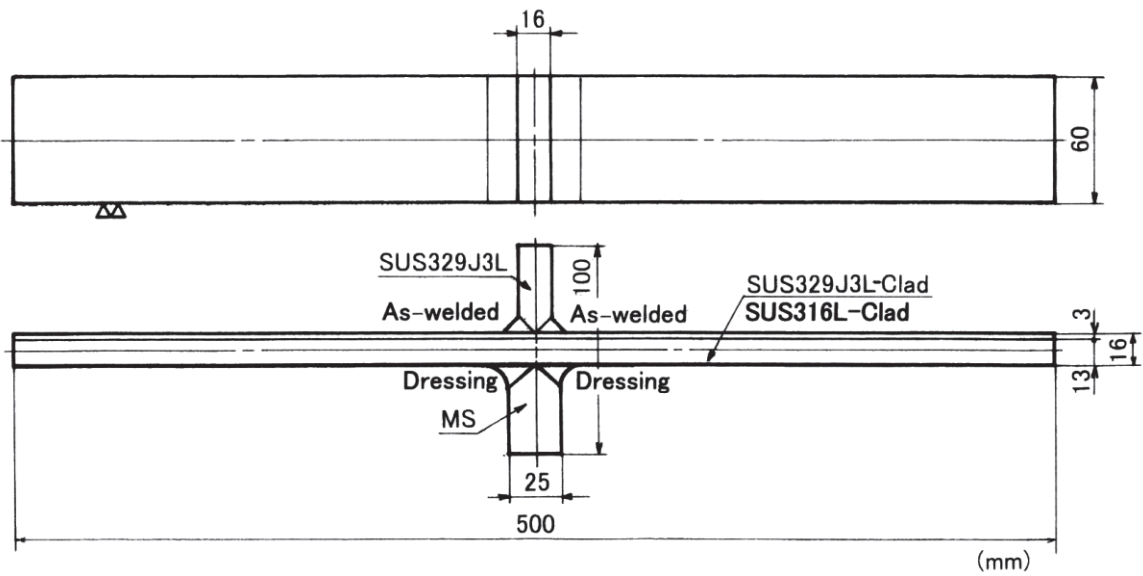
Test Steel Plate	Build-up Sequence	Welding Current (A)	Arc Voltage (V)	Travel Speed (cm/min)	Heat Input (kJ/cm)	Welding Consumables (JIS)
SUS329J3L-Clad Steel Plate + SUS329J3L Steel Plate		180 ~200	30 ~32	17.0 ~28.2	13.6 ~22.6	TS2209 -FCO
		200	32	15.7 ~28.3	13.6 ~24.5	TS2209 -FCO

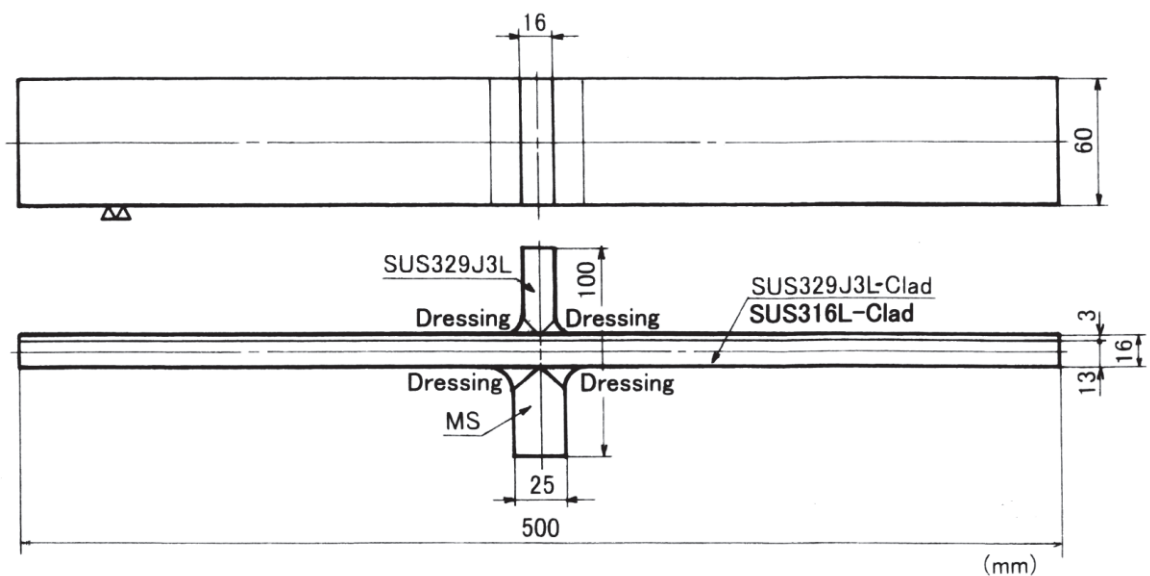
Plate Thickness : 16 mm, Gas Flow Rate : 18 ℓ/min, Interpass Temperature  $\leq 150^{\circ}\text{C}$

**Table 4.5.4 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



**Fig.4.5.1** Shape and size of fatigue test specimen  
 (Non-load-carrying full penetration cruciform welded joint)  
 (As-welded)



**Fig.4.5.2** Shape and size of fatigue test specimen  
 (Non-load-carrying full penetration cruciform welded joint)  
 (Dressing by grinding. Dressing by TIG arc)

**Table 4.5.5 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 <sup>2</sup> )	Test Load			Test Stress			Freq. f (Hz)	Number of Cycles to Failure N <sub>f</sub> (cycles)	Remark
				Max. P <sub>max</sub> (kN)	Min. P <sub>min</sub> (kN)	Range P <sub>R</sub> (kN)	Max. σ <sub>max</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Min. σ <sub>min</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Range σ <sub>R</sub> (N/mm <sup>2</sup> )			
A-1 SNCA-1	60.0	16.7	1002	334	33.4	301	333	33.3	300	5	2.66 × 10 <sup>4</sup> 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 <sup>5</sup> 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 <sup>5</sup> 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 <sup>4</sup> 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 <sup>6</sup> >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 <sup>6</sup> 1,071,265	Failure of SUS329J3L Toe
A-7 SNCA-7												

**Table 4.5.6 Results of fatigue test for non-load-carrying full penetration cruciform welded joint (Correct by K<sub>t</sub>) (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 <sub>t</sub>	Stress Range σ <sub>R</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	K <sub>t</sub> · σ <sub>R</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Number of Cycles to Failure N <sub>f</sub> (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 <sup>4</sup> 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 <sup>5</sup> 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 <sup>5</sup> 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 <sup>4</sup> 74,907	
A-5 SNCA-5	60.1	16.6	-	-	-	-	-	-	80	-	>2.23 × 10 <sup>6</sup> >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 <sup>6</sup> 1,071,265	
A-7 SNCA-7												

**Table 4.5.7 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 <sup>2</sup> )	Test Load			Test Stress			Freq. f (Hz)	Number of Cycles to Failure N <sub>f</sub> (cycles)	Remark
				Max. P <sub>max</sub> (kN)	Min. P <sub>min</sub> (kN)	Range P <sub>R</sub> (kN)	Max. σ <sub>max</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Min. σ <sub>min</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Range σ <sub>R</sub> (N/mm <sup>2</sup> )			
B-1 SNCG-1	60.1	16.6	998	333	33.3	299	333	33.3	300	5	6.30 × 10 <sup>4</sup> 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 <sup>5</sup> 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 <sup>5</sup> 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 <sup>6</sup> >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 <sup>5</sup> 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 <sup>4</sup> 52,594	Failure of SUS329J3L Toe
B-7 SNCG-7												

**Table 4.5.8 Results of fatigue test for non-load-carrying full penetration cruciform welded joint (Correct by K<sub>t</sub>) (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 <sub>t</sub>	Stress Range σ <sub>R</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	K <sub>t</sub> · σ <sub>R</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Number of Cycles to Failure N <sub>f</sub> (cycles)	Remark
B-1 SNCG-1	60.1	16.6	2.61	45.0	15.0	12.1	16.5	2.2	300	660	6.30 × 10 <sup>4</sup> 62,953	
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 <sup>5</sup> 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 <sup>5</sup> 322,267	
B-4 SNCG-4	60.0	16.5	-	-	-	-	-	-	120	-	>2.09 × 10 <sup>6</sup> >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 <sup>5</sup> 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 <sup>4</sup> 52,594	
B-7 SNCG-7												



**Table 4.5.9 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 <sup>2</sup> )	Test Load			Test Stress			Freq. f (Hz)	Number of Cycles to Failure N <sub>f</sub> (cycles)	Remark
				Max. P <sub>max</sub> (kN)	Min. P <sub>min</sub> (kN)	Range P <sub>R</sub> (kN)	Max. σ <sub>max</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Min. σ <sub>min</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Range σ <sub>R</sub> (N/mm <sup>2</sup> )			
FPLN1-1	60.0	16.2	972	324	32.4	292	333	33.3	300	5	8.76 × 10 <sup>4</sup> 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 <sup>5</sup> 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 <sup>5</sup> 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 <sup>5</sup> 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 <sup>6</sup> >2,022,206	Non-Failure
FPLN1-6	60.0	16.2	972	216	21.6	194	222	22.2	200	7	6.66 × 10 <sup>5</sup> 666,317	Failure of SUS316L Toe
FPLN1-7												

**Table 4.5.10 Results of fatigue test for non-load-carrying full penetration cruciform welded joint (Correct by K<sub>t</sub>) (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 <sub>t</sub>	Stress Range σ <sub>R</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	K <sub>t</sub> · σ <sub>R</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Number of Cycles to Failure N <sub>f</sub> (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 <sup>4</sup> 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 <sup>5</sup> 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 <sup>5</sup> 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 <sup>5</sup> 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 <sup>6</sup> >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 <sup>5</sup> 666,317	
FPLN1-7												

**Table 4.5.11 Results of fatigue test for non-load-carrying full penetration cruciform welded joint  
(SUS316L-clad+SUS329J3L steel plate. Dressing by grinding)**

R=0.1

Specimen Number	Width w (mm)	Thick. t (mm)	Cross-section Area A (mm <sup>2</sup> )	Test Load			Test Stress			Freq. f (Hz)	Number of Cycles to Failure N <sub>f</sub> (cycles)	Remark
				Max. P <sub>max</sub> (kN)	Min. P <sub>min</sub> (kN)	Range P <sub>R</sub> (kN)	Max. σ <sub>max</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Min. σ <sub>min</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Range σ <sub>R</sub> (N/mm <sup>2</sup> )			
FPLN2-1	60.2	16.1	969	215	21.5	194	222	22.2	200	8	>2.00 × 10 <sup>6</sup> >2,000,257	Non-Failure
FPLN2-2	60.3	16.0	965	322	32.2	290	333	33.3	300	7	>1.42 × 10 <sup>5</sup> >141,965	Failure from Carbon Steel
FPLN2-3	60.0	15.9	954	265	26.5	239	278	27.8	250	7	>8.87 × 10 <sup>5</sup> >887,021	Failure from Carbon Steel
FPLN2-4	60.1	16.0	962	320	32.0	288	333	33.3	300	7	>3.61 × 10 <sup>5</sup> >360,675	Failure from Carbon Steel
FPLN2-5												
FPLN2-6												
FPLN2-7												

**Table 4.5.12 Results of fatigue test for non-load-carrying full penetration cruciform welded joint (Correct by K<sub>t</sub>)  
(SUS316L-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 <sub>t</sub>	Stress Range σ <sub>R</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	K <sub>t</sub> · σ <sub>R</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Number of Cycles to Failure N <sub>f</sub> (cycles)	Remark
FPLN2-2	60.3	16.0	9.1	40.1	19.0	17.0	16.5	1.6	300	480	>1.42 × 10 <sup>5</sup> >141,965	Failure from Carbon Steel
FPLN2-3	60.0	15.9	11.2	17.2	18.1	17.3	16.5	1.3	250	325	>8.87 × 10 <sup>5</sup> >887,021	Failure from Carbon Steel
FPLN2-4	60.1	16.0	8.7	17.3	18.6	17.0	16.5	1.3	300	390	>3.61 × 10 <sup>5</sup> >360,675	Failure from Carbon Steel
FPLN2-5												
FPLN2-6												
FPLN2-7												

**Table 4.5.13 Results of fatigue test for non-load-carrying full penetration cruciform welded joint  
(SUS316L-clad+SUS329J3L steel plate. Dressing by TIG arc)**

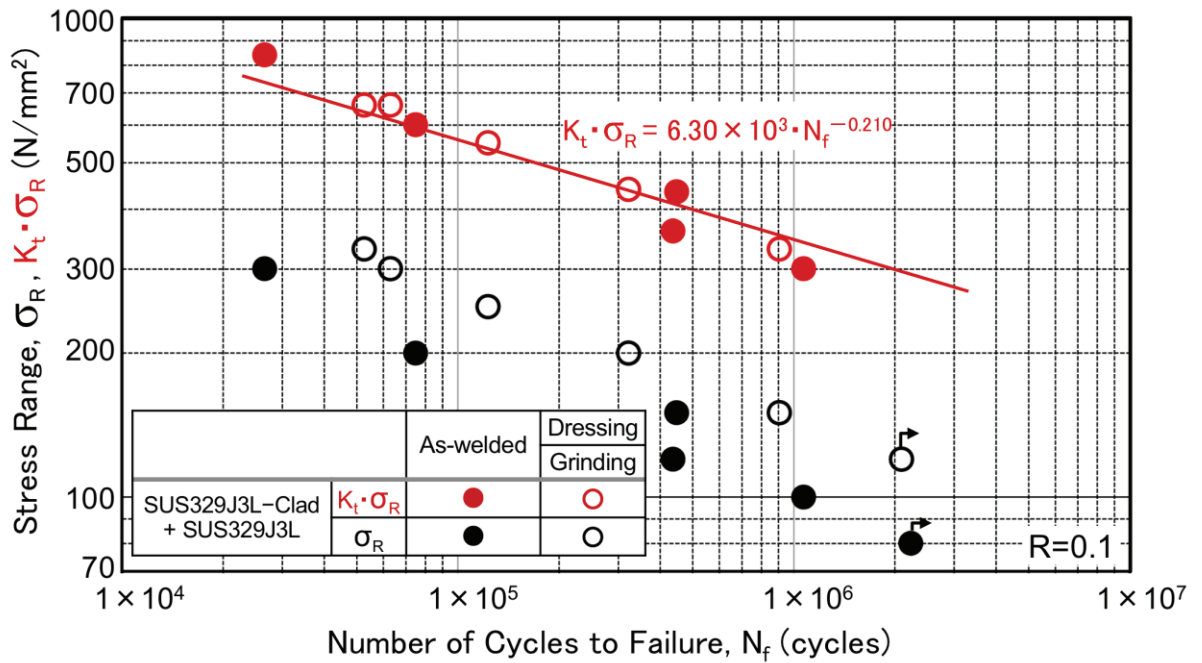
R=0.1

Specimen Number	Width w (mm)	Thick. t (mm)	Cross-section Area A (mm <sup>2</sup> )	Test Load			Test Stress			Freq. f (Hz)	Number of Cycles to Failure N <sub>f</sub> (cycles)	Remark
				Max. P <sub>max</sub> (kN)	Min. P <sub>min</sub> (kN)	Range P <sub>R</sub> (kN)	Max. σ <sub>max</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Min. σ <sub>min</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Range σ <sub>R</sub> (N/mm <sup>2</sup> )			
FPLN3-1	60.0	16.1	966	268	26.8	241	278	27.8	250	7	5.69 × 10 <sup>5</sup> 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 <sup>6</sup> 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 <sup>6</sup> >2,031,203	Non-Failure
FPLN3-4	60.0	16.1	966	322	32.2	290	333	33.3	300	7	2.53 × 10 <sup>5</sup> 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 <sup>5</sup> 210,452	Failure of SUS316L toe
FPLN3-6												
FPLN3-7												

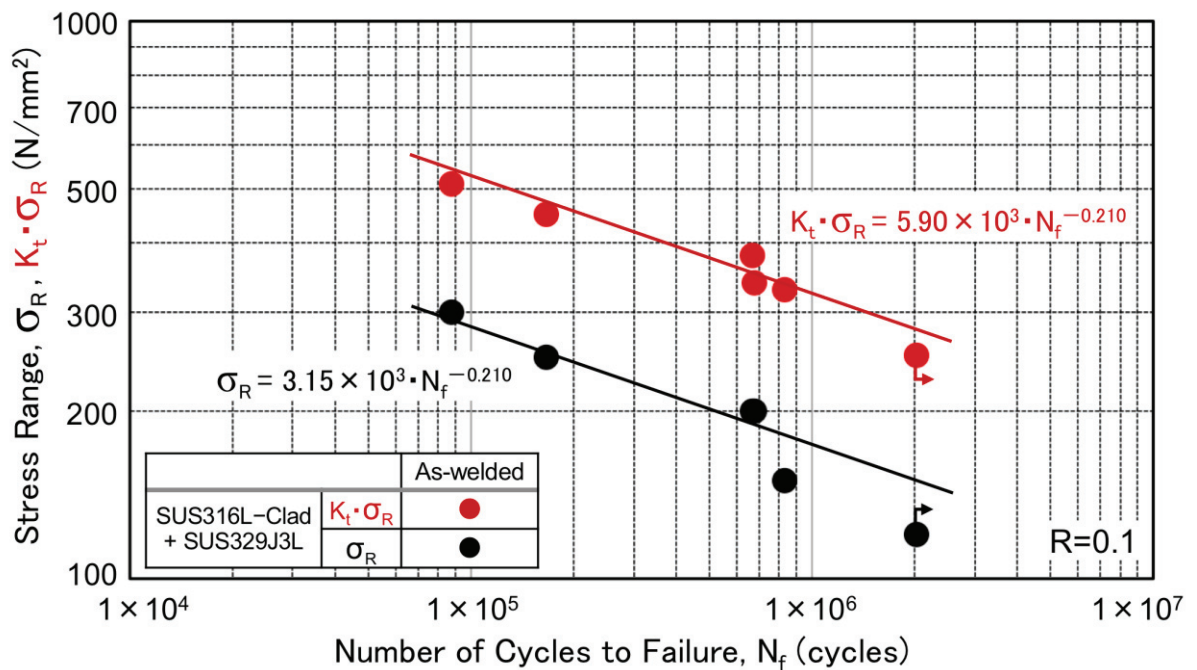
**Table 4.5.14 Results of fatigue test for non-load-carrying full penetration cruciform welded joint (Correct by K<sub>t</sub>)  
(SUS316L-clad+SUS329J3L steel plate. Dressing by TIG arc)**

R=0.1

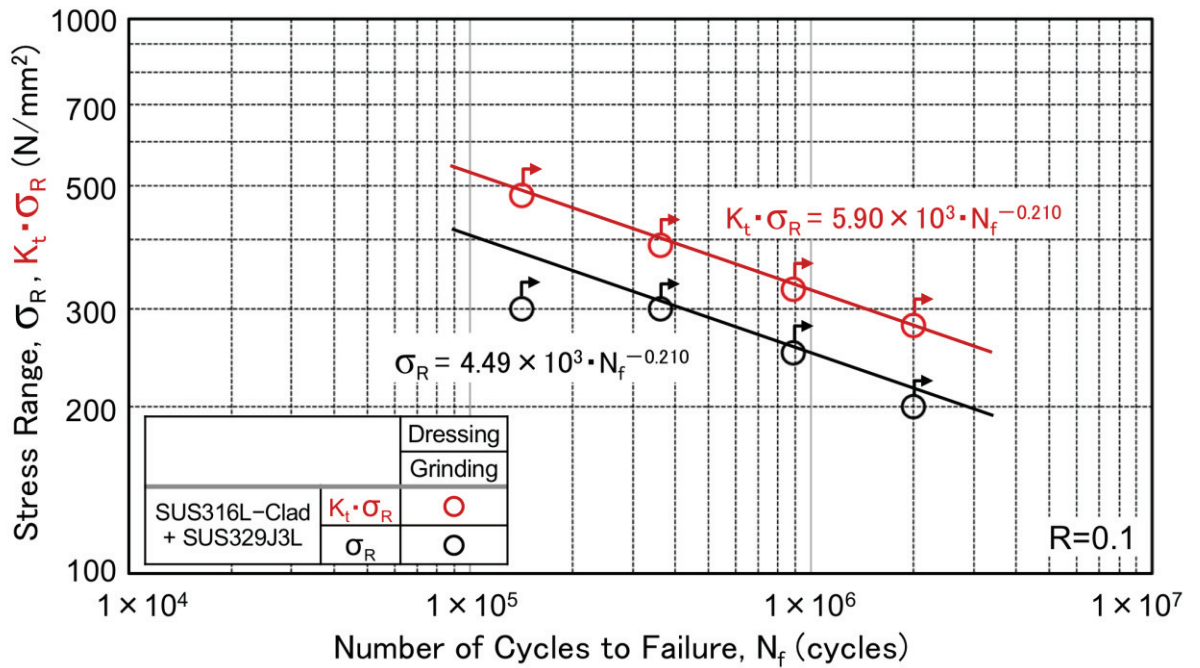
Specimen Number	Width w (mm)	Thick. t (mm)	Toe Radius R (mm)	Flank Angle θ (°)	Vertical Leg Length h (mm)	Horizontal Leg Length hp (mm)	Projection Width B (mm)	Stress Concentration Factor K <sub>t</sub>	Stress Range σ <sub>R</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	K <sub>t</sub> · σ <sub>R</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Number of Cycles to Failure N <sub>f</sub> (cycles)	Remark
FPLN3-1	60.0	16.1	10.9	27.7	17.3	13.2	16.5	1.4	250	350	5.69 × 10 <sup>5</sup> 569,200	
FPLN3-2	60.0	16.1	6.6	31.3	16.9	15.3	16.5	1.6	200	320	1.09 × 10 <sup>6</sup> 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 <sup>6</sup> >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 <sup>5</sup> 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 <sup>5</sup> 210,452	
FPLN3-6												
FPLN3-7												



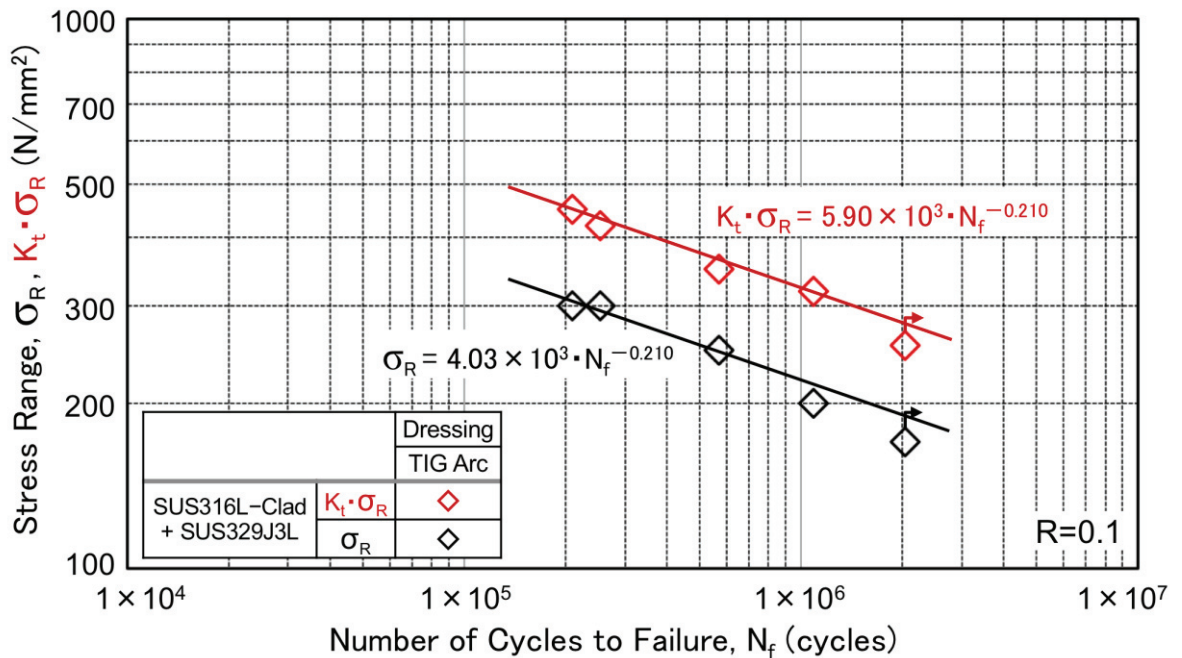
**Fig.4.5.3 Results of fatigue test for non-load-carrying full penetration cruciform welded joint ( $\sigma_R-N_f$ ,  $K_t \cdot \sigma_R-N_f$  curve)**



**Fig.4.5.4 Results of fatigue test for non-load-carrying full penetration cruciform welded joint ( $\sigma_R-N_f$  curve,  $K_t \cdot \sigma_R-N_f$  curve)**



**Fig.4.5.5 Results of fatigue test for non-load-carrying full penetration cruciform welded joint ( $\sigma_R$ - $N_f$  curve,  $K_t \cdot \sigma_R$ - $N_f$  curve)**



**Fig.4.5.6 Results of fatigue test for non-load-carrying full penetration cruciform welded joint ( $\sigma_R$ - $N_f$  curve,  $K_t \cdot \sigma_R$ - $N_f$  curve)**

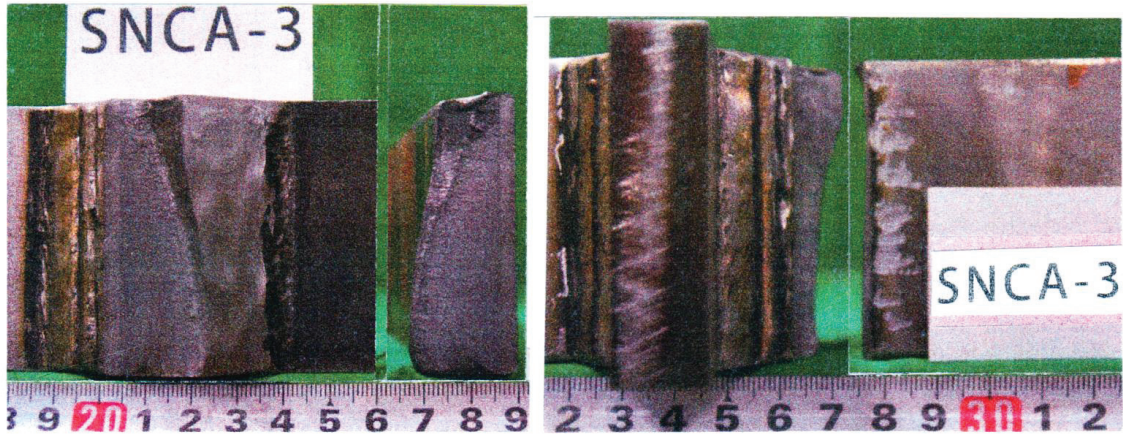


Fig.4.5.7 Fracture surface and pass after fatigue test (SNCA-3, 120 N/mm<sup>2</sup>, 4.37 × 10<sup>5</sup> cycles)

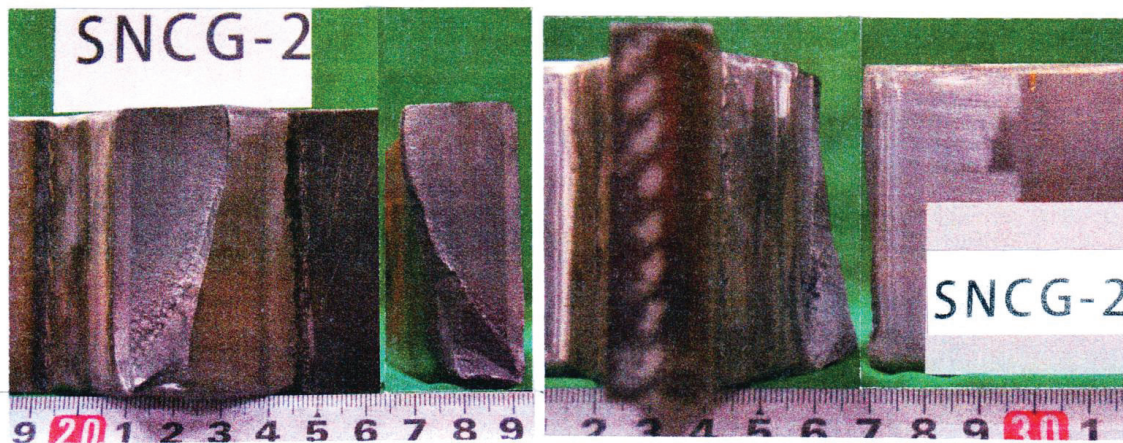


Fig.4.5.8 Fracture surface and pass after fatigue test (SNCG-2, 150 N/mm<sup>2</sup>, 9.05 × 10<sup>5</sup> cycles)



Fig.4.5.9 Fracture surface and pass after fatigue test (FPLN1-4, 250 N/mm<sup>2</sup>, 1.66 × 10<sup>5</sup> cycles)



Fig.4.5.10 Fracture surface and pass after fatigue test (FPLN3-2, 200 N/mm<sup>2</sup>, 1.09 × 10<sup>6</sup> cycles)

**Table 4.6.1 Chemical composition of test steel plate**

Test Steel Plate	(wt%)								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
SUS329J3L (t:16)	0.008	0.56	1.80	0.025	0.001	22.50	5.80	3.10	0.16

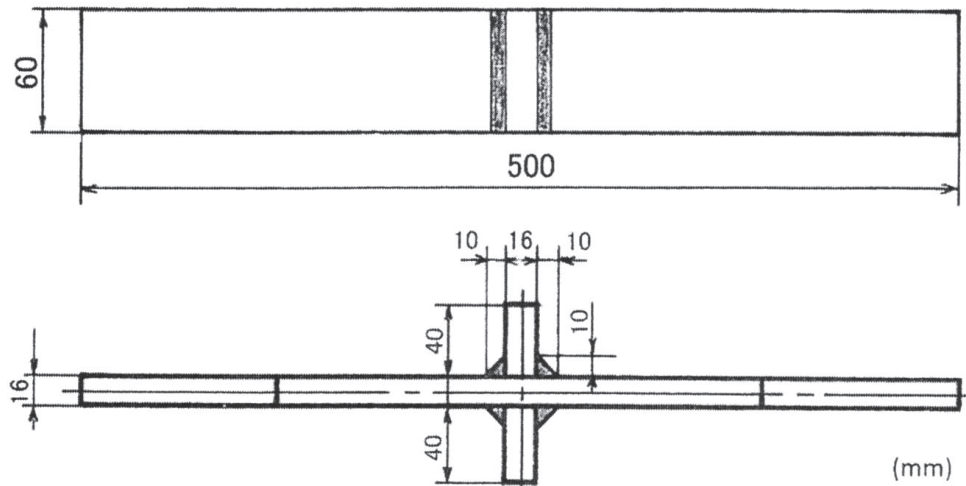
**Table 4.6.2 Mechanical properties of test steel plate**

Test Steel Plate	Thick. (mm)	0.2 % Proof Stress (N/mm <sup>2</sup> )	Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Hardness (HV)
SUS329J3L	16	615	772	38	255

**Table 4.6.3 Welding parameters of non-load-carrying cruciform fillet 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)
SUS329J3L + SUS329J3L	FCAW	18	190	32	31.6 ~39.1	9.3 ~11.5





**Fig.4.6.1 Shape and size of fatigue test specimen  
(Non-load-carrying cruciform fillet welded joint)**

**Table 4.6.4 Results of fatigue test for non-load-carrying cruciform fillet welded joint  
(SUS329J3L+SUS329J3L steel plate. As-welded)**

R=0.1

Specimen Number	Width w (mm)	Thick. t (mm)	Cross-section Area A (mm <sup>2</sup> )	Test Load			Test Stress			Freq. f (Hz)	Number of Cycles to Failure N <sub>f</sub> (cycles)	Remark
				Max. P <sub>max</sub> (kN)	Min. P <sub>min</sub> (kN)	Range P <sub>R</sub> (kN)	Max. σ <sub>max</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Min. σ <sub>min</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Range σ <sub>R</sub> (N/mm <sup>2</sup> )			
FWLN1-1	60.1	16.3	980	327	32.7	294	333	33.3	300	5	1.01 × 10 <sup>5</sup> 100,977	
FWLN1-2	60.0	16.3	978	272	27.2	245	278	27.8	250	7	2.46 × 10 <sup>5</sup> 245,696	
FWLN1-3	59.8	16.2	969	129	12.9	116	133	13.3	120	10	>2.35 × 10 <sup>6</sup> >2,352,501	Non-Failure
FWLN1-4												
FWLN1-5	60.1	16.2	974	217	21.7	195	222	22.2	200	8	5.40 × 10 <sup>5</sup> 539,864	
FWLN1-6	60.1	16.3	980	163	16.3	147	166	16.6	150	10	1.33 × 10 <sup>6</sup> 1,329,481	
FWLN1-7	60.0	16.3	978	380	38.0	342	389	38.9	350	4	5.37 × 10 <sup>4</sup> 53,711	

**Table 4.6.5 Results of fatigue test for non-load-carrying cruciform fillet welded joint  
(SUS329J3L + SUS329J3L steel plate. Dressing by grinding)**

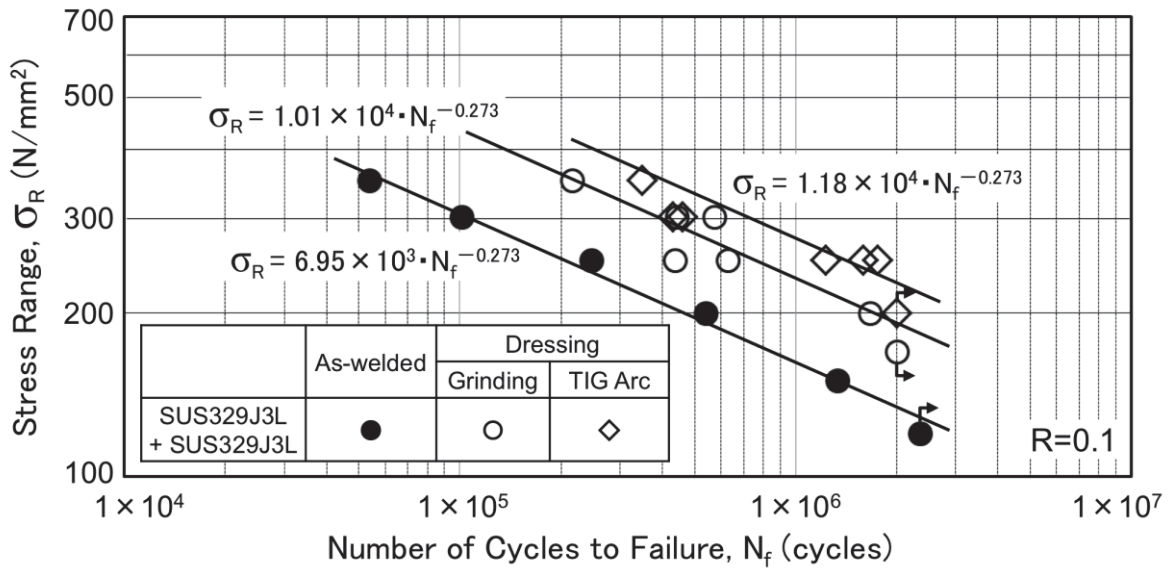
R=0.1

Specimen Number	Width w (mm)	Thick. t (mm)	Cross-section Area A (mm <sup>2</sup> )	Test Load			Test Stress			Freq. f (Hz)	Number of Cycles to Failure N <sub>f</sub> (cycles)	Remark
				Max. P <sub>max</sub> (kN)	Min. P <sub>min</sub> (kN)	Range P <sub>R</sub> (kN)	Max. σ <sub>max</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Min. σ <sub>min</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Range σ <sub>R</sub> (N/mm <sup>2</sup> )			
FWLN2-1	60.1	16.4	986	383	38.3	345	388	38.8	350	5, 4	2.15 × 10 <sup>5</sup> 214,928	
FWLN2-2	60.1	16.3	980	327	32.7	294	333	33.3	300	5	5.72 × 10 <sup>5</sup> 572,014	Failure from Root
FWLN2-3	60.0	16.3	978	326	32.6	293	333	33.3	300	5	4.42 × 10 <sup>5</sup> 441,926	
FWLN2-4	60.1	16.3	980	272	27.2	245	278	27.8	250	7	4.38 × 10 <sup>5</sup> 437,806	
FWLN2-5	60.0	16.3	978	272	27.2	245	278	27.8	250	7	6.28 × 10 <sup>5</sup> 627,630	
FWLN2-6	60.0	16.4	984	219	21.9	197	222	22.2	200	8	1.67 × 10 <sup>6</sup> 1,674,249	
FWLN2-7	60.0	16.4	984	186	18.6	167	189	18.9	170	8	>2.00 × 10 <sup>6</sup> >2,002,505	Non-Failure

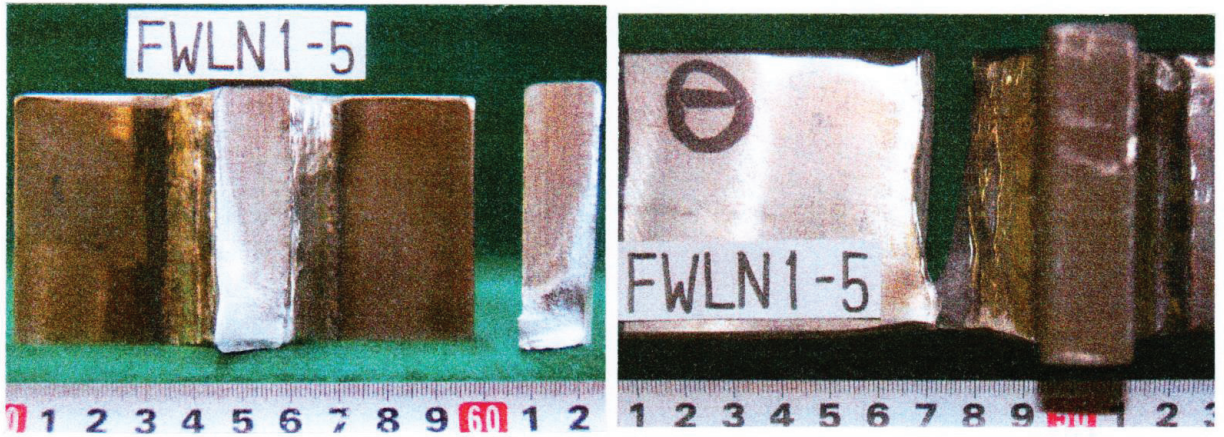
**Table 4.6.6 Results of fatigue test for non-load-carrying cruciform fillet welded joint  
(SUS329J3L + SUS329J3L steel plate. Dressing by TIG arc)**

R=0.1

Specimen Number	Width w (mm)	Thick. t (mm)	Cross-section Area A (mm <sup>2</sup> )	Test Load			Test Stress			Freq. f (Hz)	Number of Cycles to Failure N <sub>f</sub> (cycles)	Remark
				Max. P <sub>max</sub> (kN)	Min. P <sub>min</sub> (kN)	Range P <sub>R</sub> (kN)	Max. σ <sub>max</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Min. σ <sub>min</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Range σ <sub>R</sub> (N/mm <sup>2</sup> )			
FWLN3-1	60.0	16.4	984	219	21.9	197	223	22.3	200	7	>2.00 × 10 <sup>6</sup> >2,001,444	Non-Failure
FWLN3-2	60.0	16.4	984	328	32.8	295	333	33.3	300	5	4.33 × 10 <sup>5</sup> 432,889	
FWLN3-3	60.0	16.3	978	380	38.0	342	389	38.9	350	4	3.50 × 10 <sup>5</sup> 349,803	
FWLN3-4	60.1	16.4	986	274	27.4	247	278	27.8	250	7	1.76 × 10 <sup>6</sup> 1,755,009	Failure from Root
FWLN3-5	60.1	16.4	986	274	27.4	247	278	27.8	250	7	1.59 × 10 <sup>6</sup> 1,593,300	Failure from Root
FWLN3-6	60.2	16.4	987	329	32.9	296	333	33.3	300	5	4.55 × 10 <sup>5</sup> 454,966	
FWLN3-7	60.0	16.4	984	273	27.3	246	277	27.7	250	7	1.23 × 10 <sup>6</sup> 1,232,090	



**Fig.4.6.2 Results of fatigue test for non-load-carrying cruciform fillet welded joint ( $\sigma_R$ - $N_f$  curves)**



**Fig.4.6.3 Fracture surface and pass after fatigue test (FWLN1-5, 200 N/mm<sup>2</sup>, 5.40 × 10<sup>5</sup> cycles)**

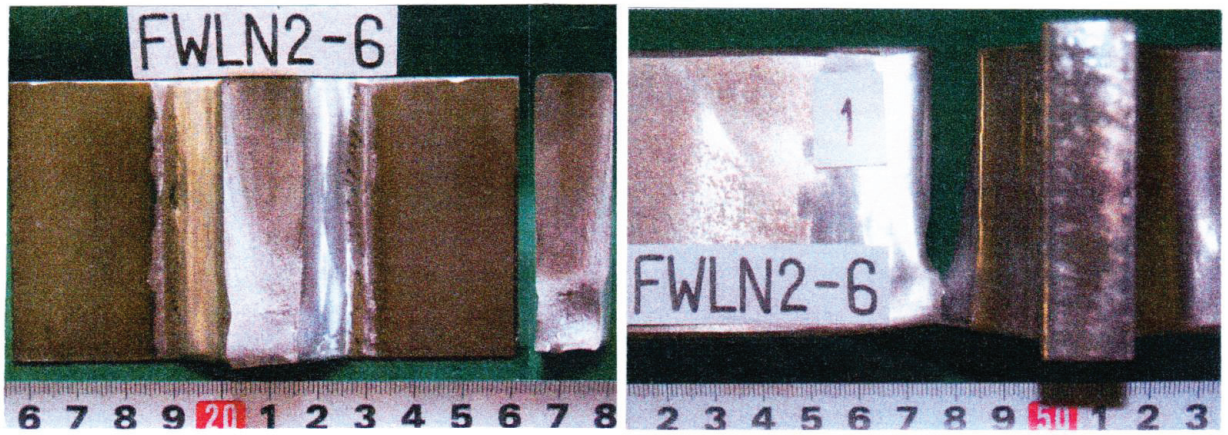


Fig.4.6.4 Fracture surface and pass after fatigue test (FWLN2-6, 200 N/mm<sup>2</sup>, 1.67 × 10<sup>6</sup> cycles)

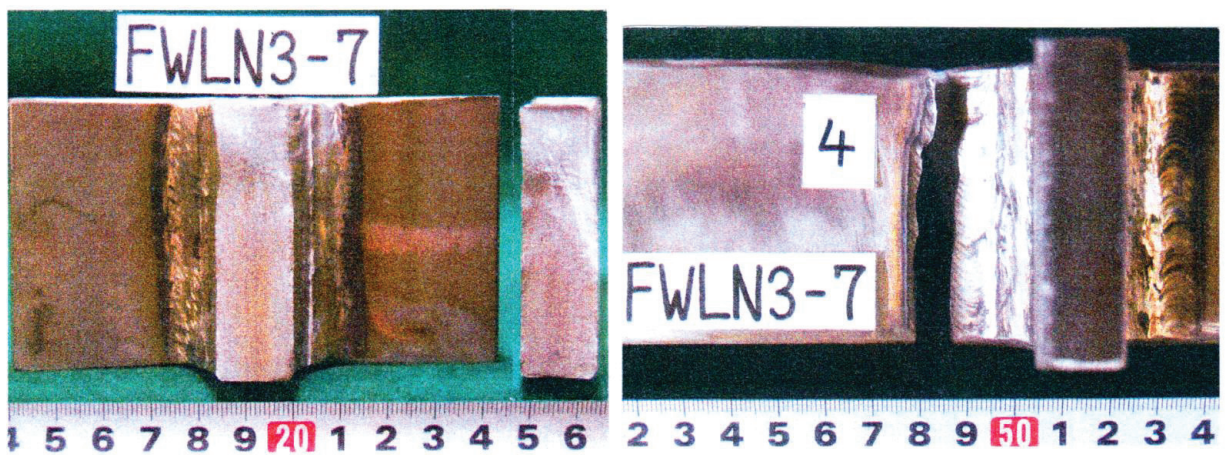
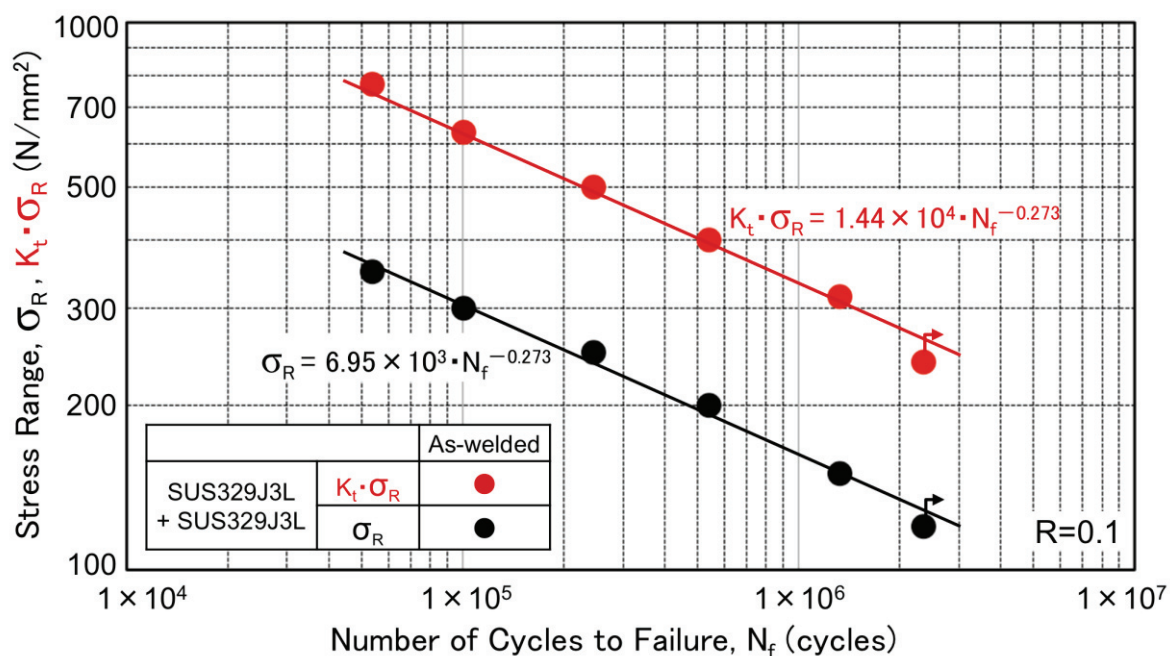


Fig.4.6.5 Fracture surface and pass after fatigue test (FWLN3-7, 250 N/mm<sup>2</sup>, 1.23 × 10<sup>6</sup> cycles)

**Table 4.6.7 Results of fatigue test for non-load-carrying cruciform fillet welded joint (Correct by  $K_t$ ) (SUS329J3L + SUS329J3L steel plate. As-welded)**

R=0.1

Specimen Number	Width w (mm)	Thick. t (mm)	Toe Radius R (mm)	Flank Angle $\theta$ (°)	Vertical Leg Length h (mm)	Horizontal Leg Length hp (mm)	Projection Width B (mm)	Stress Concentration Factor $K_t$	Stress Range $\sigma_R$ (N/mm <sup>2</sup> )	$K_t \cdot \sigma_R$ (N/mm <sup>2</sup> )	Number of Cycles to Failure $N_f$ (cycles)	Remark
FWLN1-1	60.1	16.3	2.3	39.3	12.7	11.6	16.5	2.1	300	630	$1.01 \times 10^5$ 100,977	
FWLN1-2	60.0	16.3	2.7	33.7	10.4	14.6	16.5	2.0	250	500	$2.46 \times 10^5$ 245,696	
FWLN1-3	59.8	16.2	2.0	30.2	12.3	14.5	16.5	2.0	120	240	$>2.35 \times 10^6$ $>2,352,501$	Non-Failure
FWLN1-4												
FWLN1-5	60.1	16.2	2.5	36.2	10.7	12.6	16.5	2.0	200	400	$5.40 \times 10^5$ 539,864	
FWLN1-6	60.1	16.3	0.8	32.2	11.3	13.0	16.5	2.1	150	315	$1.33 \times 10^6$ 1,329,481	
FWLN1-7	60.0	16.3	1.3	34.0	11.1	12.5	16.5	2.2	350	770	$5.37 \times 10^4$ 53,711	

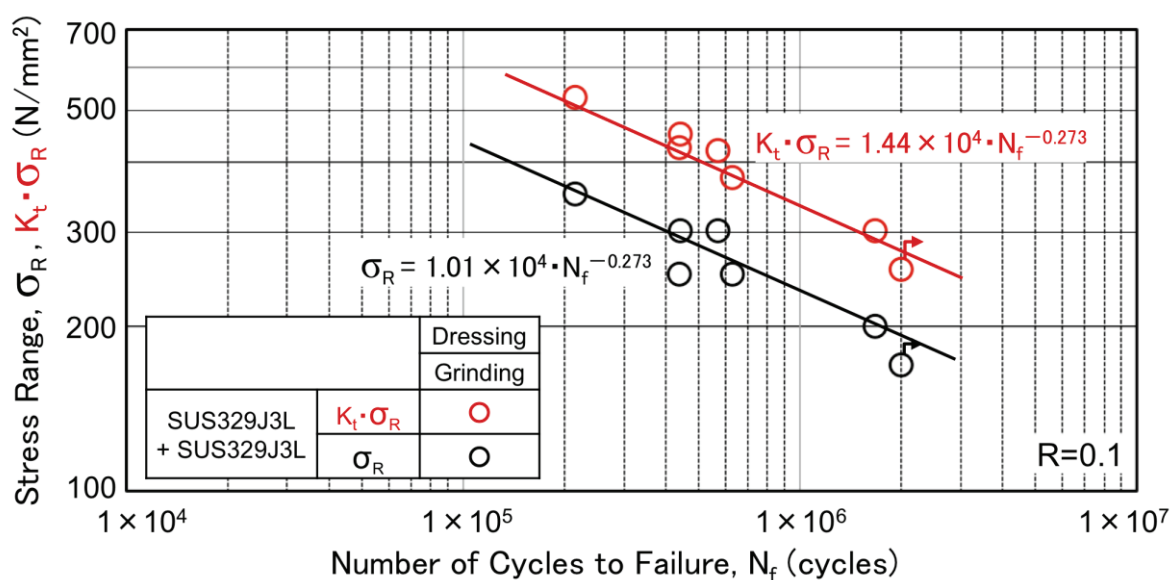


**Fig.4.6.6 Results of fatigue test for non-load-carrying cruciform fillet welded joint ( $\sigma_R$ - $N_f$  curve,  $K_t \cdot \sigma_R$ - $N_f$  curve)**

**Table 4.6.8 Results of fatigue test for non-load-carrying cruciform fillet welded joint (Correct by  $K_t$ ) (SUS329J3L + SUS329J3L steel plate. Dressing by grinding)**

R=0.1

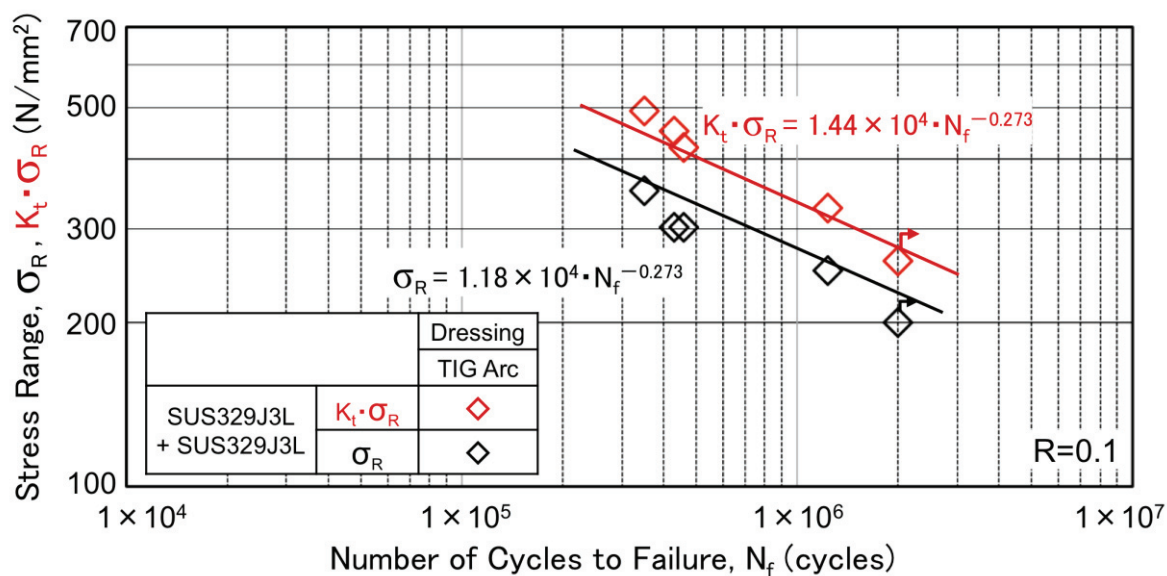
Specimen Number	Width w (mm)	Thick. t (mm)	Toe Radius R (mm)	Flank Angle $\theta$ ( $^\circ$ )	Vertical Leg Length h (mm)	Horizontal Leg Length hp (mm)	Projection Width B (mm)	Stress Concentration Factor $K_t$	Stress Range $\sigma_R$ (N/mm <sup>2</sup> )	$K_t \cdot \sigma_R$ (N/mm <sup>2</sup> )	Number of Cycles to Failure $N_f$ (cycles)	Remark
FWLN2-1	60.1	16.4	8.9	32.8	13.3	12.9	16.5	1.5	350	525	$2.15 \times 10^5$ 214,928	
FWLN2-2	60.1	16.3	12.5	30.9	13.6	13.3	16.5	1.4	300	420	$5.72 \times 10^5$ 572,014	Failure from Root
FWLN2-3	60.0	16.3	9.3	33.2	12.5	12.7	16.5	1.5	300	450	$4.42 \times 10^5$ 441,926	
FWLN2-4	60.1	16.3	3.5	25.7	12.2	12.5	16.5	1.7	250	425	$4.38 \times 10^5$ 437,806	
FWLN2-5	60.0	16.3	8.6	30.2	11.4	13.2	16.5	1.5	250	375	$6.28 \times 10^5$ 627,630	
FWLN2-6	60.0	16.4	9.8	35.4	11.3	12.8	16.5	1.5	200	300	$1.67 \times 10^6$ 1,674,249	
FWLN2-7	60.0	16.4	8.3	32.3	14.9	11.4	16.5	1.5	170	255	$>2.00 \times 10^6$ >2,002,505	Non-Failure



**Fig.4.6.7 Results of fatigue test for non-load-carrying cruciform fillet welded joint ( $\sigma_R$ - $N_f$  curve,  $K_t \cdot \sigma_R$ - $N_f$  curve)**

**Table 4.6.9 Results of fatigue test for non-load-carrying cruciform fillet welded joint (Correct by  $K_t$ ) (SUS329J3L + SUS329J3L steel plate. Dressing by TIG arc)**

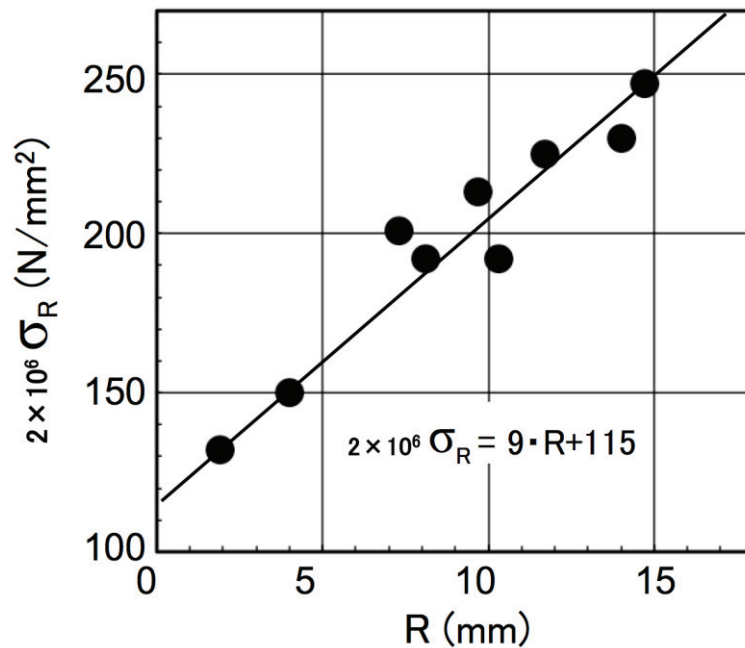
Specimen Number	Width w (mm)	Thick. t (mm)	Toe Radius R (mm)	Flank Angle $\theta$ ( $^\circ$ )	Vertical Leg Length h (mm)	Horizontal Leg Length hp (mm)	Projection Width B (mm)	Stress Concentration Factor $K_t$	Stress Range $\sigma_R$ (N/mm <sup>2</sup> )	$K_t \cdot \sigma_R$ (N/mm <sup>2</sup> )	Number of Cycles to Failure $N_f$ (cycles)	Remark
FWLN3-1	60.0	16.4	9.2	17.6	12.2	15.2	16.5	1.3	200	260	$>2.00 \times 10^6$ $>2,001,444$	Non-Failure
FWLN3-2	60.0	16.4	4.5	18.9	12.9	15.6	16.5	1.5	300	450	$4.33 \times 10^5$ 432,889	
FWLN3-3	60.0	16.3	10.8	20.9	11.2	16.2	16.5	1.4	350	490	$3.50 \times 10^5$ 349,803	
FWLN3-4	60.1	16.4	13.9	40.0	11.1	15.4	16.5	1.5	250	375	$1.76 \times 10^6$ 1,755,009	Failure from Root
FWLN3-5	60.1	16.4	6.0	24.7	11.1	16.2	16.5	1.6	250	400	$1.59 \times 10^6$ 1,593,300	Failure from Root
FWLN3-6	60.2	16.4	15.2	24.6	12.7	16.2	16.5	1.4	300	420	$4.55 \times 10^5$ 454,966	
FWLN3-7	60.0	16.4	9.1	17.3	12.1	17.1	16.5	1.3	250	325	$1.23 \times 10^6$ 1,232,090	



**Fig.4.6.8 Results of fatigue test for non-load-carrying cruciform fillet welded joint ( $\sigma_R$ - $N_f$  curve,  $K_t \cdot \sigma_R$ - $N_f$  curve)**

**Table 4.7.1 Results of fatigue test for cruciform welded joints ( $2 \times 10^6 \sigma_R - R$ )**

Results of Fatigue Test for Cruciform Welded Joints			$2 \times 10^6 \sigma_R$ (N/mm <sup>2</sup> )	Toe Radius R (mm)
Load-Carrying Full Penetration Cruciform Welded Joints	SUS316L-Clad+SUS329J3L			
	As-Welded	$\sigma_R = 4.24 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.210}$	201	7.3
	Dressing by Grinding	$\sigma_R = 5.20 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.210}$	247	14.7
	Dressing by TIG Arc	$\sigma_R = 4.85 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.210}$	230	14.0
Non-Load-Carrying Full Penetration Cruciform Welded Joints	SUS316L-Clad+SUS329J3L			
	As-Welded	$\sigma_R = 3.15 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.210}$	150	4.0
	Dressing by Grinding	$\sigma_R = 4.49 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.210}$	213	9.7
	Dressing by TIG Arc	$\sigma_R = 4.03 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.210}$	192	10.3
Non-Load-Carrying Cruciform Fillet Welded Joints	SUS329J3L+SUS329J3L			
	As-Welded	$\sigma_R = 6.95 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.273}$	132	1.9
	Dressing by Grinding	$\sigma_R = 1.01 \times 10^4 \cdot N_f^{-0.273}$	192	8.1
	Dressing by TIG Arc	$\sigma_R = 1.18 \times 10^4 \cdot N_f^{-0.273}$	225	11.7



**Fig.4.7.1 Results of fatigue test for cruciform welded joints ( $2 \times 10^6 \sigma_R - R$ )**



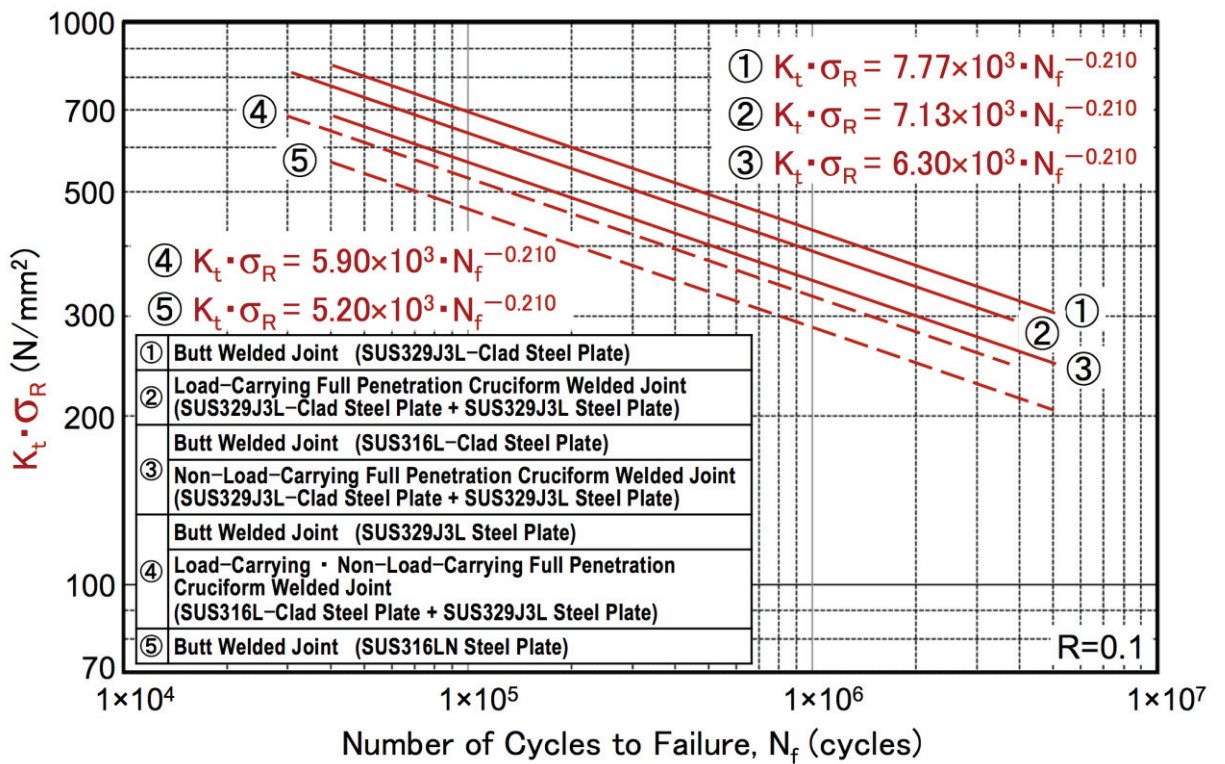


Fig.4.8.1 Fatigue strength of butt welded joints and full penetration cruciform welded joints

## 第 5 章

# カーゴタンク内トランスバルクヘッドと 二重底との十字溶接継手部の 静的FEM解析による応力集中の 検討・評価

## 第 5 章 目 次

5.1 はじめに	159
5.2 解析モデルおよび解析条件	159
5.2.1 同軸十字溶接継手解析モデルおよび荷重条件	159
5.2.2 目違い十字溶接継手解析モデルおよび荷重条件	161
5.2.3 材料定数	163
5.2.4 要素分割	163
5.2.5 解析ソフトウェア	164
5.3 同軸十字溶接継手止端部の応力集中	164
5.3.1 溶接止端部の応力集中係数の評価点	164
5.3.2 脚長寸法の影響	165
5.3.3 二重底側溶接条件の影響	167
5.3.4 同軸十字溶接継手止端部応力集中のまとめ	169
5.4 目違い十字溶接継手止端部の応力集中	170
5.4.1 溶接止端部の応力集中係数の評価点	170
5.4.2 二重底側隅肉溶接十字溶接継手の目違いの影響	170
5.4.2.1 各溶接止端部の応力集中係数	171
5.4.2.2 溶接止端部の相対位置と応力集中係数との関係	172
5.4.3 二重底側深溶け込み溶接十字溶接継手の 目違いの影響	174
5.4.3.1 溶接止端部の相対位置と応力集中係数との関係	174
5.4.4 二重底側板厚増加に伴う十字溶接継手の モールド合わせの影響	175
5.4.4.1 溶接止端部の相対位置と応力集中係数との関係	176
5.4.5 目違い十字溶接継手止端部応力集中のまとめ	177
5.5 まとめ	178
参考文献	179
図 表	181

## 5.1 はじめに

従来、ケミカルタンカーのカーゴタンク構造には、コルゲートバルクヘッドにオーステナイト系ステンレスソリッド鋼板(SUS316LN鋼板など)、二重底頂板にオーステナイト系ステンレスクラッド鋼板(SUS316Lクラッド鋼板など)が使用されている<sup>5.1), 5.2)</sup>。

コルゲートバルクヘッドに二相ステンレス鋼板(Duplex鋼板:SUS329J3L鋼板)を使用すると、SUS329J3L鋼板はSUS316LN鋼板に比べて高強度であるため(0.2%耐力で約1.5倍)、コルゲートバルクヘッドの設計応力を大きくすることが期待できる。しかし、バルクヘッドの設計応力を大きくすると、当然、バルクヘッドと二重底頂板との十字溶接継手部の応力が高くなり、溶接継手止端部の疲労強度が懸念される。さらに、十字溶接継手に対する二軸引張荷重下の疲労強度が検討された研究報告例<sup>5.3)~5.5)</sup>は少ない。

本章では、二相ステンレス鋼板のケミカルタンカー実船適用を目的として、SUS329J3L鋼板(Duplex鋼板)と、SUS316Lクラッド鋼板(SUSクラッド鋼板)とを組み合わせた十字溶接継手について、実船での溶接施工の指針を得ることを目的として、疲労強度検討の基礎となる、一軸・二軸引張荷重条件下での静的引張弾性解析(FEM解析)を実施し、脚長寸法・形状や溶接条件の異なる種々の十字溶接継手の各溶接止端部の応力集中係数の把握を試み、各溶接継手部の応力集中について相対的な比較を行った<sup>5.6)~5.10)</sup>。

特に、脚長の組み合わせ、および二重底側の溶接条件に着目し、目違いを付加して静的FEM解析を実施し、各溶接止端部の応力集中係数を評価した。

また、二重底頂板の上下面にある一对の溶接止端部の相対的な位置関係に着目し、各溶接止端部の応力集中係数を整理して、適切な脚長の組み合わせ、溶接条件および目違いの影響などについて考察した。

## 5.2 解析モデルおよび解析条件

### 5.2.1 同軸十字溶接継手解析モデルおよび荷重条件

Duplex鋼板のコルゲートバルクヘッドと、SUSクラッド鋼板の二重底との

十字溶接継手部を想定して、解析対象とした十字溶接継手の例(脚長[8,11]・隅肉溶接, 脚長[8,8]・深溶け込み溶接)を Fig.5.2.1 に示す。二重底のSUSクラッド鋼板を水平(L方向)部材とし、二重底上側のコルゲートバルクヘッドの Duplex 鋼板および二重底下側のフロア材の軟鋼板を垂直(T方向)部材とした。

SUSクラッド鋼板の水平部材(二重底頂板)の寸法は、長さ500mm, 板厚17.5mmとし、板厚17.5mmの内、SUS鋼板(合せ材)3mm, 軟鋼板(母材)14.5mmとした。垂直部材の Duplex 鋼板(コルゲートバルクヘッド)は長さ250mm, 板厚16mmとし、二重底側軟鋼板は長さ250mm, 板厚は16mmと24mmの2通りを検討した。水平部材および垂直部材の板幅は共に60mmとした。

十字溶接継手部の溶接条件は、コルゲートバルクヘッド側は全て完全溶け込み溶接とした。二重底側は、現在、深溶け込み溶接が適用されているが、建造コストの観点から、開先加工が不要な隅肉溶接が望まれるため、隅肉溶接および深溶け込み溶接の場合を検討した。Table 5.2.1 に FEM解析を実施した十字溶接継手の脚長および溶接条件等の組み合わせ一覧を示す。

十字溶接継手部の脚長について、ケミカルタンカーではコルゲートバルクヘッド側の脚長が板厚 $t$ と同程度(1.0 $t$ )であり、加えて、強度の高い二相ステンレス鋼板の適用を検討するため、脚長を小さく取る側を含めた 8, 11, 16mmの3条件とした。二重底側の軟鋼板側に対しては、脚長は0.7 $t$ 程度に取るため、軟鋼板側の脚長は、コルゲートバルクヘッド側と同程度とする場合とさらに大きくした場合を検討し、軟鋼板板厚が16mmの場合、隅肉溶接では11, 16, 24mmの3条件、深溶け込み溶接では隅肉溶接に対して、脚長を小さくした8, 11mmの2条件、軟鋼板板厚が24mmの場合、隅肉溶接では17mm, 深溶け込み溶接では10mmの各1条件とした。Table 5.2.1 に示した組み合わせの十字溶接継手について、各溶接止端部の応力集中係数を評価した。

また、十字溶接継手の解析モデルにおける二重底側の溶接部の未溶着部、すなわち、ルートギャップの形状を Fig.5.2.2 に示す。未溶着部の隙間を

0.1mmとし、未溶着部の幅は、軟鋼板 板厚16mmの場合、隅肉溶接は板厚と同じ16mm、深溶け込み溶接は5mm、軟鋼板 板厚24mmの場合、隅肉溶接は板厚と同じ24mm、深溶け込み溶接は8mmとした。また、ルートギャップの両端部はFig.5.2.2に示したように、長さ1mmの刃先形状とした。

Fig.5.2.1に示した十字溶接継手の解析モデルを用いて、水平部材および垂直部材に引張荷重を付与した一軸および二軸の静的弾性解析を実施した。水平部材(L方向)および垂直部材(T方向)それぞれの引張荷重の組み合わせをTable 5.2.2に、FEM解析における支持・荷重付与方法をFig.5.2.3に示す。Fig.5.2.3に示したように、水平部材は左端を固定して、右側端面に1.0Paの引張荷重を付与し、垂直部材は、両端面に0.0, 0.5, 1.0および2.0Paの各引張荷重を付与した。なお、T方向一軸引張条件は脚長[8,11]・隅肉溶接の十字溶接継手のみで実施した。

## 5. 2. 2 目違い十字溶接継手解析モデルおよび荷重条件

Duplex 鋼板のコルゲートバルクヘッドとSUSクラッド鋼板の二重底との十字溶接継手部を想定して、解析対象とする目違い十字溶接継手の例(脚長[8,11]・隅肉溶接, 脚長[8,8]・深溶け込み溶接)をFig.5.2.4に示す。

二重底のSUSクラッド鋼板, すなわち, 水平(L方向)部材に対し, 二重底上側のコルゲートバルクヘッドのDuplex 鋼板 および二重底下側のフロア材の軟鋼板を垂直(T方向)部材とした。また, 目違いは垂直部材に設け, Fig.5.2.4の十字溶接継手の目違いは8mmである。

SUSクラッド鋼板の水平部材(二重底頂板)の寸法は, 長さ500mm, 板厚17.5mmとし, 板厚17.5mmの内, SUS鋼板(合せ材)3mm, 軟鋼板(母材)14.5mmとした。垂直部材のDuplex 鋼板(コルゲートバルクヘッド)は長さ250mm, 板厚16mmとし, 二重底側軟鋼板は長さ250mm, 板厚は16mmと, 増厚した24mmの2通りを検討した。水平部材および垂直部材の板幅は共に60mmとした。

十字溶接継手部の溶接条件は, コルゲートバルクヘッド側は全て完全溶け込み溶接とし, 二重底側は隅肉溶接と深溶け込み溶接の2条件について検討した。

目違いの検討では、**Fig.5.2.4**に示したように、コルゲートバルクヘッド側の垂直部材を右側に移動させた。目違い量は、上下の垂直部材が同厚の十字溶接継手では、5 mmと8 mmを検討し、二重底側軟鋼板の板厚をコルゲートバルクヘッドの板厚に対して増厚した十字溶接継手では、実際の建造時にも行われる両部材の片側端面を合せたモールド合せの目違いを検討した。これらの目違い十字溶接継手を目違い無し(同軸)の十字溶接継手と比較して、目違いの影響を評価した。

**Table 5.2.3**に、FEM解析を実施した目違い十字溶接継手の脚長、溶接条件および目違い量の組み合わせ一覧を示す。

十字溶接継手の脚長について、ケミカルタンカーではコルゲートバルクヘッドの脚長は、板厚 $t$ と同程度(1.0 $t$ )であり、二重底側の軟鋼板では、隅肉溶接とする場合、脚長は0.7 $t$ 程度である。これらを基準に、軟鋼板板厚16 mmで、隅肉溶接の場合、軟鋼板側脚長を11 mmとし、コルゲートバルクヘッド側では、高強度のDuplex鋼板の適用を検討するために、脚長が短くなる側を含めた16, 11, 8 mmそれぞれを組み合わせた3条件、軟鋼板が深溶け込み溶接の場合、軟鋼板側脚長を小さくした8 mmとし、コルゲートバルクヘッド側脚長は、16, 8 mmそれぞれを組み合わせた2条件とした。これらの十字溶接継手の目違いは、5, 8 mmと同軸(0 mm)の3条件とした。また、軟鋼板板厚を増厚した24 mmの場合、軟鋼板側脚長は、隅肉溶接では17 mm(0.7 $t$ )、深溶け込み溶接では10 mmの2条件とし、目違いはモールド合せ(目違い量4 mm)と同軸の2条件とした。

**Table 5.2.3**に示した組み合わせの十字溶接継手について、各溶接止端部の応力集中係数を評価した。

また、十字溶接継手の解析モデルにおける二重底側の溶接部の未溶着部、すなわち、ルートギャップの形状は、先に**Fig.5.2.2**に示した通りとした。未溶着部の隙間を0.1 mmとし、未溶着部の幅は、軟鋼板板厚16 mmの場合、隅肉溶接は板厚と同じ16 mm、深溶け込み溶接は5 mm、軟鋼板板厚24 mmの場合、隅肉溶接は板厚と同じ24 mm、深溶け込み溶接は8 mmとした。また、ルートギャップの両端部は**Fig.5.2.2**に示したように、長さ1 mmの刃先形状とした。

**Fig.5.2.4** および**Table 5.2.3**に示した十字溶接継手の解析モデルを作成し、水平部材および垂直部材に引張荷重を付与した一軸 および 二軸の静的弾性解析を実施した。水平部材(L方向)および垂直部材(T方向)それぞれの引張荷重の組み合わせを**Table 5.2.4**に、FEM解析における支持・荷重付与方法を**Fig.5.2.5**に示す。

**Fig.5.2.5(a)**に示したように、同軸十字溶接継手では、水平部材は左端を固定して、右側端面に1.0Paの引張荷重を付与し、垂直部材は、両端面に0.0, 0.5 および 2.0Paの各引張荷重を付与した。一方、目違い十字溶接継手では、二軸引張荷重を付与する場合、目違いにより曲げ変形が生じるため、**Fig.5.2.5(b)**に示したように、水平部材端部は垂直方向を拘束し、垂直部材端部は水平方向を拘束する支持・荷重付与方法とした。参考として、**Fig.5.2.5(b)**の支持方法により、二軸引張荷重を付与した場合の変形図を**Fig.5.2.6**(等高線図は最大主応力分布)に示すが、目違いにより溶接部に曲げ変形が生じている。

前述の脚長、溶接条件に相当するルートギャップおよび目違いの条件とL方向およびT方向の荷重条件の組み合わせから、計 57ケースのFEM解析を実施した。

### 5. 2. 3 材料定数

FEM解析の対象となる十字溶接継手は、水平部材であるSUSクラッド鋼板に、垂直部材であるDuplex鋼板および軟鋼板を溶接したものである。**Table 5.2.5**にFEM解析に使用したDuplex鋼板、SUS鋼板および軟鋼板の材料定数(縦弾性係数およびポアソン比)を示す。

### 5. 2. 4 要素分割

FEM解析では4面体要素を用いた。本FEM解析では、コルゲートバルクヘッドへのDuplex鋼板適用に向けた十字溶接継手部の溶接施工の指針を得ることを目的としている。すなわち、**Table 5.2.1**および**Table 5.2.3**に示した脚長の組み合わせ、隅肉・深溶け込みの溶接条件、二重底側軟鋼板の板厚および目違い量をパラメータとして、十字溶接継手止端部の



応力集中の相対的評価を目的とする。そこで、解析モデルの溶接止端は、止端半径 0 mm, フランク角 45° の単純な形状とし、応力集中は、板厚中央におけるモデル表面上の節点応力(最大主応力)を用いて評価した。

なお、十字溶接継手の溶接止端部の応力集中が評価できる溶接止端部の要素寸法を検討した結果、すなわち、板幅方向の要素寸法を変化させて最大応力を比較したところ、0.3 mm 以下で最大応力がほぼ飽和したため、溶接止端部の板幅方向の寸法を 0.3 mm とした。

また、ルートギャップ両端 R 部近傍は、溶接止端部と同様に板幅方向の寸法を 0.3 mm 程度とし、**Fig.5.2.2** に示した通り、端部に丸みを設けていない。

**Fig.5.2.7** に、脚長 [16,11]、二重底側を隅肉溶接とした目違い 5 mm の十字溶接継手解析モデルの計算格子の全体図 (**Fig.5.2.7(a)**)、および溶接止端部近傍の格子 (**Fig.5.2.7(b)**) を示す。全格子数は約 60 万である。

## 5.2.5 解析ソフトウェア

本解析には、オープンソースである Linux ベースの CAE ソフトウェア Salome-Meca 2011 を使用した。Salome-Meca 2011 は、プリポスト処理プログラム(モデリング、メッシュ作成、可視化を含むデータ処理)の統合パッケージ SALOME に、FEM 解析ソルバーが組み込まれた CAE ソフトウェアパッケージである。FEM 解析ソルバーは、フランス電力公社が提供している構造力学・熱解析ソフト Code\_Aster である。

SALOME および Code\_Aster それぞれのバージョンは、SALOME 6.6.0 および Code\_Aster STA 10.8 である。

## 5.3 同軸十字溶接継手止端部の応力集中

### 5.3.1 溶接止端部の応力集中係数の評価点

FEM 解析によって得られた十字溶接継手部近傍の最大主応力分布(等高線図)の例(脚長 [8,11]、隅肉溶接、一軸・二軸荷重)を **Fig.5.3.1** に示す。**Fig.5.3.1** に示したように、水平方向一軸荷重下 (**Fig.5.3.1(a)**) では、水平部材側止端部にのみ応力集中が生じるが、二軸荷重下 (**Fig.5.3.1(b)**) では、垂直部材側止端部にも応力集中が生じていることが確認できる。

FEM解析によって得られた計算結果から、**Fig.5.3.2**に示す十字溶接継手部の各溶接止端部の応力集中係数を評価した。すなわち、先に述べたように、止端部応力としては板幅中央におけるモデル表面の最大主応力を用いた。応力集中係数の基準応力は、水平部材側の溶接止端部①、③、⑤、⑦は、水平部材に付与した平均応力とし、垂直部材側の溶接止端部②、④、⑥、⑧は、垂直部材に付与した平均応力とした。

### 5.3.2 脚長寸法の影響

二重底側を隅肉溶接とした十字溶接継手について、脚長寸法の影響を評価した解析結果について述べる。コルゲートバルクヘッド側、二重底側の脚長寸法の組み合わせ一覧(**No.1**～**No.6**)を**Fig.5.3.3**に示す。それぞれの鋼板の板厚が同厚16mmの十字溶接継手では、脚長[8,11]、[11,11]、[16,11]、[16,16]および[16,24]の5通りであり、異厚、すなわち、二重底側軟鋼板板厚を24mmに増厚した十字溶接継手では、脚長[16,17]の1通りである。また、脚長[8,11]の十字溶接継手については、**Table5.2.2**で述べたように、水平方向一軸荷重、水平・垂直二軸荷重の荷重条件に加え、**Fig.5.3.3**の**No.7**に示した垂直方向一軸荷重の荷重条件を検討し、それぞれを比較した。ただし、垂直方向一軸荷重の条件では、**Fig.5.3.3**の**No.7**に示すように固定端を軟鋼板側端部とした。

**No.1**、**No.2**および**No.3**は、二重底側(軟鋼板側)を脚長11mmの隅肉溶接とし、コルゲートバルクヘッド側(Duplex鋼板側)の深溶け込み(完全溶け込み)溶接の脚長寸法を変化させた場合の比較である。

**No.3**、**No.4**および**No.5**は、コルゲートバルクヘッド側は脚長16mmの完全溶け込み溶接とし、二重底側を隅肉溶接で脚長寸法を変化させた場合の比較である。

**No.6**は、二重底側軟鋼板の板厚を24mmと厚くして隅肉溶接とした十字溶接継手部を比較するものである。

静的FEM解析によって得られた各溶接止端部の応力集中係数を、**Fig.5.3.4**、**Fig.5.3.5**に示す。ただし、十字溶接継手部の解析モデルはコルゲートバルクヘッド側および二重底側の垂直部材は同軸であり、垂直部材の

中心線に対して対称であるため、止端部①③, ②④, ⑤⑦ および ⑥⑧は、それぞれ応力集中係数の平均値をとって評価した。Fig.5.3.4はコルゲートバルクヘッド側、Fig.5.3.5は二重底側であり、各図の(a)は水平部材側止端部、(b)は垂直部材側止端部の応力集中係数を示している。また、各図の横軸は、(a)の水平部材側止端部については、垂直方向(T方向)と水平方向(L方向)に付与した荷重の比(荷重比(T/L))をとり、(b)の垂直部材側止端部については、その逆数(L/T)をとって比較した。加えて、各図の(b)については、(a)との比較のため、T方向荷重とL方向荷重の荷重比(T/L)を図上側の横軸に示した。

No.1, No.2 および No.3に示すコルゲートバルクヘッド側(Duplex鋼板側)脚長寸法が異なる場合、応力集中係数が大きいか、または増大する溶接止端部に着目すると、二重底側(軟鋼板側)の脚長よりも脚長寸法が小さいNo.1では、Fig.5.3.4(a)に示したように、コルゲートバルクヘッド側の水平部材側溶接止端部①③で荷重比(T/L)とともに応力集中係数が増大する。逆に、脚長寸法が大きいNo.3では、応力集中係数が減少している。

また、Fig.5.3.5(b)に示した隅肉溶接とした二重底側の垂直部材側溶接止端部⑥⑧においては、いずれの脚長寸法の場合であっても、荷重比(T/L)とともに応力集中係数は増加し、他の止端部に比べて高い値となっている。

No.3, No.4 および No.5に示す隅肉溶接とした二重底側の脚長寸法が異なる場合、Fig.5.3.4(a)に示したコルゲートバルクヘッド側の水平部材側溶接止端部①③で二重底側の脚長寸法が大きいと、応力集中係数は明らかに高くなっている。ただし、荷重比(T/L)が増加すると応力集中係数は減少する傾向にある。逆に、Fig.5.3.5(b)に示した隅肉溶接とした二重底側の垂直部材側溶接止端部⑥⑧においては、脚長寸法が小さいと応力集中係数は明らかに大きく、加えて、荷重比(T/L)の増加とともに応力集中係数も増加する傾向にある。

No.1, No.2 および No.3の比較、およびNo.3, No.4 および No.5の比較から、バルクヘッド側と二重底フロア側の脚長寸法の違いは、溶接止端部の応力集中係数を増減させる要因となるため、できるだけ脚長寸法の違いは

少ない方が良いと考えられる。

また、コルゲートバルクヘッド側垂直部材側止端部②④ (Fig.5.3.4(b))と二重底側垂直部材側止端部⑥⑧ (Fig.5.3.5(b))との比較から、隅肉溶接のためルートギャップを有する止端部⑥⑧の方が脚長寸法の違いによる応力集中係数の差が大きく、荷重比(T/L)とともに応力集中係数が増加する傾向も認められる。

No.6の二重底側の板厚が24mmで、コルゲートバルクヘッドの板厚16mmに比べて厚く隅肉溶接とした場合、コルゲートバルクヘッド側および二重底側の上脚長側の止端部(②,④,⑥および⑧)の応力集中係数は著しく高くなっている。

No.7の垂直方向一軸引張荷重条件は、止端部②④のFig.5.3.4(b)および止端部⑥⑧のFig.5.3.5(b)に示す通り、荷重比L/T=0であるが、荷重比T/Lでは $\infty$ に相当する。すなわち、No.1の結果と比較すると、No.1の各止端部の応力集中係数の値は、荷重比(T/L)が増加するとNo.7の応力集中係数にほぼ一致することがわかる。また、No.1の水平方向のみの一軸引張条件 (Fig.5.3.5(a), T/L=0)と比較すると、Fig.5.3.5(b)のNo.7の二重底側の応力集中係数は約60%高く、二重底側隅肉溶接によるルートギャップの影響が考えられる。

### 5.3.3 二重底側溶接条件の影響

十字溶接継手の二重底側(軟鋼板側)の溶接条件(脚長寸法、隅肉溶接および深溶け込み溶接)を検討した結果について報告する。検討した十字溶接継手形状の一覧をFig.5.3.6に示す。

No.1とNo.2およびNo.3とNo.4は、それぞれDuplex鋼板側脚長が8mmと16mmの完全溶け込み溶接の場合について、軟鋼板側の溶接条件が隅肉溶接(脚長11mm)と深溶け込み溶接(脚長8mm)とを比較したものである。また、No.5は、No.4の十字溶接継手の二重底フロア側深溶け込み溶接の脚長寸法を、No.3と同じ11mmに大きくしたものである。No.6とNo.7は、軟鋼板側の板厚を24mmと増厚した十字溶接継手の隅肉溶接(脚長17mm)と深溶け込み溶接(脚長10mm)との比較である。

静的FEM解析によって得られた各溶接止端部の応力集中係数を、**Fig.5.3.4**, **Fig.5.3.5**と同様に、垂直部材の中心線対称となる止端部同士で平均値を求め、横軸に、**Fig.5.3.4**, **Fig.5.3.5**と同様に荷重比( $T/L$ )またはその逆数( $L/T$ )をとり比較した結果を、**Fig.5.3.7**, **Fig.5.3.8**に示す。

**No.1**と**No.2**との比較、すなわち、コルゲートバルクヘッド側脚長が板厚の半分( $0.5t$ )  $8\text{mm}$ である十字溶接継手の二重底側の溶接条件の比較から、**Fig.5.3.7(a)**に示す止端部①③では、**No.1**の隅肉溶接では荷重比( $T/L$ )とともに応力集中係数が増大するが、**No.2**の深溶け込み溶接では応力集中係数の増加は見られない。また、**Fig.5.3.8(b)**に示す止端部⑥⑧においても、**No.1**の隅肉溶接は**No.2**の深溶け込み溶接よりも明らかに応力集中係数は高く、加えて、荷重比( $T/L$ )の増加に伴い応力集中係数が増加する傾向も顕著である。

**No.3**と**No.4**との比較、すなわち、コルゲートバルクヘッド側脚長が板厚  $t$ と同じ( $1.0t$ )  $16\text{mm}$ の十字溶接継手の二重底側溶接条件の比較から、止端部①③では脚長 $0.5t$ の場合と比べて溶接条件に関係なく応力集中係数は低く、荷重比( $T/L$ )に対しても減少する傾向である。しかし、**Fig.5.3.8(b)**に示す止端部⑥⑧では脚長 $0.5t$ の場合と同様に、**No.3**の隅肉溶接では、**No.4**の深溶け込み溶接に比べて応力集中係数は明らかに高く、加えて、荷重比( $T/L$ )とともに増大する傾向も認められる。

一方、**Fig.5.3.8(a)**に示す止端部⑤⑦では、**No.4**の深溶け込み溶接で、応力集中係数が荷重比( $T/L$ )とともに緩やかに増大している。

**No.5**と**No.4**との比較から、二重底側(軟鋼板側)を深溶け込み溶接とし、その脚長を $0.5t$ から $0.7t$ に大きくすると、**Fig.5.3.8(a)**に示すように、二重底側脚長 $0.5t$ の**No.4**では応力集中係数が高く、荷重比( $T/L$ )とともに増加していたが、脚長を $0.7t$ と大きくした**No.5**では、応力集中は緩和されている。

**No.4**, **No.5**および**No.2**の二重底側が深溶け込み溶接で脚長が異なる十字溶接継手の比較から、コルゲートバルクヘッド側と二重底側の各脚長が等しい、すなわち、それぞれの脚部形状が二重底頂板の水平部材に対して対称であれば、荷重比( $T/L$ )の増加に伴い応力集中係数が明らか

に大きくなる溶接止端部はなくバランスが良いと言える。

最後に、No.6とNo.7との比較、すなわち、二重底側(軟鋼板側)の板厚が24mm、コルゲートバルクヘッド側(Duplex鋼板側)の板厚が16mmと、二重底側の板厚が大きい十字溶接継手における、二重底側の溶接条件(隅肉溶接と深溶け込み溶接)の比較から、同厚十字溶接継手の場合と同様に、Fig.5.3.7(b)およびFig.5.3.8(b)に示すようにコルゲートバルクヘッド側の垂直部材側止端部②④および二重底側の垂直部材側止端部⑥⑧では、隅肉溶接で明らかに高い応力集中係数が、深溶け込み溶接では低減されており、前述の同厚十字溶接継手の場合と同様の傾向が認められる。

#### 5.3.4 同軸十字溶接継手止端部応力集中のまとめ

二相ステンレス鋼板のケミカルタンカーへの実船適用に向けて、二相ステンレス鋼板製の横隔壁の応力が二重底頂板溶接部の疲労強度に及ぼす影響を把握するための基礎検討として、二相ステンレス鋼板のコルゲートバルクヘッドと、SUS316Lクラッド鋼板の二重底との十字溶接継手部の、一軸および二軸荷重下の静的FEM解析を実施した。十字溶接継手の各溶接止端部の応力集中係数を評価した結果、以下のような知見が得られた。

- ① コルゲートバルクヘッド側(Duplex鋼板側)の脚長について、0.5t、0.7t、1.0tを比較した結果、最も脚長が大きい脚長1.0tであれば、水平部材側止端部において荷重比(T/L)の増加に伴い応力集中係数が増加する傾向は見られず、十分な脚長寸法であると言える。また、二重底側(軟鋼板側)が隅肉溶接である場合、コルゲートバルクヘッド側と二重底側の脚長は揃え、水平部材上下の両止端部の位置が対象である方が良いと言える。
- ② コルゲートバルクヘッド側(Duplex鋼板側)と二重底側(軟鋼板側)の板厚が同厚の場合、二重底側は深溶け込みとし、その脚長はコルゲートバルクヘッド側の脚長と同程度(各脚部が水平軸対称となる形状)にすることが好ましく、コルゲートバルクヘッド側の脚長が1.0tの場合は、

二重底フロア側の脚長も1.0tにすることが良いと考えられる。

## 5.4 目違い十字溶接継手止端部の応力集中

### 5.4.1 溶接止端部の応力集中係数の評価点

FEM解析によって得られた十字溶接継手部近傍の応力分布(等高線図)の例(脚長[16,11], 隅肉溶接, 二軸荷重)をFig.5.4.1(a),(b)に示す。二軸荷重を付与すると, Fig.5.4.1(a)の同軸十字溶接継手では, 垂直, 水平部材側とも溶接止端部に同程度の応力集中が生じるが, Fig.5.4.1(b)の目違い十字溶接継手では, 曲げ変形により一方の溶接止端部の応力集中が高くなっていることが確認できる。

FEM解析によって得られた計算結果から, Fig.5.4.2に示す十字溶接継手部の各溶接止端部の応力集中係数を評価した。止端部応力としては, 板幅中央におけるモデル表面の最大主応力を用いた。また, 応力集中係数の基準応力は, 水平部材側の溶接止端部①, ③, ⑤, ⑦は, 水平部材に付与した平均応力とし, 垂直部材側の溶接止端部②, ④, ⑥, ⑧は, 垂直部材に付与した平均応力とした。

### 5.4.2 二重底側隅肉溶接十字溶接継手の目違いの影響

コルゲートバルクヘッド側を完全溶け込み溶接, 二重底側を隅肉溶接とした十字溶接継手について, 目違いの影響を評価した解析結果について報告する。Fig.5.4.3に評価した9種類の十字溶接継手の一覧を示す。コルゲートバルクヘッド側, 二重底側の脚長寸法の組み合わせは, 脚長[16,11], [11,11], [8,11]であり, それぞれ同軸および目違い5mm, 8mmを評価した。垂直部材の板厚は上下とも16mmとした場合である。

Fig.5.4.3の各脚長の左上に, 脚長と目違い量を表した略式記号を示す。1611\_0, 1611\_+5 および 1611\_+8 は, 脚長[16,11]の目違いの比較, 1111\_0, 1111\_+5 および 1111\_+8 は, 脚長[11,11]の目違いの比較, 0811\_0, 0811\_+5 および 0811\_+8 は, 脚長[8,11]の目違いの比較であり, それぞれコルゲートバルクヘッド側の脚長寸法が異なる。

#### 5.4.2.1 各溶接止端部の応力集中係数

静的FEM解析によって得られた各溶接止端部の応力集中係数を、**Fig.5.4.4**、**Fig.5.4.5**に示す。**Fig.5.4.4**はコルゲートバルクヘッド側、**Fig.5.4.5**は二重底側であり、各図の(a),(b)は水平部材側止端部、(c)、(d)は垂直部材側止端部の応力集中係数を示している。また、各図の横軸は、(a),(b)の水平部材側止端部については、垂直方向(T方向)と水平方向(L方向)に付与した荷重の比(荷重比(T/L))をとり、(c)、(d)の垂直部材側止端部については、その逆数(L/T)をとって比較した。加えて、各図の(c)、(d)については、(a)、(b)との比較のため、荷重比(T/L)も図上側の横軸に示した。

Duplex 鋼板側の脚長が最大である脚長 [16,11] (**1611\_0**、**1611\_+5** および **1611\_+8**) について、水平部材上の溶接止端部 [**Fig.5.4.4(a)**、**(b)**・**Fig.5.4.5(a)**、**(b)**] では、目違いの影響は、二軸側(垂直方向)荷重の増加に伴い止端部 ①③⑤ で顕著である。特に止端部 ③⑤ では荷重比(T/L)の増加に伴い応力集中係数は目違いにより増大し、止端部 ③ では荷重比2の条件で、目違い8mmの場合は同軸に比べて応力集中係数は2倍以上となる。

一方、垂直部材上の溶接止端部 [**Fig.5.4.4(c)**、**(d)**・**Fig.5.4.5(c)**、**(d)**] では、二軸側荷重の影響は小さい。しかし、目違いの影響として、垂直軸対称にある止端部同士では応力集中係数に明らかな差が生じ、止端部 ②⑧ では目違い量に伴い応力集中係数は大きくなり、目違い8mmでは同軸に比べて応力集中係数は最大で40%程度高い値を示した。

Duplex 鋼板側、軟鋼板側とも脚長が等しい脚長 [11,11] の場合、水平部材上の溶接止端部 [**Fig.5.4.4(a)**、**(b)**・**Fig.5.4.5(a)**、**(b)**] では、目違いの影響は、二軸側荷重(T/L)の増加に伴う応力集中係数の増大が明らかな止端部 ③⑤ では顕著であるが、脚長 [16,11] とは異なり、止端部 ① では目違いおよび荷重比の影響は小さい。

一方、垂直部材上の溶接止端部 [**Fig.5.4.4(c)**、**(d)**・**Fig.5.4.5(c)**、**(d)**] では、脚長 [16,11] と同様に、荷重比の影響は小さく、程度に差はあるが、目違いの影響として、垂直軸対称にある止端部同士では応力集中係数に



差が生じ、止端部②⑧では目違いとともに応力集中係数は大きくなる。特に止端部⑧では他の脚長の組み合わせに比べても応力集中係数は大きく、目違い8mmでは同軸に比べて最大で50%近く高くなった。

Duplex 鋼板側の脚長が最も小さい脚長 [8,11] について、水平部材上の溶接止端部 [Fig.5.4.4(a),(b)・Fig.5.4.5(a),(b)] では、目違いの影響は、二軸側荷重の増加に伴い止端部③⑤⑦で明らかであり、特に止端部③⑤では他の脚長の場合と同様に、目違いにより応力集中係数は荷重比の増加に伴い大きく増大する。止端部③では荷重比2の条件で、目違い8mmの場合、同軸に比べ応力集中係数は約2.5倍高くなっている。また、止端部①では他の脚長の場合と異なり、荷重比の増加とともに緩やかではあるが応力集中係数は増大する。

一方、垂直部材上の溶接止端部 [Fig.5.4.4(c),(d)・Fig.5.4.5(c),(d)] では、他の脚長の場合と同様に、荷重比に関係なく目違いにより垂直軸対称にある止端部同士で応力集中係数に差が生じ、止端部②⑧では目違い量に伴い応力集中係数は大きくなる。止端部②⑧における目違いの影響は脚長 [16,11] の場合よりも大きい。

#### 5.4.2.2 溶接止端部の相対位置と応力集中係数との関係

Fig.5.4.4 および Fig.5.4.5 に示した各溶接止端部の応力集中係数について、Duplex 鋼板側の脚長寸法が最大の16mmの場合に着目すると、目違いにより応力集中係数が増大する垂直部材上の止端部②⑧では、脚長寸法の増大により、明らかな応力集中緩和の効果が見られる。一方、二軸側荷重の影響を受け、荷重比とともに応力集中係数が増大する水平部材上の止端部③⑤では、脚長寸法が大きい効果はなく、止端部⑤では他の脚長の場合に比べやや高くなる傾向が認められた。また、全体として、止端部③⑤における目違い十字溶接継手の応力集中係数の大小には、その止端部と水平軸対称に位置する止端部、すなわち、止端部③では止端部⑦、止端部⑤では止端部①との水平軸方向の位置関係が関係し、その止端部が他方に対して外側へのずれが大きい場合(脚長 [16,11] では止端部③)、応力集中係数は小さくなる傾向にある。

これらを踏まえ、水平部材上の止端部①③⑤⑦それぞれについて、水平軸対称にある水平部材上の止端部との水平軸方向のずれ(相対位置、外側へのずれを正とする)を横軸にとり、縦軸に、脚長の組み合わせごとに各止端部の応力集中係数をとった結果を、**Fig.5.4.6**および**Fig.5.4.7**に示す。**Fig.5.4.6**は、一軸引張荷重条件であり、**Fig.5.4.7**は、荷重比(T/L)2の二軸引張荷重条件である。

**Fig.5.4.6**に示した結果から、一軸引張荷重条件では、脚長の組み合わせに関係なく、各止端部の応力集中係数はほぼ一つの曲線上に分布しており、止端部のずれとの間に明確な関係が認められる。ずれがない場合(0mm)を基準とすれば、止端部が外側(正側)にずれると、応力集中係数は低下し、逆に、内側(負側)にずれると、応力集中係数は増大することが分かる。また、それらの増減は、±10mm付近がピークであると言える。したがって、十字溶接継手において、ある水平部材上の止端部の応力集中緩和の手段として、その止端部が水平軸対称の止端部に対して同位置または内側にある場合は、やや外側になるような増脚長などが有効であると考えられる。

次に、**Fig.5.4.7**に示した二軸引張荷重条件の結果について述べる。**Fig.5.4.7**は、各脚長の組み合わせについて、止端部ごとに目違いの違いによる応力集中係数を示している。**Fig.5.4.7**から明らかなように、**Fig.5.4.6**に示された一つの曲線上にあった各止端部の応力集中係数は、二軸側荷重の付加により、大きくばらついている。また、そのばらつきは目違いが大きいほど、大きくなる。目違いの影響、すなわち、外側へのずれが大きい止端部③⑤に着目すれば、いずれの脚長の組み合わせも、各止端部の応力集中係数は目違いが大きいほど大きくなる。また、**Fig.5.4.6**の一軸引張荷重条件と同様に、止端部のずれが±10mm以内では、各止端部の応力集中係数は、止端部が外側にずれると低下する。ただし、目違い8mmの止端部③⑤では、止端部の相対位置よりも曲げの影響が強くなり、脚長の組み合わせが異なる止端部③および⑤同士の比較において、最も外側にずれて+10mm以上となる脚長[16,11]の止端部③および脚長[8,11]の止端部⑤では、応力集中係数は最小とはならず、それらよりもずれが小さい脚長

[11,11]の止端部③と⑤の応力集中係数が最も小さい。

加えて、コルゲートバルクヘッド側の脚長が大きくなると、止端部①では、二重底側の止端部⑦とは異なり、目違いの増加とともに応力集中係数は減少せず、脚長[16,11]の目違い8mmでは大きく増加している。

脚長の組み合わせ同士の比較から、水平部材上下の脚部形状が等しい脚長[11,11]は、十字溶接継手部に目違いが生じてしまった場合でも、全体として、止端部③と⑤、①と⑦の対角な位置関係にある止端部同士の応力集中の差が少なく、望ましい脚長の組み合わせであると言える。

#### 5.4.3 二重底側深溶け込み溶接十字溶接継手の目違いの影響

コルゲートバルクヘッド側を完全溶け込み溶接、二重底側を深溶け込み溶接とした十字溶接継手について、目違いの影響を評価した解析結果について報告する。Fig.5.4.8に評価した6種類の十字溶接継手の一覧を示す。

コルゲートバルクヘッド側、二重底側の脚長寸法の組み合わせは、脚長[16,8]、[8,8]であり、それぞれ同軸および目違い5mm、8mmを評価した。また、二重底側はFig.5.4.3に示した隅肉溶接の場合に比べて、深溶け込み溶接であるため脚長は8mmと小さい。また、Fig.5.4.8の各脚長の左上に、脚長と目違い量を表した略式記号を示す。1608\_0、1608\_+5および1608\_+8は、脚長[16,8]の目違いの比較、0808\_0、0808\_+5および0808\_+8は、脚長[8,8]の目違いの比較であり、それぞれコルゲートバルクヘッド側の脚長寸法が異なる。

##### 5.4.3.1 溶接止端部の相対位置と応力集中係数との関係

前述の二重底側隅肉溶接の十字溶接継手におけるFig.5.4.6およびFig.5.4.7と同様に、Fig.5.4.9およびFig.5.4.10に、水平部材上の止端部①③⑤⑦それぞれについて、水平部材上下の止端部の相対位置(外側へのずれを正とする)と各止端部の応力集中係数との関係を、脚長の組み合わせごとに示した結果を示す。Fig.5.4.9は、一軸引張荷重条件であり、Fig.5.4.10は、荷重比(T/L)<sup>2</sup>の二軸引張荷重条件である。

Fig.5.4.9 に示したように、二重底側深溶け込み溶接の十字溶接継手においても、Fig.5.4.6 と同様に、一軸引張荷重条件では、脚長の組み合わせに関係なく、各止端部の応力集中係数はほぼ一つの曲線上に分布し、止端部が外側(正側)にずれると、応力集中係数は低下し、内側(負側)にずれると、応力集中係数が増大することが分かる。また、それらの増減のピークも、±10mm 付近となっている。ただし、Fig.5.4.9 に示した二重底側が深溶け込み溶接の場合、隅肉溶接である場合の Fig.5.4.6 に比べて、脚長の組み合わせによる違いがわずかに認められる。

次に、Fig.5.4.10 に示した二軸引張荷重条件では、前述の Fig.5.4.7 と同様に、垂直部材側の荷重とともに、各止端部の応力集中係数は大きくばらつき、止端部 ③⑤ において、目違い量に伴う各止端部の応力集中係数の増大は明らかである。また、二重底側が隅肉溶接である Fig.5.4.6 と同様に、目違い 8mm の止端部 ③⑤ を除けば、各止端部の応力集中係数は、止端部が外側にずれると低下する。また、目違い 8mm では止端部 ③⑤ において、脚部形状を揃えた脚長 [8,8] の方が、脚長 [16,8] に比べて、各止端部の応力集中係数はわずかに小さくなる。

加えて、二重底側が隅肉溶接である Fig.5.4.7 では、コルゲートバルクヘッド側の脚長寸法が大きい止端部 ① で目違いにより応力集中係数が増大していたが、深溶け込み溶接である場合、その傾向は明らかに小さい。

二重底側が深溶け込み溶接である場合でも、水平部材上下の脚部形状が等しい脚長 [8,8] は、目違い 8mm の場合を除いて、止端部 ③と⑤、①と⑦ の対角な位置関係にある止端部同士の応力集中の差が少なく、望ましい脚長の組み合わせであると言える。また、止端部 ③と⑤、①と⑦ の応力集中の差は、二重底側が隅肉溶接である脚長 [11,11] と比べても小さい。

#### 5.4.4 二重底側板厚増加に伴う十字溶接継手のモールド合わせの影響

二重底側の軟鋼板のみ板厚を 24mm に増厚した十字溶接継手について、モールド合わせ、すなわち、軟鋼板の片側端面と、コルゲートバルクヘッド側の Duplex 鋼板の片側端面とを同一の垂直線上に合わせる目違いの

影響を評価した解析結果について報告する。

**Fig.5.4.11**に評価した4種類の十字溶接継手の一覧を示す。コルゲートバルクヘッド側は全て完全溶け込み溶接である。二重底側は、隅肉溶接とした場合、脚長寸法の組み合わせは脚長[16,17]、深溶け込み溶接とした場合、脚長[16,10]とした。また、モールド合わせによる目違いは4mmである。**Fig.5.4.11**の各脚長の左上に、脚長と目違い量を表した略式記号を示す。**1617f\_0**および**1617f\_m**は、二重底側隅肉溶接で脚長[16,17]の目違いの比較、**1610d\_0**および**1610d\_m**は、二重底側深溶け込み溶接で脚長[16,10]の目違いの比較であり、それぞれ二重底側の脚長寸法および溶接条件が異なる。

#### 5.4.4.1 溶接止端部の相対位置と応力集中係数との関係

**Fig.5.4.12**および**Fig.5.4.13**に、水平部材上の止端部①③⑤⑦それぞれについて、水平部材上下の止端部の相対位置(外側へのずれを正とする)と各止端部の応力集中係数との関係を、脚長の組み合わせごとに示した結果を示す。**Fig.5.4.12**は、一軸引張荷重条件であり、**Fig.5.4.13**は、荷重比(T/L)2の二軸引張荷重条件である。

**Fig.5.4.12**に示すように、一軸引張荷重条件であれば、**Fig.5.4.6**および**Fig.5.4.9**と同様に、同軸とモールドの違いに関係なく、各止端部の応力集中係数はほぼ一つの曲線上に分布し、外側にずれる止端部の応力集中係数が小さくなる。しかし、二重底側の溶接条件に違いがあるために、脚部の組み合わせによって応力集中係数の分布に差が見られる。

**Fig.5.4.13**に示す二軸引張荷重条件では、これまでと同様に、水平部材上下の脚部の大きさが同程度となる脚長[16,10]の方が、止端部③と⑤、①と⑦の対角な位置関係にある止端部同士の応力集中の差が小さくなる。また、モールド合わせによる目違いの程度であれば、止端部のずれと応力集中係数との関係は、これまで示した垂直部材同士の板厚が等しい十字溶接継手の目違い5mmまでの範囲と同様である。

ただし、二重底側の垂直部材の板厚がコルゲートバルクヘッド側に対して厚くなる影響は、二重底側を隅肉溶接とした垂直部材側止端部⑥⑧に

表われる。Fig.5.4.14(a),(b)に止端部⑥⑧の応力集中係数と荷重比との関係を示す。Fig.5.4.5(c),(d)に示した垂直部材同士の板厚が等しい十字溶接継手の結果と比較すると、Fig.5.4.14では、垂直部材側の荷重比(T/L)の増加に伴う止端部⑥⑧の応力集中係数の増加が顕著である。

一方、深溶け込み溶接では、止端部⑥⑧において垂直部材側の荷重の増加に伴う応力集中係数の増大は認められない。これらのことから、二重底側の板厚を厚くする場合には、深溶け込み溶接にする方が望ましいと言える。

#### 5.4.5 目違い十字溶接継手止端部応力集中のまとめ

二相ステンレス鋼板のケミカルタンカーへの実船適用に向けて、二相ステンレス鋼板製の横隔壁の応力が二重底頂板溶接部の疲労強度に及ぼす影響を把握するための基礎検討として、二相ステンレス鋼板のコルゲートバルクヘッドと、SUS316Lクラッド鋼板の二重底との十字溶接継手部について、目違いが生じる場合を想定して、脚長の組み合わせおよび二重底側の溶接条件が異なる種々の十字溶接継手の一軸および二軸荷重下の静的FEM解析を実施した。十字溶接継手の各溶接止端部の応力集中係数を評価した結果、以下のような知見が得られた。

- ① 垂直部材に目違いのある十字溶接継手では、交差部の中心から離れた位置にある水平部材上の溶接止端部、および中心に近い垂直部材上の溶接止端部の応力集中係数が増大する。特に、水平部材上の溶接止端部では二軸側(垂直方向)荷重の増加とともに応力集中係数が大きくなるため、目違いには十分な配慮が必要である。
- ② 二重底頂板上下面にある溶接止端部の相対位置と応力集中係数との関係の考察から、二重底側の溶接条件が同じ十字溶接継手では、一軸引張荷重条件において、各止端部の応力集中係数はほぼ一つの曲線上に分布する。相対位置の差が±10mmの範囲では、止端部が交差部から外側にあるほど応力集中係数は小さい。二軸引張荷重条件では、目違い+5mmまでは一軸引張荷重条件と同じ傾向となるが、さらに目違いが大きいと、相対位置の差も大きくなり、外側にある止端部

の応力集中係数は大きくなる。

- ③ さらに、目違いが生じ得る場合、二重底頂板上下の脚部形状・寸法は同等であること、二重底側の溶接条件は、深溶け込みであることが望ましい。
- ④ コルゲートバルクヘッド側の垂直部材に対して二重底側の垂直部材の板厚を厚くした十字溶接継手では、二重底側の溶接部の開先形状に関係なく、モールド合わせにすると、同軸合わせに比べて、極端な応力集中の増減部分が発生するために、モールド合わせは避けることが望ましい。また、二重底側の板厚を厚くする場合には、その溶接部は深溶け込み溶接にすべきであると言える。

## 5.5 まとめ

二相ステンレス鋼板のケミカルタンカー実船適用を目的として、二相ステンレス鋼板製のコルゲートバルクヘッドと、SUSクラッド鋼板製の二重底との十字溶接継手部について、一軸および二軸荷重下の静的FEM解析を実施して、各溶接止端部の応力集中を評価した。

以上述べてきたように、脚長寸法や溶接条件などが異なる、同軸および目違いの十字溶接継手について比較・評価を行った。

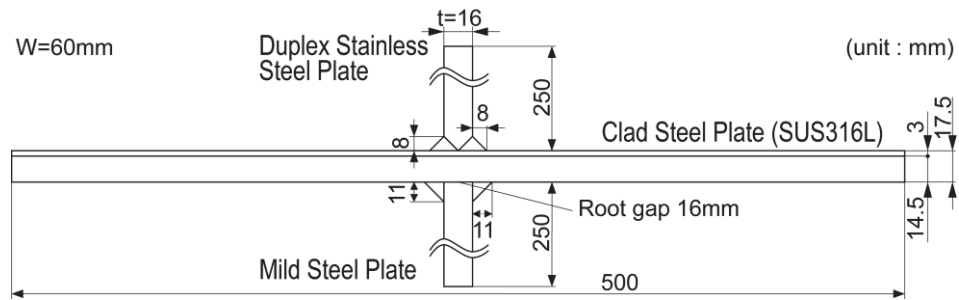
しかし、評価対象にした十字溶接継手の溶接ビード形状は、単純な形状としたために、様々な形状を有する実船の溶接ビード形状に対しては、それらの形状の違いなどに留意して、各溶接継手止端部の応力集中係数を評価する必要がある。

## 参 考 文 献

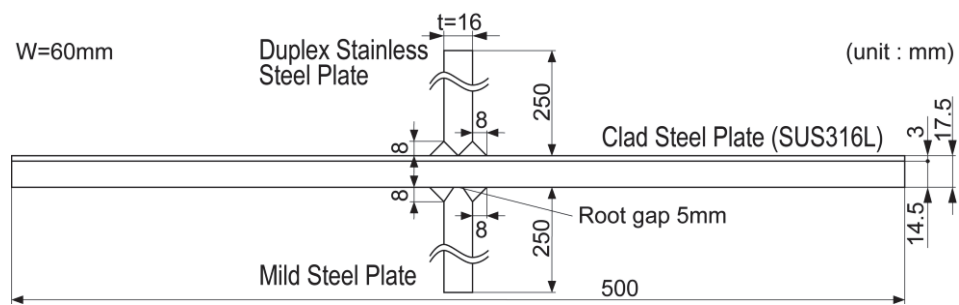
- 5.1) 矢島 浩, 座間正人, 平田隆明, 斉藤正洋, 末岡英利, 森 俊哲, 椛田 剛: 船舶に使用されるステンレス鋼・ステンレスクラッド鋼の疲労強度に関する考察, 西部造船会会報, 第75号(1988.3.), pp.224-230.
- 5.2) 内村秀之, 宅野正夫, 村上幸治, 後藤浩二: ケミカルタンカーに使用されるオーステナイト系ステンレス鋼板の疲労強度に関する一考察, 日本船舶海洋工学会論文集, 第16号(2012.12.), pp.89-97.
- 5.3) 結城良治, 北川英夫, 東郷敬一郎: 二軸荷重下の疲労き裂成長の下限界条件と開閉口挙動, 日本機械学会論文集(A編), 47巻, 422号(1981.10.), pp.981-989.
- 5.4) 高橋一比古, 高田篤志, 秋山 繁, 牛嶋通雄, 前中 浩: 2軸繰り返し荷重下における角回し溶接継手の疲労挙動, 日本造船学会論文集, 第184号(1998.12.), pp.321-327.
- 5.5) 高橋一比古, 高田篤志, 秋山 繁, 牛嶋通雄, 前中 浩: 2軸繰り返し荷重下における角回し溶接継手の疲労挙動(第2報) - 2軸荷重レンジ比および横方向繰り返し圧縮荷重の影響 -, 日本造船学会論文集, 第188号(2000.12.), pp.599-607.
- 5.6) 谷野忠和, 緒方洋典, 堺田和昌, 森 俊哲, 角田二郎, 矢島 浩: 二相ステンレス鋼板・ステンレスクラッド鋼板十字溶接継手の二軸荷重下での止端部応力に関するFEM解析, 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.77-82.
- 5.7) 谷野忠和, 矢島浩, 緒方洋典, 堺田和昌, 森 俊哲, 角田二郎: バルクヘッドと二重底との十字溶接継手部の止端部応力に及ぼす二軸荷重の影響に関する一考察, 溶接学会九州支部講演論文集, 第11号(2014.7.18.), pp.48-51.
- 5.8) 谷野忠和, 緒方洋典, 堺田和昌, 森 俊哲, 山本元道, 安藤 翼: 十字溶接継手止端部応力集中係数のFEM解析による一考察, 日本船舶海洋工学会論文集, 第24号(2016.12.), pp.309-315.



- 5.9) Kazumasa Sakaida, Hironori Ogata, 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 2), Class NK TECHNICAL BULLETIN, Vol.34(2016.12.), pp.87-93.
- 5.10) 谷野忠和, 緒方洋典, 堺田和昌, 森 俊哲, 山本元道, 安藤 翼: 目違いのある十字溶接継手止端部応力集中係数のFEM解析による一考察, 日本船舶海洋工学会論文集, 第26号(2017.12.), pp.145-155.



(a) Leg length [8, 11], fillet welding (M.S. side)

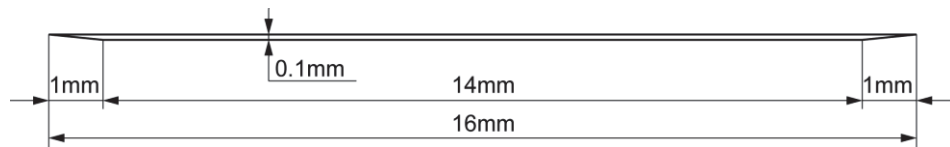


(b) Leg length [8, 8], deep pene. welding (M.S. side)

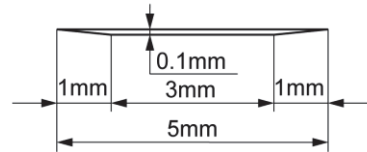
**Fig.5.2.1 Shape and size of FEM models of cruciform joints**

**Table 5.2.1 Combination of plate thickness, welding condition, leg length of cruciform joints**

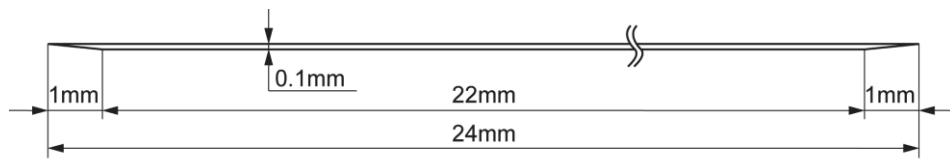
Plate thick.[mm]			Weld condition (M.S. side)	Welding leg length[mm]	
Duplex	SUS Clad	M.S.		Duplex side	M.S. side
16	17.5	16	Fillet	8	11
16	17.5	16	Fillet	11	11
16	17.5	16	Fillet	16	11
16	17.5	16	Fillet	16	16
16	17.5	16	Fillet	16	24
16	17.5	24	Fillet	16	17
16	17.5	16	Deep pene.	8	8
16	17.5	16	Deep pene.	16	8
16	17.5	16	Deep pene.	16	11
16	17.5	24	Deep pene.	16	10



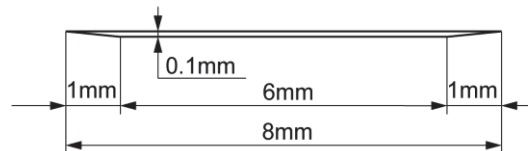
(a) Fillet welding, Root gap 16mm (1.0t) in case of mild steel plate with 16mm thick.



(b) Deep pene. welding, Root gap 5mm (0.3t) in case of mild steel plate with 16mm thick.



(c) Fillet welding, Root gap 16mm (1.0t) in case of mild steel plate with 24mm thick.

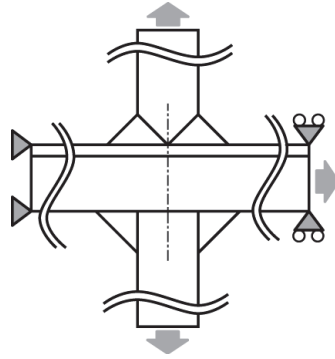


(b) Deep pene. welding, Root gap 5mm ( $t/3$ ) in case of mild steel plate with 24mm thick.

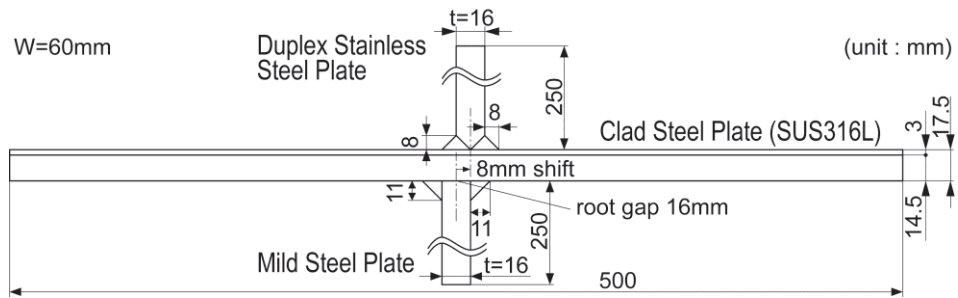
**Fig.5.2.2 Shape and size of root gap of cruciform joints**

**Table 5.2.2 Load combination in horizontal / vertical direction**

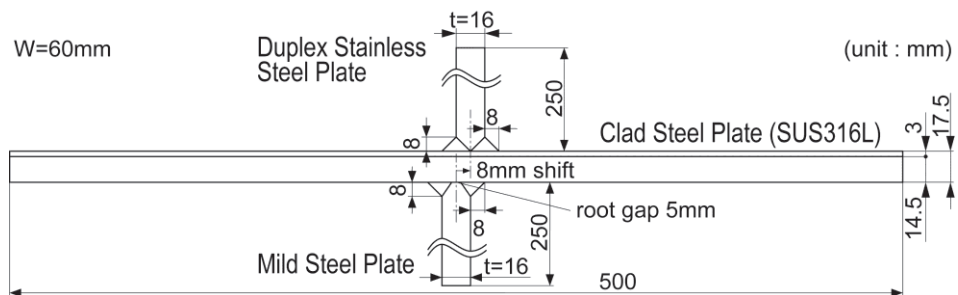
	Uni-axial		Bi-axial	
Horizontal load (L) [Pa]	1.0	0.0	1.0	
Vertical load (T) [Pa]	0.0	1.0	0.5	2.0



**Fig.5.2.3 Loading and support condition for bi-axial loading**



**(a) Leg length [8, 11], Fillet welding (M.S. side)**



**(b) Leg length [8, 8], Deep pene. welding (M.S. side)**

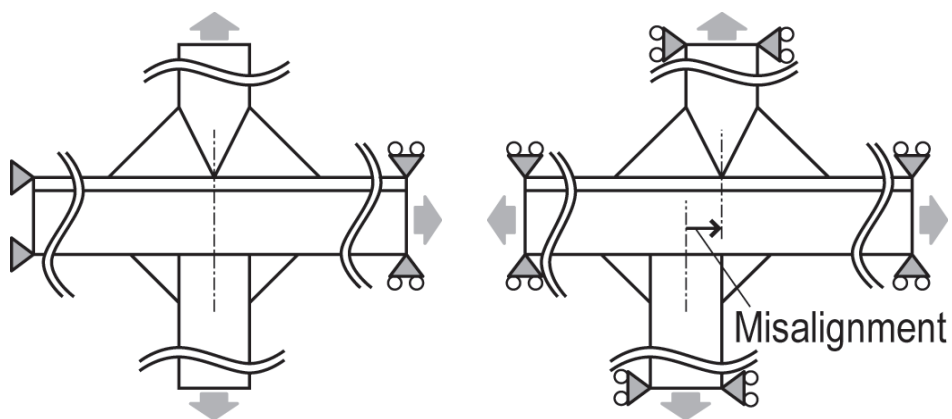
**Fig.5.2.4 Shape and size of FEM models of cruciform joints with misalignment**

**Table 5.2.3 Combination of plate thickness, welding condition, leg length and amount of misalignment of cruciform joints**

Plate thick. [mm]			Weld condition (M.S. side)	Welding leg length [mm]		Misalignment [mm]
Duplex	SUS Clad	M.S.		Duplex side	M.S. side	
16	17.5	16	Fillet	16	11	0, 5, 8
16	17.5	16	Fillet	11	11	0, 5, 8
16	17.5	16	Fillet	8	11	0, 5, 8
16	17.5	16	Deep pene.	16	8	0, 5, 8
16	17.5	16	Deep pene.	8	8	0, 5, 8
16	17.5	24	Fillet	16	17	0, 4(mold)
16	17.5	24	Deep pene.	16	10	0, 4(mold)

**Table 5.2.4 Combination of horizontal and vertical loads**

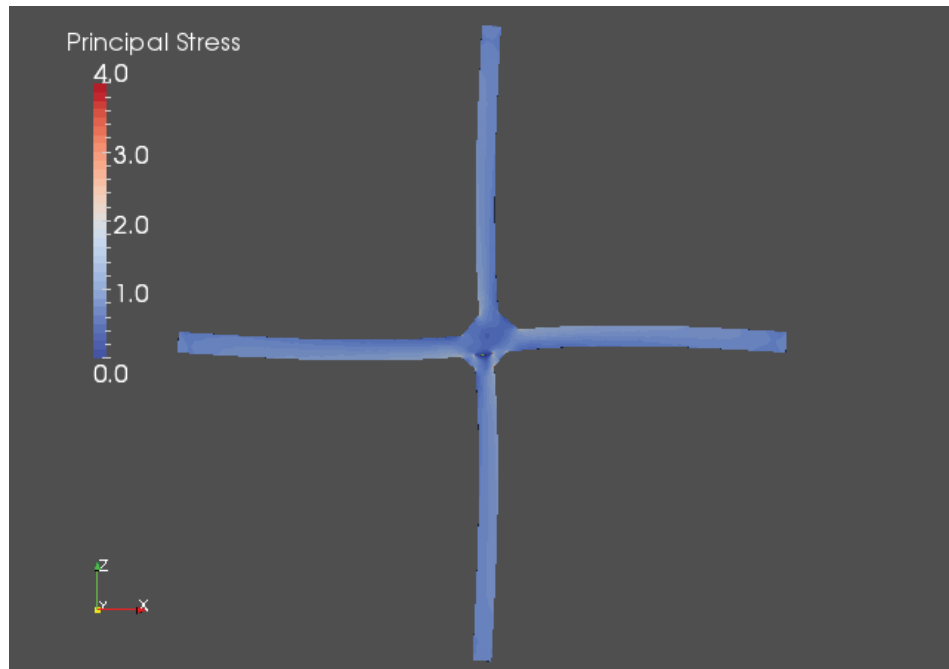
	Uni-axial	Bi-axial	
Horizontal load (L) [Pa]	1.0	1.0	
Vertical load (T) [Pa]	0.0	0.5	2.0



(a) Without misalignment

(b) With misalignment

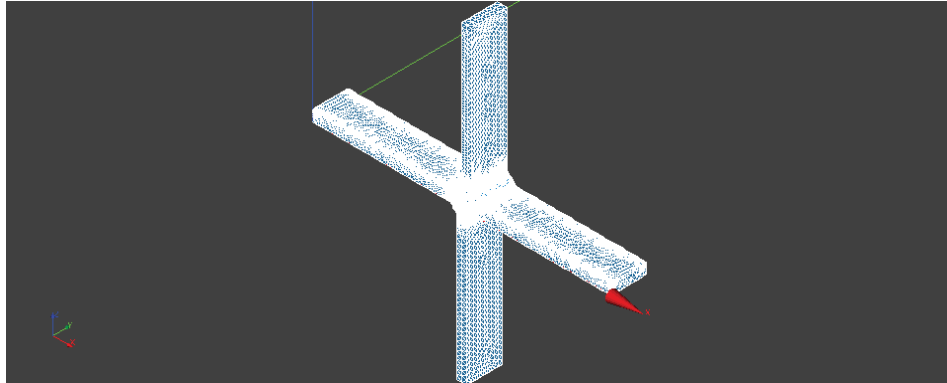
**Fig.5.2.5 Loading and support condition of cruciform joint without and with misalignment for bi-axial loading**



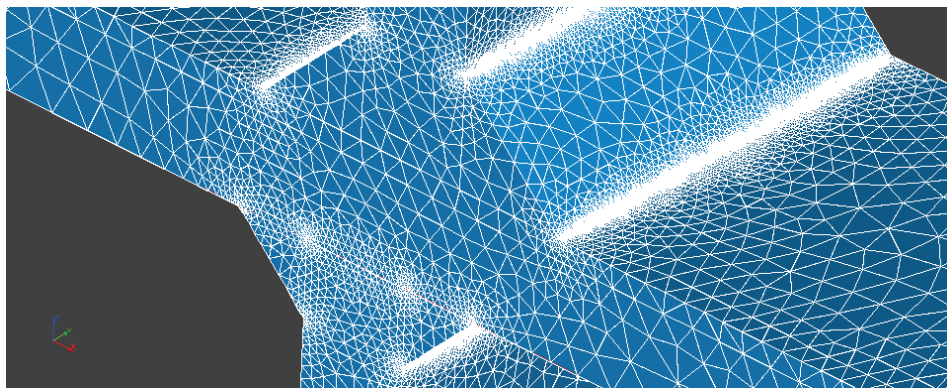
**Fig.5.2.6 Deformation of cruciform joint with misalignment under bi-axial loading**  
 (Leg length [16, 11], root gap 16 mm, misalignment 5 mm)

**Table 5.2.5 Material constants**

	Young's modulus $E$ [Pa]	Poisson's ratio $\nu$
Duplex	$1.96 \times 10^{11}$	0.3
SUS	$1.93 \times 10^{11}$	0.3
M.S.	$2.05 \times 10^{11}$	0.3

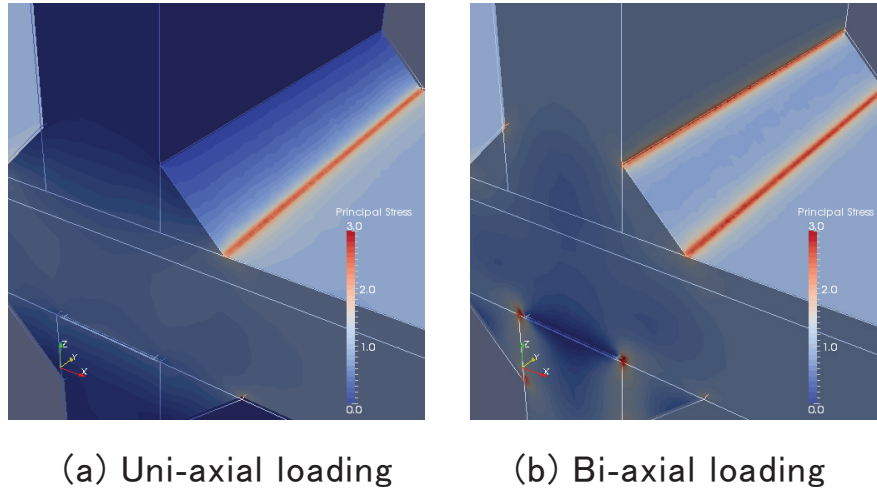


(a) Whole mesh of cruciform joint FEM model

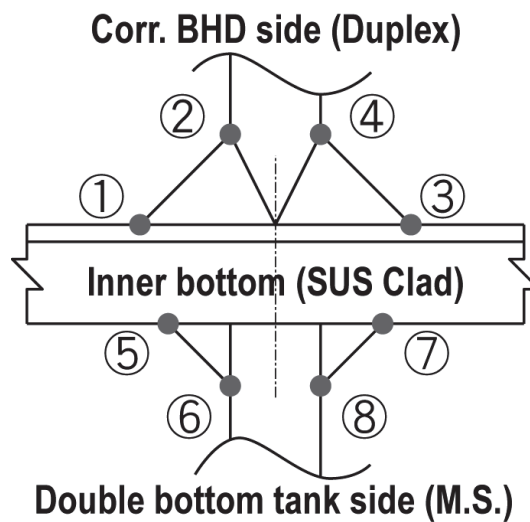


(b) Enlarged view of mesh near cruciform joint

**Fig.5.2.7 Mesh of cruciform joint FEM model**  
(Leg length [16, 11], root gap 16 mm, misalignment 5 mm)

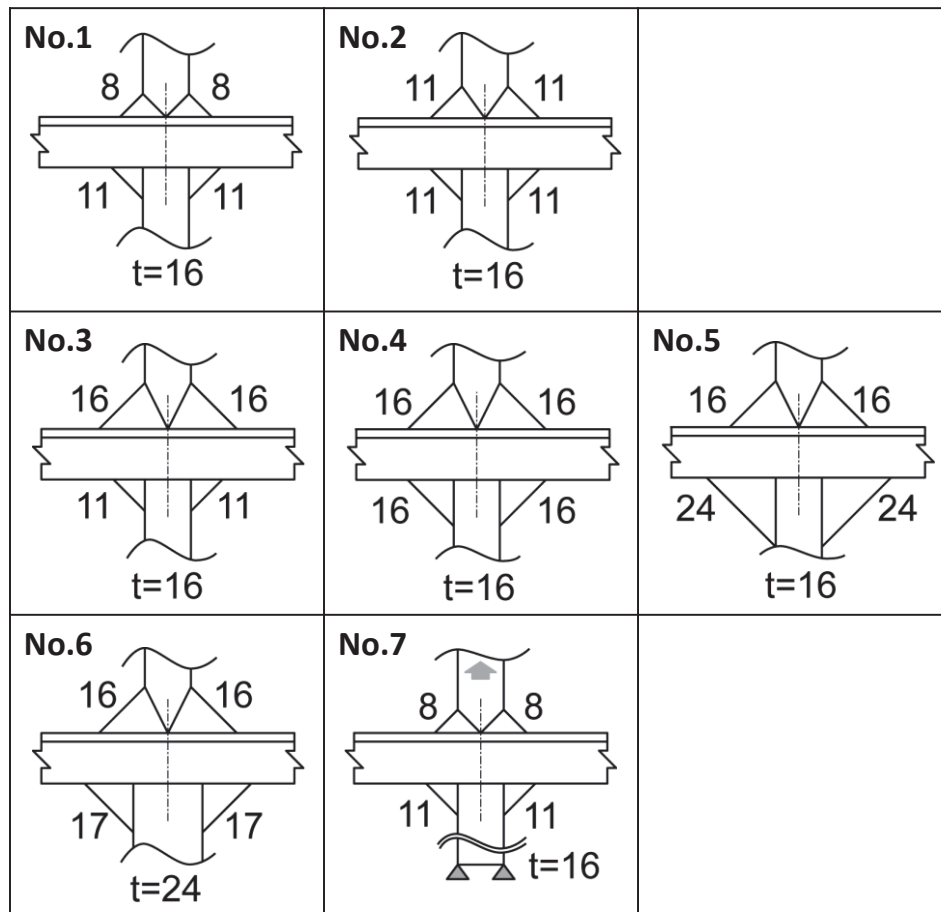


**Fig.5.3.1 Stress distributions near weld toe of cruciform joints**  
 (Leg length [8, 11], root gap 16 mm)

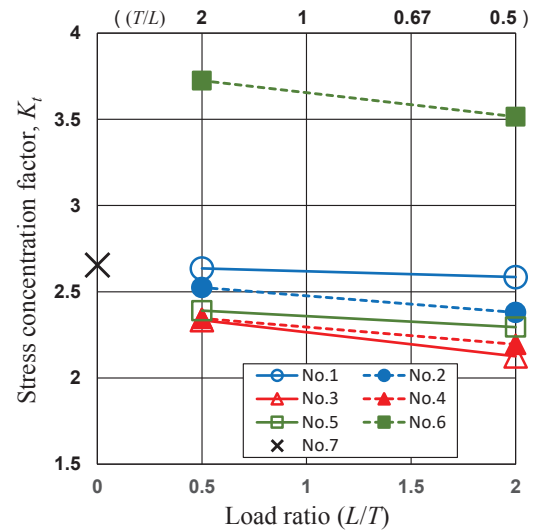
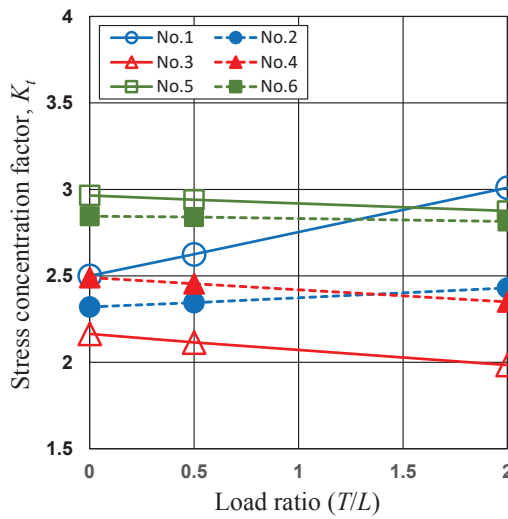


**Fig.5.3.2 Evaluated points of stress concentration factor on weld toes**



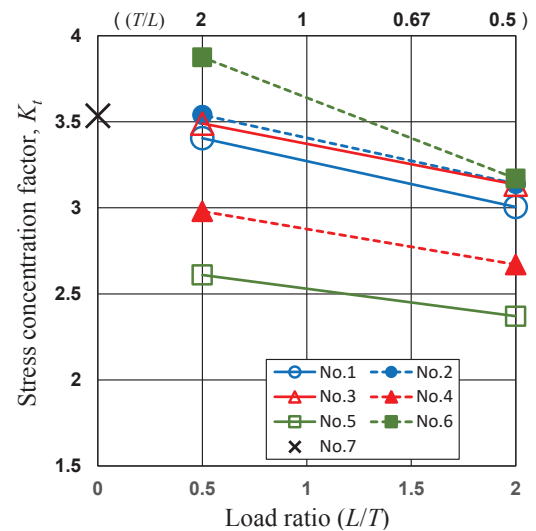
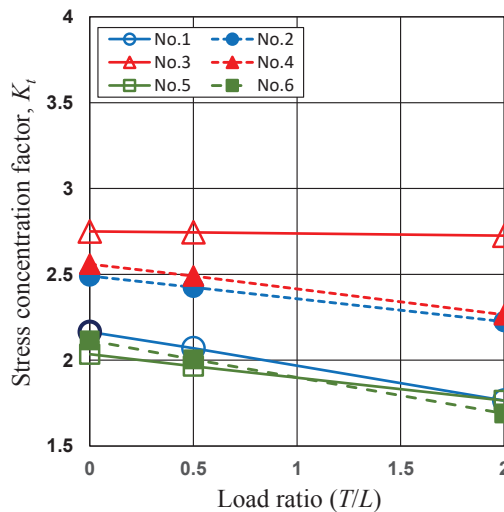


**Fig.5.3.3** Evaluated cruciform joints with fillet welding on double bottom tank side for comparison of the effect of leg length on stress concentration factor  $K_t$



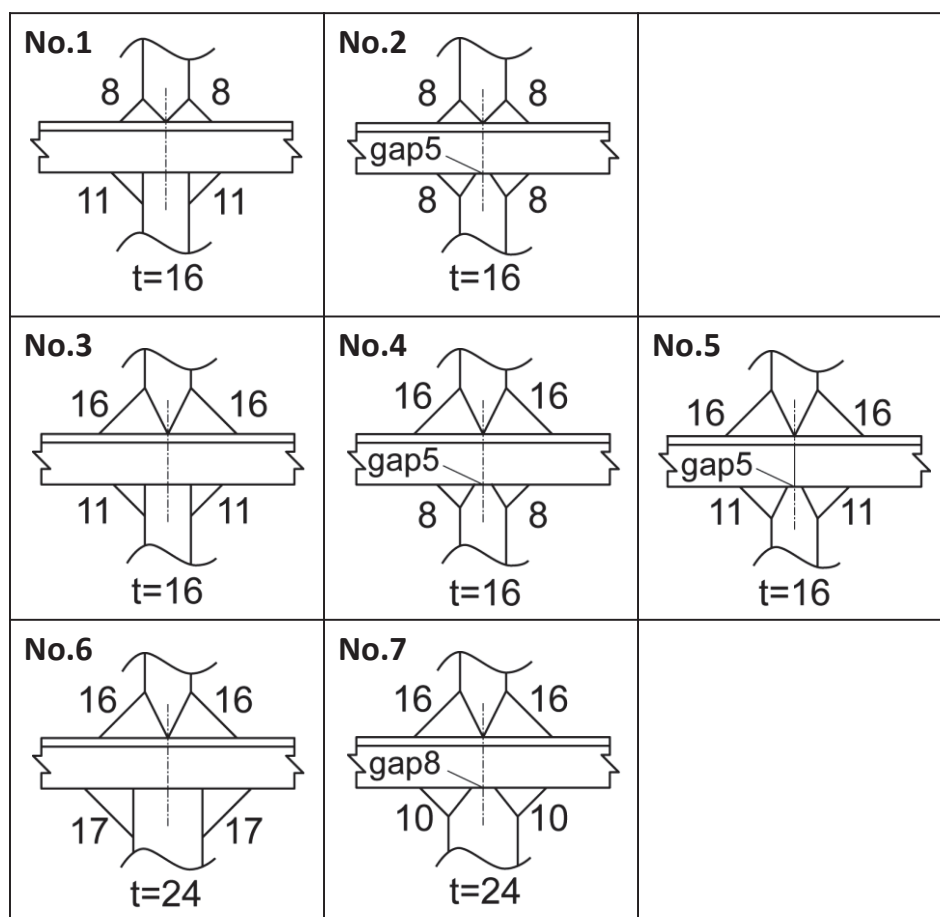
(a) Weld toe ①,③ on horizontal plate (b) Weld toe ②,④ on vertical plate

**Fig.5.3.4 Stress concentration factors on weld toe ①,③ and ②,④ in bulk head side of cruciform joints in Fig.5.3.3**

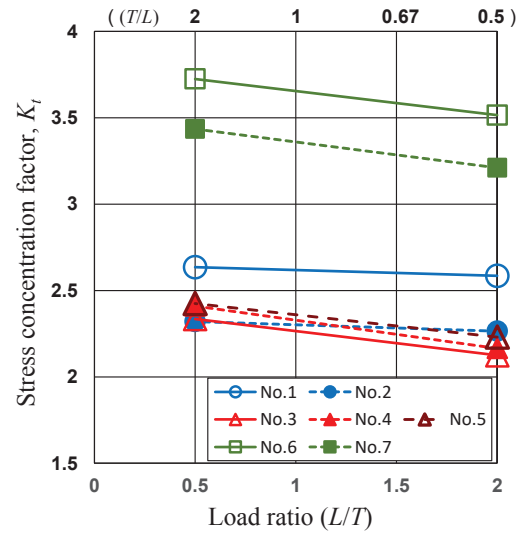
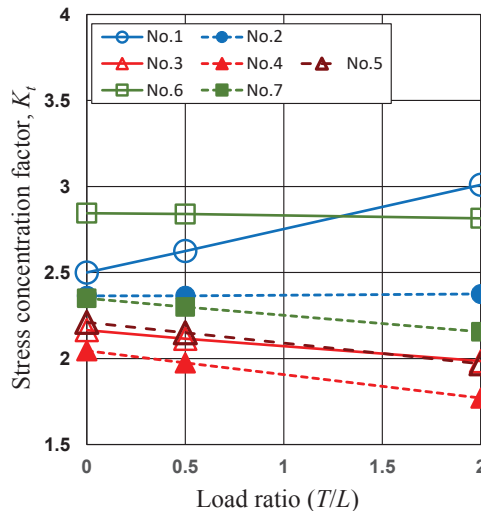


(a) Weld toe ⑤,⑦ on horizontal plate (b) Weld toe ⑥,⑧ on vertical plate

**Fig.5.3.5 Stress concentration factors on weld toe ⑤,⑦ and ⑥,⑧ in double bottom tank side of cruciform joints in Fig.5.3.3**

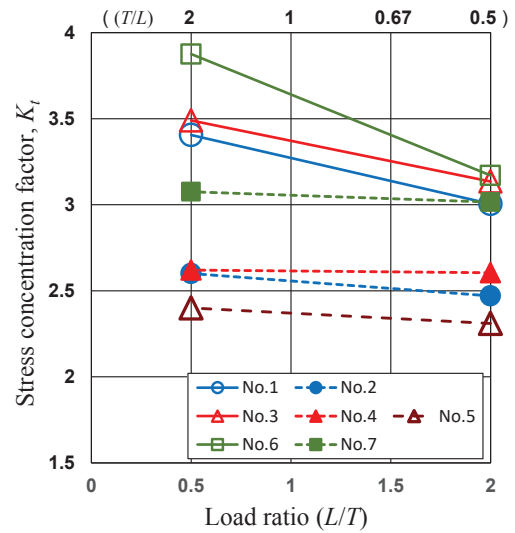
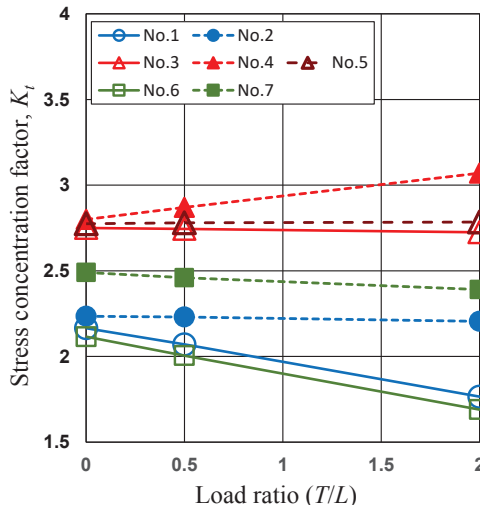


**Fig.5.3.6** Evaluated cruciform joints with difference of welding condition on double bottom tank side for comparison of the effect of welding condition on stress concentration factor  $K_t$



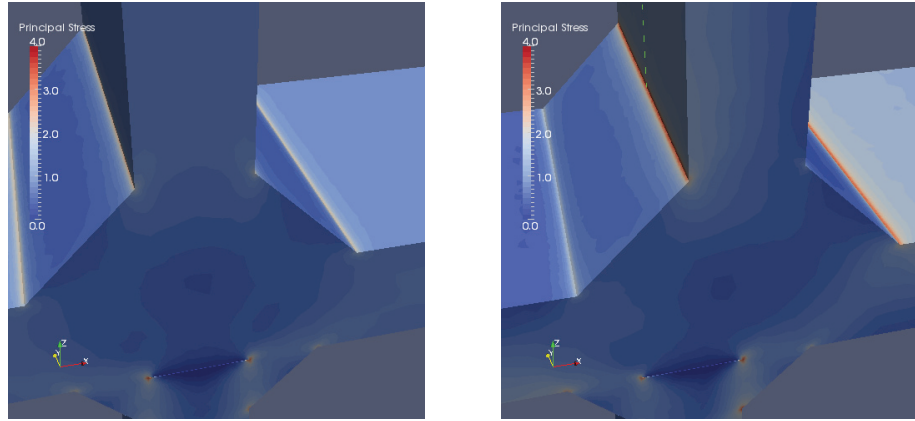
(a) Weld toe ①,③ on horizontal plate (b) Weld toe ②,④ on vertical plate

**Fig.5.3.7 Stress concentration factors on weld toe ①,③ and ②,④ in bulk head side of cruciform joints in Fig.5.3.6**



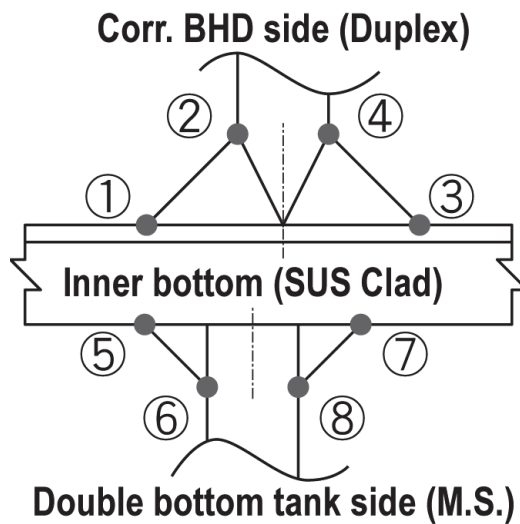
(a) Weld toe ⑤,⑦ on horizontal plate (b) Weld toe ⑥,⑧ on vertical plate

**Fig.5.3.8 Stress concentration factors on weld toe ⑤,⑦ and ⑥,⑧ in double bottom tank side of cruciform joints in Fig.5.3.6**

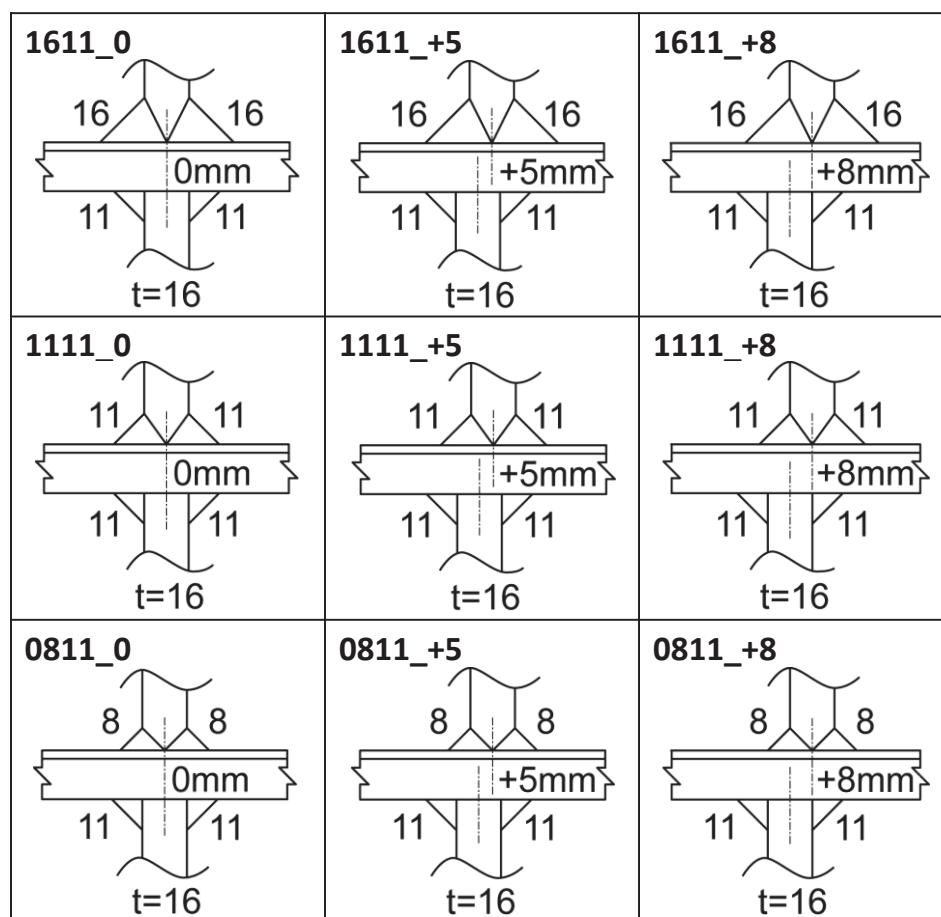


(a) Without misalignment      (b) With misalignment

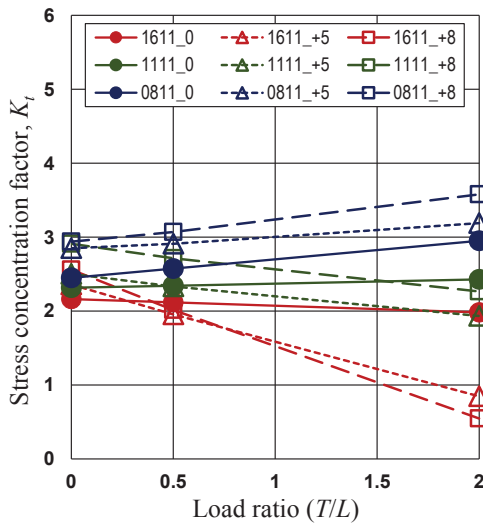
**Fig.5.4.1** Stress distributions near weld toe of cruciform joints  
(Leg length [16, 11], root gap 16 mm)



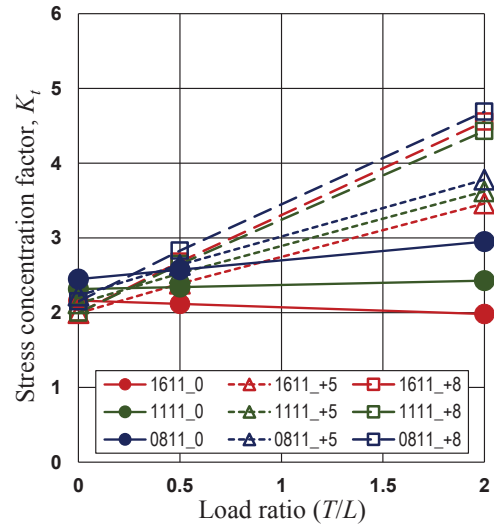
**Fig.5.4.2** Evaluation points of stress concentration factor  
on weld toes of cruciform joint



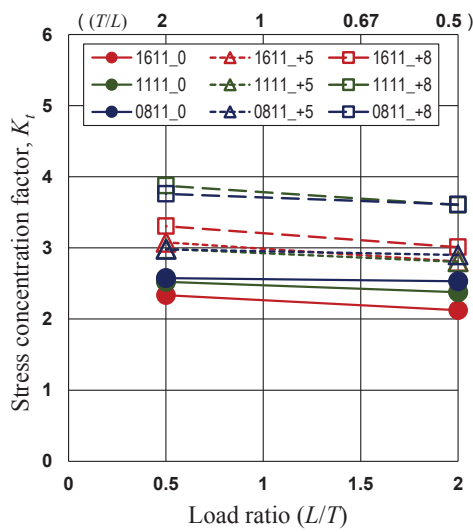
**Fig.5.4.3** Evaluated cruciform joints with fillet welding on double bottom tank side for comparison of the effect of misalignment and leg length on stress concentration factor  $K_t$



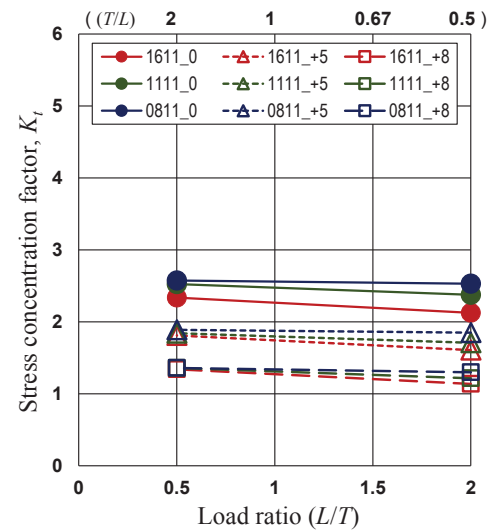
(a) Weld toe ① on horizontal plate



(b) Weld toe ③ on horizontal plate

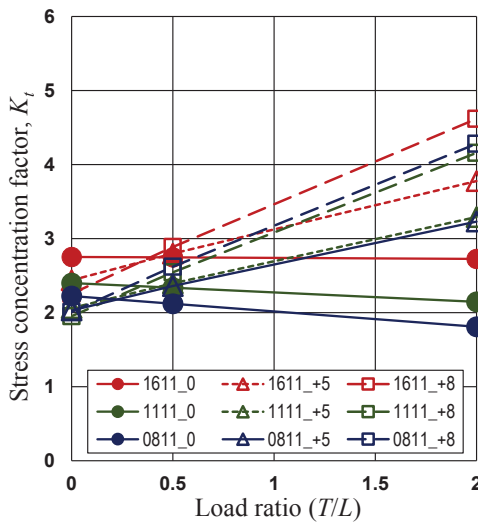


(c) Weld toe ② on vertical plate

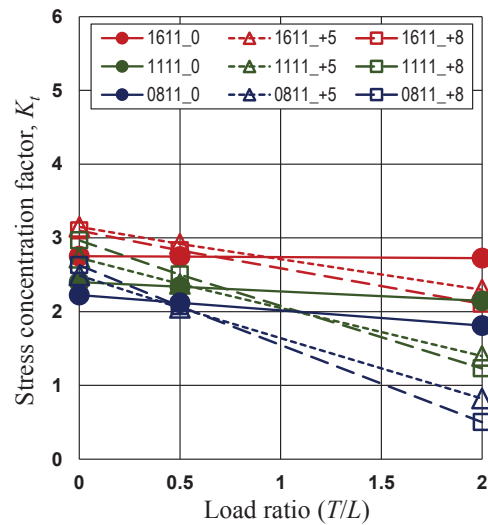


(d) Weld toe ④ on vertical plate

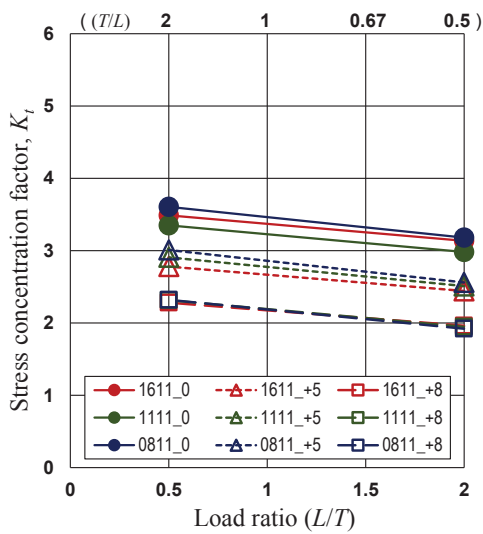
**Fig.5.4.4 Stress concentration factors on weld toe ①,③ and ②,④ in bulk head side of cruciform joints in Fig.5.4.3**



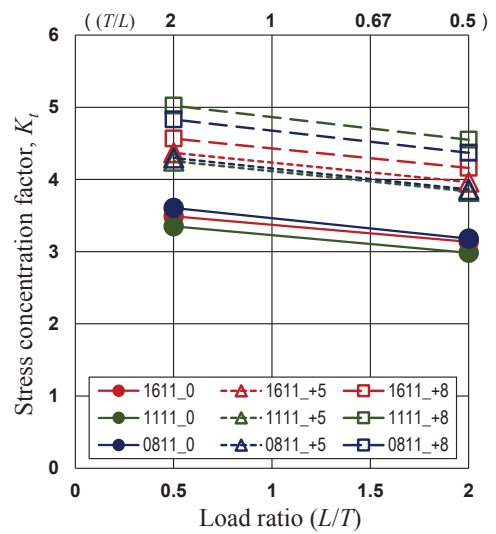
(a) Weld toe ⑤ on horizontal plate



(b) Weld toe ⑦ on horizontal plate



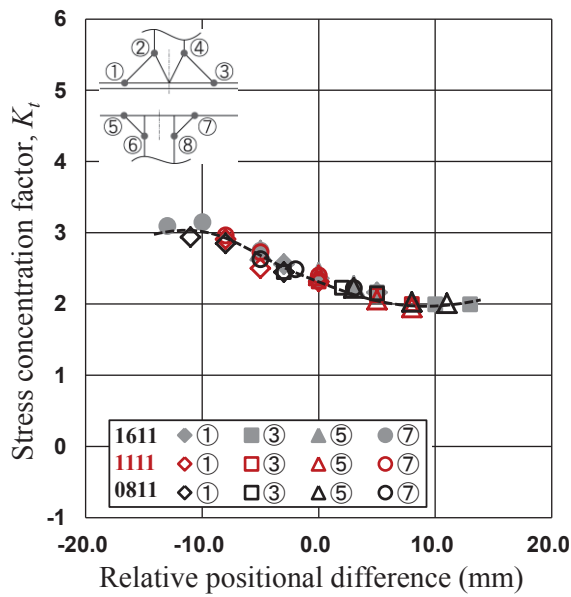
(c) Weld toe ⑥ on vertical plate



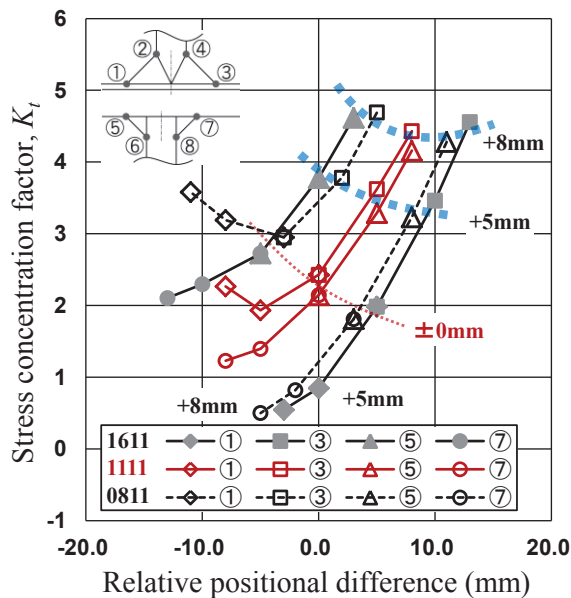
(d) Weld toe ⑧ on vertical plate

**Fig.5.4.5 Stress concentration factors on weld toe ⑤,⑦ and ⑥,⑧ in double bottom tank side of cruciform joints in Fig.5.4.3**

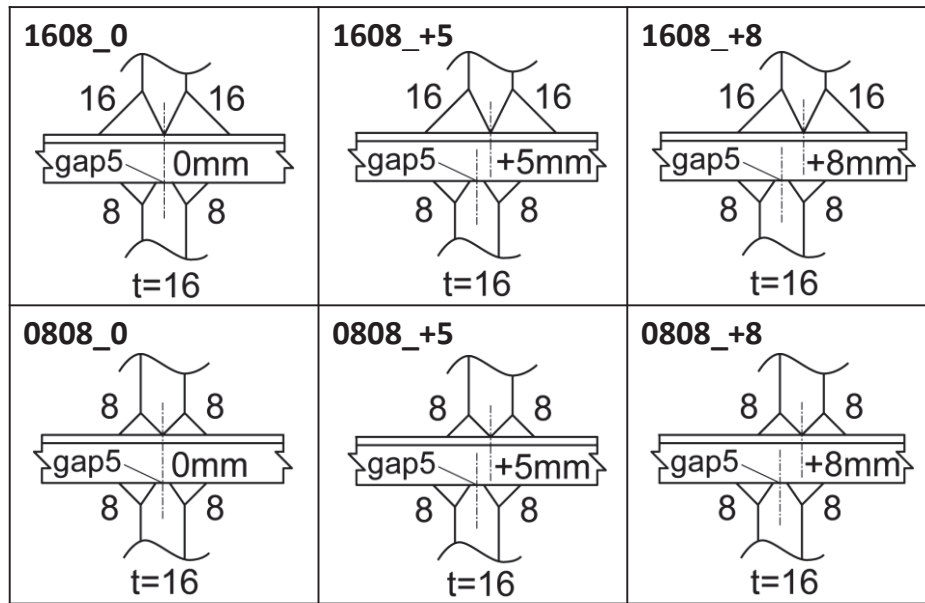




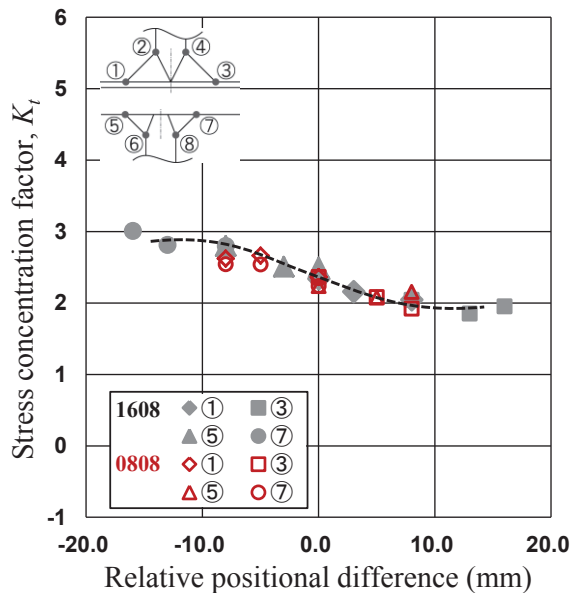
**Fig.5.4.6 Relations between stress concentration factor  $K_t$  and relative positional difference of weld toes in horizontal direction for cruciform welded joints with fillet welding on double bottom tank side under uni-axial loading condition**



**Fig.5.4.7 Relations between stress concentration factor  $K_t$  and relative positional difference of weld toes in horizontal direction for cruciform welded joints with fillet welding on double bottom tank side under bi-axial loading condition ( $T/L=2$ )**



**Fig.5.4.8** Evaluated cruciform joints with deep penetration welding on double bottom tank side for comparison of the effect of misalignment and leg length on stress concentration factor  $K_t$



**Fig.5.4.9** Relations between stress concentration factor  $K_t$  and relative positional difference of weld toes in horizontal direction for cruciform welded joints with deep penetration welding on double bottom tank side under uni-axial loading condition

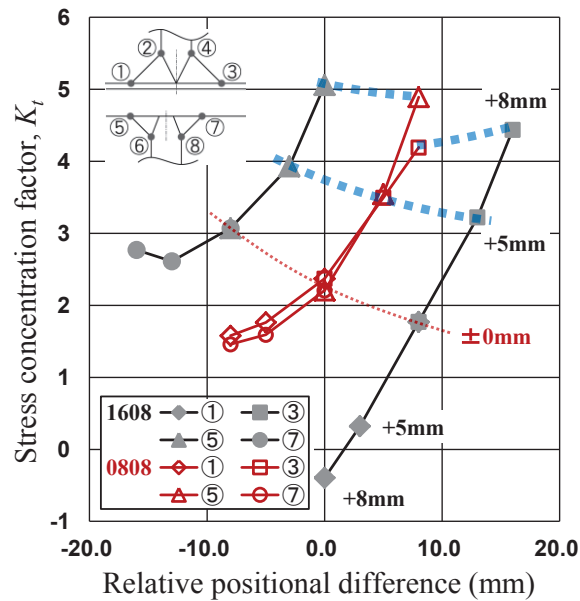


Fig.5.4.10 Relations between stress concentration factor  $K_t$  and relative positional difference of weld toes in horizontal direction for cruciform welded joints with deep penetration welding on double bottom tank side under bi-axial loading condition ( $T/L=2$ )

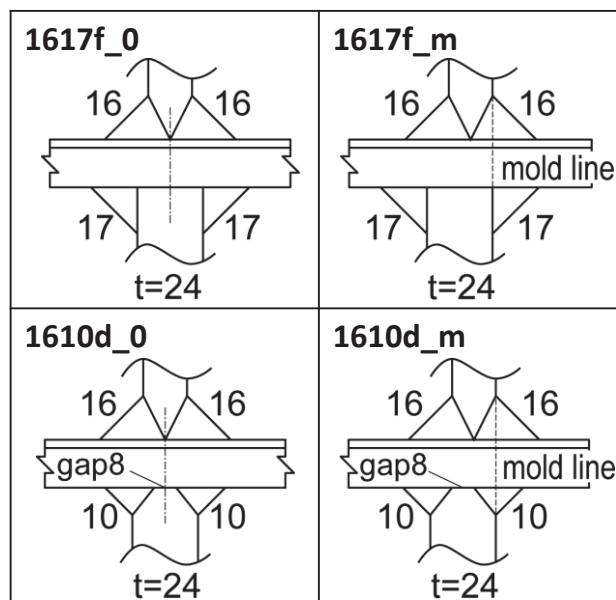


Fig.5.4.11 Evaluated cruciform joints with difference of welding condition on double bottom tank side for comparison of the effect of mold line alignment on stress concentration factor  $K_t$

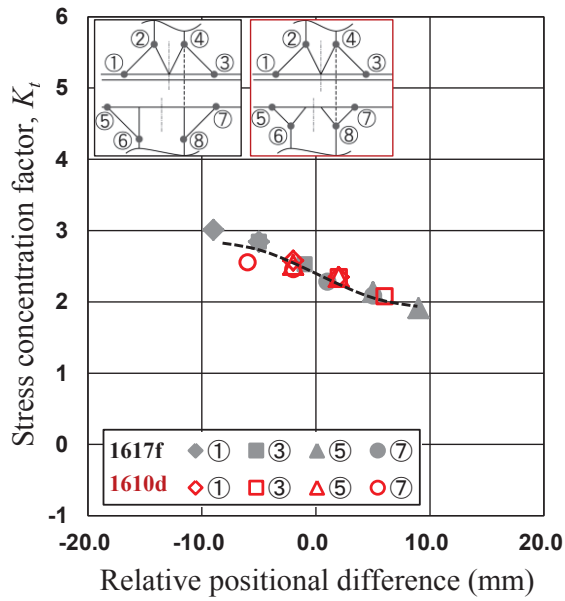


Fig.5.4.12 Relations between stress concentration factor  $K_t$  and relative positional difference of weld toes in horizontal direction for cruciform welded joints with/without mold line alignment under uni-axial loading condition

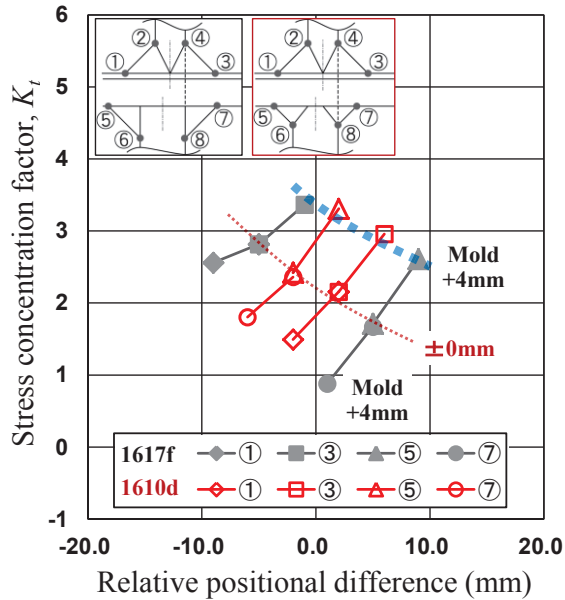
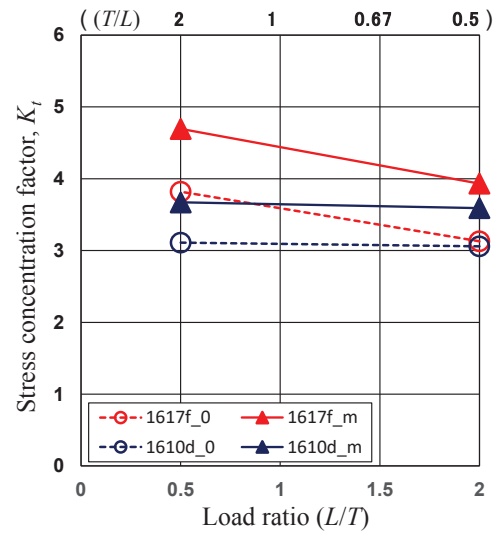
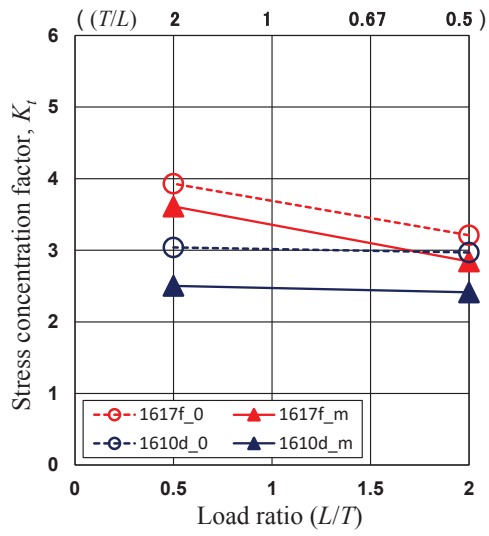


Fig.5.4.13 Relations between stress concentration factor  $K_t$  and relative positional difference of weld toes in horizontal direction for cruciform welded joints with/without mold line alignment under bi-axial loading condition ( $T/L=2$ )



(a) Weld toe ⑥ on vertical plate

(b) Weld toe ⑧ on vertical plate

**Fig.5.4.14 Stress concentration factors on weld toe ⑥,⑧ in double bottom tank side of cruciform joints in Fig.5.4.11**

## 第 6 章

# 二相ステンレスクラッド鋼板・ ソリッド鋼板 溶接継手部の耐食性に 関する検討・評価

## 第 6 章 目 次

6.1	はじめに	203
6.2	供試鋼板	203
6.3	溶接条件	203
6.4	突合せ溶接継手に対する各種基本試験およびその結果	204
6.4.1	溶接継手外観・マクロ組織・ミクロ組織観察結果	204
6.4.2	溶接金属の化学成分分析結果および フェライト量測定結果	204
6.4.3	溶接継手部硬さ分布測定結果・継手引張試験結果 およびV-ノッチシャルピー衝撃試験結果	205
6.5	突合せ溶接継手の腐食試験片採取要領	207
6.6	突合せ溶接継手に対する各種腐食試験およびその結果	207
6.6.1	耐孔食性試験およびその結果	207
6.6.2	耐粒界腐食試験およびその結果	208
6.6.3	沸騰5%硫酸腐食試験およびその結果	208
6.6.4	濃硫酸腐食試験およびその結果	209
6.6.5	りん酸腐食試験およびその結果	210
6.7	応力腐食割れ試験およびその結果	211
6.8	T溶接継手に対する各種基本試験およびその結果	212
6.8.1	溶接継手外観・マクロ組織・ミクロ組織観察結果	212
6.8.2	T溶接継手の溶接金属に対するフェライト量 測定結果	212
6.8.3	T溶接継手部硬さ分布測定結果および T溶接継手引張試験結果	212
6.9	T溶接継手に対する耐孔食性試験およびその結果	213
6.10	まとめ	213
	参考文献	217
	図 表	218

## 6.1 はじめに

2016年に新しく開発・製造された、二相ステンレス(SUS329J3L)クラッド鋼板と、SUS329J3L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を建造すれば、合理的な構造設計が実現し、世界初の新しいタイプのケミカルタンカーが誕生する。

なお、SUS329J3Lソリッド鋼板をケミカルタンカーカーゴタンク構造に実用した例は、ヨーロッパをはじめ、我が国(著者が勤務している(株)臼杵造船所)でも実績がある。

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にあたり、就航後の耐食性に関する信頼性を確保するためには、特に溶接継手部の耐食性に関する確認が必要不可欠である<sup>6.1)~6.8)</sup>。

本章では、SUS329J3Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接(通常入熱溶接および過剰入熱溶接)継手と、手直し(0回、1回および2回)溶接した、SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との完全溶け込みT溶接継手を供試して、各種耐食性について確認試験を実施し、従来、実績の多いSUS316Lクラッド鋼板溶接継手と比較・検討・評価した結果について報告する。

## 6.2 供試鋼板

供試した、SUS329J3Lクラッド鋼板[板厚16mm:SUS329J3L鋼板(合せ材)3mm+軟鋼板(母材)13mm]と、比較のために供試したSUS316Lクラッド鋼板[板厚16mm:SUS316L鋼板(合せ材)3mm+軟鋼板(母材)13mm]および、SUS329J3Lソリッド鋼板[板厚20mm]の化学成分を、**Table 6.2.1**に示す。

## 6.3 溶接条件

供試した、SUS329J3Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接(通常入熱溶接および過剰入熱溶接)条件、および手直し(0回、1回および2回)溶接した、SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との完全溶け込みT溶接条件を、**Table 6.3.1**に示す。



なお、手直し溶接する場合、造船現場では、一般的にエアアークガウジングが使用されるので、供試試験片製作もエアアークガウジングを使用し、前に溶接した溶接金属を全て除去した後に、再溶接した。

また、比較のために、ケミカルタンカーでの実績が多い、SUS316Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接（通常入熱溶接および過剰入熱溶接）継手も供試した。

## 6.4 突合せ溶接継手に対する各種基本試験およびその結果

### 6.4.1 溶接継手外観・マクロ組織・ミクロ組織観察結果

供試した、SUS329J3Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手、すなわち、入熱量 20kJ/cm・44kJ/cm の FCAW 継手と、入熱量 30kJ/cm・50kJ/cm の FCAW+SAW 継手の外観を、**Fig.6.4.1** に示す。

また、突合せ溶接継手断面のマクロ組織を **Fig.6.4.2** に示す。

さらに、表層部 Fusion Line 近傍のミクロ組織を **Fig.6.4.3** に、合せ材（SUS329J3L 鋼板：板厚 3mm）板厚中央部 Fusion Line 近傍のミクロ組織を **Fig.6.4.4** に、合せ材（SUS329J3L 鋼板）溶接金属のミクロ組織を **Fig.6.4.5** に示す。

### 6.4.2 溶接金属の化学成分分析結果およびフェライト量測定結果

先に、**6.3 節** で述べた SUS329J3L クラッド鋼板同士の突合せ溶接継手と、比較のために供試した SUS316L クラッド鋼板同士の突合せ溶接継手、さらに SUS329J3L ソリッド鋼板同士の突合せ溶接（入熱量 20kJ/cm の FCAW と、入熱量 30kJ/cm の SAW）継手の溶接金属の化学成分を分析した。分析したサンプルは、クラッド鋼板同士の突合せ溶接継手では、合せ材溶接金属表層から 0.5mm 深さ位置までの溶接金属とした。また、ソリッド鋼板同士の突合せ溶接継手では、溶接金属表層から 0.5mm 深さ位置までの溶接金属とした。化学成分分析結果を **Table 6.4.1** に示す。なお、**Table 6.4.1** 中に示した PI 値は、耐孔食性指標としてよく用いられているものである。すなわち、

$$PI = Cr + 3.3Mo + 16N(\%) \dots\dots\dots (6.4.1)$$

Eq.(6.4.1)による値である。PI値が大きいほど、耐孔食性は良くなると考えられている<sup>6.4)</sup>。

**Table 6.4.1** で明らかのように、母材のPI値に比べて、FCAW溶接金属のPI値は略同等であるが、SAW溶接金属のPI値は比較的低い値である。特に、溶接入熱量の大きいSAW 50kJ/cmの溶接金属のPI値が低いことから、成分希釈によるものと推定される。

さらに、供試した SUS329J3Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手の合せ材の溶接金属と熱影響部(HAZ)に対して、フェライト量を測定した。供試した4種類の突合せ溶接継手の合せ材溶接金属およびHAZを、8～10箇所測定した。測定は、フェライトスコープを使用して、各測定点に対して5回測定した。

測定結果を、**Fig.6.4.6** および **Fig.6.4.7** に示す。**Fig.6.4.6** から明らかであるが、FCAW 20kJ/cmの溶接継手では、測定値のバラツキは小さいが、HAZの個値で1点のみ下限値以下の値があった。また、FCAW 44kJ/cmの溶接継手では、溶接金属で下限値以下の値があった。さらに、HAZで測定値のバラツキが大きい箇所があった。

また、**Fig.6.4.7** から明らかであるが、SAW 30kJ/cmの溶接継手では、溶接金属の個値で下限値以下の値が測定され、また、HAZで測定値のバラツキが大きく、下限値以下の値も数例あった。さらに、SAW 50kJ/cmの溶接継手では、溶接金属の測定値は全て下限値以下であった。また、HAZの測定値はバラツキが大きく、下限値以下の値も多かった。

明らかに、SAW 50kJ/cmは入熱量が大き過ぎて、溶接継手は不安定であると言える。

### 6.4.3 溶接継手部硬さ分布測定結果・継手引張試験結果

#### およびV-ノッチシャルピー衝撃試験結果

先に、**Table 6.3.1** に示した、SUS329J3Lクラッド鋼板同士の4種類の突合せ溶接継手のビッカース硬さ分布を測定した。

測定位置は、合せ材表面から2mm、合せ材と母材のルート部、および母材表面から2mmとした(**Fig.6.4.8** 参照)。また、測定点は1mm間隔とし、

測定荷重は10kgfとした。

測定したビッカース硬さ分布を Fig.6.4.9 に示す。溶接入熱量に依らず、略同等な硬さ分布であると言えよう。

また、Table 6.3.1 に示した、SUS329J3Lクラッド鋼板同士の4種類の突合せ溶接継手の始端部と終端部から、試験片幅30mm、平行部長さ37mm、全長450mmのNK U2A号全厚引張試験片を採取して、室温・大気中で引張試験を実施した。引張試験結果をTable 6.4.2に示す。

SUS329J3Lクラッド鋼板母材の引張強さに対する規格値は、

$$\sigma_B \geq \frac{t_1 \cdot \sigma_{B1} + t_2 \cdot \sigma_{B2}}{t_1 + t_2} = 441.25 \text{ [N/mm}^2\text{]} \dots\dots\dots (6.4.2)$$

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

$\sigma_{B1}$  : 母材の引張強さの規格最小値 = 400 N/mm<sup>2</sup>

$\sigma_{B2}$  : 合せ材の引張強さの規格最小値 = 620 N/mm<sup>2</sup>

となっている。この値を突合せ溶接継手に適用すると、Table 6.4.2 に示した通り、全て合格であった。継手引張強さに対しては、供試した4種類の突合せ溶接継手とも、全く問題無いと言える。

なお、引張試験後の試験片を Fig.6.4.10 に示す。全て母材で破断している。

さらに、供試したSUS329J3Lクラッド鋼板同士の4種類の突合せ溶接継手の5mmサブサイズVノッチシャルピー衝撃試験を実施した。

試験片採取位置およびノッチ位置を Fig.6.4.11 に示す。さらに、試験結果を Fig.6.4.12 に示す。

Fig.6.4.11 に示したように、試験片は幅5mmのサブサイズとした。ノッチ位置は、溶接金属(W.M.)中央、Fusion Line(F.L.)、HAZ 2mmとした。さらに、試験温度は、室温(25℃)、0℃、-20℃の3温度とし、各温度で3本供試した。

Fig.6.4.12 で明らかなように、25℃～-20℃では、5mmサブサイズVノッチシャルピー吸収エネルギーに、供試した4種類の突合せ溶接継手とも、ほとんど差は無いと言える。

## 6.5 突合せ溶接継手の腐食試験片採取要領

先に、Table 6.3.1 に示した、SUS329J3Lクラッド鋼板同士の4種類の突合せ溶接継手の合せ材(SUS329J3L鋼板)に対して、耐孔食性試験、耐粒界腐食試験、沸騰5%硫酸腐食試験、濃硫酸腐食試験、およびりん酸腐食試験を実施するための試験片を作製した。試験片採取要領をFig.6.5.1に示す。

なお、Fig.6.5.1(a)の余盛有りの溶接継手から採取した試験片は、耐孔食性試験に供試するものである。さらに、Fig.6.5.1(b)に示した余盛無しの溶接継手から採取した試験片は、耐粒界腐食試験、沸騰5%硫酸腐食試験、濃硫酸腐食試験、およびりん酸腐食試験に供試するものである。

Fig.6.5.1 から明らかなように、採取した腐食試験片の長さ方向は、突合せ溶接線に垂直方向である。

また、Fig.6.5.1(a)に示した余盛有りの溶接継手から採取した腐食試験片は、表面は、溶接のままの状態を不動態化処理したままであり、他の面は、湿式#600研磨仕上げをしたものである。Fig.6.5.1(b)に示した腐食試験片は、全面湿式#600研磨仕上げをした。

## 6.6 突合せ溶接継手に対する各種腐食試験およびその結果

### 6.6.1 耐孔食性試験およびその結果

SUS329J3Lクラッド鋼板同士の4種類の突合せ溶接継手(Table 6.3.1 参照)と、比較のために、ケミカルタンカーでの実績が多いSUS316Lクラッド鋼板同士の、同様な4種類の突合せ溶接継手に対して、Fig.6.5.1に示した要領で採取・作製した試験片を用いて、耐孔食性試験を実施した。

耐孔食性試験は、JIS G0578, B法に準拠して、6%塩化第二鉄+N/20塩酸溶液中に、72時間連続浸漬した。試験片表面の孔食の有無で評価した。

耐孔食性試験結果をTable 6.6.1に示す。

なお、Table 6.6.1 に示した試験結果以外に、参考データを Table 6.6.1 の下の表に示す。CPTとは、孔食発生臨界温度のことであり、CPTが高い程、耐孔食性は良いと言える。また、耐孔食性試験前・後の試験片表面状態を、Fig.6.6.1 および Fig.6.6.2 に示す。

Table 6.6.1 および、Fig.6.6.1・Fig.6.6.2 で明らかなように、SAW50kJ/cm 以外は、耐孔食性は良好である。また、SUS316Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手より、SUS329J3Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手の方が、耐孔食性は良好であることが明らかになった。

### 6.6.2 耐粒界腐食試験およびその結果

SUS329J3Lクラッド鋼板同士の4種類の突合せ溶接継手 (Table 6.3.1 参照)と、比較のために、ケミカルタンカーでの実績が多い、SUS316Lクラッド鋼板同士の、同様な4種類の突合せ溶接継手に対して、Fig.6.5.1 に示した要領で採取・作製した試験片を用いて、耐粒界腐食試験を実施した。

耐粒界腐食試験は、JIS G0572 に準拠して、沸騰硫酸・硫酸第二鉄溶液中に、120時間連続浸漬した。腐食速度で評価した。

耐粒界腐食試験結果を、Fig.6.6.3 と Fig.6.6.4 に示す。Fig.6.6.3 には、比較のために、SUS329J3Lソリッド鋼板同士の突合せ溶接継手のデータも入っている。Fig.6.6.4 は、耐粒界腐食試験後の、SUS329J3Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手試験片の外観を示したものである。

Fig.6.6.3 より、SUS329J3Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手の、耐粒界腐食速度は、SUS329J3Lソリッド鋼板同士の突合せ溶接継手の腐食速度と略同等であり、SUS316Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手より、耐粒界腐食性は優れていることが明らかになった。さらに、溶接金属や Fusion Line を含めて、著しく腐食した箇所は無かった (Fig.6.6.4 参照)。

### 6.6.3 沸騰5%硫酸腐食試験およびその結果

SUS329J3Lクラッド鋼板同士の4種類の突合せ溶接継手 (Table 6.3.1 参照)と、比較のために、ケミカルタンカーでの実績が多い、SUS316Lクラッド鋼板同士の、同様な4種類の突合せ溶接継手に対して、Fig.6.5.1 に示した

要領で採取・作製した試験片を用いて、沸騰5%硫酸腐食試験を実施した。

沸騰5%硫酸腐食試験は、JIS G0591に準拠して、沸騰5%硫酸溶液に、6時間連続浸漬した。腐食速度で評価した。

沸騰5%硫酸腐食試験結果を、**Fig.6.6.5** および **Fig.6.6.6** に示す。**Fig.6.6.5** には、比較のために、SUS329J3Lソリッド鋼板同士の突合せ溶接継手のデータも入っている。**Fig.6.6.6** は、沸騰5%硫酸腐食試験後の、SUS329J3Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手試験片の外観を示したものである。

**Fig.6.6.5** より、SUS329J3Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手の沸騰5%硫酸腐食速度は、SAW50kJ/cm溶接継手で若干速いものの、SUS329J3Lソリッド鋼板同士の突合せ溶接継手の腐食速度と略同等であり、SUS316Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手より、優れていることが明らかになった。

また、**Fig.6.6.6** に示した腐食試験後の試験片外観では、SAW50kJ/cm溶接継手の溶接金属部分が比較的荒れていた。

#### 6.6.4 濃硫酸腐食試験およびその結果

SUS329J3Lクラッド鋼板同士の4種類の突合せ溶接継手(**Table 6.3.1** 参照)と、比較のために、ケミカルタンカーでの実績が多い、SUS316Lクラッド鋼板同士の、同様な4種類の突合せ溶接継手に対して、**Fig.6.5.1** に示した要領で採取・作製した試験片を用いて、載荷試験として、濃硫酸腐食試験を実施した。なお、50℃・98%工業用硫酸(高杉製薬製)と、50℃・95%試薬特級硫酸(和光純薬製)の2種類を使用した。

工業用硫酸と試薬特級硫酸の2種類を使用した理由は、工業用硫酸の方が試薬特級硫酸より腐食性が小さいとの過去の試験結果<sup>6.1)</sup>があるためである。すなわち、工業用硫酸中には、試薬特級硫酸よりFe, Pbなどの不純物が多く含有しており、これ等不純物が腐食性低下の原因になっていると推察されるからである。

2種類の硫酸中に20時間連続浸漬した。また、腐食速度で評価した。

工業用硫酸による濃硫酸腐食試験結果を、**Fig.6.6.7** および **Fig.6.6.8** に示す。**Fig.6.6.7** で明らかなように、溶接入熱量および鋼種に依らず腐食

速度は略ゼロであった。

また、**Fig.6.6.8**に示したように、SUS329J3Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手試験片全て、腐食試験後、全面が金属光沢を保ったままであり、全く腐食されていなかった。

一方、試薬特級硫酸による濃硫酸腐食試験結果を、**Fig.6.6.9**および**Fig.6.6.10**に示す。

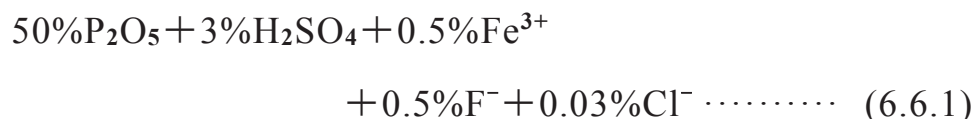
**Fig.6.6.9**で明らかのように、SUS329J3Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手の腐食速度は、SUS316Lクラッド鋼板同士やSUS329J3Lソリッド鋼板同士の突合せ溶接継手の腐食速度より若干速いという結果であった。なお、腐食速度に及ぼす溶接入熱量の影響は、ほとんど無いことが明らかになった。

また、**Fig.6.6.10**に示した腐食試験後の試験片外観では、母材部に比べて溶接金属の方が若干腐食されたようであった。

#### 6.6.5 リン酸腐食試験およびその結果

SUS329J3Lクラッド鋼板同士の4種類の突合せ溶接継手(**Table 6.3.1**参照)と、比較のために、ケミカルタンカーでの実績が多い、SUS316Lクラッド鋼板同士の、同様な4種類の突合せ溶接継手に対して、**Fig.6.5.1**に示した要領で採取・作製した試験片を用いて、載荷試験として、リン酸腐食試験を実施した。

50°Cのリン酸溶液中に120時間連続浸漬した。腐食速度で評価した。  
なお、使用したリン酸溶液の組成は、



である。

リン酸腐食試験結果を、**Fig.6.6.11**および**Fig.6.6.12**に示す。**Fig.6.6.11**には、比較のために、SUS329J3Lソリッド鋼板同士の突合せ溶接継手のデータも入っている。

**Fig.6.6.11**より、SUS329J3Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手と、

SUS329J3Lソリッド鋼板同士の突合せ溶接継手の腐食速度は略ゼロであった。SUS316Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手の腐食速度は速いという結果であった。

Fig.6.6.12に示した，SUS329J3Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手試験片全て，腐食試験後，全面が金属光沢を保ったままであり，全く腐食されていなかった。

## 6.7 応力腐食割れ試験およびその結果

SUS329J3Lクラッド鋼板同士の4種類の突合せ溶接継手（Table 6.3.1参照）と，比較のために，ケミカルタンカーでの実績が多い，SUS316Lクラッド鋼板同士の，同様な4種類の突合せ溶接継手と，SUS329J3Lソリッド鋼板同士の2種類の突合せ溶接継手を供試して，応力腐食割れ試験を実施した。

供試試験片の採取要領をFig.6.7.1に示し，試験片形状・寸法をFig.6.7.2に示す。Fig.6.7.1に示したように，合せ材側表面を0.4mm削り取って，板厚0.7mmの試験片を採取した。応力腐食割れ試験片は，突合せ溶接継手に垂直方向に採取した。なお，Fig.6.7.2に示した応力腐食割れ試験片平行部は，湿式#600研磨仕上げとした。

応力腐食割れ試験は，JIS G0576に準拠して，沸騰42%MgCl<sub>2</sub>溶液中に浸漬して，280N/mm<sup>2</sup>の定応力で，試験片が破断するまで負荷した。破断までの時間で評価した。

応力腐食割れ試験結果をFig.6.7.3およびFig.6.7.4に示す。Fig.6.7.3から明らかなように，SUS329J3Lクラッド鋼板の母材が，破断までの時間が若干長かった。また，SUS329J3Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手と，SUS329J3Lソリッド鋼板同士の突合せ溶接継手とで，破断までの時間は略同等であり，SUS316Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手より若干良いと言えよう。

SUS329J3Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手の破断後の試験片外観を，Fig.6.7.4に示した。



## 6.8 T溶接継手に対する各種基本試験 および その結果

### 6.8.1 溶接継手外観・マクロ組織・ミクロ組織観察結果

先に、6.3節で述べた、手直し(0回, 1回および2回)溶接した, SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との完全溶け込みT溶接継手(**Table 6.3.1** 参照)の外観を, **Fig.6.8.1**に示す。

また, T溶接継手断面のマクロ組織を **Fig.6.8.2**に示す。マクロ組織に, 手直し溶接による顕著な変化は見られなかった。

さらに, T溶接継手断面のミクロ組織観察位置を, **Fig.6.8.3**に示す。また, 観察したミクロ組織を **Fig.6.8.4**に示す。ミクロ組織に, 手直し溶接による顕著な変化は見られなかった。また, 析出物も確認されなかった。

### 6.8.2 T溶接継手の溶接金属に対するフェライト量測定結果

供試した, 手直し(0回,1回および2回)溶接したSUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との完全溶け込みT溶接継手(**Table 6.3.1** 参照)の溶接金属に対して, フェライトスコープを使用して, フェライト量を測定した。なお, 各測定点に対して5回測定した。

測定の結果, 手直し0回, 1回および2回のT溶接継手全てで, 溶接金属のフェライト量は30%~70%の範囲内であった。また, 手直し溶接の回数の影響も認められなかった。

代表例として, 手直し2回溶接継手に対する測定結果を, **Fig.6.8.5**に示す。

### 6.8.3 T溶接継手部硬さ分布測定結果 および T溶接継手引張試験結果

供試した, 手直し(0回,1回および2回)溶接したSUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との完全溶け込みT溶接継手(**Table 6.3.1** 参照)の, ビッカース硬さ分布を測定した。測定位置を **Fig.6.8.6**に示す。1mm間隔で測定した。また, 測定荷重は10 kgfとした。

測定したビッカース硬さ分布を, **Fig.6.8.7**に示す。手直し溶接の回数に依らず, ビッカース硬さは略同等な値を示した。

さらに, 供試したT溶接継手に対して, 継手引張試験を実施した。

Fig.6.8.8に示すように、T溶接継手のSUS329J3Lクラッド鋼板軟鋼側に、軟鋼板を垂直に溶接して十字型引張試験片として供試した。

室温・大気中で引張試験を実施した。引張試験結果をFig.6.8.9に示す。全ての試験片で、SUS329J3Lソリッド鋼板で破断した。手直し溶接を1回しても、2回しても、溶接継手引張り強さには何等問題無いことが明らかになった。

## 6.9 T溶接継手に対する耐孔食性試験およびその結果

供試した、手直し(0回、1回および2回)溶接したSUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との完全溶け込みT溶接継手(Table 6.3.1 参照)より、Fig.6.9.1に示す要領で、耐孔食性試験片を採取・作製した。

Fig.6.9.1から明らかなように、採取した耐孔食性試験片の長さ方向は、溶接線に垂直方向である。また、採取した耐孔食性試験片の表面は溶接のままの状態とし、他の面は、湿式#600研磨仕上げをした。さらに、研磨後、不動態化処理を実施した。なお、不動態化処理は、35 mass%硝酸を用い、60℃で20分間浸漬した。

以上のようにして作製した試験片を供試して、耐孔食性試験を実施した。

耐孔食性試験は、先に6.6.1項で述べたと同様、JIS G0578, B法に準拠して、6%塩化第二鉄+N/20塩酸溶液中に、72時間連続浸漬した。試験片表面の孔食の有無で評価した。

耐孔食性試験結果をTable 6.9.1に示す。なお、参考データをTable 6.9.1の下の表に示す。CPT(孔食発生臨界温度)が高い程、耐孔食性は良いと言える。

Table 6.9.1から明らかなように、手直し溶接の回数に依らず、SUS329J3Lクラッド鋼板T溶接継手の耐孔食性は良好であると言える。

## 6.10 まとめ

新しく開発・製造された、SUS329J3Lクラッド鋼板と、SUS329J3Lソリッド鋼板とを組み合わせ、ケミカルタンカーカーゴタンク構造を建造する目的で、就航後の耐食性に関する信頼性を確保するために、溶接継手部の耐食性

に関する確認を行った。

すなわち、SUS329J3Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接(通常入熱溶接および過剰入熱溶接)継手と、手直し(0回、1回および2回)溶接した、SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との完全溶け込みT溶接継手を供試して、各種耐食性について確認試験を実施した。さらに、従来、実績の多いSUS316Lクラッド鋼板溶接継手と比較・検討・評価し、以下の結論が得られた。

- ① 過剰入熱溶接(FCAW44kJ/cm, FCAW+SAW50kJ/cm)による突合せ溶接継手でも、断面マクロ組織や断面ミクロ組織に異常はなかった。
- ② 溶接金属の化学成分分析結果では、耐孔食性指標であるPI値が、FCAW溶接金属では母材と略同等であったが、SAW50kJ/cm溶接金属では低い値を示した。SAWの過剰入熱溶接は要注意である。
- ③ 突合せ溶接継手の溶接金属とHAZのフェライト量測定結果によれば、FCAW継手では略30%～70%の範囲内に入っていたが、SAW継手、特にSAW50kJ/cmの溶接継手では、フェライト量が30%以下の測定値が多かった。明らかに、SAW50kJ/cmは入熱量が大き過ぎて、溶接継手は不安定であると言える。
- ④ 過剰入熱溶接による突合せ溶接継手でも、ビッカース硬さ分布測定結果、継手引張試験結果、およびV-ノッチシャルピー衝撃試験結果全てにおいて、全く問題無いという結果であった。
- ⑤ 突合せ溶接継手の耐孔食性試験結果では、孔食発生臨界温度であるCPT値が、SAW50kJ/cm継手で5℃以下であったが、他の継手では、耐孔食性は良好であった。また、SUS316Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手より、耐孔食性は優れていることが明らかになった。
- ⑥ 突合せ溶接継手の耐粒界腐食試験結果、および沸騰5%硫酸腐食試験結果では、SUS329J3Lソリッド鋼板同士の突合せ溶接継手の腐食速度と略同等であり、SUS316Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手より、耐食性は優れていることが明らかになった。
- ⑦ 載荷試験として実施した突合せ溶接継手の濃硫酸腐食試験結果では、工業用硫酸に対しては、全ての供試溶接継手共、腐食速度は略ゼロ

であった。また、試薬特級硫酸に対しては、SUS329J3Lソリッド鋼板同士やSUS316Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手より、腐食速度は若干速いという結果であった。

- ⑧ 載荷試験として実施した突合せ溶接継手のりん酸腐食試験結果では、SUS329J3Lソリッド鋼板同士の突合せ溶接継手と共に、腐食速度は略ゼロであった。SUS316Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手より、耐食性は非常に優れていることが明らかになった。
- ⑨ 突合せ溶接継手の応力腐食割れ試験結果では、SUS329J3Lソリッド鋼板同士やSUS316Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手と略同等で、良好であった。
- ⑩ 手直し(0回, 1回 および 2回)溶接した, SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との完全溶け込みT溶接継手の, 断面マクロ組織や断面ミクロ組織観察結果では, 手直し溶接による顕著な変化は見られなかった。また, 析出物も確認されなかった。
- ⑪ 供試したT溶接継手溶接金属のフェライト量測定結果では, 全てのT溶接継手で, フェライト量は30%~70%の範囲内であった。また, 手直し溶接の回数の影響も認められなかった。
- ⑫ 供試したT溶接継手のビッカース硬さ分布測定結果, および 継手引張試験結果では, 全ての試験結果において, 何等問題無いことが明らかになった。
- ⑬ 供試したT溶接継手の耐孔食性試験結果では, 手直し溶接の回数に依らず, CPT(孔食発生臨界温度)は30℃~35℃であり, 耐孔食性は良好であることが明らかになった。

以上を総括すると、SUS329J3Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手部の耐食性は、SUS329J3Lソリッド鋼板同士の突合せ溶接継手部と略同等であり、良好であると言える。また、ケミカルタンカーでの実績が多い、SUS316Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手部より、耐食性は優れていることが明らかになった。

しかし、過剰入熱の溶接は避けるべきである。

したがって、耐食性の観点からは、SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板とを組み合わせると、ケミカルタンカーカーゴタンク構造の建造は可能であると言える。

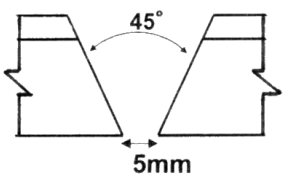
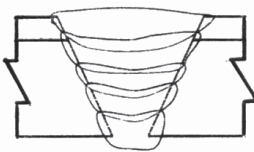
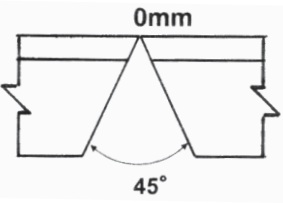
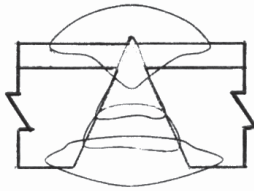
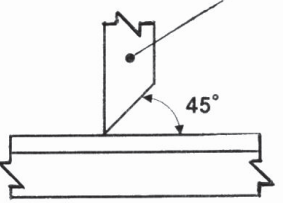
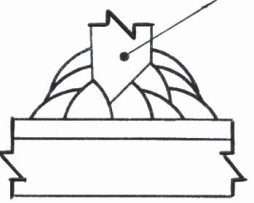
## 参 考 文 献

- 6.1) 座間正人, 齊藤正洋, 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.
- 6.2) 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(Ⅱ号)), pp.21-30.
- 6.3) 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.
- 6.4) 井上裕滋, 松橋 亮, 田所 裕, 福元成雄, 橋本剛志, 水本 学, 長崎 肇: ケミカルタンカー向け高耐食ステンレス鋼 NSSC 260A 用溶接材料の開発, 新日鉄技報, 第385号(2006.), pp.20-25.
- 6.5) 保坂信義, 西田 脩: オーステナイト系ステンレス鋼の溶接熱影響部の耐食性に関する二・三の検討, 鉄と鋼, 62巻4号(1976.), p.304.
- 6.6) 矢埜浩史, 大井健次, 小野守章: フェライト/オーステナイト系ステンレス鋼溶接金属の耐食性に及ぼす冷却速度の影響, 溶接学会全国大会講演概要, 第84号(2009.3.27.), pp.144-145.
- 6.7) 玉置克臣, 中野昭三郎, 西山 昇, 坪井潤一郎: オーステナイト系ステンレス鋼肉盛溶接金属の耐食性, 腐食防食協会春期学術講演大会講演予稿集, 1981号(1981.), pp.93-96.
- 6.8) 小山祐司, 島田鉄也, 住友秀彦, 高橋良輔, 田中郁雄: オーステナイト系ステンレス鋼の耐食性に及ぼす加工熱処理の影響, 鉄とプロセス, 8巻3号(1995.4.), p.762.

**Table 6.2.1 Chemical composition of test steel plates**

Test Steel Plate		(mass%)								
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
SUS329J3L -Clad (t:3+13)	SUS329J3L (t:3)	0.013	0.31	0.97	0.025	0.0015	22.55	5.42	3.10	0.17
	M.S. (t:13)	0.054	0.29	1.36	0.014	0.003	-	-	-	-
SUS316L -Clad (t:3+13)	SUS316L (t:3)	0.009	0.52	0.72	0.028	0.0004	16.82	12.18	2.73	0.03
	M.S. (t:13)	0.15	0.24	1.07	0.014	0.004	-	-	-	-
SUS329J3L (t:20)		0.011	0.51	1.84	0.025	0.0006	22.30	5.85	3.00	0.17

**Table 6.3.1 Welding parameters of butt welded and full penetration T welded joints (SUS329J3L-clad steel plate)**

Welded Joint	Groove Geometry	Build-up Sequence	Welding Variable
Butt Welded Joint (FCAW)			SF-1(FCAW) GFW329J3L (FCAW)  Usual H.I.: 20kJ/cm Excessive H.I.: 44kJ/cm
Butt Welded Joint (FCAW +SAW)			SF-1 (FCAW) WELSUB329J3L × SUBF-25U (SAW)  Usual H.I.: 30kJ/cm Excessive H.I.: 50kJ/cm
T Welded Joint (FCAW)			GFW329J3L (FCAW)  Repair Welding Time: 0, 1, 2  H.I.: 11 ~ 18kJ/cm

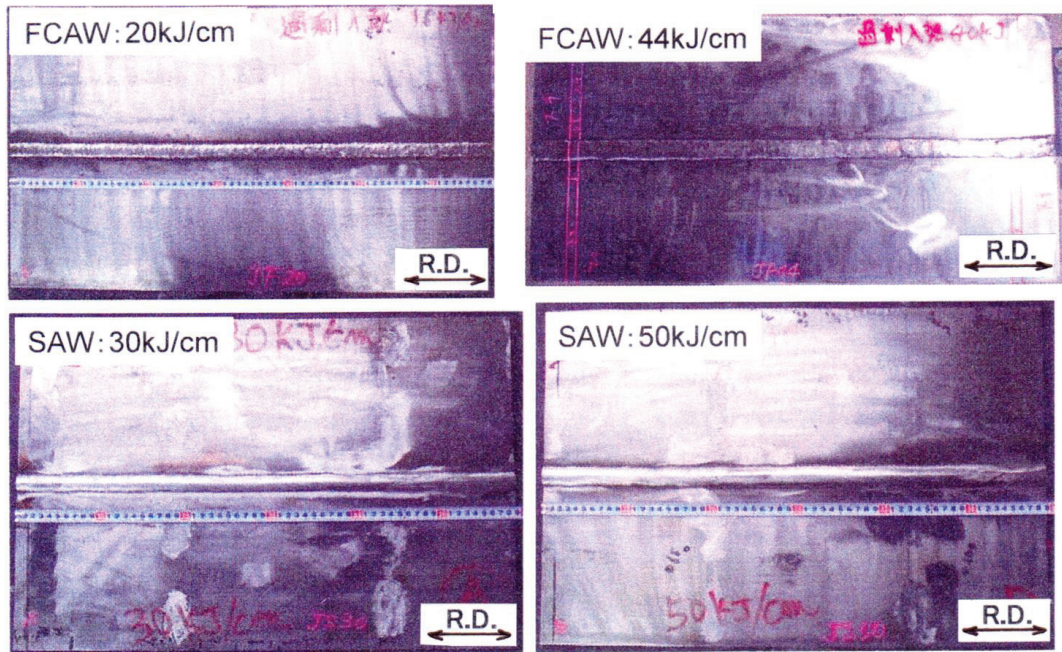


Fig.6.4.1 Appearance of butt welded joints

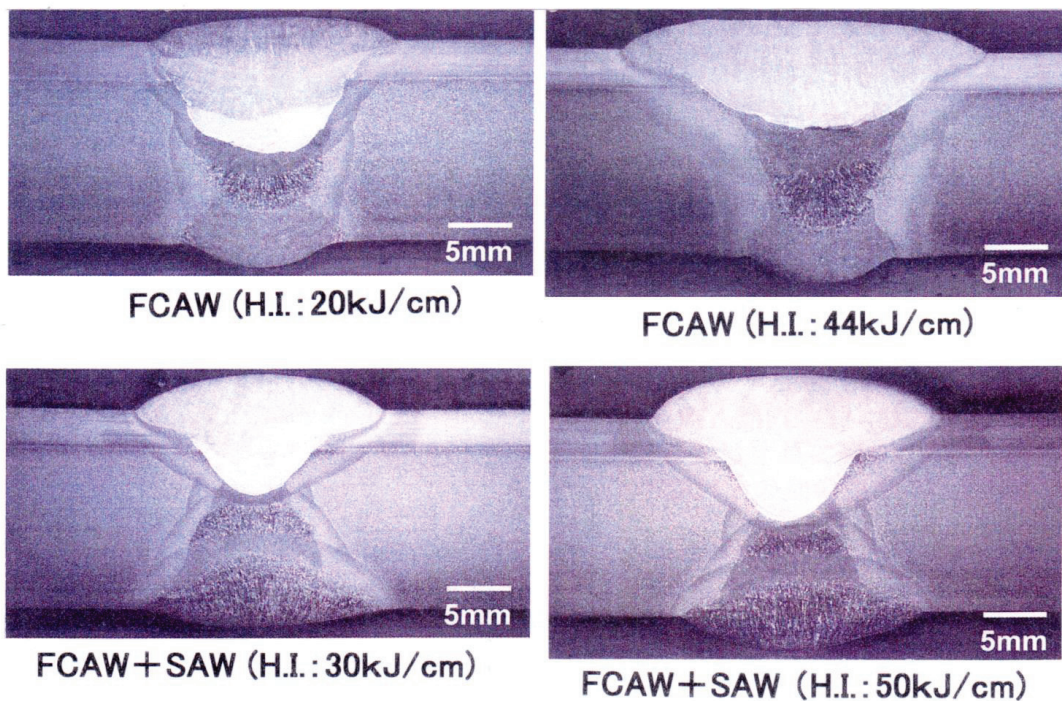
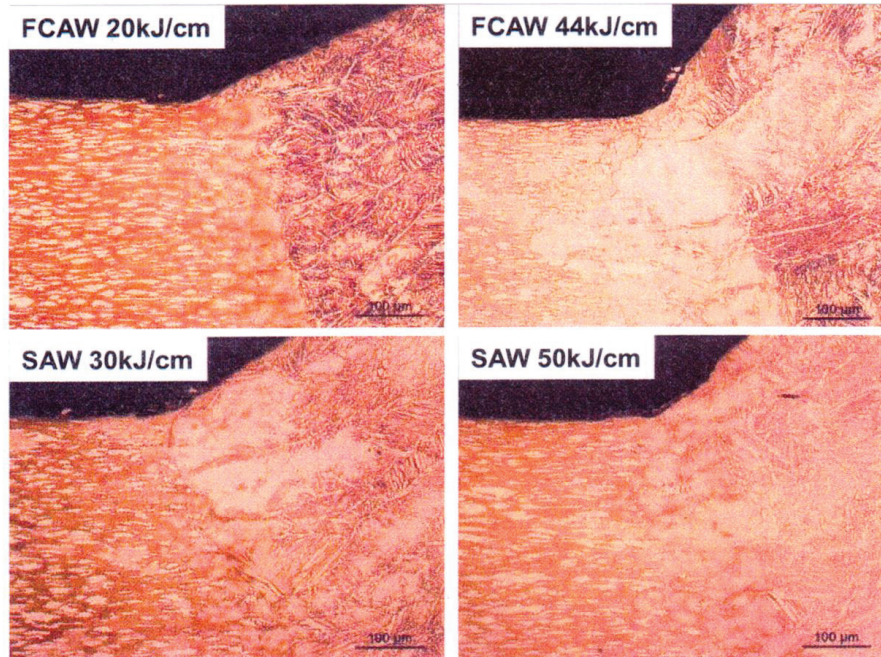
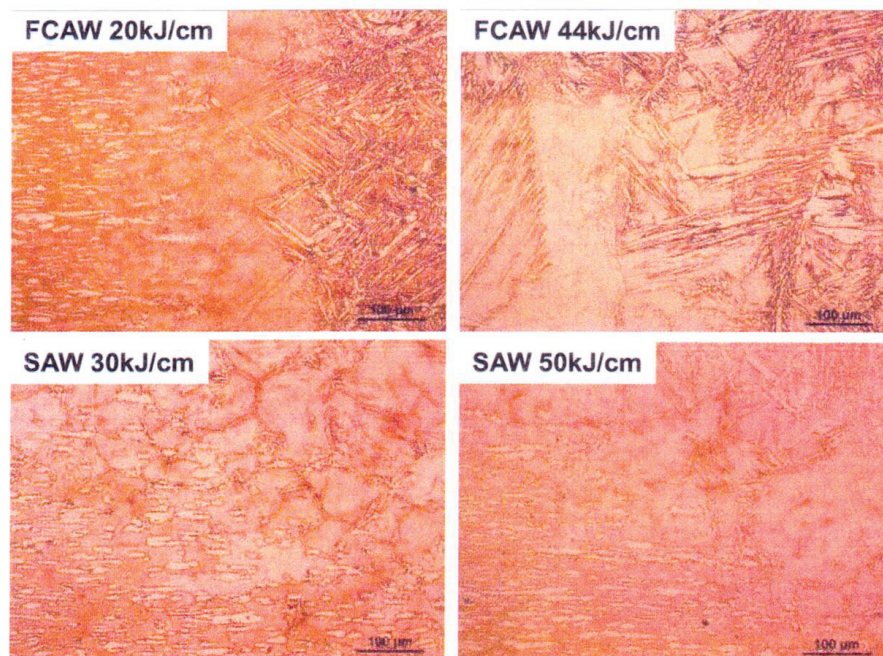


Fig.6.4.2 Results of macroscopic test of welded section for butt welded joints





**Fig.6.4.3 Results of microscopic test of welded section for butt welded joints [Fusion line]**



**Fig.6.4.4 Results of microscopic test of welded section for butt welded joints [1/2t. SUS329J3L. Fusion line]**

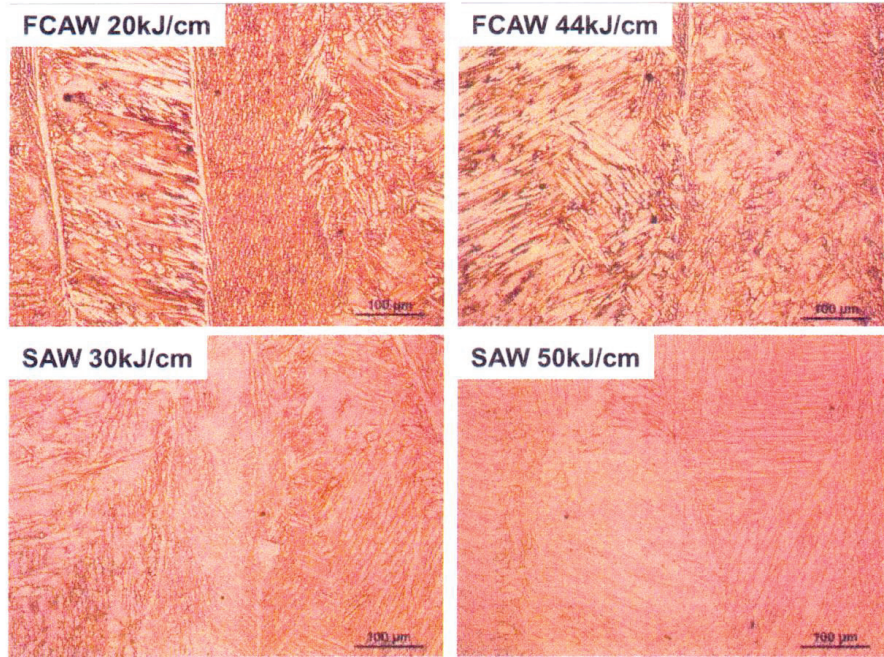


Fig.6.4.5 Results of microscopic test of welded section for butt welded joints [Weld metal of SUS329J3L]

Table 6.4.1 Chemical composition of weld metal

											(mass%)
Steel Plate	Welding Variable	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	PI
SUS329J3L -Clad	Base Metal	0.013	0.28	0.98	0.027	0.001	22.47	5.51	3.11	0.17	35.5
	FCAW 20kJ/cm	0.022	0.40	0.85	0.021	0.003	22.37	8.61	3.55	0.13	36.1
	FCAW 44kJ/cm	0.022	0.42	0.91	0.022	0.004	22.03	8.05	3.44	0.14	35.6
	SAW 30kJ/cm	0.039	0.64	1.28	0.023	0.004	19.99	7.27	2.76	0.11	30.9
	SAW 50kJ/cm	0.035	0.61	1.29	0.022	0.003	17.97	6.59	2.48	0.10	27.8
SUS316L -Clad	Base Metal	0.009	0.52	0.72	0.028	0.0004	16.82	12.18	2.73	0.03	26.3
	FCAW 20kJ/cm	0.025	0.57	1.22	0.029	0.003	22.03	12.86	2.87	0.02	31.8
	FCAW 40kJ/cm	0.027	0.52	1.11	0.028	0.003	21.37	12.66	2.87	0.02	31.1
	SAW 30kJ/cm	0.026	0.60	1.28	0.025	0.004	20.26	13.70	3.07	0.02	30.8
	SAW 50kJ/cm	0.041	0.55	1.31	0.021	0.004	16.95	11.41	2.55	0.02	25.7
SUS329J3L	Base Metal	0.011	0.51	1.84	0.025	0.0006	22.30	5.85	3.00	0.17	35.0
	FCAW 20kJ/cm	0.026	0.36	0.77	0.024	0.003	23.10	9.12	3.22	0.13	35.9
	SAW 30kJ/cm	0.019	0.52	1.52	0.025	0.002	23.00	6.88	3.08	0.17	35.8

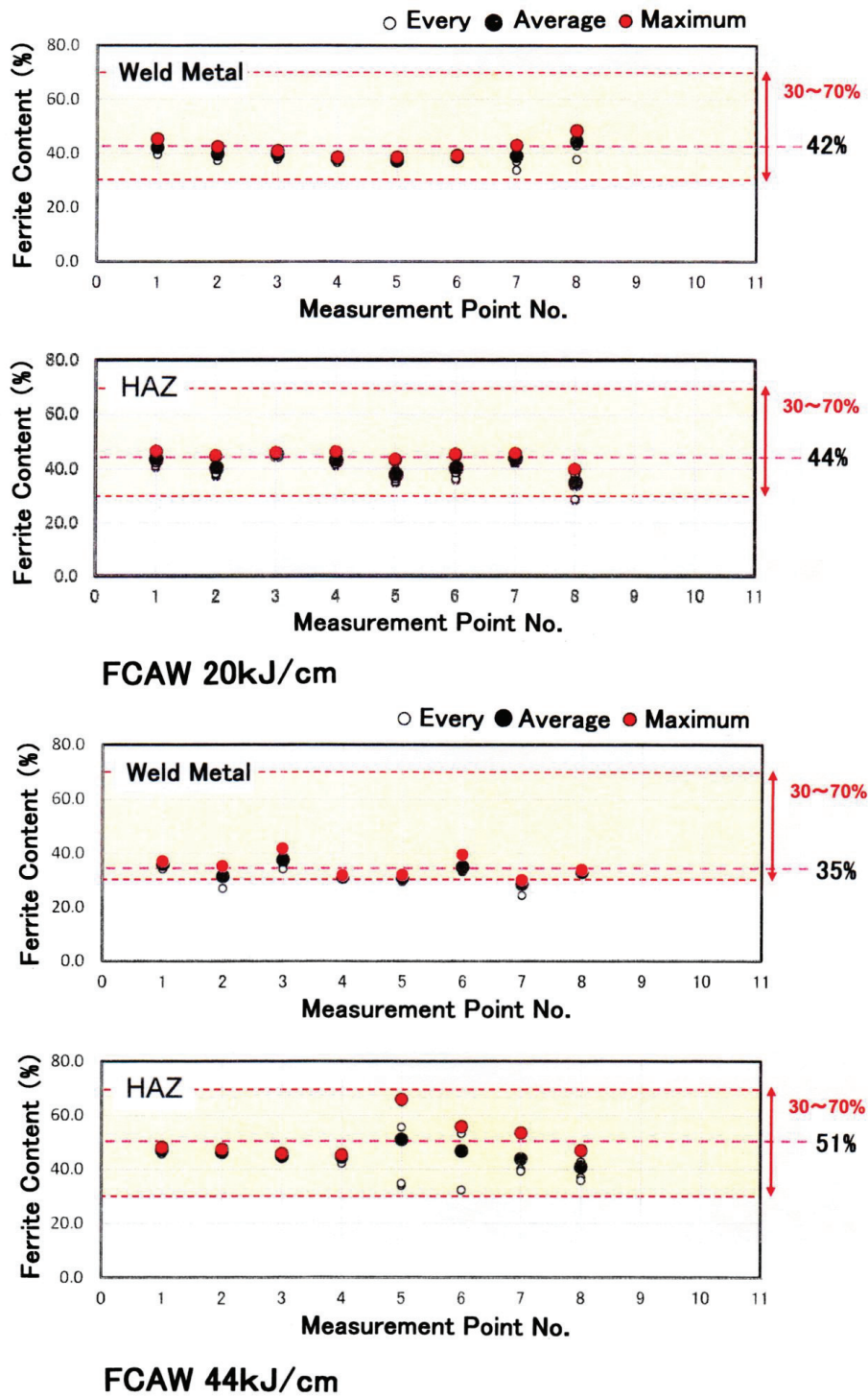
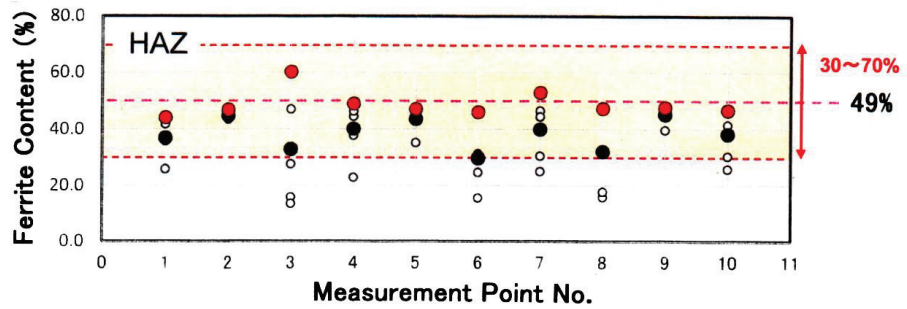
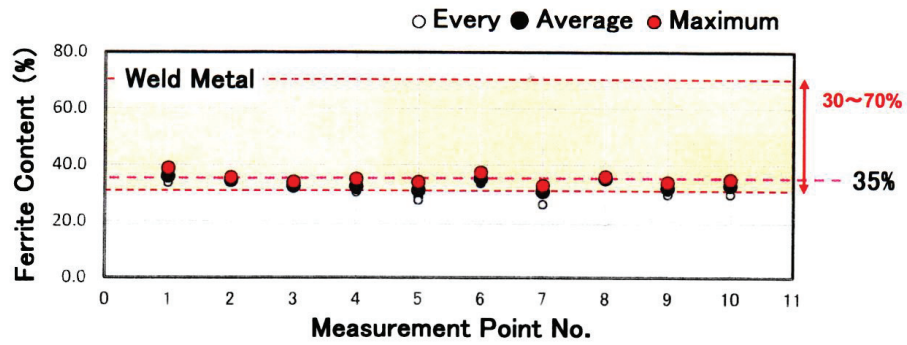
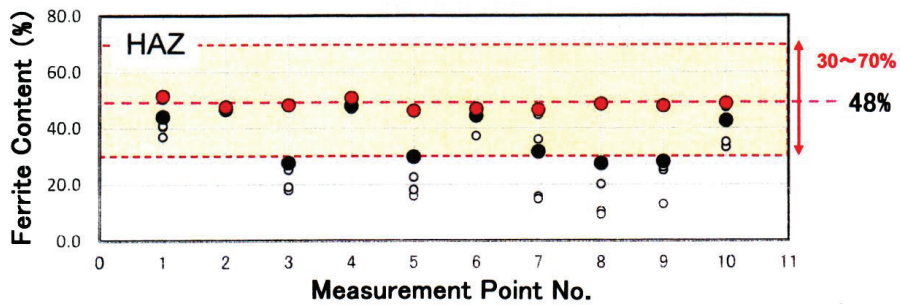
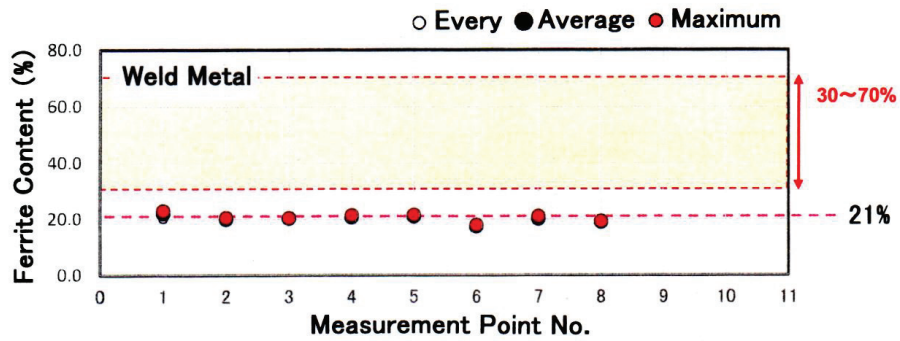


Fig.6.4.6 Ferrite content of butt welded joints of SUS329J3L-clad steel plate



SAW 30kJ/cm



SAW 50kJ/cm

Fig.6.4.7 Ferrite content of butt welded joints of SUS329J3L-clad steel plate

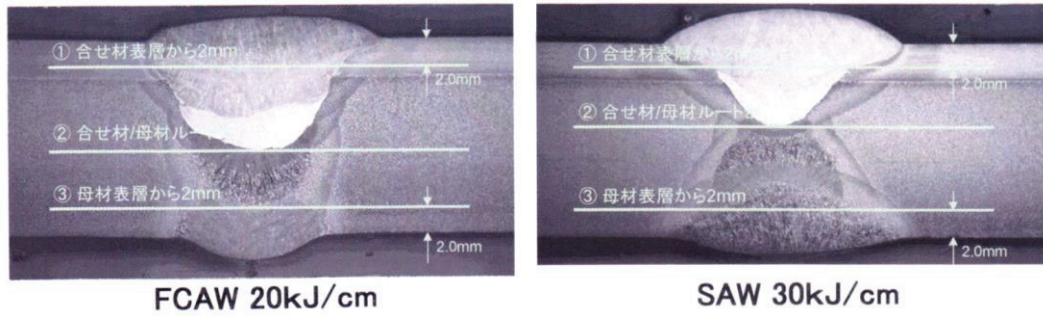
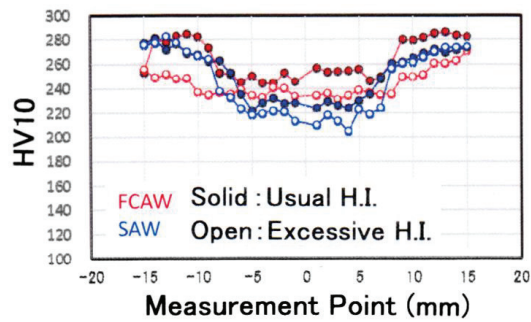
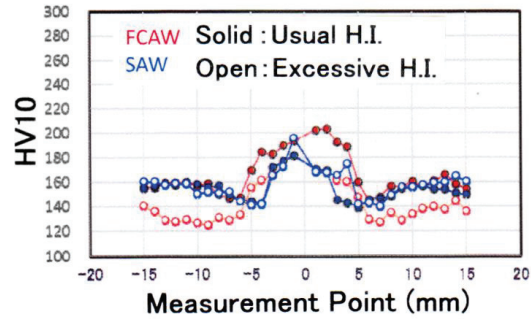


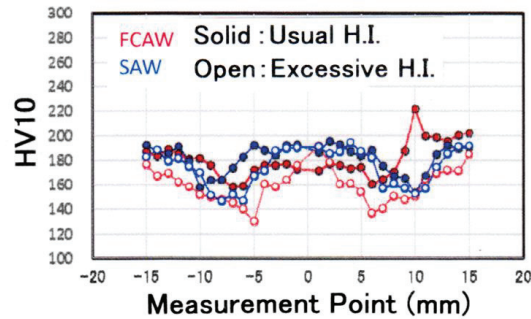
Fig.6.4.8 Measurement line of Vickers hardness



(a) 2mm from surface of SUS329J3L



(b) SUS329J3L/M.S. root



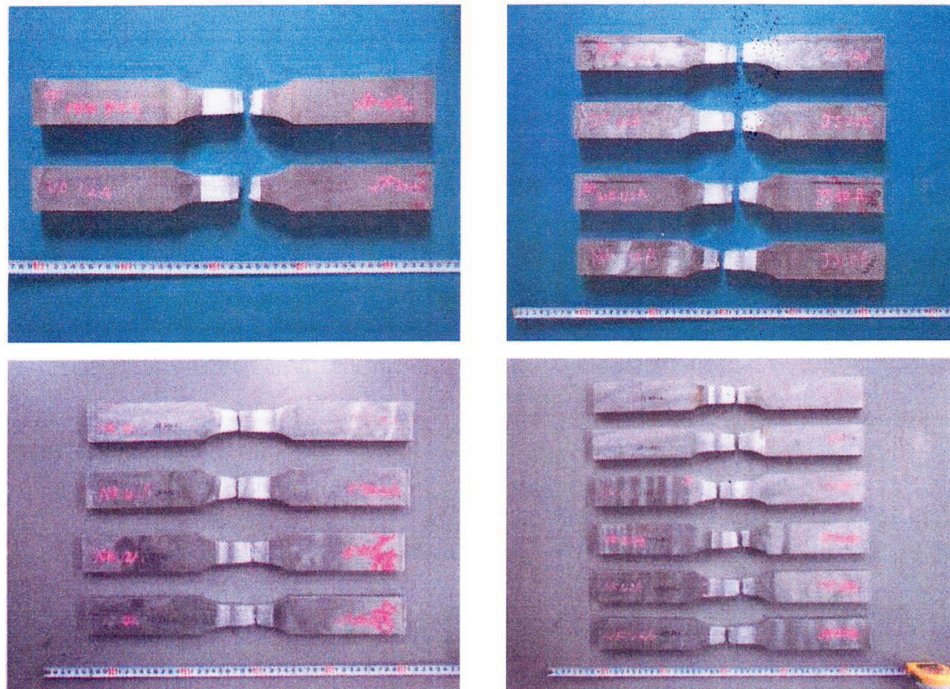
(c) 2mm from surface of M.S.

Fig.6.4.9 Vickers hardness distributions of butt welded joints

**Table 6.4.2 Results of tensile tests for butt welded joints**

	Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )					Judge.
	Start Side ①	Start Side ②	End Side ①	End Side ②	Ave.	
FCAW 20kJ/cm	500	494	500	493	497	○
FCAW 44kJ/cm	506	500	497	495	499	○
SAW 30kJ/cm	495	494	495	504	497	○
SAW 50kJ/cm	499	505	499	487	498	○

Full-Thickness Tensile Test (16mm), NK U2A



**Fig.6.4.10 Appearance of test specimens after tensile tests**

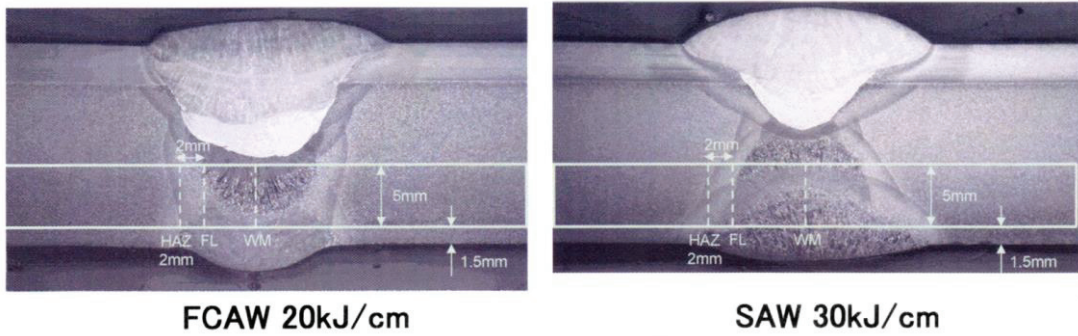


Fig.6.4.11 Cut-off plan of V-notch Charpy impact test piece and notch location

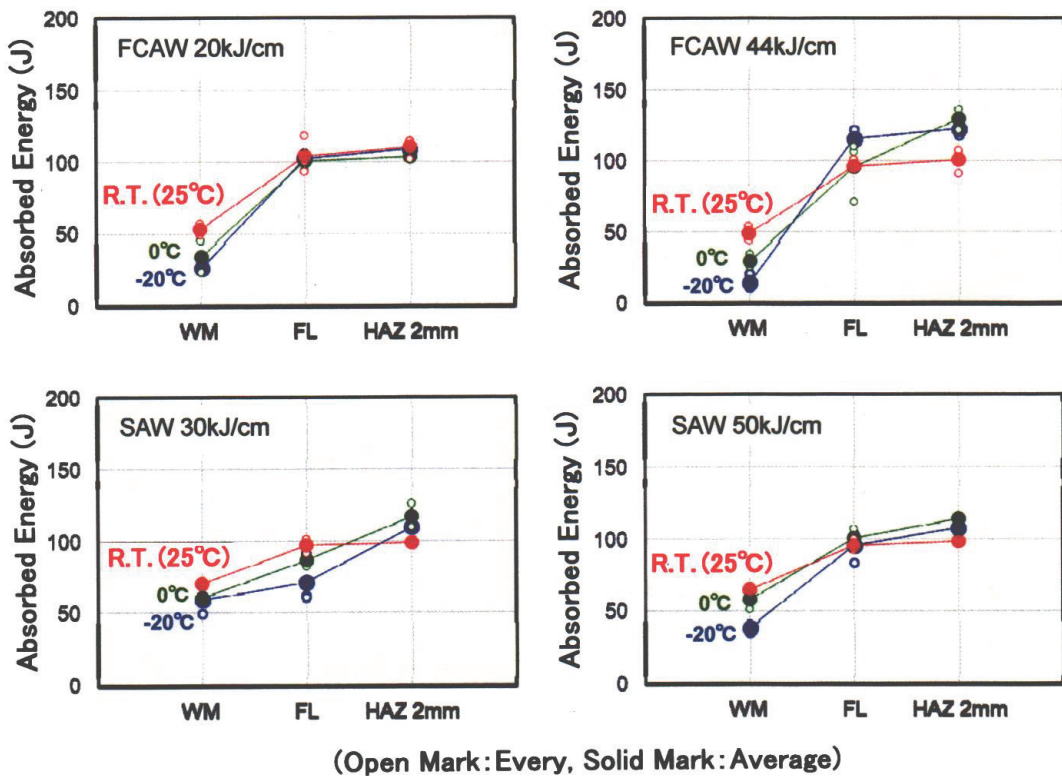
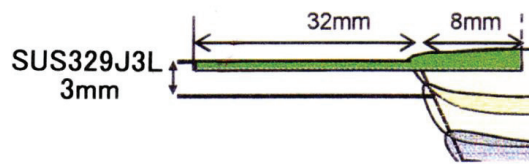
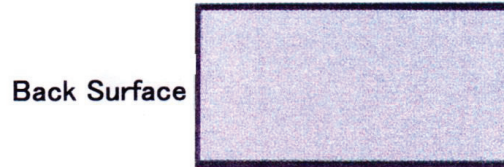
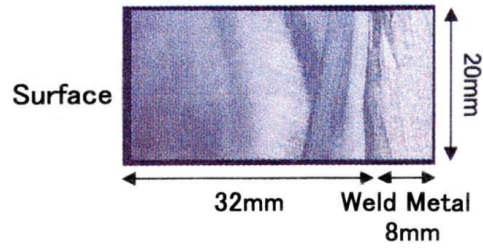


Fig.6.4.12 Results of V-notch Charpy impact tests

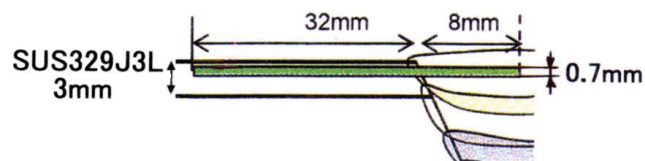


Cut-off Plan of Test Piece

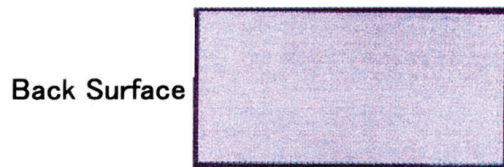
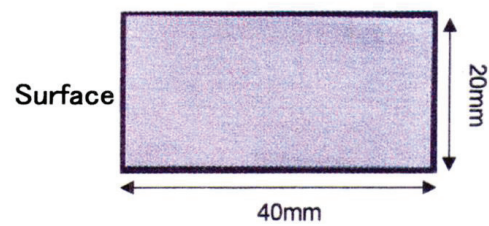


Appearance of Test Piece

(a) With reinforcement



Cut-off Plan of Test Piece



Appearance of Test Piece

(b) Without reinforcement

Fig.6.5.1 Cut-off plan of corrosion test piece



**Table 6.6.1 Results of pitting corrosion resistance tests**

Test Clad Steel Plate	Heat Input	Test Result						
		CPT	5°C	10°C	25°C	30°C	35°C	40°C
SUS329J3L	FCAW 20kJ/cm	40°C	/	/	/	○○○	○○○	×××
↑	FCAW 44kJ/cm	40°C	/	/	/	○○○	○○○	○××
↑	SAW 30kJ/cm	30°C	/	/	○○○	××○	/	/
↑	SAW 50kJ/cm	≤5°C	×××	×××	/	/	/	/
SUS316L	FCAW 20kJ/cm	10°C	○○○	×○○	/	/	/	/
↑	FCAW 44kJ/cm	≤5°C	×××	/	/	/	/	/
↑	SAW 30kJ/cm	10°C	○○○	×××	/	/	/	/
↑	SAW 50kJ/cm	≤5°C	×××	/	/	/	/	/

○ No Pitting    × Existent Pitting

**Reference Data**

Test Steel Plate	CPT
SUS329J3L-Clad, Base Metal	50°C
SUS316L-Clad, Base Metal	15°C
SUS329J3L-Solid, FCAW 20kJ/cm	35°C
SUS329J3L-Solid, SAW 30kJ/cm	40°C

SUS329J3L FCAW 20kJ/cm			
35°C			
Surface		Back Surface	
Before Test	After Test	Before Test	After Test
	○ ○ ○		○ ○ ○

SUS329J3L FCAW 20kJ/cm			
40°C			
Surface		Back Surface	
Before Test	After Test	Before Test	After Test
	○ ○ ×		× × ×

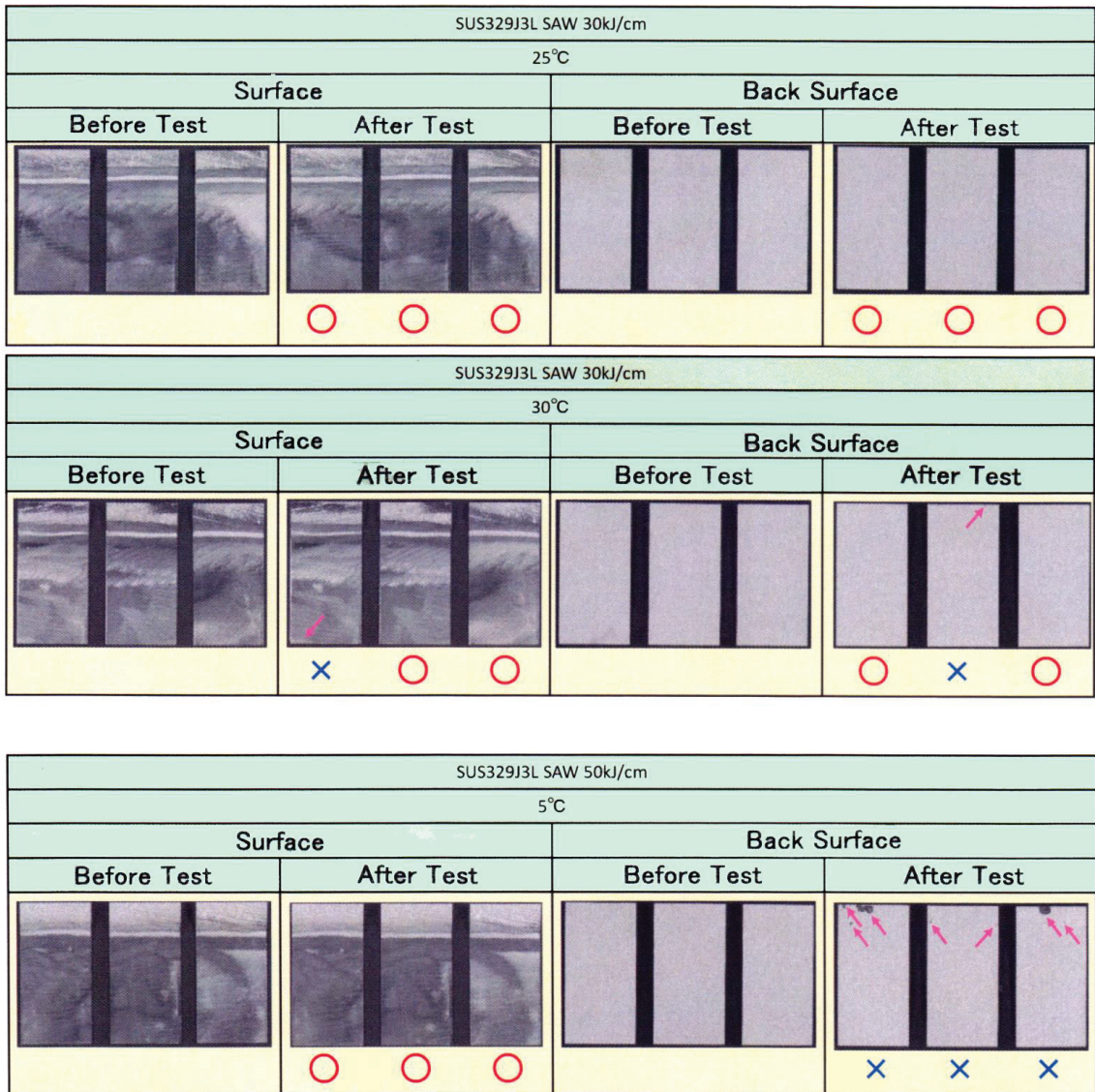
  

SUS329J3L FCAW 44kJ/cm			
35°C			
Surface		Back Surface	
Before Test	After Test	Before Test	After Test
	○ ○ ○		○ ○ ○

SUS329J3L FCAW 44kJ/cm			
40°C			
Surface		Back Surface	
Before Test	After Test	Before Test	After Test
	○ ○ ×		○ × ×

**Fig.6.6.1 Results of pitting corrosion resistance tests (Butt welded joints of SUS329J3L-clad steel plate)**



**Fig.6.6.2 Results of pitting corrosion resistance tests  
(Butt welded joints of SUS329J3L-clad steel plate)**

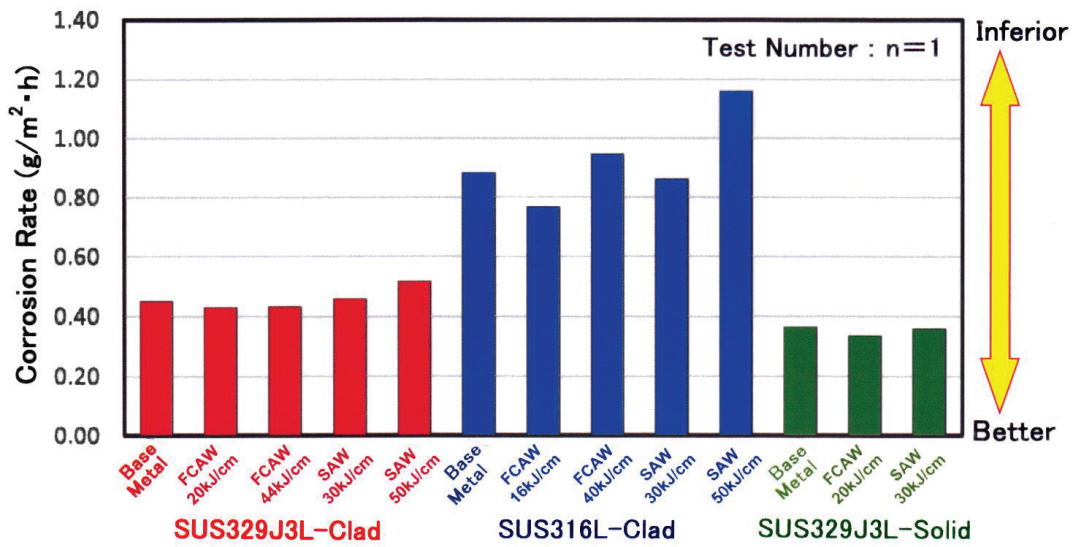


Fig.6.6.3 Results of inter-granular corrosion resistance tests

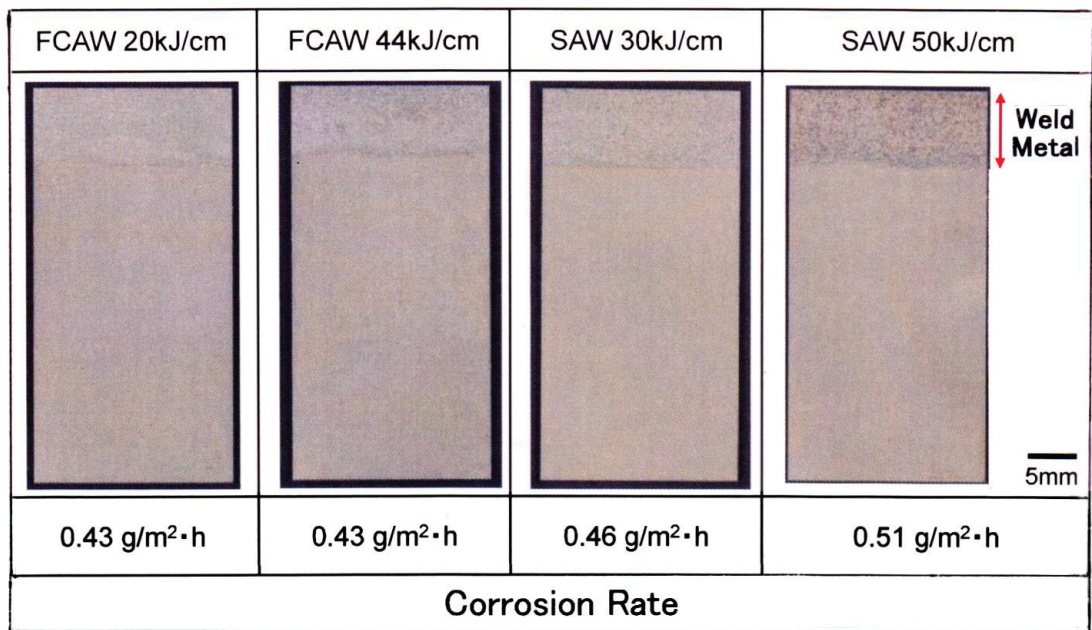


Fig.6.6.4 Results of inter-granular corrosion resistance tests (Butt welded joints of SUS329J3L-clad steel plate)

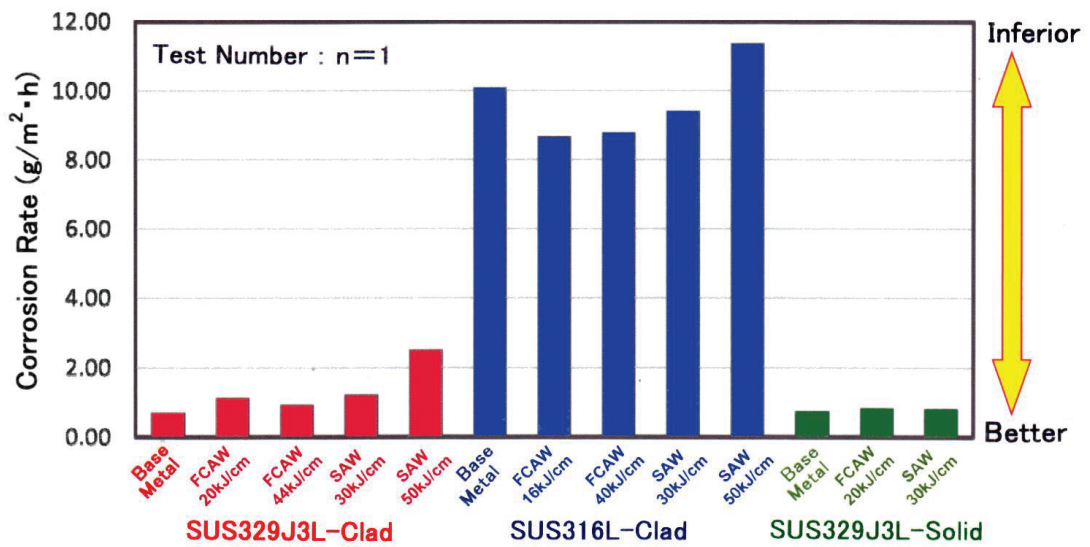


Fig.6.6.5 Results of boiling 5% sulfuric acid corrosion tests

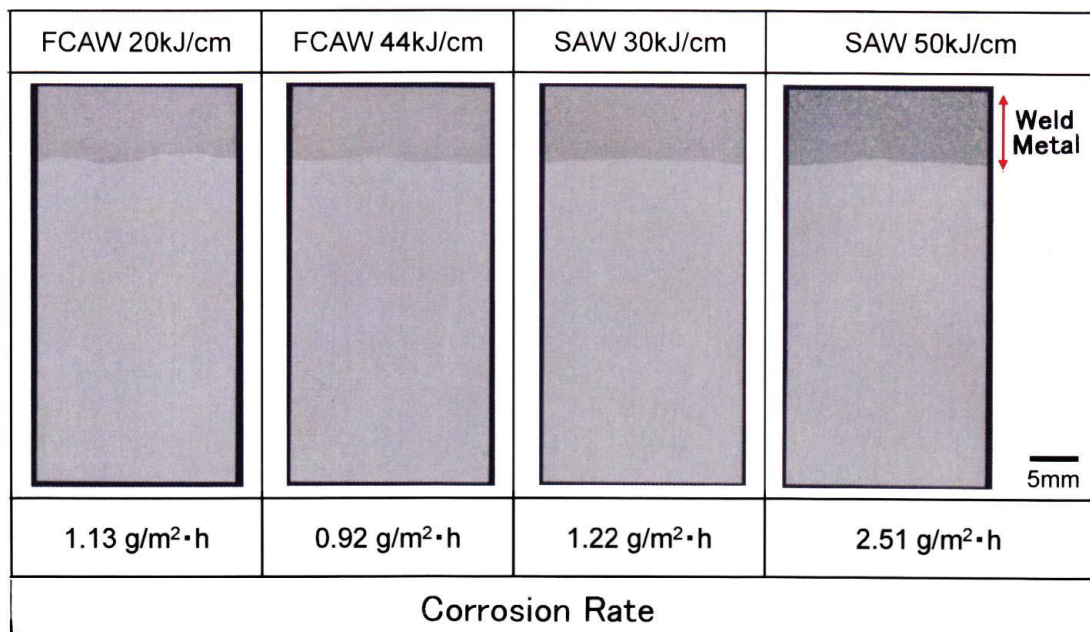


Fig.6.6.6 Results of boiling 5% sulfuric acid corrosion tests (Butt welded joints of SUS329J3L-clad steel plate)

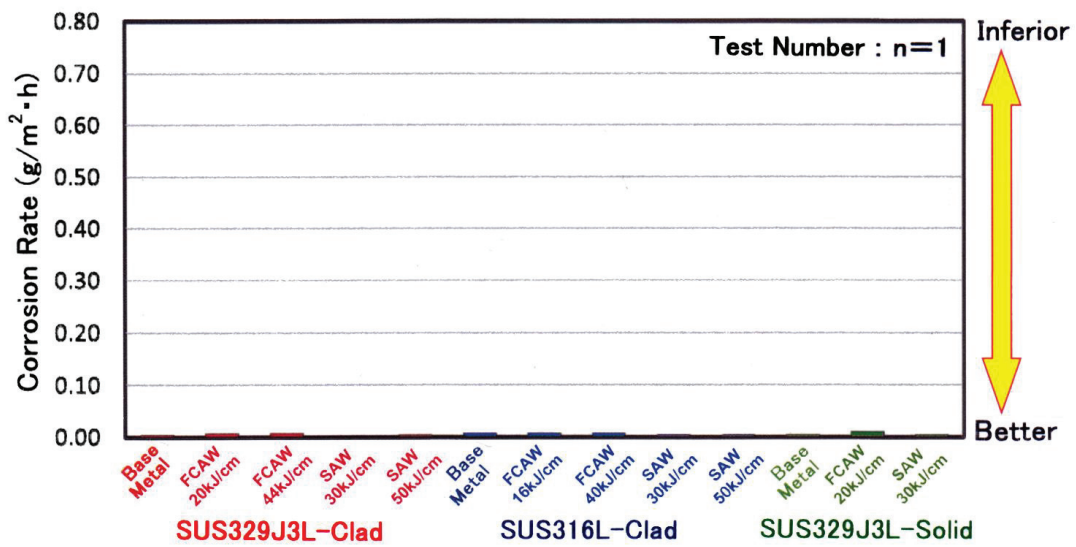
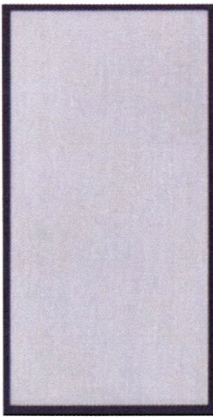
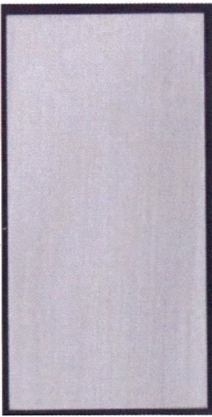
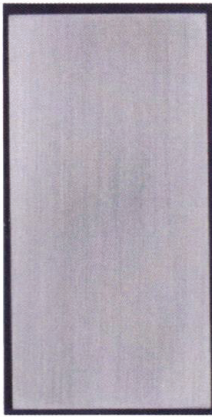
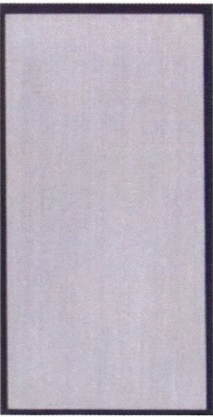


Fig.6.6.7 Results of concentrated sulfuric acid corrosion tests (Industrial sulfuric acid)

FCAW 20kJ/cm	FCAW 44kJ/cm	SAW 30kJ/cm	SAW 50kJ/cm
			
0.01 g/m <sup>2</sup> ·h	0.01 g/m <sup>2</sup> ·h	0.00 g/m <sup>2</sup> ·h	0.00 g/m <sup>2</sup> ·h
Corrosion Rate			

5mm

Fig.6.6.8 Results of concentrated sulfuric acid corrosion tests (Industrial sulfuric acid) (Butt welded joints of SUS329J3L-clad steel plate)

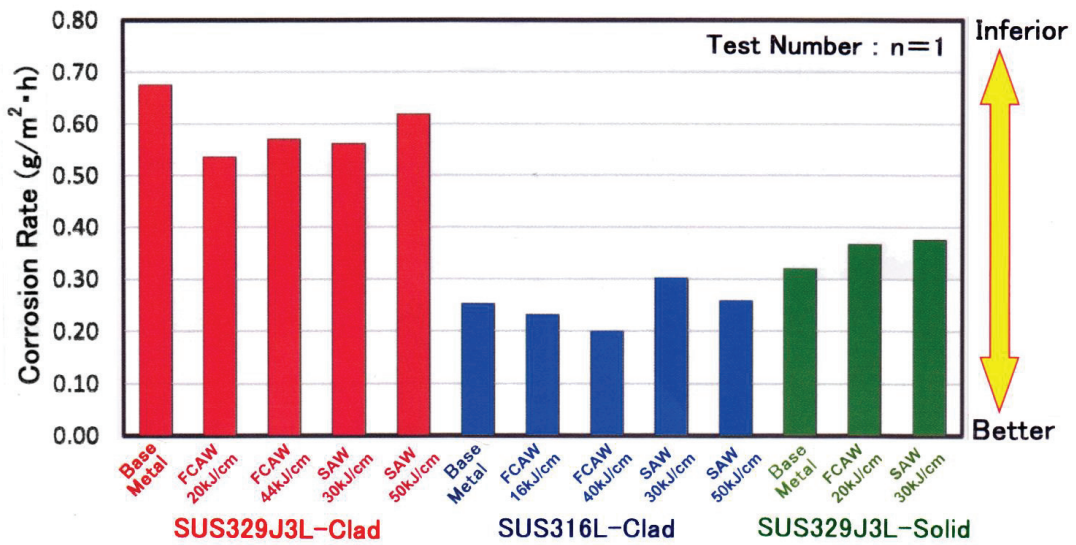


Fig.6.6.9 Results of concentrated sulfuric acid corrosion tests (Reagent sulfuric acid)

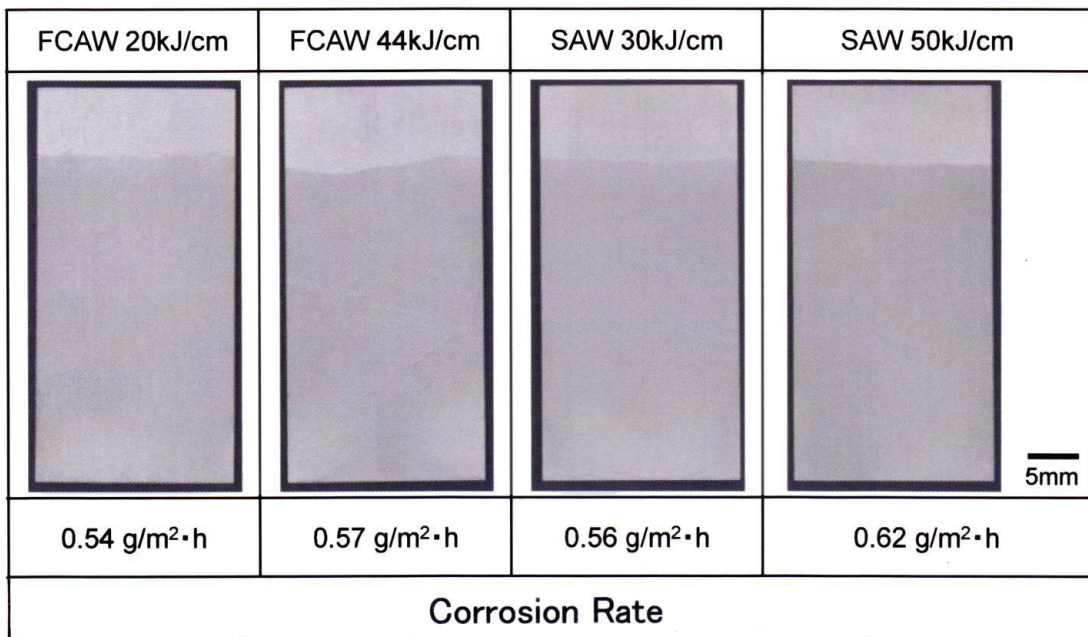


Fig.6.6.10 Results of concentrated sulfuric acid corrosion tests (Reagent sulfuric acid) (Butt welded joints of SUS329J3L-clad steel plate)

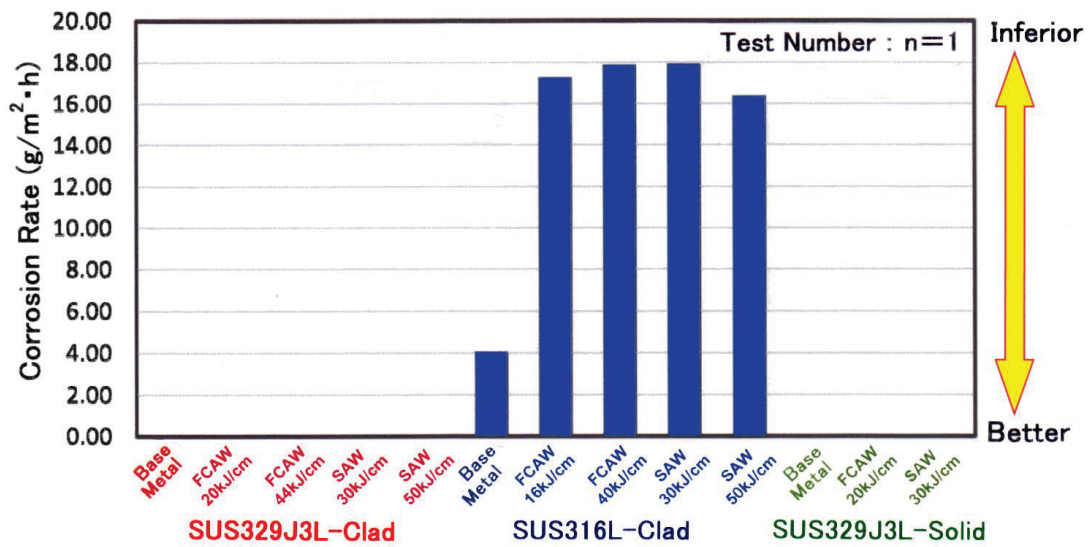
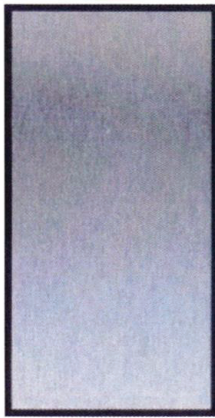





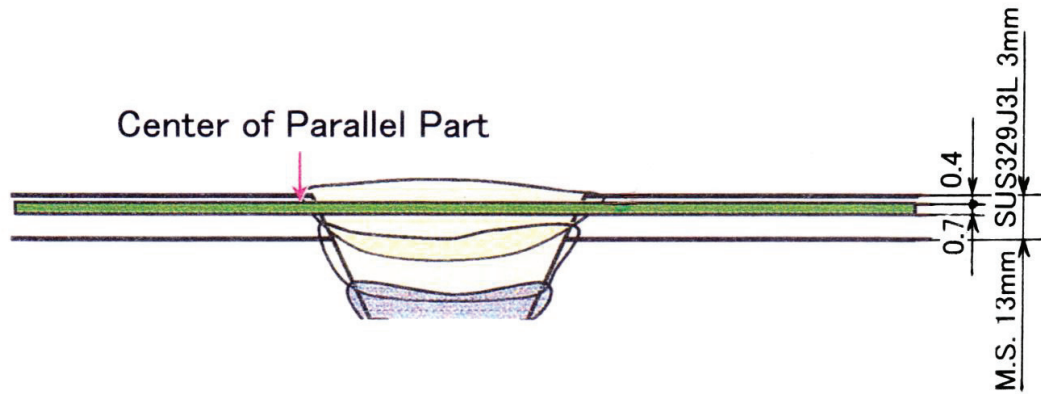
Fig.6.6.11 Results of phosphoric acid corrosion tests

FCAW 20kJ/cm	FCAW 44kJ/cm	SAW 30kJ/cm	SAW 50kJ/cm
			
0.00 g/m <sup>2</sup> ·h	0.00 g/m <sup>2</sup> ·h	0.00 g/m <sup>2</sup> ·h	0.00 g/m <sup>2</sup> ·h
Corrosion Rate			

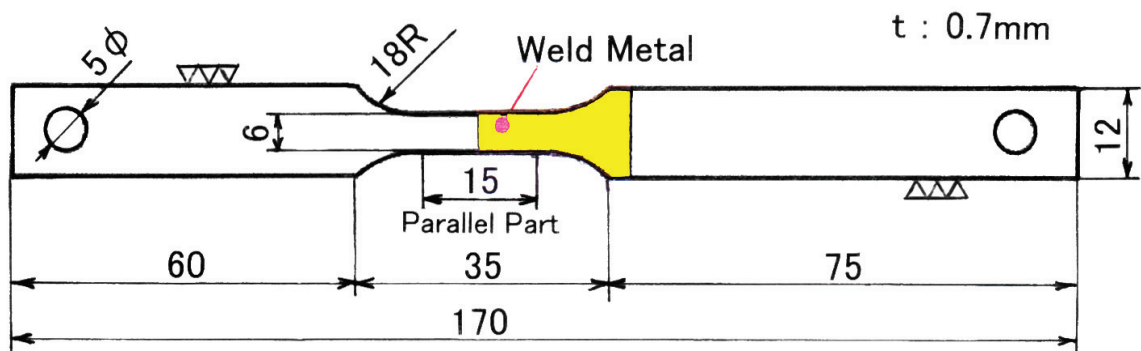
5mm

Fig.6.6.12 Results of phosphoric acid corrosion tests  
(Butt welded joints of SUS329J3L-clad steel plate)





**Fig.6.7.1** Cut-off plan of test specimen for stress corrosion cracking test



**Fig.6.7.2** Shape and size of test specimen for stress corrosion cracking test

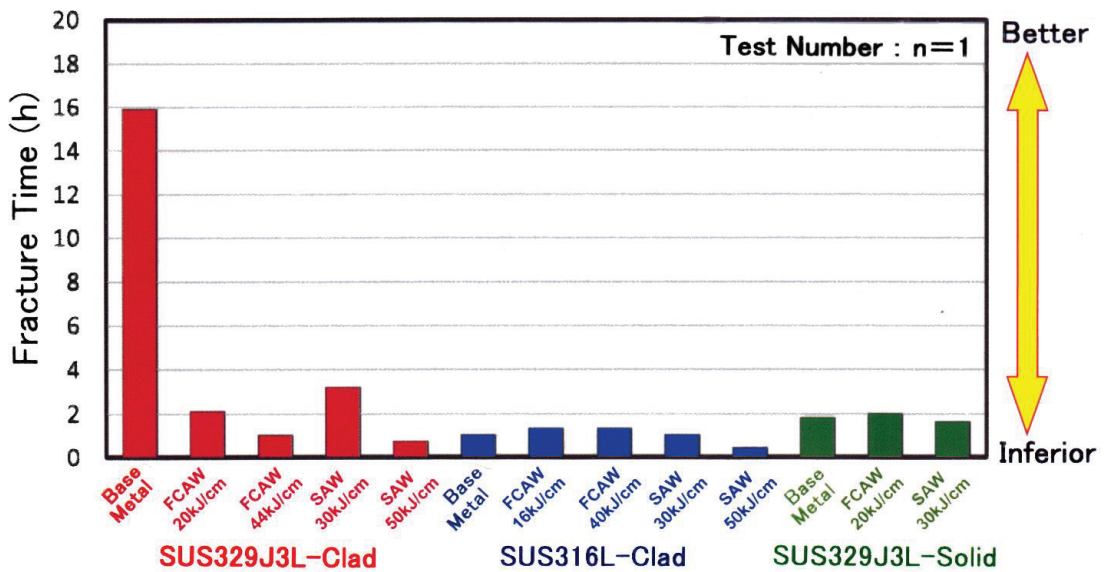


Fig.6.7.3 Results of stress corrosion cracking tests



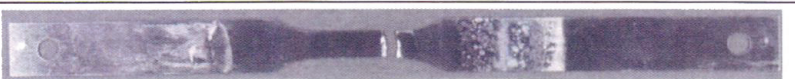

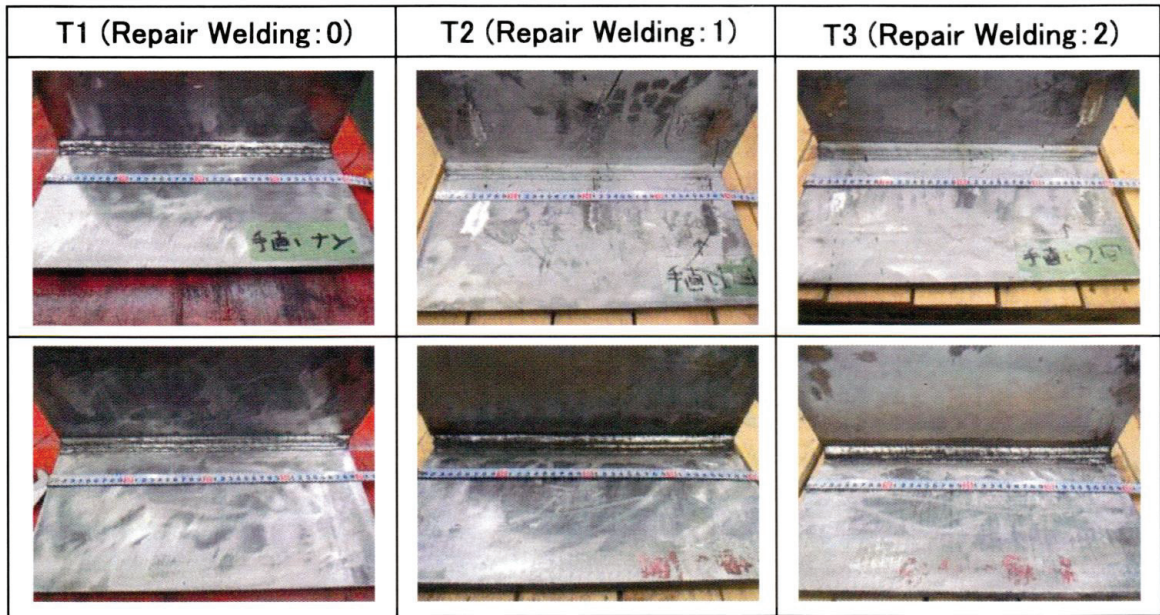
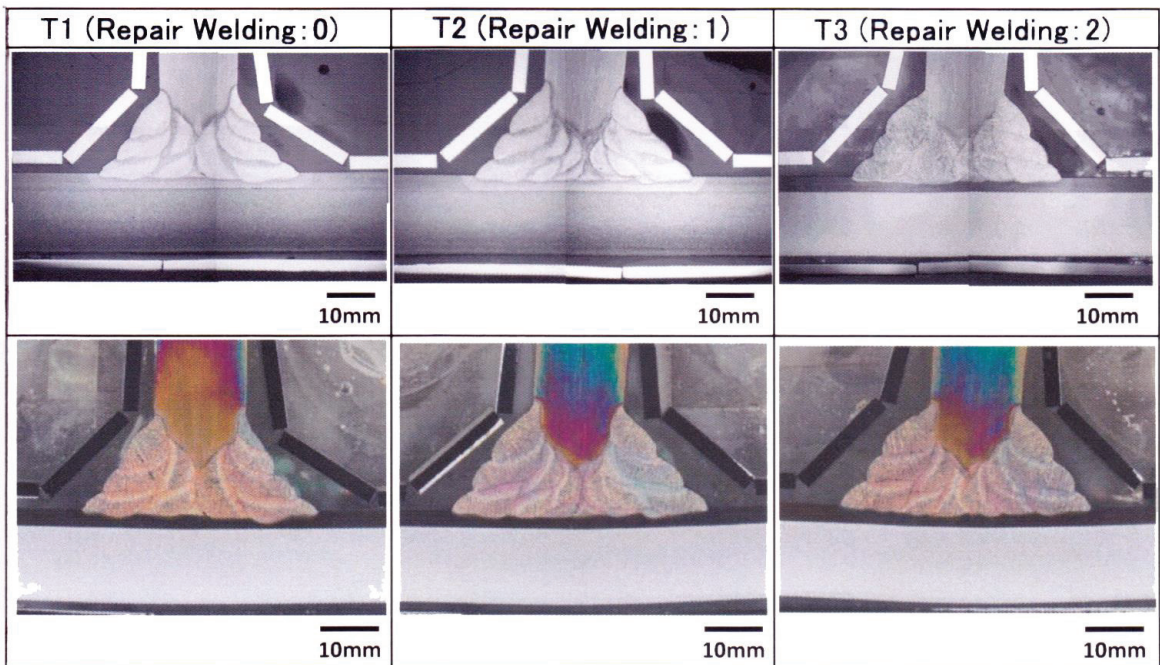
	Test Specimen of After S.C.C. Test	Fracture Time
FCAW 20kJ/cm	 Base Metal	2.1h
FCAW 44kJ/cm	 Fusion Line	1.0h
SAW 30kJ/cm	 Weld Metal	3.2h
SAW 50kJ/cm	 Weld Metal	0.7h

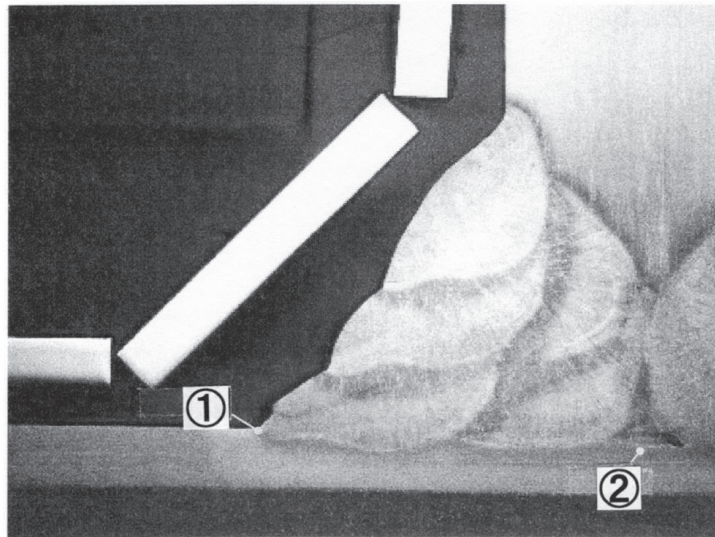
Fig.6.7.4 Results of stress corrosion cracking tests  
(Butt welded joints of SUS329J3L-clad steel plate)



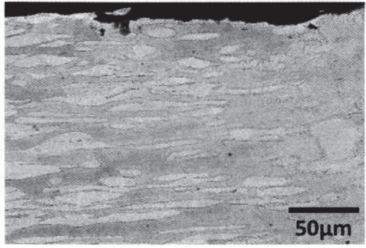
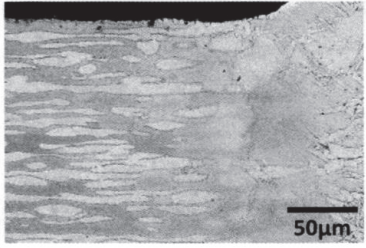
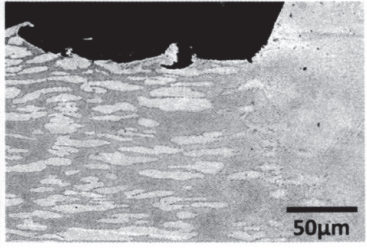
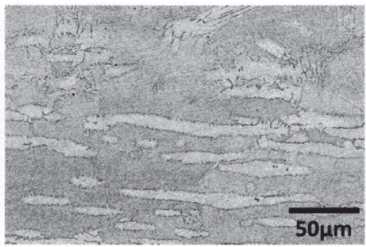
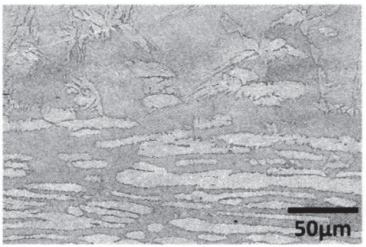
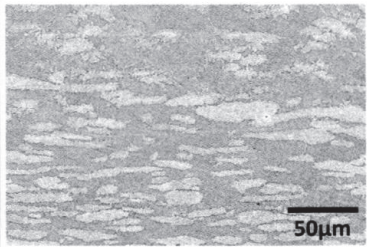
**Fig.6.8.1 Appearance of T welded joints  
(SUS329J3L-clad + SUS329J3L solid)**



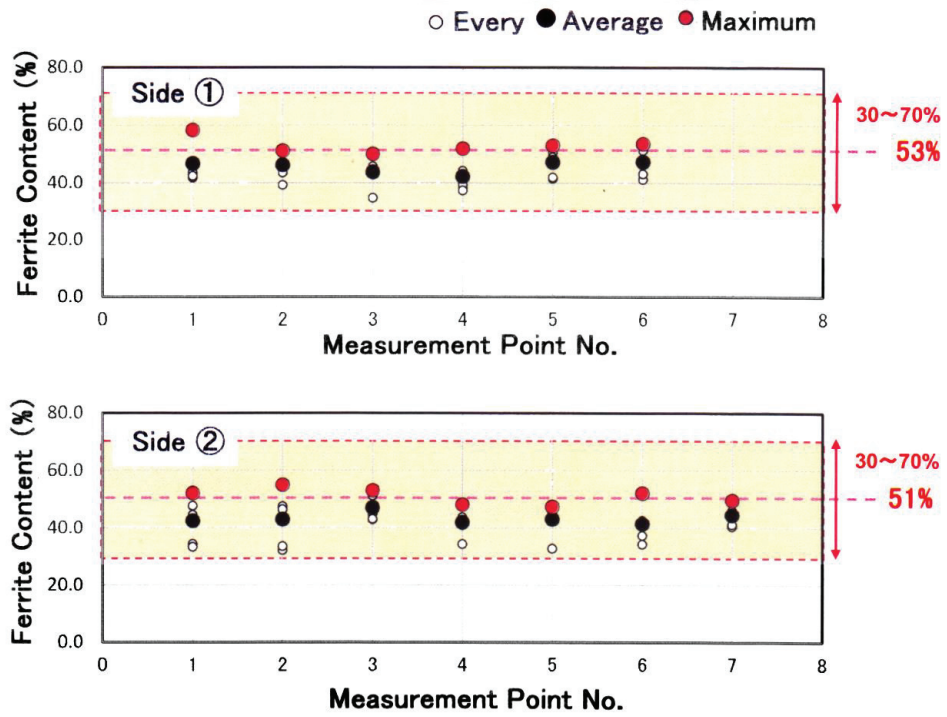
**Fig.6.8.2 Results of macroscopic test of welded section  
for T welded joints  
(SUS329J3L-clad + SUS329J3L solid)**



**Fig.6.8.3** Microscopic test area of welded section for T welded joint (SUS329J3L-clad + SUS329J3L solid)

	T1 (Repair Welding:0)	T2 (Repair Welding:1)	T3 (Repair Welding:2)
①			
②			

**Fig.6.8.4** Results of microscopic test of welded section for T welded joints (SUS329J3L-clad + SUS329J3L solid)



**Fig.6.8.5 Ferrite content of T welded joint  
(Repair welding : 2 times)  
(SUS329J3L-clad + SUS329J3L solid)**

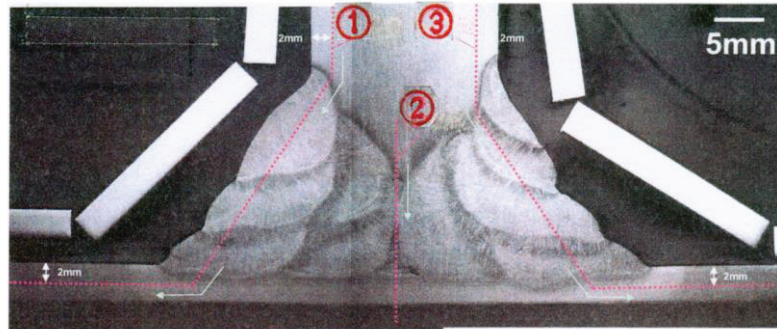


Fig.6.8.6 Measurement lines of Vickers hardness test

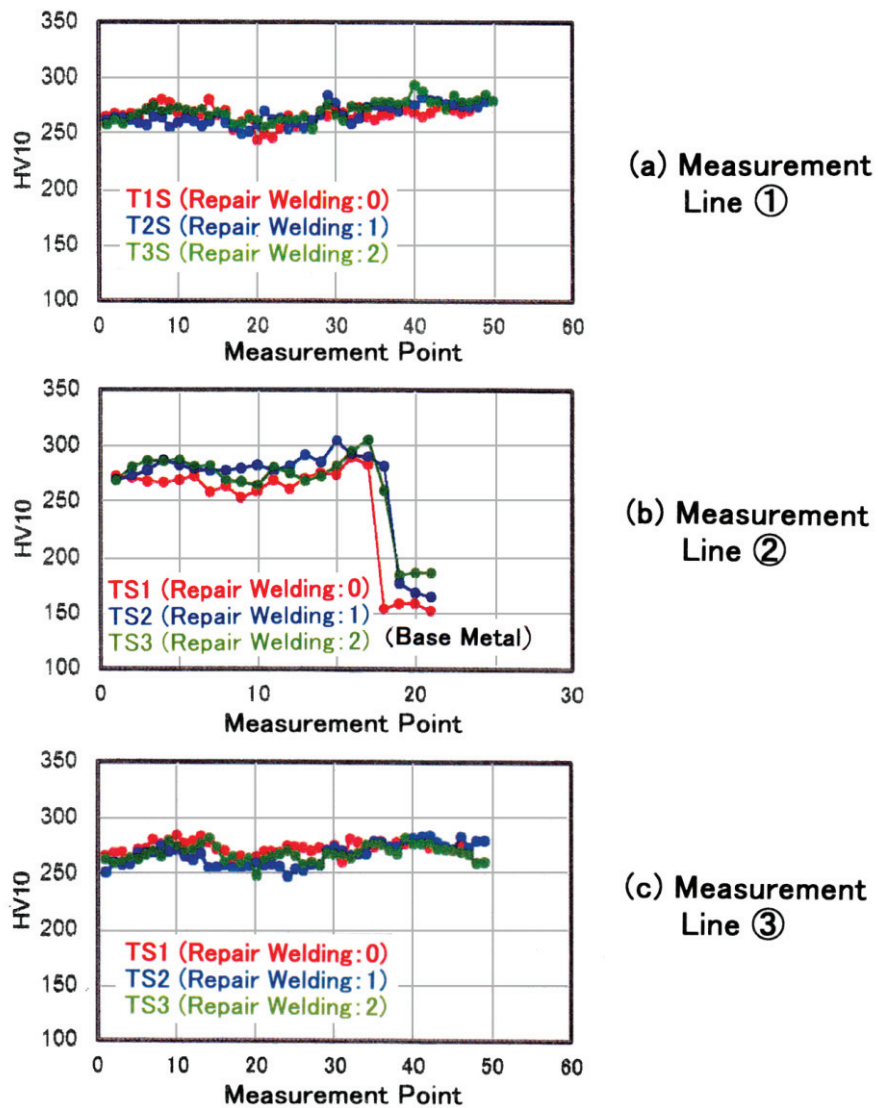
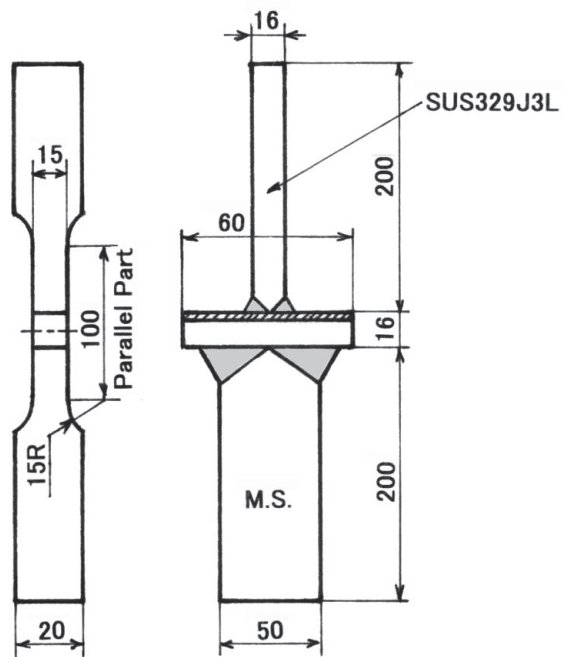


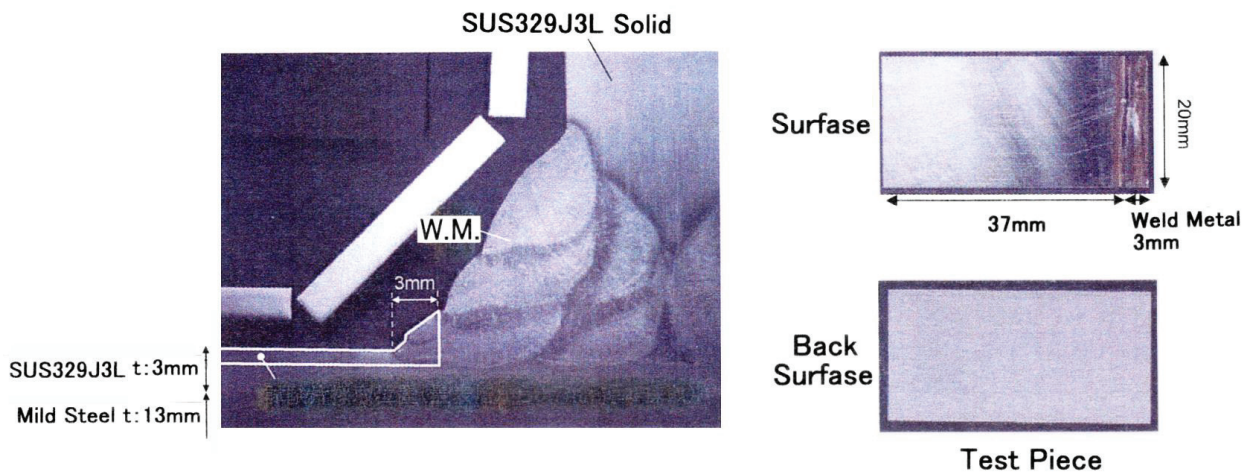
Fig.6.8.7 Vickers hardness distributions of T welded joints (SUS329J3L-clad + SUS329J3L solid)



**Fig.6.8.8** Shape and size of tensile test specimen for T welded joint

	(T1) Repair Welding : 0		(T2) Repair Welding : 1		(T3) Repair Welding : 2	
	Start	End	Start	End	Start	End
TS (MPa)	792, 801	794, 801	792, 807	801, 800	797, 807	802, 809

**Fig.6.8.9** Results of tensile tests for T welded joints



**Fig.6.9.1** Cut-off plan of test piece for pitting corrosion resistance test

**Table 6.9.1** Results of pitting corrosion resistance tests for T welded joints

Test Clad Steel Plate	Repair Welding	Test Result				
		CPT	20°C	25°C	30°C	35°C
SUS329J3L	T1, 0	35°C	○○○	○○○	○○○	× × ×
↑	T2, 1	30°C	○○○	○○○	○○×	/
↑	T3, 2	35°C	○○○	○○○	○○○	× × ×

○ No Pitting    × Existent Pitting

**Reference Data**

Test Steel Plate	CPT
SUS329J3L-Clad, Base Metal	50°C
SUS316L-Clad, Base Metal	15°C
SUS329J3L-Solid, FCAW 20kJ/cm	35°C
SUS329J3L-Solid, SAW 30kJ/cm	40°C



## 第 7 章

# ケミカルタンカー建造への 二相ステンレスクラッド鋼板・ ソリッド鋼板 適用に関する 総合評価

## 第7章 目 次

7.1 はじめに	247
7.2 本研究成果の総括	247
7.2.1 SUS329J3L クラッド鋼板接合界面の破壊靱性・ 疲労亀裂伝播特性	247
7.2.2 SUS329J3L クラッド鋼板およびソリッド鋼板の 溶接性	248
7.2.3 溶接継手部の疲労強度	249
7.2.4 カーゴタンク内トランスバルクヘッドと二重底 との交差部十字溶接継手止端部の応力集中係数	251
7.2.5 SUS329J3L クラッド鋼板およびソリッド鋼板 溶接継手部の耐食性	252
7.3 ステンレス鋼板適用範囲と使用するステンレス鋼板の 留意点	254
7.4 溶接継手の適用範囲	255
7.4.1 SUS329J3L ソリッド鋼板同士の突合せ溶接継手	256
7.4.2 SUS329J3L クラッド鋼板同士の突合せ溶接継手	256
7.4.3 SUS329J3L クラッド鋼板と SUS329J3L ソリッド鋼板 との突合せ溶接継手	257
7.4.4 SUS329J3L クラッド鋼板と軟鋼板との 突合せ溶接継手	257
7.4.5 SUS329J3L ソリッド鋼板同士の部分溶け込み T 溶接継手	257
7.4.6 SUS329J3L クラッド鋼板同士の隅肉 T 溶接継手	257
7.4.7 SUS329J3L クラッド鋼板と SUS329J3L ソリッド鋼板 との完全溶け込み T 溶接継手	258
7.4.8 SUS329J3L クラッド鋼板と SUS329J3L ソリッド鋼板 との部分溶け込み T 溶接継手	258

7.5 溶接における留意点 .....	258
7.6 溶接施工の条件 .....	259
7.6.1 溶接要員 .....	259
7.6.2 溶接施工要領書 .....	259
7.7 品質管理 .....	259
7.8 まとめ .....	260
参考文献 .....	261
図表 .....	262

## 7.1 はじめに

SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板とを使用して、ケミカルタンカー建造を実現するために、本研究では、

- SUS329J3Lクラッド鋼板接合界面の強度・信頼性(破壊靱性・疲労亀裂伝播特性)を把握・検討・評価.
- SUS329J3Lクラッド鋼板およびソリッド鋼板の溶接性に関する把握・検討・評価.
- 溶接継手部の疲労強度に関する把握・検討・評価.
- カーゴタンク内トランスバルクヘッドと二重底との交差部十字溶接継手止端部の応力集中に関する検討・評価.
- SUS329J3Lクラッド鋼板およびソリッド鋼板(特に溶接継手部)の耐食性に関する把握・検討・評価.

などを実施した。

前章までに述べて来た、これら把握・検討・評価結果によれば、これまでに実績の多い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て来たケミカルタンカーと同様、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可能であるばかりか、むしろ性能の良いケミカルタンカーが建造出来ることが明らかになった。

本章では、前章までに述べて来た、本研究の成果を総括すると共に、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へ向けての、溶接継手の適用範囲や、溶接における留意点等について述べる。

## 7.2 本研究成果の総括

### 7.2.1 SUS329J3Lクラッド鋼板接合界面の破壊靱性・疲労亀裂伝播特性

十字溶接継手引張試験片(Fig.2.3.1参照)と、CT型試験片(Fig.2.3.2参照)によって求めた、SUS329J3Lクラッド鋼板接合界面の破壊靱性値( $K_C$ 値)は、SUS329J3L鋼板TIGWおよびFCAW突合せ溶接金属の $K_C$ 値と、 $-100^{\circ}\text{C} \sim -170^{\circ}\text{C}$ 程度で略同等であることが明らかになった

(Fig.2.3.14 参照)。

したがって、新しく製造された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。

また、CT型試験片(Fig.2.4.1 参照)によって求めた、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(SM570, WEL-TEN780E)母材の疲労亀裂伝播特性と同等であることが明らかになった(Fig.2.4.15 参照)。

さらに、CCT型試験片(中央切欠付引張試験片)(Fig.2.4.2 参照)によって求めた、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、SUS329J3L鋼板母材(板厚10mm)の疲労亀裂伝播特性と概ね同等であることが明らかになった(Fig.2.4.16 参照)。

したがって、新しく製造された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、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。

## 7.2.2 SUS329J3Lクラッド鋼板およびソリッド鋼板の溶接性

SUS329J3Lソリッド鋼板とSUS316Lクラッド鋼板との完全溶け込みT継手(Fig.3.3.1 参照)による、“T継手初層高温割れ確認試験結果”によれば、開先角度 $30^{\circ}$ ～ $50^{\circ}$ の範囲では、良好な溶接性を示し、初層高温割れ発生は確認されなかった(Table 3.3.3 参照)。

過剰溶接入熱の影響度確認試験結果、すなわち、SUS329J3Lソリッド鋼板(板厚16mm)同士の突合せ溶接継手では、入熱量 $14\text{kJ/cm}$ ・ $40\text{kJ/cm}$ のFCAWも、入熱量 $35\text{kJ/cm}$ ・ $50\text{kJ/cm}$ のFCAW+SAWも、継手引張強さ(Fig.3.4.2 参照)、継手V-ノッチシャルピー衝撃試験結果(Fig.3.4.3 参照)、硬さ分布測定結果(Fig.3.4.6 参照)、溶接金属の化学成分分析結果(Table 3.4.2 参照)、フェライト量測定結果(Table 3.4.3 参照)全てにおいて、問題無いことが確認された。

さらに、SUS329J3Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手では、入熱量 $20\text{kJ/cm}$ 、 $44\text{kJ/cm}$ のFCAWも、入熱量 $30\text{kJ/cm}$ 、 $50\text{kJ/cm}$ のFCAW+SAW

も、継手引張強さには全く問題無いことが確認された(**Table3.5.2** 参照)。しかし、入熱量 44kJ/cmのFCAWでは、溶接継手全長にわたって、合せ材(SUS329J3L鋼板)と母材(軟鋼板)との接合界面の溶接金属部分にスラグ巻込みがあることが確認された。

したがって、過剰入熱での溶接は避けるべきである。

SUS329J3Lソリッド鋼板(バルクヘッドを想定)とSUS316Lクラッド鋼板(二重底を想定)、およびSUS329J3Lソリッド鋼板同士の完全溶け込み十字溶接継手(開先角度40°・50°・60°)の引張試験結果では、全ての試験片において破断位置はSUS329J3L鋼板母材であり(**Fig.3.6.6** 参照)、引張強さも全て750N/mm<sup>2</sup>以上で(**Fig.3.6.4**, **Fig.3.6.5** 参照)、優れた強度特性を有していることが確認された。

以上により、SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板とを適用したケミカルタンカー建造は、これまでに実績の多いSUS316Lクラッド鋼板や、SUS316LNソリッド鋼板を使用した場合と略同等に、現場施工が可能であることが確認された。

### 7.2.3 溶接継手部の疲労強度

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伝達型・荷重非伝達型完全溶け込み十字溶接継手、さらに、SUS329J3Lソリッド鋼板同士の荷重非伝達型十字隅肉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・評価した結果、以下のことが明らかになった。

- ① SUS329J3Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手の疲労強度(**Fig.4.8.1**中①参照)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.4.8.1**中③参照)の

$$7.77 \times 10^3 / 6.30 \times 10^3 = 1.23 \div 1.2$$

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.4.8.1** 中 ④参照)は, SUS316LNソリッド鋼板同士の突合せ溶接継手の疲労強度(**Fig.4.8.1** 中 ⑤参照)の

$$5.90 \times 10^3 / 5.20 \times 10^3 = 1.13 \doteq 1.1$$

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伝達型完全溶け込み十字溶接継手の疲労強度(**Fig.4.8.1** 中 ②参照)は, 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(**Fig.4.8.1** 中 ④参照)の

$$7.13 \times 10^3 / 5.90 \times 10^3 = 1.21 \doteq 1.2$$

約1.2倍強い。

- ④ 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.4.8.1** 中 ③参照)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(**Fig.4.8.1** 中 ④参照)の

$$6.30 \times 10^3 / 5.90 \times 10^3 = 1.07 \doteq 1.1$$

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, 各種溶接継手共, 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。

また, 十字溶接継手では, 止端半径が10mm以上になるようなドレッシング処理をすれば, 応力比0.1の条件で,  $2 \times 10^6$ 回疲労強度( $2 \times 10^6$ 回応力範囲)は,  $200\text{N/mm}^2$ 程度以上確保できることが明らかになった(**Fig.4.7.1** 参照)。

#### 7.2.4 カーゴタンク内トランスバルクヘッドと二重底との 交差部十字溶接継手止端部の応力集中係数

SUS329J3Lソリッド鋼板製の横隔壁の応力が、SUSクラッド鋼板製の二重底頂板溶接部の疲労強度に及ぼす影響を把握するための基礎検討として、SUS329J3Lソリッド鋼板製のコルゲートバルクヘッドと、SUS316Lクラッド鋼板製の二重底との同軸十字溶接継手部の、一軸および二軸荷重下の静的FEM解析を実施した。

十字溶接継手の各溶接止端部の応力集中を評価した結果、以下のような知見が得られた。

- ① コルゲートバルクヘッド側(SUS329J3L鋼板側)の脚長について、0.5t, 0.7t, 1.0t(t:板厚)を比較した結果、最も脚長が大きい脚長1.0tであれば、水平部材側止端部において荷重比(T/L)の増加に伴い応力集中係数が増加する傾向は見られず、十分な脚長寸法であると言える。また、二重底側(軟鋼板側)が隅肉溶接である場合、コルゲートバルクヘッド側と二重底側の脚長は揃え、水平部材上下の両止端部の位置が対象である方が良いと言える。
- ② コルゲートバルクヘッド側すなわちSUS329J3L鋼板と、二重底側すなわち軟鋼板のフロア材との板厚が同厚の場合、二重底側は深溶け込みとし、その脚長はコルゲートバルクヘッド側の脚長と同程度(各脚部が水平軸対称となる形状)にすることが好ましく、コルゲートバルクヘッド側の脚長が1.0tの場合は、二重底フロア側の脚長も1.0tにすることが良いと考えられる。

さらに、SUS329J3Lソリッド鋼板製のコルゲートバルクヘッドと、SUS316Lクラッド鋼板製の二重底との十字溶接継手部に、目違いが生じる場合を想定して、脚長の組み合わせおよび二重底側の溶接条件が異なる種々の十字溶接継手の一軸および二軸荷重下の静的FEM解析を実施した。十字溶接継手の各溶接止端部の応力集中を評価した結果、以下のような知見が得られた。

- ① 垂直部材に目違いのある十字溶接継手では、交差部の中心から離れた位置にある水平部材上の溶接止端部、および中心に近い垂直



部材上の溶接止端部の応力集中係数が増大する。特に水平部材上の溶接止端部では二軸側(垂直方向)荷重の増加とともに応力集中係数が大きくなるため、目違いには十分な配慮が必要である。

- ② 二重底頂板上下面にある溶接止端部の相対位置と応力集中係数との関係の考察から、二重底側の溶接条件が同じ十字溶接継手では、一軸引張荷重条件において、各止端部の応力集中係数はほぼ一つの曲線上に分布する。相対位置の差が±10mmの範囲では、止端部が交差部から外側にあるほど応力集中係数は小さい。二軸引張荷重条件では、目違い+5mmまでは一軸引張荷重条件と同じ傾向となるが、さらに目違いが大きいと、相対位置の差も大きくなり、外側にある止端部の応力集中係数は大きくなる。
- ③ さらに、構造設計の都合上もしくは施工により、目違いが生じ得る場合、二重底頂板上下の脚部形状・寸法は同等であること、二重底側の溶接条件は、深溶け込みであることが望ましい。
- ④ コルゲートバルクヘッド側の垂直部材に対して二重底側の垂直部材の板厚を厚くした十字溶接継手では、二重底側の溶接部の開先形状に関係なく、モールド合わせにすると、同軸合わせに比べて、極端な応力集中の増減部分が発生するために、モールド合わせは避けることが望ましい。また、二重底側の板厚を厚くする場合には、その溶接部は深溶け込み溶接にすべきであると言える。

#### 7.2.5 SUS329J3Lクラッド鋼板およびソリッド鋼板溶接継手部の耐食性

就航後の耐食性に関する信頼性を確保するために、SUS329J3Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接(通常入熱溶接および過剰入熱溶接)継手と、手直し(0回、1回および2回)溶接した、SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との完全溶け込みT溶接継手を供試して、各種耐食性について確認試験を実施した。さらに、従来、実績の多いSUS316Lクラッド鋼板溶接継手と比較・検討・評価し、以下の結論が得られた。

- ① 過剰入熱溶接(FCAW 44kJ/cm, FCAW+SAW 50kJ/cm)による突合せ

溶接継手でも、断面マクロ組織や断面ミクロ組織に異常はなかった。

- ② 溶接金属の化学成分分析結果では、耐孔食性指標であるPI値が、FCAW溶接金属では母材と略同等であったが、SAW50kJ/cm溶接金属では低い値を示した。SAWの過剰入熱溶接は要注意である。
- ③ 突合せ溶接継手の溶接金属とHAZのフェライト量測定結果によれば、FCAW継手では略30%~70%の範囲内に入っていたが、SAW継手、特にSAW50kJ/cmの溶接継手では、フェライト量が30%以下の測定値が多かった。明らかに、SAW50kJ/cmは入熱量が大き過ぎて、溶接継手は不安定であると言える。
- ④ 過剰入熱溶接による突合せ溶接継手でも、ビッカース硬さ分布測定結果、継手引張試験結果、およびV-ノッチシャルピー衝撃試験結果全てにおいて、全く問題無いという結果であった。
- ⑤ 突合せ溶接継手の耐孔食性試験結果では、孔食発生臨界温度であるCPT値が、SAW50kJ/cm継手で5℃以下であったが、他の継手では、耐孔食性は良好であった。また、SUS316Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手より、耐孔食性は優れていることが明らかになった。
- ⑥ 突合せ溶接継手の耐粒界腐食試験結果、および沸騰5%硫酸腐食試験結果では、SUS329J3Lソリッド鋼板同士の突合せ溶接継手の腐食速度と略同等であり、SUS316Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手より、耐食性は優れていることが明らかになった。
- ⑦ 載荷試験として実施した突合せ溶接継手の濃硫酸腐食試験結果では、工業用硫酸に対しては、全ての供試溶接継手共、腐食速度は略ゼロであった。また、試薬特級硫酸に対しては、SUS329J3Lソリッド鋼板同士やSUS316Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手より、腐食速度は若干速いという結果であった。
- ⑧ 載荷試験として実施した突合せ溶接継手のりん酸腐食試験結果では、SUS329J3Lソリッド鋼板同士の突合せ溶接継手と共に、腐食速度は略ゼロであった。SUS316Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手より、耐食性は非常に優れていることが明らかになった。
- ⑨ 突合せ溶接継手の応力腐食割れ試験結果では、SUS329J3Lソリッド

鋼板同士やSUS316Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手と略同等で、良好であった。

- ⑩ 手直し(0回, 1回 および 2回)溶接した, SUS329J3Lクラッド鋼板と SUS329J3Lソリッド鋼板との完全溶け込みT溶接継手の, 断面マクロ組織や断面ミクロ組織観察結果では, 手直し溶接による顕著な変化は見られなかった。また, 析出物も確認されなかった。
- ⑪ 供試したT溶接継手溶接金属のフェライト量測定結果では, 全てのT溶接継手で, フェライト量は30%~70%の範囲内であった。また, 手直し溶接の回数の影響も認められなかった。
- ⑫ 供試したT溶接継手のビッカース硬さ分布測定結果, および継手引張試験結果では, 全ての試験結果において, 何等問題無いことが明らかになった。
- ⑬ 供試したT溶接継手の耐孔食性試験結果では, 手直し溶接の回数に依らず, CPT(孔食発生臨界温度)は30℃~35℃であり, 耐孔食性は良好であることが明らかになった。

以上により, SUS329J3Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手部の耐食性は, SUS329J3Lソリッド鋼板同士の突合せ溶接継手部と略同等であり, 良好であると言える。また, ケミカルタンカーでの実績が多い, SUS316Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手部より, 耐食性は優れていることが明らかになった。

しかし, 過剰入熱の溶接は避けるべきである。

以上を総括すると, 耐食性の観点からは, SUS329J3Lクラッド鋼板と SUS329J3Lソリッド鋼板とを組み合わせでの, ケミカルタンカーカーゴタンク構造の建造は可能であると言える。

### 7.3 ステンレス鋼板適用範囲と使用するステンレス鋼板の留意点

ケミカルタンカーカーゴタンクの構成を Fig.7.3.1 に示す。

SUS329J3Lクラッド鋼板は, バラストタンク・暴露部およびその他区画と, カーゴタンクが隣接する場所に使用される。

SUS329J3Lソリッド鋼板は, カーゴタンク同士の隔壁として使用される。

また、カーゴタンクを構成する箇所以外は、軟鋼板もしくは高張力鋼板が使用される。

**Table 7.3.1**に、日本海事協会鋼船規則にある二相ステンレス(SUS329J3L)鋼板の化学成分や、海外で使用されている二相ステンレス(S32205, S31803)鋼板化学成分の規定値を示す<sup>7.1), 7.2)</sup>。

日本海事協会鋼船規則にあるSUS329J3Lは、S32205とS31803で規定されている化学成分を満足している。

海外で建造されるケミカルタンカーに使用される二相ステンレス鋼板の化学成分は、S32205と同等である。また、船級材として、LR32205鋼板(英国)やNV32205鋼板(ノルウェー)などが規定されている。

日本海事協会鋼船規則にあるSUS329J3Lでは、CrとMoの規定値の下限値がS31803と同じであり、S32205より低い値になっている。したがって、ケミカルタンカーに採用する際は、S32205の下限値を満足する化学成分であることを確認して採用することが重要である。

なお、二相ステンレスクラッド鋼板合せ材についても同様の化学成分の規定が適用される。

#### 7.4 溶接継手の適用範囲

主な溶接継手を示したケミカルタンカーの中央横断面図を、**Fig.7.4.1**に示す。

また、SUS329J3Lソリッド鋼板やSUS329J3Lクラッド鋼板に関連した溶接継手の例を、**Fig.7.4.2**～**Fig.7.4.9**に示す。

溶接継手としては、SUS329J3Lソリッド鋼板同士の突合せ溶接継手、SUS329J3Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手、SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との突合せ溶接継手、SUS329J3Lクラッド鋼板と軟鋼板との突合せ溶接継手、SUS329J3Lソリッド鋼板同士の部分溶け込みT溶接継手もしくは隅肉T溶接継手、SUS329J3Lクラッド鋼板同士の隅肉T溶接継手、SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との完全溶け込みT溶接継手、およびSUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との部分溶け込みT溶接継手などがある<sup>7.3),7.4)</sup>。

溶接姿勢は、水平、下向き、立向き上進、横向きおよび上向きの姿勢が適用される<sup>7.5)</sup>。

#### 7.4.1 SUS329J3L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(**Fig.7.4.2(a)**, **(b)**)は、カーゴタンク同士の隔壁部分に適用される。

工場溶接(以下、地上ステージと称す)には、FCAWやSAWが適用され、一般には下向き姿勢で溶接される。溶接材料としてはSUS329J3L鋼の共金系が使用される<sup>7.6)</sup>。

現場溶接(以下、船台ステージと称す)では、FCAWが適用され、立向き上進溶接となる。溶接材料としてはSUS329J3L鋼の共金系が使用される<sup>7.7)</sup>。

#### 7.4.2 SUS329J3Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手

SUS329J3Lクラッド鋼板同士の突合せ溶接継手(**Fig.7.4.3(a)**, **(b)**, **(c)**)は、バラスタタンク、暴露部およびその他区画と、カーゴタンクが隣接する場所に適用される<sup>7.3)</sup>。

地上ステージでの溶接には、FCAWやSAWが適用され、一般には下向き姿勢で溶接される。FCAWの場合、軟鋼板(もしくは高張力鋼板)側にルート部が来るように開先をとり、軟鋼板側の数層の溶接には炭素鋼板用溶接材料が使用される。合せ材側は、軟鋼板の溶接が被らないように注意を払い、合せ材(SUS329J3L鋼板)側はSUS329J3L鋼の共金系溶接材料を使用する(**Fig.7.4.3(a)**)。

なお、合せ材(SUS329J3L鋼板)側にルート部が来るように開先をとる場合は、溶接材料は全てSUS329J3L鋼の共金系溶接材料を使用する(**Fig.7.4.3(b)**)。

SAWでは、合せ材(SUS329J3L鋼板)側にルート部が来るように開先をとる。軟鋼板(もしくは高張力鋼板)側の溶接には、炭素鋼板用溶接材料が使用される。合せ材(SUS329J3L鋼板)側のSAWは、SUS329J3L鋼の共金系溶接材料を使用する(**Fig.7.4.3(c)**)。

船台ステージでは、FCAWが適用され、下向き溶接、立向き上進溶接

および横向き溶接となる。開先や使用される溶接材料は地上ステージの場合と同じである。

#### 7.4.3 SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との突合せ溶接継手

SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との突合せ溶接継手(**Fig.7.4.4**)は、カーゴタンク底部のサクシオンウェル(ポンプ下の受皿)にSUS329J3Lソリッド鋼板が使用されるために、適用される<sup>7.3)</sup>。一般的に地上ステージで溶接され、下向きFCAWである。開先は、レ型開先が適用され、SUS329J3Lクラッド鋼板側に開先をとる。溶接材料はSUS329J3L鋼の共金系材料が使用される。

#### 7.4.4 SUS329J3Lクラッド鋼板と軟鋼板との突合せ溶接継手

SUS329J3Lクラッド鋼板と軟鋼板(もしくは高張力鋼板)との突合せ溶接継手(**Fig.7.4.5**)は、カーゴタンクとバラスタタンク・暴露部やその他区画近傍の、使用目的が変わる部分に適用される<sup>7.7)</sup>。この継手は、カーゴタンクから外れるよう設計する必要がある。

一般的に、SAW溶接が適用され、7.4.2項と同様の方法で溶接される。

#### 7.4.5 SUS329J3Lソリッド鋼板同士の部分溶け込みT溶接継手

SUS329J3Lソリッド鋼板同士の部分溶け込みT溶接継手(**Fig.7.4.6**)は、カーゴタンクの横隔壁と縦隔壁の交差部に適用される<sup>7.7)</sup>。基本的には、地上ステージで下向きFCAWで施工される。

#### 7.4.6 SUS329J3Lクラッド鋼板同士の隅肉T溶接継手

SUS329J3Lクラッド鋼板同士の隅肉T溶接継手(**Fig.7.4.7**)は、バラスタタンク、暴露部およびその他区画と、カーゴタンクが隣接する場所に適用される<sup>7.3)</sup>。

地上ステージでの溶接には、FCAWが適用され、一般には下向き姿勢で溶接される。SUS329J3L鋼の共金系溶接材料が使用される。

船台ステージでは、FCAWが適用され、立向き上進溶接となる。SUS329J3L鋼の共金系溶接材料が使用される。

#### 7.4.7 SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との完全溶け込みT溶接継手

SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との完全溶け込みT溶接継手(**Fig.7.4.8**)は、カーゴタンク隔壁下部と二重底頂板との溶接に適用される<sup>7.3)</sup>。日本海事協会鋼船規則では、波型隔壁下部のRエンドから200mmの平行部分は完全溶け込み溶接とするよう規定されている。

一般的には、船台ステージで、水平姿勢のFCAWが適用され、SUS329J3L鋼の共金系溶接材料が使用される。

#### 7.4.8 SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との部分溶け込みT溶接継手

SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板との部分溶け込みT溶接継手(**Fig.7.4.9**)は、カーゴタンク隔壁とバラスタタンク・暴露部およびその他区画との溶接継手に適用される<sup>7.3)</sup>。

地上、船台ステージとも、FCAWが適用され、水平溶接、立向き上進溶接、横向き溶接および上向き溶接となる。SUS329J3L鋼の共金系溶接材料が使用される。

### 7.5 溶接における留意点

475℃脆化およびシグマ相脆化が懸念されるので、パス間温度を150℃以下に管理し、溶接入熱は、35kJ/cm以下にする必要がある。また、溶接後熱処理は避けることが望ましい。

溶接入熱が小さ過ぎると、フェライト量が多くなり、耐食性や靱性の劣化が起こる可能性があるため、溶接入熱は5kJ/cm以上にする必要がある<sup>7.4)</sup>。

溶接部のフェライト量が多いほど、水素割れ感受性が高くなり、溶接部において、拡散性水素に起因する低温割れの発生が懸念されるので、溶接材料の保管、管理には留意が必要である。また、開先面の水分、油分

および錆等は除去する必要がある<sup>7.8)</sup>。

## 7.6 溶接施工の条件

### 7.6.1 溶接要員

SMAW, FCAW, TIG溶接を施工する溶接要員は、船級規則に則した、技量試験を受け、承認を得る必要がある。また、ステンレスの溶接は特に力量が必要であるので、教育訓練を十分に行う必要がある。

### 7.6.2 溶接施工要領書

船級協会の規定に従い、溶接施工法承認試験を行わなければならない。手順としては、溶接施工要領書案(pWPS)および試験方案を作成し、承認を得て、試験を行う。試験後、試験成績書(WPQR)と試験成績書に基づいた溶接施工要領書(WPS)を作成し、船級協会へ提出して承認を得る<sup>7.9)</sup>。

## 7.7 品質管理

オーステナイト系ステンレス鋼板の溶接後の耐食性等、品質の確認は容易には行えない。これに対し、二相ステンレス鋼板は、**Fig.7.7.1**に示すフェライトスコープを用いれば、溶接後の耐食性等の品質確認を容易に行うことができる。

各船級規則では、耐食性や靱性を確保するために、フェライト量を30%～70%の範囲内にすることを規定している<sup>7.10)</sup>。

フェライト量の測定方法は、プローブを溶接金属や熱影響部に接触させて行う。計測前には、キャリブレーション用標準資料を用いて校正する必要がある。

7.4.4項で述べた、SUS329J3Lクラッド鋼板と軟鋼板との突合せ溶接継手においては、希釈率により、フェライト量が30%を下回る可能性がある。この継手は、カーゴタンクから外れる区画(バラスタタンクやその他区画)になるので、耐食性等の影響は関係ないと言える。そこで、日本海事協会が発行した、二相ステンレス鋼板の溶接に関するガイドラインのフェライト量



測定では、“異材継手の場合や二相ステンレス系の溶接材料を使用しない場合は、本会が適当と認めるところによる”とあるので、同継手については、カーゴタンクから除外する部分であることを溶接施工要領書(WPS)に明記し、承認を得る必要がある。

## 7.8 まとめ

本研究で得られた成果を総括すると共に、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へ向けての溶接継手の適用範囲，溶接における留意点，溶接施工の条件，品質管理などについて述べた。

SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板とを使用すれば，実績の多いSUS316Lクラッド鋼板とSUS316LNソリッド鋼板とを使用した場合より，強度・信頼性や耐食性の優れた，高性能なケミカルタンカーの建造が可能であることが明らかになった。

## 参 考 文 献

- 7.1) 岡崎 司:二相ステンレス鋼の接合—溶接接合について, 日本鋼構造協会誌, 第19号(2014.10.31.), pp.7-9.
- 7.2) 一般財団法人 日本海事協会:2017 鋼船規則 K編 材料(2017.5.), pp.24-27.
- 7.3) 株式会社 臼杵造船所:溶接施工要領 —二相ステンレスクラッド鋼の溶接施工— (2017.7.20.), pp.1-53.
- 7.4) 岩崎祐二, 福元成雄, 井上裕滋:二相ステンレス鋼の溶接金属部の組織形成に及ぼす冷却速度の影響, 溶接学会 全国大会講演概要, 第89号(2011.8.18.), pp.12-13.
- 7.5) 丸山敏治:二相ステンレス鋼溶接材料, 配管技術, 第42巻第12号(2000.10.1.), pp.33-37.
- 7.6) 小川和博:二相ステンレス鋼板の発展の歴史と現状, 溶接構造シンポジウム講演論文集(2014.), pp.533-540.
- 7.7) 株式会社 臼杵造船所:溶接施工要領 —二相ステンレス鋼の溶接施工— (2013.12.26.), pp.1-31.
- 7.8) 菊池靖志, Lundin C., Khan K.K.:二相ステンレス鋼溶接金属の水素割れにおよぼすフェライト量および水素量の影響, 溶接学会 全国大会講演概要, 第49号(1991.8.), pp.184-185.
- 7.9) 一般財団法人 日本海事協会:2017 鋼船規則 M編 溶接(2017.5.), pp.75-87.
- 7.10) 一般財団法人 日本海事協会:二相ステンレス鋼に関するガイドライン(2014.1.), pp.1-19.

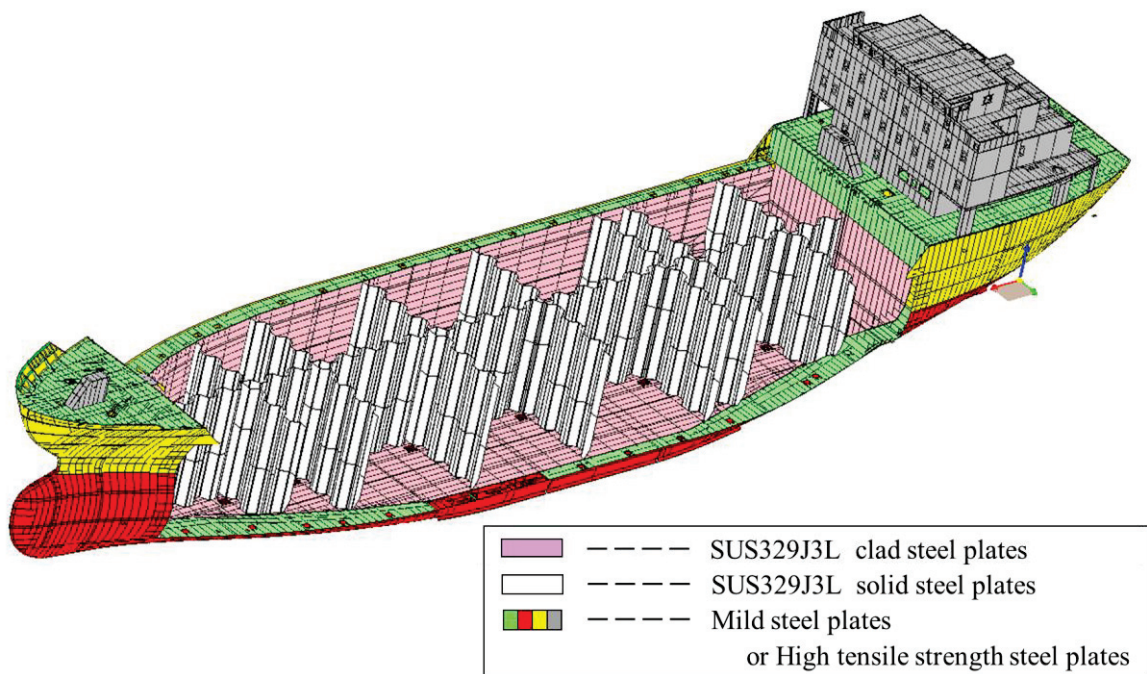


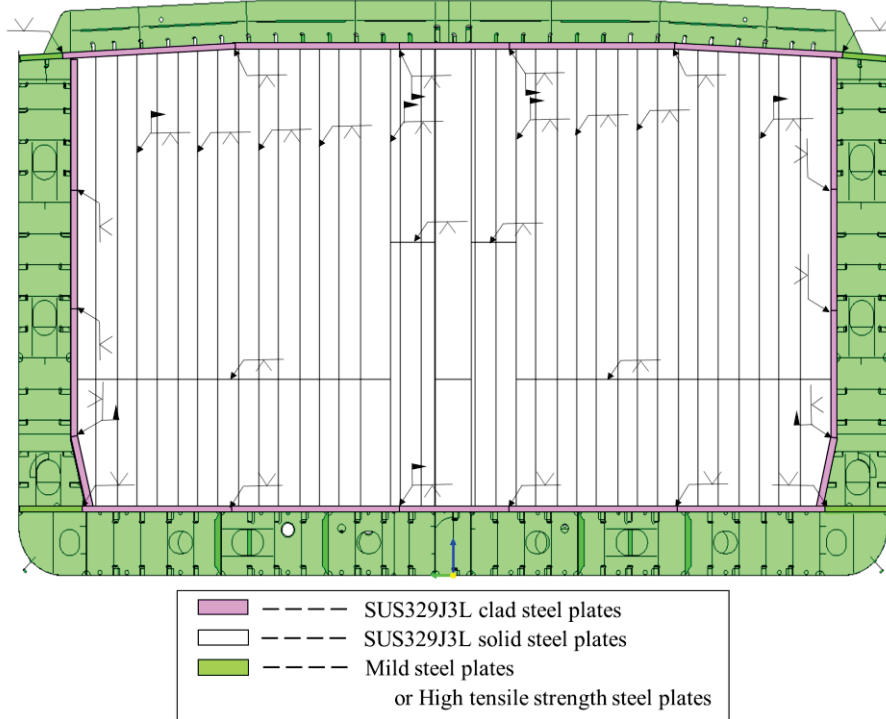
Fig.7.3.1 Construction of cargo tank

Table7.3.1 Chemical composition on rule

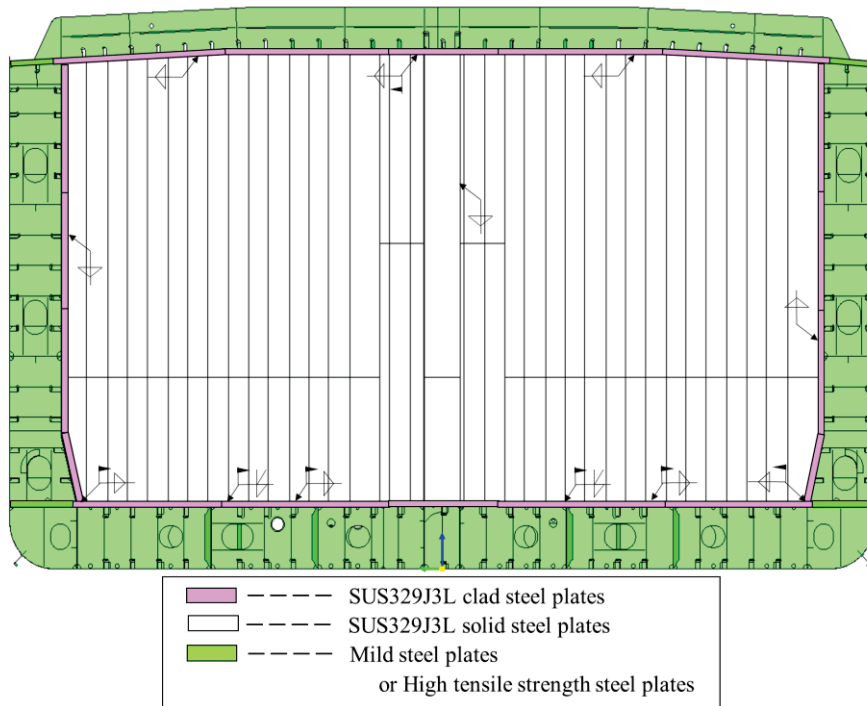
	C	Si	Mn	P	S
SUS329J3L(NK rule)	≦0.030	≦1.00	≦2.00	≦0.040	≦0.030
UNS S32205(SUS329J3L)	≦0.030	≦1.00	≦2.00	≦0.030	≦0.020
UNS S31803(SUS329J3L)	≦0.030	≦1.00	≦2.00	≦0.030	≦0.020

(wt%)

Cr	Ni	Mo	N
21.00~24.00	4.50~6.50	2.50~3.50	0.08~0.20
22.00~23.00	4.50~6.50	3.00~3.50	0.14~0.20
21.00~23.00	4.50~6.50	2.50~3.50	0.08~0.20

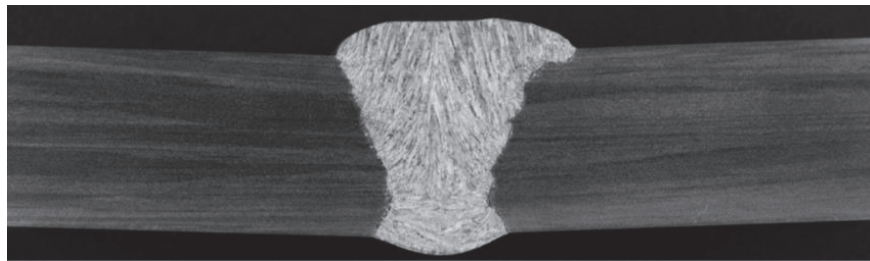


(a) For butt joint weld

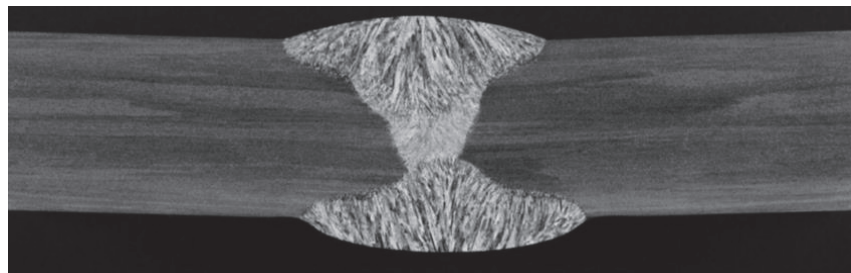


(b) For T joint weld

**Fig.7.4.1 Cross-sections of cargo tank**

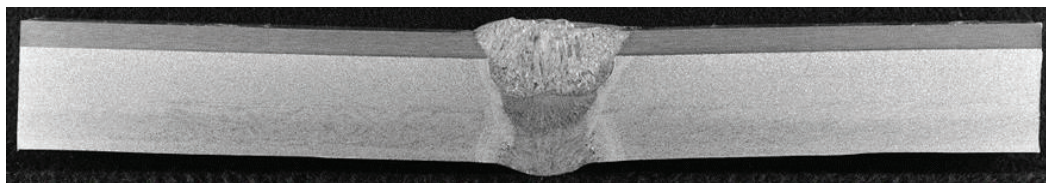


(a) Butt welded joint (FCAW)

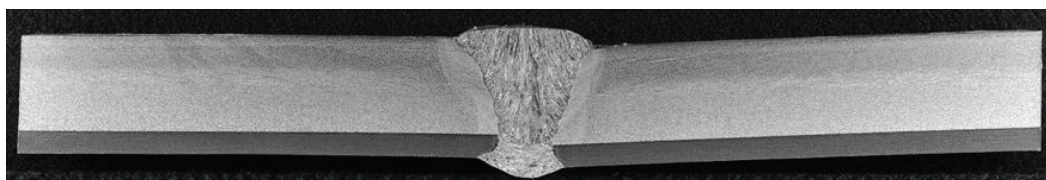


(b) Butt welded joint (FCAW+SAW)

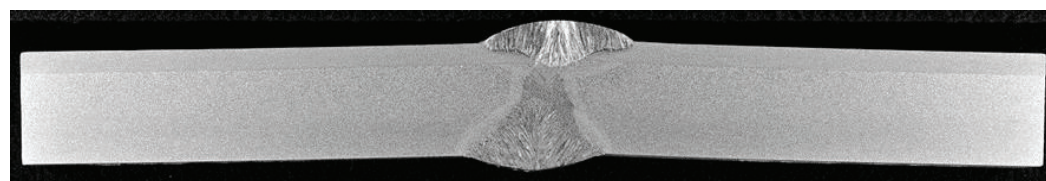
**Fig.7.4.2 Macrographs of welded joints  
(SUS329J3L steel plate  
+ SUS329J3L steel plate)**



(a) Butt welded joint (FCAW)

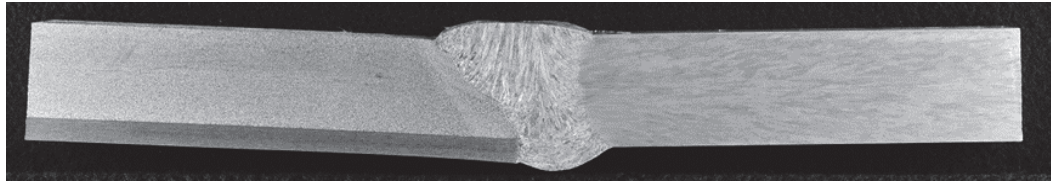


(b) Butt welded joint (FCAW)



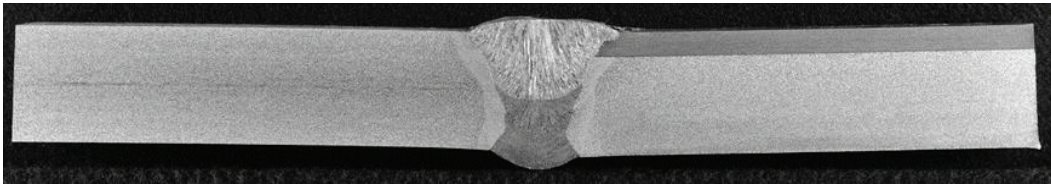
(c) Butt welded joint (FCAW+SAW)

**Fig.7.4.3 Macrographs of welded joints  
(SUS329J3L clad steel plate  
+ SUS329J3L clad steel plate)**



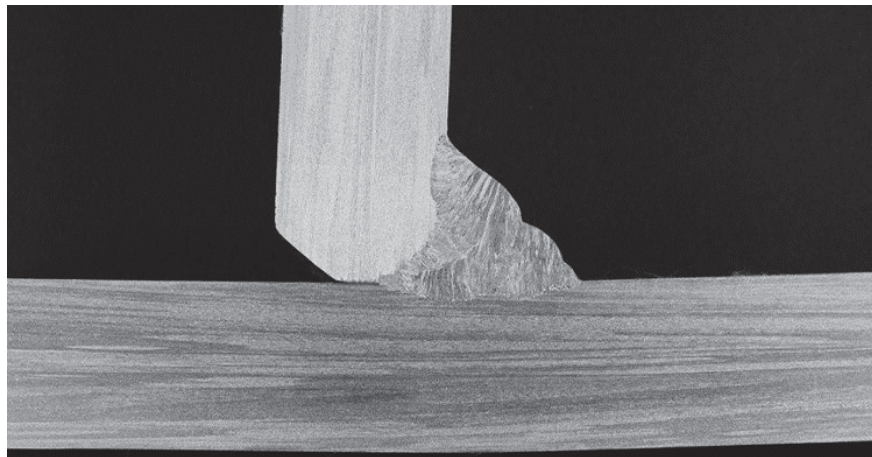
Butt welded joint (FCAW)

**Fig.7.4.4 Macrograph of welded joint  
(SUS329J3L clad steel plate  
+ SUS329J3L steel plate)**



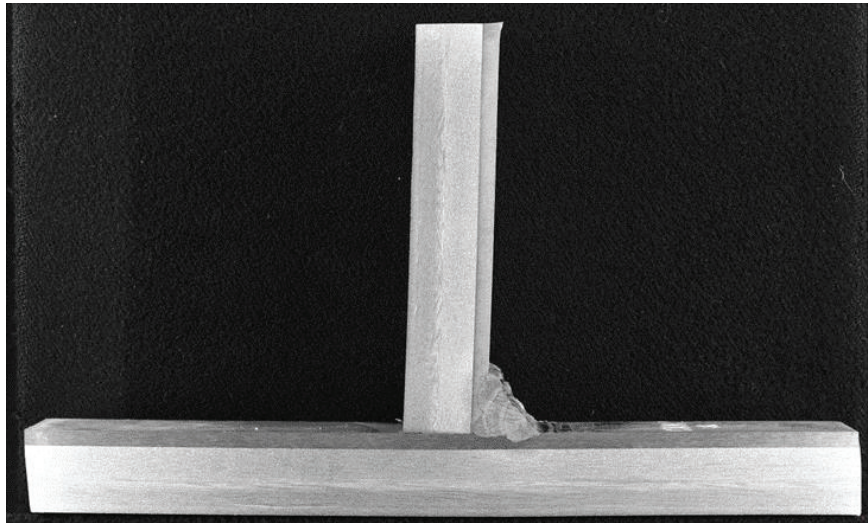
Butt welded joint (FCAW+SAW)

**Fig.7.4.5 Macrograph of welded joint  
(SUS329J3L clad steel plate  
+ Mild steel plate)**



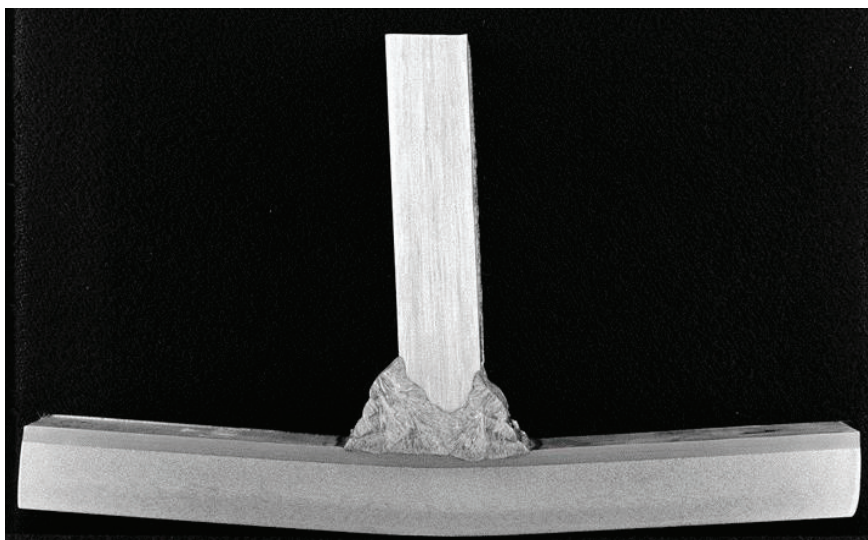
Partial penetration welded T joint (FCAW)

**Fig.7.4.6 Macrograph of welded joint  
(SUS329J3L steel plate  
+ SUS329J3L steel plate)**



Fillet welded T joint(FCAW)

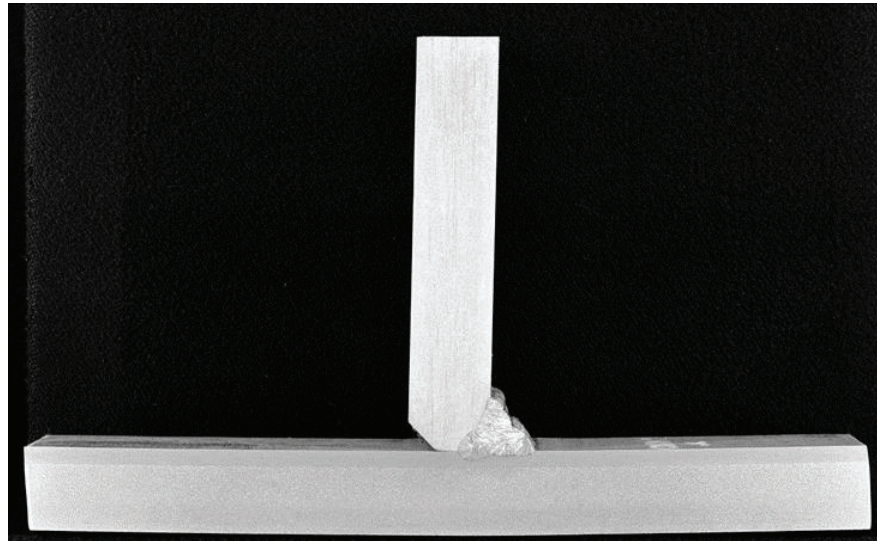
**Fig.7.4.7 Macrograph of welded joint  
(SUS329J3L clad steel plate  
+ SUS329J3L clad steel plate)**



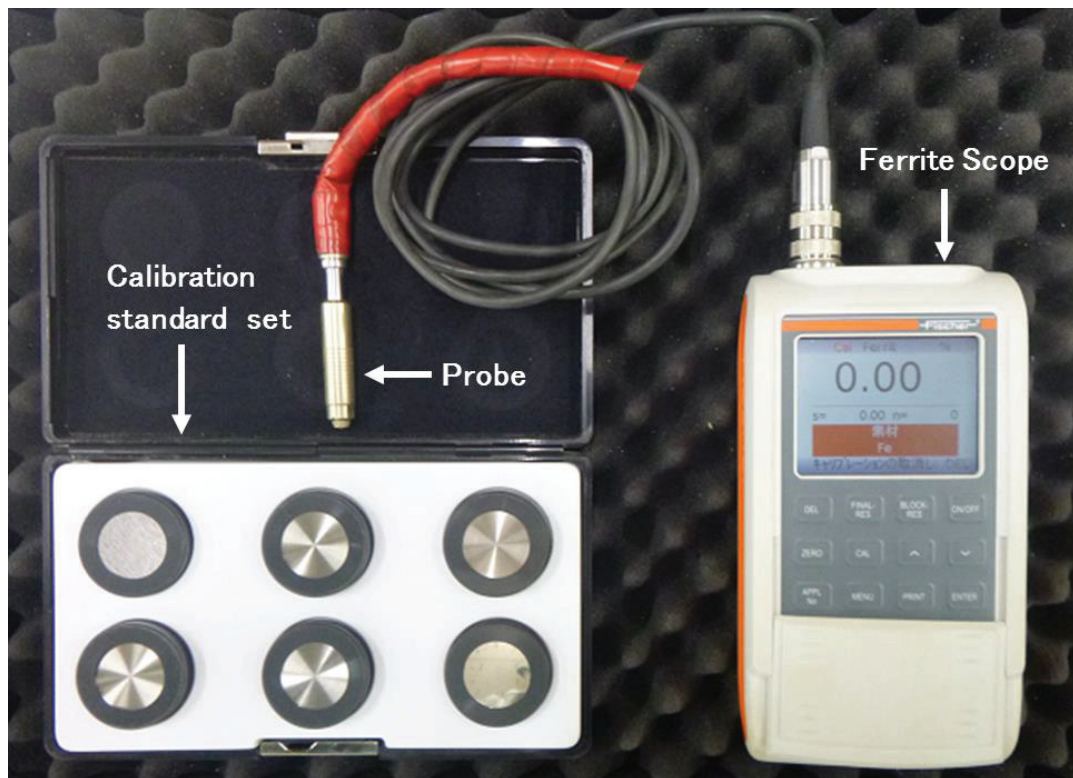
Full penetration welded T joint(FCAW)

**Fig.7.4.8 Macrograph of welded joint  
(SUS329J3L clad steel plate  
+ SUS329J3L steel plate)**





Partial penetration welded T joint (FCAW)  
**Fig.7.4.9 Macrograph of welded joint**  
(SUS329J3L clad steel plate  
+ SUS329J3L steel plate)



**Fig.7.7.1 Ferrite scope**

# 第 8 章

## 結 論

## 第 8 章 目 次

8.1 結 言 .....	271
8.2 研究成果実用化の現状 .....	271
8.2.1 ハイブリッドカーゴタンクタイプ ケミカルタンカーの建造 .....	271
8.2.2 オール二相ステンレス鋼板カーゴタンクタイプ ケミカルタンカーの建造 .....	272
図 表 .....	273

## 8.1 結 言

SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板とを使用して、ケミカルタンカー建造を実現するための基礎技術確立を目的として、国内で2016年に製造出来るようになったSUS329J3Lクラッド鋼板の、接合界面の強度・信頼性、溶接性、溶接継手部の疲労強度、トランスバルクヘッドと二重底との十字溶接継手止端部の応力集中係数、および溶接継手部の耐食性などについて、把握・検討・評価した。

結論として、SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板とを使用すれば、実績の多いSUS316Lクラッド鋼板とSUS316LNソリッド鋼板とを使用した場合と、略同等の現場工作管理で、より強度・信頼性や耐食性の優れた、しかも、合理的な設計による高性能な、ケミカルタンカーカーゴタンク構造建造が可能であることが確認出来た。

しかも、希少資源であるニッケルの節約も実現出来る。

## 8.2 研究成果実用化の現状

### 8.2.1 ハイブリッドカーゴタンクタイプケミカルタンカーの建造

一連の基礎研究で得られた知見をもとに、著者が所属している株式会社臼杵造船所において、SUS316Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板とを組み合わせた、ハイブリッドカーゴタンクタイプケミカルタンカーを建造するための、溶接施工法承認を2014年7月に、一般財団法人日本海事協会より取得した。

これにより、世界初となる、SUS316Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板とを組み合わせた12,500 DWT型(L×B×D:115×20.6×11.3 m)ハイブリッドカーゴタンクタイプケミカルタンカーが、2014年11月に就航した(**Fig.8.2.1**)。

また、株式会社臼杵造船所においては、この取り組みにより、ノルウェーの船主より受注した、12,500 DWT型(L×B×D:118×20.4×11.3 m)ハイブリッドカーゴタンクタイプケミカルタンカーが、2016年に2隻、2017年に2隻、就航した。

さらに、2018年には、16,000 DWT型(L×B×D:134×22×11.8 m)ハイブリッドカーゴタンクタイプケミカルタンカー2隻が就航予定である。

## 8.2.2 オール二相ステンレス鋼板カーゴタンクタイプ ケミカルタンカーの建造

2016年に製造できるようになった、SUS329J3Lクラッド鋼板をケミカルタンカーに使用する目的で実施された、本基礎研究で得られた知見をもとに、著者が所属している株式会社 臼杵造船所において、SUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板とを組み合わせ、オール二相ステンレス鋼板カーゴタンクタイプケミカルタンカーを建造するための、溶接施工法承認を、2017年7月に、一般財団法人 日本海事協会より取得した。

これにより、株式会社 臼杵造船所においては、世界初となるSUS329J3Lクラッド鋼板とSUS329J3Lソリッド鋼板とを組み合わせ、オール二相ステンレス鋼板カーゴタンクタイプケミカルタンカーの建造を開始した。

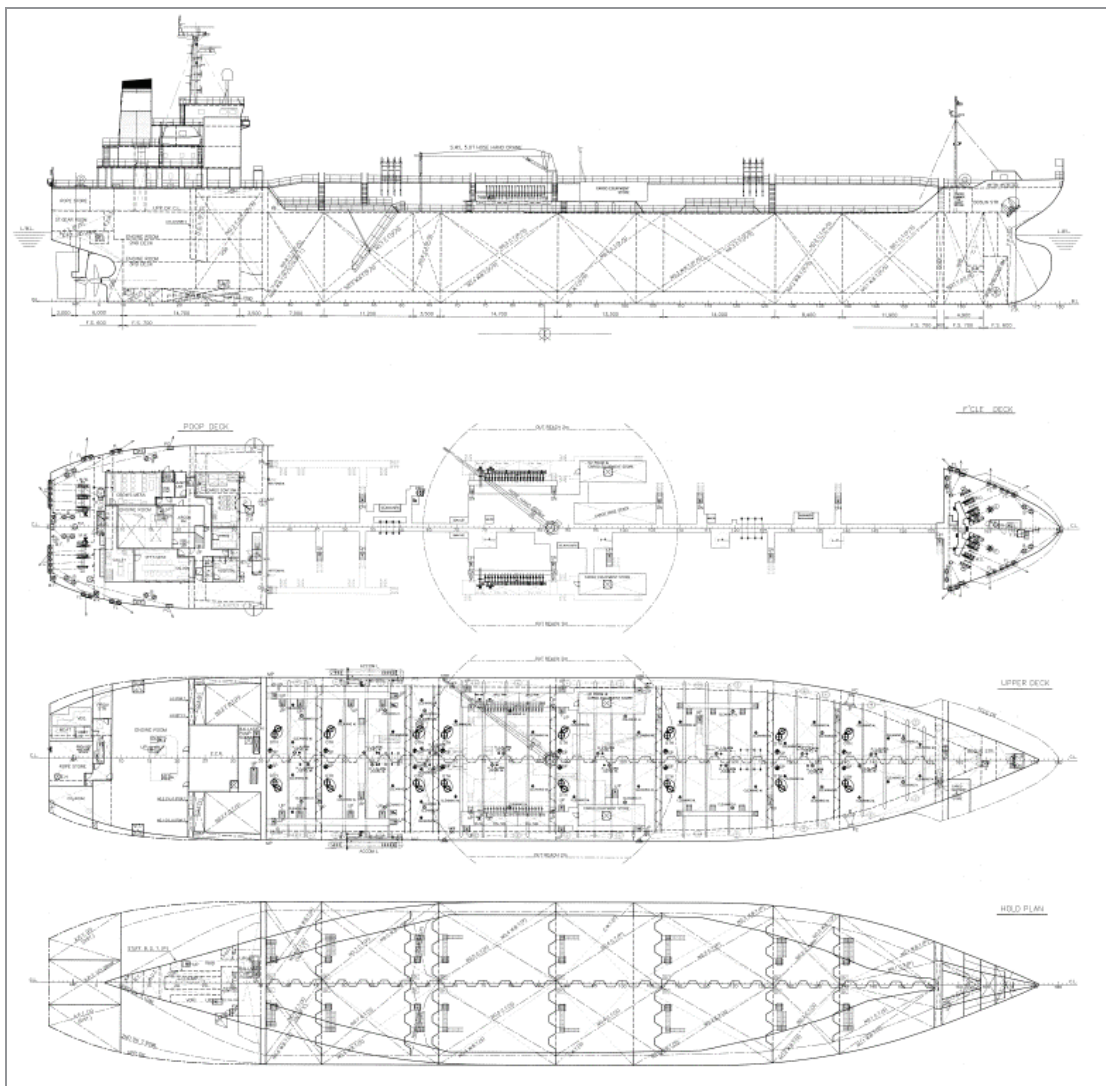
すなわち、2019年度就航予定で、12,500 DWT型(L×B×D:118×20.4×11.3 m)オール二相ステンレス鋼板カーゴタンクタイプケミカルタンカー建造に向けて、設計を開始した。

**Fig.8.2.2** に設計を開始した12,500 DWT型ケミカルタンカーの一般配置図を示す。

国内中小造船所の競争力向上と他国造船業との差別化に寄与出来るものとする。



**Fig.8.2.1 12,500 DWT type chemical tanker**



**Fig.8.2.2 General arrangement of chemical tanker with all duplex stainless steel cargo tank**

## 謝 辞

本論文を作成するにあたり、終始適切な御指導と御鞭撻を戴いた広島大学大学院工学研究科教授 篠崎 賢二 博士に深甚なる感謝の意を表します。また、広島大学大学院工学研究科博士課程後期への私の入学をお引き受け戴き、適切な御指導と叱咤激励を戴きました。重ねて感謝申し上げます。

学位論文審査において、貴重な御助言と御指導を戴いた広島大学大学院工学研究科教授 菅田 淳 博士，同 佐々木 元 博士，同 松木 一弘 博士，准教授 山本 元道 博士に、心より感謝の意を表します。

本論文をまとめる機会を与えていただき、研究と仕事の両立を支援して戴きました株式会社 臼杵造船所 社長 角田 二郎 氏に、心より感謝の意を表します。

矢島材料強度研究所代表(前 広島大学・長崎総合科学大学大学院工学研究科 教授，元 三菱重工業株式会社 技術本部 技師長) 矢島 浩 博士の終始にわたる、時間を問わない熱意ある御助言と御指導なくしては、本論文を作成するのは不可能でありました。ここに、深甚なる感謝の意を表します。また、向かう姿勢や困難克服のための具体的な方策まで丁寧に教えていただきました。重ねて感謝申し上げます。

本論文作成を進めていくにあたり、終始懇切丁寧な御指導を戴きました久留米工業高等専門学校 准教授 谷野 忠和 博士に、心より感謝の意を表します。

本研究に数多くの御助言、御指導を戴きました塾 船大工 主宰 森 俊哲 氏，長崎大学大学院工学研究科 准教授 勝田 順一 博士に、心から深く感謝の意を表します。

研究と仕事の両立を御理解いただき御支援戴きました，株式会社 臼杵造船所 執行役員 造船本部長 山本 勇一 氏，執行役員 設計本部長 堺田 和昌 氏に、心より深く感謝申し上げます。

また、本論文の提出にあたり、御支援と御協力を戴きました株式会社  
臼杵造船所設計本部ならびに造船本部の各位に厚く御礼申し上げます。

最後に、研究を進めるにあたり、御支援、御協力を戴きながら、ここに  
お名前を記すことが出来なかった多くの方々に、心より感謝申し上げます。