

# 二相ステンレス鋼の ケミカルタンカー実船適用へ向けた 設計・施工に関する研究開発

2016年7月

株式会社白杵造船所

# 目次

1. ケミカルタンカーについて
2. 目的
3. 研究概要および体制
4. 供試鋼板
5. 完全溶込けT継手強度確認試験
6. 過剰入熱影響度確認試験
7. 異材完全溶込みT継手初層溶接高温割れ確認試験
8. 腐食試験
9. ショートビード最高硬さ試験
10. 疲労試験
11. ハイテン係数検討のための高温引張試験
12. 二軸応力下での疲労強度
13. コルゲートバルクヘッドコーナーのピーク応力とコルゲートの有効幅
14. 研究成果

# 1. ケミカルタンカーについて



## 積荷は約700種類

- ・糖蜜, 食用油, アルコール。
- ・石油精製製品。
- ・硫酸・リン酸などの化学製品など。



## カーゴタンク数は18~24

- ・全てのタンクにカーゴポンプを装備。
- ・各タンクに種類の違う積荷が可能。
- ・その為, 特殊な配管艙装。

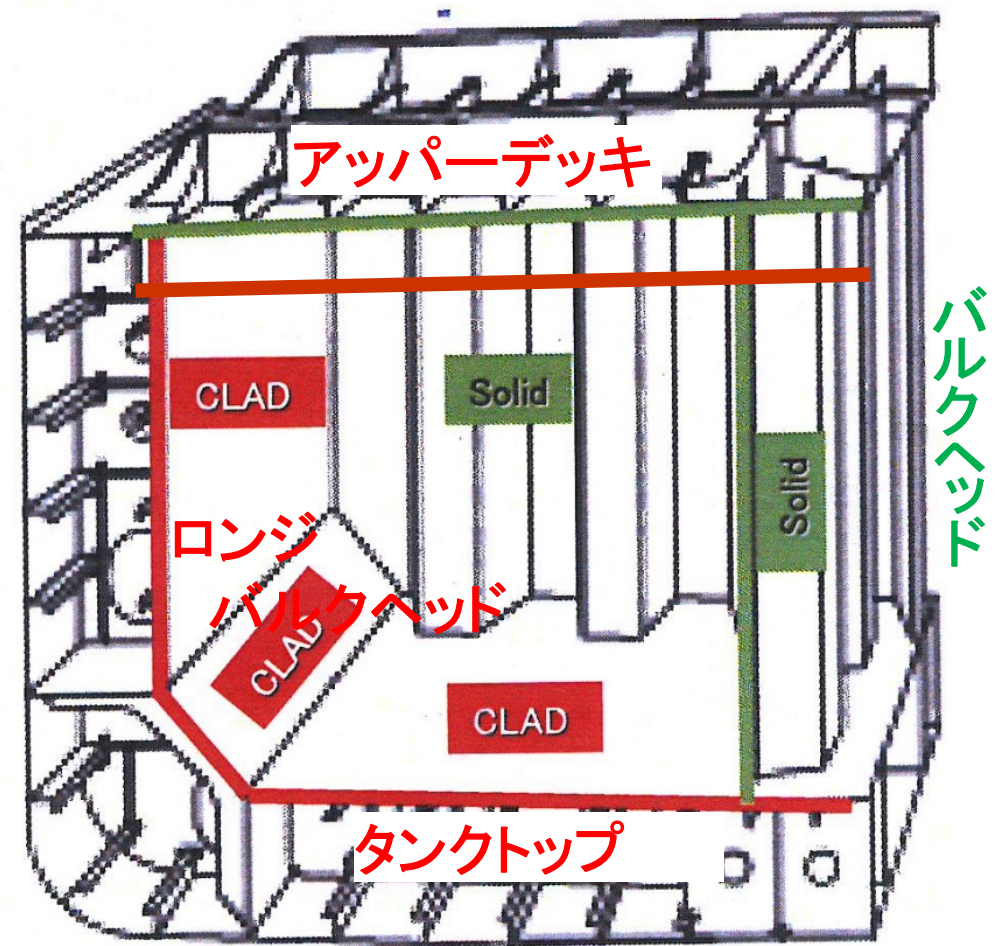
総トン数は5,000トンから40,000トン  
(オイルタンカーやバルクキャリアー  
に比べ船の大きさは小)。

- ・特定の積み荷に特化。
- ・荷役ターミナルの大きさの制約。
- ・高価なステンレスの使用。

## 2. 目的

ケミカルタンカーには、オーステナイト系ステンレス(SUS316LN)鋼板が多用されている。

二相ステンレス(SUS329J3L)鋼板が使用できれば、Ni含有量がSUS316LN鋼板の1/2程度であるので、希少資源(Ni)節約できる。また、0.2%耐力がSUS316LNの約1.5倍であることから、船殻重量低減に貢献すると考える。ケミカルタンカーに二相ステンレス鋼板を使用することを目的として、溶接に関する実用化に向けた調査研究と、実船建造を行うにあたって必要な設計基準・施工基準・詳細強度確認を行う。これらの結果をNK規則に織り込む事により、建造を可能にすることが出来る。



従来

CLAD⇒SUS316Lクラッド鋼板  
Solid⇒SUS316LN鋼板

新たな取組

CLAD⇒SUS316Lクラッド鋼板  
Solid⇒SUS329J3L鋼板

### 3. 研究概要および体制

**第一期研究(実施期間:2013年1月～2014年5月)**

疲労試験・二軸疲労試験(FEM解析)・完全溶込みT継手強度確認試験・ハイテン係数検討のための高温引張試験・腐食試験・過剰入熱影響度確認試験・異材完全溶込みT継手初層溶接高温割れ確認試験・ショートビード最高硬さ試験。

共同研究者:新日鐵住金ステンレス株式会社(SUS329J3L鋼板製造)  
JFEスチール株式会社(SUS316Lクラッド鋼板製造)  
株式会社タセト(溶接材料製造)

指導者:長崎総合科学大学 矢島教授, 谷野准教授(研究当時)  
塾 船大工 森 主宰

**第二期研究(実施期間:2014年7月～2016年5月)**

溶接継手の疲労試験・二軸疲労試験(FEM解析)・コルゲートバルクヘッドのコーナー部のピーク応力解析。

指導者:矢島材料強度研究所 矢島代表  
久留米工業高専 谷野准教授  
塾 船大工 森 主宰

## 4. 供試鋼板

### 化学成分

	wt (%)								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
SUS329J3L (t:16)	0.008	0.56	1.8	0.025	0.001	22.5	5.8	3.1	0.16
SUS316LN (t:17.5)	0.019	0.69	0.6	0.027	0.001	18.22	10.6	2.83	0.17
SUS316Lクラッド* (t:3+12)	0.008	0.54	0.77	0.024	0.001	16.94	12.11	2.84	—

\*合せ材3mm(SUS316L鋼板)の成分を示す。

**Ni量: SUS316LN鋼板に比べSUS329J3L鋼板は約半分。**

### 機械的性質

	板厚(mm)	0.2%耐力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	硬さ (HV)
SUS329J3L	16	615	772	38	255
SUS316LN	17.5	399	679	48	194
SUS316Lクラッド* (t:3+12)	15 (t:3+12)	—	476	35	—

\*SUS316Lクラッド鋼板としての強度を示す。

**0.2%耐力: SUS316LN鋼板に比べSUS329J3L鋼板は約1.5倍高い。**

# 5.1 完全溶込みT継手強度確認試験

SUS329J3L鋼板を使用した場合、開先角度と継手強度との関係が、従来材料のSUS316LN鋼板の場合とは異なる可能性があるため、T継手強度試験を実施した。

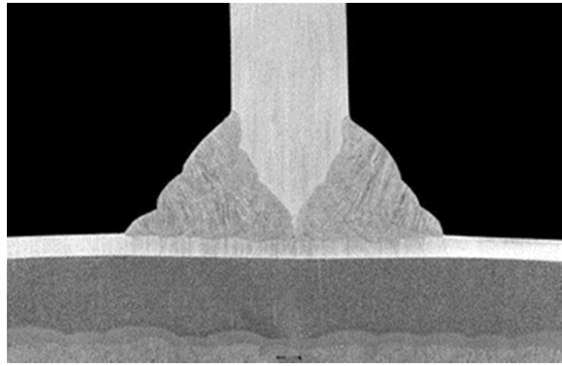
## T継手強度試験片溶接条件

溶接方法	CO <sub>2</sub> 溶接 (FCAW)
溶接姿勢	下向き
入熱量 (必須・*1)	10~13 kJ/cm (12 kJ/cm)
電流・電圧 (*1)	190~220 A・28~31 V (200 A・30 V)
溶接速度 (*1)	30~40 cm/min. (30 cm/min.)
CO <sub>2</sub> 流量 (*1)	15~20 ℓ/min. (18 ℓ/min.)
パス間温度 (必須)	< 150 °C

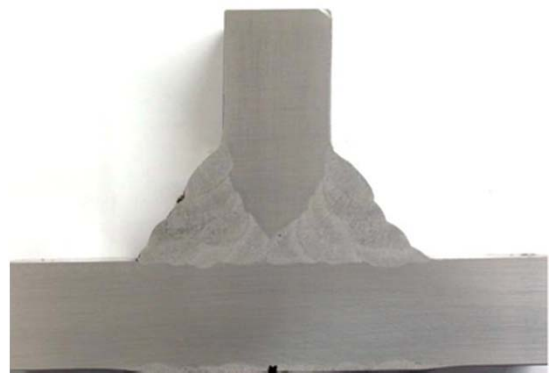
## T継手強度試験片

供試鋼板の組合せ	継手の種類	開先角度
SUS329J3L鋼板 (16mm-16mm)	T継手 (FCAW)	40度 50度 60度
SUS329J3L鋼板-SUS316Lクラッド鋼板 (16mm-15mm)		

## SUS329J3L鋼板+SUS316Lクラッド鋼板



## SUS329J3L鋼板同士



開先角度: 40° SUS329J3L鋼

SUS329J3L鋼板, SUS316Lクラッド鋼板

開先角度: 50° SUS329J3L鋼

SUS329J3L鋼板, SUS316Lクラッド鋼板

開先角度: 60° SUS329J3L鋼

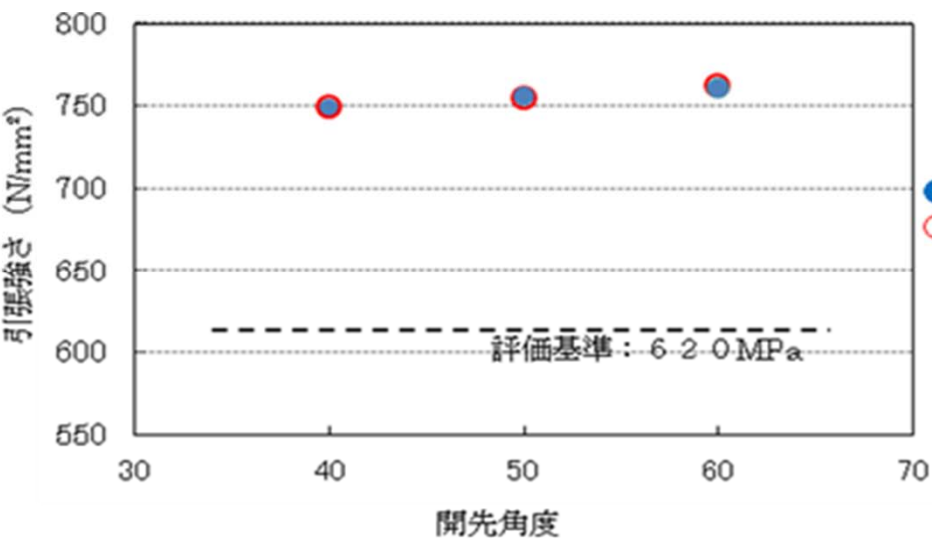
SUS329J3L鋼板, SUS316Lクラッド鋼板

溶接材料: GFW329J3L

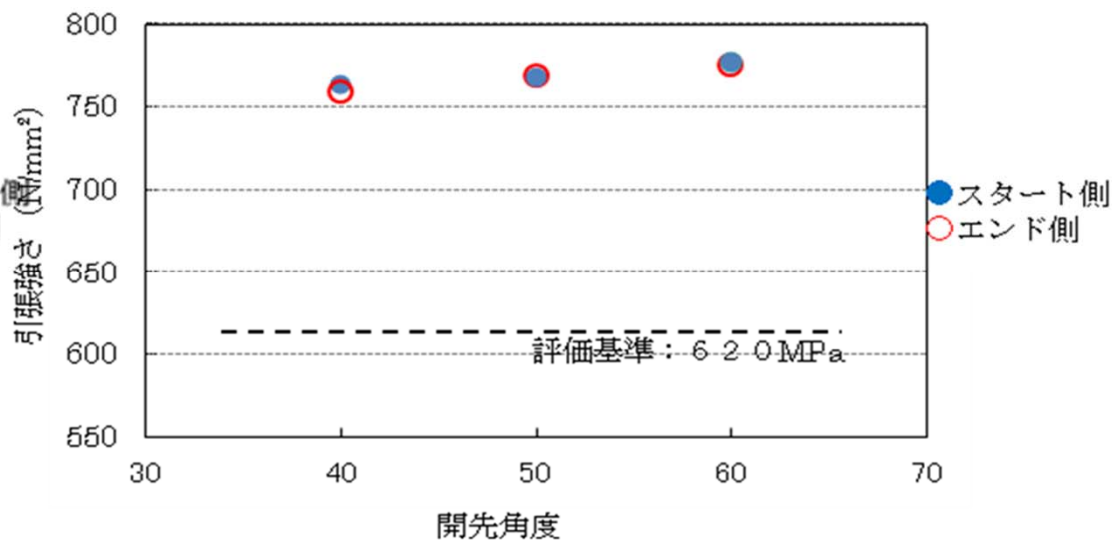
注(\*1): ( ) 内数値は試験片溶接時の狙い値を示す。

# 5.2 完全溶込みT継手強度確認試験

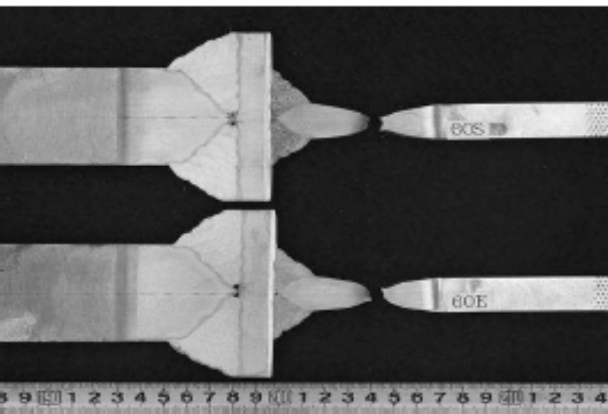
異材完全溶込みT継手強度確認試験結果  
(室温大気中)



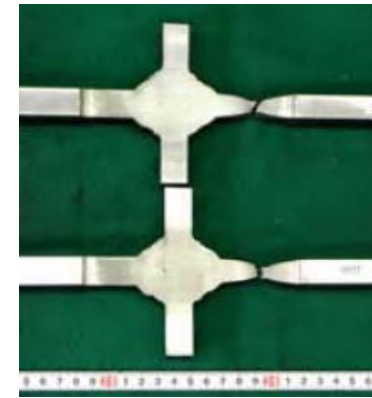
SUS329J3L鋼板同士完全溶込みT継手強度確認試験結果  
(室温大気中)



SUS329J3L鋼板+SUS316Lクラッド鋼板



SUS329J3L鋼板同士

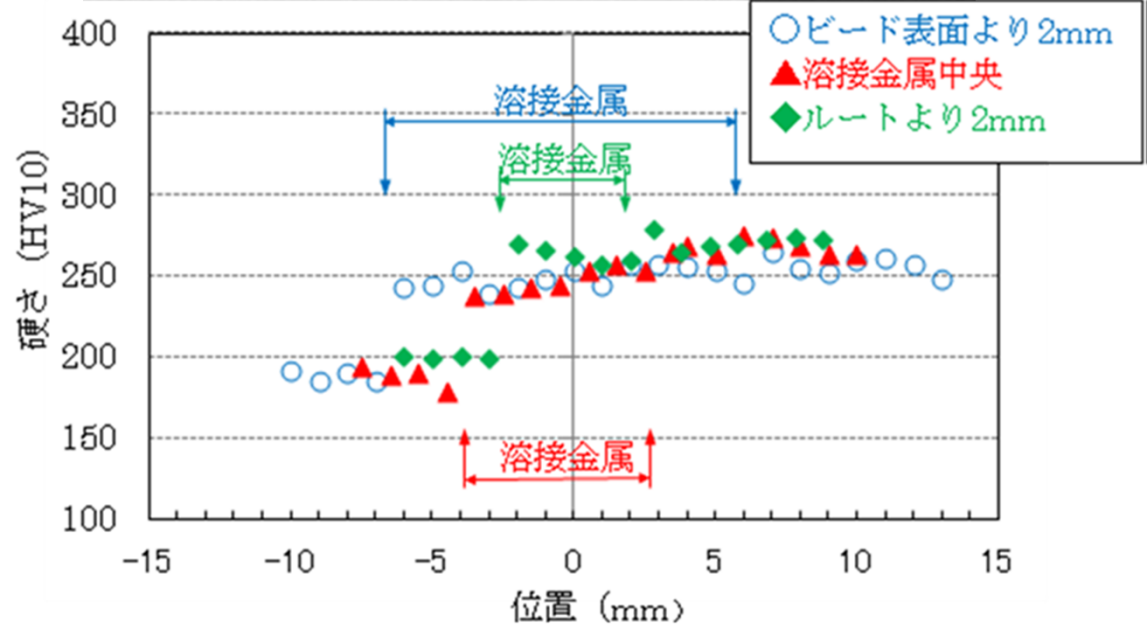
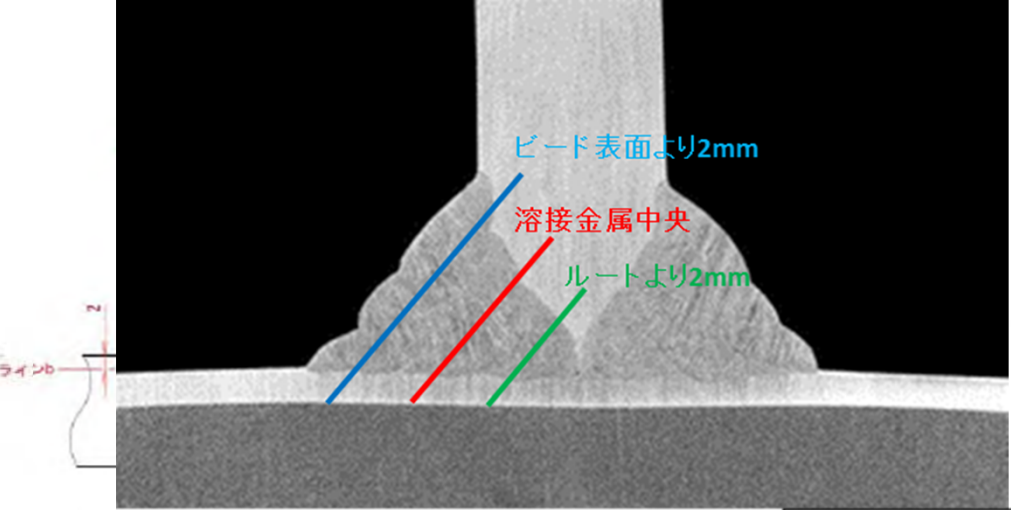


いずれの開先角度においても、破断位置は全てDuplex鋼板母材側であった。引張り強さも700N/mm<sup>2</sup>を上回っており、判定基準の“620N/mm<sup>2</sup>以上”を大幅に上回る優れた強度特性を有することが確認できた。

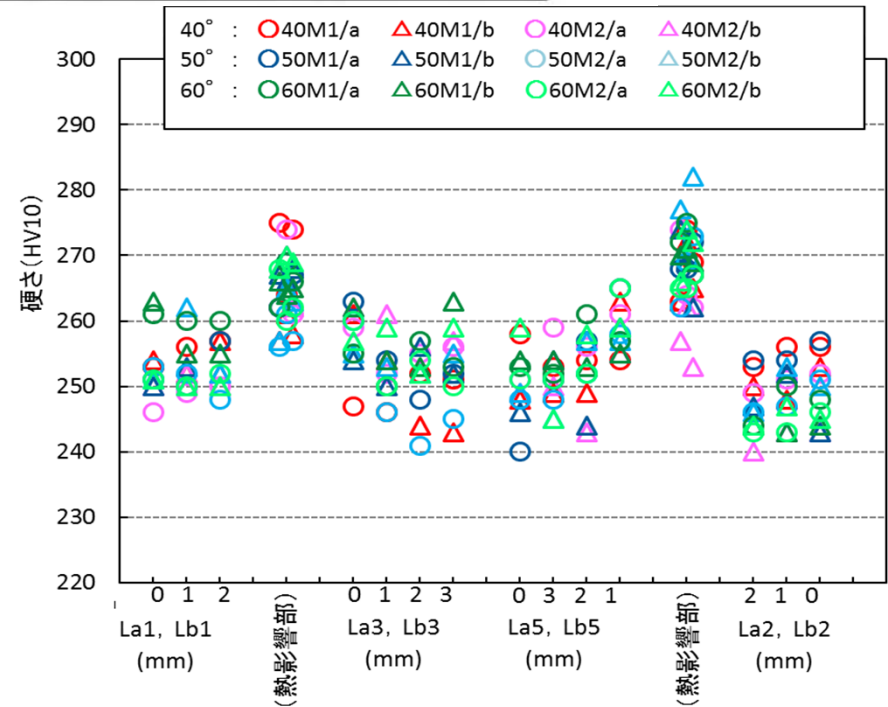
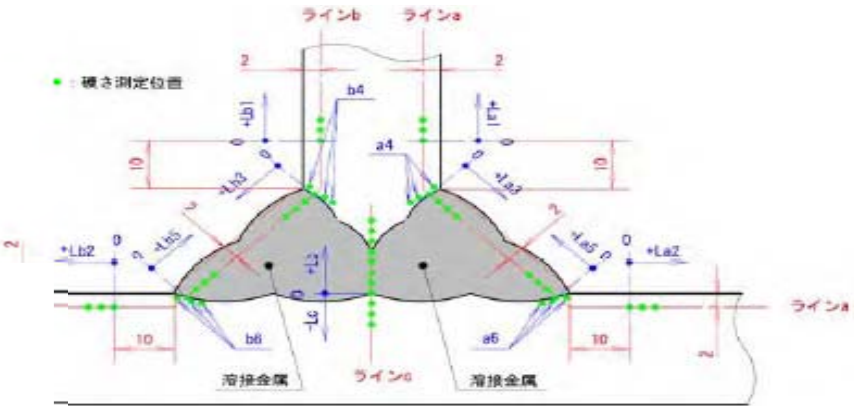


# 5.3 完全溶込みT継手強度確認試験

異材完全溶込みT継手ビッカース硬さ試験結果



SUS329J3L鋼板完全溶込みT継手ビッカース硬さ試験結果



SUS329J3L鋼板とSUS316Lクラッド鋼板とで硬さに差異がある→材料の強度特性が表れている。

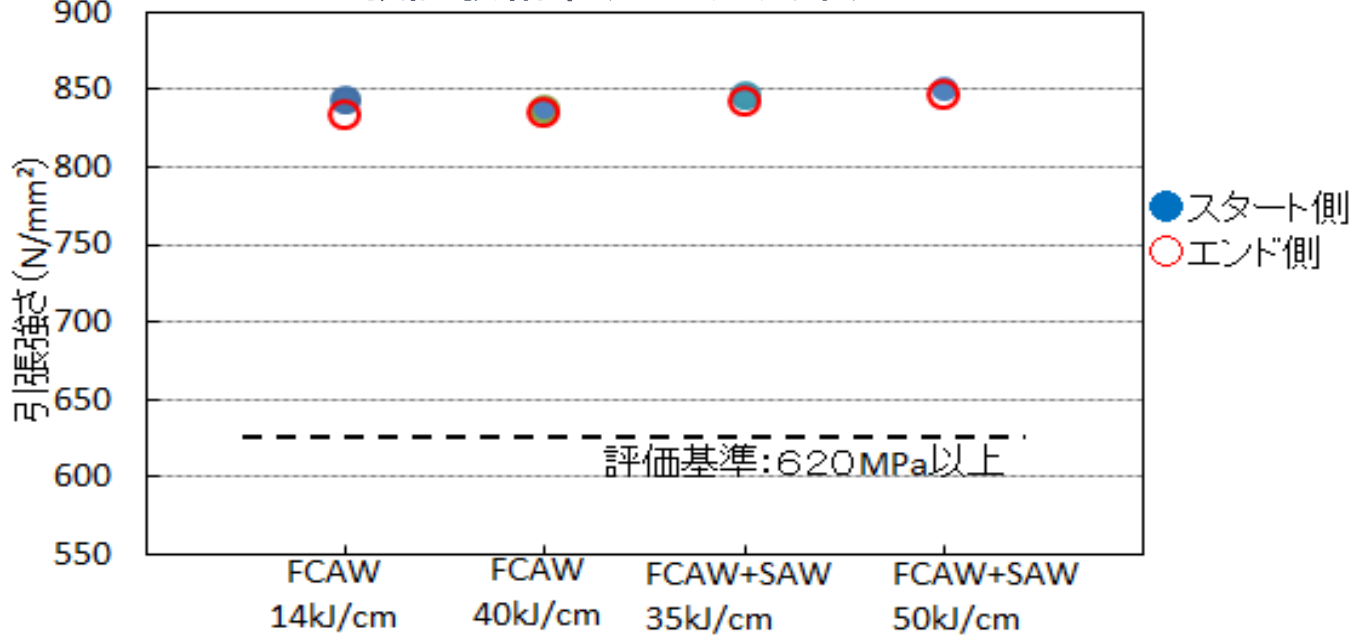
# 6.1 過剰入熱影響度確認試験

過剰入熱で突合せ溶接継手を製作し、溶接継手部の引張試験・Vノッチシャルピー衝撃試験・硬さ測定・化学成分分析・フェライト量測定を実施

## 供試溶接継手の溶接条件

供試材組合せ	溶接方法	入熱量・溶接姿勢	パス間温度
SUS329J3L鋼板+SUS329J3L鋼板 (16mm-16mm)	突合せ(FCAW)	14kJ/cm・下向き 40kJ/cm・縦向上進	150℃
	突合せ(SAW)	35kJ/cm, 50kJ/cm	150℃

引張試験結果(室温大気中)



FCAW 40kJ/cm



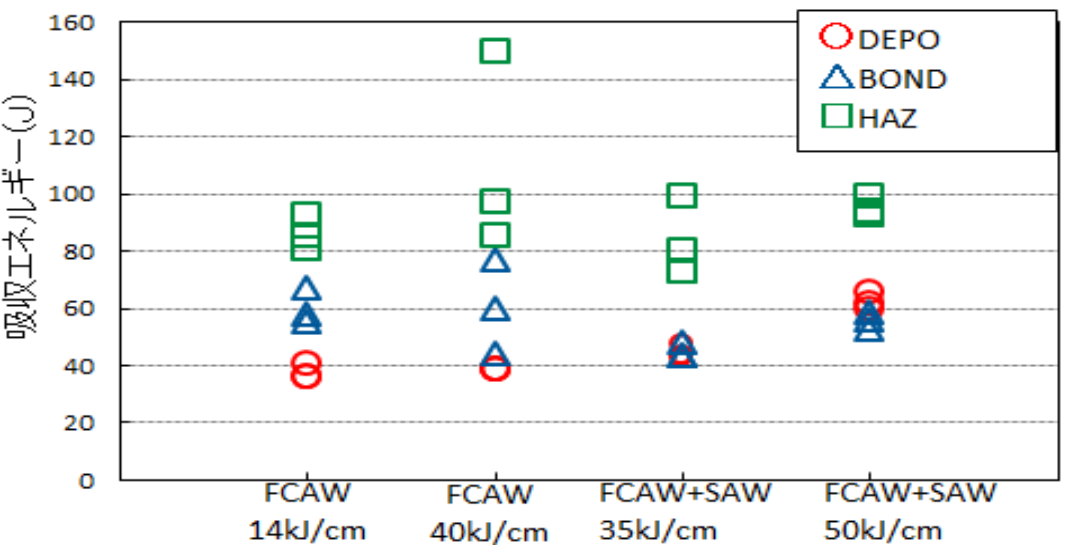
FCAW+SAW 50kJ/cm



いずれの溶接条件においても引張強さ判定基準の“620 N/mm<sup>2</sup>以上”を大幅に上回る優れた強度特性を有し、入熱量による差異は確認できなかった。

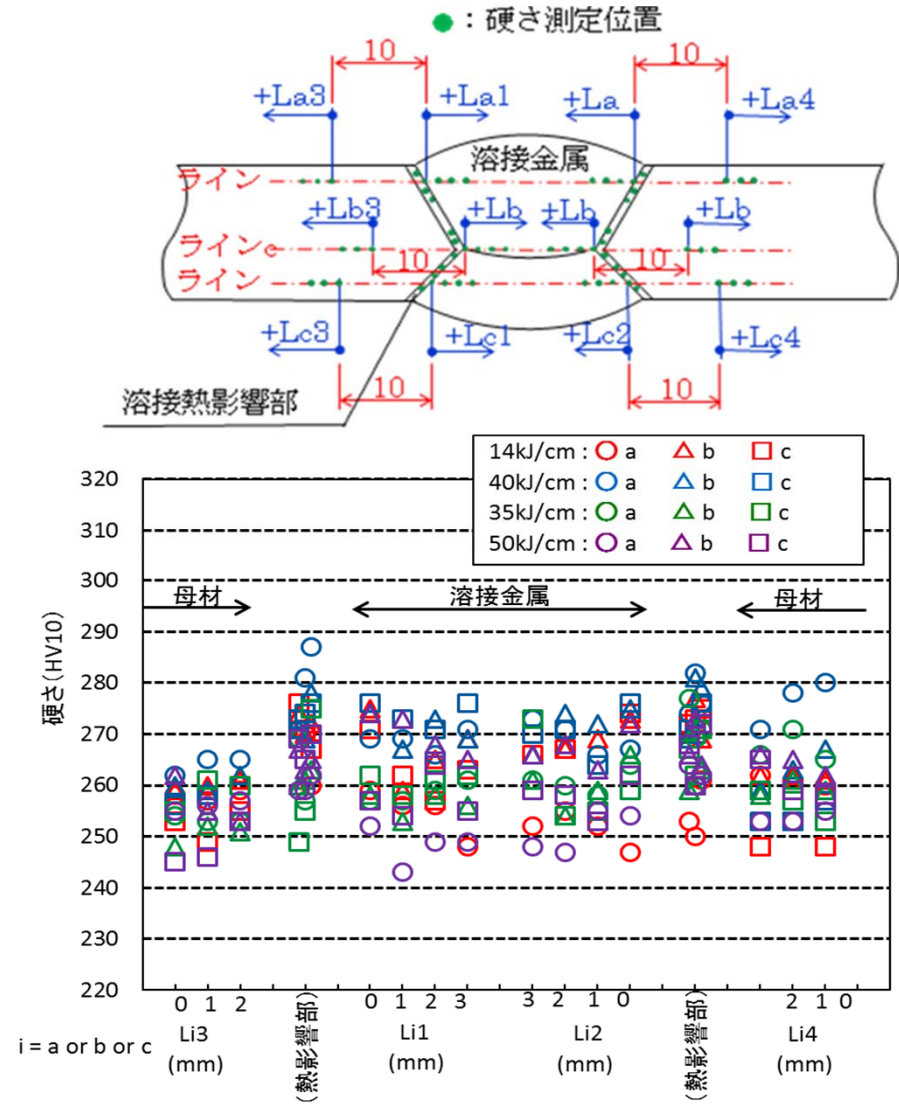
# 6.2 過剰入熱影響度確認試験

V-ノッチシャルピー衝撃試験結果  
(試験温度: -20°C)



V-ノッチシャルピー衝撃試験(試験温度 -20°C)において、いずれも入熱量が吸収エネルギーに与える影響はないと言える。

ビッカース硬さ測定結果



いずれもビッカース硬さ分布に差異は無いと考えられる。

# 6.3 過剰入熱影響度確認試験

溶接金属の化学成分分析結果

wt (%)

溶接条件	試験片符号	成分[%]										
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	N	O
FCAW 14kJ/cm	14SB	0.028	0.35	0.69	0.018	0.004	0.03	9.19	23.26	3.32	0.148	0.121
FCAW 40kJ/cm	40TB	0.024	0.50	0.80	0.024	0.004	0.08	9.15	23.44	3.25	0.134	0.114
FCAW+SAW 35kJ/cm	35B	0.028	0.49	1.10	0.022	0.004	0.07	8.68	23.23	3.25	0.145	0.079
FCAW+SAW 50kJ/cm	50B	0.025	0.50	1.08	0.033	0.004	0.08	8.64	23.16	3.17	0.139	0.078
JIS規格		≤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	—

いずれの溶接条件においても JIS規格を満足している。

溶接金属のフェライト量測定結果

溶接条件	試験片符号	フェライト含有率[%]					
		個々値					平均値
FCAW 14kJ/cm	14SF	32	32	32	32	29	31
FCAW 40kJ/cm	40TF	32	34	34	32	34	33
FCAW+SAW 35kJ/cm	35F	33	33	31	33	35	33
FCAW+SAW 50kJ/cm	50F	36	33	32	34	34	34

いずれの溶接条件においても 大きな差異はない。

溶接金属の化学成分、フェライト量大きな差異はない。

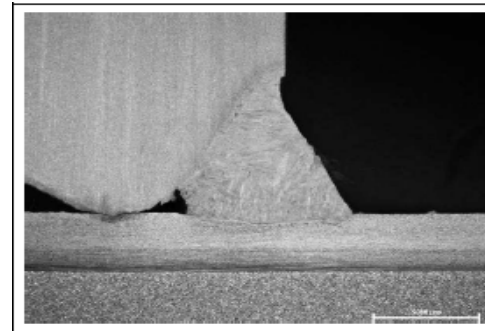
# 7.1 異材完全溶込みT継手初層溶接高温割れ確認試験

完全溶込みT継手初層の溶接において、凝固モードがFモードであっても割れが発生する可能性がある。これには開先角度が関与するとされている。  
そこで、開先角度を変化させて初層溶接金属の断面マクロから断面割れを評価。

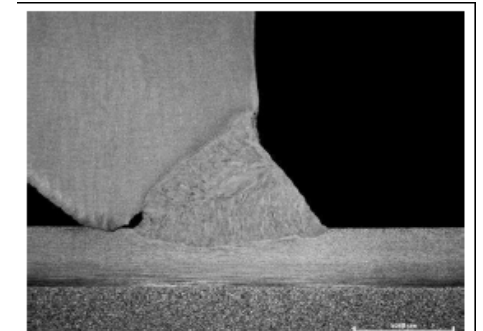
完全溶込みT継手溶接条件

溶接方法	CO <sub>2</sub> 溶接 (FCAW)
溶接姿勢	水平
入熱量 (必須・*1)	10~13 kJ/cm (12 kJ/cm)
電流・電圧 (*1)	190~220 A・28~31 V (200 A・30 V)
溶接速度 (*1)	30~40 cm/min. (30 cm/min.)
CO <sub>2</sub> 流量 (*1)	15~20 l/min. (18 l/min.)

開先角度30度



開先角度50度



いずれも、初層溶接金属の断面マクロ試験片に高温割れは発生していなかった→良好な溶接性を示す。

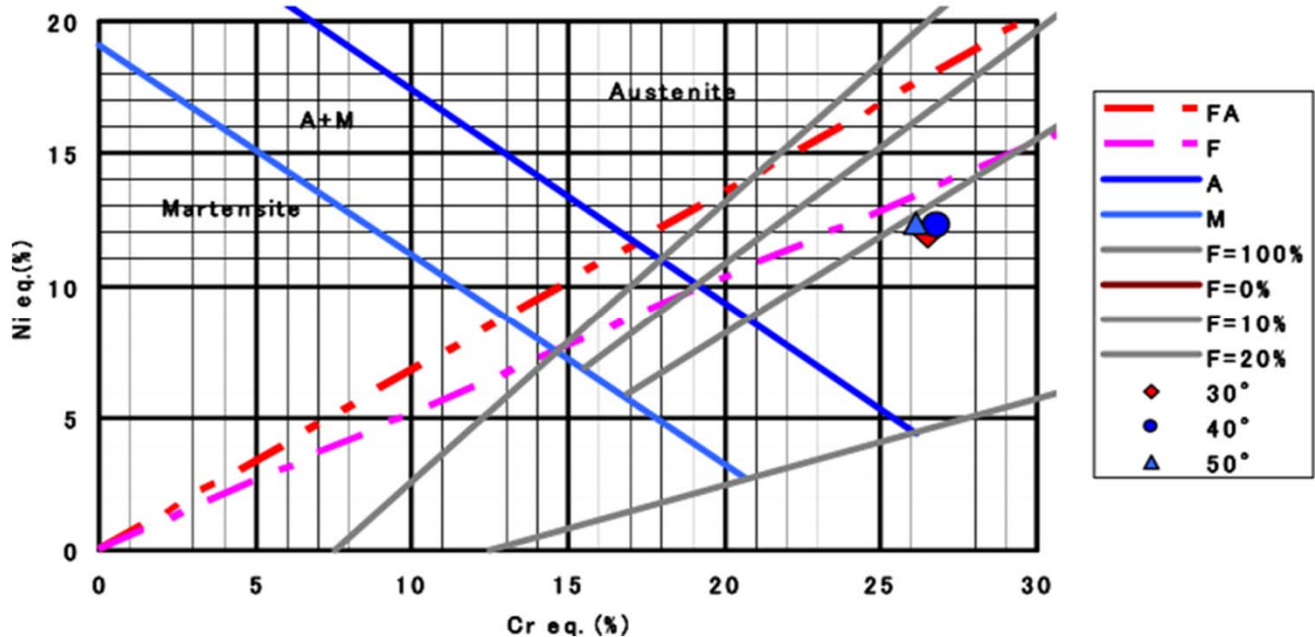
但し、開先角度が小さくなるとルート部の溶込みが不十分になる。

# 7.2 異材完全溶込みT継手初層溶接高温割れ確認試験

初層溶接金属の化学成分分析結果

Groove angle	Welded joint No.	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	wt (%)
30°	30	0.025	0.53	1.10	0.025	0.003	0.11	8.33	22.56	3.10	0.082	
40°	40	0.021	0.57	1.06	0.025	0.003	0.10	8.78	22.80	3.12	0.080	
50°	50	0.024	0.55	0.94	0.020	0.002	0.06	9.02	22.21	3.03	0.059	

シェフラの組織図



Nb	Ti	Al	B	O	N
0.011	0.020	0.004	0.0002	0.11	0.13
0.012	0.028	0.004	0.0002	0.12	0.13
0.012	0.024	0.005	0.0002	0.12	0.12

いずれの場合もオーステナイト・フェライト系の標準成分になっていることが確認された。

凝固モードは開先角度によらずFモード、凝固においてオーステナイトが晶出しないためP, Sなどの不純物のミクロ偏析が小さく、割れ感受性が低い。よって、割れの発生は見られない。

# 8.1 腐食試験

SUS329J3L鋼板の母材および溶接部の耐食性に及ぼす溶接入熱量の影響を把握するために塩化第二鉄腐食試験を実施。

## 突合せ溶接継手

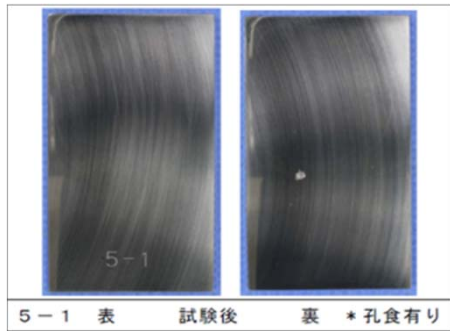
No.	溶接方法	開先角度	入熱量
1	FCAW	50°	14 kJ/cm (下向き)
2			40 kJ/cm (立向上進)
3	FCAW + SAW	45°	35 kJ/cm
4			50 kJ/cm

## 腐食試験結果

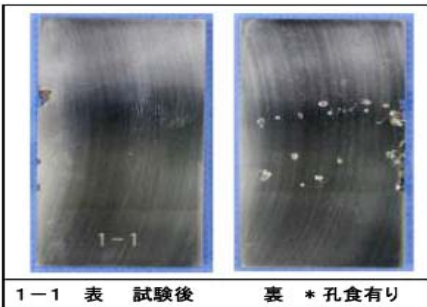
No.	溶接方法	開先角度	入熱量	孔食発生 最低温度	孔食未発生 温度	孔食発生臨界温度 (CPT)
1	FCAW	50°	14kJ/cm	25°C	未確認	-*
2			20kJ/cm	25°C	未確認	-*
3	FCAW+SAW	45°	35kJ/cm	25°C	未確認	-*
4			50kJ/cm	25°C	未確認	-*
5	母材			35°C	30°C	35°C

\* 溶接材について本試験条件では、孔食未発生温度が確認出来なかったため、CPTを決定出来ず

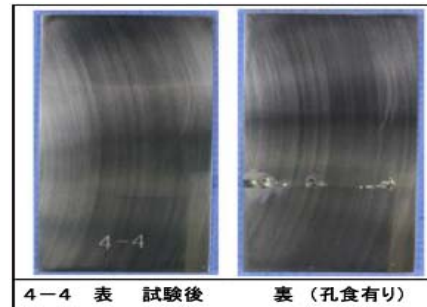
母材



FCAW 14 kJ/cm



FCAW+SAW 50 kJ/cm



母材：孔食発生臨界温度が35°C。

突合せ溶接継手溶接金属：すべての条件において孔食が発生したため、孔食発生臨界温度を決定できなかった。

# 8.2 腐食試験

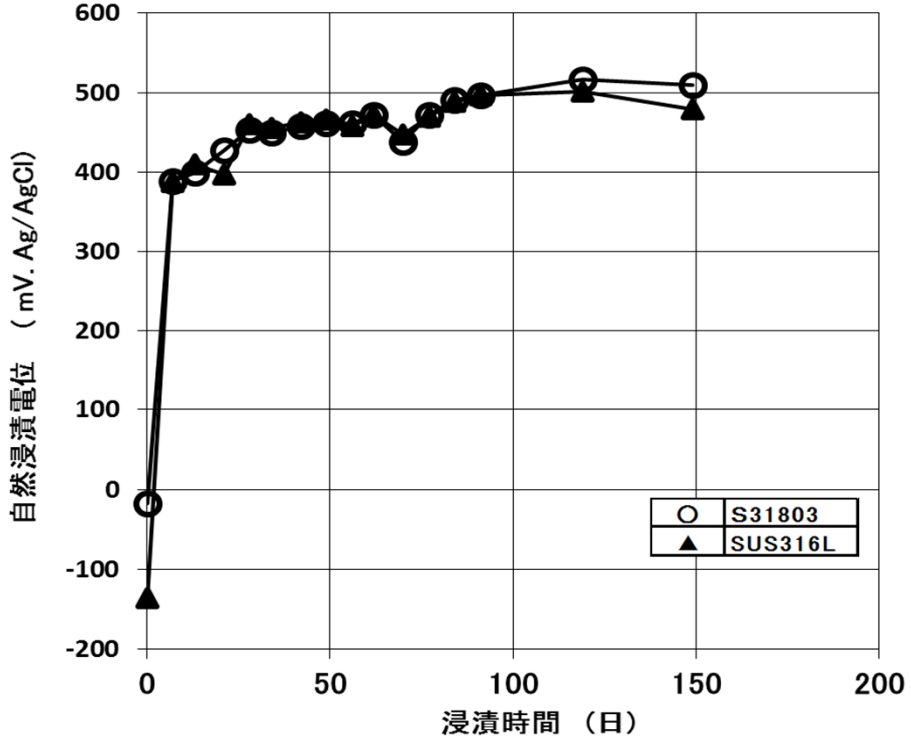
CPT値, CCT値(塩化第二鉄腐食試験)  
(新日鐵住金ステンレス(株))

鋼種	6%FeCl <sub>3</sub> +1/20N HCl, 24h	
	CPT(°C)	CCT(°C)
S31803	35	17.5
SUS316LN-315M	35	12.5
SUS317L	20	5
SUS316L	15	0

CPT(Critical Pitting Temperature) : 孔食発生臨界温度  
 CCT(Critical Crevice Temperature) : すき間腐食発生臨界温度  
 注: S31803: SUS329J3Lと同グレード

すき間腐食性はSUS316LN鋼板より良好であるため、耐食性SUS316LN鋼板よりもSUS329J3L鋼板の方が高いと考えられる

海水中におけるSUS316L鋼板およびS31803鋼板の自然浸漬電位測定結果  
(新日鐵住金ステンレス(株))



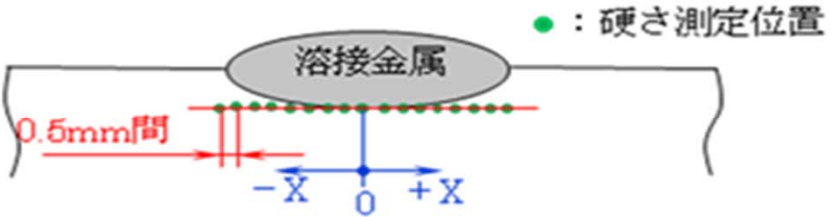
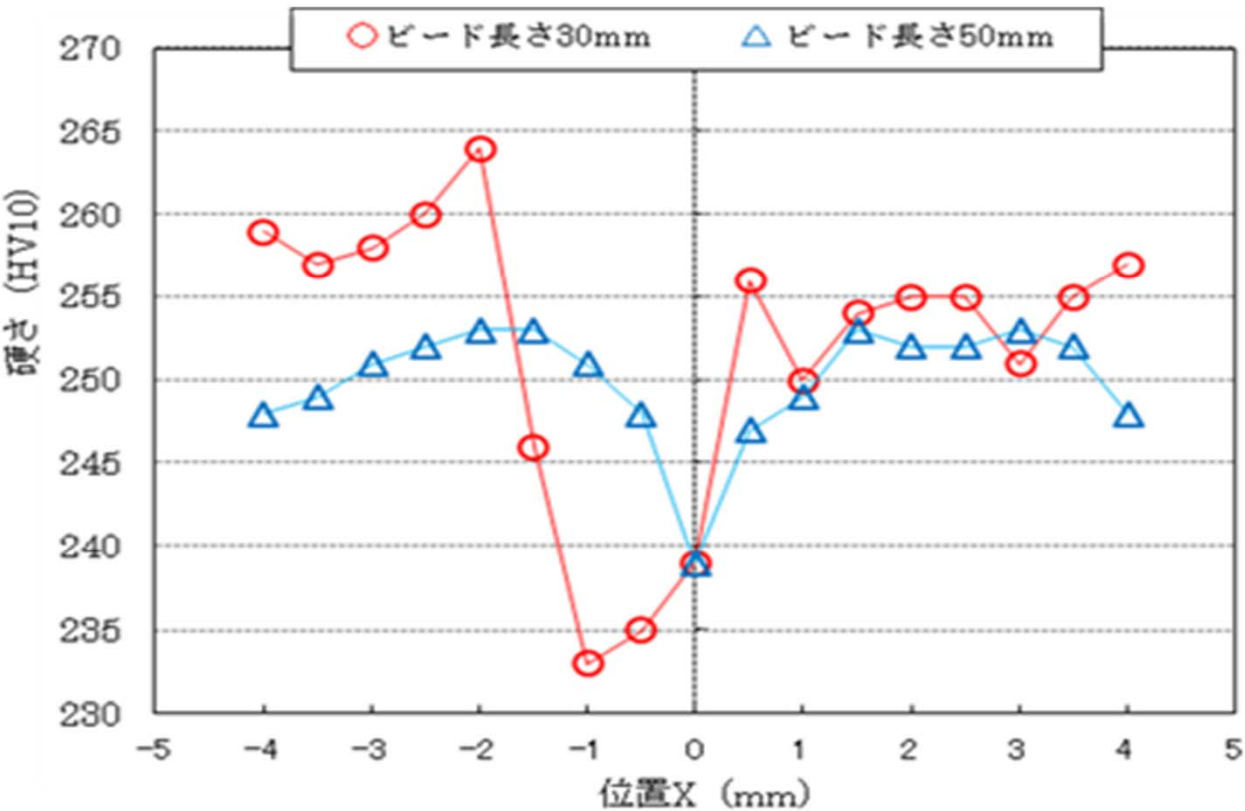
約5ヶ月間の長期浸漬でいずれの鋼種も400~500mV.SCEで不動態を維持し、オーステナイトステンレス鋼板(SUS316L鋼板)とSU329J3L鋼板との実海水中における自然浸漬電位の差は認められなく、異種金属接触腐食の可能性はないと考えられる。



# 9. ショートビード最高硬さ試験

SUS329J3L鋼板に対して、被覆アーク溶接棒SUS309MoL(3.2 mmφ)によるショートビード溶接を行った場合の、溶接熱影響部の最高硬さを測定

ビッカース硬さ測定結果



硬さ分布の差異は確認されなかった。影響は少ないと考えられる。

## 10.1 疲労試験

第一期研究により、SUS329J3L鋼板が、実船適用可能であることを確認出来た。しかし、SUS329J3L鋼板同士・およびSUS316LN鋼板同士の突合せ溶接継手、SUS329J3L鋼板とSUS316Lクラッド鋼板・およびSUS316LN鋼板とSUS316Lクラッド鋼板との荷重非伝達型完全溶け込み十字溶接継手、ならびに、SUS329J3L鋼板同士・およびSUS316LN鋼板同士の荷重伝達型・荷重非伝達型 十字隅肉溶接継手の、溶接のまま（ドレッシング無し）の疲労強度に、それぞれ有意差は確認出来なかった。第二期研究では、SUS329J3L鋼板を使用した場合の優位性を確認するために、最適な溶接条件で製作したSUS329J3L鋼板溶接継手部の疲労強度を把握・確認した。

疲労試験は、500 kN電気油圧式疲労試験機を用いて、室温、大気中、繰返し速度3～10Hz、応力比 $R=0.1$ の軸力片振引張荷重制御方式、荷重波形は正弦波で実施した。

## 10.2 疲労試験 実施項目

### ・突合せ溶接継手。

SUS329J3L鋼板同士（溶接のまま，グラインダードレッシング，TIGアークドレッシング）  
SUS316LN鋼板同士（グラインダードレッシング）。

### ・荷重伝達型 完全溶込み十字溶接継手。

SUS329J3L鋼板とSUS316Lクラッド鋼板（溶接のまま，グラインダードレッシング，  
TIG溶接後グラインダードレッシング，TIGアークドレッシング，  
ビード表面グラインダー後TIGアークドレッシング，TIG溶接ドレッシング）。

### ・荷重非伝達型 完全溶込み十字溶接継手。

SUS329J3L鋼板とSUS316Lクラッド鋼板（溶接のまま，グラインダードレッシング，  
TIGアークドレッシング，TIG溶接ドレッシング）。

### ・荷重伝達型 十字隅肉溶接継手。

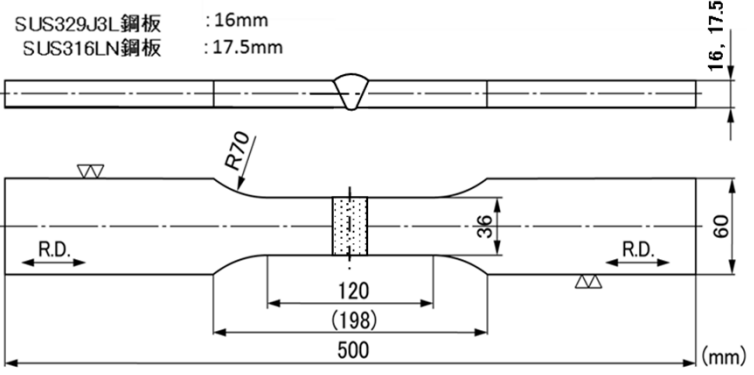
SUS329J3L鋼板同士（溶接のまま，TIGアークドレッシング）。

### ・荷重非伝達型 十字隅肉溶接継手

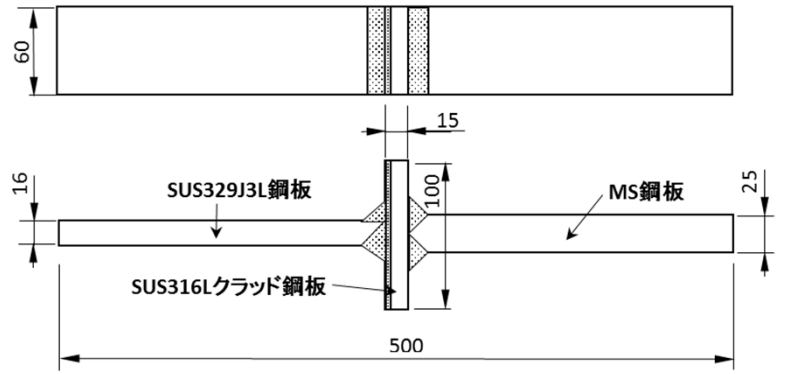
SUS329J3L鋼板同士（溶接のまま，グラインダードレッシング，TIGアークドレッシング）。

# 10.3 疲労試験 試験片形状

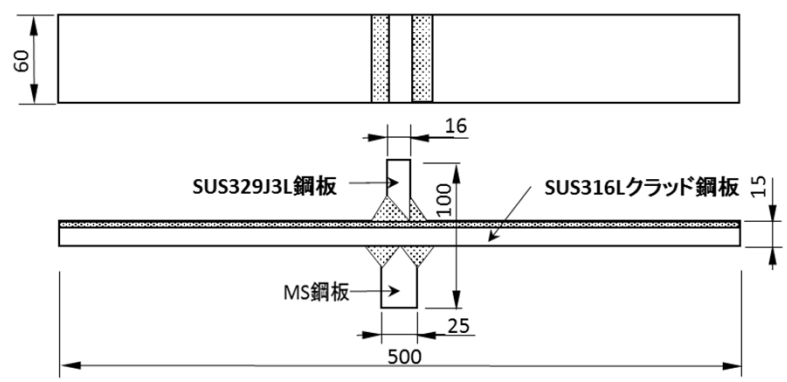
## 母材および突合せ溶接継手



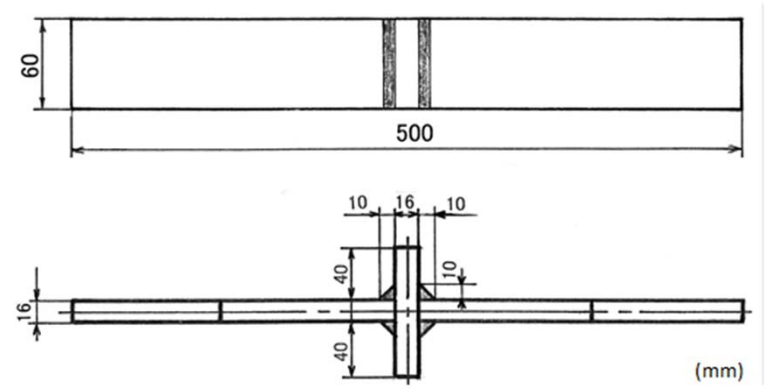
## 荷重伝達型 完全溶込み十字溶接継手



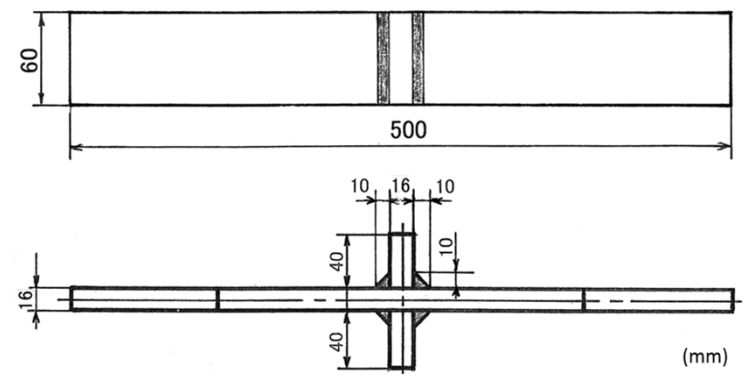
## 荷重非伝達型 完全溶込み十字溶接継手



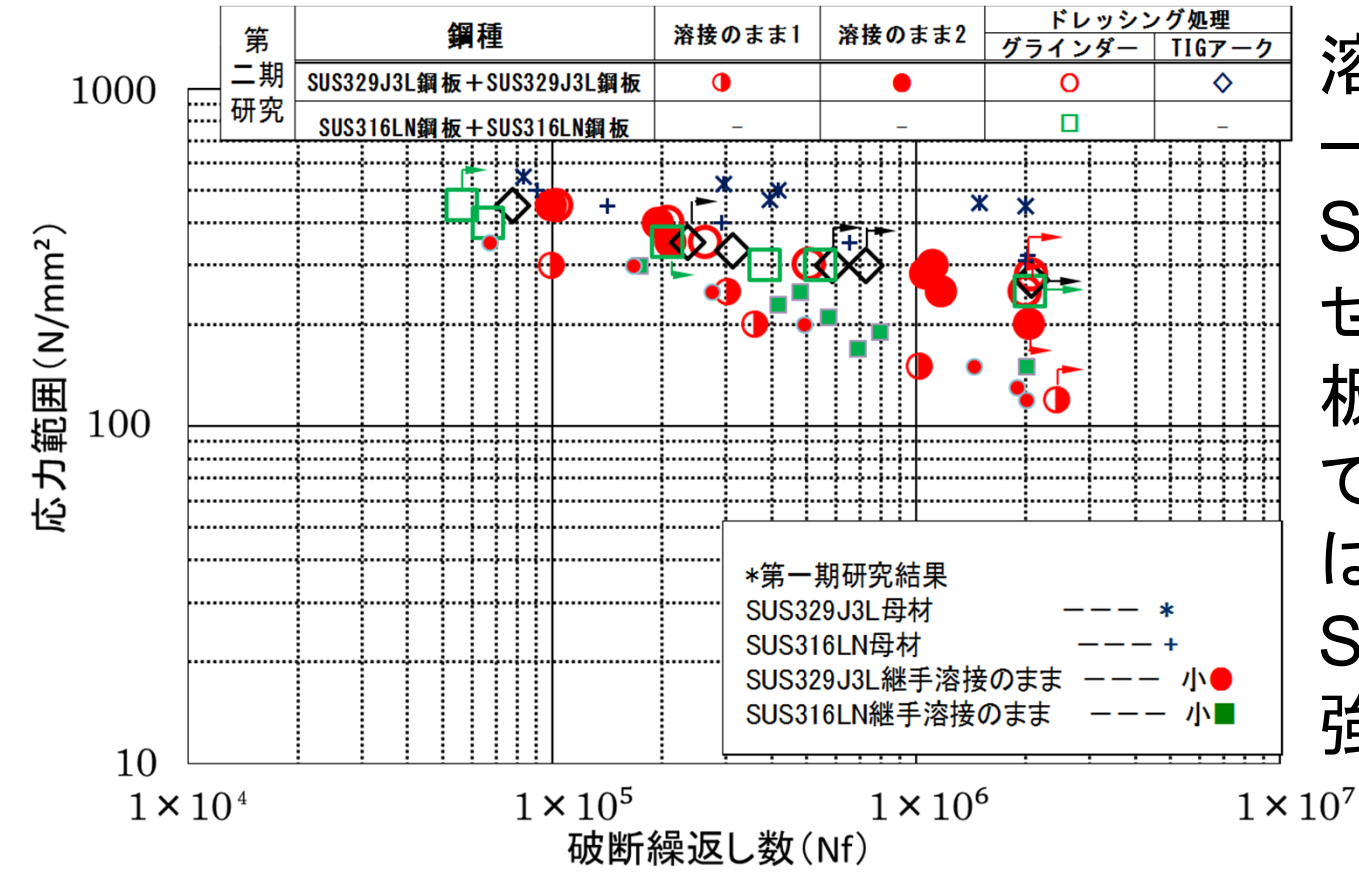
## 荷重伝達型 十字隅肉溶接継手



## 荷重非伝達型 十字隅肉溶接継手



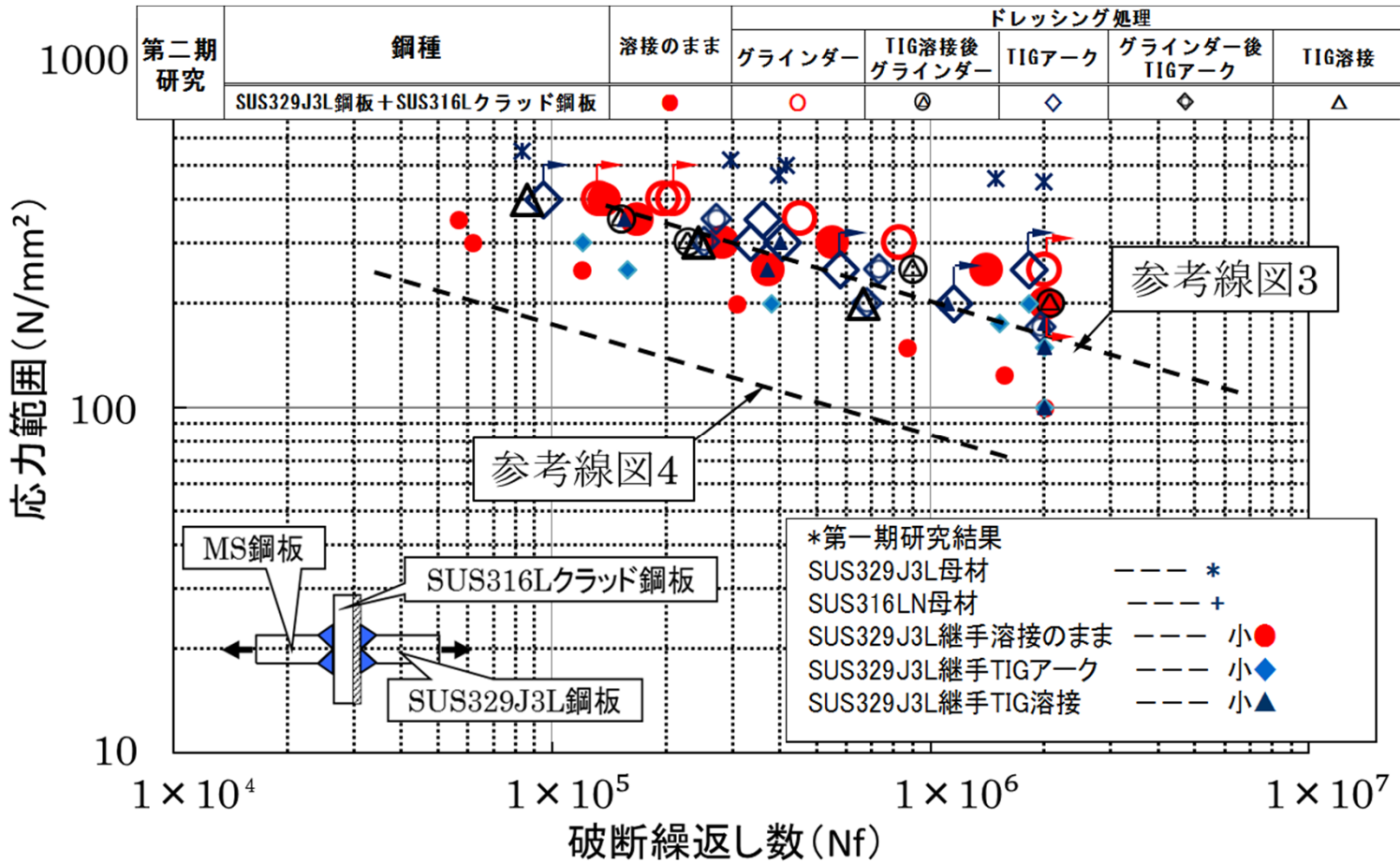
# 10.4 疲労試験結果 母材および突合せ溶接継手



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鋼板同士の突合せ溶接継手とSUS316LN鋼板同士の突合せ溶接継手とは、疲労強度にほとんど差はなく、僅かに(約10%) SUS329J3L鋼板同士の方が強いという結果であった

溶接のまま1は、溶接のままの試験結果と大差はなく、疲労限もほぼ同等。溶接のまま2では、溶接条件を厳選して余盛高さを低くし、止端部の形状をスムーズにした。止端部の応力集中係数を1.0に近づければ、疲労強度は、グラインダーによりドレッシング処理した継手やTIGアークによりドレッシング処理した継手と同等になることが明らかになった。したがって、止端部の形状によるものであると考えられる。

# 10.5 疲労試験結果 荷重伝達型 完全溶込み十字溶接継手

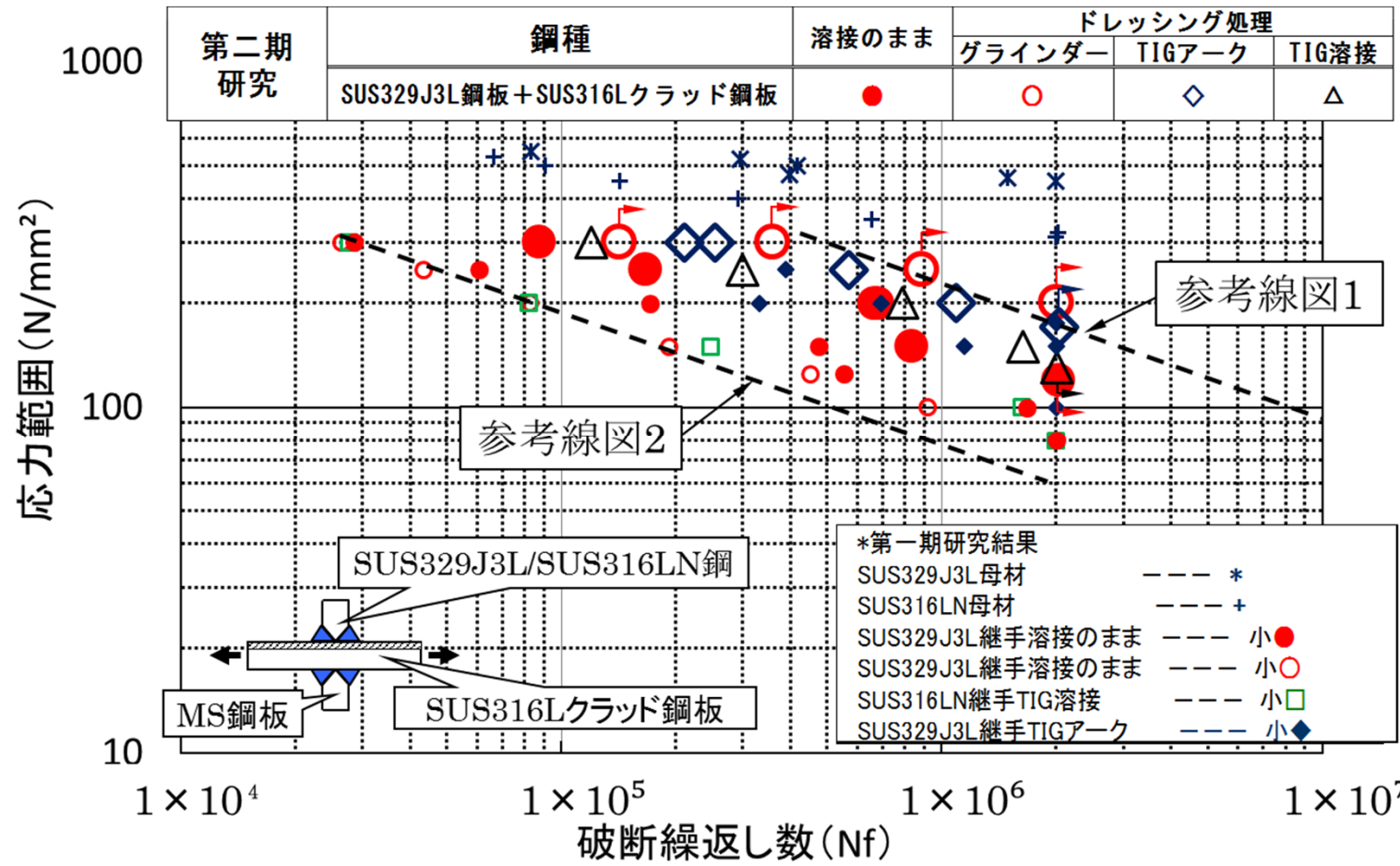


溶接条件を厳選して溶接継手形状を意識した溶接施工をした溶接のままは、ドレッシング処理をしたものと疲労強度は同程度になったと考えられる。

グラインダーによるドレッシング処理と、TIGアークによるドレッシング処理が疲労強度向上に最も適していると考えられる。

実船建造においては、溶接要員の技量にばらつきがあるため、第二期研究結果の溶接のままの適用は難しいと考えられるので、疲労強度に留意が必要な溶接止端部においては、適切なドレッシング処理を行うことが望ましい。

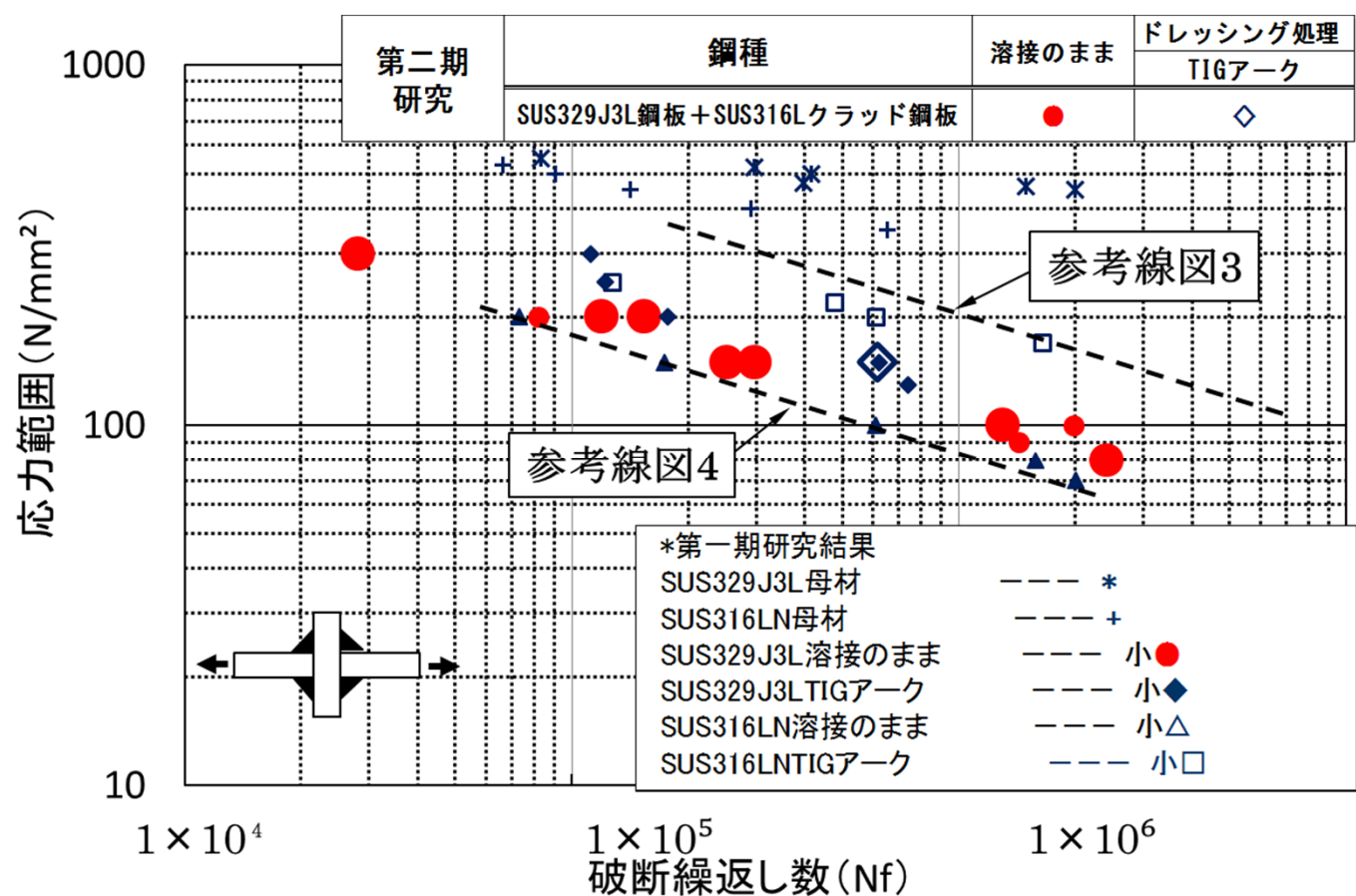
# 10.6 疲労試験結果 荷重非伝達型 完全溶込み十字溶接継手



溶接条件を厳選して溶接継手形状を意識した溶接施工をした溶接のままは、ドレッシング処理をしたものと疲労強度は同程度になったと考えられる。

クラッド鋼板の特性ではなく、溶接継手止端形状によるものであることが確認できた。TIGアークによるドレッシング処理、グラインダーによるドレッシング処理が信頼性は高いといえる。また、荷重伝達型の場合と同様、実船建造において、溶接要員の技量にばらつきがあるため、疲労強度に留意が必要な溶接止端部は、適切なドレッシング処理を行うことが望ましい。

# 10.7 疲労試験結果 荷重伝達型 十字隅肉溶接継手

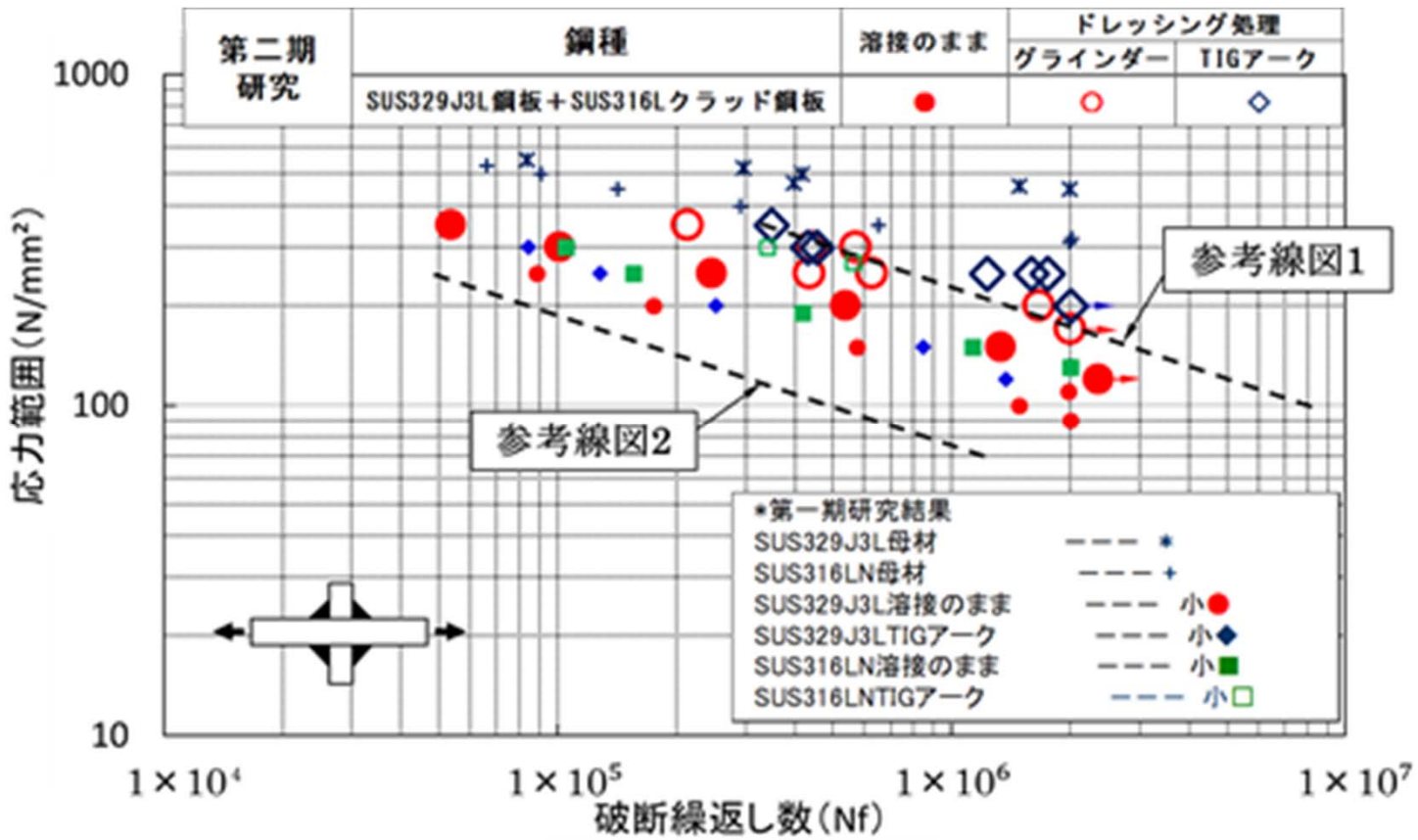


第二期と第一期の疲労試験結果は、ほぼ同等である。第一期研究結果では疲労亀裂発生位置は溶接継手止端部からであり、溶接継手止端部の影響が確認された。しかし、第二期の結果は、全ての試験片において、ルート部からの亀裂発生となった。

一般的に単純隅肉の場合、脚長と板厚との比が0.7程度以上であればトウ破壊とされているが、今回の結果においては、脚長と板厚との比が0.7程度以上であってもルート破壊することを確認した。第二期の供試溶接継手では、溶接条件の見直しにより止端部の形状が改善され**疲労強度が向上したため、亀裂発生位置がルート部へ移った**ことが考えられる。



# 10.8 疲労試験結果 荷重非伝達型 十字隅肉溶接継手

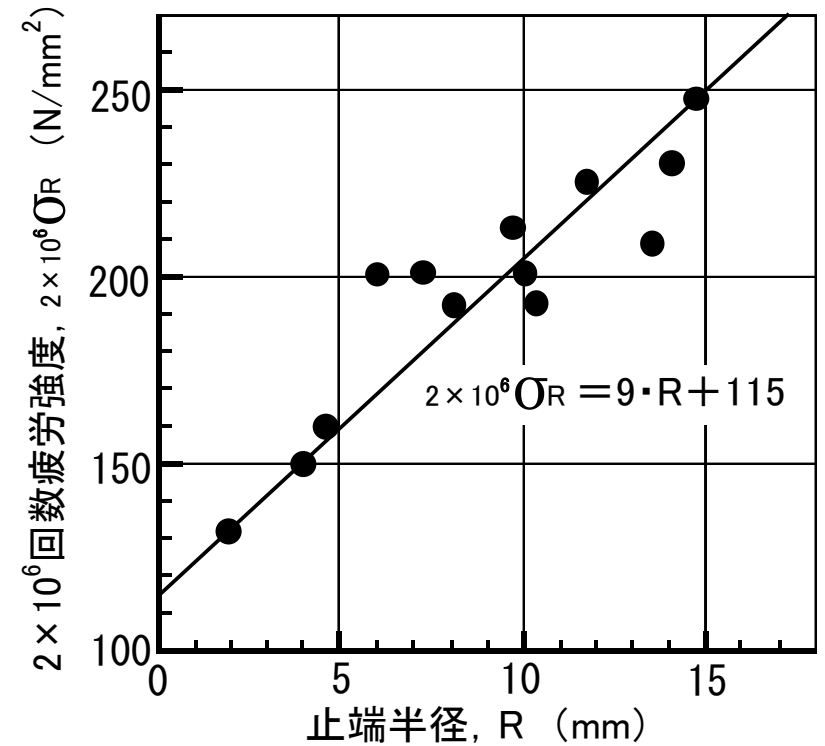


溶接条件の見直しにより継手止端部の形状が改善されたために良好な結果であった。SUS316LN鋼板同士と、SUS329J3L鋼板同士の疲労試験結果とでは、疲労強度にほとんど差はなかった。

TIGアークによるドレッシング処理，グラインダーによるドレッシング処理が信頼性は高いといえる。実船建造においては，溶接要員の技量にばらつきがあるため，第二期研究結果の溶接のままの適用は難しいと考えられるので，疲労強度に留意が必要な溶接止端部においては，適切なドレッシング処理を行うことが望ましい。

# 10.9 疲労試験 $2 \times 10^6$ 回疲労強度に及ぼす止端半径の影響

完全溶け込み十字溶接継手・十字隅肉溶接継手疲労試験結果			$2 \times 10^6$ 回 疲労強度 $2 \times 10^6 \sigma_R$ ( $N/mm^2$ )	止端半径 (平均値) R (mm)
SUS329J3L鋼板+SUS316Lクラッド鋼板				
荷重伝達型 完全溶け込み 十字溶接継手	溶接のまま	$\sigma_R = 4.24 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.210}$	201	7.3
	グラインダーによるドレッシング処理	$\sigma_R = 5.20 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.210}$	247	14.7
	TIG溶接後グラインダーによる ドレッシング処理	$\sigma_R = 4.39 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.210}$	209	13.5
	TIGアークによるドレッシング処理	$\sigma_R = 4.85 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.210}$	230	14.0
	ビード表面グラインダー仕上げ後 TIGアークによるドレッシング処理	$\sigma_R = 4.24 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.210}$	201	10.0
	TIG溶接によるドレッシング処理	$\sigma_R = 4.24 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.210}$	201	6.0
SUS329J3L鋼板+SUS316Lクラッド鋼板				
荷重非伝達型 完全溶け込み 十字溶接継手	溶接のまま	$\sigma_R = 3.15 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.210}$	150	4.0
	グラインダーによるドレッシング処理	$\sigma_R = 4.49 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.210}$	213	9.7
	TIGアークによるドレッシング処理	$\sigma_R = 4.03 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.210}$	192	10.3
	TIG溶接によるドレッシング処理	$\sigma_R = 3.37 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.210}$	160	4.6
SUS329J3L鋼板+SUS329J3L鋼板				
荷重非伝達型 十字隅肉 溶接継手	溶接のまま	$\sigma_R = 6.95 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.210}$	132	1.9
	グラインダーによるドレッシング処理	$\sigma_R = 1.01 \times 10^4 \cdot N_f^{-0.210}$	192	8.1
	TIGアークによるドレッシング処理	$\sigma_R = 1.18 \times 10^4 \cdot N_f^{-0.210}$	225	11.7



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、 $2 \times 10^6$ 回疲労強度は、 $200N/mm^2$ 程度以上確保出来るものと考えられる。

## 10.10 疲労試験 溶接条件

- ・突合せ溶接：溶接電流は170Aから200A，溶接電圧は30Vから34V，溶接速度は16cm/minから26cm/minを組み合わせた範囲。入熱量は16kJ/cmから25kJ/cmをねらい値として。
- ・完全溶け込み十字溶接継手：溶接電流は170Aから200A，溶接電圧は29Vから32V，溶接速度は20cm/minから45cm/minを組み合わせた範囲。入熱量は7kJ/cmから18kJ/cmをねらい値として。
- ・十字隅肉溶接継手：溶接電流は190A，溶接電圧は32V，溶接速度は32cm/minから39cm/minを組み合わせた範囲。入熱量は9kJ/cmから12kJ/cmをねらい値として。
- ・TIGアークによるドレッシング処理：溶接電流は150Aから180A，溶接速度は11cm/minから13cm/minを組み合わせた範囲。
- ・TIG溶接によるドレッシング処理：溶接電流は160Aから180A，溶接速度は11cm/minから15cm/minを組み合わせた範囲。形状が凸にならないよう施工すること。

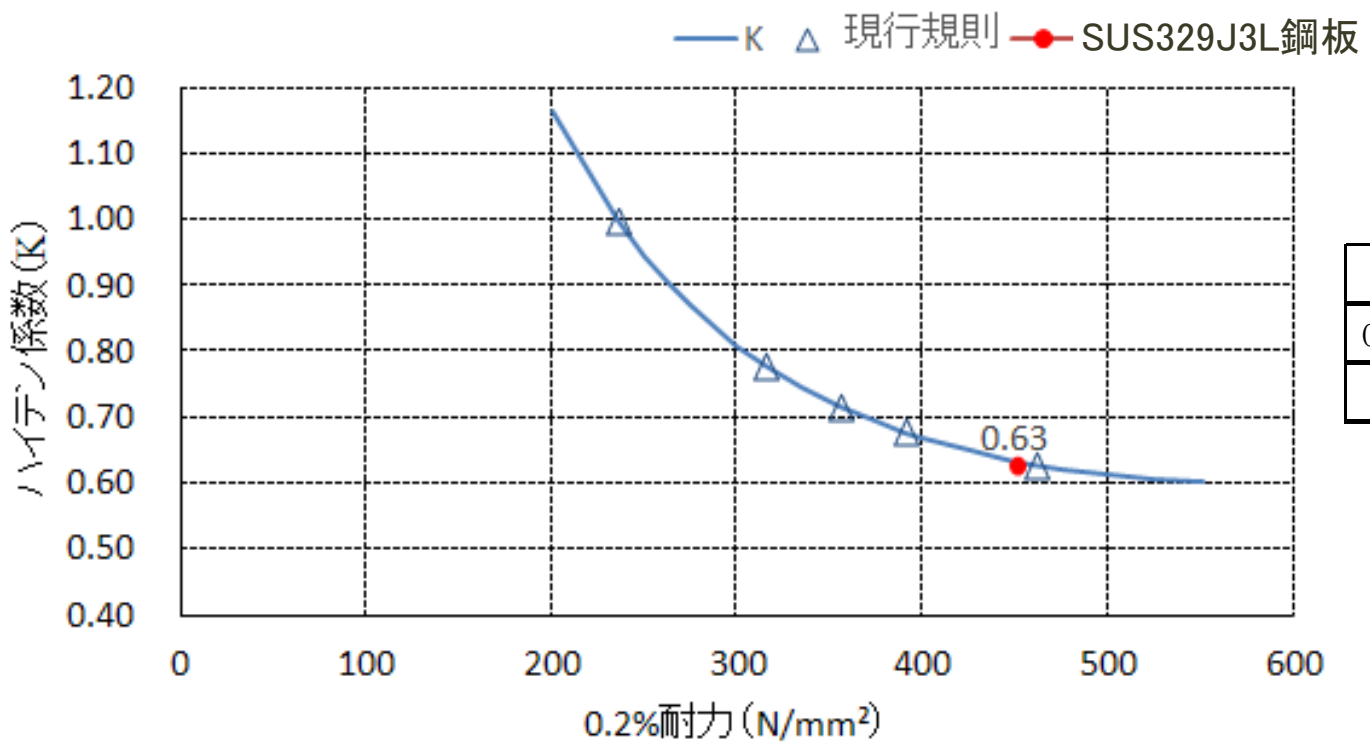
## 10.11 疲労試験 まとめ

- ・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鋼板同士の突合せ溶接継手とSUS316LN鋼板同士の突合せ溶接継手とでは，疲労強度は 約10 % (約1.1倍) SUS329J3L鋼板同士の方が強い。
- ・溶接継手止端部の，ドレッシング処理の方法として，グラインダーまたはTIGアークによるドレッシング処理がより大きな効果を示した。
- ・今回供試した溶接のままの継手では，止端形状を意識して溶接施工したため，止端部TIG溶接後グラインダーによるドレッシング処理，ビード表面グラインダー仕上げ後TIGアークにとるドレッシング処理などで，疲労強度の向上はほとんど無かった。実船の溶接作業において，溶接要員の技量にばらつきがあるため，今回供試した溶接のままの継手と同等の溶接施工は難しいと考える。そのため，特に疲労強度に考慮が必要な個所は，止端Rが10mm程度になるドレッシング処理が必要になると考える。
- ・SUS329J3L鋼板についても，各種ドレッシング処理を施すことで，従来鋼板と同様に，溶接のままの疲労強度と比べて応力比で1.3倍以上，疲労寿命として2.2倍以上の効果を得られることが確認できた。

# 11.1 ハイテン係数検討のための高温引張試験

SUS329J3L鋼板の常温～100℃のハイテン係数検討に必要なデータを得るため高温引張試験を行い材料強度のバラツキを確認する。

腐食影響を考慮した常温でのハイテン係数(K)

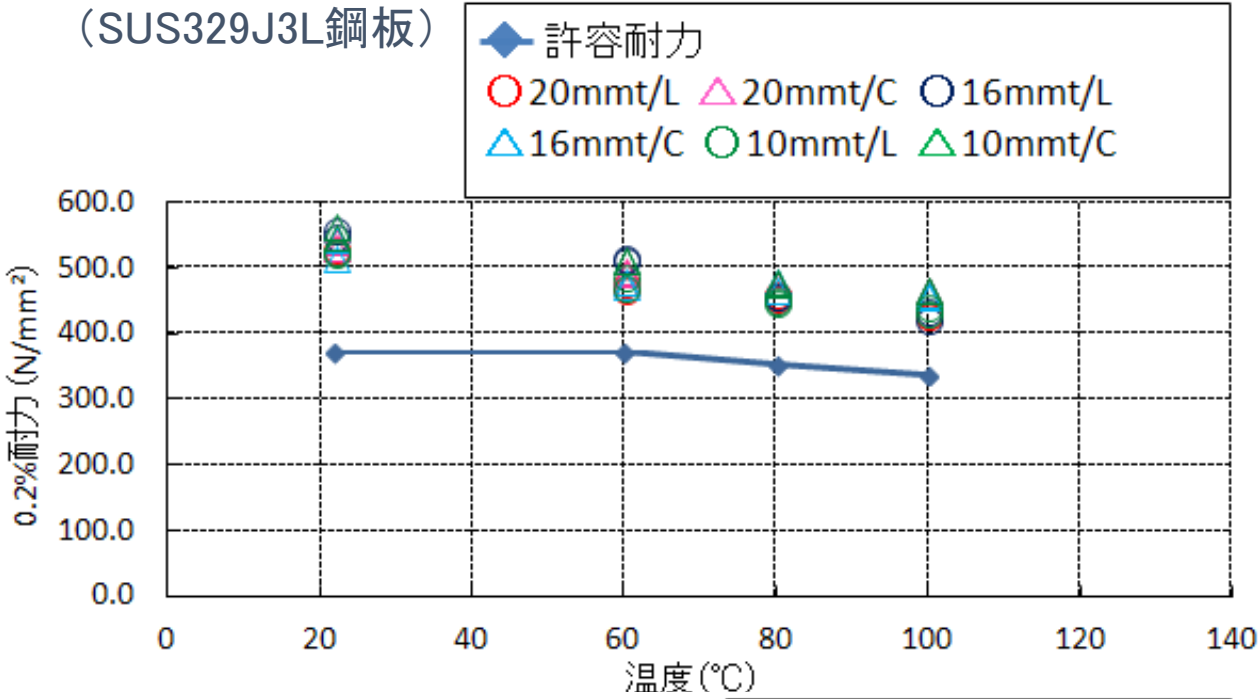


鋼種	MS	32HT	36HT	40HT	47HT
0.2%耐力	235	315	355	390	460
K	1	0.78	0.72	0.68	0.62

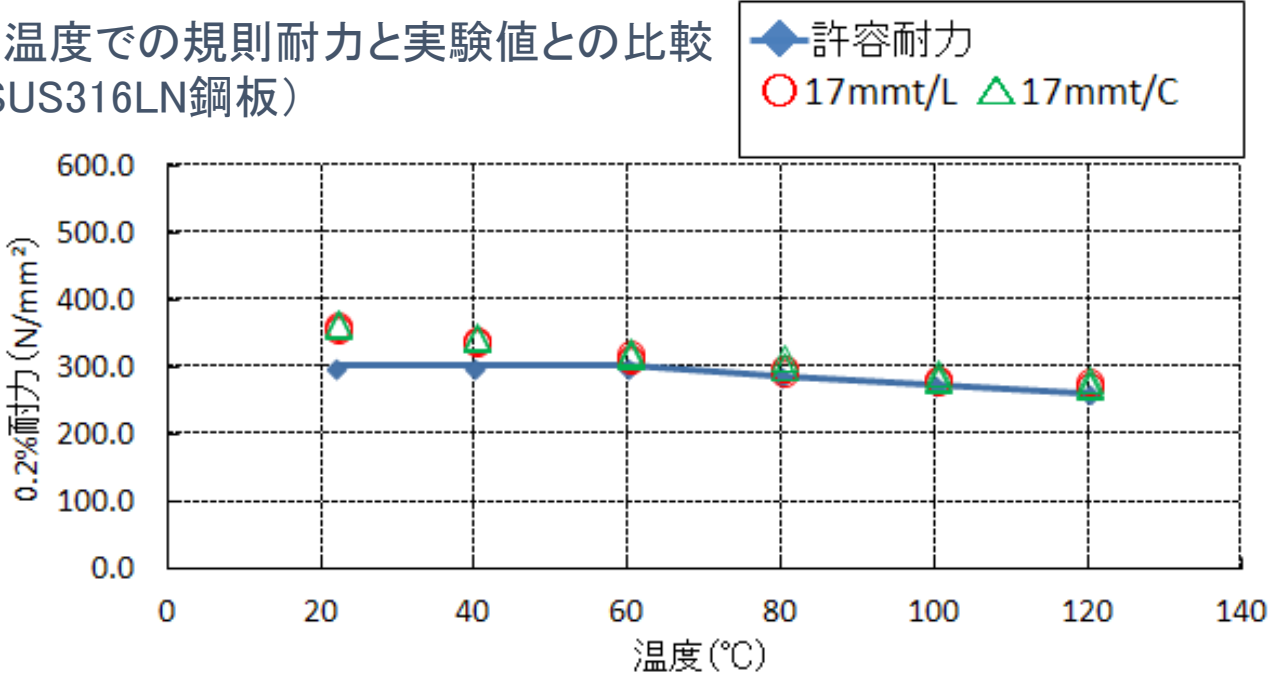
ハイテン係数(K)および腐食による強度低下を考慮した推定式により、SUS329J3L鋼板のハイテン係数を求めると0.63となる。上図にはSUS329J3L鋼板と船級規則に依るハイテン係数(K)を示す。上図より明らかのように、整合性が取れていると言える。

# 11.2 ハイテン係数検討のための高温引張試験

各温度での規則耐力と実験値との比較  
(SUS329J3L鋼板)



各温度での規則耐力と実験値との比較  
(SUS316LN鋼板)



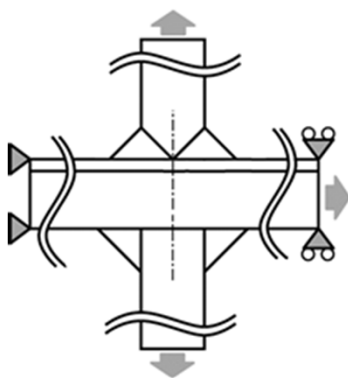
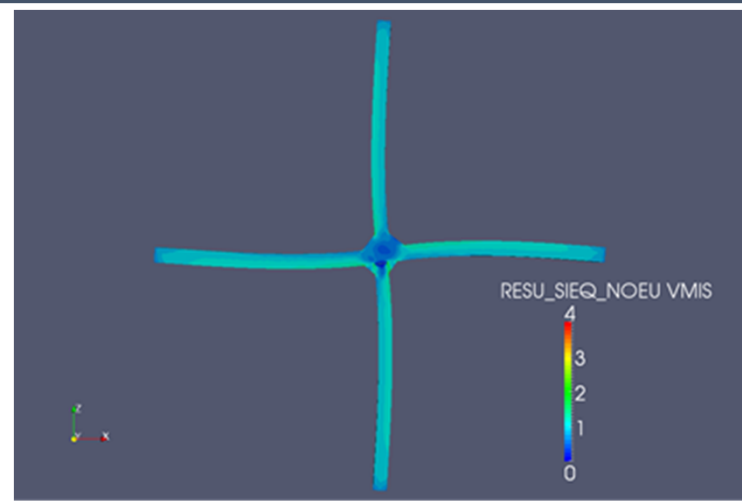
SUS329J3L鋼板は  
SUS316LN鋼板  
よりも余裕が有る。  
船級規則の温度影響  
係数は  
SUS329J3L鋼板にも  
適用可能。

# 12.1 二軸応力下での疲労強度に関する検討

二相ステンレス鋼板のケミカルタンカー実船適用には、SUS329J3L鋼板の強度が高いので従来のSUS316LN鋼板との組合せに比べ、SUS316Lクラッド鋼板側の応力が更に高くなることが予想されるので、二重底との十字溶接継手部の疲労強度を考慮した構造設計が重要である。その詳細な検討の基礎として、二相ステンレス鋼板を想定したコルゲートバルクヘッドと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、各溶接止端部の応力集中係数の把握を行った。



- ・非構造格子。
- ・最小格子幅(溶接止端部, ルート端部): 0.3mm。



	一軸引張	二軸引張			
L方向荷重 (Pa)	1	1	1	1	1
T方向荷重 (Pa)	0	0.2	0.5	1	2

- ・脚長寸法の影響。
- ・軟鋼板側 溶接条件の影響。
- ・目違いの影響。
- ・モールドの影響。
- ・増脚長の効果。
- ・ルートギャップの影響。

## 12.2 二軸応力下での疲労強度に関する検討

- ・当初心配されたバルクヘッドの荷重による二重底頂板の溶接止端部の応力集中係数の拡大はフランク角が $135^\circ$  以上であれば問題がない。
- ・コルゲートバルクヘッド側の脚長について、0.5 t, 0.7 t, 1.0 tを比較した結果脚長1.0 tの場合、荷重比の増加に伴い、応力集中係数は最も小さくなった二重底フロア側(軟鋼板側)が隅肉溶接の場合、コルゲートバルクヘッド側と二重底のフロア側の脚長は揃えた方が良いと言える。
- ・コルゲートバルクヘッド側(Duplex鋼板側)と二重底フロア側(軟鋼板側)の板厚が同厚の場合、二重底フロア側は深溶込みとし、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)にすることが良く、コルゲートバルクヘッド側の脚長を1.0 tとすれば、二重底フロア側の脚長も1.0 tにすることが良いと考えられる。
- ・目違いのある十字溶接継手では、十字溶接継手部の中心から離れた位置にある水平部材側溶接止端部、および中心に近い垂直部材側溶接止端部の応力集中係数が増大する。特に水平部材側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高くなることから、目違いには十分な配慮が必要である。
- ・モールド合わせでは、極端な応力集中の増減部分が発生するため、モールド合わせは避けることが望ましいと考えられる。
- ・目違いのある十字溶接継手について、増脚長の効果を検討した結果、JSQSに記されている十字溶接継手の目違いの処置方法がDuplex鋼板についても適用出来ると考えられる。



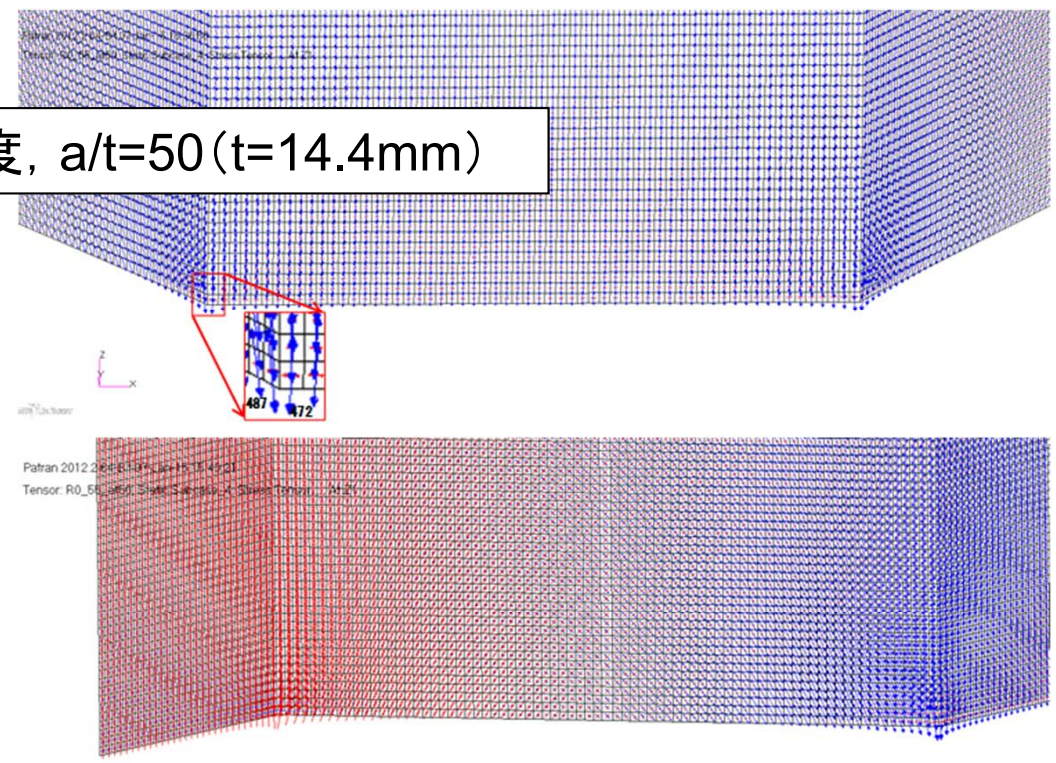
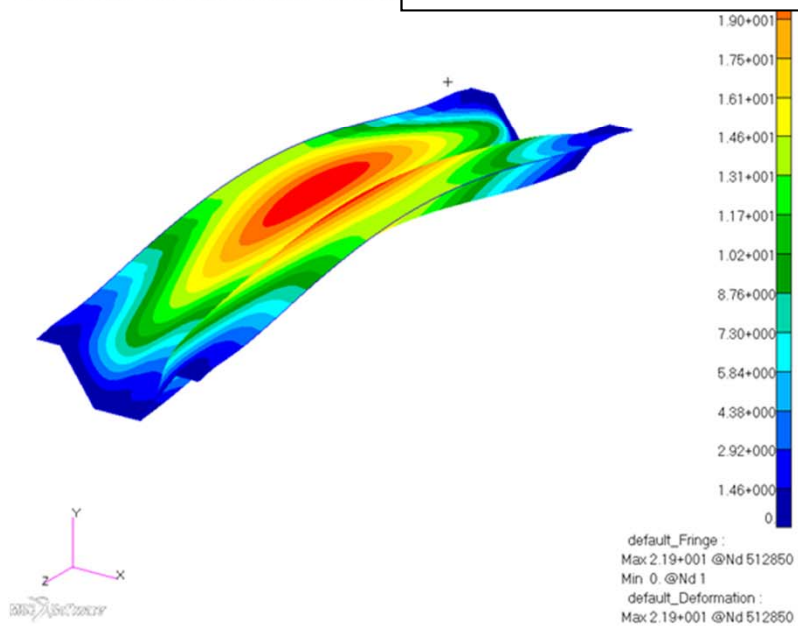
# 13.1 コルゲートバルクヘッドコーナーのピーク応力とコルゲートの有効幅

ケミカルタンカーなどで良く採用されるコルゲートバルクヘッドはコーナー位置で高い応力が発生することは良く知られているが、コルゲート形状を決めるパラメータの影響については系統的に調査された例は見当たらないので、高強度材の採用により薄板化が進むことを考慮しコーナー半径(R)、傾斜角( $\theta$ )および面材幅と板厚との比(a/t)の影響について検討した。

## (計算モデル)

Patran 2012.2 64-Bit 07-Jan-15 13:01:51  
Fringe: R0\_55\_at50, Static Subcase, Displacements, Transla  
Deform: R0\_55\_at50, Static Subcase, Displacements, Transla

計算結果例: R=90,  $\theta=55$ 度, a/t=50 (t=14.4mm)



- ・両端固定のスパン10mとし等分布荷重147N/m<sup>2</sup>(15t/m<sup>2</sup>)を負荷。
- ・コルゲートのピッチ方向境界条件は対称条件。メッシュサイズは8.9~12mm。
- ・コーナー半径0mmの場合はメッシュ境界線上にビーム要素を追加。

## 13.2 コルゲートバルクヘッドコーナーのピーク応力と コルゲートの有効幅

- ・コーナー半径を大きくすると断面係数は小さくなるが、コーナーの表面応力は小さくなり、大きいコーナー半径が疲労強度上は有利。
- ・ウェブの傾斜角を立てると、平均応力もコーナー表面応力も小さくなり、傾斜角を立てた方が疲労強度上有利。
- ・疲労強度に対する効果は、傾斜角よりもコーナー半径の方が大きい。
- ・高強度材を採用し薄板化した場合、平均応力に対するコーナー部応力の拡大率が大きくなることが心配されたが拡大率は変わらなかった。
- ・フェースの有効幅は荷重形態には影響されず、端部固着度の影響が大きいと考えられる。通常 両端固定が 有効幅は最も狭くなると言われるが、両端の固着度の組合せ次第では、両端固定よりも狭くなると考えられる。

## 14. 研究成果

### 適用船舶

2014年11月15日就航。



船種：ケミカルタンカー  
（濃硫酸・パーム油運搬船）

Lpp × B × D：115 × 20.6 × 11.3m,  
DWT：12,500 MT

船籍：Marshall

\* 12,500 MTケミカルタンカーを現在建造中（計4隻）。



- ・2016年8月就航予定。
- ・2016年9月就航予定。
- ・2017年6月就航予定。
- ・2017年8月就航予定。

# ClassNK

R & D P R O J E C T

ご清聴ありがとうございました。

本研究開発は、一般財団法人 日本海事協会の“業界要望による共同研究”のスキームにより、研究支援を受けて実施したものであります。

改めて関係各位に厚く御礼申し上げます。