

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

平成26年 5月30日

主体：株式会社白杵造船所

共同研究者：JFEスチール株式会社

新日鐵住金ステンレス株式会社

株式会社 タセト

一般財団法人日本海事協会

研究協力者：Stolt-Nielsen Limited

指導者：長崎総合科学大学 矢島教授，谷野准教授

塾 船大工 森 主宰

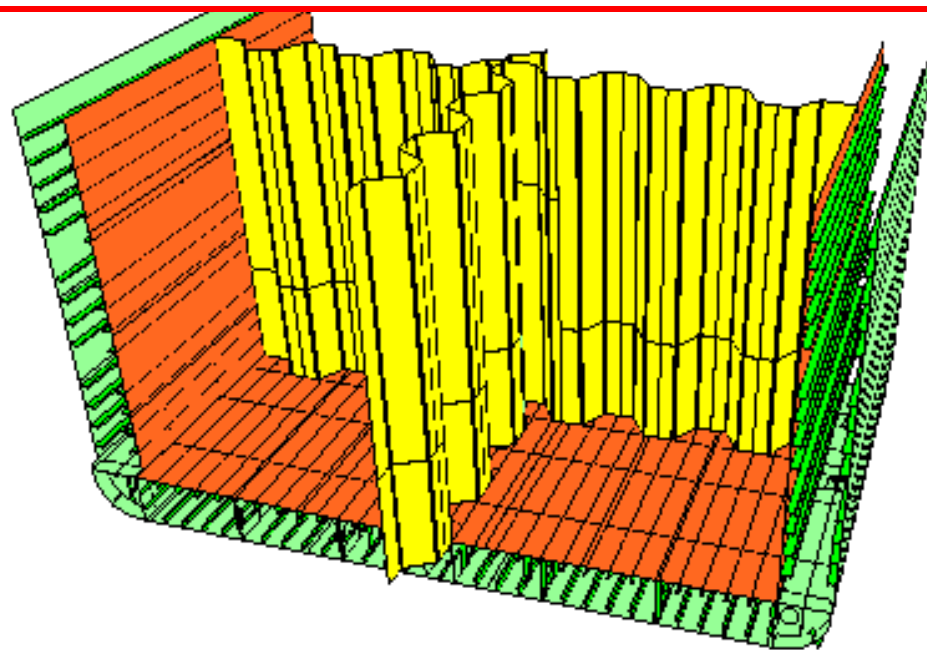


目的

- 欧州船主からの引合いに対応
- Duplex鋼板とSUS316Lクラッド鋼板とを組み合わせた世界でも実績はなく全く新しいケミカルタンカーの建造
- 実船建造に向けた設計基準・施工基準・詳細強度確認
- 規則の整備
- Niの国際価格変動に対する価格低減による競争力アップ
- 船体構造材として採用すれば軽量化できる。
- 日本国内中小造船所の競争力向上と他国造船所との差別化

適用予定箇所

- Duplex鋼板：センターバルクヘッド
トランスバルクヘッド
- SUS316Lクラッド鋼板：タンクトップ
ロンジバルクヘッド
上甲板 等



SUS316Lクラッド鋼板
の適用による、バラスト
タンク部の塗装品質の
保持



実施試験項目

- 疲労試験（母材，突合せ溶接継手，十字隅肉溶接継手，異材完全溶込み十字溶接継手）
- 二軸応力下での疲労強度
- 完全溶け込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り試験
- 腐食試験
- 過剰入熱影響度確認試験
- 異材完全溶込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
- ドレッシング部の組織観察



供試材

化学成分

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
Duplex鋼板	0.008	0.56	1.80	0.025	0.001	22.5	5.8	3.1	0.16
SUS316LN鋼板	0.019	0.69	0.60	0.027	0.001	18.22	10.6	2.83	0.17
SUS316Lクラッド鋼板	0.008	0.54	0.77	0.024	0.001	16.94	12.11	2.84	-

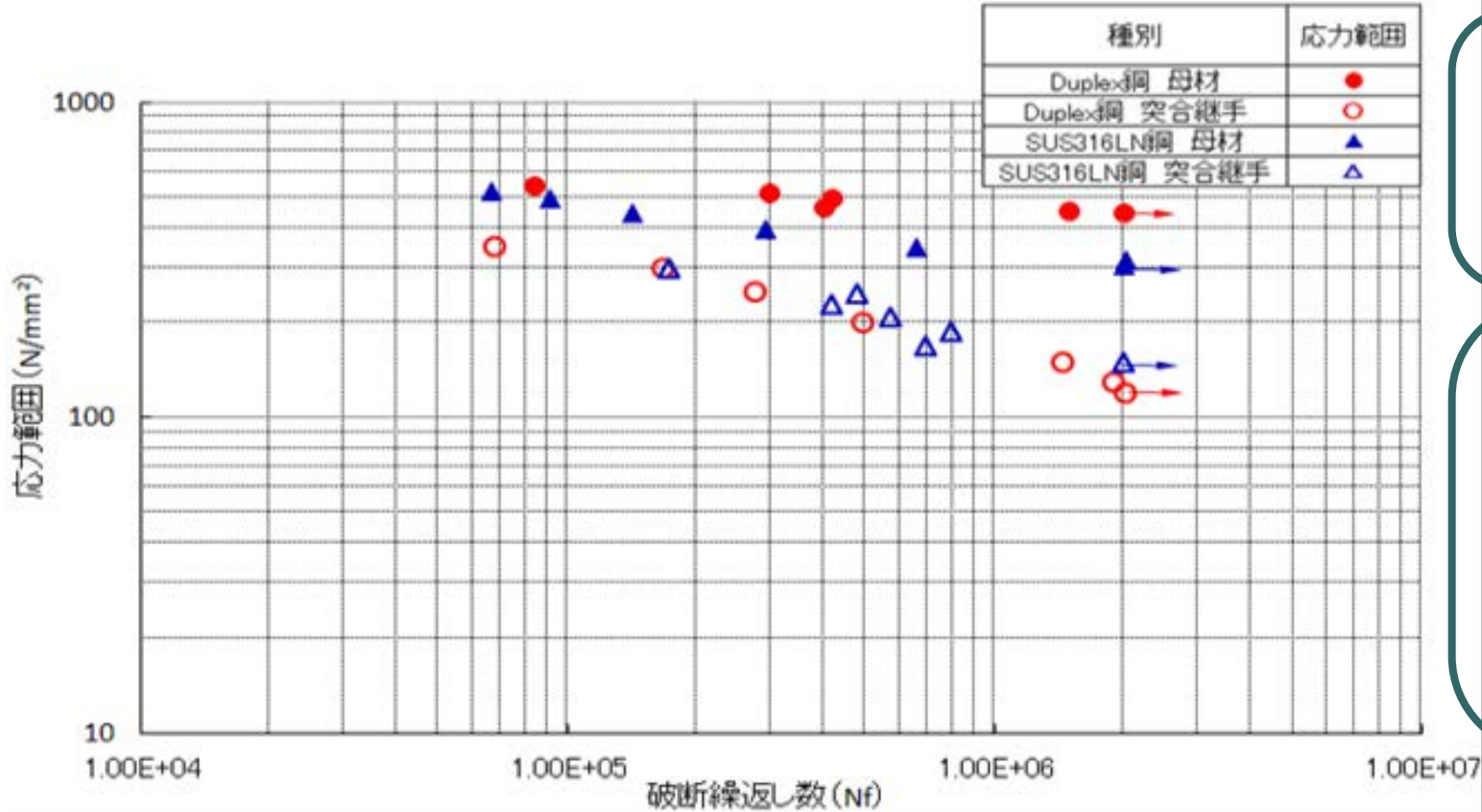
* SUS316Lクラッド鋼板は合せ材3mmの成分を示す。

機械的性質

	板厚(mm)	0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	硬さ (%)
Duplex鋼板	16	615	772	38	255
SUS316LN鋼板	17.5	399.00	679	48	194
SUS316Lクラッド鋼板	15	-	476	35	-

* SUS316Lクラッド鋼板は合せ材3mmの機械的性質を示す。

母材・突合せ継手疲労試験（結果）



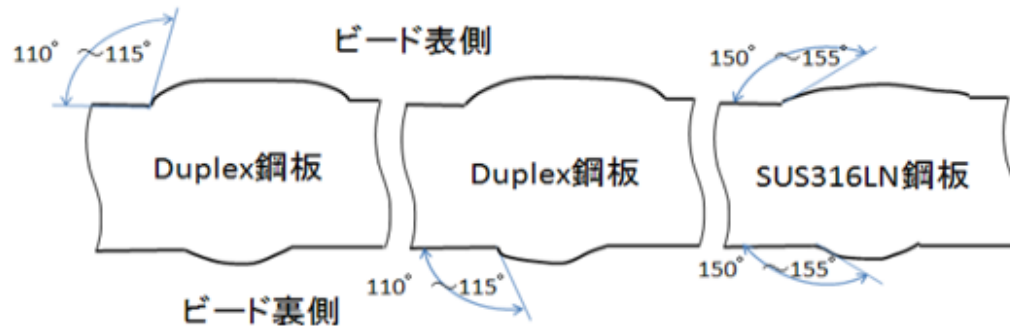
母材：
母材の強度に応じた疲労強度

突合せ継手：
Duplex鋼板同士
SUS316LN鋼板
疲労強度に大差は無く、疲労限もほぼ同等



母材・突合せ継手疲労試験（考察）

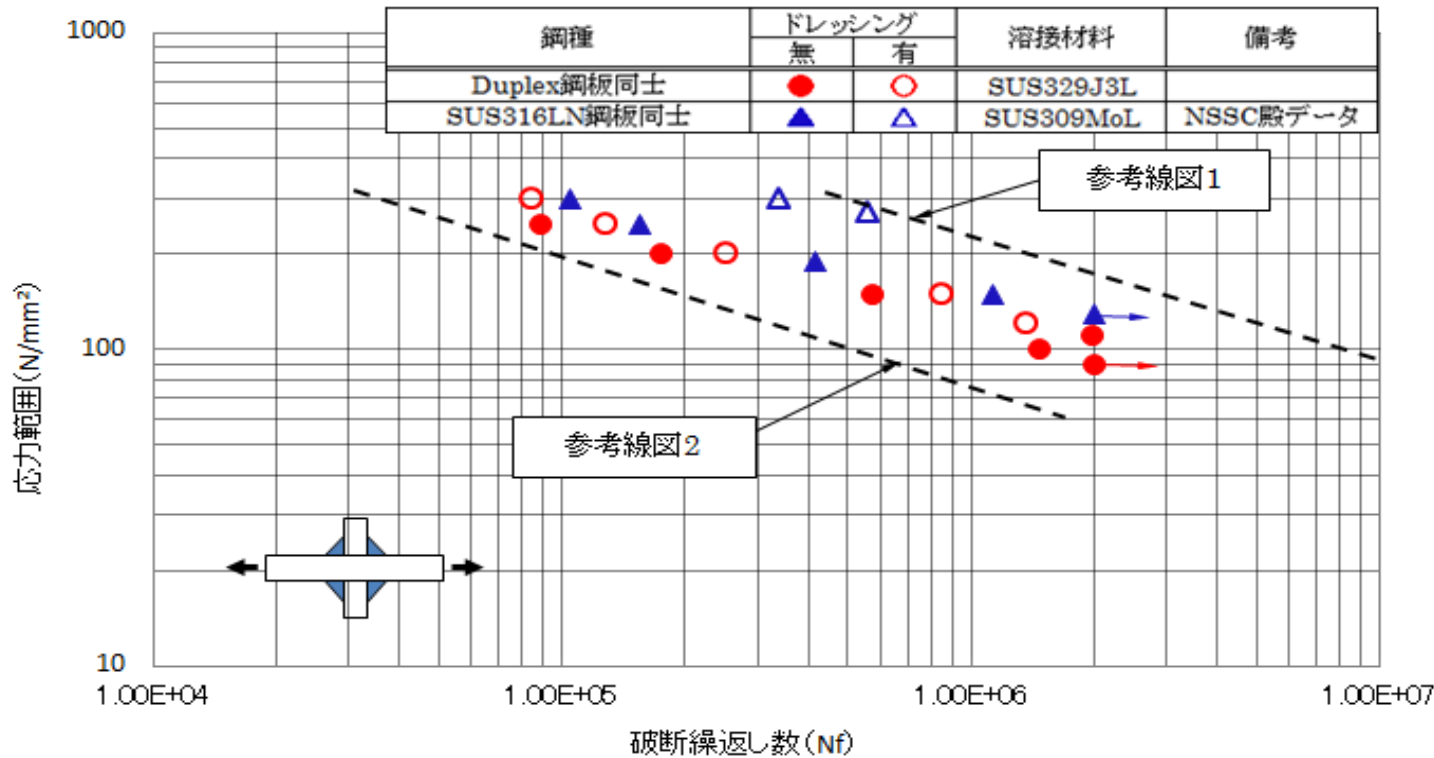
- SUS316LN鋼板→母材に比べて突合せ継手の疲労限約1/2低下
 - 一方、Duplex鋼板→母材に比べて突合せ継手の疲労限約1/3低下
- Duplex鋼板溶接継手の疲労強度の低下が著しい



突合せ継手においてDuplex鋼板同士とSUS316LN鋼板疲労強度に大差は無いが、Duplex鋼板同士の疲労強度が若干低いのは、溶接止端部形状の違い

- SUS316LN鋼板と同様にDuplex鋼板を実船適用可能であることを確認。
- 止端部形状を重点に、Duplex鋼板に最適な溶接条件、形状整形を実施し優位性を確認する必要がある→第二次研究を実施する。

十字隅肉溶接継手荷重非伝達 (結果)



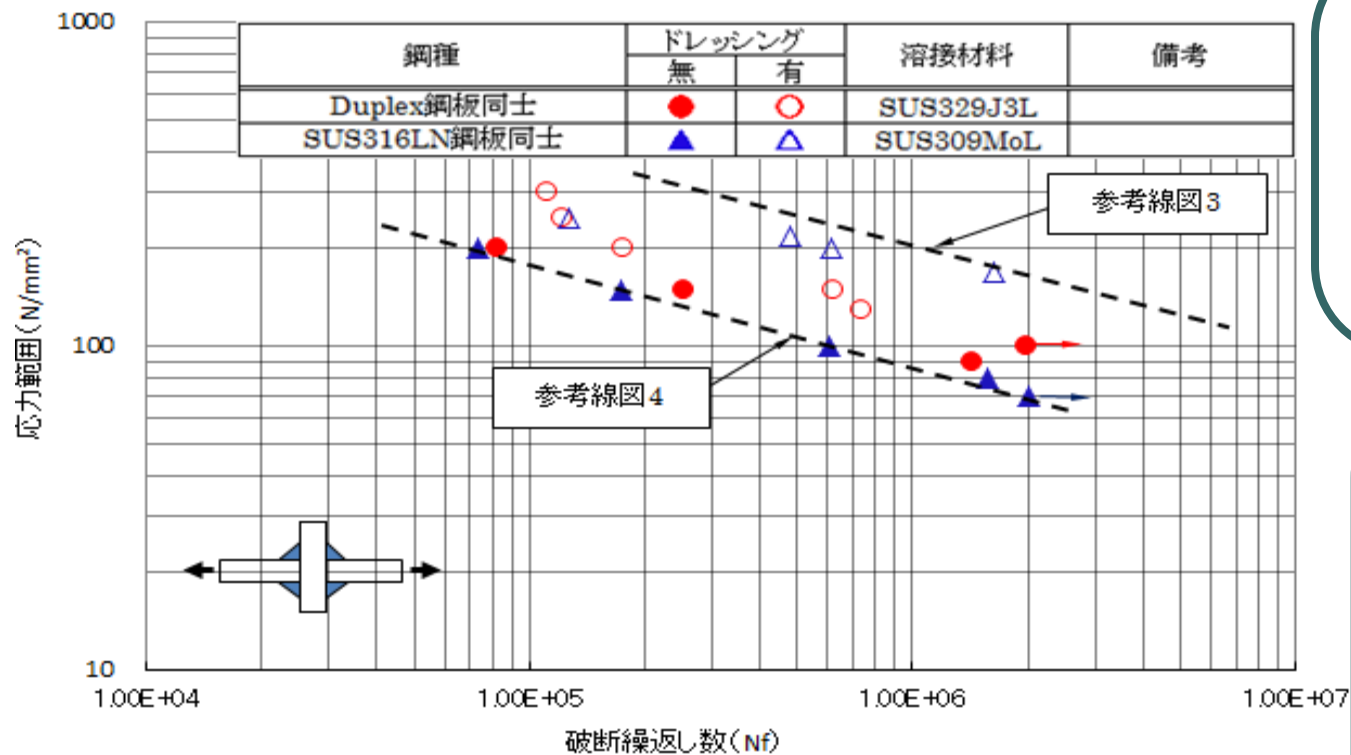
溶接まま：
Duplex鋼板同士が
SUS316LN鋼板に比
べ若干低い
→施工時期と施工場
所の違いによる

TIGなめ：
SUS316LN鋼板は
溶接のままに比べ
疲労強度が1.5倍程
度向上
Duplex鋼板同士は
多少向上しているが
効果があるとは言え
ない

参考線図1、2はUK-HSE (Health and Safety Executive) D線図の元となつた、試験データより得られた、平均線図を±2σ移動させた線図



十字隅肉溶接継手荷重伝達 (結果)



溶接まま：
Duplex鋼板同士が
SUS316LN鋼板同士に
比べ若干高いが、
大きな差はない。

TIGなめ：
SUS316LN鋼板同
士は溶接のままに比
べ大きく向上
Duplex鋼板同士は
多少向上しているが
効果があるとは
言えない

参考線図 3、4 はUK-HSE (Health and Safety Executive) D線図の元となつた、試験データより得られた、平均線図を±2σ移動させた線図

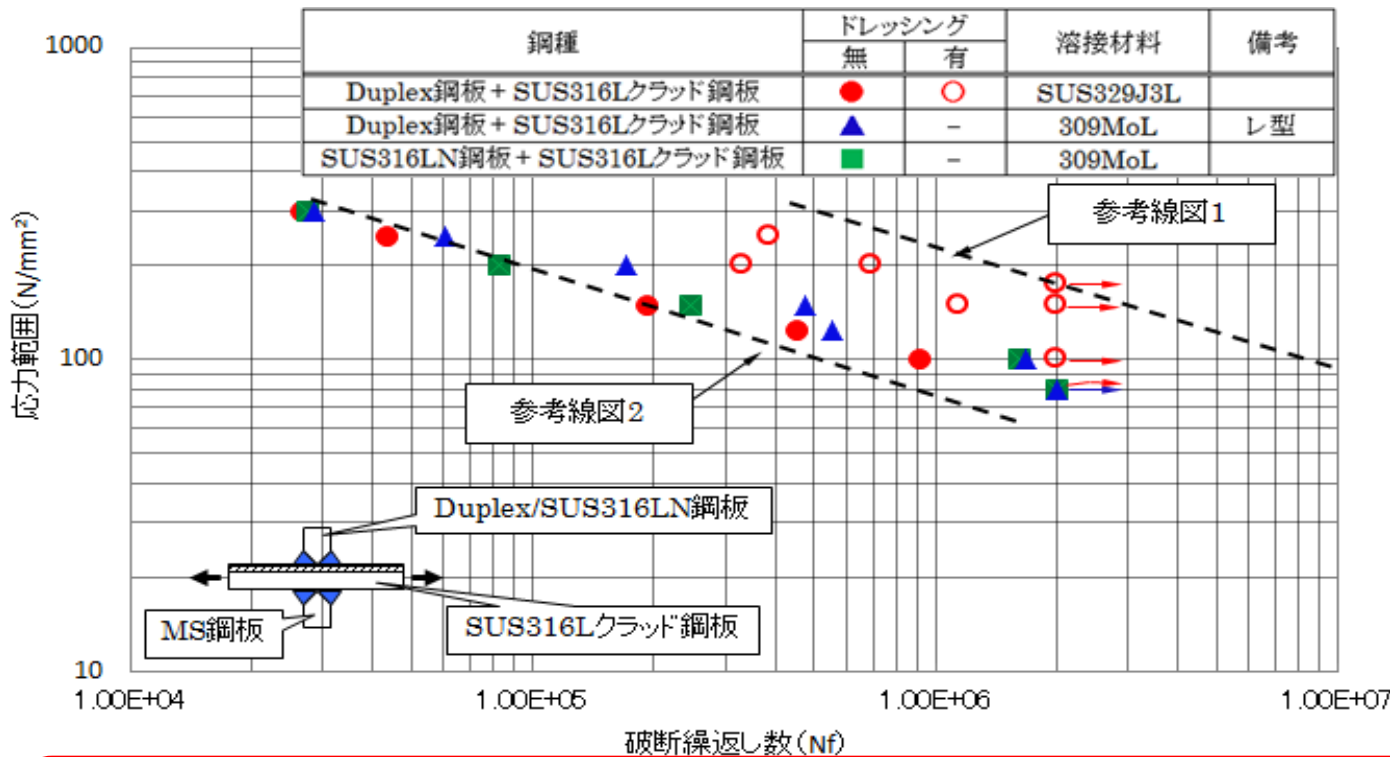


十字隅肉溶接継手

荷重非伝達・荷重伝達疲労試験（考察）

- Duplex鋼板同士とSUS316LN鋼板同士では、溶け込み深さが異なる可能性が考えられたが、差異は無く、疲労強度に及ぼす影響は無い
- 疲労強度の差は、止端形状の差による
- Duplex鋼板同士とSUS316LN鋼板同士は異質であることを認識し施工条件を決めることが重要
- 参考線図より、今回の疲労試験結果はこの範囲にある
- 止端部形状を重点に、Duplex鋼板に最適な溶接条件、形状整形を実施し優位性を確認する必要がある→第二次研究を実施する。

異材完全溶込み十字溶接継手 荷重非伝達試験（結果）



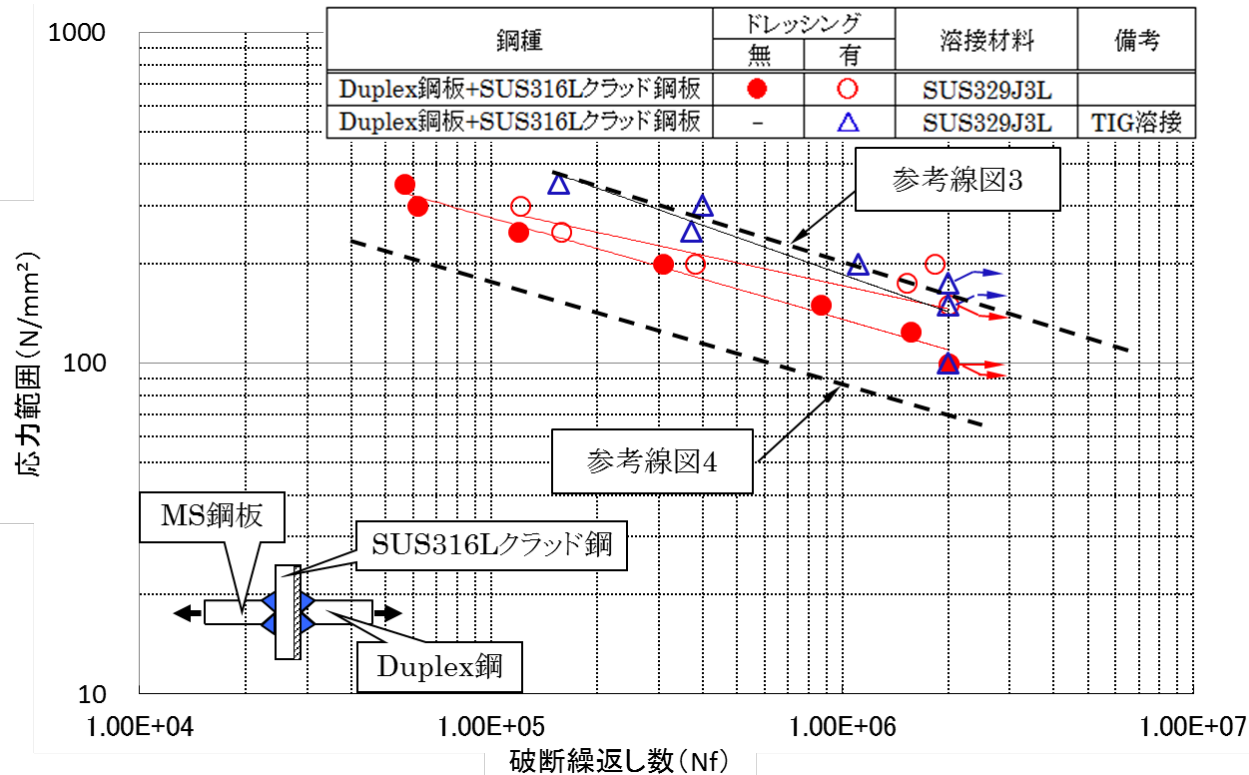
溶接まま：
組合せによる大きな
差異は無く、同等で
あった

TIGなめ：
Duplex鋼板 +
SUS316LN鋼板の溶
接のままより疲労強
度は1.5倍程度高く
なっている

参考線図1、2はUK-HSE (Health and Safety Executive) D線図の元となった、試験データより得られた、平均線図を±2σ移動させた線図



異材完全溶込み十字溶接継手 荷重伝達疲労試験（結果）



TIGなめ：
200N/mm²未満では
TIGなめの効果がある。但し、全体的には効果は小さい

TIG溶接：
溶接のままの1.5倍程度疲労強度が高くなっている

参考線図3、4はUK-HSE（Health and Safety Executive）D線図の元となった、試験データより得られた、平均線図を±2σ移動させた線図

異材完全溶込み十字溶接継手 荷重非伝達・荷重伝達疲労試験（考察）

- 異材完全溶込みではSUS316Lクラッド鋼の強度特性により、Duplex鋼板とSUS316LN鋼板の荷重非伝達では疲労強度に大きな差異は無い
- 荷重非伝達に比べ荷重伝達の疲労強度が高くなっているのは、材料の強度特性が表れている
- 疲労強度の差は、止端形状の差による
- 参考線図より、ばらつきはあるが今回の疲労試験結果はこの範囲にあり、実践適用が可能
- 止端部形状を重点に、最適な溶接条件、形状整形を実施し優位性を確認する必要がある

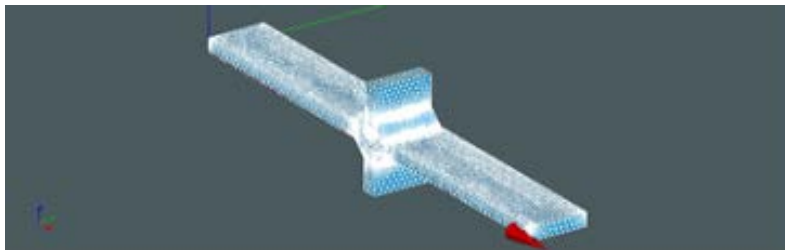


二軸応力下での疲労強度（検討）

Duplex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、それに伴う溶接継手部の二軸疲労強度解析を行う

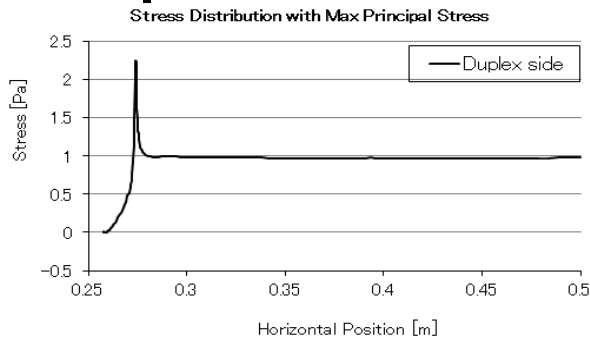
L方向およびT方向の荷重条件の組合せ

	一軸引張	二軸引張			
L方向荷重 (Pa)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
T方向荷重 (Pa)	0.0	0.2	0.5	1.0	2.0

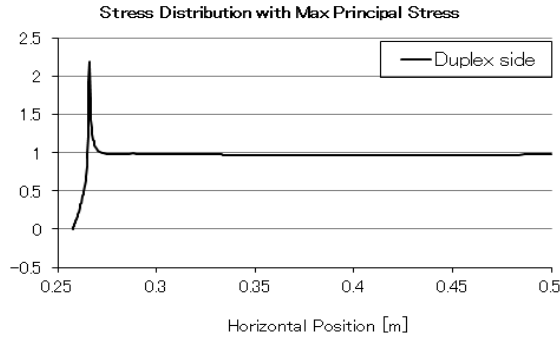


脚長は (16mm, 8mm)
(8mm, 16mm)
(16mm, 16mm)
(8mm, 8mm)
完全溶け込み、溶込み不良は
厚さ0.5mm、幅3.0mm、6.0mm

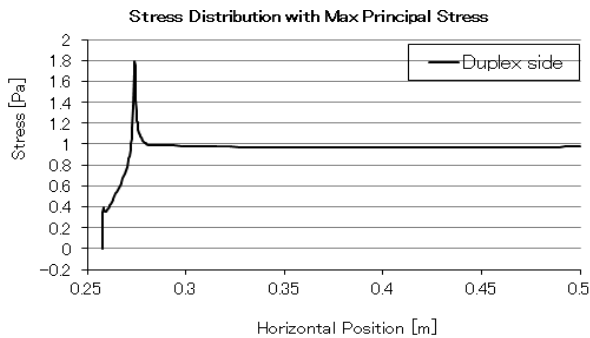
二軸応力下での疲労強度引張 (一軸引張)



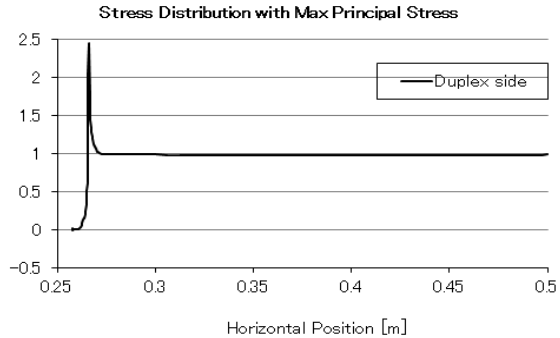
(a) 脚長 (16mm, 16mm)



(b) 脚長 (8mm, 8mm)



(c) 脚長 (16mm, 8mm)

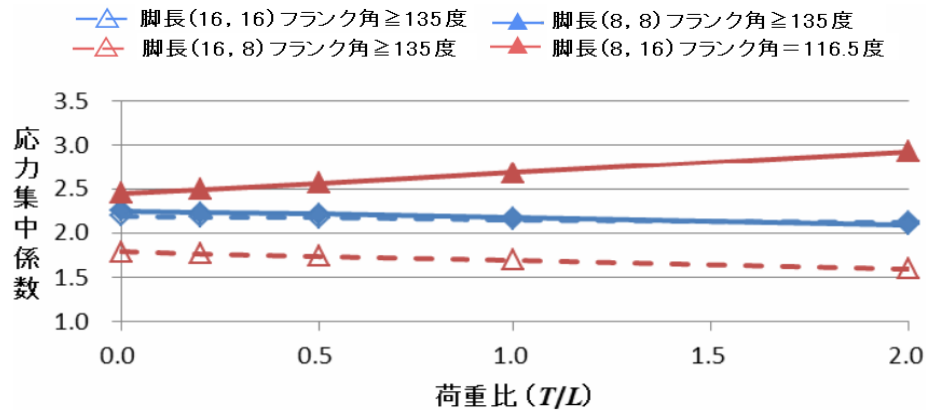


(d) 脚長 (8mm, 16mm)

一軸引張条件では脚長は
たて型ビード形状
(8mm, 16mm) の場合
は大きくなる

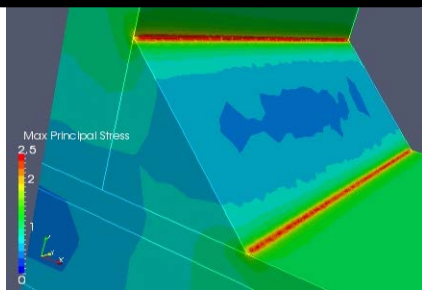
脚長	16mm, 16mm	8mm, 8mm	16mm, 8mm	8mm, 16mm
応力集中係数	2.25	2.19	1.79	2.45

二軸応力下での疲労強度 (二軸引張)

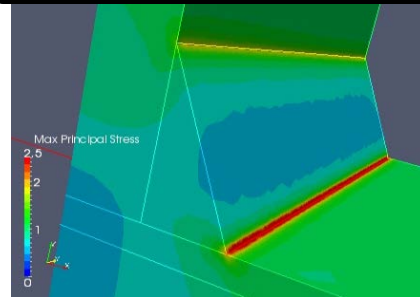


フランク角が 135° 以上の脚長(16mm, 16mm)、脚長(8mm, 8mm)ではT方向荷重により応力集中係数は若干小さくなるが、フランク角が 116.5° の脚長(8mm, 16mm)では応力集中係数は大きくなっている

フランク角 $\geq 135^\circ$



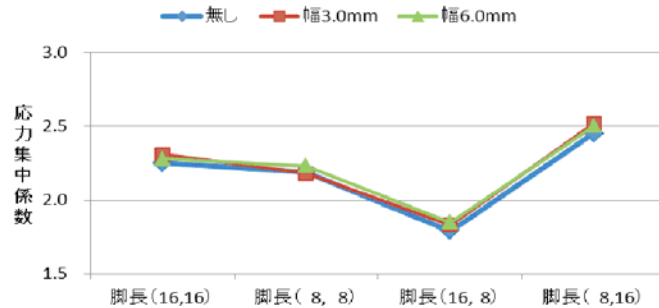
フランク角 = 116.5°



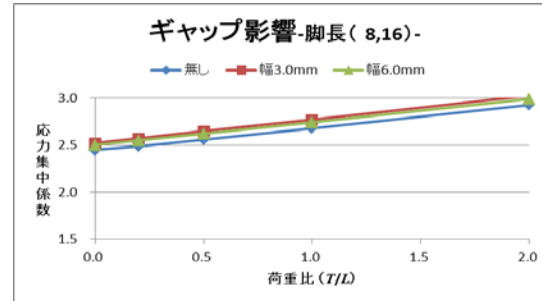
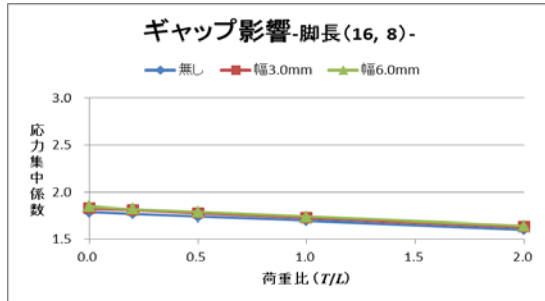
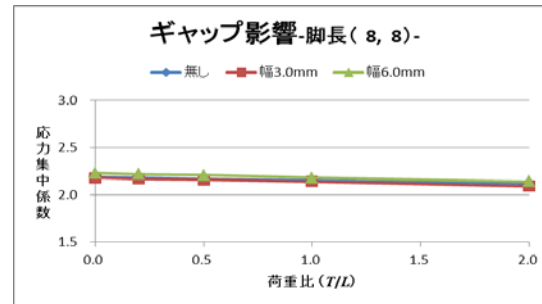
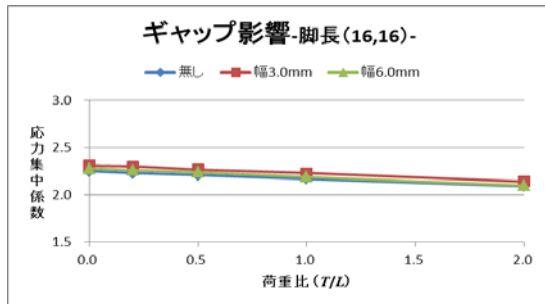
フランク角が 135° 以上では、T方向荷重により二重底頂板上の止端部の応力はごく僅かではあるが圧縮になり、L方向荷重による応力を減少させるが、フランク角 116.5° では、逆に引張になり加算されるためである



二軸応力下での疲労強度 (ギャップ影響)



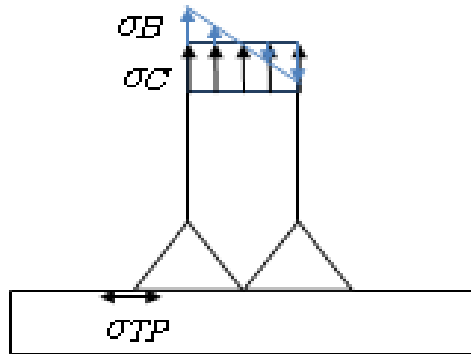
一軸引張条件 (L方向)
ギャップがあれば応力集中係数は大きくなるが、約3%である



二軸引張条件
ギャップの影響は小さいがたて型ビード形状の脚長(8mm, 16mm)ではその影響が他の形状に比べて大きい



二軸応力下での疲労強度 (曲げ応力)



コルゲートバルクヘッドは平板で構成されているので平板に荷重が働くと平板は曲げられるので曲げ応力 σ_B が付加されている可能性がある

(株) 臼杵造船所実施「125型 ケミカルタンカー 3次元構造強度解析書」
解析結果

- 比較的応力が高い中段部も板の表と裏の応力は同じであるので懸念された曲げ応力は殆んど無い
- Duplex鋼板採用による二重底頂板の溶接止端部の二軸応力下における応力上昇は無いことが確認
- フランク角が 116° 以下になるような豎型の溶接ビード形状では二重底部頂板の応力は若干大きくなる

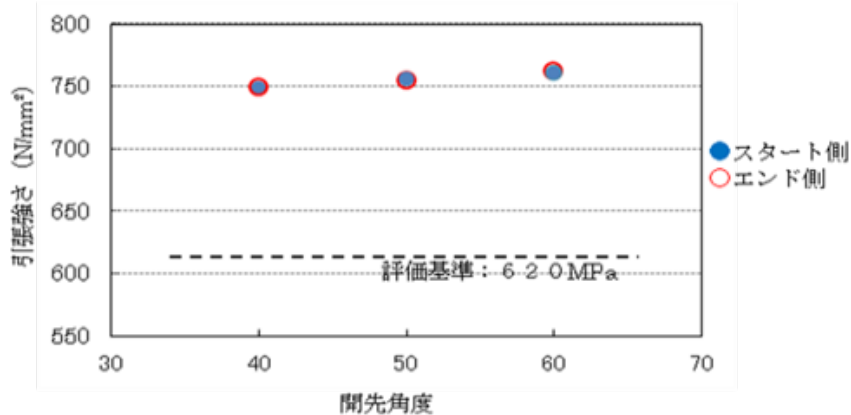
二軸応力下での疲労強度（考察）

- ・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° 以上であれば問題がないと考えられる
- ・フランク角が 135° より小さくなると応力集中係数は拡大するので溶接ビード形状には十分注意する必要がある
- ・Duplex鋼の採用で更に応力範囲が小さくなると思われるので二重底の疲労強度は安全側になると思われる
- ・Duplex鋼採用による二重底頂板の溶接止端部の二軸応力下における応力上昇は無いことが確認

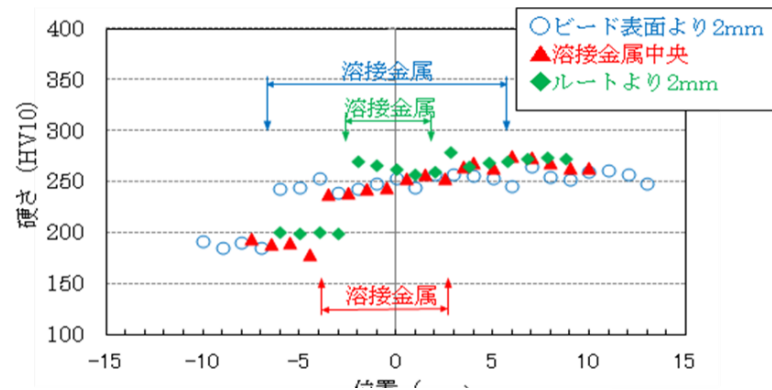


完全溶込T継手強度確認試験（結果）

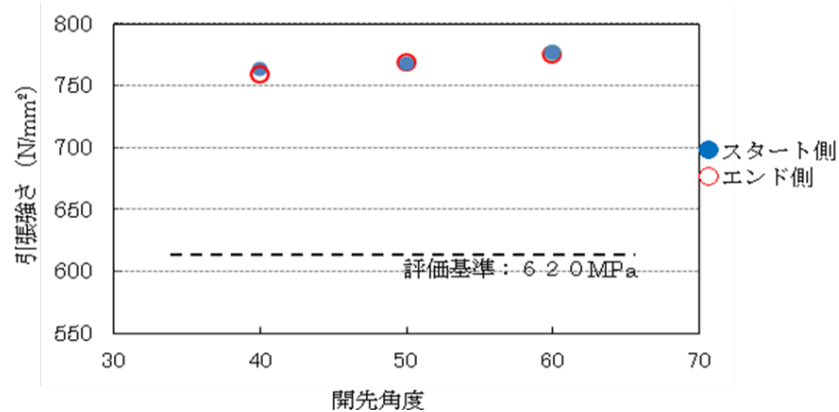
異材完全溶込T継手強度確認試験結果（室温大気中）



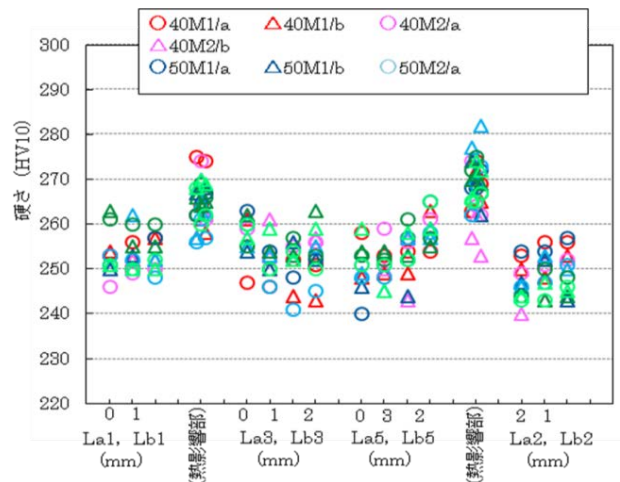
異材完全溶込T継手ビッカース硬さ試験結果



Duplex鋼板同士完全溶込T継手強度確認試験結果（室温大気中）



Duplex鋼板完全溶込T継手ビッカース硬さ試験結果



完全溶込T継手強度確認試験（考察）

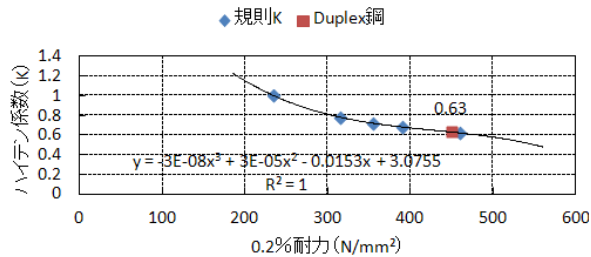
- いずれの開先角度においても溶込み不良を除き，溶接欠陥は皆無であった
- Duplex鋼板とSUS316Lクラッド鋼板とで硬さに差異がある→材料の強度特性が表れている
- いずれの開先角度においても，破断位置は全てDuplex鋼板母材側であった。引張り強さも 700N/mm^2 を上回っており，判定基準の“ 620N/mm^2 以上”を大幅に上回る優れた強度特性を有することが確認できた

ハイテン係数検討のための 高温引張試験

船級規則に規定されている鋼種と常
温でのハイテン係数 (K)

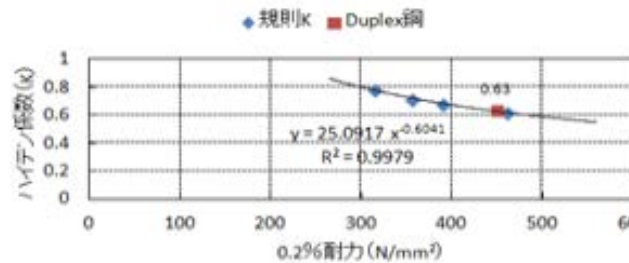
鋼種	MS	32HT	36HT	40HT	47HT
耐力	235	315	355	390	460
K	1.00	0.78	0.72	0.68	0.62

3次式



	MS	32HT	36HT	40HT	47HT
推定値	1	0.78	0.72	0.68	0.62

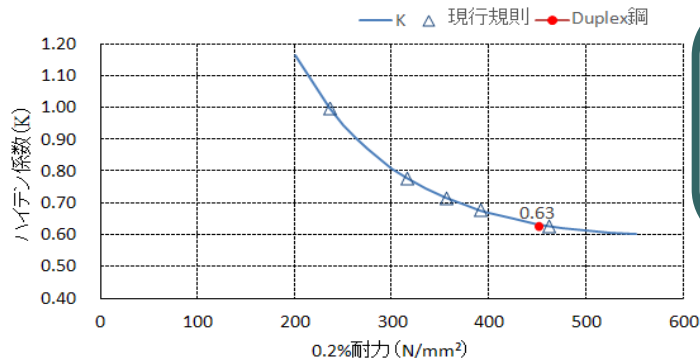
累乗2(MS除外)



	MS	32HT	36HT	40HT	47HT
推定値	-	0.78	0.72	0.68	0.62

3次式と累乗2が現行規則
のハイテン係数を最も
よく表現できることから
Duplex鋼板の常温での
ハイテン係数は0.63

腐食影響を考慮した常温でのハイテン係数 (K)

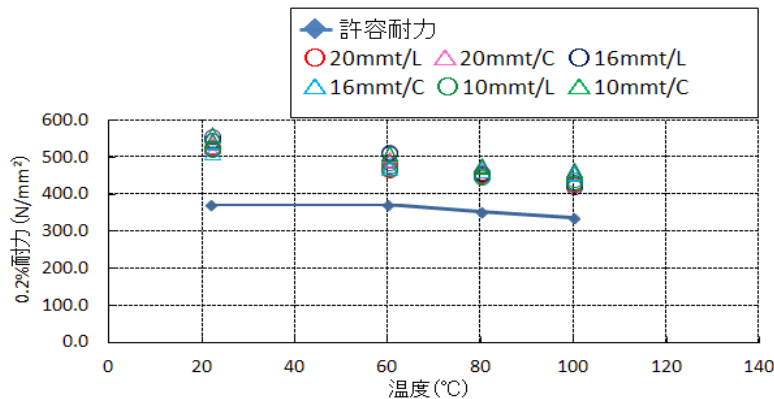


腐食による強度低下を
考慮した鋼板のハイテン
係数は0.63

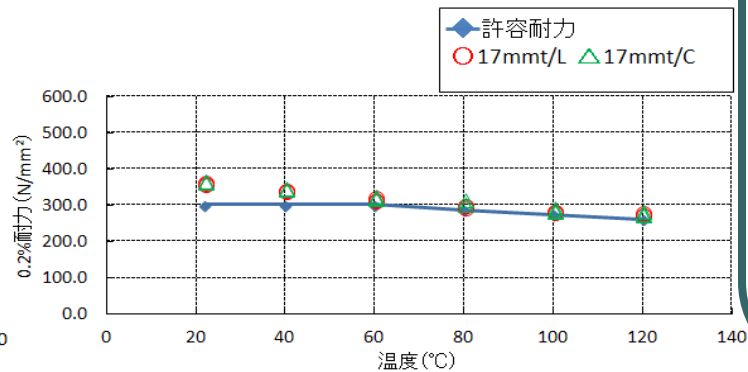
いずれの場合もハイテン
係数は0.63

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 (Duplex鋼板)



各温度での規則耐力と実験値との比較 (SUS316LN鋼板)



Duplex鋼板は
SUS316LN鋼板
よりも余裕が
有り，船級規
則の温度影響
係数は
Duplex鋼板に
も適用可能

ステンレス鋼板のハイテン係数 (K) は以下の式で推定できる

$$K = f_T f_C \frac{235}{\sigma_y}$$

$$f_C = 3.035 \left(\frac{\sigma_y}{1000} \right)^2 - 1.088 \left(\frac{\sigma_y}{1000} \right) + 1.088$$

$$f_T = \max \{ 1, 0.0025(T - 60) + 1.00 \}$$

腐食試験（結果）

塩化第二鉄腐食試験（JIS-G0578 B法）

試験時間 (hr)	温度(°C)	溶接方法	開先角度	入熱量	マ-ク	寸法(mm)			面積 (cm ²)	初重量 (g)	後重量 (g)	減量 (mg)	腐食速度 (g/m ² /h)	腐食速度 (mdd)	備考	
						t	w	L								
72	35	FCAW	50°	14kJ/cm	1-1	3.04	27.97	49.99	32.71	32.5701	32.1696	400.5	1.70	408.1	孔食有り	
					1-2	3.04	27.96	50.01	32.70	32.6057	32.1894	416.3	1.77	424.3		
				20kJ/cm	2-1	3.04	27.99	50.02	32.75	32.3961	31.9808	415.3	1.76	422.7		
					2-2	3.04	27.98	49.99	32.72	32.6214	32.1882	433.2	1.84	441.3		
		FCAW+SAW	45°	35kJ/cm	3-1	3.03	28.00	50.00	32.73	32.4127	32.0780	334.7	1.42	340.9		
					3-2	3.03	27.99	49.98	32.71	32.3770	32.0411	335.9	1.43	342.3		
				50kJ/cm	4-1	3.03	27.98	50.01	32.72	32.6937	32.3059	387.8	1.65	395.1		
					4-2	3.04	27.97	49.99	32.70	32.7245	32.3006	423.9	1.80	432.1		
	母材					5-1	3.04	27.98	49.98	32.70	32.5851	32.5777	7.4	0.03	7.5	
	母材					5-2	3.03	27.98	50.02	32.72	32.3634	32.3578	5.6	0.02	5.7	↓
	25	FCAW	50°	14kJ/cm	1-3	3.00	28.04	50.02	32.73	32.7332	31.8168	916.4	3.89	933.2	孔食有り	
					1-4	3.03	28.00	50.00	32.72	32.7237	32.3295	394.2	1.67	401.5	↓	
				20kJ/cm	2-3	3.03	27.99	49.99	32.71	32.7131	32.3810	332.1	1.41	338.4		
					2-4	3.04	27.98	49.98	32.71	32.7072	32.3975	309.7	1.32	315.6		
FCAW+SAW		45°	35kJ/cm	3-3	3.03	28.00	49.99	32.71	32.3143	32.3035	10.8	0.05	11.0	↓		
				3-4	3.04	28.01	49.99	32.74	32.4711	32.4702	0.9	0.00	0.9	孔食無し		
			50kJ/cm	4-3	3.03	27.97	49.98	32.69	32.6888	32.3813	307.5	1.31	313.6	孔食有り		
				4-4	3.03	28.00	50.00	32.72	32.7237	32.2913	432.4	1.84	440.5	↓		
母材					5-3	3.03	27.97	49.98	32.68	32.3526	32.3521	0.5	0.00	0.5	孔食無し	
母材					5-4	3.03	27.98	49.98	32.70	32.5051	32.5043	0.8	0.00	0.8	↓	
30	母材															

母材は、孔食発生臨界温度が35°C。突合せ溶接継手溶接金属は、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



腐食試験（考察1）

塩化第二鉄腐食試験（JIS G 0578）結果 新日鐵住金ステンレス（株）殿提供

鋼種	6%FeCl ₃ +1/20N HCl, 24h	
	CPT(°C)	CCT(°C)
S31803	35	17.5
SUS316LN-315M	35	12.5
SUS317L	20	5
SUS316L	15	0
NSSC2120	15	-
SUS304	5	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: Duplex鋼板

各種ステンレス鋼板の孔食指数 (PREN) および すき間腐食指数 (CI) 結果 新日鐵住金ステンレス（株）殿提供

分類	鋼種	主成分例 (%)	孔食指数 (PREN)	すき間腐食指数 (CI)
オーステナイト	SUS304	18Cr-8Ni	18	18
	SUS316L	17Cr-12Ni-2.1Mo	25	26
	SUS316LN-315M	18Cr-11Ni-2.9Mo-0.18N	30	34
	SUS317L	18Cr-12Ni-3.2Mo	28	31
二相	NSSC2120	21.5Cr-2Ni-3Mn-1Cu-0.17N	25	27
	S31803	22Cr-6Ni-3Mo-0.15N	35	39

孔食指数 (PREN: Pitting Resistance Equivalent Number), $PREN = \%Cr + 3.3 \times \%Mo + 16 \times \%N$

すき間腐食指数 (CI: Crevice corrosion resistance Index), $CI = \%Cr + 4.1 \times \%Mo + 27 \times \%N$

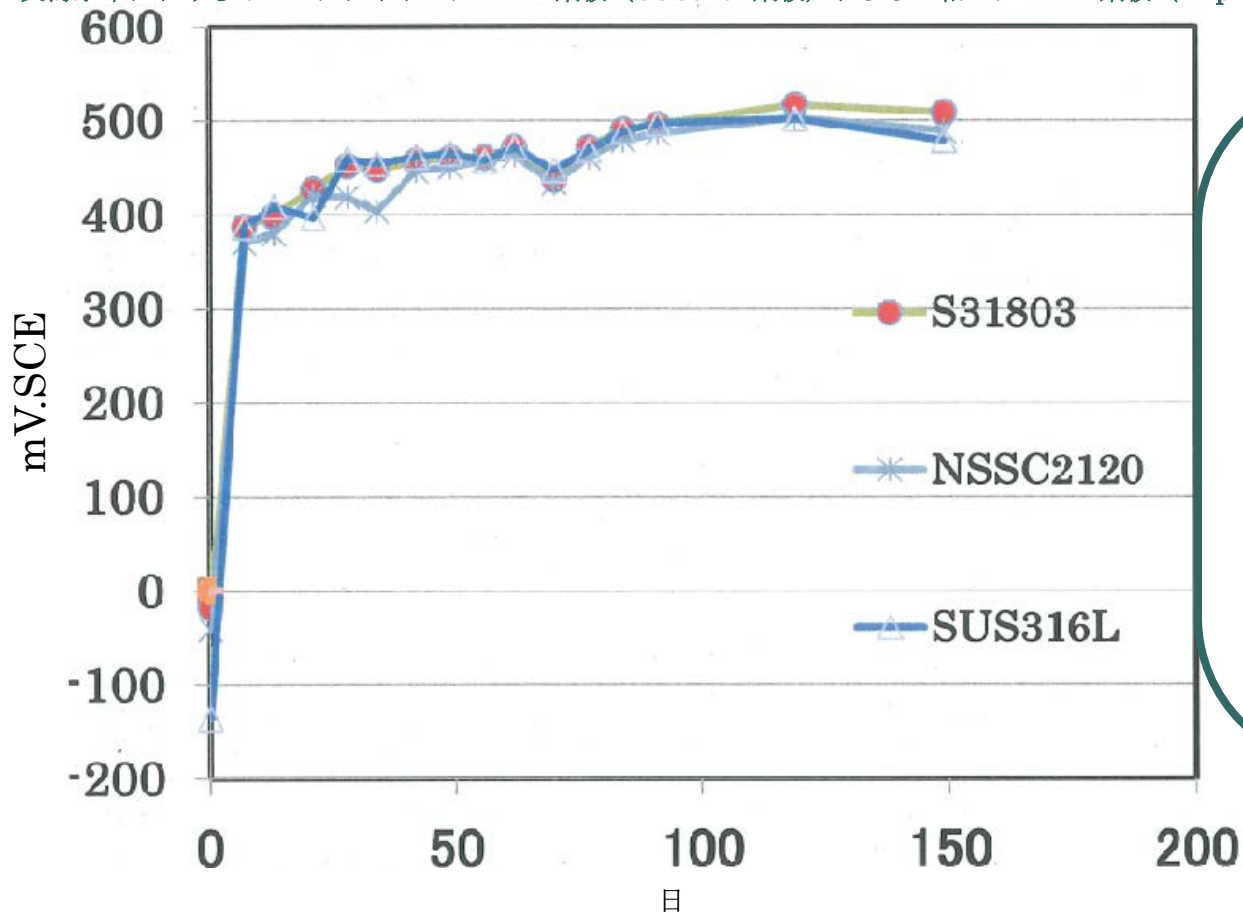
今回の試験温度は高過ぎたと考える。
Duplex鋼板母材の孔食発生臨界温度は、
今回の試験結果と同じ35°Cであり、
SUS316LN鋼板と同等である

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



腐食試験（考察2）

実海中におけるオーステナイトステンレス鋼板（SUS316L鋼板）および二相ステンレス鋼板（Duplex鋼板，NSSC2120）の自然浸漬電位測定結果

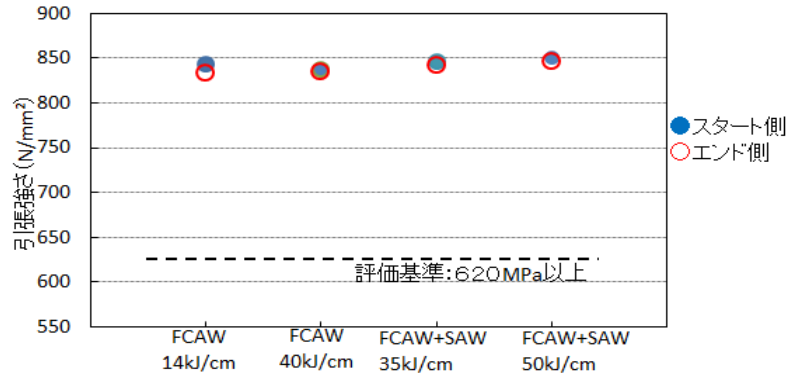


約5ヶ月間の長期浸漬でいずれの鋼種も400～500mV.SCEで不動態を維持し、オーステナイトステンレス鋼板（SUS316L鋼板）と二相ステンレス鋼板（Duplex鋼板，NSSC2120）との実海中における自然浸漬電位の差は認められなく、異種金属接触腐食の可能性はないと考えられる。

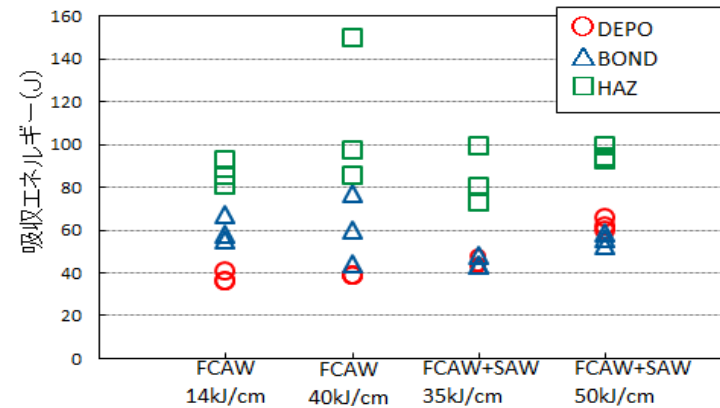


過剰入熱影響度確認試験 (結果)

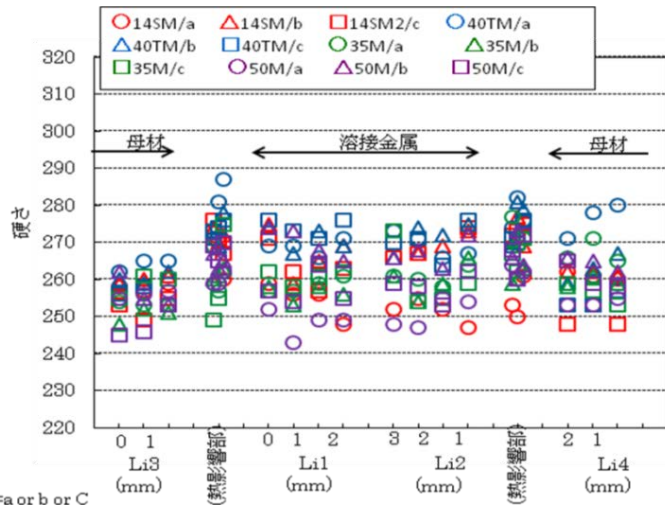
引張試験結果 (室温大気中)



シャルピー衝撃試験結果 (試験温度-20°C)



ビッカース硬さ試験結果



溶接条件	試験片符号	フェライト含有率[%]					平均値
		個々値					
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

過剰入熱影響度確認試験（考察）

- いずれの継手にも溶接欠陥は皆無であった
- いずれの溶接条件においても引張強さ判定基準の“620 N/mm²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
- V-ノッチシャルピー衝撃試験（試験温度-20℃）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
- 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
- 溶接金属の化学成分、フェライト量大きな差異はない
- 各規則に準じた施工で、過剰な入熱条件は避ける

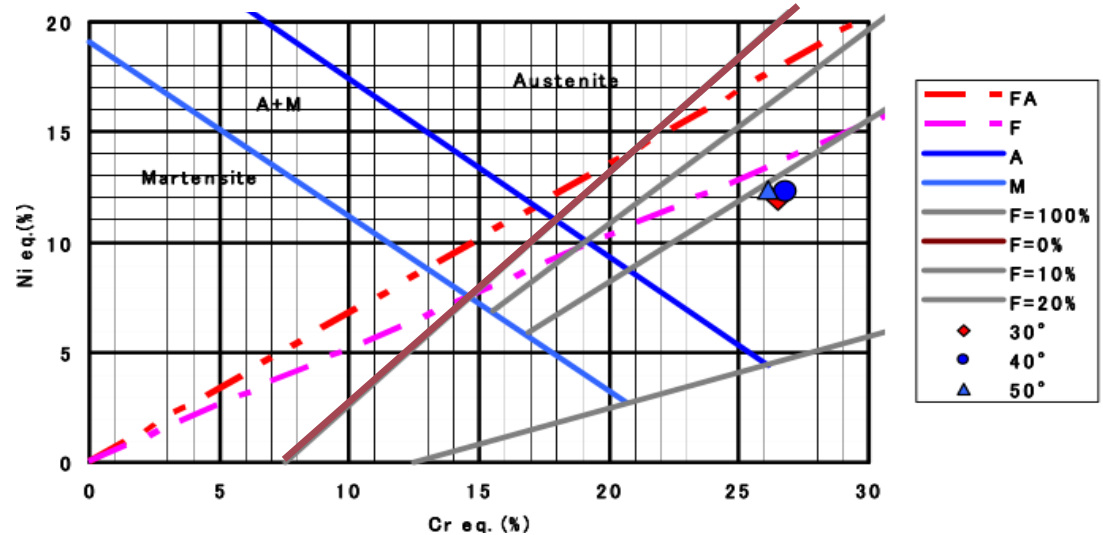


異材完全溶込みT継手 初層溶接高温割れ確認試験（結果）

各条件での割れの有無

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

シェフラの組織図



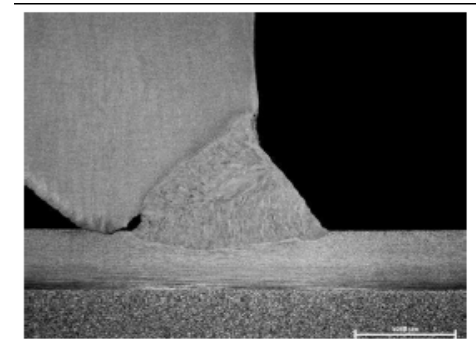
各条件において割れの発生は認められない
但し，入熱制限によるルート部溶け込み不足が生じている

開先によらず，Fモードによるオーステナイトが晶出しない
→割れ感受性が低い

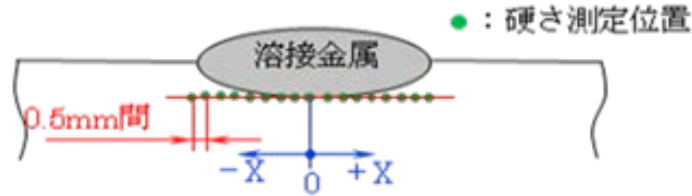


異材完全溶込みT継手 初層溶接高温割れ確認試験（考察）

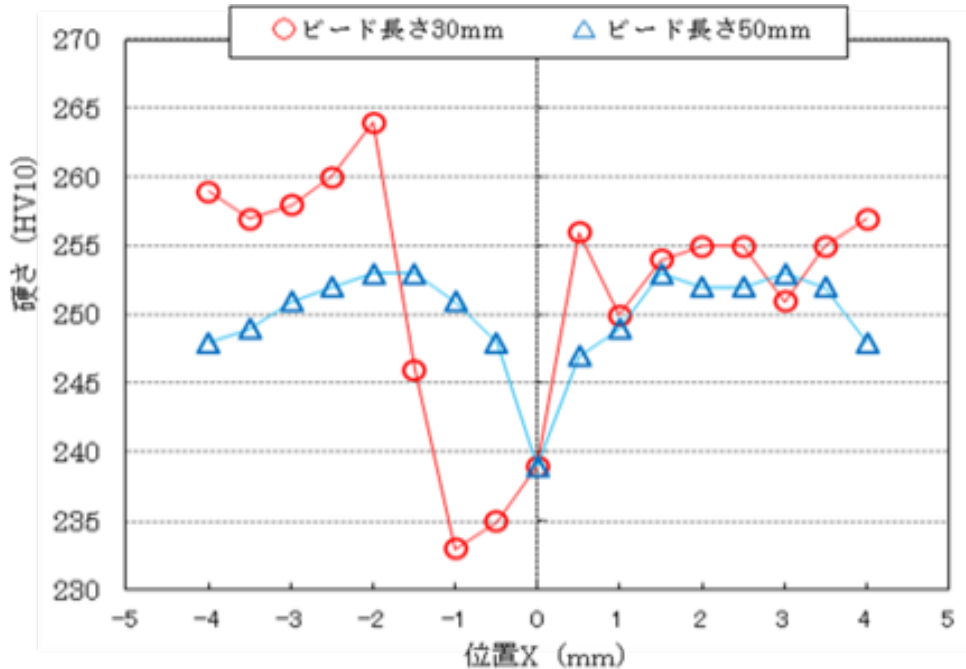
- いずれも、初層溶接金属の断面マクロ試験片に高温割れは発生していなかった。良好な溶接性を示す
- いずれの場合もオーステナイト・フェライト系の標準成分になっていることが確認された
- 凝固モードは開先角度によらずFモード、凝固においてオーステナイトが晶出しないためP，Sなどの不純物のミクロ偏析が小さく、割れ感受性が低い
よって、割れの発生は見られない
- 開先角度が小さくなるとルート部の溶込みが不十分になる



ショートビード最高硬さ試験



ビッカース硬さ分布測定結果

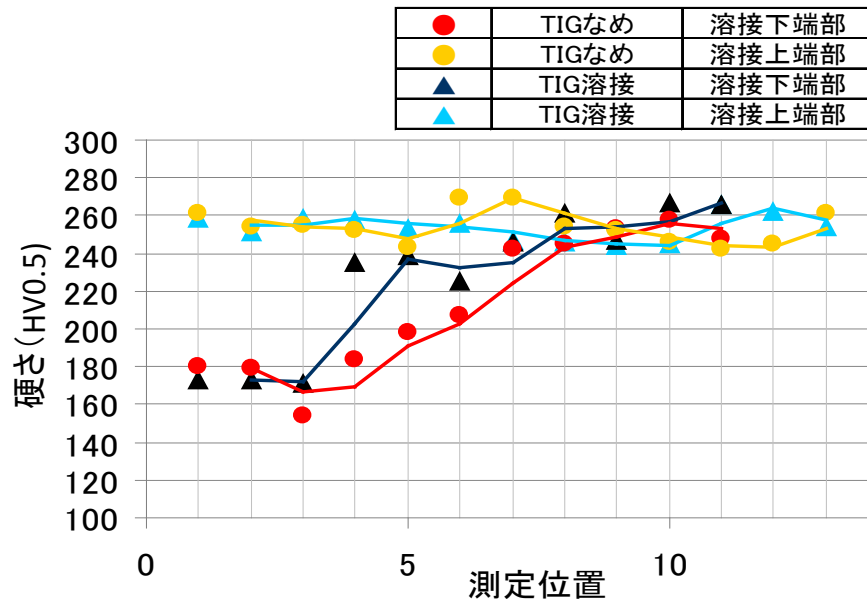


硬さ分布の差異は無いと
考えられる
影響は少ないと考えられ
るが、高強度鋼ではビー
ド長50mm以上と規定され
ているので、それに準じ
た施工が必要



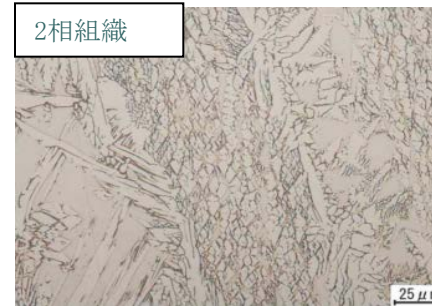
TIGなめ部、TIG溶接部の硬さ・ ミクロ考察

マイクロビッカース硬さ分布測定結果



フェライト量測定結果

測定箇所	%	FN
二相ステンレス鋼母材	33	43
FCW 溶接金属 最終層	28	43
A1 TG329J3L 溶接金属 上端部	43	50
A1 TG329J3L 溶接金属 下端部	25	25
A2 TIG メルトラン溶接金属 上端部	36	44
A2 TIG メルトラン溶接金属 下端部	12	14
ステンレスクラッド鋼母材	0.5	0.5



硬さおよびフェライト量に大きな差異はなく，“TIGなめ”と“TIG溶接”の違いによる影響は無いと考える
よって、止端形状の影響によるものが大きい。



まとめ 1

- Duplex鋼板の溶接継手と， SUS316LN鋼板の溶接継手との疲労強度は同等→Duplex鋼板が実船適用可能である
- Duplex鋼板とSUS316LN鋼板とで疲労強度に有意差は確認できなかった→溶接止端部形状の違いが応力集中度に影響
- 降伏強度の違いによるDuplex鋼板の優位性を確認出来なかった→溶接止端部の形状差による応力集中の違いが疲労強度に及ぼす影響が材料及び降伏強度の違いによる影響よりも大きく反映
- 真に材料の違いによる継手部疲労強度への影響を評価するためには， Duplex鋼板に最適な溶接条件， 形状整形を実施し， 止端部形状を同一とした試験片による疲労強度の確認→第二次研究を実施する。

まとめ 2

- Duplex鋼板の溶接施工条件をSUS316LN鋼板と同条件にて実施すると、止端部形状が悪くなるとの知見が得られた
Duplex鋼板に最適な溶接施工条件については、今後模索→第二次研究を実施する。
- Duplex鋼板を使用することは、Ni価格変動の影響が少なく大変意義がある
- 溶接施工要員の技量にとらわれない、完全溶込み十字溶接継手部の開先形状
- Duplex鋼板とSUS316Lクラッド鋼板との異材組合せ継手の溶接には、SUS329J3Lで溶接を行うことが望ましい

まとめ 3

- Duplex鋼板の採用で二重底側の溶接止端部の応力集中は緩和される方向に働き，二重底側の二軸引張による影響（損傷起因）は無視できると考えられる
- 曲げ応力を考慮した、Duplex鋼採用による二重底頂板の溶接止端部の二軸応力下における応力上昇は無いことを確認
- Duplex鋼板は，SUS316LN鋼板と強度および耐食性の面で同等以上、高温強度も同等
- ハイテン係数に関して，高温時強度の低下率の考慮も含めた，修正算式を提案した

参考文献1

- (株) 臼杵造船所：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 試験方案 (2013.2.5)
- 日鐵住金テクノロジー(株)材料ソリューション部富津：母材・溶接継手疲労試験 完了報告書(2013.7.1)
- (株)タセト：二相ステンレス鋼溶接継手の組織 観察試験 報告書(2013.7.1)
- 日鐵住金テクノロジー(株)尼崎事業所 材料評価部材料機能評価室：腐食試験 完了報告書(2013.10.1)
- 日鐵住金テクノロジー(株)八幡事業所TACセンター：二相鋼溶接継手試験作業 報告書(2013.10.31)
- (株)タセト：二相ステンレス鋼溶接継手ドレッシング部の組織観察 試験報告書(2013.11.25)
- (株) 臼杵造船所：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 (2013.12.11)
- 新日鐵住金ステンレス (株)：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 共同研究中間報告(2013.12.11)
- JFEスチール(株)：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 中間報告会資料(2013.12.11)



参考文献2

- JFEテクノリサーチ（株）ソリューション本部（川崎）：異材完全溶込みT継手疲労試験報告書（2013.12.12）
- JFEテクノリサーチ（株）ソリューション本部（川崎）：レ型異材完全溶込みT継手疲労試験報告書（2013.12.12）
- JFEテクノリサーチ（株）鋼材溶接部（千葉）：完全溶込みT継手強度確認試験報告書（2013.12.16）
- JFEテクノリサーチ（株）鋼材溶接部（千葉）：異材完全溶込みT継手初層溶接高温割れ確認試験報告書（2013.12.16）
- 塾 船大工 森 俊哲：Duplex鋼の疲労強度（2013.12.24）
- 塾 船大工 森 俊哲：Duplex鋼の材料定数（2014.3.5）
- UK-HSE:E/44/72 Reprinted from Welding Research International Volume3（1973 Number 4）
- 谷野 忠和：十字溶接継手の疲労強度評価のための静的FEM解析（2014.1.31）
- 矢島 浩，座間 正人，森 俊哲，他：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