

日本海事協会共同研究支援事業 課題名

スチフナ角回し溶接部疲労強度向上のための溶接施工法の開発

高張力鋼溶接部疲労特性向上のための溶接施工法の開発（その2）

（2013年 4月～2015年4月）

大阪大学

接合科学研究所

村川 英一, 志賀 千晃,

平岡 和雄, 堤 成一郎

大学院 工学研究科

大沢 直樹

長崎総合科学大学

矢島 浩*, 谷野 忠和*

* 研究当時の所属

今治造船(株)

紙田 健二

(株)三和ドック

松崎 拓也

三菱重工業(株)

長崎研究所 杉村 忠, 中山 伸

長崎造船所 廣田 一博

下関造船所 阿曾田 正

日本海事協会

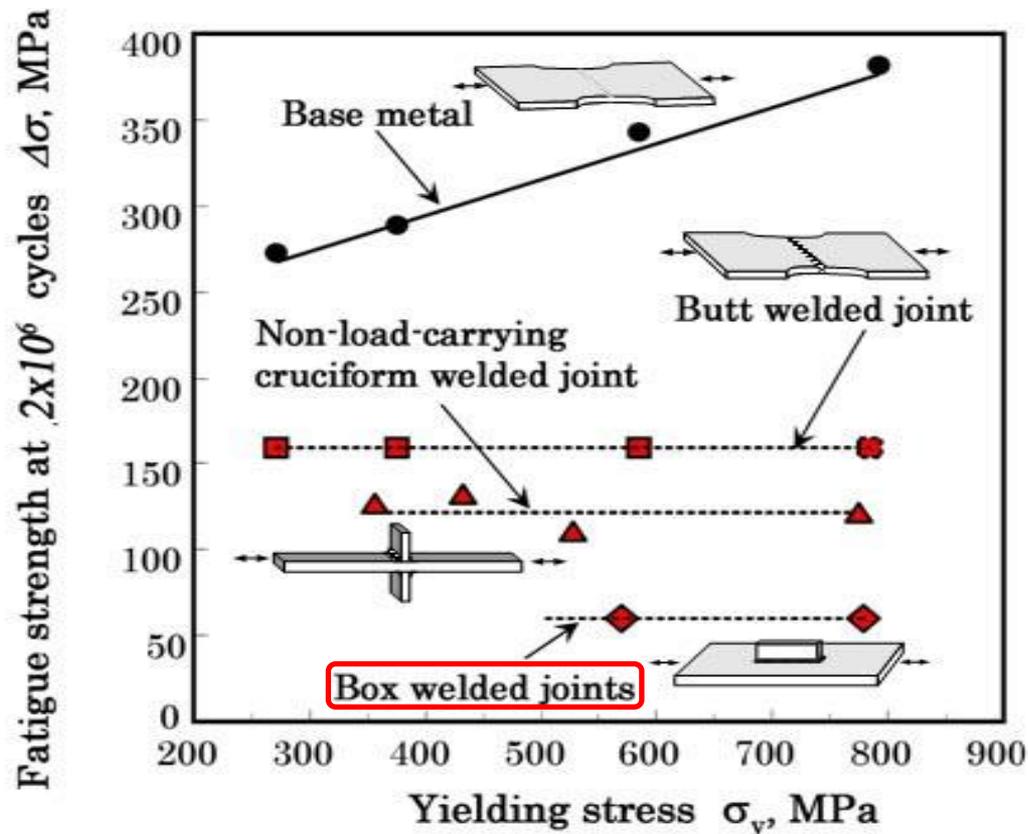
福井 努

沢登 寛

背景

ステフナ角回し溶接部の疲労強度は母材に比べ顕著に低いため、船体の設計荷重や寿命の向上に著しい悪影響を与えている。

さらに、就航中の船舶において、この角回し溶接部で多く見られる疲労亀裂は、溶接で補修・補強されているが、特に二重船底内での溶接施工は、劣悪環境のために苛酷であり、極力少ない作業時間が望まれている。

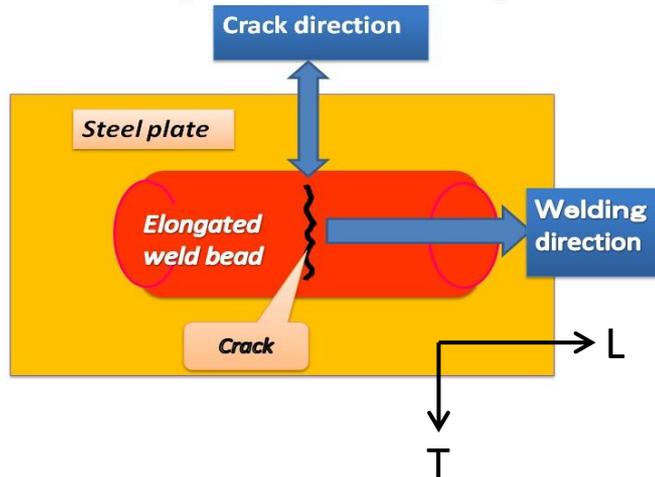


本研究(その1: 2012.4~2013.3)の成果

船体用降伏点40kgf/mm²級高張力鋼板(AH40, 板厚20mm)を使用して, スチフナ材先端部の角回し溶接部に, 新規提案の伸長ビード法 (マルテンサイト変態膨張により圧縮残留応力を導入できる10Cr-10Ni成分系の低変態温度 [Low Transformation Temperature : LTT] 溶接材料を用い, 止端部の残留応力の低減並びに応力集中を低減する) を適用した場合において, 疲労亀裂は, 従来のビード止端部ではなく, スチフナ先端直下の主板とスチフナ材との未溶着部先端から発生することが確認でき, 従来の回し溶接施工法より, 疲労寿命が2.5~3.2倍延びることが確認できた.

伸長ビード法のコンセプト

伸長ビード溶接施工法



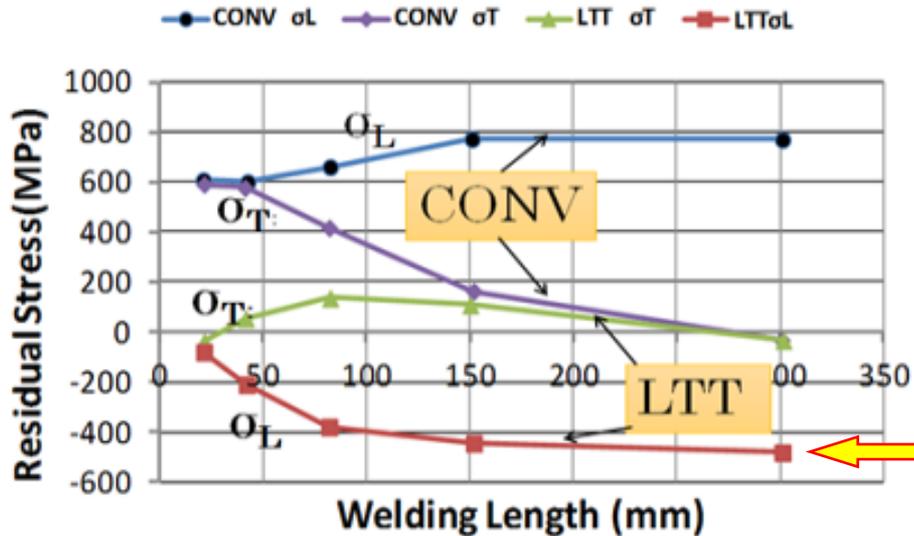
適用箇所 Applicable portion

- 亀裂発生の予測箇所
- Predictive portion of fatigue crack
- 亀裂が存在する箇所 (補修溶接後)
- Portion where fatigue crack exists

施工手順 Welding procedure

- 溶接方向は亀裂方向に直角
- Welding direction perpendicular to crack
- 亀裂長さが大きい場合 ウィービング可
- Weaving possible
- ビード長さは少なくとも20mm以上
- Over 20mm weld bead length
- 溶け込み深さは亀裂深さ以上
- Penetration depth over crack one

伸長ビード中央部の残留応力



LTT(10Cr-10Ni)溶接材料での
圧縮残留応力導入のレベルは
伸長ビード長さに支配される。

本研究（その2：2013.4～2015.4）での開発目標

①スチフナ先端角回し溶接部の疲労強度向上を実現出来る，現場施工上実用可能な，新しい溶接施工法を開発し，新造船における疲労強度重要箇所へ適用することに併せて，就航船における補修溶接施工法（超音波ピーニング施工等の代替手法）を開発し，実用化を図る．**従来に比べ3倍以上の疲労寿命の延伸を目標とする．**

②LTT(10Cr-10Ni)溶接材料より低コストの低変態温度溶接材料を開発・実用化する．溶接材料成分コストの大幅な削減を目指し，**Ni量を従来の半分以下，すなわち5%以下の低コスト低変態温度溶接材料の開発・実用化を本研究の目標とする．**

開発内容

- ① 新造船における疲労強度重要箇所の隅肉角回し溶接部への実用的な伸長ビード溶接施工法の開発
- ② 就航船における疲労強度向上対策(例えば損傷対策や高付加価値船での延命対策等)への適用を目的とした実用的な新補修溶接施工法(超音波ピーニング施工等の代替手法)の開発
- ③ 低コスト低変態温度溶接材料の開発
- ④ 溶接残留応力測定
- ⑤ 溶接残留応力分布および疲労強度に対する諸因子の影響予測
 - 反復サブストラクチャー法を用いた三次元の熱弾塑性有限要素解析のプログラムにより数値解析を実施 -

供試鋼板と供試溶接材料

供試鋼板の化学成分と機械的特性

Material	Thick. (mm)	Chemical Composition					Mechanical Properties			
		C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Y.P. (N/mm ²)	T.S. (N/mm ²)	El. (%)	vE0°C (J)
AH40	20	0.12	0.29	1.34	0.008	0.002	486	539	25	333
AH36	20	0.14	0.23	1.08	0.014	0.006	446	543	21	235
AH36	16	0.14	0.21	1.10	0.017	0.004	454	511	23	256

通常溶着金属の化学成分と機械的特性 (MX-Z200 FCW)

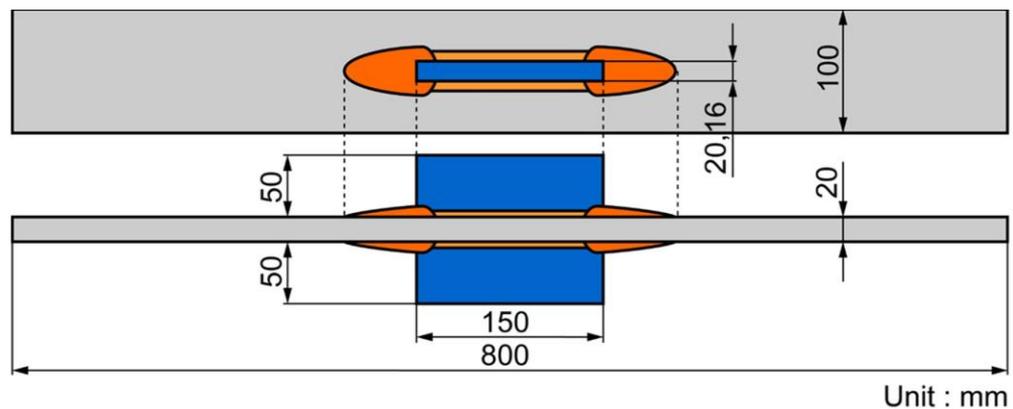
(from product catalog)

Chemical Composition (mass%)					0.2%P.S. (N/mm ²)	T.S. (N/mm ²)	El. (%)	vE (J)
C	Si	Mn	P	S				
0.06	0.50	1.40	0.013	0.009	530	590	27	98

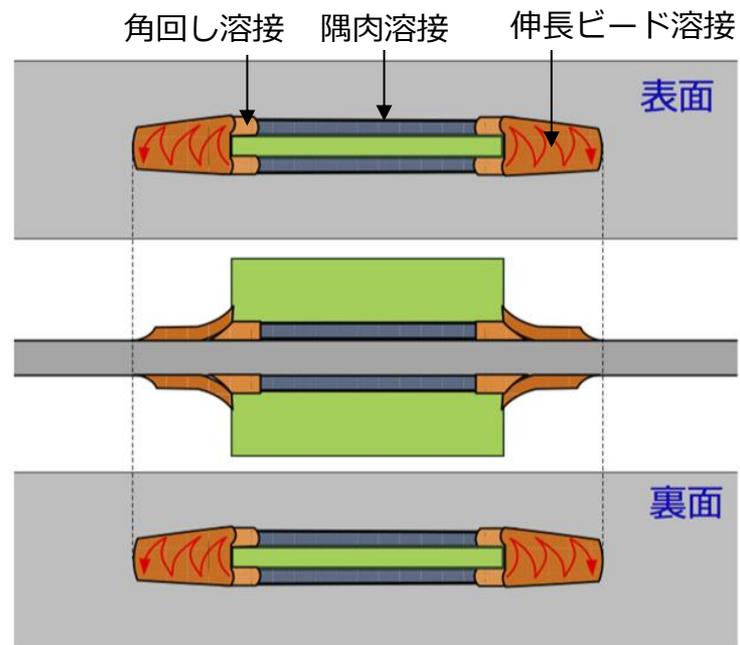
LTT(10Cr-10Ni) 溶着金属の化学成分と機械的特性 (Solid wire)

Chemical compositions (%)					0.2%P.S. (N/mm ²)	T.S. (N/mm ²)	El. (%)	vE0°C (J)
C	Si	Mn	Ni	Cr				
0.048	0.26	0.57	9.46	10.52	447	1,093	14	24

角回し溶接疲労試験体の形状と寸法



伸長ビード施工

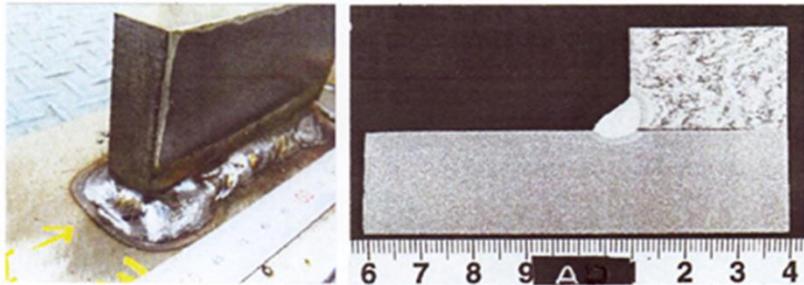


溶接条件

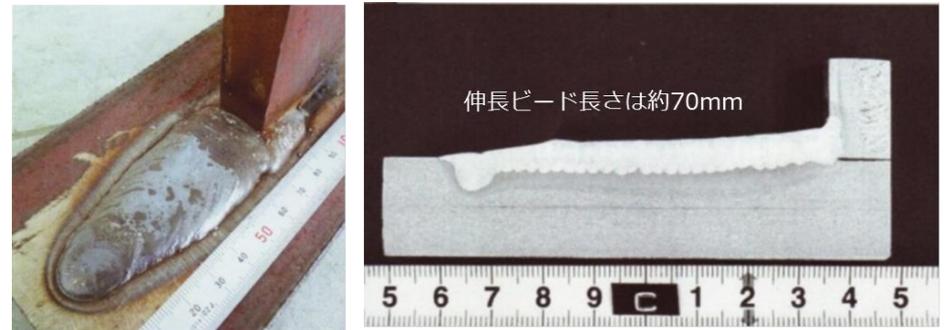
	Material	Shield Gas [25l /min]	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)	Heat Input (kJ/cm)
Fillet Weld	MX-Z200	CO ₂	280	32	48	11
Boxing Weld	LTT (10Cr-10Ni)	Ar+20%CO ₂	230, 220	31, 29	25	17, 16
	MX-Z200	CO ₂	280, 340, 300	32, 31, 32	28, 35, 45	19, 18, 13
Elongated Weld	LTT (10Cr-10Ni)	Ar+20%CO ₂	270, 320, 220	26, 27, 27	18, 18, 24	23, 29, 15
	LTT1 (5Ni)	CO ₂	290, 290, 220	28, 26, 23	18, 18, 22	27, 25, 14
	LTT2 (6.5Mn)	CO ₂	260, 320, 220	25, 27, 27	18, 18, 24	22, 29, 15
	LTT3 (3Mn-3Ni)	-	140	20	14	12
	LTT4 (13Cr-5Ni)	CO ₂	270, 320, 220	26, 28, 27	18, 18, 24	23, 30, 15

注) 溶接ロボットによる全自動施工
但し、企業における調査・検証実験は半自動溶接施工

従来の回し溶接



伸長ビード溶接



伸長ビード長さに対する施工性の事前調査

三菱重工（株）にて実施

① 伸長ビード長さ（75mm）

- ・ 施工時間：27秒 ビード幅：スタート部30mm－終端部20mm
- ・ スタート部より終端部の幅が狭くなる形が施工しやすい
- ・ 最初に形状をマーキングしておかないとビードが整わない
- ・ 75mm長さでは施工はかなり困難というわけではないが、30秒近くかかるのは一部材溶接作業が増えたイメージを受ける

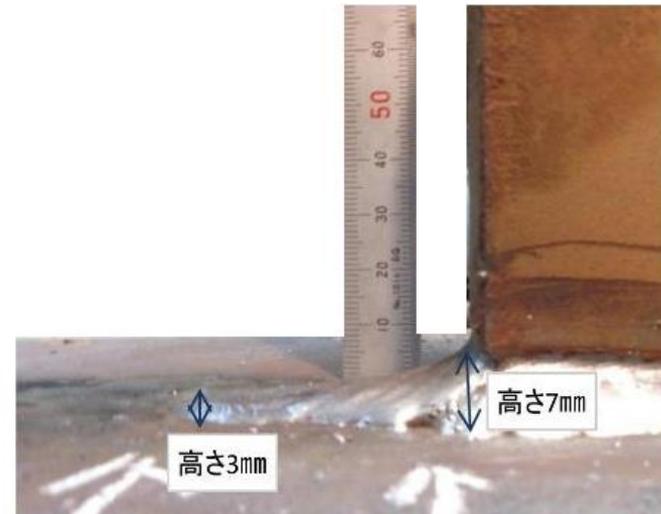
② 伸長ビード長さ（42mm）

- ・ 施工時間：14秒 ビード幅：スタート部28mm－終端部20mm
- ・ 角巻を行うレベルの時間感覚，ちょっと仕事が増えたイメージ
- ・ マーキングは慣れればする必要は無い
- ・ 75mmに比べるとこれ位なら受け入れられると感じる範囲

結論としては約40mm長さが施工上からは推奨される。



伸長ビード42mm溶接後
(幅28-20)



伸長ビード42mm側面

伸長ビード回し溶接試験体の疲労試験結果と 実用施工法の最適化

船体用降伏点40kgf/mm²級 (AH40, 板厚20mm) および 36kgf/mm²級 (AH36, 板厚20mm・16mm) 高張力鋼板を, 主板 (長さ800mm, 幅100mm) とスチフナ材 (長さ150mm, 高さ50mm) に使用した疲労試験体44体を室温・大気中で疲労試験を実施.

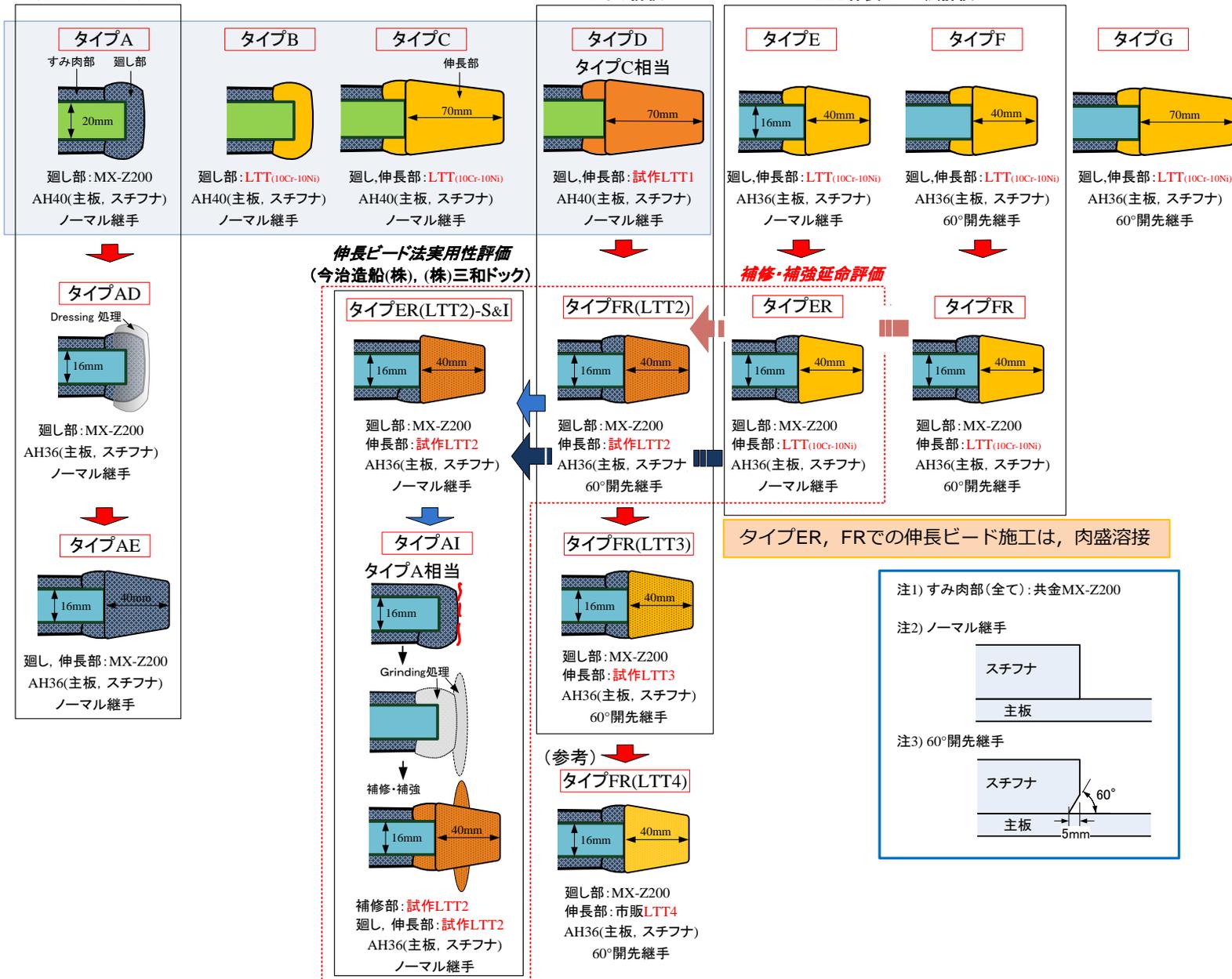
本プロジェクトで検討した疲労強度向上のための施工法

低コスト試作低変態温度溶接 ワイヤ評価

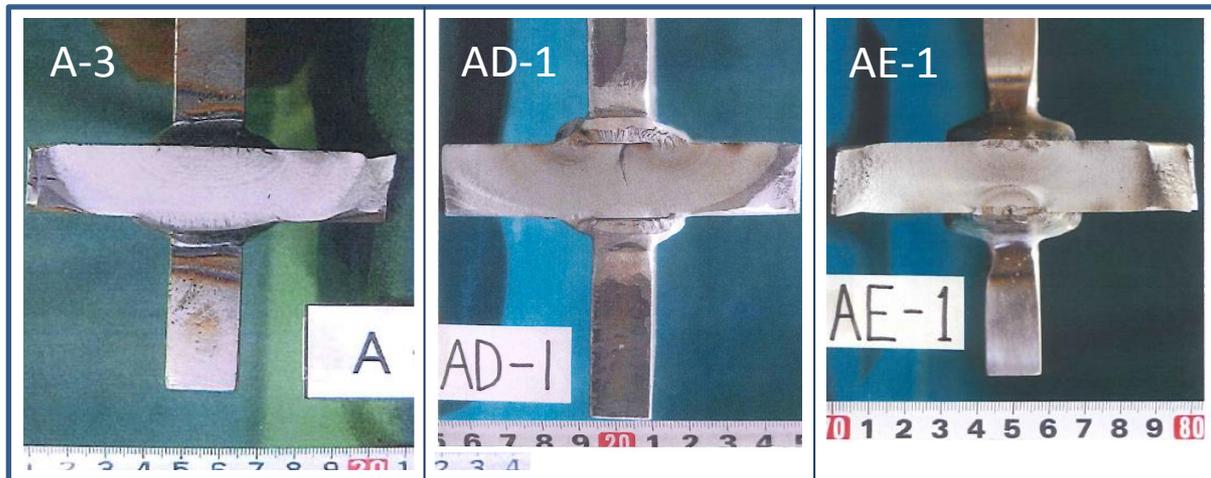
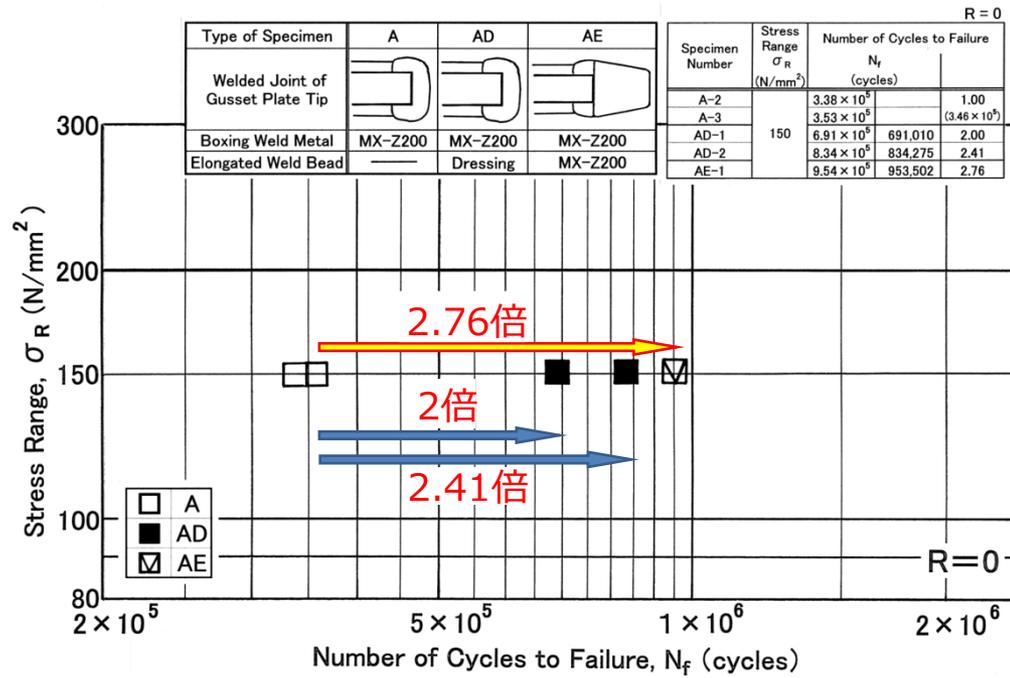
伸長ビード法基準評価

LTT伸長ビード法評価

本研究
(その1)

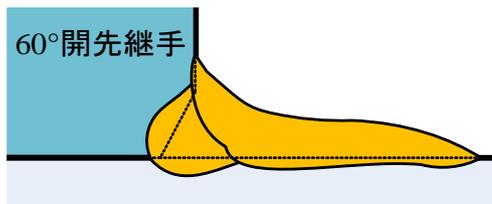


疲労寿命に及ぼすドレッシング処理と通常溶接材料での伸長ビードの影響

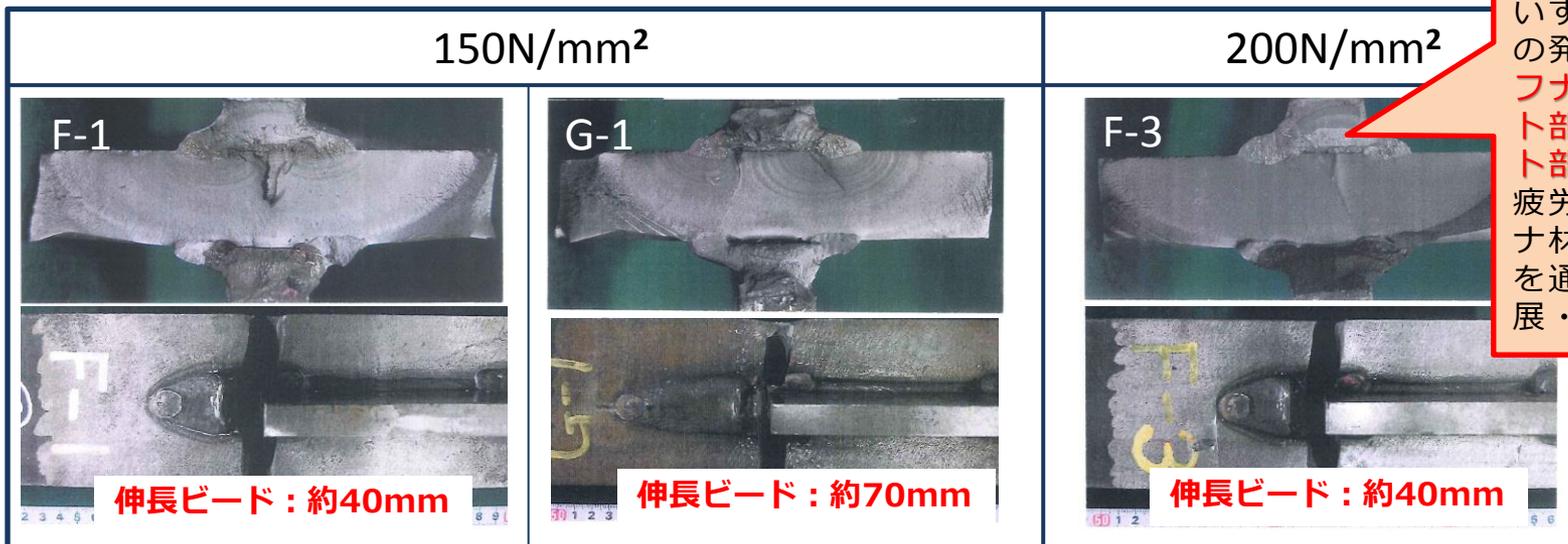
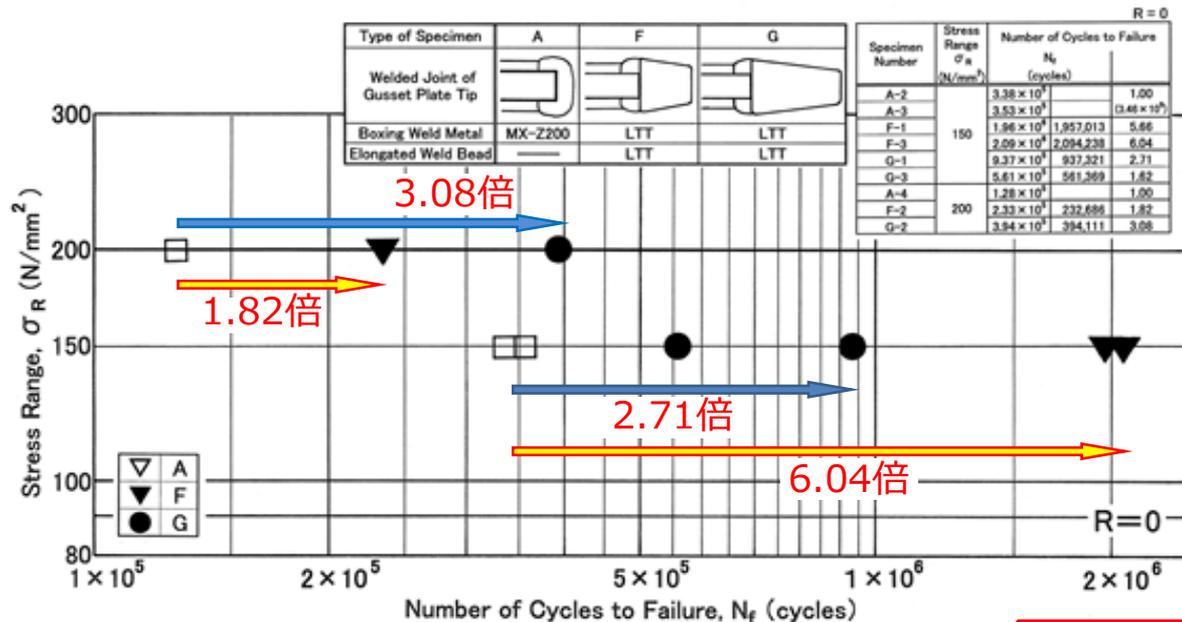


通常溶接材料による伸長ビード法とドレッシング処理での疲労寿命はほぼ同等

LTT(10Cr-10Ni) 溶接材料での伸長ビード長さが疲労寿命に及ぼす影響



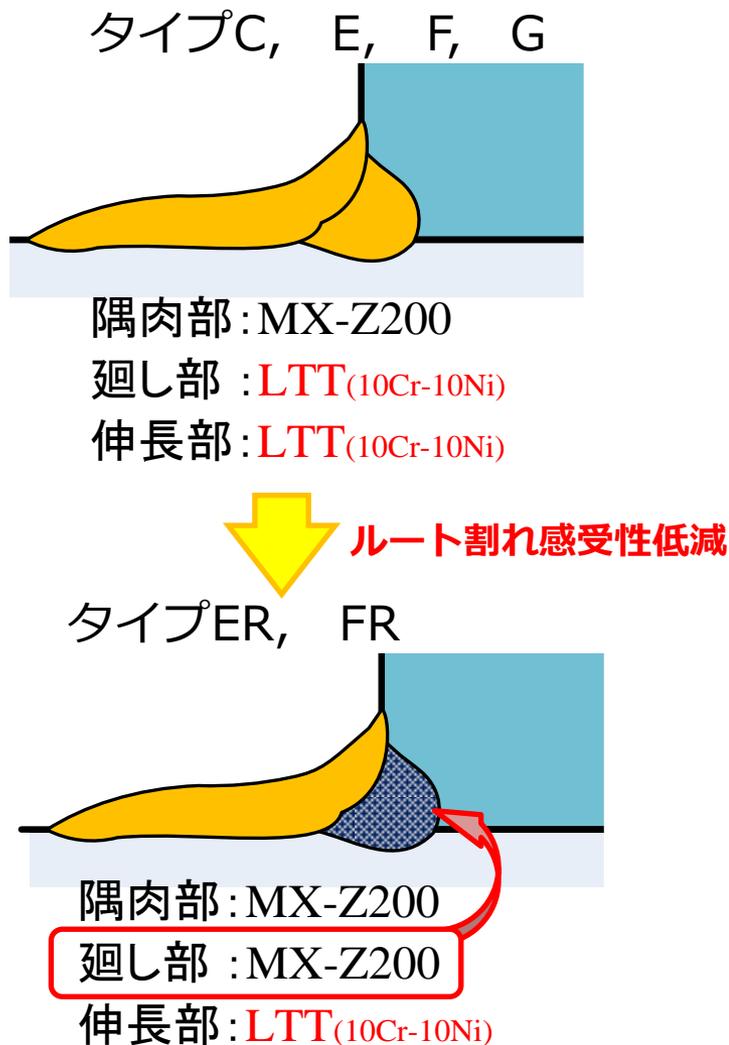
隅肉部: MX-Z200
 廻し部: LTT(10Cr-10Ni)
 伸長部: LTT(10Cr-10Ni)



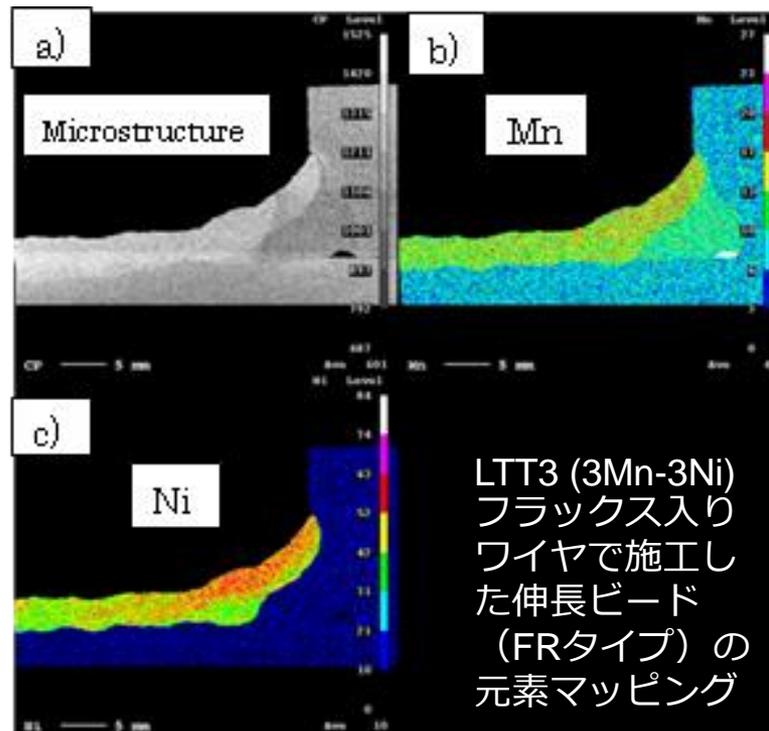
いずれも疲労亀裂の発生点は、スチフナ材先端のルート部あるいはルート部断面であり、疲労亀裂はスチフナ材廻し溶接金属を通して主板に進展・伝播していた。

疲労寿命のバラツキは大きいですが、伸長ビード長さは約40mmで有効と判断できた。

疲労寿命のバラツキ低減と更なる疲労寿命向上のための新施工法の提案

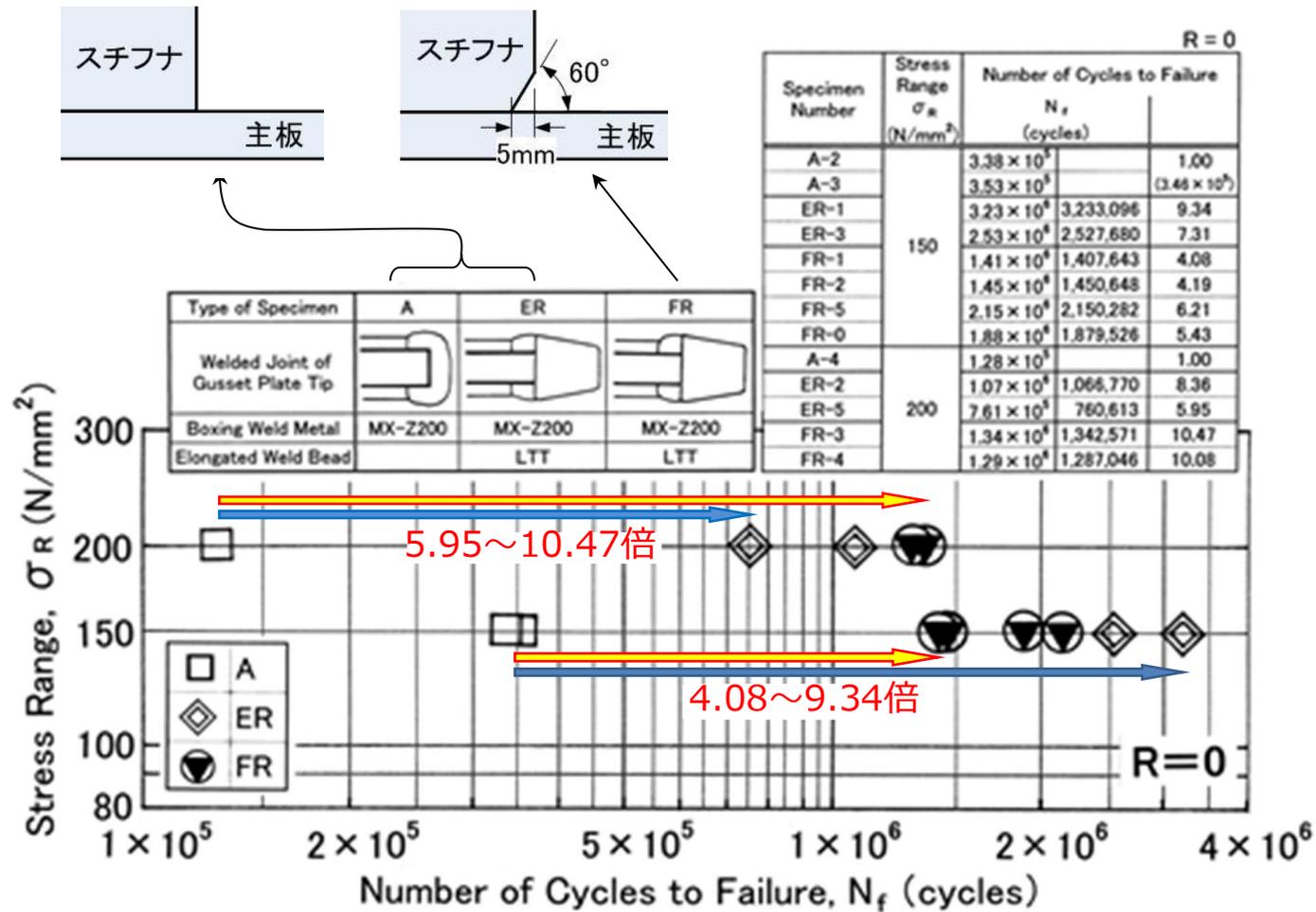


タイプER, FRでの伸長ビード施工は、従来回し部に肉盛溶接したことを示している

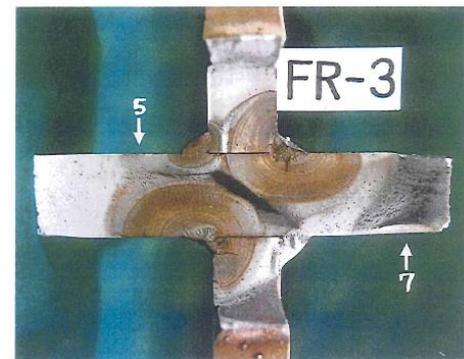
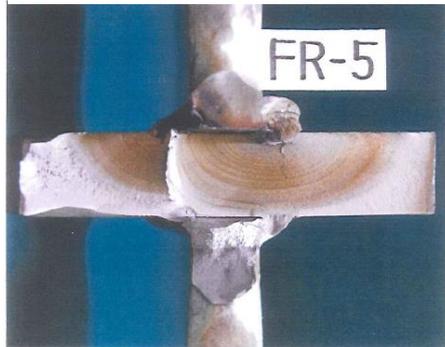


従来回し溶接施工部に、低変態温度溶接材料で伸長ビードを肉盛施工することで、圧縮残留応力を付与
⇒ 従来回し溶接部の補強・延命施工へ

新施工法における疲労寿命に及ぼすスチフナ先端の開先加工の影響



寿命のバラツキは減少し、伸長ビード(長さ約40mm)による寿命向上が大幅に上昇、また、スチフナ材の開先加工は必ずしも必要ではないと判断できた。



Type FR, 150N/mm²,
2.15 × 10⁶ cycles

Type ER, 150N/mm²,
3.23 × 10⁶ cycles

Type FR, 200N/mm²,
1.34 × 10⁶ cycles

ルート部から伝播した疲労亀裂が、スチフナ材内部を進展したことが、延命効果をもたらしたものと推察された。

低コスト低変態温度溶接材料の開発

新開発低コスト低変態温度溶接材料とその特性

新開発
溶接材料

Welding material	Chemical compositions of deposited metal (%)					Ms (°C)	YS (MPa)	TS (MPa)
	C	Si	Mn	Ni	Cr			
LTT	0.048	0.26	0.57	9.46	10.52	184	447	1,093
LTT1	0.036	0.72	2.19	5.06	0.022	431	484	784
LTT2	0.029	0.38	4.3	-	-	472	727	820
LTT3	0.034	0.41	3.3	3.3	-	408	895	973
LTT4	0.024	0.48	0.5	3.92	11.63	394	854	1,026

新規開発低コスト低変態温度溶接材料

1. 神鋼MX-4AD CO₂用フラックスコアードワイヤ(6.5Mn) --- LTT2
 韌性0°C 47J、伸び23% CO₂溶接施工 新開発ワイヤ

半自動溶接用ワイヤの
使い易さから第1候補

300円前後/kg を予定

2. 神鋼LB-3AD 被覆アーク溶接棒(3Mn-3Ni) --- LTT3
 韌性0°C 60J、伸び20% 新開発ワイヤ

300~500円前後/kg を予定

3. 神鋼MX-410NM マグ用フラックスコアードワイヤ(13Cr-5Ni) --- LTT4
 韌性-40°C 34J、伸び16% CO₂溶接施工 市販ワイヤ

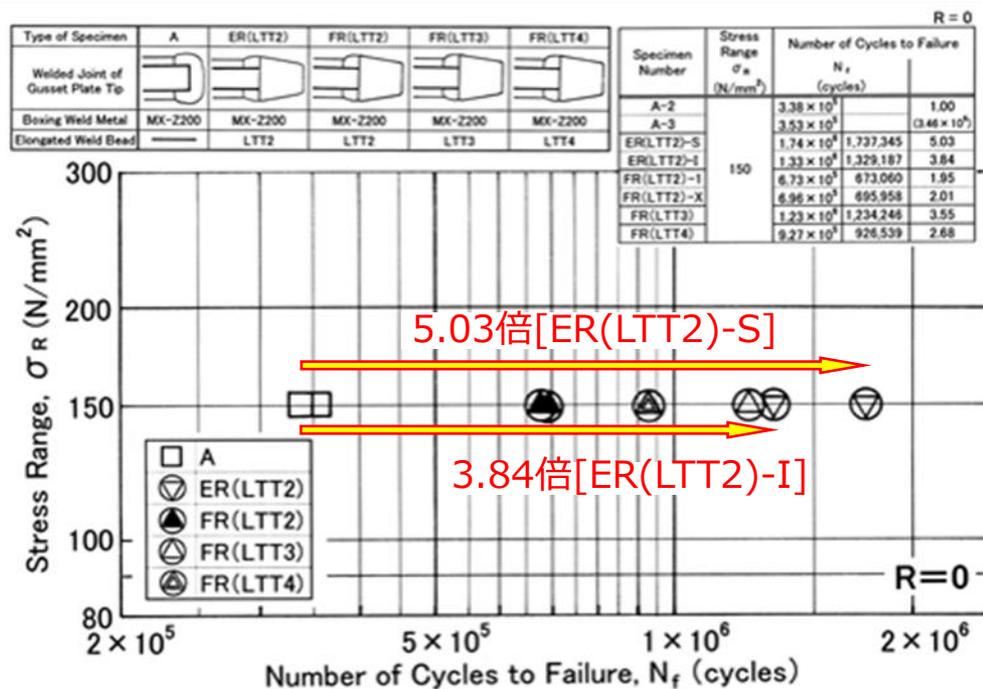
1,000円前後/kg

注) 10Cr-10Ni系マグ用ソリッドワイヤ --- LTT
 韌性0°C 27J、伸び8% マグ溶接施工

所謂
低変態温度
溶接ワイヤ

10,000円前後/kg

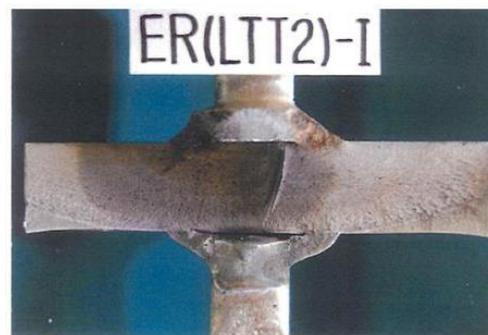
低コスト低変態温度溶接材料 (LTT2) での伸長ビード施工性検証 (タイプER)



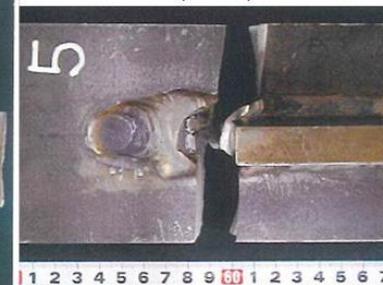
2社で施工されたタイプER(LTT2)が一番長寿命であり、タイプAの寿命の約3.8~5.0倍であった。低コストLTT2溶接材料で伸長ビードを肉盛溶接するタイプER(LTT2)が、最も実用の可能性が高い。



(株)三和ドック施工
ER(LTT2)-S



今治造船(株)施工
ER(LTT2)-I

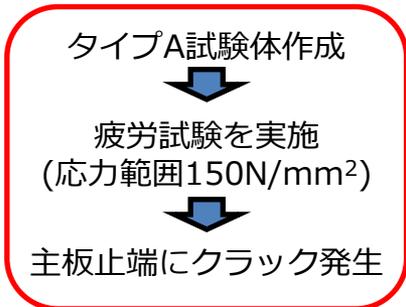


LTT(10Cr-10Ni)溶接材料の方が、LTT2溶接材料より寿命延伸（疲労強度上昇）効果は大きいですが、LTT2溶接材料の方が安価であり、特性、実用性には優れていると言える。

角回し溶接止端部に発生した疲労亀裂の補修溶接手順

(株)三和ドックにて実施

－補修手順 [タイプAI(LTT2)Sの場合]－



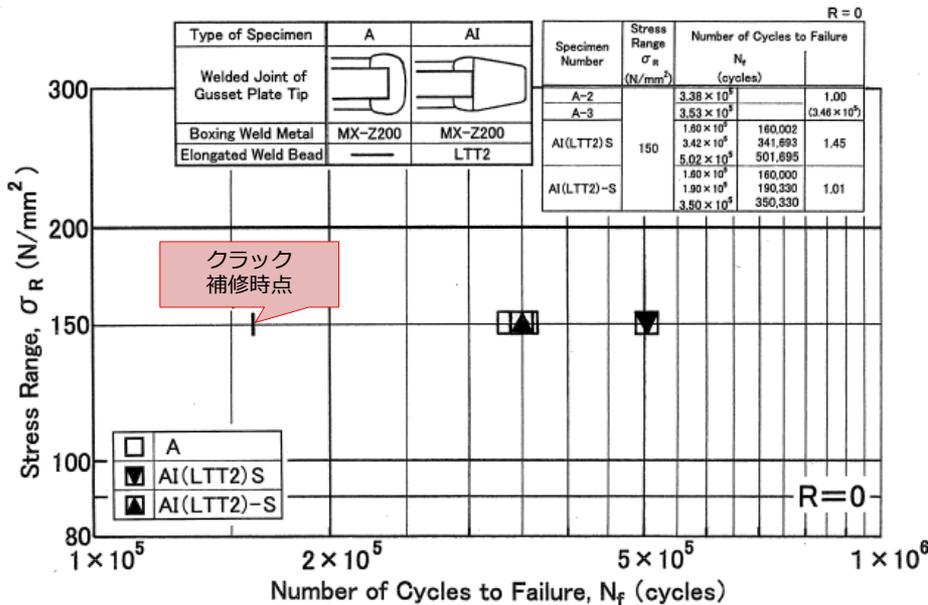
グラインダーで
クラックをはつる



クラック部を補修溶接後、
回し溶接をLTT2で実施



伸長ビードを
LTT2で実施



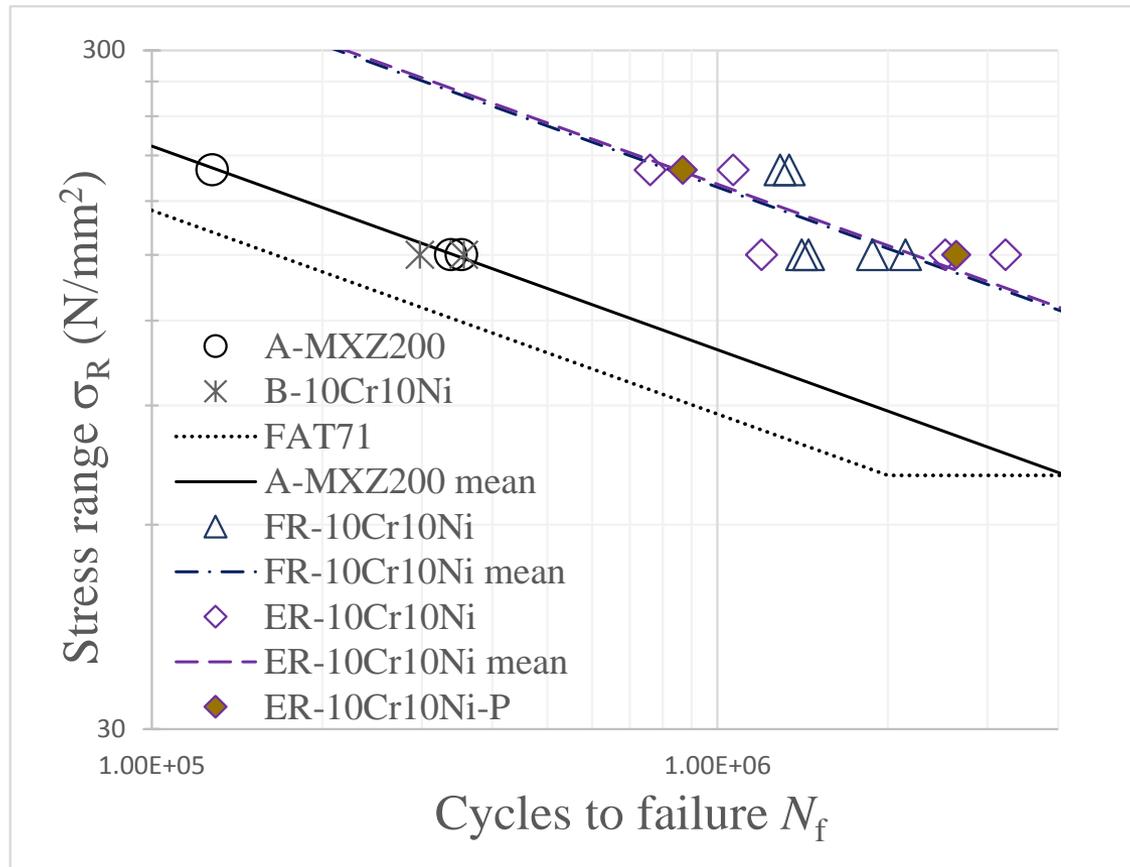
はつり、補修溶接、伸長ビード
(AI(LTT2)S)



LTT2回し溶接金属のルート部から破壊

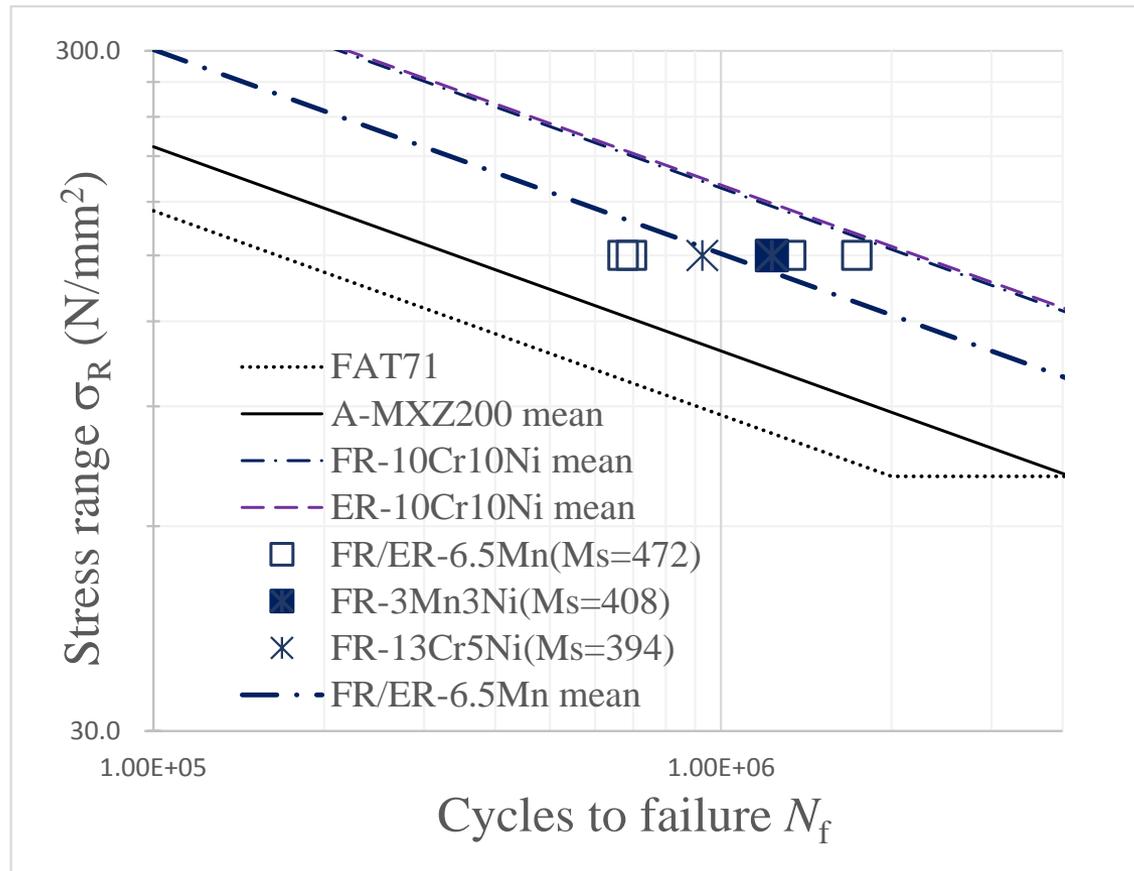
回し溶接を通常溶接材料で施工後、LTT2で伸長ビード溶接を行えば、応力範囲 (σ_R) 150N/mm²でタイプ ER(LTT2)-S, ER(LTT2)-I 並の 1.74×10^6 回 $\sim 1.33 \times 10^6$ 回程度までの延命効果が期待できるものと考えられる。

疲労設計の観点からみたLTT(10Cr-10Ni) 溶接材料による疲労強度改善効果



疲労設計の観点から整理すると、通常溶接材料で溶接した面外ガセット継手の角回し部にLTT(10Cr-10Ni)溶接材料による40mmの伸長ビードを施工した継手は、FAT(m=-0.3を仮定した場合の95%信頼度 2×10^6 回疲労強度)の75%(60 N/mm²) 上昇と疲労寿命の6.5倍延伸となる。

疲労設計の観点からみた新開発低変態温度溶接材料による疲労強度改善効果



通常溶接材料で溶接した面外ガセット継手の角回し部にLTT2(6.5Mn)あるいはLTT3(3Mn-3Ni)溶接材料による40mmの伸長ビードを施工した継手は、FATの40% (34N/mm²) 上昇と疲労寿命の3倍延伸をもたらし、高周波・超音波ピーニングと同等以上の改善効果が得られると判断できた。

疲労試験結果と実用施工法の最適化のまとめ

船体用降伏点36kgf/mm²級高張力鋼板のスチフナ角回し溶接部の疲労強度は、通常溶接材料（MX-Z200）で隅肉角回し溶接した後、低変態温度溶接材料で長さ約40mmの伸長ビード溶接施工する提案法を適用すれば、室温・大気中の疲労寿命は、最大約10倍延伸することが確認された。

また、開先加工なしのタイプERと開先加工したタイプFRの疲労試験結果から、角回し溶接を通常溶接材料で施工する場合、開先加工は必ずしも必要ではないことが明らかになった。

LTT(10Cr-10Ni)溶接材料の方が、LTT2（6.5Mn系フラックス入りワイヤ）溶接材料より寿命延伸（疲労強度上昇）効果は大きいですが、LTT2溶接材料の方が安価であり、実用性は優れていると言える。

疲労設計の観点から評価すると、本研究での試験条件では、通常溶接材料でスチフナ材先端の角回し溶接をし、低変態温度溶接材料で約40mmの伸長ビード溶接をすると、LTT(10Cr-10Ni)系ソリッドワイヤを使用した場合、FAT（95%信頼度 2×10^6 回疲労強度）が75%（60N/mm²）上昇し、LTT2あるいはLTT3（3Mn-3Ni系被覆溶接棒）溶接材料を使用した場合、FATが40%（34N/mm²）上昇することが明らかになった。すなわち、LTT2あるいはLTT3溶接材料を使用しても、高周波・超音波ピーニングと同等以上の改善効果が得られると判断できる。

LTT2溶接材料を使用して、スチフナ材先端の角回し溶接止端部に発生した疲労亀裂の補修溶接について検討した。

すなわち、タイプA（従来通りに通常溶接材料で角回し溶接をした）試験体を供試して、角回し溶接止端部に深さ3.5~5.0mm程度の疲労亀裂を発生させた。発生した疲労亀裂を研削除去して、LTT2溶接材料で補修溶接（回し溶接を含む）と長さ約40mmの伸長ビード溶接を施工し、再度疲労試験を実施したところ、タイプA試験体の約1.5倍の寿命であった。

発生した疲労亀裂を完全に除去して、通常溶接材料で補修溶接とLTT2溶接材料で長さ約40mmの伸長ビード溶接を慎重に施工すれば、更なる延命効果が期待できるものと考えられる。

角回しおよび伸長ビード止端部のX線残留応力測定

X線残留応力測定装置と測定位置

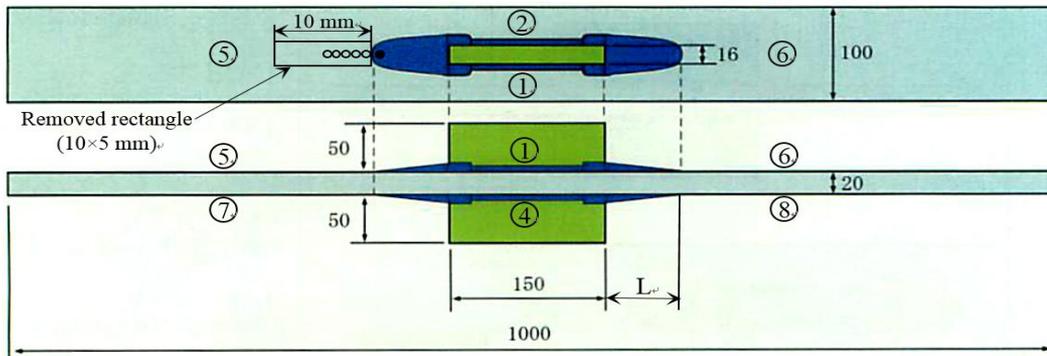
X線残留応力測定装置と測定条件

cos α 法の装置



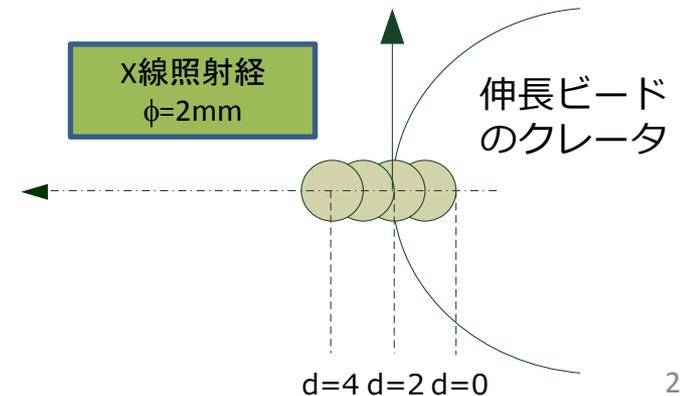
測定装置	X線応力測定装置 (パルステック工業(株) μ -X360)
特性X線	Cr-K α
管電圧	20 kV
応力定数	-437 MPa/ $^\circ$
測定方法	単一入射法
ピーク決定方法	cos α 法
回折面	Fe(α) (211)
管電流	1.0 mA
X線照射領域	約2mm Φ (Collimator size 1mm Φ)
計測時間	約 90 秒/点

試験片形状と測定位置

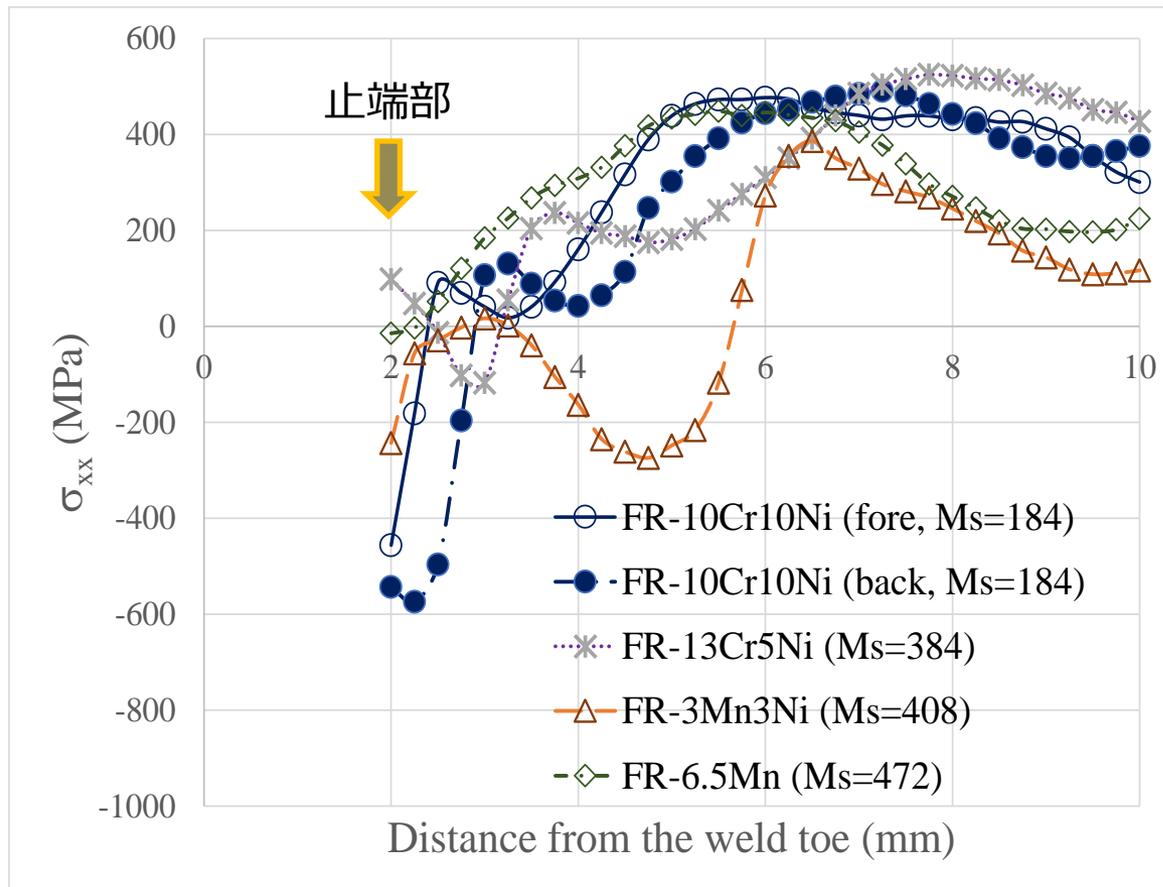


- 試験片長手（疲労試験荷重載荷）方向の板表面応力 σ_{xx} を計測
- 溶接順序①-⑧番目中の⑤番から⑧番目（Side 5-8）を計測

- 伸長ビード終端部から約2mm程度のビード上（ $d=0$ ）から計測開始



各種低変態温度溶接材料による溶接ままビード止端部の応力測定結果

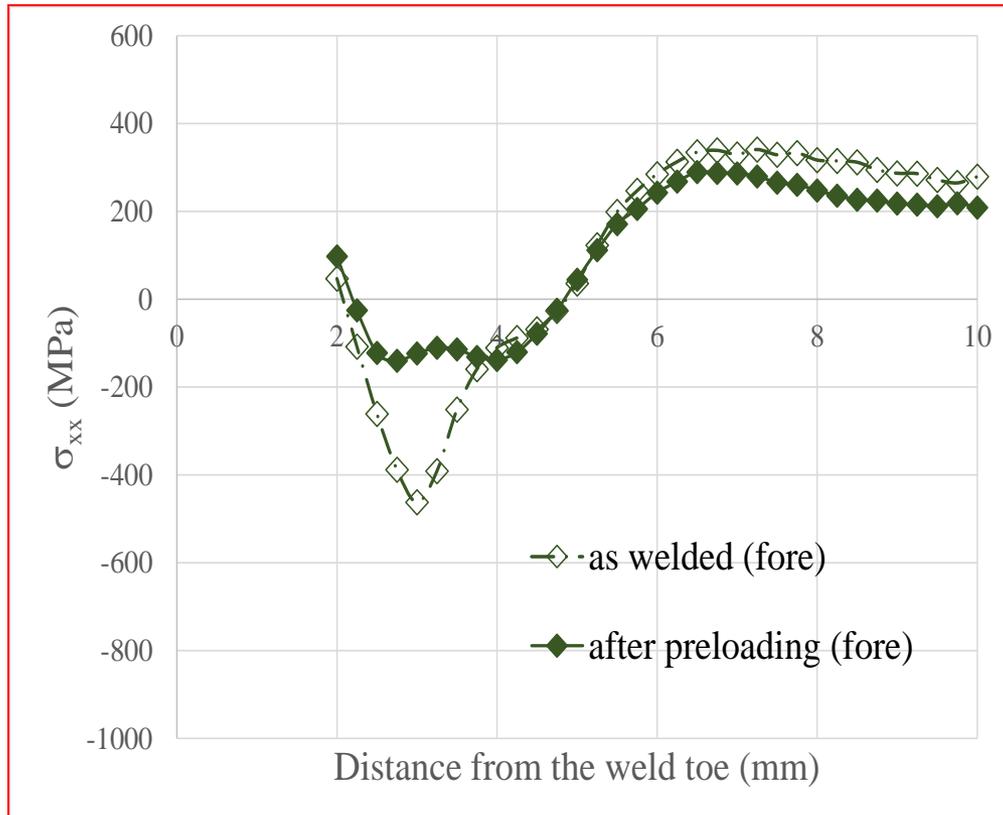


LTT(10Cr-10Ni)および低コスト低変態温度溶接材料による伸長ビード止端部の応力測定結果より、LTT(10Cr-10Ni)溶接材料が最も大きな圧縮残留応力となるが、低コスト低変態温度溶接材料を用いても、圧縮残留応力が導入されることが確認できた。

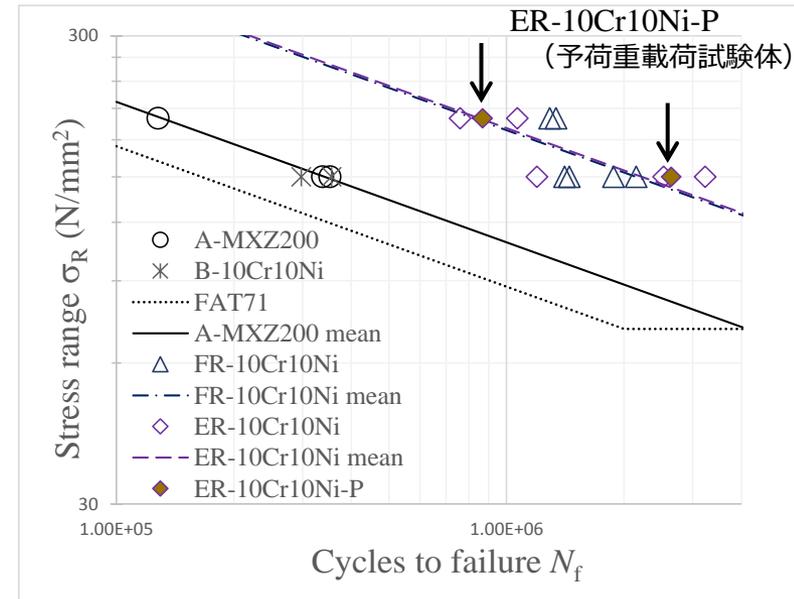
圧縮予荷重前・後(疲労試験前)のビード止端部の応力分布比較

－シェイクダウン効果の調査－

圧縮応力(-200MPa) 载荷/前後を比較



疲労試験結果 (参考)



圧縮予荷重 (-200 MPa) 前・後の応力測定結果より、ビード止端部の残留応力は変化することが確認されたが、疲労試験結果より、疲労寿命に対する影響は無いと判断された。

角回しおよび伸長ビード止端部のX線残留応力測定のとめ

高精度測定が可能な $\cos\alpha$ 法により、低変態温度溶接材料を活用した角回し溶接継手止端部の残留応力を計測した結果、LTT(10Cr-10Ni)溶接材料を用いた溶接継手の止端部には大きな圧縮の残留応力が生じる。LTT2あるいはLTT3溶接材料を用いた溶接継手においても圧縮残留応力が導入されるが、LTT(10Cr-10Ni)ワイヤを用いた方が大きな圧縮残留応力状態となる。

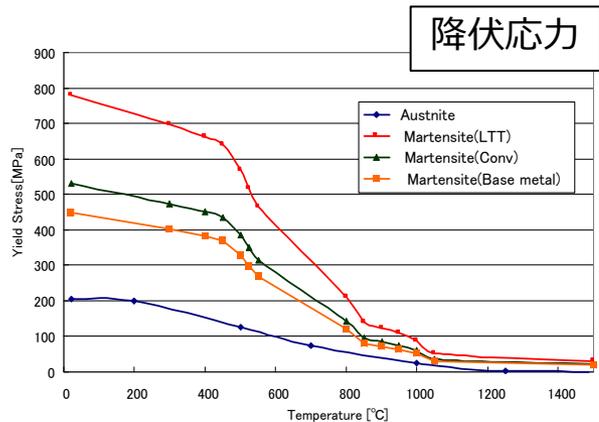
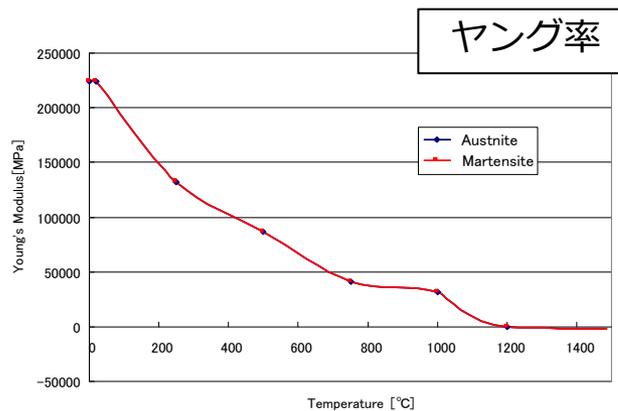
過大な圧縮予荷重 (-200MPa) によって、残留応力分布は変化する傾向にある。ただし、伸長ビード法の試験体の疲労試験結果においては、寿命には殆ど差異がなかった。このことから、残留応力分布の変化は、ほとんど影響を与えない程度であると推察された。

溶接残留応力分布および疲労強度に対する諸因子の影響予測

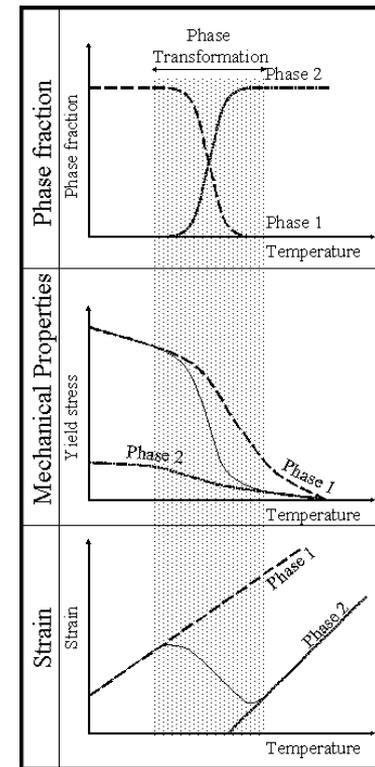
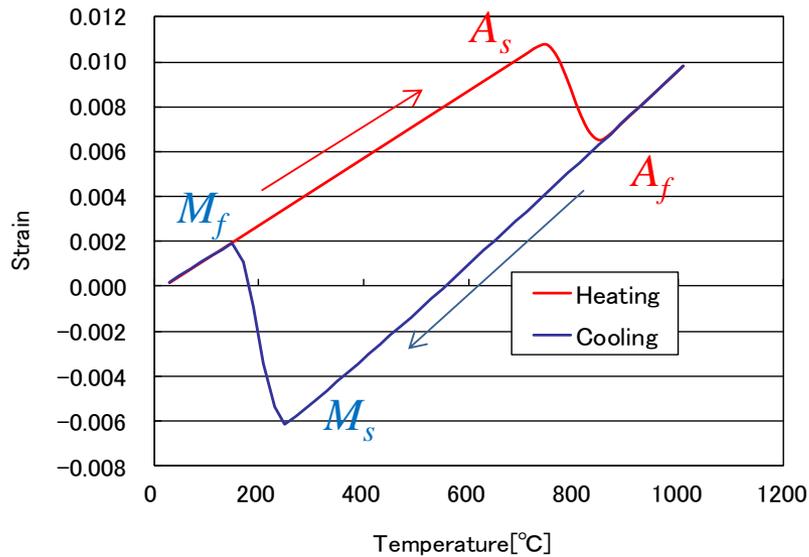
反復サブストラクチャー法を用いた三次元の熱弾塑性有限要素解析の
プログラムにより数値解析を実施

マルテンサイト変態挙動に対する熱履歴に伴う材料特性の計算手法

基本とする材料特性（抜粋）



加熱冷却過程における温度と伸びの関係

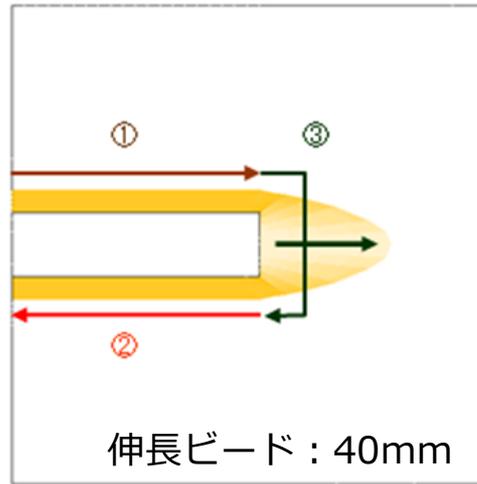


加熱，冷却過程における変態時の相分率から，基本とする材料特性をベースに混合則により複相組織の材料特性を算出。

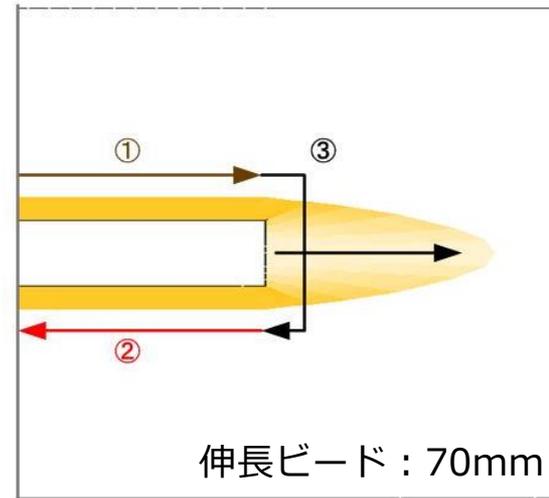
溶接施工条件 (タイプC, E の場合)

溶接順序

タイプ E



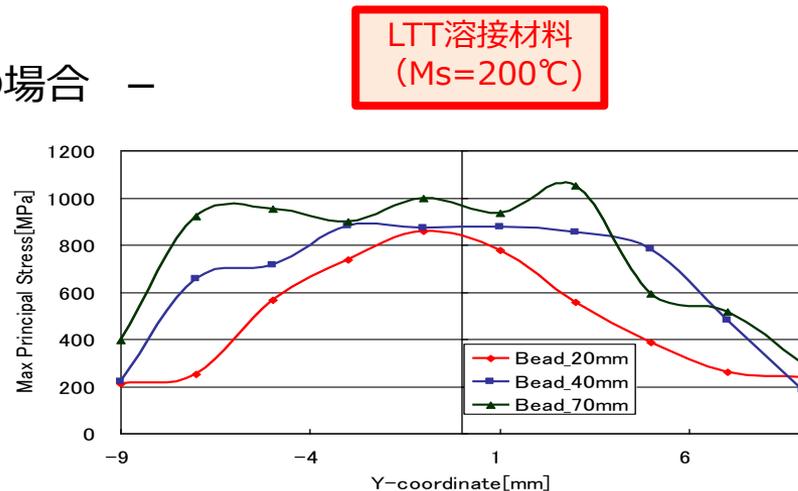
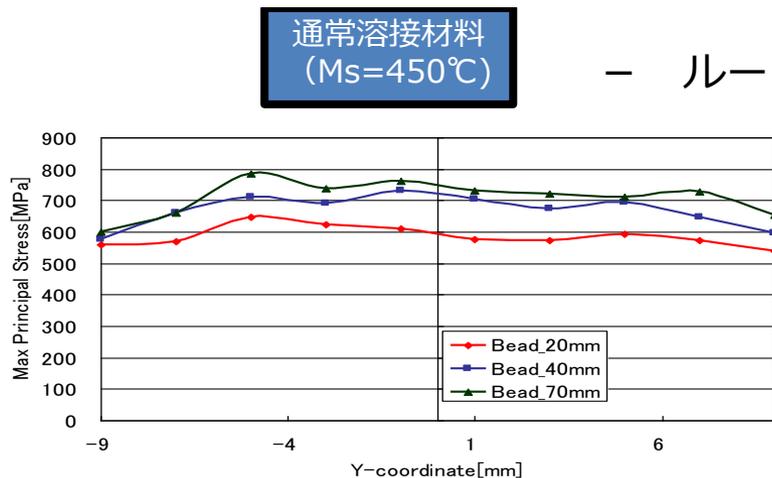
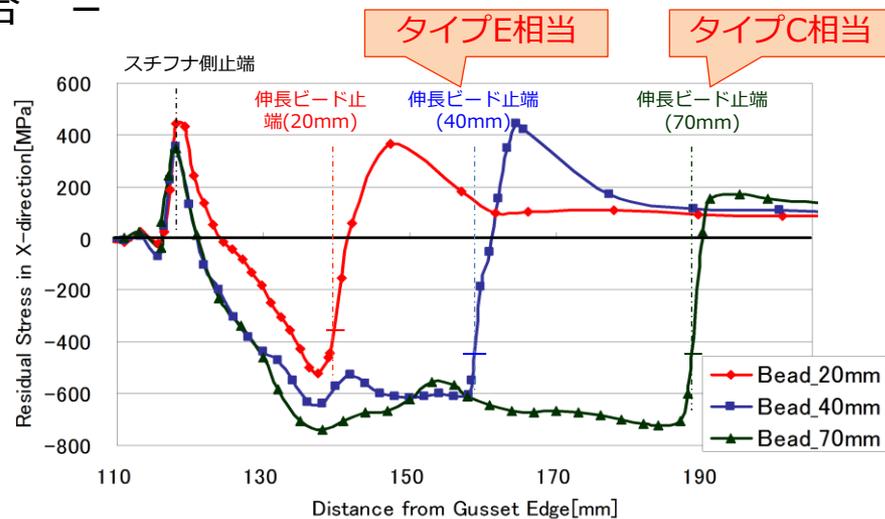
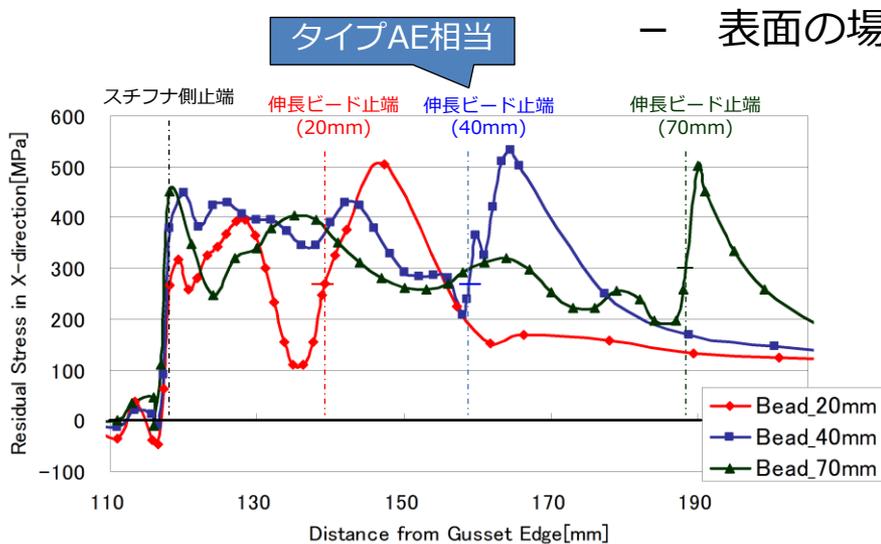
タイプ C



溶接条件

	CURRENT [A]	VOLTAGE [V]	HEAT EFFICIENCY	SPEED [mm/s]	HEAT INPUT [J/mm]
①隅肉 (通常溶接材料)	280	32	0.8	8	896
②隅肉 (通常溶接材料)	280	32	0.8	8	896
③回し (LTT溶接材料)	270	32	0.8	5.3	1304
③伸長ビード (LTT溶接材料)	280	32	0.8	3→4	2389→1792

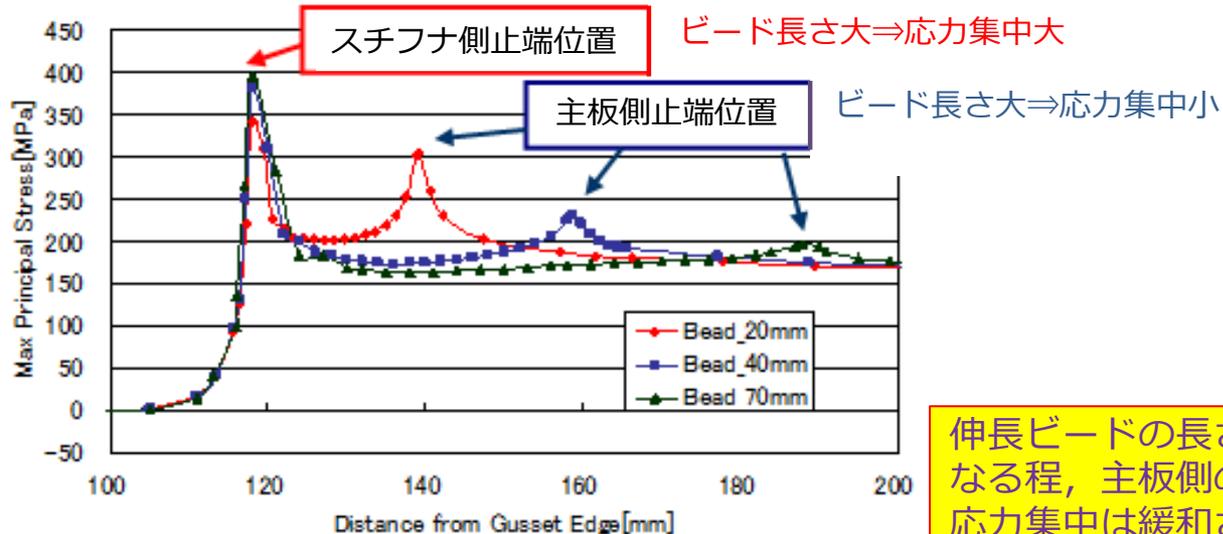
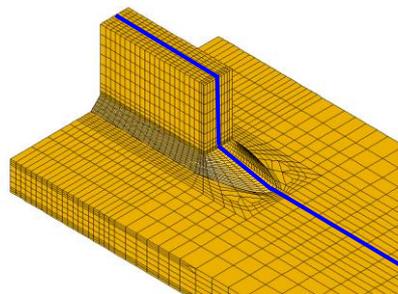
溶接残留応力に及ぼす変態温度および伸長ビード長さの影響



LTT伸長ビード長さが長くなるとビード表面、止端部ともに圧縮残留応力がより大きく現れ、40mm以上でほぼ最大の圧縮残留応力が導入され、伸長ビード長さは40mmで十分有効と判断できる。一方、LTT伸長ビードのルート部の中心位置において大きな引張残留応力が現れ、ビードが長くなると僅かに増加する。

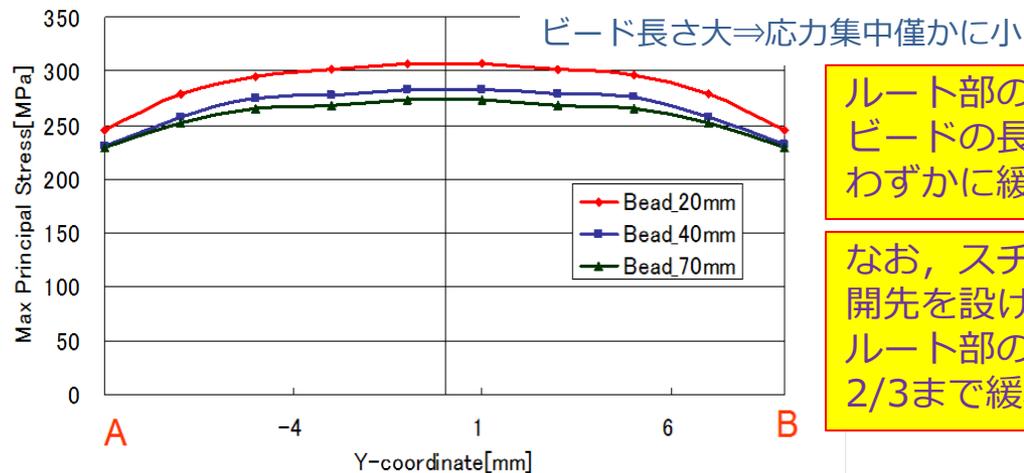
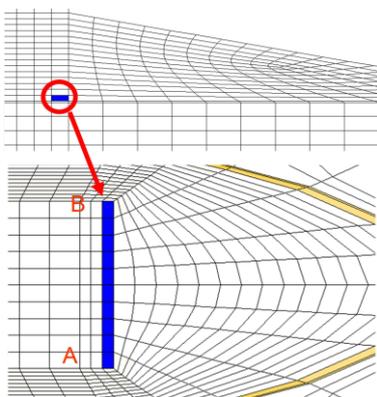
外部荷重による応力集中に及ぼす伸長ビード長さの影響

－ 表面の場合



伸長ビードの長さが大きくなる程、主板側の止端部の応力集中は緩和される。

－ ルート部の場合

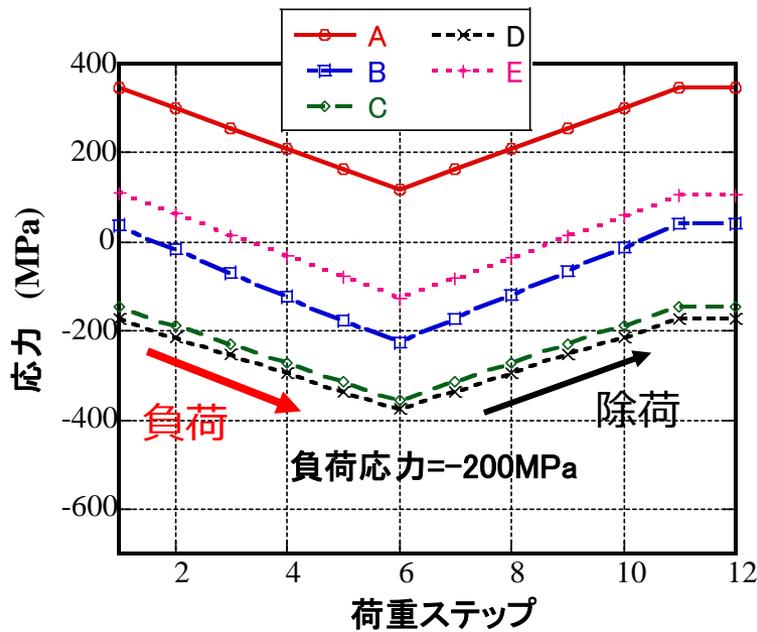
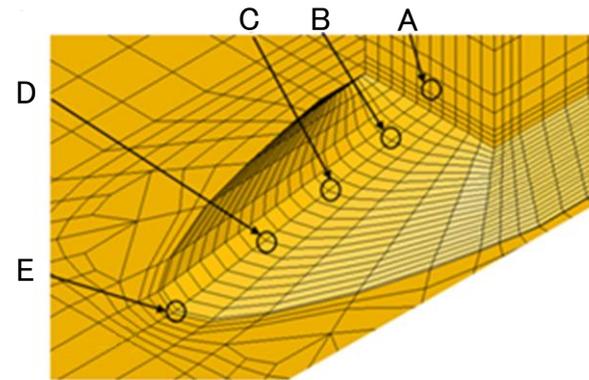
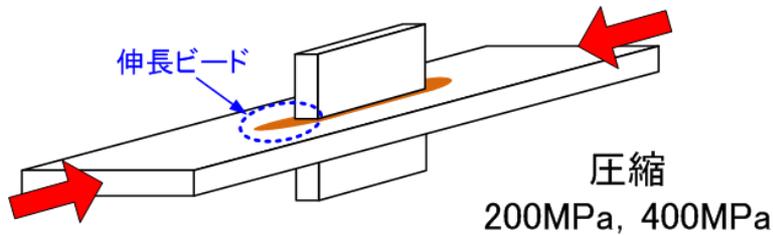


ルート部の応力集中は伸長ビードの長さの増加に従いわずかに緩和される。

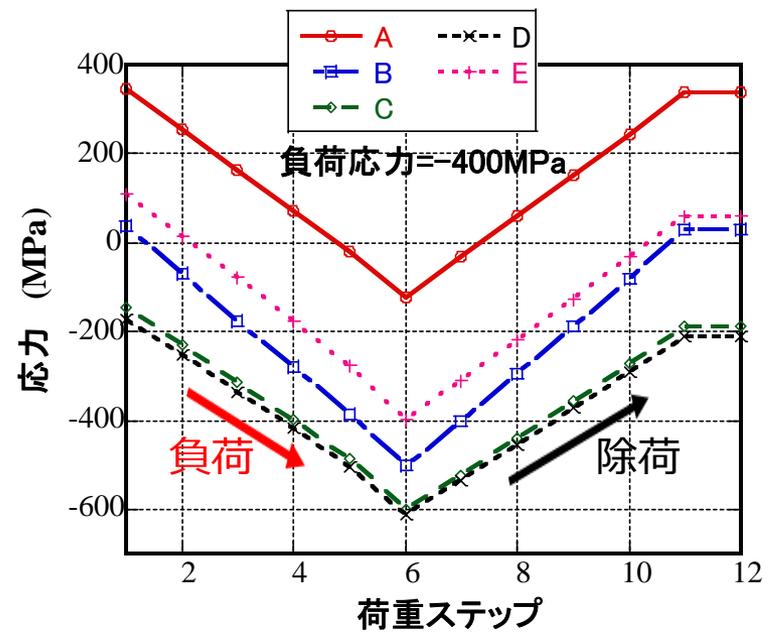
なお、スチフナ材先端部に開先を設けることにより、ルート部の応力集中は約2/3まで緩和される。

圧縮荷重負荷が溶接残留応力に及ぼす影響

—シェイクダウン効果の予測—



(a) 負荷荷重 -200 MPa



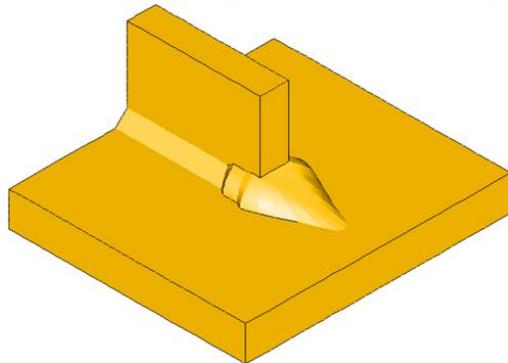
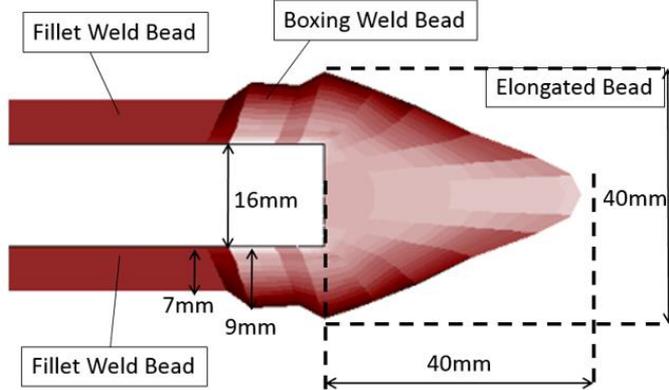
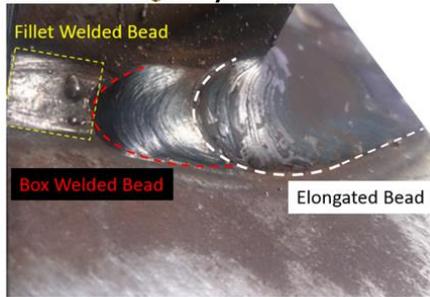
(b) 負荷荷重 -400 MPa

-200~-400MPaレベルの過大圧縮荷重負荷においては、溶接残留応力への影響は小さい。

実溶接ビードを再現した継手モデルと開発溶接材料の変態特性

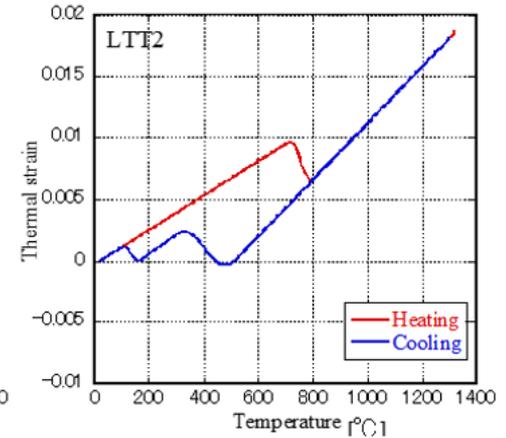
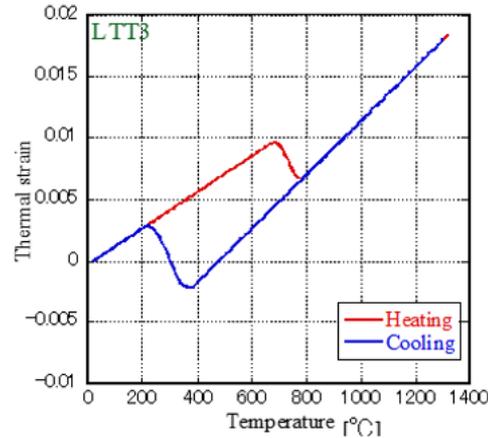
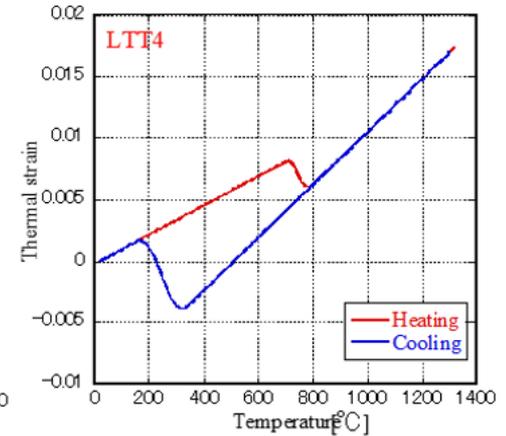
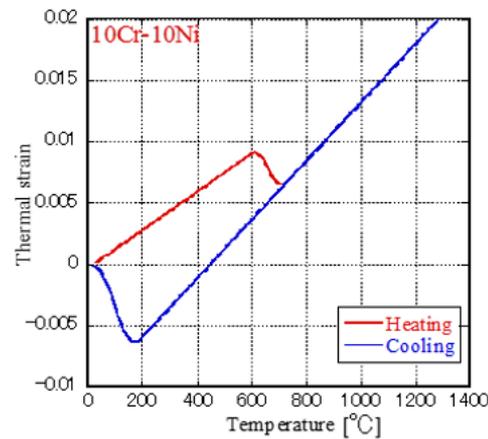
実溶接ビードを再現した継手モデル

タイプE, ER



解析で用いた各種低変態温度溶接材料の変態特性

各種低変態温度溶接材料の温度-伸び曲線

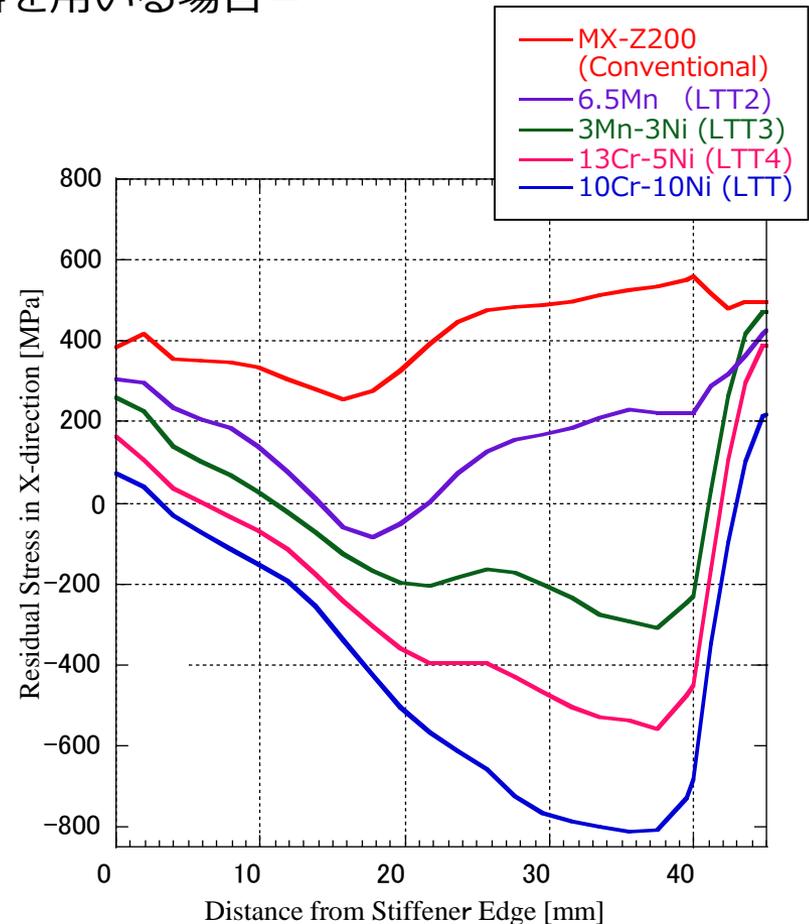
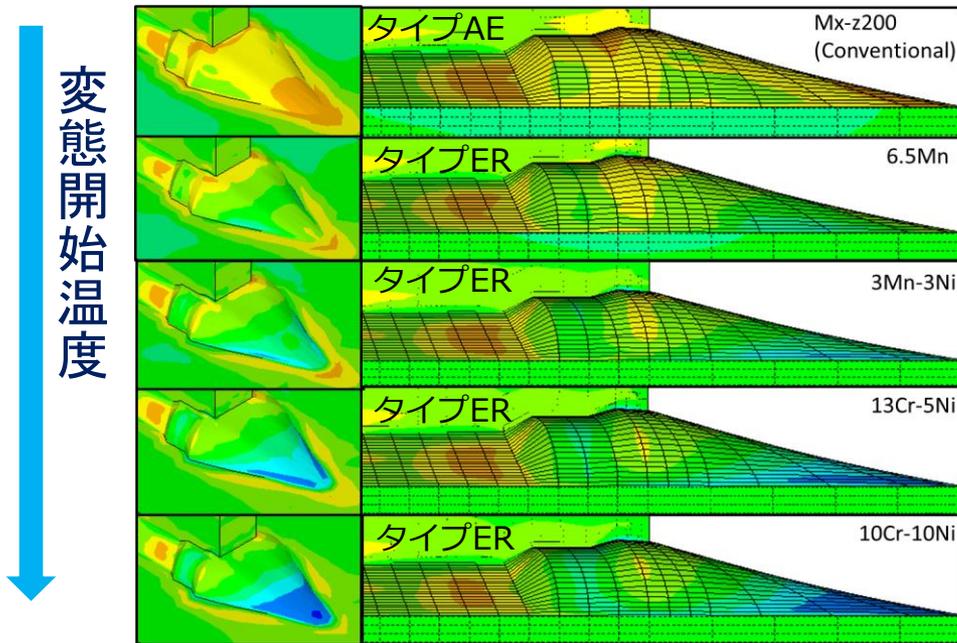


溶接残留応力に及ぼす低変態温度溶接材料のマルテンサイト変態温度の影響

－ 回し溶接に通常溶接材料を用いる場合 －

隅肉溶接：通常溶接材料 (MX-Z200)

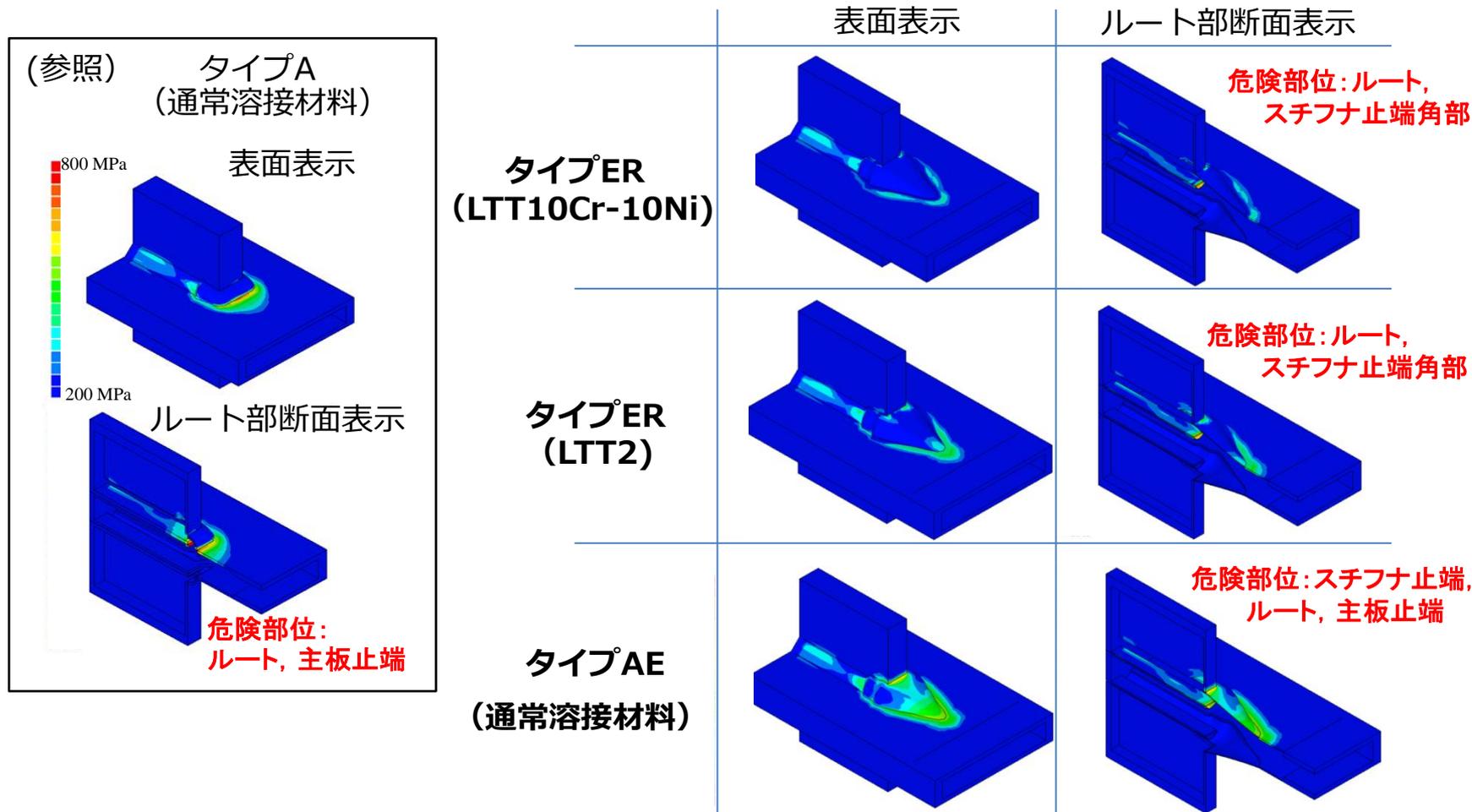
回し溶接：通常溶接材料 (MX-Z200)



タイプERの試験体を通常溶接材料および4種類の低変態温度溶接材料を用いて溶接した場合について溶接残留応力を計算した結果、いずれの低変態温度溶接材料とも通常溶接材料を用いた場合に比べ、顕著な残留応力の低減が認められる。また、マルテンサイト変態開始温度が低い程、大きな圧縮残留応力が得られる。

溶接材料およびビードの形状・寸法が疲労寿命に及ぼす影響を予測する手法の提案

– 溶接残留応力と負荷荷重による応力を用いて定義した等価応力振幅($\Delta\sigma$)分布 –



等価応力振幅分布の結果は、低変態温度溶接材料を用いたタイプERではスチフナ側の止端部とルート部が危険部位となることを示唆している。一方、伸長ビードに通常溶接材料を用いたタイプAEでは、スチフナ側の止端部とルート部に加えて主板の止端部が危険部位となる。これらは実験結果と良く対応している。

溶接残留応力分布および疲労強度に対する諸因子の影響予測のまとめ

大阪大学 接合科学研究所で開発した熱弾塑性FEMおよび新たに開発した弾性ひずみエネルギー密度に注目した等価応力振幅の概念に基づく疲労寿命概算法を用いたシミュレーションを実施し、以下の知見が得られた。

(1) 変態温度、伸長ビード長さが溶接残留応力の分布に及ぼす影響
マルテンサイト変態開始温度を変化させた解析の結果、変態開始温度が300℃以下になると主板側の止端部の残留応力は圧縮となる。また、LTT(10Cr-10Ni)での伸長ビードの場合、主板止端、ビード表面の伸長ビード方向の溶接残留応力は圧縮となり、伸長ビード長さが大きくなるとともに圧縮残留応力も増大するが、伸長ビードの長さが40 mmと70 mmとで顕著な差が無くなる。

(2) 応力集中に及ぼす伸長ビード長さ、伸長ビードの高さ、開先深さの影響
伸長ビードの長さが大きくなる、あるいは伸長ビードの高さが低い程、主板側の止端部の応力集中は緩和されるが、スチフナ側の止端部における応力集中は増加する。ルート部の応力集中は伸長ビードの長さの増加に従いわずかに緩和する。さらにスチフナ材先端部に開先を設けることにより、ルート部の応力集中は緩和される。

(3) LTT(10Cr-10Ni)ワイヤで溶接した試験体に予荷重を付与した時の残留応力の変化
200MPaあるいは400MPaの圧縮荷重を負荷した場合、荷重負荷前後の応力の変化は小さい。

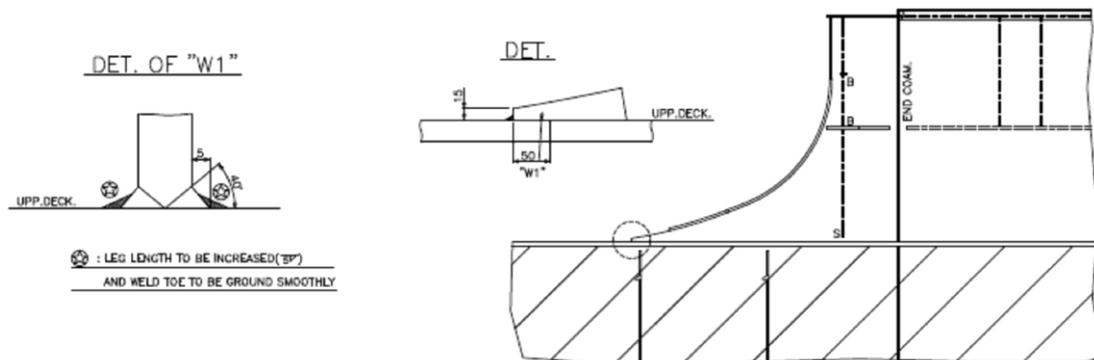
(4) 補修溶接に低変態温度溶接材料を適用した場合の残留応力分布
タイプER試験体を対象に、通常溶接材料および4種類の低変態温度溶接材料を用いた場合について溶接残留応力を計算した結果、LTT2およびLTT3溶接材料による圧縮残留応力導入の効果は、LTT(10Cr-10Ni)を用いた場合より少ないが、変態膨張による残留応力低減効果は十分得られる。

(5) 溶接材料およびビードの形状・寸法が疲労寿命に及ぼす影響
溶接残留応力と荷重負荷時の応力より等価応力振幅および疲労寿命を概算した結果では、LTT(10Cr-10Ni)およびLTT2を用いたタイプERの継手ではスチフナ側の止端部とルート部が危険部位となることを示唆している。一方、伸長ビードに通常溶接材料を用いたタイプAEでは、スチフナ側の止端部とルート部に加えて主板の止端部の3箇所が危険部位となる。これらは実験結果と良く対応している。

実船適用について

新造船への適用

ばら積み貨物船などのHatch Side Coaming Endを提案



Hatch Side Coaming End形状及び施工例

本施工への適用について，工作时数の観点から

溶接ビード整形と伸長ビードは「整形のための増し溶接にかかる時間と伸長ビード施工時間がほぼ同じと考えられる」ため，工作时数の観点からの差は溶接ビード整形にかかる時間となる。

溶接ビード整形は1箇所あたり，1.5時間（溶接からグラインダーへの切り替え，場所移動時間含む）程度

Handy Type(5 Hold)であれば5 (Hold)×4箇所となり，30時間の工数減。

Panamax(7 Hold)では28箇所，Cape size(9 Hold)では36箇所となり，大型船になるほど効果が大きい。また，疲労寿命が延びることにより，従来設計形状のシンプル化が期待される。

就航船への適用（I）

以下のような場所の亀裂補修（例えば切換え部）に補強策として適用可能と考えられる。

- ① ホールドフレーム下部ブラケット端（Fig. 1）
- ② ハッチコーミングステイとデッキとの接合部端（Fig. 2）
- ③ カーゴタンクのウェブフレームの下部端（Fig. 3）
- ④ デッキトランスの端部（Fig. 4）

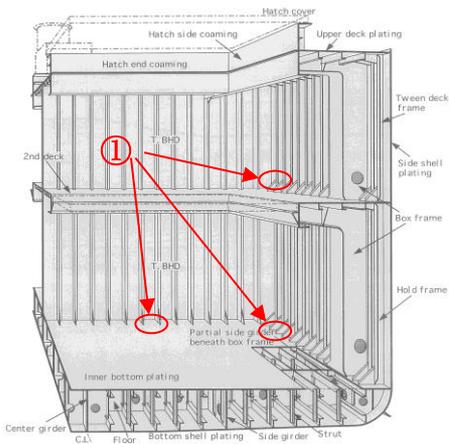


Fig. 1 カーゴホルドの構造

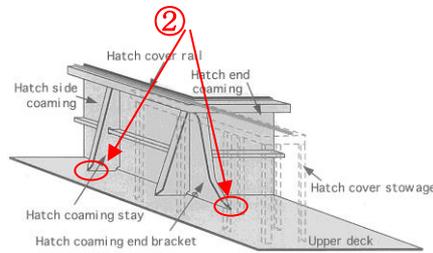


Fig. 2 ハッチコーミングの構造

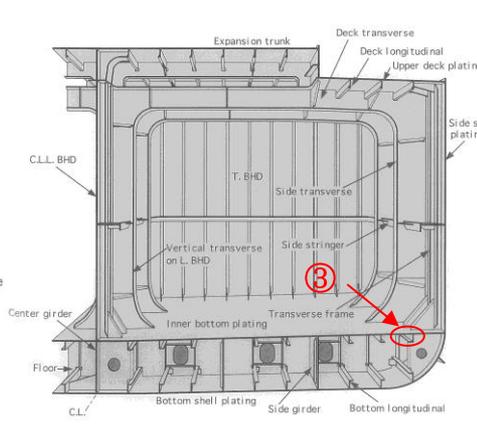


Fig. 3 カーゴタンクの構造

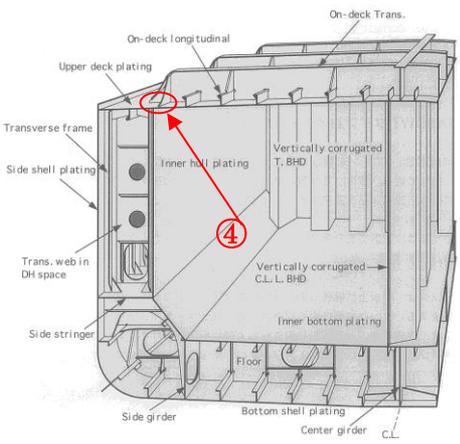


Fig. 4 カーゴタンクの構造
(ケミカルタンカー)

完全切替修理後、低変態温度溶接材料による伸長ビード溶接を追加施工することにより、同一場所からの亀裂発生を防止出来ると考えられる。

また疲労亀裂補修工事の簡略化及びコストダウンにつながるものと考えられる。

就航船への適用（Ⅱ）

亀裂を除去し溶接補修後に低変態温度溶接材料で伸長ビード溶接を行う補修方法の場合

削り，補修溶接，回し溶接，伸長ビードをLTT2溶接材料で施工したAI(LTT2)Sの疲労試験結果からのみでは，採用できるか否かの判断は現時点では難しい。



初期クラックの削り・補修溶接部ではなく，LTT2による回し溶接部のルート部から少ない繰返し数で亀裂発生・進展している。

このことから，角回し溶接を通常溶接材料で施工後にLTT2溶接材料にて伸長ビード溶接を行うなど，さらなる施工法の改善検討および試験による確認が必要であるが，ER(LTT2)-SやER(LTT2)-I並の延命効果が大いに期待できる。

おわりに

「高張力鋼溶接部疲労特性向上のための溶接施工法の開発（その2）」の研究成果を以下にまとめる。

① 新造船における疲労強度重要箇所の隅肉角回し溶接部への実用的な伸長ビード溶接施工法の開発

- ・本研究で合計44体の試験体により疲労試験を実施した。
- ・スチフナ先端部の角回し溶接を通常溶接材料で施工し、約40mm長さの伸長ビードのみ低変態温度溶接材料で溶接する施工法を提案し、室温・大気中の疲労寿命は、LTT(10Cr-10Ni)溶接材料で施工した場合、最大約10倍延伸することが確認できた。
- ・40mm長さの伸長ビード施工のみで延命効果が得られ、溶接ビード整形作業における工数の低減化に有効であると判断された。

② 就航船における疲労強度向上対策(例えば損傷対策や高付加価値船での延命対策等)への適用を目的とした実用的な新補修溶接施工法(超音波ピーニング施工等の代替手法)の開発

- ・上記提案施工法によりスチフナ材先端の開先加工の影響はほとんど無いことを明らかにした。
また、従来の回し溶接継手部に約40mm長さの伸長ビードを各種低変態温度溶接材料で肉盛溶接する施工法にて、応力範囲 (σ_R) 150N/mm²で疲労寿命は従来より3.84~9.34倍向上し、就航船でも補強・延命対策になることを明らかにした。
- ・疲労設計の観点から評価すれば、下記③の成果からも、高周波・超音波ピーニングと同等以上の改善効果が得られると判断できた。
- ・従来の角回し溶接止端部に深さ3.5~5.0mm程度の疲労亀裂を発生させた後、発生した疲労亀裂を研削除去して、LTT2(6.5Mn)溶接材料で補修溶接と長さ約40mmの伸長ビード溶接を施工し、再度疲労試験を実施したところ、タイプA試験体の約1.5倍の寿命であった。補修溶接と長さ約40mmの伸長ビード溶接を慎重に施工すれば、更なる延命効果が期待できるものと考えられる。

③ 低コスト低変態温度溶接材料の開発

- ・低コスト低変態温度溶接材料として、Niレスの6.5Mn系フラックス入りワイヤ (LTT2) を開発した。

- LTT(10Cr-10Ni)溶接材料の方が、LTT2やLTT3(3Mn-3Ni)溶接材料より寿命延伸（疲労強度上昇）効果は大きいですが、LTT2やLTT3溶接材料の方が安価であり、実用性は優れていると言える。
- LTT2溶接材料を使用しても、高周波・超音波ピーニングと同等以上の改善効果が得られると判断できた。
- LTT2溶接材料による伸長ビード施工を(株)三和ドック、今治造船(株)において実施し、応力範囲 (σ_R) 150N/mm²で疲労寿命は従来より3.84~5.03倍向上し、その有効性を確認できた。

④ 溶接残留応力測定

- 試験体36ケースを $\cos\alpha$ 法によるX線残留応力測定し、LTT(10Cr-10Ni)溶接材料を用いた溶接継手の止端部には大きな圧縮の残留応力が生じることを明らかにした。
- LTT2溶接材料を用いた溶接継手においても圧縮残留応力が導入されるが、LTT(10Cr-10Ni)溶接材料を用いた方が大きな圧縮残留応力状態となることを確認した。

⑤ 溶接残留応力分布および疲労強度に対する諸因子の影響予測

- 大阪大学接合科学研究所で開発された熱弾塑性FEMシミュレーションを実施し、
 - 変態温度、伸長ビード長さが溶接残留応力の分布に及ぼす影響
 - 応力集中に及ぼす伸長ビード長さ、伸長ビードの高さ、開先深さの影響
 - 低変態温度(LTT)溶接材料で溶接した試験体に予荷重を付与した時の残留応力の変化
 - 補修溶接にLTT溶接材料を適用した場合の残留応力分布
 に注目し、諸因子が溶接残留応力および応力集中に及ぼす影響について明らかにした。
- 溶接残留応力と応力集中の両者を考慮した等価応力振幅を指標とした疲労寿命の概算により疲労亀裂の発生危険度が高い部位の抽出を行った。予測された危険部位は疲労試験の結果を良く説明しており、使用する溶接材料の変態温度や伸長ビードの長さなどが与えられれば疲労強度の評価が可能であることを示した。この疲労寿命概算法の提案は、溶接構造物の疲労強度評価技術において多くの可能性を含んだ新しい展開である。

さらに、本研究成果を新造船・就航船に適用した場合のメリットについて検討した。

本研究は、大阪大学、長崎総合科学大学、今治造船、三和ドック、三菱重工業および日本海事協会との共同研究により実施するとともに、日本海事協会の「業界要望による共同研究」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。