

(論文)

重ねすみ肉溶接継手の残留応力特性に及ぼす諸因子の影響

Investigation of Influential Factors for Residual Stress Characteristics of Fillet Welded Lap Joints



永井卓也*¹ (博士(工学))
Dr. Takuya NAGAI



河西 龍*¹
Ryu KASAI

A systematic study has been conducted on the characteristics of residual stress in fillet welded lap joints of steel sheet. The study was conducted under varied conditions of steel types, sheet thickness and welding wires (with different transformation temperatures). The results show that, under the simulated welding conditions (with a constant deposition rate), the transverse residual stress at the weld toe, which is considered to be important for fatigue strength, is scarcely affected by the type of steel or by the thickness and becomes increasingly compressive for wires with a lower transformation temperature. Fatigue tests have also been conducted to investigate the influence of residual stress on the fatigue properties.

まえがき = 自動車業界で多用される薄鋼板の重ねすみ肉溶接継手は、疲労強度の向上に対するニーズが大きい。疲労強度の低下を招く主な要因としては、溶接金属止端部の形状によって生じる応力集中¹⁾と溶接金属止端部周辺に生じる引張残留応力²⁾が挙げられる。引張残留応力を低減させる手段の一つとして、溶接材料自体の成分制御による方法が考案されている。この溶接材料は低変態温度溶接材料と呼ばれ、通常よりも低い温度で溶接金属をマルテンサイト変態させ、その際の膨張を利用して溶接金属止端部近傍に圧縮残留応力を導入する効果がある³⁾。低変態温度溶接材料を用いたさまざまな実験は行われており、重ねすみ肉溶接継手についても検討が行われている^{4), 5)}。しかし、一般的な溶接材料との比較実験や母材の鋼種を変更した場合の影響調査等について個別の研究報告はあるものの、溶接条件や板厚といった基礎条件が揃(そろ)っておらず、諸因子の残留応力に対する影響の度合いを評価した報告例は少ない。

そこで著者らは、重ねすみ肉溶接継手における残留応力特性について、溶接条件や板厚などの基礎条件を管理した系統的調査を行った⁶⁾。本報では、鋼種、板厚、溶接ワイヤを変化させた場合の残留応力への影響度合いを調査した。また、実際にその残留応力レベルが疲労強度に影響を与えるかに関しては、疲労試験結果⁷⁾と比較・評価した結果を報告する。

1. 試験方法

1.1 供試材

供試鋼板は、Mild steel, 590 MPa級鋼, 780 MPa級鋼で、それぞれ板厚2.9 mm (590 MPa級鋼のみ2.3 mmと

3.6 mmも準備)、幅85 mm、長さ300 mmの平板を用いた。マグ溶接用のワイヤは、薄板のすみ肉溶接に一般的に使用される軟鋼ソリッドワイヤ (JIS Z 3312 G49 A2 M16)、C量を増加して変態点を調整したメタル系フラックス入りワイヤ (以下、高Cフラックス入りワイヤという)、低変態温度溶接材料であるソリッドワイヤ (10Cr-10Ni) の3種を用いた。それぞれのすみ肉溶接金属の化学成分例を表1に示す。

1.2 溶接方法

板厚2.3~3.6 mm、幅85 mm、長さ300 mmの鋼板による重ね継手に対し、80%Ar-20%CO₂を用いるマグ溶接を行った。試験板形状を図1に示す。図1に示すとおり、試験板の拘束は板状の拘束ジグを3箇所のクランプで上

表1 溶接金属の化学成分
Table 1 Chemical compositions of weld metals

Weld Material	Chemical compositions (mass%)						
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
Mild steel solid wire	0.05	0.33	1.29	0.013	0.003	0.008	0.031
High C flux cored wire	0.31	0.52	1.42	0.013	0.006	0.005	0.021
10Cr-10Ni solid wire	0.04	0.01	0.74	0.012	0.003	4.95	4.83

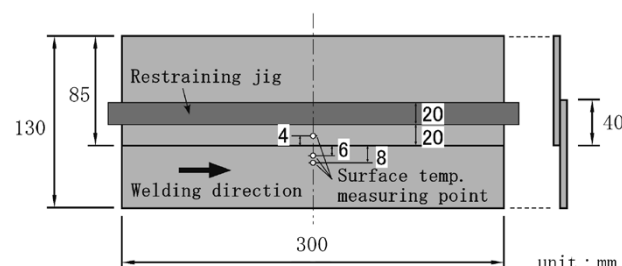


図1 試験体形状と温度測定位置
Fig. 1 Shape and dimensions of testing plate and temperature measuring points

*¹ 神鋼溶接サービス(株) 技術調査部

表2 溶接条件
Table 2 Welding conditions

Test No.	Steel Grade	Thickness mm	Weld Material	Welding Current A	Arc Voltage V	Welding Speed cm/min	Wire feed speed m/min
1	HT590	2.9	Mild steel solid wire	270	25	80	8.8
2	Mild Steel	2.9	Mild steel solid wire	265	25	80	8.8
3	HT780	2.9	Mild steel solid wire	270	25	80	8.8
4	HT590	2.3	Mild steel solid wire	200	21	80	5.8
5	HT590	3.6	Mild steel solid wire	300	25	80	10.0
6	HT590	2.9	High C flux cored wire	215	25	80	8.8
7	HT590	2.9	10Cr-10Ni solid wire	220	28	80	8.8

*No. 1, 2, 3, 6, 7 ... Deposition Rate is constant.
*No. 1, 4, 5 ... Rate of Penetration for lower plate is constant.
*Shielding gas ... Ar+20 %CO₂ (25 l/min)

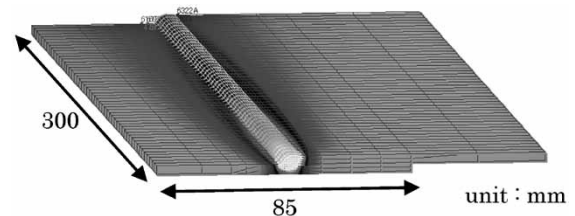


図2 解析モデル
Fig. 2 Analytical model

表3 解析条件
Table 3 Analysis conditions

Boundary condition	Atmosphere (Vacuum)	Radiant heat transfer at an emissivity of 0.8
	Restraint	Restrained at the same location for the same time as taken in the welding test
Heat source	Internal calorific type	Heat source is input into the penetration area defined with cross-sectional macrograph
Efficiency of heat input		70~80 %
Number of elements		Approx. 15,000

から押さえる方法とした。この拘束は溶接開始から3分後に外した。

各溶接材料について表2に示す溶接条件とし、繰返し数は2として溶接を実施した。Test No.1, 2, 3, 6, 7は、実施工を想定し溶着量が一定となるように電流と電圧とを調整した。Test No.1, 4, 5については実施工を想定し、下板の板厚に対する溶込み深さの割合を40%程度となるように電流と電圧とを調整した。

1.3 温度測定

有限要素法解析における入熱条件の基準とするべく、溶接時の鋼板表面温度測定を行った。図1に示すとおり、測定位置は試験板中央とし、上板は板端部から4 mm、下板は上板端部から6 mmと8 mmの計3か所とした。測定にはメモリハイコダおよび素線径0.32 mmのK熱電対（ガラス繊維被覆）を用いた。

1.4 有限要素法解析

残留応力分布を明らかにするため、有限要素法解析を行った。解析ソフトは「Quick Welder（株計算力学研究センター）」を使用した。解析モデルは実験で使用した試験体と同じ形状の3次元モデルとした（図2）。モデル上での拘束は、実験と同じ位置で角変形方向に完全拘束し、拘束時間も実験と同じ3分とした。その他解析条件は表3のとおりである。物性値には温度依存性を考慮した参照値⁸⁾および実測値を用いた。ただし、温度に対する変化が少ない密度およびポアソン比は、温度依存性を無視して一定値とした。

1.5 残留応力測定

解析結果の妥当性を検証するため、X線回折法により残留応力を実測した。試験板中央のビード止端部から0.5 mm, 1.5 mm, 2.5 mmの計3点を測定位置とした。重ねすみ肉溶接継手における疲労破壊は、応力集中部である溶接金属止端部が起点となるのが一般的であり、き裂の開口に寄与する残留応力は、溶接線直角方向が支配的となる。このため、測定方向は溶接線直角方向（ σ_y ）とした。また、測定面には電解研磨処理（深さ約200 μ m）を行い、表面の加工ひずみを除去した。残留応力の測定方法は日本材料学会のX線応力測定法標準に準拠した^{9)~11)}。測定条件を表4に示す。

表4 残留応力測定条件

Table 4 X-ray stress measurement conditions

Measuring method	Ω -Diffractometer method
Characteristic X-ray	Cr-K α
Tube voltage	30 kV
Tube current	10 mA
Diffractive plane	(211)
Diffractive angle, 2θ	156.4°
Angle of ϕ	11 angles between 0~45°
Oscillation angle of ϕ	$\pm 3^\circ$
Stress constant	-318 MPa/deg
X-ray exposure time	120 s/ ϕ
X-ray exposure area	1 mm ϕ

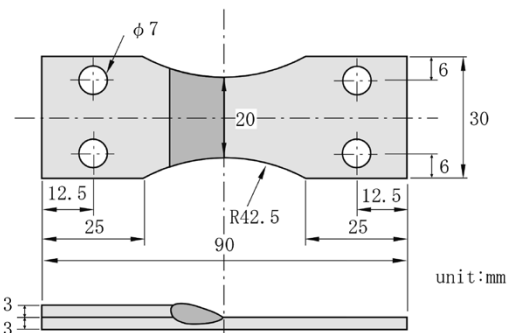


図3 平面曲げ疲労試験片
Fig. 3 Specimen for plate bending fatigue test

1.6 平面曲げ疲労試験

重ねすみ肉溶接継手から図3に示す形状の試験片を切り出して疲労試験に供した⁷⁾。曲げ変位一定型の平面曲げ疲労試験機を用いて、室温、大気中、周波数25 Hz (1,500 cpm)、初期応力比R=-1で疲労試験を実施した。変位一定型の試験であるため、き裂が発生すると設定荷重以下での試験が継続することになる。本試験では、設定荷重に対して50%まで荷重が減衰したところで試験機が停止するように設定した。また、繰返し数 2×10^6 回を疲労限度と定義して試験を終了した。

2. 結果および考察

2.1 実験値と解析値の比較

溶接継手から得られたマクロ写真を元に解析モデルを作成した。溶接時の温度測定結果と解析結果の代表例と

して、Test No.2の結果を図4に示す。3か所の温度測定位置において、実測値と解析値は良い一致を示している。Test No.2以外の条件においても、入熱効率を70～80%の間で調整した測定結果と解析結果で良い一致を示した。

図5に溶接線直角方向の残留応力 (σ_y) を示す。解析における溶接線直角方向の残留応力は、止端部から離れた点から止端部へ近づくにつれて圧縮となっている。

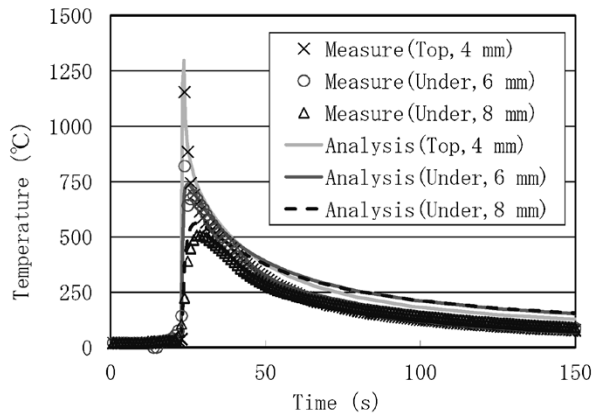


図4 温度実測と解析の比較 (Test No.2)

Fig. 4 Comparison of temperature transitions between measurement and analysis (Test No.2)

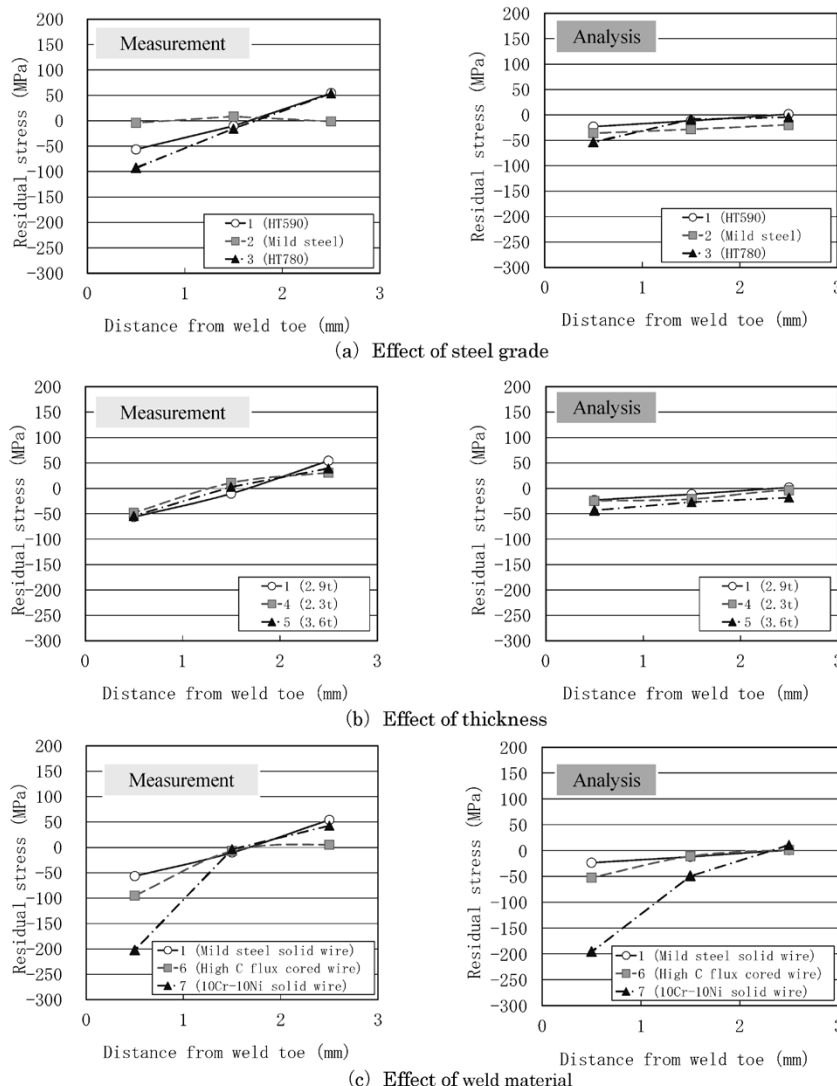


図5 溶接線直角方向の残留応力

Fig. 5 Transverse residual stress

実験値を確認すると止端部近傍においては解析と同様の傾向となりよく一致している。また、疲労強度に影響のある止端近傍の残留応力の詳細分布が解析結果により得られる。したがって、以降は解析結果で考察することとする。

2.2 鋼種と残留応力の関係 (図5 (a))

溶接線直角方向の止端部残留応力は、鋼板強度によらず-20～-50MPa程度で大きな差はない。板厚2mmについて同様の実験が行われた例では、高強度鋼板ほど止端部は圧縮残留応力が大きく、HT590とHT780とでは150MPa程度の差があると報告されている⁵⁾。今回の結果では、HT780がHT590に比べて圧縮残留応力が大きい、その差は30MPa程度であった。既報⁵⁾の断面マクロ写真において、HT590とHT780では下板への溶込み深さが異なっている。本実験では溶接条件を管理しており、溶着金属は鋼板の強度に関わらず同様の形状を示している。溶着金属量の異なる既報⁵⁾では、止端部の残留応力に影響を与える溶着金属の収縮量や温度履歴がHT590とHT780で異なる。このように、鋼種以外の影響も加わっていた可能性があり、今回の結果と異なると推察する。板厚2.9mmで実施工を想定した溶着量

が一定となる場合には、鋼板強度によって止端部の残留応力は大きく変わらないといえる。

2.3 板厚と残留応力の関係 (図5 (b))

板厚2.3~3.6 mmの範囲では、溶接線直角方向の止端部残留応力は-25~-45 MPa程度で、板厚による残留応力の明確な差はなかった。一般的に、板厚が厚くなるほど溶接時の拘束は強くなり、残留応力は高くなる。しかし、板厚2.3~3.6 mmという狭い範囲において、板厚に対する溶込み深さの割合が一定であれば、板厚の影響はほぼないということが分かった。

2.4 溶接ワイヤと残留応力の関係 (図5 (c))

溶接ワイヤによって溶接線直角方向の止端部残留応力に明確な差が生じた。10Cr-10Niソリッドワイヤ、高Cフラックス入りワイヤ、軟鋼ソリッドワイヤでマルテンサイト変態点および変態による膨張量が異なるためと考えられる。

変態点測定装置で冷却速度40℃/sで測定した溶接金属の伸び-温度曲線を図6に示す。軟鋼ソリッドワイヤでも、変態による膨張で引張応力を緩和することになるが、変態点が高いため再び収縮しはじめる温度も高く、変態による膨張効果が室温付近で得られない。低変態温度溶接材料では、変態温度が低いため膨張による引張応力の緩和および圧縮応力の付与の効果が室温付近まで継続する。変態開始温度は10Cr-10Niソリッドワイヤで388

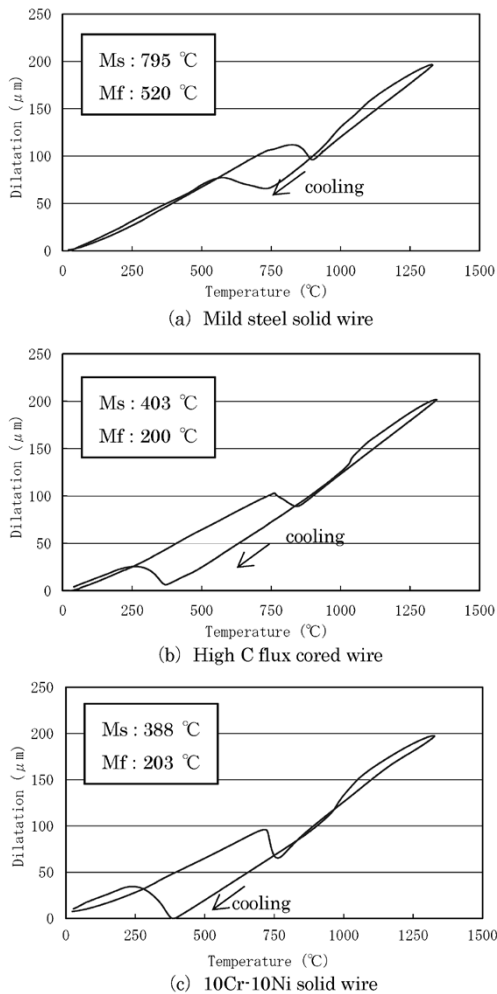


図6 温度-伸び曲線
Fig. 6 Temperature-Dilatation curve

℃、高Cフラックス入りワイヤで403℃である。このように、変態開始温度に大きな差はないが、膨張量(伸び量)が異なる。変態膨張による圧縮残留応力付与の効果は、膨張の大きい10Cr-10Niソリッドワイヤの方が勝る。今回の結果は、変態点が低く膨張量の大きいワイヤほど、止端部近傍の残留応力は圧縮となっており、過去の低変態温度溶接材料に関する研究報告と一致している⁴⁾。

板厚内部の残留応力分布を図7に示す。変態点が低く膨張量の大きい材料ほど、溶接金属内部および止端部近傍に圧縮残留応力が広がっていく傾向が確認できる。低変態温度溶接材料を用いたビードオンプレート溶接に関する解析では、溶接金属内部に圧縮残留応力が広く分布しているとの報告があり¹²⁾、今回の結果と一致している。本試験においては、変態点を3段階で変えた試験を行った。これにより、溶接金属内部の圧縮残留応力分布の範囲が、変態開始点および変態終了点が低く、かつ膨張量が大きくなるほど広がっていくことを示した。

2.5 残留応力と疲労強度の関係

薄板のマグ溶接継手において、疲労強度に関係する溶接線直角方向の残留応力は、溶接ワイヤの種類により大

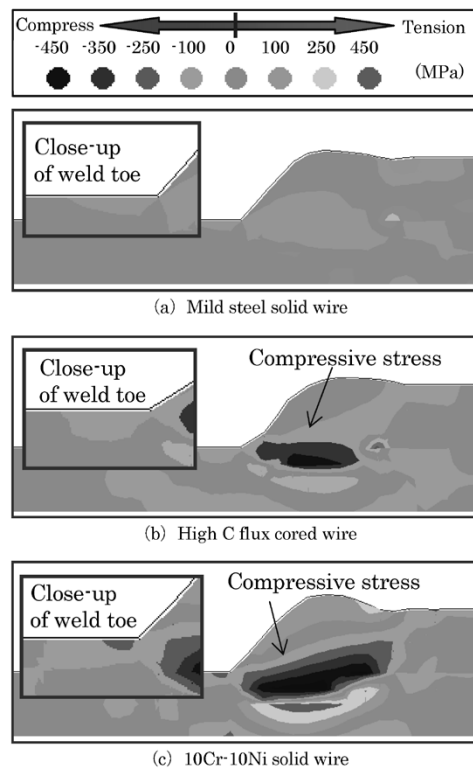


図7 溶接線直角方向の残留応力分布
Fig. 7 Cross-sectional distributions of transverse stresses

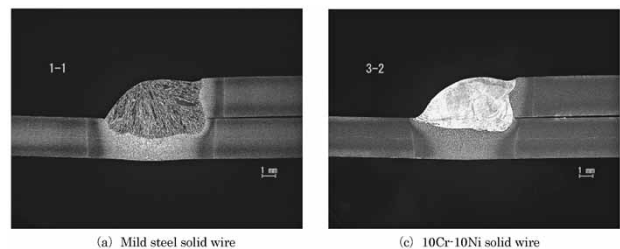


図8 断面マクロ観察
Fig. 8 Cross-sectional macrographs

きな影響を受けることが前節までの結果で分かった。そこで、軟鋼ソリッドワイヤと10Cr-10Niソリッドワイヤにおける残留応力の差が疲労寿命に影響を及ぼすかについてを疲労試験で検証した。

具体的には、表2の条件で作製した重ねすみ肉溶接継手から試験片を採取し、平面曲げ疲労試験を行った。作製した重ねすみ肉溶接継手の断面マクロ写真を図8に示す。この断面マクロ写真から止端形状を測定し、フランク角および曲率半径を求めた。また、次式¹³⁾を用いて応力集中係数 K_t を算出した(表5)。

$$K_t = 1 + \frac{1 - \exp\left\{-0.9\sqrt{\frac{T}{h}}(\pi - \theta)\right\}}{1 - \exp\left\{-0.9\sqrt{\frac{T}{h}}\left(\frac{\pi}{2}\right)\right\}} \cdot \left[\tanh\left\{\frac{\left(\frac{T}{t} - 1\right)^{\frac{1}{4}}}{1 - \frac{\rho}{t}}\right\} \cdot \frac{0.13 + 0.65\left(1 - \frac{\rho}{t}\right)^4}{\left(\frac{\rho}{t}\right)^{\frac{1}{3}}}\right]$$

K_t : 応力集中係数

θ : フランク角 (rad)

ρ : 曲率半径 (mm)

T : 重ね部の板厚 (mm)

t : 下板の板厚 (mm)

h : 溶接金属の高さ (mm)

応力集中係数は軟鋼ソリッドワイヤで1.8, 10Cr-10Niソリッドワイヤで1.3となっており, 10Cr-10Niソリッドワイヤが若干低い結果となった。応力集中を見ると疲労強度に対し10Cr-10Niが優位である。

平面曲げ疲労試験結果を図9に示す。軟鋼ソリッドワイヤと比較して, 10Cr-10Niソリッドワイヤは全域にわたって高寿命側となった。10Cr-10Niの圧縮残留応力が効果的に作用したと推察できる結果ではあるが, 溶接金

属止端形状による応力集中の影響も含まれる。したがって, 今回の結果だけでは, 10Cr-10Niソリッドワイヤの圧縮残留応力がどの程度疲労強度向上に寄与したか判断できない。しかし, 種々の溶接条件で止端形状を管理した評価をすることで, 残留応力の寄与率を定量化することも可能だと考える。

むすび = 薄板のマグ溶接における残留応力特性について, 理論および実験により, 鋼種・板厚・溶接ワイヤによる影響を系統的に調査して以下の結果を得た。

(1) 薄板の重ねすみ肉溶接継手において, 疲労強度で重要視される溶接線直角方向止端部の残留応力は, 実施工を想定した本テストにおいて, 鋼種と板厚の影響はあまりなかった。また, 変態点が低く, 変態膨張量の大きいワイヤほど圧縮応力が発生した。

(2) 溶接線直角方向において, 鋼種の影響はわずかである。高強度鋼板ほど圧縮残留応力となるものの, 明確な差は見られなかった。

(3) 溶接ワイヤの影響については, 変態点が低く, 変態膨張量の大きい材料ほど, 溶接金属内部の圧縮残留応力分布の範囲が広がっていた。

(4) 平面曲げ疲労試験の結果, 低変態温度溶接材料である10Cr-10Niソリッドワイヤの適用により軟鋼ソリッドワイヤより疲労強度が向上することを確認した。疲労強度が向上した要因の一つには, 止端部の圧縮残留応力の影響があると推察される。

本検討の実施にあたり, ご助言いただきました大阪大学工学研究科の望月教授, 大阪大学接合科学研究所の村川招聘教授, 堤准教授および菅客員教授に深く感謝の意を表します。

表5 応力集中係数 K_t

Table 5 Stress concentration factor, K_t

Weld Material	Flank Angle, θ degree	Curvature Radius, ρ mm	K_t
Mild steel solid wire	119	0.32	1.8
10Cr-10Ni solid wire	138	0.95	1.3

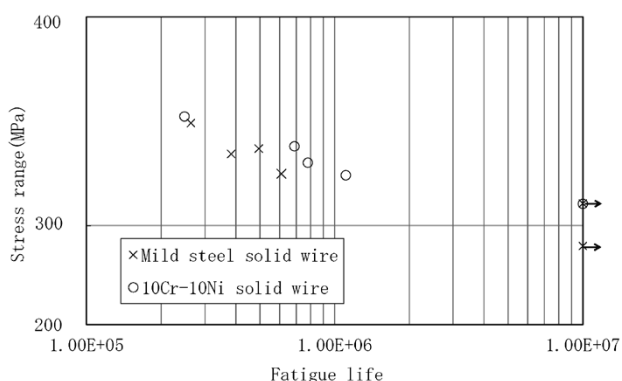


図9 疲労試験結果

Fig. 9 Results of fatigue test

参考文献

- 1) 寺崎俊夫ほか. 溶接学会誌. 1982, Vol.51, No.9, p.790-796.
- 2) 太田昭彦ほか. 溶接学会誌. 1981, Vol.50, No.2, p.161-168.
- 3) 太田昭彦ほか. 溶接学会論文集. 2000, Vol.18, No.1, p.141-145.
- 4) 太田昭彦ほか. 材料. 2001, Vol.50, No.10, p.1086-1090.
- 5) 太田昭彦ほか. 溶接学会全国大会講演概要. 2002, Vol.70, p.250-251.
- 6) 永井卓也ほか. 溶接学会論文集. 2015, Vol.33, No.2, p.202-210.
- 7) 永井卓也ほか. 溶接学会全国大会講演概要. 2017, Vol.100, p.120-121.
- 8) 日本機械学会. 伝熱工学資料. 改訂第4版, 1986, p.317-319.
- 9) D. Radaj. Welding Residual Stresses and Distortion. DVSVerlag, 2003, p.332.
- 10) J. Lu. Handbook of Measurement of Residual Stresses. The Fairmont Press, Inc., 1996, p.49.
- 11) 日本材料学会. X線残留応力測定法標準. 2002年版, p.5.
- 12) 久保高宏ほか. 材料とプロセス. 2000, Vol.13, No.3, p.423-426.
- 13) 西田正孝. 応力集中. 1967, p.47, 638.