

## 耐疲労鋼の疲労強度改善効果に関する検討

徳力, 健 / TOKURIKI, Takashi

---

(発行年 / Year)

2010-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2010-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

2009 年度 修士論文

耐疲労鋼の疲労強度改善効果  
に関する検討

指導教員：森 猛 教授

法政大学大学院 工学研究科  
建設工学専攻 修士課程

08R5109 徳力 健

# 耐疲労鋼の疲労強度改善効果に関する検討

08R5109 徳力 健

鋼素材の疲労強度は鋼材の静的強度に強く依存するものの、溶接継手の疲労強度は鋼材の種類に依存しない。そのため、高強度鋼を有効に利用するためには、溶接継手の疲労強度を改善することが重要である。これまでの溶接継手の疲労強度改善方法は、応力集中と引張残留応力の低減あるいは圧縮残留応力の導入の効果を期待したものであり、鋼材による疲労強度の改善は図れないとされてきた。このような従来の特性を打ち破り、疲労強度の高い鋼材の開発が行なわれている。その一つに耐疲労鋼がある。これは、疲労き裂進展を遅延させる鋼材として開発されたものである。その効果は、素材レベルと特定の構造に対して確認されているが、溶接継手に生じる高い応力集中や引張残留応力の影響を考慮した疲労強度の評価は行なわれていない。本研究では、TIG-dressing により引張残留応力を導入した切欠き材の疲労試験と、CCT 試験片の疲労き裂進展試験を行い、耐疲労鋼の疲労強度、き裂進展速度を調べ、それらを従来鋼で得られている結果と比較する。さらに、溶接継手の疲労試験を行い、耐疲労鋼と従来鋼の疲労強度および止端仕上げの効果を比較することにより、耐疲労鋼の疲労強度改善効果について検討する。

本研究で得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) 引張残留応力場にある耐疲労鋼切欠き材の疲労強度は、平均で従来鋼の 1.3 倍程度となる。
- (2) 引張残留応力場にある耐疲労鋼の疲労き裂進展特性は、従来鋼と同じである。
- (3) 耐疲労鋼を用いた溶接継手の疲労強度は、有限寿命域では従来鋼と同程度である。
- (4) 耐疲労鋼を用いた十字溶接継手の疲労限は、従来鋼に比べて高い。
- (5) 耐疲労鋼を用いた十字溶接継手の止端仕上げによる疲労強度改善効果は、従来鋼と同程度である。

# **A STUDY ON FATIGUE STRENGTH OF FATIGUE CRACK ARRESTING STEEL**

08R5109 Takeshi TOKURIKI

Fatigue strength of steel plate depends on the static strength of the steel, but fatigue strength of welded joints does not depend on the static strength. Therefore, in order to use high strength steel efficiently, it is important to improve the fatigue strength of welded joints. Until now, how to improve the fatigue strength of welded joints is based on effect of the reduction of stress concentration and tensile residual stress or introduction of compressive residual stress, and improvement of fatigue strength by steel itself has been considered impossible. Fatigue Crack Arresting (FCA) steel has been developed as steel with high resistance against fatigue crack propagation. Its excellent fatigue resistance has been already confirmed by fatigue crack propagation tests on the steel plates and fatigue tests on particular structures. However, evaluation of fatigue strength considering the effect of high stress concentration and tensile residual stress in welded joints has not been done. In this study, fatigue strength and fatigue crack propagation rates of FCA steel are examined using steel plate with TIG-dressing which induces tensile residual stresses and those results are compared with ones of conventional steel. Furthermore, the fatigue strength of welded joints made of FCA steel with or without toe grinding is examined and those results are compared with those of conventional steel.

The main results obtained in this study are as follows.

- (1) Fatigue strength of notched FCA steel under tensile residual stress field is average 1.3 times greater than conventional steel.
- (2) Fatigue crack propagation rates of FCA steel under tensile residual stress field is the same as ones of conventional steel.
- (3) Fatigue strength of welded joints using FCA steel is equivalent to one of conventional steel in finite fatigue life region.
- (4) Fatigue limit of cruciform welded joints using FCA steel is higher than one of conventional steel.
- (5) Improvement effect of fatigue strength of cruciform welded joints with toe grinding using FCA steel is equivalent to one of conventional steel.

# 耐疲労鋼の疲労強度改善効果に関する検討

## 目次

	頁
<b>第 1 章 序論</b> .....	1
1.1 研究の背景 .....	1
1.2 耐疲労鋼に関する既往の研究 .....	3
1.3 耐疲労鋼の特性 .....	5
1.4 金属組織観察 .....	6
1.5 研究の目的 .....	7
<b>第 2 章 耐疲労鋼切欠き材の疲労強度</b> .....	18
2.1 供試鋼材 .....	18
2.2 試験体 .....	18
2.3 残留応力の測定 .....	18
2.3.1 残留応力の測定方法 .....	18
2.3.2 残留応力の測定結果 .....	19
2.4 応力測定試験 .....	20
2.4.1 応力測定方法 .....	20
2.4.2 応力測定結果 .....	20
2.5 従来鋼の疲労試験結果の整理 .....	21
2.5.1 供試鋼材 .....	21
2.5.2 試験体 .....	21
2.5.3 疲労試験 .....	21
2.5.4 従来鋼疲労試験結果の整理 .....	21
2.6 疲労試験 .....	23
2.6.1 試験方法 .....	23
2.6.2 疲労試験結果 .....	23
2.7 従来鋼と耐疲労鋼の疲労強度の比較 .....	23
2.8 破面観察 .....	24

	頁
<b>第 3 章 耐疲労鋼の疲労き裂進展特性</b> .....	64
3.1 供試鋼材 .....	64
3.2 試験体 .....	64
3.3 残留応力の測定 .....	64
3.3.1 残留応力の測定方法 .....	64
3.3.2 残留応力の測定結果 .....	65
3.4 従来鋼の疲労き裂進展特性 .....	66
3.4.1 試験体 .....	66
3.4.2 試験方法 .....	66
3.4.3 試験データの種類 .....	66
3.4.4 $da/dN$ - $K$ 関係の整理 .....	66
3.4.5 $da/dN$ - $K$ 関係の影響因子を考慮した試験データの選択 .....	68
3.4.6 従来鋼疲労き裂進展特性の整理手順 .....	70
3.4.7 従来鋼疲労き裂進展特性の整理結果 .....	73
3.5 耐疲労鋼の疲労き裂進展試験 .....	74
3.5.1 試験方法 .....	74
3.5.2 疲労き裂進展試験結果 .....	74
<b>第 4 章 耐疲労鋼溶接継手の疲労強度</b> .....	137
4.1 供試鋼材 .....	137
4.2 試験体 .....	137
4.2.1 試験体の形状と溶接方法 .....	137
4.2.2 溶接形状 .....	138
4.3 残留応力の測定 .....	138
4.3.1 残留応力の測定方法 .....	138
4.3.2 残留応力の測定結果 .....	139
4.4 疲労試験 .....	140
4.4.1 試験方法 .....	140
4.4.2 疲労試験結果 .....	141
4.5 潜在き裂の確認 .....	141
4.6 従来鋼と耐疲労鋼の疲労強度の比較 .....	142

	頁
<b>第 5 章 溶接止端部を仕上げた耐疲労鋼十字溶接継手の疲労強度改善効果</b>	224
5.1 試験体	224
5.1.1 試験体の形状	224
5.1.2 溶接形状	224
5.2 残留応力の測定	224
5.3 疲労試験	226
5.3.1 試験方法	226
5.3.2 疲労試験結果	226
5.3.3 止端仕上げが不完全な試験体の疲労試験結果	227
5.4 耐疲労鋼と従来鋼の疲労強度比較	227
5.5 溶接のままの試験体と止端部を仕上げた試験体の疲労強度比較	227
<b>第 6 章 耐疲労鋼の疲労強度改善効果に関する考察</b>	261
6.1 疲労過程の整理	261
6.2 疲労限の発生条件	262
6.3 耐疲労鋼の疲労強度改善効果に関する考察	262
6.4 停留き裂の観察	265
6.5 各試験体のき裂発生点付近の応力分布	266
6.5.1 解析モデルおよび解析方法	226
6.5.2 解析結果	226
<b>第 7 章 結論</b>	288

参考文献

謝辞

## 第 1 章 序論

### 1.1 研究の背景

我が国の橋梁の疲労に対する安全性の照査は、活荷重比率の高い鉄道橋については古くから行われていたが、設計応力に占める活荷重応力の割合が小さい道路橋では、鋼床版を除き考慮しなくてよいとされてきた<sup>1)</sup>。しかし、近年、大型車交通量が多い道路橋においても疲労損傷が報告されるようになってきた<sup>2-3)</sup>。2006年10月に、国道25号名阪国道「山添橋」の主桁に長さ1mの疲労き裂が発見されたことは記憶に新しい。他にも首都高速道路の鋼製橋脚の疲労損傷など、設計で疲労を考慮していない既設鋼構造物の疲労損傷報告が後を絶たない。このような背景から、道路橋示方書では2002年3月の改訂版において「鋼橋の設計にあたっては、疲労の影響を考慮する」とされ、疲労安全性照査を陽な形で行なうように規定された<sup>4)</sup>。その具体的な照査方法は、日本鋼構造協会の「鋼道路橋の疲労設計指針・同解説」<sup>5)</sup>(以後、JSSC指針と記す)をベースとして作成された日本道路協会の「鋼道路橋の疲労設計指針」<sup>6)</sup>(以後、鋼道路橋疲労設計指針と記す)に則して行なわれている。

道路橋の疲労照査は、設計で考慮する期間内に橋上を走行する交通車両により生じる変動応力と疲労試験などから求まる疲労強度を比較することにより行なわれる。疲労強度について、「鋼道路橋の疲労設計指針」では継手形式に応じてA~H'の9つの強度等級が設定されている。例えば、面外ガセット継手(ガセットの長さ $L > 100\text{mm}$ の場合)と荷重非伝達型十字溶接継手の疲労強度等級は、溶接止端が非仕上げの場合それぞれG等級とE等級であり、止端仕上げを行なった場合はそれぞれF等級とD等級に格上げされる。なお、当指針で示されている継手の疲労強度は、国内外における各継手の疲労試験結果の下限値あるいは下限値に相当する非超過確率97.7%の値に基づいて定められている。

近年、鋼橋のコスト縮減策として、高強度鋼の利用に関する検討が盛んに行なわれている。高強度の鋼材を利用することで鋼重の低減が図れるが、鋼材の静的強度が増すと活荷重により生じる応力が相対的に増加するため、疲労に対してより厳しい状況となる。鋼材の疲労強度は鋼材の静的強度に強く依存するものの、溶接継手の疲労強度は鋼材の種類に依存しない<sup>9)</sup>。そのため、鋼材の静的強度が増加するほど部材寸法の決定要因が継手の疲労強度となる傾向にあり、ある程度以上の高強度化はメリットが得られないこともある。したがって、高強度鋼を有効に利用するためには、溶接継

手の疲労強度を改善することが重要である。疲労強度の改善方法としては、グラインダー等により溶接止端を仕上げる方法や部材厚を増して作用応力そのものを低減する方法が一般的である。最近では、低変態温度溶接材料を利用して溶接部に圧縮残留応力を導入する方法<sup>7)</sup>や UIT により溶接止端部の形状を改善するとともに圧縮残留応力を導入する方法<sup>8)</sup>が開発・研究されており、実橋に適用され始めている。このように溶接継手の疲労強度改善方法は、応力集中と引張残留応力の低減あるいは圧縮残留応力の導入の効果を期待したものであり、鋼材自身による疲労強度の改善は図れないとされてきた。

ところが近年、上記で述べた従来の特性を打ち破る疲労強度の高い鋼材の開発が、各鋼材メーカーで試みられている。造船用鋼板として開発され、橋梁用鋼板としての使用実績もある住友金属工業の耐疲労鋼(FCA 鋼)や、JFE スチールの造船用鋼板 AFD 鋼、そのほかにも新日本製鐵、神戸製鋼で疲労特性に優れた鋼材が研究・開発されている。いずれの鋼材も疲労き裂進展を抑制する性能の確保は、鋼材のミクロ組織制御にて行っている。本研究では、住友金属工業の耐疲労鋼を取り扱う。耐疲労鋼は、母材鋼板の金属組織を疲労き裂進展抑制に適した二相組織としたものである<sup>10-11)</sup>。耐疲労鋼の疲労強度改善効果については、これまでも素材レベルや船殻構造を模擬したモデル、桁試験体を用いた主桁横桁交差部等で確認されており、疲労強度、疲労き裂進展速度ともに従来鋼に比べて優れた特性を有していると報告されている<sup>12-17)</sup>。鋼材によって疲労強度の改善を図ることができれば、溶接止端仕上げ作業の軽減や部材厚の低減によるコスト縮減に寄与することが期待できる。しかし、既往の研究では特定の構造や条件に対する試験結果が示されており、耐疲労鋼を橋梁等の溶接構造物へ適用するための疲労強度特性は明確にはされていない。なお、ここで従来鋼とは疲労き裂進展を抑制する性能を有しない構造用圧延鋼材を意味する。

今後、橋梁等の溶接構造物に対して耐疲労鋼の適用を図るには、従来鋼との疲労強度特性の違いを明確にしたうえで、疲労強度等級を設定する必要がある。そのためには、溶接継手の疲労強度に対する重要な支配因子である応力集中や溶接残留応力の影響を考慮した耐疲労鋼の疲労強度特性の整理が必要である。

## 1.2 耐疲労鋼に関する既往の研究

耐疲労鋼に関する既往の研究を以下に示す。

二村ら<sup>12)</sup>は、I断面桁橋梁の主桁 - 横桁交差部を模した溶接桁試験体の疲労試験を行い、耐疲労鋼と従来鋼の疲労強度を比較している。載荷は、支点間距離 2200mm に中央一点載荷の 3 点曲げである。疲労試験結果より、耐疲労鋼を用いた主桁 横桁交差部の疲労強度は、従来鋼に比べて 1.5 倍以上向上する結果を得ている。

誉田ら<sup>13)</sup>は、鋼製橋脚隅角部の疲労き裂進展解析を行い、ホットスポット応力範囲で 28MPa の低応力範囲において、耐疲労鋼の疲労寿命延伸は従来鋼に比べて 4.3 倍 ~ 6.9 倍となることを示している。疲労き裂進展解析にあたっては、CT 試験片を用いた疲労き裂進展試験を行い、耐疲労鋼と従来鋼の母材鋼板の疲労き裂進展特性を評価したものを採用している。応力比は  $R=0.5$  である。また、橋脚隅角部を模擬した大型溶接構造モデルの疲労試験を行い、疲労総寿命の大部分を疲労き裂発生寿命が占めていることを確認している。なお、この研究で行なった疲労き裂進展試験では、溶接による残留応力は考慮されていない。

鷹羽ら<sup>15)</sup>は、鋼床版のデッキプレートを模擬した小型試験体の疲労試験を行い、デッキプレート貫通き裂に対する耐疲労鋼と従来鋼の疲労寿命を比較した。この研究では、Uリブ溶接部のルート部から発生するき裂に着目している。載荷は 4 点曲げである。疲労試験の結果より、耐疲労鋼は特に低応力・長寿命域での疲労寿命改善効果に優れているとの結果を示している。

森下ら<sup>16)</sup>は、耐疲労鋼の鋼鈹桁橋への適用に際して、疲労試験と疲労き裂進展試験を行っている。疲労試験は荷重非伝達型十字継手を用いて、最大応力を 350MPa で一定とし、応力範囲を  $100\text{N/mm}^2$ 、 $70\text{N/mm}^2$ 、 $50\text{N/mm}^2$  とした条件で行なっている。主板の板厚と板幅は 50mm、付加板の板厚は 36mm である。疲労試験の結果より、耐疲労鋼の疲労寿命は、従来鋼に比べて応力範囲  $100\text{N/mm}^2$  で 1.55 倍、 $70\text{N/mm}^2$  で 1.59 倍、 $50\text{N/mm}^2$  で 2.5 倍となり、応力範囲が小さいほど延伸効果が高いことを示している。また、疲労き裂進展試験は CT 試験片を用いて行なわれ、耐疲労鋼 SMA570W-H-FCA のき裂進展速度は従来鋼 SMA570W-H に比べて約 1/3 に、耐疲労鋼 SMA490BW-FCA

は従来鋼 SMA490BW に比べて約 1/2 という結果を得ている。なお、応力比は  $R=0.1$  であり、溶接による残留応力は考慮されていない。

安藤ら<sup>17)</sup>は、鋼床版の U リブ溶接部のルートから発生するデッキプレート貫通型疲労き裂について、デッキプレートに耐疲労鋼を用いた場合の疲労寿命改善効果を鋼床版の部分モデルによる実験で評価している。部分モデルは U リブおよび横リブを従来鋼とし、デッキプレートを従来鋼または耐疲労鋼としたものである。载荷は 4 点曲げであり、荷重範囲は  $P=60\text{kN}$ 、 $90\text{kN}$  としている。疲労試験結果より、耐疲労鋼を用いると SN 線の傾きが緩やかになり、長寿命域における疲労寿命改善効果が顕著であるという結果を示している。また、荷重範囲  $P=60\text{kN}$  のひずみ計測結果より、耐疲労鋼は繰返し载荷回数が約 100 万回で疲労き裂が発生しているのに対し、従来鋼は約 30 万回で発生していることを確認し、耐疲労鋼の適用により疲労き裂発生寿命が改善していることを示している。

### 1.3 耐疲労鋼の特性

一般的な構造用鋼材は、溶接性に配慮して炭素 C を低めに抑え、合金元素 (Mn、Ni、Mo、Nb、Ti、V) の添加により高強度とし、圧延のまま、もしくは焼きならしの状態で使用される。このような鋼を非調質鋼と呼ぶ。非調質鋼の組織はフェライトとパーライトからなっている。金属結晶の構造は、原子が立体的に規則正しくなっており、鉄の場合、図 1.1 に示すような 2 通りの結晶構造をとることが知られている。これらは、温度によって体心立方格子 (b.c.c.) と面心立方格子 (f.c.c.) にわかれる。ここで、図 1.2 は鉄 - 炭素系の状態図を示す。状態図とは、温度と組成および結晶構造の関係を示すものである。910 以下の温度では体心立方格子で、910~1410 間では面心立方格子となる。前者をフェライト (  $\alpha$  鉄 )、後者をオーステナイト (  $\gamma$  鉄 ) と称し、  $\gamma$  の変化を A3 変態と呼ぶ。鉄に炭素が溶けると、  $\gamma$  変態の温度は GS (A3) 線に沿って変化する。  $\gamma$  が  $\alpha$  に変態しながら温度が下がると S 点で残余  $\gamma$  はセメントライト (  $\text{Fe}_3\text{C}$  : cementite ) と  $\alpha$  の集まりとなる。これがパーライト ( P : pearlite ) と呼ばれる組織である。パーライトとは、フェライト ( 純鉄 ) とセメントライト ( 炭化物 ) の薄片が互いに層状になっており、真珠 ( パール ) のような色合いを呈することから名付けられている。なお、この状態図はゆっくり冷却した場合の組織変化であるが、冷却速度が速くなるとパーライトとなる成分変化の時間的な余裕がなく、変態の過程で種々の形態の  $\text{Fe}_3\text{C}$  となる。これは  $\alpha$  + P の組織とは異なった構造であり、ベイナイト ( B : bainite ) と呼ばれる。さらに冷却速度が速くなると、炭化物析出を伴わないマルテンサイト ( M : martensite ) 組織となる<sup>18)</sup>。

一方、耐疲労鋼は、適切な化学成分と TMCP ( Thermo Mechanical Control Process-熱加工制御圧延 ) を駆使して開発され、炭素鋼でありながら疲労き裂進展速度の遅延を実現した複合組織鋼である。母材鋼板の金属組織を疲労き裂進展抑制に適した二相組織としている<sup>11)</sup>。疲労き裂進展抑制に優れた組織とは、フェライト ( 軟相 ) とベイナイト ( 硬相 ) からなる二相組織のことであり、フェライト中を進展するき裂が硬いベイナイトに達すると、き裂進展の一時的な停留や迂回が生じ、結果としてき裂進展速度が低くなるとされている。その概念図を図 1.3 に示す。

## 1.4 金属組織観察

耐疲労鋼と従来鋼の金属組織の相違を確認するため、デジタルマイクロスコープを用いて金属組織の観察を行なった。

観察用試料は、耐疲労鋼および従来鋼の鋼板からそれぞれ約 1cm 四方の鋼材を切り出した。また、図 1.4 に示すとおり鋼板の圧延方向に対して表面、断面、側面が観察できるように 3 体を切り出し、切り出した鋼材を直径 3cm、高さ 2.5cm の円柱形型枠に入れ、冷間埋め込み樹脂を流し込んで固定した。観察用試料とデジタルマイクロスコープを写真 1.1 と写真 1.2 に示す。観察前に、鋼材表面を研磨紙で平滑になるまで研磨し、その後微細な傷を除去するために鏡面仕上げを行なった。鏡面仕上げは、フェルトが固定された回転円盤に酸化アルミニウム（アルミナ）の粒子を懸濁した水を散布しながら試料を押し付け、表面を鏡面に仕上げた。その後、結晶組織を観察するために、鏡面仕上げを施した試料にエッチングを行なった。多結晶材料では、結晶組織の違いにより腐食時間に差異が生じる。エッチングは、この性質を利用したものであり、結晶境界を観察しやすくするために行なう。腐食液には、ナイトール（硝酸 5% + エタノール 95%）を使用した。

写真 1.3～写真 1.14 にデジタルマイクロスコープで撮影した金属組織を示す。写真 1.3～写真 1.8 は従来鋼、写真 1.9～写真 1.14 は耐疲労鋼の組織を示している。従来鋼はフェライト・パーライト組織であり、金属光沢を有する部分がフェライト、暗い部分がパーライトである。耐疲労鋼は、フェライト・ベイナイト組織であり、暗い部分がベイナイトである。組織観察結果より、金属組織の相違としては、以下の特徴が見られた。

- (1) 従来鋼に比べて耐疲労鋼の結晶粒径は細かく、従来鋼の平均粒径が約  $14\mu\text{m}$  であるのに対し、耐疲労鋼は約  $4\mu\text{m}$  であった。
- (2) 従来鋼は、板厚方向にフェライトとパーライトが互層になっているのが確認できるが、耐疲労鋼には結晶の層は見られず、圧延方向と関係なく結晶が並んでいる。

## 1.5 研究の目的

先に述べた既往の研究では、橋梁部材に耐疲労鋼を適用することで、従来鋼に比べて疲労強度が改善されることが報告されている。しかし、これらは特定の構造や条件に対する試験結果を示しており、溶接継手の高い応力集中や引張残留応力を考慮した疲労強度の評価は行なわれていない。特に、耐疲労鋼の疲労き裂進展特性に関しては、引張残留応力を考慮した検討は行なわれていない。実構造物への適用を想定する場合、基本的な疲労強度の支配因子である疲労き裂の発生や進展速度は、高い引張残留応力場で検証する必要がある。

本研究では、溶接構造物へ耐疲労鋼を適用した場合の疲労強度改善効果を明らかにすることを目的として、以下の検討を行なう。

「第2章 耐疲労鋼切欠き材の疲労強度」では、TIG-dressingにより引張残留応力を導入した切欠き試験片の疲労試験を行い、耐疲労鋼の疲労強度を調べる。それらを従来鋼で得られている結果と比較することにより、引張残留応力場にある耐疲労鋼切欠き材の疲労強度改善効果について検討する。

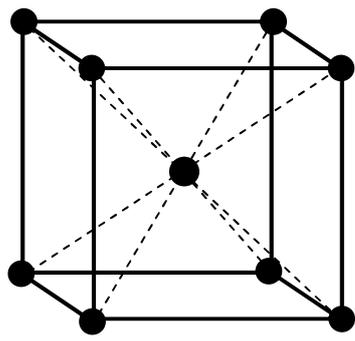
「第3章 耐疲労鋼の疲労き裂進展特性」では、切欠き材と同様に TIG-dressingにより引張残留応力を導入した中央に切欠きを有する帯板試験片の疲労き裂進展試験を行い、耐疲労鋼の疲労き裂進展速度を調べる。それらを従来鋼で得られている結果と比較することにより、引張残留応力場にある耐疲労鋼の疲労き裂進展特性について検討する。

「第4章 耐疲労鋼溶接継手の疲労強度」では、鋼橋の主たる溶接継手形式である荷重非伝達型十字溶接継手と面外ガセット溶接継手を模擬した小型試験体を用いて疲労試験を行い、それぞれ従来鋼と耐疲労鋼の疲労強度を調べる。疲労試験結果を比較することにより、溶接継手に耐疲労鋼を用いた場合の疲労強度改善効果について検討する。

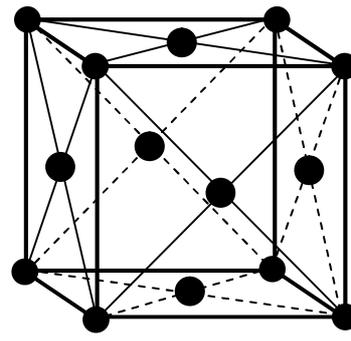
「第5章 溶接止端部を仕上げた耐疲労鋼溶接継手の疲労強度改善効果」では、荷重非伝達型十字溶接継手を対象として、従来の疲労強度改善方法である溶接止端仕上げを行った試験体の疲労試験を行い、第4章の疲労試験結果と比較することにより、耐疲労鋼溶接継手に溶接止端仕上げを行なった場合の疲労強度改善効果を明らかにす

る。また、従来鋼溶接継手についても溶接止端仕上げを行った試験体の疲労試験を行い、従来鋼と耐疲労鋼の疲労強度改善効果の違いについて検討を行なう。

「第6章 耐疲労鋼の疲労強度改善に関する考察」では、耐疲労鋼の疲労強度改善メカニズムを整理し、第2章から第5章の疲労試験結果より、耐疲労鋼の疲労強度改善効果について考察を行なう。

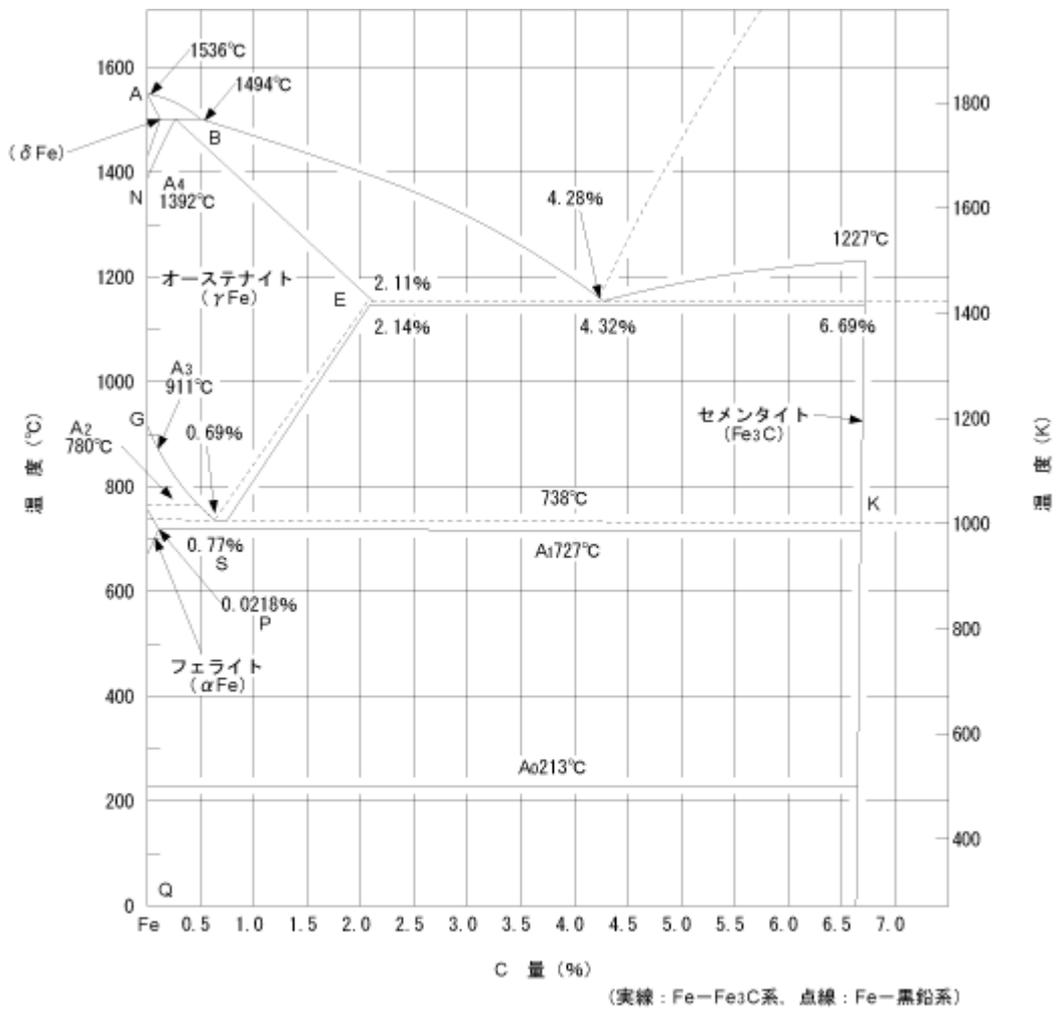


(a)体心立体格子



(b)面心立体格子

図 1.1 鉄の結晶構造



© (社)日本溶接協会, 2004

図 1.2 鉄 - 炭素系の状態図

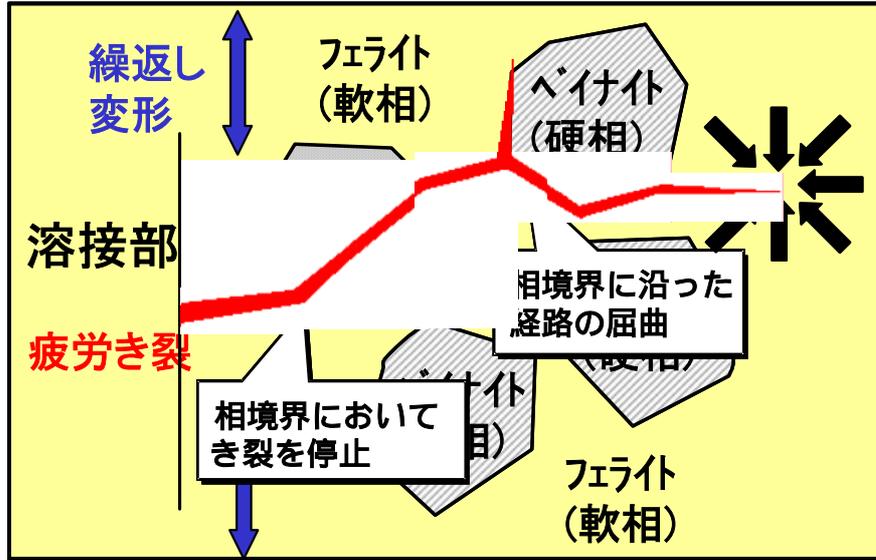


図 1.3 耐疲労鋼の疲労強度改善メカニズム

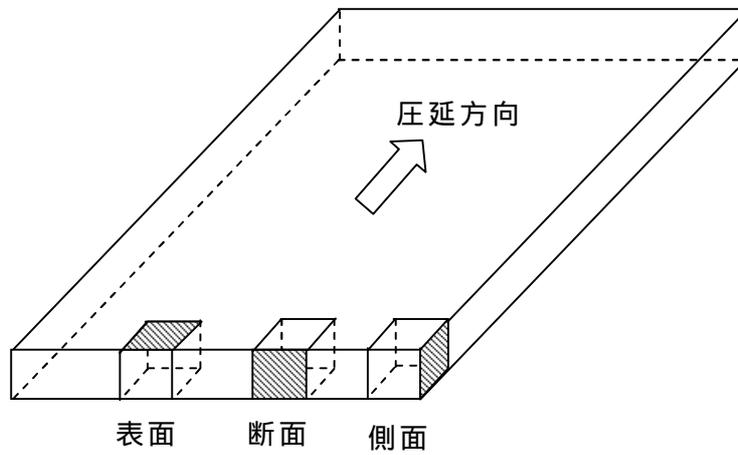


図 1.4 金属組織観察面



写真 1.1 組織観察用試料



写真 1.2 デジタルマイクロスコープ

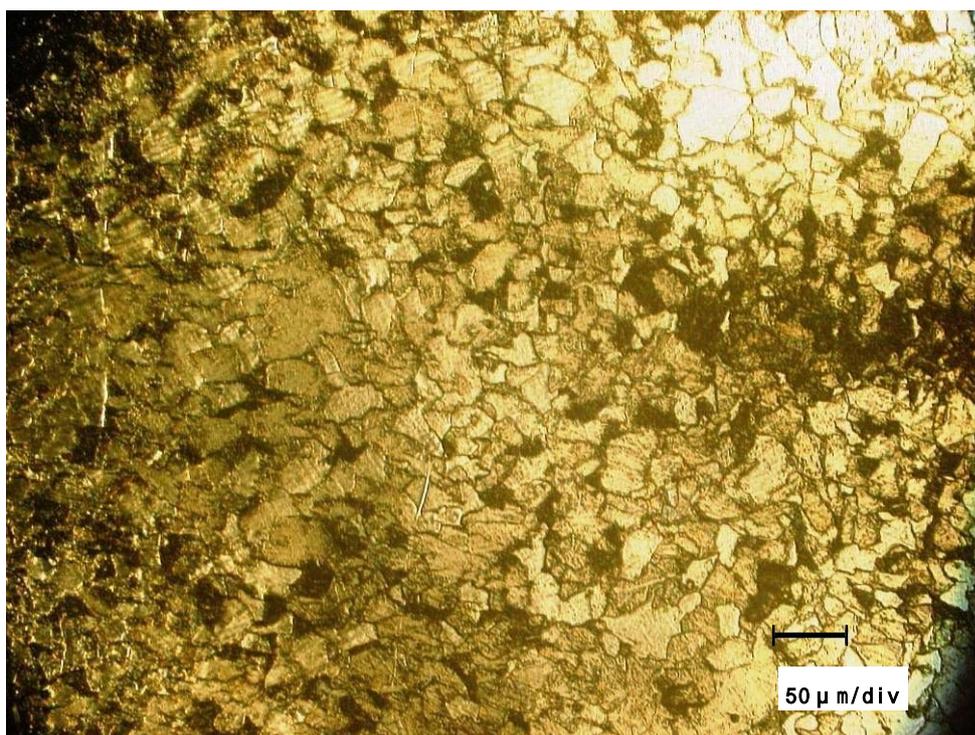


写真 1.3 従来鋼の表面組織（450倍）

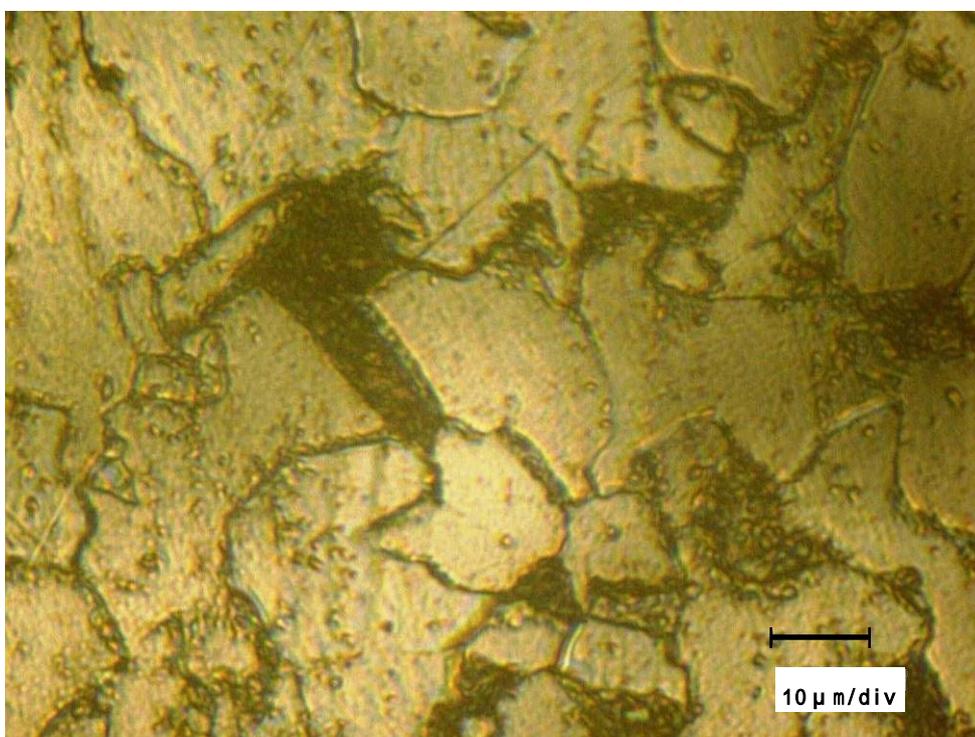


写真 1.4 従来鋼の表面組織（3000倍）



写真 1.5 従来鋼の断面組織（450倍）

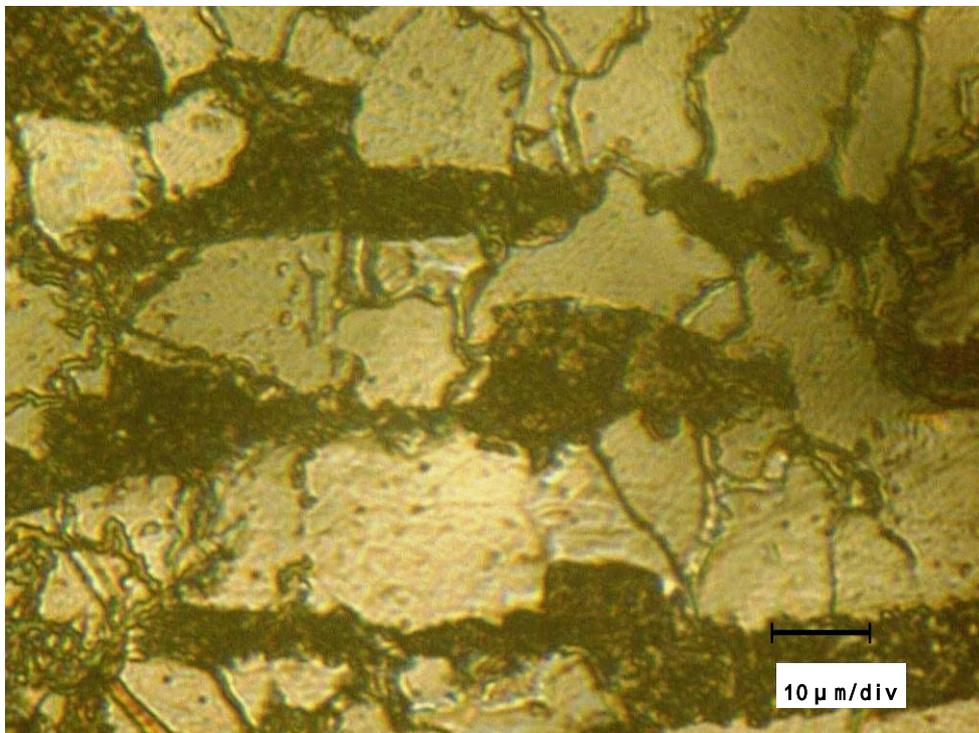


写真 1.6 従来鋼の断面組織（3000倍）

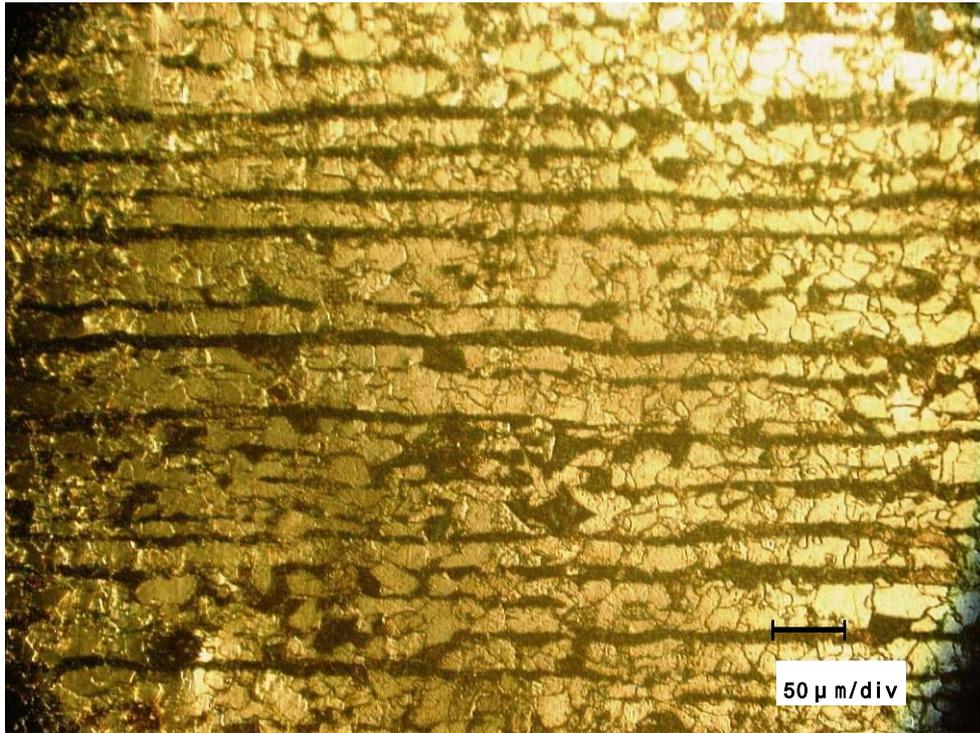


写真 1.7 従来鋼の側面組織（450倍）

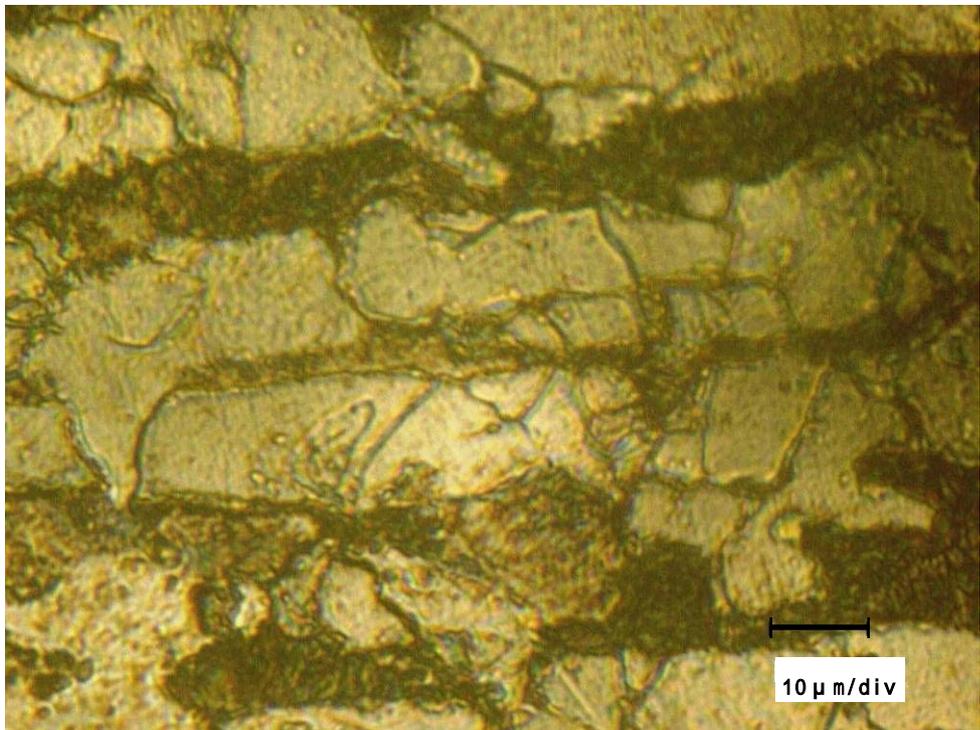


写真 1.8 従来鋼の側面組織（3000倍）

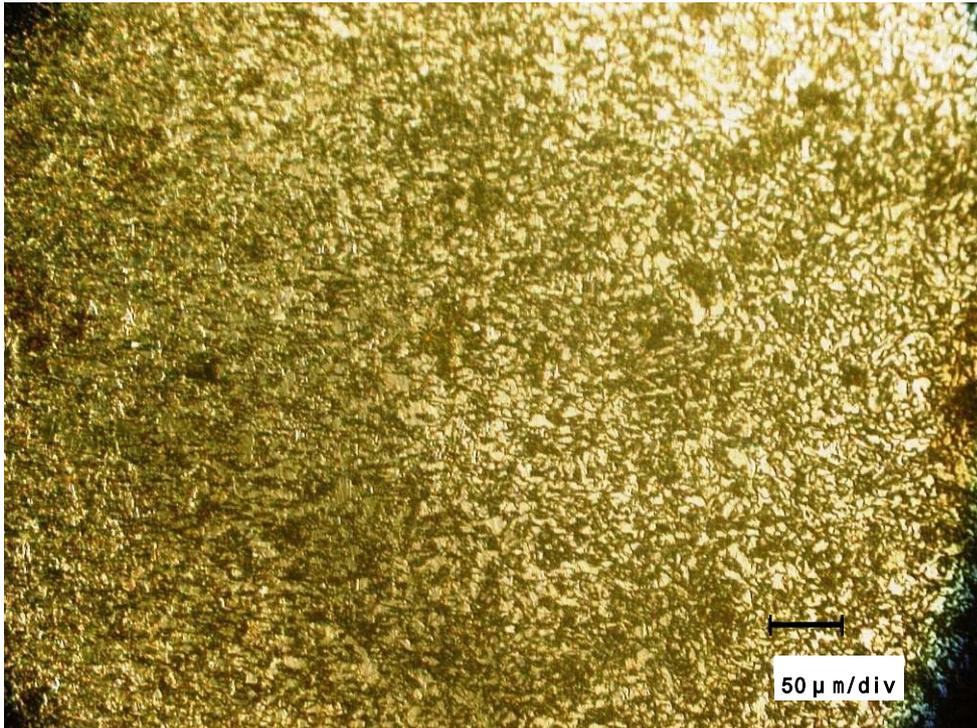


写真 1.9 耐疲労鋼の表面組織（450倍）

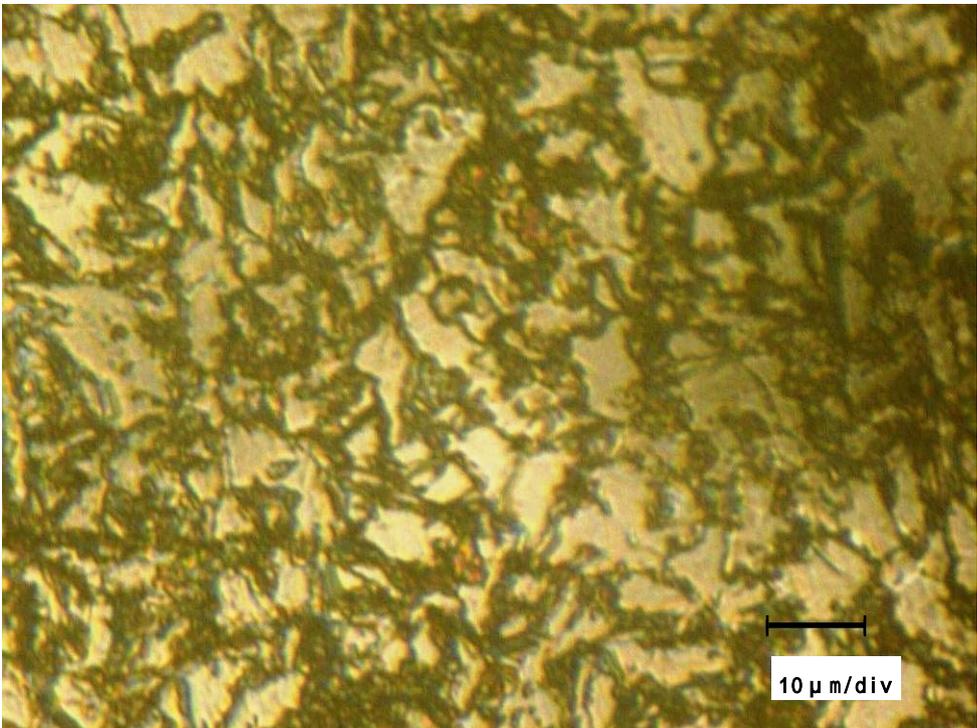


写真 1.10 耐疲労鋼の表面組織（3000倍）

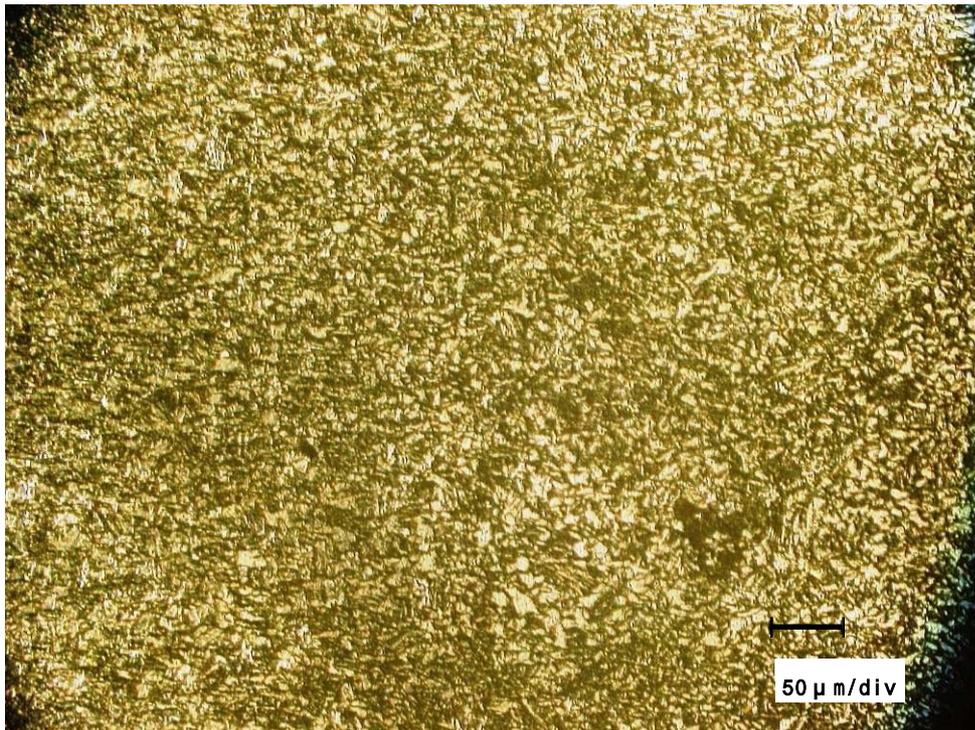


写真 1.11 耐疲労鋼の断面組織（450倍）

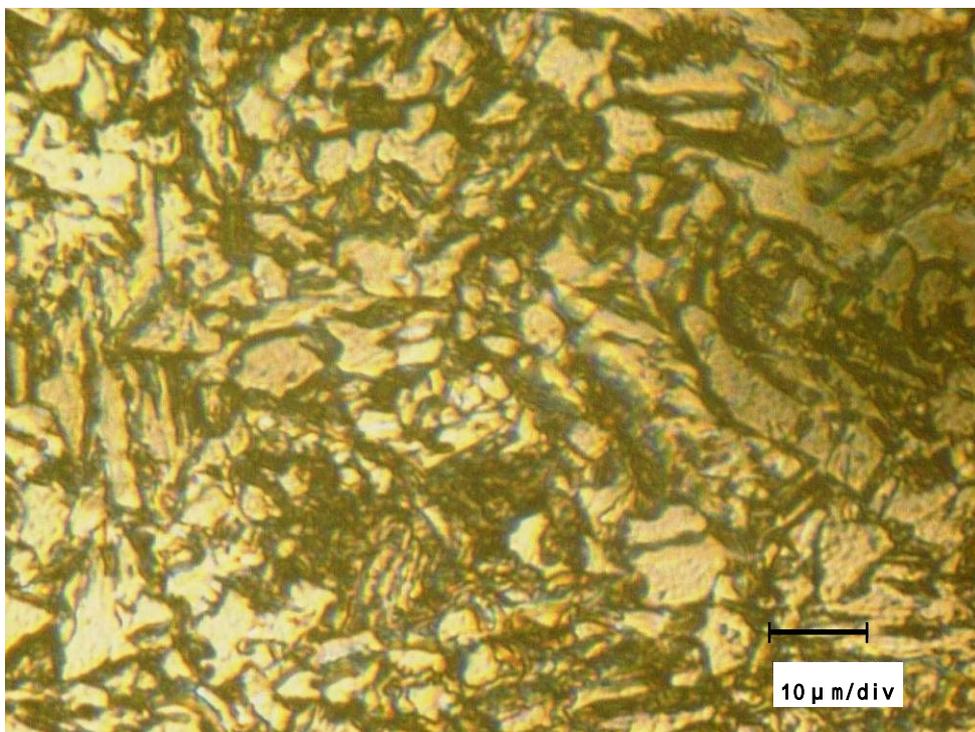


写真 1.12 耐疲労鋼の断面組織（3000倍）

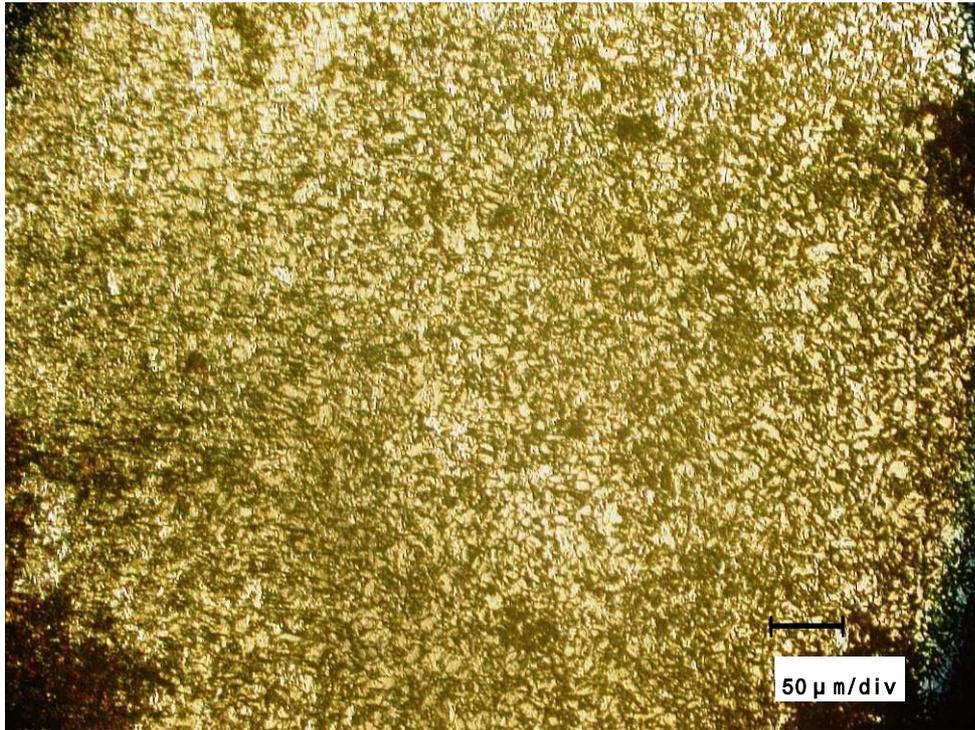


写真 1.13 耐疲労鋼の側面組織（450倍）

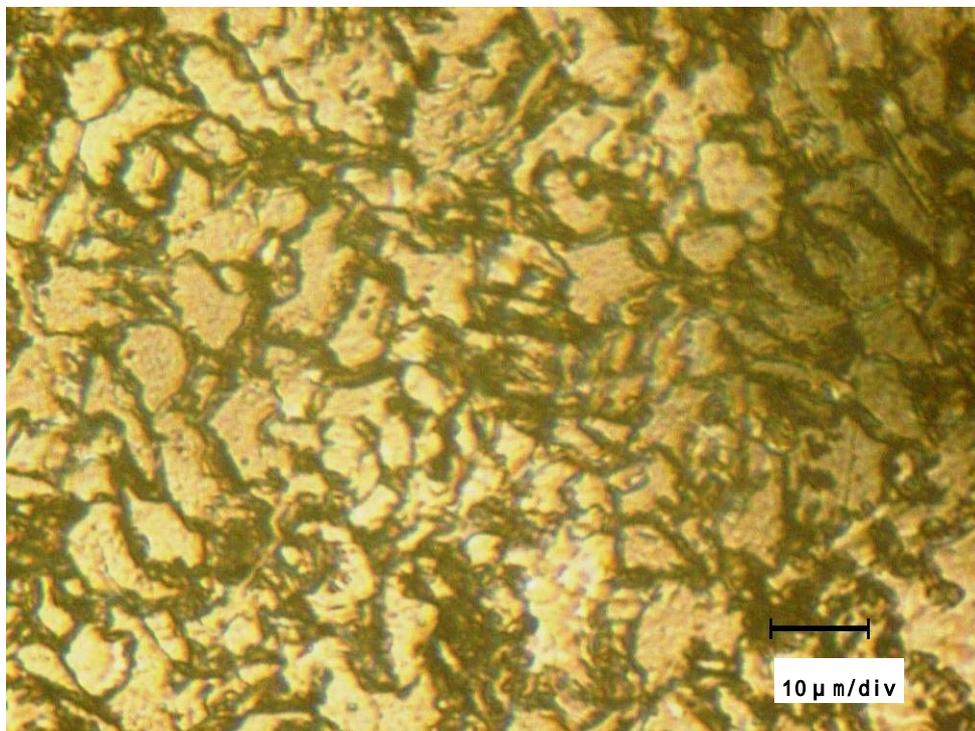


写真 1.14 耐疲労鋼の側面組織（3000倍）

## 第 2 章 耐疲労鋼切欠き材の疲労強度

### 2.1 供試鋼材

供試鋼材は、板厚 12mm の耐疲労鋼 SM490YA-FCA (降伏応力  $433\text{N/mm}^2$ 、引張強度  $591\text{N/mm}^2$ ) である。鋼材の化学成分を表 2.1 に、機械的性質を表 2.2 に示す。

### 2.2 試験体

試験体は、供試鋼材から長さ 700mm、幅 150mm の板をガス切断により切り出したものである。この試験体の表裏面中央には、引張残留応力を導入する目的で TIG-dressing を行っている。TIG-dressing を行った後、 $\phi = 18\text{mm}$  の円孔を二つ設け、その間をコンターマシン盤で鋸引きしている。図 2.1 に試験体の形状と寸法を示す。また、試験体の外観を写真 2.1 に示す。

TIG-dressing とは、非消耗式のタングステン電極により鋼を溶融させるものであり、すみ肉溶接の止端形状を改良する方法としても用いられている。TIG-dressing は自動で行い、タングステン電極 (2%Na 合金) の直径 3.2mm、溶接電流 300A、溶接速度は 12.5cm/min である。シールドガスには 100% Ar を用い、流量は 10 l/min とした。

TIG-dressing による鋼材の溶融範囲を観察するために、断面マクロ試験を行った。マクロ試験では、試験体を板幅方向に切断し、切断面を 100~400 番の布やすり及び 600~1500 番のエメリー紙を用いて研磨した後、パフ研磨によって鏡面に仕上げた。その後、溶融部にナイトール (硝酸 5% + エタノール 95%) を塗布してエッチングを行ない観察した。写真 2.2 にマクロ試験結果を示す。TIG-dressing による溶融部は表裏面とも幅 10mm、深さ 3mm の半楕円形であり、熱影響部外縁は幅 17mm、深さ 6.5mm の半楕円形となっている。

### 2.3 残留応力の測定

#### 2.3.1 残留応力の測定方法

TIG-dressing を行なった試験体は、鋼材の溶融部は熱膨張によって主として TIG-dressing を行なった方向に伸びようとするが、温度が低い周辺部に拘束されるため、溶融部には TIG-dressing の方向に圧縮応力が生じる。高温となった金属は降伏応

力が低下するため、圧縮応力により TIG-dressing 部付近は圧縮降伏して圧縮塑性ひずみが生じる。その後、温度が下がると温度に応じて収縮し、圧縮降伏している TIG-dressing 部付近は拘束を受けて引張応力が生じる。このようにして、TIG-dressing を行なった試験体には、残留応力が発生する。残留応力は、自己平衡形の応力分布となる。

残留応力の測定は、測定する試験体の表面をサンドペーパーで研磨した後、一軸のひずみゲージ（ゲージ長 2mm）を試験体両面に貼付して切断法により行った。切断法とは、貼付したひずみゲージの周囲を切断し、その時に解放されるひずみを測定することにより残留応力を求める方法である。試験体の切断にはコンターマシン盤を用いた。試験体切断の様子を写真 2.3 に示す。残留応力の測定は、切欠きを設ける前に加えて、切欠きを設けた後についても行なった。ひずみゲージの貼付位置と試験体の切断位置を図 2.2 に、切断後の試験体を写真 2.4 に示す。残留応力の測定は、表面と裏面で測定している。残留応力の値は、試験体切断後のひずみの読み値の差に鋼材のヤング率（ $2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ ）を乗じることにより求めた。切断後に残留応力が開放されることにより、引張残留応力が作用している箇所は収縮し、圧縮残留応力が作用している箇所は膨張する。そのため、残留応力を求める際には、ひずみの符号を反転させて用いた。なお、ひずみの測定には、デジタルひずみ測定器（TDS-303）を用いた。

### 2.3.2 残留応力の測定結果

残留応力の測定結果を表 2.3～表 2.4 及び図 2.3～2.4 に示す。切欠きを設ける前の試験体は、TIG-dressing 部に表裏面の平均値で  $350 \text{N/mm}^2$  程度の引張残留応力が生じている。TIG-dressing 部から両側に約 25mm 離れた位置で残留応力は圧縮に転じ、約 50mm 離れた位置では  $160 \text{N/mm}^2 \sim 190 \text{N/mm}^2$  の圧縮残留応力が生じている。試験体のコバ面では残留応力はほぼ 0 となり、応力分布は自己平衡形となっている。一方、切欠きを設けた後の試験体については、切欠き先端に相当する円孔部に  $350 \text{N/mm}^2$  程度の引張残留応力が生じている。切欠きを設ける前と設けた後の残留応力を比べると、切欠き先端に相当する位置は、切欠きを設ける前には圧縮残留応力場となっているが、切欠きを設けることにより応力が再配分され、高い引張残留応力が生じている。

## 2.4 応力測定試験

### 2.4.1 応力測定方法

応力測定試験は、応力集中点となる円孔壁の繰返し応力とひずみ性状を確認するために行なった。応力測定試験には、動的能力 $\pm 500\text{kN}$ の電気油圧サーボ式材料試験機を用い、試験体長手方向に引張荷重を10回繰返し载荷した。下限荷重を $10\text{kN}$ とし、そこでのひずみを0とした。ひずみゲージの貼付位置は図2.5に示すように円孔壁の板厚中心であり、ゲージ長は $1\text{mm}$ である。また、公称応力を測定する目的で、円孔中心から長手方向に $150\text{mm}$ 離れた位置にもひずみゲージを貼付している。ひずみ測定は1回、2回、10回目の繰返し荷重時に行った。

### 2.4.2 応力測定結果

応力測定試験の結果を表2.5～表2.7に示す。図2.6～図2.8は、それぞれ公称応力範囲 $80\text{N/mm}^2$ 、 $100\text{N/mm}^2$ 、 $120\text{N/mm}^2$ となるように繰返し荷重を与えたときの公称応力と円孔壁ひずみの関係を示す。この試験では、まず公称応力範囲 $80\text{N/mm}^2$ の試験を行ない、次に同じ試験体で $100\text{N/mm}^2$ 、そして $120\text{N/mm}^2$ の試験を行っている。それぞれの公称応力範囲で、1回目の荷重载荷時には、除荷後もひずみが残存している。このような挙動は円孔壁の塑性変形によるものであり、図2.4に示した引張残留応力の影響も考えられる。2回目の繰返し荷重時では、公称応力範囲 $120\text{N/mm}^2$ を除き弾性挙動を示し、ほぼ直線となっている。公称応力範囲 $120\text{N/mm}^2$ についても、10回目の繰返し荷重時ではヒステリシスループの幅はほぼなくなり、直線となった。また、公称応力範囲 $100\text{N/mm}^2$ の1回目については、公称応力 $80\text{N/mm}^2$ までは線形であり、その後塑性変形を示している。公称応力範囲 $120\text{N/mm}^2$ の1回目についても、公称応力 $100\text{N/mm}^2$ までは線形で、その後塑性変形を示している。これは、円孔壁の最大主応力が、以前に受けた最大荷重を超えてから塑性変形が始まるためである。

ひずみ測定より得られた円孔壁でのひずみ集中係数を表2.8に示す。ひずみ集中係数は、円孔壁のひずみを円孔中心から長手方向に $150\text{mm}$ 離れた位置のひずみで除して求めた。ひずみ集中係数は $6.15\sim 6.58$ の範囲にあり、特に公称の繰返し応力の大きさには依存していない。

## 2.5 従来鋼の疲労試験結果の整理

従来鋼の疲労試験データは、内田<sup>19)</sup>らが行った疲労試験によるものである。ここでは、疲労試験の概要と疲労試験結果の整理方法について述べる。

### 2.5.1 供試鋼材

供試鋼材は、板厚 12mm の SM400、SM490、SM490Y、SM570 と WEL-TEN780 の 5 種類である。これらの鋼材の機械的性質と化学成分を表 2.9 と表 2.10 に示す。

### 2.5.2 試験体

試験体の形状は、図 2.1 に示す耐疲労鋼の試験体と同じである。また、耐疲労鋼の試験体と同様に試験体の表裏面の中央長手方向に TIG-dressing を行っている。TIG-dressing は自動で行い、タングステン電極（2%Na 合金）は直径 3.2mm、溶接電極 300A、溶接速度は 12.5cm/min である。シールドガスには 100% Ar を用い、流量は 10 l/min である。

### 2.5.3 疲労試験

疲労試験は、動的能力 $\pm 500\text{kN}$  の電気油圧サーボ式多目的大型材料試験装置（MODEL2806、鷺宮製作所）を用い、下限荷重を 10kN とし、公称応力範囲を 60～120N/mm<sup>2</sup> の片振り繰り返し荷重下で行っている。荷重波形は正弦波、繰り返し速度は 10～18Hz である。

### 2.5.4 従来鋼疲労試験結果の整理

従来鋼の疲労試験結果を表 2.11 に示す。この疲労試験データの回帰解析を行い、従来鋼の疲労強度特性を評価した。公称応力範囲と疲労寿命の関係は、一般に両対数グラフで直線関係にあり、(2.1) 式で表される。

$$m \cdot N = C \quad (2.1)$$

ここで、 $\Delta\sigma$ ：公称応力範囲（N/mm<sup>2</sup>）

N：疲労寿命（cycle）

m：公称応力範囲 と疲労寿命 N 関係の傾き

C：疲労強度を決める定数

以下の手順で疲労寿命に対する応力範囲の回帰直線を求めた。  
 まず、(2.1) 式の両辺を対数変換する。

$$\log(\Delta\sigma^m \cdot N) = \log C \quad (2.2)$$

$$m \log \Delta\sigma + \log N = \log C \quad (2.3)$$

(2.3) 式を回帰直線  $y=ax+b$  の形で表すために、

$$\log \Delta\sigma = -\frac{1}{m} \log N + \frac{1}{m} \log C \quad (2.4)$$

とおけば、 $y = \log \Delta\sigma$ 、 $x = \log N$ 、 $a = -\frac{1}{m}$ 、 $b = \frac{1}{m} \log C$  となる。

ここで、疲労試験結果を用いて  $x$  (疲労寿命  $N$ ) に対する  $y$  (公称応力範囲  $\Delta\sigma$ ) の回帰計算を行い  $a$  と  $b$  を求め、 $m$  および  $C$  を設定する。 $m$  および  $C$  は、(2.5) 式および (2.6) 式から求められる。

$$m = -\frac{1}{a} \quad (2.5)$$

$$C = 10^{b \cdot m} \quad (2.6)$$

$x$  を独立変数とし、最小二乗法を利用した回帰計算の結果、 $a=-0.186$ 、 $b=2.938$ 、標準偏差  $s=0.049$  となり、(2.5) 式および (2.6) 式より  $m$ 、 $C$  を求めると  $m=5.38$ 、 $C=6.19 \times 10^{15}$  となる。これを (2.1) 式に代入すると、

$$\Delta\sigma^{5.38} \cdot N = 6.19 \times 10^{15} \quad (2.7)$$

となる。

図 2.9 に疲労試験結果より得られた公称応力範囲  $\Delta\sigma_n$  と疲労寿命  $N$  の関係を示す。図中の実線と破線は、(2.7) 式の回帰直線とそこから  $2 \times$  標準偏差離れた回帰直線を示している。この図からは、応力範囲と疲労寿命の関係に鋼材による顕著な違いは認められない。図 2.9 に示す  $\Delta\sigma$ - $N$  関係を従来鋼の疲労強度特性とする。

## 2.6 疲労試験

### 2.6.1 試験方法

疲労試験は、動的能力±500kN 電気サーボ式材料試験機(従来鋼の試験に用いたものと同じ)を用い、下限荷重を 10kN(下限応力 5.6N/mm<sup>2</sup>)とし、公称応力範囲を 80N/mm<sup>2</sup>、100N/mm<sup>2</sup>、120N/mm<sup>2</sup>とした 3 つの条件で行なった。荷重波形は正弦波、繰返し速度は 8~14Hz である。疲労試験の状況を写真 2.5 に示す。試験体数は、各応力範囲につき 4 体とした。各試験体の板幅と板厚を計測したものを表 2.12~表 2.13 に示す。寸法計測位置は、図 2.10 のとおりである。各試験体の荷重条件を表 2.14 に示す。

### 2.6.2 疲労試験結果

疲労試験の結果を表 2.15 に示す。なお、試験体の疲労寿命は従来鋼に合わせて破断寿命とした。この試験体においては、疲労き裂の起点となる円孔部が比較的鈍い切欠きといえること、また試験体の幅が小さいことから破断寿命に占めるき裂の進展寿命の割合は小さく、き裂発生寿命が支配的となると考えられる。破断した各試験体の破面写真を写真 2.6~2.16 に示す。

試験体 FCA09 の円孔壁には、写真 2.17 に示すように板厚方向の傷があることを確認した。この傷に沿って早期に疲労き裂が発生したため、極めて短い疲労寿命になったと考えられる。従って、耐疲労鋼の公称応力範囲  $\sigma_n$  と疲労寿命  $N$  の関係を整理する際には、この試験データは除外することにした。

そのうえで、前項で示した従来鋼の疲労試験結果に、耐疲労鋼の疲労試験結果を示したものを図 2.11 に示す。図中の実線と破線は、従来鋼の疲労寿命  $N$  に対する公称応力範囲  $\sigma_n$  の回帰直線とそこから  $2 \times$  標準偏差離れた回帰直線を示している。

## 2.7 従来鋼と耐疲労鋼の疲労強度の比較

従来鋼と耐疲労鋼の疲労強度を比較するために、耐疲労鋼について疲労試験結果の回帰解析を行うと、耐疲労鋼の公称応力範囲  $\sigma_n$  と疲労寿命  $N$  の関係は、(2.8)式で表すことができる。ここで、公称応力範囲  $\sigma_n$  と疲労寿命  $N$  関係の傾き  $m$  は、比較を容易にするために従来鋼と同じとした。

$$\Delta\sigma_n^{5.38} \cdot N = 2.85 \times 10^{16} \quad (2.8)$$

図 2.12 に従来鋼と耐疲労鋼の疲労強度比較を示す。両者を比較すると、耐疲労鋼の疲労強度は、平均で従来鋼の 1.3 倍程度となっている。

しかし、耐疲労鋼の疲労寿命は、従来鋼に比べてバラツキが大きい。従来鋼の回帰直線上にあるデータもあれば大きく改善されたデータも確認できた。各応力範囲について疲労寿命のバラツキを見ると、応力範囲  $120\text{N/mm}^2$  の疲労寿命は 15 万回～25 万回でありバラツキは小さい。応力範囲  $100\text{N/mm}^2$  の疲労寿命は 31 万回～265 万回とバラツキが大きい。3 体は 31 万回～34 万回に集中している。応力範囲  $80\text{N/mm}^2$  の疲労寿命は 52 万回～未破断であり、そのうち 2 体は 52 万回と 64 万回と近いが、他の 2 体は 845 万回と未破断でありバラツキが最も大きい。このように、応力範囲が低いほどバラツキが大きくなっている。円孔壁面には写真 2.18 に示すようにドリル刃の傷痕が見られるが、この傷の深さあるいは深い傷の数の違いが、き裂発生寿命に影響していることが考えられる。このような円孔壁面の状態の違いは従来鋼も同様に生じると考えられるため一概には言えないが、従来鋼と耐疲労鋼について、純粹に鋼材の違いを比較するためには円孔壁の状態を統一することは重要である。

## 2.8 破面観察

疲労寿命のバラツキが大きい試験体について、円孔壁面の状態の違いを調べるために SEM(走査型顕微鏡)による破面観察を行なった。観察対象は、応力範囲  $100\text{N/mm}^2$  の試験結果から FCA02 (N=265 万回)、FCA03 (N=34 万回) の 2 体とした。

FCA02 の破面観察写真を写真 2.19～2.20 に、FCA03 の破面観察写真を写真 2.21～2.22 に示す。2 つの試験体には、円孔壁の破面形状に違いが見られた。FCA03 には段差があり、この段差は複数個所から疲労き裂が発生し、進展して合体したことを示している。一方、FCA02 には、このような段差は見られない。SEM による破面観察結果からも、き裂発生点は FCA02 で 1 ヲ所(表面から 2～3mm の位置)であるが、FCA03 では段差の数に応じて複数ヶ所あることを確認した。

表 2.1 鋼材の化学成分

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ti	Nb	B	PCM
	×100			×1000		×100					×1000		×10000	×100
SM490Y-FCA	4	42	152	8	2	2	2	17	1	0	8	-	1	14

表 2.2 鋼材の機械的性質

	降伏応力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
SM490YA-FCA	433	591	17

表 2.3 切欠きなし試験体の残留応力測定結果

(a)表面

ゲージ番号	23	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	24
中心からの距離 (mm)	-75.0	-67.5	-52.5	-37.5	-22.5	-10.0	0.0	10.0	22.5	37.5	52.5	67.5	75.0
ひずみ (μ)	-290	225	592	682	155	-1715	-1406	-1696	-433	330	836	157	-41
残留応力 (N/mm <sup>2</sup> )	58.0	-45.0	-118.4	-136.4	-31.0	343.0	281.2	339.2	86.6	-66.0	-167.2	-31.4	8.2

(b)裏面

ゲージ番号	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	24
中心からの距離 (mm)	-75.0	-67.5	-52.5	-37.5	-22.5	-10.0	0.0	10.0	22.5	37.5	52.5	67.5	75.0
ひずみ (μ)	-290	597	985	868	88	-2049	-2033	-2086	-729	577	1020	343	-41
残留応力 (N/mm <sup>2</sup> )	58.0	-119.4	-197.0	-173.6	-17.6	409.8	406.6	417.2	145.8	-115.4	-204.0	-68.6	8.2

(c)表裏面の平均

ゲージ番号	23	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	24
	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13		
中心からの距離 (mm)	-75.0	-67.5	-52.5	-37.5	-22.5	-10.0	0.0	10.0	22.5	37.5	52.5	67.5	75.0
ひずみ (μ)	-290	411	789	775	122	-1882	-1720	-1891	-581	454	928	250	-41
残留応力 (N/mm <sup>2</sup> )	58.0	-82.2	-157.7	-155.0	-24.3	376.4	343.9	378.2	116.2	-90.7	-185.6	-50.0	8.2

表 2.4 切欠きあり試験体の残留応力測定結果

(a)表面

ゲージ番号	17	8	7	6	5	20	19	4	3	2	1	18
中心からの距離 (mm)	-75.0	-70.0	-60.0	-50.0	-40.0	-35.0	35.0	40.0	50.0	60.0	70.0	75.0
ひずみ ( $\mu$ )	-345	-283	225	403	-90	-1720	-1505	-243	158	218	-183	-258
残留応力 (N/mm <sup>2</sup> )	69.0	56.6	-45.0	-80.6	18.0	344.0	301.0	48.6	-31.6	-43.6	36.6	51.6

(b)裏面

ゲージ番号	17	16	15	14	13	20	19	12	11	10	9	18
中心からの距離 (mm)	-75.0	-70.0	-60.0	-50.0	-40.0	-35.0	35.0	40.0	50.0	60.0	70.0	75.0
ひずみ ( $\mu$ )	-345	-115	286	136	-79	-1720	-1505	-17	484	408	-637	-258
残留応力 (N/mm <sup>2</sup> )	69.0	23.0	-57.2	-27.2	15.8	344.0	301.0	3.4	-96.8	-81.6	127.4	51.6

(c)表裏面の平均

ゲージ番号	17	8	7	6	5	20	19	4	3	2	1	18
		16	15	14	13	20	19	12	11	10	9	
中心からの距離 (mm)	-75.0	-70.0	-60.0	-50.0	-40.0	-35.0	35.0	40.0	50.0	60.0	70.0	75.0
ひずみ ( $\mu$ )	-345	-199	256	270	-85	-1720	-1505	-130	321	313	-410	-258
残留応力 (N/mm <sup>2</sup> )	69.0	39.8	-51.1	-53.9	16.9	344.0	301.0	26.0	-64.2	-62.6	82.0	51.6

表 2.5 応力測定結果 (公称応力範囲 80N/mm<sup>2</sup>)

$\Delta\sigma_n=80\text{N/mm}^2$								
1回目			2回目			10回目		
公称応力 (N/mm <sup>2</sup> )	一般部 ひずみ ( $\mu$ )	円孔壁 ひずみ ( $\mu$ )	公称応力 (N/mm <sup>2</sup> )	一般部 ひずみ ( $\mu$ )	円孔壁 ひずみ ( $\mu$ )	公称応力 (N/mm <sup>2</sup> )	一般部 ひずみ ( $\mu$ )	円孔壁 ひずみ ( $\mu$ )
0	1	0	4	20	472	6	28	504
8	38	222	12	60	696	14	69	729
16	80	451	20	102	925	22	109	957
24	120	685	29	143	1153	30	150	1186
33	163	960	37	183	1383	38	189	1409
41	205	1237	45	225	1625	47	233	1659
50	250	1540	53	263	1844	54	271	1877
58	292	1827	61	305	2080	62	312	2110
67	335	2132	69	344	2309	70	352	2337
75	377	2433	76	379	2512	77	387	2530
84	422	2772	84	422	2771	87	434	2799
76	381	2543	77	383	2552	79	394	2577
69	343	2322	69	343	2327	71	353	2346
61	304	2096	61	304	2107	63	313	2124
53	263	1868	53	264	1877	55	274	1898
45	224	1645	45	224	1646	46	232	1665
37	187	1427	37	185	1410	38	189	1421
28	141	1168	28	142	1175	30	149	1193
20	101	940	21	103	951	22	108	961
12	59	700	12	62	720	14	68	730
4	20	472	4	20	483	6	28	504

表 2.6 応力測定結果 (公称応力範囲 100N/mm<sup>2</sup>)

$\Delta\sigma_n=100\text{N/mm}^2$								
1回目			2回目			10回目		
公称応力 (N/mm <sup>2</sup> )	一般部 ひずみ ( $\mu$ )	円孔壁 ひずみ ( $\mu$ )	公称応力 (N/mm <sup>2</sup> )	一般部 ひずみ ( $\mu$ )	円孔壁 ひずみ ( $\mu$ )	公称応力 (N/mm <sup>2</sup> )	一般部 ひずみ ( $\mu$ )	円孔壁 ひずみ ( $\mu$ )
0	0	0	2	12	262	2	11	297
9	47	261	12	60	531	11	57	556
20	102	566	22	112	822	22	111	864
31	154	863	33	164	1118	33	163	1158
41	206	1157	43	217	1418	43	216	1458
51	254	1427	53	263	1686	53	263	1723
61	306	1725	64	319	2006	63	313	2015
71	356	2011	73	367	2280	73	364	2308
81	407	2302	83	415	2566	83	414	2595
92	459	2685	93	467	2875	93	467	2902
104	518	3184	104	519	3198	104	518	3205
93	467	2893	94	468	2907	93	466	2910
83	414	2587	83	416	2609	83	413	2615
73	366	2310	73	367	2329	73	364	2329
63	314	2015	63	316	2032	62	312	2037
53	264	1729	54	268	1758	53	265	1763
43	216	1454	44	218	1471	43	216	1479
33	163	1151	33	165	1171	33	164	1183
22	112	849	23	113	866	22	111	877
12	60	542	12	58	552	12	58	574
2	12	262	3	13	285	2	12	299

表 2.7 応力測定結果 (公称応力範囲 120N/mm<sup>2</sup>)

$\Delta\sigma_n=120\text{N/mm}^2$								
1回目			2回目			10回目		
公称応力 (N/mm <sup>2</sup> )	一般部 ひずみ ( $\mu$ )	円孔壁 ひずみ ( $\mu$ )	公称応力 (N/mm <sup>2</sup> )	一般部 ひずみ ( $\mu$ )	円孔壁 ひずみ ( $\mu$ )	公称応力 (N/mm <sup>2</sup> )	一般部 ひずみ ( $\mu$ )	円孔壁 ひずみ ( $\mu$ )
0	0	0	2	8	331	2	12	425
12	59	337	13	67	660	14	72	761
24	120	684	25	127	1001	27	133	1104
36	178	1011	37	185	1340	38	192	1441
49	244	1385	50	251	1717	51	257	1810
61	304	1727	62	311	2059	63	316	2154
72	362	2066	74	371	2412	75	375	2502
85	426	2436	87	433	2774	87	437	2864
97	485	2782	99	493	3134	99	497	3216
109	545	3202	111	554	3503	111	557	3579
122	612	3871	123	614	3919	123	617	3947
111	554	3539	111	554	3569	111	557	3602
99	494	3187	99	494	3225	99	496	3257
87	434	2844	87	434	2881	88	438	2920
74	371	2487	74	372	2514	70	349	2552
62	311	2138	62	311	2166	63	314	2207
51	254	1804	50	252	1820	51	255	1864
37	186	1408	37	187	1441	38	190	1485
26	129	1066	26	129	1104	27	133	1152
13	67	701	14	69	742	14	71	784
2	8	331	2	9	373	2	11	427

表 2.8 ひずみ集中係数

公称応力範囲 $\Delta\sigma_n$ (N/mm <sup>2</sup> )	ひずみ集中係数		
	1回目	2回目	10回目
80	6.58	6.57	6.46
100	6.15	6.16	6.19
120	6.33	6.38	6.40

表 2.9 鋼材の化学成分

	C	Si	Mn	P	S	Nb	Cu	Ni	Cr	V
	×100			×1000			×100			
SM400	19	10	55	12	8	-	-	-	-	-
SM490	16	29	130	24	2	-	-	-	-	-
SM490Y	17	40	143	12	4	< 5	-	-	-	-
SM570	13	23	144	12	5	-	1	1	2	4
WEL-TEN780	19	23	145	9	1	-	-	7	-	-

表 2.10 鋼材の機械的性質

	降伏応力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
SM400	276	440	33
SM490	354	511	29
SM490Y	439	571	26
SM570	589	649	29
WEL-TEN780	794	860	23

表 2.11 従来鋼疲労試験結果

鋼種	試験体名	公称応力範囲 $\Delta\sigma_n(\text{N/mm}^2)$	疲労寿命N ( $\times 10^4$ cycles)
SM400	H400-1	60	126.4
	H400-2	80	20.7
	H400-3	100	7.5
	H400-4	60	62.3
	H400-5	80	17.7
	H400-6	100	9.1
SM490	H490-1	60	>1000
	H490-2	80	20.5
	H490-3	100	8.4
	H490-4	60	132.7
	H490-5	80	23.4
	H490-6	100	10.9
SM490Y	H490Y-1	120	6.2
	H490Y-2	100	18.5
	H490Y-3	80	21.8
	H490Y-4	60	86.7
	H490Y-5	80	24.1
	H490Y-6	40	>1000
	H490Y-7	60	>1000
	H490Y-8	80	115.4
	H490Y-9	100	16.7
SM570	H570-1	60	>1000
	H570-2	80	52.3
	H570-3	100	26.9
	H570-4	60	>1000
	H570-5	80	67.9
	H570-6	100	21.4
WEL-TEN780	H780-1	60	>1000
	H780-2	80	33.6
	H780-3	100	21.2
	H780-4	60	107.8
	H780-5	80	41.8
	H780-6	100	29.5

表 2.12 試験体の計測寸法（その 1）

試験体名	板厚(mm)					板幅(mm)			
	T1	T2	T3	T4	平均	W1	W2	W3	平均
FCA01	12.28	12.26	12.29	12.27	12.28	150.40	150.35	150.40	150.38
FCA02	12.30	12.31	12.24	12.24	12.27	150.60	150.40	150.40	150.47
FCA03	12.28	12.27	12.29	12.29	12.28	150.50	150.20	150.40	150.37
FCA04	12.24	12.26	12.24	12.26	12.25	150.80	150.25	150.85	150.63
FCA05	12.29	12.28	12.27	12.26	12.28	150.60	150.30	150.50	150.47
FCA06	12.29	12.27	12.24	12.29	12.27	150.80	150.00	150.60	150.47
FCA07	12.29	12.27	12.31	12.29	12.29	150.90	150.85	150.90	150.88
FCA08	12.28	12.29	12.23	12.24	12.26	150.50	150.20	150.60	150.43
FCA09	12.28	12.27	12.28	12.25	12.27	150.65	150.30	150.40	150.45
FCA10	12.20	12.22	12.17	12.19	12.20	150.95	150.80	150.80	150.85
FCA11	12.18	12.17	12.16	12.14	12.16	150.65	150.55	150.60	150.60
FCA12	12.27	12.25	12.28	12.28	12.27	150.90	150.90	151.00	150.93
FCA13	12.27	12.25	12.23	12.23	12.25	150.40	150.35	150.40	150.38

表 2.13 試験体の計測寸法（その 2）

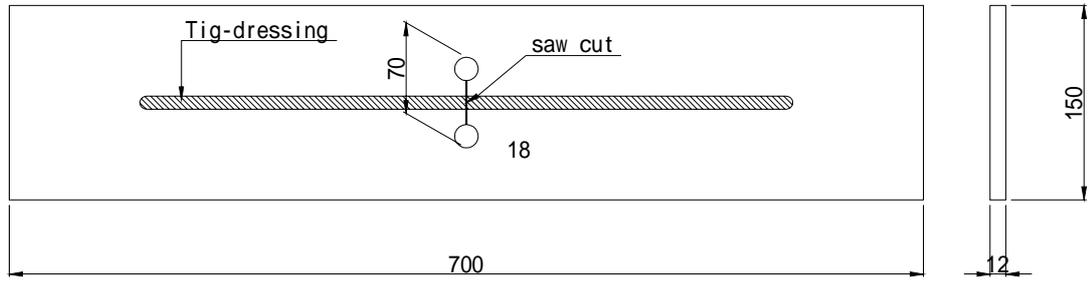
鋼種	試験体名	板厚 (mm)	板幅 (mm)	切欠き長さ (mm)	総断面積 (mm <sup>2</sup> )	純断面積 (mm <sup>2</sup> )
SM490Y- FCA	FCA01	12.28	150.38	70	1846.7	987.1
	FCA02	12.27	150.47	70	1846.3	987.4
	FCA03	12.28	150.37	70	1846.5	986.9
	FCA04	12.25	150.63	70	1845.2	987.7
	FCA05	12.28	150.47	70	1847.8	988.2
	FCA06	12.27	150.47	70	1846.3	987.4
	FCA07	12.29	150.88	70	1854.3	994.0
	FCA08	12.26	150.43	70	1844.3	986.1
	FCA09	12.27	150.45	70	1846.0	987.1
	FCA10	12.20	150.85	70	1840.4	986.4
	FCA11	12.16	150.60	70	1831.3	980.1
	FCA12	12.27	150.93	70	1851.9	993.0
	FCA13	12.25	150.38	70	1842.2	984.7

表 2.14 各試験体の荷重条件

試験体名	総断面積 (mm <sup>2</sup> )	純断面積 (mm <sup>2</sup> )	荷重範囲(kN)		公称応力範囲 (N/mm <sup>2</sup> )	純断面積 応力範囲 (N/mm <sup>2</sup> )
			LOW	HIGH		
FCA01	1846.7	987.1	10	194.7	100.0	187.1
FCA02	1846.3	987.4	10	194.6	100.0	187.0
FCA03	1846.5	986.9	10	194.7	100.0	187.1
FCA04	1845.2	987.7	10	157.6	80.0	149.4
FCA05	1847.8	988.2	10	157.8	80.0	149.6
FCA06	1846.3	987.4	10	157.7	80.0	149.6
FCA07	1854.3	994.0	10	232.5	120.0	223.8
FCA08	1844.3	986.1	10	231.3	120.0	224.4
FCA09	1846.0	987.1	10	194.6	100.0	187.0
FCA10	1840.4	986.4	10	230.8	120.0	223.9
FCA11	1831.3	980.1	10	156.5	80.0	149.5
FCA12	1851.9	993.0	10	232.2	120.0	223.8
FCA13	1842.2	984.7	10	194.2	100.0	187.1

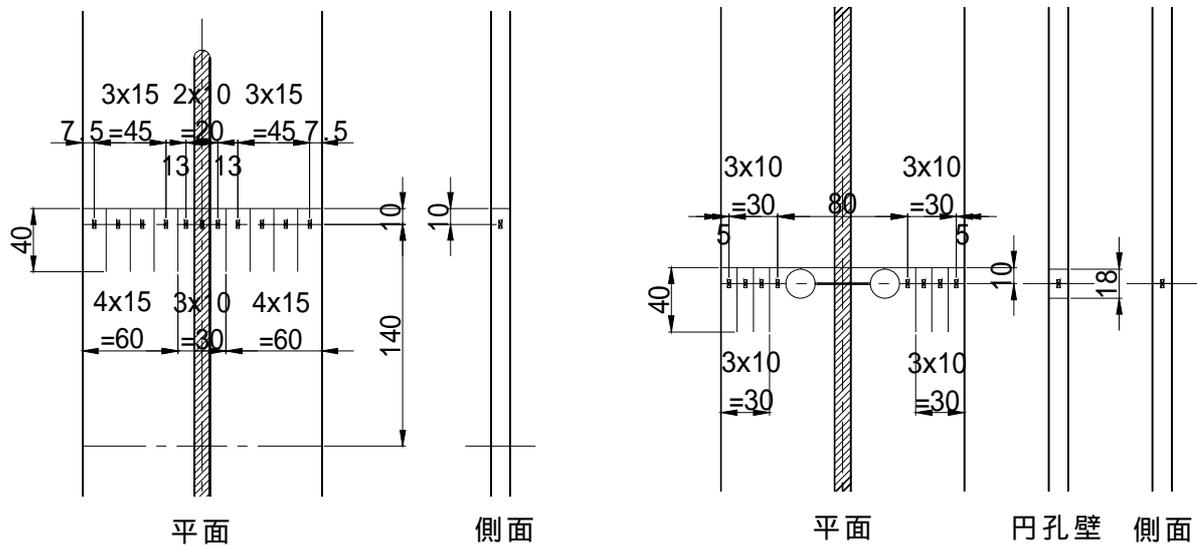
表 2.15 耐疲労鋼疲労試験結果

鋼種	試験体名	公称応力範囲 $\Delta\sigma_n(\text{N/mm}^2)$	疲労寿命N ( $\times 10^4$ cycles)
SM490Y-FCA	FCA01	100	32.6
	FCA02	100	264.8
	FCA03	100	34.1
	FCA04	80	>1000
	FCA05	80	63.8
	FCA06	80	845.3
	FCA07	120	24.9
	FCA08	120	22.0
	FCA09	100	11.0
	FCA10	120	15.7
	FCA11	80	52.5
	FCA12	120	17.5
	FCA13	100	31.5



単位:mm

図 2.1 試験体の形状と寸法



(a)切欠きなし

(b)切欠きあり

図 2.2 ひずみゲージ貼付位置および試験体の切断位置

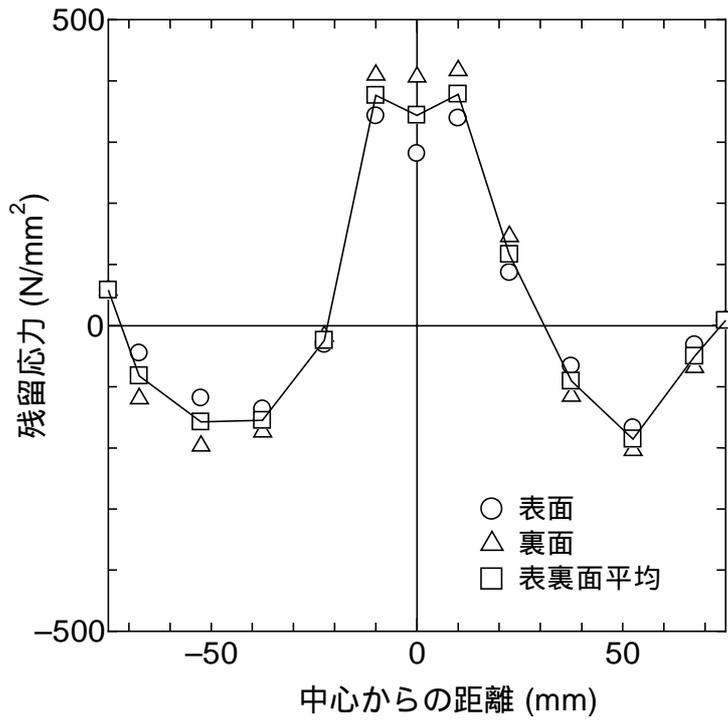


図 2.3 切欠きなし試験体の残留応力分布

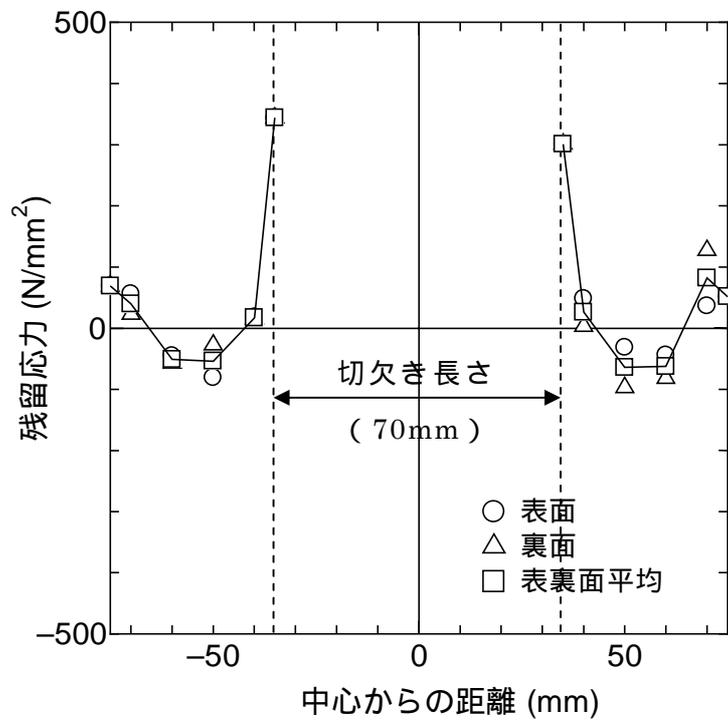


図 2.4 切欠きあり試験体の残留応力分布

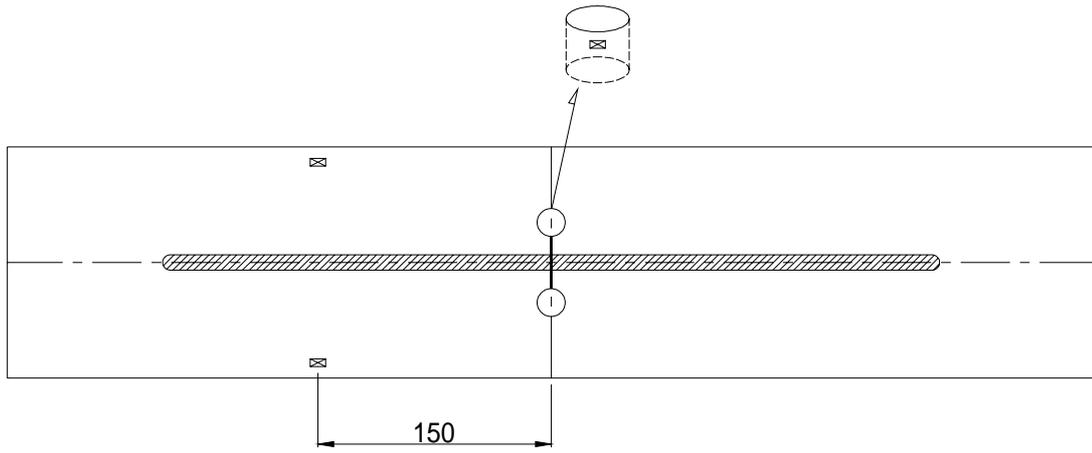
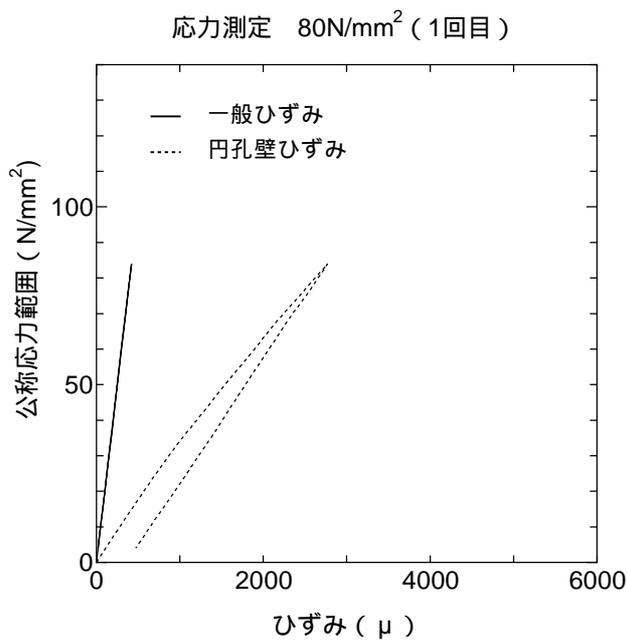
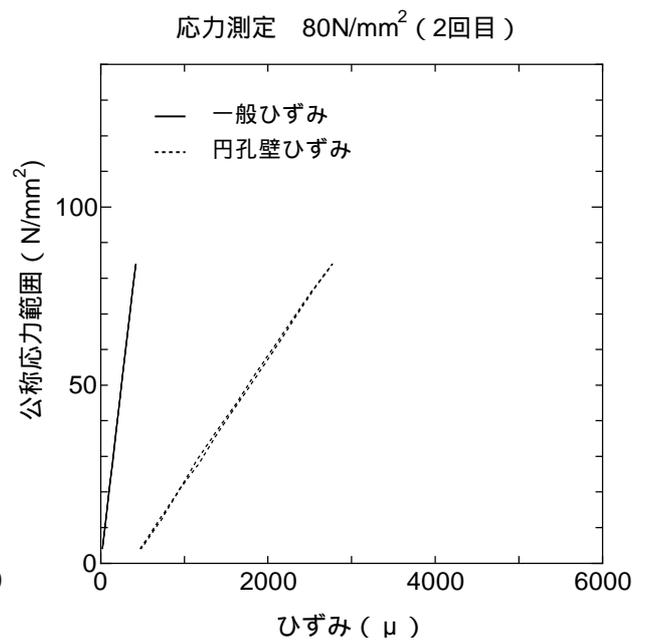


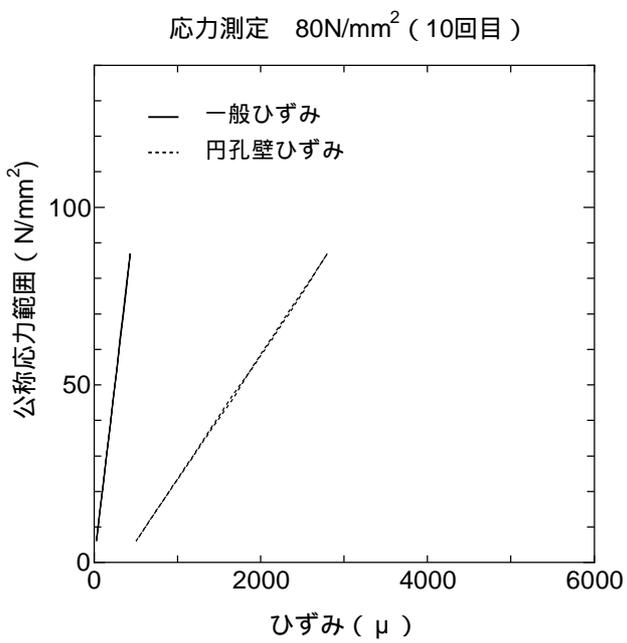
図 2.5 ひずみゲージ貼付位置



(a)1 回目载荷時

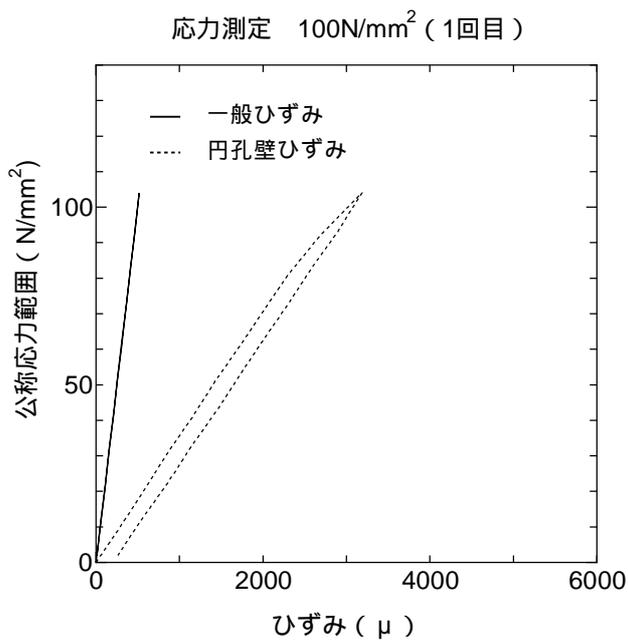


(b)2 回目载荷時

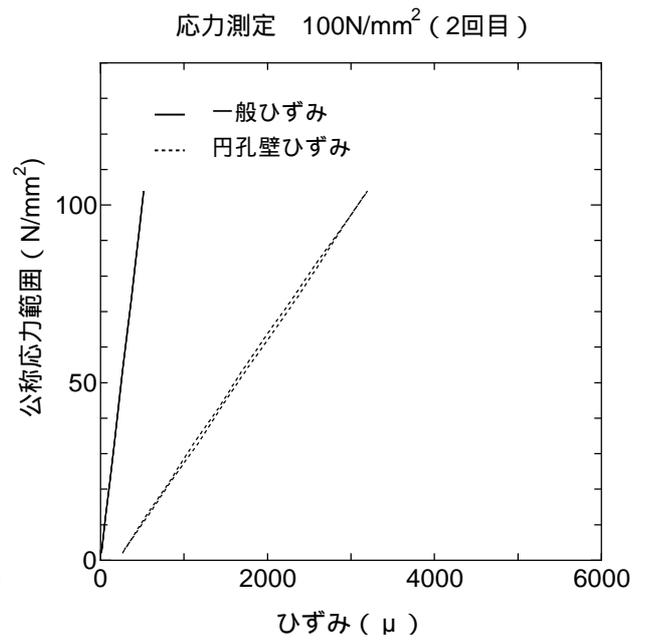


(c)10 回目载荷時

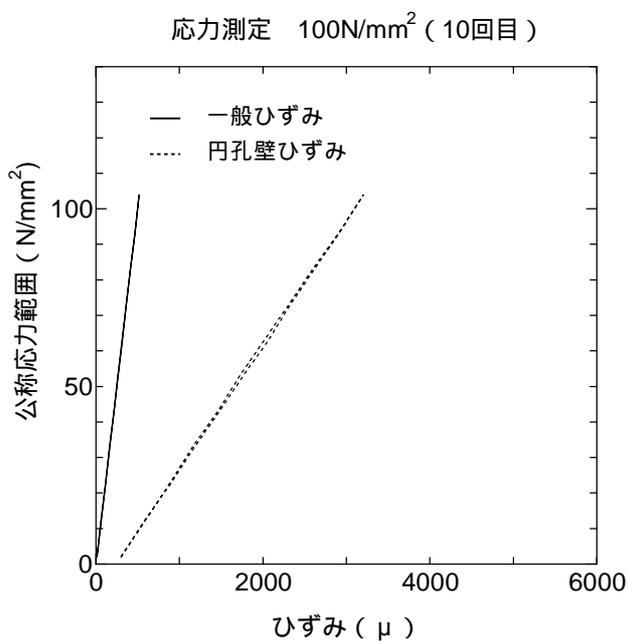
図 2.6 繰返し応力 - ひずみ関係 (応力範囲 80N/mm<sup>2</sup>)



(a)1 回目载荷時

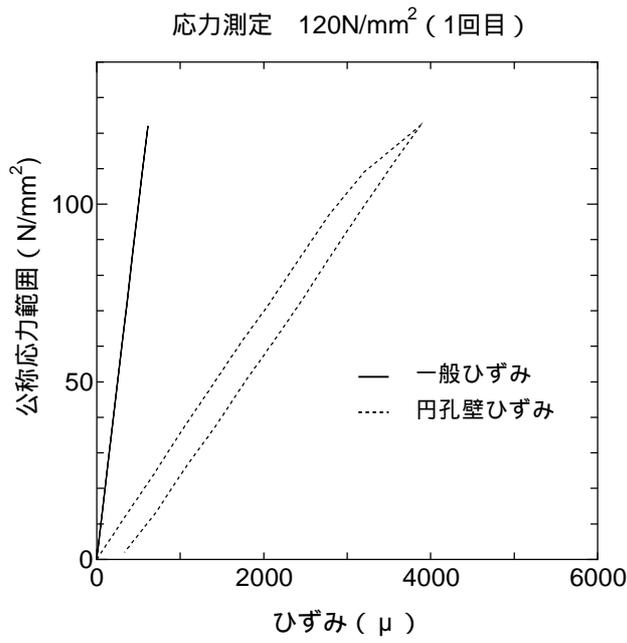


(b)2 回目载荷時

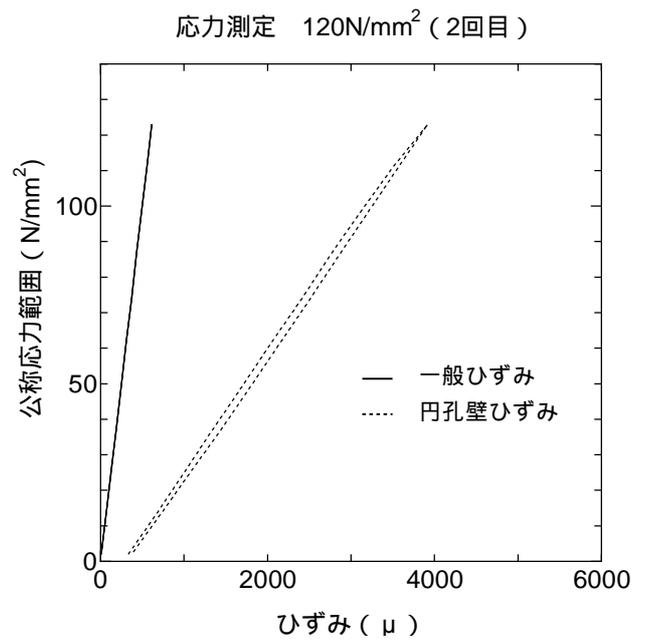


(c)10 回目载荷時

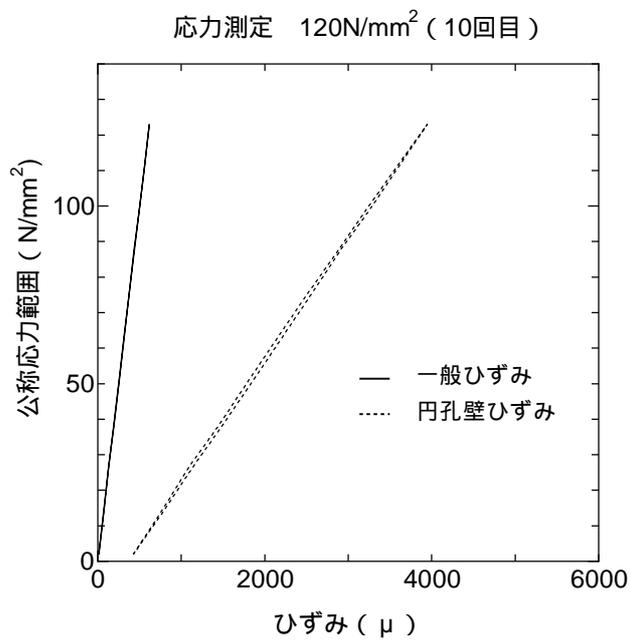
図 2.7 繰返し応力 - ひずみ関係 (応力範囲 100N/mm<sup>2</sup>)



(a)1 回目载荷時



(b)2 回目载荷時



(c)10 回目载荷時

図 2.8 繰返し応力 - ひずみ関係 (応力範囲 120N/mm<sup>2</sup>)

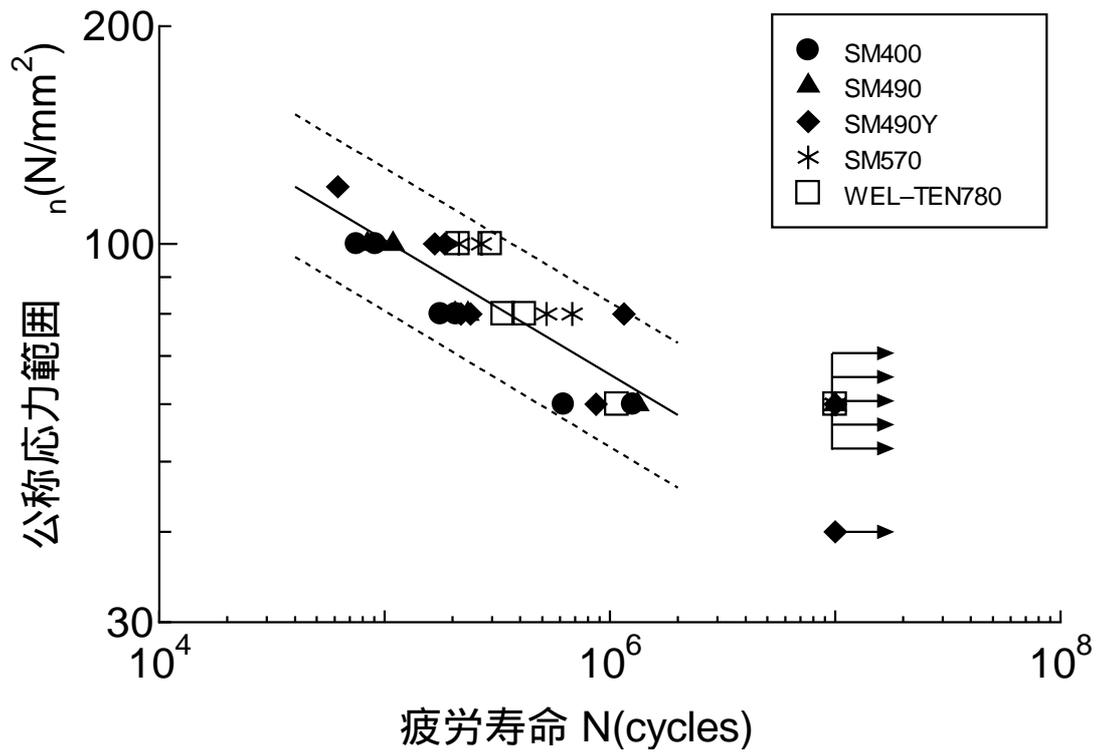


図 2.9 従来鋼  $\sigma$ - $N$  関係

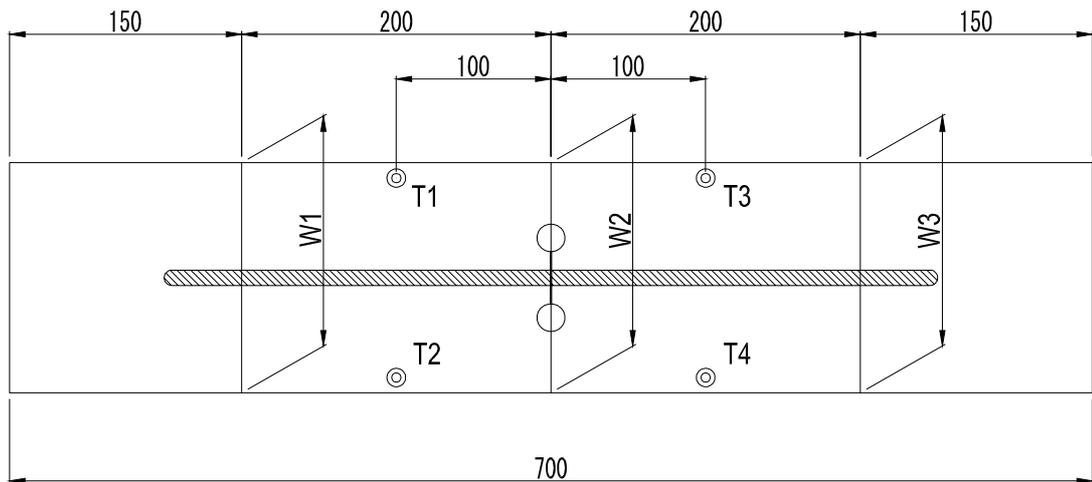


図 2.10 試験体の寸法計測位置

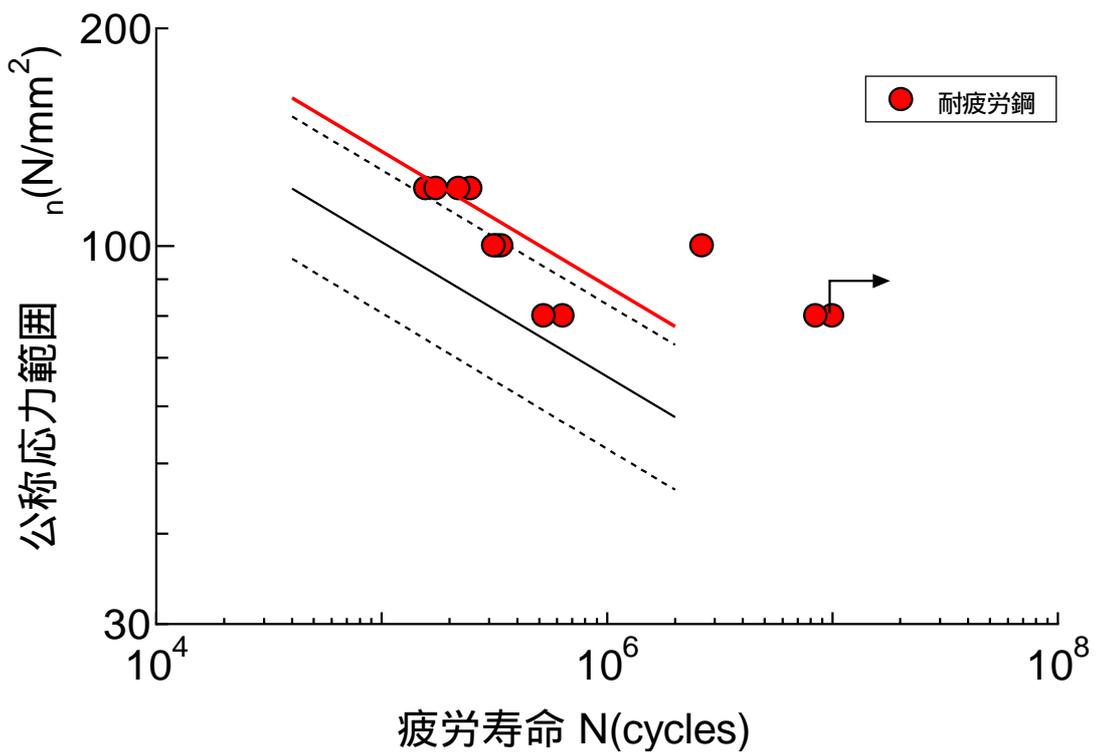


図 2.11 耐疲労鋼  $\sigma_n$ - $N$  関係

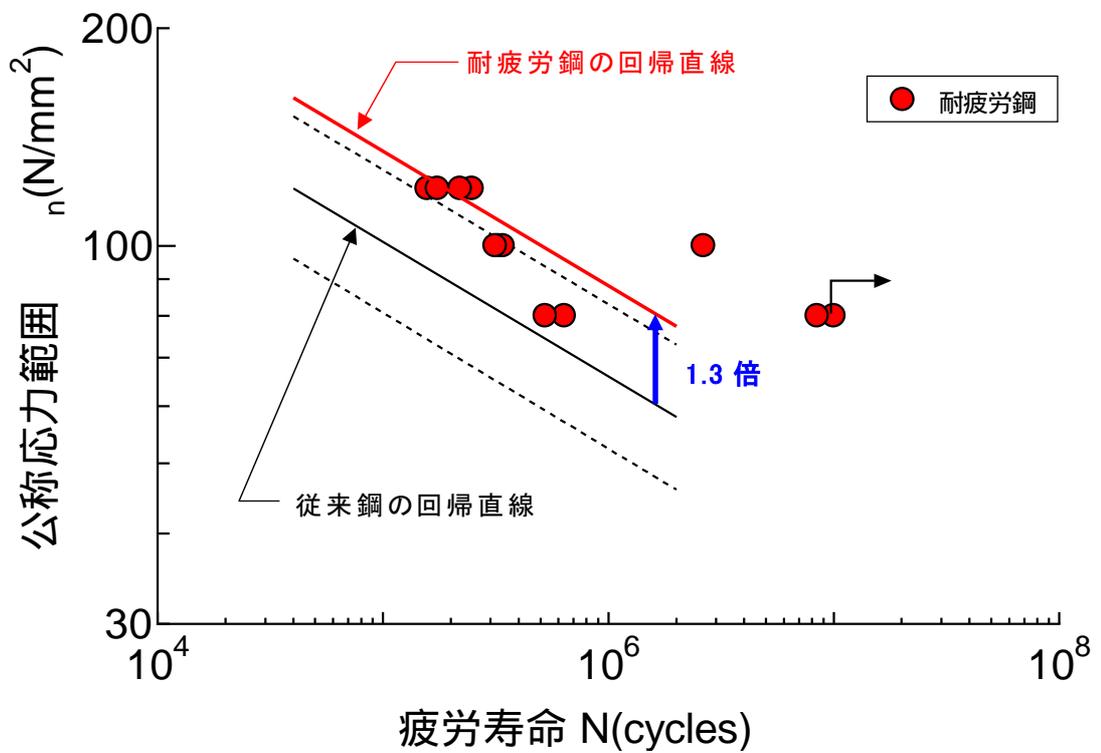


図 2.12 従来鋼と耐疲労鋼の疲労強度比較



写真 2.1 試験体の外観

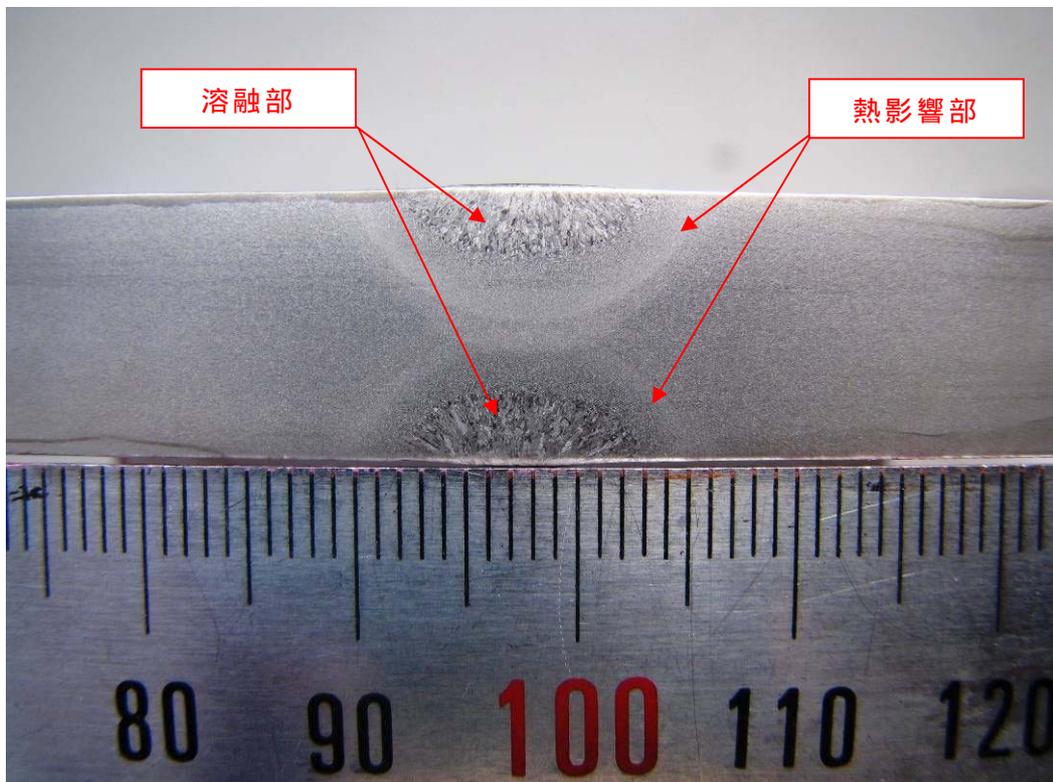


写真 2.2 マクロ写真

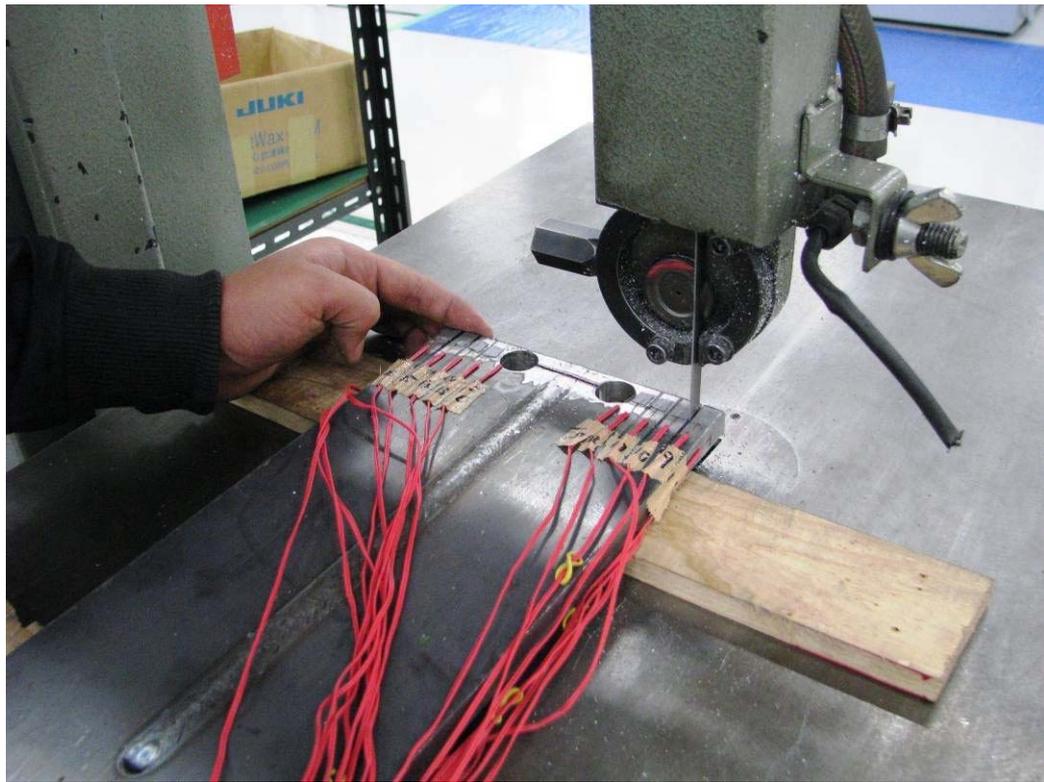
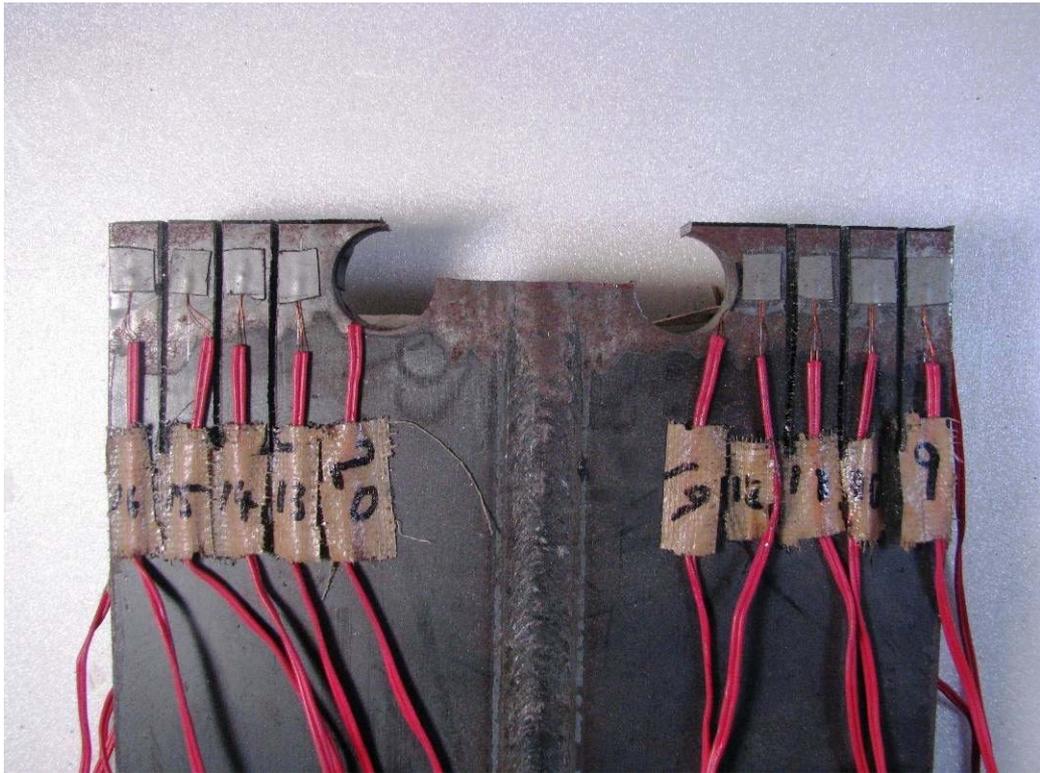
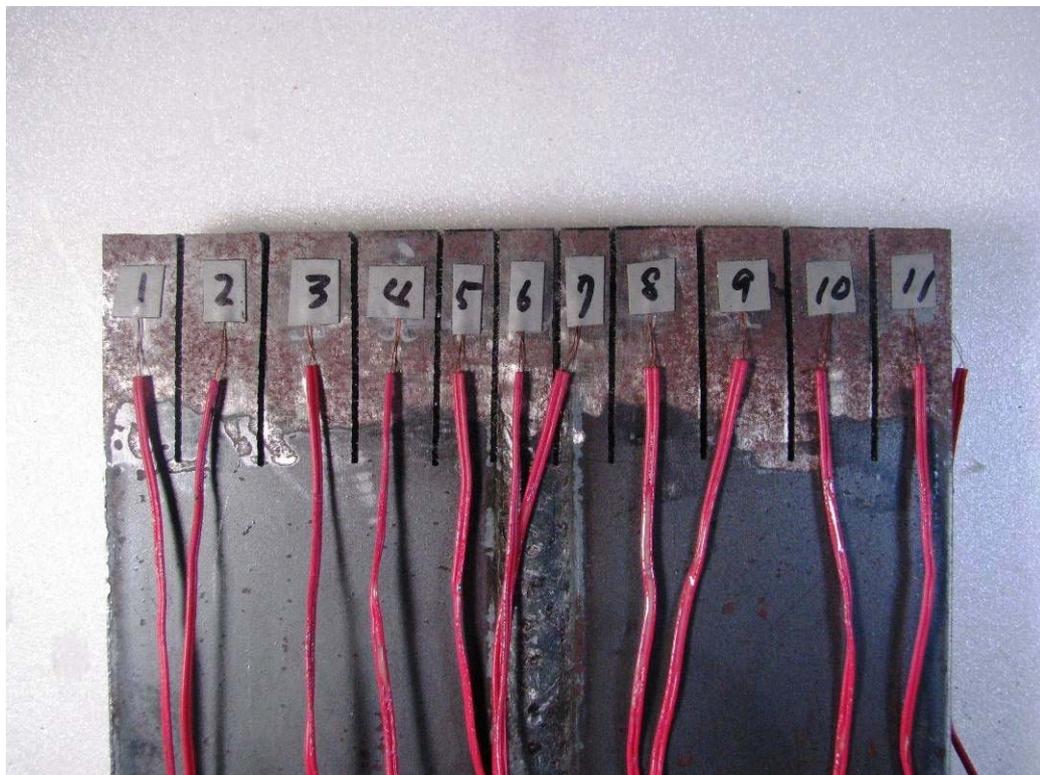


写真 2.3 試験体切断の様子



(a)切欠きあり



(b)切欠きなし

写真 2.4 切断後の試験体

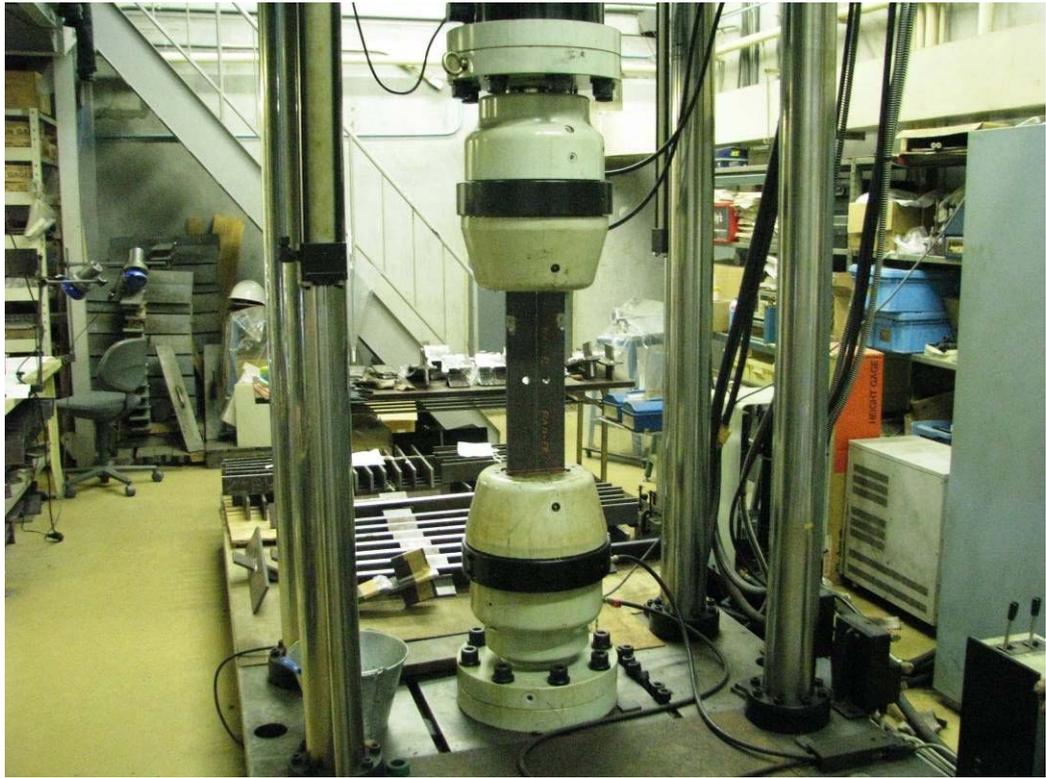
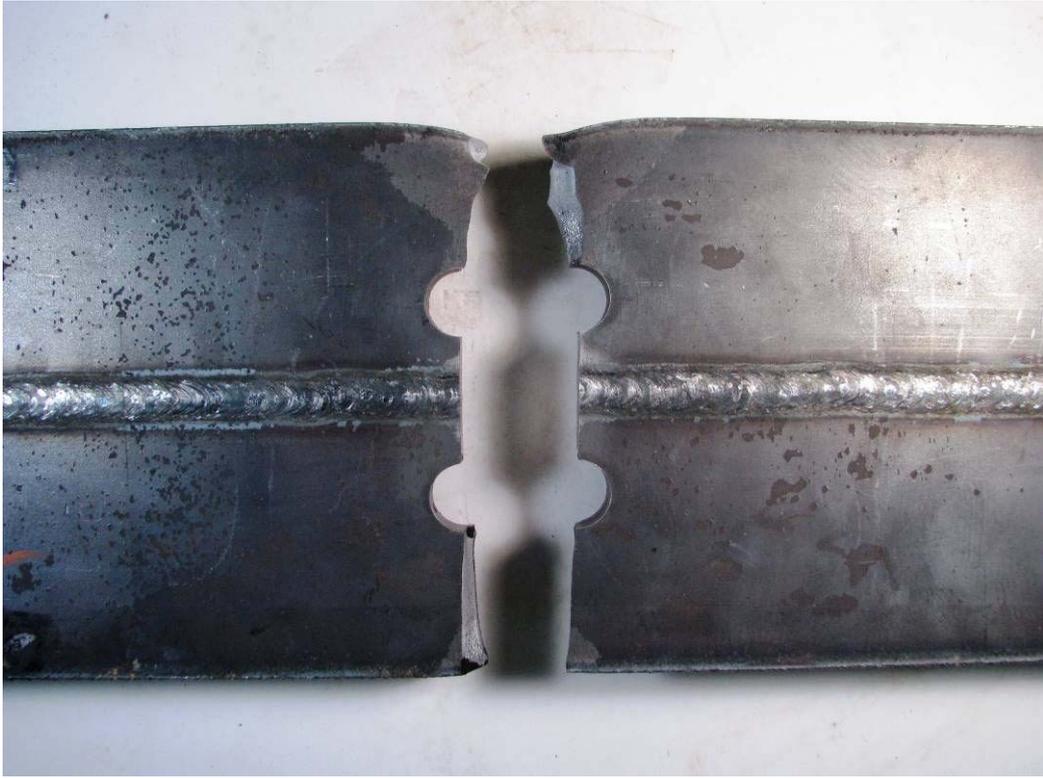
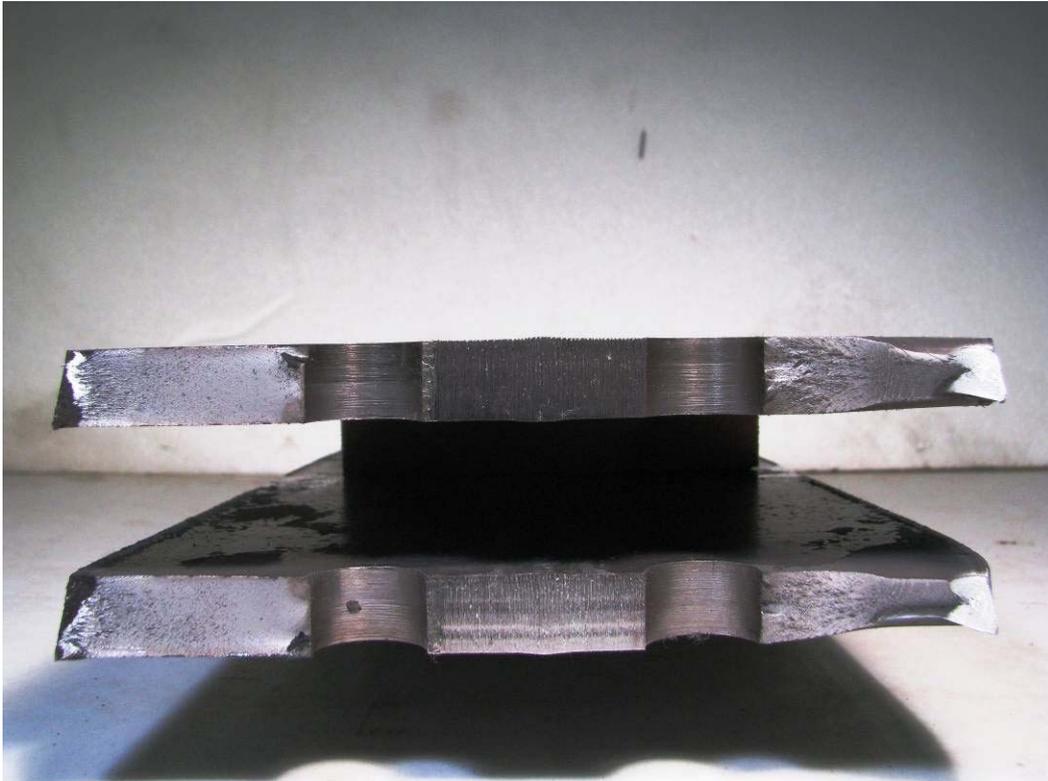


写真 2.5 疲労試験の状況



(a)正面

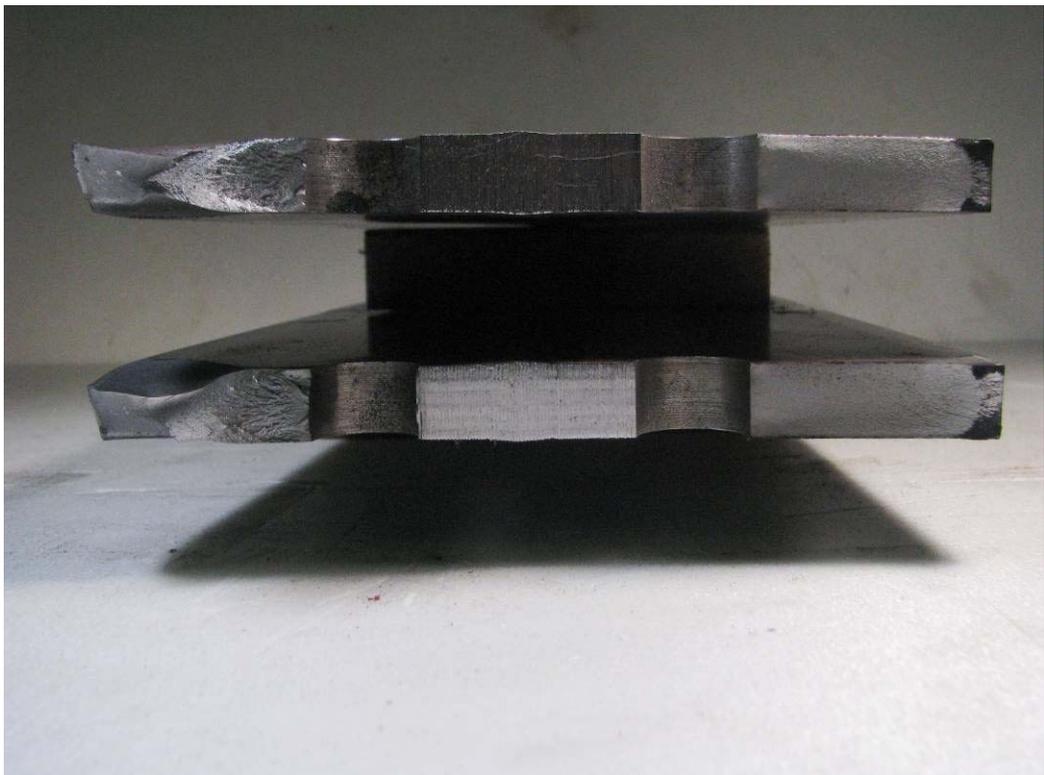


(b)破面

写真 2.6 試験体破断写真 ( FCA01 )



(a)正面

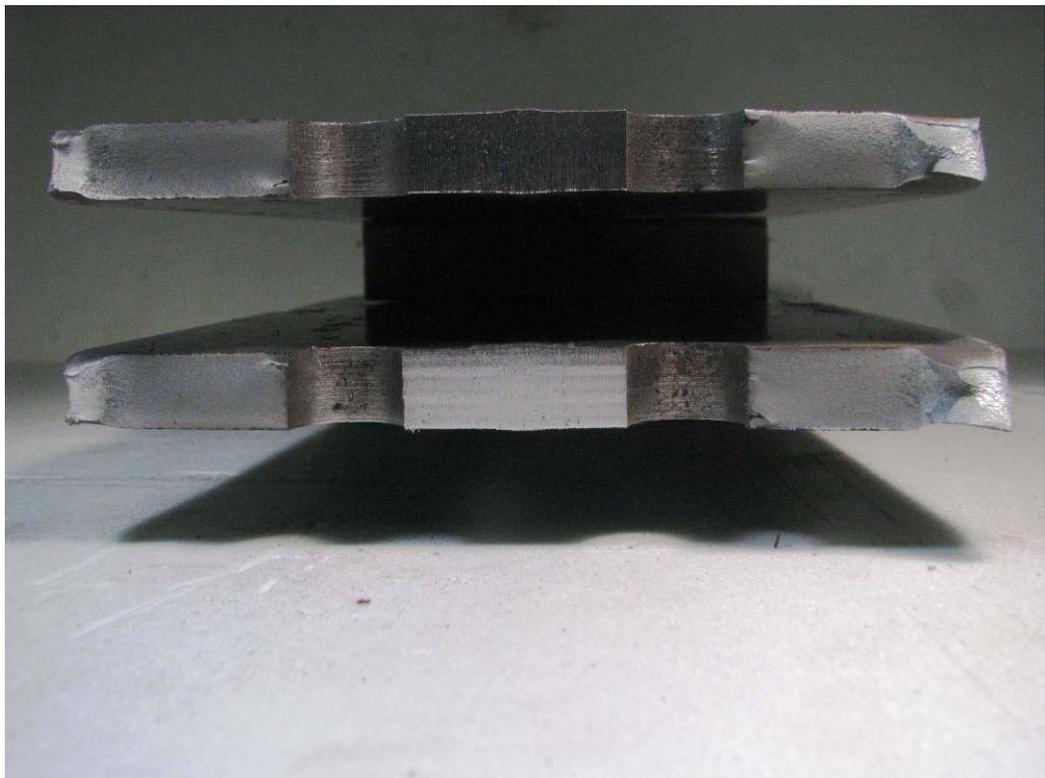


(b)破面

写真 2.7 試験体破断写真 ( FCA02 )

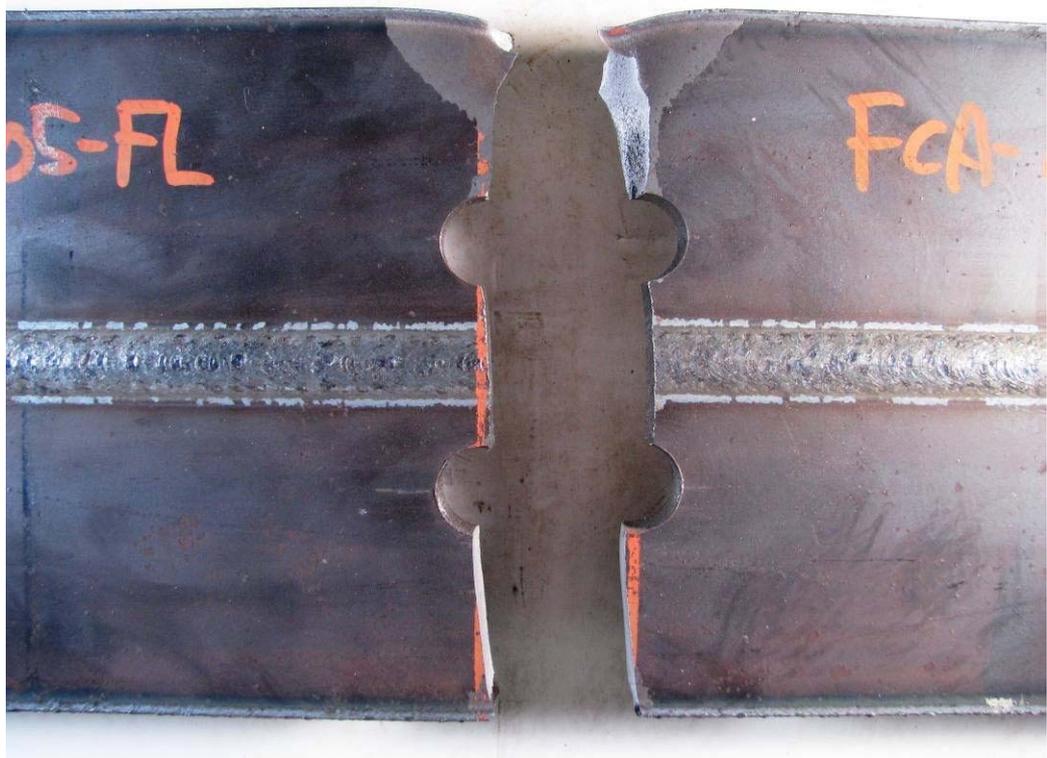


(a)正面

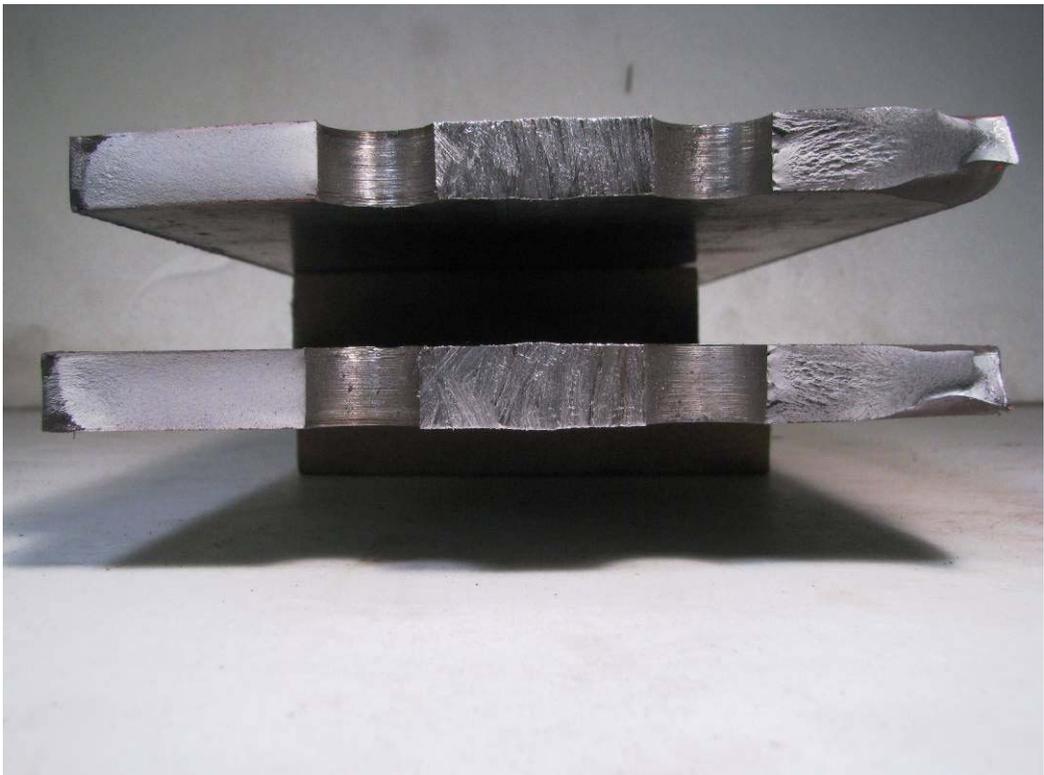


(b)破面

写真 2.8 試験体破断写真 ( FCA03 )



(a)正面

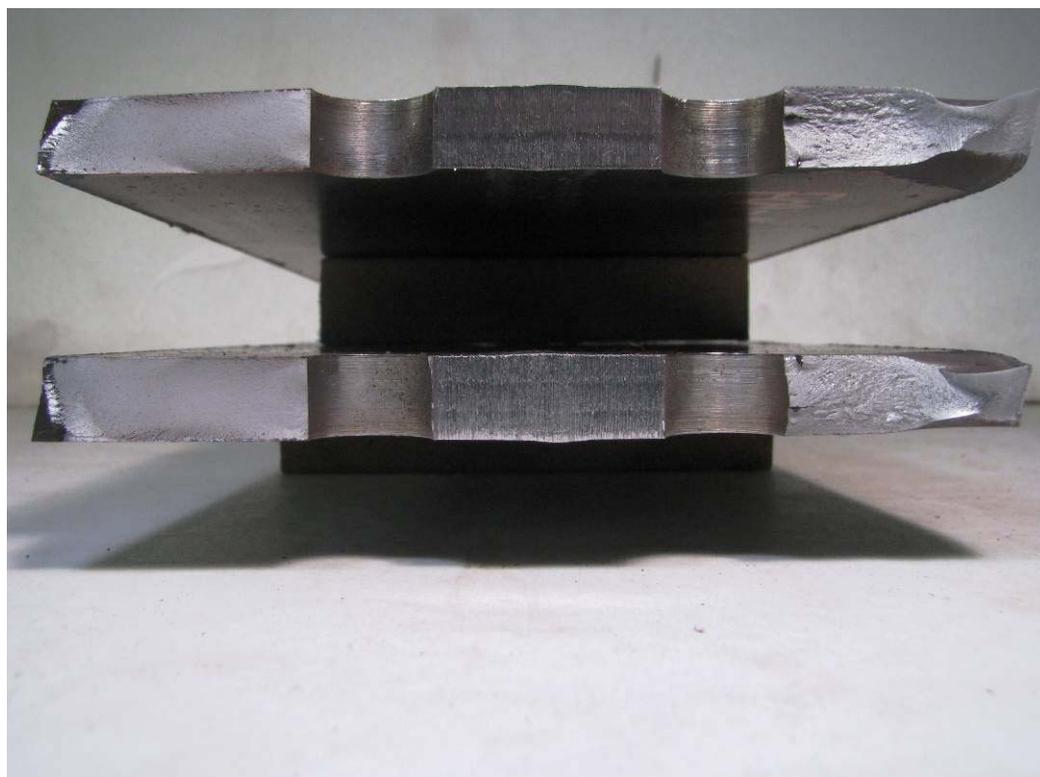


(b)破面

写真 2.9 試験体破断写真 ( FCA05 )



(a)正面

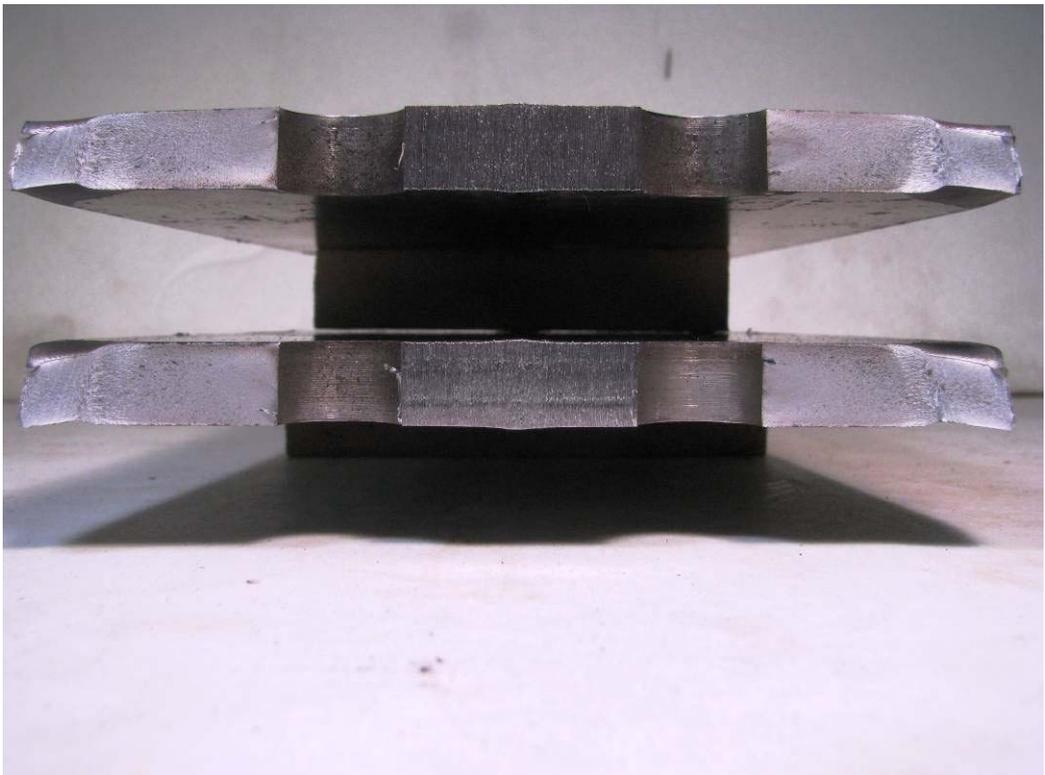


(b)破面

写真 2.10 試験体破断写真 (FCA06)



(a)正面

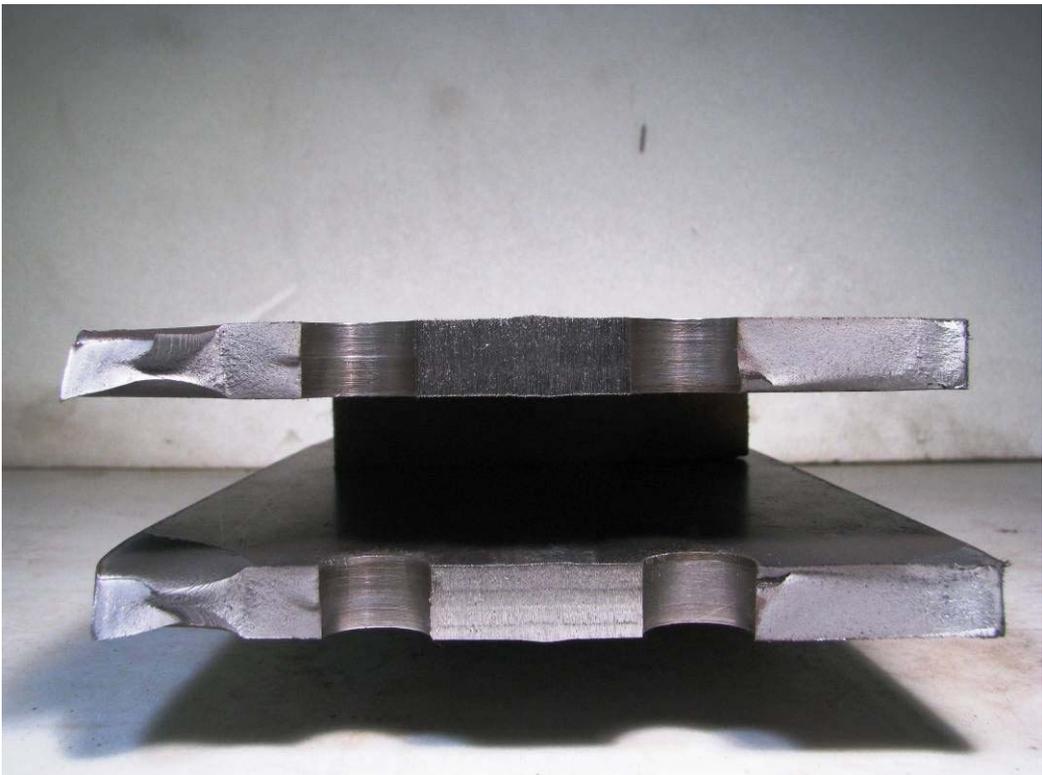


(b)破面

写真 2.11 試験体破断写真 (FCA07)

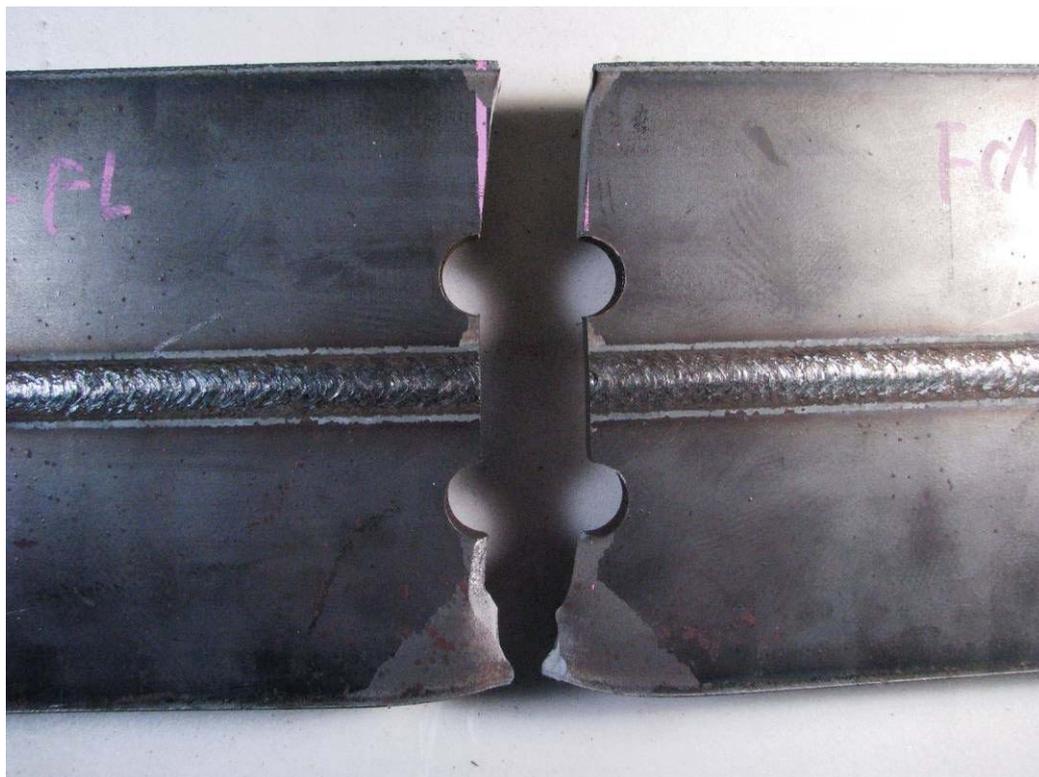


(a)正面

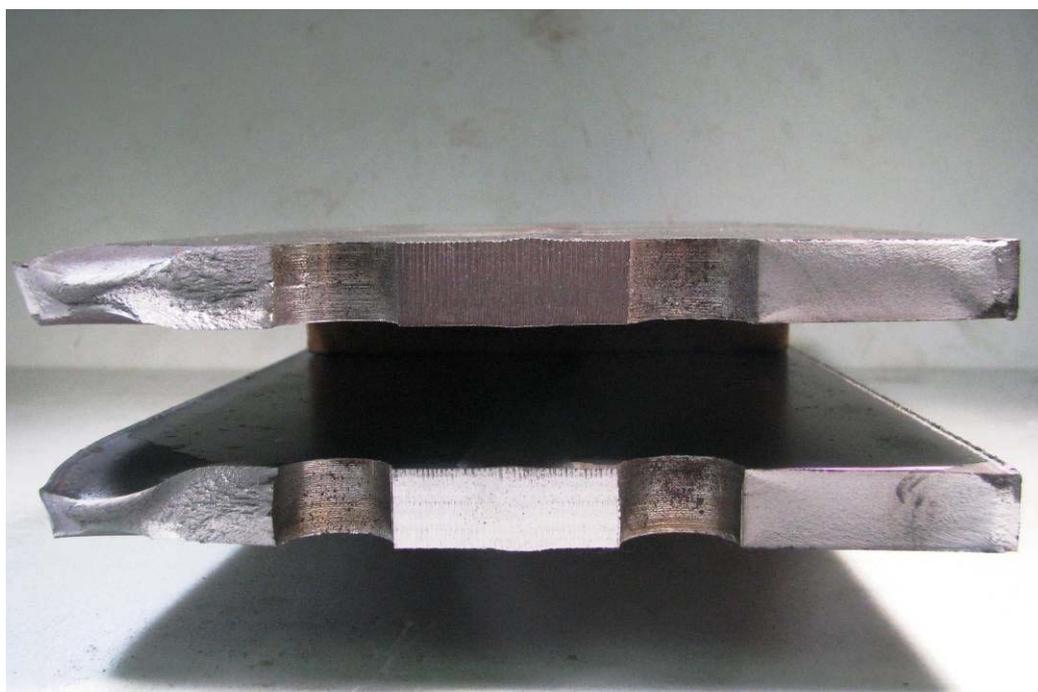


(b)破面

写真 2.12 試験体破断写真 (FCA08)



(a)正面

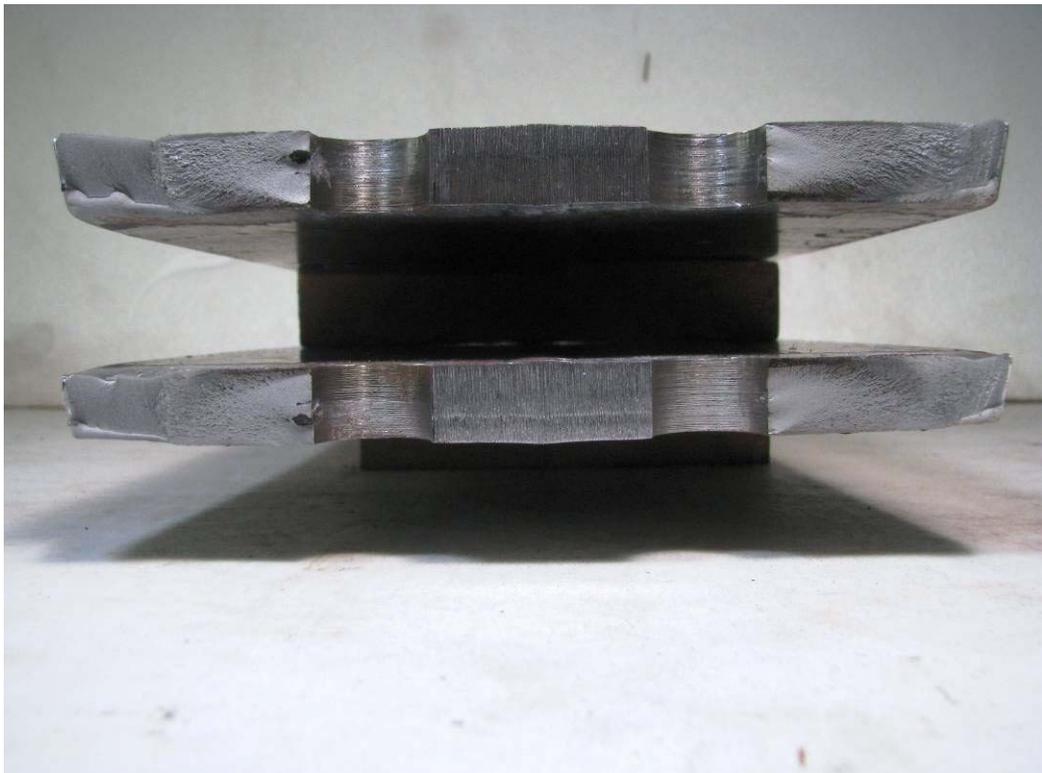


(b)破面

写真 2.13 試験体破断写真 (FCA09)

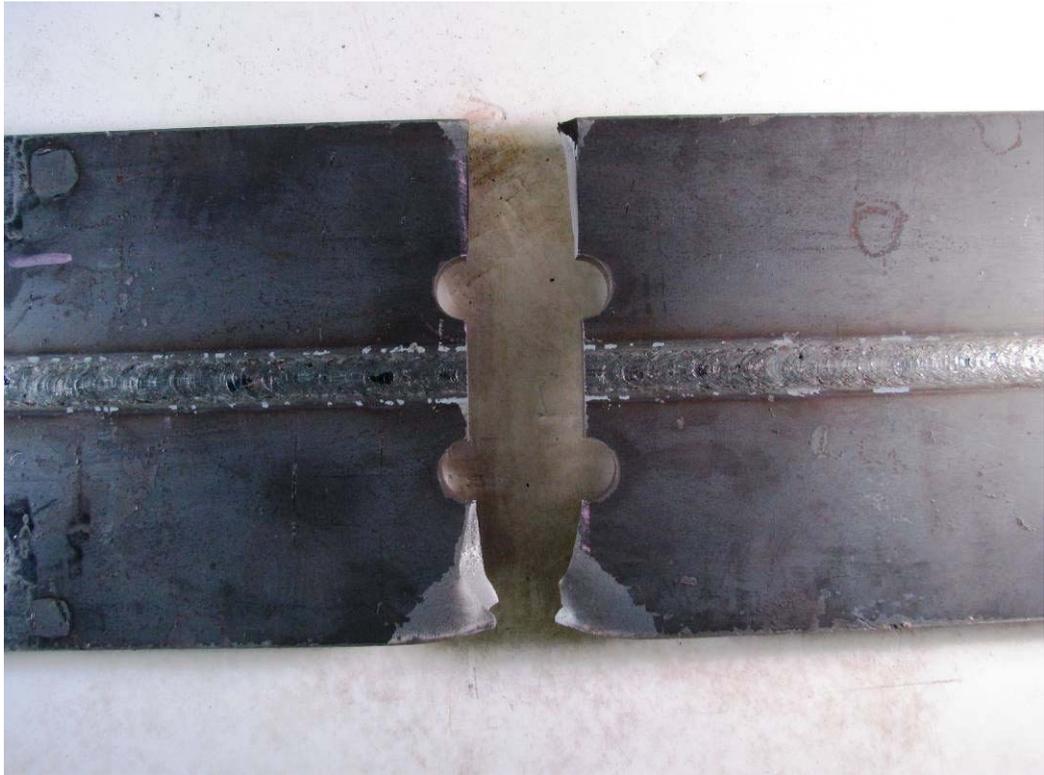


(a)正面

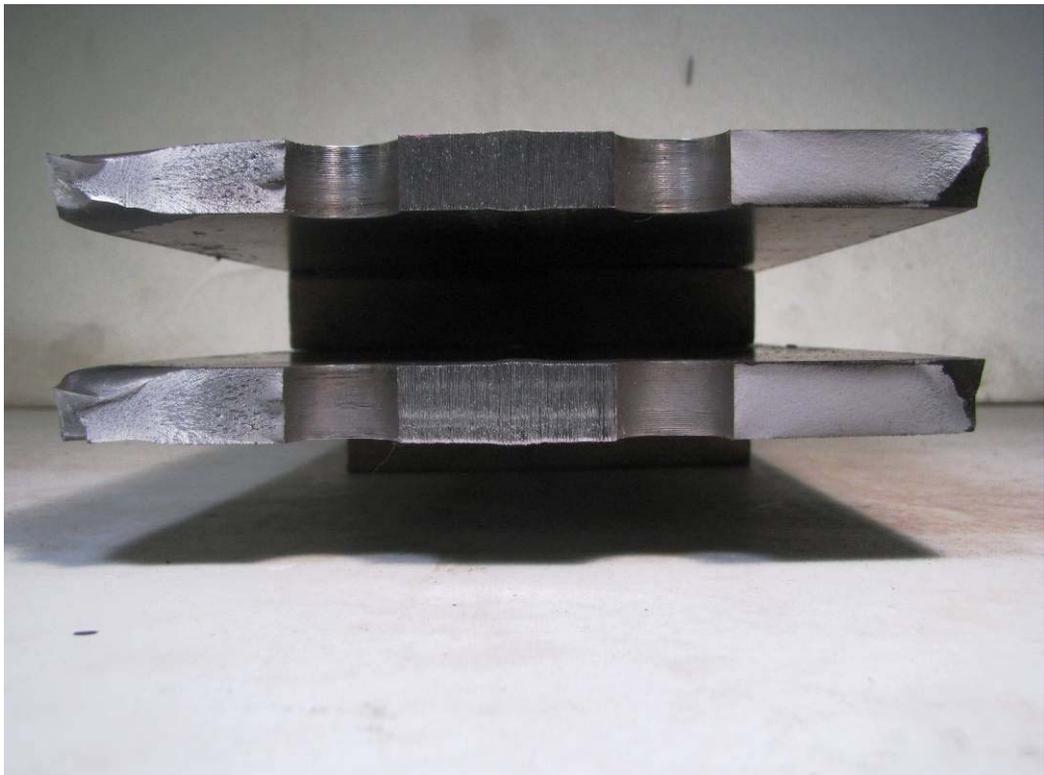


(b)破面

写真 2.14 試験体破断写真 (FCA10)

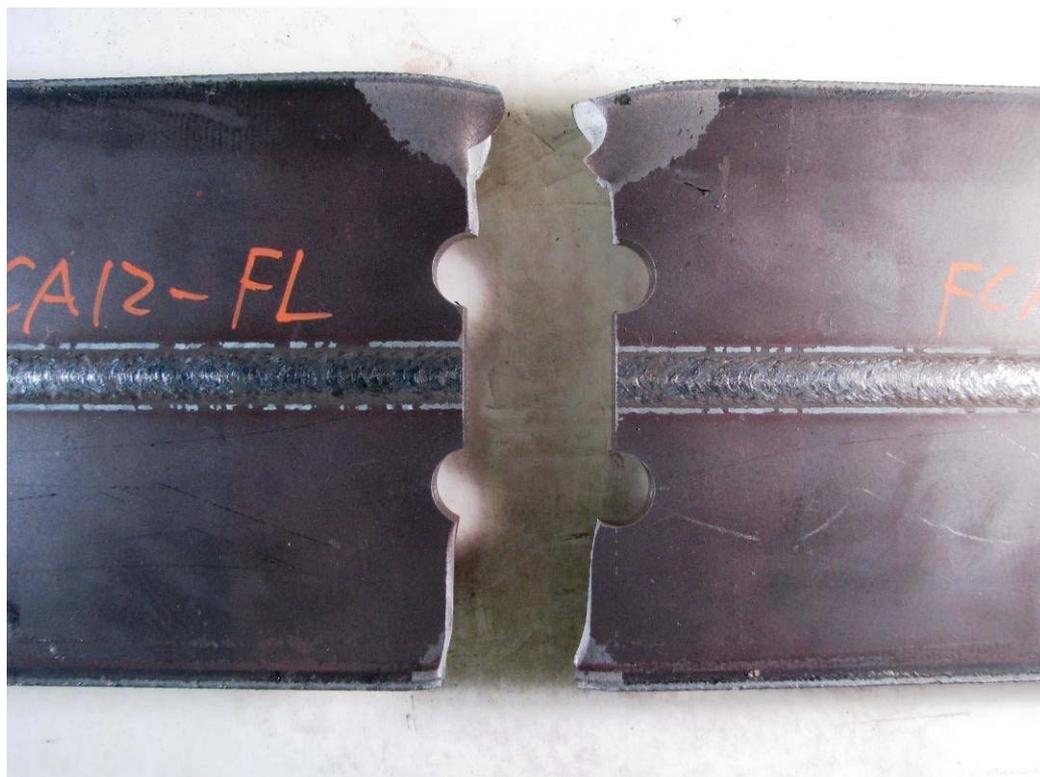


(a)正面

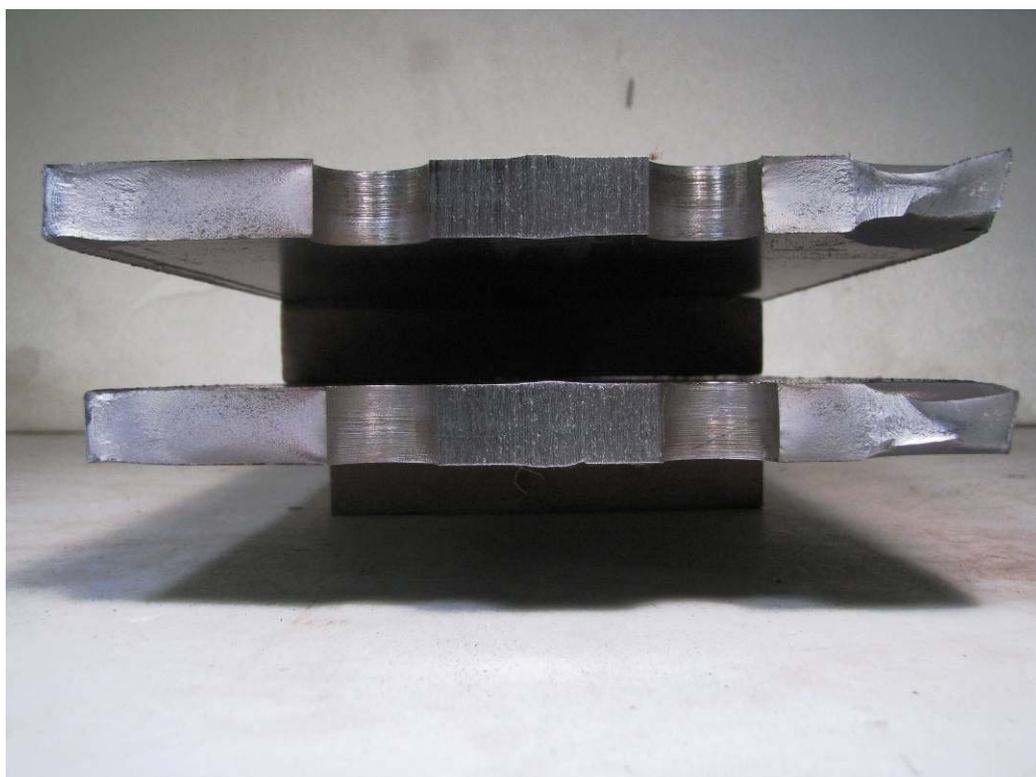


(b)破面

写真 2.15 試験体破断写真 (FCA11)



(a)正面



(b)破面

写真 2.16 試験体破断写真 (FCA12)

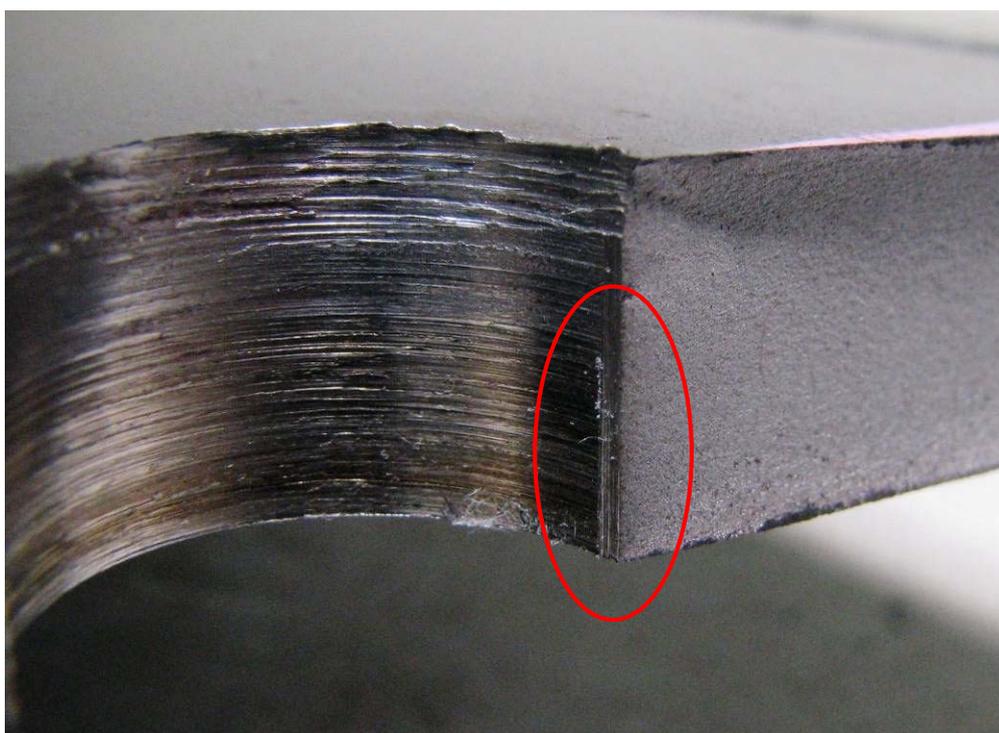


写真 2.17 円孔壁の傷



写真 2.18 円孔壁の状態



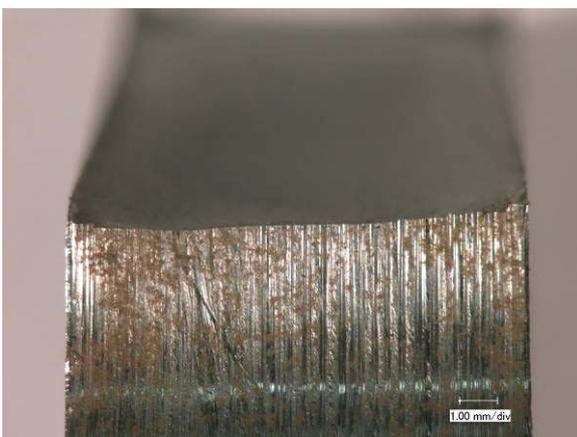
(a)試験体外観



(b)A側 疲労破面

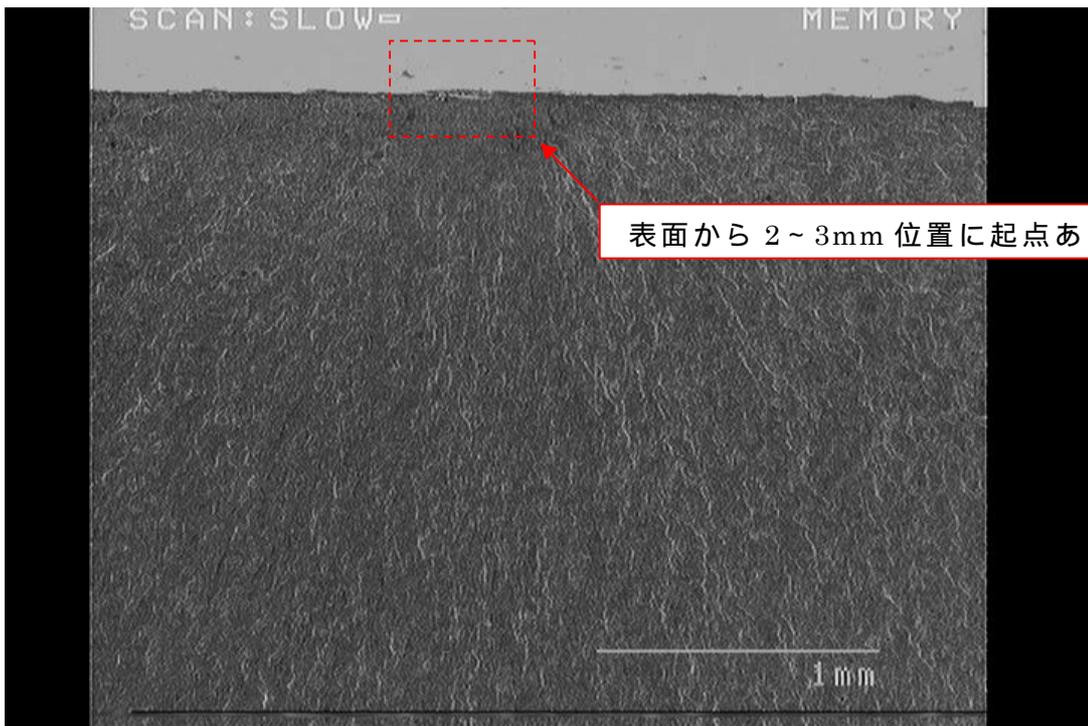


(c)B側 延性破面

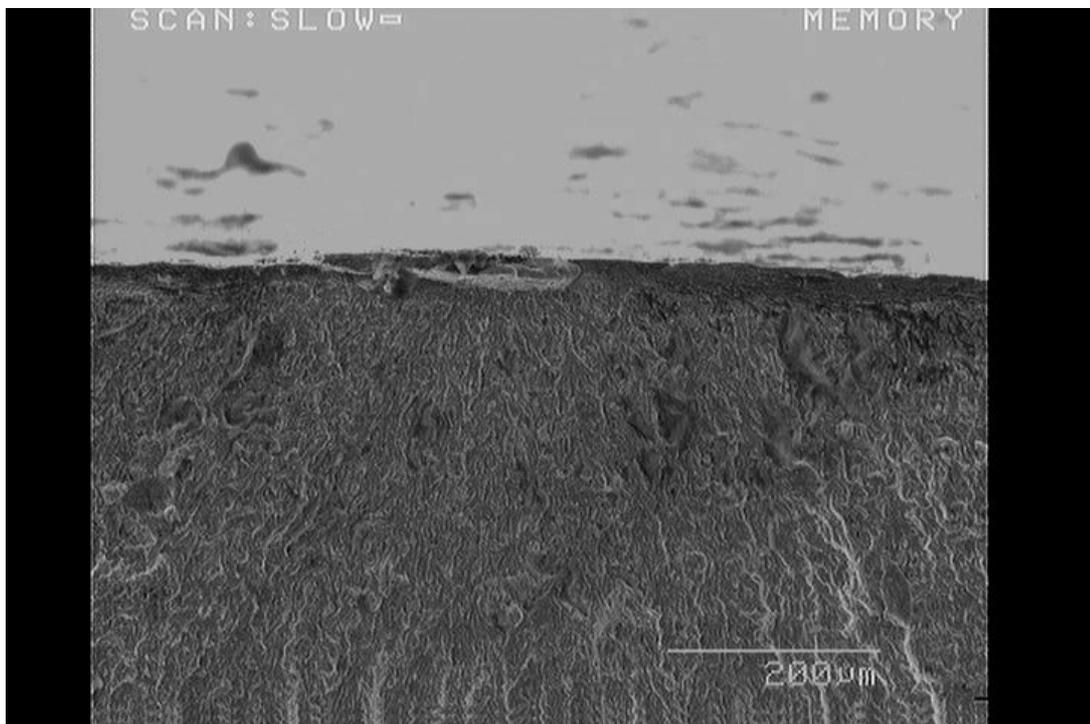


(d)き裂発生点近傍の状態

写真 2.19 FCA02 破面観察 (その1)

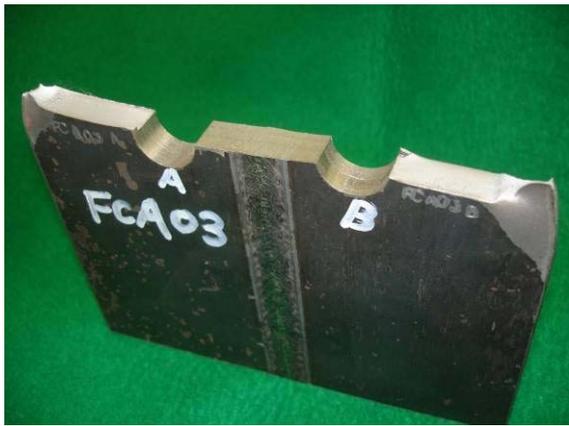


(e)SEM 低倍観察結果

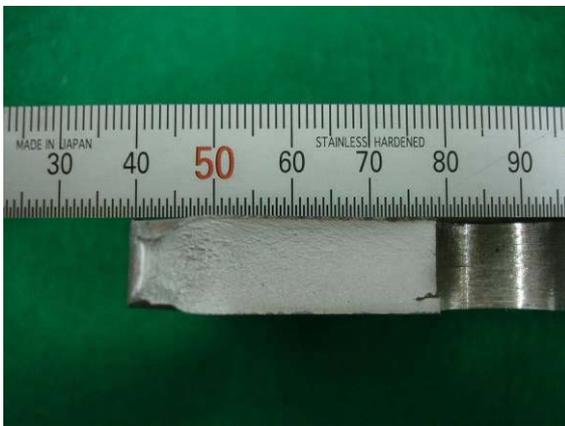


(f)SEM 高倍観察結果

写真 2.20 FCA02 破面観察 (その 2 )



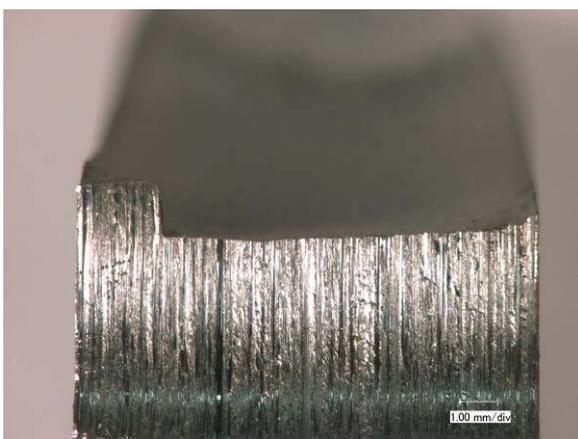
(a)試験体外観



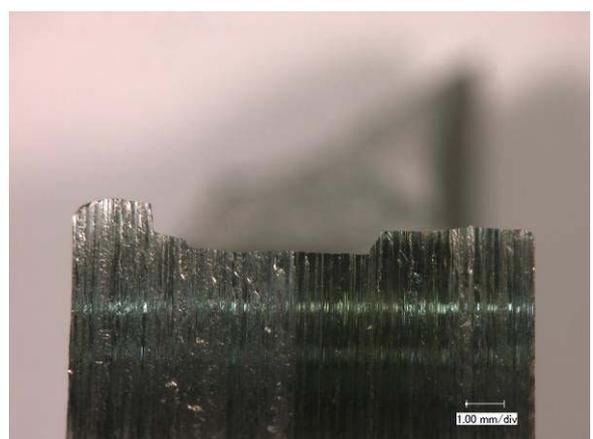
(b)A側 疲労破面



(c)B側 疲労破面



(d)A側 き裂発生点近傍の状態

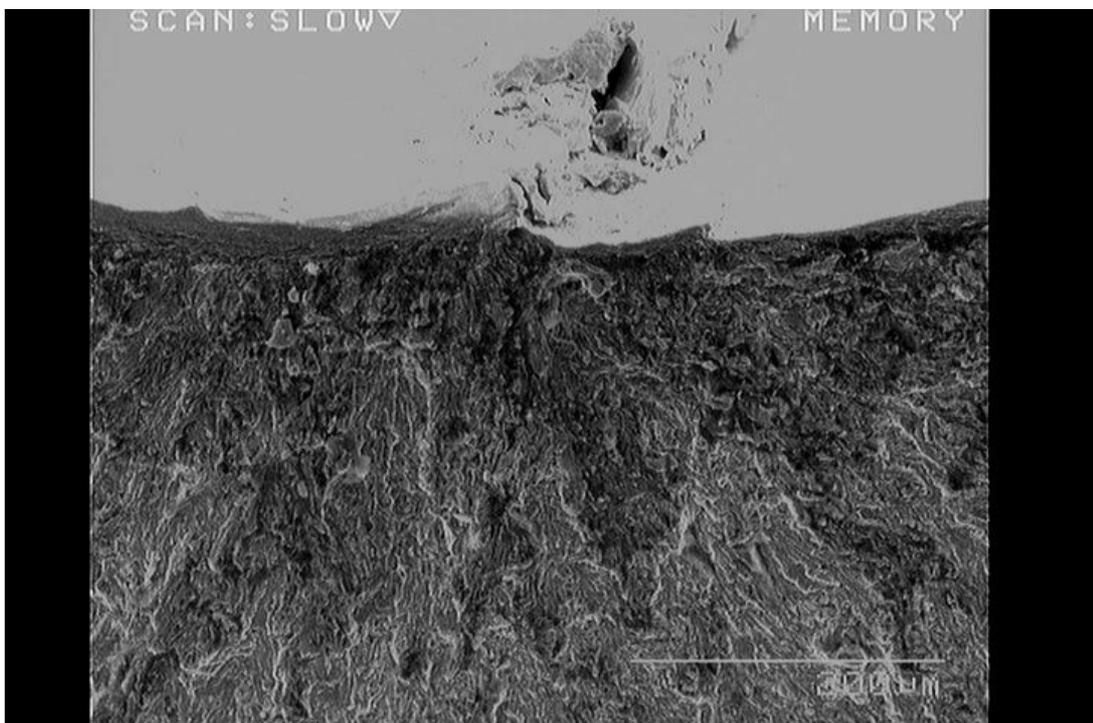


(e)B側 き裂発生点近傍の状態

写真 2.21 FCA03 破面観察 (その 1)



(f)A側 左側段差の疲労き裂発生位置



(g)B側 中央段差の疲労き裂発生位置

写真 2.22 FCA03 破面観察 (その 2)

## 第3章 耐疲労鋼の疲労き裂進展特性

### 3.1 供試鋼材

供試鋼材は、板厚 12mm の耐疲労鋼 SM490YA-FCA (降伏応力  $433\text{N/mm}^2$ 、引張強度  $591\text{N/mm}^2$ ) である。鋼材の化学成分を表 3.1 に、機械的性質を表 3.2 に示す。

### 3.2 試験体

試験体は、供試鋼材から長さ 320mm、幅 80mm の板をガス切断により切り出したものである。この試験体の表裏面中央には、引張残留応力を導入する目的で TIG-dressing を行っている。TIG-dressing を行った後、試験体の中央に超硬ドリルを用いて  $\phi=5\text{mm}$  の円孔を加工している。また、疲労き裂進展試験の載荷荷重と試験機能力の関係から、フライス盤を用いて板厚を 12mm から 9mm に減厚した。その後、円孔の板幅方向両側に糸鋸あるいは放電加工を用いて長さ 2.5mm、幅は糸鋸で約 1mm、放電加工で約 0.2mm の切欠きを設けた。

9mm に減厚した試験体にはフライス盤による切削傷が残っており、き裂先端を計測するうえで妨げとなるため、試験体表面を 100～400 番の布やすり及び 600～1500 番エメリー紙を用いて研磨した。さらに、バフ研磨を行なった後、金属用研磨剤（ピカール液：日本磨科工業株式会社）により鏡面に仕上げた。また、疲労き裂の長さの測定を容易とするため、試験体長手方向にけがき針で 5mm 間隔の基準線を引いた。

図 3.1 に試験体の形状と寸法を示す。また、試験体の外観を写真 3.1 に示す。

### 3.3 残留応力の測定

#### 3.3.1 残留応力の測定方法

TIG-dressing により導入した残留応力の測定は、測定する試験体の表面をサンドペーパーで研磨した後、試験片の中央線に沿って一軸のひずみゲージ（ゲージ長 2mm）を試験片幅方向に等間隔に貼り付け、その周りを切断する方法により行なった。試験体の切断にはコンターマシン盤を用いた。試験体切断の様子を写真 3.2 に示す。

### 3.3.2 残留応力の測定結果

残留応力の測定は、板厚を減厚する前 ( $t=12\text{mm}$ ) と減厚した後 ( $t=9\text{mm}$ ) の試験体について行なった。なお、残留応力の測定に用いた試験体は、いずれも円孔を設ける前の状態である。ひずみゲージの貼付位置及び試験体の切断位置を図 3.2 に、切断後の試験体を写真 3.3 に示す。残留応力の測定は、表面と裏面で測定している。残留応力の値は、試験体切断後のひずみの読み値の差に鋼材のヤング率 ( $2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ ) を乗じることにより求めた。切断後に残留応力が開放されることにより、引張残留応力が作用している箇所は収縮し、圧縮残留応力が作用している箇所は膨張する。そのため、残留応力を求める際には、ひずみの符号を反転させて用いた。なお、ひずみの測定には、デジタルひずみ測定器 (TDS-303) を用いた。

残留応力の測定結果を表 3.3 ~ 3.4 及び図 3.3 に示す。板厚 12mm と 9mm のどちらの試験体も、TIG-dressing 部は表裏面の平均で  $260 \text{N/mm}^2$  程度の引張残留応力が生じている。TIG-dressing 部から両側に約 25mm 離れた位置では  $190 \text{N/mm}^2 \sim 230 \text{N/mm}^2$  の圧縮残留応力が生じており、試験体のコバ面でも  $60 \text{N/mm}^2 \sim 150 \text{N/mm}^2$  の圧縮残留応力が生じている。応力分布は自己平衡形となっている。以上のように、板厚を減じたことによる残留応力の顕著な変化は見られない。

### 3.4 従来鋼の疲労き裂進展特性

従来鋼の疲労き裂進展試験データは、独立行政法人物質・材料研究機構で行なわれた各種鋼材の疲労き裂進展試験データを用いた<sup>20)</sup>。ここでは、これらの試験データを取捨選択・整理し、従来鋼の疲労き裂進展特性を設定する。

#### 3.4.1 試験体

供試鋼材は、引張強度 441 ~ 824 N/mm<sup>2</sup> の広い範囲にある溶接構造用の非調質鋼 SM50B、調質鋼 HT80、圧力容器用の非調質鋼 SB42、調質鋼 SPV50 である。板厚は 10mm である。これら鋼材の化学成分を表 3.5 に、機械的性質を表 3.6 に示す。

試験体は、長さ 480mm ~ 500mm、幅 200mm の鋼板の中央にき裂を設けた鋼素材および横突合せ溶接継手である。試験体の形状と寸法を図 3.4 に示す。

#### 3.4.2 試験方法

疲労き裂進展試験は、動的能力±400kN の電気油圧サーボ式材料試験機を用いて行なわれている。荷重波形は正弦波であり、繰返し速度は 1 ~ 60Hz である。

#### 3.4.3 試験データの種類

本検討で使用した物質・材料研究機構のき裂進展試験データの一覧を表 3.7 に示す。本データには、溶接法や入熱量、応力比を変えた試験結果が示されている。非調質鋼 SM50B と調質鋼 HT80 の試験データは、溶接法と入熱量を変えた試験結果が示され、溶接法は手溶接、ガス溶接、サブマージアーク溶接の 3 種類が用いられている。このうちサブマージアーク溶接については、入熱量を 20kJ/cm、45kJ/cm、70kJ/cm とした溶接が行なわれている。圧力容器用の非調質鋼 SB42 と調質鋼 SPV50 の試験データは、応力比を R=-1、R=0、R=0.5 に変えた試験結果が示されている。また、試験部位として鋼素材、溶接金属部、熱影響部での試験結果が示され、熱処理により残留応力を除去した試験結果も示されている。

これらの試験データを用いることにより、応力比、残留応力、鋼種、試験部位、入熱量の違いが疲労き裂進展特性に及ぼす影響を比較することができる。

#### 3.4.4 da/dN- K 関係の整理

き裂は切欠きに比べて非常に鋭いため、その先端には高い応力集中が生じる。例え

ば、無限板中に長さ  $2a$  の貫通き裂が存在し、それが遠方で一様な応力  $\sigma$  を受ける場合のき裂に沿う断面のき裂先端近傍の応力分布は、次式で与えられることが知られている。

$$\sigma = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \quad (3.1)$$

$K$  は定数であり、応力拡大係数 (Stress Intensity Factor) と呼ばれ、き裂先端近傍の応力の大きさを示すパラメータである。 $K$  は (3.1) 式より次式で与えられる。

$$K = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (3.2)$$

また、一般の場合には、き裂の形状や有限板厚・板幅等に対する補正係数  $F$  で (3.2) 式を修正して、(3.3) 式により応力拡大係数  $K$  が計算される。

$$K = \sigma\sqrt{\pi a} \cdot F \quad (3.3)$$

最大応力  $\sigma_{\max}$ 、最小応力  $\sigma_{\min}$  の繰り返し応力が作用する場合を考える。 $\sigma_{\max}$  に対応する  $K$  を  $K_{\max}$ 、 $\sigma_{\min}$  に対応する  $K$  を  $K_{\min}$  とすると、応力拡大係数  $K$  の変動幅、応力拡大係数範囲  $\Delta K$  は以下の式で表される。

$$\begin{aligned} \Delta K &= K_{\max} - K_{\min} \\ &= (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})\sqrt{\pi a} \cdot F \\ &= \Delta\sigma\sqrt{\pi a} \cdot F \end{aligned} \quad (3.4)$$

なお、補正係数  $F$  を考慮した応力拡大係数範囲  $\Delta K$  の算出には、(3.5) 式に示すき裂半長  $a$  が板幅の 0 から 70% の範囲で精度が 0.5% 以内である石田の式を用いた。

$$\Delta K = \Delta\sigma\sqrt{\pi a} \sqrt{\sec\left(\frac{\pi a}{W}\right)} \quad (3.5)$$

疲労き裂進展速度  $da/dN$  は、(3.5) 式に示した応力拡大係数範囲  $\Delta K$  の関数となることが実験的に確かめられており、次のべき関数となることが Paris により示されている。

$$da/dN = C(\Delta K)^n \quad (3.6)$$

(3.6) 式を Paris 則といい、C、n は材料定数である。

種々の鋼材を対象として行われた広範な実験の結果によると、da/dN- K の関係は 3 つの領域 (図 3.5) に分けられ、Paris 則が成り立つのは中間領域 (B 領域) に限られていることが知られている。K が小さくなると da/dN も小さくなり、ついにはき裂が進展しなくなる。このときの K を下限界応力拡大係数範囲  $K_{th}$  と呼んでいる。 $K_{th}$  近傍の領域も含めて da/dN- K 関係は、一般に次式のように表される。

$$da/dN = C(\Delta K^n - \Delta K_{th}^n) \quad (3.7)$$

この式は Paris 則に比べて、K の広い範囲にわたって、精度よく疲労き裂進展速度を記述し得る。

da/dN- K 関係は以下のように 3 つの領域に分けられるのが一般的である。

A 領域：疲労き裂進展速度は、材料微視組織、応力比、環境の影響が大きい。ただし、板厚の影響は無い。

B 領域：材料微視組織、応力比、環境、板厚の影響は比較的小さい。

C 領域：材料微視組織、応力比、板厚の影響が大きく、環境の効果は小さい。

通常の鋼構造物の疲労に対する安全性の照査においては、疲労寿命の大半が疲労き裂の小さい、すなわち応力拡大係数範囲 K が小さい間に費やされるため、高 K 領域で不安定破壊に至る上限界近傍 (C 領域) よりも  $K_{th}$  を明らかにすることが重要とされている。したがって、ここでは、(3.7) 式で da/dN- K 関係を表示することとする。

#### 3.4.5 da/dN- K 関係の影響因子を考慮した試験データの選択

鋼素材の疲労き裂進展速度は、き裂閉口現象によって複雑に変化する。一方、溶接継手では引張残留応力によりき裂先端近傍に高い応力比の条件が形成されるため、き裂閉口現象が現れなくなる。そのため、溶接継手のき裂進展特性は、応力比によらず同一となるなど、単純化されることが確認されている<sup>9)</sup>。ここでは、3.4.3 項で示した試験データを用いて、応力比、残留応力、鋼種、組織、溶接法、入熱量の違いが疲

疲労き裂進展特性に及ぼす影響について検討する。その結果より、従来鋼の疲労き裂進展特性の設定に用いる試験データの選択を行なう。

#### (1) 応力比の影響

一般に、応力比  $R (= \sigma_{\min} / \sigma_{\max})$  が高くなるほど、疲労き裂進展速度  $da/dN$  は高くなる傾向にある。応力比  $R$  は大気中疲労き裂進展速度に大きな影響を及ぼす因子である。特に  $R > 0$  の場合、低速度域において  $R$  の影響が大きい。これは疲労き裂の閉口現象が低  $K$  領域で起こりやすいためである。

この応力比の影響を図 3.6 ~ 図 3.11 に示す。素材では、応力比によって  $da/dN$ -  $K$  関係が大きく異なっている。一方、溶接継手では、応力比の違いによる  $da/dN$ -  $K$  関係の差は認められない。このようなデータが得られる原因は、試験片に存在する引張残留応力の作用により、き裂先端が常に開口した状態を保つためである。

#### (2) 残留応力の影響

引張残留応力の疲労き裂進展速度  $da/dN$  への影響は、応力比  $R$  と同様に取り扱うことができる。応力比  $R$  を一定とすると、引張残留応力が疲労き裂進展速度  $da/dN$  を高くする効果は、引張残留応力が大きいほど、 $K$  が小さいほど顕著になる。これは  $R > 0$  の場合、引張残留応力の影響で疲労き裂の閉口が生じないためである。

引張残留応力の影響を図 3.12 ~ 図 3.17 に示す。ここでは、応力比  $R=0$  について比較した。鋼素材と溶接継手では、疲労き裂進展特性に明瞭な違いが見られ、特に低  $K$  領域において顕著である。また、熱処理を施した溶接金属部の疲労き裂進展特性は、SM50B と SB42 の場合、低  $K$  領域において鋼素材とほぼ同じ  $da/dN$ -  $K$  関係となっている。SPV50 では溶接金属部や熱影響部と違いが見られなかった。これは、SPV50 の残留応力除去が不完全であったためと考えられる。

#### (3) 鋼種の影響

SM50B、HT80、SB42、SPV50 の 4 鋼種の疲労き裂進展特性を図 3.18 ~ 図 3.20 に示す。このように、鋼種による  $da/dN$ -  $K$  関係の明確な違いは認められない。

#### (4) 組織の影響

同一の横突合せ溶接試験板から削り出した 2 本の試験片の内の 1 本についてはき裂が溶接金属の中央部を、他の 1 本についてはき裂が垂直開先の熱影響部中央を進展す

るような条件で得た  $da/dN$ - $K$  関係を図 3.21 ~ 図 3.24 に示す。き裂進展部位を溶接金属とした場合と熱影響部とした場合の  $da/dN$ - $K$  関係は、ほぼ同じとなっている。従って、き裂進展部位の違いによる影響は希薄だといえる。

#### (5) 溶接法の影響

溶接法を変え、被覆アーク溶接、ガスメタルアーク溶接、サブマージアーク溶接で製作した継手の疲労き裂進展特性を図 3.25 ~ 図 3.26 に示す。このように、溶接法の違いによる  $da/dN$ - $K$  関係の差は認められない。

#### (6) 入熱量の影響

溶接入熱量を変化させた場合の  $da/dN$ - $K$  関係を図 3.27 ~ 図 3.28 に示す。これらの図に示すように、入熱量の違いによる  $da/dN$ - $K$  関係の差は認められない。

以上の検討結果より、鋼素材および熱処理を施した溶接金属を除く溶接金属と熱影響部の疲労き裂進展特性は、応力比、鋼種、溶接法、入熱量の違いによる影響は希薄であることがわかった。したがって、従来鋼の疲労き裂進展特性の設定に用いる試験データは、鋼素材および熱処理を施した溶接金属を除く溶接金属と熱影響部の全試験データ (3099 点) を用いる。これらのデータを用いて、引張残留応力場にある従来鋼の疲労き裂進展特性を整理する。

#### 3.4.6 従来鋼の $da/dN$ - $K$ 関係の求め方

疲労き裂進展速度  $da/dN$  と応力拡大係数範囲  $K$  の関係式は、下限応力拡大係数範囲  $K_{th}$  を含む式 3.7 を採用し、データプロットの密度に反比例する重み付けを行なう統計手法<sup>21)</sup>により、前項で示した試験データの回帰計算を行なった。回帰計算の手順を以下に示す。

まず、(3.7) 式の両辺について対数変換を行なう。

$$\log(da/dN) = \log\{C(\Delta K^n - \Delta K_{th}^n)\}$$

$$\log(da/dN) = \log(C \cdot \Delta K^n) - \log(C \cdot \Delta K_{th}^n)$$

$$\log C + \log \Delta K^n = \log(da/dN + C \cdot \Delta K_{th}^n)$$

$$n \cdot \log \Delta K = \log(da/dN + C \cdot \Delta K_{th}^n) - \log C$$

$$\log(\Delta K) = \frac{1}{n} \log\{da/dN + C(\Delta K_{th})^n\} - \frac{1}{n} \log C \quad (3.8)$$

(3.8) 式を da/dN に対する K の回帰式  $Y = \alpha X + \beta$  にあてはめ、以下のようにおく。

$$Y = \log(\Delta K) ; X = \log(da/dN + A) ; A = C(\Delta K_{th})^n ; \alpha = \frac{1}{n} ; \beta = -\frac{1}{n} \log C$$

次に、 $C, n, K_{th}$  を決定するための手順を以下に示す。

Step 1

各データについて、対数軸 da/dN に関するデータ密度を考慮した重み付けを行なう。  
重み付けを行なうために、全データを da/dN の昇順で並び替えを行なう。

Step2

データの重み  $W_i$  は両隣の da/dN の差で求め、次式により計算する。

$$w_i = \log(da/dN)_{i+1} - \log(da/dN)_{i-1} \quad (3.9)$$

また、da/dN の最小値と最大値に対するデータの重みについては、(3.10) 式と (3.11) 式により計算する。

$$w_1 = 2\{\log(da/dN)_2 - \log(da/dN)_1\} \quad (3.10)$$

$$w_N = 2\{\log(da/dN)_N - \log(da/dN)_{N-1}\} \quad (3.11)$$

ここで、N はデータ数である。

Step3

次に、A に任意の数値を入れて寄与率  $r^2$  を (3.12) 式により計算する。ここで、A は  $r^2$  が最大となるように繰り返し計算により求める。

$$r^2 = \frac{\left( \sum_{i=1}^N w_i X_i Y_i - \frac{\sum_{i=1}^N w_i X_i \sum_{i=1}^N w_i Y_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \right)}{\left\{ \sum_{i=1}^N w_i X_i^2 - \frac{\left( \sum_{i=1}^N w_i X_i \right)^2}{\sum_{i=1}^N w_i} \right\} \left\{ \sum_{i=1}^N w_i Y_i^2 - \frac{\left( \sum_{i=1}^N w_i Y_i \right)^2}{\sum_{i=1}^N w_i} \right\}} \quad (3.12)$$

Step4

寄与率  $r^2$  が最大となる A を用いて、(3.13)式と(3.14)式により  $\alpha$  と  $\beta$  を計算する。

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^N w_i X_i Y_i - \frac{\sum_{i=1}^N w_i X_i \sum_{i=1}^N w_i Y_i}{\sum_{i=1}^N w_i}}{\sum_{i=1}^N w_i X_i^2 - \frac{\left( \sum_{i=1}^N w_i X_i \right)^2}{\sum_{i=1}^N w_i}} \quad (3.13)$$

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^N w_i Y_i}{\sum_{i=1}^N w_i} - \alpha \frac{\sum_{i=1}^N w_i X_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (3.14)$$

Step5

n、C、 $K_{th}$  は以下の式で計算する。

$$n = \frac{1}{\alpha} \quad (3.15)$$

$$C = 10^{-\beta/\alpha} \quad (3.16)$$

$$\Delta K_{th} = \left( \frac{A}{C} \right)^\alpha \quad (3.17)$$

Step6

log ( K ) に沿う標準偏差 s は、試験データと回帰曲線から求めた数値の平均二乗偏差により求め、次式により計算する。

$$s = \left( \frac{\sum_{i=1}^N \{Y_i - (\alpha X + \beta)\}^2}{N-3} \right)^{1/2} \quad (3.18)$$

### 3.4.7 従来鋼疲労き裂進展特性の整理結果

先に示した 3099 点のデータを用い、上記の方法で求めた C、n、 $K_{th}$  は、 $C=1.43 \times 10^{-11}$ 、 $n=2.74$ 、 $K_{th}=2.44$  であり、log ( K ) に沿う標準偏差は  $s=3.47 \times 10^{-2}$  であった。これらの数値を ( 3.7 ) 式に代入し、疲労き裂進展速度 da/dN と応力拡大係数範囲

K の関係式は ( 3.19 ) 式となる。図 3.29 に従来鋼の疲労き裂進展特性データと回帰計算により得られた回帰曲線を示す。図中の実線と破線は、( 3.19 ) 式による回帰曲線と 2×標準偏差離れた回帰曲線を示している。この回帰曲線を従来鋼の疲労き裂進展特性とする。なお、JSSC 指針では、平均の da/dN- K 関係に用いる場合、 $C=1.5 \times 10^{-11}$ 、 $n=2.75$ 、 $K_{th}=2.9$  と示されており、( 3.19 ) 式で与えられる関係とほぼ同じである。

$$\text{平均} \quad da / dN = 1.43 \times 10^{-11} (\Delta K^{2.74} - 2.44^{2.74}) \quad (3.19)$$

$$\text{平均}-2s \quad da / dN = 2.22 \times 10^{-11} (\Delta K^{2.74} - 2.08^{2.74})$$

$$\text{平均}+2s \quad da / dN = 9.25 \times 10^{-12} (\Delta K^{2.74} - 2.86^{2.74})$$

### 3.5 耐疲労鋼の疲労き裂進展試験

#### 3.5.1 試験方法

疲労き裂進展試験は、写真 3.4 に示す動的能力 $\pm 100\text{kN}$ の電気油圧サーボ式材料試験機 (SV-10T、丸東製作所) を用いて行った。荷重波形は正弦波であり、繰り返し速度は 2~20Hz とした。き裂長さの測定には、測定精度 0.01mm の読み取り顕微鏡 ( $\times 50$ ) を用いた。測定箇所は、試験片表裏面のき裂両端の合計 4ヶ所について行った。写真 3.5 には、疲労き裂の測定状況を示す。

疲労き裂進展試験は、荷重範囲一定および荷重範囲漸減試験をそれぞれ 2 体ずつ計 4 体を用いて行った。荷重範囲一定試験に用いた試験体を T1 試験体と T3 試験体と称し、荷重範囲漸減試験に用いた試験体を T2 試験体と T4 試験体と称する。荷重範囲一定試験は上限荷重 74kN、下限荷重 5kN の一定振幅荷重とし、この荷重条件において

$K$  が  $10 \sim 60\text{MN/m}^{3/2}$  での進展速度が計測できる。き裂進展速度は、き裂進展量が片側で 0.25mm 程度進展するごとに試験機を止め、測定したき裂進展量を繰り返し載荷回数で除して求めた。また、荷重範囲漸減試験では、下限荷重を 5kN で一定とし、上限荷重を 74kN よりき裂が片側で約 0.25mm 伸びるごとに 5% ずつ階段状に荷重範囲を減少させる条件下で行った。この試験により、疲労き裂進展の限界値である下限界応力拡大係数近傍の  $da/dN$ - $K$  関係を調べることができる。図 3.30 に荷重範囲漸減試験における荷重範囲  $P$  とき裂長さの関係を示す。

#### 3.5.2 疲労き裂進展試験結果

T1 試験体で測定したき裂長さと荷重繰り返し数を表 3.8 に、T2 試験体の測定結果を表 3.9 に、T3 試験体の測定結果を表 3.10 に、T4 試験体の測定結果を表 3.11 に示す。図 3.31 と図 3.32 には、荷重範囲一定試験と荷重範囲漸減試験で行なった疲労き裂長さ  $2a$  と繰り返し載荷回数  $N$  の関係を示す。ここで、き裂長さ  $2a$  は左側のき裂長さ  $a_L$  と右側のき裂長さ  $a_R$  の合計である。荷重範囲一定条件下では、荷重の繰り返し載荷回数の増加に伴いき裂その成長を早める傾向が認められる。荷重範囲漸減条件下では、荷重の繰り返し載荷の増加によりき裂は進展するが、最終的に進展は遅くなり、やがて停止する傾向がわかる。なお、T1 試験体と T3 試験体および T2 試験体と T4 試験体では、繰り返し載荷回数  $N$  と疲労き裂長さ  $2a$  の関係について同じ傾向を示しているものの、数値には違いが見られる。これは、試験開始前に発生させた初期き裂の大きさが異なることが原因であると思われる。なお、いずれの試験体においても左右でき裂長さが大

大きく異なることはなかった。また、表裏においてもき裂長さの顕著な差はなかった。試験体の破面写真を写真 3.6 に示す。

耐疲労鋼と従来鋼のき裂進展特性を比較するために、耐疲労鋼の疲労き裂進展速度  $da/dN$  と応力拡大係数範囲  $K$  の関係を整理する。応力拡大係数範囲  $K$  は (3.19) 式により求めた。(3.20) 式は (3.5) 式の石田の式に比べ、き裂が長い領域においても高い精度の解 (0.1% の誤差) を得ることができる。

$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \left\{ 1 - 0.025 \left( \frac{2a}{W} \right)^2 + 0.06 \left( \frac{2a}{W} \right)^4 \right\} \sqrt{\sec \left( \frac{\pi a}{W} \right)} \quad (3.20)$$

ここで、

- $\Delta \sigma$  : 公称応力 (N/mm<sup>2</sup>) 【= P/A】
- $W$  : 試験片の板幅 (mm)
- $P$  : 荷重範囲 (N)
- $A$  : 試験片の断面積 (mm<sup>2</sup>)

なお、疲労き裂長さが  $a_i$  から  $a_{i+1}$  に進展する際の応力拡大係数範囲  $K$  は、(3.20) 式に示すように 2.75 乗平均の 2.75 乗根を用いて求めた。

$$\Delta K = \sqrt[2.75]{\left( \frac{\Delta K_i^{2.75} + \Delta K_{i+1}^{2.75}}{2} \right)} \quad (3.20)$$

疲労き裂進展速度  $da/dN$  の計算に用いる  $da = a$  は以下のように求めた。

$$\begin{aligned} \Delta a_L &= a_{L(n+1)} - a_{L(n)} \\ \Delta a_R &= a_{R(n+1)} - a_{R(n)} \\ \Delta a &= (\Delta a_L + \Delta a_R) / 2 \end{aligned} \quad (3.21)$$

ここで、 $a_L$  は左側のき裂進展量、 $a_R$  は右側のき裂進展量を示す。なお、左右のき裂長およびき裂進展量は表裏面の平均とした。

疲労き裂進展速度  $da/dN$  は  $a$  成長するのに要した繰返し回数を  $n$  とした場合、

$$da/dN = \Delta a / \Delta n \quad (3.22)$$

として求められる。

以上の算出方法で求めた疲労き裂進展試験による  $da/dN$  と  $K$  の値を表 3.12～表 3.15 に示す。表 3.12 は T1 試験体、表 3.13 は T2 試験体、表 3.14 は T3 試験体、表 3.15 は T4 試験体の数値を示す。また、耐疲労鋼の  $da/dN$ -  $K$  データをプロットしたものを図 3.33～図 3.34 に示す。図 3.33 は T1 試験体と T2 試験体、図 3.34 は T3 試験体と T4 試験体の  $da/dN$ -  $K$  関係を示す。これら耐疲労鋼の 262 点のデータを用いて、3.4.6 項の方法で求めた  $C$ 、 $n$ 、 $K_{th}$  は、 $C=1.21 \times 10^{-11}$ 、 $n=2.79$ 、 $K_{th}=2.35$  であり、 $\log(K)$  に沿う標準偏差は  $s=3.41 \times 10^{-2}$  であった。疲労き裂進展速度  $da/dN$  と応力拡大係数範囲  $K$  の関係式は (3.23) 式となる。図 3.35 に耐疲労鋼の  $da/dN$ -  $K$  データと回帰計算により得られた回帰曲線を示す。図中の赤い実線と破線は、(3.23) 式による回帰曲線と  $2 \times$  標準偏差離れた回帰曲線を示している。 $da/dN$ -  $K$  関係に試験体による差は認められない。図 3.36 に耐疲労鋼の  $da/dN$ -  $K$  データと (3.19) 式による従来鋼の回帰曲線を示す。T1 試験体と T2 試験体の  $da/dN$ -  $K$  データには多少のばらつきが見られるものの、4 体の試験体の  $da/dN$ -  $K$  データの多くが、従来鋼の  $2 \times$  標準偏差の破線内に位置している。この結果より、耐疲労鋼の疲労き裂進展特性は従来鋼と同じであると判断できる。

この結果は、長いき裂に対しては、き裂先端に常に誘起される引張残留応力による応力比効果によりき裂先端が常に開口しているため、結晶組織の影響を受けずにき裂が進展したと考えられる。

$$\text{平均} \quad da/dN = 1.21 \times 10^{-11} (\Delta K^{2.79} - 2.35^{2.79}) \quad (3.23)$$

$$\text{平均}-2s \quad da/dN = 1.87 \times 10^{-11} (\Delta K^{2.79} - 2.01^{2.79})$$

$$\text{平均}+2s \quad da/dN = 7.79 \times 10^{-12} (\Delta K^{2.79} - 2.75^{2.79})$$

表 3.1 鋼材の化学成分

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ti	Nb	B	PCM
	×100			×1000		×100					×1000		×10000	×100
SM490Y-FCA	4	42	152	8	2	2	2	17	1	0	8	-	1	14

表 3.2 鋼材の機械的性質

	降伏応力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
SM490YA-FCA	433	591	17

表 3.3 板厚 12mm 試験体の残留応力測定結果

(a)表面

ゲージ 番号	16	1	2	3	4	5	6	7	15
中心から の距離 (mm)	-40.0	-36.0	-24.0	-12.0	0.0	12.0	24.0	36.0	40.0
ひずみ ( $\mu$ )	324	2115	1064	-931	-1282	-738	1050	754	324
残留応力 ( $N/mm^2$ )	-64.8	-423.0	-212.8	186.2	256.4	147.6	-210.0	-150.8	-64.8

(b)裏面

ゲージ 番号	16	14	13	12	11	10	9	8	15
中心から の距離	-40.0	-36.0	-24.0	-12.0	0.0	12.0	24.0	36.0	40.0
ひずみ	324	499	1043	-887	-1354	-1396	998	791	324
残留応力 ( $N/mm^2$ )	-64.8	-99.8	-208.6	177.4	270.8	279.2	-199.6	-158.2	-64.8

(c)表裏面の平均

ゲージ 番号	16	1 14	2 13	3 12	4 11	5 10	6 9	7 8	15
中心から の距離	-40.0	-36.0	-24.0	-12.0	0.0	12.0	24.0	36.0	40.0
ひずみ	324	1307	1054	-909	-1318	-1067	1024	773	324
残留応力 ( $N/mm^2$ )	-64.8	-261.4	-210.7	181.8	263.6	213.4	-204.8	-154.5	-64.8

表 3.4 板厚 9mm 試験体の残留応力測定結果

(a)表面

ゲージ 番号	16	1	2	3	4	5	6	7	15
中心から の距離 (mm)	-40.0	-36.0	-24.0	-12.0	0.0	12.0	24.0	36.0	40.0
ひずみ ( $\mu$ )	727	909	1099	-717	-1397	-325	1026	720	441
残留応力 ( $N/mm^2$ )	-145.4	-181.8	-219.8	143.4	279.4	65.0	-205.2	-144.0	-88.2

(b)裏面

ゲージ 番号	16	14	13	12	11	10	9	8	15
中心から の距離 (mm)	-40.0	-36.0	-24.0	-12.0	0.0	12.0	24.0	36.0	40.0
ひずみ ( $\mu$ )	727	783	1183	-691	-1167	-1270	897	908	441
残留応力 ( $N/mm^2$ )	-145.4	-156.6	-236.6	138.2	233.4	254.0	-179.4	-181.6	-88.2

(c)表裏面の平均

ゲージ 番号	16	1 14	2 13	3 12	4 11	5 10	6 9	7 8	15
中心から の距離 (mm)	-40.0	-36.0	-24.0	-12.0	0.0	12.0	24.0	36.0	40.0
ひずみ ( $\mu$ )	727	846	1141	-704	-1282	-798	962	814	441
残留応力 ( $N/mm^2$ )	-145.4	-169.2	-228.2	140.8	256.4	159.5	-192.3	-162.8	-88.2

表 3.5 従来鋼の化学成分

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al	O	N	B
	×100			×1000		×100					×1000	×10000		
SM50B	15	37	136	20	5	1	3	2	0.1	-	-	18	77	-
HT80	12	32	85	13	3	20	80	48	41	4	56	-	-	7
SB42	17	19	81	15	7	-	1	2	0.1	0.1	-	-	-	-
SPV50	12	28	122	19	4	-	2	1	11	3	-	-	-	-

表 3.6 従来鋼の機械的性質

	降伏応力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
SM50B	372	530	25
HT80	784	824	31
SB42	284	441	35
SPV50	579	628	40

表 3.7 従来鋼のき裂進展試験データの種類

データシート	鋼種			1	2	3	4	5
No.21	SM50B	a	手溶接	鋼素材	溶接金属	熱影響部		
		b	ガス溶接		溶接金属	熱影響部		
		c	サブマージアーク溶接(20 kJ/cm)		溶接金属	熱影響部		
		d	サブマージアーク溶接(45 kJ/cm)		溶接金属	熱影響部		
		e	サブマージアーク溶接(70 kJ/cm)		溶接金属	熱影響部	溶接金属(熱処理)	

データシート	鋼種			1	2	3	4	5
No.31	HT80	a	手溶接	鋼素材	溶接金属	熱影響部		
		b	ガス溶接		溶接金属	熱影響部		
		c	サブマージアーク溶接(20 kJ/cm)		溶接金属	熱影響部		
		d	サブマージアーク溶接(45 kJ/cm)		溶接金属	熱影響部		
		e	サブマージアーク溶接(70 kJ/cm)		溶接金属	熱影響部		

データシート	鋼種			1	2	3	4	5
No.41	SB42	a	応力比:R=-1	鋼素材	溶接金属	熱影響部	溶接金属(熱処理)	
		b	応力比:R=0	鋼素材	鋼素材(熱処理)	溶接金属	熱影響部	溶接金属(熱処理)
		c	応力比:R=0.5	鋼素材	溶接金属	熱影響部	溶接金属(熱処理)	

データシート	鋼種			1	2	3	4	5
No.46	SPV50	a	応力比:R=-1	鋼素材	溶接金属	熱影響部	溶接金属(熱処理)	
		b	応力比:R=0	鋼素材	鋼素材(熱処理)	溶接金属	熱影響部	溶接金属(熱処理)
		c	応力比:R=0.5	鋼素材	溶接金属	熱影響部	溶接金属(熱処理)	

□黄色着色部は，従来鋼の疲労き裂進展特性を設定する際に使用したデータを示す．

表 3.8 疲労き裂進展試験結果 ( T1 試験体 : 荷重範囲一定 )

荷重範囲 $\Delta P(\text{kN})$	载荷回数 $N(\text{cycle})$	左		右		平均 き裂進展量 $\Delta a(\text{mm})$
		き裂長 $aL(\text{mm})$	き裂進展量 $\Delta aL(\text{mm})$	き裂長 $aL(\text{mm})$	き裂進展量 $\Delta aL(\text{mm})$	
69.0	初期	5.79		6.75		
	10000	6.04	0.25	7.01	0.26	0.26
	10000	6.31	0.27	7.34	0.33	0.30
	10000	6.59	0.28	7.68	0.34	0.31
	10000	6.85	0.26	8.07	0.39	0.32
	10000	7.10	0.25	8.48	0.41	0.33
	8000	7.30	0.20	8.69	0.21	0.21
	8000	7.50	0.20	8.90	0.21	0.21
	8000	7.76	0.26	9.16	0.26	0.26
	8000	8.08	0.32	9.48	0.32	0.32
	8000	8.47	0.39	9.86	0.38	0.38
	7000	8.73	0.26	10.10	0.24	0.25
	7000	9.02	0.29	10.33	0.23	0.26
	7000	9.24	0.22	10.63	0.30	0.26
	7000	9.40	0.16	10.97	0.34	0.25
	7000	9.64	0.24	11.36	0.39	0.32
	7000	9.76	0.12	11.70	0.34	0.23
	7000	9.89	0.13	11.97	0.27	0.20
	7000	10.28	0.39	12.32	0.35	0.37
	5500	10.54	0.26	12.63	0.31	0.29
	5500	10.77	0.23	13.16	0.53	0.38
	5000	10.98	0.21	13.76	0.60	0.41
	5000	11.30	0.32	14.14	0.38	0.35
	5000	11.66	0.36	14.72	0.58	0.47
	4000	11.92	0.26	15.07	0.35	0.31
	4000	12.26	0.34	15.45	0.38	0.36
	3000	12.50	0.24	15.75	0.30	0.27
	3000	12.78	0.28	16.06	0.31	0.29
	3000	13.04	0.26	16.35	0.29	0.28
	3000	13.25	0.21	16.68	0.33	0.27
3000	13.50	0.25	17.02	0.34	0.29	
3000	13.67	0.17	17.35	0.33	0.25	
3000	13.86	0.19	17.70	0.35	0.27	
3000	14.11	0.25	18.10	0.40	0.33	

表 3.8 疲労き裂進展試験結果 ( T1 試験体 : 荷重範囲一定 )

荷重範囲 $\Delta P(\text{kN})$	載荷回数 $N(\text{cycle})$	左		右		平均 き裂進展量 $\Delta a(\text{mm})$
		き裂長 $aL(\text{mm})$	き裂進展量 $\Delta aL(\text{mm})$	き裂長 $aL(\text{mm})$	き裂進展量 $\Delta aL(\text{mm})$	
69.0	2500	14.26	0.15	18.28	0.18	0.16
	2500	14.48	0.22	18.56	0.28	0.25
	2500	14.72	0.24	18.87	0.31	0.28
	2500	14.95	0.23	19.21	0.34	0.28
	2500	15.16	0.21	19.55	0.34	0.27
	2500	15.39	0.23	19.90	0.35	0.29
	2500	15.62	0.23	20.26	0.36	0.30
	2500	15.86	0.24	20.61	0.35	0.29
	2500	16.09	0.23	20.97	0.36	0.29
	2500	16.32	0.23	21.39	0.42	0.33
	2500	16.61	0.29	21.85	0.46	0.37
	2500	16.89	0.28	22.29	0.44	0.36
	2500	17.15	0.26	22.68	0.39	0.32
	2500	17.53	0.38	23.25	0.57	0.48
	2000	17.81	0.28	23.60	0.35	0.32
	2000	18.07	0.26	24.02	0.42	0.34
	2000	18.33	0.26	24.42	0.40	0.33
	2000	18.60	0.27	24.79	0.37	0.32
	2000	18.85	0.25	25.37	0.58	0.41
	2000	19.23	0.38	25.75	0.38	0.38
	2000	19.50	0.27	26.26	0.51	0.39
	2000	19.87	0.37	26.86	0.60	0.49
	2000	20.20	0.33	27.51	0.65	0.49
	2000	20.79	0.59	28.13	0.62	0.60
	1500	21.00	0.21	28.65	0.52	0.37
	1500	21.30	0.30	29.21	0.56	0.43
	1500	21.61	0.31	29.90	0.69	0.50
	1500	21.92	0.31	30.67	0.77	0.54
	1000	22.22	0.30	31.32	0.65	0.48
	1000	22.60	0.38	32.01	0.69	0.53
1000	22.99	0.39	32.73	0.72	0.56	
1000	23.44	0.45	33.64	0.91	0.68	

表 3.9 疲労き裂進展試験結果 ( T2 試験体 : 荷重範囲漸減 )

荷重範囲 $\Delta P(\text{kN})$	載荷回数 N(cycle)	左		右		平均 き裂進展量 $\Delta a(\text{mm})$
		き裂長 aL(mm)	き裂進展量 $\Delta aL(\text{mm})$	き裂長 aL(mm)	き裂進展量 $\Delta aL(\text{mm})$	
69.0	初期	5.11		7.11		
69.0	15000	5.42	0.31	7.42	0.31	0.31
65.3	15000	5.61	0.19	7.62	0.20	0.20
61.8	36000	5.95	0.34	8.00	0.38	0.36
58.4	30000	6.23	0.28	8.29	0.29	0.29
55.3	40000	6.60	0.37	8.70	0.41	0.39
52.3	50000	7.00	0.40	9.14	0.44	0.42
49.4	55000	7.56	0.56	9.73	0.59	0.57
46.7	60000	8.16	0.60	10.54	0.81	0.71
44.1	60000	8.77	0.61	11.07	0.53	0.57
41.6	60000	9.15	0.38	11.53	0.46	0.42
39.3	50000	9.82	0.67	11.93	0.40	0.54
37.1	35000	9.98	0.16	12.14	0.21	0.19
35.0	60000	10.19	0.21	12.57	0.43	0.32
33.0	65000	10.50	0.31	12.85	0.28	0.30
31.1	65000	10.83	0.33	13.16	0.31	0.32
29.3	70000	11.10	0.27	13.53	0.37	0.32
27.6	70000	11.49	0.39	13.81	0.28	0.34
25.9	70000	11.66	0.17	14.03	0.22	0.19
24.4	75000	12.11	0.45	14.52	0.49	0.47
22.9	80000	12.28	0.17	14.64	0.12	0.15
21.5	90000	12.54	0.26	14.84	0.20	0.23
20.2	100000	12.82	0.28	15.01	0.17	0.23
18.9	105000	13.04	0.22	15.10	0.09	0.16
17.7	240000	13.48	0.44	15.53	0.43	0.43
16.6	180000	13.69	0.21	16.25	0.72	0.47
15.5	190000	14.09	0.40	16.44	0.19	0.30
14.5	200000	14.33	0.24	16.64	0.20	0.22
13.5	210000	14.62	0.29	16.87	0.23	0.26
12.6	250000	14.86	0.24	17.01	0.14	0.19
11.7	270000	15.04	0.18	17.12	0.11	0.14
10.9	300000	15.22	0.18	17.44	0.32	0.25
10.1	400000	15.40	0.18	17.61	0.17	0.17
9.3	630000	15.60	0.20	17.76	0.15	0.18
8.6	750000	15.80	0.20	17.97	0.21	0.20
7.9	1000000	15.95	0.15	18.13	0.16	0.16
7.3	1500000	16.04	0.09	18.22	0.09	0.09
6.7	3500000	16.15	0.11	18.34	0.12	0.11
6.1	5000000	16.28	0.13	18.46	0.12	0.13

表 3.10 疲労き裂進展試験結果 ( T3 試験体 : 荷重範囲一定 )

荷重範囲 $\Delta P(\text{kN})$	载荷回数 $N(\text{cycle})$	左		右		平均 き裂進展量 $\Delta a(\text{mm})$
		き裂長 $a_L(\text{mm})$	き裂進展量 $\Delta a_L(\text{mm})$	き裂長 $a_R(\text{mm})$	き裂進展量 $\Delta a_R(\text{mm})$	
69.0	初期	5.39		5.34		
	15000	5.52	0.13	5.47	0.13	0.13
	15000	5.69	0.17	5.62	0.15	0.16
	15000	5.86	0.17	5.78	0.16	0.17
	15000	6.05	0.19	6.05	0.27	0.23
	15000	6.28	0.23	6.27	0.22	0.23
	15000	6.49	0.21	6.49	0.22	0.22
	12000	6.66	0.17	6.71	0.22	0.20
	12000	6.87	0.21	6.92	0.21	0.21
	12000	7.07	0.20	7.16	0.24	0.22
	10000	7.25	0.18	7.38	0.22	0.20
	10000	7.43	0.18	7.61	0.23	0.21
	10000	7.69	0.26	7.84	0.23	0.25
	9000	7.81	0.12	7.99	0.15	0.14
	9000	8.08	0.27	8.20	0.21	0.24
	8000	8.29	0.21	8.39	0.19	0.20
	8000	8.48	0.19	8.58	0.19	0.19
	8000	8.66	0.18	8.77	0.19	0.18
	8000	8.85	0.19	8.97	0.20	0.20
	8000	9.13	0.28	9.23	0.26	0.27
	7000	9.27	0.14	9.40	0.17	0.16
	7000	9.49	0.22	9.65	0.25	0.23
	7000	9.73	0.24	9.84	0.19	0.22
	6000	9.90	0.17	10.04	0.20	0.18
	6000	10.10	0.20	10.20	0.16	0.18
	6000	10.30	0.20	10.37	0.17	0.19
	6000	10.52	0.22	10.62	0.25	0.23
	5000	10.64	0.12	10.79	0.17	0.15
	5000	10.81	0.17	10.94	0.15	0.16
	5000	11.04	0.23	11.18	0.24	0.23
4000	11.18	0.14	11.33	0.15	0.15	
4000	11.35	0.17	11.47	0.14	0.16	
4000	11.48	0.13	11.67	0.20	0.16	
4000	11.65	0.17	11.87	0.20	0.19	

表 3.10 疲労き裂進展試験結果 ( T3 試験体 : 荷重範囲一定 )

荷重範囲 $\Delta P(\text{kN})$	载荷回数 $N(\text{cycle})$	左		右		平均 き裂進展量 $\Delta a(\text{mm})$
		き裂長 $aL(\text{mm})$	き裂進展量 $\Delta aL(\text{mm})$	き裂長 $aL(\text{mm})$	き裂進展量 $\Delta aL(\text{mm})$	
69.0	4000	11.86	0.21	12.08	0.21	0.21
	4000	12.05	0.19	12.25	0.17	0.18
	4000	12.23	0.18	12.47	0.22	0.20
	4000	12.40	0.17	12.58	0.11	0.14
	4000	12.58	0.18	12.83	0.25	0.22
	4000	12.81	0.23	13.06	0.23	0.23
	4000	13.01	0.20	13.26	0.20	0.20
	4000	13.22	0.21	13.54	0.28	0.24
	3000	13.45	0.23	13.74	0.20	0.22
	3000	13.59	0.14	13.84	0.10	0.12
	3000	13.76	0.17	14.07	0.23	0.20
	3000	13.95	0.19	14.38	0.31	0.25
	2500	14.09	0.14	14.49	0.11	0.13
	2500	14.27	0.18	14.73	0.24	0.21
	2500	14.47	0.20	14.91	0.18	0.19
	2500	14.63	0.16	15.14	0.23	0.20
	2500	14.86	0.23	15.28	0.14	0.18
	2500	15.03	0.17	15.52	0.24	0.20
	2500	15.21	0.18	15.76	0.24	0.21
	2500	15.45	0.24	15.98	0.22	0.23
	2000	15.62	0.17	16.14	0.16	0.16
	2000	15.81	0.19	16.31	0.17	0.18
	2000	16.02	0.21	16.53	0.22	0.22
	2000	16.17	0.15	16.66	0.13	0.14
	2000	16.30	0.13	16.88	0.22	0.18
	2000	16.52	0.22	17.07	0.19	0.21
	2000	16.73	0.21	17.28	0.21	0.21
	2000	16.92	0.19	17.45	0.17	0.18
	2000	17.08	0.16	17.68	0.23	0.19
	2000	17.30	0.22	17.93	0.25	0.24
	2000	17.49	0.19	18.13	0.20	0.19
	2000	17.73	0.24	18.36	0.23	0.24
1500	17.91	0.18	18.50	0.14	0.16	
1500	18.01	0.10	18.67	0.17	0.14	

表 3.10 疲労き裂進展試験結果 ( T3 試験体 : 荷重範囲一定 )

荷重範囲 $\Delta P$ (kN)	載荷回数 N(cycle)	左		右		平均 き裂進展量 $\Delta a$ (mm)
		き裂長 aL(mm)	き裂進展量 $\Delta aL$ (mm)	き裂長 aL(mm)	き裂進展量 $\Delta aL$ (mm)	
69.0	1500	18.22	0.21	18.89	0.22	0.21
	1500	18.42	0.20	19.11	0.22	0.21
	1500	18.61	0.19	19.32	0.21	0.20
	1500	18.80	0.19	19.50	0.18	0.18
	1500	19.05	0.25	19.73	0.23	0.24
	1500	19.24	0.19	19.92	0.19	0.19
	1500	19.49	0.25	20.20	0.28	0.27
	1000	19.59	0.10	20.35	0.15	0.13
	1000	19.71	0.12	20.45	0.10	0.11
	1000	19.88	0.17	20.58	0.13	0.15
	1000	19.99	0.11	20.74	0.16	0.14
	1000	20.15	0.16	20.91	0.17	0.17
	1000	20.34	0.19	21.04	0.13	0.16
	1000	20.44	0.10	21.21	0.17	0.14
	1000	20.64	0.20	21.41	0.20	0.20
	1000	20.79	0.15	21.55	0.14	0.15
	1000	20.99	0.20	21.74	0.19	0.19
	1000	21.14	0.15	21.91	0.17	0.16
	1000	21.33	0.19	22.06	0.15	0.17
	1000	21.49	0.16	22.25	0.19	0.17
	1000	21.62	0.13	22.42	0.17	0.15
	1000	21.80	0.18	22.58	0.16	0.17
	1000	21.98	0.18	22.81	0.23	0.21
	1000	22.19	0.21	23.03	0.22	0.22
	1000	22.39	0.20	23.26	0.23	0.22
	1000	22.55	0.16	23.49	0.23	0.19
	1000	22.77	0.22	23.65	0.16	0.19
	1000	23.00	0.23	23.85	0.20	0.22
	1000	23.20	0.20	24.11	0.26	0.23
	1000	23.41	0.21	24.33	0.22	0.21
1000	23.66	0.25	24.57	0.24	0.25	
1000	23.85	0.19	24.83	0.26	0.22	
1000	24.11	0.26	25.11	0.28	0.27	
1000	24.36	0.25	25.33	0.22	0.23	

表 3.10 疲労き裂進展試験結果 ( T3 試験体 : 荷重範囲一定 )

荷重範囲 $\Delta P(\text{kN})$	载荷回数 N(cycle)	左		右		平均 き裂進展量 $\Delta a(\text{mm})$
		き裂長 aL(mm)	き裂進展量 $\Delta aL(\text{mm})$	き裂長 aL(mm)	き裂進展量 $\Delta aL(\text{mm})$	
69.0	1000	24.53	0.17	25.57	0.24	0.21
	1000	24.83	0.30	25.81	0.24	0.27
	1000	25.07	0.24	26.06	0.25	0.24
	1000	25.30	0.23	26.40	0.34	0.29
	1000	25.50	0.20	26.74	0.34	0.27
	1000	25.76	0.26	27.04	0.30	0.28
	1000	26.03	0.27	27.33	0.29	0.28
	1000	26.29	0.26	27.67	0.34	0.30
	1000	26.58	0.29	27.99	0.32	0.30
	1000	26.86	0.28	28.30	0.31	0.30
	1000	27.15	0.29	28.71	0.41	0.35
	1000	27.43	0.28	29.06	0.35	0.31
	1000	27.86	0.43	29.47	0.41	0.42
	1000	28.18	0.32	29.88	0.41	0.37
	1000	28.51	0.33	30.37	0.49	0.41
	1000	28.91	0.40	30.92	0.55	0.47
	1000	29.26	0.35	31.52	0.60	0.48
	1000	29.59	0.33	32.32	0.80	0.56
	1000	29.93	0.34	33.50	1.18	0.76
	1000	30.13	0.20	35.02	1.52	0.86

表 3.11 疲労き裂進展試験結果 ( T4 試験体 : 荷重範囲漸減 )

荷重範囲 $\Delta P$ (kN)	载荷回数 N(cycle)	左		右		左右平均 き裂進展量 $\Delta a$ (mm)
		き裂長 $a_L$ (mm)	き裂進展量 $\Delta a_L$ (mm)	き裂長 $a_R$ (mm)	き裂進展量 $\Delta a_R$ (mm)	
69.0	初期	5.54		5.30		
69.0	20000	5.71	0.17	5.45	0.15	0.16
69.0	10000	5.80	0.09	5.57	0.12	0.11
65.3	30000	6.10	0.30	5.87	0.30	0.30
61.8	30000	6.39	0.29	6.16	0.29	0.29
58.4	30000	6.64	0.25	6.39	0.23	0.24
55.3	35000	6.95	0.31	6.71	0.32	0.32
52.3	35000	7.25	0.30	6.99	0.28	0.29
49.4	35000	7.52	0.27	7.25	0.26	0.27
46.7	40000	7.77	0.25	7.49	0.24	0.25
44.1	45000	8.07	0.30	7.77	0.28	0.29
41.6	45000	8.29	0.22	7.97	0.20	0.21
39.3	50000	8.56	0.27	8.23	0.26	0.27
37.1	55000	8.77	0.21	8.42	0.19	0.20
35.0	60000	9.05	0.28	8.66	0.24	0.26
33.0	65000	9.27	0.22	8.90	0.24	0.23
31.1	75000	9.51	0.24	9.12	0.22	0.23
29.3	85000	9.72	0.21	9.32	0.20	0.21
27.6	100000	10.05	0.33	9.50	0.18	0.26
25.9	110000	10.33	0.28	9.75	0.25	0.26
24.4	130000	10.56	0.23	10.03	0.28	0.26
22.9	150000	10.86	0.30	10.30	0.27	0.29
21.5	180000	11.17	0.31	10.57	0.27	0.29
20.2	200000	11.51	0.34	10.85	0.28	0.31
18.9	230000	11.86	0.35	11.13	0.28	0.32
17.7	270000	12.21	0.35	11.42	0.29	0.32
16.6	320000	12.55	0.34	11.75	0.33	0.33
15.5	370000	12.89	0.34	12.04	0.29	0.32
14.5	450000	13.41	0.52	12.37	0.33	0.43
13.5	500000	13.71	0.30	12.67	0.30	0.30
12.6	600000	14.13	0.42	13.00	0.33	0.38
11.7	800000	14.53	0.40	13.23	0.23	0.31
10.9	1000000	14.95	0.42	13.55	0.32	0.37
10.1	1300000	15.34	0.39	13.77	0.22	0.31
9.3	1800000	15.73	0.39	14.01	0.24	0.32
8.6	2500000	16.04	0.31	14.19	0.18	0.24
7.9	3500000	16.36	0.32	14.33	0.14	0.23
7.3	5000000	16.52	0.16	14.35	0.02	0.09
6.7	7000000	16.55	0.03	14.36	0.01	0.02

表 3.12 da/dN - ΔK データ ( T1 試験体 : 荷重範囲一定 )

荷重範囲 ΔP(kN)	载荷回数 dN(cycle)	き裂進展量 da(mm)	応力拡大係数範囲 ΔK (MN/m <sup>3/2</sup> )	き裂進展速度 da/dN (m/cycle)
69.0	初期			
	10000	0.26	13.8	2.55E-08
	10000	0.30	14.1	3.00E-08
	10000	0.31	14.5	3.10E-08
	10000	0.32	14.8	3.25E-08
	10000	0.33	15.2	3.30E-08
	8000	0.21	15.5	2.56E-08
	8000	0.21	15.7	2.56E-08
	8000	0.26	15.9	3.25E-08
	8000	0.32	16.2	4.00E-08
	8000	0.38	16.6	4.81E-08
	7000	0.25	16.9	3.57E-08
	7000	0.26	17.2	3.71E-08
	7000	0.26	17.4	3.71E-08
	7000	0.25	17.7	3.57E-08
	7000	0.32	18.0	4.50E-08
	7000	0.23	18.3	3.29E-08
	7000	0.20	18.5	2.86E-08
	7000	0.37	18.8	5.29E-08
	5500	0.29	19.1	5.18E-08
	5500	0.38	19.5	6.91E-08
	5000	0.41	19.8	8.10E-08
	5000	0.35	20.2	7.00E-08
	5000	0.47	20.6	9.40E-08
	4000	0.31	21.0	7.62E-08
	4000	0.36	21.4	9.00E-08
	3000	0.27	21.7	9.00E-08
	3000	0.29	22.0	9.83E-08
	3000	0.28	22.3	9.17E-08
	3000	0.27	22.6	9.00E-08
3000	0.29	22.9	9.83E-08	
3000	0.25	23.2	8.33E-08	
3000	0.27	23.4	9.00E-08	
3000	0.33	23.8	1.08E-07	

表 3.12 da/dN - ΔK データ ( T1 試験体 : 荷重範囲一定 )

荷重範囲 ΔP(kN)	载荷回数 dN(cycle)	き裂進展量 da(mm)	応力拡大係数範囲 ΔK (MN/m <sup>3/2</sup> )	き裂進展速度 da/dN (m/cycle)
69.0	2500	0.16	24.0	6.60E-08
	2500	0.25	24.3	1.00E-07
	2500	0.28	24.5	1.10E-07
	2500	0.28	24.9	1.14E-07
	2500	0.27	25.2	1.10E-07
	2500	0.29	25.5	1.16E-07
	2500	0.30	25.8	1.18E-07
	2500	0.29	26.2	1.18E-07
	2500	0.29	26.5	1.18E-07
	2500	0.33	26.9	1.30E-07
	2500	0.37	27.3	1.50E-07
	2500	0.36	27.8	1.44E-07
	2500	0.32	28.2	1.30E-07
	2500	0.48	28.7	1.90E-07
	2000	0.32	29.2	1.58E-07
	2000	0.34	29.6	1.70E-07
	2000	0.33	30.1	1.65E-07
	2000	0.32	30.5	1.60E-07
	2000	0.41	31.1	2.07E-07
	2000	0.38	31.6	1.90E-07
	2000	0.39	32.2	1.95E-07
	2000	0.49	32.9	2.43E-07
	2000	0.49	33.7	2.45E-07
	2000	0.60	34.6	3.02E-07
	1500	0.37	35.4	2.43E-07
	1500	0.43	36.1	2.87E-07
	1500	0.50	37.0	3.33E-07
	1500	0.54	38.0	3.60E-07
	1000	0.48	39.0	4.75E-07
	1000	0.53	40.1	5.35E-07
1000	0.56	41.3	5.55E-07	
1000	0.68	42.8	6.80E-07	

表 3.13 da/dN - ΔK データ ( T2 試験体 : 荷重範囲漸減 )

荷重範囲 ΔP(kN)	载荷回数 dN(cycle)	き裂進展量 da(mm)	応力拡大係数範囲 ΔK (MN/m <sup>3/2</sup> )	き裂進展速度 da/dN (m/cycle)
69.0	初期			
69.0	15000	0.31	13.6	2.07E-08
65.3	15000	0.20	13.6	1.30E-08
61.8	36000	0.36	13.1	1.00E-08
58.4	30000	0.29	12.7	9.50E-09
55.3	40000	0.39	12.3	9.75E-09
52.3	50000	0.42	12.0	8.40E-09
49.4	55000	0.57	11.7	1.05E-08
46.7	60000	0.71	11.6	1.18E-08
44.1	60000	0.57	11.4	9.50E-09
41.6	60000	0.42	11.0	7.00E-09
39.3	50000	0.54	10.7	1.07E-08
37.1	35000	0.19	10.3	5.29E-09
35.0	60000	0.32	9.9	5.33E-09
33.0	65000	0.30	9.5	4.54E-09
31.1	65000	0.32	9.1	4.92E-09
29.3	70000	0.32	8.7	4.57E-09
27.6	70000	0.34	8.3	4.79E-09
25.9	70000	0.19	7.9	2.79E-09
24.4	75000	0.47	7.6	6.27E-09
22.9	80000	0.15	7.2	1.81E-09
21.5	90000	0.23	6.9	2.56E-09
20.2	100000	0.23	6.5	2.25E-09
18.9	105000	0.16	6.2	1.48E-09
17.7	240000	0.43	5.9	1.81E-09
16.6	180000	0.47	5.6	2.58E-09
15.5	190000	0.30	5.3	1.55E-09
14.5	200000	0.22	5.0	1.10E-09
13.5	210000	0.26	4.8	1.24E-09
12.6	250000	0.19	4.5	7.60E-10
11.7	270000	0.14	4.2	5.37E-10
10.9	300000	0.25	3.9	8.33E-10
10.1	400000	0.17	3.7	4.37E-10
9.3	630000	0.18	3.4	2.78E-10
8.6	750000	0.20	3.2	2.73E-10
7.9	1000000	0.16	3.0	1.55E-10
7.3	1500000	0.09	2.8	6.00E-11
6.7	3500000	0.11	2.5	3.29E-11
6.1	5000000	0.13	2.3	2.50E-11

表 3.14 da/dN - ΔK データ ( T3 試験体 : 荷重範囲一定 )

荷重範囲 ΔP(kN)	载荷回数 dN(cycle)	き裂進展量 da(mm)	応力拡大係数範囲 ΔK (MN/m <sup>3/2</sup> )	き裂進展速度 da/dN (m/cycle)
69.0	初期			
	15000	0.13	12.7	8.67E-09
	15000	0.16	12.8	1.07E-08
	15000	0.17	13.0	1.10E-08
	15000	0.23	13.3	1.53E-08
	15000	0.23	13.5	1.50E-08
	15000	0.22	13.8	1.43E-08
	12000	0.20	14.0	1.63E-08
	12000	0.21	14.2	1.75E-08
	12000	0.22	14.5	1.83E-08
	10000	0.20	14.7	2.00E-08
	10000	0.21	14.9	2.05E-08
	10000	0.25	15.2	2.45E-08
	9000	0.14	15.4	1.50E-08
	9000	0.24	15.6	2.67E-08
	8000	0.20	15.8	2.50E-08
	8000	0.19	16.0	2.38E-08
	8000	0.18	16.2	2.31E-08
	8000	0.20	16.4	2.44E-08
	8000	0.27	16.7	3.37E-08
	7000	0.16	16.9	2.21E-08
	7000	0.23	17.1	3.36E-08
	7000	0.22	17.3	3.07E-08
	6000	0.18	17.5	3.08E-08
	6000	0.18	17.7	3.00E-08
	6000	0.19	17.9	3.08E-08
	6000	0.23	18.1	3.92E-08
	5000	0.15	18.3	2.90E-08
	5000	0.16	18.5	3.20E-08
	5000	0.23	18.7	4.70E-08
4000	0.15	18.9	3.62E-08	
4000	0.16	19.0	3.88E-08	
4000	0.16	19.2	4.12E-08	
4000	0.19	19.3	4.63E-08	

表 3.14 da/dN - ΔK データ ( T3 試験体 : 荷重範囲一定 )

荷重範囲 ΔP(kN)	载荷回数 dN(cycle)	き裂進展量 da(mm)	応力拡大係数範囲 ΔK (MN/m <sup>3/2</sup> )	き裂進展速度 da/dN (m/cycle)
69.0	4000	0.21	19.5	5.25E-08
	4000	0.18	19.7	4.50E-08
	4000	0.20	19.9	5.00E-08
	4000	0.14	20.1	3.50E-08
	4000	0.22	20.3	5.38E-08
	4000	0.23	20.5	5.75E-08
	4000	0.20	20.7	5.00E-08
	4000	0.24	21.0	6.12E-08
	3000	0.22	21.2	7.17E-08
	3000	0.12	21.4	4.00E-08
	3000	0.20	21.5	6.67E-08
	3000	0.25	21.8	8.33E-08
	2500	0.13	22.0	5.00E-08
	2500	0.21	22.1	8.40E-08
	2500	0.19	22.3	7.60E-08
	2500	0.20	22.5	7.80E-08
	2500	0.18	22.7	7.40E-08
	2500	0.20	22.9	8.20E-08
	2500	0.21	23.2	8.40E-08
	2500	0.23	23.4	9.20E-08
	2000	0.16	23.6	8.25E-08
	2000	0.18	23.8	9.00E-08
	2000	0.22	24.0	1.08E-07
	2000	0.14	24.2	7.00E-08
	2000	0.18	24.4	8.75E-08
	2000	0.21	24.6	1.03E-07
	2000	0.21	24.8	1.05E-07
	2000	0.18	25.0	9.00E-08
	2000	0.19	25.2	9.75E-08
	2000	0.24	25.5	1.18E-07
	2000	0.19	25.7	9.75E-08
	2000	0.24	26.0	1.18E-07
1500	0.16	26.2	1.07E-07	
1500	0.14	26.4	9.00E-08	

表 3.14 da/dN - ΔK データ ( T3 試験体 : 荷重範囲一定 )

荷重範囲 ΔP(kN)	载荷回数 dN(cycle)	き裂進展量 da(mm)	応力拡大係数範囲 ΔK (MN/m <sup>3/2</sup> )	き裂進展速度 da/dN (m/cycle)
69.0	1500	0.21	26.6	1.43E-07
	1500	0.21	26.8	1.40E-07
	1500	0.20	27.1	1.33E-07
	1500	0.18	27.3	1.23E-07
	1500	0.24	27.6	1.60E-07
	1500	0.19	27.8	1.27E-07
	1500	0.27	28.1	1.77E-07
	1000	0.13	28.4	1.25E-07
	1000	0.11	28.5	1.10E-07
	1000	0.15	28.7	1.50E-07
	1000	0.14	28.9	1.35E-07
	1000	0.17	29.1	1.65E-07
	1000	0.16	29.3	1.60E-07
	1000	0.14	29.5	1.35E-07
	1000	0.20	29.7	2.00E-07
	1000	0.15	29.9	1.45E-07
	1000	0.19	30.2	1.95E-07
	1000	0.16	30.4	1.60E-07
	1000	0.17	30.6	1.70E-07
	1000	0.17	30.9	1.75E-07
	1000	0.15	31.1	1.50E-07
	1000	0.17	31.4	1.70E-07
	1000	0.21	31.6	2.05E-07
	1000	0.22	31.9	2.15E-07
	1000	0.22	32.3	2.15E-07
	1000	0.19	32.6	1.95E-07
	1000	0.19	32.9	1.90E-07
	1000	0.22	33.2	2.15E-07
	1000	0.23	33.5	2.30E-07
	1000	0.21	33.9	2.15E-07
1000	0.25	34.3	2.45E-07	
1000	0.22	34.7	2.25E-07	
1000	0.27	35.1	2.70E-07	
1000	0.23	35.5	2.35E-07	

表 3.14 da/dN -  $\Delta K$  データ ( T3 試験体 : 荷重範囲一定 )

荷重範囲 $\Delta P$ (kN)	载荷回数 dN(cycle)	き裂進展量 da(mm)	応力拡大係数範囲 $\Delta K$ (MN/m <sup>3/2</sup> )	き裂進展速度 da/dN (m/cycle)
69.0	1000	0.21	35.9	2.05E-07
	1000	0.27	36.3	2.70E-07
	1000	0.24	36.8	2.45E-07
	1000	0.29	37.3	2.85E-07
	1000	0.27	37.9	2.70E-07
	1000	0.28	38.4	2.80E-07
	1000	0.28	39.0	2.80E-07
	1000	0.30	39.6	3.00E-07
	1000	0.30	40.3	3.05E-07
	1000	0.30	40.9	2.95E-07
	1000	0.35	41.7	3.50E-07
	1000	0.31	42.5	3.15E-07
	1000	0.42	43.4	4.20E-07
	1000	0.37	44.5	3.65E-07
	1000	0.41	45.5	4.10E-07
	1000	0.47	46.8	4.75E-07
	1000	0.48	48.3	4.75E-07
	1000	0.56	50.0	5.65E-07
	1000	0.76	52.5	7.60E-07
	1000	0.86	55.9	8.60E-07

表 3.15 da/dN - ΔK データ ( T4 試験体 : 荷重範囲漸減 )

荷重範囲 ΔP(kN)	载荷回数 dN(cycle)	き裂進展量 da(mm)	応力拡大係数範囲 ΔK (MN/m <sup>3/2</sup> )	き裂進展速度 da/dN (m/cycle)
69.0	初期			
69.0	20000	0.16	12.7	8.00E-09
69.0	10000	0.11	12.9	1.05E-08
65.3	30000	0.30	12.8	1.00E-08
61.8	30000	0.29	12.4	9.67E-09
58.4	30000	0.24	12.0	8.00E-09
55.3	35000	0.32	11.6	9.00E-09
52.3	35000	0.29	11.3	8.29E-09
49.4	35000	0.27	10.9	7.57E-09
46.7	40000	0.25	10.5	6.13E-09
44.1	45000	0.29	10.1	6.44E-09
41.6	45000	0.21	9.7	4.67E-09
39.3	50000	0.27	9.3	5.30E-09
37.1	55000	0.20	8.9	3.64E-09
35.0	60000	0.26	8.5	4.33E-09
33.0	65000	0.23	8.2	3.54E-09
31.1	75000	0.23	7.8	3.07E-09
29.3	85000	0.21	7.5	2.41E-09
27.6	100000	0.26	7.1	2.55E-09
25.9	110000	0.26	6.8	2.41E-09
24.4	130000	0.26	6.5	1.96E-09
22.9	150000	0.29	6.2	1.90E-09
21.5	180000	0.29	5.9	1.61E-09
20.2	200000	0.31	5.7	1.55E-09
18.9	230000	0.32	5.4	1.37E-09
17.7	270000	0.32	5.1	1.19E-09
16.6	320000	0.33	4.9	1.05E-09
15.5	370000	0.32	4.7	8.51E-10
14.5	450000	0.43	4.4	9.44E-10
13.5	500000	0.30	4.2	6.00E-10
12.6	600000	0.38	4.0	6.25E-10
11.7	800000	0.31	3.8	3.94E-10
10.9	1000000	0.37	3.6	3.70E-10
10.1	1300000	0.31	3.4	2.35E-10
9.3	1800000	0.32	3.2	1.75E-10
8.6	2500000	0.24	3.0	9.80E-11
7.9	3500000	0.23	2.8	6.57E-11
7.3	5000000	0.09	2.6	1.80E-11
6.7	7000000	0.02	2.4	2.86E-12

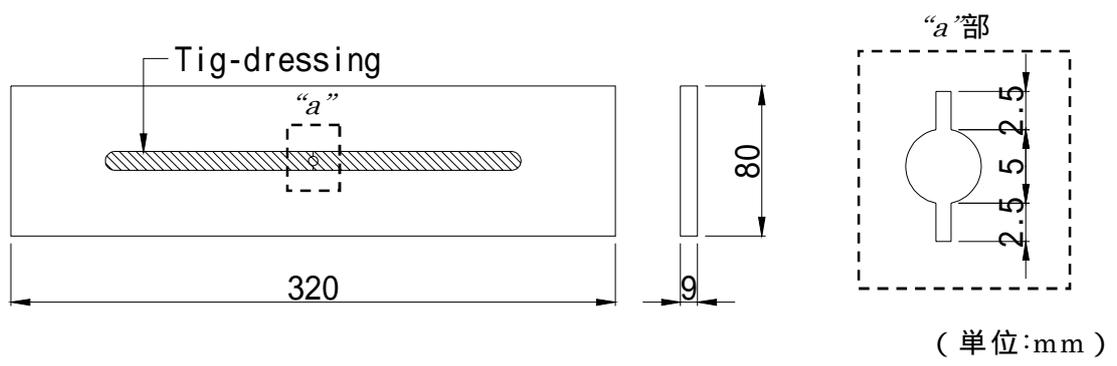


図 3.1 試験体の形状と寸法

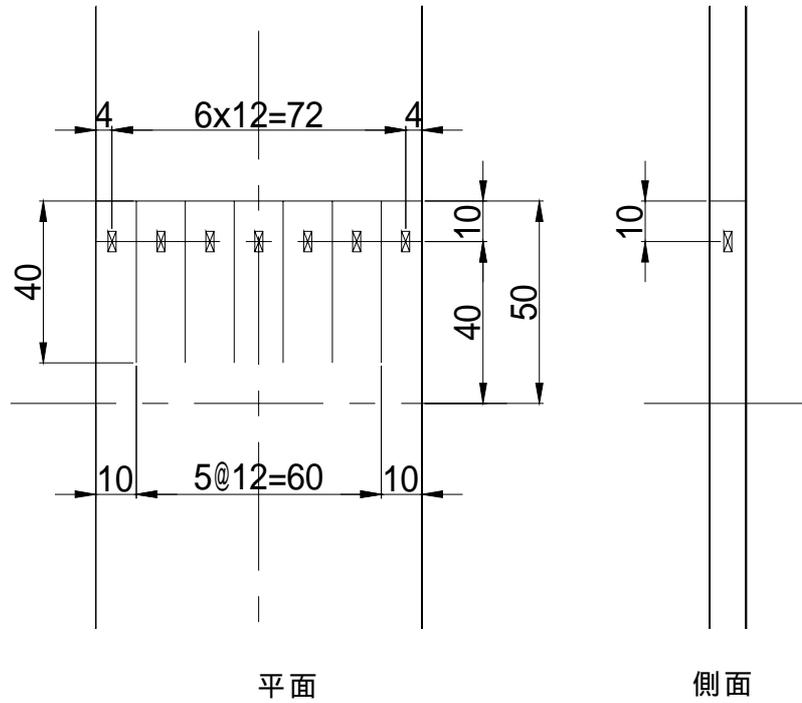
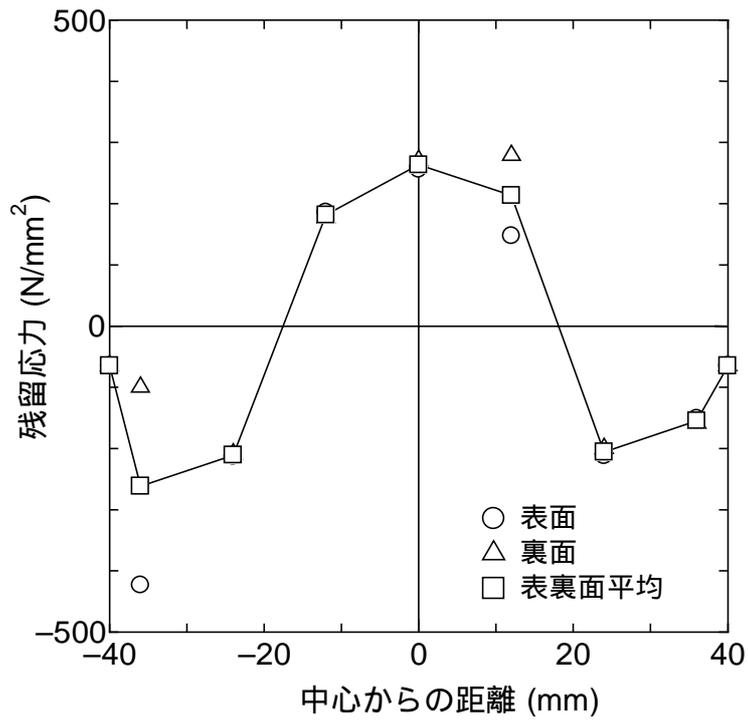
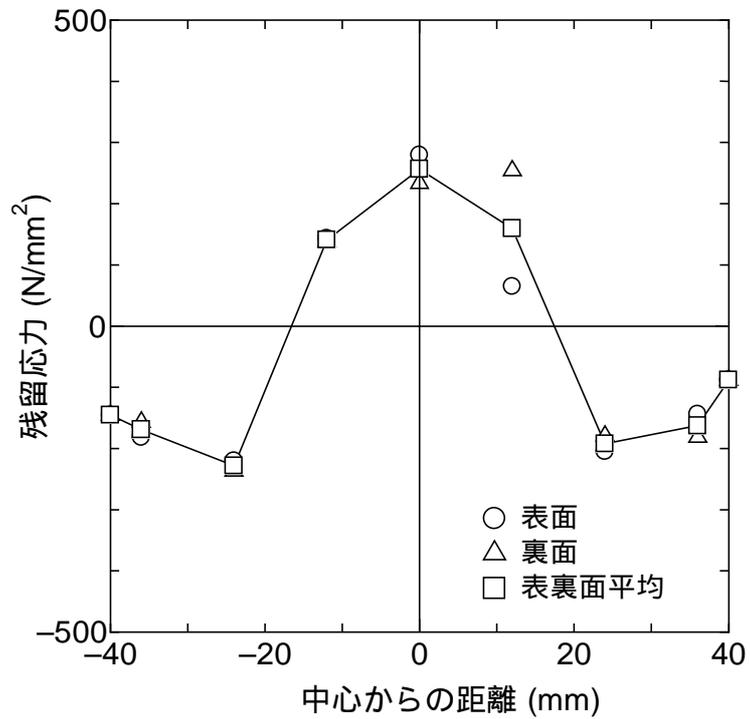


図 3.2 ひずみゲージ貼付位置および試験体の切断位置

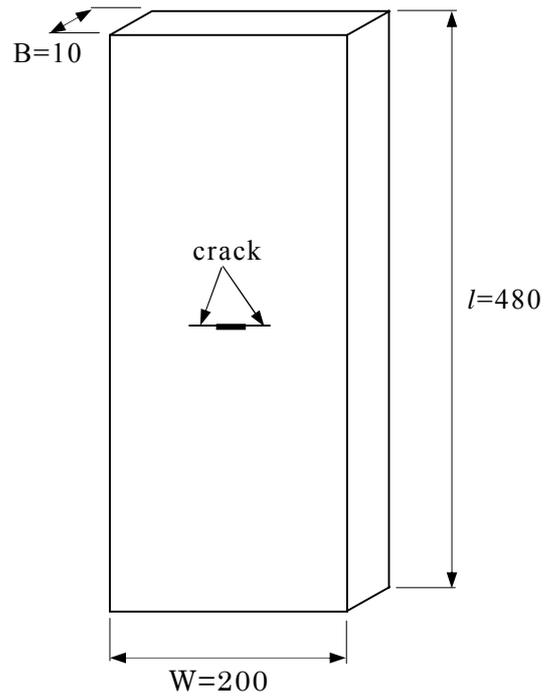


(a)板厚 12mm

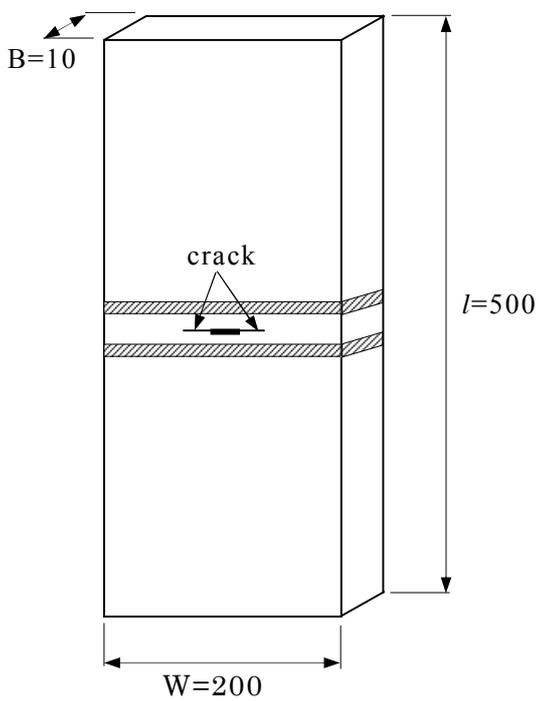


(b)板厚 9mm

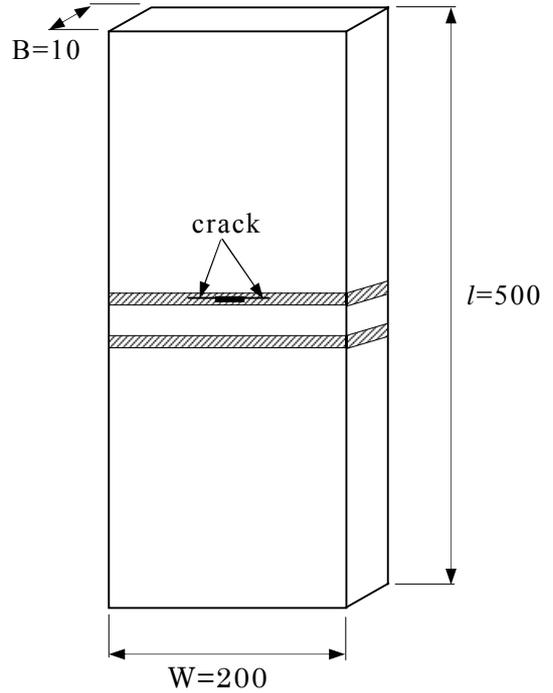
図 3.3 残留応力測定結果



(a)鋼素材試験用



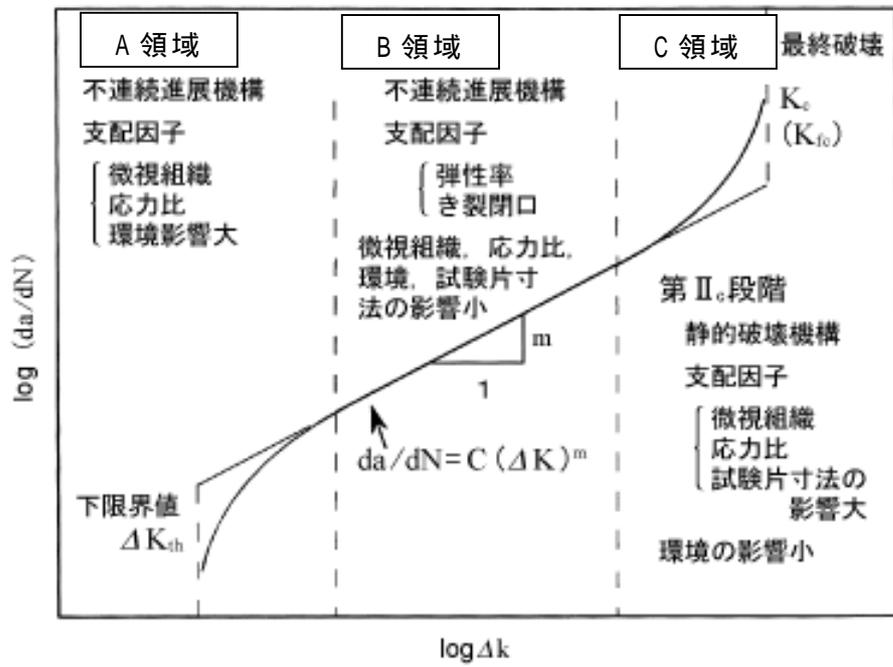
(b)溶接金属試験用



(c)熱影響部試験用

( 単位 : mm )

図 3.4 従来鋼の試験体形状と寸法



© (社)日本溶接協会, 2004

図 3.5  $da/dN - K$  の関係

### Effect of Stress Ratio

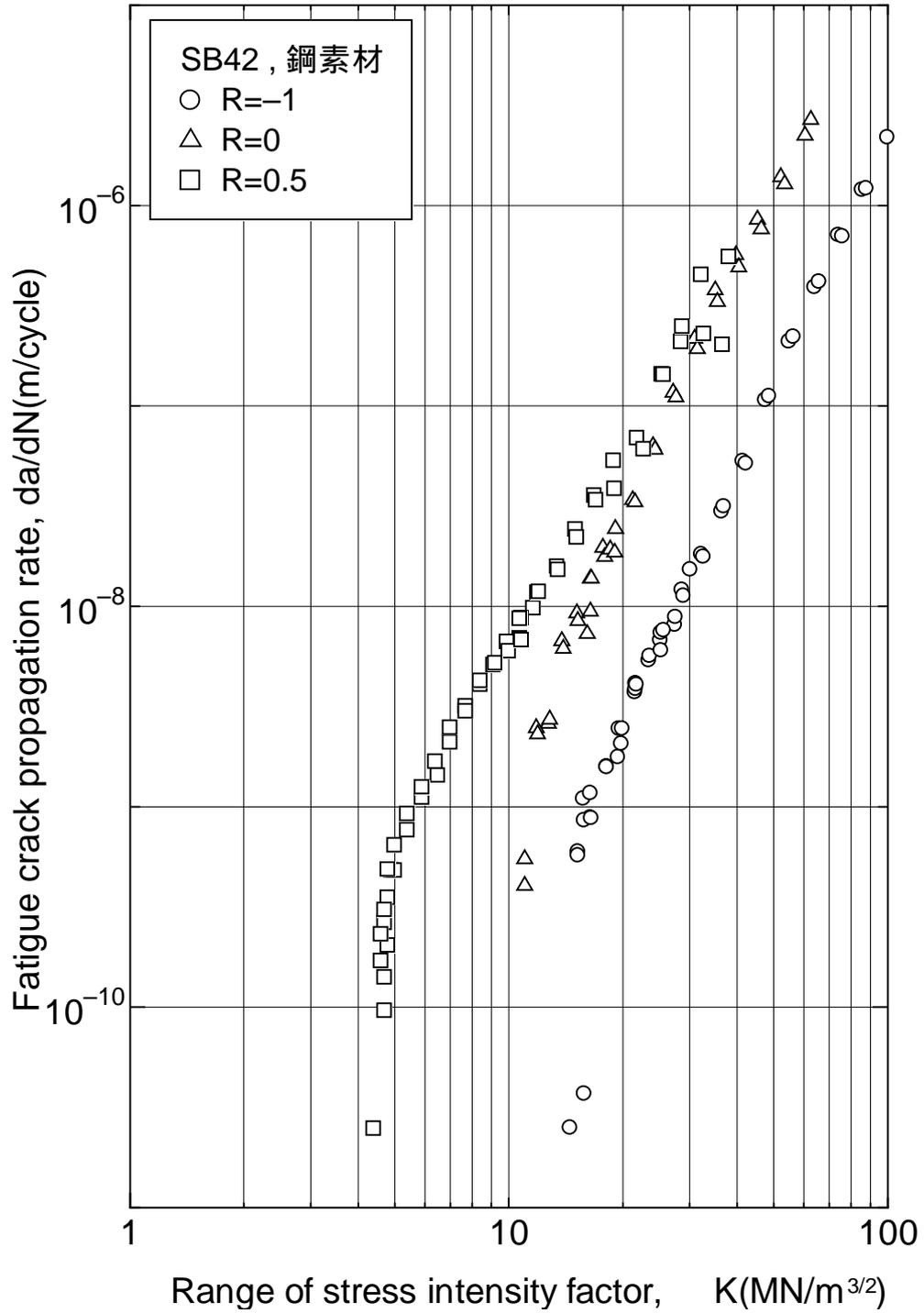


図 3.6 応力比の違いによる影響 (SB42, 鋼素材)

### Effect of Stress Ratio

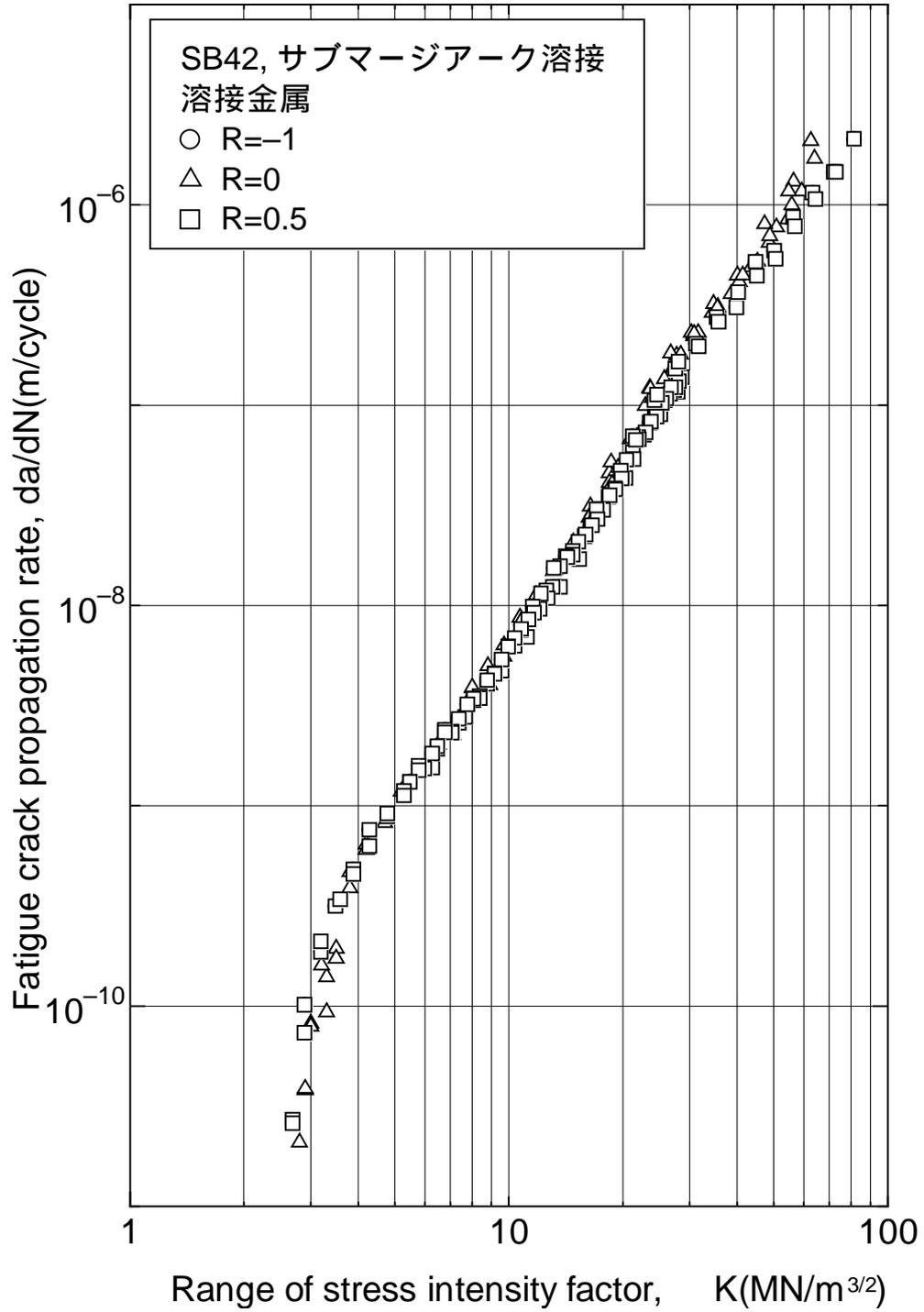


図 3.7 応力比の違いによる影響 (SB42, 溶接金属)

### Effect of Stress Ratio

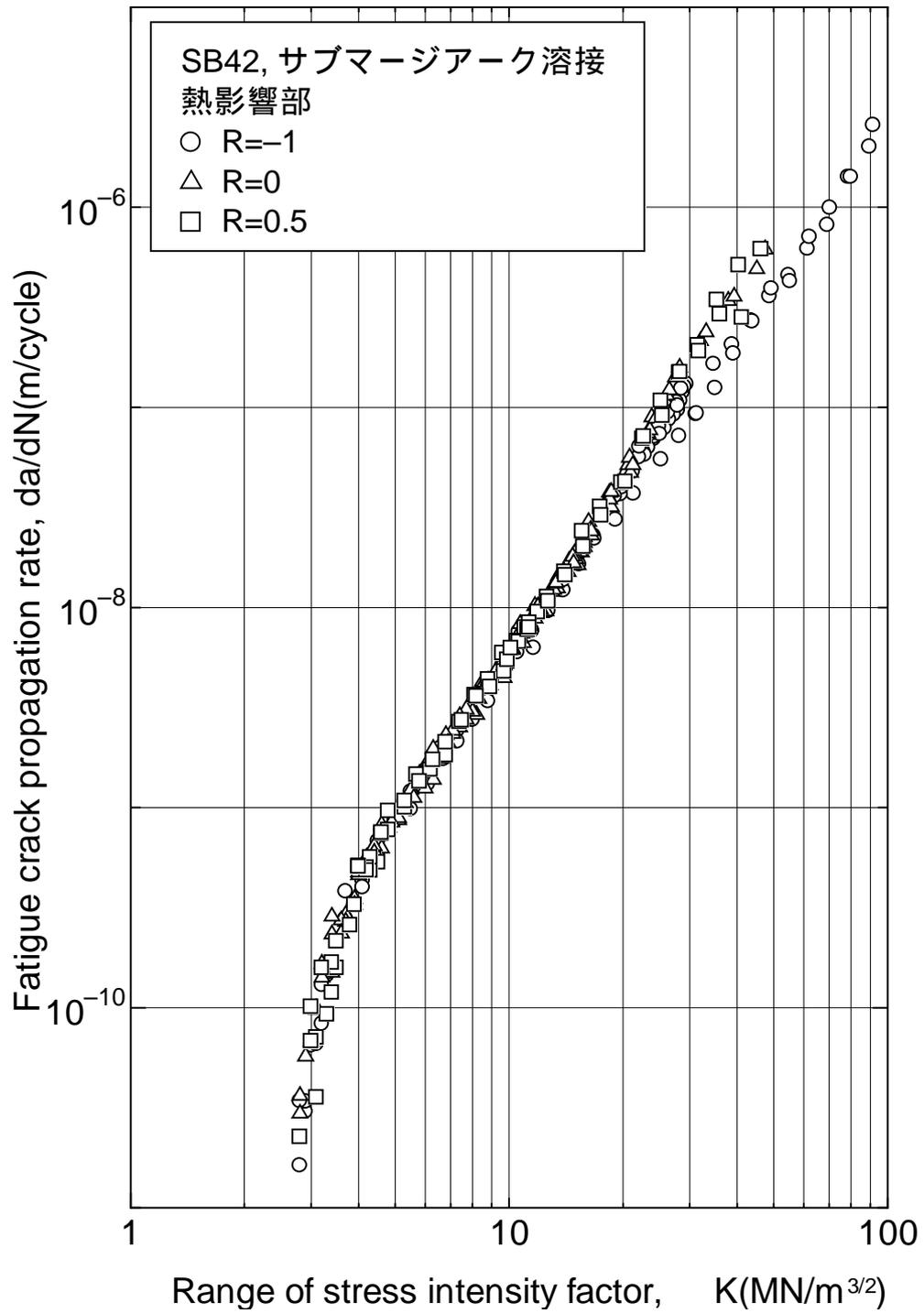


図 3.8 応力比の違いによる影響 (SB42, 熱影響部)

### Effect of Stress Ratio

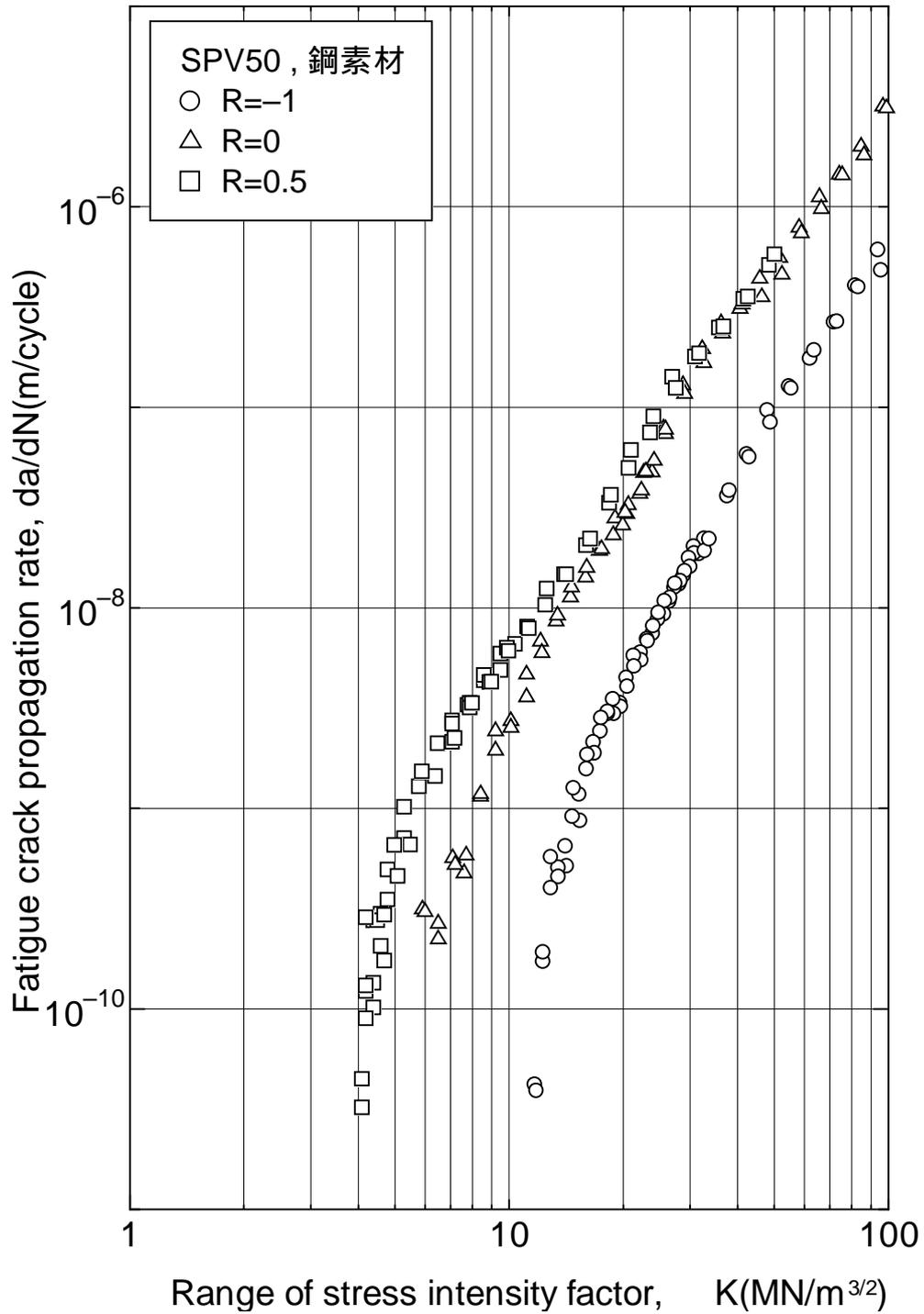


図 3.9 応力比の違いによる影響 (SPV50, 鋼素材)

### Effect of Stress Ratio

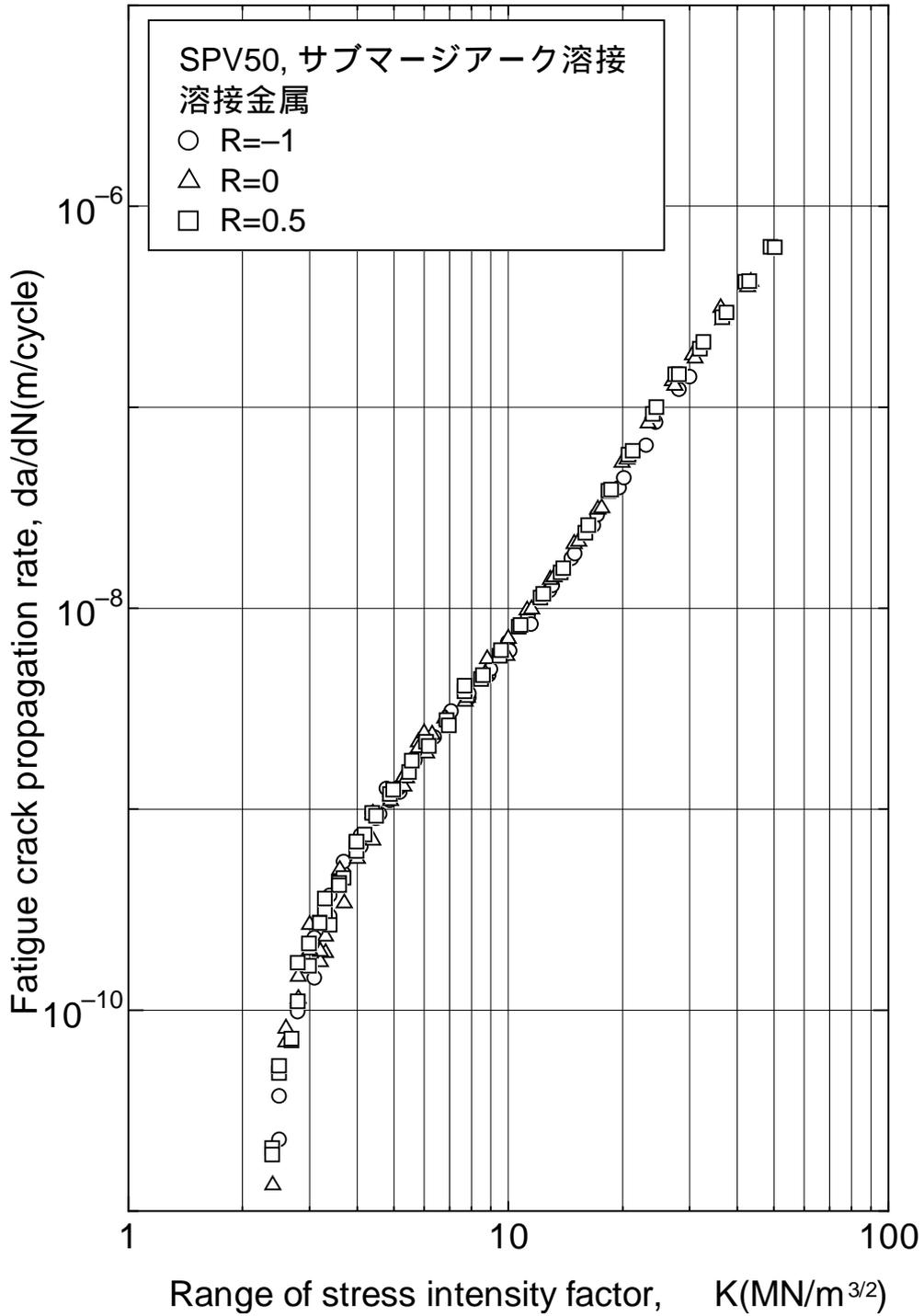


図 3.10 応力比の違いによる影響 (SPV50, 溶接金属)

### Effect of Stress Ratio

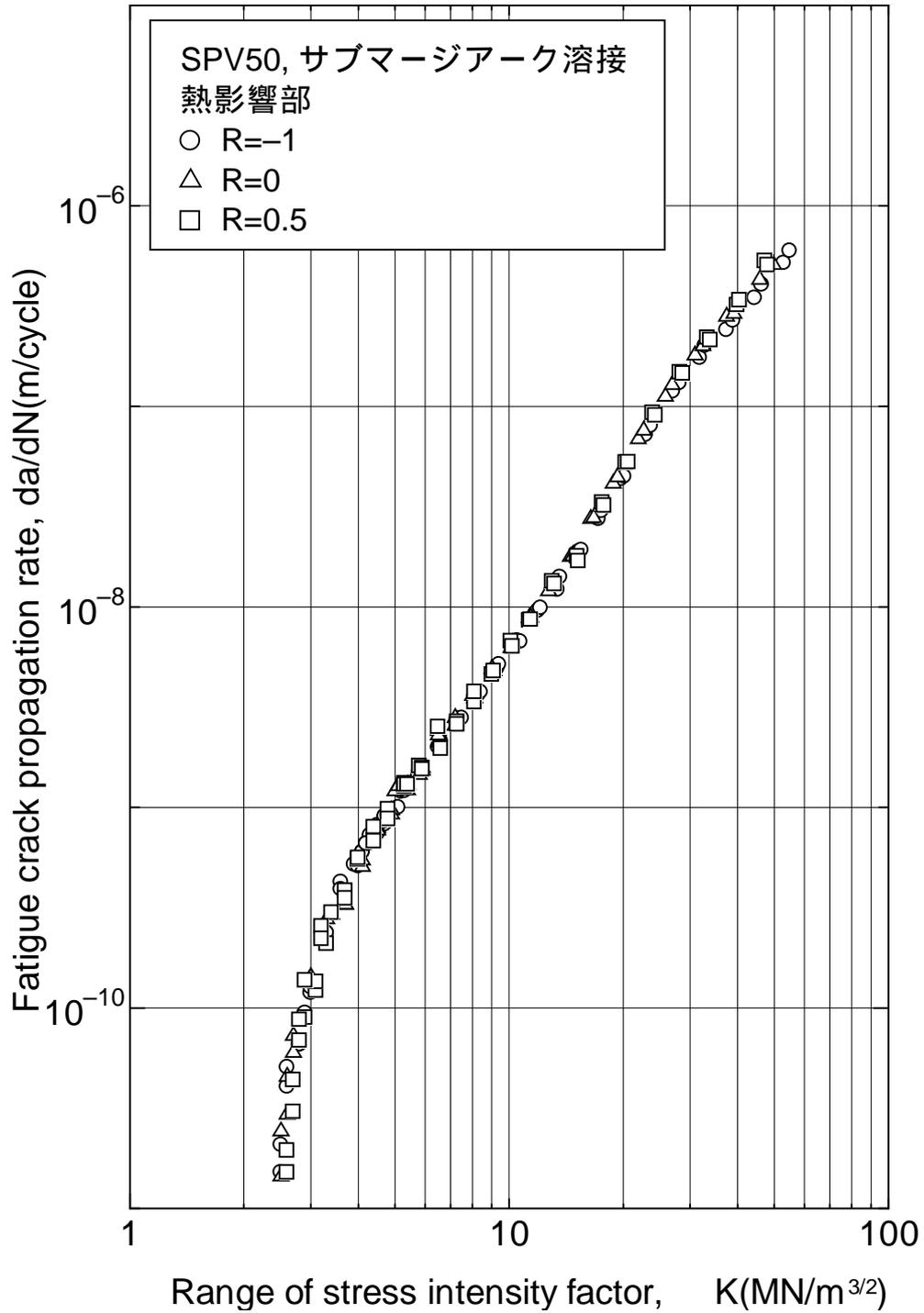


図 3.11 応力比の違いによる影響 (SPV50, 熱影響部)

### Effect of Residual Stress

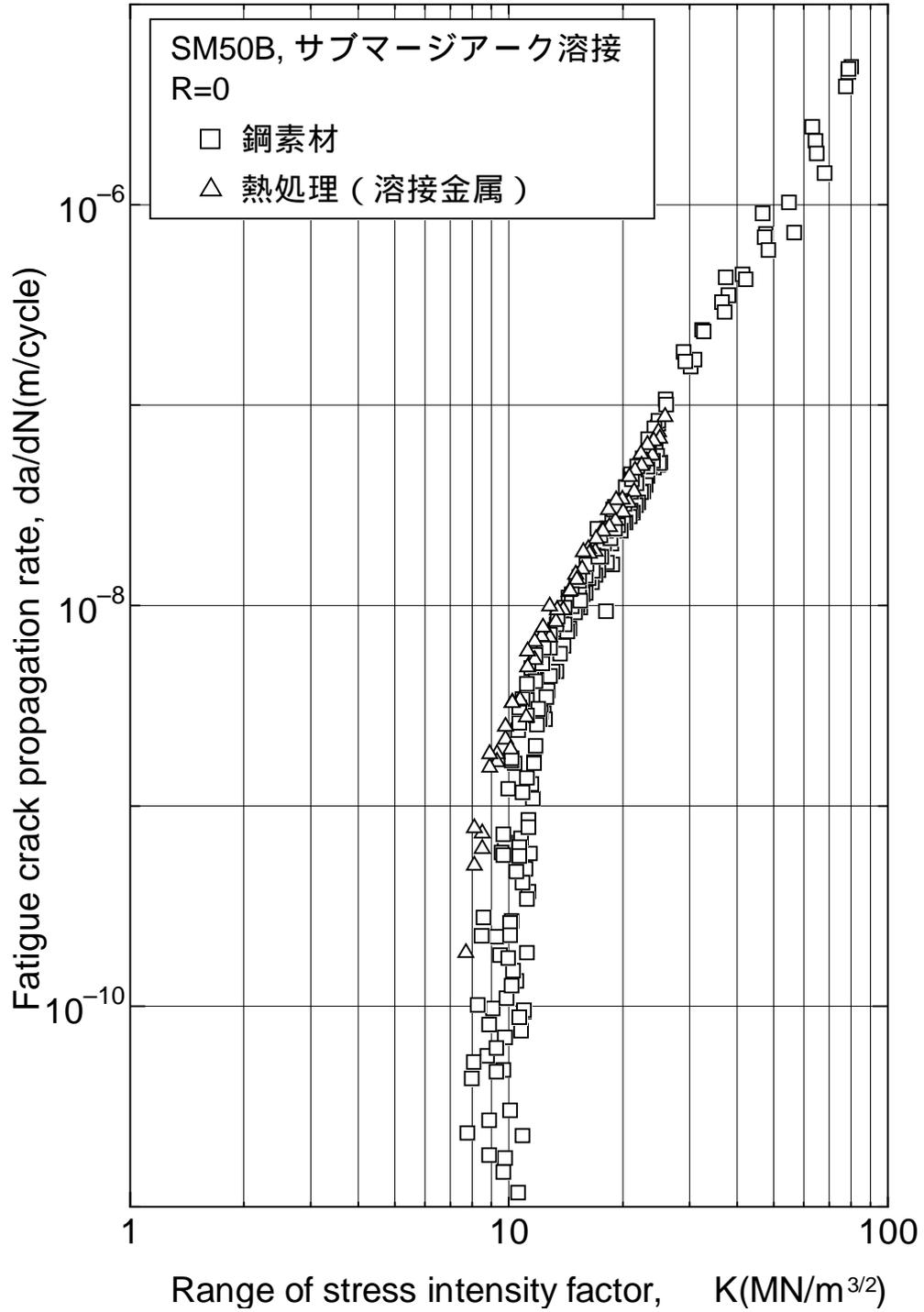


図 3.12 残留応力の影響 (SM50B, 鋼素材)

### Effect of Residual Stress

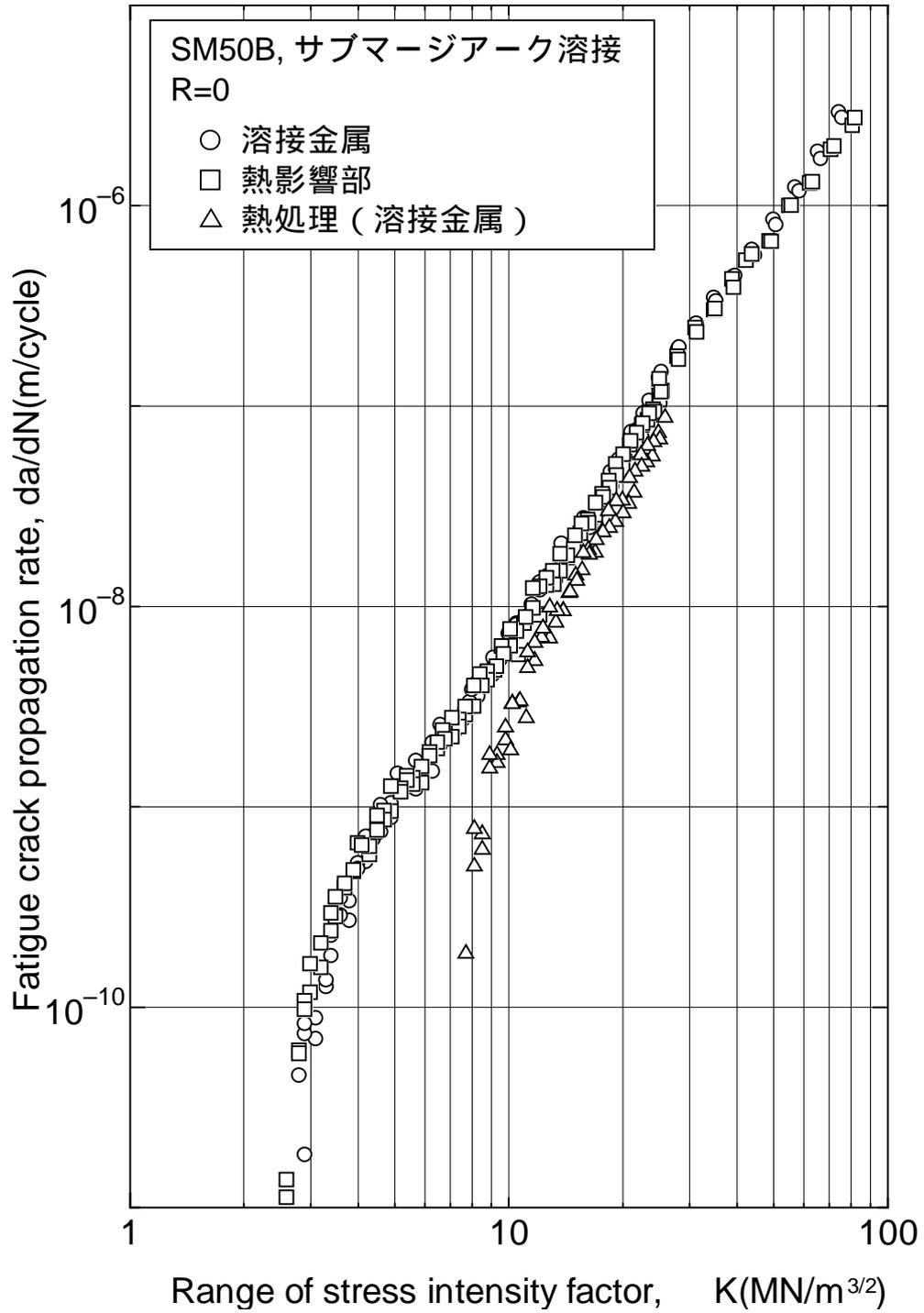


図 3.13 残留応力の影響 (SM50B, 溶接金属 + 熱影響部)

### Effect of Stress Ratio

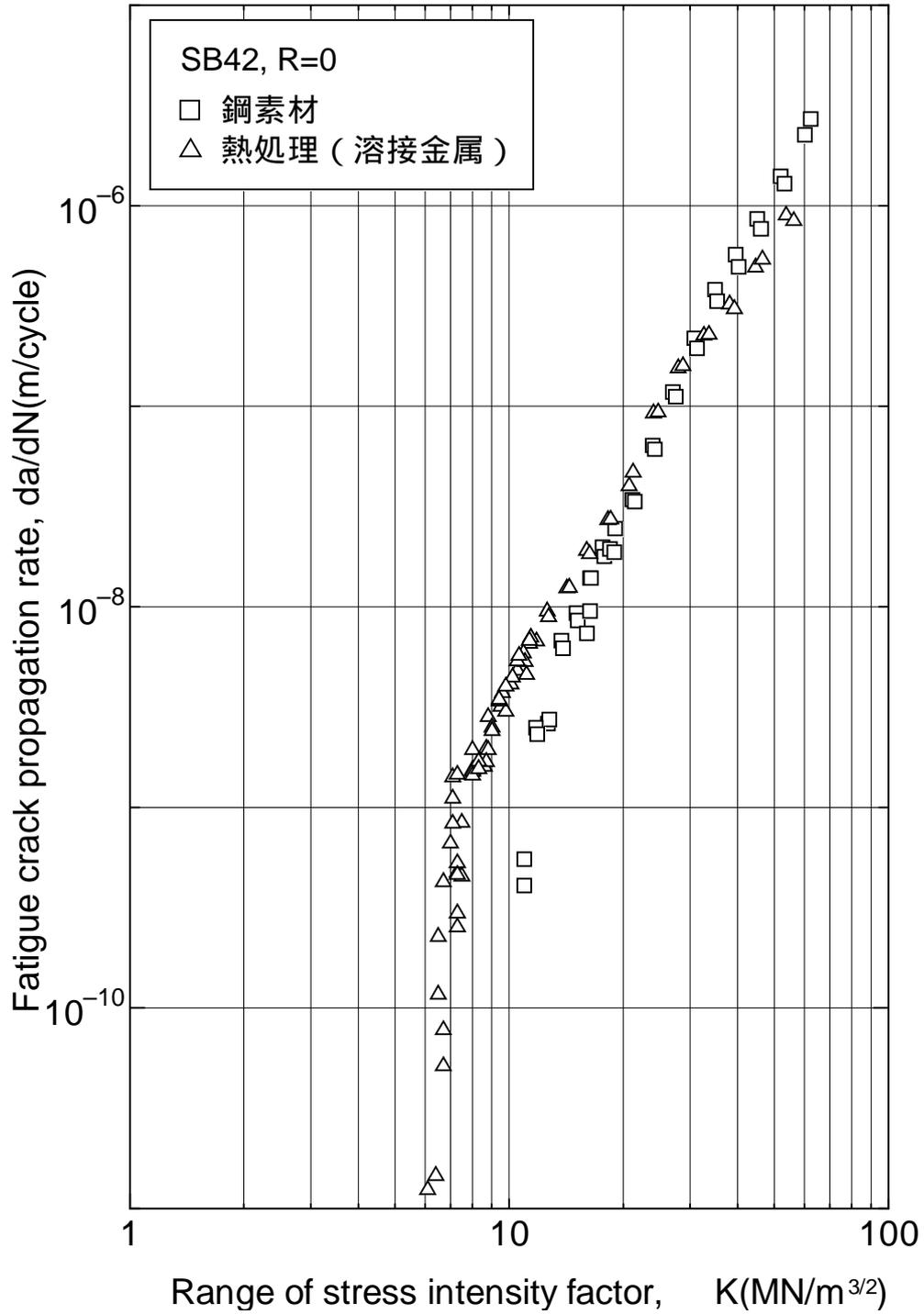


図 3.14 残留応力の影響 (SB42, 鋼素材)

### Effect of Stress Ratio

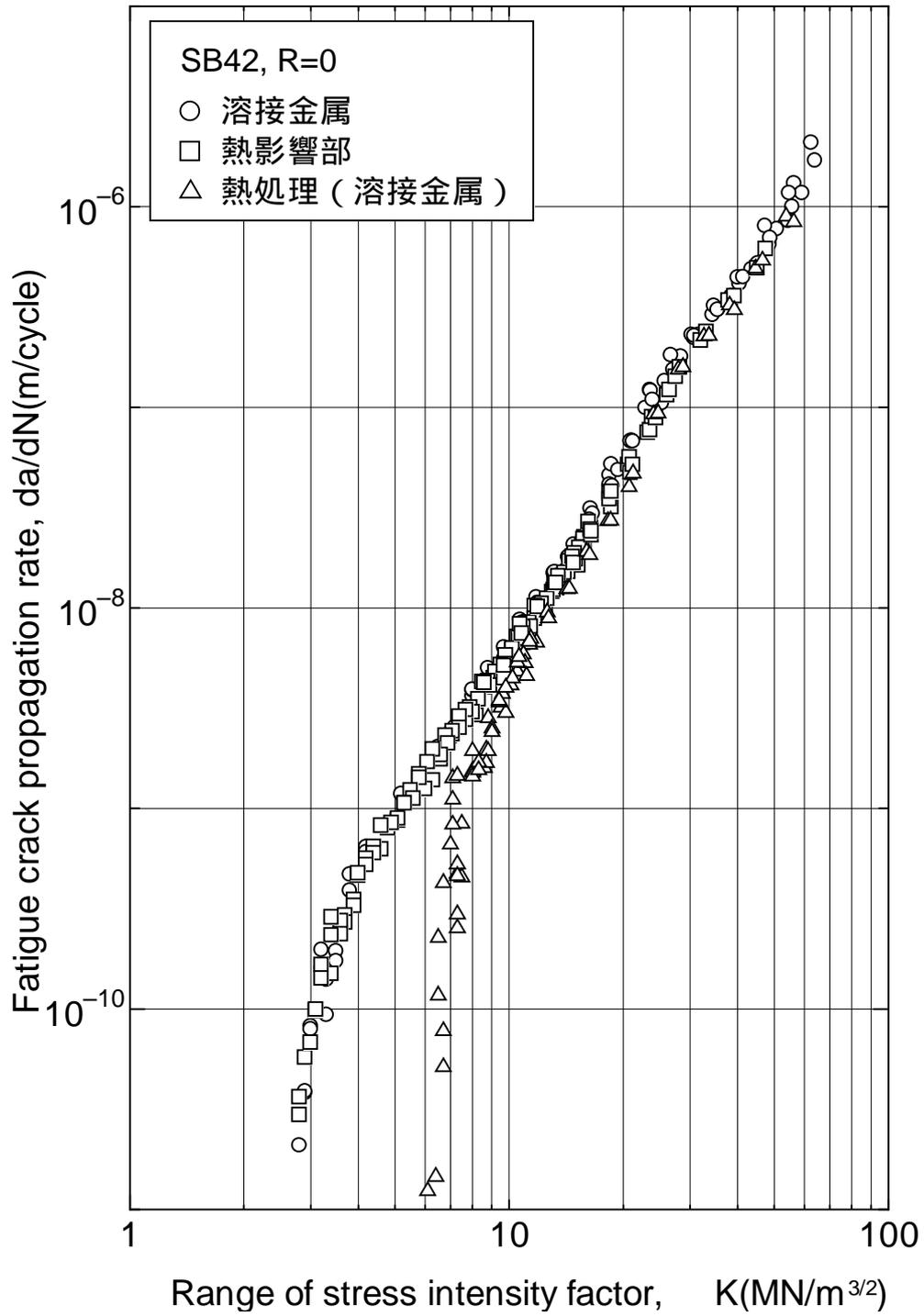


図 3.15 残留応力の影響 (SB42, 溶接金属 + 熱影響部)

### Effect of Crack Propagation Zone

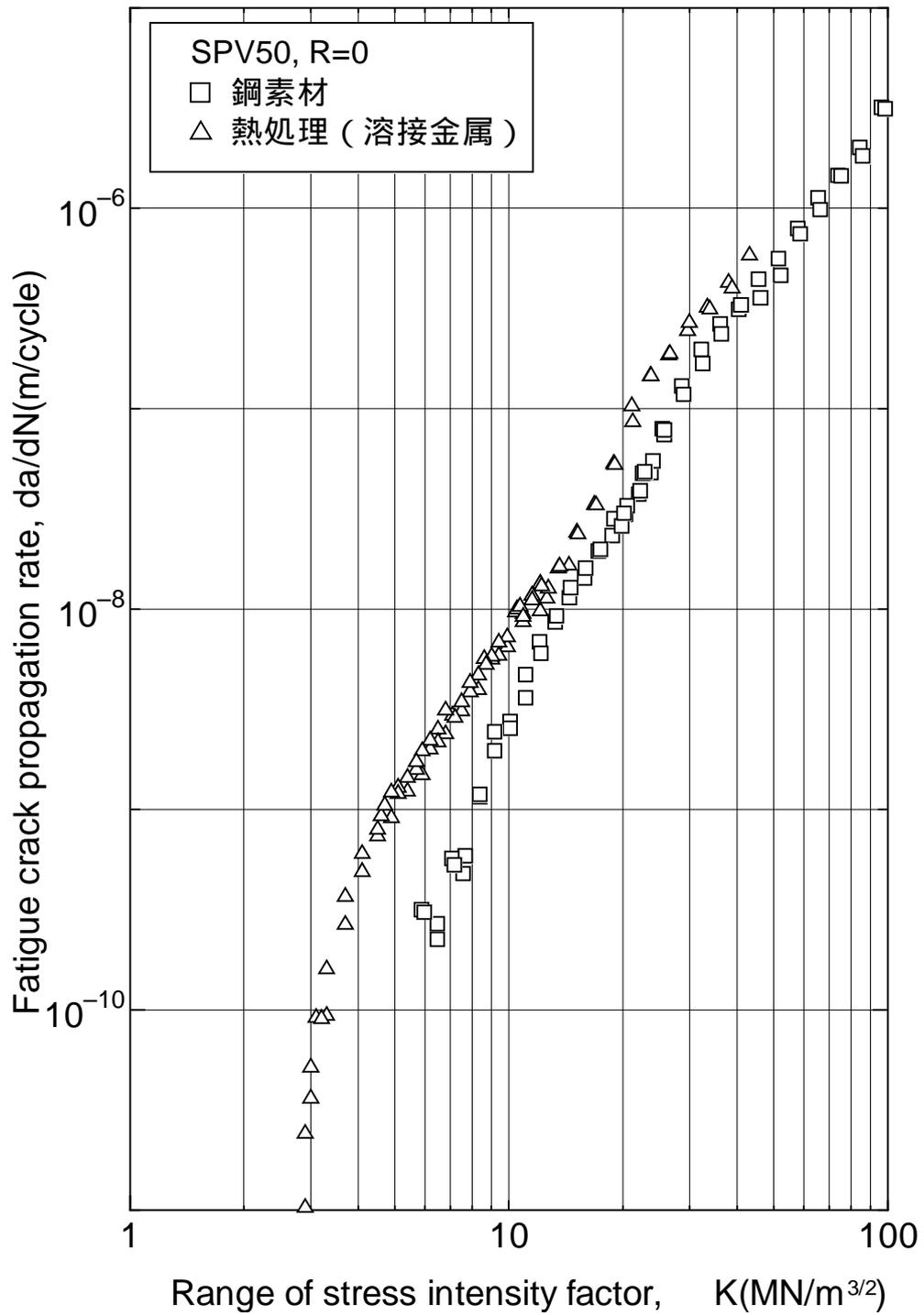


図 3.16 残留応力の影響 (SPV50, 鋼素材)

### Effect of Crack Propagation Zone

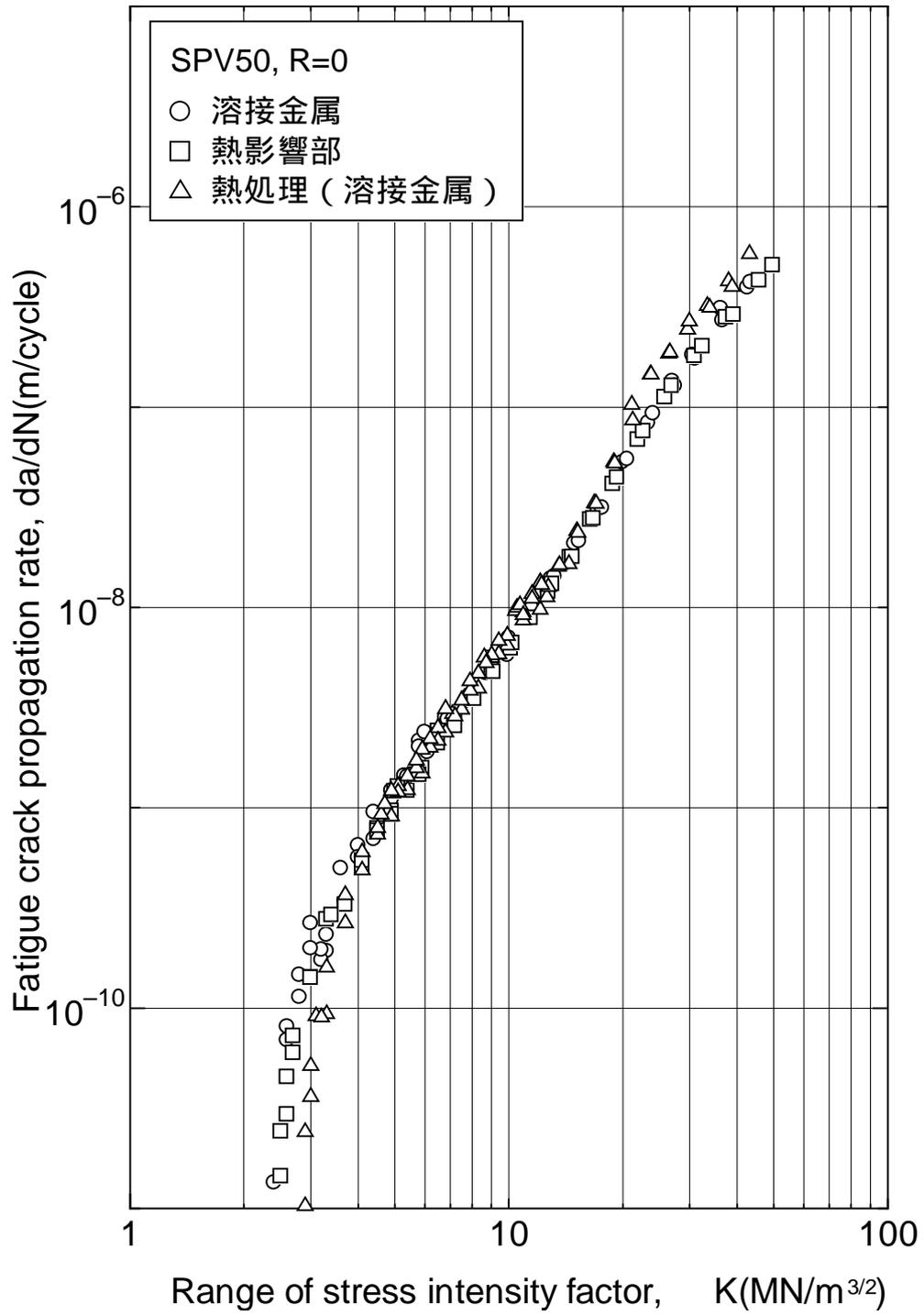


図 3.17 残留応力の影響 (SPV50, 溶接金属 + 熱影響部)

### Comparison of Material

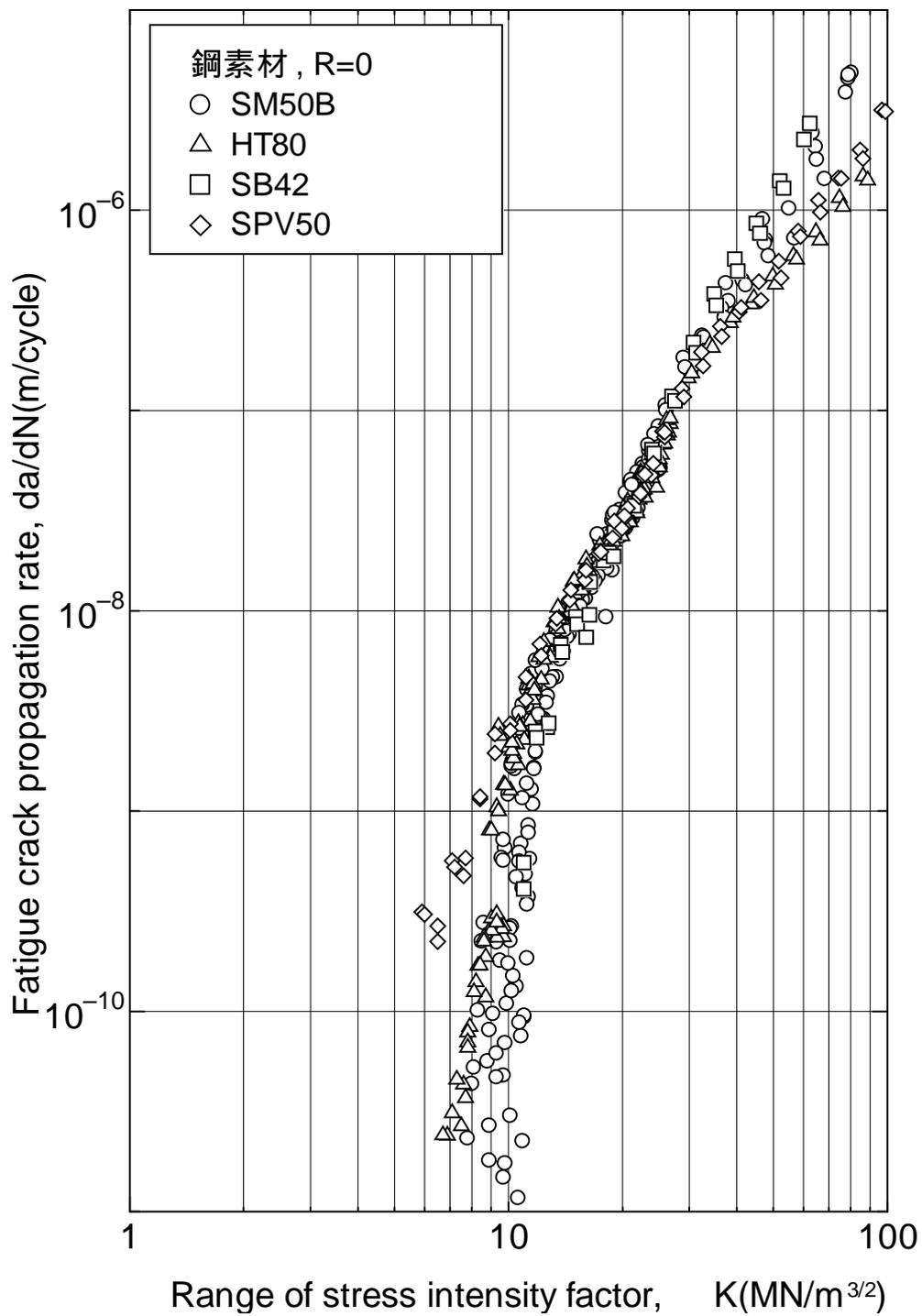


図 3.18 鋼種の違いによる影響 (鋼素材)

### Effect of Materials

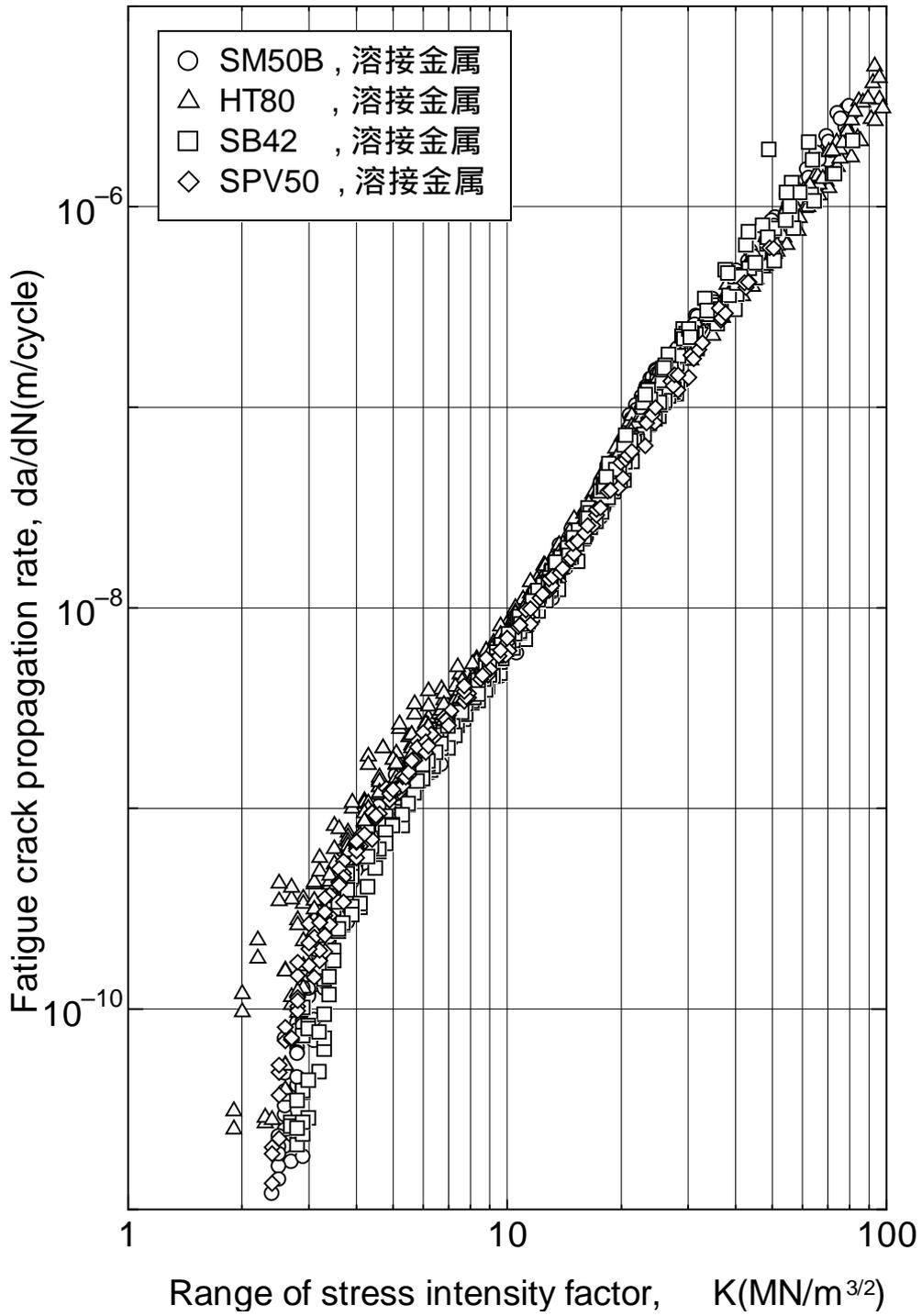


図 3.19 鋼種の違いによる影響 (溶接金属)

### Effect of Materials

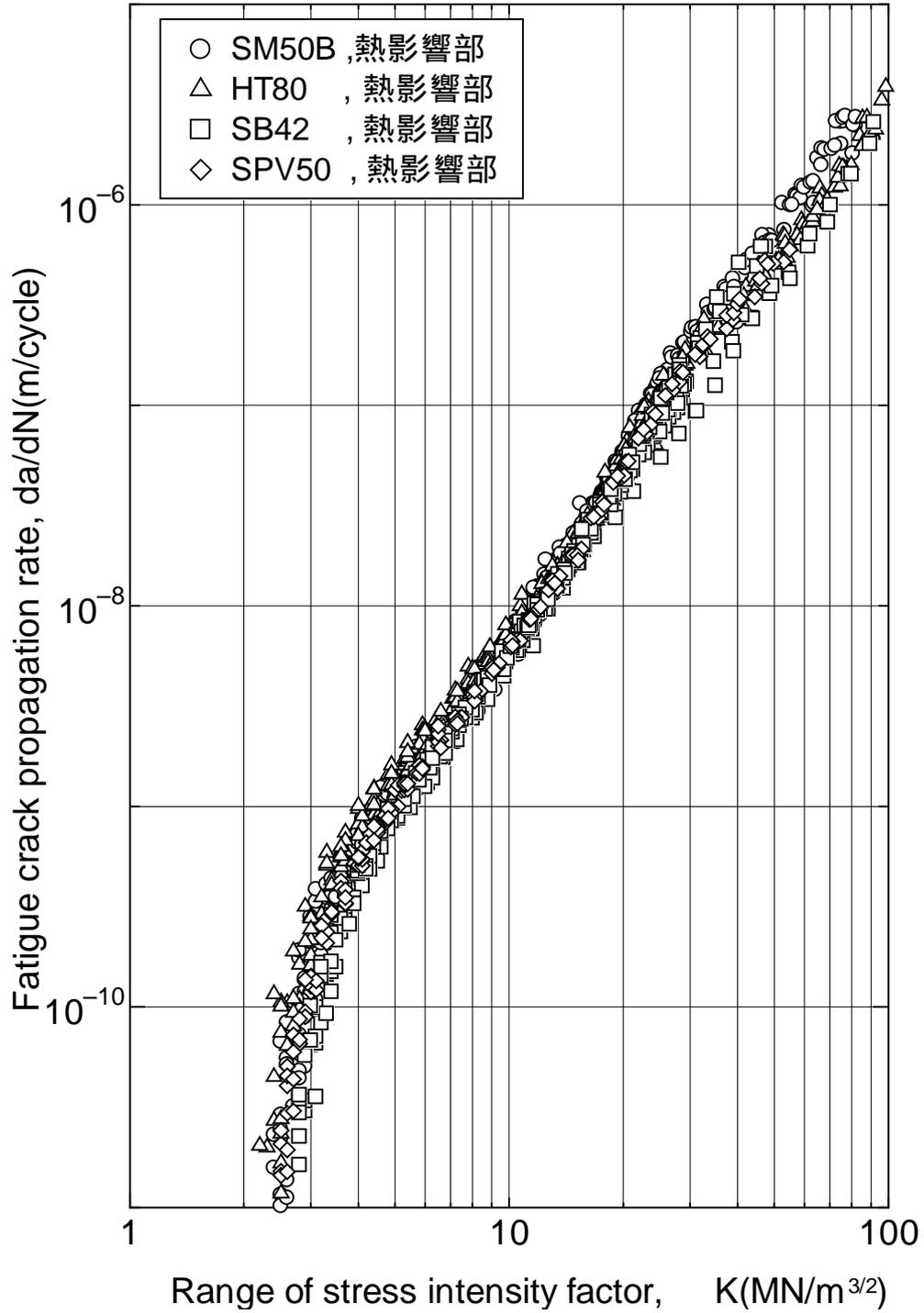


図 3.20 鋼種の違いによる影響 (熱影響部)

### Effect of Crack Propagation Zone

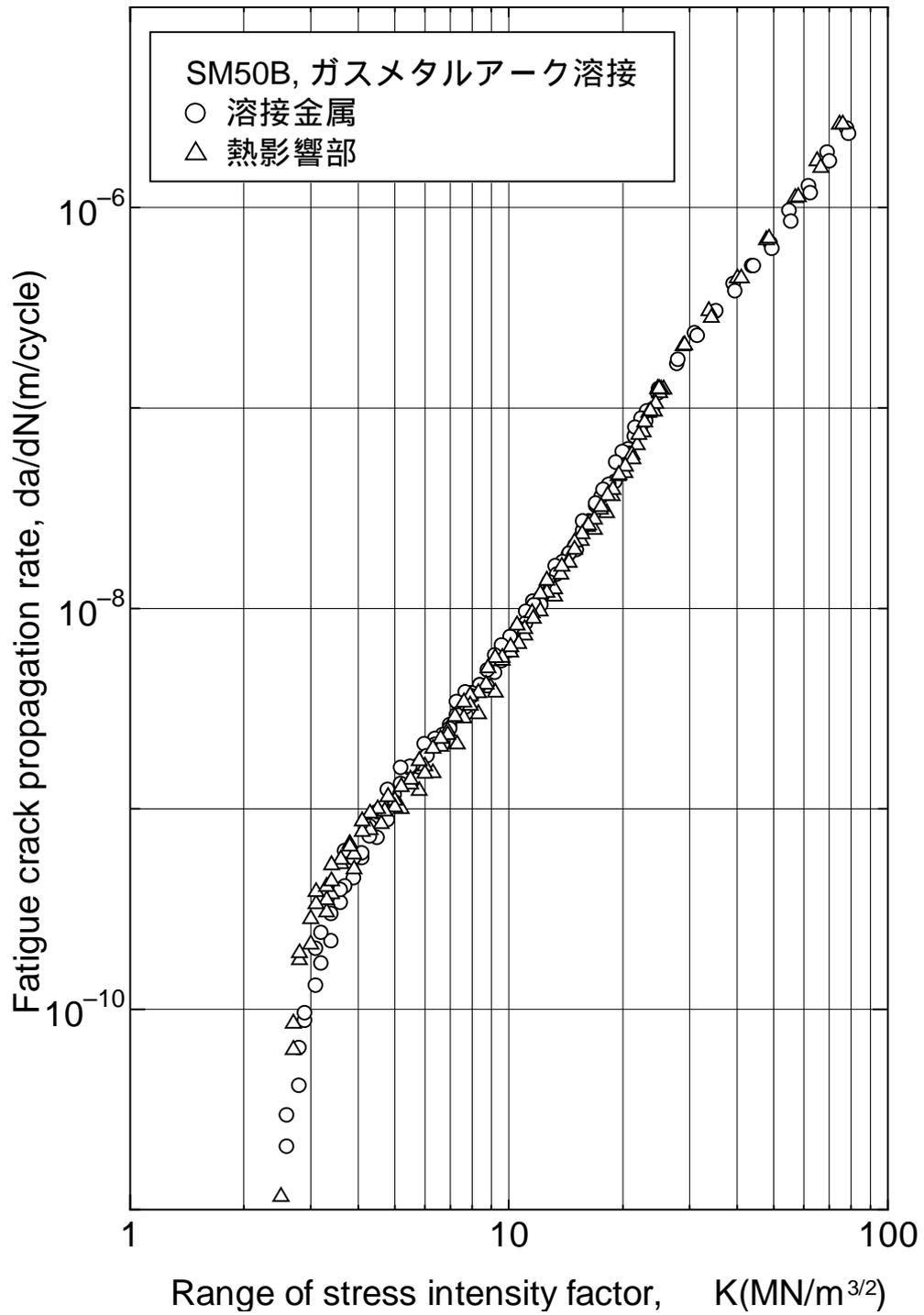


図 3.21 試験部位の違いによる影響 (SM50B)

### Effect of Crack Propagation Zone

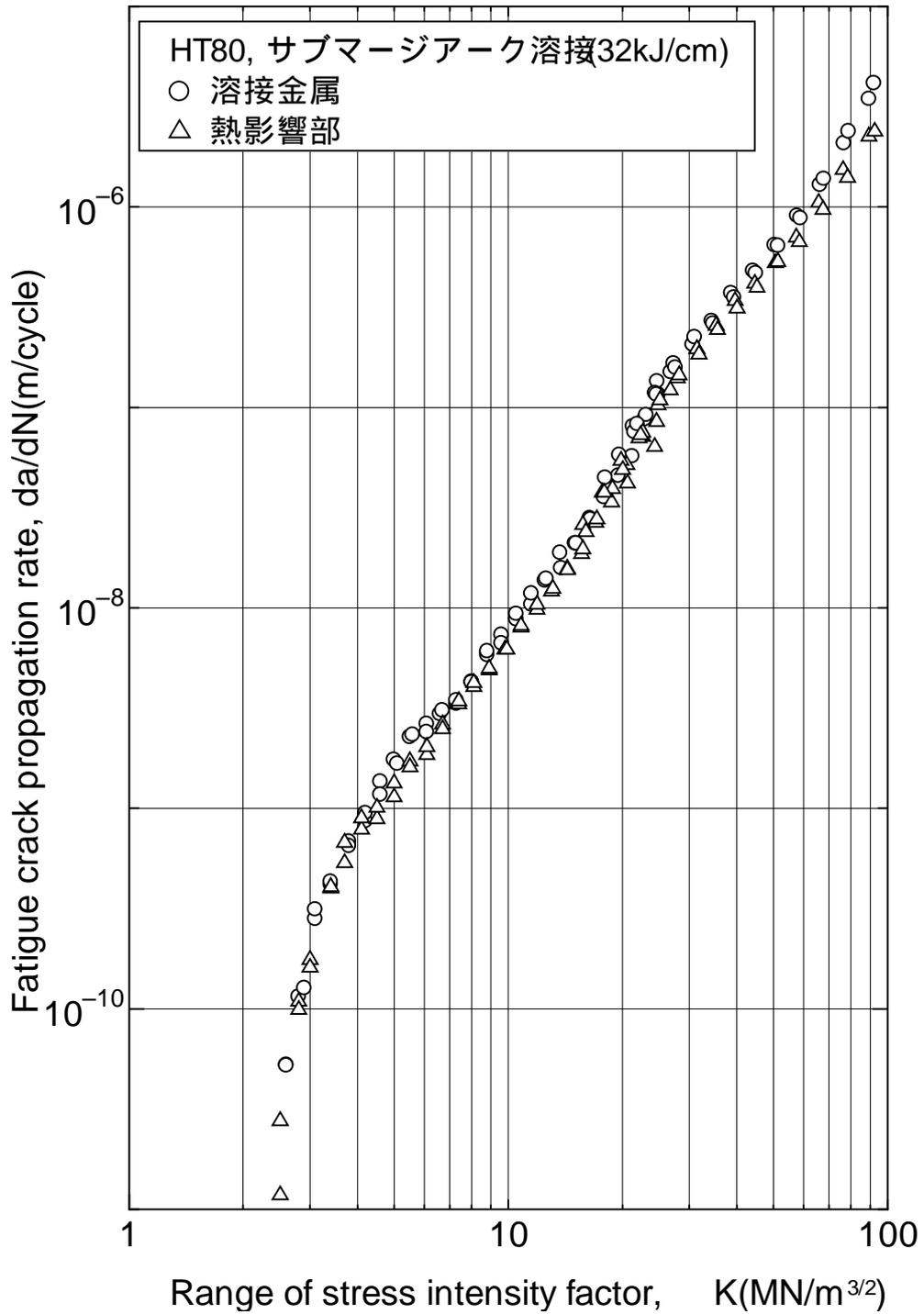


図 3.22 試験部位の違いによる影響 (HT80)

### Effect of Crack Propagation Zone

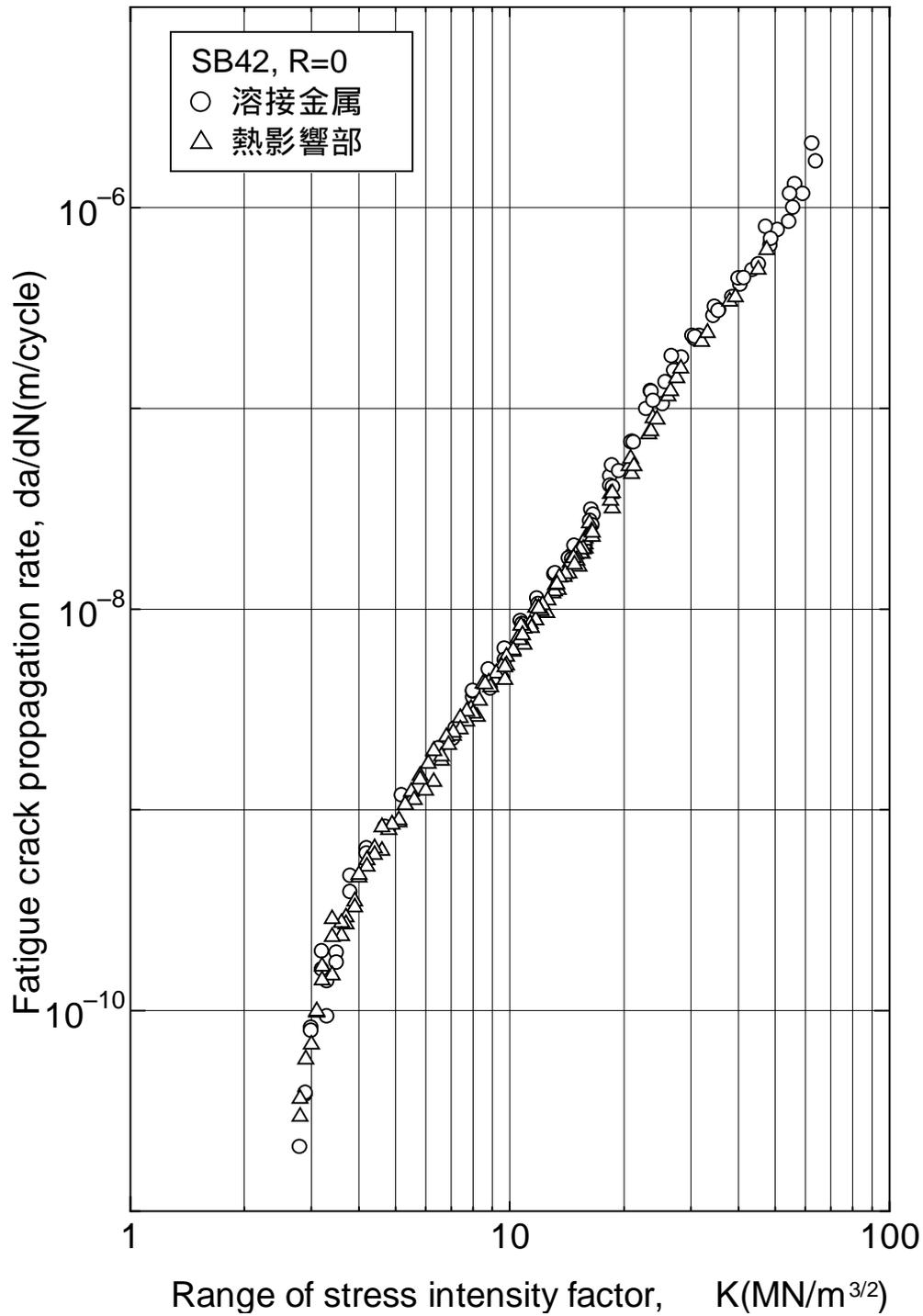


図 3.23 試験部位の違いによる影響 (SB42)

### Effect of Crack Propagation Zone

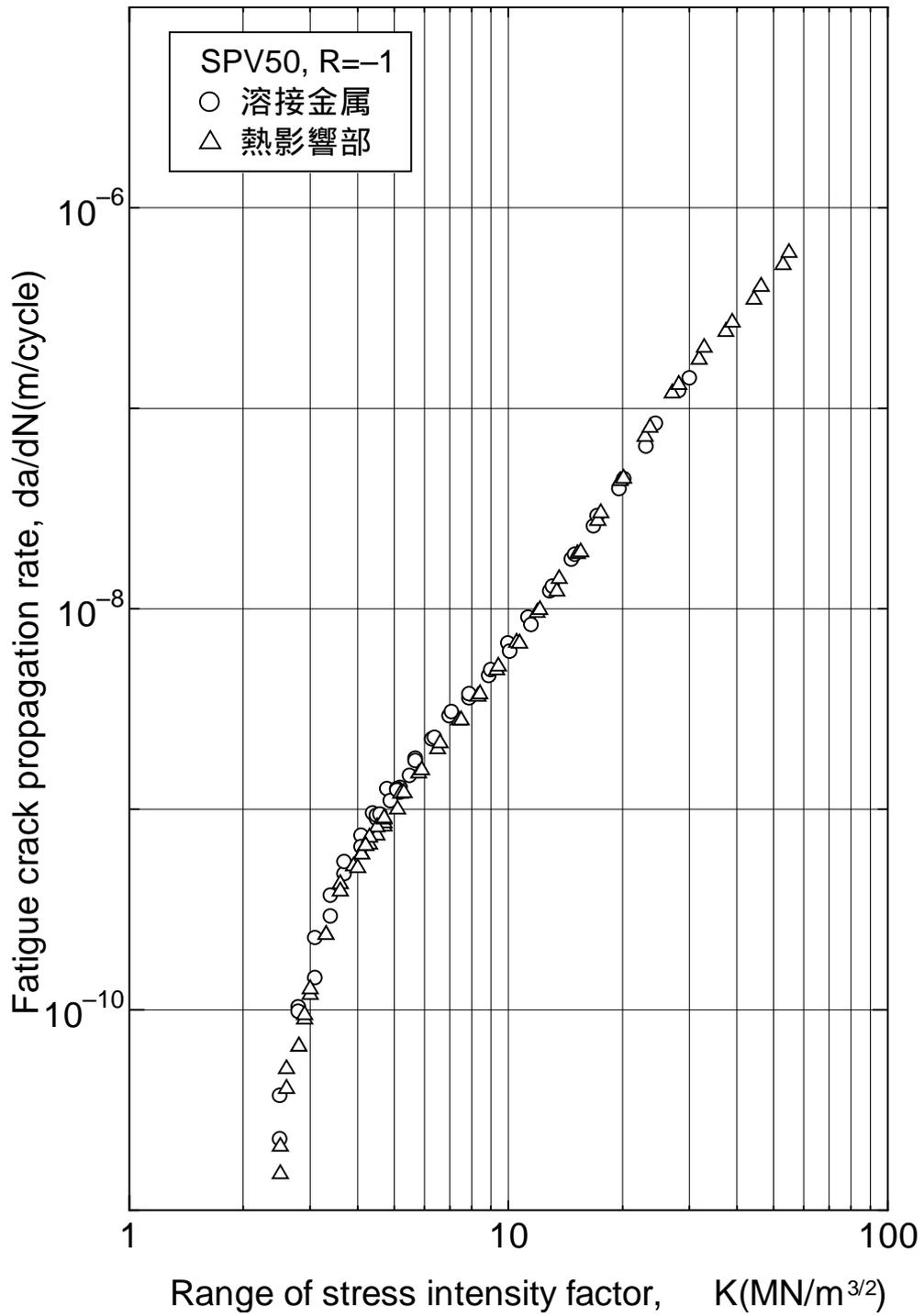


図 3.24 試験部位の違いによる影響 (SPV50)

### Effect of Welding Method

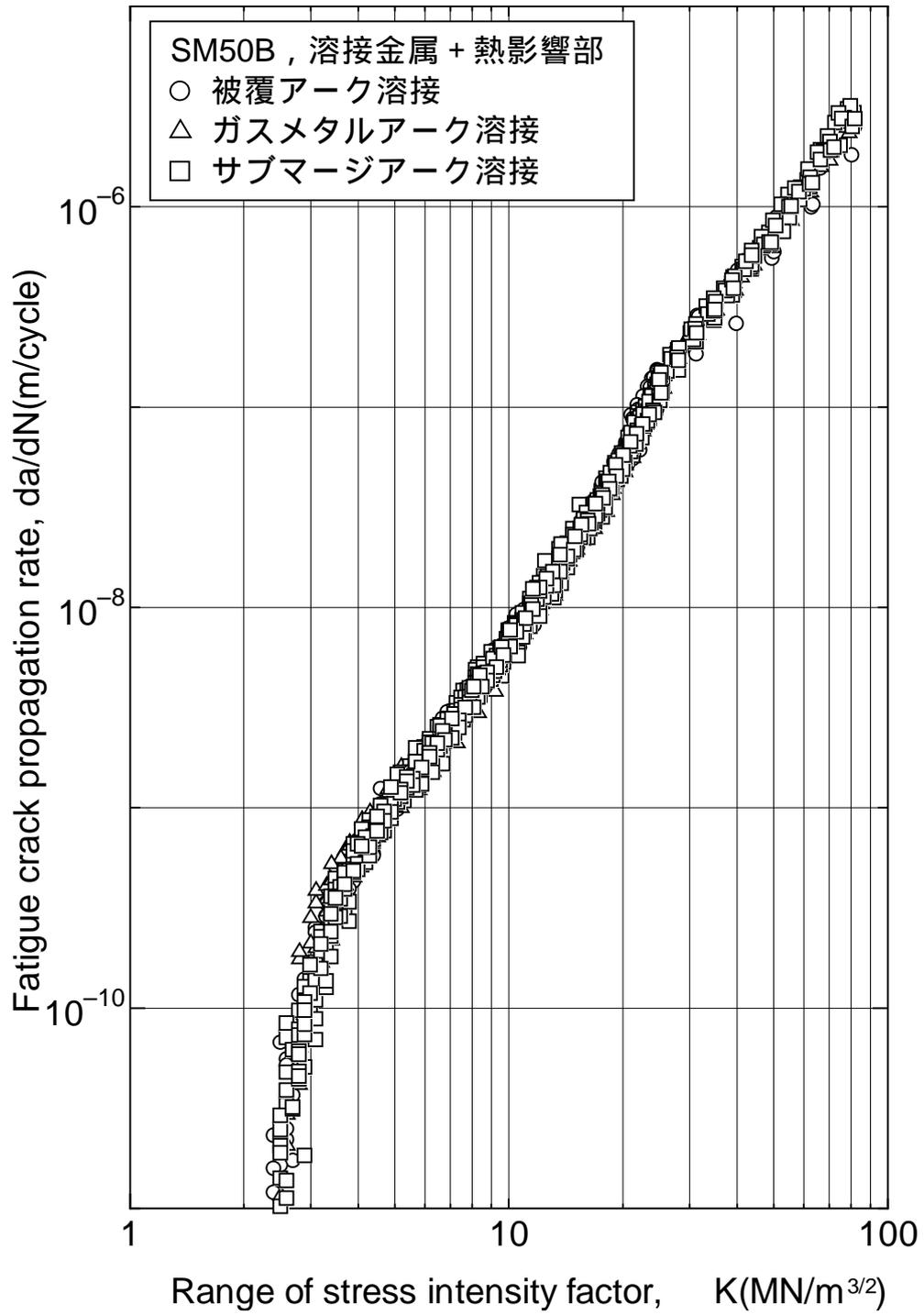


図 3.25 溶接法の違いによる影響 (SM50B)

### Effect of Welding Method

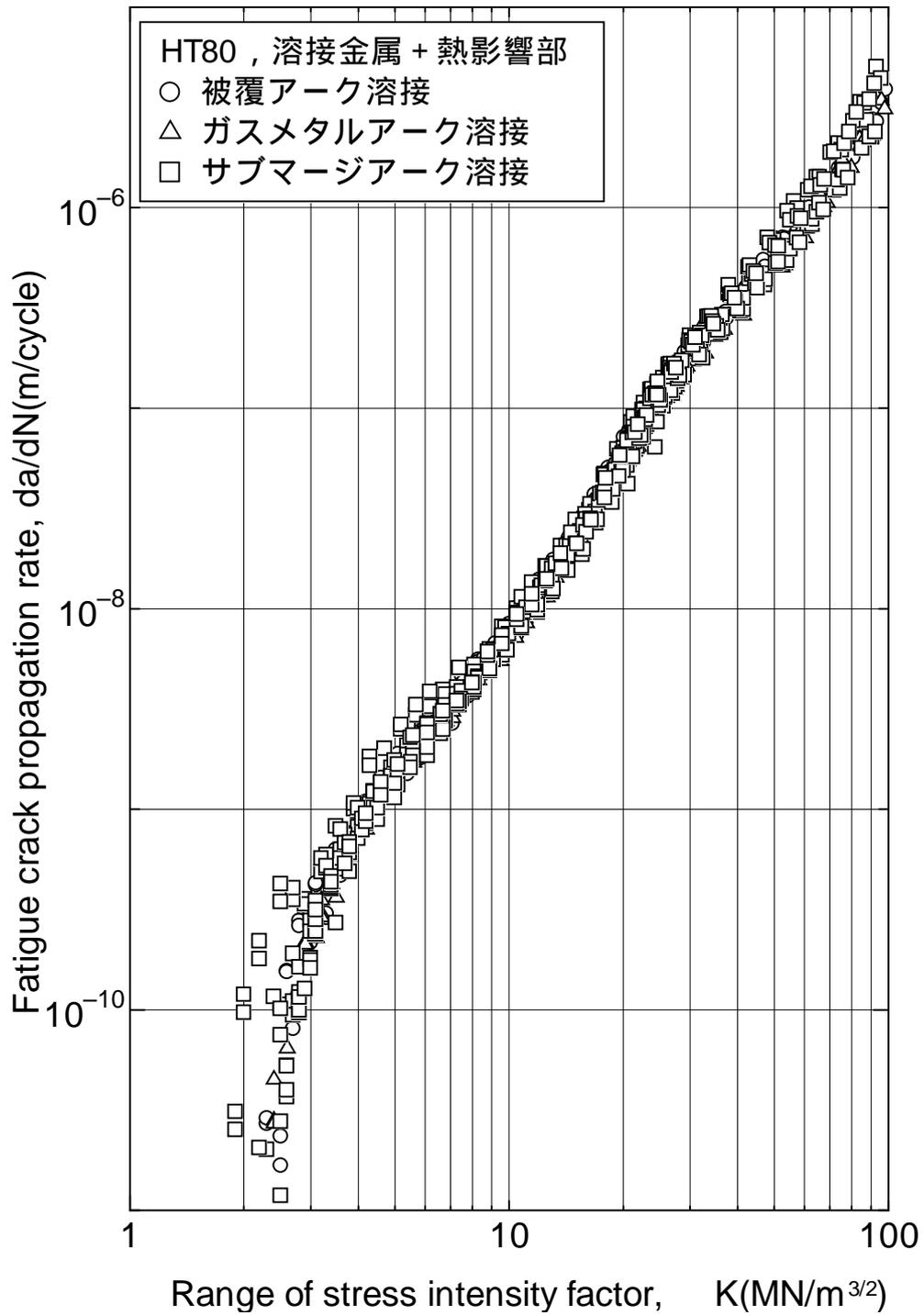


図 3.26 溶接法の違いによる影響 (HT80)

### Effect of Heat Input

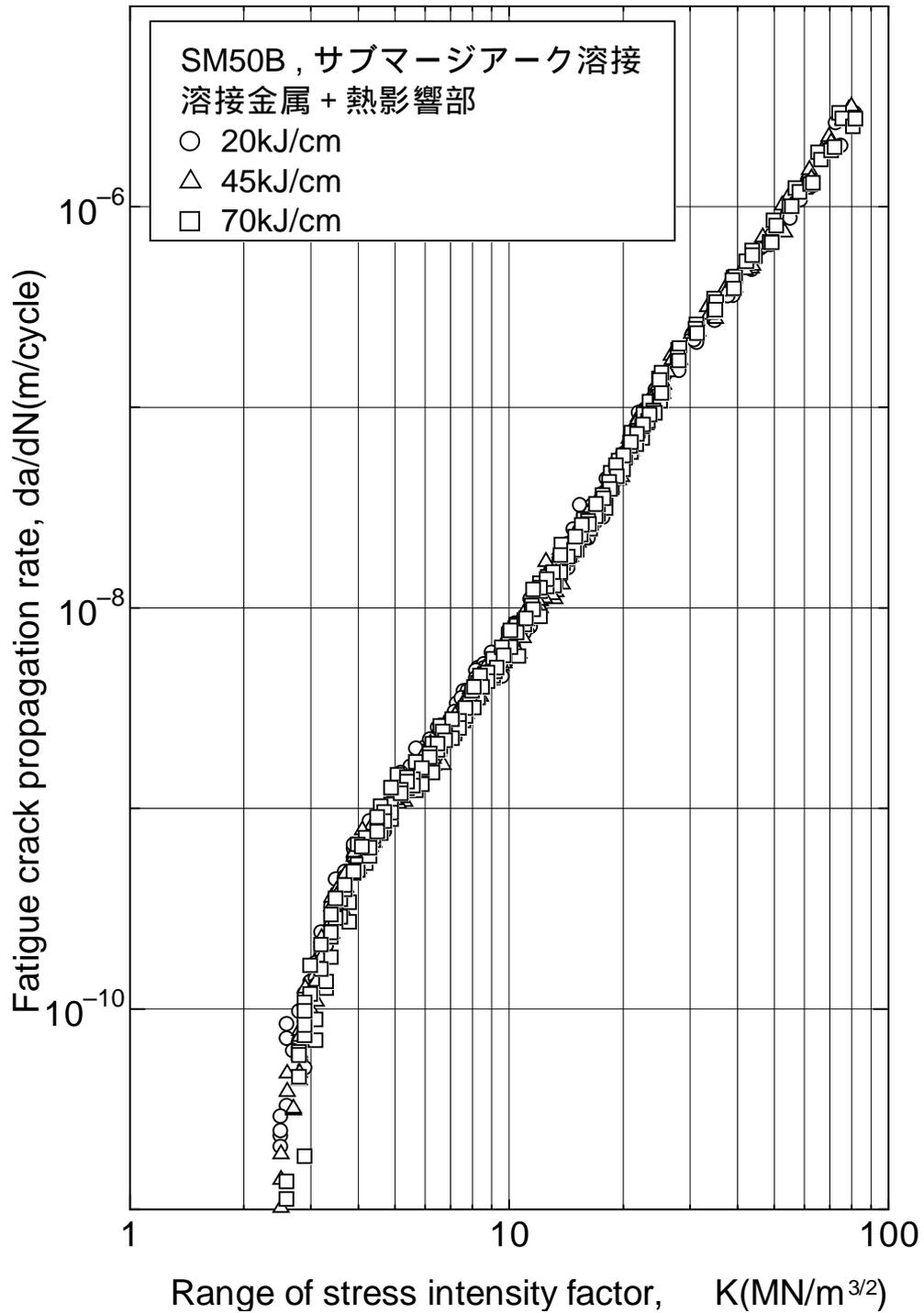


図 3.27 入熱量の違いによる影響 (SM50B)

### Effect of Heat Input

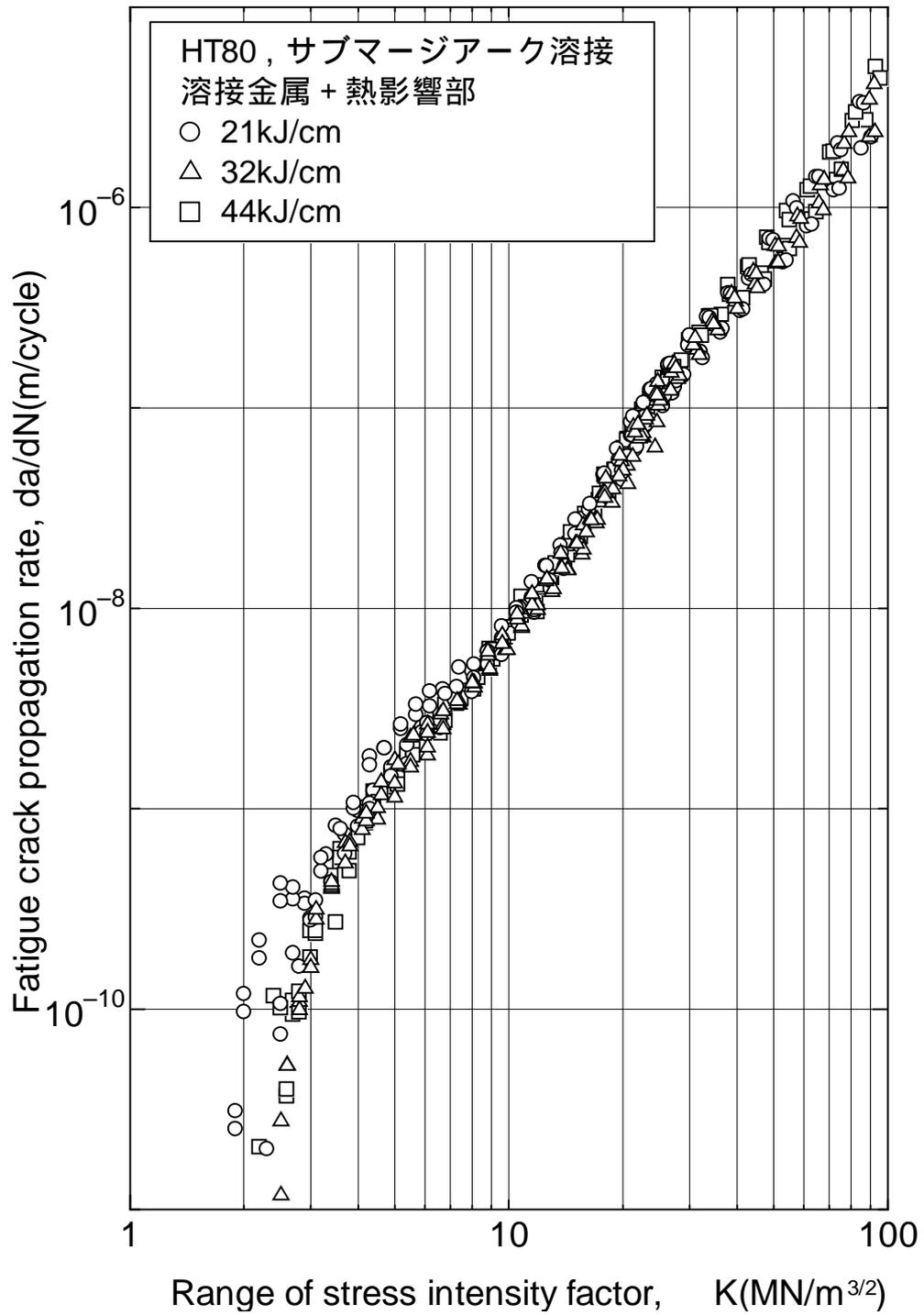


図 3.28 入熱量の違いによる影響 (HT80)

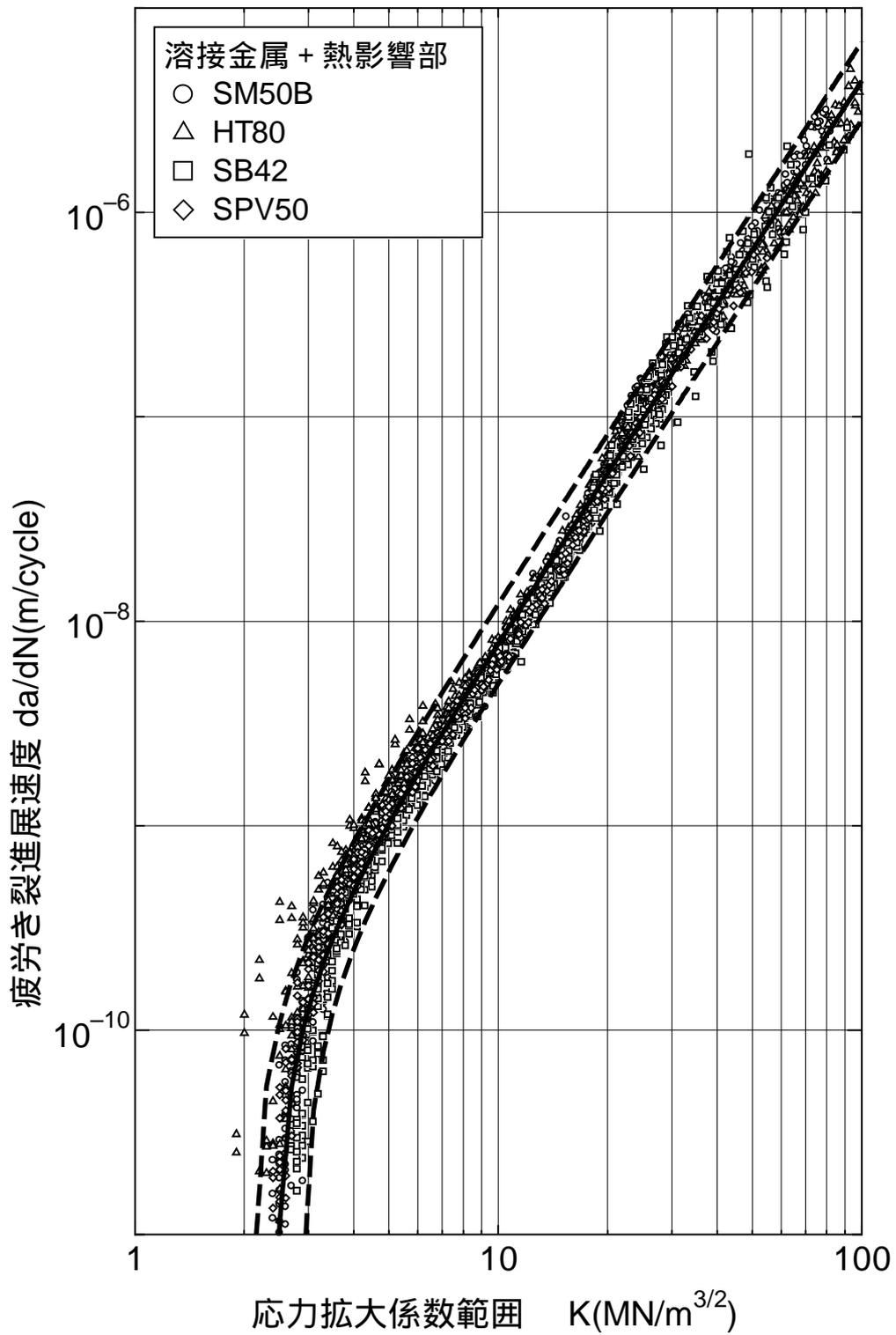


図 3.29 従来鋼の疲労き裂進展特性

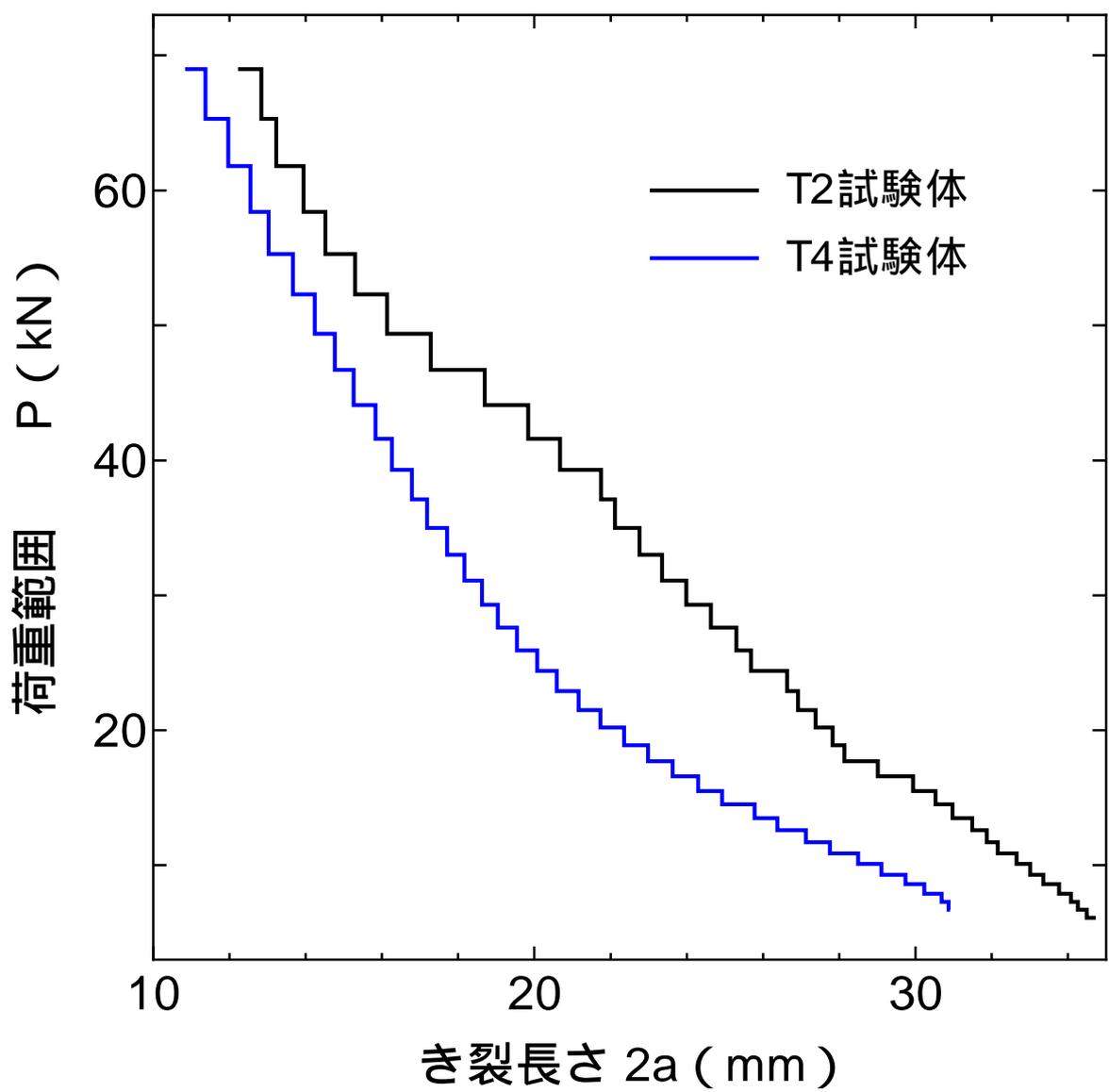


図 3.30 荷重範囲漸減試験における荷重範囲とき裂長さの関係

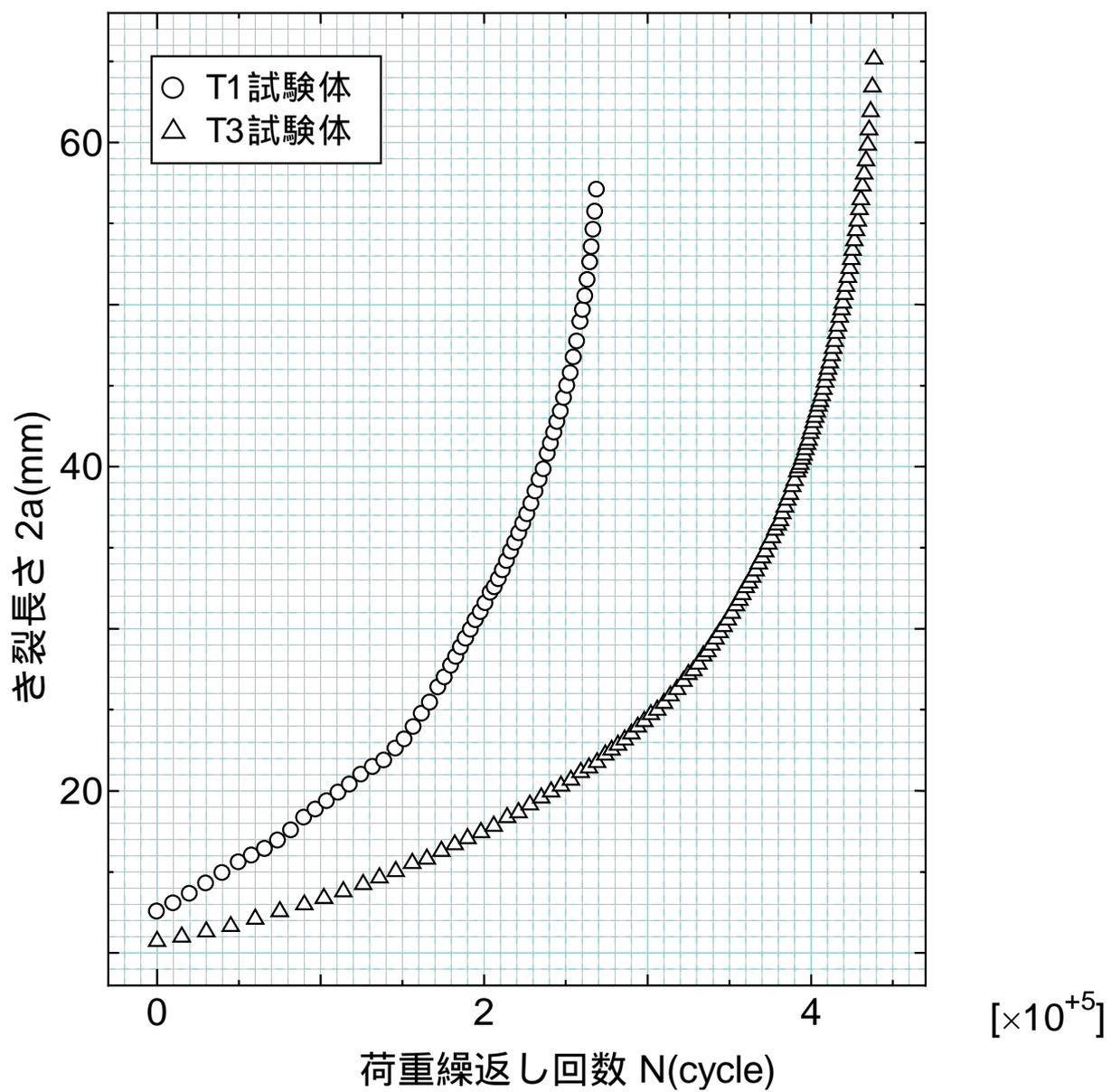


図 3.31 荷重範囲一定試験によるき裂長さ と 繰返し 載荷 回数 の 関係

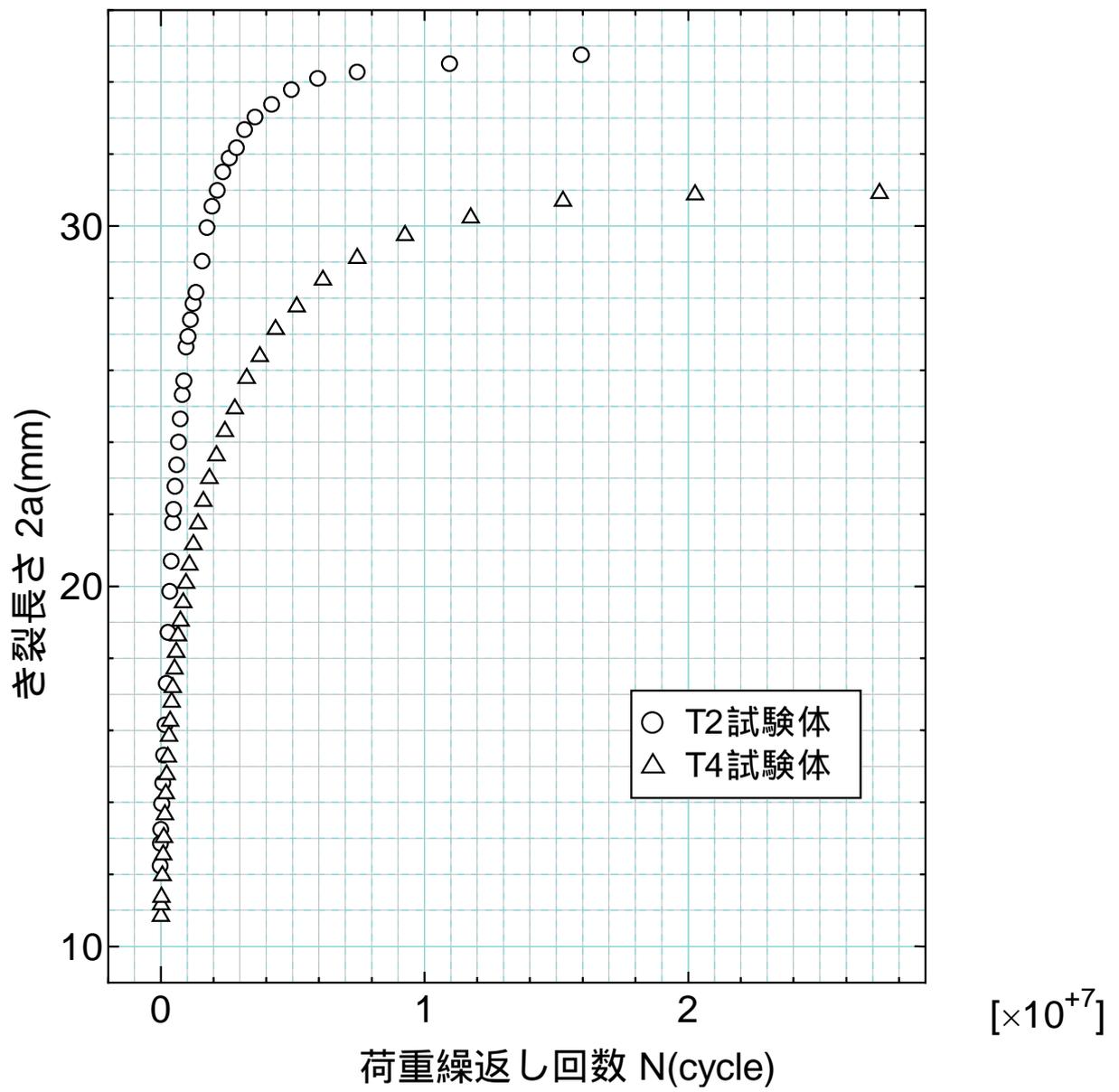


図 3.32 荷重範囲漸減試験によるき裂長さと繰返し载荷回数との関係

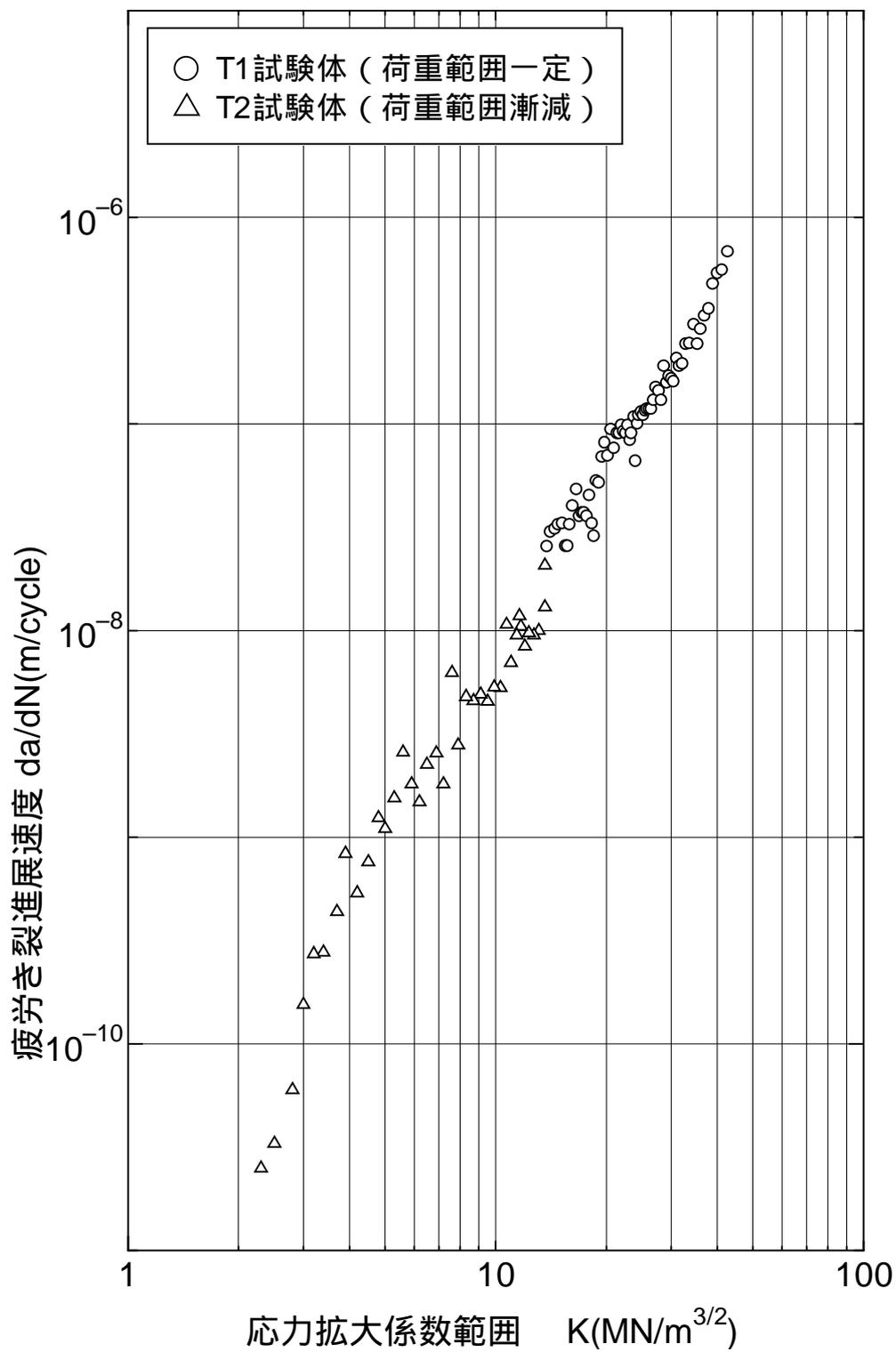


図 3.33  $da/dN$  -  $K$  関係 (T1 + T2)

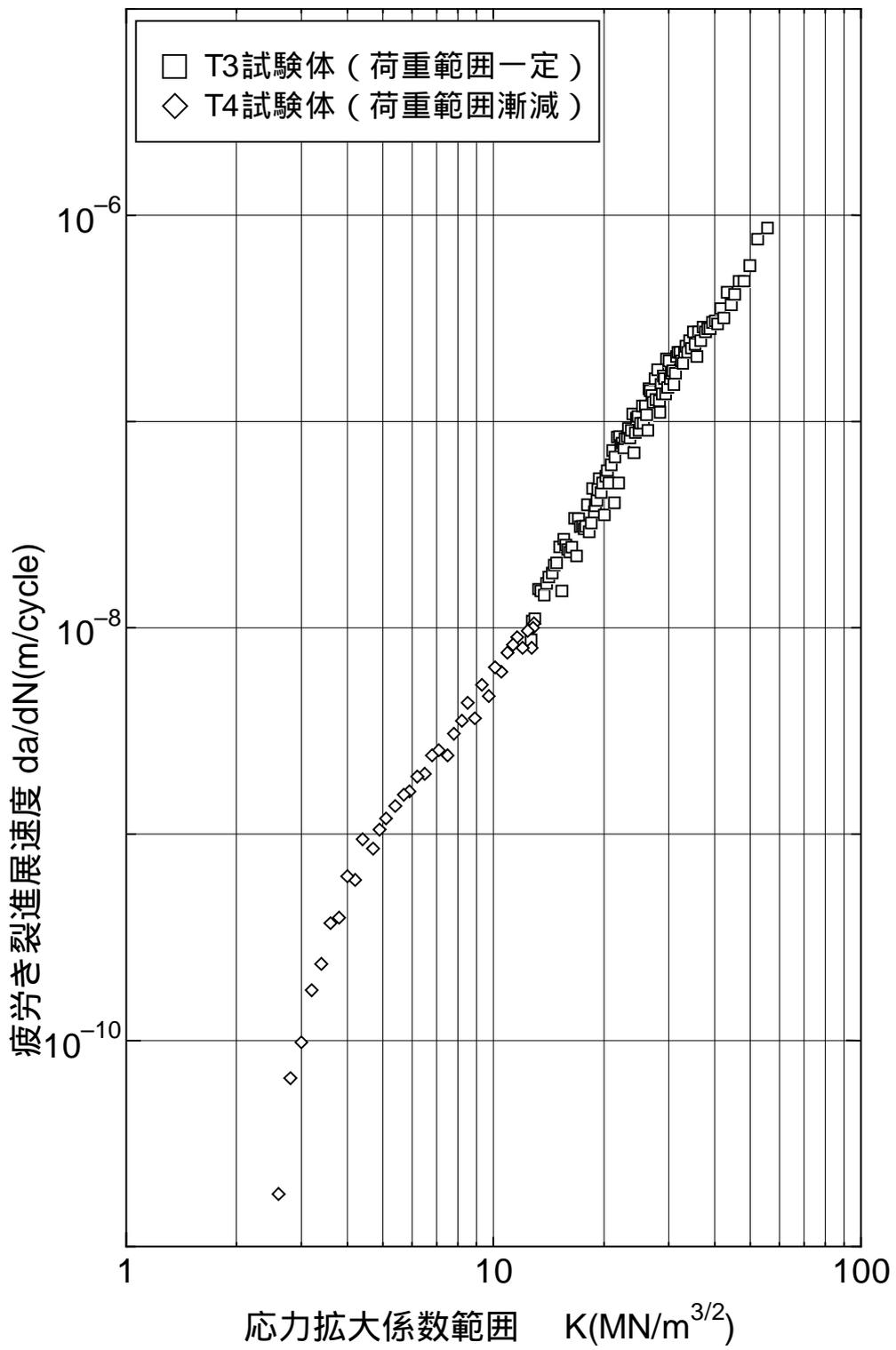


図 3.34  $da/dN$  -  $K$  関係 (T3 + T4)

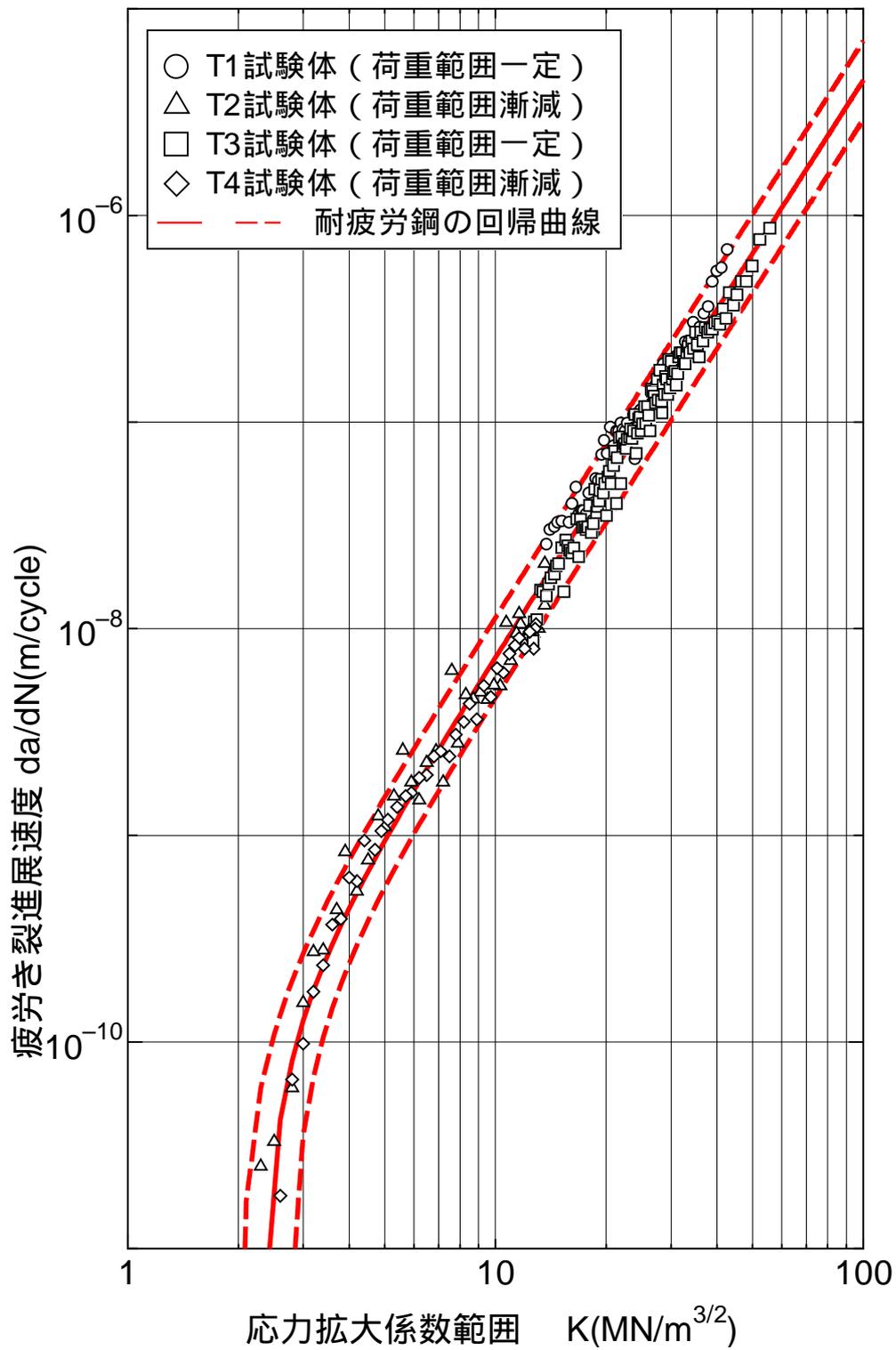


図 3.35 耐疲労鋼の疲労き裂進展特性

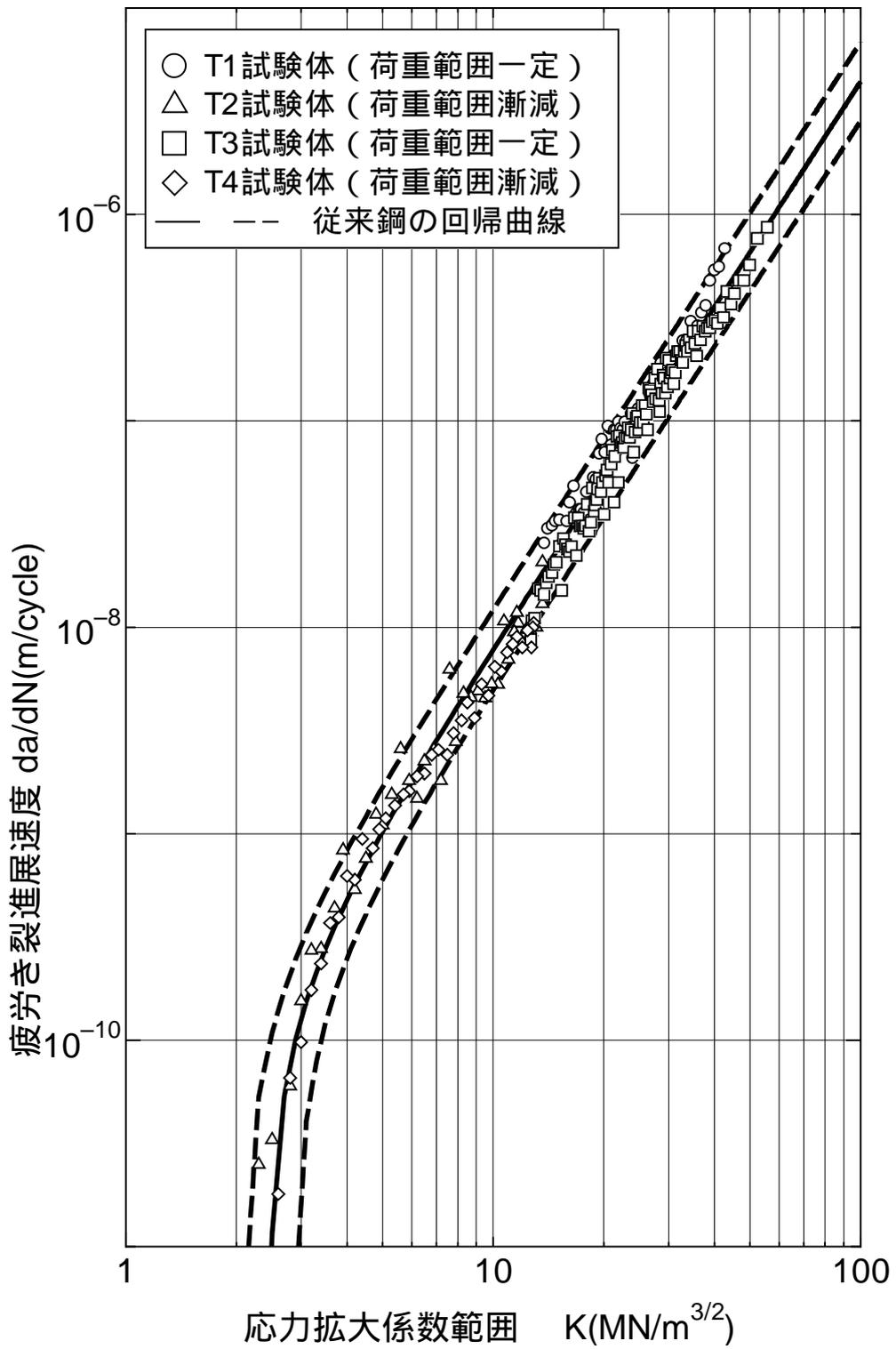


図 3.36 耐疲労鋼と従来鋼の疲労き裂進展特性の比較



(a)板厚加工前 (  $t=12\text{mm}$  )



(b)板厚加工後 (  $t=9\text{mm}$  )

写真 3.1 試験体の外観

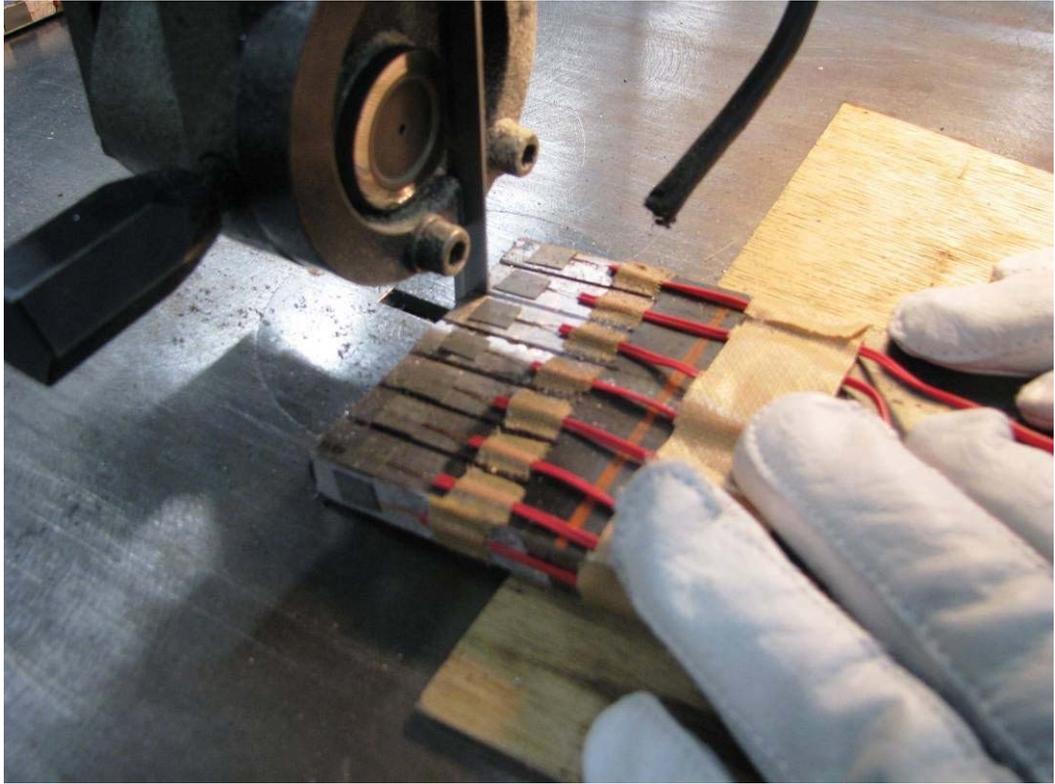


写真 3.2 試験体切断の様子

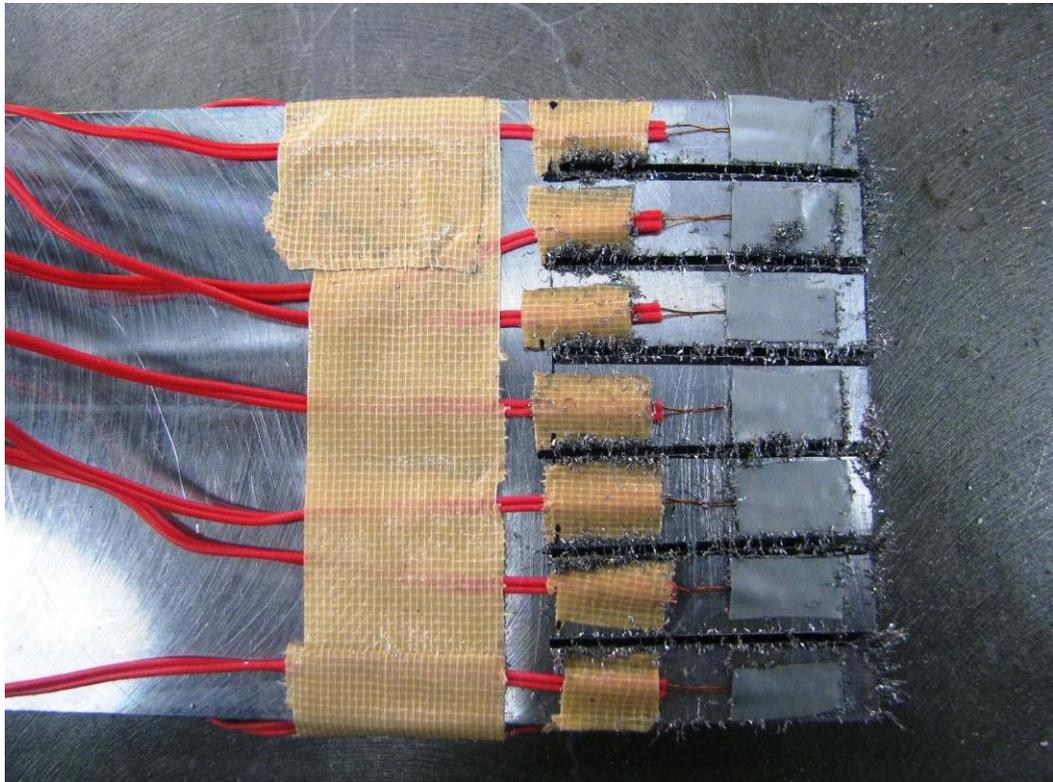


写真 3.3 切断後の試験体



写真 3.4 疲労き裂進展試験の状況

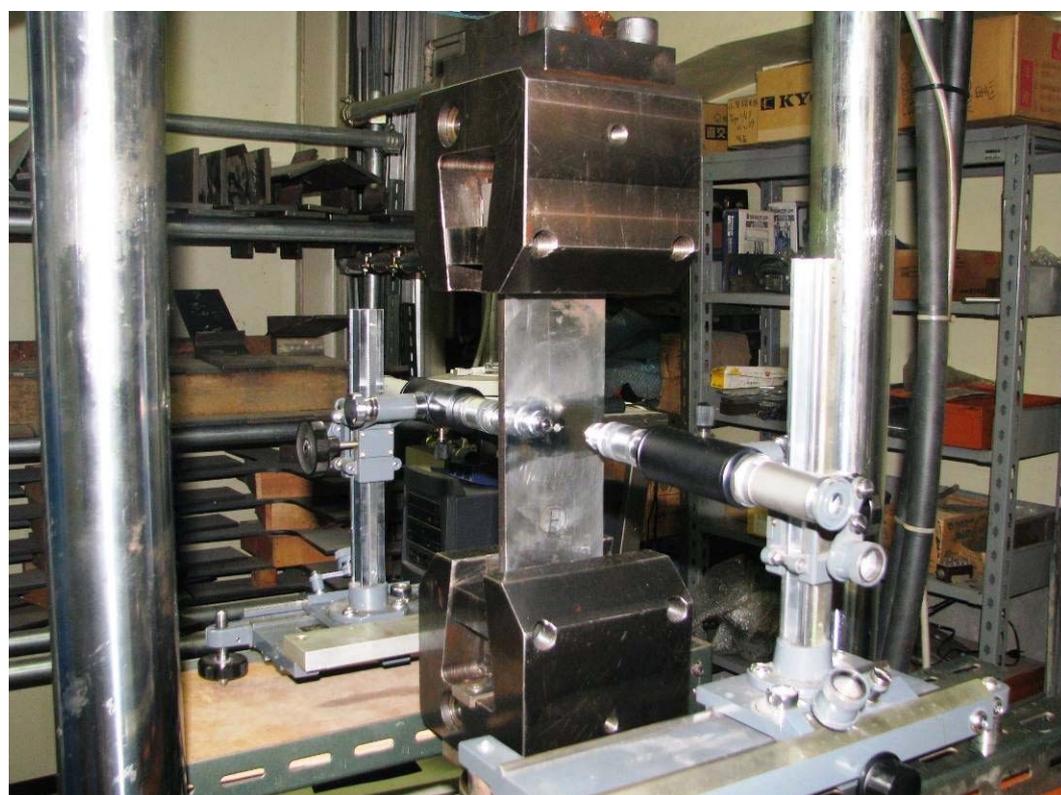


写真 3.5 き裂測定状況



(a)T1 試験体



(b)T3 試験体

写真 3.6 荷重範囲一定試験の試験体破面写真

## 第4章 耐疲労鋼溶接継手の疲労強度

### 4.1 供試鋼材

供試鋼材は板厚 12mm の耐疲労鋼 SM490YA-FCA (降伏応力  $433\text{N/mm}^2$ 、引張強度  $591\text{N/mm}^2$ ) と従来鋼 SM490YA (降伏応力  $416\text{N/mm}^2$ 、引張強度  $549\text{N/mm}^2$ ) である。これらの鋼材の化学成分を表 4.1 に、機械的性質を表 4.2 に示す。

### 4.2 試験体

#### 4.2.1 試験体の形状と溶接方法

試験体は、前節で示した耐疲労鋼と従来鋼で作製した荷重非伝達型十字溶接継手(以下、十字継手と記す)と面外ガセット溶接継手(以下、面外ガセットと記す)である。試験体の形状と寸法を図 4.1 に、試験体の外観を写真 4.1 に示す。これらの試験体を、「C-F-AW (試験体番号)」、「C-C-AW (試験体番号)」、「G-F-AW (試験体番号)」、「G-C-AW (試験体番号)」と呼ぶ。最初の記号 C は十字溶接継手 (Cruciform welded joint)、G は面外ガセット溶接継手 (out-plane-Gusset welded joint) であることを意味している。2 番目の記号 F は耐疲労鋼 (Fatigue crack arresting steel)、C は従来鋼 (Conventional steel) であることを意味している。3 番目の記号 AW は溶接のまま (as welded) を意味している。

十字継手の溶接は、図 4.2(a)に示すように付加板に深さ 5mm、角度  $60^\circ$  の開先を設け、部分溶け込み溶接で行なっている。まず、開先を溶接で埋め戻し、その後脚長 8mm のすみ肉溶接を行なっている。なお、溶接方法は  $\text{CO}_2$  溶接であり、電流 180A、電圧 20 ~ 22V、速度は 20cm/min である。

面外ガセットの溶接は、図 4.2(b)に示すようにガセット板に深さ 4mm と 6mm、角度  $60^\circ$  と  $45^\circ$  の開先を設け、完全溶け込み溶接で行なっている。まず、 $45^\circ$  側の開先を埋め戻し、 $60^\circ$  側の開先内部を  $45^\circ$  側の溶接金属が見えるまでグラインダーで切削する。次に  $60^\circ$  側の開先部を溶接で埋め戻し、その後脚長 6mm の隅肉溶接を行なっている。一般に完全溶け込み溶接ではガウジングを行なうが、熱変形を避けるためグラインダーによる切削とした。なお、溶接方法は十字継手、面外ガセットともに  $\text{CO}_2$  溶接であり、電流 180A、電圧 20 ~ 22V、速度は十字継手が 20cm/min、面外ガセットは 30cm/min である。なお、溶接方法は  $\text{CO}_2$  溶接であり、電流 180A、電圧 20 ~ 22V、速

度は 30cm/min である。

#### 4.2.2 溶接形状

各試験体の溶接止端部の曲率半径  $r$  とフランク角  $\theta$ 、そして溶接脚長を測定した。  
と および溶接脚長の定義は、図 4.4 に示すとおりである。これらの測定は、図 4.3 に示すように 1 体の試験体につき 4 箇所 (FU,FD,BU,BD) の溶接部を対象に行った。測定は、歯科用ゴム弾性印象材(ジーシーエグザファイン)で溶接部の型取りを行い、固まった印象材を約 2mm 幅にスライスし、拡大投影機を用いて観察することにより行なった。投影レンズの倍率は、 $r$  と  $\theta$  の測定で 20 倍、脚長の測定では 10 倍とした。耐疲労鋼を用いた十字継手の測定結果を表 4.3~表 4.5 に、従来鋼を用いた十字継手の測定結果を表 4.6~表 4.8 に示す。また、耐疲労鋼を用いた面外ガセットの測定結果を表 4.9~表 4.12 に、従来鋼を用いた面外ガセットの測定結果を表 4.13~表 4.16 に示す。疲労き裂の起点になると考えられる主板側溶接止端の  $r$  と  $\theta$  の関係を十字継手と面外ガセットに分けて、図 4.5(a)、(b)に示す。 $r$  は十字継手、面外ガセットともに 1mm 前後に多く分布し、 $\theta$  は十字継手で 120~130°、面外ガセットは 110~140° にデータが集中している。主板側の  $r$  と  $\theta$  の平均値は、十字継手の耐疲労鋼で  $r=1.2\text{mm}$ 、 $\theta=127^\circ$ 、従来鋼で  $r=1.0\text{mm}$ 、 $\theta=125^\circ$  であり、面外ガセットの耐疲労鋼で  $r=0.9\text{mm}$ 、 $\theta=127^\circ$ 、従来鋼で  $r=0.9\text{mm}$ 、 $\theta=126^\circ$  であった。このように、耐疲労鋼と従来鋼で溶接形状に顕著な違いは見られない。

### 4.3 残留応力の測定

#### 4.3.1 残留応力の測定方法

耐疲労鋼と従来鋼を用いた試験体の残留応力の相違を確認するために、十字継手と面外ガセットの残留応力の測定を行なった。残留応力の測定は、溶接止端線に沿って貼付した一軸のひずみゲージ(ゲージ長 2mm)の周りを切断する方法により行なった。試験体の切断にはコンターマシン盤を用いた。試験体切断の様子を写真 4.2 に示す。

ひずみゲージの貼付位置及び試験体の切断位置を図 4.6 に、切断後の試験体を写真 4.3 に示す。ひずみゲージは、試験体の溶接止端から 5mm 離れた位置を基本とするが、溶接脚長は試験体両面で異なるため、両面の主板側溶接脚長を比較し、脚長の長い面を基準とした。なお、残留応力の測定は、表面と裏面で測定している。残留応力の測定は、表面と裏面で測定している。残留応力の値は、試験体切断後のひずみの読み値

の差に鋼材のヤング率 ( $2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ ) を乗じることにより求めた。切断後に残留応力が開放されることにより、引張残留応力が作用している箇所は収縮し、圧縮残留応力が作用している箇所は膨張する。そのため、残留応力を求める際には、ひずみの符号を反転させて用いた。なお、ひずみの測定には、デジタルひずみ測定器 (TDS-303) を用いた。

#### 4.3.2 残留応力の測定結果

残留応力の測定結果を表 4.17～表 4.20 及び図 4.7～図 4.8 に示す。十字継手は、耐疲労鋼、従来鋼ともに板幅中央付近の溶接部に  $90 \sim 100 \text{N/mm}^2$  程度の引張残留応力が生じている。板幅中央から両側に  $30 \text{mm}$  離れた位置では圧縮残留応力が生じており、応力分布は自己平衡形になっている。面外ガセットは、耐疲労鋼、従来鋼ともに板幅中央のガセットの溶接部に  $290 \text{N/mm}^2$  程度の引張残留応力が溶接部に生じている。板幅中央から両側に  $20 \text{mm}$  離れた位置では圧縮残留応力が生じ、側面では  $200 \text{N/mm}^2$  程度の引張残留応力が生じている。応力分布は自己平衡形である。どちらの試験体も耐疲労鋼と従来鋼で残留応力に顕著な違いは見られない。

## 4.4 疲労試験

### 4.4.1 試験方法

#### (1) 十字継手

疲労試験は動的能力 $\pm 500\text{kN}$ の電気油圧サーボ式多目的大型材料試験装置(MODEL2806、鷺宮製作所)と動的能力 $\pm 500\text{kN}$ の応力/変位制御高ひずみ試験装置(810型材料試験、MTS)の2台を用いて、下限荷重を $10\text{kN}$ (下限応力 $10.4\text{N/mm}^2$ )とし、公称応力範囲を $110\text{N/mm}^2$ 、 $130\text{N/mm}^2$ 、 $160\text{N/mm}^2$ 、 $200\text{N/mm}^2$ とした条件で行なった。荷重波形は正弦波、繰返し速度は $8\sim 14\text{Hz}$ である。疲労試験の状況を写真4.4に示す。試験体数は、従来鋼、耐疲労鋼ともに各応力範囲につき2体とした。各試験体の板幅と板厚を計測した結果を表4.21～表4.24に示す。寸法計測位置は、図4.9に示すとおりである。各試験体の荷重条件を表4.25～表4.26に示す。疲労試験を開始する前に静的に荷重を載荷し、所定の応力が生じているか、試験体左右で応力のアンバランスがないかを調べるために、図4.10に示す位置の表裏面にひずみゲージ(ゲージ長 $5\text{mm}$ )を貼付し、ひずみの計測を行なった。ひずみの計測には、デジタルひずみ測定器(TDS-301)を用いた。左右表裏でひずみが10%以上異なっていた場合には、試験体の試験機への取り付けをやり直した。

#### (2) 面外ガセット

疲労試験は動的能力 $\pm 500\text{kN}$ の電気油圧サーボ式多目的大型材料試験装置(MODEL2806、鷺宮製作所)と動的能力 $\pm 500\text{kN}$ の応力/変位制御高ひずみ試験装置(810型材料試験、MTS)の2台を用いて、下限荷重を $10\text{kN}$ (下限応力 $8.3\text{N/mm}^2$ )とし、公称応力範囲を $60\text{N/mm}^2$ 、 $70\text{N/mm}^2$ 、 $85\text{N/mm}^2$ 、 $100\text{N/mm}^2$ 、 $120\text{N/mm}^2$ 、 $150\text{N/mm}^2$ とした条件で行なった。荷重波形は正弦波、繰返し速度は $8\sim 14\text{Hz}$ である。疲労試験の状況を写真4.6に示す。試験体数は、従来鋼、耐疲労鋼ともに各応力範囲につき2体とした。各試験体の板幅と板厚を計測した結果を表4.27～表4.30に示す。寸法計測位置は、図4.11に示すとおりである。荷重条件を表4.31～表4.32に示す。疲労試験を開始する前に静的に荷重を載荷し、所定の応力が生じているか、試験体左右で応力のアンバランスがないかを調べるために、図4.12に示す位置の表裏面にひずみゲージ(ゲージ長 $5\text{mm}$ )を貼付し、ひずみの計測を行なった。ひずみの計測には、デジタルひずみ測定器(TDS-301)を用いた。左右表裏でひずみが10%以上異なっていた場合には、試験体の試験機への取り付けをやり直した。

#### 4.4.2 疲労試験結果

##### (1) 十字継手

疲労試験の結果を表 4.33～表 4.34 に、破断した試験体の破面を写真 4.6～写真 4.19 に示す。

図 4.13 に疲労試験によって得られた十字継手の公称応力範囲  $\sigma_n$  と疲労寿命  $N$  の関係を示す。図中の青線は、JSSC 指針に示されている疲労強度等級 A～G の設計  $\sigma_n$ - $N$  関係を示している。なお、JSSC 指針では溶接のままの十字継手に対して E 等級と規定しているが、試験結果は耐疲労鋼、従来鋼ともに D 等級以上となっている。

公称応力範囲  $130 \sim 200 \text{N/mm}^2$  までは、耐疲労鋼と従来鋼の疲労強度に顕著な差は認められない。しかし、応力範囲  $110 \text{N/mm}^2$  では、従来鋼は 2 体とも破断しているのに対し、耐疲労鋼は未破断となった。この結果は、耐疲労鋼の疲労限が従来鋼に比べて高いことを示している。

##### (2) 面外ガセット

疲労試験の結果を表 4.35～表 4.36 に、破断した試験体の破面写真を写真 4.20～写真 4.41 に示す。

図 4.14 に疲労試験により得られた面外ガセットの公称応力範囲  $\sigma_n$  と疲労寿命  $N$  の関係を示す。面外ガセットに対する JSSC 指針の疲労強度等級は、溶接のままの継手に対して G 等級としているが、試験結果は耐疲労鋼、従来鋼ともに F 等級以上となっている。

十字継手の有限寿命域と同じように、耐疲労鋼と従来鋼の疲労強度に顕著な差は認められない。本試験では、疲労限を確認することができなかったが、十字継手と同様に耐疲労鋼と従来鋼の疲労限の違いを確認するには、さらに低応力範囲での検討が必要である。

#### 4.5 潜在き裂の確認

破断箇所と反対側の溶接止端部について、磁粉探傷試験を行い、き裂の有無を調査した。ここでは、破断面以外の溶接止端部に存在するき裂を潜在き裂と呼ぶ。

磁粉探傷試験は、強磁性体である試験体に磁束を流し、磁粉を試験面に散布して欠陥部に凝集吸着して形成した欠陥磁粉模様を見つけ出し、これを評価することで試験体の表層部に存在する欠陥を検出する方法である<sup>22)</sup>。

各試験体のき裂検出結果を表 4.37 と表 4.38 に示す。また、代表的な十字継手のき

裂検出写真を写真 4.42 に、面外ガセットのき裂検出写真を写真 4.43 に示す。磁粉探傷試験の結果、従来鋼十字継手は公称応力範囲  $160\text{N/mm}^2$  以上で潜在き裂が見られ、公称応力範囲  $130\text{N/mm}^2$  以下では見られなかったが、耐疲労鋼十字継手は公称応力範囲  $160\text{N/mm}^2$  以上でも潜在き裂が見られなかった。この結果は、耐疲労鋼は従来鋼に比べてき裂が発生しにくいことを示している。一方、面外ガセットについては、従来鋼、耐疲労鋼ともに公称応力範囲によらず潜在き裂が見られた。この結果は、十字継手に比べて面外ガセットはき裂が発生しやすいことを示しており、疲労試験で疲労限が現れにくい結果と一致している。

#### 4.6 耐疲労鋼と従来鋼の疲労強度比較

図 4.15 に十字継手の耐疲労鋼と従来鋼の疲労強度を比較した結果を示す。図中の赤と黒の実線は、それぞれ耐疲労鋼と従来鋼の疲労試験データに最小二乗法を適用することにより求めた回帰直線を示している。その際、疲労寿命を独立変数としている。耐疲労鋼の疲労強度は、平均で従来鋼に比べて高くなっているが、その差は小さい。例えば、回帰直線から求めた 200 万回疲労強度は耐疲労鋼で  $138.4\text{N/mm}^2$ 、従来鋼で  $132.8\text{N/mm}^2$  であり、その違いは 4.2%に過ぎない。この結果は、き裂進展寿命が、耐疲労鋼と従来鋼で同程度であることを示しており、第 3 章で示した結果とも一致する。また、耐疲労鋼は従来鋼に比べて疲労限が高くなっている。この結果は、耐疲労鋼は低応力範囲において疲労き裂発生を遅延させる効果があることを示していると考えられる。

図 4.16 には、面外ガセットの耐疲労鋼と従来鋼の疲労強度を比較した結果を示す。図中の赤と黒の実線は、それぞれ耐疲労鋼と従来鋼の疲労試験データに最小二乗法を適用することにより求めた回帰直線を示している。その際、疲労寿命を独立変数としている。耐疲労鋼と従来鋼の疲労強度はほぼ同じである。例えば、回帰直線から求めた 200 万回疲労強度は耐疲労鋼で  $91.3\text{N/mm}^2$ 、従来鋼で  $91.1\text{N/mm}^2$  であり、その違いは 0.2%に過ぎない。疲労限の差については、確認することができなかった。これは、面外ガセットは十字継手に比べて応力集中が高くき裂が発生しやすいためであり、疲労限は十字継手に比べて低い応力範囲で現れると考えられる。面外ガセットにおいて、十字継手と同様に耐疲労鋼と従来鋼で疲労限に差が生じるかを確認するためには、さらに低応力範囲での検討が必要である。

表 4.1 鋼材の化学成分

(a)耐疲労鋼

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ti	Nb	B	PCM
	×100			×1000		×100					×1000	×10000	×100	
SM490YA-FCA	4	42	152	8	2	2	2	17	1	0	8	-	1	14

(b)従来鋼

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ti	Nb	B	PCM
	×100			×1000		×100					×1000	×10000	×100	
SM490YA	16	33	134	17	3	1	1	4	1	0		-	0	24

表 4.2 鋼材の機械的性質

(a)耐疲労鋼

	降伏応力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
SM490Y-FCA	433	591	17

(b)従来鋼

	降伏応力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
SM490YA	416	549	27

表 4.3 耐疲労鋼十字継手溶接形状 (その1)

		主板側脚長 (mm)	付加板側脚長 (mm)	主板側 曲率半径 $\rho_1$ (mm)	付加板側 曲率半径 $\rho_2$ (mm)	主板側 フランク角 $\theta_1$ (°)	付加板側 フランク角 $\theta_2$ (°)
C-F-AW1	FU	8.4	9.0	1.50	1.50	132	138
		8.1	8.1	1.50	1.50	134	136
		8.3	8.3	1.50	1.50	128	134
		8.9	8.9	1.50	1.50	133	139
		8.4	8.3	1.75	1.75	126	133
	FD	8.6	8.7	1.75	1.25	126	126
		8.9	9.0	1.25	1.10	128	130
		8.6	8.3	1.50	1.50	138	134
		8.6	9.6	1.00	2.00	127	136
		9.2	9.2	1.50	1.00	137	134
	BU	8.5	8.4	1.75	2.00	131	131
		8.6	8.3	1.75	1.75	132	138
		8.7	7.8	1.75	1.75	138	134
		8.4	8.3	1.75	1.75	130	139
		9.2	8.0	1.75	1.75	140	137
	BD	8.6	7.8	1.50	1.00	138	132
		8.2	7.6	0.75	0.90	126	122
		8.3	7.8	2.00	2.00	128	128
		8.0	8.0	0.60	1.00	129	135
		9.1	7.7	2.00	1.00	126	120
C-F-AW2	FU	7.6	7.1	1.00	0.90	122	123
		8.0	7.2	1.20	0.90	120	122
		8.0	7.3	1.10	1.10	118	124
		7.8	7.0	0.90	0.75	126	120
		7.5	7.8	0.90	0.75	121	120
	FD	8.1	7.2	1.20	0.70	128	113
		8.0	7.5	0.90	0.90	123	123
		8.1	7.8	1.20	1.20	119	120
		8.0	7.8	0.90	0.90	125	124
		7.9	7.3	0.75	0.90	123	124
	BU	8.0	7.5	1.00	1.00	128	129
		8.0	7.1	1.40	0.90	128	119
		8.0	7.1	1.10	0.90	125	122
		7.0	8.0	1.00	1.00	115	128
		8.4	7.8	1.10	0.90	125	125
BD	7.5	7.7	1.10	1.10	115	113	
	8.1	7.5	1.25	1.10	115	113	
	7.5	7.5	0.90	1.00	122	125	
	8.0	7.5	1.20	1.00	128	123	
	7.7	7.8	0.90	1.00	127	122	
C-F-AW3	FU	7.5	7.3	1.00	1.00	120	124
		7.4	7.1	0.75	0.90	125	128
		7.3	7.3	0.90	1.00	124	128
		7.1	7.2	0.75	1.00	118	115
		7.3	7.2	1.25	0.90	125	124
	FD	7.4	7.2	0.65	0.65	125	124
		7.3	7.2	0.60	0.65	118	123
		7.8	7.2	1.20	0.90	128	124
		7.5	7.4	1.00	1.00	125	124
		7.8	7.0	1.00	1.00	130	124
	BU	7.9	7.6	1.00	0.90	132	122
		7.6	7.8	1.20	1.00	127	124
		7.8	7.3	1.10	1.00	131	122
		7.6	7.5	1.25	1.20	131	125
		7.5	7.5	0.75	0.60	122	124
BD	7.6	7.4	0.75	0.90	120	120	
	7.9	7.0	1.00	0.75	128	120	
	7.4	7.2	0.70	0.90	123	117	
	7.7	7.0	1.00	0.90	126	124	
	8.1	7.1	0.90	1.00	124	122	

表 4.4 耐疲労鋼十字継手溶接形状 (その2)

		主板側脚長 (mm)	付加板側脚長 (mm)	主板側 曲率半径 $\rho_1$ (mm)	付加板側 曲率半径 $\rho_2$ (mm)	主板側 フソク角 $\theta_1$ (°)	付加板側 フソク角 $\theta_2$ (°)
C-F-AW4	FU	8.6	8.4	1.40	1.10	130	128
		8.5	8.5	1.00	1.10	123	126
		8.6	8.4	1.00	1.10	124	127
		8.1	7.5	1.20	1.00	128	120
		8.2	8.4	1.10	1.20	131	130
	FD	8.4	7.8	1.30	1.10	128	126
		8.0	8.0	1.05	1.20	128	123
		7.8	8.1	1.00	1.20	123	128
		7.8	7.7	1.00	1.00	123	123
		8.5	7.8	1.00	1.00	121	121
	BU	7.8	7.8	1.00	1.10	129	127
		8.2	8.3	1.20	1.20	129	130
		7.2	7.5	1.00	1.10	123	126
		7.9	8.0	1.10	1.20	123	129
		8.0	8.1	1.20	1.20	129	128
	BD	7.1	8.0	1.00	1.00	122	127
7.0		7.7	0.90	1.10	120	128	
7.0		7.8	1.10	1.00	124	122	
7.3		7.7	1.10	1.00	122	125	
7.3		8.3	1.00	1.30	125	132	
C-F-AW5	FU	7.5	7.1	1.30	1.00	130	122
		7.5	7.1	1.30	1.40	125	127
		7.3	7.0	1.20	0.90	128	124
		7.3	7.1	1.20	1.00	132	122
		7.1	7.1	1.30	1.20	130	128
	FD	7.4	7.4	1.00	1.00	127	127
		7.4	7.5	1.10	1.00	128	128
		7.2	7.2	1.20	1.20	129	129
		7.0	8.0	1.20	1.20	125	130
		7.1	7.3	1.00	1.00	122	124
	BU	7.5	7.5	1.00	1.00	128	129
		7.6	8.0	0.90	1.20	123	132
		7.7	7.8	0.90	1.00	125	126
		7.7	8.0	1.00	1.20	120	130
		7.7	8.0	1.00	1.00	128	122
	BD	7.4	7.8	1.30	1.50	124	132
7.0		7.6	1.00	1.00	125	127	
7.6		7.8	1.25	1.20	125	127	
7.3		7.7	1.25	1.40	130	130	
7.1		7.8	1.00	1.20	132	134	
C-F-AW6	FU	7.8	7.8	1.25	1.20	132	134
		7.7	7.7	1.50	1.50	122	130
		7.7	7.8	1.10	1.25	130	130
		7.7	8.0	1.20	1.40	128	132
		7.5	7.8	1.25	1.40	132	128
	FD	7.0	7.1	1.00	1.00	132	132
		7.0	7.4	1.00	1.20	130	130
		6.6	7.2	1.00	1.00	126	129
		7.0	7.0	1.00	1.00	122	128
		6.7	7.2	1.00	1.00	120	122
	BU	7.5	7.1	1.30	1.00	128	128
		7.1	7.2	1.00	1.20	128	129
		7.5	7.1	1.30	1.10	129	129
		7.7	7.4	1.50	1.20	132	130
		7.6	7.5	1.20	1.00	130	131
	BD	7.1	7.8	1.10	1.50	128	129
7.3		7.8	1.50	1.25	124	132	
7.1		7.8	1.00	1.40	128	128	
7.3		7.5	1.40	1.40	128	131	
7.5		7.8	1.25	1.20	129	132	

表 4.5 耐疲労鋼十字継手溶接形状 (その3)

		主板側脚長 (mm)	付加板側脚長 (mm)	主板側 曲率半径 $\rho_1$ (mm)	付加板側 曲率半径 $\rho_2$ (mm)	主板側 ワシ角 $\theta_1$ (°)	付加板側 ワシ角 $\theta_2$ (°)
C-F-AW7	FU	7.2	7.7	1.20	1.10	128	131
		7.1	7.7	1.00	1.10	130	131
		6.9	7.5	1.00	1.10	124	129
		7.4	7.6	1.00	1.00	130	131
	FD	7.4	7.6	1.20	1.00	124	132
		7.5	7.5	1.30	1.10	126	129
		7.0	7.1	1.00	1.10	131	128
		7.2	6.9	1.10	1.10	128	126
	BU	7.4	7.6	1.40	1.20	123	128
		7.1	7.1	1.10	1.00	130	129
		7.9	7.8	1.20	1.00	128	128
		7.5	7.6	1.30	1.30	127	128
	BD	7.8	7.4	1.25	1.10	129	129
		7.8	7.9	1.40	1.20	128	129
		7.3	7.8	1.00	1.20	130	130
		7.8	7.5	1.10	1.00	123	122
C-F-AW8	FU	7.5	7.6	1.10	1.00	121	122
		7.8	7.8	1.00	1.00	122	125
		7.5	7.6	1.10	1.00	127	123
		7.8	7.2	1.20	1.00	122	126
	FD	7.7	7.0	1.40	1.00	130	123
		7.9	7.2	1.20	1.20	130	127
		7.7	7.1	1.20	1.10	125	120
		7.8	7.1	1.30	1.00	128	121
	BU	8.1	7.0	1.20	1.00	129	120
		8.1	8.1	1.20	1.00	120	120
		7.9	7.4	1.20	1.20	128	121
		8.0	8.0	1.20	1.20	126	123
	BD	7.9	7.8	1.10	1.10	128	120
		7.8	7.2	1.20	1.20	123	120
		8.1	7.7	1.20	1.00	129	127
		8.0	0.6	1.20	1.10	128	127
	7.6	7.4	1.20	1.10	122	126	
	8.0	7.4	1.25	1.20	128	122	
	7.6	7.7	1.20	1.20	122	120	
	8.3	8.3	1.25	1.40	132	125	
	8.3	8.2	1.40	1.50	132	130	
	8.4	7.8	1.40	1.25	126	122	
	8.2	7.9	1.50	1.40	130	125	
	8.8	8.1	1.25	1.20	132	128	
平均		7.753	7.614	1.163	1.128	126.6	126.5
標準偏差		1.00	1.11	0.28	0.27	14.70	14.87

表 4.6 従来鋼十字継手溶接形状 (その 1)

		主板側脚長 (mm)	付加板側脚長 (mm)	主板側 曲率半径 $\rho_1$ (mm)	付加板側 曲率半径 $\rho_2$ (mm)	主板側 ワジ角 $\theta_1$ (°)	付加板側 ワジ角 $\theta_2$ (°)
C-C-AW1	FU	7.5	7.2	0.90	0.75	124	131
		7.8	7.1	0.75	0.75	129	140
		7.5	7.8	0.75	1.00	132	136
		7.9	7.7	1.00	1.20	124	142
		8.0	8.0	1.25	1.40	130	134
	FD	7.7	7.5	0.70	0.90	132	135
		7.5	7.5	0.70	0.75	129	129
		7.6	7.4	0.90	0.75	125	129
		6.8	7.7	0.50	0.75	112	140
		7.7	7.6	0.70	0.75	125	126
	BU	7.8	8.0	1.40	1.50	134	133
		7.6	8.0	0.60	0.50	127	115
		7.0	7.8	0.50	0.75	122	132
		7.5	7.6	0.75	0.90	129	130
		7.4	8.1	0.40	0.70	123	137
	BD	7.7	7.2	0.75	0.50	137	140
		7.8	7.1	1.25	1.00	130	142
		8.1	7.0	0.50	0.70	120	119
		8.0	7.0	0.50	0.50	134	122
		7.9	7.0	1.00	0.50	130	124
C-C-AW2	FU	7.0	7.3	1.10	1.10	126	125
		7.1	7.4	1.15	0.60	115	129
		7.4	7.9	1.00	0.90	127	136
		6.9	7.4	0.90	0.70	114	122
		7.2	7.0	0.65	0.50	120	116
	FD	7.1	8.1	0.60	0.90	120	132
		6.4	8.1	0.60	1.50	112	138
		8.2	7.5	1.40	1.00	122	129
		7.5	7.2	1.40	0.90	133	134
		7.8	7.9	1.00	1.50	124	128
	BU	7.0	7.8	0.50	0.60	114	129
		7.1	7.2	0.70	1.00	119	130
		7.3	7.2	0.50	0.80	124	125
		7.2	7.8	1.00	1.50	120	126
		7.0	7.1	0.70	1.25	122	131
	BD	6.8	7.8	1.00	1.00	118	124
		7.5	7.5	1.50	0.90	122	130
		6.7	7.7	1.00	1.40	125	125
		6.8	7.8	1.00	1.50	127	133
		6.7	7.2	0.65	0.60	119	132
C-C-AW3	FU	7.2	7.4	0.65	1.00	127	125
		7.5	7.4	0.75	1.00	120	127
		7.5	7.5	0.70	0.90	127	128
		7.5	7.5	0.90	0.90	124	128
		7.1	7.1	1.00	0.80	121	120
	FD	8.0	7.0	1.20	0.90	132	122
		7.3	7.8	1.00	1.00	128	130
		7.5	7.7	1.20	1.00	125	129
		7.6	7.6	0.90	0.90	120	122
		7.3	7.7	1.00	1.00	121	129
	BU	6.8	7.3	0.90	0.90	117	126
		6.8	7.4	1.10	1.00	117	126
		7.1	7.0	1.00	0.90	116	124
		7.1	7.6	1.20	1.00	124	125
		6.7	7.3	1.00	1.00	124	128
	BD	7.0	7.2	0.80	0.80	118	119
		6.8	7.4	1.00	1.00	120	125
		7.1	7.1	0.90	1.00	121	127
		6.9	7.5	0.70	0.90	120	124
		6.9	7.4	1.00	1.20	114	125

表 4.7 従来鋼十字継手溶接形状 (その 2)

		主板側脚長 (mm)	付加板側脚長 (mm)	主板側 曲率半径 $\rho_1$ (mm)	付加板側 曲率半径 $\rho_2$ (mm)	主板側 フランク角 $\theta_1$ (°)	付加板側 フランク角 $\theta_2$ (°)
C-C-AW4	FU	7.5	7.5	1.00	1.00	125	126
		7.8	7.7	1.20	1.00	127	121
		7.6	7.8	0.90	1.00	126	128
		7.5	7.8	0.80	1.00	122	127
	FD	7.6	7.7	0.90	0.90	129	128
		7.3	7.4	0.75	0.90	125	125
		7.5	7.6	0.75	1.00	123	124
		7.7	7.5	0.70	0.80	124	128
	BU	7.4	7.6	0.80	1.00	125	125
		7.6	7.7	0.90	1.00	123	126
		7.3	8.0	0.90	0.75	118	120
		7.4	8.1	0.60	0.75	124	127
	BD	7.4	7.8	0.70	0.75	124	128
		7.0	8.0	0.50	0.90	113	122
		7.2	7.6	0.70	0.70	114	122
		6.5	6.8	1.00	1.00	123	123
C-C-AW5	FU	6.6	7.2	0.75	1.00	128	130
		7.0	7.1	1.30	1.30	118	119
		6.4	7.1	0.70	0.80	110	120
		6.8	6.5	0.70	0.70	128	128
	FD	8.8	7.6	1.20	1.00	138	128
		8.5	7.6	1.20	0.90	124	124
		8.3	7.9	1.25	1.10	135	128
		8.4	7.6	1.10	1.00	138	128
	BU	8.3	7.6	1.00	1.00	132	126
		7.9	7.6	0.75	0.70	128	120
		7.8	8.1	0.90	1.00	128	127
		7.8	7.9	1.00	0.90	123	121
	BD	7.8	8.1	0.70	0.90	128	124
		7.9	8.0	0.80	0.70	123	125
		7.5	8.0	1.00	0.90	128	131
		7.8	7.7	1.50	1.40	130	132
C-C-AW6	FU	7.8	7.6	1.00	0.90	133	127
		7.8	7.6	1.20	1.10	126	129
		7.6	8.0	1.20	1.20	128	130
		7.7	8.2	1.25	1.40	125	132
	FD	7.5	8.0	0.90	1.00	126	130
		8.0	8.1	1.00	1.10	128	132
		7.2	8.0	1.00	1.20	124	132
		7.2	7.8	1.10	1.00	120	129
	BU	7.6	7.2	0.90	0.80	127	127
		7.6	7.2	1.10	1.00	132	127
		7.5	7.6	1.20	1.00	122	132
		7.7	7.3	1.00	1.00	130	130
	BD	7.7	7.4	1.40	1.20	127	127
		8.1	7.1	1.20	0.75	127	120
		8.1	7.1	1.20	0.90	125	125
		7.9	7.8	1.10	0.90	126	124
FU	7.9	7.9	1.00	0.90	124	126	
	8.2	7.9	1.20	1.00	130	127	
	7.5	7.6	0.90	1.00	126	127	
	7.8	7.6	1.00	1.00	130	125	
	7.9	7.7	1.20	1.10	126	125	
	8.0	7.4	1.00	0.90	128	120	
	7.5	7.1	1.25	1.00	121	123	
	7.1	7.1	1.00	1.00	113	125	
FD	7.2	7.4	0.90	1.00	123	123	
	7.6	7.5	1.00	1.00	122	122	
	7.5	7.4	0.90	1.00	121	122	
	7.4	7.2	1.50	1.00	120	126	

表 4.8 従来鋼十字継手溶接形状（その3）

		主板側脚長 (mm)	付加板側脚長 (mm)	主板側 曲率半径 $\rho_1$ (mm)	付加板側 曲率半径 $\rho_2$ (mm)	主板側 フック角 $\theta_1$ (°)	付加板側 フック角 $\theta_2$ (°)
C-C-AW7	FU	7.7	7.6	1.10	1.00	130	128
		8.1	7.2	1.25	1.00	126	128
		7.8	7.6	1.20	1.20	128	125
		7.7	7.8	1.10	1.20	127	127
		7.7	7.6	1.40	1.20	120	125
	FD	7.4	7.4	1.00	1.00	127	128
		7.5	7.5	1.00	1.20	129	128
		7.8	7.2	1.40	1.10	123	127
		7.2	7.7	1.00	1.40	122	130
		7.8	7.6	1.25	1.20	122	122
	BU	7.8	7.6	1.20	1.20	125	129
		7.9	7.6	1.40	1.10	129	126
		7.6	7.1	1.40	1.00	123	125
		7.6	7.1	1.40	1.00	128	127
		8.0	7.3	1.20	1.00	126	129
	BD	7.4	8.0	1.00	0.90	120	119
		7.4	8.2	1.30	1.20	120	128
		7.4	7.9	1.00	1.00	119	120
7.3		7.9	1.10	1.00	123	123	
7.1		7.6	0.90	0.90	118	118	
C-C-AW8	FU	6.8	6.9	1.30	1.30	126	127
		6.8	6.9	1.20	1.25	129	128
		6.8	6.9	1.25	1.25	131	127
		7.3	6.9	1.20	1.10	132	131
		7.0	7.0	1.20	1.10	134	130
	FD	7.0	6.7	1.25	1.00	132	125
		6.7	6.4	1.00	0.90	130	126
		6.7	6.3	1.25	1.10	123	123
		7.1	6.1	1.20	1.00	130	127
		7.0	6.8	1.25	1.10	126	128
	BU	7.2	7.4	1.10	1.20	125	130
		7.7	7.4	1.25	1.30	130	126
		7.3	7.2	1.20	1.00	132	132
		7.5	7.4	1.40	1.30	127	126
		7.7	7.1	1.20	1.00	130	127
	BD	7.2	7.7	1.00	1.00	127	129
		7.1	7.8	1.10	1.30	129	131
		7.2	7.8	1.10	1.30	121	124
6.8		7.7	1.10	1.10	124	123	
7.0		7.6	1.00	1.25	128	125	
平均		7.44	7.49	0.998	0.991	124.8	127.1
標準偏差		0.93	0.91	0.27	0.24	14.81	14.84

表 4.9 耐疲労鋼面外ガセット溶接形状（その1）

		主板側脚長 (mm)	ガセット側脚長 (mm)	主板側 曲率半径 $\rho_1$ (mm)	ガセット側 曲率半径 $\rho_2$ (mm)	主板側 フランク角 $\theta_1$ (°)	ガセット側 フランク角 $\theta_2$ (°)
G-F-AW1	FU	9.4	7.4	0.90	0.60	135	131
		9.5	7.6	1.25	0.60	138	128
		9.0	7.0	1.00	1.20	132	115
		9.3	7.6	0.80	0.50	134	132
		9.4	7.3	0.75	1.25	133	139
	FD	8.0	8.0	1.10	1.75	125	144
		8.9	8.2	1.00	1.50	130	138
		8.8	7.7	1.25	3.00	142	132
		8.7	8.0	1.00	2.75	133	136
		9.0	7.7	0.90	1.40	126	132
	BU	8.6	6.1	1.50	1.40	142	129
		8.2	7.8	2.00	2.50	137	129
		7.8	6.4	0.90	1.40	130	126
		7.4	7.0	0.60	0.90	114	122
		8.2	6.7	1.40	2.00	125	123
	BD	7.5	7.2	0.90	1.85	135	133
		9.0	8.1	1.00	1.25	122	136
		9.2	9.2	0.75	3.00	127	140
		7.6	7.9	0.50	1.40	110	144
		9.2	8.9	0.60	2.50	119	129
G-F-AW2	FU	8.0	6.0	1.50	1.50	143	128
		9.8	6.9	0.90	1.00	122	126
		9.5	7.5	0.90	1.00	125	119
		9.8	7.3	1.10	1.25	141	128
		8.4	7.5	1.00	1.70	133	126
	FD	9.7	8.0	1.25	1.90	135	129
		8.6	6.7	0.75	1.25	118	116
		8.8	5.9	1.60	1.20	142	126
		9.4	6.3	1.00	1.00	129	129
		9.7	6.9	1.10	1.20	135	120
	BU	7.9	7.7	0.75	1.50	112	126
		8.1	8.1	0.90	1.25	128	136
		7.6	7.5	0.75	2.00	124	142
		7.6	6.9	0.60	0.70	118	128
		8.0	7.7	0.90	1.50	121	140
	BD	8.6	7.0	0.75	1.10	130	136
		8.1	7.5	1.00	1.10	127	123
		8.2	6.0	1.50	2.00	145	120
		8.7	7.1	1.00	1.40	131	125
		9.1	6.8	1.10	1.25	128	128
G-F-AW3	FU	8.1	7.6	0.60	2.00	120	129
		8.2	7.1	0.75	1.55	126	121
		8.0	7.1	1.00	1.20	122	124
		8.3	7.2	1.10	1.25	123	127
		8.3	7.2	0.60	1.70	120	127
	FD	9.8	7.5	1.10	1.85	127	132
		10.2	8.8	1.00	2.00	132	146
		10.0	7.5	1.00	1.75	130	122
		10.0	8.5	0.90	2.05	129	121
		10.0	8.3	0.90	1.70	128	123
	BU	8.3	7.4	1.00	0.90	126	130
		7.1	7.5	0.75	1.50	118	130
		8.7	7.7	1.10	1.30	134	127
		7.7	7.1	0.75	0.75	117	126
		8.5	6.9	1.10	1.25	137	133
	BD	9.4	7.7	0.75	2.00	127	136
		9.3	8.2	0.60	2.20	126	122
		8.6	7.8	0.50	1.40	120	132
		8.7	8.2	0.75	1.75	121	123
		9.2	7.8	0.60	2.20	121	125

表 4.10 耐疲労鋼面外ガセット溶接形状（その2）

		主板側脚長 (mm)	ガセット側脚長 (mm)	主板側 曲率半径 $\rho_1$ (mm)	ガセット側 曲率半径 $\rho_2$ (mm)	主板側 フランク角 $\theta_1$ (°)	ガセット側 フランク角 $\theta_2$ (°)
G-F-AW4	FU	7.6	7.1	0.90	1.00	135	135
		7.4	7.0	0.70	0.75	129	130
		6.8	7.4	1.00	1.00	120	132
		7.0	7.4	0.90	1.00	115	125
		7.0	7.0	0.75	1.00	110	130
	FD	7.6	7.9	1.00	1.25	128	137
		7.9	7.7	1.10	1.50	130	135
		7.5	7.7	1.00	0.90	122	133
		7.6	7.6	1.00	1.50	128	130
		7.8	7.9	1.00	1.00	126	132
	BU	8.4	6.1	1.25	1.50	130	120
		8.3	6.1	1.00	1.40	125	118
		8.3	6.5	0.75	0.90	125	125
		8.2	6.6	0.90	1.10	123	122
	BD	8.4	7.0	0.90	1.25	126	124
		8.2	6.1	1.00	1.50	131	119
		8.5	5.6	1.00	1.00	136	118
		8.4	5.6	1.20	1.50	139	118
		8.4	5.6	1.00	1.00	136	117
	G-F-AW5	FU	8.0	5.2	1.20	1.00	142
7.4			6.8	1.10	2.00	137	140
7.9			6.9	0.90	1.50	134	136
7.9			7.0	0.75	1.40	128	125
7.9			7.0	0.75	1.25	123	125
FD		7.8	7.4	0.75	1.00	120	129
		7.3	7.0	0.75	1.75	118	132
		8.0	7.1	0.75	1.50	118	124
		8.0	7.1	0.75	1.25	124	128
		7.9	7.3	0.75	1.75	119	123
BU		7.7	7.1	0.75	1.55	120	129
		8.3	7.2	0.90	1.00	118	124
		8.3	8.1	0.90	1.25	112	130
		8.4	7.5	1.00	1.25	116	123
		7.9	7.3	1.00	1.55	124	126
BD		8.2	7.3	0.75	1.25	123	129
		7.8	7.0	1.00	1.25	127	120
		7.9	6.7	1.00	1.50	128	120
		7.3	7.2	1.00	1.20	119	127
		7.1	7.2	0.90	1.00	112	127
G-F-AW6	FU	7.6	6.6	1.00	1.00	132	122
		8.5	7.1	1.00	1.00	123	123
		8.4	7.4	1.00	1.00	120	120
		8.0	7.1	0.90	0.90	110	120
		8.4	7.0	1.00	1.00	123	123
	FD	8.2	6.8	1.00	1.20	123	125
		7.9	6.9	1.00	1.20	119	124
		8.2	7.0	1.00	1.25	127	121
		7.4	6.7	1.25	1.00	114	122
		7.9	6.6	1.10	1.10	125	124
	BU	7.8	6.5	1.20	1.25	130	123
		9.4	7.2	1.00	1.00	128	125
		9.3	7.8	0.90	1.00	115	129
		8.0	6.1	1.25	1.20	135	125
		9.1	7.4	1.10	1.20	129	127
	BD	8.6	6.7	1.10	1.25	138	133
		8.3	6.7	1.25	1.20	125	123
		8.3	7.0	1.00	1.40	130	125
		8.1	6.5	1.00	1.00	130	124
		8.0	6.3	1.40	1.00	132	122
BD	8.4	6.9	1.10	1.10	124	120	

表 4.11 耐疲労鋼面外ガセット溶接形状 (その 3)

		主板側脚長 (mm)	ガセット側脚長 (mm)	主板側 曲率半径 $\rho_1$ (mm)	ガセット側 曲率半径 $\rho_2$ (mm)	主板側 フランジ角 $\theta_1$ (°)	ガセット側 フランジ角 $\theta_2$ (°)
G-F-AW7	FU	7.6	7.7	0.80	1.00	118	132
		7.6	7.6	0.80	1.10	121	126
		6.5	6.2	0.90	1.10	128	125
		7.1	6.8	1.00	1.25	127	125
		7.3	6.9	0.75	1.10	123	128
	FD	8.4	6.4	1.10	1.00	132	118
		8.0	6.2	1.40	1.50	132	120
		7.1	5.2	1.00	1.00	133	118
		7.8	6.4	1.00	1.00	122	118
		8.3	7.0	1.10	1.40	128	118
	BU	8.4	6.4	0.90	1.00	123	110
		8.3	6.5	0.75	1.00	123	116
		8.2	5.8	1.00	1.00	132	118
		8.6	6.0	1.00	1.00	126	113
	BD	8.6	6.0	1.00	1.00	128	113
		7.6	7.1	1.00	1.25	123	120
7.6		7.3	1.00	1.10	118	124	
7.5		7.5	1.00	1.25	118	128	
G-F-AW8	FU	7.8	7.0	1.00	1.30	127	123
		7.9	6.8	1.10	1.30	128	116
		8.4	6.5	1.00	1.00	127	118
		9.1	6.9	0.90	1.25	128	120
		7.8	6.3	0.75	1.00	117	116
	FD	9.2	6.4	1.10	1.10	134	118
		8.8	6.6	0.75	1.25	134	122
		9.0	6.6	1.25	1.10	133	120
		9.3	7.0	1.25	1.40	133	120
		8.5	6.5	1.25	1.00	133	120
	BU	8.1	7.0	1.10	1.50	128	120
		7.6	7.0	1.00	1.40	123	124
		8.7	7.4	0.75	1.00	130	122
		8.5	7.5	0.90	1.25	129	125
		8.2	7.1	1.00	1.50	134	122
	BD	8.4	7.4	0.90	1.05	129	125
8.5		7.1	1.00	1.25	127	124	
8.7		7.2	0.80	1.40	133	119	
8.8		7.0	0.80	1.00	135	120	
8.9		7.0	0.90	1.50	136	121	
G-F-AW9	FU	8.8	6.8	0.75	0.75	129	123
		8.8	6.8	0.75	0.75	124	120
		8.8	7.5	0.60	0.90	120	120
		8.5	7.6	0.60	1.50	130	125
		8.5	7.5	0.60	0.90	120	120
	FD	8.7	7.5	0.75	1.25	125	122
		8.5	7.5	0.75	1.00	125	123
		8.4	6.4	0.90	1.00	123	110
		8.3	6.5	0.75	1.00	123	116
		8.2	5.8	1.00	1.00	132	118
	BU	8.6	6.0	1.00	1.00	126	113
		8.6	6.0	1.00	1.00	128	113
		8.3	7.3	0.75	0.75	120	122
		8.9	7.2	0.75	0.90	127	118
		8.9	7.6	0.80	1.50	133	120
	BD	8.6	7.3	0.70	0.80	125	120
8.9		7.4	0.75	1.25	130	119	
8.0		6.0	0.70	1.50	138	120	
8.8		6.6	0.75	1.00	126	116	
8.3		7.3	0.70	1.55	127	120	
		8.4	6.3	0.70	1.40	134	118
		8.6	6.9	0.80	1.50	128	120

表 4.12 耐疲労鋼面外ガセット溶接形状（その4）

		主板側脚長 (mm)	ガセット側脚長 (mm)	主板側 曲率半径 $\rho_1$ (mm)	ガセット側 曲率半径 $\rho_2$ (mm)	主板側 フランク角 $\theta_1$ (°)	ガセット側 フランク角 $\theta_2$ (°)
G-F-AW10	FU	8.9	6.0	0.80	1.00	134	118
		8.8	5.8	1.00	1.00	137	118
		9.2	5.8	1.00	0.90	129	110
		8.9	5.9	0.80	1.25	130	119
		9.1	5.9	0.90	0.90	131	114
	FD	8.3	7.6	0.80	1.00	124	122
		8.0	7.6	0.75	1.50	130	124
		7.6	7.5	1.00	1.50	134	125
		8.1	7.6	0.75	1.25	127	118
		8.0	7.6	0.90	1.25	128	115
	BU	8.3	6.6	0.80	1.00	122	120
		8.5	6.4	0.80	1.00	126	120
		8.3	6.8	1.00	1.40	130	119
		8.4	6.5	0.80	1.00	124	120
		8.3	6.7	0.90	1.20	126	119
	BD	8.1	5.6	0.75	0.75	132	115
		8.7	6.0	1.00	1.10	134	120
		8.0	6.0	0.90	1.00	131	120
		8.4	5.8	0.75	0.90	131	117
		8.0	6.0	0.90	0.90	133	117
平均		8.35	7.00	0.935	1.275	127.1	124.3
標準偏差		1.20	1.09	0.23	0.42	16.80	16.45

表 4.13 従来鋼面外ガセット溶接形状（その1）

		主板側脚長 (mm)	ガセット側脚長 (mm)	主板側 曲率半径 $\rho_1$ (mm)	ガセット側 曲率半径 $\rho_2$ (mm)	主板側 フランク角 $\theta_1$ (°)	ガセット側 フランク角 $\theta_2$ (°)
G-C-AW1	FU	7.9	8.1	0.75	2.25	111	138
		8.1	7.9	0.90	2.25	116	133
		8.2	7.7	0.75	2.25	133	140
		8.1	7.7	1.05	2.00	131	142
		8.1	7.5	0.75	1.50	120	131
	FD	7.9	8.0	1.15	2.25	123	131
		7.7	7.6	1.00	2.50	119	124
		8.0	7.9	0.90	1.50	122	128
		8.1	8.0	1.25	2.00	121	132
	BU	7.3	7.3	0.90	2.20	120	132
		8.2	7.4	1.00	1.90	114	130
		8.5	7.5	0.75	1.90	117	134
		8.2	7.0	1.25	1.60	129	136
	BD	8.9	6.6	1.40	1.75	128	134
		9.2	7.7	1.00	2.00	122	124
		8.0	8.0	1.50	2.50	133	143
8.0		8.1	0.90	1.75	116	131	
G-C-AW2	FU	8.1	8.6	1.00	2.20	125	137
		8.2	9.6	1.00	1.20	120	132
		8.0	6.6	1.50	2.50	138	141
		8.2	7.5	0.75	1.20	111	128
		7.4	7.9	1.00	1.50	113	137
	FD	7.7	7.7	0.50	1.00	112	131
		9.5	7.0	1.25	1.50	144	125
		9.2	6.6	0.75	1.50	129	114
		7.6	7.7	0.90	2.25	120	138
	BU	7.3	7.8	0.75	1.25	116	135
		7.4	8.3	0.65	0.90	110	139
		7.4	8.0	0.65	1.00	110	142
		7.0	6.7	0.65	1.50	128	131
	BD	7.8	8.2	1.00	2.25	126	137
		7.3	8.2	0.90	2.25	122	138
		7.3	8.5	1.00	2.25	128	146
7.3		7.9	1.50	2.75	136	139	
G-C-AW3	FU	7.0	7.0	0.90	1.50	105	141
		7.8	6.0	1.25	2.25	125	132
		8.6	5.9	1.25	1.50	139	134
		7.2	8.0	0.60	2.50	120	136
	FD	8.1	6.1	1.50	1.40	130	120
		7.2	6.0	1.00	1.50	135	138
		7.2	8.0	0.50	0.90	116	136
		7.7	7.8	0.60	1.20	124	130
	BU	7.4	8.2	0.50	1.25	112	134
		7.4	8.0	0.50	0.90	106	137
		7.4	7.8	0.60	1.00	117	137
		7.7	8.0	1.00	1.00	118	129
	BD	7.8	7.7	0.75	0.90	118	131
		7.4	7.3	0.60	0.70	115	126
		7.3	7.2	0.50	1.00	118	134
		7.2	8.1	0.50	1.00	114	128
FU	7.4	7.0	0.50	1.20	112	124	
	8.7	7.5	1.00	2.00	131	120	
	7.8	7.3	1.00	1.65	121	126	
	7.1	6.8	0.60	1.10	124	126	
	8.8	7.8	1.00	1.80	129	127	
	7.2	7.9	0.60	0.80	112	129	
	7.0	8.0	0.50	1.00	108	134	
	6.9	7.5	0.50	0.60	109	122	
FD	7.4	8.2	0.60	1.10	115	134	
	7.0	7.3	0.70	0.60	115	125	

表 4.14 従来鋼面外ガセット溶接形状 (その 2)

		主板側脚長 (mm)	ガセット側脚長 (mm)	主板側 曲率半径 $\rho_1$ (mm)	ガセット側 曲率半径 $\rho_2$ (mm)	主板側 フランク角 $\theta_1$ (°)	ガセット側 フランク角 $\theta_2$ (°)
G-C-AW4	FU	9.6	7.8	1.00	1.70	135	134
		10.0	7.7	1.50	1.40	138	131
		9.1	7.6	0.70	2.00	129	127
		8.3	8.2	0.90	2.50	140	137
	FD	8.9	8.1	0.75	1.90	141	125
		7.9	6.7	0.70	1.30	129	125
		8.0	6.9	0.75	1.00	128	130
		8.3	7.0	1.00	1.50	137	133
	BU	8.1	6.8	1.00	1.50	132	132
		8.0	7.2	0.90	2.20	132	136
		8.6	8.2	0.60	1.10	113	127
		8.7	7.6	0.50	1.00	119	126
	BD	8.6	7.3	0.70	1.40	125	135
		8.6	7.6	0.50	1.20	116	130
		8.6	7.9	0.40	0.90	113	130
		6.3	7.8	0.30	0.80	105	131
G-C-AW5	FU	6.5	7.5	0.30	0.60	103	131
		6.5	7.5	0.70	1.60	127	138
		6.4	7.8	0.60	1.50	114	135
		7.8	7.2	1.20	1.60	132	128
	FD	7.8	7.0	1.10	1.60	138	128
		7.6	7.8	0.70	1.50	120	132
		7.8	7.5	0.75	1.25	131	129
		7.7	7.9	0.70	1.25	126	130
	BU	7.9	8.0	0.75	1.50	130	130
		7.4	7.3	1.00	1.50	123	129
		7.6	7.5	1.00	1.10	130	130
		7.3	7.3	1.00	2.00	133	127
	BD	8.0	7.9	1.20	1.50	127	129
		9.2	7.2	1.10	1.75	130	123
		9.2	7.4	1.00	1.00	125	128
		9.0	8.0	1.00	0.75	120	125
G-C-AW6	FU	9.1	7.7	1.00	1.00	122	124
		9.5	6.6	1.10	1.25	135	124
		9.3	7.2	0.75	0.70	123	120
		8.4	6.4	0.90	1.20	128	122
	FD	9.0	7.0	0.90	0.75	129	119
		9.0	6.5	0.90	0.90	128	122
		8.8	6.7	0.75	1.25	125	119
		8.5	8.5	1.00	1.50	129	140
BU	8.5	7.5	1.00	1.75	130	123	
	8.5	8.4	1.00	1.50	124	132	
	8.5	8.1	1.00	1.90	116	128	
	8.8	7.9	1.00	1.75	117	124	
BD	8.4	6.6	1.20	1.25	140	128	
	7.9	6.1	1.50	1.50	144	133	
	9.0	7.0	1.25	1.10	140	128	
	8.6	6.7	1.10	1.20	138	128	
G-C-AW6	FU	9.2	7.1	1.40	1.00	140	127
		8.9	7.9	1.10	1.20	127	126
		8.9	7.8	1.00	1.10	126	127
		7.3	6.2	1.20	1.20	134	130
	FD	8.0	7.1	1.00	1.40	137	127
		9.0	7.7	1.00	1.40	134	126
		7.7	7.6	1.00	1.40	138	133
		8.0	7.9	1.10	1.00	126	127
BU	8.1	7.8	1.00	1.50	134	136	
	8.2	8.0	1.25	1.10	123	130	
	8.0	8.0	1.00	1.50	126	129	
	8.0	8.0	1.00	1.50	126	129	

表 4.15 従来鋼面外ガセット溶接形状（その 3）

		主板側脚長 (mm)	ガセット側脚長 (mm)	主板側 曲率半径 $\rho_1$ (mm)	ガセット側 曲率半径 $\rho_2$ (mm)	主板側 ワック角 $\theta_1$ (°)	ガセット側 ワック角 $\theta_2$ (°)
G-C-AW7	FU	8.0	7.7	1.00	1.20	126	130
		8.2	7.6	1.00	1.10	128	127
		8.1	7.6	1.00	1.20	121	124
		8.0	7.4	1.00	1.20	128	128
		8.0	7.1	1.00	1.10	130	130
	FD	8.0	8.0	1.00	1.25	128	124
		7.6	8.0	1.00	1.20	121	133
		7.7	8.1	1.10	1.20	122	132
		7.7	8.0	1.00	1.25	123	134
		7.8	8.0	1.00	1.25	124	136
	BU	8.3	8.1	0.90	1.25	122	130
		8.4	8.0	1.00	1.25	120	133
		8.3	8.2	1.00	1.25	120	132
		7.8	7.8	1.00	1.25	126	132
	BD	8.1	8.2	1.00	1.40	126	134
		7.3	7.4	1.20	1.10	128	130
7.6		6.1	1.05	1.20	129	125	
7.4		7.6	1.05	1.10	126	127	
7.6		6.9	1.05	1.15	128	129	
		7.2	7.5	1.00	1.15	129	129
G-C-AW8	FU	8.0	6.7	1.20	1.20	138	128
		8.2	6.9	1.10	1.20	137	128
		7.7	6.1	1.25	1.25	138	128
		8.2	6.9	1.00	1.20	132	132
		8.3	7.0	1.00	1.10	137	128
	FD	8.8	6.6	1.20	1.00	131	123
		8.8	7.1	1.20	1.20	133	120
		8.5	6.3	1.00	1.10	137	124
		8.5	7.2	1.00	1.20	130	123
		8.4	6.5	1.00	1.10	132	120
	BU	9.0	7.6	1.10	1.20	136	122
		9.2	7.1	1.00	1.20	135	127
		8.8	6.9	1.00	1.25	136	122
		8.5	6.9	1.00	1.40	137	122
		9.5	7.4	1.00	1.20	135	122
	BD	9.0	7.5	1.00	1.20	127	120
9.3		7.3	1.00	1.40	135	122	
9.0		7.6	1.00	1.50	138	122	
9.2		7.7	1.00	1.20	127	122	
9.3		7.6	1.00	1.40	131	120	
G-C-AW9	FU	8.9	8.0	1.00	1.20	128	122
		8.3	7.0	1.00	1.20	138	123
		8.7	7.4	1.00	1.25	136	122
		9.0	9.3	1.00	1.10	122	125
		9.1	8.2	0.60	0.80	122	128
	FD	8.4	6.4	1.00	1.10	130	118
		9.5	6.7	1.00	1.20	130	114
		9.2	6.8	1.00	1.00	124	118
		9.4	6.1	1.25	1.00	135	115
		9.3	7.0	1.00	1.00	124	118
	BU	7.4	7.0	1.00	1.25	123	117
		7.3	6.6	1.00	1.20	133	123
		7.4	7.4	0.70	1.20	115	126
		7.3	7.3	0.70	1.00	113	124
	BD	7.5	6.8	1.00	1.40	127	116
		8.0	7.3	1.00	1.50	125	123
8.2		7.1	1.00	1.50	133	118	
7.9		6.8	1.00	1.50	137	20	
8.0		7.7	1.00	1.25	124	123	
		7.6	7.5	1.00	1.00	116	119

表 4.16 従来鋼面外ガセット溶接形状（その4）

		主板側脚長 (mm)	ガセット側脚長 (mm)	主板側 曲率半径 $\rho_1$ (mm)	ガセット側 曲率半径 $\rho_2$ (mm)	主板側 フランク角 $\theta_1$ (°)	ガセット側 フランク角 $\theta_2$ (°)
G-C-AW10	FU	8.7	7.4	1.00	1.00	122	125
		8.6	7.4	1.00	1.00	119	122
		8.8	7.4	0.75	0.90	123	127
		8.4	7.2	0.75	0.75	120	115
		8.5	7.4	0.90	1.00	127	126
	FD	8.0	6.6	0.75	1.20	125	124
		8.4	7.6	0.90	1.05	127	126
		8.5	7.6	1.00	1.40	127	123
		8.5	7.6	1.00	1.05	125	124
		8.6	7.5	1.00	1.20	125	122
	BU	8.3	7.3	0.90	1.00	117	123
		8.4	7.5	1.00	1.00	122	123
		8.4	7.6	0.75	1.00	127	122
		8.4	6.5	1.00	1.15	131	116
		8.3	7.0	1.00	1.15	125	124
	BD	9.2	7.5	1.00	1.15	128	118
		9.0	7.4	1.00	1.00	133	126
		8.5	7.3	0.95	1.15	124	124
		8.9	7.3	1.00	1.00	130	122
		9.1	7.3	1.00	1.00	123	118
平均		8.16	7.44	0.936	1.352	125.7	127.5
標準偏差		1.22	1.08	0.25	0.45	17.34	18.28

表 4.17 耐疲労鋼十字継手残留応力測定結果

(a)表面

ゲージ 番号	15	1	2	3	4	5	6	7	16
中心から の距離 (mm)	-40.0	-30.0	-20.0	-10.0	0.0	10.0	20.0	30.0	40.0
ひずみ ( $\mu$ )	303	334	-230	-552	-551	-497	15	854	678
残留応力 ( $N/mm^2$ )	-60.6	-66.8	46.0	110.4	110.2	99.4	-3.0	-170.8	-135.6

(b)裏面

ゲージ 番号	15	14	13	12	11	10	9	8	16
中心から の距離 (mm)	-40.0	-30.0	-20.0	-10.0	0.0	10.0	20.0	30.0	40.0
ひずみ ( $\mu$ )	303	765	-53	-374	-411	-394	-265	204	678
残留応力 ( $N/mm^2$ )	-60.6	-153.0	10.6	74.8	82.2	78.8	53.0	-40.8	-135.6

(c)表裏面の平均

ゲージ 番号	15	1	2	3	4	5	6	7	16
		14	13	12	11	10	9	8	
中心から の距離 (mm)	-40.0	-30.0	-20.0	-10.0	0.0	10.0	20.0	30.0	40.0
ひずみ ( $\mu$ )	303	550	-142	-463	-481	-446	-125	529	678
残留応力 ( $N/mm^2$ )	-60.6	-109.9	28.3	92.6	96.2	89.1	25.0	-105.8	-135.6

表 4.18 従来鋼十字継手残留応力測定結果

(a)表面

ゲージ 番号	15	1	2	3	4	5	6	7	16
中心から の距離 (mm)	-40.0	-30.0	-20.0	-10.0	0.0	10.0	20.0	30.0	40.0
ひずみ ( $\mu$ )	124	180	-171	-466	-468	-335	-83	489	233
残留応力 ( $N/mm^2$ )	-24.8	-36.0	34.2	93.2	93.6	67.0	16.6	-97.8	-46.6

(b)裏面

ゲージ 番号	15	14	13	12	11	10	9	8	16
中心から の距離 (mm)	-40.0	-30.0	-20.0	-10.0	0.0	10.0	20.0	30.0	40.0
ひずみ ( $\mu$ )	124	112	-414	-497	-428	-394	-116	429	233
残留応力 ( $N/mm^2$ )	-24.8	-22.4	82.8	99.4	85.6	78.8	23.2	-85.8	-46.6

(c)表裏面の平均

ゲージ 番号	15	1	2	3	4	5	6	7	16
		14	13	12	11	10	9	8	
中心から の距離 (mm)	-40.0	-30.0	-20.0	-10.0	0.0	10.0	20.0	30.0	40.0
ひずみ ( $\mu$ )	124	146	-293	-482	-448	-365	-100	459	233
残留応力 ( $N/mm^2$ )	-24.8	-29.2	58.5	96.3	89.6	72.9	19.9	-91.8	-46.6

表 4.19 耐疲労鋼面外ガセット残留応力測定結果

(a)表面

ゲージ 番号	19	1	2	3	4	5	6	7	8	9	20
中心から の距離 (mm)	-50.0	-40.0	-30.0	-20.0	-10.0	0.0	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0
ひずみ ( $\mu$ )	-1184	-322	875	396	-598	-1423	-334	461	534	94	-933
残留応力 ( $N/mm^2$ )	236.8	64.4	-175.0	-79.2	119.6	284.6	66.8	-92.2	-106.8	-18.8	186.6

(b)裏面

ゲージ 番号	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	20
中心から の距離 (mm)	-50.0	-40.0	-30.0	-20.0	-10.0	0.0	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0
ひずみ ( $\mu$ )	-1184	-109	1099	368	-540	-1434	-916	301	413	74	-933
残留応力 ( $N/mm^2$ )	236.8	21.8	-219.8	-73.6	108.0	286.8	183.2	-60.2	-82.6	-14.8	186.6

(c)表裏面の平均

ゲージ 番号	19	1	2	3	4	5	6	7	8	9	20
		18	17	16	15	14	13	12	11	10	
中心から の距離 (mm)	-50.0	-40.0	-30.0	-20.0	-10.0	0.0	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0
ひずみ ( $\mu$ )	-1184	-216	987	382	-569	-1429	-625	381	474	84	-933
残留応力 ( $N/mm^2$ )	236.8	43.1	-197.4	-76.4	113.8	285.7	125.0	-76.2	-94.7	-16.8	186.6

表 4.20 従来鋼面外ガセット残留応力測定結果

(a)表面

ゲージ 番号	19	1	2	3	4	5	6	7	8	9	20
中心から の距離 (mm)	-50.0	-40.0	-30.0	-20.0	-10.0	0.0	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0
ひずみ ( $\mu$ )	162	612	513	31	-1024	-1405	-466	-321	535	640	215
残留応力 ( $N/mm^2$ )	-32.4	-122.4	-102.6	-6.2	204.8	281.0	93.2	64.2	-107.0	-128.0	-43.0

(b)裏面

ゲージ 番号	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	20
中心から の距離 (mm)	-50.0	-40.0	-30.0	-20.0	-10.0	0.0	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0
ひずみ ( $\mu$ )	149	649	560	107	-527	-1349	-721	-407	365	602	215
残留応力 ( $N/mm^2$ )	-29.8	-129.8	-112.0	-21.4	105.4	269.8	144.2	81.4	-73.0	-120.4	-43.0

(c)表裏面の平均

ゲージ 番号	19	1	2	3	4	5	6	7	8	9	20
		18	17	16	15	14	13	12	11	10	
中心から の距離 (mm)	-50.0	-40.0	-30.0	-20.0	-10.0	0.0	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0
ひずみ ( $\mu$ )	156	631	537	69	-776	-1377	-594	-364	450	621	215
残留応力 ( $N/mm^2$ )	-31.1	-126.1	-107.3	-13.8	155.1	275.4	118.7	72.8	-90.0	-124.2	-43.0

表 4.21 耐疲労鋼十字継手試験体の計測寸法（その 1）

試験体名	板厚(mm)					板幅(mm)				
	T1	T2	T3	T4	平均	W1	W2	W3	W4	平均
C-F-AW1	12.26	12.27	12.27	12.28	12.27	80.50	80.55	80.50	80.45	80.50
C-F-AW2	12.23	12.25	12.27	12.25	12.25	80.75	80.75	80.75	80.75	80.75
C-F-AW3	12.19	12.14	12.21	12.20	12.19	80.40	80.40	80.50	80.50	80.45
C-F-AW4	12.29	12.29	12.27	12.27	12.28	80.80	80.70	80.80	81.00	80.83
C-F-AW5	12.28	12.29	12.28	12.27	12.28	81.00	80.90	81.00	81.00	80.98
C-F-AW6	12.29	12.29	12.28	12.27	12.28	80.80	80.85	81.00	81.20	80.96
C-F-AW7	12.25	12.28	12.28	12.29	12.28	80.80	80.75	80.75	80.70	80.75
C-F-AW8	12.21	12.24	12.28	12.23	12.24	80.15	80.15	80.15	80.15	80.15

表 4.22 耐疲労鋼十字継手試験体の計測寸法（その 2）

鋼種	試験体名	板厚 (mm)	板幅 (mm)	総断面積 (mm <sup>2</sup> )
SM490Y -FCA	C-F-AW1	12.27	80.50	987.74
	C-F-AW2	12.25	80.75	989.19
	C-F-AW3	12.19	80.45	980.69
	C-F-AW4	12.28	80.83	992.59
	C-F-AW5	12.28	80.98	994.43
	C-F-AW6	12.28	80.96	994.19
	C-F-AW7	12.28	80.75	991.61
	C-F-AW8	12.24	80.15	981.04

表 4.23 従来鋼十字継手試験体の計測寸法（その 1）

試験体名	板厚(mm)					板幅(mm)				
	T1	T2	T3	T4	平均	W1	W2	W3	W4	平均
C-C-AW1	11.63	11.72	11.66	11.73	11.69	80.25	80.15	80.15	80.25	80.20
C-C-AW2	11.69	11.67	11.68	11.68	11.68	80.20	80.15	80.25	80.30	80.23
C-C-AW3	11.70	11.62	11.63	11.63	11.65	80.30	80.40	80.45	80.20	80.34
C-C-AW4	11.64	11.64	11.65	11.66	11.65	80.20	80.25	80.20	80.20	80.21
C-C-AW5	11.65	11.65	11.65	11.65	11.65	80.30	80.25	80.25	80.30	80.28
C-C-AW6	11.67	11.68	11.66	11.66	11.67	80.25	80.20	80.20	80.20	80.21
C-C-AW7	11.64	11.65	11.66	11.65	11.65	80.45	80.40	80.45	80.50	80.45
C-C-AW8	11.64	11.64	11.63	11.64	11.64	80.50	80.30	80.30	80.50	80.40

表 4.24 従来鋼十字継手試験体の計測寸法（その 2）

鋼種	試験体名	板厚 (mm)	板幅 (mm)	総断面積 (mm <sup>2</sup> )
SM490Y	C-C-AW1	11.69	80.20	937.54
	C-C-AW2	11.68	80.23	937.09
	C-C-AW3	11.65	80.34	935.96
	C-C-AW4	11.65	80.21	934.45
	C-C-AW5	11.65	80.28	935.26
	C-C-AW6	11.67	80.21	936.05
	C-C-AW7	11.65	80.45	937.24
	C-C-AW8	11.64	80.40	935.86

表 4.25 耐疲労鋼十字継手の荷重条件

試験体名	総断面積 (mm <sup>2</sup> )	荷重範囲(kN)		公称応力範囲 (N/mm <sup>2</sup> )
		LOW	HIGH	
C-F-AW1	987.74	10	207.5	200.0
C-F-AW2	989.19	10	168.3	160.0
C-F-AW3	980.69	10	206.1	200.0
C-F-AW4	992.59	10	168.8	160.0
C-F-AW5	994.43	10	139.3	130.0
C-F-AW6	994.19	10	139.2	130.0
C-F-AW7	991.61	10	119.1	110.0
C-F-AW8	981.04	10	117.9	110.0

表 4.26 従来鋼十字継手の荷重条件

試験体名	総断面積 (mm <sup>2</sup> )	荷重範囲(kN)		公称応力範囲 (N/mm <sup>2</sup> )
		LOW	HIGH	
C-C-AW1	937.54	10	197.5	200.0
C-C-AW2	937.09	10	159.9	160.0
C-C-AW3	935.96	10	197.2	200.0
C-C-AW4	934.45	10	159.5	160.0
C-C-AW5	935.26	10	131.6	130.0
C-C-AW6	936.05	10	131.7	130.0
C-C-AW7	937.24	10	113.1	110.0
C-C-AW8	935.86	10	112.9	110.0

表 4.27 耐疲労鋼面外ガセット試験体の計測寸法（その 1）

試験体名	板厚(mm)					板幅(mm)				
	T1	T2	T3	T4	平均	W1	W2	W3	W4	平均
G-F-AW1	12.43	12.43	12.44	12.43	12.43	100.65	100.75	100.75	100.80	100.74
G-F-AW2	12.40	12.36	12.37	12.39	12.38	101.00	101.00	101.10	101.05	101.04
G-F-AW3	12.42	12.39	12.38	12.39	12.40	100.50	100.65	100.65	100.70	100.63
G-F-AW4	12.44	12.37	12.40	12.38	12.40	100.80	101.00	101.30	101.55	101.16
G-F-AW5	12.40	12.44	12.43	12.48	12.44	101.30	101.10	101.20	101.25	101.21
G-F-AW6	12.24	12.33	12.32	12.40	12.32	101.15	100.95	100.80	101.00	100.98
G-F-AW7	12.35	12.33	12.32	12.38	12.35	101.15	101.00	101.00	101.15	101.08
G-F-AW8	12.29	12.23	12.25	12.28	12.26	100.50	100.50	100.70	100.65	100.59
G-F-AW9	12.41	12.39	12.38	12.42	12.40	100.80	100.95	100.90	100.95	100.90
G-F-AW10	12.41	12.36	12.38	12.41	12.39	100.15	100.15	100.15	100.15	100.15
G-F-AW11	11.81	11.80	11.82	11.80	11.81	100.00	100.00	100.05	100.10	100.04

表 4.28 耐疲労鋼面外ガセット試験体の計測寸法（その 2）

鋼種	試験体名	板厚 (mm)	板幅 (mm)	総断面積 (mm <sup>2</sup> )
SM490Y -FCA	G-F-AW1	12.43	100.74	1252.20
	G-F-AW2	12.38	101.04	1250.88
	G-F-AW3	12.40	100.63	1247.81
	G-F-AW4	12.40	101.16	1254.38
	G-F-AW5	12.44	101.21	1259.05
	G-F-AW6	12.32	100.98	1244.07
	G-F-AW7	12.35	101.08	1248.34
	G-F-AW8	12.26	100.59	1233.23
	G-F-AW9	12.40	100.90	1251.16
	G-F-AW10	12.39	100.15	1240.86
	G-F-AW11	11.81	100.04	1181.47

表 4.29 従来鋼面外ガセット試験体の計測寸法（その 1）

試験体名	板厚(mm)					板幅(mm)				
	T1	T2	T3	T4	平均	W1	W2	W3	W4	平均
G-C-AW1	11.67	11.68	11.67	11.68	11.68	100.20	100.20	100.15	100.15	100.18
G-C-AW2	11.66	11.68	11.68	11.67	11.67	100.35	100.40	100.30	100.30	100.34
G-C-AW3	11.67	11.69	11.68	11.68	11.68	100.20	100.10	100.15	100.30	100.19
G-C-AW4	11.72	11.70	11.68	11.68	11.70	100.35	100.30	100.30	100.30	100.31
G-C-AW5	11.74	11.78	11.75	11.75	11.76	100.30	100.30	100.25	100.30	100.29
G-C-AW6	11.72	11.72	11.72	11.72	11.72	100.25	100.25	100.25	100.25	100.25
G-C-AW7	11.70	11.70	11.69	11.70	11.70	100.30	100.30	100.30	100.30	100.30
G-C-AW8	11.72	11.74	11.73	11.72	11.73	100.30	100.30	100.30	100.30	100.30
G-C-AW9	11.71	11.73	11.72	11.71	11.72	100.45	100.45	100.40	100.40	100.43
G-C-AW10	11.71	11.71	11.71	11.71	11.71	100.30	100.40	100.40	100.40	100.38
G-C-AW11	11.71	11.72	11.73	11.73	11.72	100.45	100.40	100.40	100.45	100.43

表 4.30 従来鋼面外ガセット試験体の計測寸法（その 2）

鋼種	試験体名	板厚 (mm)	板幅 (mm)	総断面積 (mm <sup>2</sup> )
SM490Y	G-C-AW1	11.68	100.18	1170.10
	G-C-AW2	11.67	100.34	1170.97
	G-C-AW3	11.68	100.19	1170.22
	G-C-AW4	11.70	100.31	1173.63
	G-C-AW5	11.76	100.29	1179.41
	G-C-AW6	11.72	100.25	1174.93
	G-C-AW7	11.70	100.30	1173.51
	G-C-AW8	11.73	100.30	1176.52
	G-C-AW9	11.72	100.43	1177.04
	G-C-AW10	11.71	100.38	1175.45
	G-C-AW11	11.72	100.43	1177.04

表 4.31 耐疲労鋼面外ガセットの荷重条件

試験体名	総断面積 (mm <sup>2</sup> )	荷重範囲(kN)		公称応力範囲 (N/mm <sup>2</sup> )
		LOW	HIGH	
G-F-AW1	1252.20	10	197.8	150.0
G-F-AW2	1250.88	10	160.1	120.0
G-F-AW3	1247.81	10	197.2	150.0
G-F-AW4	1254.38	10	160.5	120.0
G-F-AW5	1259.05	10	135.9	100.0
G-F-AW6	1244.07	10	134.4	100.0
G-F-AW7	1248.34	10	116.1	85.0
G-F-AW8	1233.23	10	114.8	85.0
G-F-AW9	1251.16	10	97.6	70.0
G-F-AW10	1240.86	10	96.9	70.0
G-F-AW11	1181.47	10	80.9	60.0

表 4.32 従来鋼面外ガセットの荷重条件

試験体名	総断面積 (mm <sup>2</sup> )	荷重範囲(kN)		公称応力範囲 (N/mm <sup>2</sup> )
		LOW	HIGH	
G-C-AW1	1170.10	10	185.5	150.0
G-C-AW2	1170.97	10	150.5	120.0
G-C-AW3	1170.22	10	185.5	150.0
G-C-AW4	1173.63	10	150.8	120.0
G-C-AW5	1179.41	10	127.9	100.0
G-C-AW6	1174.93	10	127.5	100.0
G-C-AW7	1173.51	10	109.7	85.0
G-C-AW8	1176.52	10	110.0	85.0
G-C-AW9	1177.04	10	92.4	70.0
G-C-AW10	1175.45	10	92.3	70.0
G-C-AW11	1177.04	10	80.6	60.0

表 4.33 耐疲労鋼十字継手の疲労試験結果

鋼種	試験体名	公称応力範囲 $\Delta\sigma(\text{N/mm}^2)$	疲労寿命N ( $\times 10^4$ cycles)
SM490YA-FCA	C-F-AW01	200	53.1
	C-F-AW02	160	96.8
	C-F-AW03	200	36.5
	C-F-AW04	160	103.8
	C-F-AW05	130	259.9
	C-F-AW06	130	268.3
	C-F-AW07	110	>2000
	C-F-AW08	110	>2000

表 4.34 従来鋼十字継手の疲労試験結果

鋼種	試験体名	公称応力範囲 $\Delta\sigma(\text{N/mm}^2)$	疲労寿命N ( $\times 10^4$ cycles)
SM490YA	C-C-AW01	200	36.5
	C-C-AW02	160	95.4
	C-C-AW03	200	27.6
	C-C-AW04	160	78.6
	C-C-AW05	130	393.5
	C-C-AW06	130	209.8
	C-C-AW07	110	354.2
	C-C-AW08	110	342.2

表 4.35 耐疲労鋼面外ガセットの疲労試験結果

鋼種	試験体名	公称応力範囲 $\Delta\sigma(\text{N}/\text{mm}^2)$	疲労寿命N ( $\times 10^4$ cycles)
SM490YA-FCA	G-F-AW01	150	47.2
	G-F-AW02	120	87.7
	G-F-AW03	150	36.1
	G-F-AW04	120	71.1
	G-F-AW05	100	165.9
	G-F-AW06	100	176.9
	G-F-AW07	85	221.1
	G-F-AW08	85	293.3
	G-F-AW09	70	411.9
	G-F-AW10	70	561.1
	G-F-AW11	60	596.3

表 4.36 従来鋼面外ガセットの疲労試験結果

鋼種	試験体名	公称応力範囲 $\Delta\sigma(\text{N}/\text{mm}^2)$	疲労寿命N ( $\times 10^4$ cycles)
SM490YA	G-C-AW01	150	36.5
	G-C-AW02	120	85.8
	C-C-AW03	150	40.0
	C-C-AW04	120	77.5
	C-C-AW05	100	157.3
	C-C-AW06	100	171.8
	C-C-AW07	85	201.9
	C-C-AW08	85	370
	C-C-AW09	70	384.9
	C-C-AW10	70	723.3
	C-C-AW11	60	427.0

表 4.37 十字継手の潜在き裂検出結果

(a)耐疲労鋼

試験体名	公称応力範囲 (N/mm <sup>2</sup> )	疲労寿命N (cycle)	破断位置	潜在き裂
C-F-AW1	200.0	531,009	FD	無
C-F-AW2	160.0	967,872	FD	無
C-F-AW3	200.0	364,847	BD	無
C-F-AW4	160.0	1,037,801	BD	無
C-F-AW5	130.0	2,598,526	FD	無
C-F-AW6	130.0	2,682,844	FD	無

(b)従来鋼

試験体名	公称応力範囲 (N/mm <sup>2</sup> )	疲労寿命N (cycle)	破断位置	潜在き裂
C-C-AW1	200.0	364,514	FD	BU
C-C-AW2	160.0	954,164	BD	FU
C-C-AW3	200.0	276,349	BD	無
C-C-AW4	160.0	786,079	BU	FD
C-C-AW5	130.0	3,934,604	FD	無
C-C-AW6	130.0	2,098,191	BD	無
C-C-AW7	110.0	3,542,006	BD	無
C-C-AW8	110.0	3,422,306	BD	無

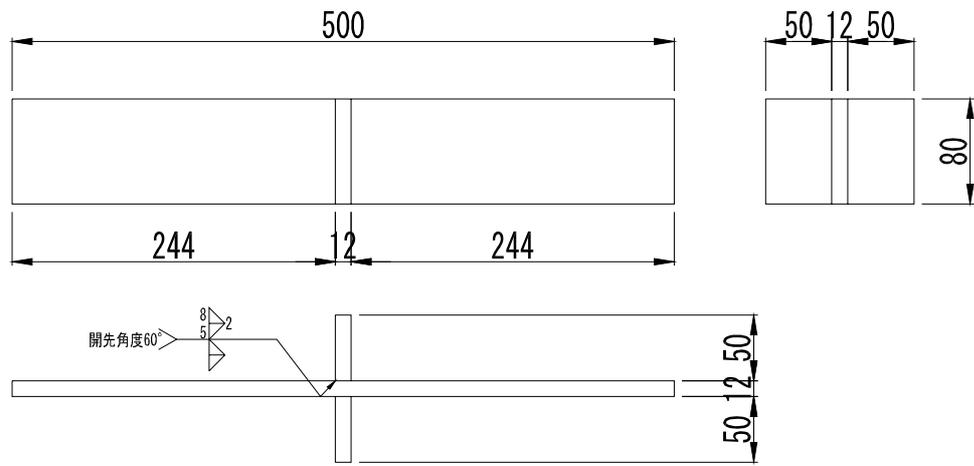
表 4.38 面外ガセットの潜在き裂検出結果

(a)耐疲労鋼

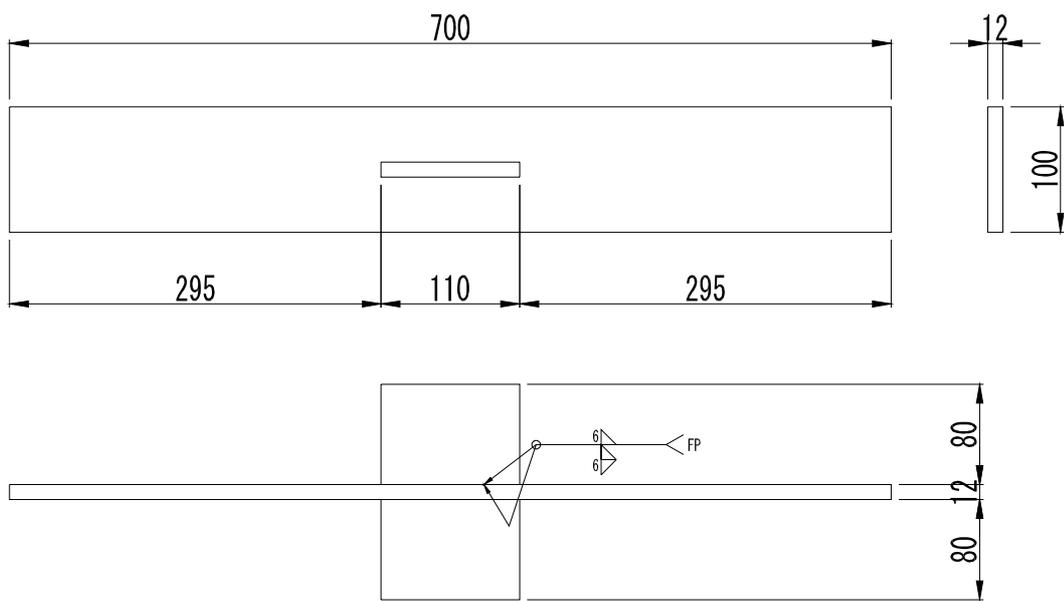
試験体名	公称応力範囲 (N/mm <sup>2</sup> )	疲労寿命N (cycle)	破断位置	潜在き裂
G-F-AW1	150.0	471,575	BD	BU
G-F-AW2	120.0	876,709	BU	BD
G-F-AW3	150.0	361,294	BD	BU
G-F-AW4	120.0	711,125	FU	FD
G-F-AW5	100.0	1,658,839	BU	BD
G-F-AW6	100.0	1,768,590	FD	FU
G-F-AW7	85.0	2,211,073	BD	BU
G-F-AW8	85.0	2,933,075	BD	BU
G-F-AW9	70.0	4,118,887	BD	無
G-F-AW10	70.0	5,611,439	BU	BD

(b)従来鋼

試験体名	公称応力範囲 (N/mm <sup>2</sup> )	疲労寿命N (cycle)	破断位置	潜在き裂
G-C-AW1	150.0	365,180	FU	FD
G-C-AW2	120.0	858,318	FD	FU
G-C-AW3	150.0	399,907	FU	無
G-C-AW4	120.0	775,066	BD	BU
G-C-AW5	100.0	1,572,920	FD	FU
G-C-AW6	100.0	1,717,506	BD	BU
G-C-AW7	85.0	2,018,652	BU	無
G-C-AW8	85.0	3,700,176	FD	無
G-C-AW9	70.0	3,849,106	BU	BD
G-C-AW10	70.0	7,233,224	BU	無

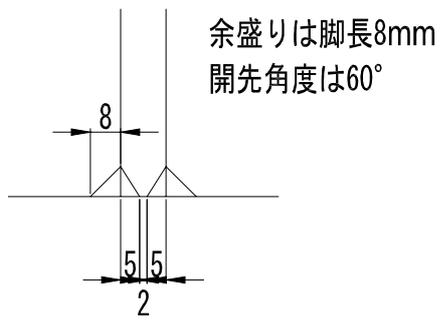


(a) 十字継手

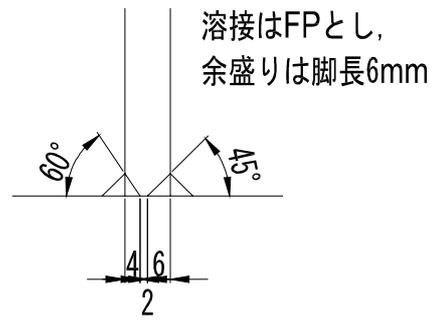


(b) 面外ガゼット

図 4.1 試験体の形状と寸法

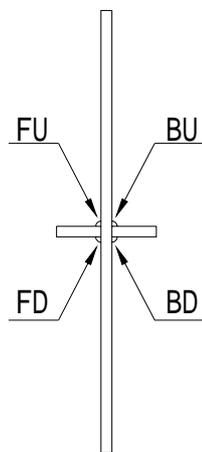


(a) 十字継手

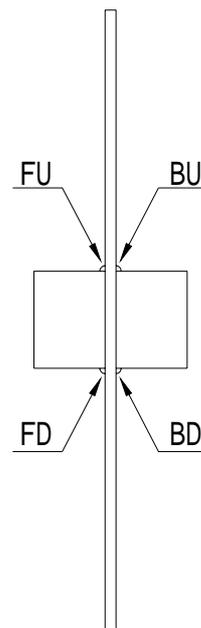


(b) 面外ガゼット

図 4.2 溶接部開先形状



(a) 十字継手



(b) 面外ガゼット

図 4.3 溶接形状測定箇所

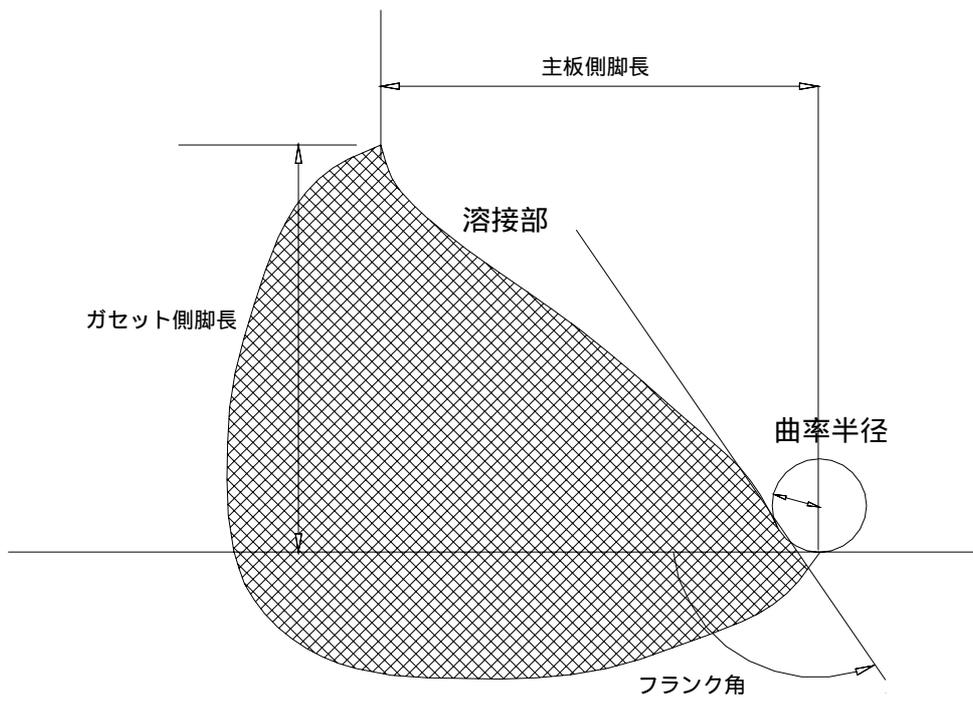
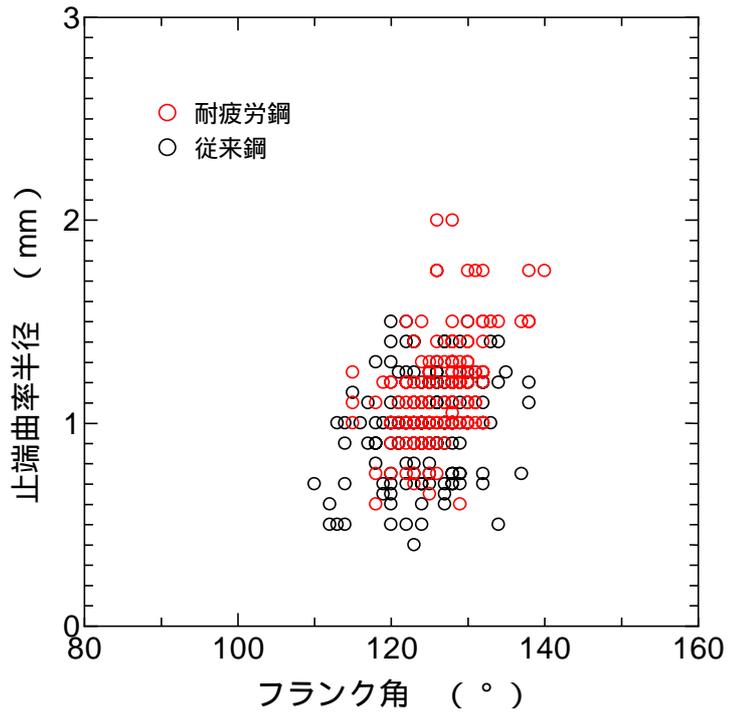
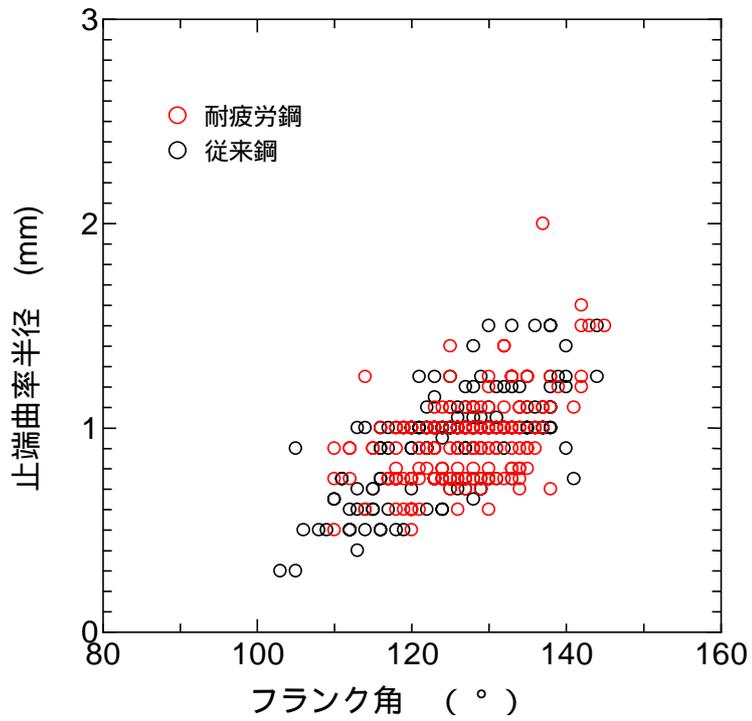


図 4.4 , , 溶接脚長の定義

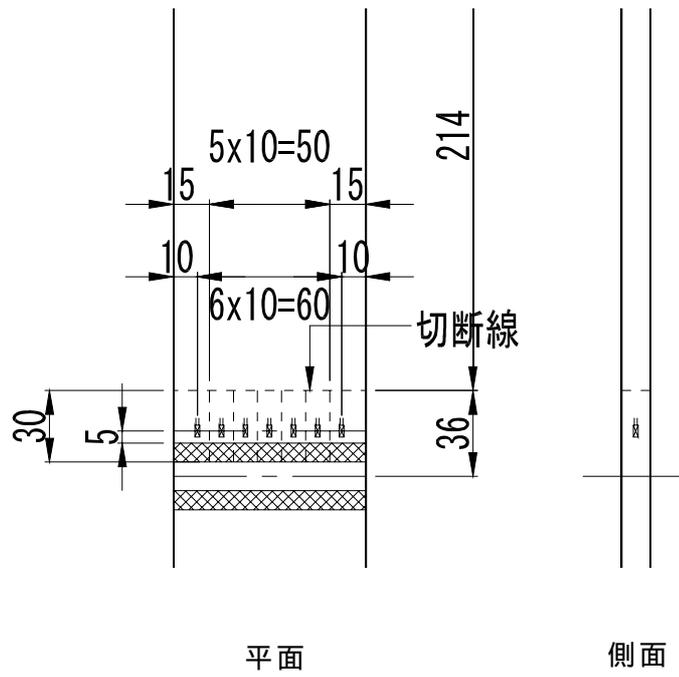


(a) 十字継手

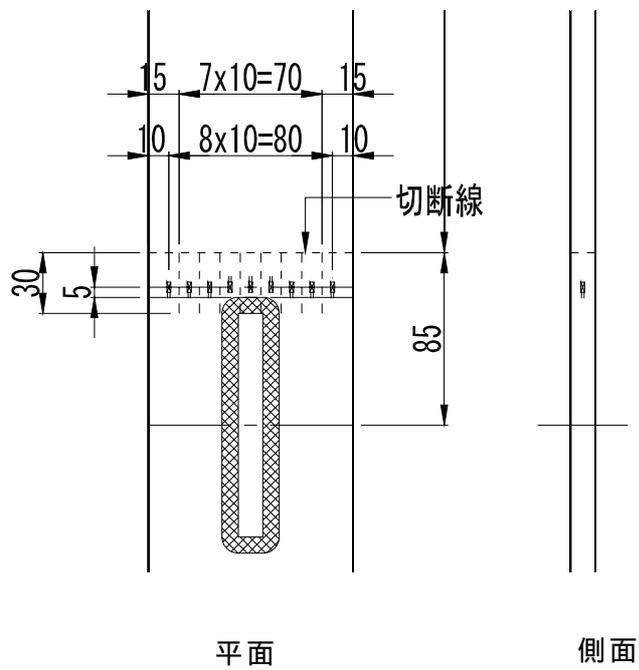


(b) 面外ガゼット

図 4.5 主板側の と の関係

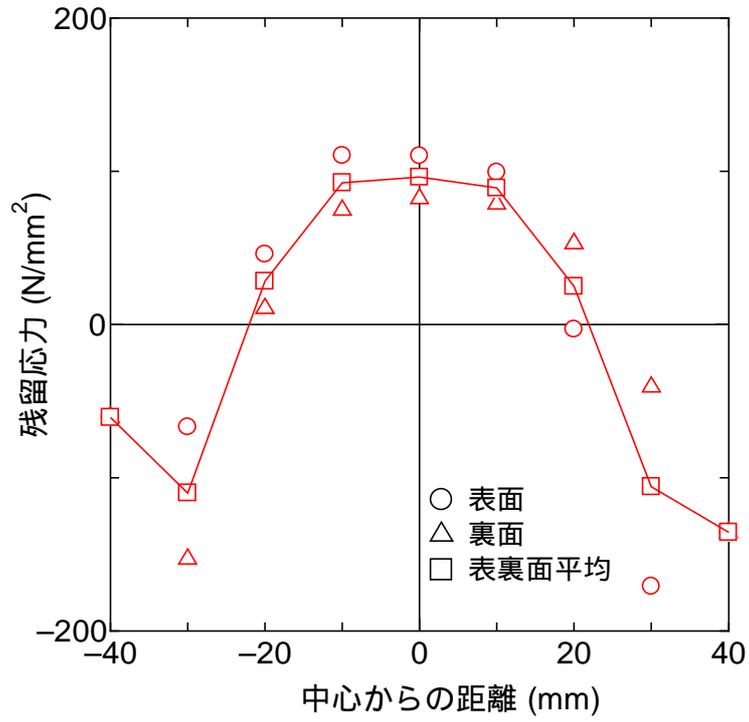


(a) 十字継手

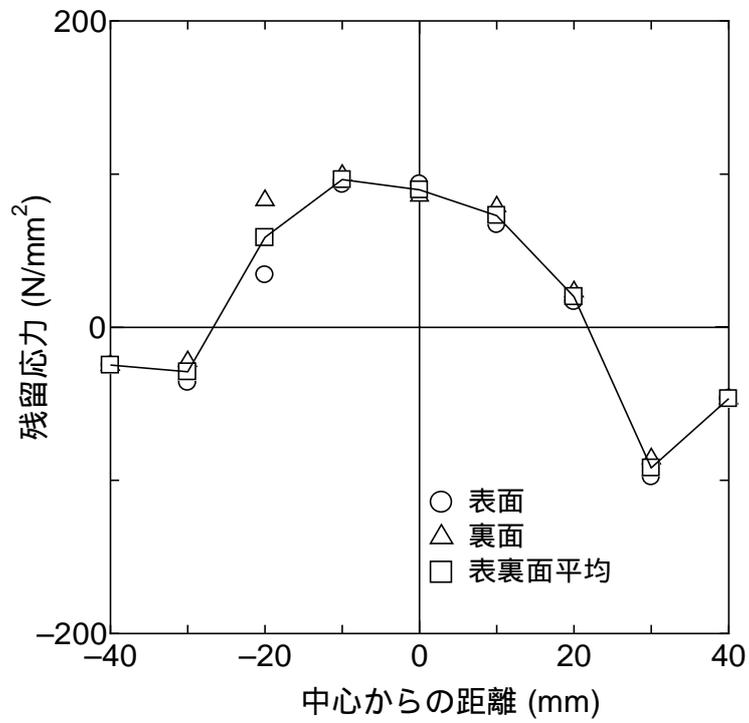


(b) 面外ガゼット

図 4.6 ひずみゲージ貼付位置および試験体の切断位置

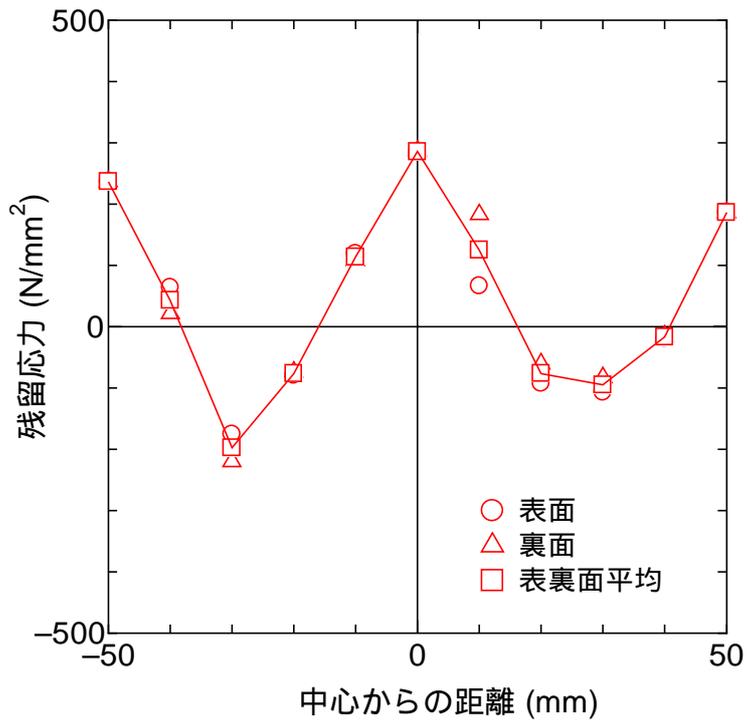


(a)耐疲労鋼

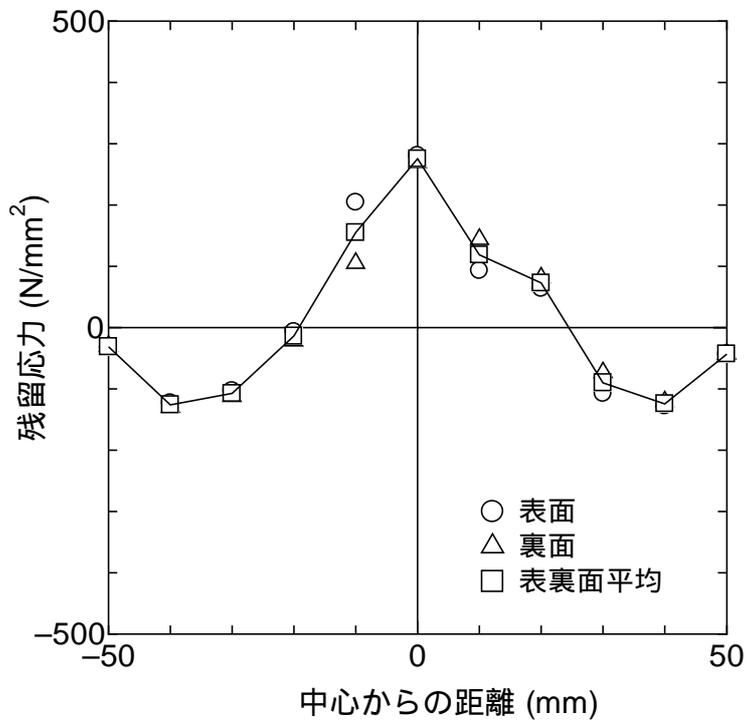


(b)従来鋼

図 4.7 十字継手の残留応力測定結果



(a)耐疲労鋼



(b)従来鋼

図 4.8 面外ガセットの残留応力測定結果

¥

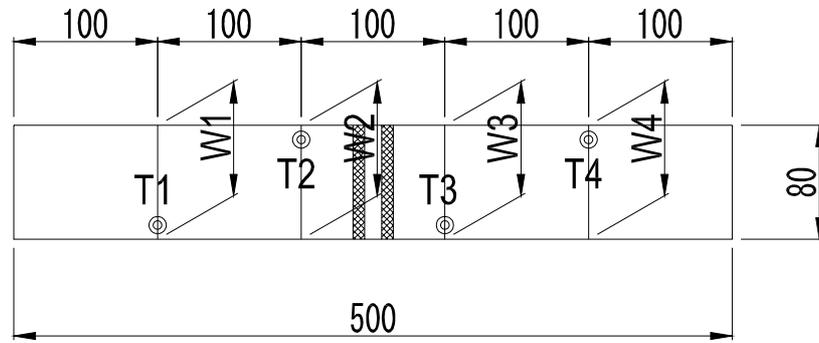


図 4.9 十字継手の寸法計測位置

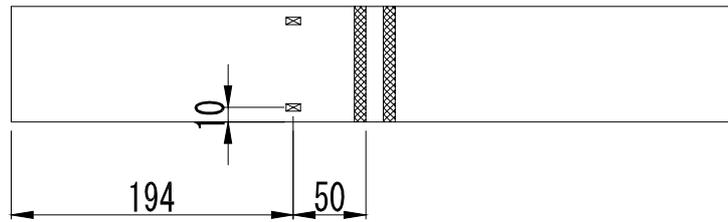


図 4.10 十字継手のひずみゲージ貼付位置

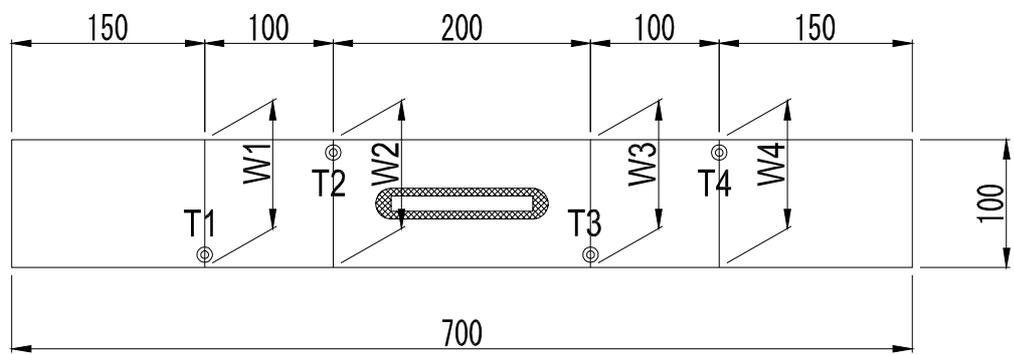


図 4.11 面外ガゼットの寸法計測位置

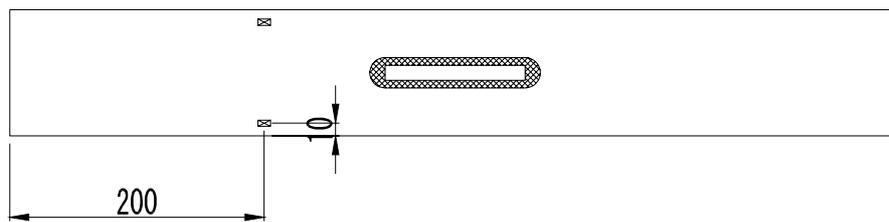


図 4.12 面外ガゼットのひずみゲージ貼付位置

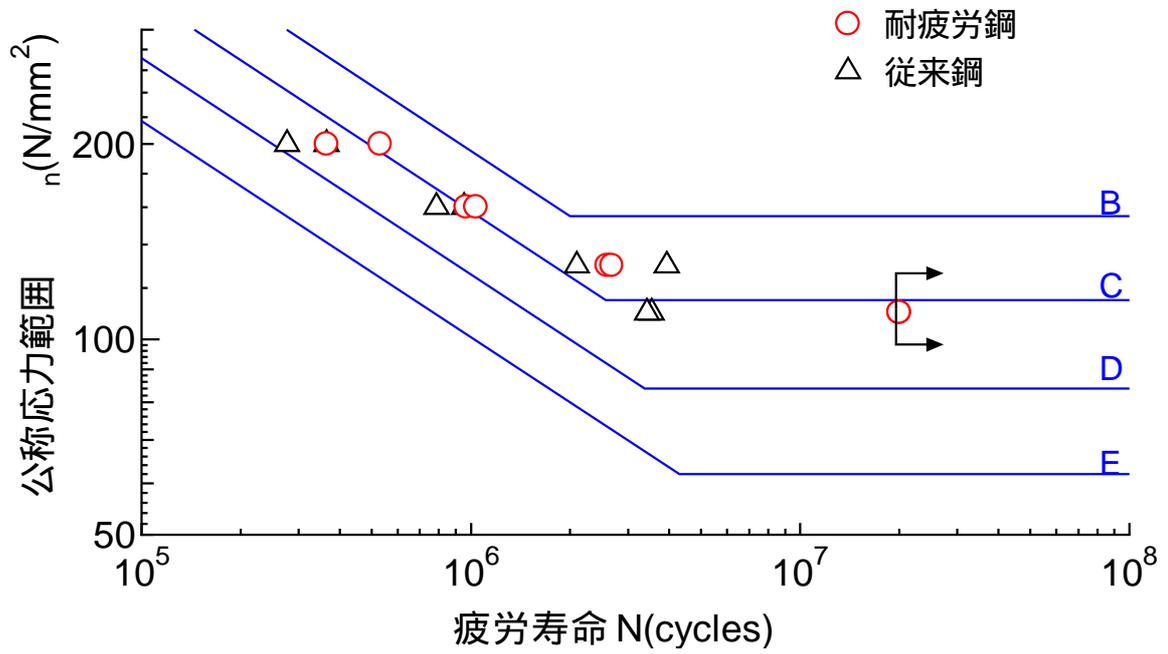


図 4.13 十字継手の  $\sigma$ - $N$  関係

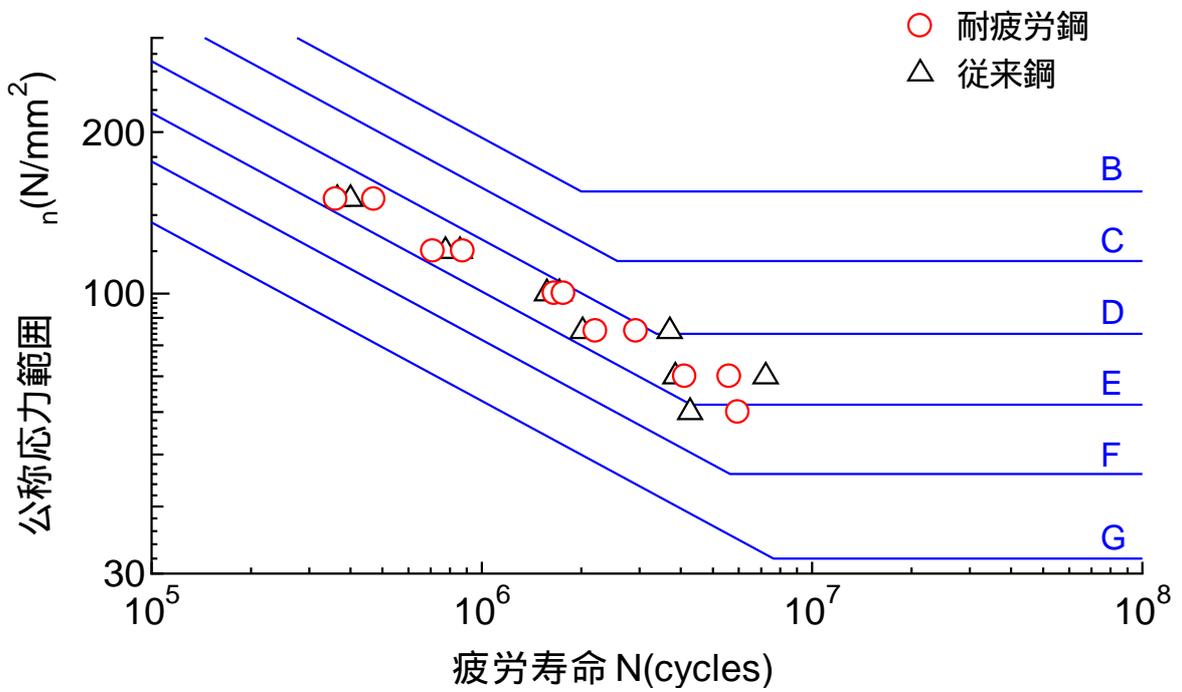


図 4.14 面外ガセットの  $\sigma$ - $N$  関係

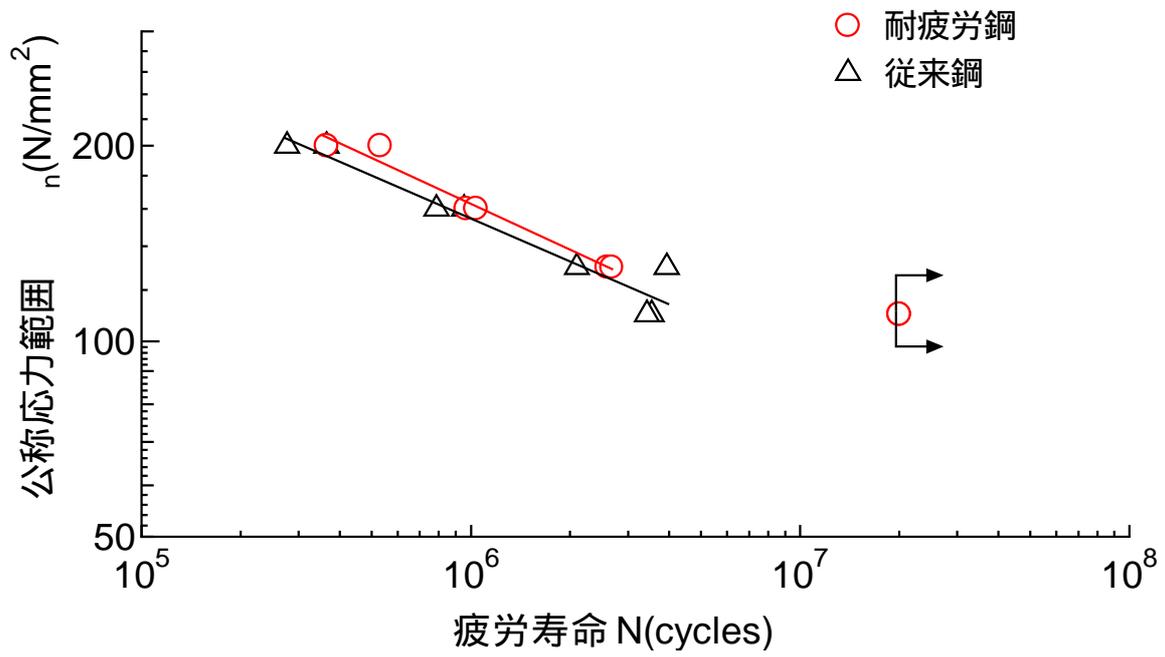


図 4.15 十字継手の疲労強度比較

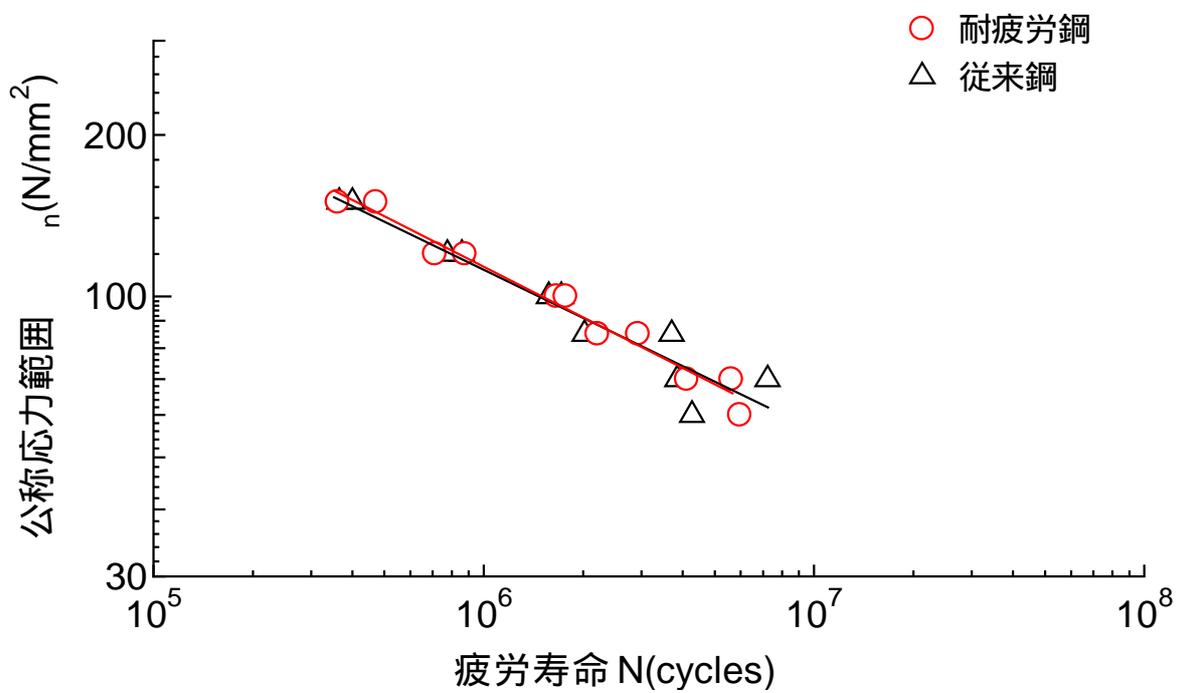


図 4.16 面外ガセットの疲労強度比較

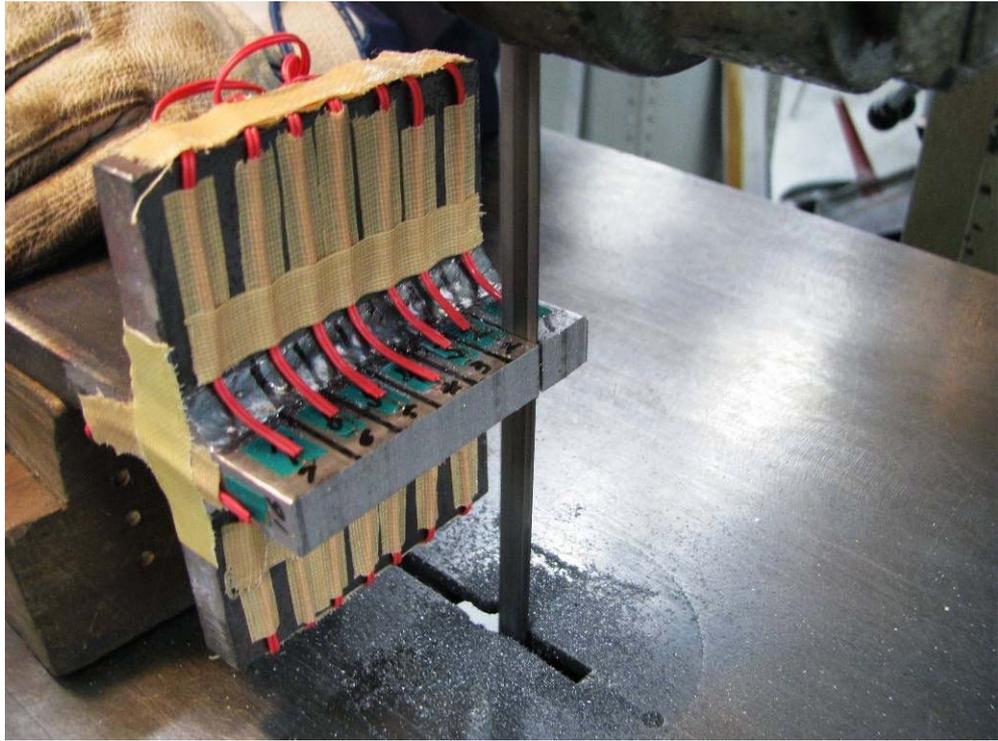


(a)十字継手

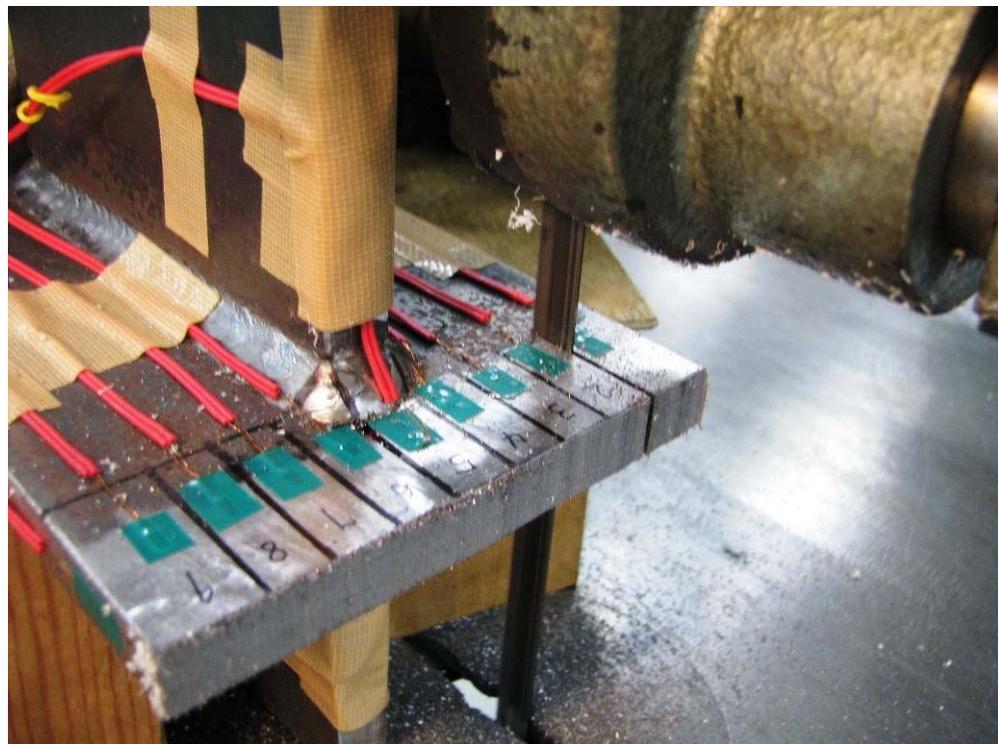


(b)面外ガセット

写真 4.1 試験体の外観

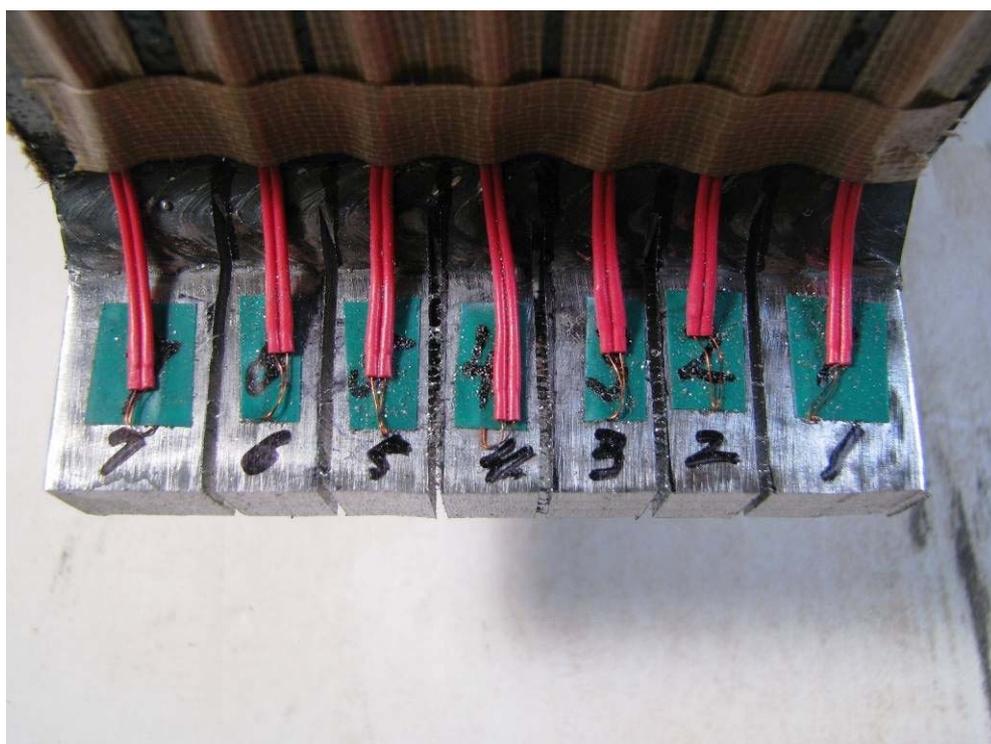


(a)十字継手

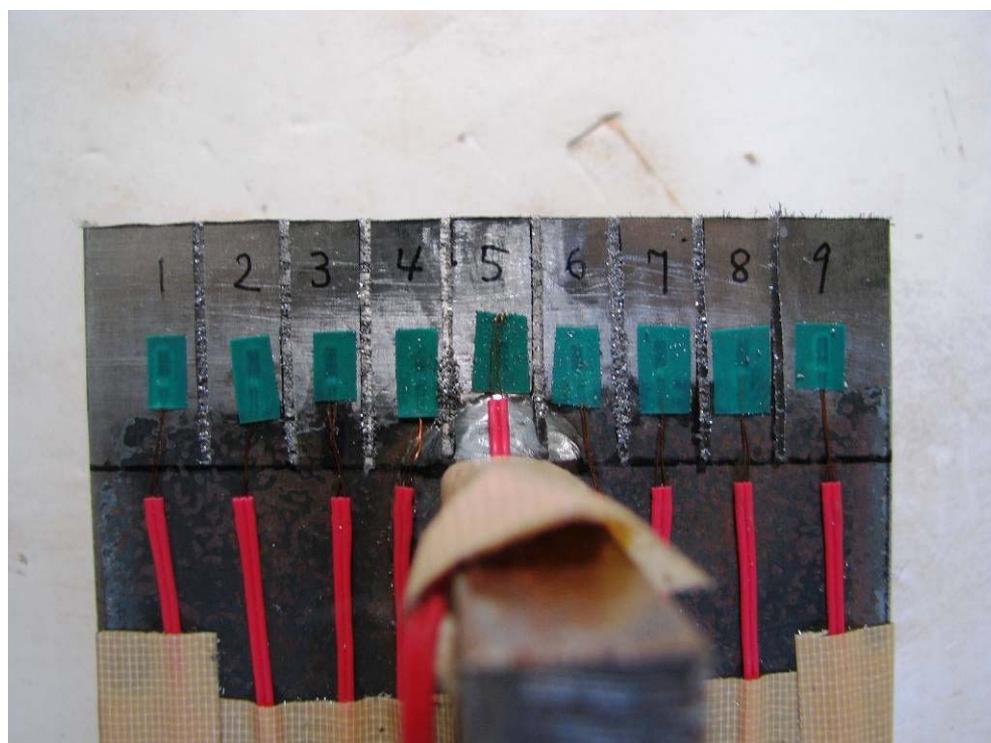


(b)面外ガセット

写真 4.2 試験体切断の様子



(a)十字継手



(b)面外ガセット

写真 4.3 切断後の試験体



写真 4.4 十字継手の疲労試験



写真 4.5 面外ガセットの疲労試験



(a)上面



(b)破面

写真 4.6 耐疲労鋼十字継手破断写真 (C-F-AW1)



(a)上面

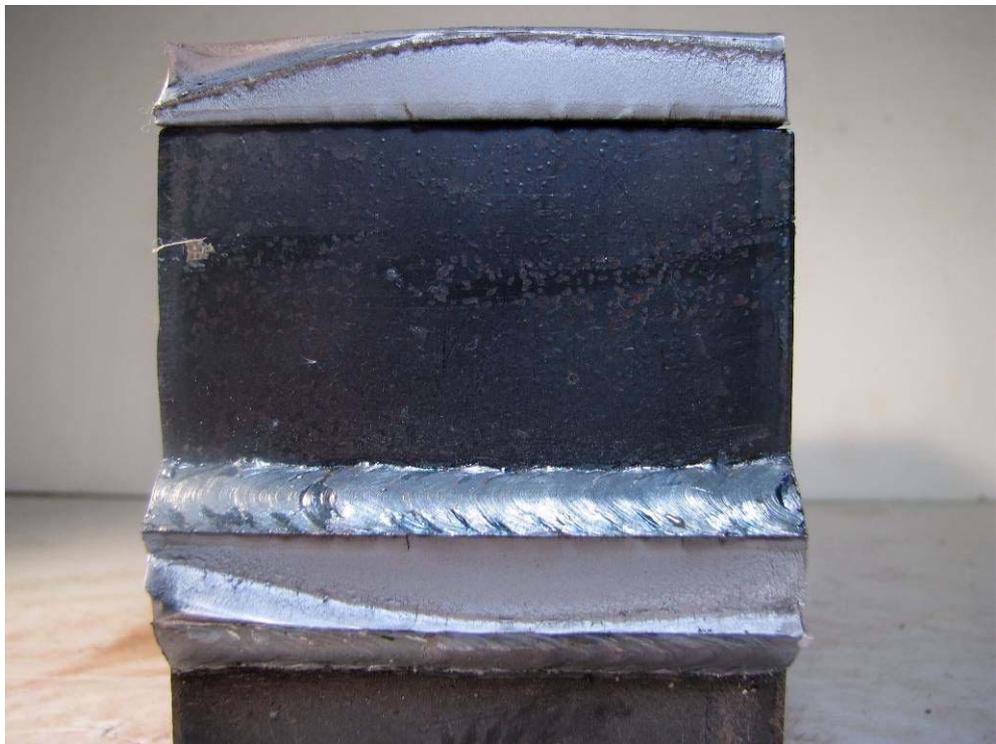


(b)破面

写真 4.7 耐疲労鋼十字継手破断写真 (C-F-AW2)



(a)上面



(b)破面

写真 4.8 耐疲労鋼十字継手破断写真 (C-F-AW3)



(a)上面



(b)破面

写真 4.9 耐疲労鋼十字継手破断写真 (C-F-AW4)



(a)上面



(b)破面

写真 4.10 耐疲労鋼十字継手破断写真 (C-F-AW5)



(a)上面



(b)破面

写真 4.11 耐疲労鋼十字継手破断写真 (C-F-AW6)



(a)上面

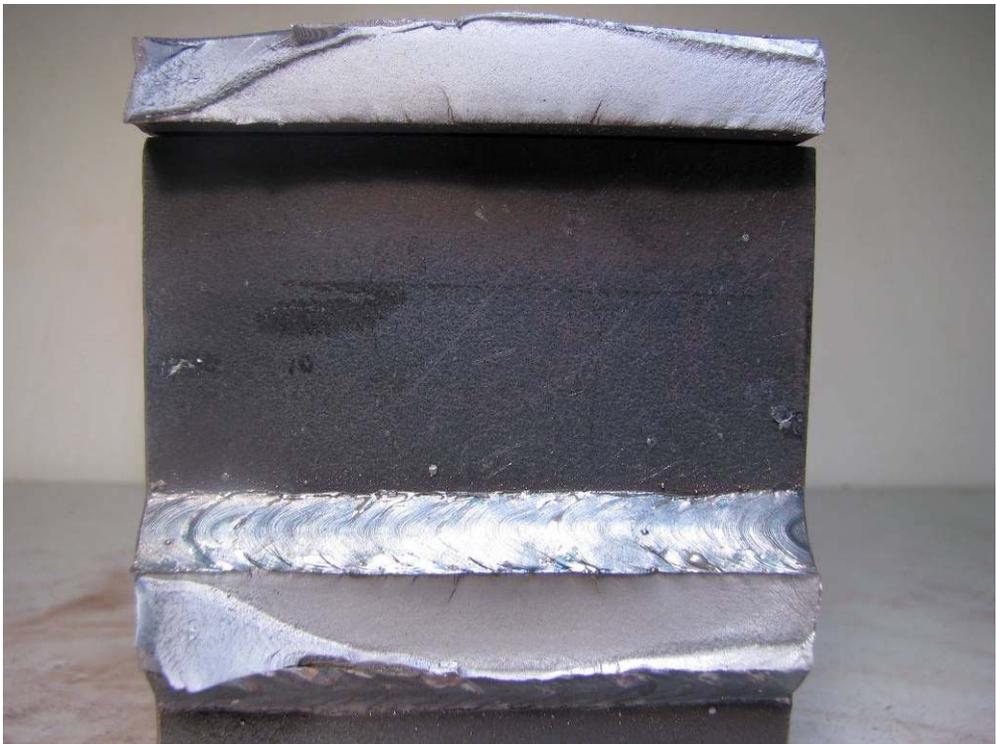


(b)破面

写真 4.12 従来鋼十字継手破断写真 (C-C-AW1)



(a)上面

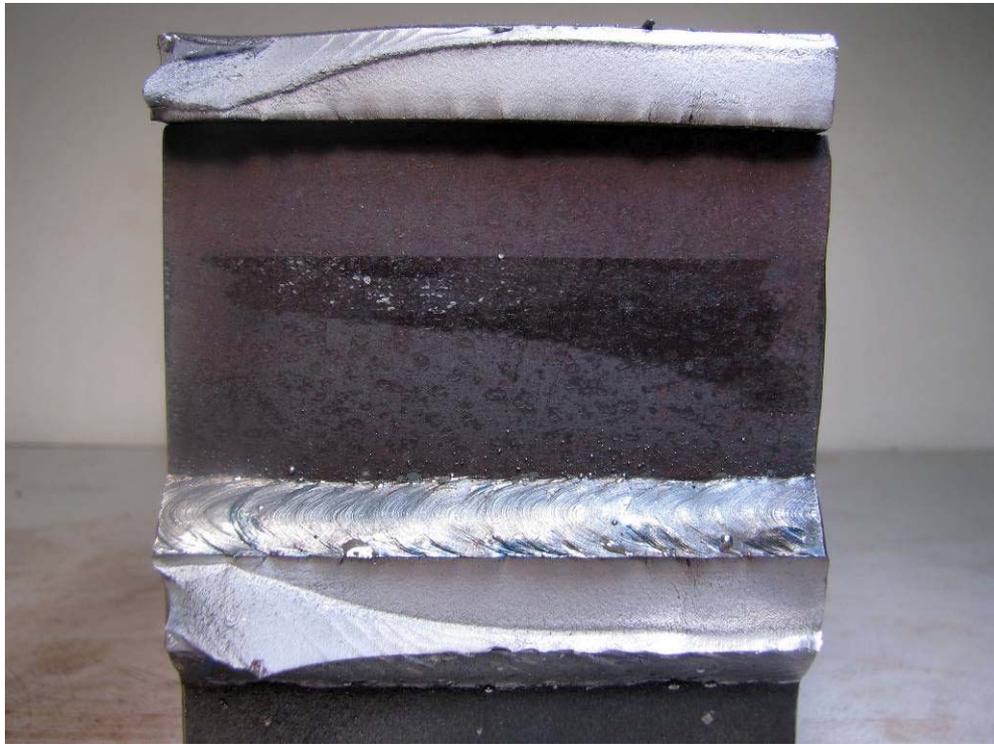


(b)破面

写真 4.13 従来鋼十字継手破断写真 (C-C-AW2)



(a)上面

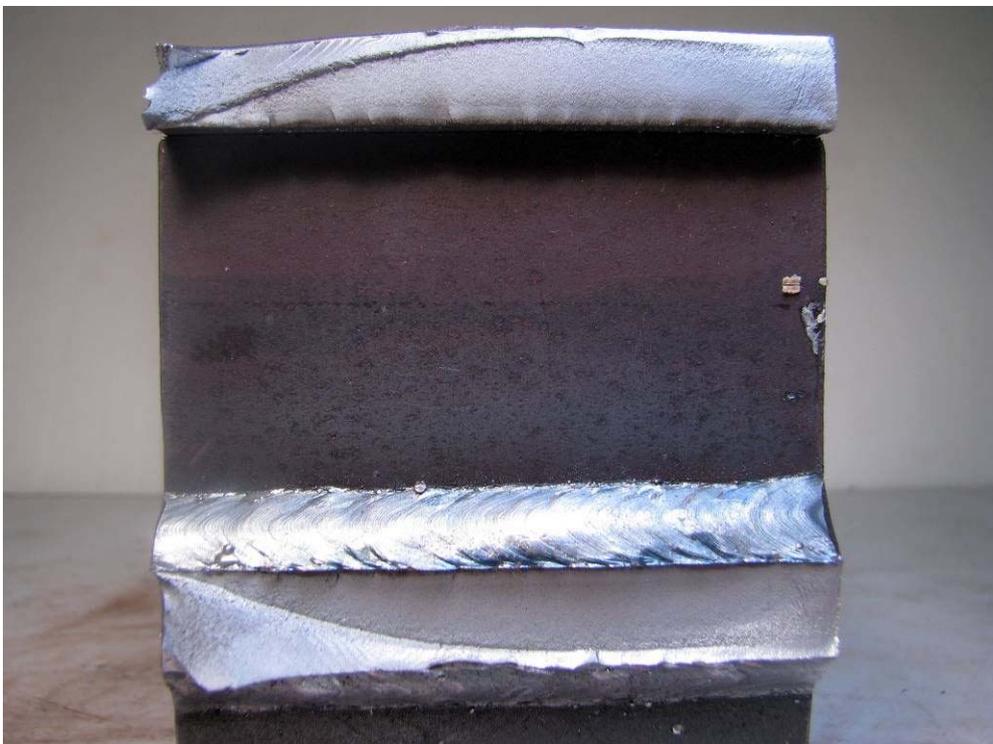


(b)破面

写真 4.14 従来鋼十字継手破断写真 (C-C-AW3)



(a)上面

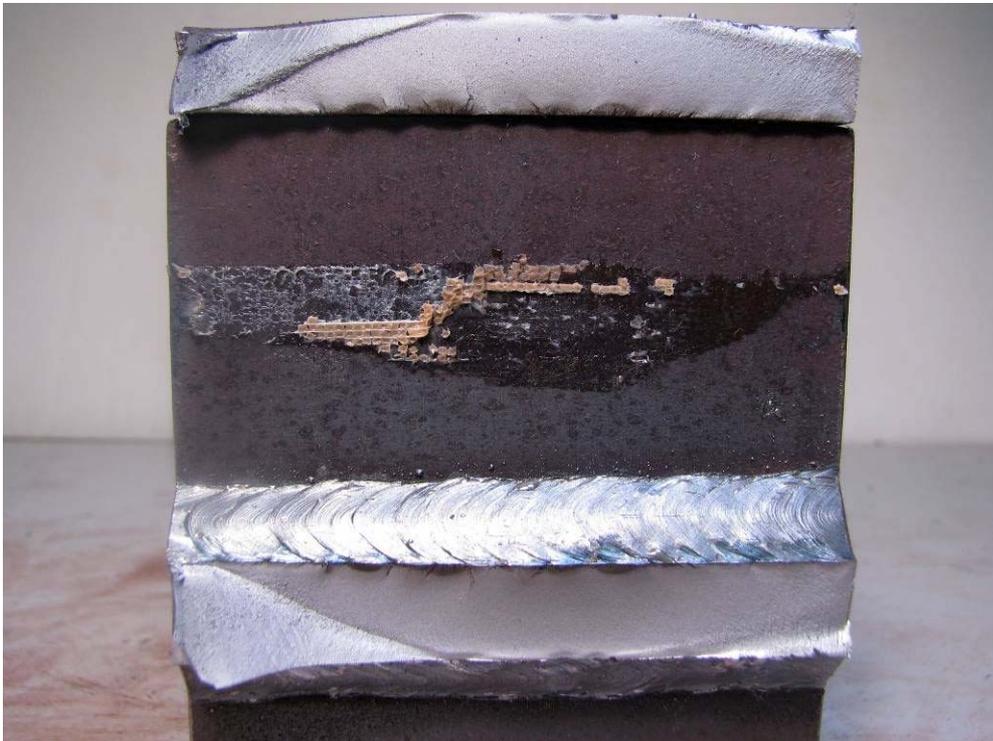


(b)破面

写真 4.15 従来鋼十字継手破断写真 (C-C-AW4)



(a)上面

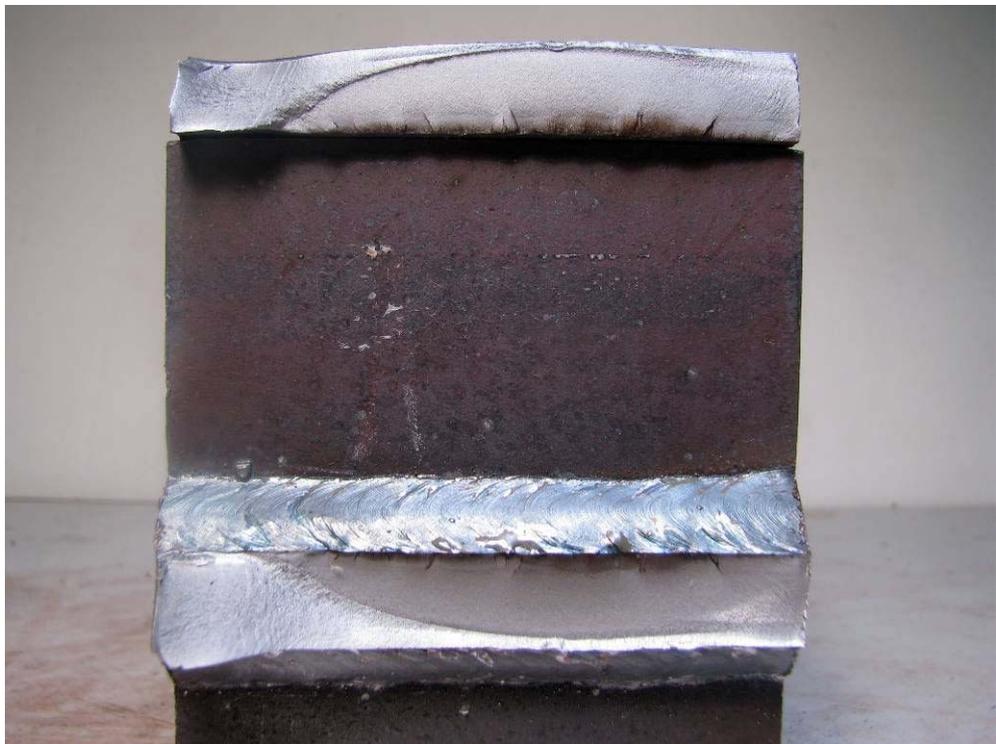


(b)破面

写真 4.16 従来鋼十字継手破断写真 (C-C-AW5)



(a)上面



(b)破面

写真 4.17 従来鋼十字継手破断写真 (C-C-AW6)



(a)上面



(b)破面

写真 4.18 従来鋼十字継手破断写真 (C-C-AW7)

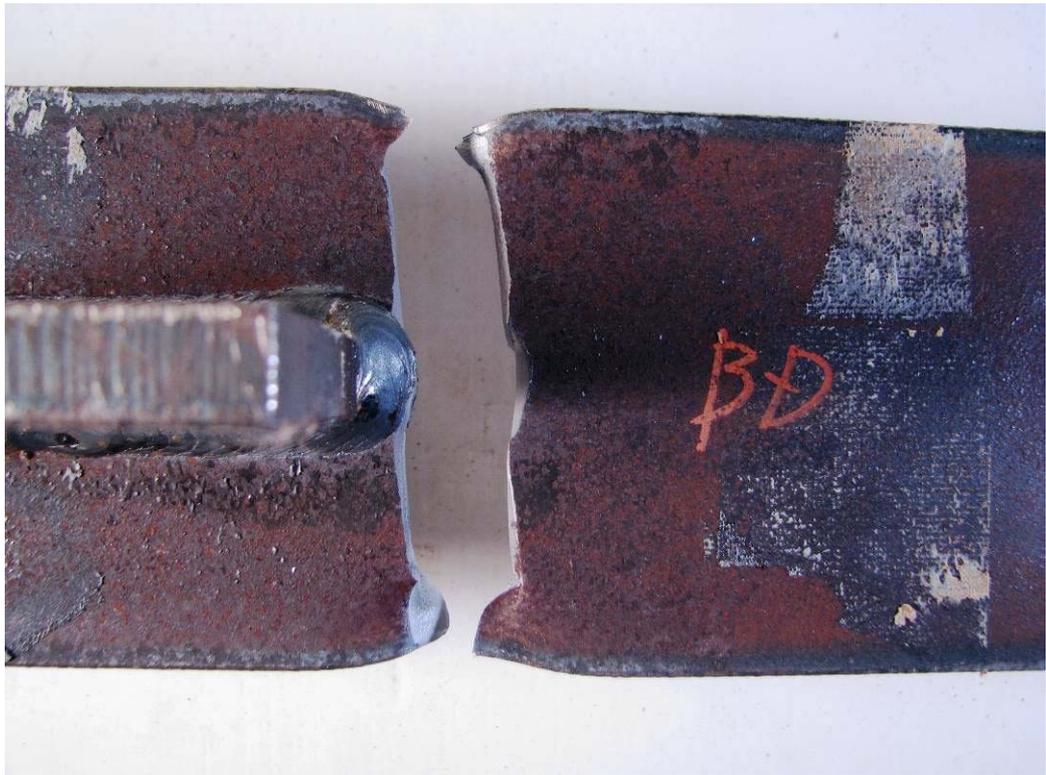


(a)上面



(b)破面

写真 4.19 従来鋼十字継手破断写真 (C-C-AW8)



(a)上面



(b)破面

写真 4.20 耐疲労鋼面外ガセット破断写真 (G-F-AW1)

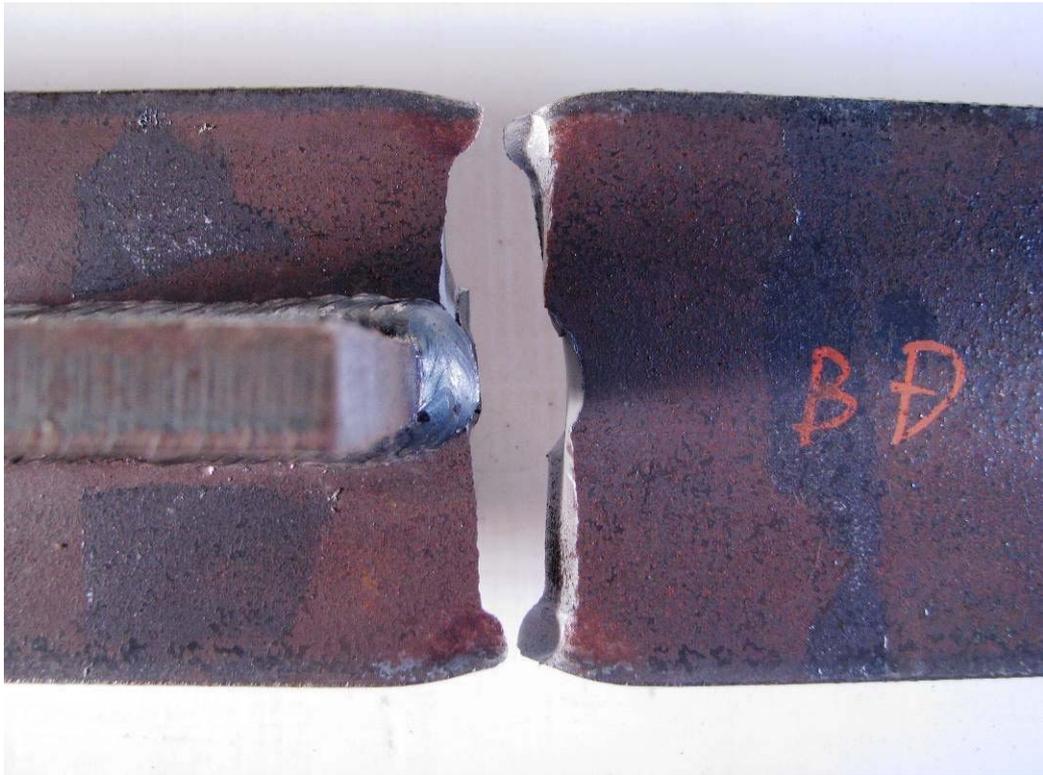


(a)上面



(b)破面

写真 4.21 耐疲労鋼面外ガセット破断写真 (G-F-AW2)



(a)上面



(b)破面

写真 4.22 耐疲労鋼面外ガセット破断写真 (G-F-AW3)



(a)上面



(b)破面

写真 4.23 耐疲労鋼面外ガセット破断写真 (G-F-AW4)

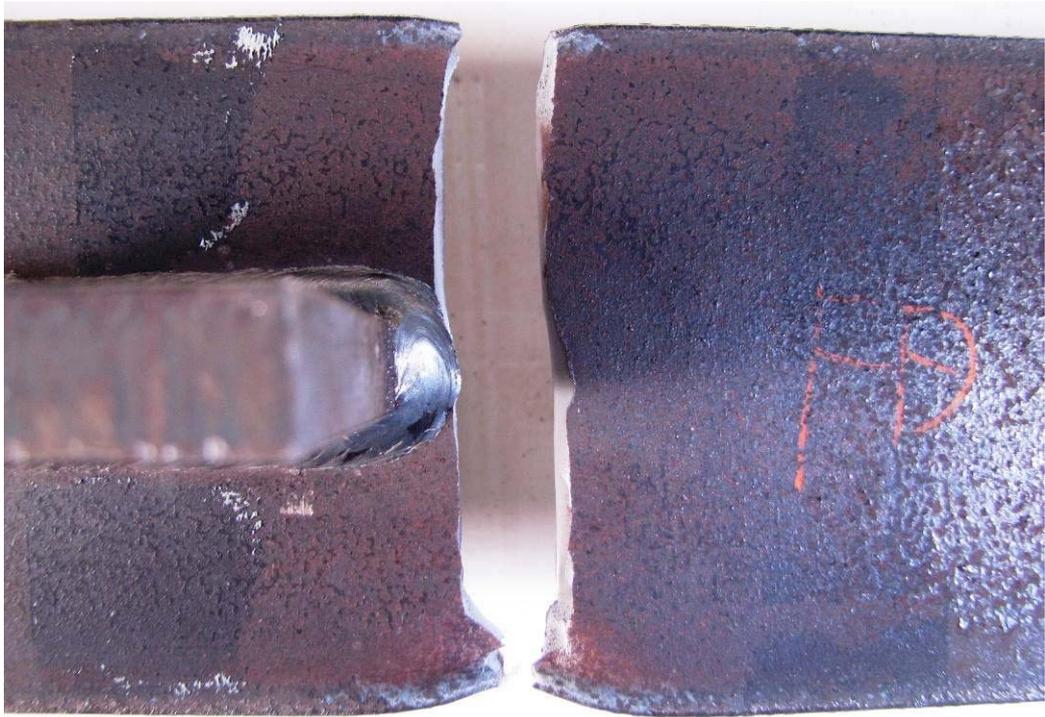


(a)上面



(b)破面

写真 4.24 耐疲労鋼面外ガセット破断写真 (G-F-AW5)



(a)上面



(b)破面

写真 4.25 耐疲労鋼面外ガセット破断写真 (G-F-AW6)



(a)上面

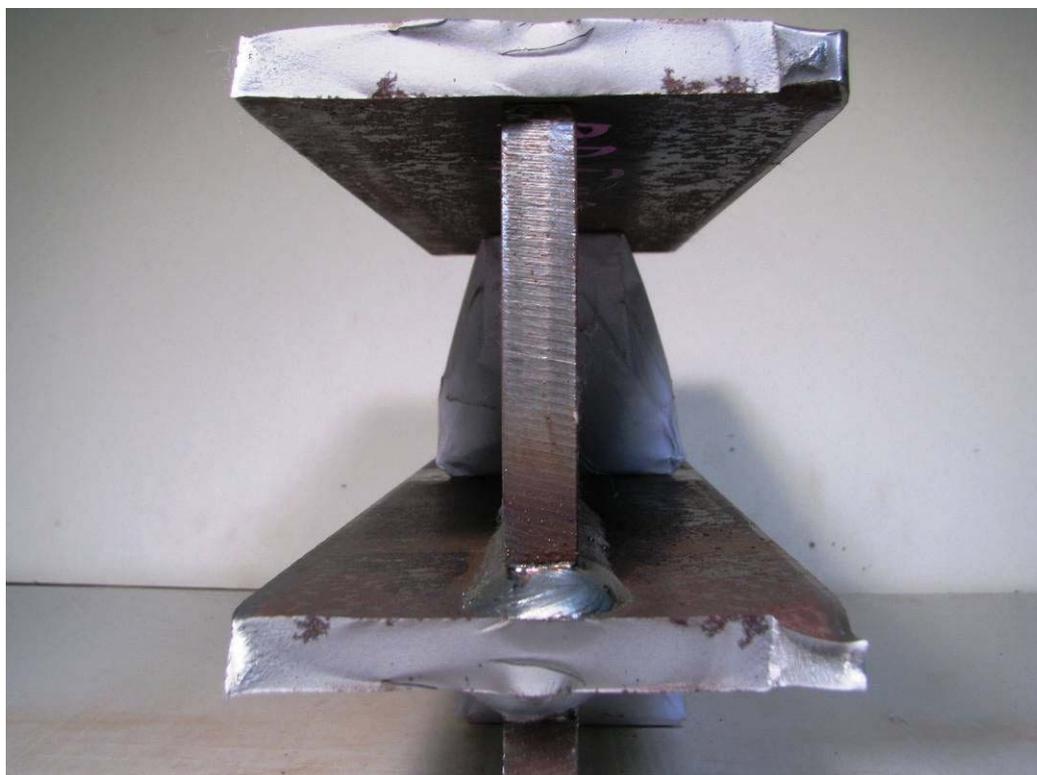


(b)破面

写真 4.26 耐疲労鋼面外ガセット破断写真 (G-F-AW7)



(a)上面



(b)破面

写真 4.27 耐疲労鋼面外ガセット破断写真 (G-F-AW8)



(a)上面



(b)破面

写真 4.28 耐疲労鋼面外ガセット破断写真 (G-F-AW9)



(a)上面



(b)破面

写真 4.29 耐疲労鋼面外ガセット破断写真 (G-F-AW10)



(a)上面



(b)破面

写真 4.30 耐疲労鋼面外ガセット破断写真 (G-F-AW11)



(a)上面



(b)破面

写真 4.31 従来鋼面外ガセット破断写真 (G-C-AW1)



(a)上面



(b)破面

写真 4.32 従来鋼面外ガセット破断写真 (G-C-AW2)



(a)上面



(b)破面

写真 4.33 従来鋼面外ガセット破断写真 (G-C-AW3)



(a)上面



(b)破面

写真 4.34 従来鋼面外ガセット破断写真 (G-C-AW4)



(a)上面



(b)破面

写真 4.35 従来鋼面外ガセット破断写真 (G-C-AW5)

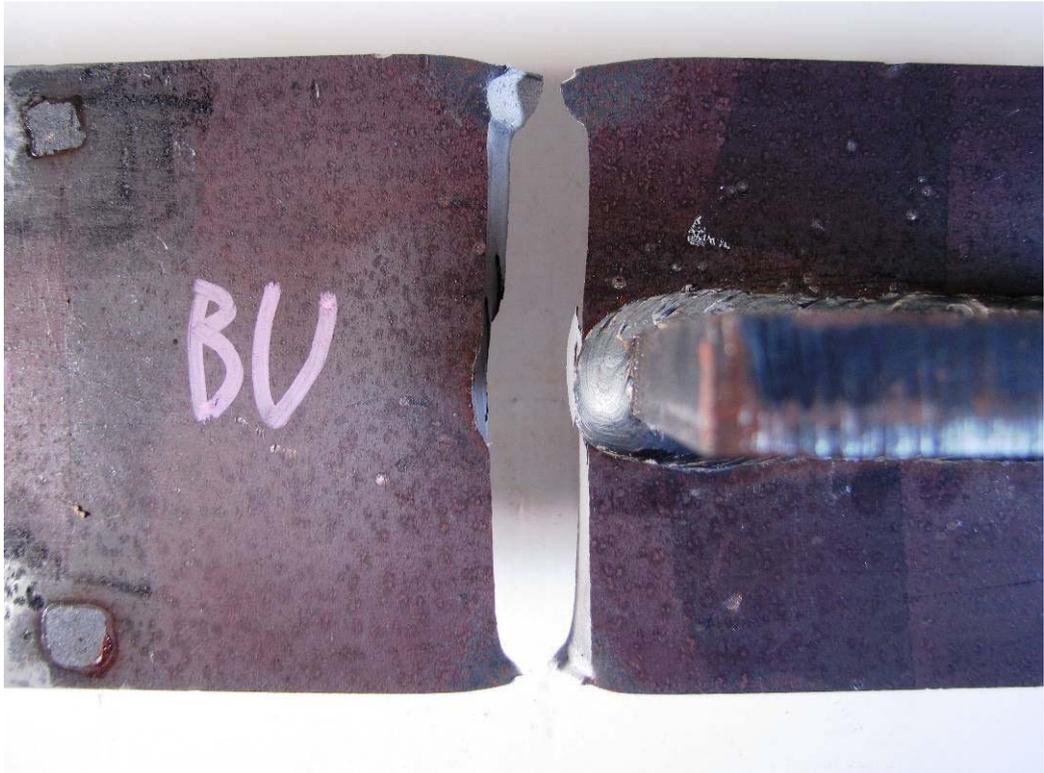


(a)上面



(b)破面

写真 4.36 従来鋼面外ガセット破断写真 (G-C-AW6)



(a)上面



(b)破面

写真 4.37 従来鋼面外ガセット破断写真 (G-C-AW7)



(a)上面

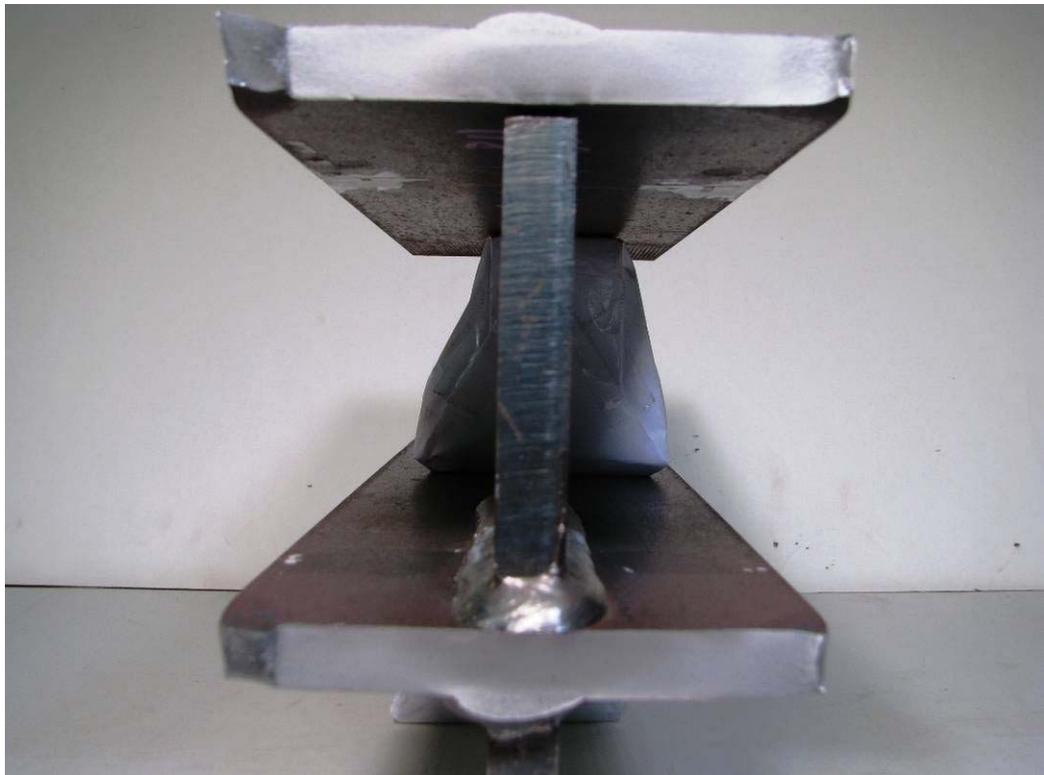


(b)破面

写真 4.38 従来鋼面外ガセット破断写真 (G-C-AW8)



(a)上面

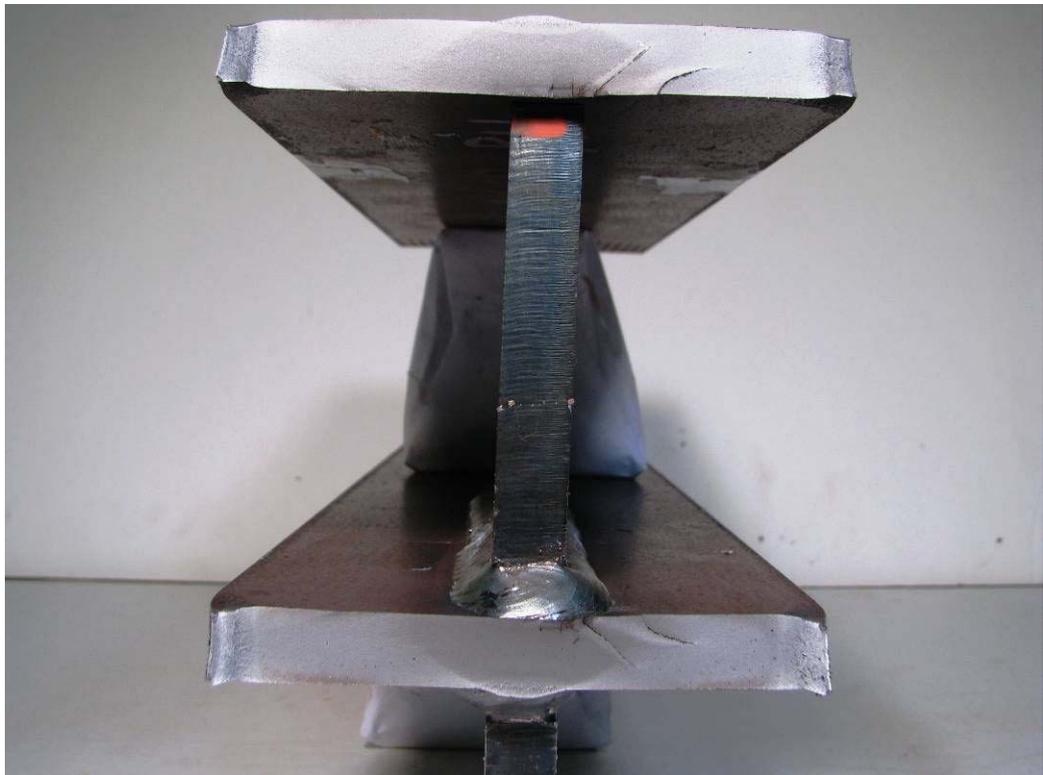


(b)破面

写真 4.39 従来鋼面外ガセット破断写真 (G-C-AW9)

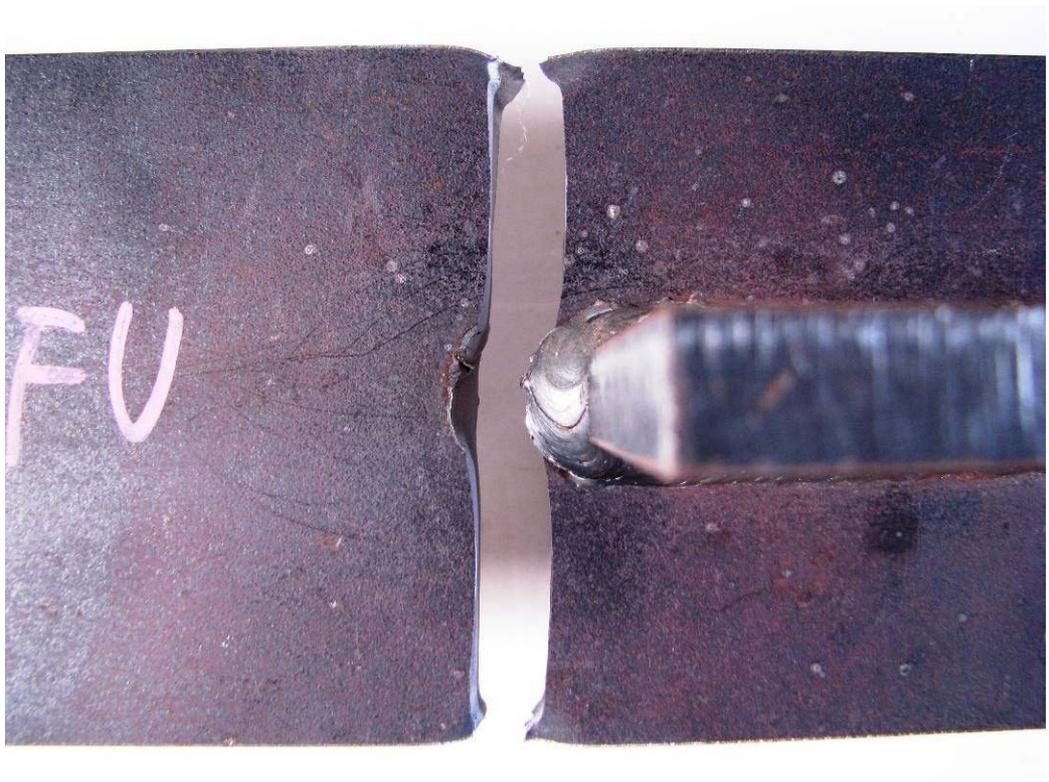


(a)上面



(b)破面

写真 4.40 従来鋼面外ガセット破断写真 (G-C-AW10)



(a)上面



(b)破面

写真 4.41 従来鋼面外ガセット破断写真 (G-C-AW11)

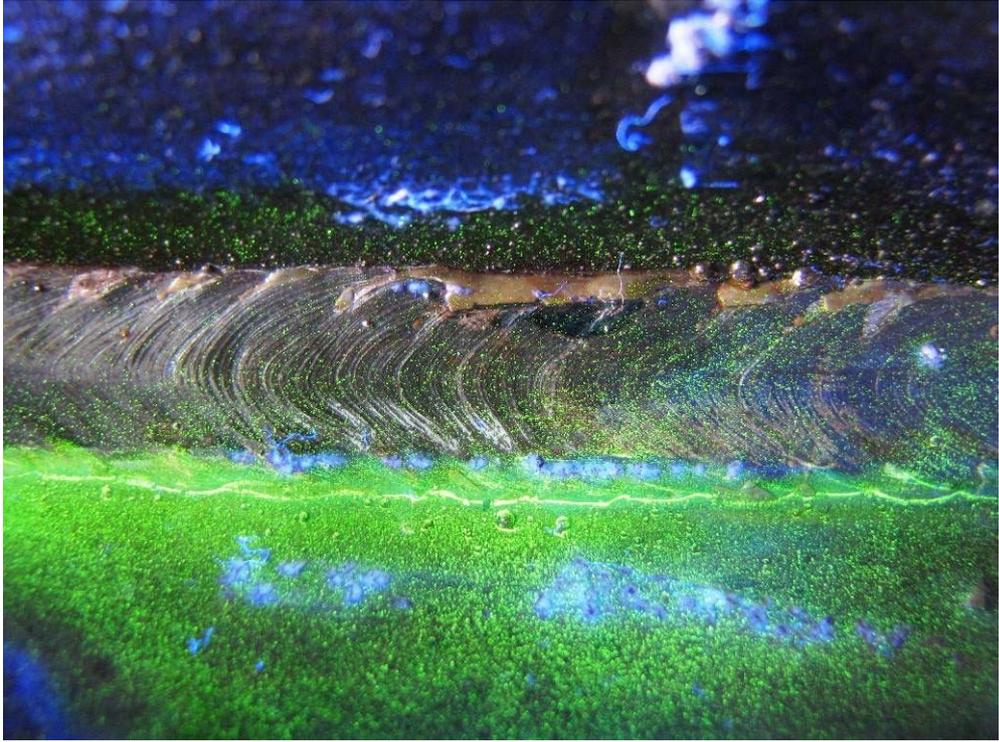


写真 4.42 十字継手の潜在き裂 (C-C-AW1)

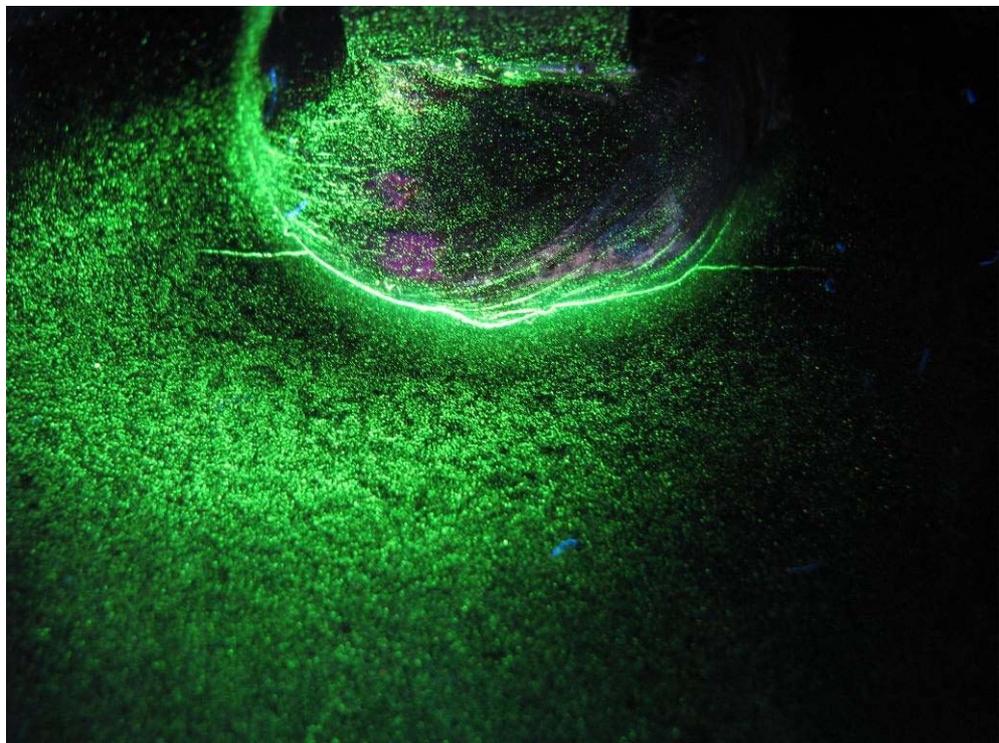


写真 4.43 面外ガゼットの潜在き裂 (G-F-AW2)

## 第 5 章 溶接止端を仕上げた耐疲労鋼十字溶接継手の疲労強度改善効果

### 5.1 試験体

#### 5.1.1 試験体の形状

供試鋼材は第 4 章 4.1 節で示したとおりである。試験体は第 4 章の試験体と同じ形状の十字継手を対象とし、超硬バー（NRS 超硬バー T3600K、サイズ 10x19x6x65、ニューレジストン株）を用いて溶接止端半径が  $r=5\text{mm}$  程度、母材の削り込みが 0.5mm 程度となるように仕上げている。耐疲労鋼を用いた十字継手を「C-F-TG（試験体番号）」、従来鋼を用いた十字継手を「C-C-TG（試験体番号）」と呼ぶ。3 番目の記号 TG が止端仕上げを行なったことを意味している。溶接止端の外観を写真 5.1 に、超硬バーを写真 5.2 に示す。

#### 5.1.2 溶接形状

各試験体の溶接止端部の曲率半径  $r$  とフランク角  $\theta$ 、そして溶接脚長を測定した。 $r$  と  $\theta$  および溶接脚長の定義と測定方法は、第 4 章と同様である。耐疲労鋼を用いた十字継手の計測結果を表 5.1～表 5.2 に、従来鋼を用いた十字継手の計測結果を表 5.3～表 5.4 示す。疲労き裂の起点になると考えられる主板側の  $r$  と  $\theta$  の関係を図 5.1 に示す。 $r$  は 4.5～5mm に分布し、 $\theta$  は 120° 付近にデータが集中している。耐疲労鋼と従来鋼で溶接形状に顕著な違いは見られない。主板側溶接止端の  $r$  と  $\theta$  の平均値は、耐疲労鋼で  $r=4.6\text{mm}$ 、 $\theta=123^\circ$ 、従来鋼で  $r=4.7\text{mm}$ 、 $\theta=123^\circ$  であった。このように、止端部曲率半径は確実に 5mm 程度に仕上げられており、フランク角は第 4 章の溶接のまま試験体とほぼ同程度であることを確認した。また、削り込み深さの平均値は、耐疲労鋼で 0.7mm、従来鋼で 0.6mm であった。

### 5.2 残留応力の測定

残留応力の測定方法は、第 4 章と同じである。切断後の試験体を写真 5.2 に示す。残留応力の測定結果を表 5.5～表 5.6 と図 5.2 に示す。耐疲労鋼は、板幅中央付近の溶接部に  $40\text{N/mm}^2$  程度の引張残留応力が生じている。板幅中央から両側に 30mm 離れた位置では圧縮残留応力が生じている。従来鋼は、板幅中央から片側に 20mm 離れた位置までは  $10\text{N/mm}^2$  程度の引張残留応力が生じているが、そこから離れた位置では圧縮残留応力が生じている。耐疲労鋼に比べて従来鋼の引張残留応力の値は小さくなっ

ているが、その差は小さい。また、第4章で行なった溶接のままの試験体の引張残留応力と比較すると、半分以下になっている。この理由は、残留応力の原因となる溶接部の一部を削除したためとも考えられるが、その詳細は不明である。

## 5.3 疲労試験

### 5.3.1 試験方法

疲労試験は動的能力 $\pm 500\text{kN}$ の電気油圧サーボ式多目的大型材料試験装置(MODEL2806、鷺宮製作所)と動的能力 $\pm 500\text{kN}$ の応力/変位制御高ひずみ試験装置(810型材料試験、MTS)の2台を用いて、下限荷重を $10\text{kN}$ (下限応力 $10.4\text{N/mm}^2$ )とし、公称応力範囲を $200\text{N/mm}^2$ 、 $220\text{N/mm}^2$ 、 $240\text{N/mm}^2$ 、 $270\text{N/mm}^2$ とした条件で行なった。荷重波形は正弦波、繰返し速度は $8\sim 12\text{Hz}$ である。疲労試験の状況を写真5.3に示す。なお、試験体数は、耐疲労鋼、従来鋼ともに各応力範囲につき2体とした。各試験体の板幅と板厚を計測した結果を表5.7～表5.10に示す。寸法計測位置は、図4.7と同じである。各試験体の荷重条件を表5.11～表5.12に示す。疲労試験を開始する前に静的に荷重を載荷し、所定の応力が生じているか、試験体左右で応力のアンバランスがないかを調べるために、図4.8と同様の位置の表裏面にひずみゲージ(ゲージ長 $5\text{mm}$ )を貼付し、ひずみの計測を行なった。ひずみの計測には、デジタルひずみ測定器(TDS-301)を用いた。左右表裏でひずみが10%以上異なっていた場合には、試験体の試験機への取り付けをやり直した。

### 5.3.2 疲労試験結果

疲労試験の結果を表5.13～表5.14に、破断した試験体の破面写真を写真5.4～写真5.19に示す。

試験体C-F-TG06の破断位置は、溶接止端部ではなく母材部であった。この破壊起点には、ガス切断によって供試鋼材を切断した際にできたと思われる小さなきずを確認した。このように母材部の小さなきずが破壊起点になったのは、溶接止端部を仕上げたことにより疲労強度が改善したためと考えられる。図5.3に疲労試験によって得られた止端仕上げを行なった十字継手の公称応力範囲 $\sigma_n$ と疲労寿命 $N$ の関係を示す。C-F-TG06の試験結果には印を付けている。図中の青線は、JSSC指針に示されている疲労強度等級A～Gの設計 $\sigma-N$ 関係を示している。なお、JSSC指針では、止端仕上げを行なった十字継手に対してD等級と規定しているが、試験結果は耐疲労鋼、従来鋼ともにB等級以上となっている。 $\sigma-N$ データは、耐疲労鋼、従来鋼ともに溶接のままの試験体に比べてバラツキが大きくなっている。耐疲労鋼と従来鋼で疲労強度に顕著な違いは認められない。

図5.4には、第4章で行なった溶接のまま試験体の疲労試験結果も含めて公称応力

範囲  $\sigma_n$  と疲労寿命  $N$  の関係を示している。溶接のままの試験体に比べると、止端仕上げを行なった試験体は、耐疲労鋼、従来鋼ともに疲労強度が大きく向上しているのがわかる。疲労強度等級では、D 等級から B 等級へ 2 ランク上がっている。

### 5.3.3 止端仕上げが不完全な試験体の疲労試験結果

試験体の中には、止端部の削り残しなど、仕上げ状態が不完全なものをいくつか確認した。不完全な仕上げの状態を写真 5.20 に示す。溶接止端部の削り残しが確認できる。止端仕上げが不完全な試験体の疲労試験結果を表 5.15 に示す。耐疲労鋼、従来鋼ともに 2 体は、超硬バーを用いて再仕上げを行なった後に疲労試験を行った。図 5.5 には、止端仕上げが不完全な試験体の公称応力範囲  $\sigma_n$  と疲労寿命  $N$  の関係を示す。止端仕上げが不完全な試験体の試験結果には、溶接のままの疲労寿命と変わらないデータも確認できた。これは、止端の削り残しがある場合、溶接のままの試験体と同様に止端に高い応力集中が発生するためである。これに対し、再仕上げを行なった試験体の疲労寿命は、図 5.4 で示した試験結果と同程度の疲労強度改善効果が認められる。この結果より、溶接止端を仕上げることにより疲労強度の向上を図るには、止端ラインを確実に削り取ることが重要である。

## 5.4 耐疲労鋼と従来鋼の疲労強度の比較

図 5.6 に耐疲労鋼と従来鋼の疲労強度比較を示す。図中の赤と黒の実線は、それぞれ耐疲労鋼と従来鋼の疲労試験データより求めた疲労寿命  $N$  に対する公称応力範囲  $\sigma_n$  の回帰直線を示している。200 万回疲労強度で比較すると、耐疲労鋼は  $233.0\text{N/mm}^2$ 、従来鋼は  $239.7\text{N/mm}^2$  であり、両者はほぼ同じである。この結果は、溶接止端部を仕上げた十字継手の疲労強度は、有限寿命域において耐疲労鋼と従来鋼で同じであり、耐疲労鋼と従来鋼で止端仕上げによる疲労強度改善効果は同程度であることを示している。また、第 4 章で示した溶接のままの十字継手では、耐疲労鋼と従来鋼に疲労限の差が見られたが、本検討では明確な差は確認できなかった。

## 5.5 溶接のままの試験体と止端部を仕上げた試験体の疲労強度比較

図 5.7 と図 5.8 に溶接のままの試験体と止端部を仕上げた試験体の疲労強度を比較した結果を示す。図 5.7 は耐疲労鋼、図 5.8 は従来鋼の結果である。図中の破線と実線は、それぞれ溶接のままと止端仕上げを行なった疲労試験データより求めた疲労寿命  $N$  に対する公称応力範囲  $\sigma_n$  の回帰直線を示している。200 万回疲労強度を比較す

ると、耐疲労鋼の溶接のままの継手では  $138.4\text{N/mm}^2$ 、止端仕上げ後は  $233.0\text{N/mm}^2$  であり、疲労強度は約 1.7 倍向上している。従来鋼の場合は、溶接のままは  $132.8\text{N/mm}^2$ 、止端仕上げ後は  $239.7\text{N/mm}^2$  であり、疲労強度は約 1.8 倍向上している。このように、耐疲労鋼と従来鋼ともに溶接止端部を仕上げることにより、大きな疲労強度改善が得られる。

表 5.1 耐疲労鋼十字継手溶接形状 (その1)

		主板側脚長 (mm)	付加板側 脚長 (mm)	主板側 曲率半径p1 (mm)	付加板側 曲率半径p2 (mm)	主板側 フック角θ1 (°)	付加板側 フック角θ2 (°)	削り込み 深さd(mm)
C-F-AW1	FU	10.4	10.6	4.5	2.0	122	127	0.8
		10.1	11.0	4.6	1.8	123	121	1.1
		10.4	10.5	4.5	2.3	127	124	0.6
		10.2	10.8	4.5	2.5	125	125	0.5
	FD	10.0	10.2	4.5	2.5	125	126	0.6
		9.4	10.2	4.8	2.3	124	130	0.5
		9.4	10.3	4.6	2.3	124	125	0.5
		9.0	9.5	4.6	1.5	122	127	0.3
		9.0	9.5	4.5	1.5	124	124	0.3
		9.1	9.5	4.5	2.0	120	127	0.4
		9.2	9.9	4.5	1.5	122	127	0.4
	BU	9.1	9.3	4.5	1.0	121	128	0.4
		9.0	10.2	4.5	2.0	125	127	0.4
		8.8	9.8	4.5	1.8	125	128	0.4
		8.6	9.2	4.5	2.0	123	127	0.4
	BD	8.8	8.5	4.5	1.3	121	124	0.4
		9.0	9.0	4.5	1.8	122	125	0.4
		9.1	9.5	4.5	2.5	124	123	0.4
		9.5	9.6	4.8	2.5	128	128	0.5
	C-F-AW2	FU	9.4	9.0	4.5	2.5	126	121
7.3			6.7	4.5	0.8	124	115	1.0
7.3			7.6	4.5	1.0	120	114	1.0
7.1			6.7	4.5	1.1	122	121	1.0
7.0			7.0	4.5	1.0	119	124	1.0
FD		6.9	7.2	4.5	0.5	123	117	1.0
		6.5	7.3	4.5	1.5	122	126	1.3
		6.6	7.1	4.5	1.0	122	124	1.2
		6.8	7.3	4.5	0.8	117	120	1.1
		6.8	7.4	4.5	1.0	122	124	1.0
		6.7	7.3	4.5	0.5	116	123	0.9
BU		6.8	7.5	4.8	1.3	117	125	1.4
		6.9	7.0	4.8	1.0	117	16	1.4
		6.9	6.7	4.8	0.5	114	120	1.0
		6.9	6.6	4.8	0.8	116	124	1.0
		7.0	7.2	4.8	1.0	124	130	0.8
BD		7.4	7.3	4.5	2.0	122	119	1.0
		7.5	7.3	4.5	1.5	122	120	1.0
		7.5	7.6	4.5	1.5	119	125	1.0
		7.5	7.5	4.5	1.4	129	124	1.0
	7.4	7.1	4.5	0.8	117	121	0.8	
C-F-AW3	FU	9.5	8.6	5.0	2.0	130	115	0.4
		9.3	8.9	4.8	2.4	131	110	0.4
		8.3	8.9	5.0	2.0	131	110	0.5
		8.2	8.8	4.8	2.0	130	110	0.5
		9.1	8.7	4.8	1.8	127	120	0.4
	FD	8.6	9.3	4.5	1.3	123	130	0.4
		8.6	9.3	4.5	1.0	124	129	0.4
		8.6	9.0	4.5	1.8	129	129	0.3
		8.5	9.5	4.3	2.0	128	133	0.5
		8.5	8.8	4.5	1.0	119	130	0.4
		8.9	9.4	4.7	2.0	126	124	0.7
	BU	9.1	9.6	4.8	2.0	125	129	0.7
		8.3	9.4	4.5	1.5	127	129	0.6
		8.3	9.4	4.5	1.0	122	125	0.6
		8.6	9.2	4.7	1.0	125	123	0.6
	BD	9.6	8.4	5.0	1.5	130	110	0.6
		9.5	8.3	5.0	1.5	130	115	0.6
		9.1	8.6	5.0	1.5	127	118	0.5
		8.8	8.2	4.8	1.3	128	117	0.5
		9.0	8.2	4.5	1.5	130	118	0.5

表 5.2 耐疲労鋼十字継手溶接形状 (その 2)

		主板側脚長 (mm)	付加板側 脚長 (mm)	主板側 曲率半径 $\rho_1$ (mm)	付加板側 曲率半径 $\rho_2$ (mm)	主板側 ワシク角 $\theta_1$ (°)	付加板側 ワシク角 $\theta_2$ (°)	削り込み 深さd(mm)
C-F-AW4	FU	7.2	8.1	4.8	0.8	118	117	0.8
		7.2	8.3	4.8	1.5	117	114	0.7
		7.7	8.4	4.5	0.8	120	119	0.7
		7.6	8.6	4.8	1.3	119	120	0.7
		7.8	8.0	5.0	1.5	121	122	0.8
	FD	9.3	8.8	5.0	0.5	123	118	0.4
		9.2	9.0	5.0	0.5	123	118	0.5
		9.1	9.1	4.8	2.0	122	120	0.5
		9.1	9.3	4.8	2.0	123	113	0.4
		9.2	8.7	4.8	2.0	124	113	0.5
	BU	7.9	8.2	4.8	1.0	124	123	0.6
		8.1	8.5	4.5	1.5	124	121	0.7
		7.5	8.6	5.0	2.0	122	116	0.8
		7.4	8.6	4.8	1.5	120	120	0.8
		7.5	7.7	5.0	1.5	121	118	0.8
	BD	9.9	9.3	4.5	0.5	122	119	0.5
		10.0	9.3	4.5	0.5	123	122	0.6
		9.8	9.6	4.8	2.0	124	122	0.4
		9.7	9.2	4.8	1.0	122	120	0.5
		10.0	9.0	4.5	1.5	121	123	0.5
平均		8.449	8.654	4.636	1.469	122.9	120.4	0.7
標準偏差		1.43	1.44	0.55	0.59	14.18	18.54	0.3

表 5.3 従来鋼十字継手溶接形状 (その1)

		主板側脚長 (mm)	付加板側 脚長 (mm)	主板側 曲率半径 $\rho_1$ (mm)	付加板側 曲率半径 $\rho_2$ (mm)	主板側 ワシ角 $\theta_1$ (°)	付加板側 ワシ角 $\theta_2$ (°)	削り込み 深さd(mm)
C-C-AW1	FU	8.0	8.4	4.70	1.25	128	127	0.6
		7.8	8.3	4.75	1.00	127	129	0.6
		7.7	8.5	4.50	2.00	120	127	0.5
		7.9	8.5	4.50	1.75	122	124	0.4
		7.8	8.7	4.50	0.50	117	132	0.3
	FD	7.7	8.3	5.00	1.00	120	128	0.7
		7.8	8.5	5.00	1.00	121	129	0.8
		8.0	10.0	5.00	2.25	121	132	0.7
		8.0	9.1	5.00	2.25	121	127	0.7
		8.1	8.4	5.00	1.50	126	127	0.7
	BU	9.0	9.2	4.50	1.00	120	115	0.7
		9.0	9.3	4.45	0.75	122	116	0.7
		9.3	9.0	4.50	1.50	122	113	0.7
		9.4	9.1	4.50	1.50	122	115	0.6
		9.7	9.5	4.50	1.00	123	120	0.6
	BD	8.0	8.5	4.75	1.00	122	125	0.6
		8.1	8.3	4.75	0.50	123	124	0.5
		8.3	8.6	5.00	1.50	122	126	0.5
		8.0	9.0	4.75	1.50	123	126	0.4
		8.2	8.3	4.70	1.00	124	122	0.5
C-C-AW2	FU	7.0	8.2	4.80	2.50	119	131	0.6
		7.0	7.7	4.75	1.25	120	127	0.6
		7.1	8.6	4.75	2.50	118	128	0.7
		7.3	8.7	5.00	2.00	122	128	0.7
		7.2	8.3	4.75	1.50	119	127	0.8
	FD	10.0	10.0	4.75	0.75	125	127	0.5
		10.0	10.0	4.50	1.50	123	125	0.5
		10.0	10.0	5.00	1.50	125	125	0.6
		10.0	10.0	4.50	1.50	122	122	0.6
		9.5	9.5	4.50	1.00	122	124	0.7
	BU	8.1	8.5	4.50	0.75	120	123	0.5
		8.1	8.7	5.75	1.50	119	123	0.5
		9.0	8.6	5.00	2.00	127	127	0.3
		8.6	9.0	5.00	2.00	128	131	0.5
		8.6	8.8	5.00	1.50	125	125	0.4
BD	8.9	9.0	4.75	1.50	123	120	0.6	
	9.0	9.0	4.75	1.50	123	123	0.6	
	8.4	8.6	4.75	1.50	119	116	0.5	
	8.3	8.6	4.75	1.50	118	116	0.5	
	8.9	8.8	4.75	0.75	122	117	0.5	
C-C-AW3	FU	8.2	7.9	4.75	1.25	124	124	0.5
		8.4	7.8	4.75	1.50	124	122	0.5
		8.3	8.1	4.75	1.50	122	125	0.6
		8.5	8.3	4.75	1.50	124	123	0.5
		8.3	8.2	4.75	1.00	123	120	0.5
	FD	9.9	9.9	4.75	1.00	120	121	0.5
		10.0	10.3	5.00	2.00	120	120	0.5
		10.2	10.0	5.00	2.00	126	119	0.4
		10.9	9.3	5.00	0.50	125	119	0.4
		9.5	9.0	4.75	0.75	121	117	0.6
	BU	7.9	7.9	4.75	1.50	122	114	0.6
		7.8	8.0	4.75	1.00	120	113	0.6
		7.7	8.6	4.50	1.25	118	108	0.6
		8.0	9.0	4.50	1.50	122	118	0.7
		8.4	8.5	4.50	1.50	116	117	0.6
BD	10.0	10.5	4.75	2.00	127	118	0.5	
	9.9	10.1	4.75	2.00	125	127	0.5	
	9.5	9.9	4.75	2.00	123	117	0.6	
	9.8	9.5	4.50	2.00	126	115	0.6	
	9.5	9.0	5.00	0.75	122	119	0.6	

表 5.4 従来鋼十字継手溶接形状 (その2)

		主板側脚長 (mm)	付加板側 脚長 (mm)	主板側 曲率半径 $\rho_1$ (mm)	付加板側 曲率半径 $\rho_2$ (mm)	主板側 フランク角 $\theta_1$ (°)	付加板側 フランク角 $\theta_2$ (°)	削り込み 深さd(mm)
C-C-AW4	FU	9.6	9.0	4.50	0.75	123	123	0.7
		9.6	9.3	4.50	0.75	123	122	0.7
		10.1	9.6	4.50	0.75	123	125	0.7
		10.0	9.5	4.50	1.50	125	126	0.7
		10.4	9.5	4.50	1.50	127	120	0.5
	FD	9.4	9.3	4.50	2.25	126	119	0.5
		9.7	10.1	4.50	2.00	129	121	0.5
		10.0	10.1	4.75	2.00	128	120	0.5
		10.5	10.1	4.75	2.00	130	123	0.4
		10.0	8.9	4.75	1.50	125	120	0.4
	BU	10.1	9.7	4.50	1.50	123	124	0.4
		10.2	10.0	4.50	2.00	126	124	0.5
		9.5	9.7	4.50	2.00	123	126	0.6
		9.6	10.1	4.50	2.50	125	129	0.5
		9.5	9.9	4.75	2.00	121	124	0.4
	BD	8.1	8.5	4.50	2.00	127	121	0.7
		9.5	8.2	6.50	1.00	131	122	0.6
		8.0	8.6	4.50	1.50	125	127	0.5
		7.8	8.5	4.50	1.50	123	125	0.4
		7.9	8.4	4.50	1.00	123	125	0.6
平均		8.84	9.01	4.733	1.459	122.9	122.5	0.6
標準偏差		1.38	1.22	0.60	0.53	13.98	14.43	0.1

表 5.5 耐疲労鋼仕上げあり十字継手残留応力測定結果

(a)表面

ゲージ番号	15	1	2	3	4	5	6	7	16
中心からの距離 (mm)	-40.0	-30.0	-20.0	-10.0	0.0	10.0	20.0	30.0	40.0
ひずみ (μ)	-84	-54	-86	-75	-15	-61	-4	212	326
残留応力 (N/mm <sup>2</sup> )	16.8	10.8	17.2	15.0	3.0	12.2	0.8	-42.4	-65.2

(b)裏面

ゲージ番号	15	14	13	12	11	10	9	8	16
中心からの距離 (mm)	-40.0	-30.0	-20.0	-10.0	0.0	10.0	20.0	30.0	40.0
ひずみ (μ)	-84	369	-27	-204	-339	-319	-234	-51	326
残留応力 (N/mm <sup>2</sup> )	16.8	-73.8	5.4	40.8	67.8	63.8	46.8	10.2	-65.2

(c)表裏面の平均

ゲージ番号	15	1	2	3	4	5	6	7	16
		14	13	12	11	10	9	8	
中心からの距離 (mm)	-40.0	-30.0	-20.0	-10.0	0.0	10.0	20.0	30.0	40.0
ひずみ (μ)	-84	158	-57	-140	-177	-190	-119	81	326
残留応力 (N/mm <sup>2</sup> )	16.8	-31.5	11.3	27.9	35.4	38.0	23.8	-16.1	-65.2

表 5.6 従来鋼仕上げあり十字継手残留応力測定結果

(a)表面

ゲージ 番号	15	1	2	3	4	5	6	7	16
中心から の距離 (mm)	-40.0	-30.0	-20.0	-10.0	0.0	10.0	20.0	30.0	40.0
ひずみ ( $\mu$ )	-495	496	217	-18	-80	-108	-117	13	322
残留応力 ( $N/mm^2$ )	99.0	-99.2	-43.4	3.6	16.0	21.6	23.4	-2.6	-64.4

(b)裏面

ゲージ 番号	15	14	13	12	11	10	9	8	16
中心から の距離 (mm)	-40.0	-30.0	-20.0	-10.0	0.0	10.0	20.0	30.0	40.0
ひずみ ( $\mu$ )	-495	-1	201	76	-13	0	-8	115	322
残留応力 ( $N/mm^2$ )	99.0	0.2	-40.2	-15.2	2.6	0.0	1.6	-23.0	-64.4

(c)表裏面の平均

ゲージ 番号	15	1	2	3	4	5	6	7	16
		14	13	12	11	10	9	8	
中心から の距離 (mm)	-40.0	-30.0	-20.0	-10.0	0.0	10.0	20.0	30.0	40.0
ひずみ ( $\mu$ )	-495	248	209	29	-47	-54	-63	64	322
残留応力 ( $N/mm^2$ )	99.0	-49.5	-41.8	-5.8	9.3	10.8	12.5	-12.8	-64.4

表 5.7 耐疲労鋼十字継手試験体の計測寸法（その 1）

試験体名	板厚(mm)					板幅(mm)				
	T1	T2	T3	T4	平均	W1	W2	W3	W4	平均
C-F-TG1	11.86	11.88	11.88	11.78	11.85	78.70	78.70	78.95	79.20	78.89
C-F-TG2	11.83	11.82	11.83	11.70	11.80	79.90	80.05	79.85	79.80	79.90
C-F-TG3	11.86	11.85	11.82	11.72	11.81	79.90	80.15	80.25	80.05	80.09
C-F-TG4	11.84	11.83	11.83	11.81	11.83	81.30	81.10	81.70	81.60	81.43
C-F-TG5	11.84	11.83	11.83	11.84	11.84	80.50	80.75	80.50	80.45	80.55
C-F-TG6	11.84	11.82	11.83	11.71	11.80	79.50	78.60	79.80	80.40	79.58
C-F-TG7	11.83	11.83	11.80	11.70	11.79	79.95	79.70	79.55	79.40	79.65
C-F-TG8	11.84	11.85	11.83	11.78	11.83	80.60	80.50	80.50	79.90	80.38
C-F-TG9	11.87	11.85	11.84	11.81	11.84	81.80	81.50	81.40	81.35	81.51

表 5.8 耐疲労鋼十字継手試験体の計測寸法（その 2）

鋼種	試験体名	板厚 (mm)	板幅 (mm)	総断面積 (mm <sup>2</sup> )
SM490Y -FCA	C-F-TG1	11.85	78.89	934.85
	C-F-TG2	11.80	79.90	942.82
	C-F-TG3	11.81	80.09	945.86
	C-F-TG4	11.83	81.43	963.32
	C-F-TG5	11.84	80.55	953.71
	C-F-TG6	11.80	79.58	939.04
	C-F-TG7	11.79	79.65	939.07
	C-F-TG8	11.83	80.38	950.90
	C-F-TG9	11.84	81.51	965.08

表 5.9 従来鋼十字継手試験体の計測寸法（その 1）

試験体名	板厚(mm)					板幅(mm)				
	T1	T2	T3	T4	平均	W1	W2	W3	W4	平均
C-C-TG1	11.69	11.72	11.73	11.73	11.72	80.95	81.10	80.80	80.60	80.86
C-C-TG2	11.80	11.76	11.76	11.76	11.77	80.00	80.40	80.10	80.10	80.15
C-C-TG3	11.73	11.75	11.75	11.75	11.75	80.70	80.65	80.65	80.45	80.61
C-C-TG4	11.76	11.76	11.75	11.76	11.76	79.85	79.75	79.65	79.70	79.74
C-C-TG5	11.74	11.73	11.73	11.72	11.73	81.15	81.10	80.90	80.75	80.98
C-C-TG6	11.72	11.73	11.74	11.73	11.73	80.70	80.45	80.40	80.10	80.41
C-C-TG7	80.80	80.50	80.30	80.10	80.43	11.75	11.76	11.79	11.74	11.76
C-C-TG8	80.55	80.55	80.15	79.85	80.28	11.75	11.75	11.74	11.74	11.75

表 5.10 従来鋼十字継手試験体の計測寸法（その 2）

鋼種	試験体名	板厚 (mm)	板幅 (mm)	総断面積 (mm <sup>2</sup> )
SM490Y	C-C-TG1	11.72	80.86	947.68
	C-C-TG2	11.77	80.15	943.37
	C-C-TG3	11.75	80.61	947.17
	C-C-TG4	11.76	79.74	937.74
	C-C-TG5	11.73	80.98	949.90
	C-C-TG6	11.73	80.41	943.21
	C-C-TG7	80.43	11.76	945.86
	C-C-TG8	80.28	11.75	943.29

表 5.11 耐疲労鋼十字継手の荷重条件

試験体名	総断面積 (mm <sup>2</sup> )	荷重範囲(kN)		公称応力範囲 (N/mm <sup>2</sup> )
		LOW	HIGH	
C-F-TG1	934.85	10	234.4	240.0
C-F-TG2	942.82	10	198.6	200.0
C-F-TG3	945.86	10	237.0	240.0
C-F-TG4	963.32	10	202.7	200.0
C-F-TG5	953.71	10	219.8	220.0
C-F-TG6	939.04	10	216.6	220.0
C-F-TG7	939.07	10	263.6	270.0
C-F-TG8	950.90	10	266.7	270.0
C-F-TG9	965.08	10	222.3	220.0

表 5.12 従来鋼十字継手の荷重条件

試験体名	総断面積 (mm <sup>2</sup> )	荷重範囲(kN)		公称応力範囲 (N/mm <sup>2</sup> )
		LOW	HIGH	
C-C-TG1	947.68	10	237.4	240.0
C-C-TG2	943.37	10	236.4	240.0
C-C-TG3	947.17	10	199.4	200.0
C-C-TG4	937.74	10	197.6	200.0
C-C-TG5	949.90	10	219.0	220.0
C-C-TG6	943.21	10	217.5	220.0
C-C-TG7	945.86	10	265.4	270.0
C-C-TG8	943.29	10	264.7	270.0

表 5.13 耐疲労鋼十字継手の疲労試験結果

鋼種	試験体名	公称応力範囲 $\Delta\sigma(\text{N}/\text{mm}^2)$	疲労寿命N ( $\times 10^4$ cycles)
SM490YA-FCA	C-F-TG01	240	406.5
	C-F-TG02	200	>1000
	C-F-TG03	240	121.9
	C-F-TG04	200	406.3
	C-F-TG05	220	306.8
	C-F-TG06	220	352.8
	C-F-TG07	270	96.4
	C-F-TG08	270	45.9
	C-F-TG09	220	214.3

表 5.14 従来鋼十字継手の疲労試験結果

鋼種	試験体名	公称応力範囲 $\Delta\sigma(\text{N}/\text{mm}^2)$	疲労寿命N ( $\times 10^4$ cycles)
SM490YA	C-C-TG01	240	91.1
	C-C-TG02	240	169.8
	C-C-TG03	200	>1000
	C-C-TG04	200	>1000
	C-C-TG05	220	>1000
	C-C-TG06	220	121.8
	C-C-TG07	270	153.8
	C-C-TG08	270	68.5

表 5.15 止端仕上げが不完全な耐疲労鋼十字継手の疲労試験結果

鋼種	試験体名	公称応力範囲 $\Delta\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	疲労寿命N ( $\times 10^4$ cycles)	
SM490YA-FCA	C-F-TG01	200	97.8	
	C-F-TG02	160	95.3	
	C-F-TG03	200	64.2	
	C-F-TG04	160	141.8	
	C-F-TG05	130	>1000	
	C-F-TG06	240	129.1	再仕上げを実施
	C-F-TG07	200	>1000	再仕上げを実施

表 5.16 止端仕上げが不完全な従来鋼十字継手の疲労試験結果

鋼種	試験体名	公称応力範囲 $\Delta\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	疲労寿命N ( $\times 10^4$ cycles)	
SM490YA	C-C-TG01	200	165.4	
	C-C-TG02	160	102.1	
	C-C-TG03	200	76.5	
	C-C-TG04	160	410.2	
	C-C-TG05	130	408.0	
	C-C-TG06	240	102.6	再仕上げを実施
	C-C-TG07	240	73.7	再仕上げを実施

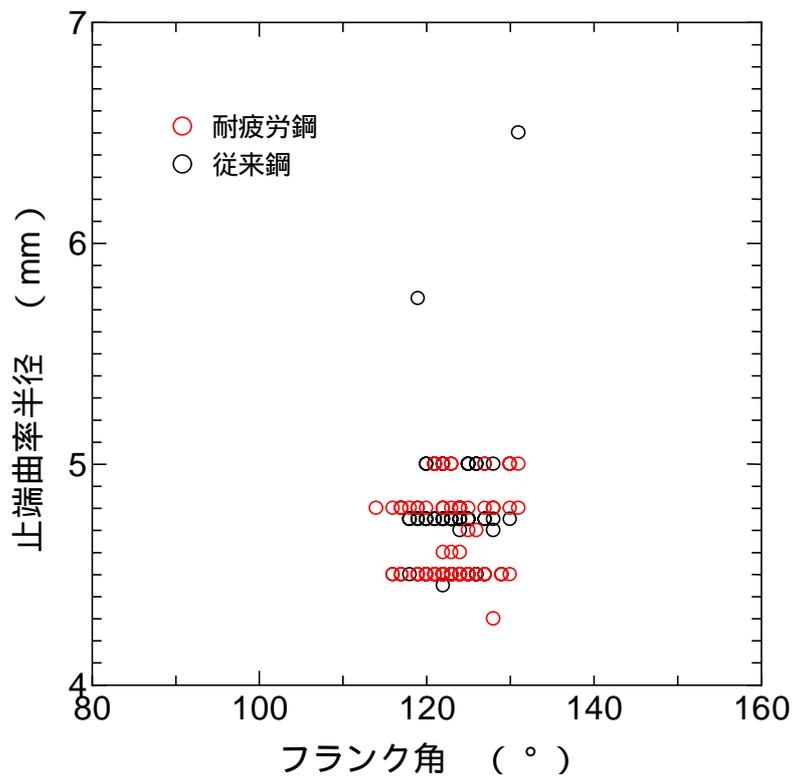
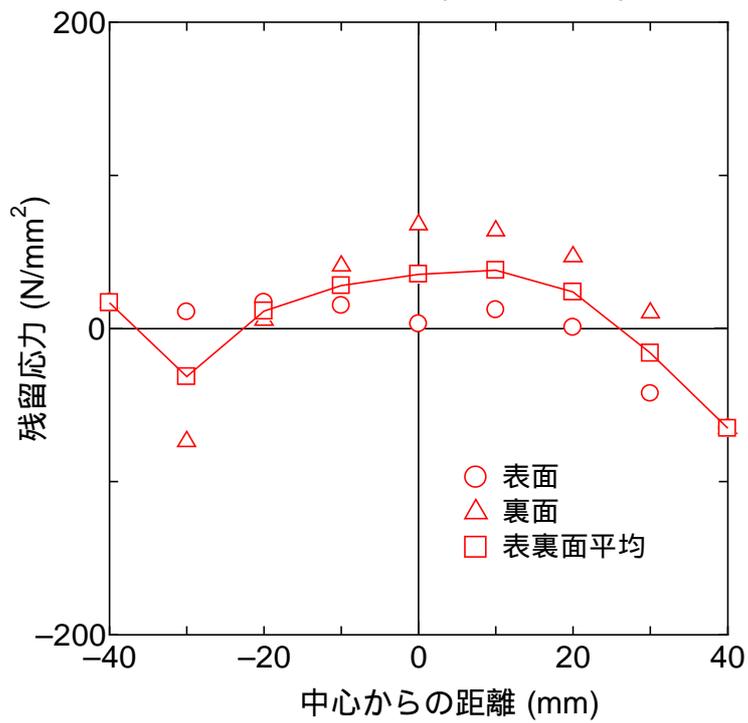
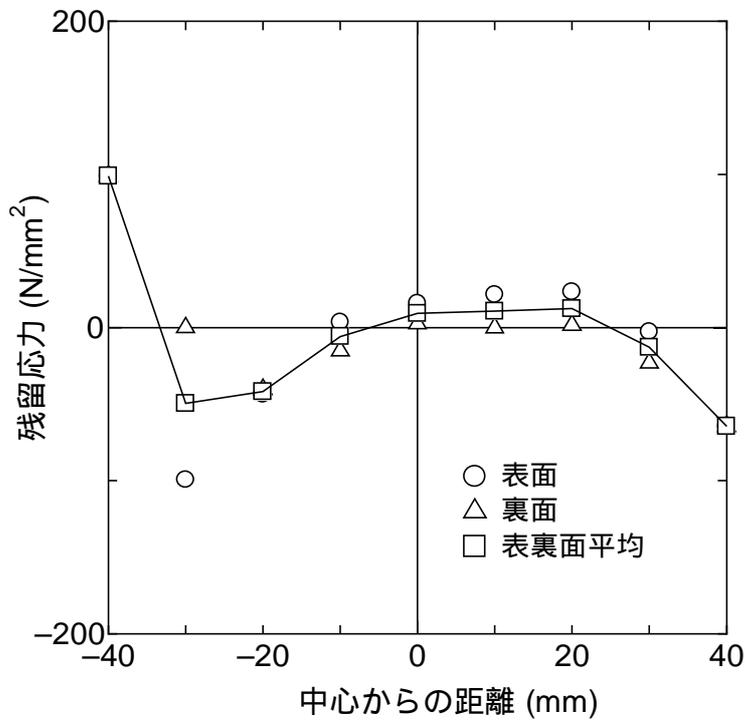


図 5.1 主板側の と の関係



(a)耐疲労鋼



(b)従来鋼

図 5.2 残留応力測定結果

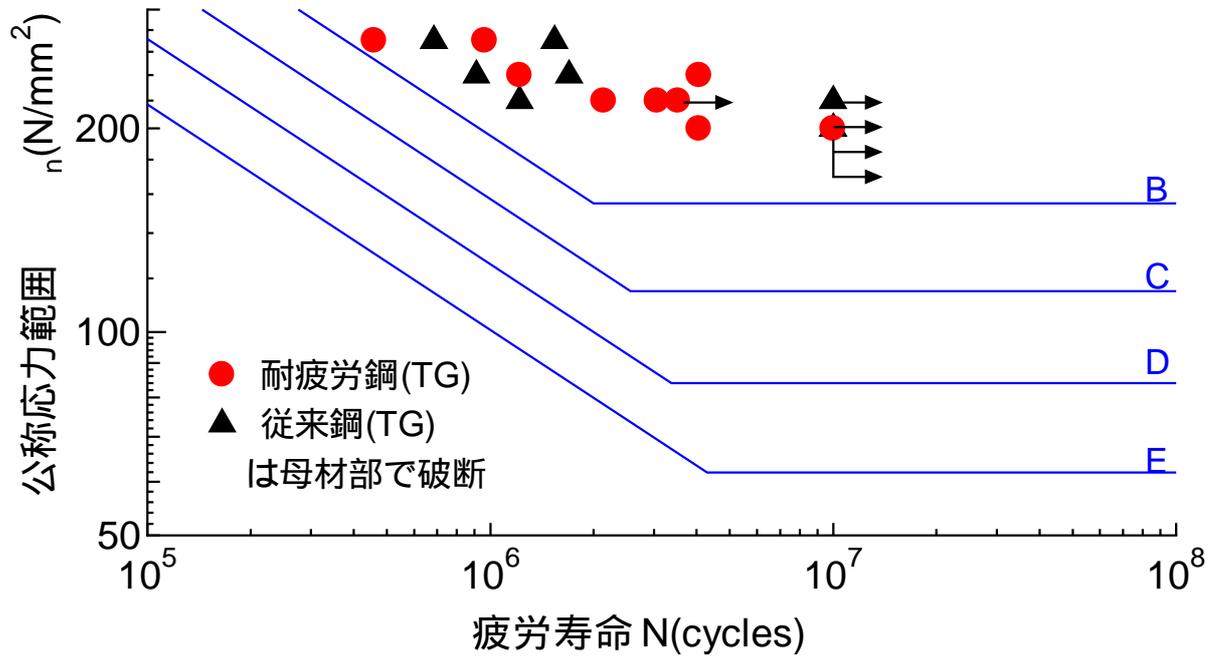


図 5.3 止端仕上げを行なった試験体の  $\sigma_n$ -N 関係

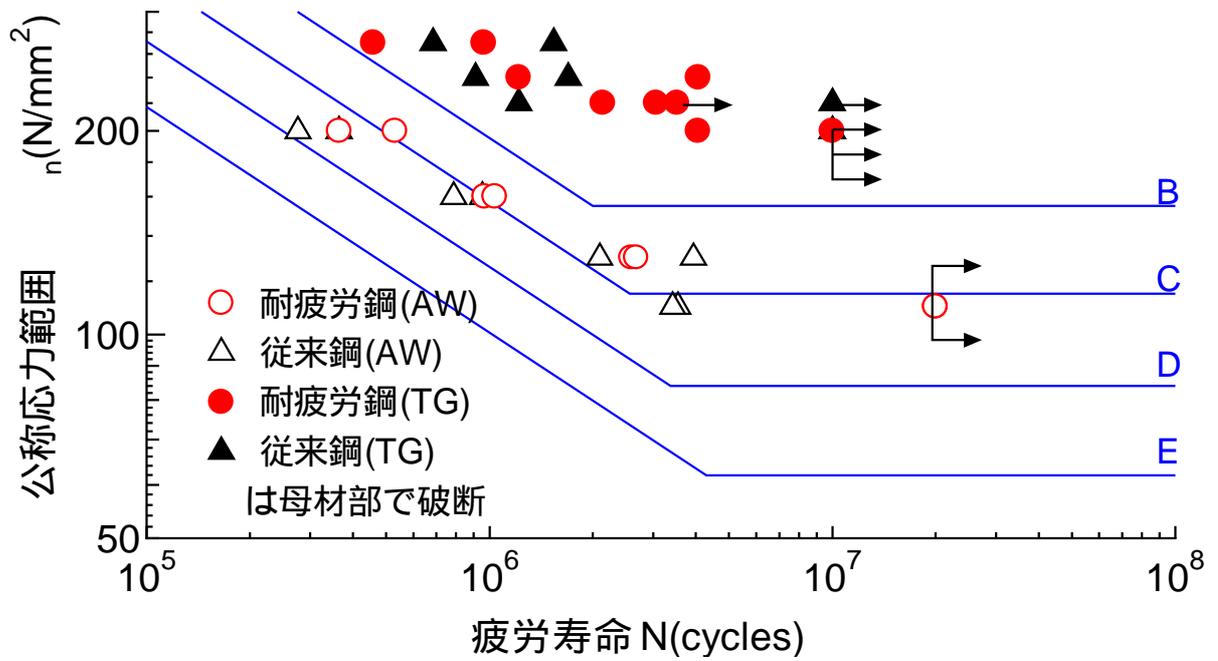


図 5.4 溶接のままの試験体を含む  $\sigma_n$ -N 関係

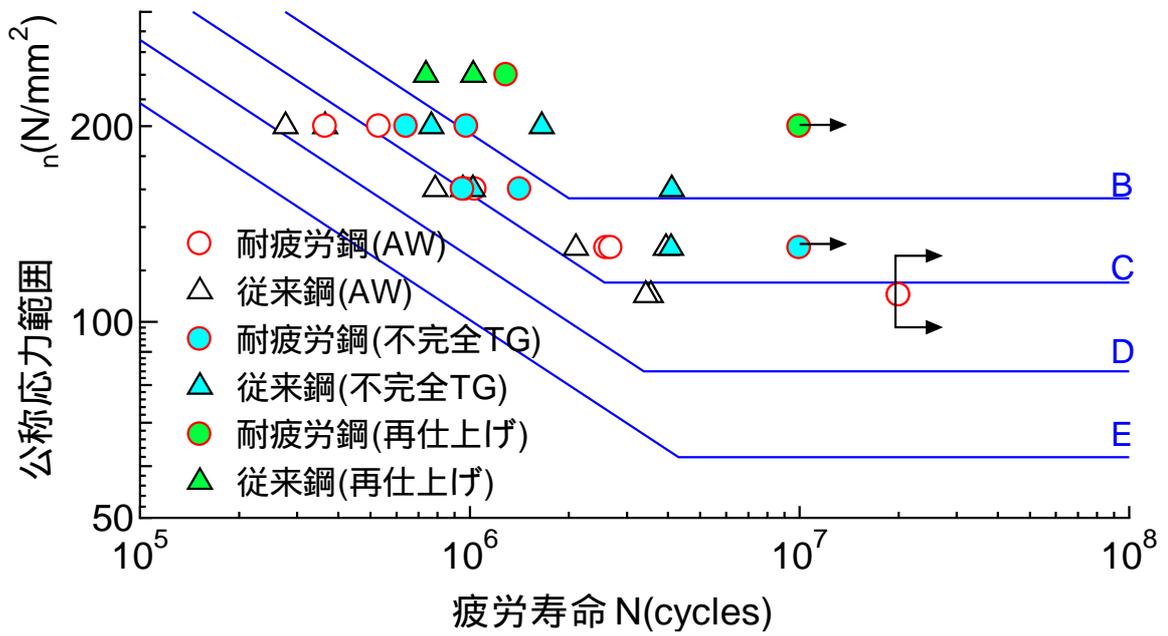


図 5.5 止端仕上げが不完全な試験体の  $\sigma$ -N 関係

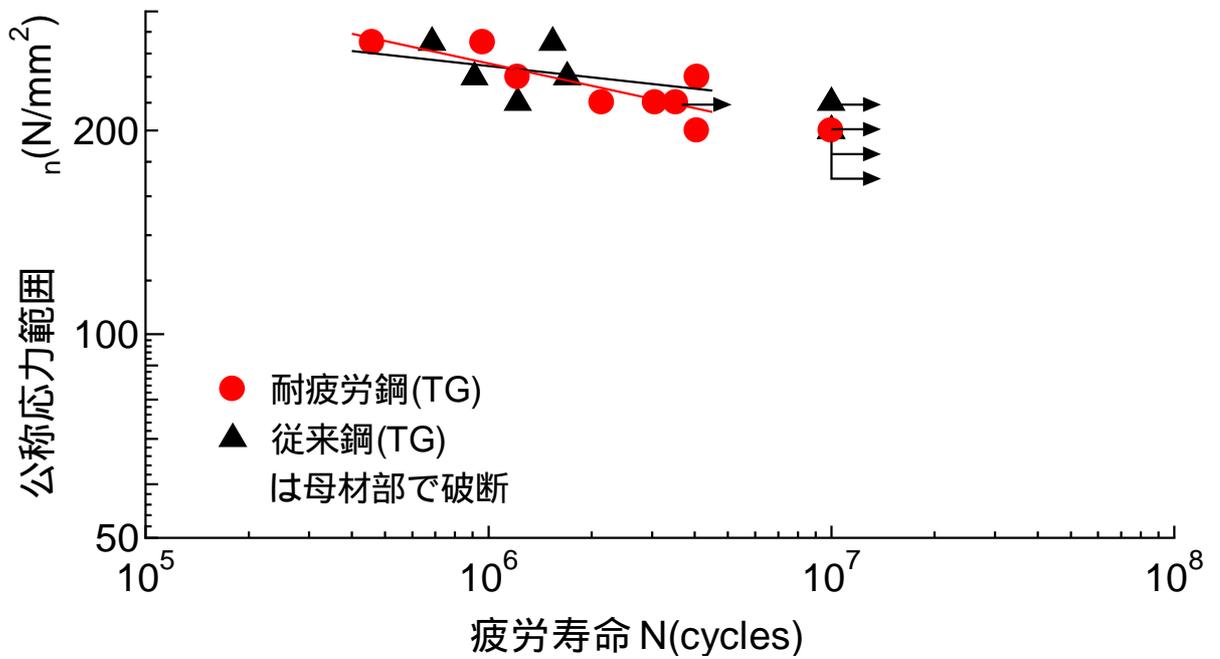


図 5.6 耐疲労鋼と従来鋼の疲労強度の比較

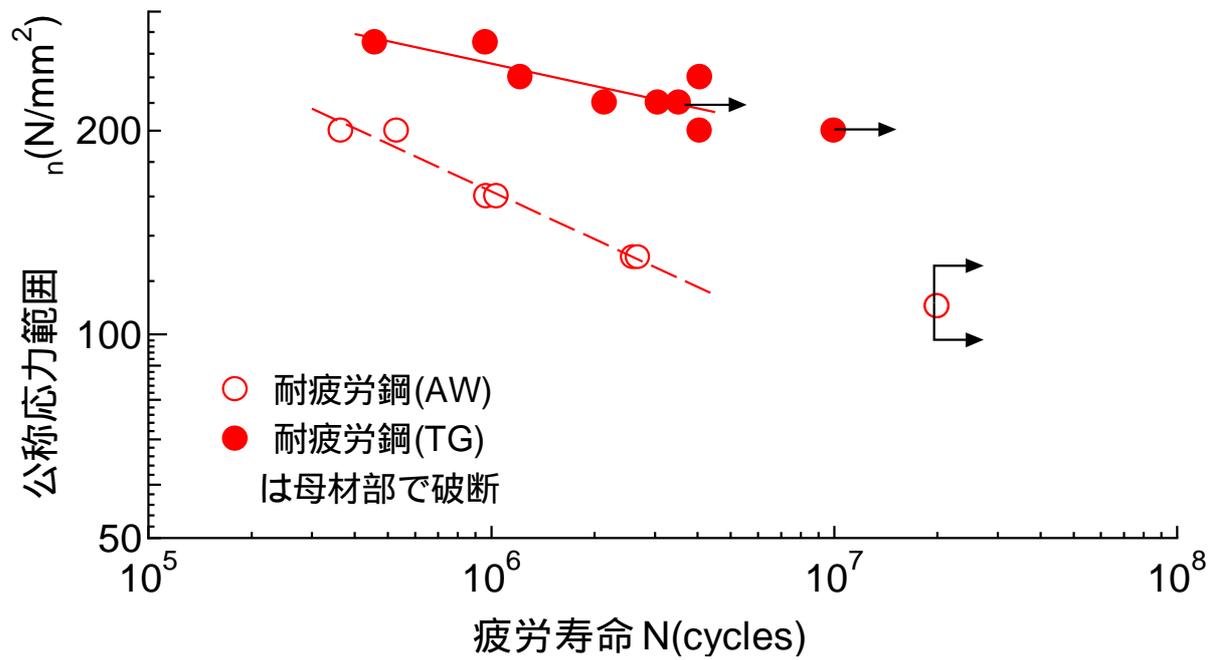


図 5.7 耐疲労鋼の溶接のままの疲労強度との比較

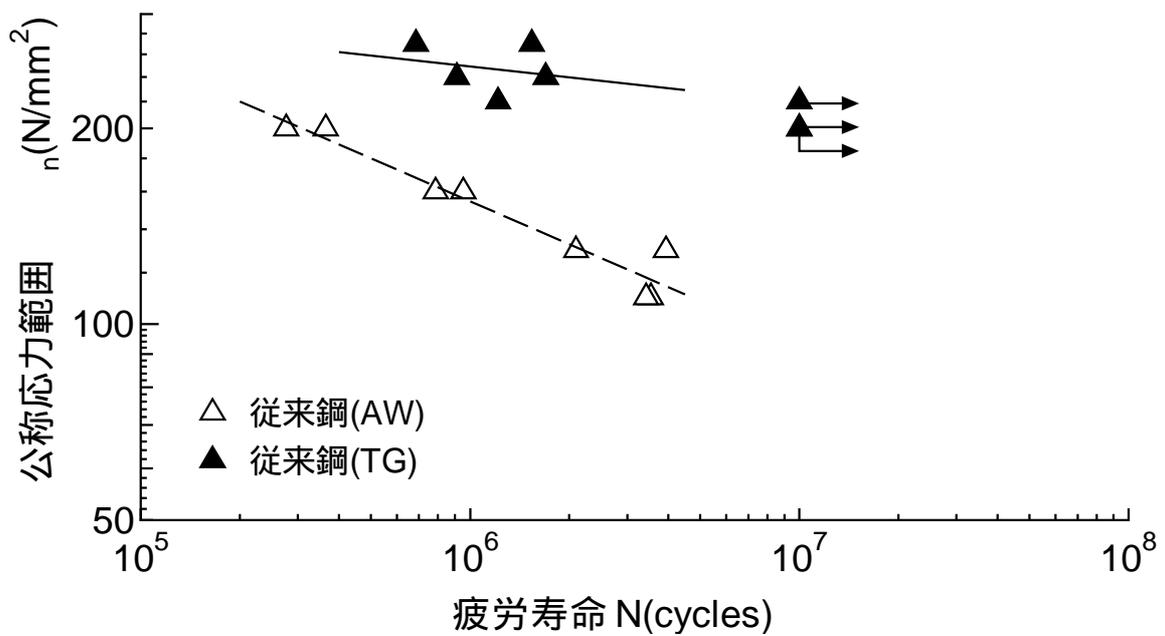


図 5.8 従来鋼の溶接のままの疲労強度との比較



写真 5.1 溶接止端の外観



写真 5.2 超硬パー

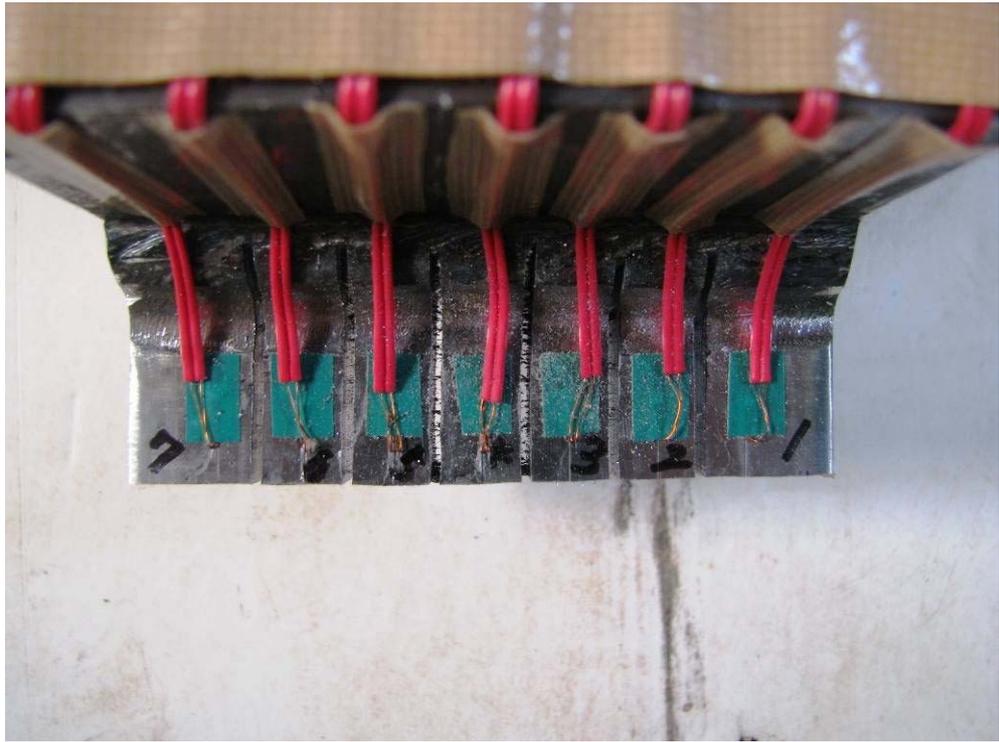


写真 5.2 切断後の試験体



写真 5.3 疲労試験の状況

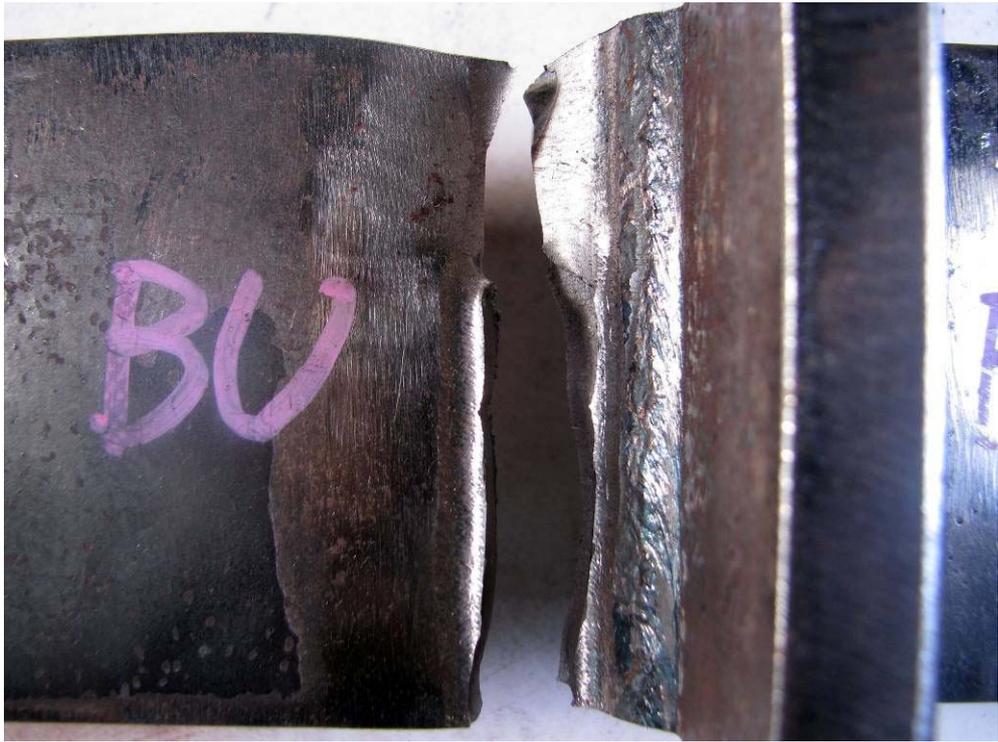


(a)上面



(b)破面

写真 5.4 耐疲労鋼十字継手破断写真 (C-F-TG1)



(a)上面



(b)破面

写真 5.5 耐疲労鋼十字継手破断写真 (C-F-TG3)



(a)上面



(b)破面

写真 5.6 耐疲労鋼十字継手破断写真 (C-F-TG4)



(a)上面

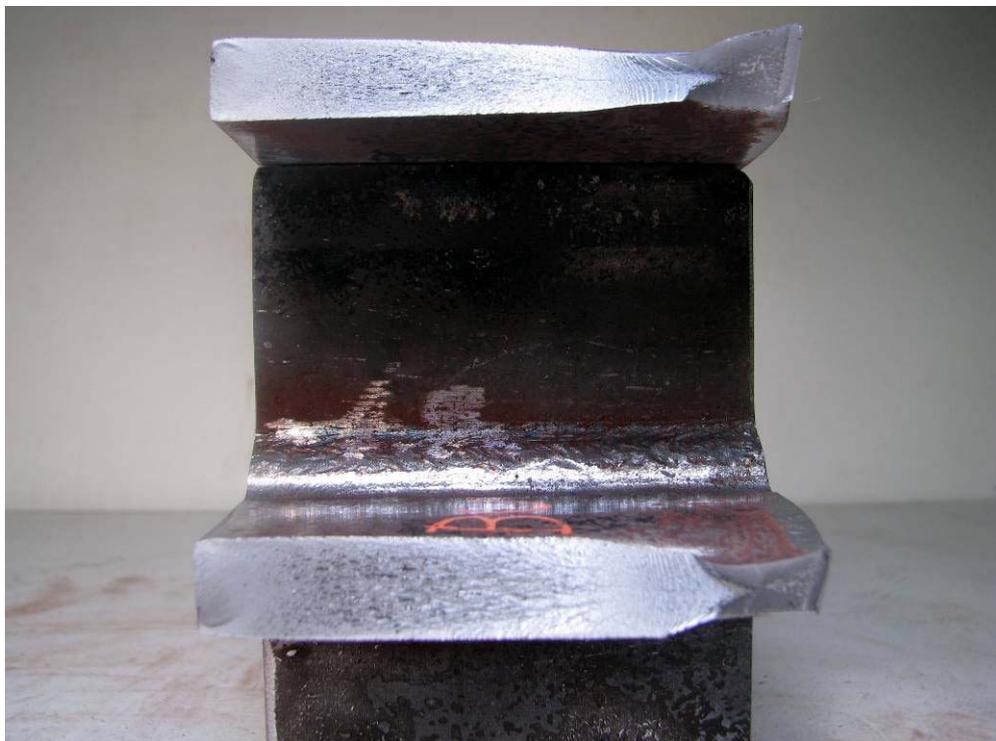


(b)破面

写真 5.7 耐疲労鋼十字継手破断写真 (C-F-TG5)



(a)上面

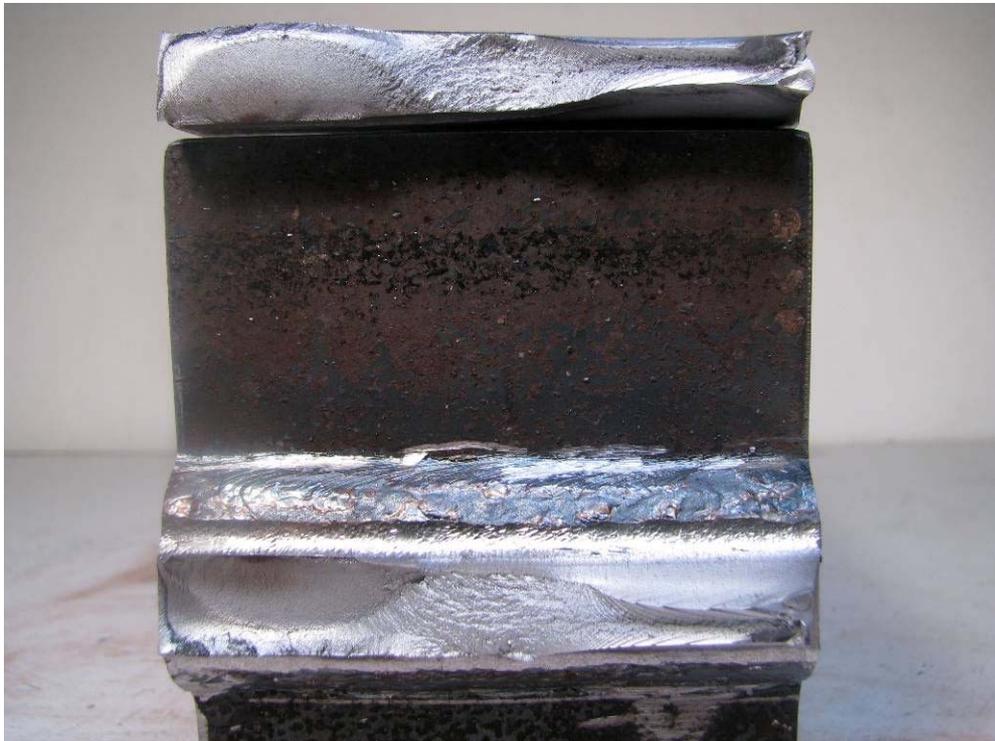


(b)破面

写真 5.8 耐疲労鋼十字継手破断写真 (C-F-TG6)



(a)上面



(b)破面

写真 5.9 耐疲労鋼十字継手破断写真 (C-F-TG7)



(a)上面



(b)破面

写真 5.10 耐疲労鋼十字継手破断写真 (C-F-TG8)



(a)上面

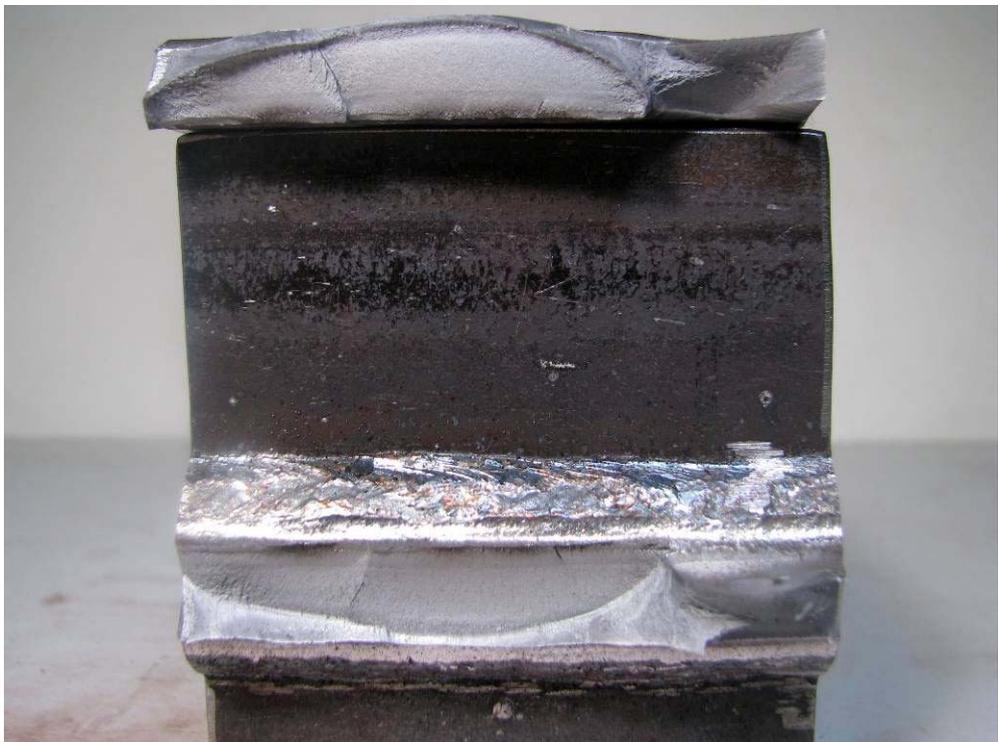


(b)破面

写真 5.11 耐疲労鋼十字継手破断写真 (C-F-TG9)



(a)上面



(b)破面

写真 5.12 従来鋼十字継手破断写真 (C-C-TG1)



(a)上面

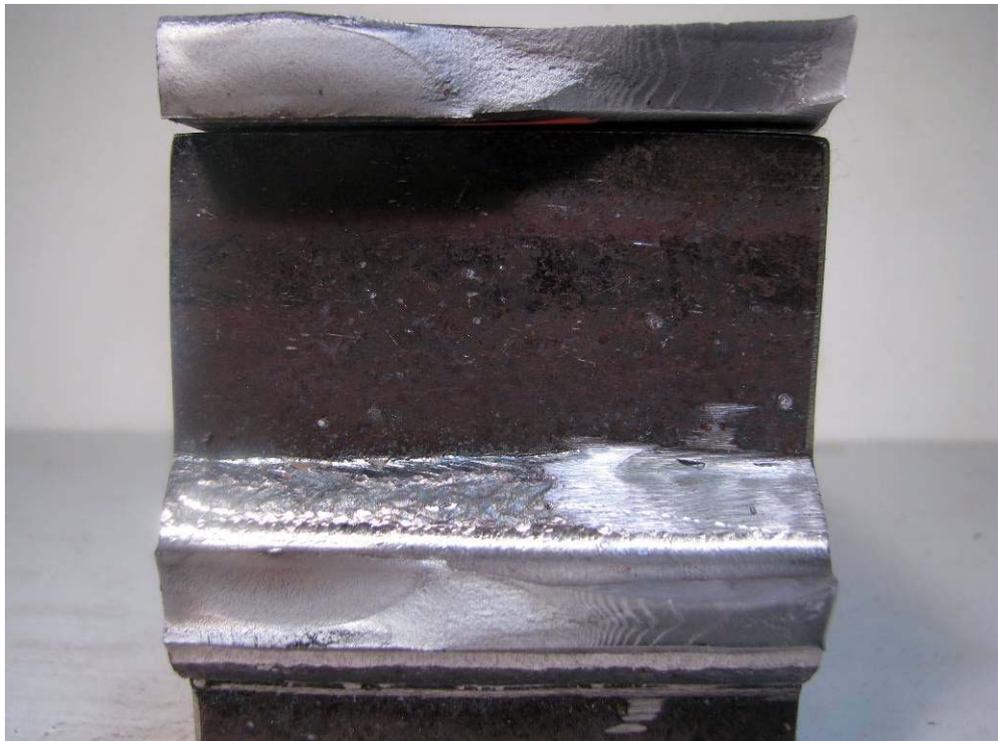


(b)破面

写真 5.13 従来鋼十字継手破断写真 (C-C-TG2)

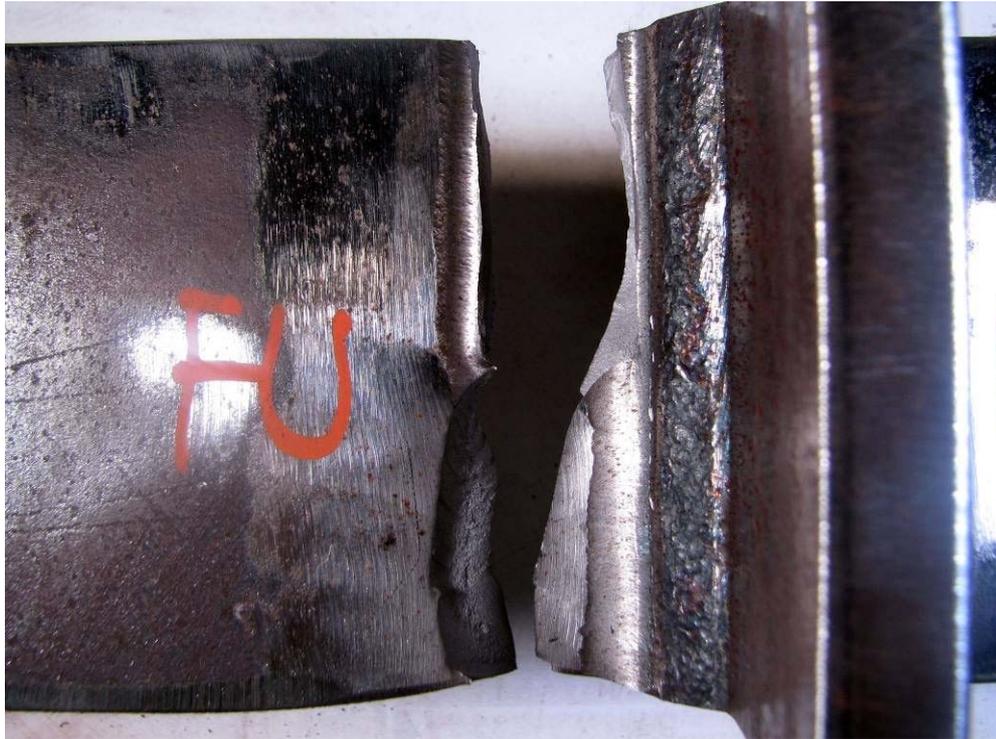


(a)上面

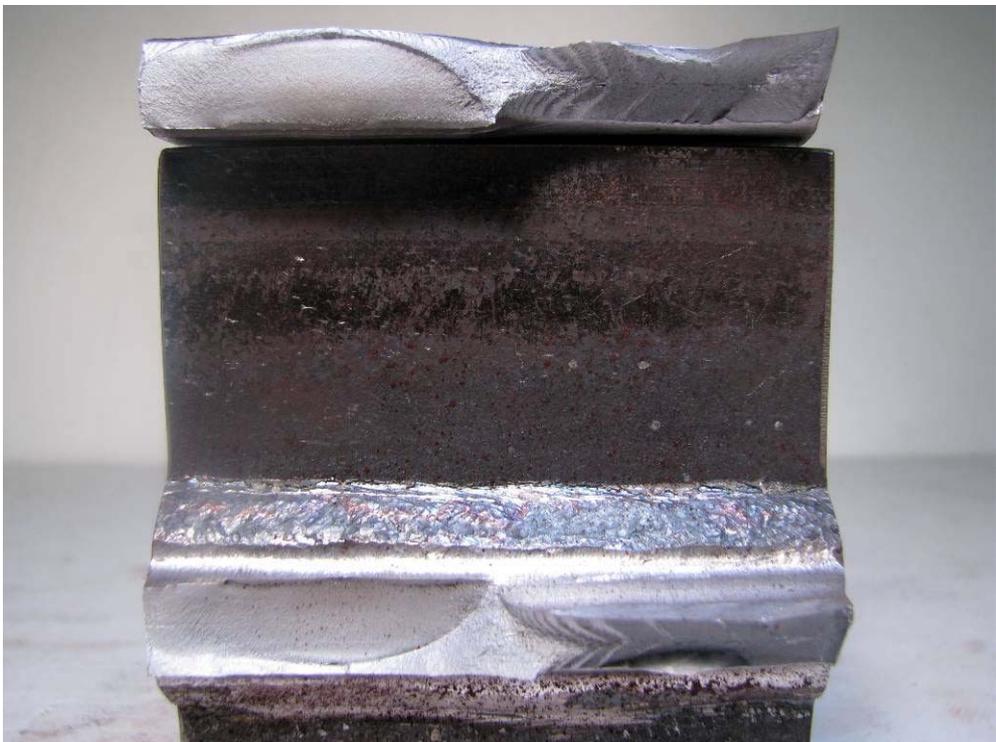


(b)破面

写真 5.14 従来鋼十字継手破断写真 (C-C-TG6)

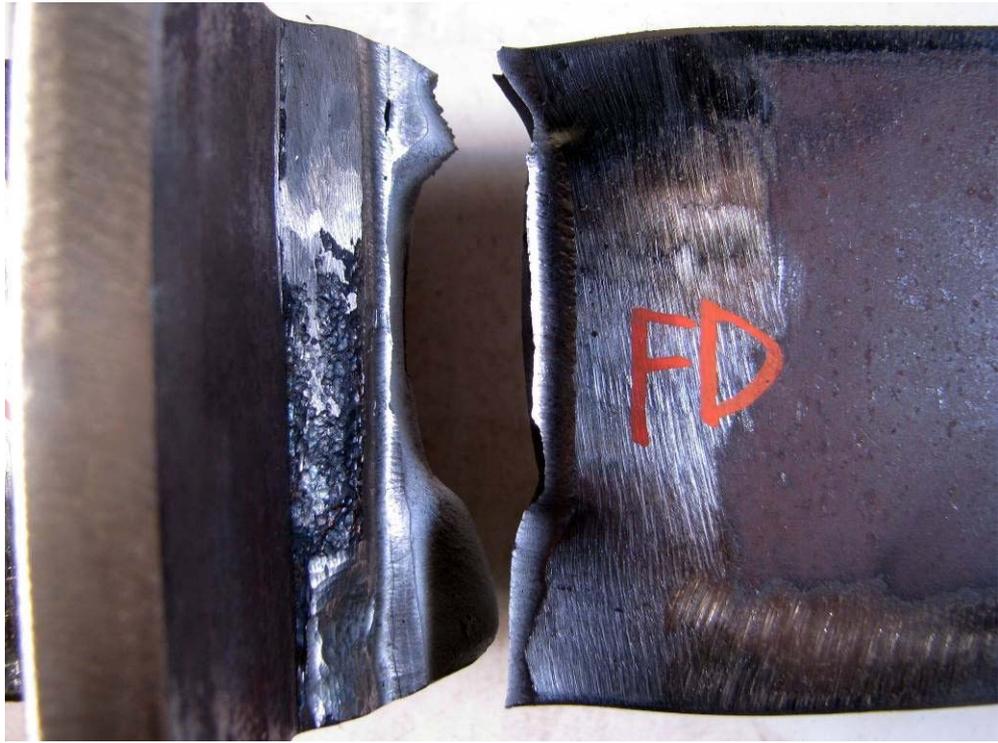


(a)上面



(b)破面

写真 5.15 従来鋼十字継手破断写真 (C-C-TG7)



(a)上面



(b)破面

写真 5.16 従来鋼十字継手破断写真 (C-C-TG8)

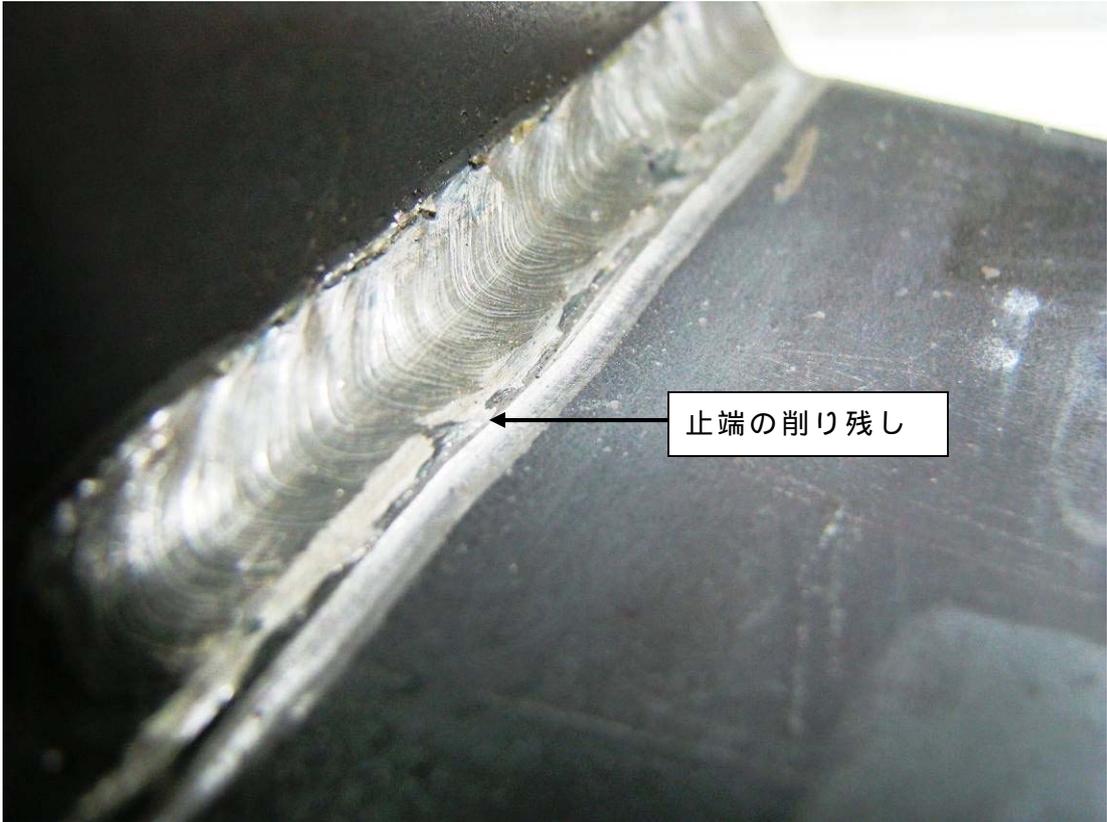


写真 5.17 不完全な仕上げ状態

## 第6章 耐疲労鋼の疲労強度改善効果に関する考察

### 6.1 疲労過程の整理

疲労過程は、き裂の発生過程と進展過程からなり、き裂進展が不安定域に達して最終破断に至る。Forsyth は、疲労過程が材料表面の結晶粒内または粒界において現れるせん断応力支配型のすべり変形からき裂発生に至る Stage<sub>1</sub>、ならびに巨視的には引張応力軸に対してほぼ垂直にき裂が進展する Stage<sub>2</sub> からなるとしている<sup>24)</sup>。図 6.1 に一般的な疲労き裂成長過程の模式図を示す。

Stage<sub>1</sub> は、き裂の発生過程であるが、微視的にはき裂初期の進展過程である。結晶粒内のすべり変形によって発生した微小なき裂は、粒界に達するとその成長が抑制される。これは、一般に隣接する結晶粒のすべり面が同一平面上にはないためである<sup>25)</sup>。なお、負荷応力範囲が大きい場合は、結晶粒が全体的に変形し、食い違いの蓄積する粒界がき裂発生箇所になる場合もある。隣接する粒界に達して停留したき裂が Stage<sub>1</sub> の停留き裂である。停留き裂が生じない限界応力は、き裂発生限界応力と呼ばれる。き裂発生限界応力以上の繰返し応力が作用すると、き裂は粒界を超えて進展する。すなわち、Stage<sub>1</sub> の疲労限はき裂発生限界応力と考えられる。一般的な鋼素材の疲労限は、材料の結晶粒径が小さくなるほど上昇するとされ、(6.1) 式の Petch 式で表される<sup>26)</sup>。

$$\sigma_{w0} = \sigma_0 + k_f / \sqrt{d} \quad (6.1)$$

ここで、 $\sigma_{w0}$  : 平滑材の疲労限

$d$  : 結晶粒径

$k_f$  : 粒界のすべり強さ

この式は、障害物間隔が小さくかつ強い障害であることが疲労限の上昇をもたらすことを示している。き裂の障害となる組織として、フェライト粒界の他、フェライト・マルテンサイト二相鋼ではマルテンサイト境界等の第二相境界がある。この第二相境界は強い障害物で  $k_f$  を大きく上昇させる。しかも、マルテンサイト相のみが分散した状態ではなく、フェライト粒を含む構造の方が有効な障害となり、疲労強度の上昇も著しい<sup>27)</sup>。このように、Stage<sub>1</sub> のき裂は、結晶組織の影響が大きいと考えられる。

粒界を超えて進展したき裂は、Stage<sub>2</sub> のき裂進展に移行する。Stage<sub>2</sub> の初期 (Stage<sub>2a</sub>) では、き裂はすべり面を変更しながらすべり面に沿って進展する。この進展過程

の疲労き裂は、結晶粒レベルの寸法を単位として不連続に進展するため、まだ結晶組織の影響を受ける。き裂は、応力軸に傾斜したすべり面方向から、次第に応力軸に対して巨視的にほぼ垂直となる方向にその進展方向を変えて進展し Stage<sub>b</sub>に至る。この進展過程では、き裂先端に形成される塑性域寸法は結晶粒径等の微視組織オーダーに比べて大きくなるため、き裂進展特性は結晶組織の影響を受けなくなり、応力拡大係数  $K$  や  $J$  積分などの破壊力学的因子に支配されるようになる。Stage<sub>b</sub>のき裂進展過程を経た後、き裂進展が加速する進展過程である Stage<sub>c</sub>に移行し、最終的に不安定破壊に至る。このように、Stage<sub>a</sub>では結晶組織の影響を受けるが、Stage<sub>b</sub>以降の長いき裂に対しては、結晶組織の影響は受けないと考えられる。

## 6.2 疲労限の発生条件

構造物の疲労限は、対象部の応力集中あるいは応力勾配によって、生じる疲労過程が異なることが知られている<sup>28)</sup>。すなわち、応力集中の程度が小さい場合は、Stage<sub>a</sub>き裂の形成過程あるいは生成した Stage<sub>a</sub>き裂の停留が疲労限を決定するのに対し、応力集中の程度が大きい場合は、Stage<sub>b</sub>き裂の停留が疲労限を決定する。

西谷らは切欠き材の強度が、切欠き半径  $r_0$  と弾性的な切欠き底の最大応力  $\sigma_{max}$  によって決まっているとする線形切欠き学を提唱している。これは、停留き裂が認められるか否かの限界（分岐点）における切欠き半径  $r_0$  が存在し、 $r_0 > r_c$  の場合、疲労限はき裂発生限界応力  $\sigma_{w1}$  で決まり、 $r_0 < r_c$  の場合、疲労限は停留き裂進展限界応力  $\sigma_{w2}$  で決まると考えられている。すなわち、 $r_0$  の大きさによって疲労限となる条件が異なることを示しており、平滑材や鈍い切欠き材の疲労限は Stage<sub>a</sub>における  $\sigma_{w1}$  で決まり、鋭い切欠き材や溶接継手の疲労限は Stage<sub>b</sub>における  $\sigma_{w2}$  で決まると考えることができる。なお、 $r_0$  が小さいとき停留き裂が生じ易くなるとされるが、これは  $r_0$  が小さいと応力勾配が大きく、き裂発生後のき裂先端の応力が急激に小さくなるためである。

## 6.3 耐疲労鋼の疲労強度改善効果に関する考察

耐疲労鋼は、フェライトとベイナイトの二相鋼である。Stage<sub>a</sub>き裂は、比較的軟らかいフェライトから発生すると考えられる。フェライト粒内から発生したき裂は、ベイナイトとの粒界に達すると、停留あるいは迂回して進展する。耐疲労鋼は結晶粒径が小さいため、ベイナイトを迂回した後再びフェライト内を進展するき裂は、すぐにベイナイトに達し、再び進展が阻まれる。その結果、結晶組織の影響が大きい Stage<sub>a</sub>

~ Stage<sub>a</sub> の疲労寿命は、従来鋼に比べて延伸する。また、硬いベイナイトの作用と結晶粒径が小さいことにより、従来鋼に比べてき裂発生限界応力と停留き裂進展限界応力が大きくなり、疲労限が上昇する。これが、耐疲労鋼の疲労強度改善のメカニズムであると考えられる。

以上を踏まえ、本研究で行なった疲労試験および疲労き裂進展試験の結果より、耐疲労鋼の疲労強度改善効果について考察を行なう。

#### (1)切欠き材の疲労強度

耐疲労鋼切欠き材の疲労強度は、従来鋼に比べて改善した。これは、Stage<sub>a</sub> においてベイナイトがき裂進展の障害となるためである。この試験体においては、応力勾配が小さいため、き裂が Stage<sub>a</sub> に至ると停留き裂は生じにくいと考えられる。

#### (2)疲労き裂進展速度

耐疲労鋼の疲労き裂進展速度は、従来鋼と同じであった。これは、Stage<sub>b</sub> き裂が結晶組織の影響を受けずに進展するためである。なお、既往の研究では、耐疲労鋼の疲労き裂進展速度は従来鋼に比べて遅延することが確認されている。これは、鋼素材に対する結果であり、残留応力は考慮されていない。

進展する疲労き裂は、負荷荷重が引張であってもき裂が閉口することがある。Elber は、このような疲労き裂の開閉口現象を実験的に確認するとともに、負荷力の全範囲がき裂進展に寄与するのではなく、き裂が実際に開いているときのみき裂が進展するとし、き裂開口点以上の応力拡大係数の範囲として有効応力拡大係数範囲  $K_{eff}$  を定義した。

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op} \quad (6.2)$$

ここで、 $K_{max}$  は最大の応力拡大係数、 $K_{op}$  はき裂開口時の応力拡大係数である。Elber は疲労き裂の閉口現象を進展するき裂先端における塑性変形域の引張残留変形に起因すると考えた。なお、き裂閉口の機構として、Elber が考えた塑性誘起き裂閉口のほかに、酸化物誘起き裂閉口や破面粗さ誘起閉口などがある。

鋼素材の場合、繰り返し荷重下においてき裂先端には開閉口現象が生じている。既往の研究において、耐疲労鋼の疲労き裂進展速度が遅延した理由は、従来鋼に比べて

耐疲労鋼のき裂開口点が高くなっているためと考えられる。耐疲労鋼のき裂開口点が高くなる理由としては、き裂が硬いベイナイトを避けることによるき裂進展経路の屈曲、あるいは残留応力等による破面の噛み合わせ不良により、破面粗さ誘起閉口が生じたことが考えられるが、その詳細は不明である。一方、高い引張残留応力場にある場合、き裂先端は常に開口しており、き裂の閉口現象は生じない。

### (3)溶接継手の疲労強度

溶接継手の溶接止端には、高い応力集中が生じている。その大きさは継手形式や溶接形状によって異なるが、一般に溶接のままの止端半径は 1mm 程度と小さく、板厚方向の応力勾配も大きい。なお、溶接継手の疲労き裂は、高い応力集中部から発生するため、疲労過程は Stage <sub>a</sub> がなく Stage <sub>b</sub> から始まる。

耐疲労鋼を用いた十字継手と面外ガセットの有限寿命域における疲労強度は、従来鋼と同程度であった。これは、Stage <sub>b</sub> における耐疲労鋼のき裂進展速度が従来鋼と同じであることによる。

耐疲労鋼を用いた十字継手の疲労限は、従来鋼に比べて高い。これは、Stage <sub>a</sub> において耐疲労鋼の停留き裂進展限界応力が従来鋼に比べて高いためである。面外ガセットも同様に考えられるが未確認である。面外ガセットの疲労限が十字継手に比べて低くなり理由は、残留応力の影響が考えられるが、その詳細は不明である。

十字継手の溶接止端を仕上げた場合、耐疲労鋼と従来鋼ともに疲労強度が改善する。これは、溶接止端を仕上げたことによる最大応力  $\sigma_{max}$  の低減効果である。しかし、止端仕上げの効果は、耐疲労鋼と従来鋼で同程度であった。この原因を調べるために、耐疲労鋼と従来鋼の破壊起点の観察を行なった。観察結果を写真 6.1 ~ 写真 6.2 に示す。どちらも破壊起点は溶接金属部であり、母材組織の違いは影響を受けなかったため、疲労強度と疲労限に差が生じなかったと考えられる。

## 6.4 停留き裂の観察

耐疲労鋼を用いた切欠き材と溶接のままの十字継手について、デジタルマイクロスコープを用いて停留き裂観察を行なった。それぞれ疲労試験の結果、未破断となった試験体を対象とした。観察にあたっては、鋼材を切り出し、冷間埋め込み樹脂で固定した後、鋼材表面を研磨して鏡面に仕上げた。

切欠き材については、公称応力範囲  $80\text{N/mm}^2$  で未破断となった試験体 (FCA04) を用いた。観察用試料を写真 6.3 に、観察結果を写真 6.4 に示す。2つの円孔について

板厚の表面、中心、裏面の3箇所で行なったが、停留き裂を確認することはできなかった。この試験体については、Stage でき裂が停留しているため、停留き裂を確認することは難しいと考えられる。また、き裂が発生していない可能性もある。

溶接のままの十字継手は、公称応力範囲  $110\text{N/mm}^2$  で未破断となった2体の試験体 (C-F-AW07、C-F-AW08) を用いた。観察用試料を写真 6.5 に、観察結果を写真 6.6～写真 6.9 に示す。観察は4箇所の溶接止端で行い、板幅の  $1/4$ 、 $2/4$ 、 $3/4$  の位置について行なったが、切欠き材と同様に停留き裂を観察することはできなかった。この試験体については、フェライト内でき裂が停留している可能性が大きい。一般に十字継手はき裂発生点が複数個所に発生するため、観察位置とは別の位置でき裂が発生していることや、結晶粒径が小さいため停留き裂の確認が困難であったと考えられる。

## 6.5 各試験体のき裂発生点付近の応力分布

### 6.5.1 解析モデルおよび解析方法

第2章、第4章および第5章の疲労試験で用いた切欠き材と溶接継手に対する応力解析を行い、き裂発生点付近の応力分布を算出した。いずれの試験体も長さ方向、幅方向、板厚方向に対象性を有することから 1/8 モデルとし、有限要素法解析プリポスト FEMAP を用いて解析モデルを作成した。解析モデルを図 6.2 に示す。溶接継手の溶接止端半径  $r$  は、溶接形状の測定結果の平均値を丸めて、溶接のままの試験体で  $r=1\text{mm}$ 、止端仕上げを行った試験体で  $r=5\text{mm}$  とした。耐疲労鋼と従来鋼で溶接形状に違いは見られなかったため、解析モデルは同一とした。要素は 8 節点固体要素とした。応力集中が最大となる切欠き材の円孔壁付近と溶接止端付近の要素寸法は、それぞれ 0.5mm と 0.1mm 程度とした。

応力解析には汎用解析プログラム CAFEM を使い、3次元弾性応力解析を行った。鋼材のヤング率は  $2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ 、ポアソン比は 0.3 とした。図 6.2 に示したモデルの長手方向の端面に  $1\text{N/mm}^2$  の引張応力を作用させて解析を行った。各試験体モデルの要素分割図を図 6.3 に示す。

### 6.5.2 解析結果

応力解析により得られた各試験体モデルの主応力のコンター図を図 6.4～図 6.7 に示す。各試験体モデルの最大主応力は、切欠き材は円孔壁の板厚中心部に、十字継手 ( $r=1\text{mm}$ ) と面外ガセット ( $r=1\text{mm}$ ) は溶接止端部に、十字継手 ( $r=5\text{mm}$ ) は母材を削り込んだ底よりわずかに溶接金属より生じている。また、十字継手は、図 6.8 に示すように側面から板幅方向に約 5mm 内側の位置で最大主応力が生じている。

表 6.1 に応力集中点の応力集中係数  $K_t$  とき裂進展方向の応力集中係数  $K_x$  の一覧を示す。応力集中係数は、最大主応力を公称応力で除して求めた。また、き裂進展方向の応力集中係数の分布を図 6.9 に示す。ここでは、応力集中点からき裂進展方向 1mm 区間に着目している。なお、切欠き材の応力集中係数は、切欠きによる断面欠損を考慮した純断面応力に対する応力集中係数を示している。図 6.10 は、図 6.9 の縦軸を  $K_t$  で除して無次元化したものである。これにより、 $K_t$  に対するき裂進展方向の応力集中係数の変化率を確認することができる。図 6.9 と図 6.10 より、 $r=1\text{mm}$  の十字継手と面外ガセットで  $K_t$  は異なるものの、 $K_x$  に対するき裂進展方向の応力集中はほぼ同じであることがわかる。また、 $r=5\text{mm}$  の十字継手と切欠き材のき裂発生点付近の応

力分布は、 $t=1\text{mm}$  の応力分布と大きくことなることがわかる。

図 6.11 に溶接止端の応力集中部での応力範囲（以下、最大応力範囲と記す）で整理した  $\sigma$ - $N$  関係を示す。最大応力範囲  $\sigma_{\text{max}}$  は、公称応力範囲に応力集中部の応力集中係数を掛けて求めた。 $t=1\text{mm}$  に関しては、耐疲労鋼と従来鋼、十字継手と面外ガセットによらず、有限寿命域における  $\sigma$ - $N$  関係に顕著な違いは認められない。しかし、耐疲労鋼を用いた十字継手は、 $\sigma_{\text{max}}$  が約  $300\text{N/mm}^2$  で未破断となっている。これより、溶接のままの耐疲労鋼を用いた十字継手は、 $\sigma_{\text{max}}$  が  $300\text{N/mm}^2$  以下では Stage  $a$  においてき裂が停留するが、それ以上では Stage  $b$  に進展すると考えられる。未確認ではあるが、従来鋼を用いた十字継手はさらに低い  $\sigma_{\text{max}}$  においてき裂が停留すると考えられる。面外ガセットの疲労限が十字継手より低くなる理由は、残留応力の影響が考えられるが、その詳細は不明である。 $t=5\text{mm}$  の十字継手の  $\sigma$ - $N$  関係は、耐疲労鋼、従来鋼ともに  $t=1\text{mm}$  に比べて有限寿命域における疲労寿命は延伸している。これは、 $t$  を大きくしたことにより Stage  $a$  き裂の発生寿命が延伸したためと考えられる。また、 $t=5\text{mm}$  の十字継手は、耐疲労鋼、従来鋼ともに  $\sigma_{\text{max}}$  が約  $370\text{N/mm}^2$  で未破断となっている。 $t=5\text{mm}$  で未破断となる  $\sigma_{\text{max}}$  が、 $t=1\text{mm}$  に比べて高くなった理由は、疲労限の決定要因が Stage  $a$  の停留き裂進展限界応力  $\sigma_{w2}$  から、Stage  $b$  のき裂発生限界応力  $\sigma_{w1}$  に変わったためと考えられるが、その詳細は不明である。

表 6.1 き裂進展方向の応力集中係数と応力勾配

(a)切欠き材

応力集中点 からの距離 $x$	切欠き材		切欠き材 (純断面に換算)	
	応力集中 係数 $\alpha$	応力勾配 $\chi$	応力集中 係数 $\alpha$	応力勾配 $\chi$
0.0mm	6.405		3.414	
0.5mm	5.609	1.592	2.990	0.848
1.0mm	5.033	1.372	2.683	0.731

(b)溶接継手

応力集中点 からの距離 $x$	十字継手 $\rho=1\text{mm}$		面外ガセット $\rho=1\text{mm}$		十字継手 $\rho=5\text{mm}$	
	応力集中 係数 $\alpha$	応力勾配 $\chi$	応力集中 係数 $\alpha$	応力勾配 $\chi$	応力集中 係数 $\alpha$	応力勾配 $\chi$
0.0mm	2.778		3.772		1.872	
0.1mm	2.260	5.181	3.068	7.038	1.785	0.867
0.2mm	1.957	4.104	2.656	5.577	1.714	0.790
0.3mm	1.752	3.419	2.378	4.647	1.649	0.743
0.4mm	1.606	2.930	2.180	3.980	1.590	0.704
0.5mm	1.496	2.563	2.031	3.481	1.537	0.670
0.6mm	1.412	2.276	1.916	3.093	1.488	0.640
0.7mm	1.346	2.045	1.825	2.782	1.443	0.613
0.8mm	1.295	1.854	1.751	2.526	1.402	0.587
0.9mm	1.253	1.694	1.691	2.312	1.365	0.564
1.0mm	1.220	1.558	1.642	2.130	1.332	0.540

$$\text{応力勾配 } \chi = \frac{\alpha_0 - \alpha_x}{x}$$

$\alpha_0$  は応力集中点での応力集中係数を示す。

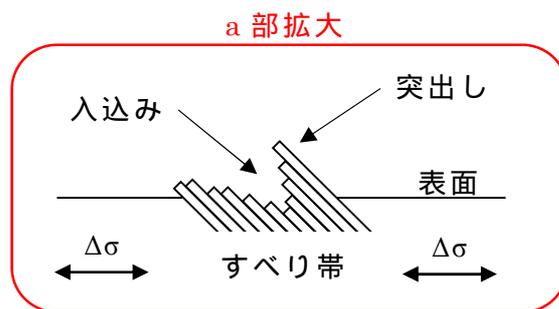
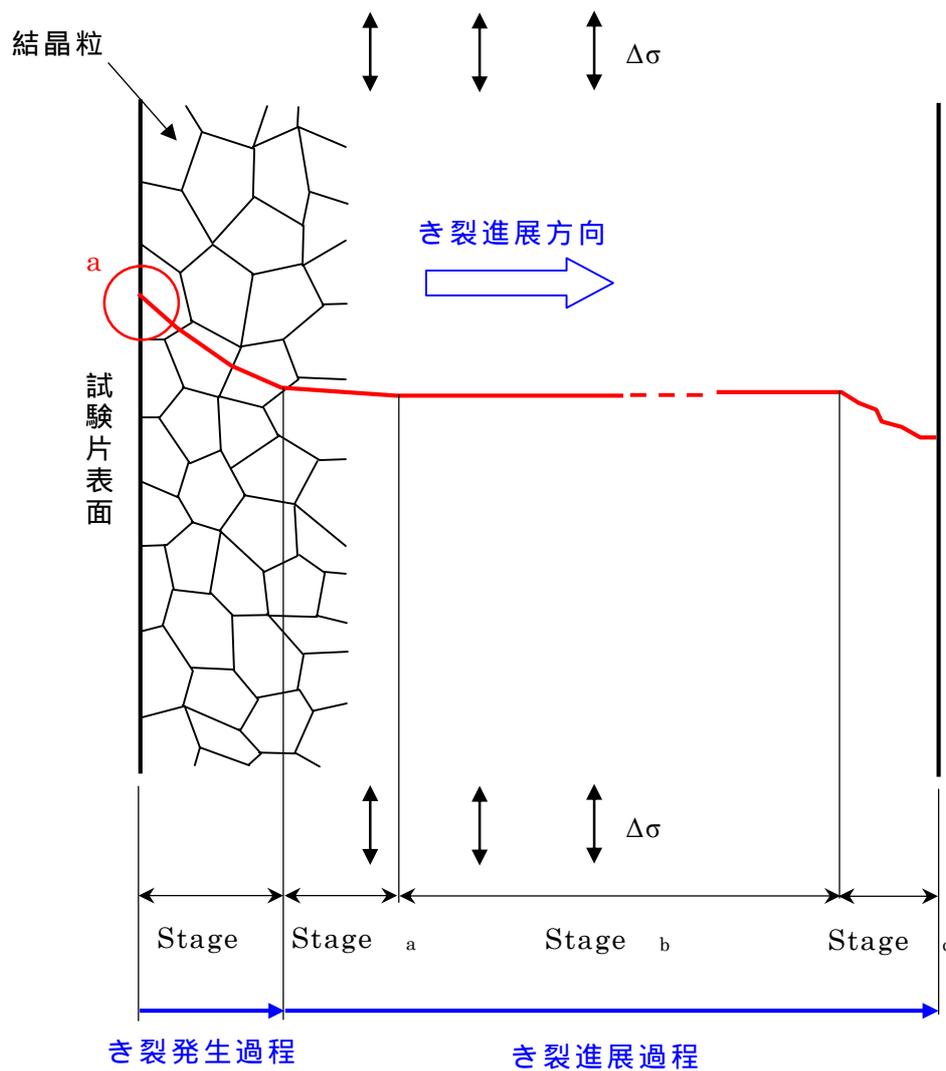
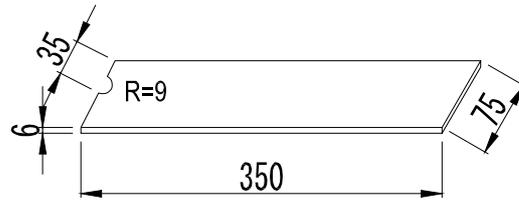
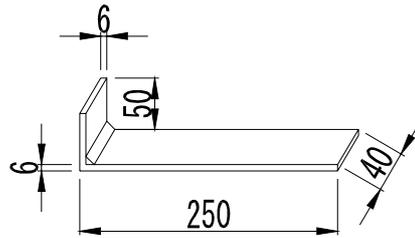


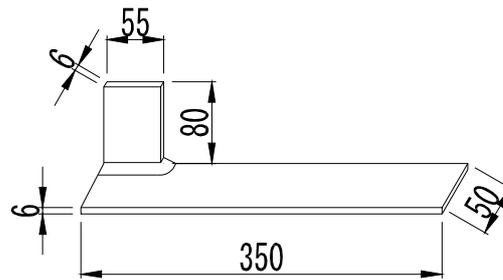
図 6.1 疲労き裂成長過程の模式図



(a)切欠き材



(b)十字継手



(c)面外ガセット

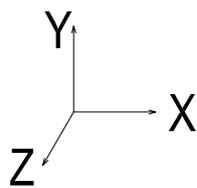
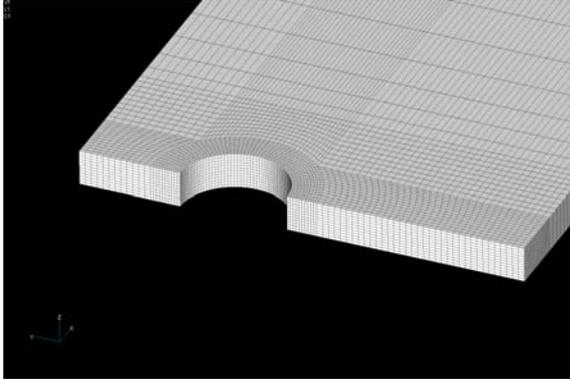
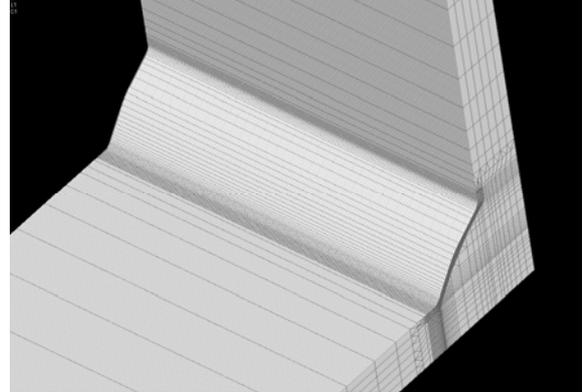


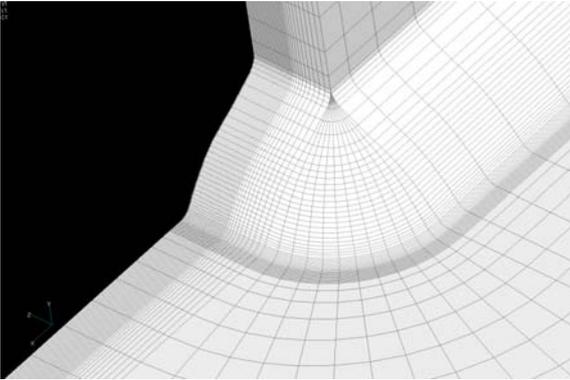
図 6.2 解析モデル



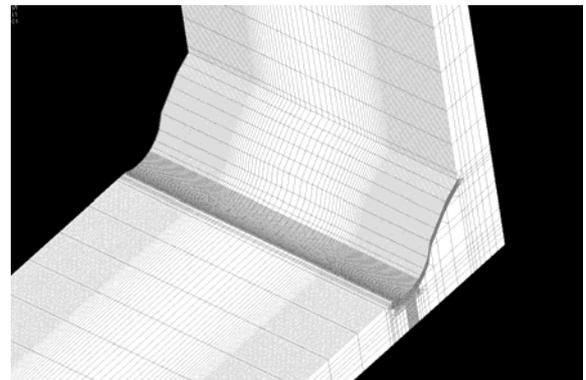
(a)切欠き材



(b)十字継手 ( =1mm )



(c)面外ガゼット



(d)十字継手 ( =5mm )

図 6.3 要素分割図

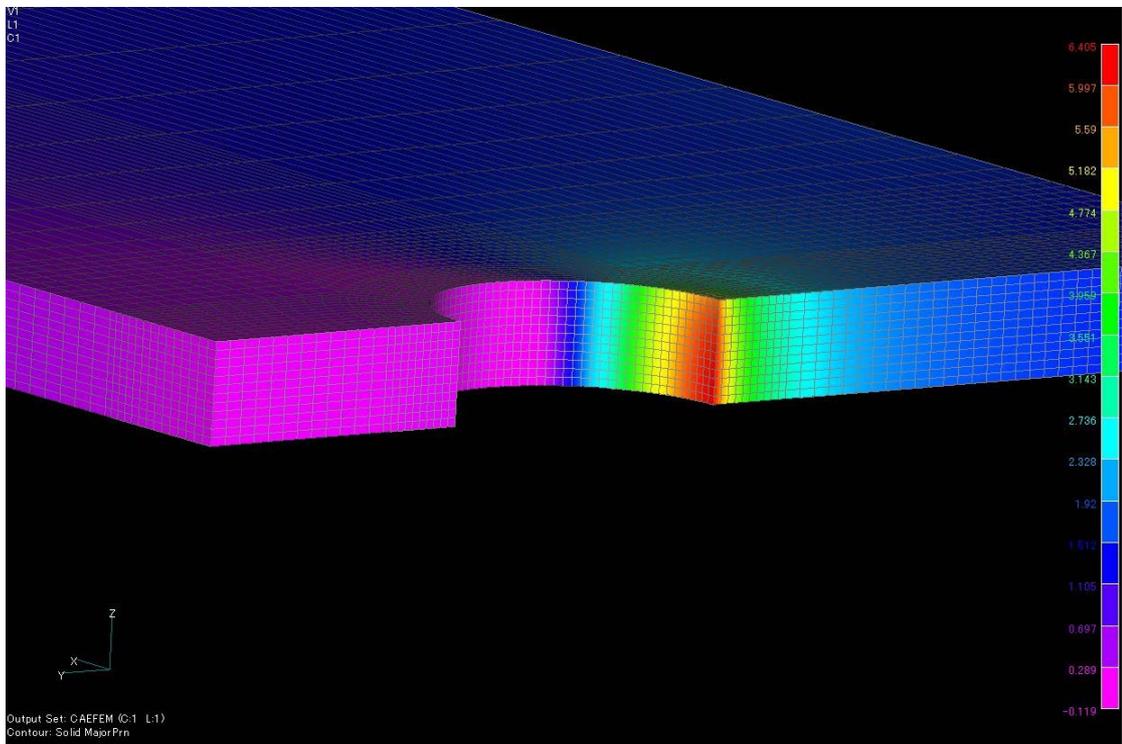
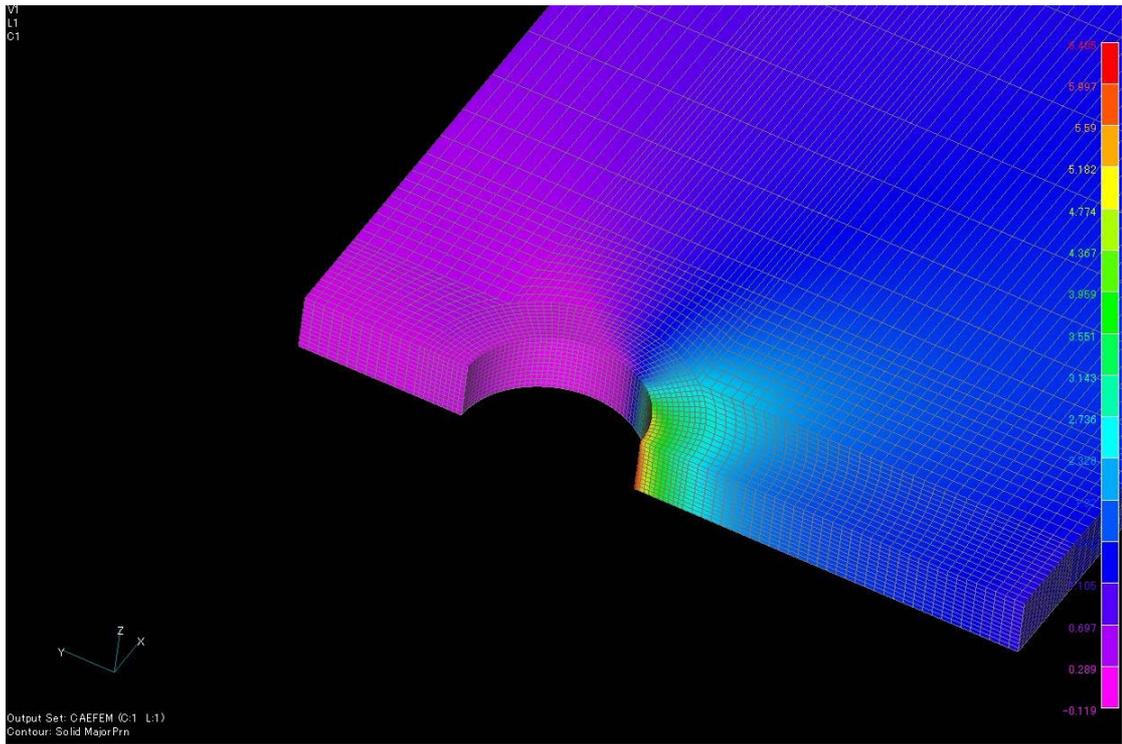


図 6.4 切欠き材の主応力コンター

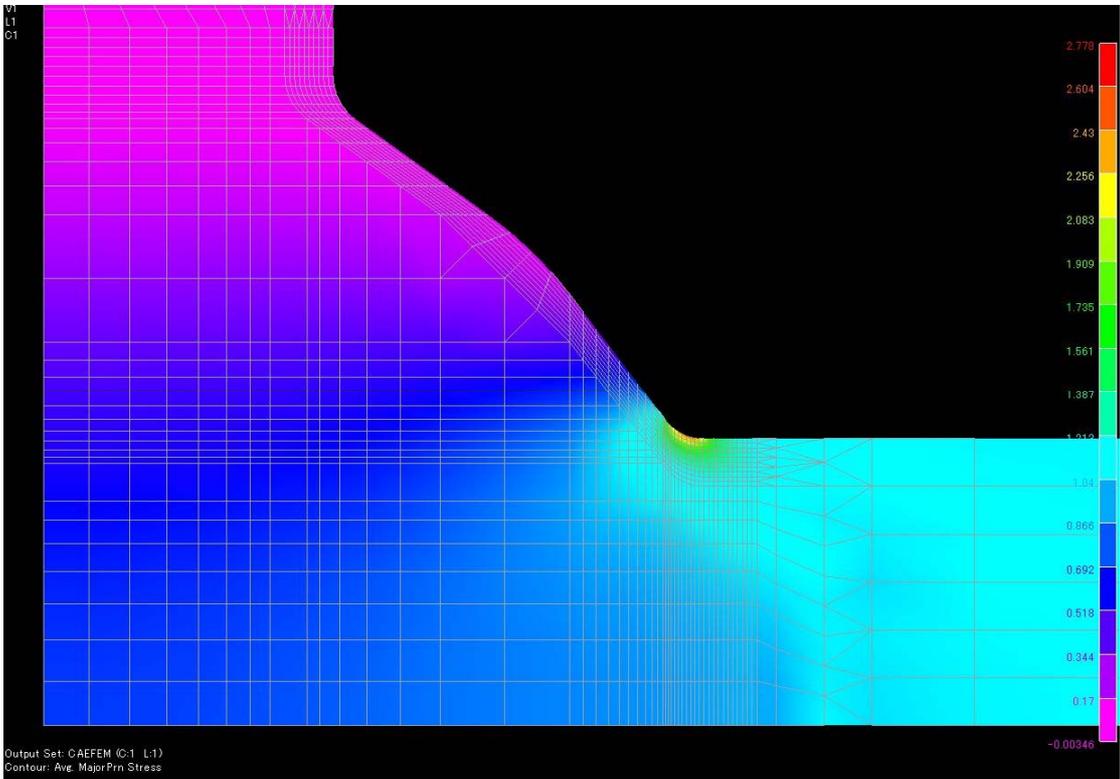
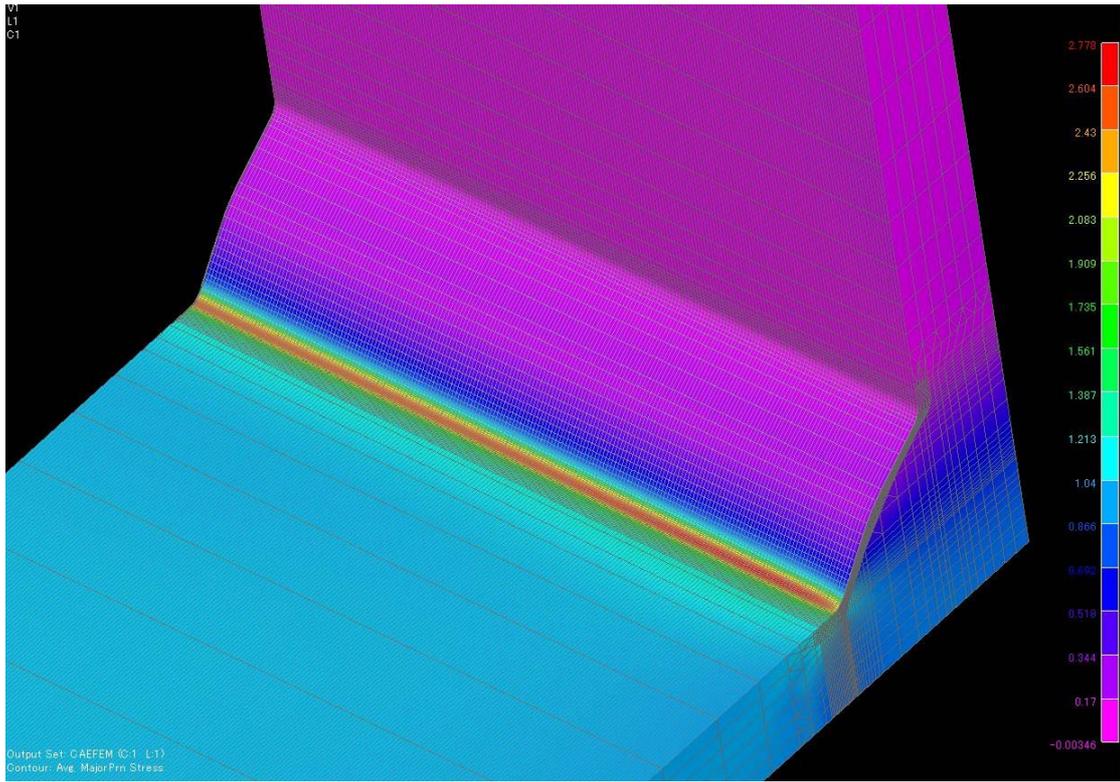


図 6.5 溶接のままの十字継手 (  $t = 1\text{mm}$  ) の主応力コンター

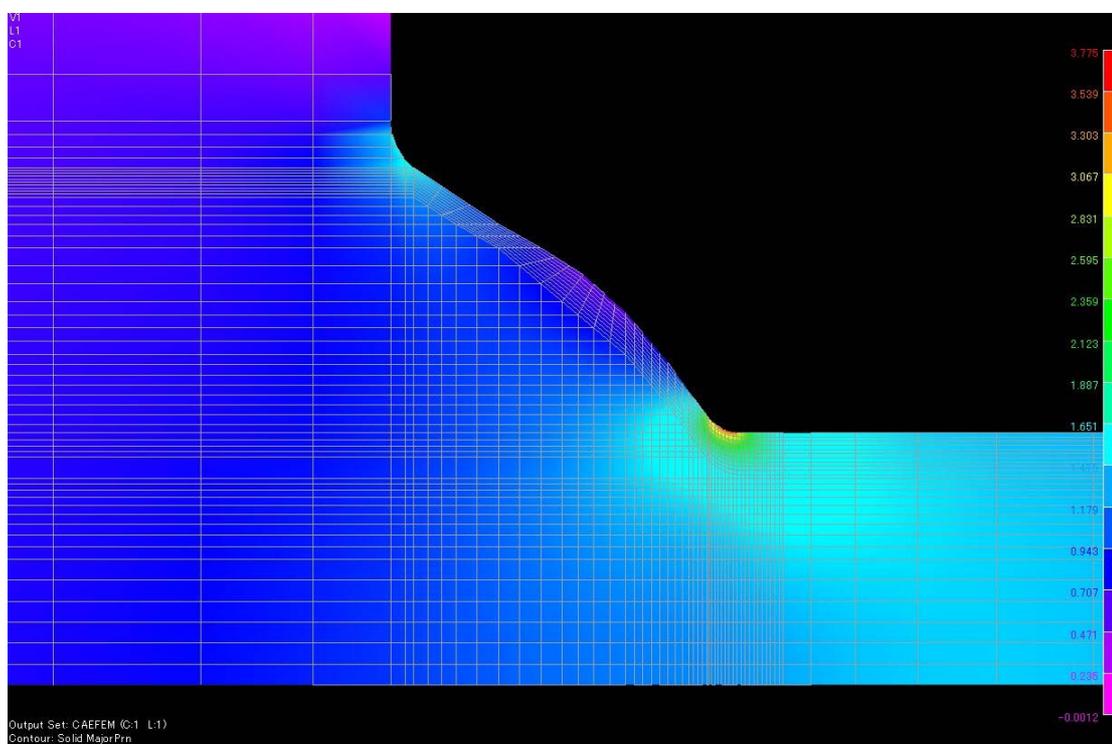
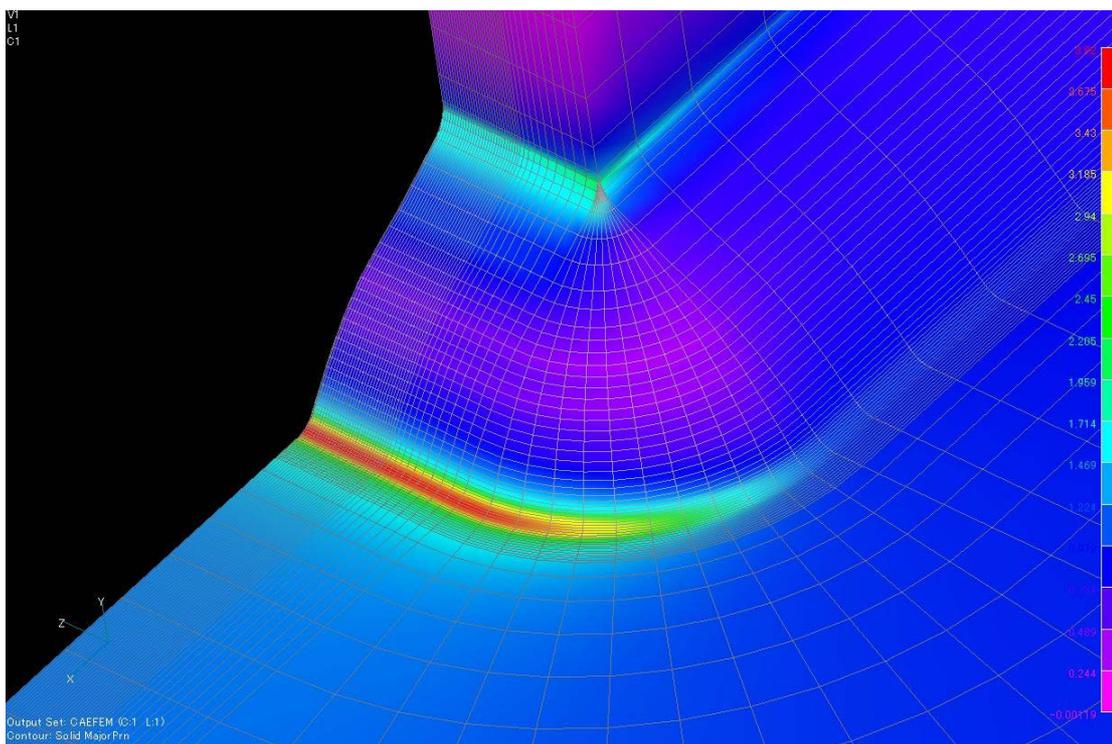


図 6.6 溶接のままの面外ガセット (  $t=1\text{mm}$  ) の主応力コンター

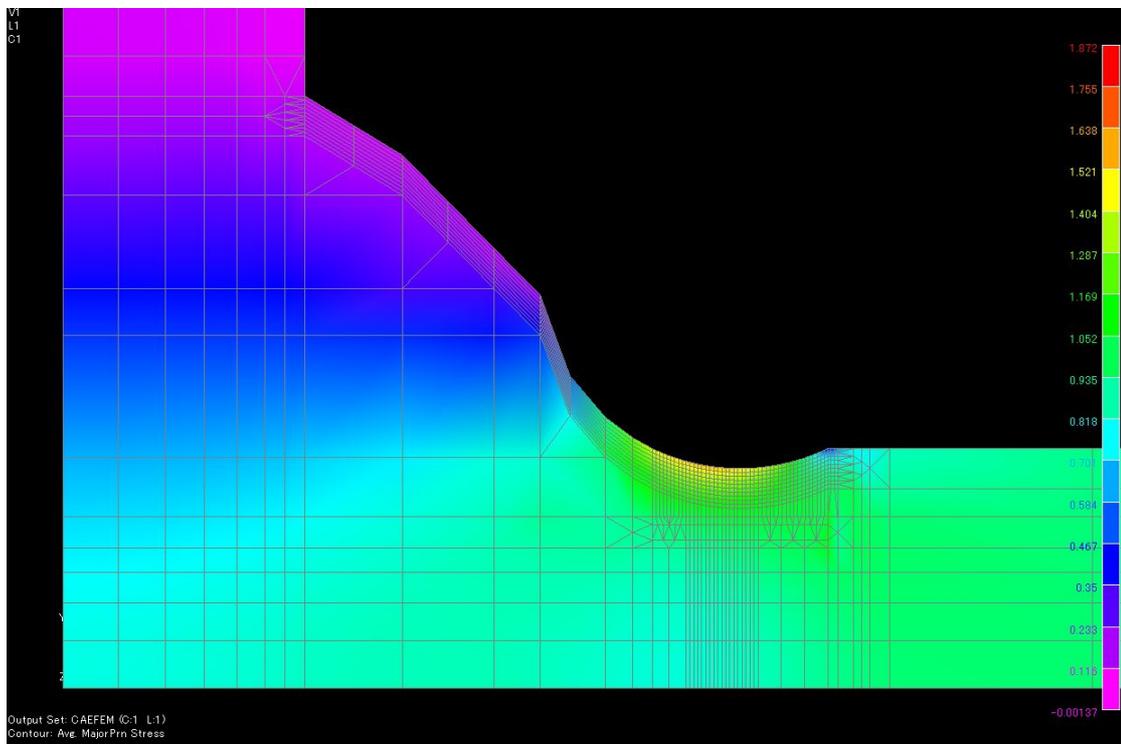
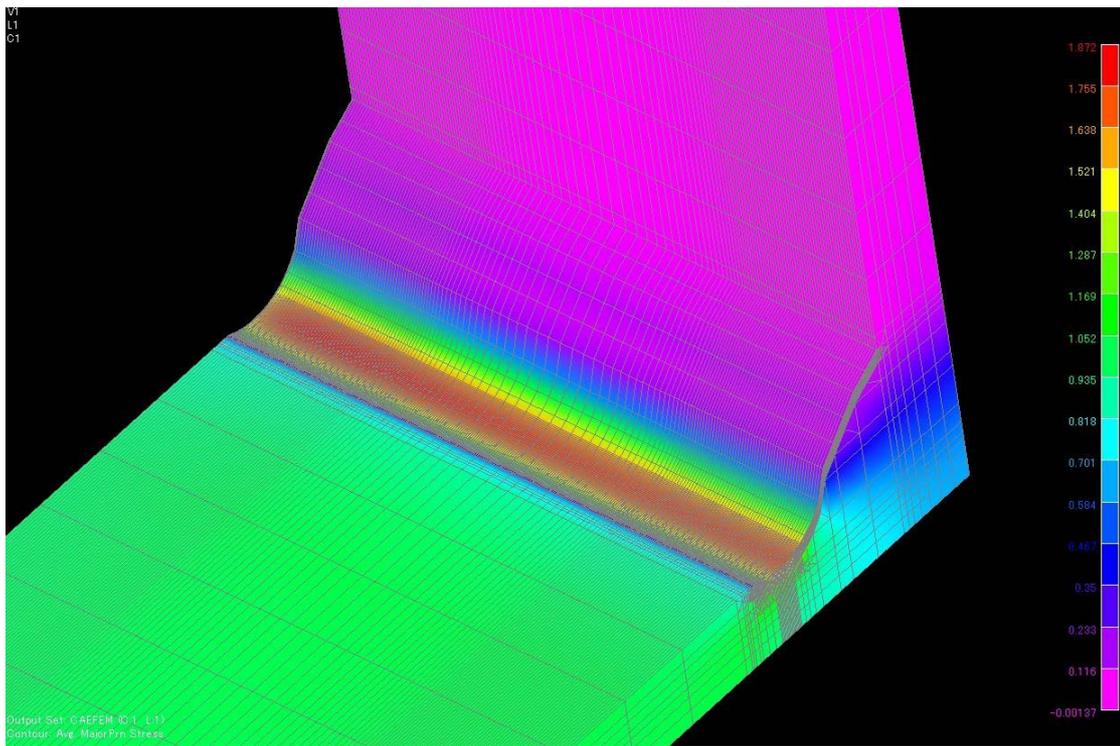


図 6.7 止端仕上げを行なった十字継手 (  $r=5\text{mm}$  ) の主応力コンター

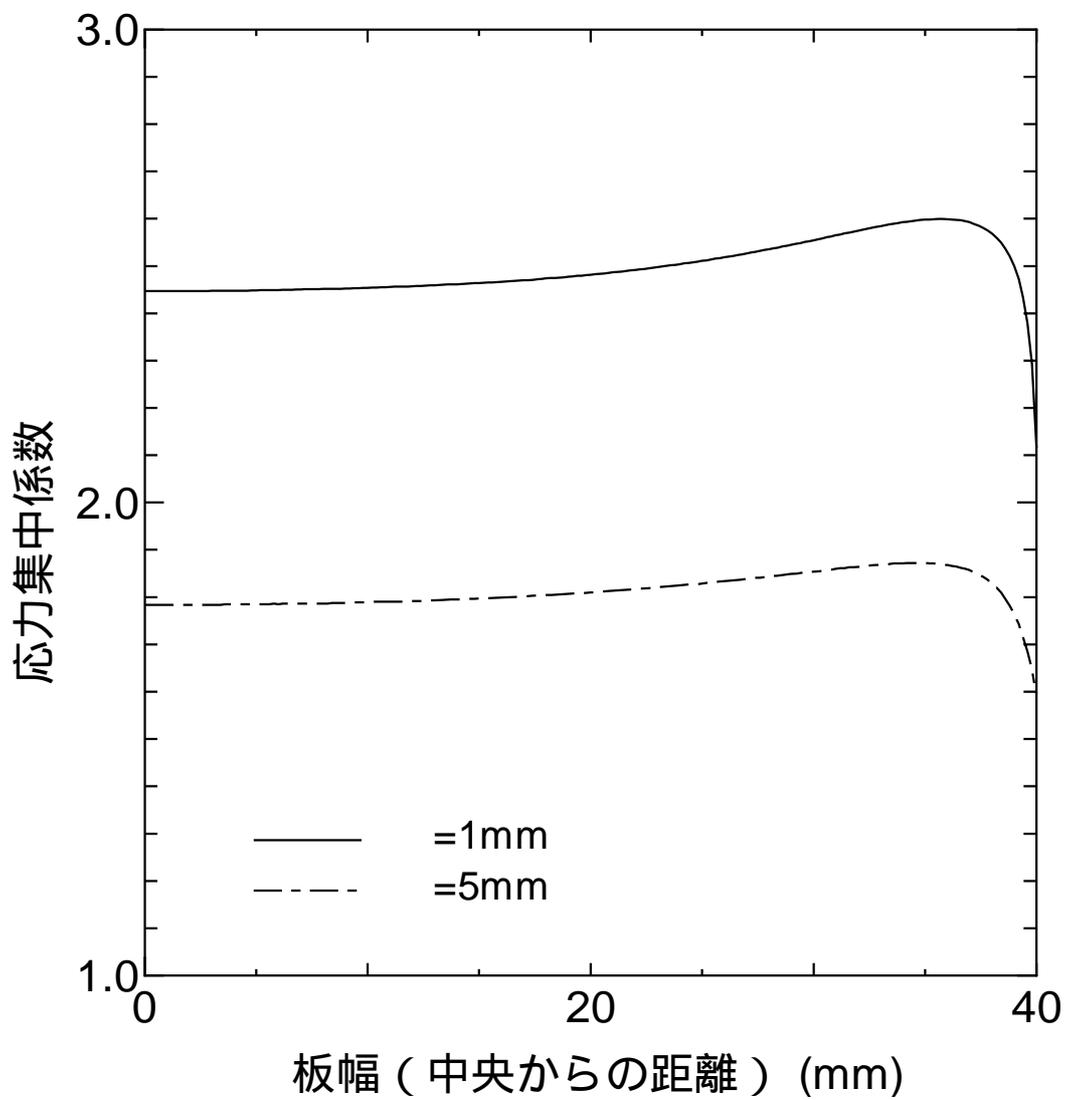


図 6.8 十字継手の板幅方向主応力分布

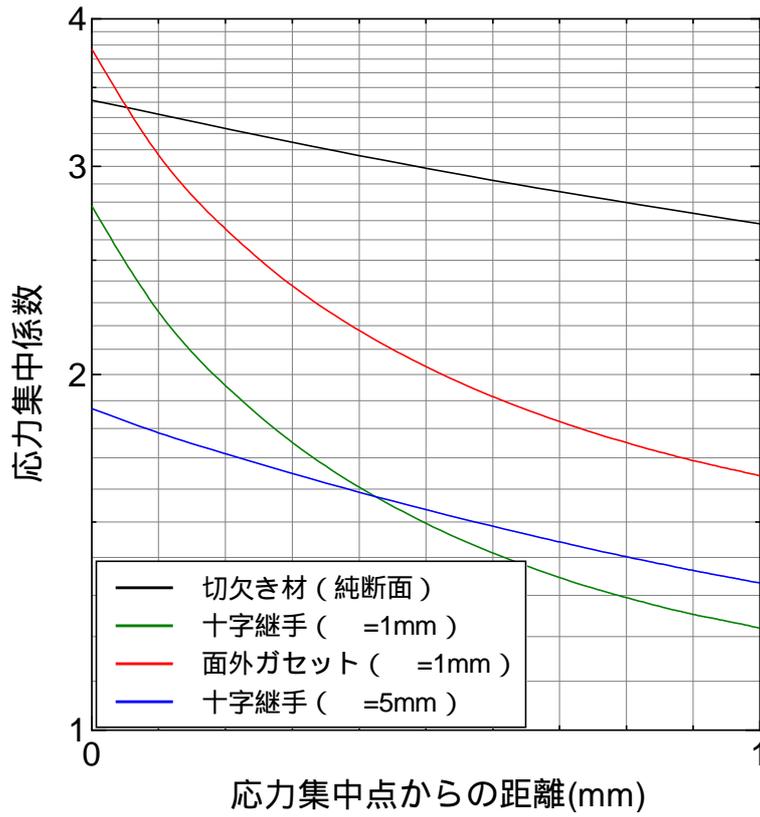


図 6.9 き裂進展方向の応力集中係数

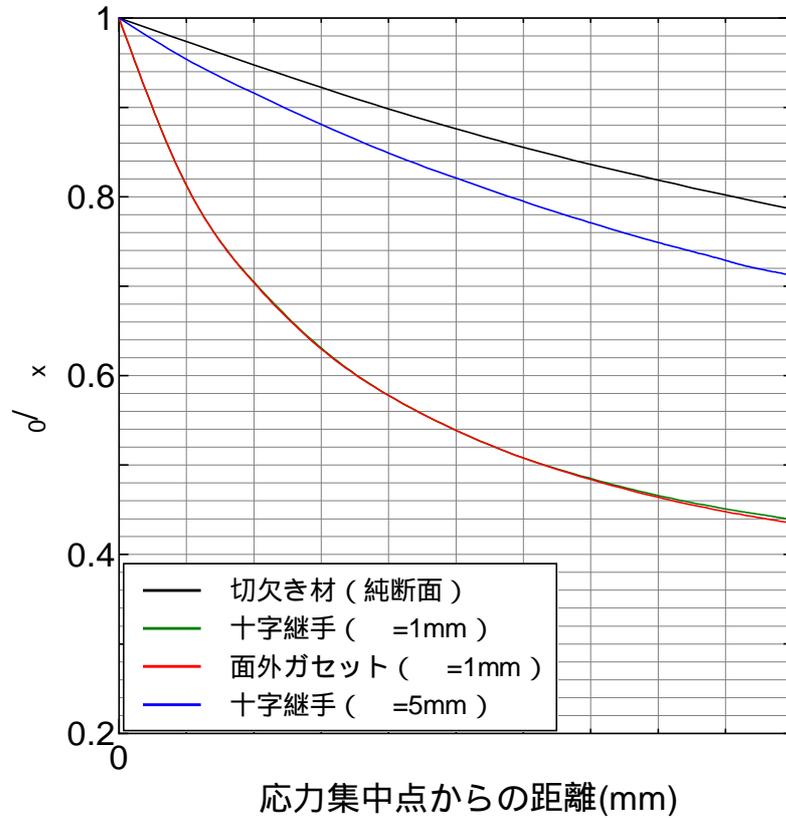


図 6.10 き裂進展方向に関する応力集中係数の変化

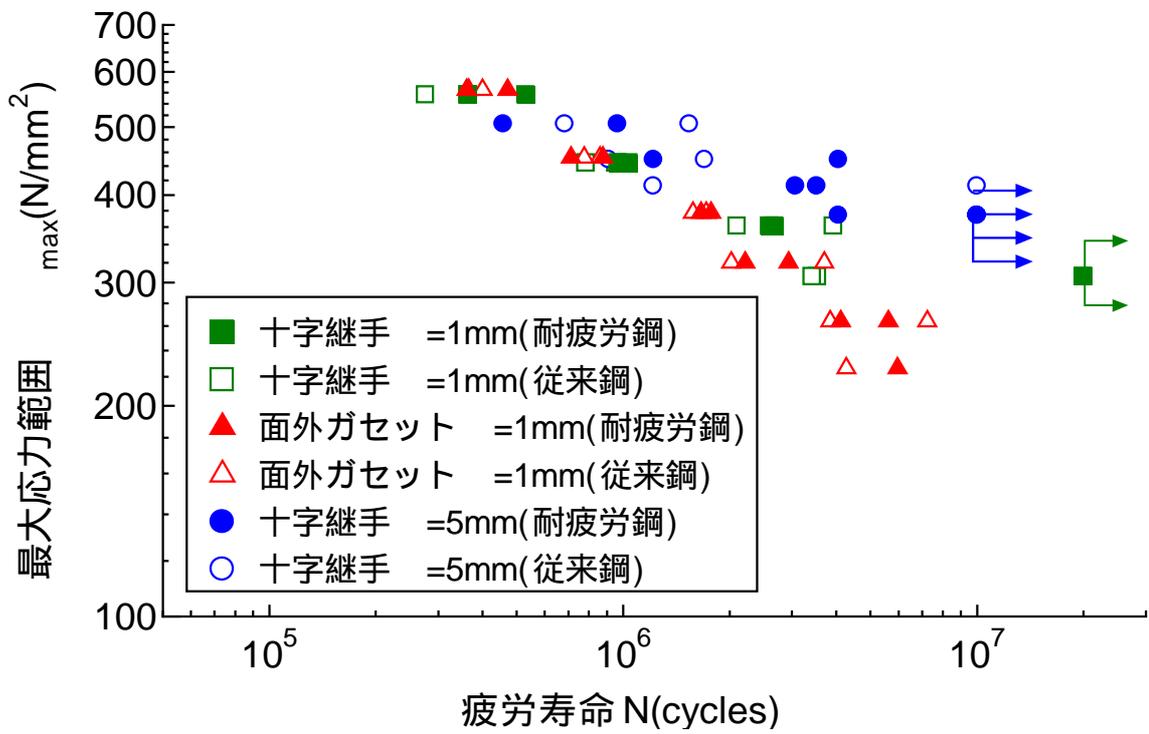
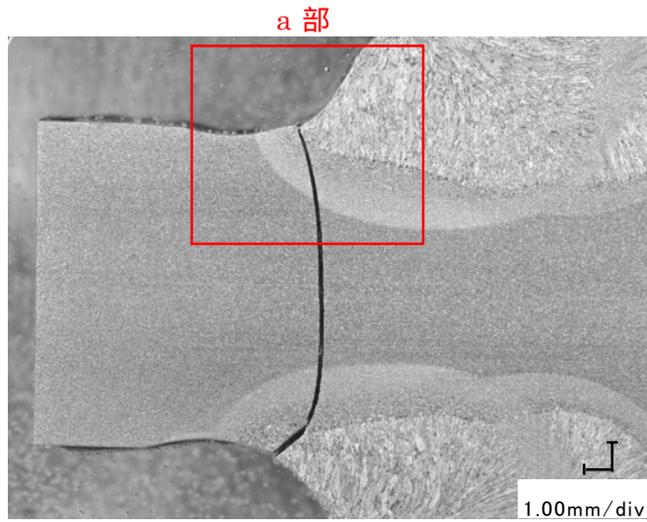
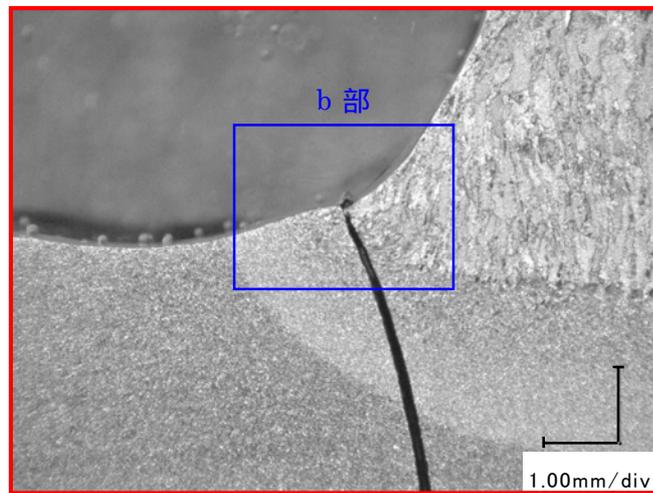


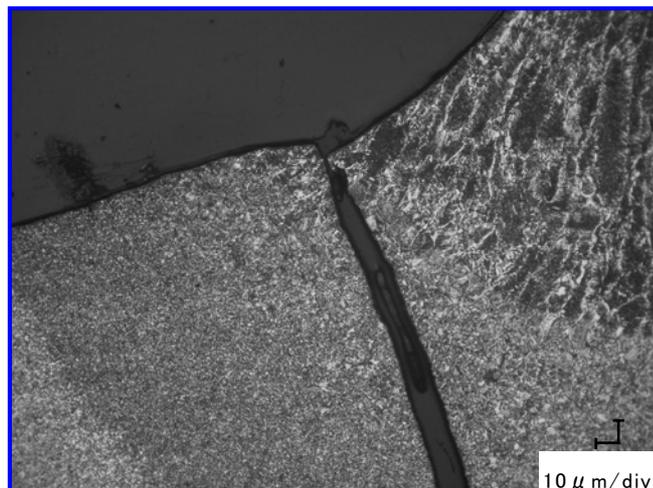
図 6.11 最大応力範囲で整理した溶接継手の  $\sigma-N$  関係



(a) 疲労き裂

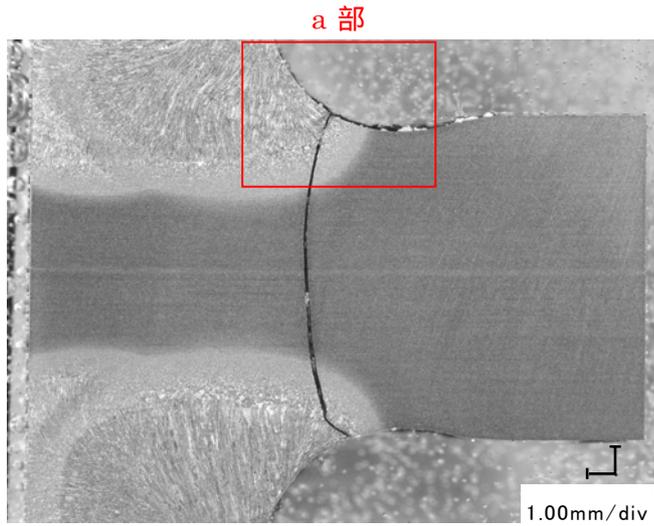


(b) a 部拡大

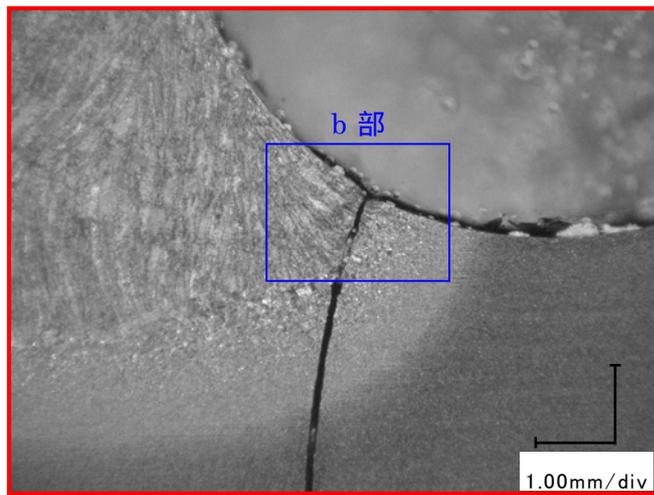


(c) b 部拡大

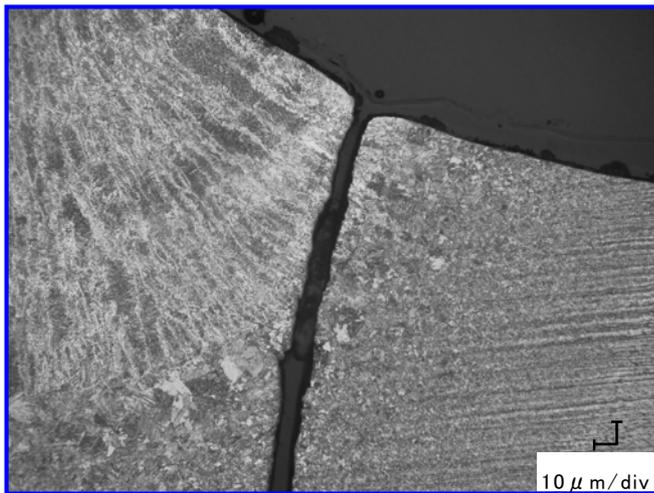
写真 6.1 止端を仕上げた耐疲労鋼十字継手の破壊起点



(a)疲労き裂



(b)a 部拡大



(c)b 部拡大

写真 6.2 止端を仕上げた従来鋼十字継手の破壊起点

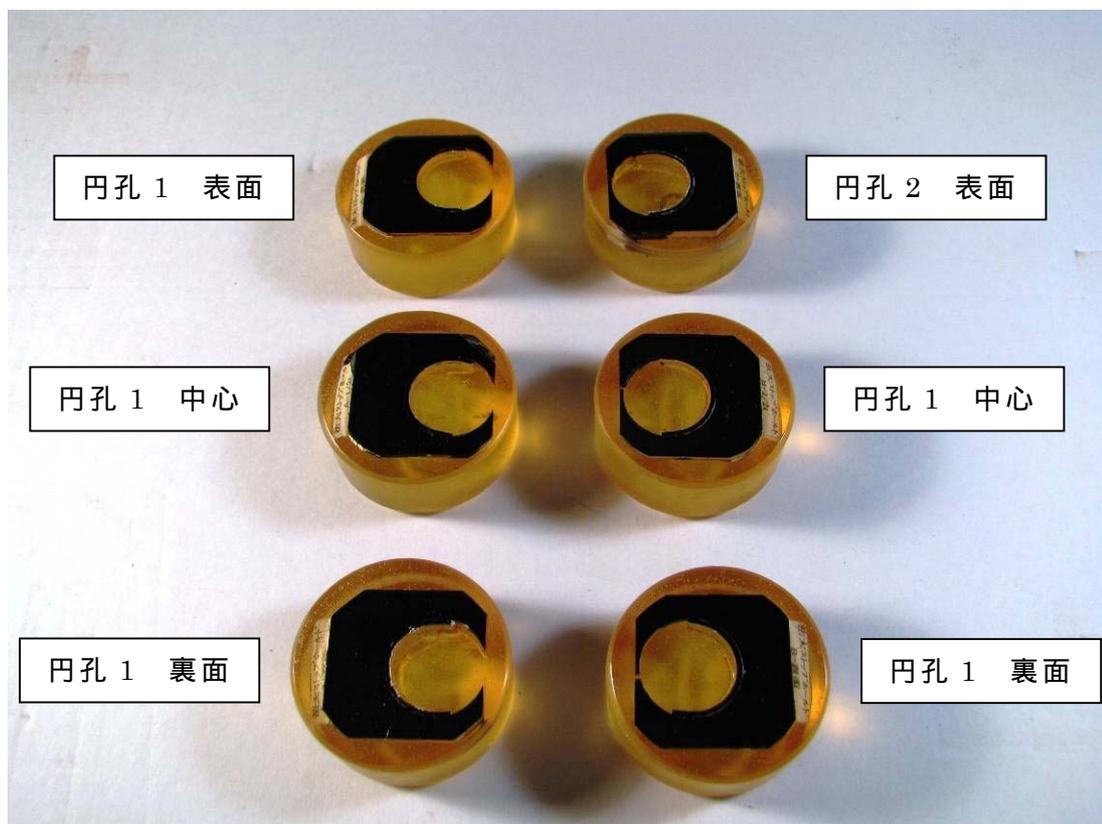
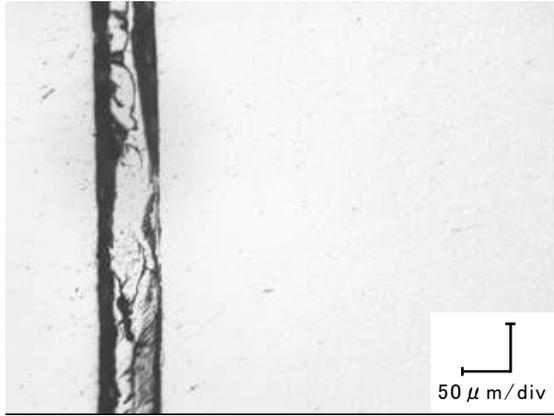
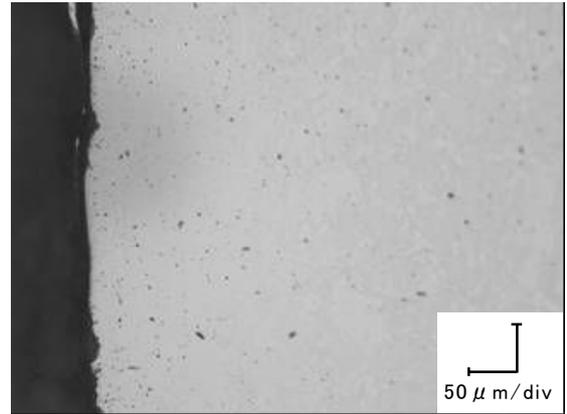


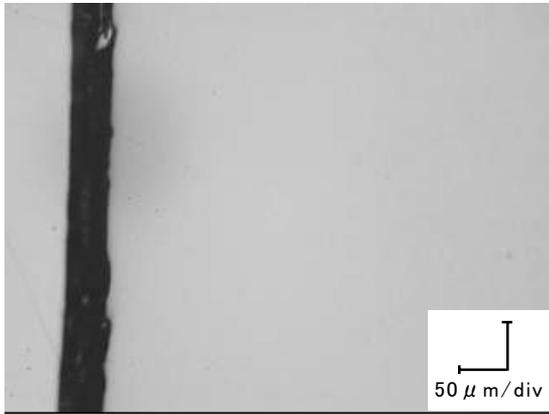
写真 6.3 切欠き材の停留き裂観察用試料



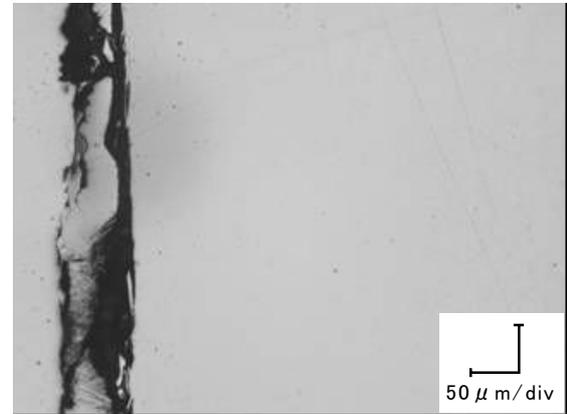
(a)円孔 1 表面



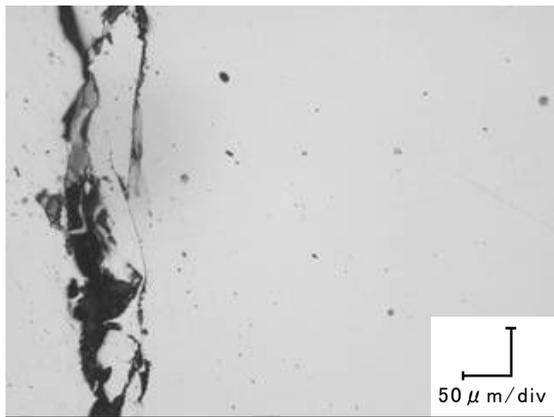
(b)円孔 2 表面



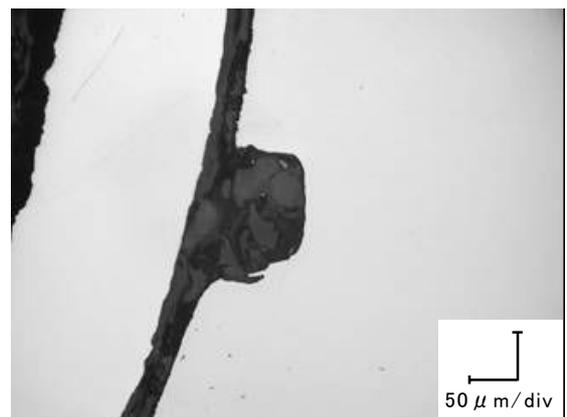
(c)円孔 1 板厚中心



(d)円孔 2 板厚中心



(d)円孔 1 裏面



(e)円孔 2 裏面

写真 6.4 切欠き材 (FCA04) の停留き裂の観察結果

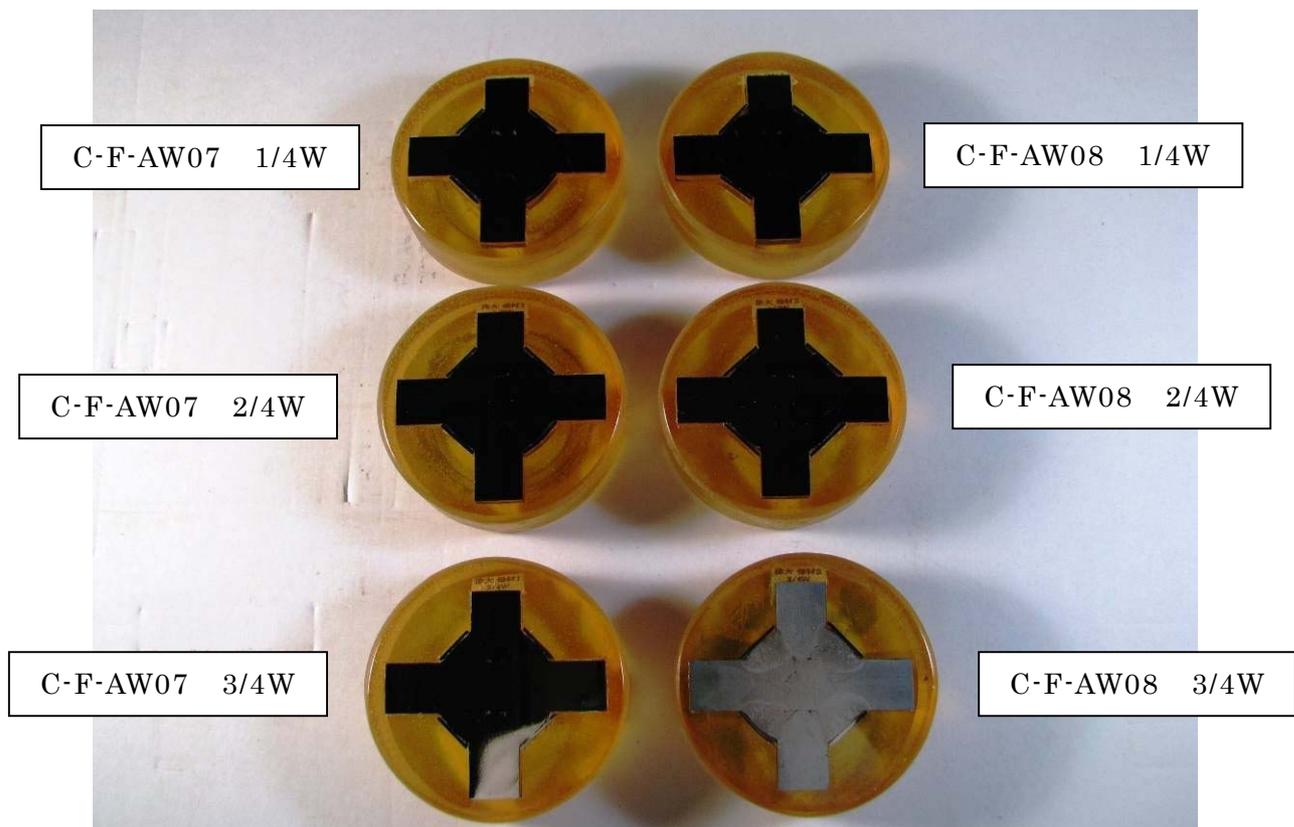
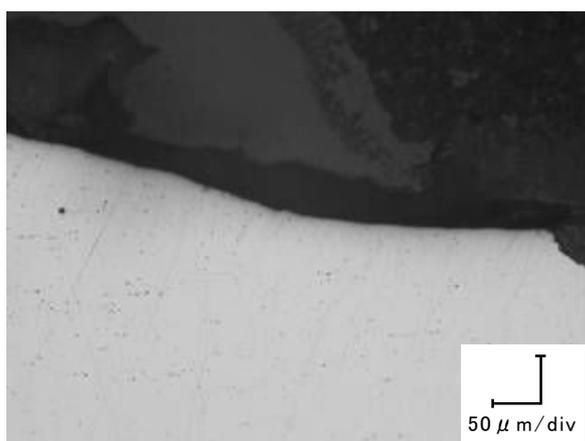
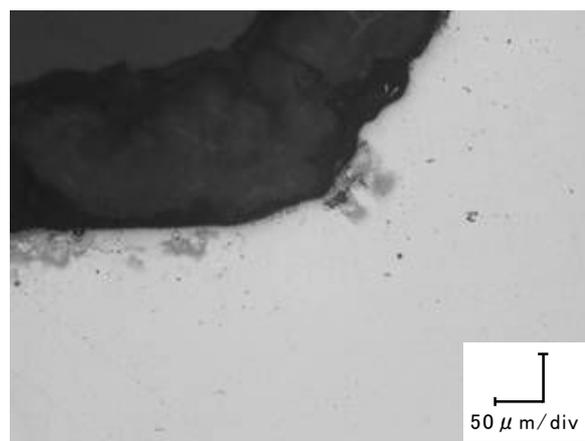


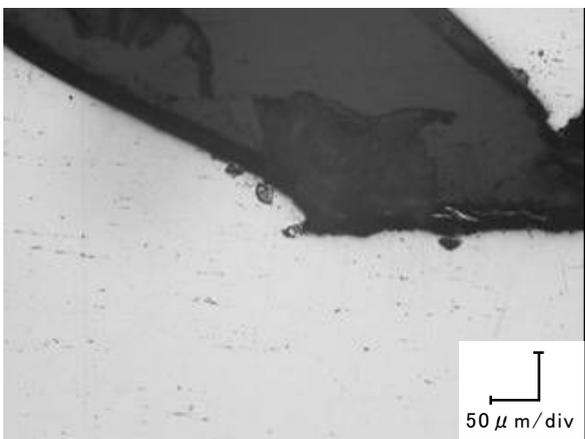
写真 6.5 溶接のままの十字継手の停留き裂観察用試料



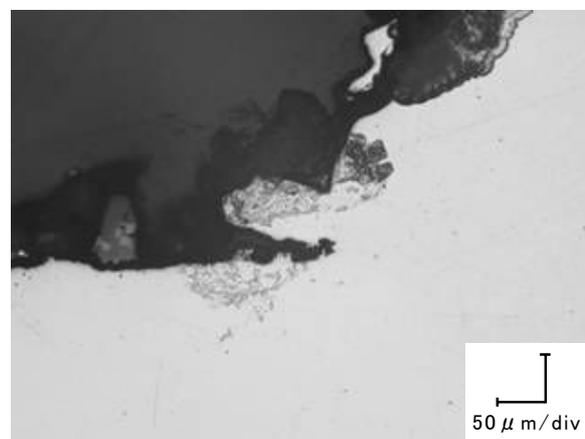
(a)止端 : 1/4W



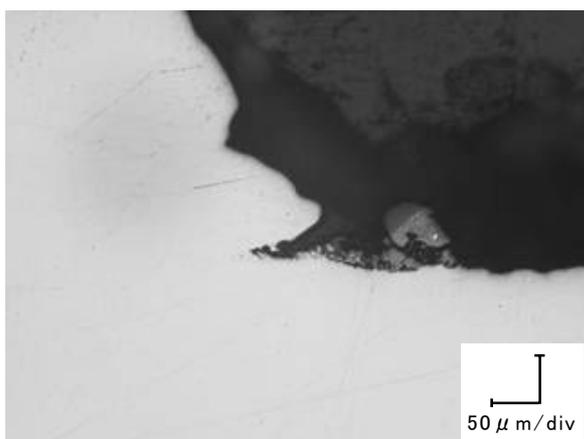
(b)止端 : 1/4W



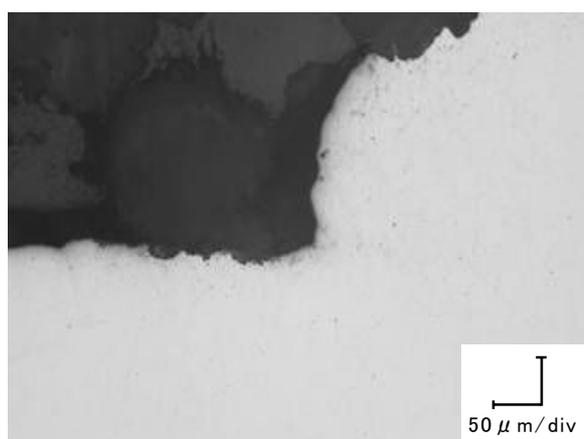
(c)止端 : 2/4W



(d)止端 : 2/4W

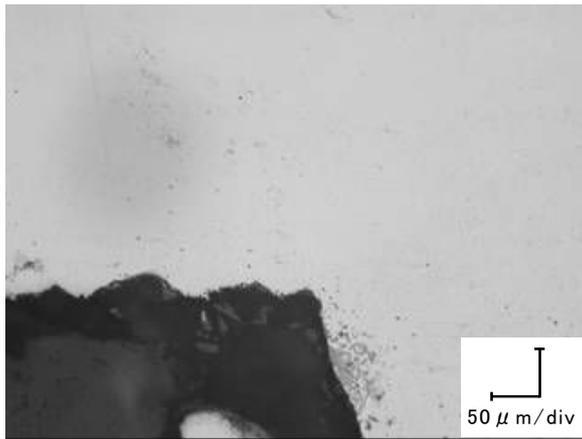


(e)止端 : 3/4W

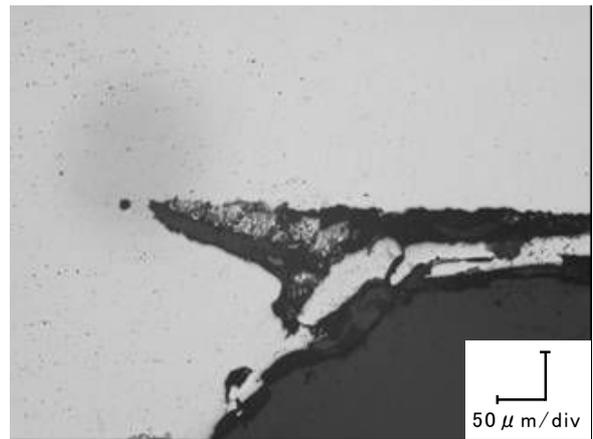


(f)止端 : 3/4W

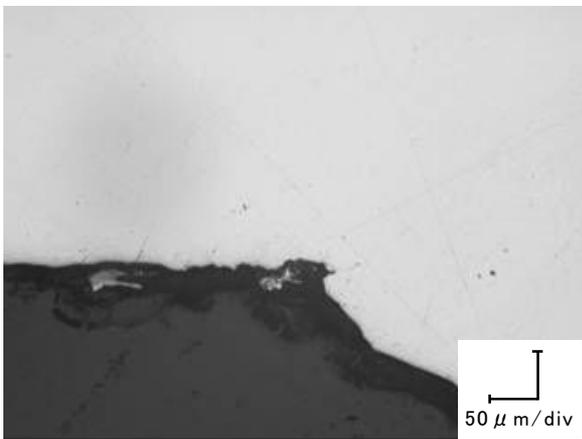
写真 6.6 十字継手 (C-F-AW07) の停留き裂観察結果 (その 1)



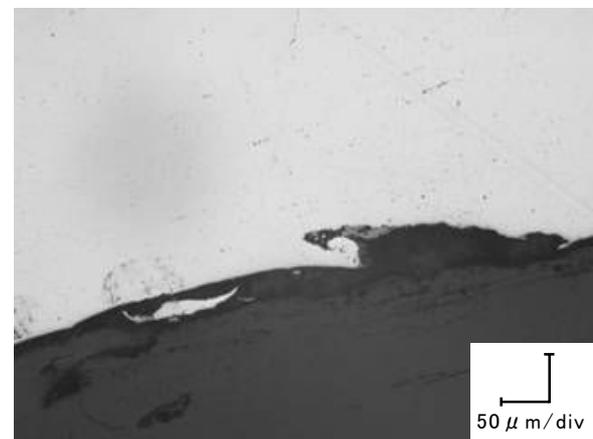
(a)止端 : 1/4W



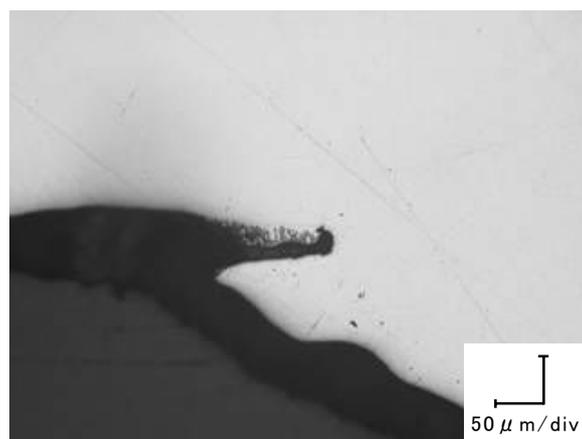
(b)止端 : 1/4W



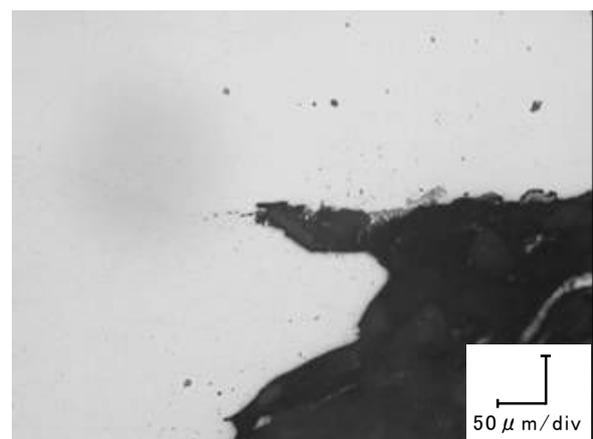
(c)止端 : 2/4W



(d)止端 : 2/4W

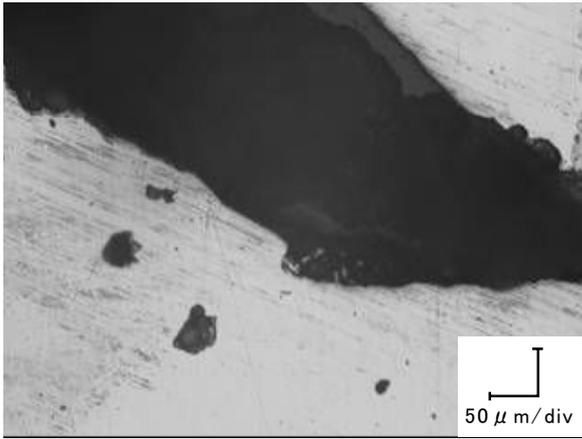


(e)止端 : 3/4W

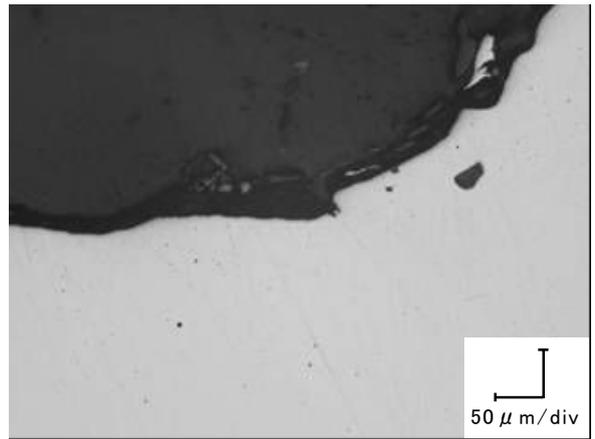


(f)止端 : 3/4W

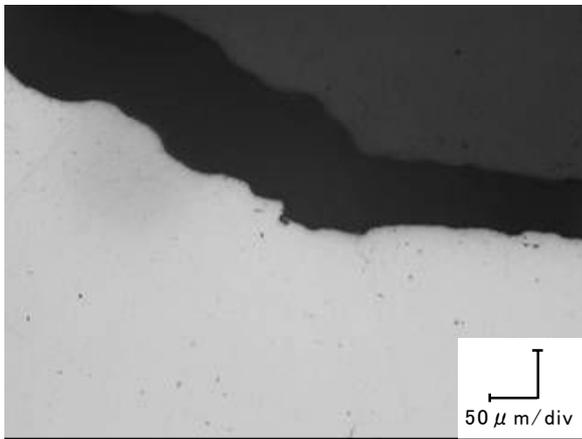
写真 6.7 十字継手 (C-F-AW07) の停留き裂観察結果 (その 2)



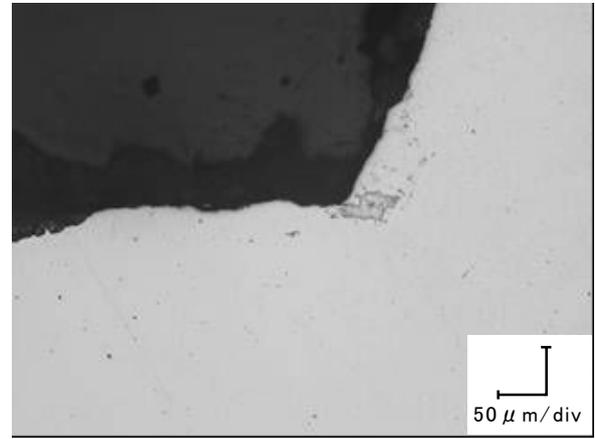
(a)止端 : 1/4W



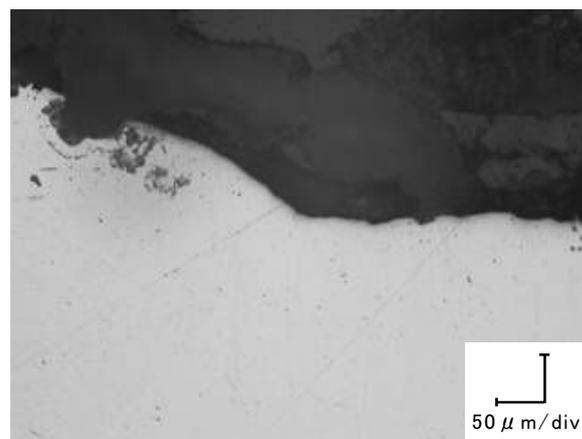
(b)止端 : 1/4W



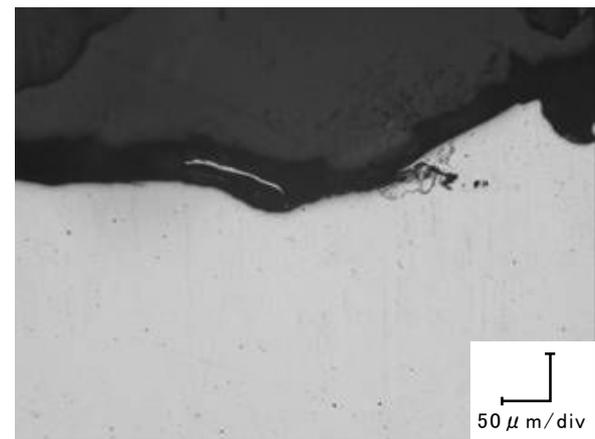
(c)止端 : 2/4W



(d)止端 : 2/4W

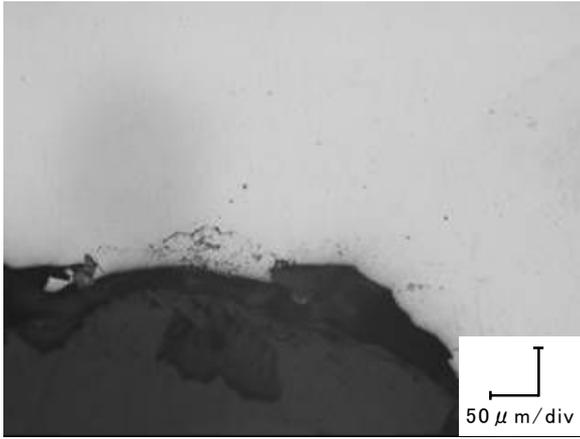


(e)止端 : 3/4W

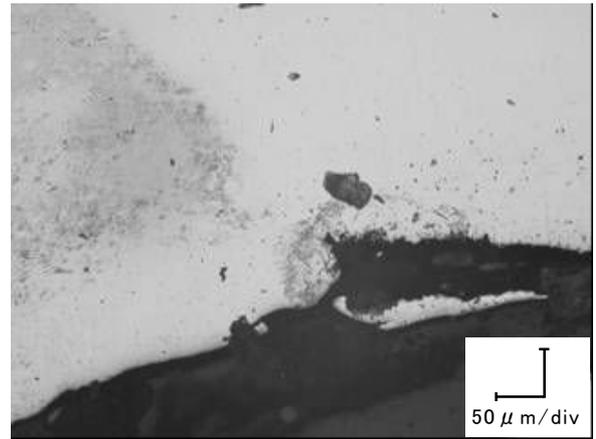


(f)止端 : 3/4W

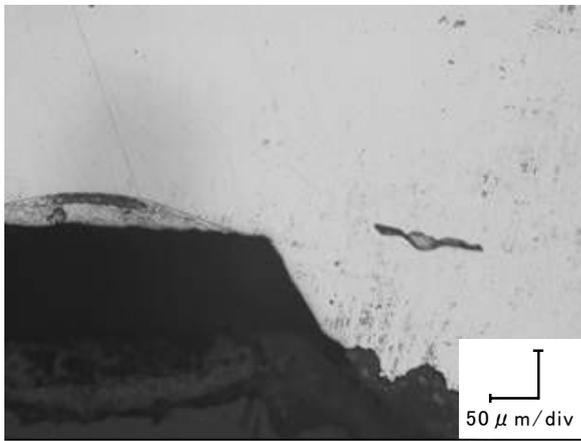
写真 6.8 十字継手 (C-F-AW08) の停留き裂観察結果 (その 1)



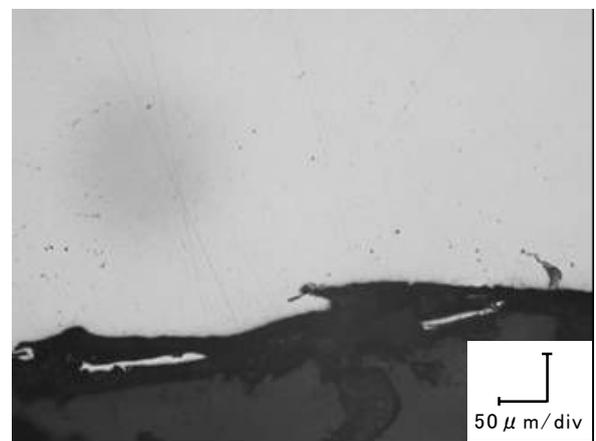
(a)止端 : 1/4W



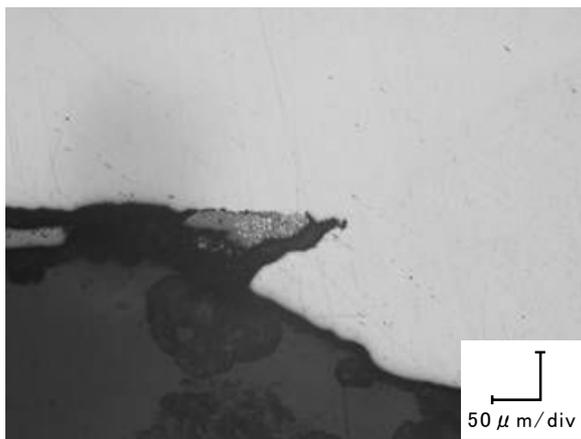
(b)止端 : 1/4W



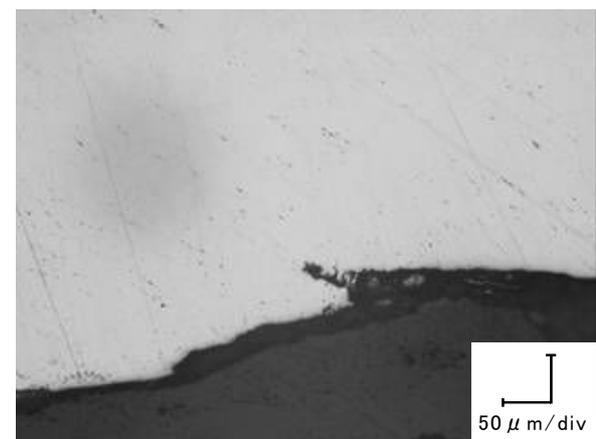
(c)止端 : 2/4W



(d)止端 : 2/4W



(e)止端 : 3/4W



(f)止端 : 3/4W

写真 6.9 十字継手 (C-F-AW08) の停留き裂観察結果 (その 2)

## 第 7 章 結論

本研究では、溶接構造物への適用を想定して、耐疲労鋼の疲労強度改善効果を明らかにすることを目的に、切欠き材と溶接継手の疲労試験および CCT 試験片の疲労き裂進展試験を行った。

本研究で得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 耐疲労鋼切欠き材の疲労試験結果にはバラツキが大きいものの、特に低応力範囲において疲労寿命延伸効果が得られた。
- (2) 耐疲労鋼の応力範囲と疲労寿命の傾きが従来鋼と同じと仮定すれば、耐疲労鋼切欠き材の疲労強度は、従来鋼の 1.3 倍程度となる。
- (3) き裂が比較的長い場合の高い引張残留応力場における耐疲労鋼の疲労き裂進展速度は、従来鋼と同じである。
- (4) 耐疲労鋼を用いた荷重非伝達型十字溶接継手と面外ガセット溶接継手の有限寿命域における疲労強度は、従来鋼と同程度である。
- (5) 耐疲労鋼を用いた荷重非伝達型十字溶接継手の疲労限は、従来鋼に比べて高い。
- (6) 耐疲労鋼を用いた荷重非伝達型十字溶接継手に止端仕上げを行なうと、溶接のままの疲労強度に比べて 200 万回疲労強度で約 1.7 倍向上する。
- (7) 耐疲労鋼を用いた荷重非伝達型十字溶接継手の止端仕上げによる疲労強度改善効果は、従来鋼と同程度である。
- (8) 耐疲労鋼は、き裂発生過程とき裂進展過程の初期において、ベイナイトが微小なき裂進展の障害となることで、疲労強度が改善すると考えられる。

## 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 鋼橋編，丸善，1990
- 2) 日本道路協会：鋼橋の疲労，丸善，1997
- 3) 西川和廣：道路橋における疲労問題と補修・補強，橋梁と基礎，第17巻，第8号，pp.19～23，1983
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 鋼橋編，丸善，2002
- 5) 日本鋼構造協会編：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，技報堂出版，1993
- 6) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，丸善，2002
- 7) 鈴木直之，太田昭彦，前田芳夫：低変態温度溶接材料を用いた角回し溶接継手の補修による疲労強度向上，溶接学会論文集，Vo.21，No.1，pp.62-67，2003
- 8) 宇佐美龍一，森猛，野瀬哲郎，田中睦人：UIT を施した面外ガセット溶接継手の疲労強度に対する施工時応力レベルと応力比の影響，土木学会第64回年次学術講演会，I-149，pp.297-298，2009.9
- 9) 太田昭彦，前田芳夫，小菅通雄，町田進，吉成仁志：引張残留応力場にある溶接継手の設計疲労き裂伝ば曲線，溶接学会論文集，Vol.7，No.3，pp.107-112，1989.8
- 10) 誉田登，有持和茂，稲見彰則，堺堀英男：疲労強度を向上させた溶接用高張力鋼板，溶接技術，Vol.56，pp.86-93，2008.8
- 11) 稲見彰則，鹿島和幸，誉田登：船舶用高機能材料 耐腐食鋼，耐疲労鋼，KANRIN 日本船舶海洋工学会誌，Vol.24，pp.2-7，2009.5
- 12) 二村大輔，松本健太郎，坂野昌弘，磯田厚志，近藤伸介，有持和茂，誉田登：耐疲労鋼を用いた主桁 - 横桁接合部の疲労挙動の検討，土木学会第59回年次学術講演会，I-536，pp.1069-1070，2004.9
- 13) 誉田登，有持和茂，松川靖，広野正彦，有馬博人，森下泰光，安田修，望月正人，豊田政男：耐疲労鋼適用による橋脚隅角部の疲労特性改善，溶接構造シンポジウム 2004 講演論文集，pp.35-38，2004.11
- 14) Masashiro SAKANO ,Daisuke NIMURA ,Kentaro MATUMOTO ,Atushi ISODA , Shinsuke KONDO , Kazushige ARIMOCHI , Noboru KONDA : IMPROVING FATIGUE STRENGTH OF WELDED BEAMS BY USING FATIGUE CRACK ARRESTING STEEL , Eurosteel 2005 , Vol.B , 1.11-25 , 2005.4
- 15) 有持和茂，大西一志，誉田登，永木勇人，森下泰光，鷹羽新二，安田修：耐疲労鋼による鋼床版デッキプレート・U リブの疲労強度向上技術の研究，溶接構造シ

ンポジウム 2006 講演論文集 , pp.233-236 , 2006.11

- 16) 有持和茂 , 誉田登 , 西尾大 , 山野達也 , 森下泰光 , 鷹羽新二 , 安田修 : 耐疲労鋼の鋼鈹桁橋への適用 , 溶接学会全国大会概要 , No.80 , pp100-101 , 2007.3
- 17) 一宮充 , 春日井俊博 , 清川昇悟 , 安藤隆一 , 誉田登 , 有持和茂 : 鋼床版の疲労損傷評価方法と鋼材による疲労寿命の改善 - 第 2 報 耐疲労鋼適用による疲労寿命の改善について - , 土木学会第 63 回年次学術講演会 , 1-208 , pp415-416 , 2008.9
- 18) 大田孝二・深沢誠共著 : 橋と鋼 , 建設図書 , 2000
- 19) 森猛 , 内田大介 , 西尾一徹 : ストップホール補修鋼部材の疲労強度に対する鋼材静的強度の影響 , 鋼構造論文集 , Vol.10 , pp.297-304 , 2002.11
- 20) 金属材料研究所疲れデータシート No.21(1980) , No.31(1982) , No.41(1984) , No.46(1985)
- 21) AKIHIKO OHTA , ISAO SOYA , SATOSHI NISHIJIMA , MICHIO KOSUGE : STATISTICAL EVALUATION OF FATIGUE CRACK PROPAGATION PROPERTIES INCLUDING THRESHHOLD STRESS INTENSITY FACTOR , Engineering Fracture Mechanics , Vol.24 , No.6 , pp.789-802 , 1986
- 22) 日本鋼構造協会 ; 土木鋼構造物の点検・診断・対策技術 - 2007 年度改訂版 - , pp.105-110 , 2007
- 23) Takeshi MORI , Atsushi ICHIKAWA : FATIGUE CRACK PROPAGATION RATE OF AUSTENITIC HIGH MANGANESE STEEL , Structural Eng./Earthquake Eng. Vol.11 , No.4 , 165s-172s , 1995.1
- 24) 星出敏彦 : 疲労の基礎と研究動向 , 材料 , Vol.52 , No.2 , pp.210-215 , 2003
- 25) A.S.TETELMAN , A.J.McEVILY,Jr 共著 , 宮本博訳 ; 構造材料の強度と破壊 1 , 培風館 , 1970
- 26) 田中啓介 , 中井善一 , 秋庭義明 : 鉄鋼材料の疲労破壊の機構と力学 , 鉄と鋼 , Vol.79 , No.8 , pp.12-23 , 1993
- 27) 山田邦博 , 国尾武 : 平滑材の停留き裂挙動を支配する微視組織因子について , 日本機械学会論文集 A , 45 巻 393 号 , pp.440-445 , 1979
- 28) 西谷弘信 : き裂における応力拡大係数に相当する , 切欠きにおける応力場の尺度 , 日本機械学会論文集 A , 48 巻 447 号 , pp.1353-1359 , 1983

## 謝 辞

法政大学大学院工学研究科森猛教授には、終始懇切丁寧なご指導を賜りました。研究の難しさと面白さ、論文のまとめ方、発表の仕方など多くのことを教えて頂きました。自分の未熟さを痛感し、鋼構造という分野の奥深さを知りました。この貴重な経験は、今後の仕事でも活かしたいと思います。2年間にわたり先生のご指導を頂けたことは、私の人生にとって幸福な時間でした。ここに深く感謝の意を表し、厚くお礼申し上げます。

法政大学工学部都市環境デザイン工学技術嘱託の濱田榮氏には、実験準備に多大なる協力を頂きました。人に対する心遣いにはいつも敬服していました。法政大学工学部都市環境デザイン工学部非常勤講師小林佑規氏には、試験機トラブルの際にはいつも助けて頂きました。また、研究に関して多くの助言を頂きました。ここに記して深謝いたします。

本論文をまとめるにあたり、貴重なご助言を頂きました住友金属工業(株)の菅田登氏と試験体の製作にご協力頂きました(株)横河住金ブリッジの中村宏氏には、心から感謝しお礼申し上げます。

当研究室OBの(株)宮地鐵工所林暢彦氏、三井造船(株)内田大介氏、(株)東京繊維骨橋梁の平山繁幸氏には研究のご助言だけでなく、大学や業界のことなど多くのことを教えて頂きました。いつも暖かいお気遣いを頂き、有難うございました。

大学院博士課程1年の原田英明氏には、研究に関して多くのサポートをして頂きました。同氏は、立派な博士になられることと思います。同じ修士課程2年の宇佐美龍一氏、甲弓子氏、西川祥央氏には、授業や諸々の手続き等で頼りにさせて頂きました。今後の活躍を心から応援しております。研究を共にした昨年度卒業生の植田隆雅氏、4年生の長島嘉洋氏には、研究を含め大学生活の楽しさを教えてもらいました。始めは戸惑い、気を使わせたと思います。また、楽しく大学生活を過ごせたのは研究室の皆様のおかげだと思います。すばらしい仲間に出会えたことに感謝いたします。

新日本技研(株)の伊東賢氏と大田孝二氏には、私が法政大学へ通うために多大なる助力を頂きました。当大学のOBでもある伊東賢氏には、大学進学のかっかけを与えて頂き、常に応援して頂きました。同氏の後輩としての名に恥じぬよう今後も精進したいと思います。また、仕事の面で多大な迷惑を掛けたにも関わらず、大学進学を応援して下さいました。新日本技研(株)の皆様には心から感謝いたします。

最後に、一切の不満も出さず応援してくれた妻と子供たちに感謝します。