

# 摩擦圧接における炭素鋼およびステンレス鋼の継手の機構について

森 重 修 一\*・瀬 戸 雅 文\*・田 戸 保\*\*

## Mechanism of Carbon Steel and Stainless Steel Welded Joint in Friction Welding

Shuichi MORISHIGE, Masafumi SETO, Tamotsu TADO

### Abstract

Fatigue limit of rotational bending of friction welded joint of carbon steel (S45C) and austenitic stainless steel (SUS304) was examined, and compared with fatigue limits of respective the base material specimen and discussed. Moreover, change of metallic texture of boundary of friction weld was analyzed and observed with energy dispersive X-ray microanalyzer.

Obtained result were summarized as follows :

- 1) Fatigue limit of friction welded joint of machine structural carbon steel (S45C) exceeds the fatigue limit of the base material specimens.
- 2) Fatigue limit of friction welded joint of dissimilar metals (S45C/SUS304) shows intermediate value of both the base material specimen, and it depend upon the material with lower fatigue limit.
- 3) In the friction welded part of SUS304 and S45C the presence of formation layer containing elemental Cr and very small amount of elemental Ni which were diffused from SUS304, was confirmed.
- 3) In the central part of this formation layer, S45C was confirmed to show convexity.

### 1. まえがき

近年、圧接継手は工業界に広く実用に供されており、この工法を用いた高品質の部品、材料の複合化など、より高度で高精度な圧接継手が求められている。すでに、摩擦圧接継手の強度に関する報告は数多くみられる。<sup>1)2)</sup>また、炭素鋼、ステンレス鋼の同種、異種圧接継手における寿命分布特性などが統計的な立場で明らかにされている。<sup>3)</sup>

前報<sup>4)</sup>において摩擦圧接法を用いて炭素鋼と合金鋼を圧

接した場合の圧接継手部における金属組織、硬さおよびバリ形状・発生状態等の変化について調べた。

そこで本研究では、異種金属を圧接すると圧接界面近傍に特異な組織の流動現象がみられることから、このことが接合強度にも影響しているものと考え、炭素鋼 (S45C) とオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS304) を用いた異種圧接継手と各々の母材との疲労限について回転曲げ疲労試験より、比較検討を行った。さらに圧接界面部の金属組織、成分の変化などについて走査型X線分析装置を用いて観察、分析を行った。

### 2. 供試材料および試験片

実験に使用した材料は機械構造用炭素鋼 (S45C)

\*宇部工業高等専門学校 機械工学科

\*\*宇部工業高等専門学校 制御情報工学科

とオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS304) を納入材のまま使用した。これらの成分を表1に示す。摩擦圧接試験片 (以下圧接試験片という) は、素材径 20 ~ 30 (mm) の材料より接合部の径 10 (mm) の加工を行い、接合面の仕上げはレジノイド砥石で切断後、前報<sup>9)</sup>と同様に旋削により粗さを R max 3 ~ 5 μm の範囲内になるように加工し圧接試験片とした。回転曲げ疲労試験片は、母材、同種圧接および異種圧接材とも図1に示す形状に製作した。切欠部は半径 R = 1 mm の環状U形切欠き (形状係数 α = 1.6, 1.4) を入れた。圧接部の切欠きの位置決めについてはとくに注意深く行った。

3. 摩擦圧接機と摩擦圧接条件

実験に使用した摩擦圧接機は、前報<sup>9)</sup>と同じで、主な仕様は軸回転数 1780 rpm、使用油圧圧力 70 kg/cm<sup>2</sup>、最大推力 1200 kg である。圧接材の接合面 (突合せ面)

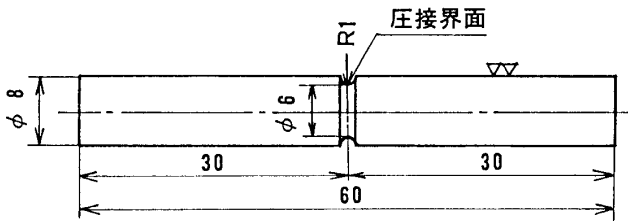


図1 試験片形状および寸法

は十分に洗浄を行い脱脂して実験に供した。

摩擦圧接条件はあらかじめ、予備実験を行って摩擦圧接継手の引張強度が十分になるような条件を選択した。表2に摩擦圧接条件を示す。摩擦加熱圧力 P<sub>1</sub> (MPa)、アプセット圧力 P<sub>2</sub> (MPa)、回転数 N (rpm) を一定として圧接を行った。

図2に各圧接継手の軸中心部を切断した接合部の外観を



(a) S45C



(b) SUS304



(c) S45C/SUS304

図2 継手接合部の断面

表1 材料の化学成分

材種	化学成分 (Wt%)						
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
S45C	0.46	0.21	0.71	0.018	0.022	—	—
SUS304	0.073	0.23	1.93	—	—	8.18	17.94

表2 摩擦圧接条件

継手の種類	設定圧力		加熱時間 t <sub>1</sub> (sec)	加圧時間 t <sub>2</sub> (sec)	アプセット時間 t <sub>2</sub> -t <sub>1</sub> (sec)	アプセット量 (l <sub>1</sub> +l <sub>2</sub> )-l (mm)	回転数 N (rpm)
	P <sub>1</sub> (MPa)	P <sub>2</sub> (MPa)					
S45C/S45C	27	47	3.68	4.71	1.03	3.96	1790
SUS304/SUS304	27	47	3.96	5.17	1.21	1.17	1790
S45C/SUS304	27	47	5.35	7.18	1.83	2.25	1790

(l<sub>1</sub>, l<sub>2</sub> 圧接試験片長さ, l 継手の全長)

示めす。炭素鋼 (S 4 5 C) の同種圧接継手では外周部には比較的大きいバリを生じているが、ステンレス鋼 (S U S 3 0 4) の圧接継ぎ手で炭素鋼に比べて小さいバリ形状となっている。S 4 5 C / S U S 3 0 4 の異種圧接継手では (a)、(b) で発生した形状と同じ大きさのバリが各々の材料側に見られバリ形状は異なって形成される。このように材料によって、バリ形状の大きさに違いみられるが、これは材料の熱伝導率の大小による影響大きいものとする。S 4 5 C 材では 0. 1 0 8 (Cal / s.°C)、S U S 3 0 4 材では 0. 0 3 8 8 (Cal / s.°C) であり、ステンレス材と比較して約 3 倍の熱伝導率を有する。S 4 5 C 材では摩擦熱による高温域の幅も、このため厚い軟化層が形成されることから大きなバリを生ずるものとする。

4. 実験方法および実験条件

回転曲げ疲労試験は、島津製作所製の式回転曲げ疲労試験機 (島津製作所製) を用いて破断までの総繰返し数が  $10^7$  の範囲で実験を行った。

まず、機械構造用炭素鋼 S 4 5 C とオーステナイト系ステンレス鋼 S U S 3 0 4 の両材料の試験片による S-N 曲線を求め、母材の材料の疲労限と S 4 5 C / S U S 3 0 4 で圧接した継手より、継手による S-N 曲線を求めて疲労限の比較検討を行った。

また、炭素鋼 S 4 5 C 材については、圧接試験片に熱処理 (真空焼鈍  $800^{\circ}\text{C} \times 1 \text{ h}$ ) したものと熱処理を施さない圧接材についても S-N 曲線を求め疲労限の比較を行った。

つぎに、回転曲げ疲労試験後の疲労破面の形態を SEM (走査型電子顕微鏡、日立製作所製) および金属顕微鏡 (オリンパス製) を用いて観察した。また、破断部から軸方向外側および異種圧接継手の圧接界面近傍の硬さを微小硬度計 (島津製作所製) を用いて荷重 200 g、荷重保持時間 10 秒で測定した。また、走査型 X 線分析装置 (KEV X K 社製) を用いて異種圧接継手 (S 4 5 C / S U S 3 0 4) の圧接界面の定性分析を行った。

5. 実験結果および考察

5-1 継手疲労強度および硬さの分布

機械構造用炭素鋼 (S 4 5 C) を前述した方法で製作した圧接試験片 (S45C/S45C) と真空焼鈍 ( $800^{\circ}\text{C} * 1\text{h}$ )

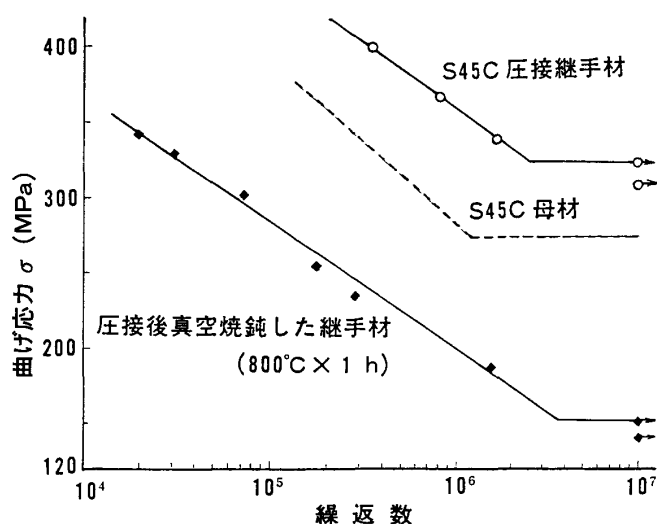


図3 繰返し圧接継手の S-N 曲線 (S45C の場合)

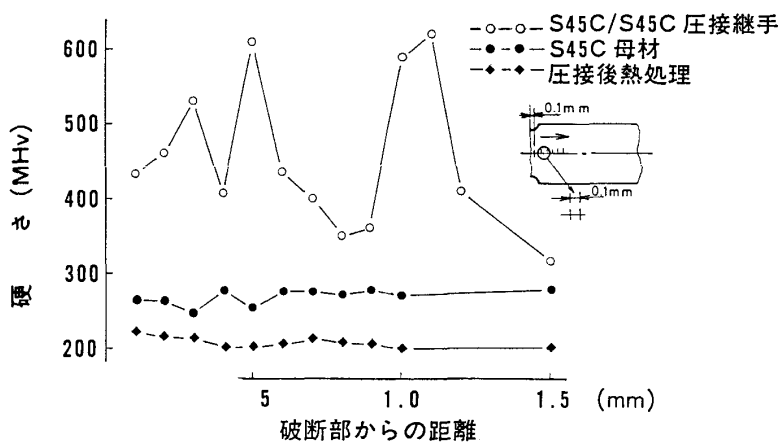


図4 疲労破断部近傍の硬さ分布

を行った場合の回転曲げ疲労試験の結果を図3に示す。S-N 曲線より求めた圧接試験片及び熱処理を施した圧接試験片の疲労限は、それぞれ 326 MPa、153 MPa といえる。なお図3の破断線は S 4 5 C 母材の S-N 曲線を示す。疲労試験結果をかなばらつきが見られるが、母材試験片を用いて行った疲労試験結果の疲労限と比較すると、圧接試験片 (未処理) は母材の疲労限より 50 MPa 強の上昇となっている。これは摩擦圧接により、圧接部近傍は熱の影響及びアーク圧力のため圧接界面域の塑性変形による硬さの上昇が生じ、この硬さの上昇が疲労限に影響しているものとする。また熱処理を施した圧接試験片の疲労限は母材の疲労限より著しく低下している。

図4は試験後の破断部端面より 0.1 mm 以内に入った軸中心付近の硬さの分布を示したものである。

熱処理を施した圧接材では破断部から外側まで、ほぼ一定値の硬さ(約HV200)を示し、圧接による影響は認められない。また、未処理の母材では製造による加工硬化のため熱処理材より、僅かに高値の硬さを示し、軸方向の硬さ変化は生じていない。しかし、圧接継手材では軸方向に対して大きな変化を示している。破断部から0.5mmと1.1mmの位置に高い硬さを示し、0.8mmに低値を示している。とくに高値は熱処理材の硬さ値の約3倍(HV600)となっており、非常に硬化した部分が圧接部近傍に存在することがわかる。このように起伏の激しい分布現象は摩擦圧接に伴う熱の発生、ねじりおよびスラスト力による組織変化などが影響しているものと考えられる。図3に示した各試験片での差異は圧接部の硬さ、組織の変化に起因しているものと考えられる。つぎに、機械構造用炭素鋼(S45C)とオーステナイト系ステンレス鋼(SUS304)の異種圧接継手、(以下(S45C/SUS304)で示す。)を先に述べた方法で製作した試験片を用いてS-N曲線を求めた。その結果を図5に示す。図にはS45C母材、SUS304母材、また、それぞれの母材同種を圧接した場合の試験結果も合わせて示した。図より(S45C/SUS304)異種圧接継ぎ手の疲労限度はS45C母材疲労限より高く、SUS304母材の疲労限よりかなり低くなっており、S45C母材の疲労限度に近い値を示している。図3に示すS45C熱処理材と比較すると高い値であるが、SUS304母材

の値とのほぼ中央値を示すことがわかる。ステンレス同種圧接試験片の疲労限は、母材疲労限より47MPa低下しており、前述したS45C同種圧接試験片での疲労限は、母材の疲労限を約50MPa上昇し、逆の結果となっている。このように材料により疲労限に差異が生じることがわかる。その原因としては、接合部近傍の接合状態、すなわち不純物の押しだし不足および中間層の金属組織の変化などが影響しているものと考えられる。

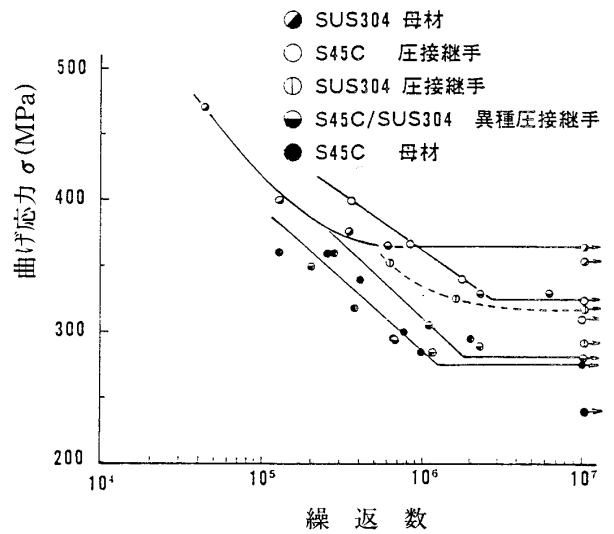


図5 圧接継手のS-N曲線

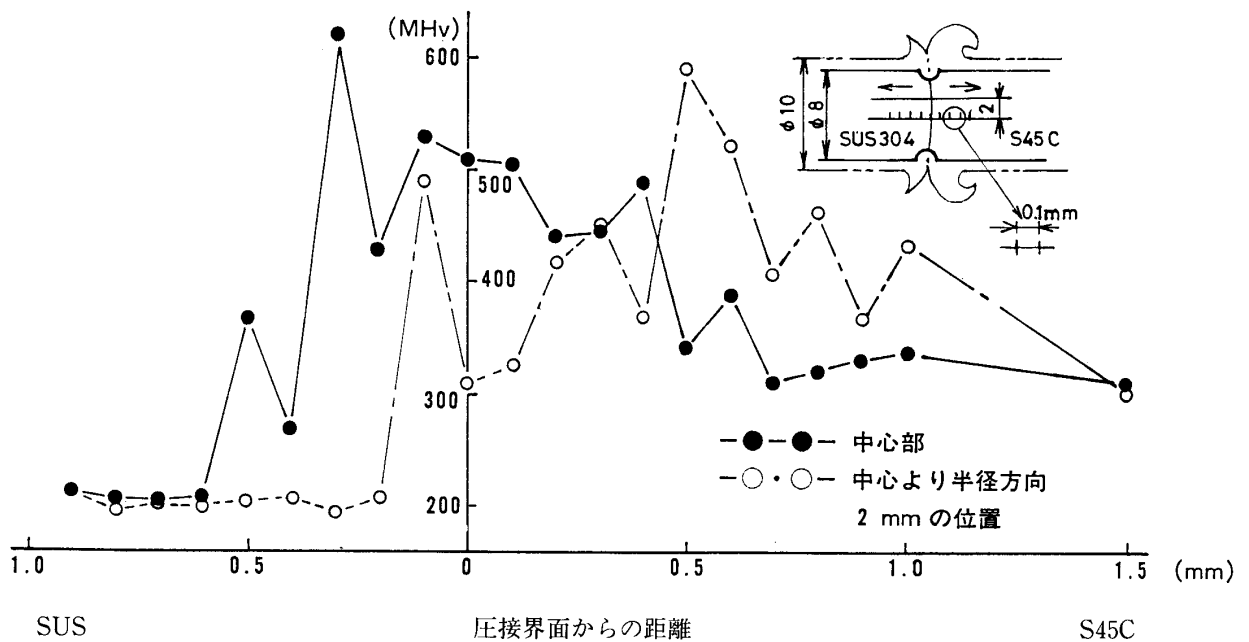


図6 圧接部近傍の硬さ分布(S45C/SUS304の場合)

図6にS45C/SUS304圧接部近傍の硬さ分布を示す。前述した方法で製作した圧接継手を軸中心部で切断して、圧接界面付近を両材料それぞれ軸方向に対して硬さの測定を行った。図中の0mmの位置は腐食液(5%ピクリン酸アルコール)を用いて接合部を判断した。なお、継手外観より判断した両材料の接合部(図1の切欠き部R1)と一致する。

図より接合部近傍の硬さは、著しく高い値を示す硬化層の存在することがわかる。このかたさ分布から硬化層は中心と外周部とでは幅に違いがあり、中心部で約1.3mm、中心より2mm外側で約1.6mmとなっている。また、最硬度値は中心部でSUS304側に0.3mm、中心より半径方向2mmの位置でS45C側に0.5mmとなっており、約0.8mmの違いが半径方向の位置によってみられる。接合部で硬さが上昇し始める位置は、中心部で0.4mm~0.5mm、これより半径方向に2mmの位置で0.1mm~0.2mmSUS304側にあり、また、S45C側へは中心部で約0.6mm、半径方向に2mmの位置では1.0mmとなっている。これは各材料の熱伝導率の差異により、摩擦熱の伝播、蓄積状態が異なることから、接合部で発生する軟化層はS45C側で厚く、SUS304側で薄くなるものと考えられる。図2に示す圧接部のバリ発生状態からも理解できる。また、半径方向の位置により、軸方向に対する硬さの変化が異なる原因ともなり、熱伝導率の高いS45C側に幅広い高硬度部が生じるものと考えられる。

5-2 接合部の機構

図7は接合部(S45C/SUS304)をCr元素で線分析した結果を示したものであるが、図からステンレス材とS45C材の間にステンレス母材とは異なったCr元素を含んだ中間層のあることがわかる。この中間層は接合部全域(半径方向)にみることが出来る。また、この現象は微少ではあるがNi元素においても確認された。図中の中間層とS45C材の境界部が図6中の0位置に対応することから、中間層の硬さは、S45C材の焼入れ材の硬さと同じような硬さを示すことがわかる。この中間層はピクリン酸などの腐食液では腐食されにくく、顕微鏡観察においてステンレス材と見誤りやすい層である。中間層の生成については、圧接にともなって発生する熱(約1150℃とされている)<sup>9)</sup>による元素移動、拡散及び軟化状態での機械的応力からのねじり変形などの影響によるものと考えられる。

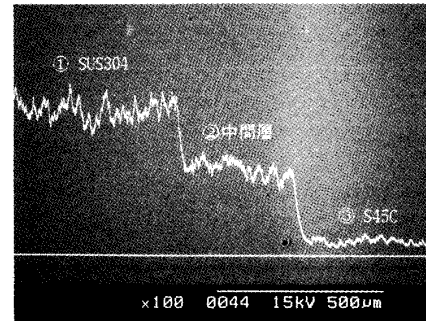


図7 異種圧接継手接合部の線分析(Cr)

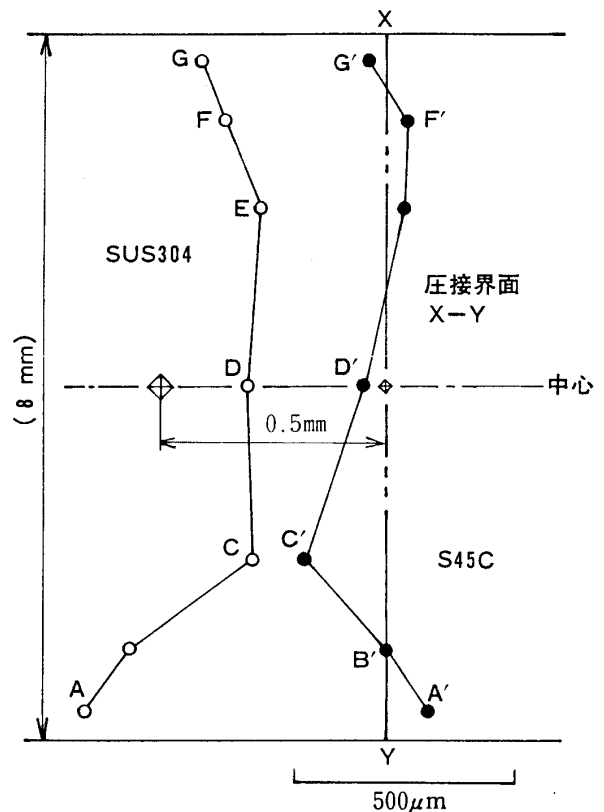


図8 異種圧接継手(S45C/SUS304)の中間層

図7の線分析の結果を半径方向全体において示したのが図8である。測定にあたっては、接合部全体を顕微鏡で確かめながら軸中心部圧接界面上にピッカース圧痕を付し、測定基準とした。両材料接合部に介在する中間層は軸中心部が薄く、半径方向に広がりを見せて形成していることがわかる。この層の変化は軸回転での周速度、すなわち外周部が速く、中心部では0であることから、熱発生の状態が異なるためと考える。

以上のように異種材料(S45C/SUS304)の接合では圧接時の摩擦熱による熱硬化は、熱伝導率などの違いによりS45C材側が数mmにも及ぶ硬化層を持つ

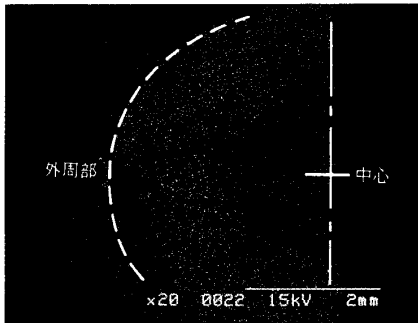


図9 疲労破面の面分析

ことがわかった。圧接界面には、摩擦熱で SUS304 材からは主な元素である Cr および微量の Ni 元素が析出した中間層が見いだされた。一方、S45C 材は十分な摩擦熱を吸収し、溶融した金属はこの中間層と効果的に作用するものとする。図9は異種圧接継ぎ手の疲労試験で破断した SUS304 側の破断部を破断面側から研磨により 0.25mm 除去したときの Cr 元素による面分析を示したものである。破断面から 0.25mm の研磨により中心部では Cr 元素が消失しているが、周辺では Cr 元素が認められる。このことから中間層は、図8に示すように S45C 側に中心部が突きでた凸形の形状を有することがわかる。この圧接界面に形成される中間層はよく混練された薄い形成層となり両材料の接合効果を引き起こしているものとする。なお、接合効果については、今後、他の材料を含めたより詳細な検討が必要である。

### 5-3 疲労破面の観察

図10に圧接継ぎ手試験片の疲労破面の様子を示す。同種圧接 S45C/S45C、SUS304/SUS304 の疲労破面は比較的なめらかで、最後の破断部分(小さな割れをもつ粗い面)を破面にみる程度である。一方、異種圧接継ぎ手 S45C/SUS304 の疲労破面は、この同種材の圧接の場合と異なり比較的凹凸のある圧接界面での剥離破断を起こしている。また、繰り返し応力  $\sigma$  が高いときは大きい剥離を生じており、破面部は結果として凹凸の激しい形状を示していた(図略)。また、破断部の断面形状を観察すると図11で示すようにステンレス側は切欠部を多く付けたコーン状の破断を起こしているが、S45C側破断部周辺は切欠部を欠いた破断形態をしていることがわかった。

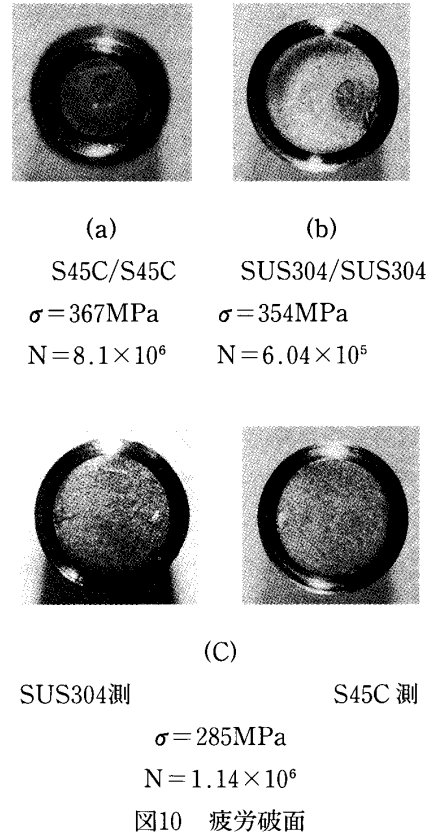


図10 疲労破面

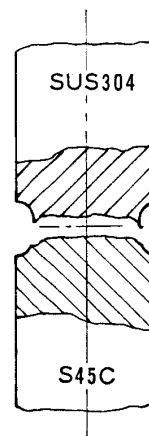


図11 継手破断部の断面形状

## 6. むすび

炭素鋼 (S45C) とオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS304) の圧接継ぎ手の製作を行い回転曲げ疲労試験による圧接継ぎ手の疲労限および接合部の機構などについて検討を行った。得られた主な結果をまとめると次のとおりである。

1) 機械構造用炭素鋼 (S45C) の圧接継ぎ手における

疲労限は母材の疲労限を大きく上回る。

- 2) 異種圧接継ぎ手 (S 4 5 C / S U S 3 0 4) の疲労限は両母材の中間の疲労限を示し、疲労限の低い材料に依存する。
- 3) S 4 5 C材とS U S 3 0 4材の圧接界面に、S U S 3 0 4材から拡散によってC r元素と微量のN i元素を含む形成層を確認した。
- 4) 形成層の中心にS 4 5 Cが凸状に形成していることが確かめられた。

最後に、本研究にあたって、機器使用の便宜を図っていただいた山根健治助教授に深く感謝いたします。なお、実験に協力された本校卒業生 穴瀬直二、岩本広己両君に深く感謝をします。

## 7. 文 献

- 1) 石橋ほか 2 名：日本機械学会論文集, 47-416(1982), 548
- 2) 中山ほか 3 名：材料, 30-329 (1982), 76
- 3) 中山ほか 4 名：日本機械学会論文集, 834-3(1984), 18
- 4) 森重           : 研究報告, 34 (1988), 94
- 5) 石橋ほか 2 名：日本機械学会論文集, 48-434(1983), 1588

(平成元年 9 月 25 日 受理)