

摩擦圧接における圧接部の観察について

森 重 修 一*

Observation of the Welded Joint in Friction Welding

Shuichi MORISHIGE

Abstract

Friction welding method, which is a method to weld two materials by the use of the friction heat generated by relative motion, has been adopted to bring an objective material rotating at high speed into contact with another objective material under a constant pressure. This report, using the trial friction machine, aims at measuring a distribution of hardness of the welded part and at finding out the mechanism of heating and welding by investigating metallic texture with the optical microscope.

1. まえがき

摩擦圧接法は圧接材を高速で回転させ、これにもう一方の被圧接材を一定加圧力の下で接触させる。それによって発生する摩擦熱を有効に利用して互いの圧接材を加熱・溶着させる方法である。この方法は第二次大戦中ドイツで熱可塑性合成樹脂パイプの突合わせ継手に応用されたといわれている。1956年頃よりソ連において金属接合の研究開発がなされ、その後英国、米国と同方法による圧接機が試作され開発研究が進められた。

わが国では1961年頃導入され、基礎応用研究¹⁾²⁾が続けられた。今日では摩擦圧接法は機械部品の製作に広く実用に供されている。特に、同種材料や同系材質についての圧接部の疲労強度、継手強度などの応用分野での報告³⁾⁴⁾は多数みられる。石橋ら⁵⁾は圧接材の引張試験および回転曲げ疲労試験を行って、母材以上の強さを得るための圧接条件を摩擦加熱中の摩擦係数と其の変化に着目し、十分な強さを得るための圧接条件を求めている。しかし

ながら圧接部の溶着機構については、いまだ十分に明らかでない。蓮井ら⁶⁾による摩擦圧接現象や蓮井・福島ら⁷⁾による摩擦圧接における摩擦面温度と圧接部の構造についての報告が見られる。

本報告では圧接部の溶着状態と溶着機構を基礎的に解明するため、圧接材料として炭素鋼および合金鋼を採用し、圧接部近傍の顕微鏡観察、硬度分布などについて測定し、検討を行ったので、その結果について報告する。

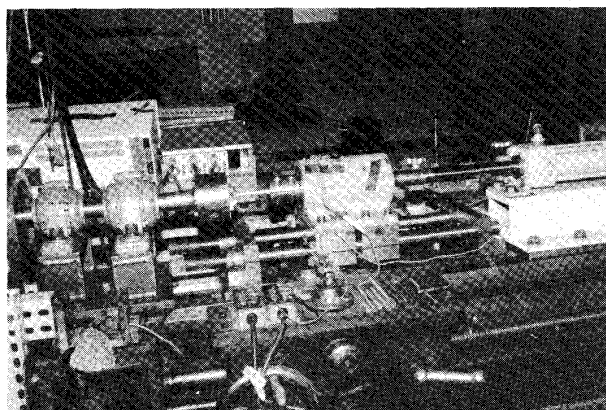


図1 試作摩擦圧接機

*宇部工業高等専門学校機械工学科

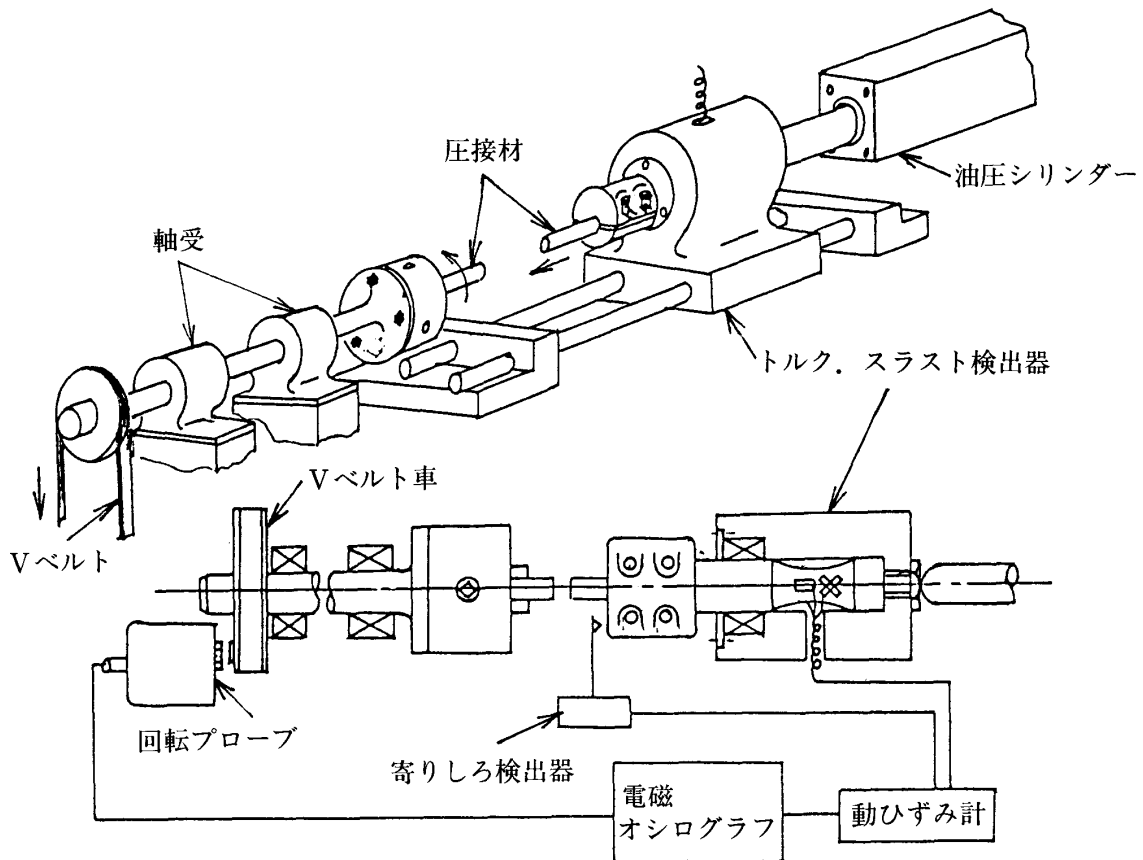


図 2 試作摩擦圧接機概略

2. 摩擦圧接機および圧接方法

2.1 摩擦圧接機

本実験には旋盤のベッドを利用した中速域摩擦圧接機を試作し、実験に使用した。図1に試作した摩擦圧接機を示す。図2は摩擦圧接機の概略図であるが、軸回転数1780rpm、圧接材の直径10mm、使用油圧圧力70kg/cm²、最大推力1200kg、主軸用電動機3.7KW(ディスク形ばね制動)である。また、採用した加圧サイクルは段階的サイクルで、摩擦圧接にともなう変動は摩擦加熱圧力(スラスト)、摩擦トルク、寄りしろ(圧接部の縮み量)、回転数の変化を測定することにより解析した。図3は炭素鋼同志(S45C材)を圧接した場合の圧接工程の時間変化に対する寄りしろ、抵抗などの現象状態を示したものであるが、各材料においても同じような傾向変化を生じる。トルク値において図中④に急激な高値の変化が見られるが、これは接合面が摩擦熱で軟化状態になり、接合面全体に溶着の拡がり開始した時期である。図中⑤では接

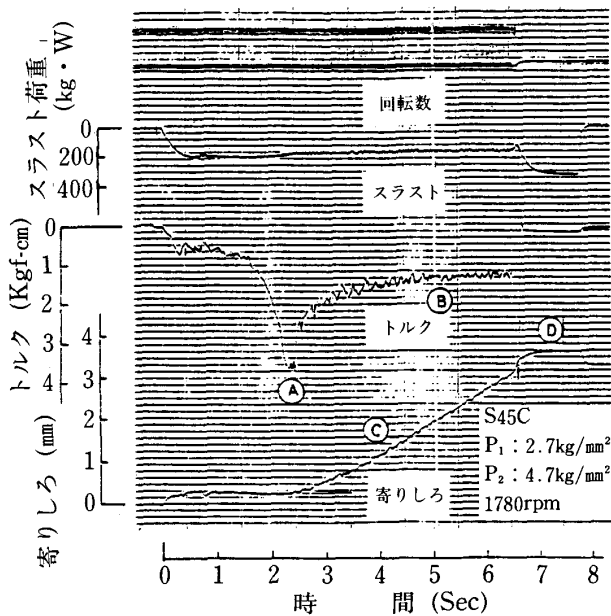


図 3 圧接工程の時間変化

合面に安定した軟化層が形成され、トルク値は漸次減少に向い、その後は安定した一定の値を示す。また、寄りしろ図中◎は摩擦熱による材料の軟化およびスラストにより直線的な増加傾向を示す。なお図中Ⓣはアプセット圧力の再加圧による寄りしろの変化を示したものである。

2.2 圧接方法

本実験に採用した圧接方法は、同一断面形状の突合せ法であり、加圧しながら相対的に回転させ、接触面に生じた摩擦熱によって接触部を加熱して圧接するものである。したがって一方の圧接材には加圧しながら押しつける力を加える。このときの押しつけ力を摩擦加熱圧力 (P_1 : kg/mm^2) と呼ぶことにする。接触面に摩擦熱が発生して接合可能な状態に到達したとき (この間に要する時間を t_1 (sec)) 瞬時に回転を停止し、さらに軸方向に高い押しつけ力を加える。これをアプセット圧力 (P_2 : kg/mm^2) と呼ぶことにする。圧接材が接触してからアプセット圧力の加圧を終了するまでの時間を圧接に要する時間 t_2 (sec) とする。なお、この圧接工程で摩擦中の減耗、寄りしろおよびアプセット寄りしろの和を全寄りしろとする。また、摩擦加熱時間 t_1 (sec) の設定は、予め供試材料で予備実験を行って、圧接工程中の摩擦トルクの変化、および接合面から押し出されてくるバリの温度を放射温度計 (株ミノルタカメラ) で測定し、決定した。

3. 実験方法および実験条件

実験に用いた圧接材の化学成分および硬さを表1に示す。圧接材の直径は10mmとし、接合面は切削によって $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ (R_{max}) 範囲に仕上げた。圧接に際しては、圧

接材の接合面 (突合せ面) を十分洗浄し脱脂した。実験条件として供試材料はS10C, S25C, S45Cの炭素鋼およびSUS304のオーステナイト系ステンレス鋼であり、炭素鋼同志の圧接では摩擦加熱圧力 (P_1): 1.6, 2.0, 2.7 (kg/mm^2), アプセット圧力 (P_2): 2.16, 4.0, 4.7 (kg/mm^2), 回転数1780rpmとし、S45CとSUS304の異種圧接では P_1 : 2.7 kg/mm^2 , P_2 : 4.7 kg/mm^2 , 回転数1780rpmを採用した。図4はS45C材同志圧接の代表例を写真で示したものである。この写真から軟化した金属は摩擦加熱時間の増加および軸方向へのスラストにより、軟化金属が外周へ押し出されてバリを形成しているのがわかる。なお圧接部の硬さ測定はマイクロビッカース硬度計 (株島津製作所) を使用し、圧接部軸断面の組織は5%ピクルルで腐食して光学顕微鏡 (オリンパス工業株) で観察を行った。

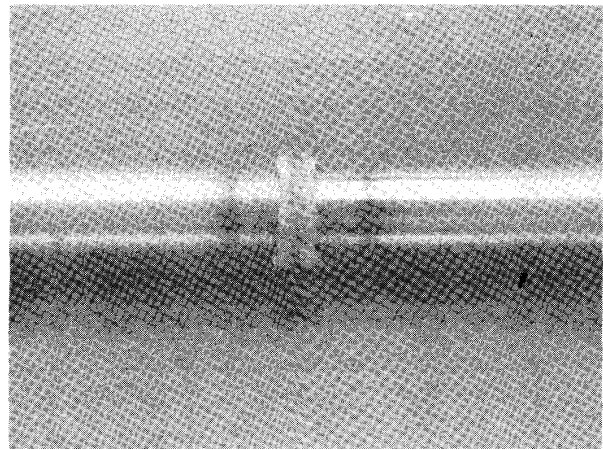


図4 圧接継手 (S45C)

表1 被圧接材の化学成分および硬さ

材種	化学成分							硬さ Hv
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	
S10C	0.11	0.16	0.30	0.005	0.014	—	—	138
S25C	0.25	0.32	0.53	0.010	0.023	—	—	163
S45C	0.46	0.21	0.71	0.018	0.022	—	—	187
SUS304	0.073	0.23	1.93	—	—	8.18	17.94	203

4. 実験結果および考察

圧接部の硬さ測定は、圧接部を軸方向に平行に中央部で切断し、圧接界面を境に左右軸方向にそれぞれ10mmまでピッチ0.5mmの間隔で圧接中心部を測定荷重100g、荷重保持時間5secで測定した。また、軸中心より4mm離れた外周部を同様に測定を行った。

4.1 S10Cの場合

図5はS10C材の圧接部における軸断面の硬さの変化を示したものである。図5—(a)は圧接条件 $P_1: 1.6\text{kg/mm}^2$, $P_2: 2.16\text{kg/mm}^2$ で圧接した場合であるが、圧接界面の硬さはHv203である。圧接界面の広い範囲が硬化しており、勾配は緩やかである。また、中心部と外周部のそれぞれの硬さにバラツキがあり、接合面全体の軟化が不十分で、このため鍛接効果も有効に働かず熱影響幅の広い硬さ分布を示すものと考ええる。図5—(b)は圧接条件 $P_1: 2.0\text{kg/mm}^2$, $P_2: 4.0\text{kg/mm}^2$ の場合であるが、圧接界面の硬さはHv206である。中心部と外周部の硬さのバラツキは少く、圧接界面付近約6mmの範囲に熱影響部とみられる硬さの高い分布を示している。図5—(c)は圧接条件 $P_1: 2.7\text{kg/mm}^2$, $P_2: 4.7\text{kg/mm}^2$ の場合である。圧接界面付近約6

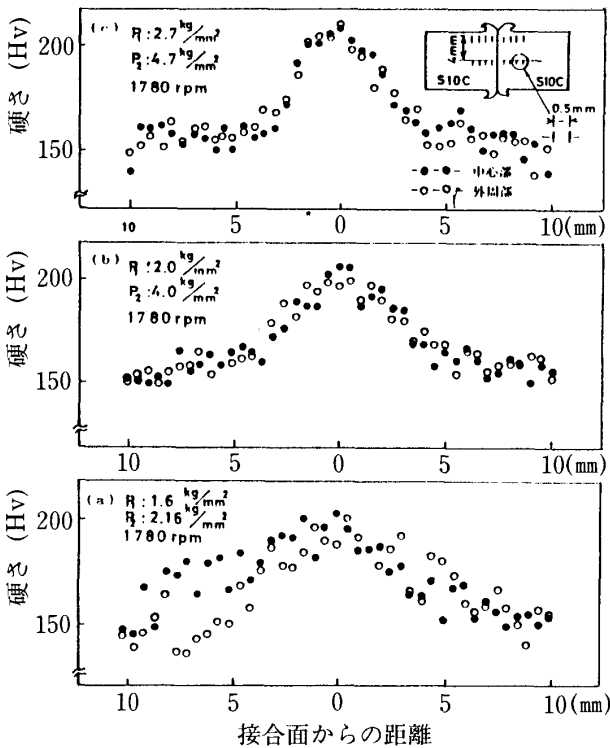


図5 圧接部の硬さ分布 (S10C)

mmの範囲が高い硬さの分布を示し、圧接界面の硬さはHv209である。硬さの分布に圧接界面から急激な硬さの低下がみられ、なお後図9に示す(c)の組織変化と非常によく対応していることがわかる。また中心部と外周部において硬さ分布は同じ傾向を示しているように摩擦熱による温度が中心部、外周部において一様な温度分布をしているものとする。

4.2 S25Cの場合

図6はS25C材同志圧接の圧接部軸断面の中心部における硬さの分布を示す。図6—(a)は圧接条件 $P_1: 1.6\text{kg/mm}^2$, $P_2: 2.16\text{kg/mm}^2$ で圧接した場合であるが、圧接界面に硬さの高値があり、軸方向へ漸次低下している。圧接界面付近約7mmの範囲に高い硬さがみられる。圧接界面の硬さはHv215と高い値を示す。母材の硬さとの差を ΔH_v で表わすと、 $\Delta H_v 52$ である。図6—(b)は $P_1: 2.0\text{kg/mm}^2$, $P_2: 4.0\text{kg/mm}^2$ で圧接した場合であるが、圧接界面の硬さが最も高くHv214である。圧接界面付近約7mmの範囲が母材の硬さよりも硬化している。図6—(c)は $P_1: 2.7\text{kg/mm}^2$, $P_2: 4.7\text{kg/mm}^2$ で圧接した場合である。圧接界面にHv213の高い値を示す。S25C材の場合、圧接条件の違いによる硬さの分布に差異は少なく、同じ傾向を

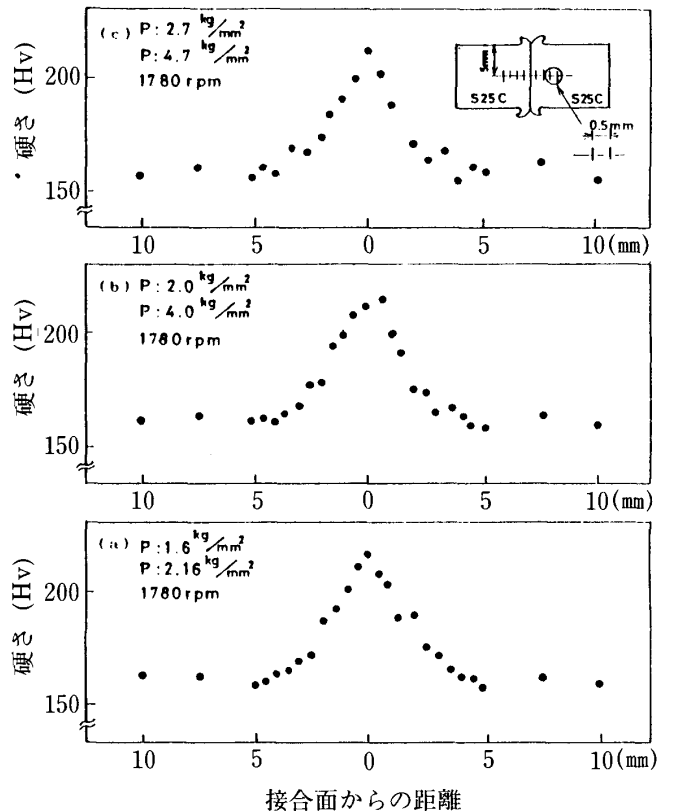


図6 圧接部の硬さ分布 (S25C)

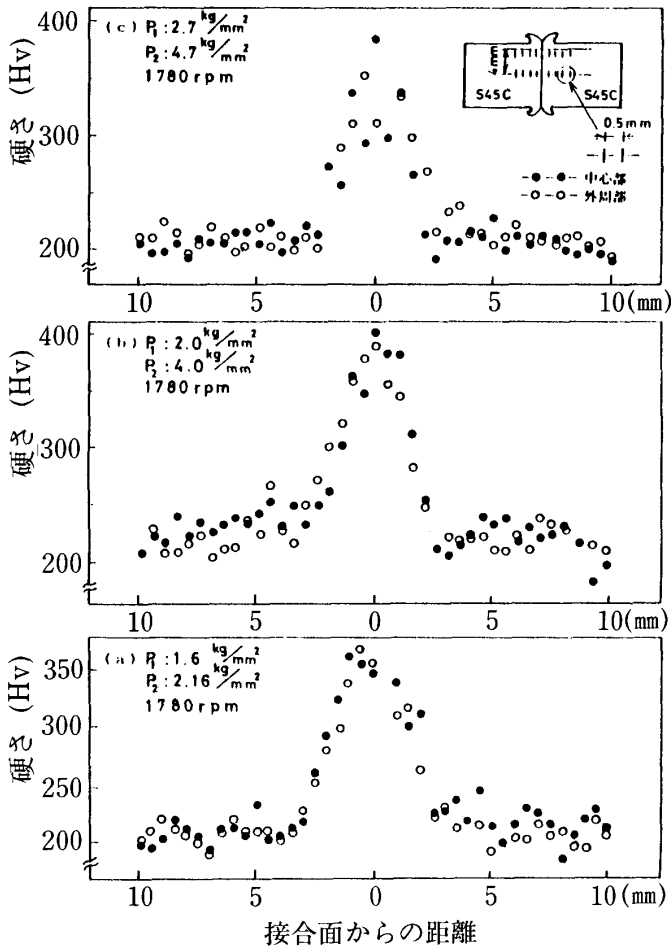


図7 圧接部の硬さ分布 (S45C)

示す。圧接界面付近約7mmの範囲が熱の影響をうけて、特に硬化しているが圧接時の温度勾配が急であるのと、軟化部に働く押しつけ力による塑性変形、熱伝導率が影響しているものと考ええる。

4.3 S45Cの場合

図7はS45C材同志圧接の圧接部軸断面の硬さの変化を示したものである。図7—(a)は圧接条件 $P_1 : 1.6\text{kg/mm}^2$, $P_2 : 2.16\text{kg/mm}^2$ で圧接した場合である。硬さ分布は圧接界面にHv360の高値があり、 $\Delta\text{Hv}173$ である。圧接界面付近約5.3mmの範囲が硬化しており、中心部、外周部の硬さのバラツキが少ないことから接合面の温度差は少ないものと考ええる。図7—(b)は $P_1 : 2.0\text{kg/mm}^2$, $P_2 : 4.0\text{kg/mm}^2$ で圧接した場合であるが、圧接界面の硬さはHv400である。圧接界面付近約5mmの範囲が特に硬化しており温度勾配が急であることがうかがえる。図7—(c)は $P_1 : 2.7\text{kg/mm}^2$, $P_2 : 4.7\text{kg/mm}^2$ で圧接した場合であるが、圧接界面付近約4.4mmの範囲に高い硬さの分布があり、中心部の

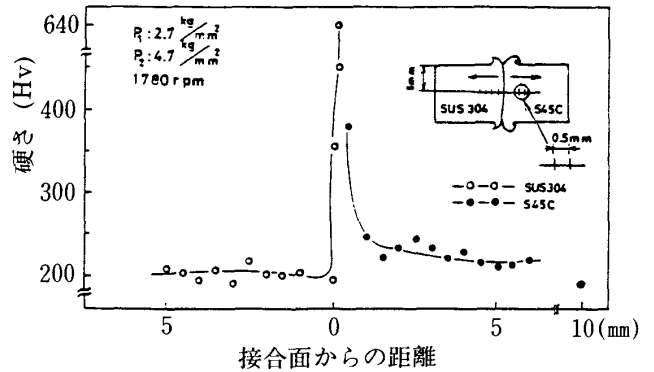


図8 圧接部の硬さ分布 (S45C/SUS304)

硬さ分布は複雑な形状をしている。これは局部的に熱せられた軟化域が押しつけ力により塑性変形し、同時に比較的急速に冷却作用が生じることから、その圧接部の金属組織も変化しているものと考ええる。なお、S45C材同志圧接では摩擦加熱圧力、アプセット圧力の増加に伴って全寄りしろも増し、圧接界面の軟化域は薄くなり、硬さ分布の急しゅんな熱影響部を形成するものと考ええる。

4.4 S45C材/SUS304の場合

図8はS45C材とSUS304材の異種材料の圧接を圧接条件 $P_1 : 2.7\text{kg/mm}^2$, $P_2 : 4.7\text{kg/mm}^2$, 回転数1780rpmで行った場合である。両材料の圧接界面において、軸中心部の硬さ分布に非対称が生じており、同種材料での対称形状と比較的特徴的である。SUS304材の硬さは、鍛造効果の影響で圧接界面極近傍において硬さの上昇があるが軸方向の硬さの変化は少ない。S45C材は圧接界面で高い値を示した後、軸方向約1mmの範囲に硬さの上昇がみられ、その後10mm付近まで母材硬さより若干高い値である。圧接界面の狭い範囲で硬さが上昇しており、Hv640である。圧接過程において発生した摩擦熱が、SUS304材の熱伝導率が小さいことから、S45CとSUS304の接合面で局部的に高温になり急しゅんな温度勾配が生じたものと考ええる。

5. 圧接部付近の顕微鏡観察

図9—(a), (b), (c)はS10C材同志圧接した場合の圧接部付近の組織である。図中圧接界面を矢印の位置0mmとする。圧接界面を境に軸方向へ1mm, 2mm, 3mmの位置の組織変化を観察した。図9—(a)は $P_1 : 1.6\text{kg/mm}^2$, $P_2 : 2.16\text{kg/mm}^2$, 図9—(b)は $P_1 : 2.0\text{kg/mm}^2$, $P_2 : 4.0\text{kg/mm}^2$, 図9—(c)は $P_1 : 2.7\text{kg/mm}^2$, $P_2 : 4.7\text{kg/mm}^2$ の条件で圧接した場合であるが、摩擦加熱圧力およびアプセット圧

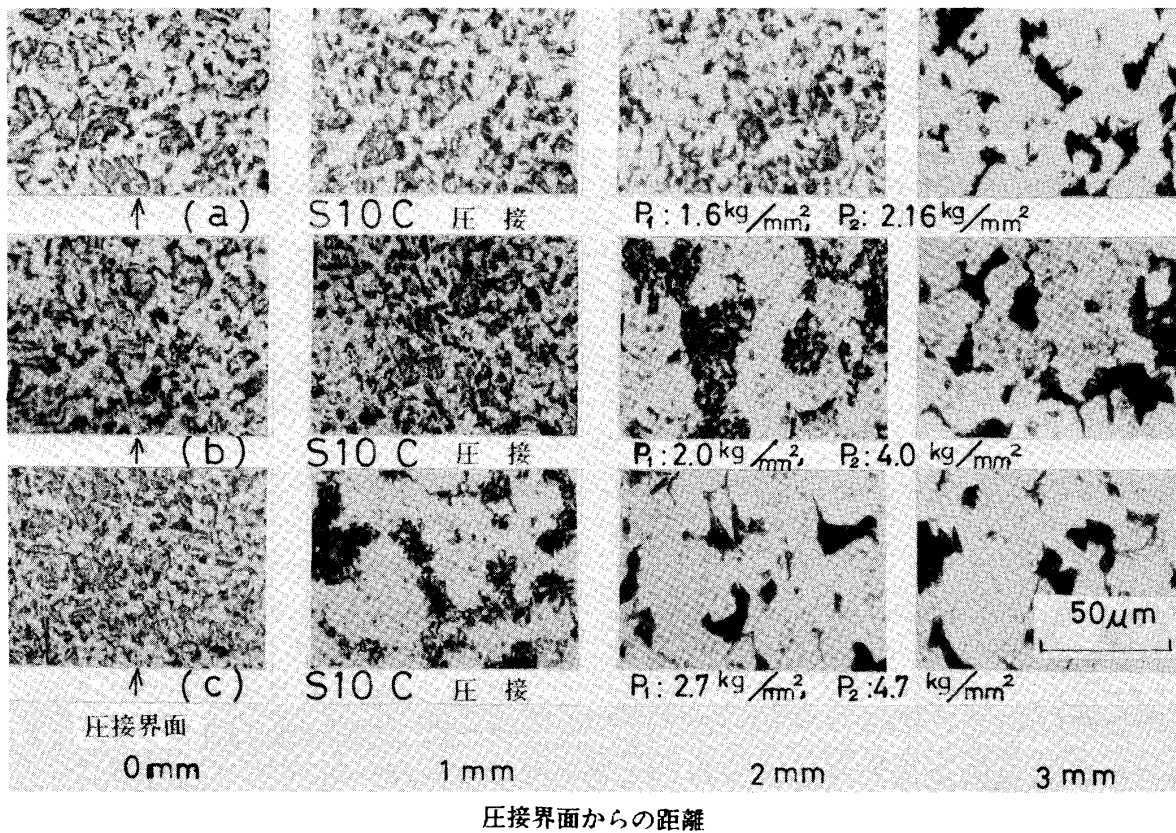


図9 圧接部付近の顕微鏡組織 (S10C)

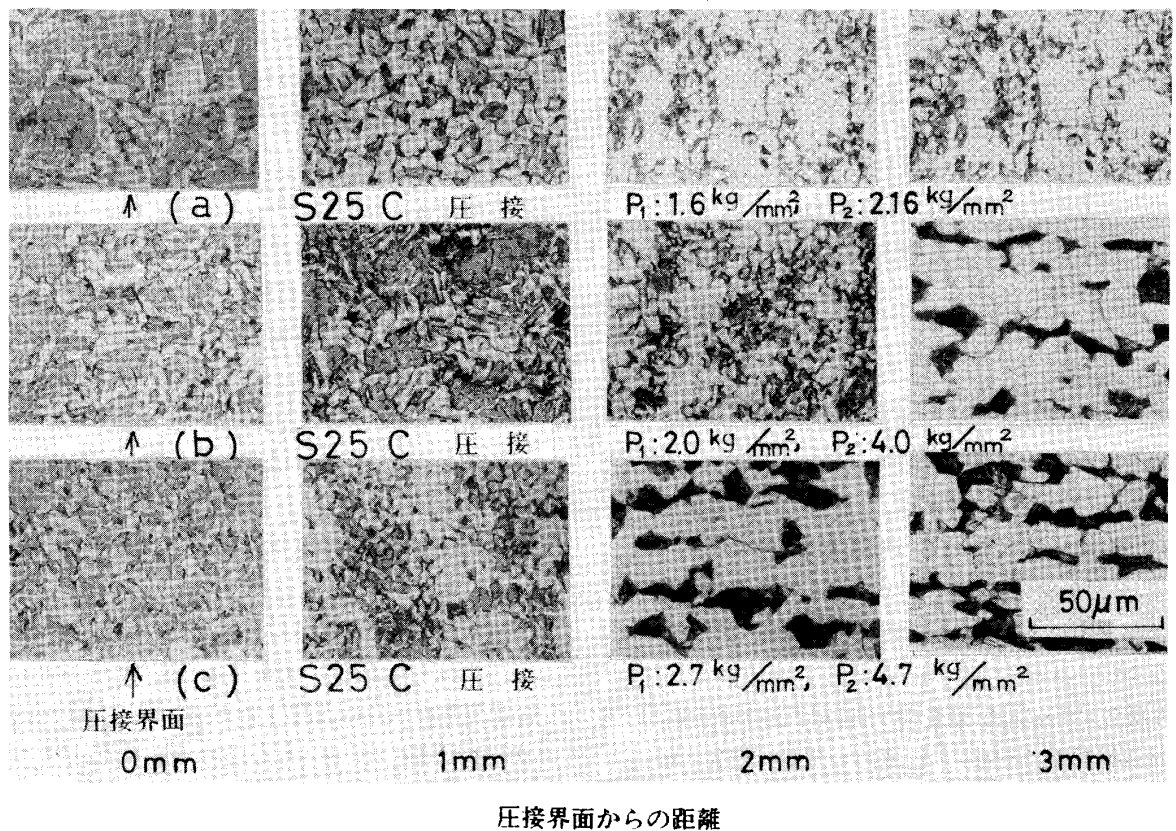


図10 圧接部付近の顕微鏡組織 (S25C)

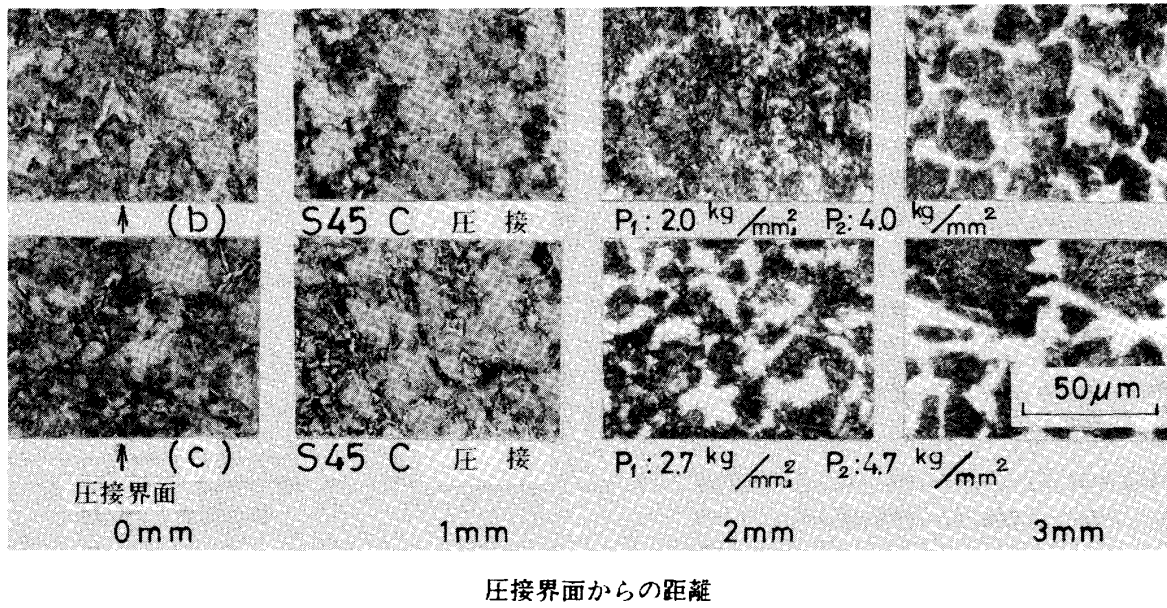


図11 圧接部付近の顕微鏡組織 (S45C)

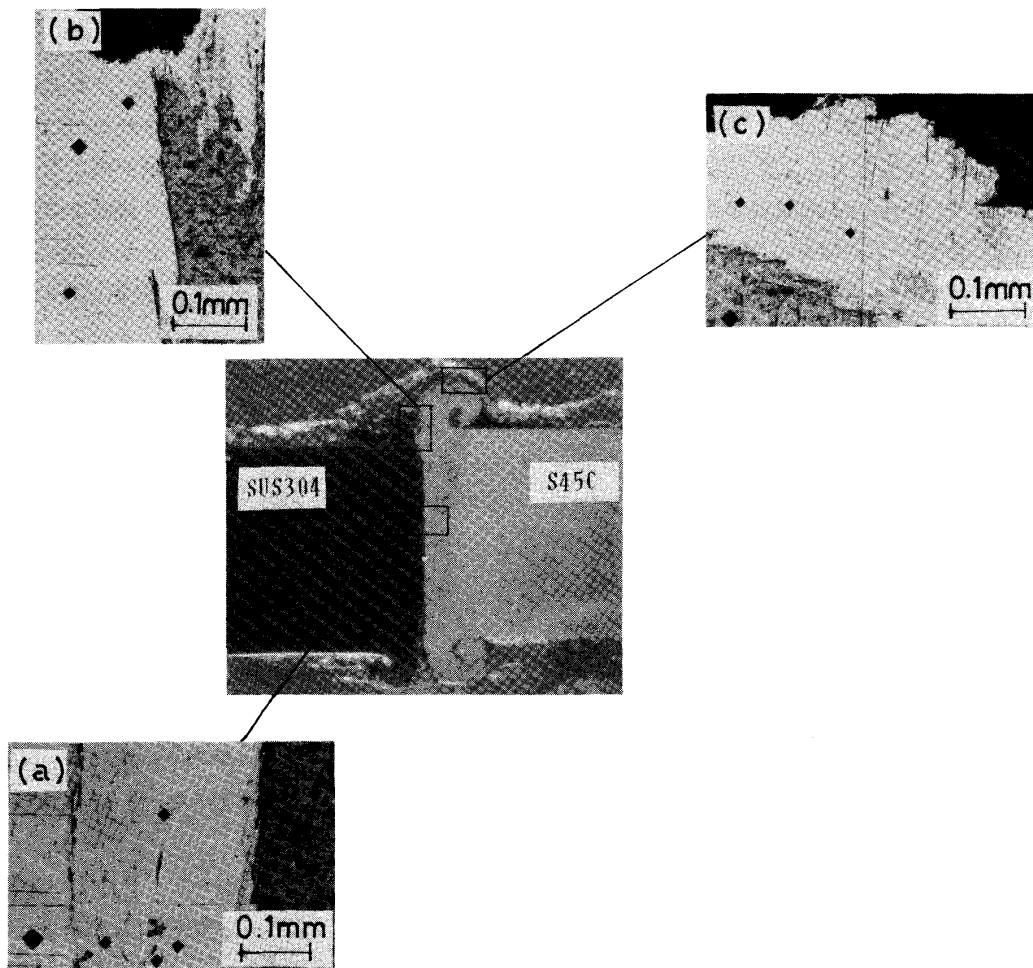


図12 異種材料の圧接部の顕微鏡組織 (S45C/SUS304)

力が増加すると、摩擦熱による熱影響は少なくなることが粗大パーライト組織からうかがえる。接合面は、いずれの圧接条件においても両圧接材の結合が完全になされ、圧接界面には微細に混合された層を形成していることがわかる。図10—(a), (b), (c)はS25C材を同志圧接した場合の圧接部付近の組織である。図10—(a)は圧接条件 $P_1: 1.6 \text{ kg/mm}^2$, $P_2: 2.16 \text{ kg/mm}^2$ の場合であるが、圧接界面0 mm付近に粗大化したパーライト組織がみられ、1 mm付近では結晶粒が微細になり、フェライト、パーライトの混在する組織となる。2 mm, 3 mmの位置では微細なパーライト組織となる。図10—(b)は $P_1: 2.0 \text{ kg/mm}^2$, $P_2: 4.0 \text{ kg/mm}^2$, 図10—(c)は $P_1: 2.7 \text{ kg/mm}^2$, $P_2: 4.7 \text{ kg/mm}^2$ の条件で圧接した場合であるが、摩擦加熱圧力、アプセット圧力が増加すると圧接界面付近に微細なフェライト、パーライト組織が形成され、熱影響幅はしだいに狭くなる。このことは、摩擦加熱圧力によって接合面に生成する過熱部分が、バリとして外周へ押し出され、さらにアプセット圧力の鍛接効果によって圧接界面に薄い層を形成することと一致するものと考えられる。図11—(b), (c)はS45C材を同志圧接した場合である。図11—(b)は $P_1: 2.0 \text{ kg/mm}^2$, $P_2: 4.0 \text{ kg/mm}^2$, 図11—(c)は $P_1: 2.7 \text{ kg/mm}^2$, $P_2: 4.7 \text{ kg/mm}^2$ の条件で圧接した場合であるが、圧接界面付近は過熱組織を呈しており、2 mm, 3 mm付近は微細な層状パーライトがみられる。なお、この付近の組織変化と（硬さの分布）図7—(b), (c)の硬さの減少傾向とよく対応している。また、摩擦圧接中に発生するバリの温度を放射温度計で測定した結果約 1200°C であった。炭素量と熱伝導率との関係において、炭素量が増加するにつれて高温度における熱伝導率は低下する⁹⁾といわれることより、本実験に採用した比較的炭素含有量の多い鋼 (S45C) においては、熱伝導率が低いため圧接時に発生する摩擦熱によって軟化が極狭い範囲の圧接界面近傍に起こり、高い押しつけ力すなわちアプセット圧力の鍛接力とが互いに影響して圧接性に有効に作用するものと考えられる。図12は炭素鋼 (S45C) とオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS304) の異種材料の圧接を $P_1: 2.7 \text{ kg/mm}^2$, $P_2: 4.7 \text{ kg/mm}^2$, 回転数1780rpmの条件で行った場合の圧接部の顕微鏡組織を示す。写真中央は、圧接部を軸方向に平行に切断したもので両材料の圧接界面を明確にするため5%ピクルルでS45C材の腐食を行った。両材料の圧接界面は、S45C材がSUS304材に凸状に僅か押し込まれた形の特徴のある圧接界面を呈する。本圧接条件では軸中心部において0.25 mm S45C材側に押し込まれていた。この押し込まれた薄い

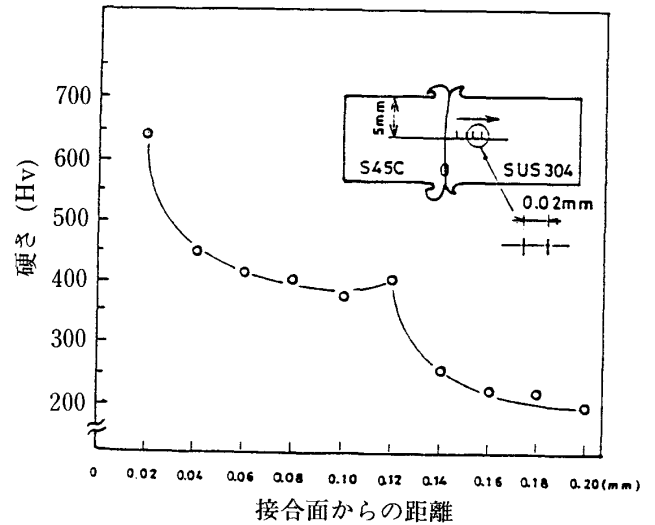


図13 圧接界面の硬さ分布

層を詳細に硬さ測定した結果を後図13に示す。SUS304材とS45C材の圧接界面の軸中心部、図12—(a)で約 $120 \mu\text{m}$ 、外周部、12—(b)で約 $70 \mu\text{m}$ の極薄い層が両材料の圧接界面にあることを見出した。なお、図12—(c)にみられるように、この薄い層はS45C材のバリの表面に多く溶着しているのがマイクロ組織で観察された。またSUS304材のバリの表面でも同じ高い硬さの値が測定されることから、この薄い層は両方の材料のバリ表面に溶着現象が生じるものと思われる。図13に示すように、硬さの測定結果より、圧接界面中心部約 $120 \mu\text{m}$ の範囲にHv400~640の高い値がある。さらに急激な放熱、空冷した両圧接材のバリ部に溶着した薄い層の硬さは、Hv642~681とさらに高い値が測定された。このような薄い層の生成は、SUS304材とS45C材の熱伝導率の大きな違いにより、圧接界面に相当高い局部的摩擦熱の上昇が起り、過熱組織として生成された金属化合物であると考えられる。今後、異種材料の圧接においては詳細な検討が必要である。

6. むすび

ブレーキ法による摩擦圧接法において継手圧接部の溶着、機構の検討を行なった。得られた結果をまとめると、つぎのとおりである。

- 1) S10Cの圧接において、 $P_1: 1.6 \text{ kg/mm}^2$, $P_2: 2.16 \text{ kg/mm}^2$ の低い圧接条件では、圧接部の中心部、外周部の硬さに広い範囲のバラツキのある熱影響層を形成する。 $P_1: 2.0 \text{ kg/mm}^2$, $P_2: 4.0 \text{ kg/mm}^2$ および $P_1: 2.7 \text{ kg/mm}^2$, $P_2: 4.7 \text{ kg/mm}^2$ の圧接条件では摩擦加熱圧

力, アプセット圧力の増加に伴って, 温度勾配が急になり, 圧接界面に約 6 mm の幅をもつ硬化部の存在が認められた。これらの形成には熱による影響があるものと考えられる。

2) S25C の圧接においては, 圧接条件の違いによる硬さ分布の変化は少ない。P₁: 1.6kg/mm², P₂: 2.16kg/mm² では, 圧接界面から 3 mm 付近まで熱の影響を受けた粗大化した結晶粒がみられる。P₁: 2.7kg/mm², P₂: 4.7kg/mm² では圧接界面から 1 mm 付近に微細な結晶粒がみられ, 2 mm 付近では母材組織となっていることがわかった。

3) 炭素含有量の比較的多い S45C の圧接では, 他の炭素鋼に比較して熱伝導率が低いため局所的な発熱を生じ, 圧接界面は十分軟化することがわかった。また, アプセット圧力の高い条件ほど, 鍛接力が有効に作用し, 過熱組織部は押し出され, 圧接部に細い結晶粒をもつ硬化組織が観察された。

4) S45C/SUS304 の異種材料の場合において, 圧接条件 P₁: 2.7kg/mm², P₂: 4.7kg/mm² では圧接界面に非対称な硬さ分布を生じ, S45C 材側に SUS304 材が約 0.25mm 押し込んだ形の圧接界面を形成し, 両金属の間に 70μm

~120μm の極硬い (硬さ HV400~642) 薄い層の存在することがわかった。

終わりに本研究に御便宜をいただいた山根健治助教授に心より感謝いたします。また, 圧接機の製作, 実験等に協力された本校卒業生諸君に感謝する。

参考文献

- 1) 中村: 日本機械学会誌, 69-564 (1966), 52.
- 2) 中村: 精密機械, 30-8 (1964), 10.
- 3) 塩谷, ほか 2 名: 溶接学会誌, 34-11 (1964), 1197.
- 4) 中山, ほか 3 名: 大阪産業大学論集, 59 (1980), 12.
- 5) 石橋, ほか 2 名: 日本機械学会論文集, 47-416 (1981), 548.
- 6) 蓮井, ほか 2 名: 金属材料技術研究所報告, 11-2 (1968), 203.
- 7) 蓮井・福島: 金属材料技術研究所報告, 6-2 (1969), 100.
- 8) 増本: 東北大学理科報告, 16 (1924), 419.

(昭和 62 年 9 月 20 日受理)