

異種材摩擦圧接における接合現象と母材降伏強度との関連*

木村 真晃**, 日下 正広**, 瀬尾 健二**, 富士 明良***

Relationship between Joining Phenomena and Yield Strength of Substrates of Dissimilar Friction Welding*

by KIMURA Masaaki**, KUSAKA Masahiro**, SEO Kenji** and FUJI Akiyoshi***

The present paper describes the relationship between joining phenomena, i.e. the friction stage and the yield strength of substrates of dissimilar friction welding. The materials used were oxygen free copper (OFC), commercially pure titanium (P-Ti), commercially pure aluminum (A1050) and type 7075 aluminum alloy (A7075). The combinations of P-Ti/OFC, A1050/OFC and A7075/OFC were joined by using a conventional friction welding machine. The same friction welding condition was used for all combinations.

Main conclusions are obtained as follows.

(1) The friction process, i.e. joining behavior, friction torque curve and welded interface behavior was observed different for each joint. The welded interface of P-Ti/OFC joint sparked, and intensively flew from P-Ti substrate. The upsetting (deformation) occurred at only P-Ti side during the friction stage after initial peak torque. The upsetting also occurred at only A1050 and A7075 substrates for A1050/OFC and A7075/OFC joints, respectively.

(2) The temperature of each joint during friction welding process was measured at centerline, half radius ($1/2R$) and periphery portions. The maximum temperature of P-Ti/OFC joint was much higher than those of both A1050/OFC and A7075/OFC joints. The maximum temperature of A1050/OFC joint was almost same as that of A7075/OFC joint after initial torque.

(3) In P-Ti/OFC joint, wear and adhesion of surfaces started at periphery portion (outer surface) of OFC substrate, and they extended toward center portion (center axis). Then, the P-Ti substrate adhered to OFC substrates after the weld faying surface of P-Ti substrate became the wear state. In A1050/OFC joint, the wear and the adhesion started at whole surface of A1050 substrate. In A7075/OFC joint, wear and adhesion started at periphery portion of both A7075 and OFC substrates, and they extended toward center portion.

(4) It is considered that the joining behavior, friction torque and welding temperature were affected by the relationship between the loaded friction pressure and the yield strength of substrates.

Key Words: Friction welding, Dissimilar materials, Joining phenomena, Friction torque, Welded interface, Center portion, Periphery portion, Adhesion, Yield strength

1. 緒 言

異種材料を接合した継手, すなわち, 異材継手は各種産業機器の部材として多く用いられており, そのニーズが高く現代工業において必要不可欠なものとなっている¹⁾. 異材継手が容易に作製できる溶接方法の一つとして摩擦圧接法があることはよく知られている.

著者らは, 摩擦圧接の接合メカニズムを解明することを目的として検討を進めており, これまでに同種材料を対象に摩擦圧接における第1位相の接合現象について様々な検討を行ってきた²⁻⁴⁾. また, 従来法の半分以上の入熱量で, 継手強度に差が無く寄り代ならびにバリの排出量が非常に少ない摩擦圧接継手の製作が可能であることを示した⁵⁾. しかし, 異種材料の接合では使用する材料の種類, つまり, 物理的性

質や機械的性質の違いにより摩擦過程中的の接合現象が著しく異なることが考えられる.

摩擦トルク曲線から分けられる4つの位相⁶⁾のうち, 異種材料の接合では特に第4位相の接合現象が得られる継手性能に大きく影響することから, これまでに多くの研究が行われてきた⁷⁻¹⁴⁾. これらの報告では, いずれも圧接条件, 供試材料, 試験片形状などが異なるために定量的な比較が難しいものの, 圧接面に生成する金属間化合物層を中心にかなり明らかにされている. しかし, 異種材料の接合メカニズムについてはほとんど明らかにされておらず, 異材継手の圧接条件を合理的に選定することはできない. これを可能にするためには, 異種材摩擦圧接の接合現象を解明することが重要であると考えられる.

そこで本報告では, 圧接条件を一定とし, 銅を基準として組み合わせる材料を種々変化させた摩擦圧接実験を行い, 摩擦過程中的の過渡的な接合現象を観察することによって, 異種材摩擦圧接の接合メカニズムを検討した. その結果, 組み合わせた母材の温度依存性を考慮した降伏強度が接合現象に大きく影響を及ぼすことを明らかにした.

*原稿受付 平成14年9月25日 平成11年度秋季全国大会で発表

**正 員 姫路工業大学大学院工学研究科 Member, Graduate School of Engineering, Himeji Institute of Technology

***正 員 北見工業大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Kitami Institute of Technology

2. 供試材料および実験方法

2.1 供試材料および試験片形状

供試材料には、無酸素銅 (JIS C1020BD-H, 以下, OFC という), 工業用純 Ti (JIS TB340H, 以下, P-Ti という), 工業用純 Al (JIS A1050BD-F, 以下, A1050 という) ならびに Al-Mg-Zn 合金 (JIS A7075-T6, 以下, A7075 という) の外径 16 mm の市販丸棒を用いた。各供試材料の機械的性質を Table 1 に示す。各供試材料を, Fig. 1(a) に示すように接合端面直径を 12 mm に旋盤加工し, チェック内での回転を防止するためにつかみ部の 3 方向を平削加工して試験片とした。また, 圧接面近傍の温度変化を測定するため, OFC 試験片に Fig. 1(b) に示すように接合端面から 1 mm 離れた側面に ϕ 0.7 mm のドリル穴をそれぞれ深さ 6.0 mm, 3.0 mm, 1.0 mm

Table 1 Mechanical properties of materials used.

Material	T.S. [MPa]	0.2%Y.S. [MPa]	El. [%]
OFC	270	262	18
P-Ti	397	362	27
A1050	111	110	28
A7075	672	619	10

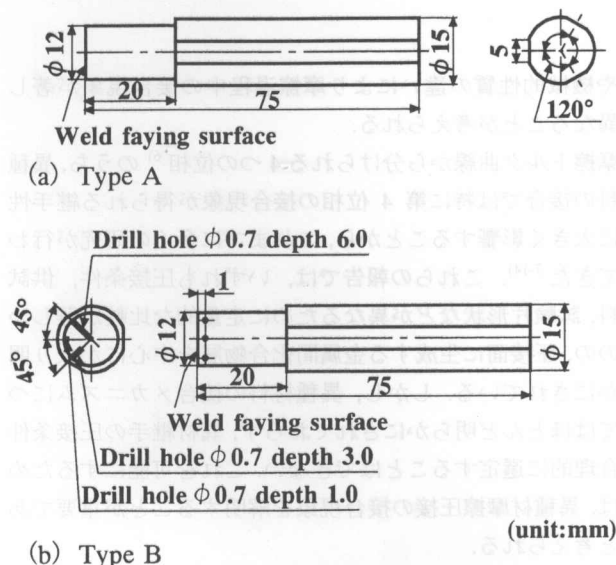


Fig. 1 Shapes and dimensions of the friction welding specimens.

Table 2 Experimental combination of materials.

Rotating side	Fixing side
P-Ti	OFC
A1050	
A7075	

まで開けた。なお, いずれの試験片も, 表面粗さを一定にするために, 既報²⁾と同様に旋盤加工後の接合端面を平面研削盤で研磨している。また, 接合直前にアセトンにより脱脂してから実験に供した。

2.2 圧接条件および接合方法

接合には, 既報²⁾と同様, 摩擦トルク測定装置を取り付けたブレーキ式摩擦圧接機を用いた。各試験片を Table 2 に示すように組み合わせ, 摩擦圧力 30 MPa, 摩擦速度 27.5 s^{-1} の一定として接合実験を行った。なお, アプセット圧力は付加していない。摩擦過程中的の母材の様相をデジタルビデオカメラで記録し, このときの摩擦トルクをサンプリング時間 0.05 s として A/D 変換ボードを介してパソコンに取り込んだ。なお, 摩擦トルクの値の最小分解能は約 1 Nm であるため, 後に示す摩擦トルク曲線では連続性に欠ける階段状となる部分があるものの, 摩擦過程中的の接合現象を把握するには十分であると考えられる。第 1 位相中の摩擦時間経過にともなう過渡的な接合現象を観察するため, 既報²⁾と同様, 摩擦圧接開始後の任意時刻で圧接面同士を強制的に瞬間分離させた実験と, 電磁クラッチを用い, 摩擦圧力を加えたまま圧接面同士の相対回転速度を瞬時に零にさせた接合実験を行った。接合後, 任意の摩擦時刻で強制分離させた各試験片の圧接面の観察, ならびに瞬時に相対速度を零にさせた継手の寄り代を測定した。さらに, 上記実験とは別に Fig. 1(b) に示す OFC 試験片を固定側に用い, 3 ケ所の各ドリル穴に素線径 0.013 mm の K 型シーース熱電対を挿入し, 摩擦時間 3.5 s として摩擦圧接中における圧接面近傍の温度変化を測定する実験を行った。

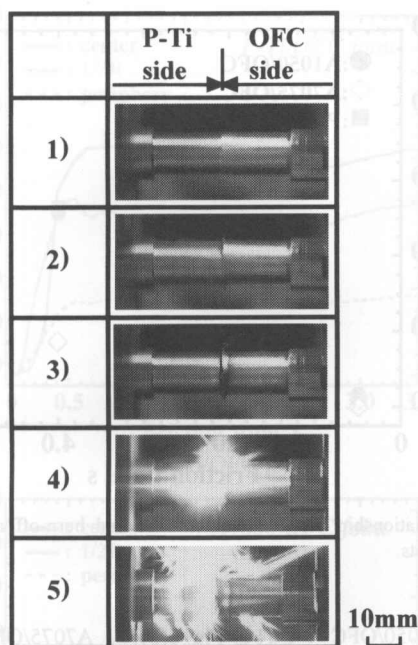
なお, 実験で得られた継手を, 以後それぞれの材料の組み合わせにより P-Ti/OFC, A1050/OFC, A7075/OFC と記す。

3. 実験結果

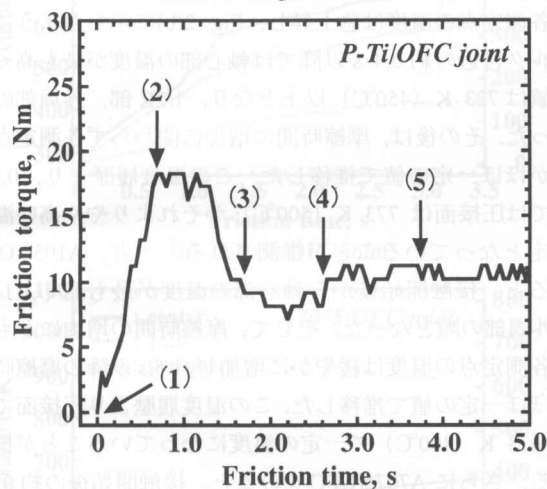
3.1 摩擦過程中的の母材様相と摩擦トルク

P-Ti/OFC の摩擦過程中的における母材様相と摩擦トルク曲線の関係を Fig. 2 に示す。なお, 写真 1)~5) は摩擦トルク曲線の (1)~(5) にそれぞれ対応している。1) は接触した瞬間であり, Table 1 に示したように常温時において軟材料にあたる OFC 側が擦られ, 摩擦トルクが増加して (2) の初期トルクへと到達した。その後, 摩擦トルクが低下して 3) のように OFC 側の圧接面外表面が灰色に変色し, 続いて摩擦トルクが若干増加して 4) のように圧接面から発光し始めた。その後は P-Ti 側から火花を発生しながら一方的に寄り始め, 大量のバリが P-Ti 側から排出された。また, (4)~(5) にかけて, 摩擦トルクはほぼ一定の値で推移した。

A1050/OFC の母材様相と摩擦トルク曲線の関係を Fig. 3 に示す。接触した瞬間 (1) より摩擦トルクは急増し, 常温時に



(a) Joining behavior

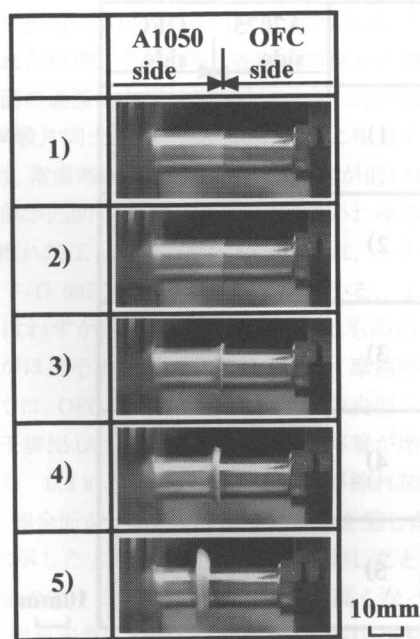


(b) Friction torque curve

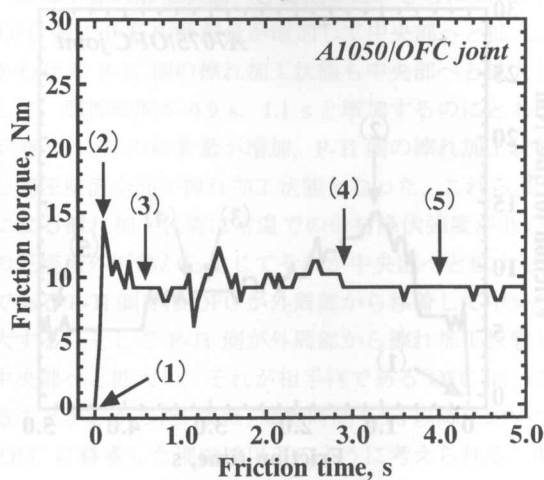
Fig. 2 Joining behavior and friction torque curve during friction welding process of P-Ti/OFC joint.

において軟材料にあたる A1050 側が一方的に変形して 2) のようにバリを排出して初期トルクに到達した。その後、3)~5) と摩擦時間が増加すると、A1050 側のみでバリが増加した。なお、バリの排出中、摩擦トルクは Fig. 3(b) のように全体的にほぼ一定で推移した。

常温において A1050 より母材降伏強度の高い A7075 を用いた場合、すなわち A7075/OFC の母材様相と摩擦トルク曲線の関係を図 4 に示す。1) は接触した瞬間であり、摩擦トルクが増加して約 6 Nm でほぼ一定の値を示す、いわゆる鋼の場合²⁾ にみられた擦れ過程が存在する。その後、2) のように A7075 側が変形し始めて(2)の初期トルクへと到達した。なお、初期トルクの値は Fig. 3(b) に示した A1050/OFC の場合とほとんど差異が認められなかった。そして、摩擦トルクが緩やかに減少して 3) のように OFC 側へ付着した A7075 と



(a) Joining behavior



(b) Friction torque curve

Fig. 3 Joining behavior and friction torque curve during friction welding process of A1050/OFC joint.

A7075 側試験片との間からバリを排出した。このように A7075/OFC の場合、バリの排出は異材界面ではなく界面から A7075 側寄りの部分でおこり、初期の圧接面が移動、いわゆる回転面が移動していることがわかる。このような回転面の移動現象は、同種材における平板と丸棒の組み合わせにおいて生じることが良く知られているものの^{15,16)}、本研究のように同径異種材の場合においても生じることが明らかとなった。その後は 4)~5) のように摩擦トルクがさらに低下してバリの排出量が増加した。

3.2 摩擦過程中的寄り代の変化

摩擦時間と摩擦過程中的寄り代を測定した結果を図 5 に示す。なお、各摩擦時間における正確な寄り代を得るために、2.2 節で述べたように電磁クラッチを用いた実験を行った。

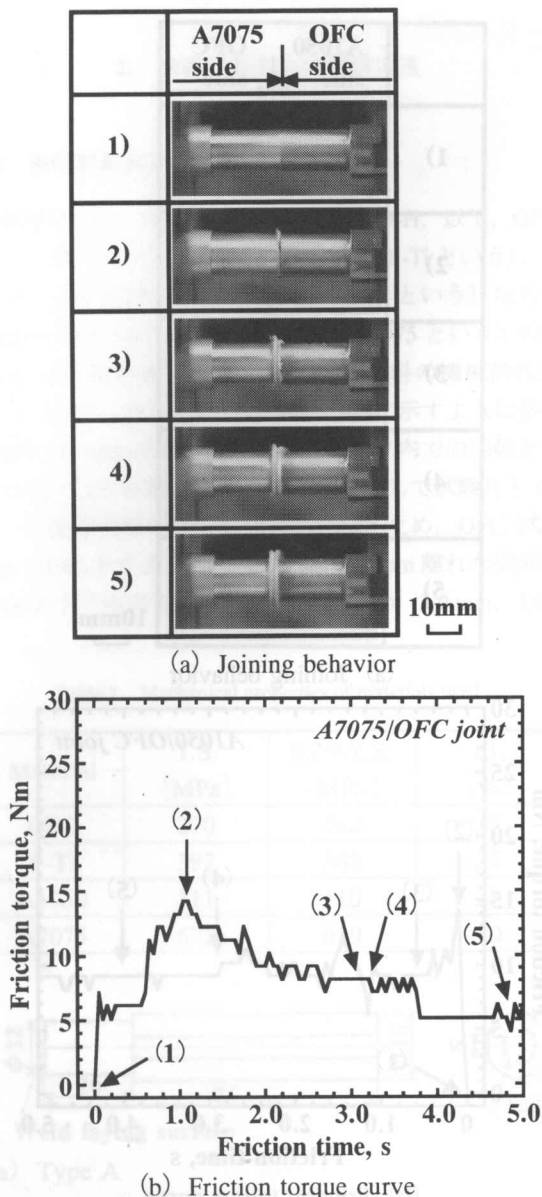


Fig. 4 Joining behavior and friction torque curve during friction welding process of A7075/OFC joint.

既報に示した S15CK 同士の結果⁴⁾と同様、摩擦時間の増加にともなっていずれの継手の寄り代も増加した。また、摩擦時間が短い間では、寄り代は母材の降伏強度の低い順に大きな値を示している。このような寄り代量の増加には、摩擦熱により圧接面の温度が上昇し、温度上昇にともなう母材降伏強度の低下が大きく影響していると考えられる。しかし、3.0 s 以降の摩擦時間では P-Ti/OFC と A1050/OFC の寄り代が急激に増加している。特に、P-Ti/OFC においては、Fig. 2 に示すように P-Ti 側から火花を飛び散らした状態となって急激に寄り代が増加して、寄り代が最も多くなっているのがわかる。

3.3 摩擦過程中的温度履歴

各継手の摩擦過程中的における温度履歴を調べるために、圧接面近傍の温度変化を測定した。P-Ti/OFC の温度履歴を Fig.

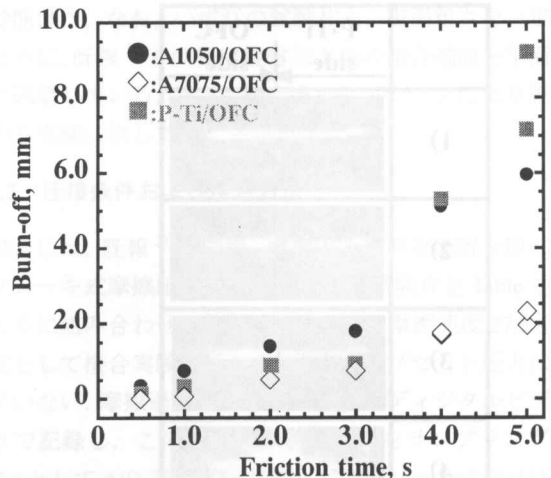
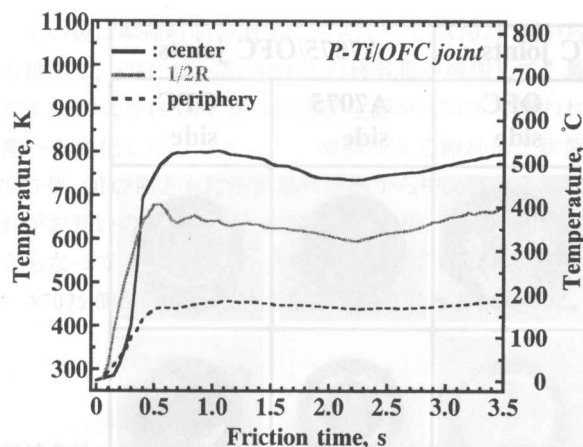


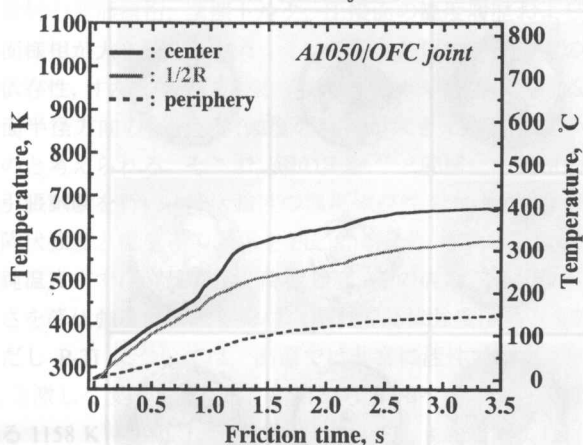
Fig. 5 Relationship between friction time and burn-off at various joints.

6(a)に、A1050/OFC のそれを Fig. 6(b)に、A7075/OFC のそれを Fig. 6(c)にそれぞれ示す。P-Ti/OFC をみると、接触開始後から各測定点の温度は急上昇し、Fig. 2(b)に示したように初期トルク付近の約 0.4 s 以降では軸心部の温度が最も高く、その値は 723 K (450°C) 以上となり、1/2R 部、外周部の順となった。その後は、摩擦時間の増加に関わらず各測定点の温度がほぼ一定の値で推移した。この温度履歴より、0.5 s 以後では圧接面は 773 K (500°C) かそれよりやや高い温度で一定となっていることが推測される。一方、A1050/OFC をみると、接触開始後から軸心部の温度が最も高く、1/2R 部、外周部の順となった。そして、摩擦時間の増加にともなって各測定点の温度は緩やかに増加し、1.5 s 以降の摩擦時間ではほぼ一定の値で推移した。この温度履歴より圧接面ではほぼ 673 K (400°C) で一定の温度になっていることが推測できる。さらに A7075/OFC をみると、接触開始後の約 0.3 s までは各測定点ともほぼ同じ温度を示したものの、その後は軸心部の温度が最も高くなり、1/2R 部、外周部の順となった。そして、摩擦時間の増加にともなって各測定点の温度は緩やかに増加し、1.5 s 以降ではほぼ一定の値で推移し、Fig. 6(b)の A1050/OFC の場合とほぼ同じ温度と考えることができる。圧接条件および相手側材料が同じであっても、A1050 および A7075 は、P-Ti よりも低い温度で接合されることがわかる。

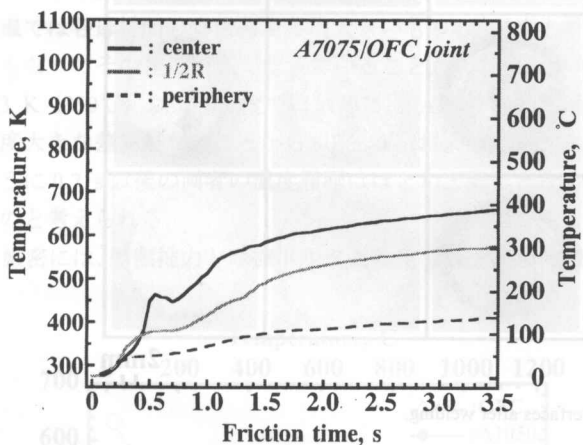
各継手とも初期トルク到達時においては、いずれも軸心部が最も高い温度となり、外周部が最も低い温度を示した。これは、外周部で発生した摩擦熱が軸心部へと移動し、熱が蓄積したために軸心部の温度が最も高くなったものと思われるが、その詳細は明らかでなく、今後の検討課題である。各測定点の温度は圧接面の温度そのものではないが、これらより、同一圧接条件でも、組み合わせる材料によって圧接面の最高到達温度が大きく異なることが明らかとなった。特に、P-Ti/OFC では接合端面同士の接触直後から温度が急上昇し、A1050/OFC および A7075/OFC では緩やかに温度上昇するこ



(a) P-Ti/OFC joint



(b) A1050/OFC joint



(c) A7075/OFC joint

Fig. 6 Temperature cycle curves.

とがわかった。ここで、A1050 の熱伝導率は $226 \text{ W/mK}^{17)}$ 、A7075 のそれは $132 \text{ W/mK}^{17)}$ 、P-Ti のそれは $18 \text{ W/mK}^{18)}$ (いずれも常温の値) であり、P-Ti は A1050 や A7075 に比べて約 $1/13 \sim 1/8$ と非常に小さい値である。このため、P-Ti 側では摩擦熱が蓄積しやすいために、温度が急上昇したものと考えられる。

3.4 圧接面の様相変化

2.2 節で述べたように圧接面同士を強制的に瞬間分離させ

る実験を摩擦時間 0.04 s から 1.1 s までについて行うことにより得られた結果、すなわち、各継手の種々の摩擦時間における圧接面の過渡的な様相変化を Fig. 7 に示す。P-Ti/OFC をみると、試験片同士が約一回転した時間に相当する摩擦時間 0.04 s では、常温時において母材降伏強度が低い OFC 側の圧接面外周部が凸凹した同心円状に変形、いわゆるむしられた (以下、擦れ加工という) 状態が認められ、この部分が相手材である P-Ti 側に移着しているのがわかる。また、圧接面中央部ではわずかに擦れた痕がみられたものの平面研削盤の研磨痕がほぼそのままの状態であった。摩擦時間が増加した 0.11 s では、OFC 側の擦れ加工状態が中央部へと拡大してバリが若干排出し、P-Ti 側への OFC の移着が増加しているのがわかる。0.3 s となると OFC 側全面が擦れ加工状態となって P-Ti 側全面が OFC で覆われた状態を呈した。そして、Fig. 2(b) に示したように初期トルクに到達したとき、すなわち Fig. 6(a) のように中央部の温度が最も高くなった 0.5 s では、OFC 側が赤色に変色して外周部に P-Ti が移着し、P-Ti 側外周部が擦れ加工状態へと変化した。さらに 0.7 s となると OFC 側に P-Ti の移着量が増加して中央部へと拡大、それにあわせて P-Ti 側の擦れ加工状態も中央部へと拡大した。そして、摩擦時間が 0.9 s、1.1 s と増加するのにもなって OFC 側に P-Ti の移着量が増加、P-Ti 側の擦れ加工状態も拡大して圧接面全面が擦れ加工状態となった。これらより、摩擦による擦れ加工状態は常温での母材降伏強度が低い OFC 側の圧接面外周部から生じてそれが中央部へと拡大し、相手材である P-Ti 側では OFC が外周部から移着して中央部へと拡大する。そして P-Ti 側が外周部から擦れ加工状態となって中央部へと拡大し、それが相手材である OFC 側へと移着することがわかった。また、摩擦時間 0.5 s 以降において P-Ti が OFC に移着した理由は以下のように考えられる。摩擦圧力が低い場合、P-Ti/OFC の圧接面では、お互いの摩擦により P-Ti と OFC とが機械的に混合されて繊維状となって巻き込まれた部分、すなわち混合層が存在する¹⁹⁾。このような機械的な混合層は他の組み合わせについても認められ²⁰⁻²³⁾、P-Ti、OFC、P-Ti、OFC と繰り返しそれぞれの母材が不規則に混合されていることから、この部分では強度的に非常に不安定な状態であると考えられる。このため、圧接面同士を瞬時に強制分離させたときに繊維状の OFC 部分からはく離したために、P-Ti が移着したものと考えられる。なお、Ti と Cu の反応拡散などによって TiCu や Ti_3Cu_4 などの金属間化合物層の生成が考えられるものの^{24,25)}、摩擦時間 0.5 s の試料を実際に X 線回折分析した結果、これら金属間化合物層の回折線は認められなかった。

一方、A1050/OFC の場合をみると、摩擦時間 0.04 s では、常温時において母材降伏強度が低い A1050 側の圧接面外周部が擦れ加工状態となっており、この部分が相手材である OFC 側にまばらに移着しているのがわかる。また、圧接面中央部ではわずかに平面研削盤の研磨痕がほぼそのままの状態で見られた。0.11 s では A1050 側の全面が擦れ加工状態

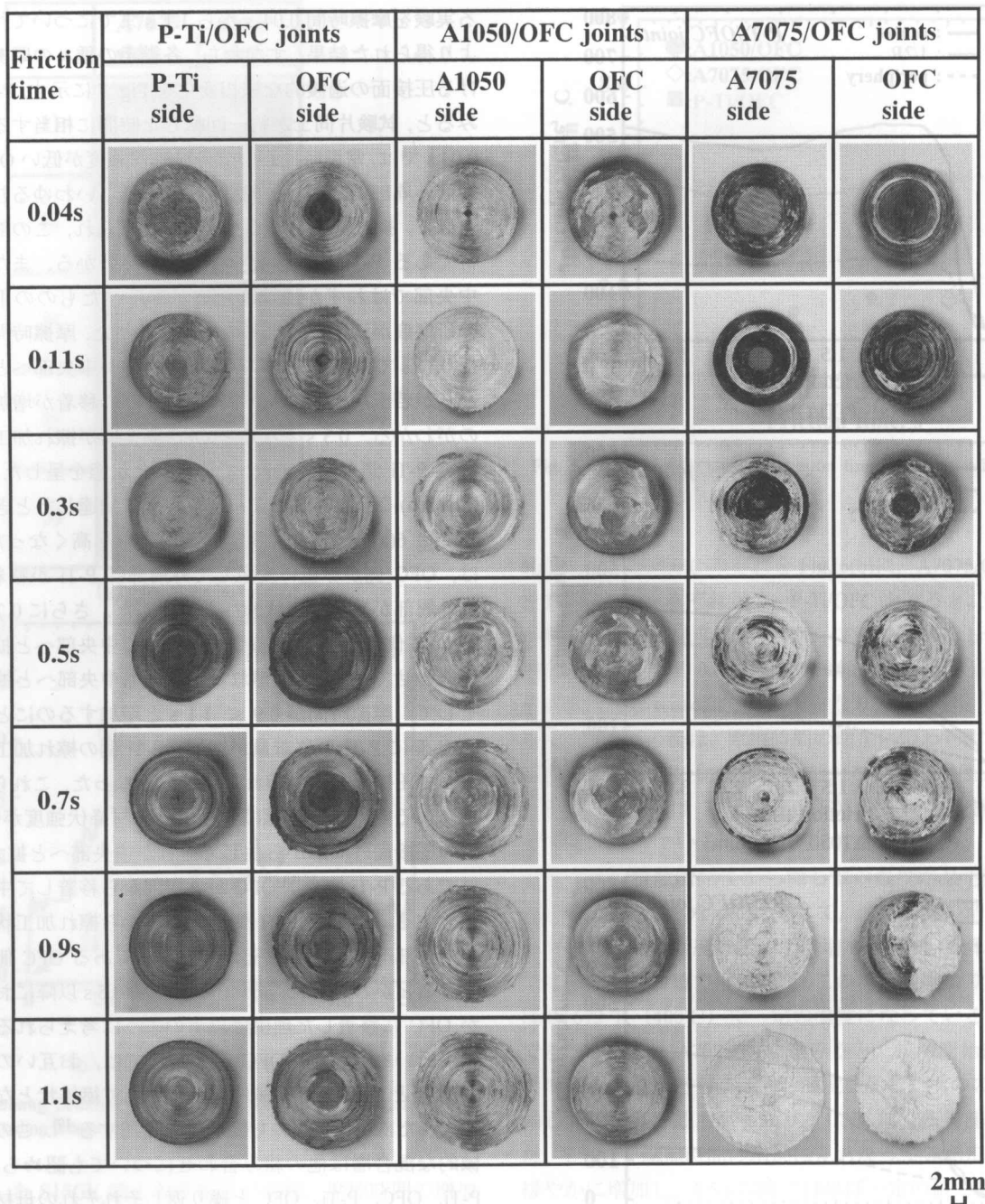


Fig. 7 Appearances of welded interfaces after welding.

となつてすでにこの時点でバリを排出し、OFC 側に A1050 の移着量が増加しているのがわかる。そして摩擦時間の増加にともなつて A1050 側が一方的に変形してバリの排出量が増加するものの、OFC 側への移着量にあまり変化がみられなかった。0.9 s 以降の摩擦時間となると、OFC 側へ移着した A1050 がまばらな状態から均一な状態へと変化し、A1050 側はきれいな同心円状へと変化した。これらより、摩擦による擦れ加工状態は常温での母材降伏強度が低い A1050 側の圧接面外周部から中央部へと拡大、それが相手材である OFC 側へと移着し、その後、摩擦時間の増加にともなつて A1050 側が一方的に変形してバリを排出することがわかった。

さらに、A7075/OFC の場合をみると、摩擦時間 0.04 s では、A7075 側、OFC 側とも圧接面外周部が擦れ加工状態となつており、いずれもお互いの圧接面へ移着しているのがわかる。また、圧接面中央部ではわずかに擦れた痕がみられたものの平面研削盤の研磨痕がほぼそのままの状態であつた。0.11 s となると A7075 側にみられた外周部の擦れ加工状態が中央部へと拡大し、A7075 の一部が大きく擦られて OFC 側へと移着しており、0.3 s ではお互いの圧接面全体が擦れ加工状態を呈した。また、OFC の一部が A7075 側に移着しているのもみられた。Fig. 4(b)に示したように擦れ過程終了直前の 0.5 s では、OFC 側への A7075 の移着量が増加しているのがわか

る。その後は摩擦時間の増加にともなって A7075 側からバリを排出し、OFC 側への A7075 の移着量が増加して、最終的に 1.1 s のように OFC 側の圧接面全面が A7075 で覆われた状態へと変化した。これより、摩擦による擦れ加工状態は A7075 側、OFC 側ともに圧接面外周部から中央部へと拡大、それがお互いの圧接面へと移着し、その後、摩擦時間の増加にともなって A7075 側が一方的に変形して OFC 側に覆い被り、A7075 側が一方的にバリを排出することがわかった。

4. 考 察

圧接条件は同じであるが、それぞれの継手の接合中における母材の変形様相、摩擦トルク、圧接面の温度履歴および圧接面様相が大きく異なった。これには、各母材降伏強度の温度依存性、すなわち摩擦過程その時々々の温度における圧接面半径方向の母材降伏強度の違いが大きく影響しているものと考えられる。そこで、鋼の実験³⁾と同様に各母材の高温引張試験を行い、降伏強度の温度依存性を求めた。各母材の降伏強度と温度との関係を Fig. 8 に示す。なお、各母材の焼鈍温度までは降伏強度を降伏強度、その温度以上では引張強度を降伏強度とし、各母材の融点で降伏強度は零とした。ただし P-Ti については、高温では非常に活性であり O_2 や N_2 と激しく反応するため、 α 相から β 相への変態点温度である 1158 K (885°C)²⁶⁾ を零とした。Fig. 8 の結果より、各母材とも温度の増加にともなって降伏強度が低下しており、常温では各母材間の降伏強度差は大きいものの、温度上昇にともなってその差は小さくなっていることがわかる。また、623 K (350°C) 以上の温度では A7075 と A1050 の母材降伏強度大きな差異がないことから、Fig. 6(b)および(c)に示したように 0.7 s 以後の両者の温度履歴はほとんど同じとなったものと考えられる。

厳密には、摩擦推力と摩擦トルクより生じる圧接面の相当

応力を考慮すべきであるものの、ここでは簡易のため、既報³⁾で述べたように負荷している摩擦推力を下回ったときに圧接面で母材が大きく変形すると考えて、各継手の接合現象について以下のような考察を行った。

P-Ti/OFC について、常温では P-Ti の降伏強度が OFC のそれより高く摩擦開始直後では前述したように OFC 側の圧接面が擦れ加工を受ける。しかし、P-Ti の熱伝導率が小さいために Fig. 6(a)のように圧接面は急激に温度上昇し、両母材の降伏強度が急激に減少する。そして、両母材の降伏強度が負荷している摩擦推力、すなわち 30 MPa を下回るときの温度は、P-Ti が B 点の約 948 K (675°C)、OFC が A 点の約 908 K (635°C) とほぼ同じ値となる。このため、接合端面同士の接触開始直後では常温では降伏強度が低い OFC が Fig. 6 のように P-Ti へ移着するものの、初期トルク付近となると P-Ti も変形して機械的な混合層を生成し、P-Ti が OFC 側へと移着する。その後、P-Ti 側では摩擦熱の蓄積によりさらに高温となり、大気中の O_2 や N_2 と反応するために Fig. 2(b)のように激しく火花を発して一方的にバリを排出したものと考えられる。

また、A1050/OFC の場合、A1050 の降伏強度は常温から 30 MPa のときの C 点となる温度、約 588 K (315°C) まで常に OFC のそれよりも低い。このため、接合端面同士の接触開始直後から常に A1050 が一方的に変形すると考えられる。

一方、A7075/OFC の場合、常温では A7075 の降伏強度が高いものの温度上昇にともなって母材降伏強度が急激に減少し、30 MPa のときの D 点となる温度約 653 K (380°C) では常温における関係が逆転して OFC より低くなる。このため、接合端面同士の接触開始直後では OFC が若干擦られるものの、摩擦熱によって急激に A7075 の降伏強度が減少して OFC よりも低下、そして降伏強度が低くなった A7075 が一方的に変形したと考えられる。また、OFC の熱伝導率が非常に高いために OFC 側に付着した A7075 の熱が OFC 側へと伝わり、付着した A7075 の温度が急に低下する。このため、Fig. 7 のように A7075 と A7075 との間からバリが排出する、いわゆる回転面の移動現象が生じたものと考えられる。

したがって、異種材摩擦圧接の接合現象を理解するためには、母材の温度依存性を考慮した降伏強度が重要となる。すなわち、組み合わせる母材間の降伏強度の差が摩擦トルク、継手の温度に大きく影響し、接合現象が大きく異なることを考えておく必要がある。

5. 結 言

異種材摩擦圧接の接合メカニズムを明らかにするために、本報告では、P-Ti/OFC、A1050/OFC ならびに A7075/OFC の組み合わせを詳細に観察し、組み合わせた母材の降伏強度と接合現象について検討した。得られた知見を以下に要約する。
(1)各継手の摩擦過程における母材の変形様相と摩擦トル

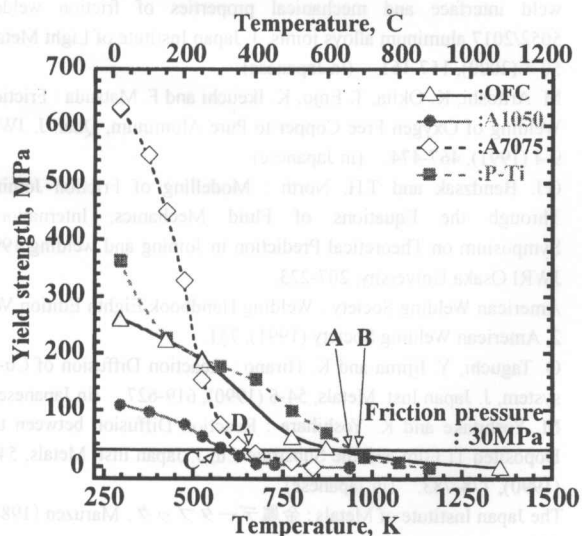


Fig. 8 Relationship between yield strength and temperature of materials used.

ク、圧接面の様相変化は大きく異なった。特に、P-Ti/OFCでは初期トルク以後にP-Ti側から激しく火花を発生してP-Ti側が一方的に変形した。また、A1050/OFCおよびA7075/OFCではA1050側およびA7075側が一方的に変形することがわかった。

(2)摩擦圧力30 MPa、摩擦速度 27.5 s^{-1} の条件では、初期トルク到達時における各継手の圧接面半径方向の温度は、外周部が一番低く、軸心部が高くなった。また、P-Ti/OFCの各測定点の温度はA1050/OFC、A7075/OFCのそれらに比べて高く、さらにA1050/OFCとA7075/OFCの温度はほぼ同じとなった。

(3)P-Ti/OFCでは、最初OFC側が擦れ加工状態となり、P-Tiへ移着し、それが中央部まで拡大した。その後、P-Ti側が擦れ加工状態となってOFCに移着した。また、A1050/OFCではA1050側が擦れ加工状態となってOFCに移着し、A7075/OFCでは両者が擦れ加工状態となってお互いの圧接面に移着した。

(4)負荷している摩擦推力と摩擦過程その時々各温度における両母材の降伏強度の差が、接合中の様相、摩擦トルク、継手温度に大きく影響していることが明らかとなった。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、実験装置の製作などにおきまして、姫路工業大学工学部工作センターに御協力を頂いたことに感謝を申し上げます。また、各母材の高温引張試験の一部に関しては、姫路工業大学工学部機械工学科 山下正人助教授、ならびに住友金属工業株式会社総合技術研究所材料研究部 藤原知哉副主任研究員、安達裕行テクニカルリーダーの御協力を受けましたことに感謝します。さらに、当時、熱心に実験に協力された姫路工業大学工学部機械工科学部生の北井秀樹君、久米正一君の両名に感謝します。

参 考 文 献

- 1) K. Nakata and M. Ushio : Needs and Prospects of Dissimilar Metal Joining and Welding, J. JWS, 71-6 (2002), 418-421. (in Japanese)
- 2) M. Kimura, H. Mioh, M. Kusaka, K. Seo and A. Fuji : Observation of the Joining Phenomena in First Phase of Friction Welding, Quar. J. JWS, 20-3 (2002), 425-431. (in Japanese)
- 3) M. Kimura, M. Kusaka, K. Seo and A. Fuji : Effect of Various Conditions on Friction Torque in First Phase of Friction Welding, Quar. J. JWS, 20-3 (2002), 432-438. (in Japanese)
- 4) M. Kimura, K. Yoshioka, M. Kusaka, K. Seo and A. Fuji : Simulation of Friction Torque in First Phase of Friction Welding, Quar. J. JWS, 20-4 (2002), 546-551. (in Japanese)
- 5) M. Kimura, M. Kusaka, K. Seo and A. Fuji : Relationship between the Friction Time, Friction Torque, and Joint Strength of Friction Welding for the Low Heat Input Friction Welding Method, Quar. J. JWS, 20-4 (2002), 559-565. (in Japanese)
- 6) A. Hasui and S. Fukushima : On the Torque in Friction Welding, J. JWS, 44-12 (1975), 1005-1010. (in Japanese)
- 7) A. Hasui, S. Fukushima and J. Kinugawa : Experimental Studies in Friction Welding Phenomenon, Transactions of National Research Institute of Metals, 11-2 (1968), 209-227. (in Japanese)
- 8) A. Suzumura, T. Onzawa, Budhi. K., A. Ohmori and Y. Arata : Joining Mechanism in Friction Welding of Ceramics to Metals, J. High Temperature Society, 13-1 (1987-1), 43-51. (in Japanese)
- 9) S. Morozumi, T. Sakurai, T. Minegishi, K. Katoh and H. Tokisue : Strength and structure of the bonding interface in friction-welded 1050 aluminum and AZ31 magnesium alloy joint, J. Japan Institute of Light Metals, 40-3 (1990), 209-214. (in Japanese)
- 10) A. Fuji, T.H. North, K. Ameyama and M. Futamata : Improving tensile strength and bend ductility of titanium/AISI 304L stainless steel friction welds, Materials Science and Technology, 8 (1992-3), 219-235.
- 11) H. Ochi, K. Ogawa, Y. Yamamoto and Y. Suga : Friction Welding of 2017 and 6061 Aluminum Alloys to S45C Carbon Steel, J. Society of Materials Science, 45-4 (1996-4), 459-464. (in Japanese)
- 12) Y. Itoh, T. Shindo, M. Saitoh and M. Tezuka : Reaction Diffusion Characteristics at Interface of Copper/Aluminium Friction Weld, J. JSME (Series A), 64-618 (1998-2), 494-499. (in Japanese)
- 13) S. Fukumoto, H. Tsubakino, K. Okita, M. Aritoshi and T. Tomita : Friction welding process of 5052 aluminium alloy to 304 stainless steel, Materials Science and Technology, 15 (1999-9), 1080-1086.
- 14) Wenzhi H., H. Horie, M. Nakamura, T. Kowata, M. Kitagawa and Chang-Gyu K. : Friction Welding of Spheroidal Graphite Cast Iron and Mild Steel, J. Japan Foundry Engineering Society, 72-2 (2000), 96-101. (in Japanese)
- 15) K. Fukakusa and T. Satoh : Travelling Phenomena of Rotational Plane during Friction Welding, J. JWS, 50-10 (1981), 953-958. (in Japanese)
- 16) T. Shinoda, Y. Mizuno, Jinqi L. and T. Saito : Friction Welding Phenomena of Aluminun, J. Light Metal Welding & Construction, 37-8 (1999), 345-350. (in Japanese)
- 17) Japan Light Metal Association : アルミニウムハンドブック, Japan Light Metal Association (1978), 20.
- 18) Japan Titanium Society : チタンの加工技術, The Nikkan Kogyo Shimbun (1996), 9.
- 19) M. Aritoshi, K. Okita, T. Enjo, K. Ikeuchi, F. Matsuda and T. Tomita : Friction Welding of Copper-Tungsten Sintered to Pure Titanium, Quar. J. JWS, 9-4 (1991), 481-488. (in Japanese)
- 20) H. Fuwano, K. Katoh and H. Tokisue : Mechanically mixed layer in weld interface and mechanical properties of friction welded 5052/2017 aluminum alloys joints, J. Japan Institute of Light Metals, 50-4 (2000), 157-161. (in Japanese)
- 21) M. Aritoshi, K. Okita, T. Enjo, K. Ikeuchi and F. Matsuda : Friction Welding of Oxygen Free Copper to Pure Aluminum, Quar. J. JWS, 9-4 (1991), 467-474. (in Japanese)
- 22) G.J. Bendzsak and T.H. North : Modelling of Friction Joining Through the Equations of Fluid Mechanics, International Symposium on Theoretical Prediction in Joining and welding 1996 JWRI Osaka University, 207-223.
- 23) American Welding Society : Welding Handbook Eighth Edition Vol. 2, American Welding Society (1991), 751.
- 24) O. Taguchi, Y. Iijima and K. Hirano : Reaction Diffusion of Cu-Ti system, J. Japan Inst. Metals, 54-6 (1990), 619-627. (in Japanese)
- 25) M. Yoshitake and K. Yoshihara : Reaction Diffusion between the Deposited Ti Film and the Substrate Cu, J. Japan Inst. Metals, 54-7 (1990), 778-783. (in Japanese)
- 26) The Japan Institute of Metals : 金属データブック, Maruzen (1984), 504.