

圧接面の初期焼付位置に及ぼす摩擦速度の影響*

—摩擦圧接の接合メカニズムに関する研究 (第4報)—

木村 真晃**, 大冢 陽右***, 安 圭栢**, 日下 正広**, 瀬尾 健二**, 富士 明良****

Effect of Friction Speed on Initial Seizure Portion on Welded Interface*

— Study of Joining Mechanism of Friction Welding (Report 4) —

By KIMURA Masaaki**, OHTSUKA Yosuke***, AN Gyu-Baek**, KUSAKA Masahiro**,
SEO Kenji** and FUJI Akiyoshi****

In the previous reports¹⁻⁴⁾, the authors had clarified the joining mechanism during the first phase of the friction stage during friction welding process. The present paper describes the effect of friction pressure and friction speed on initial seizure portion at the welded interface of mild carbon steels joint.

The following are concluded.

(1) When the substrates were welded under high friction pressure and high friction speed, i.e., 90MPa and 27.5s⁻¹, almost no wearing existed during the first phase of the friction stage. The friction torque rapidly increased and reached to the initial peak torque immediately after both weld faying surfaces contacted each other.

(2) The friction torque have included wear and seizure stages during the first phase when the substrates were welded under the welding conditions of (a) high friction pressure and low friction speed, i.e., 90MPa and 8.8s⁻¹, and (b) low friction pressure and high friction speed, i.e., 30MPa and 27.5s⁻¹.

(3) The wear of both surfaces started at the periphery portion (outer surface), and it extended toward the center portion (center axis) of the welded interface. When the substrates were welded under high friction pressure and high friction speed, the initial seizure and the joining began at the periphery portion, and they extended toward the center portion. The initial seizure and the joining randomly began on the weld faying surface and extended toward whole surface with high friction pressure and low friction speed. On the other hands, they began at center portion and extended toward periphery portion with low friction pressure and high friction speed.

(4) The initial seizure portion was described by using the relationship between the temperature and the relative speed of the welded interface, and seizure temperature of them.

(5) The modeling was presented for the phenomena of the first phase of the friction stage.

Key Words: Friction welding, First phase, Initial seizure portion, Friction speed, Welded interface, Periphery portion, Center portion, Relative speed, Joining model

1. 緒 言

摩擦圧接法は、溶融溶接の困難な材料の組み合わせについても適用できる場合が多く、各種産業分野で有効な接合手段として利用されている溶接方法である。

著者らは、摩擦圧接の接合メカニズムを解明するために、摩擦過程の第1位相における接合現象について様々な検討を行ってきた¹⁻⁴⁾。その結果、摩擦圧力30MPa、摩擦速度27.5s⁻¹の条件で接合した場合、圧接面外周部から擦れ加工が生じてそれが中央部へと拡大し、圧接面全面が擦れ加工状

態となる。そして、中央部から焼付きを生じてこの部分が接合され、これらが外周部へと拡がって全面が接合された後に初期トルクに到達するという一連の接合現象が明らかになった¹⁾。また、初期トルクの値は、圧接面全面が焼付く温度とその温度における母材のせん断破壊強さにより推定できることを明らかにし^{2,3)}、従来法の半分以下となる入熱量で継手強度に差が無く、かつ継手の寄り代量および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⁴⁾。

これらの報告はJIS Z3607の「炭素鋼の摩擦圧接作業標準」⁵⁾で規格化されている摩擦圧力と同等、もしくは低い場合の結果である。圧接条件が大きく変化する、例えば前報¹⁾の実験における摩擦圧力よりも高い場合では、上述した結果のように圧接面中央部から焼付いて接合されないことが考えられる。仮に圧接面外周部から接合された場合では、圧接面には未接合部^{6,7)}が存在する可能性があることから、得られる継手の強度は大きく影響を受けると考えられる。このため、圧接条件を大きく変化した場合の接合現象を把握することは重要である。

* 原稿受付 平成14年11月25日 平成14年秋季全国大会で発表

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

*** 正 員 姫路工業大学大学院 Student Member, Graduate Student, Himeji Institute of Technology

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

一方、トライボロジでは、摩擦面間の相対速度が速いほど、また接触圧力が高いほど摩擦面が焼付きを生じやすいといわれ⁸⁾、摩擦面温度と焼付現象に関して詳細な検討が行われてきた⁹⁻¹³⁾。使用した材料や形状、試験方法などが異なるために定量的な比較は難しいものの、これらの報告において焼付現象と摩擦面温度の関係はかなり明らかにされている。しかし、摩擦圧接のように圧接面同士が焼付きを生じるときの温度という観点からでは、相対速度が低いほど、また摩擦圧力が高いほど低い温度で焼付くと考えることができる³⁾。圧接面内における圧接面同士が焼付き始める部分、すなわち初期焼付位置と圧接条件との関係については未だ不明な点が多いことから、初期焼付位置に及ぼす圧接条件の影響を明らかにすることは非常に重要であると考えられる。

そこで本報告では、圧接面の初期焼付位置に及ぼす圧接条件の影響について検討を行った。その中で、前報¹⁾よりも高い摩擦圧力の場合について、摩擦速度を変化させて検討を行った。さらに、これらの結果を踏まえて摩擦速度が高い場合と低い場合について、第1位相の接合現象をモデル化し、接合メカニズムについて考察した。

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、S15CK 機械構造用炭素鋼の外径16mmの市販丸棒を用いた。なお、供試材料の降伏強さは294MPa、引張強さは442MPaである。Fig.1に示すように接合端面直径を12mmに旋盤加工し、チャ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。なお、接合端面の表面粗さを一定にするために、前報¹⁾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。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、前報¹⁾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。圧接条件のうち摩擦圧力は前報¹⁾よりも高摩擦圧力となる90MPa、摩擦速度は前報¹⁾と同じ27.5s⁻¹と、これよりも低摩擦速度となる8.8s⁻¹の2種類に変化させた。なお、第1位相における接合メカニズムの解明を行うことを目的としているため、アプセット圧力は付加していない。また、摩擦過程での母材の

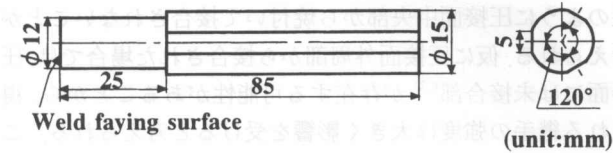


Fig.1 Shape and dimension of the friction welding specimen.

様相をビデオカメラで記録、このときの摩擦トルクをサンプリング時間0.05sとしてA/D変換ボードを介してパソコンに取り込んだ。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、前報¹⁾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複数の圧接面の断面マクロ観察、ならびに圧接面近傍の断面マクロ観察を行った。

3. 実験結果

3.1 摩擦トルク曲線

摩擦圧力90MPa、摩擦速度27.5s⁻¹と8.8s⁻¹で接合したときの摩擦トルク曲線の例をFig.2に示す。なお、Fig.2には前報¹⁾の条件における摩擦圧力30MPa、摩擦速度27.5s⁻¹の結果も示している。摩擦速度27.5s⁻¹では、前報¹⁾とは異なり擦れ過程がほとんど無く接合端面同士の接触直後から摩擦トルクが急上昇して初期トルクに到達した。一方、摩擦速度8.8s⁻¹では接合端面の接触後から摩擦トルクがほぼ一定値で推移した後に初期トルクへと到達しており、初期トルクの値および初期トルク到達時間などの値が異なるものの前報¹⁾と同様に初期トルクまでの第1位相を擦れ過程と焼付過程とに分けることができた。このような摩擦トルク曲線の差異は、摩擦圧力が低く摩擦速度が遅いほど擦れ過程が長くなることに起因していると考えられる。すなわち、27.5s⁻¹では摩擦速度が速く圧接面同士の摩擦による発熱量が多くなり、お互いの圧接面が焼付きを生じる温度まで時間がかからない。一方、8.8s⁻¹では摩擦速度が遅く圧接面同士の摩擦による発熱量が少ないために、圧接面同士が焼付きを生じる温度まで時間がかかったためと考えられる。

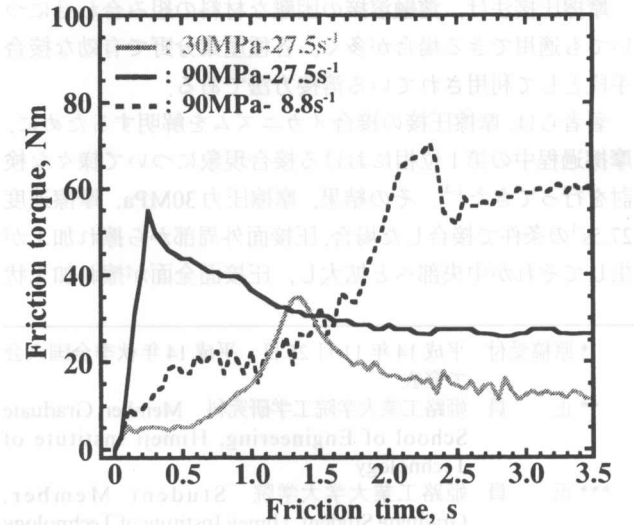


Fig.2 Friction torque curves in various friction welding condition.

3.2 圧接面の様相変化

圧接面同士を強制的に瞬間分離させる実験を行い、圧接面のマクロ観察を行った結果をFig.3およびFig.4に示す。なお、Fig.3は摩擦速度 27.5s^{-1} の圧接面写真の例であり、Fig.4は摩擦速度 8.8s^{-1} のそれらである。Fig.3の摩擦速度 27.5s^{-1} の場合について、試験片同士が約一回転した時間に相当する摩擦時間 0.04s では、回転側、固定側ともに中央部に平面研削盤の研磨痕が残っているものの、外周部が擦れ加工状態¹⁾となっているのがわかる。また、一部が焼付いて焦げ茶色(写真では灰色)へと変色した部分も観察された。なお、この変色部分を光学顕微鏡で観察したところ起伏がほとんど無く平らな面を呈しており、この状態が前報¹⁾の焼付状態と一致すること、また3.3節で述べる圧接面近傍の断面マクロ観察結果から、この部分を焼付きと判断した。 0.08s となると中央部に研磨痕がわずかに見られるものの、圧接面全面がほぼ擦れ加工状態へと変化した。また、外周部では擦れ加工状態が焼付いた後に引きちぎられた(以下、結合分離という)状態へと変化し、青白い色(写真では白色)に変色しているのが見られた。 0.11s になると、結合分離状態が中央部へと拡大し、 0.2s では圧接面全面が完全に結合分離状態となり、外周部からバリが排出しているのがわかる。これら一連の観察結果から、圧接面が外周部から擦れ加工状態となり、その部分から焼付きを生じる。そして、擦れ

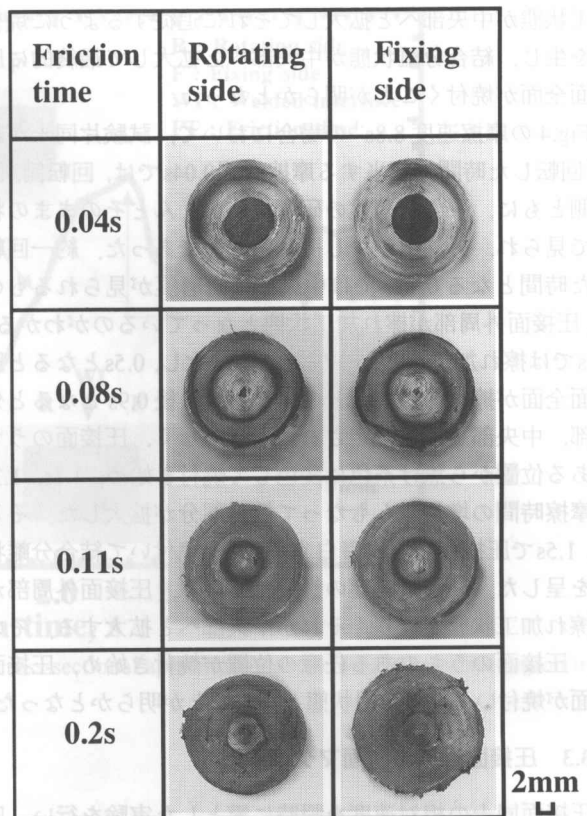


Fig.3 Appearances of welded interfaces after welding in friction speed of 27.5s^{-1} .

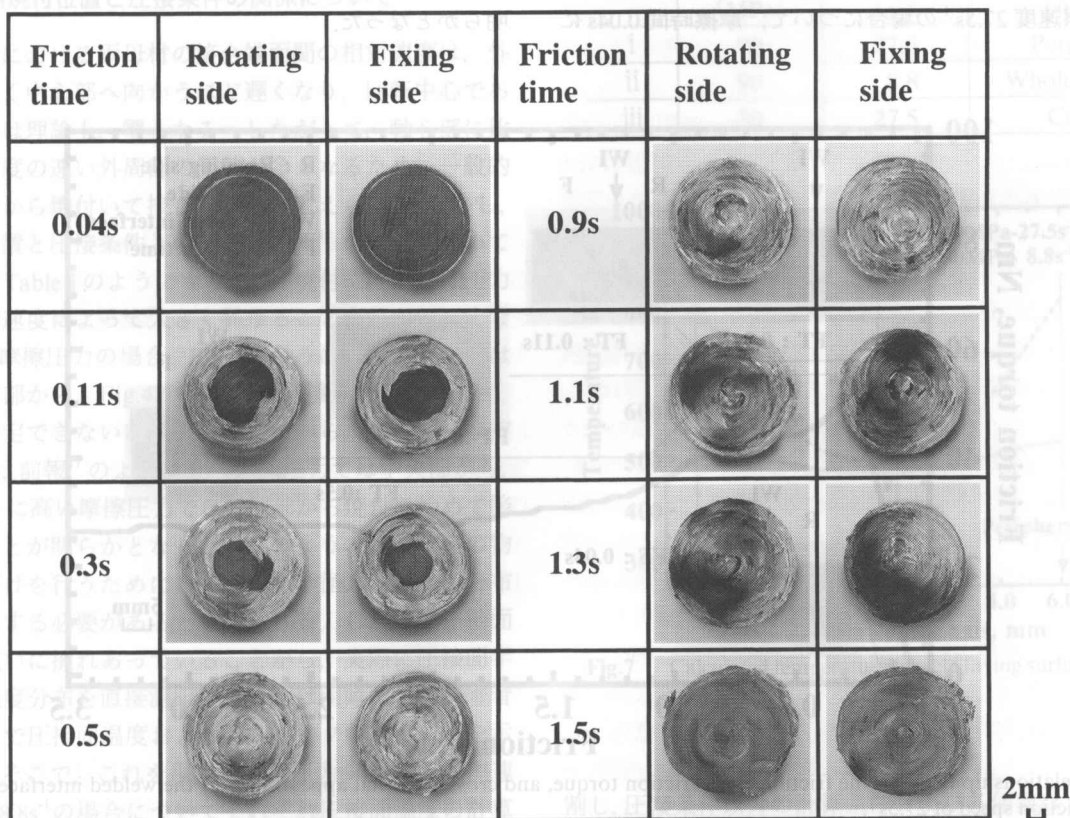


Fig.4 Appearances of welded interfaces after welding in friction speed of 8.8s^{-1} .

加工状態が中央部へと拡大してそれに追従するように焼付きを生じ、結合分離状態が中央部へと拡大して最終的に圧接面全面が焼付くことが明らかとなった。

Fig.4の摩擦速度 8.8s^{-1} の場合において、試験片同士が約 $1/3$ 回転した時間に相当する摩擦時間 0.04s では、回転側、固定側ともに、平面研削盤の研磨痕がほとんどそのままの状態で見られ、外周部が少し擦れた程度であった。約一回転した時間となる 0.11s では中央部に研磨痕が見られるものの、圧接面外周部が擦れ加工状態となっているのがわかる。 0.3s では擦れ加工状態が中央部へと拡大し、 0.5s となると圧接面全面が擦れ加工状態となった。その後 0.9s となると外周部、中央部と特に限定された場所ではなく、圧接面のうちのある位置から焦げ茶色に変色して焼付き始め、 1.1s 、 1.3s と摩擦時間の増加にともなって焼付部分が拡大した。そして、 1.5s で圧接面全面が青白く変色し、焼付いて結合分離状態を呈した。これら一連の観察結果より、圧接面外周部から擦れ加工状態となり、それが中央部へと拡大する。その後、圧接面のうちのある任意の位置が焼付き始め、圧接面全面が焼付いて結合分離状態となることが明らかとなった。

3.3 圧接面近傍の断面マクロ観察

圧接面同士の相対速度を瞬時に零とした実験を行い、圧接面近傍の断面マクロ観察を行った結果を Fig.5 および Fig.6 に示す。なお、Fig.5は摩擦速度 27.5s^{-1} の結果、Fig.6は摩擦速度 8.8s^{-1} のそれらであり、いずれも接合の進行状況をみるために Fig.2の摩擦トルク曲線に対応させて示した。Fig.5の摩擦速度 27.5s^{-1} の場合について、摩擦時間 0.04s に

おいて圧接面外周部で若干白く変色している箇所、いわゆる熱影響部（以下、HAZという）が認められた。またこの部分は、両試験片の境界面が不明瞭、つまり接合された領域（以下、接合領域という）が見られ、摩擦トルクは急上昇を始めた。この領域は、Fig.3で示した焼付部分と一致している。 0.08s となると HAZ が圧接面中央部および軸方向へと拡大し、接合領域も中央部へと拡大した。そして 0.11s では、圧接面全体が接合領域となり圧接面外周部からわずかにバリの排出が認められた。初期トルク直後の 0.3s となるとバリの排出が増加し、 0.5s ではバリの排出量がさらに多くなった。これらの観察結果より、 $90\text{MPa}\cdot 27.5\text{s}^{-1}$ の条件では前報¹⁾で示した $30\text{MPa}\cdot 27.5\text{s}^{-1}$ の場合と異なり、焼付き、すなわち接合は圧接面外周部から生じることが明らかとなった。

Fig.6の摩擦速度 8.8s^{-1} の場合において、摩擦時間 0.5s において圧接全面が凸凹しており、HAZが全面に見られた。 1.1s では両試験片の境界が一部不明瞭となり、この部分は外周部、中央部と特定できないが接合されているのがわかる。これはFig.4に示した焼付部分と一致している。その後、摩擦トルクが緩やかに上昇して 1.5s となると接合領域が拡大し、外周部からバ리를排出した。さらに摩擦トルクは上昇を続け、 1.9s のように摩擦時間の増加にともなって圧接面軸方向のHAZ幅ならびにバリの排出量が増加した。そして、初期トルクである 2.3s となると、バリの排出量が急激に増加した。これらの観察結果より、 $90\text{MPa}\cdot 8.8\text{s}^{-1}$ では、焼付き、すなわち接合は全圧接面でほぼ同時に生じることが明らかとなった。

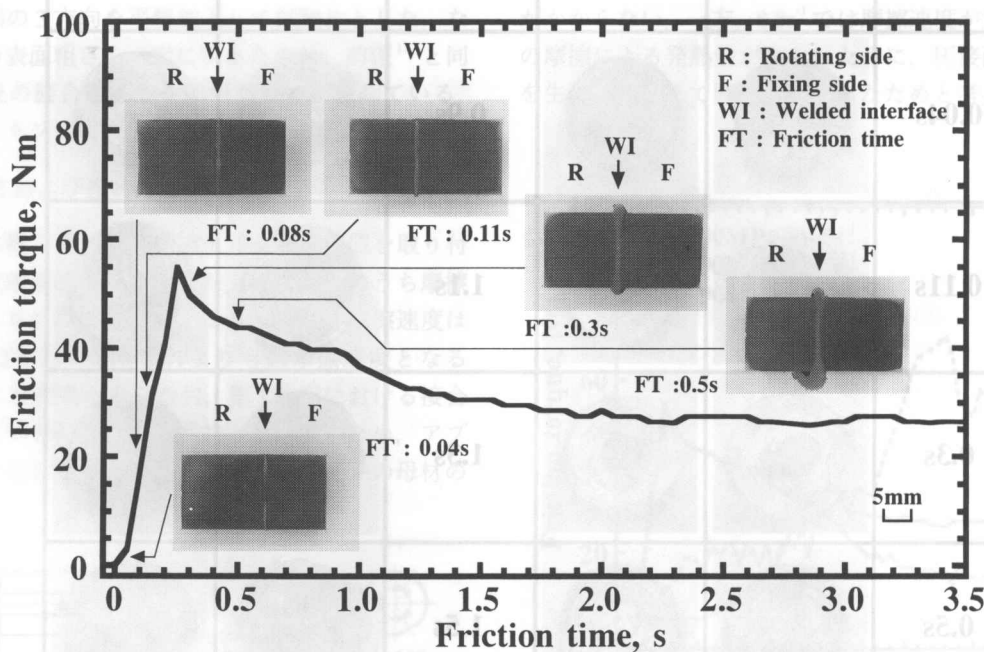


Fig.5 Relationship between the friction time, friction torque, and cross-sectional appearances of the welded interface region in friction speed of 27.5s^{-1} .

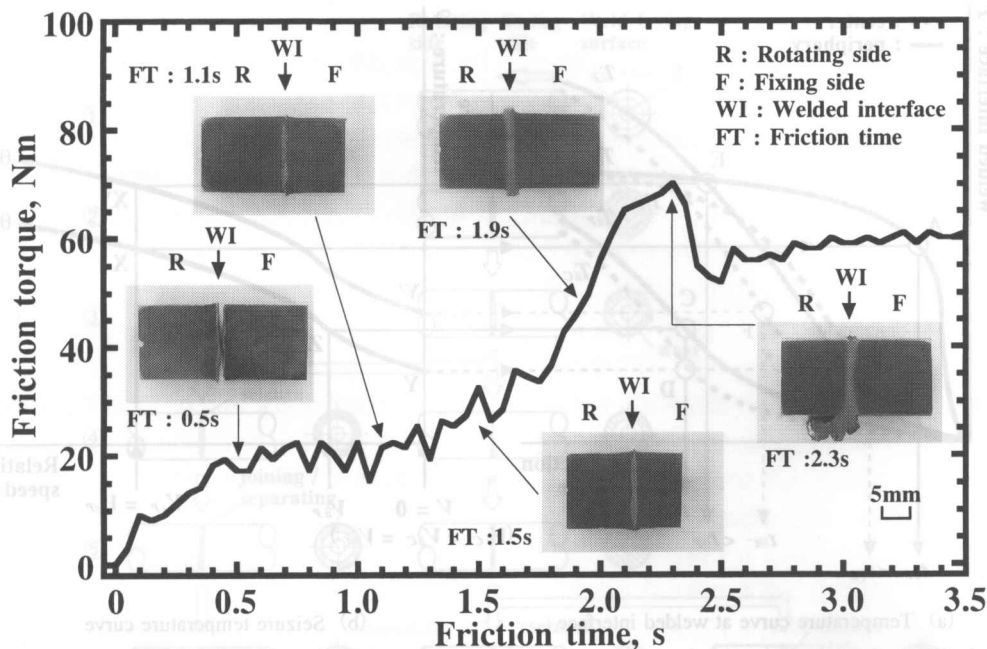


Fig.6 Relationship between the friction time, friction torque, and cross-sectional appearances of the welded interface region in friction speed of 8.8s^{-1}

4. 考 察

4.1 初期焼付位置と圧接条件の関係について

摩擦圧接における両母材の接合端面間の相対速度は、外周で最も速く中心部へ向かうほど遅くなり、回転中心である軸心部では理論上、零となる。したがって、軸心部に比べて相対速度の速い外周部の発熱が多くなるため、一般的には外周部から焼付いて接合されると考えられる。しかし、初期焼付位置と圧接条件との関係を前報¹⁾の結果も含めてまとめるとTable 1のようになり、初期焼付位置が摩擦圧力および摩擦速度によって大きく異なることがわかる。すなわち、同じ摩擦圧力の場合、Fig.3のように高摩擦速度では圧接面外周部から、Fig.4のように低摩擦速度では外周部、中央部と特定できないある任意の部分から、また同じ摩擦速度の場合、前報¹⁾のように低い摩擦圧力では中央部から、Fig.3のように高い摩擦圧力では外周部から焼付き始めて接合されたことが明らかとなった。このような実験事実の物理的意味づけを行うためには、圧接面半径方向の温度分布を明らかにする必要があると考えられる。しかし、圧接面同士はお互いに擦れあっていることから、実際に圧接面半径方向の温度分布を直接測定することは困難である。著者らは既報³⁾で圧接面温度および摩擦トルクの推算方法を示している。そこで、これを用いて摩擦圧力90MPa、摩擦速度 27.5s^{-1} と 8.8s^{-1} の場合についてそれぞれ圧接面温度の計算を行った。計算上、初期トルクに到達したときの圧接面半径方向の温度分布例をFig.7に示す。なお、圧接面を6等分

Table 1 Relationship between friction pressure, friction speed and initial seizure portion.

Suffix	Friction pressure (MPa)	Friction speed (s^{-1})	Initial seizure portion
i	90	27.5	Periphery
ii	90	8.8	Whole surface
iii	30	27.5	Center

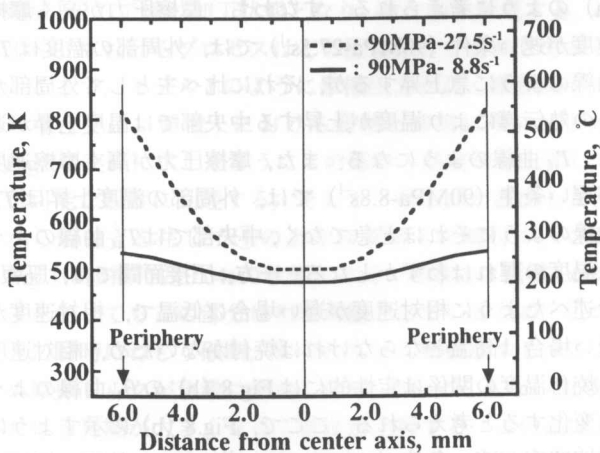


Fig.7 Calculated temperature of weld faying surface at initial peak torque.

割し、圧接条件以外の計算条件および各係数はすべて既報³⁾と同じ値を用いた。また、厳密には、負荷している摩擦圧力に対する焼付温度と圧接面間の相対速度との関係を考慮

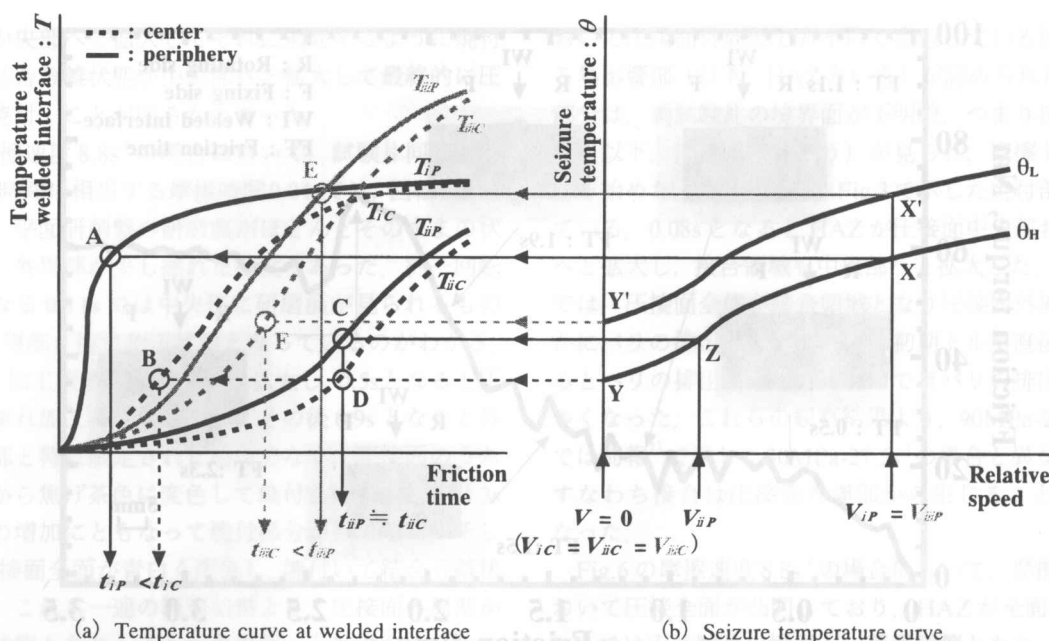


Fig.8 Schematic illustration of relationship between temperature curve at welded interface and dependence of seizure temperature curve on relative speed.

しなければならないものの、ここでは簡易のため、既報³⁾と同じ焼付温度に到達したときに圧接面同士が焼付くと仮定して計算を行った。Fig.7をみると、破線表示した $27.5s^{-1}$ では中央部と外周部との温度差が大きく、実線表示した $8.8s^{-1}$ では中央部と外周部の温度差がほとんど無いことがわかる。そこでこの結果を考慮すると、初期焼付位置と圧接条件である摩擦圧力および摩擦速度の関係は以下のように説明できると考えられる。

摩擦圧力が一定で摩擦速度が異なる場合、外周部と中央部の時間経過にともなう圧接面の温度上昇は定性的にFig.8 (a)のように考えられる。すなわち、摩擦圧力が高く摩擦速度が速い条件 ($90MPa-27.5s^{-1}$) では、外周部の温度は T_{IP} 曲線のように急上昇するが、それに比べ主として外周部からの熱伝導により温度が上昇する中央部では温度上昇が遅れ、 T_{IC} 曲線ようになる。また、摩擦圧力が高く摩擦速度が遅い条件 ($90MPa-8.8s^{-1}$) では、外周部の温度上昇は T_{iIP} 曲線のようにそれほど急でなく、中央部では T_{iIC} 曲線のように温度の遅れはわずかとなる。一方、圧接面間では、既報³⁾で述べたように相対速度が遅い場合は低温で、相対速度が速い場合は高温とならなければ焼付かないため、相対速度と焼付温度の関係は定性的にはFig.8 (b)の θ_H 曲線のように変化すると考えられる。ここで、Fig.8 (b)に示すように摩擦速度が速い条件 ($90MPa-27.5s^{-1}$) では、外周の相対速度 V_{IP} に対する焼付温度は θ_H 曲線上のX点となり、この温度に到達する外周部の温度はFig.8 (a)のA点、そのときの摩擦時間は t_{IP} となる。また、中央部の相対速度 V_{IC} は理論上零であることから焼付温度は θ_H 曲線上のY点、これに対応する温度はB点となり、そのときの摩擦時間は t_{IC} となる。 t_{IP} と t_{IC} の関係をみると、 $t_{IP} < t_{IC}$ となるため外周部が先に焼

付くことになる。このため、Fig.3に示すように摩擦時間 $0.04s$ のように外周部から焼付き始めたと考えられる。一方、摩擦速度が遅い条件 ($90MPa-8.8s^{-1}$) では、外周部の相対速度 V_{iIP} に対して焼付温度が θ_H 曲線上のZ点となり、これに対応する温度はC点であり、そのときの摩擦時間が t_{iIP} である。同様に中央部では $V_{iIC} \rightarrow Y$ 点 $\rightarrow D$ 点 $\rightarrow t_{iIC}$ と辿ることができる。 t_{iIP} と t_{iIC} の関係をみると、 $t_{iIP} \approx t_{iIC}$ となることから外周部と中央部がほぼ同時に焼付きを生じることになる。したがって、Fig.4に示したように $1.1s$ で圧接面全面がほぼ同時に焼付くものと考えられる。

摩擦速度が同じで摩擦圧力が変化した場合を考える。摩擦圧力が高い条件 ($90MPa-27.5s^{-1}$) では、外周部は T_{IP} 曲線、中央部は T_{IC} 曲線のようになり、摩擦圧力が低い条件 ($30MPa-27.5s^{-1}$) では、外周部の発熱量が少ないことから外周部では T_{iIP} 曲線、中央部では T_{iIC} 曲線のように外周部と中央部の温度差が比較的少なくなる。一方、相対速度に対する焼付温度は、摩擦圧力が低くなると高くなり、Fig.8 (b)の θ_L 曲線のように高温側へとシフトするものと考えられる。したがって、摩擦圧力が高い条件 ($90MPa-27.5s^{-1}$) では前述したとおりに辿ることができ、摩擦圧力が低い条件 ($30MPa-27.5s^{-1}$) では、外周部は $V_{iIP} \rightarrow X'$ 点 $\rightarrow E$ 点 $\rightarrow t_{iIP}$ 、中央部は $V_{iIC} \rightarrow Y'$ 点 $\rightarrow F$ 点 $\rightarrow t_{iIC}$ と辿ることができる。 t_{iIP} と t_{iIC} の関係をみると $t_{iIP} > t_{iIC}$ となることから、前報¹⁾の結果のように中央部が外周部よりも先に焼付きを生じることになると考えられる。

Table 1に示した実験結果は定性的に以上のような解釈ができる。しかし、圧接面が何度で焼付き始めるかなど、定量的な解明に関しては、今後の検討課題である。

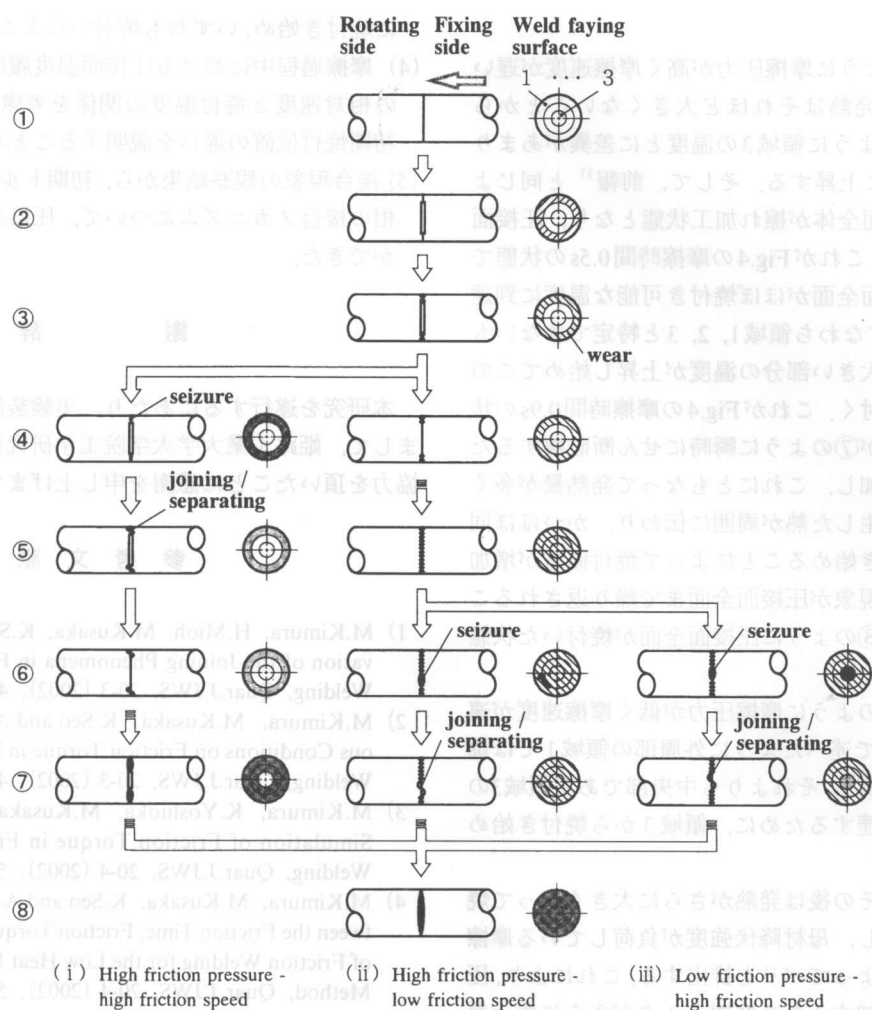


Fig.9 Schematic illustration of friction welding process during first phase.

4.2 第1位相の接合メカニズムモデルの改良

前報¹⁾において、摩擦圧接における第1位相の接合メカニズムのモデル化を示したが、4.1節のような考察を踏まえ、圧接条件が異なる場合の第1位相における一連の接合現象について、初期接合位置の違いに注目して大きく分けるとFig.9に示すような三つのモデルが考えられる。なお、モデルiが圧接面外周部から焼付く場合であり、モデルiiには圧接面全面がほぼ同時に焼付く場合、モデルiiiには前報¹⁾で示した圧接面中央部から焼付く場合を示し、簡単のために前報¹⁾と同様に圧接面はFig.9に示す領域1～3に示すように軸心部を中心とした輪の集合と考えた。まず、①の母材同士が接触した直後から圧接面では摩擦を生じる。このとき、摩擦圧力が圧接面に対して均一に負荷されているため、圧接面同士の相対速度の差異から外周部の領域1で発熱が最も多いためにこの部分の温度が上昇する。この温度上昇により②のように外周部である領域1が膨張し、領域2および領域3では圧接面間で隙間を生じた状態となる。一方、接触している領域1では負荷している摩擦推力をすべて受け持たなければならない状態、すなわち領域1にお

ける摩擦圧力は非常に大きくなる。このため、③のように領域1のみで擦れ加工状態となり、新生面を創成する。この①～③におけるプロセスはどの圧接条件でも同じである。

ここで、モデルiのように摩擦圧力が高く摩擦速度が速い場合では、領域1における発熱が非常に多いことからFig.7の実線に示したようにこの部分の温度が急上昇して焼付可能な温度に到達する。そして、新生面が露出した部分から焼付きを生じて④のように領域1が焼付く。これがFig.3の摩擦時間0.04sの状態である。実際には領域1が焼付きを生じてこの部分は相対運動をしているため、⑤のように瞬時にねじり破断、すなわちせん断破壊する。このため摩擦トルクが急激に増加し始め、それにともない領域1における発熱が大きくなって温度が上昇する。この温度上昇にともない母材降伏強度が減少し、領域1では負荷している摩擦推力を受け持てなくなるため、内側である領域2および3の内側同士が接触して⑥のようになる。さらに領域1で発生した熱が内側である領域2へ伝わることによって、⑦のように領域2のみで摩擦推力を受け持つ状態となる。この②～⑦の現象が圧接面中央部まで繰り返されることによって最終的に⑧のように圧接面全面が焼付いた状態とな

る。

一方、モデル ii のように摩擦圧力が高く摩擦速度が遅い場合では、領域 1 の発熱はそれほど大きくないことから Fig.7 の実線で示したように領域 3 の温度とに差異があまり無く、比較的緩やかに上昇する。そして、前報¹⁾と同じように⑤のような圧接面全体が擦れ加工状態となり、圧接面全面が新生面となる。これが Fig.4 の摩擦時間 0.5s の状態である。その後、圧接面全面がほぼ焼付き可能な温度に到達してある任意部分、すなわち領域 1, 2, 3 と特定できないものの最も接触抵抗が大きい部分の温度が上昇し始めてこの部分が⑥のように焼付く。これが Fig.4 の摩擦時間 0.9s の状態である。この部分が⑦のように瞬時にせん断破壊するために摩擦トルクが増加し、これにともなって発熱量が多くなる。さらにこの発生した熱が周囲に伝わり、かつほぼ同時に別の部分も焼付き始めることによって焼付領域が増加する。この⑥～⑦の現象が圧接面全面まで繰り返されることによって最終的に⑧のように圧接面全面が焼付いた状態となる。

さらに、モデル iii のように摩擦圧力が低く摩擦速度が速い場合では、前報¹⁾で述べたように外周部の領域 1 では焼付きに必要な温度が高く、それよりも中央部である領域 3 の方が先に焼付温度に達するために、領域 3 から焼付き始めることになる。

いずれの場合も、その後は発熱がさらに大きくなって焼付部分の温度が上昇し、母材降伏強度が負荷している摩擦推力を下回ることによってバリを排出する。これにより、圧接面の接触面積が増加するため摩擦トルクがさらに急上昇して初期トルクへ到達する。そして、回転側から伝達されるトルクよりも圧接面における母材のせん断破壊強さに依存するトルクが下回ったときに摩擦トルクが減少していくものと考えられる。

以上のように、初期トルク到達までの第 1 位相では、圧接条件によって初期焼付位置が異なり、接合メカニズムが異なるものと考えられる。

5. 結 言

摩擦圧接の接合メカニズムを解明するために、本報告では、圧接面の初期焼付位置に及ぼす摩擦速度の影響について検討を行った。得られた知見を以下に要約する。

- (1) 摩擦圧力が高く摩擦速度が速い条件では、擦れ過程がほとんど無く、接合端面同士の接触直後から摩擦トルクが急上昇して初期トルクに到達した。
- (2) 摩擦圧力が高く摩擦速度が遅い条件では、摩擦トルク曲線を擦れ過程と焼付過程とに分けることができた。
- (3) 摩擦速度が変化しても圧接面外周部から擦れ加工状態となり、それが中央部へと拡大した。また、摩擦圧力が高く摩擦速度が速い条件では圧接面外周部から、摩擦圧力が高く摩擦速度が遅い条件では圧接面全面でほぼ同時

に焼付き始め、いずれも焼付いたところから接合された。

- (4) 摩擦過程における圧接面温度履歴、および圧接面間の相対速度と焼付温度の関係を考慮することによって、初期焼付位置の違いを説明することができた。
- (5) 接合現象の観察結果から、初期トルク到達までの第 1 位相の接合メカニズムについて、圧接条件ごとのモデル化ができた。

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、姫路工業大学大学院工学研究科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。

参 考 文 献

- 1) 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)
- 2) 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)
- 3) 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)
- 4) M.Kimura, M.Kusaka, K.Seo and A.Fuji : Relationship between the Friction Time, Friction Torque, and Joint Properties of Friction Welding for the Low Heat Input Friction Welding Method, Quar.J.JWS, 20-4 (2002), 559-565. (in Japanese)
- 5) Japanese Industrial Standards Committee : JIS Z 3607 Recommended practice for friction welding of carbon steel, (1994). (in Japanese)
- 6) S.Fukumoto, T.Inuki, H.Tsubakino, K.Okita, M.Aritoshi and T.Tomita : Evaluation of friction weld interface of aluminium to austenitic stainless steel joint, Materials Science and Technology, 13 (1997-8), 679-686.
- 7) 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.
- 8) Japan Society for Technology of Plasticity : Tribology in Deformation Processes, Corona Publishing (1990), 35-40. (in Japanese)
- 9) M.Kawamoto and K.Okabayashi : Study on dry sliding wear of cast iron as a function of surface temperature, Wear, 58 (1980), 59-95.
- 10) H.Mishina and T.Sasada : Observation of Micro-Structure in Seized Portion and Mechanism of Seizure, Trans. of the ASME, 108-1 (1986), 128-133.
- 11) A.Azushima : Interfacial Temperature Due to Friction Between Tool and Workpiece in Metalforming Process, J.Japan Society for Technology of Plasticity, 29-328 (1988-5), 492-497. (in Japanese)
- 12) Q.Ouyang and K.Okada : A Study on the Quantitative Description of the Seizure Behavior of Steels at Low Temperature in a Vacuum, Tribology Transactions, 41-2 (1998), 301-305.
- 13) A.A.Shtertser : Welding wave on the contact spot of solids, Tribology International, 31-4 (1998), 169-174.