

## 円管摩擦圧接の摩擦トルクに及ぼす円管内径の影響\*

木村 真晃\*\*, 日下 正広\*\*, 瀬尾 健二\*\*, 富士 明良\*\*\*

### Effect of Inner Diameter on Friction Torque in Friction Welding of Pipes\*

By KIMURA Masaaki\*\*, KUSAKA Masahiro\*\*, SEO Kenji\*\* and FUJI Akiyoshi\*\*\*

The present paper describes the effects of inner diameter on friction torque during friction stage of friction welding with mild carbon steel pipes whose outer diameter is 16 mm. The experimental conditions included inner diameter (i.e., pipe thickness) and friction speed. A conventional friction welding machine was used to join all specimens.

The following conclusions are given.

(1) When various pipes with different inner diameters were welded under same friction welding conditions, the friction torque curves for each pipe is different in the first phase of the friction stage, particularly in the wear stage. That is, the initial torque and elapsed time for initial torque decreased with increasing inner pipe diameter.

(2) The initial torque and elapsed time for initial torque decreased with increasing inner pipe diameter when the joints of solid bars to pipes were welded under the same friction welding conditions.

(3) When pipes of the same inner diameter were welded:

- a) the friction torque in the first phase of the friction stage varied due to sparks flashing from the welded interface, and
- b) the initial torque and elapsed time for initial torque increased with decreasing friction speed.

(4) The result in (3) indicates that the seizure temperature at low relative speeds at the welded interface was lower than that at high relative speed.

**Key Words:** Friction welding, Friction torque, Inner diameter, Pipe, Friction speed, Welded interface, Initial torque, Elapsed time for initial torque, Relative speed

## 1. 緒 言

著者らは、摩擦圧接の接合メカニズムを解明するために、これまでに摩擦過程の第1位相における接合現象について中実丸棒を用いて様々な検討を行ってきた<sup>1-5)</sup>。さらに、これらの結果を踏まえ、接合する母材物性値と圧接条件をパラメータとして第1位相における摩擦トルクのシミュレーション方法を提案し、圧接面の焼付温度における母材降伏強度から初期トルクの値を簡易的に推定する方法を示した<sup>6)</sup>。

しかし、これらの現象はいずれも中実丸棒同士の場合であり、円管の場合では圧接面の中央部が存在しないことから中央部から焼付くことはない。また、円管の場合、中実丸棒同士の場合よりも圧接面内における相対速度差の範囲が狭くなることから、中実丸棒同士の接合現象とは大きく異なると考えられる。ところで、実際に摩擦圧接法を利用した製品は、ドライブシャフト<sup>7)</sup>、アルミホイール<sup>8)</sup>、エアバック部品<sup>9)</sup>などの自動車用部品から、圧力容器や油圧バルブ<sup>9-11)</sup>などの産業用部品まで多種多様である。これらの

製品は、中実丸棒同士はもとより円管同士、中実丸棒と円管とを組み合わせて製作されることが多い。しかしながら、円管の摩擦圧接に関する報告は少なく、ステンレス鋼管同士<sup>12)</sup>、アルミニウム管同士<sup>13,14)</sup>、ポリエチレン管同士<sup>15)</sup>、アルミニウム合金管/ステンレス鋼管<sup>16)</sup>などの組み合わせが報告されているにすぎない。これらの報告で円管の摩擦圧接現象が明らかにされつつあるものの、圧接条件、試験片形状、円管内径などがいずれも異なるために接合現象が十分解明されているとは言い難い。また、中実丸棒同士の摩擦圧接<sup>3)</sup>で示したように摩擦トルク、特に初期トルクは強度の高い健全な継手を得るための圧接条件選定に対して有効な指標となるものの、円管の摩擦圧接における初期トルクに関する知見はほとんど得られていない。

そこで本研究では、鋼材円管の摩擦圧接における摩擦トルク、特に初期トルクに及ぼす円管内径の影響について検討を行った。その中で、円管同士において内径を変化させた場合、中実丸棒とそれに組み合わせる円管の内径を変化させた場合、さらに、同一円管同士において摩擦速度を変化させた場合についてそれぞれ検討し、第1位相の摩擦トルクについて考察した。

\*原稿受付 平成15年3月17日 平成14年度春季全国大会で発表

\*\*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、S15CK機械構造用炭素鋼の外径26mmの

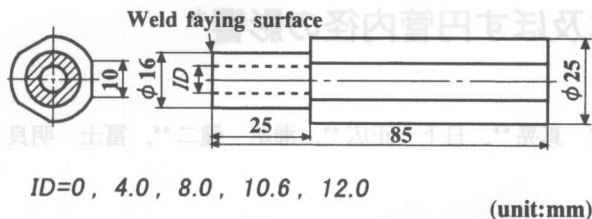


Fig. 1 Shapes and dimensions of friction welding specimens.

Table 1 Experimental combination of specimens.

| Exp. series | Rotating side | Fixing side |
|-------------|---------------|-------------|
| ①           | ID 0          | ID 0        |
|             | ID 4          | ID 4        |
|             | ID 8          | ID 8        |
|             | ID 12         | ID 12       |
| ②           | ID 0          | ID 0        |
|             | ID 4          |             |
|             | ID 8          |             |
|             | ID 12         |             |
| ③           | ID10.6        | ID10.6      |

市販丸棒を用いた。なお、供試材料の引張強さは420 MPa、降伏強さは315 MPaである。Fig. 1に示すように、供試材料の接合端面直径を16 mmに旋盤加工し、接合端面にφ4.0、φ8.0、φ10.6、φ12.0 mmの各ドリルで深さ25 mmまで穴をあけた円管模擬試験片と、穴をあけていない中実丸棒試験片の計5種類を準備した。なお、チャック内での回転を防止するために、各試験片のつかみ部の3方向に平削加工を施した。また、接合端面の表面粗さを一定にするために、これまでの実験<sup>1,3,4,5)</sup>と同様に旋盤加工後の接合端面を平面研削盤で研磨した。いずれの試験片も、接合直前にアセトンにより脱脂してから実験に供した。なお、中実丸棒試験片をID0、内径4.0、8.0、10.6、12.0 mmの円管模擬試験片をそれぞれID4、ID8、ID10.6、ID12と記す。

### 2.2 圧接条件および接合方法

実験には、摩擦トルク測定装置を取り付けた既報<sup>1)</sup>と同じブレーキ式摩擦圧接機を用いた。なお、接合現象を観察するため、アセット圧力は付加していない。また、摩擦圧接中の母材の外観様相をデジタルビデオカメラで、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記録した。さらに、摩擦時間の経過にともなう過渡的な接合現象を観察するため、既報<sup>1)</sup>と同様、摩擦圧接開始後の種々の時刻で瞬時に圧接面同士を強制的に引き離した。なお、円管の接合現象を明らかにするため、本研究ではFig. 1で示した試験片をTable 1に示すように組み合わせる実験を行った。

- ① 圧接条件を摩擦圧力30 MPa、摩擦速度27.5 s<sup>-1</sup>とし、ID0、ID4、ID8、ID12同士をそれぞれ摩擦圧接する実験。

- ② 圧接条件を摩擦圧力30 MPa、摩擦速度27.5 s<sup>-1</sup>とし、固定側にID0を取り付け、回転側にID0、ID4、ID8、ID12を取り付けて摩擦圧接する実験。

- ③ ID10.6同士を摩擦圧力30 MPaで、摩擦速度を27.5、21.7、17.5 s<sup>-1</sup>と変化させて摩擦圧接する実験。

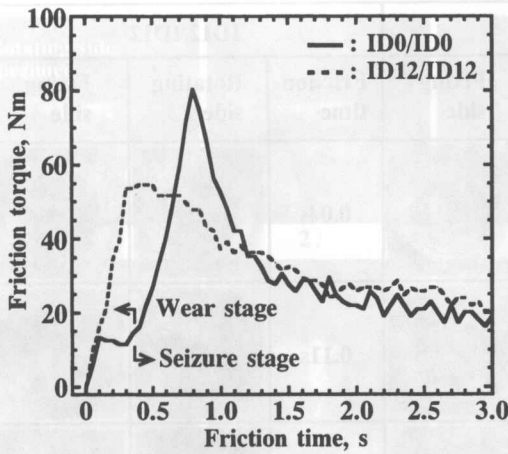
なお、組み合わせた試験片により、①の実験では、ID0/ID0、ID4/ID4、ID8/ID8、ID12/ID12、②の実験では、ID0/ID0、ID4/ID0、ID8/ID0、ID12/ID0と表示する。

## 3. 実験結果および考察

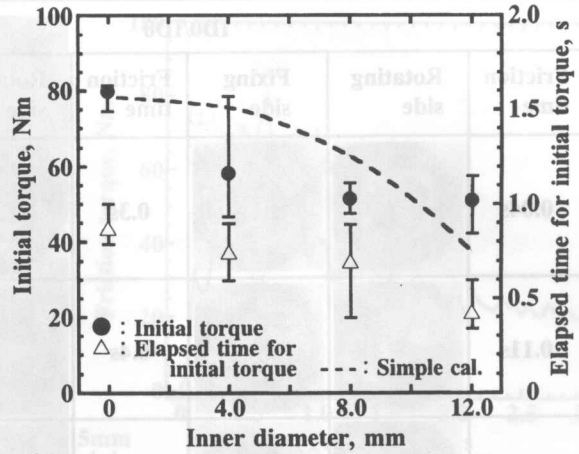
### 3.1 接合現象に及ぼす内径の影響

#### 3.1.1 摩擦トルク

摩擦圧力30 MPa、摩擦速度27.5 s<sup>-1</sup>の圧接条件で、円管内径を種々変化させた実験、すなわち①の実験で得られた摩擦トルク曲線の一例として、中実丸棒同士であるID0/ID0と円管同士であるID12/ID12の結果をFig. 2 (a)に示す。中実丸棒同士の組み合わせであるID0/ID0では、図中の矢印を境に、接合端面同士の接触直後から摩擦トルクがほぼ一定の値を示す擦れ過程<sup>1)</sup>と、圧接面同士が焼付いて摩擦トルクが急上昇する焼付過程<sup>1)</sup>とに分けられることがわかる。しかし、中央部分が存在しないID12/ID12では、一定の摩擦トルク値を示す擦れ過程がほとんどなく、接触直後から摩擦トルクが急上昇して短時間で初期トルクへと到達しており、初期トルクの値も低い。このように円管同士では、中実丸棒同士の場合と異なる摩擦トルク曲線を示すことがわかる。初期トルクの値および初期トルク到達時間を円管内径で整理した結果をFig. 2 (b)に示す。なお、中実丸棒同士の場合、圧接面の焼付温度とその温度における母材のせん断破壊強さとの関係から初期トルクの値を求めることができる簡易計算方法を著者らは既に示している<sup>6)</sup>。この方法を用い、円管の場合では単に軸の中心部分がないと仮定して計算した初期トルクの値をFig. 2 (b)に破線で示した。円管で得られた実験値は中実丸棒同士の場合とは異なりデータのばらつきが大きく、組み合わせた内径に対しては、特にID4/ID4の場合が著しく計算値とは異なる値となっている。ID12/ID12を別として、円管の場合では計算値より低い値となっており、この原因については3.2節で検討する。一方、初期トルク到達時間は内径の増加にともなって減少している。既に示した中実丸棒同士の場合<sup>1)</sup>、圧接面全面が焼付いた後に初期トルクに到達したことを考慮すると、円管の場合、内径の増加とともに初期トルク到達時間が減少するのは、内径の増加にともなって圧接面同士の接触面積が少なくなり、全面が焼付くまでの時間が短くなったためと考えられる。中実丸棒であるID0に対して円管を種々変化させた実験、すなわち②の実験で得られた結果の一例として、ID4/ID0、ID8/ID0およびID12/ID0の各摩擦トルク曲線をFig. 3 (a)に示す。いずれも摩擦トルク

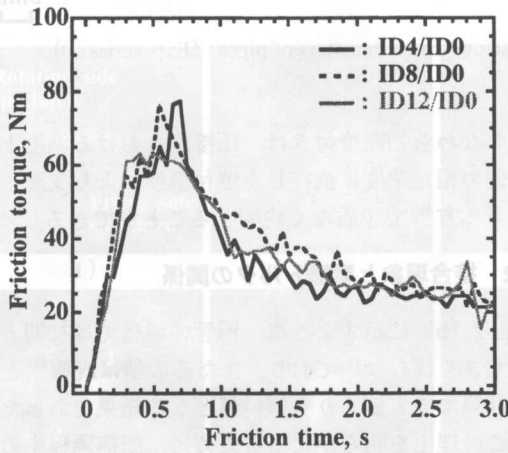


(a) Friction torque curve

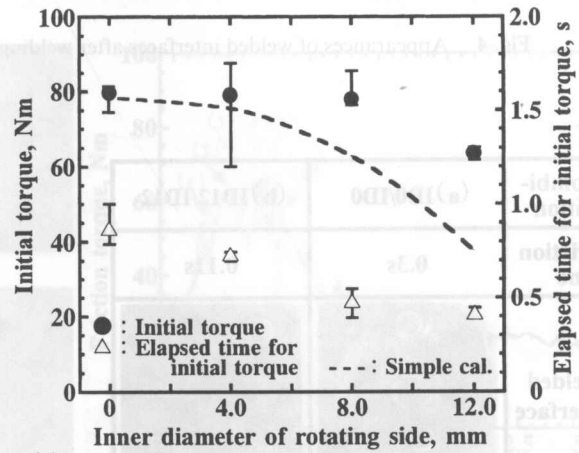


(b) Initial torque and elapsed time for initial torque

Fig. 2 Friction torque parameter under various inner diameters (Exp. series ①).



(a) Friction torque curve



(b) Initial torque and elapsed time for initial torque

Fig. 3 Friction torque parameter under various rotating side inner diameters (Exp. series ②).

が一定値を示す擦れ過程がほとんどみられず、接触直後から摩擦トルクが急上昇して初期トルクへと到達している。中実丸棒に内径の異なる円管を摩擦圧接したときの初期トルクの値および初期トルク到達時間に及ぼす内径の影響を Fig. 3 (b) に示す。データにばらつきがあるものの、初期トルクの値は内径の増加にともなって減少している。しかし、Fig. 2 (b) の場合とは異なり破線で示した簡易計算による計算値よりも実験値の方が高くなった。この原因については3.2節で検討する。一方、初期トルク到達時間はFig. 2 (b) の場合と同様に、内径の増加にともなって減少した。

### 3.1.2 圧接面様相の変化

Fig. 2に示した一連の接合現象に対応した種々の摩擦時間における圧接面の過渡的な様相の変化、すなわち、種々の摩擦時間で瞬時に強制的に引き離れたときの圧接面様相の一例を Fig. 4 に示す。中実丸棒同士である ID0/ID0 の場合、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、回転側、固定側ともに圧接面の外周部には同心円状に

凸凹に擦られた部分が認められる、いわゆる擦れ加工状態<sup>1)</sup> となっており、1/2R 部の一部に焦げ茶色に変色した部分が観察された。また、中央部ではわずかに擦れた跡がみられたものの平面研削した痕がほぼそのままの状態に残っていた。0.11 s となると外周部の擦れ加工状態が中央部へと拡大して変色部分も拡大し、0.2 s となると1/2R 部のほぼ全周が変色部分となった。0.3 s では、1/2R 部付近が青白い色 (写真では白色) に変色しているのが観察された。この部分を光学顕微鏡で観察した結果を Fig. 5 (a) に示す。変色していない領域 A では凸凹が大きく擦れ加工状態であるものの、青白く変色した領域 B では凸凹がほとんどなく平坦な面を呈している。すなわち、既報<sup>1)</sup> で示したように、この部分は焼付いた後にねじりせん断破壊された状態、いわゆる結合分離状態であることがわかる。この後、0.4 s では Fig. 4 に示すように結合分離状態が圧接面の中央部まで拡大し、0.5 s となると圧接面全面が焼付いて結合分離状態を呈した。一方、ID12/ID12 をみると、0.04 s ですでに圧接面全面が擦れ加工状態であり、内径側の一部がまばらに変色している。



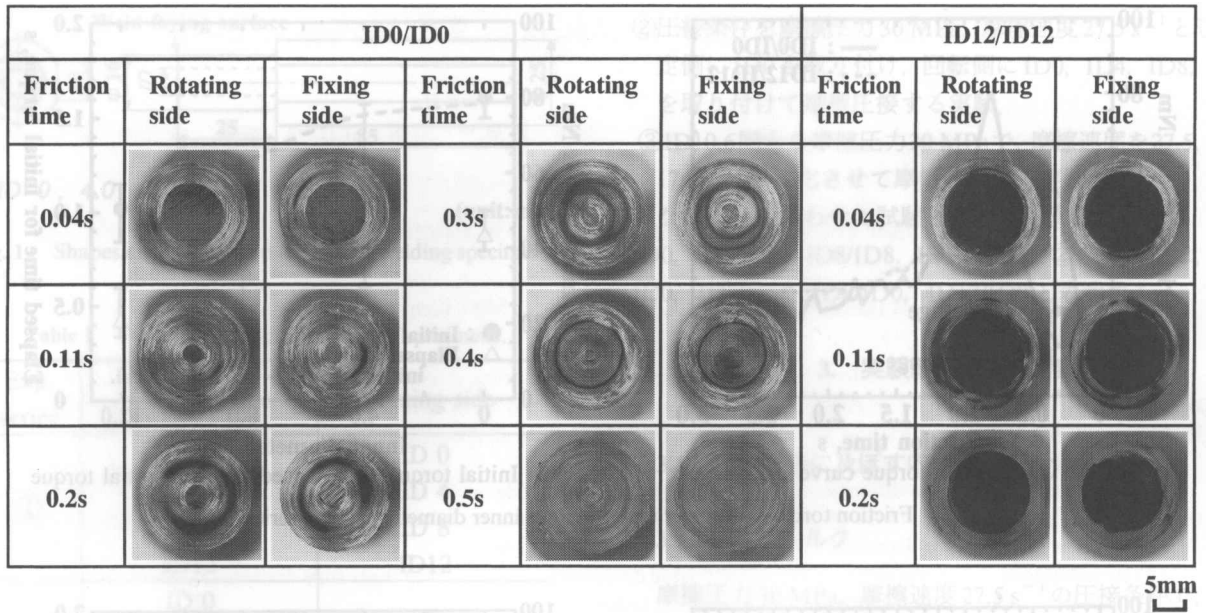


Fig. 4 Appearances of welded interfaces after welding under various inner diameters of pipes (Exp. series ①).

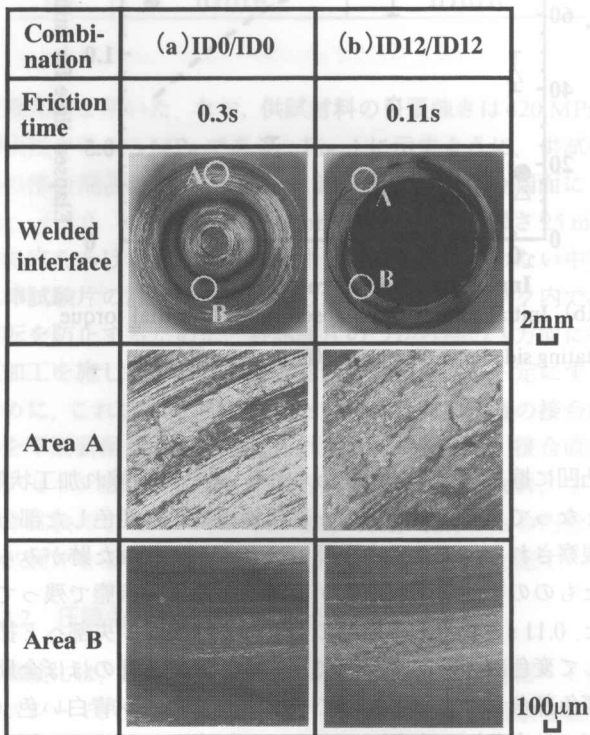


Fig. 5 Appearances and microstructures of welded interfaces after welding under various inner diameters of pipes (Exp. series ①).

0.11 sでは内径側の一部が青白い色に変色した、すなわちこの部分が焼付いて Fig. 5 (b) の領域Bの写真のように結合分離状態へと変化した。その後、Fig. 4に示すように0.2 sとなると圧接面全面が結合分離状態を呈した。このようにID0/ID0とID12/ID12では、圧接面同士が焼付きを生じる時間と位置が異なることがわかる。この圧接面同士の焼付

き、すなわち初期焼付きは、圧接面における温度上昇とその部分の相対速度に依存した焼付温度により支配されるという考え方<sup>4)</sup>で矛盾なく説明することができる。

### 3.2 接合現象と摩擦トルクの関係

Fig. 2 (b) に示すように、円管の場合では初期トルクの値が大きくばらついており、またその値は既報<sup>6)</sup>と同じ手法で計算できる値よりも低い値となる結果であった。そこで、この理由を明らかにするために、摩擦過程での母材外観と摩擦トルクの詳細に観察した。一例として、Fig. 3 (b) に示したように擦れ過程がほとんどないID4/ID4について、高い初期トルクの値が得られた場合の摩擦過程での時間経過ともなう母材外観のビデオ写真と摩擦トルクとの関係をFig. 6に、低い初期トルクの値が得られた場合のそれらをFig. 7にそれぞれ示す。なお、(a) の写真1) ~ 6) は (b) の摩擦トルク曲線中に示す (1) ~ (6) の時間にそれぞれ対応している。高い初期トルクの値が得られたFig. 6において、1) では圧接面近傍の外表面が焦げ茶色(写真では黒色)に変色し始め、2) となると圧接面全体が赤く(写真では白色)なった。このとき、圧接面からわずかではあるが火花を排出しているのがわかる。この間、摩擦トルクは上昇し続け、3) のようにばりを排出して寄り始め、(4) の初期トルクへ到達した。その後、摩擦トルクが減少し、5) から6) へと摩擦時間の経過ともなうばりの排出量が多くなった。一方、低い初期トルクの値が得られたFig. 7では、1) のように圧接面近傍の外周表面が焦げ茶色に変色し始め、2) となると圧接面全体が赤くなり、圧接面から火花が排出した。3) となると火花の排出がさらに多くなり、ばりを排出して寄り始めた。そして、4) および5) のように火花を飛び散らしながら寄り変形が増加し、(2) から(5) において摩擦トルクの増減を繰り返しながら初期トルクへ

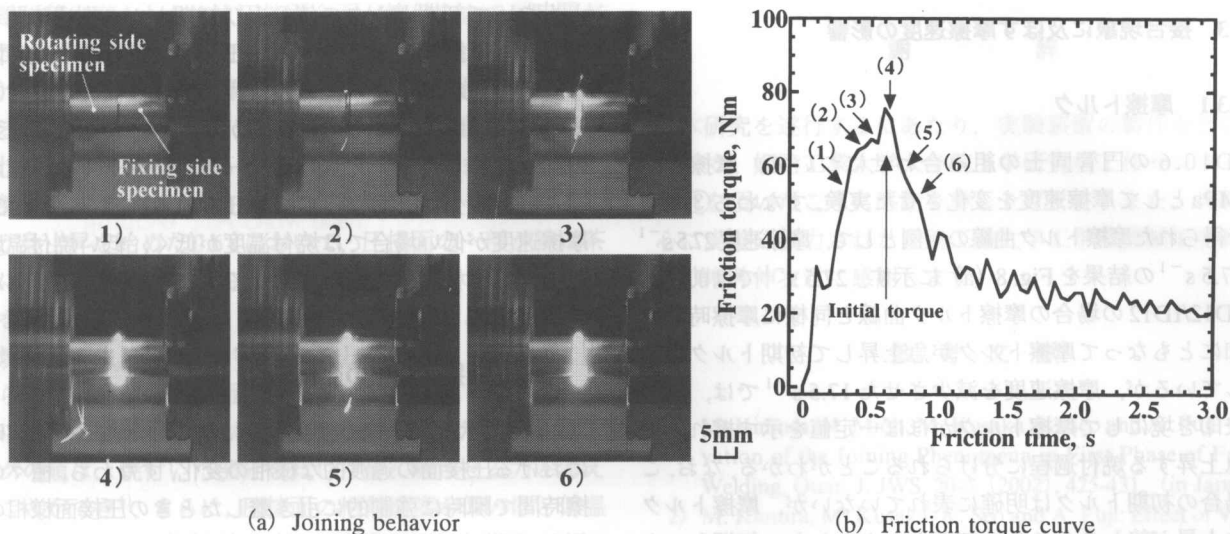


Fig. 6 Joining behavior and friction torque curve during friction welding process at high initial torque of ID4/ID4.

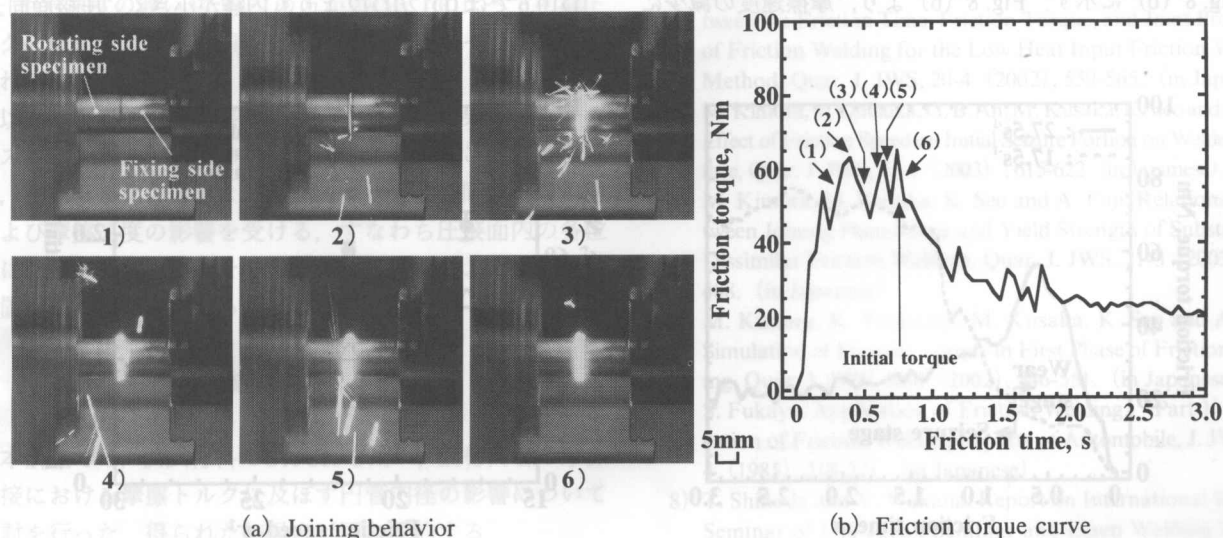


Fig. 7 Joining behavior and friction torque curve during friction welding process at low initial torque of ID4/ID4.

と到達した。その後、摩擦トルクが低下して6) のようにばりの量が多くなり、火花の排出はなくなった。このように同一圧接条件、同一円管模擬試験片で接合したにもかかわらず、摩擦過程での母材外観と摩擦トルク曲線に差異が認められた。特に、低い初期トルクの値が得られた場合では、高い場合と異なり摩擦過程において激しく火花が飛び散り、火花の飛び散り直後に摩擦トルクの値が低下していることが明らかとなった。円管同士の場合、圧接面同士の接触部で発生した熱は中央部へ伝達することがないため、圧接面の接触状態のわずかな偏りに起因して接触部が局部的に高温となって焼付き、この部分が火花として飛び散る。これは、Fig. 4の摩擦時間0.11 sの写真のように圧接面同士の初期焼付位置がばらつきやすい結果からも明らかであり、最終的に最も摩擦抵抗が大きい部分から変形し、圧接面がさらに不均一に摩擦される。その結果、強く接触した部分のみが局部的に高温となりこの部分の母材が火花として飛

び散る。そのため、全面が均一に焼付く場合に比べて初期トルクの値は小さくなる。この火花の飛び散りは非常に不安定なものであるため、結果として初期トルクの値が大きくばらつくことになる。これに対し中実丸棒同士では、圧接面同士の接触で発生した熱は中央部へ伝達するため、局部的に高温とはならない。また、仮に局部的に高温となったとしても中央部分があることから接触状態のわずかな偏りが修正されるため、圧接面同士は不均一に摩擦されない。このため、母材が飛び散ることなく均一に焼付き、初期トルクの値が高くなったと考えられる。また、Fig. 3 (b)に示す円管と中実丸棒の組み合わせでは、初期トルクの値が破線で示した計算値よりも高くなった。中実丸棒と円管の組み合わせでは、円管の内側に排出するばりが初期トルクの値に影響するためであり、計算ではこれを考慮していないため、初期トルクの値が計算値よりも高くなったものと思われる。

### 3.3 接合現象に及ぼす摩擦速度の影響

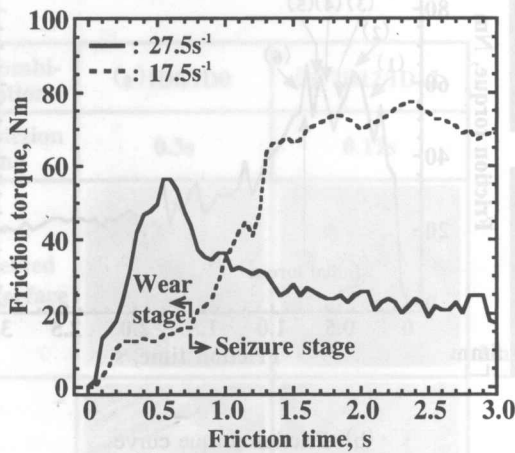
#### 3.3.1 摩擦トルク

ID10.6の円管同士の組み合わせについて、摩擦圧力30MPaとして摩擦速度を変化させた実験、すなわち③の実験で得られた摩擦トルク曲線の一例として、摩擦速度 $27.5\text{ s}^{-1}$ と $17.5\text{ s}^{-1}$ の結果をFig. 8 (a) に示す。 $27.5\text{ s}^{-1}$ では前述したID12/ID12の場合の摩擦トルク曲線と同様に摩擦時間の増加にともなって摩擦トルクが急上昇して初期トルクに到達しているが、摩擦速度を減少させた $17.5\text{ s}^{-1}$ では、図中の矢印を境にして摩擦トルクがほぼ一定値を示す擦れ過程と急上昇する焼付過程に分けられることがわかる。なお、この場合の初期トルクは明確に表れていないが、摩擦トルクの急上昇が終わるところを初期トルクとした。初期トルクの値および初期トルク到達時間を摩擦速度で整理した結果をFig. 8 (b) に示す。Fig. 8 (b) より、摩擦速度の減少に

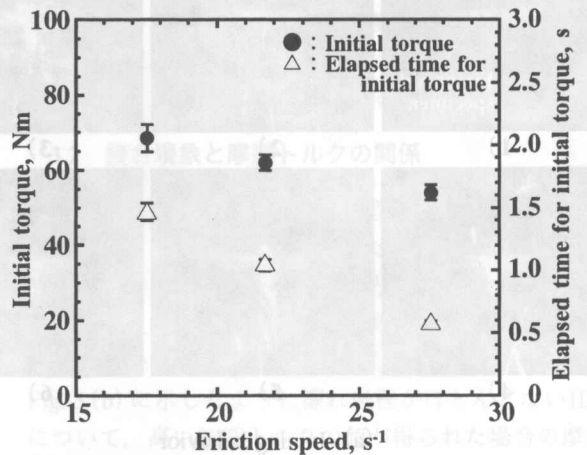
ともなって初期トルクの値および初期トルク到達時間が増加した。摩擦速度が減少すると圧接面に生じる単位時間当たりの熱量が低下する。そのため、圧接面同士が焼付き始める温度まで上昇するのに時間がかかり、初期トルク到達時間が増加したと考えられる。一方、初期トルクの値が摩擦速度の減少にともなって増加している。これについては、摩擦速度が低い場合では焼付温度が低く、低い焼付温度に対応する母材降伏強度が高くなる<sup>4)</sup> ことから、初期トルクの値が増加したと考えられる。

#### 3.3.2 圧接面様相の変化

Fig. 8に示した一連の接合現象に対応した種々の摩擦時間における圧接面の過渡的な様相の変化、すなわち、種々の摩擦時間で瞬時に強制的に引き離れたときの圧接面様相の一例をFig. 9に示す。摩擦速度 $27.5\text{ s}^{-1}$ では、Fig. 4に示したID12/ID12の場合の結果とほぼ同じ変化を示すが、ID10.6/ID10.6ではID12/ID12よりも内径が小さく、圧接面同士の



(a) Friction torque curve



(b) Initial torque and elapsed time for initial torque

Fig. 8 Friction torque parameter under various friction speeds of pipe to pipe joint (Exp. series ③).

| Friction speed: $27.5\text{ s}^{-1}$ |               |             | Friction speed: $17.5\text{ s}^{-1}$ |               |             |               |               |             |
|--------------------------------------|---------------|-------------|--------------------------------------|---------------|-------------|---------------|---------------|-------------|
| Friction time                        | Rotating side | Fixing side | Friction time                        | Rotating side | Fixing side | Friction time | Rotating side | Fixing side |
| 0.04s                                |               |             | 0.04s                                |               |             | 0.6s          |               |             |
| 0.11s                                |               |             | 0.11s                                |               |             | 0.9s          |               |             |
| 0.3s                                 |               |             | 0.3s                                 |               |             |               |               |             |

Fig. 9 Appearances of welded interfaces after welding under various friction speeds of pipe to pipe joint (Exp. series ③).



接触面積が増えたために圧接面全面が焼付くまでに時間がかかり、摩擦時間 0.3 s で一部が焼付いて Fig. 5 (a) または (b) に示した領域 B の写真のように結合分離状態となっていることがわかる。一方、 $17.5 \text{ s}^{-1}$  では、外周部から擦れ加工状態が内側へと向かって進行し、0.3 s でもまだ擦れ加工状態であった。そして、Fig. 8 (a) に示したように摩擦トルクが急上昇を始めた 0.6 s において、圧接面の一部が焦げ茶色に変色し、0.9 s となるとこの一部が焼付いて結合分離状態を呈した。このように、摩擦速度が変化すると圧接面同士が焼付きを生じる時間が異なることがわかる。以上のことから、摩擦速度と圧接面の焼付きおよび初期トルクとの関係は、定性的に以下のように整理することができる。初期トルクの値は、焼付いた部分をねじりせん断させる力と考えることができ<sup>6)</sup>、さらに、圧接面の相対速度が低いほど低温で焼付くことから<sup>4)</sup>、摩擦速度が低い条件ほど初期トルクの値は高く、また初期トルク到達時間は長くなる。したがって、相対速度の遅い  $17.5 \text{ s}^{-1}$  の方が  $27.5 \text{ s}^{-1}$  に比べて初期トルクの値が高くなり、Fig. 8 (b) の結果となったものと思われる。

以上のように円管の接合現象を観察した結果、接合メカニズムは中実丸棒同士の場合と同様に考えることができるが、初期トルクの値および初期トルク到達時間は円管内径および摩擦速度の影響を受ける、すなわち圧接面内の各位置における温度上昇とその部分の相対速度により初期焼付位置が異なることが明らかとなった。

#### 4. 結 言

本研究では、供試材料に S15CK を用い、鋼材円管の摩擦圧接における摩擦トルクに及ぼす円管内径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) 同一圧接条件で円管の内径を変化させた場合、摩擦トルク曲線、特に擦れ過程に大きな差異がみられた。また、円管内径の増加にともなって初期トルクの値は減少し、初期トルク到達時間は短くなった。
- (2) 中実丸棒に対して円管の内径を変化させた場合、同一圧接条件でも組み合わせる円管内径の増加にともなって初期トルクの値は減少するが、計算値よりも大きくなった。また、初期トルク到達時間は短くなった。
- (3) 同一圧接条件で接合しても円管同士では摩擦トルク曲線に大きなばらつきが認められた。これは、圧接面からの火花の飛び散りの有無に大きく依存しており、円管では、中実丸棒同士より第 1 位相は不安定な状態となる。
- (4) 同一内径で摩擦速度を変化させた場合、摩擦トルク曲線、特に擦れ過程に大きな差異がみられた。また、摩擦速度の減少にともなって初期トルクの値が増加した。これは、初期トルクの値は焼付いた部分をねじりせん断破壊する力であることを考慮すると、摩擦速度が低い条件では低い温度で焼付き、摩擦速度が高い条件では高い温度で焼付くということの説明できる。

#### 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。また、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学科学部生の増井伸次君に感謝します。

#### 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, 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)
- 4) M. Kimura, Y. Ohtsuka, G. B. An, M. Kusaka, K. Seo and A. Fuji: Effect of Friction Speed on Initial Seizure Portion on Welded Interface, *Quar. J. JWS*, 21-4 (2003), 615-622 (in Japanese).
- 5) M. Kimura, M. Kusaka, K. Seo and A. Fuji: Relationship between Joining Phenomena and Yield Strength of Substrates of Dissimilar Friction Welding, *Quar. J. JWS*, 21-3 (2003), 481-488. (in Japanese)
- 6) 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)
- 7) S. Fukaya: Application of Friction Welding - (Part 1) Application of Friction Welding to parts of Automobile, *J. JWS*, 54-4 (1985), 218-221. (in Japanese)
- 8) T. Shinoda and Y. Wakana: Report on International Welding Seminar of UK-Japan Seminar and Essen Welding Fair, *J. JFWA*, 5-1 (1998), 24-28. (in Japanese)
- 9) American Welding Society: *Welding Handbook Eighth Edition Vol. 2*, American Welding Society (1991), 759-761.
- 10) M. Okamura: Application of Friction Welding - (Part 2) Application of Friction Welding to parts of Industrial Machinery, *J. JWS*, 54-6 (1985), 336-340. (in Japanese)
- 11) K. Okuyama: Application of Friction Welding - (Part 3) Friction Welding of Unit Parts and Status of Friction Welding Jobs by Contract, *J. JWS*, 54-6 (1985), 341-345. (in Japanese)
- 12) H. Tokisue and K. Katoh: Friction Welding of Austenitic Stainless Steel Pipe, *Journal of The College of Industrial Technology Nihon University*, 21-1 (1988-6), 1-8. (in Japanese)
- 13) K. Ogawa, S. Kaga and K. Adachi: Friction Welding of Aluminium, *J. Light Metal Welding & Construction*, 19-10 (1981), 448-454. (in Japanese)
- 14) B.J. Eberhard, B.W. Schaaf, A.D. Wilson: Friction Weld Ductility and Toughness As Influenced by Inclusion Morphology, *Weld. J.*, 62-7 (1983-7), 171-s-178-s.
- 15) M. Hasegawa, T. Asada, N. Taki and Y. Ozawa: Study on the Friction Welding Condition of Polyethylene Pipe, *J. JFWA*, 4-3 (1997), 13-18. (in Japanese)
- 16) G. Kawai, K. Ogawa, H. Ochi and H. Tokisue: Friction weldability of various aluminum alloy pipe to SUS304 stainless steel pipe, *J. Japan Institute of Light Metals*, 49-2(1999), 83-88. (in Japanese)