

摩擦圧接における塑性流れの研究*

棟 徹 夫**

二 俣 正 美**

(昭和51年4月30日受理)

A Study of the Plastic Flow Displacement in Friction Welding

by Tetsuo TOH and Masami FUTAMATA

In friction welding, the growth of burrs or of the heat-affected zone is closely correlated with the plastic flow displacement. Some experiments on these problems have been carried out by the authors.

In this paper, several results are obtained to make clear the mechanism of friction welding, applying the theoretical analysis of the plastic flow displacement to the forge process and measuring the growth quantities of burrs and heat-affected zone under several conditions.

Calculated values from the theoretical formulas introduced into this analysis don't perfectly agree with the experimental ones, however these formulas are useful practically to estimate the displacement of the plastic zone of the weldment.

On the growth of burrs we can recognize that they have the symmetriccurled cross sections with increasing of the amount of reduction, and that the width and height of the cross section depend on the forging presure and the amount of reduction. The trend on the heat-affected zone is also same as the above.

1. ま え が き

摩擦圧接法は摩擦を有効に利用し、その発熱によって固体を接合する方法で、摩擦運動には主として回転運動を用いるので特に円形断面を有する材料の端面接合に適している。

圧接材料は同種材ばかりでなく異種材の接合も可能で、また短時間に接合が完了することなどから、現在では機械工業をはじめとして各種の分野で採用されつつある。

接合面は、その接触面が加圧されつつ相対運動することによって発生する摩擦熱によって加熱され、半溶融状態に至って溶接されることになる。しかし、摩擦圧接の機構は摩擦熱そのものが複雑な発生内容を持っていること、軸方向運動と回転運動の組合せと材料の塑性流れ

* 溶接学会昭和49年度秋季全国大会(11月, 仙台)に於て講演発表

** 北見工業大学機械工学科

との関係が必ずしも明らかにされていないことなど、細部にわたって解明すべきことは少くない。

摩擦圧接現象のうち摩擦熱の発生、摩擦トルクの解析並びに圧接部の温度の解明などに関する研究は多く行われているが¹⁻⁷⁾、他方溶接材内部に生ずる圧接時の塑性流れは、圧接の際のバリの生成に関連するとともに接合機構ともかかわりが深いため、摩擦圧接機構を解明するための要因として一部にその研究が進められている⁸⁻¹⁰⁾。

摩擦圧接の場合、加熱され半溶融状態になる部分が接合部付近に限られるため、部分的に流れの急変を生じ、ほぼ均一な条件で流れが発生する通常の塑性加工の場合とは異なるものと考えられる。

筆者らは圧接材の接合端面から熱影響部終端に至る間に塑性域を仮定し、その部分に塑性流れ理論を適用して解析を行い、炭素鋼について実験し、理論値と実験値を対比して理論式の有効性を確めた。また接合部の塑性流れの結果として外部に流出形成される、いわゆるバリの発生形状および熱影響部の生成について観察し、それらについての相関を求めた。その結果、炭素鋼の摩擦圧接現象を解明するについて、2, 3の新しい知見を得た。

2. 塑性流れ理論の導入

塑性学における塑性流れ理論を摩擦圧接に適用するために、圧接の過程における試片の変形を表すモデルを設定した。モデルの内部を摩擦熱の影響の少ない固い部分と摩擦熱によって半溶融状態となる塑性部分とに分け、半溶融状態にある接合2面間の速度と塑性部分(塑性域)

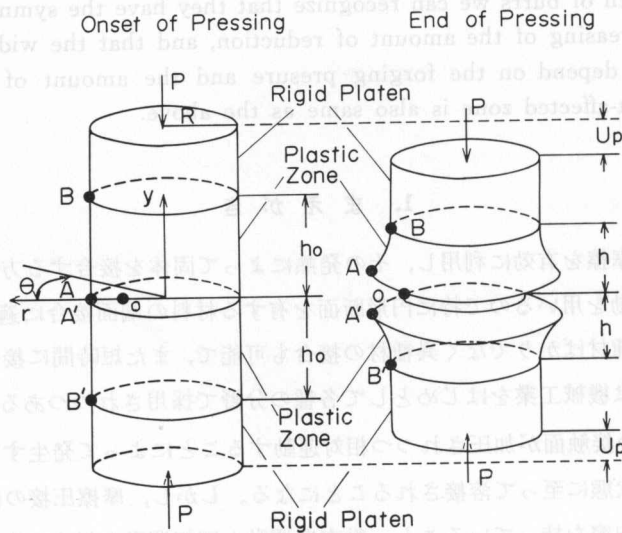


図1 摩擦圧接の前後における接合試片

Fig. 1. Weld pieces before and after pressing during the friction welding.

の物質の移動量を理論的に算出することによって、塑性流れを解析した。

図1はそのように設定した接合のモデルで、バリの生成が典型的な場合を図示している。図中左が圧接開始前、右が圧接開始後の状態を示しているが、図に見られるように、加熱過程で生成される塑性域は接合面の両側に等しい距離 h の間隔で存在する。すなわち、圧接開始前に仮定した塑性域の距離 h_0 が圧接中の加圧力 P によって h の長さに変形するが、その場合塑性域外の固い部分は、塑性域を圧縮するための Platen の作用をし、その結果塑性流れが起り、アプセット量として U_p だけ短縮すると考える。圧接中は、圧接材の固い部分と塑性域との境界は平たく、かつ接合面にも平行のままであると仮定する。

図1の左図においては、圧接開始前の OA , OA' は圧接材の相接する接合面内にあり、一方 AB , $A'B'$ は圧接材の側面に沿っているが、右図のバリ発生後の曲線の輪郭 AB および $A'B'$ は、次のことを表わしている。

すなわち、放射状に移動する塑性流れの速度は相接している中間面において最高の値となり、それから順次減少して、固い部分と塑性域との境界 $y = \pm h$ のところで速度は零となる。

2.1 速度領域

図2は圧接材の塑性域内の速度分布図である。 V_0 は圧接の進行とともに圧接材の固い部

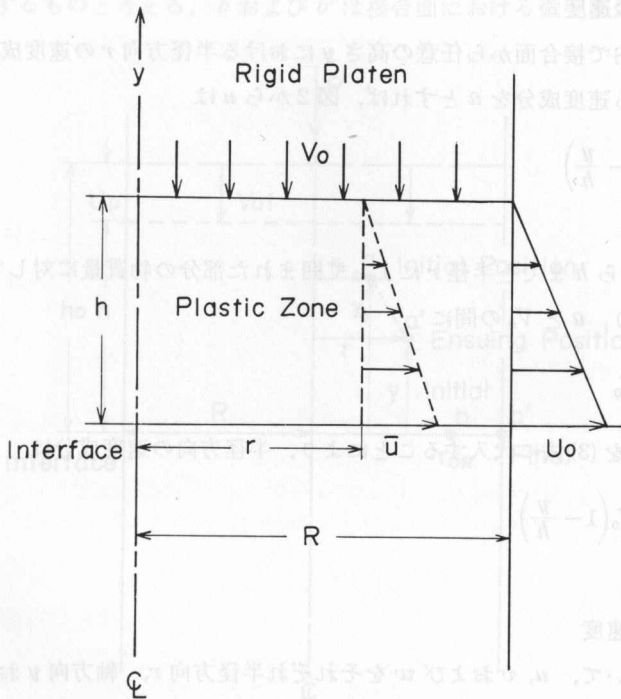


図2 試片の塑性域内の速度分布図

Fig. 2. Distribution of flow velocity within the plastic zone of the weld piece.

分が接合面に向かって進む速度(一定)で、 U_0 は半径方向(放射状)の速度である。典型的な曲線状のバリが発生する境界での半径方向の速度は、 $y = \pm h$ における零から $y = 0$ における U_0 まで、直線的に分布すると仮定する。

いま上記のほかに

t : 圧接時間(圧接開始から圧接終了までの時間)

U_p : 圧接材のアプセット量

h_0 : 圧接開始時の仮定塑性域の長さ

h : 圧接開始後の任意の時間における塑性域の長さ

とすると、次のような関係式が導かれる。

$$U_p = V_0 t \quad (1)$$

$$h = h_0 - U_p \quad (2)$$

なお、 h_0 は次のように仮定する。すなわち、その時の圧接応力レベルで、平均温度と圧縮変形に必要な最低温度とが等しくなる接合面からの軸方向の距離とする。このことは、圧接材の温度と圧縮応力を考えることによって、熱影響部と半溶融部との間の解析的結びつきを与える助けとなると思われる。

(a) 半径方向の速度

いま、塑性域内で接合面から任意の高さ y における半径方向 r の速度成分を u 、接合面内の任意の点における速度成分を \bar{u} とすれば、図2から u は

$$u = \bar{u} \left(1 - \frac{y}{h} \right) \quad (3)$$

で表わされる。

次に、 $y = 0$ から h までと半径 r によって囲まれた部分の物質量に対して、連続の定理を適用することにより、 \bar{u} と V_0 の間に

$$\bar{u} = \frac{r}{h} V_0 \quad (4)$$

が成り立ち、(4)式を(3)式に代入することにより、半径方向の速度成分は

$$u = \frac{r}{h} V_0 \left(1 - \frac{y}{h} \right) \quad (5)$$

で書き表わされる。

(b) 軸方向の速度

円柱座標において、 u 、 v および w をそれぞれ半径方向 r 、軸方向 y および円周方向 θ の速度成分とすれば、ひずみ速度成分は

$$\dot{\epsilon}_r = \frac{\partial u}{\partial r} \quad (6)$$

$$\dot{\epsilon}_\theta = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial w}{\partial \theta} + u \right) \quad (7)$$

$$\dot{\epsilon}_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (8)$$

となる^{11,12)}。

塑性における体積不変の条件

$$\dot{\epsilon}_r + \dot{\epsilon}_\theta + \dot{\epsilon}_y = 0 \quad (9)$$

において、いま圧接材の相対的回転運動がない場合とすれば $w=0$ となるので、(5)式を(6)式および(7)式に代入し、変形した後(8)式とともに(9)式に代入して積分し、 $y=0, v=0$ の境界条件を用いて整理すれば、軸方向の速度成分は

$$v = V_0 \left(\frac{y^2}{h^2} - 2 \frac{y}{h} \right) \quad (10)$$

で表わされる。

2.2 移動領域

図3は圧接材中の塑性域内にとった微小部分の移動線図を表わしている。圧接によって、塑性域内の微小部分の最初の位置 a (半径方向 r_0 , 軸方向 y_0) が、最終の位置 a' (半径方向 r , 軸方向 y) に移動するものとする。 b および b' は接合面における微小部分の移動位置を示す

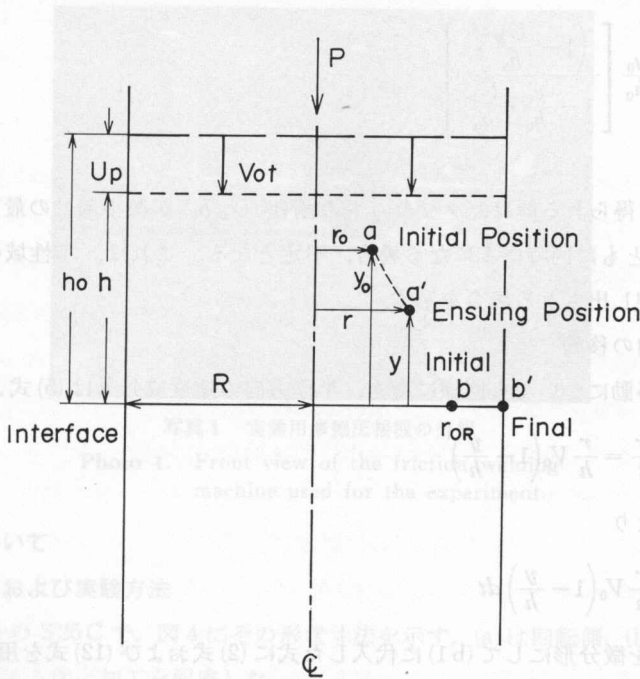


図3 塑性域内の微小部分の移動線図

Fig. 3. Displacement diagram of differential element within the plastic zone.

もので、この場合は半径方向のみとなる。以上の図をもとに、次のような関係式が導かれる。

(a) 軸方向の移動

軸方向の速度成分 v は (10) 式より

$$v = \frac{dy}{dt} = V_0 \left(\frac{y^2}{h^2} - 2 \frac{y}{h} \right)$$

となるが、これより

$$dy = V_0 \left(\frac{y^2}{h^2} - 2 \frac{y}{h} \right) dt \quad (\text{a 1})$$

(1) 式の両辺を微分形にして (a 1) に代入した式に (2) 式を用いれば

$$dy = \left[\left(\frac{y}{h_0 - U_p} \right)^2 - 2 \left(\frac{y}{h_0 - U_p} \right) \right] dU_p \quad (11)$$

が得られる。

(11) 式を変数変換して積分し、初期条件 $U_p = 0, y = y_0$ を用いて解けば、圧接中の塑性域内の軸方向の移動は、最終的に

$$y = \frac{y_0(h_0 - U_p)^2}{h_0^2 - y_0 \cdot U_p} \quad (12)$$

で表わされる。これを無次元の形に変形して

$$\frac{y}{h_0} = \frac{y_0}{h_0} \left[\frac{\left(1 - \frac{U_p}{h_0} \right)^2}{1 - \frac{y_0}{h_0} \cdot \frac{U_p}{h_0}} \right] \quad (13)$$

が得られる。

上式によって得られる解は、アプセットの割合 (U_p/h_0) が微小部分の最初の位置の塑性内の割合 (y_0/h_0) とともに同時に 1 になる場合、不定となる。これは、塑性域のすべての部分がバリのところに押し出される場合を示す。

(b) 半径方向の移動

半径方向の移動についても同様に考え、半径方向の速度成分 u は (5) 式より

$$u = \frac{dr}{dt} = \frac{r}{h} V_0 \left(1 - \frac{y}{h} \right)$$

となるが、これより

$$dr = \frac{r}{h} V_0 \left(1 - \frac{y}{h} \right) dt \quad (\text{b 1})$$

(1) 式の両辺を微分形にして (b 1) に代入した式に (2) 式および (12) 式を用いて式を整理すれば

$$\frac{dr}{r} = \left[\frac{h_0^2 - y_0 \cdot h_0}{(h_0 - U_p)(h_0^2 - y_0 \cdot U_p)} \right] dU_p \quad (14)$$

が得られる。

この式を積分し、初期条件 $U_p=0, r=r_0$ を用いて解けば、圧接中の塑性域内における半径方向の移動は、最終的に

$$r = \frac{r_0(h_0^2 - y_0 \cdot U_p)}{h_0^2 - h_0 \cdot U_p} \quad (15)$$

となり、無次元化して

$$\frac{r}{R} = \frac{r_0}{R} \left(\frac{1 - \frac{y_0}{h_0} \cdot \frac{U_p}{h_0}}{1 - \frac{U_p}{h_0}} \right) \quad (16)$$

が得られる。ここにおける R は、接合部分のもとの半径に等しい。

3. 実 験

実験は2段階に分けて行い、実験Iでは理論値と実験値を対比し、両者の関係から理論式の適用性を検討した。実験IIではバリの形状、熱影響部幅の変化を測定し、圧接条件との定量的関係を求めた。実験に使用した摩擦圧接機は筆者らの試作になるもので¹³⁾、写真1にその外観を示す。使用回転数は2100 rpmと一定にした。

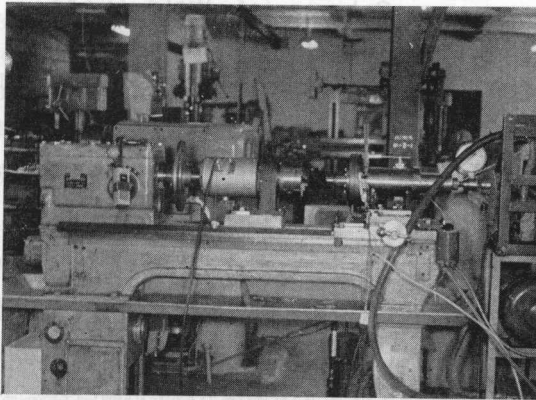


写真1 実験用摩擦圧接機の外観

Photo 1. Front view of the friction welding machine used for the experiment.

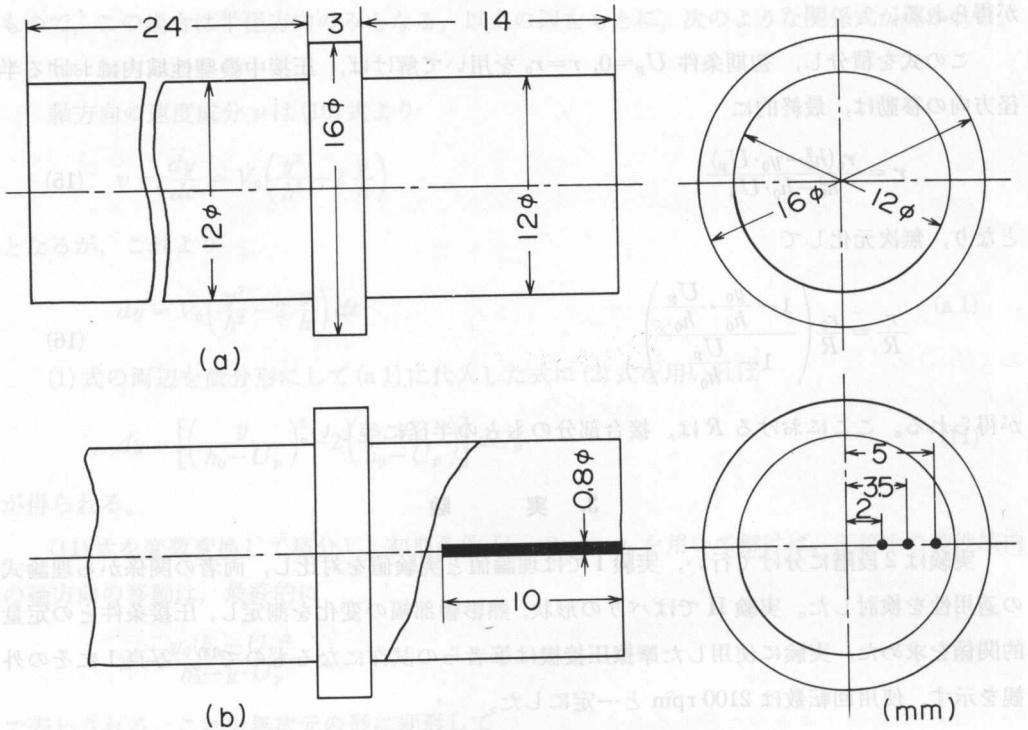
3.1 実験Iについて

3.1.1 供試材および実験方法

供試材は16φのS25Cで、図4にその形状寸法を示す。(a)は回転側、(b)は固定側で接合端面は直角になるよう仕上げ加工を配慮した。

圧接開始にあたって、接合面の油、ちりその他の異物をのぞくよう慎重に清拭した。

固定側の供試材には、図に示すように接合端面から軸方向に深さ10 mm、中心軸から半径



Scheme of Weld Piece

図4 供試材の形状寸法ならびに銅線挿入位置

Fig. 4. Shapes and dimensions of weld pieces, and inserting positions of copper wires.

方向に一直線上にそれぞれ 2, 3.5 および 5 mm の位置に 0.8ϕ の細孔をあけ、それぞれの孔に 0.7ϕ 、長さ 10 mm の銅線を挿入した。

この銅線は圧接終了後、材料の塑性流れによる移動位置を知るためのものであるが、そのため、圧接終了後銅線を挿入した方の供試材を接合面から最初 6 mm の位置で軸に直角に切断し、その面での銅線の位置を顕微鏡を用いて計測した後、順次接合面に向かって 0.1 mm ずつ慎重に切削し、ついに銅線が観測できなくなる迄銅線の位置の測定を繰返した。

圧接条件としては、加熱圧力は 4 kg/mm^2 、 6 kg/mm^2 の 2 通り、アプセット量は 1, 2, 3 および 4 mm の 4 通りを採用した。

以上の実験方法で得られた銅線の移動位置をグラフにプロットするとともに、グラフの変曲開始点 (h) から最初の仮定塑性域の長さ h_0 ($h_0 = h + U_p$) を読みとり、先の理論式から塑性域の移動点を計算し、同一グラフにプロットした。

3.1.2 実験結果および考察

表 1 に測定結果の 1 例を示す。表中、 P は加熱圧力 (kg/mm^2)、 U_p はアプセット量 (mm)、 r は軸中心から銅線中心までの距離 (mm)、 y は接合面から銅線端面までの距離 (mm) である。

表1 挿入銅線の移動位置の測定値例

Table 1. Values of displacement measuring of inserted copper wires.

y (mm)	P=4 (kg/mm ²)											
	r (mm)											
	U _p =1 (mm)			U _p =2 (mm)			U _p =3 (mm)			U _p =4 (mm)		
3.0	2.03	3.53	5.04	1.96	3.51	5.00	2.10	3.60	4.92	1.95	3.48	4.99
2.7	2.01	3.54	5.07	1.98	3.53	4.98	2.12	3.65	4.92	1.94	3.50	4.92
2.4	2.04	3.52	5.07	1.92	3.54	5.02	2.07	3.62	4.95	1.92	3.52	4.98
2.3	2.04	3.53	5.02	1.93	3.51	5.01	2.08	3.61	4.90	1.96	3.50	4.96
2.2	2.02	3.52	5.08	1.92	3.51	5.00	2.10	3.62	4.91	1.95	3.50	4.98
2.1	2.03	3.52	5.02	1.94	3.52	5.06	2.15	3.60	4.95	1.95	3.45	4.92
2.0	2.05	3.50	5.01	1.92	3.50	5.00	2.14	3.68	4.95	2.00	3.49	5.03
1.9	2.04	3.55	4.98	1.96	3.52	5.10	2.25	3.70	5.15	2.01	3.52	5.14
1.8	2.03	3.65	4.96	1.98	3.55	4.98	2.28	3.71	5.10	2.05	3.56	5.24
1.7	2.03	3.72	5.04	2.05	3.50	5.00	2.40	3.80	5.35	2.08	3.61	5.47
1.6	2.01	3.70	5.08	2.03	3.61	5.10	2.40	3.86	5.40	2.17	3.82	5.67
1.5	2.05	3.70	5.05	2.01	3.60	5.10	2.35	3.85	5.75	2.19	4.90	—
1.4	2.08	3.65	5.09	2.02	3.62	5.25	2.48	3.90	5.82	2.30	4.01	—
1.3	2.10	3.60	5.28	2.16	3.85	5.46	2.60	4.10	5.92	2.41	4.32	—
1.2	2.09	3.60	5.28	2.16	3.87	5.62	2.62	4.10	—	2.55	4.42	—
1.1	2.09	3.70	5.35	2.24	4.21	5.65	2.75	4.35	—	2.60	4.58	—
1.0	2.09	3.70	5.61	2.26	4.28	—	2.79	—	—	2.75	4.80	—
0.9	2.15	3.81	5.89	2.30	4.42	—	2.90	—	—	—	—	—
0.8	2.30	3.85	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.7	2.28	4.15	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.6	2.30	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.5	2.34	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

また、—は銅線の位置が観測されなくなり、データが得られなくなったことを示す。

図5から図8までは、実験を通じて得た実測値と理論値を示す。それぞれの U_p/h_0 の値 (ただし平均値) は、図5では0.364, 図6では0.507, 図7では0.589, 図8では0.651の場合である。

以上の結果から次のことが考察された。

(1) 圧接材の軸中心から外周に近づくにつれて、移動幅が著しくなるのが認められた。これは中心部付近における流れが、半径方向よりも軸方向に多く移動することを示している。

(2) 塑性流れが開始する点の接合面からの距離は、アプセット量が大になるに従って大きくなっており、また加熱圧力が小さいほど同様の傾向を示した。

(3) 実験値と理論値を対比すると、全体として実験値の方が中心線側にあるが、外周に近くなるにつれて両者の間の誤差の増加が認められた。その場合、加熱圧力が増加すればその誤

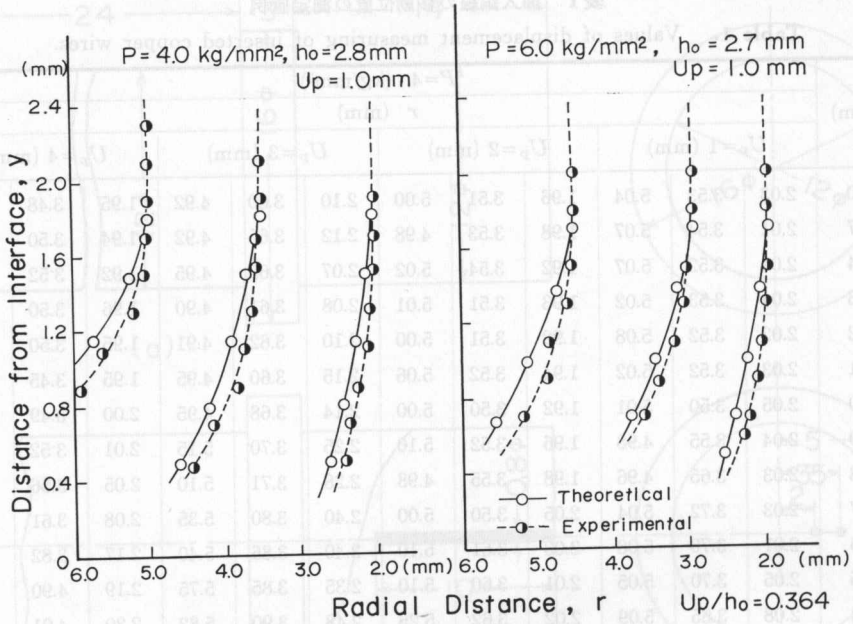


図5 S25Cにおける塑性域の移動グラフ ($U_p/h_0=0.364$)

Fig. 5. Displacement of the plastic zone on the specimen of S25C during forging, $U_p/h_0=0.364$.

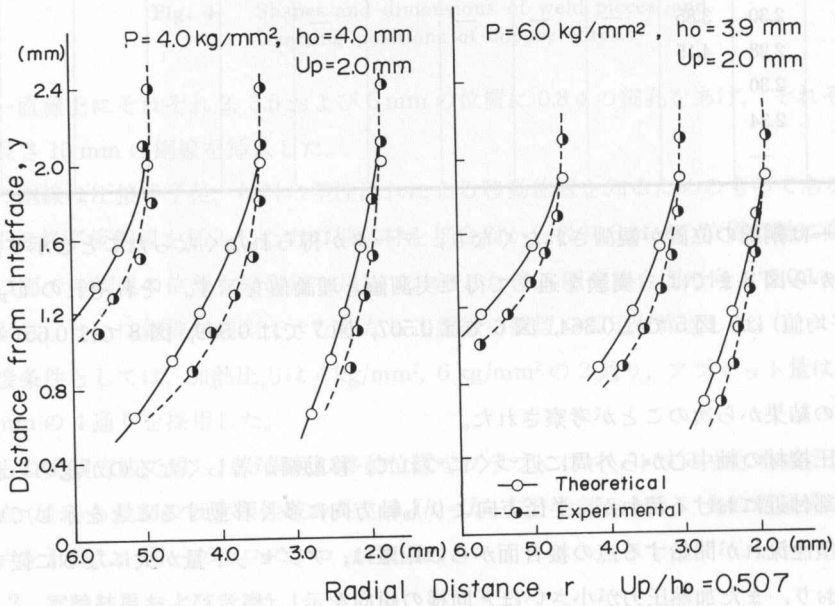


図6 S25Cにおける塑性域の移動グラフ ($U_p/h_0=0.507$)

Fig. 6. Displacement of the plastic zone on the specimen of S25C during forging, $U_p/h_0=0.507$.

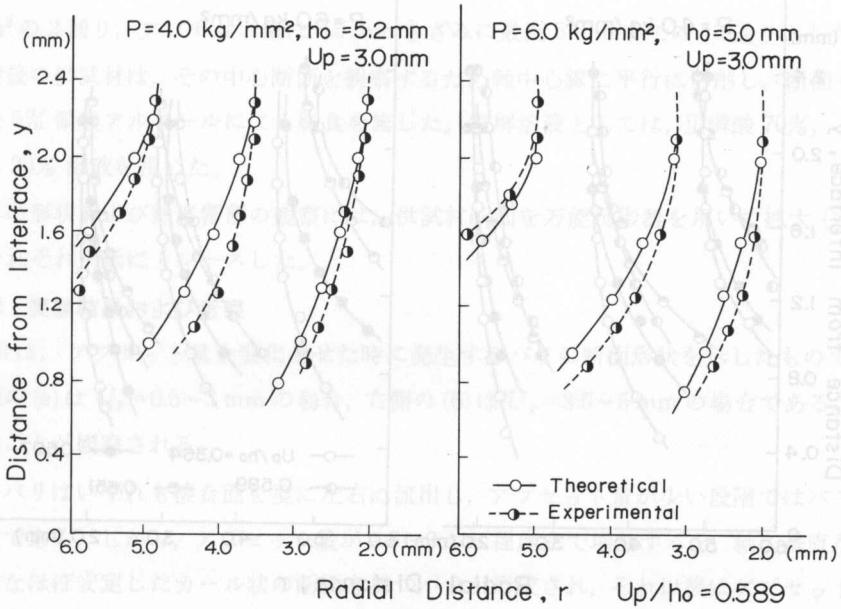


図7 S25Cにおける塑性域の移動グラフ ($U_p/h_0=0.589$)

Fig. 7. Displacement of the plastic zone on the specimen of S25C during forging, $U_p/h_0=0.589$.

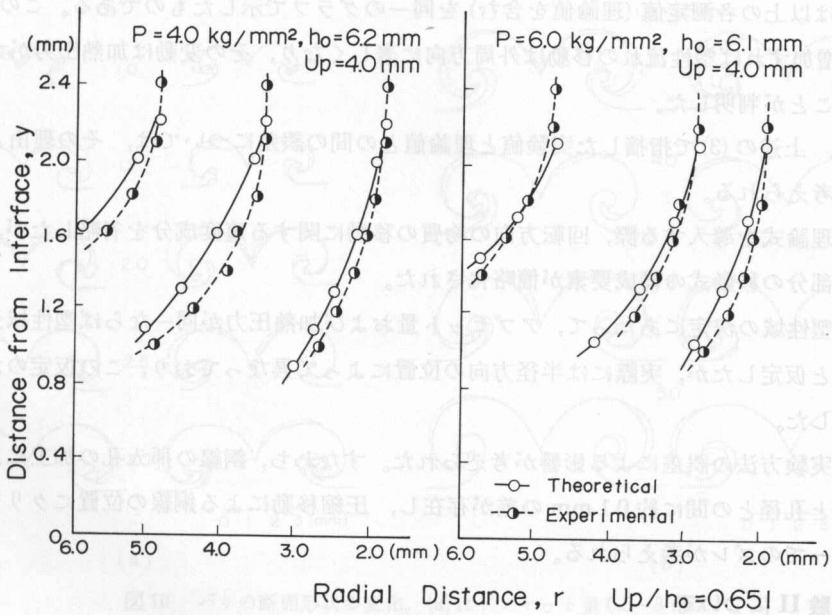


図8 S25Cにおける塑性域の移動グラフ ($U_p/h_0=0.651$)

Fig. 8. Displacement of the plastic zone on the specimen of S25C during forging, $U_p/h_0=0.651$.

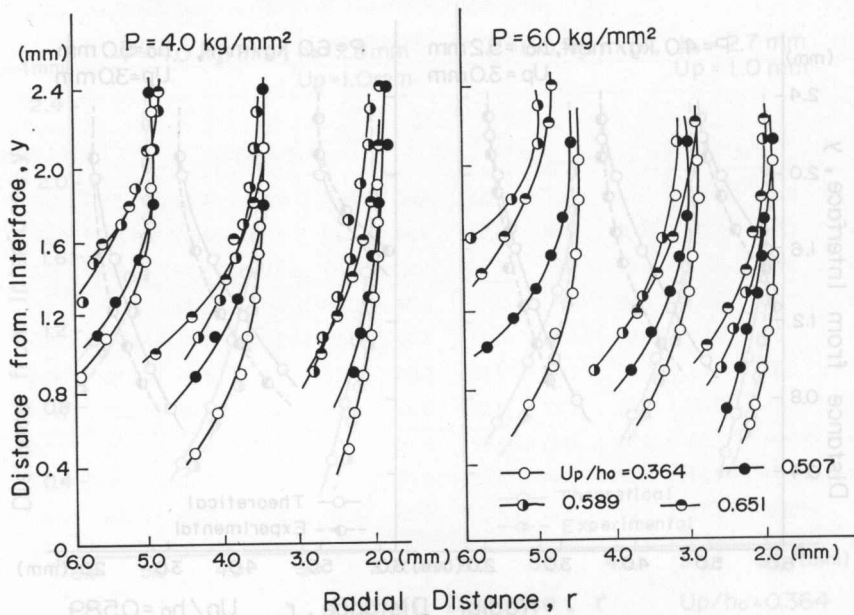


図9 塑性流れの解析結果のまとめ

Fig. 9. Summarized analytical results of the plastic flow displacement.

差は幾分減少する傾向を示した。

図9は以上の各測定値(理論値を含む)を同一のグラフで示したものである。この図から、 U_p/h_0 が増加すれば塑性流れの移動は外周方向に著しくなり、その変動は加熱圧力が大きいほど著しいことが判明した。

なお、上述の(3)で指摘した実験値と理論値との間の誤差については、その理由として次のことが考えられる。

(i) 理論式を導入する際、回転方向の物質の移動に関する速度成分を省略したが、そのために微小部分の移動式の構成要素が簡略化された。

(ii) 塑性域の決定にあたって、アプセット量および加熱圧力が同一ならば塑性域長さが同じであると仮定したが、実際には半径方向の位置によって異なっており、この仮定のためのズレが介在した。

(iii) 実験方法の誤差による影響が考えられた。すなわち、銅線の挿入孔の加工にあたって銅線外径と孔径との間に約0.1 mmの差が存在し、圧縮移動による銅線の位置にクリアランスのオーダーでのズレが考えられる。

3.2 実験IIについて

3.2.1 供試材および実験方法

供試材として16φのS25CおよびS35Cを用いた。形状寸法は実験Iと同様(図4参照)

なものを同種圧接した。圧接条件としては、S25C, S35Cの兩種ともに加熱圧力は 4 kg/mm^2 , 6 kg/mm^2 の2通り、アプセット量は 0.5 mm きざみに最高 5 mm までの10通りとした。

圧接後の供試材は、その中心断面を観察するため軸中心線に平行に切削し、断面を電解研磨した後5%硝酸アルコールによる腐食を施した。電解溶液としては、正磷酸70%、クロム酸10%、水20%溶液を用いた。

バリの形状および熱影響部の観察には、供試材断面を万能投影器を用いて拡大($\times 10$)し、それをそれぞれ別紙にトレースした。

3.2.2 実験結果および考察

図10は、アプセット量を変化させた時に発生するバリの断面形状を示したものである。

左側の(a)は $U_p = 0.5 \sim 3 \text{ mm}$ の場合、右側の(b)は $U_p = 3.5 \sim 5 \text{ mm}$ の場合である。この図から次のことが観察される。

(1) バリはいずれも接合面を境に左右に流出し、アプセット量が少い段階ではバリの形状は不安定である。しかし、アプセット量が $1.5 \sim 2 \text{ mm}$ 程度まで増加すると、軸に垂直な接合面に対称的なほぼ安定したカール状の断面を持つバリが形成され、それ以後はアプセット量の増加とともに左右対称の均一なバリの形成が進行する。

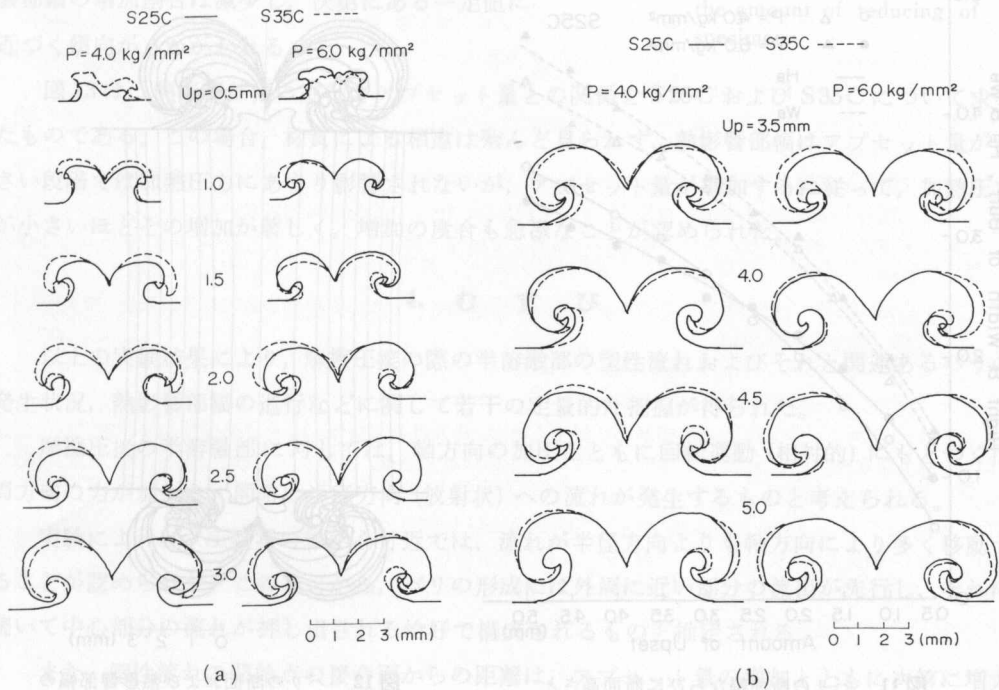


図10 バリの断面形状の変化。(a)はアプセット量 $0.5 \sim 3 \text{ mm}$ (b)は $3.5 \sim 5 \text{ mm}$ までの場合

Fig. 10. Cross-sectional variation of burr of weldments; (a) reducing amount of $0.5 \sim 3 \text{ mm}$ and (b) of $3.5 \sim 5 \text{ mm}$.

(2) S25CとS35Cとの材質の違いによるバリの形状の差は、アプセット量の小さい段階では若干のずれが見られたが、アプセット量が増加しバリの形成が安定する段階では、両者の差はほとんど見られなくなる。

(3) 接合面から左右に流出するバリの断面接点(分岐接点)の位置は、バリの対称性が安定した後はほとんど移動せず、一定点となる。

図10に示されたバリの断面形状をもとに、バリの断面幅(左右のバリの合計正面幅, W_B)および高さ(供試材外周線からの正面高さ, H_B)とアプセット量の関係をS25Cについてプロットしたグラフを図11に示す。

図から、バリの高さはアプセット量が増加しはじめるとともに曲線的に上昇するが、アプセット量がある値を越えると次第に直線的に上昇するようになる。この場合、上昇傾向は加熱圧力の小さい方が急激で、アプセット量がほぼ2.5 mm付近で両曲線は交叉し、アプセット量が2.5 mmを越えると加熱圧力の小さい場合の方が大きい値をとるようになる。

バリの幅については、高さの場合と同様にアプセット量が増加しはじめるにつれて曲線的に上昇するが、ある値を越えると直線的に上昇する。この場合、加熱圧力の大きい方が W_B の

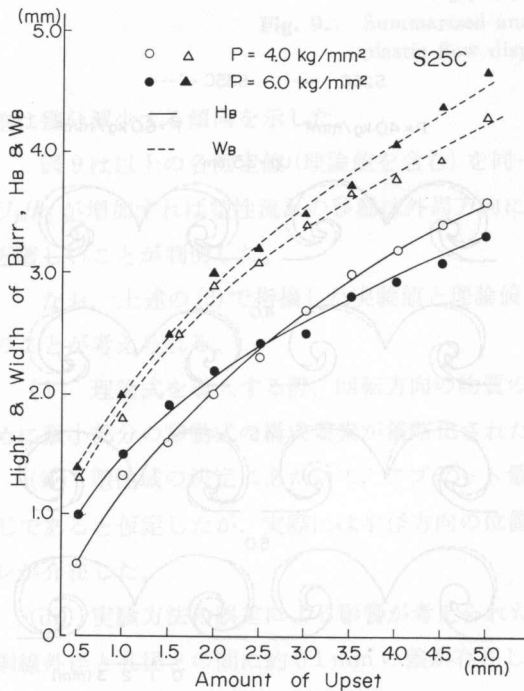


図11 バリの断面幅ならびに断面高さとおアプセット量の関係

Fig. 11. Relation of the width and the height of cross-section of burrs to the amount of reducing of specimen.

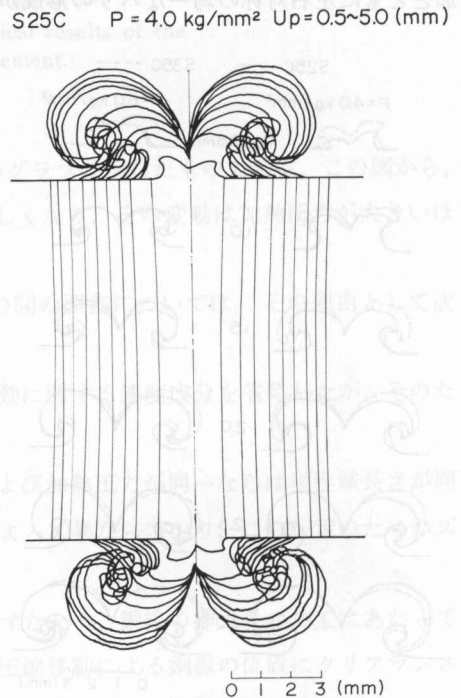


図12 バリの断面および熱影響部幅の変化のまとめ

Fig. 12. Summarized results of sectional variation of burrs and heat-affected zone.

値が大で、しかも上昇傾向が急激である。

このように、バリの高さや幅の変化の状況が異なること、特に加熱圧力が大きい場合バリの幅の増加が急激なことが、アプセット量がある値以上になるとバリの高さの増加割合が減少することの原因の一つと考えられる。

図12は、アプセット量を変えた場合のバリの断面変化を一つにまとめるとともに、それぞれの場合の熱影響部の進行幅を示したものである。図から、バリの対称性が安定した後は、左右のバリの分岐点はアプセット量とは無関係に一定点に重なっていることが認められる。

熱影響部幅の進行状況は、初期の段階では急激に増大するが、アプセット量が増加すると、バリとして排出される塑性域の変化との関連で熱影響部幅の増加割合は減少し、次第にある一定値に近づく傾向がうかがわれる。

図13は、熱影響部幅の進行とアプセット量との関係をS25CおよびS35Cについて求めたものである。この場合、材質による相違は殆んど見られず、熱影響部幅はアプセット量が小さい段階では加熱圧力にあまり影響されないが、アプセット量が増加するに従って、加熱圧力が小さいほどその増加が著しく、増加の度も急激なことが認められた。

4. む す び

以上の実験結果により、摩擦圧接の際の半溶融部の塑性流れおよびそれと関連あるバリの発生状況、熱影響部幅の進行などに関して若干の定量的な把握が得られた。

摩擦圧接の半溶融部に対しては、軸方向の加圧とともに回転運動(相対的)にもとづく円周方向の力が加わり、同時に半径方向(放射状)への流れが発生するものと考えられる。

実験によれば、圧接材の軸中心付近では、流れが半径方向よりも軸方向により多く移動することが認められた。このことから、バリの形成には外周に近い部分の流出が先行し、それに続いて中心部分の流れが押し出される恰好で構成されるものと推定される。

また、塑性流れの開始点の接合面からの距離は、アプセット量の増加とともに次第に増大するが、これは熱影響部幅がアプセット量の増加とともに大きくなることと一致している。塑性流れ開始点の接合面からの距離はまた加熱圧力にも依存し、加熱圧力が小さいほどその距離は大きい。このことは、熱影響部幅が加熱圧力が小さいほど大きくなる実験結果と一致して

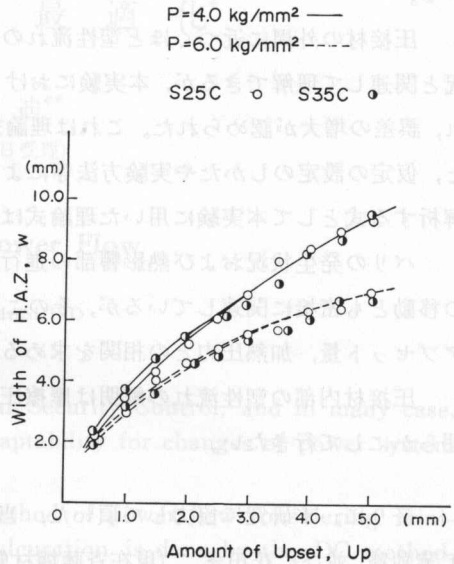


図13 熱影響部幅とアプセット量の関係

Fig. 13. Relation between the width of heat-affected zone and the amount of reducing of specimen.

いる。

圧接材の外周に近づくほど塑性流れの半径方向への移動が増加することは、バリの発生状況と関連して理解できるが、本実験における実験値と理論値の一致は外周に近づくにつれて乱れ、誤差の増大が認められた。これは理論式の導入に際して一部条件を省略して単純化したこと、仮定の設定のしかたや実験方法等によって生じたものと考えられるが、摩擦圧接の流れを解析する式として本実験に用いた理論式は、近似解として充分適用し得るものと言えよう。

バリの発生状況および熱影響部の進行に及ぼすアプセット量、加熱圧力の影響は、塑性域の移動とも密接に関連しているが、そのことがバリの断面幅および高さ、熱影響部の進行幅とアプセット量、加熱圧力との相関を求めることで明らかになった。

圧接材内部の塑性流れの解明は摩擦圧接機構の解析のため重要であり、更に実験を深めて明らかにしていきたい。

最後に、本研究に協力して頂いた、当時機械工学科4年目学生植田敏夫（現在リズム時計工業勤務）並びに花田孝二（現在斉藤鋼材勤務）の両君に深い謝意を表する。

文 献

- 1) 中村・中原・青柳・矢野：摩擦圧接法に関する研究（第1報）機械試験所所報，23-5，196-208（1969）。
- 2) C. R. G. Ellis：Continuous Drive Friction Welding of Mild Steel, Welding Research Supplement, 183-s-197-s, Apr. (1972).
- 3) T. H. Hazlett：Fundamentals of Friction Welding, Metals Engineering Quarterly (A.S.F.M), 1-7, Feb. (1967).
- 4) 蓮井・福島・衣川：摩擦圧接現象について，金属材料技術研究所報告，11-2，203-222（1968）。
- 5) 福島・蓮井：摩擦圧接の加熱過程について，溶学誌，41-9，1074-1084（1972）。
- 6) 蓮井・福島：摩擦圧接における摩擦面の温度と圧接部の構造について，材料科学，6-2，100-112，June（1969）。
- 7) 棟・二俣・阿部：摩擦圧接における圧接部の温度測定について，溶学会全国大会講演概要，第13集，146-147（昭和48年）。
- 8) T. Rich and R. Roberts：The Forge Phase of Friction Welding, Welding Research Supplement, 137-s-145-s, March (1971).
- 9) 杉山：アルミニウム合金の摩擦溶接に関する研究，住友軽金属技報，11-4，264-270，Oct. (1970).
- 10) 佐藤・深草・沖田：中実回転体におけるすべり面の移動現象，日機會・精機會北陸信越支部講演論文集，21-24（1973）。
- 11) W・ジョンソン，P・B・メラー：塑性加工学2，p.64，培風館（昭和41年）。
- 12) 山田：塑性力学，p.21および付録196，日刊工業新聞社（昭和46年）。
- 13) 棟・二俣・阿部：旋盤改造による摩擦圧接装置の試作研究，北見工大研報，5-5，159-175（昭和49年）。