

摩擦圧接の第1位相における接合現象

長谷川 正義*

Joining Phenomena on 1st Phase of Friction Welding

Masayoshi HASEGAWA*

(Received May 27, 1996)

The effect of friction pressure on friction welding phenomena in 1st phase was investigated with a brake type friction welding machine, using mild steel.

The experimental results are as follows;

- 1) The initial joining location moved from the axial center part of the specimen to the outside part with the increase of friction pressure, when friction pressure was low. However, its location was constant, when friction pressure was high.
- 2) The location of traces in faying surface moved from the outside to the center part, when friction pressure was low but its location moved slightly to the inside of the specimen, when friction pressure was high.
- 3) The location of maximum temperature in faying surface was affected by friction pressure.
- 4) The location of traces and maximum temperature in faying surface agree with initial joining location.
- 5) Friction torque on 1st phase increased with the increase of joining area.

Keywords : friction welding phenomena, 1st phase, faying surface, friction pressure, location of initial joining, friction torque

1. 緒 言

摩擦圧接法は材料の節減および接合時間の短縮に伴うコスト低減が可能であるのみならず、異種金属の接合が容易で、しかも接合部の強度が極めて高いなどの優れた特徴を持っているため、自動車産業を中心に、あらゆる産業分野で盛んに用いられている。

しかし、摩擦圧接開始から接合完了に至るまでの圧接過程に生じる接合現象は、非常に複雑で、しかも短時間で現象が変化することから実験的あるいは理論的解析が困難で、十分な解明がされていないようである。

このような状況の中でも、熱的に安定している領域で、同一現象が比較的長く継続する第3および4位相の接合現象は、解析がしやすいことと、これらの位相で生じる現象が圧接継手の接合強度に著しい影響を与えることから、かなりの研究が行われている^{1~7)}。

しかし、第1および2位相の研究は、熱的に不安定な領域で、現象の時間的変動が大きく、しかも極短時間にこれらの位相を通過することから解析が困難であるため、報告はほとんど見当たらない。

また、従来の摩擦圧接法の対象材料が延性の大きな金属であり、第1および2位相の現象が継手強度に大きな影響を与えないこともこれらの位相の研究が遅れている

*機械工学科 (Department of Mechanical Engineering)

原因の一つとしてあげられる。

しかし近年、工業製品の高性能化および高機能化が強く求められ、それに答え得る材料として種々の新素材が開発されているが、これらの新素材の中には優れた性質を持ちながら、接合技術が確立していないため、構造用材料として用いられていないものも見受けられる。

たとえば、セラミックスのように熱衝撃に弱い新素材と鋼との直接摩擦圧接はかなり困難で、現在ではアルミニウムのような軟金属を中間材として用いるかあるいはメタライズした後に摩擦圧接を行っている⁸⁾。この原因の一つに第1および2位相を含んだ摩擦過程における接合現象が十分に解明されていないことがあげられる。

さらに、第1から2位相に移る境界となる初期トルクは、ブレーキ式摩擦圧接の圧接履歴の中でも最も大きなトルク値を示す⁹⁾ので、これらの位相における圧接の諸現象を解明することは、摩擦圧接機的设计に対して有効な資料を提供するものと考えられる。

そこで本研究では、摩擦圧接の初期接合現象を解明するため、第1位相における接合の諸現象について検討を行った。

2. 実験方法

本実験に用いた母材は直径16mmのSS400熱間引抜き中実丸棒である。

試験片は図1(a)に示す形状および寸法に旋削により作製した。なお、接合面粗さは $R_a \approx 20\mu\text{m}$ に仕上げた。粗さの測定には触針式表面形状測定器を用いた。また、接合部の温度測定用の試験片としては同図に示すように、固定側の試験片接合面から1.2mm離れた箇所直径2mmのエンドミルで深さ7.5(以下、この箇所を中心部という)および3.5mm(以下、この箇所を中間部という)

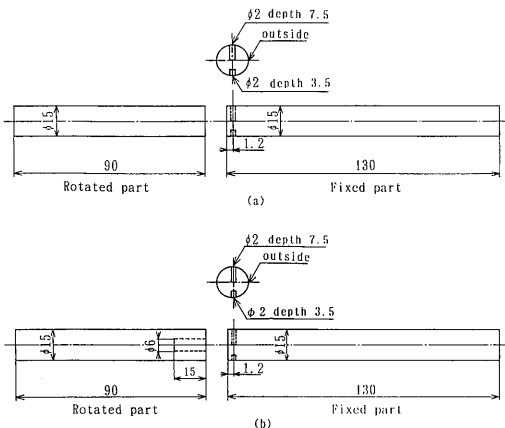


図1 試験片の形状および寸法ならびに温度測定位置
単位: mm

の穴をあけたものを用い、この二箇所の穴と試験片の外周部の一箇所の合計3箇所に直径0.35mmのアルメル・クロメル熱電対をパーカッション溶接し、温度測定を行った。さらに外周部から中心部への熱伝導を調べるため、同図(b)に示すように、回転側の試験片の軸中心に直径6mm、接合面からの深さ15mmの穴をあけ、試験片中心部から摩擦熱が発生しないようにした試験片も用いた。

摩擦圧接機にはブレーキ式を用い、圧接条件は試験片の回転速度 60.8S^{-1} を一定とし、摩擦圧力 P_1 を種々に変化させた。なお、本実験ではアブセット圧力 P_2 は付与していない。

また本実験では、ブレーキが作動してから、試験片が停止するまでの微少時間に生じる圧接条件の時間的变化が初期接合現象に影響を与えることが考えられるので、これを避けるために、ブレーキが作動すると同時に試験片を固定しているクランプを解放し、固定側の試験片も回転側の試験片と同時に回転させ、両者の相対速度を零とした。

また本研究では、第1位相における接合現象を主に扱っているが、位相については蓮井ら²⁾と同様に4つの位相に分けた。すなわち、図2に示す通常の摩擦圧接におけるトルク曲線を母材接合面の接触開始から初期トルクに至るまでを第1位相、初期トルクからトルクが減少し安定状態に至るまでを第2位相、安定域を第3位相およびアブセット圧力を付与した後を第4位相と定義した。

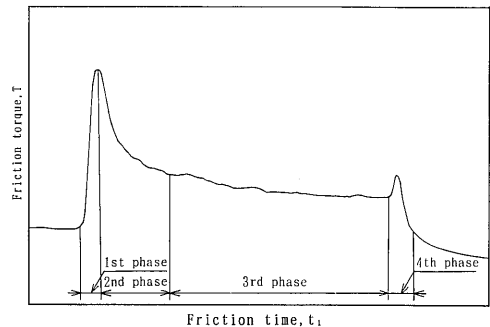


図2 トルク曲線における位相の定義

3. 実験結果とその検討

本実験で用いた摩擦圧接機の推力は、油圧によって得ているので、設定圧力(P_s)と試験片に作用する実際の圧力(P_M)との間には時間差があり得たい摩擦圧力(P_1)に設定圧力をセットして摩擦圧接を開始しても、実際の圧力が摩擦圧力に到達していないことが考えられる。

しかし、本研究のように第1位相に生じる諸現象は、後述のように、摩擦圧力 P_1 が 34.9MPa の場合には、摩

擦開始後、約 0.5 秒程度の極短時間で完了する。このような場合には、実際の圧力が設定圧力に到達するまでのわずかな時間差が実験結果に大きな影響を及ぼすと思われる。

そこで油圧油の流量を変え、スライドテーブルの送り速度 V を種々に変化させて予備実験を行ない、設定圧力と試験片に作用する実際の圧力との関係を調べた。その結果を図 3 に示す。(a) に示す $V=216\text{mm/min}$ の場合には、 P_1 が 30MPa 以上になると摩擦開始後 0.3sec 経過しても実際の圧力は設定圧力に到達せず、かなり低い値を示している。

これに比べ(b)で示す $V=555\text{mm/min}$ の場合には、

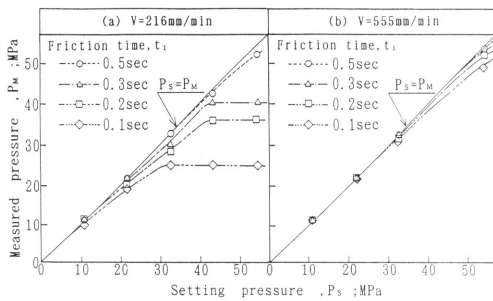


図 3 摩擦圧力の設定値と実測値の関係

P_1 が 55MPa 以下であれば、摩擦開始後 0.2sec 経過すれば、設定圧力とほぼ等しくなることが明らかとなった。したがって本研究では $V=555\text{mm/min}$ を採用した。

図 4 は初期接合箇所 S に及ぼす P_1 の影響を調べた結果を示したものである。なお、 S は同図中に示すように、試験片軸中心から初期接合部の中心までの距離で表わしたものである。同図によれば、 P_1 が約 35MPa 以下では S に及ぼす P_1 の影響は顕著であり、 S は P_1 の増大と共に

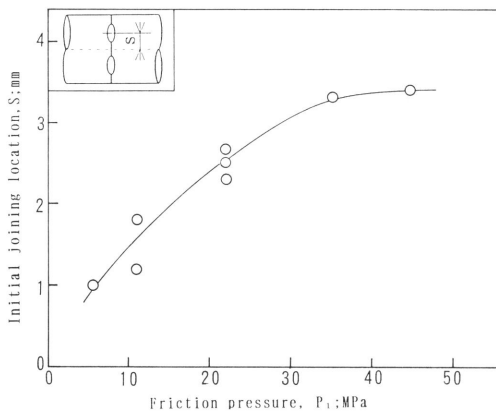


図 4 初期接合箇所 S に及ぼす摩擦圧力の影響

に著しく増加する傾向が認められる。しかし、 P_1 がそれを超えると P_1 の影響はほとんどなく、 S は約 3.5mm でほぼ一定値となるようである。

図 5 は初期接合開始からばり発生までの接合部の時間的变化を示す断面マクロ写真を種々の P_1 について比較して示したものである。初期接合部の形状はいずれの P_1 の場合も凸形を示しているが、接合部の時間的变化は P_1 の大小により異なることが観察された。たとえば、 $P_1=5.5\text{MPa}$ と低い場合には、軸中心近傍に初期接合部が観察されるが、この接合部は時間の経過と共に、まず軸中心側に拡大し、軸中心側が一体となり、次いで外周側に拡大して、ばりを発生することが観察された。

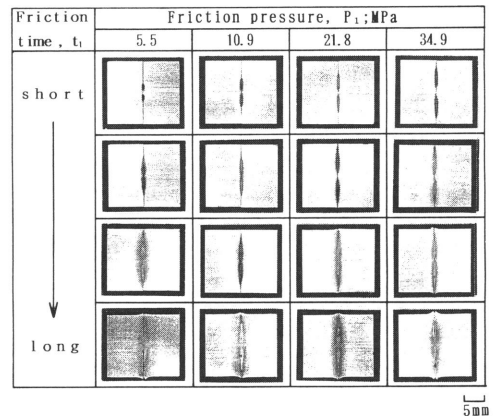


図 5 接合箇所の断面マクロ写真

これに比べ $P_1=34.9\text{MPa}$ と高い場合には、軸中心からかなり離れた箇所に初期接合部が観察され、この接合部は時間の経過と共に軸中心側と外周側との両方向に同時に拡大し、軸中心側が一体となるとほぼ同時に外周側からもばりが発生することが認められた。

図 6 は摩擦が始まってから初期接合開始までに要する時間に及ぼす P_1 の影響を調べた結果を示したものである。 P_1 が約 10MPa 以下では P_1 の影響は顕著であり、初期接合開始までに要する時間は P_1 の減少と共に著しく増大する傾向が見られる。しかし、 P_1 が約 10MPa を超えると P_1 の影響はほとんどなく、接合開始までに要する時間は約 0.2~0.3sec ときわめて短い時間でほぼ一定となることが認められた。

初期接合箇所は P_1 の増大と共に外周側に移動することをすでに述べたが、この現象を明らかにするため、接合面の塑性流動による痕跡の時間的变化を調べた。その結果を図 7 に示す。同図に示す摩擦時間 $t_1=0\text{sec}$ は摩擦開始前の状態、すなわち、旋削により接合面を仕上げた後の接合面粗さで $R_a=20\mu\text{m}$ である。なお、接合面の痕跡は触針式表面形状測定器で測定した。また、 $P_1=5.5$

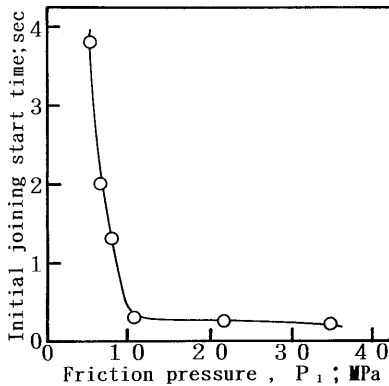


図6 初期接合開始時間に及ぼす摩擦圧力の影響

および 10.9MPa の場合の $t_1=3.5$ および 0.22sec は、それぞれの P_1 における初期接合が開始する直前に摩擦圧接機の回転を停止し、この時の接合面の痕跡を示したものである。初期接合箇所が試験片中心部近傍となる $P_1=5.5$ MPa と低い場合には、 t_1 が約 1sec で外周部の接合面に痕跡が見られ、この痕跡は時間の経過と共に中心部に移動することが観察される。

t_1 ; sec	0	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
$P_1=5.5$ MPa	R	F					

t_1 ; sec	0	0.10	0.15	0.18	0.19	0.20	0.22
$P_1=10.9$ MPa	R	F					

R: Rotated part

F: Fixed part

図7 接合面の痕跡の時間的变化

これに比べ、 $P_1=10.9$ MPa と高い場合には摩擦開始後、わずかに約 0.1sec で外周から少し内側に入った接合面に痕跡が観察された。この様相は $P_1=5.5$ MPa の低い場合と同様であるが、この接合面の痕跡は時間が経過し、接合開始直前になってもほとんど移動しないことが認められた。この点は P_1 が低い場合と著しく異なっている。

なお、 P_1 の大小にかかわらず、いずれの場合もこれらの接合面の痕跡が接合直前に大となっている箇所と初期接合箇所は一致していることが観察された。

図8は $P_1=5.5$ MPa の場合の接合面近傍の試験片中心部、外周部とその中間部における摩擦熱による温度上昇の測定結果を示したものである。同図中に示す二点鎖線は摩擦圧接機の回転を停止した時間である。

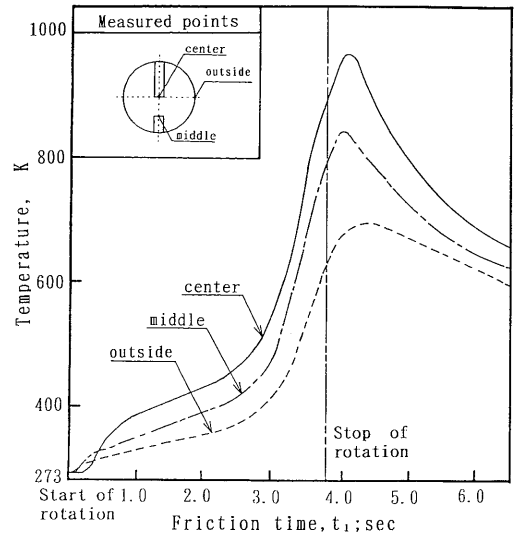


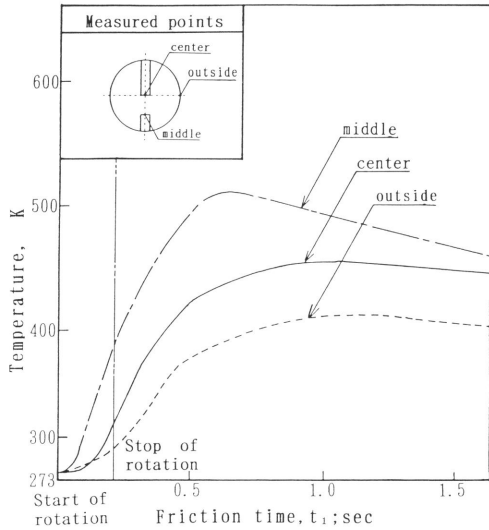
図8 温度曲線の比較 ($P_1=5.5$ MPa)

温度測定は図1に示したように、接合面から 1.2mm 離れた箇所であるから、摩擦熱による接合面の温度上昇そのものを測定しているのではないが、接合面の温度の高低を定性的に論じるのには、この箇所でも差し支えないものと考えられる。

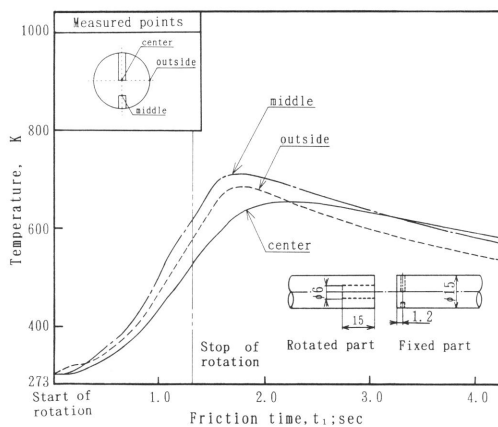
図8によれば、摩擦開始直後の温度上昇の順序は周速度に一致し、外周部、中間部および中心部の順であるが、 t_1 が約 0.4sec 経過後にはこの順序は逆転し、中心部の温度が最も高く、外周部が最も低くなることが観察された。なお、この P_1 における初期接合箇所は中心部近傍であり、温度が最も高くなる箇所とほぼ一致している。

図9は $P_1=34.9$ MPa と高くした場合であるが、摩擦開始後、約 0.1sec 後には中間部の温度が最も高くなっていることが認められた。この場合の初期接合箇所は中間部であり、この場合も初期接合箇所と温度が最も高い箇所とはほぼ一致していることが観察された。

本来、中間部近傍の摩擦発熱量は外周部のそれに比べて著しく小さいものと考えられる。それにもかかわらず、 P_1 が低い場合には中心部から接合を開始している。この原因として、外周部で発熱した摩擦熱が中心部に熱伝導により移動していることが考えられる。そこでこの現象を確認するため、中心部からの摩擦熱の発生を防止する目的で、中心部の発熱箇所を除去した試験片を作製し、この場合の温度測定を行った。すなわち、図10中に示すように、回転側の母材接合面の中心に直径 6mm および深さ 15mm の穴をあけ、前述の温度測定と同様に固定側の試験片の中心部、外周部および中間部の3箇所について温度測定を行った。その結果を図10に示す。同図によれば、中心部は摩擦面を持たないにもかかわらず、摩擦

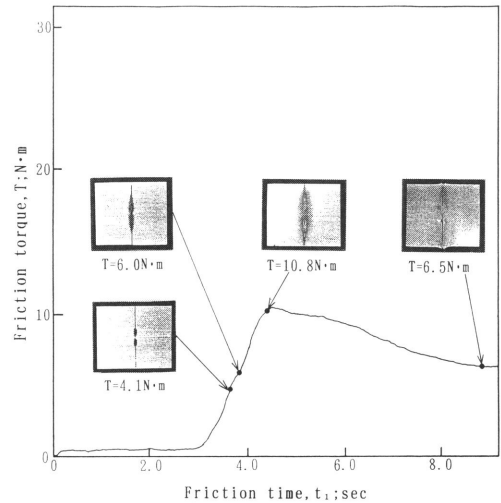

 図9 温度曲線の比較 ($P_1=34.9\text{MPa}$)

開始後約 3sec には他の測定箇所 비해、最も温度が高くなることが認められた。これは P_1 が低い場合には、図 6 で述べたように、摩擦開始から初期接合までの時間が長いために、接合面で発生した摩擦熱は、熱伝導により軸中心部に移動し、その結果、中心部の温度が最も高くなるものと考えられる。


 図10 温度曲線の比較(穴あき試験片, $P_1=5.5\text{MPa}$)

また、周速度が最も大きな外周部の温度が他の箇所よりも高くないのは、高速回転により外周部が冷却されることに一因があるものと思われる。

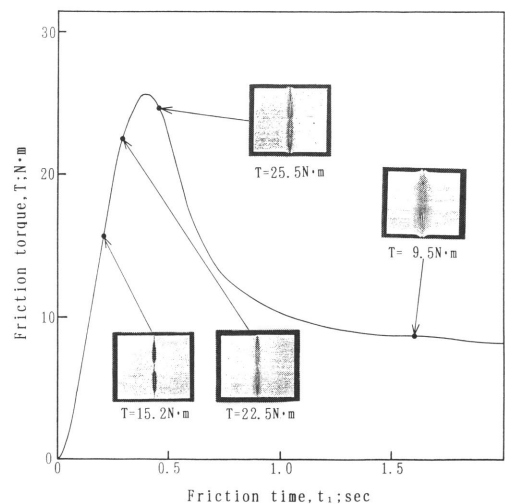
図 11 は $P_1=5.5\text{MPa}$ と低い場合の摩擦トルクに及ぼす t_1 の影響を調べた結果を示したものである。なお、同図中には各トルク値における接合状況を示す断面マクロ写真も示してある。接合面の摩擦開始後 3sec までは


 図11 摩擦トルクに及ぼす摩擦時間の影響 ($P_1=5.5\text{MPa}$)

トルクは約 $0.2\text{N}\cdot\text{m}$ 以下の低い値であった。また、初期接合が始まる $t_1=3.7\text{sec}$ におけるトルクは同図中に示すように $4.1\text{N}\cdot\text{m}$ である。その後、接合部の増大と共にトルクも増加し、摩擦開始後約 4.4sec でトルクは最大値を示し、その後トルクが減少しはじめると共に、ばりの発生が観察された。

図 12 は $P_1=34.9\text{MPa}$ と高い場合であるが、摩擦開始と同時にトルクは著しく増大し、初期接合が始まる $t_1=0.2\text{sec}$ では摩擦トルクは $15.2\text{N}\cdot\text{m}$ と高い値を示している。

また、この場合には $t_1=0.4\text{sec}$ で初期トルク ($26.5\text{N}\cdot\text{m}$) に到達している。なお、図 11 と図 12 とを比較すれ


 図12 摩擦トルクに及ぼす摩擦時間の影響 ($P_1=34.9\text{MPa}$)

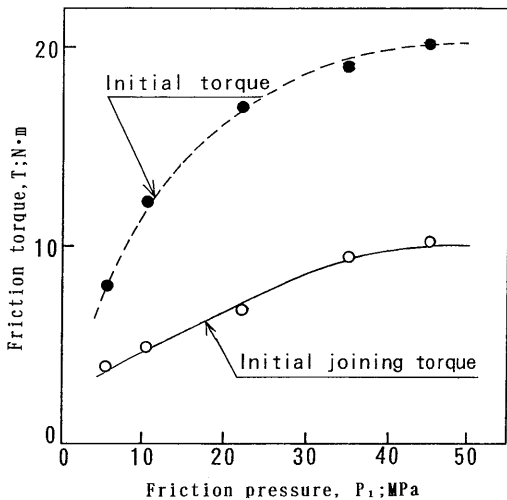


図13 摩擦トルクに及ぼす摩擦圧力の影響

ば、初期トルクは P_1 の増加と共に著しく増大するが、摩擦開始から初期トルクに至るまでの時間は著しく減少することが明らかとなった。

図13は初期接合開始時のトルクおよび初期トルクに及ぼす P_1 の影響を示したものである。両トルクに及ぼす P_1 の影響は顕著で、 $P_1 = 35\text{MPa}$ までは P_1 の増加と共に著しく増大する傾向が認められた。しかし、 P_1 がそれを超えると両トルクはわずかに増加する傾向が見られた。また、初期接合開始時のトルクと初期トルクとを比較すれば、初期トルクは初期接合開始時のトルクの約2～4倍の値を示している。

4. 結 言

軟鋼中実丸棒を用いて第1位相における摩擦圧接の諸現象について検討を加えた。得られた結果は次のとおりである。

- 1) 初期接合箇所は摩擦圧力が約35MPa以下の場合には摩擦圧力の増大と共に試験片軸中心部から外周部へと移動する。しかし、摩擦圧力がそれを超えた場合にはほぼ一定となる。
- 2) 初期接合開始に要する時間に及ぼす摩擦圧力の影響は顕著であり、摩擦圧力が約10MPa以下の場合には、摩

擦圧力の低下と共に、時間は著しく増大する。しかし、摩擦圧力がそれを超えた場合には接合開始に要する時間はほとんど変化しない。

- 3) 初期接合箇所は接合面の痕跡が最大となる箇所とほぼ一致する。
- 4) 初期接合箇所は接合面温度が最も高くなる箇所とほぼ一致する。
- 5) 第1位相における摩擦トルクは接合部の増加と共に増大する。

5. 謝 辞

本研究は平成7年度中部大学生産技術開発センターの研究費により行われたことを付記し、本学関係者各位に対し、深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 蓮井淳, 福島貞夫; 摩擦圧接の加熱課程について, 溶接学会誌, 第41巻, 第9号 (1972), p 1074~1084
- 2) 蓮井淳, 福島貞夫; 摩擦圧接におけるトルクについて, 溶接学会誌, 第44巻, 第12号 (1975), p 1005~1010
- 3) 久曾神煌, 西本廉, 乙部豊, 金井誠太, 小笠原由也, 炭素鋼の摩擦圧接に関する研究; 日本機械学会論文集 (C), 45巻, 400号 (昭54-12), p 1406~1414
- 4) 沖田耕三, 有年雅敏, 岩本和一郎, 同径丸棒継手の摩擦圧接における摩擦面の熱収支について; 溶接学会誌, 第51巻, 第2号 (1982), p 134~141
- 5) 沖田耕三, 有年雅敏, 岩本和一郎; プレーキ式摩擦圧接機による定常状態の摩擦面の温度について, 溶接学会誌, 第51巻, 第3号 (1982), p 414~319
- 6) 深草邦夫, 佐藤次彦, 摩擦圧接における回転面の移動現象, 溶接学会誌, 第50巻, 第10号 (1981), p 953~958
- 7) 深草邦夫; 真の回転接触面の特性について, 溶接学会論文集, 第14巻, 第1号 (1996), p 33~39
- 8) 岸本信也, 宗宮成行編; 金属とセラミックスの接合, 内田老鶴圃, 1990年, p 265~283
- 9) 摩擦圧接協会; 摩擦圧接, コロナ社, 昭和57年, p 28