技術資料

摩 擦 圧 接 *

蓮 井

淳**

A Survey of Friction Welding Process as A Production Joining Tool*

by Atsushi Hasui**

1. 緒 言

摩擦圧接法がわが国に導入されて以来、既に二十数年経過した。摩擦圧接は2母材間に激しい相対運動を行なわせつつ接合過程を進めるという従来の溶接では想像もされなかった独特な接合法であり、その機構に機械的因子が多く含まれていること、また、その有用性が機械部品の製作に見出されそうであることなどの特徴をもっていると判断された。したがって、この接合法に、とくに機械系加工技術者から関心が寄せられ、その特質を明確にし、その用途を探求しようということで、昭和39年に摩擦圧接研究懇談会が設立され、以後、摩擦圧接研究会、摩擦圧接協会と発展し活動を続けている¹⁾。

この間、わが国における摩擦圧接機は年々着実に増加して、現在、1000台以上が生産に稼動している²⁾。この稼動台数は世界屈指であり、その用途も各種産業にわたっている。本誌では、本号ならびに第6号において摩擦圧接実用の現状について特集することになった。この特集において、各種産業における実用例が紹介されるが、本文はそれらに共通する事項として、摩擦圧接法の特徴、圧接品の品質保証及び摩擦圧接機の現状などについて概説する。

2. 摩擦圧接法の特徴

設計及び生産技術の立場から摩擦圧接の特徴、とくに主な長所と短所について検討する。

(1) 高いエネルギー効率 摩擦圧接は、加圧下で母材の接触部に発生する摩擦熱を利用して行なう接合法である。したがって、接合したい面とその近傍にのみ熱が

発生し、それが有効に用いられることになる。この接合法と類似の用途に用いられるアプセット（抵抗）溶接などでは、母材を通して溶接電流が供給されるので、母材においても接合に必要とされない抵抗発熱を生じ、エネルギー効率が低くなる。摩擦圧接では、抵抗溶接と比較して、接合に要するエネルギーが $\frac{1}{5} \sim \frac{1}{10}$ 程度でよい。

(2) 制御が簡単 圧接条件として設定されねばならない因子は、ブレーキ式の場合、回転数、摩擦圧力、摩擦時間、アプセット圧力、アプセット時間である。フライホイール（イナーシャ）式の場合には、設定因子は回転数、フライホイールの回転エネルギー及び摩擦圧力である。これらの諸因子は、すべて最も簡単な基本的機械量で、所期値を正確に再現することが容易であり、しかも、精度高く制御・監視できる。このことは、生産加工の工程における接合の機械化、自動化にとって甚しく有利である。

(3) 高い圧接作業能率 (1)項で述べたように、接合したい部分でのエネルギー（加熱）効率が高いので、その部分は所要の加熱状態に短時間で到達し、圧接を完了できる。また、圧接機への母材の取付け、取外しの自動化が簡単で、圧接作業は高能率に行なわれる。

(4) 高い圧接精度 (2)項で述べたように、本法における圧接条件の因子は精度高く監視できる。母材が同一であれば、回転数、摩擦圧力が一定に設定されると、より速度はそれらの因子で決められる値で常に再現されるので、摩擦時間とアプセット圧力を規定すると、圧接材の長さにより寸法精度が確保される。さらに、寸法精度を高めたいときには、摩擦時間ではなく、摩擦時ならびにアプセット時に長さの寸法規整を行えばよい。とくに、精度について留意すれば、圧接品に $\pm 0.1 \text{ mm}$ の寸法精度が得られる。

さらに、母材端面の摩擦熱は回転軸対称に発生し、加圧力（摩擦圧力、アプセット圧力）は軸方向に付加され、

*原稿受付 昭和60年1月25日

**正 員 慶応義塾大学理工学部 Member,
Faculty of Sci. and Tech. Keio
University

図1 種々の組合せの材料間の摩擦圧接性

材 料	アルミニウム	アルミニウム合金	銅	銅合金	酸化カドミウム	鉛	鉛合金	セラミク	コバルト	チタン	チタン合金	インコネル	インコネル合金	マグネシウム	マグネシウム合金	モリブデン	モリブデン合金	ニッケル	ニッケル合金	ニオブ	ニオブ合金	銀	銀合金	炭素鋼	合金鋼	マレージング鋼	ステンレス鋼	タンタル	トリウム	チタン	タングステン	超硬材(炭化タングステン)	ウラン	バナシウム	ジルコニウム合金
アルミニウム	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
アルミニウム合金	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
真銅	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
占銅	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
酸化カドミウム	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
銅	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
チタン	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
チタン合金	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
インコネル	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
インコネル合金	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
マグネシウム	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
マグネシウム合金	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
モリブデン	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
モリブデン合金	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
ニッケル	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
ニッケル合金	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
ニオブ	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
ニオブ合金	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
銀	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
銀合金	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
炭素鋼	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
合金鋼	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
マレージング鋼	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
ステンレス鋼	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
タンタル	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
トリウム	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
チタン	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
タングステン	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
超硬材(炭化タングステン)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
ウラン	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
バナシウム	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
ジルコニウム合金	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

■ 良好な圧接

⊗ 圧接不可能

▨ 脆弱な圧接

□ データなし

ばりは円周方向へ均等に排出されるので、圧接が全面同時に行なわれる結果、角変形も僅かである。

したがって、すでに仕上げの機械加工を行なった分割素材を圧接し、ばりを削除しただけの状態で要求される形状、寸法精度をもつ部品が得られる。これは素材材の加工²⁾のみならず、最終製品(部品)の設計と加工の合理化に甚しく有利である。

(5) 異種材料の圧接 同種材料の圧接はもちろんであるが、多くの組合せにおいて異種材料の圧接が容易に行なえる(図1)。圧接過程において摩擦部の到達温度の上限は母材の融点あるいはそれ以下である³⁾から、融合すると脆い合金あるいは化合物を形成する材料の組合せでも、その形成を少なくおさえて接合できる。また、材料を過熱したり、燃焼させたりすることもない。この圧接現象は異種材料の接合にとくに有利である。

摩擦圧接協会では、各種産業から収集した摩擦圧接の実用例に種々の資料を付したデータシート⁴⁾を発行している。現在、107葉に達しているが、その中、78例は異

種材料の圧接である。その中から表1にいくつかを例示してある。このような異質の材料を簡単に接合し得るといことは、この圧接法の大きな特色で、機能部品の設計に大きな自由度を与えることになる。

(6) その他 圧接作業中に、他の溶接法のように、アーク、炎、火花、ヒュームなどを発生しないので、周辺の作業に対して妨害にならない。したがって、圧接機を他の工作機械の間に設備できて、加工ラインにおける諸機械の配置に制限を与えない。主軸(回転側)ヘッドをスライドできるようにした圧接機構造では、圧接機のトランスファマシンへの組込みさへ容易に行なわれるようになった⁵⁾。

上記の長所を有するのに対して、次の短所を有する。

(7) 母材形状の制限 摩擦圧接では、一方の母材を回転させるので、余り長い母材、固定していて回転できない母材あるいは大質量部、非対称質量部をもつような母材は圧接が困難である。しかし、長尺パイプの圧接を行なうラジアル摩擦圧接機が開発された⁶⁾。これは図

表 1 異種材料の圧接実用の例

加工物名称	材料の組合せ	資料提供会社
ディーゼル機関予燃室	YA 2 B(耐熱鋼)+S 45 C	三菱重工業
エンドミル	SKH 9 + S 50 C	電元社製作所
ハンドタップ	SKH 2 + SX 4 (合金鋼)	豊田自動織機製作所
ステアリングシャフト	SCM 23 + S 25 C・D	〃
モータシャフト	S 20 C + SUS 27	美吉製作所
ブレーキ部品(トルクプレート)	SUS 304 + SS 41	住友電気工業
リヤーアクスルハウジング	STKM 45 + SAPH 45 + STKM 45	トヨタ自動車工業
船外機シャフト	SUS 630 + SCM 21	トーハツ
圧力取り出しパイプ	S 35 C + STKS 1 + S 20 C	大成金属工業所
ディーゼル機関チャンパー	SUH 3 + SCM 420 (SCM 22)	日産ディーゼル工業
ケミカルポンプ用モートルシャフト	ハステロイ C + S 40 C	日立製作所
電 路 用 金 具	C 1020 (無酸素鋼) + PB (鉄・ニッケル磁性合金)	大成金属工業所
電 極	SS 41 + C 1100 B (タフピッチ銅)	東芝機械

図 2 ラジアル摩擦圧接

2に示すように、テーパをもつ中間リングを半径方向に内向きに加圧しつつ回転して行なう圧接法で、リングを介して2つのパイプが接合される(図3)。

また、少なくとも一方の母材の開先部は円形で摩擦部は連続して接触、加熱され続けることが求められる。母材の摩擦面が大気に露出する瞬間が繰返される形状であると、摩擦面の温度低下と発生する酸化物などが接合を妨害するからである。この母材形状に対する制限は、他の溶接法において見られない本法の短所である。しかし、機械部品を非回転形状と回転形状に大きく分けて、それを加工するシステム数を調査した結果を示す表2⁷⁾によると、回転形状の部品はかなり多い。このような事情から考えると、この母材形状の制限があっても、摩擦圧接の利用される分野はなお広く存在すると予測される。

なお、鋼母材に対してアルミニウムのような軟質の角状母材を圧接したい場合には、摩擦過程において、アルミニウム母材から生じ、拡大したばり部の摩擦面の内接円が母材の外接円より大きくなった後にアブセツトする

図 3 ラジアル摩擦圧接継手

手段を用いて接合し、実用している例がある。

一方、角状母材の圧接にオービット摩擦圧接法⁸⁾が、また、プラスチックの角状ケースの圧接に振動摩擦圧接法が開発されている⁹⁾。

(8) 定位相圧接が困難 摩擦圧接の最終過程の母材間の相対運動の停止時の位相、すなわち両母材間の圧接の位相を一定にするのは、通常の圧接機では困難である。定位相の圧接を行なうには、特殊の機構を組入れた圧接機を必要とする。

表2 部品形状とそれを加工するシステムの数

部 品 形 状		該当するシステムの数
非 回 転	角 物 (箱物を含む)	74
	板	4
回 転	円 筒 形	19
	円 板	15
特 殊 形 状		4
合 計		116

(9) 圧接部の低いじん性 摩擦圧接部の引張強さ、疲労強度は一般に母材と同等あるいはそれ以上であるが、衝撃試験値は低い場合が多い。圧接熱影響部におけるねじり・圧縮変形によってばりを生じるので、その排出方向、すなわち軸に垂直方向に母材の繊維組織が流れることに起因する。

例えば、SUS 304 鋼の圧接部の低温 ($0 \sim 200^{\circ}\text{C}$) におけるシャルピ衝撃値は圧接のままの状態において、母材のその $1/2 \sim 1/4$ であり、溶体化処理を施しても、十分な回復は認められない¹⁰⁾。なお、この場合、衝撃値が低下するのは圧接面を中心として両側 0.5 mm の範囲 (母材の直径: 19 mm) である。部品設計に当って、このことを考慮して、圧接部の位置ならびに形状寸法を決めれば、この短所は容易に避けられる。

3. 圧接品の品質保証

摩擦圧接部における欠陥は未接合及び割れで、圧接部内部または表面のばりの分岐部に生じる。また、割れは母材原形からばりの発生し始める形状急変部に認められることもある。これらの欠陥の検出には、他の溶接継手の場合と同様、超音波探傷法及び浸透探傷法が用いられる。しかし、このような検査は、現在、実際の生産においては、殆んど行なわれない。

摩擦圧接法が生産に導入され始めた時期には、この接合法の本質が不明であることもあって、非常に慎重な手順によって、QC 工程を用いつつ、圧接品の抜取りによる破壊試験、非破壊試験を繰返して生産の流れに乗せていった¹¹⁾。

摩擦圧接の実用が進み、また、基礎研究が展開され、その本質が次第に明らかになるにつれて、母材の材質と調整状態が確実に管理され、さらに、設定された圧接条件によって正確に施工されれば、圧接過程は常に同一に再現されて、一定品質の圧接継手が得られることが確認されるにいたった。これには、前項(2)で述べたように、圧接条件因子が精度高く再現され、監視できるという本法の特長が基盤となっている。

したがって、摩擦圧接機の制御因子として、回転数、摩擦推力、アプセット推力、摩擦時間、さらに母材の長さ等を探り、圧接過程進行中のそれらの諸因子の経過を設定値と比較し、許容範囲の内にいることを監視する様式の品質管理装置が稼動している¹⁾。さらに、管理に当っては、作動油の温度 (加圧力、ブレーキの作動機能などに影響する) も制御されている。

さらに、電子技術の発展により、上記諸因子の経過をコンピュータを応用して記憶させ、その記憶した値を基準値と比較し、合否を判定し、合格ならば次の圧接サイクルに入り、不合格ならば警報を発して、圧接機をインターロックして、そのサイクルにおいて記憶されている諸因子の経過を記録紙に書かせ、警報発信の原因の発見を容易にした管理装置もある。

最近、これまでの研究と実用の経験を基盤として、圧接品の品質を確保するための圧接作業標準及び圧接品の検査法の作成も盛んとなり¹²⁾、その体系化が進展しつつある。

4. 摩擦圧接機

実用の摩擦圧接機 (連続駆動式) は、すでに昭和37年に製作された。当初の圧接機は容量が直径 60 mm (軟鋼) の圧接程度であったが、その後、表3に示すように、

表3 摩擦圧接機の容量の増大

製造年 昭和	公称圧 接能力 (mm径)	主 軸 モータ (kw)	最大推力 (tf)		備 考
			摩擦時	アプセ ット時	
37	60	22	10	20	主軸頭ス ライド型
43	80	45	20	60	
46	100	55	35	85	
48	150	75	75	150	
56	200	200	100	300	

年を追ってその能力が増大している¹⁾。一方、蓄勢式圧接機は、昭和40年に米国より導入された。摩擦圧接機は、基本的には上記の2方式であるが、特殊な圧接機としては、

(1) 母材の回転主軸の停止の減速過程においてブレーキを開放し、ピンを主軸側に向って打ち出し、このピンが固定側の穴に入り完全停止することによって定位相をうる圧接機¹³⁾または回転軸の停止直後の圧接部が十分に高温の間に両母材の位相が定められた状態になるようにする振り機構を組込んだ定位相圧接機など^{14, 15)}。

(2) 2つのピアノ線コイルの終端と始端の圧接、両端部材の相対位相が定められている部品などの圧接において、両部材間に第3の部材を入れ、これを中間(母)材として、その両端で同時圧接ができるようにした中間部材

回転式圧接機。

(3) 駆動軸が定速回転軸、他方の軸は回転慣性質量をもつ従動軸となっており、母材の摩擦面における相対回転数が減少して零となったとき圧接が完了するもので、圧接中にばり発生部に刃物を設置し、圧接とばり削除を同時に行なえるようにしたのを特色とする二軸回転式圧接機¹⁶⁾。

(4) 最小径 2 mm までの細い母材の圧接を可能とする高速回転 (例えば, 20000 rpm) の主軸をもつマイクロ圧接機¹⁾。

(5) 熱可塑性プラスチックの接合用に開発された圧接機¹⁾。
などがある。

5. 結 語

摩擦圧接法の特徴、圧接品の品質保証及び摩擦圧接機の現状などについて、生産加工技術の立場から概説した。とくに、本法の特徴において、異種材料の圧接への利用に力点を置いたが、すでに本誌²⁾で述べられたように、異径素材の圧接などへの適用も生産加工上で大きな意義をもっている。

本法は、金属加工の分野においてさらに普及され、他の加工法、すなわち、鋳造、塑性加工あるいは粉末冶金などとの協調的活用分野が開けて、部品、部材の設計ならびに生産の合理化に寄与するものであると期待している。

参 考 文 献

1) 摩擦圧接協会：摩擦圧接協会20年誌 (昭59)

- 2) 中原：「各種加工法における摩擦圧接」, 本誌, 52-7 (1983), 578
- 3) 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 (1969), 100
- 4) 摩擦圧接協会：摩擦圧接データシート
- 5) 摩擦圧接協会：「摩擦圧接」, コロナ社 (昭54)
- 6) E.D.Nicholas and R.H.Lilly：「Radial Friction Welding」, IIW, Doc. III-632-80
- 7) 伊東：「FMS の現状と動向」, 日本機械学会誌, 85-761 (昭57), 366
- 8) J.C.Searle：「Friction Welding Non-Circular Components Using Orbital Motion」, Weld. & Met. Fab., Aug. (1971), 294
- 9) 「Vibration welding permits novel designs」, Design Engineering, Jan. (1978), 47
- 10) 沖田, 「オーステナイト系ステンレス鋼の摩擦圧接」, 摩擦圧接協会資料 No.133 (昭52)
- 11) 詳しくは, 摩擦圧接協会：「摩擦圧接」コロナ社, (昭54), 134
- 12) KUKA：「Friction Welding of Metallic Materials」, IIW, Doc. III J-58-82
BSI：「Specification for friction welding of butt joints in metals for high duty applications」, BS 6223, (1982)
野田：「摩擦圧接作業標準に関する提案」, 摩擦圧接協会資料 No.209 (昭58)
- 13) K.Nakamura and S.Nakahara：「Friction Welding of Non-Circular Section Workpieces by Phase-Matching Friction Welding Machine」, IIW Doc. III-390-70
- 14) 石川, 沼田：「定位相摩擦圧接について」, 摩擦圧接協会資料 No.70 (昭47)
- 15) 公開特許公報：特開昭50-33149, 特開昭50-33150
- 16) 蓮井, 福島, 衣川：「試作摩擦圧接機とそれによる二, 三の実験」, 日本機械学会誌, 71-597 (1968), 1390