Cr-Zr 銅合金の摩擦圧接*

竹上 弘彰**, 篠田 剛***

Friction Welding of Cr-Zr Copper Alloy*

by TAKEGAMI Hiroaki** and SHINODA Takeshi***

An investigation has been made of friction welding of Cr-Zr copper alloy, which is very difficult to join by conventional fusion welding processes because of its high thermal conductivity and susceptibility to solidification cracking and blowhole formation. It was revealed that brake timing and stopping period had significant effect on the formation of weld interface in friction welding of Cr-Zr copper alloy. The weld was established only in the center area of the forging surface during the friction stage. Severe metal flows were required to expand the weld interface to the whole forging surface to obtain the sound joint from those experiments. When the brake was operated after applying an upset pressure, referred to as brake timing “after”, the adequate metal flow was generated in the weld. Optimized parameters were brake timing “after” and stopping period more than 0.3 s to join Cr-Zr copper alloy without defects. The joint efficiency estimated from tensile strength was more than 92% at the optimum bonding parameters. All specimens failed in the soft area apart from weld interface on tensile test.

Key Words: Friction welding, Cr-Zr Copper alloy, Brake timing, Stopping period, Defect, Tensile strength

1. 緒 言

銅および銅合金は、熱伝導がよいとされるアルミニウムよりもさらに熱伝導率の大きい材料である。一般的に、熱伝導率の大きい材料を溶接する場合、熱が急速に母材中に拡散し、溶接部に熱を集中させることが難しいため溶接性が悪い。従って、銅合金材の溶融溶接において十分な溶け込みのある良好な溶接部を得るには、高温予熱・高パス間温度が必要となる。また、銅合金材の溶接部では、溶接割れやブローホールの発生も問題となる¹⁾。これらの問題点を解決するために、低入熱で短時間の接合法が求められるが、熱伝導が高いため相反する要求となる。

固相接合法である摩擦圧接法では、接合中の最高到達温度が被接合金属の融点以下であり、接合に要する熱量が小さい。また、接合時間も溶融溶接に比べ非常に短時間であることから、熱影響部を小さくできるという特徴がある²⁾。これらの点で、摩擦圧接法は銅合金材の接合に適しているとも考えられる。また、一般的に摩擦圧接継手の接合界面では割れやブローホールの発生がないことも特徴であり、銅合金材の接合を行った場合にも良好な接合部を得ることが期待できる。

摩擦圧接法は、他の溶融溶接法に比べ必要な入熱量は小さ

いが、入熱量や部材の温度分布が接合結果に大きく影響するのは溶融溶接法による継手と同様である。このため、熱の拡散が速い銅合金材の摩擦圧接においてもこの点に注意して接合条件を決定する必要がある。これまで、銅合金と異種材料の摩擦圧接については多く報告³⁻⁵⁾されているが、銅合金同種材すなわち熱伝導率の大きい材料同士の接合についてはあまり報告されていない。本研究では、摩擦圧接法により銅合金の同種材接合を行い、最適接合条件を決定するとともに、接合現象や継手の機械的性質について調べた。

2. 実 験 方 法

2.1 供試材

供試材として、直径 25 mm、全長 70 mm のクロム・ジルコニウム銅合金中実丸棒を用いた。丸棒は、鋳造材からの削り出しによって作製した。接合部端面は、旋盤加工のままとした。Table 1 に、本実験で用いた銅合金の化学組成を示す。本材は 98 % 以上が銅であり、析出硬化元素として Cr、高温延性低下防止元素として Zr が添加してある。母材には溶体

Table 1 Chemical composition of copper alloy.
(mass %)

Cu	Cr	Zr
≥98.0	0.5~1.5	0.08~0.3

*原稿受付 平成 15 年 6 月 30 日 平成 14 年度春季全国大会で発表
**正 員 名古屋大学大学院(現: JST 非常勤研究員) Member, Graduate student, Nagoya University (Present: Part-time researcher of JST)
***正 員 名古屋大学工学研究科 Member, Graduate School of Engineering, Nagoya University

化処理後、時効処理を施してあり、引張強さは 373 MPa、ビッカース硬さは HV110 である。

2.2 摩擦圧接条件

摩擦圧接は、日東機械製ブレーキ式縦型摩擦圧接装置を用いて行った。本装置は主軸回転および加圧の制御に AC サーボモータを用いている。摩擦圧接条件を Table 2 に示す。接合は寄り代制御で行い、摩擦圧力、摩擦寄り代、アプセット圧力を変化させて行った。また、ブレーキパラメータとして、ブレーキタイミング、主軸停止時間およびブレーキ方法を変化させた。これらは、主軸回転停止とアプセット圧力付与に関するパラメータである。

Fig. 1 にこれらのパラメータの関係を示す。ブレーキのタイミングがアプセット圧力付与の前か後でブレーキタイミングを定義した。アプセット前ブレーキのタイミングをブレ

Table 2 Friction welding conditions.

Friction pressure P ₁ , MPa	20.4 - 61.1
Friction upset distance u ₁ , mm	0.5 - 3.0
Upset pressure P ₂ , MPa	61.1, 122.2
Upset time t ₂ , s	10.0
Rotation speed N, rpm	2000
Stopping period t _s , s	0.3, 0.5, 0.7, 0.8
Brake timing B.T.	Before, After

Fig. 1 Schematic diagram of brake parameters of friction welding.

ーキタイミング「前」、アプセット後ブレーキのタイミングをブレーキタイミング「後」とした。実際の接合では、ブレーキタイミング「前」では、主軸回転が完全に停止した後にアプセット圧力を付与し、ブレーキタイミング「後」では、主軸回転の減速と同時にアプセット圧力を付与する。主軸停止時間は、主軸回転の減速開始から完全停止までの時間である。これらのパラメータを変化させることにより、主軸回転減速中の接合現象が異なり、接合結果が変化する^{6,7)}。

また、本装置は主軸回転停止を基本的には 2 種類の方法で行うことが可能である。1 つは、一般的な油圧ブレーキによる回転停止である。もう 1 つは、サーボモータの制御により、主軸回転を停止させる方法である。さらに、主軸停止時間を変化させて接合を行う場合には 2 種類の停止方法を選択可能である。すなわち、1) 主軸回転が完全に停止するまでサーボモータによって制御する方法、2) ある程度までサーボモータによる制御で減速した後サーボモータによる制御を切り、油圧ブレーキにより完全停止させる方法である。主軸回転の減速開始から、回転数はほぼ一定の割合で減少する。サーボモータのみで主軸停止を行った場合、約 100 rpm 以下の回転数になるとさらに緩やかに減少する。これは、回転停止位置の精度を向上させるためである。これに対し、油圧ブレーキを併用した場合、完全停止までほぼ一定の速度での減速となる。これにより、サーボモータのみで回転停止を行った場合、回転停止直前の低回転数が 0.1 s ~ 0.2 s 程度長く持続する。なお、油圧ブレーキのみで回転を停止させた場合、主軸停止時間は約 0.3 s である。

2.3 継手評価

接合した継手に関しては、外観観察を行った後、断面のマクロ観察および顕微鏡観察を行った。断面は、エメリー紙で湿式研磨し、仕上げにアルミナを用いてバフ研磨を行った後、エッチング液 (FeCl₃ : 2.5 g, HCl : 25 ml, H₂O : 50 ml) によりエッチングした。

顕微鏡観察で接合界面に欠陥が無く、良好な接合が行われていると判断した継手については、引張試験を行った。引張試験片の形状を Fig. 2 に示す。試験片の平行部直径は 16 mm、平行部長さは 50 mm である。引張試験片は JIS Z2201 4 号試験片に準じて作製したが、本実験では試験片の初期長さが短いため、平行部長さが短い。なお、接合界面は平行部中央で

Fig. 2 Shape and dimensions of tensile test specimen.

ある。

また、接合部付近の硬さ分布の測定を行った。測定は、丸棒中心軸上および中心軸から 10 mm の位置で行った。試験荷重は 1.961 N、測定間隔は 0.2 mm とした。

3. 実験結果および考察

3.1 継手外観観察結果

代表的な継手外観を、Fig. 3 に示す。Fig. 3(a), Fig. 3(b)は、ブレーキタイミングとブレーキ方法を変化させた継手である。回転側、固定側の両部材でばりが形成され、ばり表面は酸化により変色し黒色を呈した。外観観察では、接合界面で

の接合不良等は観察できなかった。

摩擦条件、すなわち回転数、摩擦圧力および摩擦寄り代が同じ場合でも、ブレーキパラメータの違いにより、ばりの形状が異なった。ブレーキタイミングを「後」に設定することや主軸停止時間を長くすることにより、ばりが大きくなった。この変化は、主軸回転の減速時に生じており、ブレーキパラメータを変化させることにより、接合現象が変化することがわかった。

3.2 継手断面観察結果

Fig. 4 および Fig. 5 に、Fig. 3 で示した継手の断面マクロ写真および断面マクロのスケッチを示す。Fig. 5 の断面図中には、エッチングにより白く変色した部分を原色で示してある。

Brake timing : Before
(a) Stopping period : 0.3 s
Brake : Hydraulic brake

Brake timing : After
(b) Stopping period : 0.3 s
Brake : Servo motor

P_1 : 20.4 MPa, u_1 : 1.5 mm
 P_2 : 61.1 MPa, t_2 : 10.0 s
 N : 2000 rpm

10 mm

Fig. 3 Appearances of friction welded joint.

(a) With defect

Brake timing : Before
Stopping period : 0.3 s
Brake : Hydraulic brake

(b) Without defect

Brake timing : After
Stopping period : 0.3 s
Brake : Servo motor

P_1 : 20.4 MPa, u_1 : 1.5 mm
 P_2 : 61.1 MPa, t_2 : 10.0 s
 N : 2000 rpm

10 mm

Fig. 4 Macro sections of friction welded joint.

Fig. 5 Comparison of discolored zone by etching.

$P_1 : 20.4 \text{ MPa}$, $u_1 : 1.5 \text{ mm}$, $N : 2000 \text{ rpm}$

Fig. 6 Macro section of friction welded joint after friction stage (No upset forge was applied).

Fig. 7 Torque curve of friction welding of copper alloy.

この部分は、入熱および塑性変形の影響により母材に比べ組織が変化した部分であると考えられる。

Fig. 4(a)あるいはFig. 5(a)に示すように、Fig. 3(a)の条件では接合界面に欠陥が存在することが分った。欠陥は主に外周部付近に見られた。外観観察で欠陥を検出できなかったのは、最外周では回転側と固定側のばりが接触し、閉じていたためである。

欠陥が形成される過程を調査するため、摩擦条件 $P_1 : 20.4 \text{ MPa}$, $u_1 : 1.5 \text{ mm}$, $N : 2000 \text{ rpm}$ で、摩擦過程終了後アプセット圧力を付与せずに接合を完了した。Fig. 6に、その継手断面を示す。これより、アプセット圧力付与直前には、接合界面の中心部のみが接合しており、外周部は全く接触していないことがわかる。この接触していない部分が、最終的に欠陥になると考えられる。

Fig. 7に、本実験で得られた体系的なトルク曲線を示す。接合開始から 1.5 s までは連続的にトルクが上昇している。この間は、接合面において密着面が増大し、摩擦面が丸棒断面全体になる。しかしながら、摩擦過程終了時には中心部のみが密着しており、外周部は回転側と固定側の部材が分離している。これは、接合界面で回転面移動現象⁸⁾を生じているためであると考えられる。一般的に、回転面移動現象は丸棒と板材の摩擦圧接のように両部材の熱容量が大きく異なる場合に見られる現象であるが⁸⁾、クロム・ジルコニウム銅合金の摩擦圧接では、同種・同径部材の接合にもかかわらず、回転面が移動したと考えられる。実際に、Fig. 6の条件で摩擦過程終了後、回転させたまま両部材を切り離し、それぞれの部材の重量を測定したところ、回転側の部材の重量が 3.7 g 増加していた（固定側の部材は 3.7 g 減少）。このことから、摩擦面が固定側部材に移動したと考えられる。部材中心部で回転面移動現象を生じたため、外周部では両部材が分離し、摩擦がほとんど行われなかったと考えられる。これは、Fig. 5(a)に示すように、欠陥部の変色域幅が、接合が行われている

中心部の幅に比べ極めて小さいことと一致する。

3.3 接合条件による接合性の変化

欠陥のない良好な接合部を得るためには、未接触部すなわち外周部でも摩擦熱の発生および塑性変形による接合を生じさせる必要がある。これには、摩擦圧力やアプセット圧力を大きくすることが考えられる。

摩擦圧力を大きくした場合、回転面移動現象を抑制し、未接触部を形成させないと考えられる。しかしながら、本実験で用いた銅合金の摩擦圧接においては、部材の温度が上昇し軟化するまでは、非常に大きなトルクが発生した (Fig. 7)。このため、摩擦圧力を大きくすると摩擦開始直後のトルクが非常に大きくなり、摩擦圧接装置に過大な負担がかかる。従って、本実験では摩擦圧力は 61.1 MPa までとしたが、この範囲では欠陥の形状に大きな変化は見られなかった。

そこで、アプセット圧力を大きくして欠陥の消失を試みた。最初に、ブレーキタイミングは「前」としてアプセット圧力を大きくした。アプセット圧力を 122.2 MPa まで上昇させたが、欠陥部の隙間は減少するものの、消失することはなかった。ブレーキタイミング「前」の条件では、Fig. 6 の状態にアプセット圧力が付与される。この状態から完全な接合部を得るには、未接触部の回転側と固定側の部材を密着させる必要がある。しかしながら、アプセット圧力は軸方向の力であるため、すでに接合している中心部に力がかかり、両部材の密着を妨げる。この結果、アプセット圧力が大きい場合にも、完全に密着しなかった部分が欠陥として残存する。これらのことから、主軸回転が完全に停止するまでに未接触部を消失させる必要があると判断できる。すなわち、主軸回転減速時の塑性変形を大きくするようなパラメータ設定を行う必要がある。

3.4 ブレーキパラメータの最適化

主軸回転減速時の塑性変形を増加させるために、ブレーキタイミング「後」で接合を行った。また、主軸停止時間も長くした。この結果、欠陥は減少する傾向を示し、Fig. 4(b)に示すように欠陥を検出できない継手も得られた。

ブレーキタイミング「後」の条件では、Fig. 6 の状態から主軸回転の減速が開始する。同時にアプセット圧力が付与され、減速時にブレーキタイミング「前」の条件よりも高い圧力が加わることになり、最終トルクの増加につながる。最終トルク過程でのトルクの上昇は、接合界面のねじれ方向の変形を促進する効果がある⁹⁾。このねじれ方向の力により、接合界面中心部の金属が激しい塑性流動を伴って外側に押し出され、外側にあった欠陥が消失したと考えられる。これは、ブレーキタイミングを「後」にした条件で、Fig. 5(b)に示すように熱影響部形状が中央部で薄くなっていることと一致する。トルク値の増加は、主軸回転減速開始から回転停止直前まで続いたため、主軸停止時間を長くすることにより、最終トルクによる塑性変形が大きくなり、欠陥を消失する効果が

大きくなる。欠陥を完全に消失させるために必要な主軸停止時間はブレーキ方法により異なり、サーボモータと油圧ブレーキの併用では、主軸停止時間 0.5 s 以上で欠陥が消失したのに対し、サーボモータのみでは主軸停止時間 0.3 s 以上で欠陥が消失した。次に、ブレーキ方法の影響について述べる。

サーボモータ・油圧併用のブレーキに比べ、サーボモータのみのブレーキの方が短い主軸停止時間で欠陥を消失させることができた。これは、同じ主軸停止時間の場合、サーボモータのみで回転停止を行うほうが、塑性変形が大きくなるためである。本装置では、主軸回転をサーボモータで行っており、減速過程においても回転を制御している。一般的に、回転数が減少するに伴い摩擦面に発生するトルクは増加する。このトルクは回転を停止させようとする力であるが、サーボモータはこの力に抵抗して回転を制御する。結果的に回転に抗する摩擦力、すなわちトルクが増大する。接合界面付近の部材は軟化して、塑性変形しやすい状態になっているため、このトルクの増大によりねじれ方向の変形を生じる。

これに対し、油圧ブレーキとの併用では、ある程度回転数が減少したところでサーボモータの制御を切り離し、油圧ブレーキにより回転を停止させる。この場合、摩擦抵抗力に抗する力は慣性力が主となり、サーボモータによる回転に抗する力は働かないため、サーボモータのみによる制御に比べトルクの上昇は小さい。このため、接合界面での塑性変形を十分に生じさせ欠陥を消失させるためには、主軸停止時間を長くする必要がある。

3.5 組織観察結果

Fig. 8 に、欠陥の認められない接合部の顕微鏡による組織観察の結果を示す。母材部分には組織の流れは見られないが、接合界面に近づくにつれて外周部に向かう流れを生じている。接合界面では、組織は著しく微細化し、組織の流れは判断できなかった。この微細化した組織は、接合時の激しい塑性流動により形成されたと考えられる。欠陥が完全に消失した継手に関しては、顕微鏡観察においても欠陥は確認されなかった。

3.6 硬さ測定結果

Fig. 9 に、硬さ測定結果を示す。図中左側は、Fig. 4(a)の欠陥が存在する継手、右側は Fig. 4(b)の健全な継手の硬さ分布を示して比較した。全ての接合条件で、接合界面での軟化が見られた。軟化の程度は接合条件によって異なっており、欠陥を有する継手では最軟化域の硬さが HV80 程度であるのに対し、欠陥のない継手では HV90~100 であった。軟化域の幅は、欠陥が存在する継手では、中心部の軟化域幅が外周部よりも大きくなり、欠陥がない継手では、逆に外周部の軟化域幅が大きくなっている。この傾向は、Fig. 5 に示した変色域の中心部と外周部の幅の大小に対応している。これらのことから、接合部付近の軟化は、接合中の入熱によるものであり、熱により析出物が再固溶したために生じたと考えられ

Fig. 8 Micro structures of friction welded joint.

Fig. 9 Comparison of hardness distributions of friction welded joints with brake timing.

Table 3 Friction welding conditions of tensile test specimen and results of tensile test.

P_1 [MPa]	u_1 [mm]	P_2 [MPa]	t_2 [s]	t_s [s]	N [rpm]	Brake	T.S. [MPa]
20.4	1.5	61.1	10.0	0.3	2000	S	345
				0.5			348
20.4	1.5	122.2	10.0	0.5	2000	S + H	364
				0.8			369

Brake timing : After

 ※ S : Servo motor
 H : Hydraulic brake

る。

3.7 引張試験結果

継手断面観察において接合界面に欠陥が認められなかった接合条件について、引張試験を行った。引張試験を行った継手の接合条件および引張試験結果を Table 3 に示す。引張試験はそれぞれの接合条件について 2 本ずつ行った。引張試験を行った結果、破断は全て接合界面よりやや離れた母材部で生じた。これは、Fig. 9 に示す、ブレーキタイミング「後」による継手の硬さ分布における最軟化域（接合界面から 2 mm 程度の範囲）である。継手強度は 344 MPa～371 MPa と母材強度 373 MPa に対し 92.3 % 以上の継手効率が得られており、接合界面においても母材程度の強度は得られていると考えられる。同じ銅材を溶融溶接した場合も軟化域で破断するが、強度は約 200 MPa であり、摩擦圧接法により、軟化域破断ではあるものの高い継手強度が得られることがわかった。

た。

以上述べてきたように、ブレーキパラメータを変化させることにより、主軸回転減速時に接合界面の塑性変形を増大させ、接合界面の熱影響部を外に押し出すことが可能である。また、この塑性変形の増大はごく短時間で生じるため、発熱量が小さく、熱影響による軟化域の幅および軟化の程度をほとんど増加させないものと思われる。このことが、ブレーキタイミング「後」の場合の継手強度の向上につながっていると考えられる。

接合界面近傍でのねじれ変形が継手性能の低下を招かないのであれば、ブレーキパラメータの制御は継手性能の向上に有効であると考えられる。本実験では、塑性変形の影響による継手強度の低下は見られず、欠陥を消失させるのに有効な方法であったと考えられる。

4. 結 言

本実験ではクロム・ジルコニウム銅合金の摩擦圧接を行い、その接合性を調べると共に、継手性能の評価を行った。以下に、その結果をまとめる。

- (1) 摩擦過程では中心部のみが密着し、外周部は回転側と固定側の部材は接触しておらず、未接接触となった。この未接触部は、摩擦圧力を 61.1 MPa まで上昇させても消失することは無かった。
- (2) ブレーキタイミング「前」では、欠陥が残存したが、同じ摩擦条件でブレーキタイミングを「後」にすることにより欠陥を消失させることができた。
- (3) 欠陥が完全に消失する主軸停止時間はブレーキ方法により異なり、サーボモータのみによる回転停止では 0.3 s 以上、サーボモータと油圧ブレーキの併用では 0.5 s 以上であった。
- (4) 欠陥のない継手に関しては、軟化域破断であるものの母材強度に対し 92.3 % 以上の継手効率が得られた。

謝 辞

本研究の一部は文部科学省の 21 世紀 COE プログラム「自然に学ぶ材料プロセッシングの創生」の援助を受けた。記してここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) JWS : Yousetsu-Kougaku-no-Kiso, Maruzen, (1982). (in Japanese)
- 2) Japan Friction Welding Association : Friction Welding, CORONA Publishing Co., LTD., 6-8. (in Japanese)
- 3) M. Aritoshi, K. Okita, T. Enjo, K. Ikeuchi, F. Matsuda and T. Tomita : Friction Welding of Copper-Tungsten Sintered Alloy to Pure Titanium ? Formation of Intermetallic Compound at Weld (Report 2)一, Quar. J. JWS, 9-4(1991), 481-488. (in Japanese)
- 4) Y. Itoh and T. Shindoh : Strength Characteristics of Copper/Aluminum Alloy Friction Welded Joint, Journal of the JFWA 5-3(1999). (in Japanese)
- 5) K. Ogawa, H. Yamaguchi, T. Yamazaki, Y. Yamamoto, T. Sawai and H. Ochi : Relation between Heat Input and Tensile Strength, Burn-off Length and Tensile Strength in Friction Welding of Industrial Pure Aluminum to Tough Pitch Copper, Journal of light metal welding and construction, 40-3(2002) 131-139. (in Japanese)
- 6) T. Shinoda, K. Lombardini and N. Seo : Effect of Braking Timing on Mechanical Properties of Friction Welded Joints, Prep. Nat. Meet. JWS, No. 48, (1991), 132-133. (in Japanese)
- 7) Y. Tanaka, K. Katoh and H. Tokisue : Effect of Brake Timing on the Mechanical Properties of Friction Welded 5052 Aluminum Alloy Joint, The 9th Materials and Processing Conference (M&P 2001), (2001), 71-72. (in Japanese)
- 8) K. Fukakusa and T. Satoh : Travelling Phenomena of Rotational Plane during Friction Welding - Experimental Results and Travelling Mechanism -, J. JWS, 50-10 (1981), 953-958. (in Japanese)
- 9) S. Fukushima and A. Hasui : Some Contributions to the Heating Phase in Friction Welding, J. JWS, 41-9 (1972), 1074-1084. (in Japanese)