5052 アルミニウム合金／純チタン摩擦圧接継手の
機械的性質に及ぼすインサートメタルの影響

加藤 数良*・時末 光*

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 54, No. 10 (2004), pp. 430-435

Effect of insert metal on mechanical properties of friction welded
5052 aluminum alloy to pure titanium joint

Kazuyoshi KATOH* and Hiroshi TOKISUE*

5052 aluminum alloy to pure titanium were friction welded using a continuous drive friction welding machine. Effect of using an insert metal on the microstructures and mechanical properties of the dissimilar friction welded joint was investigated. Friction welded joints without insert metal were observed compound layer and the thickness of inter-metallic compound layer were irregular and thick. Friction welded joint with insert metal, its compound layer became thin and generated comparatively evenly. In spite of the existence in the friction welding of the use of the insert metal, the hardness of compound layer of both welded joints showed higher than those of the both base metals. Tensile strength of welded joint without insert metal showed 78% of 5052 aluminum alloy and it's fractured at weld interface. But, in case of welded joint using an insert metal, the tensile strength showed 92% of 5052 aluminum alloy. The elongation of welded joints with insert metal was improved. All the welded joints with insert metal were fractured at softened area of heat affected zone of 5052 aluminum alloy side in tensile test.

(Received April 12, 2004)

Keywords: dissimilar friction welded joint, insert metal, 5052 aluminum alloy, pure titanium, mechanical properties

1. 緒 言

摩擦圧接は固相接合の一種であることから、溶融溶接では接合が不可能とされている組合せ、たとえば、鉄鋼材料やチタン合金とアルミニウム合金、あるいはマグネシウム合金の組合せのように両者の融点が大きく異なる異種材料の接合が容易に行えることはよく知られている。著者らも先に、アルミニウム合金あるいはマグネシウム合金の展伸材と鋳造材などの同系異種材の組合せ^{1),2)}、アルミニウムと鉄鋼材料³⁾およびマグネシウム合金と鉄鋼材料の組合せ⁴⁾に摩擦圧接の適用を検討し、摩擦圧接が異種材料の接合に有用な方法であることを示した。

しかし、アルミニウムとマグネシウム⁵⁾、アルミニウム合金とチタンの組合せでは、摩擦圧接によっても接合界面に脆弱な金属間化合物が生成し、十分な強度の継手が得られないことも多い^{6),7)}。このような組合せの接合では、接合温度を低く抑えるなどの方法により、金属間化合物の生成を抑制するなど継手強度の改善が必要となる。摩擦圧接は、その接合機構から金属間化合物の生成を皆無にすることは不可能であり、生成する化合物の挙動が明らかにされていないために抑制も困難なことが多く、これに関連する研究報告も少ない。

著者らは、1050 アルミニウムとチタンを組合せた摩擦圧接では、光学顕微鏡の範囲では金属間化合物の生成は認められ

ず、継手強度も 1050 アルミニウム母材と同等の値が得られ、破断も 1050 アルミニウム側の熱影響部であることを報告した⁸⁾。このことは、アルミニウム合金とチタンの組合せのように接合界面に金属間化合物が生成しやすい組合せでは、インサートメタルに純アルミニウムを用いることによって接合界面での金属間化合物の生成が抑制でき、継手強度の向上が可能であることを示唆するものである。

本研究では、アルミニウム合金とチタンを組合せた摩擦圧接における接合界面に生成する金属間化合物の挙動と継手強度に及ぼすインサートメタルの影響について検討した。

2. 供試材および実験方法

供試材は、5052BDS-F アルミニウム合金（以下、5052 合金と称す）と相手材として純チタン TB340C（以下、チタンと称す）を使用した。いずれも直径 20 mm の丸棒を、長さ 80 mm に機械加工したものを圧接直前に摩擦面を脱脂洗浄して用いた。供試材の化学組成を **Table 1** に、機械的性質を **Table 2** に示す。インサートメタルには、前述のように 1050 アルミニウム／チタン摩擦圧接継手⁸⁾が 1050 母材と同等の引張強度が得られたことから、安価で入手しやすいアルミニウム箔（IN30、厚さ：15 μm ）を用いた。以下、インサートメタルを用いない継手を直接継手、用いた継手をインサート継手と称す。

* 日本大学生産工学部 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)。College of Industrial Technology, Nihon University (2-1, Izumicho, 1 chome, Narashino-shi, Chiba, 275-8575)。

Table 1 Chemical compositions of base metals (mass%)
(a) Pure titanium

Fe	N	O	H	Ti
0.05	0.004	0.10	0.0015	bal.

(b) 5052 aluminum alloy

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.12	0.18	0.02	0.04	2.42	0.21	0.01	0.00	bal.

Table 2 Mechanical properties of base metals

Materials	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness	
			(HV0.1)	(HK0.01)
Pure titanium	451	39.2	162	197
5052 alloy	258	17.8	87	88

Table 3 Friction welding conditions

Rotational speed	n (s^{-1})	58
Friction pressure	P_1 (MPa)	20~50
Upset pressure	P_2 (MPa)	$P_1 \times 2$, $P_1 \times 3$
Friction time	t_1 (s)	2~5
Upset time	t_2 (s)	5

圧接には、制動式摩擦圧接機を使用し、**Table 3**に示す圧接条件を組合せてチタンを回転側、5052合金を固定側として圧接を行った。得られた継手の組織観察、全寄り代の測定、硬さ試験（ピッカース試験は、荷重：0.98 N、測定間隔：0.5 mm、ヌーブ試験は、荷重：0.098 N、測定間隔 0.05 mm、荷重保持時間はいずれも 15 s とした）、接合面をゲージ部中央とした JIS 4 号試験片による引張試験、引張試験後の破面観察および K 種熱電対（素線径：0.3 mm）を用いて圧接時の温度測定を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 組織観察

継手の軸断面の巨視的組織を **Fig. 1** に示す。継手の外観はインサートメタル使用の有無に関係なく、高温強度が極端に異なる組合せ、たとえばアルミニウムと炭素鋼の組合せ³⁾と類似した様相であり、チタンに比較して軟質な 5052 合金側より優先的にぼりが発生し、チタンを包み込むような形状であった。このことは摩擦時間が長くなるのに伴い顕著であった。また、インサート継手のぼり生成量は直接継手に比較して若干なくなる傾向にあった。インサートメタルの使用の有無に関係なく、チタン側は外観、巨視的組織ともにほとんど変化は認められなかった。

ぼり生成量の大小と密接な関係のある全寄り代の測定結果

Fig. 1 Macrostructures of friction welded joint.
($P_1=30$ MPa, $P_2=60$ MPa, $t_1=3$ s) **Fig. 2** Relation between friction time and total loss. **Fig. 3** Microstructures of friction welded joint without insert metal. ($P_1=40$ MPa, $P_2=80$ MPa, $t_1=2$ s)

を **Fig. 2** に示す。継手の全寄り代は、インサートメタルの使用の有無に関係なく、摩擦時間および摩擦圧力の増加に伴い大きくなる傾向を示した。また、インサート継手では全条件で全寄り代は小さくなる傾向にあった。

直接継手の接合界面近傍の微視的組織を **Fig. 3** に示す。継

Fig. 4 Microstructures of friction welded joint with insert metal. ($P_1=50$ MPa, $P_2=100$ MPa, $t_f=2$ s)

手の接合界面には 2017 合金/チタン摩擦圧接継手⁶⁾と同様にチタンに隣接した黒色の化合物層と不規則な層状の機械的混合層が認められた。化合物層の厚さは不規則ではあるが、軸心に近い部分に比較的厚い化合物層が観察された。化合物層の厚さ分布の詳細は後述するが、圧接条件によっては軸心と外周部の中間部に化合物層厚さのピークが観察され、外周部に近づくのに伴い化合物層の厚さは薄くなる傾向を示した。

インサート継手接合界面近傍の微視的組織を Fig. 4 に示す。インサート継手においても接合界面のチタン側に隣接して化合物層と機械的混合層の生成は認められたが、いずれも著しく薄くなった。また、詳細は後述するが、直接継手の化合物層の厚さは不規則であったが、インサート継手の化合物層は中心部と外周部で若干厚くなり、中心部から 5~8mm の場所で薄くなるものの、その厚さの差は小さく、インサートメタルの使用により化合物層の生成が抑制され、これに伴い機械的混合層の厚さも薄くなったものと考えられる。また、インサートメタルの存在は光学顕微鏡および SEM による高倍率の観察によっても確認できなかった。このような化合物の様相は、他の条件においても類似の傾向を示した。

接合界面に生成する金属間化合物はすべての圧接条件で観察されたが、圧接条件によって化合物層の厚さは若干異なる。よって、継手軸心に沿った断面に生成した化合物層の厚さの測定結果を Fig. 5 に示す。直接継手 (Fig. 5 (a)) では、摩擦時間が短い場合は軸心に近い部分に化合物層の厚い部分が存在し、外周部に近づくのに伴い薄くなる傾向にある。しかし、中心部から外周部の間では化合物層の厚さは変動を繰り返しながら外周部に近い部分で若干小さいピークが生じている。この変動は各部で生成されたものと、ばりの排出に伴い化合物が外周部へ移動するために生じたものであると考える。また、摩擦時間 4s のように一部に大きな変動が認められるのは、詳細は明らかではないが、著者らの他の実験結果から、界面で生成した化合物が外周部へ移動する際に潤滑剤のような働きをするために界面で滑りが生じるためであると推定す

(a) without insert metal
($P_1=40$ MPa, $P_2=80$ MPa)

(b) with insert metal
($P_1=50$ MPa, $P_2=100$ MPa)

Fig. 5 Measured results of intermetallic compound layer of friction welded joint.

る。

インサート継手においても直接継手と類似の変動を示し、化合物層の厚さは中心部で比較的厚くなったが、中心部から 5mm 以上離れたと化合物層の厚さは薄くなる傾向を示した。インサート継手の化合物層は直接継手に比較して全体的に薄くなり、化合物層の厚さは最も厚い部分でも $150\mu\text{m}$ と薄くなった。このことより、インサートメタルを用いることにより接合界面における化合物の生成が抑制できたものと考えられる。

3.2 温度測定

直接接合による摩擦圧接中の温度測定結果を Fig. 6 に示す。5052 合金側の圧接中の温度履歴は 6061 アルミニウム合金同種材の摩擦圧接時¹⁰⁾と同様に摩擦開始から温度は急激に上昇し、摩擦過程終了後回転が完全に停止した時点で最高温度に到達し、以後冷却の過程となる。チタン側は 5052 合金側と類似の様相を示すが、昇温速度は若干遅く、最高到達温度も低くなった。この傾向は測定位置が摩擦面より離れるのに伴い明瞭に認められた。このことは、チタンが 5052 合金に比較して熱伝導率が小さく、摩擦が完全に終了した時点においても、高温となった 5052 合金側の熱影響により両者が同一温度となるまでチタン側が加熱状態となるために、チタン側の最高温度に到達する時間に遅れが生じたものと考えられる。また、前述したようにチタンは圧接中にほとんど変形をしないが、5052 合金は摩擦寄り代が発生し、摩擦過程におい

Fig. 6 Temperature-time histories of friction welding process without insert metal. ($P_1=40$ MPa, $P_2=80$ MPa, $t_1=3$ s)

Fig. 8 Hardness distributions of friction welded joint without insert metal. ($P_1=40$ MPa, $P_2=80$ MPa, $t_1=2$ s)

Fig. 7 Relation between friction time and maximum temperature.

て測定位置が摩擦面に接近することも 5052 合金側の温度がチタン側より高く測定された一因であると考えられる。

接合面から 1 mm の位置における 5052 合金側の最高到達温度は 910~924 K, チタン側では 720~730 K といずれも 1050/チタンの組合せ⁸⁾の場合に比較して若干低い値を示した。

インサート継手の摩擦圧接中の温度履歴は、直接継手の場合と類似の傾向を示した。よって、Fig. 7 に接合面より 1 mm の位置に熱電対を挿入して測定した温度履歴より求めた最高

到達温度を示す。図には比較のために直接継手の測定結果についても併記した。最高到達温度にはインサートメタルの使用の有無による差異は明瞭には認められず、5052 合金側がチタン側に比較して高くなった。また、最高到達温度は若干のばらつきはあるが、摩擦時間が長くなるのに伴い高くなる傾向が認められた。この傾向はチタン側において明瞭であった。

3.3 硬さ試験

ビッカース硬さ試験およびヌーブ硬さ試験による直接継手の回転中心軸方向の硬さ分布を Fig. 8 に示す。ビッカース硬さ試験より、5052 合金側には接合面から約 15 mm まで軟化域が認められた。チタン側は 5052 合金側と比べて硬さのばらつきは大きいが母材と同程度の値を示し、硬さに大きな変化は認められなかった。5052 合金側に軟化域が認められたのは、素材は加工硬化により硬度が高くなっており、圧接時に界面近傍の温度上昇により軟化したものであり、加工硬化や時効硬化などによって硬度を高くした素材を用いた場合に共通して観察される現象である^{9),10)}。

ヌーブ硬さ試験では接合界面は化合物の生成により約 270HK と高い値を示した。継手の硬さ分布は圧接条件により化合物層による硬化部の範囲が異なるほかは、いずれの継手も類似の硬さ分布を示した。

インサート継手のビッカースおよびヌーブ硬さ分布を Fig. 9 に示す。インサート継手のビッカース硬さ分布は、直接継手と同様に 5052 合金側は接合面から約 15 mm まで軟化域が認められ、チタン側は 5052 合金側に比較して硬さのばらつきは大きい母材部の硬さと大差ない値を示した。また、ヌーブ硬さ分布に示すように、インサート継手の接合界面に

Fig. 9 Hardness distributions of friction welded joint with insert metal. ($P_1=50$ MPa, $P_2=100$ MPa, $t_1=2$ s)

Fig. 10 Results of tensile tests of friction welded joint without insert metal.

は化合物の生成により両母材に比較して高い値を示す部分が認められた。この接合界面の硬さは直接継手の硬さと同程度であったが、その硬化部の幅は狭くなった。

3.4 引張試験

直接継手の引張試験結果を Fig. 10 に示す。継手の引張強さは摩擦圧力の大小に関係なく摩擦時間が長くなるのに伴い低下する傾向が認められた。摩擦時間の長短により引張強さにはばらつきが認められるのは、接合強度が金属間化合物の生成により低下するためであり、低下の原因となる化合物層の厚さが接合界面の場所により不規則に存在することに起因するものと考えられる。引張強さが最大値を示した条件の継手効率

は 5052 合金母材の 78% の値であった。継手の伸びはすべて

Fig. 11 Results of tensile tests of friction welded joints with insert metal.

の条件において約 3% 以下と両母材に比較して著しい低下が認められた。引張試験における継手の破断はいずれも接合界面であり、接合界面に生成した金属間化合物が接合面破断の起点となったものとする。

直接継手の引張試験後の破断面には 5052 合金側、チタン側ともに変形はほとんど認められず、チタン側の破断面は圧接時に生成した化合物が同心円状に付着した状態であった。

インサート継手の引張試験結果を Fig. 11 に示す。Fig. 11 (a) はアプセット圧力を摩擦圧力の 2 倍とした場合、Fig. 11 (b) は 3 倍とした場合の結果である。インサート継手も、直接継手と同様に摩擦時間の増加に伴い引張強さは低下する傾向が認められたが、その差は小さく、摩擦圧力、アプセット圧力の大小による影響もほとんど認められなかった。インサート継手の引張強さの最高値は摩擦圧力 30 MPa、アプセット圧力 60 MPa、摩擦時間 2s の条件であり、5052 合金母材の 92% の値を示し、インサートメタルを用いることによって引張強さは向上した。

アプセット圧力が摩擦圧力の 2 倍の場合は、摩擦圧力 30 MPa、摩擦時間 3s 以下の継手、アプセット圧力が摩擦圧力の 3 倍とした条件では摩擦圧力 20 MPa、摩擦時間 4s 以下の継手の伸びが低下したが、その他の継手は圧接条件の相違による伸びの差は小さく、その値は約 15% であり、直接接合した継手に比べて改善された。

継手の破断は、伸びが低い値を示した条件では直接継手と同様に接合面破断した状態であったが、他の条件ではいずれも 5052 合金側の接合面から約 10mm の位置であり、5052 合金側の軟化域内で破断した。接合面破断した継手でも直接継

手に比べてチタン側破面に付着する化合物の量は少なくなる傾向にあった。

4. 結 言

5052 アルミニウム合金と純チタンの組合せに摩擦圧接を適用し、継手の組織と機械的性質に及ぼすインサートメタルの影響を検討した結果、次の結論を得た。

(1) 直接接合を行った場合には、継手の接合界面全域にわたって金属間化合物が観察され、不規則な分布を示した。

(2) 直接接合した継手の引張強さは、5052 合金母材の 78% と低く、破断は接合界面であり、伸びは 3% 以下と両母材値に比較して極端に低下した。

(3) 接合時に純アルミニウムをインサートメタルとして用いた場合には、接合界面における化合物層の生成は抑制され、最大でも約 150 μm であった。

(4) インサートメタルを用いた継手の引張試験による最高継手効率は 5052 合金母材の 92% と良好な値が得られ、伸びも約 15% と直接接合継手に比較して向上した。破断位置は 5052 合金側の軟化域であった。

これらの結果から、金属間化合物を生成する異種材料を組合せて摩擦圧接を行う場合、組合せる両者の接合性がよく、

金属間化合物を生成しにくい素材をインサートメタルとして用いることは、界面における化合物の生成を抑制し、継手強度を向上させる有効な方法であることが明らかとなった。

本研究の一部は(財)軽金属奨学会教育研究資金によった。特記して深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 加藤数良, 時末 光: 軽金属, **36** (1986), 463.
- 2) 加藤数良, 朝比奈敏勝, 時末 光: 軽金属, **44** (1994), 562.
- 3) 加藤数良, 時末 光: 日本大学生産工学部報告 A, 20-1 (1987), 1.
- 4) K. Katoh and H. Tokisue: Proceedings of 2nd Pacific Asia Conference on Mechanical Engineering (PACME, 1998 Manila Philippines), (1998), 549.
- 5) 山口英紀, 加藤数良, 時末 光: 軽金属学会第 92 回春期大会講演概要, (1997), 249.
- 6) 東條利洋, 加藤数良, 時末 光: 軽金属学会第 88 回春期大会講演概要, (1995), 289.
- 7) 富士明良, 飴山 恵, 二俣正美, 嶋木雄二: 溶接学会論文集, **12** (1994), 101.
- 8) 中川 浩, 加藤数良, 時末 光: 軽金属学会第 93 回秋期大会講演概要, (1997), 91.
- 9) 加藤数良, 時末 光: 軽金属, **40** (1990), 351.
- 10) 加藤数良, 時末 光: 軽金属溶接, **32** (1994), 203.