5052/2017 アルミニウム合金異材摩擦肉盛材の機械的性質

時末 光*・加藤 数良*・朝比奈 敏勝*・牛山 俊男**

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 54, No. 9 (2004), pp. 373-379

Mechanical properties of 5052/2017 dissimilar aluminum alloys deposit by friction surfacing

Hiroshi TOKISUE*, Kazuyoshi KATOH*, Toshikatsu ASAHINA* and Toshio USHIYAMA**

5052 aluminum alloy plate used for substrate and 2017 aluminum alloy bar used for consumable rod, both monolayer and multilayer friction surfacing were done using a numerical controlled full automatic friction welding machine. Effects of the surfacing conditions on structure and mechanical properties of both monolayer and multilayer deposits were investigated. It was clearly observed that the circular pattern appeared on the surface of both monolayer and multilayer deposits by the rotation of consumable rod, and the interval of circularly pattern become narrower with increasing of the rotation of consumable rod. The monolayer deposit has a tendency to incline toward right side (Retreating side) further than center of deposit for the traverse direction of consumable rod. And, the 2nd surfacing of multilayer deposit recognized to incline toward the 1st deposit side. A little of incomplete welds was observed at both sides of monolayer deposit. The incomplete parts of welds 1st deposit in multilayer deposit was disappeared by 2nd surfacing. Microstructures of both monolayer and multilayer deposits were finer than those of the substrate and consumable rod. The surfacing efficiency of 2nd surfacing in multilayer deposit showed higher value than that of the monolayer deposit. Hardness of both deposits showed higher value than that of the substrate and same value of consumable rod. The softened area was recognized at 2.5mm distance from the weld interface of substrate and consumable rod. The tensile strength of multilayer deposit showed higher value than that of the monolayer deposit, and both deposits showed higher value than that of the substrate.

(Received April 12, 2004)

Keywords: friction surfacing, multilayer deposit, dissimilar consumable rod, mechanical properties, surfacing efficiency

1. 緒 言

板材の表面に高機能の物体を付着させて機能性を高める表面改質法として、いくつかの方法が試みられており、実用的な成果も報告されている¹⁾。著者らは先に、その手法の一つとして、現状では実用化には至っていないが、比較的簡単な装置で強固な肉盛層が得られる摩擦肉盛の有効性を確かめるための基礎実験として、5052 アルミニウム合金板に同種材を摩擦肉盛り、肉盛層の形状および肉盛材の機械的性質に及ぼす肉盛条件の影響を検討した。その結果、適切な肉盛条件を選択すれば肉盛層の厚さが制御でき、良好な肉盛層を得られることを明らかにした^{2),3)}。

5052 アルミニウム合金同種材の摩擦肉盛では、基材表面に微細な組織を持つ肉盛層の形成は可能であるが、基材の肉盛部近傍に軟化域が存在する。また、伸びは基材を上回る値が得られるが、引張強さは基材の約 90% と低下し、強度的には摩擦肉盛の効果が認められない。したがって、摩擦肉盛の利点および表面改質の工業的意義を考慮すると、肉盛金属には、基材表面の高硬度化や肉盛材の高強度化などの付加価値が付与できる金属を用いる必要がある。

著者らが行った摩擦肉盛と同様に摩擦発熱を有効に利用した各種アルミニウム合金の摩擦圧接に関する研究^{4)~8)}では、摩擦肉盛に比較して最高到達温度は若干高い値を示すが、熱サイクルは類似の傾向を示した。また、2017 アルミニウム合金⁴⁾は、摩擦圧接後室温に放置することにより、自然時効によって軟化域の硬さは母材とほぼ同等の値まで回復する。このことは、摩擦肉盛においても 2017 アルミニウム合金を肉盛金属として用いた場合、肉盛後に熱処理を行わなくても肉盛材の強度が確保できることを示唆し、省力化の観点からも 2017 アルミニウム合金は摩擦肉盛に適した素材であると考えられる。

一方、摩擦肉盛の目的の一つである素材表面の高機能化を考慮すると、面積の大きな肉盛層を必要とする場合も多々あると考える。肉盛層の面積拡大の方法には、肉盛金属の断面積を大きくすることが考えられるが、肉盛金属の断面積を増すことは肉盛時の摩擦圧力の増加につながり、装置との関係から必ずしも得策ではない。他の方法として、摩擦肉盛を繰返す多層肉盛が考えられるが、多層肉盛に関する報告はほとんどないのが現状である。

本研究では、基材に 5052 アルミニウム合金板を、肉盛金

* 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). E-mail: tokisue@cit.nihon-u.ac.jp

** 日本大学大学院生産工学研究科 (習志野市)。Graduate School of Industrial Technology, Nihon University (Narashino-shi, Chiba).

Table 1 Chemical compositions of base metals (mass%)

Materials	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
5052 plate	0.09	0.26	0.04	0.04	2.55	0.20	0.01	bal.
2017 rod	0.44	0.25	3.80	0.68	0.56	0.02	0.02	bal.

Table 2 Mechanical properties of base metals

Materials	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HV0.1)
5052 plate	256	28.0	79.7
2017 rod	414	26.3	134.7

Table 3 Friction surfacing conditions

Friction pressure	P (MPa)	25, 30, 35, 40
Rotational speed	N (s^{-1})	13.3, 16.7, 20.0, 23.3
Traverse speed	f (mm/s)	5, 7, 9, 11
Offset of 2nd consumable rod	G (mm)	0, 5, 10, 15

属に 2017 アルミニウム合金を用いて 1 層および多層の摩擦肉盛を行い、摩擦肉盛材の組織および機械的性質に及ぼす肉盛条件の影響を検討した。

2. 供試材および実験方法

供試材は、基材に 5052P-H34 アルミニウム合金板（板厚：5 mm）を幅 50 mm、長さ 150 mm に機械加工したものを用いた。肉盛金属は 2017BE-T4 アルミニウム合金丸棒（直径：20 mm）を長さ 100 mm に機械加工して使用した。供試材の化学組成および機械的性質を **Table 1**, **Table 2** に示す。

摩擦肉盛は前報^{2),3)}と同様に、肉盛金属の長さ規制（肉盛金属の全長が 30 mm 短くなった時点で肉盛を終了する）によって行い、**Table 3** に示す肉盛条件を組合せて行った。ただし、予備実験の結果を参考に摩擦開始位置での予熱を 3 秒行った。また、本肉盛条件は、前報^{2),3)}の 5052 アルミニウム合金を肉盛金属とした場合に比較して肉盛金属の回転数を小さく設定した。このことは、予備実験において、肉盛金属の回転数が $25 s^{-1}$ 以上では肉盛金属が破損するなどの不具合が生じ、良好な肉盛材が得られなかったことによる。

多層肉盛は 1 層のみの摩擦肉盛（以下、単層肉盛と称す）の試験結果より $P=30$ MPa, $N=20.0 s^{-1}$, $f=9$ mm $\cdot$ s $^{-1}$ とし、1 層の肉盛終了後いったん室温まで冷却後、第 2 層の肉盛を行った。多層肉盛は、第 1 層の肉盛金属の回転中心に対して、第 2 層の肉盛金属の回転中心を肉盛金属の回転方向と肉盛方向が同一となる方向（Advancing side: AS）と逆方向（Retreating side: RS）に、それぞれ **Table 3** に示した距離だけ、肉盛金属の中心をその送り方向に垂直方向に変位（以下、位相と称す）を与えて行った。

Fig. 1 Sampling positions of tensile test specimen. **Fig. 2** Appearances of monolayer deposit under conditions of friction pressure 30 MPa and traversing speed 9 mm $\cdot$ s $^{-1}$. The marks show center of consumable rod.

摩擦肉盛材の外観および組織観察、硬さ試験および引張試験をいずれも肉盛層の硬さに変化が認められなくなった試験片（摩擦肉盛後 14 日後）を用いて行った。なお、引張試験片は **Fig. 1** に示す位置より、前報^{2),3)}と同一形状の試験片（ゲージ部の板厚 3.5 mm、幅 10 mm、長さ 40 mm）を採取し、単層肉盛では肉盛金属がゲージ部厚さに占める割合を板厚の 20%、多層肉盛は 40% に加工した。

3. 実験結果および考察

3.1 外観観察および肉盛層の形状

単層および多層肉盛材の外観を **Fig. 2**, **Fig. 3** に示す。単層および多層肉盛材はともに肉盛条件に関係なく、肉盛層表面に肉盛金属の回転によって生じた円弧状の模様が明瞭に観察された。この円弧状の模様は、前報^{2),3)}の同種材摩擦肉盛や、鉄鋼材料の摩擦肉盛⁹⁾と類似の形態である。

単層肉盛材の肉盛層表面に観察された円弧状模様の間隔

Fig. 3 Appearances of multilayer deposit under conditions of friction pressure 30 MPa, rotational speed 20.0 s^{-1} and traversing speed $9 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Δ : Center of 1st consumable rod, $\blacktriangle$: Center of 2nd consumable rod.

は、肉盛金属の回転数の増加および送り速度の減少に伴い狭くなった。また、肉盛層は同種材を肉盛した場合と同様に、RSに偏る傾向が認められた。この偏りは摩擦圧力および送り速度の増加に伴い大きくなる傾向を示した。肉盛層の偏りは、同種材の肉盛と同様に肉盛金属の回転方向と肉盛方向の組合せによる力学的な作用により生じるものであるが、同種材の肉盛^{2),3)}に比較して本組合せではその偏りは小さかった。このことは、肉盛金属に用いた 2017 合金は 5052 合金に比較して高温強度が高く変形が小さいためと考える。

多層肉盛材も外観は、第 1 層と第 2 層に明瞭な差異は観察されず、第 1 層の肉盛部に及ぼす第 2 層の肉盛による影響は外観観察からは認められなかった。第 2 層肉盛時に位相を与えた場合、第 2 層の偏りは位相の方向に関係なくいずれも第 1 層側に偏る傾向を示した。この偏りは位相を AS とした場合が大きく、位相が大きくなるのに伴い偏りは減少した。このことは、第 1 層の存在により肉盛金属が第 1 層側に押出されやすくなるためであり、位相が大きくなるのに伴い肉盛金属の押出される量が少なくなるためと考える。

また、位相を RS とした場合は位相の大きさの相違が肉盛層の偏りに及ぼす影響はほとんど認められなかった。このことは、前述したように単層肉盛の場合、肉盛金属の回転方向と肉盛方向との関係から肉盛層が RS に偏る傾向を示すことによるためと考える。

単層肉盛材の肉盛層形状の測定結果を **Fig. 4** に示す。肉盛層の厚さは、摩擦圧力に関係なく送り速度の増加および肉盛金属の回転数の増大に伴い薄くなった。また、肉盛金属の回転数の増大に伴い肉盛層の厚さに及ぼす送り速度および摩擦

Fig. 4 Relation between rotational speed and thickness, width and length of monolayer deposit.

圧力の影響は小さくなった。肉盛層の幅は、肉盛金属の回転数および送り速度の増加に伴い狭くなる傾向を示した。

これらの傾向は同種材の摩擦肉盛と同様であるが、同種肉盛材に比較して肉盛層厚さは薄くなり、摩擦圧力の増加に伴い肉盛層幅は大きくなった。また、SS400 基材に SUS403 を肉盛金属として摩擦肉盛をすると、肉盛時における回転数が遅いほど摩擦界面の軸方向への移動量、すなわち肉盛層の厚さが大きくなることが報告⁹⁾されている。本実験においても肉盛金属の回転数が遅い条件で肉盛層厚さの増加が認められた。

肉盛層長さは、基材に対して肉盛金属の移動距離が最大 90 mm と機械的な制約があることから、肉盛層の理想的な最

Fig. 5 Relation between offset of 2nd consumable rod and thickness and width of multilayer deposit.

大長さは肉盛金属の移動距離と直径を合せた 110 mm となる。肉盛層長さは、摩擦圧力の低い 25 MPa, 30 MPa では、主軸回転数および送り速度に関係なく最大の肉盛長さ 110 mm が得られた。摩擦圧力の高い条件では、肉盛金属の回転数が遅くなるのに伴い肉盛層長さは短くなる傾向が認められた。また、同一条件では同種材を肉盛金属とした場合に比較して、長い距離の肉盛が可能であった。

このことは、5052 合金と 2017 合金の高温強度の差によるものであり、2017 合金が 5052 合金に比較して高温での変形が少なく、ばりとしての排出量が少なくなるためと考える。また、摩擦圧力が高くなるのに伴い肉盛層の全長が短くなるのは、肉盛金属がばりとして排出される量が増加するため、肉盛金属の消費速度が速くなることによるものとする。

多層肉盛材においては、外観から肉盛層の長さは第 1 層と第 2 層で明瞭な差異は認められなかった。このため肉盛層の形状としては肉盛層の厚さおよび幅を測定した。その測定結果を Fig. 5 に示す。肉盛層の厚さは、図中に示した測定位置に関係なく位相を与えない場合に比較して、位相を 5 mm および 10 mm とした場合は若干厚くなり、15 mm とした場合にわずかに薄くなる傾向を示した。肉盛層の厚さは、第 2 層の単層の部分も単層肉盛材に比較して厚くなる傾向にあった。第 2 層の肉盛層幅は単層の場合に比較して狭くなった。

3.2 肉盛効率

摩擦肉盛では、使用する肉盛金属の種類に関係なく肉盛金属の消費分がすべて基材上の肉盛層とならず、肉盛金属の一部は摩擦圧接で発生するばり⁴⁾と同様に外部へ排出される。図は示さないが、肉盛後の肉盛金属の形態は、同種材を用いた場合^{2),3)}とばりの排出量に違いは認められるが、類似した様相を呈した。

肉盛層の形状に関連する肉盛効率（肉盛金属の肉盛前と肉盛後の重量比）を求めた。その結果を Fig. 6, Fig. 7 に示す。

単層肉盛の肉盛効率は、摩擦圧力および肉盛金属の回転数の増加に伴い低下し、特に回転数が顕著に影響を及ぼした。

Fig. 6 Effect of friction surfacing conditions on surfacing efficiency of monolayer deposit.

Fig. 7 Effect of offset of 2nd consumable rod on surfacing efficiency of multilayer deposit.

Fig. 8 Macrostructures of monolayer deposit under conditions of rotational speed 20.0 s^{-1} and traversing speed $9 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

また、基材の送り速度の増加に伴い肉盛効率はわずかに向上した。同種材の摩擦肉盛^{2),3)}に比較して、全条件で肉盛効率は若干向上するが、肉盛条件が肉盛効率に及ぼす影響は、同種材の場合と比較して明瞭な差異は認められなかった。

多層肉盛では、第 2 層目の肉盛効率は位相 0、すなわち第 1 層の直上に第 2 層を肉盛した場合が最も小さく、位相を与えることにより肉盛効率は向上し、本実験の範囲内では、位相が大きくなるのに伴い肉盛効率は向上する傾向を示した。最大肉盛効率は位相を AS に 15 mm とした条件であり、その値は約 53% と同一条件の単層肉盛に比較して高い値が得られた。

Fig. 9 Macrostructures of multilayer deposit under conditions of friction pressure 30 MPa, rotational speed 20.0 s^{-1} and traversing speed $9 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

Fig. 10 Microstructures of monolayer deposit under conditions of rotational speed 20.0 s^{-1} and traversing speed $9 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

3.3 巨視的および微視的組織観察

単層肉盛材横断面の巨視的組織の一例を **Fig. 8** に示す。基材と肉盛金属の接合界面は明瞭に識別でき、肉盛層の両端部分にわずかに未接合部分が観察された。このことは、肉盛金属に用いた 2017 合金丸棒の直径は 20 mm であるが、肉盛層の幅は 21.3 mm であり、肉盛層両端付近では摩擦圧力が有効に作用しないために肉盛層両端部に未接合部が観察されたと考える。

融接による肉盛法では、肉盛金属の基材内部への溶込みが観察されると報告されているが¹⁰⁾、摩擦肉盛は固相状態での肉盛であり、肉盛金属の基材部への溶込みは認められなかった。また、2017 合金と 5052 合金を組合せた摩擦圧接継手の接合界面には両素材が機械的に混合された機械的混合層が観察されるが⁸⁾、本実験では接合界面に機械的混合層は観察されなかった。

多層肉盛材の巨視的組織を **Fig. 9** に示す。多層肉盛においても肉盛層内および肉盛層と基材の接合界面の状況は単層肉盛と類似した様相であった。第 1 層と第 2 層が重なる部分では、第 1 層で観察された肉盛端での基材と肉盛材の未接合部は第 2 層の肉盛によって接合された状態となり、第 1 層目と第 2 層目の境界部にも肉盛不足等による空洞などは観察されなかった。しかし、第 2 層の両端に第 1 層のみの場合と同様にわずかなではあるが未接合部が観察された。

肉盛金属の回転中心位置における肉盛層界面近傍の微視的組織を **Fig. 10**, **Fig. 11** に示す。肉盛層内の組織は、肉盛金属および基材に比較して微細な層状組織を呈した。また、他の条件も類似した組織形態を示し、肉盛条件および肉盛金属

Fig. 11 Microstructures of multilayer deposit under conditions of friction pressure 30 MPa, rotational speed 20.0 s^{-1} and traversing speed $9 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

の相違が肉盛層内の組織に明瞭な差は認められなかった。

3.4 硬さ分布

単層肉盛材の硬さ分布を **Fig. 12** に示す。図はいずれも肉盛層の 2017 合金の硬さに変化が認められなくなった肉盛後 14 日間経過後の測定結果である。肉盛層に最も近い 0.5 mm の位置では軟化域が認められ、最軟化部の硬さは基材の O 材の硬さに近似した値を示した。軟化域は、肉盛金属の回転中心に対して左右対称にならず、RS へ偏る傾向を示した。このことは、肉盛層の外観で示したように、肉盛層が RS へ偏って形成されるためと考える。また、軟化域の幅は肉盛層の幅とよい対応を示した。この軟化域は肉盛層から離れるのに伴い狭くなり、最軟化部の硬さも高くなる傾向を示し、肉盛層から 2.5 mm 離れた位置では軟化域はほとんど観察されなくなった。横断面の硬さ分布に示すように、肉盛層内の硬さは基材部に比較して高い値を示した。肉盛層の硬さは表面層に近づくほど硬化し、表面層では約 131 HK と肉盛金属と

(a) Matrix

(b) Cross section

Fig. 12 Hardness distributions of monolayer deposit under condition of friction pressure 30 MPa, rotational speed 20.0 s^{-1} and traversing speed $9 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

(a) Matrix

(b) Cross section

Fig. 13 Hardness distributions of multilayer deposit under condition of friction pressure 30 MPa, rotational speed 20.0 s^{-1} and traversing speed $9 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

Fig. 14 Results of tensile test of monolayer deposits.

同等の値を示した。

多層肉盛材の硬さ分布を **Fig. 13** に示す。図は単層肉盛材と同様に肉盛後 14 日間経過後の測定結果である。基材部では単層肉盛材と同様に肉盛層の幅に対応した軟化域が観察された。位相 0 では、単層肉盛材に比較して基材部の最軟化部の硬さは若干低い値を示したが、位相を与えると最軟化部の

硬さは単層肉盛材と同程度の値を示した。

多層肉盛材横断面の硬さ分布は位相の有無に関係なく、単層肉盛材と類似した傾向を示した。位相を 0 とした肉盛材では、第 1 層、第 2 層ともに肉盛層内の硬さは基材に比較して高い値を示し、肉盛金属と同等の値が得られた。位相を与えた肉盛材では、第 1 層の肉盛層内では第 2 層に接近するの

Fig. 15 Results of tensile test of multilayer deposits.

に伴い硬化し、第2層はほぼ全面が肉盛金属と同等の値を示した。このことは、第2層の肉盛時に第1層が受ける熱影響の相違によるものと考えられる。硬さは第1層と第2層の肉盛金属回転中心間の中央部では、位相が大きくなるのに伴い肉盛時の温度の影響が小さくなることから位相の大きさに対応した硬さ変化を示した。

3.5 引張試験

引張試験結果を Fig. 14, Fig. 15 に示す。単層肉盛材の引張強さは摩擦圧力および主軸回転数の増加に伴い高くなり、送り速度が速くなるのに伴い低下する傾向を示した。本実験の範囲内では、摩擦圧力の最も高い 40 MPa の肉盛材において最高引張強さ 267 MPa が得られた。この値は基材とした 5052 合金母材の引張強さに比較して高い値であった。伸びは摩擦圧力が高くなるのに伴い増加し、送り速度が速くなるのに伴い低下する傾向を示したが、伸びに対する主軸回転数の影響はわずかであった。また、肉盛材の伸びは全条件で基材に比較して低い値を示した。このことは、肉盛材では試験片の一部が肉盛層であることより均一な変形が困難なためと考えられる。

多層肉盛材では、単層肉盛材と同様に 5052 合金基材に比較して高い引張強さが得られたが、位相の大小による引張強さの差は小さく、ほぼ一定値と考えられる程度の差であった。伸びは、単層肉盛材と同等の値を示し、位相を 0 とした肉盛材が最も小さく、位相を与えた肉盛材では位相方向に関係なく位相が大きくなるのに伴い伸びは低下する傾向を示した。

肉盛材の強度が単純に複合則に従うものとすれば、肉盛材の引張強さは、単層肉盛材で 288 MPa、多層肉盛材で 319 MPa となる。これに比較して単層肉盛材の最大値は 91.4% であったが、多層肉盛材の最大値は 95.2% と多層肉盛することにより引張強さは向上した。

図は示さないが、試験片の破断部近傍の観察結果、単層肉盛材は摩擦圧力が低い 25 MPa の試験片に肉盛層と基材部の界面にわずかな剥離が認められたが、他の試験片では界面の

剥離は認められなかった。

4. 結 言

基材とした 5052 アルミニウム合金に比較して高強度の 2017 アルミニウム合金を肉盛金属とし、単層および多層の摩擦肉盛を行い、肉盛条件が肉盛材の機械的性質に及ぼす影響を検討した結果、次の結論を得た。

(1) 肉盛層表面は、単層および多層肉盛材ともに肉盛金属の回転により生じた円弧状の模様が明瞭に観察され、単層肉盛では RS に肉盛層が偏り、多層肉盛の第2層は位相の方向に関係なく第1層側に偏る傾向にあった。

(2) 巨視的組織観察より、肉盛層と基材部の界面は単層肉盛では両端に未接合部が認められるが、多層肉盛材では第1層の第2層の肉盛と重なり合う部分は接合された状態となった。また、肉盛層内の微視的組織は肉盛金属および基材に比較して微細で層状の組織を示した。

(3) 肉盛金属の肉盛前後の重量比から求めた肉盛効率は、単層肉盛に比較して多層肉盛が高い値を示した。

(4) 肉盛層の硬さは、単層および多層肉盛材ともに肉盛金属と同等の値を示した。また、肉盛層直下の基材部に軟化域が認められたが、接合界面から離れるのに伴い軟化域は狭くなり、接合界面より 2.5 mm の位置では軟化はほとんど認められなかった。

(5) 単層肉盛材の引張強さは、基材とした 5052 合金母材の引張強さに比較して高い値が得られ、摩擦圧力および主軸回転数の増加に伴い向上し、送り速度が速くなるのに伴い低下した。多層肉盛材では、位相の相違による引張強さの差異はほとんど認められず、単層肉盛材より高い引張強さが得られた。

謝辞

本研究は、文部科学省科学研究費補助金（基盤研究（c）（2）、課題番号：14550710）およびハイテクリサーチセンター整備事業の助成を受けて遂行した。特記して深く感謝の意を表す。

参 考 文 献

- たとえば、新版接合技術総覧編集委員会：新版接合技術総覧，産業技術サービスセンター，（1994），265.
- H. Sakihama, H. Tokisue and K. Katoh: Materials Transactions, **44** (2003), 2688.
- 崎浜秀和，時末 光，加藤数良：軽金属，**52** (2002)，346.
- 時末 光，加藤数良：軽金属，**28** (1978)，450.
- 加藤数良，時末 光：軽金属，**40** (1990)，351.
- 加藤数良，時末 光：軽金属溶接，**32** (1994)，203.
- 加藤数良，時末 光：軽金属，**48** (1998)，400.
- 不破野裕崇，加藤数良，時末 光：軽金属，**50** (2000)，157.
- 深草邦夫：摩擦圧接，**2** (1995)，145.
- たとえば，富田正吾，中田一博，栗原 繁，小池弘之，三宅聡之：溶接学会論文集，**11** (1993)，247.
- 加藤数良，時末 光：軽金属，**49** (1999)，553.