

摩擦攪拌点接合ツールの塑性流動

Material Flow by Tools for Friction Stir Spot Welding

研究代表者 工学部機械工学科*1 准教授 生田 明彦
Akihiko Ikuta
共同研究者 工学部ロボティクス学科*2 教授 京極 秀樹
Hideki Kyogoku
トロント大学*3 名誉教授 Thomas H. North

In the Kinki University Research Institute of Fundamental Technology for Next Generation (KURING), studies were carried out on tools for friction stir spot welding as part of a MEXT-supported program for strategic research foundations at private universities between 2009 and 2013. From this study, some useful results were obtained. The size of stir zones produced decreases in friction stir spot welds when the thread on the cylindrical probe tool is worn. However, the effects of thread wear are limited since the production of stir zones can be controlled by the conditions of welding. The mechanical properties of friction stir spot welds made using three-flat tools are excellent since the bonded width and Y values are increased by the material flow in which the arc parts of the triangular vertex region in the cross-section of the probe press the surrounding material. The mechanical properties of friction stir spot welds are increased when the dimensions of the tip of a three-flat tool are enlarged proportionally. However, at the welding conditions of high speed, there is a limit to the extent that an expansion of the tool size can improve the mechanical properties of friction stir spot welds.

Keywords: Friction stir spot welding, Tool, Material flow, Mechanical properties, Aluminum alloys

1. はじめに

近畿大学次世代基盤技術研究所では、平成 21 年度より、文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業「地域連携による次世代自動車技術に関する研究」を実施している。本事業では、安全・環境・利便性を向上するエレクトロニクス技術の研究、環境対応型新材料・新加工技術の研究および省エネルギー化に貢献する流体工学研究技術の研究が行われている。この中で、新加工技術の研究の一環として、摩擦攪拌点接合技術を取り上げている。ここでは摩擦攪拌点接合用のツールに着目し、接合継手の機械的性質の観点からツール形状が接合材料の塑性流動におよぼす影響について検討しており、これまでにその機構などについて明らかにした。また、平成 24 年度までに、摩擦攪拌点接合機も着々と整備され、今後についても研究体制がますます整いつつある。

このように、着実な成果を挙げている本事業の期間は平成 25 年度までとなっており、一貫して行われている本事業のこれまでに得られた成果を、網羅的にまとめておくことが重要であると思われる。そこで、これまでに摩擦攪拌点接合のツールに関する研究において明らかとなった主要な結果⁽¹⁾⁻⁽³⁾について述べる。

2. 接合ツールねじ部の検討

2.1 接合ツールねじ部の摩耗

一般的に、摩擦攪拌点接合において使用されるツールは、円柱型のプローブにねじ加工されたものであり、このねじ部の有無について、その働きなどが議論されている。その結果、摩擦攪拌点接合とは異なり、摩擦攪拌点接合においては、ねじ部がなければ十分な攪拌領域が得られないとの報告がある^{(4), (5)}。しかしながら、摩擦攪拌点接合を実施していく上で無視することができない接合ツールの摩耗によって、不完全なねじ部になってしまう場合などについては報告例が見あたらない。そのため、本研究では、ねじ部を機械加工により一部除去した接合ツールを使用し、その影響を調査した。

*原稿受付 2013 年 4 月 27 日

*1 〒739-2116 東広島市高屋うめの辺 1 番
E-mail aikuta@hiro.kindai.ac.jp

*2 〒739-2116 東広島市高屋うめの辺 1 番

*3 184 College Street, Toronto, Ont., M5S3E4, Canada
E-mail north@ecf.utoronto.ca

2.2 ねじ部摩耗ツールを用いた実験方法

図1は、使用した一般的なねじ加工されたツール（以下、ねじ付きツール）、ねじ部の摩耗を再現したツール（以下、半ねじツール）および比較のためのねじ加工されていないツール（以下、ねじなしツール）を示したものである。

接合材料には、接合材料の塑性流動状態が観察しやすいように5000および6000番系のアルミニウム合金を用い、異種重ね合わせおよび突き合わせ継手を作製した。接合条件はツール回転速度を1000~3000rpmと変化させ、圧入速度、保持時間および圧入深さ等は一定とした。

接合部の評価は、得られた継手のせん断強さを求め、接合部の組織観察を行った。また、接合部の組織形状を定量化するため、図2に示すような組織形状パラメータについて計測を行った。

2.3 接合ツールねじ部が継手におよぼす影響

図1に示した各ツールを用いて摩擦攪拌点接合した継

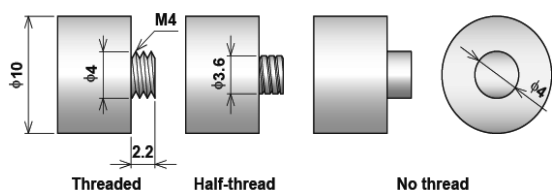


図1. ねじ部摩耗検討ツール

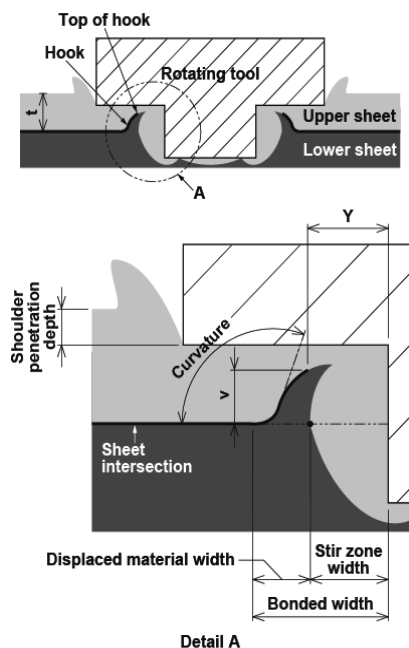


図2. 計測した組織形状パラメータ

手の引張せん断強さとツール回転速度との関係を図3に示す。図3より、ねじ付きツールの場合、1500rpmよりツール回転速度が増加すると引張せん断強さは低下する傾向を示したが、半ねじツールの場合、ツール回転速度が増加すると引張せん断強さも増加する傾向を示した。また、図4は、各ツールを用いて作製した継手の組織観察例を示したものである。図4より、使用したツールによって組織形状は大きく異なっていた。特に、矢印2で示した接合幅が大きく異なっていることが明らかとなったため、図5に示すように、組織形状を定量化した。図5より、ねじ付きおよび半ねじツールを用いた場合では、ツール回転速度を増加させると、継手の接合部に相当する接合幅は同様に増加するが、完全接合部に相当するY値は、半ねじツールの場合、増加するが、ねじ付きツールの場合、減少した。このような傾向を示すため、各ツールを用いた場合、図3に示したような継手強度になるものと考えられる。また、ねじ付きおよび半ねじツール

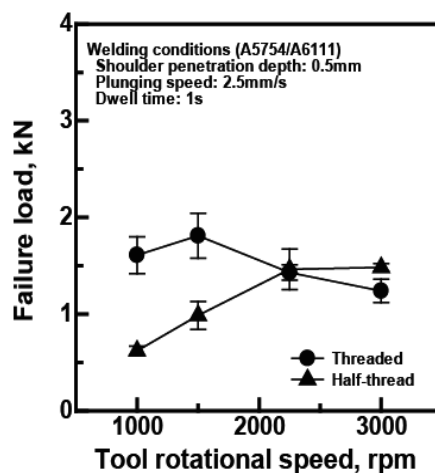
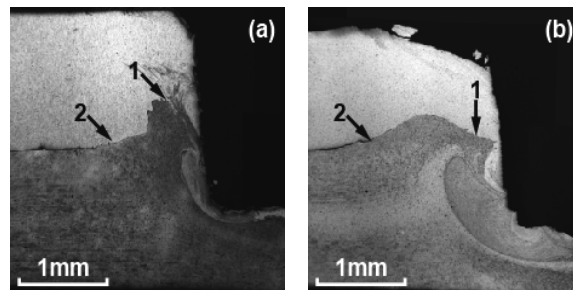


図3. ねじ部を変化させたツールを用いて作製した継手の引張せん断強さとツール回転速度との関係



(a) ねじ付き 1500rpm (b) 半ねじ 3000rpm

図4. ねじ部を変化させたツールを用いて作製した継手の組織観察例

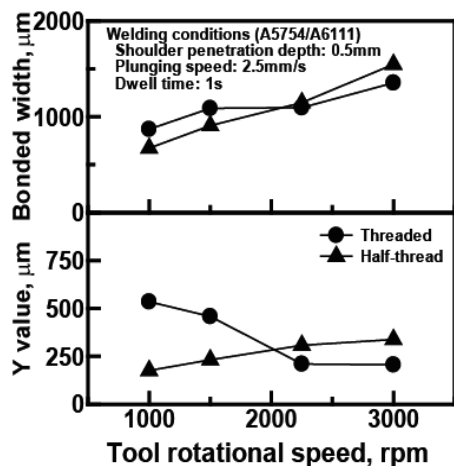


図5. ねじ部を変化させたツールを用いて作製した継手の組織形状パラメータとツール回転速度との関係

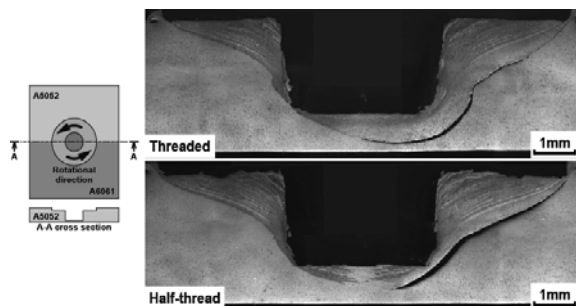


図6. ねじ部を変化させたツールを用いて作製した突き合わせ継手における塑性流動域

を用いた場合の塑性流動範囲を調査するため、異種突き合わせ継手を作製して、その断面組織観察結果を図6に示す。図6の結果より、いずれのツールの場合であっても塑性流動範囲は同様であり、計測の結果もねじ付きツールの場合 5.12mm^2 および半ねじツールの場合 5.77mm^2 であった。これらのことから、ねじの状態によらず塑性流動させる領域自体に変化はなく、ねじ状態は、組織形状を変化させる働きが異なるだけであることが明らかとなった。また、ねじが摩耗した場合、その能力は劣っていくが、ツール回転速度や保持時間を変更することで対応できる可能性が示されたことから、ツールねじ部の継手部への影響は限定的である可能性が示唆された。

3. プロブ形状の検討

3.1 三角柱型プローブツールの特性

前述したように、一般的な摩擦攪拌点接合ツールの形状は円柱型プローブを有するツールである。一方で、プローブ形状を三角柱型とした接合ツールが提案されてき

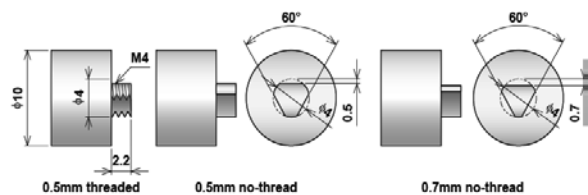
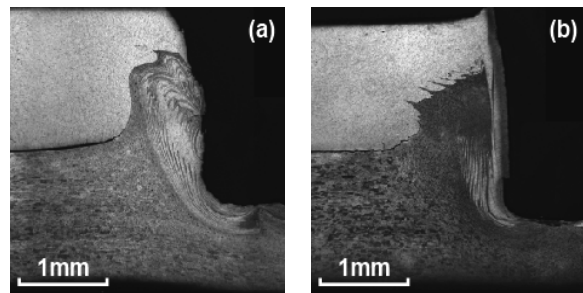


図7. 三角柱型プローブツール



(a) 0.5mm ねじ付き (b) 0.5mm ねじなし

図8. 三角柱型プローブツールを用いて作製した継手の組織観察例(A5754/A6111, 1500rpm)

ている。このツールは従来の接合ツールより良好な継手性能が得られるとの報告がある⁽⁶⁾⁻⁽⁹⁾。しかしながら、三角柱型プローブツールの使用により、なぜ良好な継手を得られるのかは完全に明らかになっていない。そのため、本研究では、接合材料の塑性流動に大きな影響をおよぼすと考えられる、三角柱型プローブのねじの有無およびエッジ部の形状を変化させた接合ツールを使用し、その影響を調査した。

3.2 三角柱型プローブツールを用いた実験方法

図7は、使用した機械加工による削り代0.5mmの三角柱型プローブツールにねじ加工したもの（以下、0.5mm ねじ付きツール）、ねじ加工していないもの（以下、0.5mm ねじなしツール）および削り代0.7mmの三角柱型プローブツールにねじ加工していないもの（以下、0.7mm ねじなしツール）を示したものである。

接合材料および接合条件には、前節と同様、5000および6000番系のアルミニウム合金を用い、異種重ね合わせ継手を作製し、ツール回転速度を1000~3000rpmと変化させ、圧入速度、保持時間および圧入深さ等は一定とした。接合部の評価も同様に、図2に示したような組織形状パラメータについて計測を行った。

3.3 三角柱型プローブツールの塑性流動

図8は、0.5mm ねじ付きおよびねじなしツールを用いて作製した継手の組織観察例を示したものである。図8より、0.5mm ねじ付きとねじなしの場合では、組織形

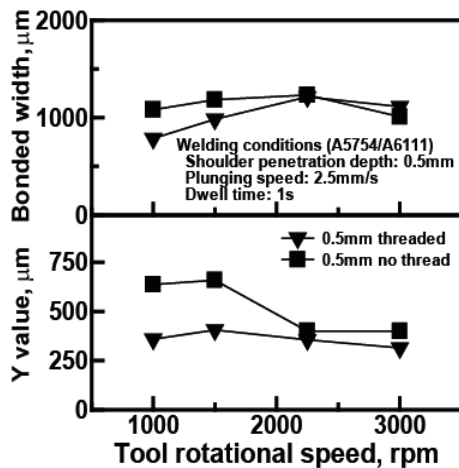


図9. ねじの有無による三角柱型プローブツールを用いて作製した継手の組織形状パラメータとツール回転速度との関係

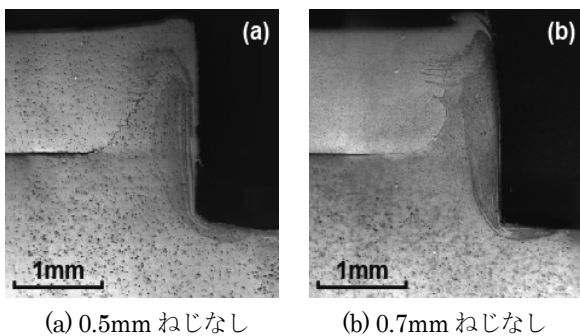


図10. 三角柱型プローブツールを用いて作製した継手の組織観察例(A5052/A6061, 1500rpm)

態が大きく異なっていた。特に、攪拌領域の大きさおよび熱加工影響部の形状が異なっており、0.5mm ねじなしツールの場合、下板材料がプローブ底部から上方へ排出されたような特徴的な流動状態を示した。図9は組織形状パラメータについての計測結果を示したものである。図9の結果より、図8において異なっていた組織形状を定量化した場合、接合幅は著しく異なっていないものの、完全な接合領域を示すパラメータであるY値が大きく異なっており、特に低回転数域で、0.5mm ねじなしツールが0.5mm ねじ付きツールの1.7倍程度であることがわかった。これらの結果は、継手の引張せん断強度の結果とよく一致しており、0.5mm ねじなしツールを用いた場合、優れた機械的性質を有する継手が得られるのは組織形状に特徴があることが明らかとなった。

ここで、0.5mm ねじなしツールがこのような組織形状を生じるための塑性流動について考えると、接合幅やY

値を大きくするためには水平方向への塑性流動が重要となる。0.5mm ねじなしツールの場合、プローブ形状自体がこのような塑性流動を発生させると考えられるため、プローブの部位についてその可能性を検討した場合、プローブ断面の円弧部が最重要部であると推察される。そのため、この部分を変化させた0.7mm ねじなしツールを用いて検討を行った。図10は、0.5mm および0.7mm ねじなしツールを用いて作製した継手の組織観察例を示したものである。図10の結果は、図8の場合と異なるアルミニウム合金であるため、完全な対比はできないが、少なくとも図10の(a)および(b)を比較すると、0.7mm ねじなしツールを用いた場合の塑性流動域の幅が、0.5mm ねじなしツールの場合より、明らかに細長い形状を示した。このような結果は、0.5mm および0.7mm ねじなしツールの場合の組織形状パラメータ計測結果からも明確になっており、Y値はほぼ同様の値を示したが、0.7mm ねじなしツールの場合の接合幅が、0.5mm ねじなしツールの場合より、常に小さくなる結果となった。さらに、0.5mm および0.7mm ねじなしツールの円弧部長さを比較すると、0.5mm ねじなしツールが約1.76倍長くなっている。その際の攪拌領域幅は、同様に0.5mm ねじなしツールが約1.76倍大きくなっており、非常に良く一致した。これらの結果から、三角柱型プローブツールの塑性流動状態について、図11に示すような塑性流動モデルを提案した。すなわち、プローブ先端エッジが材料を排出させるように流動し始めて攪拌領域を形成し、さらに排出された材料がバリのよう熱加工影響部を形成する。そして、プローブ円弧部によって断続的に水平方向へ押し出されるような働きにより、塑性流動域が拡大していくと考えられる。

4. 接合ツール寸法の検討

4.1 三角柱型プローブツールの寸法特性

摩擦攪拌点接合は、抵抗スポット溶接に代わる技術として注目されている。従来の抵抗スポット溶接では、形成されるナゲット寸法等から、継手強度におよぼす影響がすでに明らかとなっている⁽¹⁰⁾⁻⁽¹³⁾。一方、摩擦攪拌点接合において、接合部の寸法は使用する接合ツールの形状や寸法に依存するが、その決定は経験的になされている。また、接合ツールの寸法と接合部の関係も明らかになっていないのが実情である。そのため、本研究では、接合ツールとして前節でも使用した三角柱型プローブツールを用いて、接合ツール寸法を変化させた場合、継手におよぼす影響を調査した。

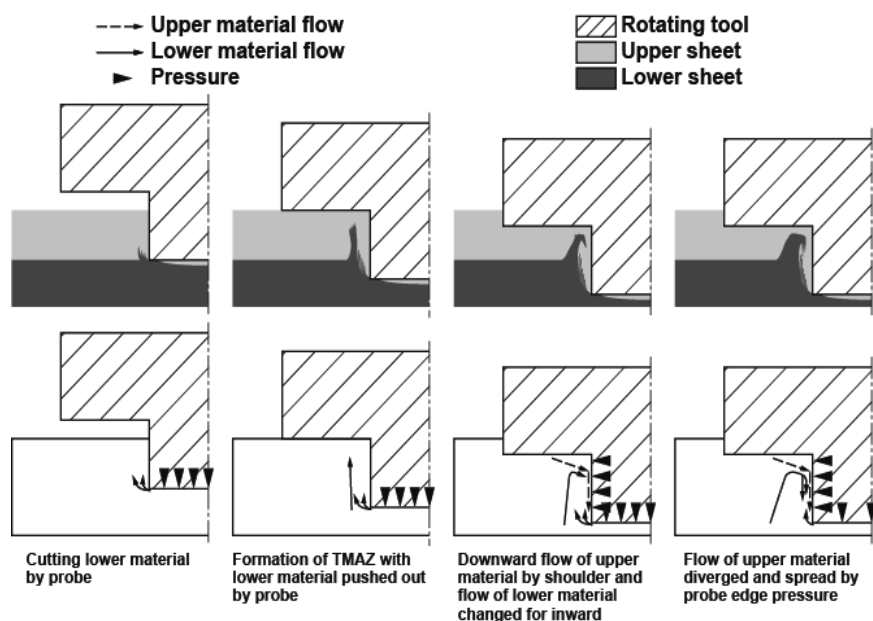


図 11. 三角柱型プローブツールを用いてアルミニウム合金を摩擦攪拌点接合した場合の塑性流動モデル

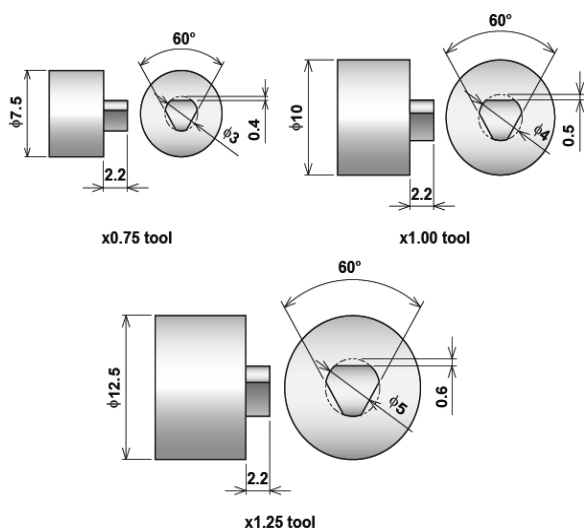


図 12. 寸法の異なる三角柱型プローブツール

4.2 接合ツール寸法評価の実験方法

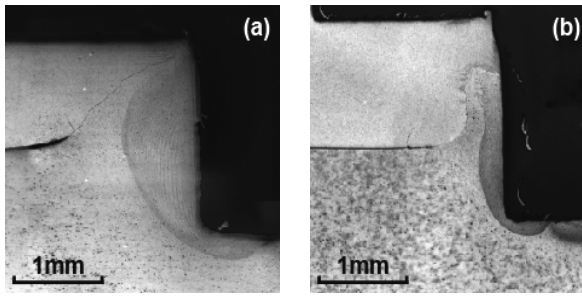
図 12 は、接合ツールの寸法の影響を検討するために使用した三角柱型プローブツールを示したものである。接合ツールの寸法は、接合ツール直径方向のみ相似的に変化させ、軸方向は一定としたものを使用した。ショルダ部の直径を 7.5 (以下、x0.75 ツール)、10 (以下、x1.00 ツール) および 12.5mm (以下、x1.25 ツール) とした 3 種類の接合ツールを使用した。

接合材料は、これまでと同様、5000 および 6000 番系

のアルミニウム合金を用いた異種重ね合わせ継手を作製した。接合条件は、ツール回転速度を 1000~3000rpm と変化させ、圧入速度、保持時間および圧入深さ等は一定とした。接合部の評価も同様に、図 2 に示したような組織形状パラメータについて計測を行った。また、引張せん断試験後の破面観察や熱量の検討も行った。

4.3 継手性能におよぼす接合ツール寸法の影響

図 13 は、x0.75 および x1.00 ツールを用いて作製した継手の観察例で、寸法の異なるツールを使用しているため、周速が同じ (70.7m/min) になる場合の比較を示したものである。図 13 より、小径の接合ツールである x0.75 ツールを用いた場合、塑性流動域も小さくなることは容易に想像できるが、それでも接合ツール寸法が異なると、組織形状が全く異なっていることがわかった。また、これらの継手を引張せん断試験に供した際、x0.75 ツールの場合は、すべての継手において熱加工影響部を横断するように破断した。図 14 はその破断面の観察結果例である。図 14 より、A 点のような部分的に接合していた領域と、B 点のような完全に接合していた領域とが比較的明瞭に観察される。そこで、破断面積が接合面積であるとして計測を行った結果を表 1 に示す。ここで、組織形状パラメータとして計測した接合幅の値も合わせて示したが、キーホルの周辺部に存在する接合面積が接合幅と同等である場合を計算上の接合面積とすると、測定された接合結果とほぼ一致した。このような結果は x1.00 ツールを用いた場合にはみられないものである。また、周速以



(a) x1.00 ツール(2250rpm) (b) x0.75 ツール(3000rpm)

図 13. 寸法の異なる接合ツールを用いて作製した継手の組織観察例 (A5052/A6061)

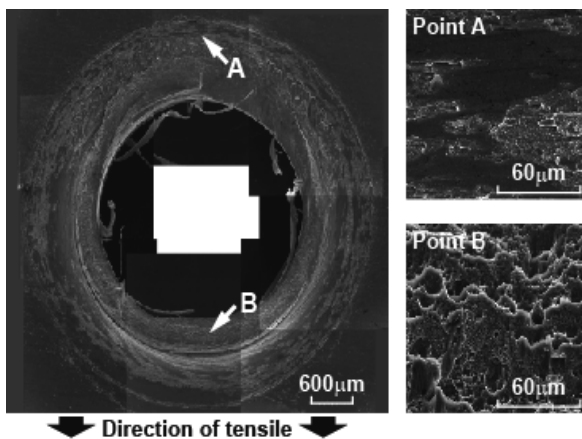


図 14. 引張せん断試験後の破面観察結果 (x0.75 ツール, 1333rpm)

外に以下の式を用いて入熱量の検討を行った。

$$q_0 = \frac{4}{3} \pi^2 \mu P N R^3$$

q_0 は単位時間当たりの熱量, μ は摩擦係数, P は攪拌部の圧力, N は接合ツール回転数および R はショルダ径である。表 2 は, その結果をまとめたものであるが, x0.75 と x1.00 ツールを用いて同様の熱量になる場合の比較として, それぞれの組織形状パラメータおよび引張せん断強さいずれの観点でも倍率はそれぞれである。これらから, 相似的に接合ツール寸法を変化させた x0.75 と x1.00 ツールでは, 接合ツール寸法と組織形状との関連がほとんどなく, 異なる接合形態となっていることが示唆された。

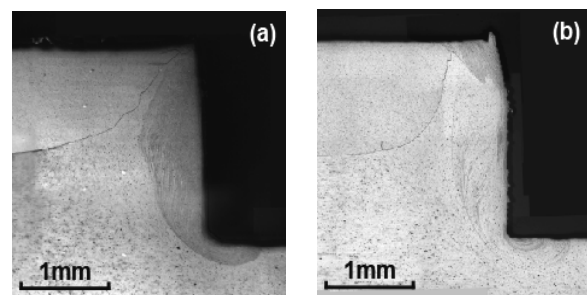
しかしながら, 他の寸法の接合ツールにおいてもこのような状態となるか, x1.25 ツールを使用して検証した。図 15 は図 13 と同様に x1.00 および x1.25 ツールを用い

表 1. x0.75 ツールを使用した場合の接合面積計測結果

Tool rotational speed (rpm)	Bonded region (mm ²)		Bonded width (μm)
	Measured	Calculated	
1000	3.38	3.71	352
1500	4.43	4.74	439
2250	5.06	5.30	484
3000	7.39	7.96	687

表 2. 同様の入熱量となる条件での x0.75 および x1.00 ツールを用いた場合の比較

Tool - Tool rotational speed	Bonded width (μm)	Y value (μm)	Failure load (kN)
x0.75 tool - 2250rpm	484	407	0.94
x1.00 tool - 1000rpm	894	653	2.52



(a) x1.00 ツール(3000rpm) (b) x1.25 ツール(2400rpm)

図 15. 寸法の異なる接合ツールを用いて作製した継手の組織観察例 (A5052/A6061)

表 3. x1.00 および x1.25 ツールを用いて作製した継手の組織形状パラメータ

Tool - Tool rotational speed	Bonded width (μm)	Y value (μm)	Failure load (kN)
x1.00 tool - 3000rpm	1589	306	2.23
x1.25 tool - 2400rpm	1470	641	2.57

て作製した継手の観察例である。図 15 から, ここでは接合ツールの寸法が異なっているにも関わらず, 若干の違いはあるものの, 同様の組織形状になっていた。表 3 は図 15 に示した継手の組織形状パラメータの測定および引張せん断試験結果を示したものである。その結果, x1.00 および x1.25 ツールを用いて周速が同様である場合, 接合ツール寸法が相似的に異なっても, 接合幅や Y 値の寸法形状および引張せん断強さも同様であった。よって, x1.00 および x1.25 ツールを用いて作製した継手については, 接合ツール寸法によらずほとんど同様の継手が得られていると考えられる。これらのことから, ここで示したような比較的高速側の接合条件においては, 接合ツール寸法を相似的に変化させた場合, ある程度大型化は継手性能向上に寄与するが, 一定以上に大型化

しても効果がみられなくなるため、何らかの最適手法が存在する可能性が示唆された。

5. まとめ

これまでに得られた摩擦攪拌点接合のツールに関する研究成果について概要をまとめた。摩擦攪拌点接合は産業界からの技術確立が強く望まれている分野であるので、今後は本研究の成果を基礎として、新たなツールの提案、異種材料継手および摩擦攪拌接合への展開等、さらなる発展が期待される。

謝辞

本研究は、文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業（平成21年～平成25年）により実施しました。また、本研究の一部は競輪の補助(23-87)を受けて実施しました。ここに謝意を表します。

参考文献

- (1) 生田明彦, ほか2名, 溶接学会論文集, 28巻, 3号(2010), pp.346-354.
- (2) 生田明彦, ほか2名, 溶接学会論文集, 30巻, 2号(2012), pp.107-115.
- (3) A. Ikuta et al., “Science and Technology of Welding & Joining”, 17-8(2012), pp.622-629.
- (4) 藤本光生, ほか4名, 溶接学会論文集, 26巻, 1号(2008), pp.67-73.
- (5) 藤本光生, ほか4名, 溶接学会論文集, 26巻, 4号(2008), pp.253-258.
- (6) H. Badarinarayan et al., “International Journal of Machine Tools and Manufacture”, 49(2009), pp.142-148.
- (7) H. Badarinarayan et al., “International Journal of Machine Tools and Manufacture”, 49(2009), pp.814-823.
- (8) N. Sun et al., “Science and Technology of Welding and Joining”, 14-8(2009), pp.747-752.
- (9) Y. H. Yin et al., “Science and Technology of Welding and Joining”, 15-1(2010), pp.81-86.
- (10) J. Heuschkel, “Welding Journal”, 31-10(1952), pp.931a-943s.
- (11) J.M. Sawhill et al., “Welding Journal”, 59-1(1980), 19s-31s.
- (12) J. Defouny, “IIW Document”, No.III-646-80(1980)
- (13) 権沢真事, ほか3名, 溶接学会論文集, 14巻, 4号(1996), pp.754-761.