3003 アルミニウム合金と熱可塑性樹脂の重ね摩擦攪拌接合

小澤 崇将*・加藤 数良**・前田 将克**

Journal of The Japan Institute of Light Metals, Vol. 65, No. 9 (2015), 403-410

© 2015 The Japan Institute of Light Metals

Friction stir lap welding of thermoplastic resins to 3003 aluminum alloy

Takamasa OZAWA*, Kazuyoshi KATOH** and Masakatsu MAEDA**

Friction stir lap welding of 3003 aluminum alloy to both polycarbonate and ABS resin are investigated. The welding was implemented using a numerically controlled friction stir welder using a special FSW tool with a sub probe. Friction stir lap welding of 3003 aluminum alloy to both types of resin materials is possible at higher welding speed than metals. The macrostructures of the joints show anchored structure in which the aluminum alloy partly penetrates into the resin. Maximum tensile shear load of the joint under the welding condition of rotational speed of 1400 rpm and welding speed of 10 mm/s with 3003 aluminum alloy to polycarbonate resin shows 1275 N, and that of the joint under the welding condition of rotational speed of 1100 rpm and welding speed of 14 mm/s with 3003 aluminum alloy to ABS resin shows 834 N. They are higher values than those of the adhesive joints with the same combination.

(Received March 24, 2015 Accepted July 7, 2015)

Keywords: friction stir lap welding, 3003 aluminum alloy, thermoplastic resin, anchor effect, hybrid welding

1. 緒 言

構造物の軽量化へ向けた材料選択の流れに乗って、鉄鋼材料から軽金属材料へ、さらに樹脂材料への転換が活発となっている。軽金属材料の中でもアルミニウム合金は種々の特性に優れ、各分野で広く用いられている¹⁾。一方、一般的に樹脂材料は耐熱性や機械的性質の低さに対する不安が根強く残っているが、近年ではそれらの特性が目覚しく向上したものが多く開発されている²⁾。アルミニウム合金と樹脂材料を適材適所へ用いたハイブリッド構造への試みは各分野で多く検討されている³⁾。ハイブリッド構造を構築するためには接合は必要不可欠であり、今後の大きな課題でもある。一般的にこの組合せには機械的締結や有機接着剤が用いられている。しかし、機械的締結では、穴あけ等の前工程に生産時間が余計にかかるのみならず、部品点数が増加して継手重量の増加につながる。有機接着剤は厳重な保守管理が求められるとともに、単位接合面積当たりの強度が低く、設計上の強度を満たすためには十分な重ね代が必要であり、接着時間に伴う生産効率の低下にもつながる⁴⁾。

このため、近年、機械的締結や有機接着剤に代わる新たな接合方法が活発に開発されている。その一つとして、金属と透明樹脂の重ね接合において樹脂側からレーザーを照射して金属側接合面を加熱し、樹脂を熔融させ接合する金属樹脂直接レーザー接合法 (LAMP)⁵⁾がある。そのほかにもエッチング処理により微細な孔食を金属に付与し、射出成形することで樹脂と一体成形を行うナノモールディングテクノロジー等の

報告^{6),7)}がなされている。しかし、樹脂と金属の組合せに制限があることや、前処理による生産時間の延長、高額な設備投資等、多くの課題がある。

固相接合法の1つである摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding: FSW) は熱影響が少なく、主にこれまで溶接が困難とされていた軽金属材料の接合に用いられる。その中でもアルミニウム合金の接合に多く用いられ、その施工事例や研究報告は多い⁸⁾。アルミニウム合金の中でも3003アルミニウム合金はFSWの接合可能条件範囲が広い⁹⁾ため、広い接合条件範囲で樹脂との接合の可能性を検討できる。3003アルミニウム合金は同じく接合条件範囲の広い純アルミニウム合金と比較し若干強度の高い材料であり、構造物の薄肉化が期待できる。また、樹脂材料は金属と比較し耐熱性に劣るため、接合時に熱が伴う場合は低入熱で行う必要がある。このことから、従来金属に用いられていた接合法の適用を検討するに当たって熱影響の少ないFSWは効果的であることが期待できる。また、FSWは前処理を必要とせず、直接接合であるので、生産時間の短縮への効果は大きい。樹脂材料のFSWに関する報告はいくつかあるが¹⁰⁾、樹脂材料と金属材料の接合にFSWを適用した報告は少ないのが現状である。

本研究では、3003アルミニウム合金と2種類の熱可塑性樹脂を用いた摩擦攪拌接合による重ね接合の可能性を検討した。

2. 供試材および実験方法

供試材は、板厚3 mmの3003-H24アルミニウム合金板 (以

* 日本大学大学院生産工学研究科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1) [現在: ペンテル株式会社] Graduate School of Industrial Technology, Nihon University (1-2-1 Izumicho, Narashino-shi, Chiba 275-8575) [Present: PENTEL CO., LTD.]

** 日本大学生産工学部 (習志野市) College of Industrial Technology, Nihon University (Narashino-shi, Chiba)

Table 1 Chemical compositions of 3003 aluminum alloy (mass%).

Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Ti	Al
0.23	0.65	0.13	1.17	0.07	0.02	Bal.

Table 2 Mechanical properties and glass transition temperatures of the base materials.

Materials	Tensile strength [MPa]	Elongation [%]	Hardness [HV0.05]	Glass transition temperature [K]
A3003	145	25	56.4	—
PC	65	89	13.4	433
ABS	40	6.4	11.4	377

Table 3 FSW conditions.

Rotational speed, N [rpm]	800, 1100, 1400, 2000
Welding speed, V [mm/s]	5 ~ 22
Tilt angle, θ [deg.]	0

後、A3003)を圧延方向に長さ100mm、幅50mmに機械加工後、接合面および供試材表面を脱脂洗浄し実験に供した。樹脂材料には板厚5mmの無色透明のポリカーボネート樹脂(以後、PC)、白濁色のABS樹脂(以後、ABS)の2種類を用い、長さおよび幅はA3003と同一とした。A3003の化学組成を**Table 1**に、供試材の機械的性質と各樹脂材料のガラス転移温度を**Table 2**に示す。

接合には全自動摩擦攪拌接合機を使用し、治具により供試材をテーブル上に固定した。予備実験により選定した**Table 3**に示す条件を組合せ、重ね幅40mmの重ね接合とした。板の配置は上側にA3003、下側に樹脂材料とした。回転工具は合金工具鋼(SKD61)製とし、予備実験においてその形状について検討した結果、一般的にFSWに用いられているねじ状のプロープを有する回転工具を使用した場合には、樹脂とA3003が混合し、接合不良が発生した。そこで、回転工具のプロープを二段とした回転工具を提案した。その形状を**Fig. 1**に示す。径の太い部分(以後、メインプロープ)と肩部(メインショルダ)はA3003の攪拌工程を担う。メインプロープの先端に設けた樹脂材料をわずかに攪拌させるための突起部(以後、サブプロープ)はA3003と樹脂の接合工程を担う。さらにサブショルダは樹脂材料とA3003の混合を抑制する役割を期待した。

本実験では、回転工具の回転方向を反時計回りとし、回転させた回転工具を被接合材に対して垂直方向から挿入するとツールから付与される垂直方向の力により上板としたA3003が大きく変形し、その後の接合に影響を与えた。よって**Fig. 2**に示すように回転工具に前進角を付けずに被接合材の端部より挿入した。また、**Fig. 1**に示すようにメインショルダとA3003表面との間に0.1mmの隙間を設けたのは、一般的な方法と同じようにショルダをA3003の表面に接触させると攪拌

Fig. 1 Shape and dimensions of new type rotational tool. **Fig. 2** Schematic illustration of the friction stir lap welding process.

領域が広くなり、A3003と樹脂材料の混合による接合不良が生じたことによる。工具傾角を0°とし、また、**Fig. 2**に示すように継手の右側をAS、左側をRSと呼ぶ。

得られた継手の外観観察、巨視的組織観察、硬さ試験(荷重:0.49N、荷重保持時間:15s)、引張せん断試験をいずれも室温で行った。硬さ試験は継手横断面の接合中央部を中心に幅方向に全長20mmを0.2mm間隔で行い、A3003板厚中央部を開始点に樹脂側へ0.5mm間隔で7列測定した。引張せん断試験は引張速度1.0mm/minで行った。試験片は接合部を試験片平行部中央とし、接合方向に垂直に採取した幅20mmの試験片に加工した。また、引張せん断強度の比較対象として接着剤継手を用いた。接着剤には主成分をアクリル変成シリコン樹脂とした一液形弾性接着剤(セメダイン株式会社)を用いた。重ね幅はショルダ径と同一の15mm、試験片の幅はFSW継手の試験片と同一の20mmとした。両材料に接着剤を塗布後、15分静置した後に接着し、接着後は24時間静置した後試験に供した。

3. 実験結果および考察

3.1 接合可能条件範囲の選定

実験より求めた接合可能条件範囲を**Fig. 3**に示す。ABSとPCでは、ABSは接合速度の高い条件、PCは接合速度の低い条件で接合が可能であることが明らかとなった。このことは、**Table 2**に示すようにABSのガラス転移温度はPCより低いため、PCと比較しABSは接合速度の高い、低入熱な接合条件となったと考えられる。また、熱可塑性樹脂には流動性を示す指標メルトフローレート(Melt Flow Rate: MFR)があり、この値が高いほど流動性が高いことを示す。PCとABSのMFRはそれぞれ2~30g/10min、5~60g/10minとされてい

Fig. 3 The process windows for welding ABS to A3003 by FSW compared to that for PC to A3003.

る¹¹⁾。このことより、PCに比較してABSは流動性に優れ、低入熱で単位接合長さ当たりの工具回転回数（以後、攪拌量と定義する）の小さい条件においても十分な流動性が得られることから、接合速度の高い条件で良好な結果が得られたものと考えられる。

また、両樹脂材料ともに工具回転数の増加に伴い接合可能速度の下限値は高くなる。工具回転数が高く、かつ接合速度が低い条件では樹脂材料への入熱が過多となり、接合不良となる。ゆえに、工具回転数の増加による入熱量の増大を抑制するために接合速度を高くする必要があるものと考えられる。

ABSの接合可能条件範囲では1400rpmより高い工具回転数では再現性が低下した。このことは工具回転数の増加によって生じるABSの過大な流動がA3003の安定した塑性流動を阻害したためと考える。

3.2 外観

A3003/PC継手（以後、PC継手）の継手中央部の外観をFig. 4に示す。A3003側の接合痕（Fig. 4(a), (b)）は通常のFSWと同様に円弧状の模様を呈した。しかし、通常のFSWで見られるショルダ径による接合痕に比較して、その幅は若干狭い。このことはショルダとA3003との間に0.1mmの隙間を設けたことが原因である。すなわち、ショルダはA3003表面と直接接触せず、発生したばりを押さえ込む役割のみを担ったことにより、ショルダ径よりも狭い接合痕が形成された。この接合痕の幅はFig. 4に示したように接合速度10mm/sが狭い。接合速度が高いほど攪拌量が減少し、ショルダ外周方向への素材の流動が抑制されたことに起因するものと推定される。

継手裏面となる無色透明のPC側から接合部の外観（Fig. 4(a'), (b'））を観察した。接合速度7mm/sではFig. 4(a')に示すようにA3003とPCが接合界面で密着した領域（以後、密着部）が明瞭に観察される。この密着部はA3003より伝達された摩擦熱がPCの接合面に届き形成されたものと考えられる。接合部中央ではサブプローブが攪拌した領域（以後、サブ攪拌部）が認められる。入熱量の少ない接合速度10mm/s（Fig. 4(b'））のサブ攪拌部ではPCがサブプローブの攪拌によって白濁色を呈した。これは入熱量の高い接合速度7mm/sの条件では認められないことから、白濁色の模様の有無はPCへの入熱量の大小に依存するものと考えられる。

Fig. 4 Appearances of the A3003/PC joints welded under rotational speed of 1400rpm. (a) A bead formed at the welding speed of 7mm/s observed from the A3003 side, (b) A bead formed at 10mm/s observed from the A3003 side, (a'), (b') observed through to PC. Each triangle mark indicates the position of the weld center. The arrow in (a') shows deformation zone.

Fig. 5 Appearances of the beads on the A3003 side of A3003/ABS joints welded under the conditions of (a) 1100rpm, 14mm/s and (b) 1100rpm, 22mm/s. Each triangle mark indicates the position of the weld center.

また、接合速度10mm/sのA3003底部がAS, RSに分離し、変形した部分（以後、変形部）が形成されるが、7mm/sの条件ではFig. 4(a')中に矢印で示すように、部分的に溝が形成されずにA3003底部が残存した。このことは接合速度が低いためにA3003底部の変形速度が小さくなり、入熱量が多くなることで熱影響による軟化が進み、A3003底部の変形が容易となったためである。

A3003/ABS継手（以後、ABS継手）の継手中央部の外観をFig. 5に示す。全条件において接合痕の幅に明瞭な差異は認められない。ABS継手の接合可能条件は、PC継手のそれよりも接合速度が高いため、接合表面近傍でのA3003の塑性

流動が抑制されたと考えられる。そのほか、接合表面には特徴的な状況はなかった。

3.3 巨視的組織

PC継手中央部の横断面巨視的組織をFig. 6に示す。全接合条件でA3003の母材部は明るく、攪拌部は逆に暗く観察され、その境界が明瞭に識別できる。A3003底部の変形部は母材部に近い明るいコントラストを呈し、攪拌部のような組織変化は認められない。このことから、変形部はプローブの接合方向への推力によって押し出されることにより形成されたものとする。その変形とプローブの移動によって生じた空間にPCが流入し、アンカー効果が得られる接合部形状となった。

また、接合速度9mm/sの条件 (Fig. 6(a)) において、A3003攪拌部のAS側外周部にPCがA3003内に流動して形成された混合組織を呈す。この組織は接合速度が高くなると不明瞭となり、接合速度13mm/s (Fig. 6(b)) の条件では観察されなく

Fig. 6 Macrostructures of A3003/PC joints welded under the conditions of (a) 2000 rpm, 9 mm/s and (b) 2000 rpm, 13 mm/s. Each triangle mark indicates the position of the weld center.

Fig. 7 Macrostructures of A3003/ABS joints welded under the conditions of (a) 1100 rpm, 14 mm/s and (b) 1100 rpm, 22 mm/s. Each triangle mark indicates the position of the weld center.

なる。接合速度が高いほど攪拌量の減少によりPCの流動が抑制され、混合組織が不明瞭になったと考える。

ABS継手中央部の横断面巨視的組織をFig. 7に示す。ABS継手はPC継手と類似の接合部形状を呈したが、接合速度の低い条件 (Fig. 7(a)) ではA3003内部深くまで樹脂が流入してA3003の攪拌部と変形部の間隙を充填した状態となった。しかし、接合速度が高くなると (Fig. 7(b)) A3003の攪拌部と変形部の間隙が広がるとともにA3003内へのABSの流動量が減少し、トンネル状の空洞が生じた。これらのことは、接合速度の低い条件では入熱が高いため、ABSの流動が容易になったためと考える。また、この空洞はAS側が大きくなる傾向にあり、接合速度が高くなるのに伴い、その傾向がより顕著となる。このようなトンネル状の欠陥は金属材料同士

Fig. 8 Hardness distributions of A3003/PC joints welded under the conditions of (a) 800 rpm, 7 mm/s; (b) 1400 rpm, 7 mm/s; (c) 1400 rpm, 10 mm/s. Each triangle mark indicates the position of the weld center.

Fig. 9 Hardness distributions of A3003/ABS joints welded under the conditions of (a) 1100 rpm, 14 mm/s; (b) 1100 rpm, 22 mm/s; (c) 1400 rpm, 22 mm/s. Each triangle mark indicates the position of the weld center.

の1つとして知られている。この欠陥は主にAS側に発生し、塑性流動不足によって生じるとされている¹²⁾。このことから、接合速度が高くなるのに伴って塑性流動が少なくなり、欠陥の成長につながったと考える。AS側の変形部の付け根では、接合速度の減少に伴いその厚さは減少する。このことは、接合速度の減少に伴う攪拌領域の増加により変形部の素材も流動し、薄肉化したためと推定する。

3.4 硬さ試験

PC継手中央部の硬さ分布をFig. 8に示す。硬さ分布はPC部では硬さの変化はほとんど認められなかったため、図にはA3003の硬さ分布のみを示す。A3003の攪拌部は母材に比較して軟化した。このことは熱影響による軟化とA3003母材にはH24材を用いたため、すでに導入されていた転位がFSW中に生じる動的再結晶により減少したこと起因する。接合速度7mm/sの、工具回転数800rpmと1400rpmの継手を比較すると、工具回転数の増加に伴って攪拌部が顕著に軟化するとともに軟化域が広がった。また、工具回転数1400rpmにおいて接合速度7mm/sと10mm/sの継手を比較すると、速度が高くなるほど攪拌部での軟化が抑制されるとともに軟化域が狭くなる。変形部は攪拌部と比較し、若干の軟化抑制が認められ、熱影響部の値とほぼ同値となる。すなわち、変形部では攪拌や押出変形による加工硬化はなく、サブショルダから受ける摩擦熱によって軟化しているものと推察する。

Fig. 9にABS継手中央部の硬さ分布を示す。全条件でPC継手のような著しい軟化はなく、軟化域は狭い。このことは、PC継手の接合条件範囲と比較してABS継手の接合条件範囲は低入熱であるためと考える。同じ工具回転数1100rpmで接合速度14mm/s (Fig. 9(a)) と22mm/s (Fig. 9(b)) の継手を比較すると、軟化域は接合速度22mm/sの条件が若干狭くなる。また、同一接合速度22mm/sにおいて工具回転数1100rpmと1400rpmでは、工具回転数1100rpmの条件が軟化域は若干狭くなる。各接合条件での軟化域の変化は、入熱量の大小によるものと考えられる。

3.5 接合過程

Fig. 10に接合中に工具を急停止させた継手を接合線に沿って切断し、AS側から観察したPC継手縦断面巨視的組織と各部の拡大組織を示す。Fig. 10(a)のサブプロブ近傍では、ツールの移動に伴いA3003底部がサブショルダに沿ってPC側へ押し出されている。工具が通過した後方に攪拌部と変形部を隔てる空間が形成され、その空間にPCが流入している。また、サブプロブ先端近傍のFig. 10(a)の図中に白線で囲んだ範囲に、PCがサブプロブの攪拌による影響を受けて白濁しているのが観察される。

一方、A3003攪拌部はFig. 10(b)に示すようにメインプロブによる攪拌により形成された凹凸が接合界面に観察され、そのピッチは平均0.526mmであり、ツールが1回転する間に移動する距離（以後、回転ピッチ¹³⁾）の0.545mm/revとほぼ一致している。接合開始点のFig. 10(c)ではA3003とPCの接合部で白濁したPCが観察され、接合が進むのに伴いこの模様は不明瞭となる。この白色の模様は回転工具挿入時の低温状態でPCがサブプロブによる攪拌を受けたことが原因である。

Fig. 11に接合中に工具を停止させた状態における工具直下の接合部をPC側から観察した結果を示す。A3003底部がサブプロブの外周に沿ってASとRSに分離して溝が形成された状態が明瞭に観察される。溝の幅は、形成直後はサブプロブ直径とほぼ等しいが、サブショルダ後縁が通過するまでに若干狭くなることも明らかである。A3003底部の変形は図中に破線で示すメインプロブ径に相当する範囲で生じた。

以上の結果より、A3003の塑性変形挙動をFig. 12に模式的に示す。本研究で考案した工具形状を用いることで、A3003の攪拌工程はメインプロブが担い、A3003底部の変形はサブプロブおよびサブショルダの接合方向への移動が担う。すなわち、攪拌部と変形部の形成工程は工具の各部が独立して担いながら同時に進行するようになる。

Fig. 10 The flow and deformation behavior in the vicinity of FSW tool observed on the transversal cross-section at the weld center of on A3003/PC joint welded under the condition of 1400rpm, 10mm/s.

Fig. 11 A weld interface just under the FSW tool observed from the PC side of an A3003/PC joint. The welding condition is 1400 rpm, 10 mm/s.

Fig. 12 Schematic illustration of the deformation behavior of the A3003 plate during FSW with a tool designed for the present study.

3.6 密着部の強度評価

永塚ら¹⁴⁾は摩擦攪拌接合を応用した重ね接合により A5052 と炭素繊維強化熱可塑性樹脂の金属酸化膜を介した直接接合が可能なことを報告している。本研究で選定した接合条件範囲において、A3003 と樹脂材料の間で何らかの化学的結合がなされているかを検討するため、Fig. 4 で観察された密着部の強度評価をサブプローブのないメインプローブのみの工具を用いて同一接合条件範囲でFSWした。サブプローブを除去することで、接合部はアンカー効果の得られない平坦な密着部のみとなる。さらに、入熱量も同接合条件でサブプローブがある場合とほぼ等しくすることができる。その結果、全接合条件において接合は達成されなかった。本研究における接合条件範囲において回転ピッチが最も小さい、すなわち最も入熱量が大きい条件でサブプローブなしの工具を用いたPC継手の破面外観を Fig. 13 に示す。樹脂側接合面はメ

Fig. 13 Plan-view appearances of an A3003/PC bead failed to join under the condition of 2000 rpm, 9 mm/s, using a tool without the sub-probe. (a) The A3003 side, (b) the PC side.

Fig. 14 Three typical cross sectional appearances of fractured A3003/PC joints. (a) Fractured by the deformation at the deformation zone, 1400 rpm, 10 mm/s; (b) by the deformation at the stir zone, 1400 rpm, 8 mm/s; (c) by detaching at the A3003/PC interface, 1400 rpm, 7 mm/s.

インプローブ直径に相当する幅で熱変形して密着部を形成していた痕跡が観察される。一方、A3003側接合面には、樹脂側密着部の起伏に対応した凹凸が観察される。いずれの破面においても、相手材料の付着は認められない。このことから、本研究で得られた継手は密着部では化学的結合は形成されず、接合強度はアンカー効果が主として担うものと考えられる。

3.7 引張せん断強度

PC継手の引張せん断試験を行った結果、継手の破断は3種類に分類された。その破断形態をFig. 14に示す。また、その分類と併せて引張せん断試験結果をFig. 15に示す。一般にアルミニウム合金などでは前述した硬さ分布は入熱の影響を大きく受けることから、FSWにおいて入熱の指標となる回転ピッチが用いられることより図は回転ピッチにより整理した。

Fig. 14(a)の破断はFig. 15に示すように回転ピッチが大きい条件範囲に集中していることから、回転ピッチの増加は入

熱の減少となり、A3003攪拌部の軟化が抑制された状態となることにより、高い引張せん断強度を示したものと推定される。

Fig. 14(b)に示す破断形態はA3003攪拌部の変形により破断したものであり、その要因には以下の2点が挙げられる。その一つはFig. 6に示したようにA3003攪拌部のASにA3003とPCが混合された脆弱な組織を示すこと。他の1つは、Fig. 8に示した硬さ分布で明らかのように回転ピッチの減少に伴うA3003の軟化によるものである。これらのことがFig. 15に示すように回転ピッチが0.4 mm/rev. 以下では引張せん断強度が低下した要因である。また、回転ピッチの増加によりA3003攪拌部と変形部の間隙が拡大するが、PCがその間隙に十分に充填されないために回転ピッチの増加による軟化抑制効果が有効に作用しなかったことも引張せん断強度低下の要因と考えられる。

Fig. 14(c)の破断形態は、A3003とPCの両者が塑性変形を起こすことなく界面で剥離破断したものである。この破断を示す条件ではA3003変形部がASとRSに分離する現象が現れ

Fig. 15 Change in the fracture load of A3003/PC joints by tensile shear test plotted as a function of the revolutionary pitch. (a), (b), and (c) indicate three types of fracture behavior in Fig. 14.

Fig. 17 Change in the fracture load of A3003/ABS joints by tensile shear test plotted as a function of the revolutionary pitch. (a), (b), (c), and (d) indicate four types of fracture behavior in Fig. 16.

Fig. 16 Four typical appearances of fracture A3003/ABS joints. (a) Fractured at the root of ABS infiltrated into the trench of A3003, 1100rpm, 14mm/s; (b) by the deformation at the deformation zone, 1100rpm, 16mm/s; (c) by the deformation at the stir zone, 1100rpm, 22mm/s; (d) by detaching at the A3003/ABS interface, 800rpm, 12mm/s.

ず、接合部に溝が形成されないために変形部へのPCの流入が阻害され、アンカー効果が得られなかったものである。変形部でASとRSに分離しないのは入熱が大きくA3003底部がサブショルダの下部のみならずサブプロープの下部を通過する変形挙動を示したことによるものである。このような現象はPCの軟化が多くA3003の変形を抑制できなかった場合と、回転工具によりA3003が分離しない状態、すなわちA3003の軟化が小さい状態が考えられる。Fig. 15において、回転ピッチが小さい場合は前者、大きい場合は後者の理由によるものとする。

したがって、PC継手の引張せん断強度は変形部の間隙の大きさとA3003攪拌部の軟化抑制によるもので回転ピッチに対して極大値を示すことになる。本実験の範囲では、1400rpm, 10mm/sの条件で引張せん断荷重は最大値1.28kNを示し、接着継手(0.21kN)の6倍を超える値が得られた。

ABS継手の引張せん断試験を行った結果、継手の破断は4種類に分類された。その破断形態をFig. 16に示す。また、その分類と用いた引張せん断試験結果をFig. 17に示す。

Fig. 16(a)の破断はA3003は変形せずに流入したABSの根元からせん断破断する。この要因には以下の2点が考えられる。1つはFig. 17に示すようにこの破断形態は回転ピッチの小さい、入熱量の大きい条件範囲に集中しているため、ABSが多く流入したこと。他の1つは巨視的組織で示したように接合速度が低くなるのに伴いA3003の間隙部ASの大きさが小さくなることでABSの充填率を高くし、アンカー効果の影響をより大きくしたことが原因であると推察する。

Fig. 16(b)の破断形態は変形部のみが変形し、A3003内に流入した樹脂が剥離する状態にあった。この破断はFig. 17より回転ピッチの低い条件範囲に集中する。このことは、回転ピッチが小さくなったことにより変形部が薄肉化し、強度が低下したことが原因であると推定する。

Fig. 16(c)の破断形態はA3003攪拌部のASが変形し、A3003内に流入したABSが剥離する状態である。Fig. 17からこの条件範囲は各工具回転数の回転ピッチの高い条件に多く集中した。このことは、Fig. 7で示したように接合速度が高くなるのに伴ったA3003の間隙部ASが大きくなることが原因と考える。

Fig. 16(d)の破断形態はFig. 14(c)と同様な状態であった。(d)内の接合速度の範囲は12~14mm/sであり、本接合範囲内で最も接合速度の小さい接合条件範囲である。同様な破断形態をとったPC継手においても接合条件は接合速度の最も小さい条件であったことから、この破断形態となる原因は低速な接合速度がA3003底部の変形速度を遅くし、その変形が容易となったことにあることが示唆される。

以上のことより、ABSの引張せん断強度には、A3003間隙部の大きさとABSの充填状態のバランスが強く影響を及ぼすと考えられる。引張せん断荷重の最高値は工具回転数

1100rpm, 接合速度14mm/sの条件で0.83kNを示し、接着継手(0.25kN)の4倍を超える値が得られた。

4. 結 言

3003アルミニウム合金と2種類の熱可塑性樹脂を用いた摩擦攪拌接合による重ね接合の可能性を検討した結果、以下の結論が得られた。

(1) 本研究で考案したツールを用いることで、A3003の攪拌工程とA3003と樹脂との接合工程を同時進行に差別化することが可能であり、高強度の継手が得られた。

(2) 接合可能条件範囲は樹脂側の熱的特性と流動性に大きく依存した。

(3) 両樹脂材料を用いた継手ともにA3003底部がサブプロープによって塑性変形したことで生じた空間に樹脂の流動が観察され、アンカー効果の得られる接合部形状となった。

(4) 引張せん断強度に及ぼす影響因子は、A3003攪拌部の機械的性質と接合部形状、A3003内への樹脂の充填状態に大きく依存し、主としてアンカー効果により接合が達成された。引張せん断荷重の最高値はPC継手で工具回転数1400rpm, 接合速度10mm/sの条件で1.28kNが得られ、ABS継手での最高値は工具回転数1100rpm, 接合速度14mm/sの条件で0.83kNを示し、両継手ともに接着剤継手の4倍以上の強度が得られた。

以上のことから、本接合方法を用いることでアンカー効果を主とした継手が得られ、短時間での直接接合が可能であった。

参 考 文 献

- 1) 例えば、板倉浩二：アルミニウム, **21** (2014), 6-11.
- 2) 例えば、小久保章博：工業材料, **62** (2014), 42-47.
- 3) For example, Z. Huang, S. Sugiyama and J. Yanagimoto: J. Mater. Process. Technol., **213** (2013), 1864-1874.
- 4) 例えば、佐藤千秋：日本ロボット学会誌, **24** (2006), 448-452.
- 5) 川人洋介、丹羽悠介、西本浩司、片山聖二：溶接学会論文集, **30** (2012), 142-148.
- 6) 例えば、安藤直樹：成形加工, **16** (2004), 588-591.
- 7) 例えば、青木 勇、笹田昌弘、春山幸生：日本機械学会論文集 (C編), **72** (2006), 657-663.
- 8) 例えば、熊谷正樹：軽金属溶接, **49** (2011), 373-378.
- 9) 小澤崇将、伊藤豪太、加藤数良：溶接学会全国大会講演概要, **92** (2013), 48-49.
- 10) For example, E. A. Squeo, G. Bruno, A. Guglielmotti and F. Quadri: The Annals of "Dunarea De Jos" University of Galati, Fascicle V, (2009), 241-246.
- 11) 株式会社ミスマ：エンジニアのための技術講座, 第406回樹脂のメルトフローレートMFR, (2009.4), http://www.koza.misumi.jp/mold/2009/04/406_mfr.html
- 12) 例えば、溶接学会編：摩擦攪拌接合—FSWのすべて—, (2006), 22-24.
- 13) T. Kawasaki, K. Makino, S. Tadori, H. Takai, M. Ezumi and Y. Ina: Proc. of 2nd Int. Friction Stir Welding Symp., TWI, (2000), CD-ROM.
- 14) 永塚公彬、吉田昇一郎、土谷淳岐、中田一博：溶接学会全国大会講演概要, **95** (2014), 54-56.