

金属表面の常圧気相表面改質を用いた熱可塑性樹脂の異種材接合技術

Technology for Joining of Dissimilar Material with Thermoplastic Polymeric Resin
Using Atmospheric Gas Phase Modification of Metal Surfaces

秋 田 浩 司*
Hiroschi AKITA

黒 田 真 一**
Shinichi KURODA

河 井 貴 彦**
Takahiko KAWAI

要 旨

金属部品に熱可塑性樹脂からなる部品を溶着接合するための金属表面改質処理を、自動車ボデー生産ライン上でおこなう技術を構築した。大気圧プラズマ化学気相成長処理の条件設定によって 1.4×10^{-9} mol/cm² という高い水酸基密度を有するガラス膜をアルミニウム合金表面上に形成できた。得られた表面は溶融した6ナイロンに対する濡れ性を有していることを確認した。加えてこれに熱溶着させた熱可塑性樹脂の界面部近傍にアモルファス層が形成されていることが観察された。これらの効果により、熱溶着による異種材接合品において既存のアンカ効果をねらった金属表面粗化品と同等の高い接合強度を得ることができた。

ABSTRACT

A technology was developed for metal surface modification treatment to be used on a car body production line for weld-joining parts made of thermoplastic resin with metal parts. A glass membrane with a high hydroxyl group density of 1.4×10^{-9} mol/cm² was successfully formed on an aluminum alloy surface by configuring the conditions for the atmospheric pressure plasma chemical vapor deposition process. The obtained surface was confirmed to have wettability to melted 6-nylon. In addition, an amorphous layer was observed to have formed near the interface portion of the thermoplastic resin thermally welded to it. The effect of these results was that a high level of join strength equal to that in existing items with roughened metal surface aiming for an anchor effect was achieved with items of dissimilar material joined by thermal welding.

1. ま え が き

近年、自動車に対する世界的な燃費向上要求の高まりを背景に、車体の軽量化を目的とした複合材料の応用検討が盛んになってきている。その中で6ナイロンに代表される熱可塑性樹脂をマトリックス材料に用いたカーボンファイバ複合材料である Carbon fiber reinforced thermo plastics (CFRTP) がその高い比強度、比剛性および Life cycle assessment の観点から注目を集めている⁽¹⁾。車体への応用に際しては使用環境による機械特性低下の懸念や高い材料コストから、金属材料との組み合わせ構造が多用される。その際の異種材接合には CFRTP のマトリックス材料である熱可塑性樹脂の熱溶着性を利用し、部品の構造や製造工程を簡素化することが軽量化およびコストの観点から望ましい。

熱可塑性樹脂の異種材溶着接合技術として、金属表面に数 nm から数十 μm サイズの微細な孔や溝を掘り込んで粗化する処理を施し、凹部に溶融した熱可塑性樹脂を射出成型で充填し冷却固化する、いわゆるアンカ効果によって機械的に接合する手法が近年多数実用化されている。たとえば小型携帯電子機器用の部品製造工程において熱可塑性樹脂と軽合金板材の、アンカ効果を利用した一体成形技術が広く用いられている。しかしこれらの表面粗化処理は、金属表面に孔や溝を形成するための薬品に部品を浸しておこなう溶液プロセスによる化学処理を必要とする。工程時間の長さや廃液処理等による設備の複雑化から、これら溶液プロセスを自動車ボデー生産ラインへ導入することは容易でない。また溶液プロセスは本来比較的小さな部品を多数同時にバッチ処理するための技術であって、サイズの大きな自動車部品表面の必要箇所のみを局所的に処理すること

* 四輪 R&D センター

** 群馬大学

には適していない。接合に不要な部分を含めた広い表面を粗化処理することは、薬品の使用量が多くなり処理設備も大型化するためプロセスコストの上昇を招き好ましくない。溶液プロセスによらない金属表面粗化手法としてレーザ加工機を用いた技術も用いられているが、微細な三次元加工を高速でおこなうには高出力な装置と複雑な制御が必要となる。

自動車部品の異種材溶着接合を実現するための、機械的接合以外のメカニズムとして化学結合力の応用が考えられる。一般的な接着接合においては接着剤成分と固体表面の間に水素結合もしくは共有結合が形成される。化学反応を伴わない熱可塑性樹脂の熱溶着接合においては水素結合による化学結合力が利用できる。

水素結合力を発現させるためには、固体表面と熱可塑性樹脂の双方に水酸基やアミド基のような異方性官能基が必要である。6ナイロンのようなポリアミド系樹脂は分子鎖の基本構造中にアミド基を含むが、アルミニウム合金のような無機材料の固体表面において異方性官能基は本来存在しないものであるため、化学的な表面改質によってこれを新たに付与することが必要となる。

そのためには二つの課題が存在する。第一の課題は熱溶融した熱可塑性樹脂の固体表面への濡れ性の向上である。化学結合力を効果的に発現させるためには固体金属表面への濡れ性が必要となるが、熱可塑性樹脂はその鎖状に伸びた分子構造から溶融時に高粘性液体となるため、硬化前の低分子量の熱硬化性接着剤に比べて濡れ性が低下する。

第二の課題は接合状態の安定性を得ることである。6ナイロンのような結晶性を有する熱可塑性樹脂においては、溶着工程における冷却固化およびその後の使用環境温度の変化によって剥離や接合強度の低下を生じやすく、接合状態の安定を得にくい。これは溶融ナイロンの結晶化進行が溶着界面部まで達すると柔軟性が失われ、異種材間の熱膨脹差からくる溶着界面熱応力を吸収できなくなり界面剥離が生じるためである。界面剥離を防止する手法として、金属表面上に柔軟な非結晶性樹脂を厚さ約 100 μm で塗装し、その表面上に重ねて熱可塑性樹脂を射出成型することで一体成形部品形状を形成し、最後に熱処理して非結晶性樹脂を架橋し接合強度を確保する技術が実用化されている。この非結晶性樹脂層のための特殊なグレードの樹脂材料が必要になり、プロセスも複雑で工程時間を要するものとなる。

2. ねらい

自動車ボデー生産ライン上で CFRTP 部品との異種材熱溶着を局所的に可能とするために金属部品の表面改質を大気中でおこなえる手法で検討した。

熱可塑性樹脂の溶着に水素結合からなる化学結合力を利

用し、アンカ効果による機械的な結合と同等の接合強度を安定的に得ることを目標とし、下記に留意した。

- (1) 接合界面の水酸基密度を高める
- (2) 接合界面における熱可塑性樹脂の濡れ性を高める
- (3) 接合の安定性を高めるため界面に非晶質層を生成

3. 達成手法

熱可塑性樹脂の熱溶着を可能とするために、金属表面に高密度の水酸基を導入することを表面処理技術検討の方針とした。金属表面水酸基と熱可塑性樹脂との相互作用によって、前述した第一の課題である溶融樹脂の濡れ性を改善し高い水素結合力を発現させることで高い接合強度を得る。さらにこの相互作用が高分子鎖の自由運動を制約する効果を利用して、溶着界面部の熱可塑性樹脂の結晶化進行を抑制することで、柔軟なアモルファス性の熱応力緩和層を形成して第二の課題である接合の安定化をも実現できると考えた。

金属表面に水酸基を導入する手法としては、常圧大気中で高速処理が可能な大気圧プラズマ法に着目した。

放電や熱により雰囲気ガスの一部をプラズマ化した、プラズマガス流を対象物に吹き付けることで酸化還元等の化学処理を常圧雰囲気中でおこなうのが一般的な大気圧プラズマ処理である⁽²⁾。

そのプラズマガス流中にシロキサン等の前駆体化合物を投入し、プラズマの作用で分解し生成させた化学活性の高い物質を対象物に吹き付けてポリマ化させることにより、対象物表面上にガラス等の薄膜を形成する表面改質技術が大気圧プラズマ化学気相成長 (chemical vapor deposition: CVD) 処理である⁽³⁾。励起種すなわち放電により励起した原子および分子のエネルギー準位は、雰囲気ガスの種類によって異なるものとなる。さらにプラズマガス流の下流側ではこれら励起種の緩和が進行したり、あるいは大気中の酸素、窒素、水等の分子と衝突して相手を励起したりすることで励起種のエネルギー準位は低下していく^{(4),(5)}。この性質を利用すれば前駆体物質が分解反応を生じる雰囲気コントロールし、同一の前駆体から異なる分解生成物を得ることが可能となる。結果として性質の異なるガラス薄膜を作り分けることができる。

既存の研究例として、Ihde らは前駆体物質にヘキサメチルジシロキサン (Hexamethyldisiloxane: HMDSO) を用いてアルミニウム合金 (Al 2024-T3) 表面上に大気圧プラズマ CVD 処理で形成した二種類のガラス膜の性状について報告している⁽³⁾。第一は雰囲気ガスに乾燥空気 (Air) を用いる処理条件で得られる、前駆体からの残留有機成分が少ない均質性の高いガラス薄膜である。これはアルミニウム合金の防食コーティングに適した物理的性質を有する。第二は同じ装置で雰囲気ガスに乾燥窒素 (N_2) を用い、前駆体を

プラズマガス流に混合する場所をプラズマ発生源から下流側に数 mm 移動させる処理条件で得られる、第一の膜に対し約 2.5 倍の有機成分を含む組成のガラス膜である⁽³⁾。これらガラス膜については塗料や接着剤の密着性についても研究がなされており、特に第一の膜については自動車ウィンドシールドにおけるウレタン系熱硬化接着剤の接着プライマとしての応用が提案されている⁽⁶⁾。

熱可塑性樹脂の熱溶着性についてはまだこのような検討がなされていない。当研究においては第二の膜表面の有機成分すなわち HMDSO 前駆体由来のメチル基に着目した。

ガラス表面部に存在するメチル基が大気圧プラズマ処理による酸化改質により水酸基(シラノール基)に変性されることが知られている⁽⁷⁾。

まず金属表面上に大気圧プラズマ CVD 処理でメチル基の豊富なガラス膜を形成し、次いでこれを大気圧プラズマ処理で酸化変性することで高密度の表面水酸基を有するガラス膜が得られると考えた。

4. 実験

4.1. アルミニウム合金の表面改質処理

大気圧プラズマ CVD 処理には Plasmatreat GmbH 製 Openair プラズマシステム (FG5001 plasma generator, PFW10-PAD/RD1004 plasma jet nozzle, PAD1 polymer coating controller) を用いた。

装置の概念図を Fig. 1 に示す。本装置は大気圧プラズマジェット装置をベースとしている。導電性金属の円筒に大気圧の雰囲気ガスを通しつつ、内部の絶縁電極に高電圧パルスを加えてアーク放電させることでプラズマを生成させる。このプラズマを含んだガス流を円筒先端部のプラズマノズルから対象物表面に吹き付けるのが大気圧プラズマジェット装置である。このプラズマノズルに Fig. 2 のような液体流路付きのカバーノズルを被せるように取り付け、これを介してプラズマガス流に前駆体物質を噴射混合することにより大気圧プラズマ CVD 処理をおこなうことができる。

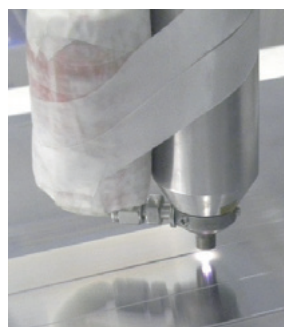


Fig. 1 Diagram of atmospheric pressure plasma CVD process principle

Table 1 Atmospheric pressure plasma CVD process conditions

Membrane type	Atmospheric pressure plasma CVD		Post processing
	Gas	Nozzle extension	
A	Nitrogen	4.5 mm	-
B	Air	-	-
C	Nitrogen	4.5 mm	Plasma oxidation
D	Air	-	Plasma oxidation

大気圧プラズマ CVD 処理を施す金属基材にはアルミニウム合金 (A1 5052) 圧延材を用いた。本合金表面には溶剤等による洗浄はおこなわず、Air を雰囲気ガスに用いて生成したプラズマガス流を吹き付けて表面に付着した油分や汚染物質を酸化除去して用いた。

次に HMDSO を前駆体物質とした大気圧プラズマ CVD 処理をおこない、基材表面にガラス薄膜を形成した。大気圧プラズマ CVD 処理は雰囲気ガス種およびノズル延長の有無が異なる二種類の条件でおこない、さらにそれぞれに対して大気圧プラズマで酸化する後処理を加えたものも作成した。こうして Table 1 に示す計 4 種類のガラス薄膜を作成した。

具体的には、第一の条件の大気圧プラズマ CVD 処理では雰囲気ガスに N_2 を用いた。加えて Fig. 3 のようにカバーノズルにシムおよびパイプ状の延長部品を追加することでプラズマガス流に前駆体が混入される位置を 4.5 mm 下流側に移動させた。こうしてアルミニウム合金表面上にガラス薄膜 (A) を形成した試料を得た。

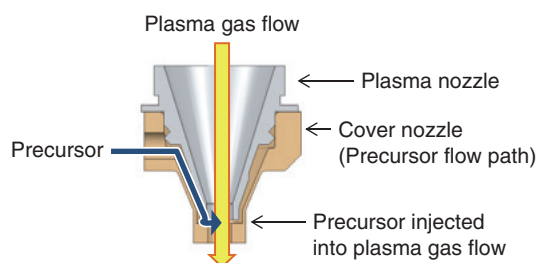


Fig. 2 Plasma CVD nozzle (original form)

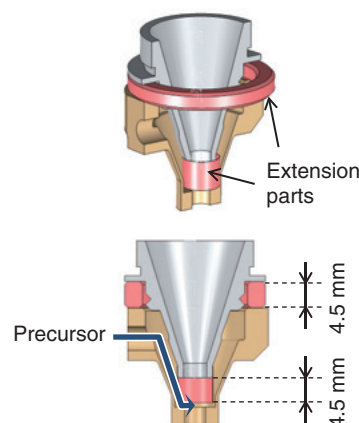


Fig. 3 Plasma CVD nozzle extension

第二の条件としては比較のために雰囲気ガスに Air を用い、延長部品を用いないオリジナル仕様のノズルを使用して大気圧プラズマ CVD 処理をおこない、ガラス薄膜 (B) を作成した。以上二つの処理はプラズマ生成条件を Plasma voltage: 283 V, Plasma current: 13 A とし、ノズル先端から基材表面までの距離 4 mm, 水平方向のノズル移動速度 20 mm/min で実施した。

さらにこれら薄膜試料 (A), (B) の表面に Air を雰囲気ガスとして生成させたプラズマガス流を前駆体の導入なしに吹き付けて残留有機成分を酸化処理した薄膜 (C), (D) をそれぞれ作成した。酸化処理はプラズマ生成条件を Plasma voltage: 301 V, Plasma current: 20 A とし、ノズル先端から基材表面までの距離 7 mm, ノズル移動速度 20 mm/min で実施した。

4.2. ガラス膜の性状分析

走査電子顕微鏡 (SEM) および原子間力顕微鏡 (AFM) を用いて、ガラス膜の形状の観察および表面粗さの測定をおこなった。

陽電子ビーム法を用いた陽電子消滅寿命測定により酸化ケイ素 (SiO_2) 骨格の平均細孔半径分布測定をおこなった。陽電子線源として ^{22}Na ベースの陽電子ビームを用い、ガンマ線検出器として BaF_2 製シンチレータと光電子増倍管を用いた。

X 線光電子分光 (XPS) を用いてガラス膜表面の元素存在比を測定した。X 線元として単色化アルミニウムを用い、pass energy 160 eV でおこなった。

イオンクロマトグラフィー法を用いてガラス膜表面の水酸基密度を測定した。具体的には臭素化ケイ素化合物の溶液で表面の水酸基を誘導体化処理した試料を熱分解させ、発生したガスをアルカリ水溶液に吸収させてイオンクロマトグラフィーにて液中の臭素量を測定した。水酸基密度は基材寸法から計算した表面積当たりの数値として計算した。

4.3. 熱可塑性樹脂溶着による異種材接合

大気圧プラズマ CVD 処理したアルミニウム合金に CF RTP を熱溶着接合したラップシヤ強度試験片を作成し、接合強さの測定をおこなった。アルミニウム合金試験片としては、大気圧プラズマ処理をおこなわなかったものの、薄膜 (C), (D) を表面に形成したもの、既存のアンカ効果利用のための金属表面粗化処理を施したものをを用いた。金属表面粗化処理手法としては、6 ナイロンの射出成型用グレードで凹凸サイズが異なる四種類の処理をアルミニウム合金に施したものを選定した。一つはレーザ加工で幅および深さが約 50 μm の溝を 200 μm ピッチのグリッド状に掘り込んだもの、他の三つは陽極酸化法や酸アルカリ溶液による化学処理でより微細なサイズの粗化や細孔形成をお

こなったものである。

熱溶着接合は、金型インサート射出成形法を用いておこなった。成形は 100 × 25 × 2.0 mm の短冊状アルミニウム合金試験片をキャビティ内にセットできる Fig. 4 のような専用金型を用いておこなった。キャビティ内の残空間を試験片と長手方向に 12.5 mm 重ねた短冊形とし、そこにカーボンファイバ (CF) を 15 wt% 含有した CF RTP グレードの 6 ナイロンペレットをシリンダ温度 260℃, 金型温度 160℃ から 180℃, 保圧力 30 MPa で射出成型することによりアルミニウム合金板と 6 ナイロン板が熱溶着接合されたラップシヤ強度試験片を得た。

全ての試験片は一水準について $n=5$ で作成してラップシヤ強度試験に供した。

SEM およびエネルギー分散型 X 線分光法 (EDX) を用いて破断面の観察および成分元素の定性分析による破壊箇所の同定をおこなった。

4.4. 熱溶着界面部の 6 ナイロン分析

微小角入射 X 線回折 (Grazing Incidence X-ray Diffraction: GIXD) 法による 6 ナイロンの結晶化状態の観察は大型放射光施設 Spring-8 の BL46XU 第 1 ハッチ内に設置された HUBER 社製多軸回折計でおこなった。試料は基材表面に 6 ナイロン薄膜層を溶液スピンコート法で形成した後に熱溶融し再凝固させて作成した。アルミニウム合金基材の圧延製法に起因する表面の凹凸が測定精度を損なうため、基材には平滑な Si ウエハを用いた。回折角に対する強度プロファイルを結晶成分と非晶成分に分離することで、結晶化度を算出した。

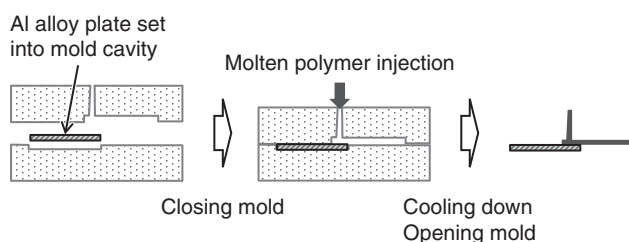


Fig. 4 Process of joining by metal insert polymer injection molding method

5. 結果と考察

5.1. 改質表面の性状分析

まず、ガラス薄膜 (A) および (B) を分析し、それぞれのガラス骨格の物理的性状を比較した。薄膜 (A) および (B) 表面の SEM 写真を Fig. 5 に、薄膜 (A) 表面の AFM 観察の結果を Fig. 6 に示す。二種類の薄膜に対する陽電子ビーム法を用いた陽電子消滅寿命測定によって得たガラスの

Table 2 Property of atmospheric pressure plasma CVD glass membrane surface

Membrane type	Process conditions			Membrane properties		
	Atmospheric pressure plasma		Post processing	C/Si content (atomic %/atomic %)	Water contact angle (°)	Hydroxyl group density (mol/cm ²)
	Gas	Nozzle				
A	Nitrogen	Extended	-	1.3	160	Unmeasured
B	Air	Normal	-	0.8	80	Unmeasured
C	Nitrogen	Extended	Oxidation	0.3	2.5	1.4×10^{-9}
D	Air	Normal	Oxidation	0.6	43	2.6×10^{-10}

SiO_x 分子骨格の平均細孔分布の比較を Fig. 7 に示す.

薄膜 (B) は平滑な表面を有する均一な膜構造を有し SiO_x 骨格の孔径分布にもシャープなピークが存在した. 薄膜 (A) は AFM で計測した表面粗さの平均二乗根値が約 20 nm の微粒子からなる構造だった. 薄膜 (A) のガラス骨格は規則性に乏しいブロードな SiO_x 孔径分布を示し, 薄膜 (B) に比べて規則性に乏しい骨格構造からなることを示唆した. この膜構造はマクロ的には表面積が大きく, ミクロ的には分子構造の規則性に欠け不安定であるため酸化改質による化学的な組成の変化を生じやすい構造であると推測される.

次いで, 薄膜 (A), (B), (C), (D) 表面の化学組成および性状の比較をおこなった. それぞれの薄膜の作製条件, XPS による化学組成分析, 水接触角および表面水酸基密度を Table 2 に示す.

C/Si 比のデータからわかるように, 薄膜 (A) は薄膜 (B) に対して HMDSO のメチル基由来の炭素成分を約 2 倍量多く含んでいた. 大気圧プラズマ処理で酸化することによる薄膜 (A) から (C) への化学組成の変化すなわち炭素原子の減少の割合は, 薄膜 (B) から (D) のそれに比較して大

きなものであった. これは薄膜 (A) の表面積が大きく酸化を受けやすいガラス骨格であったためと考えられる. 結果として薄膜 (C) の表面水酸基の密度は薄膜 (D) のそれより 5 倍以上高かった.

水接触角のデータからわかるように, 薄膜 (A) は微細な凹凸からなる物理的表面形状との相乗効果によって超撥水性を示した. 一方これを酸化して得られた薄膜 (C) は超親水性を示した. 熱溶解した 6 ナイロンに対しても Fig. 8 の写真のように同様の濡れ性の変化を示した.

5.2. 熱可塑性樹脂溶着強度の評価

インサート射出成形用の金型を使用して, 未処理のアルミニウム合金基材表面および薄膜 (D) に接触する形で 6 ナイロンを射出成型しても接合は得られず, 金型を開放すると両者が分離した状態で取り出された. 一方で薄膜 (C) の処理を施したアルミニウム合金基材からは Fig. 9 のように良好に溶着接合した試験片が得られた. また, アンカ効果利用のための金属表面粗化処理手法でアルミニウム合金

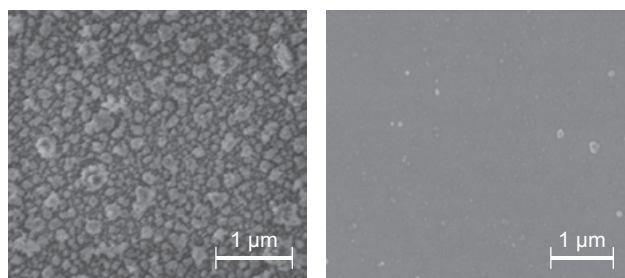


Fig. 5 SEM image of membrane A (left) and membrane B (right) surfaces

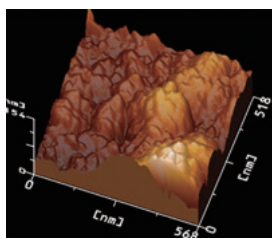


Fig. 6 AFM image of membrane A

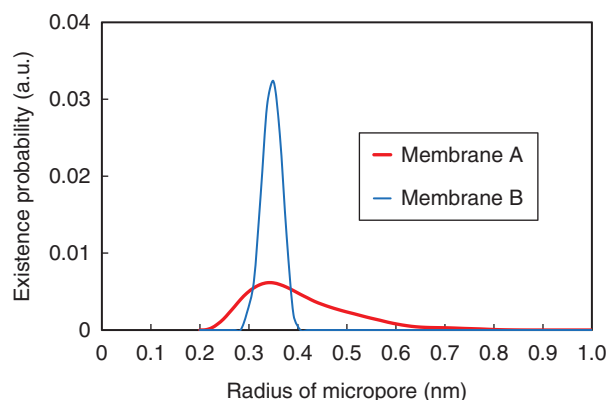


Fig. 7 Positron annihilation lifetime spectroscopy of atmospheric pressure plasma CVD glass membrane

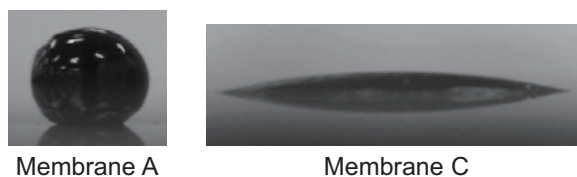


Fig. 8 Molten polyamide 6 behavior on CVD glass membrane surface

基板に処理したものについても接合した試験片が得られた。これらのラップシヤ強度試験結果の比較を Fig. 10 に示す。薄膜 (C) 処理が物理的アンカ効果と同等の溶着接合強度を実現していることが確認された。

ラップシヤ強度試験で破断させた溶着接合試験片の SEM 写真を Fig. 11 に示す。アルミニウム合金表面に CF RTP の破片が付着していることが観察された。また CF RTP 由来の炭素および CVD ガラス膜由来のケイ素の存在が EDX 分析でアルミニウム合金側の破断面上に確認された。これらのことは溶着接合部の破壊が溶着界面部の剥離やガラス層の破壊ではなく CF RTP 内部の材料破壊で生じていること、すなわち CF RTP の層間強度以上の熱溶着強度が得られたことを示している。

5.3. 熱溶着界面部の 6 ナイロン結晶化状態分析

薄膜 (C) 処理表面における熱可塑性樹脂熱溶着のメカニズムについてより詳細な解析をおこなった。

溶着界面領域とバルク領域それぞれにおける、熱可塑性樹脂の結晶化の度合いを測定評価できる GIXD 法を用いて、6 ナイロンの結晶化状態評価をおこなった。得られた結果を Fig. 12 に示す。グラフの横軸は基材表面から測定位置までの 6 ナイロン膜厚を示している。また縦軸は観察された X 線結晶回折強度の全散乱強度に対する比を示しており、大きい数値はその部分の 6 ナイロンの結晶化度が高いことを意味する。無処理の Si ウエハ表面に熱溶着された 6 ナイロンはウエハとの接触界面付近まで結晶化が進行していた。一方で薄膜 (C) 処理された表面の場合は界面



Fig. 9 Specimen of joined CF RTP and Al alloy

から厚さが数百 nm に達するアモルファス性の 6 ナイロンの層の存在が確認された。

5.4. 熱可塑性樹脂溶着安定性の確認

気温 -30°C および 80°C の雰囲気それぞれ 30 分の暴露を繰り返す冷熱サイクル環境に、溶着接合品を 200 サイ

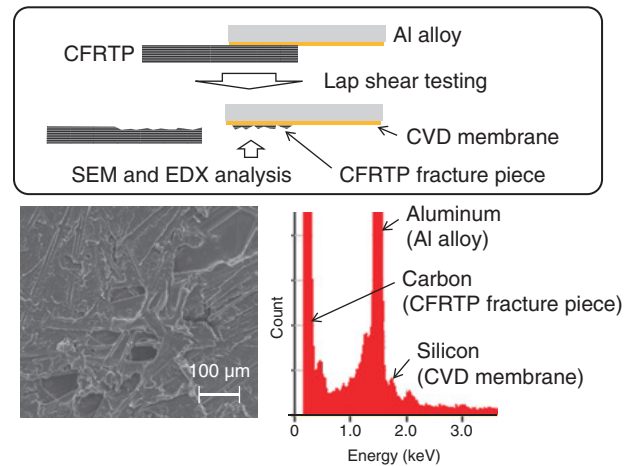


Fig. 11 SEM image (left) and EDX spectrum (right) of CF RTP fracture piece on Al alloy substrate

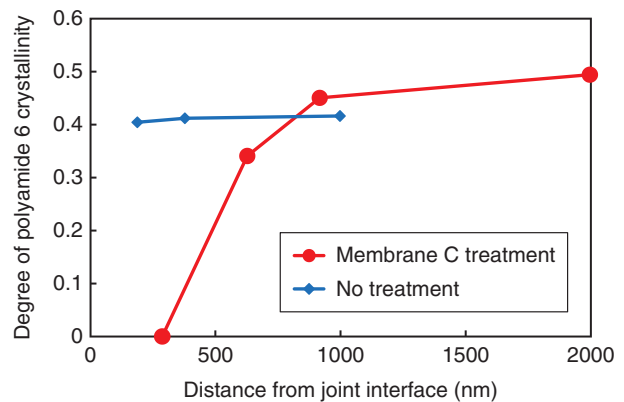


Fig. 12 Suppression of polyamide 6 crystallization by CVD membrane surface effect

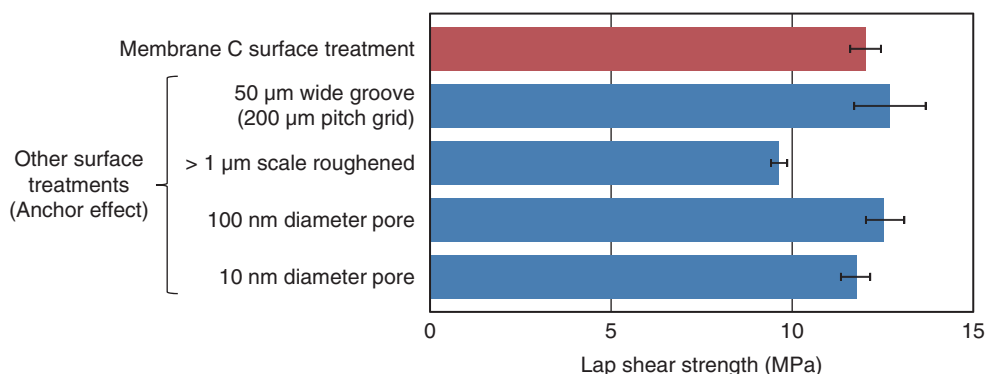


Fig. 10 Joining strength of Al alloy and CF RTP joined by insert injection molding

クル暴露した。Fig. 13 に示すように接合強度の変化は見られなかった。さらに6ナイロン板を熱溶着した試料に対し、35℃の5%中性塩水噴霧、気温60℃で湿度25% RHの乾燥雰囲気暴露および50℃で98% RHの湿潤雰囲気暴露を1サイクルとした複合サイクル試験を60サイクル実施したが溶着部の剥離は観察されなかった。

以上より、溶着界面に形成された柔軟なアモルファス層による熱応力緩和の効果によって、安定した溶着接合が得られたことが確認された。

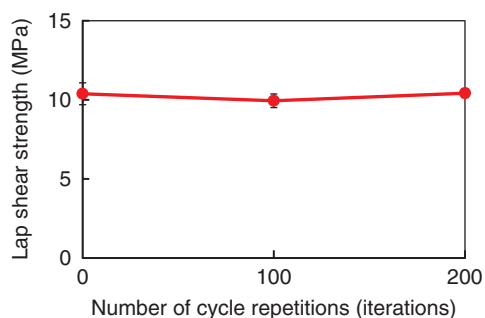


Fig. 13 Joining strength after cooling and heating cycle

6. まとめ

大気中での気相プロセスでアルミニウム合金表面にガラス薄膜層を形成する表面改質をおこない、得られた表面の性状および熱可塑性樹脂の溶着性を評価した。

- (1) 大気圧プラズマ CVD 処理において、プラズマが前駆体物質を分解する雰囲気を調整することによって有機成分を含むガラス膜を形成した。これを大気圧プラズマ処理で酸化変性することにより表面水酸基密度の高い薄膜層が得られた。
- (2) この表面は熔融状態の6ナイロンの濡れ性が高く水素結合を効果的に利用でき、熱溶着接合で機械的なアンカ効果並みの高い接合強度が得られた。
- (3) 溶着界面部近傍に6ナイロンのアモルファス層が形成された。これは熱熔融した熱可塑性樹脂の高分子鎖の運動性が固体表面水酸基との相互作用によって阻害され結晶化が抑制される効果による。結晶化したバルク部分に比べて柔軟性を有するアモルファス層が異種材料間の熱応力を吸収緩和することで、金属表面との剥離を防止し熱溶着接合を安定化した。

参考文献

- (1) 高橋淳:環境負荷低減を目指した複合材料技術の進展 3. CFRP の LCA と省エネルギー効果, 材料, Vol. 57, No. 8, p. 852-855, (2008)

- (2) Lommatzsch, U., Pasedag, D., Baalman, A., Ellinghorst, G., Wagner, H.-E.: Atmospheric Pressure Plasma Jet Treatment of Polyethylene Surfaces for Adhesion Improvement, Plasma Processes and Polymers, Vol. 4, Issue Supplement 1, p. S1041-S1045, (2007)
- (3) Lommatzsch, U., Ihde, J.: Plasma Polymerization of HMDSO with an Atmospheric Pressure Plasma Jet for Corrosion Protection of Aluminum and Low-Adhesion Surfaces, Plasma Process and Polymers, Vol. 6, Issue 10, p. 642-648, (2009)
- (4) Dowling, D. P., O'Neill, F. T., Langlais, S. J., Law V. J.: Influence of dc pulsed Atmospheric Pressure Plasma Jet Processing Conditions on Polymer Activation, Plasma Process and Polymers, Vol. 8, Issue 8, p. 718-727, (2011)
- (5) 田嶋聡美:パワーデバイス実装に用いられる異種材料のプラズマ接着前処理, エレクトロニクス実装学会誌, Vol. 19, No. 2, p. 111-119, (2016)
- (6) USP, US 7517561 B2 (2009)
- (7) Murakami, T., Kuroda, T., Osawa, Z.: Dynamics of polymeric solid surfaces treated with oxygen plasma: Effect of aging media after plasma treatment, Journal of Colloid and Interface Science, 202, p. 37-44, (1998)

■ 著 者 ■



秋田 浩 司



黒田 真 一



河井 貴 彦