

最近の異種材料の接着・接合技術の 原理別分類とその概要

鈴木 靖昭

鈴木接着技術研究所

1 はじめに

最近、航空機だけでなく、自動車の軽量化、スマートフォン、携帯電話、デジタルカメラなどの軽量化、低価格化、エレクトロニクス実装のために、金属、CFRP、セラミックス、および樹脂など多くの異種材料の接着・接合技術の必要性が高まっており、多様な接合技術が開発されている。

接着剤を使用する従来の接合法は、被着材の固定や接着剤の硬化時間などの工数を必要とする。また、エンジニアリングプラスチック（熱可塑性）のほとんどは結晶性であり後述の理由で接着性が劣るので、それらを解決するため、最近では湿式エッチングまたはレーザー処理により被着材表面に微細な凹凸を生じさせ、そこへ樹脂を直接射出成形する方法（接着面積の増加およびアンカー効果の発現）、レーザー光照射、被着材金属の摩擦、高周波、超音波、熱板などにより接合界面付近の樹脂を溶融して接合する方法、および分子接着剤トリアジンチオール類により処理した金属と樹脂を射出成形あるいは両者の加

圧加熱により化学結合させる方法などが開発された。

それらにおいては溶融した樹脂が接着剤の役割を果たしているとともに、接着の場合のように硬化のための加熱を必要とせず、冷却により樹脂が固化するため短時間で接合できるという利点がある。

それらの主な接合法について、接合原理ごとに分類して概説する^{51)~53)}。

2 接着接合の原理

2.1 化学的接着説（原子・分子間引力発生メカニズム）

緊密に接触した界面において、原子間および分子間の引力相互作用により接着するという説である。これらの引力は、イオン結合、共有結合などの一次結合、水素結合、およびvan der Waals力に分類され、図1にそれらの結合のポテンシャルエネルギーと原子・分子間距離との関係を示す^{1), 2)}。いずれの結合も、原子・分子間距離がおおよそ0.6nm以下に接近しないと生じない。

水素結合エネルギーは共有結合の場合のおよそ数分の1~十分の1、van der Waals結合エネルギーは水素結合の半分~十分の1程度である。

図1に見られるように、原子・分子間引力が生じるためには、その間の距離を0.2~0.6nmにする必要があるが、被着材表面は、図2のようにたとえ同一材料の破断面同士であってもnmオーダーよりはるかに大きな隙間が生じているため、液体状接着剤あるいは溶融した樹脂

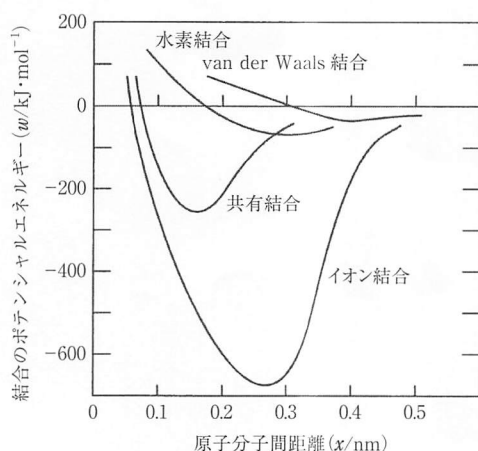


図1 化学結合のポテンシャルエネルギー^{1), 2)}



図2 被着体表面間接触模型³⁾

を隙間に充填し、被接合材表面との間隔を0.6nm以下とした後固体化し、分子間引力を生じさせる必要がある。

2.2 機械的接合説

図3のように被着材表面に凹凸が多ければ⁴⁾、そのくぼみ内へ接着剤が入り込み、錨を打ち込んだような効果(投錨効果、アンカー効果)が生じるとともに、接着面積も増加して、接着力が増すというよく知られた説である。アンカー効果は、接着強度の向上だけでなく接合部の環境耐久性向上に対しても重要であり後述する。

2.3 からみ合いおよび分子拡散説

Voyutskiiが提唱したのが拡散説^{5),6)}で、未加硫ゴムを重ね合わせておくとくっつくという現象を指している。図4は、ポリイソブチレン同士を接触させたときの経過時間とはく離荷重との関係で、時間とともにとはく離強度が大きくなることを示している^{5),6)}。また、圧力が高いほどとはく離強度が大きくなることが明らかにされている(後出の写真1(b)参照)。

2.4 溶解度パラメーターと接着強度との関係

物質の単位体積当たりの凝集エネルギーすなわち凝集エネルギー密度CED (cal/cm³)は、次式で表わされる⁷⁾。

$$CED = (\Delta H - RT)/V \dots\dots\dots (1)$$

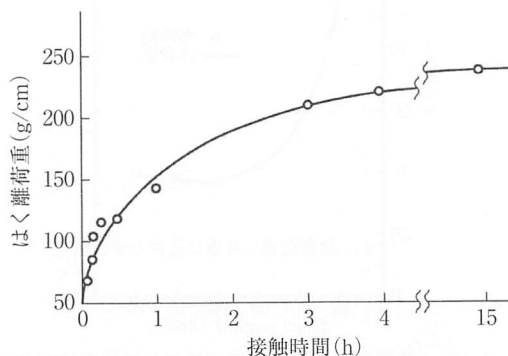
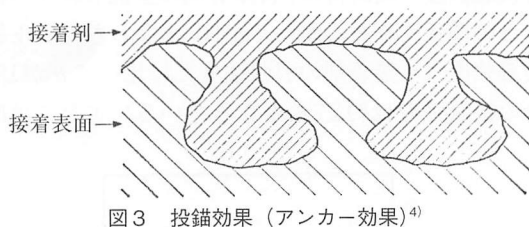


図4 ポリイソブチレンの接触時間とはく離強さの関係^{5),6)}

ここで、 ΔH : 蒸発潜熱, T : 絶対温度, V : その温度における1モルの容積, R : 気体定数 (1.982 cal/K・mol) である。

HildebrandはCEDの平方根を溶解度パラメータ (SP値) と名付け⁸⁾、記号 δ で表わした。SP値が近い物質どうしは混合しやすいといわれるが、それは以下の理由による⁷⁾。液体1と液体2を混合した時のエンタルピー変化量を ΔH 、液体1、液体2、および混合後のエンタルピーをそれぞれ H_1 , H_2 、および H_{12} とすれば、

$$\Delta H = H_{12} - (H_1 + H_2) = V(\delta_1 - \delta_2)^2 \phi_1 \phi_2 \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 ϕ_1 および ϕ_2 は液体1および液体2の容積の割合 ($\phi_1 + \phi_2 = 1$)、 V は混合後の液体の容積である。

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \dots\dots\dots (3)$$

式(3)の混合による自由エネルギー変化 ΔG は負の値でなければ液体同士が混合するという変化が進行しない。混合によるエントロピー変化 ΔS は常に正の値であり、 $-T\Delta S$ の値は常に負であるから、両液体の混合が十分に進むためには、 ΔH ができるだけ小さくなり、 ΔG の絶対値ができるだけ大きくなることが望ましい。 ΔH ができるだけ小さくなるためには、式(2)から、液体1と液体2のSP値ができるだけ近いことが要求される。固体と液体の間でも同様のことがいえる。

Iyengerらは、マイラーシート (PETフィルム、急冷により非晶質、SP値: 10.3)を種々のSP値の接着剤により接着したとき、とはく離強度が接着剤のSP値=10.3で最大値を示すという実験結果を得ており⁹⁾、接着剤の選定にあたり式(2)および式(3)の有効性が示された。

一方、結晶性材料が液体に溶解する条件は、結晶が融解して非結晶になる時のエネルギー ΔH_m を式(5)に加えた次式、

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S + \Delta H_m \dots\dots\dots (4)$$

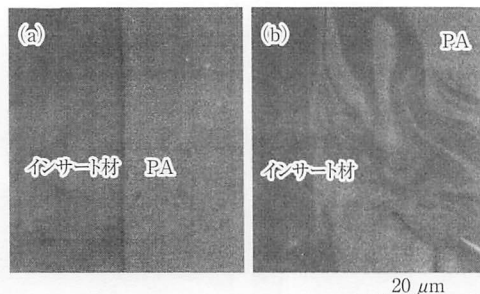


写真1 インサート材-PAのレーザ接合断面の反射電子像²⁷⁾
[(a) 未変性インサート材-PA間, (b) COOHにより変性したインサート材-PA間]

表1 種々のプラスチックの結晶化度¹⁴⁾

0	10	20	30	40	50	60	70	80
SBR	PF	EC	PVC	PS	PE	PA (ポリアミド)	POM (ポリアセタール)	
NBR	(フェノール樹脂)	(エチルセルロス)		PC (ポリカーボネート)		PET (ポリエチレンテレフタレート)		
IIR	EP					PAR (ポリアリレート)		
(ブチルゴム)	PMMA					PVDF (ポリフッ化ビニリデン)		
	PS					PTFE (フッ素樹脂)		

(SBR, スチレンブタジエンゴム, NBR: ニトリルゴム)

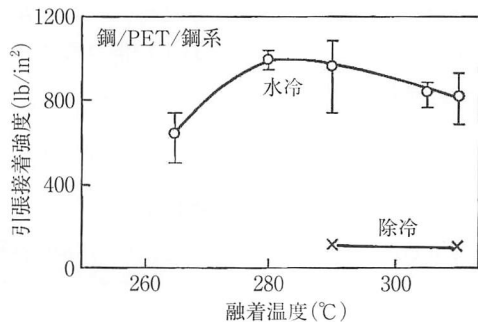


図5 PETの溶融接着強度に対する急冷（水冷）の効果¹⁵⁾

で考えなければならない¹⁰⁾。

融解熱はかなり大きな正の値であり、PE、PPのほか、エンジニアリングプラスチックのPEEK、PPS、PBN、PET、PBT、POM、PA、PTFE、ポリイミドなどが一般的に接着しにくいといわれるのは、これらが結晶性樹脂であり、溶解性を式(4)により考えなければならないためである。

これらの結晶性樹脂を接着するためには、コロナ放電処理¹¹⁾、プラズマ処理¹²⁾、UV/オゾン処理¹³⁾などの方法で樹脂の表面をかなりの程度まで酸化して、アミド基、カルボニル基、カルボキシル基などの極性基（官能基）を生成させること（改質）が必要である。

表1には、種々のプラスチックの結晶化度を示す¹⁴⁾。結晶化度100%の樹脂はないので、結晶性樹脂でもある程度の接着性は示す。

また、結晶性熱可塑性樹脂の接着性が劣ることをカバーするのが第3節で述べる微細凹凸形成による実接着面積増加法および融着法である。

図5はPETフィルムを用いて銅を溶融接着した場合

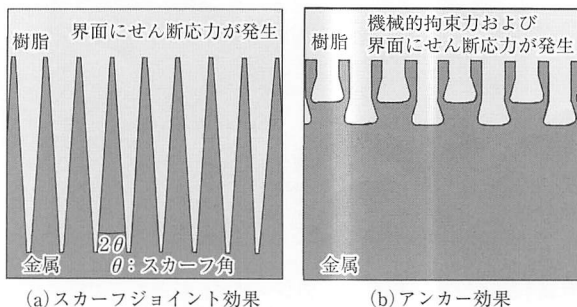


図6 被着材エッチングの効果¹⁶⁾

の接着強度であるが、急冷により結晶化が妨げられて大きな接着強度を示している¹⁵⁾。しかし、この引張接着強度は110°Cの熱処理（アニール）により急速に低下するという結果が得られており¹⁵⁾、これは加熱による結晶化度の増加によるものと考えられ、注意が必要である。

3 主な異種材料接着・接合法の接合原理

3.1 射出成形，レーザ加熱，摩擦加熱，および超音波加熱による接合法における接着力発現・向上の原理¹⁶⁾

微細凹凸中へ接着剤や樹脂が流入することにより接着・接合強度が向上する理由は、通常図3のアンカー効果、すなわち機械的な拘束力によって生じるとされているが、微細凹凸形成による接着強度向上の効果はそれだけによるものではないと考えられる。ここでは、凹部の形状を図6(a)のような逆円錐状に単純化して、多数の微細なスカーフジョイントが形成されたものとして考察する。

図7はぜい性接着剤によるスカーフ継手のスカーフ角 θ と接着強度（破断荷重/荷重方向に垂直な継手の断面積）との関係¹⁷⁾であるが、 θ が90°すなわちバット継手の接着強度（≒接着剤の引張強度）に比べて θ が15°の場合の接着強度は約2.7倍となっている。実際には図6

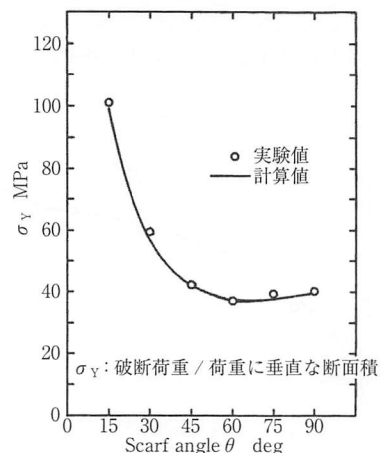


図7 ぜい性接着剤によるスカーフ継手の接着強度実験値と計算値との比較¹⁷⁾

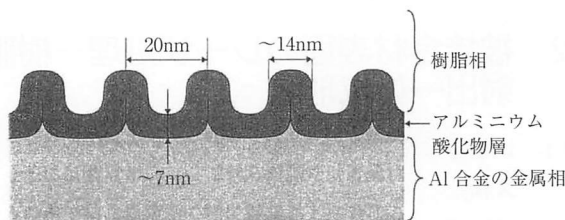


図8 NMTによる射出接合物の接合断面模式図¹⁹⁾

の紙面に垂直方向にも二次元的に微小スカーフジョイントが分布するので、 $\theta = 90^\circ$ の場合に対し $\theta = 15^\circ$ の場合は数倍 (≈ 2.72) 接着強度が大きくなり、またスカーフ角が小さい(穴が深くなる)ほど接着強度がさらに増加するものと考えられる。

図6(b)のアンカー効果による接着強度(破断荷重)の最大値は、樹脂と金属との突合せ接着部(穴が存在しない個所)による強度を除けば、

穴の数×被着材表面位置における穴の平均断面積×
母材樹脂の引張強度……………(5)

であり、これは、被着材と樹脂間の接着強度に対応した穴の深さを取れば、図6(a)スカーフジョイント効果についても同様である。

以上のように、実質接着面積を増加させること+アンカー効果により、結晶性樹脂の異種材料に対する接着強度が劣ることをカバーすることができる。すなわち単純化すれば、

実質接着面積×接着強度+アンカー効果 ≥
母材樹脂の断面積×母材樹脂の引張強度……………(6)

となり、接着強度が小さくても実質接着面積を見かけの接着面積の数倍～数十倍と大きく取ることとアンカー効果により、接着強度が母材樹脂の強度を上回り、母材破壊が生じるものと考えられ、実際にも次節において紹介する異種材料継手のほとんどが母材樹脂の破壊により破断している。

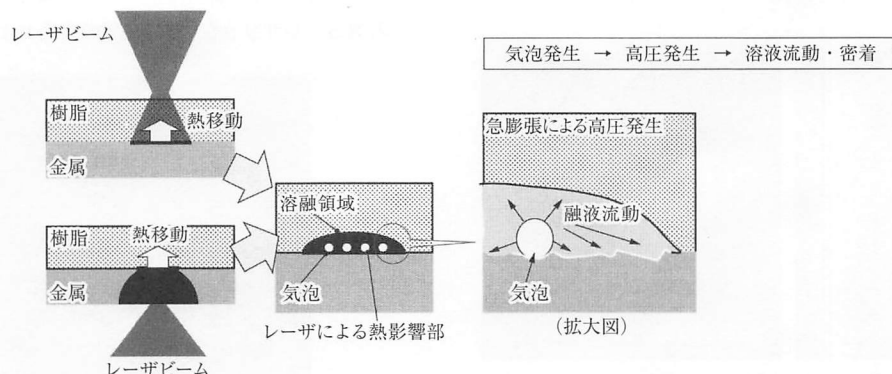


図9 LAMP接合法³¹⁾

アンカー効果の存在は、接合部が母材樹脂破断するために必要な実質接着面積を減少させる効果がある。

3.2 樹脂どうしの融着による接合の場合の接着強度発現の原理¹⁶⁾

3.2.1 一方の樹脂のみが溶融する場合

この場合は、溶融しない側の樹脂が被着材、溶融する側の樹脂が接着剤とみなされ、第2節で述べた両者の関係から接着強度が決まる。

3.2.2 両方の樹脂が溶融する場合

この場合は、結晶性樹脂においても溶融状態となり、二つの樹脂にある程度相溶性がある場合は、互いに流動して部分的には混合するため、2.4項式(4)の融解熱 ΔH_m を考慮する必要がなく、SP値を基準にして両樹脂の相溶性を検討することができる。

写真1は、スチレン系熱可塑性エラストマーをインサート材として用いたPAとのレーザー接合部の断面写真で、(a)は未変性インサート材の場合で極性が小さいためPAとよく密着しているにもかかわらず相溶性が少なく接着強度が小さかったが、(b)の場合は極性基COOH変性のインサート材であり、部分的にインサート材とPAとが混合しているため、大きな接合強度[(a)の3倍以上で母材破壊]が得られている¹⁸⁾。これは、2.3項のからみ合いおよび分子拡散説に該当するものと考えられる。

4 主な異種材料接着・接合法

4.1 金属の湿式表面処理—樹脂射出一体成形法

4.1.1 NMT[大成プラス株]

NMT処理は、図9のような径10～40nm、深さ10～20nmのディンプルを形成した金属に対し、熱可塑性樹脂を射出成形する方法であり^{19)～22)}、写真2はNMT処

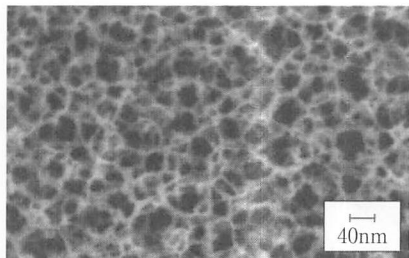


写真2 NMT処理後のアルミニウム表面のSEM写真²¹⁾

理後のアルミニウム表面のSEM写真²¹⁾である。接合部は引張強度試験において、すべて母材樹脂の破壊により破断しており、PPS-Al接合部のせん断接合強度は40～45MPaという大きな値が得られている²⁰⁾。

4.1.2 PAL-fit[®]〔日本軽金属株—ポリプラスチック株〕

Alに対し、酸を用いる陽極酸化処理により0.1～0.7 μ mの凹部を設け、射出成形により樹脂と結合する方法である^{23), 24)}。写真3はAl/PPS接合曲げ試験片の破面写真である²⁴⁾。この方法による接合部は、接触面積の増加とともに接合強度が増加しており、2.1節で述べたことが裏付けられている。

4.1.3 アマルファ〔メック株〕

金属を脱脂し、浸液によりエッチングした後、スマットを除去し、写真4のような微細孔を形成させたところへ樹脂を射出成形、移送成形、または熱圧着して接合する方法である^{25), 26)}。微細孔内部にまで樹脂が充てんされ、アンカー効果が発現する。

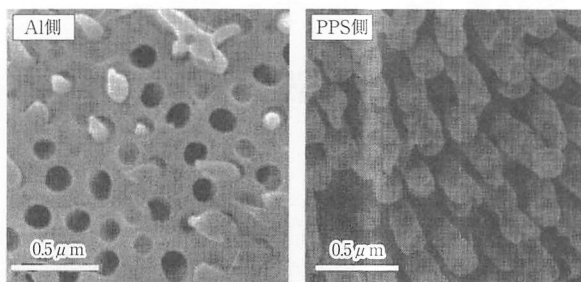


写真3 PAL-fit接合部の強度評価後の破断面観察結果³⁶⁾

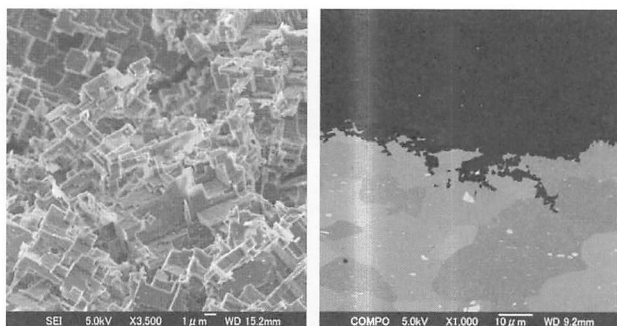


写真4 アマルファ処理をしたA5052の表面および断面SEM写真²⁵⁾

4.2 被接合材表面のレーザ処理—樹脂射出一体成形法

4.2.1 レザリッジ[®]〔ヤマセ電気株—ポリプラスチック株〕

レーザ処理により金属表面に径20～30 μ mの微細な凹凸を形成し、樹脂を射出成形する方法で、化学薬品を使用しないドライプロセスであるため、環境負荷の低減が可能である²⁷⁾。

写真5はレザリッジによる金属の表面状態および断面であり²⁷⁾、処理された金属表面は単純な凹凸形状ではなく、流入した樹脂によりアンカー効果が発現されやすい構造となっているため、破面はほとんど母材樹脂が破壊している。

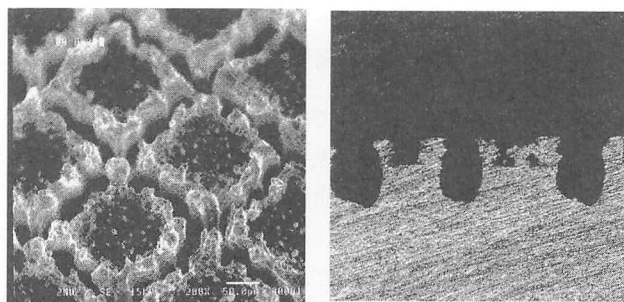
4.2.2 D LAMP[®]〔株ダイセル〕²⁸⁾

前項と同様レーザ処理により金属表面に径20～200 μ mの微細な凹凸を形成し、樹脂を射出成形する方法である。写真6に表面処理形状、写真7に接合断面図を示す²⁸⁾。

写真7の微細空隙は内部でつながっており、浸入した樹脂が縫い込まれたような構造（ステッチアンカー）を形成している²⁸⁾。

4.2.3 AKI-Lock[®]〔ポリプラスチック株〕^{29), 30)}

ガラス繊維（炭素繊維）強化PBT、PPS、PBTに対し、赤外線レーザ処理により深さ数百 μ mの溝を形成し



(a) 表面事例 (アルミダイカスト材料 ADC12)
(b) 断面事例 (アルミダイカスト材料 ADC12)

写真5 レザリッジ[®]処理金属の表面および断面観察事例²⁷⁾

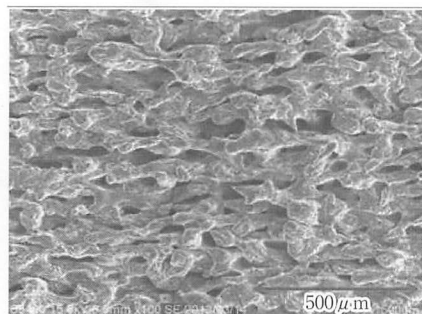


写真6 D LAMP[®]による表面処理形状²⁸⁾

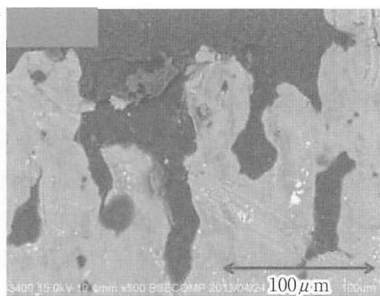


写真7 D LAMP®による接合断面図²⁸⁾

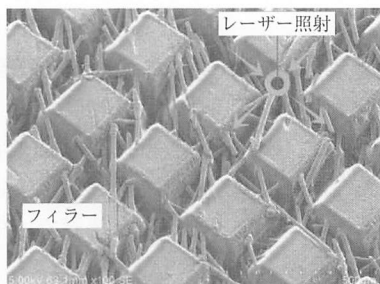


写真8 AKI-Lock® レーザ処理したガラス繊維強化樹脂の表面状態²⁹⁾ [ポリプラスチックス株式会社提供(著作権は同社に帰属)]

て強化繊維を露出させ、それをアンカーとして他の樹脂やエラストマーを射出成形する方法である。写真8はAKI-Lock処理したFRPの表面状態である。既存の接着法および無処理二重成形法では強度が出ないが、AKI-Lock処理材では十分な接合強度が得られている。

4.3 レーザ接合法

4.3.1 LAMP[大阪大学]^{31), 32)}

図9のように、金属と重ね合わせて樹脂側から(CFRTPの場合は金属側から)レーザー光を照射すると、界面付近の樹脂に高圧の気泡が発生して金属表面に微細な凹凸を形成し、生成した金属酸化物と樹脂との間の水素結合お

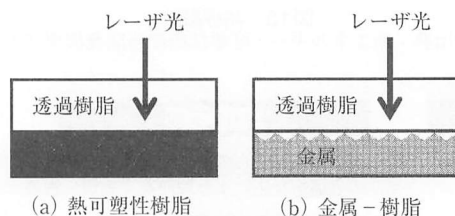


図10 レーザ接合の原理^{33), 34)}

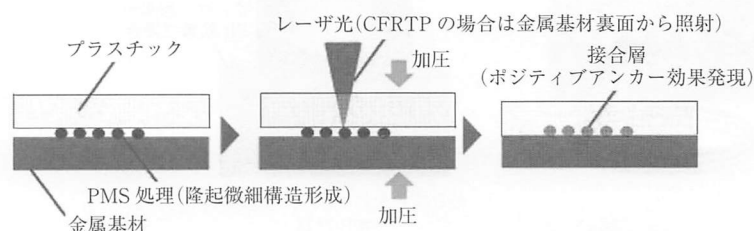


図11 PMS処理による金属と樹脂のレーザー接合³⁵⁾

よび van der Waals力、ならびに微細な凹凸によるアンカー効果により結合する^{31), 32)}。LAMP接合による引張せん断試験では、すべて母材樹脂が破壊または延伸している³¹⁾。

4.3.2 レーザ接合法[名古屋工業大学]^{33), 34)}

Alの場合はりん酸陽極酸化、Tiの場合はNaOH陽極酸化処理を行い、PMMAと重ね合わせて、図10(b)のように樹脂側からレーザー光照射を行って接合する^{33), 34)}。図10(a)のように異種樹脂の接合および微細凹凸によってレーザー光吸収率が增大することを利用して透明樹脂同士の接合も可能である^{33), 34)}。

Al-PMMAの接合強度はPMMA母材の強度に匹敵する値が得られている。

4.3.3 金属のPMS処理—金属・樹脂の大気圧プラズマ処理—レーザー接合[輝創株]^{35), 36)}

金属基材表面に対しては、PMS (Prominent Micro Structure) 処理材を用いてレーザー照射により凹凸高さが数十nm~数十μmの「隆起微細構造」を形成するという処理を行った後、大気圧プラズマ照射により官能基を生成する。樹脂に対しては、大気圧プラズマ照射により化学官能基を生成させ、図11のように樹脂側(CFRTPの場合は金属側)からレーザー照射を行い、「ポジティブアンカー効果」の発現と化学官能基間の化学結合により接合する^{35), 36)}。A5052-PA接合部において25MPaの強度が得られている³⁶⁾。

4.3.4 インサート材使用のレーザー接合[岡山県工業技術センター, 早川ゴム株, 岡山大学]^{37), 38)}

金属がAlの場合、エメリー紙処理、酸処理、アルカリ処理、陽極酸化処理などの表面処理を行い、主鎖をCOOH基で変性して極性を大きくしたスチレン系エラストマーをインサート材として挟んで、PP、PAなどと

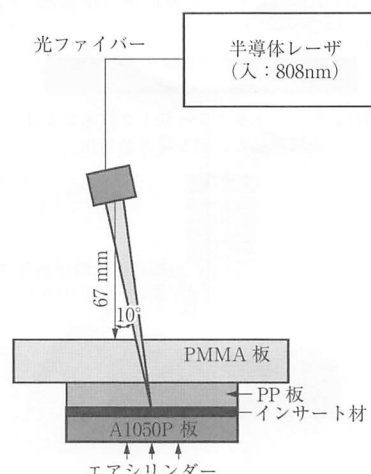


図12 インサート材使用のレーザー接合方法³⁷⁾

重ね合せて、図12のように半導体レーザー照射により接合する^{37), 38)}。

AlとPPとのレーザー接合強度は、エメリー紙によるAlの研磨面の実表面積にほぼ比例している、3.1節で述べていることに通じる。

4.4 摩擦接合法

4.4.1 摩擦重ね接合 (FLJ) [大阪大学]^{39)~41)}

エメリー紙 (#800) を使用して湿式研磨したA5052材とCFRTP (PA6マトリクス) を摩擦攪はん接合 (FSW) 装置を用いて、工具鋼SKD製ツールにより接合する。研磨の効果は大きく、アンカー効果ならびにAl表面の酸化物等と樹脂中の極性基との間のvan der Waals力および水素結合により結合する。図13は接合方法である。

A5052材において、#800湿式研磨のみの場合に比べて、シランカップリング剤水溶液を塗布乾燥後の場合のCFRTPとの接合強度は、シランカップリング剤とA5052材およびPA6との共有結合力 (化学結合力) および水素結合力が加わり⁴¹⁾約1.8倍の接合強度を示しており、シランカップリング剤の使用が接合強度の増加に極めて有効であることが示された。

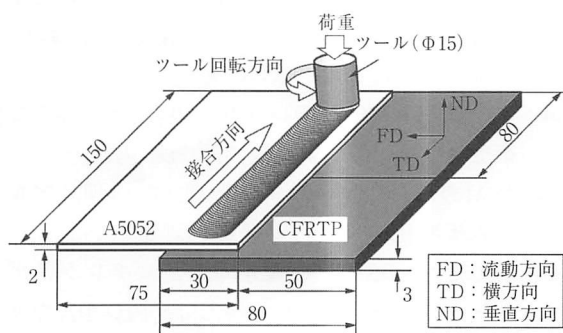


図13 AI-CFRTPの摩擦重ね接合法 (FLJ)³⁹⁾

4.5 溶着法

4.5.1 電磁誘導加熱法 ALTIM[®] [睦月電機(株)]⁴²⁾

図14のように、独自レーザストラクチャリング技術により金属部品表面を接合最適化した後、樹脂と重ね合せて高周波誘導 (IH) 加熱する。金属部品表面からの熱で流動化した樹脂部品表面を加圧により金属部品と隙間なく充填・密着し、その後、熱ひずみを最小限にするために加圧冷却することによって強固な接合面を形成する接合法である。

4.5.2 熱板融着 [新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)]⁴³⁾

図15のように、接合部を熱板により加熱熔融させ、熱板を取り去った後、両接合部を押し付けて融着するという接合法である⁴³⁾。比較的簡便な装置で、複雑な形状にも対応可能なため、用途が広い。

4.5.3 化学結合—融着法 [CAM: Chemical & Melting法] [輝創(株)]⁵⁰⁾

図16のように、金属素材にCAM剤を塗布することにより、脱水縮合によって両者の間に化学結合が生じる。そこへ樹脂素材を重ね合せて、金属素材側から加熱することにより、CAM剤と樹脂素材とが融着する。

金属—金属接合の場合は、CAM層同士を重ね合わせて融着させる。

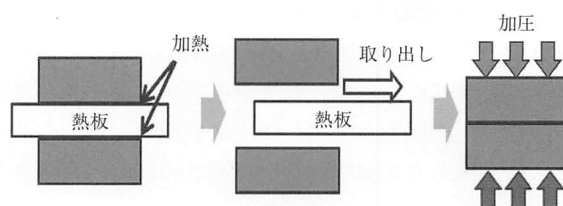


図15 熱板融着
[出典: 新エネルギー・産業技術総合開発機構]⁴³⁾

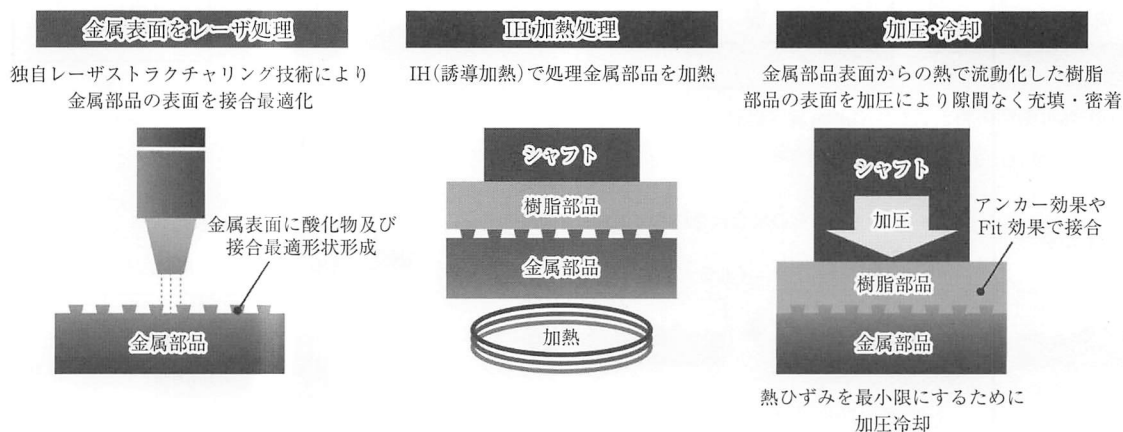


図14 電磁誘導加熱法ALTIM[®]⁴²⁾

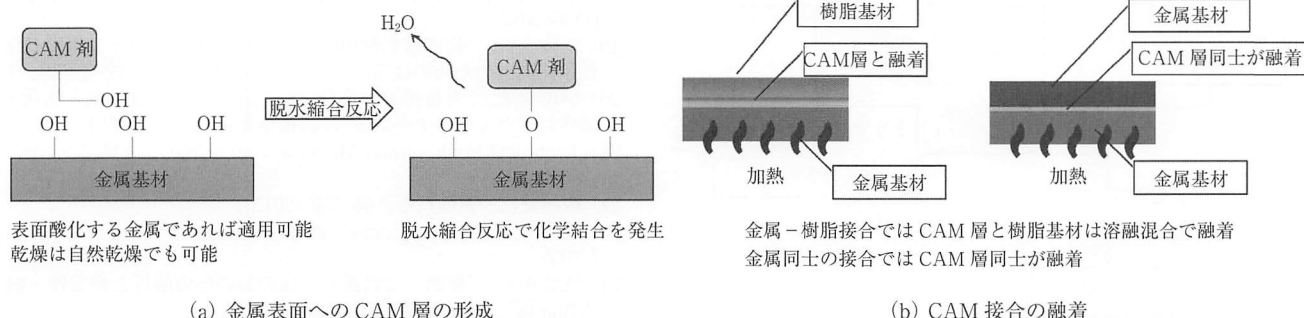


図16 CAM (Chemical & Melting) 法 [輝創(株)]⁵⁰⁾

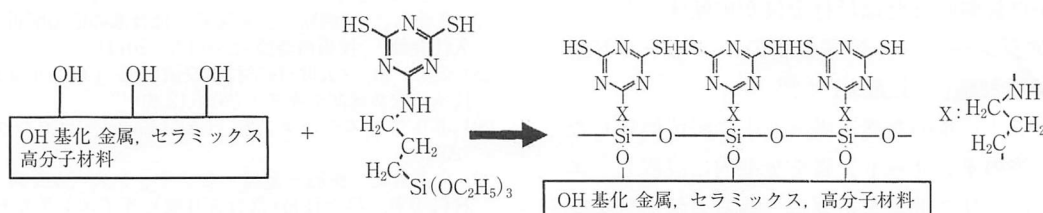


図17 OH化固体材料とTESとの反応⁴⁴⁾

4.6 分子接着剤利用法

4.6.1 分子接着剤[岩手大学工学部一(株)いおう化学研究所]^{44), 45)}

図17中に示す分子接着剤TES, すなわち 6-(トリエトキシシリルプロピルアミノ)-1, 3, 5-トリアジン-2, 4-ジチオール・モノナトリウム塩⁴⁴⁾は, トリアジンジチオール系の官能基を持ったシランカップリング剤とみなされる化合物である。チオール基 (SH) は, Ag, Cu, Ni, Fe, Zn, Pdなどの金属とメルカプチド結合し, エポキシ樹脂, ポリウレタン樹脂, 不飽和ポリエステル樹脂などと直接結合するとともに, 酸素, 過酸化水素などの酸化剤によって容易に酸化され, アルキル基が対称なジスルフィド結合 (R-S-S-R) を形成する⁴⁵⁾。

また図17のように, TES中のトリエトキシシリル基は加水分解後, 固体表面のOH基と脱水縮合して結合し, シランカップリング剤としての機能を果たす⁴⁴⁾。樹脂に対してはコロナ放電処理やプラズマ処理などにより

OH基を生成させるとともに, もともとOH基が存在するセラミックスおよび金属には同処理により洗浄を行い, シランカップリング剤としての反応を行わせる⁴⁴⁾。

図18は, 加熱・加圧により材料Bが流動・変形して, 材料Aの表面粗さを吸収して化学反応できる場合の接着方法である⁴⁵⁾。

材料AおよびBともに表面粗さを解消できない場合は, 間にTES処理したエントロピー弾性体を間に挟み加熱圧着するかあるいはSH基と反応する接着剤を用いて接合する。金属 (Al, SUS) と樹脂 (PE, PP, PA) との接合体のはく離試験において, 樹脂が母材破壊する⁴⁵⁾。

4.6.2 TRI(株東亜電化, 株トーノ精密, 岩手県工業技術センター, 岩手大学)^{46), 47)}

湿式処理により金属表面にナノスケールの結合膜を形成し, そこへ樹脂を射出成形することにより, 結合膜と樹脂が反応して強固に結合するという方法である⁴⁷⁾。図19は金属と樹脂の化学結合メカニズムである。接合部

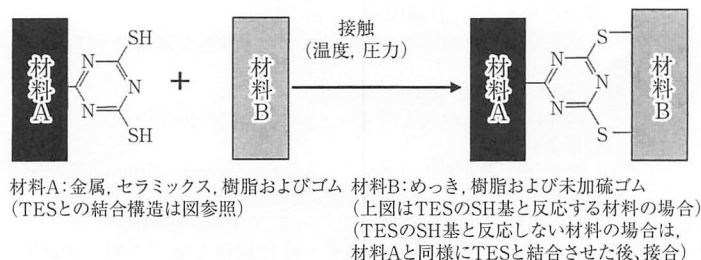


図18 表面粗さを解消できる場合の流動体接着⁴⁵⁾

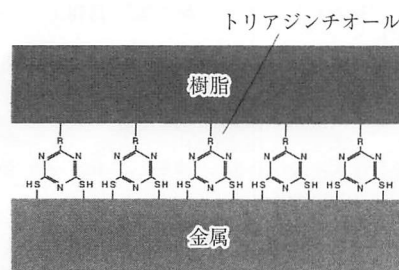


図19 TRIシステムにおける分子的結合⁴⁶⁾

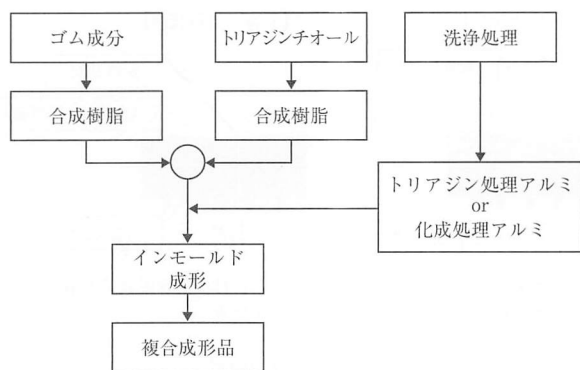


図20 アルミニウムのインモールド成形工程図⁴⁸⁾

は、大部分が母材樹脂または母材金属が破断する⁴⁶⁾。

4.6.3 トリアジンチオール処理金属のインモールド射出一体成形法〔富士通株〕^{48), 49)}

トリアジンチオールの有機溶媒溶液中に浸漬処理したアルミニウム等のインサート金属を金型内に設置し、エポキシ系またはポリスチレン系ゴム、あるいはトリアジンチオールを添加した樹脂を射出成形する方法である^{48), 49)}。図20はこの方法の工程流れ図である⁴⁸⁾。

5 おわりに

以上、最近の各種接着・接合法の概要をご紹介した。ご参考になれば幸いである。多くの図表等を引用させていただいた著者各位に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 畑 敏雄, 斎藤隆則, 日本接着学会編, “接着ハンドブック 第3版”, 日刊工業新聞社, p.5 (1996).
- 2) K. W. Allen, Analytical Proceedings, 29, 389 (1992).
- 3) 井本立也, 工業材料, 31-2, 122 (1983).
- 4) R. J. Schliekemann, 林 毅 監訳, “接着金属構造”, 日刊工業新聞社, p.8 (1977).
- 5) S. S. Voyutskii, “Autohesion and Adhesion of High Polymers”, Interscience Publ. (1963).
- 6) 三刀基郷, 日本接着学会編, “接着ハンドブック 第4版”, 日刊工業新聞社, p.13 (2007).
- 7) 井本 稔, 黄 慶雲, “接着とはどういうことか”, 岩波新書, p.33 (1980).
- 8) J. H. Hildebrand, R. L. Scott, The Solubility of Nonelectrolytes 3rd ed., Reinhold, New York (1958).
- 9) Y. Iyengar, D. E. Erickson, J. Appl. Polym. Sci., 11, 2311 (1967).
- 10) 小川俊夫, “高分子材料化学”, 共立出版, p.49 (2009).
- 11) 小川俊夫, “接着ハンドブック 第4版”, 日刊工業新聞社, p.797 (2007).
- 12) 小長谷重次, 山中淳彦, 日本接着学会編, “接着ハンドブック 第4版”, 日刊工業新聞社, p.673 (2007).
- 13) 菊池清, 水町浩・鳥羽山満 監修, “表面処理ハンドブック”, エヌ・ティー・エス, p.526 (2000).
- 14) 伊保内賢, 日本接着学会編, “接着ハンドブック 第3版”, 日刊工業新聞社, p.835 (1996).
- 15) 中尾一宗, 高分子, 19, 472 (1970).
- 16) 鈴木靖昭, 金子哲也編, “異種材料接着・接合法技術～樹脂・樹脂/樹脂・金属/金属・金属・セラミックスなど～”, R&D 支援センター, p.144 (2016).

- 17) 鈴木靖昭, 日本機械学会論文集, 50, No.451, A編, p.526 (1984).
- 18) 水戸岡 豊, “樹脂と金属の接着・接合法技術”, 技術情報協会, p.136 (2012).
- 19) 安藤直樹, “接着耐久性の向上と評価 劣化対策・長寿命化・信頼性向上のための技術ノウハウ”, 情報機構, p.372 (2102).
- 20) 小川典孝, “異材接着・接合界面における信頼性評価と劣化・破壊対策セミナーテキスト”, 技術情報協会, p.1 (2014).
- 21) Technical Book “Nano Molding Technology”, 大成プラス(株), p.7 (2014).
- 22) 板橋雅巳, 表面技術, 66, 359 (2015).
- 23) 遠藤正憲, Japan Energy & Technology Intelligence, 60, 65 (2012).
- 24) 遠藤正憲, “樹脂-金属接着・接合部の応力解析と密着性・耐久性評価”, 技術情報協会, p.207 (2014).
- 25) 林 知紀, 秋山大作, 表面技術, 66, 352 (2015).
- 26) 林 知紀, 秋山大作, 日本接着学会 第53回年次大会 講演要旨集, p.120 (2015).
- 27) 佐藤昌之, “樹脂-金属接着・接合部の応力解析と密着性・耐久性評価”, 技術情報協会, p.137 (2014).
- 28) 柴田 悟, (公財)科学技術交流財団 平成28年度異種材料接合技術研究会講演テキスト (2016.12.20).
- 29) ポリプラスチック(株), 「AKI-Lock™」カタログ (PLAMOS) (2015).
- 30) 宮下貴之, 樹脂-金属・セラミックス・ガラス・ゴム 異種材料接着/接合法技術 (落合杏月編), サイエンス&テクノロジー, p.144 (2017).
- 31) 川人洋介, 大阪大学新技術説明会資料, (2013.7.19).
- 32) 片山聖二, “樹脂と金属の接着接合法技術”, 技術情報協会, p.124 (2012).
- 33) 早川伸哉, “接着・粘着製品の分析・評価事例集”, 技術情報協会, p.231 (2012).
- 34) S. Hayakawa, J. Adhesion Soc. Jpn., 50, 170 (2014). (早川伸哉, 日本接着学会誌)
- 35) 前田知宏, 輝創株式会社 技術資料「Laser & Plasmaを利用した異種材料接合法技術」(2015).
- 36) 前田知宏, (公財)科学技術交流財団主催 平成27年度第3回異種材料接合技術研究会 講演テキスト (2016).
- 37) 日野実, 水戸岡豊, 村上浩二, 浦上和人, 永瀬寛幸, 金谷輝一, 軽金属, 60, 225 (2010).
- 38) 日野実, 水戸岡豊, 村上浩二, 浦上和人, 高田潤, 金谷輝一, 軽金属, 59, 236 (2009).
- 39) 永塚公彬, 吉田昇一郎, 土谷敦岐, 中田一博, 溶接学会 平成26年度秋季全国大会 講演概要 (2014).
- 40) 永塚公彬, 田中宏宜, 肖 伯律, 土谷敦岐, 中田一博, 溶接学会 平成27年度秋季全国大会 講演概要 第97集 (2015).
- 41) 永塚公彬, 田中宏宜, 肖 伯律, 土谷敦岐, 中田一博, 溶接学会論文集, 33, 315 (2015).
- 42) 睦月電機株式会社HP: <https://www.mutsuki.co.jp/joining>
- 43) 新エネルギー・産業技術総合研究開発機構 (NEDO)「サステナブルハイパーコンボジットの技術開発」事業原簿〔公開〕, III-2.3-10 (2014).
- 44) K. Mori, J. Adhesion Soc. Jpn., 43, 242 (2007). (森 邦夫, 日本接着学会誌)
- 45) 森 邦夫, (公財)科学技術交流財団 平成27年度第1回異種材料接合技術研究会, 講演資料, p.10 (2015).
- 46) 日経ものづくり編, “異種材料接合「何でもくっつける」技術が設計を変える”, 日経BP社, p.46 (2015).
- 47) 東亜電化(株)技術資料, TRI System～金属と樹脂の一体接合法技術～
- 48) 公開特許公報 特開平 8-25409
- 49) 梶井捷平, MtO技術研究所, 金属と樹脂の接合(ハイブリッド)技術資料
- 50) 株式会社 輝創HP: <https://kisoh-tech.com/joining-material/>
- 51) 鈴木靖昭, 接着工学, 丸善出版, 2018年, pp75-122
- 52) 鈴木靖昭, 日本接着学会誌, 54-5, 2018年, 169-186
- 53) 鈴木靖昭, 異種材料の接着・接合法技術と応用事例, 2021年, 技術情報協会, pp3-26