

異種材接合技術 ～レーザによるアルミ・樹脂接合処理を中心に～

山本 修也
Naoya Yamamoto

概要

自動車部品の小型化に向けて、異種材接合の技術開発に着手。技術課題は“接合強度”と“シール性”の両立。良好な結果を示した“アイシン特許×フェムト秒ファイバーレーザ技術”の紹介を交えつつ、評価・解析結果を報告する。

1. はじめに

自動車部品の小型化は、環境負荷に配慮した燃費向上や、快適な車内空間を実現する車室内スペース拡大など、ユーザーのうれしさに繋がるため、自動車業界において重要な課題の一つである。

小型化を実現させる手段の一つに、マルチマテリアル化(異種材料を各々の特性を活かしながら適材適所に使用)があり、要求性能の確保とコストとの両立を図りながら部品を小型化することが期待できる。このマルチマテリアル化実現において重要な技術の一つが、“異種材接合”である¹⁾。当技術は、スマートフォン等の電子デバイスやデジタル機器では積極的な採用が進んでいるものの²⁾、自動車業界では市場環境の過酷さから、採用の壁は非常に高い。

アイシンにおいても、年来、異種材接合について検討されており、製品の要求特性に合わせて技術開発が進められている。一例として、電子基板を搭載する製品に対するマルチマテリアル化の考え方について以下概説する。近年、電子基板の小型化・高機能化に伴う発熱対策として、適切な熱設計が課題である。熱設計として、例えば基板発熱部からの放熱経路を設計し、放熱経路部には“局所的に熱伝導率が高い材料”を用いることで、放熱性向上が狙える。熱設計が成立すれば、より小型の電子基板を用いることができ、結果、部品の小型化に繋がる。ここでの重要な技術課題が、“熱伝導率が高い材料”をどうやって“局所的に”組み込むのかであり、当解決策の一つが“異種材接合”である。

今回我々は、上記の熱設計の成立を目的とした“異種材接合”の技術開発に鋭意取り組む中で、アイシン特許

技術を含む種々の技術を評価したので報告する。さらに、アイシン特許技術の検討に際し、イムラアメリカ社(IMRA America, Inc.)のフェムト秒ファイバーレーザを用いたので、当該技術も紹介する。

2. 異種材接合技術について

異種材接合技術は多岐にわたり、鉄鋼材料、軽金属材料、炭素繊維強化樹脂複合材料(CFRP)、高分子材料(樹脂)など様々な組み合わせにおいて検討されているが、本報では対象製品の材料である“アルミダイキャスト(ADC12)×樹脂”の組み合わせに絞って言及する。

表1に、金属材料と樹脂材料との異種材料接合法を示す。今回は直接接合における“インサート成形法”を選択した。理由は、製品の構造上、樹脂が複雑形状になること、熱圧着させるスペースがないこと等による。

表1 異種材接合法の例³⁾

接合法		接手法
間接接合	接着法	接着剤
	機械的締結	リベット
		ボルト
		かしめ
直接接合	熱圧着法	高周波加熱
		抵抗加熱
		レーザ加熱
		超音波接合
	インサート成形法	金型を用いる熔融樹脂の射出成形

インサート成形法は、射出成形における金型内に、対象物となる金属部品を設置した状態で、樹脂を注入する

ことで、金型内で金属と樹脂の一体化を期待する工法である。樹脂側の対策アプローチとして、金属との接合性向上を狙い、材料組成を変更した接合用グレード開発も行われている⁴⁾が、一般的には表2に示すような金属側の対策アプローチが多い。

表2 インサート成形法における金属表面処理の例

物理的(アンカー)効果	レーザー
	薬液(エッチング)
	化成処理
	プラスト
化学的效果	有機めっき

金属側の主な対策アプローチとして、金属表面に、①アンカー効果を期待して微細な凹凸を形成する“物理的效果”と、②樹脂との親和性向上を期待して極性基を導入する“化学的效果”に大別される。特に多く取り組まれているのは、①の微細凹凸形成技術であり、例えばレーザーやエッチング等、様々な手法が存在し、ここに各社のノウハウがある。

今回我々は、インサート成形法における、金属表面処理技術に着目し、物理・化学的問わず各種手法について検討した。製品の要求特性より、“接合強度”と“シール性”について目標値を設け、後述する評価方法にて良否判定を行った。

3. アイシン保有特許について⁵⁾

異種材接合向け金属表面処理技術として、(株)アイシン{旧アイシン精機(株)}材料技術部が特許を取得している。表面に μm と nm スケールの2種類の微細凹凸加工を共存させることで、接合強度と耐冷熱性を向上させることができる(図1、特許第6199655号)。特に後者の nm 凹凸については、例えば後述するフェムト秒ファイバーレーザーなどを用いることで、容易に形成することができる。

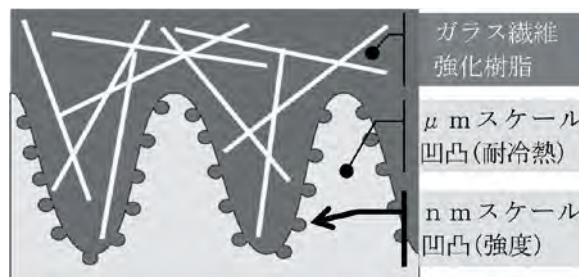


図1 アイシン特許の概要図

4. フェムト秒ファイバーレーザー加工技術の紹介

フェムト秒(femto second, fs)とは 10^{-15} 秒を意味する

SI接頭語fで、100fsのフェムト秒レーザーと呼ばれるものは 10^{-13} 秒だけONになり、そこから数十ns～数十 μs のOFF時間の後に、再度 10^{-13} 秒だけONになる、ということを繰り返すレーザーである。 10^{-13} 秒、つまり1兆分の1秒の時間に光子を閉じ込めることができるため、高精度な計測や精密な加工が可能となることが大きな特長である。さらにすべての光路をファイバーで構成することができるファイバーレーザーの強みを活かし、外乱に強く、かつコンパクトに構成できるフェムト秒ファイバーレーザーが開発された。

今回の表面処理に使用したレーザーは、表3の仕様のイムラアメリカ製フェムト秒ファイバーレーザーである(図2)。このレーザーは2018年のノーベル物理学賞受賞対象となったCPA(Chirped Pulse Amplification)技術をファイバーレーザーに適用したFCPA(Fiber Chirped Pulse Amplification)という技術を用いており、発振器、パルス伸長器、増幅器などのレーザーの主要部品を光ファイバーで構成することにより、高いビーム安定性と環境耐久性を有している。

図3に表面処理を実施するために用いたレーザー加工光学系の概略を示す。レーザー光源から出射したレーザービームは、中間光学系により適切なビーム調整を経て、集光レンズにより、加工する材料に照射される。加工の際は、ガルバノスキャナによりレーザービームを材料の表面上で高速走査することで微細溝を形成した。この手法はピストンスカートに摩擦低減目的でテクスチャ構造を付加した際に用いた方法と同様である。⁷⁾

表3 レーザーの仕様

中心波長	1040nm
平均出力	>30W
パルス幅	700fs
繰り返し周波数	1MHz



図2 使用したフェムト秒ファイバーレーザー
(イムラアメリカ製)

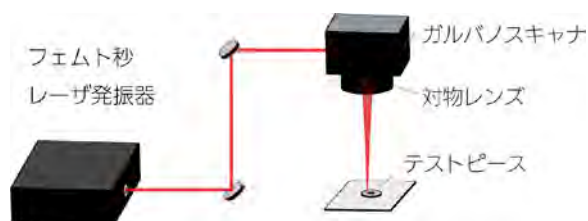


図3 レーザ加工光学系の概略図

5. 評価方法

評価は以下の手順で実施した。【手順1】テストピース (TP) 作製, 【手順2】物性評価 (初期), 【手順3】耐久試験 (冷熱試験), 【手順4】物性評価 (耐久後)。

以下, 順を追って説明する。

5.1 手順1:TP作製

図4に示す通り, ADC12製の中空リング内径側に各種表面処理を実施後, インサート成形にて樹脂と接合することでTPを得た。なお, 処理液に浸漬させるような, 全面が処理されてしまう手法については, マスキングを行うことで, 処理面積が全ての水準に対して同面積となるよう配慮した。

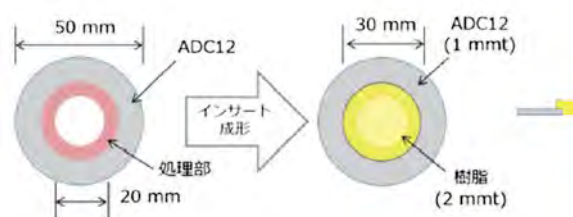


図4 テストピース (TP) 作製

また, 表4および図5に各処理の概要を示す。“サンプルE”が, アイシン特許をイムラアメリカ社のフェムト秒ファイバーレーザで処理したサンプルである。

表4 各処理の概要

No.	処理種類	凹凸のオーダ
A	薬液	nm
B-1	レーザ (格子状)	μm
B-2	レーザ (同心円状)	μm
C	レーザ (同心円状, 粗面)	μm
D	有機めっき	nm
E	フェムト秒ファイバーレーザ	nm + μm
F	薬液 (開発品)	非開示
G	ブラスト	μm

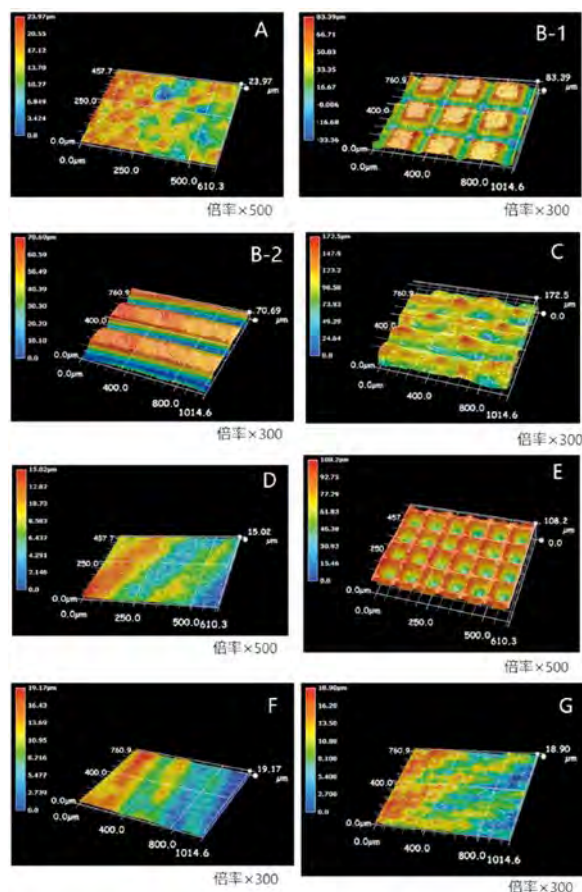


図5 各処理の外観 (カラーバーは高さ)

5.2 手順2, 4:物性評価

5.2.1 接合強度評価

接合強度評価方法について, 図6に示す。TPの裏側から, 処理面が主に引張荷重を受けるように樹脂部を打ち抜き, 破断したときの応力を測定した。温度環境は $23^{\circ}\text{C} \times 50\% \text{RH}$, 引張速度は 5 mm/s で実施した。

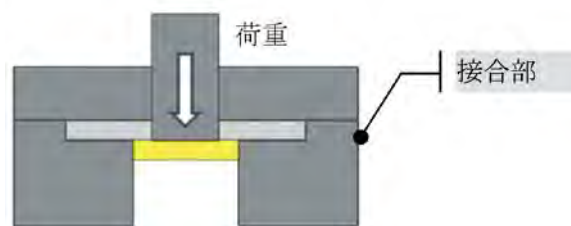


図6 接合強度評価方法

5.2.2 シール性評価

シール性評価について, 図7に示す。TP裏側からヘリウム (He) ガスにて 500 kPa まで加圧したときのガスリーク量 [$\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$] を測定した。

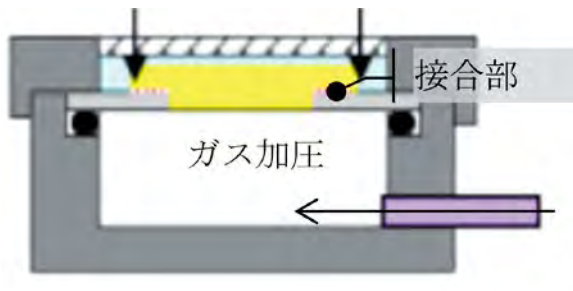


図7 シール性評価方法

5.3 手順3:耐久試験(冷熱試験)

-40℃⇔120℃(各30分)の冷熱試験を気相にて100サイクル行った。取り出し後、24時間以上測定環境にて静置し、物性評価を実施した。

6. 結果

縦軸を接合強度、横軸をシール性としたグラフに、各サンプルの耐久試験後の数値をプロットした結果を図8に示す。結果、今回の“ADC12×樹脂”の組み合わせにおいては、A、C、E、Gの4サンプルが良好な結果を示した。



図8 耐久(冷熱)試験後の評価結果

7. 考察

7.1 今回の結果に対する考察

最初に目標未達の処理方法について考察する。

まずDは、耐久試験後の図8では目標達成しているが、初期は両特性とも未達であったので、NGとしている。Dは有機めっき処理による相互作用が接合主因子であり、冷熱試験による熱履歴でADC12と樹脂との相互作用が増加し、耐久後の方が良好な結果になったと考えられる。よって、有機めっきを検討する際は、アニールなどで後加熱する追加処理が必要である。

B-1は、接合強度は目標達成するも、シール性が未達であった。格子状に溝を切っているため、リークパスが形成しやすかったことが原因だと考えられる。

対して同心円状のB-2は、シール性は目標達成したが接合強度が不足した。これは数百μmと処理ピッチが広く、アンカー効果不足だと考察している。Fは開発品で非開示情報が多いので言及を避ける。

次に、接合強度・シール性の目標値を満足したA・C・E・Gについて、いずれも図8上では同位置にプロットされた。この理由について、まず接合強度は、界面より先に樹脂の母材破壊が起こったため(約52MPaは樹脂母材強度)である。また、シール性は設備検出限界を示している。したがって、今回の評価では本来の限界値が測定出来ないほど、非常に高い接合強度とシール性を示す処理であることが分かった。

7.2 異種材接合の一般解化の試み

今回の測定結果を踏まえ、異種材接合強度の一般解化を試みた。種々の論文^{3),8)}を参考に(各因子の技術的な説明は割愛)、化学的な“濡れ性”と、物理的な“アンカー効果”と、両者が作用する“表面積”で、異種材接合強度を説明できるのではと仮説を立て、目的物性と説明変数を表5の通り設定した。以降、表5の説明変数を定量化し、データ解析を行い仮説の確からしさについて議論する。

表5 目的物性と説明変数

変数	因子	測定項目	狙い ^(*)
目的変数	接合強度	0項	
説明変数	濡れ性	接触角	-
	アンカー効果	S _z , S _{tr}	+
	表面積	レーザー顕微鏡, FIB-SEM	+

(*)「狙い」列の符号は重回帰分析における回帰係数の符号を意図しており、+は説明変数と目的変数とに正の相関があり、-は負の相関があることを示す。

7.2.1 説明変数1:濡れ性

各処理面と、樹脂との親和性の指標として、濡れ性に着目した。通常の濡れ性は基材に水滴を滴下する手法が一般的だが、今回は図9のように、処理面に対し溶融した樹脂を滴下した際の接触角測定を選定した。

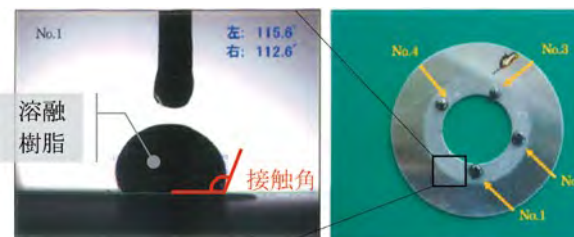


図9 樹脂の接触角測定

7.2.2 説明変数2:アンカー効果

最も定量化に困ったのがアンカー効果である。規則

的な凹凸形状であれば数値化は容易だが、特に薬剤などを用いるとランダムな微細凹凸が形成され、表面積とは別のアンカー効果としての指標設定が困難であった。今回はレーザ顕微鏡を用いた、凹凸の最大高さであるSz(図10(左)), および表面の異方性の強さを示すStr(図10(右))を用いた。

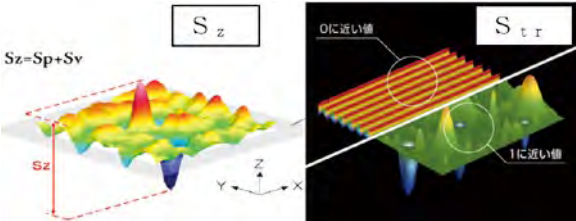


図10 アンカー効果の定量化

7.2.3 説明変数3:表面積

μmスケールの凹凸についてはレーザ顕微鏡を用いた。また、nmスケールの凹凸についてはレーザでは追従できないと考え、FIB-SEM(集束イオンビーム加工装置付走査電子顕微鏡)を用いて三次元像(図11)を構築し、表面積を算出した。

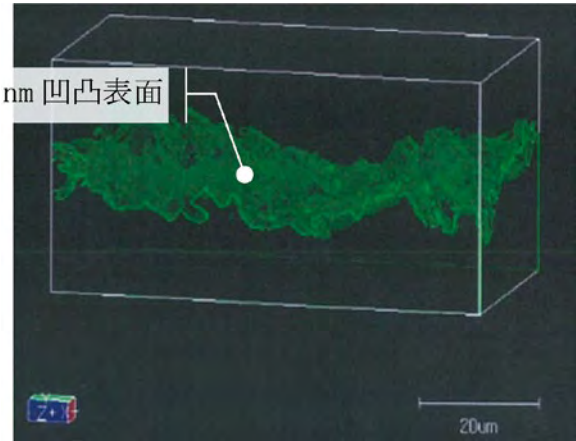


図11 FIB-SEMの三次元像

7.2.4 重回帰分析を用いた仮説の確からしさ確認

異種材接合を一般解化する上での仮説の確からしさの確認を目的とし、重回帰分析を行った。なお、前述の通り、接合強度とシール性が検出限界により頭打ちになっているため、解析結果の絶対値そのものが重要な意味を為さないことは前提の上で議論を進める。

結果を図12および表6に示す。さらに、各説明変数の解釈を表7に示す。まず各説明変数の回帰係数の符号に着目すると、仮説における狙い(表5)と符号が同一であり、仮説を支持する結果が得られた。

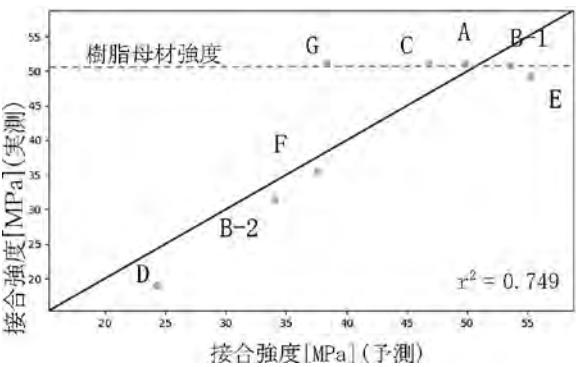


図12 重回帰分析結果(初期強度)

表6 重回帰分析結果

説明変数	分散比	偏回帰係数	標準偏回帰係数	トレランス
接触角	1.54	-0.919	-0.484	0.553
Sz	1.43	0.084	0.523	0.438
Str	2.50	29.4	0.639	0.512
表面積	2.19	7.86	0.610	0.493
定数項	1.82	123	-	-

表7 各説明変数の解釈

項目	符号	解釈と考察
表面積	+	[解釈]接合している表面積が大きい程、接合強度が高い。 [考察]樹脂との分子間力が働く面積が増加するため。
濡れ性(接触角)	-	[解釈]接触角が小さい(濡れ性が良い)程、接合強度が高い。 [考察]濡れ性が良い程、凹凸に浸透しやすくなるため。
アンカー効果(Sz, Str)	+	[解釈]表面粗さが大きい程、接合強度が高い。 [考察]凹凸が大きく、急峻である程、強いアンカー効果が発現するため。

7.2.5 アイシン特許の考察

アイシン特許は、フェムト秒ファイバーレーザを用いて形成したnm凹凸にて表面積を増加させ、かつアンカー効果の発現も期待している。今回濡れ性向上の化学的な処理はしていないが、nm凹凸の孔径は溶融樹脂が充填できる(凹凸に浸透できる)よう設計されており、実際に接触角は比較的低い値を示すため、一般解から考察しても、良好な処理方法であると考えられる。

8. 総括

今回、“ADC12×樹脂”という組み合わせにて、インサート成形法における、種々の金属表面処理技術を用いた異種材接合物性を評価した。また異種材接合強度を一般解化するため、仮説に基づく因子を定量的に測定し、データ解析を行った。

本データ解析によって得られた結果を総括すると、「異種材接合強度を向上させるためには、アンカー効果

が発現する凹凸形状を有する且つ、相互作用が働く表面を、多く設けることが重要である。」という一般解が導かれた。

今回、イムラアメリカ社のフェムト秒ファイバーレーザーを用いたアイシン特許技術(サンプルE)は、良好な結果を示した。上記の一般解と比較することで、今回の結果を考察することができ、特にnm凹凸が接合強度に寄与することが示唆されたことで、フェムト秒ファイバーレーザーのような、精密なnm凹凸を形成する加工手法の重要性が再認識できた。

9. おわりに

今回得られた一般解は、一見特に新規性を感じられるものではなく、むしろ当たり前の結果であるように思われる。しかし、従来“定性的に”重要と思われていた各影響因子について、仮説に基づき定量的な指標を設定し、定量的なデータを評価・解析した結果、“当たり前の結果になった”ことが、本稿においては非常に重要であり、今後の異種材接合検討に有用な知見になると考えられる。

余談であるが、先般、近視矯正治療を受けた際に、フェムト秒レーザーにて角膜層をスライスした。「これがフェムト秒レーザーか」と、nm凹凸の気持ちで感動に浸りつつ、何事もなく視力が回復した暁には、レーザーの技術革新に改めて信頼と敬意の念を抱いたのである。

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご協力頂いたイムラアメリカ社、および社内外の関係者の方々に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 新エネルギー・産業総合開発機構：異材溶接技術の基礎研究，平成12年度調査報告書，NEDO-ITK-0009，p. 68(2001)
- 2) 板橋雅巳・富永高広：金属と樹脂の射出接合技術(NMT)～技術概要，製品事例および技術の可能性～，計測と制御，第54巻第10号(2015)
- 3) 中田一博：マルチマテリアル化における接合技術と異種材料接合の展開，表面技術=Journal of the Surface Finishing Society of Japan第72巻12号p. 642-648(2021)
- 4) 山野直樹，高野健：金属接合用PPSグレードの開発，TOSOH Research & Technology Review Vol. 54(2010)
- 5) アイシン精機，朝生敏裕，東レ西本博晃，複合成形品，特許第6199655号(2017)
- 6) 大竹秀幸：イムラアメリカの最近の研究，AISIN TECHNICAL REVIEW VOL. 27海外法人便りp. 58-62(2023)
- 7) 堀田芳敬：超短パルスレーザーを用いたピストンスカート部の低フリクション化技術，AISIN TECHNICAL REVIEW VOL. 23p. 19-22(2019)
- 8) 鈴木靖昭：異種材料接着・接合の機構と応用技術，日本接着学会誌vol.54 No.5(2018)

筆者



山本 修也

材料技術部 先行材料開発室
新規材料技術開発に従事
技術士(化学)