

平成27年度採択
中小企業経営支援等対策費補助金
(戦略的基盤技術高度化支援事業)

「青色レーザーを用いた樹脂金属三次元動的（ヘム機構連動）
接合技術の開発」

成果報告書

平成30年 5月

担当局 中国経済産業局

補助事業者公益財団法人ひろしま産業振興機構

目 次

第1章 研究開発の概要

1-2 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-1-1 研究開発の背景・研究目的 1

1-1-2 研究開発の概要 5

1-1-3 研究開発の目標及び研究開発の実施内容 5

1-2 研究開発の実施体制

1-2-1 研究体制 8

第2章 本論

2-1 異種材料（樹脂＊金属）に対する動的接合

2-1-1 自動車用ドアの模擬形状部材による三次元動的接合実験治具等の開発 9

2-1-2 特定の樹脂＊金属に対しヘム機構を有する三次元動的接合研究 9

2-1-3 動的接合パラメータの抽出 9

2-1-4 中括 9

2-2 青色レーザ照射実験系の開発及びビームの最適化研究

2-2-1 既存色及び青色レーザ発光源の適用 10

2-2-2 照射ビームの最適化制御系の継続研究 11

2-2-3 中括 12

2-3 異材接合部の品質等の評価に関する研究

2-3-1 モニタリング技術の完成 13

2-3-2 接合部の強度等の評価 15

2-3-3 異材接合部の評価技術の確立 15

2-4 各種異材接合エンジニアリングデータの確立研究・・・・・・・・・・ 17

2-4-1 モデル材料・モデル構造での接合実験 17

2-4-2 ライン実装の接合エンジニアリングデータの確立 17

第3章 全体総括

3-1 研究開発の成果 19

3-2 今後の課題及び解決策 19

3-3 事業化展開について 19

第1章 研究開発の概要

初年度である平成 27 年度は、ベースとなる LAMP 接合法を用い、またこれを応用した樹脂と金属の接合研究を実施し、樹脂と金属の接合界面に当たる板間をレーザ照射による加熱を行い従来法（LAMP 接合法）との有意差の検証を行い、

- ①金属板のみレーザ照射されるため、レーザ光吸収による樹脂板の劣化が無い。
 - ②金属板をレーザ照射するとき、熱伝導により広範囲が高温になるため、接合部面積が大きくなる（LAMP 接合部と比較して最大で2倍以上）。
 - ③治具によって樹脂を押し付けるため、接合部の樹脂の変形量が小さい。
- などの効果を確認する成果を得た。

2 年目である平成 28 年度は、主に青色レーザの発振系の完成と集光系の開発に努めた。合わせて、接合原理の解明に取組み、初年度に設計製作した青色レーザ発振装置を基に集光光学系を設計し、これを製作することで、当初目標を達成するために矩形ビームを照射することを可能とした。

さらに、各種分析を用いて実施した樹脂と金属の接合原理解明のエビデンスとして第一原理計算を用いた机上計算を実施した。

これにより、樹脂と金属の接合原理を解明するなどの成果を得た。

最終年度である平成 29 年度は、樹脂と金属からなる自動車用ドアを完成させるための接合技術確立のために各種パラメータの抽出を実施し、接合プロセス中基も重要である接合界面の加熱条件を明らかにし、レーザ照射条件にフィードバックを行なう適用制御技術を完成させた。

また、自動車用ドアを模擬した各種試験を行い、塗装時の加熱乾燥条件や側突を模擬した過重負荷試験等を実施し、接合部の強度品質が十分であることを確認するなどの成果を得た。

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-1-1 研究開発の背景・研究目的

技術革新によるエネルギーと CO₂の飛躍的削減

東日本大震災以降のエネルギー制約に対して、省エネによりエネルギー消費量の削減及び電力需要の平準化に ALL JAPAN として取り組んでいる。これらに取り組むことは、実質的に新たなエネルギー供給源を確保することと同等の効果があり、消費側での取組みを更に強化することが重要である。その際には、生活の質を向上させながらもエネルギー消費量を削減するという、相反する課題も解決する必要がある。また、産業・民生・運輸部門の各部門において、様々なエネルギー消費量削減に関する技術力を源泉に高い国際競争力を持っている。しかしながら、今後も国際競争に打ち勝ち成長するためには、エネルギー消費量削減に関する技術を更に進化させることが必要である。

さらに、昨今、地球環境問題に端を発し、CO₂削減の要求が高まっている。一例として、自動車の CO₂規制が世界規模で強化されている（表 1 参照）。米国では、2007 年 12 月、2020 年までに新車燃費 35mpg（マイル/ガロン）とすることを求める包括エネルギー法案（H.R.6）が米国で可決した。また、EU 加盟国と欧州議会では 2020 年までに新車の CO₂排出量を 95g/km に低減すると決定しこれまでの規制値からより強化された。これにより日本を含む自動車メーカーの開発戦略を見直さなければならない事態となった。具体的には、2020 年代前半の燃費目標は、日・米・欧・中ともに 20～23 km/L（日本の 2010 年度燃費基準に対し燃費を約 1.3 倍向上）である。

	米国	欧州	米カリフォルニア州	日本
規制の種類	燃費規制	CO2排出規制	GHG排出規制	燃費規制
燃費の単位	mpg	g/km	g/mile	km/L
燃費の計測方法	CAFÉ	NEDC	CAFÉ	JC08
規制の概要	乗用車は1種類の燃費基準、小型トラックはサイズに応じ燃費基準値を設定	1種類の燃費基準値を設定	2種類の燃費基準値(車種に応じて)を設定	各重量区分ごとに燃費基準値を設定
燃費の基準値	2020年までに35mpgの改善を要求	2020年までにCO2排出量を95g/kmに削減	2016年までに新車のGHG排出量を2002年比で30%削減	2020年度末に乗用車全体の燃費を20.3km/L(2009年度比で24.1%減)

表1：米国、日本、欧州の乗用車燃費の動向と将来燃費基準

■エネルギーとCO₂の飛躍的削減に対する軽量化の効果

自動車の車両重量とCO₂排出量の関係は図1の通りとなっており、比例関係にある。100 kgの車両重量の軽量化は、CO₂排出量を20 g/km削減できる。また、図2によると車両重量100 kgの軽量化で約1 km/Lの燃費改善が可能となる。これらを基に2020年時のCO₂削減目標および燃費基準を単純に車両の軽量化のみで担保しようとした場合、2009年度比では、CO₂排出量を95 g/kmに削減するには約350 kgの車両軽量化、日本の燃費目標(20.3 km/L)を達するには、約400 kgの車両軽量化が必要になる。例えば、2010年時の車両重量平均は約1280～1290 kgとなっており、車体(ホワイトボディ)重量はその30%とされている。従って、車体重量は約390 kgとなり、上記の必要重量削減率とほぼ同量となる。つまり、革新的な軽量化技術が必要である。

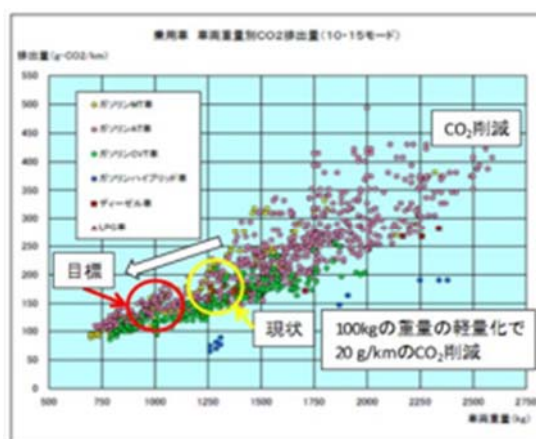


図1：車両重量とCO₂排出量の関係
(出展：国土交通省)

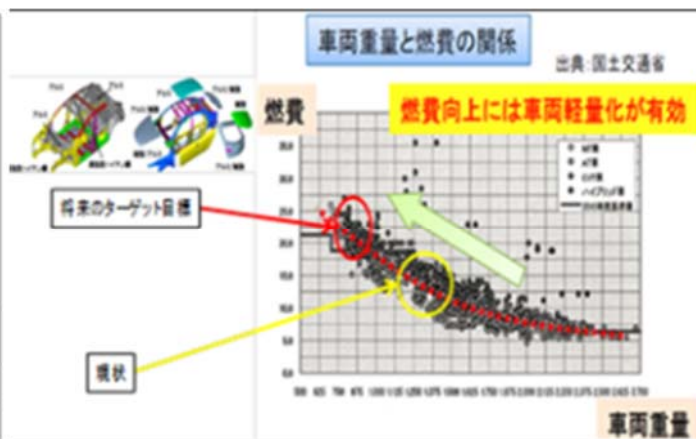


図2：車両重量と燃費の関係 (出展：国土交通省)

これら軽量化を実現するためには、①既存材料の薄板化、②高強度軽金属の利用、③

30 %軽量化ができる樹脂の採用が必須課題であり、これらマルチマテリアルの安定的な接合技術の確立が求められる。

国際自動車工業連合会（OICA）はアルミニウムや樹脂を多様化するマルチマテリアル化を予想しており、また、経済産業省では 2030 年までの素材推移を以下の図 3 の通り予想している。

なお、軽量化の実現には、高強度鋼板の適用による薄板化、軽量素材の複合化など新しい構造材の適材適所での活用が柱となってきた一方で、軽量化の前提として、供用時はもちろん衝突時においても高い安全性の確保が求められている。

しかしながら、これら多様化する素材の異材接合は、メカニカル接合においては、設計自由度の低下や締結部に一定の大きさを必要とするための軽量化への阻害、生産性の向上が大きな課題であり、金属間の場合においては IMC（金属間化合物）の抑制、また、接着剤では VOC(揮発性有機化合物)規制対応などや接着剤の硬化時間による生産性阻害という課題がある。よって、前述課題は量産時の大きな障害となる。

	接合性	問題点
超音波溶着	×	—
熱板溶着	×	—
振動溶着	×	—
インサージョンモールド	△	形状に制限(大きいものに制限) 組み付け構造制限
ヒートプレス	△	時間必要 樹脂材料の損傷 デザイン・形状に制限
射出成形	△	材料、表面状態、デザイン・大型形状に制限、
接着剤(接着シート含む)	○	耐久性、経年劣化、環境問題(VOC) 生産タクト増加、工程数増加 品質管理が困難
メカニカル接合	○	耐久性、機密性、デザイン・形状に制限、工程数増加、重量増加、固定具の質量増加
LAMP 法	○	透過性、平面の確保困難

表 2：自動車業界における異種材(樹脂＋金属)接合の現状

これら既存技術に対する新技術として、レーザによる熱源を利用した溶接技術が研究されている

(LAMP：Laser-Assisted Metal-Plastic 接合法

【大阪大学】以下 LAMP 接合法)。この新たな技術は接合部位に必要な部材の削減が可能であり、設計自由度に関してもメカニカル接合に対し、優位性を持つ、また、化学物質による健康被害等の問題を解決し、接着剤の硬化時間等による生産性の阻害問題も解決される。しかしながら、従来波長のレーザによる樹脂と金属間の直接接合は、素材の種類によって異なる吸収率の差や、ビーム品質の問題により幅広い素材の接合性や、その接合品質及び安定性において課題がある。

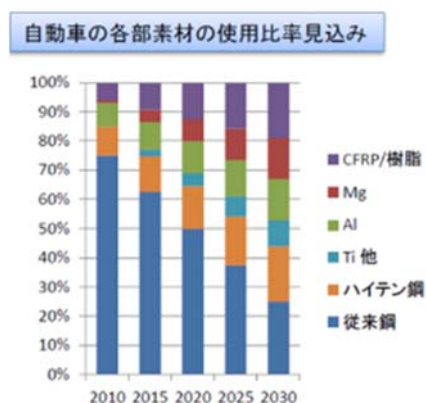


図 3：自動車の各部素材の使用比率見込み

(出展：米国エネルギー省より経産省作成)

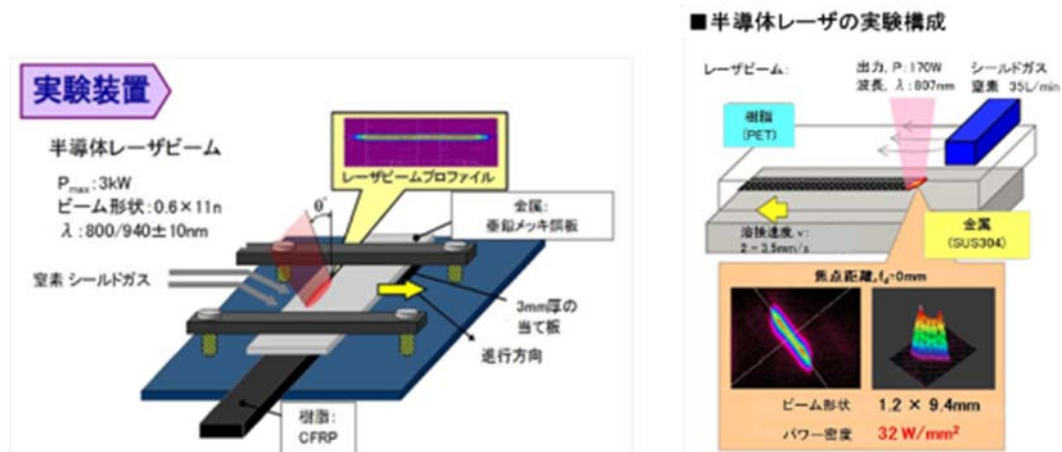


図 4：LAMP 接合法概要

レーザ波長透過の出来ない樹脂素材の場合

レーザ波長透過が樹脂素材の場合

図 4 の通り LAMP 接合法では、樹脂と金属の直接接合において、基本的に重ね部材を板上から照射し、金属を加熱することでその熱伝導により樹脂表面（金属との接触面）を加熱変質し、金属と樹脂とを接合する技術である。透過性の良い樹脂素材の場合は、金属側からまたは樹脂側からの両側照射が可能である。一方、透過性が良好でない

GFRP（ガラス繊維強化プラスチック）や CFRP（炭素繊維強化プラスチック）の場合、金属側からのみの照射となり。金属板中における熱伝導に依存する必要がある、接合面に当たる樹脂表面温度を安定的に最適化することは極めて困難であり、同 LAMP 接合法の大きな課題である。

なお、レーザ技術を利用した自動車の組み立て及び構成部品の生産においては独国をはじめとする欧州との対比上我国は後塵を拝しており、欧州自動車メーカーにおいては自動車用ドアのフクロ構造部にはほぼすべてにおいてレーザ接合が採用されている。独国等欧米に比べ我国日本はその採用進度が非常に遅く、当社においても今後大いにこれら技術に対する取り組みを進めていくわけであるが、圧倒的に後発である。また、独国自動車産業では、樹脂複合材料の利用は構造部材にまで進んでいる（参考図：図 5）



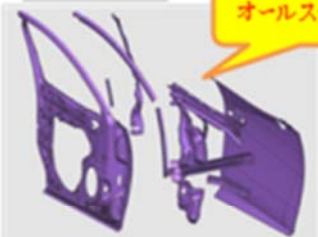
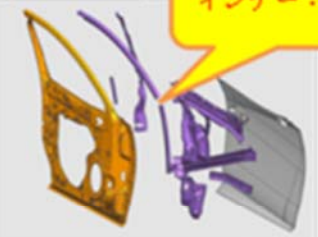
図：5 独国某メーカー樹脂化一例



本研究の主題は、上記既存技術の課題を解決し、より安定的且つ高効率な樹脂＊金属接合を実現し、これを用いることにより主題の自動車用ドアシエルの軽量化を実現し、川

下メーカーをはじめとする自動車産業全体に貢献すると共に、地球規模のCO₂排出量抑制に寄与する。また、当技術により独国を主とする欧州の自動車軽量化及びレーザー加工技術に対し、Made In JAPANの再興を確実なものにするため当社がその役割を担うことにある。

1-1-2 研究開発の概要

従来技術		新技術	
			
オールスチール		アウター：アルミ インナー：GFRP	
仕様	重量	仕様	重量
アウターパネル：スチール インナーパネル：スチール	52.2kg/台	アウターパネル：アルミ インナーパネル：GFRP	34.4kg/台
組み立て・接合法			
アウター/インナー材をヘミングした後にスポット溶接		アウター/インナー材をヘミングしながら青色レーザーを用いた三次元動的接合	

上記のマルチマテリアル化を推進し、また、これを実現するための異種材料接合技術開発を実施することで地球規模のCO₂排出量削減及び低燃費化による消費エネルギー低減を目的とした自動車用ドアシェル重量の軽量化を実現する。(上記試算にて30%の軽量化)

○新技術を実現するために解決すべき研究課題

- 【1】異種材料（樹脂*金属）に対する動的接合
- 【2】青色レーザー照射実験系の開発及びビームの最適化研究
- 【3】異材接合部の品質等の評価に関する研究
- 【4】各種異材接合エンジニアリングデータの確立研究

1-1-3 研究開発の目標

高度化目標

(五) 接合・実装に係る技術に関する事項

1 接合・実装に係る技術において達成すべき高度化目標

4) その他の川下分野に関する事項

a.自動車等輸送機械分野に関する事項

②高度化目標

ケ. 耐環境性、接着性、耐久性、はく離強度、せん断強度の向上

(中小企業庁：特定ものづくり基盤技術の高度化に関する指針)

本研究の高度化目標は自動車用ドアの30%軽量化を実現し、CO₂排出量規制対応に貢献することにある。

ことにある。

本提案の技術的目標は、以下の通り

- 【1】異種材料（樹脂*金属）に対する動的接合

平板を用いた動的接合による樹脂*金属の直接接合を実現させるための【1-1】平板による二次元動的接合実験治具等の開発を行い、【1-2】特定の樹脂（GFRP等）*金属（亜鉛メッキ鋼板、アルミニウム合金等）による動的接合研究を実施した。さらに、へム機構を導入した【1-3】自動車用ドアの模擬形状部材による三次元動的接合実験治具等の開発を実施した。これは、前項の平板による二次元動的接合に対し、製品部材を想定、模擬し、形状部材を用いた三次元動的接合というプロセスを用いることを特徴とした。これを用い、【1-4】特定の樹脂*金属に対しへム機構を有する三次元動的接合研究を実施した。平板による二次元動的接合及び形状部材による三次元動的接合においては、その接合強度の目標を、樹脂強度（例：PA材において 2500 N/25 mm）とした。また、接合プロセスにおける動的パラメータの影響度を明確化するため【1-5】動的接合パラメータの抽出を実施する。

【2】青色レーザ照射実験系の開発及びビームの最適化研究

【2-1】青色レーザ照射実験系の開発及び他の熱源による接合

青色レーザ波長を有する高出力レーザビームを用い、照射実験を行う。市販は 10 W 出力であり、本研究開発では、100 W 以上の出力を用い、世界最大の連続発振型青色レーザを開発し、使用した。

動的接合プロセスの採用に加え、既存レーザとの対比上約三倍の高吸収率を有する青色レーザビームを用いることで、板間を照射する際に、ビーム反射によって生じる樹脂表面ダメージを最大限抑制することを可能とし、また、接合部位に対し効率的な面加熱を実施した。本来レーザビームはビーム径を絞ることでその威力を発揮し様々な用途に用いられる。しかしながら、樹脂と金属の接合においては金属部の熔融温度まで加熱する照射エネルギー密度は必要とされない。樹脂表面の温度は分解点以上であるが過熱による樹脂ダメージは絶対に避けなければならず殊に GFRP 材のような表面樹脂層が僅か（凡そ 30 μ m）しかない素材においては過熱は致命傷となる。このため本接合法に求められるのは必要な接着面積全体を如何に均一且つ効率的に加熱するかであり、これを実現するためには瞬時に広面積に照射でき得るビームが必要となる。これを可能とする手段が青色のレーザビームであり、既存レーザ光源との対比上大きなビーム径において照射面積に均一且つ安定的な加熱を実施する上で大変有効的である。これにより、安定的且つ極めて高効率な接合を可能とし、圧倒的な発光コストの削減も可能とする。

青色レーザ等高効率レーザの照射ビームの最適化研究においては、吸収波長の有利な青色レーザの発光素子の集光により、接合部への照射レーザビーム品質（エネルギー密度分布等）の最適化に関する研究であり、以下三点を施策とした。

なお、本項においてレーザ熱源以外の熱源を利用した接合との優位性を示すための研究も実施した。

【2-2】既存色及び青色レーザ発光源の適用により青色レーザやその他波長を有するレーザビーム照射を実施することで青色レーザ等のビーム効果を明確化するとともに、

【2-3】レーザ発光素子の集光系の開発を行い、樹脂と金属の異種材接合を可能とするレーザ発振器を製作も視野に入れ研究開発を実施した。また【2-4】照射ビームの最適化制御系の開発により量産を想定した製品部材への照射を可能とし、本技術の量産技術化を目指す。

【3】異材接合部の品質等の評価に関する研究

本サブテーマでは、【3-1】リアルタイムモニタリング装置の研究をし、これを装着することにより非接合界面にあたる金属表面（レーザ照射面）の温度モニタリングを行い、これを界面温度の一定化に対する適応制御に用いた。この【3-2】適応制御技術の開発により生産中のリアルタイム品質保証による安定的な高品質接合を可能とする。また、

【3-3】接合部のマイクロ観察・分析・解析及び【3-4】接合部の強度等の評価を行い、これをエンジニアリングデータとすることで量産技術化後の【3-5】異材接合部の評価技

術の確立を目標とした。

【4】各種異材接合エンジニアリングデータの確立研究

【4-1】モデル材料・モデル構造での接合実験及び、これを【4-2】ライン実装の接合エンジニアリングデータを確立し、事業化に向けた技術開発完了を目標とした。

本計画の技術的目標は、以下の通り

異種材料（樹脂*金属）接合技術の確立

【1】異種材料（樹脂*金属）に対する動的接合

の【1-1】～【1-5】を実施することによる技術的目標値は

◆接合強度：せん断強度 $\geq$ 樹脂強度以上（例：PA 材において 2500 N/25 mm）
：剥離強度 $\geq$ 100 N/25 mm

JASO M 323 の 9.22(T 字剥離接着強さ試験)による

【2】青色レーザ照射実験系の開発及びビームの最適化研究

の【2-1】～【2-4】を実施することによる技術的目標値は

◆接合時間：接合速度は 1 mm/s 以内

◆青色レーザ発振：100 W 以上の出力にて連続発振可能な発振器の開発完了

【3】異材接合部の品質等の評価に関する研究

の【3-1】～【3-5】を実施することによる技術的目標値は

◆接合不良率：リアルタイムモニタリングにより接合品質不良率=0

【4】各種異材接合エンジニアリングデータの確立研究

の【4-1】～【4-2】を実施することによる技術的目標値は

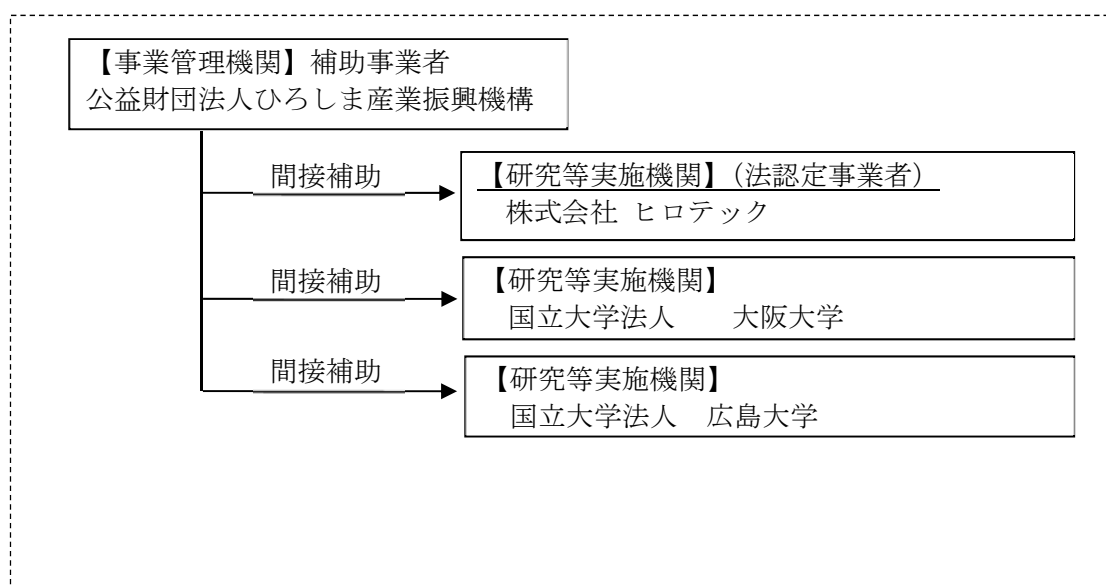
◆自動車用ドアシェル生産時間：

⇒1 分/枚を想定した接合部一点当たりの接合時間の実現

なお、ライン実装においては、当社㈱ヒロテックではこれまで川下メーカーの自動車用ドアの生産を一手に引き受け、高品質製品の納入に努めてきた。この度提案する金属と樹脂によるマルチマテリアルドアの生産実現に際しては、接合技術革新のみならず、これまで培われた生産技術や金型技術においても更なる創意が必要になると考える。その際たるものがドアシェルアウター材とインナー材のマリッジ以降のアフターヘムスポット溶接までのヘミング工程である。本提案の三次元動的接合プロセスは自動車用ドア生産においては、このドアシェルアウター材とインナー材の前述ヘミング工程において青色レーザによる照射を行い金属表面を加熱した後にヘミング加工による加圧密着を行うことにより完成される。

従って、これまでスチール材によるヘミング加工+その後のアフターヘムスポット溶接によって完成していたマリッジ以降の工程がその様相を大きく変えることとなる。ヘミング金型構造、レーザ照射を行うための要具・設備構成及び機構、すべてにおいて本項【4】にて新たな挑戦を行う必要があると考える。これら取り組みには、当社㈱ヒロテックの製造部門のみならずツーリング事業部門の参画が不可欠であり、㈱ヒロテック総力による取組みになる。しかしながら、この【三次元動的接合プロセス】は長年自動車用ドアにおいて高品質製品の生産・納品に努めてきた当社㈱ヒロテックによって培われた技術においてこそ完成させられるべきものである。

1-2 研究開発の実施体制



【総括研究代表者】(P L)
株式会社ヒロテック
生産技術研究所
主幹研究員 和鹿公則

【副総括研究代表者】(S L)
国立大学法人大阪大学
接合科学研究所
准教授 川人洋介

アドバイザー	
マツダ株式会社 技術研究所 革新研究創成部門 主幹研究員 杉本 幸弘 軽量化樹脂ドア構造及び樹脂金属接合に おける信頼性評価基準等に関する助言	東洋紡株式会社 総合研究所 エンプラ技術センター 部長 山下 勝久 使用樹脂に関する助言

当該研究開発の連絡窓口

(公益財団) ひろしま産業振興機構 研究開発支援センター

参事 神田 敏和

電話 : (082) 240-7712 FAX : (082) 242-7709

E-Mail : t-kanda@hiwave.or.jp

第2章 本論

2-1 異種材料（樹脂＊金属）に対する動的接合

2-1-1 自動車用ドアの模擬形状部材による三次元動的接合実験治具等の開発

2-1-2 特定の樹脂＊金属に対しヘム機構を有する三次元動的接合研究

併記

28年度は図6に示す動的接合ジグを用い、従来光LAMP接合法及び青色レーザー光による形状板での三次元動的接合実験を実施し、亜鉛メッキ鋼板、アルミ合金板等とPA材、GFRP・CFRP材との接合において目標の接合強度が得られた。しかしながら、自動車用ドアを想定した模擬形状部材を用いての接合強度等の研究を補完するため、【1-3】【1-4】【1-5】の実験を平成29年度においても引き続き実施した。

方法、結果及び考察

平成29年度は、図6に示すローラヘム機構を用いた接合JIG及び装置を設計製作し、自動車用ドアの一部形状部材を用い、従来光及び青色レーザー光を用いて接合実験を実施した。

また、接合に係るレーザー照射条件の制御範囲を明確化するため、【3】項にて述べる温度フィードバックシステム及びK型熱電対を用い、理想的な界面の温度条件を実現するためのデータ収集に取組んだ。

データ詳細は次項以降にまとめて記すが、本工法を用いることで研究目標として掲げた技術的目標を達成できると確信し、研究期間においては加味できなかった量産仕様に基づく要具研究を事業化に向けて本工法をより進化させる礎とすることができた。

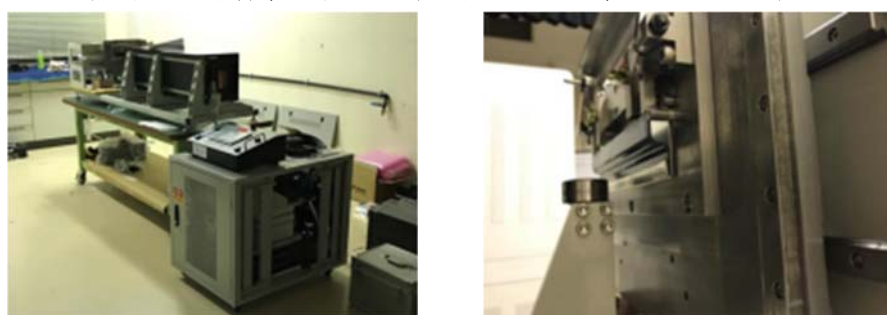


図6：ローラヘム機構を用いた青色レーザー照射装置及びJIG詳細

2-1-3 動的接合パラメータの抽出

前項にて記した装置・JIG及び、平成28年度までに製作した要具を用い、平板・形状部材による接合実験を行ないレーザー照射出力と接合強度の関係を採取し、これをプロセスウインドウとしてまとめた。

方法、結果及び考察

本項で採取した動的接合パラメータの多くは、【3】項での結果と相関が深いため【3】項にてまとめて記すこととする。

2-1-4 中括

本項の研究を実施することにより、従来のスチール製ドア製造工程を参考とし、抵抗スポット溶接をレーザー溶接に置き換え事業化に向け準備を進めることができることを改めて確認した。

また、三年の間に様々な製造プロセスを検討し、それに基づく要具を研究し接合実験を行なうことで従来明らかにされなかった樹脂と金属の接合原理の解明に一定の目処が立ったことは大変大きな収穫であったと考える。

2-2 青色レーザ照射実験系の開発及びビームの最適化研究

2-2-1 既存色及び青色レーザ発光源の適用

本項では従来近赤外光と青色レーザの有意差を明確にするための研究に注力した。
方法、結果及び考察

図6の要具と28年度までに完成させた青色レーザ装置を組み合わせることにより自動車用ドアの一部形状を模擬した形状部材を接合し従来光との差を比較評価した。また、別途製作した青色レーザ装置を用い、青色レーザによる金属吸収率への影響を確認した。

本項では青色レーザ照射による各種金属の吸収率への影響を記す。

図7に実験に用いた青色レーザ装置の概要を示す。

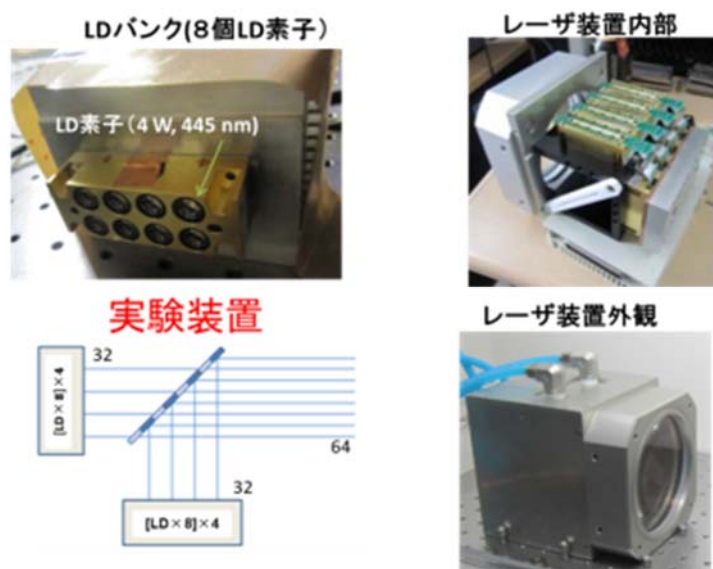


図7：吸収率評価に用いた青色レーザ装置

本レーザは最大出力が250W、波長が445nmの青色の可視光域のレーザであり、本青色レーザは出力が4W、波長が445nmのレーザダイオードを64個集め、レンズによって集光されている。

左上の画像に示すのはLD素子を8個集めたLDバンクである。

このLDバンクが装置内部に8個設置されており、装置の小型化のため右上の図のように2か所にわかれて、LDバンクが4個ずつ設置されている。

2か所に分かれているLDバンクを、このミラーを用いて一方向に集め、一方から照射された光は反射し、もう一方から照射された光は透過するように加工されている。

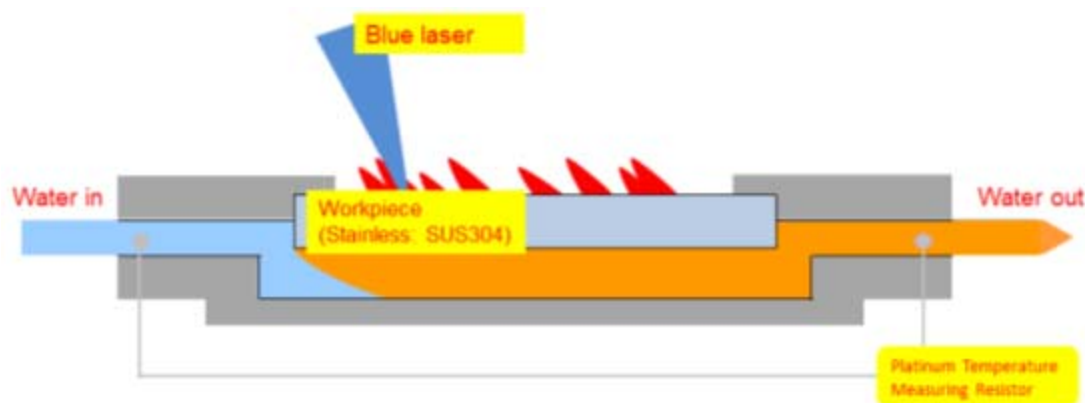


図8：カロリメトリック法概要

レーザの吸収率の測定法としてカロリメトリック法を用いた。
 カロリメトリック法はレーザ溶接時に材料に吸収された総熱量を水に写し取ることによって吸収率を測定する方法であり、治具内部に水を流し、レーザを照射、金属に熱として吸収されたエネルギーを水に写し取る。
 入口と出口で計測した温度より水の温度上昇を計算し、こちらの計算を行うことで吸収率を算出した。
 この装置により水が受けとった熱量をレーザにより試料に投入したエネルギーで割ることで吸収率を算出した。

$$\text{吸収率(\%)} = \frac{\text{水の比熱(J/kg K)} \times \text{水の質量流量(kg/s)} \times \text{温度差の積分値(K s)}}{\text{レーザパワー(W)} \times \text{レーザ照射時間(s)}} \times 100$$

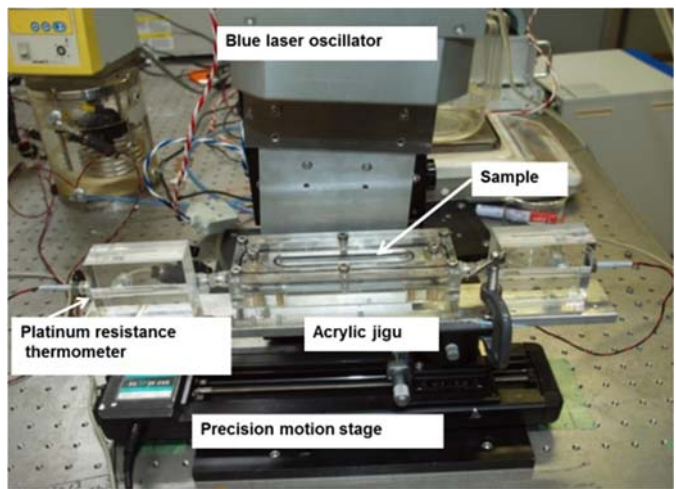


図 9：実際のカロリメトリック実験装置

図9に実際に用いた実験装置を示す。
 本装置の正確さを確かめるためニクロム線を加熱させることにより校正を行った。
 本装置は投入された熱量の95%が測定可能であることが確認された。そこで校正值として、逆数である1.05を算出した吸収率にかけることとした。なお、精度は±2%程度であった。

表4のとおり、青色レーザ照射による効果は、ステンレス鋼で約2.5倍、アルミニウムでは約1.5倍の吸収率向上が図れることがわかった。
 今回研究の柱の一つとした青色レーザは金属への吸収率向上という観点から大きな効果が得られ、これにより樹脂へのダメージ低減や低出力化によるコストダウンが期待できることが改めてわかった。

2-2-2 照射ビームの最適化制御系の継続研究

本項では、必要に応じ28年度に製作した集光光学系に関し追加・継続研究を行ないレーザビーム品質の最適化を図る計画にて進めたが、結果的には28年度完成した集光光学系によるビームが最適と判断し本レーザビームを採用するに至った。

Material	Experimental value
SUS304	70.4
Cu	67.9
A1050	29.6
SUS420J1	69.5

表 4：採取した青色レーザによる各金属の吸収率

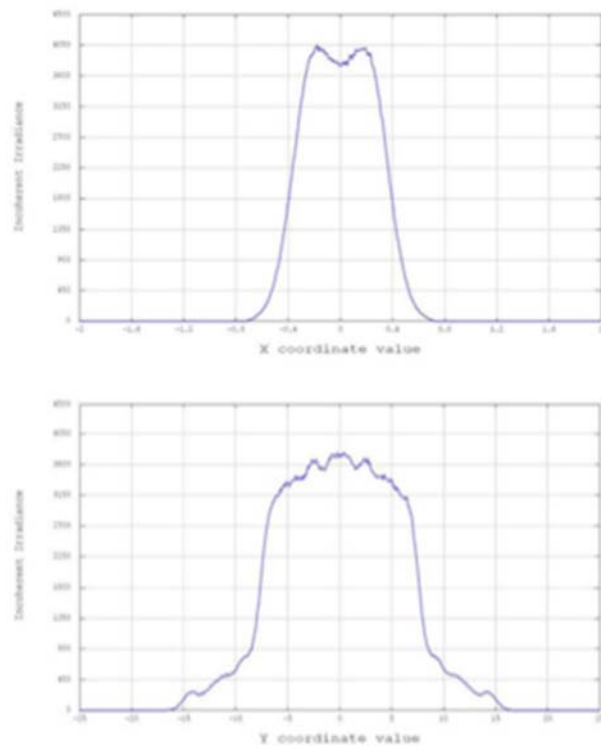


図 10：青色レーザービームプロファイル

2-2-3 中 括

青色レーザーは、報告のとおり金属への吸収率を大きく向上させることが改めて確認できた。

また、レーザー装置としての製造も行なえることが確認できた。

接合品質に及ぼす影響は、従来近赤外光との対比上、有意差はなくこれにより、ランニングコスト及び設備コストの削減につながり、最終的には顧客への製品コスト削減を可能とするアイテムであることが確認できたことは大きな実績であると判断する。

今回、基礎実験に重きを置き設備の設計製作を行なったが、補助対象期間が終わった後も、事業化に向け、量産設備への実装を可能とする青色レーザー設備の研究に取り組むこととした。

2-3 異種材料接合部の品質等の評価に関する研究

2-3-1 モニタリング技術の完成

本項では、28年度に製作したモニタリングシステムを用いた温度測定結果に基づき、新たにレーザ出力フィードバックシステムを購入し、レーザ照射中の金属表面温度を測定し、これと、接合界面に設置した熱電対による接合界面温度との相関を取りながら、レーザ照射による金属表面温度に閾値を儲け接合実験を行なうことにより接合品質の向上を図ると共に、ライン実装時のエンジニアリングデータとすることを目的に研究を実施した。

方法、結果及び考察

補助事業にて購入したMergenthaler社温度フィードバックシステムを27年度に購入したLazerline社製の半導体レーザ光学系に設置し、レーザ照射中の金属表面温度を測定し、得られた温度条件に基づきレーザ照射出力を補正する（適応制御）という手法にて金属表面を一定の温度に制御し加熱した。

なお、接合界面の温度については、接合界面金属表面にK型熱電対を設置しモニタリングした。

図11に鉄（SPCC）材 $t=0.8$ mmとGFRP $t=2.0$ mmを接合した際の各出力別接合強度を示す。

試験結果によると300 w時に最高強度を示し、出力を増すごとに強度が徐々に低下することがわかる。これは、レーザ出力を増し、界面の温度が上昇することで、樹脂の分解が進み、樹脂と金属の接合自体は容易になる反面、樹脂自体が内部破壊を起こすため、荷重に対し、樹脂破壊という形で接合体としての強度を低下させることを意味している。

また、加熱が不十分である場合は、適正温度に達した部位が少ない、樹脂と金属の接合点数が不足するために接合体としての強度を不足させる。従って、加熱法による樹脂と金属の接合は樹脂と金属の界面温度を一定範囲で均一化する必要があり、その為には、レーザ等による金属表面加熱状態を均一化する必要がある。

合わせて、アルミニウム合金（A5052 $t=1.0$ mm）とGFRP($t=2.0$)の接合強度を図12に示す。

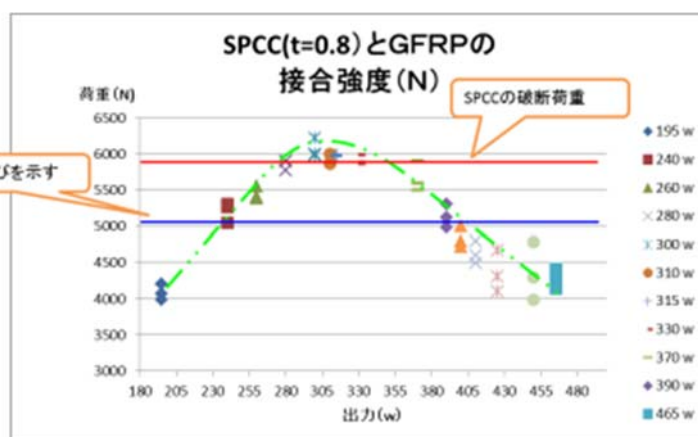


図 11: SPCC*GFRP プロセスウインドウ

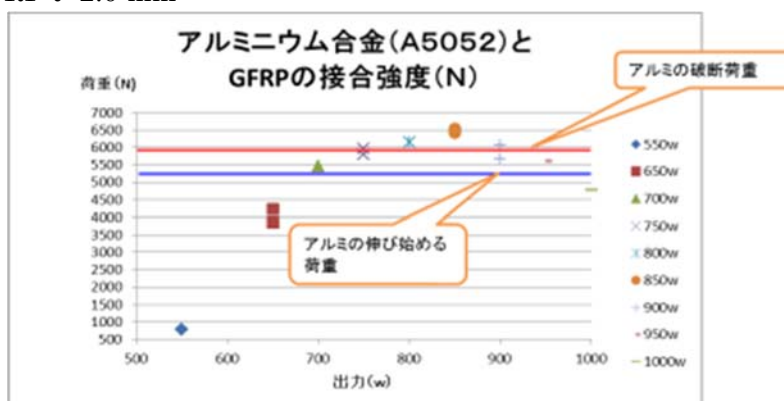


図 12: A5052*GFRP プロセスウインドウ

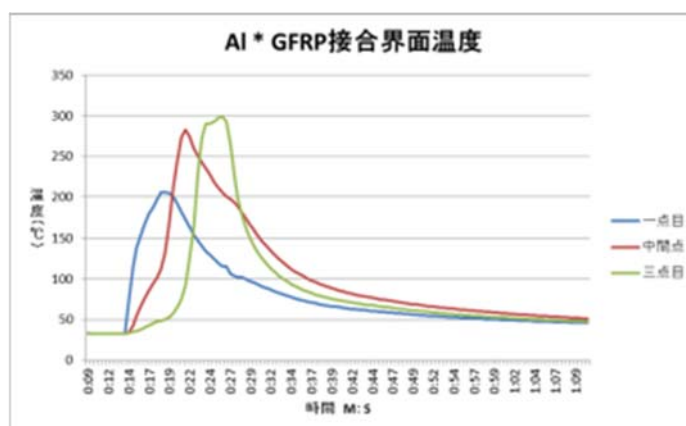


図 13: フィードバックのない状態での界面温度

本結果では、850 w照射時に6500 Nを示し、A5052が伸張し破断するほどの強度を得られた。

図13には、図12にて850 wで照射した場合の接合界面の温度を熱電対で測定した結果を示す。

接合の進行方向に3点の熱電対を設置し、測温を行なったが、接合開始部は200 °C程度しか上昇しておらず、中間点でも300 °Cに達していない。

要するに、適応制御を実施しなければ接合部の多くは実は接合が行われておらず、適温になった部位のみで強度を担保していることになる。

今回、図 12 のプロセスウインドウにて最高強度に達した試料を強制破壊し、実際に接合されている部位を確認したところ、接合の終点部のみで強度を担保していることがわかった。



図 14：最高強度品の強制破壊状態

上記において実際に接合されている部位の金属表面（照射部）を測定したところ、330 °Cであった。

また、熱電対を用いた界面温度計測した結果、接合されている部位の温度は325 °Cであった。

その為、レーザ照射部の温度を330 °Cとしてフィードバックを行なった。

※低温部位（430 °C以下）は2色センサーでは計測できないため1色にて計測。従って放射率の関係上、放射温度計での照射表面計測温度は絶対値ではない。

温度フィードバックを行なった場合の照射表面温度を図15に示す。



図 15：フィードバックによる照射表面温度

これに対し、温度フィードバックを行なった場合の界面温度を図16に示す。

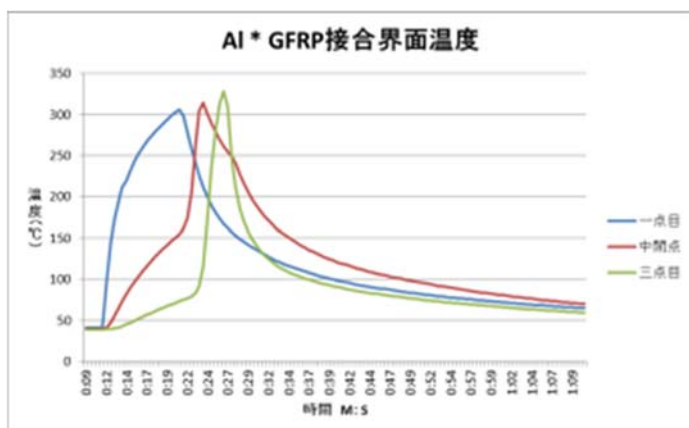


図 16：フィードバック時の界面温度

温度フィードバックを行なうことで界面全体が300℃～330℃範囲に収まっていることがわかった。

今回温度フィードバックを行なった試料は図14と同様に強制破壊を試みたが、接合範囲全体が接合され破壊に至らなかった。

2-3-2 接合部の強度等の評価

本項では、事業化に向け樹脂と金属の接合体において耐候試験を行なった結果を記す。

以下の条件に従いアルミニウム合金（A5052）とCFRP・GFRPを接合したものを塩水噴霧試験による耐食性を評価した。

塩水濃度 : 5%

噴霧量 : 1.4ml/h / 80cm²

雰囲気温度 : 35℃

噴霧時間 : 120h (5日間)

※試験条件は、JIS Z 2371に準拠



図 17 : A5052*CFRP



図 18 : A5052*GFRP

腐食減量を測定したところ両者に大きな差は生じなかった。

外観確認においては、外観腐食はCFRP>GFRPとなり、若干電食が生じていることが窺えたが、明確な差は確認できなかった。

2-3-3 異材接合部の評価技術の確立

本項においては、平板と樹脂を接合し引っ張り試験を実施した際の試料にかかる歪を可視化結果を記す。

図34・35には試験前後のひずみの状態を示す。

引張・圧縮共に樹脂、金属には生じていない。

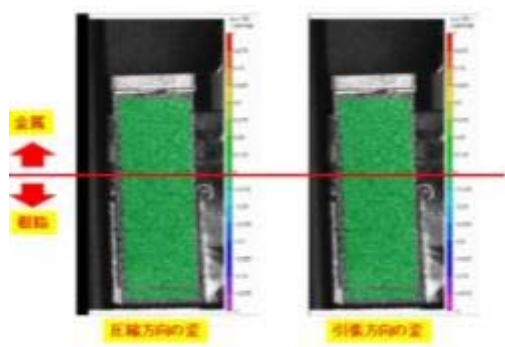


図 19：引張試験開始時の歪状態

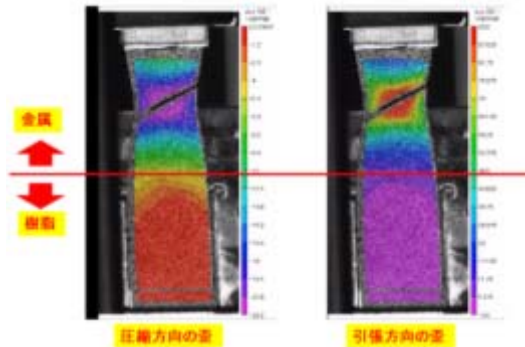


図 20：引張試験終了時の歪状態

A5052 $t=1.0$ mmとGFRPを接合しA5052が伸張し破断するまでの試料に生じる歪を可視化した。

本試験の結果からは、引張試験を実施した際に、接合部に係る歪（応力）は引張・圧縮とも、接合の最前線一箇所にかかり、接合面積全体は担保していないことが確認できる。これにより、せん断方向の荷重については、接合面積は大きな効果（影響）を持たず、せん断方向の荷重を支える最前線の接合品質が非常に重要なことがわかった。

【3】項及び【1】【2】項の研究により樹脂と金属の接合品質を評価する上で、以下の項目が非常に重要であることを確認した。

- ① 板間の間隙を制御する
- ② 接合界面に対する酸素の侵入を遮断する
- ③ 加熱温度を適正範囲に制御する

また、上記を管理し施工を安定化させることで従来の抵抗スポット溶接（RSW）によるスチールドア同様、プロセス管理により品質保証が可能であることも確認した。板間の間隙制御においては、ローラーヘム加工を併用することで、樹脂と金属の接合界面に間隙を生じさせることなく接合が可能であることを本研究において確認をすることができた。また、②の接合界面に対する酸素の侵入遮断に関しては、接合プロセス中にて接合界面に間隙を生じさせない状態を確保することで、外部からの大気混入を抑制できることを合わせて確認することができた。③においては加熱温度のモニタリング及びレーザー出力のフィードバック制御にて対応可能であることが確認できた。

2-4 各種異材接合エンジニアリングデータの確立研究

2-4-1 モデル材料・モデル構造での接合実験

本項では、自動車用ドアの一部形状部材をドアインナーを模擬しマトリックス樹脂であるPA6及びGFRP、CFRPで製作し、ドアアウターを模擬し合金化溶融亜鉛めっき鋼板及びアルミニウム合金（A5052）で製作したものを従来光及び青色レーザを用いてローラーヘムを併用した接合装置にて接合した。

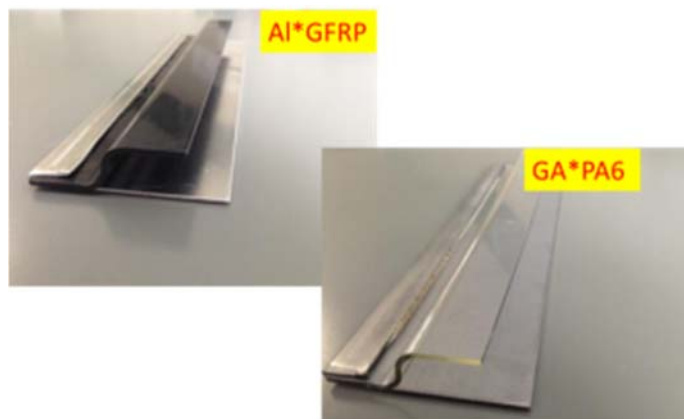


図 21：形状部材による接合品

図21の試料を用い、ドアの側突を模擬した潰し試験を実施し、ドア形状部材が荷重により変形した際の接合部への影響を確認した。

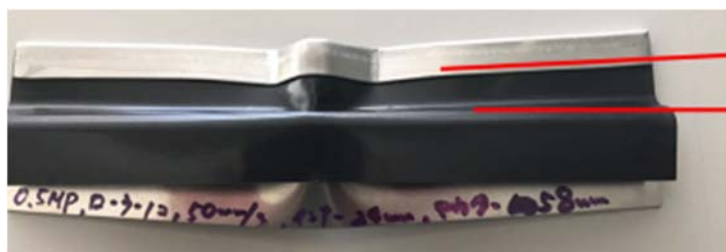


図 22：未接合品による潰し実験試料



図 23：接合品による潰し実験試料

図22・23のとおり、接合を行わず、ヘミング加工のみを行なった場合、側突を模擬した荷重を加えると、ヘミング部の樹脂と金属が変形に伴って抜けてくることがわかる、他方、接合が適切に行われている場合、図23のとおり、樹脂と金属の抜けは生じず、形状部材が大きく変形しても接合部での損傷はない。

なお、接合に係るレーザ出力については、サブテーマ【3】同様、自動車用ドアの一部形状を模擬した部材を用い接合時のレーザ照射部位の温度測定を実施し、本データを基に温度フィードバックを行なうことでレーザ出力制御により安定した接合品質の確保を実施した。

2-4-2 ライン実装の接合エンジニアリングデータの確立

本項では、各出力ごとの接合強度をプロセスウインドウとし、各々の条件による界面温度を熱電対により測定し、同様に照射面温度を非接触温度モニターにて測定した。こ

れにより照射面温度の制御範囲を決定しこれをエンジニアリングデータとした。

※図11・12・19・15・16参照

上記の基づき、レーザ照射時の接合面の温度制御範囲70℃以内と決定した。

また、事業化を目標とした場合、川下企業である自動車メーカーに納品後、塗装工程における加熱・乾燥に対応しなければならない。

そこで、対象樹脂をドアインナーとしてGFRP、ドアアウターをアルミニウム合金（A5052）を想定し、平板による試料と形状部材による試料を用い、加熱・乾燥後の品質確認を実施した。

図24に、アルミニウム合金（A5052） $t=1.0$ とGFRP $t=2.0$ の平板を接合し、180℃にて1時間加熱保持した後120分空冷し、その後に引張試験を実施した結果を示す。

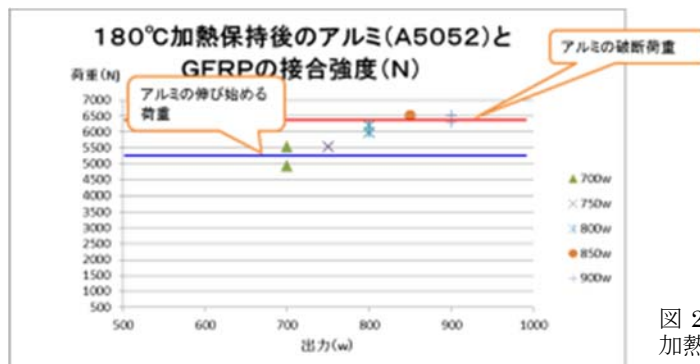


図 24 : アルミと GFRP 接合品による加熱（180℃ 1 H）後引張実験結果

また、図25にアルミニウム合金（A5052） $t=1.0$ とGFRP $t=2.0$ の形状部材を接合し、180℃にて1時間加熱保持した後120分空冷し、その後に潰し試験を実施した外観を示す。

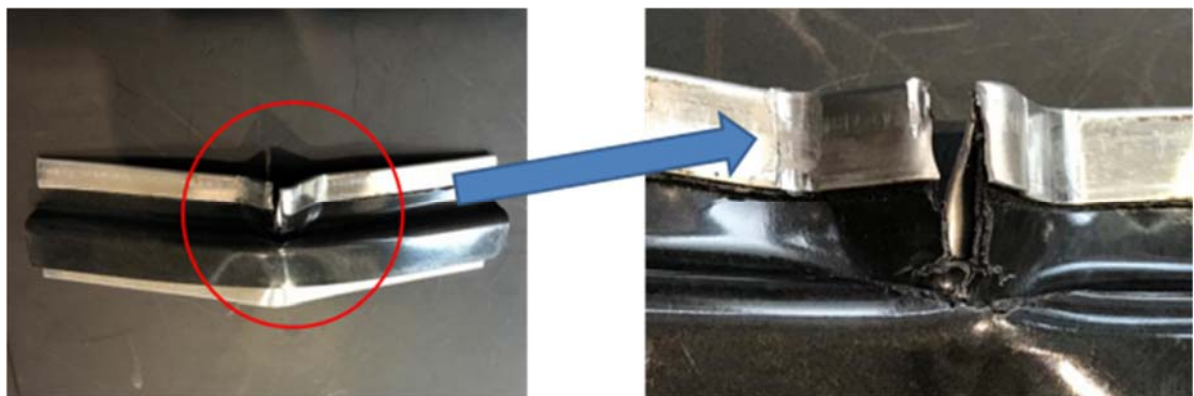


図 25 : アルミと GFRP 接合品による加熱（180℃ 1 H）後潰し実験結果

図24・25の結果から、本研究による工法を用いアルミとGFRPを接合した場合、180℃に加熱保持（1時間）しても、接合部の強度は低下することがなく、潰し試験を実施しても母材が破断するほどの衝撃を受けても接合部が剥離などを起こさないことが確認された。

第3章 全体総括

3-1 研究開発の成果

平成27年度から実施した本研究において、樹脂と金属による軽量自動車用ドアの開発に係る、接合技術の確立が行えた。
まず、初年度である平成27年度において、各種樹脂と各種金属をレーザをはじめアーク・抵抗スポット溶接など様々な溶接熱源を用い、技術的目標である接合強度を確保することに成功した。
次年度では、主に青色レーザの発振及び集光技術の開発に注力し、合わせて各種化学分析や接合界面観察を行ない、また、原理計算を用いた接合原理の解明に取り組み、その相当量を解明した。
最終年度においては、第二章で述べたとおり、自動車用ドアを軽量化するための樹脂と金属による自動車用ドア接合技術の確立を果たした。

3-2 今後の課題及び解決策

今年度をもって補助事業は完了するが、本技術を事業化に結びつけるためには解決すべき課題がある。本研究においては青色レーザを用い、接合研究を行ない、その優位性も明らかにしてきた。
しかし、本事業にて開発した青色レーザは、研究開発用であるが故、筐体も巨大であり且つ固定式である。
※図26参照



図26: 青色レーザ装置

本工法をライン実装し、生産を行なっていくためには、光学系を小型化し、ロボットにてハンドリング可能な形にモディファイする必要がある。
補助事業終了後の追加研究項目として、本内容を掲げる。

3-3 事業化展開について

本研究の事業化計画は以下のとおりとしている。

まずは、本年2018年度に図27に示す樹脂と金属のドアを試作し、川下企業であるマツダ様へ評価をお願いし、製品化の実現に向け諸々の評価研究を引き続き実施する。
図27はCFRPをインナーパネルとし、アルミニウム合金をアウターパネルとしたものであるが、ヘミング部他の異種材接合はリベットで実施したものである。これを本研究に基づく動的直接接合にて完成させたものを試作品としてマツダ様へ提供する。

製品等の名称	アルミニウム合金（アウターパネル）とGFRP（インナーパネル）による自動車用ハイブリッドドア				
開発事業者	株式会社ヒロテック				
想定するサンプル出先	マツダ株式会社				
事業年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
サンプルの出発	→	→	→	→	→
客先にて評価	→	→	→	→	→
追加研究	→	→	→	→	→
設備投資	→	→	→	→	→
製品等の生産	→	→	→	→	→
製品等の販売	→	→	→	→	→
特許出願	→	→	→	→	→
出願公開	→	→	→	→	→
特許権設定	→	→	→	→	→
ライセンス付与	→	→	→	→	→
売上高(千円)					9,700,000
販売数量(枚)					1,000,000
売上高の根拠	2022年立ち上がり年産250,000台/年に対し、本技術を活用、4枚/台のドアとして、1,000,000枚/年の生産。異材ハイブリッドドアを@9,700円と見積し、上記売上とした。				



図27:自社製作した樹脂と金属の複合素材ドア