平成26年度

ものづくり中小企業・小規模事業者等連携事業創造促進事業 戦略的基盤技術高度化支援事業

「自動車部品等の軽量化を促進するためのメタルと炭素繊維強化プラス チックス(CFRP)のレーザを用いる異材接合技術のシステム開発」

研究開発成果等報告書概要版

平成27年 3月

- 委託者 中部経済産業局
- 委託先 公益財団法人名古屋産業科学研究所

第1章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-3 成果概要	9
【1】ビーム整形光学ヘッドの開発	9
【2】品質保証技術の確立	
【3】事業化に向けた検討	
第2章 本論	
【1】ビーム整形光学ヘッドの開発	
【1-1】温度シミュレーション	
【1-2】レーザ溶着条件の最適化	
【1-3】 CFRPの損傷しきい値評価	
【1-5】ビーム整形によるレーザプロファイルの最適化	
【1-6】レーザ溶着条件の最適化とデータベースの構築	53
【1-7】システム構想構築	
【2】品質保証技術の確立	
【2-1】レーザ溶着接合部の接合強度評価技術の開発	
(1) CFRP-各種金属接着接合材の接合強度特性	
【2-2】レーザ溶着接合部の超音波映像化技術適用性評価	65
【3】事業化に向けた検討	
最終章 全体総括	

目 次

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1)研究開発の背景・研究目的

自動車の軽量化は燃費の向上、省エネルギーのための必須要件であり、最も軽量化 効果が大きいとされる炭素繊維強化プラスチックス(CFRP)の利用が検討されて いる。

本事業では『エラストマーをインサート材として用いる異種材料のレーザ接合技術』 を応用して、金属材料とCFRPの接合技術を完成させるためのシステム開発を目指 し、また接合部における品質評価方法の開発に取り組む。



図1-1 研究開発の背景

2)研究の概要

●現状

現段階で実用化されている接合技術

- ・リベットやボルトによる機械締結
- ・構造用接着剤を用いた接着
- ・これらの併用

●問題点

接合にかかる費用、時間、信頼性において、現状の接合方法はいずれも、量産方法として は十分ではない。



図1-2 従来技術と開発技術

●アプローチ方法

・有望シーズ技術「異種部材の接合方法及び異種部材接合品」(特許番号第4771371号)

を、高速かつ高品位な接合技術に展開して、量産を可能とするレーザ溶着技術を開発す る。

• 不良品を選別する品質保証技術の研究開発を行う。

●研究開発の目標

研究開発の目標としては、レーザ溶着の生産性を向上するため、

①加熱の均質化を実現するビーム整形光学ヘッドを開発する。

- ・CFRP複合層の熱変質がなく、接合部の破壊モードがエラストマー層または樹脂
 層の凝集破壊となるレーザ溶着条件を確定する。
- ・溶着条件の下で、接合巾10mm 以上、溶着速度1m/min 以上を達成することに より生産性を確保する。



また、接合の品質を確認するため、

②CFRPのレーザ溶着において不良品を識別可能な品質保証技術を開発する。

- ・接合部の劣化・損傷過程を明らかにし、接合強度評価技術を提案する。
- ・接合部の超音波伝搬映像化探傷法による接着不良検出の可能性を明らかにし、非接触型の非破壊評価手法を提案する。



図1-4 開発目標



図1-5 研究開発の概要

1-2 研究体制

① 研究組織(全体)



2 事業管理機関

公益財団法人名古屋産業科学研究所

再委託先



③ 再委託先

前田工業株式会社



独立行政法人産業技術総合研究所



岡山県工業技術センター



国立大学法人大阪大学



④ 研究員

前田工業株式会社

氏名	所属・役職			
三瓶 和久	レーザ事業部長			
松尾 教利	レーザ事業部 商品開発課			
塚原 敏明	レーザ事業部 商品開発課			
鳥越 功	レーザ事業部 製造課			
笠原 圭太	レーザ事業部 製造課			

独立行政法人産業総合研究所

氏名	所属・役職
新納 弘之	環境化学技術研究部門総括研究主幹
佐藤 正健	環境化学技術研究部門 レーザー化学プロセスグループ 主任研究員
卜部 啓	計測フロンティア研究部門 構造物画像診断グループ 主任研究員
鈴木 隆之	先進製造プロセス研究部門 機能・構造予測検証研究グループ長
原田 祥久	先進製造プロセス研究部門 機能・構造予測検証研究グループ 主任研究員

岡山県工業技術センター

氏名	所属・役職			
水戸岡 豊	研究開発部金属・加工グループ			
中西 亮太	研究開発部 金属・加工グループ			

国立大学法人大阪大学

氏名	所属・役職			
大村 悦二	大学院 工学研究科 ビジネスエンジニアリング専攻 教授			

⑤ アドバイザー

トヨタ自動車株式会社

氏名	所属・役職				
清野 誉晃	車両品質生技部 車両開発推進室 グループ長				
氏名	所属・役職				
清水 信彦	オートモーティブセンター 主席部員				

⑥ 事業管理機関

公益財団法人名古屋産業科学研究所

	氏 名	所属・役職			
久野	茂正	中部TLO	産学連携支援担当部長		
三浦	眞	中部TLO	事務員		

1-3 成果概要

【1】ビーム整形光学ヘッドの開発

【1-1】温度シミュレーション

移動任意分布熱源による無限平板の準定常温度分布の理論式を導出し、それに基づいて作 成した数値計算プログラムを用いて、適切と思われる熱源分布形状の提案を行った。具体的 には、16mm×16mmのレーザビームを1000mm/minで移動させる場合に、板 厚2mmのA5052、SUS304およびS35Cの平板の裏面温度が、幅10mmの範 囲でほぼ均一になるような矩形U字分布熱源(ここでは理想熱源と呼ぶ)の強度分布を理論的 に求めた。これら理想熱源に近い強度分布は、分岐型回折光学素子(DOE)によって実現 されるが、分岐型DOEで得られる熱源分布で裏面温度が実際はどのようになるかを、DO Eの設計値に基づいて解析した。

その結果、当初製作された分岐型DOEは、実レーザ波長(940 nm)と異なる波長 (985 nm)で設計されていたために、裏面温度の測定結果が最高温度の予想値より 10℃程度高くなったことをまず理論的に示した。この結果を踏まえてSUS用熱源分布の 再提案を行った。また、炭素鋼用熱源分布の提案も行った。その際、分岐数の少ないDOE の検討も必要と判断し、これまでの16×16分岐DOEに替わる12×12分岐DOEを 用いる新たな理想熱源も提案した。さらに、有限要素解析ソフトANSYSによってシミュ レーションして、解析結果の妥当性を検証するとともに、鋼材、エラストマー、CFRPの3 層から成る積層材での熱伝導解析も行って、提案した熱源の有用性を確認した。

【1-2】 レーザ溶着条件の最適化

接合対象とする金属材料にビーム整形光学ヘッドから出射される分岐型DOEで整形したU 字のビームプロファイルのレーザ光を照射し、サーモグラフィーで温度分布を計測し、温度分 布の均質化効果を確認した。その結果、ステンレス鋼板;SUS304、アルミ板 A5052、 鋼板SPC280ともに、接合幅の目標値として設定している10mm 幅の温度分布を30℃ 以内に均質化できることを確認した。

CFRP板とステンレス鋼;SUS304板の間に10mm 幅のエラストマーシートを挟み、 ビーム整形後のレーザ光をステンレス鋼SUS304に照射し、作製した試験片の引張試験を 実施し、加工条件と引張り強度の関係から最適な溶着条件を求めた。

ビーム整形したレーザ光により均一加熱することで目標とする10MPaの強度が得られ、破

9

断形態が凝集破壊となることを明らかにした。同様の方法で、アルミ板;A5052、鋼板; SCP280についても、ビーム整形したレーザ光により均一加熱することで目標とする 10MPaの強度が得られ、破断形態も目標とする凝集破壊とすることができた。溶着強度が最 大となる適正条件範囲はステンレス鋼板、アルミ板、鋼板とも材料の接合面の温度が300~ 400℃の間に存在することが明らかにできた。

【1-3】 CFRPの損傷しきい値評価

ビーム整形光学ヘッドを用いて温度分布を均質化したビームプロファイルを照射したCFRP 加工試料を用い、レーザ照射部位のCFRP表面状態について、平成24年度は走査型電子顕 微鏡を用いた評価、平成25年度は三次元顕微鏡(3Dプロファイラー)等を用いた評価を行 い、CFRP試料の損傷しきい値について明確化することができた。このとき、過入熱状態で はエラストマー層にCFRP層成分が混入していることが判明した。そこで、平成26年度は、 剥離後のエラストマー層表面の全反射型赤外吸収測定を行うことで、エラストマー層へのCF RP層成分の混入状況を詳細に化学分析し、接合メカニズムを解明した。これらの損傷状態と レーザの照射条件を高精度かつ系統的に比較した結果から、精度を向上させたCFRP試料の 損傷しきい値を明確化し、最適ビームプロファイルの設定に貢献できた。

表1-1 CFRPレーザ接合材(新DOE、3kW)での接合面の状況

ビーム走査速度		0.8 m/min	0.9 m/min	1.0m/min	1.1 m/min	1.2 m/min
接合面の剥離状況		エラストマ層内の凝 集剥離	エラストマ層内の凝 集剥離	エラストマ層内の 凝集剥離	エラストマ層内の凝 集剥離	CFRPとエラストマ層 での <u>界面剥離</u>
剥離表面(CFRP側)	検出	あり	あり	あり	あり	あり
でのエラストマ層の検 出	強度	小	中	大	大	微量
剥離表面でのCRRP 樹脂層の混入状態	KRS-5	あり	僅かに あり	なし	なし	あり
	Ge	僅かに あり	なし	なし	なし	あり
考 察 (CFRPの損傷閾値との関係)		損傷閾値超過 (過入熱状態)	損傷閾値超過 (やや過入熱状態)	損傷閾値近傍	良好な接着特性を 得る適正領域	入熱不足

ビーム走査速度 1.0~0.9m/minがCFRPの損傷しきい値と判明

◎CFRP-A5052レーザー接合材(新DOE, 3kW) (ビーム整形光学ヘッドを用いて温度分布を均質化したプロファイルにて照射)

ビーム走査速度		0.9 m/min	1.0m/min	1.2 m/min
接合面の剥離状況		エラストマ層内の 凝集剥離	エラストマ層内の 凝集剥離	エラストマ層内の凝集剥離 (部分的に界面剥離)
剥離表面(CFRP側) でのエラストマ層の検 出	検出	あり	あり	あり
	強度	中	大	大
剥離表面でのCRRP 樹脂層の混入状態	KRS-5	なし	なし	ごく僅かに あり
	Ge	-	-	ごくごく僅かに あり
考 察 (CFRPの損傷閾値との関係)		損傷閾値最近傍	損傷閾値近傍	良好な接着特性を 得る適正領域

ビーム走査速度 0.9m/min近傍がCFRPの損傷しきい値と推定

【1-4】溶着状態の評価・改良

インサート材として、スチレン系エラストマーおよびポリエステル系エラストマーを用い、 各種熱可塑性CFRPに対する接合性を評価し、基本的には、接合性は、エラストマーと熱 可塑性樹脂間の相溶性に従うことを明らかにした。但し、非相溶性にもかかわらず接合強度 が高いものがあり、これについては、詳細な断面観察の結果、エラストマーがマトリックス の樹脂でなく、繊維を覆う成分と反応していることを確認した。

また、エラストマーの金属との接合性について、ステンレスと比較して、アルミニウム合 金では高い接合力が得られないことから、表面処理およびレーザ表面改質を行い、反応性を 高めることに成功し、目標となる接合強度をクリアした。

【1-5】 ビーム整形によるレーザプロファイルの最適化

ステンレス鋼:SUS304を対象に、温度シミュレーションにより求められた均質加熱 を実現するためのビームプロファイルを、分岐型DOEを設計、製作し、具現化した。また、 この分岐型DOEを搭載するビーム整形光学ヘッドとレーザ出力をコントロールするパワー コントローラを設計、製作した。半導体レーザから出射されたトップハットのレーザ光が分 岐型DOEを通すことで目標とする16×16分岐のU型のビームプロファイルのレーザ光 に整形されていることを確認した。

同様の方法で、アルミ板: A5052、鋼板: SPC280についても、シミュレーショ ンで求めた均質加熱を実現するためのビームプロファイルを具現化するために、分岐型 DO Eを設計、製作し、目標とするU型のビームプロファイルのレーザ光に整形されることを確 認した。なお、アルミ板: A5052用はステンレス鋼と同じ16×16分岐としたが、鋼 板: SCP280については中央部に発生するレーザ光のピークの低減策として分割数を 12×12分割とした。この対策により中央部に発生するレーザ光のピークが低減されるこ とを確認した。

【1-6】 レーザ溶着条件の最適化とデータベースの構築

今回の研究開発ではPAを基材とする熱可塑製CFRPを主として使用したが、より幅広 い領域での適用を可能とするために基材をPPS、PP、ABS とした熱可塑製CFRPと SUS304のレーザ溶着性を評価した。また、ステンレス鋼:SUS304、アルミ:A 5052、鋼板:SCP280について板厚1mm、2mm、3mm について最適なレーザ 溶着条件を求めレーザ溶着条件一覧とデータシートとしてまとめデータベースを構築した。

【1-7】システム構想構築

ビーム整形ヘッドとパワーコントローラを3軸NC加工機に接続してNC加工システムと してシステムアップし、本研究開発のレーザ溶着加工設備として各種のレーザ溶着試験片を 作成した。

軽量材としてのCFRPは、軽量化効果の大きいフード、ルーフ等の大型のボデーパネル への適用が想定される。そこで、大型部品のフレキシブルなレーザ溶着加工を可能とするた め、ビーム整形ヘッドとパワーコントローラを多関節ロボットに接続した3次元加工システ ムとしてシステムアップした。また、販売促進用のツールとして使用できるように多関節ロ ボットシステムによるCFRPとステンレス鋼のレーザ溶着加工の動画を撮影した。

【2】品質保証技術の確立

【2-1】レーザ溶着接合部の接合強度評価技術の開発

本サブテーマは、レーザ溶着により作成したCFRPと金属接合材を用いて、JISK6 850、JISK6864規格に準拠した引張試験および疲労試験を行い、応力、ひずみ、引 張せん断強度および疲労特性を評価するとともに、そのマクロ・ミクロフラクトグラフィ的検 討により損傷・劣化過程を明らかにすることを目的とした。各種金属接着接合材の結果から、 金属の物性により接合界面でのひずみの状態が異なることが要因でせん断強度に差が見られる ことを明らかにした。本事業で開発したビーム整形光学ヘッドを用いてレーザ溶着した接合材 について引張試験および疲労試験を行った結果、最適な加工速度で作成した接合材では12 MPaを超えるせん断強度が得られ、良好な疲労強度も得られることがわかった(図1-6、図 1-7参照)。また、その破面観察から、最適な加工速度の試験片では、主に接着層の凝集破壊 が支配的である一方、加工速度が最適条件から外れた試験片では、主に接合界面での界面剥離 が支配的な因子であることを明らかにした。

12



図1-6 CFRP-SUS304レーザ溶着接合材のせん断強度とその破面観察



図1-7 CFRP-SUS304レーザ溶着接合材の疲労寿命曲線

【2-2】 レーザ溶着接合部の超音波映像化技術適用性評価

本サブテーマは、超音波伝搬映像化探傷法によるレーザ溶着接合部の探傷実験を行い、非接触型非破壊評価手法としてのレーザ溶着部への適用可能性を明らかにすることを目的とした。 まず、金属/熱可塑性CFRP接合部の映像化のための、超音波受信角、励起用レーザ照射エ ネルギー、励起・受信位置等の最適条件を実験により明らかにした。次にモデル試験体につい て映像化実験を行い、超音波板波映像から面内で5 mm 平方以上の欠陥が確実に検出可能で、 1 mm 平方でも検出可能性があることが分かった。続いて本事業で開発されたビーム整形光学 ヘッドを用い入熱条件を変えてレーザ溶着された試験体について映像化実験を行った。その結 果、図1-8のように入熱不足に伴う溶着不良(不溶着)部が超音波板波の減衰として検出可能 であり、過入熱によるエラストマー流失に起因すると思われる溶着不良も同様に検出可能であ ることが明らかとなった。更に、超音波探傷法として一般的な水浸超音波探傷法による試験を 実施し伝搬映像との比較検証の結果、図1-9のように伝搬映像や接合部状態と良好に対応す る場合もあったが、過入熱の試験体を中心に対応が良好でない場合が見られた。これは接合部 への水侵入が主な原因と考えられる。以上により、非接触非破壊型の溶着不良検出手法として この方法の有効性が明らかとなった。



図1-8 入熱不足による溶着不良部分のあるCFRP/SUS溶着試験体の 超音波伝搬映像と最大振幅画像(760 kHz)、及び溶着部写真



【3】事業化に向けた検討

本研究開発のレーザ溶着技術の目標とした接合幅10mmを1m/min以上の加工速度での接 合は達成されており、第81回レーザ加工学会講演会(2014年5月28日開催)、機械学会 セミナー(2015年2月12日開催)等の各種講演会、セミナーでの本開発技術の紹介活動 を行ってきた。また、中部経済局の支援を受けてTECH Biz EXPO 2014への サポインコーナーに出展し、6社に個別に技術プレゼンを実施する機会をいただき、2社に技 術資料を送付させていただいた。

このように宣伝活度を行いながら関係各社からの情報収集を行ってきた。本開発技術への関 心は高いがヒアリングした各社とも現在は技術調査の段階であり、製品のターゲットが具体化 して開発がスタートするためには、まだまだ時間が必要との認識である。

弊社のホームページでも本技術を紹介しており、多関節ロボットシステムの動画も掲載して

宣伝活動に当てている。今後も講演会、展示会等の機会を活用してサンプル供試、共同開発と フェーズアップしていくための宣伝活度を継続して進めていく。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

前田工業株式会社 レーザ事業部長 三瓶 和久 電話:052-604-8650 FAX:052-601-6353 E-Mail <u>mikame@maeda-kogyo.co.jp</u>

第2章 本論

【1】ビーム整形光学ヘッドの開発

【1-1】温度シミュレーション

温度シミュレーションは、異材接合に最適なレーザビームのプロファイルを見出し、提案 することを目的としている。この目的を達成するため、理論解析と数値計算の二つのアプ ローチにより最適値を探索した。

まず理論解析によるアプローチとして、温度分布の理論式に基づいて強度分布の最適解(最 適に近いと思われる強度分布)を求めた。具体的には、移動任意分布熱源による無限平板の準 定常温度分布の理論式を導出し、それに基づいて作成した数値計算プログラムを用いて、適 切と思われる熱源分布形状(以下、理想熱源と呼ぶ)の提案を行った。当初の提案は、16 ×16分割矩形熱源で、熱源分布は以下のとおりである。ここで、U(x)は矩形関数である。

SUS用: $w(x, y) = U(x)(0.4y^6 + 0.6)$ 、Al合金用: $w(x, y) = U(x)(0.8y^6 + 0.2)$

提案した分布熱源に近い強度分布は、分岐型回折光学素子(DOE)によって実現される が、理想熱源と厳密には異なる。そこで、分岐型DOEで得られる熱源分布を用いて、ねら い通りの温度分布が得られるかを、同様に熱伝導解析によって確認した。

つづいて、設計・作製された分岐型DOEによる温度測定実験結果と比較することで、提 案した熱源分布の妥当性を検証した。その結果を踏まえて、新たな分岐型DOE用分布熱源 U(x)(0.45y⁶+0.55)をSUS用に提案した。炭素鋼用には、U(x)(0.65y⁶+0.35)を提案す るとともに、分岐数の少ないDOEの検討も必要との判断から、12×12分岐DOE用と してU(x)(0.6y⁶+0.4)も提案した。一方で、材料が無限平板であるとして導出した温度上昇 の解析解に基づいて提案した一連の分布熱源の提案が妥当であるか、有限要素解析ソフト ANSYS によって再確認した。さらには、鋼材(SUS304、S35C)と、エラスト マー、CFRPの3層からなる積層板表面上を矩形し字分布熱源が移動したときの熱伝導解 析を、同じく ANSYS を用いて行って、提案した熱源の有用性を確認した。以下、研究内容 を詳述する。

(1) 移動任意分布熱源による無限平板の準定常温度分布の理論式

全パワーがW で、図2-1のように、

$$W = \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} W_{i,j}$$
(1)

17



図2-1 任意分布熱源モデル

である任意分布熱源が、表面z=0をx軸に沿って速度vで移動するとき、定常状態に達したときの無限平板(板厚L)の温度上昇の理論式は

$$T(x, y, L) = \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} \frac{\kappa W_{i,j}}{16a^2 LK} \sum_{n=0}^{\infty} c_n \cos n\pi \int_0^{\infty} \exp\left[-(n\pi)^2 \frac{\kappa\tau}{L^2}\right] \\ \times \left[\operatorname{erf} \frac{(x - \xi_i) + a + v\tau}{2\sqrt{\kappa\tau}} - \operatorname{erf} \frac{(x - \xi_i) - a + v\tau}{2\sqrt{\kappa\tau}} \right] \\ \times \left[\operatorname{erf} \frac{(y - \eta_j) + a}{2\sqrt{\kappa\tau}} - \operatorname{erf} \frac{(y - \eta_j) - a}{2\sqrt{\kappa\tau}} \right] d\tau$$
(3)

である。これをまず導出した。式(3)において、

$$c_0 = 1, \quad c_1 = c_2 = c_3 = \dots = 2$$
 (4)

であり、z軸は、表面をz=0として板厚方向に正をとっている。Kは熱伝導率、 κ は熱拡 散率である。

(2) 当初提案したU字分布熱源とSUS304無限平板の表裏面温度上昇

まず、無限平板の裏面温度を比較的均一にするには、矩形U字分布熱源が適切であること を見出した。そこで、16mm×16mmの矩形 U 字分布熱源を1000mm/min で移動 させる場合に、板厚2mmのSUS304平板の裏面温度が、幅10mmの範囲でほぼ均一 になるような矩形U字分布熱源を、同様に式(3)に基づいて探索した。その結果、 M = N = 16の場合、 $w(x, y) = U(x)(0.4y^6 + 0.6)$ が適切な分布熱源であるとして提案した。 ここで、U(x)は矩形関数である。図2-2に、W = 750 Wの場合のSUS304平板の表 裏面温度分布を示す。



(a) 表面温度上昇 (b) 裏面温度上昇 図 2 - 2 $w(x, y) = U(x)(0.4y^6 + 0.6)$ のとき、板厚 2 mm のSUS304無限平板の 温度上昇(W=750 W、v=1000 mm/minの場合)

この結果を踏まえて、住友電工㈱によってSUS用DOEが設計・製作された。この SUS 用DOE設計値によって得られる熱源分布を図2-3に、この熱源分布によるSUS304 無限平板の温度上昇を、図2-2と比較する形で図2-4に示す。この分岐型DOEを用い たときの裏面の最高温度は329℃と予測され、提案した熱源を用いる場合の同位置での 316℃より13℃程度高くなると推測された。



(a) 3D 表示

(b) 2D 表示





図2-4 図2-3に示す16mm×16mmの熱源分布によって得られる板厚2mmの
 SUS304無限平板の温度上昇(W=750 W、v=1000 mm/minの場合)

前田工業㈱において、住友電工ハードメタル㈱で製作された分岐型DOEを用いて、 S US304平板(板厚2mm)の裏面温度測定実験が行われた。実験結果を図2-5に示す。 幅10mmの範囲で約40℃の温度差が生じている。図2-4(b)の解析結果では、このDO Eを用いたときの幅10mmの範囲の温度差は約30℃と予想されることから、実験値は予 想より約10℃高い結果となった。そこで、DOE設計にあたって使用したレーザ波長を確 認したところ、波長985nmとのことであった。これは、前田工業㈱が所有する半導体 レーザ発振器のカタログ値900~1070nmの平均値である。しかし、実際の波長は9 40nmであることから、このDOEを波長940nmのレーザに用いた場合の熱源分布を 求めると、図2-6のようになることがわかった。





(a) 右図におけるラインA上の温度分布

(b)放射温度計による裏面温度測定画像

図2-5 前田工業㈱において行われたSUS304平板(板厚2mm)の裏面温度測定実験 結果(P=3.0kW、v=1000mm/minの場合)







図2-7 図2-6の熱源分布によって得られる板厚2mmのSUS304無限平板の
 温度上昇(W=750 W、v=1000 mm/minの場合)

図2-6の熱源分布を用いて図2-4と同じ解析を行った結果を図2-7に示す。このと きの裏面最高温度上昇は338℃で、幅10mmの範囲の温度差は約38℃となる。これは 図2-5(a)で示した実験結果の温度差40℃と比較的よく一致する。このことから、本解析 方法と解析結果の妥当性が示させるとともに、DOEの設計では波長が重要であると結論さ れた。

(3) 新たな設計・製作のDOE用分布熱源の提案(SUS用)

以上の解析結果ならびに実験結果から、分岐型DOEでは裏面最高温度が理想熱源より幾分 高めの温度上昇となるような熱源分布となると推測された。これは、理想熱源が図2-1の ような16×16の微小矩形熱源から構成されるのに対して、分岐型DOEでは16×16 の微小円形熱源から構成されるため、一つ一つの微小円形熱源の強度が、対応する理想熱源 の微小矩形熱源のそれより高めになるためと考えられる。そこで、裏面 x 軸上の最高温度を より小さくして、その点近傍の幅10mm の範囲の温度差をより小さくするため、熱源分布 w(x, y)の再提案を行った。具体的には、図2-8に示すような、 $U(x)(0.45y^6+0.55)$ と $U(x)(0.5y^6+0.5)$ の二つの熱源分布を提案した。



図2-8 本年度新たに提案したSUS用熱源分布(全熱量で正規化して表示)

16 mm×16 mm のこれら二つの熱源分布で得られる板厚 2 mm のSUS304無限平 板の表裏面温度上昇を、W = 750 W、v = 1000 mm/min の場合について、それぞれ図2 -9および図2-10に示す。w(x, y)が $U(x)(0.45y^6+0.55)$ さらには $U(x)(0.5y^6+0.5)$ と y^6 の係数が大きくなるほどU字熱源の中央が凹むため、裏面 x 軸上の最高温度はより低く なるとともに、その点近傍の幅 10 mmの範囲における温度分布の均一度は小さくなる。し かし、 $w(x, y) = U(x)(0.5y^6 + 0.5)$ でもその範囲における温度差は6℃程度に抑えられるこ と、製作される分岐型DOEで得られる熱源では分岐点でやや強度が強くなることから、 $w(x, y) = U(x)(0.45y^6 + 0.55)$ と $w(x, y) = U(x)(0.5y^6 + 0.5)$ の二つの熱源分布が適切なも のとしてこれらを提案した。

本提案を踏まえて、住友電工㈱によってSUS用DOEが設計・製作された。図2-11お よび図2-12に、設計されたSUS用DOEによって得られる熱源分布を示す。図2-1 3は、これらの熱源分布によるSUS304無限平板の温度上昇である。これらの分岐型D OEを用いたときの表裏面の温度上昇は、理想分布熱源で得られるものと比較的よく一致し ており、製作される分岐型DOEは有効であると判断される。



図2-9 熱源が16mm×16mmで $w(x, y) = U(x)(0.45y^6 + 0.55)$ のとき、板厚 2mmの SUS304無限平板の温度上昇(W = 750W、v = 1000mm/minの場合)



図2-10 熱源が16mm×16mmで $w(x, y) = U(x)(0.5y^6 + 0.5)$ のとき、板厚2mmの SUS304無限平板の温度上昇(W = 750W、v = 1000mm/minの場合)



図2-11 $w(x, y) = U(x)(0.45y^6 + 0.55)$ に基づいて設計されたSUS用DOEによって 得られる熱源分布(256階調表示)



図2-12 $w(x, y) = U(x)(0.5y^6 + 0.5)$ に基づいて設計されたSUS用DOEによって 得られる熱源分布(256階調表示)





(b) 裏面温度上昇

図2-13 図2-11、図2-12の熱源分布によって得られる板厚2mmのSUS304
 無限平板の温度上昇(W=750W、v=1000mm/minの場合)

(4) 炭素鋼用に設計・製作のDOE用分布熱源の当初提案

まず、先に提案したSUS用DOEが炭素鋼用にも適用できないか検討した。16mm× 16mmの $w(x, y) = U(x)(0.45y^6 + 0.55), U(x)(0.5y^6 + 0.5)$ の二つの熱源分布で得られる 板厚2mmのS35C無限平板の表裏面温度上昇を、W = 750W, v = 1000mm/minの場 合について図2-14に示す。SUS304と比較して、S35Cは熱容量がやや小さく、 熱が拡散しやすい。このため、S35Cの表面温度上昇はSUS304より小さく、均一化 しやすい。DOEで得られる熱源が16×16に分岐していることの影響はSUS304よ り小さい。一方、裏面温度上昇はSUS304より大きく、上に凸の温度分布となる。均一 化したい幅10mmの範囲の温度差は、 $U(x)(0.45y^6 + 0.55)$ の場合で約33℃、 $U(x)(0.5y^6+0.5)$ の場合でも約27℃と比較的大きい。そこで、炭素鋼用には別途DOEを設計・製作するのが妥当と判断して、熱源分布w(x, y)の再提案を行った。



(a) 表面温度上昇 (b) 裏面温度上昇 図2-14 SUS用に提案した熱源分布 $w(x, y) = U(x)(0.45y^6 + 0.55), U(x)(0.5y^6 + 0.5)$ とそれらに基づいて設計された分岐型DOEによって得られる板厚2mm のS35C

無限平板の温度上昇(W = 750W、v = 1000 mm/min の場合)

具体的には、図2-15に示す熱源分布 $w(x, y) = U(x)(0.65y^6 + 0.35)$ を提案した。16 mm×16mmのこの熱源分布で得られる板厚2mmのS35C無限平板の表裏面温度上昇 を、W=750W、v=1000mm/minの場合について、図2-16に示す。表裏面 y 軸上の 温度分布については、 $U(x)(0.5y^6 + 0.5)$ 、 $U(x)(0.55y^6 + 0.45)$ 、 $U(x)(0.6y^6 + 0.4)$ 、 $U(x)(0.7y^6 + 0.3)$ の熱源を用いた場合と比較する形で表示した。均一化したい裏面の幅10 mmの範囲の温度差を見ると $w(x, y) = U(x)(0.65y^6 + 0.35)$ が適切であることが理解される。



図2-15 当初提案した炭素鋼用熱源分布 $U(x)(0.65y^6+0.35)$ (全熱量で正規化して表示)



図2-16 炭素鋼用に当初提案した熱源分布 $w(x, y) = U(x)(0.65y^6 + 0.35)$ によって得られる板厚2mmのS35C無限平板の温度上昇(W = 750W、v = 1000 mm/minの場合)

(6) 設計・製作のDOE用分布熱源の再提案(炭素鋼用)

分岐数をこれまで16×16で提案してきた。分岐数を少なくした場合も検討しておくことも重要と判断し、最後に製作を予定していた炭素鋼用DOEでは分岐数を12×12として、適切な熱源分布を提案し、その有効性を確認した。

図2-17は、さまざまな12×12分割で得られる板厚2mmのS35C無限平板の表 裏面温度上昇を、W = 750W、v = 1000 mm/min の場合について示す。比較のため、適正 な熱源分布として先に提案した16×16分割の場合の温度上昇も示した。図より、12× 12分割では $w(x, y) = U(x)(0.6y^6 + 0.4)$ のときが16×16分割の場合の温度上昇に比較 的近いことから、これらを適切な熱源分布として新たに提案した。図2-18に、この理想 熱源と12×12分岐型DOEによる熱源分布(設計値)を示す。



(a) 表面温度上昇

(b) 裏面温度上昇

図2-17 さまざまな12×12分割矩形熱源による板厚2mmのS35C無限平板の温度 上昇(W=750W、v=1000mm/minの場合)



(a)理想熱源(全熱量で正規化して表示) (b)分岐DOEによる熱源分布(256階調表示) (22-18) 新たに提案した炭素鋼用12×12分割熱源分布 $w(x, y) = U(x)(0.6y^6 + 0.4)$

(7) ANSYS による熱伝導解析

これまでの解析解に基づく熱伝導解析結果の妥当性を念のため確認するとともに、解析解 では取り扱いが複雑な3層モデルでの熱伝導解析を行うため、有限要素法(以下、FEMと 記す)による汎用の構造解析ソフト ANSYS を用いた数値計算を行った。はじめに、SUS 304あるいはS35Cのみの平板での熱伝導解析を行った。このときの有限要素モデルを 図2-19に示す。モデルは、解析領域を16mm×6mm×2mmとし、レーザ走査領域 には0.4mm四方、厚さ方向には0.5mmの直方体要素で分割した。



図2-19 鋼材平板のみの場合の有限要素モデル







図2-20 先に提案した16×16分割の $w(x, y) = U(x)(0.6y^6 + 0.4)$ 、12×12分割の $w(x, y) = U(x)(0.6y^6 + 0.4)$ ならびに8×8分割の $w(x, y) = U(x)(0.6y^6 + 0.4)$ の熱源によるS35C平板の温度上昇。実線は、解析解に基づいて計算した無限 平板での結果を示す。(W=750W、v=1000mm/min)

FEM 解析結果の一例として、S35C の場合について、先に提案した16×16分割の $w(x, y) = U(x)(0.6y^6 + 0.4)$ 、12×12分割の $w(x, y) = U(x)(0.6y^6 + 0.4)$ 、ならびに8 ×8分割の $w(x, y) = U(x)(0.6y^6 + 0.4)$ の熱源をW=750W、v=1000 mm/min で走査し たときの温度上昇を図2-20にそれぞれ 、●、●で示す。ここでは、熱源に座標系を固 定して、幅(y方向)と厚さ(y方向)が有限で長さ(x方向)が無限の平板が x 軸方向に移動する 場合を解析した。比較のため、無限平板での解析解に基づいて計算した結果も実線で示した。 図2-21には、12×12分割の $w(x, y) = U(x)(0.6y^6 + 0.4)$ 熱源によるS35C平板の 温度上昇を、FEM解析結果と解析解に基づいて計算した結果を等温線図で示す。図2-20 と図2-21から、FEMによる計算結果は、解析解に基づいた計算結果と比較的よく一致 しており、無限平板を用いて熱源分布を提案しても妥当であることが示された。ここでは割愛するが、SUS304の場合についても同様な結果が得られた。





(b) 裏面温度上昇

図2-21 12×12分割のw(x, y)=U()(0.6 ŷ+0.)
 注意上昇(W=750W、v=1000mm/min)。上図はFEM解析結果、下図は
 解析解に基づく計算結果。

つづいて、鋼材とエラストマー、CFRPの3層から成る実用を想定したモデルでの熱伝 導解析を行った。解析モデルを図2-22に示す。モデルは、解析領域を150mm×60 mm、厚さ方向には鋼材2mm、エラストマー0.18mm、CFRP3mmにとり、レー ザ走査領域には0.5 mm 四方、厚さ方向には鋼材とCFRPについては0.5 mm、エ ラストマーは0.06 mm とした直方体要素で分割した。エラストマーの熱物性値は、 K=0.22 W/(m K)、 $\rho=920$ kg/m³、c=1900 J/(kg K)、CFRPについては、繊維方 向に平行にはK=71.6 W/(m K)、垂直にはK=1.52 W/(m K)、 $\rho=1650$ kg/m³、 c=960 J/(kg K)とした。



図2-22 鋼材とエラストマー、CFRPの3層から成る実用を想定した有限要素モデル



(a) 12×12 分割熱源*U*(*x*)(0.6*y*⁶+0.4)、 S35C の場合

(b) 12×12 分割熱源U(x)(0.4y⁶+0.6)、
 SUS304の場合

図2-23 鋼材とエラストマー、CFRPの3層から成る積層材の温度上昇(W = 750 W、 v = 1000 mm/min)

FEM解析結果の一例として、12×12分割の $w(x, y) = U(x)(0.6y^6 + 0.4)$ 熱源による S35Cとエラストマー、CFRPの3層から成る積層材の温度上昇を図2-23(a)に、 12×12分割の $w(x, y) = U(x)(0.4y^6 + 0.6)$ 熱源によるSUS304とエラストマー、C FRPの3層から成る積層材の温度上昇を図2-23(b)にそれぞれ示す。いずれも、 W = 750W、v = 1000 mm/minの場合の解析結果で、レーザはCFRPの繊維方向に走査 している。いずれの場合も、鋼材とエラストマーの界面は300℃以下になっており、エラ ストマー中央部の幅10mmの範囲の温度差は5℃程度と良好な温度分布が得られている。 【1-2】 レーザ溶着条件の最適化

分岐型DOEを装着したビーム整形光学ヘッドに半導体レーザのプロセスファイバーを接続 して、ステンレス鋼SUS304板厚2mmの試料表面にレーザ光を照射し、材料背面の温度 分布のフラット化の効果を確認した。計測方法を図2-24に示すが、試料の表面からビーム 整形光学ヘッドで整形したレーザ光を照射し、背面の温度をサーモグラフィーで計測した。



図2-24 材料裏面の温度分布計測方法

サーモグラフィーによる材料背面の温度分布の計測画像を図2-25に示す。計測データから、レーザ光照射点からのレーザ走査方向と直角方向の温度分布(図2-25の A ライン)を グラフ化し温度分布の均質化効果を確認した。



図2-25 サーモグラフィーによる温度分布計測データ

シミュレーション結果から求めたステンレス鋼:SUS304用の加熱に適したw(x, y)= U(x)(0.45y6+0.55)、w(x, y)=U(x)(0.5y6+0.5)で表されるエネルギー分布で設計・製作した分岐 型DOEによる温度分布を図2-26、図2-27に示す。

目標とする接合幅10mmでの中央部と端部の温度差はシミュレーション結果の20℃に対して、測定結果は24℃と20℃であり、温度分布のフラット化の効果が確認できた。CFR Pの基材であるPAの融点は215℃、変質・分塊温度は350℃で、その差135℃を加熱 可能温度幅として、十分余裕のある値まで温度が均質化できていることが確認できた。



図2-26 ステンレス鋼用DOE w(x, y)=U(x)(0.45y6+0.55)での温度分布



図2-27 ステンレス鋼用DOE w(x, y)= U(x)(0.5y6+0.5)での温度分布

同様にアルミ用DOE w(x, y)= U(x) (0.8y⁶+0.2)、鋼板用DOE w(x, y)= U(x)(0.6y⁶+0.4) で表されるエネルギー分布で設計・製作した分岐型DOEによる温度分布を図2-28、図2 -29に示す。目標とする接合幅10mmでの中央部と端部の温度差は20℃と25℃であり、 アルミ用DOE、鋼板用DOEについても温度分布のフラット化の効果が確認できた。



図2-28 アルミ用DOE w(x, y)=U(x) (0.8y⁶+0.2) での温度分布



図2-29 鋼板用DOE w(x, y)=U(x)(0.6y6+0.4)での温度分布
温度のフラット化効果が確認できたので、ビーム整形光学ヘッドを使用して CFRP と ステンレス鋼 SUS304 のレーザ溶着試料を作成した。試料作成の模式図を図2-30に 示す。CFRP:100mm×50mm、t=3mmとSUS304:100mm×50mm、 t=2mmの試験片の間にエラストマーを挟んで重ね合わせ、SUS304側からビーム 整形光学ヘッドにて整形したレーザ光を照射し加熱する。試料の外観を図2-31に示す。







図2-31 レーザ溶着試料外観

作製した試料の引張強度を測定した結果と破断部の外観写真を図2-32に示す。目標 とした10MPa を超える引張強度が得られた。また、破断面外観から接合幅10mmで 均質な溶着状態が得られており、破断の形態が凝集破壊であることが確認できた。



図2-32 引張強度測定結果と破断面外観;ステンレス鋼板;SUS304

同様の方法でアルミ板:A5052、鋼板:SPC280についても引張試験片を作製し、 溶着強度と破断形態を調査した。結果を図2-33と図2-34に示す。アルミの溶着強度は 8MPaと目標の10MPaに達しなかった。しかし破断面の形態は凝集破壊となっており良 好な接合が行われている。鋼材の溶着強度は10MPaを上回っており、破断の形態も凝集破 壊で目標とする接合品質が確保されていることが確認できた。





図2-33 引張強度測定結果と破断面外観 アルミ板:A5052



図2-34 引張強度測定結果と破断面外観 鋼板:SPC280

アルミ板の強度が低い理由として、板材の引張試験特有の板の変形により応力状態が変化す ることが考えられる。板の変形がない場合はせん断力が作用することになるが、板の変形が大 きくなるに従って剥離方向の応力成分が大きくなってくる。そこで板の変形の作用が小さくな るように接合位置を板端とした引張試験片を作製し引張強試験を実施した(図2-35)。その 結果を従来の接合品の強度と比較して図2-36に示す。接合位置を変えることで溶着強度が 向上し、目標とした10MPaの強度が得られることが確認できた。





b.板端での接合

図2-35 レーザ溶着試料作製の模式図





【1-3】 CFRPの損傷しきい値評価

(1) 走査型電子顕微鏡での表面分析

レーザ照射部位のCFRP表面状態を走査型電子顕微鏡分析により評価を行った。前田工業 社から提供された照射パラメータを系統的に変化させたCFRP加工試料を用いることにより、 損傷状態とレーザの照射条件とを比較検討した。表2-2にレーザ溶着試験条件を示し、図2 -37に外観写真を示す。





(a)オリジナル CFRP 表面、
 (b)オリジナル SUS 表面
 図2-37 試料表面のSEM写真:

図2-37の試料表面のSEM写真に示すように、オリジナルCFRP表面だけでなく、オ リジナルSUS表面もミクロンサイズの凹凸が観測されている。SUS表面には酸化被膜が形 成されており、これらのドメイン構造が観察されたと考察される。さらに、ごく一部の試料に ついては、不均一な照射痕が金属表面に残った場合があった。接着界面の表面状態を詳細に観 察するために、SEMでの観察を行った。均一照射の接着界面のSEM写真(図2-38)で は、エラストマー試料層において破壊が起こっていることが、CFRP表面とSUS表面の両 方にエラストマーが付着している観察結果から確認された。



図2-38 均一照射の接着界面のSEM写真

他方、図2-39の均一照射の接着界面のSEM写真では、CFRP表面とSUS表面の両 方に炭素繊維の付着が見られた。とくに、SUS表面には渦をまいたような形状の炭素繊維束 の特徴的な付着が観察された。なお、エラストマー層の残存は、今回図2-39観察結果から は認められなかった。

この渦構造は、接着界面を露出させるために行った剥離試験時に形成したとは考えにくい構 造を有している。また、CFRP表面にも同様の渦構造が形成されており、これらの結果から、 レーザ照射時に渦構造が形成されたと推察される。接着強度が他と比べてあまり大きくないこ とからも、レーザ照射時に過剰入熱が発生しており、金属とCFRPの両界面に渦構造を形成 させ、かつ、空隙層が形成されたと考察される。



図2-39 不均一照射の接着界面のSEM写真

(2) 三次元顕微鏡(3Dプロファイラー)等を用いた評価

CFRP複合層の熱変質がなく、接合部の破壊モードがエラストマー層または樹脂層の凝集 破壊となるレーザ溶着条件を見出すことを目的に、過大入熱によるCFRPの損傷の状態を解 析することで、CFRPの損傷しきい値の評価を行った。

前田工業社から提供された照射パラメータを系統的に変化させたCFRP加工試料を用いる ことにより、損傷状態とレーザの照射条件とを比較検討した。前田工業において開発したビー ム整形光学ヘッドを用いて 3kW 半導体レーザ発振器によりレーザ溶着を行った試料で、 CFRPとステンレス鋼(SUS304)の間にエラストマーシートを挟み、それを溶着する ことによって接合試験片を作製している。試験片寸法は、幅50mm、長さ100mm、厚さ はCFRPが3mm、SUS304が2mm で各試験片の重なり部分(接合部)は約20mm である。表2-1に評価結果一覧を示す。なお、本試料の破断荷重とせん断強度については、 図2-72に記載されている。

ビーム走査速度	0.8 m/min	1.0 m/min	1.2m/min	1.4 m/min
接合面の剥離状況	金属とエラストマ層の 界面剥離	金属とエラストマ層の 界面剥離	金属とエラストマ層の 界面剥離	金属とエラストマ層の 界面剥離
端部での エラストマ層のはみ出し状況 (炭素繊維の混入有無)	はみ出し あり (混入多い)	はみ出し あり (混入多い)	僅かにあり (混入微量)	はみ出し なし
エラストマ層への 炭素繊維の混入状況	あり(多い)	あり(多い)	あり(僅か)	なし
エラストマ層の厚み(µm)	65	60(中央部に凹み)	64	73
エラストマ層の上下幅(mm)	~17	~15	10~11	10
エラストマ層の表面積(mm ²)	820	710	550	500
接合面の光顕写真(剥離面)			PLO	
接合面の3D高低プロファイル 表示(高部:赤色、低部:青色)				
試料右端部でのエラストマ層 のはみ出し状況(拡大写真)		s	נאיייאיייייייייייייייייייייייייייייייי	5 はみ出し <mark>形</mark> なし
考察(CFRP部の 損傷しきい値との関係)	損傷しきい値超過 (過入熱状態)	損傷しきい値超過 (過入熱状態)	損傷しきい値近傍	損傷しきい値近傍

表2-1 CFRP加工試料の損傷しきい値評価

ビーム走査速度を変化させた各4種レーザ照射条件では、どの試験片においても金属-シー ト界面での界面剥離となっており、金属側の剥離表面にはエラストマーの残留は認められな かった。表2-1の検討で明確になったことは、端部でのエラストマー層のはみ出し状況が損 傷状態と密接に関連していることが挙げられる。低いビーム走査速度で処理した場合、端部の エラストマー層のはみ出しは大きかった。また、CFRP試料側表面に残っているエラスト マー層への炭素繊維の混入状況を観察したところ、低いビーム走査速度では多量の炭素繊維が エラストマー層に混入していた。これは、過大入熱によって、エラストマー層とCFRP表面 層が溶けた合った結果と考えられ、エラストマー層の表面積が拡がっている観察結果からも支 持される。他方、高ビーム走査速度での走掃1.4m/minでは、入熱が十分とは言えず、 エラストマー層が溶け切れていないことが明らかである。以上の検討から、表2-1の試料で は、ビーム走査速度1.2m/min前後が損傷しきい値と見積もることができた。 SUS



CFRP-SUS304レーザ溶着接合材の接合面表面写真 (スケール・バー:0.5mm)



図2-41 種類の異なるエラストマーシート(岡山県工業技術センターより提供)を用いた CFRP-SUS304レーザ溶着接合材の接合面の高低プロファイル表示 (高部:赤色、低部:黄色~青色)

次に、前述したエラストマーと種類の異なるシート(岡山県工業技術センターより提供)を 用いて、ビーム整形光学ヘッドを装備した3kW 半導体レーザにて加工速度(0.8,1.0, 1.2m/min)を変化させて得られた接合試験片の評価結果を示す。図2-40にレーザ 溶着接合材の表面写真を示す。エラストマーシート層での凝集剥離によって破壊しており、前 出のエラストマーシート(タフテック)とは明らかに異なる剥離形態となっている。とくに、 接合面の高低プロファイル観察(図2-41)からは、1.2m/min試験片では、CFRP 側およびSUS側の双方に十分な厚みのエラストマーシートが着膜しており、エラストマー層 中央部での凝集剥離が起きていることが、高いせん断応力の発生の機構であることが判った。 図2-42のレーザ溶着接合材の表面拡大写真からも上記考察は支持される。次段階において 解明すべきポイントとして、CFRP樹脂部がエラストマー層にどの程度混入しているのかを 調べる必要が挙げられる。炭素繊維の混入は、顕微鏡観察からも明瞭に分析できるが、CFR P樹脂部とエラストマーは合成高分子材料であることから、接合面の全反射型赤外吸収測定が 有効であることが示唆された。

SUS



CFRP



 3.0kW, 0.8m/min
 3.0kW, 1.0m/min
 3.0kW, 1.2m/min

 図2-42
 種類の異なるエラストマーシート(岡山県工業技術センターより提供)を用いた

 CFRP-SUS304レーザ溶着接合材の接合面表面拡大写真

(スケール:0.05mm)

(3) 全反射型赤外吸収測定での評価

CFRP 樹脂部がエラストマー層にどの程度混入しているのかの測定を行った。具体的には、 剥離後のエラストマー層の全反射型赤外吸収測定(ATR 法)を行うことで、官能基分析により CFRP 樹脂部とエラストマーを区別できるので、エラストマー層へのCFRP層成分の混入 状況を詳細に化学分析した。これらの接合面における剥離状況の観察から接合メカニズムの解

明を試みた。



図2-43 全反射型赤外吸収測定(ATR法、プリズム KRS-5)

図2-43に、エラストマー単体ならびにCFRPオリジナル表面の全反射型赤外吸収測定結 果を示す。CFRPオリジナル表面ではアミド基のN-H伸縮振動が3300cm⁻¹付近に明瞭に 観察されるとともに、1700cm⁻¹近傍のカルボニル基(C=O)のシグナルは、エラストマーと CFRPでピーク位置が異なっている。したがって、この2つの成分の混入状態を精密測定す ることができることがわかった。

$$dp = \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{n_1^2 \sin^2\theta - n_2^2}}$$

(式2-1)

分析深さ(dp) 光強度が 1/e に減少する深さ d 空気中での赤外光の波長(λ) プリズムへの赤外光入射角(θ) 45° プリズムの屈折率(n₁) KRS5:2.3、Ge:4.0 試料の屈折率(n₂) 1.5

さらに、分析深さ(dp)は式2-1にしたがって、プリズムの屈折率によって変化するので、 プリズムに KRS-5 およびゲルマニウム(Ge)を用いると、図2-44に示すように、より浅い表 面層部位の観察を Ge プリズムを使うことで測定できる。



図2-44 ATR 法における分析深さ(式2-1に基づく)



図2-45 CFRP-SUS304レーザ接合材(新DOE, 3kW)のATR法測定

SUS304との接合を3kW 照射において、走査速度1.2m/minではCFRPとエラ ストマー層での界面剥離が発生しており、プリズム KRS-5のとき剥離表面にCFRP樹脂層 が検出された。走査速度1.1~0.9m/minではエラストマー層内での凝集剥離が発生 しており、剥離表面にCFRP樹脂層が検出されなかった。走査速度0.8m/minではエ ラストマー層内での凝集剥離が発生しており、剥離表面にCFRP樹脂層が検出された(図2 -45)。分析深さが浅いプリズム Geのときでは、走査速度0.9m/minで剥離表面にC FRP樹脂層が検出されなかったことから、ビーム走査速度 1.0~0.9m/minがC FRPの損傷しきい値と判明した(表2-2)。

表2-2 CFRP-SUS304 レーザ接合材(新 DOE, 3kW)での接合面の状況

ビーム走査速度		0.8 m/min	0.9 m/min	1.0m/min	1.1 m/min	1.2 m/min
接合面の剥離状況		エラストマ層内の 凝集剥離	エラストマ層内の 凝集剥離	エラストマ層内の 凝集剥離	エラストマ層内の 凝集剥離	CFRPとエラストマ 層での <u>界面剥離</u>
剥離表面(CFRP 検出		あり	あり	あり	あり	あり
側)でのエラスト マ層の検出	強度	小	中	大	×	微量
剥離表面でのCR RP樹脂層の混 入状態	KRS-5	あり	僅かに あり	なし	なし	あり
	Ge	僅かに あり	なし	なし	なし	あり
考察 (CFRPの損傷閾値との関係)		損傷閾値超過 (過入熱状態)	損傷閾値超過 (ゃゃ過入熱状態)	損傷閾値近傍	損傷閾値近傍	入熱不足

◎レーザー照射:3.0kW (ビーム整形光学ヘッド等を用いて温度分布を均質化したビームプロファイルにて照射)

ビーム走査速度 1.0~0.9m/minがCFRPの損傷しきい値と判明



図2-46 CFRP-A5052レーザ接合材(新DOE、3kW)のATR法測定

A5052との接合では、走査速度1.2m/minでは部分的にCFRPとエラストマー層 での界面剥離が発生しており、プリズム KRS-5のとき剥離表面にCFRP樹脂層がごく僅か 検出された。走査速度1.0~0.9m/minではエラストマー層内での凝集剥離が発生し ており、剥離表面にCFRP樹脂層が検出されなかった(図2-46)。ビーム走査速度 0. 9m/minがCFRPの損傷しきい値と推定した(表2-3)。

表2-3 CFRP-A5052レーザ接合材(新DOE, 3kW)での接合面の状況

ビーム走査速度		0.9 m/min	1.0m/min	1.2 m/min		
接合面の剥離状況		エラストマ層内の 凝集剥離	エラストマ層内の 凝集剥離	エラストマ層内の凝集剥離 (部分的に界面剥離)		
剥離表面(CFRP側)	検出	あり	あり	あり		
でのエラストマ層の検 出	強度	中	大	大		
剥離表面でのCRRP 樹脂層の混入状態	KRS-5	なし	なし	ごく僅かに あり		
	Ge	-	-	ごくごく僅かに あり		
考 察 (CFRPの損傷閾値との関係)		損傷閾値最近傍	損傷閾値近傍	良好な接着特性を 得る適正領域		

◎CFRP-A5052レーザー接合材(新DOE, 3kW)

ビーム走査速度 0.9m/min近傍がCFRPの損傷しきい値と推定

これらの損傷状態とレーザの照射条件を高精度かつ系統的に比較した結果から、精度を向上させたCFRP試料の損傷しきい値を明確化し、最適ビームプロファイルの設定に貢献することができた。

【1-4】溶着状態の評価・改良

図2-47にせん断試験の結果を示す。

破壊

モード

これまでの実験から、スチレン系インサート材は、PPおよびPA6に対して高い接合性を 有することがわかっている。本実験では、樹脂がPPである水準⑥に対しては高い接合力を有 したが、樹脂がPA6の水準⑤および水準⑨にはそれほど高い接合力を示さなかった。この理 由としては、CFの影響が推測される。

他方、ポリエステル系インサート材は、ABSに対して高い接合性を有することがわかって いる。本実験では、樹脂がABSの水準⑦に加え、PPの水準⑥に対しても高い接合力を示し た。ポリエステル系インサート材とPPは非相溶系であるため、非常に興味深い。

シート	出力 (W)	⑤ PA6/ 長繊維	⑥ PP/ 長繊維	⑦ ABS/ 短繊維	⑧ PPS/ 短繊維	⑨ PA6/ 短繊維
COOH基	250	373	363	299	381	482
変性 スチレン系	275	501	457	543	416	607
	300	458	972	652	489	740
ポリ_	250	336	194	337	×	187
エステル糸	275	409	743	1397	315	206
	300	237	1561	1468	596	×

シート-A1100界面破壊

シート-CFRP界面破壊

赤数字シート凝集破壊

図2-47 インサートを用い各種熱可塑性CFRPのせん断強度

図2-48に300wで接合したA5052-ポリエステル系インサート材-PP/長繊維の断面反射電子像を示す。このとき、インサート材中にCFが取り込まれ、インサート材は直接CFではなく、CFを覆う成分と接合していることが確認できる。



図2-48 A5052-ポリエステル系インサート材-PP/長繊維の断面反射電子像



図2-49 レーザ加工エリアの表面反射電子像

接合性の向上を目的として、アルミニウム合金表面に対し、Qスイッチ短パルスレーザ照 射を行った。レーザ照射前後のA5052の表面反射電子像を図2-49に示す. レーザ加 エエリアでは、素材の溶融 - 飛散 - 凝固に伴い表面に凹凸が形成される. また、ここでは詳 細に述べないが、レーザ加工エリアは、超親水性かつ超親油性に変化した。

このように、レーザ加工エリアでは、表面エネルギーの増加および比表面積の増加が確認 された。これらのレーザ照射したアルミニウム合金を用いて接合試験を行った結果、接合強 度が増加し、目標をクリアできたとの報告を前田工業から受けている。 【1-5】 ビーム整形によるレーザプロファイルの最適化

温度シミュレーションの結果から選択した均質加熱に適したビームプロファイルを具現化 するため、多点分岐でビームプロファイルがU型の分布を形成するDOEを設計・製作した (図2-50)。DOEを使用した加工試験を実施するためDOEを搭載したビーム整形光学 ヘッドを設計・製作した(図2-51、図2-52)。常に集光点での加熱が可能なように ワークとの距離を一定に保つためワークとの距離を計測して位置補正するZ軸昇降機構を付 加している。合わせて半導体レーザをビルトインして、半導体レーザの出力制御、Z軸昇降 制御、行うパワーコントローラを設計・製作した(図2-53、図2-54)。



図2-50 製作したステンレス鋼用DOE (製作:住友電気工業㈱)



図2-51 ビーム整形光学ヘッドの設計



図2-53 パワーコントローラの設計



図2-52 ビーム整形光学ヘッド外観



図2-54 パワーコントローラ外観

製作したビーム整形光学ヘッドにステンレス鋼:SUS304用のDOEを装着し、半導体 レーザのプロセスファイバーを接続してレーザ光を照射し、ビームプロファイルを確認した。 整形後のビームプロファイルを図2-55に示す。ステンレス鋼:SUS304用のDOEで は、レーザ光は16×16分割されており、集光ビームの大きさは設計値である16mm×1 6mmで、U字型の温度分布が得られた。





w(x, y)= U(x)(0.45y6+0.55)のプロファイル w(x, y)= U(x)(0.5y6+0.5)のプロファイル 図2-55 ステンレス鋼用分岐型DOEによる整形後のビームプロファイル

同様に、アルミ用のDOEについてビームプロファイルの測定結果を図2-56に示す。ス テンレス鋼用のDOEと同様、レーザ光は16×16分割されており、集光ビームの大きさは 設計値である16mm×16mmで、U字型の温度分布が得られた。



w(x, y)= U(x) (0.8y⁶+0.2) での温度分布 図2-56 アルミ用分岐型DOEによる整形後のビームプロファイル

ステンレス鋼用、アルミ用の16×16分割のDOEでは中心部のO次回折光による高輝度 部の生成が認められた。それを抑制するために最も有効な手法は分岐数を減らすことである。 鋼材用としては分割数を16×16分割から、12×12分割とし、温度シミュレーションで 選択した所定のプロファイルを具現化するためのDOEを設計・製作した。温度シミュレー ションの結果から、12×12分割まで低減しても、レーザ光照射時の板裏面の温度分布には 大きな影響はないことが確認されている。

鋼材用のDOEについてビームプロファイルの測定結果を図2-57に示す。レーザ光は設 計値のとおり12×12分割されており、集光ビームの大きさは設計値である16mm×16 mmで、 U字型の温度分布が得られた。また、中央に発生していたO次の回折光成分による ピークは図2-58に示すように分岐数の低減により大幅に低減されたことが確認された。



w(x, y)= U(x)(0.6y6+0.4)での温度分布

図2-57 鋼板用分岐型DOEによる整形後のビームプロファイル





12×12分割

w(x, y)= U(x)(0.45y6+0.55)のプロファイル w(x, y)= U(x)(0.6y6+0.4)での温度分布

図2-58 分割数による中心部の0次回折光による高輝度部比較

【1-6】 レーザ溶着条件の最適化とデータベースの構築

今回の研究開発ではPAを基材とする熱可塑製CFRPを主として使用したが、より幅広い 領域での適用を可能とするために基材をPPS、PP、ABS とした熱可塑製CFRPとSU S304のレーザ溶着性を評価した。また、ステンレス鋼:SUS304、アルミ:A505 2、鋼板:SCP280について板厚1mm、2mm、3mm について最適なレーザ溶着条件を 求めレーザ溶着条件一覧(図2-59)とデータシート(図2-60)としてまとめデータ ベースを構築した。

	ビーム	漆美雨	出力	加工速度	最高温度	最大張力	引張強さ
照射面		冶石田.1	[W].1	[m/min]. ₁	[°C].1	[N].1	[MPa].1
		無処理.,	1700,	1.0,	353,	3366,	6.1.
			1800,	1.0,	375,	5690,	8.0.5
			1900,	1.0,-	401,	6790,	8.1.
			2000,-	1.0,-	424.	6249,	6.6.,
			2100,	1.0,-	445 .	5318,	5.0 _{.2}
			1800,	1.0,-	375,	5991,	9.1.
		アルマイト	1900,	1.0,-	401,	6969,	9.1.
		処理。	2000,-	1.0,-	424.,	7392,	8.6.
	カーボン 曲 pop プラック・1		2100,	1.0,-	445 ,	7982,	7.8
		黒色 アルマイト 処理⇒	1800,	1.0,-	375,	5698,	8.5
AI∰ DOE 08γ*+0.2,			1900,	1.0,-	401,	6210,	85.
			2000,	1.0,	424.	6491,	7.2
			2100,	1.0,-	445 ,	6537.,	6.D. ₂
			1700,	1.0,	353,	2308.	48.
			1800,	1.0,	375,	6437.,	10.1
		レーザアブ レーション・	1900,	1.0,	401,	7128,	9.8.
			2000,	1.0,	424.	6108,	7.8,
			2100,	1.0,-	445 .	5736,	65.
	サンド	サンド	3000,	0.7 ,	399,	8041,	7.6
	ブラスト	ブラスト	3000,	0.8 ,	367.,	5422,	6.2
	#200.,	#200.1	3000,	0.9 ,	351,	5357.,	7.4.

図2-59 レーザ溶着条件一覧



図2-60 レーザ溶着技術データシート

【1-7】システム構想構築

小型の自動車部品の生産用には小型のNCシステムを、フード、トランクリッド等の大型の 自動車部品には3次元の加工がフレキシブルにできる多関節ロボットシステムを想定した。

パワーコントローラとビーム整形光学ヘッドを小型のNC装置に組み込んでシステムアップ しCFRPと金属のレーザ接合用NC加工システムとして具現化し(図2-61)、今回の研究 開発の試験片作成に使用した(図2-62)。



図2-61 3軸NC加工機に搭載した加工システム



図2-62 3軸 NC 加工機による試験片作成

また、パワーコントローラとビーム整形光学ヘッドを60Kg 可搬の多関節ロボットに組み 込んでシステムアップし CFRP と金属のレーザ接合用多関節ロボット加工システムとして具現 化した(図2-63)。そして、本システムによるレーザ溶着の状況を販売促進用のプロモー ションビデオとして撮影、編集して弊社ホームページに掲載した。



図2-63 多関節ロボットに搭載した加工システム

【2】品質保証技術の確立

【2-1】レーザ溶着接合部の接合強度評価技術の開発

本サブテーマは、レーザ溶着により作成したCFRPと金属溶着接合材を用いて、JIS K6850、JIS K6864 規格に準拠した引張試験および疲労試験を行い、応力、ひずみ、引張 せん断強度および疲労特性を評価するとともに、そのマクロ・ミクロフラクトグラフィ的検討 により損傷・劣化過程を明らかにすることを目的とした。約 3mm厚のCFRP(東レ製 TLP1060)と約 2mm厚の金属の接合試験片(つかみ部分に樹脂製タブ板を接着)を用い て接合強度評価を実施した。図2-63には接合強度評価に用いた材料試験機およびその接着 接合試験片を示す。強度試験には油圧式材料試験機(MTS 810、最大荷重 100kN; 図参照) を用いた。試験時には、ひずみゲージ(共和電業製)を3枚使い、CFRP-金属の両接合界面、 CFRP表面に貼付して、動ひずみ測定器(共和電業製)を介してひずみを検出した。引張試 験では変位速度0.5mm/minの一定速度にて行った。疲労試験では、応力比0.1、 ファンクションジェネレータにて発生させた5Hzの正弦波にて引張一引張疲労を行った。





図2-64 接合強度評価に用いた材料試験機、試験片および接着剤

(1) CFRP-各種金属接着接合材の接合強度特性

接着剤を用いた接合材では、接着表面をブラスト加工後、二液性エポキシ樹脂接着剤 (DENATITE2204、ナカセケムテック製)を塗布した。熱処理硬化(80℃、30分)後、室 温にて48時間乾燥させた。図2-65にはCFRPと高張力鋼(新日鉄住金製 WELTWN590RE)接着接合材の引張試験時の応力一ひずみ線図を示す。図中に示すように、 ひずみゲージを3枚使用し、CFRP表面(Gauge1)、接着界面(CFRP面:Gauge2,金 属面:Gauge3)に貼付した。この結果から、試験片への引張荷重負荷によってCFRP表面 では引張ひずみが発生する。一方、接着界面では、圧縮ひずみが発生し、その後、CFRP側 では引張ひずみに変化する。これは重ね合わせ接着継ぎ手では接着層にはせん断応力だけでな く、板に偏心して作用する引張力により曲げモーメントが生じ接着層に引張応力も作用する組 み合わせ応力状態になるなどの影響である。本実験では、試験片が破断したときの応力をせん 断強度として求めた。次式に示すようにせん断荷重を接着面積で割ることによって、せん断応 力τを求めた。

$$\tau = \frac{P}{(w \bullet L)} \tag{1}$$

ここで、Pはせん断荷重(kN)、wは接着面幅(mm)、Lは接着面幅(mm)を示す。



図2-65 CFRP-金属接合材のひずみゲージ添付箇所、CFRP-高張力鋼接着接合材の 応力---ひずみ曲線



図2-66 CFRP-各種金属接着接合材の引張せん断強度

接着剤を用いて接合したCFRP一各種金属試験片の引張試験を実施した。金属にはアルミ ニウム合金(A5052)、チタン合金(Ti一6A1-4V)、ステンレス鋼(SUS304)、 高張力鋼(WELTEN590RE)を用いた。図2-66には引張試験により得られたCF RP-各種金属接着接合材の引張せん断強度の結果を示す。これらの結果から、アルミニウム 合金などの接合材ではせん断強度が低い。一方、チタン合金、ステンレス鋼や高張力鋼接合材 では値が高い傾向が見られる。これは、主に、金属のヤング率の大きさに起因しており、この 値が大きい金属では、板に作用する曲げモーメントが生じにくく、結果としてせん断強度が高 くなると推定される。また、CFRP-各金属との接着接合材の引張試験による破面観察から、 どれも接着層から破壊していることがわかり、凝集破壊が起こっていることがわかった。

CFRP-各種金属接着接合材を用いて疲労試験を行った。CFRP-各種金属接着接合材 の疲労寿命曲線を図2-67に示す。また、比較のために、熱硬化性樹脂CFRP-高張力鋼 接着接合材の値を図中に示す。この結果から、CFRP-高張力鋼接着接合材の疲労寿命が大 きく、チタン合金、SUS304の順となり、CFRP-A5052が最も小さい。しかしな がら、長サイクル数では同じような値に近づく傾向が見られる。一方、熱硬化性樹脂 CFRP と 高張力鋼の接着接合材と比較した場合、本試験の値は明らかに小さい。

59



図2-67 CFRP-各種金属接着接合材の疲労寿命曲線

(2) CFRP-SUS304 レーザ溶着接合材の接合強度特性

前田工業において開発したビーム整形光学ヘッドを用いて3kW 半導体レーザ発振器により レーザ溶着を行った。CFRPとステンレス鋼(SUS304)の間にエラストマーシートを 挟み、それを溶着することによって接合試験片を作製した。試験片寸法は、図2-68に示す ように幅50mm、長さ100mm、厚さは CFRP が3mm、SUS304が2mmで各試 験片の重なり部分(接合部)は約10mmとした。レーザ出力は3kW とし、加工速度(照射 速度)を変化させた。図にはレーザ溶着接合材(レーザ出力3kW,加工速度1.0m/min) の応力--ひずみ線図を示す。レーザ溶着接合試験片では、CFRP表面(Gauge 1)で一様に 引張ひずみが生じ、接合界面(Gauge 2, Gauge 3)で圧縮ひずみが生じ、その後、CFRP 側では引張ひずみに変化するように接合界面では複雑なひずみ状態になる。



図2-68 CFRP-SUS304レーザ溶着接合材の試験片と応力-ひずみ曲線 レーザ溶着接合試験片とその応力--ひずみ線図

平成26年度に開発したビーム整形光学ヘッドを装備した3kW 半導体レーザにて加工速度 (0.8,0.9,1.0,1.2m/min)を変化させて作成した接合試験片の引張せん断 強度を算出した結果を図2-69に示す。これらの結果から、加工速度が0.9m/minあ るいは1.0m/minの試験片が大きな値を示し、目標値を超える約12MPaを得た。一方、 加工速度が遅い0.8m/min、加工速度が速い(1.1m/min)試験片では値が減少 する。加工速度が最も速い1.2m/min試験片では大幅に減少する。平成25年度に開発 したビーム整形光学ヘッドを用いて作成した試験片と比較すると、0.9m/minや1.0 m/min試験片ではほぼ同等の強度が得られている。また、接着接合試験片と比較すると、 せん断強度は約3MPaほど小さい。CFRP-SUS304レーザ溶着接合材の破面観察の結 果から、加工速度が0.9m/min,1.0m/min,1.1m/minの試験片では接着 層での凝集破壊が支配的で、0.8m/min試験片ではエラストマーと SUS304 での界面 破壊、1.2m/min 試験片ではエラストマーと CFRP での界面破壊が支配的であった。これら



図2-69 CFRP-SUS304 レーザ溶着接合材のせん断荷重とせん断強度



図2-70 CFRP-SUS304レーザ溶着接合材の疲労寿命曲線

CFRP-SUS304レーザ溶着接合材を用いて疲労試験を行った。レーザ溶着接合材の 疲労寿命曲線を図2-70に示す。比較のために、接着接合材の値を破線で、平成25年度に 開発したビーム整形光学ヘッドを用いて1.2m/minで作成した結果を水色の実線で図中 に示す。なお、接着接合材はレーザ溶着接合材と試験片形状を同じ(幅50mmの試験片)に し、データを取得した。この結果から、接着接合材の疲労寿命はレーザ溶着接合材よりも大き い。レーザ溶着接合材の中で、平成26年度開発したビーム整形光学ヘッドを用いて加工速度 1.0m/minにて作成した試験片は疲労寿命が最も大きく、高サイクル側では接着接合材 に近づく傾向が見られる。レーザ溶着接合材の疲労試験後の破面観察から、疲労寿命の小さい O. 9m/min試験片では金属側での界面破壊がみられたが、疲労寿命の大きい1. 0m/ min試験片では凝集破壊が支配的であった。

(3) CFRP-A5052レーザ溶着接合材の接合強度特性

平成26年度に開発したビーム整形光学ヘッドを用いて3kW 半導体レーザ発振器によりC FRPとアルミニウム合金(A5052)のレーザ溶着を行った。試験片作成法および寸法は SUS304 と同様である。図2-71には加工速度 1.2m/minで加工した接合材の応力 ーひずみ線図を示す。CFRP-A5052レーザ溶着接合材では、CFRP表面(Gauge 1) で一様に引張ひずみが生じ、接合界面(Gauge 2, Gauge 3)で圧縮ひずみが生じるが、そ の変化量はSUS304接合材に比べて小さい。加工速度(0.9,1.0,1.2m/min)を 変化させて作成した接合試験片の引張せん断強度を算出した結果を図2-72に示す。この結 果から、加工速度が1.2m/minの試験片が10MPaを超えるせん断強度を示す。その値 はCFRP-SUS304レーザ溶着接合材(1.0m/min)よりも若干低い。一方、加 工速度が遅い0.9m/minあるいは1.0m/minの試験片では低い値となり、1.2 m/min試験片と比較すると、そのせん断荷重およびせん断強度とも2分の1程度である。 破面観察から、どの試験片においてもエラストマー層での凝集破壊となっており、破面から違 いは見られなかった。



(a) CFRP 表面
 (b) 接合界面 CFRP 側
 (c) 接合界面 A5052 側
 (c) 接合界面 A5052 側
 (c) 接合界面 A5052 側
 (c) 接合界面 A5052 側

CFRP-A5052レーザ溶着接合材を用いて疲労試験を行った。図2-73にはレーザ

溶着接合材の疲労寿命曲線を示す。比較のため、図中には接着接合材のデータおよびCFRP -SUS304レーザ溶着接合材(1.0m/min)を示す。この結果から、1.2m/m inの照射条件下でのレーザ溶着接合材の疲労寿命が大きく、CFRP-SUS304レーザ 溶着接合材に匹敵する。接着接合材よりも小さいが、1.2m/min試験片は長サイクル側 での疲労寿命は接着接合材の寿命に近づき、長寿命な特性を保持できると予測される。一方、 加工速度が遅い0.9m/minや1.0m/minでは、1.2m/min試験片よりも疲 労寿命は遙かに小さい。疲労破壊した試験片の破面観察から、0.9m/minや1.0m/ minの試験片では、金属とシート層界面の界面破壊が支配的であるのに対して、1.2m/ minの試験片ではシート層内での凝集破壊であるため、十分に疲労強度が保たれていること がわかった。



図2-72 CFRP-A5052 レーザ溶着接合材のせん断強度



図2-73 CFRP-A5052レーザ溶着接合材の疲労寿命曲線

【2-2】 レーザ溶着接合部の超音波映像化技術適用性評価

本サブテーマは、超音波伝搬映像化探傷法によるレーザ溶着接合部の探傷実験を行い、非接 触型非破壊評価手法としてのレーザ溶着部への適用可能性を明らかにすることを目的としてい る。

非接触による超音波伝搬映像化実験装置の概略を図2-74に示す。この装置は、超音波に よる非破壊検査のデータ解釈を容易にして簡便に利用可能とすることを目的に開発された励起 用パルスレーザ走査による超音波可視化法[1,2]を基本として、受信に空中探触子を用い ることにより完全非接触での超音波伝搬の映像化とそれを用いた探傷を実現している[3,4]。 (2)、(3)項で示す映像は、全て試験体の接合部の長手方向を横にして金属を上側に配置し、接 合部では金属側を超音波励起用レーザで照射し、CFRP単体部において板波基本モードの臨 界角で超音波信号を非接触受信して取得したものである。これにより、等価的にCFRP単体 部から発振され、接合部を通って金属に伝わっていく超音波(板波)の伝搬状況が映像化され る。



図2-74 非接触超音波映像化実験装置の概略

(1) 映像化のための条件確認

接合部の映像化のための適切な条件を明らかにする目的で、CFRP単体及びCFRPと金属を接着剤により接合した試験体について映像化実験を行った。その結果、本事業で対象としている熱可塑性CFRPについても超音波伝搬映像化が可能であることを確認するとともに、鮮明な映像を得るための材質毎の最適受信角度を明らかにした。次に、試験体に損傷を与えずに超音波励起を行うための適切なレーザ照射エネルギーについて実験的に調べた。その結果、目視可能な損傷(照射痕)を生じない最大エネルギーレベルが、金属では3.0mJ、熱硬化性(エポキシ)CFRPでは1.5mJ、熱可塑性(PA)CFRPでは2.0mJであることが分かった。更に、金属(アルミニウム合金)とCFRPの接合部の映像化について、励起/受信位置の組み合わせを様々に変えて実験を行った。その結果、「金属部で励起/CFRP部で受信」の組み合わせが最適であることが分かった。

(2) モデル試験体についての映像化実験

超音波映像化探傷法の接合部欠陥に対する分解能を確認することを目的として、CFRP (エポキシ/連続繊維)とアルミニウム合金(A5052)を接着し、接着不良のモデルとし て接着部の一部に厚さ0.05mmのPTFE(テフロン)シートを入れた試験体について映 像化実験を行った。CFRPは連続繊維直交積層の厚さ2mmのもの、アルミ板は厚さ2mm のものを使用し、エポキシ系接着剤により接着層厚みO.5mmで接着を行った。

図2-75に、破線で示す位置に正方形の欠陥がある場合の超音波(板波)の、380kHz での伝搬映像を示す。映像から、板波の伝搬に明らかな影響を及ぼし確実に検出できているの は5mm 平方以上の欠陥と判断されるが、1~2mm 平方でも映像に影響が見られ、欠陥検出 の可能性があることが分かった。短波長化による分解能向上を期待して760kHz と1.2 MHz での映像化実験も行ったが、周波数が高くなるとともに超音波の減衰と探触子感度低下 のため映像が不鮮明となった。ただし溶着試験体の場合、試験体によっては800kHz 帯でよ り顕著に溶着不良の影響が見られる場合もあったので、映像化実験では400kHz 帯を主体と しつ800kHz 帯も使用した。



図2-75 人工欠陥入りCFRP/アルミニウム合金接合モデル試験体の超音波伝搬映像 (周波数 380 kHz、欠陥サイズは左から 10 mm、5 mm、2 mm、1 mm 平方)

(3) レーザ溶着試験体についての映像化実験

本事業で開発されたビーム整形光学ヘッドを用いて作製されたステンレスとCFRPの溶着 試験体(CFRPは厚さ 3mm のPA/長繊維ペレット射出成形品、ステンレスは厚さ2mm のSUS304)についての超音波(板波)伝搬映像化結果(最大振幅画像)を図2-76に 示す。レーザ出力は3kW とし、溶着速度を調整することにより入熱条件を変化させている。 図で、溶着速度1.0m/minの試験体では板波がほぼ均一に伝搬しているが、1.2m/ minの試験体では図の左半分で板波の減衰が極めて大きくなっている。この部分では溶着部 に力を加える以前に部分的に剥離が観察され、残りの部分も弱い力で簡単に剥離した。図2-77に剥離後の接合面を示す。右側の、板波がSUS側まで伝搬している部分ではエラスト マーがCFRP側にも多少付着しているが、左側ではエラストマーがほぼ金属側にのみ付着し ていて、入熱不足による溶着不良が見られる。このように、溶着不良が板波の減衰として明確 に検出可能であることが明らかとなった。



図2-76 CFRP/SUS溶着試験体の超音波伝搬映像(最大振幅画像) (760kHz)



CFRP

図2-77 図2-76a)の試験体の、剥離後の接合部 (映像との比較のためSUSは左右反転表示、枠内が映像化部分)

図2-78に、平成26年度作製の温度均質性が改善された新ビーム整形光学ヘッドを用い、 4通りの入熱条件で溶着された試験体についての結果を示す。溶着速度0.8m/min以上 では入熱が大きいほどの減衰が小さくなる傾向が見られた。そして、溶着速度1.1m/mi nの試験体は前記の試験体と同じく溶着部が簡単に剥離し、入熱不足による溶着不良が板波減 衰として検出されていることが分かった。一方、溶着速度0.7m/minの場合には入熱不 足の場合と同様に板波の減衰が大きく、また溶着部が簡単に剥離した。剥離後の接合面観察か ら、この試験体では過入熱によりエラストマーか流出して溶着不良を生じ、それが板波減衰と して検出されていると判断された。



図2-78 CFRP/SUS溶着試験体(新DOE使用)の 超音波伝搬映像(最大振幅画像)(380kHz)

アルミニウム合金とCFRPの溶着試験体についても同様の実験を行った結果、過入熱の試 験体において、同様にエラストマー流失による接着不良を反映していると見られる顕著な板波 減衰が見られた。

(4) 水浸超音波エコー探傷法による試験結果との比較

映像化実験を行った試験体について、超音波探傷法として一般的な水浸超音波探傷法による 試験(信号周波数5MHz)を外注により実施し、板波伝搬映像との比較検証を行った。試験結 果を図2-79、図2-80に示す。

図2-79の結果は、図2-76と良好に対応している。すなわち、板波減衰の大きい部分 で、溶着不良部によると見られる大きなエコーが観察されている。一方、図2-80では図2 -78との対応があまり明確とはいえず、特に溶着速度0.7m/minの試験体では、溶着 部が簡単に剥離しそれが伝搬映像には反映されているにも拘わらず、水浸エコー画像では反射 エコーがほとんど観察されていない。アルミニウム合金の場合も同様に、過入熱よる溶着不良 がエコー画像に反映されなかった。この理由として、水浸超音波エコー探傷では過入熱による 溶着不良部への水侵入の影響により溶着不良部でのエコーが小さくなってしまったことが第一 に考えられる。このような接合部における水侵入の影響の心配がないことは、非接触映像化の 利点の一つと考えられる。



図2-79 CFRP/SUS溶着試験体の、水浸超音波探傷法による接合部エコー画像 (図2-76の試験体。枠内が伝搬映像化部分)





(4) まとめ

本サブテーマでは、超音波伝搬映像化探傷法によるレーザ溶着接合部の探傷実験を行い、非 接触型非破壊評価手法としての適用可能性について検討を行った結果、以下のような成果を得 た。

① 金属/熱可塑性CFRP接合部の映像化のために最適な超音波受信角、励起用レーザ照射エネルギー、励起・受信位置等の最適条件が明らかになった。

② モデル試験体についての映像化実験の結果、超音波板波映像から面内で5mm平方以上の欠陥が確実に検出可能で、1mm平方でも検出可能性があることが分かった。

③ 超音波板波伝搬映像から、レーザ溶着接合部における入熱不足又は過入熱による溶着不良 (不溶着)が検出可能であることが分かり、非接触非破壊型の溶着不良検出手法としてこの方 法の有効性が明らかとなった。

④ 水浸超音波エコー探傷画像と板波伝搬映像や溶着状態との対応は必ずしも良好でない場合が
見られ、特に過入熱による溶着不良部について顕著であった。これには溶着不良面への水侵入の影響が考えられた。このような水侵入の影響の心配がないことは接合部評価に適用する上で 非接触映像化の利点の一つと考えられる。

2-2-2節 引用文献

- [1] 高坪, 王, 津田, 遠山, 日本機械学会論文集 A 編, 72[718], 945-950 (2006).
- [2] 高坪, 非破壊検査, 57[4], 162-168 (2008).
- [3] 卜部, 高坪, 遠山, 津田, 永井, 日本複合材料学会誌, 38[5], 183-192 (2012).
- [4] 卜部, 高坪, 遠山, 津田, 王, 永井, 非破壊検査, 61[10], 537-542 (2012).

【3】事業化に向けた検討

BMWからボデーの約50%にCFRPを採用したBMW-i3が販売され、トヨタ自動車 からもフードとルーフにCFRPを採用したLexus RCFの販売が開始された。軽量化 材料としてのCFRPの重要度は高く、これまでランボルギーニ、ポルシェ等のいわゆるスー パーカーと言われる価格数千万の車に限定使用されていたものが、価格数百万の高級車のレベ ルまでCFRPが適用される時代になっている。これらに採用されているのはエポキシを基材 とする熱硬化性CFRPであり、量産車レベルまでCFRPの適用を拡大するためには本研究 の熱可塑製CFRPが必須といわれている。しかし現状では熱可塑製CFPPにも課題が残さ れており、一部、輸入材が市場に出ているが、いまだ国内メーカは販売開始にいたっていない のが現状である。

本研究開発のレーザ溶着技術の目標とした接合幅10mmを1m/min以上の加工速度で の接合は達成されており、第81回レーザ加工学会講演会(2014年5月28日開催)、機械 学会セミナー(2015年2月12日開催)等の各種講演会、セミナーでの本開発技術の紹介 活動を行ってきた。また、中部経済局の支援を受けてTECH Biz EXPO 2014 へのサポインコーナーに出展し、6社に個別に技術プレゼンを実施する機会をいただき、2社 に技術資料を送付させていただいた。

このように宣伝活度を行いながら関係各社からの情報収集を行ってきた。本開発技術への関 心は高いがヒアリングした各社とも現在は技術調査の段階であり、製品のターゲットが具体化 して開発がスタートするためには、まだまだ時間が必要との認識である。

弊社のホームページでも本技術を紹介しており、多関節ロボットシステムの動画も掲載して、 宣伝活動に当てている。今後も講演会、展示会等の機会を活用してサンプル供試、共同開発と フェーズアップしていくための宣伝活度を継続して進めていく。

最終章 全体総括

自動車の軽量化は燃費の向上、省エネルギーのための必須要件であり、最も軽量化効果 が大きいとされる炭素繊維強化プラスチックス(CFRP)、その中でも熱可塑性CFR Pが注目されている。本事業では『エラストマーをインサート材として用いる異種材料の レーザ接合技術』を応用して、金属材料と熱可塑製CFRPの接合技術を量産可能とする 技術として完成させるためのシステム開発を目指し、また接合部における品質評価方法の 開発に取り組んだ。

研究開発の目標は、CFRPの熱変質がなく、接合部の破壊モードが凝集破壊となる レーザ溶着条件を確定し、接合巾10mm以上、溶着速度1m/min以上を達成するこ とにより生産性を確保することと、非接触型の非破壊評価手法として

接合部の超音波伝搬映像化探傷法による接着不良検出の可能性を明らかにし、良品を識別可能な品質保証技術として提案することである。

目標を達成するためには、加熱の均質化が必須の要件である。まず、シミュレーションによ り、板厚2mmのSUS304、A5052および S35Cの平板の裏面温度が、幅10mm の範囲でほぼ均一になるような矩形U字分布熱源の強度分布を求めた。そして、これらの理想 熱源に近い強度分布を、分岐型回折光学素子(DOE)によって具現化した。具体的には、S US304は w(x, y)= U(x)(0.5y⁶+0.5)、A5052は w(x, y)= U(x)(0.8y⁶+0.2)の数式 で表されるU字分布を、16×16分割で、大きさが16mm×16mmのレーザビームとす る分岐型DOEを設計・製作した。また、鋼材は、分岐数の少ないDOEの検討も必要と判断 し、これまでの16×16分岐DOEに替わる12×12分岐DOEを用いることとし、シ ミュレーションで求めた w(x, y)= U(x)(0.6y⁶+0.4)の数式で表されるU字分布の分岐型DOE を設計・製作した。

この分岐型DOEを搭載するビーム整形光学ヘッドとレーザ出力をコントロールするパワー コントローラを設計、製作し、半導体レーザから出射されたトップハットのレーザ光が分岐型 DOEを通すことで目標とするU型のビームプロファイルのレーザ光に整形されていることを 確認した。そして、接合対象とする金属材料にビーム整形光学ヘッドで整形したレーザ光を照 射し、サーモグラフィーで温度分布を計測し、温度分布の均質化効果を確認した。その結果、 ステンレス鋼板:SUS3O4、アルミ板:A5052、鋼板:SPC280ともに、接合幅 の目標値として設定している10mm幅の温度分布を30℃以内に均質化できることを確認し た。

CFRP板とステンレス鋼:SUS304板の間に10mm幅のエラストマーシートを挟み、 ビーム整形後のレーザ光をステンレス鋼SUS304に照射し、作製した試験片の引張試験を 実施し、加工条件と引張強度の関係から最適な溶着条件を求めた。

ビーム整形したレーザ光により均一加熱することで目標とする10MPaの強度が得られ、破 断形態が凝集破壊となることを明らかにした。同様の方法で、アルミ板:A5052、鋼板: SCP280についても、ビーム整形したレーザ光により均一加熱することで目標とする10 MPaの強度が得られ、破断形態も目標とする凝集破壊とすることができた。溶着強度が最大と なる適正条件範囲はステンレス鋼板、アルミ板、鋼板とも材料の接合面の温度が300~40 0℃の間に存在することが明らかにできた。

接合部の状態について、走査型電子顕微鏡、三次元顕微鏡(3Dプロファイラー)等を用い た評価を行い、また、剥離後のエラストマー層表面の全反射型赤外吸収測定を行うことで、エ ラストマー層へのCFRP層成分の混入状況を詳細に化学分析し、CFRP試料の損傷しきい 値についても明確化することができた。

また、レーザ溶着により作成したCFRPと金属接合材を用いて、JIS K6850、JIS K6864 規格に準拠した引張試験および疲労試験を行い、応力、ひずみ、引張せん断強度および疲労特性を評価するとともに、そのマクロ・ミクロフラクトグラフィ的検討により損傷・劣 化過程を明らかにした。最適な加工速度で作成した接合材では12MPa を超えるせん断強度が得られ、良好な疲労強度も得られることがわかった。

今回の研究開発ではPAを基材とする熱可塑製CFRPを主として使用したが、より幅広い 領域での適用を可能とするために基材をPPS、PP、ABS とした熱可塑製CFRPとS US304のレーザ溶着性を評価した。また、ステンレス鋼:SUS304、アルミ:A50 52、鋼板:SCP280について板厚1mm、2mm、3mm について最適なレーザ溶着条 件を求めレーザ溶着条件一覧とデータシートとしてまとめデータベースを構築した。

ビーム整形ヘッドとパワーコントローラを3軸NC加工機に接続してNC加工システムと してシステムアップし、本研究開発のレーザ溶着加工設備として各種のレーザ溶着試験片を作 成した。さらに、軽量材としてのCFRPは、軽量化効果の大きいフード、ルーフ等の大型の ボデーパネルへの適用が想定される。そこで、大型部品のフレキシブルなレーザ溶着加工を可 能とするため、ビーム整形ヘッドとパワーコントローラを多関節ロボットに接続した3次元加 エシステムとしてシステムアップした。また、販売促進用のツールとして使用できるように多 関節ロボットシステムによるCFRPとステンレス鋼のレーザ溶着加工の動画を撮影した。

レーザ溶着接合部の非破壊検査方法として、超音波伝搬映像化探傷法によるレーザ溶着接合 部の探傷実験を行い、非接触型非破壊評価手法としてのレーザ溶着部への適用可能性を明らか にした。まず、金属/熱可塑性CFRP接合部の映像化のための、超音波受信角、励起用レー ザ照射エネルギー、励起・受信位置等の最適条件を実験により明らかにした。次にモデル試験 体について映像化実験を行い、超音波板波映像から面内で5mm平方以上の欠陥が確実に検出 可能で、1mm平方でも検出可能性があることが分かった。続いて、レーザ溶着された試験体 について映像化実験を行った。その結果、入熱不足に伴う溶着不良(不溶着)部が超音波板波の 減衰として検出可能であり、過入熱に起因する溶着不良も同様に検出可能であることが明らか となった。

前述のようにBMWからCFRPのBMW-i3が販売され、トヨタ自動車からもフードと ルーフにCFRPを採用したLexus RCFの販売が開始された。軽量化材料としての CFRPの重要度は高い。現在、採用されているのはエポキシを基材とする熱硬化性CFRP であり、量産車レベルまでCFRPの適用を拡大するためには本研究の熱可塑製CFRPが必 須といわれている。しかし現状では熱可塑製CFRPにも課題が残されており、一部、輸入材 が市場に出ているが、いまだ国内メーカは販売開始にいたっていないのが現状である。

本研究開発のレーザ溶着技術の目標とした接合幅10mmを1m/min以上の加工速度での接合は達成されており、各種セミナー、講演会、展示会、弊社のホームページでの本開発技術の紹介活動を継続して行っている。本開発技術への関心は高いがヒアリングした各社とも現在は技術調査の段階であり、製品のターゲットが具体化して開発がスタートするためには、まだまだ時間が必要との認識である。

今後も講演会、展示会等の機会を活用してサンプル供試、共同開発とフェーズアップしてい くための宣伝活度を継続して進め、本技術の実用化へ向けた検討を推進していく。