

# 電磁成形を用いた異種材マルチマテリアル接合加工技術の開発

国立研究開発法人産業技術総合研究所 製造技術研究部門

原田祥久

(2020 年度一般研究開発助成 AF-2020020-B3)

キーワード：電磁成形，異種材，接合

## 1. 研究の目的と背景

我が国は、内閣府「エネルギー・環境イノベーション戦略」において、数十から百億トンの温室効果ガス削減を目指しており、目標として、自動車重量の半減が掲げられている。そのためには構造材を適材適所に用いるマルチマテリアル化の実現が必要不可欠である。特に、炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は、軽量かつ高強度を有することから軽量化のキーマテリアルであり、車体骨格構造の CFRP と金属の異種材の新しい接合加工技術の開発が期待されている。

従来、接合技術には、「熔融接合」、「固相接合」、「機械的接合」、「接着接合」などがある<sup>1)</sup>。CFRP と金属の異種材接合技術では航空機用途においてリベット等の「機械的接合」と「接着接合」が併用されている。また、熱可塑性樹脂を用いた CFRP では、レーザー等の加熱による「熔融接合」、超音波やホットスタンプ（熱間プレス）のように塑性変形を利用した「固相接合」が研究されている。これらの手法はメリットがある反面、デメリットが存在する。例えば、「機械的接合」ではリベット等の円孔部周辺の応力集中による強度低下および重量増加、「接着接合」では有機等を使用するため環境への負荷や大幅な工程時間増がある。「熔融接合」では CFRP の樹脂層の劣化による強度低下や寿命低下がある。「固相接合」では加工速度が速いが、超音波では接合面積に限られること、ホットスタンプではスプリングバックや金型寿命等の問題がある。

上記接合加工以外に、電磁成形を利用した異種材接合加工がある。電磁成形法は磁界のエネルギーを瞬時に被加工物に加えることによって塑性変形させる方法である<sup>2)</sup>。この成形によって、大幅な工程時間の短縮、成形性の向上が可能となり、自動車部品ではアルミニウム合金のバンパーステーの成形に一部用いられている<sup>3)</sup>。この方法を接合加工に応用し、電気抵抗の大きい金属を用いると、金属に発生する熱と電磁力を利用することができ、熱可塑性樹脂 CFRP と金属の異種材接合が可能となる<sup>4)</sup>。

現在、自動車部品では鉄鋼材料からアルミニウム、CFRP などの軽金属や複合材などのマルチマテリアル化が進んでおり、今後さらなる軽量化のためには、これらの材料に対する需要はますます増加するとともに、CFRP や金属などの接合が必須となる。そこで本研究では、輸送機器のマルチマテリアル化に対応するために、電磁成形を用いた炭素繊維強化プラスチック (CFRP) と金属の異種材の超高速

かつ高信頼性を有する接合加工技術の開発について述べる。

## 2. 研究方法

### 2・1 電磁成形による接合実験

本研究で使用した電磁成形装置の外観を図 1 に示す。装置は図 2 に示すように容量 33.4μF のコンデンサを 12 個、並列あるいは直列に接続することで容量を 33~401μF まで変化させることができる。コンデンサの充電圧は 200V の電源を用いて、昇圧トランスにより 15kV まで印可が可能である。充電エネルギー E は次式にて表される。

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (1)$$

ここで、C はコンデンサ容量、V は充電圧であり、本装置では最大 45kJ のエネルギーを加工に用いることができる。図 3 には電磁成形による接合加工に用いた平板スパイラルを示す。コイルの外径は 100mm、内径は 14mm、ピッチは 4mm である。ガラステープにより絶縁された 15×2mm の矩形断面を持つ銅線を渦巻き状に巻き、コイル導体と同じ穴を持つガラス繊維強化プラスチック (GFRP) の厚板に挿入し、電気絶縁と強度化を施している。インダクタンスおよび抵抗は、それぞれ 4.4μH および 1.1mΩ である。



図 1 電磁成形装置の外観

図 4 には電磁成形による接合法の概略を示す。平板コイルの上に矩形の銅板を設置して、接合に用いる金属板を銅板にブリッジさせてワンターンコイルを形成させ抵抗加熱を行った。銅板に流れる電流の計測を行ったところ、コイルに 6.6kA 流した場合には銅板には 32kA が流れたこと

から 4.8 倍の電流が流れており電流を増幅することができた。そのため本実験では銅板を用いて、接合に用いる金属板上に CFRP を置いて、その上をダイで固定した。金属と CFRP の接合表面は、SiC 耐水研磨紙(#100)あるいはアルミナ粒子(約 100  $\mu\text{m}$ )を用いてブラスト処理を行った。

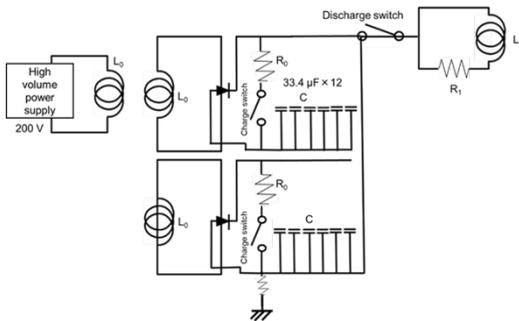


図 2 電磁成形装置の電源回路図

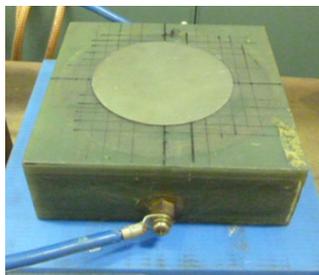


図 3 平板型スパイラルコイル

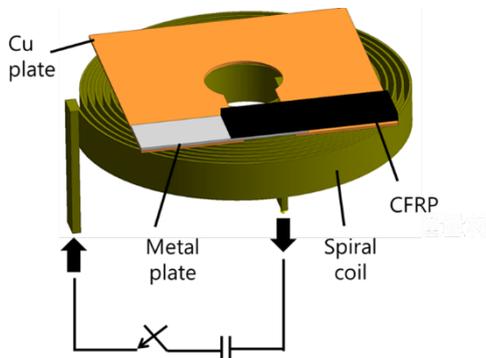


図 4 平板スパイラルコイルを用いた電磁成形による接合法の概略図

## 2・2 試料

本研究で用いた金属は純チタン(第2種), チタン合金(Ti-6Al-4V), ステンレス鋼(SUS304), ニッケル合金(C276), 高張力高(HT590)を用いた。厚さ 1mm の板材を 20×70mm に加工した。CFRP として 1~6mm 長程度の炭素繊維が 20%混入したポリアミド 6(PA6)を母材とする射出成形材を用いた。厚さが約 3.0mm の板材を 20×70mm に加工し、接合実験に用いた。電気抵抗は直流 4 端子法により調べ、室温において純チタンは 0.5  $\mu\Omega\text{m}$ , チタン合金は 1.7  $\mu\Omega\text{m}$ , SUS304 は 0.7  $\mu\Omega\text{m}$ , C276 は 1.3  $\mu\Omega\text{m}$  となった。

電磁成形によってシングルラップ状に接合した試験片

を用いて引張試験を行った。試験後の破面の面積を測定し、破断荷重を面積で除して引張せん断強度を算出した。引張速度は 0.2mm/min とし、破壊に至るまで荷重と変位を測定した。

## 2・3 有限要素解析

電磁成形による接合加工は瞬時に加工が行われるため測定が難しい。そこで有限要素法(FEM)による数値解析を行った。解析に用いたのは汎用 FEM ソフトウェア Femtet(ムラタソフトウェア製)を用いた。解析に用いた材料パラメータを表 1 に示す。解析手法には過度応答解析を用いた。解析モデルには四面体一次要素を使用し、メッシュサイズは、コイルが 2.0mm, 銅板コイルは 1.0mm, 金属板は 0.5mm, CFRP は 0.5mm とした。コイルの電気伝導率は 5.977  $\times 10^7\text{S/m}$  を用いた。解析に用いた印可電流について、回路上に直接電流計を設置することはショート危険性があるため、コイルのみの状態で電圧を印可し、発生する磁場によって生じる誘導起電力から印可電流を同定した。

表 1 解析に用いた材料パラメータ

	チタン	Ti-6Al-4V	SUS304	C276
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	4.51	4.4	7.93	8.89
熱伝導率 (W/m·K)	21.9	7.5	16.0	11.0
比熱 (J/kg·K)	524	585	502	427
電気伝導率 (S/m)	2.38 $\times 10^6$	5.98 $\times 10^5$	1.37 $\times 10^6$	0.77 $\times 10^6$
比透磁率	1.0	1.0	1.02	1.0

## 3. 研究成果

### 3・1 有限要素法(FEM)を用いた電磁場と熱伝導の連成解析

図 4 に示した実験モデルの数値計算を行い、接合面での温度とローレンツ力を解析した。接合面の温度は測定した印可電流の 1 パルスあたりの終了時間である 184  $\mu\text{s}$  を、ローレンツ力はその電流値が最大となる 92  $\mu\text{s}$  で評価を行った。最初に、電磁成形によって発生する接合界面の温度を解析した。一例として図 5 には Ti-CFRP 接合材の充電圧 4~7kV のときの金属面の温度コンター図を示す。この結果から充電圧が大きくなるに従って接合面の温度が上昇している。また、温度分布には偏りが見られ、充電圧が大きくなるにつれて、その偏りも大きくなる。この傾向は他の金属も同様な結果となった。次に、数値解析により算出した接合面の温度について、融解温度が占める領域の割合を温度分布のヒストグラムにまとめた。一例として、図 6 には Ti-CFRP 接合材の充電圧 4~7kV のときの結果を示

す。本研究で用いた CFRP の融解温度を調べるため、示差走査熱量計 (DSC) を用いて測定した結果、209°C 付近から融解し始め、240°C で融解のピークを示した。そこで、測定した融解温度の領域が占める割合を算出した。その結果、Ti 接合材では充電圧が 5kV のとき融解温度が占める割合が 23.1% と多い。その他 Ti-6Al-4V, C276 接合材も同様であったが、その割合が 50% 以上あり、Ti 接合材よりも強固に接合されると予測された。一方、SUS304 接合材では 4kV のときが 50% 以上あった。

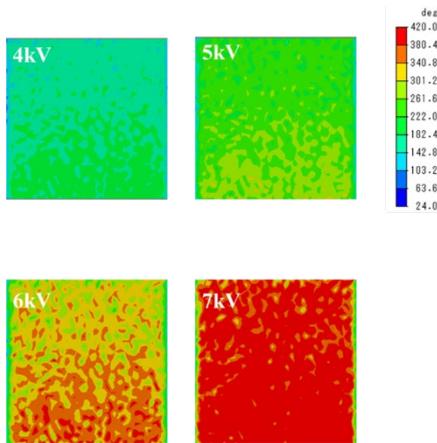


図 5 FEM 解析による Ti-CFRP 接合材の接合面の温度コンター図 (充電圧 4~7kV)

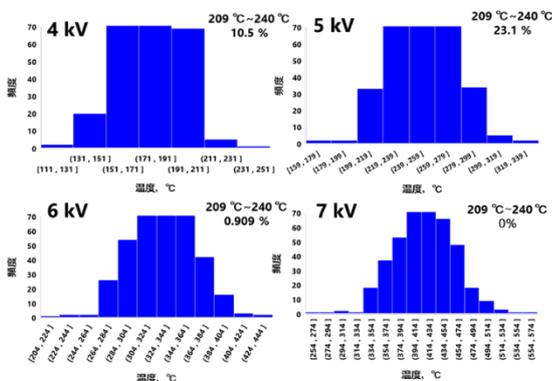


図 6 FEM 解析による Ti-CFRP 接合材の接合面の温度分布 (充電圧 4~7kV)

次に、電磁成形によって発生する接合面のローレンツ力の解析を行った。一例として、図 7 には Ti-CFRP 接合材の充電圧 4~7kV のときの金属面に発生するローレンツ力分布図を示す。この結果から、充電圧が増加するとローレンツ力も大きくなるが、接合面の端部付近の分布が増大する傾向が見られる。これは実験に用いたスパイラルコイルの形状に影響したためである。また、Ti, Ti-6Al-4V, SUS304, C276 接合材の金属板全体にかかる垂直成分 (Z 方向) のローレンツ力と充電圧の関係を図 8 にまとめた。この図から、すべての接合材において充電圧が増加するとローレンツ力も大きくなり相関性が確認できる。しかし、充電圧が

大きすぎると CFRP が絶縁破壊する可能性があり、小さすぎると接合面に圧接力がかからない。よってローレンツ力に最適な値があり、誘導加熱により発生する温度とのバランスが必要となる。

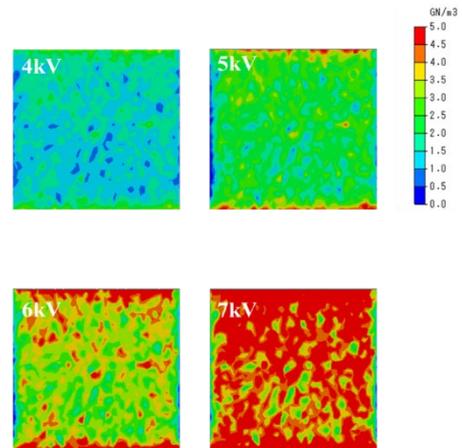


図 7 FEM 解析による Ti-CFRP 接合材の接合面のローレンツ力分布図 (充電圧 4~7kV)

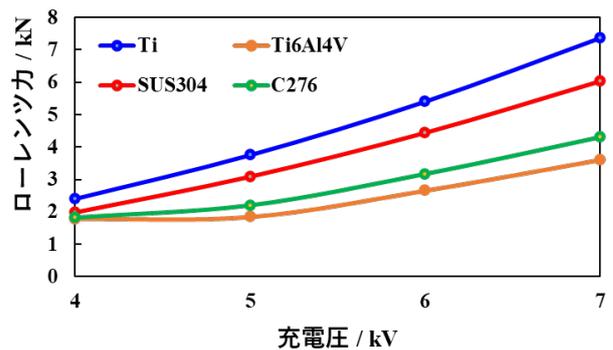


図 8 各種接合材の充電圧とローレンツ力の関係

### 3・2 電磁成形による接合実験 (表面加工の影響)

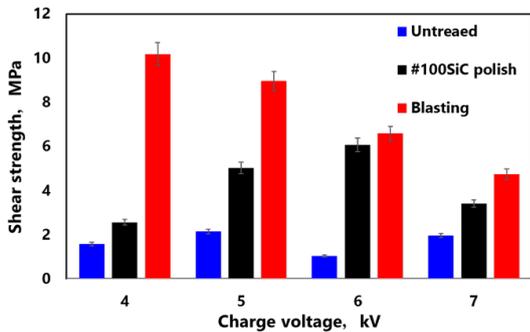
本実験に用いた CFRP は直径 7 $\mu$ m 程度の炭素繊維が樹脂にて包含された構造となっている。すなわち、試験片の表面層は樹脂相となっているため、CFRP と金属の異種材接合には樹脂母材と金属の接合面の状態が重要となる。そこで最初に接合面の表面加工による影響を調べた。

表 2 Ti, Ti6Al4V および CFRP の表面加工による表面粗さの変化

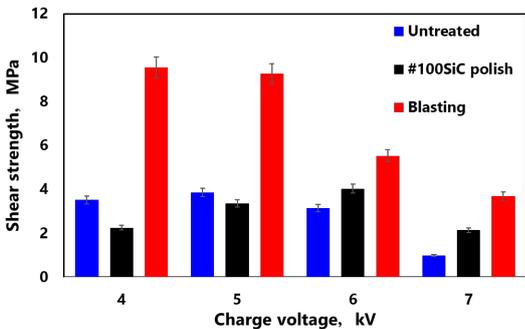
試料	表面粗さ $S_a$ ( $\mu$ m)		
	Ti	Ti-6Al-4V	CFRP
加工なし	11.2	12.9	12.5
SiC 湿式研磨	17.8	15.4	16.3
ブラスト加工	49.3	30.4	25.6

Ti, Ti-6Al-4V および CFRP の接合面に、SiC 湿式研磨 (#100), ブラスト加工 (アルミナ粒子 100  $\mu$ m) の表面加工

を施し接合実験を行った。表 2 には各材料の表面粗さの測定結果を示す。Ti では、表面加工を施していない試料の粗さは約  $11.2\mu\text{m}$  に対して、SiC 研磨紙では  $17.8\mu\text{m}$ 、ブラスト加工では  $49.3\mu\text{m}$  となり、ブラスト加工を施すことにより約 4 倍の表面粗さを得た。Ti-6Al-4V で約 3 倍、CFRP では約 2 倍も粗さが大きくなる。これら接合面の表面加工を施した試料を用いて、電磁成形による接合加工を行った。そのときの充電圧は 4~7kV にて実施した。これら接合材について引張試験を行い、引張せん断強度を算出した結果を図 9 に示す。これらの結果から、ブラスト加工を施すことにより、Ti-CFRP 接合材では充電圧 4kV のとき約 10.2MPa、Ti6Al4V-CFRP 接合材では約 9.5MPa と大きな引張せん断強度を得ており、加工なしや研磨試験片の場合と比較すると 3~5 倍程度大きな値となる。また、それぞれの接合材において充電圧が 4kV のとき強度が最大となることから、強度の充電圧依存性が見られる。この大きな強度上昇の理由としてアンカー効果が上げられる。



(a) Ti-CFRP 接合材

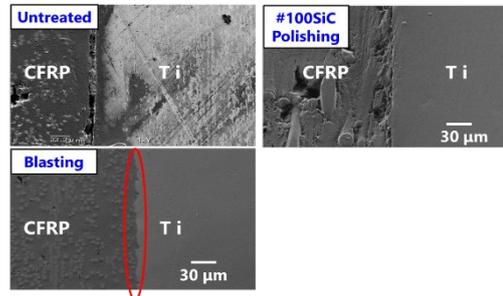


(b) Ti6Al4V-CFRP 接合材

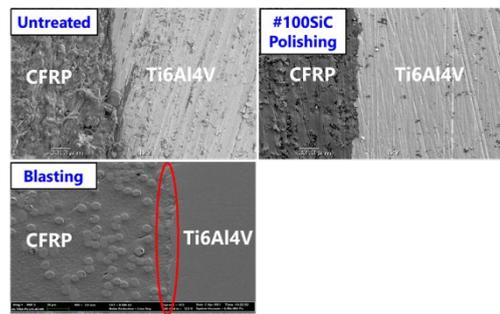
図 9 接合面に各種表面加工を施した試料について電磁成形により接合した接合材の接合強度の充電圧依存性

図 10 には Ti-CFRP および Ti6Al4V 接合材について各種表面加工処理を施した接合界面の SEM 像を示す。これらの結果から、Ti あるいは Ti6Al4V 接合材ともにブラスト加工を行うことで、CFRP との接合界面が波状を伴いそこに樹脂が流れ込み密着していることがわかる。一方、加工処理のない試料や SiC 研磨紙による加工した試料では界面において剥離等が見られる。以上の結果より、接合面にブ

ラスト加工を施すことによって金属表面の微細な凹凸に CFRP のマトリックス樹脂が入り込み、機械的な接合（アンカー効果）を形成することが確認できた。しかし、SEM 画像の中には、CFRP 側に損傷している画像も見られた。

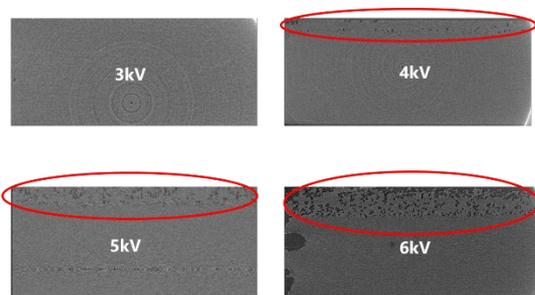


(a) Ti-CFRP 接合材

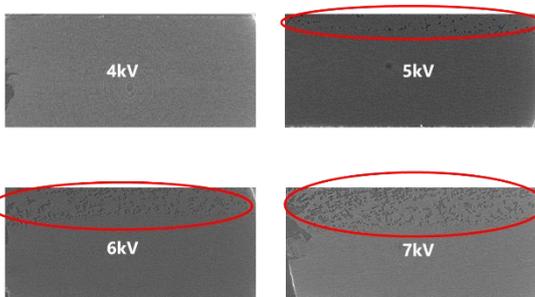


(b) Ti6Al4V-CFRP 接合材

図 10 接合面に各種表面加工を施した試料について電磁成形により接合した接合材の接合界面の観察



(a) Ti-CFRP 接合材



(b) Ti6Al4V-CFRP 接合材

図 11 電磁成形により接合した Ti-CFRP と Ti6Al4V-CFRP 接合材の CFRP 側の内部損傷観察

そこでマイクロフォーカス X 線 CT により CFRP 側の内部観察を行った。図 11 には Ti-CFRP および Ti6Al4V-CFRP にブラスト加工を行い、充電電圧 3~7kV で電磁成形による接合を行った試料の X 線透過像を示す。この結果から、充電電圧が大きくなるにつれて CFRP の内部損傷も大きくなっていることがわかる。Ti では 4kV から、Ti6Al4V では 5kV から損傷が進む。内部損傷が生じる原因としては、電磁成形時に CFRP の樹脂が融解温度を超え、空隙を形成すると予測される。また、図 10 に示したように引張せん断強度の最大値は、両金属とともに充電電圧が 4kV のときであるが、XCT 観察の結果から、Ti では充電電圧が 3~4kV、Ti6Al4V では 4~5kV の間に最適な条件があることが考えられる。

### 3・3 電磁成形による接合実験（各種金属との接合）

SUS304, C276, HT590 と CFRP について、電磁成形による接合を行い、引張試験を行った。図 12 には接合面にブラスト加工を施した SUS304, C276, HT590-CFRP について、電磁成形により接合した試験片を用いて引張試験により得られた引張せん断強度と充電電圧の関係を示す。これらの結果から、SUS304 では充電電圧が 4kV のとき約 12.8MPa, C276 では 5kV のとき約 11.7MPa となり、Ti や Ti6Al4V よりも大幅な強度向上が見られる。一方、SUS304 に物性値に近い高張力鋼 HT590 では、約 8MPa と他の金属に比べて若干小さな値となる。この要因については接合破面を比較することでわかる。図 13 には SUS304, C276, HT590-CFRP 接合材の接合破面を比較した写真を示す。HT590 の場合、同じ充電電圧でも SUS304 や C276 よりも CFRP の付着が少ないように見える。したがって、接合面での温度が CFRP の樹脂の融解温度まで上昇していない可能性が考えられる。HT590 の組成には銅(Cu)が 0.3%程度含まれる。そのため他の金属よりも、電磁成形時に使用している銅板コイルとの相性がよく、接合を行うと HT590 板と接している部分で銅板コイルと接合されてしまうことがあった。すなわち、実際の実験では解析結果よりも強い電磁力が生じるため接合面で温度上昇していないと考えられる。

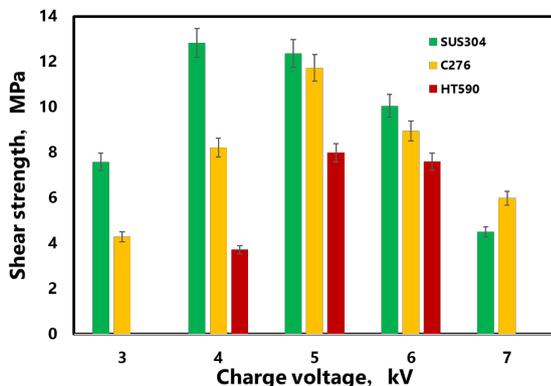


図 12 充電電圧 3~7kV で電磁成形による接合を行った SUS304, C276, HT590-CFRP 接合材の引張せん断強度の比較

Metal	Joint fracture surfaces		
	4 kV	5 kV	6 kV
SUS304 (1.0 mm)			
C276 (1.0 mm)			
HT590 (1.0mm)			

図 13 充電電圧 4~6kV で電磁成形により接合した SUS304, C276, HT590-CFRP 接合材の引張破壊後の接合破面観察

表面加工なしとブラスト加工を施した SUS304 と CFRP を電磁成形による接合を行った接合材の疲労試験を実施した。加工条件はどちらの試料とも接合強度が最も高い値である充電電圧 4kV を用いた。疲労条件は、室温にて周波数 5Hz, 応力比 0.1 の引張疲労にて行った。図 14 には横軸が破断したときの疲労回数、縦軸が最大応力の S-N 線図を示す。この結果から、どちらの試料も最大応力が小さくなるにしたがって、繰返し数も増加する典型的な疲労曲線を示す。ブラスト加工を施した試料は、加工なしの試料よりも疲労強度が大きく、同程度の応力負荷の条件で比較すると  $10^3$  回ほど違うことがわかる。以上の結果から、SUS304-CFRP 接合材において、接合面にブラスト加工を施すことによって接合した場合には大幅な疲労寿命の増加が見込めることがわかった。

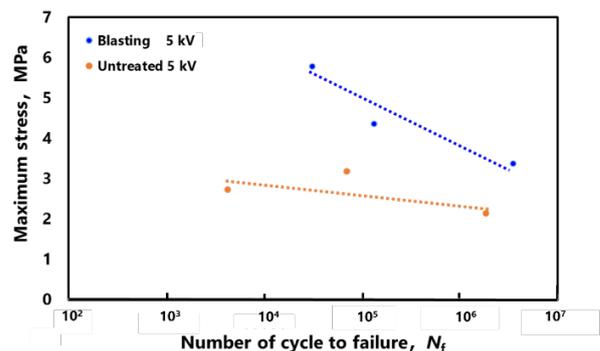


図 14 接合面に表面加工なしあるいはブラスト加工を施し電磁成形により接合した SUS304-CFRP 接合材の疲労特性評価

### 3・4 接合界面の表面分析

CFRP と金属の異種材の直接接合では、CFRP 樹脂の極性官能基と金属表面の酸化物が静電相互作用による分子間力を発生させているという報告がある<sup>5)</sup>。そこで電磁成形

による接合においてどのような結合が生じているのかを X 線光電子分光装置(XPS)を用いて調べた。表面にプラスト加工を施した試料を電磁接合し、界面を含む試料の断面を研磨し分析を行った。なお、研磨による汚れを除去するため、測定前に Ar イオンを用いたスパッタリングを行った。図 15 には Ti-CFRP 接合材の接合界面の Ti 面側の C1s, O1s, N1s, Ti2p に関する XPS スペクトルを示す。測定箇所は接合界面から 0.5mm, 0.2mm, 0.1mm 離れた 3 点で測定を行った。この結果から C1s では、界面近傍に近づくにつれ炭素繊維の C-C, 樹脂由来の C=O, O=C-O 基などのピークが存在している。また N1s では、界面に近づくにつれ、CFRP 由来のアミド基が大きくなっている。Ti2p では、TiO<sub>2</sub> の大きなピークが確認される。また界面付近では今まで測定されなかった TiO のピークが確認される。

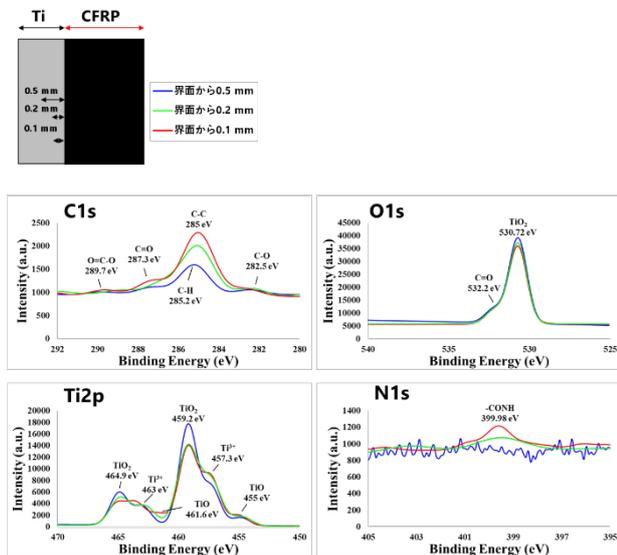


図 15 充電圧 4kV で電磁成形により接合した Ti-CFRP 接合材の接合界面での Ti 面側の XPS スペクトル

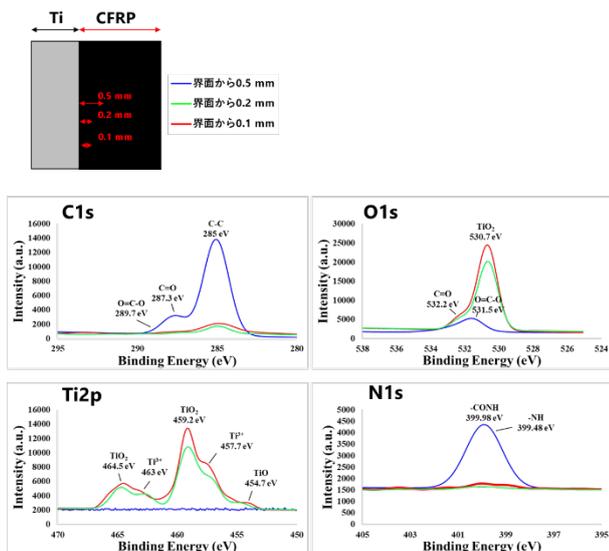


図 16 充電圧 4kV で電磁成形により接合した Ti-CFRP 接合材の CFRP 面側の XPS スペクトル

次に CFRP 側について同様に分析を行った。界面から 0.5 mm, 0.2 mm, 0.1 mm 離れた Ti-CFRP 接合界面の CFRP 面側の C1s, O1s, N1s, Ti2p に関する XPS スペクトルを図 16 に示す。C1s では、界面から離れた場所では、炭素繊維の C-C, 樹脂由来の C=O, O=C-O 基などのピークが存在している。しかし界面近傍に行くとピーク強度がかなり小さくなる。O1s では、界面から離れた場所は、樹脂由来の C=O, O=C-O 基などのピークが存在している。一方、界面に近づくにつれ、TiO<sub>2</sub> の大きなピークが見られた。Ti2p では、界面から離れた場所では全くピークがないのに対し、界面近傍では TiO<sub>2</sub> の大きなピークが確認された。また界面付近では今まで測定されなかった TiO のピークが確認され、Ti 面側と同じようなスペクトルとなる。

以上の結果から、プラスト加工の Ti-CFRP は界面近傍で TiO<sub>2</sub> または TiO を介して接合されているということが分かった。また Ti 面側では N1s で CFRP 由来のアミド基に関する大きなピーク強度が得られている。したがって、CFRP 由来のアミド(-CONH)基と Ti 由来の Ti-O の酸化物により、界面に水素結合が生成され、これが強度上昇に影響を与えている。

#### 4. 結び

本研究では輸送機器のマルチマテリアル化に対応するため、電磁成形を用いた CFRP と金属の異種材接合加工を行った。有限要素法を用いた加工条件の最適化を行い、その結果を反映させて、電磁成形装置を用いて純チタン、チタン合金、ステンレス鋼、ニッケル合金、高張力鋼材に電磁エネルギーを加えることで CFRP との接合が可能となった。また、ステンレス鋼では接合強度が 12MPa を超え十分に実用に耐えられる性能を得ることができた。しかしながら、接合面における温度の均一性に欠けるため、今後はコイル形状の最適化が必要であり、接合に適したコイルの開発を行う予定である。

#### 謝 辞

本研究の一部は公益財団法人天田財団の 2020 年度一般研究開発助成(AF-2020020-B3)の支援によって実施された。電磁成形実験および力学特性評価は名越貴志博士、中田暁人氏、解析は中住昭吾博士の協力のもと実施した。XPS 分析は、大阪産業技術研究所および福島県ハイテクプラザにて実施した。

#### 参考文献

- 1) 西口公之 他：新版接合技術総論，(1994)，美巧社
- 2) 鈴木秀男 他：塑性と加工，25-283 (1984)，694.
- 3) 津吉恒武 他：神戸製鋼技報，59-2 (2009)，17.
- 4) 原田祥久，松崎邦男，中田暁人，野村悠：チタン，69-1 (2021).
- 5) Feng, Z., Ma, G. and Su, J.: Journal of Manufacturing Processes, 64 (2021), 1493.