

# 電磁成形を用いた炭素繊維強化プラスチックと金属の異種材接合技術の開発

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

(平成 28 年度 一般研究開発助成 AF-2016006)

キーワード：電磁成形, CFRP, 接合

## 1. 研究の目的と背景

地球温暖化対策として、自動車・航空機等の輸送機器の軽量化・低燃費化が望まれている。特に、自動車の軽量化による対策は必須であり、そのためには材料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。炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は、軽量でかつ高強度を有することから次世代の構造材料として注目されており、車体骨格構造の CFRP と金属のハイブリッド化 (接合) 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リベット等の「機械的接合」、「接着接合」が一般的に用いられており、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。

これら接合技術の他に、電磁成形を利用した方法が考えられる。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。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、最近では自動車部品のアルミニウム合金の成形に用いられている。筆者らは、難加工性材料のマグネシウム合金に適用し、高速変形を実現している<sup>3)</sup>。この手法は電気抵抗の低い金属に限られ適用可能である。接合の場合も同様で、電気抵抗の低い金属同士の界面にメタルジェットを放出させ接合することが知られている。現状として、自動車部品は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、金属のみならずプラスチックあるいは CFRP などへの適用が必要不可欠となるとともに、それらの接合が必須となる。電磁成形での接合では、金属と金属の接合に関しては多数報告されているが<sup>4)</sup>、金属とプラスチックや CFRP の接合に関する報告はほとんどない。そこで、電気抵抗の高い金属に誘導起電力を発生

させることによる誘導加熱と磁場の反発力を利用すれば、金属と CFRP の接合が期待できる。

そこで本論文では、電磁成形法を接合に応用して、CFRP と金属の異種材接合を行う技術開発について述べる。

## 2. 実験方法

### 2・1 試料

本研究で用いた金属は純チタン (第 2 種) およびチタン合金 (Ti-6Al-4V) を用いた。厚さ 0.5mm の板材を 100×100mm に加工した。CFRP として熱可塑性樹脂 CFRP の母材に多く用いられる PA66 (ナイロン 66) を用いた。厚さが約 3.0mm の板材を 20×100mm に加工し、接合実験に用いた。チタンの電気抵抗は直流 4 端子法により調べ、室温において純チタンは 50 $\mu\Omega$ cm、チタン合金は 180 $\mu\Omega$ cm となった。また、PA66 の熱的特性は示差走査熱量計 (DSC) によって調べ、熔融開始温度は約 240 $^{\circ}$ C であった。

### 2・2 電磁成形による接合実験

本研究で使用した電磁成形機の外観を図 1 に示す。装置は容量 33.3 $\mu$ F 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 33~400 $\mu$ F 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。電磁成形に用いた平板スパイラルを図 2 に示す。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、電気絶縁と強度強化を施している。インダクタンスおよび抵抗は、それぞれ 4.4 $\mu$ H および 1.1m $\Omega$  である。

図 3 には電磁成形による接合法の概略を示す。平板コイルの上に断熱のためガラスクロスを置き、その上にチタン板、PA66 もしくは CFRP、その上にガラスクロスを置いて

押さえにより固定した、200 $\mu$ F のコンデンサバンクに 6~10kV で充電した後、コイルに放電することにより、チタン板材を加熱するとともに電磁力により PA66 板材に加圧することで行った。電磁力による温度変化は、サーモラベルを用いた。



図1 電磁成形機の外観

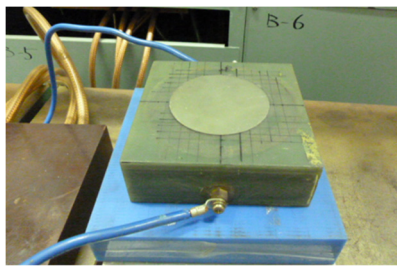


図2 電磁成形用コイル

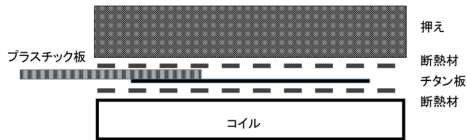


図3 金属とCFRPの接合プロセス

### 2・3 有限要素解析

電磁成形による接合界面の温度変化は瞬時に発生す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二次要素を使用し、要素数は、コイルが約 33800 要素、チタン板材が約 42700 要素とした。コイルの電気伝導率は  $5.977 \times 10^7$  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加し、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。解析で付加した印可電流を図 4 に示す。電磁成形において最大変形量は第一周期で生じることがわかっているため、本解析では 40 $\mu$ s を解析終了時間とした。

表1 解析に用いた材料パラメータ

	純チタン	チタン合金(Ti-6Al-4V)
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	$4.5 \times 10^3$	$4.4 \times 10^3$
熱伝導率(W/m·K)	21.9	7.5
比熱 (J/kg·K)	$5.24 \times 10^2$	$5.85 \times 10^2$
電気伝導率 (S/m)	$2.38 \times 10^6$	$5.98 \times 10^5$
比透磁率	1.0	1.0

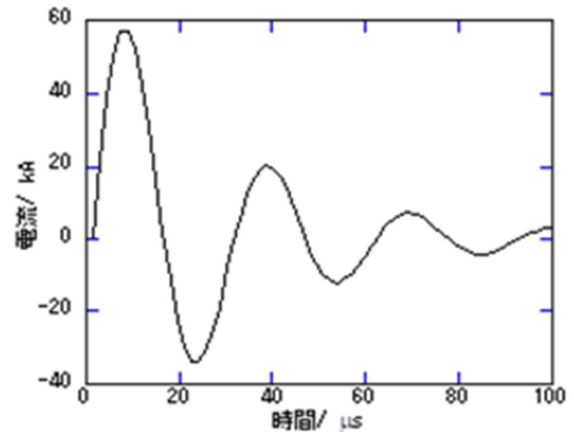


図4 解析に用いた印可電流

## 3. 実験結果

### 3・1 電磁成形によるチタン材との接合実験

CFRP は直径 7 $\mu$ m 程度の炭素繊維がプラスチックにて包含された構造となっている。すなわち、試験片の表層はプラスチック相となっているため CFRP と金属の異種材接合にはプラスチック母材と金属の接合加工を行う必要がある。そこで本研究では、熱可塑性樹脂 CFRP に多く用いられる PA66(ナイロン 66)を用いてチタンおよびチタン合金(Ti-6Al-4V)との接合加工実験を行った。

図 5 には 200 $\mu$ F、8kV あるいは 10kV の充電エネルギーをコイルに解放したときに、純チタン板材に生じた誘導電流による温度上昇を測定した結果を示す。(a)では正方形の板材を用いて 100 $^{\circ}$ C のサーモラベルによる温度測定した結果である。温度は板の外側部分で高くなっており 100 $^{\circ}$ C を超えることがわかる。しかしながら、板の角部分では 100 $^{\circ}$ C 以下となり、中心付近でも 100 $^{\circ}$ C に達していない。これは、コイル形状を反映して誘導電流が板全体に均一には流れず、同心円状に流れ、端部分で大きく流れていることを示す。(b)に示す 200 $\mu$ F、10kV の充電エネルギーに増加させた条件においては 150 $^{\circ}$ C 以上の温度が得られていない。そこで、板材の中心に直径 30mm の穴を空けて電流密度を増加させることを試みた。(c)に示すように板材の中心に穴をあけて電磁エネルギーを与えた場合には温度が 200 $^{\circ}$ C まで達している。さらに(d)のように辺の中心部分を 20mm 幅にして電磁エネルギーを与えた場合、

PA66 の溶融開始温度を超えて 250°C以上に温度が上昇する様子がわかる。これは、電流の通路が狭まり、抵抗が高くなったため、結果として温度上昇が生じたと考えられる。

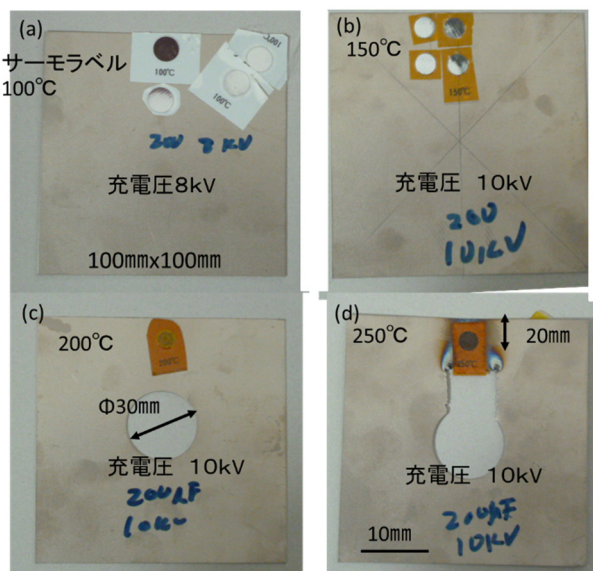


図5 純チタン板材に電磁エネルギーを与えたときの温度変化

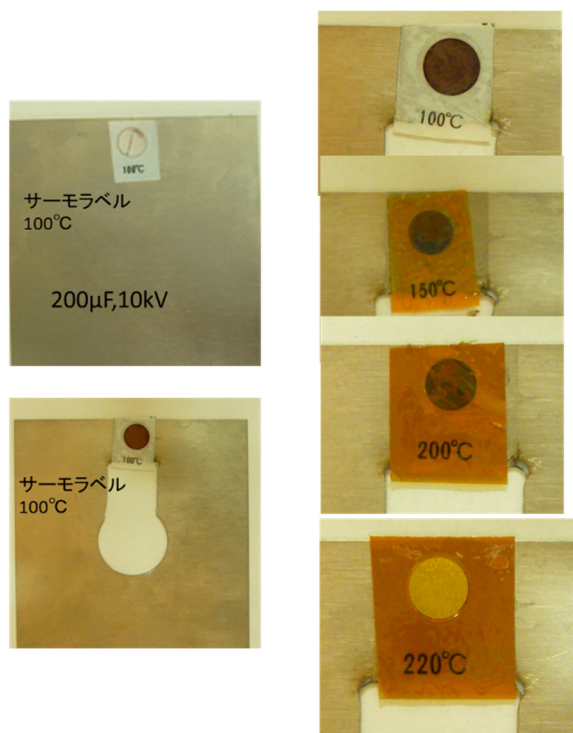


図6 チタン合金(Ti-6Al-4V) 板材に電磁エネルギーを与えたときの温度変化

図6には200µF、8kVあるいは10kVの充電エネルギーをコイルに解放したときに、チタン合金(Ti-6Al-4V)板材に生じた誘導電流による温度上昇を測定した結果を示す。この結果から、温度上昇は200°Cまで見られるが、220°Cまで達していないことがわかる。これは、チタン合金では電気抵抗が高いため、電流が流れる表皮深さは12mmとな

り、0.5mm厚さの板材に流れる誘導電流は少なくなるためと考えられる。一方、純チタン板材の表皮深さは6mmであり、チタン合金よりも大きな電流が流れ、結果として抵抗加熱が可能になったと考えられる。

図7は図5(d)の形状の純チタン板材を用いて電磁成形機によりPA66板材との接合を行ったときの結果を示す。PA66の端の部分では溶融により変色している様子が見られ、純チタン板材においても変色しており、加熱により酸化していることがわかる。図8には接合界面の光学顕微鏡による観察結果を示す。この結果から、純チタンとPA66の界面にPA66が溶融して凝固した組織が形成され、純チタンと溶融部分が接合していることがわかる。一方、PA66の溶融部分の近傍には空隙が形成される。次に、接合した試験片から短冊状に加工し、ラップジョイントによる引張試験を行った。図9には各種充電電圧における接合強度(引張せん断強度)を示す。この結果から、接合強度は充電電圧の増加により向上し、最大で約1.5MPaまで増加する。しかしながら、純チタンとPA66の溶融部分との間で破壊が生じており、改善する必要がある。

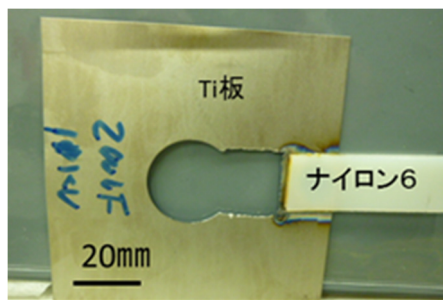


図7 純チタン板材とPA66との電磁成形による接合

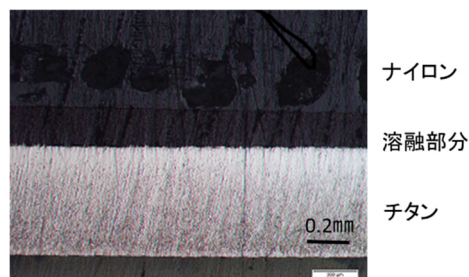


図8 チタンとPA66接合界面の光学顕微鏡観察

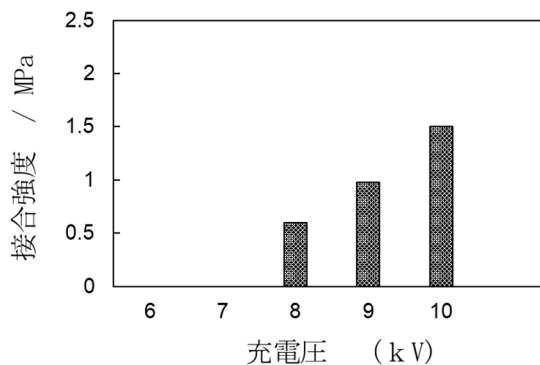


図9 各種充電電圧で接合したチタン-PA66の接合強度



### 3・2 有限要素法(FEM)を用いた電流—磁場—熱連成解析

電磁エネルギーを与えたときの純チタン板面の温度を解析するため FEM による電流—磁場—熱連成解析を行った。その結果を図 10 に示す。左図に示したサーモラベルによる測定箇所の温度は、右図に示す解析結果より 248-291℃の温度域を表しており、実験および解析の両者は一致している。したがって、FEM 解析によって実験をモデル化できていることを確認した。次に純チタン上に PA66 を置いて解析を行った。その結果を図 11 に示す。下図には接合面における温度のラインプロファイルを示す。この結果から、温度は中心付近の始点では 200℃超であるが、端部に向かって急激に減少し、約 120℃程度になっている。すなわち、PA66 への熱伝導により表面温度が低下しており、結果として図 9 に示したように接合強度が 1.5MPa 程度になったと推定される。図 12 にはチタン合金 (Ti-6Al-4V) を用いたときの解析結果を示す。この解析結果から、接合面温度のラインプロファイル分布の傾向は純チタンのときと同じような変化が見られるが、温度範囲が 30℃~55℃程度となっており、ほとんど温度上昇が見られない。



図 10 FEM 解析による純チタン表面上の温度分布

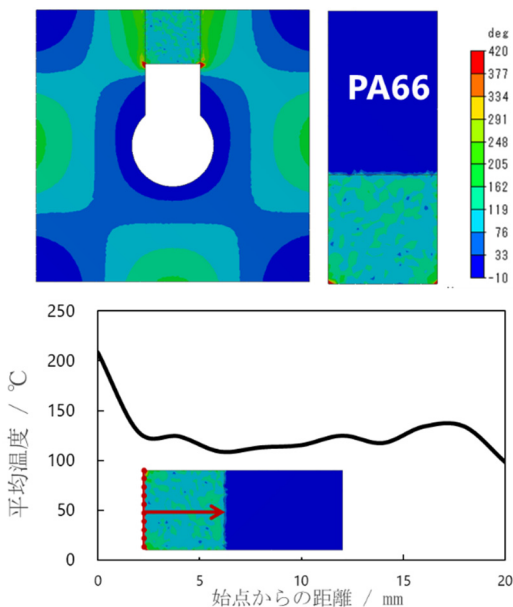


図 11 FEM 解析による PA66-純チタン表面上の温度分布

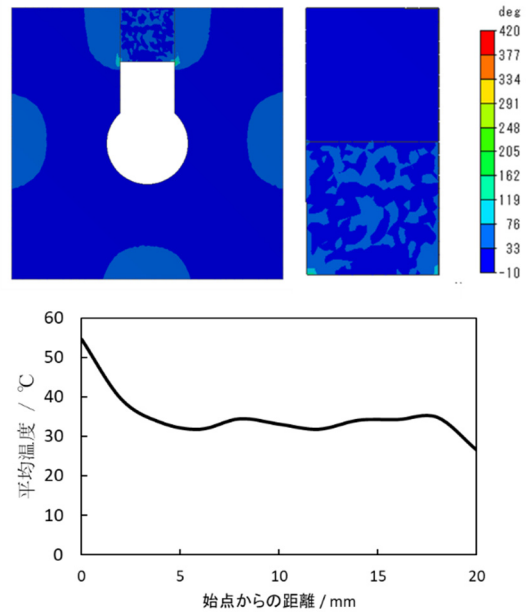


図 12 FEM 解析による PA66-チタン合金(Ti-6Al-4V) 表面上の温度分布

### 3・3 電磁成形用板状コイルを用いた接合

図 3 に示す手法では、電気抵抗が高いチタン合金(Ti-6Al-4V)では PA66 との接合が出来なかった。そこで、このような材料でも電磁成形を用いた接合が可能となるようにするため、電磁成形用板状コイルを図 2 に示したコイルの上に置く方法で実施した。その際に使用した板状コイルを図 13 に示す。銅製板状コイルに幅 20mm のスリットを設けて、その上にチタン合金および PA66 を設置して行った。その結果を図 14 に示す。左図に示すように PA66 とチタン合金の接合が可能となり、右図に示すように CFRP とチタン合金の接合も可能となっている。

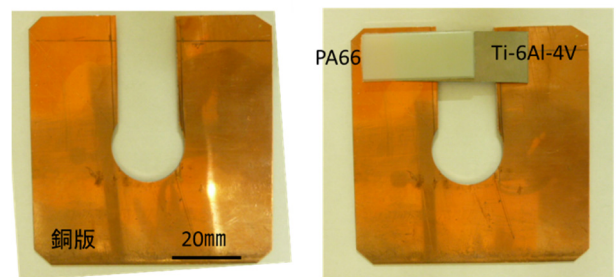


図 13 電磁成形用板状コイル

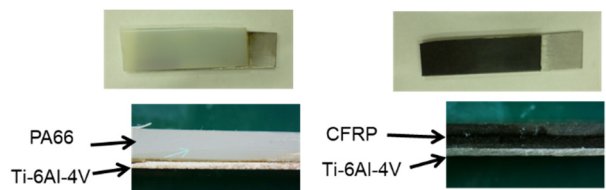


図 14 Ti-6Al-4V と PA66 あるいは CFRP との接合

また、図 15 には銅製板状コイルを用いてチタン合金と PA66 を置いたときの FEM による電流-磁場-熱連成解析の結果を示す。グラフ中には図 12 の結果も同様に示した。この結果から、銅製板状コイルを使用した場合には、PA66 の表面温度は 270~360℃ の範囲で温度分布が見られ、PA66 が熔融する十分な温度上昇が発生する。このように、銅製板状コイルを使用することによって、本来電磁エネルギーを利用して接合不可能な材料でも接合可能となることがわかった。一方、温度分布の均一化などの課題があり、今後 FEM 解析と併せて研究を行っていく予定である。

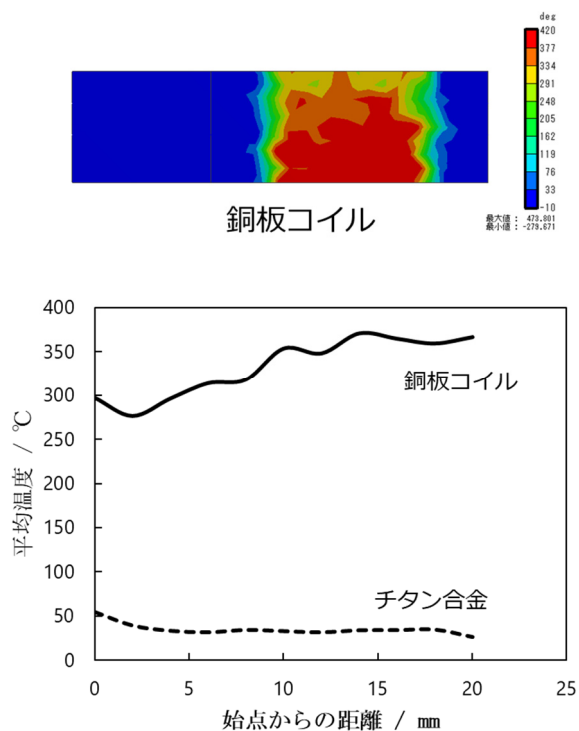


図 15 電磁成形用板状コイルを用いたときの FEM 解析による PA66-純チタン表面上の温度分布

#### 4. 結び

本研究では電磁成形法を用いて、CFRP 母材とチタン材の異種材接合加工を行った。電磁成形機を用いて純チタン板材に電磁エネルギーを加えることで PA66 との接合が可能であった。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、十分な接合強度が得られなかった。また、電気抵抗が高く電磁接合の難しいチタン合金(Ti-6Al-4V)では、銅製の板状コイルを用いることによって、PA66 との接合することが可能となった。今後、FEM 解析により接合界面での温度分布の均一性を図るとともに、それ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平成 28 年度一般研究開発助成 (AF-2016006) の支援によって実施された。電磁成形実験は松崎邦男博士、解析は中住昭吾博士の協力のもと実施した。

#### 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) 松崎邦男，原田祥久，丸山諒：第 68 回塑性加工連合講演会，25 (2017)，235.
- 4) 糸井貴臣，鈴木亮，佐々木雅史，岡川啓吾：軽金属溶接，55-8 (2017)，6.