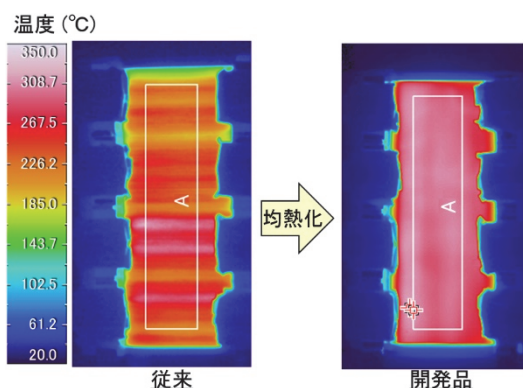


熱可塑性複合材の抵抗融着法による効率的な接合技術

Efficient Joining Technology for Thermoplastic Composites Using Resistance Welding Method



渡邊 保徳*¹
Yasunori Watanabe

柴 勇輔*²
Yusuke Shiba

弘津 聡史*³
Satoshi Hirotsu

丸山 諒*⁴
Ryo Maruyama

守屋 誠*⁵
Makoto Moriya

岩永 知也*⁶
Tomoya Iwanaga

三菱重工業株式会社では、カーボンニュートラル実現に向けて、航空機の機体軽量化により燃費を向上させ、環境への影響を低減する取組みを進めている。機体軽量化と組立時間低減の打ち手の一つとして、熱可塑性複合材の融着接手法がある。本報では、融着接合法のうち、接合界面を局所的に加熱して融着する抵抗融着法について、安定した融着品質を得るためのプロセスを開発したため、その概要について報告する。

1. はじめに

三菱重工業株式会社(以下、当社)は 2040 年にカーボンニュートラルを達成することを宣言(MISSION NET ZERO)し、航空機では機体軽量化や空力特性改善により燃料消費を抑え、環境影響を低減することを目指している。

欧州・北米の民間航空機メーカーを中心に進められているプロジェクトでは、2035 年前後には現行の月産 10 機前後から月産 60~100 機への生産レートアップを目標に研究開発に取り組まれている。その中では、従来のボルト結合・接着接合から熱可塑性複合材の融着接合に変更する取組みも進められている。これを実現できれば、機体重量低減に加えて、サイクルタイムを大幅に短縮でき生産レートアップが可能なことから、当社を含め、世界中で研究開発が行われている。

2. 抵抗融着法

2.1 融着接合法

融着接合法には、熱板(熱伝導)融着、振動融着、超音波融着、抵抗融着、電磁誘導融着、レーザー融着などがあり、このうち主要な手法の概要を表 1 に示す。このうち、熱板融着は金型などの外部からの加熱により接合する母材(以下、被着体)を昇温し、被着体の樹脂を溶融・融着する。その他の融着接合法は接合界面を局所的に加熱する方式であり、振動融着と超音波融着は、振動や超音波の伝搬により接合界面に摩擦発熱と粘弾性発熱を生じさせて加熱・融着する。抵抗融着は、被着体間の接合界面に発熱体と呼ばれる薄層導電体を挟み、電流によるジュール発熱で接合界面を加熱する^{(1),(2)}。電磁誘導融着は、サセプターと呼ばれる薄層導電体を挟み、渦電流損による発熱で接合界面を加熱する。レーザー融着は片側の被着体を透過させたレーザーで接合界面を加熱する。

*1 総合研究所 ファクトリーイノベーションセンター 主席チーム統括

*2 総合研究所 ファクトリーイノベーションセンター

*3 総合研究所 伝熱研究部 主席チーム統括

*4 総合研究所 伝熱研究部

*5 民間機セグメント 事業開拓部 グループ長

*6 民間機セグメント 事業開拓部

本報では、上記融着接合法のうち、接合界面を局所的に加熱可能で、狭隘部へも適用可能な抵抗融着法を取り上げる。

表1 各種融着接合法

融着接合法	熱板(熱伝導) Hot Press Welding	振動・超音波 Ultrasonic Welding	抵抗 Self-Resistance Welding	電磁誘導 Induction Welding
概略	金型などの外部からの加熱により接合する母材を昇温し、接合界面まで熱伝導させて加熱し樹脂を熔融・融着する。	振動や超音波の伝搬により、接合界面の突起やエネルギーダイレクターと被着体間に摩擦発熱と粘弾性発熱を生じさせて加熱し融着する。	被着体間の接合界面に発熱体と呼ばれる薄層導電体を挟み、発熱体に電流を流して、発熱体のジュール発熱により界面を加熱し融着する。	サセプターと呼ばれる薄層導電体を挟み、コイルから生じた磁束によってサセプターに渦電流損を生じさせ、サセプターの発熱により界面を加熱し融着する。
概略図				

2.2 抵抗融着法

抵抗融着の品質を安定させるためには、発熱体と被着体の過加熱や加熱不足を避け、発熱体の温度を材料ごとに適切な範囲に保つ必要があり、発熱体の温度分布を小さくすることが重要である。本報では、異なる材料タイプの発熱体について発熱時の温度分布と融着強度を評価・実証し、安定した融着品質が得られる発熱体の構成を明らかにする。

3. 発熱試験による発熱体の性能検証

3.1 発熱体

発熱体の材料候補は以下 5 種類である。

- (1) 一方向性プリプレグ
- (2) 0/90° 炭素繊維織物
- (3) 樹脂を含浸させた 0/90° 炭素繊維織物
- (4) 炭素系不織布
- (5) 樹脂を含浸させた炭素系不織布

発熱体(1)の一方向性プリプレグは一方向に配向させた炭素繊維に樹脂を含浸させたシートであり、従来から発熱体に用いられている材料の一つである⁽²⁾。0/90° 炭素繊維織物はある方向(0°)とその直交方向(90°)に配向させた連続繊維を織って製作された材料である。発熱体(3)及び(5)はホットプレス法によって、被着体と同じ熱可塑性樹脂を(2)及び(4)の発熱体中含浸させることによって成形したものである。なお、熱可塑性樹脂は高耐熱性樹脂 PAEK であり、融点 T_m は 305℃である。

3.2 発熱試験

発熱体の温度分布は発熱試験により評価する。発熱試験のセットアップと外観を図 1 に示す。発熱体は絶縁材と電極の間に挟まれており、絶縁材と電極はクランプによって固定されている。発熱試験では、電極を通じて発熱体に電流を流すことで、ジュール発熱によって発熱体が加熱される。電流はすべての試験において最高温度の昇温速度と降温速度が一定となるように制御する。発熱体の表面温度は、上方からサーモビューワーで測定し、サーモビューワーの放射率は、別試験で発熱体表面に貼り付けた熱電対の測定温度に基づいて設定する。

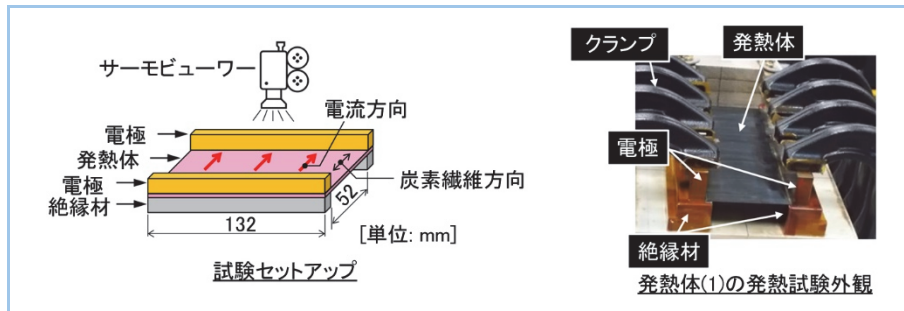


図1 発熱試験

3.3 発熱試験結果

発熱体(1) 一方向性プリプレグの発熱試験においてサーモビューワーで撮影された温度分布画像を図2(左)に示す。電流の経路と炭素繊維の方向は図の上下方向である。上下方向の色がほぼ同じであり、左右方向の色が異なることから、繊維方向には温度分布が小さく、繊維直交方向には温度分布が大きいことがわかる。図2(右)は発熱体(1)の発熱試験中の表面温度の時刻歴波形を示しており、 T_{max} 及び T_{min} はサーモビューワー画像の白枠内における最高温度と最低温度である。図2は、発熱体を加熱するために要した電流も示している。

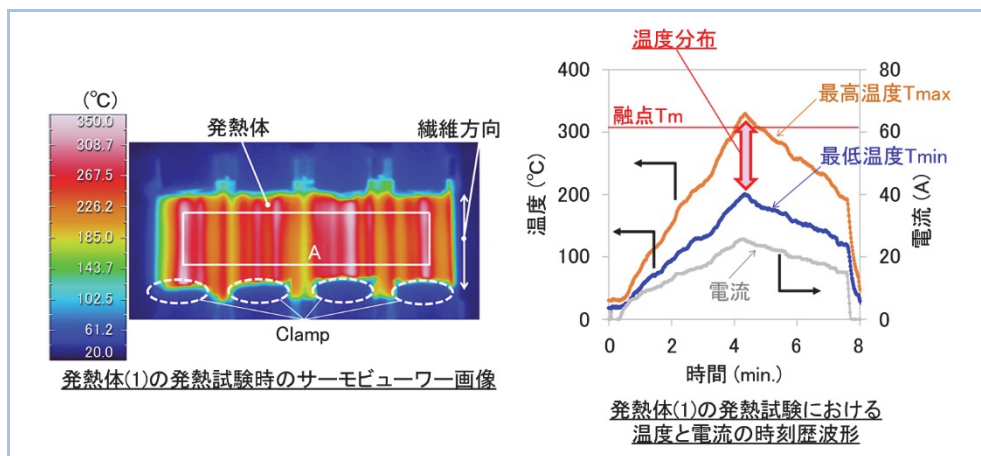
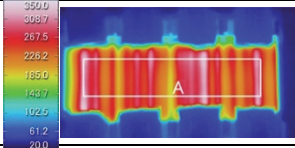
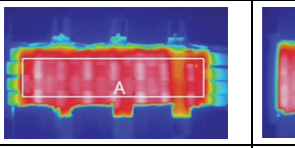
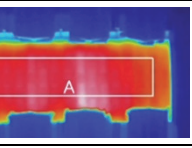
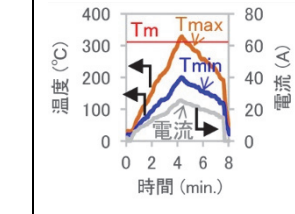
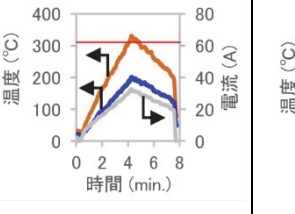
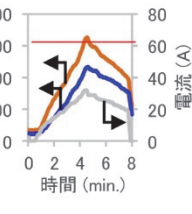
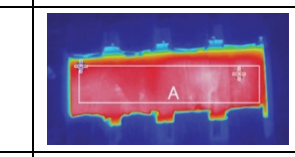
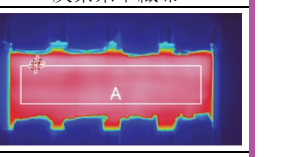
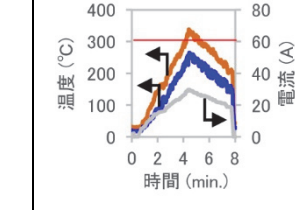
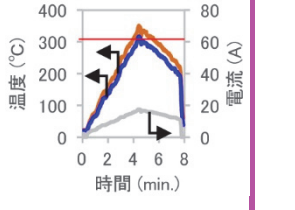


図2 発熱体(1)の発熱試験結果

発熱体の材料候補 5 種類の発熱試験結果を表2に示す。発熱体(1)から(4)に比べ、発熱体(5)は最高温度 T_{max} と最低温度 T_{min} の差、つまり発熱体面内の温度分布が大幅に低減された。融着部を全面融着させるためには、最低温度 T_{min} を一定温度以上まで昇温する必要があり、温度分布が大きい場合には最高温度 T_{max} が高くなり材料の熱劣化を招く。そのため、温度分布の低減は材料にとって適切な温度範囲内に融着温度を制御することを可能にする。発熱試験は各発熱体 1 体の結果を表2に示しているが、発熱体(5)を追加で 4 体実施しても個体差による温度分布のバラつきは最大 10°C 程度と小さい結果であった。また、表2の通り、発熱体(5)では他の発熱体に比べ、最大電流も低減されており、消費電力も抑えられた。なお、本試験では発熱体毎の温度分布を比較するために最高温度の昇温速度と降温速度を全ての発熱体に対して統一したが、発熱体(5)は熱応答性も良いため、本試験よりも昇温速度と降温速度を高めて接合時間を短くすることができ、サイクルタイム短縮にも繋がる。

表2 発熱体全ての発熱試験結果

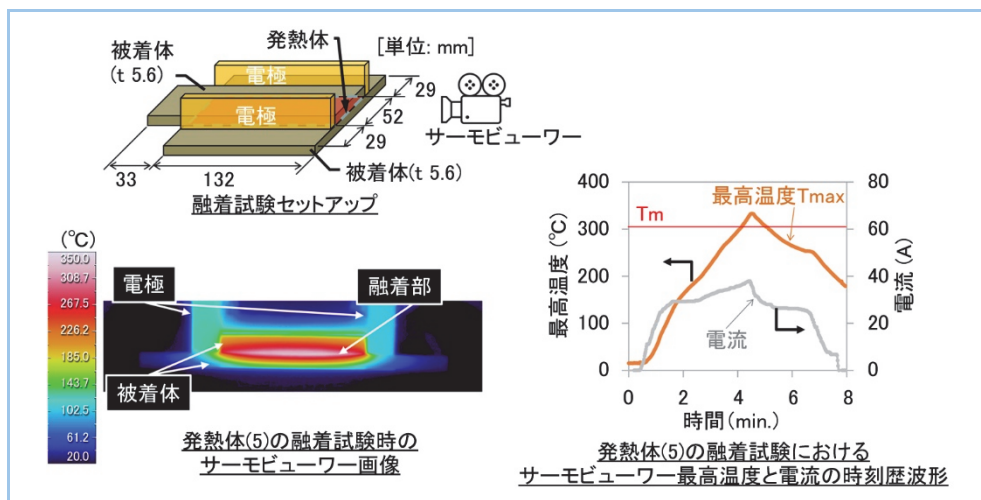
No.		(1)	(2)	(3)
発熱体	材料	一方向プリプレグ	0/90° 炭素繊維織物	樹脂を含浸させた 0/90° 炭素繊維織物
発熱試験結果	サーモビューワー画像			
	温度と電流			

No.		(4)	(5)
発熱体	材料	炭素系不織布	樹脂を含浸させた 炭素系不織布
発熱試験結果	サーモビューワー画像		
	温度と電流		

4. 融着品質検証

4.1 融着試験

融着試験では、発熱体を被着体の間に挟み、電極から発熱体に電流を流すことで、ジュール発熱によって発熱体と接した被着体が加熱され、樹脂が溶融し融着される。図3に融着試験のセットアップと発熱体(5)の融着時のサーモビューワー画像、融着試験時のサーモビューワー最高温度と電流の時刻歴波形を示す。なお、融着試験における電流は最高温度の昇温速度と降温速度が発熱試験と同じになるように制御した。



4.2 融着強度試験

融着品質は SSLS (Slotted Single Lap Shear) 強度試験によって評価する。強度試験片の寸法を図 4(左)に、試験結果を図 4(右)に示す。強度試験では試験規格 ASTM D5868 を参考に、面外変形拘束なく、長手方向に引張荷重を負荷した。融着試験にて融着した供試体から強度試験片 2 体を切り出しており、試験片 2 体の強度の最大値と最小値を図 4(右)のエラーバーにて示す。発熱体(5)を用いた融着試験片の SSLS 強度は 41 MPa であり、発熱体(1)を用いた融着試験片と同等であった。破壊部位はどちらも融着部の凝集破壊であった。

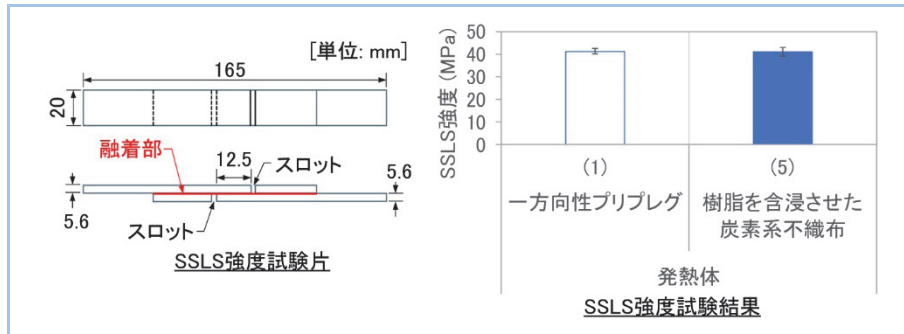


図4 SSLS 強度試験片と強度試験結果

以上から、発熱体(5)は従来の発熱体(1)と同等の融着強度を確保できることを実証した。

5. まとめ

樹脂を含浸させた炭素系不織布の発熱体は、融着界面の温度分布を大幅に低減したことで、材料に好適な温度範囲内での制御が可能となり、過加熱による材料の熱劣化や加熱不足による未融着を回避できる。また、同発熱体では必要な消費電力を低減できることも確認した。この発熱体を用いた融着強度が従来の一方向性プリプレグを用いた場合と同等であることも実証した。これにより、従来の一方向性プリプレグと同等の融着強度を確保しながら、熱劣化や未融着のリスクを低減し、安定した融着品質を得られる発熱体の構成を明らかにした。

参考文献

- (1) A. Yousefpour, et al., Journal of Thermoplastic Composite Materials, 17(2004), p.303-341
- (2) M. Endrass, et al., ITHEC2020 (2020), p.219-222