

# CNT 添加エネルギーダイレクタを用いた 熱可塑性 CFRP の超音波融着接合に関する研究

ビジネスエンジニアリング専攻 倉敷研究室 西村 壮真

## I. 研究背景と目的

近年、炭素繊維強化熱可塑性プラスチック（Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics、CFRTP、以下、熱可塑性 CFRP）が、次世代の航空機や自動車、産業機器の構造部材として適用され始めている<sup>(1)</sup>。熱可塑性 CFRP を用いて構造部材を製造する際には、何らかの手法で接合する必要があり、高い接合強度・信頼性で接合するために部材間の樹脂を加熱熔融させて接合を行う融着接合手法が提案されている<sup>(2)</sup>。超音波融着接合手法は、接合部の熱可塑性樹脂を表面摩擦と粘弾性摩擦による発熱で瞬時に加熱熔融することができ、高い生産性で融着接合することが可能である<sup>(3)</sup>。熱可塑性 CFRP の超音波融着接合は、図1に示すようにエネルギーダイレクタと呼ばれる熱可塑性樹脂の突起物やシート等を接合界面に挿入し、エネルギーダイレクタに超音波振動を集中させて融着接合を行う手法<sup>(3)</sup>が提案されているが、接合強度や信頼性に課題がある。

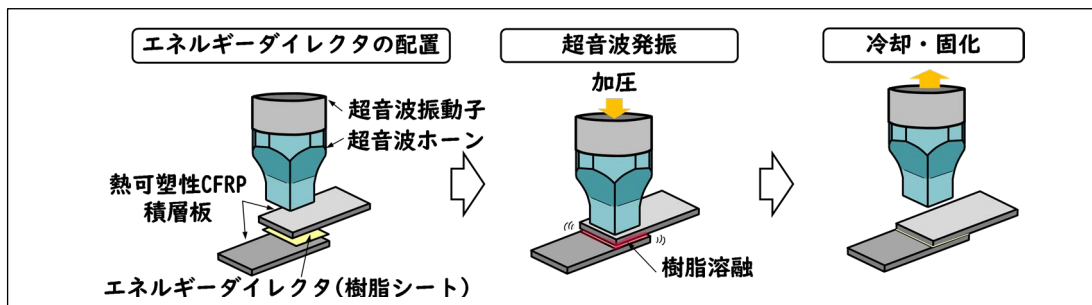


図1：熱可塑性 CFRP の超音波融着接合プロセスの概略図

そこで、より高い接合強度・信頼性で熱可塑性 CFRP の超音波融着接合を行うために、エネルギーダイレクタの改質や繊維強化等による補強が必要となる<sup>(4)</sup>。また、炭素繊維や CNT は荷重負荷に伴う電気抵抗値が変化するピエゾ抵抗効果を示す。この特性を利用し、融着接合部の抵抗ひずみ特性<sup>(5)</sup>を調査することで、接合部の健全性モニタリングへの応用が可能となる。本研究で提案するエネルギーダイレクタの CNT 添加による期待できる効果を図2に示す。図2に示すように、製造時から使用時そして使用後までの一連の過程において効果が期待できる。

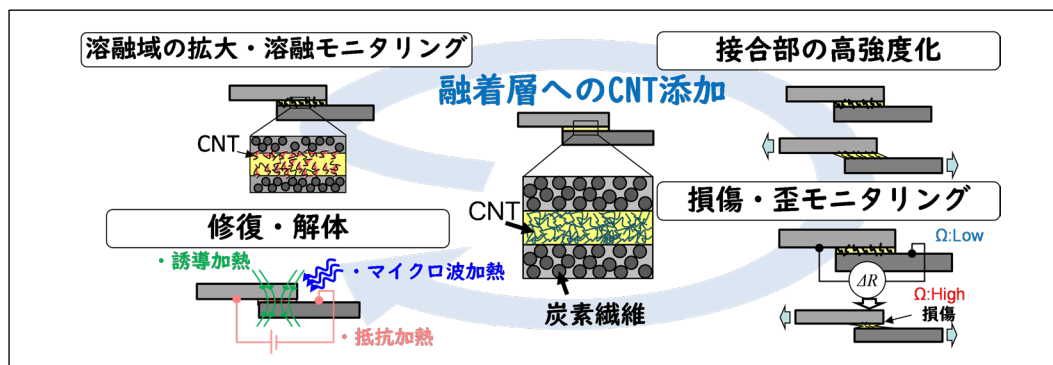


図2：エネルギーダイレクタの CNT 添加により期待できる効果

本研究では、熱可塑性 CFRP の超音波融着接合時の樹脂熔融挙動の解明や接合強度の向上および損傷検知能力の付与を目的に、エネルギーダイレクタに単層カーボンナノチューブ（SWCNT）または多層カーボン

ナノチューブ (MWCNT) を溶融混練および加熱プレス成形により任意の重量割合で添加し、超音波融着接合した際の引張せん断強度および損傷・ひずみ検知能力を明らかにした。

## 2. 実験結果

織物 CF/PPS 積層板の超音波融着接合時において、融着接合面に挿入するエネルギーダイレクタへの SWCNT および MWCNT の添加率が引張せん断強度に及ぼす影響を明らかにするために、本研究では PPS 樹脂単体と、PPS 樹脂に SWCNT および MWCNT を 0.1、0.5、1.0、1.5、2.0 wt% 添加したエネルギーダイレクタを用いて超音波融着接合を行った。エネルギーダイレクタ中の各種 CNT の重量含有率が引張せん断強度に及ぼす影響を図 3 に示す。MWCNT を 0.5–1.0 wt% 添加することで融着接合部がナノ繊維強化され、引張せん断強度が向上することが確認された。

融着接合部の健全性モニタリングの評価には、電気伝導経路を単純化するために UD-CF/PPS 積層板を用いた。その際、PPS 樹脂単体と SWCNT を 1.0 wt% 添加したエネルギーダイレクタを用いて超音波融着接合により作製した試験片を用いた。各試験片の繰り返し引張荷重負荷時の電気抵抗変化を図 4 に示す。SWCNT を 1.0 wt% 添加した場合は、未添加時と比較して電気抵抗変化率とゲージ率が向上した。これは、エネルギーダイレクタに CNT を添加することで接合層の導電経路が増加し、荷重負荷時の導電経路変化と、積層板の炭素繊維と CNT のピエゾ抵抗効果が顕著になったためと考えられる。

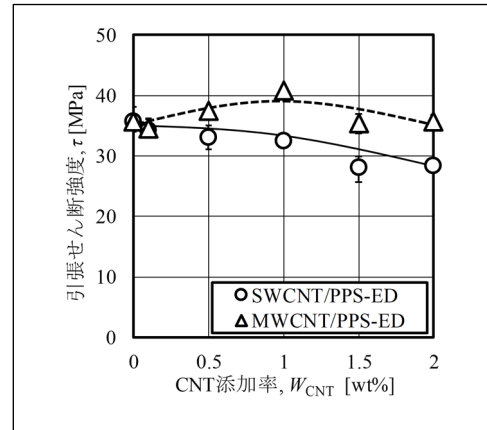


図 3：エネルギーダイレクタ中の SWCNT および MWCNT 添加率が引張せん断強度に及ぼす影響

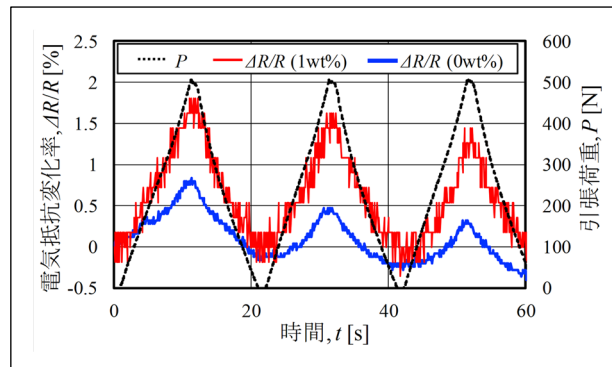


図 4：CNT 添加が荷重負荷時の電気抵抗変化に及ぼす影響

## 3. まとめ

本研究では、PPS 樹脂単体および CNT を添加した PPS 樹脂エネルギーダイレクタを用いて CF/PPS 積層板の超音波融着接合を行った際の、融着接合挙動や引張せん断強度に及ぼす影響を調査した。エネルギーダイレクタに CNT を添加することで、樹脂溶融が促進され、一部の条件において引張せん断強度も向上することが確認された。健全性モニタリングの評価では、CNT を添加した場合、電気抵抗変化率とゲージ率が向上し、電気抵抗変化率が負荷荷重に良好に追従することが分かった。このように、製造時から使用時まで使用後までの一連の過程において効果が確認され、産業適用に向けて着実に進歩したといえる。なお、これらの成果の一部に関して国際学会 5 件、国内学会 7 件の口頭発表にて研究報告を行った。今後は、本研究で得られた知見をもとに静的なスポット接合から接合ツールを連続的に摺動させることで大面積の接合を安定的に行う手法を開発し、産業実装に向け研究を推進する。

## 4. 参考文献

- (1) I. F. Villegas, et.al, Journal of Thermoplastic Composite Materials, Vol.28, No.8, pp.1007–1024, 2012.
- (2) I. F. Villegas and G. Palardy, Composite Interfaces, Vol.24, No.5, pp.515–528, 2017.
- (3) J.C. Yan, X.L. Wang, R.Q. Li, H.B. Xu and S.Q. Yang, Key Engineering Materials, Vol.353–358, pp.2007–2010, 2007.
- (4) 田邊大貴, 堀内睦之, 西村壮真, 西籾和明, “織物 CF/PPS 積層板の超音波スポット融着接合に及ぼすエネルギーダイレクタの炭素繊維強化の影響”, 材料, Vol.71, No.6, pp.495–500, 2022.
- (5) Bregar. T et al., Sci Rep 10, 16833, 2020.