

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔平成28年度研究進捗評価用〕

平成25年度採択分
平成28年3月16日現在

熱可塑 CFRP の直接その場成形プロセスの解明と実用展開
Process Clarification and Practical Realization of
Direct In-situ Processing Method of Carbon
Fiber Reinforced Thermoplastics

課題番号：25220914

石川 隆司 (ISHIKAWA TAKASHI)

名古屋大学・ナショナルコンポジットセンター・特任教授



研究の概要

熱可塑樹脂テープと炭素繊維束を直接、積層・加熱・加圧・硬化を行う手法（直接その場成形法）の提案、各プロセスの基礎現象の解明、さらに実用に向けた評価法の確立を研究目的とする。これまでに、装置の簡易模型を製作し、直接その場成形法の実現可能性を示すとともに、最適成形条件の存在機構、衝撃変形破壊機構、破壊抑制方法に関する知見を得た。

研究分野：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：構造・材料、複合材料、テーププレースメント、高速衝撃破壊

1. 研究開始当初の背景

炭素繊維強化複合材料(CFRP)は、同じ重量の構造用鋼と比較して約 10 倍の強度があり、耐食性にも優れるため、製品のエネルギー効率の向上や寿命の拡大に寄与し、持続可能社会に不可欠の材料として期待されている。しかしながら、高強度な CFRP は、素材となるプリプレグ(樹脂を予め染みこませた繊維のシート)や成形設備であるオートクレーブ(高温高圧でプリプレグを硬化させる釜)が高価であり、かつ、製作に長時間を要するので、製品が高価なものになってしまう。また、リサイクル性も悪く、オートクレーブのサイズの制限により実用的な製作可能な最大サイズにも限界がある。

2. 研究の目的

低コストでリサイクル可能な CFRP の成形法として、プリプレグやオートクレーブを用いず、熱可塑樹脂(加熱により柔らかくなる樹脂)テープと炭素繊維束を直接、最適方向へ積層し、加熱・加圧、硬化を行う手法（直接その場成形法）を提案し、各プロセスの基礎現象を解明し、さらに実用に向けた評価法を確立する。そして、この方法における、繊維や樹脂の熱伝導、樹脂同士の融着、樹脂の繊維への含浸や、ボイド(気泡)の発生、消滅、放出を含むマクロからマイクロに至る熱可塑 CFRP(CFRTP)の成形プロセスを解明する。また、成形条件やボイド、繊維配向等のマイクロ、メゾレベルの内部構造と CFRTP の強度の関係や超高速現象である CFRTP の破壊プロセスを解明する。これらの現象の解明によ

り、低コスト CFRTP を高強度にするための最適な成形条件と内部構造を探索することを目的とする。

3. 研究の方法

直接その場成形法の実現可能性を調べるために、主要部分を抽出した簡易モデルを製作し、レーザー強度、加圧、送り、繊維や樹脂の種類や厚さ、繊維配向等の成形条件や内部構造と材料中のボイドや材料の強度等の関係を調べる。ボイドの生成、放出に関しては、プロセス途中の材料を製作しデジタル顕微鏡等により観察評価する。

衝撃破壊試験においては、高速ビデオカメラや速度干渉法を用いた観察や数値シミュレーションにより高速衝突時の動的挙動を解析し破壊機構を解明する。得られた結果を分析し、耐衝撃破壊特性の改善等 CFRTP を高強度にするための最適な成形条件、内部構造を科学的に明らかにする。

4. これまでの成果

直接その場成形法を実現および成形プロセスを解明するために、図1に示すような半導体レーザーと石英ガラスローラーから構成される直接その場成形装置のプロトタイプを開発した。レーザーは石英ガラスローラーに入射、透過しながら集光され、矩形の照射面を加熱する。本システムでは、従来の加圧・加温ローラーとは異なり、熱源としてエネルギー密度の高いレーザーを使っており、また、加圧幅と加熱幅を独立に変えることができる。このことにより、含浸速度を高め、

型への積層成形速度を維持するポテンシャルを期待した。ポリアミド(PA)シートを炭素繊維開繊糸で挟んだ試料を加熱・加圧した結果、含浸深さは小さいもののPAを融解し、炭素繊維に含浸させることに成功し、本手法の有効性を確認した。

積層プロセスに関しては、高温ガスによる加熱装置を備えた自動積層装置を用いて、PAと炭素繊維のプリプレグテープからCFRP積層板を製作し、ガス温度、ローラー押付力などの成形パラメータがボイドの発生と各層の融着具合、積層板の曲げ強度と破壊モードへ与える影響を調査し、最適成形条件に関する知見が得られている。

高速破壊評価では、高速度ステレオビデオカメラシステムを用いた超高速3次元変形計測システムを構築し、異物衝突によるCFRTPの変形・損傷挙動を定量的に把握できるようになった。さらに、本システムを活用することで、衝突異物が有する運動エネルギーをCFRTP部材が散逸する機構として、部材のたわみが重要であることを実験的に明らかにした。さらに、部材のたわみを引き出すためには、破断歪みの大きな炭素繊維を用いること、強化繊維の変形を阻害しにくい樹脂をマトリックスとして用いること、これらの組み合わせに即した、適切な界面接着強度と強化繊維の積層構成が求められることを明らかにした。また、界面接着強度の制御手法の提案を行い、強度制御が可能であることを実証した。

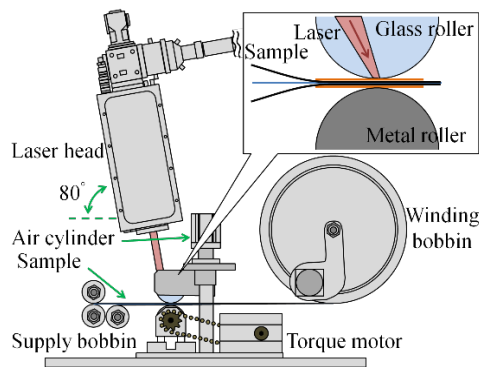


図1 直接その場成形装置プロトタイプ

5. 今後の計画

半導体レーザーと石英ガラス-金属ローラー/金属平板システムのプロトタイプをさらに改良し、直接その場成形法の原理実証とその試作CFRTPの含浸・積層評価を行う。レーザーによる加熱長およびローラーによる加圧長を独立に変化させる機能を強化する。改良されたシステムを使って、別々に供給される炭素繊維開繊糸と熱可塑性樹脂テープを重ねてローラー加圧し、加圧された試料端面を観察することにより、樹脂含浸深さおよびボイド分布を調査する。また、樹脂が

含浸した炭素繊維束を用いて積層板に対して同様な評価を行う。このようなシステムの改良およびボイド分布評価のための顕微鏡画像の後処理技術などを構築することで、加圧長、加熱長、レーザー照射パワー密度、加圧力、ローラー回転速度/平板送り速度を成形パラメータとして含浸・積層特性を評価し、直接その場成形法が可能な範囲を明らかにする。さらに、加熱・加圧により炭素繊維束を熱可塑性樹脂に含浸させ、基材に融着させるプロセスにおける、適切な成形条件を解析モデルより推定し、含浸程度とボイド発生場所を予測するシステムを構築し、数値解析結果と実験結果の比較を通して、その数値解析手法の妥当性を評価する。

高速衝撃破壊プロセスの解明・抑制法の提案として、炭素繊維とマトリックス樹脂との接着性を制御できる含浸性の高い、炭素繊維表面処理方法の確立を目指す。また、界面接着強度を制御したCFRTPについて、変形や破壊が大きい飛翔体を用いた十分な衝突実験が実施し、CFRTPのたわみによるエネルギー散逸と破壊の詳細機構の解明を行う。PDVを用いた衝撃強度評価においては、小型加速装置を製作しPDV計測システムを完成し、テーププレースメント製品の衝撃強度評価を行う。

これらの成果を総括し、提案手法の実用化可能性、他分野への応用等を検討する。

6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

- [1] A. Sasoh, T. Imaizumi, A. Toyoda, T. Ooyama: In-Tube Catapult Launch from Rectangular-Bore Aeroballistic Range, *AIAA Journal*, Vol. 53, No. 9, 2015, pp. 2781-2784. DOI:10.2514/1.J053540.
- [2] K. Sekine, T. Kumazawa, Y. Tanabe: Influence of Joining Interlayer on Impact Damage to Laminated Boron Carbide Ceramics, *International Journal of Applied Ceramic Technology*, published online: 3 November 2014, pp. 1217-1229.
- [3] 佐藤, 名波, 池田, 石川: 直接その場成形法によるCFRTP積層板の材料特性評価, 第7回日本複合材料会議(JCCM-7), 2016, 1A-12 (4pp).
- [4] 藤井, 横洲, 浅井, 市川, 酒井, 池田, 石川: 半導体レーザーとローラーによる熱可塑性UDプリプレグ成形法の開発, 第7回日本複合材料会議(JCCM-7), 2016, 1B-14 (4pp).
- [5] 横洲, 藤井, 浅井, 市川, 酒井, 池田, 石川: 半導体レーザーによる熱可塑性UDプリプレグの非定常加熱応答特性, 第7回日本複合材料会議(JCCM-7), 2016, 1B-06 (4pp).

ホームページ等

<http://structure.nuae.nagoya-u.ac.jp/>