

補助事業番号 2018M-169  
補助事業名 平成30年度 CFRPの耐久性および残存性強度のエントロピー損傷に基づく同定 補助事業  
補助事業者名 東京理科大学基礎工学部材料工学科 准教授 小柳潤

## 1 研究の概要

飛躍的に適用が拡大されている炭素繊維強化プラスチック（CFRP）において、耐久性の確保は今重要な課題の一つである。日本は炭素繊維の世界市場の6割近くを占めており、CFRPの技術において世界を先導してしかるべきである。本事業では様々な温度・負荷履歴を考慮したCFRPの耐久性と残存強度を同定する技術を構築した。はじめに界面の力学特性と樹脂の力学特性をそれぞれ明らかにし、次にCFRPの数値シミュレーションにこれを入力して実験結果と比較することで、忠実な数理モデルを確立して破壊を予測する。マイクロメカニカルモデリングを利用し、繊維は弾性体、マトリクスは損傷を考慮した粘弾粘塑性体とし、様々な温度・負荷履歴による損傷の累積を考えた。これによって、従来無視されていた低応力域での繰り返し負荷による損傷蓄積や低応力クリープでの損傷蓄積をモデル化し、長期耐久性を予測できるノウハウを得た。繊維/樹脂界面はマイクロメカニカル試験から機械的特性を評価し、結合力要素を用いてその破壊を記述した。一方、時間は温度との関係が強く、一般に樹脂の挙動には温度時間換算則が成り立つ。すなわち、高温では時間の流れが速くなり損傷の蓄積も顕著となる。つまり温度変化の考慮なくして正確な寿命予測をすることはできない。申請者は温度時間換算則を用いて樹脂やCFRPの挙動を予測することに精通しており、本研究でもこの経験に基づいて温度を考慮した時間項を粘弾粘塑性損傷構成則に適用し、正確な破壊予測を行う。特に本研究では熱力学的エントロピーを樹脂損傷の指標とし、様々な温度での負荷履歴を考慮してエントロピー生成量と樹脂損傷を関連づけることでCFRPの包括的な残存強度予測を達成した。

## 2 研究の目的と背景

炭素繊維強化プラスチック（CFRP）が近年では航空宇宙分野で幅広く用いられるようになった。近い将来はCFRPが航空宇宙産業にとどまらず、自動車産業を中心に様々な分野へ大幅に適用される時代が到来する。このとき問題となり得る要素として、CFRPの耐久性、価格、効率的な設計が挙げられる。耐久性の予測に関し述べると、疲労やクリープの力学負荷に対してほぼ無反応なCFRPの耐久性評価は極めて難しいという現状がある。

## 3 研究内容（URL：<https://www.rs.tus.ac.jp/koyanagi/2020jka/index.html>）

本研究では、CFRPの耐久性を評価するために、樹脂の特性を求め、次に界面の特性を求め、これらを直接CFRPモデルに入力することで妥当性の高い耐久性予測を行うことを目指している。研究のステップは大きく3つに分類される。①樹脂の特性を求めること（粘弾粘塑性

エントロピー損傷を考慮した構成則を構築し、有限要素解析ソフトへこの新しい構成則を実装すること)、②界面の特性を求めること(界面強度を正しく評価すること)、および③CFRPモデルにこれらの特性を入力し、根拠ある耐久性の予測を行い、実験で実証することである。

- ① 各種粘弾性試験を実施し、粘弾性モデルを決定した。また、図1に様々な温度・負荷方式でポリイミド樹脂の破壊までに要した生成エントロピーを比較する。生成エントロピーの値が概ね一定の値でポリイミドが破壊に至ることが確認できる

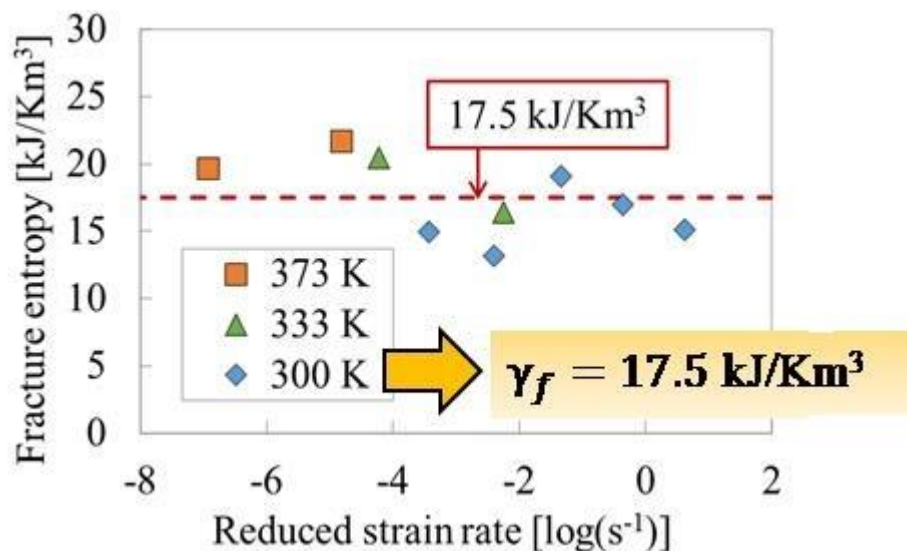


図1 様々な試験条件でのポリイミド樹脂破壊試験と生成エントロピー値

- ② 上記の検討の結果を下図に示す。本研究では見かけの界面強度ではなく実験と解析のハイブリッドによる正確な界面強度を求めることが可能である。本研究により、界面強度の温度依存性は小さいことが確認できた。

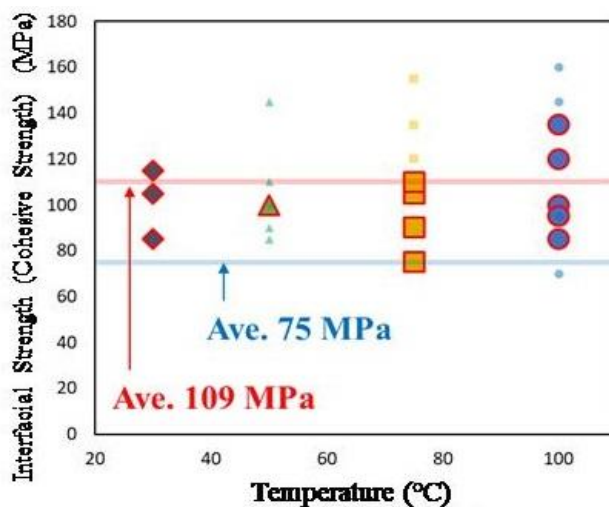


図2 界面強度の温度依存性

③ CFRPモデルによる破壊予測について、図3の左のようなCFRPモデルを考え、繊維は弾性体とし、界面には結合力要素を入れて上記②の結果を入力した。UMATを用いてユーザーサブルーチンをコーディングして、独自のエンタルピー損傷を考慮した非線形粘弾性構成則をABAQUSに実装した。

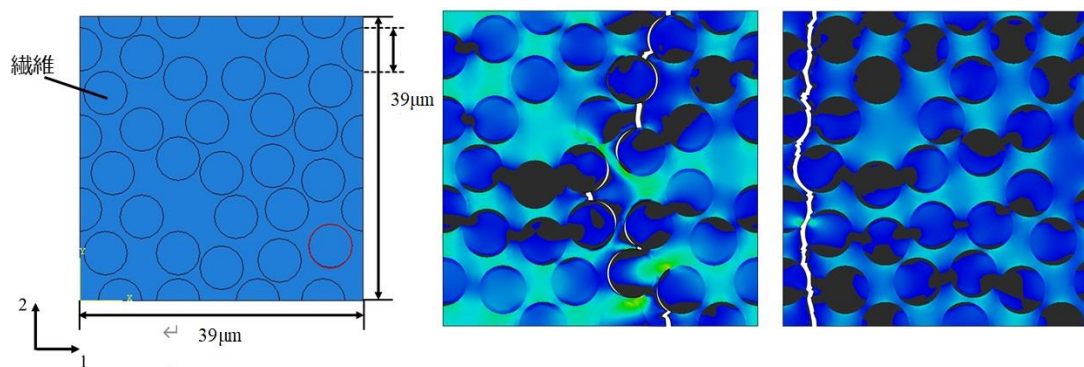


図3 CFRPモデル（左図），高速での破壊（中），低速での破壊（右）

#### 4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

低炭素社会、省エネの実現のため、自動車を中心とする様々なところに軽量・高強度なCFRPを適用することを目指す。これに向けて、CFRP大幅適用への障害を一つ一つクリアしていく。本事業ではCFRPの耐久性に関して、これまでの複合材料の歴史に類のない包括的な寿命予測手法を確立する。ノウハウの蓄積により安心してCFRPを利用できる社会を目指す。

#### 5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

内閣府の戦略的イノベーションプログラムにおける、航空機をターゲットとした革新的構造材料の枠組みの中で、ジェットエンジンにCFRPを適用すべく、新規開発された耐熱CFRPの力学特性評価を担当している。当研究室が世界に誇れるCFRPの界面力学特性評価技術・耐久性評価技術を活用し、プロジェクトに貢献している。等事業はこれらの取り組みの延長に位置づけられる。

#### 6 本研究にかかわる知財・発表論文等

1. Jun Koyanagi, Norie Itano, Michihiro Yamamoto, Kazuki Mori, Yuichi Ishida, Timur Bazhirov, Evaluation of the Mechanical Properties of Carbon Fiber/Polymer Resin Interfaces by Molecular Simulation, *Advanced Composite Materials*, Vol. 28 (2019), pp. 639-652.
2. M. Sato, S. Shirai, Jun Koyanagi, Y. Ishida, Y. Kogo. Numerical simulation for strain rate and temperature dependence of transverse tensile failure of unidirectional CFRP, *Journal of Composite Materials*, Vol. 53 (2019), pp. 4305-4312.

## 7 補助事業に係る成果物

### (1) 補助事業により作成したもの

事業紹介のホームページ (<https://www.rs.tus.ac.jp/koyanagi/2020jka/index.html>)

## 8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 東京理科大学基礎工学部材料工学科

住 所： 〒125-8585

東京都葛飾区新宿6-3-1 研究棟9F

担 当 者： 准教授 小柳潤（コヤナギジュン）

担 当 部 署： 小柳研究室（コヤナギケンキュウシツ）

E - m a i l： [koyanagi@rs.tus.ac.jp](mailto:koyanagi@rs.tus.ac.jp)

U R L： <https://www.rs.tus.ac.jp/koyanagi/home.html>