

未来社会創造事業 探索加速型
「持続可能な社会の実現」領域
年次報告書(探索研究期間)

| |
|--------------------|
| 令和2年度 研究開発年次報告書 |
|--------------------|

令和元年度採択研究開発代表者

[研究開発代表者名：小柳 潤]

[学校法人東京理科大学 先進工学部・教授]

[研究開発課題名：エントロピー損傷に基づく熱可塑CFRPの寿命定量化]

実施期間：令和2年04月01日～令和3年03月31日

§1. 研究開発実施体制

(1)「主体」グループ(東京理科大学・埼玉大学)

① 研究開発代表者:小柳 潤 (東京理科大学先進工学部マテリアル創成工学科, 教授)

② 研究項目

- ・有限要素法によるエンタロピー損傷に基づく CFRP 破壊シミュレーション
- ・熱可塑樹脂の非線形粘弾性挙動のモデル化
- ・CF/樹脂界面の力学特性評価

(2)「実験」グループ(京都工芸繊維大学)

① 主たる共同研究者:大谷 章夫 (京都工芸繊維大学繊維学系, 准教授)

② 研究項目

- ・CFRP 残存強度の評価
- ・熱可塑樹脂の成型, および粘弾性特性試験

(3)「分子シミュレーション」グループ(伊藤忠テクノソリューションズ株式会社)

③ 主たる共同研究者:森 一樹 (伊藤忠テクノソリューションズ株式会社科学システム事業部, 研究員)

④ 研究項目

- ・MD による CF/樹脂界面の力学特性評価
- ・MD による熱可塑樹脂

§2. 研究開発実施の概要

21 世紀である現在, CFRP は航空宇宙分野の範疇を脱し, 身近な材料として様々な産業に幅広く適用されつつある。一方で CFRP の破壊は炭素繊維の破断や, 樹脂の微小クラック, また繊維/樹脂界面のはく離といった微視的損傷の複合的な蓄積から成り, 金属材料の破壊より複雑で理解が難しい。また, 樹脂は時間依存性を有するため, 耐久性の議論となるとさらに複雑である。従来の耐久性評価へのア



アプローチは、一定応力(クリープ)負荷下や一定応力速度(Constant Stress Rate:CSR)試験において破壊までの時間を調査するものが多く、破壊機構が度外視されることもあり、ましてや負荷途中の残存強度や劣化の度合い等は議論の対象外であった。このため過剰な安全設計を選択せざるを得ず、まだ利用できるモノも取り替えて廃棄するケースが希ではない。単純負荷下での破壊までの時間に注目するのではなく、各環境で各負荷を受けたときのそのマイクロな劣化機構を分子構造レベルから理解し、現存の強度や余寿命を高精度に予測する技術を確立することは、モノをより長く、効率的に利用することに直結し、さらには超長寿命化に向けた新規 CFRP の材料設計指針の提案にも発展する。

CFRP の破壊は、繊維破断、樹脂の破壊、繊維/樹脂界面のはく離の微小損傷の蓄積から成るため、そのそれぞれの破壊特性を取得し、マイクロスケールで数値シミュレーションを実施することでマクロな強度発現機構を理解する手法が近年開発された(Koyanagi et al. Composites Part A 2014)。しかし関連する従来の研究には時間依存性は含まれておらず、損傷モデルも金属を対象とするものを用いているため、CFRP の残存強度・余寿命の推定ができるとは言い難い。これを可能にするためには時間依存型の強度モデルを取り入れる必要があるが、様々な条件を包括的に取り扱える強度モデルが現状では確立されていないことがボトルネックとなって未解決である。一方で、分子レベルの構造の変化を考慮してこのモデルを確立できれば裏付けのある本質的な議論が可能となるが、CFRP に関する分子シミュレーションの技術レベルはまだ成熟しておらず、定量的な議論には至っていない(Koyanagi et al. Advanced Composite Materials 2019)。計算コストの問題、強度に関して現実系とのギャップが大きいことなどがその要因であり、このことは当該分野でも技術レベル向上のボトルネックとなっている。以上のように、マイクロスケールでの定量的な議論がなされていないため、その次のメゾスケールでの定量的な議論も必然的に難しくなる。このため本研究では、マイクロな時間依存現象を解明し、CFRP のマクロな寿命特性を把握することで、サステイナブルな CFRP の新規開発に繋げる。

本研究の目的は、力学的負荷だけでなく、熱的負荷や吸水劣化等を含む様々な負荷を受けた後の自動車用途熱可塑性 CFRP の残存強度を明らかにすることである。分子構造から CFRP のマクロな強度・耐久性を定量的に予測する技術を確立する。また分子シミュレーションや有限要素解析などの CAE 技術を駆使して、残存強度の発現メカニズムを明らかにし、なお良い CFRP の提案につなげる。CFRP の自動車への適用を強く後押しする位置づけの研究である。

本研究では、エントロピー損傷を考慮した非線形粘弾粘塑性モデルを構築し、これに従って散逸エネルギーを定量化して破壊を予測する試みは世界初であり、独創的である。したがってこのモデルを有限要素解析に実装することも世界初となるが、この数値実装により、様々な負荷を受けた後の残存強度・余寿命を有限要素シミュレーションで予測することが可能となるため、極めて有効な開発と言える。例えば、繰り返し負荷を受ける場合、応力比、応力振幅、周波数等の疲労特性への影響はまったく解明されていないが、エントロピー損傷に基づいた構成則を適用することで、都度の負荷による累積損傷を定量的に記述することができ、根拠のある耐久性の議論が可能となる。