

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
終了報告書(探索研究期間)

令和3年度
研究開発終了報告書

令和元年度採択研究開発代表者

[研究開発代表者名：荒井 政大]

[所属 名古屋大学 大学院工学研究科・教授]

[研究開発課題名：CFRP の長期信頼性向上を目的とした
材料設計・評価システムの開発]

実施期間：令和元年 11 月 1 日～令和 4 年 3 月 31 日

§ 1. 研究実施体制

(1) 研究代表者名大グループ(名古屋大学)

① 研究開発代表者: 荒井 政大 (名古屋大学 工学研究科、教授)

② 研究項目

- ・直交 CFRP 積層板の疲労試験の実施, 多軸応力下の疲労試験の実施
- ・CFRP 積層板の強度・損傷クライテリア, 非弾性構成式の評価
- ・CFRP の損傷・破壊進展シミュレーション

(2) 共同研究者岐阜大グループ(岐阜大学)

① 主たる共同研究者: 仲井 朝美 (岐阜大学 工学部、教授)

② 研究項目

- ・CFRP の繊維/樹脂界面強度の評価
- ・CFRP の繊維近傍における局所熱物性の評価

(3) 共同研究者信州大グループ(信州大学)

① 主たる共同研究者: 西村 正臣 (信州大学 学術研究院、准教授)

② 研究項目

- ・繊維/樹脂系の分子動力学シミュレーション
- ・エポキシ樹脂のマイクロ構造と変形に関する分子動力学解析

§ 2. 研究実施の概要

探索研究期間では、CFRP の長期信頼性と寿命の評価・予測を可能とする "余寿命評価式" を新たに提案する。材料の余寿命は、引張強さや破壊靱性値、剛性等の経時的な変化と、材料内部のモルフォロジ的な変化、すなわち、外的負荷や変形に伴って CFRP 内部に発生するトランスバースクラック、層間剥離、繊維/樹脂界面き裂、繊維破断等の発生密度などのパラメータを相互に関連づけることで記述し得ると考えられる。本パラメータは、材料の変形モードや応力状態に依存するベクトル (ないしはテンソル) 量として定義され、負荷履歴、変形履歴、き裂密度等の状態量依存パラメータとなる。探索研究の期間 においては、余寿命を支配的に決定する因子を明らかにするとともに、余寿命を CFRP の損傷から簡便に評価するための評価式を提案し、その有効性を明らかにすることが目的である。

炭素繊維(7~10 μm)とマトリクス樹脂の界面、ならびに樹脂内のマイクロボイドを起点とする損傷が拡大・進展し、トランスバースクラックとして CFRP 積層板内を進展する領域、スケールでいえば数 μm からプリプレグの厚さ 100~200 μm レベルの損傷進展を詳細に観察することにより、繰り返し荷重下における CFRP 積層板の損傷の余寿命を評価した。試験片には熱硬化型エポキシ樹脂#2592(東レ)をマトリクス、炭素繊維 T700(東レ)を強化繊維とする CFRP 積層板、熱可塑性樹脂のポリアミド 6 をマトリクスとし、炭素繊維 T700 を強化繊維とする CFRP 積層板の 2 種類を用い、ともにオートクレーブ法により成形を行った。余寿命の評価にあたっては、CFRP 積層板に蓄積される損傷を定量的に評価することが重要である。本申請研究では主に樹脂内・繊維/樹脂界面内に発生するトランスバースクラック

クをレプリカ法によって観察し、定量化すること、さらには試験片に損傷・破壊が生じた後の残留試験片剛性に着目してその損傷と余寿命の関係について考察することによって、CFRP 積層板の余寿命を評価するための "余寿命評価式" を新たに提案した。また、実験的に得られた余寿命評価式を数値解析によって導出することを目的として、粘弾塑性理論に連続体損傷力学と繰り返し荷重下における損傷の重畳を考慮した材料モデルを適用することにより、繰り返し荷重下における CFRP 積層板における損傷進展を模擬できること、さらには数値シミュレーションによって CFRP 積層板の余寿命を予測することが可能であることを明らかにした。さらには多軸応力場において疲労試験の実施が可能な試験装置を本研究室において新たに開発し、応力-サイクル曲線(S-N 曲線)が応力比の影響を受けること、すなわち多軸応力下においては CFRP 積層板の余寿命 (破断までのサイクル数) が低下することを明らかにした。

また、上述の繊維/樹脂間の損傷進展を模擬するには、繊維/樹脂間の強度ならびに疲労特性を把握することが重要となる。探索期間においては、帯板樹脂内に短繊維を埋め込んだうえで試験片に引張荷重を加え、その臨界繊維長を測定することによって炭素繊維/樹脂界面の強度を評価するフラグメンテーション試験を実施した。繰り返し荷重下でのフラグメンテーション試験を実施することによって、マトリクス樹脂内において繊維の初期破断が発生する時点の荷重を測定した。さらには初期破断荷重を繰り返した際における繊維/樹脂間の損傷進展を観察することにより、繰り返し荷重下における界面破壊疲労特性を実験的に評価するための基礎的知見を得ることができた。

さらには、原子間相互作用から原子レベルの動的変化を検討できる分子動力学法により、CFRP の強度特性に関して原子レベルでの知見を得ることを目的として、種々の変形シミュレーションを実施した。炭素繊維とポリマー構造との界面における変形時の原子構造変化について検討するため、0 層のグラファイトとポリエチレンを交互に配置したような周期境界モデルを対象として、単純せん断シミュレーションを実施した。応力ピークまではグラファイトと PE がほぼ一体となってせん断変形が生じていたものの、ピーク以後はグラファイト/PE 界面ですべりが生じており、それ以降は界面すべりに変形が集中して各領域の構造がほとんど変化していないことが明らかとなった。今回は、グラファイトとの平滑な界面を含むモデルを対象としたが、今後は表面を修飾するなどで界面状態の違いを加えることにより、炭素繊維/樹脂界面での原子構造の違いが界面のせん断すべり変形に与える影響について検討する予定である。