

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（本格研究）

令和4年度採択研究開発代表者

[研究開発代表者名: 荒井 政大]

[国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学 大学院工学研究科・教授]

[研究開発課題名: CFRP の疲労劣化の機構解明と余寿命推定法の確立]

実施期間 : 令和5年4月1日～令和6年3月31日

§1. 研究開発実施体制

(1) 荒井@名大グループ(名古屋大学)

- ① 研究開発代表者:荒井 政大 (名古屋大学大学院工学研究科、教授)
- ② 研究項目「マイクロ・メゾ疲労損傷評価」
 - ・マトリクス樹脂と界面の非線形・非弾性構成式モデルの開発
 - ・繰り返し荷重下でのトランスバースクラック進展モデルの開発と数値解析

(2) 小柳@実機における熱拡散率・比熱の測定による損傷検知理科大グループ(東京理科大学)

- ① 主たる共同研究者:小柳 潤 (東京理科大学 先進工学部科、教授)
- ② 研究項目「エントロピー評価に基づく CFRP のナノ・マイクロ損傷評価」
 - ・樹脂分子の破断を考慮した分子シミュレーション手法の構築
 - ・CFRP のメゾレベルの損傷とエントロピーの定量リンクの確立

(3) 木村@KEKグループ(高エネルギー加速器研究機構)

- ① 主たる共同研究者:木村 正雄 (高エネルギー加速器研究機構、教授)
- ② 研究項目「ナノ X-CT, マイクロ X-CT を用いた CFRP の損傷評価」
 - ・ナノ X-CT を用いた樹脂内のナノボイド発生の観察
 - ・ナノ X-CT を用いたナノボイド⇒マイクロボイド進展の観察

(4) 丸本@筑波大グループ(筑波大学)

- ① 主たる共同研究者:丸本一弘 (筑波大学数理物理系、教授)
- ② 研究項目「ESR を用いた CFRP の疲労損傷の評価」
 - ・ESR を用いた電子スピンと疲労損傷の関係の定量評価
 - ・ESR を用いた実機の損傷評価法の検討

(5) 長野@名大グループ(名古屋大学)

- ① 主たる共同研究者:長野方星 (名古屋大学大学院工学研究科、教授)
- ② 研究項目「熱物性測定に基づく CFRP の疲労損傷評価」
 - ・ロックインサーモグラフィを用いた熱物性測定と疲労損傷の関係の定量化
 - ・実機における熱拡散率・比熱の測定による損傷検知

(5) 高橋@北大グループ(北海道大学)

- ① 主たる共同研究者:高橋航圭 (北海道大学大学院工学研究院、准教授)
- ② 研究項目「マルチスケール X-CT を用いた CFRP の繊維樹脂界面の疲労損傷評価」
 - ・ナノ X-CT を用いた繊維/樹脂界面き裂発生機構の観察
 - ・マイクロ X-CT を用いたき裂進展特性・き裂分岐特性の観察

§2. 研究開発成果の概要

研究開発項目1(ナノ・マイクロ損傷評価)では、ESRを用いた測定を実施して、繰り返し荷重をうけたCFRP試験片における疲労損傷と電子スピンとの間に定量的な関係があることを見出した。そして、低荷重レベルと高荷重レベルでは定性的に異なるサイクル数の依存性を示すことが分かった。また、ロックインサーモグラフィを用いたCFRPの熱物性測定を実施して、比熱・熱拡散率の変化を測定することで、CFRPに用いられているエポキシ樹脂、およびCFRPの疲労損傷の進展と余寿命の評価が可能であることを示唆した。さらには比熱の測定データより疲労損傷の進展課程におけるエントロピーの変化を見積もることによって、マトリクス樹脂とCFRPの疲労損傷進展を評価可能であることを見出した。ESR解析を用いた同様な評価も現在進行中である。一方で、エポキシの三次元架橋構造を構築するためのアルゴリズムを開発し、また繰り返し負荷で分子が破断するアルゴリズムを開発し、分子動力学シミュレーションにこれらを導入した。繰り返し負荷によるエントロピーの上昇は、分子の再配列と分子の破断に起因することを明らかにした。

研究開発項目2(繊維/樹脂界面のメカニクス評価)では、KEKにおいて放射光ナノ～マクロX-CTのマルチスケール観察を行い、炭素繊維/樹脂解明や樹脂内でナノボイドがマイクロボイドに進展する挙動を解明し、FE計算による応力解析の結果と合わせて、炭素繊維の配列構造がナノスケールでのき裂発生と進展に大きな影響を与えることを明らかにした。また、SPing-8において放射光ナノX-CTによって数10 μm 程度の微小き裂を検出し、マイクロX-CTによって繰返し負荷によってトランスバースクラックに至るまでのき裂進展過程を捉えることに成功した。微小き裂がプライ間の樹脂リッチ層を横断する長さになると、急速にき裂進展することが明らかとなった。また、カーボンナノチューブと樹脂との界面を含む原子モデルを対象とした分子動力学解析を実施し、炭素材による変形拘束がエポキシ樹脂の変形挙動に与える影響について検討し、樹脂中において空隙が拡がり応力が急減するような破断挙動の発生基準について明らかにした。

研究開発項目3(マイクロ・メゾ疲労損傷評価)では、 $[0/45/90/-45]_{\text{sym}}$ ¹擬似等方積層板を対象として疲労試験を実施した。90°層のトランスバースクラック発生に伴い、45°層のトランスバースクラックが発生、その後層間剥離の進展へと遷移する破壊を荷重レベルごとに分類した。結果として擬似等方積層板のトランスバースクラックと層間剥離進展挙動は荷重レベルによってその様相を大きく変えることを明らかにした。また引張-圧縮2軸応力疲労試験を実施した。引張と圧縮の応力比および荷重レベルを変化させた疲労試験を実施し、これらの条件によって疲労破壊の限界サイクル数が異なることを見出した。一方でエントロピーを基準として繰り返し負荷に応じて損傷が増えていく数値シミュレーションを実施し、実験結果と比較して定性的な一致を得ることができた。

研究開発項目4(実機レベルの余寿命評価システム)

令和5年度、名古屋大学(荒井グループ)では、 $[0/45/90/-45]_{\text{sym}}$ 擬似等方積層板を用いて疲労損傷進展の実験的評価を行った。荷重レベルを変化させた引張疲労試験を実施し、超音波探傷とX線CT撮影を組み合わせることで荷重レベルやサイクル数と疲労損傷の関連について詳細に調査した。荷重レベルの増加とともに45°層、-45°層においてもトランスバースクラックの発生が認められ、荷重レベルがさらに増加すると45°層におけるトランスバースクラックがより低サイクル側で発生することが確かめられた。擬似等方積層板の疲労損傷進展挙動の予測が数値シミュレーションレベルで可能となれば、実機レベルの疲労損傷評価・余寿命評価が実現できるものと期待され

¹ “sym”は symmetry の略。CFRPは繊維方向に強度が依存する異方性材料で、どの方向も同程度の強度を有する積層材料を擬似等方性積層と呼ぶ。今回の繊維方向は $[0/45/90/-45]_{\text{sym}}$ で表され、0°, 45°, 90°, -45°, -45°, 90°, 45°, 0°の順で積層した。

る。さらには比熱や ESR の測定結果およびエントロピーの評価結果と併せ、CFRP 積層板の種々の損傷進展と余寿命の評価が可能となれば、本申請研究の最終目標である実機の余寿命評価が実現可能となるものと期待される。

【代表的な原著論文情報】

1. Y. Kitagawa, K. Sasaki, M. Arai, A. Yoshimura, K. Goto, Experimental Evaluation of Fatigue Properties of Carbon Fiber/Epoxy Matrix Interface and Numerical Simulation of Transverse Cracking under Cyclic Load, *Advanced Composite Materials*, Vol.33, No.2, 2024, pp.212-232.
2. Junya Katsumata, Fumiya Osawa, Go Sato, Atsushi Sato, Kazumoto Miwa, Shimpei Ono, Kazuhiro Marumoto, Investigating the operation mechanism of light-emitting electrochemical cells through operando observations of spin states, *Communications Materials*, Vol. 4, 2023, pp.41-1-10, DOI: 10.1038/s43246-023-00366-3.
3. N. Kudo, R. Fujita, Y. Oya, T. Sakai, H. Nagano, Jun Koyanagi, Identification of invisible fatigue damage of thermosetting epoxy resin by non-destructive thermal measurement using entropy generation, *Advanced Composite Materials*, Vol. 33 (2024), pp. 233-249.