

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(本格研究期間)

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4年4月1日～令和5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、繰り返し荷重をかけた CFRP 試験片における疲労損傷と電子スピンの間に定量的な関係があることを見出した。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 を用いた分析による同様の評価を現在検討中である。一方で、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を導入した。

**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た。また、SPing-8 において放射光ナノ X-CT によって検出した繊維/樹脂界面き裂の繰返し負荷に伴う進展を追跡し、隣接する炭素繊維の間を横断する樹脂割れへと移行していく過程を捉えることに成功した。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、樹脂マトリクスおよびナノ繊維界面における構造変化を検討し、変形および応力との関係を詳細に明らかにした。

**研究開発項目3(マイクロ・メゾ疲労損傷評価)**では、樹脂と界面の損傷モデル、マトリクスの非線形・非弾性構成式モデルを適用し、疲労損傷の模擬にマイナー則を取り入れた解析手法を適用して繊維・樹脂間を進展するき裂の疲労進展挙動を有限要素法により模擬することに成功した。また、エネルギー解放率に基づくトランスバースクラックと層間剥離の評価モデルを提案し、エネルギー解放率と き裂進展速度を規定するべき乗則(修正 Paris 則)で与えられる微分方程式を数値的に解くことによって、繰返し荷重下におけるトランスバースクラックと層間剥離の進展・拡大を予測することに成功した。

### 研究開発項目 4 (実機レベルの余寿命評価システム)

現在のところ、トランスバースクラックと層間剥離の発生・進展の予測モデルを構築して実機レベルの損傷進展と余寿命評価のための基礎検討を行っている。そのなかで、非線形粘弾性モデルやエントロピーを組み込んだ材料特性モデルを導入するとともに、分子動力学解析による樹脂変形特性のモデル化等のさまざまな材料評価手法の基礎検討を行い、中間評価後の実機レベルの余寿命評価に対応した数値計算システムの検討を進めている。損傷の測定・評価技術としては、ロックインサーモグラフィによる熱伝導率測定技術にさらなる改良を加え、実機の損傷・余寿命のその場観察を実現させるべく測定精度の向上を図るとともに、実機におけるその場 ESR 測定を可能とし、エントロピー評価による実機余寿命の評価を可能とするための基礎検討を行っている。

#### 【代表的な原著論文情報】

- (1) Jun Koyanagi, Asa Mochizuki, Ryo Higuchi, VBC Tan, TE Tay, Finite element model for simulating entropy-based strength-degradation of carbon-fiber-reinforced plastics subjected to cyclic loadings, International Journal of Fatigue, Vol.165, Published Online.
- (2) Youzou Kitagawa, Masahiro Arai, Akinori Yoshimura, Keita Goto, Prediction of transverse crack multiplication of CFRP cross-ply laminates under tension-tension fatigue load, Advanced Composite Materials, 2022, Published Online.
- (3) Masao Kimura, Toshiki Watanabe, Sota Oshima, Yasuo Takeichi, Yoshihiro Niwa, Yuji Seryo, Masaki Hojo. Nanoscale in situ observation of damage formation in carbon fiber/epoxy composites

under mixed-mode loading using synchrotron radiation X-ray computed tomography, *Composites Science and Technology*, Vol.230, 2022, DOI:10.1016/j.compscitech.2022.109332.

(4) Seira Yamaguchi, Kyotaro Nakamura, Taeko Semba, Keisuke Ohdaira, Kazuhiro Marumoto, Yoshio Ohshita and Atsushi Masuda, Effects of SiNx refractive index and SiO<sub>2</sub> thickness on polarization-type potential-induced degradation in front-emitter n-type crystalline-silicon photovoltaic cell modules, *Energy Science & Engineering*, Vol10, No.7, DOI:10.1002/ese3.1135, pp.2268–2275.