

細井厚志研究室

超音波疲労試験における擬似等方CFRP積層板の疲労損傷に及ぼす自己発熱の影響

1. 緒 言

近年、炭素繊維強化プラスチック（CFRP）は風力タービンブレードといった 10^8 サイクル以上の繰り返し負荷が加わる部材に適用が進んでいる。このような 10^8 サイクル以上の繰り返し負荷が加わる領域は超高サイクル域と呼ばれる。この超高サイクル域における疲労特性を調べるために、金属材料ではアルミニウムや鋼材などを対象として試験周波数 $f=20$ kHzで疲労試験を行うことのできる超音波疲労試験機が使用されており、大幅に試験時間を短縮できる。この超音波疲労試験機のCFRPへの適用は三点曲げ試験から始まったが、試験片端部に最大の変位、中心領域に最小の変位が生じるような形状の試験片を設計することで、軸方向荷重下での疲労試験も可能になっている。しかし、複合材を構成する樹脂は金属と比べて熱伝導率が低く、粘弾性特性も大きく影響する。よって、高速で負荷と除荷を繰り返す超音波疲労試験では、試験片に過度の温度上昇が生じる。この温度上昇の対策として、空冷と間欠運転（負荷を加えた後、に一定の休止間隔を設けるプロセスを繰り返す負荷方法）が活用されているが、これらの対策によっても自己発熱に起因する温度上昇を完全に抑えることはできない。

超音波疲労試験と油圧疲労試験で取得した疲労寿命を比較した研究においては、油圧疲労試験の結果から得られた近似曲線と超音波疲労試験の結果が一致すると報告している例もあれば、一致しないと報告している例もあり、超音波疲労試験と油圧疲労試験の結果に差異が存在するかについてはいまだ未解明である。

超音波疲労試験と油圧疲労試験の大きな違いとして、試験周波数及び自己発熱による温度上昇が挙げられる。超音波疲労試験と油圧疲労試験結果の差異がある場合、これらの試験方法による条件の差異がその要因となっている可能性がある。よって、自己発熱による温度上昇が損傷の累積に与える影響を詳しく調べる必要がある。また、CFRP試験片の側面や破断面の観察を行うデジタルマイクロスコプや電子顕微鏡では、CFRPの損傷の発生から進展までを三次元的に計測することが難しい。このため、本研究ではX線CTを用いてクラックの観察を行う。さらに、超音波疲労試験と温度環境下での油圧疲労試験において損傷を同一の評価手法で評価し、整理することにより、損傷の累積に対して自己発熱による温度上昇が与える影響を明らかにする。

2. 試験方法及び試験方法・評価方法

2.1 材料系 本研究では、T800S/#3900-2B層間強化プリプレグから成形した擬似等方CFRP積層板（[-45/0/45/90]_s）

を用いて疲労試験を実施した。各層の厚さは0.191 mmである。繊維体積含有率 V_f は56 %である。

2.2 油圧疲労試験 室温（RT）と50℃での損傷累積の観察と評価を目的として、油圧疲労試験機を用いて疲労試験を行った。油圧疲労試験片の寸法は図1に示す。タブとして $\pm 45^\circ$ 層のGFRP積層板を使用した。疲労試験を行う前に加工傷を研磨で取り除いた。試験条件は試験周波数 $f=5$ Hz、応力比は $R=-1$ とした。恒温槽付疲労試験機を用いることで超音波疲労試験の自己発熱を模擬した50℃の環境下で試験を行った。各温度条件における試験片は2本とし、 $\sigma_{\max}=250$ MPa、200 MPaのそれぞれで2本ずつ試験を行った。1, 2, 5×10^6 サイクル（ $n=1, 2, 3, \dots$ ）で試験を停止し、X線CTを用いてクラック進展の観察を行った。

2.3 超音波疲労試験 ギガサイクル域までの損傷進展の観察と評価を目的として超音波疲労試験を実施した。超音波疲労試験片の形状を図2に示す。タブにはアルミニウム合金A2017が使用された。この超音波疲労試験片の形状は周波数約20 kHzにおいて縦振動一次モードで共振するように有限要素法を用いて設計した。試験片中心部の10 mmの区間でひずみと応力が一定となっているため、この区間において油圧疲労試験結果と比較可能である。試験条件は応力比 $R=-1$ 、周波数 $f=20$ kHzで設定した。試験片の過度な温度上昇を防ぐため、空冷と間欠運転を行った。間欠運転では、負荷過程を150 ms、休止過程を3000 msと設定する。試験片の温度測定には赤外線サーモグラフィカメラを使用した。1, 2, 5×10^6 サイクル（ $n=4, 5, 6, 7, \dots$ ）で試験を停止しX線CTを用いてクラックの観察を行った。

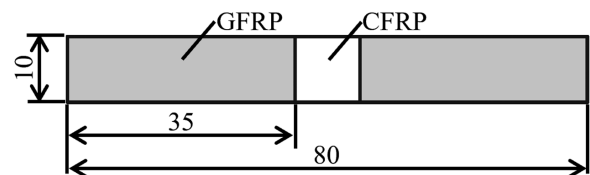


Fig. 1 CFRP specimen geometry for hydraulic fatigue test (unit: mm).

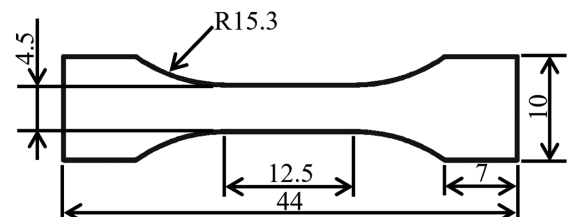


Fig. 2 CFRP specimen geometry for ultrasonic fatigue test (unit: mm).

2. 4 X線CTでの損傷評価 擬似等方CFRP積層板の各層における損傷の発生から進展までを三次元的に観察、評価するためにX線CTを用いた。X線CTでの油圧疲労試験片の観察画像は図3に示す。X線CT画像から観察可能なトランスバースクラックの総数を n_{90° と定義した。また、評点間距離を L とし、トランスバースクラック密度を算出した。

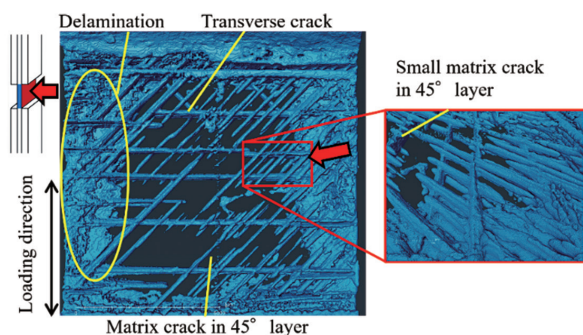


Fig. 3 Observation of Test Specimens for Hydraulic Fatigue Testing Using X-ray CT.

3. 試験結果・考察

超音波疲労試験と油圧疲労試験におけるクラック密度の成長挙動を同一の指標で比較するために、シアラグ解析に基づいて最大エネルギー解放率を算出した。トランスバースクラック密度が $D_{90^\circ, k}$ から $D_{90^\circ, k+1}$ に変化した際の最大エネルギー解放率 $G_{\max}$ を熱残留応力を考慮して求めた。これにより、油圧疲労試験 (RT, 50 °C) と超音波疲労試験の結果を、同一指標を用いて整理することが可能となる。観察を行った各サイクルにおけるクラック密度からクラック密度成長速度 (dD/dN) を求め、修正Paris則を用いて評価した。特に90°層のトランスバースクラック密度の成長速度を図4にまとめた。油圧疲労試験におけるRTと50 °C条件の差は、熱残留応力の違いとして $G_{\max}$ に反映した。

図4より、250 MPaの油圧疲労試験でのRT条件と50 °C条件の結果を比較すると、トランスバースクラック密度が低く、最大エネルギー解放率が高い領域では、RT条件と50 °C条件の結果は近い値をとる。一方で、クラック密度の増加に伴い、最大エネルギー解放率 $G_{\max}$ が減少していくと、同一の最大エネルギー解放率 $G_{\max}$ に対する50 °Cのトランスバースクラック密度増加速度 dD/dN はRT条件の結果よりも低くなる傾向が確認できる。全体としては、50 °C条件の近似曲線は、RT条件よりもやや下方に位置している。この要因としては、温度上昇に伴う材料の靱性の向上が考えられる。トランスバースクラック密度の増加によりクラック間隔が狭くなると、隣接クラック間で応力が十分に回復しなくなるため、最大エネルギー解放率は減少する。その結果、クラック密度が上昇するにつれて、この

温度上昇による材料の靱性向上の影響が相対的に大きくなると考えられる。さらに、トランスバースクラックの増加はクラック周辺の局所的な温度上昇が生じる領域の拡大を招く。このように温度上昇の影響を受ける領域が材料内部で広がることで、さらなる靱性向上に寄与している可能性が示唆される。

180 MPaでの超音波疲労試験の結果では、トランスバースクラックの増加に伴って最大エネルギー解放率 $G_{\max}$ が減少していくと、ある段階で dD/dN が急激に小さくなり、250 MPaの油圧疲労試験結果 (RT, 50 °C) の近似曲線よりも下方にプロットされる。このように急速に dD/dN が小さくなるのは、トランスバースクラック数が増加して、クラック数がほとんど増加しなくなる飽和領域へ遷移しつつある影響などが考えられる。

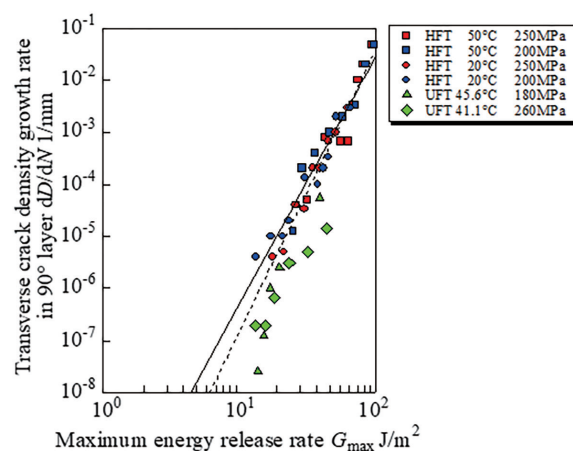


Fig. 4 Relationship between transverse crack density growth rate in 90° layers and maximum energy release rate.

4. 結 言

本研究では、擬似等方CFRP積層板に対してRT及び50 °C環境下で油圧疲労試験及び超音波疲労試験を実施し、X線CTによりクラックを観察するとともに、各層のクラック密度を評価した。さらに、各層の損傷状態と熱残留応力による影響を考慮したエネルギー解放率をシアラグ解析によって算出し、クラック密度の増加速度と最大エネルギー解放率の関係として整理することで、温度上昇や試験条件が疲労損傷累積に与える影響を検討した。250 MPaの油圧疲労試験の結果に基づく、RTよりも50 °C条件の方が90°層のトランスバースクラックの累積が抑制される傾向が見られ、温度上昇による材料の靱性の向上の影響が示唆された。よって、高い試験周波数に起因する自己発熱により試験片内部の温度上昇が生じる超音波疲労試験を用いた損傷評価においては、熱残留応力の影響を含めた材料の温度依存性を考慮することが必須である。

著書・論文

S. Takashiro, Y. Sugeno, A. Hosoi, H. Kawada Influence of electropulsing on fatigue crack growth retardation in hot-work die steel Mechanical Engineering Journal, 2026, accepted.
T. Isogai, H. Saitoh, A. Hosoi, D. Tsunoda, H. Koshita, H. Kawada Effects of material composition on fatigue properties of short aramid fiber reinforced plastics using hybrid non-destructive testing methods Mechanical Engineering Journal, 2026, accepted.
K. Ogawa, K. Tanaka, T. Takase, R. Sano, A. Hosoi, S. Harashima, K. Nakamura, Y. Arao Self-assembling of few-layer graphene onto glass fibers and strength enhancement mechanism of graphene-enhanced glass fiber-reinforced plastics Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2026, accepted.
M. Otsubo, R. Tajiri, A. Hosoi, T. Sakurai, T. Yamatogi, K. Kimoto, H. Kawada Experimental evaluation of fatigue properties and failure mechanisms of thick carbon fiber-reinforced plastic laminates under three-point bending load Advanced Composite Materials, 2026, accepted.
T. Matsuo, Y. Nishi, H. Saito, A. Hosoi, H. Kawada Effects of self-heating on fatigue behavior of quasi-isotropic CFRP laminates under ultrasonic loading Advanced Composite Materials, 2026, 1-18. (https://doi.org/10.1080/09243046.2026.2641271).
R. Sano, Y. Koga, I. Sumi, A. Hosoi, K. Kawahara, H. Matsutani, H. Kawada Evaluation of fatigue fracture mechanism of carbon fiber-reinforced foams using nondestructive testing and fatigue life prediction using damage mechanics Composites Science and Technology, 2025, 111502 (https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2025.111502).
K. Kometani, A. Hosoi, H. Kawada Interfacial microstructure effects on the bonding strength and interlaminar fracture toughness of aluminum alloys thermally bonded to carbon fiber-reinforced polyetheretherketone Surface Science and Technology, 2025, 3, 18 (https://doi.org/10.1007/s44251-025-00082-9).
細井厚志, 川田宏之 炭素繊維強化プラスチック積層板の超高サイクル疲労 後編 擬似等方炭素繊維強化プラスチック積層板の超高サイクル疲労特性の評価 機械の研究, 2025, 77, 12, 874-879.
細井厚志他 「シランカップリング処理によるアルミニウム合金とCFRTPの接合強度向」 シランカップリング剤の基礎と応用, シーエムシー出版, 第3章, 第3節, pp.158-168, 2026年3月.

講演・発表

Y. Shimamura, J. Shirasaka, T. Fujii, H. Kawada, A. Hosoi, Y. Inoue Evaluation of tensile strength of multi-walled carbon nanotube by ultrasonication and in-situ tensile test in SEM Joint-Symposium on Mechanics of Advanced Materials & Structures 2025 (JSMAMS 2025), Kyoto, Japan, 28/11-1/12/2025. 一般
K. Nishi, T. Omori, T. Komori, A. Hosoi, N. Sugiura, H. Kawada Role of matrix resin in delaying transverse crack growth in cross-ply CFRP laminates The 3rd China-Korea-Japan Joint Symposium on Composite Materials 2025 (the 3rd CKJ-CM), 15294, Guangzhou, China, 22-24/11/2025. 一般
S. Takashiro, Y. Sugeno, A. Hosoi, H. Kawada Influence of electropulsing on fatigue crack growth retardation in hot-work die steel 2nd JSME International Conference on Materials & Processing (ICM&P 2025), 3J06, Guam, USA, 3-6/11/2025. 一般
T. Isogai, H. Saitoh, A. Hosoi, D. Tsunoda, H. Koshita, H. Kawada Effects of material composition on fatigue properties of short aramid fiber reinforced plastics using hybrid non-destructive testing methods 2nd JSME International Conference on Materials & Processing (ICM&P 2025), 1B12, Guam, USA, 3-6/11/2025. 一般
A. Hosoi, T. Saito, M. Sakanobe, H. Kawada Crack-tip micro-bridging for enhancing interlaminar fracture toughness at the CF/PA6-aluminum alloy bonding interface The 10th International Conference on Fatigue of Composites (ICFC10), Abstract p.46, Sapporo, Japan, 1-4/7/2025. 一般
R. Sano, I. Sumi, A. Hosoi, K. Kawahara, H. Matsutani, H. Kawada Evaluation of resin design and fatigue life scatter of carbon fiber reinforced foam using non-destructive testing method The 10th International Conference on Fatigue of Composites (ICFC10), Abstract p.10, Sapporo, Japan, 1-4/7/2025. 一般

A. Hosoi Effect of interface microstructure on interlaminar fracture toughness in dissimilar joints of thermoplastic CFRP and aluminum alloys the 39th Conference and 32nd Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue and Structural Integrity (ICAF 2025), Xi'an, China, 9-12/6/2025. 一般
笹川昌暉, 細井厚志, 国吉ニルソン 「シランカップリング剤と炭素繊維強化熱可塑性プラスチックとの結合形成の理論的解析」 日本化学会 第106回春季年会, F1234-1vn-01, 日本大学船橋キャンパス, 千葉, 2026年3月17-20日. 一般
松尾俊輝, 後藤蒼志郎, 今井康太, 細井厚志, 阿部 暉, 川田宏之 「超音波疲労試験における擬似等方CFRP積層板の疲労損傷に及ぼす自己発熱の影響」 日本機械学会 関東支部 第32期総会・講演会, GS0402, 日本大学駿河台キャンパス, 東京, 2026年3月9-10日. 一般
齋藤達明, 小澤朋生, 細井厚志, 川田宏之 「Al合金とCF/PEEK積層板の接合強度に及ぼす接合界面のレーザー加工構造の影響」 日本機械学会 関東支部 第32期総会・講演会, GS0409, 日本大学駿河台キャンパス, 東京, 2026年3月9-10日. 一般
坂本麗衣, 佐野隆人, 細井厚志, 足立健太郎, 松谷浩明, 川田宏之 「曲げ疲労負荷下におけるCFRP/CFRFハイブリッドパネルの損傷進展挙動の評価」 関東学生会 第65回学生員卒業研究発表講演会, 531, 日本大学駿河台キャンパス, 東京, 2026年3月9日. 一般
佐野隆人, 坂本麗衣, 細井厚志, 河原康太, 松谷浩明, 川田宏之 「複合的非破壊計測を活用したCFRFの疲労損傷進展過程に基づく疲労寿命予測」 第17回日本複合材料会議 (JCCM-17), 1B-07, 立命館大学大阪いばらきキャンパス, 大阪, 2026年3月3-5日. 一般
大森智也, 小森達也, 西 耕平, 細井厚志, 杉浦直樹, 川田宏之 「疲労負荷下における高弾性繊維CFRPクロスプライ積層板のトランスバースクラック進展に及ぼす母材樹脂の影響」 第17回日本複合材料会議 (JCCM-17), 2C-04, 立命館大学大阪いばらきキャンパス, 大阪, 2026年3月3-5日. 一般
伊藤拓海, 郡司遼太郎, 熊谷駿介, 後藤康夫, 國友 晃, 細井厚志, 川田宏之 「溶液紡糸CNT糸の強度発現機構: 実験と粗視化分子動力学法による解析」 1B-08, 立命館大学大阪いばらきキャンパス, 大阪, 2026年3月3-5日. 一般
高村 駿, 脇 勇一郎, 角 侑樹, 杉浦直樹, 細井厚志, 川田宏之 「蒸気タービン用スラスト軸受摺動材としてのCF/PEEK複合材料の熱伝導率向上に向けた研究」 1D-03, 立命館大学大阪いばらきキャンパス, 大阪, 2026年3月3-5日. 一般
高橋悠一郎, 上半宙輝, 菊池 舞, 鬼塚麻季, 小向拓治, 細井厚志, 川田宏之 「NOLリング試験によるCFRPの疲労特性評価手法の検討」 1D-04, 立命館大学大阪いばらきキャンパス, 大阪, 2026年3月3-5日. 一般
近藤 匠, 野口航希, 久保田勇希, 阿部圭佑, 宇田道正, 岸本克己, 細井厚志, 川田宏之 「コスモコート処理を施したFB-SiC/SiC複合材料の高温酸化耐性評価」 3C-04, 立命館大学大阪いばらきキャンパス, 大阪, 2026年3月3-5日. 一般
中村優作, 田辺和輝, 手嶋星尚, 久保田勇希, 阿部圭佑, 宇田道正, 細井厚志, 川田宏之 「作製条件の異なる乾式紡糸SiC繊維における機械的特性と微細構造評価」 3C-05, 立命館大学大阪いばらきキャンパス, 大阪, 2026年3月3-5日. 一般
坂邇邊 萌, 米谷華織, 齋藤達明, 細井厚志, 川田宏之 「表面ナノ構造を有するアルミニウム合金とCF/PA6積層板の異種接合における層間破壊靱性向上機構の解明」 70th FRP CON-EX 2025, P-2, 秋葉原UDX, 東京, 2025年10月29-30日. 一般
佐野隆人, 坂本麗衣, 細井厚志, 川田宏之 「損傷発達モニタリングによるCFRFの疲労寿命特性のばらつきの実験的評価」 2025年度 第12回ZAIKENフェスタ, p.31, 早稲田大学各務記念材料技術研究所, 東京, 2025年10月23日. 一般
磯貝拓海, 細井厚志, 川田宏之 「AFRPの疲労損傷発達挙動に及ぼす材料組成の影響」 2025年度 第12回ZAIKENフェスタ, p.30, 早稲田大学各務記念材料技術研究所, 東京, 2025年10月23日. 一般