

# 博士論文概要

## 論文題目

繊維強化複合材料の疲労における  
長期耐久性評価

Evaluation of long-term durability in  
fatigue of fiber reinforced composites

申請者

細井	厚志
Atsushi	Hosoi

機械工学専攻 材料力学研究

2007 年 12 月

輸送機器は日本で消費される石油の 4 割弱を消費し、運輸部門での二酸化炭素排出量は総排出量の 2 割強を占めており、その割合は年々増加している。輸送機器のライフサイクルにおける二酸化炭素のほとんどは使用中に排出されており、燃費向上の視点から輸送機器のさらなる軽量化が不可欠である。CFRP は軽量かつ優れた機械的性質を有するため、航空・宇宙分野をはじめとし、今後は自動車、鉄道車両などの輸送機器、風力発電のブレードの構造材料など多岐にわたる分野で、金属に替わる構造材料としての適用が期待されている。

CFRP 積層板の破損は主に、マトリックスクラックや層間剥離、繊維破断に大別される。一般に疲労負荷下における CFRP 積層板の損傷進展は、その積層構成にもよるが、まずマトリックスクラックが生じ、層内で進展する。その後マトリックスクラック先端の応力集中により隣接層のマトリックスクラックや、層間剥離が引き起こされ、積層板内に進展する。このような損傷が累積することにより疲労強度低下を引き起こす。最終的に、 $0^\circ$ 層の荷重分担率は損傷が累積されるとともに増加し、破断ひずみに至ると積層板が疲労破壊すると考えられている。確かに荷重方向に繊維を一方向に配向させた積層板( $0^\circ$ 材)の疲労強度は良好で、殆ど疲労強度低下を起こさない。しかし、実働環境で用いられる場合は、多方向に繊維を配向させた擬似等方性の積層板として用いられることが多い。一旦、CFRP 積層板内部にマトリックスクラックが生じると、マトリックスクラック先端の応力集中部に繰返し負荷が付与されることにより、マトリックスクラックを起点とした層間剥離や、隣接層に新たなマトリックスクラックを引き起こし、繰返し疲労負荷により構造物の破壊につながる内部損傷が拡大する恐れがある。そのため、今後多くの分野で利用されることが期待されている CFRP の長期信頼性を確立することは重要である。

これまで CFRP 積層板における損傷進展の下限界について評価した研究はいくつかおこなわれており、トランスバースクラック成長はその形成に伴うエネルギー解放率の下限界エネルギー解放率の存在が示唆されている。また層間剥離成長については、一方向試験片を用いた双片持ちはり(DCB: Double Cantilever Beam)試験や端面切欠き曲げ(ENF: End Notched Flexure)試験においてモード I 及びモード II の層間剥離進展における下限界の存在が示唆されている。しかし、CFRP 積層板に生じるトランスバースクラック進展における明確な下限界エネルギー解放率の存在は明らかにされていない。また、繊維を多方向に配向させた積層板におけるトランスバースクラックを起点として発生、進展する層間剥離成長についての下限界エネルギー解放率の存在も明らかにされていない。さらに、CFRP 積層板において明確な疲労限についても確認されていない。CFRP 積層板の疲労における破壊形態は金属材料と異なり非常に複雑で、破壊力学的に評価することは非常に困難である。また、これまで高サイクル疲労特性について十分な評価はされていない。それゆえに、CFRP 積層板の長期信頼性を確立するあたり、次の 2 点を解

決することが課題となっている．

- (1) 繰返し振幅数  $10^8$  回を超える疲労損傷挙動の調査と実験データの蓄積．
- (2) 超長寿命域におけるマトリックスクラックや層間剥離の進展挙動の力学的評価．

そこで、本研究では上記の 2 点を解決することを目的とし、CFRP 積層板について疲労損傷進展について実験及び破壊力学的アプローチから調査を行った．その上で、CFRP 積層板の疲労損傷進展について下限界値  $\Delta G_{th}$  の存在の有無について評価を行った．CFRP 積層板の損傷はマトリックスクラックや層間剥離、繊維破断等の損傷が相互に作用しながら進展する．本論文では、まずマトリックスクラック成長、層間剥離成長それぞれの実験及び破壊力学的評価を示す．最終的にそれらの損傷進展の相互作用について評価を行う．本論文は 8 章より構成されており、以下のように纏めている．

第 1 章では、複合材料における近年の研究開発の動向及び本研究の背景と意義を述べた．これまで行われてきた複合材料の疲労損傷進展挙動に関する研究の現状及び課題等を纏め、本論文の研究目的を示した．

第 2 章では、疲労試験に伴う積層板の自己発熱による温度変化について評価を行う．高サイクル疲労特性について調査を行うためには、加速試験を行う必要がある．CFRP 積層板の母材となる樹脂が粘弾性特性を示すため、繰返し疲労負荷を受けると内部発熱やクリープ特性によって、試験周波数の違いにより疲労寿命に影響を及ぼすことが推測される．そこで、粘弾性特性が及ぼす疲労試験中の試験片の温度変化について調査を行う．さらに、熱伝導方程式より導いた理論解析から実験結果との比較を行い、加速試験を行う際の試験条件の選定を行う．

第 3 章では、高サイクル疲労負荷を受ける CFRP 積層板内部に進展するトランスバースクラック進展挙動について評価を行う．繰返し振幅数  $10^8$  cycle の疲労試験を行い、高サイクル領域におけるトランスバースクラック進展挙動を観察し、負荷応力レベルの違いによる損傷進展挙動の違いを調査する．また、トランスバースクラック進展に伴うエネルギー解放率を算出し、トランスバースクラック進展速度とエネルギー解放率の関係をを用いた Paris 則で評価することによって、トランスバースクラック進展における下限界領域  $\Delta G_{th}$  が存在するか否かについて検討する．

第 4 章では、高サイクル疲労負荷を受ける CFRP 積層板自由縁で形成される微小のトランスバースクラック増加挙動について評価を行う．積層構成によっては積層板自由縁で応力特異場が生じる．自由縁で荷重軸方向に大きな引張の応力特異場が生じる積層構成では、トランスバースクラックが進展する前に、微小のトランスバースクラックが多数形成される．その微小のトランスバースクラック形

成に伴うエネルギー解放率を定式化し、トランスバースクラック形成速度とエネルギー解放率の関係をを用いたべき乗型の **Paris** 則で評価を行うことにより、トランスバースクラック形成における下限界領域  $\Delta G_{th}$  が存在するか否かについて検討する。

第 5 章では、高サイクル疲労負荷を受ける CFRP 積層板内部に進展する層間剥離成長挙動について評価を行う。繰返し振幅数  $10^8$  cycle の疲労試験を行い、高サイクル領域における層間剥離成長挙動を観察し、負荷応力レベルの違いによる損傷形態の差異について示す。また、層間剥離進展に伴うエネルギー解放率を算出し、層間剥離進展速度とエネルギー解放率の関係をを用いた **Paris** 則で評価することによって、層間剥離進展における下限界領域  $\Delta G_{th}$  の存在の有無について検討する。

第 6 章では、層間剥離進展に及ぼすトランスバースクラックの影響について実験的な評価を行う。積層板の疲労損傷挙動は、マトリックスクラックや層間剥離が相互に作用しながら成長する。第 4 章から第 5 章までに示した評価は、それぞれの相互作用は考慮されていない。実験的な評価として、疲労試験前に予めトランスバースクラックを導入した試験片と、未損傷状態の 2 種類の試験片を用意し、 $3 \times 10^8$  cycle の疲労試験を行い、それぞれの試験片について層間剥離進展挙動を比較する。トランスバースクラック近傍から生じる層間剥離挙動を調査することにより、トランスバースクラックが層間剥離進展に及ぼす影響を調査する。

第 7 章では、トランスバースクラックを有する積層板の応力解析を行い、トランスバースクラックを有するときの層間剥離進展に伴うエネルギー解放率について定式化する。さらに層間剥離が進展を開始するクリティカルトランスバースクラック密度を算出する。最終的に第 6 章で得られた実験結果に基づき、トランスバースクラックの影響を考慮に入れた上で、層間剥離進展速度とエネルギー解放率の関係をを用いた **Paris** 則で評価し、層間剥離進展における下限界領域  $\Delta G_{th}$  が存在するか否かについて検討する。

第 8 章では、本論文の結論及び今後の展望について示す。本研究において、繰返し振幅数  $10^8$  cycle オーダーまでの疲労試験を行った結果、明確な疲労限は確認されなかったものの損傷進展における下限界領域  $\Delta G_{th}$  の存在を示唆した。また、実験結果より負荷応力レベルの違いによる疲労損傷挙動の差異を明らかにし、高サイクル領域における層間剥離進展挙動の重要性を示した。

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏 名 細井 厚志 印

(2007年11月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論 文	<p>(1) Transverse Crack Growth Behavior Considering Free-edge Effect in Quasi-isotropic CFRP Laminates under High-cycle Fatigue Loading, Composites Science and Technology, <u>Atsushi Hosoi</u>, Yoshihiko Arao and Hiroyuki Kawada. (Submitted)</p> <p>(2) High-cycle fatigue characteristics of quasi-isotropic CFRP laminates (Initiation and propagation of delamination considering the interaction with transverse cracks), International Journal of Fatigue, <u>Atsushi HOSOI</u>, Narumichi SATO, Yasuyuki KUSUMOTO, Keita FUJIWARA and Hiroyuki KAWADA. (Submitted)</p> <p>(3) Stress Analysis of CFRP Laminates Containing Transverse Cracks Considering Free-Edge Effect and Residual Thermal Stress, Material Science &amp; Engineering A, <u>Atsushi HOSOI</u> and Hiroyuki KAWADA. (Accepted)</p> <p>(4) High-cycle fatigue characteristics of quasi-isotropic CFRP laminates, Advanced Composite Materials, Vol. 16, No.2, pp. 151-166, 2007, <u>Atsushi HOSOI</u>, Yoshihiko ARAO, Hirokazu KARASAWA and Hiroyuki KAWADA.</p> <p>(5) Fatigue characteristic of quasi-isotropic CFRP laminates subjected to variable amplitude cyclic loading of two-stage, International Journal of Fatigue, Vol. 28, No.10, pp. 1284-1289, 2006, <u>Atsushi Hosoi</u>, Hiroyuki Kawada and Hiromichi Yoshino.</p> <p>(6) Long-Term Durability of Polymer Matrix Composites under hostile Environments, Materials Science and Engineering A, Vol. 412, No. 1-2, pp. 159-164, 2005, Hiroyuki KAWADA, Akira KOBICI, Jun KOYANAGI and <u>Atsushi HOSOI</u>.</p>
国際会議	<p>(7) High-cycle fatigue characteristics of quasi-isotropic CFRP laminates (Initiation and propagation of delamination considering the interaction with transverse cracks), 4<sup>th</sup> International Conference on Fatigue of Composites (ICFC4), Kaiserslautern, 9/2007, <u>Atsushi HOSOI</u>, Narumichi SATO, Yasuyuki KUSUMOTO, Keita FUJIWARA and Hiroyuki KAWADA.</p> <p>(8) Interaction between transverse cracks and edge delamination considering free-edge effects in composite laminates, Proceedings of 16<sup>th</sup> International Conference on Composite Materials (ICCM16), Kyoto, 7/2007, <u>Atsushi Hosoi</u>, Shinako Yagi, Keiichi Nagata and Hiroyuki Kawada.</p> <p>(9) Stress analysis of cracked laminates considering free-edge effect and residual thermal stress, Korea-Japan Young Researchers Workshop on Composite Materials 2007, Tokyo, 2/2007, <u>Atsushi Hosoi</u> and Hiroyuki Kawada.</p> <p>(10) Stress Analysis of CFRP Laminates Containing Transverse Cracks Considering Free-Edge Effect and Residual Thermal Stress, 2nd International Conference on Recent Advances in Composite Materials (ICRACM2), New Delhi, 2/2007, <u>Atsushi Hosoi</u> and Hiroyuki Kawada.</p>

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
国際会議	<p>(11) High-cycle fatigue characteristic of quasi-isotropic CFRP laminates containing open hole, 7<sup>th</sup> China-Japan Joint Conference on Composite Materials (CJJCC-7), Dunhuang, 8/2006, <u>Atsushi Hosoi</u>, Keiichi Nagata, Yasuhiro Sakamoto and Hiroyuki Kawada.</p> <p>(12) Transverse Crack Growth Behavior Considering Free-edge Effect in Quasi-isotropic CFRP Laminates under High-cycle Fatigue Loading, 12th European Conference on Composite Materials (ECCM 12), Biarritz, 8/2006, <u>Atsushi Hosoi</u>, Yoshihiko Arao and Hiroyuki Kawada.</p> <p>(13) Transverse crack growth behavior in quasi-isotropic CFRP laminates under high-cycle fatigue, Doshisha Univ./ KAIST/ Nihon Univ./ T.I.T./ Waseda Univ. Student Joint Workshop on Composite Materials, Tokyo, 2/2006, <u>Atsushi Hosoi</u>, Yoshihiko Arao and Hiroyuki Kawada.</p> <p>(14) High-cycle fatigue characteristics of CFRP laminates, 2<sup>nd</sup> COE-CIR Workshop, Hukuo-ka, 8/2005, <u>Atsushi Hosoi</u> and Hiroyuki Kawada. (Poster session)</p> <p>(15) Damage mechanics characterization of high-cycle fatigue in quasi-isotropic CFRP laminates, Society for Experimental mechanics (SEM) annual conference and exposition, Portland, 6/2005, <u>Atsushi Hosoi</u>, Hirokazu Karasawa and Hiroyuki Kawada.</p> <p>(16) Long-term durability of polymer matrix composites under hostile environments, International Conference on Recent Advances in Composite Materials (ICRACM), Varanasi, 12/2004, H. Kawada, A. Kobiki, J. Koyanagi and <u>A. Hosoi</u>.</p> <p>(17) Fatigue characteristic of quasi-isotropic CFRP laminates subjected to variable amplitude cyclic loading of two-stage, Third International Conference on Fatigue of Composites (ICFC3), Kyoto, 9/2004, <u>Atsushi Hosoi</u>, Hiroyuki Kawada and Hiromichi Yoshino.</p>
学会発表	<p>(18) CFRP 積層板の高サイクル疲労特性（トランスバースクラックの影響を考慮に入れた層間剥離成長挙動の評価），第 32 回複合材料シンポジウム，長崎，10/2007，<u>細井厚志</u>，楠本康之，藤原圭太，佐藤成道，川田宏之。</p> <p>(19) CFRP 積層板の高サイクル疲労荷重下におけるトランスバースクラック成長及び層間剥離成長における実験及び解析的評価，東レ講演会，愛媛，10/2007，<u>細井厚志</u>，川田宏之。</p> <p>(20) 擬似等方性 CFRP 積層板の高サイクル疲労特性（負荷応力レベルの違いによる損傷発生挙動の差異），日本複合材料学会 2007 年度研究発表講演会，東京，5/2007，<u>細井厚志</u>，楠本康之，藤原圭太，八木志奈子，佐藤成道，川田宏之。</p> <p>(21) トランスバースクラックを有する CFRP 積層板の応力解析と剛性低下予測，日本複合材料学会 2007 年度研究発表講演会，東京，5/2007，<u>細井厚志</u>，川田宏之。</p>

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
学会発表	<p>(22) 擬似等方性 CFRP 積層板の高サイクル疲労特性（層間はく離におけるトランスバースクラックの影響）、第 46 回学生員卒業研究発表講演会、栃木、3/2007、川田宏之、藤原圭太、楠本康之、<u>細井厚志</u>、八木志奈子。</p> <p>(23) エッジ効果と熱残留応力を考慮したトランスバースクラックを有する CFRP 積層板の応力解析、九州大学応用力学研究所力学専門部会共同研究集会、福岡、1/2007、<u>細井厚志</u>、八木志奈子、永田啓一、川田宏之。</p> <p>(24) 炭素繊維強化プラスチック積層板の長期耐久性評価、第 5 回若手研究者による Workshop、東京、12/2006、<u>細井厚志</u>。</p> <p>(25) 擬似等方性 CFRP 積層板の高サイクル疲労特性（トランスバースクラックを考慮した層間剥離の進展挙動）、第 31 回複合材料シンポジウム、長野、10/2006、<u>細井厚志</u>、八木志奈子、川田宏之。</p> <p>(26) 擬似等方性 CFRP 積層板の高サイクル疲労特性（エッジ効果を考慮したトランスバースクラック進展挙動）、日本複合材料学会 2006 年度研究発表講演会、東京、6/2006、<u>細井厚志</u>、荒尾与史彦、川田宏之。</p> <p>(27) 引張疲労負荷における Stitched Laminate Composite の内部損傷進展、日本機械学会関東支部第 12 期総会講演会、東京、3/2006、荒尾与史彦、<u>細井厚志</u>、川田宏之。</p> <p>(28) 高サイクル疲労における擬似等方性 CFRP 積層板のトランスバースクラック進展挙動、第 30 回複合材料シンポジウム、愛媛、10/2005、<u>細井厚志</u>、荒尾与史彦、川田宏之。</p> <p>(29) 円孔を有する擬似等方性 CFRP 積層板の高サイクル疲労特性、第 30 回複合材料シンポジウム、愛媛、10/2005、<u>細井厚志</u>、坂本康弘、永田啓一、川田宏之。</p> <p>(30) 縫合 CERP 積層板の静的強度、疲労強度に対するスティッチ間隔の影響、第 30 回複合材料シンポジウム、愛媛、10/2005、荒尾与史彦、<u>細井厚志</u>、川田宏之。</p> <p>(31) 擬似等方性 CFRP 積層板の高サイクル疲労特性（負荷応力レベルにおける損傷挙動の差異）、日本複合材料学会 2005 年度研究発表講演会、東京、5/2005、<u>細井厚志</u>、唐沢博一、八木志奈子、高橋敏紀、川田宏之。</p> <p>(32) 擬似等方性 CFRP 積層板の高サイクルにおける疲労特性、日本機械学会関東支部第 11 期総会講演会、東京、3/2005、<u>細井厚志</u>、川田宏之。</p> <p>(33) 擬似等方性 CFRP 積層板の高サイクル疲労特性、九州大学応用力学研究所力学専門部会共同研究集会、福岡、3/2005、<u>細井厚志</u>、唐沢博一、川田宏之。</p> <p style="text-align: right;">その他 2 件</p>