

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K13921

研究課題名（和文）先進複合材料の破壊特性向上へ向けた微視構造最適化に関する数値解析的研究

研究課題名（英文）Numerical study on the composite microstructure for the improvement of fracture properties

研究代表者

樋口 諒 (Higuchi, Ryo)

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・特任准教授

研究者番号：00815946

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、様々な微視構造（繊維形状、直径、配置）を有する炭素繊維強化プラスチック（CFRP）の巨視的な力学特性を包括的に調査可能な数値解析手法開発に取り組んだ。具体的には、拡張有限要素法（XFEM）、均質化法、モンテカルロ法を組み合わせた微視構造解析ツールを開発し、樹脂の弾塑性・損傷構成則を実装して力学特性評価を実施した。開発手法は円形・通常径繊維のCFRPの弾性特性および破壊特性をばらつきも含めて評価可能であることを確認している。また、開発手法を用いた非円形繊維のCFRPの解析により、繊維形状の設計によって、円形繊維に比して優れた力学特性を発現し得ることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、繊維形状の設計により力学特性の向上が可能であることが明らかとなった。このような知見は過去に報告されておらず、そもそも様々な繊維形状の弾性特性を比較した数値解析もなされていないことから、本研究独自の成果であるといえる。また、本研究で開発した微視構造解析手法は、本研究で対象とした繊維形状、直径、配置の変化だけでなく、材料種の変化（熱可塑性樹脂、3Dプリント材等）、材料挙動の変化（動的問題、長期寿命特性）へも対応可能であり、実際に研究期間内にこれらの問題での検証も実施している。これは、提案手法が広範な工学問題において複合材料の微視構造設計を援用可能なツールであることを示している。

研究成果の概要（英文）：This study developed a mesh-independent simulation tool in order to comprehensively investigate the effect of microstructure on the macroscopic mechanical properties of composites. The developed tool consists of homogenization method, extended finite element method, and Monte-Carlo method. For progressive damage simulation, the elasto-plastic-damage constitutive law of resin was implemented. As the verification, the homogenization simulations of general circular carbon fiber reinforced plastics (CFRPs) were conducted and the predicted results are compared with the experiment. Finally, the effect of fiber shape on the mechanical properties of CFRP was numerically investigated. Among the five kinds of fiber shape (circular, elliptical, 2-lobed, triangular, and square), triangular CFRP exhibits the best transverse and shear mechanical properties. This result enhances the possibility to improve the transverse and shear performance of UD CFRP by optimization of fiber shape.

研究分野：複合材料工学

キーワード：炭素繊維強化プラスチック 計算機援用設計 均質化法 拡張有限要素法

1. 研究開始当初の背景

近年、軽量かつ優れた力学特性を有する炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の航空・宇宙分野での適用範囲が拡大しており、それに伴って CFRP の力学特性に対する要求も年々高まっている。しかし、近年の材料開発に伴う各方向の破断ひずみの推移を比較すると、繊維方向引張の破断ひずみは向上しているものの、その他の方向の破断ひずみは向上していない。特に、繊維直交方向引張の破断ひずみが最も低く、実際に構造材料として用いられる積層板においても、初期損傷は荷重方向と繊維方向が直交する層で発生する。この初期損傷が別形態の損傷の引き金となり、最終的には積層板全体の健全性低下に寄与するため、繊維直交方向の破壊特性向上が近年の課題となっている。CFRP は繊維と樹脂から構成される微視的非均質材料であり、繊維直交方向強度は樹脂特性だけでなく、繊維体積含有率や繊維配置などの微視構造にも依存することが知られている。近年、製造法の進歩により、様々な断面形状の繊維が製造可能となり、これらが繊維直交方向引張・圧縮強度へ影響を及ぼすことが明らかとなった。さらに、開繊技術の発展により薄層 CFRP が開発され、薄層化により繊維直交方向強度が向上することが報告されている。このことは、層厚に対する繊維径の大きさが繊維直交方向強度へ寄与する可能性を示唆している。このように微視構造の設計自由度が増加している中で、本研究では、既存の CFRP における微視構造(繊維の形状や直径など)が巨視的な繊維直交方向力学特性の観点において最適な構造なのかという点を明らかとしたい。微視構造最適化の実現へ向け、これらを包括的に調査する上では、実験的調査よりもコスト・時間の両面で効率的な数値解析的調査が望ましく、それを実現可能な微視構造解析手法の開発が必要とされている。

2. 研究の目的

本研究では、CFRP の繊維直交方向力学特性を向上させるための微視構造最適化へ向けて、微視構造(繊維形状、直径、配置)が様々な荷重条件下で繊維直交方向力学特性へ及ぼす影響を包括的に解明することを目的とする。本目標達成へ向けては、膨大な微視構造候補を対象とした調査が必要である。過去に提案された微視構造解析手法では、全て一般的な有限要素法(FEM)と均質化法を採用しており、微視構造変化に伴ってリメッシュ、境界条件の再定義が必要であった。これにより、調査対象の微視構造、荷重条件が制限されてきた。そこで本研究では、解析手法に拡張有限要素法(XFEM)を採用し、均質化法、モンテカルロ法と統合することで、微視構造変化が巨視的力学特性へ及ぼす影響について、極めて効率的な調査を可能とする。まず、微視構造が巨視的力学特性へ及ぼす影響を調査するために均質化法を採用する。ここで、実際の CFRP では繊維が不規則に配置し、力学特性に寄与するため、理想的な正方配置や六方配置による解析では高精度な強度予測は困難であることが知られている。そこで、本研究では、実際の繊維配置を再現した上で、モンテカルロ法により乱数を用いて生成した複数の繊維配置において解析を行うことで、配置のばらつきまでを考慮した強度予測を行う。さらに、様々な繊維の形状、直径、配置、複数の荷重条件を効率良く解析する上で、XFEMを採用する。XFEMでは、繊維/樹脂界面上の要素に拡充関数、拡充節点を導入することで、微視構造をメッシュと独立にモデル化することが可能となる。これにより、微視構造を変えた場合に一般的な FEM で必要となるリメッシュ、境界条件の再定義が不要となるため、人の手を要する処理作業を半減させることができ、解析効率の大幅な向上に繋がる。提案手法および実施内容の概要を図1に示す。

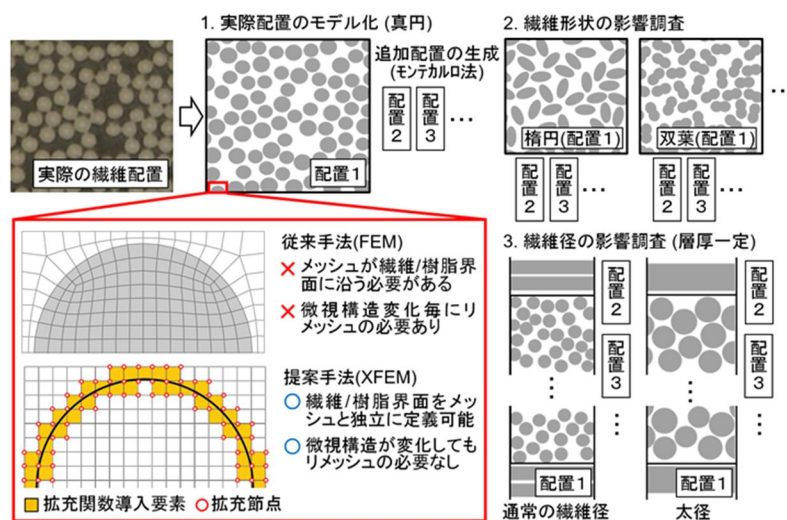


図1：微視構造解析手法と実施内容の概要

3. 研究の方法

本研究では、CFRP の繊維形状、直径、配置が様々な荷重条件下で力学特性へ及ぼす影響を明らかにする。本目標達成へ向け、まず膨大な微視構造候補を網羅的に調査可能な微視構造解析手法を開発する。次に、開発手法を用いた力学特性評価を実施する。実施内容の詳細を以下に示す。

【XFEM コード開発】 XFEM の拡充関数にランプ関数を採用することで、繊維/樹脂界面でのひずみ場の不連続性をメッシュと独立に導入可能な XFEM コードを開発する。コードの妥当性検証として、繊維を 1 本のみ含む簡易モデルを作成し、通常の有限要素法の解との比較を行う。

【均質化法・モンテカルロ法の XFEM コードへの統合】 開発した XFEM コードへ均質化法、モンテカルロ法を統合し、微視構造解析手法を完成させる。解析精度検証として、通常の繊維形状・繊維径の CFRP を対象とし、複数の荷重条件下で繊維直交方向力学特性評価を行い、実験結果と比較する。

【繊維形状が巨視的力学特性へ及ぼす影響に関する数値解析的調査】 楕円形や双葉形など種々の繊維形状を対象として、様々な荷重条件下で微視構造解析を実施し、力学特性を調査する。

【繊維直径が巨視的力学特性へ及ぼす影響に関する数値解析的調査】 全方向に完全な周期性を仮定した微視構造解析では繊維径の影響を正確に評価できないため、本研究では、層厚方向を全てモデル化し、層厚方向の周期性を排除した解析モデルを構築し、繊維径の影響を調査する(図 1 参照)。

4. 研究成果

本研究では、様々な微視構造(繊維の断面形状、直径、配置のばらつき)を有する CFRP の巨視的な力学特性を包括的に調査可能な数値解析手法開発に取り組んだ。具体的には、XFEM、均質化法、モンテカルロ法を組み合わせた独自の微視構造解析手法を開発した。また、開発手法に樹脂の弾塑性・損傷構成則を実装し、繊維直交方向の弾性特性および強度特性の評価を実施した。

まず、提案手法の精度検証のため、各弾性率および破断ひずみの実験値(T. Morimoto et al., JAXA-RM-14-004, 2015)が参照可能な円形・通常径の CFRP (T800S/3900-2B、東レ)を対象とし、提案手法での予測結果を実験値と比較した(表 1)。ここで、解析モデルは最も簡単な正方配列と、実際の配置のばらつきを考慮したランダム配列 10 パターンを準備した。表に示す通り、繊維配置の不均一性は繊維直交方向の荷重伝達能力を低下させる一方で、長手方向せん断の荷重伝達能力を向上させることが分かる。その結果、全ての弾性率において、ランダム配列は正方配列よりも高精度な予測を与える結果となった。また、ランダム配列では弾性特性のばらつきの程度(CV 値)も概ね予測可能であることが分かる。これらの結果より、提案手法は繊維直交方向ヤング率、長手方向せん断弾性係数に関し、ばらつきの程度を含めて高精度に予測可能であることが確認された。破壊特性については、繊維配置の不均一性は強度を低下させることが分かる。これは、破壊は最弱部で生じるため、繊維が最も近接する箇所が生じることが原因である。一方で、正方配置・ランダム配置ともに破断ひずみは実験と良い一致を示しており、提案手法および実装モデルの妥当性が示されたと言える。

次に、開発手法を用いて円形、楕円形、双葉形、三角形、四角形状の炭素繊維で強化された CFRP の力学特性評価を実施した。ここでも正方配列、ランダム配列を準備し、それぞれの均質化弾性率および繊維直交方向引張下での破断ひずみを算出した。解析結果を図 2 に示す。図 2 より、正方配列の場合、特にアスペクト比の大きい形状では直交異方性が発現しており、長径方向に高く、短径方向に低い弾性率が得られている。これは、繊維間距離が短い程、隣接繊維との間での荷重伝達が容易になるためである。但し、四角形 CFRP のみ例外であり、繊維間距離が円形 CFRP よりも長いにもかかわらず、繊維直交方向ヤング率は円形 CFRP よりも高い。これは、繊維形状の負荷方向への投影面積が円形よりも大きいため、荷重経路の幅が円形 CFRP よりも高いためであると考えられる。以上の結果より、CFRP としての繊維直交方向ヤング率は基本的に繊維間距離に依存するが、繊維形状によっても変わることが確認された。一方で、図 2 を見ると、ランダム配列では正方配列でみられた直交異方性が消失し、横等方性となっていることが分かる。これは、図 3 に示すように、繊維方向(=負荷方向への投影面積)や繊維間距離がランダムであることにより、これらの影響が平均化されるためと考えられる。一方、ランダム配列であっても、非円形 CFRP で円形よりも高い繊維直交方向ヤング率やせん断弾性係数が確認され、特に四角形 CFRP では円形 CFRP よりも 5% ヤング率が高い結果となった。次に、破断ひずみの解析結果の解釈のため、正方配置での破断ひずみと繊維間距離の関係を図 4 に示す。図中の赤丸はき裂発生位置を示している。全形状で破壊発生位置は繊維の頂点部であったが、破断ひずみは大きく異なる結果となった。楕円形と双葉形では短径方向負荷時の破断ひずみは円形に比して増加し、長径方向負荷時の破断ひずみは低下した。これは繊維間距離の影響であり、繊維間距離が近くなるほ

表 1 円形・通常径 CFRP での解析精度検証(実験値との比較)

	Exp.	Sim. square	Sim. random
E_L (GPa)	153 (2.02)	154 (—)	154 (9.18×10^{-4})
E_T (GPa)	8.00 (1.85)	8.39 (—)	7.96 (1.27)
ν_{LT}	0.34 (3.46)	0.262 (—)	0.262 (0.763)
ν_{TT}	0.45–0.5 ¹	0.482 (—)	0.506 (0.438)
G_{LT} (GPa)	4.03 (2.14)	3.12 (—)	3.36 (2.16)
G_{TT} (GPa)	2.67–2.76 ²	3.04 (—)	2.89 (0.863)
ε_T^{cr} (%)	0.90 (2.94)	0.92	0.89 (4.6)

¹ Typical value for an epoxy resin.

² Calculated as $G_{TT} = E_T/2(1 + \nu_{LT})$.

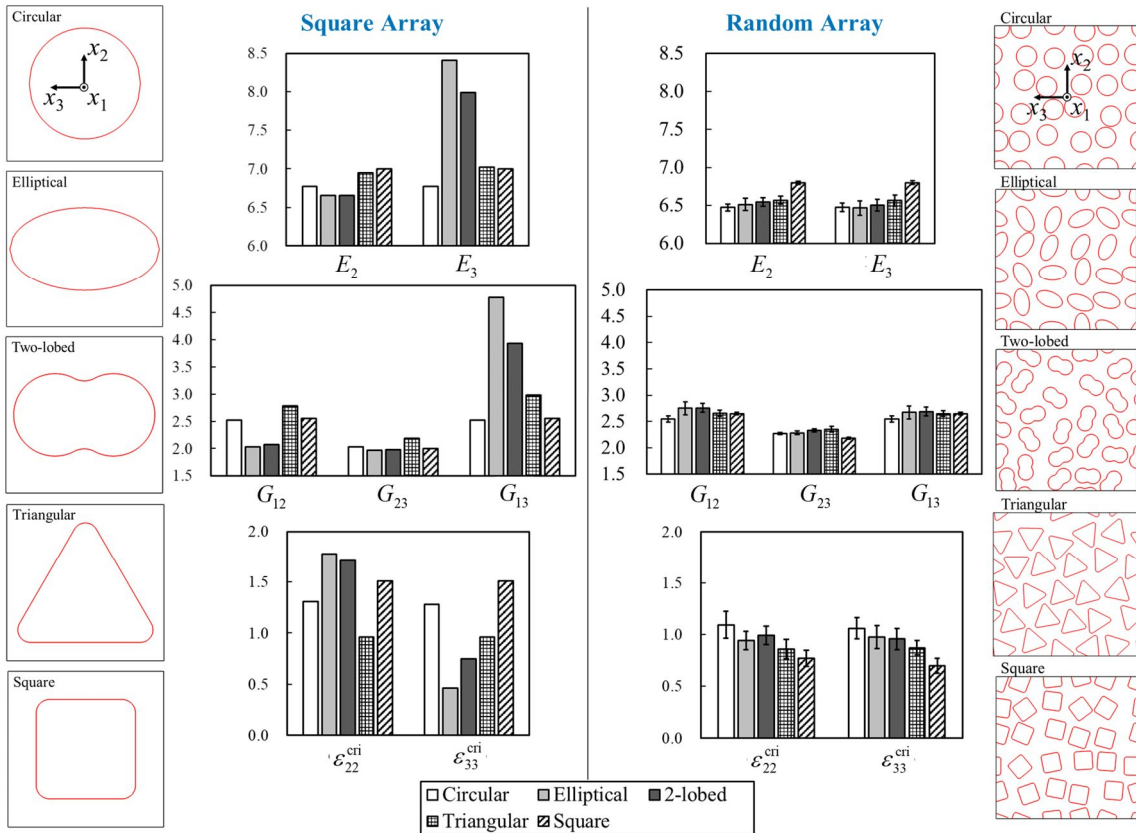


図2 各繊維形状での均質化弾性率・繊維直交方向破断ひずみの比較

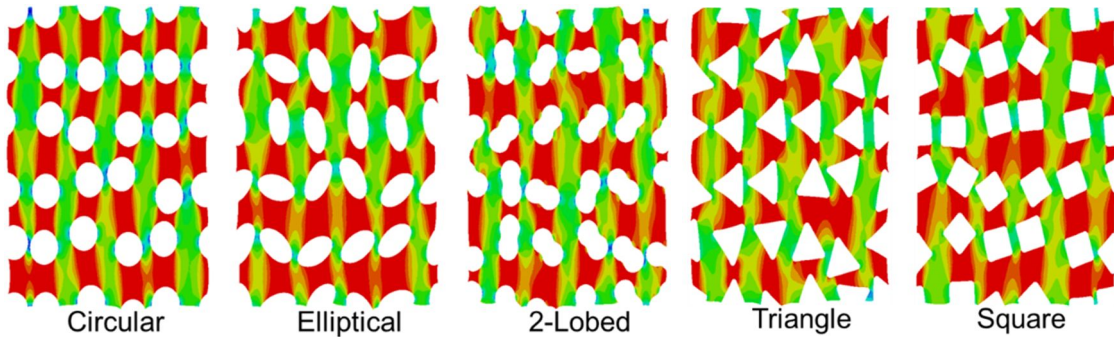


図3 ランダム配列における x_2 方向負荷時の応力分布 σ_{22}

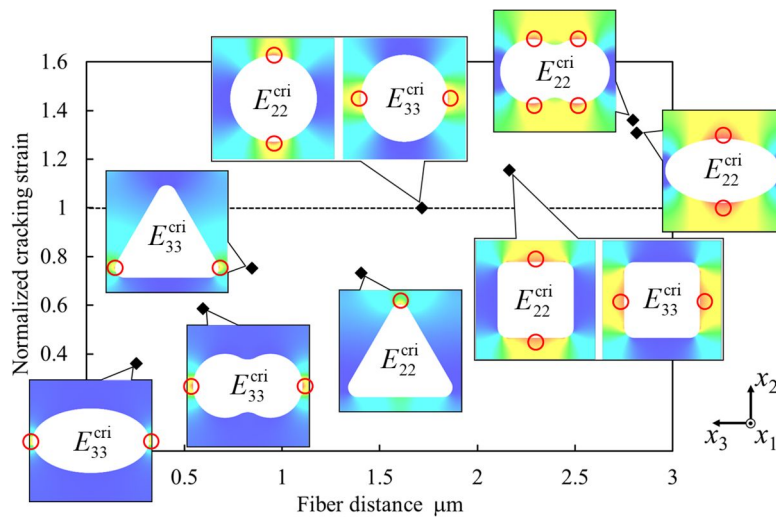


図4 正分配列における繊維直交方向引張破断ひずみと繊維間距離の関係

ど樹脂が繊維から受ける拘束が厳しくなるためである。一方で、ランダム配置では上記の異方性の影響が平均化され、破断ひずみは円形に比して変わらない、もしくは低くなる結果となった。ランダム配置では、繊維の方向や繊維間距離がランダムとなり、弾性特性は平均化されるが、破壊は最も繊維間距離

が小さい箇所が発生するため、繊維間距離が近くなりやすい非円形繊維では早期に破壊が発生するためである。従って、繊維直交方向の引張破壊特性のみに着目する場合、円形に近く繊維間距離が小さくなり辛い繊維形状が好ましいと言える。以上の結果より、繊維形状の設計により、CFRP の力学特性を向上できる可能性が示唆された。このような知見は過去に報告されておらず、そもそも様々な繊維形状の力学特性を比較した数値解析もなされていないことから、本研究独自の成果であるといえる。

さらに、繊維径の影響を検証するため、板厚全体をモデル化した解析モデルを構築した。ここでは、繊維と樹脂を区別する非均質層と、区別しない均質層からなる解析モデルを開発した。非均質層では、繊維 / 樹脂界面のはく離、樹脂の塑性や損傷の累積によるき裂の発生と進展をモデル化した。また、層厚方向へのき裂進展挙動を適切に捉えるため、隣接(均質)層を導入し、非均質層への拘束効果を考慮している。本モデルは繊維径の影響調査の目的で開発したが、妥当性検証として、実験値が参照可能な層厚の異なる CFRP クロスプライ積層板の引張解析を実施した。き裂挙動について実験結果(H. Saito et al., Adv. Compos. Mater., 21(1), (2012), 57-66)との比較結果を図 5 に示す。図より、提案モデルは各層厚でのき裂進展挙動を良く再現しており、き裂発生破断ひずみについても試験結果とよく整合することから、十分な予測精度を有することが示された。ここでは層厚依存のき裂挙動を対象としたが、提案モデルは層厚が同じで繊維径が異なる場合の強度評価へも適用可能である。

また、本手法は、繊維直交方向引張負荷に限らず、繊維方向圧縮、繊維直交方向圧縮、繊維方向せん断など様々な荷重条件へと拡張し、いずれの荷重条件下でも試験と整合する解析結果を得ている。この過程で、実際の複合材料微視構造を画像ベースでのモデル化と、人工的に生成する周期配列を組み合わせた新たな解析モデル構築手法を開発している。さらに、様々な材料挙動(動的問題、長期寿命特性)、材料種(熱可塑性 CFRP、3D プリント材、メタマテリアル)へも適用し、提案手法の更なる機能拡張、妥当性検証を実施している。

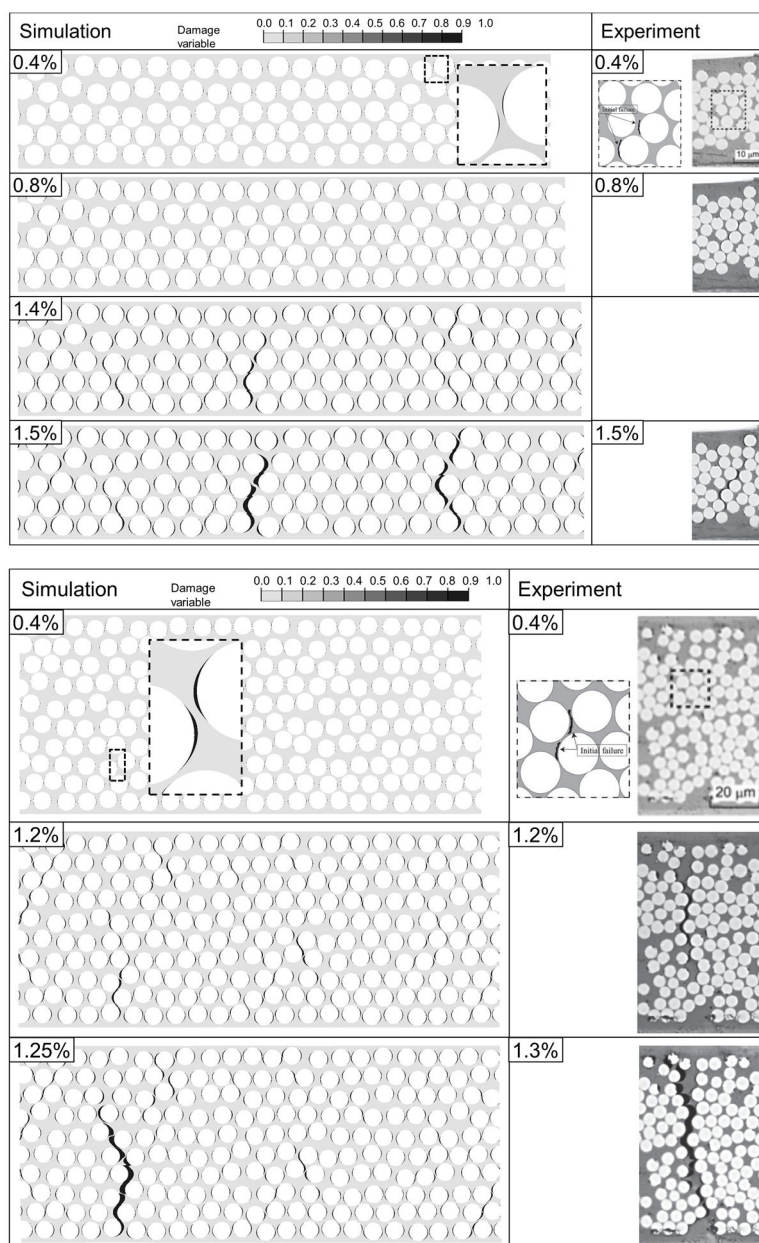


図 5 層厚の異なる CFRP でのき裂累積挙動の実験との比較(上:層厚 24 μ m、下:層厚 40 μ m)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 16件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Higuchi R., Aoki R., Onodera S., Lu X., Zhi J., Leong K.H., Yokozeki T., Okabe T., Tay T.E.	4. 巻 242
2. 論文標題 Multi-fidelity progressive damage simulation of notched composite laminates with various ply thicknesses	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Solids and Structures	6. 最初と最後の頁 111518 ~ 111518
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijsoistr.2022.111518	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Takahashi Takuya, Todoroki Akira, Kawamura Chikara, Higuchi Ryo, Sugiyama Tetsuya, Miyanaga Toshiaki, Hattori Koichi, Ueda Masahito, Yokozeki Tomohiro, Honda Masanori	4. 巻 289
2. 論文標題 Unidirectional CFRP kinking under uniaxial compression modeled using synchrotron radiation computed tomography imaging	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Composite Structures	6. 最初と最後の頁 115458 ~ 115458
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compstruct.2022.115458	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Aoki Ryoma, Higuchi Ryo, Yokozeki Tomohiro, Aoki Kazuyuki, Uchiyama Shigekazu, Ogasawara Toshio	4. 巻 280
2. 論文標題 Effects of ply thickness and 0°-layer ratio on failure mechanism of open-hole and filled-hole tensile tests of thin-ply composite laminates	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Composite Structures	6. 最初と最後の頁 114926 ~ 114926
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compstruct.2021.114926	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Higuchi Ryo, Hayashi Ibuki, Yokozeki Tomohiro, Aoki Takahira	4. 巻 234-235
2. 論文標題 Theory for deformation of laminate with multiple inhomogeneous inclusions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Solids and Structures	6. 最初と最後の頁 111291 ~ 111291
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijsoistr.2021.111291	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hayashi Ibuki, Higuchi Ryo, Yokozeke Tomohiro, Aoki Takahira	4. 巻 188
2. 論文標題 Analytical study on the thermal deformation of ultralight phased array antenna	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Acta Astronautica	6. 最初と最後の頁 531 ~ 544
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actaastro.2021.08.009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Koyanagi Jun, Kawamoto Kodai, Higuchi Ryo, Tan Vincent Beng Chye, Tay Tong-Earn	4. 巻 5
2. 論文標題 Direct FE2 for simulating strain-rate dependent compressive failure of cylindrical CFRP	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Composites Part C: Open Access	6. 最初と最後の頁 100165 ~ 100165
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcomc.2021.100165	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kota Takamoto, Toshio Ogasawara, Hiroki Kodama, Tomoisa Mikami, Sota Oshima, Kazuyuki Aoki, Ryo Higuchi, Tomohiro Yokozeke	4. 巻 145
2. 論文標題 Experimental and numerical studies of the open-hole compressive strength of thin-ply CFRP laminates	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Composites Part A: Applied Science and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 106365
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compositesa.2021.106365	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 R. Higuchi, S. Warabi, A. Yoshimura, T. Nagashima, T. Yokozeke, T. Okabe	4. 巻 145
2. 論文標題 Experimental and numerical study on progressive damage and failure in composite laminates during open-hole compression tests	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Composites Part A: Applied Science and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 106300
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compositesa.2021.106300	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. Sato, K. Hasegawa, J. Koyanagi, R. Higuchi, Y. Ishida	4. 巻 141
2. 論文標題 Residual strength prediction for unidirectional CFRP using a nonlinear viscoelastic constitutive equation considering entropy damage	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Composites Part A: Applied Science and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 106178
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compositesa.2020.106178	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 R. Aoki, R. Higuchi, T. Yokozeki	4. 巻 143
2. 論文標題 Fatigue simulation for progressive damage in CFRP laminates using intra-laminar and inter-laminar fatigue damage models	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Fatigue	6. 最初と最後の頁 106015
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijfatigue.2020.106015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 R. Higuchi, S. Warabi, W. Ishibashi, T. Okabe	4. 巻 198
2. 論文標題 Experimental and numerical investigations on push-out delamination in drilling of composite laminates	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Composites Science and Technology	6. 最初と最後の頁 108238
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compscitech.2020.108238	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 R. Higuchi, R. Aoki, T. Yokozeki, T. Okabe	4. 巻 29
2. 論文標題 Evaluation of the in-situ damage and strength properties of thin-ply CFRP laminates by micro-scale finite element analysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Composite Materials	6. 最初と最後の頁 475-493
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/09243046.2020.1740867	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hitoshi Hamori, Hisashi Kumazawa, Ryo Higuchi, Tomohiro Yokozeki	4. 巻 245
2. 論文標題 Gas permeability of CFRP cross-ply laminates with thin-ply barrier layers under cryogenic and biaxial loading conditions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Composite Structures	6. 最初と最後の頁 112326
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compstruct.2020.112326	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 R. Higuchi, R. Aoki, T. Yokozeki, T. Okabe	4. 巻 ---
2. 論文標題 Evaluation of the in-situ damage and strength properties of thin-ply CFRP laminates by micro-scale finite element analysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Composite Materials	6. 最初と最後の頁 ---
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/09243046.2020.1740867	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 樋口諒, 青木涼馬, 横関智弘, 岡部朋永	4. 巻 46 (5)
2. 論文標題 ミクロスケール解析による薄層CFRP積層板のin-situ損傷・強度特性評価	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本複合材料学会誌	6. 最初と最後の頁 ---
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.6089/jscm.46.212	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 R. Higuchi, T. Yokozeki, T. Nagashima, T. Aoki	4. 巻 126
2. 論文標題 Evaluation of mechanical properties of noncircular carbon fiber reinforced plastics by using XFEM-based computational micromechanics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Composites Part A	6. 最初と最後の頁 105556
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compositesa.2019.105556	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計19件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 11件）

1. 発表者名 RYO HIGUCHI, RYOMA AOKI, TOMOHIRO YOKOZEKI, SOTA ONODERA, TOMONAGA OKABE, KARH HENG LEONG, JIE ZHI, XIN LU, TONG-EARN TAY
2. 発表標題 Evaluation of Notched Strength of Thin-Ply Composite Materials Using Adaptive Discrete-Smeared Crack (A-DiSC) Method
3. 学会等名 American Society for Composites 35th Technical Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 樋口諒, 横関智弘, 青木隆平, 山下慎一郎, 太田公一, 松倉いづみ, 糸日谷剛, 守屋勝義
2. 発表標題 CFRP製航空エンジン部品のコーティングに関する界面特性評価
3. 学会等名 第45回複合材料シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 樋口諒, 横関智弘, 青木隆平, 岸本直子, 渡邊秋人, 黒瀬豊敏, 上土井大助
2. 発表標題 CFRP薄板製軽量アンテナパネル構造の熱変形解析
3. 学会等名 第62回構造強度に関する講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 樋口諒, 青木涼馬, 横関智弘
2. 発表標題 層厚の異なるCFRP積層板のトランスバースクラック進展に関する微視的解析
3. 学会等名 第24回計算工学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryo Higuchi, Ryoma Aoki, Tomohiro Yokozeki
2. 発表標題 Numerical Simulation of Cracking Behavior in Thin Ply Composite Laminates
3. 学会等名 5th International Conference on Mechanics of Composites (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryo Higuchi, Ryoma Aoki, Tomohiro Yokozeki
2. 発表標題 An Approach to Micro-Meso Modeling of Composite Laminates with Various Ply Thicknesses
3. 学会等名 3rd South-East Asia-Japan Conference on Composite Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 樋口諒, 青木涼馬, 横関智弘, 青木一行, 小祝京, 内山重和, 小笠原俊夫
2. 発表標題 層厚の異なるCFRP積層板の損傷進展に関するマルチスケール解析
3. 学会等名 第61回構造強度に関する講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryo Higuchi, Ryoma Aoki, Tomohiro Yokozeki
2. 発表標題 MULTI-SCALE MODELLING OF DAMAGE PROPAGATION IN THIN-PLY CFRP LAMINATES
3. 学会等名 16th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition - JISSE16 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryo Higuchi, Ryoma Aoki, Tomohiro Yokozeki
2. 発表標題 Multiscale damage analysis of thin-ply composite laminates
3. 学会等名 1st Russia-Japan Joint Workshop on Composite Materials (RJCOM1) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryo Higuchi, Ryoma Aoki, Tomohiro Yokozeki
2. 発表標題 Prediction of notched strength of thin-ply CFRP laminates with various ratios of 0-degree layer
3. 学会等名 44th International Conference and Expo on Advanced Ceramics and Composites (ICACC 2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 樋口諒, 青木涼馬, 横関智弘, 青木一行, 小笠原俊夫
2. 発表標題 薄層CFRP積層板のノッチ強度に関するメソスケール解析
3. 学会等名 第11回日本複合材料会議 (JCCM-11)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryo Higuchi, Tomohiro Yokozeki, Tomonaga Okabe, Toshio Nagashima, Takahira Aoki
2. 発表標題 Development of mesh-free simulation tool for the optimization of microscopic composite structure
3. 学会等名 18 European Conference on Composite Materials - ECCM18 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryo Higuchi, Tomohiro Yokozeki, Tomonaga Okabe, Toshio Nagashima, Takahira Aoki
2. 発表標題 Development of mesh-free simulation tool for the prediction of microcracks in composites with various fiber shapes
3. 学会等名 13th World Congress in Computational Mechanics - WCCM2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryo Higuchi, Tomohiro Yokozeki, Tomonaga Okabe, Toshio Nagashima, Takahira Aoki
2. 発表標題 Microscale Simulation of Composites with Various Microstructures by Using eXtended Finite Element Method (XFEM)
3. 学会等名 33rd ASC Technical Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryo Higuchi, Tomohiro Yokozeki, Toshio Nagashima, Takahira Aoki
2. 発表標題 Development of mesh-free simulation tool for the optimization of composite microstructure
3. 学会等名 The 13th China-Japan Joint Conference on Composite Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryo Higuchi, Tomohiro Yokozeki, Toshio Nagashima, Takahira Aoki
2. 発表標題 Development of mesh-free simulation tool for the optimization of microscopic composite structure
3. 学会等名 Indo-Japan Workshop 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 樋口諒, 横関智弘, 岡部朋永, 長嶋利夫, 青木隆平
2. 発表標題 XFEMを用いた炭素繊維強化複合材料の微視的損傷解析
3. 学会等名 第23回計算工学講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 樋口諒, 横関智弘, 長嶋利夫, 青木孝平
2. 発表標題 XFEM に基づく複合材料微視構造の均質化解析
3. 学会等名 第60回構造強度に関する講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 樋口諒, 青木涼馬, 横関智弘
2. 発表標題 層厚を考慮した複合材料マルチスケール解析技術開発
3. 学会等名 第10回日本複合材料会議
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------