

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：33919

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03852

研究課題名(和文)短繊維強化樹脂複合材料のX線による非破壊内部疲労損傷評価手法の開発

研究課題名(英文)Evaluation of Internal Fatigue Damage in Short Fiber Reinforced Plastics by Transmission X-Ray Diffraction

研究代表者

清水 憲一 (SHIMIZU, Kenichi)

名城大学・理工学部・教授

研究者番号：50294434

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：3層積層構造を有する短繊維GFRPに対して、X線によるひずみスキャンニング法を行った結果、PPS相の板厚方向の熱ひずみは圧縮の値を示した。これに対して、面内方向の熱ひずみは射出方向、直交方向ともに比較的小さい値であった。

負荷応力に対して、PPS相のひずみは比例的に増加したことから、ひずみ一定モデルに従って変形することがわかった。また、引張強さから、破断時のPPS相ひずみを予測した結果、ウェルドでは小さいひずみで破断したことから、危険部位であることがわかった。ウェルドでは、マクロひずみの増加に対するPPS相のひずみ増加割合が小さかったことから、繊維と樹脂の結合が弱い可能性がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、ガラス短繊維で強化した熱可塑性樹脂PPSの複合材料に生じる内部ひずみを、高輝度放射光によるひずみスキャンニング法を用いて非破壊的に評価したものである。この方法では、細いX線束をスキャンして局所のひずみの分布を測定できるために、繊維配向が様でない部材にも適用可能であり、実際に自動車用部品の材料に使用されているガラス短繊維強化PPSの射出成形平板に対して、板厚内部のPPS相のひずみ分布の変化を測定することに成功している。さらに理論的基礎として、繊維配向を考慮したマイクロメカニクスおよび有限要素法を組み合わせた新たな解析手法を提案し、その妥当性を示している。

研究成果の概要(英文)：As a result of a strain scanning method using X-rays on short fiber GFRP having a three-layer laminated structure, the thermal strain in the plate thickness direction of the PPS phase showed a compression value. On the other hand, the thermal strain in the in-plane direction was relatively small in both the injection direction and the orthogonal direction.

Since the strain of the PPS phase increased proportionally with the loading stress, it was found that the strain deformed according to the constant strain model. In addition, as a result of predicting the PPS phase strain at fracture from the tensile strength, it was found that the weld fractured with a small strain, which is a dangerous part. In welds, the ratio of increase in strain in the PPS phase to the increase in macrostrain was small, so the bonding strength between the fiber and the resin may be weak.

研究分野：機械工学

キーワード：X線ひずみスキャンニング法 熱応力 短繊維GFRP 繊維配向分布 マイクロメカニクス

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

陸上輸送機の燃費向上を目指して車体の軽量化が求められており、短繊維強化樹脂材料(SFRP)が注目されている。通常、SFRP 部品は射出成形により製作されるが、射出成形時のモールドの流動性により、表面のシェル層では射出方向に繊維が配向し、中央のコア層ではそれと直交方向に繊維が配向する傾向がある。さらに成形時に高温から室温に温度が変化することで、各層間および母相と繊維の間の熱膨張係数(CTE)のミスマッチによる残留ひずみが発生する。これらの残留応力は、部品の形状安定性あるいは破壊強度に大きな影響を与えることが予想され、その実態の把握が重要である。

複合材料のひずみや応力の非破壊的測定法として X 線法が有力である。一般に、複合材料においては、各相の応力を測定し、複合則を用いてマクロ応力を求める必要があるが、母相あるいは繊維相の応力が測定出来ない場合には、測定可能な相の応力から、マクロ応力を評価しなければならない場合も多い。例えば、繊維がガラスのように非晶質の場合、あるいは炭素繊維のように結晶質でも配向性が非常に強いために応力測定が困難な場合である。申請者はこれまで、結晶性の熱可塑性樹脂 PPS (polyphenylene sulfide) を炭素繊維で強化した SFRP に対して、母相である PPS 相の応力を  $\sin^2\psi$  法の反射法および透過法によって測定することからマクロ応力を評価する手法を提案し、繊維がほぼ一方方向に配向したシェル層の応力解析に適用した。一方、実際の射出部品においては繊維配向が分布しており、繊維配向分布を考慮した測定法の開発が望まれる。

### 2. 研究の目的

そこで本研究では、放射光を光源として用いて、射出成形平板の側面から X 線を入射し、透過法によるひずみスキャンニング測定を行った。この手法は X 線束をスキャンしてひずみの分布を測定できるために、繊維配向が分布する部材にも適用可能と期待できる。本研究では、ガラス短繊維で強化した PPS (Poly-phenylene sulfide) 樹脂材料を板厚 1mm に射出成形した平板に対して、X 線を用いて母相のひずみの測定を行った。3 軸熱ひずみの評価を行った後、射出方向と平行および直交方向に引張負荷を与え、軸方向ひずみおよび板厚方向ひずみをひずみスキャンニング法で測定し、負荷応力との関係について検討した。さらに、ウエルドを有する試験片についても同様の検討を行った。

### 3. 研究の方法

#### 3.1 供試材および試験片形状

供試材は PPS 樹脂にガラス短繊維を 40wt% 含めて射出成形した厚さ 1mm の GFRP 平板である。このとき繊維の体積分率は 0.25 となる。Fig. 1(a)に射出成形平板の寸法を示す。射出成形平板中の繊維配向は、三層積層構造になっており、表面のスキン層は射出方向に繊維が配向し、中央にはそれと直交方向に繊維が配向したコア層がある。本実験に用いた板厚 1mm の成形平板については、コア層厚さが約 0.2mm、スキン層厚さが表面、裏面ともに約 0.4mm であった。Fig. 1(b)には、メタルインサートを挿入し、流動樹脂の会合部(ウエルド部)を有する平板であり、ウエルド部をもつ試験片も製作した。

引張条件下のひずみ測定に用いたドッグボーン型試験片の形状を Fig. 2 に示す。Fig. 1 の射出成形平板から、長手方向(負荷方向)が射出方向と平行な試験片(MD 材)、直交する試験片(TD 材)、中心にウエルド部を有する試験片(WD 材)を切出した。

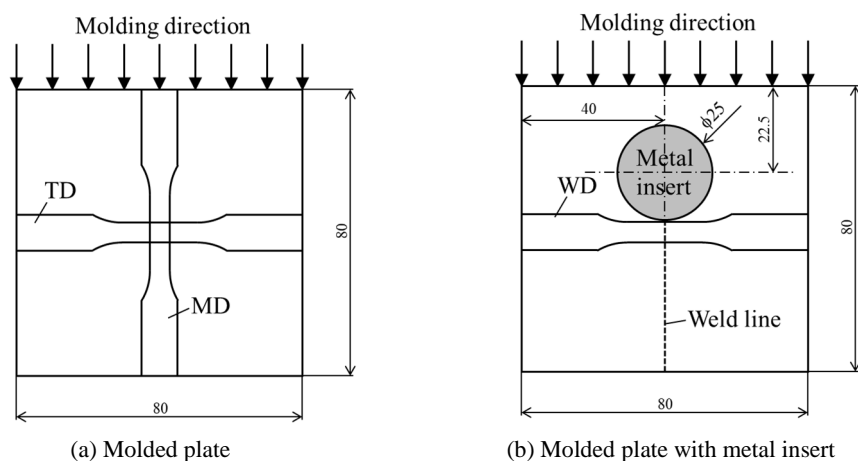


Fig. 1 Specimen cut out from molded plate

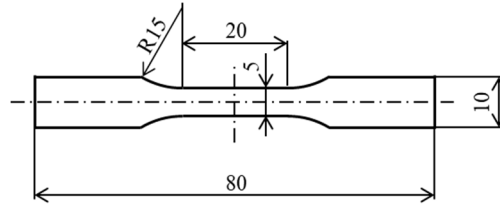


Fig. 2 Shape and dimensions of tensile specimen

### 3.2 引張試験

電気油圧サーボ式疲労試験機を用い、引張速度 0.1 mm/min で、静的引張試験を行った。試験環境は室温大気中で、試験機のストローク変位を測定した。破断後に標点間（平行部）の破断伸びを計測し、ストローク変位を平行部間のひずみに換算した。ヤング率とポアソン比はひずみゲージで測定した。

### 3.3 ひずみ測定

SPring-8 のビームライン BL46XU において、透過法ひずみスキャンニングを使用して母相のひずみ分布を測定した。Table 1 に X 線測定条件を示す。エネルギーは 20 keV の単色光を使用し、発散スリットは 0.1×0.1 mm、受光スリットの高さは 0.1 mm と同一であるが、幅は大きく 2.0 mm とした。3 軸熱ひずみ測定には、MD 材の中心から 5 mm×5 mm の平板を切出し、MD 方向、TD 方向および板厚方向のひずみ  $\varepsilon_{MD}$ 、 $\varepsilon_{TD}$  および  $\varepsilon_z$  を測定した。Fig. 3 に、それぞれのひずみ方向の X 線入射方向および測定領域を示す。X 線を平板の側面から入射し、平板の中心を測定した。測定領域の形状は、底面が細長い菱形の四角柱である。板厚方向（z 方向）に X 線をスキャンし、-0.45, -0.4, -0.3, -0.2, -0.1, 0（板厚中心）、+0.1, +0.2, +0.3, +0.4, +0.45 の 11 点のひずみ分布を測定した。引張負荷条件下の X 線測定については、ドッグボーン試験片の側面から X 線を入射し、試験片中心の長手方向および板厚方向のひずみを測定した。

Table 1 X-ray conditions

Measurement material	PPS
Energy level (keV)	20
Wave length (nm)	0.06199
Measurement method	Transmission strain scanning
DS-1, $h \times w$ (mm)	0.1×0.1
RS-1, $h \times w$ (mm)	0.1×2.0
RS-2, $h \times w$ (mm)	0.1×2.0
Diffraction plane	111, 200
Diffraction angle $2\theta_0$ (deg)	8.20
Scanning range $2\theta$ (deg)	5.6-10.0
Preset time (s)	2
Number of partition	88
Step width (deg)	0.05

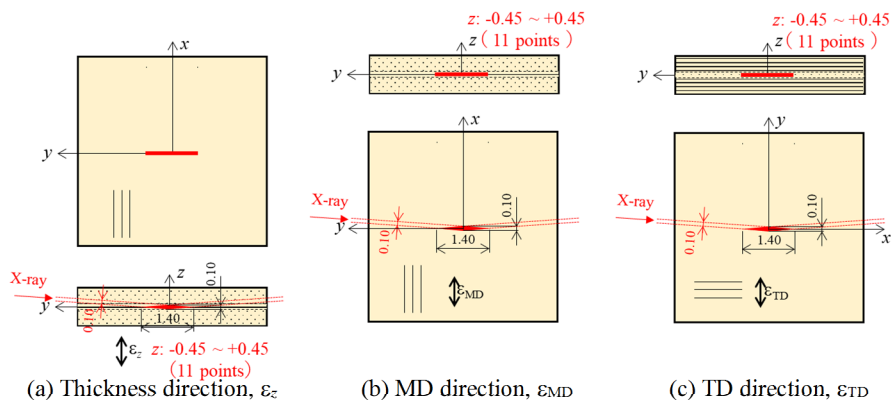


Fig. 3 Measurements of strain in three directions

## 4. 研究成果

### 4.1 引張試験

Fig. 4 に MD 材, TD 材, WD 材の応力 - ひずみ線図を示す. ひずみが約  $2 \times 10^{-3}$  までの領域で直線近似して求めたヤング率と引張強さおよび破断ひずみを Table 2 にまとめる. MD 材と TD 材を比較すると, 負荷方向に配向した繊維の割合が高い MD 材の方が, ヤング率, 引張強さともに高い値を示す. これに対して, WD 材は TD 材よりヤング率, 引張強さともに低い.

Specimen	Young's modulus $E$ (GPa)	Tensile strength $\sigma_B$ (MPa)	Fracture strain $\epsilon_f$
MD	11.6	128.9	$7.6 \times 10^{-3}$
TD	7.6	82.5	$7.5 \times 10^{-3}$
WD	6.2	73.3	$6.4 \times 10^{-3}$

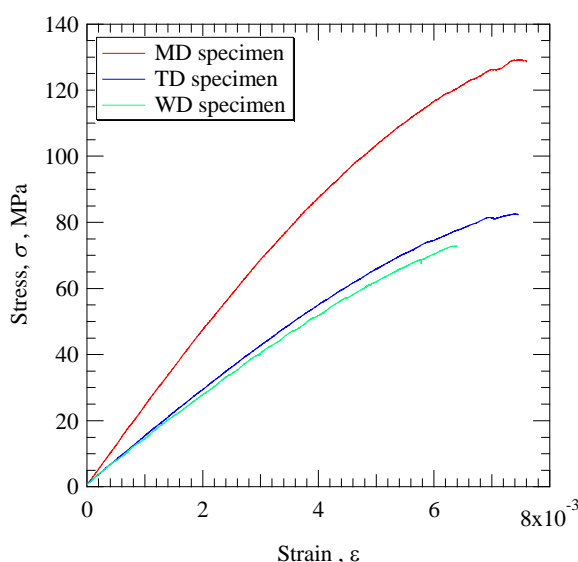


Fig. 4 Stress - strain relation in tension tests

### 4.2 三次元熱ひずみ

Fig. 5 に, 板材より得られた PPS 相の三次元ひずみ分布を示す. なお, 無ひずみ時の格子面間隔  $d_0$  は,  $27^\circ\text{C}$ における PPS 単体の実測値 ( $d_0=0.43442$  nm) を用いた. MD 方向のひずみは板の内部 (コア層) で圧縮, 表面 (シェル層) で引張の値を示している. これに対して, TD 方向のひずみは板の内部 (コア層) で引張, 表面 (シェル層) で圧縮の値となっており, MD 方向のひずみと逆の分布を示す. また, MD 方向および TD 方向のひずみの絶対値はほぼ等しい. 一方, 板厚方向のひずみは圧縮であり, 板中心から表面に向かって減少する傾向がみられる.

### 4.3 応力負荷による内部ひずみの変化

MD 材に応力を負荷したときの PPS 相のひずみ変化を Fig. 6 に示す. 応力の増加とともに, 負荷方向のひずみは増加, 板厚方向のひずみは減少していることがわかる. ただし, 負荷方向のひずみ増加量に比べると, 板厚方向のひずみ減少量は小さい. また, 負荷方向ひずみ, 板厚方向ひずみ共に, 板幅方向に分布を持っているが, 負荷によって分布形状は大きく変化せず, 上下に平行移動していることがわかる.

TD 材に応力を負荷したときのひずみ変化を Fig. 7 に示す. MD 試験片と同様の傾向を示す. WD 材に応力を負荷したときのウェルドライン上のひずみ変化を Fig. 8 に示す. MD 材および TD 材と異なり, WD 材では, 無負荷時の PPS 相の長手方向 (負荷方向) ひずみが, 板厚方向全体に渡って圧縮の値を示すことがわかる. ただし, 負荷に伴うひずみ変化は, MD 材, TD 材と同様である. また, ウェルドラインからそれぞれ上下  $0.1\text{mm}$  の位置についても同様の測定を行ったが, ウェルドライン上における結果とほぼ同様の値を示した.

### 4.4 母相ひずみと負荷方向ひずみの関係

負荷応力を Table 2 に示した各試験片のヤング率を用いて割って, 軸方向マクロひずみに変換した結果を Fig. 9 に示す. 各試験片の傾きがほぼ等しいことから, 応力一定モデル (Reuss モデル) よりもひずみ一定モデル (Voigt モデル) に従って変形したことがわかる.

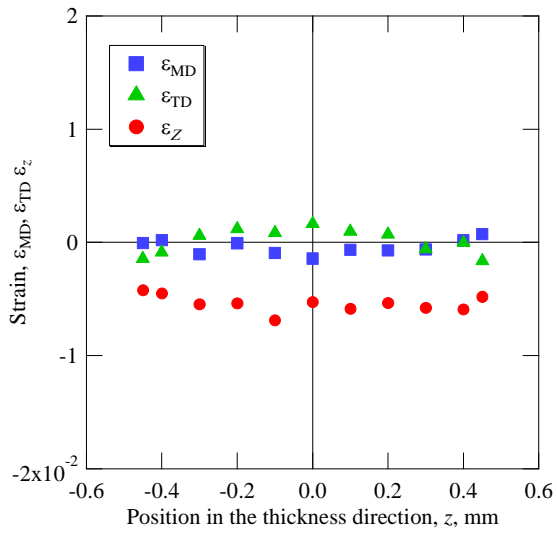


Fig. 5 Distribution of triaxial strains in molded plate

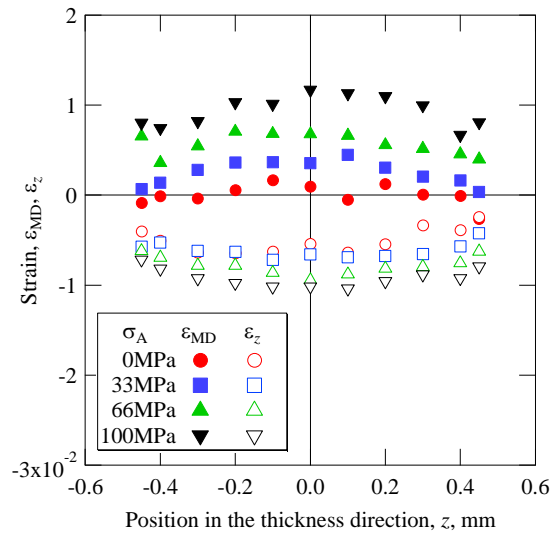


Fig. 6 Change of strain distribution in MD specimen due to uniaxial loading

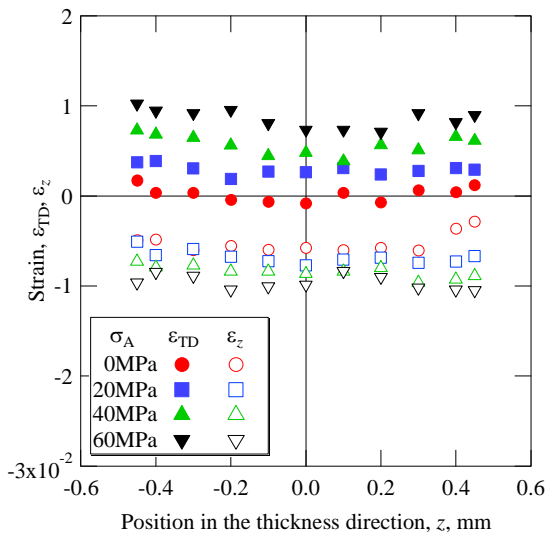


Fig. 7 Change of strain distribution in TD specimen due to uniaxial loading

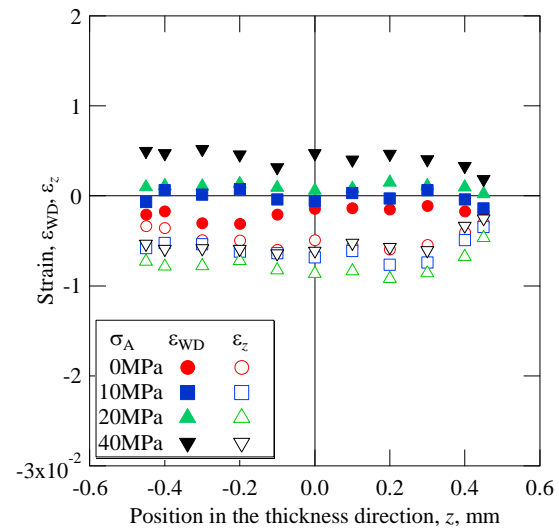
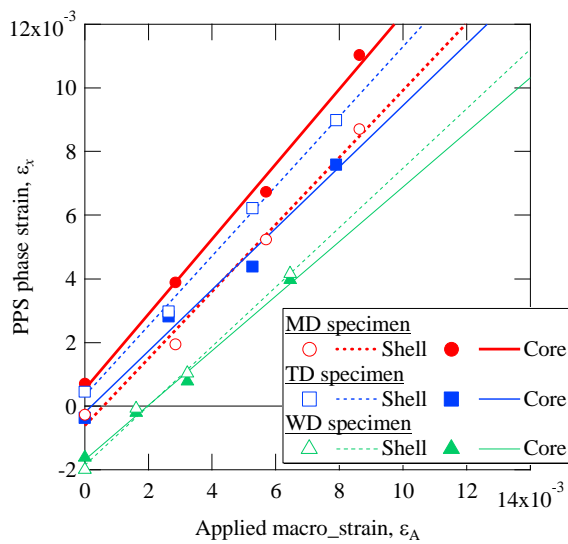
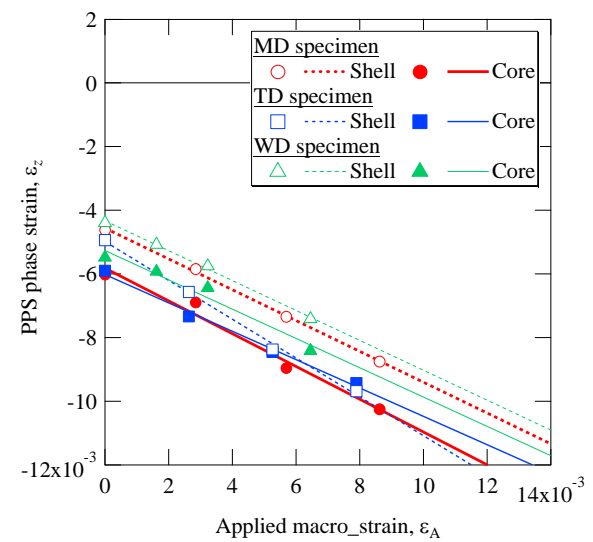


Fig. 8 Change of strain distribution in WD specimen due to uniaxial loading



(a) Strain in the loading direction



(b) Strain in the thickness direction

Fig. 9 Change of strain in shell and core region due to applied strain,  $\sigma_A/E$ , under uniaxial loading

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 SHIMIZU Kenichi、IWAHORI Keisuke、SATO Tatsuki、TSUCHIHASHI Hiromu、KATO Naoki、TANAKA Keisuke	4. 巻 69
2. 論文標題 Evaluation of Internal Strain Distribution in Glass-Short-Fiber Reinforced Plastics by Synchrotron Strain-Scanning Method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Society of Materials Science, Japan	6. 最初と最後の頁 300～307
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2472/jsms.69.300	査読の有無 無
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14件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 ○清水憲一（名城大）、竹田章悟（名城大理工）、土橋広武（名城大院）、岩堀恵介（デンソー）
2. 発表標題 ウェルド部を有する短繊維GFRP の疲労特性
3. 学会等名 日本材料学会第68 期学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩堀恵介（デンソー）、○清水憲一（名城大）、佐藤龍樹（名城大院）、土橋広武（名城大院）、田中啓介（名産研）
2. 発表標題 短繊維GFRPの三軸熱ひずみおよび引張条件下における内部ひずみ変化の評価
3. 学会等名 第53回X線材料強度に関するシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 ○加藤直己（名城大院）、清水憲一（名城大）、岩堀恵介（デンソー）、田中啓介（名産研）
2. 発表標題 層状組織を有する短繊維CFRP の疲労き裂前縁形状の評価
3. 学会等名 日本機械学会M&M2019材料力学カンファレンス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 ○土橋広武（名城大院），清水憲一（名城大），岩堀恵介（デンソー），田中啓介（名産研）
2. 発表標題 射出成形した短繊維CFRP の疲労に伴うスティフネスの変化と疲労特性評価
3. 学会等名 日本機械学会M&M2019材料力学カンファレンス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 ○佐藤龍樹（名城大院），清水憲一（名城大），岩堀恵介（デンソー），田中啓介（名産研）
2. 発表標題 円孔を有する短繊維CFRP の疲労き裂発生挙動
3. 学会等名 日本機械学会M&M2019材料力学カンファレンス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 ○犬飼英人（名城大院），清水憲一（名城大），岩堀恵介（デンソー），鈴木良典（名城大院）
2. 発表標題 短繊維GFRPの異方性が疲労強度に与える影響
3. 学会等名 2019年度日本ばね学会秋季定例行事
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木良典（名城大院），土橋広武（名城大院），清水憲一（名城大），岩堀恵介（デンソー），田中啓介（名産研）
2. 発表標題 短繊維GFRP射出成型板のX線応力測定と疲労破壊挙動
3. 学会等名 第19回破壊力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加藤弘之 (名城大院), 清水憲一 (名城大), 岩堀恵介 (デンソー), 田中啓介 (名産研)
2. 発表標題 短繊維強化CFRP射出成型板のき裂進展速度に及ぼすき裂閉口の影響
3. 学会等名 第19回破壊力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenichi Shimizu, Yuya Hasegawa and Keisuke Tanaka
2. 発表標題 Effect of Thickness on Fatigue Crack Propagation in Injection Molded Short Carbon Fiber Reinforced Plastics
3. 学会等名 Fatigue2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 清水憲一, 土橋広武, 王チン, 岩堀恵介, 田中啓介
2. 発表標題 短繊維強化樹脂材料の疲労に伴うスティフネスおよび樹脂相応力の変化
3. 学会等名 X線シンポジウム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 土橋広武, 王チン, 清水憲一, 岩堀恵介, 田中啓介
2. 発表標題 射出成型した短繊維FRPの疲労き裂発生挙動に及ぼす繊維配向の影響
3. 学会等名 疲労シンポジウム2018
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 加藤直己, 長谷川祐哉, 清水憲一, 岩堀恵介, 田中啓介
2. 発表標題 短繊維CFRPの疲労き裂進展挙動に及ぼす層状組織の影響
3. 学会等名 疲労シンポジウム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤龍樹, 清水憲一, 王チン, 岩堀恵介, 田中啓介
2. 発表標題 短繊維CFRPの疲労き裂発生挙動に及ぼす切欠き穴径の影響
3. 学会等名 M&M2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 加藤 弘之, 清水憲一, 岩堀恵介, 田中啓介
2. 発表標題 短繊維CFRPのき裂開閉口挙動
3. 学会等名 M&M2018
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
---------	---------