

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 5 月 18 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04637

研究課題名(和文) 高強度ガラス繊維と現場重合型熱可塑性樹脂複合材による自動車衝撃吸収部材の開発

研究課題名(英文) Development of automobile shock absorbing member by made of high strength glass fiber and in-situ polymerizable thermoplastic resin

研究代表者

青木 義男 (AOKI, Yoshio)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：30184047

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、自動車構造のマルチマテリアル化で活用されるようになった繊維強化プラスチックを、より安価な材料で大量生産を可能にするため、高強度ガラス繊維を強化材としたGFRP衝撃吸収部材の材料設計と製造法に関する検討を行った。大量生産を実現するためにフィラメントワインディング法による高強度ガラス繊維と熱硬化性樹脂によるクラッシュボックスを試作し、落錘衝撃試験によってエネルギー吸収特性を検証した。この結果、鋼製構造部材に対して破壊過程の支持荷重を安定化し、CFRPに匹敵するGFRP衝撃吸収材の繊維配向角と積層構成を検証し、その動的特性を誤差5%以内で再現できる数値解析モデルの開発も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、自動車には省エネルギー化と安全性向上が強く求められており、電気自動車や自動走行の実現が期待されている。このため、自動車車体には軽量化と安全性の両立が求められている。本研究で開発したGFRP衝撃吸収部材は、軽量化と衝撃吸収特性の双方が、従来のCFRP製部材に匹敵する特性を有する。さらに、フィラメントワインディング成形法を活用することで、より安価に大量生産が可能となる。さらに部材端部の締結部の設計を工夫することで、更なる衝撃吸収特性の向上や部品点数の削減、絶縁性など高機能化が見込めるため、電気自動車などに有用な構造部材と考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this research, in order to enable mass production of fiber reinforced plastics, which have come to be used in multi-material automobile structures, with cheaper materials, GFRP shock absorbing members using high-strength glass fiber as a reinforcing material. The material design and manufacturing method were examined. In order to realize mass production, a crash box made of high-strength glass fiber and thermoplastic resin was prototyped by the filament winding method, and the energy absorption characteristics were verified by the drop weight impact test. As a result, the supporting load in the fracture process was stabilized for the steel structural member, and the fiber orientation angle and the Stacking Sequences of the GFRP shock absorbing member comparable to CFRP were verified. We were also able to develop a numerical analysis model that can reproduce the dynamic characteristics within an error of 5%.

研究分野：安全設計工学

キーワード：自動車衝撃吸収部材 GFRP 衝撃吸収特性 フィラメントワインディング法 衝撃応答解析 クラッシュボックス 高強度ガラス繊維 落錘衝撃試験

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、自動車の省エネルギー化、機能性向上、運動性能向上の観点から自動車の車体の軽量化ニーズが高まり、構造部材レベルからのマルチマテリアル化が検討されている。構造部材には軽量高強度なアルミ合金や熱硬化性樹脂をマトリックスとした繊維強化プラスチック (FRP) が利用されはじめています。しかし、自動車衝撃吸収材への FRP の適用事例はリサイクル性の低さから高級車種がほとんどであり、生産性・経済性の面から一般車、軽自動車等への FRP・FRTP の構造部材や衝撃吸収材への適用は実現できていない。この要因としては以下の3点が挙げられる。

- (1) 炭素繊維が高額なため部材の製造コスト自体を抑制することができない。
- (2) 熱硬化性樹脂の硬化時間が10分程度かかるため、生産性の向上に限界がある。
- (3) 衝撃吸収特性を飛躍的に向上させるような樹脂系が開発されていない。

現在、ハイブリット車や電気自動車が世界的なニーズになりつつあり、軽量化と共に絶縁性やリサイクル性などもますます問われることになるであろう。

### 2. 研究の目的

上で述べた3つの課題に対する改善策、「高強度ガラス繊維と衝撃吸収性能に優れた熱可塑性プラスチックの複合化」、「現場重合型樹脂による高速成形」、「現場重合型熱可塑性樹脂のポリマーブレンド」の3つの材料開発をベースに、申請者が有する実大衝撃試験装置と動的応答解析技術を駆使して、部材組付け部や保守保全性も考慮した衝撃吸収部材の設計・解析・衝撃試験を行うことで、経済性や生産性にも優れた GFRTTP 高強度衝撃吸収部材の開発を目的とする。

本研究における技術目標は、「材料設計技術」、「成形技術」、「動的特性 ( 衝撃吸収性等 ) 評価技術」、「解析手法確立技術」の4つの側面に分類できる。それぞれについての基礎的検討は、研究グループのこれまでの研究成果で培ってきているため、3年間での研究ターゲットは自動車主要構造部材への応用研究としての技術目標であり、各項目は以下に列挙される通りである。

#### (1) 技術目標

高強度衝撃吸収複合材に用いる現場重合型熱可塑性樹脂の選定 [ 材料設計技術 ]

高強度衝撃吸収複合材に用いる高強度ガラス繊維基材と積層構成の最適化 [ 材料設計技術 ]

GFRTTP 高強度衝撃吸収部材の成形方法および最適成形条件の確立 [ 成形技術 ]

GFRTTP 高強度衝撃吸収部材の動的特性評価方法の確立 [ 動的特性評価技術 ]

GFRTTP 高強度衝撃吸収部材の動的応答解析モデルの確立と破壊パラメータの決定 [ 解析手法確立技術 ]

#### (2) 実用化目標

従来型の熱硬化型エポキシ樹脂をマトリックスとする CFRP と比較して、吸収エネルギー、成形時間、材料コストの項目に対して、次のような実用化目標を掲げ開発を進める。

衝撃エネルギー吸収量は120%以上、ならびに破壊過程における平均伝達荷重に対する変動荷重を20%以内に安定化する。生産時間は20%以上短縮する。材料コストは30%以上低減する。

解析結果と実験結果の誤差 ( 最大荷重、伝達荷重、最大変位、破壊過程とエネルギー吸収量 ) を10%以内とする。

#### (3) 社会性

本研究では、最高水準の GFRTTP 高強度衝撃吸収部材を従来の1/2の材料コストと1/2の成形サイクルで製造できる衝撃吸収部材の開発を行う。従来、一部の高級車にしか搭載できなかった軽量で高強度、優れた衝撃吸収性能を有するプラスチック複合材料が一般車や軽自動車に搭載できるようになれば、CO<sub>2</sub>の排出量の抑制や電気自動車、ハイブリット車の性能向上や生産技術も進展し、大きな社会的効果が期待できる。併せて、現場重合型熱可塑性樹脂の採用により、成形自由度も増し、部品点数削減と共にリサイクル材としての活用も見込める。また、自動車主要構造部材の GFRTTP 化は、運転性能と生産性の向上と共に、省エネとリサイクル推進の中心的な技術として急速に広まる可能性が高く、今後の重要な位置づけとなる。

#### (4) 実現可能性

申請者は、従来型の CFRP による衝撃吸収部材の開発とその性能評価の研究に従事してきた経緯から、国内でも最先端の実験設備と評価実績を有している。例えば、申請者の有する実験設備は自動車部材実大サイズでの破壊過程の詳細な評価が実施できる大型のものであり、実用化研究に対して有意義である。今回、新たに GFRTTP の材料開発において我が国でもトップクラスの開発実績を持つ研究者と協業する体制を作り、材料開発ではすでに要素技術の研究がスタートしているため、製品化の実現可能性は極めて高いと言える。

#### (5) 独創性・先進性

今回申請をした「GFRTTP 高強度衝撃吸収部材」の開発のキーテクノロジーは、高強度ガラス繊維基材と熱可塑性樹脂による衝撃吸収性能とリサイクル性の向上、現場重合型樹脂による高速成形、現場重合型熱可塑性樹脂のポリマーブレンド、新規メカニズムによる衝撃吸収部材開発の4つであるが、申請者らの独創的かつ専門的な研究内容をベースにしており、世界での基礎研究例も見受けられず、実用化されていない先進的な技術開発である。

### 3. 研究の方法

次に本研究は3年間の研究期間において下記の手順に沿って遂行する計画であった。

#### (1)高強度衝撃吸収 GFRTF の現場重合型熱可塑性マトリックス樹脂の選定

高強度衝撃吸収 GFRTF の現場重合型熱可塑性マトリックス樹脂として、現場重合型熱可塑性エポキシ樹脂と現場重合型 PA6 の2種類の樹脂を選定した。これらの2つの樹脂の最適硬化条件を探索し、その条件での機械的特性を試験片レベルで検討した。

#### (2)高強度衝撃吸収 GFRTF の高強度ガラス繊維基材の選定と積層構成の最適化

2種の現場重合型熱可塑性樹脂をマトリックスとし、数種類の高強ガラス繊維基材を用いて FRTF を成形し、GFRTF としての機械的特性を比較・評価した。特に、高強度ガラス繊維基材の表面処理の条件が GFRTF の機械的特性に与える影響について調査した。そして、FEM 解析を用いて GFRTF の重量当たりの衝撃吸収性能が最大化する高強度ガラス繊維基材の選定と積層構成の決定を行った。

#### (3)GFRTF 高強度衝撃吸収部材の成形方法および最適成形条件の確立

上記(2)の項目で得られた GFRTF の積層構成による衝撃吸収部材を保有する製造装置を用いて FW 成形法あるいは RTM 成形法にて試作し、成形方法の確立と最適成形条件の決定を行った。また、従来型の熱硬化型エポキシ樹脂をマトリックスとする CFRP の成形サイクルタイムと比較してより高速になるだけではなく、成形設備の小型化や成形手順を簡略化できる可能性も高いため、併せて検討を行った。

#### (4)GFRTF 高強度衝撃吸収部材の動的特性評価方法の確立

積層構成を変化させた2種類の GFRTF 高強度衝撃吸収部材について実大衝撃実験を行い、その実験結果と、熱硬化性樹脂による従来 CFRP や熱可塑性樹脂による CF/PA6、CF/PEEK 部材の実験結果との比較分析を行い、GFRTF 部材に関する動的特性の把握と共に、本研究で開発する GFRTF 衝撃吸収部材の優位性と課題について検討した。また、GFRTF 部材の静的・動的試験から FEM 解析用パラメーターの導出や破壊則の決定を行い、部材レベルでの動的応答解析に反映した。

#### (5)GFRTF 高強度衝撃吸収部材の FEM 解析と解析モデルの妥当性の検証

新規開発した GFRTF 衝撃吸収部材の部材組付け部を含む FEM 動的応答解析を行い、衝撃実験結果との比較・検討を行った。また、GFRTF 衝撃吸収部材とその損傷制御設計なども検討項目に入れて衝撃吸収部材の試作・衝撃試験を繰り返し実施し、FEM 解析との比較・検討を踏まえて、最適な積層構成、適正な組付け部を含む GFRTF 衝撃吸収部材の形状解析、FEM 解析モデルの妥当性の検証、衝撃吸収部材設計手法を概ね確立した。

これらの結果に基づき、最終的に最も優れた積層構成や設計要求を満たす形状寸法での GFRTF 高強度衝撃吸収部材の成形を再度行い、成形サイクル、生産性、材料コストを計測した上で、従来型の熱硬化型エポキシ樹脂をマトリックスとする CFRP 部材や熱可塑性樹脂による CF/PA6 部材、CF/PEEK 部材とも比較・検討して、実用化目標への到達レベルを確認・検証した。

### 4. 研究成果

#### (1)2018年の実績

本研究では、強化繊維のコスト低減のために汎用ガラス繊維を用いた E ガラス繊維/EPOXY 製クラッシュボックス(以下 E-GFRP と記す)を大量生産可能なフィラメントワインディング(FW)法で成形し、落錘衝撃試験を行った。そして、汎用ガラス繊維を用いた E-GFRP 円筒殻の繊維度(Tex)を変更し4種類の試験体のエネルギー吸収特性を比較した。また、有限要素法数値解析(汎用コード;LS-DYNAを使用)を用いて E-GFRP 数値解析モデルの動的応答解析を行い、初期破壊荷重の立ち上りの適性化について検討した。

2018年度はFW(フィラメントワインディング)成形法を用いた E-GFRP クラッシュボックスの衝撃試験と2種類の数値解析モデルから算定された荷重変位線図について比較検討を行い、次の主要な結論を得た。

FW成形法で製作した E-GFRP クラッシュボックスの衝撃吸収特性と破壊過程、破壊様相について検証し、強化繊維の積層構成では、 $\pm 45^\circ / \pm 88^\circ$  の二層構造から成る FW 試験体の衝撃吸収特性が高いことが判明した。

衝撃試験結果から、適切な破壊制御治具を用いれば GFRP 試験体でも CFRP に匹敵する衝撃吸収特性を引き出せることが確認された。

繊維度では DType(2220Tex)の繊維度の試験体がクラッシュボックスの設計要件に近いエネルギー吸収特性を有する可能性を示した。また、繊維度の違いは初期破壊ならびにその後の破壊の起点となるため、破断伸びを活かした破壊を誘発させることに繋がられる可能性がある。

E-GFRP 試験体の動的応答解析により、試験体端部にテーパ加工を施すことによる支持荷重の安定化を促せることを検証することができた。さらに、熱可塑性エポキシ樹脂をマトリックスとするトウプリプレグを用いて、CFRTF 円筒を FW 法で成形する手法の開発を行い、直径 100mm で適正品質の CFRP 円筒を成形することができた。

#### (2)2019年の実績

2019年度は2018年度の結果から強化繊維の配向角を変えて FW 成形した E-GFRP クラッシュボ

ックスの落錘衝撃試験と時刻歴応答数値解析から算定された荷重変位線図について比較検討を行い、以下に示す主要な結論を得た。

FW 成形法で製作した E-GFRP クラッシュボックスの衝撃吸収特性と破壊過程、破壊様相について落錘衝撃試験によって検証し、 $\pm 45^\circ$  から  $\pm 60^\circ$  で高いエネルギー吸収特性が得られることを確認した。

特に  $\pm 45^\circ$  の試験体で高いエネルギー吸収量と圧壊時の安定支持荷重が得られることを検証し、CFRP に匹敵する衝撃吸収特性を引き出せる可能性を示すことができた。

精緻化したクラッシュボックスの物理モデルを再検討して時刻歴応答解析を行い、実験結果に対してエネルギー吸収量と圧壊時の支持荷重に関して誤差 5% 以内の良い一致を得ることができた。

精緻化した解析モデルによって、高いエネルギー吸収量と安定支持荷重を得る積層構成と繊維配向角を計算し、 $\pm 51^\circ$  程度がエネルギー吸収特性に優れた適正な配向角であることを示唆した。

### (3)2020 年の実績

2020 年度は、従来のガラス繊維の組成を変えることによってコストを抑えながら、強度と弾性率を向上させた高強度ガラス繊維 (HME ガラス繊維) を用いてフィラメントワインディング製 (FW) GFRP 円筒を成形し、落錘衝撃試験を実施し、以下に示す主要な結論を得た。

巻き角度  $\pm 45^\circ$  と  $\pm 60^\circ$  において HME-glass は CFRP 円筒と同等の比エネルギー吸収量を示すことを検証した。

繊維径が GFRP の機械的特性に及ぼす影響を調査した研究は多くなされてきたが、大量生産が可能な FW 法では繊維束単位で樹脂への含浸、マンドレルへの巻き付けを行うため、繊維径だけではなくテックス (繊維束の太さを表す単位で 1,000m あたりのグラム数) の影響についても検討し、テックスを小さくすることで GFRP 円筒の繊維体積含有率が向上し、表面の審美性は高いが、GFRP 円筒のエネルギー吸収特性においては、テックスよりも繊維径の影響を大きく受けることを明らかにした。

FEM による衝撃応答解析モデルの開発を行い、安全設計要件として重要となる荷重-変位線図における中央値、安定荷重領域内エネルギー吸収量について 5% 程度の誤差となる解析モデルを開発することができ、一般的な衝撃応答解析で要求される誤差が 10% 程度であることから解析モデルとしての妥当性な結果と評価した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 川口奨, 坂田憲泰, 平山紀夫, 青木義男, 村田聖憲, 保戸塚敬太, 佐野一教	4. 巻 65
2. 論文標題 GFRP製クラッシュボックスの開発	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 強化プラスチック	6. 最初と最後の頁 156-158
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 坂田憲泰, 平山紀夫, 青木義男, 瓦口翔馬, 加藤優作, 佐野一教, 相澤恒史, 山田誠司	4. 巻 64
2. 論文標題 高強度ガラス繊維を用いたFW円筒のエネルギー吸収特性	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 強化プラスチック	6. 最初と最後の頁 212-217
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -
1. 著者名 Yasuhiro Tanimoto, Toshihiro Inami, Masaru Yamaguchi, Kazutaka Kasai, Norio Hirayama and Yoshio Aoki	4. 巻 2018
2. 論文標題 Characterization of Esthetic Orthodontic Wires Made from Glass-Fiber-Reinforced Thermoplastic Containing High-Strength, Small-Diameter Glass Fibers	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Advances in Materials Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 7-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1155/2018/4985030	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 -
1. 著者名 坂田憲泰, 川口奨, 平山紀夫, 青木義男, 村田聖憲, 佐野一教	4. 巻 66
2. 論文標題 FW製GFRP円筒のエネルギー吸収特性に及ぼすテックスと繊維径の影響	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 強化プラスチック	6. 最初と最後の頁 232-237
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 川口奨, 坂田憲泰, 平山紀夫, 青木義男, 村田聖憲, 保戸塚敬太, 佐野一教
2. 発表標題 FW製GFRPクラッシュボックスのエネルギー吸収特性に及ぼす繊維束の影響
3. 学会等名 64rd FRP CON-EX2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川口奨, 坂田憲泰, 平山紀夫, 青木義男, 村田聖憲, 保戸塚敬太, 佐野一教
2. 発表標題 ガラス繊維の繊維径とテックスがFW製GFRP円筒のエネルギー吸収特性に及ぼす影響
3. 学会等名 プラスチック成形加工学会第27回秋季大会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂田憲泰, 平山紀夫, 青木義男, 加藤優作, 川口奨, 佐野一教, 相澤恒史, 山田誠司
2. 発表標題 高強度ガラス繊維を用いたGFRP円筒のエネルギー吸収特性
3. 学会等名 (公社)自動車技術会2018年春季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川口奨, 坂田憲泰, 平山紀夫, 青木義男, 加藤優作, 村田聖憲, 佐野一教
2. 発表標題 GFRP製クラッシュボックスの開発
3. 学会等名 (一社)強化プラスチック協会FRP CON-EX 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川口奨, 坂田憲泰, 平山紀夫, 青木義男, 加藤優作, 村田聖憲, 佐野一教
2. 発表標題 積層構成がFW製円筒のエネルギー吸収特性に及ぼす影響
3. 学会等名 (一社)日本機械学会M&M2018材料力学カンファレンス
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川口奨, 坂田憲泰, 平山紀夫, 青木義男, 加藤優作, 村田聖憲, 佐野一教
2. 発表標題 高強度ガラス繊維を用いたFW円筒のエネルギー吸収特性
3. 学会等名 (一社)日本複合材料学会第10回日本複合材料会議 (JCCM-10)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Yoshio Aoki, Darren Coste	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Scholars ' Press	5. 総ページ数 72
3. 書名 CFRP Tether for Use in Multi-Directional Tether Deployment Mechanisms	

〔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
研究 分担者	平山 紀夫  (HIRAYAMA Norio)  (70582518)	日本大学・生産工学部・教授   (32665)	

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
---------	---------