

令和 6 年 5 月 15 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03753

研究課題名(和文)粘弾性・粘塑性解析に基づく炭素繊維強化熱可塑性樹脂の強度解析

研究課題名(英文) Strength evaluation of carbon fiber reinforced thermoplastic based on viscoelastic-viscoplastic analysis

研究代表者

坂上 賢一 (Sakaue, Kenichi)

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号：40383509

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)：ポリアミド6 (PA6) およびポリブチレンテレフタレート (PBT) の粘弾性・粘塑性挙動から、非線形粘弾性と塑性または粘塑性を組み合わせた力学モデルにより熱可塑性樹脂の時間依存力学挙動を最もよく再現できることを明らかにした。また、熱可塑性樹脂の粘弾性特性および時間-温度換算則を用いることにより、応力負担モデル (Global Load Shearingモデル) およびその拡張モデルを通じて一方向強化熱可塑性樹脂の引張強度の温度依存性と強度のばらつきを予測できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ポリアミド6 (PA6) などの熱可塑性樹脂をマトリクスとする炭素繊維強化熱可塑性樹脂 (CFRTP) は構造用CFRTPとして期待されている。構造用CFRTPの設計において、低温から高温までの広い温度範囲、ならびに衝撃負荷から長期クリープまでの広いひずみ速度範囲に対する強度を予測する必要がある。本研究は一方向強化熱可塑性樹脂の強度・寿命予測法を提案しており、この成果は自動車やインフラ構造物に向けたCFRTPの設計と利用拡大に貢献できる。

研究成果の概要(英文)：The viscoelastic and viscoplastic behavior of polyamide 6 (PA6) and polybutylene terephthalate (PBT) are evaluated and are predicted by a mechanical model combining nonlinear viscoelasticity and plasticity or viscoplasticity. Moreover, based on the viscoelastic characteristics and the time-temperature superposition principle of thermoplastics, the temperature dependence of tensile strength and strength variation of unidirectionally reinforced thermoplastics can be predicted through the Global Load Shearing Model and its modified model.

研究分野：材料力学

キーワード：複合材料 熱可塑性樹脂 粘弾性 粘塑性 強度予測

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

炭素繊維強化熱可塑性樹脂 (CFRTP) の構造最適設計のためには、広範な負荷条件での力学挙動・破壊挙動を表現できる数値構造解析が必要である。多種多様な積層構造が考えられる複合材料では、数値シミュレーションと実験評価の両面から力学特性や破壊挙動の評価が必要である。熱可塑性樹脂は粘弾性と粘塑性を合わせ持つため、変形の全過程で温度とひずみ速度に対して著しく力学特性が変化する。そのため、炭素繊維強化熱可塑性樹脂 (CFRTP) の数値解析および実験評価は、本質的な特性である粘弾性や粘塑性に基づいて行う必要がある。

これまで、高分子材料をマトリクスとする複合材料の温度やひずみ速度依存性に関する実験評価について、国内では粘弾性論に基づく長期クリープ寿命の予測に関する研究、CFRTP の粘弾性挙動に関する研究、マルチスケール構造解析などの研究が実施されている。しかし、いずれの研究グループも CFRTP の粘弾性・粘塑性構造解析はまだ実施していない。これは、温度やひずみ速度を変えた広範な条件における熱可塑性樹脂の粘弾性や粘塑性特性の計測が煩雑であるため、CFRTP の構造解析に利用できる熱可塑性樹脂の粘弾性・粘塑性特性の計測例がほとんどないことに起因している。また、構造解析を実施するための有限要素解析のソフトウェアでは粘弾性と粘塑性を同時に解析する機能が標準的に備わっておらず、容易に粘弾性・粘塑性解析が実施できないことも問題の一つである。粘弾性・粘塑性に基づいて力学挙動を再現する技術が確立できれば、低温から高温までの広い温度範囲、ならびに衝撃負荷から長期クリープまでの広いひずみ速度範囲の力学挙動を予測できるようになり、CFRTP の構造最適化の精度が向上する。これにより、自動車やインフラ構造物への CFRTP の利用拡大に貢献できる。

2. 研究の目的

本研究では、炭素繊維強化熱可塑性樹脂 (CFRTP) の力学挙動・破壊挙動をマルチスケール構造解析に基づいて確立することに向けて、CFRTP および熱可塑性樹脂の粘弾性・粘塑性力学特性評価の実施、必要なサブルーチンの開発を粘弾性・粘塑性の有限要素解析を実施する。

また、応力負担モデル (GLS モデル: Global Load Shearing モデル) を通じて、熱可塑性樹脂をマトリクスとする炭素繊維熱可塑性樹脂の一方方向強化材の強度を予測する。

3. 研究の方法

(1) 熱可塑性樹脂の粘弾性・粘塑性力学特性評価

粘弾性・圧縮性塑性力学モデルによる評価

ここでは力学モデルに線形粘弾性要素と塑性要素の直列モデルを用いる。塑性要素は、拡張 Drucker-Prager 降伏条件と非関連流れ則により圧縮性塑性を表現できるモデルである。

材料試験は、ポリブチレンテレフタレート (PBT)、ポリアミド 6 (PA6) を用い、恒温槽内で引張試験を行う。複数の温度下において引張試験を実施し、引張試験中のひずみ計測はデジタル画像相関法を用いる。得られた応力-ひずみ関係から、塑性物性を同定する。このとき、あらかじめ計測された線形粘弾性特性を用いる。PBT の線形粘弾性特性には、動的粘弾性試験により得られた複素弾性係数を変換した応力緩和係数のマスターカーブを用いる。PA6 の線形粘弾性特性には、応力緩和試験によって得られた応力緩和係数のマスターカーブを用いる。解析ソフトは Abaqus/Standard 2017 を用い、開発したサブルーチンにより粘弾性・圧縮性塑性の有限要素解析を行う。

非線形粘弾性・粘塑性力学モデルによる評価

ここでは力学モデルに Schapery 非線形粘弾性要素と粘塑性要素の直列モデルを用いる。粘塑性要素は、拡張 Drucker-Prager 降伏条件と塑性乗数に Perzyna 型粘塑性モデルを用いた非関連流れ則によって表現されるモデルである。

材料試験は、ポリブチレンテレフタレート (PBT) に対するクリープリカバリー試験である。クリープリカバリー試験では、試験開始時に一定応力を加えた後に応力を保持してクリープ変形を発生させる。一定時間経過後に、応力を完全に除荷してひずみを回復させる。Schapery 非線形粘弾性-Perzyna 型粘塑性直列モデルによるクリープリカバリー試験の応力保持部と応力除荷部のひずみ応答に基づいて、クリープリカバリー試験の試験結果から非線形粘弾性パラメータを同定する。解析ソフトは Abaqus/Standard 2017 を用い、開発したサブルーチンにより非線形粘弾性・粘塑性の有限要素解析を行う。

(2) GLS モデルによる一方方向強化材の強度予測

ここでは、統計的寿命予測法に基づく一方方向 CF/PP の寿命予測に必要な種々の温度における静的強度と強度のばらつきを、解析的手法によって推定する。はじめに、Eshelby の等価介在物法と Mori-Tanaka の平均場理論に基づく逆解析によって、CF/PP 積層材のオフアクシス方向の応力-ひずみ線図からマトリクスの応力-ひずみ関係を計算する。このマトリクスの応力-ひ

ずみ関係に粘弾性特性の温度依存性を適用して種々の温度の応力 - ひずみ関係を推定する．次に，種々の温度のマトリクス of 応力 - ひずみ関係から初期欠陥の存在を考慮した GLS モデルによって，CF/PP の強度の温度依存性と強度のばらつきを予測する．

CF/PP の強度の温度依存性と強度に用いる GLS モデルは，一般的な GLS モデルと本研究で提案する拡張 GLS モデルである．拡張 GLS モデルでは，一般的な GLS モデルに繊維の初期欠陥を導入したモデルである．

4. 研究成果

(1) 熱可塑性樹脂の粘弾性・粘塑性力学特性評価

粘弾性・圧縮性塑性力学モデルによる評価

単軸引張試験より得られた PBT の応力 - ひずみ線図を図 1 にプロットで示す．この結果から温度の上昇にともない応力が低下し，温度依存性があることが分かる．各試験温度における体積ひずみの計測結果から，変形の全過程において体積が増加し，非圧縮性塑性挙動を示すことが確認されている．

試験結果から同定されたパラメータと構成モデルを用いて有限要素解析を行う．解析から得られた応力 - ひずみ線図を図 1 の実線で示す．どの試験温度においても PBT の応力ひずみ関係を再現できることが分かる．また，解析から得られた体積ひずみの変動も再現できることを確認している．したがって，単軸引張試験における粘弾性・圧縮性塑性挙動を有限要素解析で再現できる．

非線形粘弾性・粘塑性力学モデルによる評価

非線形粘弾性挙動と圧縮性非対称性粘塑性挙動を表現できる構成モデルを用い，クリープリカバリー試験と単軸引張試験から PBT の物性値を同定した．その結果，非線形粘弾性挙動と圧縮性粘塑性挙動を再現できることを確認した．しかし，単軸引張試験から同定された粘塑性物性値はクリープリカバリー試験の結果と整合が取れておらず，粘塑性物性値の同定方法や用いる粘塑性モデルに関してさらなる検討が必要である．

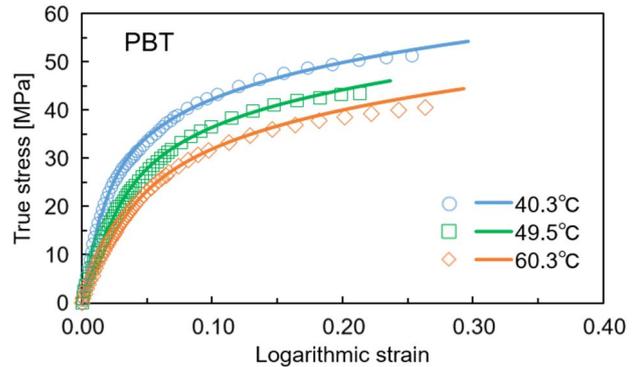


図 1 PBT の応力 - ひずみ線図

(2) GLS モデルによる一方向強化材の強度予測

図 2 に初期欠陥の割合を 0 から 0.6 まで変化させたときに拡張 GLS モデルで予測される一方向強化 CF/PP の応力 - ひずみ関係を示す．図中には初期欠陥の割合が 0 の場合における繊維の累積破断確率も示してある．マトリクスのせん断降伏応力が 6.81 MPa，繊維のヤング率は 240 GPa，繊維半径は 7 μm である．

図 2 から，初期欠陥割合が大きくなるにともなって，最大応力が低下することがわかる．ひずみが 0.005 までの小さい範囲において，初期欠陥割合が変化してもヤング率は変化しないことがわかる．その他の計算結果から，マトリクスのせん断降伏応力が低下すると，最大応力が低下することが示されている．したがって，マトリクスのせん断降伏応力の温度依存性を考慮することによって，GLS モデルによって一方向強化材の強度の温度依存性を表現することができる．

また，初期欠陥割合 0 の強度予測結果は破壊確率 0.95，初期欠陥割合 0.6 の強度予測結果は破壊確率 0.10 の結果と一致することが確認されている．したがって，拡張 GLS モデルから推定したマトリクス樹脂のせん断降伏応力をもとに，一方向 CF/PP の強度の温度依存性と強度のばらつきを予測できる．

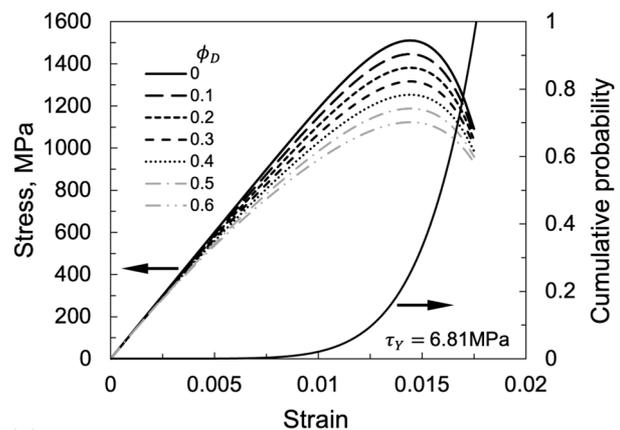


図 2 拡張 GLS モデルで予測される応力 - ひずみ線図

< 引用文献 >

Sato, Y., Masumizu, S., Sakaue, K., Koyanagi, J., Ohtani, A., and Sakai, T., Evaluation of

viscoelastic non-isochoric plastic behavior of PBT and PA6, *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 27-3, (2023.9), 829-841.

田井稜華・沼野直樹・坂上賢一・伊崎健晴, GLS モデルによる一方向 CF/PP の温度依存強度特性の予測, *実験力学*, 23-2, (2023.6), 113-117.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Sato Yoshihiko, Masumizu Sayaka, Sakaue Kenichi, Koyanagi Jun, Ohtani Akio, Sakai Takenobu	4. 巻 27
2. 論文標題 Evaluation of viscoelastic non-isochoric plastic behavior of PBT and PA6	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Mechanics of Time-Dependent Materials	6. 最初と最後の頁 829-841
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11043-022-09552-1	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 田井稜華, 沼野直樹, 坂上賢一, 伊崎健晴	4. 巻 23
2. 論文標題 GLSモデルによる一方向CF/PPの温度依存強度特性の予測	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 実験力学	6. 最初と最後の頁 113-117
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9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 坂上賢一, 樋口捷
2. 発表標題 塑性変形により誘起される熱可塑性樹脂の異方性力学特性
3. 学会等名 日本機械学会M&M2023材料力学カンファレンス
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田井稜華, 坂上賢一
2. 発表標題 GLSモデルによる一方向CF/PPのワイブル分布の予測
3. 学会等名 日本実験力学学会2023年度年次講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Fukuo Atsuko, Sakaue Kenichi
2. 発表標題 Evaluation of compressive strength of short glass fiber reinforced polybutylene terephthalat
3. 学会等名 International Conference of the Advanced Technology in Experimental Mechanics and International DIC Society Joint Conference 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 沼野直樹, 田井稜華, 坂上賢一, 伊崎健晴
2. 発表標題 一方向炭素繊維強化ポリプロピレンテープの温度依存力学特性の評価
3. 学会等名 日本実験力学会2022年度年次講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤慶彦, 坂上賢一
2. 発表標題 圧縮性粘塑性を考慮した熱可塑性樹脂の非線形粘弾性粘塑性特性の評価
3. 学会等名 日本機械学会M&M2022材料力学カンファレンス
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福應敦子, 坂上賢一
2. 発表標題 短繊維強化熱可塑性樹脂の圧縮試験
3. 学会等名 日本非破壊検査協会第53回応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 坂上賢一, 岩田玲将
2. 発表標題 熱可塑性樹脂の非線形粘弾性特性評価
3. 学会等名 日本機械学会M&M2021材料力学カンファレンス
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 升水沙弥香, 坂上賢一, 小柳潤, 大谷章夫, 坂井建宣
2. 発表標題 繰返し負荷試験によるポリアミド6の力学挙動評価
3. 学会等名 日本実験力学会2021年度年次講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤慶彦, 坂上賢一
2. 発表標題 圧縮性塑性構成式に基づく熱可塑性樹脂の力学挙動シミュレーション
3. 学会等名 日本実験力学会2021年度年次講演会
4. 発表年 2021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
---------	---------