

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01634

研究課題名（和文）高分子特性を活かした繊維強化複合材料創出のための界面接着性と高分子構造の体系化

研究課題名（英文）Systematization of interfacial adhesion and polymer structure for creation of fiber reinforced composites utilizing polymer properties

研究代表者

植松 英之（Uematsu, Hideyuki）

福井大学・学術研究院工学系部門・准教授

研究者番号：80536201

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：強化繊維の表面官能基と表面凹凸の影響を分離したモデル的な強化繊維を用い、偏光を含む顕微ラマン分光分析と分子動力学計算を取り入れることで強化繊維周辺での熱可塑性樹脂（高分子）の構造を評価し、高分子と強化繊維との界面接着性や複合材料の力学特性に及ぼす高分子構造の影響を明らかにした。繊維表面が影響する領域、すなわち界面相の結晶構造が接着性や力学特性に重要な要素であることを見出し、この界面相の結晶構造には繊維の官能基や表面凹凸だけでなく高分子組成に依存す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

市販されている炭素繊維や高分子マトリクスを用いて、これまで明らかにされてこなかった炭素繊維表面官能基や表面粗さ、高分子の組成が界面接着性や複合材料の力学特性に及ぼす影響を明らかにした。現在市販されている強化繊維や高分子を用いた研究であること、様々な種類の繊維や高分子の組み合わせから得られた成果であることから、社会実装する際の最適な材料設計にダイレクトに寄与する。また、得られた設計指針から、さらに向上するための新たな分子への展開も期待できる。また界面相の結晶構造が複合材料の界面現象を理解するための学理の一つであることを明確に位置づけたことは、新たな学問領域の開拓に前進した。

研究成果の概要（英文）：Using a model reinforcing fiber that separates the effects of surface functional groups and surface irregularities, the conformation or crystal structures of thermoplastic (polymer) in the vicinity of the reinforcing fiber were explored by non-polarized and polarized micro-Raman spectroscopy and molecular dynamics simulations in order to elucidate the effects of polymer structure on the interfacial adhesion between the polymer and the reinforcing fiber and their mechanical properties. It was revealed that the crystalline structure at the region affected by the fiber surface, i.e. at the interphase, is an important factor in interfacial adhesion and mechanical properties, and the crystalline structure at the interphase depends not only on the functional groups and surface irregularities of the fiber, but also the molecular composition of matrix polymer.

研究分野：複合材料

キーワード：界面 高次構造 分光分析

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 (CF) あるいはガラス繊維 (GF) で強化されたプラスチックには、生産性やリサイクル性に優れた熱可塑性樹脂 (以下、高分子) をマトリックスとした利用が望まれている。しかし、連続繊維で強化した複合材料に高分子を用いるためには課題が山積している。課題の一つである CF と高分子の界面接着性を向上させるための手法として、CF の表面を酸化処理することや反応性の高い官能基で変性する、あるいは高分子鎖の一部に極性官能基を導入することが知られている。一方で、申請者らのこれまでの検討により、CF 界面近傍での高分子の結晶構造が界面接着性に起因していること、CF の表面状態で高分子の結晶構造が変わることが示唆されている。さらに、空間分解能が $1\mu\text{m}$ の顕微ラマン分光分析を強化繊維間の高分子構造の評価に応用する技術も構築しつつあった。そこで、「強化繊維界面での高分子のコンフォメーション (2次構造および高次構造) が、強化繊維との界面接着性とどのような関係になるのか」、「強化繊維の表面官能基と表面凹凸が高分子の構造形成にどのように影響するか」を申請者らが有する構造解析技術で検討することとした。

2. 研究の目的

偏光を含む顕微ラマン分光分析を基軸とし、強化繊維周りでの高分子の構造と強化繊維との界面接着性の関係を体系化することが目的である。そのために、モデル的な強化繊維を用いて、強化繊維の表面形状が界面接着性と高分子構造に及ぼす影響、強化繊維種が高分子構造の形成と界面接着性に及ぼす影響、強化繊維の表面官能基が高分子構造と界面接着性に及ぼす影響、④強化繊維周りでの構造形成機構 を検討した。

3. 研究の方法

マトリックスとして汎用高分子であるポリ塩化ビニル (PVC) やポリプロピレン (PP)、エンジニアリングプラスチック (エンブラ) であるポリカーボネート (PC)、ポリアミド 6 (PA6)、ポリフェニレンサルファイド (PPS)、スーパーエンブラであるポリエーテルエーテルケトン (PEEK) を用いた。強化繊維には、表面凹凸やサイジング剤の種類の異なる CF や表面状態の異なる GF を用いた。本報告書では、PA6 と PPS を用いた結果を示す。

界面の接着性を評価するために、強化繊維 1 本に対して溶融した高分子を付着させて界面せん断強度を評価するマイクロドロップレット法と、プリプレグシートから一方向に積層させて成形した一方向強化材 (UD 材) を作製し、繊維軸方向とは直角方向の引張特性から評価した。複合材料の力学特性として、プリプレグシートを様々方向に CF を積層し成形した疑似等方材 (QI 材) の引張、曲げ、衝撃特性を評価した。

繊維間の高分子構造は、UD 材を用いた X 線回折 (XRD) や広角 X 線散乱 (WASX) を計測した。UD 材の繊維軸方向にスライスした試験片の偏光顕微鏡 (POM) 観察、あるいは、破断面や研磨した複合材料断面の繊維近傍の高分子のラマンスペクトルから結晶構造とその割合、結晶の配向性、繊維と高分子の界面相互作用を検討した。

4. 研究成果

目的に挙げた ~ に対して成果を記載する。

強化繊維の表面形状が界面接着性と高分子構造に及ぼす影響

炭素繊維 (CF) は製造方法によって図 1 に示すように、表面が滑らかな CF (CFs) と CF の半径方向に数百 nm オーダーの凹凸が形成される CF (CFr) がある。また CF を束にしてハンドリング性や加工性や糸切れなどの保護を目的としたサイジング剤が表面に塗布されており、そのサイジング剤が表面に吸着しやすいように、CF 表面の一部は親水化されている。従って、CF の表面形状が界面接着性や高分子構造に及ぼす影響を評価するためには、CF 表面のサイジング剤の除去、除去した後の CF 表面官能基を疎水化する必要がある。そこで、サイジング処理された CF をアセトンで洗浄してデサイジングし、そのデサイズされた CF (dCF) を窒素雰囲気下、 1000°C で 1h 燃焼して、表面に存在するヒドロキシ基 (OH) やカルボキシル基 (COOH) の割合を燃焼前と比較して 1/10 以下にした CF (iCF) を調整した。CFRP で使用される代表的な熱可塑性樹脂である PA6 とこれらの CF の界面せん断強度をマイクロドロップレット法にて評価した。図 2 に示すように、iCF に比べて dCF と PA6 の界面せん断強度は高いことが示された。PA6 鎖のアミド

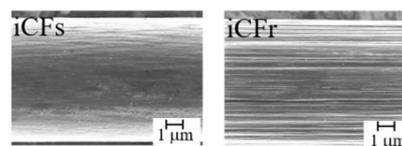


図 1 CF 表面のモルフォロジー

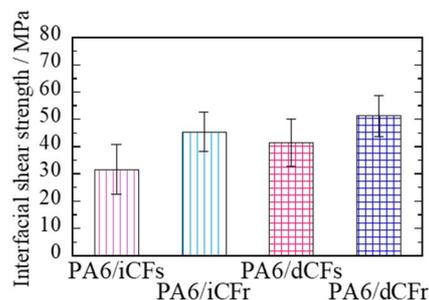


図 2 PA6/CF の界面せん断強度

基とCF表面のOHあるいはCOOHと界面相互作用するためであり、これまでの結果と一致している。ここで重要な結果として表面官能基の量によらず、表面に凹凸のあるCFrはCFsと比べて界面せん断強度が高いことが新たに示された。

CF近傍のPA6の結晶構造をPOMと顕微ラマン分光分析にて評価した。図3はCFを45°に傾けた際のCF近傍のPA6の様子を示している。iCFsと比べてiCFr近傍のPA6は明るい様子が示された。すなわち、iCFr近傍ではCF軸方向に配向したPA6の結晶が形成していることを意味する。この配向結晶は、dCFrでも明瞭に示されたことから、CF表面の凹凸の存在がCF軸方向へのPA6の結晶形成を促進させていること、OHやCOOHがこの配向結晶を促していることが明らかにされた。次に偏光顕微ラマン分光分析にて、CF近傍のPA6の結晶構造をキャラクタリゼーションした。空間分解能1μm程度であることから、ドロップレット試料の断面を研磨しCF表面から0.5、1、2、4μm離れた場所のPA6のCF軸方向のラマンスペクトルを計測し、そのラマンスペクトルを解析することで結晶相(α晶、β晶、γ晶)の割合を定量化した。図4に示すように、CF軸方向に沿ったPA6のα結晶がiCFsから2μm程度離れた場所と比べてiCFs近傍では20%程少ないのに対して、iCFrではα晶は場所によらずほぼ一定であった。さらにiCFsと比べてiCFr近傍ではα晶が20%程多いことが明らかにされた。ここでは図示しないが、dCFrではCF表面の粗さによらずα晶の変化はなく、いずれの場所においても50%程度がα結晶であることがわかった。

以上より、PA6と親和性のあるCF表面のOHやCOOHの存在はCF表面でのエピタキシャル結晶の形成に寄与し、CF表面の凹凸はCF軸方向の結晶成長を促し、この結晶がCFとの高い界面接着性に反映されたと結論付けられた(モデル図を図5に示す)。

*本内容の詳細はH. Uematsu et al. Polymer, 284, 126290 (2023) に掲載

強化繊維種が高分子構造の形成と界面接着性に及ぼす影響

で使用したiCFs, dCFsに加えて表面処理されていないガラス繊維(GF)を用いた。高分子マトリクスにはポリフェニレンサルファイド(PPS)を使用した。PPSを合成した後の精製の仕方が異なる2種類のPPSを用い、分子同士の反応性の高いPPSをPPSr、そうでないPPSをPPSIとする。図6に各サンプルにおける界面せん断強度を示す。PA6とは異なり、CFの表面にOHやCOOHなどの反応性の高い官能基が存在する、あるいは分子同士の反応性の高いPPSrでは界面せん断強度が低いことが明らかになった。またCFと比べるとGFとの界面せん断強度が低いことも明らかになった。界面での相互作用と、界面相のPPSの結晶構造を明らかにするために、顕微ラマン分光分析を実施した。主鎖にあるベンゼン環の振動モードからCF表面との静電相互作用の一つである電子相互作用の程度を評価した。その結果、GFとPPSの電子相互作用は非常に小さく、またPPSrとdCFsの相互作用はPPSIとiCFsの相互作用に比べて小さいことが示された(図7)。すなわち、CF表面の官能基が少ないあるいは、PPSの分子反応性が少ないとCF表面のベンゼン環とPPSの主鎖骨格のベンゼン環同士の相互作用が大きいたことが明らかにされた。また結晶化度の異なるPPSのXRDパターンとラマンスペクトルの関係から、偏光ラマンスペクトルで得られた繊維軸方向のPPSの配向性を評価した。図8に示すようGFやdCFs近傍でのPPSの配向性は低いことが示された。以上より、CFとPPSの電子相互作用によるCF軸方向の分子配向性が界面接着性に寄与しており、この相互作用には、CFとPPSの反応性が少ないことが重要な要素となることが判明した。

*本内容の詳細はH. Uematsu et al. Composite Part A, 165, 107355 (2023) に掲載

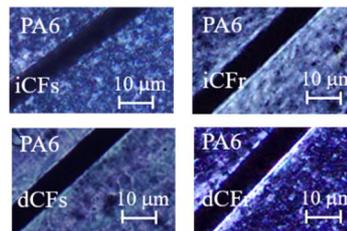


図3 PA6/CFの偏光像

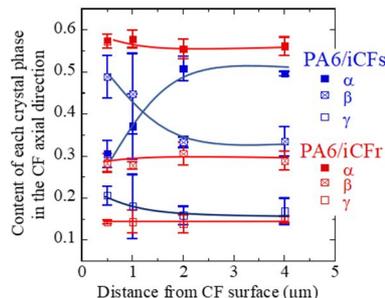


図4 CF近傍のPA6の結晶相

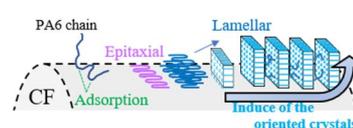


図5 PA6の結晶形成の様子

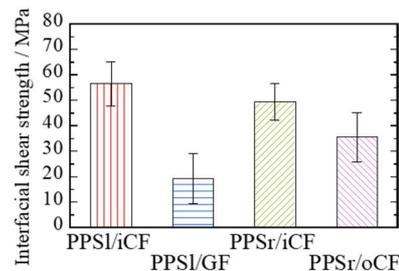


図6 PPSとGF,CFの界面せん断強度

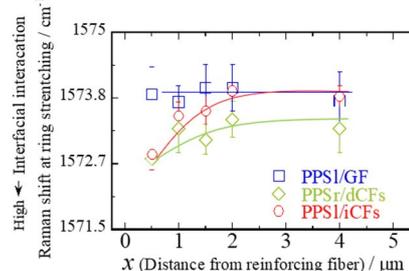


図7 電子相互作用

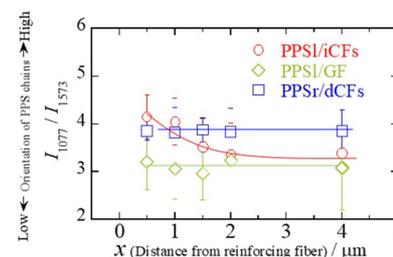


図8 繊維軸方向のPPSの配向性

強化繊維の表面官能基が高分子構造と界面接着性に及ぼす影響

で説明したように、CF 表面には CF を束ねるためのサイジング剤が塗布されている。このサイジング剤が PA6 との界面接着性や PA6 の結晶構造に及ぼす影響を検討した。ここでは、や で示した 1 本の強化繊維を用いたマイクロドロプレット法だけでなく、1 方向に配列した CF を PA6 フィルムと複合化した中間材料(プリプレグシート)からなる PA6/CF 複合材料(UD 材)を用いて検討した。表面凹凸やサイジング剤の種類が異なる 3 種類の CF を用いた。図 9 には用いた CF のモルフォロジーを示す。IM-CF の表面は滑らかで、SIM-CF と SM-CF には凹凸が存在していることがわかる。UD 材の CF 軸方向とは直交方向の引張試験により界面接着性を評価した結果を図 10 に示す。PA6/SM-CF では強度と破断ひずみが多いが、IM-CF あるいは SIM-CF を用いると破断ひずみの低下、強度の低下が示された。破断面における CF 表面に付着した PA6 のラマンスペクトルを計測し、に示すように PA6 の結晶相 (α 晶、 β 晶、 γ 晶) の割合を定量化した。その結果、強度や破断ひずみの大きい SM-CF に付着した PA6 には β 結晶と α 結晶の割合が多く、強度と破断ひずみの小さい SIM-CF では α 結晶が少なく、 γ 結晶が多いことが判明した(図 11)。またシングルフィラメントを用いたマイクロドロプレットによる界面強度は、SIM-CF/PA6 の組み合わせが最も大きく、SM-CF と PA6 の組み合わせが最も小さくなった。以上のことから、PA6 と CF 界面での相互作用が大きい組み合わせでは、PA6 の安定した α 結晶の形成が阻害されることで界面相の強度が低下することが明らかにされた。様々な方向に CF を配列させた QI 材の曲げ物性を評価した結果、SM-CF/PA6 の強度と比較して、IM-CF や SIM-CF では 15%程度強度が低下した。PA6 に生じる応力レベルは結晶相に依存することから、CF 間の PA6 の結晶の分布を偏光顕微ラマン分光分析から定量化した。その結果、強度の低い IM-CF、SIM-CF 間での PA6 の α 結晶の分布の均一性が低いに対して、強度の高い SM-CF 間での PA6 の α 結晶の均一性が高いことが明らかになった(図 12)。以上のことから、PA6 と CF 界面での相互作用が強いと PA6 の結晶形成が不均一になりやすく、PA6 の破壊が起こりやすくなることで PA6/CF の力学特性が低くなると結論付けられた。

*本内容の詳細は H. Uematsu et al. Polymer, 275, 125907 (2023) に掲載

強化繊維周りでの構造形成機構

高分子マトリクス中の結晶構造が界面接着性だけでなく複合材料の力学特性にも重要な要素となることが明らかになったことから、や で使用していた PA6 だけでなく、別の PA6 を用いて CF との界面接着性や PA6/CF の力学特性を評価した。図 13 に示すように、球晶サイズが大きい PA6 (PA6L) を用い、これまで使用していた PA6 (PA6S) と比較した。で使用した CFs と CFr にサイジング剤が塗布された CF を用いた。と同様に UD 材を作製し、CF 軸方向とは直交方向に引張試験を行った結果を図 14 に示す。球晶サイズの大きい PA6L をマトリクスとすると破断ひずみが低下することで強度が低下した。破断面を観察すると CF 表面に PA6L は残存している場所が多く示されたことから PA6L の結晶構造が強度低下に関係していることが示唆された。そこで、CF 軸方向にスライスした試験片について偏光顕微鏡観察を行った。CFr を用いた複合材料の結果を図

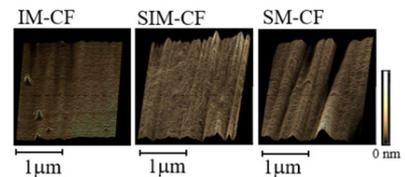


図 9 CF の表面モルフォロジー

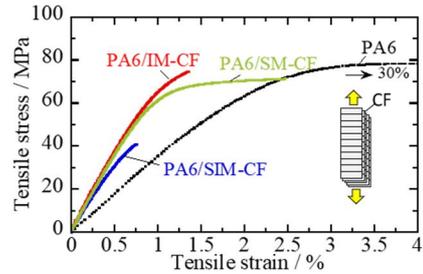


図 10 PA6/CF の界面物性

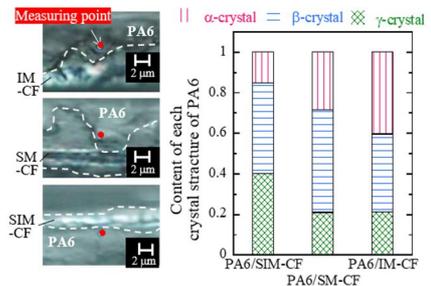


図 11 破断面の CF に付着した PA6 の結晶相の割合

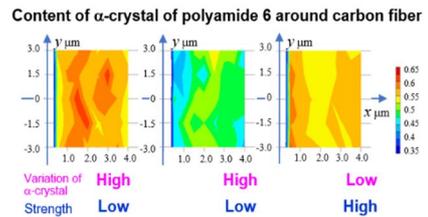


図 12 CF 間での PA6 の結晶構造

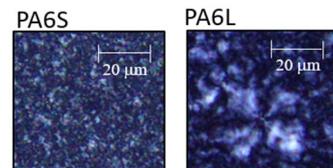


図 13 PA6S と PA6L の球晶サイズ

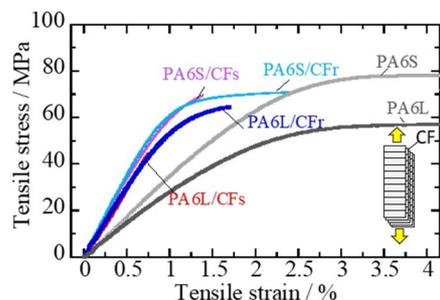


図 14 各 PA6/CF の界面物性

15 に示す。黒い領域が CF を示しており、45° に傾けた際の CF 間に存在する PA6 の色を比較すると、PA6S では青色に呈色しているが、PA6L では青だけでなく黄色や緑色にも呈色している。すなわち、PA6S は CF 軸方向に沿って配向しているが、PA6L は配向していない可能性が高い。そこで、広角 X 線散乱 (WAXS) により PA6 の結晶面が CF に対してどのように配向しているかを検討した。その結果、PA6S の結晶面は CF 軸方向に並んでいるが、PA6L の結晶面の配向は示されなかった。すなわち、PS6L の結晶配向性の均一性は低いことが明らかとなった。また偏光顕微ラマン分光分析を行うことで、CF 軸に対する結晶面の向きを明確にすることを試みた。その結果、PS6S は CF 表面に沿って結晶ラメラが成長していること、言い換えると PA6 が CF 表面においてエピタキシャルに結晶成長していることが示唆された。CF 表面における PA6S の結晶面の模式図を図 16 に示す。PA6 鎖のアミド基と CF 表面の官能基との化学的相互作用による吸着がエピタキシャルな結晶成長を促すことと、球晶サイズが小さいほど、CF 表面での化学的相互作用がドライビングフォースとなった CF 軸方向の PA6 の結晶が CF 表面から離れた界面相、バルク領域の結晶形成に寄与して配向結晶が CF 間で形成できたと考えられる。また図 17 に示すように、各 PA6/CF の疑似等方材の曲げ特性を評価した結果、CF 間で PA6 が配向結晶している PA6S/CF は PA6L/CF に比べて強度が 20% 程度高いことが示された。CF 近傍での PA6 の形成機構が示唆されたと同時に、高分子マトリクスの CF 軸方向の配向結晶化も PA6/CF 複合材料の力学特性には重要な要素であることが明らかにされた。

*本内容の詳細は H. Uematsu et al. Composite Part A, 176, 107837 (2024) に掲載

以上総括すると、偏光を含む顕微ラマン分光分析を基軸とした強化繊維周りでの高分子の構造評価と強化繊維との界面接着性の関係を検討するための手法は確立できた。本報告書には極性の高い PA6 と極性が低く剛直性の高い PPS の結果について示したが、この他にも PVC、PP、PC をマトリクスとした時の界面特性と界面構造あるいは界面相の構造の関係を明らかにした。様々な半結晶性高分子、表面構造の異なる強化繊維の組み合わせにおいて包括的に検証することで、高分子の構造と強化繊維との界面接着性の関係を体系化する。

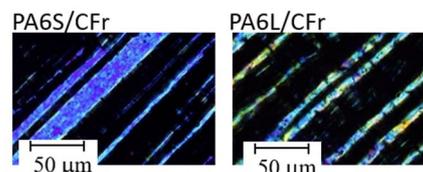


図 15 PA6/CF の偏光顕微鏡像

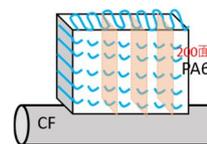


図 16 CF 表面での PA6 の結晶形成

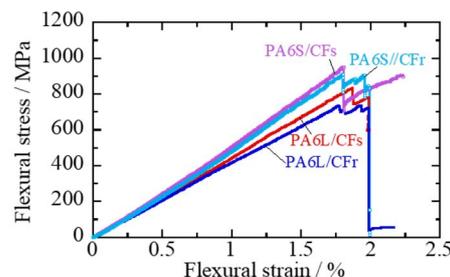


図 17 各 PA6/CF の曲げ特性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計19件（うち査読付論文 17件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 佐々 遼介、岡田 将人、植松 英之、金田 直人	4. 巻 66
2. 論文標題 熱可塑性CFRPを対象としたローソク型ドリルによる穴加工	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 砥粒加工学会誌	6. 最初と最後の頁 457 ~ 463
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11420/jsat.66.457	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 Uematsu Hideyuki, Higashitani Naoki, Yamaguchi Ayaka, Fukuishima Akinori, Asano Takayuki, Mitsudo Seitaro, Sugihara Shinji, Yamane Masachika, Irisawa Toshihira, Ozaki Yukihiro, Tanoue Shuichi	4. 巻 34
2. 論文標題 Effects of polycarbonate crystals, - interactions, and chemical bonds at an interface on the interfacial adhesion between polycarbonate and reinforcing fibers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Surfaces and Interfaces	6. 最初と最後の頁 102300
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.surfin.2022.102300	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 YAMANE Masachika, UEMATSU Hideyuki, TANOUE Shuichi	4. 巻 88
2. 論文標題 Effect of layer thickness of prepreg on tensile properties of quasi-isotropic carbon fiber reinforced polyamide 6	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 22 ~ 00073
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.22-00073	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 Uematsu Hideyuki, Yoshida Kou, Yamaguchi Ayaka, Fukushima Akinori, Sugihara Shinji, Yamane Masachika, Ozaki Yukihiro, Tanoue Shuichi	4. 巻 165
2. 論文標題 Enhancement of interfacial shear strength due to cooperative - interaction between polyphenylene sulfide and carbon fiber and molecular orientation of polyphenylene sulfide via the - interaction	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Composites Part A: Applied Science and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 107355
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compositesa.2022.107355	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 YAMANE Masachika, UEMATSU Hideyuki, TANOUE Shuichi	4. 巻 89
2. 論文標題 Effect of layer thickness of prepreg and fiber/matrix interfacial properties on impact resistance of carbon fiber reinforced polyamide 6	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 22 ~ 00263
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.22-00263	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 Yamaguchi Ayaka, Urushisaki Michio, Uematsu Hideyuki, Sakaguchi Toshikazu, Hashimoto Tamotsu	4. 巻 55
2. 論文標題 Effects of different types of maleic anhydride-modified polypropylene on the interfacial shear strengths of carbon fiber-reinforced polypropylene composites	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Polymer Journal	6. 最初と最後の頁 153 ~ 161
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41428-022-00733-w	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 Uematsu Hideyuki, Mune Kotaro, Nishimura Shunya, Koizumi Koutarou, Yamaguchi Ayaka, Sugihara Shinji, Yamane Masachika, Kawabe Kazumasa, Ozaki Yukihiro, Tanoue Shuichi	4. 巻 154
2. 論文標題 Fracture properties of quasi-isotropic carbon-fiber-reinforced polyamide 6 laminates with different crystal structure of polyamide 6 due to surface profiles of carbon fibers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Composites Part A: Applied Science and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 106752 ~ 106752
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compositesa.2021.106752	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 Uematsu Hideyuki, Sudo Ken, Eguchi Taichi, Yamaguchi Ayaka, Hirata Toyoaki, Koori Yohei, Yasuda Hiroshi, Senga Minoru, Yamane Masachika, Ozaki Yukihiro, Tanoue Shuichi	4. 巻 153
2. 論文標題 Improvement of interfacial shear strength between syndiotactic polystyrene and carbon fiber by Self-localization of acid modified poly(2,6-dimethyl-1,4-phenylene ether) on the surface of carbon fiber	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Composites Part A: Applied Science and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 106706 ~ 106706
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compositesa.2021.106706	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 Uematsu Hideyuki、Nishimura Shunya、Yamaguchi Ayaka、Yamane Masachika、Ozaki Yukihiro、Tanoue Shuichi	4. 巻 54
2. 論文標題 Growth of polypropylene crystals in the vicinity of carbon fibers and improvement of their interfacial shear strength	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Polymer Journal	6. 最初と最後の頁 667 ~ 677
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41428-022-00622-2	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 Tanoue Shuichi、Uematsu Hideyuki	4. 巻 42
2. 論文標題 Characterization of polypropylene/magnesium oxide/vapor-grown carbon fiber composites prepared by melt compounding	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Polymer Engineering	6. 最初と最後の頁 204 ~ 213
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1515/polyeng-2021-0201	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 Ono Mizuki、Yamane Masachika、Tanoue Shuichi、Uematsu Hideyuki、Yamashita Yoshihiro	4. 巻 13
2. 論文標題 Mechanical Properties of Thermoplastic Composites Made of Commingled Carbon Fiber/Nylon Fiber	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Polymers	6. 最初と最後の頁 3206 ~ 3206
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/polym13193206	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 YAMANE Masachika、NAKAKUBO Shota、KOIZUMI Koutarou、UEMATSU Hideyuki、TANOUE Shuichi	4. 巻 87
2. 論文標題 Effect of layer thickness of prepreg on static and dynamic flexural properties of continuous carbon fiber reinforced polyamide 6	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 20-00438
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.20-00438	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 Uematsu Hideyuki, Doi Miyuki, Yorikane Shunya, Yamaguchi Ayaka, Nishimura Fumihito, Sugihara Shinji, Yamane Masachika, Ozaki Yukihiro, Tanoue Shuichi	4. 巻 42
2. 論文標題 Enhancement of interfacial adhesion to carbon fibers via electrostatic interaction using polyvinyl chloride as a model matrix	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Surfaces and Interfaces	6. 最初と最後の頁 103287 ~ 103287
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.surfin.2023.103287	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 Uematsu Hideyuki, Ishikawa Maya, Yamaguchi Ayaka, Sugihara Shinji, Nishitsuji Shotaro, Nishimura Fumihito, Yamane Masachika, Kawabe Kazumasa, Ozaki Yukihiro, Tanoue Shuichi	4. 巻 176
2. 論文標題 Enhancement of flexural properties of carbon fiber-reinforced polyamide 6 via oriented crystallization of polyamide 6 among carbon fibers	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Composites Part A: Applied Science and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 107837 ~ 107837
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compositesa.2023.107837	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 Uematsu Hideyuki, Mune Kotaro, Yamaguchi Ayaka, Sugihara Shinji, Nishitsuji Shotaro, Nishimura Fumihito, Yamane Masachika, Ozaki Yukihiro, Tanoue Shuichi	4. 巻 284
2. 論文標題 Promotion of crystallization of polyamide 6 at an interphase and a mechanical interlocking effect at an interface due to surface irregularities of carbon fibers	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Polymer	6. 最初と最後の頁 126290 ~ 126290
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.polymer.2023.126290	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 Uematsu Hideyuki, Aratama Toumu, Yamaguchi Ayaka, Fukushima Akinori, Sugihara Shinji, Nishimura Fumihito, Yamane Masachika, Ozaki Yukihiro, Tanoue Shuichi	4. 巻 49
2. 論文標題 Influence of Polyetheretherketone radicals on interfacial interaction with carbon fiber and crystal formation of Polyetheretherketone at the interphase	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Surfaces and Interfaces	6. 最初と最後の頁 104409 ~ 104409
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.surfin.2024.104409	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 Yamaguchi Ayaka, Uematsu Hideyuki, Sakaguchi Toshikazu, Hashimoto Tamotsu	4. 巻 56
2. 論文標題 Effects of different types of functionalized polypropylenes on the tensile strength of short carbon fiber-reinforced polypropylene composites	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Polymer Journal	6. 最初と最後の頁 205 ~ 214
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41428-023-00856-8	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 Uematsu Hideyuki, Tanoue Shuichi	4. 巻 36
2. 論文標題 繊維強化プラスチックにおける界面力学特性	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Seikei-Kakou	6. 最初と最後の頁 100 ~ 103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4325/seikeikakou.36.100	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 -

1. 著者名 Uematsu Hideyuki	4. 巻 35
2. 論文標題 複合材料の界面特性	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Seikei-Kakou	6. 最初と最後の頁 228 ~ 231
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4325/seikeikakou.35.228	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24件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 K. Sudo, H. Uematsu, A. Yamaguchi, M. Yamane, Y. Koori, H. Yasuda, M. Senga and S. Tanoue
2. 発表標題 Development of carbon fiber-syndiotactic polystyrene (SPS) composites
3. 学会等名 37th International Conference of the Polymer Processing Society (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Tanoue and H. Uematsu
2. 発表標題 Examination of the impregnation process of carbon fiber bundle by steady-state viscoelastic flow simulation
3. 学会等名 37th International Conference of the Polymer Processing Society (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 強化繊維とPEEKの結晶構造と界面接着性
2. 発表標題 新玉十夢, 山口綾香, 植松英之, 山根正睦, 田上秀一
3. 学会等名 日本繊維機械学会第75回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石川満也, 小泉洸太郎, 山口綾香, 植松英之, 山根正睦, 田上秀一
2. 発表標題 リアミド6の結晶サイズが炭素繊維強化ポリアミド6の力学特性に及ぼす影響
3. 学会等名 日本繊維機械学会第75回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 植松英之, 西村俊哉, 山口綾香, 山根正睦, 田上秀一
2. 発表標題 強化繊維近傍のポリプロピレンの結晶構造と界面接着性
3. 学会等名 プラスチック成形加工学会第33回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宗虎太郎, 植松英之, 山口綾香, 山根正睦, 田上秀一
2. 発表標題 炭素繊維とポリアミド系樹脂の界面特性と結晶構造との関係
3. 学会等名 プラスチック成形加工学会第30回秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小野瑞輝, 替地慎, 川邊和正, 山根正睦, 植松英之, 田上秀一, 山下義裕
2. 発表標題 熱可塑性薄層UDプリプレグシートを用いた織物複合材料の力学特性評価
3. 学会等名 日本繊維機械学会北陸支部 繊維学会北陸支部 研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 植松 英之, 山口 綾香, 山根 正睦, 田上 秀一
2. 発表標題 炭素繊維近傍のポリアミド6の高次構造と複合材料の力学特性の関係
3. 学会等名 2022年繊維学会年次大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 植松 英之
2. 発表標題 繊維強化プラスチックの力学特性と界面特性に関する研究
3. 学会等名 プラスチック成形加工学会関西支部（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 植松 英之, 小泉 洸太郎, 山口 綾香, 山根 正睦, 田上 秀一
2. 発表標題 ポリアミド 6/ 炭素繊維複合材料の衝撃特性と炭素繊維の表面性状の関係
3. 学会等名 日本繊維機械学会第74回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山根 正睦, 中久保 翔太, 小泉 洸太郎, 植松 英之, 田上 秀一
2. 発表標題 炭素繊維強化ポリアミド6の擬似等方積層板における層厚さと曲げ特性の関係
3. 学会等名 プラスチック成形加工学会第32年会次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宗 虎太郎, 植松 英之, 山口 綾香, 山根 正睦, 田上 秀一
2. 発表標題 ポリアミド6と炭素繊維の界面特性に及ぼす炭素繊維の表面性状の影響
3. 学会等名 プラスチック成形加工学会第32年会次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西村 俊哉, 中久 保翔大, 山口 綾香, 植松 英之, 山根 正睦, 田上 秀一
2. 発表標題 表面特性の異なる炭素繊維強化ポリアミド 6 複合材料の力学特性と破壊挙動
3. 学会等名 成形加工学会第29回秋季大会(2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小泉 洸太郎, 山口 綾香, 植松 英之, 山根 正睦, 田上 秀一
2. 発表標題 ポリアミド6の結晶構造が炭素繊維強化ポリアミド6の力学特性に及ぼす影響
3. 学会等名 日本繊維機械学会・繊維学会北陸支部 2021年度研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田 洸, 山口 綾香, 植松 英之, 田上 秀一
2. 発表標題 ポリフェニレンサルファイドと強化繊維の界面接着性に関する研究
3. 学会等名 日本繊維機械学会・繊維学会北陸支部 2021年度研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 植松 英之
2. 発表標題 強化繊維と高分子の界面特性と高分子の高次構造の関係
3. 学会等名 接着講座マスターコース(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 植松英之, 西村俊哉, 山口綾香, 山根正睦, 田上秀一
2. 発表標題 炭素繊維間のポリアミド6の結晶構造と複合材料の機械的特性
3. 学会等名 日本繊維機械学会第76回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 頼金隼矢, 山口綾香, 植松英之, 田上秀一
2. 発表標題 ポリ塩化ビニルと強化繊維の界面接着性に及ぼす静電相互作用の効果
3. 学会等名 プラスチック成形加工学会第34回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 植松英之
2. 発表標題 高分子の結晶構造と高分子/炭素繊維複合材料の力学特性の関係
3. 学会等名 高分子学会関東支部第69 回茨城地区活動講演会(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 別宮ゆき, 山口綾香, 植松英之, 山根正睦, 田上秀一
2. 発表標題 炭素繊維表面がポリアミド6/炭素繊維複合材料の界面特性に及ぼす影響
3. 学会等名 プラスチック成形加工学会第31回秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 加藤倫, 山口綾香, 植松英之, 山根正睦, 田上秀一
2. 発表標題 ガラス繊維の表面組成がポリプロピレン/ガラス繊維複合材料の界面特性に及ぼす影響
3. 学会等名 プラスチック成形加工学会第31回秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石川満也, 山口綾香, 植松英之, 山根正睦, 田上秀一
2. 発表標題 ポリアミド6の結晶構造と炭素繊維強化ポリアミド6の力学特性の関係
3. 学会等名 日本繊維機械学会 繊維学会北陸支部 2023 年度研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 新玉十夢, 植松英之, 山口綾香, 田上秀一
2. 発表標題 PEEK と炭素繊維の界面接着発現機構の検討
3. 学会等名 日本繊維機械学会 繊維学会北陸支部 2023 年度研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 植松 英之、山口 綾香、山根 正睦、田上 秀一
2. 発表標題 炭素繊維強化ポリアミド6の力学特性とポリアミド6の結晶構造
3. 学会等名 第15回 日本複合材料会議(JCCM-15)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>高分子加工学研究室 https://www.fmc.u-fukui.ac.jp/~pproc/index.html</p>

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	杉原 伸治 (Sujihara Shinji) (70377472)	福井大学・学術研究院工学系部門・教授 (13401)	
研究分担者	福島 啓悟 (Fukushima Akinori) (50725322)	福井大学・学術研究院工学系部門・講師 (13401)	
研究分担者	山根 正睦 (Yamane Masachika) (60755263)	福井大学・産学官連携本部・非常勤講師 (13401)	
研究分担者	田上 秀一 (Tanou Shuichi) (40274500)	福井大学・繊維・マテリアル研究センター・教授 (13401)	

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