

令和 3 年 5 月 16 日現在

機関番号：13701

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K14906

研究課題名（和文）CFRPの面内非一様燃え拡がり挙動モデリング：汎用三次元燃え拡がりモデルへの展開

研究課題名（英文）Modeling of in-plane non-uniform flame spread behaviors of CFRPs: Development in universal three-dimensional flame spread model

研究代表者

小林 芳成 (Kobayashi, Yoshinari)

岐阜大学・工学部・助教

研究者番号：00827016

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：従来の燃え拡がり研究は、アクリル樹脂などの等方材料を対象してきた。そのため、これまでに提案された燃え拡がりモデルもそのような材料を想定したモデルとなっている。一方、炭素繊維強化プラスチック（CFRP）は炭素繊維配合方向によって異方性を持つことが知られており、従来の燃え拡がりモデルではカバーすることのできない材料である。そこで本研究は、炭素繊維配合方向の異なるCFRPを製作し、それらの燃え拡がり挙動を調査すると共に、異方性の影響のモデル化に挑戦した。そして、炭素繊維を介した固相の熱輸送を考慮した新たな燃え拡がりモデルを構築し、それをもとに算出した燃え拡がり速度は実験値と良い一致を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた知見および成果は、火災安全という点から固体材料の燃焼性評価に貢献することが期待できる。特に、構築した燃え拡がりモデルは、従来の燃え拡がりモデルではカバーできなかった異方材料にも適用することが可能であるため、より広範な材料の燃え拡がり挙動を予測することができる。今後は、当モデルをベースに限界酸素濃度や燃え拡がり速度などの特性値を定量予測できるよう高精度化していく。

研究成果の概要（英文）：Past studies on flame spread over solid materials targeted isotropic materials such as acrylic resins. Conventional flame spread models, therefore, assume such materials. On the other hand, carbon fiber reinforced plastics (CFRPs) are found to become anisotropic depending on carbon fiber orientation. Thus, the conventional models could not deal with the CFRPs. This work then fabricated CFRP sheets with different carbon fiber orientations and investigated their flame spread behaviors. Furthermore, it addressed the modeling of flame spread behaviors of CFRPs. Finally, a novel flame spread model which involves the solid-phase heat transfer via the carbon fibers was developed, and flame spread rates calculated via the developed model agreed with the experimental flame spread rates.

研究分野： 燃焼工学

キーワード： 炭素繊維強化プラスチック 燃え拡がり 炭素繊維配合方向 熱的異方性 限界酸素濃度 燃え拡がり速度

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。

1. 研究開始当初の背景

固体材料上の火炎の燃え拡がりは、燃烧科学としての学術的側面と防災という実務的側面から広く研究が行われてきた。特に、燃え拡がり速度や消炎限界などを指標として、材料形状や熱物性・雰囲気の影響を調査した研究が多く、研究代表者らのグループもこれまでそれらの影響を中心に調査してきた。しかし、従来の燃え拡がり研究は、いずれも高分子材料などの単一素材から成るモノマテリアルを対象としており、複合材料のように複数の素材から成る材料の燃え拡がりを調査した研究例はない。複合材料の内、炭素繊維と熱硬化性樹脂から成る炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は、その軽量で高剛性という特徴から、鉄道車両や車椅子・スポーツ用品など様々な分野に応用されている。その CFRP に対し、名古屋大学・長野教授らは繊維配合方向による熱拡散率の異方性を明らかにしている。燃え拡がりは材料内部の熱輸送が支配因子の一つであるため、CFRP 上の火炎の燃え拡がり挙動は一様ではない可能性が考えられる。これまで提唱されてきた燃え拡がりモデルの多くは、de Ris [1] のモデルが基本となっている。しかし、そのモデルは面内の熱輸送は等方的に行われると仮定しているため、CFRP のように面内の燃え拡がりが一様でない材料には適用できないことが予想される。今後、ニーズに応じた材料的特性を有する新しい複合材料が次々に創成されると予想される。そのような未知の材料に対しても、その燃え拡がり挙動を包括的に表現するためには、材料に依らず汎用性の高い燃え拡がりモデルの構築が求められる。このような背景が経緯のひとつとなり、CFRP を出発材料として複合材料の非一様な燃え拡がり挙動のモデリングに取り組むに至った。

2. 研究の目的

上記 1 の背景を受け、本研究は炭素繊維配合方向の異なる CFRP シートを製作して燃え拡がり試験を行い、画像解析による燃え拡がり挙動の定量化および赤外線カメラによる材料表面の温度分布の可視化により、熱的異方性が燃え拡がり挙動に及ぼす影響を明らかにする。そして、得られた知見をもとに熱的異方性の影響を定式化し、その数理モデルを従来の二次元燃え拡がりモデルに組み込むことで、CFRP 燃え拡がりモデルを構築する。

3. 研究の方法

(1) 試験材料の製作

- CFRP の中でも高熱伝導なピッチ系 CFRP を試験材料として使用するため、その元となるプリプレグシート (熱硬化性樹脂が含浸した炭素繊維シート) を採寸して切り出す。
- 所定のサイズに切り出したプリプレグを積層して、高温炉で真空加熱成形する。なお、プリプレグを積層する際に、シートの積層方向を変えることで炭素繊維配合方向の異なる CFRP シート (図 1) を製作する。

(2) 燃え拡がり試験装置の設計・製作

- 燃え拡がり試験は、燃え拡がり挙動が定常になり易い対向流条件において実施する。そのため、内部に試験材料を設置できる風洞型の試験装置を設計し、燃え拡がり時の様子を観察できるように透明性の高いアクリル樹脂で製作する。
- 流速は、試験装置上部に取り付けたファンにより調整可能にする。また、酸素濃度は試験装置自体を 1 m³ サイズのグローブボックス内に設置し、そのグローブボックスの酸素濃度を変化させることによって操作できるようにする。これにより、任意の流速・酸素濃度条件において燃え拡がり試験を実施できるようにする。

(3) 燃え拡がり試験

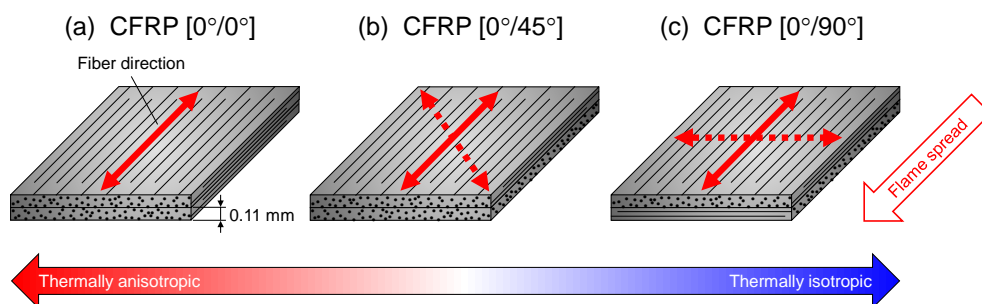


図 1 炭素繊維配合方向の異なる炭素繊維強化プラスチック CFRP シートの概要

- 上記(1)で製作した CFRP シート、そして(2)の燃え拡がり試験装置を用いて、燃え拡がり試験を実施する。この時、可視カメラによる燃え拡がり挙動の観察、および赤外線カメラによる材料表面の温度分布の可視化を行う。
- 炭素繊維配合方向の異なる CFRP シートに対して、流速および酸素濃度を変化させながら燃え拡がり試験を行い、燃え拡がり得る最低の酸素濃度（限界酸素濃度）を特定する。

(4) 燃え拡がり挙動の定量化

- 上記(3)の燃え拡がり試験で得られた動画データを解析し、燃え拡がり速度・火炎長さ・予熱領域長さなど特性値を抽出して、燃え拡がり挙動を定量化する。
- 炭素繊維配合方向を数値化してインデックスとし、算出した各特性値の炭素繊維配合方向に対する依存性を明らかにする。

(5) 熱的異方性の数理モデル構築

- 炭素繊維配合方向によって面内の熱伝導特性が変化するという伝熱工学の観点に立脚し、上記(4)で得られた知見をもとに熱的異方性の定式化を行う。
- 定式化した熱的異方性モデルを従来の燃え拡がりモデルに組み込むことで、CFRP 燃え拡がりモデルの構築を行う。

(6) 燃え拡がりモデルの妥当性検証

- 上記(5)で構築した燃え拡がりモデルを参考にエネルギーバランス式を立て、そこから燃え拡がり速度の解析解を導出する。
- 得られた燃え拡がり速度の理論式を用いて、上記(3)の燃え拡がり試験と同条件における燃え拡がり速度を算出する。そして、それらと実験結果を比較し、構築した燃え拡がりモデルが妥当か検証する。

4. 研究成果

[1] CFRP シートの燃え拡がり挙動

炭素繊維配合角度が 0 deg., 15 deg., 30 deg. の CFRP シート、そして比較対象として同じ厚さの PMMA シートの燃え拡がり挙動を図 2 に示す。なお、条件は自然対流下で、酸素濃度は各配合角度における限界酸素濃度である。CFRP の場合、火炎後方にすすの付着した炭素繊維が残っているが、PMMA は何も残渣が無い。これは、CFRP 上の火炎の燃え拡がりが炭素繊維ではなく、エポキシ樹脂の熱分解によって駆動されていることを意味している。限界酸素濃度付近では、大抵 PMMA のように小さく弱い青炎が観察されるが、CFRP は限界酸素濃度においても黄色の輝炎が形成されている。この違いは、主に熱分解ガスの生成割合に依るところが大きい。PMMA の熱分解温度は~ 670 K であり、エポキシ樹脂の熱分解温度 (~ 430 K) の方が低い。そのため、CFRP の方が熱分解ガスの生成量が

多く、燃料過濃により輝炎が形成されていると考えられる。

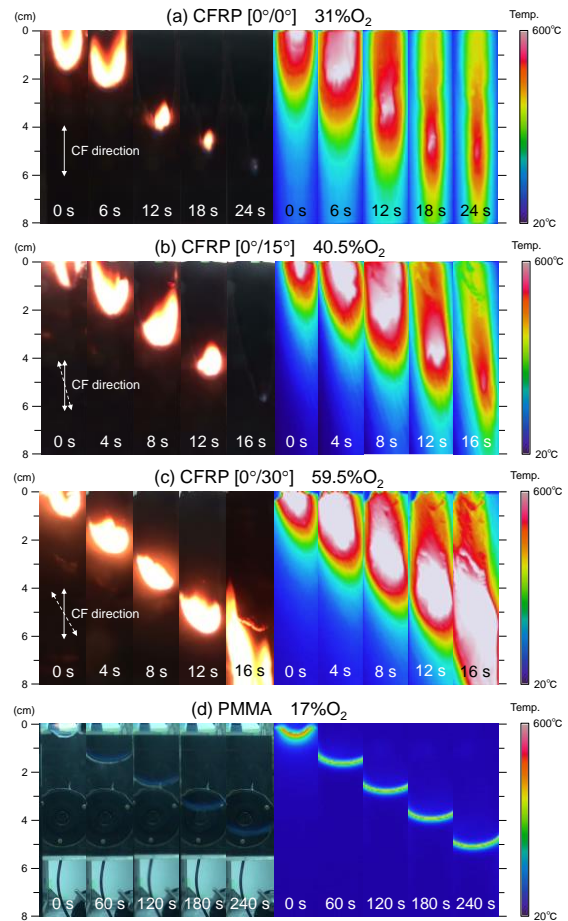


図 2 自然対流下での炭素繊維配合方向の異なる CFRP および PMMA の燃え拡がり挙動とその時の表面温度分布

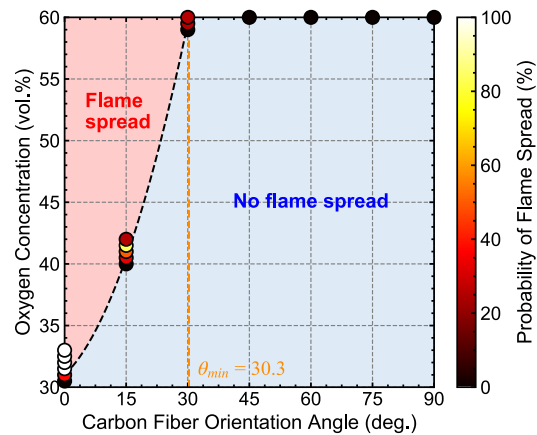


図 3 自然対流下における CFRP 限界酸素濃度の炭素繊維配合角度に対する依存性

また、15 deg.と 30 deg.の場合、火炎は炭素繊維配合方向に沿って伝播している。つまり、炭素繊維配合方向が火炎の伝播方向を支配していることを意味している。これは、炭素繊維配合方向から火炎伝播方向を推測できる可能性があり、防災上重要な知見である。図 2 に添付されている時間と火炎の位置を比較すると、CFRP 上の火炎の燃え広がりは PMMA に比べて圧倒的に速いことがわかる。これは、炭素繊維の高い熱伝導率に起因している。つまり、炭素繊維が熱伝導体となって火炎伝播を促進している。

【2】 炭素繊維配合方向に依る限界酸素濃度の違い

自然対流下での炭素繊維配合方向の異なる CFRP シート各々の限界酸素濃度を図 3 に示す。限界酸素濃度は、炭素繊維配合角度の増加に伴って大きく上昇し、45 deg.以上では酸素濃度 60%でも燃え広がることはなかった。このように、一つの材料が複数の限界酸素濃度をもつことを明らかにしたのは、本研究が初めてである。45 deg.以上では、火炎は全く燃え広がらず、点火直後に消炎した。90 deg.においては点火すらせず、これは 90 deg.が火炎に対して最も安全であることを示唆している。点火しなかった要因は、点火器からの熱が拡散し、燃え広がるのに十分な熱分解ガスが生成されなかったためだと考えられる。

自然対流下で燃え広がった 0 deg., 15 deg., 30 deg.に対して、強制対流下での限界酸素濃度を特定した。その結果を図 4 に示す。比較のために PMMA の限界酸素濃度も示す。0 deg.の場合、限界酸素濃度は流速に対して変化はなく、概ね 31%で一定である。一方、15 deg.と 30 deg.では、流速に反比例して低下した。35 cm/s から 130 cm/s にかけて、15 deg.は 5%, 30 deg.は 10%低下している。したがって、炭素繊維配合角度が大きくなるにつれ、限界酸素濃度の流速に対する依存性は強くなるといえる。流速が上がるにつれて火炎が試料側に傾き、火炎から炭素繊維への熱流束が増加する。それにより炭素繊維を介して熱伝導によって火炎前方の予熱領域に輸送される熱量が増加し、結果として限界酸素濃度が低下する。一方で、PMMA にはそのような固相の熱伝導の効果は無い。そのため、流速に比例して対流による熱損失が増加し、滞留時間は減少する。これらは消炎と吹き飛びに関連しており、PMMA の限界酸素濃度は流速に比例して増加することになる。

【3】 燃え広がり速度

画像解析により燃え広がり速度を算出すると、CFRP の燃え広がり速度は PMMA に比べて圧倒的に速く、少なくとも PMMA の二倍以上速い。その要因は、上記【1】【2】で述べたように、エポキシ樹脂の低い熱分解温度と炭素繊維の高い熱伝導率である。流速が上がるにつれ、CFRP と PMMA の燃え広がり速度はそれぞれ増加および低下した。この逆の傾向は、上記【2】で述べた限界酸素濃度の流速に対するメカニズムを用いれば説明ができる。燃え広がり速度の傾向か

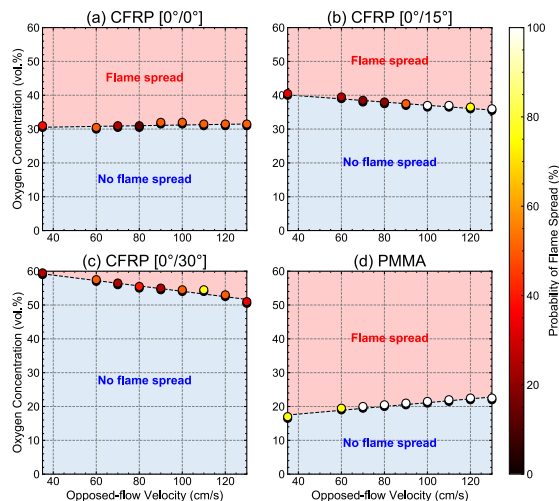


図 4 炭素繊維配合方向の異なる CFRP および PMMA の限界酸素濃度の流速依存性

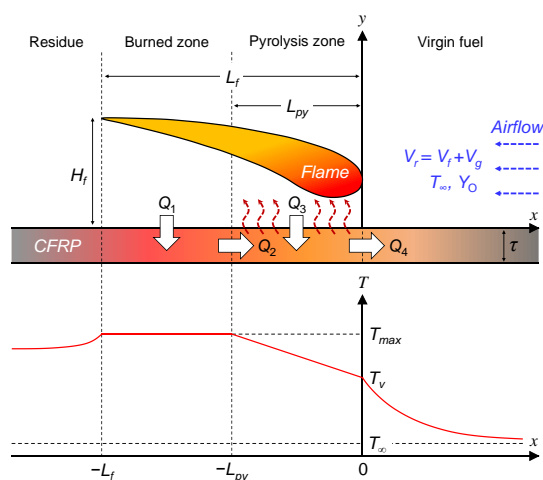


図 5 構築した CFRP 燃え広がりモデルの概要

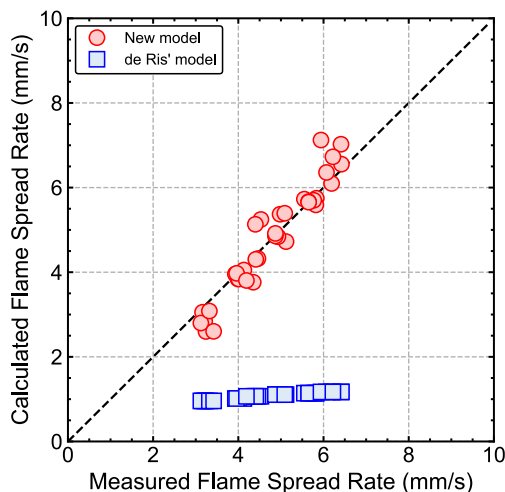


図 6 燃え広がりモデルから算出した燃え広がり速度の理論値と実験値の比較

らして、同じ酸素濃度条件では 0 deg. の燃え拡がり速度が最も速いと考えられる。炭素繊維配合角度があると、火炎伝播方向とは異なる方向への熱損失が生じ、それは角度と共に増加する。したがって、炭素繊維配合方向の揃った 0 deg. では、火炎から炭素繊維を介した熱全てが火炎伝播方向へ輸送されるため、最も燃え拡がり速度が速くなる。これらの知見は、CFRP が燃え拡がり得る条件では、CFRP は瞬時に火災規模を拡大する恐れがあることを意味している。そのため、防災という観点からは限界酸素濃度以下の条件において CFRP を利用する事が求められる。

【4】 CFRP 表面の温度分布

図 2 の燃え拡がり時の CFRP および PMMA の表面温度分布を見ると、CFRP の予熱領域（橙色から緑色の領域）は、PMMA に比べて圧倒的に大きく、炭素繊維の長手方向に伸びている。このような特徴は、炭素繊維を介した熱輸送の影響によるものである。0 deg. の場合、予熱領域は縦方向に細く、横方向に熱が輸送されていないことがわかる。これは、エポキシ樹脂の熱伝導率（ $\sim 0.3 \text{ W/m/K}$ ）が低いために、炭素繊維間の熱輸送がほぼ無いことに起因する。一方で、15 deg.、30 deg. のように配合角度があると、横方向にも熱が輸送されるため予熱領域は横方向にも拡大している。つまり、0 deg. では横方向への熱輸送が制限される分、火炎前方へ多くの熱が輸送される。しかし、15 deg. や 30 deg. のように配合角度があると、火炎伝播方向とは異なる方向へ熱が輸送され、0 deg. よりも火炎伝播方向への熱輸送量が小さくなる。その結果として、0 deg. の場合に限界酸素濃度が最も低く、燃え拡がり速度が最も速くなる。

表面温度分布画像から予熱領域の長さ、つまり予熱長さを算出すると、実際に 0 deg. の CFRP の予熱長さが最も長く、炭素繊維配合角度が増加するにつれて短くなっているのがわかる。従来の燃え拡がりモデルでは、燃え拡がり速度は予熱長さと相関があることを示しており、この結果はそれを裏付けているといえる。同様に考えると、PMMA の燃え拡がり速度が遅いのは、予熱長さが短いことに起因している。また、CFRP の予熱長さは流速に比例して増加しており、これは上記【2】で述べたメカニズム — 流速が増加するにつれて炭素繊維を介した熱輸送が促進され、限界酸素濃度の低下および燃え拡がり速度の増加がもたらされる — を支持している。

【5】 CFRP 燃え拡がりモデルとその妥当性

上記【1】～【4】の知見を総括し、図 5 に示す燃え拡がりモデルを構築した。当モデルは、従来の燃え拡がりモデルに固相の熱輸送を考慮したものである。熱伝導による熱流束を定義するのに、簡易的な温度プロファイルを添えてある。なお、当モデルは炭素繊維配合方向が一方向に揃っている、つまり 0 deg. の場合に相当する。そのため、火炎からの熱は炭素繊維を介して、全て火炎前方の予熱領域に輸送されると仮定している。その他に、i) 面内の燃え拡がり挙動は一樣、ii) 材料は熱的に薄い、つまり材料内部の温度勾配は無い、そして iii) 熱物性値は温度に依らず一定、という仮定を適用している。今、火炎が流速 V_g の流れに対向して一定の速度 V_f で燃え拡がっているとす。火炎を固定した座標系では、火炎に対して $V_r = V_f + V_g$ の速さで流れが向かってくることになる。一般に、燃え拡がり速度 V_f は自然対流（ $\sim 35 \text{ cm/s}$ ）に比べて非常に低いので、本研究では $V_r \approx V_g$ が成り立つ。なお、炭素繊維配合角度がある場合には、横方向への熱損失を考慮するか、3次元へのモデルの拡張を検討する必要がある、それは今後の課題である。

図 5 を参考に熱流束 $Q_1 \sim Q_4$ を求め、燃焼領域（Burned zone）と熱分解領域（Pyrolysis zone）においてエネルギーバランス式を立てる。それらを連立することにより、燃え拡がり速度 V_f の解析解が得られる。その解析解は、火炎長さ L_f 、火炎高さ H_f 、そして予熱領域長さ L_{py} を含む形となる。火炎高さ H_f と予熱領域長さ L_{py} は、Bhattacharjee ら[2]によって提案されたモデルを用いて求める。火炎長さ L_f は適当なモデルが存在しなかったため、本研究では実験値を用いた。そして、CFRP の密度・比熱・熱伝導率などの熱物性値を解析解に代入することにより、燃え拡がり速度の理論値を算出した。その結果を図 6 に示す。本研究で提案したモデルによる燃え拡がり速度の理論値は、実験値と定量的に一致している。一方、燃え拡がりモデルの代表例である de Ris のモデルで計算した燃え拡がり速度は、実験値よりかなり低い値となっている。これは、de Ris のモデルが固相の熱輸送を考慮しておらず、火炎からの熱が気相を通して予熱領域に輸送されるというメカニズムを取っていることに起因する。そのため、予熱領域に輸送される熱量を過小評価しており、結果的に低い燃え拡がり速度が導かれている。図 6 の結果を見れば、構築したモデルは妥当のように思えるが、上記で述べたように当モデルは 0 deg. の場合である点、そして火炎長さ L_f は実験値を採用して点など、まだ改善すべき点が多い。そのため、火炎長さ L_f のモデル化、そして炭素繊維配合角度がある場合へのモデルの拡張が今後の課題であり、引き続きこれらの課題の解決に向けて取り組んでいく。

[1] J. N. de Ris, Spread of a laminar diffusion flame, Symposium (International) on Combustion, 12 (1969) 241-252.

[2] S. Bhattacharjee, S. Takahashi, K. Wakai, C. P. Paolini, Correlating flame geometry in opposed-flow flame spread over thin fuels, Proceedings of the Combustion Institute, 33 (2011) 2465-2472.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Yoshinari Kobayashi, Kaoru Terashima, Rikiya Oiwa, Misuzu Tokoro, Shuhei Takahashi	4. 巻 38
2. 論文標題 Opposed-flow flame spread over carbon fiber reinforced plastic under variable flow velocity and oxygen concentration: The effect of in-plane thermal isotropy and anisotropy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the Combustion Institute	6. 最初と最後の頁 4857 ~ 4866
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.proci.2020.06.380	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4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Yoshinari Kobayashi, Kaoru Terashima, Rikiya Oiwa, Misuzu Tokoro, Shuhei Takahashi
2. 発表標題 Opposed-flow flame spread over carbon fiber reinforced plastic under variable flow velocity and oxygen concentration: The effect of in-plane thermal isotropy and anisotropy
3. 学会等名 38th International Symposium on Combustion (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大岩力哉, 所美鈴, 小林芳成, 高橋周平
2. 発表標題 炭素繊維強化プラスチックCFRPの燃え拡がり挙動のモデル化
3. 学会等名 熱工学コンファレンス2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林芳成, 寺嶋薫, 大岩力哉, 所美鈴, 高橋周平
2. 発表標題 炭素繊維強化プラスチックCFRPの燃え拡がり ー炭素繊維配合方向が燃え拡がり挙動に及ぼす影響ー
3. 学会等名 第57回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 寺嶋薫, 大岩力哉, 所美鈴, 小林芳成, 高橋周平
2. 発表標題 固体平板材料の異方性が限界酸素濃度に及ぼす影響
3. 学会等名 第57回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2019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
研究協力者	高橋 周平 (Takahashi Shuhei)	岐阜大学・工学部・教授 (13701)	

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