

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：13701

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K14093

研究課題名（和文）炭素繊維強化プラスチックCFRP燃え拡がりモデルの高精度化

研究課題名（英文）Improving the CFRP flame-spread model

研究代表者

小林 芳成（KOBAYASHI, Yoshinari）

岐阜大学・工学部・准教授

研究者番号：00827016

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、研究代表者がこれまでに構築した炭素繊維強化プラスチック（CFRP）の燃え拡がりモデルを改良し、燃え拡がり限界を意味する限界酸素濃度（LOC）を定量的に予測することに挑戦した。具体的には、炭素繊維配合方向による固相内の熱輸送の違いをモデル化し、火炎高さが対向流速の増加と共に消炎距離に漸近するようモデル式を改良した。これにより、様々な対向流速における燃え拡がり速度を定量的に予測できるようになった。さらに、当燃え拡がりモデルに対してスケール解析を行い、LOCを解析的に導く方程式を導出した。その式からCFRPのLOCを求めたところ、実験値と定性的に一致する値が得られた。

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、学術的には燃焼科学、とりわけ固体材料上の火炎の燃え拡がりを理解するのに役立つ。従来の固体材料の燃え拡がり研究は、炭素繊維強化プラスチック（CFRP）のような炭素繊維配合方向によって異方性をもち、高熱伝導な材料を対象として来なかった。そのため、本研究は燃え拡がり研究の裾野を広げ、燃焼科学を深化させる。一方実用的には、CFRPをはじめとする複合材料や高熱伝導材料の燃焼性評価に貢献することが期待できる。CFRPは軽量・高剛性という特徴から航空宇宙産業など多くの分野で利用されているため、そのような業界・分野において製品の火災安全性評価に役立てられることが想定される。

研究成果の概要（英文）：This work improved the flame-spread model of carbon-fiber-reinforced plastics (CFRPs) developed by the principal investigator in past studies and attempted to quantitatively estimate the limiting oxygen concentration (LOC), i.e., the flame-spread limit. Specifically, the difference in solid-phase heat transfer according to the orientation of carbon fibers was modeled, and an equation of flame height was modified so that the flame height approached the quenching distance with increased opposed-flow velocity. These improvements allowed the CFRP flame-spread model to quantitatively predict the flame spread rate at different opposed-flow velocities. In addition, a scale analysis was performed for that CFRP flame-spread model, and an equation that analytically derived the LOC was introduced. When the LOC was calculated by substituting the properties of the CFRP to that equation, the theoretical LOC qualitatively agreed with the experimental LOC.

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 限界酸素濃度 燃え拡がり速度

1. 研究開始当初の背景

研究代表者は、本研究の基課題となる科研費・若手研究「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」(19K14906)において、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に取り組んだ。炭素繊維が燃え拡がり方向に配合されている一方方向CFRPを対象に、様々な雰囲気条件(対向流速、酸素濃度)で燃え拡がり試験を行い、燃え拡がり特性を明らかにした。そして、その知見をもとに一方方向CFRPの燃え拡がりモデル(図1)を構築した。更に、当モデルから燃え拡がり速度(V_f)の解析解を導出し、 V_f の理論値を求めた。その理論値と実験値を比較したところ、自然対流下では両者は定量的に一致したが、強制対流下では対向流速(V_g)が増加するにつれ差が大きくなる傾向が見られた。また、同じ式を用いて二方向CFRPの V_f を求めたところ、こちらは自然対流下でもあまり良い一致が見られなかった。そのため、多方向に炭素繊維が配合されたCFRPにも対応し、かつ高 V_g における V_f を定量的に推定するには現在の燃え拡がりモデルを改良しなければならない。

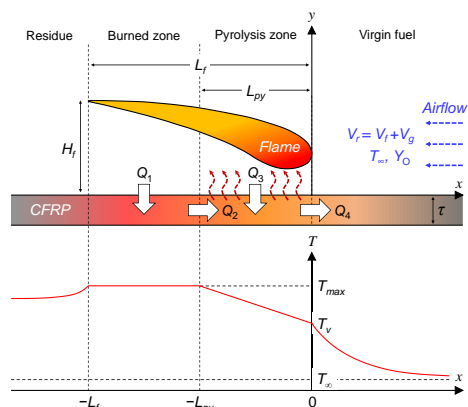


図1 一方方向CFRP燃え拡がりモデル

2. 研究の目的

上記1のような現状があり、本研究では一方方向CFRP燃え拡がりモデルを(1)まずは二方向CFRPにも対応できるようにすること、そして(2)高 V_g 下でも V_f を定量的に予測できるようにすることを目指した。(1)では、炭素繊維が一方方向から二方向に配合されることで生じる固相内の熱輸送の変化を調査し、炭素繊維の配合角度(θ)をパラメータとして炭素繊維配合方向の影響をモデル化した。(2)では、高 V_g でのCFRPの燃え拡がり挙動を精査し、燃え拡がりモデルに含まれる火炎に関するモデル式が火炎挙動を正しく表すように改良した。

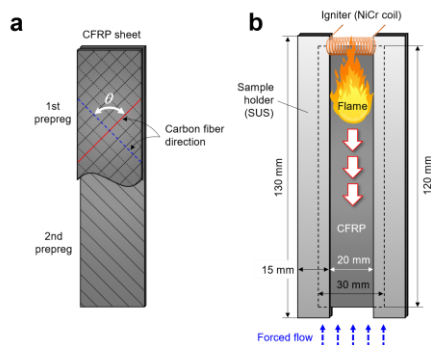


図2 (a) 二方向CFRPシート, (b) 対向流燃え拡がり試験

3. 研究の方法

実験としては、2枚の一方方向炭素繊維シート(日本グラファイトファイバー社製, NT91500-525S)を燃え拡がり方向に対して対称となるように交差させて積層し、図2に示すような二方向CFRPシートを作成した。この時の交差角度が θ に相当する。その二方向CFRPシートを風洞(図3)内に垂直に設置して上部を点火し、火炎が強制対流に対向しながら下方に向かって燃え拡がるように試験を行った。なお、対向流燃え拡がりとしたのは、並行流に比べて燃え拡がり挙動が定常状態になり易く、解析が容易であるためである。 V_g は風洞上部に設置した吸い込み式DCファンの印加電圧を変更することで調整可能であり、酸素濃度についてはこの風洞をグローブボックス内に設置し、そのボックス内の酸素濃度を変更することで調整した。以上のようなセットアップのもと、 θ 、 V_g 、酸素濃度の3つをパラメータとして、広範な条件におけるCFRPの燃え拡がりデータを取得した。燃え拡がり試験中は、可視カメラで火炎の燃え拡がり挙動を、赤外線カメラでCFRPの表面温度分布を記録しており、それらから V_f などの特性値を算出した。そして、そのデータと理論をもとに、前節2(1)のモデル化および(2)のモデル式の改良を行った。

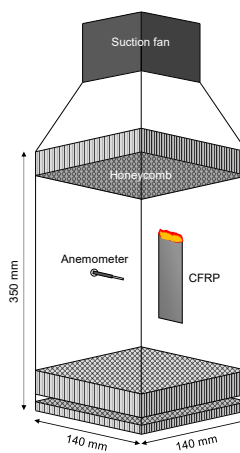


図3 燃え拡がり試験用風洞

4. 研究成果

(1) CFRP の燃え広がり挙動および表面温度分布

図4に燃え広がり時の火炎および表面温度分布のスナップショットを示す。火炎後方を見ると、炭素繊維が完全に燃え切らずに残渣として残っているのが分かる。つまり、炭素繊維シートに含浸していたエポキシ樹脂のみが熱分解されて燃料蒸気となり、炭素繊維は伝導体として機能していることが考えられる。火炎前方の大きな予熱領域は、正に高熱伝導炭素繊維によって熱が火炎前方に輸送されていることを示している。通常、アクリル樹脂 (PMMA) のようなポリマーでは熱伝導率が非常に低いため、このように巨大な予熱領域は観察されない。そのため、これはCFRPの燃え広がりにおける特徴の一つといえる。

図4aは、 θ による影響を示している。 θ が増加するにつれ、予熱領域が縮小しているのが分かる。これは恐らく、燃え広がり方向と垂直な横方向への熱輸送が増えたため、火炎前方への熱輸送量が低下し、結果として予熱領域サイズが小さくなったものと考えられる。図4bは、 V_g の影響を示している。 θ を増加させた時のように、 V_g の増加と共に予熱領域は小さくなっている。高 V_g では火炎が伸び、更に火炎とCFRPとの距離が近づくため、火炎からの入熱量は増加する。それにより燃え広がりが加速され、 V_f は上昇する。一次元の熱伝導方程式を解くと、予熱領域の長さは V_f に反比例することが理論的に求まるため、結果として高 $V_g \Rightarrow$ 高 $V_f \Rightarrow$ 予熱領域の縮小という因果関係が分かる。最後に、図4cに酸素濃度の影響を示す。酸素濃度に比例して火炎温度 (T_f) が上昇するため、それにより V_f も上昇する。この場合、 V_g の影響と同様に考察をすることができ、高酸素濃度 \Rightarrow 高 $T_f \Rightarrow$ 高 $V_f \Rightarrow$ 予熱領域の縮小という結論が導かれる。

(2) 燃え広がり速度

可視カメラの動画を解析して火炎の先端をトラッキングすることにより、 V_f を算出した。図5に V_g を横軸とした V_f を θ および酸素濃度毎にプロットしたグラフを示す。いずれの θ および酸素濃度においても、 V_f は V_g に比例して増加している。これは上記(1)で述べたように、高 V_g では火炎が伸ばりCFRP表面に接近することで火炎からの入熱量が増加したことに起因する。一方で、 V_g の増加は対流熱損失の増加をもたらす。対流熱損失が入熱量の増加よりも勝る場合に V_f は低下するが、図5の結果を見る限りでは入熱量の増加による効果の方が顕著であるといえる。このように V_g によって V_f が変化するのは、CFRP特有のものである。本研究で用いたCFRPは熱的に薄いものであるが、その場合 V_f は V_g に依らないことが理論的に示されている。したがって、この特異性は熱分解せずに伝導体として働いている炭素繊維の存在によって生じていると考えられる。 θ の影響を明確にするため、図6に V_g および θ をパラメータとした酸素濃度60%における V_f を示す。全 V_g において $\theta=0$ deg.の V_f が最も高く、 $\theta=30$ deg.の V_f が最も低い。これまで説明してきたように、燃え広がりを駆動する火炎前方への熱輸送量が θ の増加と共に低下することが主な要因となって V_f が低下したと考えられる。通常、 V_f は固体材料の固有値であり、雰囲気条件によって一意に定まる。しかし、CFRPの場合は θ によって V_f が異なるため、同じ組成であっても θ が異なれば違う材料として扱う必要があるといえる。

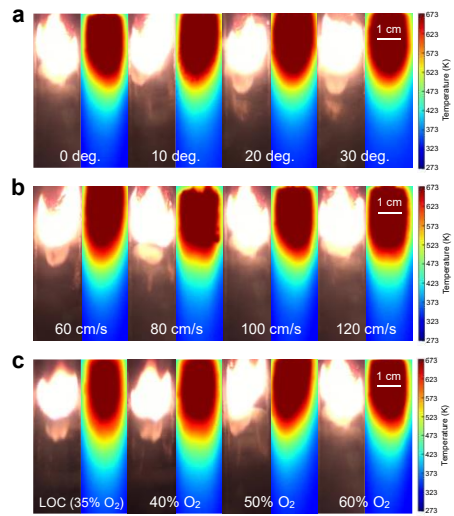


図4 CFRP上の火炎の燃え広がり挙動および表面温度分布

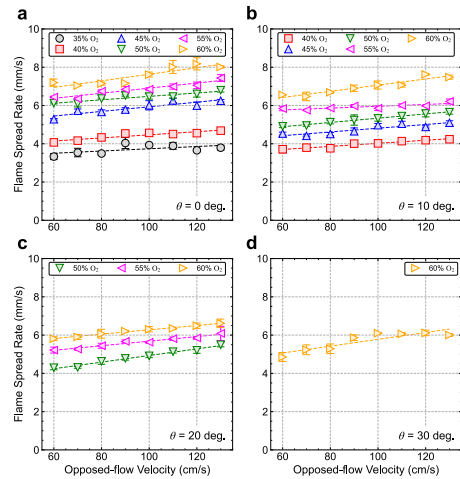


図5 燃え広がり速度における対向流速の影響

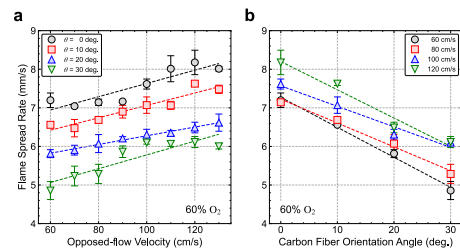


図6 燃え広がり速度における炭素繊維配合角度の影響

(3) 炭素繊維配合方向による固相内の熱輸送のモデル化

θ によって燃え拡がり方向への正味の熱輸送量に変化するという仮説に立ち、表面温度分布のデータをもとに θ 毎の燃え拡がり方向の熱伝導率—有効熱伝導率 (λ_{eff})—を導出した (図7). その結果, $\lambda_{eff} = \lambda_0 \cos(\theta/2)$ (ここで, λ_0 は $\theta=0 \text{ deg.}$ のときの熱伝導率) という関係式が得られた. つまり, 燃え拡がり方向へは $\cos(\theta/2)$ 倍された熱量が輸送され, $\sin(\theta/2)$ 倍の熱量が燃え拡がりとは関係のない横方向へ輸送され消失することになる. なお, この関係性は図2aを参照して幾何的にも確認することができる. この λ_{eff} を一方向 CFRP の燃え拡がりモデルに適用することで, 二方向 CFRP まで燃え拡がりモデルの適用範囲を拡張することができると思われる.

(4) 火炎高さのモデル式改良

一方向 CFRP 燃え拡がりモデルに上記(3)の λ_{eff} を導入し, 二方向 CFRP にも対応可能としたモデルを用いて V_f の理論値を算出した. そして, それと本研究の燃え拡がり試験で得られた V_f を比較した結果を図8に示す. 本研究の基課題でも見られたように, V_g が増加するにつれ, 理論値と実験値の差が大きくなっていく結果となった. 理論値の方が高くなっていることから, 火炎からの入熱量を実際よりも過大評価してしまっていると推察された. そこで, 入熱量を決める因子を見直したところ, 火炎高さ (H_f) を表すモデル式が原因ではないかという結論に至った. 火炎と CFRP 表面との距離を指す H_f は, これまで以下のようなモデルを採用してきた.

$$H_f = \frac{1}{5} \frac{1}{Y_O} \frac{T_f - T_v}{T_v - T_\infty} \frac{\alpha_g}{V_g}$$

このモデルの不備は, V_g を限りなく大きく ($V_g \rightarrow \infty$) した時, H_f が0に収束してしまう点である. これはつまり, 火炎が CFRP 表面に貼りつくことを意味している. しかし, 実際の燃え拡がりではそのようなことは起きず, 火炎は消炎距離以上に近づけないはずである. そこで, H_f がある値に漸近するよう実験データをもとに上式を改良した. それが以下のモデル式である.

$$H_f = \frac{1}{5} \frac{1}{Y_O} \frac{T_f - T_v}{T_v - T_\infty} \alpha_g \left(0.41 \times \frac{1}{V_g} + 1.79 \right)$$

当モデルが $V_g \rightarrow \infty$ のときに収束する値が消炎距離に近い値となっているのか検証したのが図9である. なお, 図9ではエポキシ樹脂の熱分解ガスの主成分がメタンであることより, メタン—空気混合気の消炎距離を比較対象としている. 両者のオーダーが合っていることから, 改良した H_f モデルは有効であると考えた. この新しい H_f モデルを古いものと置き換えて再度 V_f の理論値を計算し, 実験値と比較した結果が図10である. 本研究で得られた強制対流下における V_f をもとに H_f のモデル式を修正しているため, 理論値と実験値が一致するのは当然である. それでは真の検証にはならないため, 当モデルで自然対流下 ($V_g \sim 35 \text{ cm/s}$) における V_f の理論値を算出し, 過去に取得した実験値と比較を行った. その比結果が図11である. 自然対流下でも両者は概ねよく一致しているといえる. これらの結果より, 上記の H_f 式により過大な入熱量が是正され, 実験値に近い V_f が算出されるようになったといえる. したがって, この H_f 式を採用することで, 低 V_g から高 V_g に至る広い流速域における V_f を推算することが可能になる.

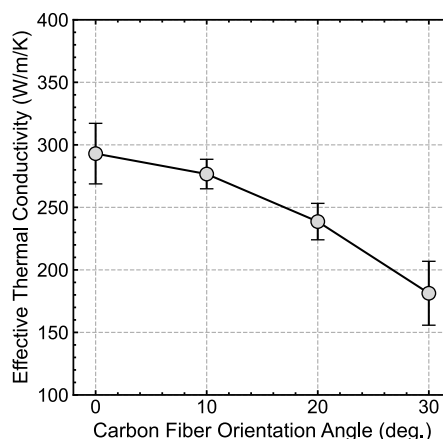


図7 炭素繊維配合角度ごとの有効熱伝導率

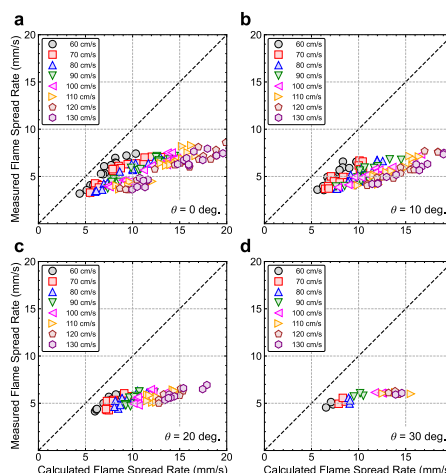


図8 強制対流下における燃え拡がり速度の理論値と実験値の比較 (火炎高さのモデル式修正前)

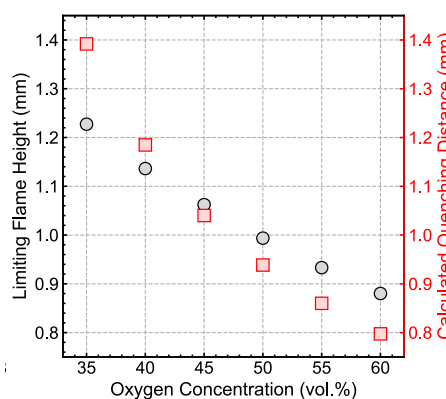


図9 火炎高さの極限值と (メタン—空気混合気) 消炎距離の比較

それでは真の検証にはならないため, 当モデルで自然対流下 ($V_g \sim 35 \text{ cm/s}$) における V_f の理論値を算出し, 過去に取得した実験値と比較を行った. その比結果が図11である. 自然対流下でも両者は概ねよく一致しているといえる. これらの結果より, 上記の H_f 式により過大な入熱量が是正され, 実験値に近い V_f が算出されるようになったといえる. したがって, この H_f 式を採用することで, 低 V_g から高 V_g に至る広い流速域における V_f を推算することが可能になる.

以上、本研究は上記（１）～（４）の成果により、基課題で構築した一方向 CFRP 燃え拡がりモデルを二方向 CFRP にも対応させると共に、広い速度域における V_f を定量的に予測できるようになった。但し、当燃え拡がりモデル中の火炎長さに至っては、未だモデル化できておらず実験値を採用している。そのため、現状でも CFRP 燃え拡がりモデルは完全な物理モデルとはなっていない。その点については今後の課題として、引き続き CFRP の燃え拡がり研究に取り組み、燃え拡がりモデルを完成させたいと思う。

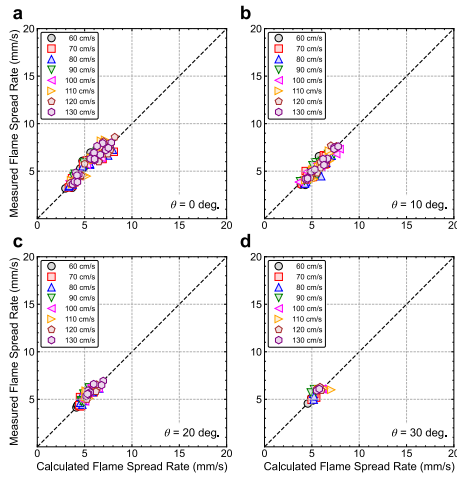


図 10 強制対流下における燃え拡がり速度の理論値と実験値の比較（火炎高さのモデル式修正後）

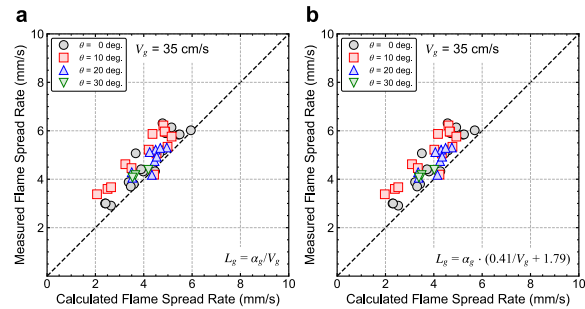


図 11 自然対流下における燃え拡がり速度の理論値と実験値の比較（火炎高さのモデル式修正後）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2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, Keisuke Matsumoto, Naoki Matsukawa, Shuhei Takahashi	4. 巻 39
2. 論文標題 Opposed-flow flame spread over carbon fiber reinforced plastic with different carbon fiber orientations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the Combustion Institute	6. 最初と最後の頁 3899 ~ 3907
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.proci.2022.08.131	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 Yoshinari Kobayashi, Naoki Matsukawa, Keisuke Matsumoto, Shuhei Takahashi	4. 巻 39
2. 論文標題 Theoretically predicting the flame-spread limit of carbon-fiber-reinforced plastic	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the Combustion Institute	6. 最初と最後の頁 4135 ~ 4143
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.proci.2022.07.130	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7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Yoshinari Kobayashi, Keisuke Matsumoto, Naoki Matsukawa, Shuhei Takahashi
2. 発表標題 Opposed-flow flame spread over carbon fiber reinforced plastic with different carbon fiber orientations
3. 学会等名 39th International Symposium on Combustion (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshinari Kobayashi, Naoki Matsukawa, Keisuke Matsumoto, Shuhei Takahashi
2. 発表標題 Theoretically predicting the flame spread limit of carbon fiber reinforced plastic
3. 学会等名 39th International Symposium on Combustion (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡村 康希, 松川 直生, 松本 圭佑, 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の対向流燃え拡がりにおける非燃焼部の熱的影響
3. 学会等名 日本マイクログラビティ応用学会 第34回学術講演会 (JASMAC-34)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松川 直生, 松本 圭佑, 岡村 康希, 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の燃え拡がり限界の理論的予測
3. 学会等名 第60回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松本 圭佑, 松川 直生, 小林 芳成, 中谷 辰爾, 高橋 周平, 津江 光洋
2. 発表標題 過重力環境下における熱的に薄いPMMAシートの下方向燃え拡がり
3. 学会等名 第60回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松川 直生, 松本 圭佑, 小林 芳成, 高橋 周平
2. 発表標題 炭素繊維配合方向の異なる炭素繊維強化プラスチックの下方向燃え拡がり挙動
3. 学会等名 日本マイクログラビティ応用学会 第33回学術講演会 (JASMAC-33)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本 圭佑, 松川 直生, 小林 芳成, 高橋 周平
2. 発表標題 対向流速中に置かれたCFRPの火炎伝播挙動に及ぼす炭素繊維配合方向の影響
3. 学会等名 第59回燃焼シンポジウム
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