

令和 5 年 5 月 24 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02397

研究課題名（和文）低圧場を活用した熔融プラスチックの燃焼特性に対する新規評価法の提案と検証

研究課題名（英文）Novel evaluation methodology of burning character of thermoplastic material using low pressure

研究代表者

中村 祐二（NAKAMURA, YUJI）

豊橋技術科学大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：50303657

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：数値計算により燃焼流のポリマー流動が燃焼過程に大きく影響を与えることを明らかにした。その効果を排除すべく、グラスホフ数近似を活用により一次元燃焼を低圧場で再現させる手法を開発・改良した。燃焼中の温度計測（試料内部温度および気相の温度）を通じて質の高いB定数の取得が可能となった。燃焼データは既存の微小重力場を用いた一次元燃焼場のそれに近づくことを確認したが、既存の微小重力実験データは限られて試料のデータしか存在しないため、独自開発による微小重力実験を実施した（落下塔：コスモトールを使用）。これまで気泡形成抑制に効果的であったシェル構造試料でも気泡の破裂が確認され、気泡形成の解明が課題として残る。

研究成果の学術的意義や社会的意義

熔融とガス化を含めたプラスチックの非定常流動問題を数値的に解く手法の開発を行い、熔融挙動により着火タイミングが大きく影響を受けることを明らかにした。また3D観測可能な可視化法の開発により、流動が燃え拡がり現象にも影響することがわかった。そのような流動効果を抑制させるべく、グラスホフ数近似を用いて煤と無関係な熱可塑性高分子（プラスチック）の一次元燃焼特性を得る方法論を提供した。この提案は、燃焼問題で課題となる次元を落とす「簡略化」に役立つという学術的意義をもたらすだけでなく、プラスチックの燃焼性評価の精度向上に資するものであり、将来的には燃焼特性の標準化に資するものとなり得る。

研究成果の概要（英文）：With direct numerical simulation of melting/gasification model of thermoplastic polymers, it was clearly shown that the dynamics of molten matter largely alter the combustion character (ignition etc). To avoid such dynamical effect and bubble bursting, shell-structured 1-D spherical combustion system over a polymer in low pressure has been developed. With detail temperature measurement, it is understood that modified transfer number (B-number) is measured in satisfactory level of accuracy. In fact the burning character is quite similar to what has been reported with microgravity (1-D) test results. In order to compare in a precise manner, microgravity combustion chamber to perform droptower test is developed. Through the microgravity experiments, it was notified that d-square law is satisfactory presented, however, bubble bursting is found to fail to suppress even the shall-structure is employed. Precise understating of bubble formation/bursting is seriously required.

研究分野：火災

キーワード：熱可塑性樹脂 燃焼 火災 熔融 突沸 移動数 燃焼特性

1. 研究開始当初の背景

熱可塑性プラスチックは加工が容易で、軽重量でありながら高強度、化学的・物理的に安定などの優れた特徴を有する。その一方で LOI (限界酸素指数) が低い可燃物であることから、その火災安全性が常に問題となる。そのため、正確な燃焼特性の把握は極めて重要であるにも関わらず、現状はそれが出来ていないと言っても過言ではない。

プラスチックが加熱されると「ガラス転移温度 (~400K)」を超えて軟化し、表面に熔融相を形成する。熔融部がさらに加熱されると熔融層内にて熱分解反応によるガス化が起こり、気相に放出された熱分解ガスが周囲の酸素と混合して燃焼に至る。この一連の燃焼過程において以下2つの複雑化要因をもたらす物理過程が内在していることがわかる。

- ・流動化：プラスチックの熱分解温度 (~800K) とガラス転移温度 (~400K) には大きな隔たりがあるため、大量に形成された高温熔融相が自重により滴下し、ガス化面積が増えて燃焼加速をもたらす。時間の経過とともに火炎高さが伸びていく。
- ・気泡破裂：熔融層内部で頻繁に起こる熱分解反応によって生じた分解ガスは気泡となって表面に達して、熱分解ガスを放出する際に突沸現象を呈する。このとき、熔融層の一部が微小液滴となって周囲に飛散し、燃焼場を変化させる。

現状、我々が計測している燃焼特性とは、上記2点の影響をそのまま含む。ところが「それらの効果は燃焼特性に影響する」にも関わらず、「それぞれの効果が現象にもたらす程度は全くわかっていない」。そのため、熱可塑性プラスチックの燃焼性の評価法は多数存在するが、その種類毎に判定される燃焼性に大きな差が認められる。この事実は、物質固有であるはずの燃焼特性が既存の評価法で正しく評価できないことを意味する。この問題を解決するには、それらの効果を排除した燃焼状態を実現して燃焼特性を調べる必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は上記の課題解決にある。すなわち、①熔融滴下の影響を排除できるような燃焼場を用いて、②突沸影響のない燃焼を実現させた上で試験体毎の燃焼性評価を行う方法論の確立・検証を行う。ここで確立される状態はいわば「標準状態」であり、燃焼性評価の基本形となり得るものである (本研究の学術的インパクト)。本研究を通じて、これまで曖昧であった固体材料の燃焼性評価の基準化に発展し得る (本研究の波及効果)

3. 研究の方法

本研究では、学術的「問い」で挙げた課題①②を解決するため、次の2つの方法を提案する。すなわち、①試験場として液滴燃焼のような一次元燃焼場 (球状火炎) を実現させ、②突沸を抑制するために燃焼試料量 (厚み) を制限する (下図参照) という方法である。

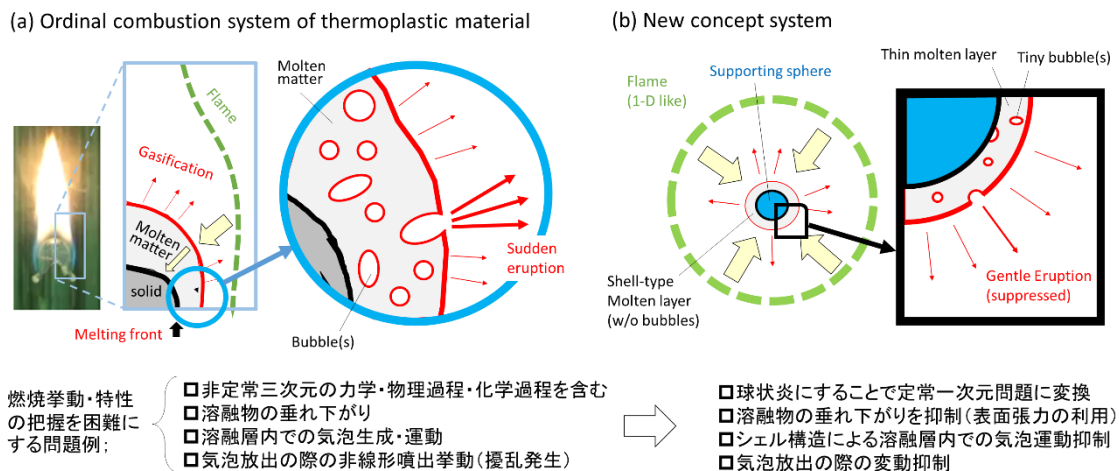


図3-1 熔融流動・突沸を抑制した一次元燃焼場の概念図 (左：従来法, 右：本提案手法)

地上場では浮力による流れにより一次元燃焼は実現しにくいいため、通常、微小重力場での燃焼実験が行われる。本研究はこれに対して、燃焼の相似則に基づく実験を行う。すなわち、低圧下の低 Gr 数場で、浮力の影響が無視できる一次元燃焼場 (球状火炎) を実現する。しかし、ただ球状火炎にするだけでは不足である。なぜなら、試料径がミリオーダーになると、微小重力実験でも突沸が確認されるからである (NIST-IR)。そのため試料と類似の熱容量・熱伝導特性を持つ支持球周りに熔融試料を「薄肉シェル状に配置」して、突沸発生そのものを抑制する。この概念は、

低圧燃焼と高分子燃焼に豊富な知見を有する申請者独自のものであり、他に例を見ない。当該コンセプトのうち、低圧場活用の有効性については先行試験により確認済である。図3-2はPMMAを試料としたときの微小重力実験結果(左:NIST-IRより引用)と低圧場での実験結果(右)を比較して示している。低圧場を導入することでほぼ球状の火炎が達成されるのみでなく、その燃焼特性(例:燃焼速度)は微小重力場を用いた既存研究の結果をほぼ再現できる(Migita et al., Fire Tech. in print)。この先行研究の方法論の拡張に加えて、薄肉シェル構造に必要な条件検討ならびに比較検証データを加えることで、本燃焼試験の標準化が可能となる「固体材料の燃焼性評価の標準状態の確立」を目指す。実施課題を以下にまとめる。

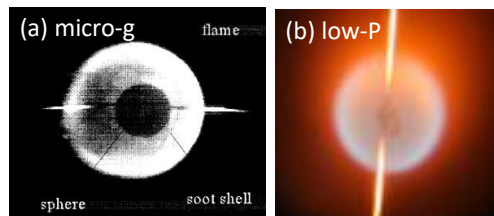


図3-2 ポリマー球による一次元燃焼場
(a)NISTによる微小重力場でのPMMA燃焼例
(b)低圧場での燃焼試験結果(試料:PMMA)

「固体材料の燃焼性評価の標準状態の確立」を目指す。実施課題を以下にまとめる。

- 課題1 低圧場を用いた一次元燃焼場の再現実験の高度化(薄肉溶融シェル構造の有効性の確認等)
- 課題2 微小重力実験用の試験システム開発・実験実施(比較可能なデータ取得)
- 課題3 直接数値シミュレーションモデルによる溶融誘導が燃焼特性(着火・燃え広がり)に与える影響評価

4. 研究成果

(A) 直接数値モデル開発(溶融流動が着火・燃え広がりを与える影響評価)

数値計算により溶融部の再固化が溶融部「だまり」を作りだし、流動により加熱部から逃げた溶融可燃物の流動を抑制して自発着火を誘発するという、流動ダイナミクスが燃焼現象に与える影響評価に利用可能であることを示した。現状、三次元的な流動現象の解析は難しいものの、溶融による流動が燃焼場の形成および継続に大きく影響を与え得ることを示すことができた(図4-1)。

溶融物の形状をCTの技術を応用して得る方法により角部の燃焼進行が時間と共に緩和する現象に対してダムケラー数を用いた考え方で整理されることを示すことができた。もちろん溶融部の変形が燃焼場を準定常的に変化させ得ることを実験的に示すことにも成功しており、本観測手法が熱可塑性ポリマー燃焼機構の解明を支える基幹技術として提供できることを確信している。

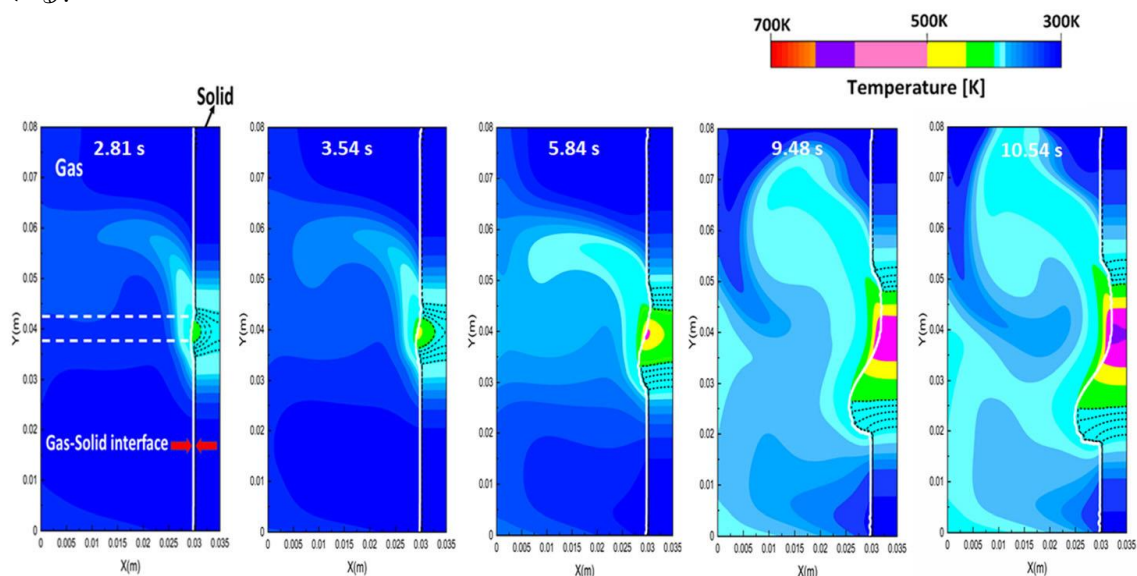


図4-1 垂直に配置したPMMA板の局所加熱着火前の時系列変化の一例^[1]

(B) 低圧場を用いた一次元燃焼場の再現実験の高度化(薄肉溶融シェル構造の有効性の確認)

低圧燃焼場における火炎温度および試料温度を計測する実験システムを構築した。加熱により試料を支持球周囲に均一に覆うことが必要であるが、条件によっては偏るなどが散見されたため、加熱機構部分の更新を行い、均一な加熱を実現できるようにした。その結果、当初よりは改善されたものの、まだ改善の余地があることがわかった。特にPPなどの激しく溶融部が垂れ下がる場合でも安定した燃焼場を達成できるような試料支持部の検討を試行錯誤することで行い、垂れ落ちを小さな壁を作ることで防ぐことが有効であること(図4-2)、そのような状況でもd2則は成立することを示した。

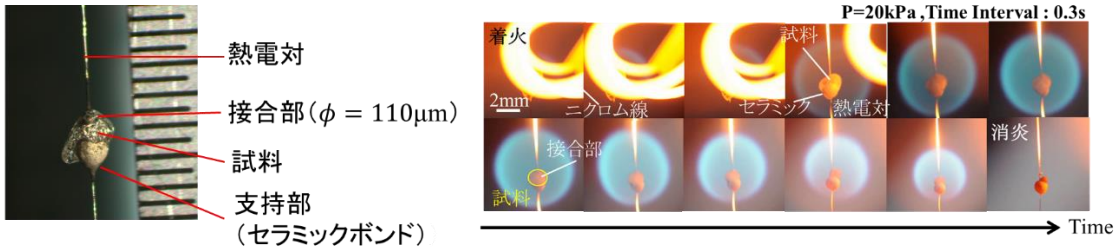


図 4-2 試料をセラミック球で支持した場合の低圧場における一次元燃焼^[2]

様々なサイズの支持球を検討することによって最適な試験条件を抽出し、再現性の高い試験を行うべく継続検討をしている。この検証のため、熔融物の流動性の低い試料 (PMMA) と高い試料 (PP) の 2 種類での燃焼試験を実施した。PP の場合、支持球からのずり落ちが頻りに観察されることがわかった。この結果は、試料によって最適な支持球にしておく必要があることを示唆している。火炎温度計測を行うことで、低圧化に伴う燃焼温度の低下がどの圧力値から生じるのかを実験的に明確にし、火炎形状が真球を示しつつ火炎温度が低下しないウィンドウ (最適実験領域) が存在することを明らかにした (図 4-3)。この条件範囲で得られた燃焼速度は、過去に報告されている NIST による微小重力実験の結果とよく合致することを確認した。

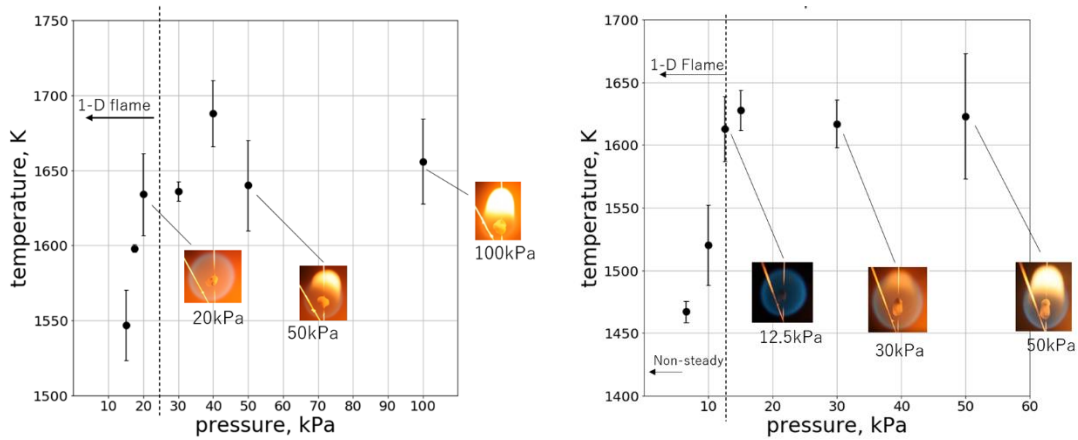


図 4-3 熱電対による火炎温度の圧力依存性 (左: PMMA, 右: PP) ^[3]

燃焼時の発生煤計測とそれによる燃焼特性への影響評価については煤が大量に発生する PP と PMMA の結果を比較することで煤影響評価モデルを構築した。ただし、このモデルを構築する上で幾つかの仮定を含むため、現状では汎用性に乏しい。PMMA や PP 以外の試料での検討を重ねることでモデル精度が高まるものと考えられる。本件については今後の課題とする。

(C) 微小重力実験用の試験システム開発・実験実施・比較可能なデータ取得

低圧燃焼場が一次元燃焼場であることを実証するため、ポリマー球の微小重力実験データを得ることが必須である。これまでの準備期間を経て、本年度は装置開発のための検討・試作ならびに赤平市にある落下塔 (コスモトール) での実施を行った。落下実験には内カプセルラックに収まるような装置デザインを行い、全てのデバイスを自動的に稼働させることと、制動時の (上向きの) 過重力に対して装置が健全性を保つような工夫を加える必要がある。微小重力実験のノウハウについては広島大の金准教授、岐阜大の小林准教授等から情報収集などを行い対処した。

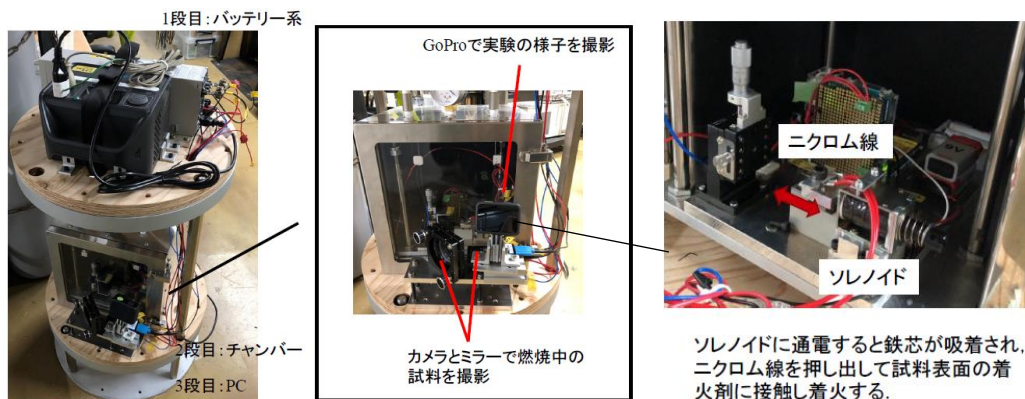


図 4-4 開発した微小重力実験システム (未発表)

落下実験は2023年1月に実施した。結果として、1-2mm直径の試料（今回は基準試料であるPMMAのみで実施）を用いても、微小重力実験では煤の堆積・破裂が顕著に観察され、低圧場で得られる「安定した青炎」とは煤生成による影響分が異なる。そのため、燃焼特性自体も完全一致はしないと予想されたが、計測結果によれば、1割程度の燃焼速度定数の違いで収まった。

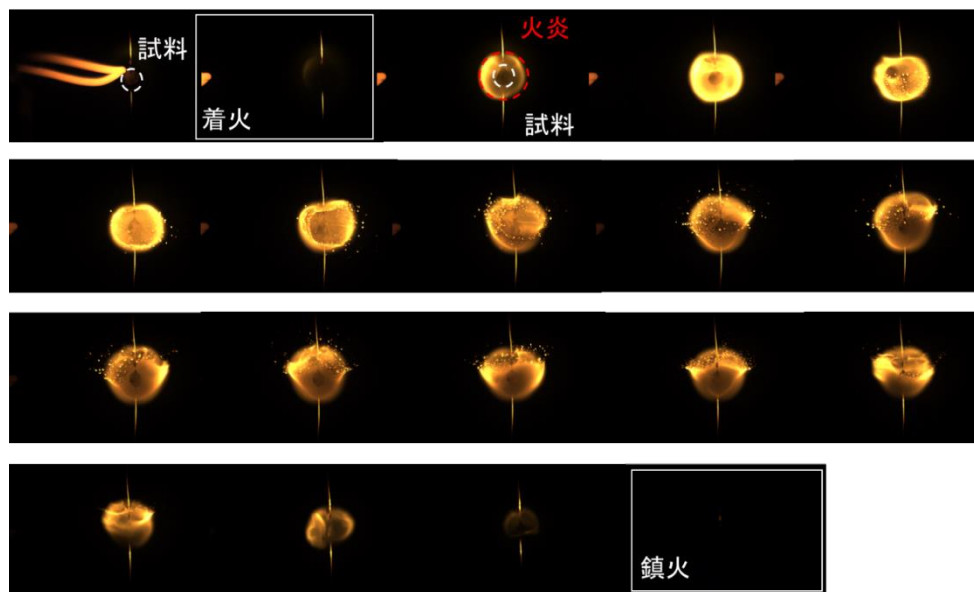


図4-5 微小重力場におけるPMMA球の燃焼過程の一例（実験結果）

上記結果から移動数（B定数）を求める際、内部気泡生成による見かけ密度の計測が必要であるため、別シリーズで内部気泡の形成に関する基礎実験を実施した。以前の試みでは加熱条件を幅広に変化できなかったこと、計測精度が高くなく結果の整理に曖昧さが残るなどの課題があったため、実験デザインを一新し、理論値との検証を含めて実験データの精度向上を担保した。その結果、気泡発生は試料温度で決めるわけではなく、加熱速度や温度分布などにも依存するという新しい知見を得た（図4-6）[4]。このことは加熱の仕方によって気泡初生を左右するメカニズムが内在していることを示唆する。このモデル化を行うことで加熱試料内部に形成される気泡量が想定可能となり、移動数の特定のための見かけ密度を求めることが可能となることがわかった。

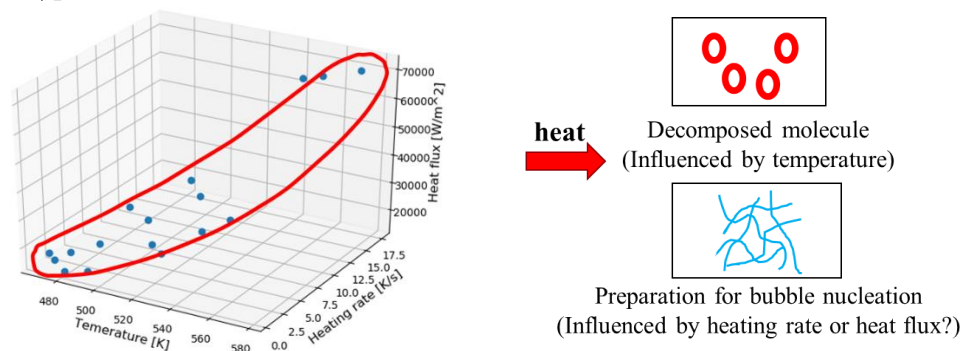


図4-6 気泡形成時の熱条件の整理と気泡形成メカニズム（案）[4]

参考文献

- [1] Singh, S., and Nakamura, Y., "A Numerical Study of Dripping on the Ignitability of A Vertically Oriented Thermoplastic Material Locally Heated by An Irradiation Source", Fire Technology, Vol. 58, (2021.5), pp. 75-105, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10694-021-01137-7>.
- [2] 松本瑠海, "低圧場を活用したPMMA燃焼時の熱分解特性評価", 豊橋技術科学大学 卒業論文(2021.3)
- [3] 長津縁, "低圧力場を用いた熱可塑性樹脂の燃焼特性評価", 豊橋技術科学大学 卒業論文(2021.3)
- [4] Nagatsu, E., Yamazaki, T., Matsuoka, T., and Nakamura, Y., "Bubble Nucleation and Bursting in the Heated Molten Polymers", Proc. 14th Asia-Pacific Conference on Combustion (14th ASPACC), Kaohsiung, Taiwan (2023.5), Paper ID 112.

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 Singh, S., and Nakamura, Y.	4. 巻 58
2. 論文標題 A Numerical Study of Dripping on the Ignitability of A Vertically Oriented Thermoplastic Material Locally Heated by An Irradiation Source	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Fire Technology	6. 最初と最後の頁 75-105
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10694-021-01137-7	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8件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Singh, S., and Nakamura, Y.
2. 発表標題 The Effect of Viscosity on Ignition of A Vertically Oriented Polymeric Material subjected to Constant Radiation Heat Flux
3. 学会等名 2nd Asian Conference on Thermal Sciences (2nd ACTS) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本瑠海, 長津 縁, 野崎和希, 右田龍弥, 山畑拓海, 中村祐二
2. 発表標題 相似則を活用した微小重力下での燃焼場の再現
3. 学会等名 日本マイクロ重力応用学会第33回学術講演会 (JASMAC-33) 講演論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村祐二, 右田龍弥, 山畑拓海, 松岡常吉
2. 発表標題 相似則を用いた熱可塑性樹脂の一次元燃焼の再現
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 中村祐二, 右田龍弥, 山畑拓海, 松岡常吉
2. 発表標題 圧力場を活用した熱可塑性樹脂の燃焼特性評価
3. 学会等名 令和2年度日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高木 輝, 松岡常吉, 中村祐二
2. 発表標題 固体の変形過程の可視化による燃焼速度の計測
3. 学会等名 第58回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nakamura, Y
2. 発表標題 Strategy to Fundamental Fire Research in Reduced Gravity
3. 学会等名 SFPE London Webinars, Imperial Collage, London (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nagatsu, E., Yamazaki, T., Matsuoka, T., and Nakamura, Y.
2. 発表標題 Bubble Nucleation and Bursting in the Heated Molten Polymers
3. 学会等名 14th Asia-Pacific Conference on Combustion (14th ASPACC) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Amaryllis Kiwin Wellson, 松本瑠海, Yue Zhang, 山崎拓也, 中村祐二
2. 発表標題 即時着火による熱可塑性樹脂の高精度燃焼速度計測
3. 学会等名 令和5年度日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2023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
研究分担者	松岡 常吉 (MATSUOKA TSUNEYOSHI) (90633040)	豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授 (13904)	可視化実験の主担当

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