

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18775

研究課題名（和文）月、火星を見据えた有人宇宙活動における固体材料火災安全性評価手法の構築

研究課題名（英文）Establishment of solid material fire safety evaluation method for manned space activities on the Moon and Mars

研究代表者

中谷 辰爾（Nakaya, Shinji）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・准教授

研究者番号：00382234

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：月、火星に向けた有人宇宙活動における固体プラスチック材料の火災安全性を評価するため、直径4mmおよび6mmのPMMAロッドに対して燃焼試験を実施した。遠心器に燃焼容器を設置し、過重力環境下において対向流中における火災伝播可能な限界酸素濃度を調べた。また、限界酸素濃度モデルを構築した。ベイズ的アプローチであるマルコフ連鎖モンテカルロ法を用いて、モデルパラメータの評価を行った。結果、過重力下における限界酸素濃度の特性を明らかにした。また、限界近傍ではコリオリ力が無視できることが示された。さらに、月、火星といった部分重力下の限界酸素濃度を予測すると、通常重力や微小重力より小さいことが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、月、火星を含む有人宇宙探査が計画されている。有人宇宙活動における火災安全性はこれまで、地上において評価されているが、燃焼現象が微小重力や部分重力環境下の挙動とは異なり、これらの環境下における火災安全性の評価手法が求められていた。本研究で得られた結果やモデルの評価結果は、これらの環境下における火災安全性評価手法の構築に必要な多くの知見を示したのに加え、通常重力と微小重力での結果と比較すると部分重力環境下において最も火災が起きやすいことを示した。また、ベイズ的手法によりモデルの不確定性を示したことにより、今後の実験の必要性について示すことができ、有人宇宙活動の拡大につながる知見を得た。

研究成果の概要（英文）：In order to evaluate the fire safety of solid plastic materials for manned space activities under partial gravity conditions aiming at the Moon and Mars, combustion experiments were conducted for PMMA rods with diameters of 4 and 6 mm. A combustion vessel was installed in a centrifuge, and the limiting oxygen concentration (LOC) for flammability in opposed-flows under hypergravity environments was investigated. In addition, a LOC model in opposed-flow was developed, considering the energy balance. The model parameters were evaluated using a Bayesian approach: the Markov Chain Monte Carlo method. As a result, we clarified the characteristics of the LOC under hypergravity. It was also shown that the Coriolis force can be negligible near the LOC. Furthermore, predictions of the LOC under partial gravity, such as on the Moon or Mars, showed that it is lower than those in normal gravity and microgravity.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：有人宇宙活動 火災安全性評価 微小重力環境 部分重力環境 浮力 固体燃焼

1. 研究開始当初の背景

有人宇宙活動における宇宙火災安全対策として、材料の燃焼性を特定の試験によって判別し、一定基準を満たしたもののだけを使用することで火災の発生を未然に防ぐ。この材料選定方法として NASA-STD-6001B が挙げられ、これまで宇宙火災安全確保の面で多くの貢献を果たしてきた。一方でこのテストをクリアした材料のみ宇宙での使用が認められる Pass-Fail テストでありコストが非常に高いことや、重力の影響を考慮せず宇宙環境で使用予定の材料を地上環境のみで試験していることなどが課題として挙げられる。微小重力環境下では地上と比べて材料が燃焼しやすい状況があることが近年の研究で明らかになっている。以上より、この選定法が変わる、部材の安全性を定量的に評価した新たな指標を提案することが目指されている。また将来国際宇宙ステーション (ISS) だけでなく月面や火星上でも有人宇宙活動が行われる可能性を考えると、重力を定量的なパラメータとして指標に組み込む必要がある。

新たな安全性基準の指標として消炎限界酸素濃度(Limiting Oxygen Concentration,以降 LOC)が注目されている。LOC とは対向流中において固体の燃料上の火炎が燃え広がるか消炎するかの境界を表す雰囲気酸素濃度のことである。対向流速が速い時には吹き飛び消炎、遅い時には輻射熱損失の影響による消炎が起こるため低流速、高流速領域において LOC はいずれの場合においても高い値を示している。自然体流の影響により LOC の最小値である最低限界酸素濃度(MLOC)は微小重力、部分重力で達成されるため地上試験では宇宙環境における MLOC は得られない。

2. 研究の目的

そこで本研究ではロッド状試料を伝播する対向流火炎のスケール解析を行い、固体材料上の予熱帯における熱バランス式を考えることにより、LOC を予測するモデルを提案する。

また、これまで研究が行われてきた無重力環境下にとどまらず、重力の影響とそれに付随する自然対流速の影響及び試料厚さの影響を考慮することを目指す。モデルの妥当性を確認するために遠心装置を用いて通常重力下、過重力環境の対向流下において直径 4,6mm のキャスト型 polymethyl methacrylate (以降 PMMA) ロッドの燃焼実験を行い、LOC を測定する。

また、本研究では実験データから物理モデルの予測値の不確かさを評価するため、マルコフ連鎖モンテカルロ法(以降 MCMC 法)の一つであるメトロポリス・ヘイスティング法(以降 MH 法)を用い、推定値及びその不確かさを確率的に評価することでマージンを含めたソフトな予測を行う。

3. 研究の方法

3.1. 実験設備

図1に燃焼器の外観図を示す。燃焼器の全長は 300mm、直径 80mm である。窒素と酸素の混合気が燃焼器下部より流入し、上部より排出される。燃焼器下部には径の異なる二種類のビーズ、ハニカム、メッシュ板を設置することで整流を行なった。燃焼器内において層流が実現していることは粒子画像流測定法 (Particle Image Velocimetry) によって確認した。窒素と酸素はマスフローコントローラー (KOFLOC, 8550MC) によりそれらの流量を個別に調整し、実験条件に応じて酸素濃度を 0.5%刻みで、混合器の流速を 5-30 cm/s の間で 5cm/s 刻みで変化させた。

試料には全長 130mm、直径が 4mm と 6mm の二種類のキャスト PMMA ロッドを用いた。試料先端をトーチで着火し試料上での火炎の伝播を確認した後、燃焼器内に取り付けることで外部熱を考慮することのない必要のない対向流火炎を実現した。燃焼の様子を観測するために専用カメラモジュール (Imaging Source, DFK 33UX174) とレンズ (Vs Technology, SV-0614H 6mm) を使用し、コンピュータ (GMK tec, NucBox G2) 上に記録した。なおカメラの解像度は 1920×1080 ピクセル、フレームレートは 30fps である。

図2に遠心装置の外観図を示す。遠心装置の中心にはモーター (T-MOTOR, AK10-9) が取り付けられており、任意の各速度を入力することで燃焼器を回転させることができる。モーターの回

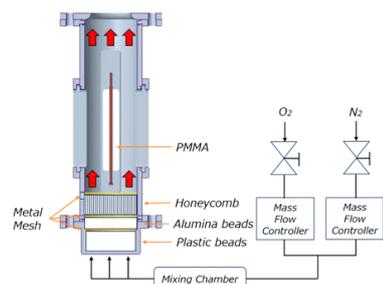


図 1. 燃焼器の外観図

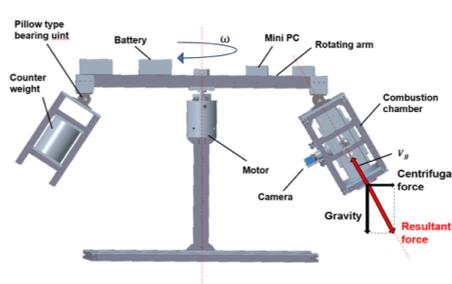


図 2. 遠心装置の外観図

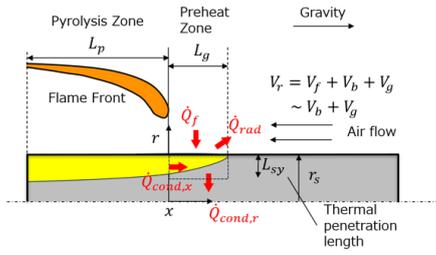


図 3. 固体材料上を伝播する対向流火炎の外観図

rad/s, $4G$ を実現するために必要な角速度 ω_{4G} は 6.44, 5.10 rad/s であった。アームが短い 410mm の方が必要な角速度の値が大きくなるためコリオリ力の影響がより現れやすいと考えられる。

角速度が安定し、火炎が燃焼器中心の上 2cm まで伝播したのち、酸素濃度を条件値に設定した。本研究ではその後火炎が 4cm 伝播した場合を可燃であると定義した。また本研究では可燃である条件の酸素濃度の内、最も低いものを LOC として定義した。

3.2. 対向流火炎の可燃限界予測モデル.

本節では熱的に厚い試料における可燃限界モデルについて述べる。図 3 は対向流速 V_g の中に置かれた試料半径 r_s のロッド型試料上を速度 V_f で伝播する二次元の火炎をモデル化したものである。本モデルにおいては気相、固相の温度場の貫通距離について

$$L_{sx} \approx L_{gx} \approx L_{gy} \approx \frac{\alpha_g}{V_r}$$

という仮定を置いている。ここで α_g , V_r はそれぞれ気相の温度拡散係数、火炎に対する対向流の相対速度である。熱的に薄い試料では温度場の貫通距離と試料厚さ r_s において $L_{sy} \approx r_s$ という仮定が成り立つが、熱的に厚い試料では $L_{sy} < r_s$ であるためこの仮定は適用できないため、半径方向の熱伝導と温度場の貫通距離の再定義を行う必要がある。 $L_{sy} = r_s$ となる臨界厚さは以下のように表される。

$$\tau_{crit} = \frac{1}{C_R} \frac{\lambda_s}{c_p \rho_g V_r} \frac{T_v - T_\infty}{T_f - T_v},$$

$$C_R = \frac{L_g / r_s}{\ln\left(\frac{L_g + r_s}{r_s}\right)} \quad (1)$$

従って本研究では熱的に厚い試料では温度場の貫通距離はこの臨界厚さを超えることはないとして仮定し、 $L_{sy} \approx \tau_{crit}$ とした。

また熱的に厚い試料では固相内部での熱伝導があると考え、軸方向、半径方向についてその大きさを評価する。

以上より予熱帯において熱バランスを考え以下の関係が成り立つと考えた。

$$V_f \rho_s c_s S (T_v - T_\infty) + \int_0^{L_g} 2\pi r_s \varepsilon (1 - \alpha_{abs}) \sigma (T(x, r_s)^4 - T_\infty^4) dx \sim \left(1 - \frac{1}{D_a}\right) \frac{2\pi \lambda_g}{\ln\left(\frac{L_g + r_s}{r_s}\right)} L_g (T_f - T_v)$$

$$- \int_0^{r_s} 2\pi r \lambda_s \left(\frac{dT(x, r)}{dx} \Big|_{x=0} - \frac{dT(x, r)}{dx} \Big|_{x=L_g} \right) dr - \int_0^{L_g} 2\pi \lambda_s \left(\left(r \frac{dT(x, r)}{dr} \Big|_{r=r_s} \right) - \left(r \frac{dT(x, r)}{dr} \Big|_{r=r_s - L_{sy}} \right) \right) dx \quad (2)$$

ここで左辺第一項は固相予熱帯における未燃燃料の予熱量を表し、 V_f , ρ_s , c_s , S , T_v , T_∞ はそれぞれ火炎伝播速度、固相での密度、固相での比熱、固相での断面積、熱分解温度、雰囲気温度を表す。また左辺第二項は固相予熱体表面からのふく射熱損失を表し、 r_s , ε , α_{abs} , σ , はそれぞれ試料半径、表面放射率、気相での吸収係数、ステファンボルツマン係数である。また $T(x, r)$ は固相予熱帯における温度分布であり以下のように与えられる。

$$T(x, r) = T_\infty + (T(0, r) - T_\infty) \exp\left(-\frac{x}{L_g}\right) \quad (3)$$

転は proportional-integral-differential (PID) 制御によって行われた。本研究では $2G$ 及び $4G$ の二つの過重力環境下において実験を行なった。

また、過重力環境下の燃焼器内において発生するコリオリ力が LOC に及ぼす影響を考慮するため、遠心装置のアームとして 410mm, 1000mm の二種類の長さのものを用いた。燃焼器の側面には 6 軸センサ (InvenSense, MPU6050) が取り付けられており、過重力環境を実現する上で必要な角速度を事前に計測した。それぞれのアーム長さにおいて $2G$ を実現するために必要なモーターの角速度 ω_{2G} は 9.15, 7.53

$$T(0, r) \begin{cases} = T_\infty + \frac{T_v - T_\infty}{L_{sy}}(r - r_s + L_{sy}) \\ , & (r \geq r_s - L_{sy}) \\ = T_\infty, & (r < r_s - L_{sy}) \end{cases} \quad (4)$$

右辺第一項は火炎から固相への熱伝導を表し、 D_a 、 λ_g 、 T_f はダムケラー数、気相での熱伝導係数、火炎温度を表す。右辺第二項は固相内部での軸方向の熱伝導を表し、 λ_s は固相での熱伝導係数を表す。右辺第二項、第三項はそれぞれ固相内部の軸方向と半径方向の熱伝導を表す。

次に重力項の影響を考える。本研究では固体材料上を伝播する対向流火炎において火炎に対する流れの相対速度 V_r を以下のように求めた。

$$V_r = V_f + V_g + V_b \sim V_g + V_b, \\ V_b \sim \left[\frac{\alpha_g g (T_f - T_\infty)}{T_v} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

本研究では境界層の影響を考慮し、以下のように実質的な対向流速度を以下のように定義する。

$$V_{r,eff} = \frac{V_r}{P_r^{\frac{1}{2}} R_e^{\frac{1}{4}}} \quad (6)$$

ここでプラントル数は $P_r = \nu_g / \alpha_g$ 、レイノルズ数は $R_{ex} = x_d V_g / \nu_g$ である。 ν_g 、 x_d はそれぞれ気相における動粘性係数、代表長さであり本研究ではロッド下端から最終的に燃え広がった位置までの距離とした。

以上より式(2)を無次元数に置き換えると以下のように表される。

$$\eta + R_{rad} + \frac{1}{D_a} = 1 + \Lambda_{cond,x} + \Lambda_{cond,r} \quad (7)$$

それぞれの無次元数 η 、 R_{rad} 、 D_a 、 $\Lambda_{cond,x}$ 、 $\Lambda_{cond,r}$ それぞれ無次元火炎伝播速度、無次元ふく射熱損失係数、ダムケラー数、無次元軸方向試料内熱伝導係数、無次元半径方向試料内熱伝導係数を表しており、以下の形で表される。

$$D_a \approx \frac{\alpha_g}{V_{r,eff}^2 \rho_g Y_o A \exp\left(-\frac{E}{RT_f}\right)}, \quad (8)$$

$$R_{rad} \approx \frac{\varepsilon(1 - \alpha_{abs})\sigma}{\rho_g c_g V_{r,eff} (T_f - T_v)} \frac{r_s}{L_g^2} \\ \ln\left(\frac{L_g + r_s}{r_s}\right) \int_0^{L_g} (T(x, r_s)^4 - T_\infty^4) dx \quad (9)$$

$$\Lambda_{cond,x} \approx -\frac{1}{6} \left(1 - \frac{1}{e}\right) \frac{\lambda_s T_v - T_\infty}{\lambda_g T_f - T_v} \\ \frac{(-3r_s + L_g)L_{sy}}{L_g^2} \ln\left(\frac{L_g + r_s}{r_s}\right). \quad (10)$$

$$\Lambda_{cond,r} \approx -\left(1 - \frac{1}{e}\right) \frac{\lambda_s T_v - T_\infty}{\lambda_g T_f - T_v} \ln\left(\frac{L_g + r_s}{r_s}\right). \quad (11)$$

火炎が消炎するのは、式(7)の無次元火炎速度 η が0となるときであると考えられる。この時の酸素濃度が可燃限界モデルにより予測されたLOCの値となる。

4. 研究成果

図4にロッド上における火炎の伝播様子を示す。それぞれの条件においてLOCとLOC+1%の二つの酸素濃度に関して火炎を撮影した。LOC付近の酸素濃度では過重力下のいずれの条件に

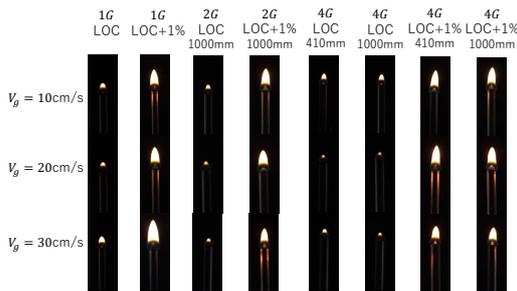


図4. 火炎画像. 酸素濃度はLOC, LOC+1%, 重力は 1, 2, 4G, 対向流速度 V_g は 10, 20, 30cm/s, アームは 410, 1000mm

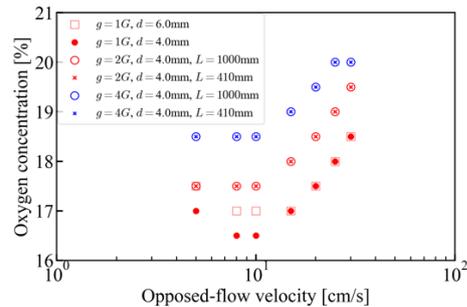


図5. LOCの散布図

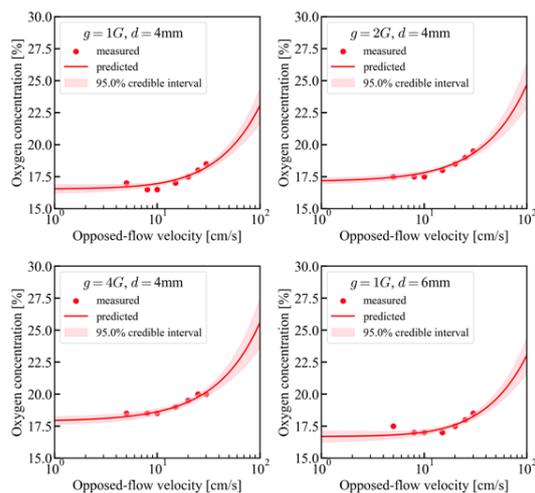


図 6. MCMC-MH 法によって予測された LOC の平均値と 95%信頼区間

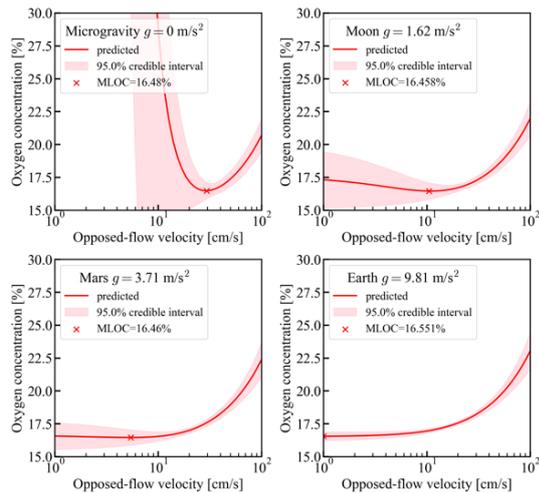


図 7. 微小重力下, 部分重力下 (月, 火星), 地上における LOC の予測曲線および 95% 信頼区間

においても, 重力が $4G$, 強制流速 $V_g = 10 \text{ cm/s}$, 酸素濃度が LOC の時, 火炎はコリオリ力が働く方向に傾いていることが確認された. ところが $V_g = 30 \text{ cm/s}$, 酸素濃度が LOC の時は今回の実験条件の中でコリオリ力の影響が最も強く現れると考えられるアームが 410 mm の時であっても火炎の傾きは確認されなかった. 酸素濃度が LOC+1% の条件でも, 火炎長さは増加したものの, 火炎の傾きは確認されなかった. 燃焼器内を流れる気体は内壁によって囲われているため, コリオリ力の影響を受ける気体が制限される可能性が考えられる. また後述するように, 二つのアーム長さにおいて LOC の値に違いは確認されなかった.

図 5 は $1, 2, 4G$ 各条件における LOC の値をプロットしたものである. 横軸は対数スケールで表示された外部対向流速 V_g であり, 縦軸は各実験において設定した雰囲気酸素濃度である. V_g が増加するにつれ LOC も増加し吹き飛び消炎の影響が強く現れていることが確認された. $1G$ の下では低流速領域において, 試料直径が 6 mm の方が 4 mm と比較して LOC が大きくなった. ロッド状サンプルにおいては径が大きくなるにつれ, 火炎伝播速度が減少することが明らかになっているため, この際輻射熱損失の影響が大きくなったと考えられる.

過重力環境下において LOC はいずれの長さのアームにおいても同じ値を示した. 図 4 より, 酸素濃度が高く, 火炎が長い時, コリオリ力の影響が支配的であることが確認できる一方で, 火炎が小さい LOC 近傍では試料軸方向の自然体流の影響も小さくなっていると考えられる. 従って本研究においてはコリオリ力が LOC に及ぼす影響は極めて小さいと判断した.

続いて, 計測された LOC と MCMC-MH 法を用いて可燃限界予測モデルの評価を行った. 250 万点をサンプリングし, 初期値依存性を考慮して初期 10% のサンプルを棄却した. 図 6 にモデルによって予測された LOC の推移を示す. 赤い点, 赤い実線, 赤いバンドはそれぞれ LOC の実験値, パラメータベクトルをモデルに適用して得られた LOC の平均値, 95% 信用区間 ($\pm 1.96\sigma$) を表す. 測定された LOC は信用区間内に存在していることが確認された. また LOC のデータが存在する領域と比較して, データが存在しない領域の信用区間は広がった.

試料径が $4, 6 \text{ mm}$ いずれの場合においても $1G$ では予測された値に反して, $V_g = 5 \text{ cm/s}$ の LOC が $V_g = 10 \text{ cm/s}$ の LOC よりも大きくなった. これは外部対向流速が自然対流速度と比べて非常に小さいため, 燃焼ガスが燃焼器内で再循環し, 火炎付近の実際の酸素濃度が低くなってしまった可能性が考えられる. 今後データ点を増やすなどしてさらなる調査を行う必要がある.

自然対流速度は式(11)で表される. サンプリングによって得られたパラメータ B_4 の分布に対してガウス分布によってヒストグラムのフィッティングを行った. ガウス分布の最頻値 $B_4 = 2.47$ より $1G$, 酸素濃度 21% における自然対流速度は $V_b = 33.0 \text{ cm/s}$ と導出された. この値は先行研究で導出された値と近い値を示している.

図 7 ではサンプリングされたモデルのパラメータを元に予測された微小重力下, 部分重力下 (月, 火星) における LOC を示している. 微小重力下では先行研究でも示されたように下に凸な放物線が得られ, 低流速領域では輻射熱損失の影響が強く現れていることが分かる. 月面では MLOC が $V_g = 10.5 \text{ cm/s}$ の時に確認された. 図 7 で示された 4 つの条件のうち部分重力環境下で最も MLOC が低くなることが分かった. 従って本研究で試料として選択したキャスト型 PMMA ロッドは, 概ね月面あるいは火星程度の重力環境下で最も燃えやすいと考えられる. 但し, これらにおいて $V_g < 10 \text{ cm/s}$ において信用区間の幅が大きく増加しているため, 今後, 微小重力下, 部分重力下でも実験を行い, モデルのバリデーションを行うと同時にベイズ更新を行う必要がある.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 戸田寛人, 中谷辰爾, 津江光洋
2. 発表標題 PMMAロッド上を伝播する対向流拡散火炎の消炎限界予測
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
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroto Toda, Shinji Nakaya, Mitsuhiro Tsue
2. 発表標題 Extinction Limit of Opposed Flow Flame Propagating on PMMA Rods
3. 学会等名 The 33rd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹俣太郎, 井原渉, Justin Nelson, 任方思, 中谷辰爾, 津江光洋
2. 発表標題 Effects of Gravity on Limiting Oxygen Concentration (LOC) of PMMA Rods under Hypergravity Environment of a Centrifuge
3. 学会等名 The 34th International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 竹俣太郎, Ma Yuxuan, 任方思, 中谷辰爾, 津江光洋
2. 発表標題 対向流中のキャスト型 PMMA ロッドの燃え広がりにおいて重力が消炎限界酸素濃度に及ぼす影響
3. 学会等名 第61回燃焼シンポジウム
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	津江 光洋 (Tsue Mitsuhiro) (50227360)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授 (12601)	

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