

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：10101

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K20389

研究課題名（和文）熱物性の異なる材料が組み合わさった複合材の燃え拡がり現象

研究課題名（英文）Flame spread over composites consisting of materials with different thermal properties

研究代表者

金野 佑亮（Yusuke, Konno）

北海道大学・工学研究院・助教

研究者番号：10907728

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）：プリント基板ならびにアクリル板を用いて下方燃え拡がり試験を行った。燃え拡がり速度、火炎形状、限界酸素濃度に対する試料側面の状態と試料形状の影響を実験的に明らかにした。燃え拡がり試験で、試料保持方法や試料形状の効果が現れない一般性の高い試験結果を得るために、試料側面と試料保持具の間に火炎の消炎距離程度の空間を設ける試験法の妥当性を検証した。その結果、燃え拡がり火炎は試料に沿って一様に進行し二次元的な燃焼現象が確認できることを明らかにした。また、二次元的な燃焼現象を観察するための試料側面と金属板の距離は試料の形状に依存することを実験的に明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電気火災に関与する可燃物の多くは良導体と絶縁体から構成される複合材であり、このような熱的性質が顕著に異なる材料から構成される電気部品等の燃焼機構は極めて複雑である。本研究では実験的検討を基礎に、複合材の難燃性を科学的に正確に評価可能な燃焼試験法を提案することを目標に、着火方法・試料保持方法・試料形状が試料の燃焼特性に及ぼす影響を体系的に調査した。本研究で得られた成果により、複合材特有の燃焼時の熱損失効果や試料の幾何形状効果が明らかになった。また、複合材において二次元的な燃え拡がりを実現する試験法を確立し、試料保持方法や試料形状に依存しない複合材の燃焼特性に関わるデータを得ることを可能にした。

研究成果の概要（英文）：Downward flame spread tests were conducted using printed circuit boards and acrylic plates. The effects of sample width, sample thicknesses, and sample side conditions on the flame spread rate, flame shape, and limiting oxygen concentration were experimentally clarified. To obtain generalized test results, in which the effects of the sample holding method and sample shape are not apparent, an air gap equivalent to the flame quenching distance was provided between the sample sides and the metal plate. As a result, it was clarified that the flame spreads uniformly along the sample and that a two-dimensional flame spread phenomenon could be confirmed. It was also experimentally clarified that the air gap size between the sample sides and the metal plate for observing the two-dimensional flame spread phenomenon depends on the shape of the sample such as width and thickness.

研究分野：燃焼工学

キーワード：燃え拡がり 消炎 熱損失 複合材料 火災安全 電気火災 燃焼

1. 研究開始当初の背景

電気火災の初期段階において火災拡大に関与する可燃物の多くは、熱的性質が極めて異なる良導体と絶縁体が組み合わさった複合材や組立品である。例えば、絶縁体が燃焼している際に良導体が同時に加熱されると、良導体を通じた熱輸送が原因で火災性状や絶縁体そのものの難燃特性が変化する。そのため電気部品や組立品の難燃性を正しく見積もるためには、可燃物単体ではなく複合材としての燃焼特性を評価する必要がある。さらに、複合材の燃え拡がり機構について科学的理解を深めておくことは電気設備における延焼速度や有効な消火方法などを検討する際にも重要な知見となる。

2. 研究の目的

熱的性質が極端に異なる材料から構成される複合材の難燃性を科学的かつ正確に評価可能な難燃性評価試験を提案することを目指す。プラスチック材料などの酸素指数 (Oxygen Index) の測定にも使用される下方燃え拡がり試験を参考に、複合材の燃焼試験を実施した。各種材料の幅・厚み・熱物性値が材料の燃焼特性に及ぼす影響を実験的に調査し、難燃性を評価する際の最適な着火方法・試料形状・試料保持方法について議論をおこなった。

3. 研究の方法

図1に示す風洞を用いて市販のプリント基板を対象に下方燃え拡がり試験を実施した。風洞にはガスボンベから窒素と酸素の混合気体を供給した。各種ガスの体積流量を質量流量計で調節し風洞内の酸素濃度および気体流速を所定の値に設定した。予備検討の結果、プリント基板単体では着火が困難であることが判明した。そのため図1に示すようにプリント基板の上端に助燃剤としてPMMAを貼り付けてプリント基板上の火炎燃え拡がりを実現した。

本研究では試料の保持方法に工夫を施した。先述したプラスチック材料の難燃性を調査する酸素指数法 (ISO-4589-2) では、自立しない試料を風洞内に設置するために、図2右に示すように試料の両側面を金属板で挟み込んで保持することが一般的である。また、固体燃え拡がりに関する基礎研究でも同様の試料保持方法が適用されることが多い。これは試料側面および角部の燃焼を食い止めることで、火炎が試料表面を一樣に燃え拡がる二次元的な燃え拡がり現象を実現するためである。しかしプリント基板を対象に同様の試料保持方法で燃え拡がり試験を実施すると、プリント基板に貼り付けられた銅箔から保持具への熱損失が顕著になる。その結果、試料の燃焼性が著しく低下することが想定される。そこで図2左に示すように、試料の側面と保持具の間に隙間を設けて試料から保持具への熱損失の影響を低減する方法を提案する。

このとき、試料側面と保持具の隙間が大きすぎると試料角部に火炎が形成されてしまう。その結果、角部の燃焼が先行し、燃え拡がりに3次元的な効果が含まれてしまう。そのため試料側面の隙間の最適値を探索することを目的として、図3に示す実験系を構築して試料側面に置かれた金属壁が試料の下方燃え拡がりに及ぼす影響を別途調査した。

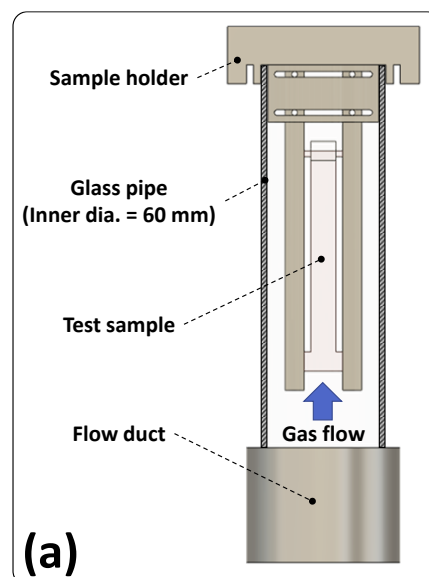


図1 プリント基板の下方燃え拡がり試験装置。

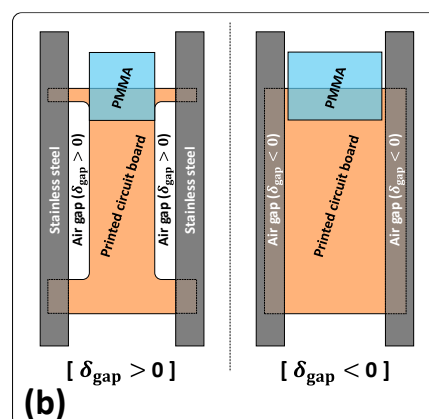


図2 プリント基板の保持方法。

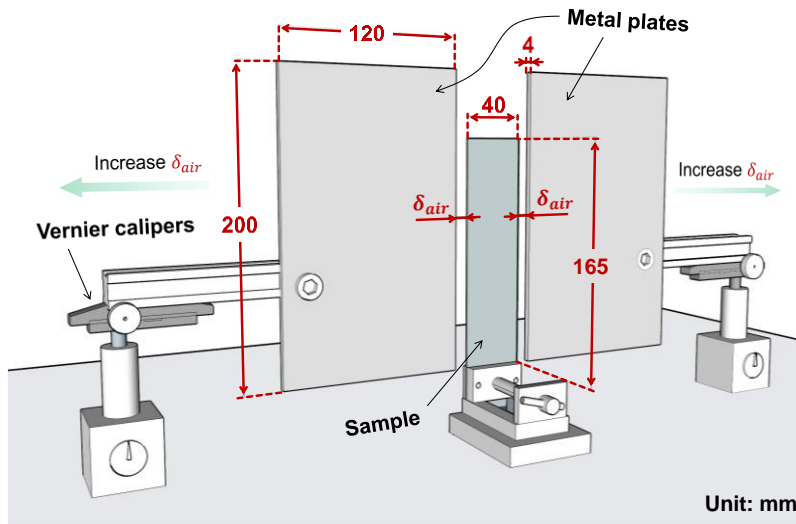


図3 PMMA の下方燃え拡がり試験装置.

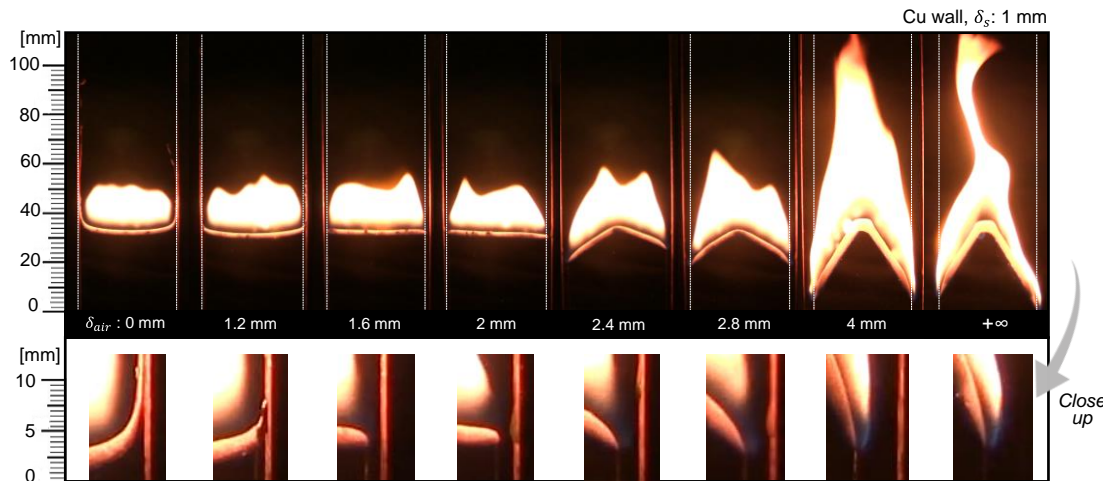


図4 試料側面と金属壁の距離を変えたときの PMMA 燃焼時の振る舞い. PMMA の幅は 40 mm, 厚みは 1 mm. 金属壁の厚みは 4 mm, 材料は銅.

4. 研究成果

(1) 試料角部の燃え拡がりに及ぼす金属壁の影響

図3に示した実験系を用いて PMMA 板の下方燃え拡がりに対する試料側面と金属壁の隙間の影響を調査した. 図4は試料側面と金属壁の隙間を0-4 mmまで変化させたときの燃え拡がり火炎の様子である. 試料側面の隙間が2.4-4 mmの条件では試料角部を先行して火炎が燃え拡がることが観察された. その結果, 火炎前縁は逆V字型の形状を取り燃え拡がりに3次元の形状効果が現れた. 一方で, 試料側面の隙間が2 mm以下になると試料角部の燃焼は食い止められて火炎前縁は水平になり, 二次元的な燃え拡がりが実現された. しかし, 試料側面の隙間が1.2 mm以下になると金属壁近傍の火炎が金属壁への熱損失の影響によって消炎し, 火炎前縁はU字型の形状を取った. 火炎形状の観察の結果, 試料側面に2 mmの隙間を設けると火炎が一樣に燃え拡がり二次元的な燃え拡がりが実現されることが明らかになった.

図5に燃え拡がり速度と試料側面の隙間の関係を示す. 金属壁の熱伝導率の影響を調査するため

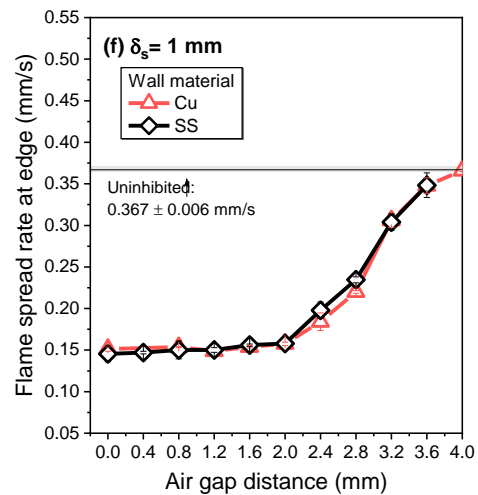


図5 PMMA の燃え拡がり速度と試料側面の隙間の関係.

に銅板とステンレス板を用いて実験を行った。しかし、図5からわかるように金属壁の熱物性値の違いは燃え拡がりに対して顕著な影響は及ぼさないことが明らかになった。これは本研究で使用した金属壁の厚みが大きく、熱伝導よりも熱容量の効果が顕著に現れたと考えられる。

試料側面の隙間の影響に着目すると、0 - 2.0 mm の範囲では燃え拡がり速度はおおよそ一定の値を示した。しかし試料側面の隙間が 2.0 mm より大きくなると燃え拡がり速度は急激に大きくなり、隙間が 4 mm まで拡大すると金属壁がない状態の燃え拡がり速度と同程度の値を示した。以上のことから、試料の側面から 2 mm 程度の距離に金属などの不活性材料を配置することで、試料の角部や側面の燃え拡がりを食い止めつつ、試料の保持具への熱損失が顕著にならない燃え拡がり試験を実施できることが実験的に示された。

(2) プリント基板の燃え拡がり

図1、図2に示した実験系を用いてプリント基板の下方燃え拡がりを調査した結果を記す。本研究で使用したプリント基板は紙フェノールの片面に銅箔が貼り付けられた試料である。フェノール樹脂は熱硬化性樹脂であるため、図6に示すように炭化しながら燃焼することが観察された。

PMMA の燃え拡がり試験の結果を参考に、試料側面と試料保持具の間に 2 mm の隙間を設けた条件と（図6(a)）、試料側面を 2 mm 保持具で挟み込んだ条件（図6(b)）で実験を行った。更に燃焼領域の幅が 5, 13, 30 mm の3種類の試料を用意して、試料幅の影響も調査した。

試料側面に 2 mm の隙間を設けたときの火炎の様子を確認すると、試料幅が狭い条件では試料角部が先行して燃焼する様子が顕著であるが、試料幅が広くなると試料角部よりも中央が先行して燃え拡がること became 明らかになった。そのため、試料幅に応じて二次元的な燃え拡がりを実現される、試料側面の隙間が変化することが示唆された。試料側面を 2 mm 挟み込んだ条件でも同様に、試料幅に応じて火炎の様子が変化し、同じ雰囲気条件では試料幅が狭い試料ほど火炎の発光強度が弱まり、試料の燃焼性が著しく抑制されることが明らかになった。

図7に試料側面に 2 mm の隙間を設けた条件と試料側面を 2 mm 保持具で挟み込んだ条件で取得した燃え拡がり速度と酸素濃度の関係を示す。図7(a)から、試料側面に隙間を設けた条件では試料幅が狭くなるに連れて燃え拡がり速度が大きくなり、可燃限界も低酸素濃度側に拡大することが明らかになった。一方で、図7(b)に示す試料側面を 2 mm 挟み込んだ条件では試料幅が狭くなるに連れて燃え拡がり速度が低下するだけでなく、可燃限界が高酸素濃度側に著しく縮小することが明らかになった。以上のことから、多くの燃え拡がり研究で採用されている試料保持方法をプリント基板のような複合材に適用してしまうと、試料から保持具への熱損失が増大するため、試験結果が実験手法や試料形状に強く依存し、一般性のあるデータ取得が困難になることが明らかになった。そのため複合

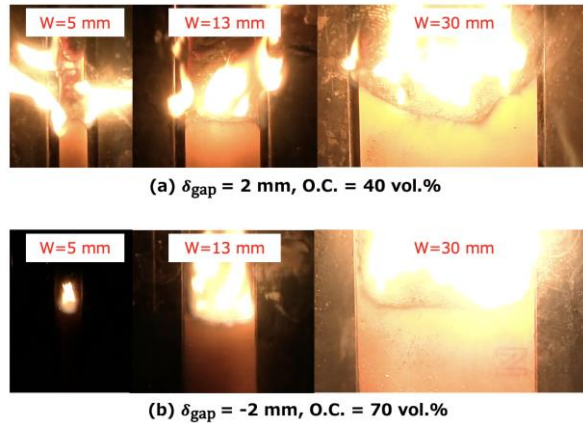


図6 プリント基板の下方燃え拡がりの様子。試料側面と保持具の隙間が 2 mm(a)と - 2 mm の条件(b)

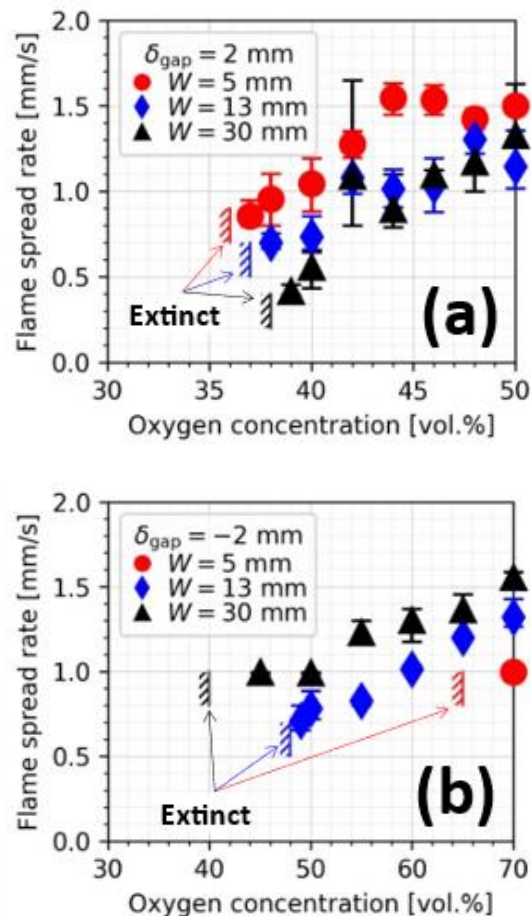


図7 燃え拡がり速度と酸素濃度の関係。試料側面と保持具の隙間が 2 mm(a)と - 2 mm の条件(b)

材に限らず、熱伝導率の大きな固体材料の燃え広がりを観察する際は、本研究で提案するように側面に1-2 mm程度の間隙を設けることが推奨される。

(3) 研究成果の意義と今後の展望

プリント基板のような複合材を対象に燃え広がりを体系的に調査した研究例は非常に限定的である。そのため、本研究を通して得られた知見は複合材などの燃焼試験法を制定・議論する際に有意義なものとなる。また、本研究を通して複合材特有の燃焼時の熱損失の効果や試料の形状効果を洗い出すことができた。これは、実火災の延焼過程の理解にも貢献するものである。

また実験的検討の結果、現象の解析を容易にする二次元的な燃え広がりを観察可能な条件をおおよそ特定することができた。今後、燃え広がり速度や消炎条件を予測するモデル構築を進め、複合材の燃焼機構について科学的に明らかにしてゆく。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Konno Yusuke, Li Yutao, Citerne Jean-Marie, Legros Guillaume, Guibaud Augustin, Hashimoto Nozomu, Fujita Osamu	4. 巻 39
2. 論文標題 Experimental study on downward/opposed flame spread and extinction over electric wires in partial gravity environments	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the Combustion Institute	6. 最初と最後の頁 3785 ~ 3794
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.proci.2022.07.002	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 該当する

1. 著者名 Konno Yusuke, Hashimoto Nozomu, Fujita Osamu	4. 巻 254
2. 論文標題 On the radiation extinction of opposed flame spread over curved solid surface in low flow velocity conditions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Combustion and Flame	6. 最初と最後の頁 112836 ~ 112836
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.combustflame.2023.112836	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 Ma Yuxuan, Konno Yusuke, Wang Qiang, Hu Longhua, Hashimoto Nozomu, Fujita Osamu	4. 巻 254
2. 論文標題 Effect of solid surface curvature and wall heat loss on the downward flame spread along the edge of thin PMMA sheets	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Combustion and Flame	6. 最初と最後の頁 112837 ~ 112837
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.combustflame.2023.112837	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 該当する

〔学会発表〕 計23件（うち招待講演 2件/うち国際学会 12件）

1. 発表者名 Vipin Kumar, Amit Kumar, Manu B V, Yusuke Konno, Osamu Fujita
2. 発表標題 Flame spread over thin hollow cylindrical fuels and its comparison with thin planar fuels
3. 学会等名 14th Asia-Pacific Conference on Combustion (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yusuke Konno, Shoryu Ishikawa, Nozomu Hashimoto, Osamu Fujita
2. 発表標題 Experimental observations of downward flame spread along thin wire in various gravity fields using a centrifuge
3. 学会等名 14th Asia-Pacific Conference on Combustion (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 金野佑亮, 石川昇龍, 橋本望, 藤田修
2. 発表標題 遠心加速器内における円筒固体材料の燃え拡がり現象の観察
3. 学会等名 第20回HASTIC学術技術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 内垣雄介, 金野佑亮, 橋本望, 藤田修
2. 発表標題 プリント基板上の下方火炎伝播に試料幅と側端燃焼が及ぼす影響
3. 学会等名 第20回HASTIC学術技術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小島遼平, 金野佑亮, Yuxuan Ma, Qiang Wang, 橋本望, 藤田修
2. 発表標題 可燃性固体材料の角部の燃え拡がり現象における熱損失の影響
3. 学会等名 日本機械学会北海道学生会 第52回学生員卒業研究発表会 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Karam Askarov, Yusuke Konno, Nozomu Hashimoto, Osamu Fujita
2. 発表標題 Downward flame spread in an opposed forced flow over combined copper and polyethylene under variable flow velocity and oxygen concentration
3. 学会等名 日本燃焼学会 第60回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yusuke Konno
2. 発表標題 Development of evaluation method for material flammability in spacecraft environment
3. 学会等名 The 25th HU and SNU Joint Symposium Joint Symposium in the fields of Mechanical and Aerospace Engineering (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Osamu Fujita, Yusuke Konno, Guo Feng, Nozomu Hashimoto, Masao Kikuchi
2. 発表標題 Recent Progress of Electric Wire Combustion Research in FLARE Project
3. 学会等名 13th Asian Microgravity Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金野佑亮, Yashendra Mohan, 橋本望, 藤田修
2. 発表標題 電線被覆上の下方燃え拡がりに及ぼす被覆材の厚み影響
3. 学会等名 熱工学コンファレンス2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 内垣雄介, 金野佑亮, 橋本望, 藤田修
2. 発表標題 プリント基板上の下方燃え拡がりに及ぼす試料幅の影響
3. 学会等名 熱工学コンファレンス2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 橋本望, 金野佑亮, 中谷辰爾, 津江光洋, 小林芳成, 高橋周平, 鳥飼宏之, Guillaume Legros, Carlos Fernandez-Pello, 菊池政雄, 藤田修
2. 発表標題 FLARE-2/FLARE-3プロジェクト: 低重力環境下における固体材料の火災安全評価手法の開発
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
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yusuke Konno, Nozomu Hashimoto, Osamu Fujita
2. 発表標題 On the radiation extinction of opposed flame spread over curved solid surface in low flow velocity conditions
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 Yusuke Konno, Yutao Li, Jean-Marie Citerne, Guillaume Legros, Augustin Guibaud, Nozomu Hashimoto, Osamu Fujita
2. 発表標題 Experimental study on downward/opposed flame spread and extinction over electric wires in partial gravity environments
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 Yusuke Uchigaki, Yusuke Konno, Nozomu Hashimoto, Osamu Fujita
2. 発表標題 Experimental observations of downward flame spread over printed circuit boards: Effects of heat loss from the sample to the sample holder and edge propagation on the flammability limits
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 金野佑亮, 舟崎杏珠, 橋本望, 藤田修
2. 発表標題 地上とは異なる重力環境下での材料難燃性評価に使用される遠心加速度を利用した燃焼試験装置の開発検討
3. 学会等名 第19回HASTIC学術技術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 内垣雄介, 金野佑亮, 橋本望, 藤田修
2. 発表標題 複合平板試料の下方燃え拡がり現象に関する実験的検討 -試料ホルダーによる試料側面の挟み込み幅の違いが燃え拡がりに及ぼす影響-
3. 学会等名 日本機械学会北海道学生会 第51回学生員卒業研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yusuke Konno
2. 発表標題 Material Flammability Research for Spacecraft Fire Safety: How to evaluate material flammability in microgravity using data obtained on the ground?
3. 学会等名 Work Safety Occupational Health Academic Forum (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yusuke Konno, Nozomu Hashimoto, Osamu Fujita
2. 発表標題 On the effects of surface curvature and relative gas flow velocity on the opposed flame spread and radiation extinction over a thermally thin cylinder
3. 学会等名 13th Asia-Pacific Conference on Combustion (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Daiki Royama, Yusuke Konno, Nozomu Hashimoto, Osamu Fujita
2. 発表標題 Study on Downward Flame Spread Phenomenon over Electric Wire with Different Insulation Thickness
3. 学会等名 13th Asia-Pacific Conference on Combustion (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金野佑亮, 橋本望, 藤田修
2. 発表標題 対向流雰囲気において円筒固体表面上を燃え広がる火炎の輻射消炎について
3. 学会等名 日本燃焼学会 第59回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 内垣雄介, 金野佑亮, 橋本望, 藤田修
2. 発表標題 宇宙火災安全性向上に向けた電子回路基板材料の試験片形状確定に向けた研究
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
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金野佑亮, 田口修一郎, 内垣雄介, 橋本望, 藤田修
2. 発表標題 プリント基板上の下方燃え拡がりに関する実験的検討 - 試料側面と試料ホルダーの間隙距離が燃え拡がり速度と限界酸素濃度に及ぼす影響 -
3. 学会等名 日本機械学会 熱工学コンファレンス2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Osamu Fujita, Nozomu Hashimoto, Yusuke Konno, Guo Feng, Seiya Kawaguchi, Masao Kikuchi
2. 発表標題 Contribution of FLARE project to fire safety in reduced gravity -Research on Flammability of Electric Wire-
3. 学会等名 Lunar Surface Science Workshop (国際学会)
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			
フランス	Sorbonne University	Orleans University		
英国	University College London			
インド	Indian Institute of Technology Madras			
中国	Univ. of Science and Technology of China			