

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：13904

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K16365

研究課題名(和文)狭空間内燃え拡がりで見られる燃焼モードの遷移臨界条件の導出

研究課題名(英文)A critical condition for combustion mode transition of flame spread in narrow channel

研究代表者

松岡 常吉 (Matsuoka, Tsuneyoshi)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：90633040

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：流路断面形状が円形または矩形である二種類の風洞を用いて実験を行い、狭流路内を燃え拡がる火炎の燃え拡がり速度におよぼす断面形状の影響を明らかにした。円筒内燃え拡がりの消炎限界近傍条件で見られる regression モードが、平行平板間の燃え拡がりにおいても存在することを確認した。消炎限界をまたぐように酸化剤流速のステップ関数的変化させたときの火炎の応答を調べ、遷移後に現れる燃焼モードが流路断面形状によって異なることを示した。燃焼中の試料形状変化を時系列で可視化する手法を提案し、可視化システムの構築と検証試験を実施した。また、燃え拡がり中の固相内の温度分布を計測可能なホログラフィ干渉計を構築した。

研究成果の概要(英文)：Two series of experiments were conducted with two kinds of fuel geometry to form a narrow channel: parallel plates and cylinder. Based on a comparison between cylindrical and rectangular channels, the geometrical effects on the flame spread were clarified. The regression mode, which is known as a unique near-limit behavior that has observed for the flame spread in cylinder, is confirmed to occur for that in parallel plates. Experiments with a step change in oxidizer velocity enabling the mode transition were then performed to observe the response of the flame. It is found that the resulted mode is different depending on the channel geometry. An in-situ method to extract the outer surface shape of deforming thermoplastic materials during combustion was proposed. A visualization system was developed and the proposed method was validated by using the system. A holographic interferometry for measurement of temperature field in the solid was also constructed.

研究分野：燃焼工学

キーワード：火災安全 燃え拡がり 高酸素濃度 消炎限界 狭流路 バックライト再構成法 ホログラフィ干渉法

1. 研究開始当初の背景

酸素ガスは医療や製造業において欠かすことのできない物質であるが、その供給ラインのように高圧かつ高濃度の酸素雰囲気下ではほぼ全ての物質が可燃性となり得るため発火しやすく、その火災危険性は他のガスラインに比べて著しく高い。

本研究では酸素ガスラインの中でも医療用などに用いられるプラスチック製チューブを対象とする。流路がこのような可燃物で構成され、かつ狭い(流路の大きさが数mm程度)場合には、火災が発生しやすいだけでなく消火が困難となることもある。例えば酸素ガス流速を増加させていくと、通常であればやがて吹き飛び限界と呼ばれる消炎限界に至り(火炎が伝播し得る限界)火炎は消える。ところが、可燃性固体で構成された狭流路内を火炎が伝播する場合には、消炎限界近くの条件で燃焼はむしろ激しさを増し、さらには火炎の先端で可燃性固体が溶けて上流の流路が拡大されながら燃焼が持続されるのである。Hashimoto らはこのような燃焼状態を安定燃焼と呼んだ[1]。本研究では流路が溶融し拡大するという特徴に着目し regression モードと呼ぶことにする。

CO₂ 排出の低減技術として期待されている酸素燃焼の普及とともに酸素ガスの利用は今後益々増加すると予想される。安全な社会インフラとして酸素ガスラインを整備するにはその火災安全性を担保しなければならない。上記の regression モードの発現メカニズムの解明はそのための重要な検討課題であるにも関わらず、これまで系統的に調べられていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、狭い円筒内燃え拡がりの消炎限界近くの条件で起こる regression モードについて、その発現メカニズムを解明することである。これまで regression モードに関する研究が進んでいない理由は、円筒内を伝播する火炎が観察しにくいからである。このモードを扱った研究のほとんどは円筒内燃え拡がりの範疇で実施されてきたが、この系では火炎が存在する流路自体が小さい上に、試料それ自体がレンズとして働くため、外部から精度よく観察することが難しいのである。

本研究では「円筒内」燃え拡がりで見られる regression モードを、「平行平板間」燃え拡がりの現象として再現することを試みる。平行平板の系ではレンズ効果がないため観察は容易であり、したがって発現メカニズムについて詳細に検討することが可能となる。平行平板と円筒では流路断面形状が異なるため、その影響についても別途調べる。平行平板系で得られた regression モードに関する知見に流路形状の影響を加味して、円筒内燃え拡がりにおける regression モードの発現メカニズムを解明する。

3. 研究の方法

本研究では主に図1に示す2種類の風洞装置を用いて実験を実施した。以下で装置および実験方法の概略について説明するが、実験によっては、例えば装置に改良を施したことで一部詳細が異なる点もあるので注意されたい。

風洞は主に可燃性固体の試料(アクリル樹脂)が設置されたテストセクションと酸化剤の助走区間である整流部から成る。平行平板の実験で用いた試料の大きさは高さ 150mm、幅 30mm、厚み 10mm であり、テストセクションの隙間高さ h は、試料をはめ込んだ金属製治具の固定位置を変えることで 15mm まで調整可能である。一方、円筒の実験では、試料に直径 20mm アクリル樹脂製円柱に任意の大きさの貫通穴を開けたものをテストセクションとした。つまり酸化剤は貫通穴を流れ、この場合の隙間高さは貫通穴の直径である。

酸化剤には酸素、空気またはそれらの混合ガスを用い、風洞整流部の下方に接続された流路を通じて供給された。酸化剤流速 U_m および酸素濃度 X_o は各ガスの流量を流量計により制御することで調整した。また、それぞれのガスについて複数の供給用流路が三方弁等を介して接続されており、流路を切り替えることで燃焼中に酸化剤流速を変化させることができる。風洞内に所定の流速・酸化剤濃度で酸化剤を供給し、風洞出口からライターや火をつけた木片等を差し込んで試料の上端で着火し、燃え拡がる様子をビデオカメラ等により撮影し、観察した。

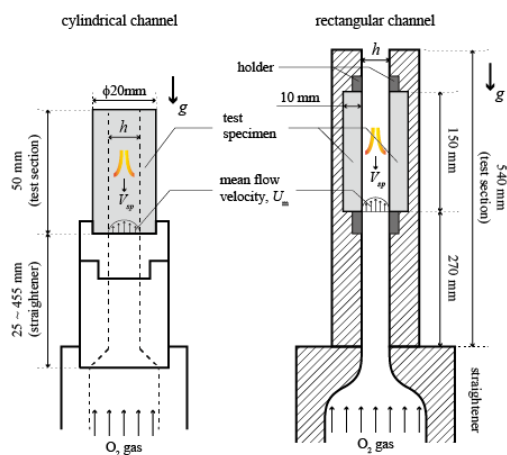


図1 実験装置の模式図

4. 研究成果

(1) regression モードの発現メカニズム

① 流路断面形状の影響

流路断面形状の影響は、酸化剤流の速度境界層の違いと可燃性固体の予熱領域の大きさの違いとして現れると考えられる。そこで本研究では、それぞれの影響について実験的に検討した。図1に示した実験装置を用い、隙間高さを1~10mmまで変えて燃焼実験を行った。酸化剤は純酸素とし、酸化剤流速は

30cm/s または 90cm/s とした。

図 2 は $h = 4\text{mm}$, $U_m = 90\text{cm/s}$ としたときの流路内を燃え広がる火炎の写真である。両者の火炎形状はほとんど同じように見えるが、実際には円筒の場合には火炎は軸対称に形成されていることと、レンズ効果による歪んでいる点が異なる。図 3 にそれぞれの流路における火炎の燃え広がり速度(火炎先端の移動速度)を比較した結果を示す。図より、両者の h に対する傾向はよく似ているものの、定量的には一致していない。これは流路形状の違いによるものと考えられる。

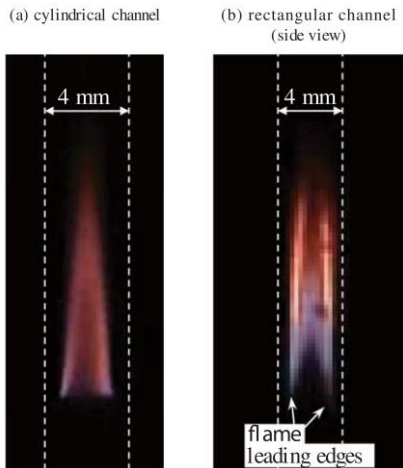


図 2 円筒内(左)および平行平板間(右)を燃え広がる火炎の写真(隙間高さ 4mm, 酸化剤流速 90cm/s)。白の点線は試料壁面を表す。燃え広がり方向は上から下、酸化剤は下から上に流れる

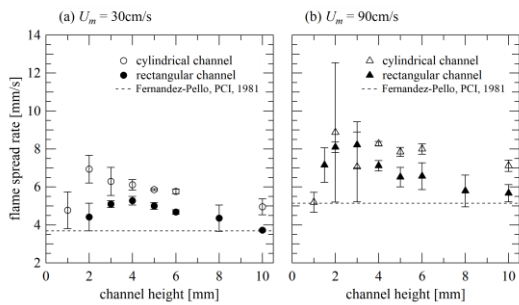


図 3 円筒内および平行平板間を燃え広がる火炎の燃え広がり速度。(左)酸化剤流速 30cm/s, (右)酸化剤流速 90cm/s。比較のため、Fernandez-Pello らによる単一平板での実験結果 [2] を点線で示した

Bhattacharjee らによれば、境界層の影響は火炎先端での酸化剤流速(有効流速)により評価できる [3]。本研究でも同様に境界層の影響を評価した。酸化剤流がポアズイユ流れであると仮定して各条件における有効速度を見積もり、それぞれの場合の燃え広がり速度を有効流速に対してプロットしなおした。その結果を図 4 に示す。有効速度が小さい領域では、異なる流路形状で得られた燃え広がり速度がおおむね一つの包絡線上に整

理されていることから、流路内の燃え広がりにおいても境界層の影響は有効速度を用いて評価できることが分かった。有効流速が大きい場合にずれが見られるのは、気相の燃焼反応による影響が考慮されていないからだと考えられる。

予熱領域の大きさについては、酸化剤流速に依存する熱的厚さを考慮した幾何学的な体積として評価した。その結果、酸化剤流速が 10cm/s 以上であれば、隙間高さ 1mm 以上の流路において形状による差はほとんどないことが示された。以上より、流路断面形状の違いは火炎先端における酸化剤流速を考慮することで評価できることが分かった。

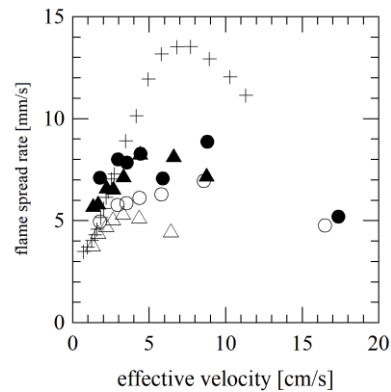
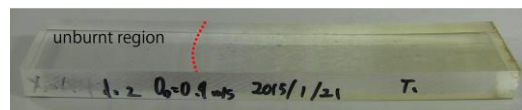


図 4 燃え広がり速度と有効速度の関係。○および●は円筒の結果、△および▲は平行平板の結果で、白抜き記号は酸化剤流速 30cm/s, 黒塗りは酸化剤流速 90cm/s。+: Fernandez-Pello らによる単一平板での実験結果 [2]

② regression モードの再現

③では regression モードへの遷移過程の観察を行うが、その予備検討として平行平板間燃え広がりにおいても regression モードが存在するかどうかを確認した。図 5 は異なる酸化剤流速で行った実験後の試料の写真である。酸化剤流速が大きいときには燃え広がった部分(点線の下流側)が大きくえぐれていることが分かる。一方、酸化剤流速が小さいときにはこのようなえぐれは見られない。

(a) $h = 2\text{ mm}$, $U_m = 0.9\text{ m/s}$, $X_0 = 0.4$



(b) $h = 2\text{ mm}$, $U_m = 8\text{ m/s}$, $X_0 = 0.4$

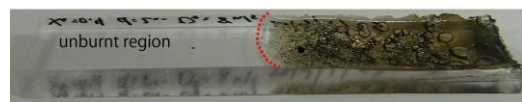


図 5 (a) 一般的な燃え広がりモードで燃焼後の試料, (b) は regression モードで燃焼後の試料。燃え広がり方向は右から左で、酸化剤 ($X_0 = 0.4$) は左から右。赤の点線は未燃部と既燃部の境目

試料がえぐれるということは、固体が激しく溶解しながら燃え広がったことを意味する。このような燃焼の仕方は regression モードでのみ見られる特徴であることから、平行平板間燃え広がりでも regression モードが存在することが確認できたと言える。

③ 平行平板間燃え広がりの場合の火炎のステップ応答

regression モードの発現メカニズムについて検討するには、燃え広がりから regression モードへの遷移過程を観察する必要がある。そこで本研究では、2つの燃焼モードをまたぐように酸化剤流速をステップ関数的に変化させ、そのときの火炎の応答を調べた。

図6はステップ変化に対する火炎の応答を観察した結果の例である。 $X_{O_2} = 0.4$ では酸化剤流速が増加すると火炎は一瞬静止し、その後ただちに消炎した。酸素濃度を変えて同様の実験を行ったところ、 $X_{O_2} = 0.6$ では同じく消炎したが、 $X_{O_2} = 0.8$ では消炎せず、両側の火炎が非対称な状態となって保炎し燃え広がる様子が確認された。

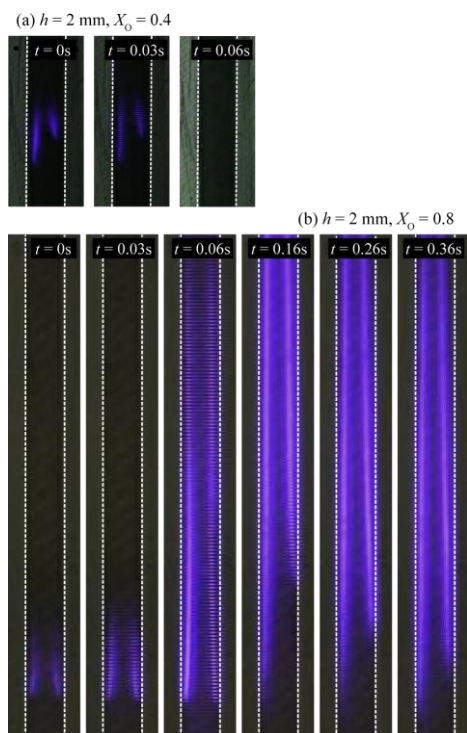


図6 酸化剤流速のステップ変化に対する火炎の応答。(a) $X_{O_2} = 0.4$, (b) $X_{O_2} = 0.8$ の結果。酸化剤流速ははじめ 1 m/s で、変化後は 16 m/s ($X_{O_2} = 0.4$) または 25 m/s ($X_{O_2} = 0.8$) である。 $t = 0$ は火炎の挙動が変化し始めた時刻

前項で示したように、平行平板間燃え広がりにおいても regression モードが存在するにもかかわらず、図6の結果は酸化剤流速のステップ的变化に対して regression モードには遷移しないことを示している。この理由

は現時点では未解明であるが、狭流路内燃え広がりには regression モードも含め安定性の異なるいくつかの燃焼モードがあり、それらのうちどれが現れるかは着火の仕方や遷移の仕方によって異なるのかもしれない。なお、本研究でその存在が確認された非対称な燃え広がりについては、(2)節であらためて検討する。

いずれにせよ平行平板の系は regression モードの発現メカニズムを調べるのに適していないことが分かったので、以下では当初予定を変更し、詳細観察は期待できないものの、円筒内燃え広がり立ち戻ってそのステップ応答を調べることとした。

④ 円筒内燃え広がりの場合の火炎のステップ応答

円筒内燃え広がりについて、③と同様の実験を実施し、火炎のステップ応答を観察した。ただし酸化剤は純酸素である。図7に酸化剤流速の変化前後の火炎先端近傍の写真、図8に写真から目視により抽出した火炎先端位置と流路形状の時間変化の様子を示す。

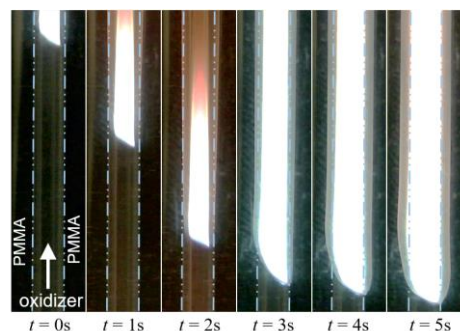


図7 酸化剤流速のステップ変化に対する火炎の応答。 $t < 2.2 \text{ s}$ では酸化剤流速は 3 m/s , $t > 3.2 \text{ s}$ では 15 m/s 。2点鎖線は初期の試料表面位置を表す

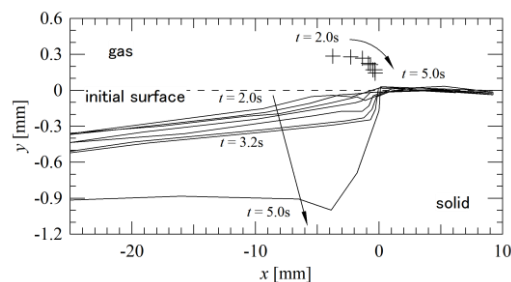


図8 試料表面の位置 (実線) と火炎先端位置 (+). $t = 2 \sim 3.2 \text{ s}$ のデータは 0.2 s 間隔。火炎先端の位置は輝度が高い領域のうち最上流にある位置とした

これまで regression モードでは火炎は試料のえぐれた部分に隠れるようにして保炎されると考えられてきた。しかし、図8からは regression モードに遷移した後でも火炎は試料表面上にあり、えぐれた部分に入り込んでいるようには見えない。流路の急拡大部での流速を見積もったところ、限界流速以下

となっており、火炎先端位置での流速の低下が保炎に寄与している可能性が示唆された。③で述べた問題のため、本研究期間内では regression モードの発現メカニズムの全容解明には至らなかったが、今後は熔融過程を含めた数値シミュレーションなどを行いさらに研究を進めていく予定である。

(2) 非対称な燃え拡がりに関する数値実験

平行平板の実験で観察された非対称な燃え拡がりには消炎限界近傍における燃焼モードの一つと考えられ、その発現条件やメカニズムを理解することは火災安全上重要である。本研究では、火災シミュレーションソフトである Fire Dynamics Simulator (FDS) [4] を用いた数値実験により、燃え拡がりにおける非対称性の発現条件とメカニズムについて検討した。

はじめに FDS で非対称な燃え拡がりを再現できることを確認した後、酸化剤流速および空隙高さを変えて数値シミュレーションを実施した。図 9 は各燃焼モードの発現条件をマッピングしたものである。この結果は非対称状態への遷移は酸化剤流速が高いか、または空隙高さが小さいときに起こることを示している。この傾向は前述の実験結果とも矛盾しない。また条件によっては、両側の火炎がそれぞれの位置関係を入れ替えながら燃え拡がる場合もあることも分かった。一方、非対称性の発現メカニズムとしては、対称状態にあった火炎のどちらか一方の局所消炎によるものであることが示唆された。局所消炎により火炎構造が変化し、それに伴い下流領域での反応が促進された結果、最終的に系は非対称となって安定化されると考えられる。

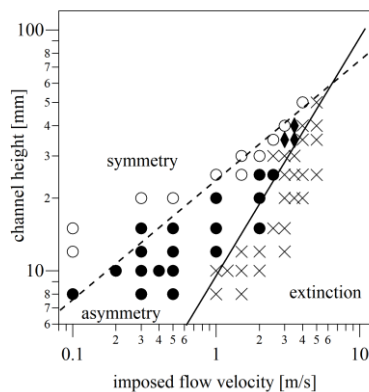


図 9 燃焼モードの発現条件マップ。○:対称火炎, ●:非対称火炎, ◆:振動火炎, ×:消炎

(3) 燃焼中の試料形状の可視化システムの開発およびホログラフィ干渉計の構築

本研究の目的達成のためには、燃焼中の試料の形状変化の可視化と、可燃性ガス量の推定が必要であった。そこで本研究ではサブテーマとして以下の2つの可視化・計測システムの構築を行った。

燃焼中の試料の形状変化の可視化には、バックライト撮影と医療用 CT で用いられるフィルタ補正逆投影法を組み合わせた三次元可視化法を提案し、そのシステムを開発した。図 10 はシステムの検証試験の一例である。燃焼中に熔融しながら変形していく ABS 樹脂の様子を時系列で可視化することができた。

一方、可燃ガスの発生量についてはそれを直接計測することは困難であるため、可燃性固体内部の温度分布から推定することとした。固相内の温度分布についてはホログラフィ干渉法により計測することとし、Ito らが燃え拡がりの実験で用いたもの[5]を参考に干渉計を構築した。図 11 はアクリル樹脂の試料上を燃え拡がる火炎近傍の干渉縞画像である。固相内部の領域まで細かい干渉縞ができており、温度分布を捉えることができていくことが分かる。研究期間中は火炎挙動の観察に注力したため、これらの方法を用いた実験は実施できなかったが、いずれも今後燃焼モードの遷移機構を解明するための有用なツールとして本研究の重要な成果である。

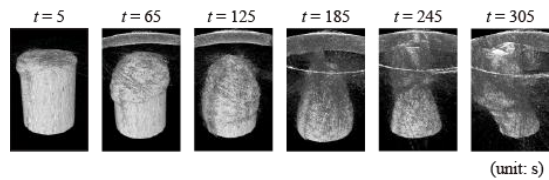


図 10 本研究で開発したシステムを用いて可視化した燃焼中の試料の形状変化過程

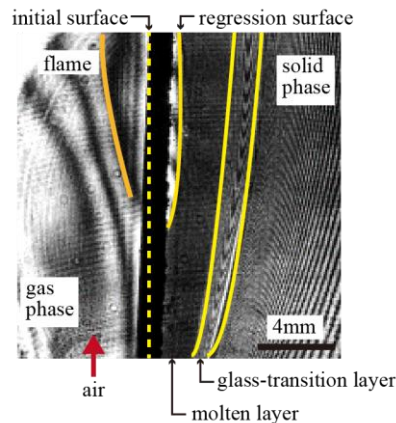


図 11 ホログラフィ干渉法による結果の例

<引用文献>

[1] N. Hashimoto, H. Nagata, T. Totani, I. Kudo, Combust. Flame, 147 巻, 2006, 222-232
 [2] A. C. Fernandez-Pello, S. R. Ray, I. Glassman, Proc. Combust. Inst., 18 巻, 1981, 579-589
 [3] S. Bhattacharjee, R. Nagarkar, Y. Nakamura, Combust. Sci. Technol., 186 巻, 2014, 975-987
 [4] <https://pages.nist.gov/fds-smv/> (2018年6月20日参照)

- [5] A. Ito, T. Kashiwagi, Proc. Combust. Inst., 21 巻, 1988, 65-74

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① T. Matsuoka, K. Nakashima, T. Yamazaki, Y. Nakamura, Geometrical Effects of a Narrow Channel on Flame Spread in an Opposed Flow, Combustion Science and Technology, 査読有, 190 巻, 2018, 409-424
DOI: 10.1080/00102202.2017.1394848
- ② 松岡 常吉, 小池 悠太, 中村 祐二, 燃焼により変形する固体の外面形状のその場抽出方法, 実験力学, 査読有, 17 巻, 2017, 191-197
DOI: 10.11395/jjsem.17.191
- ③ 松岡 常吉, 村上 智志, 山崎 拓也, 中村 祐二, 可燃性固体からなる狭流路内で発現する非対称な燃え拡がり, 日本機械学会論文集, 査読有, 83 巻, 2017, 17-00009
DOI: 10.1299/transjsme.17-00009
- ④ T. Matsuoka, T. Yamazaki, Y. Nakamura, High-speed imaging of temporal thermal field in thermoplastic material during flame spread, Proceedings of SPIE, 査読有, 10328 巻, 2017, 1032815
DOI: 10.1117/12.2270460
[学会発表] (計 10 件)
- ① T. Matsuoka, S. Murakami, S. Sato, Y. Nakamura, Dynamic behavior of adjacent two diffusion flames in crossflow, 37th International Symposium on Combustion, 2018 年 7 月 29 日~2018 年 8 月 3 日, ダブリン (アイルランド) (発表確定)
- ② 松岡 常吉, 狭流路内を燃え拡がる火炎の非対称性, 明治大学先端数理科学インスティテュート「現象数理学」共同研究集会「火災における不安定性の数理」(招待講演), 2017 年 10 月 5 日, 明治大学中野キャンパス(東京都中野区)
- ③ 村上 智志, 松岡 常吉, 中村 祐二, Fire Dynamics Simulator を用いた狭流路内燃え拡がりの数値解析, オープン CAE シンポジウム 2017, 2017 年 12 月 7 日~2017 年 12 月 9 日, 名古屋大学 (愛知県名古屋市)
- ④ 小池 悠太, 松岡 常吉, 中村 祐二, 3 次元画像再構成による熱可塑性固体の燃焼時変形過程の時系列計測, 第 55 回燃焼シンポジウム, 2017 年 11 月 13 日~2017 年 11 月 15 日, 富山国際会議場 (富山県富山市)
- ⑤ 松岡 常吉, 小池 悠太, 中村 祐二, バックライト画像の再構成による熱可塑性

樹脂の燃焼時変形過程の可視化方法, 可視化情報全国講演会 (室蘭 2017), 2017 年 11 月 3 日~2017 年 11 月 4 日, 室蘭工業大学 (北海道室蘭市)

- ⑥ T. Matsuoka, K. Nakashima, T. Kajimoto, A. Yoshimasa, Y. Nakamura, Fingering behavior of flame spread over solid combustibles, Eighth International Symposium on Scale Modeling (ISSM-8), 2017 年 9 月 12 日~2017 年 9 月 14 日, ポートランド (アメリカ合衆国)
- ⑦ T. Matsuoka, S. Murakami, T. Yamazaki, Y. Nakamura, Numerical investigation of transient process to form asymmetrically arranged spreading flame in narrow channel, The Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC9), 2017 年 10 月 27 日~2017 年 10 月 30 日, 沖縄コンベンションセンター (沖縄県宜野湾市)
- ⑧ T. Matsuoka, S. Murakami, T. Yamazaki, Y. Nakamura, Numerical Study on Asymmetric Flame Spread in A Narrow Combustible Channel, 26th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems (26th ICDERS), 2017 年 7 月 30 日~2017 年 8 月 4 日, ボストン (アメリカ合衆国)
- ⑨ 松岡 常吉, 山崎 拓也, 山崎 貴史, 中村 祐二, 狭流路内を燃え拡がる火炎の吹き飛び限界挙動に関する研究, 第 54 回燃焼シンポジウム, 2016 年 11 月 23 日~2016 年 11 月 25 日, 仙台国際センター (宮城県仙台市)
- ⑩ T. Yamazaki, T. Matsuoka, Y. Nakamura, High-speed imaging of temporal thermal field in thermoplastic material during flame spread, The 31st International Congress on High-Speed Imaging and Photonics (ICHSIP 31), 2016 年 11 月 7 日~2016 年 11 月 10 日, ホテル阪急エキスポパーク (大阪府吹田市)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

該当なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松岡 常吉 (MATSUOKA, Tsuneyoshi)
豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 9 0 6 3 3 0 4 0