

令和 2 年 7 月 6 日現在

機関番号：13904

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13967

研究課題名（和文）狭流路内を燃え広がる火炎の不安定性：臨界条件と動的挙動の解明

研究課題名（英文）Instability of flame spread in narrow channel: critical condition and dynamic behavior

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）・准教授

研究者番号：90633040

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、狭流路内で向かい合った火炎について実験と数値シミュレーションを行い、非対称性の発現メカニズムについて検討した。狭流路内燃え拡がりの気相における物理過程を模擬できる装置を開発して実験を行い、燃え拡がりで見られる対称火炎および非対称火炎が再現できることを示した。また、条件によっては火炎が振動する場合があることを示した。ただし、これは燃料流速の非一様性に起因して起きた可能性がある。二次元モデルに基づく数値シミュレーションを実施し、火炎が非対称となる臨界条件を明らかにした。さらに、非対称性の発現メカニズムを提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気体燃料を用いた燃焼実験により狭流路内で向かい合った火炎が非対称となる現象を再現したことは、これが可燃性固体の燃え拡がり特有の現象ではなく、同様の系で起きる一般的な現象であることを示すものとして学術的意義が大きい。火炎が非対称化する基本的物理は狭流路内の燃え拡がりにおいても同じであると考えられ、したがって本研究で得られた知見は酸素療法中の火災事故防止に役立つことが期待される。また、今後さらなる検証が必要ではあるものの、振動火炎の存在を示したことは本研究で得られた重要な知見の一つである。

研究成果の概要（英文）：This is an experimental and numerical studies to investigate the mechanism which induces asymmetry of opposed flames inside a narrow channel. A new experimental system to reproduce the corresponding physical process in the gas phase of flame spread in narrow channel was developed. It is confirmed both symmetric and asymmetric flames are successfully observed with this system. In addition, flame oscillation was observed under certain conditions, though this behavior was possibly caused due to non-uniformity of the fuel velocity. Numerical simulation based on the two-dimensional model was carried out and the critical condition under which the flame becomes asymmetric was identified. Further, a potential mechanism of the asymmetric flame was proposed.

研究分野：燃焼工学

キーワード：火災 燃え拡がり 対称性 プラスチック 狭流路

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、在宅酸素療法中に起きる火災事故が頻発している。在宅酸素療法は、プラスチック製の酸素チューブを通して鼻などから酸素を取り込む治療法で、日本国内の患者数は約 17 万人とされている。酸素チューブは可燃物(可燃性固体)であるため、酸素療法中にたばこなどの火源が近づくと着火して火がチューブ内部を燃え広がって火災へと発展する、火が人体にまで到達した場合には、死亡事故に至ることもある。このような酸素チューブ火災を防ぐには、火源を酸素チューブに近づけないなど使用上の注意を守ることが第一であるが、万が一着火した場合にも人体に到達する前に消火する、あるいは到達するまでの時間をできる限り遅らせるなどシステムのフェイルセーフ設計も重要である。

酸素療法システムの延焼防止策を確立するには、酸素チューブ内を火炎が燃え広がる際の燃焼性状を予測する必要がある。しかし、正確に予測するのは難しいのが現状である。その理由は、既存の燃え広がり理論は開いた空間に置かれた単一の可燃性固体平板上の燃え広がりを対象として構築されたもので、酸素チューブのように狭い空間内に火炎が近接して形成される系にはそのまま適用できないからである。さらに、円筒内の燃え広がりに関する研究事例が限られており[1]、そもそもこの現象に関する十分な知見が得られていないという問題もある。

我々は火災安全の観点から、酸素チューブ内の燃え広がりが二枚の可燃性固体平板で狭まれた空間の燃え広がりとして模擬できる[2]ことに着目し、研究を進めてきた。その一連の研究において、燃焼限界に近い条件では流路中心線に対して線対称に形成されていた二つの火炎が非対称となることを見出した[3,4]。流路内を燃え広がる火炎の非対称性は、近接する火炎同士の相互作用に起因して誘起された不安定性より発現したもの、すなわち狭流路内の燃え広がりを特徴づけるものと考えられる。だとすればそのメカニズムの解明は、狭流路内の燃え広がりを伴って発達する火炎の挙動を予測する上で重要な要素である。しかし、火炎が移動しながら非対称化するため観察が難しく、また現象が複雑であるため解明には至っていない。

2. 研究の目的

この研究の最終目標は、狭流路内の燃え広がりに関する知見を得て、その知見をもとに酸素チューブ火災の延焼防止策を確立することである。そのために、現象を特徴づける火炎の相互作用とその結果現われる非対称性の発現メカニズムを理解する必要がある。しかし、上述のとおり、現象の複雑さと観察の難しさのために、発現メカニズムは解明できていない。

燃え広がりが複雑である要因は、これが固相と気相における反応および輸送過程が連成している点にある。一方、観察が難しいのは火炎が移動しているからである。研究実施に先立ち予備検討を行ったところ、非対称性の発現は近接する火炎同士の相互作用に起因するもので、燃料が固体であるかどうかは重要ではないことが示唆された。このことを踏まえ本研究では、平行平板間の燃え広がりにおいて流路を構成する可燃性固体を気体燃料用バーナーに置き換える方法を提案する。これにより、任意の位置にあるバーナー上に静止火炎を安定的に形成することができるため詳細な観察が可能となるだけでなく、固相の物理過程を排除することで気相の物理過程にのみ着目して非対称性の発現メカニズムを検討することができる。この考えに基づき、本研究では狭流路内で向かい合った火炎に関する実験および数値シミュレーションを実施し、火炎が非対称となる条件を特定するとともに、非対称性の発現メカニズムを検討する。

3. 研究の方法

3.1 矩形流路型バーナー

はじめに気体燃料を用いた場合でも非対称な火炎が観察されるのかを検証するため、図 1 に示すような装置(以下、これを矩形流路型バーナーと呼ぶ)を開発した。これは二つのステンレス製直方体を整流装置の上に平行に設置し、その前後を薄板で挟んだもので、左右のバーナー間を酸化剤が下から流れ、それに直交するように中央部から燃料を供給する構造となっている。前面の薄板にはガラスを用い、ガラスを通じて燃焼中の様子を観察することができる。流路幅を調整できるように、装置右側のバーナーの下部にはステージが取り付けられている。酸化剤および燃料の供給ラインには流量計が接続されており、これを操作することで供給するガスの流速や濃度を調整することができる。また、実験中のバーナー温度を一定に保つため、バーナー上部には水冷機構を設けている。

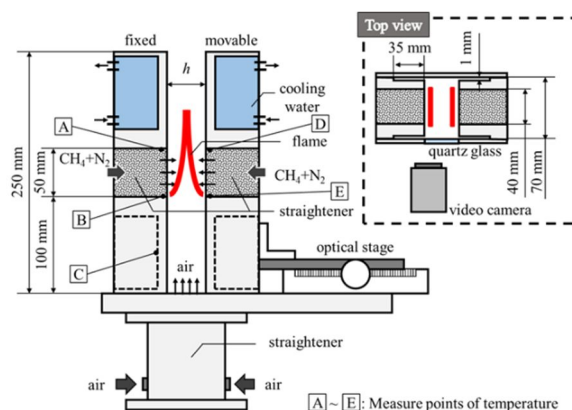


図 1 矩形流路型バーナーの模式図(正面図)。右上は上面図。

3.2 燃焼実験

図 1 に示す装置を用いて、様々な条件における燃焼実験を実施した。燃料には窒素希釈したメ

タン,酸化剤には空気を用いた.実験パラメータとして空気流速と流路幅を変化させて実験を行った.なお,研究初期にはメタンの濃度を変えた実験も実施したが,その後実験方法を見直し,最終的にメタンの流速および質量分率はそれぞれ 1.9 cm/s,0.22 で一定として実験を実施した.以下で述べる結果は,この条件で行った実験により得られたものである.

各パラメータを所定の値に設定してから空気とメタンを吹き出し,流路出口において着火させた.着火後,燃料の吹き出し口付近まで火炎は逆火し,流路内に火炎が形成された.この方法で着火しなかった条件においては,適当にパラメータを調整して強制的に着火させた後,各パラメータが所定の値となるよう素早く調整した.燃料吹き出し口下端でのバーナー壁面温度が 90 に達した時点で火炎の様子をカメラにより撮影した.

3.3 数値シミュレーション

次節で示すように,気体燃料を用いた場合でも対称および非対称火炎が観察されることが確認できた.次いで系の対称性を決めるパラメータについて詳細に検討するため,実験系を簡略化した二次元系について数値シミュレーションを実施した.ほとんどの条件において実験では二次元的な火炎が観察されたため,このモデルはおおむね妥当であると考えられる.

用いた基礎方程式は以下の三式である.

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + \frac{\partial \theta}{\partial \eta} = \frac{1}{Pe_T} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} \right) + \frac{Y_{F0} + sY_{O0}}{Y_{F0}Y_{O0}} \Omega$$

$$\frac{\partial Y_F}{\partial \tau} + \frac{\partial Y_F}{\partial \eta} = \frac{1}{Pe_F} \left(\frac{\partial^2 Y_F}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 Y_F}{\partial \eta^2} \right) - s\Omega$$

$$\frac{\partial Y_O}{\partial \tau} + \frac{\partial Y_O}{\partial \eta} = \frac{1}{Pe_O} \left(\frac{\partial^2 Y_O}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 Y_O}{\partial \eta^2} \right) - \Omega$$

はエネルギー保存式, と はそれぞれ燃料および酸素の化学種保存式である.ただし,燃料と酸素の物質拡散係数は等しいと仮定した. θ は温度, Y_F と Y_O は燃料と酸素の質量分率で,いずれの式も無次元化されている. s は酸素ベースの量論混合比, Y_{F0} と Y_{O0} は燃料と酸素の流入境界における質量分率である. Pe_F と Pe_O はそれぞれの化学種の物質拡散に関するペクレ数, Pe_T は熱拡散に関するペクレ数である.また,式の生成項に含まれる Ω は次式で表される無次元反応速度である.

$$\Omega = DaY_FY_O \exp\left(\frac{\beta(\theta-1)}{\gamma(\theta-1)+1}\right)$$

Da , β , γ はいずれも無次元パラメータで,それぞれダムケラー数,ゼルドビッチ数,火炎温度に対する系外への熱損失の比を表すパラメータである.なお,反応にはメタンの一段総括反応を仮定した.

方程式系に含まれるパラメータのうち Pe_T , β , γ および s を一定とし,さらに燃料と酸素の物質拡散係数は等しいとして,ダムケラー数 Da と物質拡散に関するペクレ数 Pe ($\equiv Pe_F = Pe_O$)を変えて数値シミュレーションを行った.ここで Pe_T と Pe の比であるルイス数 Le を考えると, Pe を変化させることは Le を変化させたと見なすことができる.火炎が非対称となる要因としてルイス数効果の一つである熱拡散不安定性が予想されたため,以下では Pe ではなく Le をパラメータとして扱い議論する.

4. 研究成果

4.1 燃焼実験による非対称火炎の検証

矩形流路型バーナーを用いた実験により観察された火炎を図2に示す.写真は図1の手前方向から撮影したものである.鉛直方向の白い点線はバーナーの壁面を,水平方向の白い点線は燃料吹き出し口の上端と下端を示している.図2に示すように,空気流速が小さい条件では流路中心に関してほぼ対称な火炎が形成された.両側の燃料吹き出し口の下端近くに火炎先端があり,ここで下から上に向かって流れる空気と水平方向に噴き出した燃料が反応していると考えられる.また,両側の火炎は下流で一体化しているように見える.空気流速が増加すると,片側の火炎が消失し全体として非対称な火炎が観察された.この状態では,下流で火炎の輝度が若干高くなっている様子が見られることから,ここで反応に使われなかった余剰燃料が反応していることが示唆される.なお,空気流速が大きい条件で非対称となる結果は,平行平板間燃え拡がりの数値シミュレーションでも確認されている[4].また,流路幅を変えて同様の実験を行ったところ,少なくとも今回行った実験条件の範囲では,流路幅が火炎形状におよぼす影響はあまり見られなかった.

実験条件によっては,図3に示すように左右もしくはどちらか一方の火炎が周期的に前進後退するような挙動が観察された.はじめに片側の火炎(図では左側)が下流に後退すると,やや遅れてもう片方の火炎(図では右側)が後退し始める.それと同時に左側の火炎が上流に向かって前進し,燃料吹き出し口の下端まで戻り最初の状態を反転させた形状になる.反転した火炎に

関して同様の過程が繰り返された結果、あたかも振動しているように見えるのである。このような振動挙動は燃え拡がりの実験では確認されていなかった現象であり、学術的に興味深い。ただし、本研究期間の初期に行った実験では様々な条件において振動挙動が観察されていたものの、研究期間後期に実施した実験では観察されなくなった。その理由について検討した結果、振動火炎は燃料流速の非一様性に起因して起きたもので、燃料流速が一樣な場合には起こらない可能性があることが示唆された。

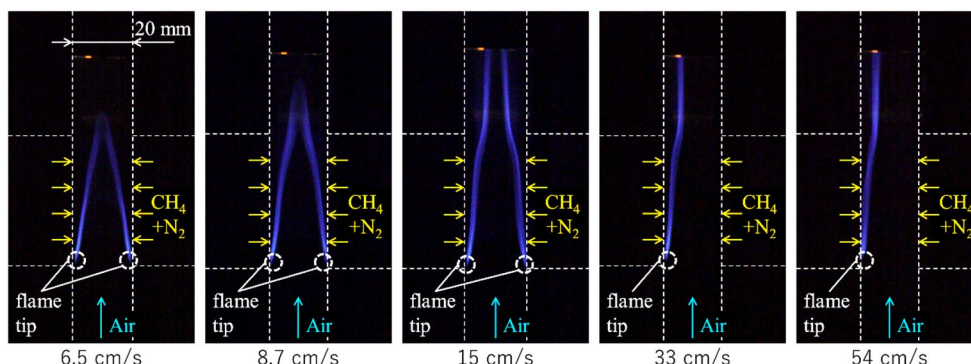


図2 流路幅を20mmとして行った実験で観察された火炎。写真の下の数値は空気流速を示す。

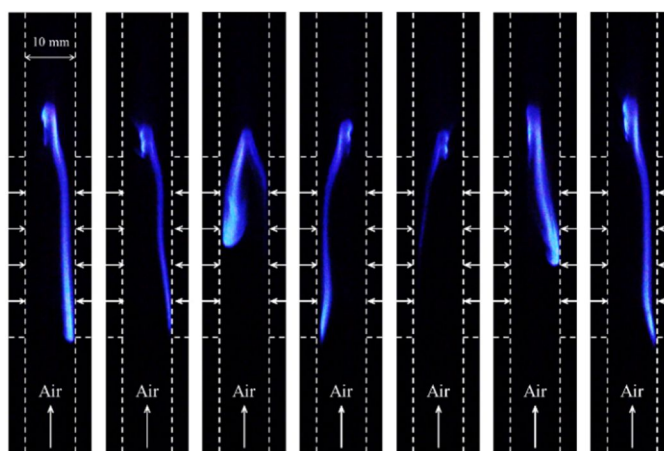


図3 流路幅10mm，空気流速15cm/sの条件で観察された振動火炎（この実験におけるメタンの質量分率は0.42）

4.2 数値シミュレーション

$Le = 0.5$ としてダムケラー数を変化させたときの反応速度分布を図4に示す。図の赤い部分が火炎の先端である。 $Da \geq 7.0 \times 10^4$ では全体として対称な火炎が形成されているのに対し、 $Da \leq 6.5 \times 10^4$ では右側に明確な火炎先端が形成されておらず、左下から右上に向かって繋がったような火炎が形成された。後者は流路中心線に対して対称ではないため、このような火炎を非対称火炎と判断した。なお、このシミュレーションでは、系に擾乱を与えるため流路の中央より左側の位置に着火源を設けており、そのため非対称となる条件では、左側に先端があるような火炎が形成されている（流路右側に着火源を設定した場合は右側に火炎先端が形成され、両側に着火源を設けた場合は火炎が非対称とならないことを確認している）。数値シミュレーションと実験で得られた火炎の形状がよく似ており、また非対称となる条件も同様の傾向を示していることから（ダムケラー数が流速に反比例することに注意されたい）、数値シミュレーションは定性的には現象を再現できていると考えられる。

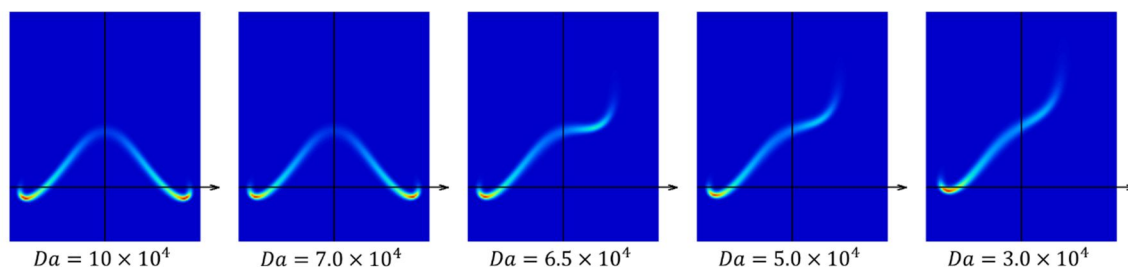


図4 数値シミュレーションにより得られた対称および非対称火炎

4.3 非対称性の発現メカニズム

図5は数値シミュレーションで得られた結果を、条件ごとに整理したものである。図中の破線は、それぞれの状態（対称、非対称および消炎）の臨界条件を示している。図より、非対称性の発現条件は、ルイス数が臨界値以下、かつダムケラー数が臨界値以下（ただし臨界値はルイス数に比例して増加する）であると考えられる。ルイス数が支配パラメータに含まれるということは、本研究で扱う現象と固体燃焼におけるフィンガリング不安定性（同じルイス数を支配パラメータとする）との類似性を示唆するものである。

ルイス数は熱拡散と物質拡散の比であり、1以下では物質拡散の方が熱拡散に比べ強く働き、未燃側（この系では上流側に相当）に凸な領域では燃焼が強められ、既燃側（この系では下流側）に凸な領域では弱められる[5]。一方、ダムケラー数は流れと反応の特性時間の比であり、臨界値以下では火炎は消炎する。このことを踏まえ、以下では非対称性の発現メカニズムについて検討する。

何らかの擾乱の作用（例えば流路内の速度分布が変動するなど）により火炎の対称性が破れた状態を考える。ルイス数が臨界値以下のとき、熱と物質拡散の不均衡効果により上流側に張り出した火炎に酸素供給が集中し、反対側の火炎近傍では酸素不足状態となる（図5より臨界値は約0.8であることに注意されたい）。さらにこのときダムケラー数も十分小さいとすると、酸素不足となった側は、燃焼が弱められているため局所消炎する。その結果、反応に使われなかった酸素と燃料は混合しながら下流へと流れるが、上流側に残った火炎から予熱を受けるため、下流の適当な位置で再着火する。こうして上流で消えずに残った火炎と下流で再着火した火炎が形成され、最終的に非対称な状態が実現される。臨界ルイス数が1よりも小さいのは、火炎先端の曲率が大きく、それによる安定化効果が作用したためであると考えられる。メタンのルイス数は1よりも小さく、また実験でも空気流速の大きい燃焼限界近傍で非対称性が発現することから、ここで提案するメカニズムは実験結果とも矛盾しない。ただし、今後定量的に実験と数値シミュレーションの結果を比較するには、モデルや計算に用いた各パラメータについてより詳細に検討していく必要がある。

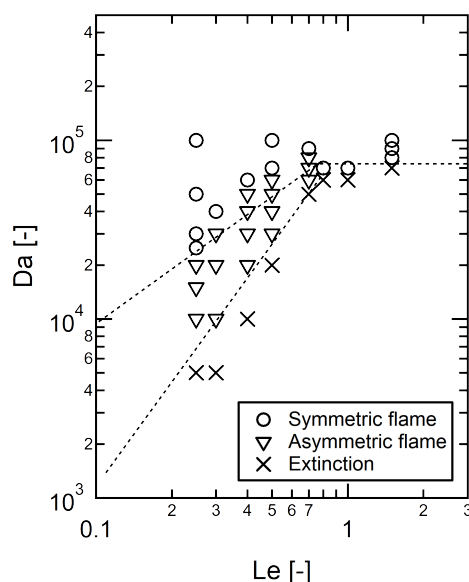


図5 発現条件のマッピング（○：対称火炎，▽：非対称火炎，×：消炎）

4.4 成果のまとめ

本研究により得られた成果を以下にまとめる。

1. 狭流路内燃え拡がりの気相における物理過程を模擬できる矩形流路型バーナーを開発した。開発した装置を用いて実験を行い、気体を燃料とした系においても火炎が非対称となることを確認した。
2. 条件によっては振動挙動が観察される場合があることを示した。ただし、これは燃料流速の非一様性に起因して起きた可能性があるため、さらなる検証が必要である。
3. 二次元モデルに基づく数値シミュレーションを実施し、実験で観察された対称火炎および非対称火炎を再現した。さらに、ダムケラー数およびルイス数を変えたパラメトリックスタディにより、火炎が非対称となる臨界条件を明らかにした。さらに非対称性の発現メカニズムを提案した。

火炎が非対称化する基本的物理は可燃性固体を燃料とする狭流路内燃え拡がりにおいても同じであると考えられる。したがって、得られた知見は狭流路内燃え拡がりで観察された非対称状態についても適用可能であると期待される。

<引用文献>

- [1] G.W. Sidebotham, S.L. Olson, Combust. Flame, 154 巻, 2008, 789-801
- [2] T. Matsuoka, K. Nakamshima, T. Yamazaki, Y. Nakamura, Combust. Sci. Technol., 190 巻, 2018, 409-424
- [3] 松岡常吉, 村上智志, 山崎拓也, 中村祐二, 日本機械学会論文集, 83 巻, 2017, 17-00009
- [4] T. Matsuoka, S. Murakami, T. Yamazaki, Y. Nakamura, Combust. Sci. Technol. Advanced online publication. <https://doi.org/10.1080/00102202.2018.1534838>
- [5] C.K. Law, Combustion Physics, Cambridge University Press, 2010

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Matsuoka Tsuneyoshi, Yoshimasa Akihiro, Masuda Masashi, Nakamura Yuji	4. 巻 56
2. 論文標題 Study on Fingering Pattern of Spreading Flame Over Non-charring Solid in a Narrow Space	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Fire Technology	6. 最初と最後の頁 271-286
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10694-019-00865-1	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 Tsuneyoshi Matsuoka, Satoshi Murakami, Takuya Yamazaki, Yuji Nakamura	4. 巻 -
2. 論文標題 Symmetric and nonsymmetric flame spread between parallel plates of thick combustible solid	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Combustion Science and Technology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/00102202.2018.1534838	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11件（うち招待講演 2件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 松岡常吉, 佐藤駿, 安田大晃, 桑名一徳, 中村祐二
2. 発表標題 狭流路内に形成された対向火炎に関するパラメトリックスタディ
3. 学会等名 第57回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 増田雅士, 溝口哲也, 松岡常吉, 桑名一徳, 中村祐二
2. 発表標題 並行流中での薄い円形固体上の燃え拡がりにおける分裂挙動
3. 学会等名 第57回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤駿, 松岡常吉, 安田大晃, 中村祐二
2. 発表標題 直交流中に向かい合って形成された拡散火炎の形状と挙動に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会熱工学コンファレンス2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松岡常吉, 増田雅士, 溝口哲也, 桑名一徳, 中村祐二
2. 発表標題 薄い固体の燃焼時に現れるフィンガリングパターンの評価
3. 学会等名 日本機械学会熱工学コンファレンス2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松岡常吉, 増田雅士, 吉政彰泰, 中村祐二
2. 発表標題 熱的に厚い固体の有炎フィンガリングの支配パラメータに関する検討
3. 学会等名 日本実験力学学会2019年度年次講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tsuneyoshi Matsuoka
2. 発表標題 Combustion Instability and Pattern Formation of Flame Spread
3. 学会等名 Special Seminar on Combustion and Fire Sciences (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松岡 常吉, 京極 友宏, 小池 悠太, 寺田 啓人, 中村 祐二
2. 発表標題 変形しながら燃焼する熱可塑性樹脂形状の時系列三次元計測
3. 学会等名 第56回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 村上 智志, 松岡 常吉, 佐藤 駿, 中村 祐二
2. 発表標題 直交流中に向かい合って形成された拡散火炎の対称性の破れ
3. 学会等名 第56回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉政 彰泰, 増田 雅士, 松岡 常吉, 中村 祐二
2. 発表標題 厚い固体の燃え拡がりにおいて現れるフィンガリングパターンの評価
3. 学会等名 第56回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tsuneyoshi Matsuoka
2. 発表標題 Near-limit instabilities of opposed flame spread over thick solid combustibles
3. 学会等名 15th International Conference on Flow Dynamics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tsuneyoshi Matsuoka, Satoshi Murakami, Shun Sato, Yuji Nakamura
2. 発表標題 Dynamic behavior of adjacent two diffusion flames in crossflow
3. 学会等名 37th International Symposium on Combustion (国際学会)
4. 発表年 2018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
--	---------------------------	-----------------------	----