

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04944

研究課題名（和文）超音波で消す革新的消火方法開発のための流れと火炎の干渉メカニズムと最適条件の解明

研究課題名（英文）Elucidation of Flow-Flame Interference Mechanisms and Optimal Conditions for the Development of Innovative Fire Extinguishing Methods Using Ultrasonic Waves

研究代表者

廣田 光智（Hirota, Mitsutomo）

室蘭工業大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：50333860

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：手術室などの水が使用できない閉空間での火災を少ない電力で簡単に消火させるために、音（超音波）を用いた新規消火方法を提案した。超音波による進行波や定在波を形成した空間中では圧力振動により流れ場が変形する。この音の効果を火炎の根元に作用させることにより、後流側の火炎の反応を抑制し消火に至らしめた。本研究では、流れ場の変化をレーザー計測などにより可視化し、火炎挙動と対比させることで、超音波中の火炎が消火に至るメカニズムを調査した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

震災の二次災害などの同時多発的に発生した火災に対して、消防隊の消火活動が遅れた場合でも無人で抑制・消火ができるような抜本的な対策・技術開発が必要である。しかも電源喪失・断水・閉空間などの消火に厳しい条件が重なることを想定しなければならない。本研究結果により、超音波定在波の効果で発生した流れによって火炎や発熱源が変形・除去されて小さくなり、消火に至るメカニズムが明らかになった。これにより、消火剤として水を使用できない閉空間において発生した、まだ規模の小さい火災に対して初期消火装置として適用が可能であることが示された。

研究成果の概要（英文）：We proposed a new fire extinguishing method using sound (ultrasonic waves) to easily extinguish a fire with little power in an enclosed space where water is not available, such as an operating room. In a space where ultrasonic waves form traveling and standing waves, the flow field is deformed by pressure oscillation. By applying this sound effect to the base of the flame, the reaction of the flame in the backstream was suppressed and the fire was extinguished. In this study, the mechanism of flame extinction in ultrasound was investigated by visualizing the changes in the flow field by laser measurement and contrasting them with flame behavior.

研究分野： 燃焼工学

キーワード： 超音波 消火 流れの可視化

### 1. 研究開始当初の背景

日本では、多くの大地震が起こっている。これらの例では震災だけではなく、それに付随する大規模な電源喪失やインフラ破損などにより二次災害が起こることもわかってきた。したがって早期に対策が必要である。もし、同時多発的に火災が発生した場合、既存の消火戦略では不十分である。つまり、すでに震災によって想定外に初期消火ができない状況になっていることから、これまでのような消火方法ではなく、電源喪失・断水・無人においても抑制・消火ができるような抜本的な対策・技術開発が必要である。特に手術室や大型コンピュータなどで管理するデータセンターなどの当初から消火に水が使用できない閉空間の場合、火災鎮圧後の早期普及も考慮したうえで、大規模火災に拡大しないような予備電源程度の電力で無人でも初期消火程度の能力を有する新規消火設備が望まれる。

申請者は、これまでに超音波の定在波を形成してその空間中に燃焼領域があった場合、条件によっては火災の安定性が良くなって燃焼改善が可能であることを示してきた。この方法を援用して、燃焼領域をわざと不安定条件にすることで火災形成の安定性を悪化させ最終的に消滅に至る条件を見つければ、水を使わずに初期消火程度の火災抑制が可能だと考えた。現状では、超音波によって消火が可能な条件や音で誘起された流れと干渉して火災が消滅に至るメカニズムがわからない。また火災の火元が固体、液体、気体などの相の違いによって燃焼形態が変わるため、それぞれの火源において超音波による消火能力の知見が必要である。これらによって装置化に向けた基礎特性を得たい。

### 2. 研究の目的

本研究では、固体、液体、気体中に形成される火災の燃焼抑制・消火が可能な、水を用いない超音波による新規消火方法の開発を目的とする。特に、超音波が作用する空間の流れの三次元挙動と火災との干渉から得られる最適消火条件を調査することで、通常の散水消火方法の適用が困難な閉空間で発生した火災の拡大抑制とその消火を効率的に行う革新的方法の確立を目指す。

具体的には、ろうソクなどの芯をともなう火炎、被覆電線に沿って燃える火炎、線香の燃焼先端、アルコール液体燃料によるプール火炎を対象に消火実験を行う。超音波によって得られる音圧分布や流れを測定し、消火との関係を調査する。超音波の進行波あるいは定在波を用いた場合の消火の可否を様々な条件で調査し、初期消火装置として最適な照射条件を得る。

### 3. 研究の方法

#### (1) 超音波発生装置

図1は、超音波を発生させる装置の構成図である。ファンクションジェネレータ (NF回路設計ブロック製: WF1974) で発生させた正弦波をバイポーラ電源 (NF回路設計ブロック製: HSA4051) に入力した。ここからの出力はインピーダンス整合用のマッチングトランス (本多電子製: 特注) により調整してボルト締めランジュバン型振動子 (BLT: Bolt clamped Langevin-type Transducer, 本多電子製: HEC-3020P2B) に接続し、共振周波数 20kHz 近傍で駆動させた。直径 30mm の振動面から進行波を照射する場合と、振動面と同軸上で振動面から 37.5mm 位置に振動子と同じ直径・同じ素材の反射面を対向して設置したときに得られる定在波を照射する場合の、二つに分けて実験を行った。線香などの消火対象の火源は、この進行波あるいは定在波の領域に設置した。なお、超音波はまず進行波で照射して実験を行い、進行波で消火が困難な時には比較的広い範囲で高い音圧分布を得られる定在波を用いた。

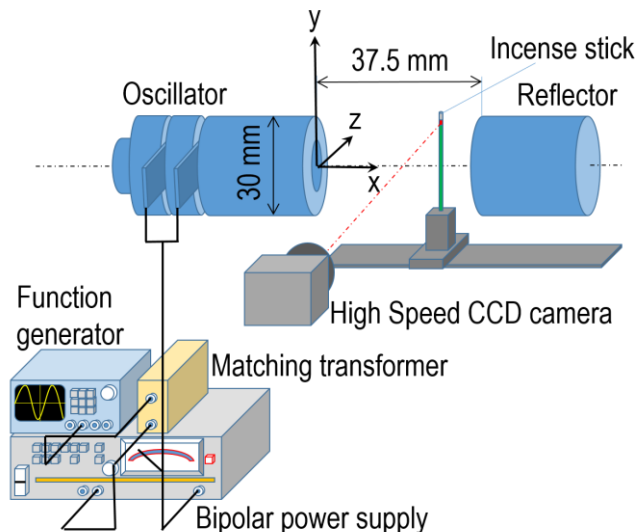


図1 実験装置概略図

線香などの消火対象の火源は、この進行波あるいは定在波の領域に設置した。なお、超音波はまず進行波で照射して実験を行い、進行波で消火が困難な時には比較的広い範囲で高い音圧分布を得られる定在波を用いた。

#### (2) 音あるいは流れの測定

超音波によって得られる音場の音圧は、小型マイクロフォン (RION 製: UC-29, 直径 1/4 inch, 20~100,000 Hz) による騒音計 (RION 製: UN-14) で測定した。流れ場の様子はシュリーレン光学系による密度勾配の変化として撮影した。また、局所の流速は熱線流速計 (KANOMAX 製: ) で測定した。また、加湿器による水ミスト (ザウター平均粒径 7.1 $\mu$ m) あるいは線香の煙 (粒径 0.5~1.5  $\mu$ m: 西華デジタルイメージ社による計測例) をトレーサとして使用し、ハイス

ピードカメラ（ディテクト製：HAS-L2）で火源周囲の流動を撮影した。このとき、速度の分布は粒子画像流速計（PIV: Particle Image Velocimetry）、粒子挙動は粒子像追跡流速計（PTV: Particle Tracking Velocimetry）によってそれぞれ測定した。光源は LD 励起連続発振レーザー（CNI 製：MGL-FN-532-500mW）を用いて厚さ 1mm 程度のシート光を照射した。

### (3) 対象とする燃焼形態とそれぞれの実験方法

ろうそくあるいはアルコールランプを火源とした消火実験は、次のように行った。BLT の真横にろうそくあるいはアルコールランプを設置した。ろうそくやアルコールランプに着火し、超音波領域に火炎を近づけて消火に至った時の火炎基部の位置を測定した。印加電圧を変化させて同様の消火実験を繰り返し行った。

被覆電線の伝播火炎の消火実験は、次のように行った。35 mm×40 mm の矩形断面バーナから酸素ガスを一様流速で流出させた。バーナ出口から 30 mm の高さに水平に被覆電線（0.12 mmφ10 芯、外径 1.3 mm）を設置し、片側から着火して火炎を伝播させた。直径 30 mm の BLT を電線の真横 10 mm 離れた場所に設置した。実験は、まず BLT からの音圧を測定した。BLT に対して騒音計を正対させ、BLT からの距離と半径方向位置を変化させて音圧レベル分布を測定した。次に電線に沿って伝播する火炎挙動を二つのハイスピードカメラを用いて正面と斜め上からの画角で撮影した。このときバーナからの酸素流速を変化させて電線の火炎伝播速度を変化させた。BLT を駆動させずに電線に着火し、ある程度火炎が伝播した後、BLT を駆動させてその消火挙動を観察した。電線の着火後に BLT を駆動して、火炎伝播が抑制され消火に至ったものを消火成功としてカウントした。10 回の消火実験のうち消火成功となった確率を消火確率として算出した。

エタノールを燃料としたプール火炎の消火実験は、次のように行った。縦 6mm 横 20mm のステンレス製の容器にエタノール（和光純薬：99.5%）を注ぎ液体燃料のプールとした。ここに着火して準定常火炎を形成し、その後、超音波の進行波を照射した。また着火する前にあらかじめ超音波を作用させ、音場中を火炎が伝播するような挙動も観察した。これらの火炎挙動はハイスピードカメラを用いて撮影した。

線香のくん焼の消火実験は、次のように行った。線香は、平均直径 2 mm の市販品（日本香堂製：毎日香）を使用した。BLT の振動面の同軸上で振動面から 37.5mm 離れた場所に、振動子と同じ直径 30mm のジュラルミンの反射面を対向して設置した。この挟まれた領域に超音波の定在波を形成し、この領域に線香を 1 本立てた。線香の燃焼の様子は、ハイスピードカメラで撮影した。消火の実験は、振動子の駆動電力を 45 W で固定して行った。線香に着火後に超音波を駆動させ、くん焼部分が消滅したときを消火成功として、5~10 回繰り返し行った。消火成功回数を実験回数で割って消火確率と定義した。

## 4. 研究成果

### (1) 研究の主な成果

#### ①消火特性

図 2 は、ろうそくの火炎を対象として、超音波進行波を真横から照射し消火に至ったときの火炎基部の位置を表している。横軸は振動面からの音軸方向距離、縦軸は振動子を動かし消火した瞬間の火炎基部と振動子下端までの距離を表す。上下 2 つのプロットの間に位置する空間が、消火が可能な範囲であることを示している。この範囲内に火炎が存在すると吹き飛ばようにして消炎に至る。またこの範囲外に存在する火炎は一方に押し曲げられるが消炎には至らない。また印加電圧が 60 V、80 V、100 V と増加させるほど、消火範囲が拡大されることなどがわかった。同様の範囲において測定した音圧レベルと比較すると、139 dB 以上の音圧レベルの範囲に火炎基部が侵入すると火炎全体が消炎すること、印加電圧が大きいほど音圧の大きい領域が振動面とは鉛直方向に拡大されること、その影響範囲は半径方向には広がらないことがわかった。

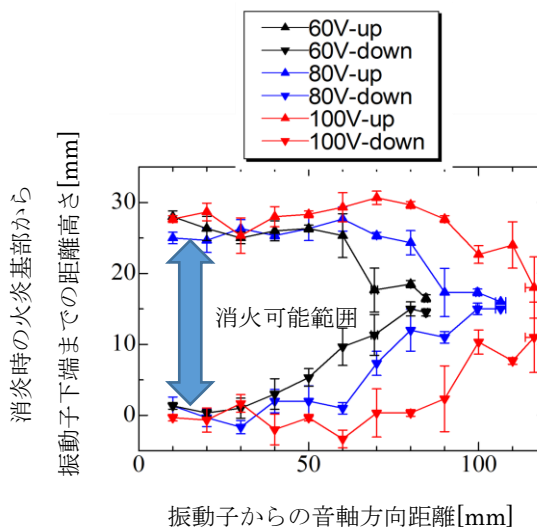


図 2 ろうそくの火炎を消火できる範囲

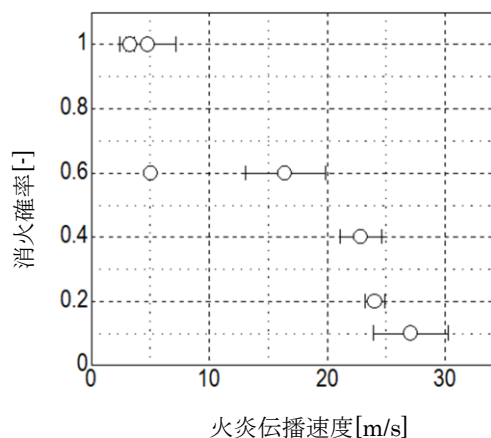


図 3 被覆電線に沿った火炎の消火確率

図3は、被覆電線に沿った伝播火炎に対して超音波進行波を真横から照射したときの消火確率を表している。超音波を照射しない場合に得られる火炎伝播速度と、超音波により消火に至った消火確率の関係を示している。縦軸は消火確率、横軸は火炎伝播速度である。図より、火炎伝播速度が15 mm/s 近傍から消火確率が低下し、火炎伝播速度が27 mm/s ではほぼ消火できず超音波照射領域を火炎が通過してしまうことがわかった。

図4は、エタノールプール火炎と斜め上から照射された音場が干渉してプールの端面から火炎が消炎する度合いを測定したものである。超音波振動子はプールの短辺側に設置した。横軸はBLTの振動面から液面までの距離、縦軸は超音波を照射して火炎が形成されていない領域の幅であり、プール端から火炎先端位置までの距離を測定したものである。各プロットは、○が超音波照射前にすでに火炎を形成させた場合、●が火炎伝播前にすでに超音波を照射した場合の結果である。図より、伝播火炎の場合(●)、液面から60mm程度離れた位置から照射しても火炎を60mm遠くで停止させて延焼を抑える効果があることがわかった。ただし同様の効果は定在火炎(○)では得られなかった。

図5上側は、それぞれの線香の設置位置(x軸位置)に対する消火確率である。騒音計で得られた音圧の実効値と重ねて表示した。縦軸は消火確率あるいは音圧の実効値、横軸はx軸位置である。図5下側は、超音波定在波中に発泡スチロール片が保持される圧力の節の位置をプロットした。図より、概ね圧力の節の位置近傍において消火確率が1となって確実に消火されていること、圧力の腹の位置近傍で消火確率が急激に低下して消火が難しくなることが分かった。

#### ②流れの特性と消火に至るメカニズム

ろうそくと被覆電線上の伝播火炎は、火炎の熱によって固体燃料が気化して

周囲空気に拡散し形成されている点で類似している。そこでこれらの火炎が消火に至った過程を流れ場の可視化計測を考慮して検討した。図6は、熱線流速計で測定した超音波進行波中の速度分布である。振動面の中心を原点として、振動面から垂直方向にx軸、半径方向にy軸、測定される流速をz軸としている。図より振動子中心付近で0.6m/s程度のx軸方向速度が誘起されていることが分かった。図7は、被覆電線に沿って伝播する火炎のシュリーレン画像である。超音波を照射していないt=0sに比べて、照射後t=2.25sでは、火炎の大きさが小さく密度勾配の大きい領域も小さくなっていることがわかる。これらより、ろうそくや被覆電線上の伝播火炎は、超音波進行波の照射により振動面から遠ざかる方に音響放射力で押し倒されて火炎が小さくなり、発熱量が減ることで固体燃料の気化量が減って消火に至ったことがわかった。

液体燃料の伝播火炎は、全体を消火させることができなかったが、火炎伝播の進行方向に対して対向させて超音波進行波を照射すると伝播を抑制できた。これが可能となった理由を流れ場の計測から検討した。図8は、PIVによって測定された超音波振動子前方の流速分布である。図より振動子から60mm程度離れた領域で誘起される流れの速度は0.2m/s程度であることがわかった。液体燃料表面の火炎の伝播速度はこれよりも速いため、流れが対向しただけでは抑制できない。したがって、この場合は火炎が前方からの音響放射力により後ろ側に押し倒され、伝播先端領域での加熱量が格段に減って進行を抑制したことがわかった。

線香のくん焼は、定在波によって消火が可能となったので、定在波中の粒子挙動から検討した。図9は、超音波の定在波の圧力の腹の位置上方から微粒子が自由落下する軌跡を重ね合わせた

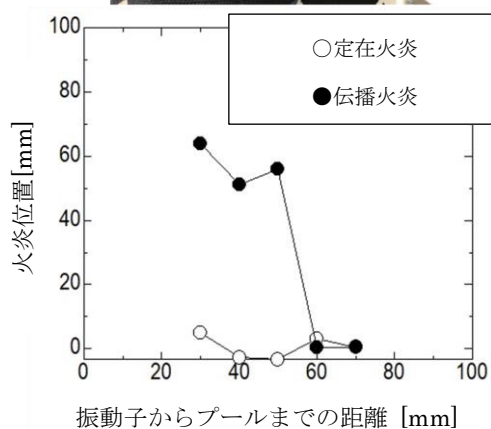
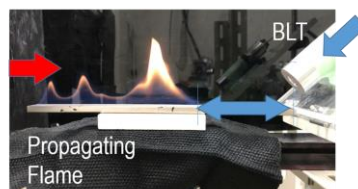


図4 エタノールプール火炎の伝播抑制

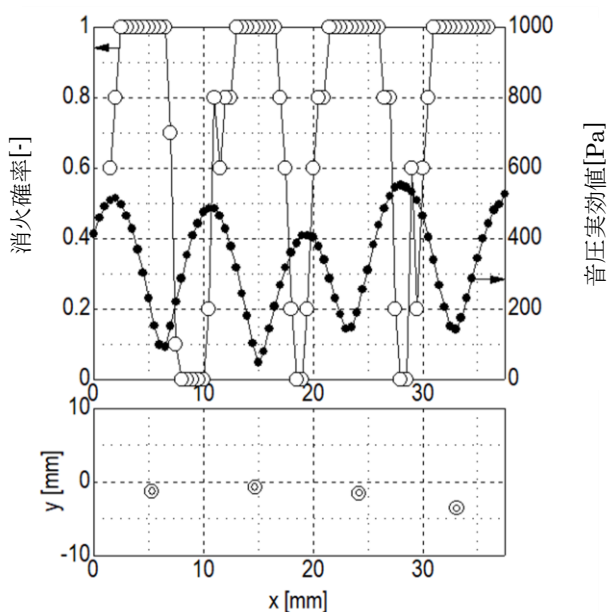


図5 線香の消火確率と音圧の関係

ものである。図より、圧力の腹から節に向かって横方向に流されている様子が観察され、その後慣性力が強く圧力の節を通過して反対側の腹側に移動したあとは再び圧力の節側に引き寄せられていることがわかった。図10は、圧力の節近傍に設置した線香の消火直前の挙動である。図より、発生した煙は線香の下側に線香から離れる方向に押し広げられていた。またくん焼の先端が振動面と反射面側に吹き飛ばされ加熱量が減ってやがて消えることがわかった。これらより、圧力の節に向かって音軸の前後から音響放射力がかかることで線香のくん焼部分が反力で飛散し、加熱部分が小さくなって消火に至ることがわかった。

### ③当初予期していない新たな知見

超音波の非線形音響効果を利用して密度差のある界面に音の力を作用させて火炎を変形することを応用して消火が実現できると考えていたので、無炎燃焼(くん焼)の場合は消火効果が得られず、くん焼速度の低下などの抑制効果のみ得られるものと当初予期していた。実際には、くん焼領域近傍に発生した流れと非線形音響効果の力によってくん焼部分が吹き飛ばすこととなり、消火が実現できた。すべてのくん焼の形態に適用できるものではないが、有炎燃焼だけでなく無炎燃焼においても条件によっては消火が可能であることが当初予期していない新たな知見であり、住宅火災の延焼抑制にもつながる興味深い点である。

### (2) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

音を用いて燃焼を改善させる方法は従来から検討されているが、音を作用させて火炎を消炎させようとする例は世界的に見てもほとんどない。現状で音による消火方法として公開されている米国での研究例は周波数の低い音を用いるもので、音の指向性が低くその効果が広い領域に拡散して弱くなってしまふ。これを回避するためにノズル部を工夫して渦輪を生成して消火させているが、そもそも強い低周波音が消火活動そのものを妨げてしまふ。本研究は、可聴音よりも周波数の高い超音波を用いているため指向性が高く、音の効果を集中させることができる。これにより装置の小型化・簡素化が容易であるという利点を有する。さらに本研究結果により火災の規模がごく初期の段階なら、様々な火災の形態に対してその抑制と消火の効果が確認できた。したがって閉空間で水を使用できない特殊環境での初期消火方法として実用化に向けた基礎的知見が得られたといえる。

### (3) 今後の展望

本研究が対象としている特殊環境の火源は、天井、床面、壁面などの固体表面上に配置されている。もし超音波を固体表面近くの火源に照射する場合は、壁面との干渉を考慮して火源が壁面側に押し付けられる方向に照射して熱損失を促して消火するなどの工夫も考えられる。今後の実用化に向けては、本研究成果の基礎的知見をもとに、使用環境での具体的な設置・動作を想定した調査が必要である。

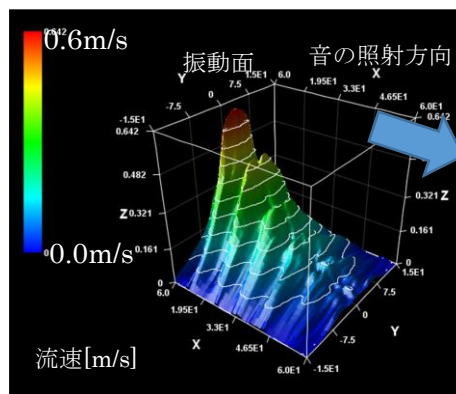


図6 超音波進行波中の速度分布

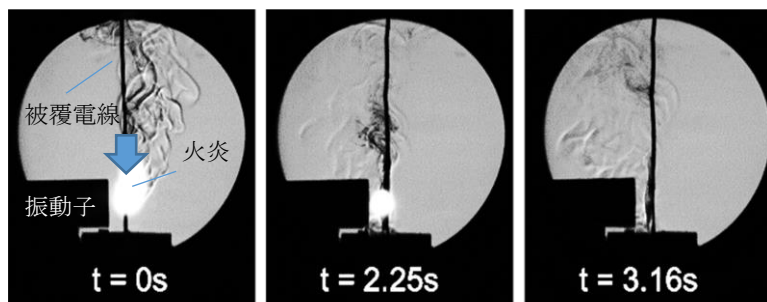


図7 被覆電線に沿った伝播火炎のシュリーレン画像

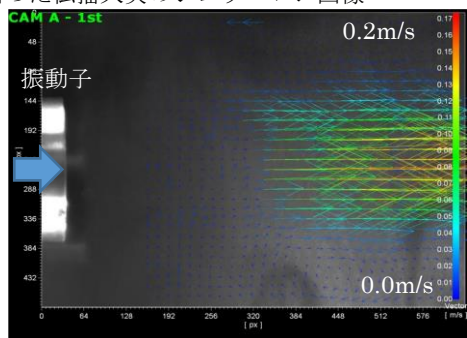


図8 超音波進行波中の速度ベクトル分布

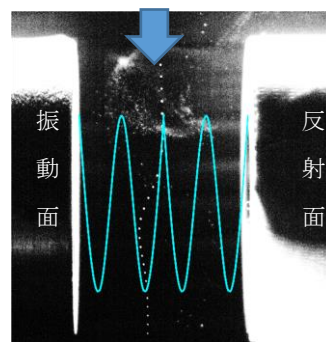


図9 超音波定在波中の微粒子の軌跡

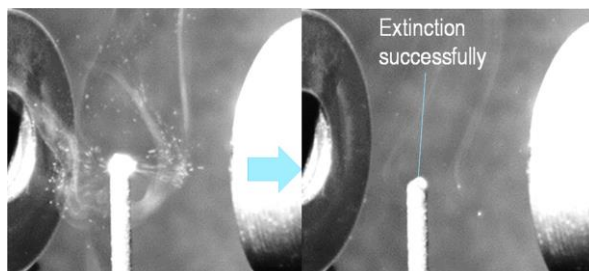


図10 線香の消火直前の挙動

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 廣田光智、道政幸成、中村祐二、
2. 発表標題 超音波を用いた電線火災の消火
3. 学会等名 2020年度火災学会研究発表会，日本火災学会，2020年度火災学会研究発表会講演論文集，
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 廣田光智，道政幸成，中村祐二，畠中和明，
2. 発表標題 超音波が電線に沿って伝播する火災を消火させるときの流れ場の変化
3. 学会等名 日本機械学会第98期流体工学部門講演会，日本機械学会，日本機械学会第98期流体工学部門講演会講演論文集，
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 道政幸成，廣田光智，中村祐二，畠中和明，
2. 発表標題 超音波を干渉させた火災周辺の密度や流れ場の可視化
3. 学会等名 第58回燃焼シンポジウム，日本燃焼学会，第58回燃焼シンポジウム講演論文集，
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 道政幸成、廣田光智、畠中和明、中村祐二
2. 発表標題 超音波による可燃性固体燃え広がり抑制
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 辻本竣也、三浦航星、廣田光智、中村祐二、畠中和明
2. 発表標題 様々な燃焼状態に作用させた超音波による消火効果
3. 学会等名 第59回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

推進工学研究室（燃焼班）へようこそ  
<https://pelmit2015.wixsite.com/pelmit>

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