

令和元年6月19日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K01279

研究課題名(和文) 最適な表面性状の高温固体面への液滴衝突でミストを生成・輸送する新規消火方法の開発

研究課題名(英文) Development of a new fire extinguishing method to generate and transport mist by droplet impact on high temperature solid surface with optimum surface properties

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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：この研究は、加熱された固体表面を粗くして、衝突した消火剤液滴の蒸発を促す。新規消火方法の確立を目指すものである。これにより、通常は消火が難しい大規模火災においても効率的に消火させたい。

液滴衝突で発生した消火剤ミストと蒸気の拡がりを三次元で可視化する方法を開発した。その結果から、ミストで火を消しその後蒸気で周辺を窒息させると消火が完了することがわかった。また固体表面性状・液滴径・衝突条件などに最適値があることがわかった。これらの最適条件を用いて、複数の液滴により広範囲に消火が可能となることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

東日本大震災において各地で生じた火災では、現場の温度が高温となり投入した水が消火に有効な蒸気やミストにならなかった。火災現場のように固体表面が加熱されていると、衝突した水滴と伝熱面との間に蒸気が膜状に形成されるいわゆる膜沸騰となり、水が蒸発しにくくなる。本研究により液滴一滴の効果が明確になったので、その効果の重ね合わせをすればより少ない水で消火が可能となる。また、蒸気やミストなどの軽い消火剤が到達しにくい大規模火災現場でも、火炎直前まで直径の大きい液滴として消火剤を輸送すればよいので、消火の確率が上がる。

研究成果の概要(英文)：This study aims to establish a new method of extinguishing fires by roughening the heated solid surface and promoting the evaporation of impacted extinguishant droplets. In this way, we want to efficiently extinguish even large-scale fires that are usually difficult to extinguish.

We developed a method to visualize the spread of extinguishant mist and vapor generated by droplet collision in three dimensions. From the results, it was found that extinguishing the fire with mist and then suffocating the area with steam completed the extinction. It was also found that there are optimum values for solid surface properties, droplet diameter and collision conditions. Using these optimal conditions, it was found that multiple droplets could be used to extinguish extensively.

研究分野： 燃烧工学

キーワード： 間接消火 二次微粒化 ミスト可視化

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

内閣府の平成27年度版防災白書①によると、南海トラフ地震や首都直下地震が直近のターゲットとして地震津波災害対策が策定されている。その中で、今後10年間で達成すべき減災目標のひとつに、石油コンビナート防災対策の充実等が挙げられ、大規模火災への備えが示された。東日本大震災において各地で生じた火災では、現場の温度が高温となり投入した水が有効に消火に作用しなかった。火災現場において固体表面が加熱されると、水滴と伝熱面との間に蒸気が膜状に形成されるいわゆる膜沸騰へ遷移し、蒸発しにくくなる。申請者は、固体表面の粗さを粗くすることで通常は液滴が膜沸騰となるような高温でも蒸発させることを可能とし、後流側の火災を消火できることを発見した②。固体表面粗さを粗くすることで膜沸騰温度を高温側へ移行できることは数多くの伝熱研究③から予測はできるが、それと同時に発生したミスト群を輸送して火災にぶつけ、消火に至らせる例はこれまでにない。ただし現状では発生したミスト群が火災に輸送されるメカニズムが不明確で消火確率が上がらないため、改善が必要である。

2. 研究の目的

表面性状を粗くすることで固体表面が高温でも衝突した消火剤液滴からミストを発生・輸送し、このミストによって後流の火災を消火させる新規の間接消火方法の開発を目的とする。申請者の従来成果を応用して、火炎基部（火炎の最上流端）へミストを連続的に輸送し確実に消火させたい。そのために液滴衝突による後流側への流れの発生とそれによるミストの最適輸送条件を調査する。これにより、通常は消しにくい大規模火災において消火効率を向上させる革新的方法の確立を目指す。具体的には、(1) まず高輝度連続発振レーザとハイスピードカメラを用いて、水滴が固体表面へ衝突しミスト群を発生する挙動を時系列に可視化することで消火に必要な条件を調査し、(2) 次に発生したミスト群の輸送挙動を把握するために、走査型ガルバノミラーを用いてレーザ光を奥行き方向に短時間に走査する工夫を施し、これによるミスト群の同時刻断層写真を取得・再構成してその拡がりや評価しながら液滴径や衝突角度の影響も含めて消火に至るメカニズムを調査し、(3) これらの結果をもとに複数液滴を連続滴下して発生するミスト群を干渉させ、これにより拡大される消火範囲を調査した。

3. 研究の方法

(1) 単一液滴衝突による消火実験

図1は実験装置の概略図である。ある高さからマイクロシリンジ (Hamilton, 1010TLL) を用いて直径 $4.08\text{mm} \pm 0.11\text{mm}$ の水滴を落下させた。これをホットプレート (MSA ファクトリ, カスタムホットプレート) の上にのせたステンレス皿に衝突させ、その蒸発挙動をハイスピードカメラ (ディテクト, HAS-L2M) によって撮影した。このとき照明としてメタルハライドランプ (Photoron, HVC-SL) を用いた。ステンレス皿から25mm上方では直径4mmの円管からメタンガスを 0.31m/s で噴出させて拡散火炎を形成し、発生したミスト群がこれを完全に消火させたときを消火成功とした。この消火実験を同条件で20回繰り返し、そのうち消火に成功した回数を繰り返し数20で除して消火確率とした。この実験を、液滴衝突表面温度、液滴落下高さ、衝突面性状、液滴への二酸化炭素溶存度をそれぞれ系統的に変化させて行った。なお衝突面性状は、ステンレス皿そのもの・両面テープでいわき硅砂を付着させたもの、セラミック系接着剤 (アロンセラミック, C) でいわき硅砂を付着させたものを作成し、表面粗さ計 (Mitsutoyo, SJ-410) で粗さを、注水法で空隙率を、それぞれ測定した。また液滴への二酸化炭素の溶存方法は、マイクロバブル発生装置 (西華産業) を用いて行い、その溶存量は、ポータブル炭酸ガス濃度計 (東亜ディーケーケー, CGP-31) で計測して、常温の最大溶解度に設定した。

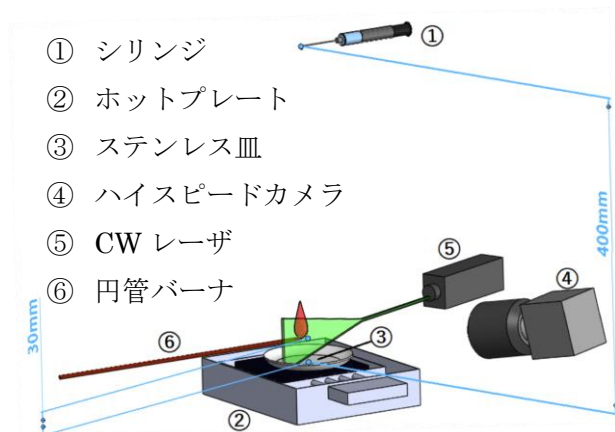


図1 実験装置概念図

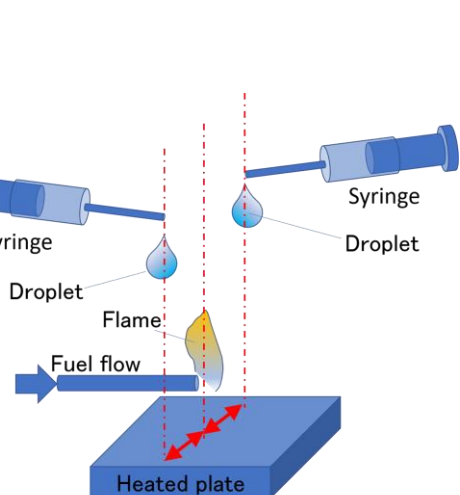


図2 二滴同時滴下概念図

(2) ミスト群の発生と消火の挙動の可視化

液滴衝突によって発生したミスト群の挙動を可視化するために、図1中に示したようにCWレーザー(CNI, 532nm-500mW)によるレーザービームを円筒面平凹レンズ(CLSQ-1020-15N)、円筒面平凸レンズ(CLSQ-2030-1000P)を用いてレーザーシート光として照射し、ハイスピードカメラで撮影した。また、三次元的に広がるミスト群の時系列挙動を調査するために、レーザー光学系の途中に小型ビーム走査型ガルバノミラー(Thorlabs社製:GVS301)を挿入して、レーザーシート光がカメラの撮影軸の奥行き方向に短時間(20Hz)で走査できるように工夫を施した。得られた二次元の各走査画像を同時刻で撮影された断層写真として扱い、画像解析ソフトImageJ Fijiで三次元画像として再構築することで、蒸気の三次元的広がりを時系列に可視化した。

(3) 複数液滴衝突による消火実験

液滴を二滴同時に滴下して発生したミスト群の干渉による火炎の消火特性の変化を調査するために、図2のように加熱平板と平行でかつ火炎を挟んで火炎からの距離が同じになるようにマイクロシリンジを設置した。この装置を用いて、上記(1)と(2)の方法で消火特性を測定した。

4. 研究成果

(1) 液滴衝突による最適消火条件

図3は、直径4.1mmの単一液滴の落下高さを変えることで変化する消火確率を、様々な加熱平板温度において測定した結果である。このときの加熱平板は通常のステンレス皿を用いた。横軸は加熱平板温度、縦軸は消火確率、各プロットは液滴の落下高さを示している。また、各落下高さからの単一液滴の落下挙動において、加熱平板への衝突直前の落下速度をハイスピードカメラ画像から算出した。この落下速度を横軸として得られた最大消火確率との関係をまとめた。左図より、まず落下高さが異なると消火確率が最大となる温度域は200°C程度と変わらないが最大消火確率の値が変化することがわかった。右図より最大消火確率が1となる落下速度は2.7m/sであり、最適値が存在することがわかった。同様に図4は、単一液滴の落下高さを変えることで変化する消火確率を、様々な加熱平板温度において測定した結果である。このときの加熱平板はステンレス皿に両面テープを用いていわき砂砂3号を付着させたものを用いた。左図より、いわき砂砂が付着していると表面温度が200°Cを超える高温になっても一度上昇した消火確率が下がらない傾向を示したが、落下高さが変わるとその最大値が大きくなる場合もあることがわかった。右図より最大消火確率が1となる落下速度は2.7m/sで、図3の最適値と同様であった。これらのことより直径4.1mmの単一液滴の場合、消火に有効な最適落下高さは400mm、そのときの落下速度は2.7m/sであることがわかった。

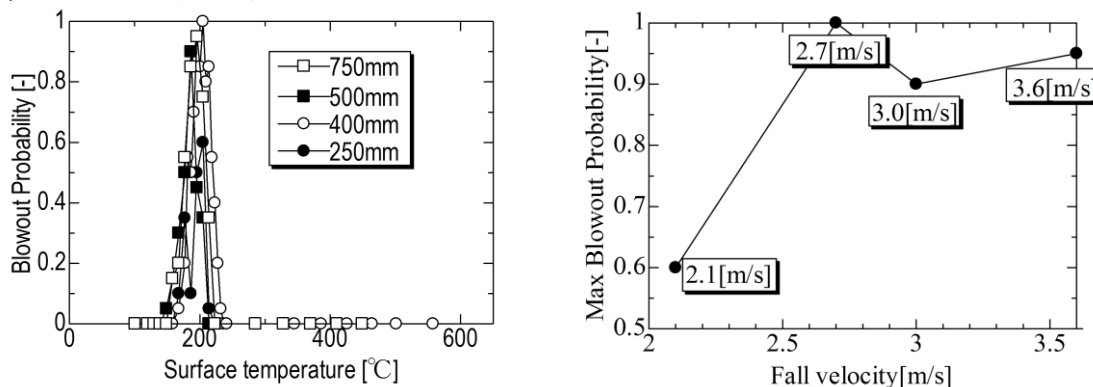


図3 液滴の落下高さ(落下速度)と消火確率の関係-表面改質しない場合

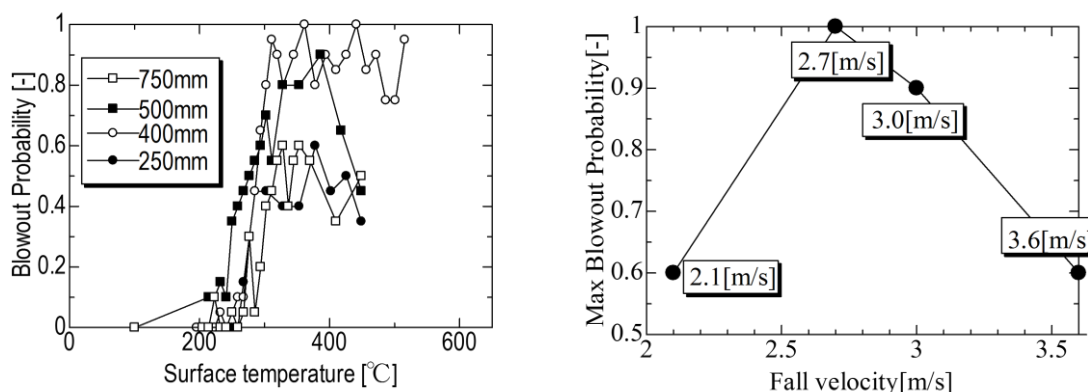


図4 液滴の落下高さ(落下速度)と消火確率の関係-表面改質した場合

図5は、二酸化炭素を溶存させた単一液滴を高さ400mm(落下速度2.7m/s)から落下させた場合の、消火確率の変化である。このときの加熱平板は両面テープでいわき砂砂3号を付着させ

たものを用いた。横軸は加熱平板温度、縦軸は消火確率、各プロットは二酸化炭素溶存の有無を示している。図より、二酸化炭素を溶存させた方が各温度で得られる消火確率の値が大きく、二酸化炭素を溶存させることで消火しやすくなることがわかった。

図6は、加熱平板表面性状を変えたときの消火確率の変化を測定した結果である。横軸は加熱平板温度、縦軸は消火確率、各プロットは付着させるいわき砂の種類の違いである。数字が大きいほど平均粒径が小さい。なお、左図は砂の付着を両面テープによって行った場合、右図は砂の付着を市販のセラミック系接着剤(アロンセラミックC)で行った場合の結果である。図より、付着させる砂の種類によって消火確率が変化すること、両面テープで付着させた場合よりもセラミック系接着剤で付着させた場合の方が消火確率が高いことがわかった。この加熱平板表面性状と消火の関係性を調査するために、図7に加熱平板表面粗さ(算術平均粗さRa)を横軸とし、消火確率が0.5以上となる温度範囲を縦軸に矢印による範囲で、図8に加熱平板表面空隙率(Aw)を横軸とし、消火確率が0.5以上となる温度範囲を縦軸に矢印による範囲で、それぞれ示した。この二つの図を比較すると、加熱平板表面粗さでは図6のような砂の付着方法の違いによる傾向の違いが判別できないが、加熱平板表面の空隙率にはその傾向の違いがはっきり分かれていた。図6のように消火確率の傾向が砂の付着方法によって変化した原因は、加熱平板表面粗さの違いではなく、空隙率の違いの方が大きく影響していることがわかった。

なお、そもそも両面テープやアロンセラミックを利用して最適な大きさの砂を火源付近の加熱固体壁へ付着させることは実際の消火活動では実現が非常に難しい。本申請の間接消火方法ではこの改質方法の確立が実現に向けた重要な点であり、本申請とは別に研究を進める予定であった。ところが今回上記の本申請の実験において、セラミック系接着剤を消火剤に混入し、加熱平板へその液滴が衝突することでセラミックの薄膜表面に改質できることが偶然判明したため、これを利用して消火活動中に簡便に火源付近の表面改質が可能となった。図9は、その判明したセラミック系接着剤混入による表面改質とそれによる消火確率について測定した結果である。左図において、横軸は加熱平板温度、縦軸は表面粗さ、各プロットは純水中のセラミック系接着剤の濃度(質量分率)である。右図において、横軸は加熱平板温度、縦軸は消火確率、各プロットは純水中のセラミック系接着剤濃度(質量分率)である。右図より、消火確率がほぼどの温度域においても1となり、砂によって表面改質した図6に比べて消火が容易であることがわかった。左図より、どの温度においても改質された表面粗さはほぼ一定であり、どのような火災現場においても同様の改質状態にできることがわかった。

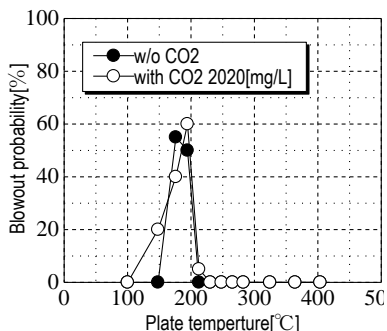


図5 二酸化炭素溶存の影響

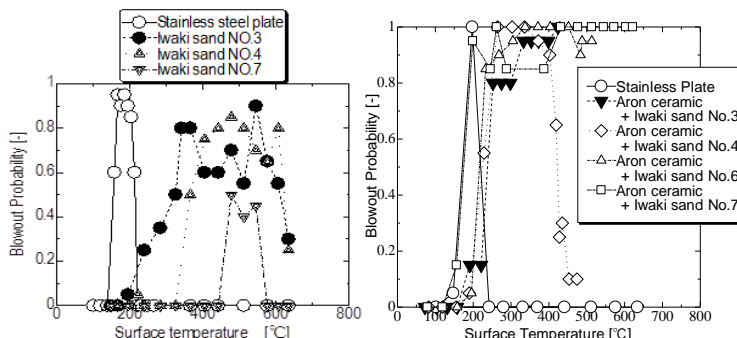


図6 固体表面性状の影響 (左:両面テープで砂を付着, 右:セラミック系接着剤で砂を付着)

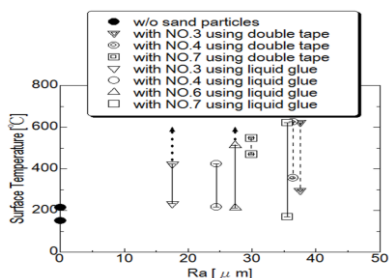


図7 表面粗さと消火可能範囲の関係

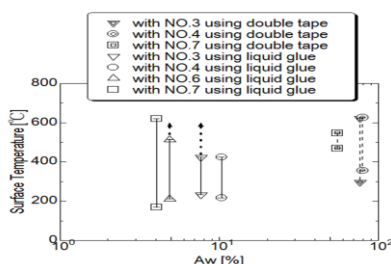


図8 空隙率と消火可能範囲の関係

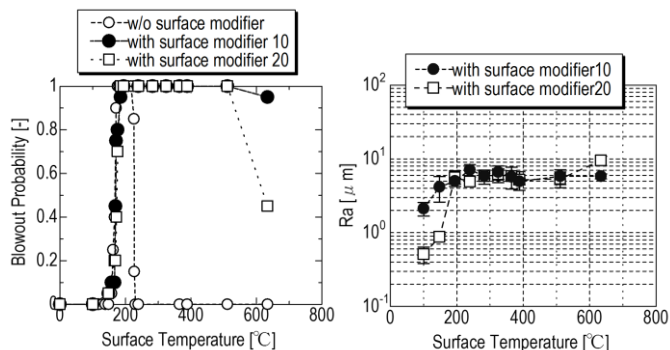


図9 セラミック系接着剤による表面改質を用いた場合 (左:消火確率, 右:改質時の固体表面温度と表面粗さの関係)

(2) 消火のメカニズム

前項に示したような消火に必要な条件と、発生するミスト群の可視化画像を合わせて検討し、本報で提案する間接消火方法において火炎が消火に至るメカニズムを調査した。図 10 は、単一液滴に二酸化炭素を溶存した場合に加熱固体表面に衝突後 0.028 sec 後のミスト群の発生をレーザシート光により可視化した画像の比較である。左図は二酸化炭素を溶存しない場合、右図は二酸化炭素を溶存した場合である。図より、二酸化炭素を溶存した方が得られたミスト群の輝度値やその拡がり大きいことから、ミスト群の発生が促進されたことがわかった。図 11 は、改質された固体表面上に単一液滴が衝突直後から火炎が消炎するまでの挙動を時系列で示したものである。図より、まず衝突直後 0.025 (20/800) sec に発生する二次微粒化した水滴の跳ね上がりで火炎が吹き飛ばされて消炎し、その後 0.125 (100/800) sec までに発生するミスト群がバーナ出口付近を連続的に通過することで窒息させて再着火が起こらず、その結果消火が完了することがわかった。この過程を様々な条件で観察したところ、上記の二つの両方がそろわないと消火に至らないことも判明した。また、図 12 に示すようにミスト群の三次元的な拡がりも同時に検討したところ、発生するミスト群の中心付近がバーナ出口に向かって輸送されないで液滴衝突直後に一度火炎が消炎しても再着火する場合もあることがわかった。この結果を受けて液滴径を変えた実験、液滴衝突角度を変えた実験をそれぞれ行った。詳細は割愛するが、大きい液滴径を用いると後から発生するミスト群の存在時間が長くなり再着火しにくくなること、衝突角度が大きくなるとミスト群の輸送経路が火源中心からずれて消火確率が下がることがわかった。

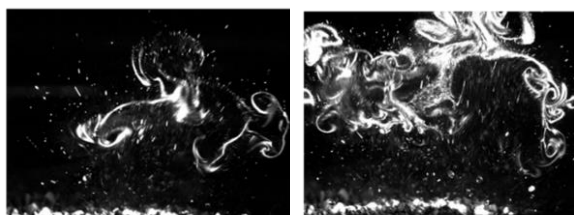


図 10 二酸化炭素溶存によるミスト群の拡がりの違い

(左：溶存なし、右：溶存あり)

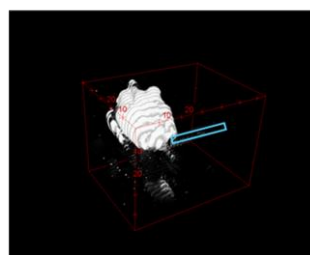


図 12 ミスト群の三次元的拡がり

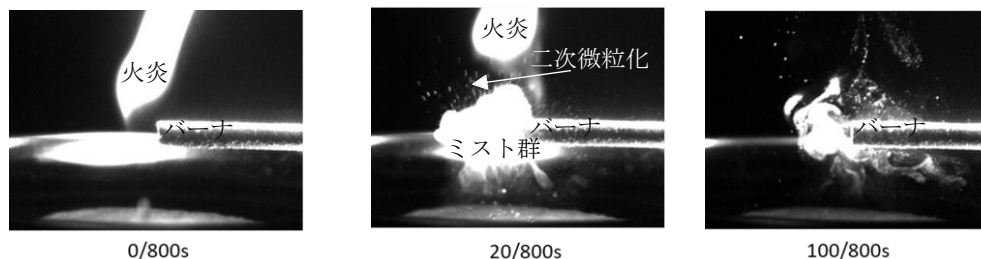


図 11 間接消火の過程

(3) 複数液滴衝突によるミスト群の干渉と消火範囲の拡大

前項において単一液滴による間接消火のメカニズムが判明したので、実際の消火活動を想定して、複数液滴による消火可能範囲の拡大を検討した。まず単一液滴による消火可能範囲を測定した。図 13 は、加熱固体表面を質量分率 10%のセラミック系接着剤を含んだ水の衝突を用いて改質した場合、液滴の落下位置を火炎中心から横方向 (x 軸方向) へ移動させて消火確率の変化を測定したものである。横軸は火炎中心と液滴の落下位置の距離、縦軸は消火確率、各プロットは表面改質の有無を示している。図より、表面改質を施すと液滴により消火できる x 軸方向の範囲が狭くなることがわかった。図 14 は、液滴を二滴同時に落下させたときの消火確率を測定したものである。横軸は火炎中心と液滴の落下位置の距離、縦軸は消火確率、各プロットは液滴の個数の違いを表している。なお二滴同時に用いる場合は、火炎を挟んで左右対称に液滴を落下させた。図より、二滴同時に落下させた場合の方が消火可能範囲が拡大しており、図 13 に示した表面改質をしない場合の単一液滴の結果よりもその範囲が広がっていることがわかった。発生するミスト群を干渉させて消火範囲を広げる、液滴間距離の最適値が存在することがわかった。これにより表面改質することでミスト群の拡がりを押さえ込んでしまう本手法の欠点を補完し、消火が可能となることがわかった。

<引用文献>

- ①内閣府, 防災白書, 2015
- ②廣田光智, 後藤好孝, 鳥飼宏之, 齋藤務, JCHSIP2013
- ③例えば, G. S. Emmerson, International Journal of Heat and Mass Transfer, 18-3, pp. 381-386, 1975

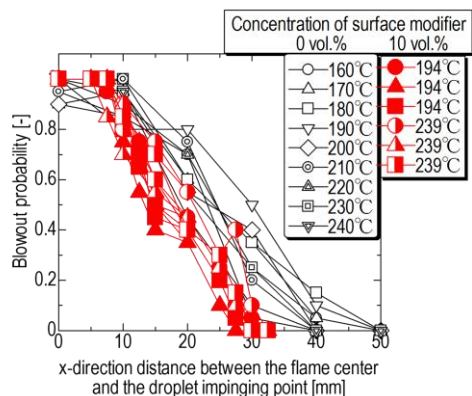


図 13 単一液滴の消火可能範囲
(表面改質の影響)

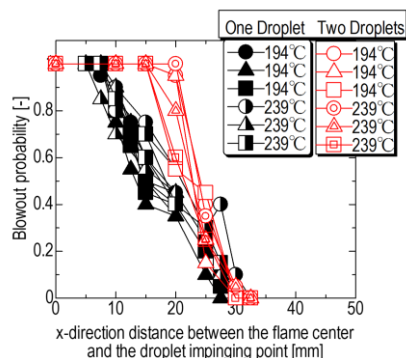


図 14 複数液滴の消火可能範囲
(単一液滴との比較)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

①廣田光智, 鳥飼宏之, 後藤好孝, 佐々木崇志, 飯塚光耶, 齋藤務, 加熱平板への水滴衝突現象を用いた間接消火法の検討 -加熱平板表面粗さの変化と消火特性の関係-, 日本燃焼学会誌, 2019 (20190527 掲載決定)

〔学会発表〕(計 18 件)

①廣田光智, 山川僚太, 飯塚光耶, 鳥飼宏之, 畠中和明, 間接消火における表面張力の違いが消火能力に与える影響, 第 96 期日本機械学会流体工学部門講演会, 2018

②飯塚光耶, 廣田光智, 鳥飼宏之, 畠中和明, 固体壁面性状が液滴の衝突挙動と有効消火範囲に及ぼす影響, 第 56 回燃焼シンポジウム, 2018

③廣田光智, 桑島義和, 鳥飼宏之, 畠中和明, セラミック系接着剤を混合した水による表面改質とその消火効果, 平成 30 年度火災学会研究発表会, 2018

④桑島義和, 廣田光智, 鳥飼宏之, 赤石壮史, 折居紳一郎, 開米広樹, 柿崎大輔, 畠中和明, 高温固体表面への表面改質剤の付着による間接消火効果の向上, 第 55 回燃焼シンポジウム, 2017

⑤タミルワールナン ギータン, 廣田光智, 鳥飼宏之, 赤石壮史, 折居紳一郎, 開米広樹, 柿崎大輔, 畠中和明, 水滴の大きさとその衝突角度が間接消火に及ぼす影響, 第 55 回燃焼シンポジウム, 2017

⑥廣田光智, 桑島義和, ギータン タミルワールナン, 鳥飼宏之, 畠中和明, 間接消火における水蒸気生成過程の可視化, 可視化情報学会全国講演会 (室蘭 2017), 2017

⑦滝川健一郎, 廣田光智, 齊藤寛泰, 鳥飼宏之, 齋藤務, 畠中和明, 柿崎大輔, 開米広樹, 赤石壮史, 折居紳一郎, 高温固体表面へ落下する液滴中の二酸化炭素マイクロバブルが消火に及ぼす影響, 第 54 回燃焼シンポジウム, 2016

⑧堤友輔, 廣田光智, 鳥飼宏之, 齋藤務, 畠中和明, 柿崎大輔, 開米広樹, 赤石壮史, 折居紳一郎, 粗さを変えた高温固体表面への液滴の落下速度が消火に及ぼす影響, 第 54 回燃焼シンポジウム, 2016

⑨M. Hirota, H. Torikai, T. Sasaki, H. Okimoto, Y. Matsuoka and T. Saito, Visualization of Flame Extinction Process by the Effect of Liquid Droplet Impinging on Heated Plate, The 31th International Congress on High-speed Imaging and Photonics, 2016

〔その他〕

ホームページ等

・室蘭工業大学共同研究開発センターseeds 集

<http://www.muroran-it.ac.jp/crd/seeds/6/hirota.pdf>

・推進工学研究室 室蘭工業大学

<http://pelmit2015.wix.com/pelmit>

6. 研究組織

(1) 研究協力者

研究協力者氏名：鳥飼 宏之

ローマ字氏名：TORIKAI Hiroyuki

所属研究機関名：弘前大学

部局名：大学院工学研究科

職名：准教授

研究者番号 (8 桁)：50431432

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。