

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26282098

研究課題名(和文) ウォーターミストによる消炎現象に関する基礎学理の体系化と展開

研究課題名(英文) Systematization and application of physics of fire extinguishment by water mist

研究代表者

吉田 亮 (Yoshida, Akira)

東京電機大学・工学部・教授

研究者番号：40105680

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では拡散火炎に関しては対向流拡散火炎と同軸流拡散火炎を用い、また予混合火炎に関しては淀み流予混合火炎および容器内予混合火炎を用い、それぞれについてウォーターミストの火炎抑制効果を実験と数値解析により解明した。対向流拡散火炎の消炎限界伸長率はミストの質量分率とともに低下し、ミストは予混合火炎の燃焼速度を低下させる。同軸流拡散火炎は基部にミストが侵入することにより燃焼速度が低下し消炎する。また最小着火エネルギーはミスト量の増加に伴い増加し、爆発抑制効果があることが示された。これらの実験結果は数値計算とも一致し、ウォーターミストの火炎抑制効果が大きいことが示された。

研究成果の概要(英文)：Counterflow diffusion flame and co-flowing diffusion flame were employed for the study of suppression effectiveness of water mist. Flame speed was measured in the premixed flame stabilized in the stagnation flowfield and the effect of water mist on ignition and flame propagation in a vessel were investigated. Experiments were compared with the numerical simulation. Critical stretch rate at extinguishment decreases with water mist mass fraction and the flame speed decreases with water mist addition. Flame speed at the flame base of co-flowing diffusion flame decreases and the flame readily blows off. Minimum ignition energy increases with the water mist addition and water mist makes the combustible mixture more difficult to be ignited. Fire suppression effectiveness of water mist was clearly shown by experiments and numerical simulations.

研究分野：燃焼工学

キーワード：火災 消防 防災 燃焼 消火

1. 研究開始当初の背景

ここ数年住宅火災および爆発事故による死者数は1,700名を超え、そのうちの約5割が65歳以上の高齢者であり、今後高齢化が進むにつれてさらに増加する恐れがある。また火災の件数も一年間で50,000件を超えており、火災による損失損害額は1,400億円に上っている。こうした状況を改善し、安心して安全に生活できる社会の構築のために、効率的な防火・消火設備の開発が必要である。

2. 研究の目的

ウォーターミストは従来用いられてきたハロン系消火剤に比較して環境負荷がなく、人体に無害なため古くからハロン代替消火剤として注目されてきた。しかし、ウォーターミストによる火災の消火機構が燃焼学的に解明されていない上に、ウォーターミストの拡散過程が気体消火剤と異なるために、火災の消火に効果的なミストの条件や供給方法は明らかにされていない。本研究では、ウォーターミストによる拡散火災の消火機構および混合気の着火や燃焼速度に及ぼす影響を熱力学、流体力学および化学に基づき燃焼学的に明らかにし、基礎学理を体系化した上で、実用技術への展開を図ることを目的とする。

3. 研究の方法

実験では拡散火災に関しては対向流拡散火災および同軸流拡散火災を用い、一流体噴射弁によりウォーターミストを空気に添加し、消火機構を明らかにする。また予混合火災に関しては、燃焼速度におよぼすウォーターミストの影響を明らかにするために淀み流予混合火災を用いる。一方混合気の着火エネルギーにおよぼすミストの影響を調べるために容器内の静止混合気を熱線により着火する。

数値解析では、ウォーターミストと気体の運動を分離してオイラー-ラグランジュ系で基礎方程式を構築し、対向流拡散火災の消火限界を求めた。また、ミストの蒸発過程を化学反応でモデル化した簡易モデルを用いて、対向流拡散火災の消火限界、予混合火災の燃焼速度および最小着火エネルギーにおよぼすウォーターミストの影響を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 対向流拡散火災

実際の火災で発生する火災のほとんどが拡散火災であり、拡散火災の消火機構を明らかにすることは、ウォーターミストにより実際の火災を消火する上で極めて重要である。これまでウォーターミストによる拡散火災の消火を支配しているパラメータはミストの面積パラメータであると考えられてきたが、本研究により、ミストの質量分率が消火に大きな影響を与えることが明らかになっ

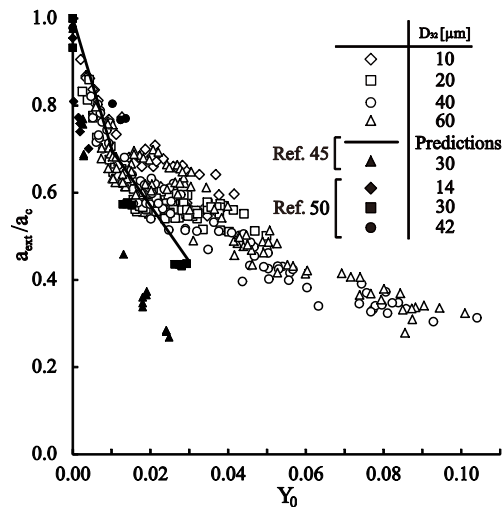


図1 消火限界伸長率

た。図1に消火限界伸長率をミストの質量分率の関数としてあらわす。図より明らかなように種々の粒径のミストに対して消火限界伸長率は一本の曲線で表される。また消火に有効なミスト粒径は40ミクロン以下であり、火災伸長が消火を促進することも明らかとなったが、これは従来の設計では全く考慮されていなかった。また40ミクロン以下のミストはストークス数が小さいために、ミスト自体の慣性力は小さく、空気流に追従する。これまでウォーターミストはスプリンクラーの延長として考えられてきた。しかし、ミスト粒子は慣性力が小さいため火災中への貫通力は極めて小さい。従って、火災へのミストの供給方法には工夫が必要である。本研究の結果から火災全体を包み込むようにすると、ミストの蒸発潜熱および発生した水蒸気の潜熱を有効に利用することができ、高い消火性能が得られることが明らかとなった。一方、数値計算ではミストに働く重力を考慮し、対向流拡散火災の最高温度が求められた。図2に典型的な例を示す。粒径が小さいほどミストの冷却効果は大きく、また重力の影響は小さく、ミストはほぼ空気流に追従して運動していることがわかった。また求めら

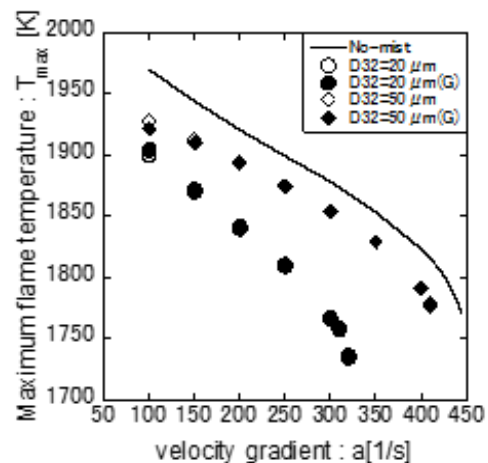


図2 対向流拡散火災の最高温度

れた拡散火炎の最高温度は定性的に実験結果と一致することが明らかになった。また空気流への追従性の高さは、ウォーターミストを実際に消火に使用する場合の供給方法に示唆を与えるものである。

(2) 同軸流拡散火炎

ガスプラントの火災ではガスタンクから漏洩したガスが引火すると拡散火炎を形成し、その火炎が周囲の機器あるいはタンクを加熱することで被害が拡大するため、燃料噴流拡散火炎を消滅させることが重要である。同軸流拡散火炎では燃料噴流速度あるいは周囲空気流速を増加すると、付着火炎が浮き上がり、下流側に安定なリフト火炎が形成される。同軸流拡散火炎の実験では、火炎のリフト限界およびリフト火炎の吹き飛び限界におよぼすウォーターミストの影響が明らかにされた。図3にリフト火炎のリフト高さを示す。(a)はミスト無添加時、また(b)はミスト流量 $Q_m = 600$ [ml/h]とした場合である。リフト高さは周囲空気速度 U_a および燃料吹き出し速度 U_f の増加とともに増加し、ある点でリフト火炎が吹き飛び、ウォーターミストを空気流に添加することによりリフト高さは増大し、吹き飛びが起りやすくなる。 U_f が大きい場合に吹き飛びが起きなくなる領域があるが、これは下流に再循環領域ができ

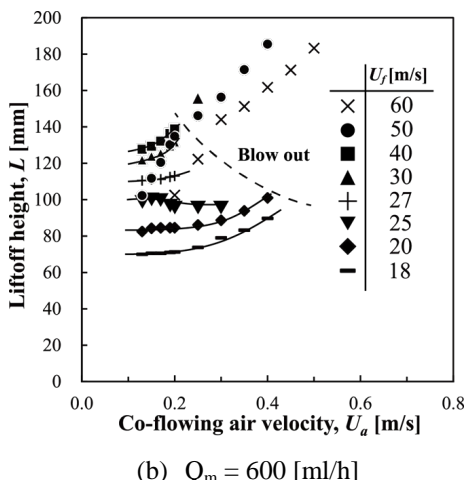
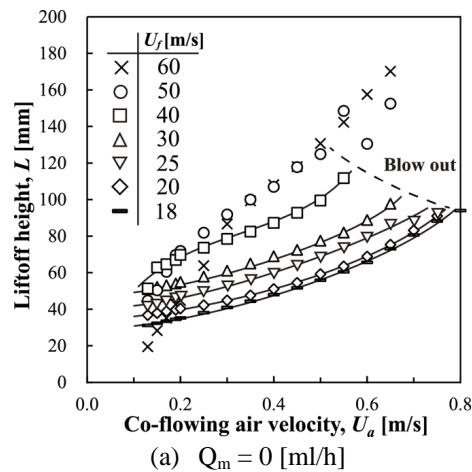


図3 リフト火炎のリフト高さ

るため自然界では起きにくい現象である。図3から明らかなように、空気流にウォーターミストを添加することで消滅しやすくなり、このことはウォーターミストの消火剤としての有用性を示すものである。リフト火炎は火炎基部にできる部分予混合火炎が火炎全体の安定性を支配している。この予混合火炎の燃焼速度と流れ場の流速が釣り合った点で火炎は安定化する。空気流中に添加されたウォーターミストは予混合火炎の前面で完全に蒸発し、予熱帯を冷却するとともに、発生した水蒸気が拡散により反応帯に流入し反応帯を冷却する。その結果燃焼速度は低下して、流れ場の流速とのつり合いが崩れ、火炎は吹き飛び消滅に至る。

(3) 予混合火炎の燃焼速度

伸長を受けた予混合火炎の燃焼速度におよぼすウォーターミストの影響を定み流れ場を用いて調べた。実験で測定された層流燃焼速度を図4に示す。ミストが無添加の場合、層流燃焼速度は火炎伸長率の増加に伴い増加するという一般的な傾向を示す。ミストを添加した場合、燃焼速度は全体的に低下するが、伸長率に対する依存性は逆転する。つまり見かけ上のマークシュタイン長さが負から正に変化する。

一方、図5は数値計算により求められた層流燃焼速度を表す。図中<WMG>はウォーターミストを添加した場合を示す。数値計算では混合気中にウォーターミストを添加するこ

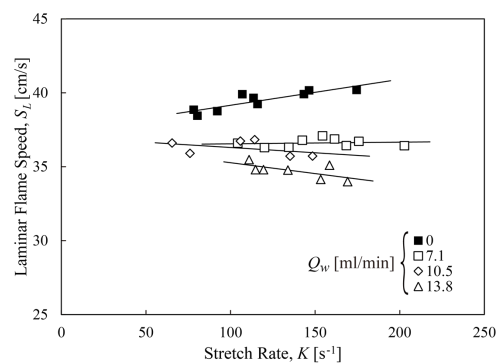


図4 層流燃焼速度(実験)

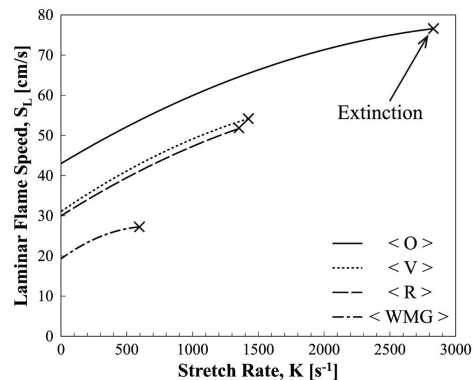


図5 層流燃焼速度(数値計算)

とにより層流燃焼速度は大幅に低下する。しかし、実験で見られたような火炎伸長率に対する依存性が逆転することはない。実験で用いた淀み流れ場では、速度勾配がかなり大きく、40 ミクロン程度のみスト粒子のストークス数は1よりも大きくなる。流れ場は淀み面に近付くと急激に直角方向に変化する。しかし、ストークス数が1より大きいためにミスト粒子は流れに追従できず、中央部分に集中する傾向がある。そのため淀み流線周りのミスト粒子濃度は周辺部より高くなり、中心部分の燃焼速度が低下する。この傾向は火炎伸長率の増加とともに大きくなる。従って、淀み流線周りで測定された燃焼速度は、火炎伸長率の増加とともに低下する。

(4) 混合気の最小着火エネルギー

予混合火炎に関連し、当初の目的にはなかったが、研究の途中で最小着火エネルギーの問題が派生した。最小着火エネルギーはこれまでに火花点火機関に関連して広く研究がなされているが、爆発防止という防災の立場からも研究されている。しかし、ウォーターミストが最小着火エネルギーにおよぼす影響はほとんど明らかにされていない。本研究ではミストを含んだ混合気を着火するために金属細線を急速加熱する方法を確立した。

着火限界を支配しているパラメータとして着火エネルギーの絶対量、単位体積当たりのエネルギー密度あるいは単位時間、単位体積当たりのエネルギー発生率が用いられてきたが、本研究ではエネルギー密度により着火確率を系統的に表せることが示された。図6はプロパン 空気混合気の最小着火エネルギー密度を示す。ウォーターミストの爆発抑制効果は、混合気の当量比に大きく依存し、量論比付近ではほとんど効果はないが、量論比から外れると希薄側でも過濃側でも最小着火エネルギー密度は著しく増加し、爆発抑制効果が大きいことがわかる。密閉空間に可燃性物質が漏洩した場合、その初期段階で検知してウォーターミストを供給することで爆発を防ぐことが可能である。

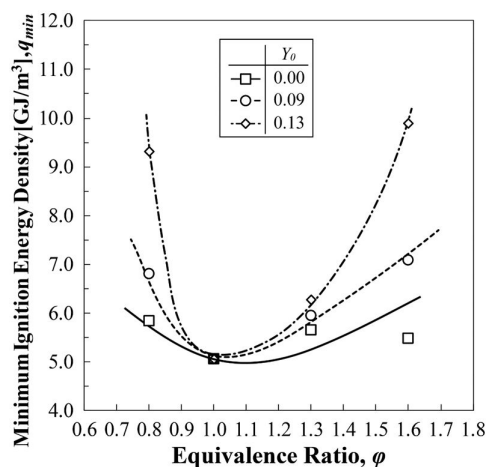


図6 最小着火エネルギー密度

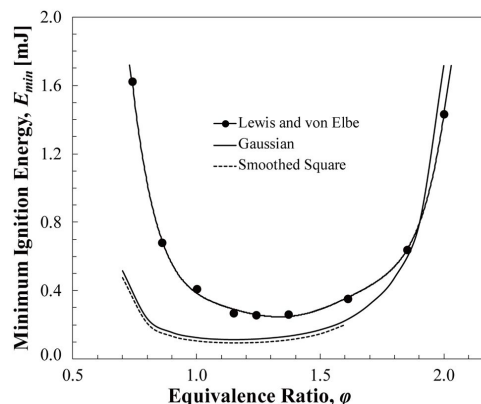


図7 最小着火エネルギー(数値計算)

一方、数値解析により求めた、ミスト無添加時のプロパン 空気予混合気の最小着火エネルギーを図7に示す。数値計算では、最小着火エネルギーはエネルギーの絶対値で与えられ、図6のエネルギー密度と異なるが、この点は今後モデルの改良などにより検討する必要がある。実験とは定性的によく一致するが定量的には数値計算の結果の方が最小着火エネルギーは小さくなる。これは実験では電極の形状、電極材料および放電時間の影響を受けるためと思われる。

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 5 件)

蛭名 航, 吉田 亮, ウォーターミストによるメタン 空気対向流拡散火炎の消炎現象に関する数値計算, 日本燃焼学会誌, 第59巻, 第188号, pp. 132-138.

Ebina, W., Liao, C., Naito, H., and Yoshida, A., Effect of Water Mist on Minimum Ignition Energy of Propane/Air Mixture, 査読有, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 36, pp. 3271-3278, DOI:10.1016/j.proci.2016.06.019.

Okawa, T., Ebina, W., Naito, H., and Yoshida, A., Inhibition of Propane/Air Premixed Flame by Water Mist, 査読有, Fire Science and Technology 2015 - Proceedings of 10th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, pp. 903-911, Springer.

Yoshida, A., Okawa, T., Ebina, W., and Naito, H., Experimental and Numerical Investigation of Flame Speed Retardation by Water Mist, Combustion and Flame, 査読有, Vol. 162, pp. 1772-1777, DOI:10.1016/j.combustflame.2014.11.038.

Yoshida, A., Kashiwa, K., Hashizume, S., and Naito, H., Inhibition of Counterflow Methane/Air Diffusion Flame by Water Mist with Varying Mist Diameter, Fire Safety

[学会発表](計 34 件)

山田雄大,西岡牧人,吉田 亮,ウォーターミストによる対向流火炎の消炎機構の研究,平成 29 年度日本火災学会研究発表会, pp. 204-207.

中原佳祐,廖赤虹,内藤浩由,吉田 亮,プロパン - 空気予混合気の最小着火エネルギーに及ぼすウォーターミストの影響(第 2 報),平成 29 年度日本火災学会研究発表会, pp. 212-214.

立原美代子,西岡牧人,吉田 亮,プロパン 空気予混合気の最小着火エネルギーに関する詳細反応機構を考慮した数値解析,平成 29 年度日本火災学会研究発表会, pp. 40-41.

松尾涼平,内藤浩由,吉田 亮,乱流空気流中に形成される対向流拡散火炎の消炎に及ぼすウォーターミストの影響,平成 29 年度日本火災学会研究発表会, pp. 64-65.

浅野慎一,吉田 亮,同軸流拡散火炎のリフト高さに及ぼす周囲空気流とウォーターミストの影響,第 54 回燃焼シンポジウム, USB.

松尾涼平,内藤浩由,吉田 亮,ウォーターミストがメタン 空気対向流乱流拡散火炎の消炎に及ぼす影響,第 54 回燃焼シンポジウム, USB.

山田雄大,吉田 亮,西岡牧人,重力を考慮した数値解析によるウォーターミストの消炎機構の研究,第 54 回燃焼シンポジウム, USB.

中原佳祐,廖赤虹,内藤浩由,吉田 亮,ウォーターミストによる着火抑制効果 - プロパン 空気予混合気の最小着火エネルギー密度 - ,第 54 回燃焼シンポジウム, USB.

Nakahara, K., Liao, C., Naito, H., and Yoshida, A., Inhibition Effectiveness of Water Mist on Ignition of Propane/Air Mixture, 16th International Water Mist Conference, Vienna, Austria.

Matsuo, R., Naito, H., and Yoshida, A., Extinguishment of Counterflow Diffusion Flame by Polydisperse Water Mist with Various Sauter Mean Diameters, 36th International Symposium on Combustion, Seoul, Korea.

Asano, S., and Yoshida, A., Effect of Water Mist on Liftoff Height of Jet Diffusion Flames in Co-Flowing Air, 36th International Symposium on Combustion, Seoul, Korea.

Ebina, W., Liao, C., Naito, H., and Yoshida, A., Effect of Water Mist on Minimum Ignition Energy of Propane/Air Mixture, 36th International Symposium on Combustion,

Seoul, Korea.

中原佳祐,廖赤虹,内藤浩由,吉田 亮,ウォーターミストによる着火抑制効果 - 熱線の溶断時間の影響 - ,平成 28 年度日本火災学会研究発表会, (2016.5), 266-267.
浅野慎一,吉田 亮,同軸流拡散火炎のリフト高さに及ぼすウォーターミストの影響,平成 28 年度日本火災学会研究発表会, (2016.5), 264-265.

松尾涼平,内藤浩由,吉田 亮,対向流拡散火炎の消炎限界伸長率にウォーターミスト粒径および流量の及ぼす影響,平成 28 年度日本火災学会研究発表会, (2016.5), 262-263.

山田雄大,吉田 亮,西岡牧人,対向流予混合双子火炎の局所燃焼速度に与えるウォーターミストの影響,第 53 回燃焼シンポジウム, pp. 556-557.

大川統一朗,内藤浩由,吉田 亮,ウォーターミスト粒径がプロパン空気予混合火炎の層流燃焼速度に及ぼす影響,第 53 回燃焼シンポジウム, pp. 554-555.

蝦名 航,廖赤虹,内藤浩由,吉田 亮,プロパン 空気予混合気の最小着火エネルギーに及ぼすウォーターミストの影響,第 53 回燃焼シンポジウム, pp. 552-553.

Okawa, T., Ebina, W., Naito, H., and Yoshida, A., Inhibition of Propane/Air Premixed Flame by Water Mist, 10th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, Tsukuba.

Hashizume, S., Naito, H., and Yoshida, A., Extinguishment of Counterflow Diffusion Flame by Water Mist with Various Diameters and Mass Fractions, The 10th Asia-Pacific Conference on Combustion, Beijing, China.

21 Ebina, W., Liao, C., Naito, H., and Yoshida, A., Influence of Water Mist on Ignition of Propane/air Mixture, The 10th Asia-Pacific Conference on Combustion, Beijing, China.

22 橋爪脩平,内藤浩由,吉田 亮,ウォーターミストによる対向流拡散火炎の消炎ミスト粒径および質量分率の影響,平成 27 年度日本火災学会研究発表会, 106-107.

23 蝦名 航,廖赤虹,内藤浩由,吉田 亮,プロパン 空気予混合気の着火に及ぼすウォーターミストの影響,平成 27 年度日本火災学会研究発表会, 104-105.

24 大川統一朗,内藤浩由,吉田 亮,プロパン 空気予混合火炎の燃焼速度と火炎温度に及ぼすウォーターミストの影響,平成 27 年度日本火災学会研究発表会, pp. 102-103.

25 菅野将俊,吉田 亮,西岡牧人,対向流拡散火炎におけるウォーターミストの消炎機構に関する数値解析,第 52 回燃焼シンポジウム, pp. 112-113.

26 大橋直人,内藤浩由,吉田 亮,ウォーターミストによる同軸流拡散火炎のリフト

- 火炎の消炎現象に及ぼすリム厚さの影響 , 第 52 回燃焼シンポジウム, pp. 110-111.
- 27 蝦名 航, 吉田 亮, ウォーターミストによる対向流拡散火炎の消炎現象に関する数値解析, 第 52 回燃焼シンポジウム, pp. 114-115.
- 28 Yoshida, A., Ebina, W., and Okawa, T., Suppression Effectiveness of Water Mist on Accidental Aircraft Fires, 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, St. Petersburg, Russia, ICAS2014-11.10.3-2014_0480, pp. 1-10. http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2014/data/papers/2014_0480_paper.pdf.
- 29 Okawa, T., Ebina, W., Naito, H., and Yoshida, A., Experimental and Numerical Study of Laminar Flame Speed Retardation by Water Mist, 35th International Symposium on Combustion, San Francisco.
- 30 Hashizume, S., Naito, H., and Yoshida, A., Measurement of Suppression Effectiveness of Water Mist with Varying Diameter Using Counterflow Methane/Air Diffusion Flames, 35th International Symposium on Combustion, San Francisco.
- 31 Ohashi, N., Naito, H., and Yoshida, A., Experimental Study of Extinguishment of Confined Propane/Air Diffusion Flame by Water Mist, 35th International Symposium on Combustion, San Francisco.
- 32 大橋直人, 吉田 亮, 同軸流拡散火炎のリフト火炎の安定性に及ぼすウォーターミストの影響, 平成 26 年度火災学会研究発表会, pp. 62-63 .
- 33 大川統一朗, 内藤浩由, 吉田 亮, よどみ流中に形成されるプロパン-空気予混合火炎の燃焼速度に及ぼすウォーターミストの影響, 平成 26 年度火災学会研究発表会, pp . 112-113 .
- 34 蝦名 航, 吉田 亮, プロパン-空気予混合火炎に及ぼすウォーターミストの化学的抑制効果, 平成 26 年度火災学会研究発表会, pp. 114-115 .

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称 :
 発明者 :
 権利者 :
 種類 :
 番号 :
 出願年月日 :
 国内外の別 :

取得状況 (計 0 件)

名称 :
 発明者 :
 権利者 :
 種類 :
 番号 :
 取得年月日 :
 国内外の別 :

〔その他〕
 ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究代表者

吉田 亮 (YOSHIDA, Akira)
 東京電機大学工学部・教授
 研究者番号 : 40105680

(2)研究分担者

西岡 牧人 (NISHIOKA, Makihito)
 筑波大学システム情報系・教授
 研究者番号 : 70208148

(3)連携研究者

()

研究者番号 :

(4)研究協力者

()