

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：11101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26560170

研究課題名(和文) 燃焼ガスによって形成した渦輪を利用した不活性ガス消火法の研究

研究課題名(英文) Study on Extinguishing Method with an Inert-Gas Vortex Ring Generated by a Premixed Combustion

研究代表者

鳥飼 宏之(Torikai, Hiroyuki)

弘前大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：50431432

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：消火ガスは噴流形態で高圧ボンベから放出され、周囲空気を巻き込み、消火ガスの濃度が低下する。その結果、消火能力を維持して消火ガスを遠方輸送することができない。そこで本研究は、微粒子等の遠方輸送が可能な渦輪を消火ガス輸送に利用した。渦輪形成には円孔を有した容器内でのメタン-空気予混合気の燃焼現象を用いた。またその燃焼により空気中のO<sub>2</sub>を消費して残るN<sub>2</sub>と燃焼ガス(CO<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>O)を消火ガスとして用いた。そして消火対象にはメタンと空気で形成した拡散火炎を用いた。その結果、燃焼ガス渦輪を形成するメタン-空気予混合火炎が最大燃焼速度を示す当量比で最も消火効果が高くなることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：A vortex ring has a possibility to deliver an extinguishing gas more effectively and over a longer distance than a jet flow which is used to release an extinguishing agent from extinguishing equipment to fire sites. We have examined experimentally the extinguishing method with a vortex ring generated by a premixed combustion. When the premixed combustion is performed under the stoichiometric condition, the combusted gas does not include oxidizer and is considered as an inert gas mixture. The extinguishing experiments of a methane-air jet diffusion flame have been carried out. From the experimental results, it is found that the combusted-gas vortex ring formed at an equivalence ratio of 1.05 shows the largest extinguishing range, which is fifteen times larger than the inner diameter of the premixed combustion tube. The extinguishing tendency of the combusted gas vortex ring clearly depends on the magnitude of a burning velocity of a methane-air premixed flame.

研究分野：消火の科学・技術

キーワード：火災 消火 不活性ガス 渦輪 予混合燃焼 拡散燃焼 消火剤輸送法 燃焼速度

1. 研究開始当初の背景

消火活動によって生じる水損と汚損の回避にはガス消火剤の使用が有効である。しかし、従来、消火ガス輸送に噴流を利用しており、噴流の周囲空気の巻き込みが原因で遠方火源に対して消火効果を発揮することは簡単ではない。そこで、消火剤の火源への輸送方法を工夫することで、その消火効果の増大と使用量の低減をはかることを目的とした **Extinguishing Agent Delivery** というコンセプトを報告者は提唱している。そして、そのコンセプトに沿った消火法として不活性ガスで形成した渦輪を用いた消火法について検討している。一般的に、渦輪は円孔から流体を瞬間的に押し出すことで簡単に形成でき、円孔直径の数百倍の距離を静止気体中であれば直線的に移動する性質を有する。

ここで、過去の実験結果から渦輪による消火ガス輸送の可能性を示す。

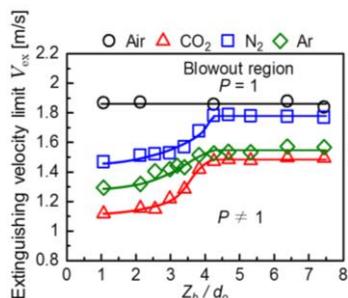
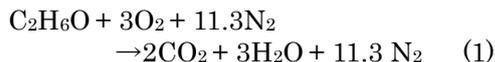


図1 過去の実験で明らかとなった不活性ガス渦輪の消火特性

図1は消火マップを示し、縦軸は完全消火(消火確率  $P=1$ )となる各ガスで形成された渦輪の最小移動速度  $V_{ex}$ 、横軸は渦輪の形成位置から火炎までの飛翔距離  $Z_b$  を円孔直径  $d_0$  で除した値である。消火対象はメタン-空気の噴流拡散火炎を用いており、その火炎高さは一定である。図1では不活性ガスの  $V_{ex}$  が空気中の  $V_{ex}$  (○) よりも小さい値を示している。これは不活性ガス渦輪が消火剤を含まない空気渦輪よりも、高い消火効果を有していることを示している。更に興味深いことに  $Z_b/d_0 \geq 4$  では、不活性ガス渦輪の消火能力は距離によらず一定値を示す。これは渦輪の移動距離が増加しても、渦輪が流体力学的不安定性から崩壊するまでは一定量の消火ガスを輸送可能であることを示している。このように不活性ガスで形成した渦輪を用いた消火法には検討価値があることがわかる。

2. 研究の目的

本研究は、燃焼ガスで形成した渦輪を用いた消火法について検討する。この方法では、不活性ガス渦輪を形成するのに、可燃性予混合気の爆発現象を利用する。ここで予混合燃焼を用いた消火ガス生成の利点について述べる。例えば、エタノール-空気の総括反応式は以下となる(式には空気中の  $N_2$  も加えている)。



式(1)は1モルのエタノールから16.3モルの消火ガスが得られることを示している。そしてエタノールを液体とした場合、その初期体積の約8600倍の大量の消火ガス(373.15 K, 0.1MPaの条件)を、燃焼現象を利用して形成可能であることを意味する。



図2 1リットルの初期体積から形成できる消火ガス量の比較

図2は液体エタノール、液化炭酸ガスそして高圧  $N_2$  ガスを各々1リットル用意し、大気圧、 $100^\circ C$ の条件でどれだけの消火ガス体積が得られるかを比較している。その結果、エタノールの燃焼を用いて得られる消火ガス量は液化炭酸ガスの16倍、高圧窒素の43倍となる。これは少量の液体燃料を携帯し燃焼現象を利用することで、火災現場で大量の消火ガスを生成・使用することが可能であることを意味し、同時に、ガス消火機器の軽量・小型化と消火者の機動性の向上が可能であることを示している。更に加えて、燃焼反応によって生成される熱による気体膨張を利用して、円孔から燃焼ガスを押し出し、燃焼ガス渦輪を形成・駆動できる。従って、燃焼反応を利用することで消火ガス生成と渦輪駆動を同時に行える利点がある。

以上を踏まえて、片側開放の円筒容器内でメタン-空気予混合火炎を形成し、燃焼ガス渦輪を形成した。この燃焼ガス渦輪を用いて、メタン噴流拡散火炎を消火対象とした消火実験を行った。そして、その消火特性として燃焼ガス渦輪で完全消火が達成される消火可能範囲を解明した。そして渦輪を形成するための予混合燃焼の当量比を変化させ、最も高い消火効果が得られる当量比の条件を解明した。更に、高速度カメラを用いて消火過程を観察することで、消火機構の解明も行った。

3. 研究の方法

メタン-空気予混合気形成のために、メタンは高圧ボンベから、空気はコンプレッサーから供給した。予混合気の当量比の値は、メタンと空気の体積流量の比によって決定した。渦輪形成装置と消火対象を形成するバーナを図3に示す。

渦輪形成装置は、内径  $d_0=30$  mm、外径 40

mm, 高さ 90 mm の片側開放のアルミニウム製円筒とした。点火はピエゾ素子を用い電気スパークで行った。点火位置は円筒容器中心、底面から上方 8 mm とした。

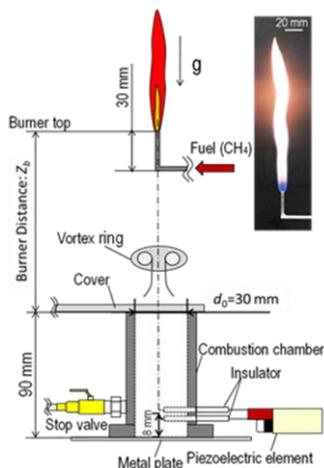


図3 消火実験装置

消火対象はメタン-空気噴流拡散火炎とし、外径 3 mm, 内径 2.6 mm のステンレス管で作製した L 字型のバーナを用いた。L 字型バーナの直管出口部分は 30 mm とした。平均火炎高さ 190 mm の火炎を形成した。そのときのメタン流量は 1050 ml/min とした。また、バーナ出口中心との距離  $L$  [mm] を変化させた。消火実験では、渦輪発生装置の開口部に僅かな隙間を残して蓋を置き、当量比が既知である予混合気を一定流量で 3 分間供給し、装置内気体を置換した。そして試行回数を 10 回とし、消火成功回数を試行回数で除し各条件での消火確率  $P$  [-] を算出した。

#### 4. 研究成果

(1) 燃焼ガス渦輪の形成  
図 4 に当量比  $\phi=1.05$  における燃焼ガス渦輪の形成過程を示す。着火後 10.5 ms で火炎が渦輪形成装置の開口部から周囲空気へ噴出し、12 ms で噴出した火炎が横方向へ広がっている。そして、13-15.5 ms で火炎にマッシュルーム形状が現れ、渦輪が形成されている。20.5 ms で予混合気が燃え尽き、予混合火炎が消滅している。このように予混合燃焼によって燃焼ガス渦輪が生成された。

次に、図 4 渦輪形成過程の観察から渦輪形成装置開口部から噴出する火炎面先端の移動距離を時間に対して測定し、その結果から

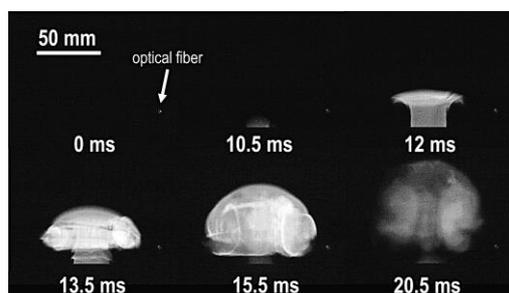


図4 燃焼ガス渦輪の形成過程の連続画像

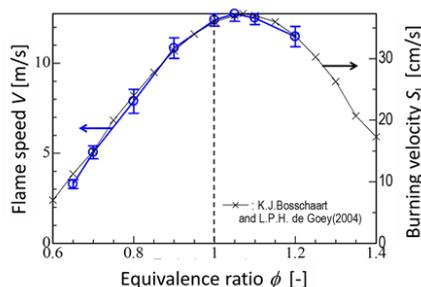


図5 渦輪の火炎速度と当量比の関係

予混合火炎面の火炎速度  $V$  [m/s] を求めた。図 5 に  $V$  と他の研究者の層流燃焼速度  $S_b$  [cm/s] の測定結果を、 $\phi$  を横軸として比較する。図 5 から  $\phi$  の変化に対して  $V$  と  $S_b$  の分布傾向は良い一致を示し、 $\phi=1.05$  近傍で最大となる。この結果は、渦輪形成装置から噴出する火炎の移動速度が燃焼速度に依存していることを示す。そして、渦輪は予混合燃焼による気体膨脹で円孔から噴出した燃焼ガスで形成されるため、渦輪の移動速度は燃焼ガスの噴出速度に大きく依存すると考えられる。その考えに基づけば、燃焼ガス渦輪の移動速度は、その渦輪を形成するために使用した予混合気の燃焼速度の大きさに依存すると考えられる。

#### (2) 燃焼ガス渦輪による消火過程

図 6 に、消火成功時に観察された消火過程での火炎の振る舞いを連続画像として示す。時間は火炎基部に渦輪が干渉する直前を 0 ms としている。図 6 では、火炎に渦輪が干渉してから 33 ms 程度で火炎基部がバーナから離れ、火炎が浮き上がることがわかる。これは、渦輪によって火炎が下流へと吹き飛ばされたためと考えられる。更に、133-200 ms で渦輪の干渉によって、下流へと吹き飛ばされそしてバーナリムから浮き上がった火炎は、渦輪の進行方向と一致し、よりバーナ下流方向へと押し流される。それと同時に、火炎の長さは徐々に減少し、黄炎が見えなくなり、200 ms で全体的に青炎となる。これは、火炎基部がバーナから浮き上がったために、その基部の上流領域で燃料と酸化剤が混合された予混合気が、火炎へと流入したためと考えられる。そして最終的に、246 ms で火炎は下流へと完全に吹き飛ばされ、全体消滅が生じ消火成功となる。このように、消火成功での火炎の振る舞いから、火炎の消滅は渦輪到達によって生じた瞬間的な速度増加によって火炎が下流へと流され、結果として火炎伝播速度と火炎への流れの速度との不釣り合いから達成されたものと考えられる。

他方、図 7 に消火失敗時の火炎の振る舞いを示す。消火失敗の場合も消火成功時と同様に、渦輪が到達後 33 ms 程度で火炎基部がバーナから浮き上がる。しかし、223 ms 程度で、バーナから浮き上がった火炎は下流域で静止する。その後、333 ms では浮き上がった火

炎は上流へと移動し始める。これは、浮き上がった火炎基部の上流域において、バーナから噴出するメタンガスと周囲空気とが相互拡散により混合し、更に形成された予混合気が火炎へと到達したことで、浮き上がった火炎の基部が、空間中に濃度勾配を有した予

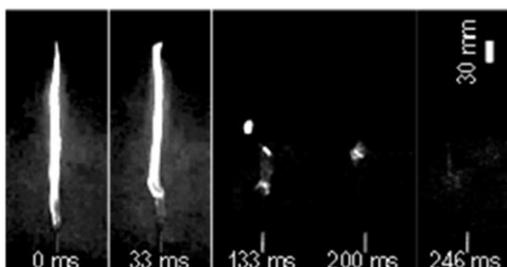


図6 消火成功時の火炎挙動  
( $\phi=1$ ,  $L/d_o=15$ )

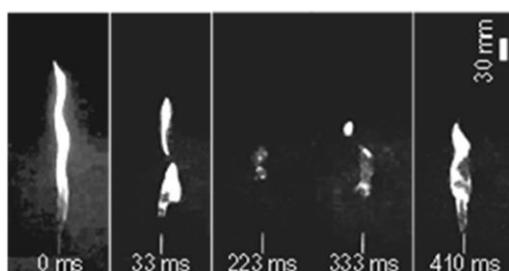


図7 消火失敗時の火炎挙動  
( $\phi=1$ ,  $L/d_o=15$ )

混合気層中を上流へと伝播したことを意味している。そして410 msにおいて上流へ伝播した火炎によって、拡散火炎がバーナ上に再安定化され、最終的に燃焼ガス渦輪による消火が失敗となる。

以上の消火過程の観察結果を踏まえると、燃焼ガス渦輪による消火が成功するか否かは、まず渦輪が火炎基部をバーナから吹き飛ばし、更に、浮き上がった火炎の基部を下流で浮き上がって安定に燃焼できる領域から火炎基部を押し出せるかどうか依存する。より詳細に説明すれば、浮き上がった火炎の基部前方では、濃度勾配を有した予混合気層が形成される。その濃度勾配は火炎基部が、よりメタン噴流下流に移動するほど緩やかになる。その結果、可燃範囲内の燃料濃度を有する予混合気層の空間的な幅が増加し、それに伴い基部の火炎は Triple flame とされるような燃焼形態に変化すると考えられる。このとき、濃度勾配を有する予混合気層内で燃焼する火炎基部前方では、基部での燃焼反応によって生じた発熱による気体膨脹が生じ、局所的な圧力上昇が生じると考えられる。その結果、火炎基部に流入する流れの流線が基部前方で押し広げられ、可燃性混合気の基部への流入速度が低下すると考えられる。このことは、吹き飛ばされた火炎基部は、下流へ移動するほど吹き飛ばして消火を達成するのが難しくなることを意味している。そのため渦輪の消火には、火炎基部をバーナから

浮き上がった後に、基部を上流に伝播させず、下流へと吹き飛ばして消火を達成するための渦輪移動速度が必要となると考えられる。

### (3) 消火確率分布と消火可能範囲

図8に $\phi=1$ として $L$ を変化させて $P$ を測定した結果を示す。この実験から燃焼ガス渦輪の消火範囲がわかる。横軸は $d_o$ で $L$ を除いた無次元距離としている(ただし、図6で示したように実際の渦輪外直径は $d_o$ よりも3倍程度大きい)。

図8から $\phi=1$ では $L/d_o \leq 12$ まで $P=1$ を示し、 $L/d_o=12$ が $\phi=1$ における燃焼ガス渦輪の最大の消火可能範囲  $L_m/d_o$  を示すといえる。 $\phi=1$ の場合、燃焼ガスの組成としては他の当量比に比べ酸化剤成分つまり酸素や残存する可燃成分が含まれる量は最も小さいと考えられる。つまり燃焼ガス渦輪が渦輪内に燃焼ガスを保持して移動していた場合、その不活性ガスが $\phi=1$ の $L/d_o \leq 12$ まで消火に影響していると考えられる。更に渦輪消火の場合、渦輪の移動速度の大きさによって火炎基部が下流へと吹き飛ばされることも消火達成の要因と考えられる。渦輪の移動速度は、予混合気の燃焼速度に依存すると考えられる。なぜならば燃焼速度が大きい程、円孔から押し出される気体速度が増加し、形成された渦輪の移動速度が増大すると考えられるためである。

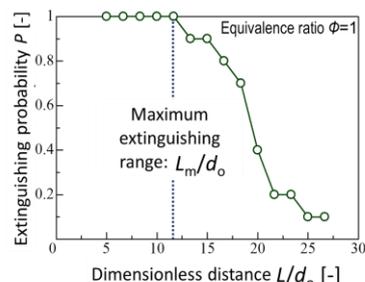


図8 燃焼ガス渦輪の消火可能範囲

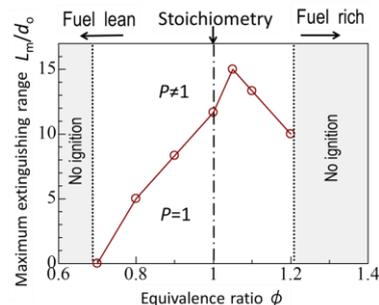


図9 消火可能範囲と当量比の関係

次に図9に $L_m/d_o$ と $\phi$ との関係を示す。図9から、 $L_m/d_o$ は $\phi=1.05$ でピークを示し、 $\phi$ が増加 or 減少しても $L_m/d_o$ が減少傾向を示すことがわかる。従来、メタンの最大燃焼速度は $\phi=1.06$ 近傍で得られるため、燃焼ガスの組成において最も消火に有利な $\phi=1$ よりも燃焼速度の値がより大きい $\phi=1.05$ の燃焼ガス渦輪の消火能力が高いことが分かった。このこと

から消火可能範囲は燃焼速度の大きさに依存していると言える。

#### (4) 燃焼ガス渦輪の消火機構

消火過程における火炎基部最下端のメタン噴流下流方向を正としたZ軸上の位置を時間経過に対して測定した結果を図10と図11に示す。図10は消火成功を示し、火炎基部最下端が時間に対して一定速度で下流へ押し流されていることがわかる。他方、図11では、図10と同様にほぼ一定速度で下流へと流された後に、火炎の上流伝播が生じていることがわかる。そこで図10と図11から基部が下流へ押し流される速度  $V_f$  [m/s]を算出した。

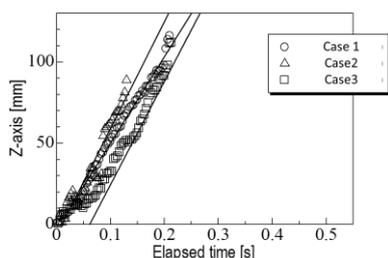


図10 消火成功での火炎位置と時間の関係 ( $\phi=1, L/d_0=15$ )

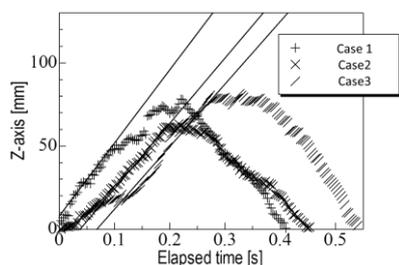


図11 消火失敗での火炎位置と時間の関係 ( $\phi=1, L/d_0=15$ )

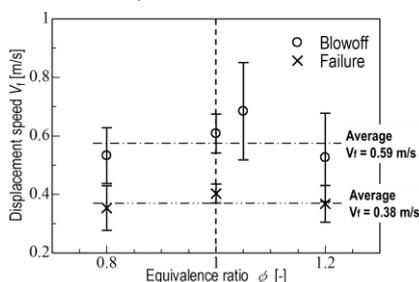


図12 火炎基部の移動速度と  $\phi$  との関係 ( $\phi=1, L/d_0=15$ )

各  $\phi$  に対する  $V_f$  の測定結果を図12に示す。図12から  $V_f$  は消火成功も失敗も若干の  $\phi$  への依存性はあるものの、ほぼ一定値と見ることが出来る。消火成功時には  $V_f$  の平均値は約 0.59 m/s であり、他方、消火失敗の  $V_f$  の平均値は約 0.38 m/s である。

この  $V_f$  の値は火炎に衝突し、下流へと基部を押し流す渦輪の移動速度と一致していると考えられる。その考えに基づけば、燃焼ガス渦輪の消火メカニズムは次のように考えられる。つまり、浮き上がった火炎基部が有する伝播速度を、その火炎基部に流入する予

混合気速度が上回ったときに、火炎は下流に流され消火成功と考えられる。反対に、基部に流入する予混合気速度が伝播速度を下回る場合、消火失敗となる。このように、燃焼ガス渦輪での消火の成否は浮き上がった火炎の伝播速度と予混合気の火炎基部に流入する速度のバランスで決定されると考えられる。従って、図12から、燃焼ガス渦輪の移動速度が 0.5m/s 付近が消火の成否の境界となっていると考えられる。メタンの燃焼速度は 0.4m/s 程度であることから、消火対象の燃焼速度も消火の成否と関係があると言える。またこの結果から、燃焼ガス渦輪を用いた消火では、渦輪を形成するのに用いる予混合燃焼において、燃焼速度が大きくなればなるほど消火効果が増大すると考えられる。

#### 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 3 件)

① Hiroiyuki Torikai, Yuki Soga and Akihiko Ito, Schlieren Visualization of Blast Extinguishment with Laser-Induced Breakdown, Proceedings of The Combustion Institute, Vol. 36, 2017, pp. 3297-3304 (査読有り). DOI: 10.1016/j.proci.2016.06.131

② Hiroiyuki Torikai, Miho Ishidoya and Akihiko Ito, Examination of Extinguishment Method with Liquid Nitrogen Packed in a Spherical Ice Capsule, Fire Technology, Vol. 53, 2016, pp. 1-14 (査読有り). DOI: 10.1007/s10694-015-0534-6

③ Yuki Chiba, Hiroiyuki Torikai, Akihiko Ito, Characteristics of a Jet Diffusion flame with Inert-Gas Vortex Ring, Progress in Scale Modeling, Vol. 2, 2014, pp.115-125 (査読有り). DOI: 10.1007/987-3-319-10308-2\_14

[学会発表] (計 20 件)

① Hiroiyuki Torikai, Yuki Soga and Akihiko Ito, Schlieren Visualization of Blast Extinguishment with Laser-Induced Breakdown, 36<sup>th</sup> International Symposium on Combustion, August 1<sup>st</sup>-5<sup>th</sup> 2016, in Korea.

② Hiroiyuki Torikai, Sanehito Kenmotsu and Akihiko Ito, Extinguishment of a Jet Diffusion Flame with Combusted-Gas Vortex Ring, 27<sup>th</sup> International Symposium on Transport Phenomena, September 20<sup>th</sup>-23<sup>rd</sup> 2016, in Hawaii.

③ Hiroiyuki Torikai, Sanehito Kenmotsu and Akihiko Ito, Examination of Extinguishment of A Jet Diffusion Flame with a Vortex Ring

Generated by a Premixed Flame, 36<sup>th</sup> International Symposium on Combustion, August 1<sup>st</sup>-5<sup>th</sup> 2016, in Korea.

④工藤真也, 鳥飼宏之, 伊藤昭彦, 不活性ガスを充填したゴム風船によるメタン-空気拡散火炎の消火, 平成 28 年度日本火災学会研究発表会, May 16<sup>th</sup>-17<sup>th</sup> 2016, 新潟県.

⑤劔持翔人, 鳥飼宏之, 伊藤昭彦, 燃焼ガス渦輪を用いた噴流拡散火炎の消火, 平成 28 年度日本火災学会研究発表会, May 16<sup>th</sup>-17<sup>th</sup> 2016, 新潟県.

⑥鳥飼宏之, 石戸谷美帆, 伊藤昭彦, 球状氷カプセルを用いた消火法の消火過程の観察, 平成 28 年度日本火災学会研究発表会, May 16<sup>th</sup>-17<sup>th</sup> 2016, 新潟県.

⑦劔持翔人, 鳥飼宏之, 伊藤昭彦, 横田輝, 予混合燃焼により形成した渦輪を用いた拡散火炎の消火, 第 54 回燃焼シンポジウム, November 23<sup>rd</sup>-25<sup>th</sup> 2016, 仙台市.

⑧劔持翔人, 鳥飼宏之, 伊藤昭彦, 燃焼ガスで形成した渦輪を用いた噴流拡散火炎の消火, 第 53 回燃焼シンポジウム, November 16<sup>th</sup>-18<sup>th</sup> 2015, つくば市.

⑨土屋智之, 鳥飼宏之, 伊藤昭彦, 高温壁への水滴衝突を利用した間接消火法の検討, 日本機械学会 熱工学コンファレンス 2015, October 24<sup>th</sup>-25<sup>th</sup> 2015, 大阪大学.

⑩高津敏志, 鳥飼宏之, 伊藤昭彦, 高温壁への水滴衝突による間接消火法への水滴直径の影響, 平成 26 年度日本火災学会研究発表会, May 27<sup>th</sup>-28<sup>th</sup> 2014, 東京理科大.

〔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〕

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

鳥飼 宏之 (TORIKAI, Hiroyuki)

弘前大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号 : 50431432

(2)研究分担者

なし ( )

研究者番号 :

(3)連携研究者

なし ( )

研究者番号 :