

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：11101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02393

研究課題名（和文）空中起爆による爆風消火の消火機構解明

研究課題名（英文）Clarification of Extinguishing Mechanism of Airburst Blast Extinguishment

研究代表者

鳥飼 宏之（Torikai, Hiroyuki）

弘前大学・理工学研究科・教授

研究者番号：50431432

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,000,000円

研究成果の概要（和文）：微小爆薬を用いた空中起爆による爆風消火の基礎研究を実施し、地面で反射ブラスト波が形成されることで爆風消火の効果が增大することを解明した。特にマッハ反射が形成されると消火可能な水平方向距離（火炎と爆点との水平方向距離）は最も大きい。またその消火可能な水平方向距離は、一般に知られているSachのスケール則で整理できた。この関係を用いて実験室スケールで得られた空中起爆爆風消火の結果を、実規模の爆風消火に適用することが可能となることが分かった。これらの研究成果によって、爆薬を使用した空中起爆爆風消火の大規模森林火災や地震火災などに対する緊急の消火法としての適用可能性が大きく向上したと言える。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震火災や大規模林野火災に対する緊急の消火法として爆風消火は使用することができる。そこで微小爆薬を用いて空中起爆爆風消火の消火機構を解明する基礎研究を行った。空中起爆を行うと、ブラスト波が地面で反射して反射ブラスト波が形成される。起爆高さによって先行するブラスト波と反射したブラスト波が重なるマッハ反射が生じる。このマッハ反射が生じて拡散火炎と干渉する条件で、爆風消火によって消火できる爆点と拡散火炎との距離が最も大きくなることが分かった。このようにマッハ反射が生じて爆風が火炎に作用する爆点高さが、空中起爆爆風消火における最適起爆点高さであることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Basic research on airburst blast extinguishment using micro explosives has been carried out, and it is clarified that the formation of reflected blast waves on the ground increases the extinguishing effectiveness of the blast extinguishment. In particular, the horizontal distance between the jet diffusion flame and the location of airburst shows the greatest when Mach reflection occurs. The horizontal distance of the effective range of the blast extinguishment, within which the diffusion flame can be always blown off by the blast waves, is organized by Sach's scaling law. Therefore, using this relationship, it is found that the experimental results of airburst blast extinguishing obtained on a laboratory scale can be applied to actual-scale blast extinguishment. These research results have greatly improved the applicability of airburst blast extinguishment using explosives as an emergency firefighting method for large-scale forest fires and earthquake fires.

研究分野：消火の科学・技術

キーワード：爆風消火 爆薬 空中起爆 ブラスト波 反射ブラスト波 火災 拡散火炎 消炎

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 国内で大規模地震が生じると都市部で火災が同時多発的に発生し甚大な被害が生じる。特に、火災の火勢が地域の消防力を上回ると延焼を許すうえに、地震により道路などのインフラが破壊され通常の消火法が利用できない。このような地震火災や、近年国外で頻発する大規模林野火災などに迅速に対応するための緊急の消火法が必要である。消火剤を必要とせずブラスト波と流れの効果で短時間に消火を達成する爆風消火は、その候補の一つである。

(2) これまでの爆風消火の基礎研究により、地上起爆での爆風消火の消火メカニズムが解明されている。しかし、空中起爆のように地上で反射ブラスト波が形成される場合の爆風消火機構については全く検討されていない。爆風消火の消火機構においては、ブラスト波と拡散火炎との干渉によって引き起こされる Richtmyer-Meshkov instability (以降、RMI と表記) が鍵となるため、地面近傍で形成される反射ブラスト波の爆風消火への影響は大きいと考えられる。

(3) 第2次世界大戦時に広島、長崎で投下された原子爆弾は、爆風による都市の破壊を効果的に行うために空中で起爆した。これは反射ブラスト波の利用を意味している。このことを踏まえると、爆風消火においても空中起爆により反射ブラスト波を形成することで消火効果を増加させることが期待できる。このように兵器開発のために蓄積されてきた爆風に関する知見が、爆風消火という火災安全技術の開発に利用できる可能性がある。

(4) 衝撃波研究において、衝撃波と予混合火炎との干渉現象を検討した研究は国内外で古くから多数存在する。しかし、衝撃波と予混合火炎よりも複雑な火炎構造を有する拡散火炎との干渉現象を火災消火の研究と結びつけて検討している例はこれまでにない。また燃焼研究においても爆風消火で観察される消炎現象について検討している例はない。

2. 研究の目的

爆薬による爆風消火は“大規模地震で生じる同時多発火災”や“異常気象に起因して生じる広域林野火災”のような消火困難な火災に対する有効な減災手段となる。これまで地上起爆の場合、①ブラスト波と拡散火炎の干渉によって生じる気流と②爆薬から生じる爆轟生成ガスの気流の2つの流れが火炎を消火に導くことが知られている。しかし先に述べたように空中起爆による爆風消火について検討した例はない。地面を伴う空中起爆の場合、地面でブラスト波の反射が生じ、この反射ブラスト波の形成が上記①の消火効果を増大させる可能性がある。そこで本研究では空中起爆を行う位置(爆点)を変化させ、爆風消火特性への影響について詳しく調査し、爆風消火における最適な爆点位置を明らかにする。そして光学的な流れの可視化手法と高速度カメラを用いて空中起爆による爆風消火の消火機構を解明することを目的とした。また、空中起爆爆風消火の最適爆点位置に対するスケール効果についても検討した。

3. 研究の方法

(1) 空中起爆爆風消火の消火機構を明らかにするために、空中起爆かつ地面がない場合の爆風消火実験を行った。この場合、反射衝撃波は形成されない。その実験装置を図1に示す。円管バーナ(内径:2.8 mm, 外径:3.2 mm)によりメタン-空気噴流拡散火炎(断面平均流速 1.4 m/s)を形成した。爆薬には図2に示す 20 mg のアジ化銀(AgN_3)を用いた。この 20 mg のアジ化銀ペレットは、2つの 10 mg のアジ化銀ペレットを接着剤で適切に合体させて形成した。10 mg のアジ化銀ペレット(昭和金属工業製)は、直径 1.5 mm, 高さ 1.5 mm の円筒形であり、完爆すると約 18 J のエネルギーを放出する。20 mg の薬量での爆風消火では、爆轟生成ガスが火炎に干渉する前に消火が達成され、純粋にブラスト波による消火過程が観察できる。微小爆薬は直径 0.1 mm のナイロン製の釣り糸に瞬間接着剤で取り付け、任意の空間位置に固定した。起爆は Q-switched Nd: YAG レーザを波長 532 nm, ビーム径 約 5 mm, レーザエネルギー 30 mJ/pulse で照射して行った。また図1に示すように原点 O と R 軸, Z 軸をそれぞれ定義し、爆点位置を座標

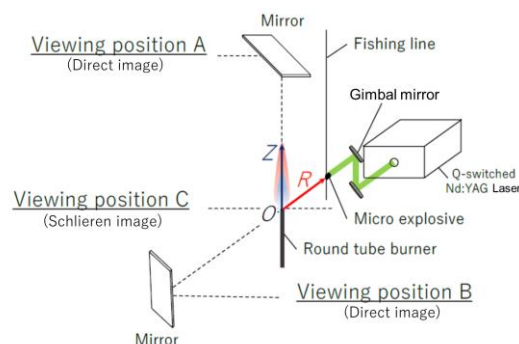


図1 空中起爆による爆風消火の実験装置 (地面なし)

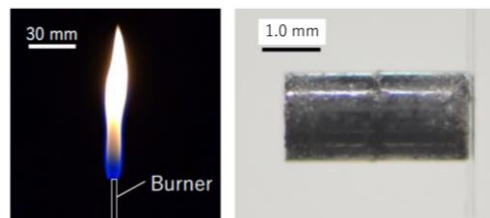


図2 消火対象と 20 mg のアジ化銀ペレット

(R, Z)で表した。

空中起爆かつ地面がない場合の爆風消火過程を図1に示すように撮影した。撮影方向 A では、平板ミラーを介し火炎直上から消火過程を直接撮影した。撮影方向 B では同じく平板ミラーを介して火炎の背面から消火過程を直接撮影した。撮影方向 C では、シュリーレン法を使用して側方から消火過程を観察した。直接撮影は高速度カメラ (Nac, ACS-1) を使用し、撮影方向 A では撮影速度 5000 fps, 露光時間 199.5 μ s, 撮影方向 B では撮影速度 3000 fps, 露光時間 332 μ s で記録した。シュリーレン画像は高速度カメラ (Nac, MEMRECAM HX-3) を用いて撮影速度 30000 fps, 露光時間 2 μ s で記録した。また消火過程観察では爆点を(R, Z)=(110 mm, 0 mm)に配置した。

(2) 空中起爆かつ地面ありの場合、つまり反射ブラスト波が生じる場合の爆風消火の実験を行った。その実験装置を図3に示す。消火対象は、上記で説明したのと同様のバーナを用いた。バーナは平らなアルミ平板に埋め込まれ、バーナ先端の高さとアルミ平板上面の高さを一致させた。また、地面ありの爆風消火実験でも、2つのアジ化銀ペレットを1つに接着した20mgのアジ化銀を使用した。着火には上記と同様のレーザーを使用した。座標は図3のように設定した。また、消火効果を定量的に評価するため

成功回数を合計の消火実験回数 (10回) で除して消火確率 $P [-]$ を算出した。空中起爆かつ地面ありの爆風消火過程は、図1の撮影方向 C からシュリーレン法を用いて観察し、拡散火炎に干渉する直前の衝撃波構造を検討した。また空中起爆爆風消火における最適爆点位置に対するスケール効果を検討するために、爆薬量を 10 mg–30 mg で変化させて、消火確率分布の測定を行った。

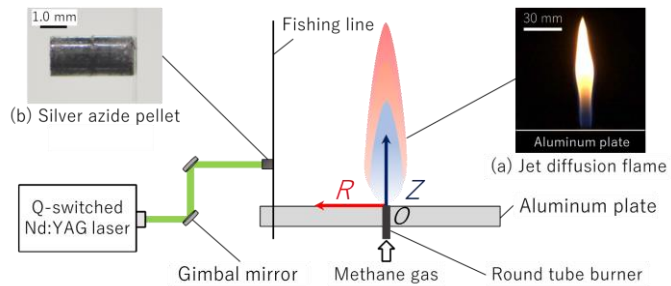


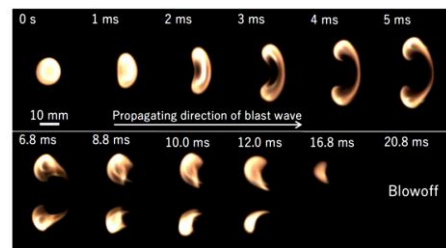
図3 空中起爆による爆風消火実験装置 (地面あり)

4. 研究成果

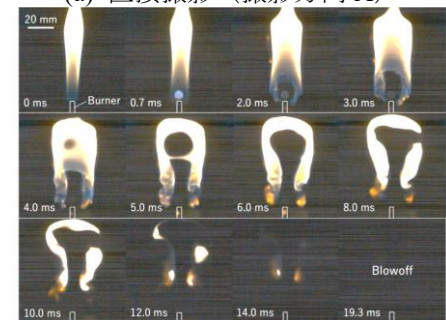
(1) 空中起爆かつ地面がない場合の爆風消火過程を火炎直上 (撮影方向 A) から観察したものを図4(a)に示す。図4(a)から、ブラスト波と拡散火炎の干渉により RMI が誘起され、燃焼領域に渦対が形成される。その渦運動によって、図4(a)のように時間経過と共に拡散火炎面が大きく画像上下方向に伸張される。その結果、総合的な燃焼反応の速度が、酸化剤または燃料の反応帯への輸送速度に追いつけず局所消炎が生じると考えられる。そして、時間の経過と共に徐々に火炎面積を減少させ、最終的に全体消炎に至る。

(2) 空中起爆かつ地面がない場合の爆風消火過程を、火炎背面 (撮影方向 B) から観察した結果を図4(b)に示す。起爆から 0.7 ms で RMI によって火炎基部領域の火炎幅が横方向に増大する。次に、2.0 ms では下流域の火炎幅も増加すると同時に、火炎基部領域で局所消炎が形成される。時間経過と共に、その局所消炎は下流域へと拡大し、8.0 ms で拡散火炎が左右2つに分離される。これらの火炎挙動は RMI に起因して燃焼域に形成された渦対の影響によるものである。最終的に消炎領域が拡大し、全体消炎が達成される。

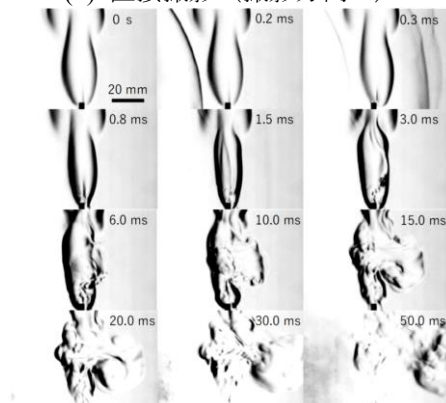
(3) 空中起爆かつ地面がない場合の爆風消火過程を、シュリーレン法を用いて観察した結果を図4(c)に示す。起爆から 0.2-0.3 ms でブラスト波が拡散火炎を通過している。0.8-6.0 ms で画像左側の火炎帯外縁から火炎内を通過して画像右側へ移動する流れが観察できる。これは RMI に起因した渦形成とそれに誘起された局所的な流れを意味している。10 ms 以降で、その流れが画像右方向に大きく噴き出し、それと共に火炎も吹き飛ばされている。20 ms で火炎基部が吹き飛びはじめ、最終的に全体消炎に至る。



(a) 直接撮影 (撮影方向 A)



(b) 直接撮影 (撮影方向 B)



(c) シュリーレン法 (撮影方向 C)

図4 空中起爆かつ地面なしの爆風消火過程の観察

以上から図4で示したように、空中起爆かつ地面がない場合、爆風消火はブラスト波と拡散火炎の干渉に起因するRMIによって燃焼領域に渦対が形成される。その影響を受けて、火炎基部領域の火炎面が大きく変形して局所消炎を生じる。そして下流域の火炎も同様に変形すると共に、その消炎領域が拡大し、徐々に火炎面積を減少させて最終的に全体消炎つまり消火に至る。このような消火機構であることが分かった。このことは、爆風消火を緊急時の消火法として使用するための重要な結果である。

(4) 空中起爆かつ地面ありの場合の爆風消火過程を、シュリーレン法を用いて観察した結果を図5に示す。基本的な爆風消火過程は、先に示した図4で説明したのと同様であった。ただし、空中起爆の地面からの高さ Z が変わることによって、噴流拡散火炎に干渉するブラスト波の衝撃波構造が異なる。そこで、各起爆条件での爆風消火過程において、図5における起爆から $167\ \mu\text{s}$ のブラスト波が拡散火炎に干渉する直前のブラスト波構造に注目する。

図5(a)は、 $Z=3\ \text{mm}$ と爆点高さが極めて地面に近い条件での爆風消火過程である。起爆から $167\ \mu\text{s}$ の画像を見ると、火炎基部領域に干渉する直前のブラスト波には反射ブラスト波が形成されていない。他方、図5(b)は、 $Z=40\ \text{mm}$ での起爆による爆風消火過程である。起爆から $167\ \mu\text{s}$ の画像を見ると、マッハ反射(Mach reflection)となっており、火炎基部領域に干渉する直前のブラスト波構造が、反射ブラスト波が先行するブラスト波に追いつくことで形成されるMach stemが生じている。次に、図5(c)は、 $Z=80\ \text{mm}$ と爆点高さが比較的高い条件での爆風消火過程である。起爆から $167\ \mu\text{s}$ の画像を見ると、反射ブラスト波形成されているが、火炎基部領域に干渉する直前のブラスト波構造が、反射ブラスト波が先行するブラスト波に追いついていない正常反射(regular reflection)となっていることがわかる。

このように爆点高さが異なることによって、爆点と火炎との距離 R の大きさにも依存するが、拡散火炎に干渉してRMIを引き起こすブラスト波構造が異なることがわかる。

(5) 各爆点位置(R, Z)での消火確率 P の値について図6に示す。縦軸は爆点高さ Z 、横軸は爆点位置と火炎中心との水平距離である。図6において、 $P=1$ を示す各 Z での最大水平距離を消火限界(extinguishing limit)とし、青の実線で図中に示す。この消火限界の値が大きいくほど、爆風消火の効果が高いと言える。図6から、消火限界は $Z < 40\ \text{mm}$ では Z が増加するにつれて増加し、 $Z=40\ \text{mm}$ 付近で消火限界が最大値を示す。更に $Z > 40\ \text{mm}$ では、 Z が増加するにつれて、今度は消火限界が減少する。この消火限界の分布から、 $20\ \text{mg}$ のアジ化銀を用いた消火実験では、 $Z=40\ \text{mm}$ が空中起爆の爆風消火において最適な爆点高さとなっていることが分かる。

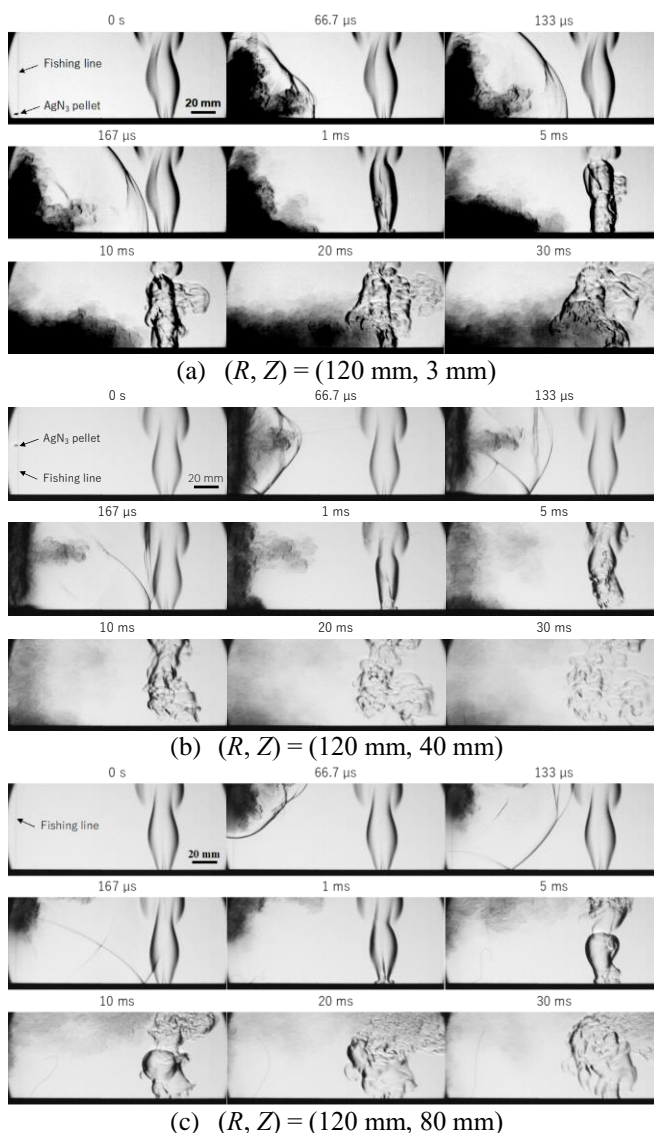


図5 空中起爆かつ地面ありの爆風消火過程のシュリーレン法による観察(撮影方向C)

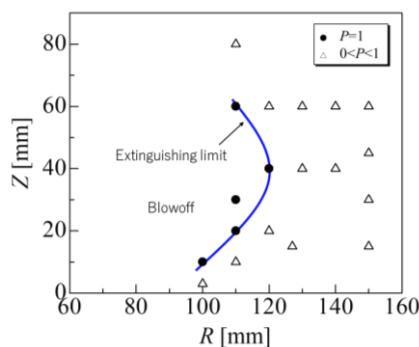


図6 空中起爆爆風消火の消火限界マップ(地面あり)

このことは図5の結果と合わせて考えると、マッハ反射が形成される条件において、空中起爆による爆風消火は、消火可能となる爆点と拡散火炎との距離が最も大きくなることが明らかとなった。

(6) 図7にアジ化銀の爆薬量を10 mgから30 mgまで変化させた場合の消火限界マップを示す。20 mgのデータは図6と同様である。図7中の各消火限界の左側の領域は、爆薬によって本研究の拡散火炎が常に消火される消火有効範囲である。図7から消火有効範囲の半径方向の最大距離を消火限界距離 R_{ex} とし、この位置での起爆高さを最適消火爆点高さ Z_{ex} と定義する。この R_{ex} と Z_{ex} の爆薬量に対する変化を検討することで、空中起爆かつ地面ありの場合の爆風消火に対するスケーリング則を明らかにできる。

図8は、 R_{ex} と Z_{ex} と爆薬量の関係を示している。 R_{ex} と Z_{ex} は爆薬量の増加つまり爆発への投入エネルギーの増加に伴い単調に増加している。

ここで R_{ex} と Z_{ex} の値を、ブラスト波のスケーリング則としてよく知られている Sach のスケーリング則を用いて無次元化する。Sach のスケーリング則を以下に示す。

$$R_c = (E/p_0)^{1/3} \quad (1)$$

E [J]は爆薬のエネルギー量、 p_0 [Pa]は大気圧である。また R_c [m]は爆発によって形成されたブラスト波が強い衝撃波として伝播する距離を示す。

図9は爆薬量と無次元距離 R_{ex}/R_c [-]および無次元起爆高さ Z_{ex}/R_c [-]の関係を示す。その結果、 R_{ex}/R_c は投入エネルギー量によらず、約1.8という同じ値を示す。従って、消火限界の水平距離 R_{ex} は R_c に依存して決定してることがわかる。他方、最適起爆高さ Z_{ex} は R_c で無次元化を行っても一定値にはまとまらなかった。これは図5で議論したようにブラスト波の内部構造が消火効果に影響を与えるため、爆風消火に最適な起爆高さのスケーリングについては衝撃波構造を考慮する必要があることを意味している。

このように、空中起爆による爆風消火において、反射ブラスト波が形成される場合、その爆風消火有効範囲が最も大きくなる最適な起爆高さが存在することが明らかになった。また、その爆風によって消火可能な爆点と消火対象との距離である消火限界は、ブラスト波の研究で有名な Sach のスケーリング則で整理することができる。つまり、このスケーリング則を用いれば、実験室規模で得られた爆風消火の結果を、実際のスケールの爆風消火に適用できることを意味している。

(7) 以上のように、空中起爆による爆風消火の基礎研究を実施し、マッハ反射が形成されることで爆風消火の消火効果が增大することが分かった。また、その消火可能な半径距離は、従来から知られている Sach のスケール則で整理できたため、この関係を用いて実験室スケールでの空中起爆による爆風消火結果を、実際のスケールにおける爆風消火に適用することが可能となることが分かった。これらの研究結果によって、爆薬を使用した空中起爆爆風消火の大規模森林火災や地震火災などに対する緊急の消火法としての適用可能性が大きく向上したと言える。

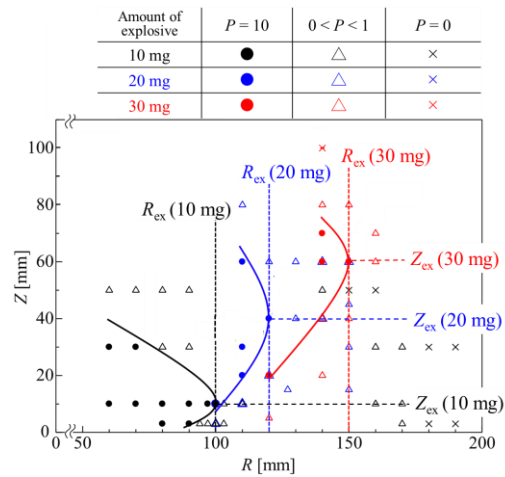


図7 異なる爆薬量に対する消火限界マップ

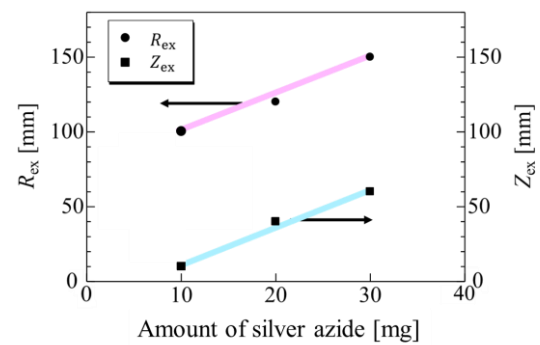


図8 爆薬量と最適爆点高と爆点-火炎距離の関係

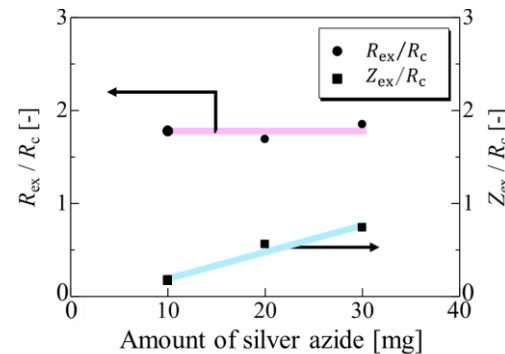


図9 Sach's scaling law による整理

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 鳥飼宏之	4. 巻 VOL. 71, No. 3
2. 論文標題 気体消火剤を用いた消火の基礎	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本火災学会誌	6. 最初と最後の頁 20-25
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 鳥飼宏之	4. 巻 VOL. 65, No.211
2. 論文標題 消火の科学-消火戦略の重要性	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本燃焼学会誌	6. 最初と最後の頁 9-16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20619/jcombsj.65.211_9	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 鳥飼 宏之, 廣田 光智, 斎藤 寛泰	4. 巻 VOL.62, No. 2
2. 論文標題 より効果的な消火法の開発を目指して-消火戦略の重要性	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 安全工学	6. 最初と最後の頁 100-106
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18943/safety.62.2_100	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 吉田優真, 鳥飼宏之
2. 発表標題 メタン - 空気噴流拡散火炎の爆風消火と投入エネルギー量の関係
3. 学会等名 第59回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鳥飼 宏之, 横田 頌平, 中元 崇人
2. 発表標題 固体または液体上で行った空中起爆爆風消火の消火特性の比較
3. 学会等名 2021年度 日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 有馬正人, 鳥飼宏之
2. 発表標題 線状に配置された噴流拡散火炎群へのブラスト波入射角度の爆風消火への影響
3. 学会等名 日本機械学会東北学生会 第52回卒業研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuma Yoshida, Hiroyuki Torikai
2. 発表標題 Study on scaling law of airburst blast extinguishment with micro explosives
3. 学会等名 9th International Symposium on Scale Modeling (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中元 崇人, 鳥飼 宏之
2. 発表標題 水面上に形成された噴流拡散火炎の微小爆薬を用いた爆風消火の検討
3. 学会等名 第58回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 横田 頌平, 鳥飼 宏之
2. 発表標題 シュリーレン法による空中起爆による爆風消火の消火過程の可視化
3. 学会等名 第58回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中 英祐, 鳥飼 宏之
2. 発表標題 左右に振られたCO2噴流を用いた拡散火炎の消火過程で観察される火炎挙動
3. 学会等名 日本機械学会 熱工学コンファレンス2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 横田 頌平, 鳥飼 宏之
2. 発表標題 空中起爆消火へのプラスト波挙動の影響
3. 学会等名 2020年日本火災学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 扇谷昂志, 鳥飼宏之
2. 発表標題 火災旋風に対する爆風消火の効果の検討
3. 学会等名 東北学生会 第 53 回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 執行 俊作, 鳥飼 宏之
2. 発表標題 爆風消火特性と直線配置された噴流バーナ火炎列へのプラスト波入射角度の関係
3. 学会等名 第60回 燃焼シンポジウム
4. 発表年 2022年 ~ 2023年

1. 発表者名 Yuma Yoshida and Hiroyuki Torikai
2. 発表標題 SCHLIEREN VISUALIZATION OF EXTINGUISHING PROCESS OF DIFFUSION FLAMES IN AIRBURST BLAST EXTINGUISHMENT WITH MICRO EXPLOSIVES
3. 学会等名 The 13th Pacific Symoisum on Flow Visualization and Image Processing (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuma Yoshida and Hiroyuki Torikai
2. 発表標題 Blowoff Mechanism of Airburst Blast Extinguishment of a Methane Air Jet Diffusion Flame with Micro Explosive
3. 学会等名 14th International Symposium on Fire Safety Science (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鳥飼 宏之, 有馬 正人
2. 発表標題 直線的に配置された噴流拡散火炎列へのプラスト波入射角度の爆風消火特性への影響
3. 学会等名 2022年度火薬学会春季研究発表会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

第58回燃焼シンポジウムでベストプレゼンテーション賞を受賞
<https://www.st.hirosaki-u.ac.jp/news/awarded/jusho/201203-3.html>

9th International Symposium on Scale ModelingでBest Early Career Awardを連名で受賞

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