

平成 30 年 5 月 25 日現在

機関番号：82113

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K18199

研究課題名(和文) 散水による可燃物の燃え拡がり抑制効果の工学的評価手法に関する研究

研究課題名(英文) Research on evaluation method for suppression effect of flame propagation by water application

研究代表者

野秋 政希 (Noaki, Masaki)

国立研究開発法人建築研究所・防火研究グループ・研究員(移行)

研究者番号：90535478

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、以下の二つのサブテーマにおいてそれぞれ下記の成果を挙げた。
「散水による燃焼中の可燃物から隣接する可燃物への着火抑制」について、火熱を模擬した電熱ヒーターと散水装置、可燃物から構成される装置を用いて様々な加熱強度、散水密度に対する可燃物の着火時間等を測定し、同実験結果を分析・考察することにより、散水による受熱低減効果を考慮した着火モデルを構築した。
「散水による可燃性内装材の燃え拡がりの抑制」について、鉛直面の可燃性内装材を下端から着火させ、上方に燃え拡がる過程で散水を行い、可燃性内装材の表面温度や発熱速度を測定し、散水による燃え拡がりの抑制に関する知見を収集した。

研究成果の概要(英文)：This research gave results mentioned below for the following two sub-topic.
1. In case of "the suppression of ignition of combustibile material by water application", The experiments using the system constructed by electoric heater, water application system and combustibile material were carried out. In these experiments, ignition time et. al. were measured under various heating and sprinkling conditions. From the analysis and consideration of these experimental results, an estimation model for ignition time considering the cooling effect by water applicaiton were suggested.
2. In case of "the suppression of flame propagation of combustibile interior finish by water application", the experiments that water application activated at the time when the combustibile material ignited from the bottom was propagating were carried out. In these experiments, the surface temperature and heat release rate of combustibile interior finish was measured.

研究分野：火災安全工学

キーワード：散水 スプリンクラー 着火 受熱低減 熱分解 内装材 火炎伝播 発熱速度

1. 研究開始当初の背景

スプリンクラー等の散水設備は火災拡大を抑制する設備として広く知られているにもかかわらず、建築物の火災安全性を工学的に検証する上で、散水設備の影響を考慮することが困難な状況にある。これは、散水による火災抑制効果を工学的に評価する手法が確立されていないことが一因である。

散水設備の火災拡大の抑制効果を建物の火災安全性の工学的な検証に応用できれば、建築基準法が要求する火災安全性を損なうことなく、a)可燃性であるが機能的または意匠的に有効な建材を積極的に使用できる、b)防火対策のバリエーションを増せる、など多くの波及効果を期待できる。特に a)に関連して近年では、地球温暖化抑制や地域経済の活性化などの観点から木材の積極的利用が期待されている。しかし、内装材に可燃性材料が使用されたり、室内に可燃性の物品が密に配置された空間で火災が発生すれば、瞬く間に火災が拡大し、在館者の避難や消火活動が困難となる。散水設備による火災抑制効果を工学的に評価する手法が確立できれば、このような木材の積極的利用と火災安全の両立を図れる可能性がある。

散水設備による火災拡大の抑制効果には、A.火災室温度の低減、B.火源の燃焼抑制、C.燃え広がりの抑制、D.煙層の降下などいくつかの効果があることが知られている。これまで申請者らは、これらの効果のうち「B.火源の燃焼抑制」に着目した研究を実施し、散水時における可燃物の物理的な燃焼モデルを構築した。

一方、近年、他の研究者によって、A.火災室温度の低減や D.煙層の降下に着目した研究がなされ一定の有効性が確認されている。

他方、「C.燃え広がりの抑制」に主たる着眼を置いた研究事例は少なく、定量的な評価手法が構築されていない。しかし、申請者らは昨年度から電熱ヒーターまたはガスバーナーを加熱源とし、散水を用いた可燃物間の着火遅延に関する実験を実施してきた。

申請者はこの研究を継続・発展させることで「C.燃え広がりの抑制」に関するさらなる定量的知見の収集とその効果のモデル化を実施した。

2. 研究の目的

本研究では、散水設備による C.燃え広がりの抑制」を以下の 2 つの課題に分けて、それぞれの効果に関する定量的知見の収集及びそのモデル化を目的として研究を遂行した。

- i) 散水による可燃物の着火抑制効果
- ii) 散水による壁内装材の火災伝播抑制効果

3. 研究の方法

3. 1 散水による可燃物の着火抑制効果

本研究では、散水中においても表面に水膜が形成されず可燃物が熱分解または着火に

至る条件に主眼を置き、散水による可燃物の熱分解および着火の遅延効果を把握することを目的として、以下に示す 2 種類の試験体を用いた実験を実施した。また、それらの実験結果および既存の熱着火理論を用いて、散水による受熱低減効果を考慮した正味の入射熱流束と可燃物の熱分解時間および着火時間の関係について考察した。

- ①散水が無い条件における可燃物の着火性に関する既往の研究成果に倣えば、着火は可燃物に入射する熱流束に大きく左右される。そこで、まず、散水時における正味の受熱量の把握を目的とし、高温となっても熱分解が生じない材料である鋼板に対し、放射加熱と散水を同時に与える実験を実施した。また、散水時における物体の表面温度を測定する方法として、放射温度計を用いた方法の有効性について検討した。
- ②次に、散水が可燃物の熱分解時間および着火時間に及ぼす影響の把握を目的として、PMMA を試験体として①と同様の装置を用いた実験を実施した。

①②共に実験装置は同様であり、次に示す通りである。発熱性試験装置で用いられるコーンヒーターを加熱源として使用した。試験体とコーンヒーターを 50mm の間隔で鉛直に正対させ、試験体一面を放射加熱した (図 1)。

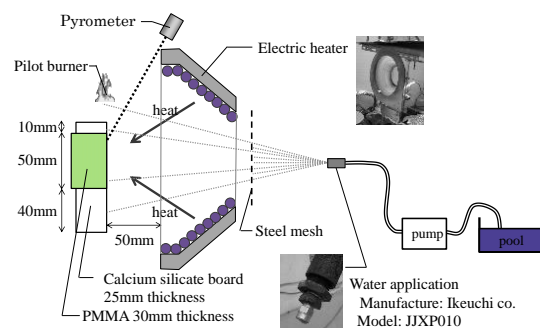


図 1 散水による着火抑制実験の概要

また、図 1 に示すように散水設備をコーンヒーターの背面側に設置し、コーンヒーターの穴を通して試験体表面へ水を供給した。このとき、コーンヒーターと散水設備の間に複数枚重ねた鉄製の網を設置し、試験体に供給する散水密度 (単位面積単位時間当たりの散水量) を調節した。

実験の主なパラメータは、加熱強度 (試験体の単位面積当たりには与えられる熱量) および散水密度 (試験体の単位面積当たりには与えられる水量) である。加熱強度は 20 ~ 45kW/m² を 5kW/m² ずつ変化させた 6 条件とし、散水密度は 0、2、4、6 g/s.m² の 4 条件とした。

主な測定項目は試験体の温度と可燃性試験体の熱分解開始および着火の時間である。

3. 2 散水による壁内装材の火炎伝播抑制効果

本研究では、壁内装材の燃え拡がり性状に及ぼす散水設備の影響に関する定量的知見の収集を目的として実験的研究を実施した。また、既往の鉛直上方火炎伝播モデルに基づき、散水による吸熱効果を加味した火炎伝播モデルを構築した。

実験では鉛直に立てた可燃性壁内装材を下端から幅方向に一斉に点火し、上方への燃え拡がっている間に内装材全面に散水し火炎伝播性状の変化を確認した。図1に実験概要図、表1に実験条件を示す。可燃性壁内装材にはPMMA(幅300mm、高さ1000mm)を用いた。助燃材から試験体に着火後、試験体高さの半分の位置まで熱分解を起こしたタイミングで散水ヘッド(いけうち社製、型番:BBXP060、放水量:0.2L/min(0.2MPa))を作動させ、散水を開始した。試験体上端まで燃焼した時点で実験を終了し、燃焼が継続している場合には強制消火した。

パラメータは散水密度 w (0, 0.2, 0.7 g/s/m²の3パターン)、助燃材の種類(エタノール、n-ヘプタン)と助燃材の寸法(幅300mm、奥行き25, 100mm)とした。散水密度は試験体表面と散水ヘッドとの距離を変化させることで調節した。

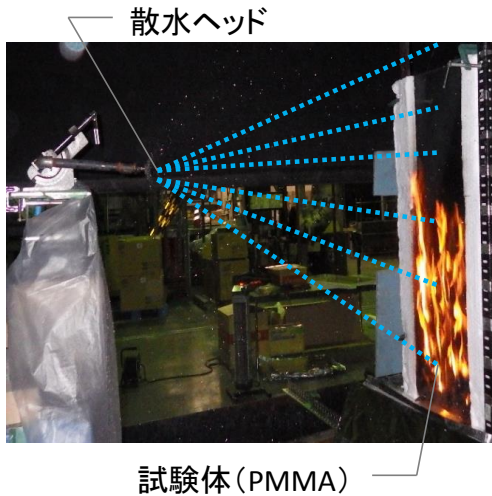


図2 散水による火炎伝播抑制実験の概要

4. 研究成果

4. 1 散水による可燃物の着火抑制効果

① 散水による受熱低減確認実験

熱電対による鋼板温度の測定結果の経時変化の一例(加熱強度 40kW/m²)を図3に示す。図3より、散水開始(600秒)以前は加熱開始から鋼板の温度は上昇するが、散水開始直後からは温度が急激に低下した。その後、散水開始から300秒程度経過すると温度の低下勾配は緩やかとなり、概ね一定の値で推移している。これは、ヒーターからの加熱と水による吸熱が釣り合ったためと考えられる。

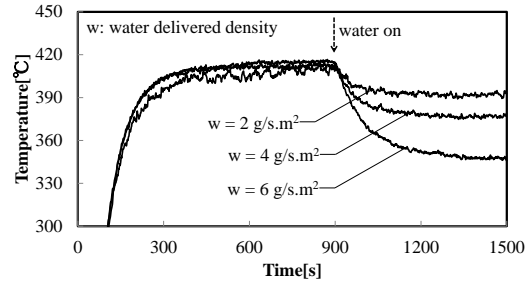
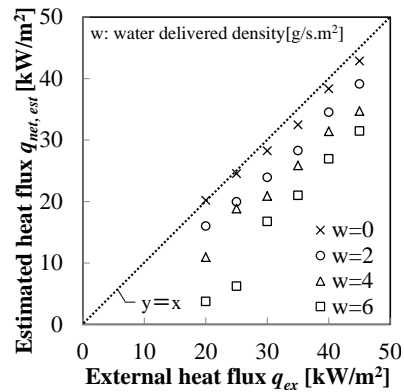


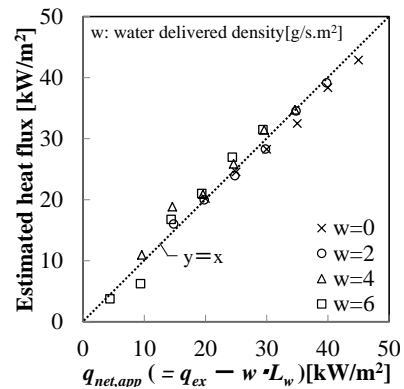
図3 鋼板の温度 (加熱強度 40kW/m²)

鋼板温度の実測値を用いて鋼板の熱収支から鋼板表面に入射する熱流束を推定した結果(推定熱流束)と加熱強度を比較した結果が図4(a)である。図より、加熱強度が同じであれば散水密度 w の増加に伴って推定熱流束が低減することが分かる。

一方、図4(b)は図4(a)の横軸を加熱強度から鋼板表面に供給された水が全て蒸発したと仮定し、その蒸発潜熱および水が沸点まで上昇するのに必要な熱量(顕熱)を減じた値(みかけの入射熱流束)とした結果である。図より、散水密度や加熱強度によらず、推定熱流束がみかけの入射熱流束と概ね等しいことから、散水が物体の表面で全て蒸発する場合には、単位面積当たり供給された水の蒸発潜熱および顕熱の分だけ加熱強度が低減するとみなせることを確認した。



(a) 推定熱流束と加熱強度の比較



(b) 推定熱流束とみかけの入射熱流束の比較

図4 加熱強度、推定熱流束、みかけの入射熱流束の比較

② 散水による着火抑制確認実験

実験時の PMMA 試験体表面の様子の一列を散水密度別に比較した結果を図 5 に示す。図 5(a)より散水無しの場合、加熱開始後しばらくすると、PMMA の表面は気泡を伴いながら溶融し始め、その後着火した。また、図 5(b)~(d)より、散水有りの場合、加熱強度が高く散水密度が低い条件では、試験体表面の水滴が当たった部分では瞬間的に濡れるもののすぐに乾き、しばらくすると散水が可燃物表面に供給されているにもかかわらず熱分解し始め、着火に至った。ただし、加熱強度が低く、散水密度が高い条件では、供給された水滴群が蒸発しきらずに、試験体表面に残存し、熱分解を生じないケースも存在した。

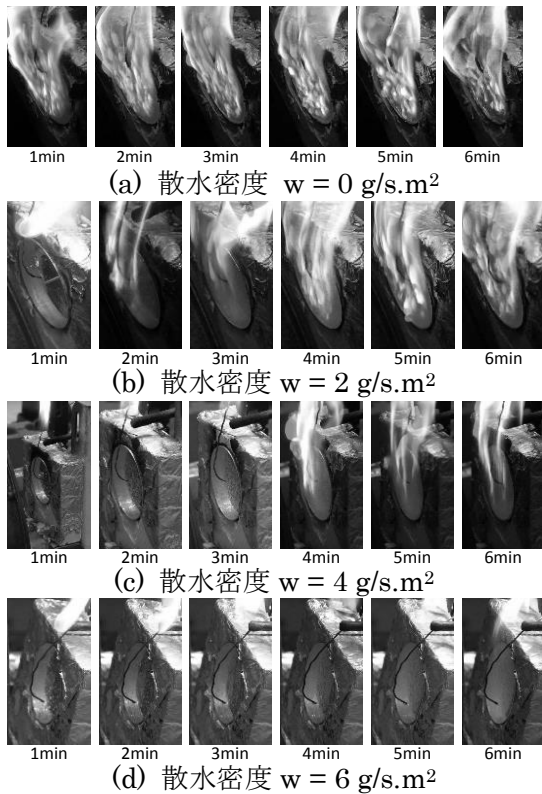


図 5 PMMA 試験体の観察記録の例
(加熱強度：40kW/m²)

PMMA の表面温度の経時変化の一例を整理した結果が図 6 である。図より、散水有りの条件では、加熱強度が同じであっても、散水密度が増加するほど表面温度の上昇は緩やかとなることを確認した。

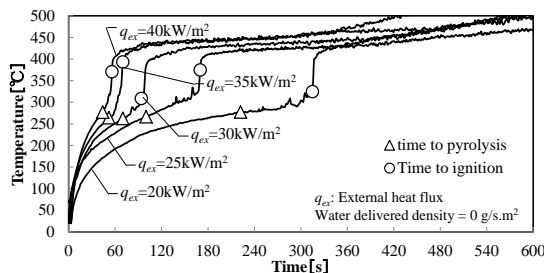


図 6 PMMA 試験体の表面温度経過の一例

熱分解を開始する時間（熱分解開始時間と呼ぶ） t_p と加熱強度の関係性を散水密度別に整理した結果を図 7 に示す。図 7 より、熱分解時間は加熱強度の増加に伴い短くなり、散水密度が高いほど長くなる傾向にあることが確認できる。

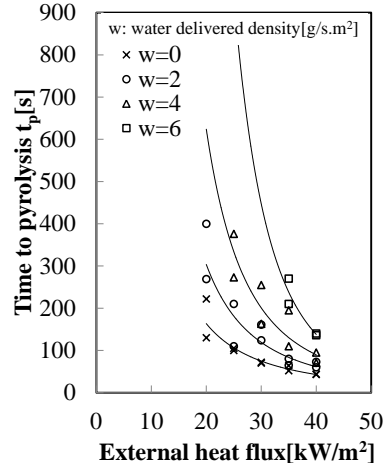
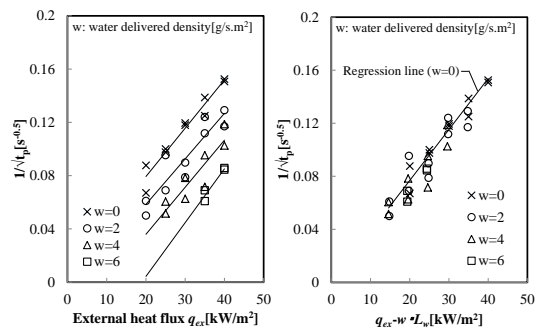


図 7 加熱強度と熱分解時間（散水密度別）

既往の熱着火理論に基づけば、熱分解時間または着火時間の平方根の逆数と加熱強度は直線的な相関性を持つはずである。この相関性は、散水無しの条件において成立することが既往の研究によって確認されているが、散水有りの条件においても成立するか否かについては検討の余地があった。

図 8(a)は Fig.16 は熱分解時間 t_p の平方根の逆数と加熱強度を散水密度別に整理した結果である。図より、熱分解時間の平方根の逆数 $1/\sqrt{t_p}$ は、散水密度によらず、加熱強度に対し概ね直線的な相関にあり、各回帰直線の傾きは散水の有無によらず大きく変化していない。一方、図 8(b)は図 8(a)の横軸をみかけの入射熱流束（4.1 節①参照）とした結果である。図より、散水の有無によらず $1/\sqrt{t_p}$ の実験値は概ね一本の直線上にあることから、散水無しにおける加熱強度と $1/\sqrt{t_p}$ の関係式が既知であれば、みかけの入射熱流束から散水時の熱分解時間を推定可能であることを確認した。



(a) 加熱強度 (b)みかけの入射熱流束
図 8 $1/\sqrt{t_p}$ と試験体への入射熱の比較

4. 2 散水による壁内装材の火炎伝播抑制効果

図9は試験体の発熱速度（燃焼によって単位時間当たり発生した熱量）の経時変化を散水密度別に整理した結果である。図9より散水密度が大きくなるほど発熱速度の増加勾配は緩くなる傾向を確認した。

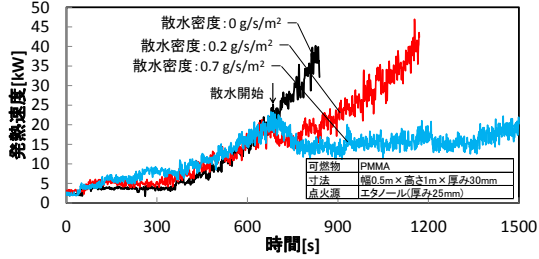


図9 散水密度毎の発熱速度の経時変化

図10は試験体表面をビデオおよびサーモカメラによって撮影した画像を散水開始（試験体半分燃焼時）から1分毎に整理し、散水の有無に比較した結果である。図より、散水無しに比べ散水有りの方が上方への火炎伝播が遅延していることが確認できる。

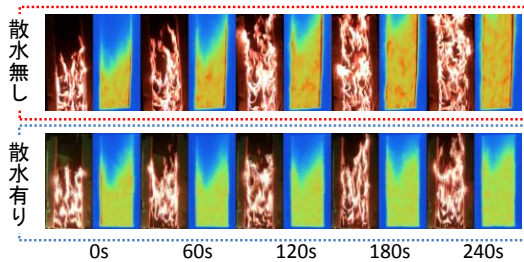


図10 試験体表面の観察の様子（1分毎）

試験体表面が熱分解温度に到達した時間とその高さ（以降、熱分解高さと呼ぶ）の関係を散水有無別にまとめた結果、熱分解高さ×試験体幅×単位面積当たりの発熱速度から計算した発熱速度は酸素消費法により測定した値と概ね等しいことを確認した。

また、既往の火炎伝播理論をベースに散水時の燃え拡がり速度の推定モデルを構築した。同理論によれば、熱分解領域下端の位置が変化せず、熱分解領域の大きさに比例した速度で加速度的に熱分解領域が拡大すると考え、熱分解高さ x_p を式(1)のように近似している。

$$x_p = x_0 \cdot \exp(\alpha \cdot t) \quad (1)$$

ここで、 x_0 は加熱初期の試験体の熱分解高さ（着火源の仕様によって変化）、 t は加熱開始からの時間である。この指数関数のべき乗である α は可燃性壁面の発熱性および着火性に応じて式(2)のように計算できる。

$$\alpha = \frac{K \cdot Q'' - 1}{t_{ig}} \quad (2)$$

このうち、試験体の単位面積当たりの発熱速度 Q'' 、着火時間 t_{ig} は散水により燃焼抑制効果および着火抑制の影響を受ける。両者の影響を4.1節の成果およびこれまでの研究成果を用いて推定した結果が図11である。図11より、推定値は散水密度の増加に伴う α の減少傾向を概ね再現できているが、実験値より幾分高い値を示している。これは、熱分解領域の上部に供給された水滴群の一部が流れ落ち、燃焼領域の発熱を低減していたためなどの影響と考えられ、今後改善の余地が残る。

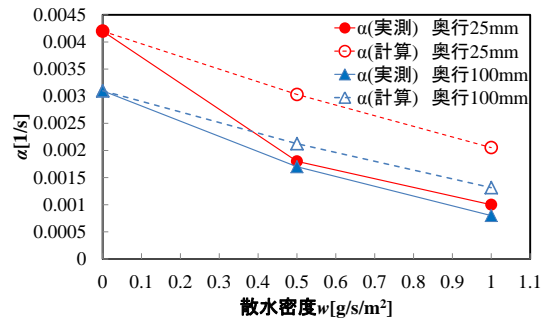


図11 α の推定値と実験値

なお、同実験に先立ち、壁内装材を模擬する試験体として様々な可燃物（ポリエチレン（PE）、ABS、ポリプロピレン（PP）、ポリアセタール（POM）、ポリエチレンフォーム、ポリエチレンテレフタレート（PET）、ポリカーボネート（PCET）、ポリウレタンフォーム、段ボール）を対象として、散水無しの条件下で同様の実験を実施したが、表1に示す通り、恒常的に燃え拡がり続ける試験体が少なかったことから、本実験ではPMMAを用いた。ただし、ウレタンフォームおよび段ボールは、燃え拡がり続けたものの、ウレタンフォームの場合は火炎伝播が早すぎたため本実験で使用した熱画像の測定周期では火炎伝播速度に追従できず、段ボールの場合、燃焼の経過に伴い表面に炭化層が形成され、燃焼形態が複雑であることから、今回の実験では使用しなかった。今後はこれらの材料についても検討の余地がある。

表1 各種可燃物の鉛直火炎伝播性状

| 壁面の材料 | 燃焼時の様子 |
|--------------------|---|
| ポリエチレン(PE) | 助燃材の火炎で焙られていた部分は燃焼したが、その後ほとんど燃え上がらず。 |
| ABS | 壁面着火後、燃え上がったが、しばらくすると燃焼が弱くなる。表面に炭化層が形成されていた。 |
| ポリプロピレン(PP) | 壁面着火後、燃えるものの溶融した壁面が滑り落ちてくるため、燃え上がらない。液だれしたプラスチックが激しく燃える。 |
| ポリアセタール(POM) | 壁面着火後、燃えるものの溶融した壁面が滑り落ちてくるため、燃え上がらない。常に青い煙。 |
| ポリエチレンフォーム | 溶融すると下に滑り落ちてくるものの上方向火炎伝播はする。散水すると燃焼が激しくなる。 |
| ポリエチレンテレフタレート(PET) | 溶融するものの着火せず。 |
| ポリカーボネート(PCET) | PMMAと同様に加熱部分に気泡ができる。熱分解するものの着火せず。 |
| ポリウレタンフォーム | 早期に着火し、順調に火炎伝播する。散水開始以降も鎮火せず。 ⇒ 試験体として有力候補だが火炎伝播速度が非常に速すぎてサーモカメラでとらえることが難しい。 |

※ 助燃材はいずれもジェル着火剤（エキネン）

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 1 件)

野秋政希、山口純一、大宮喜文：散水による可燃物の熱分解および着火の遅延効果に関する研究、日本建築学会環境系論文集 第83巻 第744号、2018年2月(査読有り)

[学会発表] (計 1 件)

宮澤佑弥、野秋政希、大宮喜文：「散水による可燃性内装材の燃え拡がり抑制に関する実験的研究」、日本建築学会大会学術講演梗概集A-2、pp. 235-236、2017年9月

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

野秋 政希 (NOAKI Masaki)
建築研究所・防火研究グループ・研究員
研究者番号：90535478

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

大宮 喜文 (OHMIYA Yoshifumi)
東京理科大学・理工学部・教授
研究者番号：10287469

宮澤 佑弥 (MIYAZAWA Yuya)
建築研究所 非常勤職員 (平成29年度)