

令和 3 年 6 月 25 日現在

機関番号：82665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04675

研究課題名(和文) 火災拡大における複合的要素の適切な評価手法の構築

研究課題名(英文) Investigating Combined Effect of Radiation and Firebrands on Fire Spreads

研究代表者

鈴木 佐夜香 (Suzuki, Sayaka)

総務省消防庁消防大学校(消防研究センター)・その他部局等・その他

研究者番号：50714135

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：屋外火災拡大は接炎・輻射・火の粉によっておこるが、既往の研究では個々の火災拡大機構にのみ注目しており、複合的な影響に関しては検討がされていなかった。本研究課題では輻射熱と火の粉による複合的な着火機構に関して検討を行った。火の粉発生装置と輻射熱板を用いた実験装置を作成し、風速を変化させて実験を行った。外部からの輻射熱による予熱時間の変化と火の粉を加えた場合の着火にかかる時間の変化より、定量的な関係を見出した。風速が上がると対流による熱損失が増えること、また、火の粉の温度があることにより、外部からの輻射熱による影響は小さくなることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題は輻射熱と火の粉による複合的な着火機構に関して初めて研究されたものである。これまでわかっていなかった有風下での火の粉の熱量に関して一定の知見を得ることもできた。また、研究成果によって屋外火災における火災拡大の予測、それに伴う火災時のリスク評価をより正確にすることが可能となる。火の粉による飛び火は近年着目されているが、大規模火災において飛び火の着火危険性を評価することに役立つ。

研究成果の概要(英文)：Outdoor fires, for example urban fires, post-earthquake fires, wildland fires, spread via direct flame contact, thermal radiation, and/or firebrands. Past research focus on one of those paths, and little attention was paid to combined effects. In this study, the investigation on combined effects of thermal radiation and firebrands was performed. Experiments were performed by using the newly developed experimental setting which contains a firebrand generator and a radiant heat panel. Qualitative relationship on pre-heating time and the time to ignition was revealed experimentally and theoretical approach supported experimental results. As wind speed increases the convective heat loss from fuel beds also increases and the firebrand temperature increases, which resulted in shorter time to ignition at higher wind speed.

研究分野：火災、燃焼

キーワード：市街地火災 大規模火災 火の粉 林野火災 着火 輻射熱

### 1. 研究開始当初の背景

平時における大規模市街地火災はこれまで日本ではほとんど起こらないとされていたが、40年ぶりに起こった2016年末の糸魚川市大規模火災は今後大規模市街地火災が起こる可能性を改めて示すこととなった。糸魚川市大規模火災で着目されたのは火の粉による建物への飛び火の被害であるが、この点に関しては市街地火災のみならず世界各地で起こっている林野・市街地両方の大規模屋外火災においても見られる現象である[1]。

火災拡大の要因としては接炎・火の粉・輻射熱の3要素が考えられるがこれまでの研究は接炎と輻射熱に焦点が挙げられており、火の粉に関しては飛散に焦点が当てられてきた。火の粉による着火の研究に関しては近年になって研究が行われており、個別の火の粉を対象にした実験に加え、火の粉発生装置の開発による風洞での着火実験は多くの建物の脆弱性を明らかにしてきた[1]。

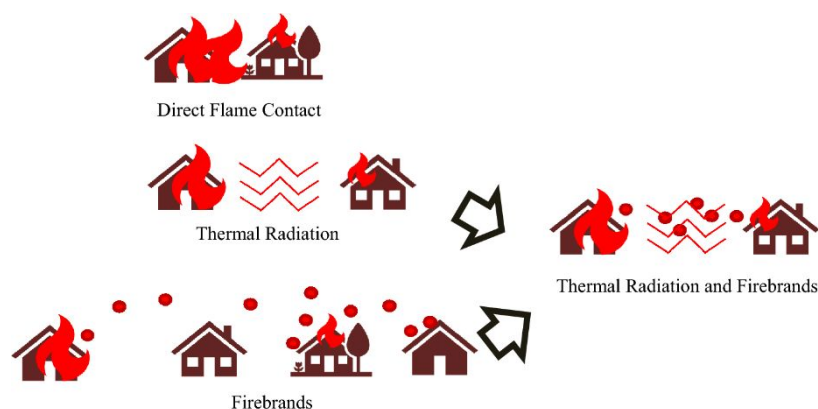


図1 市街地火災の延焼経路のイメージ。左：上から接炎・輻射熱・火の粉。右：本研究課題で対象とした輻射熱と火の粉の相互作用[2]。

火災においては上記の3要素が独立して火災拡大を起こすのではなく、影響を及ぼしあうことが知られているが、特に大規模市街地火災においては火災からの距離によってその影響が異なってくる。中でも火の粉は飛散によって火災を拡大することから独立的に影響を考えがちではあるが、市街地火災のような飛散距離の比較的短い中で起こる着火に関しては接炎の影響を無視することはできても、輻射熱の影響を無視することはできない。しかしながら、既往の研究においては特に長距離飛散後の火の粉を対象としていることもあり火の粉に対する輻射熱の影響は考慮されていない。また、火の粉を輻射熱等で代用し評価する手法も検討されたが、火の粉の局所加熱性や複数の火の粉による相互作用による着火現象等は輻射熱では代用できないことが知られている[3]。

### 2. 研究の目的

本研究では「火の粉の着火性(着火遅れ時間)に及ぼす火の粉の個数と輻射熱の影響を解明する」ことを目的とした。

### 3. 研究の方法

研究は以下のように実施した。屋外火災は有風下で起こる火災のため、火の粉による着火、及び火の粉と輻射熱による着火の実験では風速を変化させて実験を行った。火の粉の種類として、樹木から採取した火の粉の大きさに近いものと(これ以下「樹木火の粉」という)、建物から採取した火の粉の大きさに近いもの(これ以下「建物火の粉」という)の2種類を使用した[4]。

- 1) 輻射熱のみ、火の粉のみによる着火にかかる時間を測定する。
- 2) 1)の結果をもとに、火の粉と輻射熱の両方によって着火にかかる時間を測定する。
- 3) 可燃物の含水率を変化させて、2)と同様の実験を行い、火の粉と輻射熱の両方によってかかる時間を測定する。
- 4) 実験結果をもとに定量的な関係を見出す。

2)3)の実験では図2(左)の火の粉発生装置を輻射熱板と組み合わせて作成した実験装置を利用して実験を行った。1)の結果をもとに、輻射熱と火の粉の両方によって着火することを目的とし、無風時、輻射熱のみでは30分以内に着火しない $8.5 \text{ kW/m}^2$ を選択した。有風下での熱量は風速 $4 \text{ m/s}$ で $5.9 \text{ kW/m}^2$ 、風速 $6 \text{ m/s}$ で $5.6 \text{ kW/m}^2$ 、風速 $8 \text{ m/s}$ で $4.0 \text{ kW/m}^2$ であった。これは対流による熱損失のためである。予熱時間を0分、10分、20分と変化させた。火の粉の着床フ

ラックスは樹木火の粉の風速 6m/s 下で 6.3 個/m<sup>2</sup>s、風速 8m/s 下で 9.0 個/m<sup>2</sup>s、建物火の粉の風速 4m/s で 0.75g/m<sup>2</sup>s、風速 6m/s で 0.40g/m<sup>2</sup>s、風速 8m/s で 0.12g/m<sup>2</sup>s とした。変化させる含水率は 0%、10%、20%、30% とした。

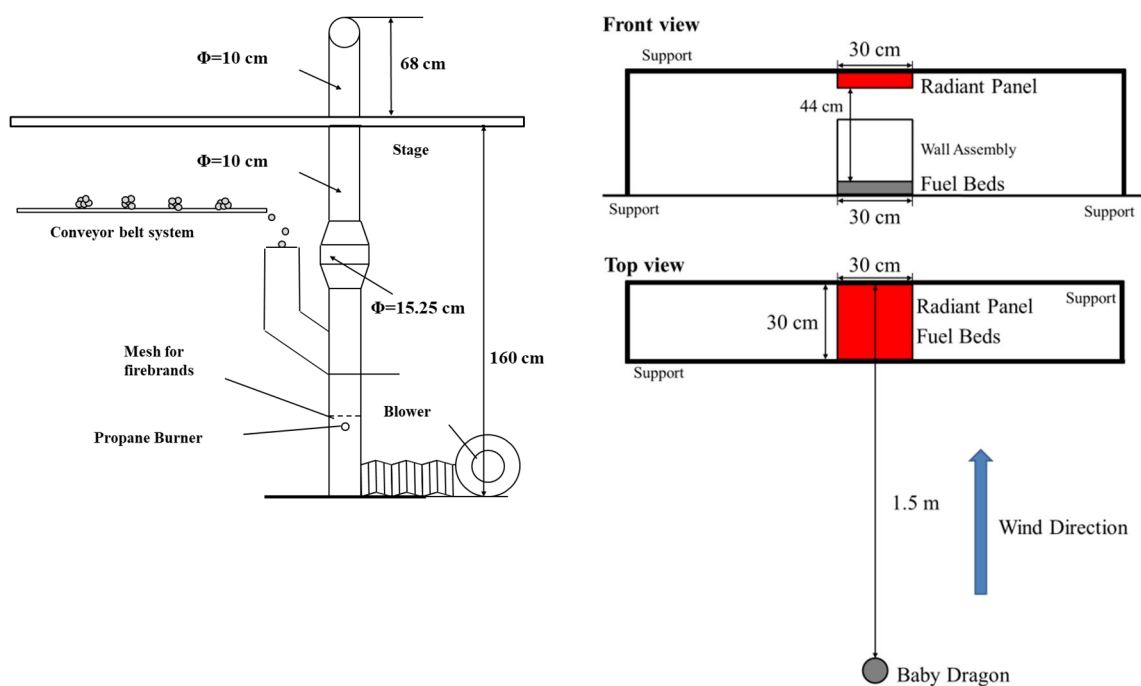


図 2 実験装置図 (右: 火の粉発生装置概要図、左: 実験装置全体概要図)

#### 4. 研究成果

樹木火の粉を用いた実験における輻射熱による予熱時間と無炎着火までの時間の関係の例を図 3 に示す。

- Experiments with radiant panel under a 6 m/s wind
- Experiments without radiant panel under a 6 m/s wind
- Experiments with radiant panel under an 8 m/s wind
- Experiments without radiant panel under an 8 m/s wind

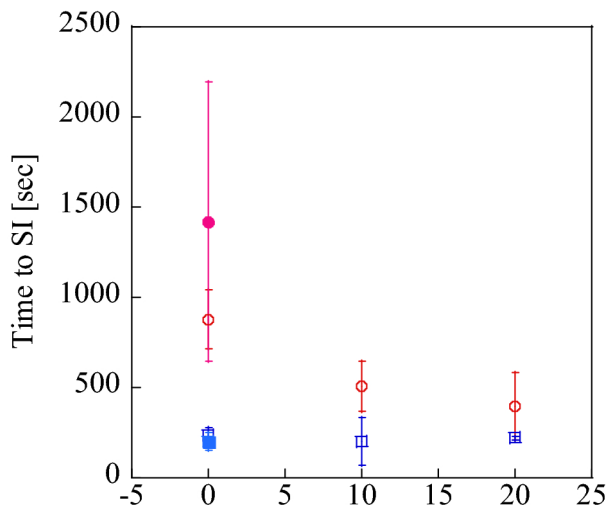


図 3 樹木火の粉での実験における予熱時間と着火にかかる時間の関係

グラフより風速 6m/s では予熱時間の違いによる影響が大きく出ていることが分かる。風速 8m/s の場合には予熱時間による着火にかかる時間の变化はほとんど見られないが、風速 6m/s では急激に減少した。これは風速 8m/s では輻射熱そのものが減少することに加えて、火の粉の温度が上昇するため、着火しやすくなるためと考えられる。

乾燥した可燃物と火の粉の間の熱量の保存より、以下の式が一般的に導かれる。

$$Q_{fuel, total} = Q_{firebrand, total} + Q_{fuel, external} = Q_{firebrand, comb} - Q_{firebrand, loss} + Q_{fuel, rad} - Q_{fuel, conv} \quad (1)$$

式(1)に具体的な計算式を導入することで、式(2)を導くことが出来る。式(2)で示されているようにこの式は (定量) = ay+x の式になるため、外部

からの熱量と火の粉からの可燃物に熱量の間には式(3)の関係があることが分かる。

$$Q_{fuel, total} = M_{firebrand} \left[ \Delta H_w - \frac{A_{firebrand, external}}{MF} \{ h_{firebrand} (T_{firebrand} - T_0) + \epsilon \sigma (T_{firebrand}^4 - T_0^4) \} \right]$$

$$T_0^4 \}}] + Q_{fuel, external} = \alpha y + x \quad (2)$$

$$y = \frac{-x + Q_{ig}}{\alpha} = Ax + B \quad (A = \frac{-1}{\alpha}, B = \frac{Q_{ig}}{\alpha}) \quad (3)$$

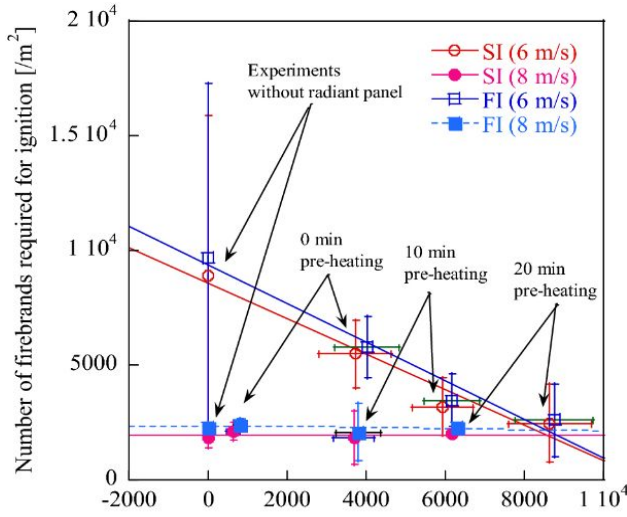


図4 可燃物への総合的な熱量と樹木火の粉の数の関係

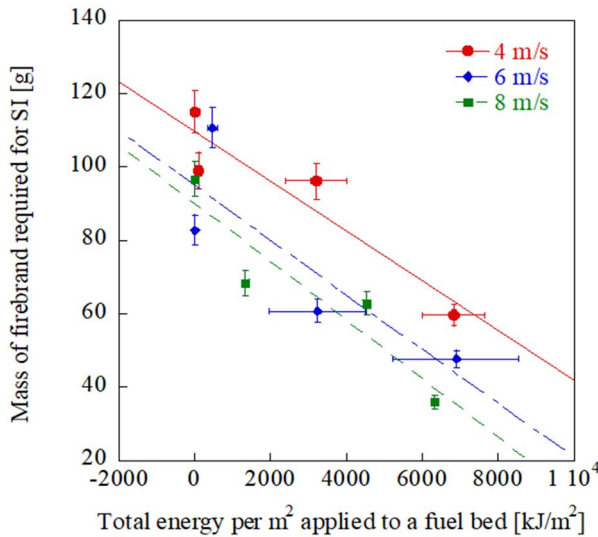


図5 可燃物への総合的な熱量と建物火の粉の量の関係

式(3)の $Q_{ig}$ は可燃物の着火に必要な熱量である。式(3)の関係を図4、図5に示した。図4では樹木火の粉と輻射熱による着火では、風速8m/sになると外部からの熱量の影響をほとんど受けないことが分かる。図5では建物火の粉と輻射熱による着火の風速による変化を示している。風速が速くなるにつれ、着火に必要な火の粉及び輻射熱量が少なくなっていることが分かるが、樹木火の粉と比較して、風速の影響を受けにくいことも分かった。輻射熱量が変化しないことから、風速が上昇することによる対流による総合的な熱量の減少及び、火の粉の温度(及び熱量)の増加による影響だと考えられる。

含水率を変化させた実験でも同様の傾向が見られたが、式(1)に可燃物中の水分の温度上昇及び蒸発熱を加えることになり、式が複雑になるため、定量的な関係を見出すためには更なる実験が必要なが分かった。今後の課題としたい。

#### 参考文献

1. Manzello, S.L., et al., Role of firebrand combustion in large outdoor fire spread, *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 76, 100801 (2020).
2. Suzuki, S., Manzello, S.L. Investigating Coupled Effect of Radiative Heat Flux and Firebrand Showers on Ignition of Fuel Beds. *Fire Technol* **57**, 683-697 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10694-020-01018-5>.
3. Santamaria, S. et al., 'Investigation of structural wood ignition by firebrand

accumulation, In: *Proceedings of The First International Conference on Structural Safety under Fire & Blast*, At Glasgow, Scotland, UK. pp. **127-138**. (2015)

4. Manzello, S.L., and Suzuki, S., (2017) Generating Wind-Driven Firebrand Showers Characteristic of Burning Structures, *Proceedings of the Combustion Institute*, 36: 3247-3252. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proci.2016.07.009>.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Suzuki Sayaka, Manzello Samuel L.	4. 巻 57
2. 論文標題 Investigating Coupled Effect of Radiative Heat Flux and Firebrand Showers on Ignition of Fuel Beds	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Fire Technology	6. 最初と最後の頁 683 ~ 697
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10694-020-01018-5	査読の有無 有
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 該当する

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 鈴木佐夜香
2. 発表標題 Experiments to Determine Coupled Effects of Radiative Heat Flux and Firebrand Showers on Ignition of Fuel Beds
3. 学会等名 13th International Symposium on Fire Safety Science (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木佐夜香
2. 発表標題 Quantifying the Influence of Smoldering Particle Size and Radiant Heat Flux on Ignition of Fuel Beds
3. 学会等名 38th International Symposium on Combustion (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Samuel L. Manzello
2. 発表標題 Quantifying the Influence of Smoldering Particle Size and Radiant Heat Flux on Ignition of Fuel Beds
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 鈴木佐夜香
2. 発表標題 Investigating coupled effect of radiative heat flux and firebrand showers on ignition of fuel beds - effect of firebrand distribution - and firebrands on ignition
3. 学会等名 2020年度火災学会研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木佐夜香
2. 発表標題 Investigating coupled effect of radiation and firebrands on ignition
3. 学会等名 第57回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sayaka Suzuki
2. 発表標題 Investigating Ignitions of Fuel Beds by Using a Reduced-Scale Firebrand Generator
3. 学会等名 アジアオセアニア国際火災シンポジウム (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究協力者	マンツェロ サミュエル (Manzello Samuel L.)	米国国立標準技術研究所・Engineering Laboratory・Mechanical Engineer	

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			
米国	米国国立標準技術研究所			