

令和 3 年 5 月 15 日現在

機関番号：82115

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H03369

研究課題名(和文) 関東大震災で大きな被害をもたらした巨大火災旋風の現代の市街地での発生可能性

研究課題名(英文) Occurrence probability of the gigantic fire whirls observed in the 1923 Kanto Earthquake in contemporary cities

研究代表者

樋本 圭佑 (Himoto, Keisuke)

国土技術政策総合研究所・建築研究部・主任研究官

研究者番号：90436527

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,400,000円

研究成果の概要(和文)：火災旋風は、市街地火災に付随して発生する竜巻状の火炎の渦で、過去に大規模な被害をもたらしてきた。現代の市街地であっても、市街地火災によって火災旋風が発生する可能性は否定できず、その場合の被害は甚大なものになることが予想されるが、その実態は明らかにされていなかった。本研究では、過去の事例調査に基づく地震出火確率モデルの開発、延焼モデルの計算負荷を低減させるための火災気流の温度場に関する相似則の構築、火災旋風が発生するための火源条件と流入風条件に関する実験的分析を行った。これに延焼モデルによる市街地火災性状の予測を組み合わせることで、現代の市街地における火災旋風の発生可能性の分析を可能にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

火災旋風の発生は、地震時等に発生が予想される市街地火災の被害を飛躍的に拡大させる可能性がある。このため、発生メカニズムについて実験的・理論的な分析が加えられることはあったが、実際の市街地でどの程度の危険性が想定されるのか、明らかになっていなかった。本研究では、火災延焼に関する数値シミュレーションの結果を活用することで、実験的な分析の結果を実際の市街地での評価に拡張できるようにした。

研究成果の概要(英文)：Fire whirl is a tornado-like vortex of flame associated with urban fires, which would cause extensive human and property damages if occurred. However, to date, the occurrence condition of fire whirls has not been fully investigated. The issues that have been addressed in this study are as follows: 1) development of a statistical model for the post-earthquake ignition probability considering inter-earthquake heterogeneity; 2) development of a similarity model for the temperature field downwind of a fire source in cross-wind for reducing computational cost of fire spread simulation; and 3) wind tunnel experiments for investigating the occurrence conditions of fire whirls. These results can be used to evaluate the occurrence probability of fire whirls in contemporary cities by integrating them into the fire spread simulation.

研究分野：建築・都市防災計画

キーワード：市街地火災 地震火災 火災旋風 火災

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

火災旋風は、市街地火災に付随して発生する竜巻状の火炎の渦で、過去にも大規模な被害をもたらしてきた。例えば、1923 年関東大震災では、当時の東京市内で約 110 か所、横浜市内で約 30 か所での火災旋風の発生が確認されている。このうち本所被服廠跡では、巨大な火災旋風が発生し、避難していた 4 万人のうち 3 万 8 千人が亡くなっている。現代の市街地にあっても、市街地火災によって火災旋風が発生する可能性は否定できず、その場合の被害は甚大なものになることが予想されるが、その実態は明らかにされていなかった。

### 2. 研究の目的

本研究では、過去の事例調査に基づく地震出火確率モデルの開発、延焼モデルの計算負荷を低減させるための火災気流の温度場に関する相似則の構築、火災旋風が発生するための火源条件（形状、発熱速度）と流入風条件（風向、風速）に関する実験的分析を行った。これに延焼モデルによる市街地火災性状の予測を組み合わせることで、現代の市街地における火災旋風の発生可能性の分析を行えるようにした。

### 3. 研究の方法

#### 3.1 地震間の非均質性を考慮した地震出火確率モデルの開発

本研究では、比較的規模の小さな地震を含めた火災事例の収集を行ってデータベースを構築した（1995 年から 2017 年までの震度 6 弱以上の揺れを観測した 24 件の地震のうち、11 件の地震により発生した 665 件の火災）。集住した事例をもとに、地震火災の種別・原因、出火、延焼拡大、消防活動、人的被害の観点から比較分析を行い、近年の日本において発生した地震火災に通底する特徴を抽出することを試みた。また、出火件数が少なく、通常であれば統計的な分析が困難な地震についても、地震間の出火メカニズムの共通性に着目し、パラメーターに共通の事前分布を設定する階層ベイズモデルを適用することで、出火確率の分析を行えるようにした。

#### 3.2 大規模市街地に対応した市街地火災延焼モデル

本研究では、正方形拡散バーナーを境界層風洞内に設置し、横風を加えることにより吹き倒された火災ブルームの気流軸周り、および風下側の床面付近の温度上昇を熱電対で計測した。本実験で採用した実験変数は、拡散バーナーの径  $W$ 、発熱速度  $\dot{Q}$ 、流入風速  $U_{\infty}$  の 3 条件である。実験結果を分析するため、火災ブルームの気流軸に沿った幅、上昇速度、および温度上昇と軸上距離に関する相似則を、横風の影響を考慮して導いた。こうして得られた相似則を利用することにより、市街地火災延焼シミュレーションにおいて多数の燃焼建物の風下側の温度上昇を評価する際の手続きを簡略化することが可能になる。

#### 3.3 火災風洞実験に基づく火災旋風発生条件の分析

本研究では、燃料吹き出し面を調整することで火源形状を変更可能な 2.4m 角（最大）の拡散バーナーを火災風洞実験棟の測定洞内に設置し、ここに市街地風を模擬した気流を加えることで、火災旋風の発生条件の検討を行った。燃料には都市ガスを使用し、超音波流量計により実験中の供給速度を計測した。実験条件には、火源形状、発熱速度  $\dot{Q}$ 、流入風速  $U_{\infty}$  の 3 条件を考慮した。このうち火源形状は長方形、千鳥形、口字形、門形、L 字形、一文字形について、火源規模は 0.1 ~ 1MW の範囲について、流入風速は基準風速 0 ~ 3.0m/s の範囲についてそれぞれ検討した。これらを組み合わせた条件の下での燃焼を 10 分間継続させ、そのうちの前後 1 分ずつを除

外した 8 分間の風速計の記録と、ビデオカメラの撮影記録との関係から、火災旋風の発生条件を分析した。

#### 4. 研究成果

##### 4.1 地震間の非均質性を考慮した地震出火確率モデル

図 1 は、1995 年兵庫県南部地震および 2016 年熊本地震における出火件数を、当該地震の出火記録のみを対象として分析した単独モデル (IM) と、複数の地震の出火記録に階層ベイズ手法を適用したモデル (HBM) で分析した結果を比較したものである。出火件数が多い 1995 年兵庫県南部地震については、IM による評価は比較的良好であったが、出火件数が少ない 2016 年熊本地震については、観測値との乖離が大きかった。これに対し、HBM では、特に IM による精度が低かった 2016 年熊本地震について、観測値との一致が改善された。

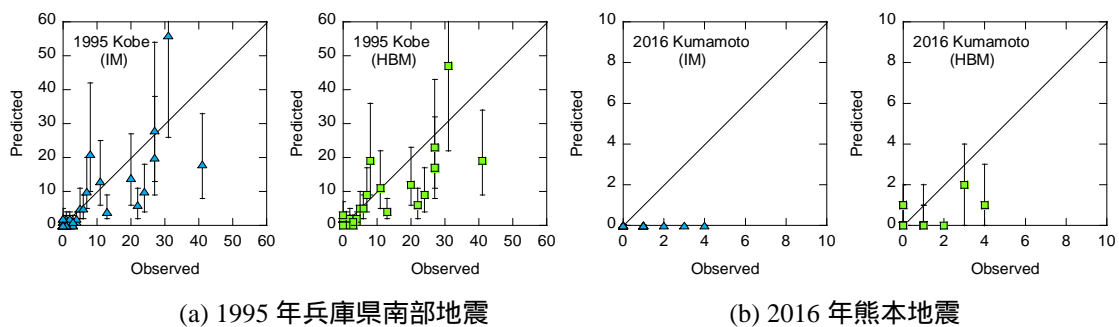


図 1 地震出火件数の観測値と予測値の比較

##### 4.2 大規模市街地に対応した市街地火災延焼モデル

次元的考察に基づき導かれた無次元温度上昇 $T^*$ と無次元距離 $S^{*-5/3}$ の関係を、実験結果に基づいて整理した結果を図 2 に示す。データ点に対する回帰式は以下の通りであり、妥当な精度で $T^*$ を評価できた。

$$T^* = 2.08S^{*-5/3} \quad (R^2 = 0.964) \quad (1)$$

ここで得られた次元的関係は無風時のそれに一致しており、軸上距離を適切に評価できれば、横風の影響は明示的には表れないことを示している。また、市街地火災延焼シミュレーションへの適用を念頭に置けば、気流軸上の温度上昇だけでなく、床面付近の温度上昇を評価することも重要である。そこで、本研究で導出した次元的関係を用いて測定結果を整理したところ、良好にその傾向を抽出することができた。ただし、横風により気流軸と床面との距離が変化する関係上、横風の影響を考慮した仮想点熱源を導入した。

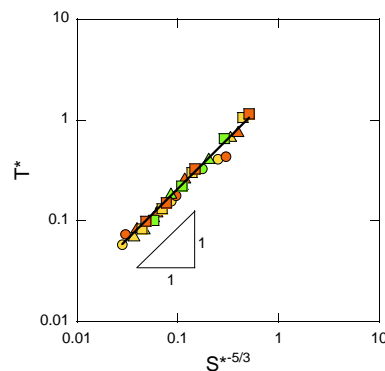


図 2 気流軸上の無次元温度上昇

#### 4.3 火災風洞実験に基づく火災旋風発生条件の分析

図3は、本実験の結果に基づき、無次元数 $\Omega$ と、火災旋風の発生頻度 $p$ の関係を整理した結果を示している。ただし、火源形状はL字形であり、無次元数 $\Omega$ は、次のように整理されるフルード数である。

$$\Omega = \left( \frac{\dot{Q}'g}{c_p \rho_\infty T_\infty U_\infty^3} \right)^{1/3} \quad (2)$$

ここで、 $\dot{Q}'$ は単位長さあたりの発熱速度、 $g$ は重力加速度、 $c_p$ は比熱、 $\rho_\infty$ は外気比重、 $T_\infty$ は外気温度、 $U_\infty$ は流入風速である。図3は、無次元数 $\Omega$ が一定の範囲内にあるときに火災旋風の発生頻度 $p$ が高くなることを示しているが、これは、発熱速度 $\dot{Q}'$ と流入風速 $U_\infty$ のうち、いずれか一方が大きすぎても、逆に小さすぎても火災旋風は発生しないことを示している。また、実験の観察によれば、火災旋風の発生箇所は、発熱速度 $\dot{Q}'$ や流入風速 $U_\infty$ といった条件に大きくは依存せず、火源の下流側の辺上に集中していた。このことは、流れが火源を回避することによって生じる渦対が、何らかの原因で対称性を失った場合に火災旋風が発生する可能性があることを示している。

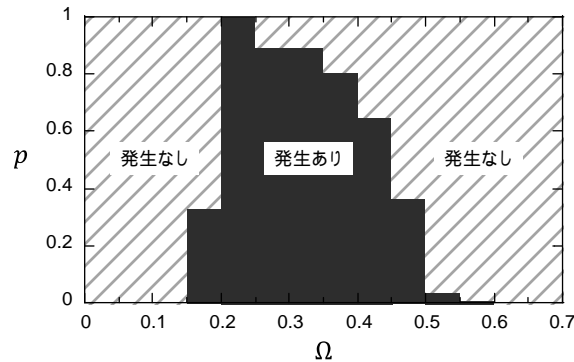


図3 火災旋風の発生頻度

また、市街地における火災旋風の発生可能性について検討するため、いくつか実際の市街地を対象とした延焼シミュレーションを実施した。ここで得られた延焼動態を、上記モデルの入力条件とすることで、火災旋風の発生確率の空間的な分布を調べた。この結果、現代の市街地において火災旋風が発生するには、燃焼領域の広がりがある以上となることに加え、市街地風の風速が十分低くなるのが条件となることが分かった。これは、現代の市街地において延焼火災が発生した場合の発熱密度が、従来の木造家屋が主体であった市街地に比べて低くなっており、浮力（重力）によって火源の上方に形成される上昇流の規模が小さくなっているため、これに対応する流入風の影響（慣性力）も小さくなる必要があったためである。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Himoto Keisuke	4. 巻 106
2. 論文標題 Quantification of cross-wind effect on temperature elevation in the downwind region of fire sources	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Fire Safety Journal	6. 最初と最後の頁 114 ~ 123
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.firesaf.2019.04.010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Himoto Keisuke	4. 巻 -
2. 論文標題 Hierarchical Bayesian Modeling of Post Earthquake Ignition Probabilities Considering Inter Earthquake Heterogeneity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Risk Analysis	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/risa.13455	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Himoto Keisuke	4. 巻 Vol.55, No.3
2. 論文標題 Comparative Analysis of Post-Earthquake Fires in Japan from 1995 to 2017	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Fire Technology	6. 最初と最後の頁 935-961
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10694-018-00813-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 樋本圭佑	4. 巻 67
2. 論文標題 糸魚川市において大規模火災が発生した背景について	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 火災	6. 最初と最後の頁 8-13
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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 竹谷修一・林吉彦・樋本圭佑・岩見達也	4. 巻 42
2. 論文標題 都市防火対策の系譜と市街地火災時の風の影響	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本風工学会誌	6. 最初と最後の頁 251-260
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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Himoto K, Deguchi Y.	4. 巻 116
2. 論文標題 Temperature Elevation and Trajectory in the Downwind Region of Rectangular Fire Sources in Cross-winds	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Fire Safety Journal	6. 最初と最後の頁 103183
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.firesaf.2020.103183	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計5件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 田島慎之助・樋本圭佑・大宮喜文
2. 発表標題 有風下における可燃物間の延焼時間の分析
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 樋本圭佑
2. 発表標題 横風の影響を受ける火災プルームの軸上温度上昇
3. 学会等名 日本火災学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 樋本圭佑・林吉彦・成瀬友宏
2. 発表標題 中規模火源を利用した火災旋風の発生条件に関する検討
3. 学会等名 日本火災学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 樋本圭佑・林吉彦・成瀬友宏
2. 発表標題 中規模火源を利用した火災旋風の発生条件に関する検討
3. 学会等名 日本火災学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 樋本圭佑・出口嘉一・林吉彦
2. 発表標題 火災旋風の発生条件を分析するためのL字型火源周辺流れ場のPIV計測
3. 学会等名 日本火災学会
4. 発表年 2020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 分担 者	林 吉彦  (Hayashi Yoshihiko)  (70212157)	国立研究開発法人建築研究所・防火研究グループ・グループ長   (82113)	

6. 研究組織（つづき）

	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 分 担 者	成瀬 友宏  (Naruse Tomohiro)  (50237624)	国土技術政策総合研究所・建築研究部・室長     (82115)	

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