

令和 5 年 6 月 2 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02310

研究課題名（和文）飛び火延焼モデルの開発と木造密集市街地の火災延焼予測・消防水利更新計画への応用

研究課題名（英文）Development of a fire-spotting model and its applications to fire spread simulations and renewal plans of water sources for firefighting in a densely populated wooden building district

研究代表者

飯塚 悟 (Iizuka, Satoru)

名古屋大学・環境学研究科・教授

研究者番号：40356407

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、火災延焼拡大の要因となる「飛び火延焼」を模擬する新しいモデルの開発を行い、開発モデルを組み込んだCFD（Computational Fluid Dynamics：計算流体力学）ベースの火災延焼シミュレーションモデルにより、国土交通省公表の「地震時等に著しく危険な密集市街地」に指定されている愛知県名古屋市内の木造密集市街地を対象とした火災延焼予測のケーススタディを実施した。また、過去の木造建物火災の焼損面積と必要消火水量の関係式を導き出し、その関係式と火災延焼予測結果から消防水利更新計画の簡易な検討に取り組んだ。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究チームが知る限り、木造密集市街地火災を対象としたCFDベースの火災延焼シミュレーションモデルの開発（飛び火延焼モデルの開発を含む）と応用は国内外で例がなく、本研究成果は学術的新規性が高いとともに、迅速な消火活動や適切な消防水利の事前検討に資するより正確な火災延焼予測が可能となり得る点で社会的意義も高い。

研究成果の概要（英文）：In this study, a new model that simulates spotting fires, which are a factor in the spread of fire, was developed. Fire spread simulations were conducted for a densely populated wooden building district in Nagoya, Aichi Prefecture, by the CFD (computational fluid dynamics)-based simulation model introducing the developed fire-spotting model. In addition, a relational expression between the burned area of past wooden building fires and the required amount of fire extinguishing water was derived, and based on the relational expression and the fire spread simulation results, a simple examination of renewal plans of water sources for firefighting was performed.

研究分野：建築・都市環境工学

キーワード：飛び火延焼 木造密集市街地 火災延焼予測 消防水利

1. 研究開始当初の背景

耐火構造建物や防火構造建物の増加、都市基盤整備の進展、消防力の向上に伴い、現在、大規模な市街地火災が発生することは滅多にない。しかし、東京や大阪、名古屋の大都市圏を始め、木造建物が密集する市街地が依然として多く存在しており、切迫性が指摘されている南海トラフ巨大地震や首都直下地震の発生時には特に、これらの木造密集市街地での火災発生および延焼拡大の危険性、すなわち、大規模火災に進展する可能性が危惧されている。

市街地火災などの広範囲にわたる火災延焼予測に対しては、コンピュータシミュレーションの活用が有用である。しかし、日本国内でこれまでに実施されてきた市街地火災シミュレーションのほとんどは、火災時の気象状況や火災延焼メカニズムを大幅に簡略化したモデル（以下、簡略化モデル）に基づいたものである。国外では、アメリカ商務省・標準技術研究所（NIST）が無償公開している FDS（Fire Dynamics Simulator）など、火災延焼メカニズムのより正確な再現が可能となる CFD（Computational Fluid Dynamics）ベースのシミュレーションモデルの開発が進められてきているが、大規模火災となると、原野・森林火災や原野-市街地境界火災への適用にはほぼ限定されている。

火災延焼は、接炎、放射伝熱、対流伝熱、飛び火が混在する複雑な物理現象であり、簡略化モデルに基づくシミュレーションでは、予測の正確性に限界がある。簡略化モデルを用いても、「過去」の事象に関しては、火災現場から得られる各種データとの比較に基づくモデルパラメータの調整により、再現性を高めることが可能な場合もあるが、「将来」の事象の予測に対しての正確性の向上は難しい。正確性の向上のためには、火災延焼メカニズムのより正確な再現、すなわち、それを可能とする CFD ベースの火災延焼シミュレーションモデルの開発・導入が欠かせない。迅速な消火活動や適切な消防水利の事前検討を行うためにも、より正確な火災延焼予測が求められている。

2. 研究の目的

①火災延焼拡大の要因となる「飛び火延焼」を模擬する新しいモデルの開発、②新たに開発する「飛び火延焼モデル」を組み込んだ CFD ベースの火災延焼シミュレーションモデルによる「木造密集市街地の火災延焼予測」、③予測される火災延焼に対する必要消火水量の推定と「消防水利更新計画」の検討、の3つが本研究の目的である。研究対象地は、国土交通省公表の「地震時等に著しく危険な密集市街地」に指定されている愛知県名古屋市内の木造密集市街地とした。

3. 研究の方法

本研究では、火災延焼シミュレーションモデルとして CFD ベースの FDS（アメリカ NIST 開発）を導入し、これに本研究で新たに開発した飛び火延焼モデルを組み込み、対象とする木造密集市街地の火災延焼予測のケーススタディを実施した。また、飛び火延焼モデルの開発に先立ち、建物への飛び火過程（火の粉飛散から建物内部侵入・着火の過程）検証のための火災風洞実験も実施した。

4. 研究成果

（1）飛び火過程検証のための火災風洞実験

本研究では、建物屋根部分を通じた火の粉の建物内部侵入・着火に着目し、燃焼させた木製クリブから発生・飛散する火の粉を実規模の屋根試験体（瓦屋根、屋根裏、天井板、軒天井、軒裏換気口などを再現）に対して浴びせかける実験を行った（図1）。

瓦屋根は現代仕様のもを用いたが、その場合、地震などに起因して瓦屋根の脱落がない限り、屋根部分から建物内部へ燃え抜ける可能性は低い。そこで本実験では、軒裏換気口からの火の粉の侵入を検討することとし、軒裏換気口における金網の有無（金網なしは脱落時を想定）の比較を行った。実験の結果、軒裏換気口に金網が脱落せずに存在している場合、火の粉が軒を介して建物内部へ侵入する可能性は低いことが明らかとなった。



図1 飛び火実験風景
(建物屋根部分からの火の粉侵入・着火の検証実験)

本研究では実施に至らなかったが、今後、窓などの他の開口部からの火の粉の建物内部侵入・着火に着目した飛び火実験も必要である。

(2) 飛び火延焼モデルの開発

本研究では、飛び火延焼過程を①火の粉発生、②火の粉飛散・沈降、③建物内部への火の粉侵入、④可燃物への着火、の4つに区分し、飛び火延焼モデルの開発を進めた。これらのうち、②については火災延焼シミュレーションモデルで陽に解析可能となるので、新たなモデル化が必要となるのは①、③、④である。①については、火の粉の直径・密度、寿命、発熱速度、発生時間間隔を制御パラメータとするモデル、③については、上述の火災風洞実験の結果（建物屋根部分を通じた火の粉の建物内部侵入・着火の可能性は低い）を踏まえて窓（開口部）を介して火の粉が侵入するモデル、④については、侵入する火の粉の可燃物への堆積確率と着火個数を制御パラメータとするモデル、を開発した。なお、③に関して、窓面積は研究対象地である名古屋市の特定地区の木造住宅調査結果に基づいて決定した。

(3) 木造密集市街地の火災延焼予測のケーススタディ

①建物内部へ侵入する火の粉の可燃物への堆積確率と着火個数の違い、建物群の窓（開口部）位置の違いが火災延焼範囲に及ぼす影響

図2は建物内部へ侵入する火の粉の可燃物への堆積確率の違いが火災延焼範囲に及ぼす影響を示す結果の一例、図3は建物内部へ侵入する火の粉の可燃物への着火個数の違いが火災延焼範囲に及ぼす影響を示す結果の一例である。なお、本研究では、対象市街地内の個々の建物の違いは検討外とし、火災発生原因建物も周辺建物も全て同じ建物モデルとしている。図2の堆積確率の違いについては、80% → 10%になると火災延焼範囲が3割強減少した（10% → 80%になると火災延焼範囲が1.5倍拡大した）。図3の着火個数の違いについては、1個 → 3個になると火災延焼範囲が6割強減少した（1個 → 3個になると火災延焼範囲が2.6倍拡大した）。建物内部可燃物への着火に関する制御パラメータに関しては、堆積確率よりも着火個数の設定の方が火災延焼範囲に及ぼす影響が大きいことが確認された。

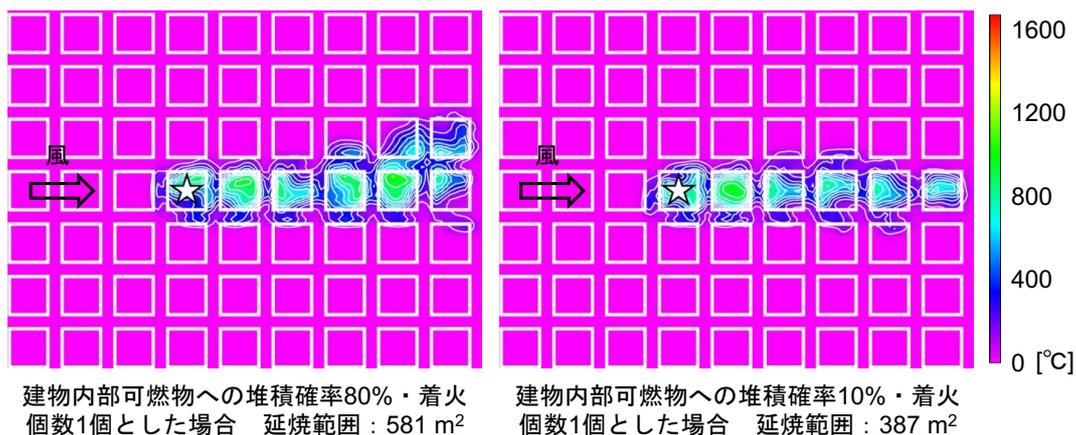


図2 火災発生原因建物（☆印）全焼から1200秒後の水平断面温度分布（地上6m）
（火災発生原因建物および周辺建物全てで開口部を全側壁面に設置した場合）

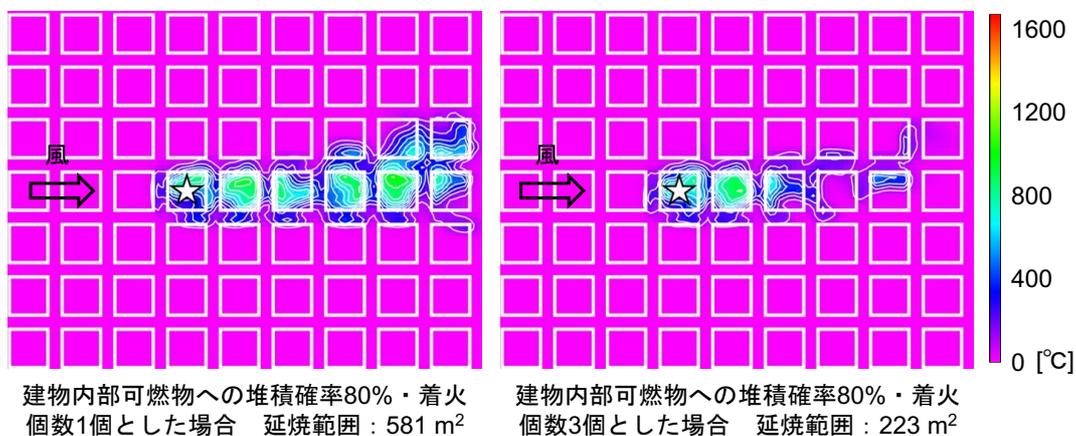


図3 火災発生原因建物（☆印）全焼から1200秒後の水平断面温度分布（地上6m）
（火災発生原因建物および周辺建物全てで開口部を全側壁面に設置した場合）

図4は、建物開口部の配置（主流方向に対する開口部の向き）の違いが火災延焼範囲に及ぼす影響を示す結果の一例である。主流方向に垂直な壁面で開口部を有する場合、主流方向に水平な壁面で開口部を有する場合に比べて火災延焼範囲が2.9倍拡大した。火災延焼に対して、建物開口部位置は、建物内部可燃物への着火に関する制御パラメータよりも大きな影響をもたらす場合があることが確認された。

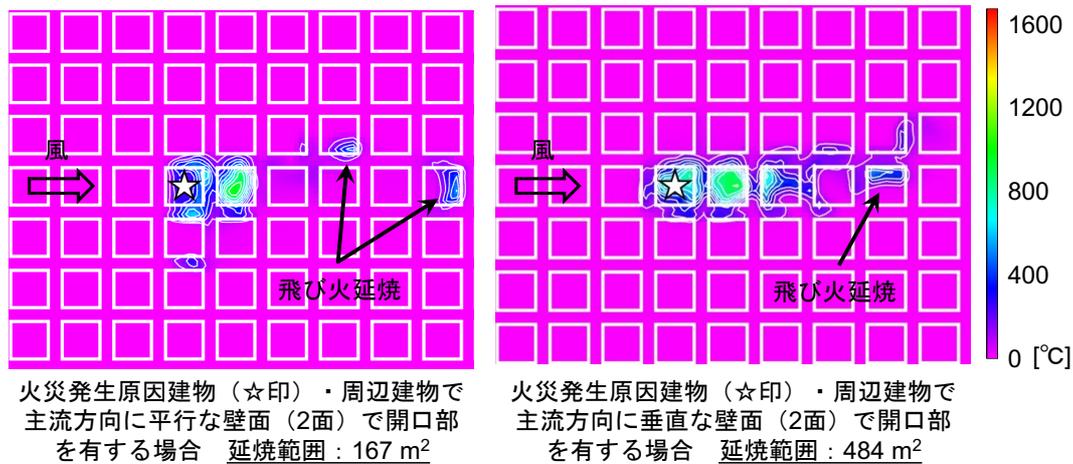


図4 火災発生原因建物（☆印）全焼から1200秒後の水平断面温度分布（地上6m）（建物内部へ侵入する火の粉の可燃物への堆積確率を80%、着火個数を1個と設定した場合）

②木造密集市街地火災の想定条件となる巨大地震時の建物倒壊が火災延焼範囲に及ぼす影響

本研究で対象とする木造密集市街地火災は、南海トラフ巨大地震や首都直下地震のような巨大地震時に発生が危惧される火災を想定している。地震時を想定しているため、対象とする木造密集市街地において、地震による建物倒壊を組み込んだケーススタディを実施した。ただし、本研究では、建物倒壊については、火災発生原因建物とその風下側建物（ただし、火災発生原因建物に隣接する一棟のみ）の倒壊の組み合わせの検討、倒壊後の建物形状については、建物高さが半減し、水平方向に建物専有部分が拡大する簡易モデルの導入を行った（図5）。

図6は、建物倒壊なしの場合と建物倒壊ありの場合の火災延焼範囲の変化を示す結果の一例である。火災発生原因建物の風下側建物のみが倒壊する場合には、建物の倒壊なしの場合と火災延焼性状が類似（主流風下方向に細長く延焼）する一方、火災発生原因建物が倒壊する場合には、主流横断方向にも延焼が拡大していく傾向が確認された。飛び火に伴う延焼に関しては、建物倒壊なしの場合と建物倒壊あり（火災発生原因建物の倒壊もしくはその風上側建物の倒壊）の場合で顕著な差は見られなかった。

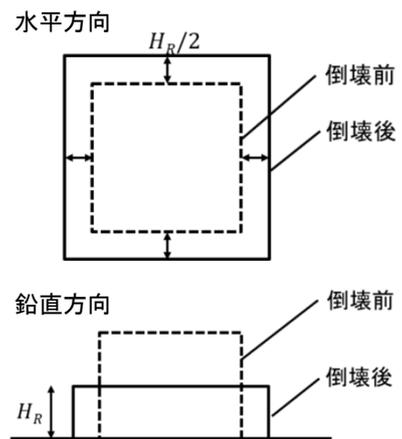


図5 建物倒壊モデル

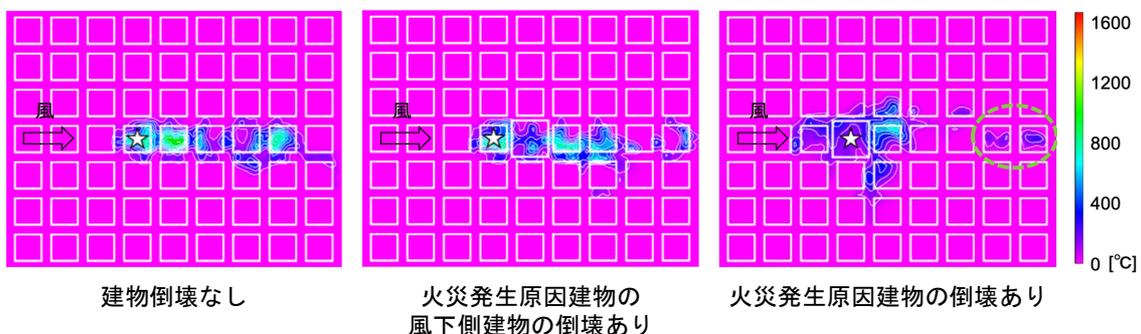


図6 火災発生原因建物（☆印）での火災発生から1200秒後の水平断面温度分布（地上6m）

(4) 予測される火災延焼に対する必要消火水量の推定と消防水利更新計画の検討

図7は、名古屋市消防局提供の木造・準耐火木造建物火災の焼損面積と消火に要した放水量のデータ（名古屋市内の過去768件分のデータ）を図化したものである。この図から回帰式を求めると

$$W = 0.5418A$$

と与えられる。ここで、 W は必要消火水量 (m^3)、 A は焼損面積 (m^2) である。本研究では、上述した火災延焼予測結果から得られる延焼範囲を A に代入して必要消火水量の検討を行った。ただし、本研究で実施した火災延焼予測のケーススタディでは、火災発生原因建物を固定していたため、火災発生がランダムに生じる場合、あるいは同時多発で生じる場合も考慮した上での消防水利更新計画の検討には至らなかった。この点は今後の課題である。

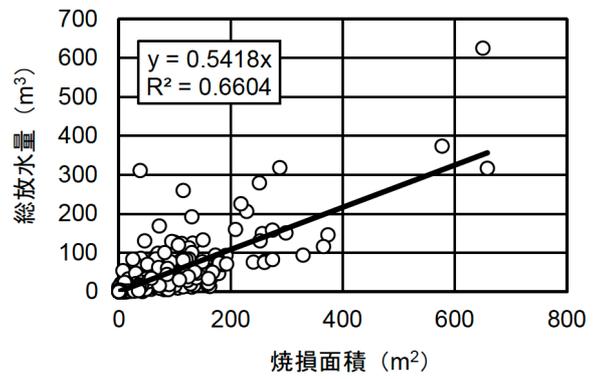


図7 木造建物の焼損面積と総放水量の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 陳雨萌, 飯塚悟
2. 発表標題 集合住宅火災における排煙戦術のシミュレーション検討（その3）見通し距離を用いた煙拡散性状の評価
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 釘崎理, 大津山堅介, 廣井悠
2. 発表標題 住民の共助活動に着目した市街地火災避難行動に関する研究 - 関東大震災の体験談分析を踏まえた東京都大田区および品川区におけるマルチエージェントシミュレーション -
3. 学会等名 日本災害情報学会第26回学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大城織人, 吉岡英樹, 飯塚悟
2. 発表標題 市街地火災時における軒裏換気口を介した飛び火に関する火災風洞実験
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮田裕貴, 飯塚悟
2. 発表標題 集合住宅火災における排煙戦術のシミュレーション検討（その2）火災発生階の違いが建物内の煙流動に及ぼす影響
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 神長侑磨, 飯塚悟, 大城織人, 宮田裕貴
2. 発表標題 木造密集市街地の火災延焼シミュレーションと必要消火水量の推定
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮田裕貴, 飯塚悟, 神長侑磨
2. 発表標題 集合住宅火災における排煙戦術のシミュレーション検討
3. 学会等名 日本建築学会大会
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	廣井 悠 (Hiroi Yu) (50456141)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授 (12601)	
研究 分担者	吉岡 英樹 (Yoshioka Hideki) (90462564)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授 (12601)	

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