

令和 3 年 6 月 6 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17K06541

研究課題名（和文）構造物の燃焼解析と精緻な風況解析を連成した市街地火災解析法の構築

研究課題名（英文）Development of an urban fire simulation based on wind and combustion interaction analysis

研究代表者

長谷部 寛 (HASEBE, Hiroshi)

日本大学・理工学部・准教授

研究者番号：60366565

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、市街地火災の予測および防災に資するため、精緻な風況解析と燃焼解析を連成させた新たな火災解析法の構築を目指したものである。独自の火災延焼速度計測のための風洞実験法および実験器具を構築するとともに、実験室レベルで風速約3 m/sまでの火災の延焼速度計測を行った。さらに、市街地の複雑な建物形状を正確に表現した風況解析を実現するため、CADで描かれた形状を直接解析メッシュとして用いることが可能なアイソジオメトリック解析法を導入し、アイソジオメトリック解析に基づく風と火災の連成解析法を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

風が火災の延焼速度を増加させることは広く知られているが、実験施設の関係から定量的な評価が難しかった。本研究では、独自の装置を開発し、風が火災の延焼速度に及ぼす影響を定量的に評価した。風と火災の関連現象の解明に貢献すると考えられる。さらに、市街地風況解析のために、アイソジオメトリック解析法を導入した。昨今、都市の3Dモデルが公開され、ますますCADと解析の関係性は強まる傾向にある。そのような観点からも有効な解析法である。これらを組み合わせることで、市街地火災の予測に有益な解析法を構築する素地は整ったと考えられる。

研究成果の概要（英文）：The present study aims to develop a new urban fire simulation that combines wind and combustion interaction analyses in order to the prediction and prevention of urban fires. We developed a unique wind tunnel method and apparatus for fire spread rate measurement. We also measured the fire spread rate up to a wind speed of about 3 m/s at the laboratory level. In addition, an isogeometric analysis was introduced to accurately represent the complex shapes of buildings in urban areas. We incorporated into our interaction analysis of wind and fire based on the isogeometric analysis.

研究分野：風工学

キーワード：市街地火災 風況 火災の延焼速度 ポータブルマルチファン風洞 アイソジオメトリック解析 風と火災の連成解析

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

関東大震災や阪神淡路大震災などの大地震により発生した火災は、地震の直接的な被害以上の甚大な被害を及ぼす場合がある。南海トラフ地震などの巨大地震の発生が危惧される今日、大規模な市街地火災の予測は防災対策上必須である。

阪神淡路大震災の市街地火災の甚大な被害を契機に、2003年国土交通省により市街地火災の延焼予測のためのシミュレーションシステムが開発された¹⁾。現在でも本シミュレーションシステムが防災対策に活用されているが、その中で用いられている解析法は、風はある1点の一定風速が代表値として用いられ、火災温度や火炎形状などは多数モデル化されている。それら以外にも実験式や経験則が数多く組み合わせられたものとなっている。さらに、報告書の中で課題として上げられた、

- ・火災建物周辺のマイクロな風環境による火災性状の変化
- ・飛び火による跳躍延焼

の2点は未だ解決されていない。

市街地火災時のマイクロな風環境をCFDにより解いた事例として黄らの研究²⁾があるが、建物形状は立方体のブロックであり、火の粉の飛散状況の把握に主眼が置かれていたことから、前述の課題を解決するには至っていない。

一方で研究代表者は、2014年から2016年にかけて、木材燃焼解析と気流解析を連成させた新たな林野火災解析法の開発に取り組んできた³⁾。この解析法の特徴は、木材燃焼過程の化学反応プロセスを表現するモデルから、燃焼の反応速度や反応熱を算出し、木材温度変化の支配方程式に反映させた燃焼解析を行っている点にある。

以上のように、研究代表者は新たな林野火災解析法を構築してきたが、木材燃焼の化学反応プロセスを解いていることから、この解析法は林野火災だけでなく、市街地火災にも応用が可能であると考えた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、これまでに構築した林野火災解析法をベースとして、高精度な市街地火災シミュレーション法を構築することにある。

これまで構築した火災解析法は林野火災を対象としたものであり、木々が密接した状況を想定していた。一方で、市街地火災を想定すると、家屋と家屋の隙間を考慮し延焼を精度よく再現できるようになること、有風時に発生する飛び火による延焼効果を考慮すること、さらに市街地の住家のマイクロ形状を解析で再現することなどが課題として考えられた。以上の課題を克服し、新たな市街地解析法を構築することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 有風時の延焼速度評価

これまで構築した火災解析法は林野火災を対象としたものであり、木々（葉と葉）は近接しており、非常に延焼しやすい状況下にあった。ただし、構築した解析法により評価された延焼速度は、観測された現象よりも感覚的に遅いものであった。しかし、有風時の延焼速度を検討した文献は数少なく、定量的な検証は不十分であった。

高精度な市街地火災解析法を構築するにあたり、風が火災の延焼に及ぼす影響を把握することは重要であり、自ら風洞実験を実施し、データ取得することとした。

(2) 延焼および放射による火災の熱伝播の影響

構築した解析法は放射による熱伝達を簡略化して扱っていた。市街地火災を想定した場合、家屋と家屋の間には庭や道路などがあり、若干の隙間がある。そのため、火炎が直接隣の家屋に接して温度を上昇させる場合もあるが、火炎からの放射熱伝達を十分に考慮しなければ、精度の良い延焼予測は実現しない。そこで、放射熱量の解析法の見直しを行うこととした。

(3) 火の粉による延焼の影響

市街地火災においては火の粉の影響を考慮する必要がある。たとえば、2016年12月に発生した新潟県糸魚川市の大規模火災では、強風により発生した大量の火の粉などが広く飛散し、同時多発的に延焼拡大した⁴⁾。したがって、火の粉の挙動を把握するとともに、その影響を解析法に組み込む必要がある。そこで、まずは自ら風洞実験を実施し、火の粉の挙動を把握するとともに、解析への組み込み方を検討することとした。

(4) アイソジオメトリック解析に基づく風況解析法の構築

市街地火災では建物形状に影響を受ける風況を正確に予測することが重要である。そのためには、建物形状を出来るだけ正確に表現した解析メッシュが必要になるが、その生成には大きな労力を要してきた。そこで本研究では、CADで描いた形状をそのまま解析することができるアイソジオメトリック解析法⁵⁾を導入することとした。

4. 研究成果

(1) 風洞実験に基づく有風時の延焼速度の計測と火の粉の飛散状況の把握

風が火災の延焼速度に及ぼす影響を定量的に把握するため、独自の実験装置を構築し、有風下での木材燃焼実験を実施した。実験装置は過去に作成したグリルに石を敷き詰めて葉材を堆積させるものを用い、小型のファンで送風することとした。実験装置を図1に示す。通常の実験室でこのような実験を行うことが困難であるため、消防学校の施設を借用し、実験を実施した。

燃焼材としては主としてクヌギの枯葉を用いた。単位面積あたりの枯葉の重量（堆積密度）を $0.5 \sim 1.5 \text{ kg/m}^2$ まで変化させた。風速は、0, 1.0, 1.7, 2.7 m/s の4パターンを実施した。延焼速度計測のために、K型熱電対を用いて、複数箇所の温度変化を計測し、その結果から延焼速度を評価した。また、火炎の様子を捕らえるために動画を撮影し、その動画からも延焼速度を評価することにした。

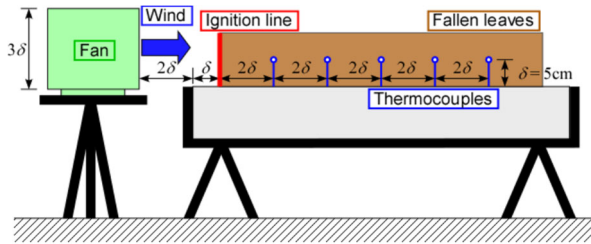


図1 有風下の燃焼実験装置

写真1 (a), (b) に風速 1.0, 2.7 m/s のときの火炎の様子を示す。また、図2に各風速の延焼速度を Rothermel ら⁶⁾の実験と比較した結果を示す。風速 1.0 m/s のときは、若干風にあおられて火炎が傾いているが、図2に示す延焼速度は無風時と大きな差異は見られなかった。一方で、風速 1.7, 2.7 m/s のときは、延焼速度が無風時に比べて3倍以上の速度になった。さらに風速 2.7 m/s の場合は、写真でも明確に確認できるように、火炎は大きく傾き、火勢も大きく増した。わずか 3 m/s の風速でも延焼速度と火勢が大きく変わることを確認した。

そのほかにもこの実験から火の粉の挙動が把握できた。風速 2.7 m/s の時は、多量の火の粉が生成、実験装置から舞い上がり、装置の外へと度々飛散した。画像解析の結果、火の粉は主に2パターンの挙動を示していることが分かった。1つ目のパターンは、周辺の空気が熱せられて生じた上昇気流により、真上に舞い上がり、頭上を漂う挙動である。これは、実験に用いたファンの直径が小さく、実験室全体に風が吹いていないためと考えられた。2つ目のパターンは、傾いた炎に並行し、風に乗って実験装置から飛び出す挙動である。風速 2.7 m/s の風に乗って飛散することから、その速度は速く、量も多いことが確認された。これらの実験結果は、解析法の検証に用いることができる。

ただし、図2の結果を比較すると、既往のデータよりも少々延焼速度が低い。これは、実験当日が雨天で、空気中の湿度が高く、延焼速度が低下したと推測された。また、用いたファンの直径が十分大きくなく、ファンからの風を直接用いていたため、断面内の風速分布や乱れは一様でない。これらを改善することが今後の課題と言える。



(a) 風速 1.0 m/s



(b) 風速 2.7 m/s

写真1 有風下の火炎の様子

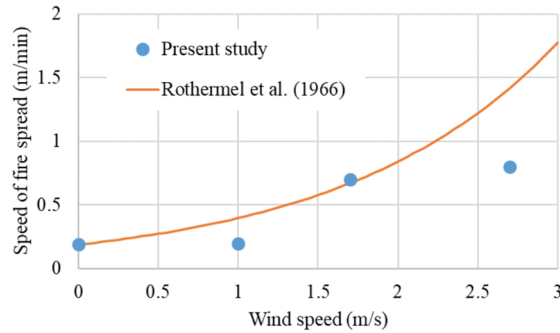


図2 風速と延焼速度の関係

(2) ポータブルマルチファン風洞の製作

前述の延焼速度を計測する実験の課題として、ファンで生成した気流が一樣でなく、火災の延焼状況に影響を及ぼした可能性が考えられた。また、ファンで生成できる気流の風速最大値が 3 m/s 弱であり、現象に近づけるため、より高風速の実験を行う必要があった。

そこで、消防学校のように、風洞設備のない場所でも精緻な風洞実験が実施できるよう、バッテリー駆動の持ち運び可能な風洞を製作した。ポータブルマルチファン風洞と名付けたこの風洞は、ファンを格子状に配置するマルチファン方式を採用し、ファンにはパソコン内部冷却用のファンを用いた。電源は、家庭用 100V 電源駆動以外にも、電源が確保できない場所で実験が可能のように、電池駆動できる形式とした。ほかにも手軽に製作が可能のように、身近な材料を使用した。

製作したポータブルマルチファン風洞を写真 2 に示す。あわせて図 3 に、この風洞で生成した気流の風速流下方向分布を示す。吹き出し口から 90 cm の範囲で、風速 3~4 m/s となり、延焼速度計測時に用いたファンで生成した気流よりも高い風速を実現できた。さらに、それぞれのパソコンファンに可変抵抗器を接続することで、風速の制御も可能になり、おおむね 0.5 m/s 間隔でのコントロールも可能になった。このマルチファン方式は、理論上、設置するファンの数を増やせば風速は増加するので、今後はファンの数を増やしてより高い風速の気流生成、その気流での延焼実験を試みる予定である。

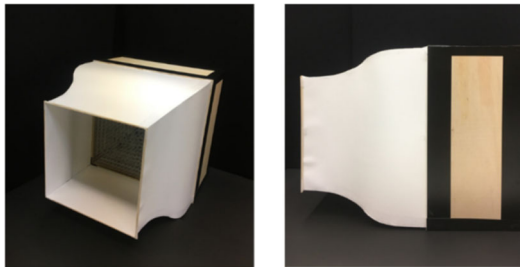


写真 2 ポータブルマルチファン風洞

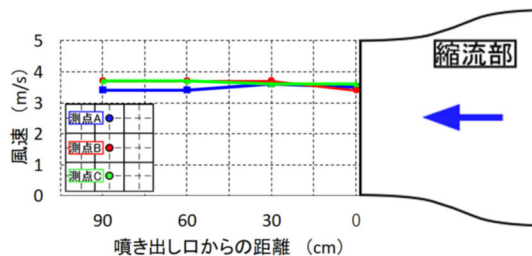


図3 風速流下方向分布

(3) 放射熱量計算過程の見直しと火災と気流の連成解析における境界条件の改良

これまで構築した林野火災解析法は、放射熱量の計算過程を大胆に簡略化していた。そのため、火災の延焼に及ぼす放射効果が過小評価されており、解析結果の延焼速度は実験値に対して小さな値となっていた。そこで、放射熱量の計算過程を見直し、より精緻に解析できる方法を検討した。

数多くの放射解析の先行研究では、放射による伝熱効果を波線追跡などの方法を用いて全周方向に計算する例が多かった。市街地火災を想定した際、また本研究で構築している気流と火災の連成解析法のスキームを考慮した際、まずは隣り合う要素間の放射伝熱効果を組み込むことが効率的と判断された。そこで、2 物体間の放射解析を前提とし、そのプロセスを構築している解析法に組み込んだ。

一方で、放射伝熱の影響が改善され、早く熱が伝わるようになったため、解析の安定性が低下した。具体的には、解析領域側方の開放境界から流入する流体量が増加し、境界上で発散が生じるようになった。熱源の熱量を低下させると解析が安定化したことから、側方境界の境界条件に課題があると判断し、側方境界に対して用いているトラクション・フリー条件の見直しを図った。具体的には、境界に直交する方向と沿う方向の両方の表面力をゼロとしていたところ、直交する方向のみをゼロとして、境界接線方向には条件を与えず方程式を解く扱いとした。現在、この境界条件を実装しており、この条件が機能すれば、火災の延焼解析結果の改善が見込まれる。

(4) アイソジオメトリック風況解析法の構築と3次元メッシュ生成法の提案

市街地の複数ある建物形状を正確に表現しつつ、極力手間なくメッシュ生成するため、CADデータを直接解析メッシュとして用いることが可能なアイソジオメトリック解析法に基づく風況解析法を構築した。CADにはNURBSモデリングに秀でたRhinocerosを用い、アドインツールのGrasshopperを活用してメッシュ生成から境界条件指定まで一括して行えるインターフェースを構築した。

円柱まわりの流れ解析を対象として実施した解析例を示す。図4はCAD上で作成したアイソジオメトリック解析の解析メッシュである。このような解析メッシュを、メッシュ生成ソフトを用いることなくCAD上で生成することが可能となった。図5に解析結果を示す。図5の右側は、円柱表面にわずかな突起を付けている。このように微妙な形状の差異も柔軟にメッシュ生成できる解析法が構築できた。さらに、形状は単純なものであるが、閉空間の対流熱伝達の解析を実施し、これまで構築した有限要素法による風と火災の連成解析法と定量的に差異のない結果が得られることを確認した。また、3次元解析を実施するための独自のメッシュ生成法も構築した。今後は、市街地の解析メッシュを作成し、市街地風況のアイソジオメトリック解析を実施する予定である。

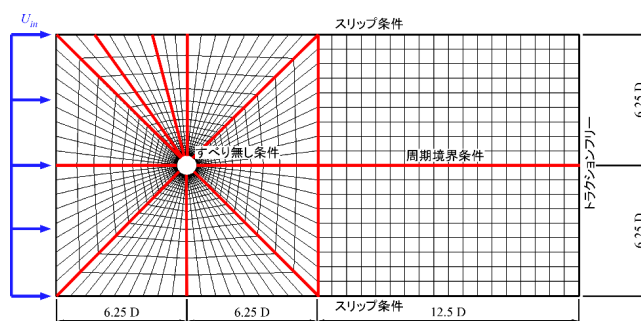


図4 アイソジオメトリック解析のメッシュ

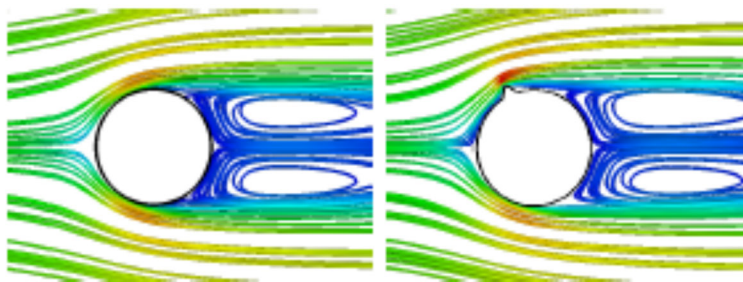


図5 円柱まわりの流れ解析結果

[参考文献]

- 1) 国土交通省：まちづくりにおける防災評価・対策技術の開発報告書，2003
- 2) 黄弘，加藤信介，大岡龍三：火の粉の飛散を組み込んだ都市火災伝搬のCFD解析，ながれ，第12巻第2号，pp. 58-68，2004
- 3) 長谷部寛，小柳出亨，野村卓史：有限要素法による木材燃焼時の気流性状に関する解析，計算工学講演会論文集，Vol. 20，A-1-3，2015
- 4) 篠原雅彦，河関大祐，高梨健一：糸魚川市大規模火災の出火当時の風速について，消防科学と情報，No. 130，pp. 41-45，2017
- 5) J. A. Cottrell, T. J. R. Hughes, Y. Bazilevs: Isogeometric Analysis -Toward Integration of CAD and FEA-, Wiley, 2009
- 6) R.C. Rothermel and H.E. Anderson: Fire Spread Characteristics determined in the laboratory, U.S. Forest service research paper, Int-30, 1966

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2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 Hiroshi Hasebe, Toru Oyaide, Hiroya Suzuki and Takashi Nomura	4. 巻 1
2. 論文標題 Numerical Study on the Airflow Characteristics Caused by Wood Combustion	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of 16th International Conference on Automatic Fire Detection & Suppression, Detection and Signaling Research and Applications Conference	6. 最初と最後の頁 261-268
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 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 Hiroshi Hasebe, Toru Oyaide, Hiroya Suzuki and Takashi Nomura	4. 巻 -
2. 論文標題 Development of a fluid combustion interaction analysis for the wildfire simulation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of International Workshop on Wind Related Disasters and Mitigations	6. 最初と最後の頁 No.45(1-7)
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 Hiroshi Hasebe, Gaku Kawai, Kenta Nakazawa, Yamato Kikuchi, Yuna Takahashi, Takashi Nomura	4. 巻 1
2. 論文標題 An Attempt to Measure the Speed of Fire Spread in the Wind	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 15th International Conference on Wind Engineering	6. 最初と最後の頁 391-392
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 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7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 長谷部寛, 高橋勇成, 菊池耶麻刀, 草野拓哉
2. 発表標題 ポータブルマルチファン風洞の試作
3. 学会等名 土木学会第75回年次学術講演会概要集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長谷部寛
2. 発表標題 Bスプライン基底関数を用いた自然対流のアイソジオメトリック解析
3. 学会等名 第24回計算工学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長谷部寛, 鈴木宏哉, 野村卓史
2. 発表標題 VMS有限要素法によるキャピティ内の自然対流の解析
3. 学会等名 計算工学講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hiroshi Hasebe, Syun Morioka, Tadakatsu Imai and Takashi Nomura
2. 発表標題 B-Spline solid mesh generation based on the equations of linear elasticity
3. 学会等名 IGA 2018: Integration Design and Analysis (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長谷部寛
2. 発表標題 付加物を有する円柱まわりの流れへのアイソジオメトリック解析の適用
3. 学会等名 日本風工学会年次研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroshi Hasebe
2. 発表標題 Isogeometric Analysis for High temperature and Variable Density Flows
3. 学会等名 The 7th Asia-Pacific Congress on Computational Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長谷部寛, 森岡舜, 今井忠勝, 野村卓史
2. 発表標題 線形弾性解析を用いたアイソジオメトリック解析のためのソリッドメッシュ生成法
3. 学会等名 第24回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2021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	野村 卓史 (NOMURA Takashi) (50126281)	日本大学・理工学部・特任教授 (32665)	

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