

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 7 日現在

機関番号：13904

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K12472

研究課題名(和文)火災旋風の学理：渦構造解明と安定性理論の体系化に向けて

研究課題名(英文)A Fire Whirl: Systematic Study For Structure and Stability Analysis

研究代表者

中村 祐二 (NAKAMURA, Yuji)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50303657

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：L字に配列された火源の上に形成される風洞内火災旋風を対象にし、大規模火災風洞(建築研)とラボスケールの火災風洞を用いることで火災旋風の発生位置を再現可能な模型実験手法を導いた。その手法を活用し、ラボスケール試験にてレーザーシートによる流れ場の可視化を行い、時計回り・反時計回りの火災旋風の存在および発生に関わる時系列変化を確認することに成功した。模型実験手法の確立については新たに生じた不可避の課題であり、その解決に相当量の時間を要したため、様々な擾乱に対する火災旋風の応答性についての整理が不十分となっている。今後の課題として継続的に検討してゆく予定である。

研究成果の概要(英文)：Fire whirl appeared over L-shape fire source is investigated at various scales; one is made by large-scale wind tunnel equipped at Building Research Institute (BRI) and the other is made by small-scale wind tunnel in the lab (Scale factor is five times). It turned out that the existing scale law is not enough to predict the location of the pair of fire whirls. We found the additional scaling law to make this possible and scale model experiment is eventually established for this purpose. Through the small-scale model experiment, flow pattern around the fire whirl is visualized by laser sheet and time-evolution of fire whirl is properly captured. Further study will be continued to investigate the stability in detail.

研究分野： 燃焼学, 火災物理学, 模型実験理論

キーワード： 火災 火災旋風 模型実験 相似則 安定性

1. 研究開始当初の背景

記録によれば、関東大震災の時に発生した巨大火災旋風は、燃え種のない広場に「安定に」「長時間」存在し、しかも「自由に動きまわった」という。火の(で)ないところにこのような巨大渦が安定に動き回ると考えられているが、むしろ、炎の竜巻とは別の高温熱渦が発生し、それが前記被害もたらしたと考える方が妥当ではなかろうか。これを調べるためには、安定して火災旋風試験が可能な設備を整えることと、それらの渦が安定に存在することを示す必要がある。

2. 研究の目的

本研究課題では、上記の疑問を科学的に解明するための方法論の確立を試みる。具体的には、①定常状態を得られる実験系を確立した後、②火災旋風の発生位置、渦の構造を精密に調べることで、火源上以外に形成される巨大渦の安定性を科学的に説明する方法論を導くことに寄与する。本研究では模型実験によりラボスケールで実スケールと同じ火災旋風状況を再現することが必須であるため、そのような相似則の確立も重要な因子である。これにより、再現が難しく確率論として扱われがちな火災現象を理論的に扱うための道筋を示し、最終的には「理論火災学」の発展を促すブレークスルーを担うことになるかと期待される。

3. 研究の方法

建築研究所が所有する大規模火災試験設備により、数m級の火災旋風発生試験を実施する(図1)。その結果を踏まえて、模型実験に基づく「小型の火災旋風試験装置(小型風洞内で火災旋風の状況を再現する試験施設)」による再現試験を行う。小型風洞は現有装置から高精度となるよう改良する必要があるため、まずは改良を施し、数m級の火災旋風を再現できるかどうかを検討した。



図1 建築研究所の火災風洞(左)および数m級の火災旋風(右)

4. 研究成果

(1) 建築研における大規模火災風洞(幅5m, 高さ5m, 試験部全長15m)を用いて数m級火災旋風再現試験を実施した。燃焼区域は図2に示す通り1mx1.5mの領域の端をL字状に燃料を入れるステンレスバットを配列した。このとき耐熱煉瓦を周囲に敷き詰めバットを完全に「埋め込む」。燃料は純ヘプタンとし、バットに水(2.6L)を入れた上層に0.6L入れる(水を下層に入れることでバットの熱変形を防ぐ)。L字内部にはずいぶん示すようにケ

イカル板を敷く。ここには熱電対が埋め込まれており、L字の内部の温度計測が可能である。この設定で得られた火災旋風の一例を図3に、風速1m/sのときに得られた発生位置を図4にまとめる。

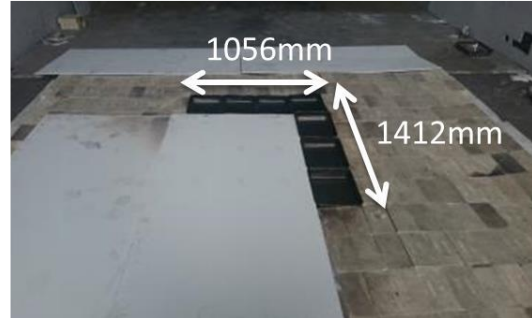


図2 建築研における大規模火災風洞内の燃料配置

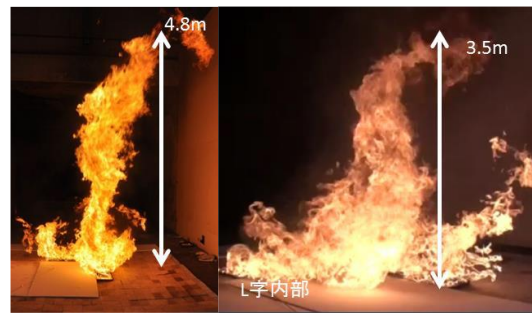


図3 大規模火災風洞内で発生させた火災旋風

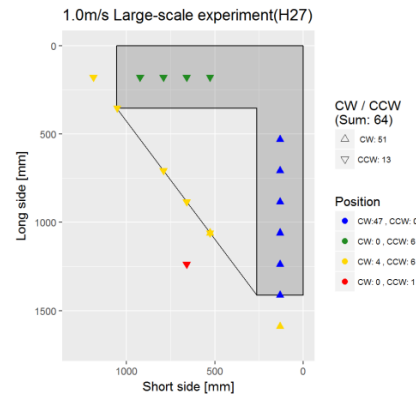


図4 火災旋風の発生位置(風速1m/s, △: 時計回り, ▽: 反時計回り)

図4からわかるようにL字の対角線上には反時計回りの火災旋風が発生することを再確認した。もちろんここは燃料パンの上ではないため燃料がない。しかしながらL字内部の位置までプローブを挿入してガス採取した結果、そこからは十分な可燃ガスが検知されることがわかった。燃料ガスが検知された位置はちょうど白色のケイカル板が黒ずみを見せる領域(L字対角線内部)に相当していることは興味深い(図5参照)。このように数m規模の大規模火災旋風試験では時計回りと反時計回りの火災旋風が混在し、発生しては消滅するという不安定な振る舞いを示す。特に反時計回りの火災旋風は燃料上に

は存在しない。しかしそこには多量の燃料ガスが「未燃焼の状態が存在する」。これは恐らく燃焼しきらない燃焼成分が下流に運ばれたためであり、燃料が存在する領域を増加させている。

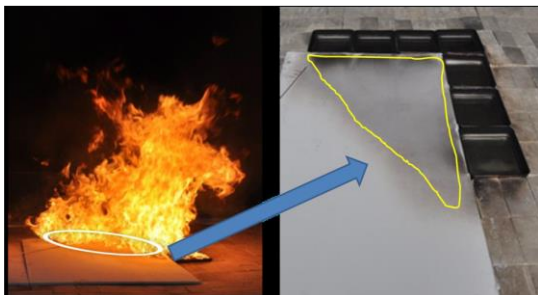


図5 燃焼試験後のブラックマーク

(2) 建築研における大規模火災風洞で得られた状況を本学内の小型火災風洞で再現し、安定性などの検討の準備を行う。まず事業開始前に完備されていた風洞の改良を行った。主な改良点を図示したものを図6に示す。ファン領域後のハニカム部以降に5段のメッシュを100mm毎に配置した。可視化のためのスモークリキッドを含ませた線香は最後段のメッシュ手前に配置した。

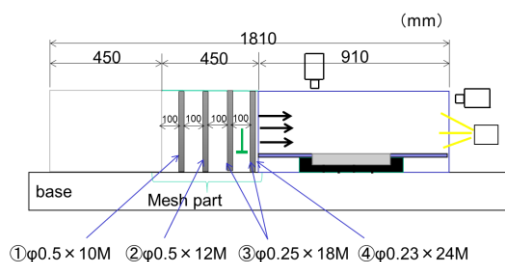


図6 改良後の小型火災風洞（上：模式図，下：全体写真および内部の燃料配置）

加えて出口に低圧発生装置を配備して強制排気を促した。この結果、整流度合は著しく改善された（図7）。

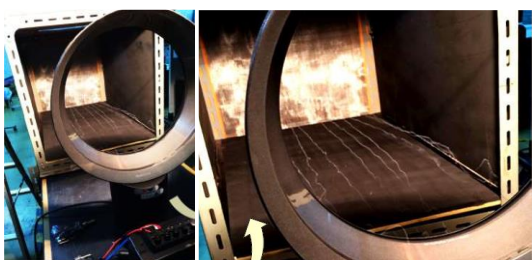


図7 表面を這う流れの可視化例（整流度合が改善されていることがわかる）



図8 試験的に発生させた障害物背後の渦構造と火災旋風

試験的に形成した障害物背後の火災旋風周りの流れ場も明確に可視化されていることがわかる（図8）。

この風洞を用いて風速および燃料容器サイズをパラメータとして火災旋風実験を実施した。その代表的な結果を図9に示す。

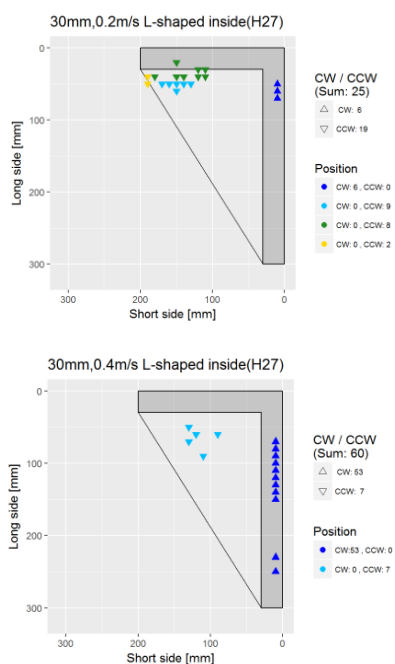


図9 火災旋風の発生位置（トレー幅 30mm，風速 0.2m/s（上），風速 0.4m/s（下），△：時計回り，▽：反時計回り）

ここにはある代表的な条件しか示していないが、時計回りの火災旋風は「殆ど発生しない」。特に建築研での試験結果で見られたL字対角線上における火災旋風の発現を認めない。すなわち、模型実験として何か不足している。なお、小型風洞試験では既存の研究を参考にして、風速と発熱量で決まる無次元数を合わせている。すなわち既存の相似則では「火災旋風の発生有無」を判定することはできるが、発生位置を相似にできない。

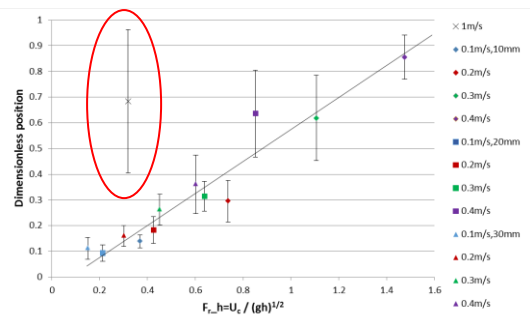


図10 火災旋風の発生位置の無次元数（縦軸）とフルード数（横軸）の関係

実際、火災旋風の発生位置の無次元量を F_r 数で整理すると、小型試験同士は直線上に乗るが、実スケール試験（赤色で囲った部分）は全くそこからずれる。

その違いとして最も大きいものは「対角線上の炎の有無」である。これが発生するためには「燃料容器上以外のL字領域内部にも未燃焼の燃料が輸送されなければならない」ことを意味している。そこでL字内部にも追加の燃料容器を配置することで「L字内部への未燃の燃料漏れがある」ことを再現できるかどうかを試みた。ただ闇雲に燃料面積を増やすのではなく、燃料容器の総面積を建築研との実験のスケール比の二乗にするように配慮した。すなわち燃料が発生し得る領域（境界条件）のスケール比を合わせることにした。その結果、図11に示すようにL字対角線上にも明確に（しかも頻繁に）火災旋風の発現を認めた。燃料トレー上の火災旋風発生位置（青色○で囲った部分）と比較すると、発生位置は同じ下流の位置にある。これらはカウンターボルテックスの発生位置であり、これらが1対の火災旋風となることが確認できた。また、気相内の流動に関する相似則（既存の研究で示されているもの）のみならず境界条件まで合わせなければ火災旋風発生位置まで再現できないことがわかった。

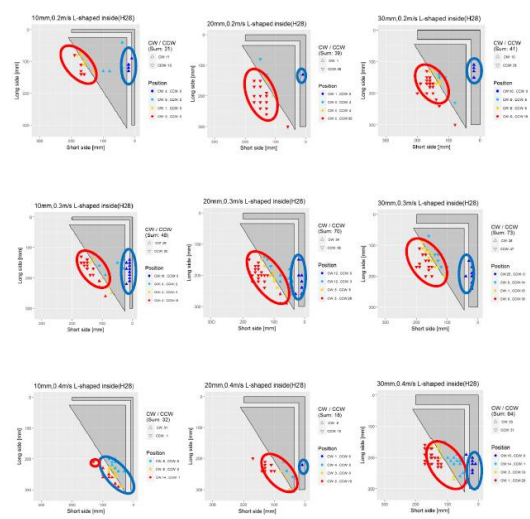


図11 火災旋風の発生位置（各種トレー幅10~30mm, 各種風速0.2~0.4m/sでの条件を記載。△：時計回り, ▽：反時計回り）

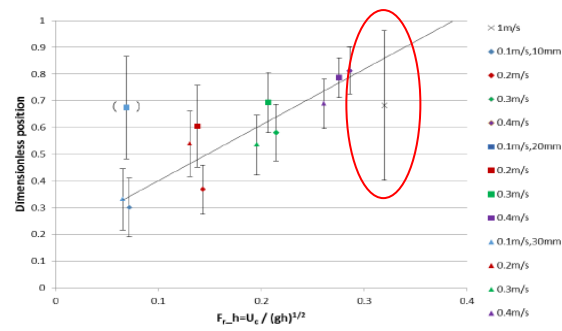


図12 火災旋風の発生位置の無次元数（縦軸）とフルード数（横軸）の関係（L字内部の燃料を増やした場合）

なお、改良した小型試験で得られた F_r 数と無次元の火災旋風位置は、試験スケールの差にも関わらず結果が一線上にて整理されることがわかる（赤色で囲った部分が実スケール試験）。この事実からも境界条件として与える燃料発生領域の面積比を相似則として考慮しなければならないことがわかる。

(3) 流入口（床面近く）に導入したスモークリキッドを浸した線香の煙粒子をレーザーシートで反射させることで流れの可視化を行った。その代表例を図13に示す。

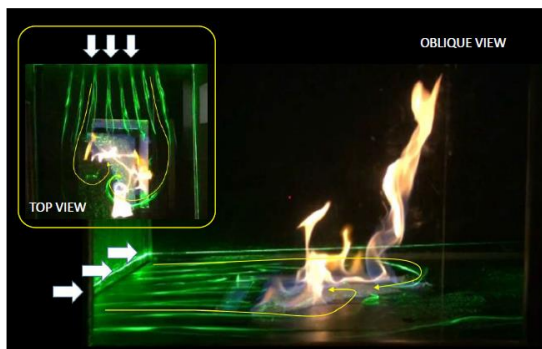


図13 レーザシートにより可視化された流れ場

図からわかるように火源であるL字状の外側から左右に流れが分かれ、燃料最下流から「逆流」して渦が形成され、一対の渦対が並列して形成される。静止画ではわからないが動画で確認すると、燃料上の時計回りの火災旋風が形成された後、逆側に発現する反時計回りの渦が強くなり、火災旋風へと成長する様子が明確に認められる。つまり発生には順番があって、火源上の火災旋風の発生後にL字内部の火災旋風ができる。このことは周囲の広範囲の火災領域部で（炎を伴う）炎の竜巻が、それ以外の領域の火災旋風を「誘発する」ことを意味しており、いわゆる（火源のないところである）避難所に動き回る火災旋風とは、周囲の火災領域で発現した火災旋風に起因する可能性が示された。

なお、流入流れに強弱の擾乱を与えた場合でも火源上に発生する火災旋風が焼失することはなく、一旦発生すると（少なくとも暫

くは)そこに滞在する。すなわち、その後に発現する反時計回りの火災旋風も擾乱にはマイナーな影響しか持たない。ただし、流れ方向に対するかく乱の影響については検討できなかったため、それについては今後の課題である。

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 0 件)

[学会発表] (計 4 件)

1. Saito, K., Kuwana, K., Nakamura, Y., and Sekimoto, K., "Large-scale Wind-tunnel Experiments and Numerical Study on Moving-type Fire Whirls", Proc. 10th US National Combustion Meeting, Collage Park, MD USA (2017. 4), 2FI-0168
2. Nakamura, Y., Shiino, K., and Nakashima, T., "How Well We Can Predict the Occurrence of Large Fire Whirl through Scale Model Experiment?", Proc. 12th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2015), Sendai Japan (2015. 11), **invited talk at OS3-3** (on USB).
3. Salameh, A., Akafuah, N., Forthofer, J., Finney, M., Kuwana, K., Sekimoto, K., Nakamura, Y., and Williams, F. A., "Fire Whirls in Wildland Fires", Proc. The 6th International Fire and Ecology and Management Congress: Advancing Ecology in Fire Management (6th AFE Fire Congress), San Antonio, TX, USA (2015. 11), SS19-15.
4. Shiino, K., and Nakamura, Y., "Mobility of Fire Whirl formed over L-shape Ethanol Tray embedded in Small-scale Wind Tunnel", Proc. The 10th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology (AOSFST-10), Poster Session, Tsukuba, Japan (2015. 10), FP-8 (on USB)

[その他]

新聞・メディア

1. 池上彰と考える! 巨大自然災害から命を守れ~南海トラフ巨大地震に備えよ~第6弾:名古屋TV (2017. 5. 22 放映予定)
2. 「備える」3. 11 から災前の策 : 中日新聞 (2017. 2. 6)
3. 大地震 火災旋風の猛威 : 読売新聞 (2016. 12. 4)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 祐二 (NAKAMURA, Yuji)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・機械工学系・准教授

研究者番号: 50303657