

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：11501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25560177

研究課題名(和文)大震災時に発生する火災旋風の渦力学的視点からのメカニズム解明

研究課題名(英文) Mechanism Clarification of a Fire Tornado Occurring in Great Earthquake Disaster from a Viewpoint of Vortex Dynamics

研究代表者

篠田 昌久 (SHINODA, Masahisa)

山形大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：80292241

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)：本研究では、渦力学的視点から火災旋風の構造やメカニズムの解明を試みた。手法には数値流体力学(CFD)的手法を用いた。結果として、火災旋風内部に内側のラセン状の渦線と外側のラセン状の渦線からなる2重構造が見出され、その2重構造の隙間領域に燃焼ガスの高速上昇流が存在することが分かった。このラセン状の渦線の2重構造とその誘起速度による高速上昇流形成メカニズムは、燃焼ガスを竜巻のような細長い円筒領域内に閉じ込めながら地上から上空へ高速輸送することが可能であり、火災旋風の発生・維持のために本質的に重要な構造とメカニズムであるといえる。

研究成果の概要(英文)：In this study, it was attempted to clarify the structure and mechanism of a fire tornado from a viewpoint of vortex dynamics. The method of computational fluid dynamics (CFD) was used. As a result, the double structure consisting of inner helical vortex line and outer helical vortex line was found in the fire tornado, and the high-speed upward flow of combustion gas was also found in a gap region between the inner and outer helical vortex lines. This double structure of helical vortex lines and its induction flow velocity enabled the high-speed transport of combustion gas from the ground to the sky, keeping the combustion gas in the tornado-like slender cylindrical region. Therefore, the structure and mechanism found in this study seemed to be essentially important for the formation and sustainment of the fire tornado.

研究分野：流体力学、燃焼学

キーワード：火災旋風 渦・旋回流 重力・浮力 燃焼 ラセン状の渦線 渦力学 数値シミュレーション 防災・安全

1. 研究開始当初の背景

自動車エンジンの燃焼室や航空機エンジンの燃焼器内のような可燃性ガス中の微細スケールの渦に点火した場合、渦に沿って火炎が高速に伝播することが知られている。この現象はボルテックス・バースティングと呼ばれ、乱流燃焼の基礎過程の一つとして注目されている。

この現象に対して最初に提案されたメカニズムとしては、Chomiak (1976) の「圧力差による高速火炎伝播機構」[1]があるが、これは火炎前後の圧力差が火炎を前方に駆動するというものである。しかしその後、本研究の研究代表者らのグループ(1993)によって「渦系ソリトンによる高速火炎伝播機構」[2-5]が新たに提案された。これは火炎の熱膨張効果などによって形成されたラセン状の渦線(渦系ソリトン)の誘起速度が火炎を前方に駆動するというものである。このような燃焼学分野の微細スケールの渦に対する渦力学的メカニズムは、防災・安全分野の巨大スケールの火災旋風にも適用できるのではないかと発想したのが本研究の背景である。

参考文献

- [1] Chomiak, J., Proceedings of the Combustion Institute, Vol.16 (1976) pp.1665-1673.
 [2] 篠田昌久, 矢野和重, 王健平, 藤原俊隆, 第 31 回燃焼シンポジウム講演論文集 (1993) pp.249-251.
 [3] 篠田昌久, 山下博史, 第 44 回燃焼シンポジウム講演論文集 (2006) pp.312-313.
 [4] 佐藤裕也, 篠田昌久, 山下博史, 日本燃焼学会誌, 52 巻, 161 号 (2010) pp.224-232.
 [5] 佐藤裕也, 篠田昌久, 山下博史, 日本燃焼学会誌, 56 巻, 177 号 (2014) pp.241-250.

2. 研究の目的

火災旋風とは巨大な炎の竜巻現象のことであり、大震災時に市街地や山林などで発生すると甚大な被害をもたらすことが知られている。例えば日本では関東大震災(1923)や阪神・淡路大震災(1995)などで発生し、特に関東大震災では火災旋風により約 3 万 8000 もの人命が失われたとされている。しかし火災旋風の構造や発生・維持のメカニズムなどはまだ十分に分かっておらず、その発生防止や被害予測などの防災対策がまだ十分にできていないという問題がある。

そこで本研究では、研究代表者らのグループが微細スケールの渦に対して提案した「渦系ソリトンによる高速火炎伝播機構」という渦力学的メカニズムを、巨大スケールの火災

旋風に新たに適用し、渦力学的視点(特にラセン状の渦線に着目する視点)から火災旋風の構造やメカニズムを明らかにすることを目的とする。本研究により火災旋風の構造やメカニズムが明らかになれば、多数の人命に係わる防災・安全分野への大きな貢献となる。

3. 研究の方法

これまでの研究代表者らのグループの研究成果により、燃焼学分野の微細スケールの渦に対しては、「渦系ソリトンによる高速火炎伝播機構」の有効性・妥当性が確認されている。

そこで平成 25 年度(1 年目)は、防災・安全分野への応用展開の第一歩として、先行研究[1,2]に続き、まず火災旋風現象を数値流体力学(CFD)的に再現する。その際、自作ソフトウェア(乱流モデルなし)による実験室スケール火災旋風モデル(図 1)の数値シミュレーションと、市販ソフトウェア(乱流モデルとして圧縮性 LES モデル使用)による大スケール火災旋風モデルの数値シミュレーションにより、2 通りの数値シミュレーションを試みる。ここで市街地や山林などの大規模火災時に発生する実際の火災旋風は、非定常・3 次元・巨大スケールの化学熱流体力学的現象として非常に巨大かつ複雑なものであるため、そのすべてを詳細に再現することは難しいが、本研究では簡単化したモデルを考えて、現象の本質をとらえることだけに専念する。

そして平成 26 年度(2 年目)と平成 27 年度(3 年目)は、数値シミュレーションによって得られた数値データを可視化・解析することにより、「渦系ソリトンによる高速火炎伝播機構」という渦力学的メカニズムが火災旋風にも成り立っているかどうかを検証する。

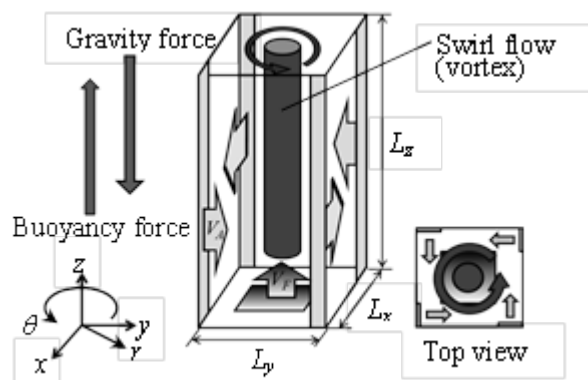


図 1 実験室スケール火災旋風モデル

参考文献

- [1] 田中邦典, 佐藤裕也, 篠田昌久, 山下博史, 第 49 回燃焼シンポジウム講演論文集 (2011) pp.148-149.

[2] 田中邦典, 佐藤裕也, 篠田昌久, 山下博史, 第 50 回燃焼シンポジウム講演論文集 (2012) pp.172-173.

4. 研究成果

2 通りの火災旋風モデルの数値シミュレーション・可視化・解析により、以下のような研究成果が得られた。

(1) 実験室スケール火災旋風モデルの数値シミュレーションと、大スケール火災旋風モデルの数値シミュレーションのどちらにおいても、火災旋風のような現象を再現することができた。ただし燃料・空気の流入速度などの計算条件において、非常に狭い範囲の条件でのみ安定な火災旋風が形成されることが分かった。

(2) 実験室スケール火災旋風モデルと大スケール火災旋風モデルのどちらにおいても、数値データの可視化・解析により、火災旋風内部に内側のラセン状の渦線と外側のラセン状の渦線からなる 2 重構造が見出され、その 2 重構造の隙間領域に燃焼ガス的高速上昇流が存在することが分かった(図 2)。このラセン状の渦線の 2 重構造は、トンネルや煙突の壁のような役割をして、燃焼ガスを細長い円筒領域内に閉じ込めながら地上から上空へ高速輸送しているように見え、竜巻のような形状をもつ火災旋風の発生・維持のために本質的に重要な構造であると思われる。また 2 重構造の隙間領域に見られる燃焼ガス的高速上昇流は、浮力効果や燃料・空気流入効果などから予想される速度よりも高速であり、主にラセン状の渦線の誘起速度によって駆動されていると考えられる。

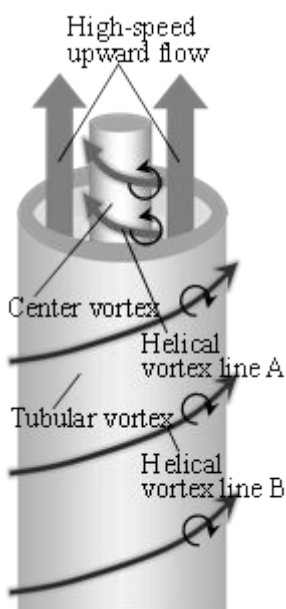


図 2 火災旋風内部におけるラセン状の渦線の 2 重構造

(3) 上記(2)の成果により、当初予想した「渦系ソリトンによる高速火災伝播機構」という渦力学的メカニズムと類似したメカニズムが火災旋風でも成り立っていることが確認された。特に火災旋風内部の燃焼ガス的高速上昇流形成メカニズムはこれまで十分に分かっていなかったが、それをラセン状の渦線の誘起速度によるものとして説明可能になった。ただし火災旋風では、渦系ソリトンのような孤立波的・局所的なラセン状の渦線ではなく、連続的なラセン状の渦線が重要な役割を担う。

(4) また桑名[1]によれば、林野火災の火災前線に沿って火災旋風が運動していく様子がインターネット動画で紹介されているが、これは、火災旋風(渦の循環)に横風(一樣流)が当たった場合に働く揚力や抗力が原因であると考えられる(図 3)。このような考察も、渦力学的視点によって初めて可能になる。

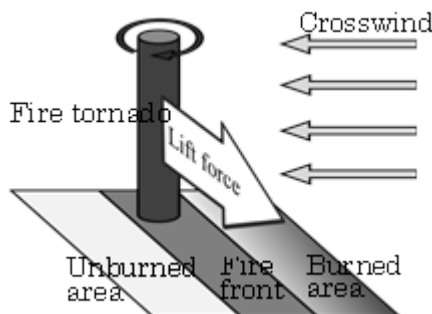


図 3 揚力による火災旋風の運動

(5) 以上のように、火災旋風の構造やメカニズムを渦力学的視点から明らかにした本研究成果は、従来にはない独創的な成果を多く含んでいる。しかし成果発表は学会発表のみであり、雑誌論文発表まで行うことはできなかったため、本研究終了後も発表は続けていく予定である。近い将来、本研究成果が火災旋風の諸特性理解、発生防止・予測、進路予測、被害予測などの防災対策に活かされることが期待される。

参考文献

[1] 桑名一徳, 日本燃焼学会誌, 53 巻, 164 号 (2011) pp.78-84.

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)
なし

〔学会発表〕(計 5 件)

杉本勇貴、篠田昌久、山下博史、火災旋風モデルの 3 次元数値シミュレーション、

日本燃焼学会第 53 回燃焼シンポジウム、
2015 年 11 月 16 日～18 日、つくば国際会
議場（茨城県つくば市）

杉本勇貴、篠田昌久、火災旋風モデルの
3 次元数値シミュレーション、日本機械
学会東北支部第 51 期秋季講演会、2015
年 9 月 26 日、福島工業高等専門学校（福
島県いわき市）

杉本勇貴、加藤大祐、篠田昌久、実験室
スケール火災旋風モデルの 3 次元数値シ
ミュレーション、日本機械学会東北支部
第 50 期総会・講演会、2015 年 3 月 13 日、
東北大学工学部（宮城県仙台市）

加藤大祐、杉本勇貴、篠田昌久、FLUENT
を用いた大スケール火災旋風モデルの 3
次元数値シミュレーション、日本機械学
会東北支部第 50 期総会・講演会、2015
年 3 月 13 日、東北大学工学部（宮城県仙
台市）

杉本勇貴、篠田昌久、火災旋風モデルの
3 次元数値シミュレーション、日本機械
学会東北支部第 50 期秋季講演会、2014
年 9 月 5 日、東北学院大学工学部（宮城
県多賀城市）

〔図書〕(計 0 件)

なし

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

なし

取得状況(計 0 件)

なし

〔その他〕

ホームページ等

<http://shinoda.yz.yamagata-u.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

篠田 昌久 (SHINODA, Masahisa)

山形大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：80292241

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし