

平成21年 5月29日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）

研究期間：2007～2008

課題番号：19860021

研究課題名（和文） 大規模火災旋風の性状予測および被害評価

研究課題名（英文） Understanding the nature of, and evaluating the damage caused by large-scale fire whirls

研究代表者

桑名 一徳（KUWANA KAZUNORI）

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号：30447429

研究成果の概要：火災被害を拡大することで知られる、火災旋風の影響度（周囲への熱輻射量など）を正確に評価し、また、発生防止のための知見を得る目的で、火災旋風の詳細な機構を実験および理論解析の両面から検討した。その結果、火災旋風が発生すると火炎面積および周囲への熱輻射量が劇的に増加するのは、旋風の発生に伴う火炎形状の変化により、発熱速度（燃料消費速度）が増大するためであることが明らかになった。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,330,000	0	1,330,000
2008年度	1,330,000	399,000	1,729,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,660,000	399,000	3,059,000

研究分野：燃焼工学・安全工学

科研費の分科・細目：工学・熱工学

キーワード：プール火災、旋回流、火炎高さ、伝熱

1. 研究開始当初の背景

(1) 大規模火災が起こると、火炎に直接触れなくても、火炎からの熱輻射により熱傷などの被害が発生する。火炎からの輻射熱量は火炎面積に依存し、火炎が大きいほど被害も大きい。火炎面積を劇的に増やす要因の一つとして、火炎と旋回流の相互作用が知られており、この相互作用による火炎高さの著しい増大現象は火災旋風と呼ばれる。

日本では、1923年の関東大震災直後に、被服廠跡（現在の東京都墨田区横綱）で火災旋風が発生し、わずか15分ほどの間に約38,000人が死亡した大惨事がよく知られている。また、最近の米国カリフォルニア州の森林火災

でも火災旋風が発生し、消火活動を制限するなどしたことが報告されている。

(2) これまでも、火災旋風の基礎的性質を理解するための研究がいくつか行われてきた。しかし、これらの研究では、火炎高さの増大機構についてあまり検討されていない。一般の火災では、火炎高さは発熱速度に依存する。したがって、火災旋風発生時の火炎高さ増大機構は、旋風により発熱速度（燃料消費速度）が増加するためか、旋風そのものによる流体力学的機構によるものだと考えられるが、このような議論もほとんどされてこなかった。

2. 研究の目的

(1) 本研究の第一の目的は、火災旋風が発生した時に火災高さが増大する機構を解明することである。火災旋風が発生すると火災被害が拡大する原因の一つは、火災高さの増大、および、それに伴う周囲への熱輻射量の増大である。したがって、火災高さ増大機構を解明することにより、火災旋風発生時の正確な被害予測が可能になると期待される。

(2) 第二の目的は、解明された火災高さ増大機構に基づいて、火災旋風発生時の火災高さを予測できる理論を構築することである。火災高さを各種パラメータの関数として解析的に表すことができれば、周囲への熱輻射量等も定量的に評価できるようになる。

3. 研究の方法

(1) 上記の目的を達成するため、本研究では、液体燃料のプール火炎やバーナー火炎を用いた火災旋風実験、数値流体力学 (computational fluid dynamics、CFD) 計算、および、理論解析の手法を用いた。それぞれについて以下に簡単に説明する。

(2) 先述のように、火災旋風の火災高さ増大機構は、発熱速度 (燃料消費速度) の増加によるものか、何か別の機構によるものかと考えられる。そこで、発熱速度の効果を見極めるために、燃料消費速度を制御できるバーナー火炎、および、燃料消費速度を制御できない液体プール火炎を用いて火災旋風実験を行った。(液体プール火炎の燃料消費速度は火炎からの熱流入量に応じた液体燃料の蒸発速度により決まるので、これを制御することは困難である。)

実験方法としては、図1に示したように、燃焼域 (バーナー火炎または液体プール火炎) の周囲に半円筒をずらして置くことにより、火災旋風を発生させるものを採用した。燃焼域で生じる上昇気流のため外部の空気がスリット部から取り込まれるが、軸対称的な半円筒の配置のため、旋回流が誘起される。スリット幅や液体プール径、円筒径を変化させて実験を行い、火災高さを測定した。また、液体プールの重量の経時変化を電子天秤で測定することにより、燃料消費速度を算出した。さらに、熱線風速計を用いて、スリット位置での空気流入速度を測定した。

(3) CFD 計算では完全な軸対称を仮定したり境界条件等を任意に設定できたりする。したがって、CFD の手法を用いれば、理想的な系で仮想的な実験を行うことができる。これにより、例えば火災高さの、各パラメータに対

する依存性を明らかにすることができる。そこで本研究では、火災高さに及ぼす燃料消費速度の影響を明らかにする目的で、燃料消費速度を任意に変化させた CFD 計算を行った。

(4) 上述のような CFD 計算を行えば、原理的には、あらゆる条件で、火災旋風発生時の火災高さを予測することが可能である。しかし、一般に、火災の CFD 計算には膨大な計算時間が必要であり (特に大規模火災の場合)、多くの条件に対して CFD 計算を行うのは現実的ではない。そこで本研究では、火災旋風発生時の火災高さを解析的に求められる理論の構築を試みた。

旋回流を伴わない通常の火炎に対しては、火災高さを予測する理論がいくつか提案されている。本研究では、数学的な手法により、これらの理論を旋回流のある場に適用する方法を検討した。

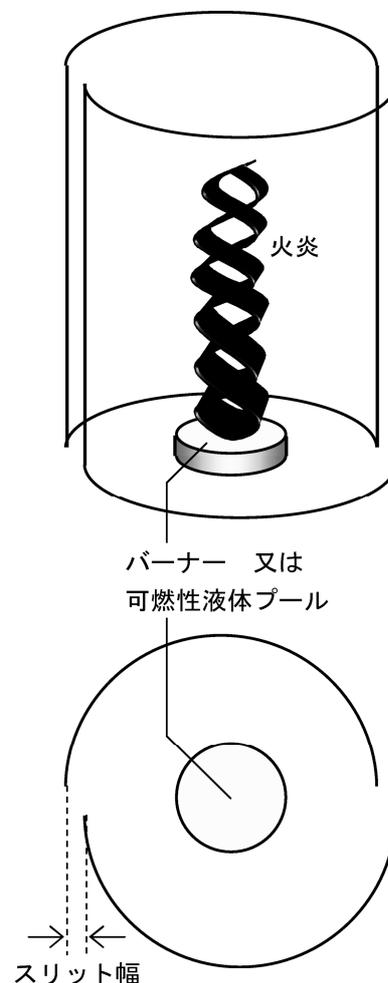


図1 実験方法

4. 研究成果

(1) まず、液体プール火炎とバーナー火炎を用いて行った火災旋風実験の結果を比較検

討する。図 2(a)が、旋回流がない場合の、直径 3 cm のプール火炎（燃料はエタノール）の写真である。同じプール火炎を用いて、図 1 のように半円筒を用いて火災旋風を発生させると、図 2(b)のような火炎が形成される。この写真の条件では、プール火炎と旋回流が相互作用することにより、火炎高さが約三倍に増加した。また、このとき、燃料消費速度も約三倍に増加することが確認された。さらに、スリット幅を変化させて様々な強度の旋回流とプール火炎を相互作用させたところ、火炎高さが燃料消費速度にほぼ比例するという結果が得られた。

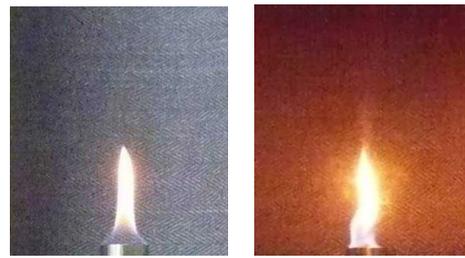
一方、メタンを用いたバーナー火炎を用いて図 2 と同様な実験を行った結果を図 3 に示す。図 3(a)は旋回流がない場合で、火炎高さが図 2(a)とほぼ同じになるように燃料流量を調節した。この条件で旋回流と相互作用させると図 3(b)のような火炎が形成された。螺旋形の火炎が形成されたものの、火炎高さはほとんど変化しなかった。

これらの実験と同様な条件で CFD 計算も行った。非定常の二次元軸対称モデルを採用し、一段階の総括燃焼反応を仮定した。燃料供給の境界条件として以下の二種類を用いた。すなわち、燃料気体の流速が一定の場合（バーナー火炎に相当する）と、火炎からの熱流入量に比例して燃料気体が供給される場合（プール火炎に相当する）である。前者の場合は旋回流の存在による火炎高さの変化はほとんど無かったが、後者の場合では旋回流により火炎高さが増加するという、実験と同様な結果が得られた。

以上の結果から、火災旋風が発生したときに火炎高さが増加するのは、なんらかの理由により燃料消費速度（液体燃料が蒸発する速度）が増加するためであることがわかった。



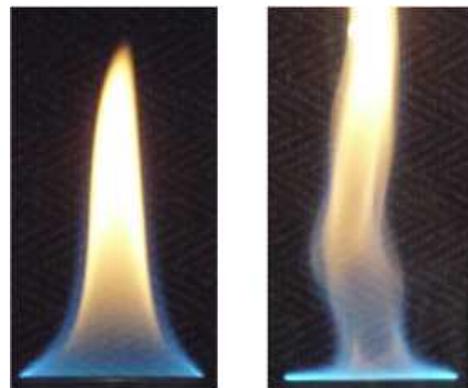
(a) 旋回無 (b) 旋回有
図 2 液体プール火炎と旋回流との相互作用



(a) 旋回無 (b) 旋回有
図 3 バーナー火炎と旋回流との相互作用

(2) 火災旋風発生時に火炎高さが増大するのは燃料消費速度の増加が原因であることがわかったが、それでは、なぜ燃料消費速度が増加するのだろうか。この疑問に答えるため、液体プール表面近傍の火炎基部の様子を拡大観察した。その結果を図 4 に示す。この図より、旋回流がある場合は、火炎が中心軸方向へ絞り込まれるような形状となることがわかる。これにより、高温である火炎面の位置が液体表面に近づき、液体への熱移動が促進されて、蒸発速度の増加、すなわち、燃料消費速度の増加へとつながることが示唆された。

ここまでの結果により、火災旋風が発生すると火炎が高くなる理由は、旋回流の存在により火炎形状が変化し、燃料の気化が促進される（つまり、燃料消費速度が増加する）ためだとわかった。



(a) 旋回無 (b) 旋回有
図 4 旋回の有無による火炎基部形状の変化

(3) 本研究が対象としているような系では、燃料消費速度を用いて、二つの異なる無次元数を定義できる。すなわち、Reynolds 数および Froude 数であり、それぞれ以下のように定義できる。

$$Re = \frac{ud}{\nu}, Fr = \frac{u^2}{gd}$$

ここで、 u は燃料消費速度を燃料気体の流速に換算した値、 d は燃焼域のサイズ(液体プール直径)、 ν は気体の動粘度、 g は重力加速度である。これら二つの無次元数のうち、どちらが現象を支配しているのかを検討するため、プール直径を変化させて実験を行った。その結果を図5に示す。図5(a)は無次元火炎高さ(火炎高さ h をプール直径で除したものを) Reynolds数の関数としてプロットしたもので、図5(b)は同じく無次元火炎高さをFroude数の関数としてプロットしたものである。この図から明らかなように、無次元火炎高さはReynolds数にほぼ比例するものの、Froude数との間には明白な相関関係が認められなかった。したがって、本研究が対象とした規模の火災旋風では、Reynolds数が支配的なパラメータであることがわかった。

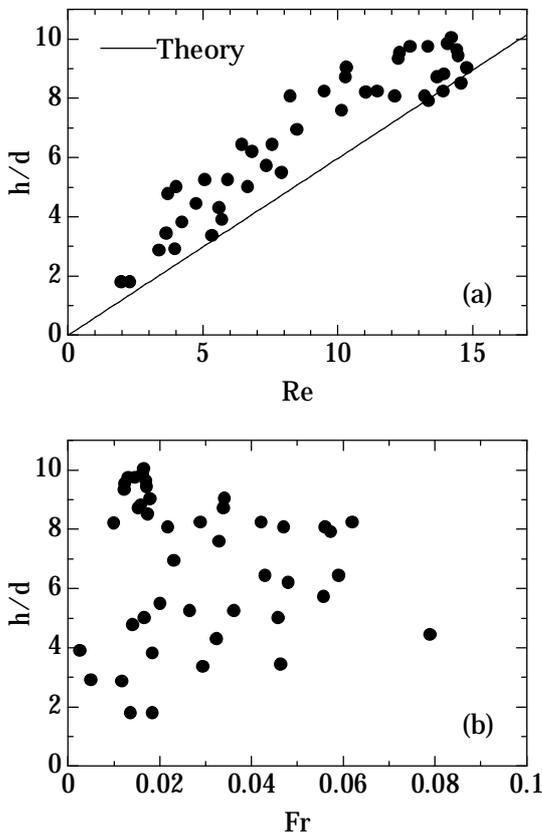


図5 火炎高さと無次元パラメータ

(4) 図5から得られた、無次元火炎高さがReynolds数に比例するという知見に基づき、無次元火炎高さをReynolds数の関数として予測する理論の構築を試みた。

定常で軸対称な流れを仮定すると、混合分率 Z の保存式は円筒座標系を用いて以下のよ

うに表される。

$$u_r \frac{\partial Z}{\partial r} + u_z \frac{\partial Z}{\partial z} = \frac{1}{Re} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial Z}{\partial r} \right)$$

ただし、各変数は d および u を用いて無次元化されている。なお、混合分率は空気側で0、燃料側で1になる量で、燃料種に依存する値 Z_{st} となる位置が火炎面を表す。

ここで、一般的な流れ場として、

$$u_r = -rV(z), \quad u_z = U(z)$$

を仮定する。このとき、

$$\xi = u_z^{1/2} r$$

で定義される座標変換を導入すると、もとの保存式は以下ようになる。

$$\frac{\partial Z}{\partial z} = \frac{1}{Re} \frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\xi \frac{\partial Z}{\partial \xi} \right)$$

この式は、解がよく知られている熱伝導方程式と同じかたちをしている。 $\xi = 0$ で $Z = Z_{st}$ となる z が火炎高さであり、次式で与えられる。

$$\frac{h}{d} = \frac{Re}{16 \ln[1/(1 - Z_{st})]}$$

この理論解析でも、無次元火炎高さがReynolds数に比例することになり、実験結果(図5(a))とも矛盾しない。図5(a)に理論線も示したが、実験結果とよく一致している。なお、Reynolds数を評価する際、物性値は1500Kの値を用いた。これは燃焼反応による温度上昇を考慮するため、旋風のない通常の火炎の高さを予測するとき一般に採用される方法になった。

ここでの理論解析に採用した座標変換の方法から、旋風が発生すると火炎基部の構造が変化する(図4)機構について知見が得られる。粘性流体では、旋回流を維持するためには中心軸へ向かう流れが必要である。この中心方向への流れにより軸方向上向きの流れが誘起される(質量保存の法則による)。本研究で採用した座標変換は、この軸方向の流速(そして必然的に中心方向への流速)に依存している。中心方向への流れの大小により火炎形状がどのように変化するかを図6に示す。この図は、先に示した座標変換に基づいて得られた。図6によると、中心方向へ向かう流れが速くなると、火炎面の位置は中心軸に近づくように変化する。この結果は、旋回流の存在により、火炎が中心へ絞り込まれるように変形した実験結果(図4)と定性的に一致している。なお、図6は、Reynolds数が一定の条件での火炎形状の変化を示しているため、火炎高さ(Reynolds数に比例する)は変化していない。

以上をまとめると、混合分率の保存式に対して、流れ場に応じた座標変換を行うことに

より火炎高さの解析解を求めることができ、実験結果ともよく一致した。また、座標変換の方法から、火炎形状の変化に関する知見が得られた。

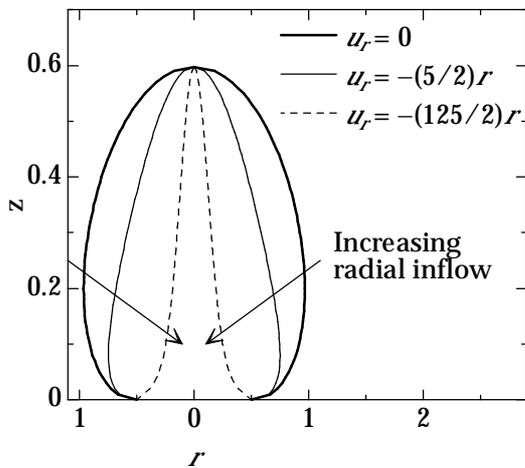


図6 火炎形状の変化

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4件)

桑名一徳、森下聡、土橋律、榎田玄一郎、
火災旋風発生時の火炎高さについて 実験室規模の軸対称火災旋風の場合、日本燃焼学会誌、51、pp. 56-62、2009、査読有

K. Kuwana、N. Tagami、S. Mizuno、T. Ida、
Extinction of laminar jet diffusion microflames、Proceedings of the Combustion Institute、32、pp. 2505-2510、2009、査読有

K. Kuwana、K. Sekimoto、K. Saito、F.A. Williams、
Scaling fire whirls、Fire Safety Journal、43、pp. 252-257、2008、査読有

桑名一徳、井田民男、
噴流拡散マイクロフレームの安定性に関する理論的考察、日本燃焼学会誌、50、pp. 81-86、2008、査読有

〔学会発表〕(計3件)

林靖浩、桑名一徳、土橋律、
火災旋風の挙動に及ぼす燃料性状の影響、平成21年度日本火災学会研究発表会、2009年5月20日、東京

K.H. Chuah、K. Kuwana、K. Saito、
Modeling small scale methanol pool fire generated fire whirls、32nd International Symposium on Combustion、2008年8月5日、Montreal

森下聡、桑名一徳、土橋律、
プール火災と旋回流の相互作用に関する研究、平成20年度日本火災学会研究発表会、2008年5月21日、神戸

6. 研究組織

(1) 研究代表者

桑名一徳 (KUWANA KAZUNORI)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号：30447429

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者