

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 22 日現在

機関番号：12701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26560174

研究課題名(和文) 動揺火源上に形成される火災プルーム性状に関する研究

研究課題名(英文) Plume Property Above A Fire Source With A Simple Harmonic Oscillation In Horizontal Direction

研究代表者

岡 泰資 (OKA, YASUSHI)

横浜国立大学・環境情報研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10240764

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：火災プルームは、燃焼により生じた熱および燃焼生成物質を移流拡散させる推進力となるため、火災現象の素過程として重要な役割を果たす。船舶火災時の火源上に形成される火災プルームには、気象・海象条件に依存した船舶動揺に起因した傾斜および慣性力が作用する。

そこで本研究では、船舶火災時の火災プルーム性状を明らかにすることを目的として、火災火源を水平方向に単振動させた模型実験を実施し、陸上建物内での火災を想定して構築された固定火源上の火災プルームの温度・速度減衰に関する既往の関係式との差異を検討した。さらに、既存の軸対象プルームの関係式を水平移動させることで温度場を予測する簡易手法の妥当性を評価した。

研究成果の概要(英文)：Engineering correlations on fire plume are widely utilised to assess a fire safety of onshore buildings and plants. In the offshore environment, however, fire plume properties are considerably different from those in a compartment of onshore building because the fire source location changes with time due to the influence of complex ship motions. As a preliminary step, a series of tests were conducted by controlling a fire source to simulate swaying motion and temperature rise and upward velocity were measured along the centerline of the fire plume. Temperature and velocity attenuations along the centre of the fictitious rectangular fire source show the property of either asymmetric or line fire source depending on the amplitude of simple harmonic oscillation of a fire source. Temperature field on the vertical plane running along the centre and parallel to the long side of the fictitious rectangular fire source can be predicted by the proposed simplified correlation.

研究分野：火災安全工学

キーワード：船舶火災 動揺火源 火災プルーム

1. 研究開始当初の背景

火災プルームは、燃焼により生じた熱および燃焼生成物を移流拡散させる推進力であり、陸上建物内の天井近傍に設置された火災感知器あるいはスプリンクラーの作動に影響を与える。このため、建築火災安全工学分野において、数多くの理論的、実験的研究が実施され、火災プルーム軸に沿った温度・速度の減衰性状、天井下に運ばれる質量流量などに関する有益な関係式が導かれている。これらの関係式は、熱気流の発生源である火源は、重力が一律に作用する陸上建築空間内のある位置に時間的に固定された状態を想定している。ところが船舶内の火災プルームは、気象・海象条件により船舶特有の動揺・傾斜等の影響のために火源位置の時間的な変化および船体動揺に起因する慣性力の影響を受ける。そこで、船舶火災時の熱気流の流動性状は、火源位置が時間的に変化しない陸上建物空間内のそれとは大きく異なると考えられる。このため陸上建物空間内を対象とした火災プルームの流動性状に係わる工学的手法の、船舶特有の動揺・傾斜を伴う状況への適用性およびその範囲については、未解明の部分が非常に多い。

2. 研究の目的

本研究では、6自由度の船体運動のうち最も代表的な横揺れを想定し、水平方向への単振動および振り子運動を取り上げた。このように、動揺する火源上に形成される火災プルームの流動に注目し、模型実験による実測および数値シミュレーションの両面から取り組むことで、固定火源上の火災プルームの温度・速度性状に係わる既往の関係式との差異を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

【単振動実験】

火源を水平方向に単振動運動させるために、電動スライダ(ELF6XD080-KD, 最大ストローク 0.7 m, オリエンタルモーター(株)製)に一辺 0.1 m の正方形ガスバーナーを取り付け、発熱速度、振幅、周期、火源径を変化させた実験を実施した。具体的には、電動スライダの可動中央を原点とし、これから左右への移動幅を 0.1, 0.2, 0.3 m の 3 段階、周期を 6, 8, 12, 18 秒の 4 段階変化させた。燃料には LPG を用い、発熱速度は 5, 10 kW の 2 段階とした。なお、電動スライダに取り付けた火源は正弦波で制御した。

火源表面から 0.5, 1.0, 1.5, 2.2 m の各高さにおいて、熱電対・二方向プローブを火源移動方向に 0.1 m 間隔に設置した測定装置を水平方向に動かすことで、 1.4×2.2 m 範囲の温度・速度を測定した。高さ 0.5 m では素線径 0.2 mm の K 型熱電対を、これ以外の高さでは K 型極細シース型熱電対(保護管外径 0.15 mm, 素線径 0.023 mm)を用いた。速度測定は、上昇気流が持つ動圧と静圧の差圧を、微

差圧トランスデューサ(バリダイン社製, DP103)で計測し、二方向プローブ先端に取り付けた熱電対で計測した二方向プローブを通過する熱気流の温度をもとに密度補正することで、速度に換算した。各設定周期の 50 往復中の出力を 50 ms 毎に収集した。

【振り子運動実験】

正弦波運動で制御できる動揺台(下に凸な円弧に沿った往復運動を模擬できるプランコ型動揺装置)を用いた。電動スライダを用いた単振動運動実験で採用した水平方向への振幅と一致させるために、回転半径 1.84 m から揺れ角を逆算し、 $\theta = 3, 6.3, 10^\circ$ の 3 段階の揺れ角で実験を行った。素線径 0.2 mm の K 型熱電対を水平方向に 0.05 m 間隔に可動中央から左右両方向へ 0.9 m まで配置した熱電対ツリーを、 $z = 0.2, 0.35, 0.5, 0.8, 1.0, 1.25$ m の 6 段階変化させて 1.8×1.25 m の範囲の温度を測定した。

【簡易モデル】

周期が 12 秒以上のゆっくりと水平に単振動する状態では、火源の移動により生じる横風の影響が小さい(火災プルーム軸は傾かずに水平移動する)とみなすことができる。そこで、ガウス分布を仮定した既存の点火源上の軸対象プルームの関係式をもとに、ゆっくりと水平に単振動する火源上の温度場・速度場を予測する簡易モデルを導出し、振動する火源の中心を通り火源移動方向に平行な垂直断面(x - z 平面)上の計算領域を等間隔格子で離散化し、数値計算した結果と実測値との比較から、簡易モデルの有効性を評価した

4. 研究成果

【水平温度分布】

振幅 $A = 0.2$ m の範囲を火源が単振動する状況では、火源の移動周期に係わらず、動揺火源上に形成されたプルーム内の高さ方向への水平温度分布は、火源からの高さ依存して特徴的な分布形状を示した。 $z = 0.5$ m の火源近傍高さでは、火源の移動範囲の両端近傍に固定火源が仮想的に存在し、各火源上に形成される二つのプルームが互いに干渉したような水平温度分布を示した。また、火源から十分離れた高さ($z = 2.2$ m)では、火源の可動中央とほぼ一致する位置に最高温度上昇が現れる分布へと変化した。その一方、振幅 $A = 0.1$ m と火源の移動範囲が狭い条件では、上述のような水平温度分布の変化は見られず、いずれの高さにおいても火源の可動中央にほぼ一致する位置に最高温度上昇が現れるような固定火源上のプルーム内の水平分布に似た温度分布を示した。速度分布においても、同様の結果が得られた。また、振り子実験のように、単振動実験よりも火災の傾斜が大きい状況においても同様の温度分布が得られた。

【特性温度上昇の算出】

単振動運動あるいは振り子運動する仮想矩形火源上に形成した火災プルームの代表

温度として、特性温度上昇を導入した。具体的には、火源表面からの各高さにおけるプルーム水平方向への温度分布が top hat 型であると仮定する理論解析モデルに従い、各高さにおけるプルーム内の水平方向への平均温度とした。各高さの特性温度上昇の算出は、水平分布形状に依存して2種類の方法を採用した。火源の移動幅の両端近傍に仮想的に存在する固定火源からのそれぞれのプルームが互いに干渉した水平温度分布(火源の可動中央軸を基準に左右方向にそれぞれ最高温度上昇ピークが現れる分布形状)を示す場合、それぞれの最大温度上昇の $1/e$ の温度上昇にまで減衰する位置を算出し、2点間の水平距離をプルーム有効幅と定義した。また、ほぼ火源の可動中心軸近傍に一つの最大温度上昇ピークが現れる水平分布を示す場合、火源の移動方向(火源の可動中央軸を基準に左右方向)に対して、最大温度上昇の $1/e$ の温度上昇(ΔT_b)が出現する位置をそれぞれ求め、この2点間の水平距離をプルーム有効幅と定義した。水平温度分布を測定した各高さにおいて、各測定点の位置と温度上昇値をもとにした台形則による温度上昇の積分値を算出した有効プルーム幅で除すことで特性温度上昇を求めた。ただし、火源の水平移動方向(x 方向)に対して垂直な方向(y 方向)については、いずれの高さにおいてもバーナー中心軸上で最大温度となることから平均化しなかった。

【垂直温度減衰および遷移高さ】

単振動運動あるいは振り子運動する仮想矩形火源上に形成された火災プルーム内の各測定高さで定義した特性温度上昇を、建築火災安全工学分野において多用される火災プルームの軸上温度性状に関する経験式と振幅毎に比較したところ、以下の3つの段階に移行していくことがわかった。

- (1) 火源近傍では、振幅、周期、発熱速度の変化に依存せず、火源からの高さに対する温度減衰勾配がほぼ-1となることから、短辺を正方火源辺長、長辺を正方火源の移動範囲として定義される仮想矩形火源上に形成される2次元プルームの温度減衰と同様の減衰性状を示す。
- (2) 矩形火源上に形成される火災プルームの温度減衰から正方火源上のプルームと同様の減衰勾配を示す遷移状態となる。
- (3) 仮想矩形火源から十分に離れた高さ領域では、温度上昇の高さ方向への減衰勾配の値は-5/3と、正方火源上の軸対象プルームと同様の減衰勾配を示す。

実測範囲は火源表面から2.2mの高さまでであったため、2次元プルームから軸対称プルームへと温度性状が変化する高さ(上記(1)から(2)へあるいは(2)から(3)へ移行する高さ)を実測値から算出することができなかった。そこで、ゆっくりと水平に単振動する火源(仮想矩形火源)の中心軸を通り長辺に平行な鉛直平面上の温度場を、提案した簡易

計算モデルで算出し、上記(1)から(2)へ遷移が生じる高さを算出した。算出した遷移高さは、火源の代表径、振幅および発熱速度の関数として表現できることを示した。なお、この簡易モデルでの予測結果が、単振動実験での実測結果とほぼ一致することは確認済みである。

【見かけの発熱速度の算出】

単振動運動実験、振り子運動実験ともに、仮想矩形火源からの高さに対する温度減衰性状こそ、長谷見らおよび Yuan らが提案した固定された矩形火源上の温度減衰性状と一致したものの、特性温度上昇そのものは低く、周期が短いほど、また揺れ角(振幅)が大きいほど特性温度上昇は低下した。この理由として、単振動運動あるいは振り子運動する仮想矩形火源上においては、火源の移動に伴い火炎が傾倒すること、熱を発生する領域が仮想矩形火源上を時間的に移動する(火源が存在したり、しなかったりと時間的に変化する)ため、火源の可動領域と同じ大きさ、発熱速度を持つ固定された矩形火源よりも発熱速度が小さくなることが考えられる。そこで、この見かけの発熱速度を Q_{os} 、常時火炎が存在する矩形火源の発熱速度を Q として、各実験条件における低減率(α_{ave})を以下の手法で算出した。

- (1) 各高さにおける特性温度上昇が、既存の温度減衰式に一致するように、仮想的発熱速度 $Q_{os,ij}$ を算出する。なお i は測定点数、 j は発熱速度の条件数を意味する。
- (2) 算出した $Q_{os,ij}$ をを用いて、測定数 n で除した平均値($Q_{os,ij,ave}$)を求める。
- (3) $Q_{os,ij,ave}$ を実験条件の発熱速度 Q_j で除し、ひとつの発熱速度における発熱速度減少率($\alpha_j=Q_{os}/Q_j$)を求める。
- (4) この作業を発熱速度毎に実施し、その平均値 α_{ave} を低減率とする。

なお、本実験では、温度減衰性状が遷移領域から軸対象プルームへ変化する領域の測定数が十分でないため、2次元プルームから遷移領域へ変化するまでに対応する。このように算出した低減率は、振幅が大きいほど大きく、また周期が短いほど小さいという性質をもとに、この低減率を、振幅と周期の関数として表現できる実験式を提案した。

【上昇速度減衰】

速度場については、単振動実験の結果と簡易計算モデルの結果が異なる傾向を示した。例えば、振幅の小さい場合には無次元特性速度は一定ではなく徐々に減衰しており、2次元プルームのトラジェクトリに沿った性状を示さなかった。一つの原因として、速度計測に二方向プローブでの測定が考えられる。二方向プローブは、もともと火炎が存在するような高温領域での速度計測のために開発されたプローブであり、その先端部の形状から、鉛直上向きに速度だけでなく、斜め方向に上昇する速度成分も感知する。このため上昇速度のみを対象とする簡易モデルとの違

いが生じたと考えられる。また、簡易計算モデルでの結果は、火源に近い、高さが低いところでは単振動実験と同程度の無次元特性速度まで上昇し、火源から離れるにつれて無次元特性速度が減少していく傾向が振幅にかかわらず得られたが、振幅が大きいほど無次元高さが高いところで特性速度が変化した。この変化点の高さまで実験結果を得られていないため、実験側でもより高い領域での速度計測が今後求められる。

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 1 件)

- 1) Oka, Y., Oka, H., and Iizuka, M., “Temperature Attenuation Above A Fire Source With A Simple Harmonic Oscillation In Horizontal Direction”, Proceedings of 14th International Conference and Exhibition on Fire Science and Engineering (Interflam 2016), 査読有

〔学会発表〕(計 1 件)

1. 飯塚真実, 岡 泰資, 岡 秀行: 水平方向に単振動する火源上の温度性状, 第48回安全工学研究発表会, pp.77-80, 2015.12.3

6．研究組織

(1)研究代表者

岡 泰資・OKA YASUSHI

横浜国立大学・環境情報研究院・准教授
研究者番号：10240764

(2)研究分担者

岡 秀行・OKA HIDEYUKI

海上技術安全研究所・海洋リスク評価システム安全技術研究グループ・主任研究員
研究者番号：80399518

(3)連携研究者

なし