

令和元年6月11日現在

機関番号：11101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H03924

研究課題名(和文) 水流上に浮遊する液体燃料表面上の火炎の燃え拡がり

研究課題名(英文) Flame spreading over a liquid fuel floating on water stream

研究代表者

伊藤 昭彦 (ITO, Akihiko)

弘前大学・理工学研究科・客員研究員

研究者番号：30127972

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,300,000円

研究成果の概要(和文)：津波火災の燃え拡がり機構を解明するための基礎研究として、可燃性液体上に形成される火炎現象について実験的に検討した。その結果、Sub-flash状態で可燃性液体表面上に形成される火炎の燃え拡がりでは、静止、燃料単層の場合に比較して静止、2層(液体燃料+水)の上に形成される火炎の方が、燃え拡がり速度がより小さいことが分かった。また、流動する液体燃料上に、対向流燃え拡がりの形で形成された火炎の燃え拡がり速度は、液体燃料流の速度が増加するのに伴い燃え拡がり速度が増加することが分かった。しかし、燃え拡がり速度の増加には限界があり、燃え拡がり速度を燃料流速が上回ると火炎は下流へと流されることわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

東日本大震災で観察された津波火災という流る海水上に浮いた液体燃料表面上の燃え拡がり現象について、従来の液体燃料上の燃え拡がりの知見をふまえて実験的にそして詳細に調べた。その結果、水に浮いている燃料の上に形成される火炎の方が、燃料層の上だけに形成された火炎よりも燃え拡がる速度が小さいことが分かった。これは、水の層が火炎の燃え拡がりを抑制することを意味している。また、対向する液体燃料流上に形成された火炎の燃え拡がり速度は、液体燃料流速の増加に伴い燃え拡がり速度が大きくなることが分かった。これは、火炎に対して水流の向きが燃え拡がり速度の増減を決定づけることを意味している。

研究成果の概要(英文)：In order to clarify the flame spreading mechanism of Tsunami fires, the combustion phenomena formed over a liquid fuel have been investigated experimentally. Two different kinds of flame spreading experiments were performed. One was the flame spreading formed over a liquid floating on a still water layer. The other was the opposed-flow flame spreading formed over a liquid fuel stream. As a result, it is seen that the spreading rate of the flame formed over still fuel and water layers becomes lower than that of the flame formed over a fuel layer. On the other hand, it is found that the spreading rate of the flame formed over the opposed fuel flow increases as the opposed fuel flow speed becomes larger. However, when the fuel flow speed is much larger than the flame spreading rate, the flame was flowed downstream.

研究分野：火災燃焼工学

キーワード：津波火災 燃え拡がり 液体燃料 対向流燃え拡がり 並行流燃え拡がり 拡散火炎 マランゴニ対流
燃え拡がり速度

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災では津波が沿岸部の都市を襲い、津波により流出し海上に浮遊した可燃性液体が燃料となって火炎が燃え広がるという津波火災が発生した。この津波火災について、その基礎的な火災特性と燃え広がり機構を検討した研究例はほとんどない。

他方、古くから、液体燃料貯蔵タンクや自動車等の事故に伴う燃料漏洩によって形成される単層の液体燃料表面で生じる火炎の燃え広がり現象は、数多く研究されてきた。その結果、液体燃料の液温が引火点以上である場合 (Super-flash 状態と呼ばれる)、液体表面上に形成された燃料蒸気と空気の濃度勾配を有した予混合気層を、火炎が予混合火炎として伝播することで燃え広がりが生じることが知られている。

それとは異なり、液体燃料の液温が引火点より低い場合 (Sub-flash 状態と呼ばれる)、燃料蒸気を形成するのに必要な熱を火炎から可燃性液体へ輸送する伝熱機構が重要となる。それは気相での対流熱輸送 / 熱伝導や放射、液相での対流熱輸送 / 熱伝導である。特に液相内での熱輸送が、その可燃性液体の流動に大きく影響を受け、火炎の燃え広がり挙動に大きな影響を与える。そのため Sub-flash 状態では、火炎が周期的にジャンプ挙動を繰り返す振動燃え広がり (Pulsation flame spreading) が観察されることがよく知られている。報告者は Pulsation flame spreading の発生機構として 1 サイクルが 4 ステップから構成される図 1 のようなモデルを提案し、その発生機構の説明に成功している。

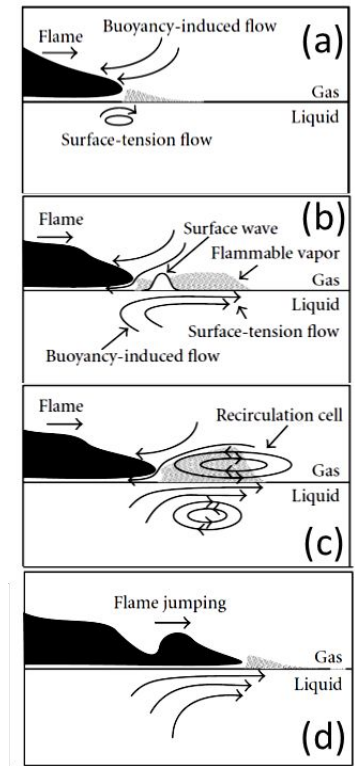


図 1 Sub-flash 状態での振動燃え広がりの生成機構

- (a) : 火炎が液面上をゆっくりと移動し、液相には温度勾配に起因した表面張力流、気相には火炎による浮力流が形成される。そして徐々に、液相内で渦が発達していく。
- (b) : 渦の発達に伴い、表面波が発生する。表面波により低温領域ができ、火炎は表面波より前方に伝播できない。
- (c) : 低温領域が温まり、可燃蒸気濃度が可燃限界に達する。
- (d) : 可燃蒸気に引火して、火炎は大きく前方に伝播する Jump 状態となる。そして Step 1 へと戻る。

以上のように、静止した単相の液体燃料上を燃え広がる火炎の機構は、その初期液温によって振る舞いが大きく異なる。

津波火災の場合、流れる海水上に液体燃料が浮遊して生じている。そのため図 1 で示した燃え広がりとは、その燃焼状況が大きく異なる。従って、津波火災における燃え広がり機構は、これまで静止した単相の液体燃料表面上を伝播する火炎を用いて検討してきた結果とは異なると言える。

特に、先に述べた Super-flash 状態では火炎の燃え広がりは液面上に生じた混合気層内で、どのような燃料蒸気の濃度分布が形成されているかが重要になる。そのため、その海水の流れによって気相内に形成される燃料蒸気層の厚みがどのように変化するか、Super-flash 状態での津波火災の燃え広がり機構への影響と考えられた。他方、Sub-flash 状態の振動燃え広がりでは、図 1 で説明したように、その火炎挙動は液相内の渦の生成に大きく影響を受ける。そのため可燃性液体が浮かぶ流体の流れが、その燃え広がり機構に及ぼす影響は極めて大きいことが予想された。

このような背景を基に、本研究は水の流れに浮かぶ液体燃料表面を燃え広がる火炎の火災特性及び燃え広がり機構について実験的に調査、解明することとした。

2. 研究の目的

本研究は、従来の液体燃料表面上の燃え広がり機構において、水流の影響が大きいと考えられる液体燃料の液温が引火点以下の Sub-flash 状態での現象について火災特性と燃え広がり機構を実験的に詳しく検討した。特に、その津波火災の燃え広がり機構の解明のために次のような幾つかの段階に分けて検討を行った。まず 1 つめの段階では、静止状態の水の上に浮かぶ液体燃料つまり液体 2 層上に形成される火炎の伝播について調査を行った。この 1 つめの段階では静止、単層の液体燃料表面上の火炎伝播についても実験を行い、それら 2 つを比較することで、水の層の存在による燃え広がり現象への影響について明らかにした。2 つめの段階では、液体燃料単層で液体燃料が流れている場合に、その表面上に形成される火炎の伝播現象について検討を行った。このとき、水流の向きと火炎が燃え広がる方向との関係性から、2 つの形態

の燃え広がりが存在する．1つは、水の流れる方向と同じ方向に燃料表面上を火炎が伝播する並行流燃え広がり(Concurrent flame spread) ,そして、もう一つは、水流の流れる方向と対向する形で燃料表面上を火炎が伝播する対向流燃え広がり(Opposed flame spread)である．このような伝播形態の違いについても、流動する燃料層の場合は検討を行った．そして、3つめの段階として、水の層を流して、その上に燃料の層を形成し、その液体燃料表面上を伝播する火炎について検討することが必要であった．しかし、流れる水上に一定厚みを有する液体燃料層を形成・浮遊させることが困難であったため、本研究では3つめの段階について検討は行っていない．

以上のような各実験から得られた、水に浮いた液体燃料上または流動する液体燃料上を伝播する火炎の基礎的な知見をまとめ、流れる液体燃料表面上を燃え広がる火炎の火炎特性と燃え広がり機構について明らかにすることを目的とした．

3. 研究の方法

図2に静止、2層(水の上に液体燃料が浮遊)における燃え広がり実験を行うときに用いた矩形の容器を示す．側壁は耐熱硝子でできており、液層内の密度変化を可視化記録できるようになっている．この容器に、注ぐ液体燃料の量を変えることにより、液体燃料厚さを変化させた．液体燃料には n-デカンを用いた．n-デカンの初期液温は 40 の範囲とした．これらの液温は n-デカンの引火点(53)よりも低い温度である．着火はニクロム線を加熱することで行った．また動画撮影を行いその結果から、燃え広がり速度を算出した．

他方、図3に単層そして流動する燃料上を燃え広がる場合に用いた実験装置の概略図を示す．燃料流は重力によって駆動され、その流量を燃料容器の出口に設置したニードルバルブで制御した．流れを安定させるためテストセクションの上流に整流部を設置した．燃料の流れを伴う火炎の伝播実験は次の手順で行った．初めに、静止状態の燃料に着火し火炎の伝播を確認した後、上流と下流のストップバルブを同時に解放しテストセクションに一定厚みを有する燃料の流れを形成した．着火装置にはコイル状に成形したニクロム線を用いた．また燃え広がり速度を測定する実験区間の長さは 150mm とした．燃料は実際の津波火災を起こしうるケロシンを使用し、流れる燃料の厚さは 5mm ,燃料の初期液温は 20 とした(この温度は、ケロシンの引火点より十分に低い値である)．

4. 研究成果

津波火災の基礎特性を明らかにするために、1つめの段階として静止、燃料と水の2層上での燃え広がり実験を行った．実験パラメータとしては、初期燃料厚さを 3-20mm の範囲で変化させた．そして実験動画から火炎伝播速度の測定を行った．そして火炎が伝播している時の液相中の流れの速度分布の測定を PIV 法を用いて行った．更に液相中の温度境界層の厚みをシャドウグラフィ法を用いて可視化して測定した．

その結果、図4のような図を得ることができた．図4は単層および2層(n-デカンと水)の初期燃料厚さと燃え広がり速度との関係を示している．図4から、2層での液体燃料上を伝播する火炎の燃え広がり速度が、単相で得られた燃え広がり速度に比べて、燃料厚みが 5-15 mm の範囲においてすべて減少することが明らかとなった．更に、可視化実験の結果、2層の燃え広がりの場合の方が、液中に形成される渦構造の中心が、単層に比べて液面からより深い位置に形成されることがわかった．そのために、単層に比べて2層の方が、渦運動によってより液相中の深い位置まで火炎からの熱が輸送され、液相中に形成されている温度境界層の厚みが増加していると考えられることがわかった．

また、2層の燃え広がりでは、水の層が燃え広がり方向と反対の方向に移動し、そして液相中の渦中心は単層に比べて深くなる、つまり液層内の深さ方向の熱輸送の特性長さが増加するこ

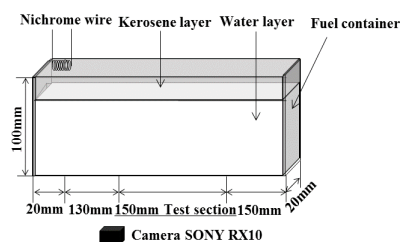


図2 静止、2層(浮遊する液体燃料と水)での燃え広がり実験装置

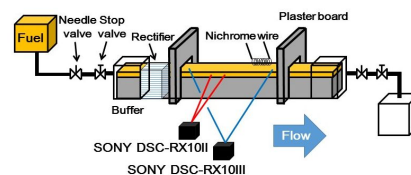


図3 流動、1層(流れる液体燃料)での燃え広がり実験装置

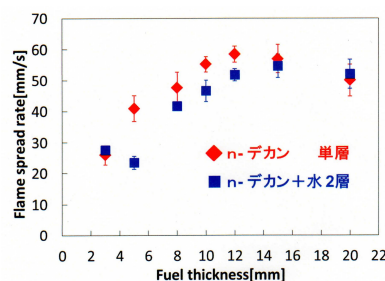


図4 n-デカン単層およびn-デカンと水の初期燃料厚さと燃え広がり速度との関係

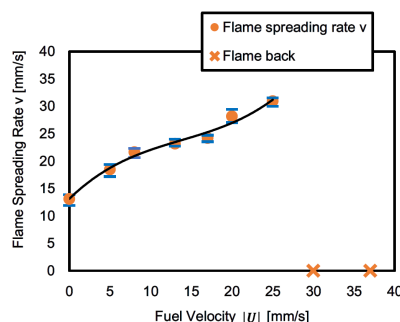


図5 流動するケロシン単層上を対向して燃え広がる火炎の燃え広がり速度と液体燃料の流動速度との関係

とが分かった。他方、2層での燃え拡がりでの火炎先端前方への熱輸送の特性長は減少した。これは火炎前方の燃料への熱輸送量が減少したことを意味していると考えられる。以上の各現象が燃え拡がりに作用して、2層での燃え拡がり速度の値が単層に比べて減少したと考えられる。

他方、流動する燃料上に形成された燃え拡がり現象の結果を図5に示す。特に図5は、火炎の燃え拡がり方向と対向して流動する液体燃料上を伝播する火炎の燃え拡がり現象について検討したものである。並行流に比べて対向流での燃え拡がり現象の方が、観察が容易であり、再現性も高いため、ここでは対向流燃え拡がりの結果を示す。液体燃料にはケロシンを用い、燃料厚さは5 mm、初期液温は20℃としsub-flash状態とした。燃料流の断面平均流速の値は0, 5, 8, 13, 20, 25, 30, 37 mm/sとした。実験結果として燃え拡がり速度は燃料の対向流速が増加するとともに増大した。この傾向を説明するために、斜め上方から撮影した映像から燃え拡がり火炎の先端位置に形成される火炎基部の挙動とその形状を調べた。また、火炎からの発光を利用したシャドウグラフ法により液層内の密度変化を可視化し、液体燃料流中の熱対流挙動の撮影も行った。また赤外線カメラを用いて斜め上方から流動する液体燃料表面の温度分布の撮影も行った。ただしサーモグラフィカメラで得られた熱画像の解析では、定量値では無く相対的な温度の高低について検討するという定性的な議論とした。以上のような火炎と液体燃料の観察結果から、流動する液層内で火炎からの熱流入によって生じるマランゴニ対流の長さ(火炎基部から上流側に伸びる熱対流領域の長さ)については、燃料流速の増加と共に減少することが確認できた。他方、燃え拡がり速度は液体燃料の対向する流速が増加するほど、火炎基部形状が変形し、燃料流速の増加と共に火炎基部の長さが増大することが分かった。この火炎基部の長さが増大することで、火炎先端から液体燃料への熱輸送量が大きくなり、それに伴い燃え拡がり速度が増大することがわかった。

このように、従来から知られている静止、単層の液体燃料上の燃え拡がりとは、2層そして流動の影響が含まれる津波火災は、その火炎特性および燃え拡がり機構が異なることが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2件)

Shingo Kuwana, Hidekazu Tamizu, Akihiko Ito, Hiroyuki Torikai, Flame Spread over Liquid Fuel on a Water Layer - Basic Research on Tsunami Fire, Open Journal of Safety Science and Technology, 査読有, Vol.7, 2017, 11 - 21,

DOI: <https://doi.org/10.4236/ojsst.2017.71002>

Koei Yoshida, Ryo Takahashi, Hiroyuki Torikai, Akihiko Ito, Effect of Gravity on Radiative Heat Feedback on Small-Scale Pool Fires Using the Radiative Absorption Model, Modern Applied Science, 査読有, Vol.10, No. 10, 2016, 150 - 159,

DOI: <https://doi.org/10.5539/mas.v10n10p150>

〔学会発表〕(計 10件)

田水秀和, 鳥飼宏之, 伊藤昭彦, 液体燃料の流れに対向して燃え拡がる火炎 - 津波火災の基礎研究, 第56回燃焼シンポジウム, 2018.

田水秀和, 鳥飼宏之, 伊藤昭彦, 流動するケロシン上の燃え拡がり - 津波火災の基礎研究, 第55回燃焼シンポジウム, 2017.

Hidekazu Tamizu, Shingo Kuwana, Hiroyuki Torikai, and Akihiko Ito, Flame Spread over Liquid Fuel Floating on a Water Layer -Basic Research on Tsunami Fire, 8th International Symposium on Scale Modeling, 2017.

Ryo Takahashi, Akihiko Ito, Hiroyuki Torikai, Effect of gravity on heat feedback of small-scale pool fires, 5th World Congress on Petrochemistry and Chemical Engineering, 2016.

中嶋 拓也, 鳥飼 宏之, 伊藤 昭彦, 低レイノルズ数噴流拡散火炎の火炎形状に及ぼす重力の影響, 熱工学コンファレンス, 2016.

桑名 伸吾, 田水 秀和, 鳥飼 宏之, 伊藤 昭彦, 水面に浮遊したケロシンの燃え拡がり, 熱工学コンファレンス, 2016.

桑名伸吾, 佐々木航一郎, 伊藤昭彦, 鳥飼宏之, 水面に浮遊した液体燃料の燃え拡がり, 平成27年度日本火災学会研究発表会, 2015.

桑名伸吾, 佐々木航一郎, 伊藤昭彦, 鳥飼宏之, 水面上に浮遊した液体燃料の燃え拡がり, 第53回燃焼シンポジウム, 2015.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

なし

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：鳥飼宏之

ローマ字氏名：(TORIKAI, Hiroyuki)

所属研究機関名：弘前大学

部局名：大学院理工学研究科

職名：准教授

研究者番号（8桁）: 50431432

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。