

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：31103

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04925

研究課題名（和文）重力環境の違いに着目した消火設備・消火戦術の高度化に関する研究

研究課題名（英文）Research on the sophistication of fire extinguishing equipment and fire extinguishing tactics focusing on the difference in gravitational environment

研究代表者

工藤 祐嗣 (KUDO, Yuji)

八戸工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：80333714

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 500,000円

研究成果の概要（和文）：密閉度が高く換気条件が悪い低酸素濃度条件下で区画火災が生じた場合、区画内をランダムに動き回るゴースティング火災が発生することがある。一方、火災への空気流入速度が制限される低重力環境下では、可燃限界酸素濃度が低下することが報告されている。両者を比較するための実験を行い、ゴースティング火災発生直前には可燃性混合気層の形成が確認され、下層の温度上昇と上層の温度低下が確認された。可燃性混合気層においては浮力の影響が小さくなることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

密閉度が高く換気条件が悪い低酸素濃度条件下で区画火災が生じた場合、区画内をランダムに動き回るゴースティング火災が発生することがある。この可燃濃度範囲の低下により、ガス系消火設備が十分働かない可能性がある。本研究では、可燃性混合気層の形成により、ゴースティング火災が低酸素濃度条件下で換気が供給されていれば発生することを明らかにし、低重力環境での燃え拡がりにおける低酸素側への燃焼範囲の拡大との類似性を明らかにすることで、効果的なガス系消火設備の設計や消防隊が安全に火災区画内に内部侵入するための指針策定に関わる基礎データを得ることができた。

研究成果の概要（英文）：If a compartment fire occurs under low oxygen concentration conditions with high airtightness and poor ventilation conditions, a ghosting flame that randomly moves around in the compartment may occur. On the other hand, it has been reported that the flammable limit oxygen concentration decreases in a low gravity environment where the inflow rate of air into the flame is limited. An experiment was conducted to compare the two, and the formation of a flammable air-fuel mixture layer was confirmed immediately before the occurrence of the ghosting flame, and the temperature rise of the lower layer and the temperature decrease of the upper layer were confirmed. It was found that the effect of buoyancy is small in the flammable air-fuel mixture layer.

研究分野：火災安全工学

キーワード：ゴースティング火災 区画火災 ガス系消火設備 消防戦術 微小重力環境火災

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

火災による被害をできるだけ小さくするために、もっとも大切なのは火災の拡大を阻止することである。この観点から火災拡大の基礎研究である燃え広がりに関する研究は多い。燃え広がりには初期の火災拡大を問題にすることが多く、その実験条件の多くは常温・常圧下で行われている。火災が進展すると、火災室の温度は上昇する。火災室内の温度が上昇することで、火災と周囲の温度差は小さくなり、火災に作用する浮力の効果は小さくなる。この条件下では、ゴースティング火災のような特異な火災現象が発生するが、そのメカニズムは明らかになっていない。一方、微小重力環境下における燃え広がりにおいて、通常重力では消炎してしまう酸素濃度でも火災が維持される可能性があることが数値計算により指摘され、実験でも確かめられている。

本研究では、閉鎖空間における火災現象と浮力の効果の小さい低重力環境における燃え広がりには一定の関係性があるものと考え、低酸素濃度・低重力・低速条件下での燃え広がり実験を行う。また、小型区画を用いた火災実験を行い、ゴースティング火災発生条件を明らかにする。両者を比較し、火災からの熱フィードバックから切り離された条件下での火災維持メカニズムを研究期間内で明らかにする。

2. 研究の目的

本研究の目的は、火災拡大の基礎現象である燃え広がりの解明である。燃え広がりの研究は過去から多く行われているが、多くは室温条件で行われている。実際の火災室では、煙層からの加熱や火災室自体の室温上昇により、周囲との温度差は小さくなり、浮力の効果が小さくなる。本研究では、浮力が燃え広がりに与える影響に着目する。浮力の作用する方向が燃え広がりに与える影響が大きいのは既知だが、浮力自体の大きさが変化することによる燃え広がりの変化については、熱的影響と混同され、明確になっていない。燃え広がりに与える浮力の効果を解明することで、火災室内での可燃物の燃え広がりの解明や、ガス系消火における確実な消火ガス量の算定など、消火メカニズムの高度化に寄与できるものとする。

3. 研究の方法

本研究では、閉鎖空間における火災現象と浮力の効果の小さい低重力環境における燃え広がりには一定の関係性があるものと考え、低酸素濃度・低重力・低速条件下での燃え広がり実験を行う。また、小型区画を用いた火災実験を行い、ゴースティング火災発生条件を明らかにする。両者を比較し、火災からの熱フィードバックから切り離された条件下での火災維持メカニズムを研究期間内で明らかにする。

【落下塔による低重力環境下での燃え広がり実験】

- ・ まず、落下実験装置による低重力環境での燃え広がり実験を実施する。
- ・ 酸素濃度を变化させた低速気流を流した風洞内で燃え広がり実験を行い、燃え広がり酸素濃度下限 (LOL) を測定する。
- ・ 短時間の低重力環境で実験を実施するため、試料への着火を低重力環境で行うことはできない。通常重力環境で着火を行うことになるが、風洞内で着火する場合には、通常重力環境の LOL が低重力環境に比べ高く、着火が困難である。
- ・ そこで、風洞の外で着火後、落下開始と同時に試料を風洞内へと挿入し、測定を行うこととする。試料の挿入タイミングは落下開始のタイミングにより自動で行う。これにより、LOL

近傍の不安定な燃え広がり状態からの実験を避け、再現性を高めることが期待される。

- ・ このような短時間低重力実験では、試料の熱慣性による、通常重力環境からの移行に時間がかかり、LOL が正確に測れないとの指摘がされている。本研究では熱的に薄い試料を用いることで、予熱時間の短縮化を図っているが、実験装置に赤外線カメラによる試料表面温度測定装置を組み込み、予熱長さを測定することで、重力環境の変化に現象が追従できていることを確認する。

【小型区画によるゴースティング火災発生条件探索実験】

- ・ 60cm 角程度の小形の火災実験用区画を作成し、アルコール燃料を火源とした区画火災実験を実施する。
- ・ 区画内の温度、酸素濃度を測定し、区画内の浮力の効果をグラスホフ数で評価するとともに、区画火災における LOL の測定を行う。
- ・ 小型区画における酸素濃度の測定は、従来、ガスサンプリングによる測定が必要であり、サンプルガスを測定器に引き込むことによる換気量の変化が火災性状に与える影響が顕著であった。この影響は区画サイズが小さい場合は特に大きい。申請者は、自動車エンジン用酸素濃度センサを利用することにより、区画内のガスをサンプリングすることなく現象が発生している場所での酸素濃度の「その場」測定が可能な方法を開発した⁵⁾。これを応用することで、小型区画における火災実験でも、換気量に影響を与えることなく酸素濃度の測定が可能であり、LOL を精度よく測定することができる。

4. 研究成果

【落下塔による低重力環境下での燃え広がり実験 - 熱慣性の影響の検証 - 】

これまでの研究ではある一定幅の試料を用いて実験が行われる場合が多く、低重力環境での燃え広がりにおけるスケール効果、すなわち試料幅が与える影響については十分検討されていない。また、通常重力条件下ではこれまで多くの燃え広がり実験が行われてきたが、通常重力条件下では火災の浮力流れに起因する induced flow が存在するため、実際の火災への流入速度は 20cm/s 程度以下を下回ることはなく、それ以下の火災への気体流入速度における消災限界は明らかとなっていない。これまで著者らは空気雰囲気下で試料幅を変えた燃え広がり実験を行い、試料幅が変わることで燃え広がり火災に部分消災が生じることを明らかにしてきた¹⁾。しかし、特に周囲流速が 5cm/s 以下の領域については、伊藤らによる MGLAB 落下塔で行われた実験データ²⁾があるが、低重力環境下かつ低速気流中の詳細な実験データは存在しない。そこで当研究室では、短時間の落下実験装置を用いて低重力環境を作り、低速気流中で燃え広がり実験を行ってきた。しかし、落下実験装置では低重力環境の持続時間が短く、熱慣性が現象に影響を与えているとの指摘がある。そこで時間応答性が良く、小型の実験装置に使用可能な試料表面温度測定装置を開発し、予熱長さの時間変化を測定することで、燃え広がりにとって重要な予熱長さ変化の時間追従性について調査することにした。

燃え広がり試料表面温度の測定としては、直径 25 μ m 程度の極細熱電対を用いた直接測定法が多く用いられている。しかし極細熱電対の扱いは容易ではなく、測定点数も限られるため火災先端の空間移動を時間変化に変換するが、これは定常状態であることが前提であり、本研究で注目している時間応答性の検討には適当ではない。本研究では温度分布の測定に高い空間分解能に加えて早い時間応答性も必要となることから、赤外線カメラによる非接触温度測定が適当であると考えられるが、通常の赤外線カメラは大型かつ高価であり、落下実験による破損の可能性

や小型実験装置への組み込みを考慮すると実現は困難であった。しかし、最近小型かつ安価な赤外線カメラモジュール (FLIR 社製 Lepton)³⁾ が発売されたことで、上記の問題点をクリアできると考え、本研究ではこれを採用する。

測定対象とする燃え拡がり実験として、下方燃え拡がりから上方燃え拡がりへ変化させた瞬間の追従性を確認する。縦 55mm×横 55mm、長さ 240mm のアクリル製風洞を上方および下方に 45° の角度で傾けることのできる架台に組み込んだ。赤外線カメラモジュールは風洞天井部に 3D プリントにより作成したマウントプレートを介して設置した。このプレートには赤外線通過窓と拡大レンズを兼ねる目的で、シリコン平凸レンズ (株)アイ・アール・システム扱い) を組み込んでいる。実験は試料の一端に着火し、燃え拡がり火炎が試料表面温度測定装置の視野に達したところで下方燃え拡がりから上方燃え拡がりに切り替え。この時の予熱長さの時間変化を測定することとした。試料はセロハン紙 (厚さ 0.021mm) およびろ紙 (厚さ 0.25mm) とし、試料幅は 20mm とした。風洞内を静止気流とすると風洞内の酸素濃度が低下し燃え拡がりが不安定となるため、比較的低速の対向気流を発生させることとした。ここで対向気流速度は 11cm/s、酸素濃度は 21vol.% である。

予熱領域長さの測定結果を図 1 に示す。画像内に測定温度範囲が明示されていないが、赤外線カメラの視野に火炎先端が入るまではカメラモジュールが自動で測定レンジを変えていくため、測定温度範囲が変化し、比較可能な測定データとなっていない。これは図 1 の測定前半の測定データが不安定な部分に相当する。火炎先端が視野に入ると、最高温度が +140℃、最低温度が常温に固定されるため、温度測定範囲が変化しない条件での予熱領域長さの測定が可能となる。図 3 前半の下方 45° 燃え拡がりにおいて、予熱領域長さは両者とも約 1.2mm 程度であり、Parker らによる熱的に薄いセルロース系材料のカード表面上の下方燃え拡がりにおける予熱領域長さ (約 1.5mm)⁶⁾ と大差ないデータが得られている。試料に薄いセルロースを用いた場合、燃え拡がり方向の変化に伴って明確な予熱領域長さの変化が見られ、約 0.3 秒程度で気相の変化に追従していることがわかる。一方、ろ紙の場合、約 1 秒程度掛けて徐々に変化し、熱慣性の影響がセロハン紙に比べ大きいことがわかる。以上の結果より、試料に薄いセロハン紙を用いれば、熱慣性の影響は 0.3 秒程度に限定され、短時間落下実験において落下後半であれば、熱慣性の影響をある程度排除できているといえる。

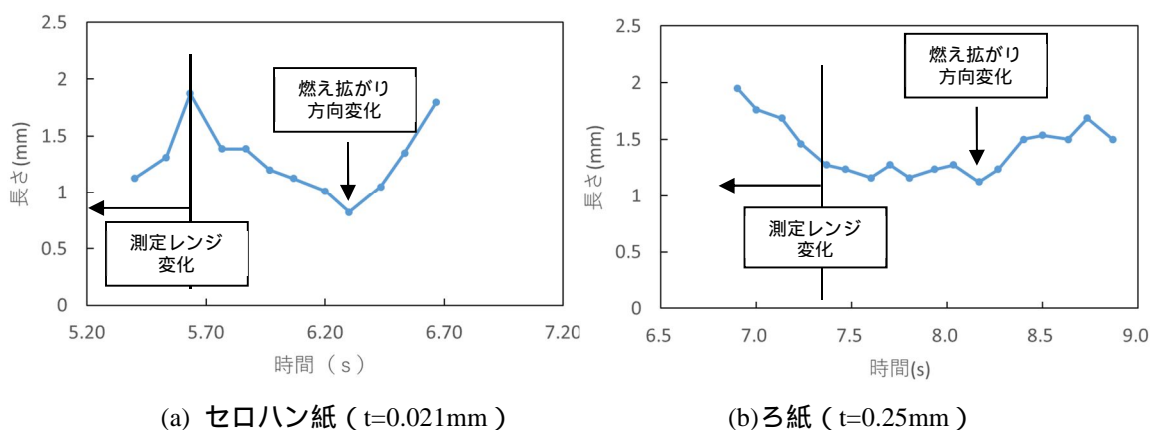


図 1 予熱領域長さの時間変化

【小型区画によるゴースティング火炎発生条件探索実験】

密閉度が高く換気条件が悪い、低酸素濃度条件下で区画火炎が生じた場合、区画内をランダムに動き回るゴースティング火炎が発生することがある。一方、火炎への空気流入速度が制限される低重力環境下では、可燃限界酸素濃度が低下することが報告されている。低重力環境下で見ら

れる低酸素濃度条件での燃焼現象との類似点を明らかにするため、R2年度は小型区画を作成し、ゴースティング火炎の発生条件を明らかにする区画火災実験を行った。

実験装置として、耐火断熱材(イソライト社製イソウール)を加工し低換気条件の小型区画を製作した。寸法は内法が300mm×220mm×220mm、前壁面は開口部を設け、取り外し可能な扉とする。区画の外側には密閉度を上げるためにアルミ板を貼った。温度測定のため、区画中央部の底面から高さ方向50mmずつ熱電対を設置し、計6カ所を測定した。区画横壁面に酸素濃度センサを取り付け、時間変化による酸素濃度変化をリアルタイム測定する。実験用燃料としてはエタノールを用い、区画中央部に火皿を設置し、火皿への燃料供給量を電子天秤にて測定した。

開口部高さを変化させ複数の実験を実施したところ、開口部高さ80mmの時、図2に示すゴースティング火炎が現れた。区画内温度分布および酸素濃度を図3に示す。開口部から火炎が噴出する噴出火炎に移行する直前の実験開始後105秒から115秒付近で、全ての熱電対による温度が顕著に低下している。また酸素濃度も低下し続けている最中である。この間にゴースティング火炎が発生していた。ゴースティング火炎は、本実験では床面から100mmの位置の温度501℃、酸素濃度3.51%で発生した。ゴースティング火炎発生直前には区画上部の温度低下が見られ、この際に燃料容器内の燃料は沸騰していることが観察された。



図2 ゴースティング火炎写真

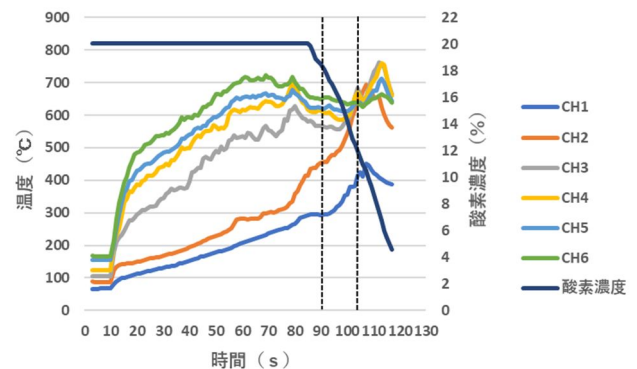


図3 区画内温度分布

燃料の気化が急激に進むことにより、区画内の既燃焼ガスの混合が進み、区画内温度分布の変化をもたらすが、温度が高い既燃焼ガスより重い燃料蒸気は同様に重い開口部から流入した新鮮空気と区画内で可燃性混合気層を形成することが考えられる。これにより区画下層の酸素濃度は低下、温度は上昇するが、温度差が小さくなることで浮力流れの速度も低下する。浮力流れの速度が燃焼反応の化学反応速度と同等程度に低下すると低酸素濃度環境でも火炎を維持することが可能となるが、これは微小重力・低重力環境における燃え広がり火炎の火炎維持メカニズムと類似性を持つものである。

参考文献

- 1)遠藤ら，第48回燃焼シンポジウム講演論文集，p.534 (2010).
- 2)鳥飼ら，第47回燃焼シンポジウム講演論文集，p.512 (2009).
- 3)<https://www.flir.com/globalassets/imported-assets/document/flir-lepton-engineering-datasheet.pdf>
- 4)<https://github.com/groupgets/LeptonModule>
- 5)<https://gato.intaa.net/archives/8459>
- 6)Parker, W.J., J. Fire and Flammability, 3, p.254-269, (1972).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 工藤祐嗣
2. 発表標題 固体表面上の燃え拡がりにおける予熱長さ測定法の開発
3. 学会等名 2020年度日本火災学会研究発表会（弘前）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------