

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：11101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22310098

研究課題名(和文)凝縮相上の燃え拡がりと消炎に及ぼす重力作用の解明と宇宙環境での最適消火法の提案

研究課題名(英文)Clarification of Effect of Gravity on Flame Spreading over Condensed Phase and Its Extinction and Proposing of Extinguishing Method in Space

研究代表者

伊藤 昭彦 (ITO, Akihiko)

弘前大学・理工学研究科・教授

研究者番号：30127972

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,200,000円、(間接経費) 3,660,000円

研究成果の概要(和文)：低重力環境を形成できる落下塔を用いて、熱的に薄い可燃性固体試料上を伝播する火炎そして液体燃料プール上に形成した火炎などの凝縮相上の燃焼現象に対する重力作用の影響について実験的に検討した。その結果、プール火炎に関しては、重力の変化に対する火炎高さの変化が1G近傍の低重力条件でピーク値をとることを明らかにした。また通常重力から低重力へと変化することで、プール火炎の基部に火炎面に垂直方向から流入する空気流速は劇的に減少することを解明した。更に、定常火炎からパuffing現象を伴った火炎へと変化が生じ始める限界を予測することができる臨界グラスホフ数を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：To improve our understanding of the effects of gravity on flame characteristics, we conducted an experimental investigation on small-scale pool fires under different gravity levels to normal. The drop tower facility at Hirosaki University in Japan was used to obtain an arbitrary low gravity environment. For pool fire in low gravity environments, the measurements revealed that the puffing frequency and flame height declined with decreasing gravity. The flame height showed a tendency to peak at a certain level of gravity. Moreover, the normal velocity component to the flame sheet declined with decreasing gravity. To clarify the factor of puffing occurrence factor, experiments were performed using eleven different sizes of fuel pan and three different kinds of fuels. The occurrence of the puffing phenomenon, namely the puffing-limit, was summarized by the relation between the (H/D) limit and Grashof number, and found to be inversely proportional.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・社会システム工学・安全システム

キーワード：低重力環境 落下塔実験 凝縮相 プール火炎 パuffing現象 グラスホフ数 火炎高さ

1. 研究開始当初の背景

将来、人が経験する重力レベルは宇宙空間の微小重力環境だけでなく、月、火星などの低重力環境へと多様化すると考えられる。そして宇宙での長期滞在が可能となると火災発生の危険性が増大する。もし宇宙火災が起き人命が失われた場合、宇宙開発計画の大きな停滞は避けられない。そのため宇宙利用の促進と同時に、地上とは異なる重力環境での火災に対する安全性を確保するための科学・技術が重要となる。これまで微小重力環境での可燃物上の燃え広がり現象については詳しく検討されてきた。しかし、これから開発が期待されている月面や火星といった低重力環境での凝縮相上の燃焼現象に関する研究はほとんど行われていない。

2. 研究の目的

そこで本研究は、更なる宇宙開発の促進に向けて月、火星などの低重力環境での火災安全性の確立を目的に、低重力場における凝縮相上の燃焼現象について、研究代表者らが開発した低重力環境形成用の落下塔を用いて調査する。特に、可燃性固体表面上の燃え広がり、プール火災について重力作用の影響について調べる。また、宇宙空間では人が生活できる場所は常に閉鎖された環境で有り、そのような場所での消火法は、地球上で有効と評価された方法をそのまま適応することは難しい。そこで地上とは異なる重力場で、また閉鎖環境下で使用可能な消火法についても検討した。

3. 研究の方法

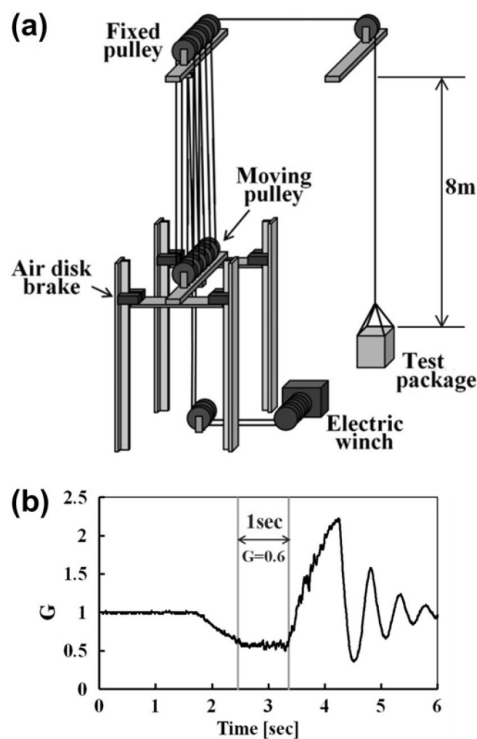


図1 低重力落下塔

はじめに、低重力落下塔について説明する。落下塔の概略図を図1(a)に示す。この落下塔装置では落下ラックにワイヤーをつけており、このワイヤーの先にラックの落下速度を調節するためのカウンターバランスが取り付けられている。このカウンターバランスの重量または落下ラックの重量を増減させ、ラックの落下加速度を調整し、落下時のラック内の重力レベルを調節・設定できる。図1(b)は低重力実験用落下塔で得られた落下時間と落下ラック内の重力加速度との関係を示す。図1(b)の結果から、重力レベルが0.6Gの低重力条件では約1秒間の実験時間が得られることがわかる。この実験時間は、低重力値がより小さくなると、より減少することになる。落下ラックには、小型のプール火災、や可燃性固体表面上の火災伝播を検討できる風洞などを取り付けることができる。

4. 研究成果

ここでは、特に顕著な成果が得られた液体燃料プール上に形成される火炎への重力作用の影響について述べる。図2にプール火炎の形成装置の概略を述べる。図2のように液体燃料を満たす火皿の周囲は水冷とした。また3つの異なる直径(10, 20そして30 mm)の火皿を用いた。液体燃料にはアセトン、 n -ヘプタンそしてケロシンを用いた。また、火皿周囲からタルク粒子を気流に添加し、50mWのシートレーザにより流れを可視化した。更に、この粒子軌跡を撮影することで、Particle tracking 法として流速の測定も行った。

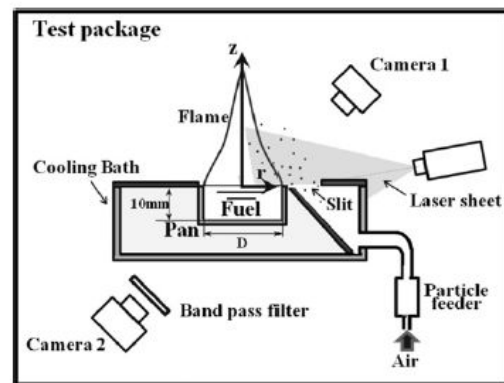


図2 プール火炎の形成装置

(1) パuffing周期への重力の影響

プール火炎は火炎規模が大きくなると、浮力によって誘起される流れにより火炎が上下に伸び縮みするパuffing現象が観察される。図3に直径30mmの火皿で形成されたプール火炎のパuffing周波数と重力値の関係を示す。図3から重力の現象に対して、パuffing周波数も単調に減少することがわかる。ただし、燃料種によってその減少率が異なる。ここで、従来の研究でパuffing周期の検討に用いられてきた2つの無

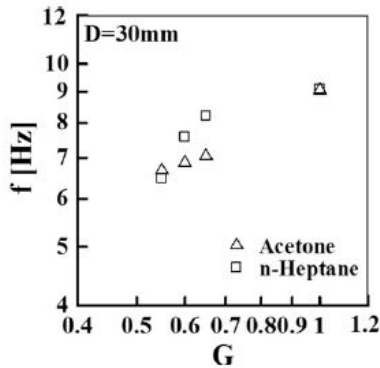


図3 パフティング周波数への重力作用

次元数を導入して図3を整理する．1つ慣性力と重力との比であるフルード数 Fr であり，もう一つは無次元の振動周波数をストロハル数 St である．その整理した結果を図4に示す．図4から全てのプロットが1つの直線上に整理できており，低重力環境のパフティング現象においても従来の研究と同様に Froude 数が支配パラメータであることがわかった．ただし，Froude 数ではパフティング現象が開始する臨界の重力値に関する情報は得られない．

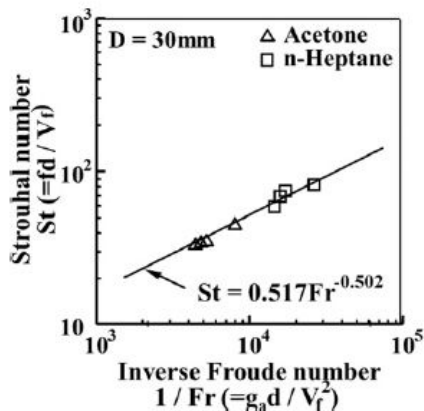


図4 パフティング周波数の Froude 数による整理

(2) プール火炎高さへの重力の影響

図5にプール火炎の高さと重力値との関係を示す．ただし，火炎高さは通常重力 $1 G$ での火炎高さで無次元化している．図5から $1 G$ よりも大きな過重力環境から重力を下げると，それに伴って火炎高さが減少することがわかる．他方， $1 G$ よりも重力値が減少すると，今度は重力が低下するほど火炎高さが低下する傾向を示す．このことは $1 G$ もしくは $1 G$ 付近の低重力領域に，自然対流の影響を受けて形成される火炎高さが最大となる条件が存在する可能性を示している．また，低重力範囲での重力減少に伴う火炎高さの減少傾向が重力値の $1/4$ 乗に比例していることがわかった．

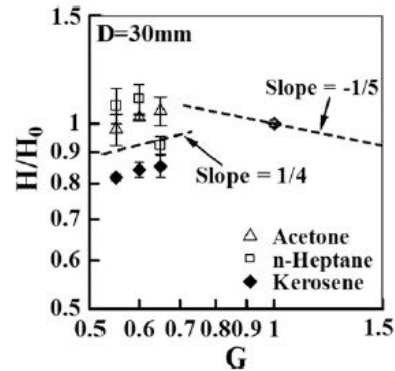
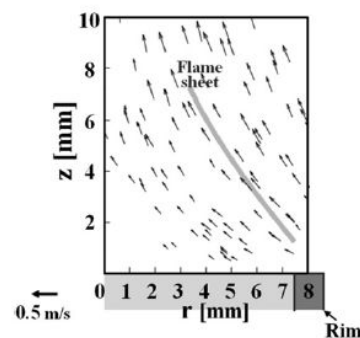


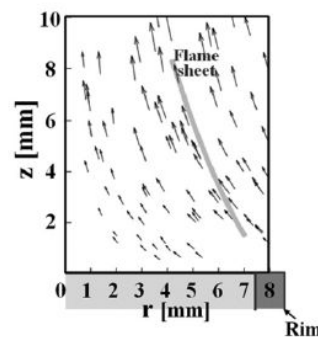
図5 火炎高さへの重力の影響

(3) 低重力における火炎基部付近の速度場の測定

火炎によって形成された自然対流の流れに微小な固体粒子を添加することで，直径 15mm の火皿の上に形成された火炎の基部付近の速度場を，図6のような速度ベクトルマップとして $1 G$ 環境 (図6(a)) だけでなく低重力環境 (図6(b)) でも得ることができた．この速度場の解析から，低重力場では燃料液面から高さ方向に離れるほど， $1 G$ に比べて流速が低下することが明らかとなった．更に，火炎面付近に存在する速度ベクトルを，火炎面に平行な方向と垂直な方向に分解して，その速度成分ごとの大きさを重力値で比較した場合，火炎面に垂直に流入する空気流の大きさが低重力となることで劇的に減少することがわかった．この流れの特性の理解は，先の火炎高さの重力への依存性などを解明するのに役に立つ．



(a)



(b)

図6 火炎基部周囲の流れへの重力の影響

(4)パuffing現象が生じる限界条件

重力値，火皿直径，液体燃料を変化させることで，プール火炎が定常火炎からパuffing火炎へと遷移する限界条件についても調べた．図7は各プール火炎でパuffing現象が開始する限界の火皿直径を示している．図7からパuffing現象が開始する限界パン直径は重力値が増加すると，それに反比例して減少することがわかる．

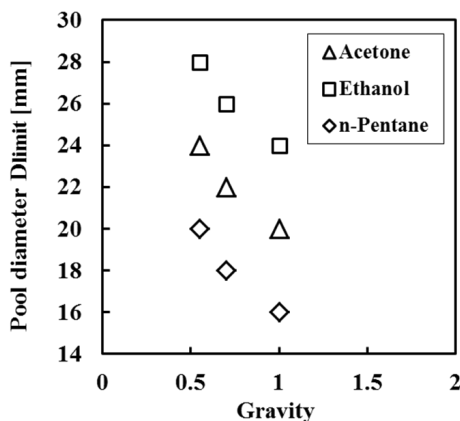


図7 定常火炎からパuffing火炎となる限界のパン直径

これら実験結果を基に，定常火炎が維持できなくなる限界のパン直径に，通常重力値で得られる定常火炎の火炎高さと同重力条件下で得られる火炎高さの比をかけた値を代表寸法とした，火炎のパuffing状態と定常状態とを判別する臨界グラスホフ数を，新しく定義した．その臨界グラスホフ数を横軸と取り，縦軸は限界条件で得られる火炎高さとパン直径との比として表したものを図8に示す．図8から全ての限界条件が1つの曲線に統合的に整理されていることがわかる．この結果から，定常火炎からパuffing火炎への遷移は，火炎に生じる浮力の大きさが火炎に作用する粘性力に比してある一定の大きさで上回ったときに開始することがわかった．

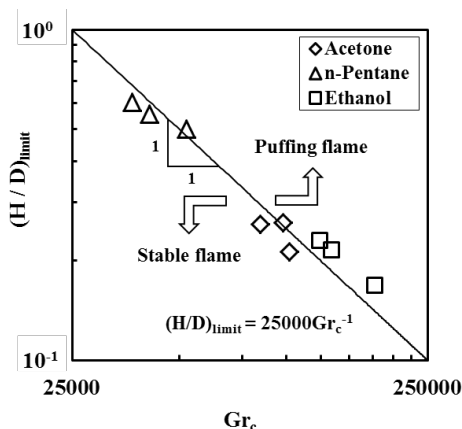


図8 パuffing現象が開始する臨界グ

ラスホフ数

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 3件)

Naohiro Yoshihara, Akihiko Ito, Hiroyuki Torikai, Flame characteristics of small-scale pool fires under low gravity environments, Proceedings of the Combustion Institute, 査読有り, Vol.34, 2013, pp.2599-2606.

DOI: 10.1016/j.proci.2012.06.088

Shuhei Abe, Akihiko Ito, Hiroyuki Torikai, Flame spread along a thin combustible solid with randomly distributed square pores of two different sizes, Modern Applied Science, 査読有り, Vol.6, 2012, pp.11-19.

DOI: 10.5539/mas.v6n9p11

〔学会発表〕(計 3 4件)

Hiroki Abe, Akihiko Ito, Hiroyuki Torikai, Effect of Gravity on Puffing Phenomenon of Liquid Pool Fires, 35th International Symposium on Combustion, 2014.8.7, San Francisco, USA.

Yuji Nakamura, Kaoru Wakatsuki, Hiroyuki Torikai, Akihiko Ito, Scale Modeling of Buoyancy-Induced Instability of Pool Fires, The 8th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, 2013.11.4, Sendai, Japan.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

6．研究組織

(1)研究代表者

伊藤 昭彦 (ITO Akihiko)

弘前大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：30127972

(2)研究分担者

鳥飼 宏之 (TORIKAI Hiroyuki)

弘前大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：50431432

(3)連携研究者

()

研究者番号：