

研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19710141
 研究課題名(和文) 微小重力環境を模擬した高温低酸素環境における浮き上がりプール火災に関する研究
 研究課題名(英文) Study of lifting pool flame in high-temperature low-oxygen concentration flow to simulate microgravity condition
 研究代表者
 工藤 祐嗣 (Yuji KUDO)
 八戸工業大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：80333714

研究成果の概要(和文)：

高温低酸素条件により微小重力環境の火災現象を模擬する技術を確認する目的で、高温低酸素気流中でのプール火災実験を行った。燃料にはPMMA丸棒を用い、溶融したPMMAがプール火炎を形成するようにした。このプール火炎の周囲を同軸状に高温低酸素気流が流れる。酸素濃度と気流速度を変化させながら限界酸素濃度と同軸流速の関係をマッピングしたところ、T'ienらが数値計算により求めた微小重力環境下におけるU字型の燃焼限界に近い燃焼限界マップが得られた。また、対照データとして実験室内に6m級の落下実験装置を作成し、低重力環境下の燃え広がり火炎の観察実験を行った。さらに、NISTの開発したFDS(Fire Dynamics Simulator) ver.5を用いた数値計算を行い、実験と同様の現象が数値計算でも見られることを確認した。

研究成果の概要(英文)：

In order to establish the way of simulate the fire behavior of high temperature and low oxygen microgravity conditions, the pool fire experiments were conducted in a stream of high temperature and low oxygen. The PMMA rods were melted to form a pool fire. High temperature low oxygen concentration gas flows coaxially around the pool fire. We have mapped the relationship between the critical oxygen concentration and coaxial flow with varying oxygen concentrations and air velocity. The flammability limit was formed U-shaped map. The data in the laboratory as an experimental control to create 6m fall class, observation of the flame spread experiments were conducted under low-gravity environment on fire. In addition, NIST developed the FDS (Fire Dynamics Simulator) ver.5 numerical calculations performed, and confirmed to be seen in numerical experiments with similar symptoms.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	700,000	0	700,000
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	750,000	3,950,000

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：①宇宙インフラ，②火災，③微小重力，④浮き上がり火炎

1. 研究開始当初の背景

民間による宇宙旅行が提案され、宇宙環境における火災安全性は今後重要となることが予想されるが、微小重力・低重力火災安全性評価法は確立されていない。一般的には重力による浮力流れの影響が小さくなり、火炎への酸素供給が拡散支配となるため酸素供給が抑えられ、火災規模は制限され火災リスクも低下するものと考えられている。しかし T'ien らによる薄い紙の着火限界に関する数値計算結果では、低酸素濃度・低流速側に別の着火領域が現れることが指摘されている。この計算結果は微小重力環境では通常重力とは現象が異なるために、火災リスクが拡大する可能性を示唆している。よって微小重力環境での燃焼実験による火災安全性の評価が必要であるが、微小重力環境での燃焼実験は高コストで多大な労力が必要であり、ISS 日本実験棟「きぼう」への燃焼実験モジュール搭載が見送られるなど現実的ではない。そこで本研究では、通常重力場で微小重力場での燃焼を模擬できる低酸素・高温気流中での燃焼実験を行う。低酸素・高温気流中での微小重力環境の模擬は申請者らが独自に開発したオリジナルな方法であり、既に熱的に薄い紙の燃え広がりについて、高温・低酸素気流中では微小重力環境に非常に近い火炎形状となることが確かめられている。しかし、燃え広がり火炎では火炎が移動するため、詳細な火炎温度分布、可視化による周囲空気流れ場の測定は難しい。そこで火炎を静止させた同軸流中の浮き上がりプール火炎に対しこれを適用する。プール火炎を同軸流中で浮き上がり火炎とするのは他に例がなく、申請者らのオリジナルである。浮き上がりプール火炎は火炎エッジ部が燃料容器より浮き上がるために燃料容器リム部への火炎の熱損失がなく、火炎も安定しているため、詳細な火炎温度、流れ場の測定に適している。

2. 研究の目的

高温・低酸素同軸気流中浮き上がりプール火炎基部の詳細な測定により、T'ien らの示した微小重力における低酸素濃度側の消炎限界を通常重力場で実験的に再現するとともに、その原因を明らかとするのが本研究の目的である。

3. 研究の方法

(1) 高温・低酸素同軸気流中浮き上がりプール火炎実験

実験装置の概略図を図1に示す。本研究では、高温同軸気流発生装置先端に PMMA 円

柱を設置し、高温減酸素同軸気流中で燃焼させ、火炎の変化をビデオカメラにて記録した。また、同軸流の酸素濃度を酸素濃度計（島津 POT-101）にて測定し、酸素濃度および同軸流の平均流速が火炎に与える影響について調べた。

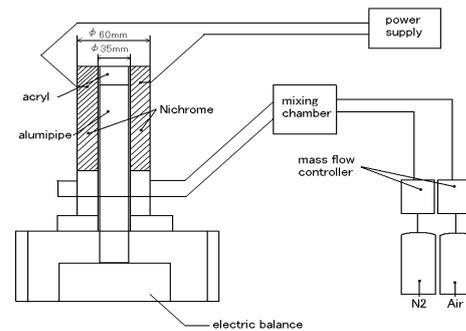


図1 実験装置概要図

(2) 落下実験による対照データの取得

図2に実験装置の概要を示す。テスト部とカメラ、加速度センサを乗せた実験ラックを高さ6mのH鋼に沿わせ落下させる。着地時の衝撃に備え、ラックの落下する床面にはクッション材を配置するとともに、ラック自体も厚さ4mmのL字断面アングルで作成した。また、外気流の影響をなくするため、ラック全体は軽量の段ボール構造のプラスチック板で覆った。落下加速度信号および実験映像信号はそれぞれ無線（Bluetooth および無線LAN）により送信し、地上のPCへと送った。試料にはろ紙（アドバンテック No.141, 厚さ250 μ m）を用いた。寸法は幅10mm、長さ100mmである。ろ紙の設置角度を0度、45度、90度の3つにし、45度は上方燃え広がりとは下方燃え広がりをそれぞれ測定した。周囲条件は酸素濃度21vol.%, 大気圧, 自然対流下での燃え広がりである。着火にはニクロム線を使用し、試料に一端に着火し、火炎先端がカメラ視野内に到達したところで落下させた。

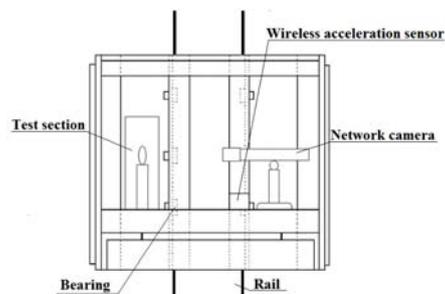


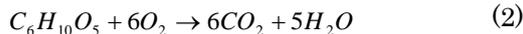
図2 落下実験装置概要図

(3) FDSによる数値計算

NISTで開発されたFire Dynamics Simulator ver. 5を用いて数値計算を行った。長さ70mm、高さ50mmの二次元計算領域を設定し、境界条件はOpen、格子間隔は0.5mmとした。ただし、試料厚さが格子間隔に比べ薄いため、試料のごく近傍のみ格子の高さ方向寸法を0.25mmとした。高さ20mmの位置に試料として厚さ0.25mmのセルロース固体を置き、裏面は露出とした。熱分解および燃焼は、錦ら³⁾を参考に、以下のモデルを用いた。セルロース固体は(1)式で得られる反応速度で分解し、熱分解ガスを放出する。

$$\omega_s = A_s \exp\left(-\frac{E_s}{RT_s}\right) \quad (1)$$

ここで、セルロース密度 $\rho = 560 \text{ kg/m}^3$ 、蒸発熱 $L_v = 753 \text{ kJ/kg}$ 、分解反応の頻度因子 $A_s = 1.0 \times 10^{10}$ 、活性化エネルギー $E_s = 104 \text{ kJ/mol}$ とした⁴⁾。残ったcharは表面燃焼によって再度分解してCOとなり、燃焼して最終的にはCO₂となる。また、固体セルロースの含水率は5%とし、含まれる水分の蒸発も考慮した。熱分解によって発生したセルロース(気体)の燃焼は有限速度を持つ総括一段反応を仮定し、以下によるものとした。



反応速度は(3)式により与えた。

$$\omega = B\rho Y_{PYRO}^{0.265} Y_{O_2}^{2.0} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (3)$$

反応の頻度因子 $B = 3.0 \times 10^{12} \text{ m}^3/\text{mol/s}$ 、活性化エネルギー $E = 62.8 \text{ kJ/mol}$ 、燃焼発熱量 $\Delta H = 1.674 \times 10^4 \text{ kJ/kg}$ とした。数値計算はFDSver.5のユーザズマニュアルより、有限反応速度モデルを使用する場合に推奨されるDNSにより行った。着火は $x=70\text{mm}$ の試料上方に0.25mm離して設置したヒータに5秒間、800°Cを与えて行った。計算は実時間20秒まで行い、実時間10秒で落下開始、落下後0.5秒で $2 \times 10^{-3}g$ に達し、1秒後に制動加速度5gが0.5秒間続くものとした。計算時間はCPU Quad-Core AMD Opteron 2.3GHz、メモリ2GBのWorkstationを用いて約24.5時間だった。

4. 研究成果

(1) 高温・低酸素同軸気流中浮き上がりプール火災実験

高温・低酸素同軸気流中の火災写真を図3に示す。酸素濃度を低下させると火災長が下流方向に長くなった。これは酸素濃度を低下させることで燃焼反応速度が低下し、反応に時間を要するようになったためと考えられる。また、同軸流の平均流速と酸素濃度を变化させた場合のマップを図4に示す。○が浮き上がり火災、×が消炎、◆は浮き上がりが

見られなかった火災である。燃焼限界酸素濃度は約8vol.%となり、通常重力・通常酸素濃度の燃焼限界である約17vol.%に比べ低く、T'ienら¹⁾が数値計算で求めた微小重力における限界酸素濃度の約12vol.%より低い場合でも、浮き上がり火災が維持された。



図3 高温低酸素同軸気流プール火災写真

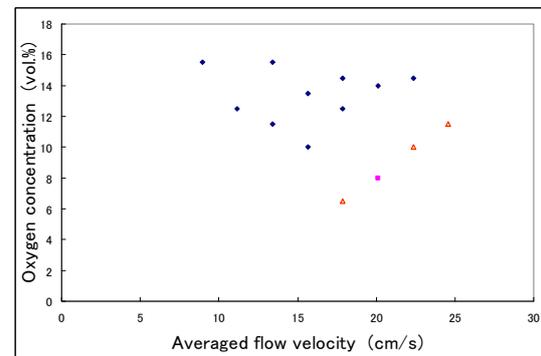


図4 燃焼限界マップ

(2) 落下実験による対照データの取得

図5に落下装置内の重力変化のグラフを示す。ここで落下開始を0秒とした。着地するまでのおよそ1秒間、低重力環境を実現することができた。しかし、落下直後には $1 \times 10^{-3}g$ 程度の低重力環境となったものの、徐々に重力加速度は増加し、着地直前には0.3g程度となった。また落下開始後0.9秒付近には小さなピークが生じた。これらは実験ラックをレールに沿わせて落下させているために、その摩擦や表面状態が大きく影響しているためと考えられる。しかし、今回の実験範囲は可視像の実験映像の観察のみであり、観察している限り、火災そのものに大きな影響を与えるものではなかった。

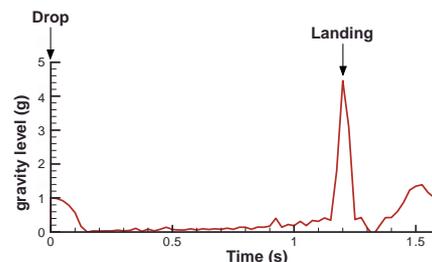


図5 落下実験装置内の重力変化

図6に燃え拡がり火炎写真を示す。(a)が落下前(通常重力)、(b)が落下中(低重力)である。低重力環境では輝炎が減少し青炎部分が増加する。また、火炎帯が厚くなるが、その輝度は低下し境界があいまいとなる。また、可燃物表面と火炎先端の間の距離である消炎距離は、低重力環境に移行することで大きくなった。

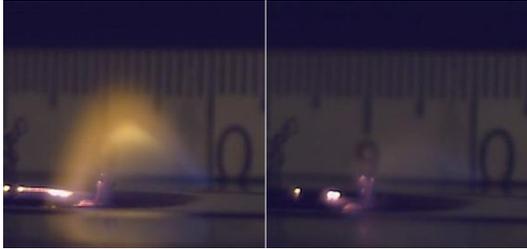


図6 火炎写真

(3) FDSによる数値計算

図7には火炎形状の比較のため、火炎帯長さを格子寸法に置き換え、計算により得られた速度、温度、燃料濃度および酸素濃度より計算格子に対する滞留時間と化学反応時間を算出して求めた局所のダムケラー数分布を示す。(a)が通常重力(実時間9.9秒)、(b)が低重力(制動開始直前:実時間10.9秒)である。両者を比較すると、低重力環境では火炎形状は丸みを帯び、火炎帯は厚くなっているのがわかる。また、試料表面からの消炎距離は低重力環境で増加し、これらの傾向は実験での観察結果と概ね一致する。

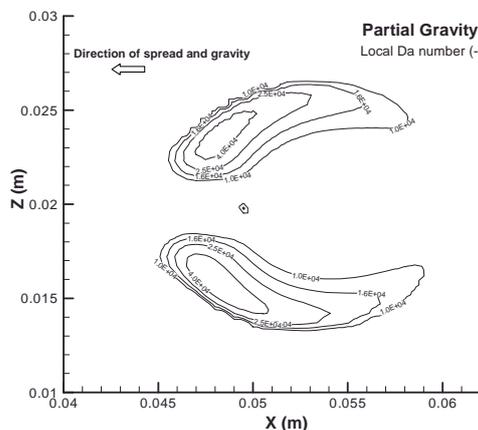


図7 FDS数値計算結果

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

- ① 工藤祐嗣, 宮腰直幸, 大黒正敏, Fire Dynamics Simulatorの火災基礎現象への適用, 八戸工業大学紀要, 査読無, Vol.29, 2010, 7-13.
- ② Y Kudo, Y. Kudo, H. Torikai, A. Ito, Effects of particle size on flame spread over magnesium powder layer, Fire

Safety Journal, 査読有, vol.45, 2010, 122-128.

[学会発表] (計9件)

- ① 工藤祐嗣ほか4名, 低重力環境における熱的に薄い可燃性固体表面上の燃え拡がり, 平成21年12月5日, 札幌
- ② 工藤祐嗣ほか1名, 熱的に薄い可燃物に設けられたギャップが燃え拡がりにおよぼす影響, 平成21年度日本火災学会研究発表会, 平成21年5月19日, 東京
- ③ 風晴勇太・鳥飼宏之・伊藤昭彦・工藤祐嗣, 微小重力環境下における薄い可燃性固体の燃え拡がり限界, 2008.12.3-5, 京都
- ④ 工藤祐嗣ほか2名, PMMA粉体堆積層表面上の燃え拡がり, 2008.12.3-5, 京都
- ⑤ 工藤祐嗣ほか1名, 不連続な分布をもつ可燃物表面上の燃え拡がり, 2008.5.21-22, 神戸
- ⑥ 風晴勇太・沖崎哲也・工藤祐嗣・鳥飼宏之・伊藤昭彦, 微小重力環境下における薄い可燃性固体の燃え拡がり限界, 2008年5月22日, 神戸
- ⑦ 相馬透・瀧本健二・工藤祐嗣・鳥飼宏之・伊藤昭彦, 薄い可燃性固体表面上の燃え拡がり速度および燃え拡がり限界に与える重力の影響, 日本機械学会東北学生会第38回卒業研究発表講演会, 2008年3月7日, 八戸
- ⑧ 長土居謙政・鳥飼宏之・伊藤昭彦・工藤祐嗣, 高温・減酸素狭流路内における薄い可燃性固体の燃え拡がり, 第47回燃焼シンポジウム, 2007年12月5日, 仙台
- ⑨ 永田朋幸, 長土居謙政, 工藤祐嗣, 鳥飼宏之, 伊藤昭彦, 微小重力および過重力環境における薄い固体の燃え拡がり, 第45回燃焼シンポジウム, 2007年12月6日, 仙台

[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

<http://www.mech.hi-tech.ac.jp/kikai/kenkyuu/k.kudouken.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

工藤 祐嗣 (Yuji KUDO)

八戸工業大学大学院・工学研究科・准教授
研究者番号: 80333714

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし