

平成 22 年 6 月 1 日現在

研究種目：基盤研究(B)  
 研究期間：2007 ～ 2009  
 課題番号：19310103  
 研究課題名（和文）低重力および高重力環境での火災安全性評価のための凝縮相表面上燃え拡がりの基礎研究  
 研究課題名（英文）Fundamental Research on Flame Spread over Condensed Phase Combustibles for Fire Safety Assessment of Low and Super Gravity Environments  
 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

研究成果の概要（和文）：宇宙環境での火災安全性の確立には、様々な重力場での可燃性液体・固体の燃焼特性を把握する必要がある。本研究は微小重力では落下塔、高重力では旋回腕装置そして低重力ではカウンターウェイトを有した落下塔を用いて、広範な重力環境での可燃性固体および液体上での燃え拡がり速度を明らかにした。更に、減酸素環境を利用し、微小重力場での燃え拡がりを地上で模擬する方法を明らかにした。また微小重力場でのろ紙の燃え拡がり限界酸素濃度の測定を行い、限界酸素濃度が流速の増加に対して下に凸の U 字曲線を描くことを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In order to establish the fire safety assessments for space mission, investigation of flame spread over condensed phase materials in various gravity environments is important. In this study, a drop tower, a rotating arm facility and the drop tower with counterweight system are used for a microgravity test, a super gravity test and a low gravity test, respectively. As a result, we have clarified the flame spread rates of the combustible solid and liquid in various gravity levels, microgravity ( $10^{-5}$  G), low gravity (0.5~0.9 G) and supergravity (2~5 G). Moreover, we have proposed the simple method of fire safety assessment using the similarity between the gravity effect and the oxygen restriction effect on steady flame spread under normal gravity. And the relationship between the oxygen concentration limit for spreading flame over thermally thin combustible solid under microgravity condition and the opposed flow velocity has also been clarified for extinguishments of space fire.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2008 年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2009 年度	3,000,000	900,000	3,900,000
年度			
年度			
総計	8,600,000	2,580,000	11,180,000

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：燃え拡がり，火災，宇宙開発，凝縮相，微小重力，高重力，低重力，

## 1. 研究開始当初の背景

1986年のスペースシャトル チャレンジャー号の爆発事故以降、NASAを中心に微小重力環境での可燃性液体・固体についての火災安全性に関する検討が行われた。特に、燃料表面上での火災の燃え拡がりとはスモルダリング（くすぶり燃焼）に関して研究が盛んに行われた。固体上の燃え拡がりでは、微小重力となることで、気相での浮力による対流が消失する。それに伴って火炎への酸素供給が減少し、また火炎から固体燃料への熱輸送も減少する。その結果、火災の燃え拡がり速度は一般的には通常重力場に比べて大きく減少する。液体表面上の燃え拡がりでは、更に火炎からの熱輸送を受けて液相において表面張力と浮力による2種類の対流が生じる。気相だけでなく液相内の浮力による対流が重力の影響を大きく受け、一般に微小重力場では燃え拡がり速度は地上に比べて減少する。

ただし宇宙開発の進展に伴い、人類は微小重力( $\mu\text{G}$ )だけでなく、 $1/6\text{G}$ の月そして $1/3\text{G}$ の火星などの低重力環境をも経験する。その場合、可燃性液体・固体上の燃え拡がり現象は、宇宙空間を想定した微小重力場だけでなく、月面や火星探査を想定した低重力場における火災安全性についても検討する必要がある。しかし、これまでに、そのような検討が系統的になされた例は少ない。

更に宇宙進出で人が経験する重力環境は微・低重力だけにとどまらない。シャトルの事故が打ち上げ時に起きたように、ロケットの打ち上げ時に生じる高重力場での可燃性液体・固体の火災安全性についても調べる必要がある。しかし、高重力環境での燃え拡がり現象について調べられた例も多くはない。

以上を踏まえて、本研究は火災安全性を評価する重力場を微小重力から低重力そして高重力と広い範囲で変化させ、可燃性液体および固体表面上を燃え拡がる火災現象について実験的にそして詳細に調査を行っている。

また宇宙ステーションの建設では、膨大な種類の材料が微小重力環境に持ち込まれるため、それらの材料の燃焼性状を1つ1つ落下塔や航空機などの特殊実験施設を用いて評価することはコスト・労力の面から現実的に難しい。そこで本研究は、地上で減酸素環境を利用して微小重力環境での燃え拡がりを模擬し、微小重力場での火災安全性評価を地上で行う低コスト方法の開発も行う。

## 2. 研究の目的

現在、国際宇宙ステーションによる宇宙環境の利用が進められている。その過程において火災が起き人命が失われた場合、開発計画の再考と停滞が避けられない。そのため宇宙環境利用の推進と共にその安全性確保が重要となる。そこで本研究は、火災安全性の確保に向けて、微小重力、低重力そして高重力場における可燃性液体及び固体つまり凝縮相上の燃え拡がり現象について検討し、燃え拡がり速度と重力の関係とを明らかにすることを目的とする。微小重力と低重力場の形成には落下塔を使用し、高重力場の形成には旋回腕実験装置を利用する。

また、通常重力場では可燃性固体および液体上を伝播する拡散火炎の反応帯への酸素供給は、燃焼反応と自然対流によって生じる火炎帯内の濃度勾配による物質拡散で行われる。しかし微小重力場では自然対流が無く、またもし強制対流も無ければ、火炎反応帯への酸素供給は燃焼反応による濃度勾配で生じる物質拡散だけで行われる。そのため宇宙では地上に比べて火炎への酸素供給量が顕著に減少し、火炎の燃え拡がり速度も減少する。また可燃性液体では液相中のレーリー対流も抑制されるため、更に燃え拡がり現象が変化する。このように微小重力場では燃焼反応は抑制され消炎が地上に比べ容易となる可能性がある。しかし自然対流が無く火炎へ流入する気流の流速が減少することは、火炎の吹飛びをも抑制するため、通常重力場よりも微小重力場の方が、消炎が困難となる可能性もある。そこで、可燃物の火災安全性を評価する1つの指標として燃え拡がり限界酸素濃度について注目する。これは可燃性物質が燃焼を継続できなくなる限界の酸素濃度を意味し、その値が小さい材料ほど危険度が増す。本研究では、微小重力場で熱的に薄い可燃性固体上に形成された火炎の燃え拡がり限界酸素濃度と酸化剤流速との関係についても明らかにすることを目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 微小重力場での燃え拡がり実験

微小重力実験は、日本無重量総合研究所が所有する $10^{-5}\text{G}$ の微小重力環境を約4.5秒間維持できる自由落下塔施設を利用した。落下カプセルに図1に示す風洞装置を搭載した。風洞はアクリル製で高さ70 mm×幅70 mmの流路断面、長さ100 mmの整流部と長さ300 mmのテストセクションを有した。この風洞を用いて熱的に薄い可燃性固体であるろ紙および液相の厚さが薄いn-ブタノール液面上での燃え拡がり実験を行った。また風洞は2つのポンペを有し、各ポンペに酸素濃度を調整した酸化剤ガスもしくは酸素を含まない消火ガスを充填し、それらのポンペを切り替えることで酸素濃度条件を変化させて燃え拡がり速度の測定実験を行った。他方、燃え拡

がり限界酸素濃度測定では、一方のポンペに落下前の火炎形成のために通常重力場の燃え拡がり限界より大きな酸素濃度の気体（例えば空気）を初期ガスとして充填して風洞へ流した。そしてもう一方のポンペには落下後、微小重力場の形成と同時に風洞内を低酸素条件とするために初期ガスよりも酸素濃度を減少させた気体を充填して風洞へ流した。ただし、空気よりも高酸素条件の実験では、初期ガスから目的とする高酸素ガスを風洞に供給し、重力変化に伴う酸素濃度の切り替えを行わなかった。ガスの切り替えは各ポンペの電磁弁の開閉を制御することで行った。

ろ紙はアドバンテック No.131, 厚さ 0.25 mm, 密度 560 kg/m<sup>3</sup> を使用した。ろ紙寸法は幅 50 mm×長さ 140 mm と幅 25 mm×長さ 140 mm の 2 つを使用した。着火はニクロム線の通電加熱で行った。各実験とも対向流火炎伝播とした。風洞には 3 台のビデオカメラを設置し、この映像から燃え拡がり速度の測定および消炎の判断を行った。燃え拡がり限界酸素濃度の測定では、落下実験で得られる微小重力環境は約 4.5 秒間なので、本研究では微小重力場において 4 秒以内で消炎した条件を燃え拡がり限界外と定めた。ただし時間制限がない場合、通常重力での燃え拡がり限界酸素濃度は約 17.5 % 一定であった。

### (2) 高重力場での燃え拡がり実験

高重力場の実験は、JAXA つくば宇宙センターが所有する旋回腕施設を利用して行った。実験風洞は微小重力実験と同様のものを用い、可燃性試料にはろ紙を用いた。旋回腕装置は 7 m の長さの腕を有し、その先端に実験装置を搭載した。風洞は重力と遠心力の合成力がつねに試料表面に直交するように傾斜をつけて設置した。高重力における重力レベルは、2G~5G まで増加させた。また、可燃性試料は、重力方向に対して燃え拡がり方向を変化させ、重力方向と紙面が直交する水平燃え拡がりを 0° とし、紙面が +20° 傾く上方燃え拡がりおよび、-20° 傾く下方燃え拡がり実験を行った。対向気流は 0.1 m/s, 酸素濃度 21 vol.% に設定した。

### (3) 低重力場における燃え拡がり実験

弘前大学理工学部校舎を利用して図 2 に示すカウンターバランスを有する低重力落下塔施設を製作した。この落下塔の落下距離は約 10 m であり、カウンターウェイトを調整することで 0.5 G~0.9G までの低重力環境を約 1 秒間形成することができる。この低重力落下塔を用いて、可燃性液体と固体上に形成される 2 つの燃焼現象の低重力場での基礎特性を検討した。1 つは n-ブタノール・プール火災で生じるフリッカリング周波数への重力変化の影響である。そして、もう 1 つは熱的に薄い紙上の燃え拡がり速度への重力変化の影響についてである。

図 3 は、低重力落下塔で得られた落下ラック内の加速度の時系列データを示している。縦軸の加速度は地上での重力加速度で無次元化している。図 3 から、落下から 0.8 s 程度で重力レベルは、若干変動するものの、ほぼ一

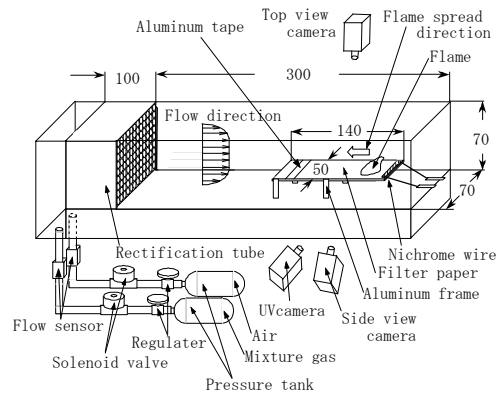


図 1 微小重力及び高重力実験に使用した風洞装置

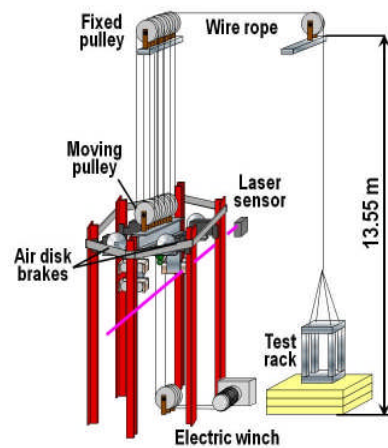


図 2 弘前大学の低重力落下塔

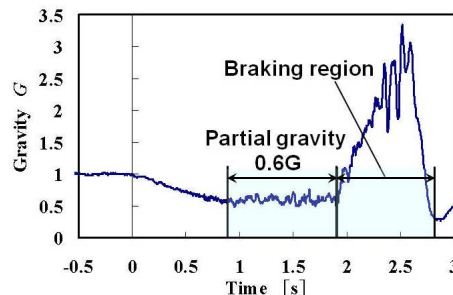


図 3 落下塔の加速特性

定となり 1 秒間程度維持されることがわかる。図 3 では、おおよそ 0.6 G 一定と見なすことができる。そして制動が生じると、ラック内は高重力場となり、最終的に静止する。

落下ラックと動滑車部は固定滑車を通してワイヤーロープ（直径 10 mm）で接続されている。動滑車部は床に固定された電動ウィンチ（シーマリン, LD10000）により上昇させた。動滑車部の制動には空圧ディスクブレーキ（Suntes, DB-3020A-5-01R）を 4 台取り付け、ブレーキによって落下直前のラック保持、落下ラックの制動を行った。制動のタイミングはレーザーセンサ（KEYENCE, LV-11SA）を落下塔内部の壁面に取り付け、動滑車部がセンサ位置を通過するとブレーキ

が自動的に作動するようにした。

#### 4. 研究成果

(1) 微小重力環境における燃え広がり  
 微小重力で酸素濃度を变化させて行った燃え広がり実験結果を図 4 に示す(断面平均流速 0.1 m/s, ろ紙の幅 50 mm). 図 4 には通常重力場で酸素濃度を同様に变化させた場合の燃え広がり速度も示している. 図 4 から, 微小重力場では酸素濃度によらず火炎は円弧を描く火炎形状となった. そして酸素濃度の減少に伴い火炎の大きさは減少した. 一方, 通常重力場では, 火炎は鉛直方向へ立ち上がる形状となった. しかし酸素濃度の減少に伴い火炎高さは減少し, 微小重力の火炎形状に近づいてゆく. また, 燃え広がり速度は 1G,  $\mu$ G ともに酸素濃度の低下に伴って低下する. ただし図 4 から, 1G, 酸素濃度 18 vol.%での燃え広がり速度が,  $\mu$ G, 酸素濃度 21 vol.%の燃え広がり速度とほぼ等しくなることがわかる(図中の緑色破線). このことは, 地上で減酸素環境を用いることで, 微小重力場での燃え広がり速度を模擬できることを意味する. つまり, 地上で減酸素環境を利用することで, 様々な可燃性材料の微小重力場での火災安全性について, 低コストかつ簡便に評価することが可能であることを示している.

次に, 酸素濃度と流速を変化させて, 火炎の燃え広がり限界を調べた結果を図 5 に示す. 横軸は対向気流速, 縦軸は酸素濃度である. この図から, 微小重力環境におけるろ紙の燃え広がり限界酸素濃度が図中の実線として得られ, その限界値は気流速の増加に対して下に凸の U 字曲線を描くことがわかった. また, その燃え広がり限界酸素濃度の最小値を示す気流速は 0.05 m/s である. 流速 0.05 m/s 以上の条件では, 流速増加と共に限界酸素濃度が上昇する. これは流速増加つまり酸化剤供給量の増加に対して, それを消費するための反応速度の増加が燃焼継続に必要となり, その結果, 限界酸素量が増加したと考えられる. またこの限界酸素濃度の値は, 先に示した通常重力場の限界酸素濃度の値に比べて小さく, 微小重力場では火炎が消失しにくくなっていることを示している.

他方, 0.05 m/s より小さい流速範囲では, 流速減少に対して限界酸素濃度が急増し, 火炎が高酸素条件でも容易に消失することを示している. これは流速減少により酸素供給量が低下し, また同時に燃焼ガスの火炎からの排出量も低下するため, 燃焼ガスが不活性ガスとして火炎付近に滞留することになる. その結果, 0.05 m/s から流速が減少するほど, 火炎が消失し易くなり酸素濃度 21 vol.%以上の高酸素条件でも消失が生じたと考えられる.

この結果から, 微小重力場で火災が発生した場合, 地上とは異なり火炎周囲の気流を強制的に停止することで, 火炎を消失に導き消

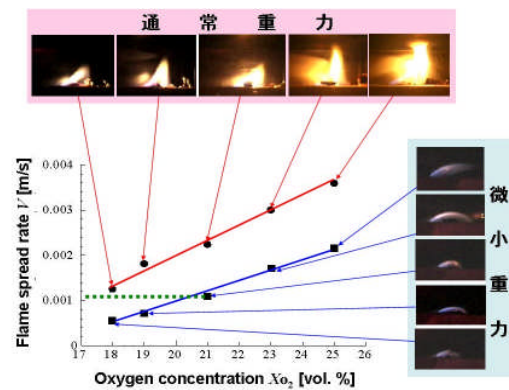


図 4 微小重力環境および地上・減酸素環境での燃え広がり速度

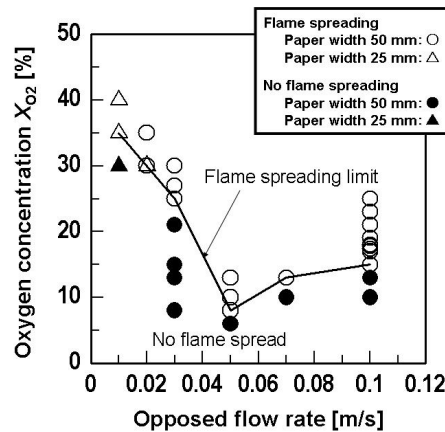


図 5 微小重力場における燃え広がり限界

火を達成できる可能性があることがわかった.

#### (2) 高重力環境での燃え広がり

図 6 に高重力場でろ紙を,  $+20^\circ$ の傾斜をつけた上方燃え広がり,  $-20^\circ$ の傾斜をつけた下方燃え広がり観察された火炎形状を示す. 図から, 高重力場で重力が増加していくと下方燃え広がりでは, 火炎の大きさは徐々に減少していることが分かる. 他方, 上方燃え広がりでは重力の増加に伴い火炎高さが増加していることがわかる. このように, 高重力場では重力方向と火炎の伝播方向との関係により, 火炎の様相が大きく変化する.

次に図 7 に各伝播方向での燃え広がり速度を示す. 燃え広がり速度は高重力場で上方へ燃え広がる場合, 重力レベルが大きいほど燃え広がり速度が増加することがわかった. 他方, 下方燃え広がりでは, 逆に重力レベルが増加するほど燃え広がり速度が減少する. これらは, 自然対流流速が重力が増加するほど大きくなり, 火炎と対向する場合は燃え広がり速度を減速し, 並行流となる場合は火炎の燃え広がり速度を増大させることを示している. そして水平方向伝播は, 重力レベルの変化に対して上方伝播と類似した振る舞いを示す.



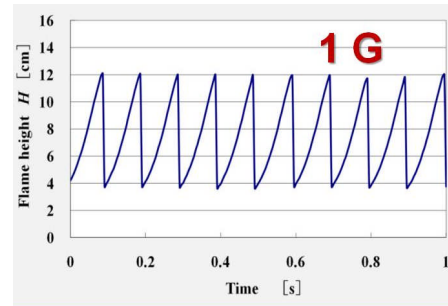
以上の結果は、低重力範囲では重力レベルが減少することで、やがて重力方向と燃え拡がり速度との関係は重要ではなくなり、最終的には微小重力場での燃え拡がり速度に到達すると考えられる。よって、高重力と微小重力との間に存在する。低重力場において火炎が重力との方向によらず一定値を示す条件が存在するものと考えられる。

(3) 低重力環境における燃え拡がり

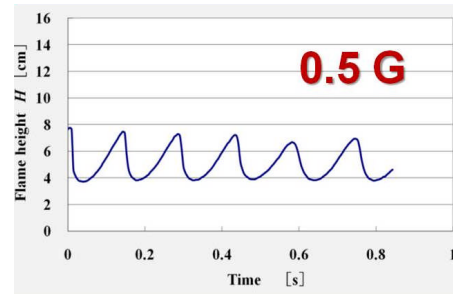
低重力落下塔を用いて、エタノール・プール火災を静止空気中で形成し、そのとき生じるフリッカリング周波数と重力の変化について検討した。図 8(a), (b)は時間経過に対する火炎上端の挙動を示している。図 8から 1G もしくは 0.5G でも、火炎挙動に明確な周期性が存在することがわかる。ただし、重力が低下することで、その周期が長くなり、また振幅が減少している。この火炎高さの変動周波数  $f$  と重力レベル  $G$  との関係を図 9 に示す。この結果から、低重力環境では重力が低下すると、プール火災で生じる火炎のフリッカリング周波数  $f$  は減少することがわかる。また同時に、火炎高さおよび火炎高さの変動幅も重力低下とともに減少した。これらの変化は、液体燃料近傍の流れの構造が重力の大きさの変化と共に変わった事が原因と考えられる。

最後に、図 10 に低重力範囲におけるろ紙上で形成された火炎の燃え拡がり速度と重力レベルの変化との関係を示す。ただし、燃え拡がり速度は 1G での値で無次元化している。図 10 から、弘前大学の低重力落下塔か

ら得られた燃え拡がり速度の値には比較的大きなばらつきが存在した。しかし、低重力範囲で重力レベルが低下すると、燃え拡がり速度は通常重力場よりも減少することがわかった。そして、その燃え拡がり速度の減少傾向は、重力レベルの減少に対して単調に変化しているわけではなく、0.2~0.3G 程度



(a) 通常重力場



(b) 低重力場

図 8 火炎高さの周期変動 (パン直径 25 mm)

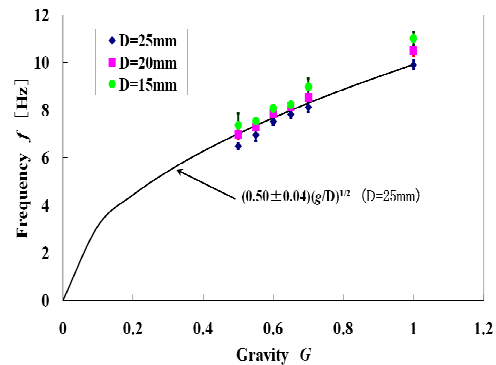


図 9 プール火災のフリッカリング周波数と重力レベルの関係

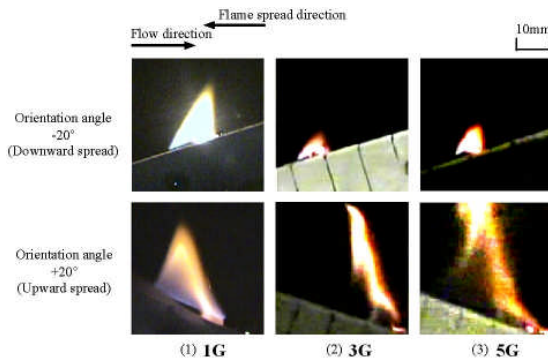


図 6 高重力場での燃え拡がりの様子

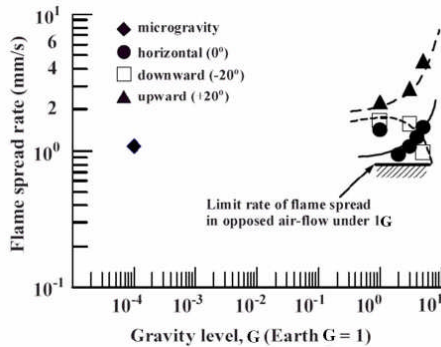


図 7 高重力場での燃え拡がり

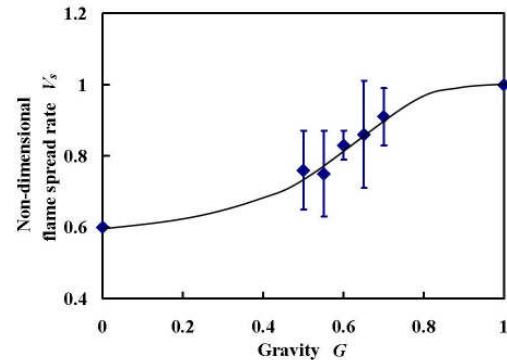


図 10 低重力環境における燃え拡がり速度

低重力場で、燃え拡がり速度が微小重力場での燃え拡がり速度の値に漸近する可能性を示唆していると考えられる。

#### 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 2 件)

- ①高橋梢, 伊藤昭彦, SAITO, Kozo, Sub-flash 状態の液体燃料表面上燃え広がり及び重力の影響, 日本燃焼学会誌, 第 5 1 巻 1 5 6 号, pp.149-157(2009), 査読有り.
- ②K. Takahashi, A. Ito, Y. Kudo, T. Konishi, K. Saito, Scaling Analysis on Pulsating Flame Spread over Liquids, International Journal of Chemical Engineering, Vol.2008, Article ID178292, 10pages(2008), 査読有り.

[学会発表] (計 12 件)

- ①鳥飼宏之, 徳田光則, 三上孝太, 伊藤昭彦, 低速気流中での薄いセルロース系固体の燃え拡がり限界, 第 47 回燃焼シンポジウム, 2009 年 12 月 4 日, 札幌, 北海道大学.
- ②Hiroyuki Torikai, Akihiko Ito, Yuji Kudo, Effect of Gravity on Flame Spread along a Thin Combustible Solid for Different Sample Orientations in Opposed-flow, Sixth International Symposium on Scale Modeling, 2009. 9.15, Hawaii, Hilton Kauai Beach Resort.
- ③今井真澄, 鳥飼宏之, 伊藤昭彦, 薄い可燃性固体の燃え拡がり限界に及ぼす燃え拡がり方向の影響, 平成21年度日本火災学会研究発表会, 2009年5月19日, 神楽坂, 東京理科大.
- ④相馬透, 鳥飼宏之, 伊藤昭彦, セルロース系固体の燃え拡がり限界に及ぼす重力の影響, 平成 21 年度日本火災学会研究発表会, 2009 年 5 月 19 日, 神楽坂, 東京理科大.
- ⑤鳥飼宏之, 伊藤昭彦, 工藤祐嗣, 微小重力環境での熱的に薄い可燃性固体の燃え拡がり限界酸素濃度, 宇宙利用シンポジウム (第 25 回), 2009 年 1 月 15 日, 相模原, JAXA 宇宙科学研究本部.
- ⑥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 (対向流速と酸素濃度の影響), 第 46 回燃焼シンポジウム, 2008 年 12 月 5 日, 京都, 京都テルサ.
- ⑦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, 平成 20 年度火災学会研究発表会, 2008 年 5 月 22 日, 神戸, 神戸大学.
- ⑧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, 八戸市, 八戸工業大学.

- ⑨藤田修, 中村祐二, 永田晴紀, 菊地政雄, 伊藤昭彦, 梅村章, 高橋周平, 微小重力環境を利用した固体燃焼現象研究, 宇宙利用シンポジウム (第 24 回), 2008 年 1 月 17 日, 江東区, 日本未来科学館.
- ⑩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, 仙台国際センター.
- ⑪及川俊, 沖崎哲也, 工藤祐嗣, 鳥飼宏之, 伊藤昭彦, 薄い液体燃料層上を燃え拡がる火炎の不安定, 第 45 回燃焼シンポジウム, 2007 年 12 月 6 日, 仙台, 仙台国際センター.
- ⑫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 45 回燃焼シンポジウム, 2007 年 12 月 5 日, 仙台, 仙台国際センター.

[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

研究成果を公表するための Home page の URL:  
<http://www.mech.hirosaki-u.ac.jp/~mont/hlyhp/design/monthly2007.05/index.html>

#### 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

工藤 祐嗣 (KUDO YUJI)

八戸工業大学・工学部・講師

研究者番号: 80333714

##### (3) 連携研究者

無し