

低圧閉鎖空間における固体の自発着火特性に関する基礎研究

北大工 中村祐二、青木晶世、伊東弘行、藤田修、草野真一郎

Study of Laser-Induced Spontaneous Ignition of Solid Combustibles in Depressurized Enclosure

Yuji Nakamura, Akiyo Aoki, Hiroyuki Ito, Osamu Fujita and Shin-ichiro Kusano
Div. Mech. Space Eng., Hokkaido University, N13W8, Kita-ku, Sapporo 060-8628
E-Mail: akiyo@mech-me.eng.hokudai.ac.jp

Abstract: Irradiated ignition characteristics of cellulose sheet under low pressure are investigated experimentally. Our final goal of the present study is to establish the standard for fire safety in space enclosure environments. In this paper, two represented sample orientations (either vertical and horizontal) are considered. Total pressure and oxygen concentration are varied from 20kPa to 100kPa and from 15% to 100%. Ignition by CO₂ laser is observed and the critical partial pressure of oxygen for ignition is determined as a measure of the fire risk. Results showed that critical amount of oxygen for ignition with both sample orientations are reduced as total pressure is reduced till 40kPa monotonically. Our results suggest that more severe regulation for fire safety should be applied in the space habitat. In the future work, effect of sample orientation on ignition should be more clarified.

Key words; Fire, Ignition, Low Pressure, Cellulose Sheet, Heat Transfer

1. 緒言

1.1 本研究の背景

人間が宇宙空間で活動を行うためには、外環境から切り離された独立閉鎖系が不可欠である。このような閉鎖系としては例えばシャトル、宇宙服、火星基地がある。このような独立閉鎖系においては、外圧と内圧との差が小さいほど望ましい。と言うのも、圧力差が小さい程構造の単純化が可能となるからである。NASA のスペースシャトルは Apollo 1 の教訓[1]から常圧且つ酸素濃度 21%の大気を用いているが、次世代宇宙機(ORION)では全圧 65kPa、酸素濃度 30%(in vol.)の雰囲気を用いることが最近公表された[2]。図 1 は NASA が宇宙閉鎖系での環

境を調査したものである。この図で、火災の危険性は酸素濃度最大 30%(図中赤線)までは小さいとされた。

また、JAXA などが中心となって研究を進める宇宙農業ドームでは、内圧 20kPa 酸素濃度 50%の農業用ドームや内圧 50~100kPa、酸素分圧 20kPa の居住区が検討された [4][5]。ここに挙げた例は全て地球上の大気よりも低圧高酸素濃度となっているが、それは人間が通常の活動を行うにはある値以上の酸素分圧が必要なために他ならない。しかし酸素濃度の上昇は一般に燃焼性を高めるため、火災安全性の点からは好ましくない。それは先に挙げた Apollo 1 の例からも明らかである。それにも関わらず低圧高酸素環境が検討されている理由のひとつとして、圧力を下げると一般に燃焼性が低くなると言われているからであろう [ex.6]。逆に圧力を高くすると燃焼性はよくなり、エンジンやボイラの燃焼に高圧燃焼が利用されている。高圧燃焼を対象とした研究も多く、高圧になると最小着火エネルギーが小さくなる[7]、自着火温度が下がる[8]、着火遅れ時間が短くなる[9]などの結果が報告されている。

1.2 これまでの研究成果

このような背景があるためか、低圧場における火災危険性の研究は皆無に近い。しかし閉鎖系の安全性を十分保障するためには、学術的な裏づけが必要である。そこで我々は燃焼の開始である着火に着目し、その低圧場での挙動を調べてきた[ex.10]。圧力と酸素濃度を主なパラメータとした実験によ

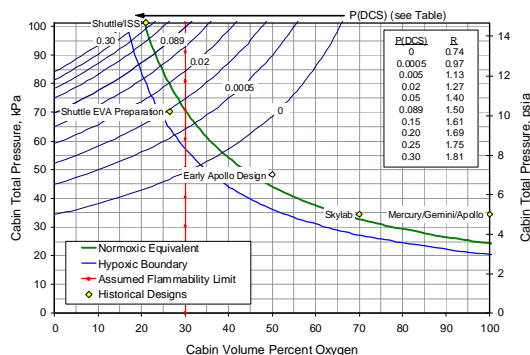


Fig.1 Assumed flammability limit (NASA)[3]

ば、低圧条件下ではその着火限界酸素分圧が低下することがわかった [10]。つまり試料周囲の酸素分子数が常圧より少ない環境で着火するというのである。その理由として低圧化による自然対流の抑制が考えられる。つまり酸素分子の減少による化学反応速度の低下よりも減圧による対流熱損失の減少の方が、着火への影響が大きいという可能性がある。そこで今回、筆者らは試料を水平に設置して実験を行った。水平にすることで試料周りの自然対流は淀み点流れとなり、鉛直に試料を設置した実験 [10] よりも対流熱損失が少なくなると考えたからである。本報では水平設置実験と鉛直設置実験を比較、検討する。

2. 実験装置および条件

2.1 実験装置

装置の詳細は報告済み[10]であるので、ここでは概略と変更点についてのみを説明する。燃焼室内に固体燃料としてセルロースシート(ADVANTEC#1、主成分(99%以上): α -セルロース)を配置し、内部気体を調整して密閉し、レーザーで着火させた。固体燃料試料は鉛直に設置していたが、水平に設置して下からレーザーを照射できるようにした(図 2)。燃焼室は高真空を保てるように設計しており、レーザー照射および観察用の窓を有する。熱源には最大出力 20W の CO₂ レーザ(SYNRAD, 10.6 μ m)を用いた。照射強度の減衰を防ぐため、10.6 μ m にて透過率の高い ZnSe 製の窓を用いた。観察用の窓から内部の

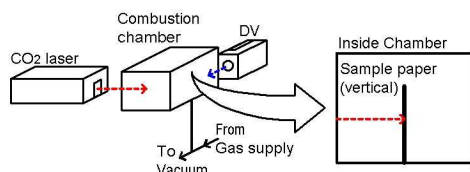


Fig.2-1 Experimental equipment (vertically oriented)

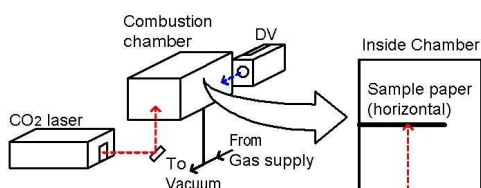


Fig.2-2 Experimental equipment (horizontally oriented)

様子をデジタルビデオカメラ(以下 DV と表記)にて毎秒 30 コマで記録した。本研究では DV 画像にて気相からの燃焼による強い発光を認めた場合を着火と定義した。

2.2 実験条件

本研究では内部圧力を常圧(100kPa)から着火しなくなるまで段階的に低下させた。酸素濃度は 15~100%(in vol.) の範囲で変化させた。燃焼室内部の初期気体組成は、酸素と不活性気体成分のみとし、不活性気体成分には窒素と二酸化炭素の二種類を用いた。水平設置での実験は窒素希釈のみで行った。セルロースシートは少なくとも一晩以上デシケータで乾燥させた。レーザーによる加熱は時間 $t=0s$ から $t=2s$ まで連続的にセルロースシートに与えられた。平均レーザーパワー密度は 0.64W/mm² で一定した。

3. 結果

3.1 着火範囲

試料を鉛直、水平に設置したときのそれぞれの着火範囲を図 3-1、3-2 に示す。

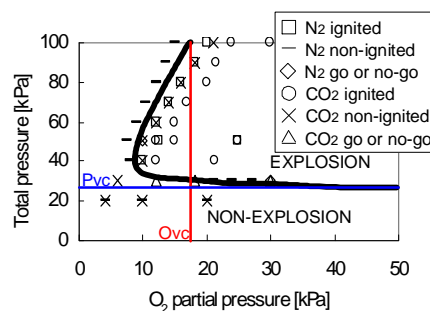


Fig.3-1 Ignitable map (vertically oriented)

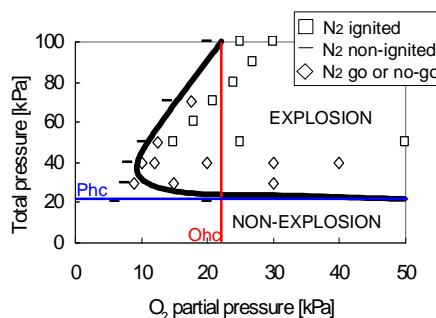


Fig.3-2 Ignitable map (horizontally oriented)

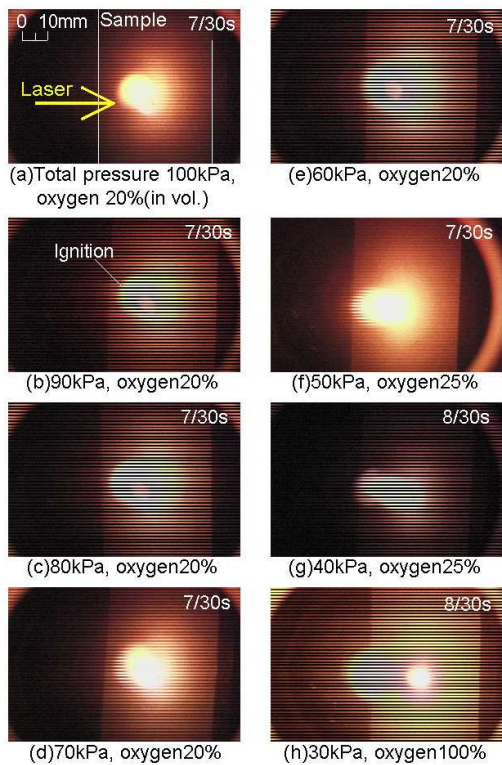


Fig.3-3 Instantaneous pictures of onset of the ignition near the ignition limit (vertically oriented)

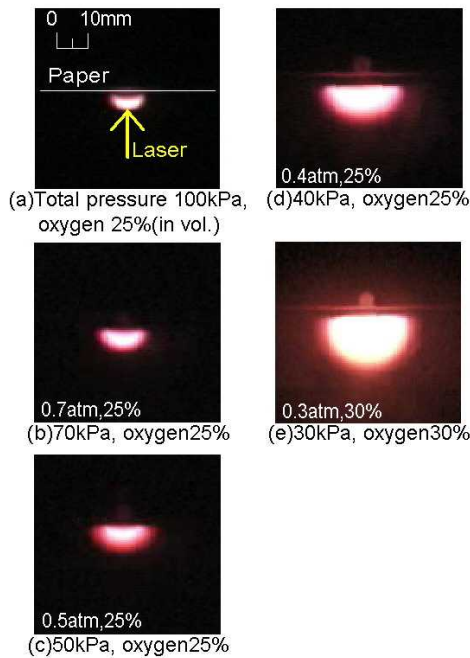


Fig.3-4 Instantaneous pictures of onset of the ignition near the ignition limit (horizontally oriented)

試料を水平に設置したときにも着火限界酸素分圧が減少した。また鉛直に設置したときと比べて着火範囲の広さに大きな違いは現れなかったが、着火限界圧力や酸素分圧に違いが観察された。鉛直設置のときの着火限界圧力 P_{vc} は水平の限界圧力 P_{hc} より大きくなり、鉛直の常圧での着火限界酸素分圧 O_{vc} は水平の限界分圧 O_{hc} より小さくなった。つまり可燃圧力範囲は水平に設置したときのほうが広く、可燃酸素分圧範囲は鉛直に設置したときのほうが広がる。

次に着火時の映像を図 3-3、3-4 に示す。図 3-3 の常圧と 30kPa を比較するとその発光領域は低圧のほうが広い。水平に設置したときは、発光領域が減圧とともに広がる様子がよくわかる。また鉛直のとき形状が円柱状になるのに対し、水平では試料表面に押し付けられたような半球となっている。

4. 考察

4. 1 減圧が着火に及ぼす影響

着火限界分圧が減圧とともに少なくなることには自然対流が着火に影響した結果と考えられる。これは以前にも紹介したが[9]、試料を水平に設置した場合にも同様な影響が考えられる。簡単に述べると、輸送過程を示す無次元数(レイノルズ数、グラスホフ数)からわかるように、自然対流は減圧とともに抑制され拡散が支配的になる。従って自然対流による駆動力は、低圧になるほど拡散に対し小さくなる。そのため対流熱損失が相対的に小さくなり、反応場が高温に保たれ易くなったと考えられる。減圧による対流熱損失減少の概念図を図 4-3 に示す。

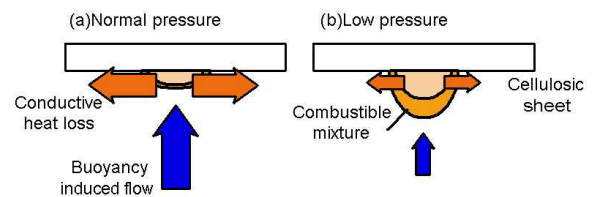


Fig.4-1 Schematic illustration of convective effect on heat transfer

4. 2 試料の向きが着火に及ぼす影響

試料の向きによって異なるものとして、試料周りの流れが考えられる。鉛直に設置されているときは自然対流による流れは試料に沿ったものとなるが、水平のときは淀み点流れが形成される。水平設置の発光領域の形状は、この淀み点流れによるもの

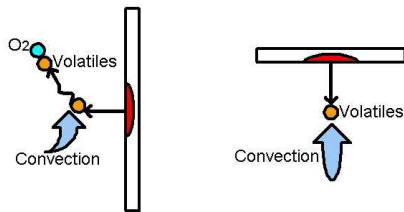


Fig.4-2 Schematic illustration of sample orientation effect on mixing volatile and oxygen

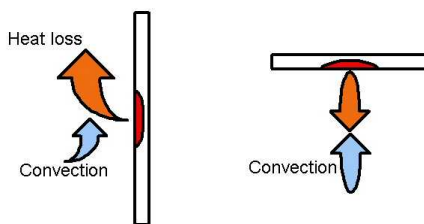


Fig.4-3 Schematic illustration of sample orientation effect on heat transfer

と考えられる。この流れの違いから着火範囲について考察してみると、水平設置には鉛直に比べ酸素不足になりやすいという着火抑制の効果と反応場に熱が溜まりやすいという着火促進の効果があると考えられる(図4-2、4-3)。この二つの効果の大小により、鉛直設置と水平設置との着火範囲の違いが生じたと考えられる。このように試料の向きや減圧が着火に与える影響は大きいと考えられる。ただしその寄与度がどの程度であるかを述べるにはレーザ出力を変えて実験するなど、更なるデータの取得が必要である。

5. 結言

本研究では試料の向きが鉛直と水平の二通りの場合における減圧時の輻射着火実験を行い、それぞれの場合における着火限界マップを作成し、着火しやすさに与える試料方向の影響を明確にした。その結果、水平に設置したときも鉛直と同様に、低圧化により着火限界を与える酸素分圧が減少した。また可燃酸素分圧範囲は鉛直に設置したときのほうが広く、可燃圧力範囲は水平に設置したときのほうが広くなることがわかった。発光領域の形状から自然対流が影響を及ぼしていると考えられる。自然対流抑制の可燃酸素分圧範囲拡大への影響が大きければ、自然対流の発生しない宇宙空間の閉鎖系で

はより高度な火災対策が望まれる。

謝辞

次世代宇宙機 ORION について NASA の Dr. D. L. Henninger、Dr. D. J. Barta と Dr. G. Ruff からは大変有益な情報をいただいた。また、JAXA の山下雅道教授との宇宙農業における火災安全性についての議論が本研究の基礎となった。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] <http://history.nasa.gov/Apollo204/>
- [2] http://www.nasa.gov/pdf/140636main_ESAS_05.pdf
- [3] P. Campbell et al., Habitat. 2006 conf., (2006).
- [4] 山下他,第 21 回宇宙利用シンポジウム講演集, pp. 323-326, (2005).
- [5] 橋本,第 22 回宇宙利用シンポジウム講演集,pp. 307, (2006).
- [6] 斉藤他,工業火薬協会誌, Vol. 41, No. 3, (1980).
- [7] M. Weinrotter et al., Int. Jour. of Hydrogen Energy, Vol. 30, pp. 319-326, (2005).
- [8] M. Caron et al., Jour. of Hazardous Materials, Vol. A65, pp. 233-244, (1999).
- [9] T. Kashiwagi et al., Comb. Sci. & Tech., Vol.8, pp.121-131, (1973).
- [10] Y. Nakamura. et al., Proc. 25th Int'l. Sympo. Space Tech. Sci. ISTS2006-h-25 (on CD-ROM), (2006).