

低圧場における高分子被覆導線の燃え広がりに関する研究

北大工 中村祐二、松村智洋、吉村野歩子、伊東弘行、藤田修

Study of Flame Spread over Polymer-Insulated Wire in Depressurized Enclosure

Yuji NAKAMURA, Tomohiro MATSUMURA, Nobuko YOSHIMURA, Hiroyuki ITO,
and Osamu FUJITA

Div. Mech. Space Eng., Hokkaido University, N 13 W 8, Kita-ku, Sapporo 060-8628

E-Mail: yuji-mg@eng.hokudai.ac.jp

Abstract: Flame spread character along polyethylene (PE)-insulated wire as a model of electric devices, which is most possible fire source in space, in quiescent closed chamber is examined experimentally. Sub-atmospheric pressure range from 20 kPa to 100 kPa is of interest to simulate the space habitant environment. Throughout the study, ambient gas composition is fixed at 79 vol.% of nitrogen and 21 vol.% of oxygen (same as air), hence the partial pressure of oxygen is decreased as the pressure in the chamber is decreased. Flame spread subsequent forced ignition is observed and the spread rate is determined as a measure of the fire damage. Three types of chamber configuration are demonstrated to investigate the enclosure effect on flame spread; such as (a) with ceiling and side walls (severely confined case), (b) with ceiling but no side wall, (c) open (no obstacle. Least confined case). Results showed that the spread rate is quite sensitive on the imposed enclosure configuration near the extinction condition; the spread rate decreased with ceiling and side walls but no decrement trend is observed in open configuration. It is suspected that the burned gas tends to stagnant near the combustion regime in severely confined case and the oxygen component to be burned is limited. Without any confined effect, faster spread rate is achieved in depressurized environment. It is addressed that the severe regulation for fire safety should be applied in the space habitant.

Key words: Fire, Sub-atmospheric Pressure, Polyethylene, Electric Wire

1. 緒言

1. 1 低圧火災研究の必要性

宇宙船内や船外活動中の宇宙服、地球外惑星の人工基地など、高い真空場にさらされる構造物は、外気と隔離された閉鎖空間である。このような特殊環境下では、内圧と外圧との差をできるだけ小さくした方が構造物を簡素化・軽量化できるため、概して内圧は常圧 ($P_0=101$ kPa) よりも低く設定されることが多い。例を挙げれば、最近 NASA (アメリカ航空宇宙局) が公表した次世代宇宙船 (ORION) では、内部圧力 65 kPa (~ 0.65 気圧)、酸素濃度 30% とすることが決められた[1]。また、宇宙農業構想では農業ドーム内部圧力 20 kPa、酸素濃度 50% とする案がベースに話が展開されている[2]。なお、現在のスペースシャトル、国際宇宙ステーション (ISS) では内圧 101 kPa、酸素濃度 21% という地上と同じ環境としている。ORION でそれが見直されたということは、今後の宇宙開発では低圧空間が基本となってゆくことを暗示している。

ところで、人間活動が宇宙での閉鎖空間で行われることを前提とすれば、そこにはあるレベル以上の酸素分圧とすることが必要である (もっとも、酸素ポンペを抱えて活動することも可能であるが、長時

間の滞在ではその選択は不適であろう)。全圧を低下させつつ地上と同程度の酸素分圧を保とうとすると、自ずと場の酸素「濃度」は高くなる。一般に、高酸素濃度状態では燃焼性が高まるため、火災危険性の回避にはそのような選択は好ましくない。しかし前述の通り、構造物の簡素化を目指すには、低圧は最も手軽な方法である。つまり、「火災安全性」と「構造物の簡素化」はトレードオフの関係にあり、それらを同時に満足し得る内部環境の「最適点」が存在することになる。この最適条件は宇宙構造物の設計の際に重要となる。この点において、低圧空間での火災研究は、宇宙開発において重要な意味を持つ。

1. 2 これまでの研究成果

このように低圧空間は宇宙環境としてよく利用されるにも関わらず、低圧場での火災危険性の研究は皆無に近い。言葉を変えれば、一体どの圧力・酸素濃度にすれば「安全」なのかという疑問に対して、現状では学術的な裏づけを持った回答はできない。それを解決すべく、我々は宇宙火災[ex.3-5]でしばしば原因として挙げられる「電線」を対象とし、低圧空間におけるその燃焼特性を実験的に調べてきた[ex.6-9]。主に組成を一定 (つまり酸素「濃度」

は一定)とする場で、圧力のみを実験パラメータとした実験によれば、驚くべきことに「低圧になるほど燃え広がり速度(=火炎が進行する速度。火災研究で危険性の指標を与える一つ)は大きくなる」事実を確認した[6]。酸素濃度を固定して全圧を減じると、空間中の酸素分圧は減じる。つまり、「酸素分子の個数は減る(燃焼反応の速度は低下する)」にも関わらず、燃え広がり速度が大きい、つまり「燃えやすい」わけである。一見矛盾したこの結果は、低圧化による燃焼反応速度の低下よりも、低圧化による熱損失の効果が大きく上回ることが要因である。しかしながら、その詳細についてはまだ十分に解明されていない。現在、この問題に物理的な解釈を与えるために、精力的な研究を続けているところである。本報はそれらの一部にあたるものであり、特に低圧化に伴う燃焼室形状が燃え広がり特性に与える影響について調べたものである。ここで得る知見は、低圧火災という特殊火災に対する知識を与えるだけでなく、航空機(運行時の内圧は80 kPa)内部の火災安全を確保するためにも役立つ。また、低圧場での燃焼特性を積極的に利用した化学プラントの設計にも役立つ知見も与え得る。

2. 実験装置および実験条件

図1に実験装置の概略図を示す。装置の詳細は既報[ex.6-9]とと同じであるため、ここでは概略と本研究に特化した情報のみを記す。燃焼サンプルは心線にニクロム合金(NiCr。直径0.5 mm)、被覆材にポリエチレン(PE。厚さ0.15 mm)のモデル電線とする。ポリエチレンは導線の絶縁物として好んで用いられる材質として知られている。ニクロム心線は他の金属線に比べれば熱伝導率が低い(=抵抗値が大きい)ため、実際には用いられない。ただし、ここでの目的は「電線燃焼」というものを「燃焼物(PE)よりも桁違いに熱伝導率の大きな金属(NiCr)が熱輸送に同時に関与する場合の燃焼」と捉え、同じ燃焼場を高い再現性で実現させることに

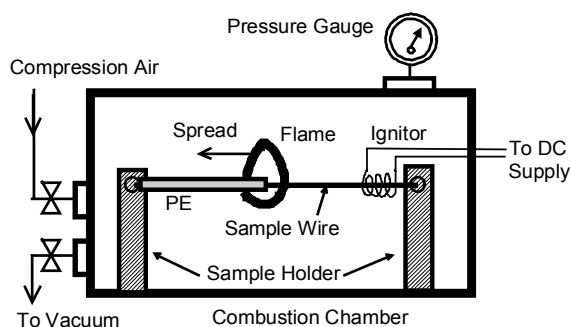


Fig.1 Schematic diagram of experimental set up

ある。その意味で、実物として存在しないニクロム導線を用いたとしても、被覆導線上の燃え広がり特性の主要なメカニズムを得ることになんら支障がない。

サンプルはチャンバ中央に水平方向に配置され、その一端には着火用の加熱コイルが取り付けられている。コイルを加熱させると被覆分の温度が上昇し、沸点に達すると分解ガスが気相に放出される。そのうちの可燃成分は気相の酸素と混合し、溶融部周辺に混合領域を形成する。その混合気が加熱用コイルにより熱されると、可燃条件に達し、着火に至る。着火後、溶融部を取り囲むように形成される火炎は未燃の被覆を加熱し、そこでの熱分解を促進させる。分解ガスが発生すると、先ほどに比べて予混合領域が広がり(この場合、左側)、火炎は動く。この現象のことを「火炎燃え広がり」と呼ぶ。燃え広がり様子はDVカメラにより撮影され、画像解析データとして蓄えられる。燃焼チャンバ内部のガス組成は窒素79%と酸素21%の混合気であり、全圧を100 kPaから20 kPaまで変化させた。なお、コイルの加熱時間は全ての条件で5秒とする。

本研究では、燃焼チャンバ内部に蓋あるいは壁などを挿入し、それら障害物による「閉鎖度合(以後、空間条件と称する)」が低圧場での電線燃え広がり現象に与える影響について検討する。考慮する空間条件は以下の3種類とする(図2参照)。

- (a) 内蓋と側面壁を追加(ダクト型閉鎖空間)
- (b) 内蓋のみ追加(上部への流動制限)
- (c) 障害物なし(擬似開放空間)

図2(a)はダクトの断面図に相当する。つまりサンプルの軸方向とダクト開放方向は同じ向きではなく、垂直関係にある。(c)の「擬似開放空間」は、厳密には開放ではなく有限の体積を持つ(外チャンバで仕切られる閉鎖空間内部での現象である)が、余計な内蓋や壁のない状態を指す。考慮した3つの空間条件では、閉鎖度合の厳しい順に(a)~(c)である。

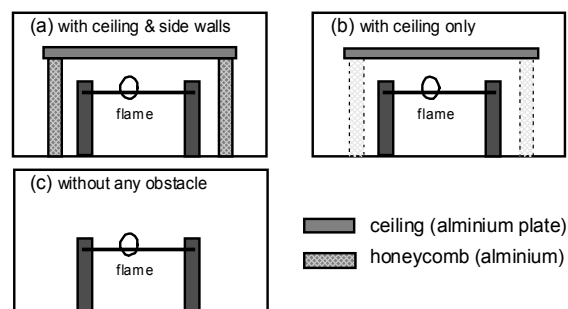


Fig.2 Considered "confined" conditions

3. 実験結果

3. 1 圧力に依存した火炎形状

図3に、着火後15秒後での各圧力条件における燃え広がり中の火炎直接写真(上)と火炎透過光写真(下、背景光には白色散乱光を用いた)を示す。なお空間条件は(a)の「最も閉鎖度合の高い場合」である。火炎直接写真からは、圧力低下に伴い火炎の明るい領域(輝炎部)は小さくなり、火炎高さは短くなることわかる。それとは逆に、火炎の横幅は広がることも確認できる。また、青炎部に着目すると、圧力低下に伴い明るさが低下することがわかる。青炎は主に C_2 , OH , CH ラジカルの自発光であり、その発光強度はそれらのラジカルの生成・消費速度に比例する。つまり、低圧場に形成される火炎の方が反応活性の低い「弱い火炎」であることがわかる。これらの圧力に依存した火炎の低性的な特徴は、空間条件に依存せず同じである。

透過光写真によれば、熔融部の大きさが雰囲気圧力場に応じて異なる。熔融部は金属線(NiCr)に保持され、低圧になるほど下側に懸垂する部分が増加する。写真からでは確認できないが、低圧火炎ほど燃え広がり途中で熔融部が落下する。落下回数は圧力低下に伴い増加し、30 kPaにおいては落下の衝撃で火炎が消滅することも頻繁に確認できる。圧力に依存した熔融部の大きさの変化は、定性的に空間条件には依存しない。ただし、同じ圧力条件であっても、落下回数および落下時に消滅を伴うかどうかは、空間条件に依存する。

3. 2 空間条件に依存した低圧環境での燃え広がり速度の変化

DVカメラで火炎の移動速度を算出すると、本研究で扱う条件範囲においては、ほぼ一定であった。火炎の移動速度とは、前述の「燃え広がり速度」に相当する。つまり、燃え広がり速度は条件が決まれば確定する固有値となる。

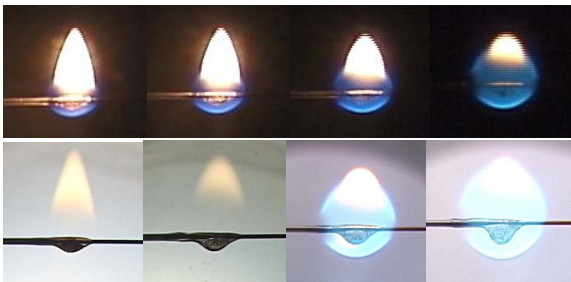


Fig.3 Direct photographs (top) and photographs with backlight (bottom) of spreading flame over PE-insulated wire (from left, $P=100, 80, 60, 40$ kPa). Flame spreads from right to left. Every image is taken at $t=15$ s after ignition. Backlight images are all magnified.

図4に、様々な空間条件における燃え広がり速度の圧力依存性をまとめた。なお、この場合の燃え広がり速度は、着火後5秒~20秒の範囲における火炎移動履歴から平均値として求めたものである。各条件において少なくとも5回以上の実験を繰り返し、実験毎のばらつきを誤差線として表示した。図からわかる通り、圧力低下に伴い、空間条件の違いが明確に現れるようになる。(a)の「閉鎖度合の最も高い場合」には、圧力低下に伴いはじめは燃え広がり速度が増加するが、途中から増加割合がほぼ0となる。一方で、(c)の「閉鎖度合の最も低い場合」には、圧力低下に伴い、燃え広がり速度は増加する一方であり、増加割合もほぼ一定である。注目すべきは、その傾向が「消炎間際まで持続される」ことにある。ここでいう消炎限界とは、5秒の加熱時間で燃え広がりする火炎が形成されない限界のことを指し、前述の熔融部の落下に伴う消炎とは異なる。(a)の場合とは異なり、(c)の空間条件においては、熔融部の落下に伴う消炎は観察されない。このことは、消炎限界付近まで火炎の強度(発熱速度と同義)は((c)では(a)に比べて)比較的強いことが推測される。

空間条件の違いが低圧になるほど顕著に現れるということは、(a)の結果は「低圧の効果」と「閉鎖空間の効果」が同時に現れたものであり、低圧化のみの特徴を理解する対象としては好ましくない。閉鎖空間の効果は、燃焼強度を変化させることが実験的に明らかにされた。次にその直接要因について検討を試みる。

3. 3 閉鎖条件が燃焼状態に及ぼす影響

図5に、(a)と(c)の異なる空間条件において、サンプルの下方20 mmにおける温度履歴を示す。温

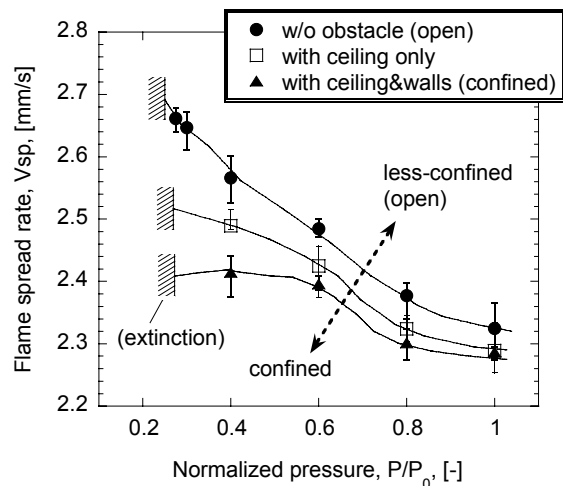


Fig.4 Flame spread rate in various “confined” conditions

度計測のための K 型熱電対位置は、サンプル真下より 20 mm あるいは 40 mm 離れた位置に配置し、それぞれ図中で●および○で示す。図より、閉鎖度合の強い場合（図 5(A)）では、既燃ガスの混入による温度上昇が認められるが、閉鎖度合の弱い場合（図 5(B)）ではそれが確認できない。本実験は地上実験であり、サンプル下側の空気が自然対流により火炎に運ばれ燃焼に参加する。ここに既燃ガスが混入すると、初期エンタルピーは大きくなるものの、燃焼にあずかる酸素濃度が低下する。後者の影響が強く現れたとすれば、閉鎖度合が大きいほど燃焼に参加する酸素が低下して火炎が弱く（＝発熱速度が遅く）なり、燃え広がり速度が遅くなったものと解釈できる。つまり閉鎖空間が燃え広がり現象に与える影響とは、既燃ガスを淀ませて低酸素状態を作り出すことに他ならない。なお、温度履歴だけから判断すれば、(c)の空間条件では有限体積であっても擬似的な「開放空間」が模擬できていることがわかる。よって図 4 の(c)、つまり圧力低下に伴い燃え広がり速度は増加する傾向は、純粋に圧力の影響であり、ここに閉鎖空間の影響は含まれていないことが確認できる。燃え広がり速度の大小は火災危険性の大小にそのまま通じるため、低圧場では常圧場よりも厳しい火災安全基準を設ける必要があることが示唆される。

4. 結言

本研究では低圧場における電線燃え広がり現象に対して、閉鎖度合を変化させることで、燃え広がり現象に与える閉鎖空間の影響ならびに低圧化の影響を明確化することを試みた。その結果、閉鎖度合が高い場合には、既燃ガスが燃焼場に混入して局部的に低酸素状態にして燃え広がり速度の増加を抑制することがわかった。閉鎖空間の影響の無視できる状態で得られた低圧化の影響は、燃え広がり速度を増加させることのみで現れる。このことから、宇宙構造物内部に低圧条件を選ぶ場合には、地上場よりも厳しい火災安全基準を設ける必要があることが示唆される。

謝辞

本研究は科学研究費補助金（課題番号：17710131）および日本宇宙フォーラムからの援助を受けて行われたものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

[1] http://www.nasa.gov/pdf/140636main_ESAS_05.pdf

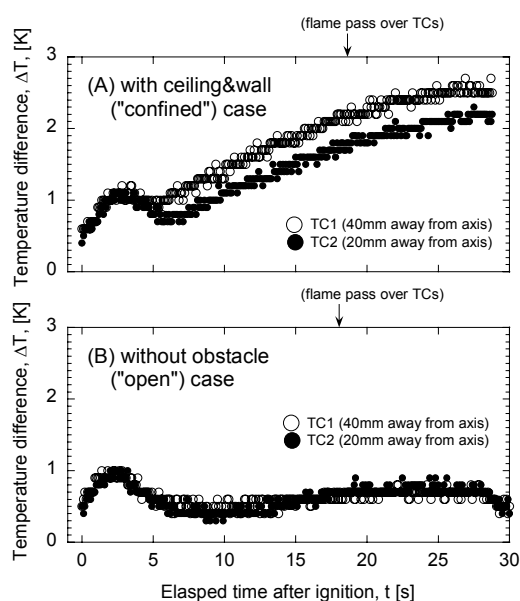


Fig.5 History of gas temperature below the flame; 20mm below the sample (A) with ceiling&wall case, (B) no obstacle

- [2] http://surc.isas.ac.jp/space_agriculture/
- [3] Friedman, R., Fire Safety in Spacecraft, *Fire and Materials*, vol. 20, pp.235-243 (1996)
- [4] Limerio, T., Wilson, S., Perlot, S., and James, J., The Role of Environmental Health System Air Quality Monitors in Space Station Contingency Operations, *SAE Tech. Paper 921414* (1992)
- [5] Paulos, T., Paxton, K., Jones, S., Issacci, F., Catton, I., and Apostolakis, G., Risk-based Spacecraft Fire Safety Experiments, *AIAA 93-1153*, 1993.
- [6] 中村祐二, 吉村野歩子, 松村智洋, 低圧雰囲気下での電線火災の危険性に関する研究, 第 43 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, vol. II, pp.457-458 (2006.5)
- [7] Nakamura, Y., Yoshimura, N., Matsumura, T., Ito, H., and Fujita, O., Flame Spread over Polymer-Insulated Wire in Reduced Pressure Environments: Comparisons to Microgravity Phenomena, *5th Int'l. Sympo. Scale Modeling*, Choshi, Japan, pp.196-205 (2006.9)
- [8] 松村智洋, 中村祐二, 吉村野歩子, 藤田修, 伊東弘行, 山根清隆, 低圧空気流中における電線の火炎燃え広がりに関する研究, 第 44 回燃焼シンポジウム講演論文集, pp.406-407 (2006.12)
- [9] 吉村野歩子, 中村祐二, 松村智洋, 藤田修, 伊東弘行, 山根清隆, 低圧環境での導線燃え広がり挙動に関する基礎研究, 第 44 回燃焼シンポジウム講演論文集, pp.408-409 (2006.12)