

微小重力場における電線被覆の過電流通電による溶融および着火挙動

北海道大学 藤田 修

1. はじめに

将来の有人宇宙活動を展開するにあたり、宇宙船内の火災安全性の確保は最も重要な課題の一つである。火災現象は重力に起因する自然対流により支配的影響を受けることから、微小重力環境ではその燃焼状態は地上とは全く異なるものとなる。従って微小重力場における各種材料の燃焼特性を明らかにすることは極めて重要と考えられるが、その一方で、微小重力実験機会は極めて限定されていることから、その実験的研究は十分に進展しているとは言えないのが現状である。

宇宙船内火災の開始要因で最も可能性の高いものの一つに、短絡や過電流による電気配線の着火現象がある。とくに、これまでの著者らの研究[1-3]により電線の着火性は通常重力場に比べ微小重力場において大幅に高くなることが示されている。すなわち、地上における材料の着火に関する安全性の判断は、微小重力場においても必ず安全側の判断を与えるとは限らないと言える。著者らが現在準備を進めているISS第2期利用後期テーマではこの点に着目し、電気配線の着火性を微小重力場において系統的に取得することを計画している。

電線の着火現象において、心線で過電流によるジュール熱が発生したとき、被覆材質によっては（例えば、ポリエチレン、ポリビニル）これが溶融し液体状に変化した後着火が生じる。通常重力場ではこの溶融被覆は重力により滴下し、電線は短時間で心線のみが露出した状況となる。一方、微小重力場では溶融被覆が滴下することはなく電線に付着したまま残留し、心線の温度が十分に高くなるとこれを着火源として着火が生じる。このとき、溶融被覆の変形挙動により過電流を与えた心線の温度分布が変化することや可燃性の熱分解ガスの放出状況が変化する可能性があり、結果的に溶融被覆の挙動が電線の着火現象に大きな影響を与え可能性がある。したがって、溶融被覆の挙動を現象論として把握するとともに、その挙動と着火現象の相互関係を知ることは重要である。着火現象における溶融被覆の動的挙動に関しては、第2期利用後期テーマには研究項目として設定されておらず、大気球による微小重力実験機会は、この点を検討する上で貴重な実験機会と考えている。

2. 実験装置概要

実験装置の概念は図1に示すように比較的単純なものである。電極としての役割を兼ねる支柱に、試料である電線を固定する。電線の両端は被覆を剥いで、支柱に固定された電極に直接接続する。この電極は定電流電源と接続されており、任意のタイミングで任意の電流を供給できる。この試料および試料ホルダーは、燃焼容器に封入され、任意のガス組成中で着火実験を行うことができる。この着火実験の様子は燃焼容器の窓を通しデジタルビデオカメラにより記録する。

試料としては、任意の電線を使用することが可能であるが、以下の節で紹介する実験に関しては心線がニ

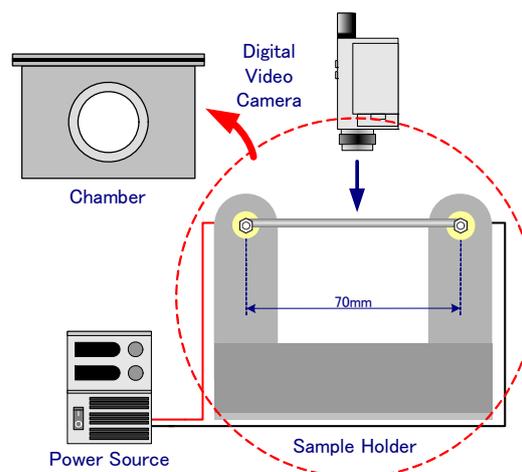


図1 電線通電着火試験装置の概念

クロム、被覆材はポリエチレン (PE) で心線径が0.5mm、被覆厚さ0.15mm (試料外径0.8mm) のものを使用している。

3. 微小重力下における電線の通電着火特性

図2には、電線に過電流を連続的に供給 (連続通電) した際の着火限界を通常重力環境および微小重力環境において求めた結果である。微小重力環境を得る手段としては、北海道赤平市にある50m級落下塔コスモトローレおよび岐阜県土岐市のMGLABを使用した。また、この図において、着火限界条件は着火を発生させることのできる下限の電流値により与えられ、異なる酸素濃度毎にこの値を求めている。図中、◎が通常重力場でも微小重力場でも着火する条件、○が50m級落下塔において着火が確認された条件、△がMGLABで着火が確認された条件である。

この図から明らかなように、着火範囲は微小重力環境で明らかに拡大する。例えば、酸素濃度21%の条件で比較した場合、通常重力下では下限電流として14A程度まで着火が生じるが、微小重力下では7A程度でも着火が生じる。また、落下塔の違いにより微小重力継続時間が異なるが、図2から微小重力継続時間が長くなるほど着火下限電流は小さくなることも理解できる。

図3は、電線に通電する時間を制限 (短時間通電) した際の着火の限界条件を通電エネルギーで与えている。すなわち、通電時間を一定とした場合、通電電流を変化させることで通電時間内に電線に与えられるエネルギーを変化させることができる。このような方法で、特定の通電時間に対し、着火の生じる下限でエネルギーを求めた結果が図3である。この結果によると、着火の生じる通電エネルギーは微小重力場において大幅に低下すること、通常重力場では通電時間に対し着火下限エネルギーが変化するのにに対し微小重力場ではほぼ一定値を示すことがわかる。後者については、微小重力場における着火現象は、通電時間に関わりなく、特定のエネルギーが電線に与えられると発生することを意味している。

上の議論で述べたように、電線通電着火の限界条件は、電流を連続的に供給した場合下限電流値で与えられ、短時間通電を行った場合は下限電力量で与えることができる。ここで興味深いのは、この両者が共通の着火現象であるにも関わらず、着火限界が連続通電と短時間通電で異なる物理量により与えられることであ

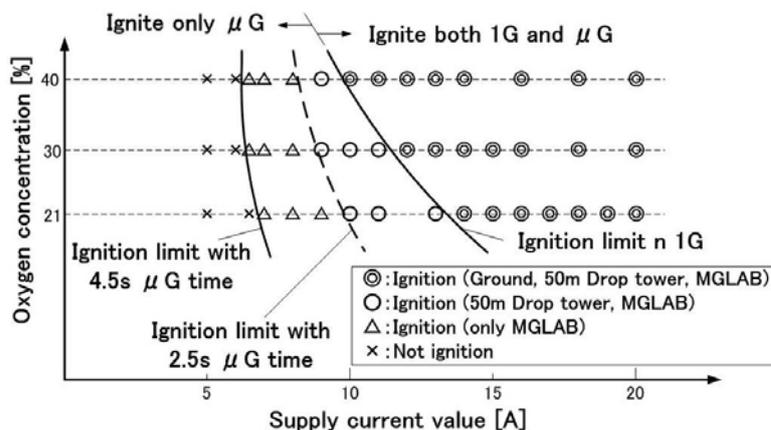


図2 電流条件に対する着火限界条件 (1G, μG) [1]

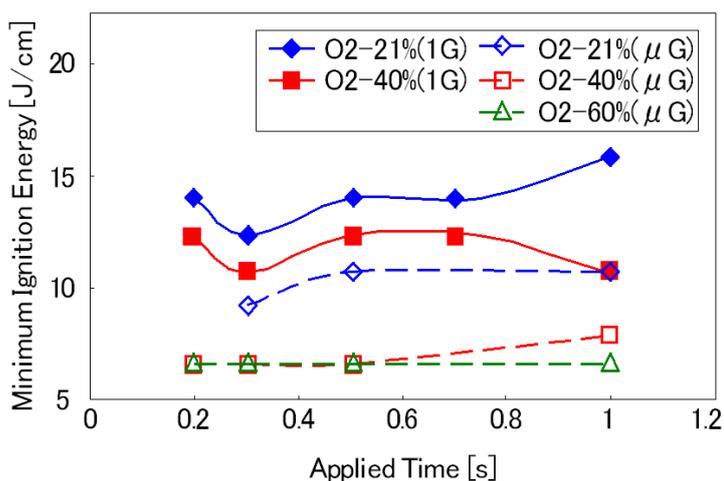


図3 通電時間の違いによる着火下限エネルギー(1G, μG)[2]

る。その様子を概念的に示したものが図4である。すなわち、電線の着火限界は電流と供給エネルギーの空間に示すことができ、それぞれの限界条件に漸近する曲線で与えられると考えられる。したがって、例えば下限電流付近では通電時間が十分長く積算のエネルギーが大きくなっても着火の生じない条件が存在し、一方、下限エネルギー条件付近では電流値がい

くら大きくても着火は生じない場合がある。
微小重力場における電線の通電着火研究では、この着火限界曲線を実験的および理論的に与えることが重要な目標になる。

4. 電線溶融被覆の不安定挙動

電線に通電着火を行う際、電線被覆に用いられる多くの材料（例えば、ポリエチレンやポリビニル等）は、着火が生じる前に被覆が溶融しこれが熱分解し着火に至る。この過程で、溶融した被覆が電線への通電電流や通電時間、さらには重力条件により様々な形状を示す。例えば図5は、ポリエチレン被覆電線（3節で示した着火実験で使用した電線）の着火直前の被覆材形状の時間変化を示したもので、微小重力場で取得したものである。電線に通電を行いしばらくすると、溶融被覆のところどころに被覆の太い箇所と細い箇所が現れてくる（4.700s）。さらに時間が経過すると、この被覆はいくつかの独立した塊となり周期的に分布する液滴となっている（4.900s）。着火現象は、このような被覆の着火前の動的挙動と密接に関連していることが予想され、着火限界条件を確定するうえでは、通電条

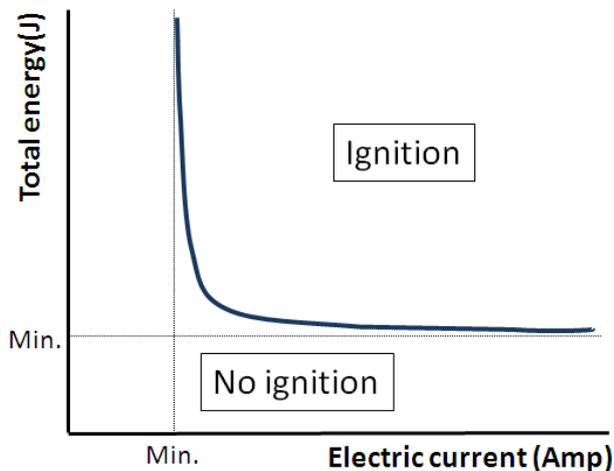


図4 過電流電線の着火限界条件の概念図(μG)

を示す。例えば図5は、ポリエチレン被覆電線（3節で示した着火実験で使用した電線）の着火直前の被覆材形状の時間変化を示したもので、微小重力場で取得したものである。電線に通電を行いしばらくすると、溶融被覆のところどころに被覆の太い箇所と細い箇所が現れてくる（4.700s）。さらに時間が経過すると、この被覆はいくつかの独立した塊となり周期的に分布する液滴となっている（4.900s）。着火現象は、このような被覆の着火前の動的挙動と密接に関連していることが予想され、着火限界条件を確定するうえでは、通電条

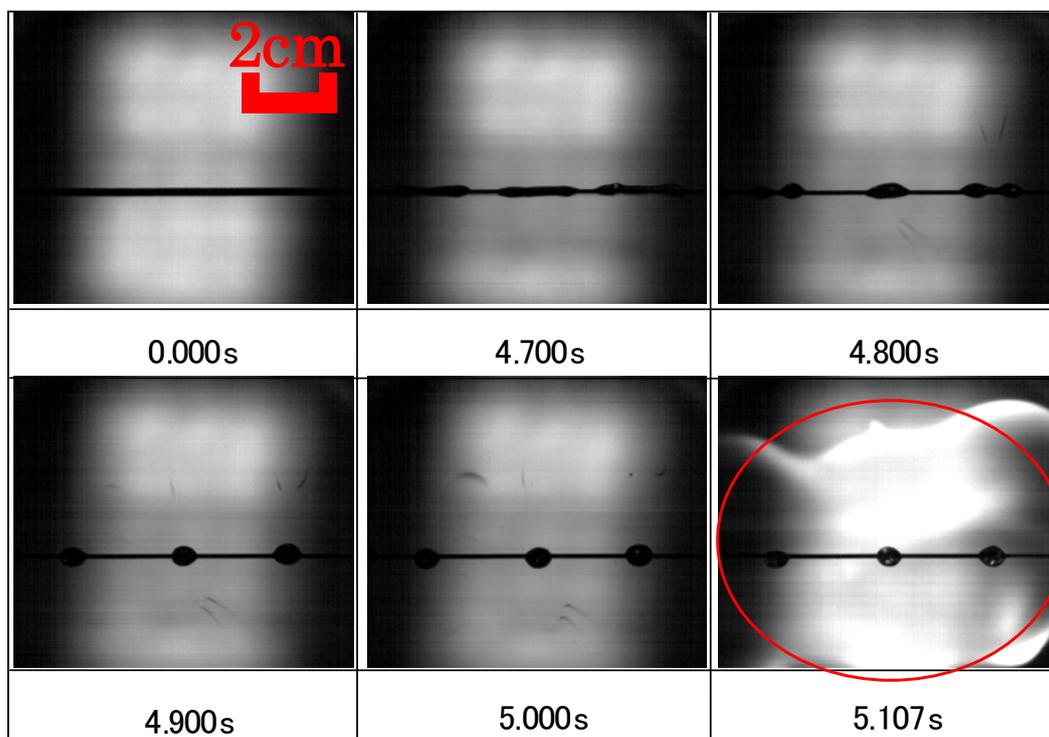


図5 低電流通電時に生じる電線被覆の挙動の例 ($G=0.01$, $\tau_i=5.083s$, $X_{O_2}=21\%$, $I=6A$)

件と被覆の動的挙動の相互関係、および被覆の動的挙動と着火限界条件の関係を明らかにすることは重要な課題と言える。とくに、図4に示した着火限界条件曲線のなかで下限電流値条件付近では、着火遅れ時間が極めて長くなり、この熔融被覆の動的挙動が着火限界に対し重要な影響を与える可能性がある。この実験を実施する上では、ある程度の微小重力継続時間と質の高い微小重力環境が必要であり、この下限電流条件付近がとくに大気球を利用した微小重力実験の研究対象になると考えている。

5. まとめ

本稿では、著者らが推進する微小重力場における電線の過電流による着火現象研究の概要を紹介した。この一連の研究では、着火限界条件を、通電電流および通電エネルギーに関し与えることが大きな目標となっている。とくに通電電流の下限条件付近では着火遅れ時間が長くなり、着火前に生じる電線被覆の熔融および不安定挙動が、電線の着火限界に影響を与える可能性がある。このような背景から、電線の通電着火時に生じる被覆の挙動は極めて興味深い研究対象であるが、一方で、ある程度の微小重力環境継続時間および微小重力の質が必要となることから、大気球による微小重力実験は、本研究に対する有力な実験手段になるものと考えている。

[参考文献]

1. K. Agata, O. Fujita, Y. Ichimura, T. Fujii, H. Ito, Y. Nakamura, *Jpn. Soc. Microgravity Appl.* 25 (1) (2008) 11–16. (in Japanese).
2. O. Fujita, T. Kyono, Y. Kido, Y. Nakamura, H. Ito, *Proc. Combust. Inst.* 33 (2011) 2617-2623.
3. Y. Takano, O. Fujita, N. Shigeta, Y. Nakamura, H. Ito, *Proc. Combust. Inst.*, 34 (2013) (in print).