代表提案者　渋谷龍一
受付番号

応募フォーム詳細

１．実験テーマ名

微小重力環境における「ロウソクの科学」
（チーム名：学習院大学理学部
微小重力研究会 2006）

２．実験の目的・概要

2.1　初めに

微小重力環境を利用した実験として最も有名な現象としてロウソクの炎の形状変化があげられる。これは地上においては熱対流の影響で円錐形をしているロウソクの炎が、微小重力環境では熱対流の消失によって球形になる現象である（図 1）。

ロウソクの炎の形状変化は微小重力環境の特異性を分かりやすく、そして興味深く表しているために微小重力実験のデモンストレーションとしてよく紹介されている[1.2]。

しかし、現在までに行われているロウソクの炎についての実験報告をみると、単純に「炎の形が円錐形から球になる」という形状の定性的な変化を述べるだけで、定量的な研究は行われていない。

微小重力環境においてロウソクの形状が円錐形から球形になる現象を定性的な形状変化だけを見て終わらせるのは疑問だと筆者は感じている。それはロウソクの炎の形状が球になるということは、「半径」というただひとつのパラメータで炎を定量的に扱えることを意味する。そこで本提案では、ロウソクの炎が球形になるという微小重力環境での特性を利用して、ロウソクの炎の雰囲気の変化による炎の大きさ・温度の測定を実施し、筆者が仮定する「ロウソク係数」の測定を目的とする。

この「ロウソク係数」とは、ロウソクの炎の大きさには雰囲気・温度との線形関係が存在すると仮定して、その係数がロウソクの種類によって一定であり、ロウソクの燃焼特性を表す量として定義できるのではないかと考えて仮定した係数である。このロウソクの炎について「大きさ-雰囲気の圧力・温度」の関係から「ロウソク係数」を導出したい。

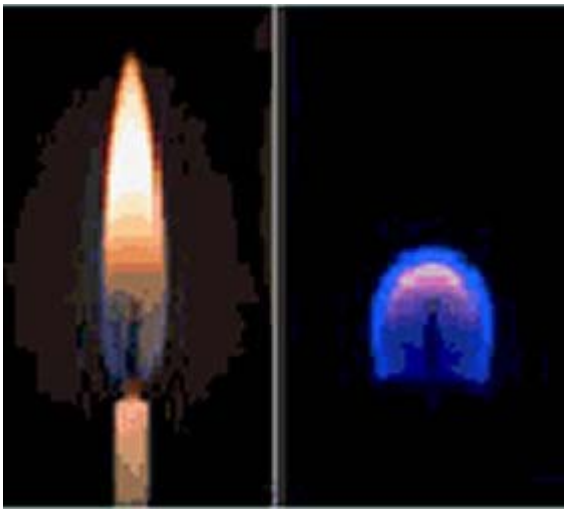

図 1.地上と微小重力環境におけるロウソクの炎の形状変化（JAXA 公式サイト http://idb.exst.jaxa.jp/gallery/gallery_jikken/jikken_photo.htm より引用）

2.2　予備実験状況

現在までに行っている予備実験の状況について述べる。

筆者らの研究グループでは、2004 年に微小重力環境における線香花火の燃焼実験を実施し、その際に金属製の密閉チャンバーを製作した（図 2）。このチャンバーは現在でも実験に使用しており、現時点で最大 4 気圧まで内部雰囲気を加圧することが可能である。

このチャンバーを用いて現在は主に加圧空気中での線香花火の燃焼実験を地上で実施しているが、装置を転用することで加圧空気中でのロウソクの炎の大きさ・温度の変化を測定している。

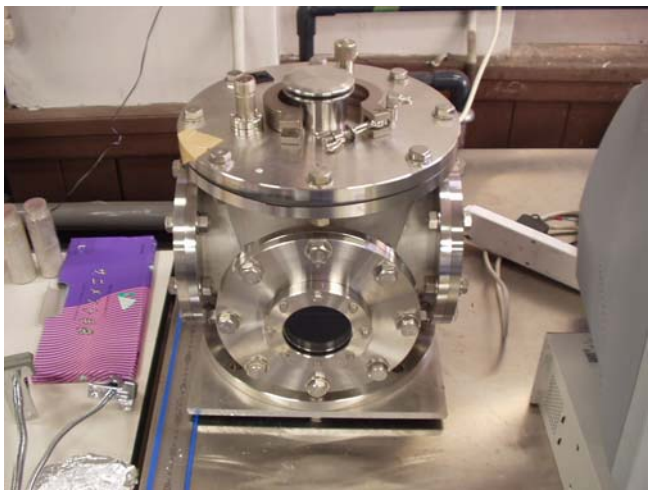

図 2.加圧燃焼実験に使用する金属性チャンバー

図 4.放射温度計による加圧雰囲気中での燃焼温度測定装置

2.3　実験方法

雰囲気に乾燥空気を使用し、圧力を徐々に増加させてロウソクの炎の大きさと温度を測定した。

温度は放射温度計を用いて測定した。放射温度計の校正には熱電対を使用した。

ロウソクの炎の大きさは、円柱座標系をとった場合の炎の Z 軸方向の長さを「大きさ」とした（図 3)。ロウソク炎の温度は、炎の部分によって異なるが放射温度計の焦点を軸の Z 軸方向にスキャンして得た最大値をロウソクの温度とした（図 4)。

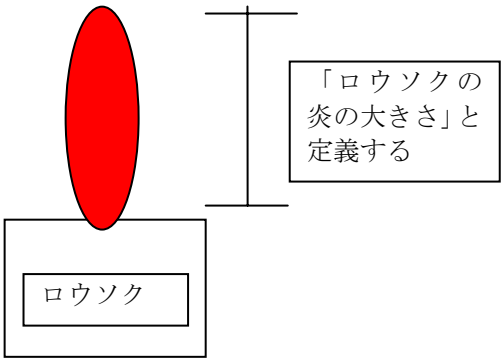

図 3.ロウソクの炎の大きさの定義

2.4　実験結果・考察

雰囲気の圧力を変化させた場合のロウソクの炎を撮影した写真は以下の図5.6.7のようになった(フィルターをかけて撮影しているので炎しか写っていない)。

図 5.　0.1MPa 時のロウソクの炎

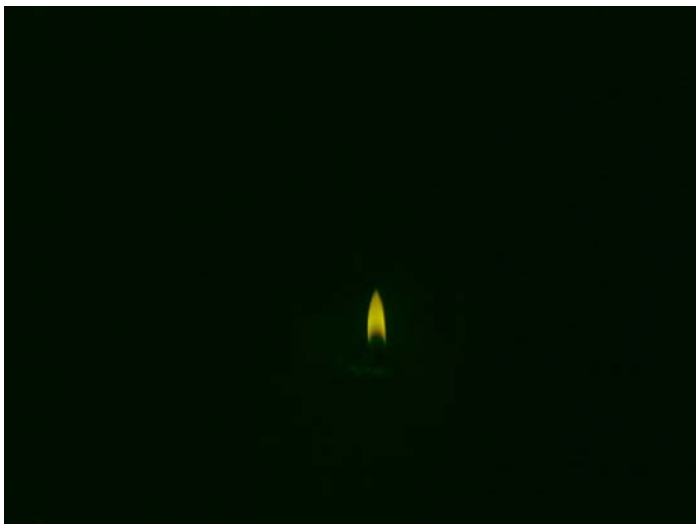

図 6.　0.2MPa 時のロウソクの炎

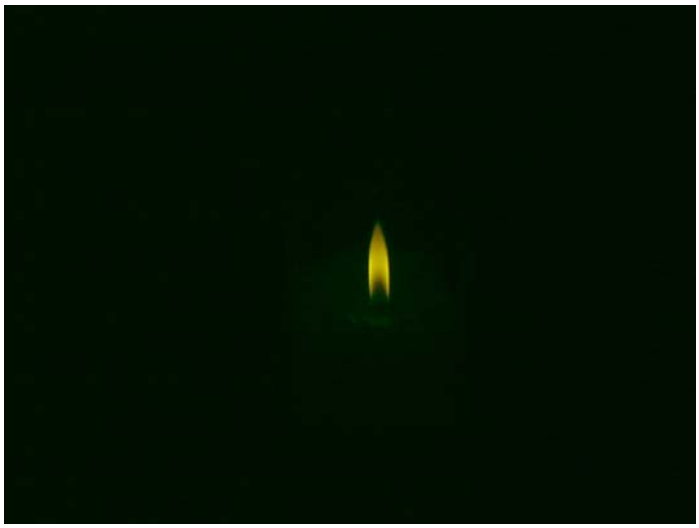

図 7.　0.3MPa 時のロウソクの炎

以上の写真から、ロウソクの炎の大きさは雰囲気の圧力に対して明らかに依存している。この結果をグラフにプロットしたものが図 8 である。

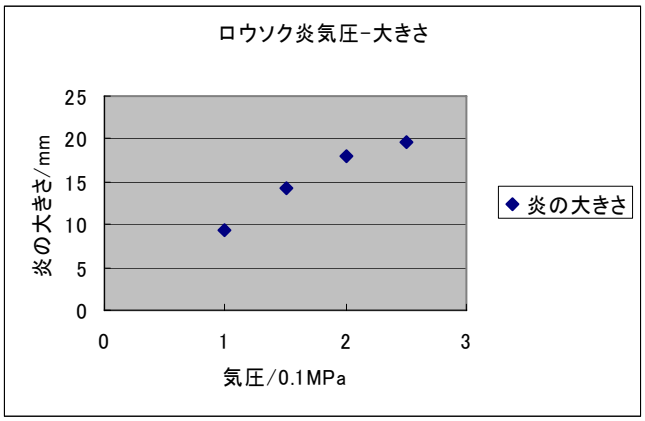

図 8.　雰囲気の圧力とロウソクの炎の大きさの関係

また、放射温度計を用いて雰囲気の圧力とロウソクの炎の温度との関係を測定した結果が図 9 である。

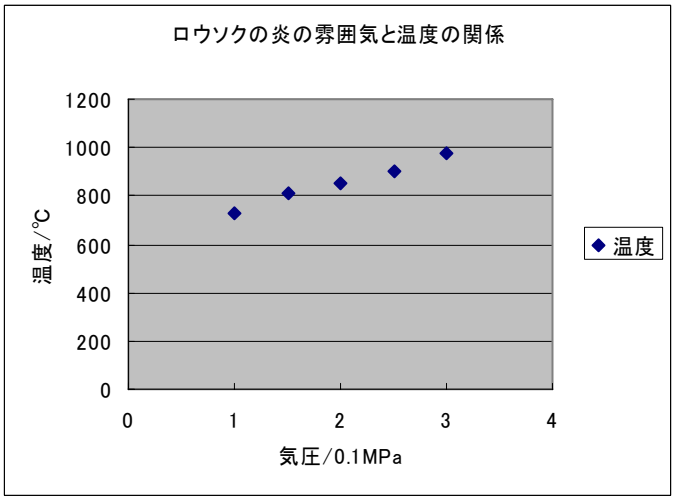

図 9.　雰囲気の圧力とロウソクの炎の温度の関係

以上の図 8.9 から、ロウソクの炎の大きさは 0.2MPa 程度までは圧力に対して線形であることが分かる。また、炎の温度に関しては 0.3MPa まで線形関係にあることが実験的に明らかとなった。

この結果から、雰囲気の圧力を増加させると、ロウソクの炎への雰囲気からの酸素供給量が増加し、その結果として温度が上昇することが考えられる。炎の大きさが増加したことも、炎の温度が上昇したことによって熱対流が増加して炎が「長細く」なったためだと考えられる。

この考えを確かめるために、上記 2 つのグラフから「温度-炎の大きさ」についてグラフにプロットした。結果は図 10 のようになった。

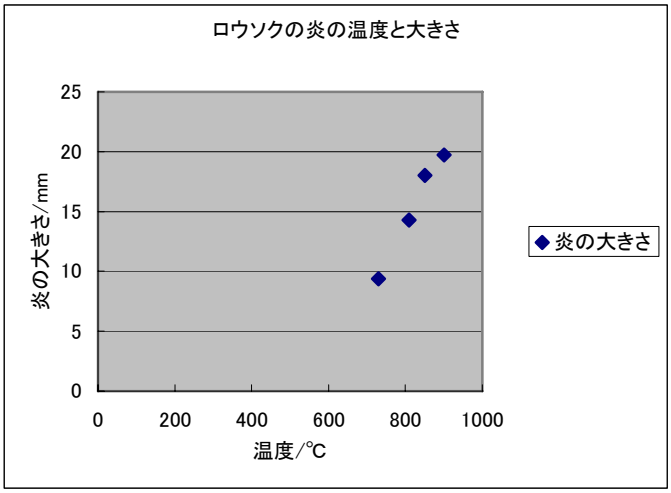

図 10.　ロウソクの炎の温度と大きさの関係

以上のように「温度-炎の大きさ」でグラフにプロットすると、データが線形に並ぶ。ここから、雰囲気を加圧すると、ロウソクの炎の温度が上昇することにより熱対流が増加して炎の形状が細長くなるという考えが成り立つ。

以上が地上での予備実験の結果である。地上において雰囲気を加圧した状態でのロウソクの燃焼実験を実施し、ロウソクの炎の温度と大きさが雰囲気の圧力に応じて変化することを実験的に確かめた。しかし、ロウソクの炎の大きさの変化は熱対流の影響が極めて大きいと考えられる。それゆえに、熱対流の影響を受けない微小重力環境で雰囲気を変化させた実験を実施し、ロウソクの圧力（温度）と炎の大きさ（半径）との関係を実験的に明らかにしたい。

微小重力環境でも雰囲気の圧力とロウソクの炎の温度の関係は地上と変わらないと考えられるが、熱対流が消失した環境での炎の大きさ（微小重力環境では炎が球形を取るために半径）が、地上と同様に雰囲気・温度と線形関係をとるかどうかが不明なため、実験的に明らかにしたい。おそらくは線形関係はとるだろうが、その比例係数は地上とは異なった値をとると仮定している。微小重力環境でのこの比例係数は熱対流の影響を受けていない単純な系での実験結果であるため、この係数を「ロウソク係数」として定義したい。この値は、ロウソクの種類によって一定であり、ロウソクの燃焼特性を示す量になると期待している。「ロウソク係数」の次元は雰囲気の圧力に注目した場合は m/Pa であり、ロウソクの炎の温度に注目した場合は m/K である。

３．実験内容の区分

化学・物理・生物・医学・理工・文化・芸術・その他（　　）

４．実験手順

1.微小重力環境での実験手順は、放物線飛行前に圧縮空気のボンベからチャンバー内部に空気を導入して目的の圧力まで加圧する。
2.μＧになると同時に、点火装置である電熱線に通電させ、チャンバー内部のロウソクに点火する。発生する炎をビデオカメラを用いて光学的に観察・記録する。また放射温度計を用いて、ロウソクの炎の温度を測定する。
3.微小重力環境終了後は、機外排気システムを用いてチャンバー内部を減圧してロウソクの火を消し、次の放物線飛行の準備をする（1に戻って雰囲気の加圧からはじめる）。

本実験では雰囲気を加圧した状態で微小重力環境におけるロウソクの炎の燃焼実験を実施するが、航空機実験の特性上、μＧ の前に 1.5G、後に 2G の過重力状態が発生する。そこで、1.5G の重力時にロウソクの燃焼実験を実施することで、過重力状態におけるロウソクの炎の雰囲気圧力-ロウソクの炎の大きさのデータを取得することも可能であると考えている。

筆者が調べた限り、μＧ 状態はもちろん過重力環境で雰囲気を変えてロウソクの燃焼実験を行った例は存在しないため、航空機実験を実施できるならばμＧのみならず 1.5G 環境でのロウソクの炎の燃焼実験もあわせて実施し世界初のデータを取得したい。

また、現時点では雰囲気の「圧力」を変更してロウソクの燃焼実験を地上で行っているが、空気中の酸素分圧を変更した状態での燃焼実験も実施したいと考えている。本年度の無重力実験コンテストの実験実施時期は来年 3 月と期間があるため、本提案が採用されたならば雰囲気について圧力のみならず酸素分圧

をパラメータとして変更した状態での燃焼実験も実施し､｢雰囲気中の酸素濃度-ロウソクの炎の大きさ」のデータも微小重力環境で取得したい。

以上の実験の結果から「雰囲気の圧力」「雰囲気の酸素分圧」をパラメータとして、「ロウソクの炎の大きさ（半径)」「ロウソクの炎の温度」が定量的に得られる。ここから、ロウソクの炎の大きさ（半径）が雰囲気の圧力・酸素分圧・炎の温度に対して線形関係であるかを確かめ、線形である場合はその係数（ロウソク係数）を求める。

５．実験装置概要

実験装置は図２で示した2004年度に線香花火の燃焼実験用に製作した金属製密閉チャンバーを改造して使用する。実験システムは図11に示すようにロウソクを取り付けるチャンバーに加圧用の乾燥空気バルブと機外排気システムを組み合わせて使用する。

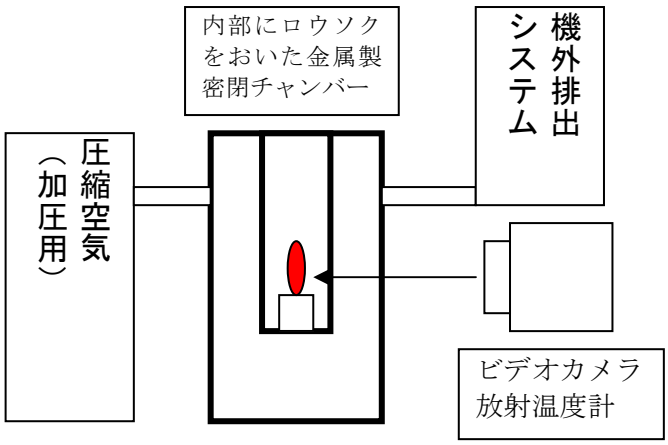

図 11.　実験システム概要

ロウソクの点火には電熱線を使用する。電熱線による点火方法は 2004 年度の線香花火燃焼実験で確立し、微小重力環境で 30 回線香花火に点火することに成功した信頼性の高い点火システムである。

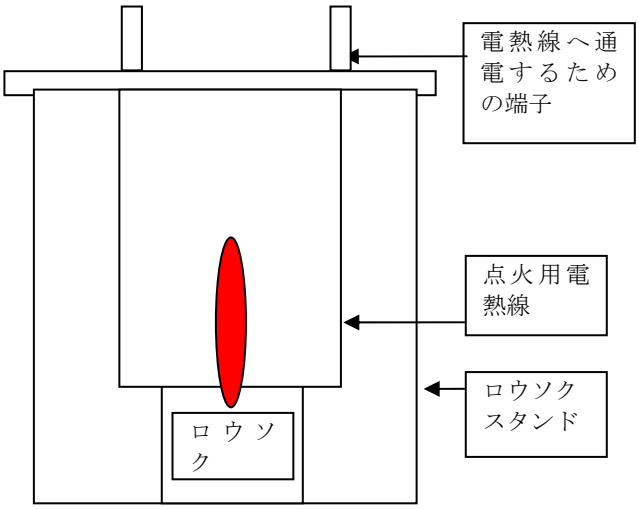

図 12.　ロウソク取り付け部分･点火システム

参考文献

1.斉藤幸一：化学と教育、46 巻 5 号（1998)、P320
2.ブルーバックス、宇宙実験最前線、講談社

６．実験装置のサイズ／重量概算

サイズ：300mm×300mm×400mm
重量：30kg

７．必要な電源容量概算

（ AC100V ）（ Max.3Amp ）・ DC28V（Max.5Amp)）

８．実験支援装置の利用要望

（ビデオカメラ／VTR・データレコーダ・その他）

９．危険物等の搭載の有無

（高圧ガス・可燃物・毒物・その他）

１０．実験実施時の航空機への搭乗希望有無

（ 有 ・ 無 ）

１１．役割分担

プロジェクトマネージャー：渋谷龍一
プロジェクトリーダー：石井啓太
アシスタントプロジェクトマネージャー：市村豊

１２．その他特記事項