

微小重力環境における線香花火の燃焼の定量的解析方法

市村豊、渡辺匡人（学習院大学）
石川毅彦（JAXA）

Quantitatively analyze about Japanese sparkler “senkoh-hanabi” combustion under microgravity

Yutaka ICHIMURA, Masahito WATANABE

Department of Physics, Gakushuin University, Mejiro, Toshima-ku, Tokyo 171-8588, Japan

Takehiko ISHIKAWA

JAXA, 1-1, Sengen 2chome, Tsukuba-city, Ibaraki 305-8505

E-mail: argonworks@gmail.com

Abstract; we research about Japanese sparkler “senkoh-hanabi” combustion under microgravity. Present “senkoh-hanabi” study, report only qualitative analysis. Then we develop method of quantitatively analyze about “senkoh-hanabi”. This method can show “senkoh-hanabi” spark distribution by integrate video image. Use this method; we clear “senkoh-hanabi” spark distribution are symmetry around fire ball.

Key words; Combustion, Japanese sparkler, senkoh-hanabi, microgravity experiment

1.はじめに

線香花火の燃焼は、発生する火花の生成メカニズムや火花が時間変化することなど、問題点が指摘されているが明らかにされていない部分が多く存在する。線香花火の過去の研究では、火花の飛び方の非線形性に注目した寺田の指摘や、中谷らによる研究が先駆的に行われた[1,2]。近年には伊藤による線香花火からの火花発生についての研究がある[3,4]。また線香花火は身近な存在であるところから中高生の科学コンテストでも研究テーマとして取り上げられることが多い[5]。しかし、線香花火の火球への雰囲気からの酸素供給量や、火球内部の対流が火花に及ぼしている影響についての研究報告はなされていない。そこで筆者は火球周りの空気の流れや火球内部の対流の火花への影響を調べるため、2004年12月に第二回無重力実験コンテストの一環として航空機を用いた微小重力環境における線香花火燃焼実験を実施した。この研究では微小重力環境において線香花火を燃焼させ、光学的に燃焼を観察した。実験の結果として、微小重力環境では線香花火の火球は生成するが(Fig1)火花は発生しないこと、また0G後に1.5GにGが変化すると火花が発生する(Fig2)ことを明らかにした[6]。

しかし、この実験では微小重力環境中での火花発生が実現できなかったため、現在は雰囲気を加圧した状態で花火を燃焼させ微小重力環境中での火花発生を目的とした実験を計画している。

具体的には JAXA が開発している大気球を用

いた微小重力実験システムを利用して、2007年5月に微小重力環境での線香花火燃焼実験を再度実施する予定である。

本報告では、実験結果を解析するために新たに考案した線香花火の火花の時間変化および分布の定量的表現手法について報告する。

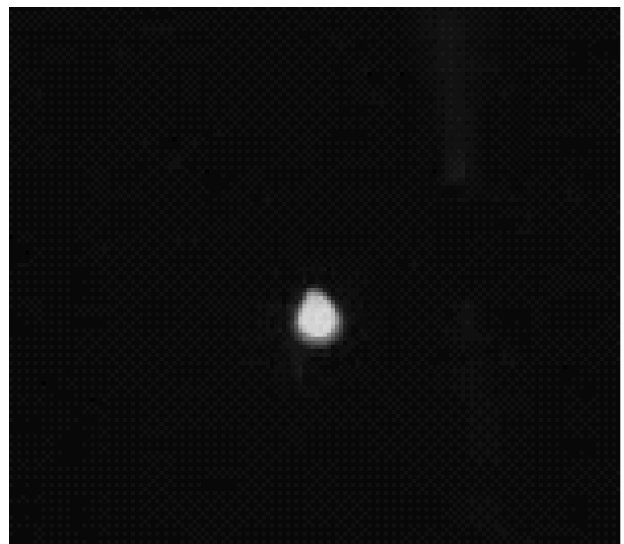


Fig1. 微小重力環境で生成した火球

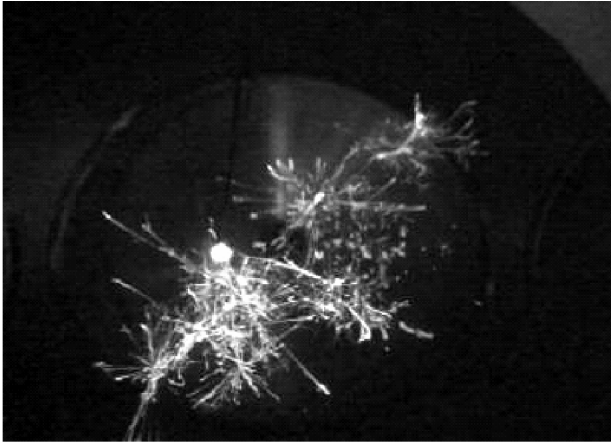


Fig2. 0G から 1.5G へ重力が変化した後に発生した火花

2.線香花火の燃焼の画像解析方法

線香花火の燃焼において、もっとも特徴的かつ興味深い現象は「火花の発生」である。しかし、線香花火から発生する火花を定量的に表現する方法が確立されていないことが、研究を行ううえで困難であった。そこで筆者は線香花火から発生する火花の分布から大きさを定量的に定義する方法を開発した。

線香花火の燃焼は、雰囲気を加圧するにしたがって発生する火花が短くなるが、「火花の大きさ」を厳密に定義する方法が今まで無かったため、映像を積分することによって「火花の大きさ」を出来るだけ厳密に決定する方法を考えた。また現在計画している微小重力環境での線香花火燃焼実験の結果を地上と微小重力環境とで発生する火花にどのような違いが表れるかを議論するために「火花の分布」を定量的に表現する方法を考えた。

線香花火の燃焼を調べるうえでは、光学的に毎秒 30 フレームの CCD カメラを使用してサイドビューで燃焼・火花を撮影する方法がもっとも簡便である。

そこで CCD カメラが毎秒 30 フレームであることを利用して、線香花火の燃焼映像をサイドビューで撮影した映像を 1 コマずつ切り分けて、画像解析を行った。

2.1 火花の時間変化に関する画像解析方法

まず、線香花火の燃焼・火花発生を撮影した画像に関して 320×240 の解像度に設定する。その上で、線香花火の燃焼は火花と背景部のコントラストがはっきりしていることを利用して、任意の閾値を設定して、コンピューター上でそれぞれの画素について閾値よりも輝度が高いか低いかで火花の部分と背景の部分の選別を行った。

初期の方法では、単純に画面のうち光っている部分の画素数を数えて横軸・時間・縦軸・光ってい

る画素数でグラフにプロットした。

この方法でグラフに表示した結果を空気雰囲気 1G 環境(Fig3)と、0G 後の 1.5G 環境で発生した火花について(Fig4)それぞれ示す。Fig3 Fig4 のグラフは横軸が時間、縦軸が画像中の火花の占める面積の割合を示している。

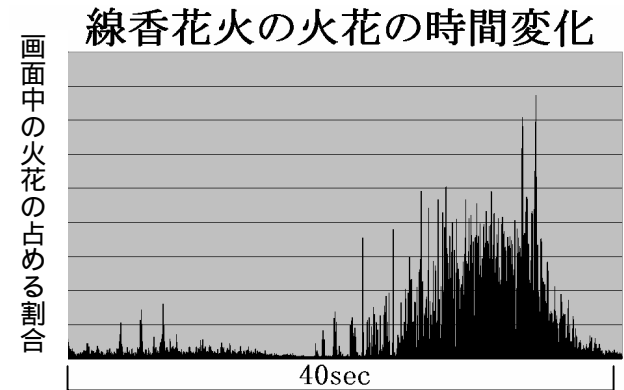


Fig3. 1G 環境での線香花火の火花の時間変化

線香花火の火花の時間変化1.5G

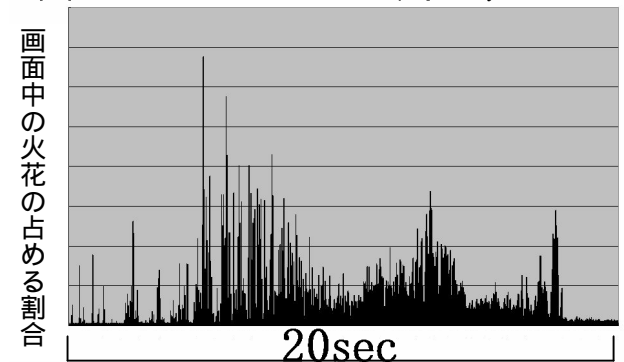


Fig4. 1.5G 環境での線香花火の火花の時間変化

初期の方法では単純に「画面の中で光っている面積」を求めて時間ごとに並べ火花の時間変化を求めた。

この方法によって、ピーク位置を見ることで火花発生の時間間隔を求めることが可能である。しかし、得られる情報が少ないため、プログラムを書き換え、別の算出方法で線香花火の火花分布の可視化を行った。

2.2 火花の分布に関する画像解析方法

画面の解像度に関しては同様に 320×240 に設定し、同じように閾値を設定して火花の部分と背景の部分コンピューター上で選別する。

新たに考案した方法では、あらかじめプログラム中で配列変数を 360×240 だけ設定することで、画素ごとにどれだけ火花が分布しているかを足し合わせていく方式を採用した。

これによって、位置情報を含んだまま火花の部分だけを足し合わせることが可能になった。

この方法によって、火花の分布を 3D グラフに表示した(Fig5)。また可視化ツールに当初はエクセルを使用していたが、任意のデータについて分布の可視化が出来ないため、後で gnuplot を可視化ツールとして使用した。その結果をあわせて示す(Fig6)。

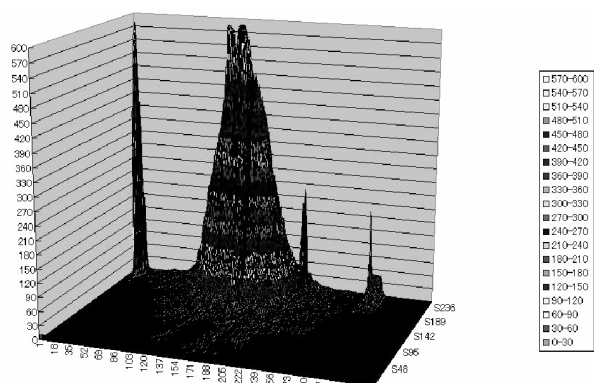


Fig5. 1G、0.1MPa 空気雰囲気における線香花火の火花の分布をエクセルで可視化したグラフ

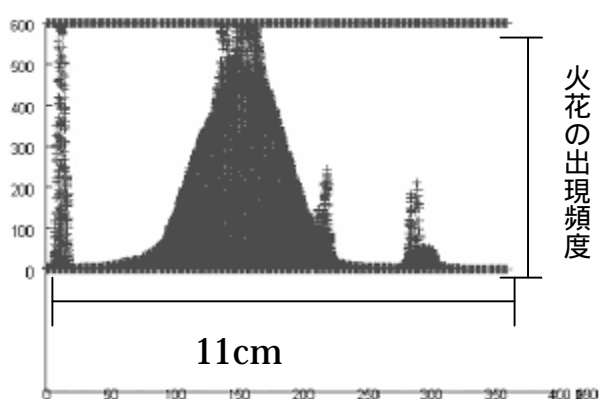


Fig6. 上記 Fig5 の火花分布を gnuplot を用いて可視化したグラフ

Fig5 Fig6 のグラフでは水平面が画面の x-y 平面を示している。Z 軸方向の高さが、線香花火の燃焼を撮影した映像から火花の部分で時間で足し合わせた結果で、Z 軸方向に高いほど火花の分布が大きいことを示す。

以上のような可視化を行った結果、線香花火の火花は、火球を中心として対照的に分布していることが明らかになった。

今回開発した画像解析手法を用いて、微小重力実験の予備実験として地上で実施している、加圧雰囲気中での線香花火の燃焼・発生した火花について火花分布の可視化を行った。その結果を次に示す(Fig7, Fig8)。

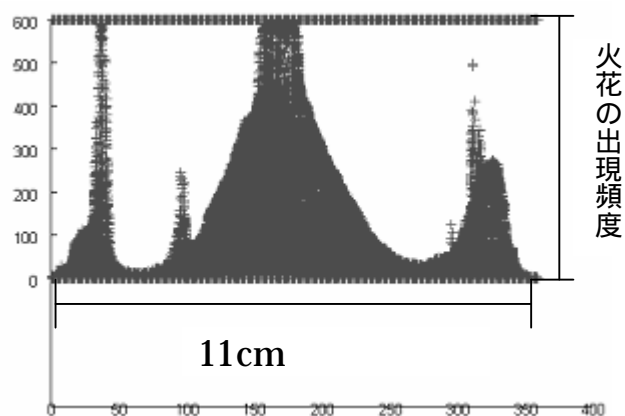


Fig7. 0.2MPa 空気雰囲気での燃焼・火花の分布を可視化したグラフ。中央のピーク以外は実験装置の内壁に反射した光によるノイズ

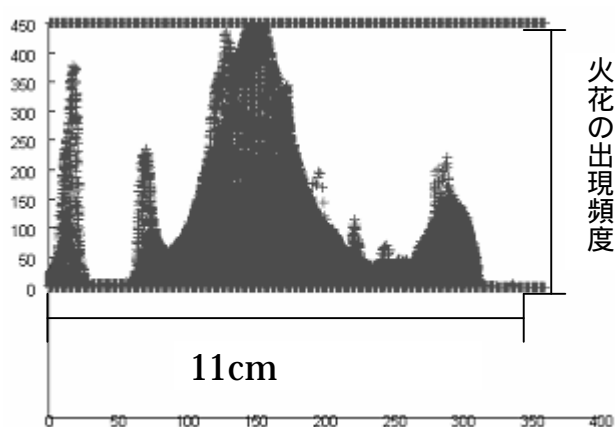


Fig8. 0.3MPa 空気雰囲気での燃焼・火花の分布を可視化したグラフ。Fig7 と同様に中央のピーク以外はノイズ

0.2MPa・0.3MPa 環境で燃焼させた線香花火について発生した火花の分布の可視化を行ったが、0.1MPa での火花と比べて 0.2MPa 雰囲気・0.3MPa 雰囲気のグラフには中央の分布に違いが見られる。0.1MPa のグラフではピークが直線からなっているが、0.3MPa のものでは曲線からなっている。このピークを形成する線の曲率から、線香花火の火花を定量的に特徴付けることが出来ないかと考えている。

また、線香花火の火花は雰囲気を加圧すると火球中心からの飛ぶ距離が明らかに短くなる。

この画像解析の結果からはその変化を読み取ることが難しい(0.1MPa の結果も 0.3MPa の結果も分布のピーク幅が同程度の大きさに見える)。しかし、足し合わせる画像の範囲の取り方や、背景と火花部分を判別するための閾値のとり方を工夫することで、ピーク幅を「火花の大きさ」として定義することが出来ると考えている。

3. まとめ

線香花火の燃焼・発生する火花を CCD カメラを用いてサイドビューで撮影した映像に関して、火花の部分を背景から選別して足し合わせることで線香花火の火花の分布を定量的にグラフに表示することに成功した。その結果、線香花火の火花が火球を中心に対照的に分布していることを明らかにした。またグラフにした際の分布のピーク幅を見ることで「線香花火の火花の大きさ」を定義することが出来るようになった。

筆者らが現在予定している JAXA の大気球を用いた微小重力環境での線香花火燃焼実験のための地上予備実験として、加圧環境での線香花火の燃焼について調べている。その結果を本解析手法で解析したが、現時点では火花が火球中心から飛ぶ距離が短くなる現象を示すことは出来ない。しかし、解析する範囲や、信号と背景を区別するための閾値を適切に設定することでこの問題は解決できると考えている。

参考文献

1. 寺田寅彦「寺田寅彦随筆集 第二巻」岩波文庫 1964
2. 中谷宇吉郎、関口譲「線香花火及び鉄の火花に就いて」理化学研究所彙報、6 集 12 号、1927
3. 伊藤秀明「線香花火の実験的考察-溶融 K_2Sn 中の石墨微結晶の構造的酸化反応」化学と教育、39 (6) 号、P682-685、1991
4. 伊藤秀明「線香花火（特に長手牡丹）用合成木炭の開発とその火花発現のメカニズムの解明」火薬学会誌、57 (5) 号、P186-191、1996
5. 「第 46 回日本学生科学賞 作品集」P46、読売新聞東京本社事業開発部、2003
6. 市村豊、井上武士、渋谷龍一、堀岡昌代、渡辺匡人「微小重力環境における線香花火の火花の飛び方」日本マイクログラビティ応用学会誌、23 号、P44、2006