

■特集／FEATURE ■

—花火の燃焼科学／The Combustion Science in Fireworks —

花火と科学の接点

Science and Fireworks

新井 充*

ARAI, Mitsuru*

東京大学 環境安全研究センター 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1
The University of Tokyo, Environmental Science Center, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

Abstract : As an introduction of the special issue for the combustion science in fireworks, features of Japanese fireworks, competitions of fireworks display, names/gyokumei of individual firework, and science of fireworks are explained. The science of fireworks include physical, health, and environmental issues related to fireworks, such as searching of substitute for sensitive oxidizing substance, preventing mass explosion, searching of substitute for toxic or harmful ingredients, and preventing smoke emission.

Key Words : Fireworks, Chrysanthemum, Peony, Multiple pistils, Senkohanabi, Mass explosion

1. はじめに

梅雨があけると、花火の季節が始まります。ここでは、花火の燃焼科学特集の導入として、日本の花火、花火と科学との接点について簡単に説明させていただきます。

2. 日本の花火

「牡丹」、「松葉」、「柳」、「散り菊」と可憐な変化を見せてくれる線香花火、夜空にカラフルな 6 重の同心円を見せてくれる五重芯の菊型花火、そして直径 800 m に開発する世界一の四尺玉、どれもが日本にいなくては決して見ることのできない花火です。これだけを見ても、日本が類まれなる豊かな花火文化を持った国であることがわかります。しかしながら、花火発祥の国は中国と言われていますし、花火の生産数においても中国は間違なく世界一です。また、カラフルな近代的花火の技術は江戸時代に英国からもたらされたことが知られています。果たして、日本の花火は本当に世界一なのでしょうか？

日本の花火の国際的な評価は、気になるところだと思います。私が自信を持って言えるのは、個々の打揚花火の質(Quality)については、間違なく日本の花火が世界一だということです。ただ、この世界一の花火を楽しんでいただ

くためには、花火競技大会に足を運んでいただく必要があります。ここでは先ず、我が国における 2 大花火競技大会を紹介したいと思います。

2.1. 花火競技大会

2 大花火競技大会のひとつは、毎年 8 月の最終土曜日に秋田県大仙市大曲で行われる全国花火競技大会「大曲の花火」です[1]。大曲の花火は、国内トップクラスの花火業者 28 社が、昼花火の部、10 号玉の部、創造花火の部の 3 部門を打揚げ、部門優勝と総合優勝(内閣総理大臣賞)を競う大会です。この特徴は、国内では珍しい(競技大会としては唯一)昼花火が打ち揚げられること、各業者がこの昼花火を含む 3 部門を全て打ち揚げなくてはならないことです。もうひとつが、10 月の第 1 土曜日に土浦市で行われる土浦全国花火競技大会です[2]。土浦全国花火競技会は、国内で定評のある約 70 社が、10 号玉の部、創造花火の部、スターマインの部を打ち揚げて、部門優勝と総合優勝(内閣総理大臣賞)を競う大会です。こちらは部門毎の参加が認められているので、大曲の内閣総理大臣賞が総合力を重視しているのに対し、土浦の内閣総理大臣賞は専門性を重視しているとも言えると思います。内閣総理大臣賞を授与できる大会は、全国でもこの 2 つの花火競技大会のみであり、それが 2 大花火競技大会と言われる所以でもあります。それぞれの部門について簡単に説明すると、まず「大曲の花火」の昼花火の部ですが、5 号玉 5 発で競われます。昼

* Corresponding author. E-mail: m_arai@esc.u-tokyo.ac.jp



図1 昇曲付三重芯変化菊(写真提供:大仙市).



図2 彩色千輪菊(写真提供:大仙市).



図3 型物(写真提供:大仙市).

花火は光ではなく煙を愛する花火であり、代表的なものに、煙竜、煙菊、煙柳があります。煙竜は、パラシュートに吊られた発煙花火数個が煙火玉の開発とともに放出され、煙を出しながらゆっくりと落下するポカ物で、発生しながら落下することにより縦に伸びる煙を竜に見立てるもので

す。煙の色が濃く、太く、短いのが良いとされています。一方、煙菊、煙柳は、それぞれ夜の割物の菊型花火、ポカ物の柳花火の光が彩煙に置き換えられたものです。次に10号玉の部は、10号玉2発で競われます。特に1発目は課題玉と称し、三重芯以上の芯入割物が課題になっています。(図1)2発目は自由玉と称されていますが、一発目と重複しないという条件がついています。自由玉としては、「千輪」(図2)、「冠菊」、「小割模様」に加え、「万華鏡／八方咲」や「時間差」等があります。「大曲の花火」の創造花火は以下のように定義づけられています。「創造花火とは、創造の名のごとく従来の丸型の概念を破った花火。昭和39年(1964年)の大曲全国花火競技大会から全国で初めてとり入れられた花火で、秋田県大仙市が創造花火の発祥地です。元大会委員長の故佐藤勲氏の考案により、打揚花火にテーマをもうけて形態・色彩・リズム感・立体感など、花火師の創造性を追求したものです。」これらに対し土浦では、10号玉の部は、10号玉1発で競われ、創造花火は、大曲とは異なり以下のような説明がなされています。「決まった型にとらわれず斬新なアイデアを競う創造花火では、5号玉を7発打ち揚げます。数字やアルファベット、キャラクターなどさまざまな模様が夜空に浮かび、観る人を沸かせます。(図3)作品が球状ではない花火もあるため、開いたときの向きによっては見えづらいことがあります。」スターマインは、決められた筒数と玉数の範囲内で2.5号玉以上4号玉以下の打揚花火を音楽付きで打ち揚げて競います。

2.2. 玉名(ぎょくめい)

昇分砲付八重芯錦菊先紅点滅(のぼりぶんぽうつきやえしんにしきぎくさきべにてんめつ)[2]

煙火玉につけられた玉名ですが、以下にその意味を説明します。

「昇分包」：煙火玉が上昇してゆく間に見せる効果を昇曲(のぼりきょく)あるいは昇曲導(のぼりきょくどう)と言いますが、分砲は、曲あるいは曲導の種類で、左右に火花を散らすものを言います。

「八重芯」：芯が二重に入ったものを八重芯と呼びます。芯入割物が開発され、一世を風靡した後しばらくしてから、二重芯が開発されたわけですが、当時は二重芯が究極の花火と考えられ、これ以上のものができる想像が全くできなかつたために八重芯と名付けられたようです。実際には、現在、競技会レベルで五重芯(いつえしん)、エキジビションレベルでは六重芯まで開発が進んでいます。

「錦菊」：錦色(金色)の菊型花火です。菊の他、牡丹、ダリア、冠菊、千輪、松島等、開発後の主たる形がはいります。

「先紅」：親星の色の変化を表す語句です。先というのは菊型花火で放射状に広がる花弁の先端部のこと、そこが錦色から紅色に変化することを表しています。

「点滅」：光の先のさらなる変化を表す語句です。ここでは、錦色から紅色に変化した光の先が点滅することを表してい

ます。

玉名には大きく分けて2つのタイプが有り、ここに挙げた例のように、打ち揚げられてから上空で開発し更に変化する様子までを忠実に表している伝統的なタイプの玉名と、開発から変化までのイメージから創出した現代的なタイプの玉名です。「大曲の花火」の10号玉の部では、課題玉に前者のタイプ、自由玉に後者のタイプの玉名をつけるのが一般的なようです。伝統的な玉名は、どのような花火が揚がるのかを事前にイメージすることができるので、その意味がわかっていると花火大会での楽しみ方が広がると思います。また、玉名はスターマインや創造花火のような組花火にもつけられています。玉名と実際の花火との一致というのは、競技大会では重要なポイントになっています。

3. 花火と科学の接点

言うまでもなく、花火が見せる様々な現象は、その殆どが火薬によって生み出されるものであり、火薬は主として酸化性物質と可燃性物質の混合物ですから、我々が見ているのは化学反応であり、花火を理解するためには化学および科学的知識が必須であります。しかしながら、今日の花火の大部分は、花火職人さんが経験的に積み上げてきた技術であり、ごく最近までは、花火が関わる化学反応の理解も進んでいませんでした。ここでは、そのような花火の技術について、科学的な解釈が可能なものの、科学が花火技術に寄与できる部分について簡単に説明してゆきます。

3.1. 線香花火(現象の理解)

「花火は線香花火に始まり線香花火に終わる」、誰の言葉かは存じませんが、非常に単純な花火でありながら、「牡丹」、「松葉」、「柳」、「散り菊」の四態を見せてくれる線香花火を描写するには、なかなか含蓄のある言葉に思えます。線香花火のメインの効果である「松葉」(中央の火球から、火花が次々に枝分かれしながら放射状に飛び広がる効果)は、SENKOHANABI Effectとして海外にも紹介されています。酸素中で鉄の細線を燃やすとこれと似た効果が得られ、中学校の理科の教科書に写真も載っていることから、線香花火の火薬には鉄粉が含まれていると誤解されている方もいらっしゃいますが、実は、火薬成分としては純粋な黒色火薬のみが使われています。そして、黒色火薬のみでどうしてあのような「松葉」ができるのか、実は最近までその機構は解明されていませんでした。線香花火については、九州大学 大学院工学研究院 準教授の井上智博先生が本号に寄稿されています。

3.2. 煙の発生抑制

打揚花火では、打揚火薬である黒色火薬の燃焼時、開発のための割薬(過塩素酸カリウム、硝酸カリウム、木炭等からなる組成物)の燃焼時、および星の燃焼時に煙の発生を供なうことが知られています。これらの煙については、

特に風向きが打揚現場から観客席方向の場合、および無風の場合に、観客の視界を遮るために、できれば無い方が好ましいと言えます。また、今のところ大きな問題になってはいませんが、花火大会で発生する煙による健康や環境への影響も懸念されるところです。

なお、花火大会における浮遊粒子状物質(SPM)については、東京大学の阿久津好明先生が2003年9月6日あきる野市、10月4日土浦市でそれぞれ行われた花火大会で測定した結果を報告しておられます。それによると、あきる野市 $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、土浦市 $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (それぞれピーク値)となっており、全国平均 $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ より低い値となっていて、特段の心配がないことがわかっています。また、花火大会でのPM2.5について積極的に測定した例はありませんが、関東地方大気環境対策推進連絡会 浮遊粒子状物質調査会議による平成26年度浮遊粒子状物質合同調査報告書では、平成26年7月26日夜に真岡市で観測された高濃度のPM2.5の原因を花火大会の影響としています[3]。

煙について話を戻しますと、星については、既に煙発生の少ないものが開発されてきております。打揚時の煙の低減については、ディズニーランドにて、圧縮空気による打揚が試みられていた時期がありましたが、煙火玉への不着火問題が克服できなかったことから、現在では実施されていないと聞いています。因みに、打揚火薬を使った通常の打揚では、煙火玉への点火は積極的に行う訳ではなく、打揚火薬の燃焼時に自動的にはほぼ100%の確率で煙火玉への着火が起きることが知られています。また、打揚薬としての黒色火薬に替えて無煙火薬を使用することも検討されたようですが、花火の打揚は銃身の内側と弾丸とがほぼ隙間なく密着している銃砲と異なり、打揚筒と煙火玉では、そのクリアランスが大きいため、黒色火薬に比較して燃焼速度が低い無煙火薬ではその隙間からガスが抜けてしまって、十分な推力が得られないために実用に至っていないようです。このように、打揚薬、割薬の燃焼による煙の発生抑制については、いまのところ解決策が無く、今後の重要な課題の一つであると言えます。煙火組成物の燃焼による煙の発生抑制につきましては、東京大学名誉教授の越光男先生が理論的な考察を進められていて、本号に寄稿されておられます。

3.3. 色の探求[4,5]

広重の浮世絵に描かれた両国の花火(現在の隅田川花火)は、和火と言われる炭火色単色の花火ですが、現代の花火は、赤、緑、黄、青と大変カラフルになってきています。これらは、もちろん炎色反応によるもので、明治時代に英國から伝えられた金属塩の配合がその基になっているのですが、実はその時に伝えられた技術は金属塩の使用だけではなく、酸化剤としての塩素酸カリウムの導入により高い燃焼温度を達成できるようになったことが重要です。これ以前に日本で使われていた酸化剤は、種子島銃とともに伝えられた硝石(硝酸カリウム)でしたが、硝酸カリウムは酸

化力が十分ではなく、電子を熱励起するための高い温度が得られないため、金属塩を美しく発光させることができなかつたからです。

花火の場合、赤はストロンチウム、黄はナトリウム、緑はバリウム、青は銅の炎色反応によるものです。このうち黄色は、ナトリウムの原子発光によるD線(596.0および596.6 nm)の線スペクトルであってほぼ単色であるのに対し、赤、緑、青は、ストロンチウム、バリウム、銅それぞれの化合物による分子発光による帶スペクトルであり、同じ金属を含んでいても分子種の違いにより、色合いが微妙に異なることが知られています。また、三原色が得られれば、理論的にはそれらの合成で全ての色が表現できるはずなのですが、実際には三原色のそれぞれが効率よく発色する温度が必ずしも同じではないため、目的とする色を的確に表現するのは必ずしも容易ではありません。花火の発色については、(国研)産業技術総合研究所主任研究員の松永猛裕博士が本号に寄稿されています。

3.4. Mass explosion (大量爆発) の問題

2000年にオランダの Enschede にて、欧州史上戦後最大の産業事故が発生しました。これは、倉庫に保管されていた花火が火災から爆発を起こし、死者 22 名、負傷者 947 名を記録したものです[6]。更に、2004年にデンマークの Seestにおいても、よく似た事故(倉庫に保管されていた花火の火災・爆発事故: 死者 1 名負傷者 24 名)が発生しています[7]。一般的に考えると、花火を大量に保管している倉庫が火事になった場合には、個々の花火が次々に連続的に爆発することが予想されるわけですが、これらの事故においては、火災の初期段階では個々の花火の連続的な爆発現象が見られたものの、それに引き続き、残りの大量の花火が一度に全て爆発する、mass explosion (大量爆発) と呼ばれる現象が確認されており、Enschede では 200 t、Seest では 284 t の火薬が大量爆発を起こしたと推定されています。ある程度の間隔を経て置かれた 2 つ以上の爆薬の一つが起爆された際に、それ以外の爆薬が同時に爆発する現象は、殉爆あるいは誘爆として知られています。そして、同様な現象が、花火における雷組成物や、雷組成物を多く含んだ煙火玉でも起きる可能性があることはこの時点でも認識していました。しかしながら、上記 2 つの事故における煙火玉の大半は、雷組成を含んでいないと考えられたため、この事故を受けて、オランダ、ドイツを中心とした欧州の国立の研究機関が”CHAF”と名付けられた研究プロジェクトを立ち上げて検討した結果、大量爆発を起こす可能性のある煙火組成物を Flash composition (閃光組成物) と名付け、簡易的な分類試験方法も提案しています[8]。しかしながら、彼らの提案する分類試験方法では、既に実規模実験により大量爆発を起こさないことが確認されている日本製の割薬が閃光組成物に分類されてしまうこと、既に大量爆発を起こすことが確認されている「滲剤」については閃光組成物に分類されないこと、等の問題点があり、今後の改善に向

けての研究が期待されています。大量爆発および閃光組成物については、(公社)日本煙火協会技術顧問の畠中修二博士が本号に寄稿されています。

3.5. 既に解決済みの問題

3.5.1. 赤爆からアルミ爆へ

かつては、大きな音を出す雷組成として、塩素酸カリウムと鶏冠石(AS_4S_4)からなる組成物(通称赤爆)が用いられていましたが、鶏冠石が毒性のあるヒ素を含んでいることから、塩素酸カリウムとアルミニウム粉との組成物(通称アルミ爆)への代替が進んだようです。なお、現在のアルミ爆は、過塩素酸カリウムとアルミニウム粉の組成物になっており、毒性に加え発火・爆発安全性も改善されています。

3.5.2. 塩素酸カリウム使用の削減

花火の酸化剤としては、かつては塩素酸カリウムが一般的でしたが、塩素酸カリウムを含む煙火組成物は、感度が高く事故が絶えなかったことから、1992年の茨城県の煙火製造所の爆発事故を契機に、経済産業省が代替物質としての過塩素酸カリウムの使用を奨励する指導を行いました。(公社)日本煙火協会もこの指導に全面的に協力したことから、我が国の煙火製造における塩素酸カリウムから過塩素酸カリウムへの移行は迅速かつ確実に進み、現在では塩素酸カリウムの使用は発煙組成物に限定されるようになっており、事故の減少に役立ったと考えられています。この塩素酸カリウムから過塩素酸カリウムへの変換は、上記爆発事故調査の過程での研究結果に基づくもので、科学的根拠を得た安全指導の好例であると言えます。

3.5.3. 雷組成からの硫黄、三硫化アンチモンの一掃

段雷と呼ばれる昼のポカ物花火があり、強烈な音と光を発する雷粒を 3 つ含むものを三段雷、5 つ含むものを五段雷と呼びます。かつては、選挙の投票日や運動会開催日の早朝に、号砲にみたてて打ち揚げられていました。基本組成は、過塩素酸カリウムとアルミニウム粉(アルミ爆)ですが、それに硫黄や三硫化アンチモンを追加する組成も知られていました。しかしながら、1997年に岡山県の煙火製造所が、雷組成の配合工程で爆発事故を起こしたことから、事故調査委員会による原因調査研究が行われ、硫黄あるいは三硫化アンチモンのアルミ爆への追加が、雷組成のパフォーマンスにはほとんど影響を与えない半面、感度を著しく増加させることを見出しました。(公財)日本煙火協会は、その研究結果を受けて、会員煙火業者に対する積極的な情報共有を行って、雷組成への硫黄および三硫化アンチモンの不添加を促しています。

3.6. 将来的な課題

過塩素酸塩は、甲状腺ホルモンの恒常性に影響を与えることが報告されています。これは、過塩素酸イオンが優先

的に甲状腺へ取り込まれることにより、甲状腺ホルモンを作るのに必須とされるヨウ素の甲状腺への取り込みを阻害するためとのことです[9]。このことを受けて米国カリフォルニア州では、過塩素酸塩を 6 ppb 以上含有するすべての物品の製造、流通、販売、仕様、廃棄等を規制しています。この問題は、いまのところ米国カリフォルニア州に限定された問題であること、花火に使われる過塩素酸カリウムはその大部分が燃焼反応で消費されてしまうため、花火消費後に残留する過塩素酸塩の量が少ないと推定されること、および、ロケット産業等で消費される過塩素酸塩に比べると花火産業で消費される過塩素酸塩の量は相対的に少ないと見積もられることから、花火由来の過塩素酸塩の削減は喫緊の課題とまでは言えないと考えられます。ただ、我が国においては、安全面からの積極的な指導の結果、花火に使われる酸化剤の大部分が過塩素酸カリウムとなってきていることから、今後も注視していくべき問題だと言えます。なお、米国では既に過塩素酸塩代替がある程度は進んできていますと聞いています。

4. 花火の教育・研究

花火の科学をサポートしている組織および情報交流の場としては、以下のものがあります。

4.1. 教育・研究機関

東京大学 環境安全研究センター 新井充研究室
 横浜国立大学大学院 工学研究院 三宅淳巳研究室
 横浜国立大学大学院 工学研究院 熊崎美恵子研究室
 福岡大学 工学部 化学システム工学科 加藤勝美研究室
 足利大学大学院 煙火化学専修 丁大玉研究室
 静岡理工科大学 機械学科 増田和三研究室
 九州大学 航空宇宙工学部門 井上智博 准教授
 (公社)日本煙火協会 煙火検査所
 (国研)産業技術総合研究所 安全化学研究部門 松永猛裕
 グループ
 JAXA 宇宙科学研究所 堀恵一研究室

4.2. 国内での情報交換の場

国内では、火薬学会の中に煙火専門部会(畠中修二部会長)があり、年間を通じて情報交換の場を提供している他、火薬学会の年会(5月)および秋季研究発表会(11月)が、花火を含む火薬関連研究の発表の場になっています。また、火薬学会では、国際シンポジウム(ISEM: International Symposium on Energetic Materials)を3年ごとに開催しています。

4.3. 国際的な学術交流および情報交換の場

ISF: International Symposium on Fireworks は、1992年に、カナダの爆薬研究所(CERL: Canadian Explosives Research Laboratory)の主催で始められた、花火に関する国際シンポ

ジウムであり、昨年5月に日本の大曲で開催されたシンポジウムで16回を迎えました。これまで、18ヶ月～24ヶ月間隔で、花火に関する科学、工学、芸術、法規制等についての情報交換を行なってきています。

当初の主催は、カナダの天然資源省爆発研究所でしたが、第6回シンポジウムからは、非営利組織である国際花火シンポジウム協会が主催することになって現在に至っています。

国際花火シンポジウムは大きく3つのパートから成り立っています。第1はもちろんシンポジウム本体であり、ここでは花火に関する科学、工学、芸術、法規制等についての報告を中心とした討論、意見交換が為される他、予め決められたテーマに関して、グループでディスカッションや情報交換を行う、モディレーテッドセッションがあります。口頭発表の皮切りには、主催国の花火の歴史と伝統についての報告があるのが通例であって、主催国の花火の歴史を知った上でその国の花火を見ると、より深い視点で花火が楽しめる気がします。シンポジウムと並行して、各国からの花火関係業者が集うトレードショウが行われており、各国の特徴ある花火、製造装置、試験装置、打揚げ関連器具等々を確認することができます。3番目は Social Event で、開催地ならではの、エクスカーションや花火見学が行われます。通常のシンポジウムでは、本来、おまけ程度の価値であるはずのものですが、花火のシンポジウムということもあって、花火見学は、参加者が一番楽しみにしている部分でもあります。特に海外での花火見学では、文化の違いを大きく感じることが多く、メキシコ、マルタでは日本のものとは全く違う仕掛け花火に、またポルトガルではロケット花火に熱狂する人々に驚かされた想いがあります。

これまで行われたシンポジウムは以下の通りです。

1992年第1回 モントリオール、加、1994年第2回 バンクーバー、加、1996年第3回 ディズニー・ワールド(オランダ)、米、1998年第4回 ハリファックス、加、2000年第5回 ナポリ、伊、2001年第6回 ディズニー・ワールド(オランダ)、米、2003年第7回 バレンシア、西、2005年第8回 滋賀、日本、2006年第9回 ベルリン、独、2007年第10回記念大会 モントリオール、加、2009年第11回 プエルト・バヤルタ、墨、2010年第12回 ポルトガル、葡、2012年第13回 マルタ、2013年第14回 長沙、中国、2015年第15回 ボルドー、仏、2017年第16回 大曲、日本

また、次回、第17回は、2019年5月にプエルト・バヤルタ、墨での開催が決まっています。

5. おわりに

花火の燃焼科学特集の導入として、日本の花火、花火と科学との接点について書かせていただきました。現状、日本の花火研究のレベルは、決して低い方ではありませんが、研究者の人数はごくごく限られています。本号の特集を見

ていただいて、少しでも花火に興味をもっていただければと思つております。

References

1. <http://www.oomagari-hanabi.com>
2. <http://www.tsuchiura-hanabi.jp>
3. 関東地方大気環境対策推進連絡会 浮遊粒子状物質調査会議, 「平成 26 年度浮遊粒子状物質合同調査報告書」(2016).
4. 山本ゆみ子, 東京大学 大学院工学系研究科 修士論文(2000).
5. 千田和也, 東京大学 工学部 卒業論文(2001).
6. https://en.wikipedia.org/wiki/Enschede_fireworks_disaster
7. https://en.wikipedia.org/wiki/Seest_fireworks_disaster
8. Recommendations on the Transport of Dangerous Goods, Manual of Tests and Criteria, 6th revised edition, United Nations (2015).
9. Blount, B.C., Pirkle, J.L., Osterloh, J.D., Valentin-Blasini, L., Caldwell, K.L., "Urinary perchlorate and thyroid hormone levels in adolescent and adult men and women living in the United States.", *Health Perspect.* 114(12):1865-71 (2006).
10. 新井充監修, 「花火の事典」, 東京堂出版(2016).