

# 質点シミュレーションを利用した打ち上げ花火作成支援システム

## A support system for making fireworks based on particle simulation

林 亮子†      山崎 貴之†      長谷川 俊†  
Ryoko Hayashi    Takayuki Yamazaki    Shun Hasegawa

### 1. まえがき

日本の代表的な夏の風物詩である花火<sup>[1][2]</sup>は、古くから花火を専門とする職人によって制作され、打ち上げられているが、火薬を扱うために制作も打ち上げも危険をとめない、花火の仕上がりは実際に打ち上げないとわからない。一方、近年の電子計算機はハードウェアおよびソフトウェアが発達したため、打ち上げ花火のコンピュータグラフィックス（以後CGと呼ぶこととする）が容易に作成できる<sup>[3][4][5][6]</sup>。CGを利用して安全に様々な花火を試作することで、花火文化の発展に貢献することができると考えられる。そこで、本研究では打ち上げ花火作成支援システムの開発を試みる。

花火にはいろいろな種類があるが、本研究では夜打ち上げる「割物」と呼ばれる花火を扱う。これは球を基本形状とする花火であり、我々が打ち上げ花火というときまずイメージするものの一つである。

### 2. 背景

以後の議論で必要となるため、まず花火の構造を紹介し、いくつかの用語を定義する。割物で我々が見ているのは光る粒であるが、これは星と呼ばれるもので、火薬と金属粉を混ぜて固めた小さい球である。花火の構造を図1(a)に示す。花火で打ち上がるものは玉と呼ばれ、和紙を張り合わせて作った球状の玉皮の中に星を並べ、中心部には割薬と呼ばれる火薬をつめて作られる。割薬には導火線がつながっており、打ち上げの過程で着火したのちに爆裂する。

次に打ち上げのしくみを説明する。打ち上げで用いる装置の概要を図1(b)に示す。打ち上げの際には打上筒に揚げ薬という、玉を上昇させるための火薬を入れ、その上に玉を入れる。速火線という打ち上げ用の導火線に火をつけると、揚げ薬に火が着き、筒内の温度と圧力が高くなるために玉が上昇して押し出される。なお、筒内の圧力が十分高くなるまで

玉が飛び出さないように、圧板で玉を押さえる。

花火の運動は、高校程度の力学の知識でおおまかに説明できるため、花火のシミュレーションやCG作成はこれまでも行われており、アミューズメント用のアプリケーションや趣味で制作されたものなども多数存在する。ここでは学術的な文献として発表されているものを紹介する。福山らは速度の二乗に比例する空気抵抗を用いて3次元CGを制作した<sup>[3]</sup>。後藤らは風の影響を考慮した花火の3次元シミュレーションを行い、OpenGLを用いて芯入り牡丹などの様々な割物のCG制作を行った<sup>[4]</sup>。後藤らは打ち上げ後の到達高度の実測値とシミュレーション結果を比較した結果、シミュレーションでは実測値よりも到達高度が低くなった。鈴木らは剛体運動に基づく花火のシミュレーションを行い、ヘッドマウントディスプレイとセンサシステムを組み合わせ対話処理による花火CGの表示を行った<sup>[5]</sup>。

以上のように、多数の花火シミュレーションプログラムが存在し、本物の花火に近いグラフィックス作成が行われているが、花火の制作を支援するシステムはまだ開発の余地がある。そこで本稿では、専門家が花火の打ち上げイメージをつくる過程を支援することを目標とし、花火の形状を作成するためのユーザインタフェースを含む花火制作支援システムの開発を試みた結果を報告する。

実際の花火の制作は職人が経験と勘によって行っており、明文化が困難であるため、星の制作から打ち上げまでの現実の花火を完全に模擬するようなシステムの開発は現在のところは非常に困難である。また、燃焼は非定常な物理過程であり、モデル化に困難を伴う。一方で星は既存のものを使用することとし、使用する種類と配置を考慮するだけでも多様な花火を制作できるものと考えられる。そのため、本研究では当面火薬の燃焼に関連する部分を直接扱うことは避けて星を質点とみなし、質点運動を行って一定の時間見える球体として星をモデル化する。

†金沢工業大学, Kanazawa Institute of Technology

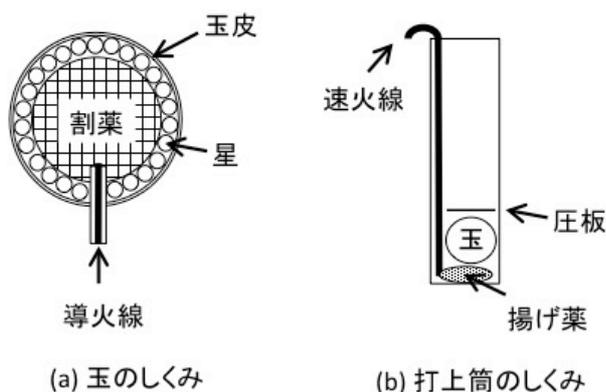


図1. 花火の構造と打ち上げ装置の構造

### 3. システム概要

本システムは大きく2つの部分に分かれる。1つは花火のシミュレーションおよびCG表示部分、もう1つはユーザインタフェース部分である。今回は花火のシミュレーションおよびCG表示部分をプログラミング言語C++とCG作成の標準APIとして知られるOpenGLを用いて開発し、ユーザインタフェース部分はhtmlとPerlを用いてウェブページおよびCGIプログラムとして開発している。以下に各部分の詳細を述べる。

### 4. 花火シミュレーションとCG表示

本研究では、花火の打ち上げの一連の過程を2つに分割して考える。2つの過程の概要と、その過程のシミュレーション内容を以下に述べる。

**過程1**：打ち上げ直後から最高点に達して玉が速度0になるまでを過程1とする。この間の運動を、垂直上方に初速を持ち、重力のみが働く等加速度運動と考える。今回はこの過程は質点の運動として簡略化し、空気抵抗は扱わない。到達高度は質量に依存せず初速と重力加速度のみによって決まるため、過程1におけるパラメータは初速だけである。CG作成上は、1個の球オブジェクトとして玉を描画することとなる。オイラー法を用いて数値的に時刻刻みごとの玉の位置を計算し、その位置に球を描画する。

**過程2**：玉が速度0になった瞬間に玉を複数の星に置き換える。その後星はあらかじめ設定した生存時間だけ光り続けるので、その生存時間が終わるまでを過程2とする。星は生存時間が終わると

消える。星は質点と考えるので大きさがなく、過程2の開始直後では玉の位置に全ての星が存在するものとする。そして星は外向きに初速を持ち、重力と空気抵抗を受けながら運動する。CG作成上は、星は大きさを持った物体として描画することとなる。

以上の2つの過程のうちで過程2が花火の見え方の核心部分であるため、以下で過程2の運動とCG作成について詳細を述べる。過程2における初速度を決める手順の詳細は文献[6]に譲り、ここでは概要を述べる。星を一旦球面上に配置し、球の中心を3次元座標の原点とすると、星の位置から外向きのベクトルが得られるので、これを適切な速さに補正して初速ベクトルとする。星を配置するのは、球の赤道およびそれに平行する円周上であり、等間隔に星を配置する。実際の花火では、玉皮の内側に星を最密充填するように一重に並べるため、星は円周上には乗らないが、今回はその配置は模擬していない。

今回制作する花火は芯入り菊、千輪、冠菊と呼ばれるものである。花火では球殻上に星が並んで光るという見方をすると、芯入り菊とは半径の異なる球殻が複数個あり、入れ子になっている状態の花火である。千輪とは、一旦星が光って見えた後に再度小さい花火としてさらに爆発するものである。冠菊とはしだれ柳とも呼ばれるもので、星が長く尾を引く花火である。なお、花火の種類や名前は文献によって様々であるため、文献によっては本稿で述べたものと異なる名前を使用している場合もある。

花火は様々な形状が可能であるが、上記の3種類の花火は全く構造が異なるようなことはなく、基本構造は図1(a)に従い、多層や入れ子にしたり、星の光る時間を変えることで制作できる。本システムでは玉のしくみと星の光り方を制御するためにパラメータを使用するが、プログラムの開発を容易にして種類を組み合わせた花火を可能にするため、3種類の花火を統一的に扱うようにパラメータを設計した。設計結果として、3種類の花火を特徴づけるパラメータを表1に示す。

表1に示すように、芯入り菊は子生成回数を2以上にすることで多重に球殻を作成する。他の花火では球殻が1個あるため、子生成回数は1である。孫生成回数は星の分裂回数を表し、千輪では星が1回分裂するため1であり、他の花火では分裂しないの

で0である。冠菊を特徴づけるのは光維持時間と尾の生存時間である。光維持時間は星が光って見える時間であり、尾の生存時間は尾の長さである。他の花火でも星が光り、ある程度の長さまで尾も引くので、どちらのパラメータも他の花火では0にならずある大きさの量を持つ。一方冠菊では星の光る時間が長く、尾も長く引くため、2つのパラメータは他の花火よりも1桁大きな数値になる。

次に、CG作成の概要を述べる。パラメータ設計上、星は必ず尾をある程度引くものであると位置づけられているため、星を表すCGのオブジェクトは直線オブジェクトである。直線を用いて曲線を表現するためには複数直線を関節でつなぐ必要があり、特に冠菊のように尾を長く引く花火では、尾を曲線らしく見せるために関節を6個程度以上にする必要があり、関節を増やすほど曲線に近くなるが、関節を増やすと描画に計算資源を必要とするため、1つの花火の星の数や、同時に打ち上げ可能な花火の数が制限されることになる。

## 5. 花火設定支援インタフェース

本研究で制作する花火は種々の形状が可能であるが、パラメータの数が多く、プログラム開発者以外のユーザが適切に設定するのが困難である。そこでパラメータを適切に設定するユーザインタフェースを開発した。このユーザインタフェースはウェブページとして用いる。いくつかの重要なパラメータのみをウェブページからユーザが入力すると、その入力値に連動して他のパラメータを計算し、あらかじめ用意したひな形パラメータファイル中のパラメータを置換することによってユーザ設定パラメータファイルを作成する。このプログラムはPerlで開発されており、CGIプログラムとして動作する。そのため、花火シミュレーションプログラムはウェブアプリケーションのように動作する。

表1. 3種類の花火を特徴づけるパラメータ

名称	芯入り菊	千輪	冠菊
星の数	143	416	237
子生成回数	2	1	1
孫生成回数	0	1	0
光維持時間[秒]	5	2	10
尾の生存時間[秒]	0.3	0.2	4

今回は以下に示す3種類のパラメータ指定方法を実装した。

**指定法1**：玉名に基づく指定

**指定法2**：あらかじめ用意したパラメータ設定からの選択式指定

**指定法3**：ユーザの数値入力による、個別のパラメータの直接指定

以上のうちで、指定法1の玉名に基づく指定が本システムの特徴的な機能であるため、次に詳細を述べる。

打ち上げ花火の中で大型の玉には名前がついていることがあり、玉名と呼ばれる。玉名は「菜の花畑」などのように、花火をデザインする際のイメージに基づいてつけられることもあるが、基本は「八重芯引先紅光露」などのように、花火の形式に従って名前がつく。例えば「八重芯引先紅光露」では、八重芯すなわち多重になっていて、尾を引いていて、一番外側が赤系の色であり、最後にピカッと光る「光露」がある、というように形式を羅列していくと名前になる。

花火の形式は主に4つに分けられているので、次にその4つと指定法1のサポート内容を述べる。

**上昇**：打ち上げ直後、最高点に達するまで。最近の花火では、ここで尾を長く引かせたり途中で小さな花火を開かせるなど、工夫を凝らしたものが多くなっている。本課題では、昇曲導と呼ばれる長く引く尾の有無を選択可能である。

**芯**：「芯入り菊」の芯と同じで、多重にするかどうか、二層か三層かを指定する。本課題では、なし（一重）、芯入り（二層）、八重芯（三層）から選択可能である。

**玉**：おおまかな花火の種類で、菊（星が光る際に球の中心から星まで直線状に尾を引く）、牡丹（ほとんど尾をひかない）、柳（いわゆるしだれ柳で、垂れ下がるほど長く尾を引く）から選択可能である。

**後の曲**：一旦開いた花火が途中で変化する場合にその変化を指す。本課題で扱える花火に千輪があって、開花後に星が1回分裂するが、この分裂が後の曲であり、分裂後にさらに小さい花が開くものは「小割浮模様」と呼ばれる。指定法1ではこの小割浮模様の有無を選択できる。

芯の色などを個々に色指定することも技術的には十分可能であるが、今回は色はランダムに選択した。

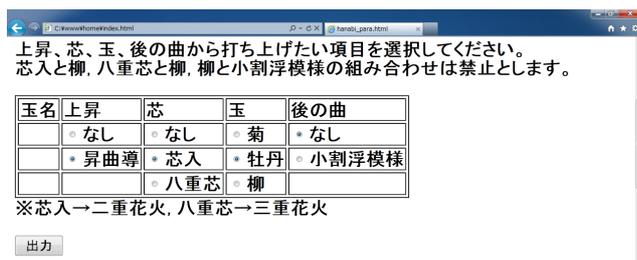


図2. 玉名に基づく花火パラメータ設定画面

指定法1の表示例を図2に示す。図2のようにチェックボックスを用いて各形式での機能の有無または選択肢から1つずつ選ぶと、対応するパラメータ値をPerlプログラムが生成し、ひな形ファイル中のパラメータ値と置換することでユーザ設定ファイルを作成する。図3では昇曲導、芯入、牡丹を組み合わせしており、後の曲は「なし」を選択しているので、出力ボタンをクリックすると、「昇曲導付芯入り牡丹」と表示される。

他のパラメータ指定方法の概要を述べる。指定法2はプルダウンメニューが一つあり、プルダウンメニューの見出しとパラメータセットが1対1に対応していて、見出しを選ぶことでパラメータセットを1つ選択する。このときプルダウンメニューの見出しには玉名を用いており、色はランダムに決定する。方法3では、パラメータ設定に失敗すると花火が全く見えなくなることから、今回は花火の見え方に関する詳細なパラメータ設定は避け、到達高度と打ち上げ位置のみを指定することとして数値で直接入力するようにした。

図3に本システムを用いた花火の制作例を示す。図3は八重芯菊すなわち三重の菊で、色は層ごとに異なるように設定されている。

## 6. 今後の課題

伝統的な花火は球面上に星を配置したような形状であるが、最近では、型物と呼ばれる色々な形をした花火、例えば眼鏡型やハート型などの非円形状の花火が花火大会などでも打ち上げられるようになっていく。そのような花火の制作支援では、星が玉皮内に詰まった状態を作成した上で個々の星の性質を指定するユーザインタフェースが必要であり、現在その開発を行っている。他にも、玉皮中の星の配置を実際の花火に近づけることも必要であり、シミュレーション部分についても改良の余地がある。

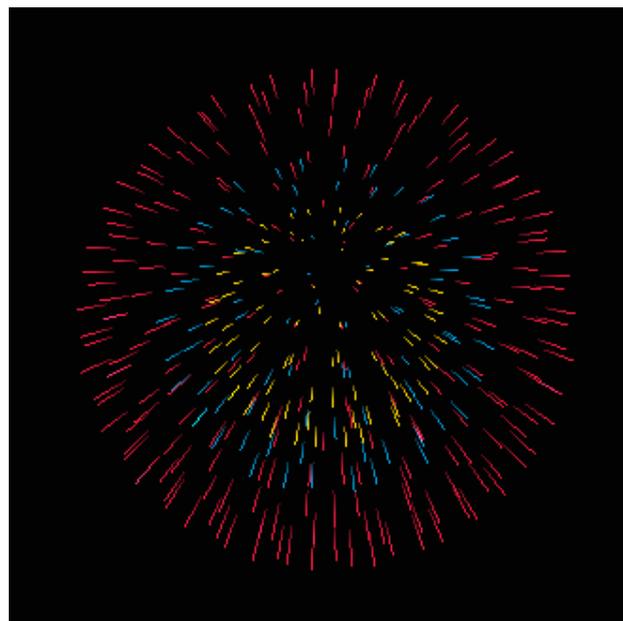


図3. 本システムによる花火の作成例（八重芯菊）

また、近年では建物などに画像を投影するプロジェクションマッピングが行われている。防火対策ができないなどの問題で実際の花火打ち上げが困難な場所においても、プロジェクションマッピングを用いて花火CGを投影すれば花火を楽しむことができるので、そのような展開も考えられる。

## 参考文献

- [1] 「花火の科学」, 細谷政夫, 細谷文夫, 東海大学出版会, (1999).
- [2] 「花火の図鑑」, 泉谷玄作, ポプラ社, (2007).
- [3] 「花火の運動のコンピューターシミュレーションによる3次元表現」, 福山, 大原, 菅野, 長崎大学教育学部強化教育学研究報告, 31, pp. 13-18, (1998).
- [4] 「打ち上げ花火の3Dビジュアルシミュレーションに関する研究」, 後藤, 清水, 高橋, 金, 南山大学数理情報学部 情報通信学科 2008年度 卒業論文 要旨集.
- [5] 「物理ベース CG 計算力学の新しい応用」, 鈴木克幸. 可視化情報学会誌, 28. 108, pp. 28-31. (2008).
- [6] 「パーティクルシステムを用いた花火のコンピュータグラフィックスに関する研究」, 松岡, 鈴木, 佐渡, 長谷川, 金沢工業大学 平成21年度 工学設計 III プロジェクトレポート, (2009).