

〔特集〕ながれと創造教育

創造性教育としてのペットボトルロケットコンテスト

*東京工業大学 理工学研究科 森 脇 亮†
東京工業大学 理工学研究科 大 澤 和 敏

Pet-Bottle Rocket Contest for Fostering of Creativity

Ryo MORIWAKI, School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

Kazutoshi OSAWA, School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

1 はじめに

大学生（学部3年生）を対象にした実験系授業においてペットボトルロケットコンテストを開催し、学生の創造性や学問への興味を向上させることを試みている。このペットボトルロケットコンテストとは、水噴射を推進力としたペットボトル製ロケットを飛ばし、ロケットの飛距離や飛行姿勢などを競うものであり、最近では全国各地でその大会が開催されている。ペットボトルロケットの推進力や飛行中にロケットに作用する力は、後で詳細に示すように、ベルヌイの定理や運動量保存則といった流体力学の基本原理や、気体の状態方程式や剛体の力学などを用いて記述できる。そのため、学部生がこれまで学んできた知識を総動員することで、ロケットの飛行挙動を事前に予測することができ、また力学ベースで考案した自作のペットボトルロケットでコンテストに臨むことができる。自分たちで制作したロケットが遠く、高く、美しく飛んだときの感動は、学生のやる気を引き起こさせるため、このコンテストは大学生を対象にした実験系授業のテーマとして適している。このコンテスト形式の授業は水理学実験（2004年度までは土木工学実験第二）の一部として毎年開講しており、2006年には東京工業大学の創造性育成科目として認定された。

本コンテストが初めて開催されたのは1998年であり、これまでも幾多の報告¹⁾⁴⁾を行ってきたが、「ながれと創造教育」という本特集に合致した内容であることから、再度紹介させていただくことにする。

2 ペットボトルロケットの構成とその基本飛行特性

ペットボトルロケットは、図1に示されるように、ペットボトルを連結した胴体部分、先端部分のポリウレタンキャップ、下端部分に取り付けられた噴出口から構成されている。胴体部分の下部がエンジンタンクの役割を担っており、ここに注入された水と圧縮空気がタンク下部から噴出することにより生成される推進力に伴って、ロケットは上空へと飛行することが可能となる。標準型のロケットを一体制作するには5本分のペットボトルが必要であり、また耐圧性を確保するために炭酸用のペットボトルが用いられる。先端部のキャップ、噴出口、発射台などの部品は、日本ペットボトルクラフト協会などから入手できる。

ペットボトルロケットの飛行特性は、ロケットの推進力と飛行中に作用する流体力によって大きく特徴づけられる。上述したように、タンク部から水と空気が噴出することにより、噴射方向の運動量フラックスが発生し、作用・反作用の法則から噴射方向とは逆向きに同じ大きさの力がロケットに作用する。これを推進力としてペットボトルロケットは上昇する。このような推進力の大きさは、タンク内水量や空気圧によって大きく影響を受ける。



図1 ペットボトルロケットの構成と推進力に関する概念図

*〒152-8552 目黒区大岡山 2-12-1
†E-mail: moriwaki.rya@m.titech.ac.jp

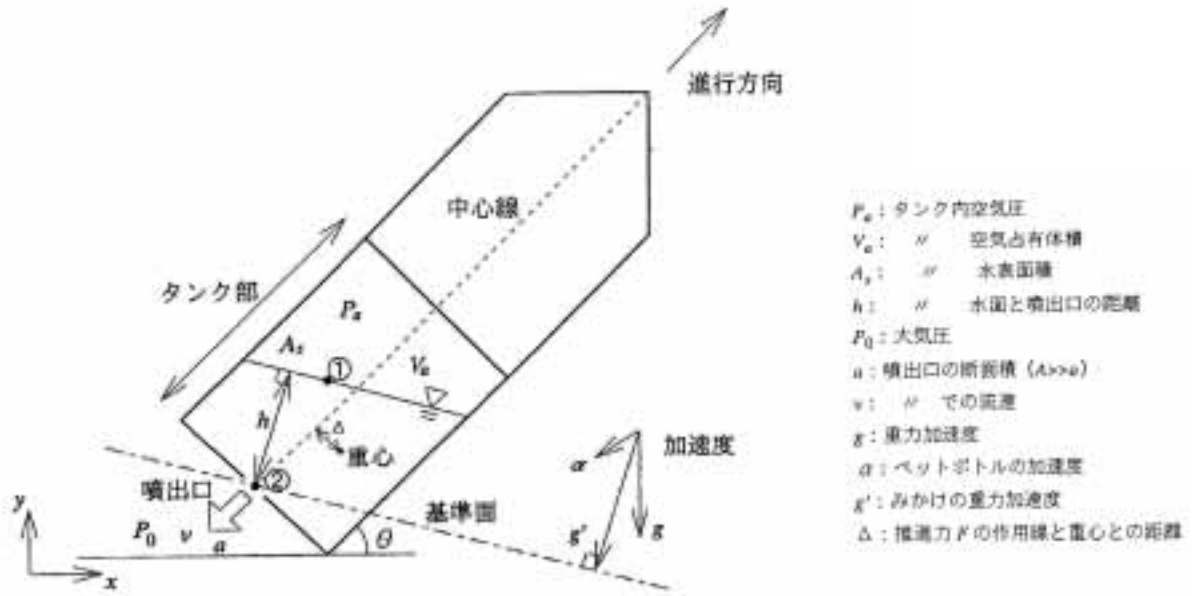


図2 ペットボトルロケットの飛行計算に必要な諸量の定義

また、飛行中にロケットに作用する流体力には、ロケットの形状が非常に大きく影響する。さらに、ロケット発射角度については、ロケット飛行を単純な斜方投射運動として考えれば45度の仰角が最大到達距離を達成する最適角度となるが、一般的には45度より上向きの65度前後が最適角度となることが知られている⁵⁾。これは、後述のようにロケットが回転を引き起こす力（トルク）を受けた結果であると考えられる。このように、ペットボトルロケットは、ロケットそのものの条件ならず、発射条件によっても飛行挙動が大きく変化する。

3 ロケット飛行理解のための数値シミュレーションと飛行実験

ペットボトルロケットの飛行に関する力学の理解を学生に促すために、コンテストの前に、数値シミュレーション・飛行実験などを行っている。学部生に配布するテキストには、流体力学・質点の力学・気体力学などの方程式を連立させて飛行挙動を予測する手法が書かれている。これまで学習してきた個々の知識を組み合わせることでロケットの飛行挙動を記述できることに学生たちは興味を覚えるようである。

3.1 ロケット飛行に関する力学の概要

3.1.1 ロケットの推進力

ある加速度で運動するペットボトルロケットとともに移動する座標系においてロケットの推進力を求める。ペットボトルロケットに作用する推進力 F は運動量保存則をもちいれば、以下のように与えられる。

$$F = \rho_w C a v^2 \tag{1}$$

ここで、 ρ_w : 水の密度、 C : 縮脈係数、 a : 噴出口の断面積、 v : 噴出口での流速である。これらを含む諸量の定義を図2に示す。タンク内の空気圧 P_a 、大気圧 P_0 、噴出口からタンク内の水面位置までの距離を h とすれば、図2中の水表面上の点①と噴出口中心にある点②を通る流線に対するベルヌイの式は、以下ようになる。

$$\frac{P_a}{\rho_w g'} + h = \frac{v^2}{2g'} + \frac{P_0}{\rho_w g'} \tag{2}$$

ただし、ここでの基準面は噴出口中心を通り水面に平行な面とし、噴出口の面積が小さいことから水面における速度水頭は無視している。 g' は見かけの重力加速度であり、重力加速度 g とロケットの加速度 α の合成である。式(2)より、噴出速度 v は以下のように与えられる。

$$v = \left(2g'h + \frac{2}{\rho_w} (P_a - P_0) \right)^{0.5} \tag{3}$$

上式の未知数であるタンク内気圧 P_a は、気体の状態方程式からタンク内における等温変化を仮定して、以下のよう定式化できる。

$$P_a = \frac{P_a' V_a'}{V_a} \tag{4}$$

また、水の占有体積 v_l はタンク内の連続条件により、以下のように表される。

$$\frac{dv_l}{dt} = -C a v \tag{5}$$

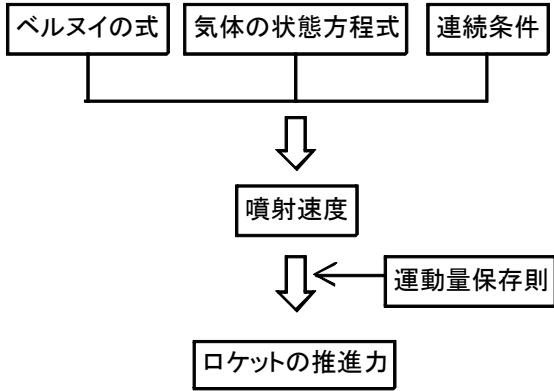


図3 ロケットの推進力に関する導出過程

上述した式(2)~(5)より噴出速度 v が求められ、式(1)から推進力 F が求められる。このように、推進力を求める過程では、図3に模式的に示されるように、流体力学や水理学の基礎的要素が数多く盛り込まれている。

3.1.2 ロケットの飛行運動に関する定式化

ロケットに作用する力として、推進力ベクトル (F_x, F_y) と重力ベクトル ($0, g$), 抗力ベクトル (D_x, D_y) を考慮して、水平方向 (x 方向) 及び鉛直方向 (y 方向) の運動方程式の定式化を行い、揚力、慣性抵抗に関しては無視することにする。(タンク内の水を除いた) ペットボトル本体の質量を M , タンク内の水の質量を m_l , ペットボトルロケットの x, y 方向の速度を u_p, v_p とすると、各方向の運動方程式は、以下のように記述される。

$$(M + m_w) \frac{du_p}{dt} = F_x - D_x \quad (6)$$

$$(M + m_w) \frac{dv_p}{dt} = F_y - D_y - G \quad (7)$$

ここで、添え字 x, y は各外力の作用方向を表している。各方向の推進力と抗力は、以下ようになる。

$$\begin{aligned} F_x &= F \cos \theta \\ F_y &= F \sin \theta \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} D_x &= 0.5 \rho_a C_D A u_p (u_p^2 + v_p^2)^{0.5} \\ D_y &= 0.5 \rho_a C_D A v_p (u_p^2 + v_p^2)^{0.5} \end{aligned} \quad (9)$$

ここに、 C_D は抵抗係数、 A はペットボトルの進行方向への投影面積である。

最終的には、式(8)と(9)を式(6)、(7)に代入すれば、ペットボトルロケットに関する並進の運動方程式が導出される。

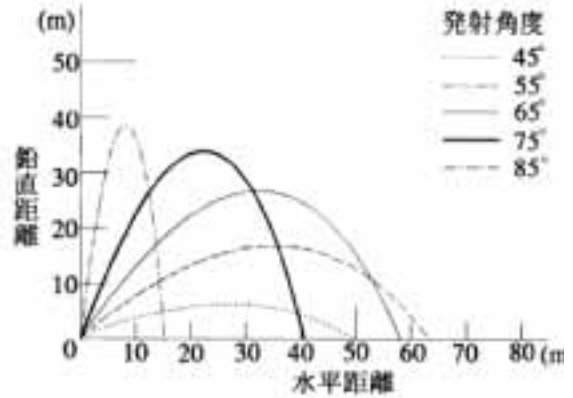


図4 ロケット軌道シミュレーションの例

3.1.3 回転運動に関する定式化

回転運動に関しては、タンク内の水面が図2に示されるように、タンク底面と平行でない場合には、重心位置がタンク軸上からずれる。タンク軸上から重心位置までの距離を Δ とすれば、ロケットに作用する推進力 F によるトルク N (回転を引き起こす力) は、以下ようになる。

$$N = -F\Delta \quad (10)$$

以上のことから、角速度 ω およびロケットの傾き θ は、以下のように与えられる。

$$\frac{d(I\omega)}{dt} = -F\Delta \quad (11)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (12)$$

ここで、 I は慣性モーメントである。式(11)、(12)より、ロケットの傾きの時間的な変化が記述できることになる。

3.2 数値シミュレーションとテスト飛行

ペットボトルコンテストの準備を始める段階において、前節で述べたペットボトルロケット飛行に関する力学過程を説明した資料を学生たちに配布し、独自のロケットを考案する際の参考にさせている。またペットボトルロケット飛行に関する力学の諸過程を連成した飛行シミュレーションプログラムを学生に公開している。この数値プログラムはフォートラン言語にてプログラミングされており、入力データとして、初期気圧、タンク容量、初期水量、発射角度、ロケット重量などを与えれば、ロケットの飛距離や飛行軌跡が出力されるようになっている(結果の一例を図4に示した)。学生はパラメータを変化させて数値計算を行い、各パラメータがペットボトルロケットの挙動に及ぼす効果に関して事前に検討を行い、最適なタンク容量、初期水量、発射角度、ロケット重量などを事前に調べる事ができる。

またペットボトルコンテスト開催の数日前にはロケットのテスト飛行を行う機会を設定している。コンテストでは初期気圧以外の条件は自由に与えられているため、学生は数値シミュレーションを活用しながら思い思いのオリジナルロケットを制作してくる。想定どおりの飛距離が得られない場合も多くみられ、学生はあれこれ試行錯誤しながらロケットの修正を行う。

4 ペットボトルロケットコンテスト

コンテストは大学のグラウンド全面を使って行い、飛距離やニアピン（目標までの距離）などの項目をグループ（6～7名で構成）ごとに競わせている。コンテストではその距離のみならず、飛行の美しさやロケットの工夫度も重要な採点項目として含まれている。

コンテスト当日は、事前に「ロケットの披露会」が開かれ、教員、学生、TAの大学院生を含む全員が見守る中、自分たちの創作したロケットの工夫点や飛行予想結果についてプレゼンテーションを行う（図5）。どのような点に工夫してロケットを作成したのかを明確化させることができ、学生のアイデア自体を別途評価できるような仕組みになっている。学生たちはここぞとばかり、自分たちの「作品」のユニークな点やアイデアをアピールする。教員からの鋭い質問（特に力学的な工夫点に対して）にタジタジになる学生もいれば、負けじと大見得を切る学生もいる。

これまでのコンテストで学生が考案した数々のアイデアのいくつかを以下に紹介する。

- ・羽根を傾けてロケット軸を中心に回転させ、飛行の安定性を確保すると同時に飛行挙動を美しくみせる。



図5 ロケット披露会の様子



図6 コンテストの様子

- ・機体を流線型にする、表面にディンプルをつける、などの工夫によりロケット背部の剥離領域を小さくして飛行距離を伸ばす。
- ・揚力を得るために翼をつけ、飛距離と飛行の美しさを狙う。
- ・タンクを連結させてタンクの容積を増やし、推進力の持続時間を延ばすことで飛距離を伸ばす。
- ・機体を細型にして投影面積を小さくし、流体抵抗を小さくする。
- ・タンク内を加工することにより、機体にかかるトルクを小さくする、または縮脈係数を変化させる。
- ・途中で機体を分離させ、噴射時とその後の滞空時で異なる飛行挙動を達成する。
- ・水の代わりに比重の大きい砂糖水を使い、大きな運動量（噴射力）を得る。
- ・ドライアイスを入れてタンク内気圧を大きくし、大きな噴射力を得る。

これらのアイデアの中にはルール違反(?)と思われるような奇抜なものも登場し、普段は怖い顔をした先生方にも笑いが漏れていた。

そして其の後、グラウンドに移動してコンテストが開始される。ロケットが発射するときの迫力は相当なもので、水を吐き出しながら空高く飛んでいくロケットを見送るのは気持ち良いものである。アイデアは良くても空中分解してしまうロケットもあれば、披露会で宣言したとおりの見事な飛行を示すロケットもあり、学生達も童心に戻って結果に一喜一憂している⁹⁾。例年、優勝するロケットは100m以上の飛距離を出し、グラウンドは大きな歓声につつまれる。こうした時間を学生と教員で共有できるのも、本コンテストの大きな魅力の一つである。

5 おわりに

ペットボトルロケットの飛行は水理学や流体力学の基礎法則と深く関わっており、学部生がこれまで学んできた知識を総動員することでオリジナルのペットボトルロケットを創造することができる。また制作したロケットを実際に飛行させることが可能なため、ペットボトルロケットコンテストは学生の自主的・創造的な取り組みの力を養成するのに適したテーマである。これまでを振り返ると、本コンテストは創造性育成科目として成功を収めていると判断してよいだろう。想像力豊かな様々なロケットが制作され、普段は大人しくしている学生も積極的に参加していたように思う。また水理学および流体力学に対する興味や関心を持たせることにも多少は貢献できたと考えている。理工離れが進んでいると言われて久しいが、このような実験を通して、少しでも流体力学を含めた科学の面白さや奥深さを肌で感じてもらえれば幸いである。

謝辞：本ペットボトルロケットコンテストは、東京工業大学の池田駿介教授、灘岡和夫教授、八木宏助教授、神田学助教授、浦瀬太郎助教授、および、二瓶泰雄氏（東京理科大学助教授、元東工大助手）、日向博文氏（港湾技術研究所、元東工大助手）、戸田祐嗣氏（名古屋大学講師、

元東工大助手）、波利井佐紀氏（オーストラリア海洋研究所、元東工大助手）との様々な議論を通して構成されたものです。ここに謝意を表します。

引用文献

- 1) 二瓶泰雄, 森脇亮, 戸田祐嗣, 日向博文: 実験系授業としてのペットボトルロケットコンテスト, 東京工業大学土木工学科研究報告, 57, pp75-87, 1998.
- 2) 戸田祐嗣: 学生実験としてのペットボトルロケットコンテスト開催の試み, 土木学会誌, 83(9), pp32-35, 1998.
- 3) 二瓶泰雄, 戸田祐嗣, 日向博文, 森脇亮: ペットボトルロケットを用いた実験系授業の試み, 日本流体力学会年会'98 講演論文集, pp11-12, 1998.
- 4) 戸田祐嗣, 二瓶泰雄, 日向博文, 森脇亮: ペットボトルロケットの飛行挙動シミュレーションとそれを取り入れたコンテスト形式の授業の試み, 土木学会第53回年次学術講演会講演概要集第2部, pp392-393, 1998.
- 5) 別府護郎: ペットボトルロケット決定版, ダイナミックセラーズ, 1996.
- 6) 浜本ほか: ペットボトルロケットコンテスト実施報告—最長不倒距離への挑戦—, 東京工業大学土木工学科研究報告, 61, pp99-102, 2000.