

II-196

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

東京工業大学 工学部 正会員 戸田祐嗣, 二瓶泰雄, 日向博文, 森脇亮

1. はじめに

資源を有効利用した娯楽の一つとして、ペットボトル製ロケットの飛行コンテストが全国各地で行われている。ペットボトルロケットの飛行は水理学や流体力学に関する基礎法則と深く関わっていると同時にそのダイナミックな挙動は我々の興味や好奇心を強く刺激する。従って、ロケットの飛行挙動に関する実験や解析を行うことは、大学学部学生のような水理学や流体力学の初学者がそれらを勉強・理解するための良い題材であると思われる。そこで、我々は学部学生の授業にペットボトル製ロケットによるコ

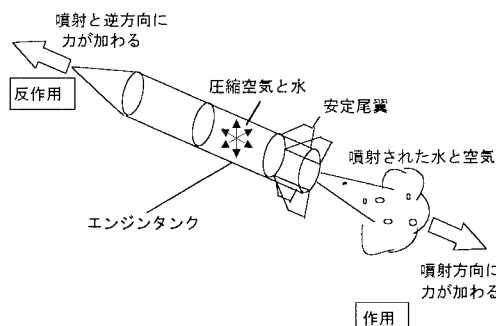


図-1 ペットボトルロケットの飛行原理

ンテスト形式の実験を取り入れることを試みた。本報告ではペットボトルロケットの飛行挙動に関する数値解析モデルの概要とそれを題材とした実験、コンテストの実施状況を紹介する。なおペットボトルロケットに関する準備実験およびコンテストは、東京工業大学土木工学科で実施されている「土木工学実験第二」という科目の中の一部として行われており、本報告で記述されている内容は、この実験を担当している土木系教官（池田駿介教授、灘岡和夫教授、八木宏助教授、神田学助教授）と著者らとの様々な議論を通して作成されたものである。

2. ペットボトルロケットの飛行シミュレーションモデルの概要¹⁾

ペットボトルロケットの飛行原理の概念図を図-1 に示す。ロケットのエンジンタンクには水と圧縮空気が充填されており、発射台のスイッチを引くと圧縮空気に追い出された水がエンジンタンクから噴射する。ロケットはその反作用を受け、これを推進力として飛行する。また、ペットボトルロケットは初期水量やタンク内初期空気圧といった発射条件やロケット形状などに依存しながら 45 度より大きな発射角度で最大飛距離を示すことが経験的に知られている。これはペットボトルロケット発射直後には、推進力の作用線より下方にロケット重心位置が存在するため、ロケットを前傾させる方向にモーメントが働くことが一因と考えられる。従って、ペットボトルロケットの飛行挙動をシミュレーションするためには、推進力や並進運動の定式化に加えて、モーメントの影響を考慮した回転運動の方程式を定式化することが重要となる。

ロケットに作用する力の中で揚力と慣性抵抗を無視し、回転運動に関しては推進力によるモーメントのみを考慮すると、ロケットの並進運動、回転運動はそれぞれ次式で定式化される（座標系は、水平面内のロケットの進行方向に x 軸、鉛直上向きに y 軸とする）。

$$(M + m_w) \frac{du_p}{dt} = F_x - \frac{1}{2} \rho_a C_D A u_p \sqrt{u_p^2 + v_p^2} \quad (1)$$

$$(M + m_w) \frac{dv_p}{dt} = F_y - \frac{1}{2} \rho_a C_D A v_p \sqrt{u_p^2 + v_p^2} - (M + m_w) g \quad (2)$$

$$I \frac{d\omega}{dt} = -F \Delta \quad (3)$$

ここで、 F : 推進力、 u_p , v_p : ロケットの x, y 方向の速度、 ρ_a : 水の密度、 C_D : 抵抗係数、 A : ペットボトルの進行方向投影面積、 I : ロケットの慣性モーメント、 ω : ロケットの角速度、 Δ : タンク軸上から重心までの距離である。

タンク内初期空気圧、初期水量、初期発射角度を与えれば、気体の状態方程式、ベルヌイの定理、連続条件と
キーワード: ペットボトルロケット, 飛行挙動シミュレーション, 実験系授業。

連絡先: 〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1

いった基本原理から決定される推進力 F を用いて、(1),(2),(3)式からロケットの並進、回転運動を数値的に解析することが可能となる。

市販の 1.5l ペットボトルで作成されたロケットの飛距離に関する飛行実験と飛行シミュレーション結果の比較を図-2に示す。発射角度が 50 度のケースをのぞき、シミュレーションが飛距離の実測値を良く表していることが分かる。また、ロケットが最大飛距離を示す発射角度は 45 度より大きく（本ケースの場合 70 度付近）、前述したモーメントによるロケットの回転運動の効果が再現されている。図-3 にロケットの飛行軌道のシミュレーション結果を示す。モーメントの効果でロケットが前傾するため、発射角度が小さい場合は水平飛距離が小さくなっている。

3. ペットボトルロケットを題材とした実験系授業

このようなロケットの飛行に関する基礎原理を理解し、水理学・流体力学により一層の興味や関心を持ってもらうことを目的としたコンテスト形式の実験系授業を実施した。はじめにペットボトルロケットの飛行原理に関わる基礎実験を行い、ロケットの飛行に関する理解を深めた後にコンテストを行った。

コンテストに先立って行われた実験では、上記の支配方程式の導出、ロケットの抵抗係数の測定、予備的飛行実験、飛行シミュレーションを行った。これらの実験・シミュレーション結果を通じてペットボトルロケットの飛行基本特性に関する考察や議論を行い、コンテスト用のロケット製作やコンテスト時の発射条件の決定を行うこととした。

表-1 にコンテストのルールを示す。飛距離やニアピン部門に加え、前述のモーメント効果を低減するような工夫を施さなくてはならない低発射角度部門を設けた 3 部門でのコンテストを実施した。コンテスト当日には各グループからロケット製作のコンセプトや工夫点等に関する発表が行われた。事前に行っていた実験の結果をふまえて随所に工夫の凝らされたすばらしいロケットがたくさん登場した。コンテストは 1997 年 12 月 18 日に東京工業大学・大岡山グラウンドにて開催された。各グループとも 100m 近くの飛距離を叩き出し（表-1）、自分たちのロケットの飛距離、高度に歓声が上がった²⁾（写真-1）。

4. おわりに

こういったコンテスト形式の実験を通じて、学生が少しでも水理学を含めた学問全般の面白さや奥深さを肌で感じてもらえれば幸いである。

参考文献：1)実験系授業としてのペットボトルロケットコンテスト：二瓶泰雄ら，東京工業大学土木工学科研究報告，No.57，1998.
2)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：戸田祐嗣，土木学会誌，1998（投稿中）

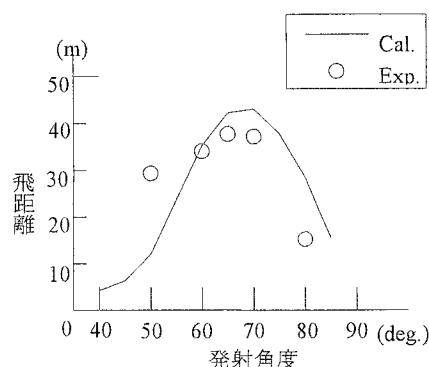


図-2 飛行距離に関する飛行シミュレーション結果と実測値との比較（タンク内初期空気圧 4.0bar，タンク内水量 500ml）

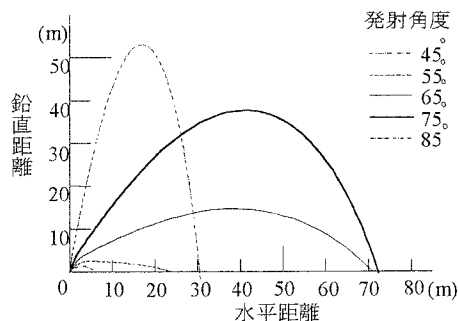


図-3 ロケット軌跡に関するシミュレーション結果（タンク内初期空気圧 8.0bar，タンク内水量 600ml）

表-1 コンテストのルールと結果

	飛距離部門	ニアピン部門	低発射角度部門
ロケットの種類	ノーマルタイプ (特別な細工なし)		自由
初期タンク内空気圧	8.0bar		自由
発射角度	自由	50 度	
初期水量	自由	自由	
採点項目	飛距離	ニアピン(発射地点より 70m)	飛行距離 飛行の美しさ 工夫度
最高記録	109m	7.2m	87.6m

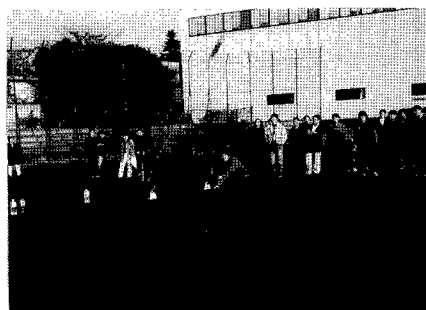


写真-1 コンテストの風景