

児童を対象とした科学教室用の教材開発 — 「飛ぶ仕組み」を理解するための地面効果翼機の製作 —

増 淵 寿^{*1}

Development of Teaching Materials
for a Science Experiment and Handicraft Classes
aimed at Elementary School Students.

- Production of a Paper Airplane Using Ground Effect
for Understanding of Flight Principle -

Hisashi MASUBUCHI

This paper reports on creation of study program for a science experiment and handicraft classes aimed at elementary school students. In this program each student builds a paper airplane using ground effect and competes on the flight distance.

First we designed and manufactured paper template of airplane and gum-powered catapult-assisted launch equipment that were needed for execution of this program. Also, lecture contents were prepared to teach students how airplanes fly.

Using this program, we actually offered about two hours of science class twice. The result showed wing-in-ground effect craft was a suitable teaching material for beginners, because the airplane had simple structure that made adjustment for stable flight easy. But the program demands continual refinement so as to extract technical creativity from students.

KEYWORDS : Teaching Material Development, Airplane, Ground Effect, Fluid Dynamics

1. はじめに

小学生児童を対象とした科学教室を開催するために、教材の開発と講義プログラムの作成を行った。教室の内容は、児童に少し変わった組立て式の紙飛行機を作ってもらい、これを滑空させて飛行距離を競わせるものである。ほとんど予備知識のない児童でも、難易度が高い「(飛行機の) 飛ぶ仕組み」を学習できる科学教室にすることを目指した。全体を通して、参加した子供たちの自然科学や工業技術(特に流体工学)に対する興味が増すことを期待する。

はじめに、表 1 に科学教室の全体概要と所要時間とを記す。簡単な実験を含む二回の講義、紙飛行機の製作、および飛行実験から構成され、合計で二時間ほどの教室となることを想定している。

表 1 科学教室の全体概要と所要時間

内 容	時間
1, 自己紹介と概要説明	25 分
2, 講義 1 … 飛ぶ仕組みの説明	
3, 紙飛行機の製作 (工作)	50 分
4, 講義 2 … 地面効果翼機の説明	15 分
5, 飛行実験 … 試験飛行と飛距離測定	30 分

*1 機械工学科 (Dept. of Mechanical Engineering), E-mail:masubuti@oyama-ct.ac.jp

2. 教材（地面効果翼機）の特徴

2.1 機体の仕様

児童に作成させる紙飛行機は，鳥取大の久保昇三教授が開発したものを原型とする．完成した機体を図 1(a)に，側面図を図 2 に示し，主要寸法を表 2 にまとめた．質量は約 18.5g で，重心の水平方向位置は，機体のほぼ中央にある．

図 1(b)の市販の模型飛行機と比べると，翼面積が大きく，主翼のアスペクト比が小さく（翼弦長に比べ翼幅が短く），水平尾翼が無い（無尾翼機である）という特徴がある．これは，本機が後述する地面効果翼機として設計されているためで，三菱重工業がレジャー用に開発した実験艇 μ SKY-1²⁾ に良く似た形状となっている．

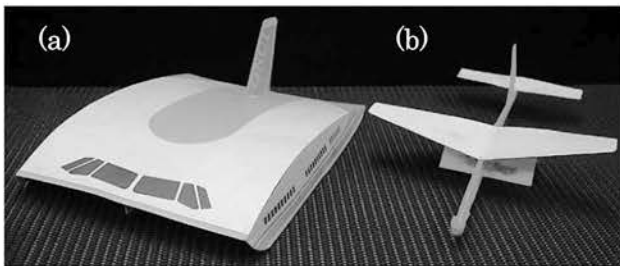


図 1 (a)完成した機体 (b)比較用の模型飛行機

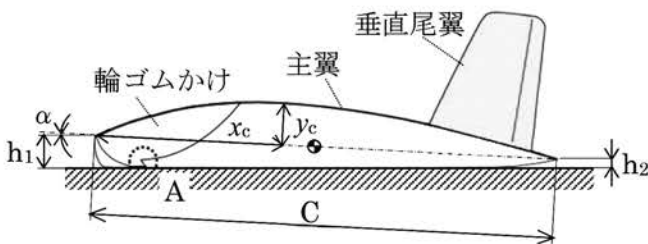


図 2 機体の側面図

表 2 機体の主要寸法

前縁高さ	$h_1 = 16.4\text{mm}$	
後縁高さ	$h_2 = 4.4\text{mm}$	
翼弦長	$C = 238\text{mm}$	
最大そり	$y_c = 21.8\text{mm}$	(9.2%)
最大そりの位置	$x_c = 96.8\text{mm}$	(41%)
翼弦線の傾き	$\alpha = 2.7^\circ$	
主翼幅	$B = 178\text{mm}$	
() 内の数値は翼弦長 C との比		

2.2 機体の飛ばし方と飛び方

図 1(b)の模型飛行機と同じように，図 1(a)の機体を手投げで飛ばすと，必ず前転か後転の宙返りをしてしまい，上手く滑空させることはできない．本機は無尾翼機であるため，縦方向に不安定なことが原因である³⁾．しかし，機体を平らな床に置いて水平方向に押し出すと，床面スレスレを滑るように飛ぶことができる．実際には，完全に離陸するのではなく，機体の一部が接地したまま飛ぶように滑っていることが多いようである．

2.3 地面効果

翼形状をもつ物体が地面近くを飛行すると，上空を飛ぶときよりも多くの揚力を得られることが知られている．この現象は地面効果（または表面効果，地表効果）と呼ばれており，図 1(a)の機体は，この効果を利用して平滑な床面上をより遠くまで飛行するように設計されている．

実際にどれほどの効果があるのかを確認するため，主翼まわりの空気の流れを数値シミュレーションしてみたところ，地面がない場合に比べ，揚力が約 1.7 倍に増加することが分かった．シミュレーションの詳細については後報とする．

2.4 主翼の形状（反り）による影響

飛行性能に影響する主翼形状の中で「反り」に注目する．反りの効果を確認するために，図 3 の平板翼機（反りのない主翼を有する機体）を製作し，床面に水平に射出してみた．すると，反りのある図 1(a)の機体とは異なり，すぐに機首上げの状態になって宙返りしてしまった．これは，反りが無いために，風圧中心（揚力の作用点）が重心よりも常に前方になってしまうことが原因と考えられる．このように，翼の反り



図 3 平板翼機（反りのない主翼）

は、揚力増大の効果ばかりでなく、風圧中心を後方へと移動させることによって、縦方向の安定性を生じさせることを狙って加えられたものと考えられる。

3. 教室開講の準備

科学教室を開催するために、以下の物品、装置および資料を用意した。

3.1 紙飛行機（ペーパークラフト）の型紙

A4 サイズの厚手（260g/m²）のケント紙 2 枚に、図 4 をカラー印刷したものが型紙となる。軽量化のために、薄い紙（210g/m²）の機体も試してみたが、強度不足のために機体に変形し、飛距離が減少してしまったため不採用とした。

はじめて開催した科学教室では、どの線も黒の実線で描いた型紙を使用したところ、「折り曲げ線」も切断してしまうミスが多発した。このため、切り取り線は「黒の実線」、折り曲げ線は「赤の破線」と区別するように型紙を改良したところ、二回目の教室では間違いをなくすことができた。

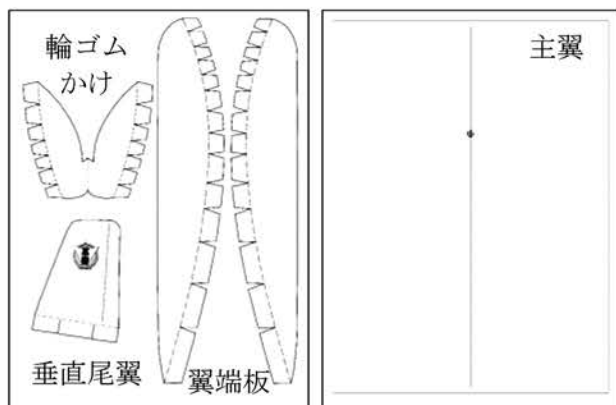


図 4 紙飛行機の型紙

3.2 講義用の資料

表 1 に示す講義 1, 2 において使用する資料で、合計 30 枚程の説明用スライドと動画などで構成される。児童が受け身にならぬよう、三択のクイズを多用し、加えて身近な事例を盛り込むように工夫した。さらに、本校学生の指摘を受け、低学年児童のために漢字には全てふりがなを付記した。

3.3 ゴムカタパルト（射出機）

図 5 のように、床面に貼り付けたゴムの一端を図 2 の A で示す輪ゴムかけに掛けて、機体を後方に引いて放せば、本機を飛ばすことができる。ただし、この方法には次の欠点がある。

- ・ゴムの伸び量を一定にすることが難しいため、飛行距離の競争には適さない。
- ・飛行距離の増加を狙ってゴムの伸びを増していくと、主翼等にかかる荷重が増えるから、機体の変形や破損を引き起こす危険性が高い。

そこで、糸ゴムを動力源としたゴムカタパルトを製作することにした。設計にあたり、カタパルトに求められる仕様を以下のように整理した。

- ・ゴムの伸び量が、毎回同じになる。
- ・射出の瞬間までゴムの張力が機体に加わらない。
- ・できる限り床面に近い高さから射出し、水平方向にのみ初速度を与える。
- ・「発射準備～発射～次の発射準備」までを短時間かつ簡単にできる。
- ・構造的に強固で安全である。
- ・寸法が小さく、学校外へも容易に持ち出せる。
- ・児童自らが発射ボタンを押して、機体を射出させることができる。

これらの要求を考慮して製作したカタパルトを図 6 に示す。ゴムの張力に耐えられるように、全ての部品はアルミフレーム（断面寸法 20×80mm）の土台へ固定し、この土台上にプラスチックダンボール（幅 250×長さ 1000mm）を被せて滑走路とした。プラスチックダンボールは飛行場の滑走路をイメージした灰色とし、中央に白のテープを貼った。このカタパルトの使用手順を以下に記す。

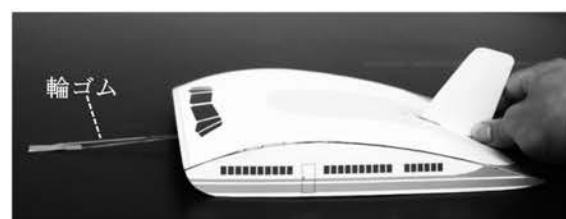


図 5 機体の飛ばし方

- (1) 糸ゴムの中央に結び付けた紐を図の左側へ引き、輪になった紐の端を回転板のフックに掛ける。回転板はストッパーによって反時計回りの回転が妨げられているため、ゴムは伸びたままで静止する。
- (2) 糸ゴムが紐に引っぱられて V 字になったところ (図 6 の A') へ輪ゴムかけ (図 2 の A) が位置するように、飛行機を滑走路にのせる。機体が射出方向に正対するよう向きを調整する。
- (3) 発射レバーの端(i)を下に押す。レバーは図中の軸 S_1 を中心に回転して、ストッパーのついた端(ii)が上がる。回転板はゴムの復元力によって軸 S_2 を中心に反時計方向に回転し、紐の輪の部分がフックから外れる。糸ゴムは縮みながら飛行機を水平に押し出す。

このように機械装置としては簡単な構造であるが、製作時には次の問題のために苦労することになった。

① 滑走路上の部品の高さの制約 機体がプーリの上方を通過するとき、主翼がプーリに

接触してしまうとスムーズに飛び出すことができない。そのため、プーリ部の高さ H は図 2 の h_2 ($\approx 4.4\text{mm}$) 未満でなくてはならない。

次に、回転板のフックとプーリ溝とを結ぶ直線 (ここを糸ゴムと紐とが通る) をできるだけ水平にし、その直線を図 2 の A で示す輪ゴムかけの窪みの高さに近づける必要がある。なぜなら、この直線が低すぎると、機体の輪ゴムかけにゴムがかからず、高すぎると紐が主翼の後縁に接触してしまうためである。この寸法に関するかなり厳しい制約のために、部品の調達には苦労を強いられた。

② 糸ゴムのプーリからの脱輪 ゴムの張力は予想以上に大きく、当初は機体射出後に糸ゴムがプーリ溝から必ず外れてしまった。外れたゴムを溝に入れ直す作業は、予想以上の時間と手間とがかかるため、図 6 に示す L 字のアルミ材を脱輪防止用に取り付けた。さらに、滑走路表面とプーリ溝との間隔を狭くしてゴムが上下に動くのを抑制することで、ゴムの脱輪をほぼ抑制できるようになった。

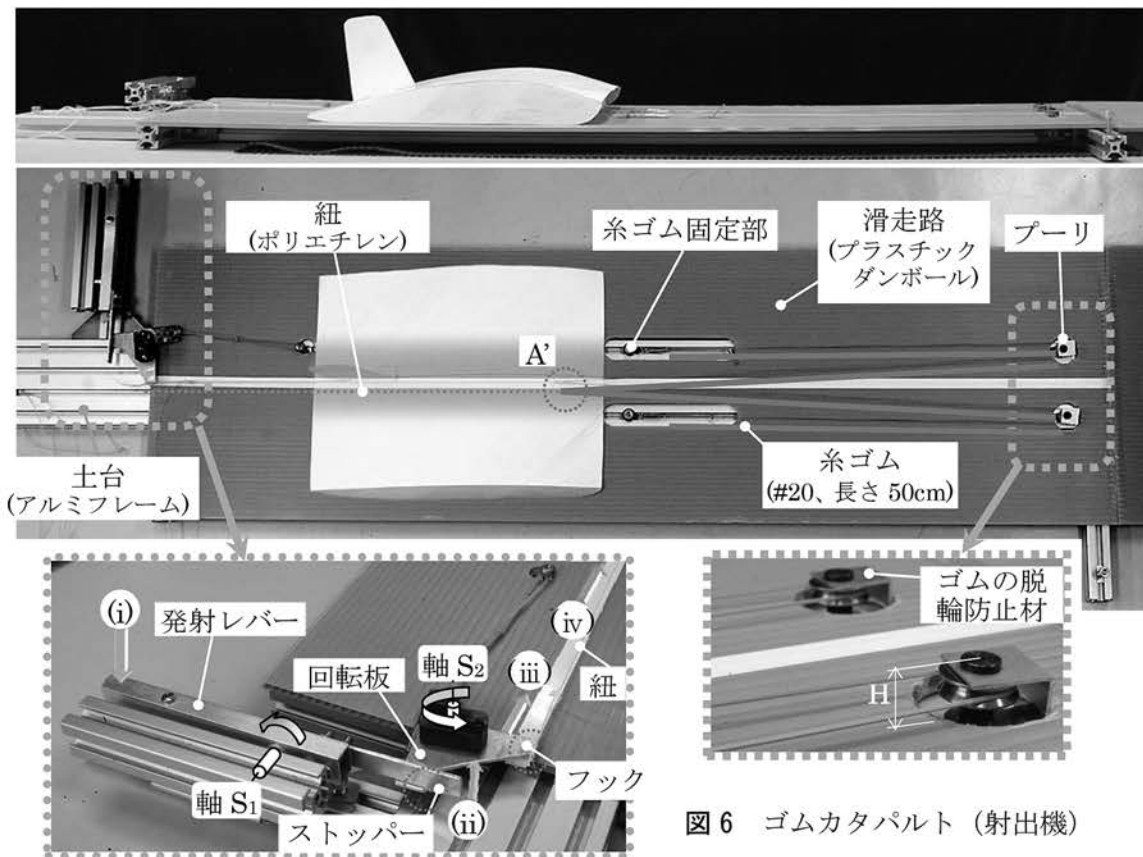


図 6 ゴムカタパルト (射出機)

3.4 簡易風洞

作成した機体は床面上を滑るように移動するため、飛行の様子の詳細を目視で観察することが難しい。そこで、図7に示す小型の簡易風洞を作成して縮小模型に風を送り、飛行状態を観察してもらうことにした⁴⁾。送風源にはDCプロペラファン（最大風量 2.8m³/min）を利用し、段ボールを主材料として製作した。機体模型としては、主翼の反りがあるものと無いものとの2種類を用意した。

3.5 その他

前記のもの以外に、工作用の道具一式（はさみ、のり、両面テープ、着色用サインペン）、重心位置調整用のゼムクリップ（おもりとして使用する）、飛距離測定用の巻尺、完成した機体の例（工作时に参考としてもらう）などを用意した。また、講義概要と機体の作り方を記載した配布用資料を、A4サイズの両面コピー1枚で作成した。

4. 科学教室の詳細

表1に記載した教室内容の詳細について、実施順に説明する。

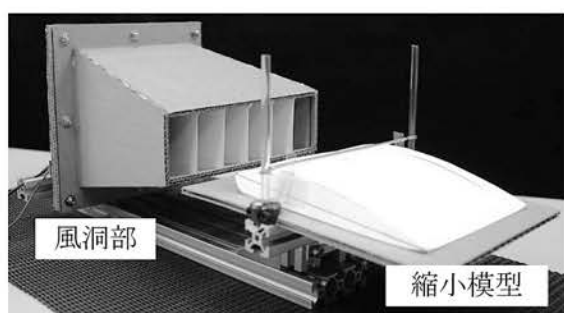


図7 簡易風洞

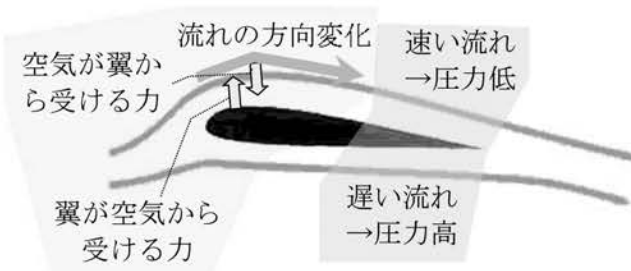


図8 揚力発生の説明

4.1 自己紹介と概要説明

この教室で実施する内容などを簡単に紹介する。自然科学や工学への興味喚起が主目的とはいえ、高専のPRもさりげなく盛り込むように配慮した。

4.2 講義1 … 飛ぶ仕組みの説明

本教室における学習のポイントは、一般的な固定翼機の飛ぶ仕組みを学ぶことである。これを教えるには、「なぜ翼には揚力が発生するのか」を話さねばならない。多くの流体力学の教科書⁵⁾では、揚力の発生は「循環」を使用して説明されているが、この概念は児童には難しすぎる。そこで、改めて巷に溢れる飛行に関する資料を調査すると、次の二種類の説明法が存在することが分かった。

説明1：ベルヌーイの定理による説明… 図8の翼において、翼の上側の空気は下側に比べて速く流れる。すると、ベルヌーイの定理から空気の圧力は上面の方が下面よりも小さくなり、この圧力差が揚力を生み出す。

説明2：コアンダ効果による説明… 空気には粘性があるため、図8のように翼に沿って巻き付くように流れる（＝コアンダ効果）。その結果、翼の上側を通過する空気は、流れ方向が下向きに変化する。物体の運動方向を変えるには外力が必要で、空気に力を加えているのは翼に他ならない。すなわち、空気は翼から下向きに力を受けて向きを変え、他方、翼は空気から作用反作用の法則にしたがって上向きの力、すなわち揚力を受ける。

二つの説を簡単に記述するとこのようになる。ここで、たとえば竹内⁶⁾は前者を用いて揚力発生の説明を行い、Anderson⁷⁾らは両説を挙げた上で後者の説が正しいとしている。一方、竹内⁸⁾は『飛行機が飛ぶしくみ』なんてものは、案外、よくわかっていない」と言い切っている。このように専門家の間でも論議⁹⁾を呼ぶ揚力発生メカニズムを、児童相手に正確に説明するのは我々の力の及ぶところではない。

そこで、ベルヌーイの定理もコアンダ効果も割愛し、「翼をはさんだ空気の圧力の差が、翼に揚力を発生させる」ことだけを伝えることにした。すなわち、説明のストーリーは次の通り

である。

① 地球上では重力がはたらくので、何もしないと飛行機は空中に留まることができず地面に向かって落下する。落下しないためには上向きの力が必要である。(図 9(a)のスライドを使用)。

② 飛行機を糸で吊ったり、棒で支えたりすれば落下は防げるが、これは「飛ぶ」とは呼ばない。すなわち、「飛ぶ」ためには、「空気」に飛行機を上向きに押す力を発生させる(空気で飛行機を支える)必要がある。(図 9(b)のスライドを使用)。

③ 地球上にある空気は、接触する物体をあらゆる方向に押ししている。これを空気の圧力(大気圧)という。ここで、空気が止まっている状態で流れていないときは、1枚の紙の表面を押す空気の圧力は両面で同じ大きさである。(静止流体における圧力の等方性)。このため、空気は紙を支えることはできず、重力に引かれて落ちてしまう。

一方、空気が動いて流れると、紙の上下面にはたらく空気の圧力の大きさに違いが発生することがある。紙の下面の圧力が上面よりも大きければ、紙を支えることが可能となる。この圧力差による力を揚力と呼ぶ。(説明後に、図 10 に示す送風機と一枚の紙とを使った実験を行い、流れる空気が紙を持ち上げることを実演

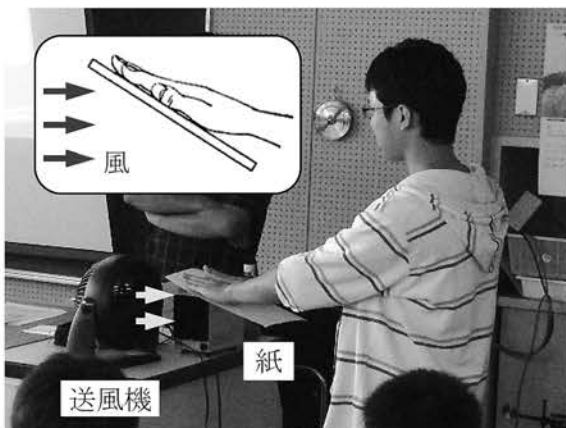


図 10 デモ実験の様子

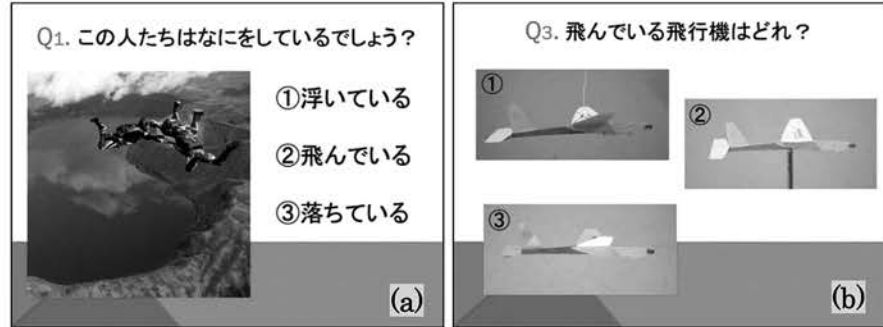


図 9 説明用のスライド (一部抜粋)

してみせる)。

上述の説明には正確性を欠く部分があることは承知しているが、予備知識のない児童に「飛ぶ仕組み」を教えるには、枝葉の部分は切り捨てる覚悟が必要と割り切ることにした。

4.3 地面効果翼機の製作

図 4 の 2 枚の型紙から、はさみを使って部品を切り離し、糊付けをして地面効果翼機を完成させる。このとき、スプリングバックのために、主翼となる厚手のケント紙に適切な反りを予め与えておくことが困難である。このため、主翼と翼端板との貼り合わせが最も難しい作業となる。そこで、工作が苦手な者には、この部分の接着は、糊付けではなく両面テープで代用させる。さらに、このままでは全員が同じ機体になってしまうため、組立前にサインペン等で機体に着色、あるいは描画をしてもらう。

4.4 講義 2 … 地面効果翼機の説明

作成した機体の接着が完了するのを待つ時間を使い、児童を集合させて再び講義を行う。ここでは、翼に関する少し専門的な事項(1)(2)と、機体を真っ直ぐ安定して飛ばすために必要な調整法(3)とについて話をする。

(1) 翼の地面効果 … 図 1(a)の機体を手投げし、地面から離れたところは上手く飛べないことを実演して見せる。その後、この機体が地面効果翼機であると種明かしをして、地面効果の説明やその応用例(自然界の生物や、地面効果を応用した乗り物など)の紹介を行う。

(2) 翼形状の効果 … 主翼の反りの有無によって、飛び方にどんな違いがあるのかを紹介する。まず、図 7 の簡易風洞を使った比較実験を実

演ずる。反りがない翼は、まず、機首が上がって浮上するのに対し、反りのある翼は、機体前方は接地したまま後縁側が浮かびあがるだけで、完全には離陸しない。次に、反りが無い機体の飛行の様子を撮影した動画を見せる。前述のとおり、機体は宙返りしてしまい、遠方まで飛ぶことはできない。

このような飛び方の違いが、風圧中心の違いによって発生することを説明する。児童対象としてはかなり難易度の高い内容であるが、このあとの調整法（縦方向のつりあい）と関係するため、説明に含めることとした。

(3) 地面効果翼機の調整法 … 紙飛行機を定常直進滑降させるには、縦・横方向のそれぞれについて、つりあいと安定とが必要となる¹⁰⁾。このうち、今回の機体で最重要となるものは、図 11 のピッチング方向（縦方向）のつりあいである。このつりあいをとるには、クリップのおもりを主翼に付加して重心位置を変えればよいことを説明する。次に、横方向のうちヨーイングは、垂直尾翼に反りをつければ舵として使えることを教える。最後に、本機は床面上を滑りながら飛ぶため、ローリングの調整は通常は必要ない。

なお、安定性の話は難しすぎるので、ここでは(2)の説明と絡めてつりあいの話だけを行う。

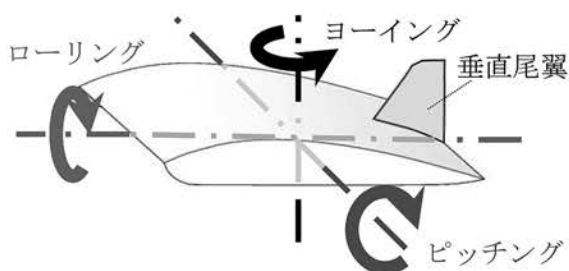


図 11 縦・横方向の三つの軸

4.5 飛行実験

完成した機体の調整を目的として、はじめに試験飛行を行う。機体をカタパルトから打ち出して飛行状態を確認し、必要に応じて前節で説明した機体の調整を行う。距離を競うのではないため、簡易構造のゴムカタパルトを使用する。

次に、試行錯誤的な調整が済み、真っ直ぐ安定して飛ぶようになった者から、図 6 のカタパルトを使って飛行距離の測定を行う（図 12 参

照）。児童たちは自発的に発射のカウントダウンを始め、本教室で最も盛り上がる瞬間である。飛行距離は、会場の広さに応じて、カタパルトのゴムの伸び量で調整することが可能であり、今回は 6～8m ほどに設定した。複数回の測定を行うが、飛行距離の再現性は比較的高い。



図 12 飛行実験の様子

5. 科学教室の実施結果

5.1 開催した科学教室の概要

準備した内容に則り、二回の科学教室を「夏休み工作教室」として、栃木県子ども総合科学館において開催した。開催日時と参加児童数とは下記の通りである。募集条件は科学館からの要請を尊重して決定した。

第 1 回 H25 年 8 月 9 日午後、参加児童 12 名
募集条件：小学校高学年～中学生

第 2 回 H26 年 8 月 21 日午前、参加児童 16 名
募集条件：小学校低学年以上

図 13 に、学年毎の参加児童数を示す。募集条件のとおり、第 1 回は高学年、第 2 回は低学年の児童が主体で、中学生の参加者はいなかった。

5.2 参加児童へのアンケート

教室終了後、参加児童にアンケートを実施した。アンケート項目は科学館が作成したもので、その抜粋を表 3 に、集計結果の一部を図 14 に示す。

質問事項 5（時間）では、「短い」と回答した児童が 1 名ずついた。工作時に、着色に夢中になって時間が不足した者の回答と推測する。実際には、二回の教室とも、参加者全員が最後の飛行距離測定までを実施して、ほぼ時間通り

に終了している。したがって、時間に関しては全2時間で問題ないものと判断する。

質問事項6(説明)では、「まあまあ」「わかりにくい」を選択した者が、第2回目で3名と多かった。低学年児童を対象に含める場合、講義部分はより噛み砕いた丁寧な説明にする必要がある。これは、講義を行っている際の児童の反応からも実感できた。

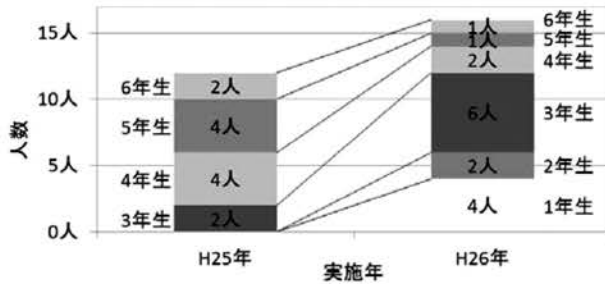


図13 学年毎の参加児童数

表3 アンケート内容(抜粋)

質問事項	回答の選択肢		
4.内容について	楽しかった	まあまあ 楽しい	あまり 楽しくない
5.時間について	短い	ちょうど よい	長い
6.説明について	よく わかった	まあまあ わかった	わかり にくかった
7.また きたいか	できれば きたい	こない	わから ない

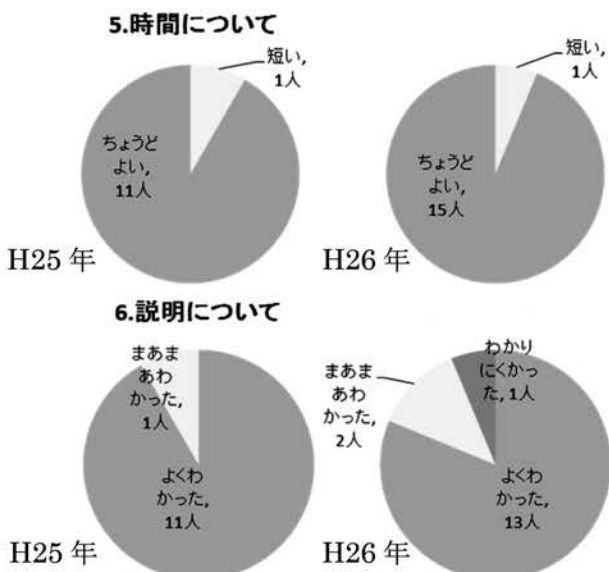


図14 アンケート集計結果

質問事項4(内容)と7(また来たいか)では、全員が「楽しかった」「できればきたい」を選択してくれた。児童対象の教室ではこれが最重要な項目と思われるから、アンケートの結果通りに受け取れば、所期の目的はほぼ達成できたものとする。なお、参加児童に楽しんでもらう工夫として、図15のような飛行記録入りの記念撮影を実施したところ、好評のように感じられた。



図15 記念撮影の様子

6. まとめ

児童を対象とした科学教室用の教材開発を行い、これを使用した教室を二回開催した。全体を通して気が付いた点を以下にまとめる。

<本科学教室の優れた点>

- ・この科学教室において、一人分の材料費はケント紙2枚の約60円だけである。これ以外に、のりや両面テープなどの消耗品が必要となるが、工作教室としては極めて安価に開催できる。
- ・教材として使用する地面効果翼機は、普通の模型飛行機に比べて完成後の調整が容易であるから、ものづくりの経験が少ない児童向きといえる。すなわち、3軸のうちローリングの調整が不要で、主翼の上反角調整も必要ない。加えて水平尾翼は存在しないから、調整のしようがない。

<本科学教室の改良点>

- ・講義の中で扱う「気圧」については、児童でも予備知識はあるものと誤解していたために説明が不十分であった。気圧を実感させる科学実験は数多く考案されているため、これを取り込んで「飛ぶ仕組み」の理解を深めてもらうこ

とが望ましい。

・参加した児童は、好みのデザインに彩色し、余った紙で吹き流しをつけたり、垂直尾翼の形を変えたりと、芸術面での創造性を発揮してくれた。一方、工学面での独自性を引き出すことはできていなかった。その原因としては、次の二点が挙げられる。

① 提供する型紙が一種類のため、現状では全員が同じ形の機体を作成するしかない。型紙通りの工作では、独創性を発揮しようにも限界がある。

② 飛行距離の競争を行っているにも関わらず、「どうすれば遠くまで飛ばせるか？」についての科学的な説明がない。これは、参加した児童が独力で工夫できるほど簡単な内容ではない。

そこで、①に対しては、飛行性能の異なる複数の機体（型紙）を開発すること、②に対しては、まず飛行距離への影響が大きい因子（重心位置など）を明らかにし、次に参加者が自分の機体に対して、この因子を調整することで、飛行距離を変えられるような仕掛けを導入すること、が求められる。

いずれを行うためにも、さらなる実験や解析を行って、地面効果翼機の飛行特性を詳しく理解する必要がある。また、これらの改良を加えて内容をより充実させれば、対象を中学校生徒へとレベルアップした科学教室でも、十分に使用に耐える教材になるものと考えられる。

参考文献

- 1) Paper Craft “RAM”, < <http://space.geocities.jp/ashix58/ram/ram.pdf> > (参照日 2014年9月26日)
- 2) 松原武徳ほか, 地面効果翼の高揚力化の研究, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.58, No.552 (1992), pp.2456-2463.
- 3) 小林昭夫, 図解 飛行機はなぜ飛ぶか?—紙ヒコーキとゴム動力機でわかる飛行の仕組み, 講談社 SOPHIA BOOKS (2002), pp.25-37.
- 4) 渡辺儀輝, おもしろ実験と科学史で知る物理のキホン カ・熱・光・電気・流体がスラスラわかる, ソフトバンククリエイティブ (2009), pp.210-213.
- 5) たとえば, 松村昌典ほか, 明解入門 流体力学, 森北出版 (2012), pp.164-168.

- 6) 竹内淳, 高校数学でわかる流体力学, 講談社ブルーバックス (2014), pp.12-32.
- 7) デビッド・アンダーソン, スコットエバーハート, 中井祐輔訳, 空を飛ぶ仕組み (-Understanding Flight-) 航空技術 No.574- (2003).
- 8) 竹内薫, 99.9%は仮説, 光文社新書 (2006), pp.14-28.
- 9) 鈴木真二, 飛行機が飛ぶわけ—「ベルヌーイの定理」説をめぐる論争を解く(1),(2), <<http://www.flight.t.u-tokyo.ac.jp/~suzuki/MSNsuzuki1.pdf>> (参照日 2014年9月29日)
- 10) 小林昭夫, 紙ヒコーキで知る飛行の原理, 講談社ブルーバックス (1988), pp.84-118.

【受理年月日 2014年 9月29日】

