

気圧差で重量物を浮上させる演示実験装置の開発と実践



京都市青少年科学センター 海老崎

功*

目的

中学校理科において、圧力や大気圧に関する内容は1年次に「圧力の単位」「圧力と面を押す力、面積の関係」「大気圧とは何か、大気圧の大きさ」などを行う。中学校学習指導要領では理科の学習において「活用力」や「実生活との関わり」が一層重視されるようになったが、教科書では布団圧縮袋や吸盤などが記載されている程度である。これらの学習に結びつけて「ふもとで買ったポテトチップスの袋が山頂で膨らむ」程度は理解できると考える。では、この学習内容が「飛行機はなぜ空を飛べるのか」というところにつながっているだろうか。飛行機の揚力に寄与する力の多くは翼が生み出す翼上下の気圧差だが、この学習内容でそれを理解するのは難しいのではないか。

飛行機の揚力については「翼前部で上下に分かれた空気が翼後部で“同時に合流する”という誤り」および「迎角を無視し上面が膨らんだ“翼の断面形状のみに注目しベルヌーイの定理を適用する”という誤り」などを曲解し、「ベルヌーイの定理は誤りであり、空気分子が翼の下面に当たって下向きに力を受けることによる作用反作用から翼に上向きの揚力が生ずる」という誤った説がはびこった（この作用反作用説の誤りは専門家のWEBなどに明快に指摘されている）。

難解な流体力学と違い作用反作用説は単純明快なこともあり、理科教員までもがそれを信じてしまうことがあった。これは理科教員であっても飛行機のような重量物が浮上するほどの気圧差による現象や実験を経験したことがない上に、気圧差から生じる力の計算を十分にやっていないことが原因ではないだろうか。

これを払拭するにはポリ袋を使った簡易エアジャッキのように、下から支えて持ち上げるのではなく、空中に気圧差で浮くという現象を見せたい。重いボウリング球がわずかな気圧差で宙に浮いていたらその原理の入り口には導けるのではないか。

本実践は、

「わずかな気圧差でも、断面積が大きければ、大きな力を生み出す」

「それにより重量物を空中に浮かす」ことを演示し、圧力差により生じる力の大きさについての学習効果を高めることをねらいとしている。

概要

ボウリング球に筒を被せ、ボウリング球の上部を吸引してわずかに減圧することでボウリング球を浮上させる実験である（写真1）。この実験およびそれに伴う考察から、わずかな気圧差で大きな力を生み出せることを示すことができ、巨大な重量を持つ飛行機が空中に浮くことができる理由を考えさせることができる。



写真1 実験のようす

I. ボウリング球浮上の原理

約20hPa（=約0.019気圧）だけ減圧しながら、球上部の空気を吸いきると筒の最上部まで上げることができる。その途中であっても球は重力で落下するが、その落下は球と筒の壁の間に隙間があるほど速くなる。筒の上部からボウリング球を落とせば一瞬で落下するが、すぐに筒の上部に気密性のふたをすれば、その落下はゆるやかになる。この時、筒の最上部から最下部に落下するのに5秒かかるとすると、筒上部の

（注）海老崎功指導主事は平成25年4月1日付で京都市立西京高等学校附属中学校に転任された。

* えびさき いさお 京都市立西京高等学校附属中学校 指導教諭

〒604-8437 京都府京都市中京区西ノ京東中合町1

☎(075)841-0010 E-mail ebisan@mbox.kyoto-inet.or.jp

30Lの空気を5秒以内に吸いきらないと球は重力による落下に負けて、全く浮上しないことになる。

II. 本装置の特徴

本装置では、最上部から最下部まで自然に落下する(球と筒の隙間から球上部に30Lの空気が戻る)のに約2分という時間を実現した。つまり、2分間以内に60L(もとの空気量+最大落下分)の空気を吸いきることができれば誰でも最上部まで上げることが可能である。人の減圧能力は個人差があるが、100~600hPa程度は下げることができるので20hPa下げことは簡単である。浮上にかかる時間の現在の最速記録は13秒程度であるが、スピードを競わずにゆっくり、休み休みでも2分間息を吸えば誰でも楽に浮上させることができる。

教材・教具の製作方法

本装置は、ボウリング球(直径218mm、16ポンド=約7kg)にアクリル製の透明円筒(外径230mm、内径220mm、高さ750mm~1000mm程度)を被せ、上部に取り付けたふたを通して吸引、減圧することにより球の上下で気圧差を作り、浮上させるものである(図1)。

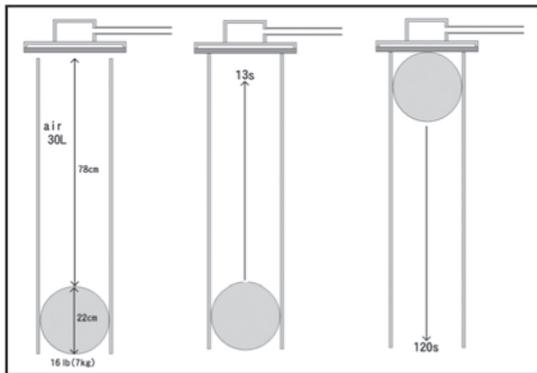


図1 装置の概要

I. ボウリング球

安価なものは3,000円程度から市販されているが、本装置のものはボウリング場で廃棄予定のものを無料で入手した。アクリル筒内径とボウリング球直径には2mmほどの差があるが、写真2左のようにボウリング球の赤道部に塩ビ板(幅50mm、厚さ0.5mm)を両面テープで接着した上に、スコッチメンディングテープ(住友スリーエム、アセテート、表面つや消し加工、厚さ約0.06mm、幅18mm)を重ねて巻き付け隙間を埋める。テープを巻く量は気温などによりボウリング球がわずかに膨張、収縮するので、球の上下動に最適の隙間となるようにテープを1重ほど解くか(気温が高めの時)、あるいは追加で1重ほど巻き足す(気温が低めの時)程度の調整を行う。メンディング

テープは表面がつや消し加工のため適度にザラついている。そのためセロハンテープやラップのように筒の内側に貼り付き引っ掛かることがなく、隙間をギリギリまで埋めてもスムーズな上下動が可能である。隙間が大きければ当然ボウリング球の落下が早く、人の吸引のスピードでは浮上させられなくなり、逆に隙間が小さすぎるとボウリング球が筒の途中で挟まって動かなくなる。この素材は簡単な調整で最適の隙間を得るために最適である。

II. ボウリング球の台

350mm×350mmほどの木板中央にボウリング球を安定して置くことができ、アクリル筒を被せた時に下部に空気が入り出る隙間があればよい。最も簡単な作りのものは写真2右のようなものである。

III. アクリル筒

特注ではなく既製品として外径230mm、内径220mm、長さ1000mmのものが2~3万円程度で市販されている(写真3)。本装置で最も高価な部品であるが、この価格帯のものは精度も高く、これまで長さ750mm~1000mmのものを4本購入したが、どの筒も正常に機能した。



写真2 ボウリング球の赤道部とボウリング球の台



写真3 アクリル筒(上から見たところ)

IV. ふた

アクリル板(250mm×250mm、厚さ5mm)の片面に硬質ゴム(厚さ5mm)を両面テープで貼り付けたものに吸引用の穴を開けた。吸引時の抵抗を少なくするために吸引口は大きいほどよく、本装置はアルミ

パイプ（外径13mm、内径12mm）を用い、それに内径13mmの吸引用ビニルチューブを被せて用いる。アルミパイプの端にボウリング球と同じくメンディングテープを巻き、被せたビニルチューブがアルミパイプに貼り付かず、着脱しやすいようにした。実験時には長さ200mmほどのビニルチューブを複数用意すると連続使用が可能である。ふたには直径5mmの穴を10個開け、それぞれにゴムシート（厚さ0.5mm）を弁として貼り付けた（写真4）。これは大きな穴ほど吸引時の抵抗が少ないが、穴を大きく設計するとそれに伴う弁の動きも大きくなり、浮上させた球が弁が閉じる動作の間に大きく落下するためである。つまり、「小さな穴をたくさん開けて大きな穴の代わりにする」「それぞれの弁の動きを小さくする」ためにこのような設計にしたものである。



写真4 上から見たふたと吸引口の拡大図

ふたの裏側中央にボタンスイッチを取り付け、ボウリング球が浮上しきると乾電池式のブザーが鳴り、達成感を感じられるようにした。また、裏側の周囲4カ所には、実験中にアクリル筒からふたが脱落しないようにアクリル小片を両面テープで貼り付けた（写真5）。

本装置においてはこの部分の工作を丁寧に行う必要がある。10個のゴムシートの逆止弁部分全体を覆い、吸い口を取り付けられる筐体（100mm×100mm×50mm程度）があれば、他はボール盤程度で工作可能である。



写真5 ブザーとふた裏面（中央はボタンスイッチ）

学習指導方法

中学生の理科では現象を見せるだけでなく、計算（概算程度でよい）を伴った理解をさせたい。圧力が全体にかかる力とその面積によって決まることを、繰り返し計算を行い確認する。その際、圧力の単位は「パスカル」であるが、実生活では「気圧」を使うことも多く、また、 1cm^2 あたり1kgの空気による重さ

（1kg重）がかかっているということを利用すると計算がしやすくなる。そこで本実践ではあえて「気圧」を中心に、「パスカル」は補助的に用いているが、指導者の展開手法によりどちらかの単位に揃えて学習することも可能である。以下に指導手順の一例を示す。

- ①教科書の一連の圧力、大気圧の実験学習を行う。
- ②授業の終わりに「ジャンボジェット（400トンとする）はなぜ空を飛べるのか（浮いていられるのか）」と発問する。知識として翼による気圧差を知っている生徒もいるが、実際の計算までは知らない。
- ③翼の上下で気圧差ができていないことを伝える。
※気圧差を生じるメカニズムは簡単に紹介するが、ベルヌーイの定理などに深入りはしない。特に前述したような誤った説明をしないように注意する。
- ④飛行機をボウリング球に置き換えた時、どの程度の気圧差で浮上するか計算する。
- ⑤わずかな気圧差で大きな力が実際にはたらくことを本装置を用いて演示する。
- ⑥ボウリング球は浮上したが、気圧差で400トンのものが浮上するのか、どの程度の気圧差で浮上するか計算する。翼の面積は 500m^2 である。
- ⑦ボウリング球の0.02気圧に対し、ジャンボジェットは0.08気圧であり、オーダーが大きく異なるわけではなく、実感上、無理な値ではないことに気づかせる。

ボウリング球の質量 7.3kg ボウリング球の直径 21.8cm 直径部分の断面積 373cm^2 $\rightarrow 7.3 \div 373 \approx 0.02$ $\rightarrow 1\text{cm}^2$ あたり 0.02kg しかない 1気圧は 1cm^2 あたり約1kgの重さがかかる \rightarrow 球の上下で0.02気圧の差があればボウリング球は浮く	「気圧の差」について ボウリング球を浮かす \rightarrow 0.02気圧の差 ジャンボジェットを浮かす \rightarrow 0.08気圧の差 人の吸引 \rightarrow 0.1~0.7気圧の差
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

図2 授業で用いるスライドの例（その1）

気圧「低」 ↑ ボウリング球 気圧「高」	わずか 0.02気圧 の差	気圧「低」 ↑ 飛行機 気圧「高」	わずか 0.08気圧 の差
-------------------------------	---------------------	----------------------------	---------------------

図3 授業で用いるスライドの例（その2）

実践効果

本実践を含んだ実験学習を平成19年度に京都市青少年科学センターにおいて中学校1年生を対象に行った。学習後の自由記述アンケートは「面白かった」「びっくりした」「気圧差で大きな力を生み出すのがわかった」というものばかりであった。この結果だけで本実践の教育的な効果は判定できないので、本実践を教員研修の場で行い、実際に日々生徒を指導する立場

の教員の意見を両面質問紙を用いたアンケート法で聞いた(図4)。

- ①A県B町・C町合同研修会(理科部会)2012.8.22
小学校教員13名・中学校教員5名
- ②D県小中学校理科教育研究発表会、2012.10.4
小学校教員96名・中学校教員90名

アンケートのお願い【裏は指示があるまで見ないでください】

以下のアンケートは、調査実施員の手配について謝辞も含めて、それに関する研究および報告(報告、論文等)でしか用いられません。また、個人情報は必ずしも必要でないのでご協力をお願いいたします。(研究実施者 湯澤 浩)

・番号順に回答し、次の質問に進んでから回答することはありません。
・回答は一つだけで大丈夫です。
・質問に迷うものがあるときは、最も近い答えのものを選択してください。

1. あなたの性別をご記入ください。(中) (男) (女) その他)

2. あなたの専門教科/専門分野についてご記入ください。(物理) (理科以外の理科) (理科以外)

3. あなたの教員経験年数をご記入ください。(3年以内) (4年以上)

以下は「16ボルトのボウリング球(約4g)を直径部分の距離は約400m」についての質問です。

4. この球の自由落下実験のプログラム(強力な遠隔操作)で上向きに強い風を当てると球は浮き上がると思いますか。
(浮くと思う) (浮かぬと思う) (まったく予想できない)

5. 「4」の回答はどうやって頂きましたか。
(理科の知識をかなり使った) (理科の知識を少し使った) (理科の知識は使わなかった)

6. この球に慣性なくひたすらはまる間をかせぎ、上から距離を測ると、球は浮き上がると思いますか。
(浮くと思う) (浮かぬと思う) (まったく予想できない)

7. 「6」の回答はどうやって頂きましたか。
(理科の知識をかなり使った) (理科の知識を少し使った) (理科の知識は使わなかった)

8. この球に慣性なくひたすらはまる間をかせぎ、上から距離を測ると、球は浮き上がると思いますか。
(浮くと思う) (浮かぬと思う) (まったく予想できない)

9. 「8」の回答はどうやって頂きましたか。
(理科の知識をかなり使った) (理科の知識を少し使った) (理科の知識は使わなかった)

10. 「6」「8」の回答は「大気圧」が大きいですか。
(はい) (いいえ) (どちらでもない) (わからない)

11. 「10」の回答はどうやって頂きましたか。
(理科の知識をかなり使った) (理科の知識を少し使った) (理科の知識は使わなかった)

【裏は指示があるまで見ないでください】

表

【こちらは「表」です】

以下については、ボウリング球についての実験を体験した後にお答えください。

・番号順に回答し、次の質問に進んでから回答することはありません。
・回答は一つだけで大丈夫です。
・質問に迷うものがあるときは、最も近い答えのものを選択してください。
・10は自由落下して下さい。

12. 実験の結果「わずかな大気圧の力で大きな力が発生する」といえますか。
(全くは感から知っていた) (今回初めて知った) (実験を体験してまだ理解できない)

13. 実験の途中で「1」知見」とはどういうものか学びました。その内容についてどう思いましたか。
(覚えていた) (忘れていた) (思い出した) (覚えていなかった)

14. 実験結果を説明するために簡単な計算を行いましたか。
(計算手帳は使った) (知らなかった) (使った) (計算が理解できず使えなかった)

15. この実験を授けようと思えば、授業のどこで授けますか。
(授業の導入に使う) (授業の内容を深めるに使う) (授業のまとめに使う)

16. あなたの授業でこの実験を行うとします。どのような現象の授業などでこの実験を指導できると考えますか。単元や授業の流れで思い浮かぶものがあれば簡単にまとめて下さい。

この実験で「1」知見」とは「地上の物体は空気圧を受ける」といふことを、授業で説明した後、その空気圧が「1」知見」といふことを、授業で説明する。

裏

図4 両面質問紙

アンケート表面は実験前に「ボウリング球は人の吸引で浮くと思うか」「この問題を考えるのに理科の知識を使ったか」などをたずね、裏面は実験後にそれがどう変容したかを調べる内容である。そして、実際の授業ではどこで使えるか、また、どのような効果が期待できるか、などを答えてもらった。その結果、D県では理科指導をしているはずの中学校理科教員の約半数が「ボウリング球が人の吸引程度での気圧差で浮上すると思うか」という実験体験前の質問について回答するのに「理科の知識」を使っていないことがわかった(表1)。

表1 理科の知識を使って考えたか
その回答はどうやって導きましたか

	人数	%
理科の知識をかなり使った	6	6.7%
理科の知識を少し使った	42	46.7%
理科の知識は使わなかった	42	46.7%

中学校理科教科書の内容程度の指導では、実際の現象の圧力計算をする場面が少なく、高真空・低真空の区別(真空度の違い)などにもふれないことから、教員自らも気圧差による現象を科学的に考えることから遠ざかっていることに原因があるのかも知れない。

これらを改善するには実生活に関連した現象で、学びの有用性を一層高められるような実験が必要だと考える。本実践は「大気による圧力」において、これまで深められていなかった以下の内容を補える可能性がある。

- ・真空の程度を意識した現象の理解
- ・数値計算(概算)を伴った圧力の理解
- ・学びの有用性につながる実験

そして理科教員が陥りやすい誤り(マグデブルグ半球の実験のように高真空時のみ大きな力がはたらく、飛行機は空気との作用反作用で浮く等)を解消する上でも必要な実験と考える。

アンケート結果から、本実践をどのような場面で導入できるかをたずねたところ、

- ・授業の導入として驚きをもたせる
- ・授業の内容を深め感動をもたせる

という選択肢が中学校教員から多く支持された(表2)。ボウリング球が浮上するという派手な実験から、インパクト実験のような役割ばかりが選ばれるのではないかと予想していたが「授業の内容を深める実験」となり得ることも多くの先生が感じてくれたことがわかった。

表2 この実験を授業のどこで使うか

この実験を授業のどこで使うか	A県小学校	A県中学校	D県小学校	D県中学校
授業の導入として驚きをもたせる	2	2	58	52
授業の内容を深め感動をもたせる	9	4	24	25
授業のまとめに印象を深める	2	1	14	13

その他補遺事項

I. ボウリング球浮上時の気圧測定

ボウリング球浮上時のアクリル筒内部の真空度は自作気圧計（高真空、低真空が両方測れる 2way のもの）を用い、ふたの一部に穴を開けビニルチューブで接続し測定した。ボウリング球上昇中のアクリル筒内部が計算値と同じ 0.98 気圧前後（約 20hPa の減圧）を示すようすは、実験室のモニタ（CCD カメラを用い気圧計の目盛り部分を拡大表示している）で確認できる（写真 6）。



写真 6 ふたに接続した気圧計とモニタへの投影

自作にこだわらず、ビニルチューブでの接続が可能なタイプの市販デジタル気圧計を接続するか、または小型の簡易デジタル気圧計をアクリル筒の内側上部にビニルテープで貼り付け封入しても、ボウリング球上昇中の 20hPa ほどの減圧を測定することができる。

※誤差が 1hPa 以下の精度の高いデジタル気圧計は数万円と値が張るが、腕時計併用タイプなどの誤差がやや大きいもの（数 hPa 程度、安いものは 3,000 円程度～）でも減圧の程度は確認できる。

II. 複数で同時に吸引できる装置

1人で2分以内に60Lの空気を吸いきる自信がない人や、1人で前に出て実験をするのが恥ずかしいと言う時などのために、複数人で同時に吸引することができる装置も準備した（写真7）。これに内径10mmのビニルチューブを取り付け、その先端に新品のストローを挿し吸引する。複数人で同時に吸引すると、浮上に必要な吸引のパワー（減圧）は同じであるが、ボウリング球上部の空気を吸いきる時間が格段に早くなるので、浮上にかかる時間も短くなる。



写真 7 5人で同時に吸引できる装置

III. 現役機長からの評価

平成22年および23年に「空からの環境学習（主催：豊中市、環境省近畿地方環境事務所）」において、本装置を使った実験演示を行った。このイベントの講師は日本航空のボーイング747-400の現役機長であったが、その中で飛行機が空に浮かぶことができる理由につながる実験の実施を依頼された。そこでボウリング球の浮上と飛行機の浮上を関連させながら、飛行機の質量と翼の面積、上下の気圧差などをスライドで示しながら実験を行った。これらの実験および展開について、説得力を伴った内容であったという評価を機長から頂き、本実践をまとめる契機となった。

IV. 本実験のヒント

ボウリング球に筒を被せ、掃除機などで上部から吸引し、素早く浮上させる実験は大阪市立科学館のサイエンスショーから広まった。名古屋市科学館には同様の展示物がある。これらの装置はボウリング球と筒にある程度の間隙があり、吸引を止めると一気にボウリング球が落下する。本実践はこの隙間部分の改良および弁の個数、形状などの工夫により、1人の吸引でも無理なく浮上させられるようにしたものである。