

サイエンスショー「飛べ！ブーメラン」実施報告

大 倉 宏 *

概 要

2019年12月から2020年2月までブーメランをテーマにしたサイエンスショーを実施した。ブーメランが投げ手のところに戻って来るのを見た人はどうしてだろうとふしぎに思うので、実験とそこで起こる現象には興味を持っていただけた。しかしその説明は容易ではなく、揚力が横向きに働くのでブーメランの軌道が曲がること、回転するブーメランが歳差運動を起こすため刻々と揚力の向きが変化すること、などを丁寧に説明するように心がけた。

1. はじめに

投げ手のところに戻って来るブーメランはふしぎな道具である。オーストラリアの先住民アボリジニが狩りに使っていたことは一般に良く知られている。しかし弓矢が発達する前は世界各地にあったという学説があることや、エジプトのファラオ、ツタンカーメンの墓からも出てきていることなどはあまり知られてはいない。

ブーメランはときおりアニメキャラクターの武器として登場することもあり、子どもも良く知っている。現在では、娯楽としてだけではなく、競技スポーツとしても楽しまれている。

このようにブーメランは、全く知らない人がないくらいポピュラーな道具と言える。その一方で、ブーメランを実際に投げたことのある人は、会場で尋ねても少なかった。さらに投げてきちんと戻って来た経験を持つ人はほとんどいっしょらなかった。報告者自身も子どもの頃おもちゃを投げたことがあったが戻って来させることはできなかった。

いずれにしろ、ブーメランが戻って来ることはふしぎで、何かヒミツがありそうだと多くの人が興味を持つ。ブーメランを題材としたサイエンスショーは過去何回か行っているが、今回は2011年の冬の「飛べ！ブーメラン」以来のリバイバルとなった^[1]。

2. 実験と演示例

2-1. 様々な形のブーメラン

アボリジニのブーメランは「く」の字に折れ曲がった平らな木板であるが、実は様々な形のものがある。くの字型の木製のブーメランの実物(=オーストラリアのお土産)の他、競技用の羽根が3枚あるいは4枚のプラスチック製のブーメランをいくつか見せて紹介した。

そして、どのブーメランにも共通してわずかであるが表面(おもてめん)にふくらみ(以下、カンバー)があることも指摘した。

2-2. 世界一かんたん紙ブーメランを作る

これらの木製、あるいはプラスチック製のブーメランは、硬いので人にぶつかると怪我をさせてしまう危険がある。投げるには広い場所が必要でサイエンスショーの狭い会場では投げるができない。そこで、この会場でも安全に投げることのできる厚紙でかんたんに作れるブーメランを紹介し、紙ブーメランを作った。

厚紙は板目表紙(セキレイ 板目表紙 美濃判)を長さ30センチ、幅3センチの短冊形に切ったものを2枚用いた。

2枚を十字に重ねてホチキスで止め、表(おもて)と決めた側を上にして、翼端4か所に少し上にカンバーを持たせる。

後述する上反角との兼ね合いでもあるが、カンバーはわずかによく、あまりつけると失速してしまう。そしてカンバーをつけた表面(おもてめん)を上にし、中央をへこませ、翼端を持ち上げるように上反角をつける。できた厚紙ブーメランを投げたとき、ブーメランが上に上がるようなら上反角のつけ過ぎだし、落下するようなら不十

*大阪市立科学館学芸課
ohkura@sci-museum.jp

分である。つまり、上反角をきつくするかゆるくするかでブーメランの軌道を調整できる。

また、飛び方にほとんど影響はないが、誤って人にぶつかったときの危険性を小さくするために、翼端の角はハサミで丸く切り落としていた。

2 - 3 . 紙ブーメランを投げる

ブーメランは自身が自転しながら大きく円に近い軌道を描いて旋回して戻って来る。そのため回転と表記するとブーメランのどの運動を指すのか混乱することがある。そこで本稿では、地球の自転に相当する部分を中心に「自転」あるいは「回転」、太陽の周りを廻る公転に相当する運動を「旋回」と呼んで区別することにする。

さて、我々の紙ブーメランの投げ方であるが、右利きの人でも、左利きの人でも、表面(おもてめん)が顔の方を向くようにブーメランの端をつまんで、手首を折り返し構え、スナップを効かせて良く回転をかけて上手投げで投げる。旋回半径は1.5～2メートル、旋回時間は1秒ほどである。強く(速く)投げても旋回半径はほとんど変わらず、旋回時間が短くなるだけである。

投げる前に、観客には予め手で顔(目)をガードしておくことを要請しておく。観客のいない方に向けて投げるので、めったにぶつかることはないが、それでも狭い会場でやっているので4～50回やって一度だけ観客にぶつけてしまったことがあった。そのため、観客への注意喚起は必須である。

投げる前に、ブーメランは縦投げ(上投げ)なのか、横投げなのかを尋ねると、年齢の低い子ほど横投げと答える割合が多かった。フリスビーを連想しているのかもしれない。

フリスビーのように横投げをすると、ブーメランは急上昇し、最高点から今度は急降下する。急降下の先に観客がいると危ないので注意が必要である。

投げてキャッチ(ここでは拍手をいただける)を2～3回行って、ブーメランの飛び方をじっくり観察していただいた。

2 - 4 . 飛行機とコマ

さて、ブーメランを投げて見事に戻ってきたのですが、どうして戻ってくることができたのでしょうか、これからどうしてブーメランが戻って来るのか解説します、ブーメランの運動に共通する2つのものがあります、と言って飛行機の模型とコマの模型を登場させる。

飛行機とブーメランの共通点はなんでしょう？コマとブーメランの共通点はなんでしょうと観客に尋ねると、翼があることと回転するという共通点は観客が答えてくれる。

これから飛行機の翼にどのような力が働くかから見

て行きましようと言って、以前はすぐ次の風船に実験に移った。しかしこの流れでは、何を説明されているのかわからないという声があったので、以下のように何を説明したいのかをもう少し説明することにした。

2 - 5 . ブーメランと飛行機の関係

この部分は実験がなく説明だけが数分続いてしまうのだが、少し込み入った説明をした。

飛行機は翼があるから飛ぶことができ、このとき翼には上向きの力(揚力)が生じている。飛行機は動いてなければ揚力は働かず墜落してしまう。揚力は翼に空気がぶつかる(翼の周りに空気が流れる)ことにより力が発生する。と、飛行機の模型を使って説明を始める。

では、飛行機が曲がる(旋回する)ときはどうするでしょう？と、飛行機の模型を前に進ませ、そこからそのままの姿勢で機種向きと進行方向を変えて見せる。(こどもも含めて)ほとんどの人が、飛行機はこのように飛ばないことを知っていた。

飛行機は機体を曲がる方に傾けて旋回するのである。つまり、真つすぐ飛んでいる時は上向きに働いている揚力を、機体を傾けることで横向きに働かせることによって、軌道を曲げている。



ブーメランと飛行機模型を両手に持ち、揚力の働く向きを説明している。

それはブーメランも同じである。我々のブーメランは、投げ手のところに戻ってきた。投げたものが戻って来るためには少なくとも軌道が曲がらなければならない。そのためには横向きに力が働く必要があると説明した。

改めて、ブーメランは横投げではなく、縦投げすることを強調した。横投げならば上向きに働く揚力を縦投げすることによって、横向きに働かせて、軌道を曲げるのである。

ブーメランを横投げするとどうなるかも見てもらいましょうと言って、横投げもして見せた。果たしてブーメランは揚力が上に働くので上昇してしまう(ぎゅんと上に上がり、最高点から急降下するような動きをする)。

2 - 6 . 浮かぶ風船

さて、ところで翼に風があたるとどうして揚力がうまれるのでしょうか？ということで、しばらく揚力の説明をした。

翼に揚力が発生するためには、ここでは①翼のふくらみ(=カンバー)の存在②迎え角のいずれか、あるいは両方があれば発生すると説明した。そして、紙ブーメランを作るときに翼端にカンバーをつけたが、本物の飛行機の翼にもカンバーがあることを模型を使って説明した。(より正確には、前縁に丸みがあり、後端が尖っているクッタの条件が必要なのだが、厳密性は犠牲にして①か②であると言い切って説明した。)

さて、ふくらみがどのように働くのかをこの模型を使って実験したいのですが、模型は重くて強い風が作れないといけないので、代わりに丸みのある軽い風船を使って実験・説明をします、ということで風船を風で浮かせる実験を行った。

送風機の風を上に向け、その上に膨らませた風船を浮かべた。風が吹いていることを視覚的に認めてもらうため、割りばしの先にビニールひもをつけた吹き流しを作り、それで風があることを示した。

風船は抗力で(風船の下に風がぶつかり、すぐ上には風船に遮られて風がないから)浮くので、下からの風が当たる面積を大きくするため、風船は大きく膨らませる必要がある。

2 - 7 . 斜めでも浮かぶ風船

この送風機は傾けることができます。風船を浮かべたまま、送風機を傾けていくと何が起きるのでしょうか？という、結果を予想してもらった。風船が落ちると考える人が多かったが、風船が浮いたままなので観客は驚く。

この風船を浮かべているのは、風船の周りの空気の流れですと言って、風船と送風機の間にも両手を入れ、風を遮ると風船は下に落ちる。

改めて風船を浮かべて、では、風船の周りに風がどのように吹いているか、どの部分の流れが強いかをこの吹き流しを使って調べて見ましょう、調べる前に予想してみましよう、ということで予想してもらった。

- ① 風船の下に強い風の流れがある。
- ② 風船の上に強い風の流れがある。
- ③ 風船全体を包み込むように風が吹いている。

手を挙げていただく③だと考える人が多かった。しかし、吹き流しで調べると②で、この結果は意外だったようで驚く方が多かった。

単純に①では、力が釣り合わせることは難しく、どこかにポンと飛んで行くだろうと言うと、そうかと思う人が多い。



風船は、吹き飛ばされる力(抗力)と流れに引きずり込まれる力(揚力)と重力の3つが釣り合って空間の一点にとどまっているのである。

実は、この実験は噴流(ジェット)が物体に沿って流れるコアンダ効果(その反作用として物体が流れの側に引きずり込まれる)を見ているのであって、揚力が生じている例として相応しくはないという見解もある。

たしかにそのとおりではあるが、揚力は翼の上面と下面との流れに差があることによって生じる。風船の上方には流れがあり、下方には流れがほとんどない。結果的に風船の上面の圧力は低くなり、流れに対して垂直の向きに力が働くのだから、揚力の例としてよからうと、この実験を行った。

我々は、風に吹き飛ばされることは経験があるが、流れに引きずり込まれることは、あまり経験しない。そこで台風で瓦が飛ばされる話や、海や川で流れに引きずり込まれて溺れる話、電車のホームに立つと危険な話などの例をあげて説明した。

2 - 8 . 浮かぶビーチボール

さらに、強い風を使えばこんなこともできます、ということで、プロアを使ってビーチボールを浮かべた。プロアを振り回すとビーチボールがプロアの風についてくることをご覧いただいた。たしかに風には吹き飛ばす力(抗力)だけでなく、流れに引きずり込む力(揚力)もあることを見ていただいた。

2 - 9 . 浮かぶビーチバット

さらに、風に包み込まれているのではないことを納得していただくため、ビーチバットも浮かべて見せた。ビーチバットは立った姿で浮いているが、長いので、風が包み込んでいるのではないことは、視覚的に明らかである。



2 - 10 . ペットボトルは浮くか？

同様に逆さにしたペットボトルを浮かせることにもチャレンジした。バランスを取るために、30CCほど水を入れた。しかし、何度挑戦しても浮かない。

そこで、このペットボトルに翼を付けることで浮かべます。ただし、翼は皆さんが思うような形をしてないかもしれません。と言って、底にビニールボールを半分に切ったものをくっつけたもの逆さまにして丸い部分に風を当て、浮かせる。

2つの違いは、平らだったか、丸みがあったかの違いで、丸みがあると揚力が強く働く(つまり、ボールが揚力を発生させる翼として機能している)のだと説明した。

2-6. 説明のまとめと回転への導入

これで、ブーメランの翼につけた丸みがどのような働きをするか分かっていただけだと思います。丸みがあると、風の流れる速くなり、流れが速くなった方に引きずり込まれます。

実は、丸みでなく翼を傾け(迎え角をつけ)ても同じで、翼の下に風が当たって押されて浮くのではなく、翼の上に速い空気の流れが起こってその流れに引きずり込まれるようにして浮くのですと説明した。

ただし、飛行機は補助翼を使って飛行中姿勢をコントロールし迎え角をつけることができる。しかしブーメランにはそのような機構がないので、投げた後から迎え角をコントロールすることができない。そのためブーメランにはキャンバーが必要なのである。

そして、飛行機はこの揚力を上向き、つまり機体を浮かせるのに使っていますが、我々のブーメランでは、ブーメランの軌道を曲げるために横向きに使っています。なので、ブーメランを立てて、上手投げをします(フリスビーとは投げ方が違う)。と説明した。

さて、これでブーメランは真っすぐ飛ぶのではなく、軌道がカーブすることが分かりました。しかし、カーブしても、自分のところに戻って来るかどうかはまだ分かりません。と言って、再び飛行機の模型を取り出した。

飛行機が旋回するとき、どうするでしょうかと言って、飛行機の向きを(手で)変えながら旋回させるのと向きを

変えずに旋回させるのを見てもらった。

もちろん、飛行機の向き(姿勢)が変わらなければ戻って来れませんね。ブーメランも同じです。飛行機なら人が操縦することによって向きを変えることができますが、ブーメランは操縦しませんから、自動的にブーメランの向きが変わらなければなりません。それはどのようにになっているのでしょうかと、次の実験に移った。

2 - 11 . コマの歳差

ブーメランの向きが変わるのは、回転するコマの運動と関係しますと言って、直径 10 センチほどの大きさのコマを机の上でまわした。回転してないとコマは倒れますが、回転していると倒れません。少し傾いても、首振り運動をするだけで倒れません。

コマを倒そうとする重力がずっと働いているのに働いているのに、倒れることなく回り続けます。

2 - 12 . 車輪のコマ

自転車の車輪の回転軸に 30 センチほどの金属棒を取り付けたものをコマにした。金属棒の先端は丸く削り出している。車輪を回してスタンドの上に乗せると、写真のようにスタンドの上で歳差運動を見せる。スタンドの棒の凹みと削り出した部分が上手く合っているので軸が水平よりも傾いてもなお回り続けるほどであった。かなりダイナミックな演示で人気があった。

そして、このように回転しているものに力が働くと、回転面が変化していく(あるいは回転軸の向きが変化する、コマの場合は首振りする)運動のことを歳差運動と言い、回転する物体の特徴的な運動であることを伝えた。



2 - 13 . 車輪を振り回す

この歳差運動を体感してみませんかということで、お

お客様に回転する車輪を持っていただいて、軽く振っていただいて歳差運動を体験していただいた。車輪はそれなりに重く、回転していると思わぬ方向に動くので、注意が必要である。安全第一なので、少し危ないなど感じたお客様には、車輪をゆっくりと動かすようお願いして、お客様の動きに注意した。

まず、回転していない車輪をもっていただいて、剣道の「面」のように振りかぶって振り下ろす動作をしてもらった。その後で、車輪を回転させて同じように振り下ろしてもらった。観客はまっすぐ振り下ろすことができず、車輪を左右に持って行かれる。



まっすぐ振り下ろせず、女の子は体が完全に横に向いてしまった。

また、回転する車輪を水平に動かそうとすると今度は上下に持って行かれる。このように、回転する物体の向きを変えようとする、その向きとは直角向きに運動がおこる。つまり、上下に向きを変えようとする、左右(水平)に運動がおこり、水平に向きを変えようとする、上下に向きが変わってしまう。これが歳差運動であると説明した。

力の向きと運動の向きが一致しないのは、不思議なようで当たり前である。持ち上げた石を放せば、下に落ちる。重力が下に働くからである。しかし、放り投げれば、放物運動をする。相変わらず重力は下に働いているにもかかわらず、軌道と力の向きは一致していない。

このように動いている物体に力が働くと運動の向きと力の向きは、一般には一致しない。回転運動も同じことで、静止しているものを回転させれば、力の向き(正確にはトルク)と運動の向きは一致している。しかし、回転しているものを動かそうとすると、外から加えた力の向きと運動の向きは一致しないのである(90度ずれる)。

と、ここまでは、観客の顔色を見ながら、説明することはあった。直線運動の時は、運動の変化の向き(運動量の変化する方向)と力の向きが一致するように、回転の時は、角運動量の変化の向きがトルクの向きに一致することは、物理を学んだ者にとっては当たり前であ

るが、さすがにそこまでは言わなかった。

力学は、慣れてしまえば当然のように思えても、直観に反することが多い。どこまで踏み込んだ解説するのは難しく、観客の反応を見ながらせざるを得ない。

2-14. ブーメランの翼の速度差

ブーメランは回転しながら飛ぶ。このとき、ブーメランの翼にどのような力が働くのか考えて見ましょう、ということ翼に働く揚力を説明した。

回転する翼が上に来た時、ブーメランが回転することによる翼の動く向きと、ブーメランの併進する向きとは一致するので、ブーメランの翼には強い風が当たります。揚力も強くなります。

一方で、ブーメランの翼が下に位置するとき、回転の向きと進行方向は逆向きになるので打ち消しあって、翼に働く揚力は小さくなります。

ブーメランは全体としては、揚力が働くので、カンバーのある表面(おもて)の方へ曲がっていきますが、翼毎に揚力の大きさには違いがあり、その違いはブーメランをお辞儀させるような力になるはずですが、でも、果たして回転しながら飛んでいるブーメランはお辞儀をするのでしょうか？と問いかけます。

2-15. 紐で吊るした車輪

先ほどの車輪の軸の片方をロープ1本で支える。手を離すとパタンとお辞儀をするよう倒れます。この倒れ方(倒れる向き)はブーメランと一緒にです。



では、車輪を回転させるとどうなるでしょう？ブーメランが回転するのと同じ向きに回転させますと言って、車輪を回転させ、車輪からは手を放し、ロープで支える。車輪は、ロープで支えられているので、ロープの周りを左回りに旋回運動(歳差運動)を始める。

この車輪と同じようにブーメランも回転する面を歳差運動によって変えていくと説明する。

ブーメランを右手で上投げをする(表面(おもてめん)を顔の方(=左)に向けて投げる)と、揚力によって、軌

道が左に曲がるだけでなく、ブーメランの回転の向きも歳差運動で少し左に向きを変える。

進んで少し左に曲がり、回転面の向きを少し左に変え、進んで少し曲がり、回転面の向きを変え、、、を繰り返すと。ブーメランは左回りに旋回し、投げ手のところで戻って来る。という説明を行った。

以上でブーメランがなぜ戻って来るのかの説明は終了した。

2 - 16 . ブーメランの作り方再び

最後にブーメランの作り方をおさらいしましょうと言って、短冊 2 枚を取り出す。

長さ 30 センチ、幅 3 センチほどの短冊状の厚紙を 2 枚用意します。厚紙は、板目表紙という紙を使っています。これを十字に重ねてホチキスで止めます。紙の角は人にぶつくと危ないので、丸く切り落とします。

(これは、本質ではないのでショーでしゃべりませんが、紙には目があり、表と裏があります。好みの問題なのかもしれませんが、表と決めた面を同じ向きに重ね、ホチキスの表面になるようにします。ブーメランの裏面がとじ裏になりますが、できればフラットクリンチのホチキスを選びます。経験的にこうした方がきれいに戻って来るように思います。)

そして表と決めた方が凸になるように、4つの端に上が凸になるように丸み(キャンバー)をつけます。丸みは、ブーメランの端3~4センチ、弱くつければ十分です。と説明した。

実は、簡単な計算からキャンバーから生じる揚力だけでは、ブーメランを旋回させる向心力には不十分であることが分かっている。しかし、歳差運動が起こるので、自動的に迎え角が付くのでより大きな揚力が得られ、そのため手元に戻って来る。込み入った事情ではあるが気になるので最初は説明をしていた。しかし観客の反応がよくなかったので、次第にこの説明を省略してしまうようになった。

さらに、表面を上に向け、4枚の翼を持ち上げ、中央部分を凹ませるように上反角をつけ、これで完成です。と言ってブーメランの作り方のおさらいをした。

そして、投げかたも説明した。右利きでも、左利きでも、表面が顔の方を向くようにブーメランの翼を指でつまんで持ち、手首を返して構える。そして、手首のスナップを効かせてブーメランによく回転をかけて前方に投げ出す。

キャッチするときは、ブーメランは横倒しになりホバリングして戻って来るので、両手で挟むようにすると容易にキャッチできる。なぜ横倒しになるかという、ブーメランの翼に働く揚力は、上下だけではなく、前後も大き

さに差があり、回転軸の向きを水平に移動させるようなトルクが生じる。しかし歳差運動によって、回転軸を起こす(横に向いていた表面(おもてめん)を上に向ける)運動が生じるためである。

しかし、余計な込み入った説明をしなかったために、キャッチしにくくなるが、ホバリングが起きない(観客に見せない)ように投げ方や折り曲げ方を調整して投げ、キャッチしていた。

3 . 考察とまとめ

歳差運動の説明は分かりづらいので、当初は踏み込まずざらりと説明していた。前回、旋回運動が歳差運動そのものだと説明する演者いた。旋回運動は、地球の公転運動に対応するものであり、歳差運動とは別物である。歳差運動は軸の向き(北極星)が変わることである。

コマが首を振りながら動く運動をひとくりに歳差運動というが、コマの軸の足元が摩擦でほとんど動かないから首を振るのであって、軸が変化するところが歳差運動の本質である。コマの場合には全体を歳差運動と言ってよいのかもしれないが、紐に吊るした車輪が紐の周りを旋回するのは、まさに向きが変化する部分が歳差であって、運動全体を歳差というのは何ともおかしい気がする。

他にも細かいことを言い出すと、いろんなことが気になることが多い難しいテーマであった。

ブーメランの運動は、力学的には、揚力を横向きに働かせること。歳差運動が起こるので、その揚力の働く向きが刻々と変わりきちんと向心力として作用するので、旋回して投げ手のところに戻って来る、ということに尽きる。

しかし持っている予備知識がバラバラの観客にブーメランの運動を説明することは容易ではなく、不本意ながら方便のようなわかった気にさせる説明が必要になってしまう。報告者には強い違和感があったが、歳差と旋回もそうだったのかもしれない。力学現象をきちんと説明することを見ておもしろいショーにするのは実に難しいと改めて感じた。

4 . 謝辞

このプログラムを作る過程でさまざまな有益な助言を同僚や科学デモンストレーターの皆様からいただきました。ここに感謝いたします。

5 . 参考文献

[1]大倉宏「サイエンスショー『飛べ！ブーメラン』実施報告」大阪市立科学館研究報告 22,85-88(2012)