

回転円筒体の飛行

静岡県立三島北高等学校

科学部 二年 工藤幹太 一年 佐藤王海

- 1 **動機** X-ZYLO の飛びそうもない形状や特徴的な飛行方法に興味を持ち研究するに至った。
- 2 **X-ZYLO について** X-ZYLO とはラングスジャパンから販売されている円筒形をしたおもちゃである (図 1)。回転をつけながら飛ばすことによって 180m も飛ぶとされている。 **図 1 ↓**
- 3 **目的** 実験から X-ZYLO の飛距離との関係のあるものを発見し、それを理論的に解明する事を目的とし、実験を進めていく。



4 実験 2 様々な条件での実験

(1) **方法** X-ZYLO を参考に、自作の円筒型ジャイロ飛行装置 (以降装置) を 4 種類作り C、D、E、F と名付けた。装置は重りとして本体の 1 倍の質量のガムテープを巻き、巻いた方を装置前方とする。C は円筒をそのまま切り出した形状 (図 2)、D は C の後方を波状に切り取った形状 (図 3)、



E は C の後方を三角形に切り取った形状

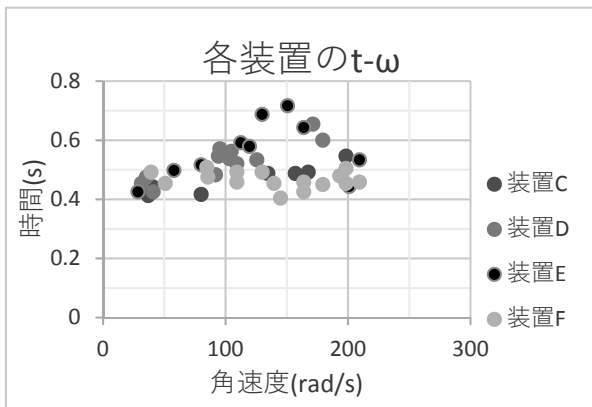
(図 4)、F は C の後方を凸凹に切り取った形状 (図 5)。左から図 2、3、4、5、6

それに加え、発射装置も製作した (図 6)。装置を結合部 (ペットボトル) にはめて使用する。ゴムと竹を動力とし、発射装置は地面から 80 cm の高さから水平に発射する。結合部を引くことにより初速度を、回すことにより回転速度を得ることができる。ストッパー (前方の銀筒) によって結合部が止まり、自作装置は結合部から離れて飛行する。発射装置の結合部を飛距離 0 cm とし、そこから発射装置の前方方向に飛距離をとる。発射時を 1200fps で録画し、ストッパー (20 cm) を通り過ぎるフレーム数から初速度 (m/s) を、自作装置に付けたマークが一回転するフレーム数から回転速度を (m/s) 算出する。(回転速度は接線方向の速度である) まずは、体育館を使用し長時間の運動の様子を見る。体育館の二階 (4.7m) から水平投射を行い遠くからその運動の様子全体を録画する。録画したものから各時間での水平、鉛直方向の変位を計測し記録する。そのデータから傾向を見る。80 cm の高さから水平投射を C、D、E、F でおこなった。なお、これ以前の実験より水平方向に等速、鉛直方向に等加速度で運動していることが分かっている。

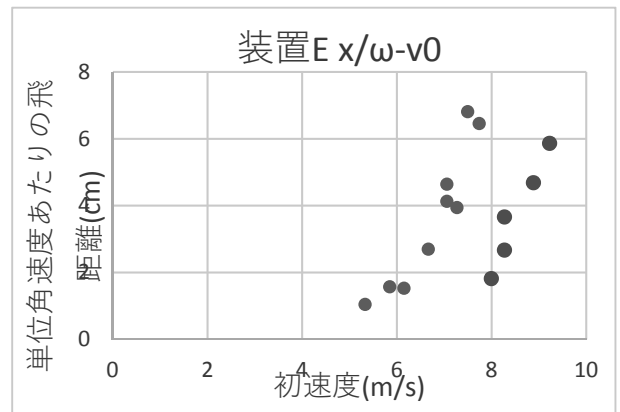
(2) **仮説** X-ZYLO の飛距離と初速度、回転速度は比例の関係にある。より飛距離を伸ばすためには初速度に合った回転速度が、また回転速度に合った初速度がある。

(3)結果

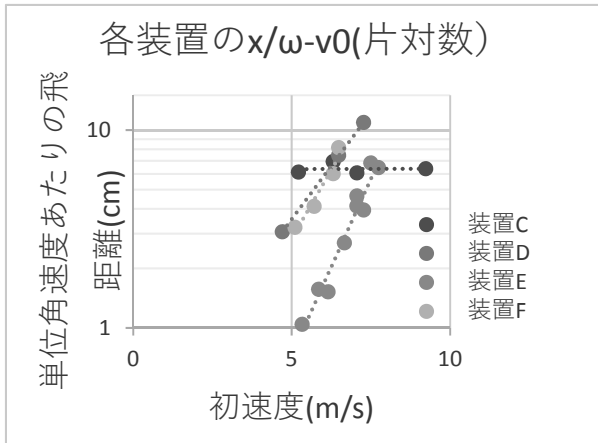
グラフ 1



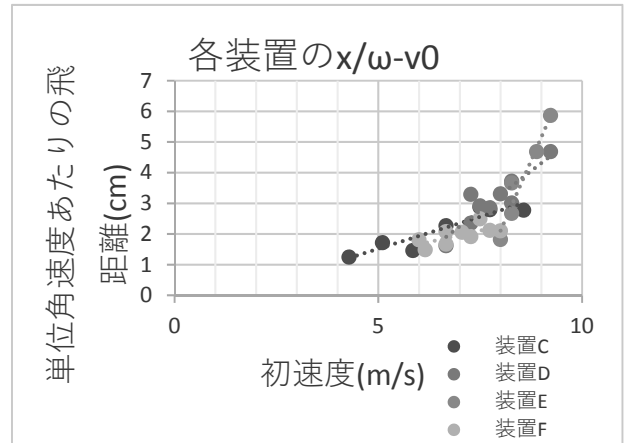
グラフ 2



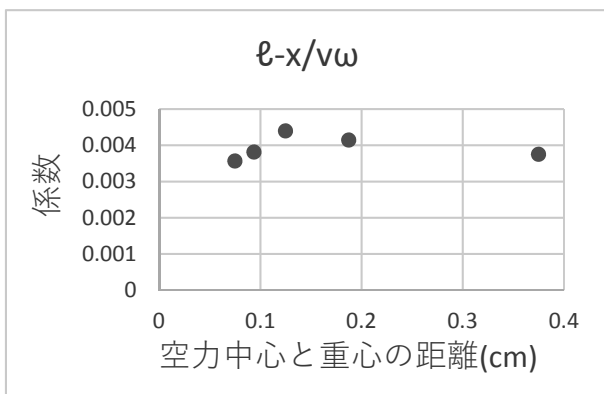
グラフ 3



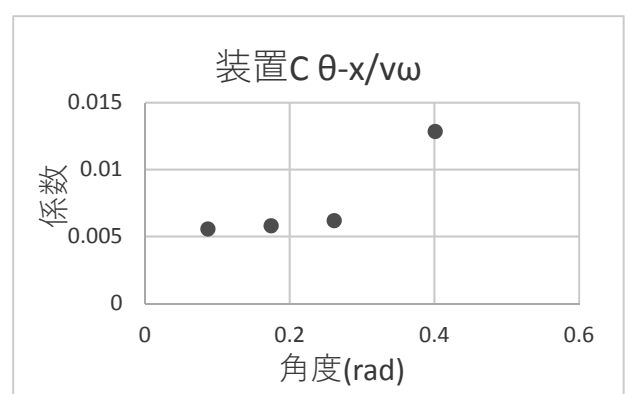
グラフ 4



グラフ 5



グラフ 6



収集したデータから装置毎に角速度—落下時間、初速度—単位角速度あたりの飛距離のグラフを作った(グラフ1)。初速度を v_0 、角速度を ω 、落下時間を t 、単位角速度あたりの飛距離を x/ω と表

現する。C, D, Fについては時間と角速度が比例していることが分かる。Eについては角速度 150rad/s 近辺で最大値となり前後では比例していることが分かる。時間と角速度の比例から $t = k \omega$ 、等速直線運動から $x = v t$ なので異なる角速度の間の比較を行うために飛距離を角速度で割った単位角速度あたりの飛距離を用いる。各装置の単位角速度あたりの飛距離と初速度のグラフ(グラフ 2)は上下に二本の線が引けるように点が配置される。最も分かりやすい(どの装置でも似たようなグラフの形をする)装置 E のグラフが右図である。(赤を上、青を下とする)よってまずは上のものを片対数グラフでグラフを作る。このグラフ(グラフ 3)は y 軸が対数の片対数グラフ(y 軸の間隔は等しくならない)で直線状に点が引けることからグラフ 8 の赤点の単位角速度あたりの飛距離と初速度は指数関数の関係にあることが分かる。なお、底はスケールが変わる為何かは分からない。次に、下の点達のグラフを通常軸で作る(グラフ 4)。グラフが直線なことから各装置の x/ω と初速度が比例していることが分かる。グラフ 5 についてここでの係数というのは飛距離から速度と角速度を割ったものである。実験 1 より飛距離と初速度の関係は等速直線運動の通りであるため前述の方法で係数を得る。空力中心と重心の距離を l と表現する。 l と $x/v\omega$ の関係は l が 0.125 近辺で最大値をとり、その前後では比例していることが分かる。

(4) **結論、考察** 角速度が増加する範囲($t = a\omega$)で考え、グラフ 8 の下を $x = v\omega k \cdots$ ①上を $x = 10^{av} \omega u \cdots$ ②(k, u は比例定数)の二種類の式と置く。ここで長さの単位を m 、時間の単位を s とする。次元解析的考え方から①は $m = m * s^{-1} * k$ ②は $m = s^{-1} * u$ となることから比例定数 k は s^1 、 u は $m * s$ となる。①も②の式に現れる違いはグラフ 8 の上と下であることから、 s, t の差分 m 、つまり何かの長さが二つの違いであると考え。これはまだ調べていなく、同じように実験をしても簡単に変ってしまうものであると考える。どの装置からも似たような傾向が見られるため、装置後方の形状は運動そのものを変えるのではなく k や u に関すると考え。E で時間と角速度のグラフが山になった(グラフ 7 黒点)ことから C, D, F でも角速度をさらに上げていくことで山となると考える。装置の長さ(D, E, F は最も長いところ)を d (cm) 重り部分の長さを αd とする。重りを抜いた装置の質量を m (kg) ガムテープで取り付けた重りの質量を βm (kg) とする。空力中心は $\frac{d}{4}$ 重心は $\frac{2d(1+\beta\alpha)}{4(1+\beta)}$ となり l は $\frac{d(-2\alpha+\beta-1)}{4(1+\beta)}$ となる。質量は比だけが残っているので全体の質量は関係しないが長さは比も全

体の長さも関係してくることが分かる。装置の構造により約 23° 程度までしか計測ができなかったが、 θ にもどこかに適したものがあると考え。また、角速度が大きすぎると最初につけた角度をジャイロ効果によって保ってしまうことも確認できた。ただ、角速度が小さく水平に戻る場合も水平以上に傾くことは無かった。これは最も空気抵抗が小さい角度が水平だからだと考える。

6 実験 3 ドライアイスによる気流シミュレーション

(1) **方法** 回転中の装置内部と周辺部の気流を見るためにドライアイスを使用して次の 5 つの方法で気流を見た。装置はモーターを使い反時計回りに回している。

ア 装置を回転軸を水平にした状態で上方からドライアイスかけるようにする (図 7)

イ 装置を回転軸を鉛直にした状態でドライアイスが装置前方から後方に通過させるようにする。(図8)

ウ 装置前方を下に向けてドライアイスに近づける(図9)

エ 装置後方を下に向けてドライアイスに近づける(図10)

図7 ↓



図8 ↓



図9 ↓

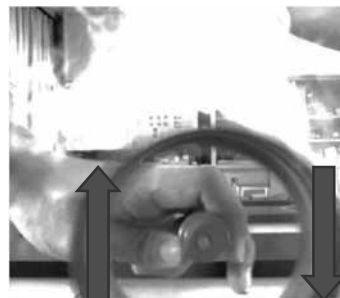
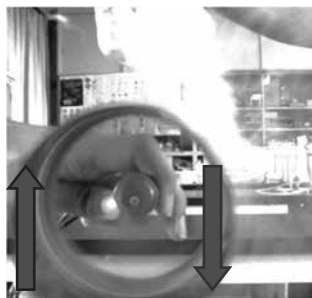


↓ 図10



(2) 仮説装置は後方の回転軸付近から空気を吸込み後方の周から空気を吐き出している。装置後方の形状はこの空気の吐き出し方に影響する。装置後方の切り取り部分から空気が吐き出されることにより空気の流れが装置前方から後方へと定められる。

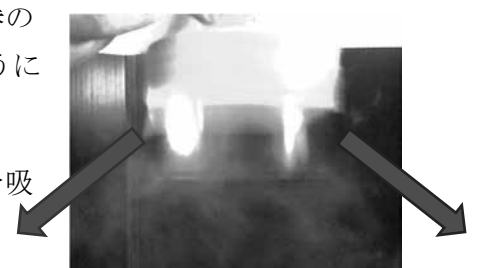
(3) 結果 全42回の中から見られた傾向を挙げていく。まず、全ての装置で共通している点から



挙げていく。アからは装置上方から下方へ流れる空気は回転方向が下向きの側面では装置に沿うように流れ(図13)、回転方向が上向きの側面では装置から剥がれるようにして流れる。(図14) 左図11 右図12



イからは装置後方では吐き出される二種類の空気があり、回転軸付近では収束する竜巻のように(図13)、周付近では拡散するように吐き出される(図14) 左図13 右図14



ウからは装置前方の回転軸付近から空気を吸込んでいることが分かった。(図9)

エは装置後方の回転軸付近から空気を吸い込んでいることが分かった。(図10)

次に装置ごと異なる点を挙げていく。アは全て同様の傾向が見られた。イはCでは収束する空気がたびたび消えていたがD、E、Fでは消えることが少なかった。これよりD、E、Fでは、円筒の中心の回転軸付近に、装置前方から後方へ向かう空気の流れがあると考えられる。拡散する空気はあま

り違いが見られなかった。ウは全て同様の傾向が見られた。エは全て同様の傾向が見られた。VはCではただ吸込むだけだが、D,E,Fでは竜巻のように回転しながら吸い込まれていた。

(4)結論、考察 Cではジャイロ効果によって姿勢を保ったことにより、空気抵抗は減ったが装置後方から空気を吸込むことにより後方が低圧となり減速してしまうと考えた。そこでD,E,Fのように後方を切り取り、後方から空気を吐き出すことにより低圧となるのを防いでいると考える。また、装置内部の空気は前方回転軸付近から入った後に装置内部側面に張り付けられ、回転するものと装置内部回転軸付近に収束していき回転するものの二種類があると考え、張り付いた空気は装置を出るときにその遠心力で拡散しながら吐き出され、収束していった空気はそのまま竜巻のように吐き出される。装置内部では空気が渦を作る。そのため中心から外側にかけて圧力が連続的に大きくなっている。これからも後方の竜巻のような空気は低圧(ベルヌーイの定理より)と考えられる。

7 参考文献

回転する円筒はなぜよく飛ぶか 静岡県立静岡高等学校 平成19年度理科研究発表論文集

ジャイロ効果

<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B8%E3%83%A3%E3%82%A4%E3%83%AD%E5%8A%B9%E6%9E%9C>

流れの剝離 <http://www.cradle.co.jp/tec/column06/023.html>

空力中心 <http://acspec.blog.fc2.com/blog-entry-7.html>

次元解析 <http://eman-physics.net/dynamics/dimension.html>