

# 1. 研究の動機

僕は、今年の夏までソフトテニス部に所属していた。ソフトテニスという競技は、硬式テニスとは違って、柔らかく軽いゴムボールを軽いラケットで打つものである。軽いボールであるために意図的に回転をかけた時の変化は想像以上に大きい。ソフトテニスの変化球では、主にドライブ回転と言われる前回り方向の回転をかけてコート内に「落とす」技術が使われている。これは回転によって下向きの力を与えているらしい。しかし、回転をかければかけるほど良いと言う訳ではないようだった。

ある時、ボールにあまりにも強いドライブ回転をかけたが、なかなかボールが落ちてくれずにコート外に出てしまうということがあった。通常ならきちんとコートに収まるはずだと思っていたので驚いた。その現象はプレイヤーの間で、ボールが「伸びる」、「浮く」または「滑る」と言われていた。この現象は試合などで起こってしまっただけではいけないと思い自分の中では禁物であるとしていた。また、これは雨の中で練習している時など、泥がついて汚れたボールを使用している時に、より起こりやすかった。

そこで僕は、この現象が起こる仕組みと条件がとても気になったので、この研究を試みようと思った。

## 2. 研究の目的

- (1) ソフトテニスの打球がドライブ回転をかけても落ちない現象の原理を知る。
- (2) (1) で知ったことをもとに、これからのソフトテニスの技術の向上と、ソフトテニスの指導などに活かす。

### 3. 研究の予想

回転を強くかけて打たれたボールはおそらく遠心力によって大きく変形しているはずだ。そのため、向かって行く時の前面の面積が小さくなり、空気抵抗が減少するのではないか。

また、泥のついたボールでは、ボールが伸びる現象が起こりやすいということから、ボールの表面に当たる空気の流れが関係しているのではないかと思う。ボールが通常より大きく伸びるということは、ボールが進行方向に進むことを邪魔するものがないということではないか。通常のボールならば、空気抵抗などの力が、進行方向と反対向きにはたらいていて、減速し、着地するのだと思う。つまり、空気抵抗などの進行方向と反対方向への力がなくなれば、ボールが伸びる現象が起こるといことが考えられる。

## 4. 研究の方法

- (1) 文献調査
  - ・空気抵抗について
  - ・マグナス力について
- (2) 実験1(予備実験) ボールの付近の空気の流れの可視化
- (3) 実験2 回転するボールの周りの空気の流れの観察
- (4) 実験3(観察) 伸びるボールの観察
- (5) 実験4 ボールの形状による空気の流れの変化
- (6) 実験5 ボールの回転による空気の流れの変化
- (7) 実験6(発展実験) ボールの条件による違い

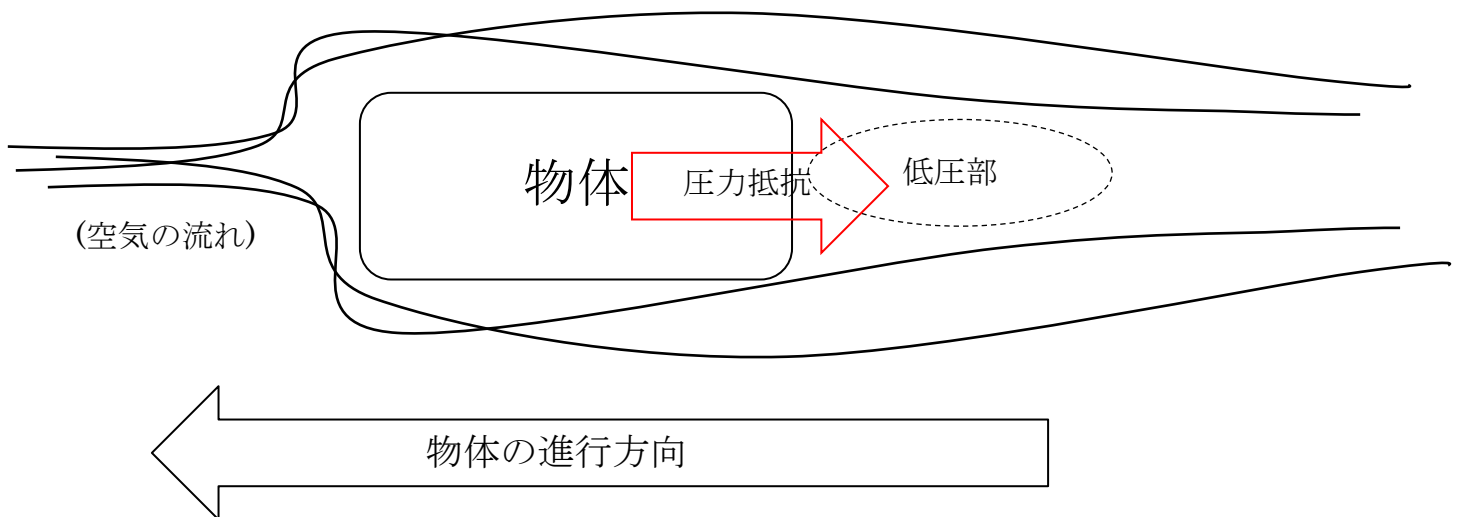
## 5. 文献調査

### (1) 空気抵抗について

研究について予想をして、空気抵抗が関わってくるのではないかと思い、空気抵抗とはどのような力であるのかを調べた。

空気抵抗は、空気中を移動する物体にはたらく力の、流れに平行で同じ向きの力である。空気抵抗の中でも大きい力の一つ、圧力抗力は物体の後方で圧力が低下して生まれる力である。

物体に正面から受ける空気が後方に流れる時に物体の真後ろで空気の流れが無い部分生まれ、物体の後方の圧力が低下する。物体はその圧力の低い部分に引き寄せられる。このようにして、物体に進行方向と反対向きに加わる力が圧力抵抗と呼ばれている(下図)。



抗力 - Wikipedia  
を参考とした

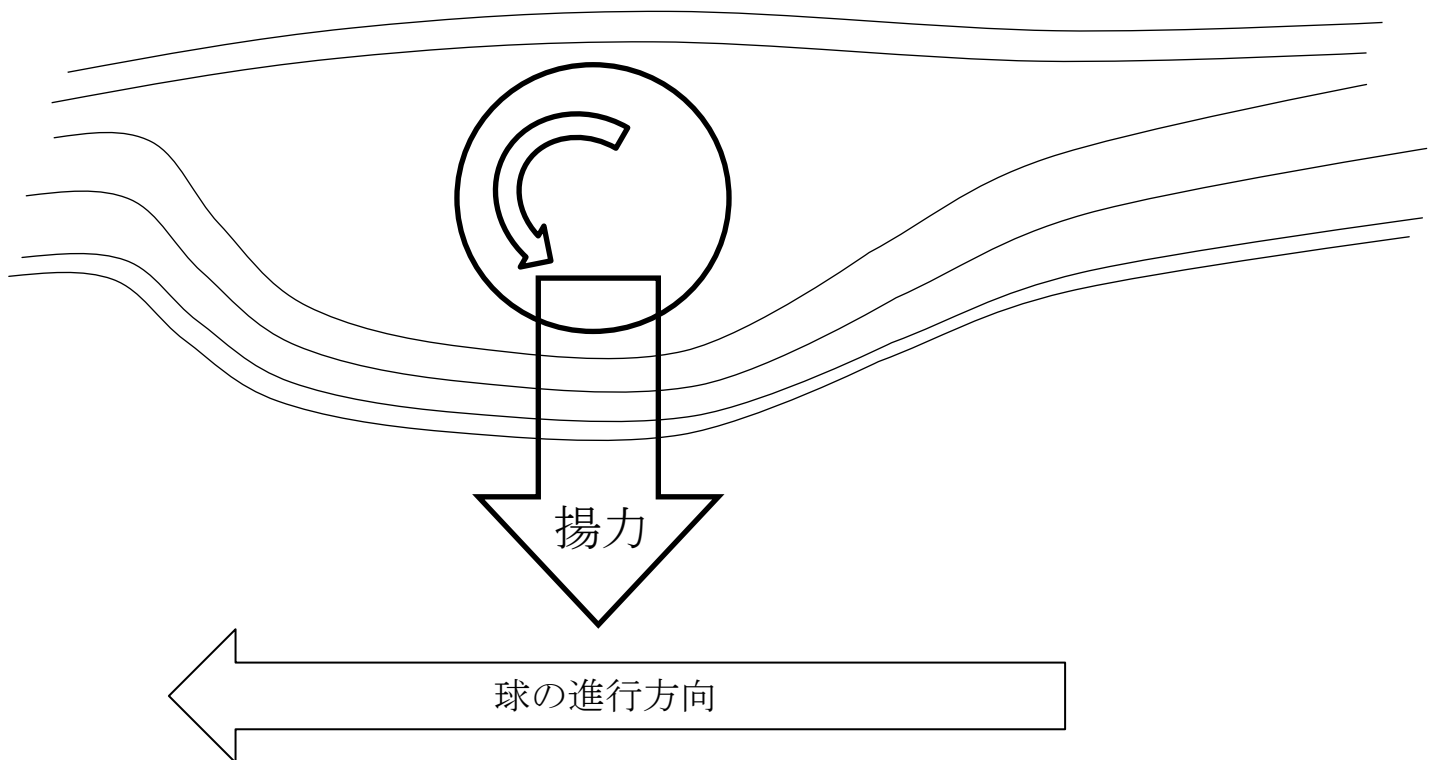
## (2)マグナス効果について

実験の中で、ボールは回転していることを前提としている。回転によって起こる力が本題に関係している可能性があるとして調べた。

テニスボールのように、球技において球にドライブ回転をかけると、下向きに揚力が生まれ、落下が早くなったり沈んだりする。この現象は、マグナス効果によると説明される。

マグナス効果は、一様な流れの中に置かれた回転する円柱または球に、流れと回転軸に対して垂直方向の力(揚力)がはたらく現象のことである。

回転により、その表面に接している粘性を持つ流体(空気など)が引きずられる循環により揚力を生じている。



マグナス効果 - Wikipedia  
を参考とした。

## 6. 研究の内容

### 実験1(予備実験) ボールの付近の空気の流れの可視化

#### 目的

以前、線香の煙で空気の流れを可視化する装置を使ったが、その装置をもう一度作ってみたが、はっきりと見ることができなかつたため、新たにボールの周りの空気の流れを再現し、可視化する。

#### 方法

ボールの付近に空気の流れを発生させ、どのようにして可視化をするか模索する。

下記のような装置を考え、結果を比較することにした

#### 実験に使用できそうな可視化の装置

空気の流れの可視化には 煙などの流れを使ってみようと思ったので、発煙装置などをいくつか考えた。

- (1) グリセリンと水の加熱による煙のようなものの取得
- (2) ドライアイスによる水の状態変化でできた微小な水滴(氷)の使用
- (3) 別の線香と装置での発煙

## 実験内容

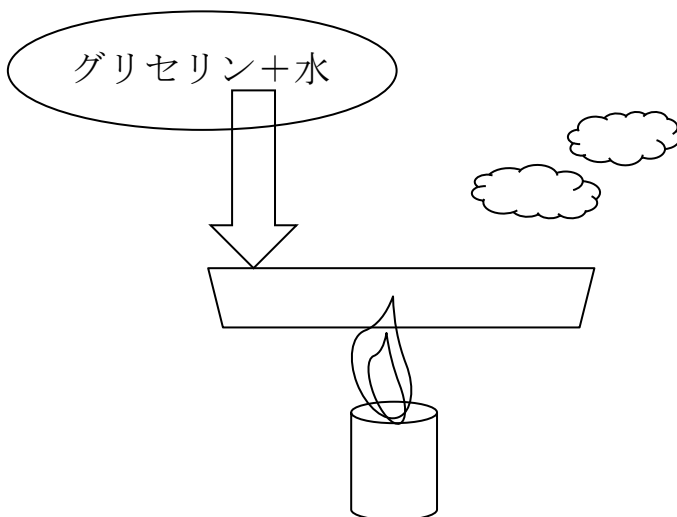
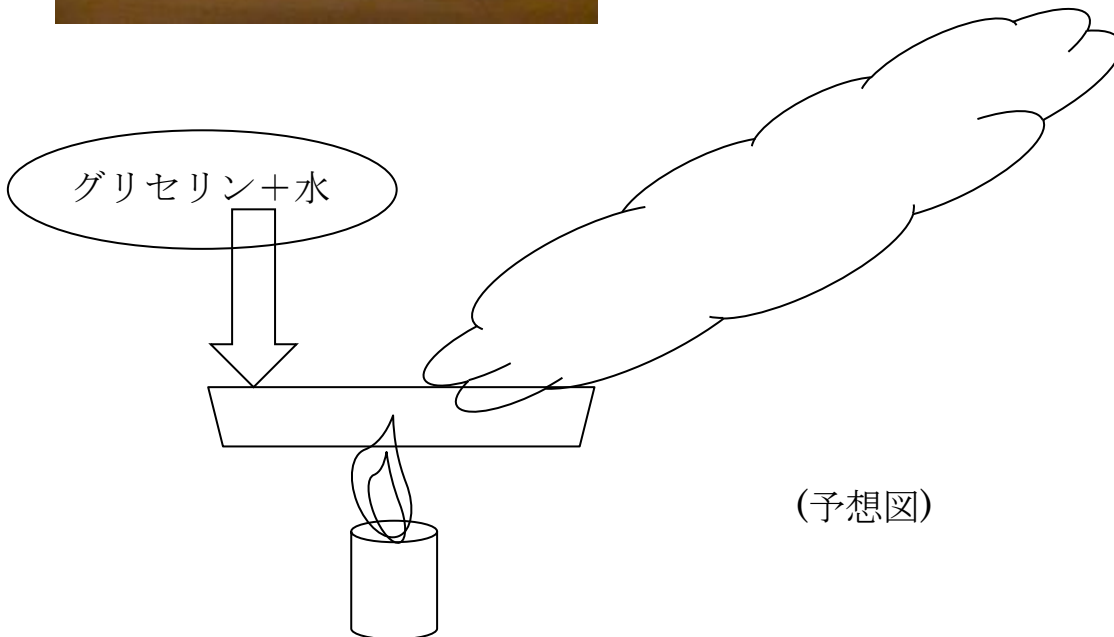
### (1) グリセリンと水の加熱による煙のようなものの取得

インターネット上に装置の動画があり、それを参考にした。



#### 使用した物

- ・水
- ・グリセリン
- ・ろうそく
- ・アルミ皿
- ・スタンドとなる物



#### 結果

煙のようなものが出てきたが  
ごくわずかで、安定して煙煙のよ  
うなものは得られなかった。

よって、本実験に使うのは難し  
そうだ。



(2) ドライアイスによる水の状態変化でできた微小な水滴(氷)の使用

ドライアイスの水の中へ入れることによる、水の状態変化で見える微小な水滴(氷)を使って試した。



**結果**

上の写真のように、扇風機の後ろ側から吸い込むようにして仮に流れをつくらうとしてみたが、微小な水滴(氷)はすぐに水蒸気になってしまい、実験には向かないと思われた。また、発生するものができるとのドライアイスがすぐに昇華してしまい、持続性がないとわかった。これは本実験に使うのは難しそうだ。

### (3)別の線香と装置での発煙

昨年使用した装置をベースにし、新調した線香と装置で試した。



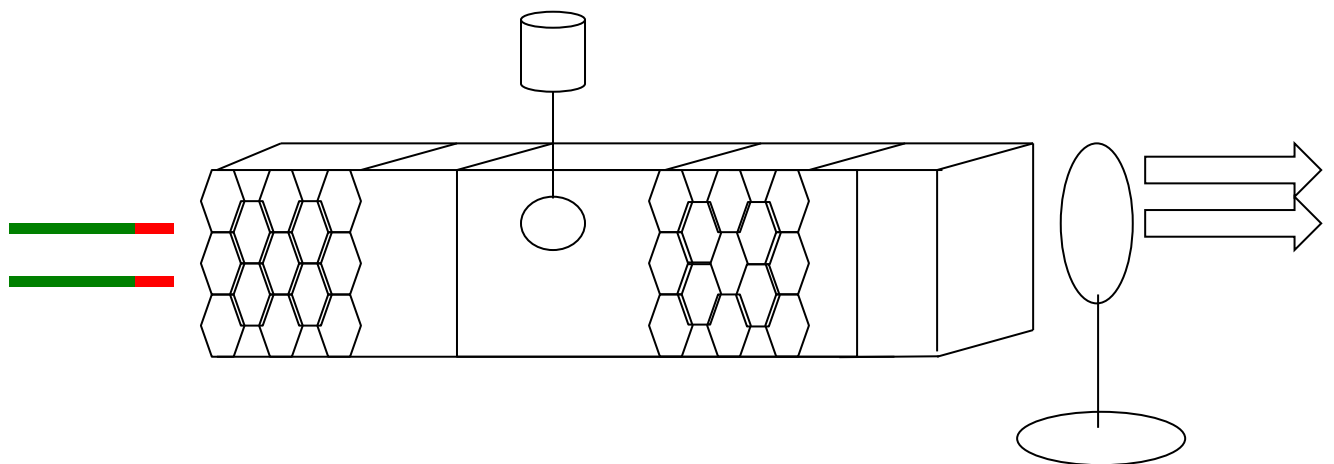
#### 使用したもの

蜂の巣型整流器(細)、(粗)、透明ケース、線香、モーター、ボール、扇風機、ペンライト

※ 蜂の巣型整流器については後述。

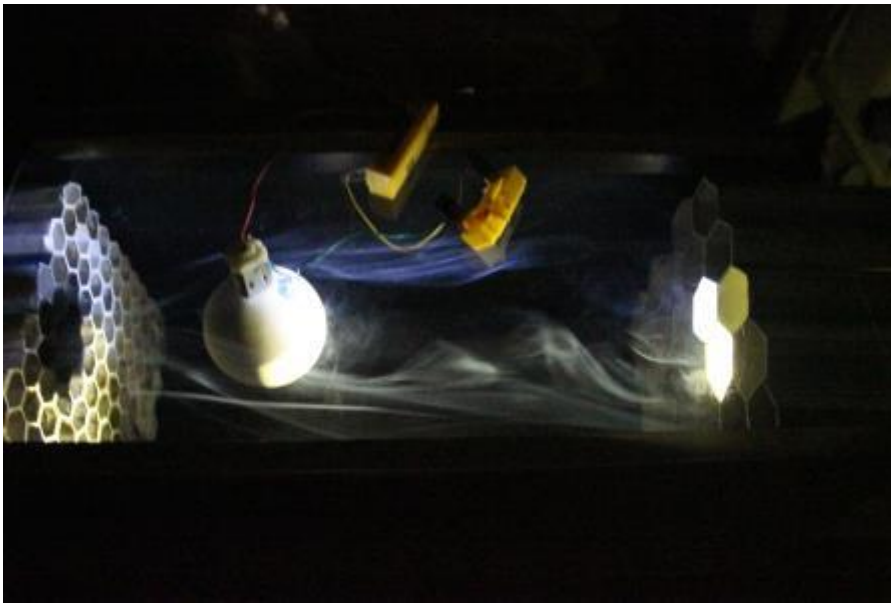
今回はなるべく実際の実験に近づけて試した。

モーターは回さないが、下図のように組み立てる。



線香	蜂の巣型整流器(細)	透明ケース	蜂の巣型整流器(粗)	扇風機(吹き出し方向は右)
		ボールとモーター	ライト	

## 結果



部屋は暗くしてライトを当てながら行った。

空気の流れが充分見えている事がわかる(写真の右に線香がある)。  
線香を新品にしたためか、煙の量が格段に増えた(線香は10本ほど置いている)。  
この装置であれば本実験に使用しても問題なさそうだ。

## 予備実験の結果

一番利用できそうなものとして、3番目に扱った、線香の煙を本実験に使用することにした。

## 実験に使用したものについて

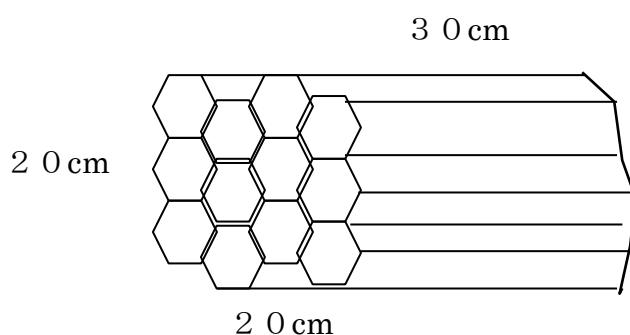
### 蜂の巣型整流器

予備実験の途中から使用している蜂の巣型整流器だが、これは発生した煙を安定させ、よりまっすぐに、邪魔されずに物体に当てるための装置である。また、それを物体の両側に挟むように置くことで、物体の後ろを流れる空気の流れまで安定させることができる。

蜂の巣型整流器の構造

材質…紙(厚紙)

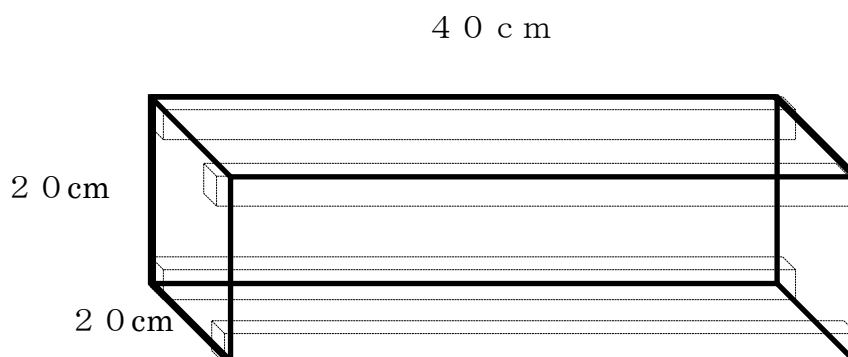
切り口は正六角形で、(細)としている方がその大きさは小さく、たくさん並んでいる。



### 透明ケース

上面はアクリル板、横と底面はベニヤ板で内側を黒く塗ってある(煙を見やすくするため)。補強のために4辺には角棒が入っている。

このサイズは蜂の巣型整流器を差し込めるようになっている。



## 実験 2 回転するボールの周りの空気の流れの観察

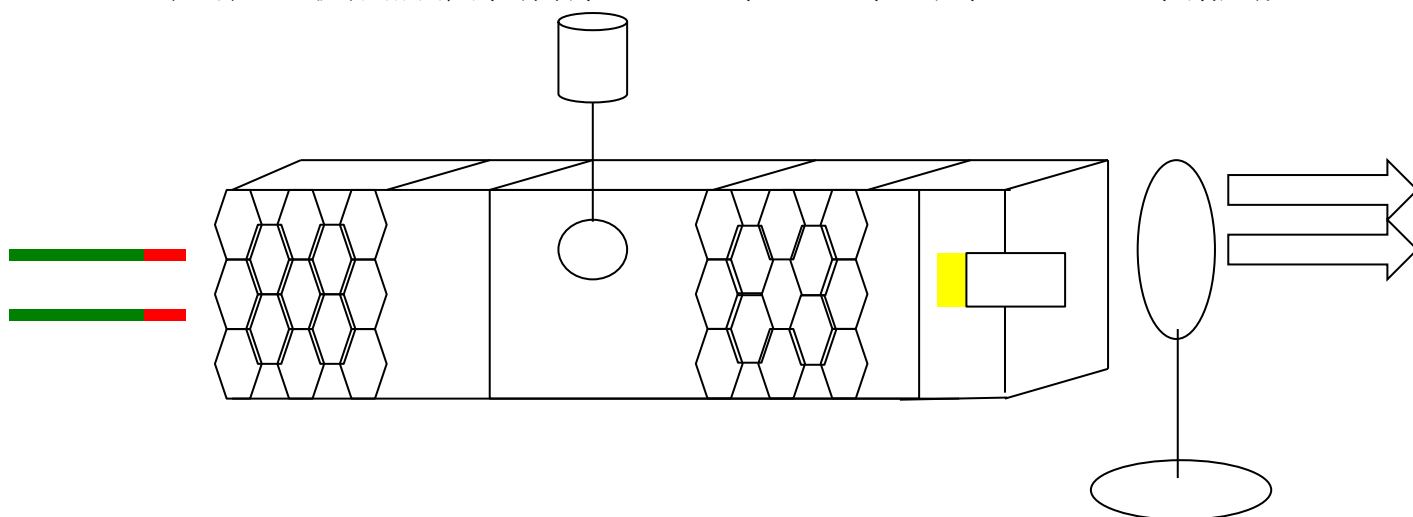
### 目的

空気が回転するボールにあたった時、なにが起きているのか調べる。

### 実験装置と準備したもの



蜂の巣型整流器(細)(粗)、線香、モーター、ボール、電池、ペンライト、扇風機



### 方法

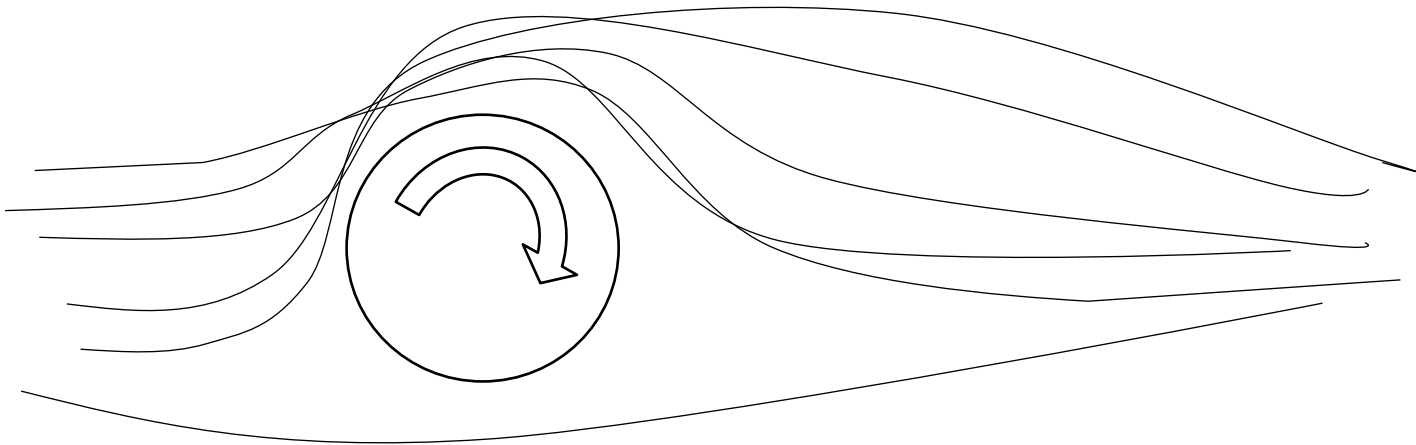
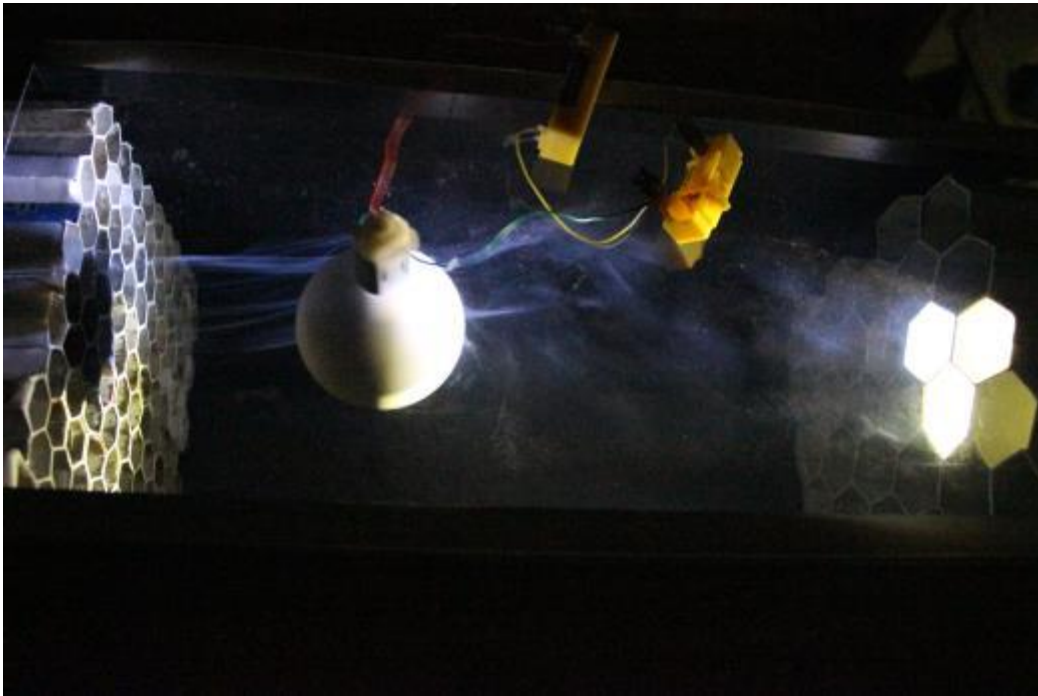
空気の流れを作り、可視化し、回転するボールに当てる。

## 予想

空気の流れが片側にかたよるのではないか。

また、回転によって空気の流れが大きく広がるのではないだろうか。

## 結果



上は空気の流れの図。回転方向と空気の流れの向きが同じになっている側(図の上半分の側)に空気の流れがかたよっている。また、ボールのすぐ後ろでは、空気の流れがボールに巻きこまれるような流れが見られた。

回転方向と空気の流れの向きが同じになっている側(図の上半分の側)では、反対側に比べて空気の流れが速かった。

## 考察

この実験の結果から、ボールが回転することによって、空気の流れがボールに巻き込まれるということがわかる。

実験1(予備実験)の(3)の時の結果と比較すると、若干であるがボールの後ろの空気の流れの見られない部分が小さくなっている。このことから、ボールが回転することによって空気の流れはボールの後ろ側まで巻き込まれていることがわかる。

もっと実際にその現象が起きているところを再現してみれば大きな違いが生まれてくるのではないか。

## 実験 3（観察）伸びるボールの観察

### 目的

伸びるボールの特徴を確認する。

### 実験 3-1 伸びるボールの形の観察

#### 目的

伸びるボールの形状に関する特徴を確認し、模擬実験に活かせるようにする。

#### 方法

通常のドライブ回転をかけたボールと、強烈に回転をかけて伸びたボールを打ち、撮影してボールの形状を比較する。

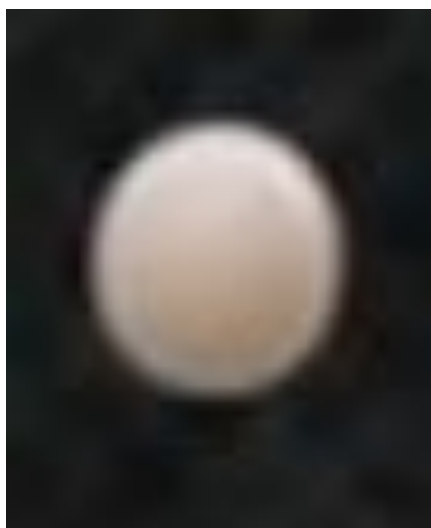
#### 予想

自分の経験上、ボールに回転がかかれば、遠心力によって軸から離れる向きに扁平すると思う。

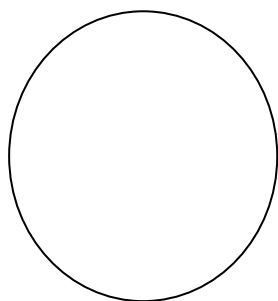


# 結果

通常のボール



1 4

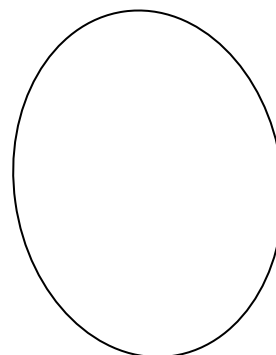


1 5

伸びるボール

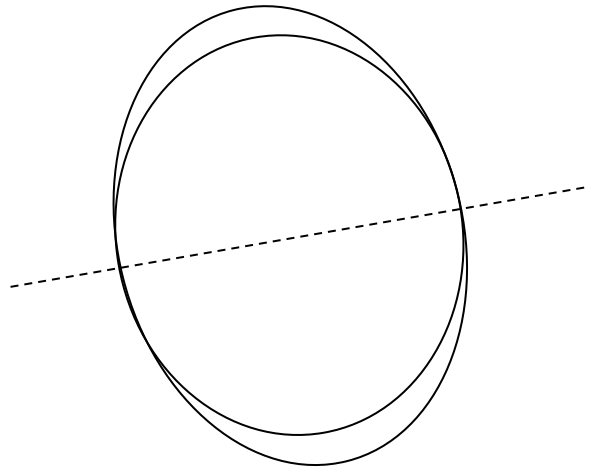


1 1



1 5

2つのボールのおおよその縦横比は、1 5 : 1 4と1 5 : 1 1だった



上の写真と図のように、伸びるボールのほうは、回転軸が傾いている(写真は水平なところにあるカメラでほぼ正面から撮った)。

また、写真から、はっきりと見えているところとぼやけているところあるとわかったので、図にも表したが、思っていたよりぼやけて見える部分が大きかった。

## 考察

伸びるボールのほうが通常のボールより扁平したという結果から、正面や背面の面積は通常のボールより小さいはずだ。これは、イメージとして空気抵抗の減少につながるのではないか。空気抵抗が減少していれば、ボールが伸びるということの理由になるだろう。

また、回転軸が傾いているということは、回転する向き力の他に、わずかに別の方向からの力を受けていたはずだ。さらに、ぼやけているところが見えるということは、ボールが変形しながら回転しているということが考えられる。これはおそらく回転軸の傾きによるものだ。すなわち、回転方向以外の力が加わると軸が傾いて、ボールが変形しながら回転していく、ということが言えるのではないか。

ボールが扁平することやボールが変形しながら回転しているということは、おそらくボールの「伸び」に関わってくるのではないだろうか。検証する必要があるだろう。

## 実験 3-2 伸びるボールの軌道の観察

### 目的

伸びるボールの軌道に関する特徴を確認し、最終的な結論に活かせるようにする。

### 方法

通常のドライブ回転をかけたボールと、強烈に回転をかけて伸びたボールを打ち、横から撮影してボールの軌道を比較する。

通常のボールも伸びたボールも、何度も打って、スピードや力加減がなるべく同じになるようにする。

### 予想

今までは自分のいる側からしか軌道を見ていないので、横から見るとなると、イメージしにくいですが、物理的に「浮き上がる」というように上向きの力が生まれることはないと思うので、通常よりも奥に落ちると思う。

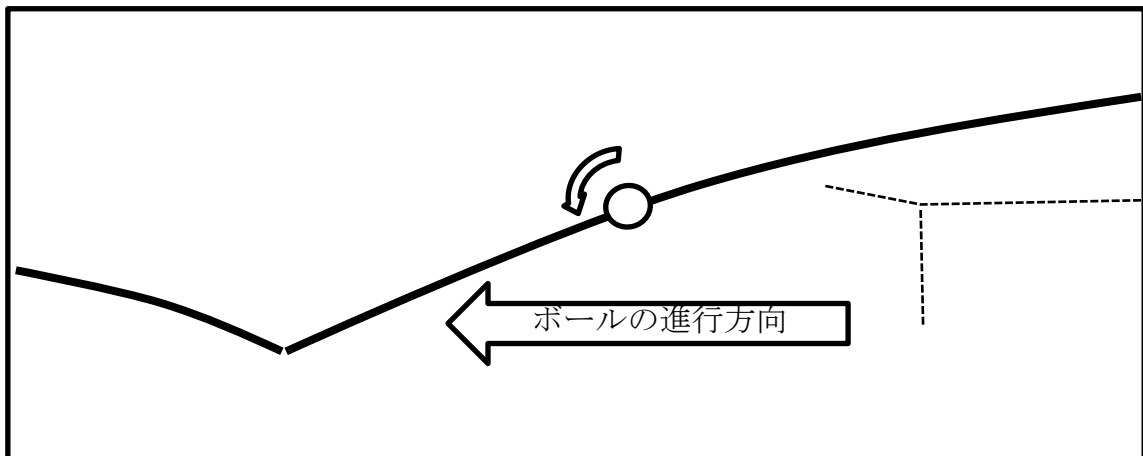
## 結果

通常のボールの場合



動画で撮ったものをコマ送りして合成した(17枚・計0.60秒間)

写真中央を右から左へ



写真の軌道を見やすくするために写しとった図

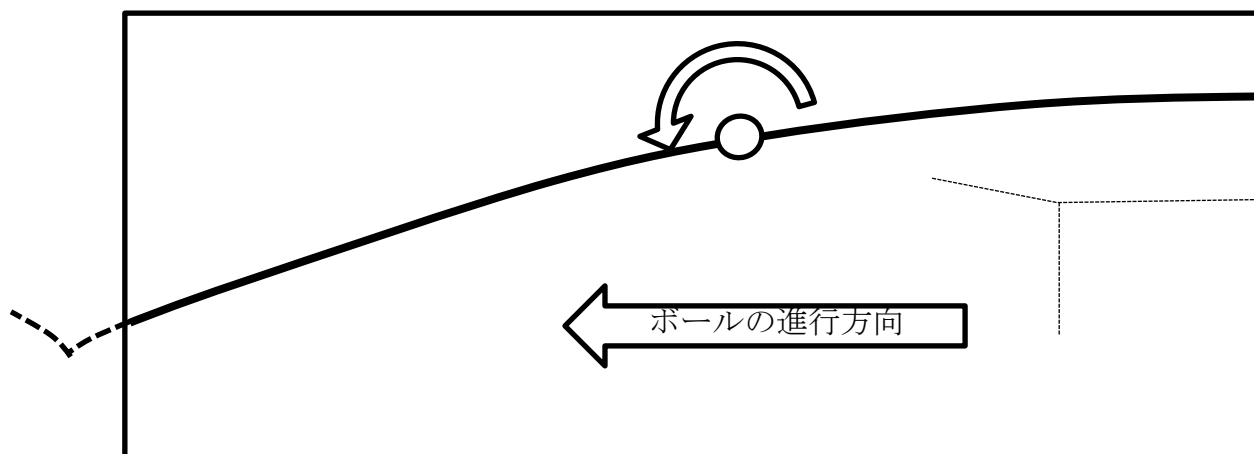
特徴

- ・ ネットを超えたあたりからだんだんと沈み込んでいる。
- ・ 写真では見にくいですが、編集時には早い段階と後の段階で、思っていたよりも減速している様子がわかった。

## 伸びたボールの場合



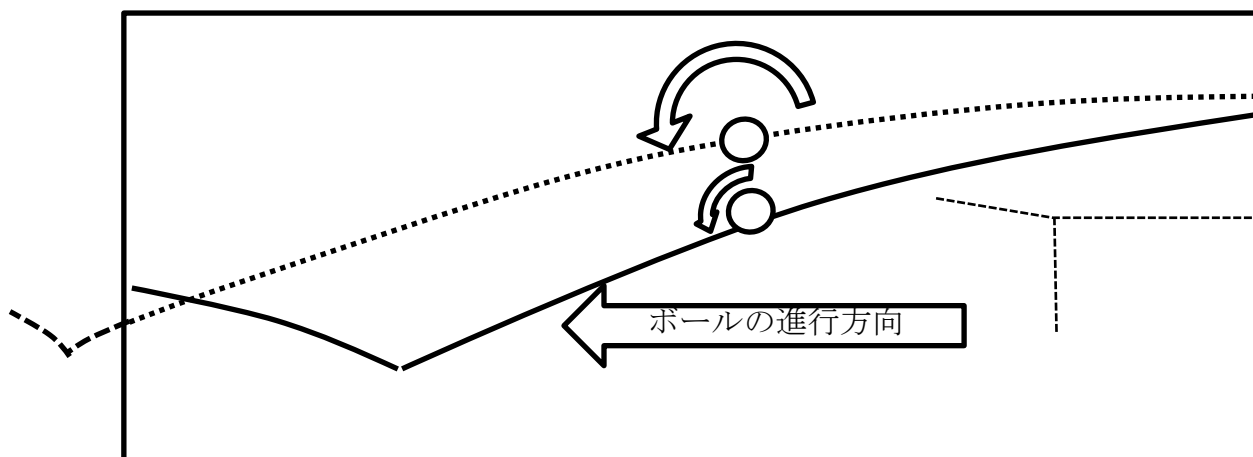
同じく動画で撮ったものをコマ送りして合成した(17枚・計0.65秒間)  
写真中央を右から左へ



写真の軌道を見やすくするために写しとった図(左の破線は予測の軌道)

### 特徴

- ・ネットを超えてもなかなか沈まなかった。
- ・編集時に早い段階と後の段階で、速さの変化はあまりみられなかった。



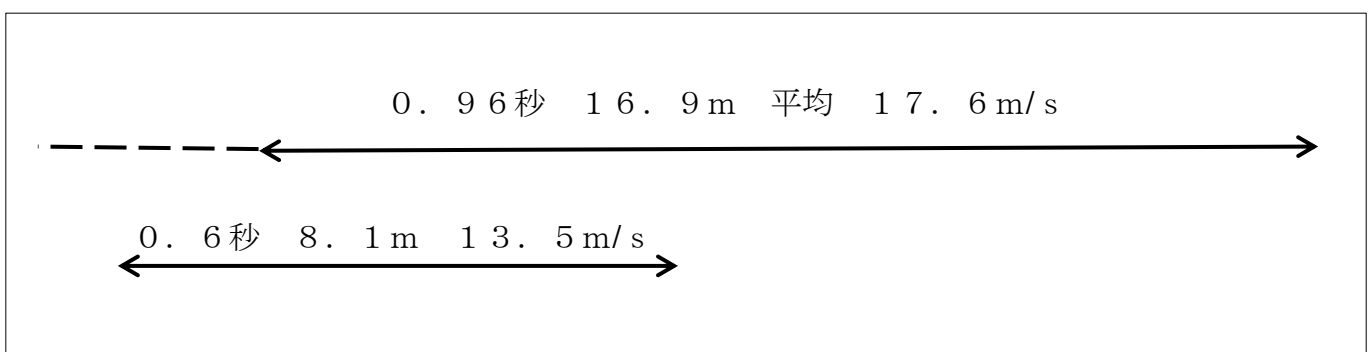
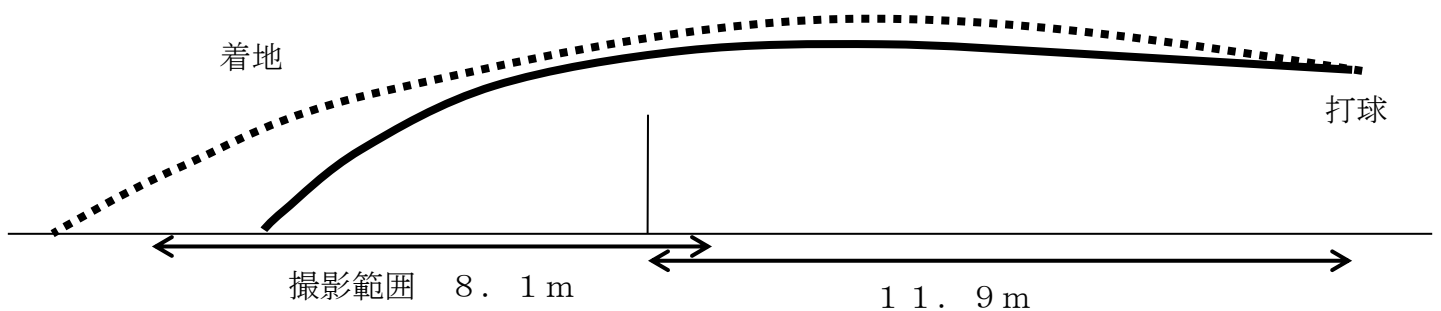
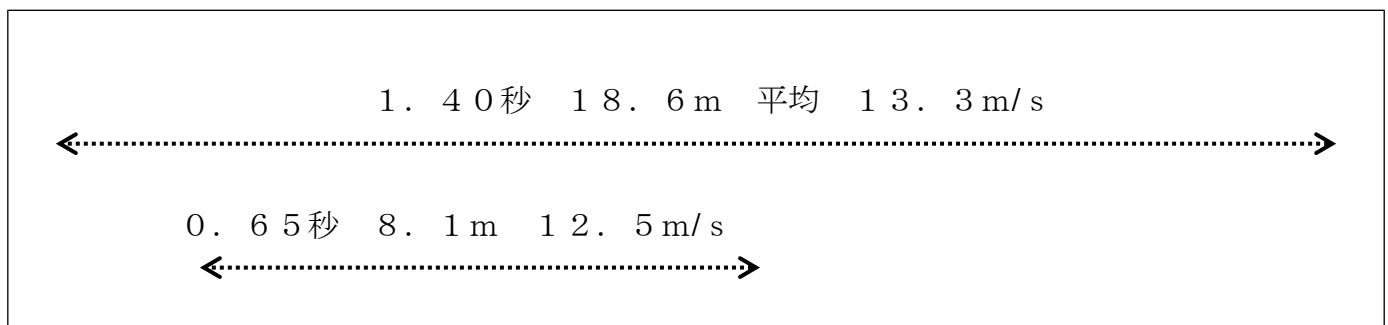
2つの軌道を重ねた図(実線は通常の回転、点線は強い回転)

	通常のボール	伸びたボール
ボールの回転	弱いドライブ回転	通常よりも強いドライブ回転
ボールの はやさ (画面内)	8.1 m間を0.6 秒 → 13.5 m/s	8.1 m間を0.65 秒 → 約12.5 m/s
最高到達点 (高さ)	ほぼ同じ	
落下地点	打点から約16.9 m	打点から約18.6 m
打球から 着地までの 時間	約0.96 秒	約1.40 秒
平均の 速度 (打点-着地)	約17.6 m/s	約13.3 m/s

## 考察

まず、通常のドライブ回転よりも強いドライブ回転のほうが伸びたボールのほうが落下までの距離が長かったことなどから、ボールが伸びている現象が起きていると確認できる。

また、通常のボールの平均の速度が伸びたボールを上回っているのに対し、撮影した画面内ではほぼ同じ時間、速度で通過していた。このことから、通常のボールは減速していても、伸びたボールはそれほど減速していないということが考えられる。





## 実験4 ボールの形状による空気の流れの変化

### 目的

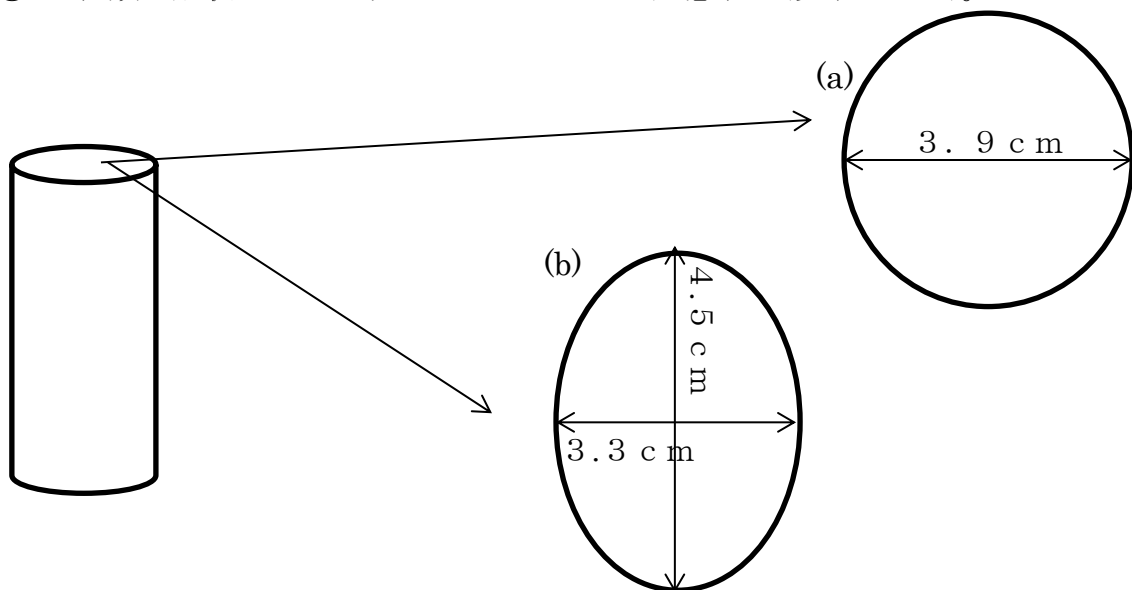
実験3-1で、強い回転を与えて伸びたボールは縦に扁平していることがわかったので、ボールの形状によってボールの周りの空気の流れに変化はあるのかどうか知る。

### 準備したもの

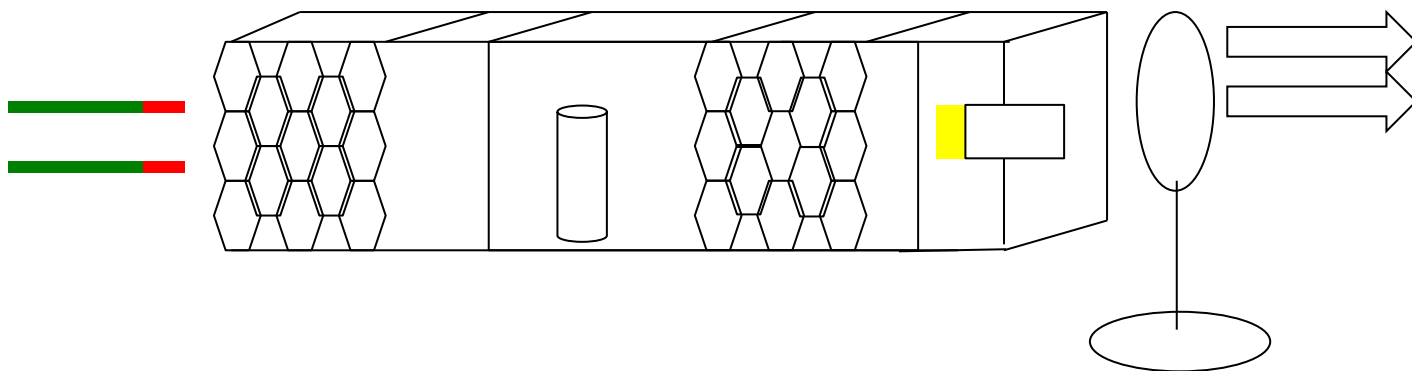
- ・蜂の巣型整流器を含む空気の流れの可視化装置
- ・トイレットペーパーの芯(丸いものと潰したもの)

### 方法

- ① 2種類の形状のトイレットペーパーの芯を用意する(以下の通り)。



② 2種類の芯を空気の流れをみる装置の中に立て、空気の流れの違いや特徴を観察する。



線香、蜂の巣型整流器(細)、透明ケース、蜂の巣型整流器(粗)、ライト、扇風機  
トイレットペーパーの芯

### 予想

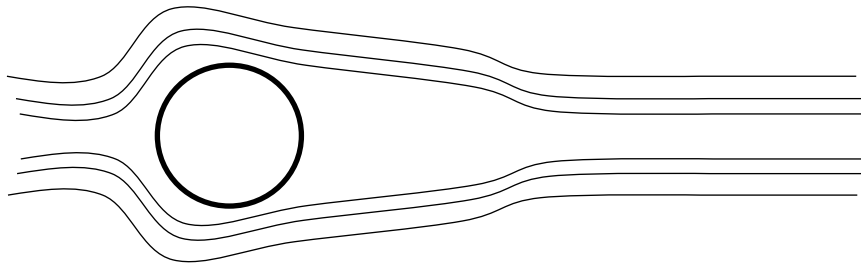
正面から見た時に小さく見える(b)のほうが空気の流れにぶつかる面が小さそうなので、空気の流れの変化は小さいだろう。

また、それは空気抵抗の大きさに関係しているのではないか。

## 結果

次からの2つの写真は空気が左から右へ流れている。

(a) 丸い形(通常のボールの形状)



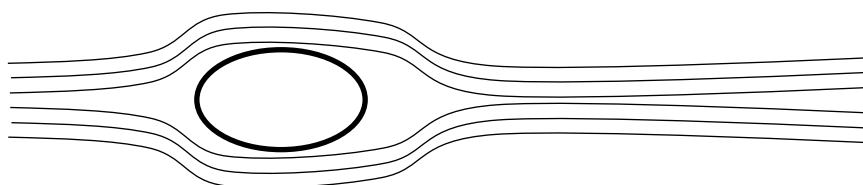
上は模式図

### 特徴

芯のすぐ後方に空気の流れは見られなかった。

芯の手前で写真の上方向と下方向に分かれた空気の流れは芯から離れたところで合流しているようだった。

(b)潰れた形(伸びるボールの形状)



上は模式図

#### 特徴

芯のすぐ後方には若干空気のだよみが見られる。

芯の手前で写真の上方向と下方向に分かれた空気の流れは比較的芯から離れていなかった。

通常のボールの形状の時より、流れの乱れが少なかった。

## 考察

この結果を受け、考察していく上で、予想した「空気抵抗」が関係してくるのではないかと思った。そこで、5. 文献調査(1)において、空気抵抗について調べた。

文献と実験の結果を照らしあわせて考えてみると、「物体に正面から受ける空気が後方に流れる時に物体の真後ろで空気の流れが無い部分生まれ、物体の後方の圧力が低下する。物体はその圧力の低い部分に引き寄せられる。このようにして、物体に進行方向と反対向きに加わる力が圧力抵抗と呼ばれている。」

ということから、物体の後方に空気の流れが見られなかった(a)は、より圧力抵抗(空気抵抗)が大きいのではないかと考えられる。

反対に(b)は、物体の後方に空気の流れが(a)よりもあったため、比較的圧力抵抗(空気抵抗)が小さいのではないかと考えられる。

このことから、ボールに強く回転をかけて扁平したボールには空気抵抗があまり加わらず、減速せずに伸びていくような軌道を描く、実験3-2のようなことが言えるのではないか。

## 実験5 ボールの回転による空気の流れの変化

### 準備したもの

- ・蜂の巣型整流器を含む空気の流れの可視化装置
- ・トイレトペーパーの芯(丸いものと潰したもの)
- ・モーター

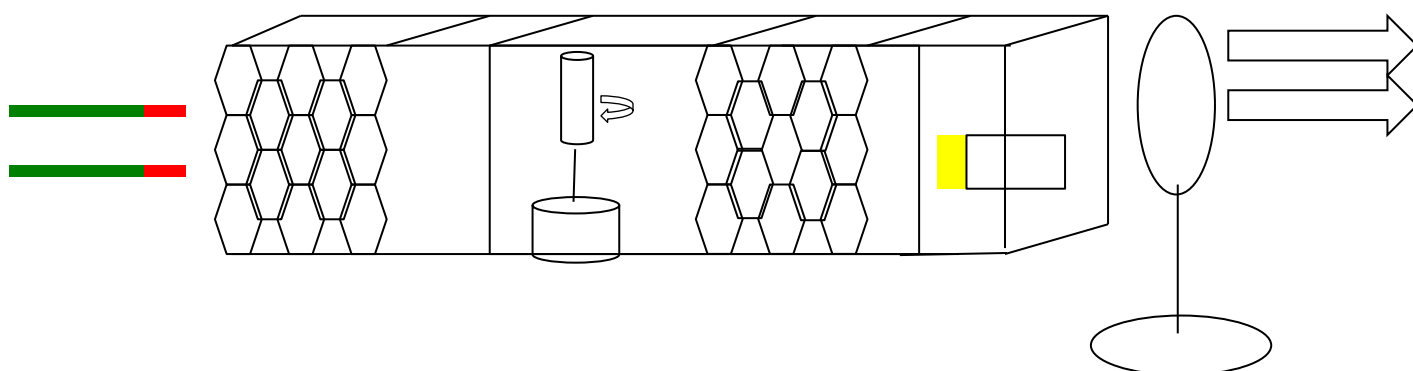
### 目的

ボールが回転することによるボールの周りの空気の流れの変化を確認し、ボールの軌道の変化との関連性を見つけ出す。

ボールの回転数によるボールの周りの空気の流れの変化を確認し、ボールの軌道の変化との関連性を見つけ出す。

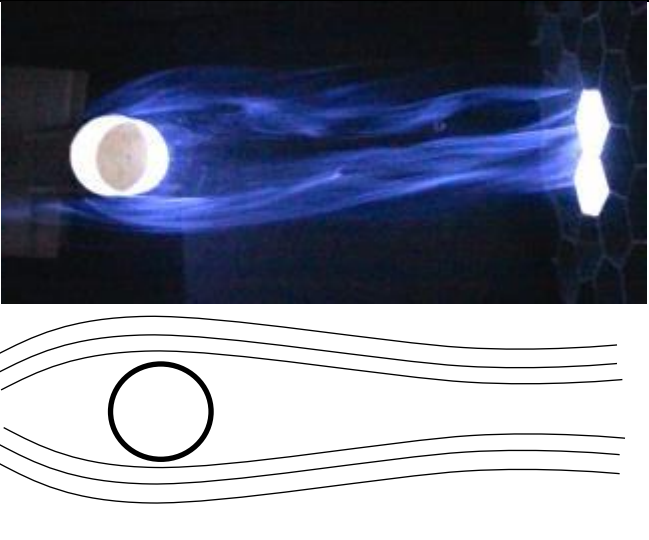
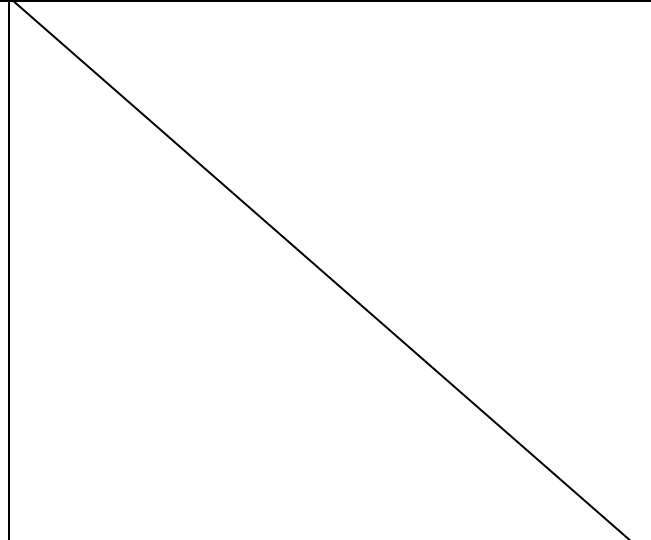
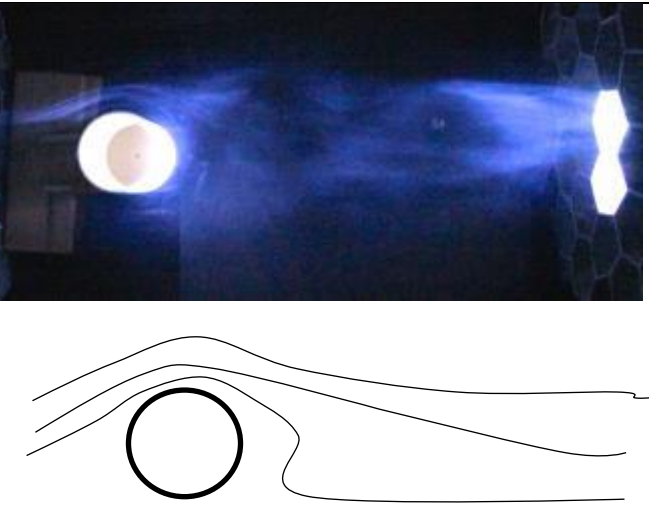
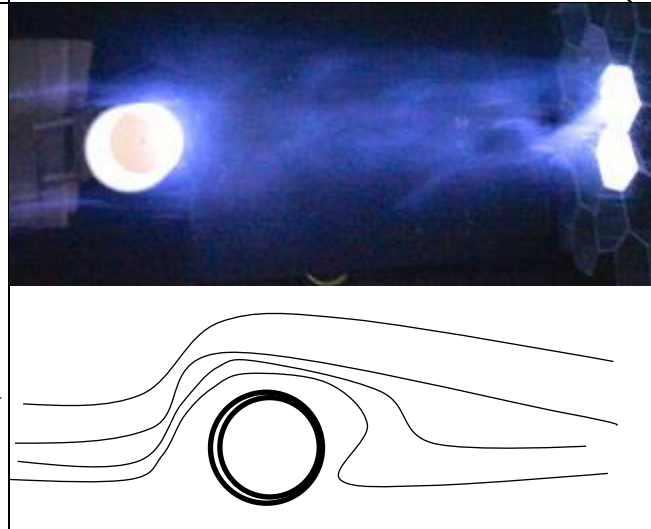
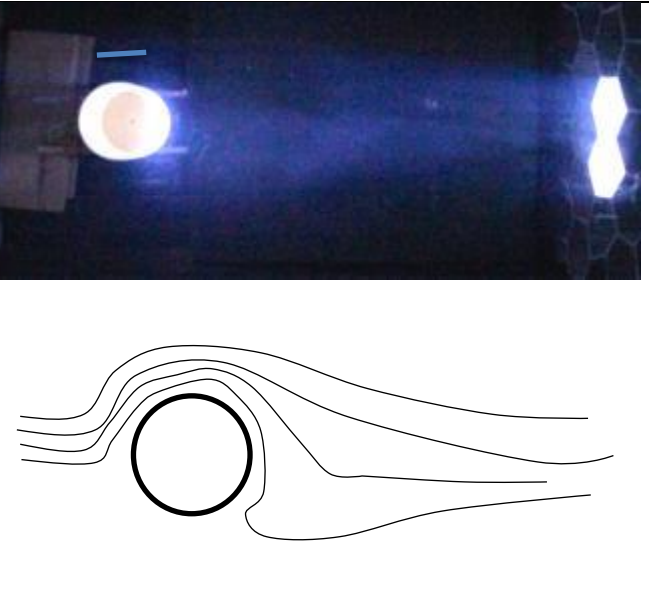
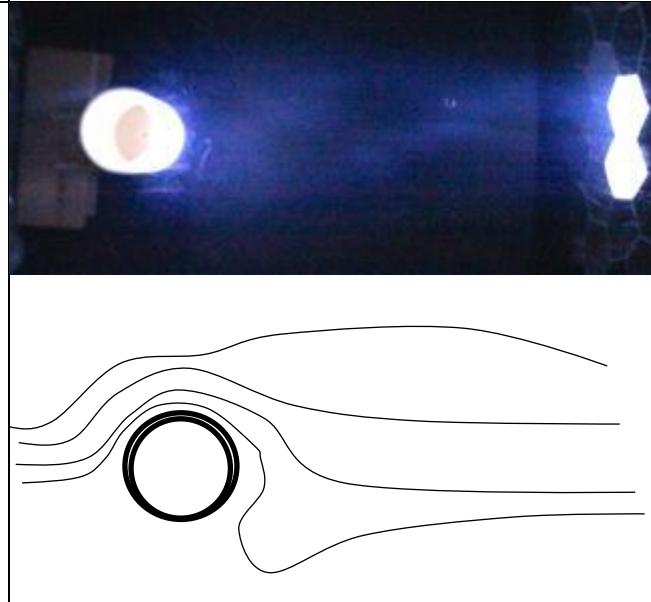
### 方法

- ① 実験4で使用した(a)、(b)の形状のトイレトペーパーの芯を、モーターの軸となるべくずれないように接合する(右写真)。
- ② 2種類の形状のトイレトペーパーの芯を回転させながら、空気の流れをみる装置の中に入れて、空気の流れを観察する。



- ③ ②を、電池の数(モーターの回転数)を変えて空気の流れを観察する。

結果

	(a)の形状	(b)の形状
回転なし	 <p>The photograph shows a circular object on the left emitting a blue plasma jet towards a target on the right. The schematic below shows a circle with several parallel lines passing through it, representing the jet's structure.</p>	
電池1個	 <p>The photograph shows the setup with one battery. The schematic shows the jet's structure with a slight constriction on the right side.</p>	 <p>The photograph shows a different jet configuration with one battery. The schematic shows a more complex jet structure with multiple layers and a constriction.</p>
電池2個	 <p>The photograph shows the setup with two batteries. The schematic shows a jet structure with a significant constriction on the right side.</p>	 <p>The photograph shows a different jet configuration with two batteries. The schematic shows a jet structure with a different constriction pattern.</p>

いずれも写真左から空気が流れてきている。回転はすべて時計回り。  
それぞれの写真下の模式図は空気の流れを大まかに表している。

#### 比較

- ・(b)の形状の2つは、変形しながら回転していることになるが、(a)では変形がほとんどない
- ・(a)よりも(b)のほうが、ボール後方の空気の流れが乱れていて、より大きく広がっていたり、ボールを取り巻くように流れが変化したりしていた。
- ・回転しているものは、回転していないものと違って、きれいに線状にならないところが多く、もやもやとしか見えないところがあった。
- ・電池1個と2個のものでは、2個のもののほうが、より線状になっていないところが多く、空気の流れが大きく散らされているようだった。



## 考察

(a)は通常のボール、(b)は伸びるボールの形状に似せて、(b)は変形しながら回転する様子を再現したが、(b)のほうがボール後方の空気が乱れていたということから、伸びているボールの後方では、空気がより乱れているのだと考えられる。

また、(b)のほうがボールを取り巻いているようだったことと、5.文献調査(1)の空気抵抗についての

「物体に正面から受ける空気が後方に流れる時に物体の真後ろで空気が流れが無い部分生まれ、物体の後方の圧力が低下する。物体はその圧力の低い部分に引き寄せられる。このようにして、物体に進行方向と反対向きに加わる力が圧力抵抗と呼ばれている。」

ということと、

回転がより多くかかるほど流れに乱れが生じていたという結果から、回転によって空気が乱れているのではないかということから、(b)のほうが空気抵抗は少なくなっていると考えられる。

つまり、伸びるボールが減速せずに長く飛んで行くことの一因として、回転と回転によるボールの変形によって空気抵抗が減少しているということが考えられる。

## 実験6 (発展実験) ボールの条件による違い

### 目的

動機で述べたように、ボールが伸びる現象は泥がついて汚れたボールを使用している時により起こりやすかった。

このことから、ボールの条件が異なる場合での伸びる現象について知る。

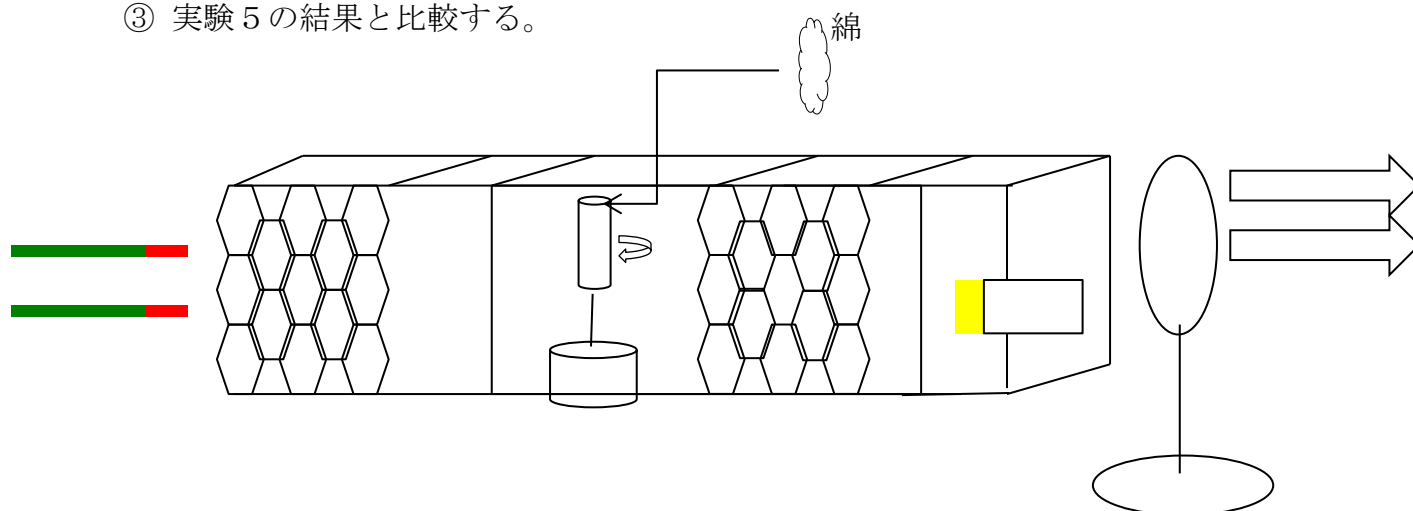
### 実験装置と準備したもの

- ・蜂の巣型整流器を含む空気の流れの可視化装置
- ・トイレットペーパーの芯
- ・綿
- ・モーター



### 方法

- ① 実験5で使用した(a)の形状のトイレットペーパーに、泥を模した、綿を一部に貼り付ける(右写真)。
- ② ①で作ったものを実験5のときのように空気の流れる装置の中で回転させる。(電池は一個)
- ③ 実験5の結果と比較する。



### 予想

ボールについたものがボールの表面の凹凸となって空気の流れを乱すのではないか。また、それは凹凸がないときよりも大きな乱れとなるのではないか。

## 結果

写真左から右へ空気が流れている。

回転は時計回り。

ボールの表面に何か付着して凹凸ができている場合



そうでない場合(実験5より)



## 比較

凹凸をつけて回転させたほうは、空気の流れがほとんど線状にならず、もやもやと後ろへ流れていった。一方、実験5の時のものは、線状に見えている部分があり、流れに変化はあるもののそれほど乱されていなかった。

ただしどちらも空気の流れを巻き込んでいることに変わりはない。

## 考察

結果を比較して、空気を巻き込んでいるということから、空気抵抗は減少しているということが考えられる。

また、ボールの表面に凹凸がある場合には空気の流れがより大きく乱れたため、空気の巻き込みも大きくなって、より空気抵抗の減少につながったのではないかと考えられる。

## 7. 研究のまとめ

今回のいくつかの実験と観察を通して、ボールが伸びるという現象について自分なりにではあるが仕組みなどを理解することができた。

実験4や5などで示した通り、その現象が起こる要因として、

- ・ 回転の遠心力でのボールの正面の面積の減少による空気抵抗の減少
  - ・ 回転と回転軸のブレのボール表面の変形による空気の巻き込みや乱れた空気の流れの発生での低圧部の減少による空気抵抗の減少
- の2つを見出した。

また、実験6で、ボールの表面に凹凸があることで空気の流れの乱れが増大し、空気抵抗の減少につながるという考えを新たに発見した。

実験3 - 2ではボールの回転、軌道の違いから、減速のしかたの違いを導き出した。これは軌道の変化が空気抵抗の減少によるものだということに当てはめる事ができる。

つまり、当初疑問に思った回転の違いによる軌道の変化は、空気抵抗の減少が大きく関わっていたということが言えるだろう。

さらにボールが伸びる現象を引き起こすもととなる原因を考えると、以下のとおりであった。

- ・ ボールに強い回転がかかっていること
- ・ 回転による変形があること
- ・ 回転軸が横からの力などでブレていること
- ・ ボールが受ける空気がボールの後ろまで巻き込まれていること

この他にも原因はあるかもしれないが、現時点ではここまで追求できた。

ふつう、ドライブ回転による力は下向きにはたらき、落下地点も手前になるはずだった(5. 参考文献(2)より)。それでもこの現象が起きてしまうということは、それ以上の要因があるということなので、空気抵抗は非常にボールに影響を及ぼしているのだろう。

## 8. 研究の反省・感想

今回の研究では、ボールが伸びる現象の原理を知ることが目的としてきて、大まかな答えが導き出せたことに感激している。自分の今までしてきた競技についてここまで深く知ることができたのはとてもありがたいことだと思っている。しかし忘れてはならないのが、もう1つの目的だ。目的の(2)では、これからのソフトテニスの技術の向上とソフトテニスの指導などに活かすとした。

これについて具体的に、ドライブ回転に頼ったスイングをしないことや、回転の回転軸がブレを起こさないように真っ直ぐにラケットを当てるなど、考えられることがたくさん出来たので、目的に応えられていると思う。また、この考えをより多くのプレイヤーに知ってもらったり、自分の中で再研究してみたりなど、この研究がより多くの場で活躍できることを期待している。

この研究はソフトテニスを知る人だけでなく、もっと広くの人に見てもらいたい。なぜなら、この研究で示したことは、身近なところにも同じに考えられるところが様々にあるからだ。それでもこの研究は身近なことの小さな1つにすぎない。だからこそこうして身近なことに対する考えを持ち、1つ1つ深めていく研究というものは大事であり、自分の楽しみとなっているのだろう。

## 9. 参考文献

- 抗力 - Wikipedia  
<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8A%97%E5%8A%9B>
- マグヌス効果 - Wikipedia  
<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%B0%E3%83%8C%E3%82%B9%E5%8A%B9%E6%9E%9C>
- 「物理なぜなぜ事典①」 力学から相対論まで