



# 水面における バスタブ渦の 回転速度

物理2班

班員 加賀谷 魁 佐々木 穂乃佳 千田 明 深堀 秀平 藤岡 華梨  
指導教員 瀬々 将吏

## 動機

今年の春、私達はスイスで開発された川で水渦を用いた発電に興味を持った。このとき使われる「重力水渦発電機」と呼ばれる装置は、水力発電よりも小規模で自然にかかる負担が少なく、設置コストも低いため、新しいエネルギー源として期待されている。そこで私達は家庭排水で発電できるのではないかと考えた。(参考文献1)

## 先行研究

渦の流れが軸対称で、排水直前の水が完全に静止しているときコオリ力によって、北半球では反時計回りになり容器の温度や非軸対称性による錯乱によって回転方向が決定することが分かっている。また、コリオリ力は低気圧などの大きなスケールのものでないと影響しないとも言われている。(参考文献2)

## 研究の目的

発電装置は円柱容器の中央にプロペラを入れて渦の力で回転させる形式の物を考えている。しかし、家庭排水では排水量が少なく発電のための十分なエネルギーが発生しないのではないかと考えた。よって今回の研究では「発電を実現するために渦の速さを速くする条件を見つけること」を目的とした。

## 仮説

普段目にするバスタブ渦の様子から以下の二つの仮説を立てた。

- 1 減った水の量が多いほど速い
- 2 排水口が大きいほど速い

## 予備実験での傾向

予備実験では先行研究の内容とは異なり、全く動きのない状態では渦が発生しにくい傾向にあるということが分かった。理由としては容器が小さく、真ん中に排水口を開けたことで軸対称になったからだと考えている。また、排水口が大きいほど瞬間に流れる水の量が多くなり傾向として渦が回転しやすいと分かった。

## 実験方法

容器の側面に1cmごとに目盛りをつけ、10cmの目盛りまで水とトレーサーを入れる。次にプロペラ(画像1)を5秒間水面に平行になるように入れ、安定して渦を発生させるようにする。トレーサーの動きを追うために周囲と容器の底を暗くし、真横からライトで照らす。これを容器の真上、横の二方面から撮影し、水の深さと水の流れが分かるようにする。(図1)

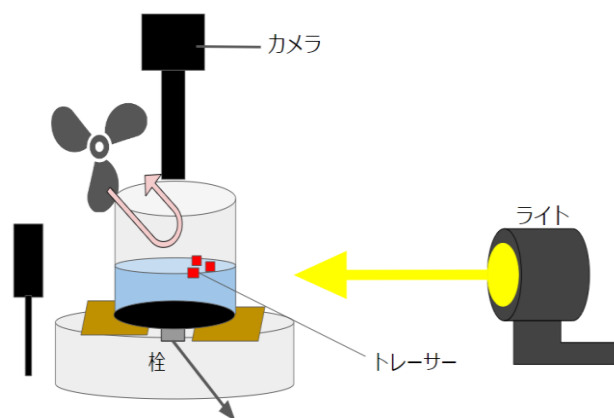


図1

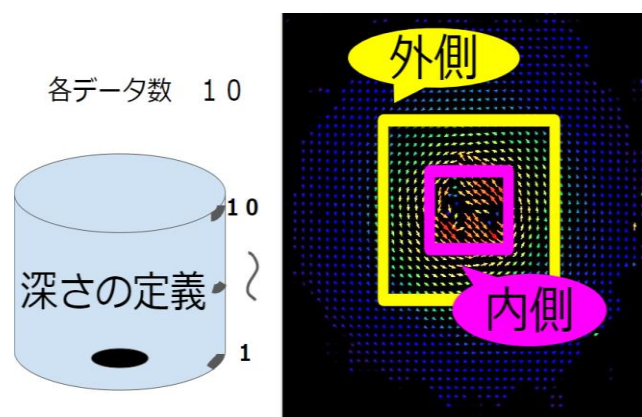


図2

実際の実験では容器の目盛りの値を水の深さとする。渦の循環を求める際それぞれのデータにおいて二通りの経路の循環を求めた。その際(図2)のように外側、内側と設定した。

画像1 プロペラ  
(約0,37秒で一回転)



## 使用したツール

### トレーサー

液体の流れなど、特定の物質を追跡するための物質のこと。今回は、水面の動きを見るためにペットボトルのキャップを刻んだものを水に入れて使用した。大きさは約2～5mmになるように調整した。

### PIV法

今回は流れの可視化と数値化のためにPIV法を用いた。(図3)のように物体の速さと向きを非接触で求め、ベクトルのように表すことができる。赤に近づくほど速く、青に近づくほど遅いことを示している。

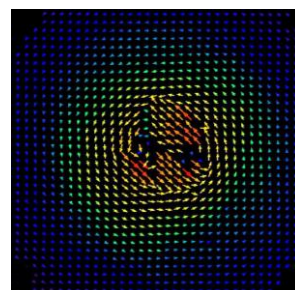


図3

### 循環

このPIV法で数値化したデータから渦の強さを表す循環を求めた。循環とは閉じた経路を考え、流速ベクトルの経路に沿った成分を積分したものである。速度成分を足し合わせたものなのでベクトルの長さの和、すなわち全体の回転の強さを表すことになる。よって今回はこの数値を速さの指標として使うことができ、循環が大きいほど速いと言える。実際は半時計回りがマイナス、時計回りがプラスの値で表示されたが、今回は回転方向ではなく、値の大きさが重要だと考えたため、絶対値で比較する。

### ケルヴィンの循環定理

理想的な流体において渦管渦の中心を囲む循環は経路の形によらない、渦の形によって渦の強さが変わることはない

$$\oint_C \vec{v} \cdot d\vec{s}$$

用具について

容器は半径10 c mの円柱



## 結果と考察

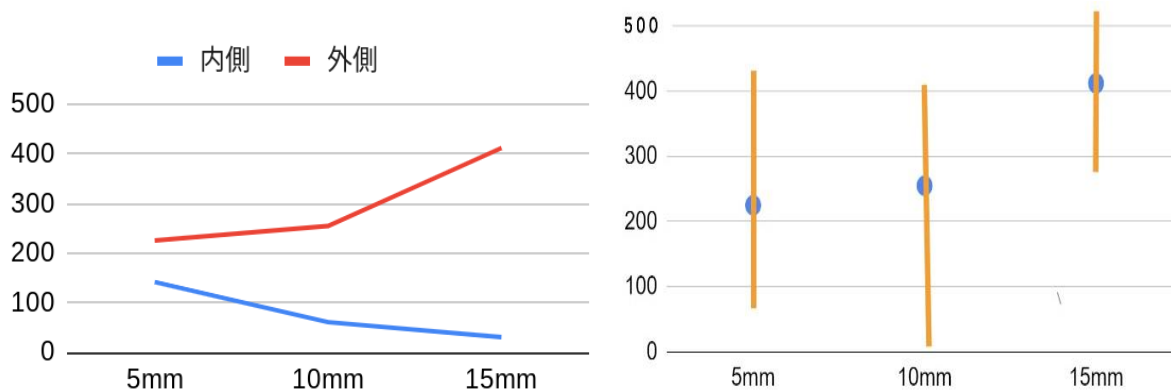
### 仮説1 「排水口が大きいほど速い」について

#### 実験1-(1)

排水口の大きさを5mm, 10mm, 15mmに変えて水の高さが5cmになったときの循環を求め比較した。

#### 結果1-(1)

青いグラフが内側、赤いグラフが外側の循環の平均を示している。(グラフ1) 内側は排水口が大きいほど循環が小さく、外側は排水口が大きいほど大きくなっていった。だが、内側と外側で値が大きく変わってしまった。



グラフ1

グラフ2 (外側平均)

オレンジラインは最大と最小を結ぶ ● 平均値

#### 考察1-(1)

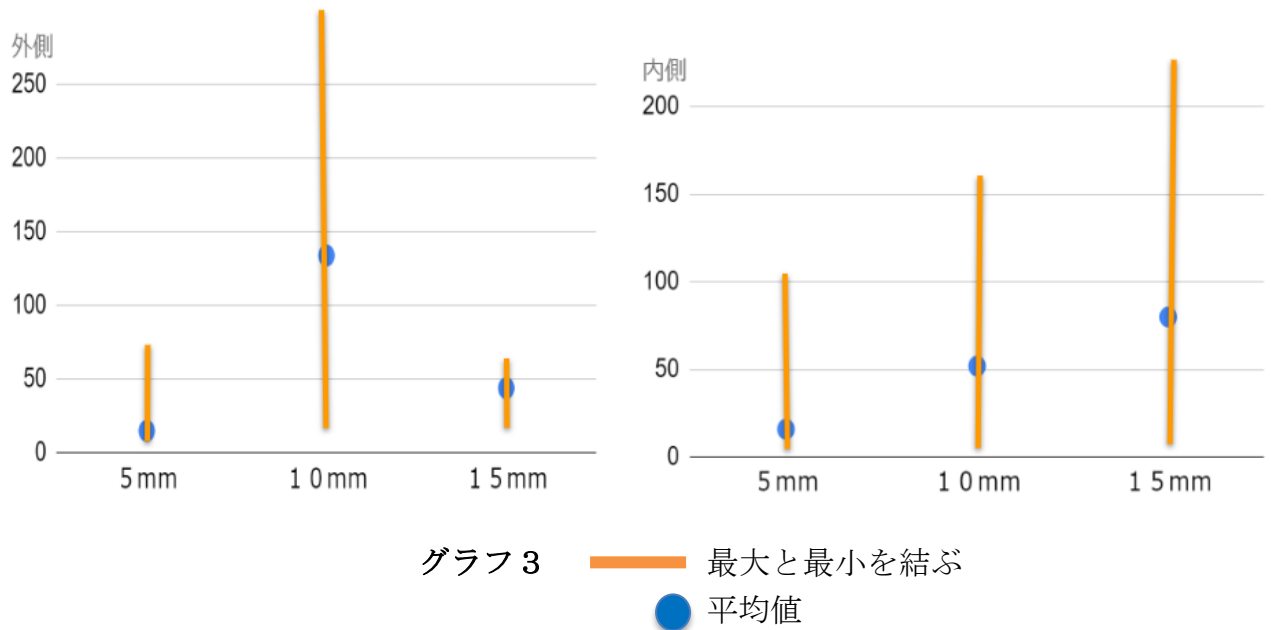
本来ならばケルヴィンの循環定理より内側と外側で循環の値が等しくなるはずであった。このようになった要因としてトレーサーの分布の違いが考えられる。プロペラを入れることでトレーサーがはじめに容器の端に集まり、時間と共に内側へ流れ、5cmに来た時外側に多くなる。よってトレーサーの多い外側の循環の方が信頼できるため、外側の値だけ比較した(グラフ2)。点は平均を表している。排水口が大きくなるほど循環が大きくなっているように思われるが視覚的に正確に判断できないため相関係数を求めた。すると約0.50となり正の相関があるといえる。しかし前述の通り循環が外側と内側で異なった。

#### 実験1-(2)

加えて排水口の大きさが5mm、10mmのときに容器の端からトレーサーを入れ続け、常にトレーサーが満遍なく広がるようにする。

## 結果 1 - (2)

まだ外側と内側で違いがあるが、外側は山型で、内側では相関係数が約 0.49 と弱い正の相関があった。よって、実験 1 の結果を考えても排水口が小さいほど渦の速度は速くなる可能性が高いといえる。



## 考察 1 - (2)

外側のデータについて、実際の映像を見たところ、容器の淵からトレーサーを継ぎ足しているため手で足したときの勢いで飛んだトレーサーが映っていた。そのためグラフ 3 の外側のデータは信頼できない。一方、内側にはトレーサーが満遍なく広がっていた。よって、グラフ 2 の外側の結果とグラフ 3 の結果を採用する。すると、どちらの場合も排水口の大きさが大きいほど渦の回転速度が大きくなった。このようになる原因を考えたとき、排水口が大きいとき広範囲から水が集まり渦のスケールが大きくなるため循環が大きくなり、排水口が小さいと渦のスケールが小さくなり循環も小さくなると考えられる。

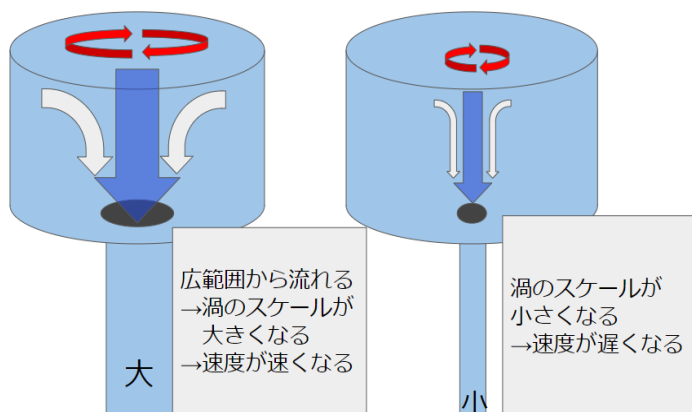


図 4

## 仮説2 「流れる水の量が多いほど速い」について

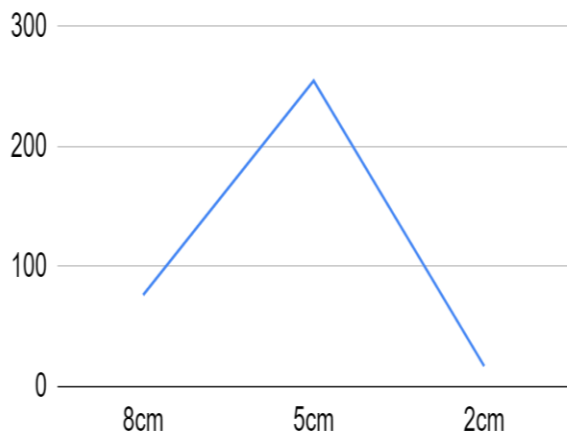
### 実験2-(1)

排水口の大きさは10mmにして水の高さは8, 5, 2cmの時の循環を調べた。トレーサーの継ぎ足しはしなかった。

### 結果2-(1)

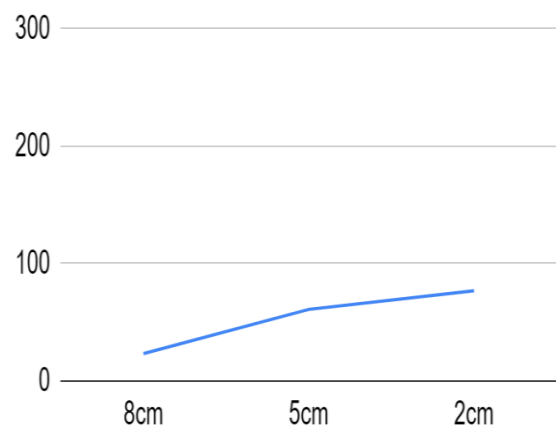
外側ではグラフが山型になり、水の深さが5cmのとき最高になっている。(グラフ4)、内側では減った水の量が多いほど循環が大きい傾向にある(グラフ5)。先ほどと同様にトレーサーの分布が多いデータだけを使うと、このように山型になった(グラフ6)。この結果から速さが最大になる高さがあると考え、新しく「水の量が5cmになったとき速さが最大になる」という仮説を立てた。

外側



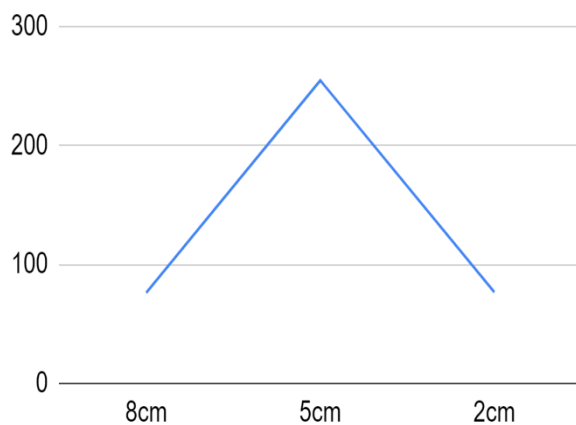
グラフ4

内側



グラフ5

8cm、5cmは外側、2cmは内側



グラフ6



### 仮説 3

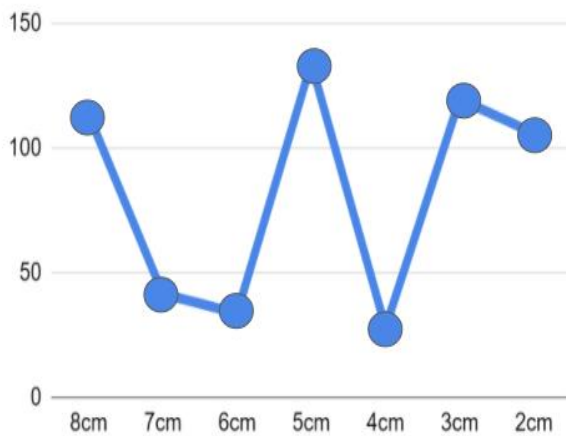
「水の量が5cmになったとき速度が最大になる」について

### 実験 3

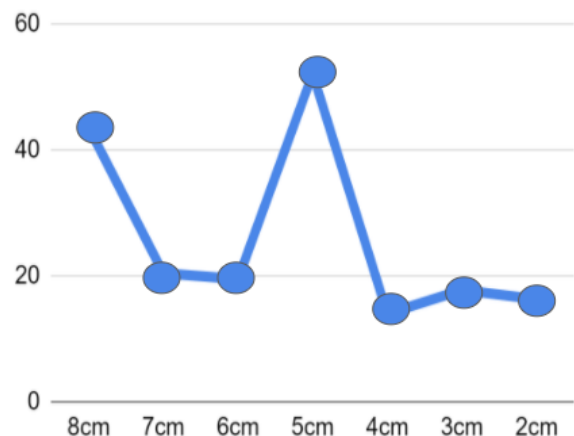
排水口の大きさは同じく10mmにし、8cmから2cmの間で1cmごとに計測。トレーサーを継ぎ足し満遍なく広がるようにしている。

### 結果 3

外側と内側で循環の値が異なり内側では3cmの時に大きくなっている。だが全体の傾向としては同じようになっており、5cmの時に循環の値が大きくなっている。(グラフ7) (グラフ8)



外側 グラフ 7

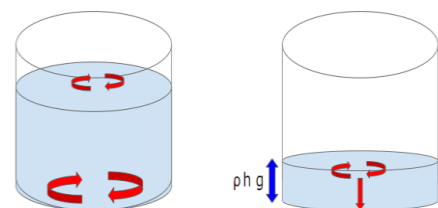


内側 グラフ 8

### 考察 3

外側で3cmの循環の値が大きくなった要因としては前述の通り、継ぎ足されたトレーサーが勢いよく飛んだために解析の際反応してしまったと思われる。はじめの速さについてはプロペラが生んだ流れの影響を多く受けているために速くなったのではないかと考えている。5cmに速くなった原因としては、水が多すぎると容器の下の方で渦が回転していても表面まで回転しきれず、少なすぎると水圧が小さくなり放水時の勢いもなくなり、渦の速度も遅くなる可能性があると考え(図5)。5cmの時がどちらの条件も満たさない深さのため速くなったのではないかと考えている。しかし底面での渦の速さを調べていないので断定はできない。

図 5



## 結論

仮説に反して排水口が大きいほど速度が速くなる。また、水の量が多いほど速いとは言えず、真ん中の深さである5cmの時に速くなる。

## 今後の展望

今後はより正確な結果を得るため、試行回数を増やし、もう一度実験方法を見直して水の量と渦の速さの規則性を見つけるべく再挑戦したい。今回は紙のトレーサーでデータを出せなかったので、紙のトレーサーを用いて水面以外も調べたい。また発電に応用できるように渦でプロペラを回すことも考えたい。

## 謝辞

今回の研究にあたり、熱心にご指導していただいた秋田県立大学システム科学技術学部石本先生ありがとうございました。

## 参考文献

- 1 水渦で発電！ インドに輸出されるスイスの発電技術
- 2 コリオリ力 (<https://eman-physics.net/analytic/coriolis.html>)
- 3 流体運動の可視化 種子田定俊 1973年
- 4 バスタブ渦の起源 日本物理学会 2012年
- 5 排水溝にできる渦巻きの謎 萩野颯人 2009年
- 6 静圧と動圧ー流体の圧力と運動エネルギーの等価交換

