

令和 3 年度(2021 年度)

芝浦工業大学 工学部 機械機能工学科

卒業論文

波力駆動式湧昇ポンプの揚水量及び  
鉛直変位の評価方法の構築

Construction of evaluation method for pumping  
capacity and vertical displacement  
of the wave-powered upwelling pump.

学籍番号 AB18092

氏名 高橋 真夢

指導教員 田中 耕太郎教授

# 目次

第1章 緒言.....	3
1.1 研究背景.....	3
1.2 研究目的.....	6
第2章 原理.....	7
2.1 波力駆動式湧昇ポンプの構成部品.....	7
2.2 波力駆動式湧昇ポンプの作動原理.....	9
2.3 揚水量の計算方法.....	10
2.3.1 理想的な最大揚水量.....	10
2.3.2 重力による管内の水の上昇速度減少効果.....	11
第3章 実験装置及び実験方法.....	15
3.1 揚水量の測定実験.....	15
3.1.1 実験装置.....	15
3.1.2 実験方法.....	21
3.2 動作解析による鉛直変位測定実験.....	21
3.2.1 実験器具.....	21
3.2.2 実験・解析方法.....	22
第4章 実験結果.....	29
4.1 室内実験装置による揚水量の測定結果.....	29
4.2 室内実験装置による揚水量の測定結果についての考察.....	32
4.3 屋外実験による鉛直変位の解析結果.....	36
4.3.1 ブイの中心座標の鉛直変位.....	36
4.3.2 ブイの回転による湧昇ポンプの上昇変位.....	36
4.3.3 湧昇ポンプ接続部と湧昇ポンプ本体の鉛直変位.....	39
4.4 屋外実験による鉛直変位の解析結果についての考察.....	41
第5章 結言.....	42
謝辞.....	42
参考文献.....	43

## 第1章 緒言

### 1.1 研究背景

近年、地球温暖化に伴う気温上昇により、海面温度の上昇が観測されている[1]。海面温度が上昇すると表層水は軽くなり、底層水との対流が起こりにくくなるため、表層水と底層水は成層の状態となる。底層水は植物プランクトンの光合成に必要な窒素やリン等の栄養塩を多量に含んでいるため、表層水と底層水が成層の状態であると表層の有光層で植物プランクトンが増殖しない[2]。これは漁獲量の減少や、植物プランクトンの光合成による二酸化炭素回収量の減少という問題を引き起こす。

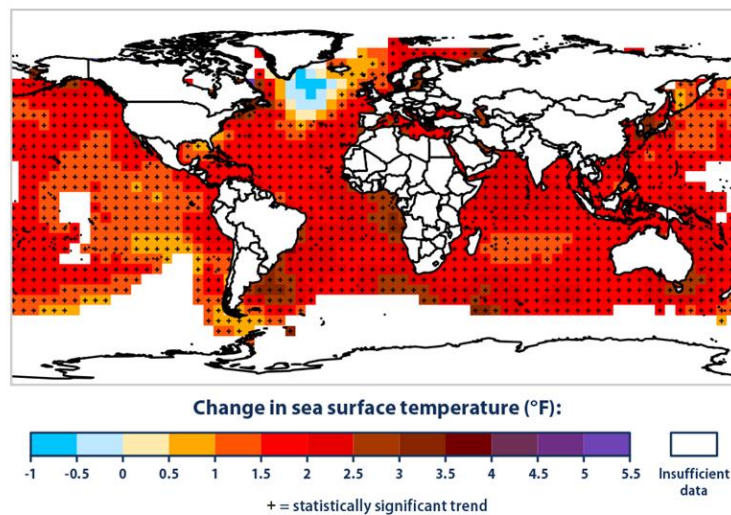


Fig.1 Global sea surface temperature [1]

これらの問題を解決するため、波力駆動式湧昇ポンプを用いた人工湧昇の発生を検討する。湧昇とは、底層の海水が表層に湧き上がる自然現象である。湧昇には、主に沿岸部で発生する沿岸湧昇と赤道付近で発生する赤道湧昇がある。沿岸部では、風によって沿岸の海面付近の水が沖合に運ばれ、その不足した海水を補うために底層の海水が表層に湧き上がるので湧昇が発生する。また、地球の自転によって北半球では北東貿易風、南半球では南東貿易風が吹いている。赤道付近ではこの貿易風によって、海面付近の水が北と南に流れる。よって、その不足した海水を補うために底層の海水が表層に湧き上がるので湧昇が発生する。

人工的に湧昇を発生させることによって栄養塩の豊富な底層水が表層の有光層に運ばれるため、植物プランクトンが大量に繁殖する。植物プランクトンは海洋生態系の底辺に位置しているため、植物プランクトンを増殖させる事で良好な漁場の形成が期待できる[3]。また、植物プランクトンの光合成による二酸化炭素吸収量の増加も期待できる。

人工湧昇の方式にはいくつか種類があるのでここで説明する。

1つ目の方式は、波力駆動式湧昇ポンプによる人工湧昇である。波力駆動式ポンプは、波力エネルギーを利用してポンプで底層の水を表層に送り込む方式である。この方式は外部からの出力が必要なく、その場で得られる波力エネルギーのみで稼働するという点が優れている。しかし、駆動力が波の大きさに依存するため、安定して湧昇を行う事が難しいといった課題がある。

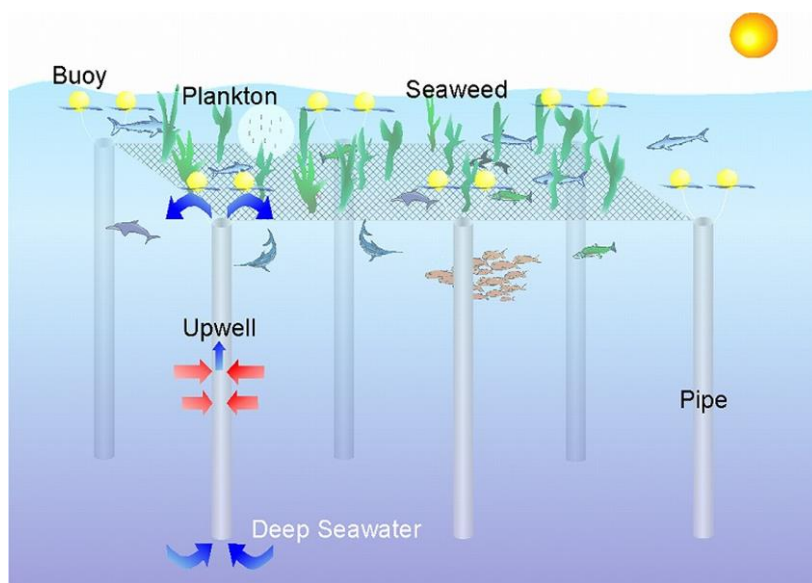


Fig.2 Upwelling by wave-powered upwelling pump [4]

2つ目の方式は、エアリフトポンプによる人工湧昇である。エアリフトポンプは圧縮した空気を動力源としており、パイプの下部から圧縮した空気を注入する。すると、空気の密度は周囲の液体の密度より小さいため、パイプ内の二層混合物の平均密度は周囲の液体の平均密度よりも小さくなる[5]。その結果、パイプ内の液体は上に押し上げられる。液体がパイプ上部から流出すると、パイプ下部から周囲の液体が流入し、継続的に稼働する。この方式は構造がシンプルで可動機械部品がないという点が優れている。しかし、エアリフトポンプを動かすための電気入力が比較的大きくなってしまったといった課題がある。

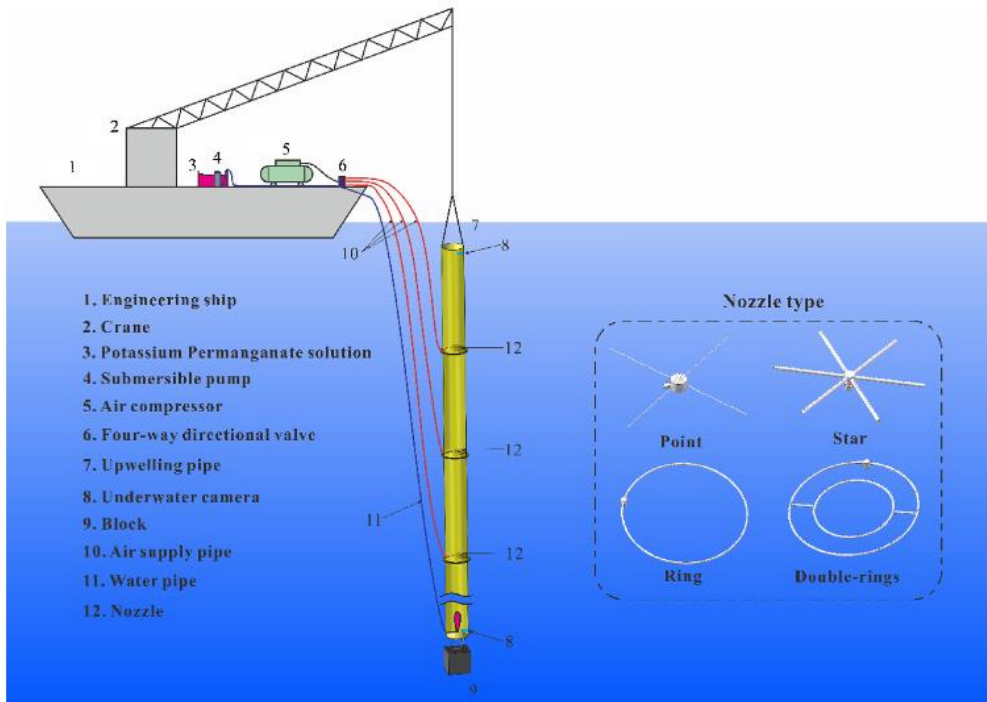


Fig.3 Upwelling by air-lift pump[6]

3 つ目の方式は、人工構造物による人工湧昇である[7]。これは、海底に人工構造物を設置し、これらの構造物によって引き起こされる上昇流によって湧昇を行うという方式である。この方式は他の方式よりも湧昇流量が大きいという点や、海底に設置した後は動力もメンテナンスも不要という点が優れている。しかし、大規模であるが故に、人工湧昇による悪影響を確認した際にすぐに撤収する事が出来ないといった課題がある。

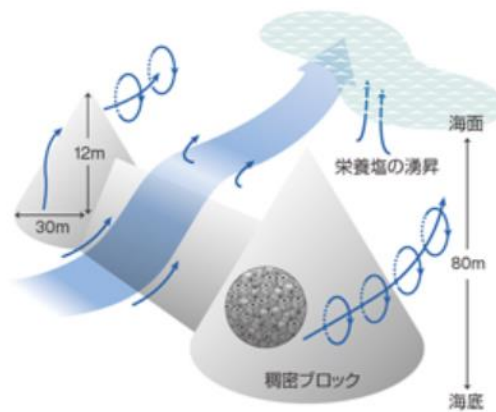


Fig.4 Upwelling by artificial structures[8]

本研究では波力駆動式湧昇ポンプによる人工湧昇方式を採用した。採用理由としては、再生可能エネルギーのみを用いて人工湧昇を行えるといった点や、装置の小型化が可能で設置、撤収が容易であるといった点が挙げられる。波力駆動式湧昇ポンプには大型の物も存在するが、本研究では小型の湧昇ポンプを扱う。大型の湧昇ポンプは湧昇を行う際に数メートル単位の波を必要とするが、小型化する事で数センチ程度のさざ波からでも湧昇を行う事が可能である。これにより、水深が浅い場所でも波力駆動式湧昇ポンプ利用できるようになる。しかし、装置を小型化することでポンプ1本当たりの揚水量は減少するため、複数のポンプを配置し利用することが必要となる。

## 1.2 研究目的

波力駆動式湧昇ポンプを実際に利用するためには、ポンプによってどの程度の揚水量が得られるのかを評価する必要がある。しかし、海で稼働している波力駆動式湧昇ポンプの揚水量を求めるのは困難である。そこで、実験室内に波力駆動式湧昇ポンプを水中で上下に運動させる装置を製作し、その装置を用いてポンプの揚水量を測定する。

また、波の作用によってブイや波力駆動式湧昇ポンプがどの程度上下に運動するのも不明である。したがって、海に設置した波力駆動式湧昇ポンプの様子を撮影し、2次元動作解析ソフトを用いて鉛直変位を算出する。鉛直変位は揚水量に関わるパラメーターであるため、算出する価値があると考えている。

## 第2章 原理

### 2.1 波力駆動式湧昇ポンプの構成部品

波力駆動式湧昇ポンプは図5に示すように、逆止弁と塩化ビニル管で構成されている。

- ・逆止弁（外径 64mm, 内径 60mm,）
- ・塩化ビニル管（外径 60mm, 内径 56mm）

本研究で使用する波力駆動式湧昇ポンプは NPO ESCOT によって製作された小型湧昇ポンプである。波力駆動式湧昇ポンプの全長は 70cm である。逆止弁は 45° でカットされていて、図6に示すようにばね蝶番を用いた蓋が取り付けられている。



Fig.5 Wave-powered upwelling pump



Fig.6 Check valve

海で実際に波力駆動式湧昇ポンプを使用する際には、図 7 のようにブイと湧昇ポンプをロープで繋いで動作させる。実際に海で使用される波力駆動式湧昇ポンプ構成部品を以下に示す。

- ・波力駆動式湧昇ポンプ（上部 2m, VU125 下部 1m, VU150）
- ・ブイ(直径 300mm)
- ・風受け
- ・ロープ

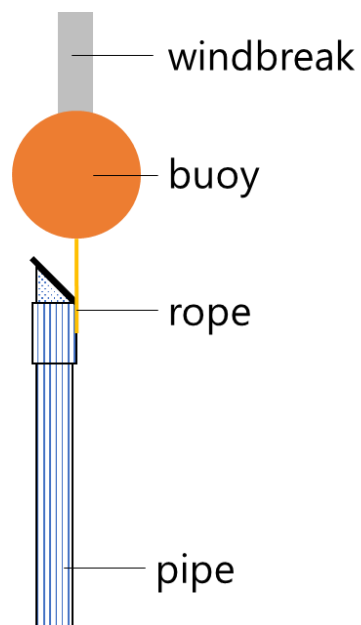


Fig.7 Connecting the buoy to the pump



また、海に設置した波力駆動式湧昇ポンプを図 8 に示す。この写真は千葉県岩和田漁港の堤防内における試験運転の様子である。

ブイの上部には風受けが取り付けられている。風受けで風を受けてブイが回転する事で、その分湧昇ポンプを上を引き上げる事が出来る。



Fig.8 Wave-powered upwelling pump at sea

## 2.2 波力駆動式湧昇ポンプの作動原理

波力駆動式湧昇ポンプの作動原理を図 9 に示す。波の作用により浮体が浮き上がる時、上方からの水圧により弁が閉じ、管内の水が引き上げられる(図中の①)。管が減速し、管内の水の速度が管の速度よりも大きくなった時、下方からの水圧により弁が開き始め、管内の水を放出する(図中の②)。そして、浮体が下がる時も、下方からの水圧により弁が開くので、管内の水を放出する(図中の③,④)。浮体が下がりきった後は弁が閉じる(図中の⑤)。以降は②~⑤を繰り返し揚水が行われる。

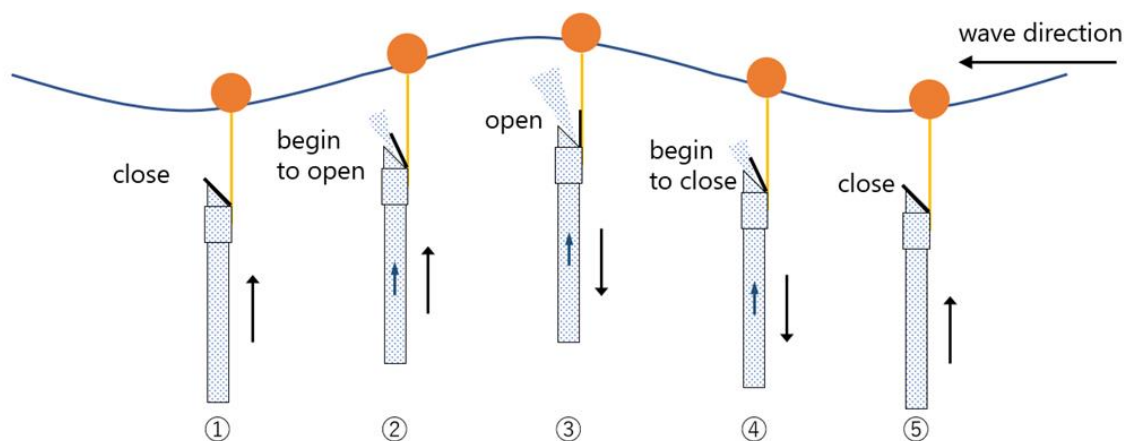


Fig.9 Operating principles

## 2.3 揚水量の計算方法

### 2.3.1 理想的な最大揚水量

湧昇ポンプの上下運動を単振動と仮定する。湧昇ポンプの最大上昇速度は、式(1)のようになる。

$$V_{max} = r\omega = \frac{H}{2} \times \frac{2\pi}{T} = \frac{\pi H}{T} [\text{m/s}] \quad (1)$$

$V_{max}$  : 湧昇ポンプの最大上昇速度[m/s]

$r$  : 振幅[m]

$\omega$  : 波の振動数[1/s]

$H$  : 波高[m]

$T$  : 波の周期[s]

弁が閉じている時、湧昇ポンプと管内の水はともに上昇するため、湧昇ポンプの最大上昇速度と管内の水の最大上昇流速は等しくなる。

$$U_{max} = V_{max} = \frac{\pi H}{T} [\text{m/s}] \quad (2)$$

$U_{max}$  : 管内の水の最大上昇速度[m/s]

揚水量は管内の水の流速と管の断面積の積で表すことができるので、式(3)のようになる。

$$Q_{max} = U_{max} \times A = \frac{\pi AH}{T} [\text{m}^3/\text{s}] \quad (3)$$

$A$  : 管の断面積[m<sup>2</sup>]

$Q_{max}$  : 最大揚水量[m<sup>3</sup>/s]

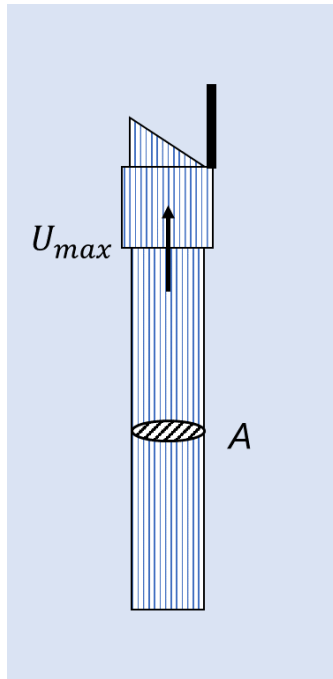


Fig.10 Maximum pumping capacity

### 2.3.2 重力による管内の水の上昇速度減少効果

Brian Kirke 氏によると、管内の水の上昇速度は、重力の影響により式(4)のように抑制されると提案されている[9].

$$U = \frac{\pi H}{T} - \frac{\rho' - \rho}{\rho'} g t [\text{m/s}] \quad (4)$$

ただし、 $U > 0$ とする.

- $U$  : 管内の水の上昇速度[m/s]
- $\rho$  : 表層水の密度[kg/m<sup>3</sup>]
- $\rho'$  : 管内の水の密度[kg/m<sup>3</sup>]
- $g$  : 重力加速度[m/s<sup>2</sup>]
- $t$  : 時間[s]

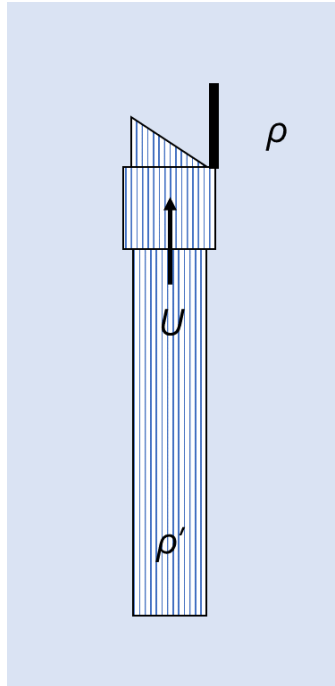


Fig.11 Effects of gravity

式(4)より，最小上昇速度は式(5)のようになる。

$$U_{min} > \frac{\pi H}{T} - \frac{\rho' - \rho}{\rho} gT [\text{m/s}] \quad (5)$$

$U_{min}$  : 管内の水の最小上昇速度[m/s]

式(1)，式(5)より平均上昇速度は式(6)のようになる。

$$\bar{U} \cong \frac{\pi H}{T} - \frac{\rho' - \rho}{2\rho} gT [\text{m/s}] \quad (6)$$

$\bar{U}$  : 管内の水の平均上昇速度[m/s]

したがって，平均揚水量は式(7)のように算出される。

$$\bar{Q} = \bar{U} \times A = \left( \frac{\pi H}{T} - \frac{\rho' - \rho}{2\rho} gT \right) A [\text{m}^3/\text{s}] \quad (7)$$

$\bar{Q}$  : 平均揚水量[m<sup>3</sup>/s]

また、平均値揚水量 $\bar{Q}$ に対しての実際の揚水量 $Q_{real}$ の比を湧昇効率 $\eta_u$ として式(8)のように定義する.

$$\eta_u = \frac{Q_{real}}{\bar{Q}} \quad (8)$$

$\eta_u$  : 湧昇効率  
 $Q_{real}$  : 実際の揚水量[m<sup>3</sup>/s]

ここまでの解析はブイならびに湧昇ポンプが波の三角関数波で上下動することを解析の前提としている. 実際の波が複雑で, その波の効果は測定結果より考察する必要があるが, その効果以外にブイと湧昇ポンプに働く力に関して以下の運動方程式が考えられる. ここで力の効果として次の4項目を考慮した.

- (1) ブイの動きの沈み込みの効果
- (2) 上下動する際のポンプ外壁・弁板と海水間の流動抵抗
- (3) 上下動する際のポンプ内壁と海水間の流動抵抗
- (4) 逆止弁の駆動, 水通過に対する流動抵抗

ブイの上下方向  $z$  の運動方程式は式(9)のようになる.

$$m_b \frac{d^2z}{dt^2} = -m_b g + F_{buoy} - F_{pump} \quad (9)$$

$m_b$  : ブイの質量[kg]  
 $F_{buoy}$  : ブイの浮力[N]  
 $F_{pump}$  : ポンプを引き上げる力[N]

湧昇ポンプの上下方向の  $z$  の運動方程式は式(10)のようになる.

$$m_p \frac{d^2z}{dt^2} = -(\rho' - \rho)V_p g + F_{pump} \pm F_{flow\ out} \pm F_{flow\ in} \pm F_{valve} \quad (10)$$

$m_p$  : 湧昇ポンプの質量[kg]  
 $V_p$  : 管内の水の体積[m<sup>3</sup>]  
 $F_{flow\ out}$  : 上下動する際のポンプ外壁・弁板と海水間の流動抵抗による力[N]  
 $F_{flow\ in}$  : 上下動する際のポンプ内壁と海水間の流動抵抗による力[N]  
 $F_{valve}$  : 逆止弁の駆動, 水通過に対する流動抵抗による力[N]

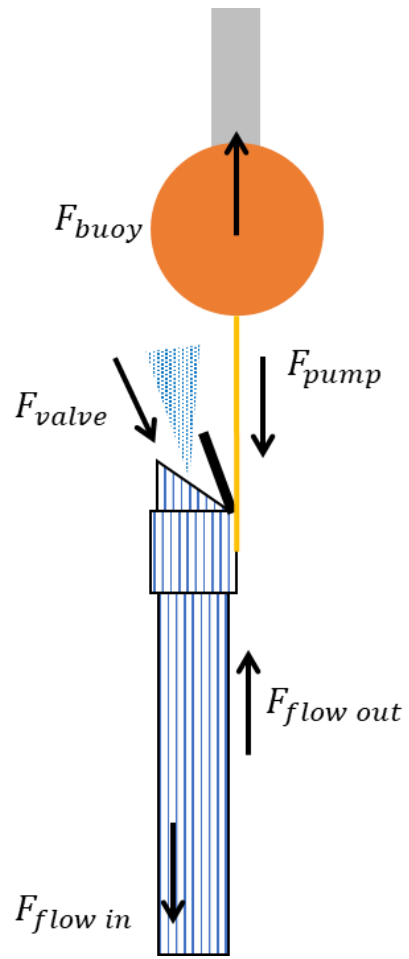


Fig.12 Force acting on the device

## 第3章 実験装置及び実験方法

### 3.1 揚水量の測定実験

#### 3.1.1 実験装置

波力駆動式湧昇ポンプの揚水量を定量的に評価するため、実験室内に揚水量測定装置を製作した。揚水量測定装置は、動力発生部分、揚水部分、揚水量測定部分の3つに分かれている。装置の全体図を図13に示す。

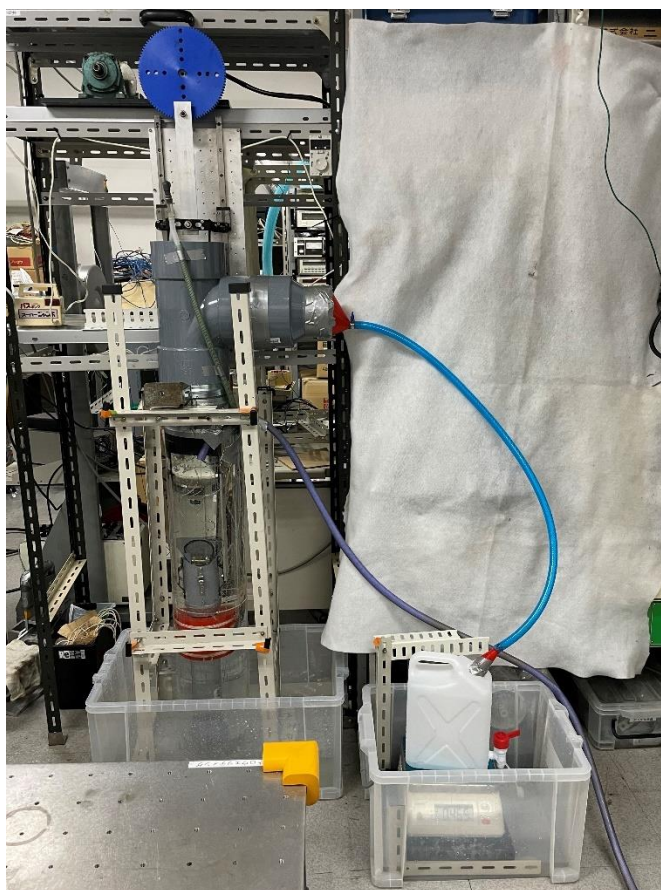


Fig.13 Overall view of the equipment

動力発生部分を図 14, 15, 16 に示す.

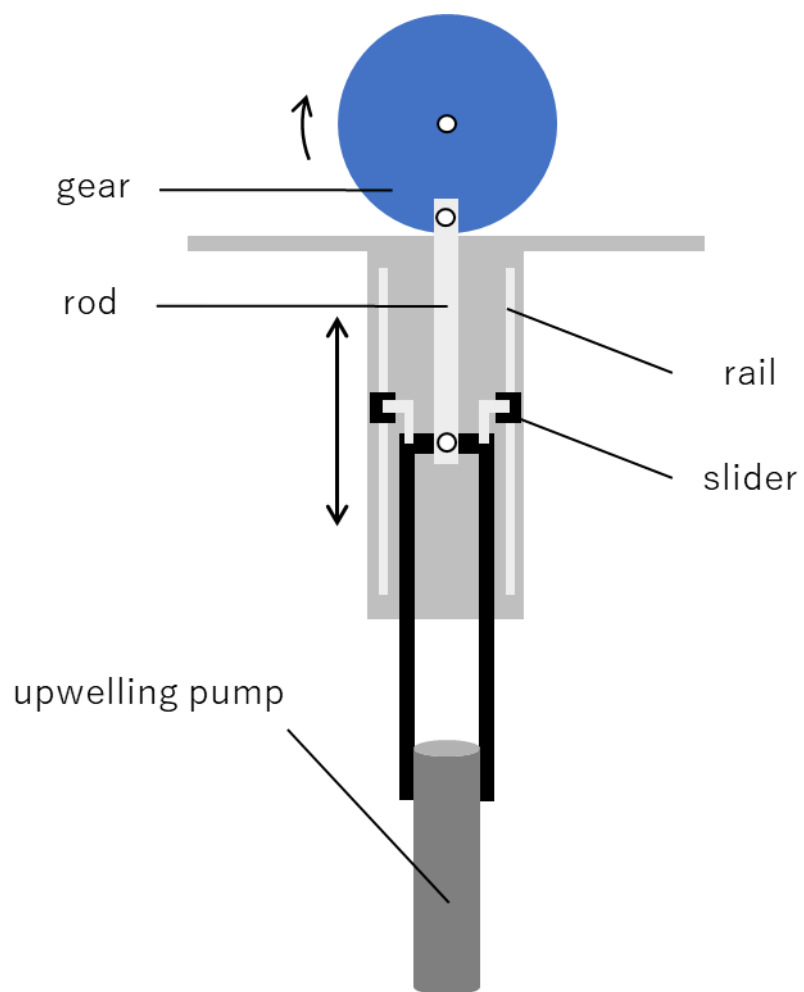


Fig.14 Power generation part (diagram)



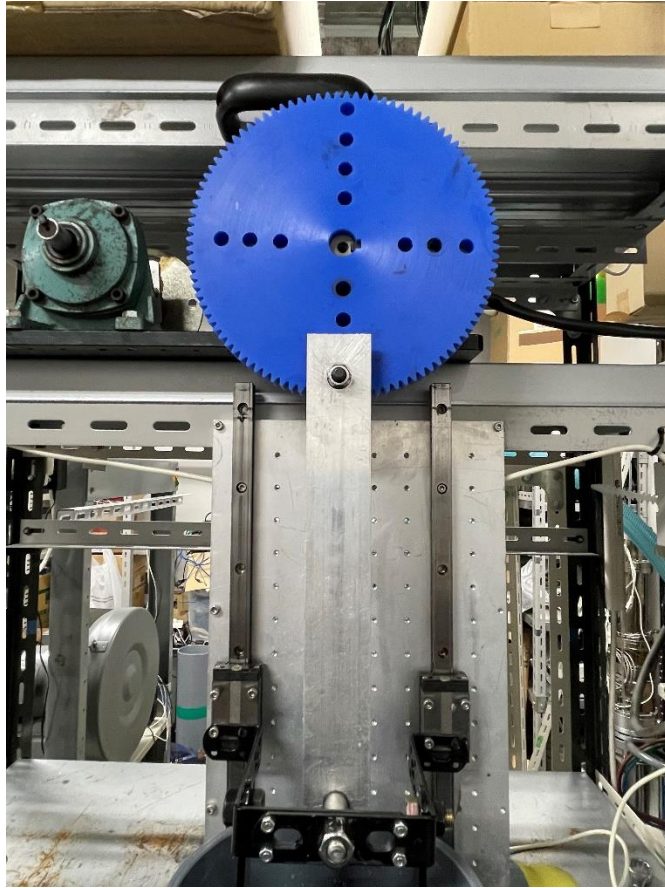


Fig.15 Power generation part

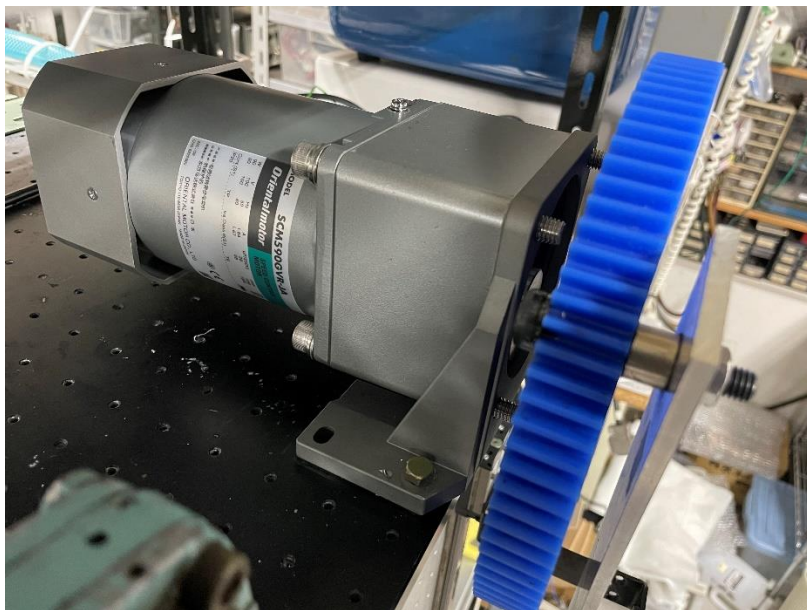


Fig.16 Motors and gears

動力発生部分の構成部品を以下に示す.

- ・モータ (型番 SCM590JA)
- ・歯車 (材質 MC901)
- ・ロッド
- ・スライダ
- ・レール

ここではモータ, 歯車の回転運動をロッド, スライダ, レールを用いて直線運動に変換することで波力駆動式湧昇ポンプを上下に運動させるための動力を得ている. この装置では, モータの回転数を調節する事でポンプの上下運動の周期を変える事が出来る. また, 歯車とロッドの接続位置を調節する事で上下運動の幅を変える事が出来る. 以下に各部品の詳細を示す.

揚水部分を図 17, 18 に示す.

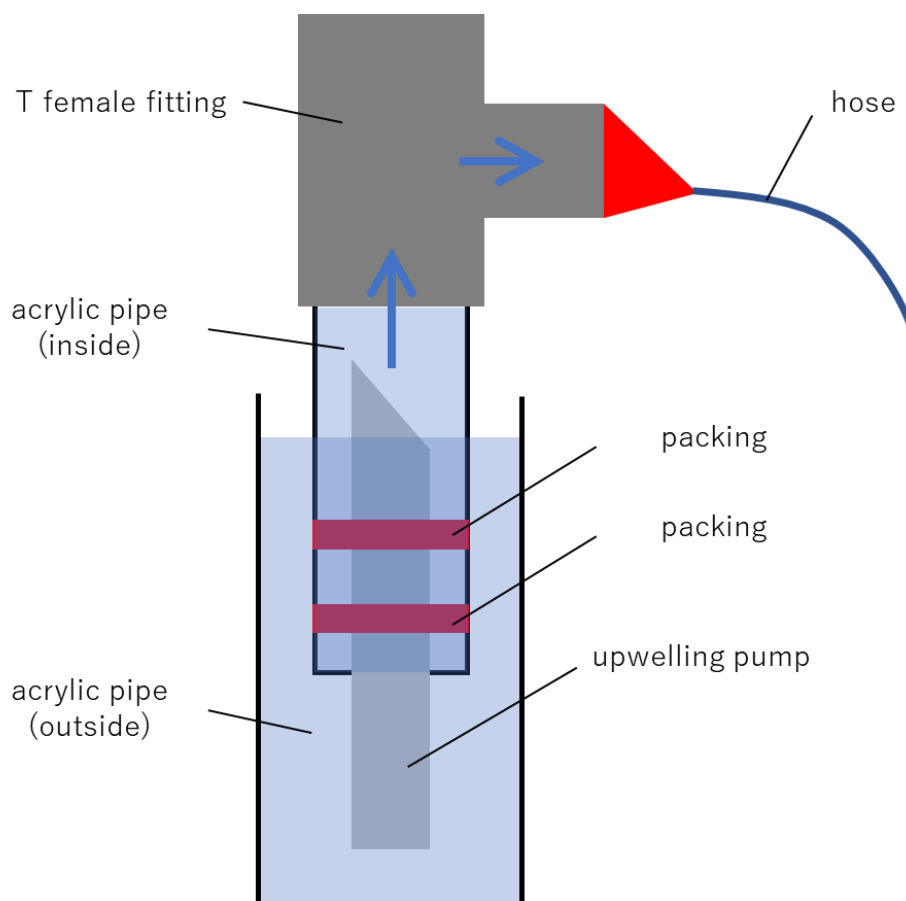


Fig.17 Pumping part (diagram)

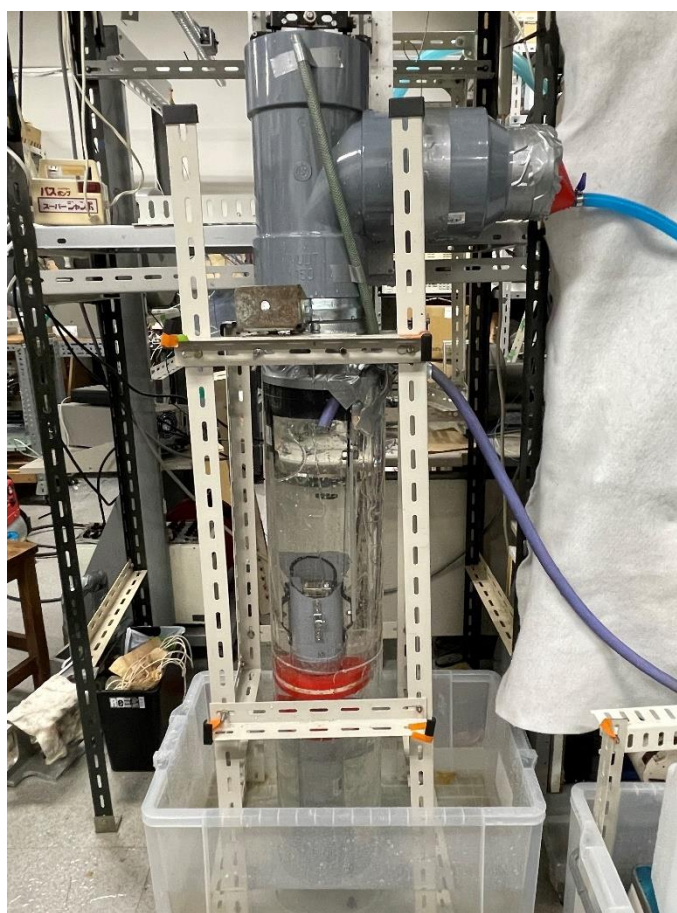


Fig.18 Pumping part

揚水部分の構成部品を以下に示す。

- ・波力駆動式湧昇ポンプ
- ・アクリルパイプ外側（外径 200mm，内径 190mm，長さ 980mm）
- ・アクリルパイプ内側（外径 150mm，内径 140mm，長さ 683mm）
- ・パッキン
- ・パッキン固定具
- ・チーズ配管

外側のアクリルパイプと内側のアクリルパイプには予め水を入れておく。波力駆動式湧昇ポンプを上下に動かすと、外側のアクリルパイプ内の水を汲み上げて内側のアクリルパイプ内に放出する。内側のアクリルパイプ内にはパッキンがあるため、放出された水は外側のアクリルパイプ内には流出せず、内側のアクリルパイプ内に溜まっていく。内側のアクリルパイプ内の水位が増していくと、水はチーズ配管を通過して揚水量測定部分に流れる。このような仕組みで、揚水した水だけを揚水量測定部分へと運ぶ事が出来る。

揚水量測定部分を図 19, 20 に示す.

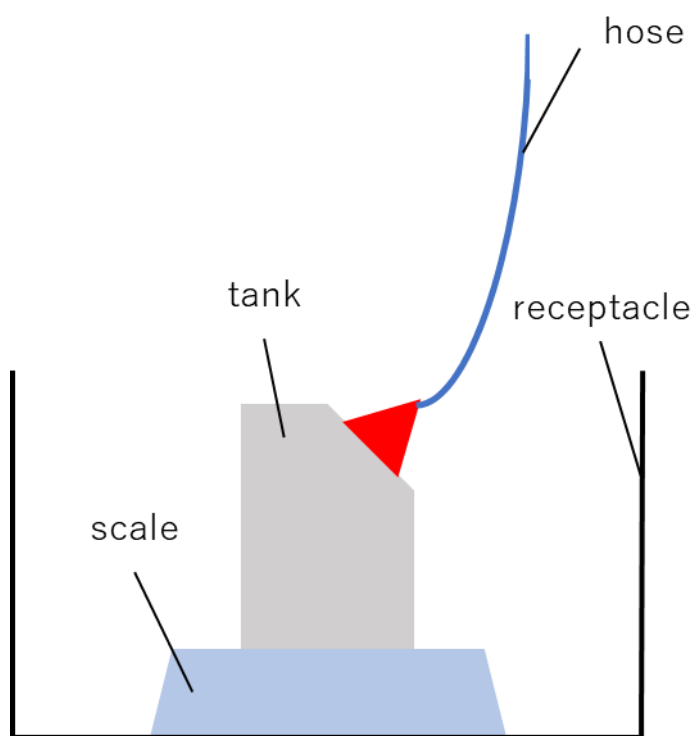


Fig.19 Measurement part (diagram)



Fig.20 Measurement part

揚水量測定部分の構成部品を以下に示す。

- ・タンク（容量 5L）
- ・ホース
- ・秤（型番 CS-10KWP, 秤量 10kg, 最小目盛 0.005kg, 防水性能 IP65）
- ・受け容器

揚水部分から流れてきた水がホースを通してタンクに流入する。そのタンクの重さを秤で測定する事で揚水量が求まる。

### 3.1.2 実験方法

揚水量の測定実験の実験方法を以下の(1)～(5)に示す。

- (1)チーズ配管の分岐の下辺りまで内側のアクリルパイプに水を入れる。
- (2)8割程度の水かさになるまで外側のアクリルパイプに水を入れる。
- (3)モータの回転数を 20rpm, 30rpm, 40rpm, に設定する。また, 上下運動幅が 60mm, 130mm, 180mm になるようにロッドを接続する。
- (4)それぞれの回転数, それぞれの回転数で湧昇ポンプを動作させ, 揚水量が安定したのを確認してから, 2分間の揚水量を 30秒ごとに記録する。
- (5)測定は 2回ずつ行い, 平均値揚水量を算出する。

## 3.2 動作解析による鉛直変位測定実験

### 3.2.1 実験器具

本実験は, 2次元動作解析ソフト Kinovea(Kinovea-0.9.5-x64)を用いて解析を行う。Kinovea は, スポーツ分析用に設計されたビデオ注釈ツールである[○]。

動画の撮影はスマートフォンの内臓カメラを用いて行った。

また, Kinovea を用いて物体を追跡する際の目印として, ブイ上部に取り付けられた風受けと波力駆動式湧昇ポンプから出ている管の先端にテニスボールを取り付けた。

装置の全体図を図 21 に示す。

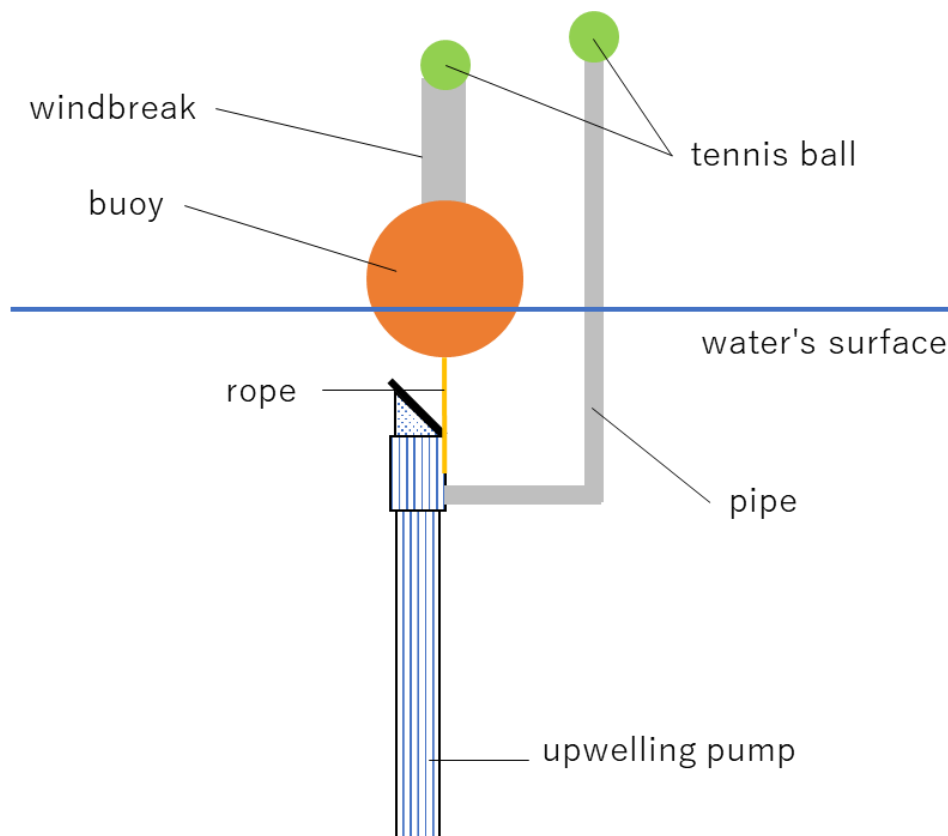


Fig.21 Overall view of the upwelling pump system

### 3.2.2 実験・解析方法

動画の撮影方法を以下の(1)~(2)に示す。

- (1)カメラを地面と水平になるように設置し、海で稼働している波力駆動式湧昇ポンプと結ばれているブイ、ブイ上部に取り付けられた風受け、また波力駆動式湧昇ポンプから出ている管をカメラの画角に収める。
- (2)波の作用によって運動している波力駆動式湧昇ポンプと結ばれているブイ、ブイ上部に取り付けられた風受け、また波力駆動式湧昇ポンプから出ている管の様子を撮影する。
- (3)動画の撮影時間は 10 秒で、合計 5 本撮影する。

次に、Kinovea での動作解析方法を以下の(1)~(6)に示す。

- (1)Kinovea を起動すると図 22 のような画面が表示される。画面左上の File ボタンをクリックし、さらに Open video をクリックする。すると、動画ファイルの選択画面が開くので撮影した動画を選択する。

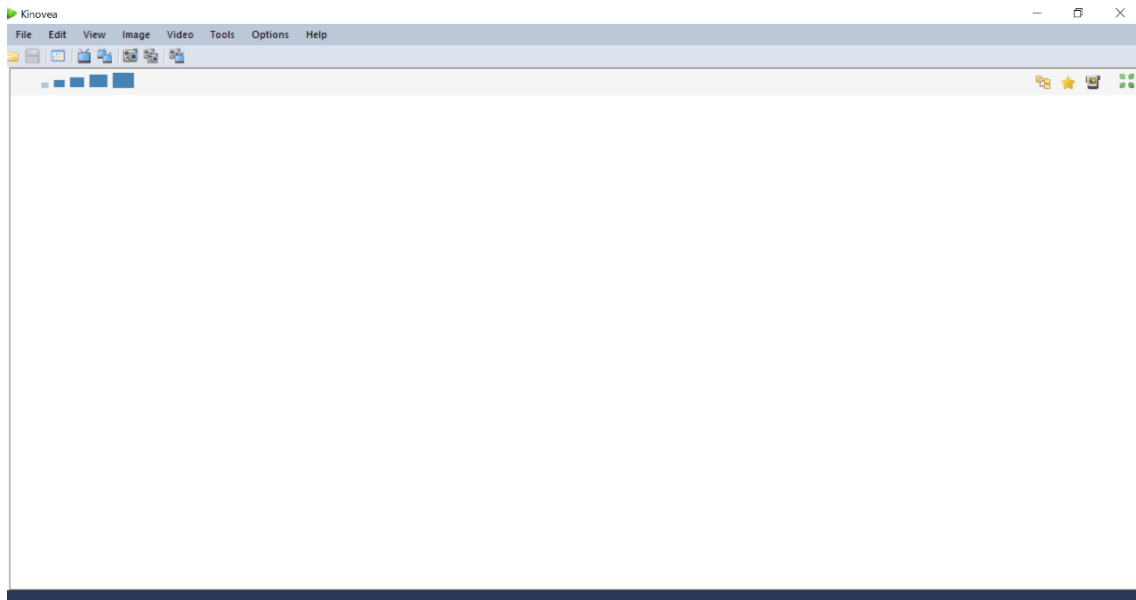


Fig.22 Selecting a video file

(2)動画ファイルを選択すると、図23のような画面が表示される。画面左下の再生ボタンをクリックし動画が正常に再生されるか確認する。



Fig.23 Confirmation of playback

(3)画面上を右クリックすると，図 24 のようなメニューが開くので，Track path をクリックする。

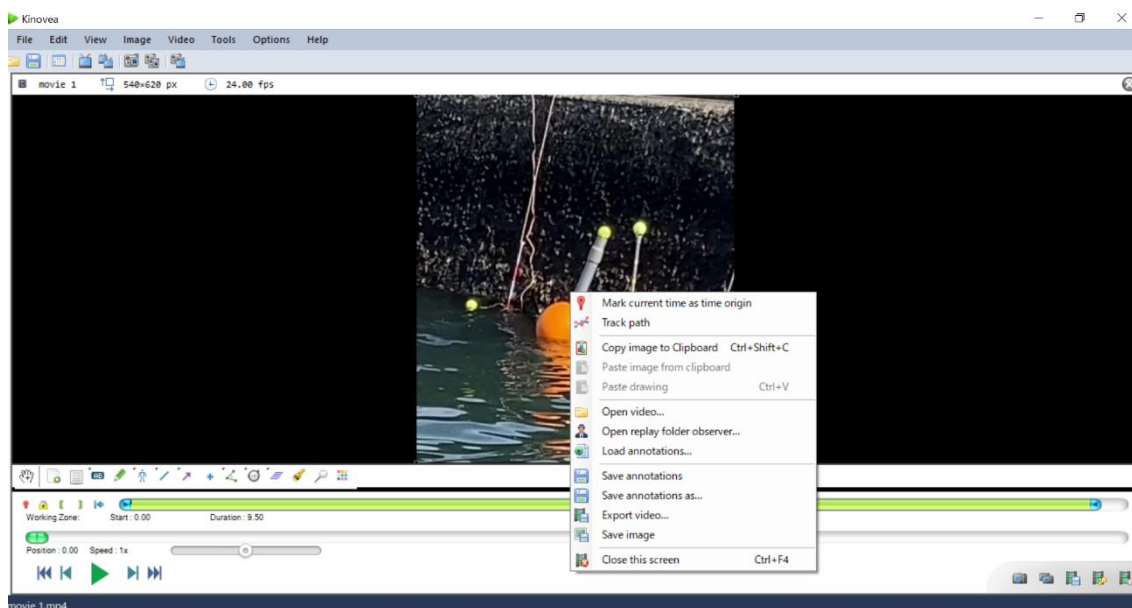


Fig.24 Set up tracking 1

(4)追跡範囲を指定する枠が表示されるため，図 25 のようにその枠の位置を追跡対象に合わせる。

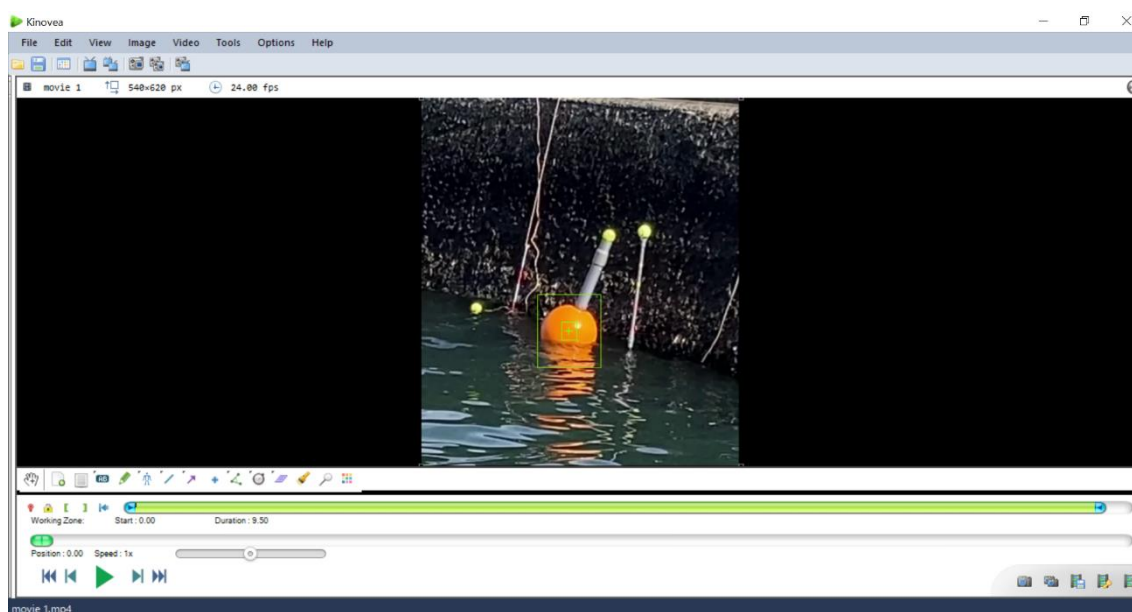


Fig.25 Set up tracking 2



(5)枠内にカーソルを置き右クリックする。すると、図 26 のようなメニューが開くので Configuration をクリックする。

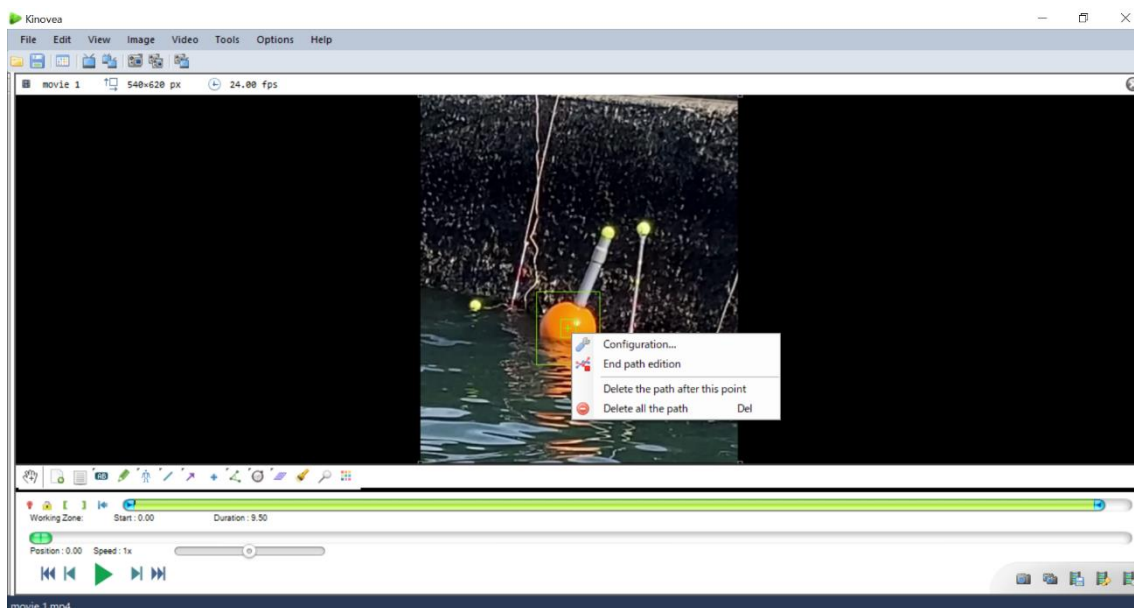


Fig.26 Set up tracking 3

(6)図 27 のようなウインドウが開くので、枠のサイズを追跡対象に合わせ、Apply をクリックする。

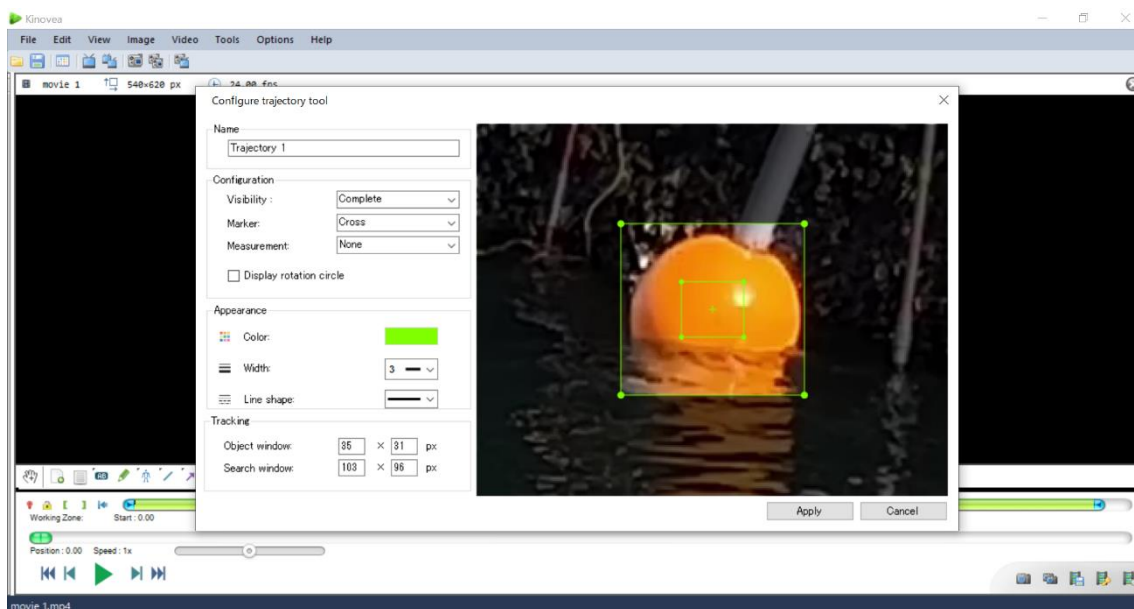


Fig.27 Set up tracking 4

(7)画面中央下のツールバーの line(左から 7 番目, 図 28)をクリックし, 長さが分かる物体に合わせて線を引く. 本実験ではブイの直径に合わせて線を引いた.

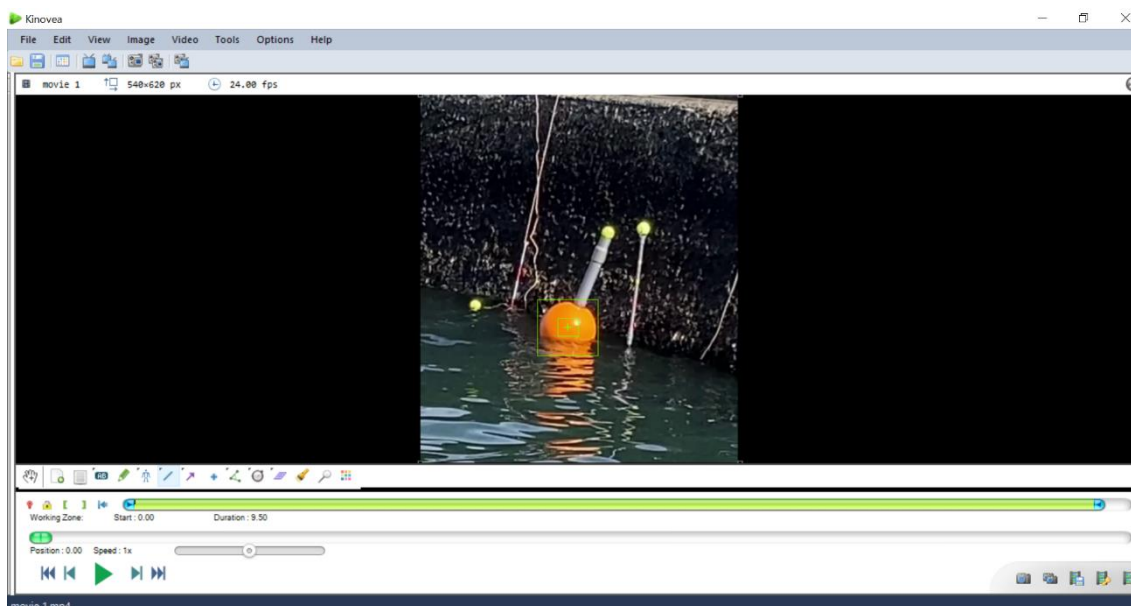


Fig.28 Set up the line 1

(8)引いた線に合わせて右クリックすると図 29 のようなメニューが表示されるので, Calibrate をクリックする.

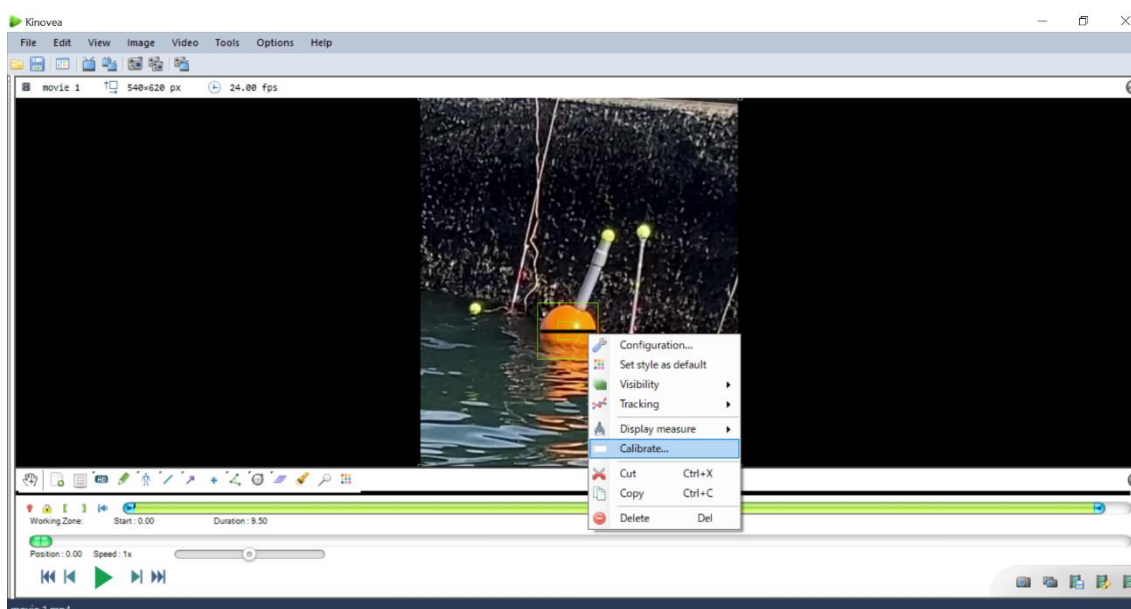


Fig.29 Set up the line 2

(9)図 30 のようなウィンドウが開くので、線の実際の長さを 30cm に設定し、Apply をクリックする。

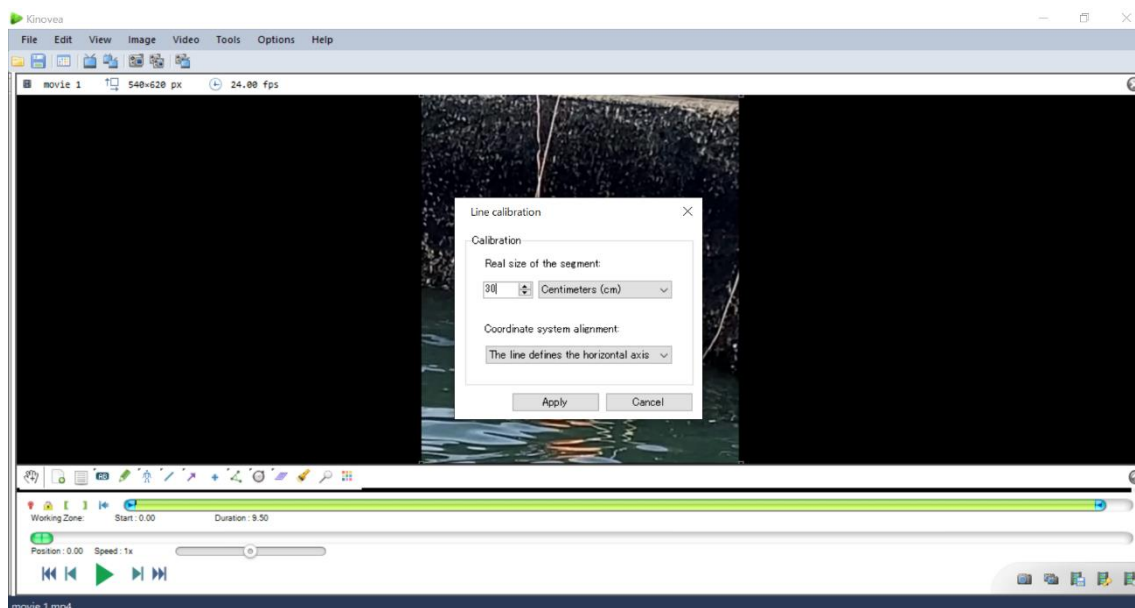


Fig.30 Set up the line 3

(10) 画面左下の再生ボタンをクリックし、追跡対象が正常に追跡できているかを確認する。  
(11)画面上部の Tools を選択すると図 31 のようなメニューが開くので、Coordinate system をクリックし座標軸を設定する。

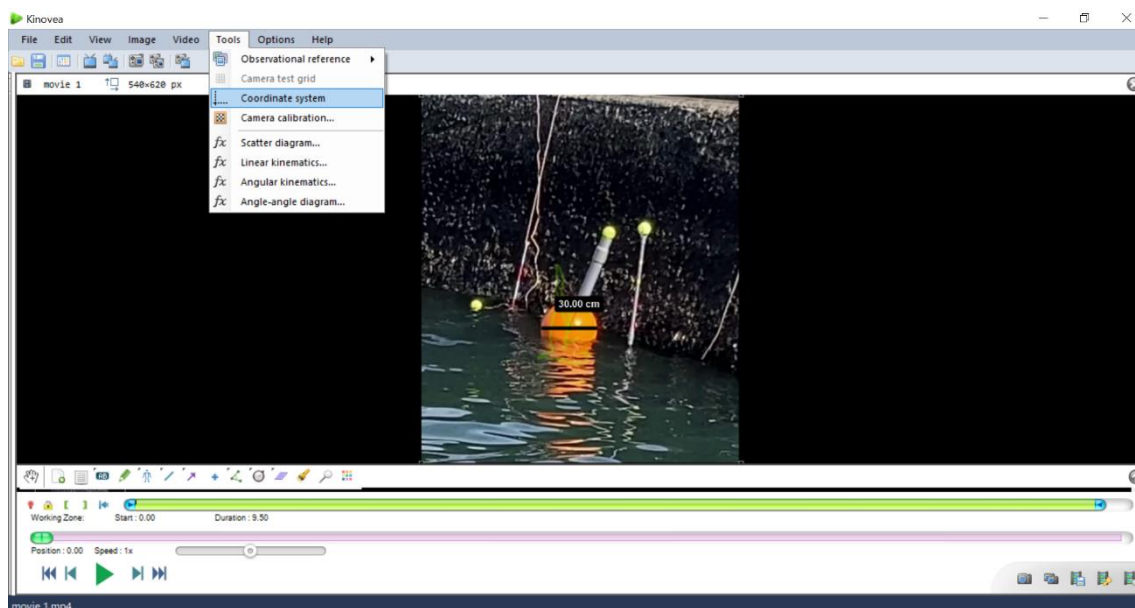


Fig.31 Setting coordinate axis

(12)画面左上の File をクリックすると、図 32 のようなメニューが開くので、Export to spreadsheet を選択し、Excel に追跡対象の座標データを出力する。

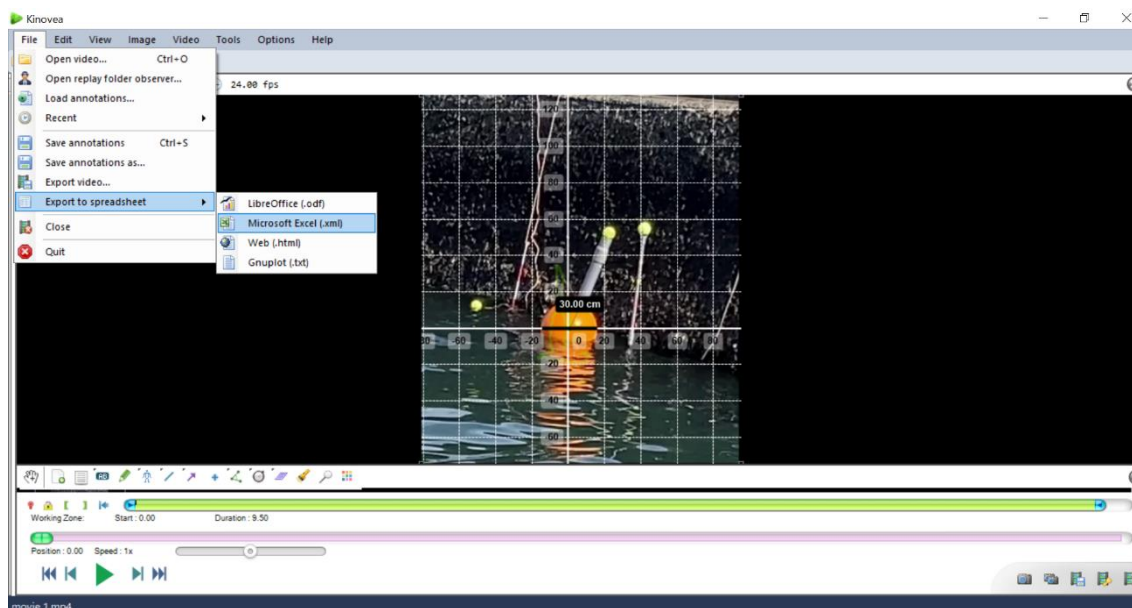


Fig.32 Output data

(13)出力したデータから、各鉛直変位を算出する。

## 第4章 実験結果

### 4.1 室内実験装置による揚水量の測定結果

モータの回転数 20rpm, 上下運動幅 60mm での測定結果を以下に示す.

Table 1 Amount of pumping water(20rpm, 60mm)

経過時間[s]	揚水量(1回目)[kg]	揚水量(2回目)[kg]	揚水量(平均)[kg]
0	0.000	0.000	0.000
30	0.320	0.420	0.370
60	0.765	0.925	0.845
90	1.280	1.450	1.365
120	1.815	1.990	1.903

モータの回転数 30rpm, 上下運動幅 60mm での測定結果を以下に示す.

Table 2 Amount of pumping water(30rpm, 60mm)

経過時間[s]	揚水量(1回目)[kg]	揚水量(2回目)[kg]	揚水量(平均)[kg]
0	0.000	0.000	0.000
30	0.500	0.520	0.510
60	1.055	1.105	1.080
90	1.670	1.745	1.708
120	2.290	2.320	2.305

モータの回転数 40rpm, 上下運動幅 60mm での測定結果を以下に示す.

Table 3 Amount of pumping water(40rpm, 60mm)

経過時間[s]	揚水量(1回目)[kg]	揚水量(2回目)[kg]	揚水量(平均)[kg]
0	0.000	0.000	0.000
30	0.660	0.620	0.640
60	1.385	1.310	1.348
90	2.185	2.055	2.120
120	2.950	2.835	2.893

モータの回転数 20rpm, 上下運動幅 130mm での測定結果を以下に示す.

Table 4 Amount of pumping water(20rpm, 130mm)

経過時間[s]	揚水量(1回目)[kg]	揚水量(2回目)[kg]	揚水量(平均)[kg]
0	0.000	0.000	0.000
30	0.535	0.500	0.518
60	1.185	1.140	1.163
90	1.895	1.840	1.868
120	2.670	2.585	2.628

モータの回転数 30rpm, 上下運動幅 130mm での測定結果を以下に示す.

Table 5 Amount of pumping water(30rpm, 130mm)

経過時間[s]	揚水量(1回目)[kg]	揚水量(2回目)[kg]	揚水量(平均)[kg]
0	0.000	0.000	0.000
30	0.625	0.705	0.665
60	1.400	1.560	1.480
90	2.225	2.420	2.323
120	3.090	3.355	3.223

モータの回転数 40rpm, 上下運動幅 130mm での測定結果を以下に示す.

Table 6 Amount of pumping water(40rpm, 130mm)

経過時間[s]	揚水量(1回目)[kg]	揚水量(2回目)[kg]	揚水量(平均)[kg]
0	0.000	0.000	0.000
30	0.725	0.750	0.738
60	1.540	1.585	1.563
90	2.430	2.490	2.460
120	3.380	3.455	3.418

モータの回転数 20rpm, 上下運動幅 180mm での測定結果を以下に示す。

Table 7 Amount of pumping water(20rpm, 180mm)

経過時間[s]	揚水量(1回目)[kg]	揚水量(2回目)[kg]	揚水量(平均)[kg]
0	0.000	0.000	0.000
30	0.705	0.805	0.755
60	1.440	1.630	1.535
90	2.205	2.490	2.348
120	2.995	3.310	3.153

モータの回転数 30rpm, 上下運動幅 180mm での測定結果を以下に示す。

Table 8 Amount of pumping water(30rpm, 180mm)

経過時間[s]	揚水量(1回目)[kg]	揚水量(2回目)[kg]	揚水量(平均)[kg]
0	0.000	0.000	0.000
30	0.815	0.780	0.798
60	1.655	1.580	1.618
90	2.525	2.385	2.455
120	3.425	3.250	3.338

モータの回転数 40rpm, 上下運動幅 180mm での測定結果を以下に示す。

Table 9 Amount of pumping water(40rpm, 180mm)

経過時間[s]	揚水量(1回目)[kg]	揚水量(2回目)[kg]	揚水量(平均)[kg]
0	0.000	0.000	0.000
30	1.110	1.085	1.098
60	2.180	2.055	2.118
90	3.240	3.035	3.138
120	4.325	3.995	4.160

## 4.2 室内実験装置による揚水量の測定結果についての考察

第4章で示した平均揚水量を上下運動幅毎にグラフにしたものを以下に示す。

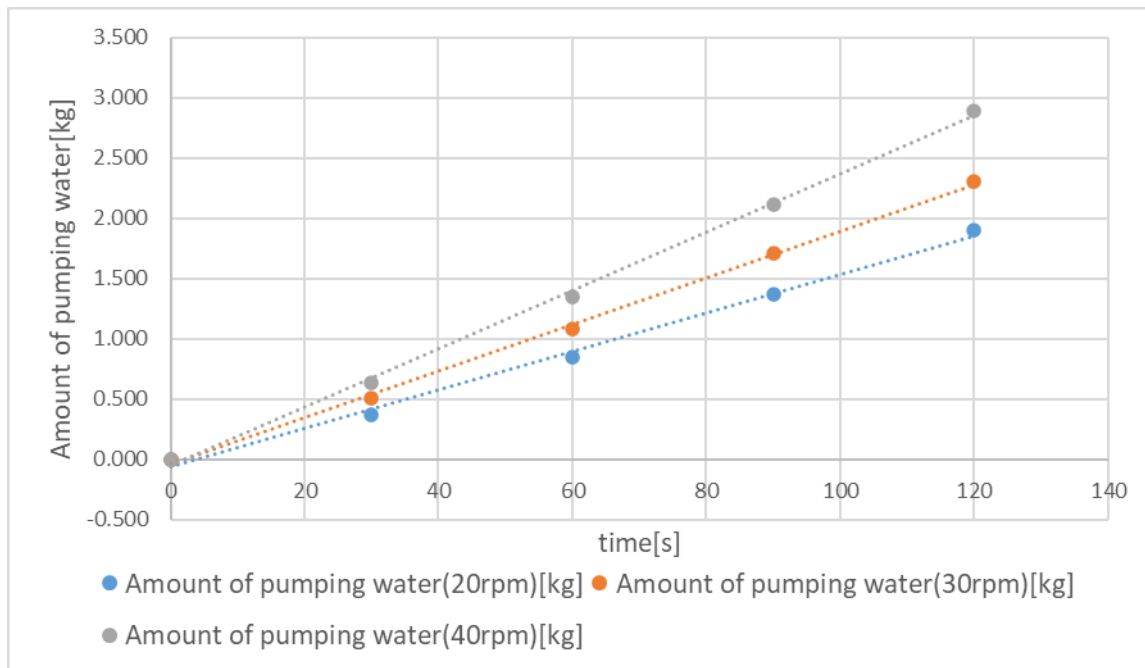


Fig.33 Amount of pumping water(60mm)

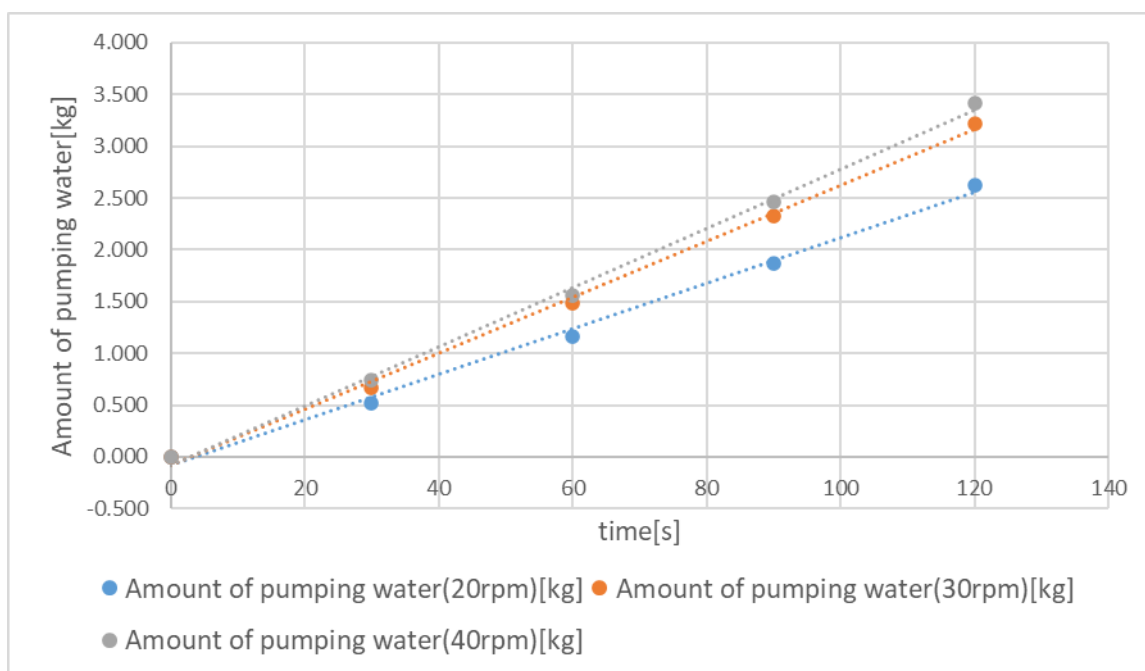


Fig.34 Amount of pumping water(130mm)



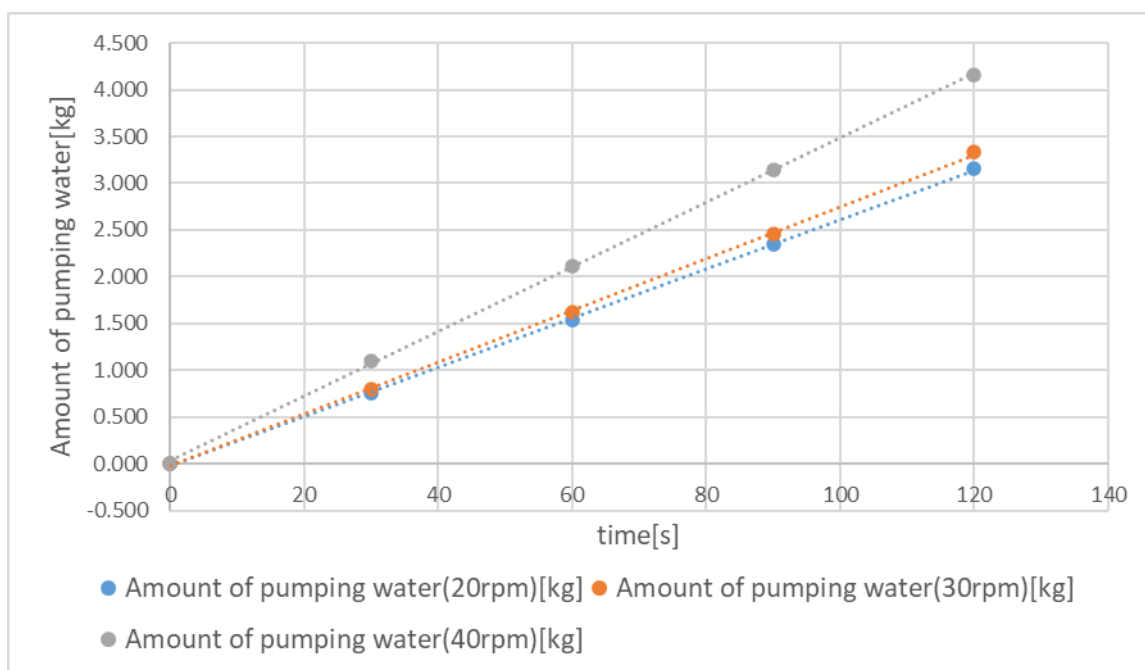


Fig.35 Amount of pumping water(180mm)

本実験では上下運動幅を 60mm, 130mm, 180mm に設定したが, これは波高が 60mm, 130mm, 180mm の波に対応している. また, モータの回転数を 20rpm, 30rpm, 40rpm に設定したが, これは周期が 3 秒, 2 秒, 1.5 秒の波に対応している.

実験結果から, 上下運動幅が大きくなるほど湧昇ポンプの揚水量は増加し, また, モータの回転数が大きくなるほど湧昇ポンプの揚水量が増加する事が確認できた. これは言い換えると, 波の波高が大きくなるほど湧昇ポンプの揚水量は増加し, 波の周期が小さくなるほど湧昇ポンプの揚水量は増加するという事である.

2.3.1 で示したように, 湧昇ポンプの最大揚水量は,

$$Q_{max} = \frac{\pi AH}{T} [\text{m}^3/\text{s}]$$

と表すことができる. この式から揚水量は波の波高に比例し, 波の周期に反比例する事がわかる. しかし, 本実験では波高(上下運動幅)を 60mm から 180mm へと 3 倍に変化させても揚水量が 3 倍になるということとはなかった.

実験装置の評価としては, 内側のアクリルパイプ内のパッキンから外側のアクリルパイプへの水漏れや, モータのトルク不足という課題が確認できた. パッキンの水漏れは測定する揚水量を減少させ, モータのトルク不足はモータの回転数を一定に保てなくさせるため, どちらも測定の精度を減少させる要因になったと考えられる.

次に, 式(8)から湧昇効率を算出する. 平均揚水量[kg]の測定結果を以下に示す.

Table 10 Average amount of pumping water [kg]

	60[mm]	130[mm]	180[mm]
20[rpm]	1.903	2.628	3.153
30[rpm]	2.305	3.223	3.338
40[rpm]	2.893	3.418	4.160

測定時間は2分間のため、表10から平均揚水量[m<sup>3</sup>/s]を算出した。算出結果を以下に示す。

Table 11 Average amount of pumping water [m<sup>3</sup>/s]

	60[mm]	130[mm]	180[mm]
20[rpm]	0.0000159	0.0000219	0.0000263
30[rpm]	0.0000192	0.0000269	0.0000278
40[rpm]	0.0000241	0.0000285	0.0000347

式(7)から理論平均揚水量[m<sup>3</sup>/s]を以下のように算出した。算出結果を以下に示す。

Table 12 Theoretical amount of pumping water [m<sup>3</sup>/s]

	60[mm]	130[mm]	180[mm]
20[rpm]	0.0001546	0.000335	0.000464
30[rpm]	0.0002319	0.000502	0.000696
40[rpm]	0.0003092	0.000670	0.000928

表11, 表12の値を用いて、式(8)から湧昇効率 $\eta_u$ を算出した。算出結果を以下に示す。

Table 13 upwelling efficiency

	60[mm]	130[mm]	180[mm]
20[rpm]	0.103	0.065	0.057
30[rpm]	0.083	0.053	0.040
40[rpm]	0.078	0.043	0.037

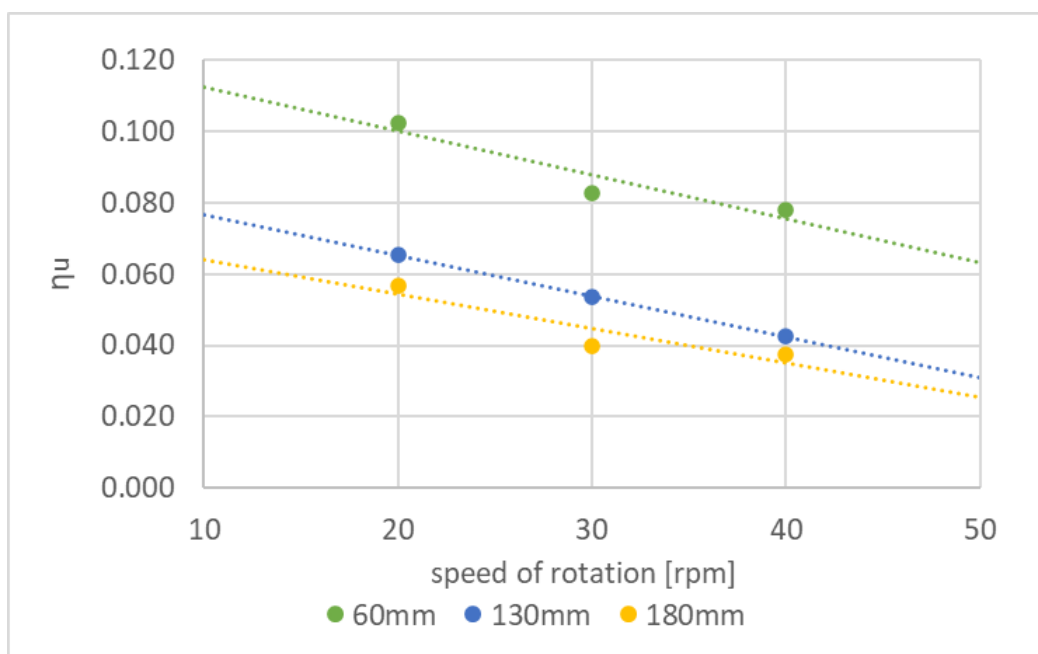


Fig.36 upwelling efficiency

表 13, 図 36 に示すように本実験から得られた湧昇効率はかなり低いものとなった. この原因としては, 内側のアクリルパイプ内のパッキンから外側のアクリルパイプへの水漏れ, 逆止弁の駆動による流動抵抗, 湧昇ポンプと水との流動抵抗による損失が大きかったという事が考えられる.

### 4.3 屋外実験による鉛直変位の解析結果

#### 4.3.1 ブイの中心座標の鉛直変位

波の作用による鉛直方向のブイの中心座標の時間変化を図 37 に示す。ここで、鉛直方向の座標を  $z$ 、経過時間を  $t$  とした。

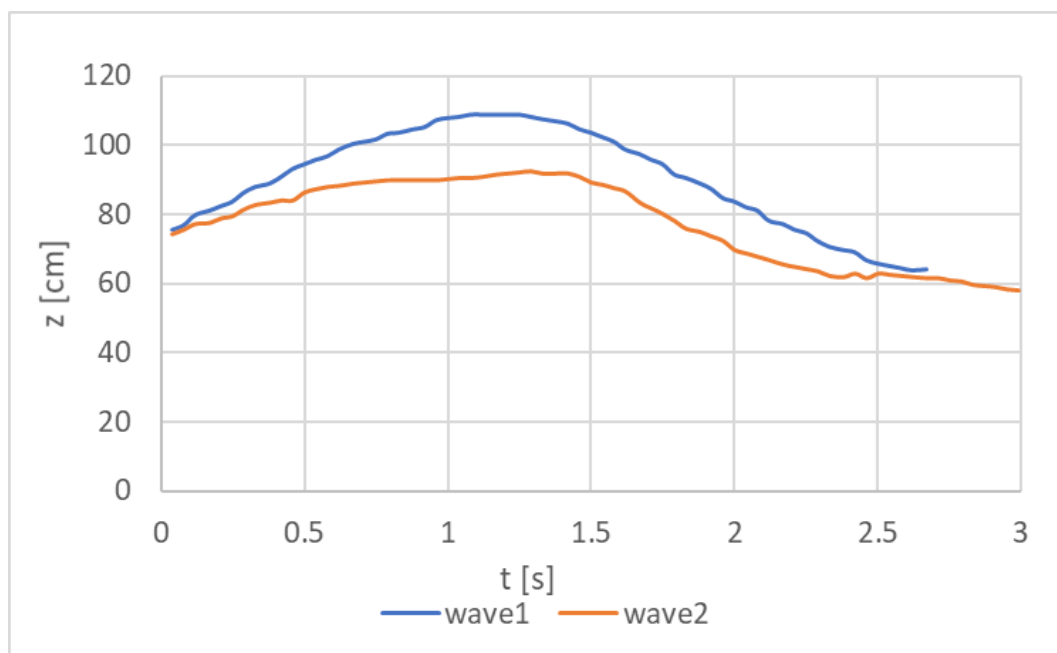


Fig.37 Vertical displacement of the buoy's center coordinates

#### 4.3.2 ブイの回転による湧昇ポンプの上昇変位

ブイ上部に取り付けられている風受けにより、波力だけでなく風力も利用して波力駆動式湧昇ポンプを上へ引き上げる事ができる。ブイが風を受けて傾くことで、ブイ下部にあるブイと湧昇ポンプの接続部が上に引き上げられる。

ブイと湧昇ポンプの接続部の鉛直変位  $h$  の算出方法を以下に示す。

$$h = r - r \cos \theta \text{ [m]} \quad (11)$$

$h$  :ブイと湧昇ポンプの接続部の鉛直変位[m]

$r$  :ブイの半径[m]

$\theta$  :ブイの傾き[deg]

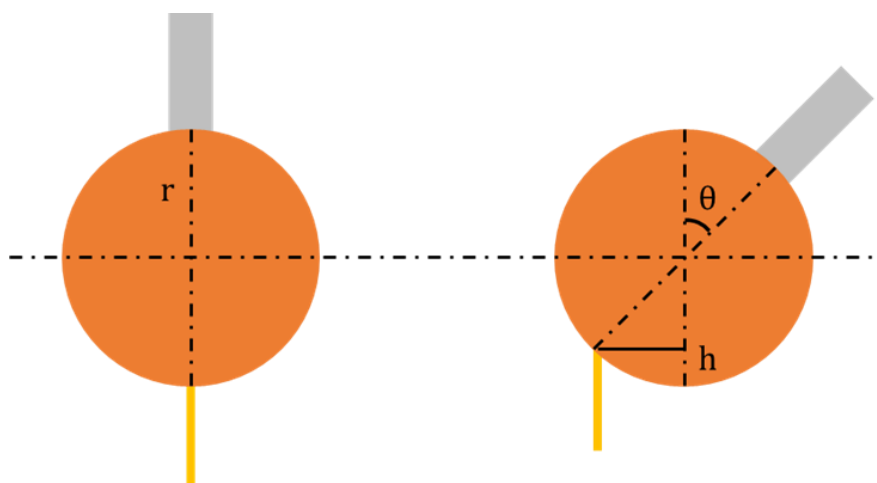


Fig.38 Effect of windbreak

この上昇変位を求めるため、図 39, 40 中のブイの傾き  $\theta$  (風受けの傾き) を算出する。図中の  $L$  はブイの中心からテニスボールの中心までの距離である。ブイは半径 15cm で、風受けの根本からテニスボールの中心までの距離は 45cm であるため、 $L=60\text{cm}$  となる。

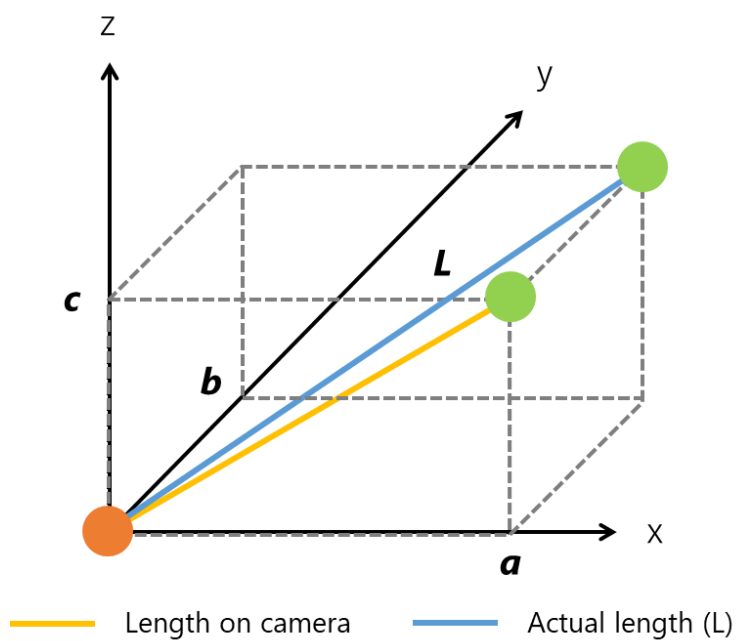
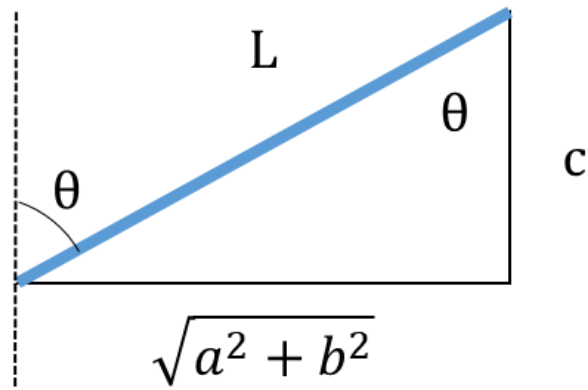


Fig.39 Three-dimensional coordinates



(Find b from L, a, c)

Fig.40 Angle calculation method

ブイの中心座標を原点とした時の、テニスボールの中心の y 座標を  $c$  とすると、

$$\cos \theta = \frac{c}{L} \quad (12)$$

となるため、 $\theta$ は、

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{c}{L}\right) \quad (13)$$

のように算出することができる。波の作用によるブイの傾き  $\theta$  の時間変化を図 41 に示す。

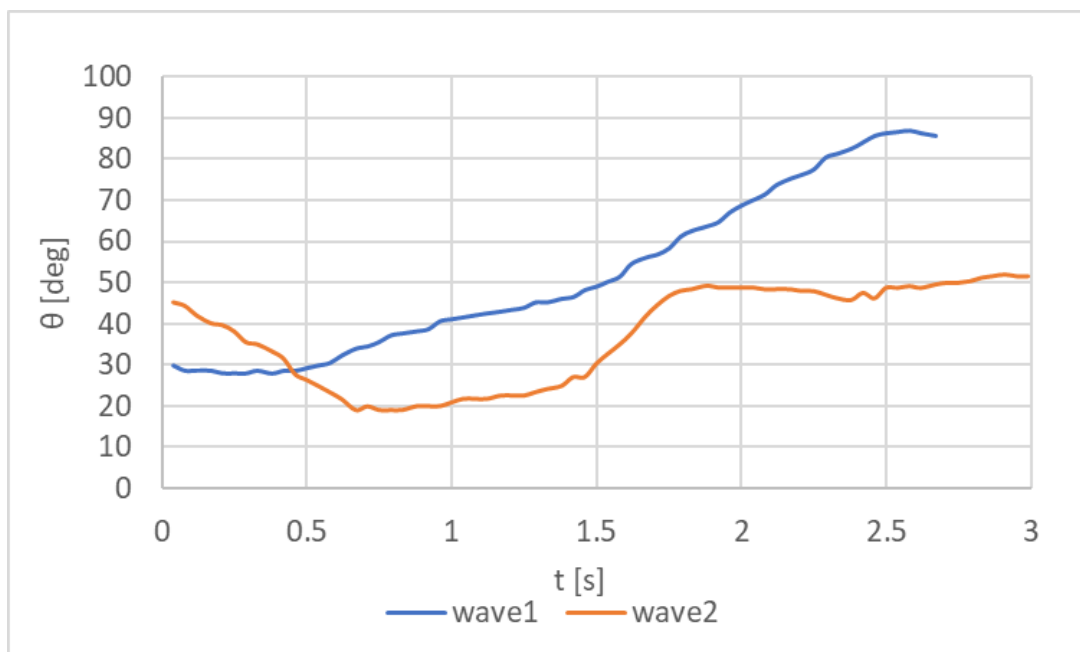


Fig.41 Tilt of buoy

### 4.3.3 湧昇ポンプ接続部と湧昇ポンプ本体の鉛直変位

算出した  $\theta$  を用いて式(11)より、ブイの回転によるブイと湧昇ポンプの接続部の鉛直変位  $h$  を算出した。  $h$  の時間変化を図 42 に示す。

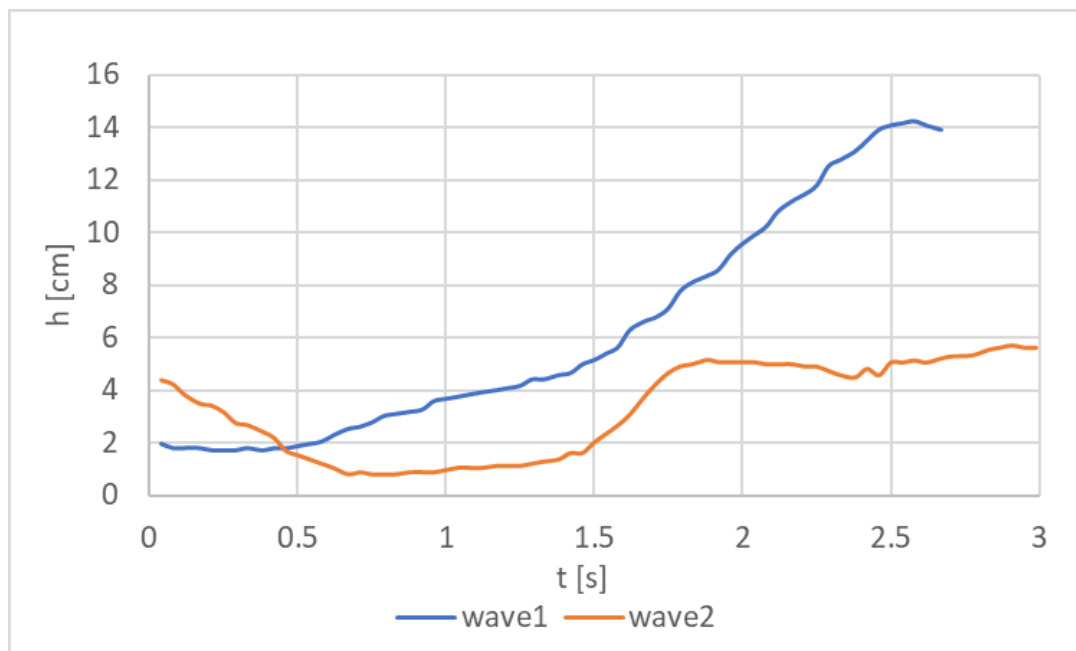


Fig.42 Vertical displacement of connection

ブイの中心座標の鉛直変位  $z$  と、ブイの回転によるブイと湧昇ポンプの接続部の鉛直変位  $h$  を足し合わせることによって、湧昇ポンプ接続部の鉛直変位  $d_1$  を求めた。また、湧昇ポンプ本体の鉛直変位（湧昇ポンプから出ている管の鉛直変位）  $d_2$  も求めた。

ここで、ブイの中心座標の変位を  $d_3$  として、  $d_1$ 、  $d_2$ 、  $d_3$  の時間変化を図 43、 44 に示す。尚、それぞれ時刻 0 での位置を 0 とした。

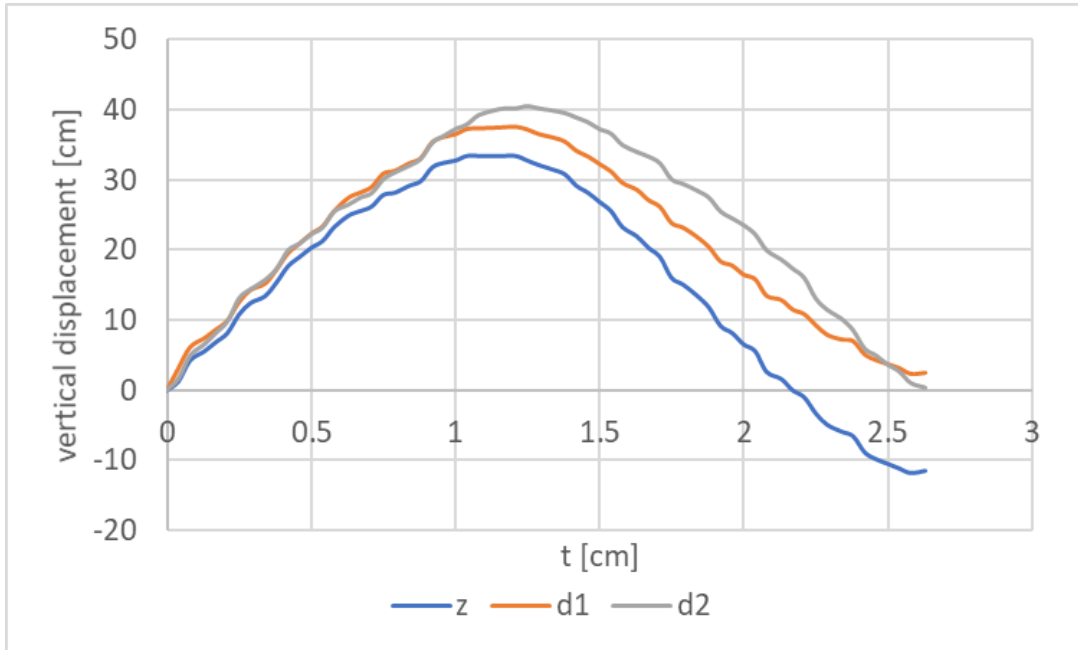


Fig.43 Comparison of displacement (wave1)

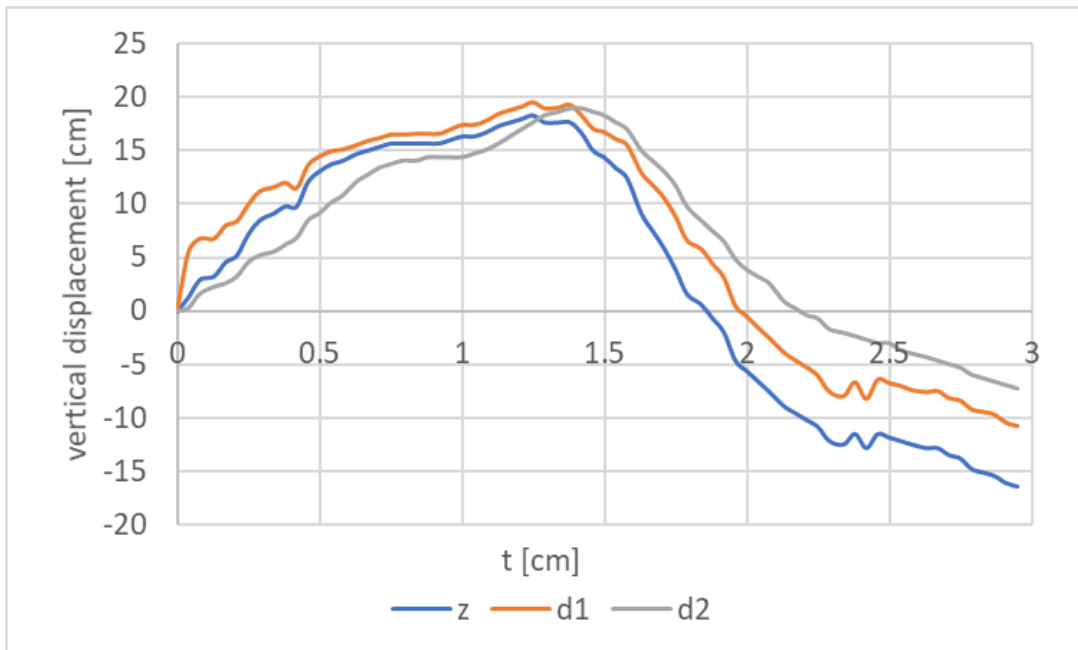


Fig.44 Comparison of displacement (wave2)



#### 4.4 屋外実験による鉛直変位の解析結果についての考察

ブイの中心と湧昇ポンプ接続部の鉛直変位を比較すると、湧昇ポンプ接続部の方が上昇変位は大きくなっているが、下降変位は小さくなっているという事がわかった。これは、ブイの下降中にブイが傾くことで湧昇ポンプ接続部の位置が上昇したためだと考えられる。しかし、これは計算上の値であり、実際にブイが傾いた時湧昇ポンプが引き上げられる様子を本動作解析で正確に確認することはできなかった。この効果は、ブイの上昇中にブイが傾けば湧昇ポンプの上昇変位を増加させることができると考えられるが、ブイの下降中にブイが傾くと湧昇ポンプの下降変位を減少させてしまうと考えられるので、メリットとデメリットを併せ持つ。この効果の有無を確認するためには、水中からの撮影による解析や、実験室内の水槽内にブイと湧昇ポンプの模型を浮かべ観察するという事が必要だと考えられる。

湧昇ポンプ接続部と湧昇ポンプ本体の鉛直変位を比較すると、湧昇ポンプ本体は湧昇ポンプ接続部に比べて遅れて下降していることがわかった。これは、下降する際にブイと湧昇ポンプを接続しているロープがたわむことによるものだと考えられる。

湧昇ポンプ本体の鉛直変位の算出結果の妥当性に関してだが、湧昇ポンプから出ている管は $5^{\circ}$ ～ $15^{\circ}$ 程傾きながら上下に運動していたため、鉛直変位を正確に求める事ができなかった。湧昇ポンプの鉛直変位をより正確に求めるためには水中にカメラを設置し、水中で撮影した映像から動作解析を行う必要があると考えられる。

## 第5章 結言

本研究では、波力駆動式湧昇ポンプの揚水量を定量的に評価する室内実験装置の製作と、海で作動する波力駆動式湧昇ポンプの鉛直変位の測定を行った。波力駆動式湧昇ポンプの揚水量は波高が大きくなるほど増加し、波の周期が小さくなるほど増加する事がわかった。また、海での波力駆動式湧昇ポンプの大まかな鉛直変位は計測できたが、より厳密な測定を行うためには撮影方法の改良が必要である。加えて、海での波力駆動式湧昇ポンプは傾きながら作動するため、そのような動きを再現できる室内実験装置も必要である。

## 謝辞

卒業論文の執筆にあたり、指導教員の田中耕太郎教授から、波力駆動式湧昇ポンプの原理や実験方法について丁寧なご指導をいただきました。また、共同研究先のNPO ESCOT 藤本治生様からたくさんの情報提供や実験協力をしていただきました。ここに心より感謝の意を示します。この卒業研究を通して、沢山の知識、経験を積むことができました。関わってくださった全ての方々に感謝致します。

## 参考文献

- [1]U.S. Environmental Protection Agency, "Sea Surface Temperature", Climate Change Indicators, (2021), <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-sea-surface-temperature>, (参照 2022-1-27)
- [2]大内一之, "密度流拡散装置による海洋深層水の人工湧昇と海域の肥沃化", 日本船舶機関学会誌, Vol.34,No.11,(1999),pp.748-755
- [3]池谷 透, 川延 京子, 高橋 正征, "亜熱帯表層植物プランクトン群集に対する海洋深層水の肥沃化効果", 海洋深層水研究, Vol.4,No.1,(2003),pp.29-37
- [4]Institute of Fluid Science, TOHOKU University "LAPUTA project"
- [5]Wei Fan, Jiawang Chen, Yiwen Pan, Haocai Huang, Chen-Tung Arthur Chen, Ying Chen, "Experimental study on the performance of an air-lift pump for artificial upwelling", Ocean Engineering,Vol.59,(2013),pp.47-57
- [6]Yongfa Qianga, Wei Fan, Canbo Xiao, Yiwen Pan, Ying Chen, "Effects of operating parameters and injection method on the performance of an artificial upwelling by using airlift pump", Applied Ocean Research,Vol.78,(2018),pp.212-222
- [7]永松 哲郎, 中村 啓彦, 野元 達美, 中尾 智, "海底構造物によって誘起される人工湧昇流の可視化実験", 鹿兒島大學水産學部紀要, Vol.60,(2011),pp.25-32
- [8]海洋政策研究所, "読者からの投稿 海と CO2 対策", 笹川平和財団, 2006, [https://www.spf.org/opri/newsletter/151\\_3.html](https://www.spf.org/opri/newsletter/151_3.html), (参照 2022-1-17)
- [9]Brian Kirke, "Enhancing fish stocks with wave-powered artificial upwelling", Ocean & Coastal Management,Vol.46, (2003),pp. 901-915.