

令和4年度（2022年度）

芝浦工業大学 工学部 機械学群
機械機能工学科

卒業論文

波動式湧昇ポンプの性能解析シミュレーションと実験による評価

Performance Analysis Simulation and Experimental Evaluation of Wave Type
Upwelling Pump

学籍番号 AB19037

氏名 小島 希

指導教員 田中 耕太郎 教授

目次

概要	3
第 1 章 緒論	3
1.1 研究背景	3
1.2 研究目的	4
第 2 章 原理	5
2.1 人工湧昇について	5
2.1.1 永久塩泉方式	5
2.1.2 エアリフトポンプ方式	7
2.1.3 人工構造物による湧昇	8
2.2 波動式湧昇ポンプの構成	8
2.3 波動式湧昇ポンプの原理	9
2.4 湧昇水量の計算	10
2.4.1 理想的な湧昇水量の計算	10
2.4.2 重力による損失を考慮した湧昇水量の計算	11
第 3 章 人工湧昇ポンプの数値解析に関する研究	12
第 4 章 実験内容	14
4.1 実験方法	32
4.2 実験結果	33
4.3 考察	33
第 5 章 解析	34
5.1 海洋でのポンプの運動	34
5.2 室内での実験	34
5.3 湧昇装置の解析	40
5.4 考察	43
第 6 章 結論	44
謝辞	45
参考文献	45

概要

第 1 章 緒論

1.1 研究背景

世界の漁場は、海洋の総面積の約 0.1%の海域に集中しており、そこでの漁獲高は50%を占めると言われている。その約 0.1%に相当する海域は、ペルー沖、カリフォルニア沖、南西アフリカ沖などが有名であり、湧昇流といわれる自然現象が起こる海域である⁽¹⁾。

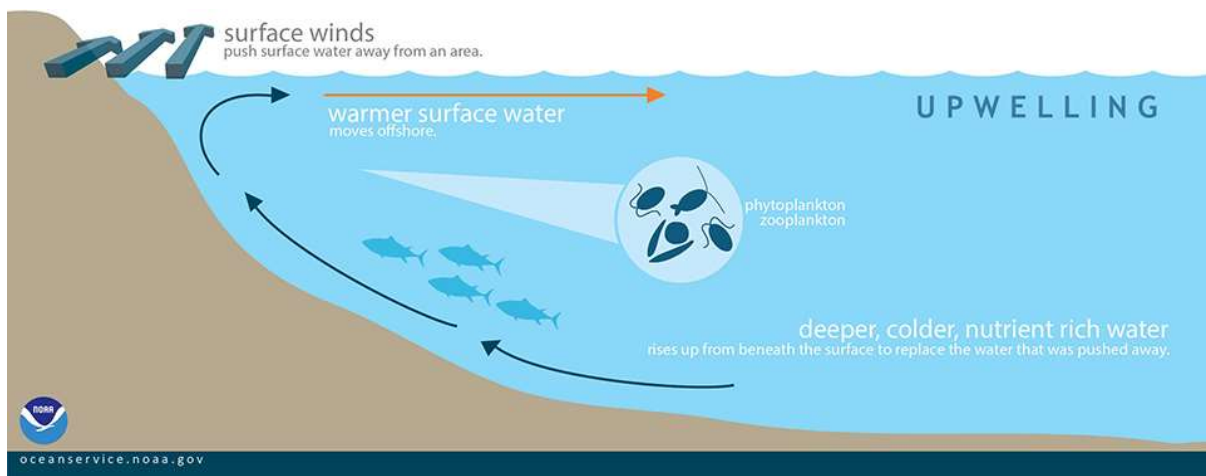


Fig. 1 Schematic diagram of upwelling flow⁽²⁾

湧昇とは、深く冷たい深層水が表面に向かって上昇する過程である。ここでいう海洋深層水とは、太陽光が到達しない水深 200m より深い深度の海水である。つまり、海面を横切って吹く季節風や貿易風などの風が、水を押しのけ、その後水面下から水が上昇し、押しのけられた水を置き換える。風のほかにも地形変化や潮流などが原因になることがある。

海面水よりも冷たく、栄養素が豊富である深層水が、光の届く表層に大量に上昇することで、光合成により食物連鎖の源になる植物プランクトンの盛んな生産が行われ、それに続き動物プランクトン、魚類など二次生産が行われる。したがって、良好な漁場を形成する。

近年、この湧昇流を人工的に発生させ、新たな好漁港を形成させる取り組みが行われている。日本で初めて取り組まれた実験は、1989年に富山湾で行われた「豊洋」と呼ばれる海洋深層水の温度差発電によるものである⁽²⁾。その後、2000年より相模湾で「拓海」と呼ばれる装置が設置され、約5年間稼働した⁽³⁾。これらの取り組みから日本でも様々な方式のポンプが利用されている。

1.2 研究目的

本研究では、様々な方式の中から、小型の波力駆動式湧昇ポンプによる人工湧昇について扱う。この方式は電力を必要とせず、自然エネルギーである波力エネルギーのみを用いて人工湧昇を行うことが可能である。また、小型である点から容易に、かつ、湧昇量は少ないものの様々な場所に多くの装置を設置することも可能である。

一方、海の上に浮かんでいる状態で深層水が海面にどのくらい湧昇しているかは、測定が困難であるため、正確な湧昇量が不明である。そこで、実際に海で使用されているポンプと機能が同等のポンプを用いて室内実験を行い、湧昇量を測定する。またそこから、ポンプや弁、ポンプを浮かべるブイの形状を変化させたときの性能評価を行い、小型の波力駆動式湧昇ポンプとして最適なポンプを考察することを**本研究の研究目的とした**。

第2章 原理

2.1 人工湧昇について

自然に起こる湧昇流を再現する人工湧昇には、様々な方法がある。その中でも、海洋の塩分濃度の違いを利用する永久塩泉方式、人工構造物による湧昇、空気を圧縮してパイプに注入し湧昇させるエアリフトポンプ、太陽光や風力発電による電力を使用する分散型電源方式などが多く用いられている⁽⁴⁾。以下で、永久塩泉方式、人工構造物による湧昇、エアリフトポンプについて説明する。

2.1.1 永久塩泉方式

まず、永久塩泉方式について説明する。ストーンメルら⁽⁵⁾は、1956年に管外の暖かい海水から熱を受けて管内の低塩分の海洋深層水を温め、その浮力によって海洋深層水

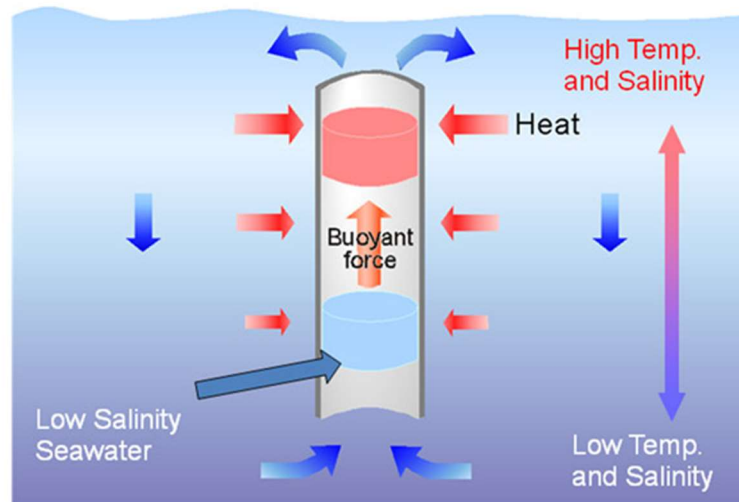


Fig. 1 Principle of permanent salt spring method

を汲み上げるという、永久塩泉の原理を提案した。これを利用することにより、海洋の温度差と塩分差のみで海洋深層水を汲み上げることが可能である。つまり、管内を低温度かつ低塩分の海洋深層水で満たしておくことで、管の外側の高温度の海水から温められることにより管の内側の海水の温度が高くなり、そこで生じた浮力によって管内の低塩分の海水が上昇するということである。その後、再び管の下部から低温度かつ低塩分の海洋深層水が流入し先ほどと同様のことが起こる。これは、海洋の深さに対する温度分布と塩分濃度分布が維持される限り、永久に続く。

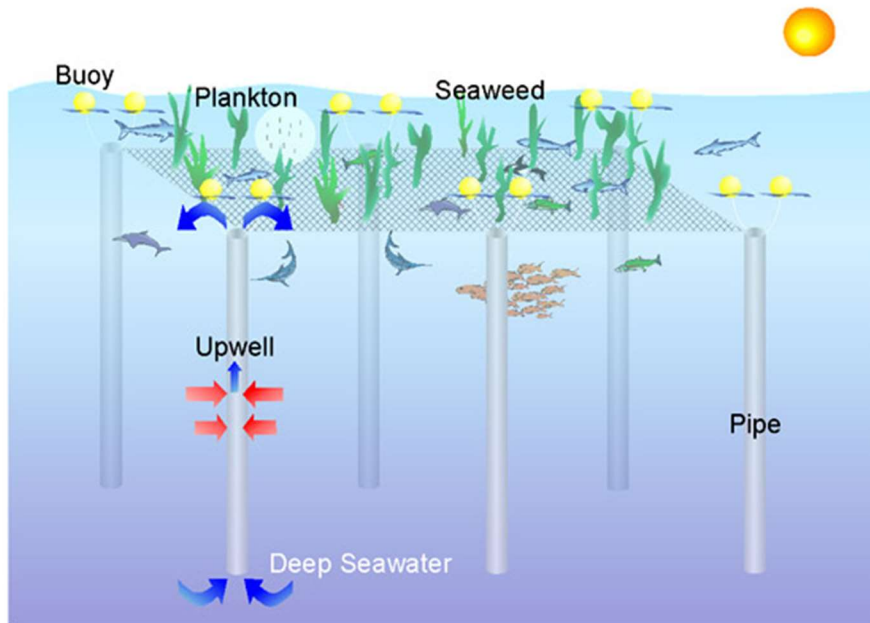


Fig. 2 Laputa plan

この方式を利用したプロジェクトに「ラピュタプロジェクト」と呼ばれるものがある。2004年に丸山らによって、永久塩泉の原理に基づいて植物プランクトンを栽培することを提案された。沖ノ鳥島などがある海域は、表層の栄養塩が極端に少なく海洋の生物生産性が低いので海洋砂漠と呼ばれている。一方、海洋深層水の栄養塩濃度が高く、表層のクロロフィル濃度が低いことから、ラピュタプロジェクト実施の好適地である。栄養塩の豊富な海洋深層水を太陽光が届く表層に大規模に汲み上げることができれば、海洋砂漠に図3のような生物生産性の高い畑が構築されることになる。

このように、永久塩泉は海洋深層水を汲み上げる有効なメカニズムと考えられている。海洋の温度差と塩分濃度のみで深層水を汲み上げることが可能であるため、他のエネルギーを使用することがなく、かつ非常に単純な構造で人工湧昇が実現可能である。

2.1.2 エアリフトポンプ方式

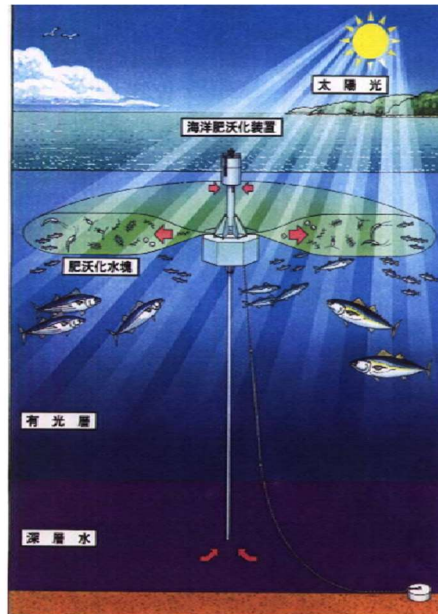


Fig. 4 Conceptual diagram of "Takumi"

次にエアリフトポンプ方式について説明する。エアリフトポンプは人工湧昇で利用される前から知られており、炭化水素、汚れた水、危険な液体をポンプで送り、固体材料を輸送するために使用されている。そのポンプを海洋で利用することで、人工湧昇を起こすことが可能となり、最も古くから利用されている方式である。空気は圧縮され、水を輸送するパイプの下部に注入される。その結果、気泡が上昇し空気と水の混合物の密度が低下するため、パイプ内の水位が上昇する。水位がパイプの上部に達し水が流出すると、水は下端から連続的に流れる。これにより、海域で湧昇が起こる。

図4に示すように、第1章で述べた相模湾で稼働した「拓海」もエアリフトポンプ方式も用いている。「拓海」の装置は浮体および深層水取水管(ライザー管)で構成される。浮体は、装置の上下に設置されており、その間は細い円柱(コラム)で接続されている。コラムの基部に深層水と表層水を同時に引き込み、混同したうえで放水する揚水ポンプを配置しており、混合した海水を装置の周囲に放水する。

以上のように、エアリフトポンプには動力源が必要となる。人工湧昇で利用する際の簡易な給電方法として、海水中に全体が沈んでいる垂直パイプを通して海洋深層水を湧昇させる装置としてのエアリフトポンプの性能が良いとされている。構造がシンプルで特にメンテナンスなども不要である点では優れているが、長いパイプが海中でねじれてしまう点や電源を確保する必要があるという点で課題が残っている方式である。

2.1.3 人工構造物による湧昇

最後に人工構造物による湧昇について説明する。これは、海底に築堤や衝立のような人工構造物を設置することにより、海流が構造物によって上昇流を引き起こし、海洋深層水が湧昇するという方式である。日本では、愛媛県宇和島沖、長崎兼五島沖、鹿児島県阿久根沖などに設置されている。

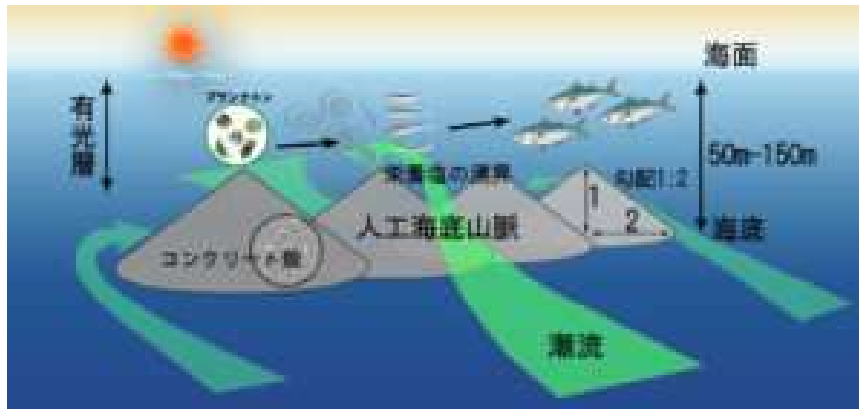


Fig. 5 Schematic diagram of an upwelling flow caused by an artificial structure⁽⁸⁾

以前に説明したエアリフトポンプに比べて、湧昇流量が非常に大きく、日量3千万トンから8億トンと推定されている。また、エアリフトポンプは揚水ポンプを稼働するため多大な動力を必要とするのに対し、人工構造物による方式では一度海底に構造物を設置してしまえば動力もメンテナンスも不要であるという点で優れていると言える。他にも、海底に人工構造物を設置することにより、構造物自体が海洋生物の生息域となり人工漁礁の役割も果たす。それは、栄養分が豊富な深層水が光を浴びることにより、プランクトンが繁殖しやすい環境となりその影響から、小型魚類が増え魚類が隠れる場ともなり得るからである。

2.2 波動式湧昇ポンプの構成

2.1 で人工湧昇に利用されている方式の中の3つを説明したが、本研究では波動式湧昇ポンプに着目している。波動式湧昇ポンプは、電力を使わず、波の力をそのままエネルギーとしてポンプに活用できるという点で優れている。一方で、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ことが難しいという課題もある。その中で、漁港にどのくらいの影響力があるのか、千葉県御宿町岩和田漁港では実証実験が行われている。図6はその様子である。岸壁で実験を行っているが、現在は沖でも実験が行われている。

波動式湧昇ポンプは、海で図 7 の構成で設置されている。海面にブイを浮かせ、その下部にポンプとなるパイプをロープで吊り下げ、パイプの上部分には逆止弁を取り付ける。海面に浮いたブイが波によって動くことでパイプも動き、下方の水を湧昇する仕組みである。詳しい作動原理は 2.3 で示す。



Fig.6 Installed in the sea

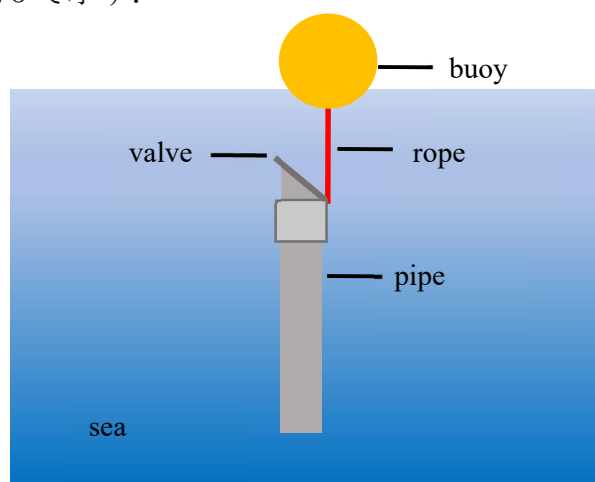


Fig.7 Configuration of wave upwelling pump

2.3 波動式湧昇ポンプの原理

湧昇は、パイプが波によるブイの動きを受けて上下運動を行うことで起こる。その際に岸壁や海岸近く、沖合で波は様々な動きをされると考えられるが正弦波であると仮定する。

波の動きとパイプについている弁の動きの関係を図 8 に示す。パイプが波の振幅の一番下から上向きに上昇するとき、パイプに付いている弁は上部からの水圧により閉じている。一方、パイプ内の水の流れはパイプ外と等しい速さで上昇する。その後、パイプが波の振幅の最大付近になるに連れて、パイプ外の流れの速さは小さくなりパイプ内の速さは先ほどのままであるので、パイプ内からの水圧が上部からの水圧より大きくなり弁が開く。ここで下部の水が海の表層へと湧昇される。波の高さが小さくなると上部からかかっていた水圧は弁の下部からかかるため、弁は開いたままであり、波が振幅の一番下になる頃に弁は閉じている。この際、弁はパイプの面積よりも大きいためパイプ外の水の圧力を下から受けることは考えられる。このような波の動きと共に湧昇ポンプを用いて、波力のみで湧昇が行われている。

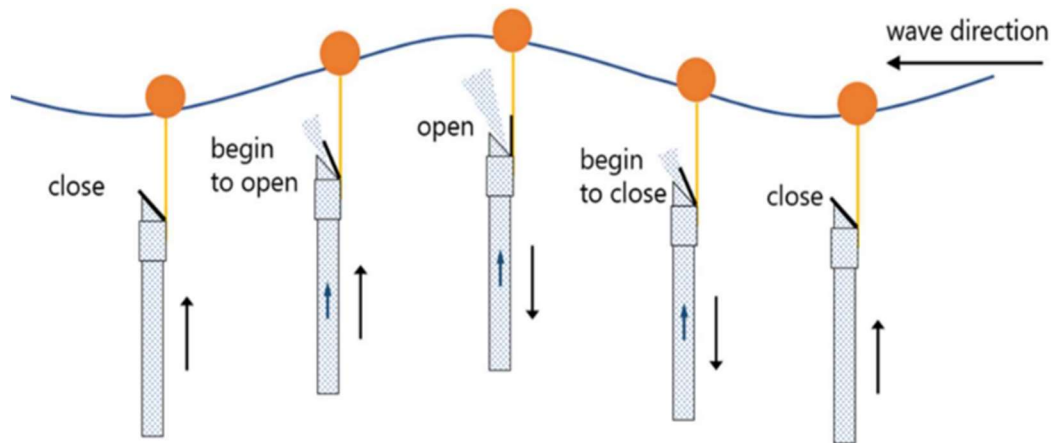


Fig.8 Working principle

2.4 湧昇水量の計算

このような動きをするポンプであるが、このポンプによる湧昇量は単にポンプの上下運動によって決定されず、パイプ内で上向きの加速度をもった海水が、弁が閉じるまでにパイプ外に出た水量を計算しなくてはならない。以下に湧昇水量の計算方法を示す。

2.4.1 理想的な湧昇水量の計算

Brian 氏によれば、湧昇ポンプの上下運動を単振動と仮定すると湧昇ポンプの最大上昇速度 V_{max} [m/s] は、波高 H [m]、波の周期 T [s] を用いて式(2.1)のようになる。

$$V_{max} = r\omega = \frac{H}{2} \times \frac{2\pi}{T} = \frac{\pi H}{T} \quad (2.1)$$

湧昇ポンプが上昇し逆止弁が閉じている場合、管内の海水は湧昇ポンプとともに上昇することから、湧昇ポンプの上昇速度 V_{max} とポンプ内の海水の上昇速度 U_{max} [m/s] は等しくなり、式(2.2)の関係が成り立つ。

$$U_{max} = V_{max} = \frac{\pi H}{T} \quad (2.2)$$

管内の流量 Q_{max} [m³/s] は、管の断面積 A [m²] と流速 U_{max} [m/s] を用いて式(2.3)のように表せる。

$$Q_{max} = AU_{max} \quad (2.3)$$

以上から、波動式湧昇ポンプによる理想的な湧昇水量 $Q[\text{m}^3/\text{s}]$ は、式(2.4)で与えられる。

$$Q = \frac{\pi AH}{T} \quad (2.4)$$

2.4.2 重力による損失を考慮した湧昇水量の計算

Brian 氏によって、重力による影響を受けた際の管内の海水の上昇速度 $U[\text{m/s}]$ は、海洋深層水と表層水の密度差 $\Delta\rho[\text{m}^3/\text{kg}]$ 、表層水の密度 $\rho[\text{m}^3/\text{kg}]$ 、重力加速度 $g[\text{m/s}^2]$ 、周期 $T[\text{s}]$ を用いて式(2.5)のように変化すると考えられている。

$$U = V_{max} - \frac{\Delta\rho}{\rho} gT = \frac{\pi H}{T} - \frac{\Delta\rho}{\rho} gT \quad (2.5)$$

これにより、重力の影響を受けた際の波動式湧昇ポンプによる海洋深層水の湧昇水量は式(2.6)で表すことができる。

$$Q' = AU = A \times \left(\frac{\pi H}{T} - \frac{\Delta\rho}{\rho} \right) gT \quad (2.6)$$

以上のような計算方法によって、湧昇水量の理論値を算出することが可能である。

第3章 人工湧昇ポンプの数値解析に関する研究

多くの研究では、規則正しい波による波浪駆動型の人工湧昇のみが検討されている。しかし、実際の波は非常に複雑であり、多くの規則正しい波の集合体として見る事ができる。つまり、波浪駆動型人工湧昇装置の性能をより正確に解析するためには、入射波の不規則性を考慮する必要がある、と Clark らは述べている。この際の波力発電人工湧昇装置は、図9に示すようにブイと流量調整弁付きパイプから構成されている。海面が上昇するときは弁が閉じており、このとき装置とパイプ内の水柱は上方に加速される。海面が下降するとき、装置には水柱よりも大きな力を持っていて弁が開く。それに伴い、長いパイプの先端から海洋深層水が装置外に流出する。

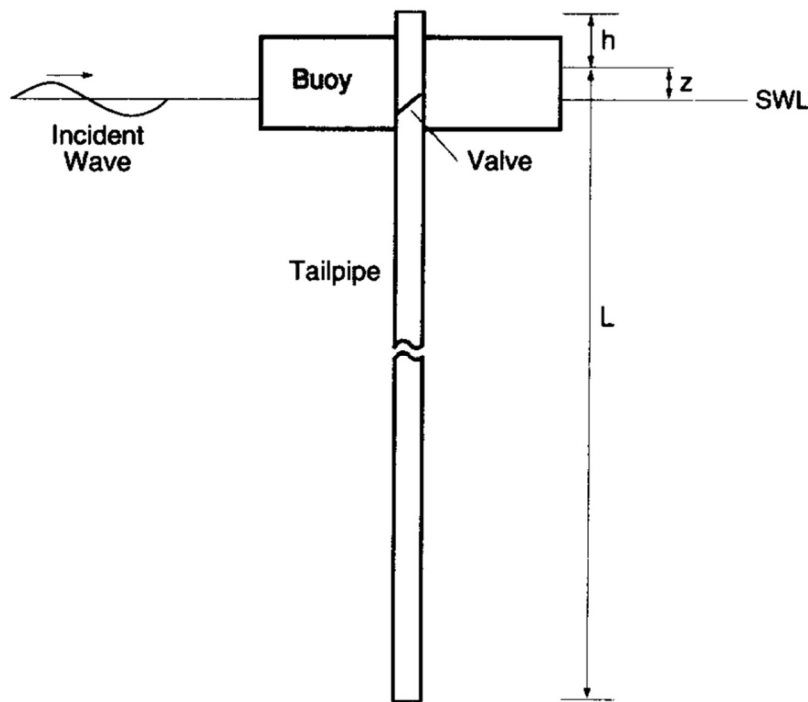


Fig.9 Wave power artificial upwelling device

この実験装置は、波力エネルギーが豊富で持続的であり波力による人工湧昇に適したハワイ諸島沖で利用されている。Clark らの研究では、ハワイの不規則波を表現する時系列を開発し、規則的な入射波と不規則な入射波の両方に対して装置の性能に関する2つの別々の解析を実施している。使用する通常の波は、ハワイの不規則な波の有義波高と有義波周期に等しい波高と波周期を適用する。有義波とは、熟練した観測者が目視で観測する波高や周期に近い値と言われており、詳細には、ある地点で連続する波を1つずつ観測した際に波高の高い順から1/3の個数の波を平均した波のことである。これは、実際の海面には非常に高い波が存在することや、海岸や浅瀬、岸壁の付近では波が大きく異なることから、複雑な波をわかりやすく表すために統計量を用いている。気象庁が天気予報や波浪図などでも用いられている。

図○に示すような装置が波浪により隆起すると、装置内部の水は慣性力により上方に移動し続け、海洋深層水を浮上させる。この現象は、装置と装置内の水の相対的な動きを表す方程式でシミュレートすることが可能である。これは、流量制御弁が開いているか閉じているかによって適用できる。

弁が閉じているとき、パイプ内の水柱は装置とともに移動する。この状態で、水柱の装置に対する相対速度 U [m/s] は式(3.)で示す。

$$U = 0 \quad (3.1)$$

このときの装置の運動方程式は、静水線上のブイのヒープの変位 z [m]、浮体装置の質量 m [kg]、パイプ内の水の質量 m_w [kg]、浮体装置の追加質量 m_a [kg]、浮遊系の質量減衰係数 b [kg/s]、水中での装置の動きによる粘性係数 β [Pa·s]、水の密度 ρ [kg/m³]、重力加速度 g [m/s²]、ブイの断面積 S_w [m²]、鉛直方向の波の励振力を用いて式(3.)のような形式になる。

$$(m + m_w)\ddot{z} = -m_a\ddot{z} - b\dot{z} - \beta|\dot{z}|\dot{z} - \rho g S_w z + F_e \quad (3.2)$$

次に、バルブが開いているとき、装置に対するパイプ内の水柱の相対的な加速度は、静水面上下のパイプの長さのそれぞれ L [m]、 h [m]を用いて、式(3.)で示すことができる。

$$\dot{U} + \ddot{z} + \frac{z+h}{L+h}g = 0 \quad (3.3)$$

この装置の運動方程式は以下のようなになる。

$$m_1\ddot{z} = -m_a\ddot{z} - b\dot{z} - \beta|\dot{z}|\dot{z} - \beta'U^2 - \rho g S_w z + F_e \quad (3.4)$$

式(3.2)と(3.4)では浮体の質量のみを考慮しているという点でのみ違いが生じている。どちらの方程式にも考慮されている鉛直方向の波の励振力は式(3.5)のように表すことが可能である。

$$F_e = C\rho g S_w A \sin(\omega t) \quad (3.5)$$

以上のような方程式を解くことで波動式湧昇ポンプの動きをグラフに表すことが可能になり、比較しやすくなる。

第4章 実験内容

4.1 実験装置および方法

室内実験の装置図を図10に示す。

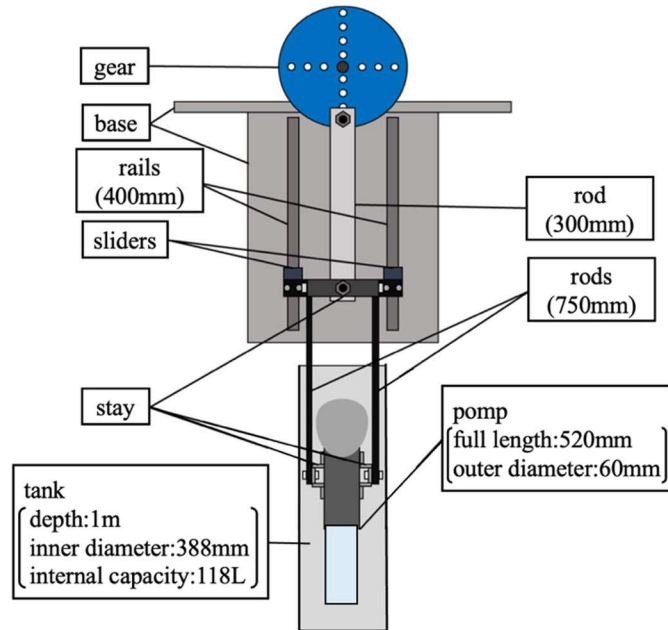


Fig. 10 Experimental equipment diagram



Fig. 11 Experimental device

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。

モータはオリエンタルモーター社製の SCM590JA、スペックは単相 100V の出力 90W である。ギアヘッドはオリエンタルモーター社製の 5GVR30B、平行軸付き GV ギアに減速比が 30 の組み合わせである。この場合モータの許容トルクは 1200rpm のときに 18.8Nm であり、軸先の許容ラジアル荷重は 700N である。

図 12 に示すのは現在使用しているポンプの弁構造である。これは NPO 法人エスコットにて製作されたもので、逆止弁と塩ビ管を蝶番で留めてある。また、塩ビ管は 45° の角度でカットされている。実際に使用するものには蓋が閉まることを助長するために、蝶番付近にシリコンゴムを接着してある。接着にはシリコンゴム用両面シートを使用した。

弁の角度は既存の 45° に加えて 0°、15°、30°、60° を用意した。また、蓋の形状は「ぴったり」(図上では「Just」)、「丸」(図上では「Circle」)、「角」(図上では「Corner」)を用意した。

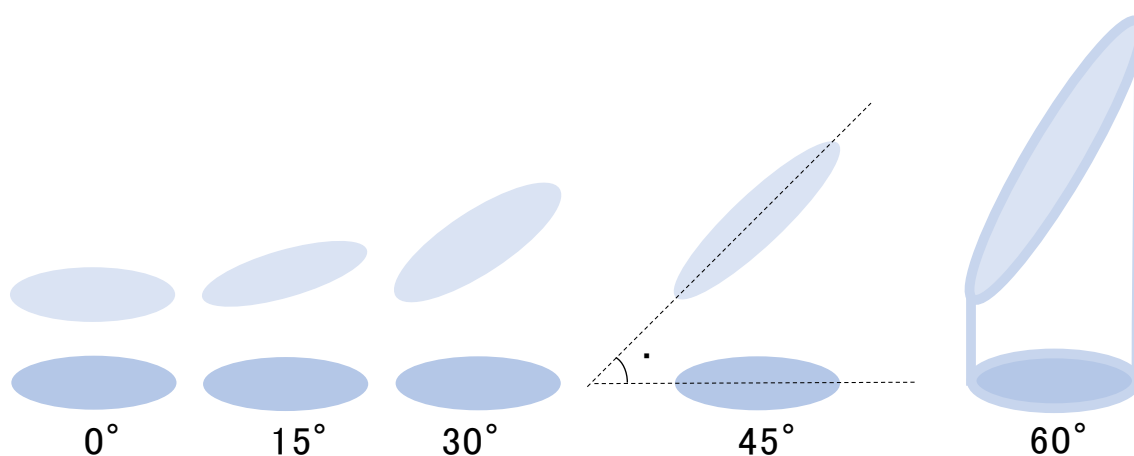


Fig. 12 Diagram of difference in valve structure



Fig. 13 Difference in valve structure

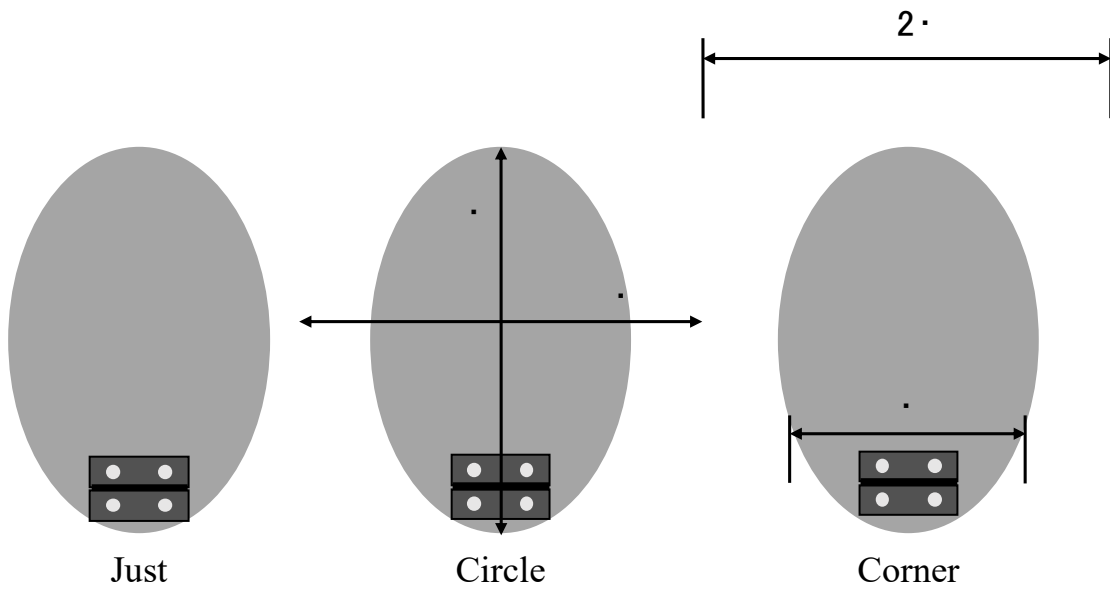


Fig. 14 Lid Shape Diagram



Fig. 15 Lid shape

ポンプはアルミ棒と留め具によって支えている。留め具には、クランク形状のジョイント金具を2つ組み合わせボルトで固定することで、 Ω 上にして使用した。

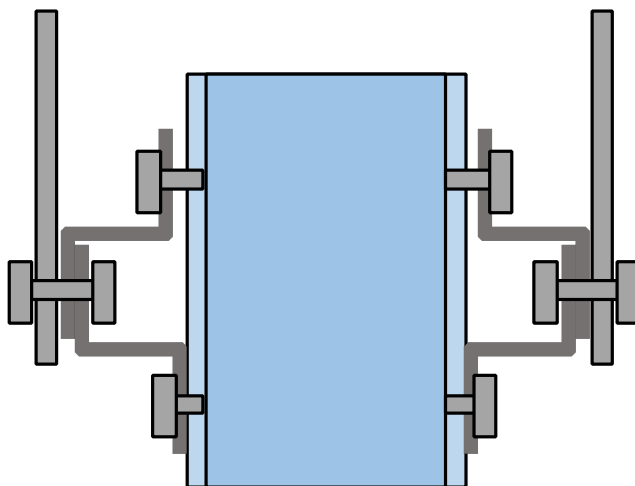


Fig. 16 How to fix the pump and aluminum rod

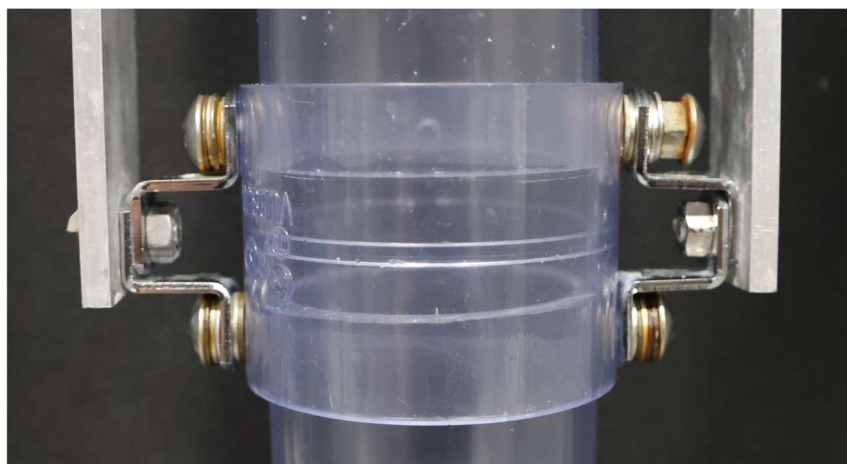


Fig. 17 Fixing method of pump and aluminum rod

次に実験方法を記す。

- ① カメラを三脚で固定し、ポンプの軌道全体がフレームに収まるよう設置する。カメラはハイフレームレート（119.88fps）に設定した。
- ② 照明を点灯させた。
- ③ 弁の角度 0° に「ぴったり」の蓋を装着した。
- ④ 弁部品をジョイントに装着する。撮影方向に対して 135° の位置に出口が向くようにつけた。ジョイントに差し込み、若干の固定ができれば動作に支障はない。
- ⑤ ポンプ内にトレーサー粒子が流れ込むように水槽内をかき混ぜた。ギアの回転数を 40rpm 以上の速さで 1 分程度動かした。または長尺状の物体で直接攪拌した。

- ⑥ ギアの回転数を 30rpm に設定した.
- ⑦ カメラの録画を開始した.
- ⑧ 1分程度撮影を行い，録画を終了した.
- ⑨ ギアのスイッチを切り，弁を取り外した.
- ⑩ ③～⑨について，「丸」，「角」でそれぞれ測定を行った.
- ⑪ ③～⑩について，15°，30°，45°，60°でそれぞれ測定を行った.
- ⑫ 動作解析ソフト Kinovea を用いて，撮影動画のトレーサー粒子の追従を行った.

波動式湧昇ポンプをモータに繋ぎ，上下動を強制させることで水槽内の水を湧昇させた．使用したモータは，回転数と上下運動幅の変更が可能である．装置については昨年度行われていたものと大きな変化はない．しかし，測定方法を昨年ものから大幅に変更した．昨年の実験では，揚水量の測定の際に水漏れが起こっていた可能性があるためだ．

動画解析には，Kinovea という解析ソフトを用いた．このソフトは 1/30 秒の測定間隔で動画内の対象となる物体を追跡し，変位を求めることができる．撮影の前に水槽内をよくかき混ぜることで，水中の物体が全体的に散らばった状態を作った．撮影時は測定対象を見やすくするため，背面に黒色の幕を設置し，上部から水槽内をライトで照らした．撮影にはハイフレームレートというモードを用いた．これにより，撮影動画がスローモーション動画として取り込まれるため動画解析において追跡しやすくした．なお，スローモーションの動画は元動画に対して 4 倍の長さに引き伸ばすことができる．

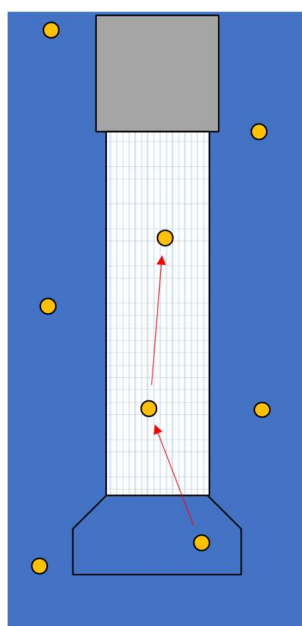


Fig. 18 Tracking diagram

トレーサー粒子については、密度より PA12 の試料片(比重 1.02~1.04)を選定した。さらにカメラ観察のしやすさより、形状は約 3 mm の立方体を使用することにした。水槽内の水には食塩を混ぜ合わせ食塩水とし、海水と同程度の塩分濃度とした。水槽内に試料片を入れたところ、ポンプ筒内を浮遊して移動することが確認できた。また、個体ごとの区別が付きやすくなるよう一部に青、赤、黄の色を塗った。

4.2 測定結果

トレーサーの追従は図 19 のようになった。



Fig. 19 Line that followed the tracer

各条件下における 1 周期の揚水量を表 1 に示す

Table 1 Flow rate

$\times 10^{-4}[\text{m}^3/\text{cycle}]$	0°	15°	30°	45°	60°
Just	6.168428	5.687144	5.259536	6.392971	6.563676
Circle	6.093813	5.894992	5.575419	6.229682	6.746909
Corner	6.099787	5.840552	5.855470	5.835044	6.367565

この結果から角度ごとの揚水量を比較したグラフを図 20 に示す。

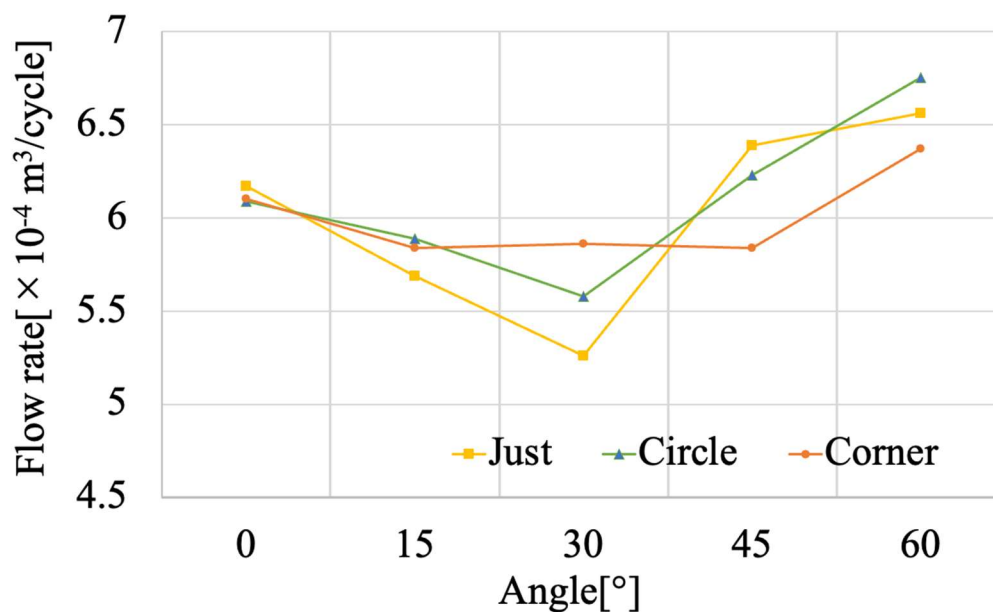


Fig. 20 Comparison of pumping capacity with respect to angles

また、蓋の形状ごとの揚水量を比較したグラフを図 21 に示す。

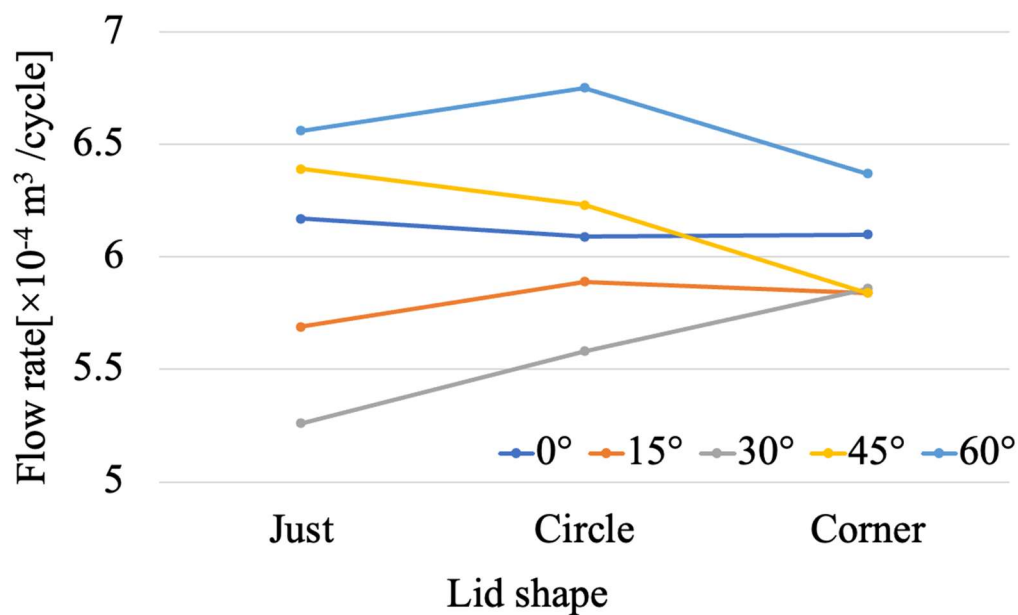


Fig. 21 Comparison of pumping capacity with respect to the lid shape

以下に、角度 0°、「ぴったり」の時の速度グラフを示す。

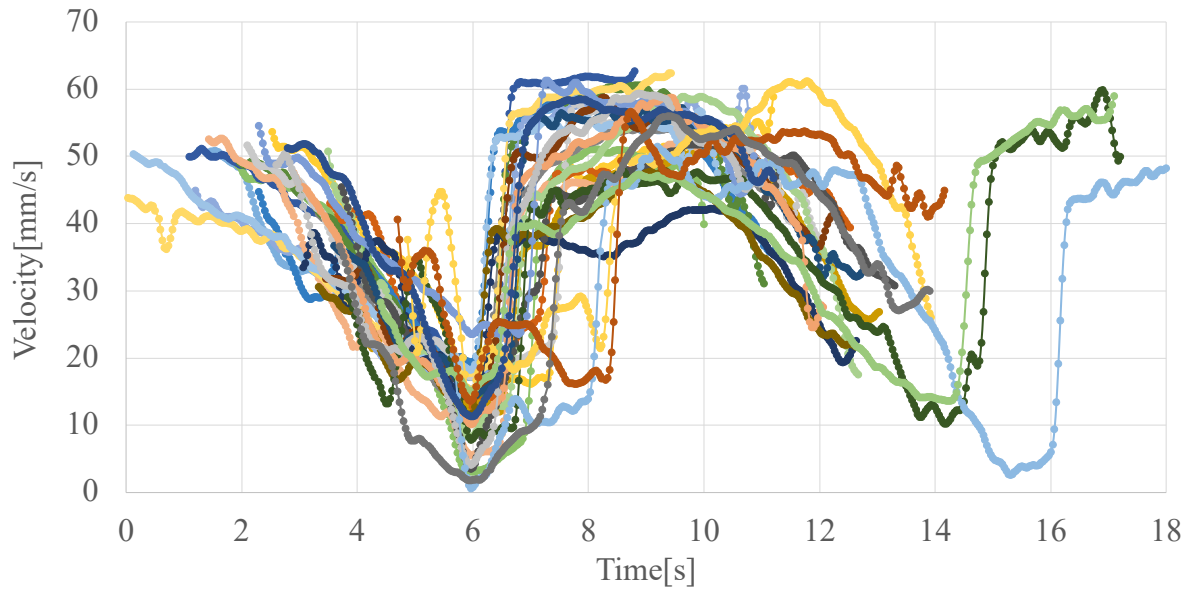


Fig. 22 Tracer speed (lid shape : Just, angle : 0°)

角度 15°, 「ぴったり」の時の速度グラフを示す.

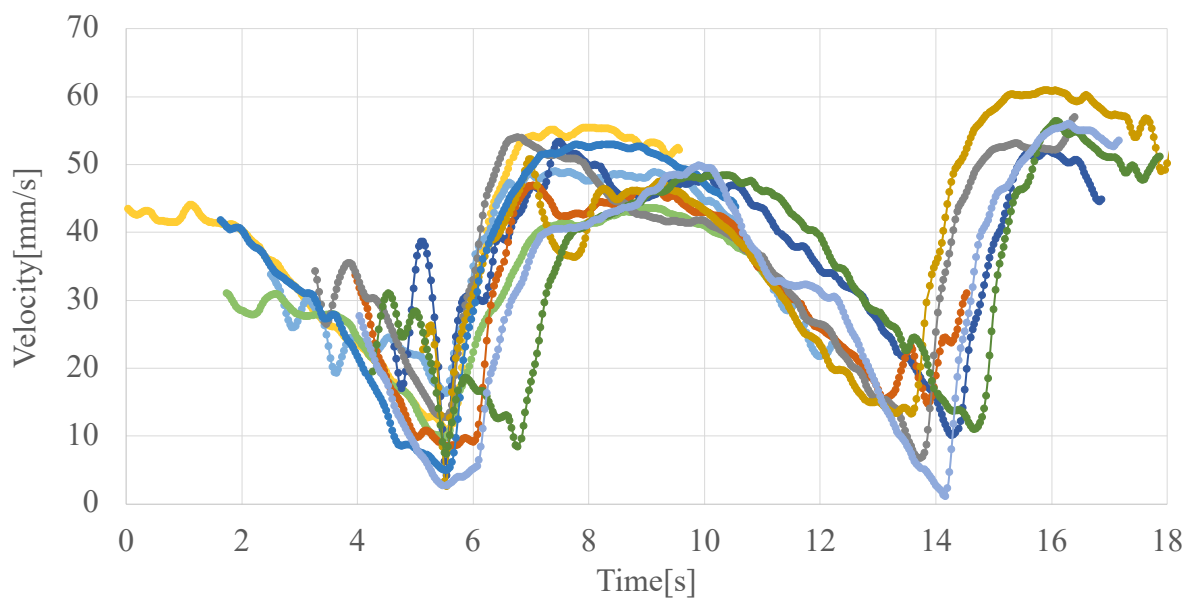


Fig. 23 Tracer speed (lid shape : Just, angle : 15°)

角度 30°, 「ぴったり」の時の速度グラフを示す.

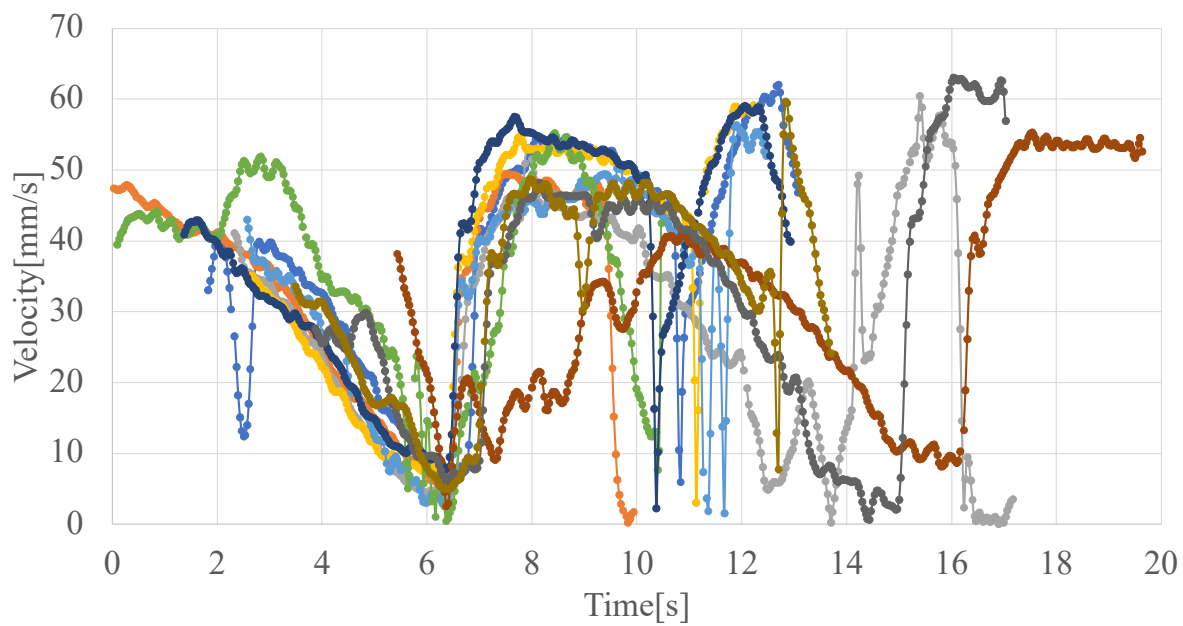


Fig. 24 Tracer speed (lid shape : Just, angle : 30°)

角度 45°, 「ぴったり」の時の速度グラフを示す.

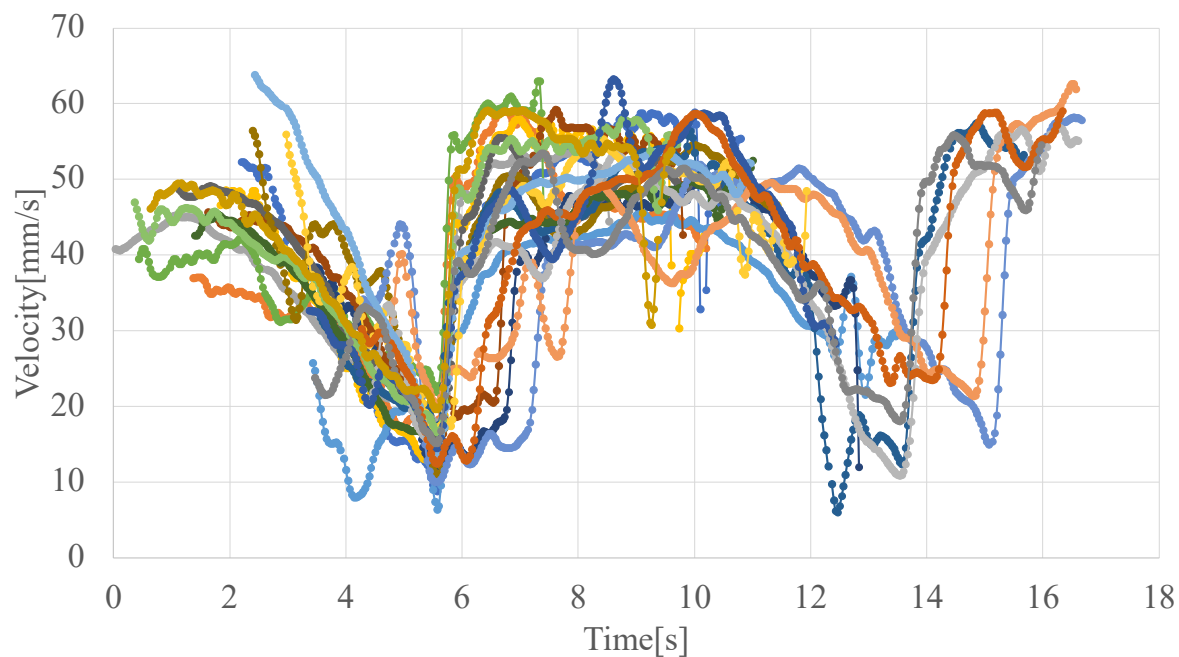


Fig. 25 Tracer speed (lid shape : Just, angle : 45°)

角度 60°, 「ぴったり」の時の速度グラフを示す.

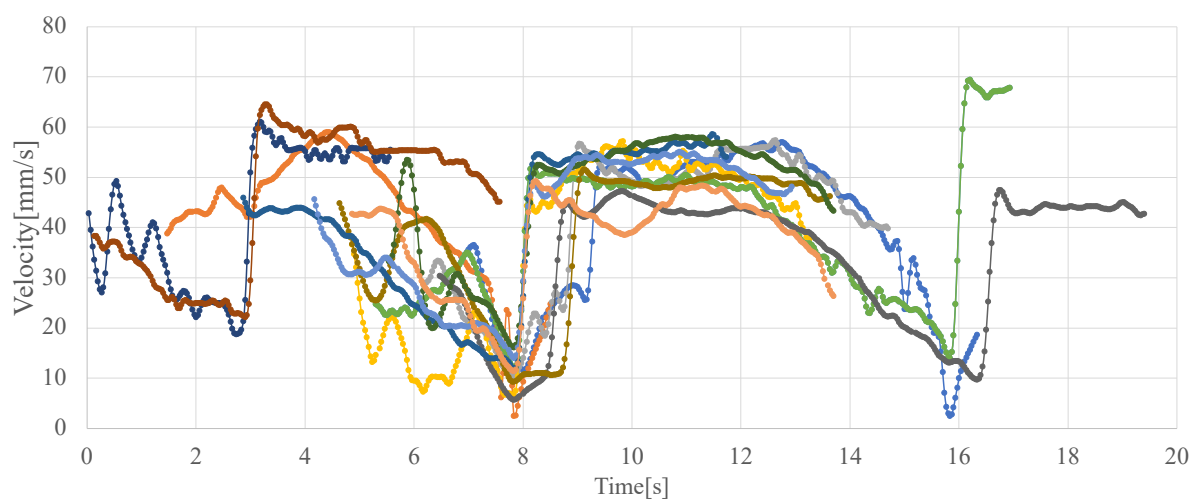


Fig. 26 Tracer speed (lid shape : Just, angle : 60°)

角度 0°, 「丸」 の時の速度グラフを示す.

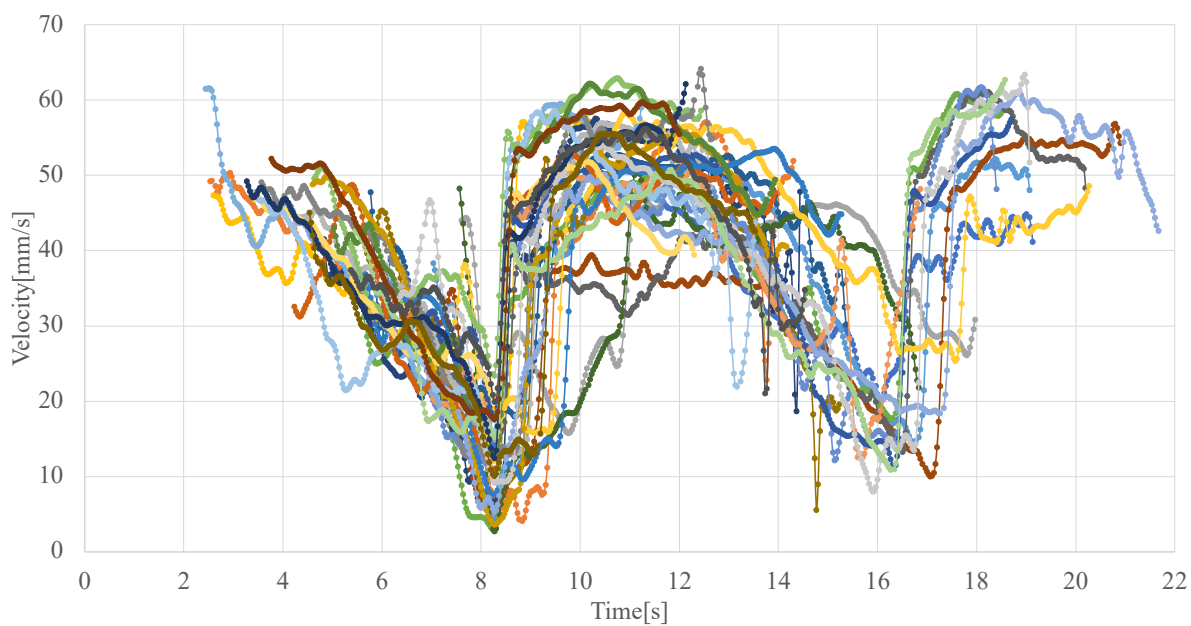


Fig. 27 Tracer speed (lid shape : Circle, angle : 0°)

角度 15°, 「丸」 の時の速度グラフを示す.

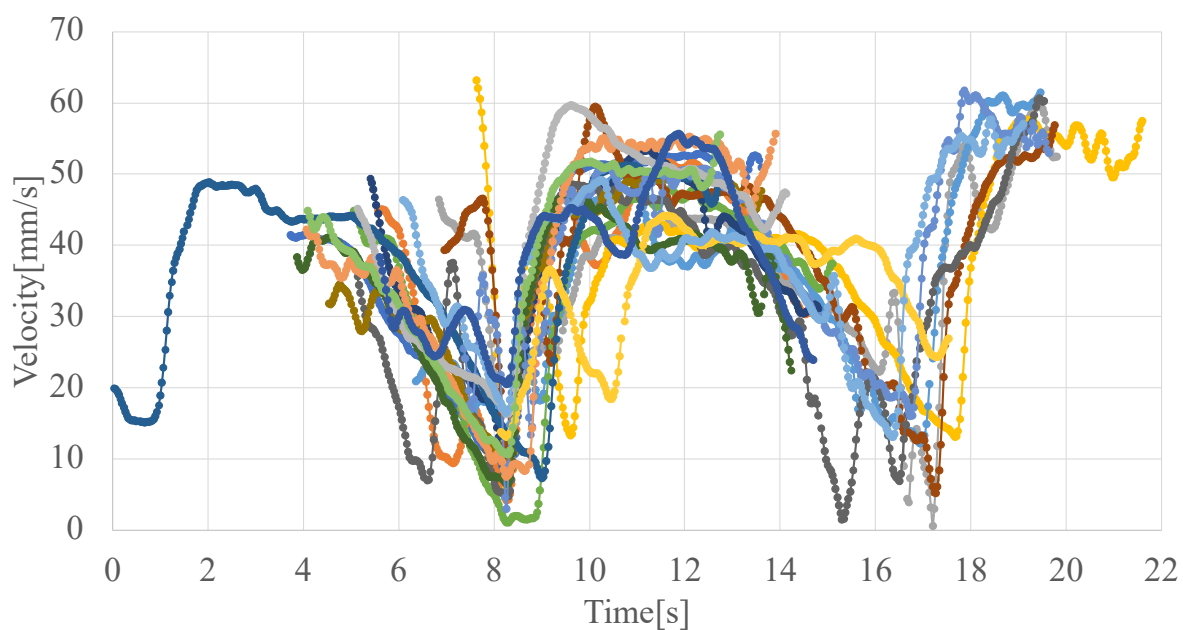


Fig. 28 Tracer speed (lid shape : Circle, angle : 15°)

角度 30°, 「丸」 の時の速度グラフを示す.

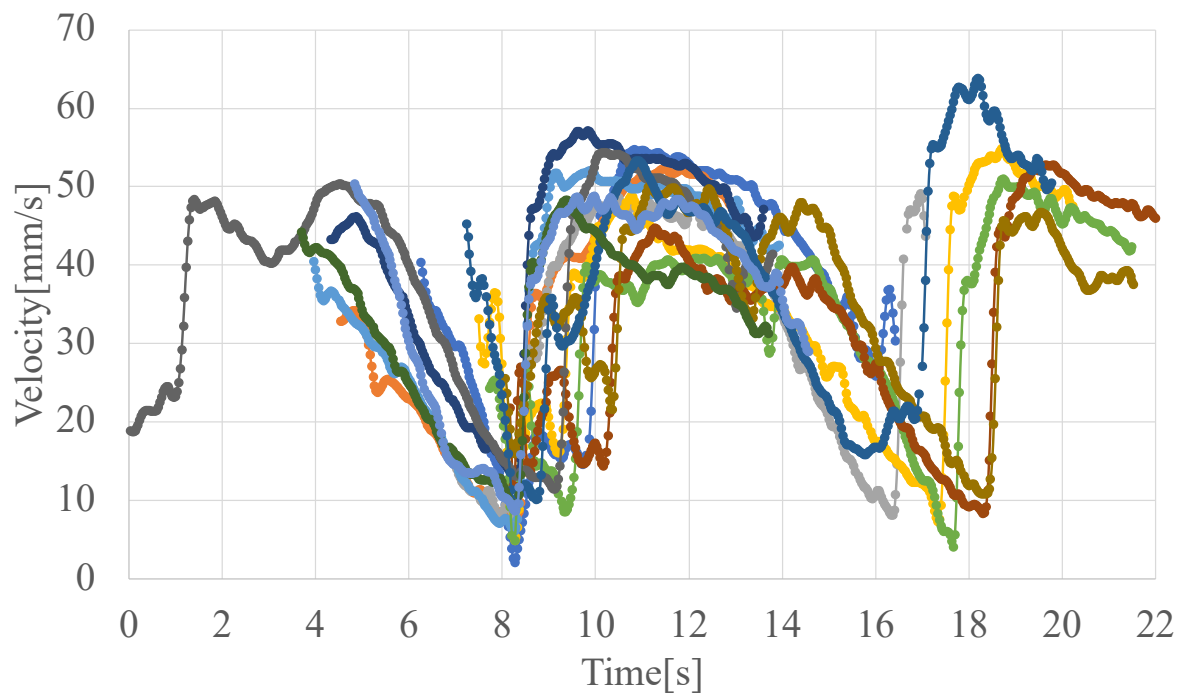


Fig. 29 Tracer speed (lid shape : Circle, angle : 30°)

角度 45°, 「丸」 の時の速度グラフを示す.

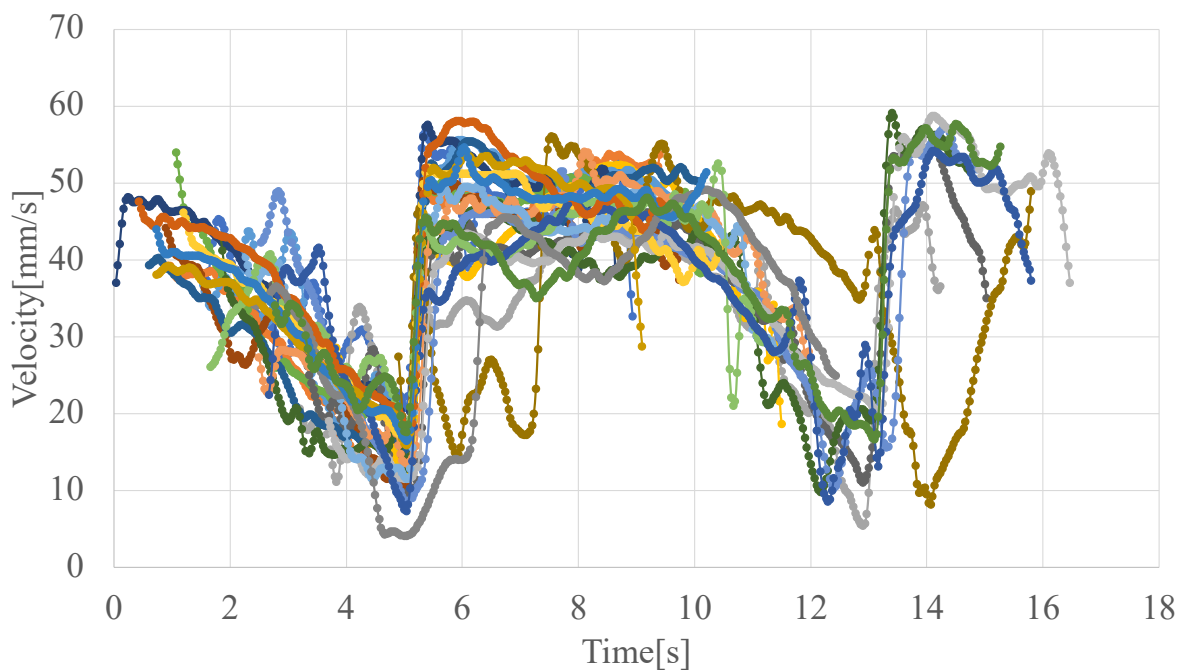


Fig. 30 Tracer speed (lid shape : Circle, angle : 45°)

角度 60°, 「丸」の時の速度グラフを示す.

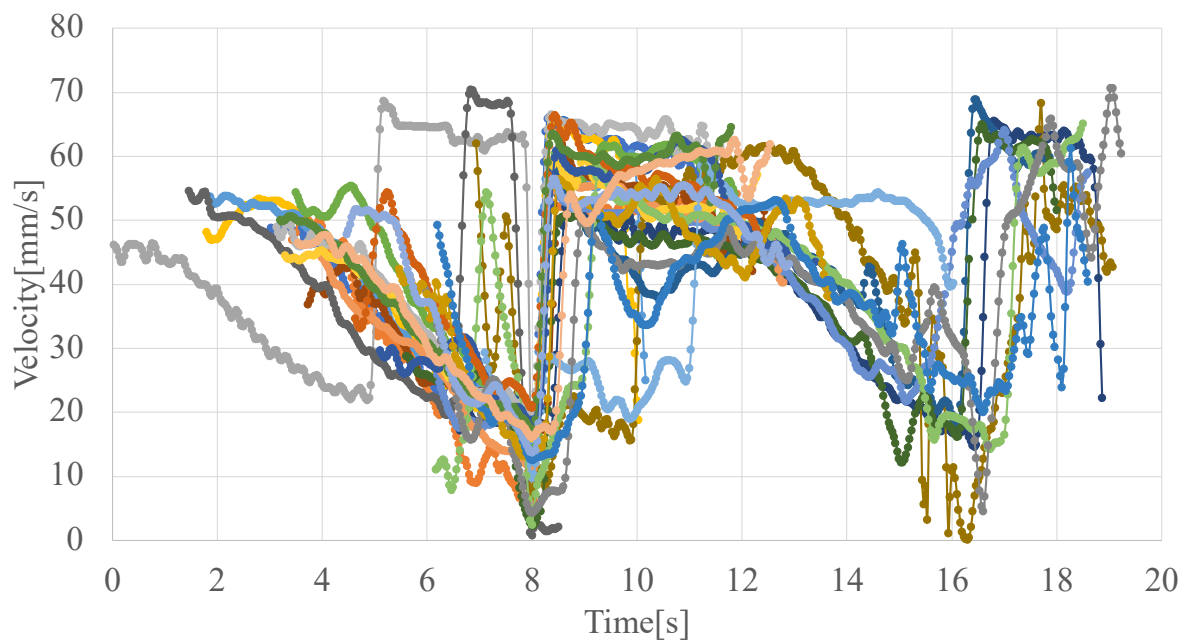


Fig. 31 Tracer speed (lid shape : Circle, angle : 60°)

角度 0°, 「角」の時の速度グラフを示す.

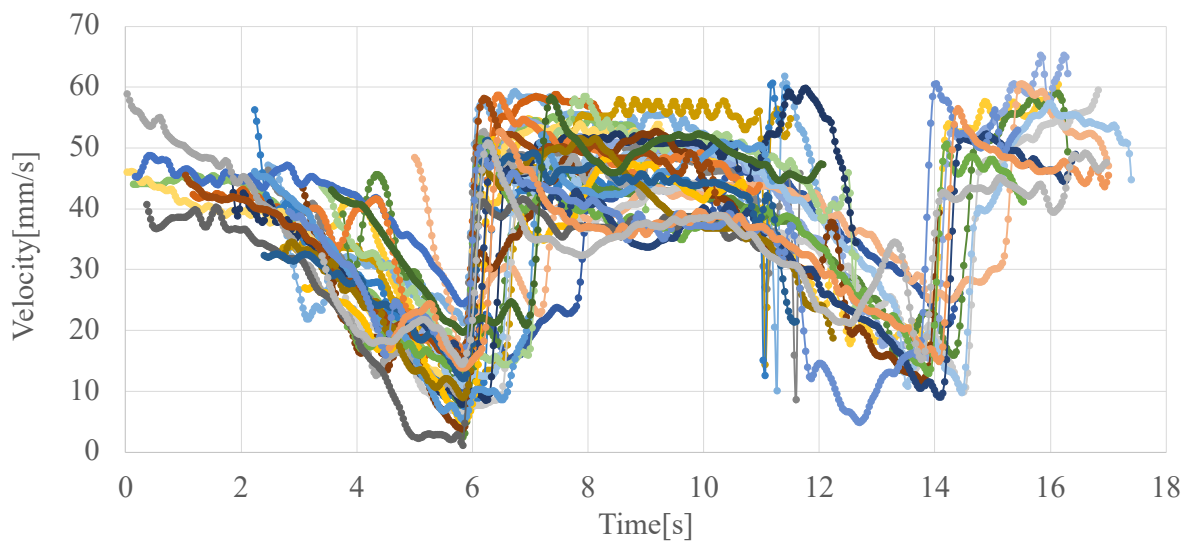


Fig. 32 Tracer speed (lid shape : Corner, angle : 0°)

角度 15°, 「角」の時の速度グラフを示す.

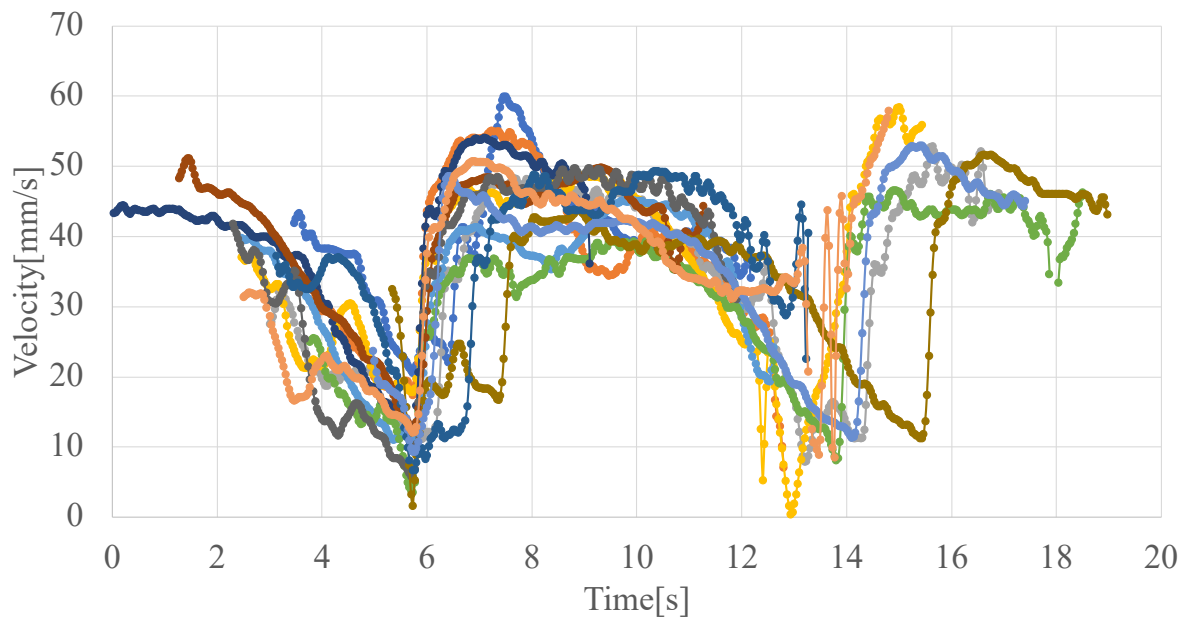


Fig. 33 Tracer speed (lid shape : Corner, angle : 15°)

角度 30°, 「角」の時の速度グラフを示す.

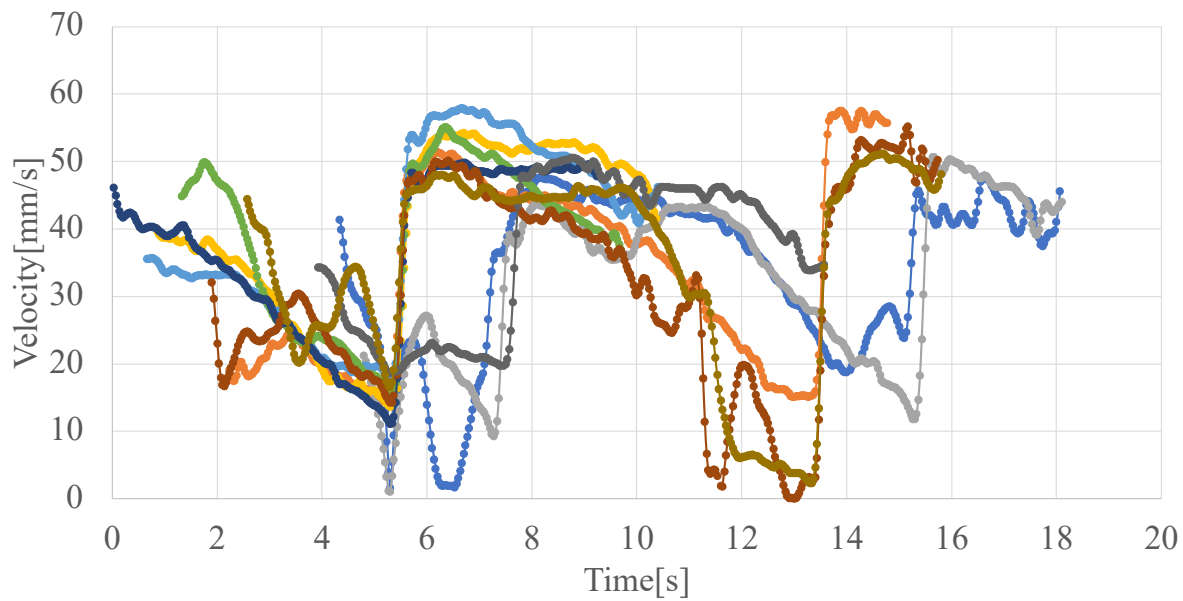


Fig. 34 Tracer speed (lid shape : Corner, angle : 30°)

角度 45°, 「角」の時の速度グラフを示す.

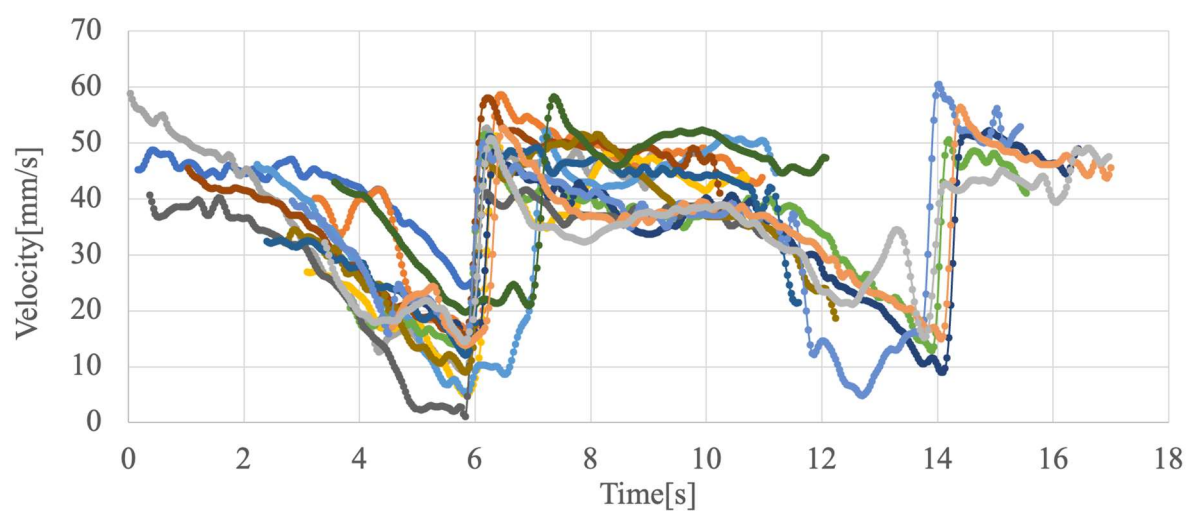


Fig. 35 Tracer speed (lid shape : Corner, angle : 45°)

角度 60°, 「角」の時の速度グラフを示す.

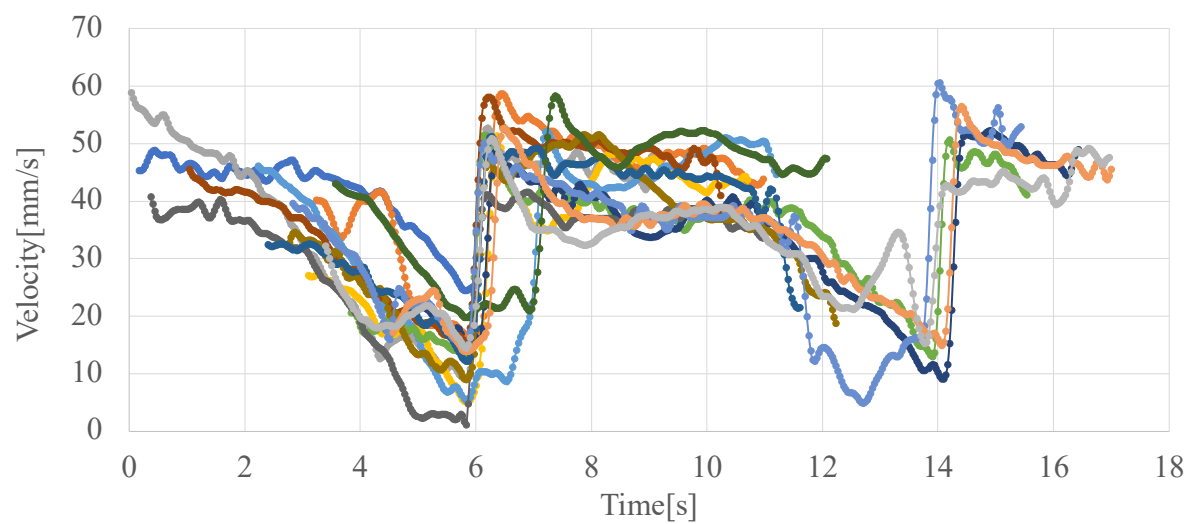


Fig. 36 Tracer speed (lid shape : Corner, angle : 60°)

4.3 考察

Brian 氏によると、水面の動きを単振動とした時、水面と管内の水の垂直方向の速度は上向きを正とすると、図 37 のような関係になる。水面が上がるに伴い、管内の水も速だが上昇する。やがて最高速度になり、次第に速度が減衰する。その後、再び水面と共に上昇する、という流れだ。したがって、管内の水は常に上向きに速度を持つということがわかる。

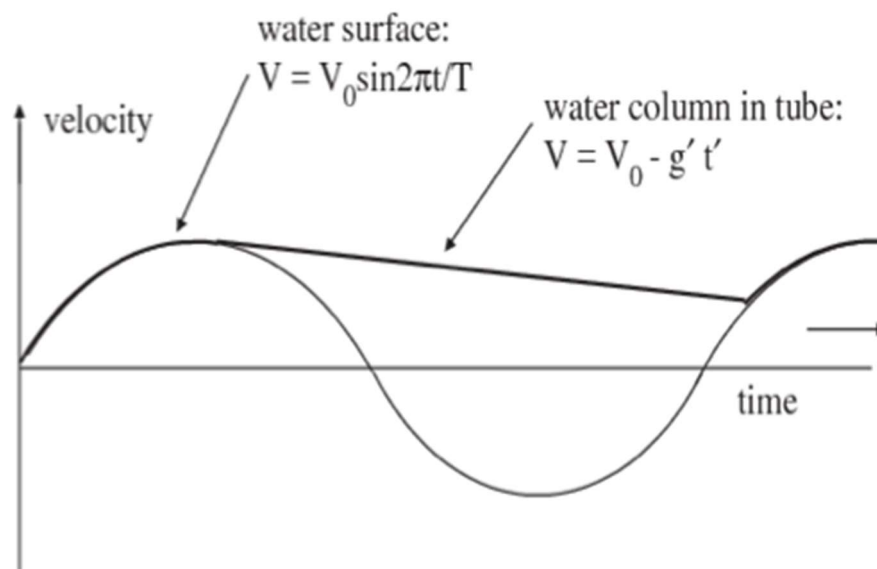


Fig. 37 Vertical velocity of water surface and water in tube

以下図 38 に、速度の測定値と単振動で動くポンプの速度の関係図を示す。

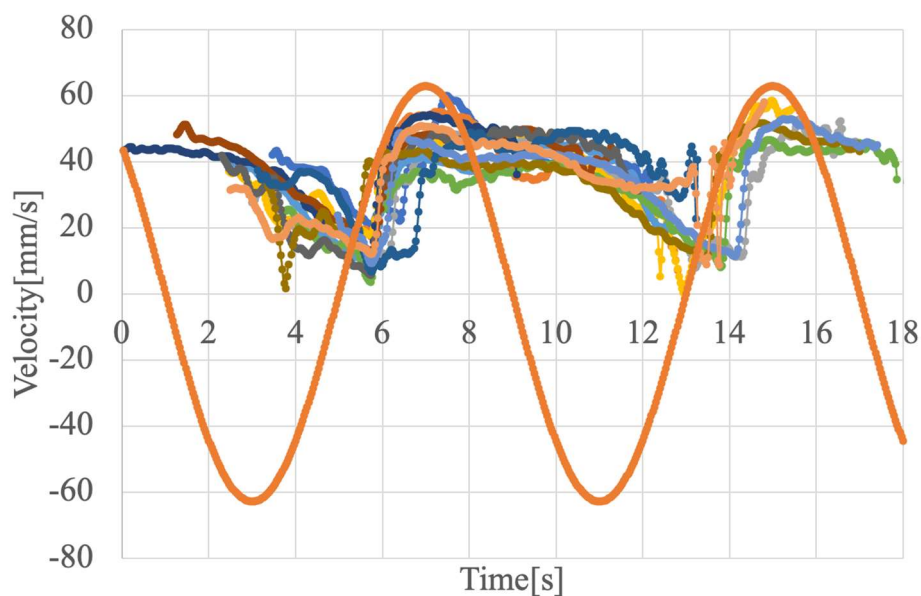


Fig. 38 Relationship between measured value and sine wave

ギアの速度は 30rpm で、周期が 2s である。また、ギアの半径は 200mm であるため、ポンプの最高速度は $2\pi r/T$ で求まる。図 37 と図 38 は波形が類似しているといえるだろう。つまり、ポンプは正常に作動をしていると言って良い。図 38 は角度が 15° で、蓋の形状が「角」の時のグラフである。他のグラフを見ても速度は常に上向きを示していることが読み取れる。

Table 2 Upwelling efficiency

%	0°	15°	30°	45°	60°
Just	66.0	60.9	56.3	68.4	70.3
Circle	65.2	63.1	59.7	66.7	72.2
Corner	65.3	62.5	62.7	62.5	68.2

湧昇効率は全角度、形状において 50%を超える結果となった。特に 60° は 70%程であり、他条件に比べて優れていると言える。次点で 0° と 45° が高い効率を示している。当初は、角度が大きくなるにつれ湧昇性能が高くなると予想していたため、 0° で高い値を取ったことは予想外であった。揚水量が多くなる要因として、 45° 、 60° については弁の切断角度が関係していると考えられる。角度がつくことで、弁が出る粒子の運動方向が上を向くため今回のような単振動では出口付近にてトレーサーはスムーズに放出されると考えられる。 0° の結果については弁部の蓋の開き具合及び密閉具合も影響しているのではないかと考える。 0° は管内の水の進行方向と蓋の向きが直行するため、水が速度を持ち、蓋を押し上げる際に、他条件に比べて蓋に大きな力がかかっていることが考えられる。そのため、 0° は蓋がより開いていたのと考えられる。それに伴い、湧昇性能が上がったという訳だ。

蓋の形状についての比較では、形状の違いによる揚水量の差は見られなかった。ポンプ

また、本実験では測定サンプル数は 10 としている。最大値から最小値を引いた、データのばらつきを表 3 に示す。大量のデータを採集し揚水量がおおよそ収束値となるサンプル数を求める必要があった。

Table 3 Upwelling efficiency

$\times 10^{-4}[\text{m}^3/\text{cycle}]$	0°	15°	30°	45°	60°
Just	2.108	1.495	2.601	2.583	2.137
Circle	2.855	1.872	2.307	1.948	2.485
Corner	2.607	1.769	1.787	2.314	2.140

測定条件についても、ギアの回転数を増加させることや振幅を増減させること、奥行き方向のトレーサー変位を測ることといった変更を加える余地がある。ギアの回転数を上げるためにはポンプを長く、また、実験に使用する水槽を深くする必要がある。これは、カメラで測定が可能な範囲を広げるためである。ギアの回転数を上げることや振幅を小さくすることは、実際の海の条件に近づくと考えられるため、測定の必要性があると言える。トレーサー変位は、カメラを2台にして奥行き方向の変位を測定することで、動作への影響を見出すことができる可能性がある。

本研究では、速度をトレーサーが通る点のみで測定した。一方で、ポンプ管内を水が一様な速度を持って運動している訳ではない。例えば、ポンプ内壁面付近を運動する流体は、壁とそれに接する流体の間に働く摩擦の影響から付加質量により少々減速する可能性もある。もし本格的に速度の測定を考えるならば、トレーサー粒子をより細かくし、個体数を大量に増やす必要がある。それに伴い、解析ソフトが変わってくるため、そのような流体解析ソフトの選定も測定の条件と考える。

角度の違いからは 60° での測定値が他より大きい値をとっていることがわかった。 60° は角度が大きいため、トレーサーの横揺れが少なく直線で出口まで向かう個体も多いことが目視及び解析結果により確認できた。したがって、角度が大きいほど縦方向の汲み上げに有効である可能性も予想できる。ただし、この運動が単振動の上下動であることを忘れてはいけない。横揺れを加味した場合、結果が変わることは容易に想像できる。

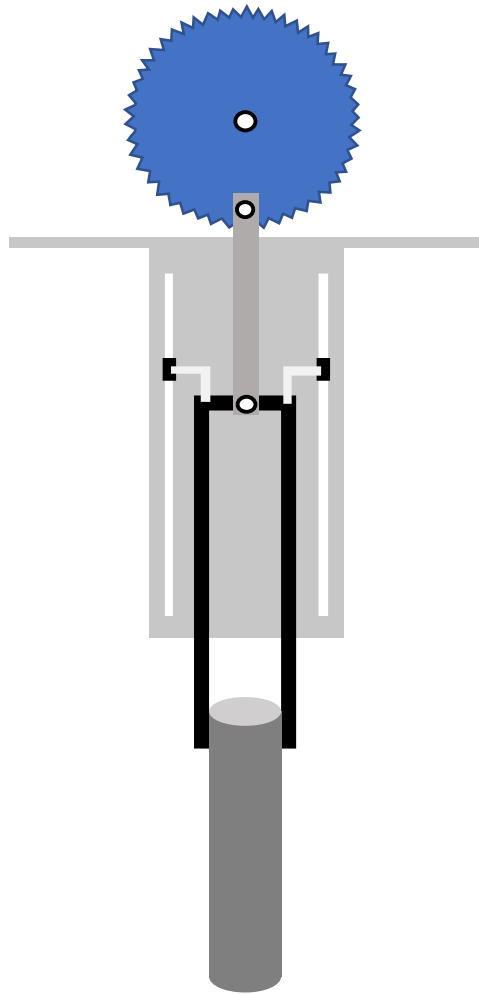


図 3 室内実験装置

4.1 実験方法

ロードセルをつけてオシロスコープで測定しただけでは、周期がわからない（モーターが正しいかもわからないから、光電センサを用いて1周期をわかりやすくし、実験結果のグラフを正しく解析する）

4.2 実験結果

4.3 考察

違いは形と言うか面積かな

第5章 ポンプ運動の解析

5.1 海洋でのポンプの運動

海の波は不規則であることから、海洋に浮かんでいる装置も不規則な動きをすることが考えられる。第4章の室内実験は、波を規則的な正弦波であるとしパイプと弁の構造のみに着目して行った。この章では、実際の波に近づけるために波の周波数や入射波の周期を変化させた状態で検討を可能にする。



Fig.39 Real buoy⁽⁸⁾

本研究で扱うポンプは、図39のような風の影響を受けやすくした受風パイプがついたブイで海洋に浮かんでいる。このブイが風や波によって動くことでブイからロープで繋がれたパイプが振動し湧昇が行われる。前章の実験で弁の角度や形を変化させ、その際はモーターで強制的に動かしていたが、実際に海洋で同様の実験を行ったとすれば弁にかかる抵抗によりブイが大きく沈み込む可能性も考えられる。パイプがブイを引っ張る力が強ければ、実際の波が大きくてもパイプの動きは小さくなることが推測される。そこで、弁の構造を変化させた際のブイを引っ張る力がどれくらいあるのか実験を行った。

5.2 室内での実験

パイプがブイを引っ張る力を測定するために実験を行った。ロードセルをパイプとモーター間に設置し、ひずみを測定することでパイプがブイを引っ張る力が算出可能である。

5.2.1 実験装置

この実験を行うときの必要な装置を以下に示す。

- 歯車
- モーター（オリエントアルモーター 型番 SCM590JA）
- 水槽
- ポンプ（パイプ，弁）
- ロッド
- スライダ
- レール
- ロードセル（KYOWA 型番 LUR-A-50NSA1 ±50N 用）
- 光電センサ（azbil 型番 HPV-S12）
- 動ひずみ測定器
- センサ用電源
- オシロスコープ

上記のレールまでの装置は前章と同様のものを使用した。ロードセルは引張圧縮両用で 50N まで測定が可能な小型のもので、図 40 のように使用した。そのロードセルで測定した値を表示させるために動ひずみ測定器に接続し、その波形がわかりやすいようにオシロスコープを繋いだ。モーターにより歯車が回転し、そこに取り付けられた金具でパイプが正弦波の動きをするが、オシロスコープ上で歯車の回転周期を明確にするために歯車の横に図 41 の光電センサを取り付けた。全体図を図 42 に示す。



Fig.40 Load cell



Fig.41 Photoelectric sensor

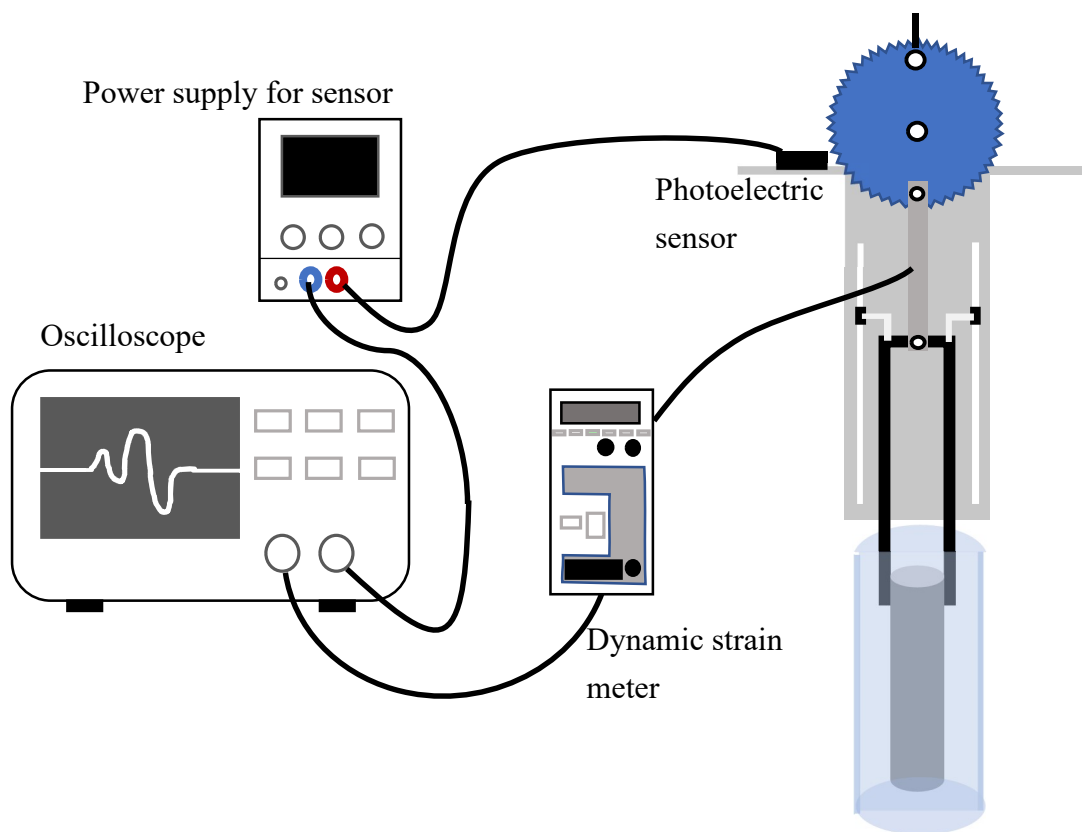


Fig.42 Laboratory experiment of tensile force measurement

5.2.2 実験手順

図 42 のように装置と測定器類を接続し，ポンプを動かした．詳しい手順は以下に示す．

- ① モーター，センサ用の電源，動ひずみ測定器，オシロスコープの電源を入れ，すべて繋いでおく．
- ② 長いパイプを水中に入れ，初めに上部の取り外しができるパイプの角度が 0 度のものを取り付けた．その際に弁は「ぴったり」の形を使用した．
- ③ モーターを 30rpm の速さで動かし，そのときに測定したオシロスコープの記録を保存した．
- ④ モーターを止め，上部の取り外しが可能なパイプを取り，パイプの角度はそのままで弁の形を「丸」に変えた．
- ⑤ ③の手順を行い，弁の形を「角」に変更し再び③を行う．弁の形を 3 種類終えたら，パイプの角度を 15°，30°，45°，60°の順に変化させ，それぞれの弁の形も変化させた．

5.2.3 実験結果および考察

このような手順で測定した際の、オシロスコープの結果は図 43 のようになった。このときの実験条件は、パイプの角度を 30° 、弁の形を「ぴったり」にしたときである。画面上部のグラフは、ロードセルで測定したひずみをオシロスコープで表示させたものである。つまり、パイプがブイを引っ張る力がここからわかる。一方で、画面下部のグラフは光電センサで読み取ったものであり、ある一定周期で細かい線が飛び出ているのがわかる。このときに、歯車に取り付けられた金具を光電センサが感知していることになる。

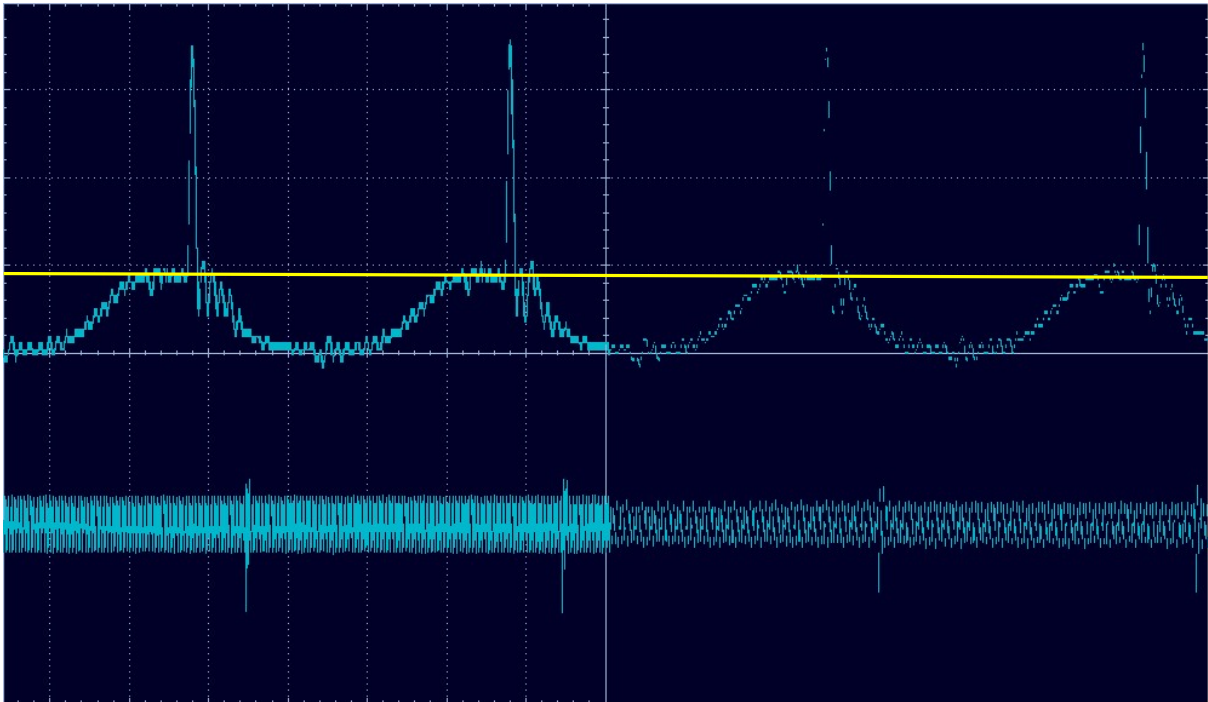


Fig. 43 Oscilloscope recording

光電センサが感知する間隔は、歯車の周期と同じである。歯車の最下部を基準にとり、時計回りに 22° 回転したところに光電センサを取り付け、歯車の光電センサ用の金具はパイプが繋がる場所から 180° 回転したところに取り付けている。

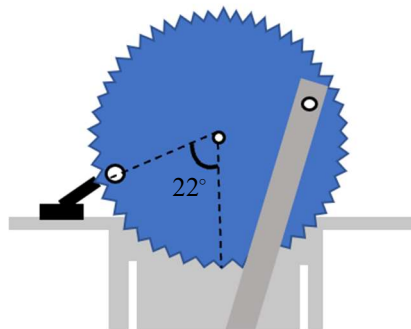


Fig. 44 Photoelectric sensor details

再度オシロスコープの記録を見てみると、画面上部のグラフで一部飛んでいる箇所があるのがわかる。これはひずみが大きく、ロードセルに大きな力が瞬時に加わったということであり、水中でパイプが上昇を始めて弁が閉まった時の衝撃が表れていると考えられる。しかし、この値は一時的な引張であり、継続的な力ではないためパイプがブイに及ぼす影響とはとらえず、そこ以外で図 43 で黄色い線を引いた値であるブイを引っ張り続ける力の大きさを表 4 に示す。

Table 4 Tension per valve shape and angle

	Force (N)		
	Just	Corner	Circle
0°	1.53	1.64	1.48
15°	1.74	1.67	1.60
30°	1.74	1.67	1.74
45°	1.67	1.67	1.74
60°	1.60	1.67	1.53

これをグラフにすると以下のようになる。

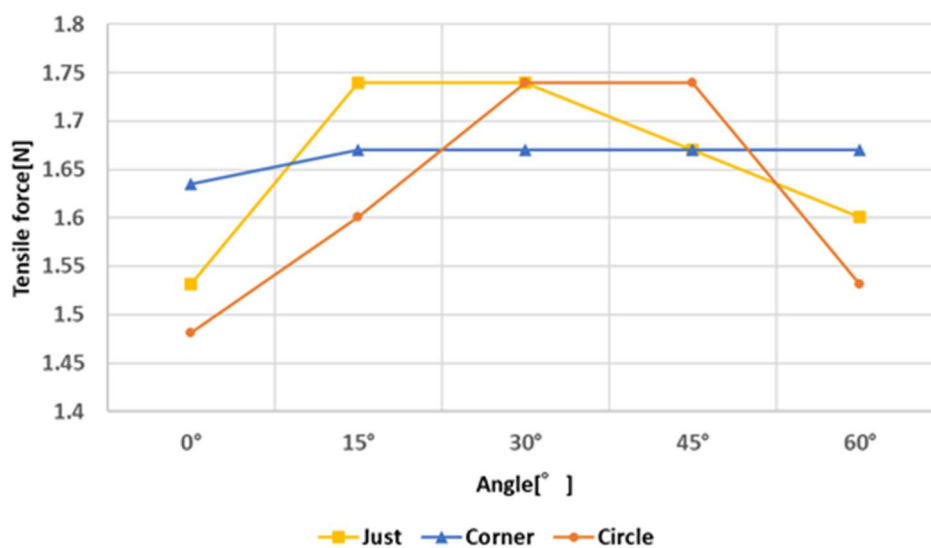


Fig. 45 Tension per valve shape and angle

この結果から、弁の角度が 15°、30°、45°では引っ張る力に大きな変化はなく、それに比べて 0°、60°は比較的小さい値を示していることがわかる。形ごとで見ると、角度ごとに比較したときほどには違いが出ていない。図 45 は弁の角度と形を対応させてグラフで表したが、オシロスコープのデータを CSV ファイルで保存したときの形ごとの結果は以下のようになる。

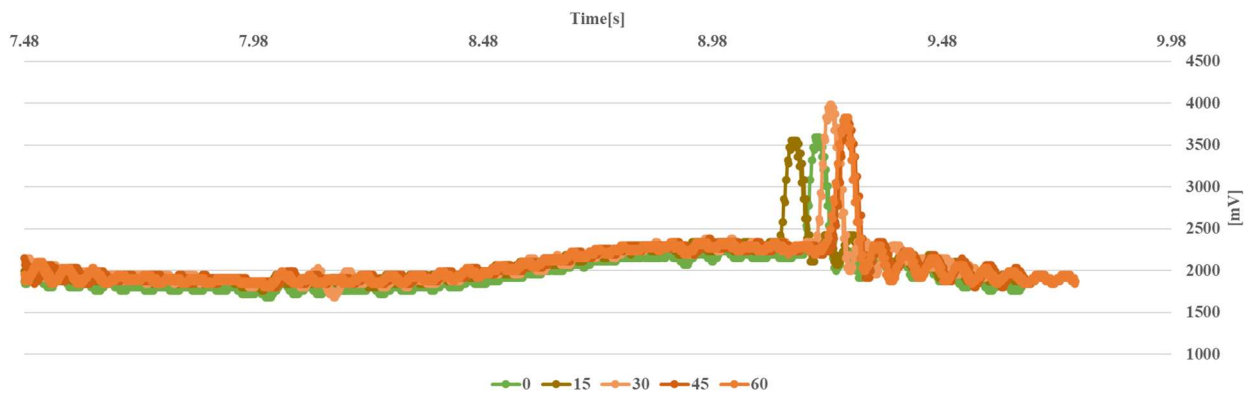


Fig. 46 Tension per valve angle (Just)

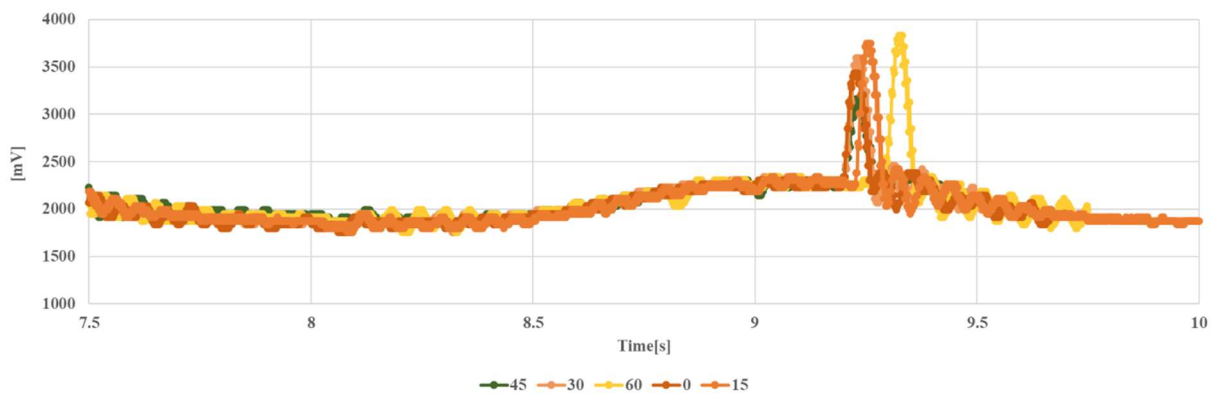


Fig. 47 Tension per valve angle (Corner)

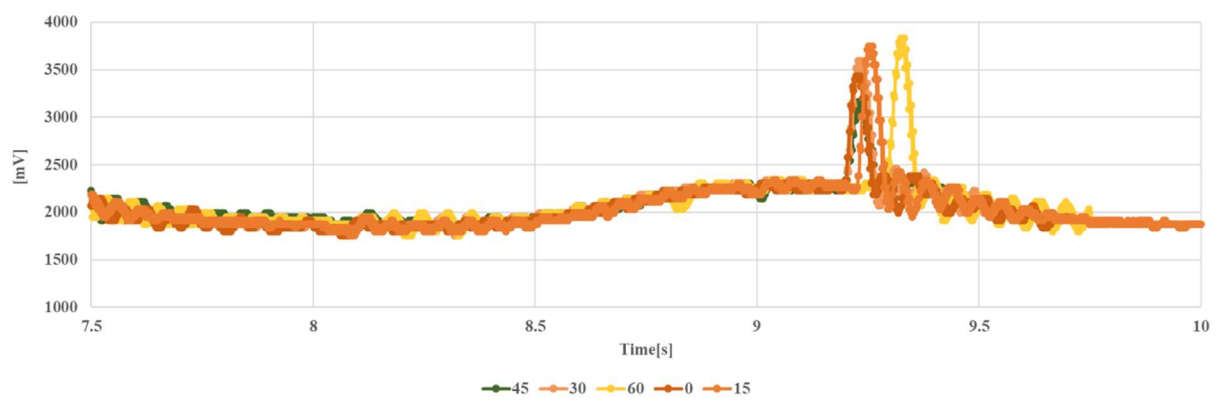


Fig. 48 Tension per valve angle (Circle)

この3つのグラフのそれぞれを比べると、ブイがパイプを引っ張る力はどの角度でもほとんど等しくなっていることがわかる。また、オシロスコープで測定した波形は数値含めてすべてほとんど等しいが、違う点も存在する。それは、それぞれのグラフで弁の角度が異なると値が飛んでしまう時間に差があるという点である。つまり、角度を変化させたときの結果に違いがあるとすると、弁が閉まるタイミングが異なるということである。また、明らかにいえることは、60°では弁が閉まるタイミングが遅く、閉まるときの衝撃が一番大きいことである。他の角度では0°でほんのわずかに弁の閉まるタイミングが遅いが、15°、30°、45°、と大きな差はないといえる。

5.3 湧昇装置運動の数値解析

次に、ポンプの運動方程式を考え、そこからパラメータを変化させて解析を行う。運動方程式を考えるためにまず、実際に海に浮かんでいる状況を簡易的なモデルで表す。これは第3章に述べたモデルと同様に、海洋でのポンプの運動方程式は以下のように考えられる。

$$m\ddot{z} = -bz - \beta|\dot{z}|\dot{z} - \rho g S_w z + F_e \quad (5.1)$$

ここで、装置の鉛直方向変位 z [m]、浮体装置の質量 m [kg]、浮遊系の質量減衰係数 b [kg/s]、水中での装置の動きによる粘性係数 β [Pa・s]、水の密度 ρ [kg/m³]、重力加速度 g [m/s²]、ブイの断面積 S_w [m²]、鉛直方向の波の励振力 F_e である。また、 F_e は式(5.2)のように計算できる。

$$F_e = C\rho g S_w A \sin(\omega t) \quad (5.2)$$

このときの A [m] は入射波振幅、 ω [sec] は振動周波数とする。これらの式(5.1)、(5.2)を用いて Excel でオイラー法により解析を行った。以下に使用するパラメータを示す。

Table 5 Concrete number

m [kg]	24
S_w [m ²]	12.5
A [m]	1.9
ω [sec]	12
b [kg/sec]	650
C	0.97
ρ [kg/m ³]	1

上記のパラメータで解析を行った結果を以下に示す。

解析結果の装置にかかる力は以下のようなになる。

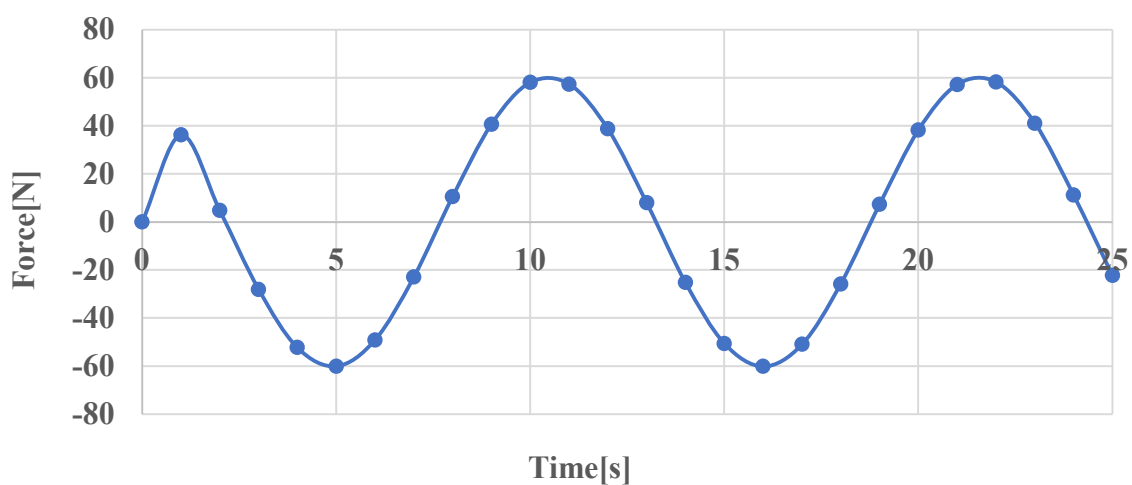


Fig. 49 Force applied to the device

次に、装置の鉛直方向変位は以下の結果になる。

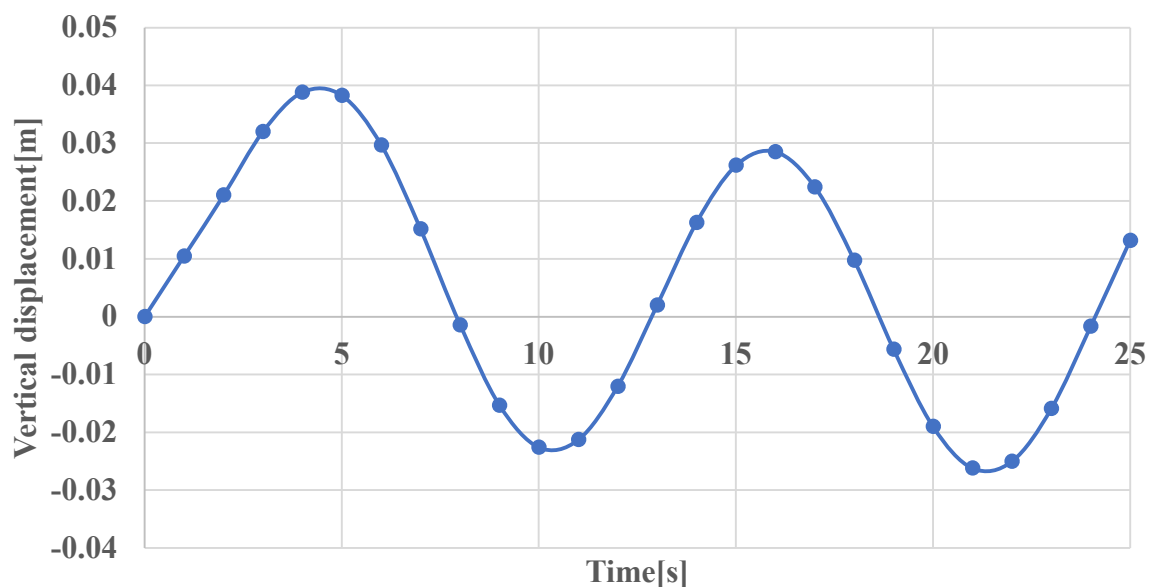


Fig.50 Vertical displacement of the device

図 49 のグラフは、5 秒までの装置にかかる力、約 40N はその後の 60N に比べて小さいことがわかる。しかし、小さい値が出たのは初めのみであり、その後は同じ軌道を描いている。また、図 50 のグラフは、10 秒までの装置の鉛直方向最大変位が 0.04m であるが、その後の変位は最大 0.03m ほどで一定になることがわかった。この 2 つのグラフを比較してみると、装置にかかる力が正の方向に大きいと約 5 秒後に鉛直方向

変位も大きくなり,力が負の方向に大きいと約5秒後に変位も負の方向に大きくなる
 ことが分かった.このように,装置にかかる力と鉛直方向変位は関係があるといえる.

次に,パラメータを変更したときの解析を行った.以下にブイの大きさを変えたとき
 の結果を示す.ブイの大きさを変更させると,表5のブイの断面積 S_w のパラメータ
 が変更される.ブイの断面積を 8m^2 , 12.5m^2 , 20m^2 の3つで解析を行った.

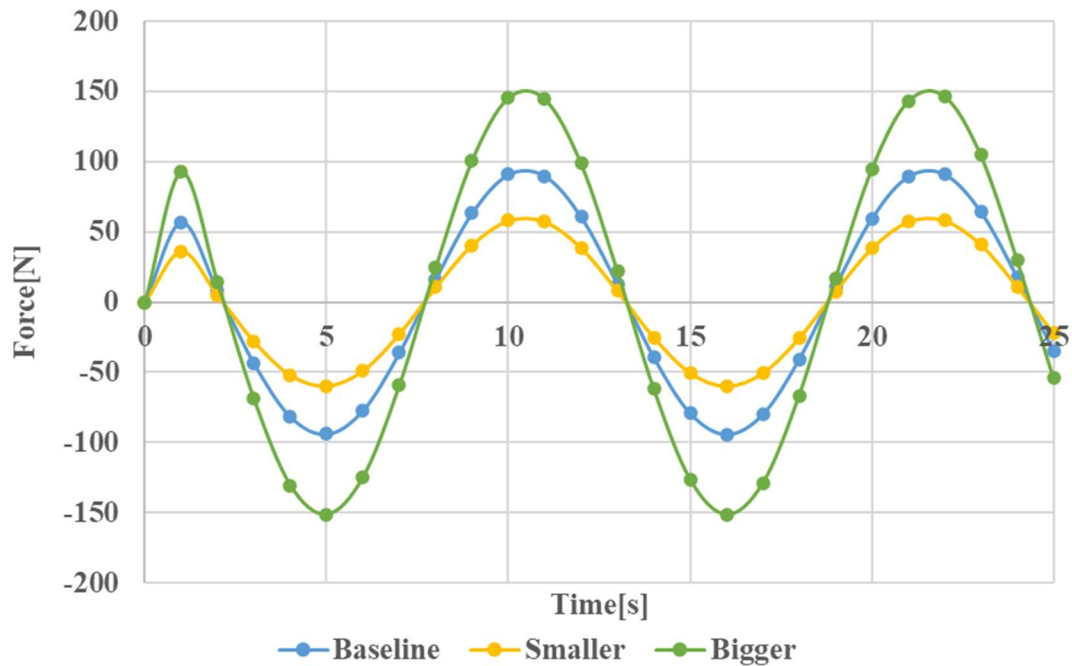


Fig.51 Force applied to the device (3 types)

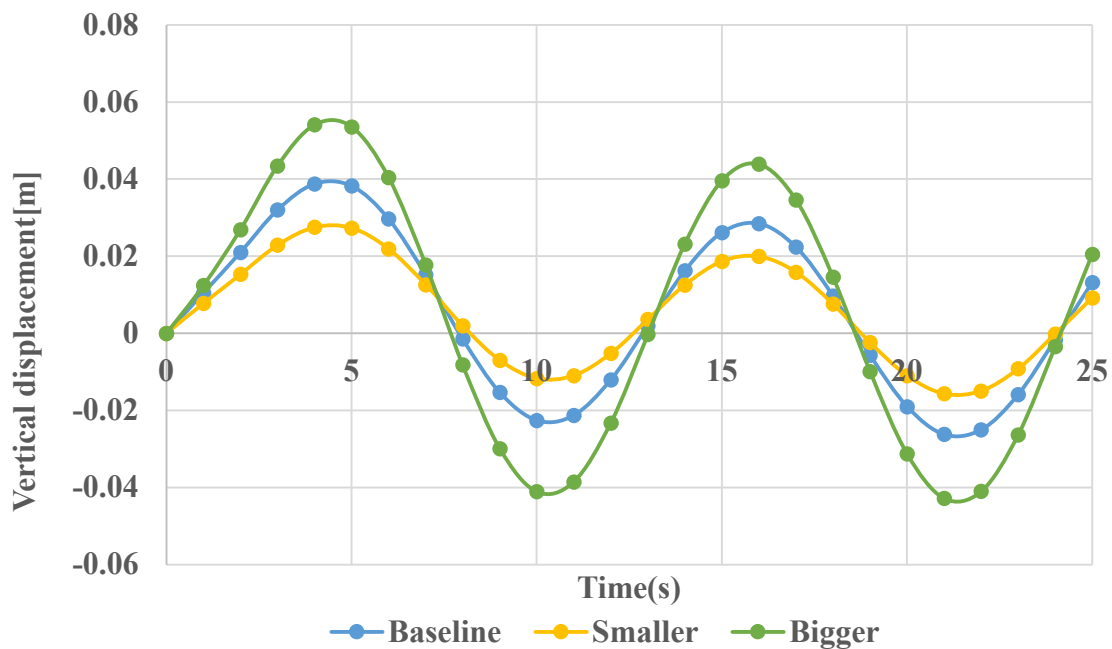


Fig.52 Vertical displacement of the device (3types)

図 51 は、ブイの大きさを変化させたときの装置にかかる力を表しており、ブイを小さくすると装置にかかる力が小さくなることがわかる。反対に、ブイを大きくすると力が大きくなる。一方で図 52 は、ブイの大きさを変化させたときの装置の鉛直方向変位を表しており、ブイを大きくすると変位も大きくなり、小さくすると変位も小さくなることがわかる。また、 8m^2 、 12.5m^2 、 20m^2 というように変化させた断面積は、均等な変化をしていないがその結果もグラフに出ており、基準値から小さくした方が大きくしたときよりも変化の差が小さいことが読み取れる。これらから、ブイの大きさを大きくするほど装置は鉛直方向に大きく運動することがわかった。

5.4 考察

ブイの大きさを変化させる以外にも、波の振幅やパイプの質量を変化させたときの解析も同様に行うことができる。これらの結果も、綺麗な正弦波のようなグラフを表すと考えられる。また、室内でブイの実験をしたときのブイがパイプを引っ張る力と、解析結果から求めた力には大きすぎる差が生じていることがわかる。これは、パイプの長さやブイの大きさなどでパラメータの大きさが大幅に異なることと、パイプの長さや太さを変えたときの違いが質量にしか表れないような運動方程式になってしまっているからだと考えられる。正弦波のようなグラフが表れるのも、実際の波では考え難いこともあり、解析に用いた運動方程式が不十分であることが推測できる。実際の波を方程式で表すことは容易ではないが、解析結果が正弦波のようにならないような解析方法を考察する必要があると感じる。

第6章 結論

本研究では、波動式湧昇ポンプの湧昇水量測定方法を確立させ、波動式ポンプの性能改善パラメータの検討を行った。

- 湧昇水量の測定方法は、ナイロン12の3mmのトレーサー粒子を水槽に入れ、ポンプをモーターで上下に動かすことにより湧昇を起こさせる。そこで撮影を行い、トレーサー粒子をkinoveaというソフトで追従を行った。そこからトレーサー粒子の速度を測定し、湧昇水量を算出可能になる。そのとき、トレーサー粒子は水道水よりも重いため、塩を同じ密度になるまで投入した。
- 性能が良いポンプを検討するために、弁の角度と形を変えた室内実験で湧昇水量の測定を行った。弁の角度は、 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° の5通りとし、弁の形は「ぴったり」、「角」、「丸」の3通りで実験を行った。角度が 60° で最大の湧昇水量であり、 15° 、 30° 、 45° は 0° よりも少なく、形ごとの比較をすると、大きな違いは見られないが、湧昇水量が「ぴったり」は少なく、「丸」では比較的多いことがわかった。以上より、この実験で弁の角度が 60° の「丸」の形をしたポンプの性能が最も良いと考えられる。
- 弁の角度、形それぞれのポンプがブイを引っ張る力を測定した。弁の角度が 15° 、 30° 、 45° では引っ張る力に大きな変化はなく、それに比べて 0° 、 60° は比較的小さい値であった。形ごとで見ると、角度ごとに比較したときほどには違いが出ていないことがわかった。これらの結果を総合的に評価すると、弁の形は大きな影響を与えず、弁部の管切断角度による違いが大きいと感じた。 0° 、 60° では湧昇水量が多く、ブイを引っ張る力も大きくないことから、ブイを引っ張る力が小さいと湧昇水量は大きくなるように因果関係が存在しているように考えられる。これらの結果から弁の形が違っても、 0° 、 60° が今回行った実験では性能が良いポンプであったと言える。
- 数値解析では、運動方程式のパラメータを変化させて装置にかかる力や鉛直方向の変位を求められ、ブイの大きさを変化させたときの解析を行った。結果、ブイの大きさを変化させると大きな違いが生じることがわかった。波の振幅や装置の重さを変化させたときの解析も行える。また、解析結果が正弦波のような波形を表していて実際の波とは考え難いため、運動方程式を考え直す必要があると考えられる。

謝辞

本研究を行うにあたり、指導教員である田中耕太郎教授からは、実験方法や論文について丁寧にご指導を受け賜りました。また、NPO 法人エスコット藤本治生様には様々な情報を提供していただきました。心より感謝申し上げます。そして本研究を行うにあたり、波動式湧昇ポンプの実験装置や実験の解析、考察などを通して多くの技術や知識、経験を積むことができました。関わっていただいたすべての皆様に感謝いたします。

参考文献

- [1] National Oceanic and Atmospheric Administration, “Upwelling”, National Ocean Service, <https://oceanservice.noaa.gov/facts/upwelling.html>, (参照 2023.1.10)
- [2] 富山県深層水協議会, ”深層水研究のあゆみ”, 富山の深層水, <https://t-deepsea.jp/deepsea/history/>, (参照 2023.1.10)
- [3] 宮部宏彰, 山磨敏夫, “海洋肥沃化装置「拓海」(たくみ)”, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol. 40, No. 3 (2005), pp. 82-87.
- [4] 吉田耕造, “沿岸湧昇”, 沿岸海洋研究ノート, Vol. 11, No. 2 (1974), pp. 127-142.
- [5] Zhang DH, Wei Fan, “Reviews of power supply and environmental energy conversions for artificial upwelling”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No. 56 (2016), pp. 659-668.
- [6] 一般社団法人日本機械学会, ”ラピュタ計画”, 流体工学部門, https://www.jsme-fed.org/newsletters/2010_9/no5.html
- [7] 永松哲郎, 中村哲彦, ”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”, 鹿児島大学水産学部紀要, Vol. 60, (2011), pp. 25-32.
- [8] NPO ESCOT, ”波動式湧昇ポンプ”, https://npo-escot.org/?page_id=10344
- [9] Brian Kirke, ”Enhancing fish stocks with wave-powered artificial upwelling”, *Ocean & Coastal Management*, Vol.46, (2003), pp. 901–915.
- [10] 榎木亨, 中村孝幸, 三木秀樹, “波動場の円柱後流渦による振動応答の実態とその予測について”, 第23回海岸工学講演会論文集, (1976), pp. 33-38.
- [11] Clark C. K. Liu and Qiao Jin, “ARTIFICIAL UPWELLING IN REGULAR AND RANDOM WAVES”, *Ocean Engineering*, Vol. 22, No. 4(1995), pp.337-350.
- [12] Clark C. K. Liu, “HYDRODYNAMIC PERFORMANCE OF WAVE-DRIVEN ARTIFICIAL UPWELLING DEVICE”, *Journal of Engineering Mechanics*, (1999), pp. 728-732.
- [13] X.R. Zhang, S.Maruyama, and S. Sakai, “Flow prediction in upwelling deep seawater-the perpetual salt fountain”, *Deep-Sea Research*, Vol. 1, No. 51, (2004), pp. 1145-1157.

- [14] Koutaro Tsubaki, Shigenao Maruyama and Atsuki Komiya, “Continuous measurement of an artificial upwelling of deep sea water induced by the perpetual salt fountain”, *Deep-Sea Research*, Vol. 1, No. 54, (2007), pp. 75-84.