

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

波動湧昇ポンプによる湧昇水量の定量的な

評価を行うための実験方法について

About the experimental method to

quantitatively evaluate the amount of

upwelling by the wave upwelling pump

学籍番号 AB18060

氏名 小林 優樹

指導教員 田中耕太郎 教授

目次

1. 背景と目的	1
2. 自然界の湧昇現象.....	1
2.1. 風成湧昇.....	1
2.2. 地形性湧昇	2
3. 海洋深層水について.....	2
4. 人工湧昇について.....	10
4.1. 人工構造物による湧昇流	11
4.2. 永久塩泉方式.....	12
4.3. 波動湧昇ポンプについて	14
4.3.1. 理想的な条件における湧昇水量.....	15
4.3.2. 重力による損失を考慮した場合の湧昇水量.....	17
4.3.3. 湧昇効率について.....	18
4.3.4. 波動湧昇ポンプについての運動方程式.....	19
4.4. 実際の海域で行われた人工湧昇	20
4.4.1. 密度流拡散装置	20
4.4.2. 養殖マガキの成長促進	21
4.4.3. 拓海プロジェクト.....	23
5. 湧昇現象のデメリット	24
5.1. 低温化.....	25
5.2. 低酸素化(青潮).....	25
5.3. 赤潮	25
6. 画像解析ソフトを用いた波動湧昇ポンプの挙動解析.....	25
7. 波動湧昇ポンプの定量評価を行う実験装置の設計	27
7.1. 駆動部の設計.....	27
7.2. 測定器の設計.....	31
8. 製作した装置の評価.....	40
8.1. 製作した部品の評価.....	40
8.2. 第1回 測定装置作動実験.....	47
8.3. 第2回 測定装置作動実験.....	50
8.4. 第3回 測定装置作動実験.....	54
9. 実験方法	58
10. 実験結果	59
10.1. 上下動変位 180mm の場合	59
10.2. 上下動変位 130mm の場合	61

10.3. 上下動変位 60mm の場合	64
10.4. 測定結果のまとめ	66
11. 考察	67
12. 今後の展望	70
13. まとめ	73
14. 謝辞	73
参考文献	74
図表番号	77

1. 背景と目的

近年人口増加により、食糧不足問題が深刻となっている。しかし、陸上での農業生産量のこれ以上の増加は農業用地や環境問題という制約から大きな期待はできない。そこで、水産資源を増加させることによる食糧不足問題への対策が期待されている。そこで、海底付近から栄養塩を多く含んだ海洋深層水を海面付近まで上昇させる湧昇という現象に注目が集まっている。

自然に湧昇現象が発生している海域は湧昇域と呼ばれているが、この湧昇域は全海洋面積のうちわずか 0.1%程度であるのに対して、全世界の魚類生産の約半分がこの湧昇域で生産されていると言われている⁽¹⁾。そのため、人工的に湧昇現象を発生させ、魚類生産量を向上させる方法についての研究が進められている。しかし、透明な深層水の湧昇量を定量的に評価する方法はいまだ確立されていない。

本稿では、様々な人工湧昇方式についての説明、及び実海域で稼働させた人工湧昇装置の紹介及びそれによる影響と、波のエネルギーを利用した波動湧昇ポンプを利用した場合の湧昇水量を定量的に評価する方法について論述する。

2. 自然界の湧昇現象

生物の死骸や、植物性プランクトンなどによって生成された栄養分などは重力によって鉛直下向きの力を受け沈降していく。これらは有光層と呼ばれる太陽光が届く海面から水深 200[m]程度までの範囲では魚類などの餌として、また植物性プランクトンが光合成を行う際の養分などによってほとんどが消費されている。これにより有光層では常に栄養分が枯渇状態ある。しかし、無光層と呼ばれる太陽光が届かなくなる水深 200[m]程度以深では植物性プランクトンが光合成を行うことが出来ないため栄養分が有光層と比べて多く残る。また、光合成が行われなために溶存酸素濃度が低い貧酸素状態となっている。無光層の栄養塩が豊富に含まれた海洋深層水を海面付近まで湧昇させることが出来れば、改めて有光層で栄養塩が消費され植物性プランクトンが増殖し、それを餌とする魚介類が増殖し、増殖した植物性プランクトンによって生産された栄養分や増殖した魚介類の死骸が同様に無光層へと向けて沈降していき、これらがまた湧昇されることによって好循環となり、湧昇域には豊かな漁場が形成される。

自然界の湧昇現象は主に次の 2 種類の原因から成り立っている。

2.1. 風成湧昇

風成湧昇とは、季節風などのような定常風によって発生する湧昇現象のことである。

① 季節風によって表層離岸流が発生し、沿岸部の表層海水が沖に向かって流れだした場合に沿岸部表層の海水を補うために海底付近の深層水が海面付近に上昇することによって発生する。例として南米ペルー沖の太平洋では、季節風が定常的に吹くため沿岸湧昇流が発生しており、カタクチイワシなどの大漁場となっている。⁽²⁾

② 赤道付近では、赤道に沿うような方向に吹く定常風によって赤道上を海水が流れるとき、その海水の流れはコリオリ力の影響により北半球では風の流れに対して直角右向きに海水が移動する。反対に、南半球では海水は直角左向きに移動する。この流れの方向が変化する現象はエクマン輸送と呼ばれる。これによって、赤道付近の海水を補うために海底から海洋深層水が湧昇する。(3)

2.2. 地形性湧昇

地形性湧昇とは、海嶺などの海底に存在する海嶺などの突起物に海底付近を流れる海流が衝突することによって上昇流が発生することによって、海底付近の栄養塩豊富な深層水が海面付近にもたらされる湧昇現象のことである。

3. 海洋深層水について

一般に太陽光の届かない水深 200m 以深に存在する海水を海洋深層水と呼ぶ。この海洋深層水は、海底火山などの熱源が存在する環境でなければ日光により熱エネルギーを受け取れないため、無光層の海水は表層の海水と比べて寒冷である。そのため、湧昇現象によって海面温度の低下を見込むことができる。これによって、近年海水温度の上昇によるサンゴの白化や台風による被害などの海面温度の上昇を原因とする諸問題の改善を見込むことができる。

鈴木氏によれば(4)、2000年6月に三浦沖で採水された表層海水と三浦沖水深300mより採水された海洋深層水はそれぞれ下表のような特徴を持つ。ここで、水温は年間の変動幅を示し、TOC(全有機炭素)とは Total Organic Carbon の略語であり『水中に存在する有機物の総量を、有機物中に含まれる炭素量で表わした「水の汚れ」を示す指標の一つとして用いられています。』([全有機体炭素(TOC)の測定法について](5)より引用)。TOC の値が小さいほどその水質良く綺麗であることになる。

また、ケイ素・リン・窒素や硫黄・カリウム・カルシウム・マグネシウム・鉄・マンガン・銅・亜鉛・モリブデンなどの元素は植物性プランクトンや海藻などの植物体を形つくるのに不可欠な存在である。これらは海中では主にケイ酸塩・リン酸塩・硝酸塩などの無機塩類として溶存しており、これらを栄養塩類という。栄養塩類は海の肥料の働きをし、植物プランクトンを養い、そして植物プランクトンを餌として動物性プランクトンや魚介類が成長し、魚介類の死骸が分解され再び栄養塩類に戻るという食物連鎖の基本をなす(6),(7)。よって、これらの栄養塩類が豊富であるほど植物性プランクトンが増殖し、それらを餌とする魚介類なども増殖する。つまり、溶存している栄養塩類が豊富であるほど、その海域は漁場に適しているといえることができる。

Table 1 Comparison of deep sea water and surface water off Miura ⁽⁴⁾

	単位	表層海水	海洋深層水
水温	°C	15~28	9~10
pH	—	8.2(24[°C])	7.8(24[°C])
Na	mg/l	9,360	10,700
Cl	mg/l	18,600	18,400
Mg	mg/l	999	1,210
Ca	mg/l	355	363
K	mg/l	398	395
硝酸性窒素	mg/l	0.04	0.37
リン酸態リン	mg/l	<0.001	0.041
ケイ酸態ケイ素	mg/l	<0.1	1
TOC	mg/l	2.3	<1
一般細菌	CFU/ml	2	0

また,隅田氏らによれば⁽⁸⁾,高知県室戸深層水取水口近辺の深層水と表層水,及び富山深層水,ハワイの深層水と表層水の特徴は表2及び表3のようになっている.

**Table 2 Comparison of the surface water and deep sea water
from the facility of Muroto ⁽⁸⁾**

	MUROTO (Marin sampling) 0m	MUROTO (Marin sampling) 320m	MUROTO (Land sampling) 0m	MUROTO (Land sampling) 320m
Temperature(°C)	20.1	8.97	21.0	13.1
pH	—	—	8.19	7.87
DO(mg/l)	7.5	4.4	8.3	7.3
TOC(mg/l)	—	—	1.6	0.93
NO ₃ ⁻ + NO ₂ ⁻ (μ M)	2.19	23.1	1.49	26.0
PO ₄ ³⁻ (μ M)	0.19	1.72	0.34	1.65
Sio ₂ (μ M)	4.58	43.7	13.6	63.9

**Table 3 Comparison of the surface water and deep sea water
from the facility of Toyama and Hawaii ⁽⁸⁾**

	Toyama 321m	Hawaii 15m	Hawaii 600m
Temperature(°C)	2.41 (1.37~3.77)	26.19 ±0.99	8.83 ±1.18
pH	—	8.24 ±0.05	7.61 ±0.09
DO(mg/l)	—	6.87 ±0.41	1.24 ±0.21
TOC(mg/l)	—	0.68 ±0.68	0.50 ±0.47
NO ₃ ⁻ + NO ₂ ⁻ (μ M)	10.1 (4.42~22.4)	0.24 ±0.18	39.03 ±1.83
PO ₄ ³⁻ (μ M)	1.32 (0.86~1.98)	0.15 ±0.04	2.89 ±0.26
Sio ₂ (μ M)	24.0 (9.91~47.7)	2.64 ±0.95	74.56 ±4.64

また,山田氏らによれば⁹⁾,岸からわずかに離れることで水深数百メートルに達する急深な地形を有することから,海洋深層水を利用しやすい海域と考えられている相模湾において,海洋深層水と表層水の採水を行った結果下記のような特徴を持つと分かった.採水は水総研所属の漁業指導調査船「江の島丸」(99 t)を用い,下図に示した相模湾内の小田原市早川沖(離岸距離 約 1.8km,水深 310m)及び横須賀市長井沖(離岸距離 5.6km, 水深 310m)の 2 カ所で行った.

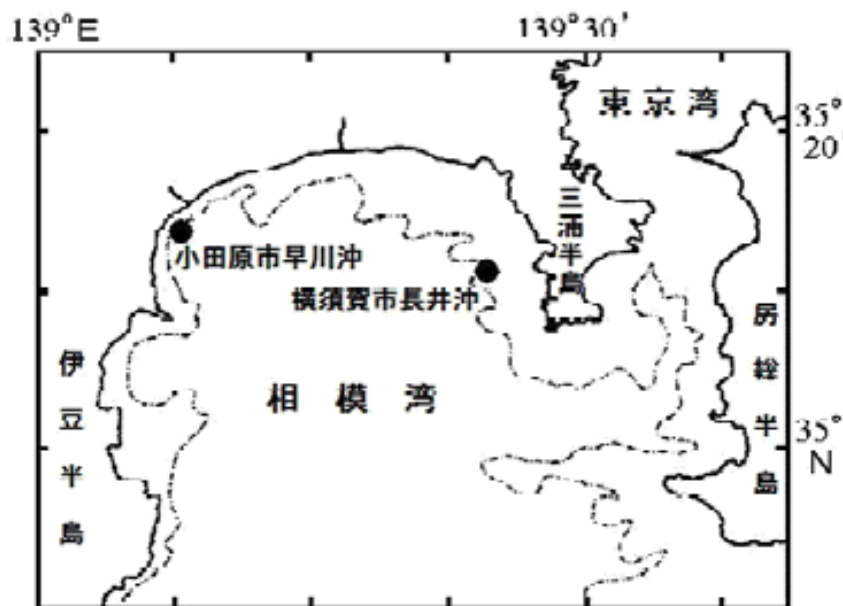


Figure 1 Sampling point for water
(Dashed line is 200m isobath)⁹⁾

採水調査は平成 13 年度と平成 14 年度の 2 回それぞれ海洋構造の成層期(夏季)及び混合期(冬季)の年 2 回行い合計 4 回の調査結果を記録した.平成 13 年度は 2001 年 7 月 18 日及び 2002 年 1 月 24 日,平成 14 年度は 2002 年 9 月 5 日及び 2003 年 2 月 14 日に調査を実施した.平成 13 年度の調査では,主要元素のナトリウム(Na),カリウム(K),マグネシウム(Mg),カルシウム(Ca),ストロンチウム(Sr),塩素(Cl),臭素(Br)の 7 項目と微量元素であるカドミウム(Cd),鉛(Pb),銅(Cu),亜鉛(Zn),鉄(Fe),マンガン(Mn),ニッケル(Ni),モリブデン(Mo),ヒ素(As)の 9 項目及び環境汚染物質のトリブチルスズ(TBT)の合計 17 項目についての分析を行った.また,平成 14 年度の調査では水質基準項目や環境汚染物質の水銀(Hg),セレン(Se),六価クロム (Cr6+),ホウ素(B),ウラン(U),シアン(CN),フッ素(F),TBT,トリフェニルスズ(TPT),フタル酸ジエチルヘキシル(DEHP)の 10 項目と,13 年度の調査結果でやや高い測定値が得られた Fe と Zn の 2 項目を対象とした.また,採水した試料について水温,塩分,溶存酸素(DO),化学的酸素要求量(COD)及び,栄養塩類の亜硝酸態窒素(NO₂-N),硝酸態窒素(NO₃-N),アンモニア態窒素(NH₄-N),リン酸態リン(PO₄⁻),ケイ酸態ケイ素(SiO₂-Si)を分析した.

**Table 4 2001 Comparison of deep sea water and surface water
for off Nagai and Odawara(Major elements, pollutants of Environmental)⁽⁹⁾**

Sampling point for water	Off Nagai	Off Nagai	Off Odawara	Off Odawara
	0m	300m	0m	300m
Na (mg/l)	10,400	10,700	10,200	10,600
	11,000	10,900	11,000	11,000
K (mg/l)	420	430	400	430
	430	430	440	430
Mg (mg/l)	1,330	1,240	1,300	1,350
	1,270	1,260	1,280	1,260
Ca (mg/l)	400	410	390	410
	420	410	420	400
Sr (mg/l)	7.6	7.8	7.6	7.6
	7.9	8.1	8.3	8.3
Cl (mg/l)	17,600	18,500	17,400	18,300
	19,600	19,500	19,900	19,800
Br (mg/l)	74	73	68	73
	62	67	64	65
TBT (ng/l)	<5	<5	<5	<5
	<5	<5	<5	<5

(上段：成層期(夏季),下段：混合期(冬季))

Table 5 2001 Comparison of deep sea water and surface water for off Nagai and Odawara

(Trace amount of elements) ($\mu\text{g/l}$)⁽⁹⁾

Sampling point for water	Off Nagai	Off Nagai	Off Odawara	Off Odawara
	0m	300m	0m	300m
Cd	0.048	0.077	0.027	0.077
	0.026	0.073	0.025	0.071
Pb	0.54	0.05	0.11	0.17
	1.70	0.03	0.22	<0.02
Cu	1.4	0.31	2.2	0.60
	1.7	0.63	1.0	0.77
Zn	16	1.6	4.3	1.3
	17	5.4	2.2	1.6
Fe	43	4.8	44.0	2.7
	21	0.7	3.9	7.7
Mn	2.20	0.16	0.94	0.10
	0.32	0.13	0.21	0.23
Ni	0.34	0.19	0.29	0.16
	0.30	0.36	0.24	0.39
Mo	9.6	9.9	9.9	9.7
	10.0	10.0	10.0	10.0
As	0.5	1.1	0.8	1.1
	1.3	1.2	1.0	1.1

(上段：成層期(夏季),下段：混合期(冬季))

Table 6 2001 Comparison of deep sea water and surface water for off Nagai and Odawara
(General items and Nutritional salts) ⁽⁹⁾

Sampling point for water	Off Nagai	Off Nagai	Off Odawara	Off Odawara
	0m	300m	0m	300m
temperature of water (°C)	24.6	8.6	25.9	8.7
	13.7	7.4	14.0	7.8
salt (psu)	33.65	34.25	32.97	34.28
	33.81	34.24	34.30	34.25
DO (ml/l)	4.10	2.97	4.47	2.93
	2.85	2.50	1.97	2.56
COD (ppm)	3.06	1.34	2.80	1.46
	1.36	1.01	0.96	0.50
NO ₂ -N (μg/l)	0.17	0.13	0.13	0.14
	0.80	0.14	0.55	0.11
NO ₃ -N (μg/l)	5.93	26.38	5.56	26.16
	5.55	20.80	4.69	19.34
NH ₄ -N (μg/l)	3.17	2.08	2.40	2.56
	1.77	1.55	3.00	1.90
PO ₄ -P (μg/l)	0.21	1.06	0.12	1.03
	0.45	0.98	0.42	1.10
SiO ₂ -Si (μg/l)	0.14	49.97	2.40	43.71
	5.04	40.74	4.55	38.95

(上段：成層期(夏季),下段：混合期(冬季))

Table 7 2002 Comparison of deep sea water and surface water for off Nagai and Odawara
(Trace amount of elements) ($\mu\text{g/l}$)⁽⁹⁾

Sampling point for water	Off Nagai 0m	Off Nagai 300m	Off Odawara 0m	Off Odawara 300m
Hg	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005
	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005
Se	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Cr6+	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
B	4,500	4,500	4,500	4,500
	4,400	4,400	4,400	4,400
U	3.0	3.1	3.0	3.1
	3.2	3.2	3.0	3.1
F	1,300	1,400	1,300	1,400
	1,300	1,300	1,400	1,300
CN	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Zn	6.4	7.4	9.4	5.0
	2.3	1.8	1.8	2.3
Fe	36	9.1	15	2.0
	1.8	1.0	11	7.6
TBT	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
TPT	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
DEHP	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5

(上段：成層期(夏季),下段：混合期(冬季))

Table 8 2002 Comparison of deep sea water and surface water for off Nagai and Odawara
(General items and Nutritional salts)⁽⁹⁾

Sampling point for water	Off Nagai 0m	Off Nagai 300m	Off Odawara 0m	Off Odawara 300m
temperature of water (°C)	27.52	8.36	27.94	8.32
	15.60	10.26	14.10	10.04
salt (psu)	33.96	34.33	33.64	34.32
	34.22	34.37	34.06	34.37
DO (ml/l)	4.68	4.68	4.00	3.31
	3.71	3.71	4.62	3.69
COD (ppm)	1.59	1.58	1.91	1.68
	0.97	1.31	0.89	0.71
NO ₂ -N (μg/l)	0.03	0.04	0.05	0.08
	0.47	0.05	0.53	0.06
NO ₃ -N (μg/l)	5.93	26.38	5.56	26.16
	5.55	20.80	4.69	19.34
NH ₄ -N (μg/l)	3.05	2.45	2.53	-
	2.27	5.96	1.85	1.65
PO ₄ -P (μg/l)	0.13	1.09	0.15	1.08
	0.52	2.07	0.15	2.06
SiO ₂ -Si (μg/l)	0.14	49.97	2.40	43.71
	5.04	40.74	4.55	38.95

(上段：成層期(夏季),下段：混合期(冬季))

以上から,海洋深層水は表層水と比べて

- (1)栄養塩類が豊富に溶存している.
- (2)一年を通して水温が低温で安定している,という特徴があると言える.

4. 人工湧昇について

海中にポンプを設置し,そのポンプによって深層水を人工的に揚水させるという方法がある.このポンプは陸地から海中の無光層まで長大なホースを海底に這わせ,陸地の施設でポンプを駆動させ海洋深層水を獲得するという方法や,海底に海嶺を人工的に再現しその構造物に海流を衝突させ湧昇流を発生させるという方法や,海洋上に太陽光エネルギーや風力などで駆動するモータを取り付けた筏を係留することで,海面付近に海洋深層水を湧昇させるという方法や,海洋の温度差を利用した湧昇方式として永久塩泉と呼ばれる方式についても

研究が進められているが、現状ではポンプの駆動に化石燃料を利用する必要があることや、施設のメンテナンスコストなどといった問題点があるため、自然エネルギーである波のエネルギーや風のエネルギーを利用した湧昇方式が環境面という観点からは適している。本稿では、波のエネルギーを利用した波動湧昇ポンプについて論述する。

4.1. 人工構造物による湧昇流

海底付近に海流が流れている海域では、人工の構造物を海底に設置することによって人工的に湧昇流を発生させるという湧昇方式がある。海底に設置した構造物自身に魚礁集積効果があり、魚礁と同様の働きをする。ここで魚礁とは、物陰に隠れる性質を持つ魚類の隠れ場となったり、親魚の産卵場となったりする構造物のことである。日本では実際に日本海西部や隠岐海峡において人工の魚礁が設置されている。人工的に湧昇現象を発生させる効果を持つ魚礁を「マウンド礁」と呼びマアジ・マサバ・マイワシなどを保護・育成している⁽¹⁰⁾。

このような人工構造物による湧昇現象を定量的に評価することは容易ではないが、永松氏らによれば、愛媛県宇和島沖・長崎県五島沖・鹿児島県阿久根沖などに設置された人工構造物による湧昇水量は3千万～8億 t/day と試算されている⁽¹¹⁾。

人工構造物により人工的に発生させた湧昇現象には、大規模な湧昇現象を発生させることができるという特徴がある。それに対して、巨大な構造物を海底に沈めるということから、(1)海底付近に定常的に流れる海流が存在すること、(2)構造物を指定の位置に投下することやメンテナンスが容易になるようにするために、構造物を設置することができるのは水深50～80mの比較的浅瀬の海域に限定されてしまう。また、構造物を設置することによって何らかの不利益が発生してしまった場合に構造物を撤去し、湧昇現象による影響を除去することが容易ではないため、湧昇現象による効果がいまだ明確に示されていない現状では、人工構造物による湧昇は適当な方法ではないと言える。

以上から海底に人工構造物を設置することによって誘起される湧昇流には次のような特徴がある。

- (1)海中に設置した大きな構造物によって湧昇流を発生させるため、湧昇水量は大量となる。
- (2)海底付近に定常な海流が流れていれば、動力を必要とせずに湧昇流を発生させることができる。
- (3)海底に構造物を設置するため、一度設置してしまうと撤去・改修・メンテナンスが困難となる。
- (4)人工構造物を設置することができるのは、海底に定常な海流が流れ、かつ浅瀬の海域である。

4.2. 永久塩泉方式

永久塩泉とは、海中に設置したパイプと海水の水深ごとの温度差を利用することによる人工湧昇現象である。永久塩泉の原理は、海洋の上層が高温・高塩分、下層が低温・低塩分となる成層中に鉛直にパイプを設置し、パイプ内を下層の低温・低塩分の海水で満たす。この状態で時間が経過すると上層ではパイプが暖められていく、そしてこの熱がパイプを通してパイプ下部へと伝わっていくとパイプ内部の海水は同じ温度となる。これにより、パイプ内部の海水は高温・低塩分となり、パイプ外部の海水は高温・高塩分となる。そのため、パイプ内外には塩分の密度差が発生し、パイプ内部の海水には浮力が発生する。その結果、パイプ内部に上昇流が発生し、湧昇現象が引き起こされる。この湧昇流は、上層が高温・高塩分、下層が低温・低塩分となる成層が成立している限り半永久的に発生し続ける。

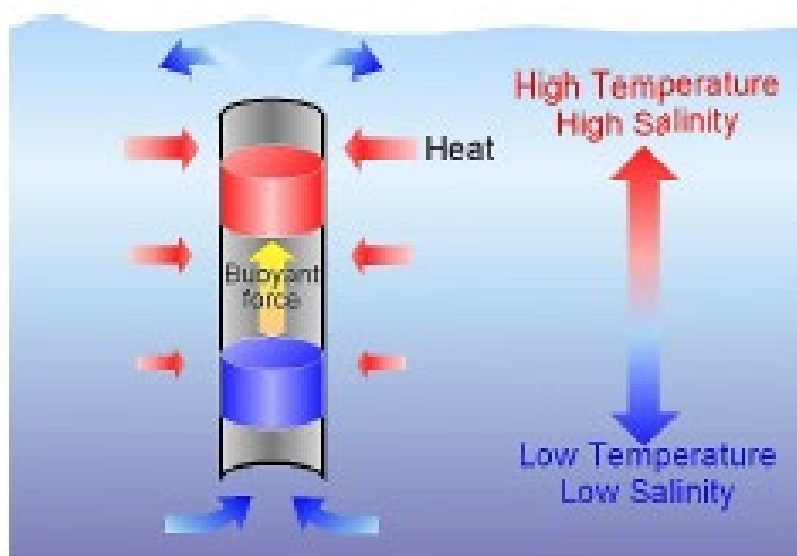


Figure 2 Perpetual salt fountain⁽¹²⁾

永久塩泉方式が適している海域は、塩分極小層が水深 300~600m に存在する亜熱帯の海域が挙げられる⁽¹²⁾。つまり、海洋深層水と表層水に温度差のないような高緯度海域や、上層が高温・高塩分で下層が低温・低塩分となる成層が成立しないような浅瀬の海域には永久塩泉方式は適していない。

古川氏らによれば、⁽¹³⁾マリアナ海域付近で行われた実験によって、永久塩泉方式による湧昇水量を 40~80t/day と見積もった。この実験で使用されたのは下図のような全長 300m、直径 0.3m のパイプである。

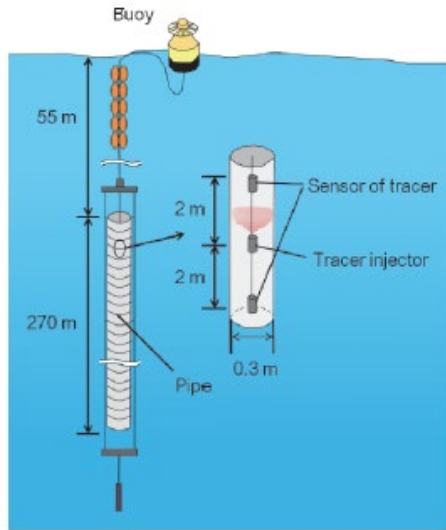


Figure 3 Upwelling pipe of perpetual salt fountain ⁽¹³⁾

永久塩泉方式では、パイプの上端が高温・高塩分の成層中に存在し、パイプの下端が低温・低塩分の成層中に存在する必要がある。そのため、パイプが海流によって抗力を受け、パイプ上端が低温・低塩分成層中まで沈み込んでしまうと湧昇が発生しなくなってしまう。そのため、パイプを流線形となるように製作することでパイプ上端の沈み込みを抑えることができると実験によって示された ⁽¹³⁾。この実験を実施した海域は生産性の低い海域であることから、日本国内で永久塩泉方式による湧昇パイプを設置するのに適していると考えられている沖ノ鳥島周辺海域である。ここで、ブイの浮力を F_B [kgf]、海面流速を U_0 [m/s]、抗力係数を C_D とし、円筒形湧昇パイプの抗力係数 $C_D = 1.2$ 、流線形湧昇パイプの抗力係数 $C_D = 0.3$ とすると湧昇パイプ上端の沈み込みと海面流速の関係は下図で示された。

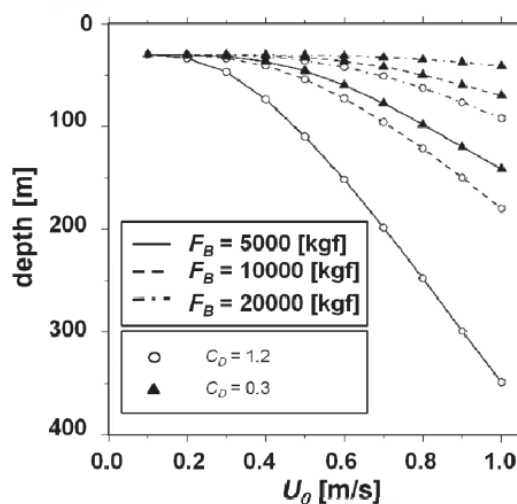


Figure 4 Connection of Depth of top of the pipe and Velocity of flow of sea surface ⁽¹³⁾

これにより、湧昇パイプの断面形状を流線形とすることによって、パイプ上端の沈み込みを抑えるために必要となるブイの浮力は、1/3程度まで減少させることができるということが示された。

以上から、永久塩泉方式には次のような特徴がある。

- (1)海中に設置したパイプを用いて海中の温度差により、動力を必要とせず湧昇を発生させることができる。
- (2)湧昇された海洋深層水は表層と同じ温度となっているため海水表面の低温化は期待できない。
- (3)表層と深層に大きな温度差があるような海域が適しており、高緯度海域や浅瀬の海域では使用できない。
- (4)人工構造物による湧昇と比べると湧昇水量は少なくなる。

4.3. 波動湧昇ポンプについて

波動湧昇ポンプの模式図を次に示す。

波動湧昇ポンプを沖合に設置する場合は、海面に浮かべたブイと無光層へ届かせるために 200[m]程度の長さを持つパイプを棒やワイヤなどでつなぐ。ブイとパイプを棒で繋ぎ、

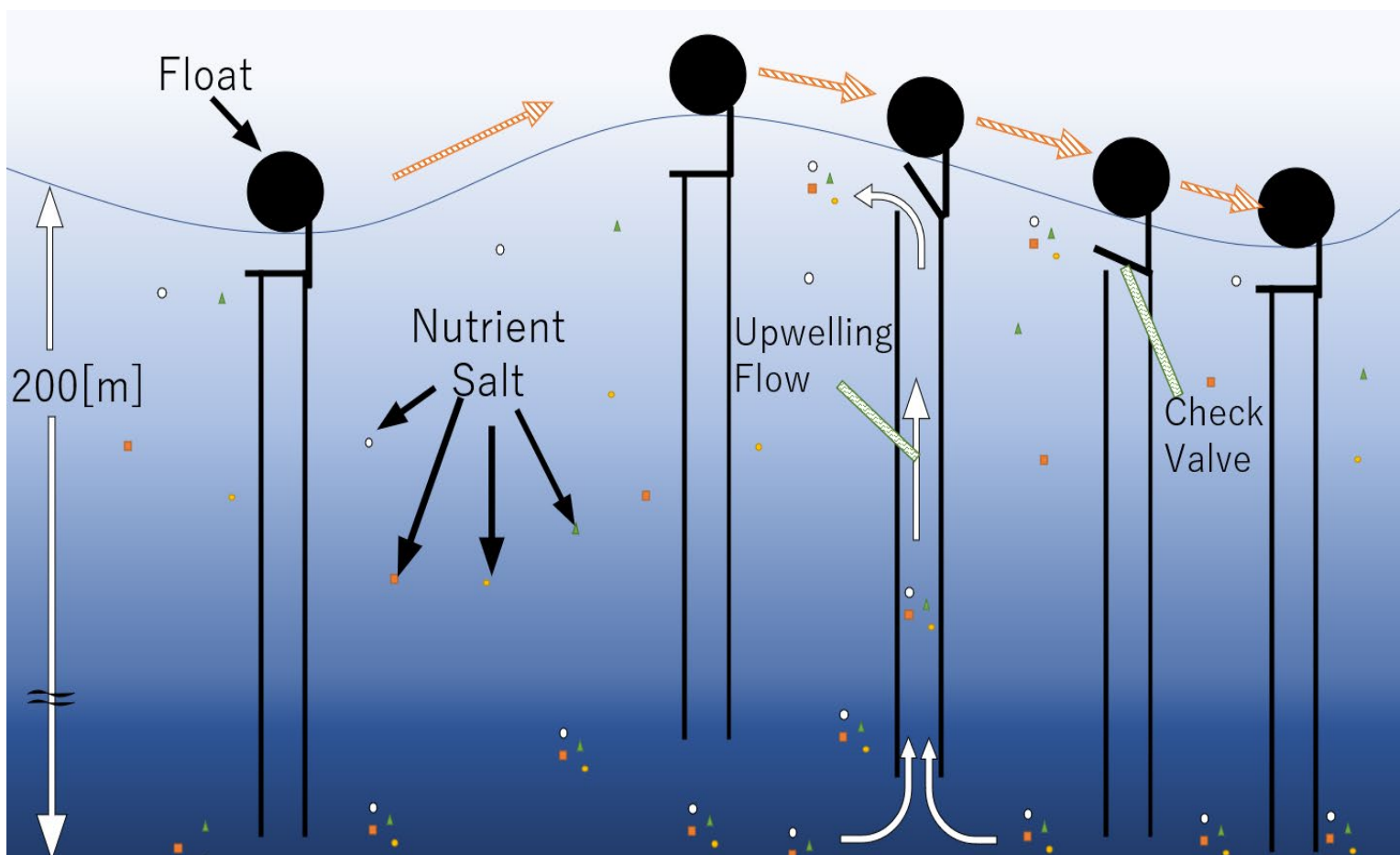


Figure 5 Upwelling by a Wave Pump.

この棒が海水による抵抗を受けた場合でも変形しないように設計した場合は、ブイとパイプの動きが完全に連動する。また、ブイとパイプをワイヤで繋いだ場合は、パイプが受ける抵抗によって、ブイの動きに対してパイプの動きが遅れることになる。

これにより、波によるブイの上下動がパイプに伝わりブイと連動してパイプが上下する。パイプ上端には逆止弁が取り付けられており、この逆止弁はパイプ降下時に開くように作られているため、パイプが上昇する際にパイプ内の海水がある加速度によって持ち上げられる。その後、パイプが降下する際は逆止弁が開き、パイプ上昇時の加速度によってパイプ内の海水には鉛直上向きの力がはたらくため、パイプ内に湧昇流が発生する。以上の上下動のサイクルを繰り返すことで、海洋深層水が海面付近にもたらされる。この時の湧昇量はパイプの上下動変位によって決定されるのではなく、加速度によって発生した力を受けた海水がパイプ上端から流出し、それによって発生した流れが逆止弁によってせき止められるまでの流量によって決定されると考えられている。つまり、単純にパイプの上下動変位を測定することによって湧昇水量を測定することはできない。また、パイプ降下時に湧昇流が発生するため、パイプは高い加速度で上昇し、ゆっくりと降下するほど湧昇性能が高くなると考えられている。よって、パイプとブイは変形しない棒で固定するのではなく、パイプが海水による抵抗を受けてゆっくりと降下できるようにワイヤやゴムのような材質の部品を用いて接続するという方式が適している。

この波動湧昇ポンプには次のメリットがある。

- (1)構造が単純であるために、ポンプの製造やメンテナンス作業が容易である。
- (2)逆止弁部分を除けば、高い精度が必要となる箇所がない。
- (3)自然エネルギーである波のエネルギーを利用しているため、環境に対する負荷を少なくすることができる。

そのため化石燃料を利用して湧昇現象を発生させる方式と比べると環境への負荷が少なく、太陽光エネルギーを動力として駆動するモータや風力をエネルギー源とする風車と水車を接続した人工湧昇装置と比べると、製造及びメンテナンスコストを抑えることができるため海洋環境を改善させるとい目的からすると波動湧昇ポンプが適している。

また、波のエネルギーを利用して湧昇現象を発生させることから、波が弱くなる内湾には波動湧昇ポンプは適していない。それに対して、人工構造物による湧昇方式とは異なり、浅瀬の海域でも使用することができる。また、永久塩泉方式とは異なり、波がある海域であれば高緯度の海域でも使用することが出来、海面温度の低下も期待できる。

この波動湧昇ポンプの揚水量を定量的に評価するために、以下のような方程式が提案されている。

4.3.1. 理想的な条件における湧昇水量

Brian 氏によれば⁽⁴⁾、湧昇ポンプの上下動を単純な単振動と仮定すると、ポンプの上昇速度 V_{max} [m/s]は波の高さを H [m]、波の周期を T [s]とすると次式で表すことができる。

$$V_{max} = r\omega = \frac{H}{2} \times \frac{2\pi}{T} = \frac{\pi H}{T} \quad (1)$$

逆止弁が閉じている場合,つまり湧昇ポンプが上昇する際は湧昇ポンプと内部の海水が同時に上昇することから,ポンプの上昇速度 V_{max} と湧昇ポンプ内の海水の上昇速度 U_{max} には以下の関係が成り立つ.

$$U_{max} = V_{max} = \frac{\pi H}{T} \quad (2)$$

管内の流量 Q [m³/s]は管の断面積 A [m²],流速 U_{max} [m/s]を用いて次のように表せる.

$$Q = AU_{max} \quad (3)$$

以上から,波動湧昇ポンプによる理想的な条件における湧昇水量 Q [m³/s]は次式で与えられる.

$$Q = \frac{\pi AH}{T} \quad (4)$$

ここで, H は波の波高, T は波の周期を表す.

気象庁によって,下図の諸地点における波浪の観測データが提供されている⁽¹⁵⁾.

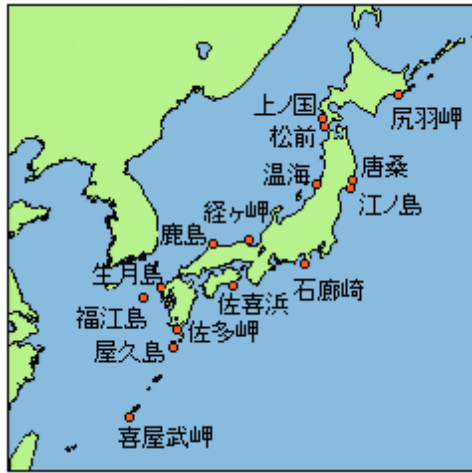


Figure 6 Installation point of coastal wave meter⁽¹⁵⁾

上記のデータから,石廊崎において2021年11月における波浪の平均周期 \bar{T} ,平均波高 \bar{H} は以下のように与えられる.

$$\bar{T} = 6.9 \text{ s}, \bar{H} = 0.725 \text{ m} \quad (5)$$

また,波動湧昇ポンプの断面積 A を永久塩泉方式に用いたものと同様であると仮定すると,

$$A = \frac{\pi}{4} 0.3^2 \approx 0.07065 \text{ m}^2 \quad (6)$$

以上の数値を波動湧昇ポンプによる最大湧昇水量 Q を表す式に代入して,

$$Q = \frac{\pi \times 0.07065 \times 0.725}{6.9}$$

$$\approx 0.0233 \text{ m}^3/\text{s} \quad (7)$$

ここで,仮に海水の密度を $1027\text{kg}/\text{m}^3$ とすると ⁽¹⁶⁾,

$$Q = 0.0233 \text{ m}^3/\text{s} \times 1027 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$= 23.9291 \text{ kg}/\text{s} \quad (8)$$

このとき, $1\text{kg} = 1/1000\text{t}$.

また, $1\text{s} = 1/60\text{min} = 1/3600\text{h} = 1/86700\text{day}$ であるから,

$$Q = 23.9291 \times \frac{86400}{1000}$$

$$\approx 2067 \text{ t}/\text{day} \quad (9)$$

となる.

ただし,上記の式は,湧昇パイプ内部を上昇する海水にはたらく重力や管壁による流路抵抗,逆止弁を押し開く際に消費される流れのエネルギーなどの様々な損失の影響を考慮していない.

4.3.2. 重力による損失を考慮した場合の湧昇水量

Brian 氏によって⁽¹⁴⁾,重力による影響を受けた際の管内の海水の上昇速度 U は,海洋深層水と表層水の密度差 $\Delta\rho$,表層水の密度 ρ ,重力加速度 g ,周期 T を用いて次式のように変化すると提案されている.

$$U = V_{max} - \frac{\Delta\rho}{\rho} gT = \frac{\pi H}{T} - \frac{\Delta\rho}{\rho} gT \quad (10)$$

これによって,重力による影響を受けた際の波動湧昇ポンプによる海洋深層水の湧昇水量 Q' は次式で表すことができる.

$$Q' = AU = A \times \left(\frac{\pi H}{T} - \frac{\Delta \rho}{\rho} g T \right) \quad (11)$$

前述した石廊崎における波浪のデータを用い、 $\Delta \rho$ を 2kg/m^3 程度と見積もると⁽¹⁴⁾,

$$\begin{aligned} Q' &= 0.07065 \left(\frac{0.72\pi}{6.9} - \frac{2}{1027} 9.8 \times 6.9 \right) \\ &\approx 0.0139\text{m}^3/\text{s} \\ &= 14.2753 \text{ kg/s} \\ &= 14.2753 \times \frac{86400}{1000} \\ &= 1233 \text{ t/day} \end{aligned} \quad (12)$$

となる。よって、永久塩泉方式と比べると湧昇水量は大きくなると言える。

4.3.3. 湧昇効率について

今回我々は下記に示すように湧昇効率 η_u [%]を定義した。

$$\eta_u = \frac{\dot{Q}}{Q'} \times 100 \quad (13)$$

Q' [kg/s]:式(11)に示した重力による影響を受けた湧昇水量。

\dot{Q} [kg/s]:実験によって測定した湧昇水量。

この湧昇効率 η_u [%]は、波動湧昇ポンプの全長や逆止弁構造による影響を受けないため、逆止弁構造の性能評価の指針として利用することができる。

波動湧昇ポンプの特徴は下記の通り。

(1)人工的に構造物を海底に設置することによる湧昇方式と比較すると、湧昇水量は少なくなってしまう。ただし人工構造物方式とは異なり、十分な定常波が存在すれば浅瀬の海域などでも使用できる。

(2)永久塩泉方式と比較すると、湧昇水量は多くなると考えられる。また永久塩泉方式とは異なり、海中に温度・塩分による成層が形成されている必要はなく、海面温度の低下を期待することができる。

(3)波動湧昇ポンプによる湧昇水量は波が高く、波の周期が短い海域であるほど多くなり、波の穏やかな内湾などでは性能が低下してしまう。

(4)構造が単純なため,製造・メンテナンスにかかるコストは安価に抑えることができる.

4.3.4. 波動湧昇ポンプについての運動方程式

波動湧昇ポンプの運動方程式として以下の方程式を提案する.

式(4)・(11)では,波動湧昇ポンプがサインカーブを描き上下するという前提のもとに成立している.しかし,実際の海域ではより複雑な軌道を描き上下していると考えられる.

まず,浮きの挙動について波動湧昇ポンプにはたらくと考えられる力の関係を下図に示す.また,これらの関係についての運動方程式を下記に示す.

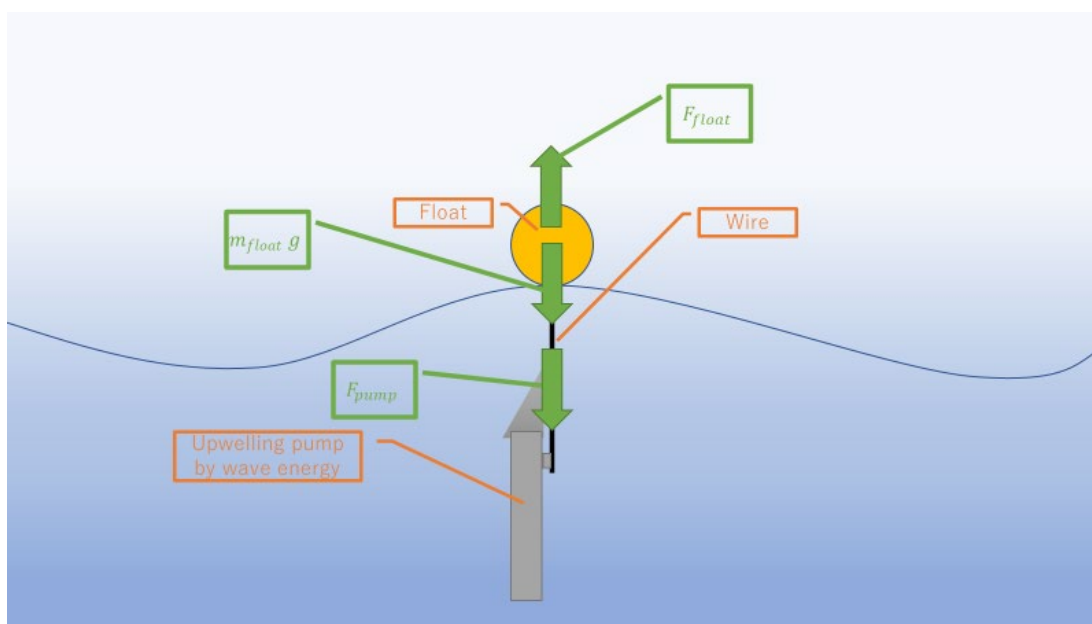


Figure 7 Relationship of forces working on floats

$$m_{float} \frac{d^2 z}{dt^2} = -m_{float} g + F_{float} - F_{pump} \quad (14)$$

F_{float} [N]:浮きの浮力

F_{pump} [N]:ポンプを引き上げる力

m_{float} [kg]:浮きの質量

また,波動湧昇ポンプにはたらくと考えられる力の関係を下図に示す.

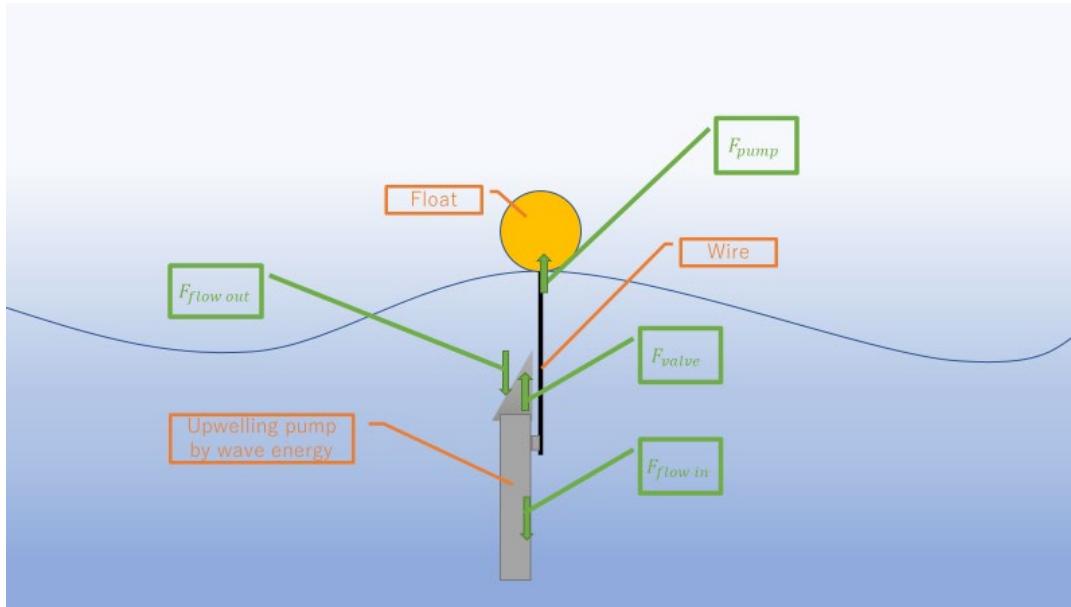


Figure 8 Relationship of forces working on upwelling pump

次に、波動湧昇ポンプについての運動方程式は下記のように考えられる。

$$m_{pump} \frac{d^2 z}{dt^2} = -(\rho_{pump} - \rho_{water})V_{pump} g + F_{pump} \pm F_{flow out} \pm F_{flow in} \pm F_{valve} \quad (15)$$

m_{pump} [kg]: 波動湧昇ポンプ全体の重量

ρ_{pump} [kg/ m³]: ポンプの密度

ρ_{water} [kg/m³]: 海水の密度

V_{pump} [m³]: 波動湧昇ポンプ全体の体積

F_{pump} [N]: ポンプを引き上げる力

$F_{flow out}$ [N]: ポンプが上下動する際にポンプ外壁・逆止弁と海水の間にはたらく力。

$F_{flow in}$ [N]: ポンプが上下動する際にポンプ内壁と海水の間にはたらく力。

F_{valve} [N]: ポンプが上下動する際に海水が逆止弁を押し開く際の抵抗力。

4.4. 実際の海域で行われた人工湧昇

本章では、実際の海域で使用された人工湧昇装置について紹介し、それらの装置の効果を解説することによって人工湧昇の有効性を示す。

4.4.1. 密度流拡散装置

大塚氏らによれば⁽¹⁷⁾、夏季の閉鎖性海域のように海中に密度による成層が形成されている場合その海域では鉛直混合が発生せず、底層は貧酸素状態となりヘドロなどが形

成され環境悪化を招くことが多い。これを改善するため、表層と底層の海水を混合し中密度となった海水を広範囲に拡散させる装置を密度流拡散装置という。ただ、底層の海水を湧昇させるだけでは湧昇水がすぐに沈降してしまうため、表層海水と混合させたいえで海中に放出させる。

三重県志摩半島南部に位置する五ヶ所湾に密度流拡散装置を設置し、稼働させ水質がどのように変化したかについての調査を大塚氏らが行った⁽¹⁷⁾。これにより下表の結果が得られた。これによって、密度流拡散装置によって水質が改善されることが示された。

Table 9 Comparison of sediment for analysis results before and after equipment installation in Hasamaura⁽¹⁷⁾

(COD: Chemical Oxygen Demand, T-S : Total Sulfide amount, IL: Ignition Loss)

Survey date	COD(mg/g)	T-S(mg/g)	IL(%)
1995.3	8.12-11.8	0.47-1.26	12.3-14.8
2995.8	11.7-13.5	0.68-1.20	14.6-16.1
1996.8	10.9-18.1	0.08-1.07	14.6-16.1
1999.8	-	0.91-2.79	17.3-21.5
2006.2	7.4	0.17-0.18	6.0-7.3
2006.8	7.0-7.8	0.18-0.26	7.2-9.2
2006.9	8.6-10.2	0.20-0.27	8.3-9.5
2006.11	5.9-20.2	0.12-0.71	6.2-13.7

4.4.2. 養殖マガキの成長促進

漁業者らによれば筏垂下式のカキ養殖では、周囲と比べて中央部はカキの餌となるプランクトンが十分に行きわたらないため、中央部のカキは周囲と比べて成長が遅れてしまう。そのため、自然エネルギーを利用して養殖施設の中央部に湧昇流を発生させ、プランクトンが比較的多い周辺・下層の海水を上昇に誘引し、水通しも改善することによってカキの養殖施設全体の水温差を小さくし、カキの成長を促進、均一化する技術の研究が行われた⁽¹⁸⁾。

湧昇流発生装置は以下の方式による装置を製作し、試験筏に固定した。海面から垂直方向に高さ 2m の回転軸を設置し、この回転軸に対して 22.5° の角度で水平方向に風車羽根(長さ 0.7×幅 0.3m) 4 枚を取り付けた。また、水深 1m の位置に直径 1m のスクリューを取り付け、スクリューと風車の中間部に減速比が 1/10 となる減速機を取り付けた。このスクリューは風速 5m/s 以上の時に回転した。

また、湧昇装置を設置していない試験筏(対照区)を設置し、比較をできるようにした。

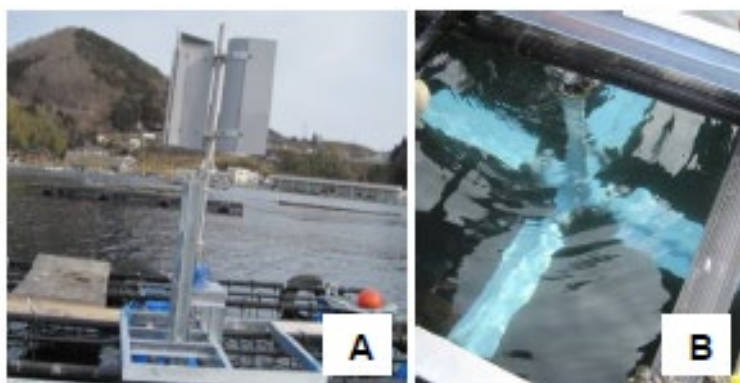


Figure 9 A:Wind type – Windmill B:Wind type - Underwater the screw⁽¹⁸⁾

風力による湧昇装置を設置した区画と対照区における養殖ロープ毎の平均株重量の階級別水平分布を下図に示す。

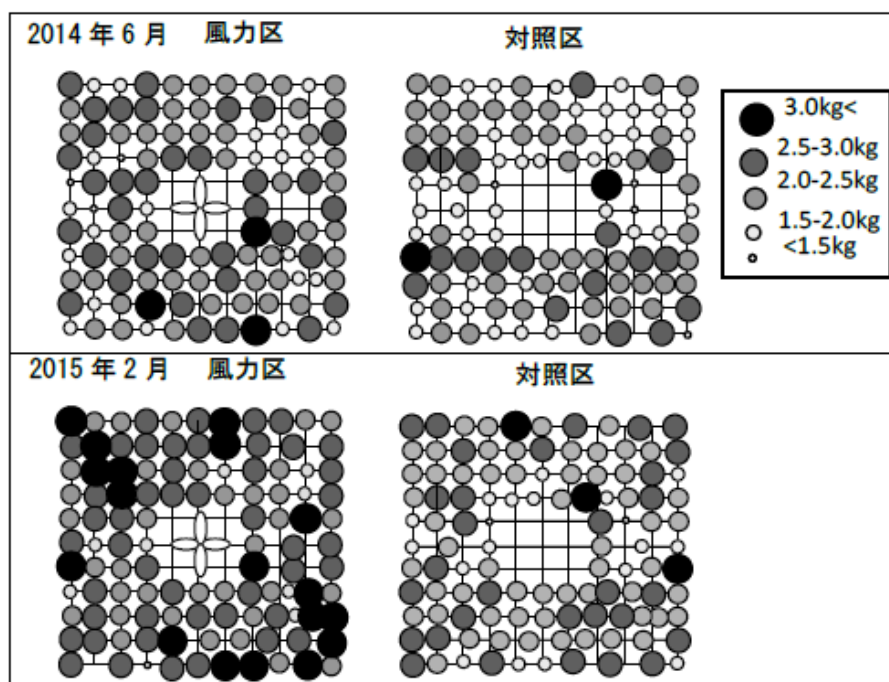


Figure 10 Horizontal distribution of average stock weight by class in the test raft⁽¹⁸⁾

上図から、湧昇装置を設置していない対照区では外周ほど平均株重量が大きいのに対して、風力による湧昇装置を設置した風力区ではカキの平均株重量の増加、及び各養殖ロープの平均株重量の均一化に成功していることがわかる。

この結果から、養殖施設において小規模の湧昇現象によって水産資源の増強を期待できることがわかる。

4.4.3. 拓海プロジェクト

拓海プロジェクトとは、海洋肥沃化実海域実験装置「拓海」を用いて相模湾中央部に水深 200m から 10 万 m³/day の深層水の連続的な汲み上げを行うことによって、海洋環境を改善するプロジェクトである⁽²⁾。

拓海は水深 200m より海洋深層水を 10 万 t/day、水深 5m の表層水を 20 万 t/day をそれぞれ取水し、これらを混合し水深 20m の位置から水平に吐出する。吐出水は表層水と海洋深層水を混合しているため、ただ海洋深層水を湧昇させる場合と異なり、吐出水は水平に広がっていき密度流が形成される。

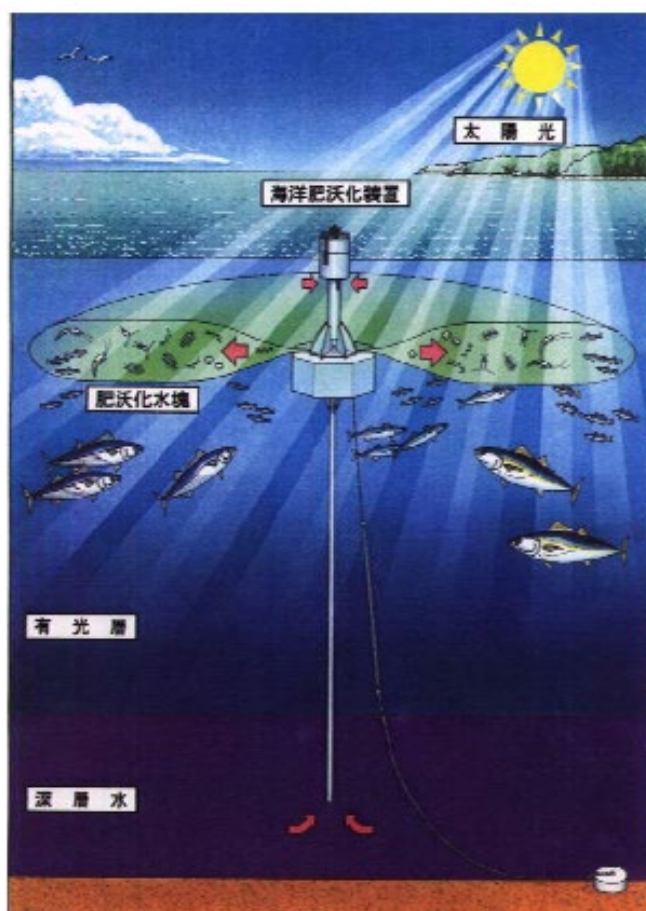


Figure 11 Conceptual diagram of TAKUMI⁽²⁾

拓海は相模湾の平塚南方沖約 20km、水深 1000m の海域に 2003 年 5 月に設置され、2003 年 7 月から約 2 年間稼働した。この間軽微な故障はあったものの、台風等による荒天に対しても十分な安定性を示した。



Figure 12 TAKUMI in operation⁽²⁾

拓海による実験開始後海洋計測を行い,下図のように拓海からの放流水が有光層である水深 25~40m の層に留まっていることが確認された.

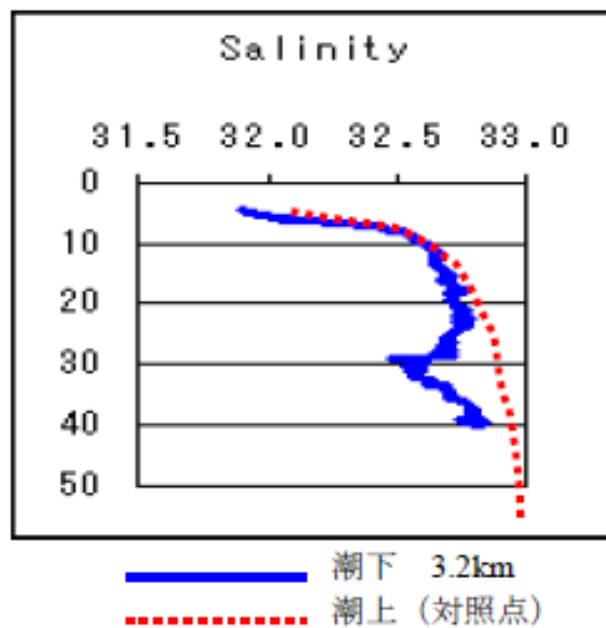


Figure 13 Vertical distribution of upwelling water⁽²⁾

5. 湧昇現象のデメリット

2章で述べたように湧昇現象によるメリットは多い.しかし,湧昇現象にはメリットだけではなくデメリットも存在すると言われている.績氏らによれば,『時間規模を小さくとると,低温化・低酸素化を通して生物の逸散・繁死をもたらすなど資源生物環境に悪影響を与えている』⁽³⁾.湧昇による表層海域の低温化・低酸素化は次のような原因から発生する.

5.1. 低温化

海洋深層水は太陽光にさらされていないために、周辺に海底火山などの熱源がある場合や海流などにより有光層との鉛直混合が発生していない場合は、表層の海水温と比べて低温である。そのため、海洋深層水を湧昇させた場合表層の低温化を招いてしまう。例えば、2章で挙げた南米ペルー沖での湧昇現象では、赤道直下に位置しているのにも関わらず海表面温度は赤道直下の他の海域と比べて5°C以上も低くなっている⁽²⁾。

5.2. 低酸素化(青潮)

無光層では植物性プランクトンによる酸素の生産が行われなため、表6などから表層と比べて溶存酸素濃度が低い。そのため、海洋深層水をそのまま表層に湧昇させれば、酸欠により海洋生物の大量死を招いてしまう。例えば、東京湾などの閉鎖的な内湾で発生する青潮は低層の貧酸素水塊の湧昇が原因の一つであるといわれている⁽¹⁹⁾。

5.3. 赤潮

湧昇現象によって栄養塩が豊富な海洋深層水が表層へもたらされるなど、海洋が富栄養化状態となるとそれらの栄養塩を餌として、植物性プランクトンが大幅に増殖する。閉鎖性の強い内湾のような海域では、特定の種のプランクトンのみが増殖し、場を独占する。そして、特定のプランクトンが表層を独占するような状況を赤潮という。⁽²⁰⁾これを防ぐためには、人工湧昇装置を内湾では使用しない、プランクトンを魚介類などが十分に消費できるように人工湧昇装置を段階的に増設していくなどの工夫が必要となる。

これらを防ぐためには湧昇水を表層海流によって、表層海水と混合・希釈させることが必要である。また、実海域に設置後容易に撤去できる波動湧昇ポンプによって人工湧昇を発生させ、悪影響が発生した場合に容易に人工湧昇装置を取り除くことができるようにする必要がある。そのため波動ポンプによる湧昇水量を定量的に評価し、既存の海洋情報と合わせて海面温度の低下度合やプランクトンの増加度合について、精確なシミュレーションを実行することが重要である。

6. 画像解析ソフトを用いた波動湧昇ポンプの挙動解析

NPO 法人エスコットの藤本氏から、千葉県夷隅郡御宿町岩和田漁港内に波動湧昇ポンプを取り付けた実験動画を提供していただき、この動画を基に画像解析ソフトを用いて波動湧昇ポンプの挙動の解析を試みた。漁港内に波動湧昇ポンプを取り付けたため、波は穏やかであり、波が岸壁に反射することによる反射波が発生しているため、漁港内では低い波が小刻みに発生している状態である。

漁港内に設置した波動湧昇ポンプの概略図を下記に示す。

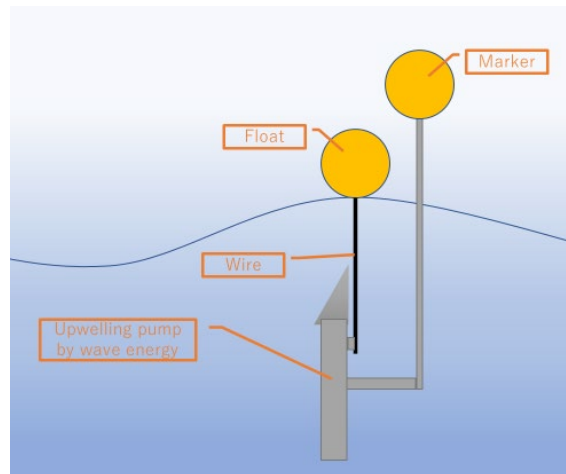


Figure 14 Schematic diagram of upwelling pump by wave energy

ブイと波動湧昇ポンプが連動して動いているようであれば、ブイと波動湧昇ポンプに取り付けた目印の鉛直変位量が一致すると考えられる。



Figure 15 Upwelling pump by wave energy State of installation

画像解析によって、求められたブイの鉛直変位量とブイの運動の周期を下表に示す。ここで、ブイの鉛直変位量は1つの波によるブイの最下点と最上点の差とし、運動の周期は最下点から最上点に到達するまでの時間とした。

Table 10 Vertical displacement of float

	displacement[cm]	period[s]
wave1	44.82	2.63
wave2	34.67	2.95

また,波動湧昇ポンプに取り付けた目印について,ブイと同様に画像解析ソフトによって鉛直変位量を求めた.これによる鉛直変位量を下表に示す.

Table 11 Vertical displacement of Marker

	displacement[cm]
wave1	39.90
wave2	24.86

これによって,ブイの上下動に対して波動湧昇ポンプの上下動が遅れていることが分かった.これは,波動湧昇ポンプが波によって抵抗を受けてしまうためだと考えられる.

7. 波動湧昇ポンプの定量評価を行う実験装置の設計

7.1. 駆動部の設計

波動湧昇ポンプを上下させるための動力源として,AC スピードコントロールモータ(SCM590GVR-JC)及び,減速機として減速比 30 である 5GVR30B,コントローラとしてUS2D90-JA-CC,平歯車(モジュール 2 J シリーズ,PSA2-100J18)を選定した.

これらの諸元を下表に示す.

Table 12 Standard of motor (SCM590GVR-JC) ⁽²¹⁾

最大出力	[W]	90
電圧	[V]	単相 200
周波数	[Hz]	50
可変速度変位	[rpm]	90~1400
許容トルク	[mN・m]	730
起動トルク	[mN・m]	480
電流	[A]	1.2
消費電力	[W]	198

Table 13 Standard of spur gear (PSA2-100J18) (22)

歯数	100
モジュール	2
穴径 [Φmm]	18
歯幅 [mm]	20
材質	MC901
種別	平歯車
許容トルク (N・m[kgf・m])	曲げ強さ(参考値):34.2(3.48)
形状	S5
基準円直径 [mm]	200
歯先円直径 [mm]	204
バックラッシ[mm]	0~0.46(理論値)
質量 [kg]	0.72

平歯車には波動湧昇ポンプの上下動変位を調整することができるように図 12 に示すような穴あけ加工を行った後,これらを図 13 のように組み立て,ねじ穴を開けた金属板に固定した.金属板に固定することによって,モータがずれることがないようにした.また,スピードコントローラに減速機の減速比 30 を設定することによって,スピードコントローラに表示される回転数は 90~1400rpm から 3~53rpm と修正され,図 12 に示す穴あけ加工を行うことによって,波動湧昇ポンプの上下動変位は 60・90・100・130・140・150・180mm に変更できるようになった.この穴あけ加工は平歯車の両端に行うことによって一端を波動湧昇ポンプと接続し,もう一端にカウンターウェイトを取り付けることができるようにした.

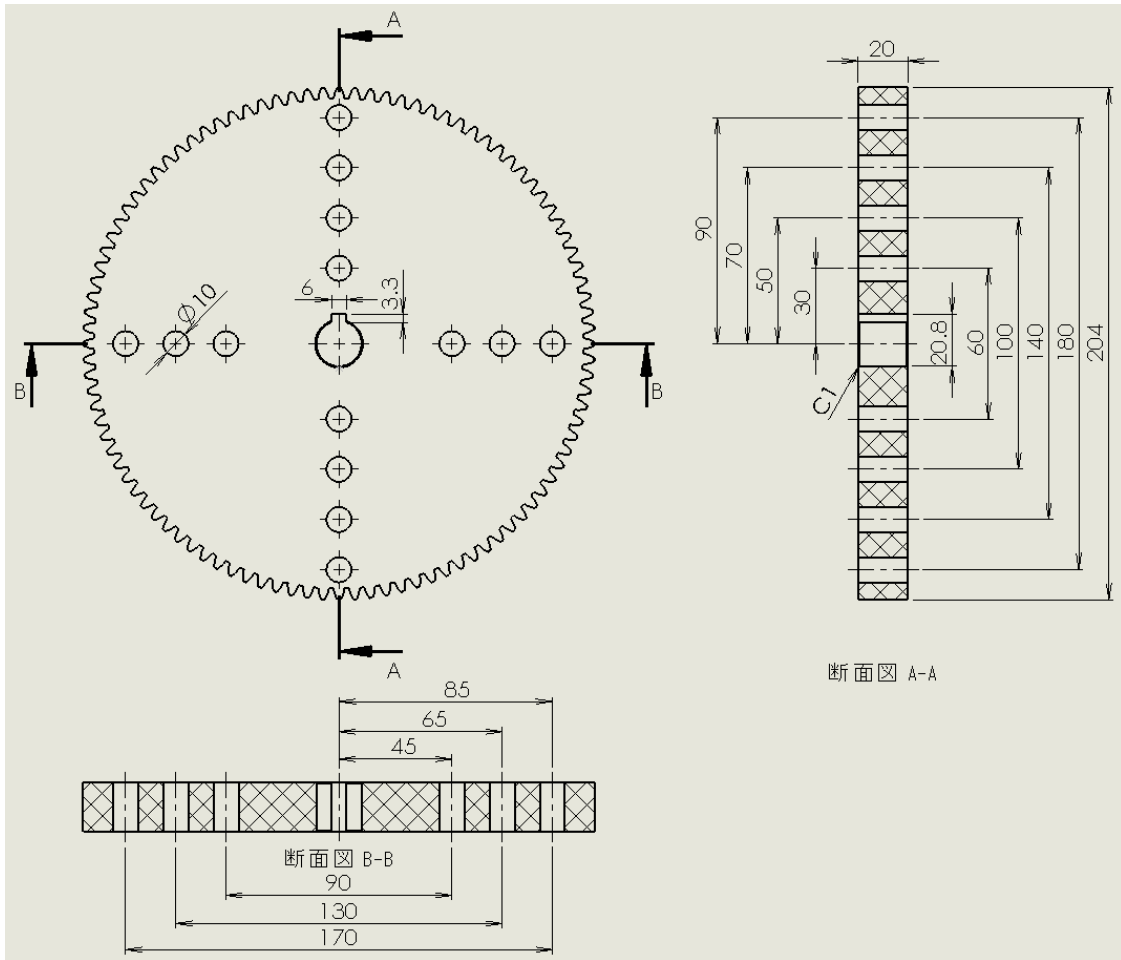


Figure 16 Processing of gear

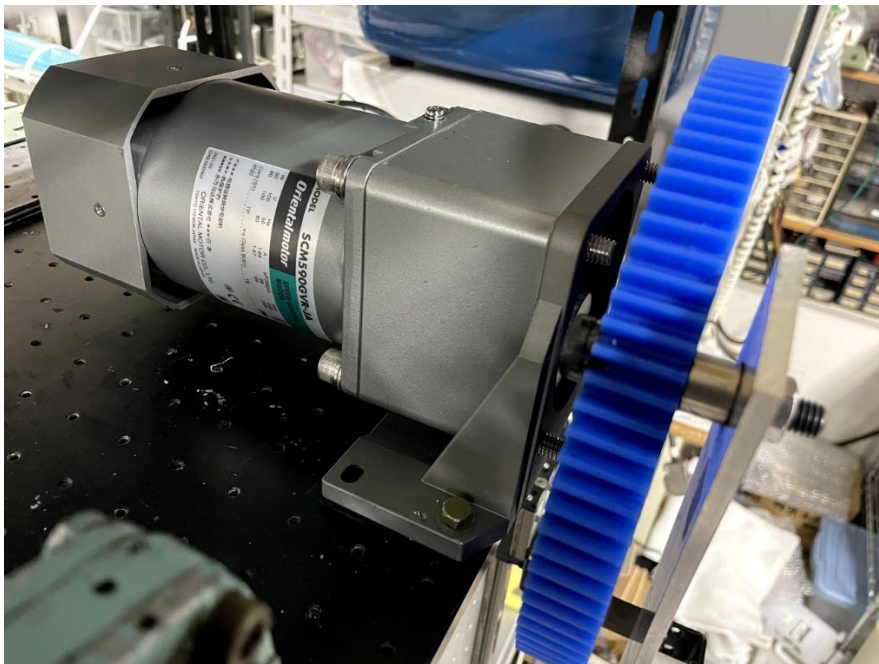


Figure 17 Source of power

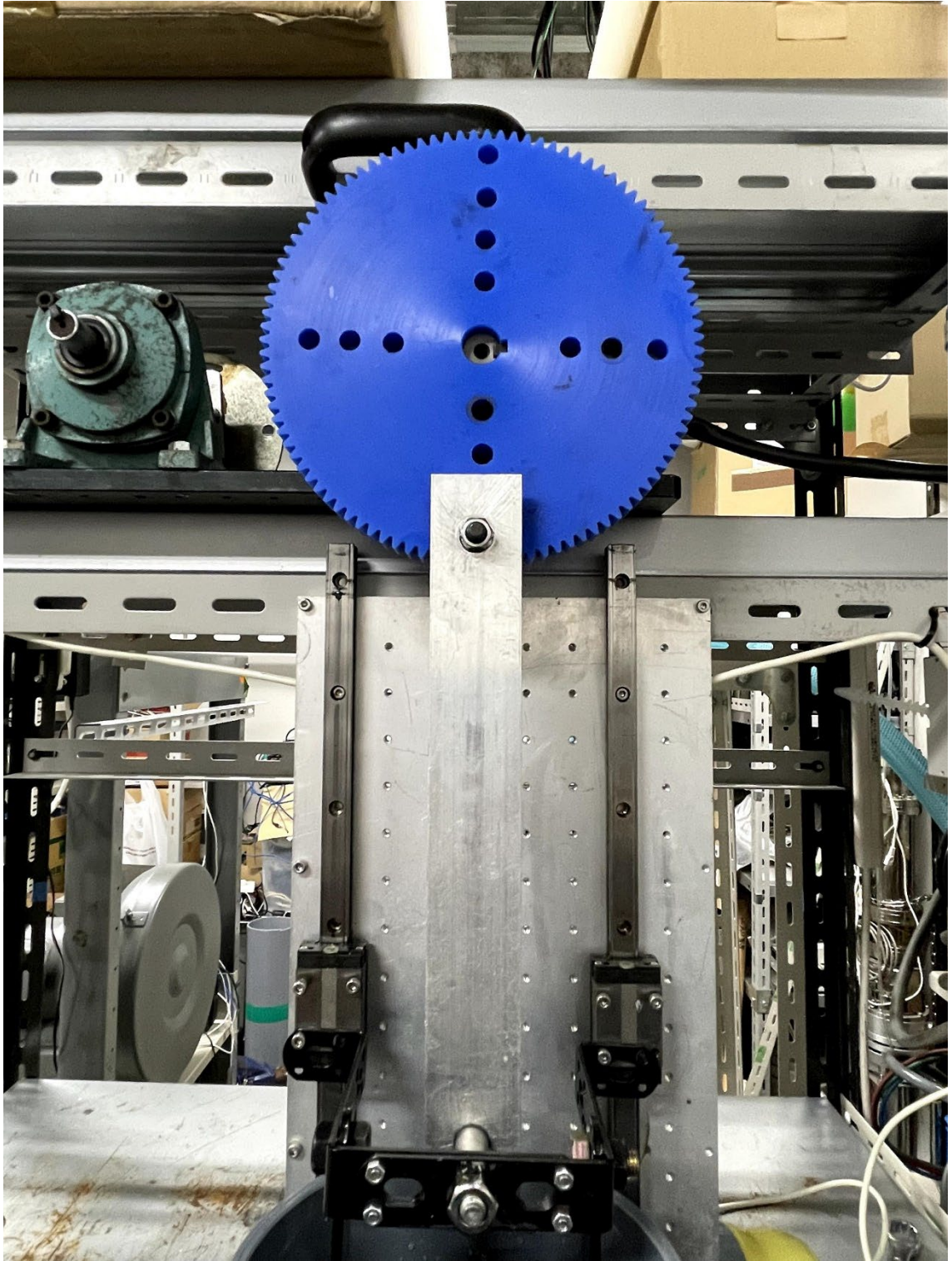


Figure 18 Source of power after assembly

7.2. 測定器の設計

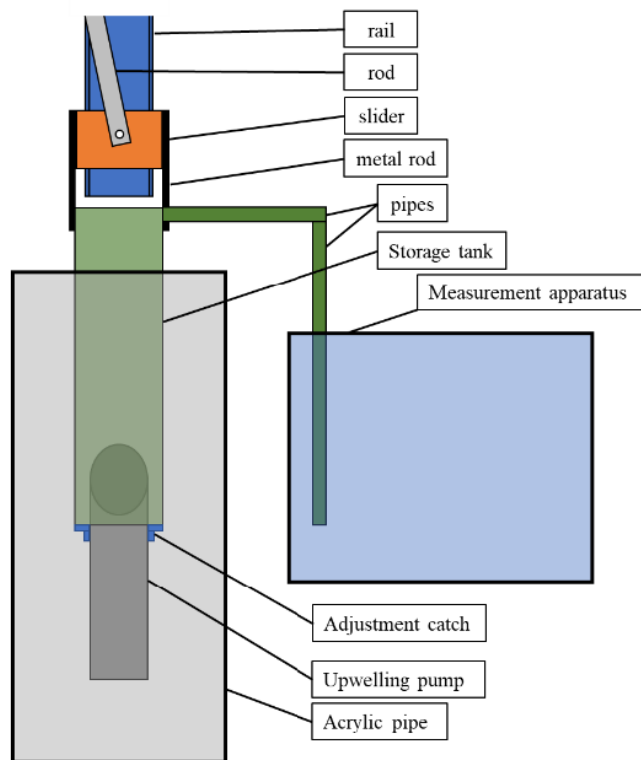


Figure 19 How to evaluate the wave upwelling pump Conceptual diagram

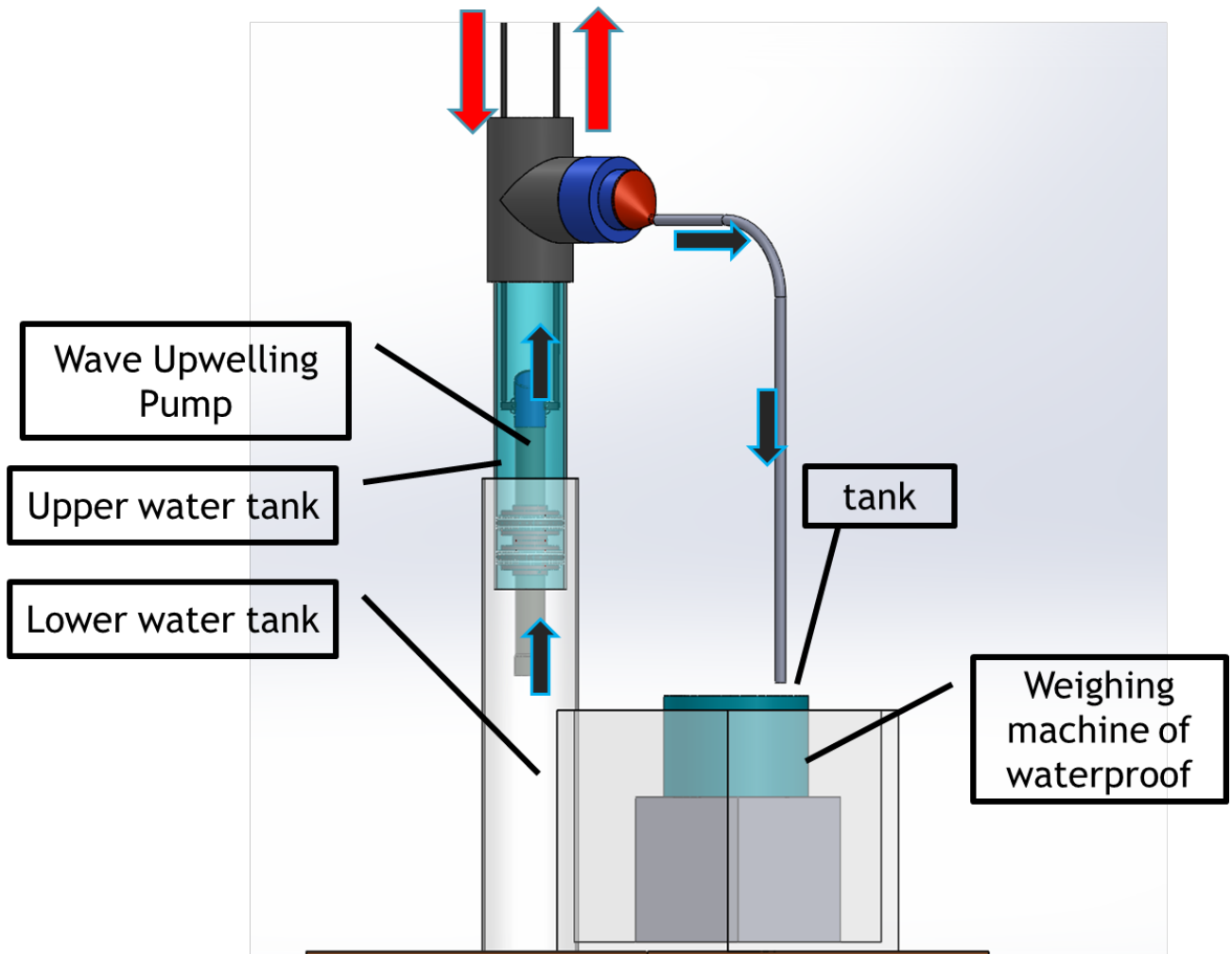


Figure 20 Flow measuring device Design stage

図 19 のようにモータによる円運動をスライダ機構によって、上下の直線運動に変更し波動湧昇ポンプを駆動させる。その後、波動湧昇ポンプによる湧昇水を上部タンクへ貯め、その水をパイプを経由して外部のタンクへ貯めていく、こうして外部タンクへ貯められた水の単位時間当たりの変化量を計測することによって湧昇ポンプの性能を定量的に評価できるようになる。

昨年の波動湧昇ポンプの作動実験に用いた部品の寸法を基に下図のような波動湧昇ポンプの定量的性能評価実験装置を設計した。

図 14 のように下部水槽に貯めた水を、湧昇ポンプを上下させることによって上部水槽に貯める。そして上部水槽に貯めた水を、ホースを通して外部タンクに貯める。このタンクの下部に設置した防水はかりを用いて、タンクの単位時間当たりの重量変化を記録する。これによって、湧昇ポンプが理想的に上下動した場合の性能を定量的に評価することができるようになる。

流量測定装置の組立図を下記に示し、その後各部品の部品番号と主要寸法及び使用用途を以下にまとめる。

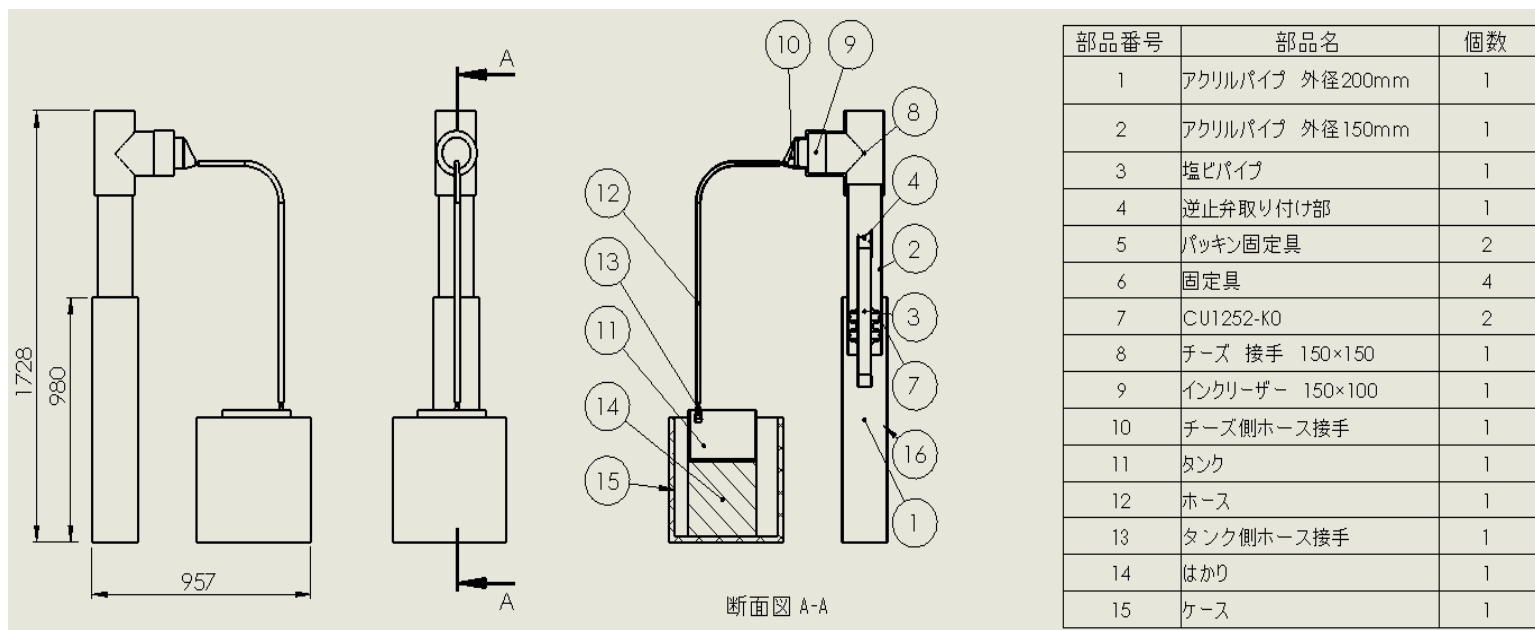


Figure 21 Flow measuring device Assembly drawing

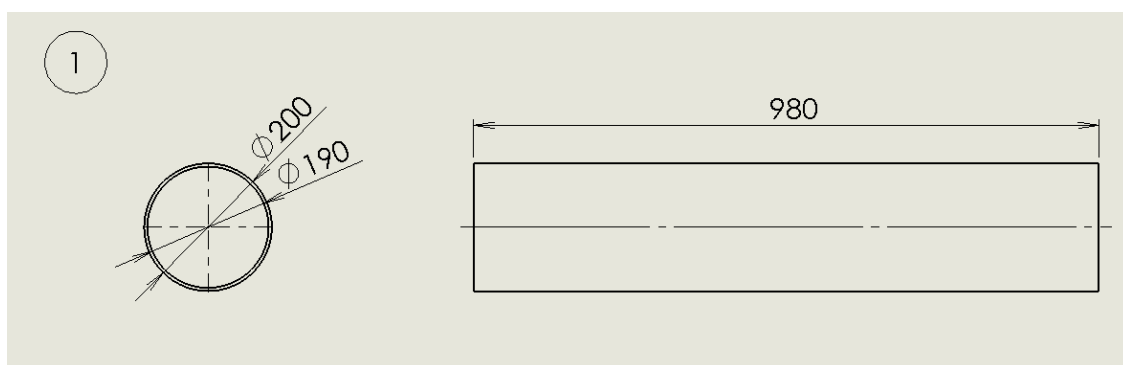


Figure 22 Part number 1 Acrylic pipe (Outer diameter 200mm)

上記の部品は下部水槽として使用する。

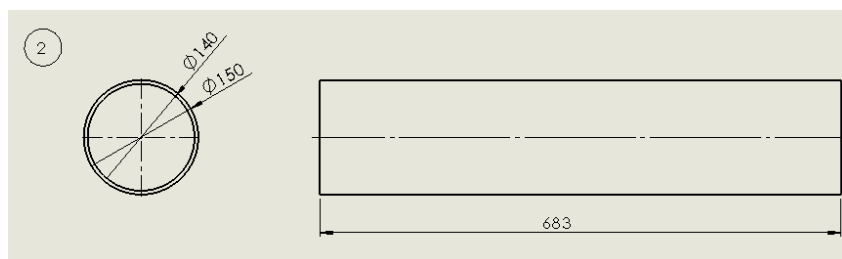


Figure 23 Part number 2 Acrylic pipe (Outer diameter 150mm)

上記の部品は上部水槽として使用する。

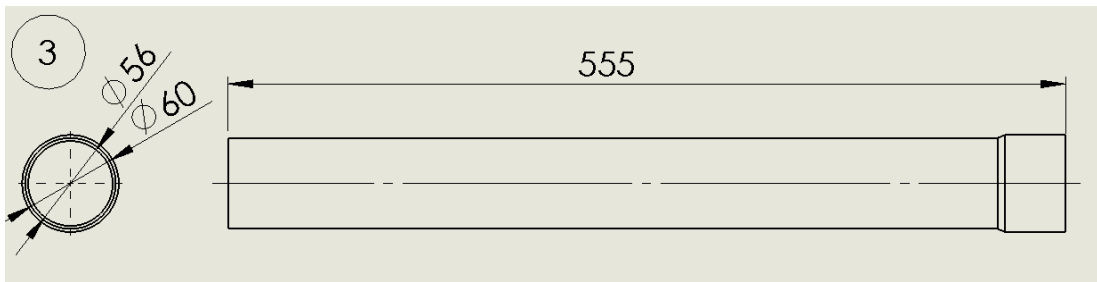


Figure 24 Part number 3 PVC pipe

上端に逆止弁を取り付け,波動湧昇ポンプの本体として使用する.

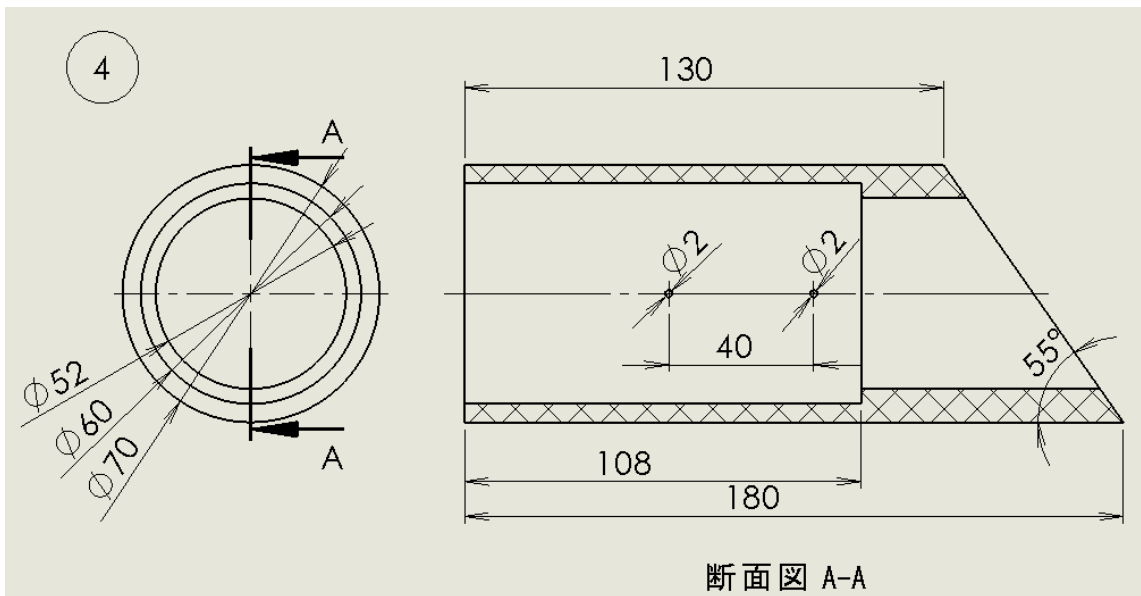


Figure 25 Part number 4 Check valve mounting part

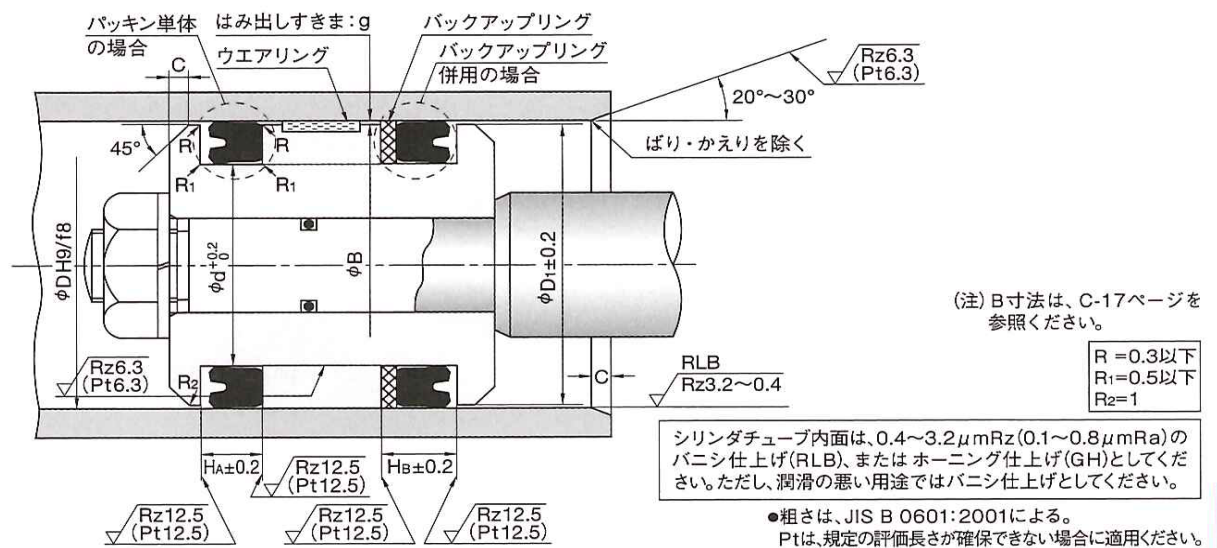
側面に内径 2mm の貫通穴を開け,この穴にモータと接続するための取手を固定する.前述のように塩化ビニルパイプに取り付けた状態で使用する.

また,上部水槽内に貯めた水が下部水槽に落下しないよう密閉するために,型番 CU1252-K0 というパッキンを選定し,このパッキンを固定するために下記のような固定具を当研究室所有の 3D プリンタを利用して製作した.

選定したパッキン(型番 CU1252-K0)は,往復運動兼回転運動用のパッキンであり,外径 $D=140\text{mm}$,内径 $d=125\text{mm}$ である⁽²³⁾.

パッキンの固定具として図 26・27 を参考にして設計を行った.

USH型



バックリン呼び寸法 および 装着部寸法							標準 (A505)		耐熱 (F357)		併用バックアップリング部品番号 BRT2(バイアスカット)
d	D	h	H _A	H _B	φD ₁	C	バックリン部品番号	呼び番号	バックリン部品番号	呼び番号	19YF
98	112	8.5	9.5	12.5	110	4	CU1067K0	USH-98	CU1067K2	USH-98F	GN4824V0
100	115	9	10	13	113		CU1082K0	USH-100	CU1082K3	USH-100F	GN4512V0
106	120	8.5	9.5	12.5	118		CU1135K0	USH-106	CU1135K1	USH-106F	GN4826V0
110	125	9	10	13	123		CU1157K0	USH-110			GN4480V0
112	125	8.5	9.5	12.5	123		CU1178K0	USH-112	CU1178K1	USH-112F	GN4827V0
	125	9	10	13	123		CU1179K0	USH-112A			GN4827V0
115	130	8.5	9.5	12.5	128		CU3259K0	USH-115			GN4593V0
118	132	8.5	9.5	12.5	130		CU1204K0	USH-118			GN5414V0
125	140	9	10	13	138		CU1252K0	USH-125	CU1252K2	USH-125F	GN4481V0
130	145	9	10	13	143		CU1280K0	USH-130			GN4628V1
132	145	8.5	9.5	12.5	143		CU1291K0	USH-132			GN5737V0
136	150	8.5	9.5	12.5	148		CU1306K0	USH-136	CU1306K3	USH-136F	GN4830V0
140	155	9	10	13	153		CU1323K0	USH-140	CU1323K1	USH-140F	GN4526V0
145	160	9	10	13	158		CU1343K0	USH-145	CU1343K2	USH-145F	GN4551V0
150	165	9	10	13	163		CU1359K0	USH-150	CU1359K1	USH-150F	GN4833V0

Figure 26 USH type packing Catalog ⁽²³⁾

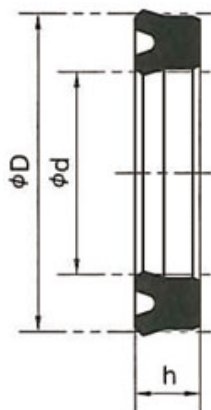


Figure 27 USH type packing Size ⁽²³⁾

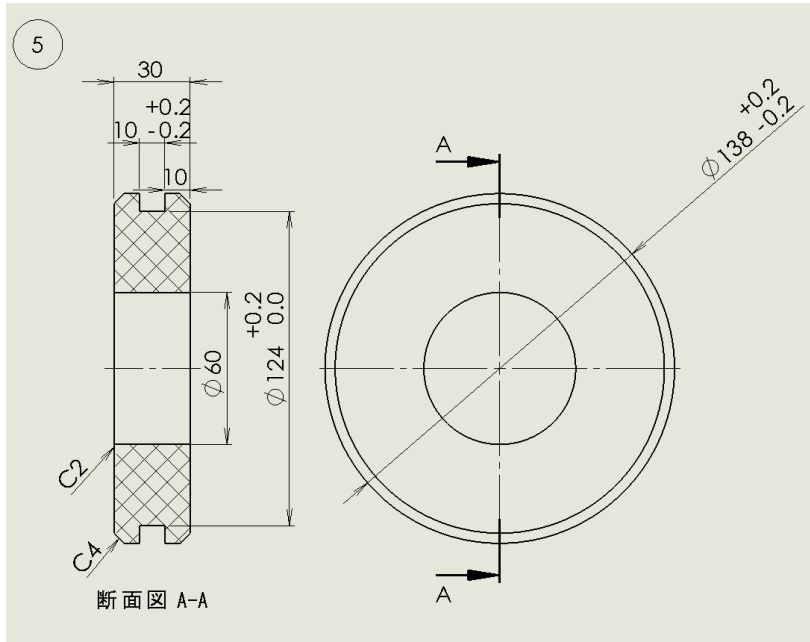


Figure 28 Part number 5 Packing fixture

また,部品番号5のパッキン固定具の固定位置がアクリルパイプとの摩擦によって,ずれることのないように下記のような固定具を設計した.

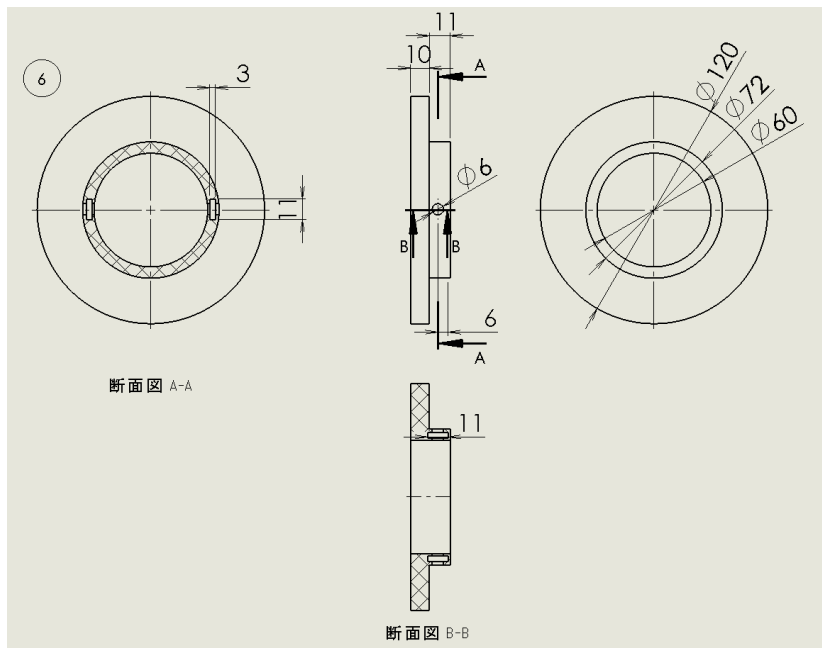


Figure 29 Part number 6 Fixture

3D プリンタによって,図 29 中断面図 A-A 及び断面図 B-B における $3 \times 11 \times 11$ mm 溝の積層が終了した後一時的に 3D プリンタを停止させ,この溝に正方形 M6 ナットをはめ込んだ後,積層を再開させることで,3D プリンタでは製作が困難なねじ山を固定具に再現

することができる。部品番号 5 パッキン固定具と部品番号 6 固定具を塩化ビニルパイプに取り付けた後、部品番号 6 固定具の M6 ナットに M6 ボルトをはめ込むことで、部品番号 5 パッキン固定具の位置を固定することができる。



Figure 30 Part number 7 CU1525-K0⁽²³⁾

今回選定したニトリルゴム製のパッキン。往復運動用の密封装置である。上部水槽からの漏水を防ぐために使用する。

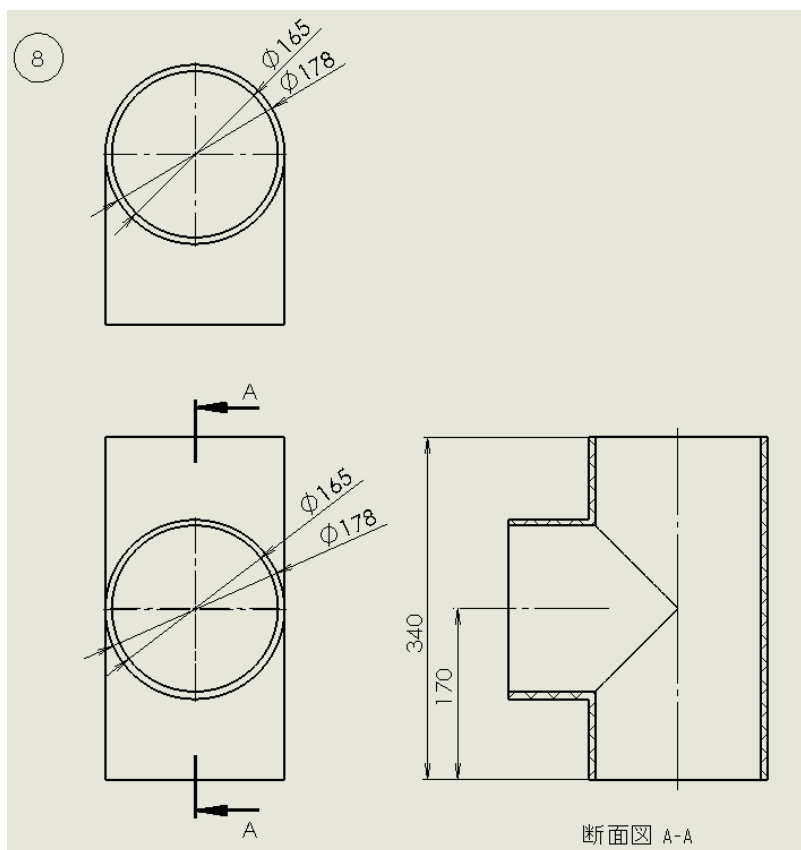


Figure 31 Part number 8 Fittings for cheese 150×150

上部水槽へ湧昇された水をタンクへと導くことができるように既製品である塩化ビニル製の呼び径 150×150 チーズを購入した。

また,当研究室所有の 3D プリンタは印刷可能範囲が 150×150×150mm であるため,この 3D プリンタを用いてホースと接続するインクリーザを製作できるようにするため,呼び径 150×100 インクリーザを呼び径 150×150 の塩化ビニル製チーズと接続した.

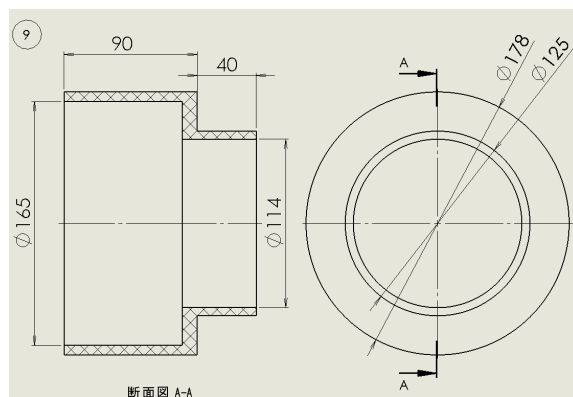


Figure 32 Part number 9 In increaser 150×100

上記のインクリーザを用いて,ホースをタンクに固定するために下記のようなインクリーザを製作した.

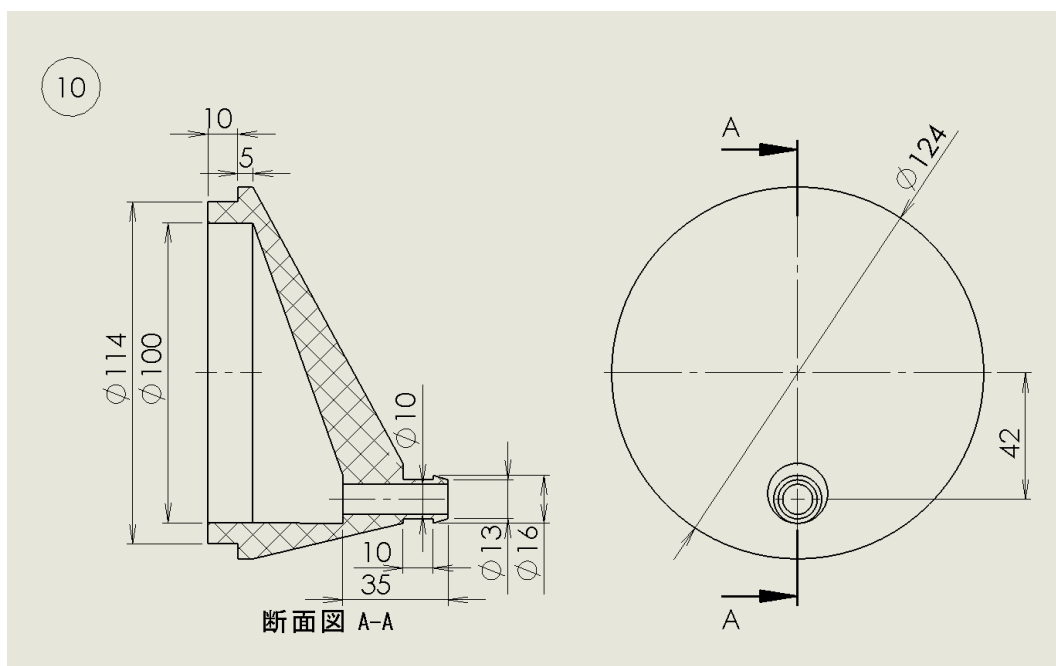


Figure 33 Part number 10 Hose fitting (For In increaser)

部品番号 10 は部品番号 9 インクリーザ 150×100 に接続し,もう一端を内径 15mm のホースと接続する.

湧昇水を一時的に貯めるために下記のコック付きタンクを選定した.波動湧昇ポンプによる湧昇流が定常的になるまではコックを開いた状態とし,湧昇流が定常になった後コックを閉め,湧昇水をタンク内に貯める.これによって,波動湧昇ポンプによる定常でない湧

昇水がタンク内に貯まることがなく、タンクが満たされるまでの計測時間を延ばすことができる。



Figure 34 Part number 11 Tank with cock⁽²⁴⁾

このコック付きタンクの容量は5Lである。

チーズ側とコック付きタンクを内径 14mm の部品番号 12 ホースで接続した。

また、コック選定後チーズ側とタンクをホースで接続するために下記の部品を設計した。

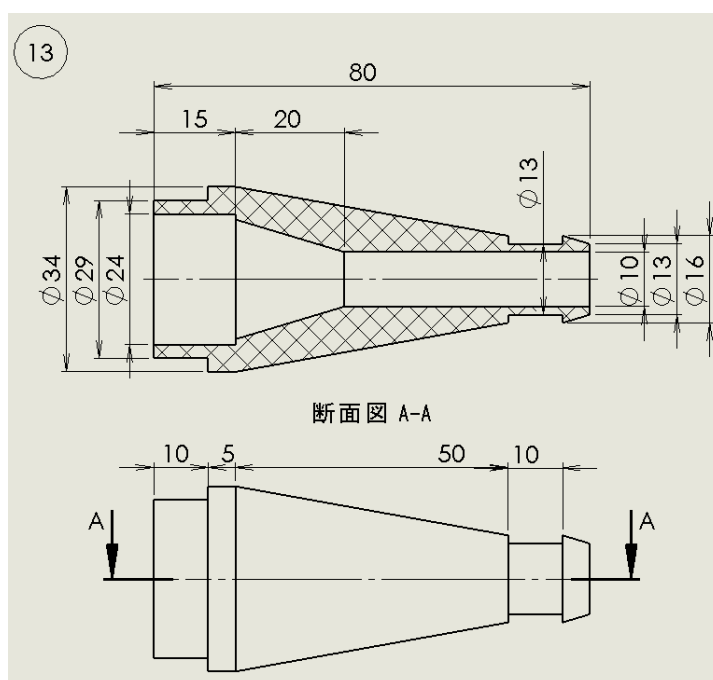


Figure 35 Part number 13 Hose fitting(For Tank)

次に,コック付きタンクの重量変化を測定するために下記の防水はかりを購入した.このはかりの防水性能は IP65 で秤量 10kg,単 2 乾電池 4 本を電源とする.ここで,防水性能を示す IP65 とは,『内径 6.3mm の注水ノズルを使用し,約 3m の距離から 12.5L/分の水を最低 3 分間注水する条件であらゆる方向から噴流を当てても機器の機能が動作することを意味します.』⁽²⁵⁾より引用.つまり,タンクからこぼれてしまった水がかかっても故障しないものの,水没すると故障してしまう.



Figure 36 Part number 14 Waterproof scale⁽²⁶⁾

この防水秤の品番は CS-10KWP,秤量は 10kg,最小単位は 0.005kg,電源は単 2(15V)乾電池 4 本である.

また,下部水槽及び外部タンクから漏水した場合を考え,プラスチック製のケースの上に下部水槽及び外部タンクを設置した.

8. 製作した装置の評価

8.1. 製作した部品の評価

今回実際に製作した部品は,部品番号 5・6・10・13 であり,これらの部品を当研究室所有の 3D プリンタで製作した.これら以外の部品は既製品を加工せず利用した.

実際に製作した部品番号 5 パッキン固定具を下記に示す.

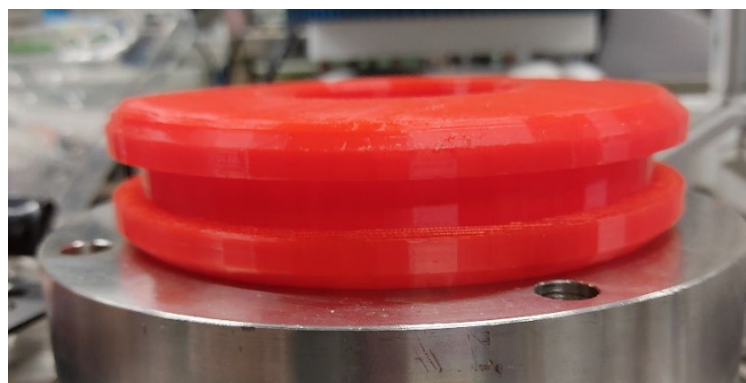


Figure 37 Packing fixture

図 30 部品番号 5 パッキン固定具について各部寸法を下記のように表し,各部寸法の測定を行った.ここで,図 31 中溝部外径 d_2 を直接測定することが困難であったため,図 31 中 t を 5 回測定し,この値 t の平均値 \bar{t} を 2 倍し,

$$d_2 = \overline{D_3} - 2 \times \bar{t} \quad (16)$$

という関係式から d_2 を求めた.

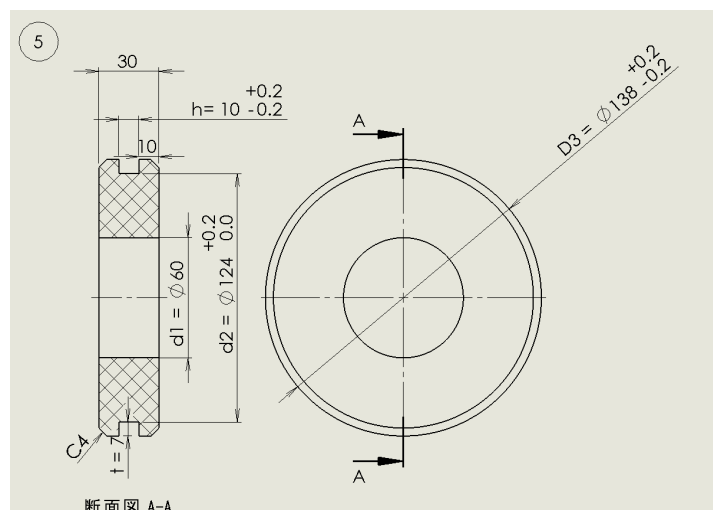


Figure 38 Part number 5 Packing fixture

各寸法の測定結果を下表に示す.

Table 14 part number 5 Results of each dimension measurement

d_1	D_3	t	h
59.25	137.70	6.50	9.15
59.00	137.60	6.60	9.65
59.50	137.60	6.60	9.50
59.90	137.80	6.60	9.05
59.90	137.90	6.60	9.35

よって各部の平均寸法は,

$$\bar{d}_1 = 59.51\text{mm}, \bar{D}_3 = 137.72\text{mm}, \bar{t} = 6.58\text{mm}, \bar{h} = 9.34\text{mm} \text{ となる.}$$

式(13)から,

$$\begin{aligned} d_2 &= 137.72 - 2 \times 6.58 \\ &= 124.56\text{mm} \end{aligned} \quad (17)$$

以上から,パッキン固定溝の外径は設計寸法よりも大きくなってしまっている.また,パッキン溝の高さ t の値は設計寸法よりも小さくなってしまった.また,湧昇パイプに取り付ける

軸穴 ϕd_1 の値は軸よりも小さくなってしまった。これらの寸法の設計値と測定値のずれは、3D プリンタによる積層終了後フィラメントの熱が空気によって冷却されることによる縮みと 3D プリンタによる製作時に溝部に存在したサポート材が部品に残ってしまったことが原因であると考えられる。また、軸穴の寸法が軸よりも小さくなってしまったことで、しまりばめ状態となり、部品番号 6 固定具を製作することなくパッキン固定具の位置を固定することができるようになった。

製作したパッキン固定具にゴムパッキンを取り付けた後、上部水槽にはめ込むことが出来なかった。これは、実際に製作した部品の寸法変化によって、溝部の体積が設計よりも小さくなってしまったためであると考え、以下のように設計変更を行った後、改めて製作した。

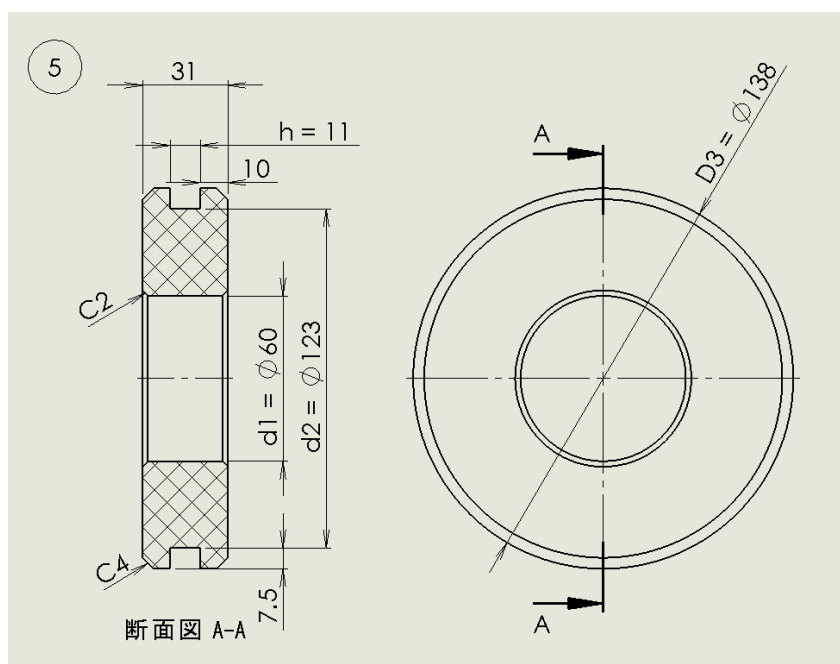


Figure 39 Part number 5 Packing fixture (After improvement)

上部品を新たに 3D プリンタによって製作した後、各部寸法を同様に測定した結果、下記のようになった。

Table 15 part number 5 Results of each dimension measurement

d_1	D_3	t	h
59.20	137.85	7.20	10.35
59.25	137.50	7.00	10.25
59.50	137.90	7.00	10.20
59.35	138.50	7.20	10.15
59.15	137.90	7.20	10.25

よって各部の平均寸法は、

$\bar{d}_1 = 59.29\text{mm}$, $\bar{D}_3 = 137.93\text{mm}$, $\bar{t} = 7.12\text{mm}$, $\bar{h} = 10.24\text{mm}$ となる。

式(13)から,

$$\begin{aligned}d_2 &= 137.93 - 2 \times 7.12 \\ &= 123.69\text{mm}\end{aligned}\tag{18}$$

以上から,設計寸法を調整し新たに製作した部品の各部寸法は,必要寸法と比べてわずかに小さくなっているが,設計寸法と測定値のずれは無視できる程度である.

新たに製作したパッキン固定具にゴムパッキンを取り付け,上部水槽にはめ込んだところ,パッキンと上部水槽側面にはたらく摩擦が大きく,無視できない程の損失が発生してしまうことが分かった.

そのためゴムパッキンを取り付けるのではなく,湧昇ポンプへ取り付け中に破損してしまったパッキン固定具の破損部にドリルで $\Phi 3$ の穴を開け,そこから紐を通し,パッキン固定具の溝部分に綿製(直径 3mm)の紐を巻き付けることによる密封方式を採用することとした.破損してしまったパッキン固定具を使用したのは,製作したパッキン固定具の両端に面取りを行っていたため面取りを行った箇所紐を固定するための溝を作成できなかったためである.また,軸穴の寸法が設計よりも小さくなり,部品番号 6 の固定具を軸に取り付けなくてもパッキン固定具の位置を固定できるため,部品番号 6 の固定具は製作しなかった.

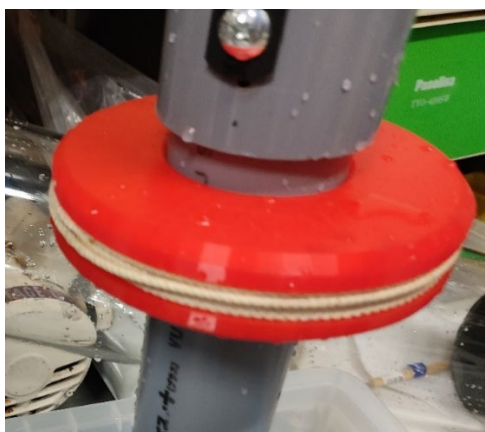


Figure 40 Packing fixative after attaching the string

部品番号 5 パッキン固定具と同様に下図に示す各部寸法を測定した.本部品において高い精度を必要とする箇所はないため,各部の寸法を一度のみ測定した.

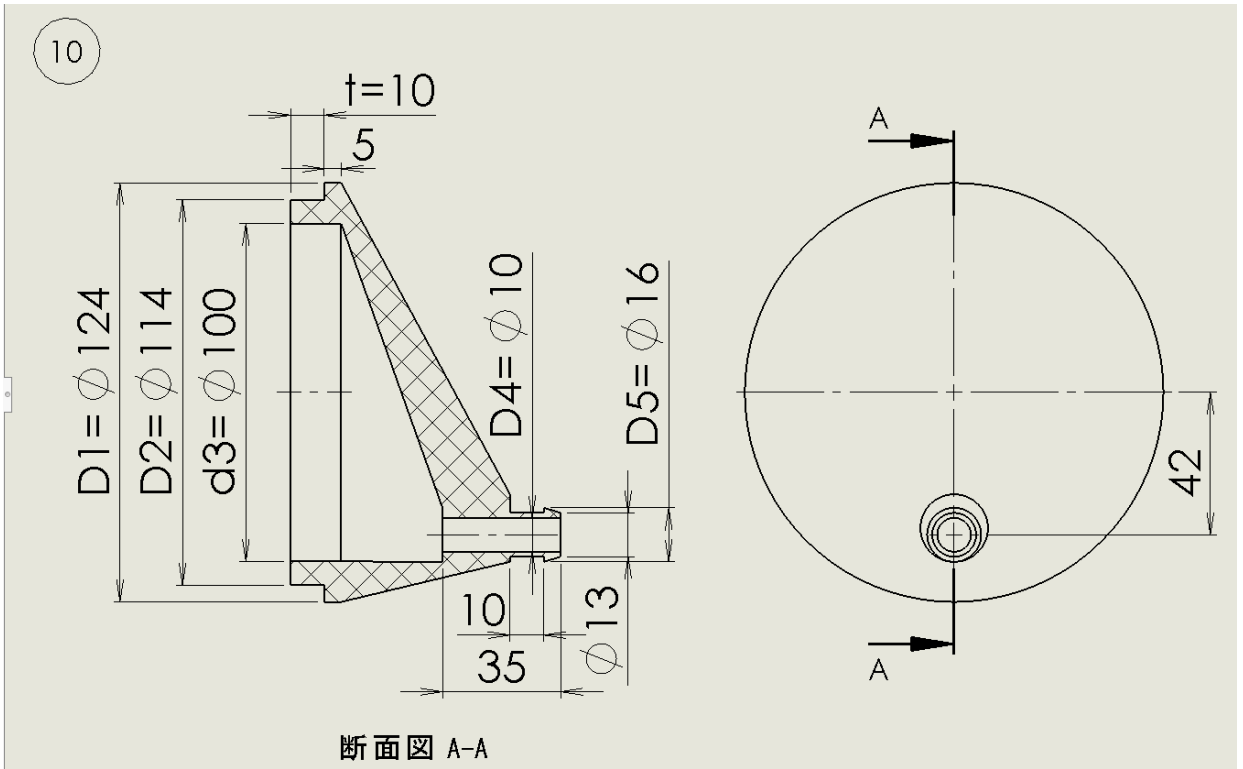


Figure 41 Part number 10 Hose fitting(For Increaser)

製作した部品番号 10 を下記に示す.

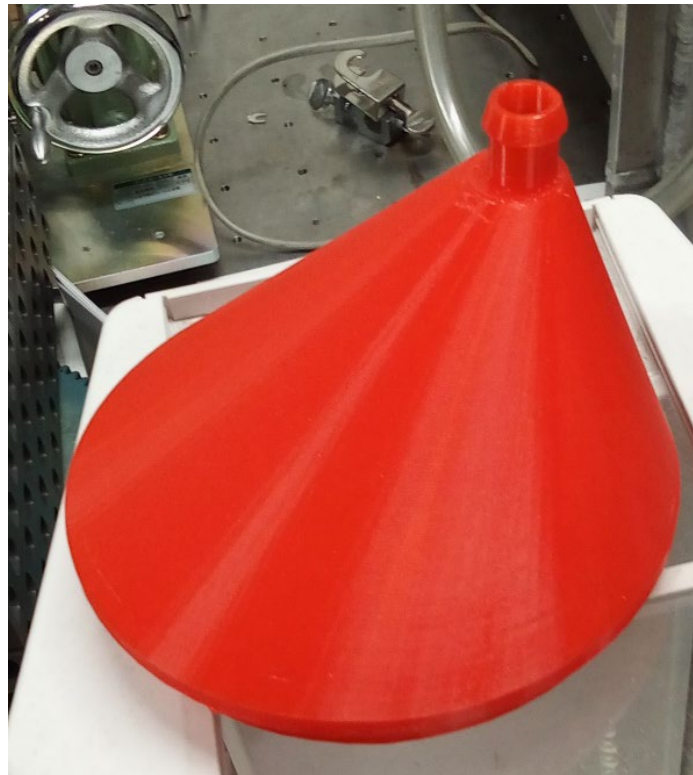


Figure 42 After made hose fitting(For Increaser)

Table 16 Hose fitting(For Increaser) Results of each dimension measurement [mm]

D_1	D_2	d_3	D_4	D_5	t
123.50	113.00	99.10	13.10	14.70	9.15

150×100 インクリーザにはめ込む側である図 33 中 ΦD_2 が設計よりも細くなってしまったため、インクリーザに対してすきまばめ状態となっている。ただし、問題なく使用できるためこの部品を使用して問題ない。

次にタンクにホースを繋げる部品について下記に示す各部寸法を測定した。この部品は、部品番号 10 チーズ側ホース接手と同様に高い精度を必要とする箇所はないため、各部の寸法を一度のみ測定した。

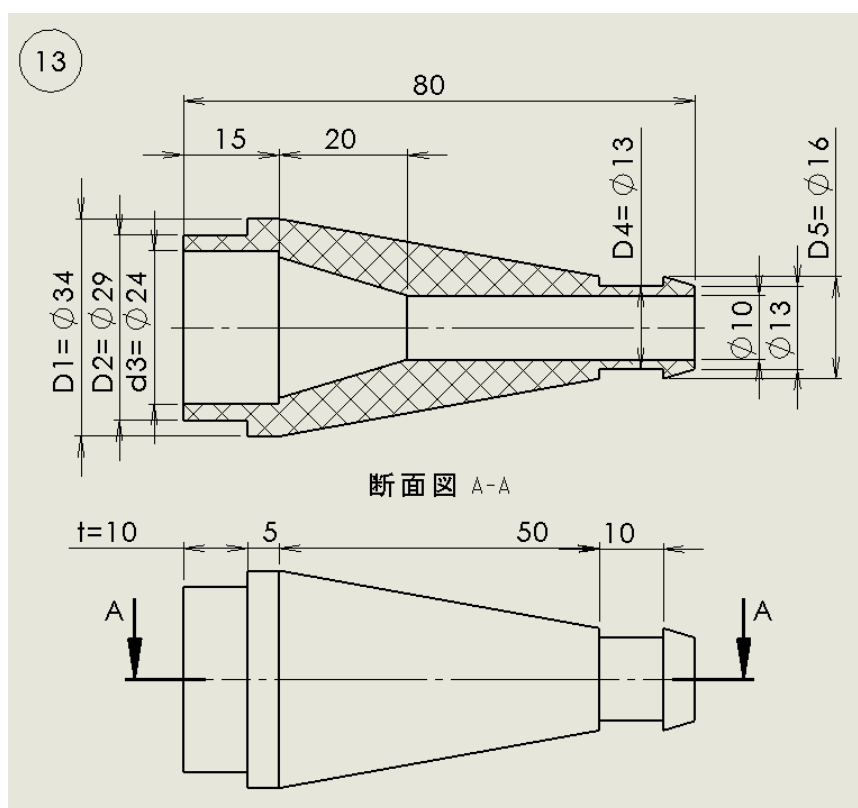


Figure 43 Part number 3 Hose fitting(For Tank)

Table 17 Hose fitting(For Tank) Results of each dimension measurement [mm]

D_1	D_2	d_3	D_4	D_5	t
34.00	29.10	24.00	13.00	15.00	9.70

上記の部品も部品番号 10 と同様に問題なく使用することができる。

以上から、3D プリンタによって製作した部品には積層完了後に冷却されることによって、各部がわずかに収縮することが分かった。また、この収縮は体積の大きい部品程収縮量が大きくなる。よって、体積の大きい部品を設計する際は必要寸法よりわずかに大きく設計する必要がある。この部品を製作後タンクに取り付けた様子を下記に示す。



Figure 44 Part number 13 Hose fitting(For Tank)

また,部品番号1・2・3・4は前年使用した部品をそのまま利用し,部品番号7・8・9・11・12・14は既製品を購入し,加工せず使用した.

波動湧昇ポンプには次のような逆止弁構造を取り付けた.



Figure 45 Check valve structure

上図に示した逆止弁構造を波動湧昇ポンプに取り付けた様子を下記に示す.



Figure 46 Upwelling pump by wave energy

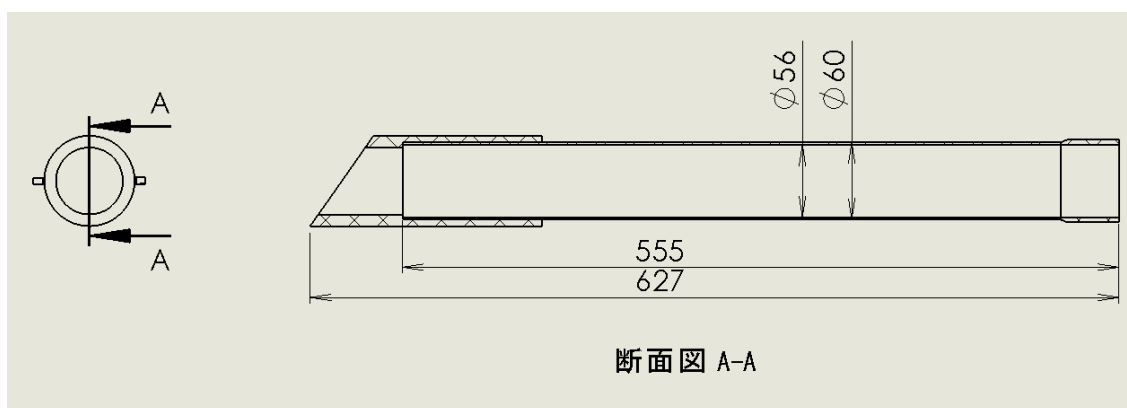


Figure 47 Assembly drawing of upwelling pump by wave energy

8.2. 第1回 測定装置作動実験

各部品の製作・組み立てが完了したため、測定装置の作動実験を行った。本実験は、水を各水槽内に入れていない状態と各水槽に入れた状態における作動状態の確認を目的とする。

最初に、水を入れていない状態において作動実験を行った結果、波動湧昇ポンプの上下と連動して、上部水槽内の波動湧昇ポンプに取り付けた逆止弁が開閉することが確認された。これは上部水槽内をパッキン固定具が上下動することによる体積変化によって、下部水槽内の空気の一部が下部水槽から上部水槽内へ逃げているためだと考えられる。これによって、密封が行われていることがわかる。

次に,上部水槽のみに注水し,紐による密封の状態を確認した.この結果,紐を巻き付けた箇所の内一部から漏水が確認された.そのため,紐による密封は十分ではないと言える.しかし,本実験における目的は作動状態を確認することであったため,実験を続行した.

最後に上部水槽及び,下部水槽内を水で満たした状態で波動湧昇ポンプを動作させた.その様子を下図に示す.



Figure 48 Wave upwelling pump
(Statically determinate state)



Figure 49 Wave upwelling pump
(Highest position)



Figure 50 Wave upwelling pump (Lowest position)

以上に示したように,波動湧昇ポンプの動作によって,水面の上下動が確認できた.これは,パッキン取り付け部がピストンの役割を果たし,上部水槽と下部水槽の体積変化によるものである.

また、本実験の際モータの回転数を高速とした際に、紐にはたらく摩擦による抵抗力を受け、モータの固定板が持ち上がってしまった。このため、今回の実験ではモータの回転数を 4rpm とした。

今回の実験によって以下の問題点が発見された。(1)モータの回転運動を上下動へ変換するスライダ機構のレール上端から、スライダが外れることによって、異音が発生していること。(2)波動湧昇ポンプの最高位置が想定よりも高い位置であったために、逆止弁の開閉状態が確認できないこと。(3)モータの回転数を高速にした際にモータを固定した金属板が浮き上がってしまうこと。

8.3. 第2回 測定装置作動実験

前回の実験によって判明した問題点の原因と解決方法を下記に示す。今回の実験における目的は、上記に示した問題点の解消を確認することである。

問題点1：モータの回転運動を上下動へ変換するスライダ機構のレール上端から、スライダが外れることによって、異音が発生していること。

原因：スライダの上下動範囲に対して、レールの取り付け位置が下であったためである。

解決法：レールを現在の取り付け位置から上方へ取り付け直す。これによって、発生したスライダ部における異音が確認されなくなった。



Figure 51 Rail mounting position before the adjusting



Figure 52 Rail mounting position after the adjusting

問題点 2 : 波動湧昇ポンプの最高位置が想定よりも高い位置であったために、逆止弁の開閉状態が確認できないこと。

原因 : 前回の実験時に使用した塩化ビニルパイプが長すぎたため、逆止弁取り付け位置が塩化ビニル製チーズの中に隠れてしまった。

解決法 : 逆止弁の開閉状態を画像解析によって解析できるようにするため、塩化ビニルパイプをより短いものに取り換えた。

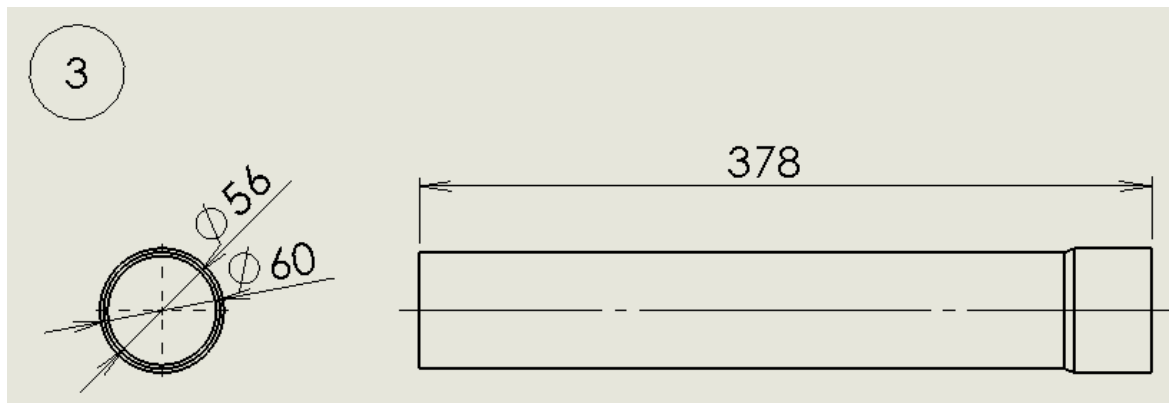


Figure 53 after the replacement of PVC pipe

また、スライダと波動湧昇ポンプを繋ぐ金属部品の取り付け位置の微調整を行った。これによって、波動湧昇ポンプが最上部にある状態でも逆止弁の開閉状態を確認できるようになった。

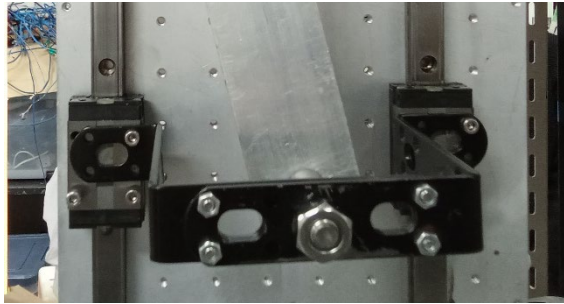


Figure 54 Slider mounting position before the adjusting

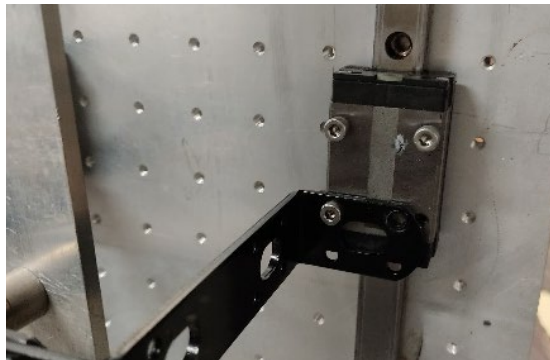


Figure 55 Slider mounting position after the adjusting

問題点 3: モータの回転数を高速にした際にモータを固定した金属板が浮き上がってしまうこと。

原因 : 上部水槽を密封するために取り付けた紐が上部水槽内を摺動する際に発生してしまう摩擦によるものと考えた。

解決法 : モータを固定している金属板を棚板に固定し, モータ部にはたらく抵抗力を受けても金属板がずれてしまわないように対策を行った。

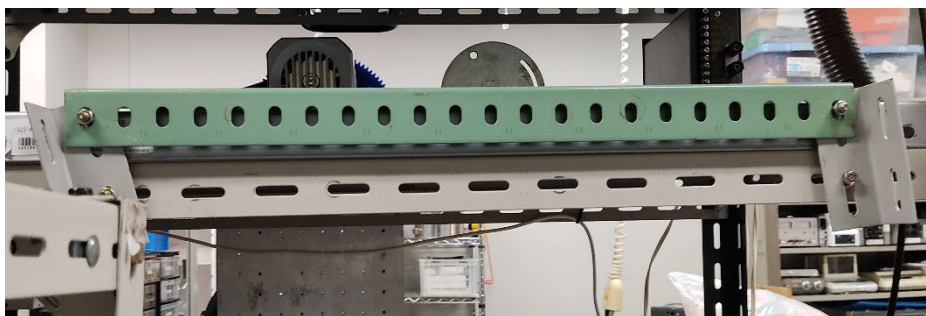


Figure 56 State of fixing the metal plate

問題点 4 : 上部水槽内のパッキン固定具から漏水が発生してしまっていること。

原因 : パッキンの密封性能が十分ではないため。

解決法 : 下記に示すような新たなパッキン固定具を作成し, パッキンを 2 重にすることによって密封性能を向上させることが出来た。

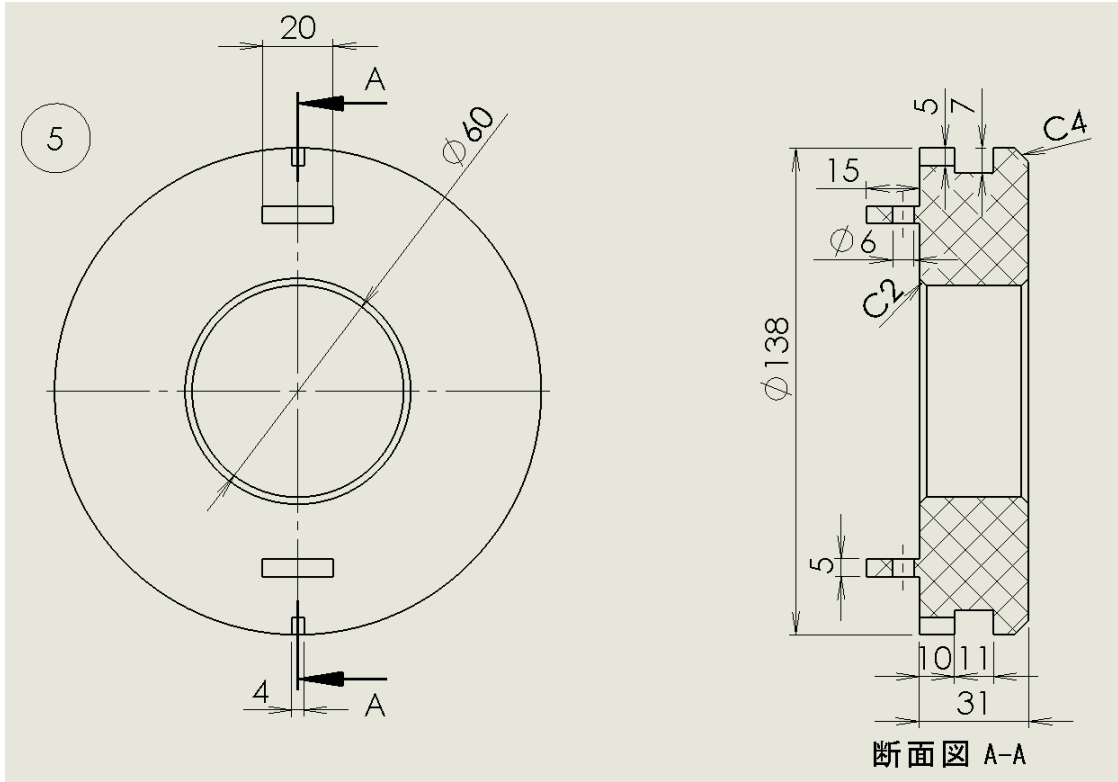


Figure 57 String fixture for packing

上記部品を波動湧昇ポンプに取り付けた様子を下記に示す.これによって,パッキン部からの漏水量を改良前の半分ほどに減少させることが出来た.



Figure 58 Upwelling pump in lower water tank

8.4. 第3回 測定装置作動実験

前回の実験を受けて、各部の調整を行うことによって波動湧昇ポンプを動作させた際の問題点は解決された。そのため今回の実験では、実際に上部水槽及び下部水槽に水を満した状態で波動湧昇ポンプを動作させ、湧昇水量を測定するための実験を行った。

まず上部水槽内にのみ水を注ぎ、上部水槽と下部水槽間を密封するパッキン部からの漏水量を評価した。上部水槽内に 1L の水を注ぎ、その水が下部水槽へ漏水するまでの時間を計測したところ、1 分 30 秒で上部水槽内の水がすべて漏水した。しかし、これ以上紐を巻き付ける量を増やしてしまうと摺動時の負荷が大きくなってしまうため、漏水量をさらに少なくすることは困難である。

また、下部水槽内の水面に対して上部水槽の水面が高すぎるため、これらの水面を揃えようとする力が働き、波動湧昇ポンプが上下するたびに上部水槽と下部水槽の隙間から漏水が発生した。また、その影響によって上部水槽の水面が時間経過とともに降下していき、湧昇水量を測定することが出来なかった。

原因：前述したように上部水槽と下部水槽の水面の高さが異なるため、サイフォンの原理によって上部水槽と下部水槽の水面を揃えようとする力がはたらくため。

解決法：上部水槽と下部水槽の隙間を塞ぎ、密封することによって下部水槽からの漏水を防ぎ上部水槽の水面が降下するのを防ぐことが出来るようにした。しかし、上部水槽と下部水槽の隙間を完全に塞いだため、波動湧昇ポンプを動作させるたびに下部水槽内の圧力が増加していくことでモータの出力に対して抵抗力が大きくなり、波動湧昇ポンプを動作させることが困難になっていった。また、波動湧昇ポンプによって汲み上げられた分の水を給水することも困難になってしまっていた。そのため、下部水槽に水道につないだホースを挿入し、下部水槽内の圧力を減じるために空中に解放されたホースを挿入した後、上部水槽と下部水槽の隙間を密封した。これによって、上部水槽の水面が降下してしまうことを防ぎ、かつ波動湧昇ポンプを動作させることが出来るようになった。



Figure 59 Gap sealed state (The left side is the water supply hose)

最終的な測定装置の全体図を下記に示す.

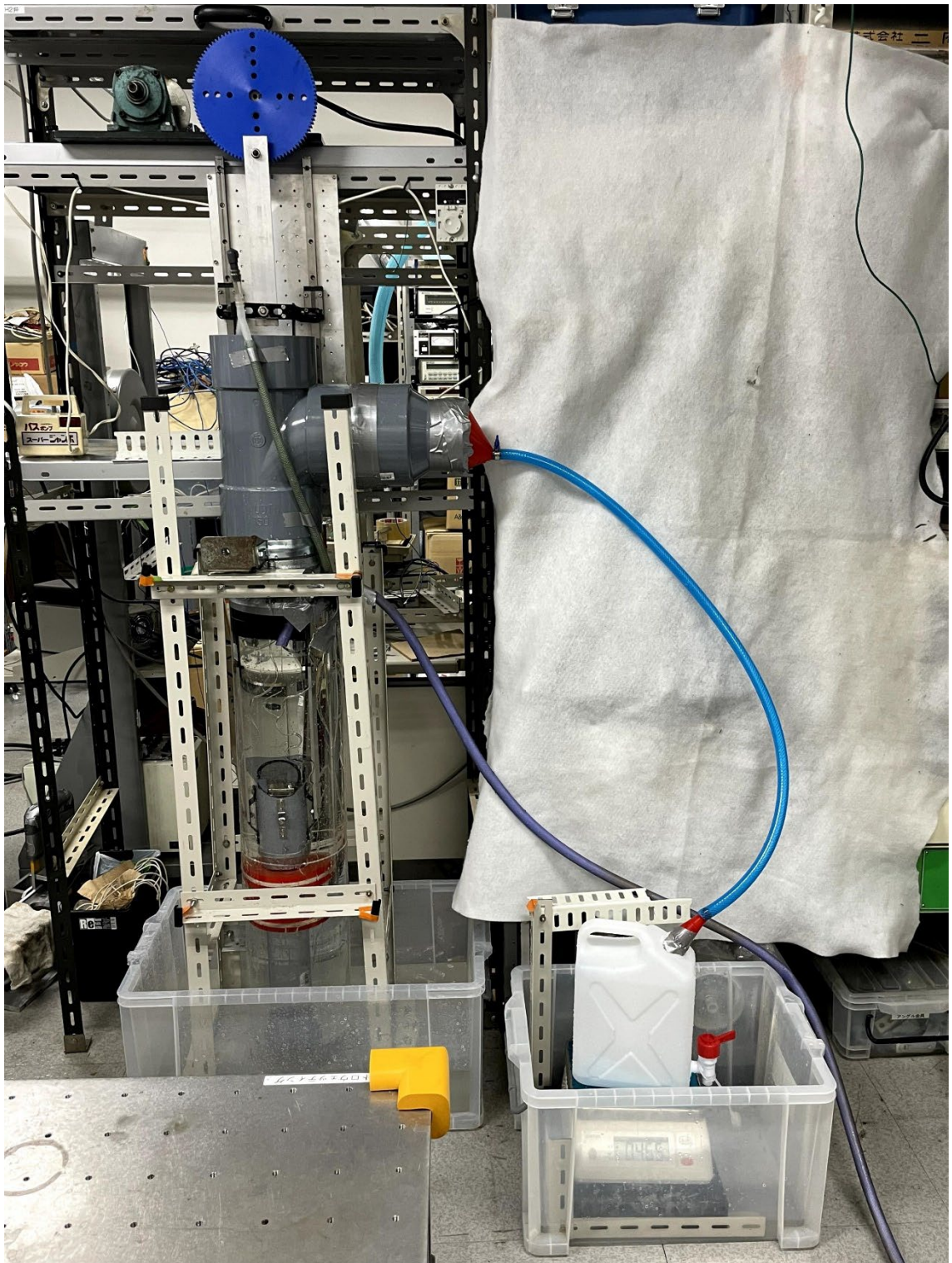


Figure 60 Overall view of measuring device

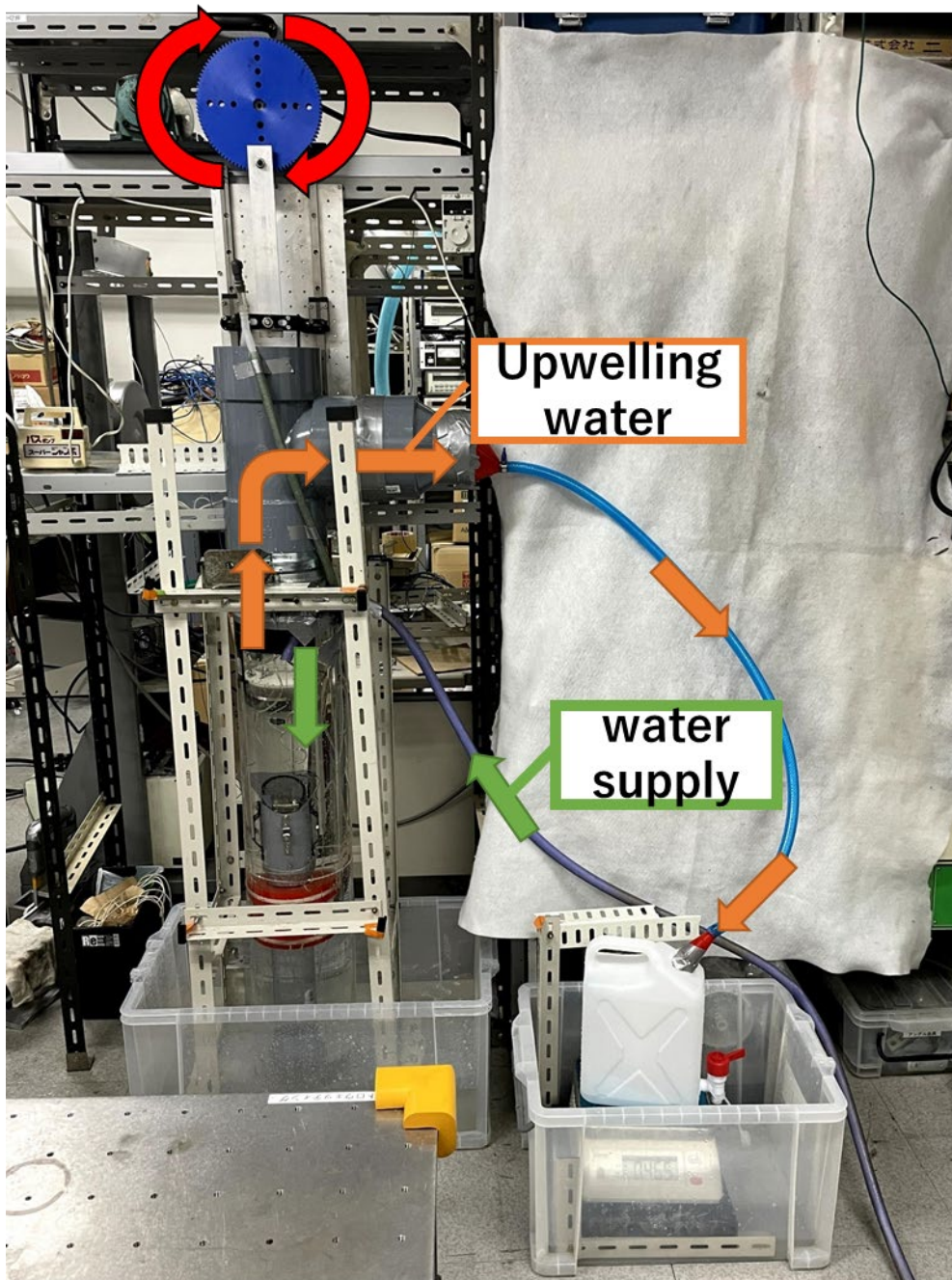


Figure 61 Overall view of measuring device (Water path)

9. 実験方法

下記の実験方法によって波動湧昇ポンプの性能測定実験を行った。

- 1.波動湧昇ポンプの上下動変位を 180mm とし,前述のようにモータによって波動湧昇ポンプを上下に駆動させる.
- 2.下部水槽内に固定したホースを通して注水を行う.このときの流量は 0.011L/s (1L/1.5min)で固定し,時間経過によって上部水槽の水面が降下しないようにし,実験が終了するまでホースの流量は変化させないようにする.
- 3.波動湧昇ポンプを上下させることによって上部水槽に貯められた水を,チーズ及びホースを通してコック付きタンクに送る.
- 4.波動湧昇ポンプによる上昇流が定常になった後コックを閉め,コック付きタンク内に水を貯める.
- 5.タンクのコックを閉めるのと同時に防水はかりのゼロ点調整を行い,30 秒ごとの重量変化を記録する.
- 6.上記の手順をモータの回転数 20rpm,30rpm,40rpm ごとにそれぞれ 2 回ずつ繰り返す.
- 7.各回転数の測定が終了した後波動湧昇ポンプの上下動変位を 130mm に変更し,実験手順 3~6 を再度繰り返す.
- 8.同様に,各回転数の測定が終了した後波動湧昇ポンプの上下動変位を 60mm に変更し,実験手順 3~6 を再度繰り返す.
- 9.各測定が終了した後,波動湧昇ポンプとモータの接続部を外した後上部水槽に排水ポンプを取り付け,排水を行い測定装置の片付けを行う.

前述したように,同一の波動湧昇ポンプの性能は波の周期に当たるモータの回転数及び波の高さに当たる波動湧昇ポンプの上下動変位によって決定されると予想される.

10. 実験結果

実験結果を下記にまとめる.1・2列目に測定結果を示し,3列目に30秒ごとの湧昇水量を計算した値を示す.

10.1. 上下動変位 180mm の場合

Table 18 Rotation of motor (20rpm, First)

[s]	[kg]	amount of upwelling [kg/(30s)] (20rpm, First time)
0	0.000	-
30	0.705	0.705
60	1.440	0.735
90	2.205	0.765
120	2.995	0.790

平均湧昇水量 0.749kg/(30s)

Table 19 Rotation of motor (20rpm, Second)

[s]	[kg]	amount of upwelling [kg/(30s)] (20rpm, Second time)
0	0.000	-
30	0.805	0.805
60	1.630	0.825
90	2.490	0.860
120	3.310	0.820

平均湧昇水量 0.828kg/(30s)

Table 20 Rotation of motor (30rpm, First)

[s]	[kg]	amount of upwelling [kg/(30s)] (30rpm, First time)
0	0.000	-
30	0.815	0.815
60	1.655	0.840
90	2.525	0.870
120	3.425	0.900

平均湧昇水量 0.856kg/(30s)

Table 21 Rotation of motor (30rpm, Second)

[s]	[kg]	amount of upwelling [kg/(30s)] (30rpm, Second time)
0	0.000	-
30	0.780	0.780
60	1.580	0.800
90	2.385	0.805
120	3.250	0.865

平均湧昇水量 0.813kg/(30s)

Table 22 Rotation of motor (40rpm, First)

[s]	[kg]	amount of upwelling [kg/(30s)] (40rpm, First time)
0	0.000	-
30	1.110	1.110
60	2.180	1.070
90	3.240	1.060
120	4.325	1.085

平均湧昇水量 1.081kg/(30s)

Table 23 Rotation of motor (40rpm, Second)

[s]	[kg]	amount of upwelling [kg/(30s)] (40rpm, Second time)
0	0.000	-
30	1.085	1.085
60	2.055	0.970
90	3.035	0.980
120	3.995	0.960

平均湧昇水量 0.999kg/(30s)

以上から,

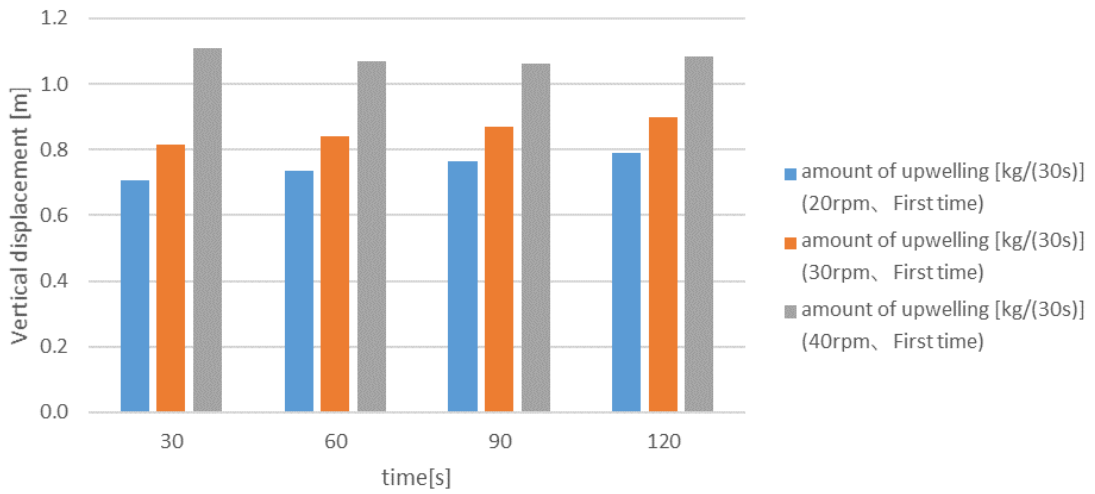


Figure 62 Amount of upwelling [kg/(30s)] (First time)

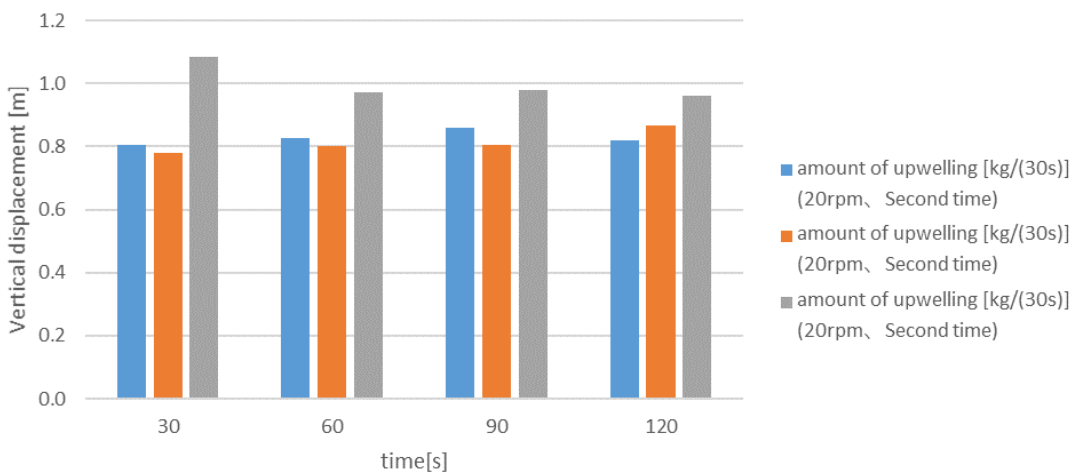


Figure 63 Amount of upwelling [kg/(30s)] (Second time)

10.2. 上下動変位 130mm の場合

Table 24 Rotation of motor (20rpm, First)

[s]	[kg]	amount of upwelling [kg/(30s)] (20rpm, First time)
0	0.000	-
30	0.535	0.535
60	1.185	0.650
90	1.895	0.710
120	2.670	0.775

平均湧昇水量 0.668kg/(30s)

Table 25 Rotation of motor (20rpm, Second)

[s]	[kg]	amount of upwelling [kg/(30s)] (20rpm, Second time)
0	0.000	-
30	0.805	0.805
60	1.630	0.825
90	2.490	0.860
120	3.310	0.820

平均湧昇水量 0.646kg/(30s)

Table 26 Rotation of motor (30rpm, First)

[s]	[kg]	amount of upwelling [kg/(30s)] (30rpm, First time)
0	0.000	-
30	0.625	0.625
60	1.400	0.775
90	2.225	0.825
120	3.090	0.865

平均湧昇水量 0.773kg/(30s)

Table 27 Rotation of motor (30rpm, Second)

[s]	[kg]	amount of upwelling [kg/(30s)] (30rpm, Second time)
0	0.000	-
30	0.705	0.705
60	1.560	0.855
90	2.420	0.860
120	3.355	0.935

平均湧昇水量 0.839kg/(30s)

Table 28 Rotation of motor (40rpm, First)

[s]	[kg]	amount of upwelling [kg/(30s)] (40rpm, First time)
0	0.000	-
30	0.725	0.725
60	1.540	0.815
90	2.430	0.890
120	3.380	0.950

平均湧昇水量 0.845kg/(30s)

Table 29 Rotation of motor (40rpm, Second)

[s]	[kg]	amount of upwelling [kg/(30s)] (40rpm, Second time)
0	0.000	-
30	0.750	0.750
60	1.585	0.835
90	2.490	0.905
120	3.455	0.965

平均湧昇水量 0.864kg/(30s)

以上から,

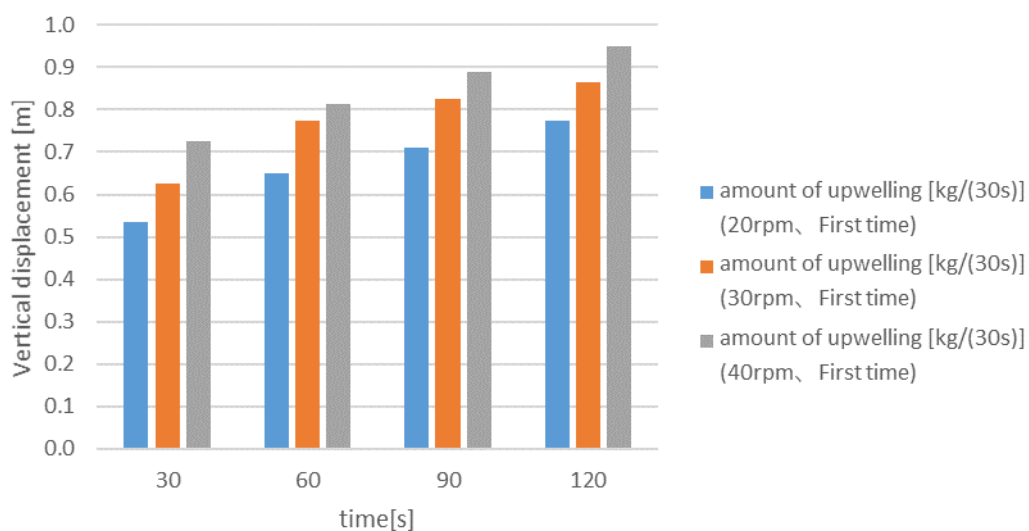


Figure 64 Amount of upwelling [kg/(30s)] (First time)

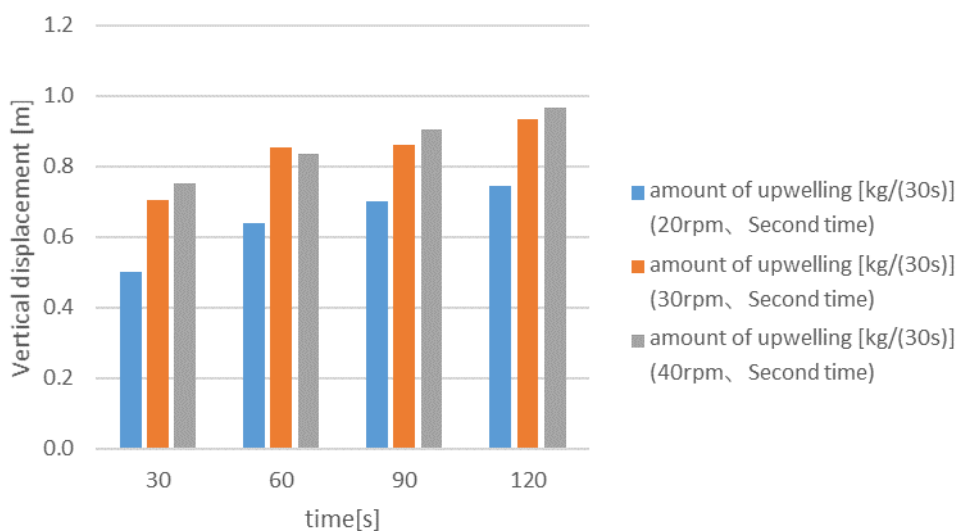


Figure 65 Amount of upwelling [kg/(30s)] (Second time)

10.3. 上下動変位 60mm の場合

Table 30 Rotation of motor (20rpm, First)

[s]	[kg]	amount of upwelling [kg/(30s)] (20rpm, First time)
0	0.000	-
30	0.320	0.320
60	0.765	0.445
90	1.280	0.515
120	1.815	0.535

平均湧昇水量 0.454kg/(30s)

Table 31 Rotation of motor (20rpm, Second)

[s]	[kg]	amount of upwelling [kg/(30s)] (20rpm, Second time)
0	0.000	-
30	0.805	0.805
60	1.630	0.825
90	2.490	0.860
120	3.310	0.820

平均湧昇水量 0.498kg/(30s)

Table 32 Rotation of motor (30rpm, First)

[s]	[kg]	amount of upwelling [kg/(30s)] (30rpm, First time)
0	0.000	-
30	0.500	0.500
60	1.055	0.555
90	1.670	0.615
120	2.290	0.620

平均湧昇水量 0.573kg/(30s)

Table 33 Rotation of motor (30rpm, Second)

[s]	[kg]	amount of upwelling [kg/(30s)] (30rpm, Second time)
0	0.000	-
30	0.520	0.520
60	1.105	0.585
90	1.745	0.640
120	2.320	0.575

平均湧昇水量 0.580kg/(30s)

Table 34 Rotation of motor (40rpm, First)

[s]	[kg]	amount of upwelling [kg/(30s)] (40rpm, First time)
0	0.000	-
30	0.660	0.660
60	1.385	0.725
90	2.185	0.800
120	2.950	0.765

平均湧昇水量 0.738kg/(30s)

Table 35 Rotation of motor (40rpm, Second)

[s]	[kg]	amount of upwelling [kg/(30s)] (40rpm, Second time)
0	0.000	-
30	0.620	0.620
60	1.310	0.690
90	2.055	0.745
120	2.835	0.780

平均湧昇水量 0.709kg/(30s)

以上から、

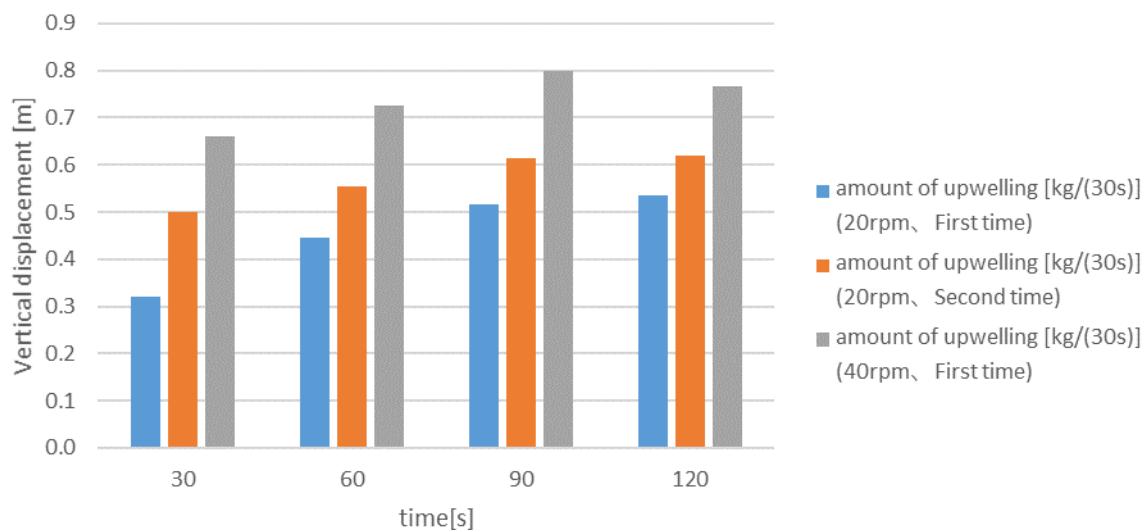


Figure 66 Amount of upwelling [kg/(30s)] (First time)

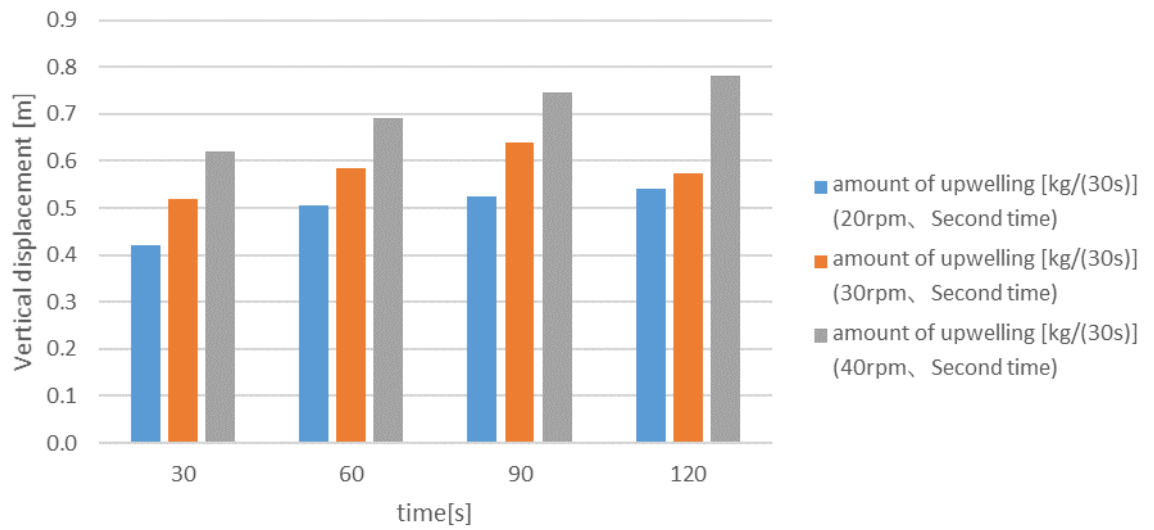


Figure 67 Amount of upwelling [kg/(30s)] (Second time)

10.4. 測定結果のまとめ

以上の測定結果から各回転数及び各上下動変位量における平均湧昇水量を kg/(30s) から kg/s に変換した値を下表に示す。

Table 36 Average upwelling amount [kg/s]

	Vertical displacement 180mm	Vertical displacement 130mm	Vertical displacement 60mm
20rpm	0.02627	0.02190	0.01585
30rpm	0.02781	0.02685	0.01921
40rpm	0.03467	0.02848	0.02410

上表の値をグラフにまとめた結果下記のようになった。

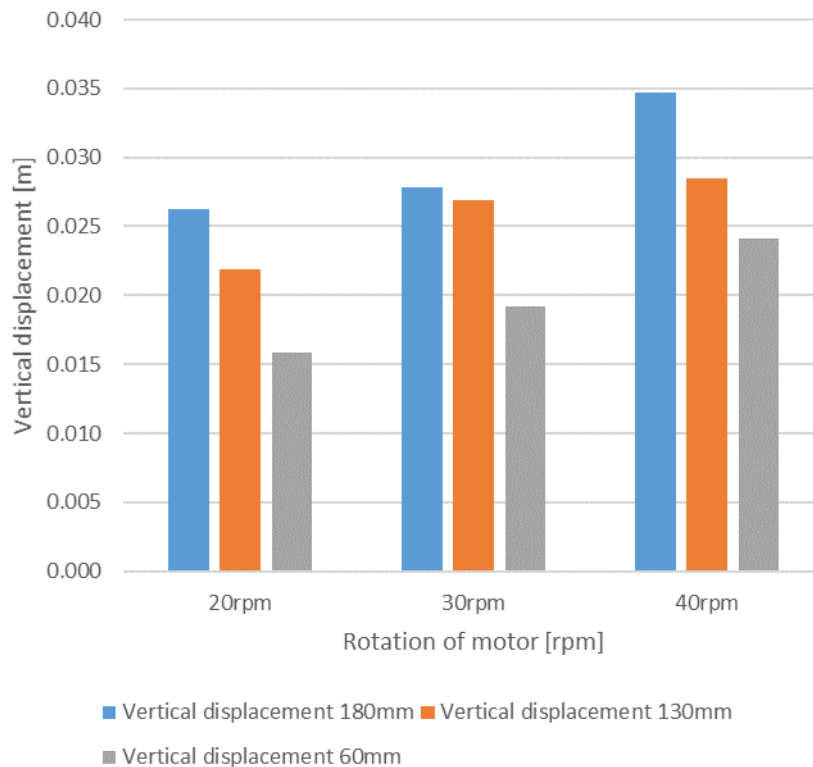


Figure 68 Average upwelling amount [kg/s]

11. 考察

今回の実験時において、波動湧昇ポンプを上下させている状態では上部水槽内の水面は、波動湧昇ポンプに取り付けたバッキン固定具によって上部水槽内の水面が上下することを除けば、水面の高さに変化がほとんどないことを目視で確認した。つまり、上部水槽からの漏水量を改善することが出来ればより正確な湧昇水量を測定することができるようになる。

今回チーズとコック付きタンクを内径 15mm のホースで繋いだが、波動湧昇ポンプによる湧昇水量に対してホース内径が細すぎてしまったために、上部水槽はホース接続口に対して上方で安定していた。そのため、波動湧昇ポンプによって湧昇された水が単純にコック付きタンクへ流れるのではなく、水圧の影響を受けてホースへ押し出されることになってしまった。これによって余計に考慮すべき事項が増えてしまった可能性がある。よって、新たな実験ではホース内径を現在よりも大きくし、上部水槽内の水面がホース接続口の中心軸と一致するように工夫することによって、より正確な湧昇水量を測定できると考えることができる。

今回の実験ではモータの回転数をそれぞれ 20rpm,30rpm,40rpm に設定し、波動湧昇ポンプを上下させた。しかし、実際にスピードコントローラに表示されたモータの回転数は-5rpm ~+5rpm 程度のばらつきが確認された。これは、波動湧昇ポンプが上昇する際は波動湧昇ポンプの重量によって鉛直下向きに負荷がかかり、モータの回転とは逆方向にトルクが発生し

てしまったため波動湧昇ポンプの上昇時は低速となり、波動湧昇ポンプが降下する際は逆に、モータの回転方向にトルクが発生してしまったため、波動湧昇ポンプが高速で降下してしまったためだと考えられる。しかし、この回転数のばらつきはほとんど無視できる程度であったため今回の実験では、大きな影響を与えなかったと考えられる。

実験の結果、波の周期に当たるモータの回転数が多いほど湧昇水量は多くなり、波の高さに当たる波動湧昇ポンプの上下動変位が大きいほど湧昇水量が多くなるという傾向にあることが示された。よって、Brian 氏によって示されたように波動湧昇ポンプの性能を決定づけるパラメータとして、少なくとも波の高さと波の周期の 2 つが重要なパラメータであるということを今回の実験によって示すことが出来た。ただし、回転数 30rpm という条件においては上下動変位が 180mm と 130mm の間に大きな数値差は確認できなかった。これは、実験の回数が十分ではなかったために測定結果が偏ってしまったためだと考えられる。そのため、今後はこの条件下で複数回実験を行い、どのような数値が得られるか、また優位な数値差が表れるのかを確認する必要がある。

また、前述した式(4)及び式(11)に今回使用した波動湧昇ポンプの主要データを代入し、これらの式による理論値と今回の測定値を比較すると次のようになった。図 43 から今回使用した波動湧昇ポンプの内径は 55mm。また、モータの回転数が 20rpm の時波の周期は 3s、モータの回転数が 30rpm の時波の周期は 2s、モータの回転数が 40rpm の時波の周期は 1.5s であり、水の密度 ρ を 997kg/m^3 、 $\Delta\rho$ を 2.00kg/m^3 、重力加速度を $9.81\text{m}^2/\text{s}$ であるから、式(4)による湧昇水量 Q [kg/s] は次式で表すことができる。

$$Q = \frac{\pi A H}{T} \times \rho \text{ [kg/s]} \quad (19)$$

式(16)より実験に使用した波動湧昇ポンプの湧昇水量の理論値は下記のようになる。

Table 37 Theoretical value of upwelling pump for experiment [kg/s]

	Vertical displacement 180mm	Vertical displacement 130mm	Vertical displacement 60mm
20rpm	0.4465	0.3225	0.1488
30rpm	0.6697	0.4837	0.2232
40rpm	0.8930	0.6449	0.2729

同様に重力による影響を受けた場合の湧昇水量 Q' [kg/s] は次式で表すことができる。

$$Q' = AU = A \times \left(\frac{\pi H}{T} - \frac{\Delta\rho}{\rho} gT \right) \times \rho \text{ [kg/s]} \quad (20)$$

今回の実験では水の密度は一定であるため、 $\Delta\rho=0$ である。そのため、 Q' は式(19)と一致する。また、測定の結果を再び下記に示す。

Table 38 Average upwelling amount [kg/s] (Repost)

	Vertical displacement 180mm	Vertical displacement 130mm	Vertical displacement 60mm
20rpm	0.02627	0.02190	0.01585
30rpm	0.02781	0.02685	0.01921
40rpm	0.03467	0.02848	0.02410

以上から,Brian 氏によって示された波動湧昇ポンプの湧昇水量の理論値に対して,今回の実験による測定結果はおよそ 1/10 程度という値となってしまった.これは,Brian 氏によって示された理論式が重力による損失のみを考慮した式であることが原因であると考えられる.本来であれば,波動湧昇ポンプ内の水には重力による損失だけではなく,管内を上昇するときに管壁からはたらく流路抵抗や,逆止弁を湧昇水が押し開く際に失われる流れのエネルギーが考慮する必要がある.また,今回我々が製作した測定装置がいまだ不完全であったために,例えば上部水槽からの下部水槽への漏水などの損失が発生してしまっていたことなどが測定値と理論値の間にずれが生じてしまった原因であると考えられる.

湧昇効率 η_u は次式から,表 39 のようになる.

$$\eta_u = \frac{Q}{Q'} \times 100 \quad (21)$$

Table 39 Efficiency of upwelling [%]

	Vertical displacement 180mm	Vertical displacement 130mm	Vertical displacement 60mm
20rpm	5.88	6.79	10.65
30rpm	4.15	5.55	8.60
40rpm	3.88	4.42	8.83

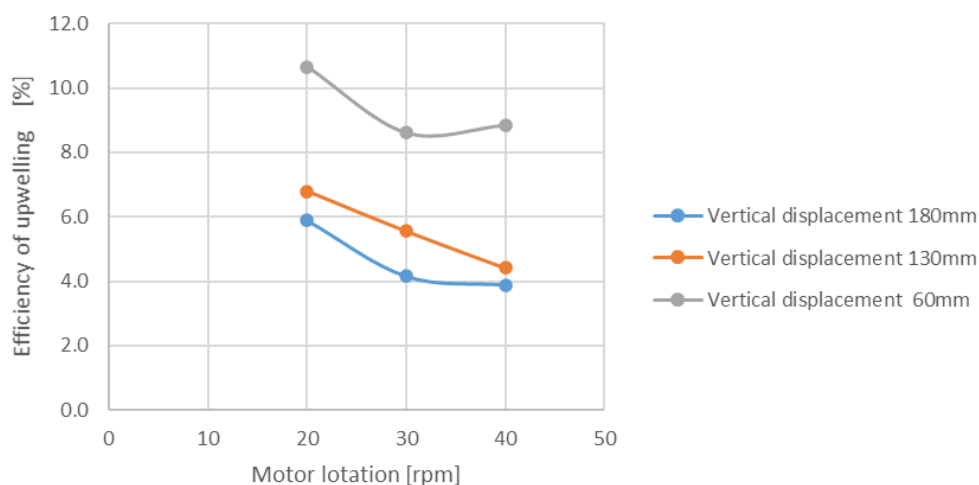


Figure 69 Efficiency of upwelling[%]

表 39 によれば、波の周期が長いほど湧昇効率が高く、かつ波の高さが低いほど湧昇効率が高くなるということが分かった。しかし湧昇水量の測定結果から、波の周期が短く波の高さが高いほど湧昇水量は多くなることが分かっている。これは、湧昇水量の理論値 Q' が重力による損失のみを考慮しているためだと考えられる。波動湧昇ポンプの損失として、流路抵抗や逆止弁を押し開く際に消費される流れのエネルギーを挙げたが、このうち流路抵抗は波の周期が長いほど、つまり波動湧昇ポンプが低速で動作するほど、波動湧昇ポンプ内部の水の流速が遅くなるため、流路抵抗による損失は少なくなると考えられる。反対に、波動湧昇ポンプが低速で動作するほど波動湧昇ポンプが内部の水にはたらく慣性力も弱くなり、逆止弁を押し開こうとする力も弱くなってしまふためだと考えられる。実際に、測定装置を上下動変位 60mm で低速で動作させた場合に逆止弁が開くまでにかかる時間は上下動変位が 180mm や 130mm に対して遅くなっていることが目視によって確認できた。そのため逆止弁は面積が大きくし、波動湧昇ポンプ外部の水によって大きな抵抗力を受けるように設計するほうが、波の周期が長く、かつ波の高さが低い海域では有効であると考えられる。ただし、弁の面積が大きくなることで、波動湧昇ポンプが上昇する際に大きな抵抗力を受けてしまうため、逆止弁の取り付け角度を鋭角とし、投影面積を小さくすることが必要である。

12. 今後の展望

今後測定装置を改良できる点として以下のような点が挙げられる。

今回の実験では、波の高さと波の周期が波動湧昇ポンプの性能を決定づけるパラメータであるということが示された。これら以外に波動湧昇ポンプの性能を決定づけるパラメータとして波動湧昇ポンプの全長や断面積、逆止弁形状などが考えられる。今回製作した測定装置は外径 140mm 程度までの塩化ビニルパイプを取り付けることが出来、塩化ビニルパイプの全長も 130cm 程度の塩化ビニルパイプを取り付けることができるため波動湧昇ポンプの全長や断面積と湧昇水量の間にどのような関係にあるのかを確認することができるようになる。また、塩化ビニルパイプに取り付ける逆止弁構造について、逆止弁の取り付け角度はどのような値が良いのか、及び逆止弁の面積は大きいほうがいいのかなども今回製作した測定装置によって評価することができるようになる。

前述したように、今回の実験ではモータの回転数にばらつきが確認された。これに対する対応策として歯車にカウンターウェイトを取り付けることが挙げられる。また、波動湧昇ポンプの湧昇水量について、波動湧昇ポンプの上昇は高速で波動湧昇ポンプの降下は低速であるほど、湧昇水量が大きくなると予想されている。そのため歯車に取り付けるカウンターウェイトは、波動湧昇ポンプの上昇時にモータにはたらく荷重よりも大きい荷重としたものを波動湧昇ポンプの上下動とは 180 度だけ位相をずらし取り付けることによって、カウンターウェイトの上昇時は低速で、カウンターウェイトの降下時は高速となることで、波動湧昇ポンプの降下時は低速で、波動湧昇ポンプの上昇時は高速という状態を実現することができるため、前述した予想の真偽を評価することができるようになる。

また,今回製作した測定装置は波動湧昇ポンプが理想的に上下動した場合の湧昇水量を測定する装置である.実際の海洋では海流によって波動湧昇ポンプは抵抗力を受けるため,波動湧昇ポンプは斜めに傾いた状態で上下すると考えられる.そのため,今回製作した測定装置を改良し,波動湧昇ポンプを斜め方向に上下させることができるようにすることによって,さらに実際に海洋で波動湧昇ポンプを動作させた場合の湧昇水量に近づけることができるようになる.

今回製作した測定装置に取り付けた波動湧昇ポンプは内部の上昇流を確認することができるようにするため,透明な塩化ビニルパイプを使用した.そのため,下部水槽内に目印となるような物体をあらかじめ入れておけば,波動湧昇ポンプ内の上昇流の流速を測定することもできるようになる.このようにして測定した流量と 10 章で述べた実験方法による流量を比較することで,流速を測定することによる流量の評価方法が信頼できるかどうかを確認することができる.これは,単純に流速を測定するだけでは逆止弁を押し開く際の逆流などの損失が,波動湧昇ポンプの流量に対してどのような影響をもたらすかが未だ不明であるため,今回製作した測定装置によって波動湧昇ポンプの性能を評価する方式のほうが,正確性が高いと考えられるためである.

また,画像解析ソフトを利用して波動湧昇ポンプを取り付けたブイの動きを解析することを試みたが,実際に海中において波動湧昇ポンプがどのような挙動であるかを確認することは容易ではない.そのため,造波装置を用いて実際の海洋状況を再現することによって波動湧昇ポンプの挙動を観察することによって,波動湧昇ポンプ下端に重りを固定する必要があるのかなどを確認する必要がある.

最後に,今回製作した測定装置は下部水槽の水面に対して上部水槽の水面が高くなりすぎたために上部水槽から下部水槽へ向かって漏水が発生してしまっていた,そのため下図に示すように直方体の水槽に加工を施し,下部水槽と上部水槽の水面の高さを一致させることによってこの漏水の影響を抑えることができるようになり,より正確な湧昇水量を評価することができるようになる.

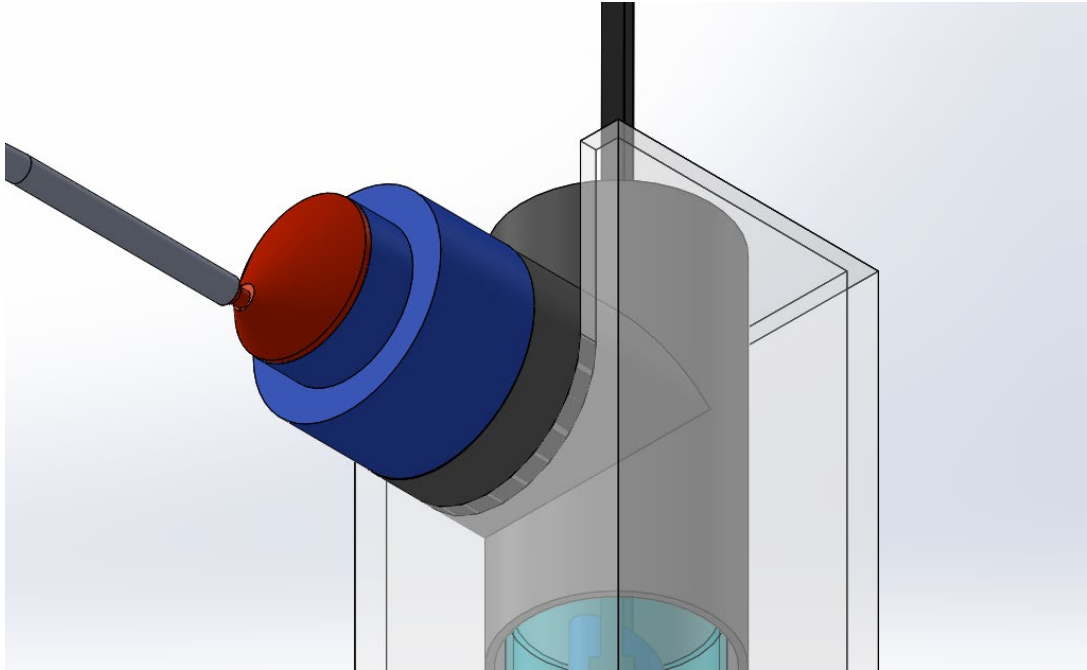


Figure 70 Improvement plan for measuring device

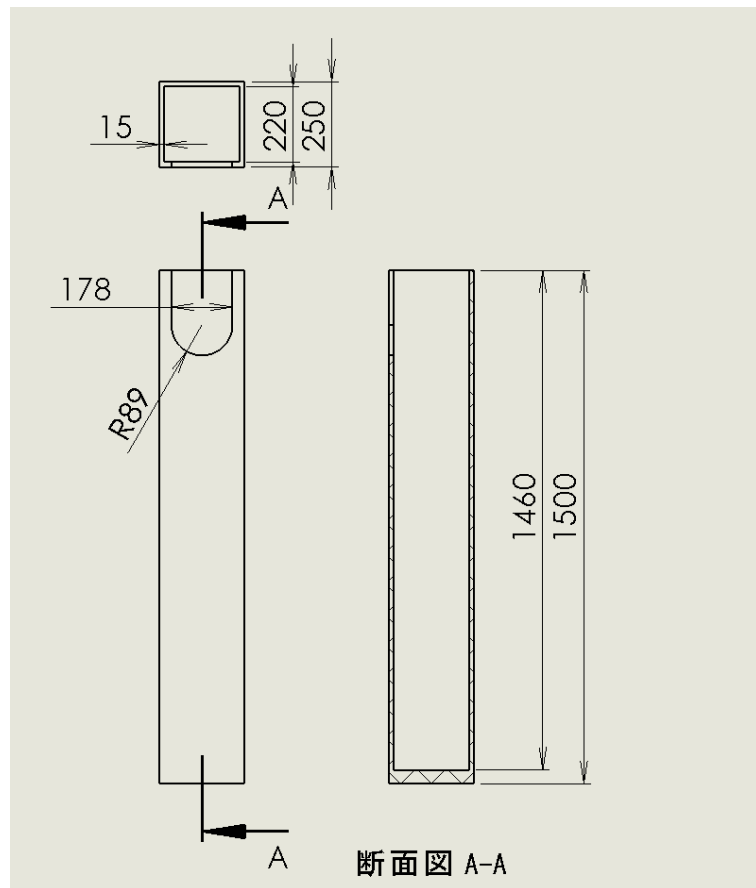


Figure 71 Processing diagram for measuring device

13. まとめ

資源に乏しい日本において水産資源の増産というのは、世界有数の領海面積を持つ我が国にとって非常に重要な課題である。この課題を解決するための手段として、実際に内湾の養殖筏に人工湧昇装置を設置することによって養殖マガキの身入りを向上させるという実験が行われ、湧昇現象によって水産資源に良い影響を与えることが出来ると示された⁽¹⁸⁾。また、2003年から2005年にかけて、相模湾において「拓海」という人工湧昇層内の海洋実験が行われ、「拓海」による放流水が表層にとどまっていることが示された⁽²⁾。しかし、現状では海洋で人工湧昇装置を長期間稼働させたという研究は十分ではない。そのため、人工湧昇によって海洋にどの程度の影響があるのかというデータは十分に揃ってはいない。今回の研究によって、波動湧昇ポンプの性能を定量的に評価するための実験方法を構築することが出来た。そして今回の実験によって、波動湧昇ポンプの性能は波の高さ及び波の周期によって決定づけられるということが示された。この実験装置を用いて波動湧昇ポンプの性能を評価することによって、人工湧昇装置が海洋環境にどのような影響をもたらすかを正確にシミュレーションすることができるようになる。

14. 謝辞

卒業論文の執筆にあたり、指導教員の田中教授から理論や実験方法について熱心な指導を頂きました。また、NPO 法人エスコット藤本様から資料の提供や実際の海洋へ波動湧昇ポンプを設置した際の記録動画などを共有して頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- (1).万乃俊文,“深層水の湧昇(2)連続成層化における検討”,海洋深層水研究,2 卷 1 号, (2001), p. 49-55.
- (2).大内 一之,” 深層水汲み上げによる海洋肥沃化実験－拓海プロジェクト－”, 海洋開発論文集 23 卷,(2007),p.11-16
- (3).績 辰之介,中尾 徹,” 天然湧昇域の海洋環境特性について”, 水産土木 22 卷 2 号, Vol. 22, (1986), p. 41-58
- (4).鈴木 孝治,” 海洋深層水.”, Journal of the Society of Inorganic Materials, Vol. 12, (2005), p. 423~428.
- (5).株式会社 東邦微生物病研究所,” 全有機体炭素 (TOC) の測定法について”,
<https://www.toholab.co.jp/info/archive/10630/>
最終閲覧日:2022/1/3
- (6).ブリタニカ国際大百科事典 コトバンク,“栄養塩類. ブリタニカ国際大百科事典 小項目辞典 「栄養塩類」の解説”,
<https://kotobank.jp/word/%E6%A0%84%E9%A4%8A%E5%A1%A9%E9%A1%9E-36006>.
最終閲覧日:2022/1/5
- (7).百科事典マイペディア 「栄養塩類」の解説,“コトバンク 「栄養塩類」. 百科事典マイペディア「栄養塩類」の解説”,
<https://kotobank.jp/word/%E6%A0%84%E9%A4%8A%E5%A1%A9%E9%A1%9E-36006>.
最終閲覧日:2022/1/5
- (8).隅田隆, 田村愛理, 川北浩久,” 室戸海洋深層水の特性”, 日本海水学会誌, Vol. 55, (2001),p. 158-165,
- (9).山田佳昭, 小倉光夫,” 相模湾における海洋深層水の含有成分”, 神奈川県環境科学センター研究報告,(2004),p.109-112
- (10).農林水産省,” 魚食文化を支える 人工漁礁を知ろう”,
https://www.maff.go.jp/j/pr/aff/2008/spe1_04.html
最終閲覧日:2022/1/5
- (11).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”, 鹿児島大学水産学部紀要=Memoirs of Faculty of Fisheries Kagoshima University, Vol. 60,(2011),p. 25-32,
- (12).流体工学部門, 一般社団法人日本機械学会,” 流れの読みもの. ラピユタ計画－海洋砂漠を海洋深層水で緑化する－”
https://www.jsme-fed.org/newsletters/2010_9/no5.html#ctop

最終閲覧日:2022/1/5

- (13).古川 琢磨, 矢吹 崇, 知崎 正純, 守谷 修一, 岡島 淳之介, 小宮 敦樹, 竹原 洋一郎, 石川 陽一, 塩原 泰, 市川 正和, 円山 重直,” 永久塩泉を用いた海洋深層水汲み上げによる沖ノ鳥島海洋緑化に向けた湧昇パイプ展開方法の提案”,(2014),土木学会論文集 B3 (海洋開発) , Vol. 70, p. 1-12
- (14).Brian, Kirke,” Enhancing fish stocks with wave-powered artificial upwelling”, Ocean & Coastal Management, Vol. 46, (2003), p. 901-915
- (15).国土交通省 気象庁,” ホーム > 各種データ・資料 > 海洋の健康診断表 > 波浪に関するデータ > 沿岸波浪計観測値. 沿岸波浪計観測値”,
<https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/db/wave/obsdata/past/usw.php>

最終閲覧日:2022/1/5

- (16).藤尾伸三(東京大学 大気海洋研究所 准教授),” 五ヶ所湾における密度流拡散装置の環境修復効果”,
<https://ovd.aori.u-tokyo.ac.jp/fujio/2017chiba/2017chiba02.pdf>

最終閲覧日:2022/1/5

- (17).大塚 耕司, 中谷 直樹, 大内 一之, 粟島 裕治, 山磨 敏夫,” 五ヶ所湾における密度流拡散装置の環境修復効果”,(2007),日本船舶海洋工学会論文集, Vol. 6, p. 57-63
- (18).熊谷 明,押野 明夫,” 自然エネルギーを利用した湧昇流発生による養殖マガキの身入り向上に関する研究.”, 宮城県水産研究報告,(2018),p. 1-9
- (19).佐々木 淳,” 東京湾 湾奥水塊の湧昇現象と青潮への影響”, 海岸工学論文集 44 巻,(1997),p. 1109-1105
- (20).渡辺 正孝, 木幡 邦男,” 内湾の環境保全 赤潮の発生機構 と青潮の生成環境” 環境科学会誌,(1995), p. 449-460
- (21).オリエンタルモーター株式会社,” AC スピードコントロールモータ 製品カタログ”, p. 31,
- (22).MiSUMi-VONA,” PSA プラスチック平歯車 (PSA2-100J18)”,
<https://jp.misumi-ec.com/vona2/detail/221004936805/?HissuCode=PSA2-100J18>

最終閲覧日:2022/1/24

- (23).MiSUMi-VONA,” USH 型ピストン・ロッドシール両用パッキン (一体溝装着可) ”,
<https://jp.misumi-ec.com/vona2/detail/221005482228/>

最終閲覧日:2022/1/11

- (24).モノタロウ,” 瑞穂化成工業 扁平缶ケミカルコック付”,
https://www.monotaro.com/p/3487/7902/?t.attr_f1051=3%81%604%96%A2%96%9E%0A5%81%606%96%A2%96%9E&t.q=%83R%83b%83N%95t%82%AB%83%5E%83%93%83N

最終閲覧日:2022/1/11

(25).SHARP, ” ホームタブレット (AQUOS ファミレド) Q&A 情報”,

<https://cs.sharp.co.jp/faq/qa?qid=155781>

最終閲覧日:2022/1/11

(26).モノタロウ, ” デジタル防水はかり”,

https://www.monotaro.com/p/3558/9854/?t.attr_f1452=10kg&t.q=%96h%90%85%20%82%CD%82%A9%82%E8%20%83f%83W%83%5E%83%8B

最終閲覧日:2022/1/12

図表番号

Table 1	Comparison of deep sea water and surface water off Miura ⁽⁴⁾	3
Table 2	Comparison of the surface water and deep sea water	4
Table 3	Comparison of the surface water and deep sea water	4
Table 4	2001 Comparison of deep sea water and surface water.....	6
Table 5	2001 Comparison of deep sea water and surface water.....	7
Table 6	2001 Comparison of deep sea water and surface water.....	8
Table 7	2002 Comparison of deep sea water and surface water.....	9
Table 8	2002 Comparison of deep sea water and surface water.....	10
Table 9	Comparison of sediment for analysis results before and after equipment.....	21
Table 10	Vertical displacement of float.....	26
Table 11	Vertical displacement of Marker.....	27
Table 12	Standard of motor (SCM590GVR-JC) ⁽²¹⁾	27
Table 13	Standard of spur gear (PSA2-100J18) ⁽²²⁾	28
Table 14	part number 5 Results of each dimension measurement	41
Table 15	part number 5 Results of each dimension measurement	42
Table 16	Hose fitting(For Increaser) Results of each dimension measurement [mm]	45
Table 17	Hose fitting(For Tank) Results of each dimension measurement [mm].....	45
Table 18	Rotation of motor (20rpm, First).....	59
Table 19	Rotation of motor (20rpm, Second).....	59
Table 20	Rotation of motor (30rpm, First).....	59
Table 21	Rotation of motor (30rpm, Second).....	60
Table 22	Rotation of motor (40rpm, First).....	60
Table 23	Rotation of motor (40rpm, Second).....	60
Table 24	Rotation of motor (20rpm, First).....	61
Table 25	Rotation of motor (20rpm, Second).....	62
Table 26	Rotation of motor (30rpm, First).....	62
Table 27	Rotation of motor (30rpm, Second).....	62
Table 28	Rotation of motor (40rpm, First).....	62
Table 29	Rotation of motor (40rpm, Second).....	63
Table 30	Rotation of motor (20rpm, First).....	64
Table 31	Rotation of motor (20rpm, Second).....	64
Table 32	Rotation of motor (30rpm, First).....	64
Table 33	Rotation of motor (30rpm, Second).....	64
Table 34	Rotation of motor (40rpm, First).....	65

Table 35	Rotation of motor (40rpm, Second).....	65
Table 36	Average upwelling amount [kg/s].....	66
Table 37	Theoretical value of upwelling pump for experiment [kg/s].....	68
Table 38	Average upwelling amount [kg/s] (Repost).....	69
Table 39	Efficiency of upwelling [%].....	69
Figure 1	Sampling point for water	5
Figure 2	Perpetual salt fountain ⁽¹²⁾	12
Figure 3	Upwelling pipe of perpetual salt fountain ⁽¹³⁾	13
Figure 4	Connection of Depth of top of the pipe and Velocity of flow of sea surface ⁽¹³⁾	13
Figure 5	Upwelling by a Wave Pump.	14
Figure 6	Installation point of coastal wave meter ⁽¹⁵⁾	16
Figure 7	Relationship of forces working on floats.....	19
Figure 8	Relationship of forces working on upwelling pump.....	20
Figure 9	A:Wind type – Windmill B:Wind type - Underwater the screw ⁽¹⁸⁾	22
Figure 10	Horizontal distribution of average stock weight by class in the test raft ⁽¹⁸⁾	22
Figure 11	Conceptual diagram of TAKUMI ⁽²⁾	23
Figure 12	TAKUMI in operation ⁽²⁾	24
Figure 13	Vertical distribution of upwelling water ⁽²⁾	24
Figure 14	Schematic diagram of upwelling pump by wave energy.....	26
Figure 15	Upwelling pump by wave energy State of installation.....	26
Figure 16	Processing of gear.....	29
Figure 17	Source of power.....	29
Figure 18	Source of power after assembly.....	30
Figure 19	How to evaluate the wave upwelling pump Conceptual diagram.....	31
Figure 20	Flow measuring device Design stage.....	32
Figure 21	Flow measuring device Assembly drawing.....	33
Figure 22	Part number 1 Acrylic pipe (Outer diameter 200mm).....	33
Figure 23	Part number 2 Acrylic pipe (Outer diameter 150mm).....	33
Figure 24	Part number 3 PVC pipe.....	34
Figure 25	Part number4 Check valve mounting part.....	34
Figure 26	USH type packing Catalog ⁽²³⁾	35
Figure 27	USH type packing Size ⁽²³⁾	35
Figure 28	Part number 5 Packing fixture	36
Figure 29	Part number 6 Fixture.....	36
Figure 30	Part number 7 CU1525-K0 ⁽²³⁾	37

Figure 31	Part number 8	Fittings for cheese 150×150.....	37
Figure 32	Part number 9	Increaser 150×100.....	38
Figure 33	Part number 10	Hose fitting(For Increaser).....	38
Figure 34	Part number 11	Tank with cock ⁽²⁴⁾	39
Figure 35	Part number 13	Hose fitting(For Tank).....	39
Figure 36	Part number 14	Waterproof scale ⁽²⁶⁾	40
Figure 37		Packing fixture.....	40
Figure 38	Part number 5	Packing fixture.....	41
Figure 39	Part number 5	Packing fixture (After improvement).....	42
Figure 40		Packing fixative after attaching the string.....	43
Figure 41	Part number 10	Hose fitting(For Increaser).....	44
Figure 42		After made hose fitting(For Increaser).....	44
Figure 43	Part number 3	Hose fitting(For Tank).....	45
Figure 44	Part number 13	Hose fitting(For Tank).....	46
Figure 45		Check valve structure.....	46
Figure 46		Upwelling pump by wave energy.....	47
Figure 47		Assembly drawing of upwelling pump by wave energy.....	47
Figure 48	Wave upwelling pump	Figure 49 Wave upwelling pump.....	48
Figure 50		Wave upwelling pump (Lowest position).....	49
Figure 51		Rail mounting position before the adjusting.....	50
Figure 52		Rail mounting position after the adjusting.....	51
Figure 53		after the replacement of PVC pipe.....	51
Figure 54		Slider mounting position before the adjusting.....	52
Figure 55		Slider mounting position after the adjusting.....	52
Figure 56		State of fixing the metal plate.....	52
Figure 57		String fixture for packing.....	53
Figure 58		Upwelling pump in lower water tank.....	53
Figure 59		Gap sealed state (The left side is the water supply hose).....	55
Figure 60		Overall view of measuring device.....	56
Figure 61		Overall view of measuring device (Water path).....	57
Figure 62		Amount of upwelling [kg/(30s)] (First time).....	61
Figure 63		Amount of upwelling [kg/(30s)] (Second time).....	61
Figure 64		Amount of upwelling [kg/(30s)] (First time).....	63
Figure 65		Amount of upwelling [kg/(30s)] (Second time).....	63
Figure 66		Amount of upwelling [kg/(30s)] (First time).....	65
Figure 67		Amount of upwelling [kg/(30s)] (Second time).....	66

<i>Figure 68</i>	<i>Average upwelling amount [kg/s]</i>	67
<i>Figure 69</i>	<i>Efficiency of upwelling[%]</i>	69
<i>Figure 70</i>	<i>Improvement plan for measuring device</i>	72
<i>Figure 71</i>	<i>Processing diagram for measuring device</i>	72