

振動水柱型底層酸素供給装置の特性

CHARACTERISTICS ON AN OXGEN SUPPLY SYSTEM FOR BOTTOM LAYER AERATION BY USING OSCILLATION WATER COLUMN

山城朋明¹・沢本正樹²・佐藤栄司³・風間聡⁴

Tomohiro YAMASHIRO, Masaki SAWAMOTO, Eiji SATO, and So KAZAMA

¹ 学生員 東北大学大学院工学研究科 博士課程前期 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)

² フェロー 東北大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (同上)

³ 東北大学大学院技官 工学研究科土木工学専攻 (同上)

⁴ 正会員 東北大学大学院助教授 工学研究科土木工学専攻 (同上)

This paper proposes an oxygen supply system for bottom layer aeration by wave, which has attracted our interest as clean energy. It is an application of a principle of the oscillating water column, due to wave motion. This instrument has some interesting characteristics. Our previous study showed the condition of maximum flow rate in various wave conditions and pipe sizes. It is also revealed that in some condition, center velocity of the pipe becomes upward flow, and in case of resonance, the fluid in pipe oscillates with high amplitude. Further research by the experiment of this paper showed that upward flow is canceled vanished when a cylinder is installed in pipe, and that in resonance condition, the flow rate in pipe decreases. The maximum flow rate and vertical velocity can be determined by wave magnitude and pipe size.

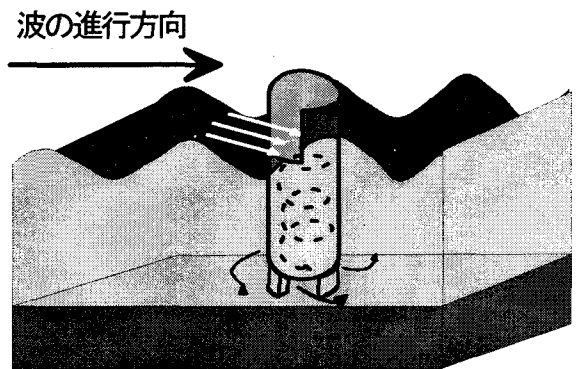
Key Words: vertical pipe; waves; dissolved oxygen; velocity distribution; resonance;

1. 緒言

これまでに波力発電装置を中心とする数多くの波エネルギーの利用法が研究者、技術者によって考案され、その一部は実用に供されている。その多くが波の単振動を利用した振動水柱型である。波の複雑な挙動を単振動へ変換することによって、エネルギーを効率よく取得するものである。

閉鎖性の高い港湾内やダム湖、貯水池などにおいて、水交換を促進させ富栄養化などの水質汚濁を改善するために、浅層の溶存酸素の豊富な水を底層に送り込む装置も開発されている。人工エネルギーを用いた曝気が主であるが、近年、越波の原理を利用した装置も考案されている。溶存酸素が豊富な浅層の海水を越波させ、装置内に入射した流体を水頭差によって装置の下部へ流し込む原理である。

同様の目的を達するための装置として、下迫ら¹⁾ (1999) は防波堤に越波造流装置を設置し、閉鎖性水域である港内に波浪場の海水を効率よく取り込むためのケーソンの形状を提案している。小松ら²⁾ (1998) は風波が発達し易いダム湖に越波造流装置を設置し、波を越波させ一方向流を起し、貧酸素層に溶存酸素が豊富な水を送り込む装置の実験を行い、装置の特性および水質改善効果を評価した。振動水柱型装置としては、Czitromら³⁾ (2000) が、波浪場の海水を静穏水域へ導水させるための波エネルギーを用いた真空ポンプ装置を考案した。



図—1 装置概念図

この原理を利用した装置として従来型とは別に、著者ら⁴⁾ は図—1に示すような表層水を底層へ送り込む装置を考案した。この装置は小規模なため、安価で任意地点に設置できる利点をもつ。また曝気を行うため常に一定の溶存酸素濃度をもつ海水を送り込むことが可能である。さらに湖沼のような波高が低い水域においても、表層水を送り込むことができる。本実験では開水路にスリット付きの円管を設置し規則波を与え、波形や管の寸法などを変化させ、管内の流速分布や流量の特性を調べ、より流量の増加を期待できる装置形状などの提案を行うことを目的としている。なお、今回供給酸素量は、溶存酸素濃度が一定であると仮定し、流体の流量の大小をもって議論する。

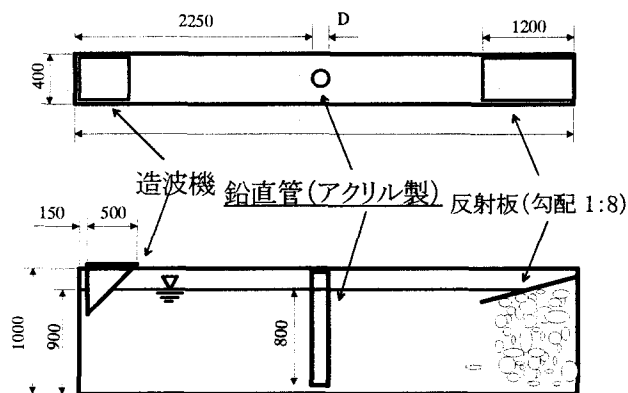


図-2 実験装置

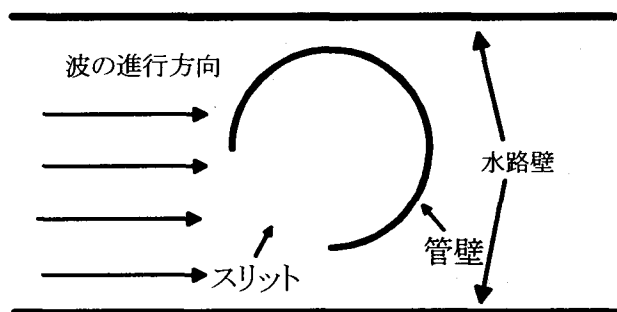


図-3 スリットの向き

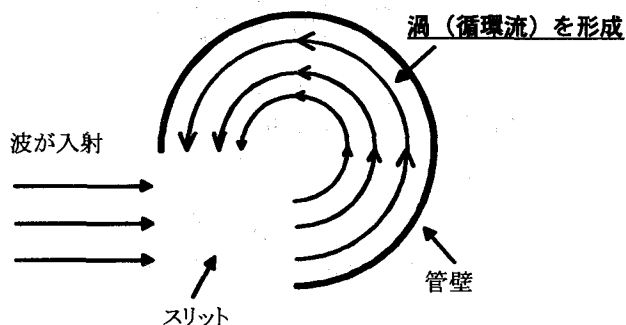


図-4 装置の原理（渦の形成）

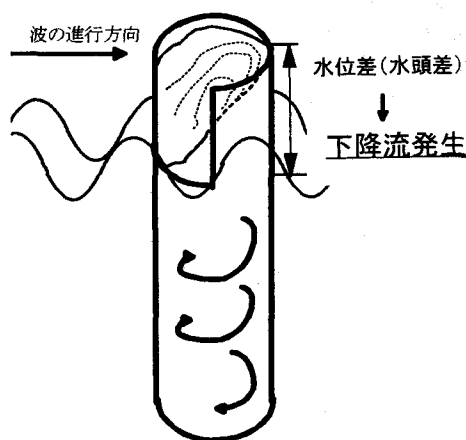


図-5 装置の原理（下降流の発生）

表-1 装置の稼動が想定される海域での波浪条件

		水深:h[m]	年平均有義波周期[s]	有義波長:L[m]	相対水深:h/L
現場の 海域	東京湾	16.5	3.4～3.5	18.0～19.1	0.86～0.92
	瀬戸内海	17.0	3.5～3.6	19.1～20.2	0.84～0.89
		設定水深:h[m]	設定周期[s]	波長:L[m]	相対水深:h/L
実験室		0.90	0.7～1.2	0.99～2.24	0.40～0.91

2. 実験装置

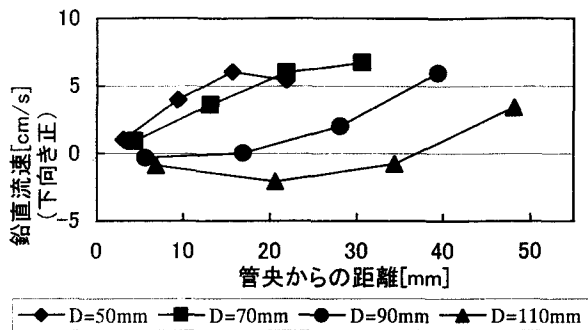
(1) 装置の概要

図-2に実験装置の概略図を示す。管はアクリル製で開水路に鉛直に固定されている。管上部には円周の1/4の長さをもつスリットが設けられており、ここから水が流入する。この水路に対するスリットの向きは、渦が形成されやすいよう図-3のとおりにする。波高が小さくても波が装置に入射できるよう、スリット下面は常に静水面に合わせて設置してある。管底は開放してある。造波機から生じる波の

周期および波高は連続的に変化させることが可能である。なお装置脇を通過した波は緩衝材などにより吸収されるため、波の反射は起こらない。

(2) 装置の原理

装置の原理を図-4、図-5に示す。鉛直管のスリットから波が入射すると、管壁に沿って循環流（渦）が生じる。このとき管壁側の水位は管外のそれと比較して高くなるため下降流を生じる。その際、管の中心に形成される渦により曝気が行われ、飽和状態となる。したがって多量の溶存酸素が含まれた



図—6 流速分布（波高6.0cm，波の周期0.90秒）

表層水を底層へ送り込むことができる。管内で水はらせんを描きながら管底へ流れていく。管底は開放されているので、ここから水が放出される。

3. 実験条件

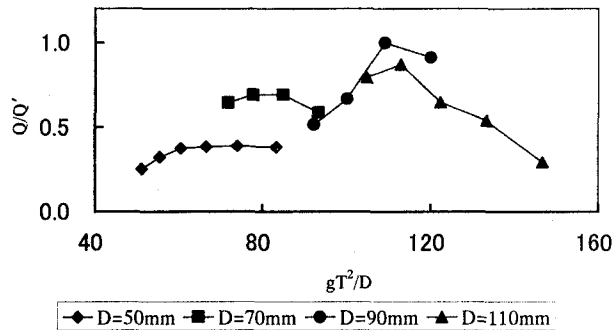
本装置は吹送距離が長く風波を生じ易い比較的浅い湖沼または内湾などの閉鎖性水域で、かつ夏季に密度成層されるため良好な水環境を維持するために鉛直方向に関する海水交換が必要な水域に対しての適用を想定される。模型実験を行う際には長さに関する相似がかなり重要となる。

表—1に代表的な想定水域として考えられる東京湾および瀬戸内海の波浪データ⁵⁾を示す。表では有義波のデータについて記してあるが、実際の水域で生じている波は様々な成分を持つ合成波であり、また台風や風などにより波高は常に変化する。装置は入射波高が小さくても稼動するが、強風時の稼動を想定し、実験時の波高は相似比を考慮した波高（表—1に示す波浪海域を想定した場合は、約2.0cm）よりも高い5.0cmとした。波の周期は、相対水深がおおよそ一致するように設定した。

流量の算出方法について述べる。まず管底で電磁流速計を用いて流速を測定する。具体的には、管底の断面について管底から10mm毎のブロックに区切り、各ブロック毎に鉛直方向に関する流速を測る。なお流速は波を受けるたびに刻々と変化するため、30波受ける間の流速を時系列平均することにより算出した。ここで管底から近いブロック毎に測定された流速を、 $V_1, V_2, \dots, V_m$ cm/sとすると、流量 Q cm³/s は次式で示される。

$$Q = \frac{\pi}{Dm} \sum_{k=1}^m V_k (k-0.5) \quad (1)$$

実際には送り込まれる溶存酸素の量が問題となるが、渦が形成される段階で曝気が起こり飽和状態に近くなるため、送り込まれる酸素の量は水の流量に比例すると考え、本論文では水の流量の大小により議論する。



図—7 流量変化（波高6.0cm）

4. 基礎実験結果

著者はこれまでに装置に関する簡単な特性を模型実験により把握した。管内の鉛直流速分布については、水位差を獲得しやすい管壁側で流速が大きくなること、および図—6に示すように管径が大きい場合、管底側では上昇流が見られることを確認した。また流速分布データを断面について積分することによって得られる流量については、スリット下辺を波谷と一致させると流量が最大となること、図—7（ Q' は管径 D が90mm，波の周期 T が0.83秒時の流量）に示すように管径によって最適な波の周期が決定されることを確かめた。

5. 管内流動の周波数特性

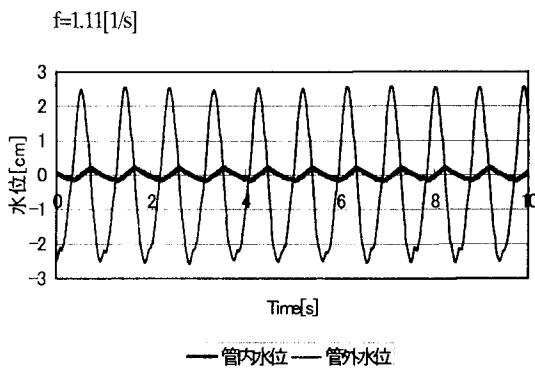
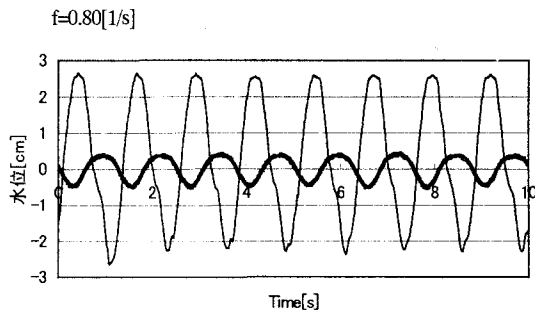
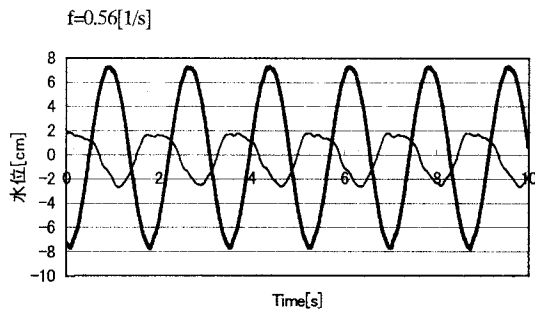
(1) 固有振動数の影響

4章で管径に応じて最適な流量をもつ波の周波数が決定されることを模型実験により示した。この原因について水位差の獲得のしやすさや波の入射速度が流量に影響を及ぼす可能性がある。

ここでさらに管内の流体の固有振動による流動特性も流量に影響を及ぼすことが考えられたため、これに関する実験を行った。まず鉛直管にスリットを入れず、波高が5.0cmで異なる数種類の周波数をもつ波を起こし管に作用させた場合の管内外の水位を調べた。管内（管底）および管外の変位の時系列変化を図—8に示す。これよりいずれの周波数の場合も、管内と管外の水位変化は当然周期的だが、位相のずれが生じていることが分かる。これは管近傍の水位が下がる時に、管内の水が管底より圧力を受け水位が上昇することにより説明できる。つまりスリットがない場合、管内と水位が管外のそれよりが高くなると、スリットより水が吐き出されることになる。これにより上昇流が卓越し、負の流量をもつことになる。

固有振動数 f は、摩擦や流体の管内との流出入などによる損失を無視した場合、次式により与えられる。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}} \quad (2)$$



図—8 管内外の水位比較（D=50mm）

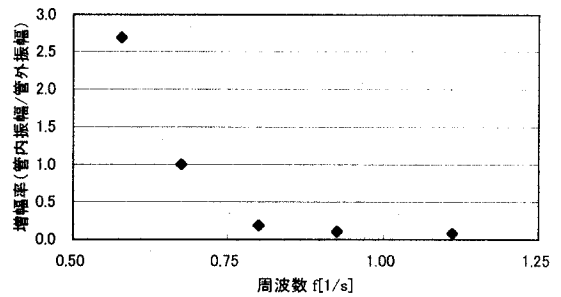
なお、 l ：管の没水深である。今回用いた実験装置において、固有振動数 f は、

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{980}{80}} = 0.56 \text{ [1/s]}$$

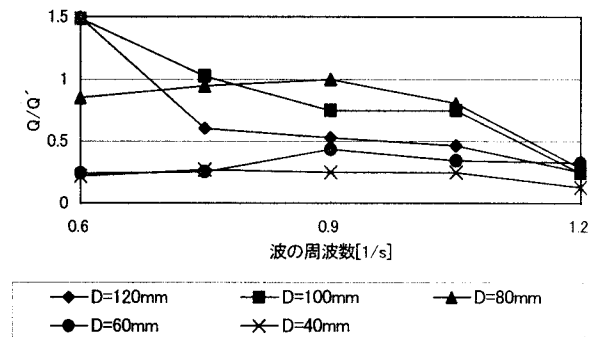
となる。

ここで異なる周波数を持つ波を管に作用させた場合の増幅率（管外の振幅に対する管内の振幅）を図—9に示す。これより、波の周波数が固有振動数に近づくとも増幅率が大きくなることが分かる。造波機の都合上周波数を更に小さくすることはできなかったが、管の没水深により定まる固有振動数の整数倍の波を作用させると、増幅率が大きくなることが固有振動の原理から理解できる。

(2) スリットを入れた場合の流量変化



図—9 周波数と増幅率の関係



図—10 周波数と流量の関係（波高5.0cm）

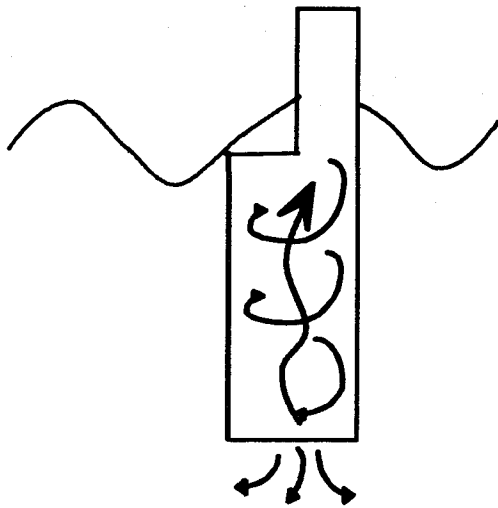
実際の装置にはスリットがある。スリットの下面は静水面に合わせて設置されるので、スリットを流入する水の影響で管の固有振動数が変動する可能性がある。そこで管にスリットを入れ、波の周波数と管径を変化させた実験を行った。この実験による流量変化を図—10に示す（ Q' は $D=80\text{mm}$ 、 $T=0.90\text{s}$ 時の流量）。

この図より以下の点が分かる。

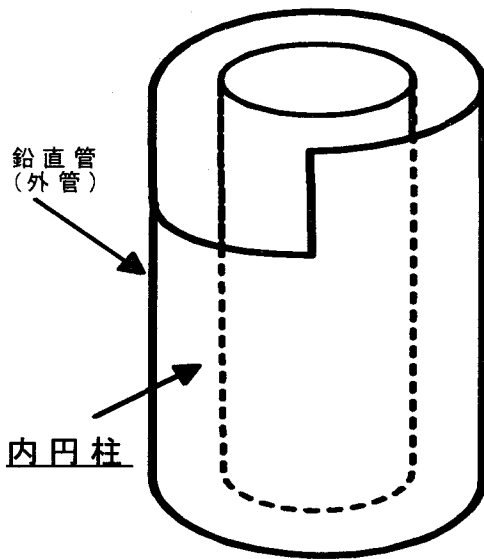
- ①管径が小さくなるにつれ最大流量をもつ波の周波数は増加する。
- ②周波数が小さくなるに従い各管径がとる最大流量が減少する。

前者の原因として、波の周波数が小さくなると、波速が増大し、入射した水が水頭差により下降する前に再びスリットから吐き出されるためと考えられる。後者については、管の断面積が小さくなること、および共振の影響が強くなることにより多量の水がスリットより吐き出されるようにことが挙げられる。

したがって上昇流による流量減少を防ぐためには、装置を設置する現場における波の振動数特性を把握し、管の没水深を調整し固有振動数に近づけないようにすればよいことになる。また管径は波の周波数により決定すればよい。ただし本装置の目的を達するには、没水深、すなわち管底の位置を海底付近に設定することが最適であるので、海底の深さが共振をとる没水深と同程度の場合、何らかの方策が必要である。



図一11 管央での上昇流

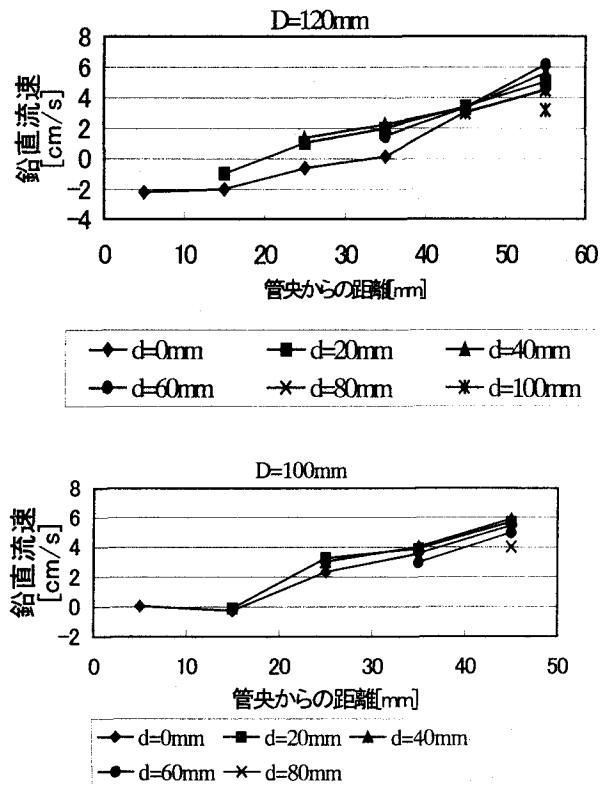


図一12 上昇流抑止円柱

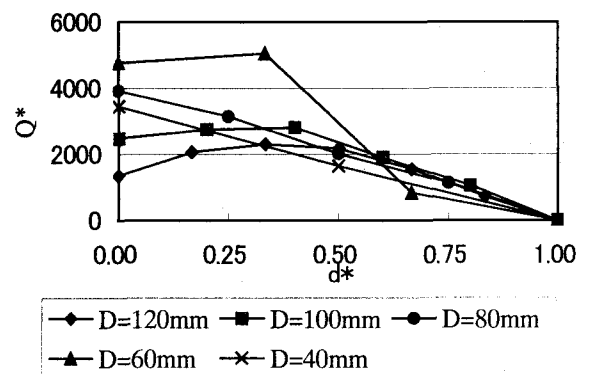
6. 管央における逆流とその防止策

(1) 概要

4章で述べたように、波形条件や管の寸法を様々に変化させ、管内の流速分布を測定し流量を求めた。流速分布の大まかな傾向として、管央側では流量が小さく、図一11のように上昇流が見られることを挙げた。この理由として、渦を形成するときに管央の水面が管壁側の水面や管外の水位よりも低くなり、管央部の水柱が上昇しようとする復元力が作用することが挙げられる。この流れは圧縮空気を熱空気と冷空気に分離するボルテックスチューブ⁶⁾などで見られる流れである。そこでこの復元力を抑え流量の増加を期待し、図一12に示すように上昇流が見られる管央部に内円柱を設置する場合について検討を行う。単純には上昇流が見られる部分のみに内円柱を設置したほうがよいと考えられるが、管壁との摩擦



図一13 円柱の径を変化させた場合の流速分布 (波高5.0cm, 波の周期0.90秒)



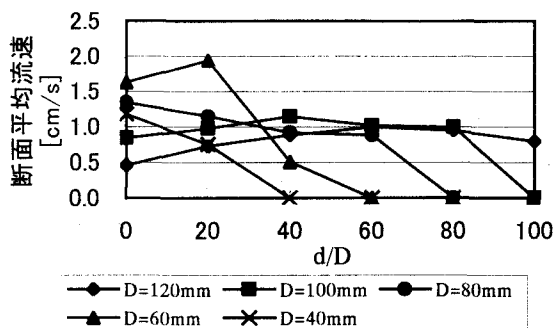
図一14 外管、円柱の径を変化させた場合の流量変化 (波高5.0cm, 波の周期0.90秒)

が増大することや入射した波が内円柱により反射されスリットから水が吐き出されることもあるので、円柱の径を様々に変え、流速分布および流量の特性を実験により把握した。

(2) 実験結果

外管の内径を120mmとし、内円柱の径を変化させた場合の流速分布を図一13に示す。それぞれの図は外管の内径は同一で、異なる円柱の外径毎に線により示してある。

図一14に図一15などの結果より算出した、外管の



図一15 断面平均流速(波高5.0cm, 波の周期0.90秒)

内径 D , および内円柱の径 d を変化させた場合の流量変化を示す。ここで管径, 流量はそれぞれ次のように無次元化している。

$$d^* = \frac{d}{D} \quad (3)$$

$$Q^* = \frac{Q}{D^2 g T} \quad (4)$$

ここで, g : 重力加速度, Q : 測定された流量, T : 波の周期である。

この図より管径(外管の内径)が大きい場合, 上昇流が見られる範囲が大きいので, 流量は円柱の径に対して極大値をとる。円柱の径が小さい場合, 円柱近傍において上昇流が見られ流量が減少する。また外径が最適値より大きい場合, スリットより入射した波が円柱により反射しスリットから水が吹き出されるので流量が減少するものと考えられる。

図一15に図一14の値に断面積を除すことにより得られる管内の全断面における平均鉛直流速を示す。鉛直流速が大きいと, より高速で海水の鉛直混合を起こすことができる。円柱の大きさに関わらず管径が100mmの場合に流量が最大となっている。波の周期が一定の場合, 最大の鉛直流速をもつ条件は, 管径により定まり, 円柱の外径には無関係であることが示された。

7. 結語

表層の水を底層に送り込む実験装置の流動特性を様々な波形条件および管の寸法による実験により把握することができた。

(1) 周波数特性

波の振動数が管の没水深によって定まる管の固有振動数に近くなると管内の流体の振動が大きくなった。したがってスリットがつけられた管に同様の波を作用させると, スリットより水を吹き出し, 流量

は減少した。

(2) 管央での逆流防止円柱の効果

管央での逆流を抑えて流量の増加を期待するために円柱を管内に挿入した結果, 管央での復元力が生じなくなるため, 多くの場合管内には下降流のみしか見られなくなり, 上昇流が見られる範囲にのみ円柱を設置した場合に流量が最大となることが示された。ただしこの場合, 管内における渦の形成による曝気が生じなくなるので, 実際に底層に送り込まれる酸素の量は減少している恐れがある。したがって曝気が行われない場合の溶存酸素濃度を把握した上で, 円柱を設置すべきかどうかの判断をする必要がある。管内の上部に渦が生じるよう, 円柱は管の下部のみに設置することも考えられよう。

上昇流を完全に抑える手段として, 波力発電装置などで用いられている整流弁を取り付けることも考えられ, 導入の検討に値するであろう。ただし損失が大きくなるので各種実験による考察が必要である。

実験では単一成分の波を用いたが, 様々な成分の波を重ねあわせたケース, 潮汐を考慮したケースなど, 実海域での装置の適用を想定した研究も今後必要となる。摩擦などを考慮した数値モデルを導入し, 管内の流体流動について洞察を行いたい。

参考文献

- 1) 下迫健一郎, 近藤充隆, 藤堂ひろみ, 福井正幸, 高橋重雄 (1999), 越波造流型海水交換防波堤の開発とその水理特性, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.1096-1100
- 2) 小松利光, 岡田知也, 丸井茂俊, 松永陽一郎, 藤田和夫, 柴田敏彦 (1998) 波浪エネルギーを利用したダム湖・貯水池における水質改善法に関する現地観測, 水工学論文集, 第42巻, pp.727-732
- 3) S.P.R.Czitrom, R.Godoy, E.Prado, P.Perez, R.Peralta (2000), Hydrodynamics of an oscillating water column seawater pump, Ocean Engineering 27 pp.1181-1219
- 4) 山城朋明, 沢本正樹, 佐藤栄司 (2000), 波を用いた底層酸素供給装置の開発, 土木学会第55回年次学術講演会, II-29
- 5) 全国港湾海洋波浪観測資料 (1998), 財団法人沿岸開発技術研究センター
- 6) 小川 明, 渦学, pp.94-99, 山海堂 (1981)

(2000. 10. 2受付)