

水弁集約式波力発電システムにおける整流弁 (水弁) の損失特性

Characteristics of Loss at Rectifying Valve (Water-Valve)

in a Wave Power Conversion System with Water-Valve Rectifier

佐藤 英資*・佐藤 栄司**・沢本正樹***

Eisuke Sato, Eiji Sato and Masaki Sawamoto

This paper deals with a wave power generation system with water-valve rectifier. The water-valve rectifier converts oscillating air flow into steady air flow. The rectifier doesn't have a mechanical moving element, so the system is simple and maintenance free. However, because of the characteristic form of the rectifier, the loss in the rectifier is large and it is difficult to understand the characteristics of loss. In the paper, we indicate the characteristics by changing the cross-sectional area and the number of air pipes which affects the loss of water-valve rectifier.

Keywords : water-valve rectifier, wave power generation system, characteristics of loss

1. はじめに

数ある波力発電装置の中でも振動水柱型の波力発電装置においては、空気室内の水面変動によって生じる振動空気流からどのように発電用タービンを回転させるかが重要な課題となっている。著者らは、水弁と称する空気整流装置を組み込んだ波力発電装置について検討を進めてきた。この波力発電装置では振動空気流を一方向空気流に整流する際に水弁と呼ばれる流体力学的な特性を利用した整流弁を用いている。その概念図を図-1に示す。

寄せ波時において、水弁前後の圧力差が生じ排気側の水弁のみを空気流が通過する。引き波時においては、逆に吸気側の水弁を空気流が通過する。このようにして一様空気流が生み出され、それぞれ排気側吸気側の両方でタービンを回転させることができる。このような水弁は機械的可動部を持たないので、全体のシステムが比較的シンプルでありメンテナンスフリーであるという利点を持つ。しかし、このような独特の弁の形状により水弁での損失が比較的大きく、その特性がとらえにくいといった欠点を持っている。

本研究では水弁の損失に影響を与えると考えられる鉛直管の本数、断面積を変化させてその損失特性を明らかにすることを目的とする。

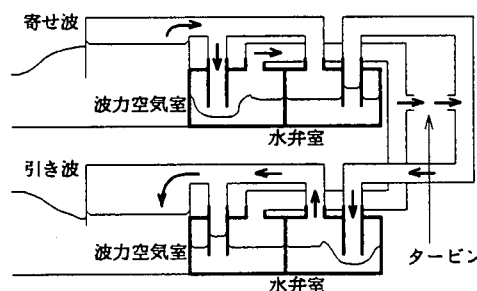


図-1 水弁式波力発電装置概念図

2. 実験装置および実験方法

(1) 実験装置

実験装置の概略図および測定点を図-2に示す。実験装置において波力空気室内の水面の上昇、下降によって生じる振動空気流をピストンから振動空気流を送り込むことによって再現させた。この振動空気流が実験装置に送り込まれ、水弁によって一様空気流に変換される。実験は、鉛直管径、鉛直管本数、鉛直管没水深、ピストン振幅、ピストン周期を変数としておこなった。

ピストンの仕様は、直径20cmの円筒形で、断面積は314cm²であり、ゼロ位相時の体積は8164cm³である。このピストン4本からの振動空気流は、流出管を経由して空気室に入る。流出管の直径は8cmで、その断面積は50.27cm²である。

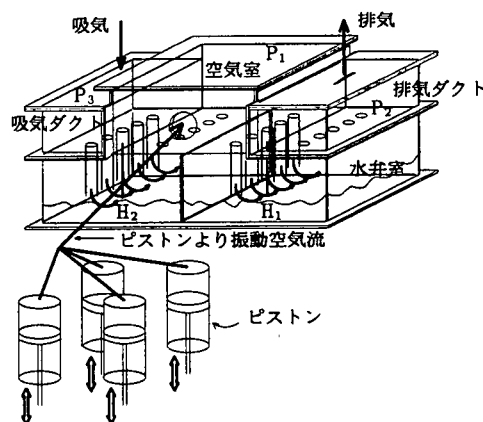


図-2 実験装置概略図

* 学生会員 東北大学大学院 (〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉)

** 東北大学工学研究科土木工学専攻

*** フェロー 東北大学工学研究科土木工学専攻

(2) 実験方法

測定は、 P_1 、 P_2 、 P_3 における圧力を歪式圧力計、 H_1 、 H_2 における鉛直管内の水面変動を容量式波高計により測定した。また、ピストンの振幅を振幅測定器によって測定した。測定は50Hzでサンプリングし、AD変換後パソコンのハードディスクに記録した。サンプリングは90秒間行い、そのデータに対してピストンの振幅のゼロアップクロスをとることにより周期を決定し、それをもとに8波から17波分に対して位相平均化処理を行い解析に用いた。

実験ケースを表-1に示す。まず、ピストン周期、鉛直管径を一定、ピストン振幅、鉛直管没水深、鉛直管本数を変数として実験を行い鉛直管没水深の効果を知るための実験を行った。更に、鉛直管没水深を一定、ピストン周期、ピストン振幅、鉛直管径、鉛直管本数を変数として実験を行いその損失特性について考察を行った。

表-1 実験ケース

ピストン周期	ピストン振幅	鉛直管径	鉛直管本数	鉛直管没水深
5sec	2.5cm	3.0cm	1本	1cm
			2本	
7sec	7.5cm	4.0cm	3本	
			4本	
9sec	12.5cm	5.5cm	5本	

3. 実験結果および考察

(1) 鉛直管没水深 H の効果

ここで、鉛直管没水深 H と水弁の損失の関係を明らかにする。図-3 にピストン周期7sec、ピストン振幅2.5、7.5、12.5cm、鉛直管径4cm、鉛直管本数1本の場合における鉛直管没水深 H と圧力損失水頭 h の関係を示す。圧力損失水頭 h は1周期間の平均値とし、排気時、吸気時で以下のような式を用いた。ここで、 ρ_w は水の密度、 g は重力加速度である。

排気時 :
$$h = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{P_1 - P_2}{\rho_w g} dt$$

吸気時 :
$$h = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{P_3 - P_1}{\rho_w g} dt$$

ピストン振幅が一定であれば圧力損失水頭 h は鉛直管没水深 H に比例して増加していることがわかる。この場合、比例定数は約1となり傾きがほぼ等しい直線で表すことができる。他の実験ケースについても同様のことがいえる。つまり、圧力損失水頭 h は鉛直管没水深 H とその他の部分 h' で表すことができる。

以後、圧力損失水頭 h から鉛直管没水深 H の効果を引いた部分 h' についての損失特性を明らかにしていく。

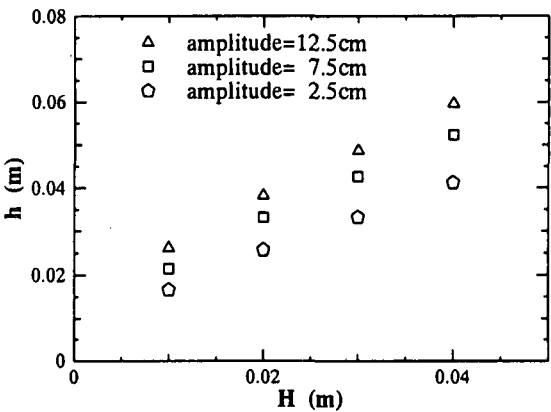


図-3 鉛直管没水深 H と圧力損失水頭 h の関係

(2) 鉛直管径 d の効果

図-4 にピストン周期5、7、9sec、ピストン振幅2.5、7.5、12.5cm、鉛直管本数1本、鉛直管径3、4、5.5cm の場合の圧力損失水頭を示す。ここで縦軸は圧力損失水頭 h から鉛直管没水深 H を引いた値 h' であり、横軸は鉛直管内を通過する最大空気流速 V である。

全体的に鉛直管径が大きくなると鉛直管内最大空気流速が小さくなっており、また鉛直管内の最大空気流速が等しい場合には鉛直管径が大きいほど圧力損失水頭が大きくなっていることがわかる。この図では、圧力損失水頭 h' を鉛直管内最大空気流速 V の関数として表しているため鉛直管径が大きいほど圧力損失水頭 h' が大きくなっている。しかし、空気室に流入する空気流が同一の場合には鉛直管径を大きくとることにより、鉛直管内最大空気流速が抑えられ、圧力損失を抑えることができる。図-4 鉛直管内最大空気流速 V と圧力損失水頭 h' の関係

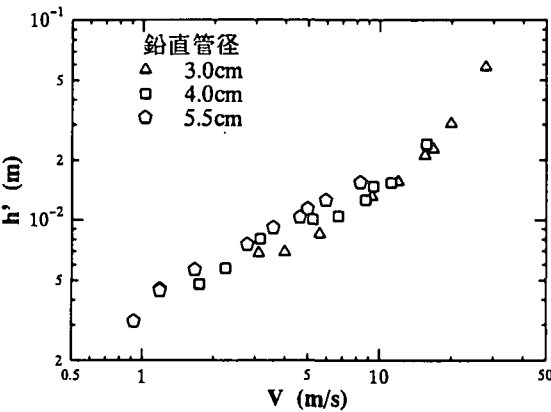


図-4 鉛直管内最大空気流速 V と圧力損失水頭 h' の関係

図-5に図-4と同じ実験ケースにおける無次元空気流速と無次元圧力損失水頭の関係を示す。ここで縦軸 h^* は h' を鉛直管径 d で無次元化したものであり、横軸 V^* は V を $\sqrt{2gd}$ で無次元化したものである。無次元空気流速 10~13 を境にして損失特性が異なっていることがわかる。これは高流速時には空気流は水中に途切れることなく風路を形成するが、低流速時には空気流は鉛直管端部で大きく変動することが確認されている。低流速時、高流速時の空気の流れの形態がこのような損失特性の差として現れていると考えられる。このような処理を行うことにより、圧力損失水頭 h と鉛直管内最大空気流速 V の関係を明らかにすることができた。

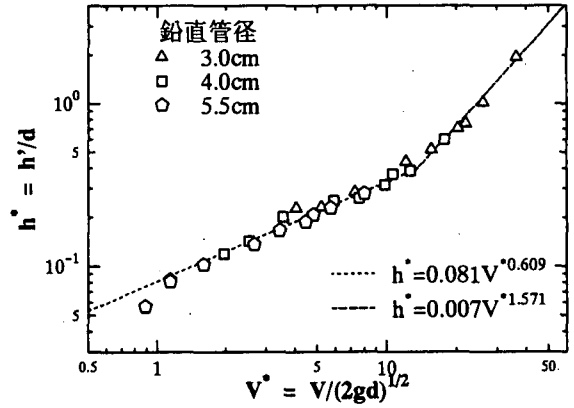


図-5 無次元空気流速と無次元圧力損失水頭の関係

(3) 鉛直管本数の効果

図-6にピストン周期 5, 7, 9sec, ピストン振幅 2.5, 7.5, 12.5cm, 鉛直管径 3, 4, 5.5cm, 鉛直管本数 1, 2, 3, 4, 5 本の場合の圧力損失水頭 h' と鉛直管内最大空気流速 V の関係を示す。鉛直管本数が 1 本と 5 本の場合を黒塗りで表している。鉛直管本数が多いほど圧力損失水頭 h' が大きくなっているが、これは図-4同様に圧力損失水頭 h' を鉛直管内最大空気流速 V の関数として表しているためである。空気室に流入する空気流が同一の場合には鉛直管本数を増やすことにより、鉛直管内最大空気流速が抑えられるため圧力損失を抑えることができる。図-7に無次元化した鉛直管内空気流速と圧力損失水頭の関係を示す。前節と同じように、縦軸は h' を鉛直管径 d で無次元化したものであり、横軸は鉛直管内最大空気流速 V を $\sqrt{2gd}$ で無次元化したものである。全体的に鉛直管本数が多くなると鉛直管内空気流速が小さくなっており、それに伴って圧力損失水頭も小さくなっている。また、無次元空気流速と無次元圧力損失水頭の関係は鉛直管本数ごとに異なっていることがわかる。この差が鉛直管本数を複数にした場合の効果である。

図-8に無次元化した鉛直管内空気流速と圧力損失水頭の関係を示す。鉛直管本数 n 本の場合、鉛直管本数 1 本に相当する鉛直管径は $\sqrt{n}d$ で表すことができる。したがって、使用した鉛直管径 d に $\sqrt{n}$ を掛けることにより鉛直管径 1 本に相当する損失水頭を求めることができる。横軸は V を $\sqrt{2g\sqrt{n}d}$ で無次元化したものであり、縦軸は h' を $\sqrt{n}d$ で無次元化したものである。図-8より、圧力損失水頭 h と鉛直管内最大空気流速 V の関係を明らかにすることができた。

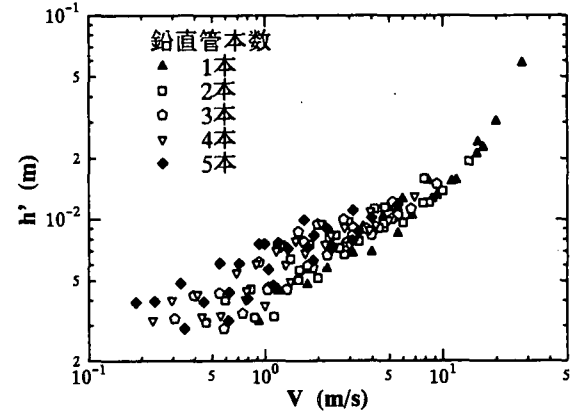


図-6 圧力損失水頭 h' と鉛直管内最大空気流速の V の関係

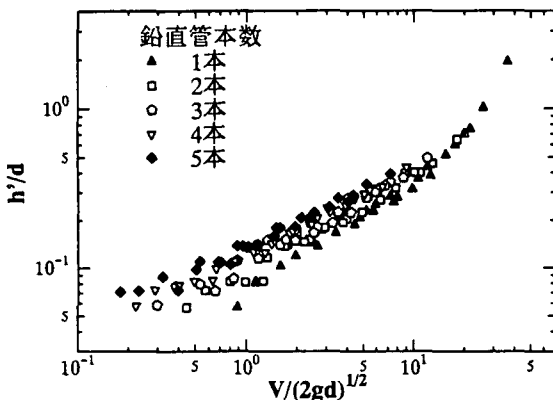


図-7 無次元空気流速と無次元圧力損失水頭の関係

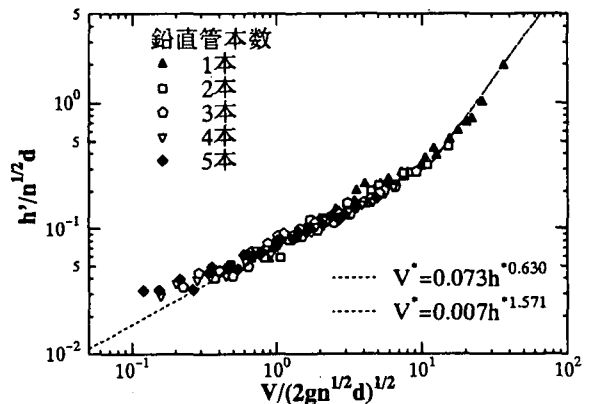


図-8 無次元空気流速と無次元圧力損失水頭の関係

(4) 鉛直管全断面積の効果

前節、前々節の結果より鉛直管径、鉛直管本数を変化させた場合の無次元鉛直管内空気流速と無次元圧力損失水頭の関係が求められた。また、圧力損失水頭を抑えるには鉛直管径を大きくし、鉛直管本数を増やせばよいということが明らかになった。つまり、鉛直管の全断面積が大きければ圧力損失水頭が抑えられるということになる。

ここで、鉛直管全断面積と圧力損失水頭の関係を求める。図-9にピストン振幅12.5cm、ピストン周期5sec、の場合の鉛直管全断面積と圧力損失水頭 h' の関係を示す。それぞれの鉛直管径において鉛直管本数は鉛直管全断面積が大きい方から5, 4, 3, 2, 1本となっている。この図を見ると鉛直管全断面積と圧力損失水頭の関係は一本の曲線で表すことができるといえる。つまり、鉛直管径、鉛直管本数が異なっても圧力損失水頭は鉛直管全断面積の関数で表すことができるということが明らかになった。

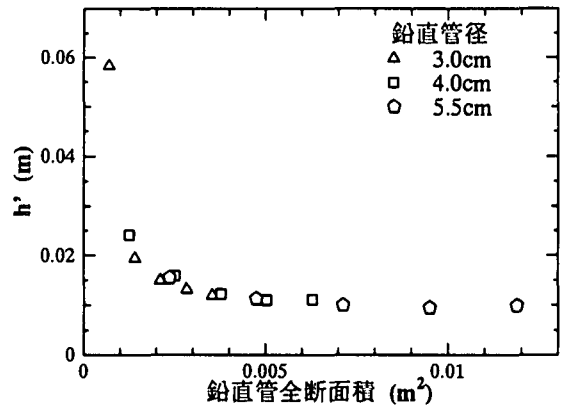


図-9 鉛直管全断面積と圧力損失水頭 h' の関係

(5) 水井におけるパワー効率

ここでは、空気室と排気・吸気ダクト間のエネルギー差について比較を行った。入力、出力エネルギー EI 、 EP を以下の式により求めた。

$$EI = \frac{1}{T} \int_0^T P_1 V_1 dt$$

$$EP = \frac{1}{T} \int_0^T P_2 V_2 + P_3 V_3 dt$$

P_1, P_2, P_3 : 空気室, 排気, 吸気ダクト圧力

V_1, V_2, V_3 : 空気室, 排気, 吸気ダクト体積

T : ピストン周期

図-10にピストン周期5, 7, 9sec, ピストン振幅2.5, 7.5, 12.5cm, 鉛直管本数1本, 鉛直管径3, 4, 5.5cmの場合の無次元空気流速とエネルギー効率の関係を示す。鉛直管径が同じ場合、鉛直管内空気流速が大きいほどエネルギー効率がよくなっている。また、鉛直管内空気流速が同じ場合、鉛直管径が大きいほどエネルギー効率がよくなっている。

図-11にピストン周期5, 7, 9sec, ピストン振幅2.5, 7.5, 12.5cm, 鉛直管径3cm, 鉛直管本数1, 2, 3, 4, 5本の場合の無次元空気流速とエネルギー効率の関係を示す。図-10同様に鉛直管内空気流速が大きいほどエネルギー効率がよい。また、鉛直管内空気流速が同じ場合、鉛直管本数が多いほどエネルギー効率がよくなっている。

図-10, 図-11よりエネルギー効率をアップさせるにはピストン周期を小さくしピストン振幅を大きくすればよい。つまりピストン移動速度が大きくなればエネルギー効率がアップする。実際の海域での適用を考慮すると、入射波の波高が大きく、周期が短いときにエネルギー効率がアップする。また、ピストン周期、ピストン振幅、鉛直管本数が同じ条件の下では鉛直管径が大きいほど効率がよく、ピストン周期、ピストン振幅、鉛直管径が同じ条件の下では鉛直管本数が多い方が効率がよい。つまり、鉛直管全断面積が大きい方が効率がよいということになる。

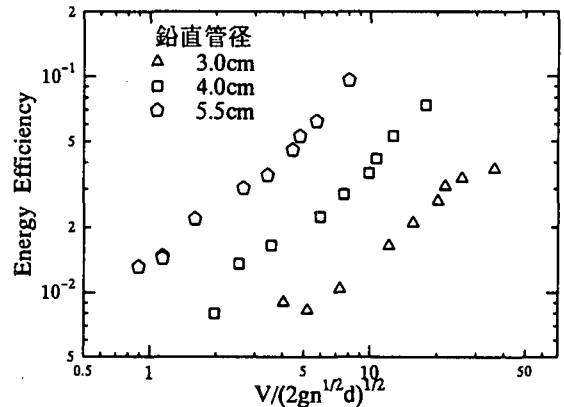


図-10 無次元空気流速とエネルギー効率の関係

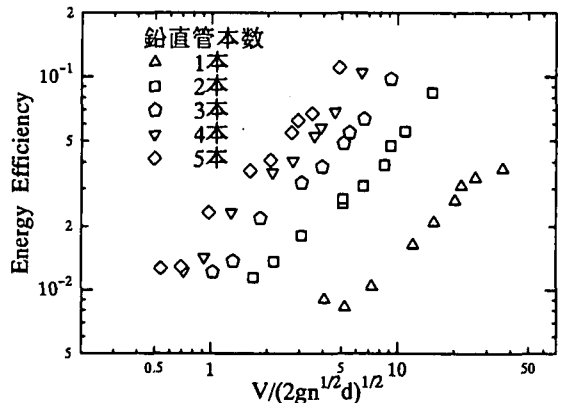


図-11 無次元空気流速とエネルギー効率の関係

図-12にピストン周期 5sec, ピストン振幅 12.5cm, 鉛直管径 3, 4, 5.5cm, 鉛直管本数 1, 2, 3, 4, 5 の場合, つまりピストン振幅, ピストン振幅が同じ場合の鉛直管全断面積とエネルギー効率の関係を示す。図-12より, 鉛直管全断面積が増加するほどエネルギー効率がアップする傾向にあるが, 鉛直管全断面積 0.003m²付近を境にしてその傾きが緩やかになっていることがわかる。また, 鉛直管本数を変化させて鉛直管全断面積を増加させた場合と鉛直管径を変化させて鉛直管全断面積を増加させた場合の違いはないといえる。したがって, 水弁のエネルギー効率をアップさせるには鉛直管全断面積をできるだけ大きくすればよいということがわかった。

しかし, 水弁室断面積に比べて鉛直管全断面積が大きくなりすぎると, 逆流時に鉛直管に入る水の体積と水弁室内の水の体積が同程度となり, 逆止弁として正常に作用しなくなることもあり得る。したがって, 圧力漏れを起こさない程度に鉛直管の断面積をできるだけ大きくすることが必要である。

(6) 水面押し下げ深さの効果

図-13にピストン周期 5, 7, 9sec, ピストン振幅 2.5, 7.5, 12.5cm, 鉛直管本数 1 本, 鉛直管径 3, 4, 5.5cm の場合の無次元圧力損失水頭と無次元水面押し下げ深さの関係を示す。ここで, 縦軸は前節同様に圧力損失水頭 h より鉛直管没水深 H の 2 倍, $2H$ を引いた h' を鉛直管径 d で無次元化したものである。また, 横軸は空気流が鉛直管を通過している際に水面を押し下げる深さ dh を鉛直管径 d で無次元化したものである。また, 図-14にピストン周期 5, 7, 9sec, ピストン振幅 2.5, 7.5, 12.5cm, 鉛直管径 3cm, 鉛直管本数 1, 2, 3, 4, 5 本の場合の無次元圧力損失水頭と無次元水面押し下げ深さの関係を示す。

鉛直管内を空気流が通過する際に, 水弁室内の水面が大きく乱される。したがって, 水面押し下げ深さの値に多少ばらつきが見られるが図-13, 図-14より大まかな傾向が読みとれる。水面押し下げ深さが大きいほど圧力損失水頭が大きくなっていることがわかる。これは, 水面にはたらく空気流のエネルギーが大きくなるほど損失が増加することを示している。これらの図より, 鉛直管径, 鉛直管本数による違いは見られない。したがって, 無次元圧力損失水頭と無次元水面押し下げ深さの関係が求められた。

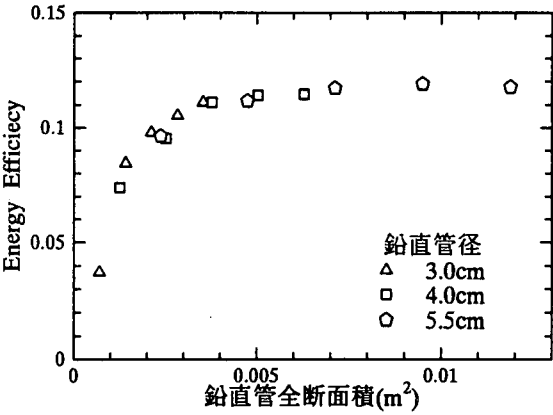


図-12 鉛直管全断面積とエネルギー効率の関係

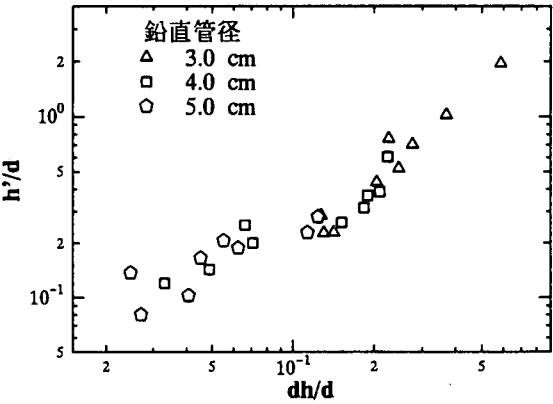


図-13 水面押し下げ深さと圧力損失水頭の関係

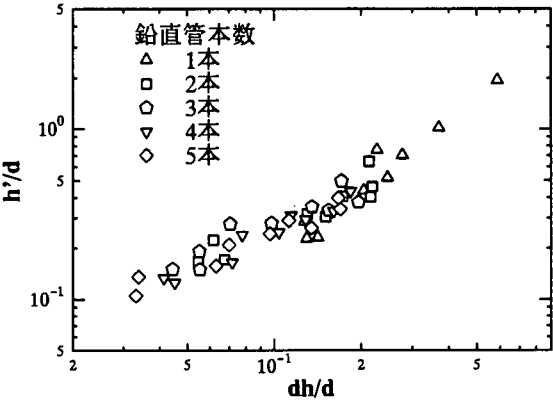


図-14 水面押し下げ深さと圧力損失水頭の関係

図-15にピストン周期5, 7, 9sec, ピストン振幅2.5, 7.5, 12.5cm, 鉛直管本数1本, 鉛直管径3, 4, 5.5cmの場合の無次元水面押し下げ深さとエネルギー効率の関係を示す。また, 図-16にピストン周期5, 7, 9sec, ピストン振幅2.5, 7.5, 12.5cm, 鉛直管径3cm, 鉛直管本数1, 2, 3, 4, 5本の場合の無次元水面押し下げ深さとエネルギー効率の関係を示す。

水面押し下げ深さが大きいほどエネルギー効率がよくなっている。これは, 水面押し下げ深さが大きいほど鉛直管内空気流速が大きくなることから明らかである。また, 水面押し下げ深さが同じ場合, 鉛直管径が大きく鉛直管本数が多いほど, つまり鉛直管全断面積が大きいほどエネルギー効率がよいことがわかった。

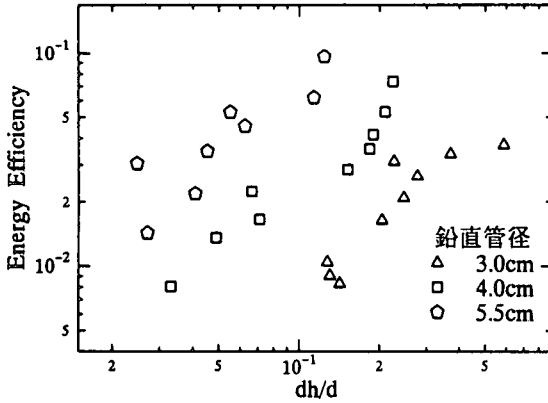


図-15 水面押し下げ深さとエネルギー効率の関係

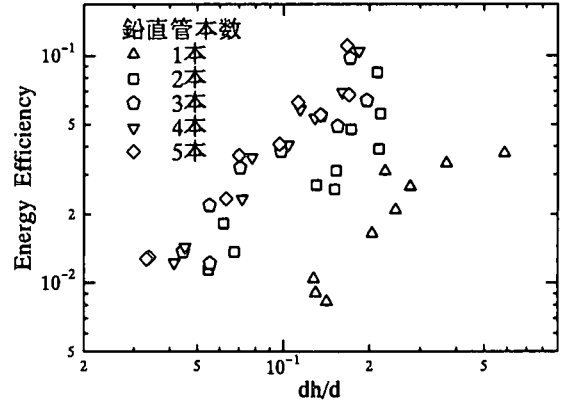


図-16 水面押し下げ深さとエネルギー効率の関係

4. 結論

今回の実験結果より, 以下のことが明らかとなった。

- 圧力損失水頭 h は, 鉛直管没水深 H とその他の部分 h' の和で表すことができる。
- 圧力損失水頭 h' は鉛直管径が大きく, 鉛直管本数が多いほど小さくなる。ここで圧力損失水頭 h' に支配的なものは鉛直管全断面積である。
- 鉛直管径, 鉛直管本数を変化させた場合, 無次元鉛直管内空気流速と無次元圧力損失水頭の関係を求めることができた。
- 鉛直管内を通過する空気流速が大きくなると圧力損失水頭は大きくなるがエネルギー効率も大きくなる。
- 水弁でのエネルギー効率を考えると鉛直管全断面積が大きいほど効率がよい。
- 水面押し下げ深さが大きいほど圧力損失水頭が大きくエネルギー効率が大きい。

謝辞：本論文公表にあたり小川記念基金の補助を受けた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 田中重人, 沢本正樹：密閉型波力ケーソンの検討 海洋開発論文集, Vol.4, pp.283-288, 1988.
- 2) 田中重人, 沢本正樹, 渡辺國也：密閉型波力ケーソンの水理特性 海洋開発論文集, Vol.5, pp.7-11, 1989.
- 3) 沢本正樹, 首藤伸夫, 渡部國也, 新嶋洋明：水弁を通過する空気流のエネルギー損失 土木学会論文集第 375 号, 1986.
- 4) 堀川清司：海岸工学 東京大学出版会
- 5) K.Watanabe, H.Nakagawa and M.Sawamoto: Study on pneumatic wave power conversion system with water valve rectifier Coastal Engineering in Japan, Vol.32, No.2, pp.257-269, 1989.
- 6) M.Sawamoto, D.Tsumune, K.Watanabe and M.Ohtomo: A new type wave power conversion system with water valve rectifier Proc. of Int. Symp. on Ocean Energy Development (ODEC), pp.281-287, 1993.