

水弁式波力発電ケーソンの連成による集約効果

橋本 敦*・佐藤英資**・佐藤栄司***・沢本正樹****

1. はじめに

新しい代替エネルギーの一つとして、無尽蔵に存在する海洋の波浪エネルギーを有効に利用することは、重要な課題である。高橋（1993）の報告によると、日本周辺には、約3,500万kWの波パワーが平均して押し寄せているという。3,500万kWは、日本の総発電量の1/3に達する。こうしてみると、日本は波エネルギーの宝庫といえる。しかし、地域的にみると太平洋側の波浪は、季節による変動はさほどなく年間を通じて安定した電力供給が可能であるといえる。対して日本海側では、冬期には大きな波浪が押し寄せるが、夏期には静穏になってしまう。また、波エネルギーは密度が薄く、変動性が高いことなどから、経済的利用は容易なことではない。

波エネルギーを有効に利用しようと、波力発電装置に関する研究は盛んにおこなわれている。著者らは、水弁と称する水理学的空気整流装置を組み込んだ波力発電装置についてこれまで検討を進めてきている（津盲ら、1993）。

本研究では、これまでの知見に加え、さらに現実に近い最適システムを探ることを目的としている。水弁が空気流を整流する働きを持つことから、複数の波力空気室を連成させることで大規模集約化が可能となる。図-1に4連成波力発電装置に位相差90°の波が入射する時の概念図を示す。しかし、複数の空気室を連成させた場合、各空気室の現象が異なってくると考えられる。特に異なる位相差をもった波が入射してくる場合、空気室相互による干渉が起こりシステムの効率に変化をきたす可能性がある。また、連成による集約効果が有効に働き、効率アップにつながるとも考えられる。これまでに、2つの空気室を連成させた場合、入射波の位相差が180°のとき、効率が上がることが明らかになっている。

本研究では、さらに連成を増やした場合について、連成効果がシステムの効率に有効に働くかどうかを検討し、空気室の連成を4つにした縮尺模型実験より、連成

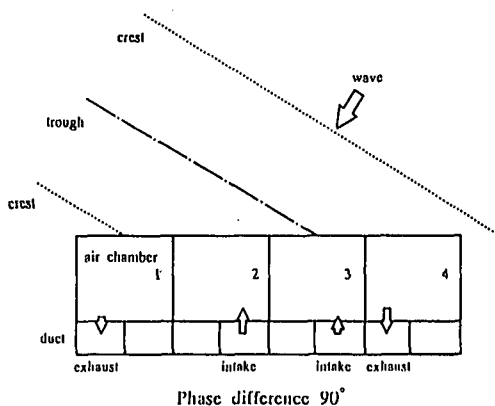


図-1 4連成時波力システム概念図（位相差90°の波の入射による）

作用がシステムに及ぼす影響を明らかにした。

2. 連成時の集約特性

(1) 実験装置および方法

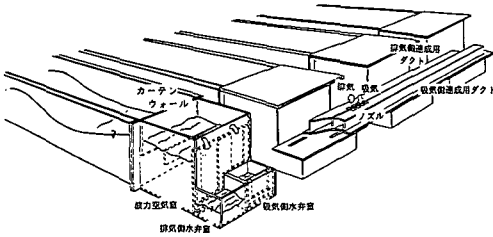
実験装置概略図を図-2に示す。4つの水路端にはそれぞれ波力空気室が設置されている。それぞれの波力空気室は、水弁室を経て、排気・吸気連成用ダクトでつながっている。もう一方の水路端にはそれぞれフラップ型の造波器が設置されており、位相差をもった波が入射することで、波力空気室の水面が変動し、振動空気流が生まれる。空気流は水弁で整流され、連成用ダクトで集約されノズルより出力される。

実験では、各水路における重複波の腹と節での波高 H_{1p} , H_{nd} , 波力空気室の水面変動 H_1 , H_2 , H_3 , H_4 を容量式波高計にて測定した。波力空気室の圧力 P_1 , P_2 , P_3 , P_4 排気・吸気ダクト P_{ex} , P_{in} を歪み式圧力計にて測定した。入射波は、波力空気室前面のカーテンウォールで一部反射波となる。サンプリングは、反射波が造波器で反射し再び戻ってくるまでの重複波の間、周期にして3波分とした。この3波のアンサンブル平均をとったデータを結果に用いることにした。実験ケースを表-1に示す。

(2) 実験結果および考察

図-3、図-4に入射波が位相差45°, 90°のずれを持っているときの波力空気室水面変動、排気・吸気ダクト圧

* 正会員 工修 五洋建設(株)
 ** 学生会員 東北大学大学院土木工学専攻
 *** 東北大学工学部土木工学科
 **** 正会員 工博 東北大学教授工学部土木工学科



図一2 実験装置概略図

表-1 実験ケース（連成時集約特性）

位相差 (deg)	波高 (m)	周期 (s)	ノズル面積 (m ²)
0	0.054	1.54	0.0002
45			0.0004
90			0.0006
135			0.0008
180			0.0012
			0.0016

力変動のアンサンブル平均を示す。位相差 45° では空気室 1, 4 に比べ空気室 2, 3 の水面変動が小さい。対して位相差 90° では、各空気室において差は現れていない。このことは、入射波の位相差により現象が異なってくることを表している。そこで、入射波の位相差に着目して連成波力発電ケーソンのシステムの効率について考察する。

測定した各水位変動と各圧力変動より、入射波の持つパワー EI、EI から反射波の持つパワーを差し引いたもの（実際に波力空気室に入射するパワー）ET、波力空気室内における水面変動の持つパワー EA、ノズルより出力する空気流の持つパワー EB を以下のように定義する。

$$EI = \frac{1}{8} \rho g H_l^2 B C_G$$

$$ET = (1 - K_r^2)EI$$

$$EA = -\frac{1}{T} \int_0^T \sum_{i=1}^4 P_i v_i A_i dt$$

$$EB = -\frac{1}{T} \int_0^T (P_{ex} v_{ex} A_{ex} + P_{in} v_{in} A_{in}) dt$$

ここで ρ は水密度, g は重力加速度, H_i は入射波高, B は水路幅, C_c は群速度, K_r は波の反射率, v は各空気流速, A は各断面積である。

これより求めた波力空気室内の効率 EA/ET を図-5に示す。縦軸は効率 EA/ET 、横軸はノズル比(波力空気室断面積に対するノズル面積の比)である。波力空気室内の効率 EA/ET からは位相差によりあまり差はみられない。空気室それぞれの現象は位相差により異なるが、トータルでは効率に差がないということがわかる。水弁

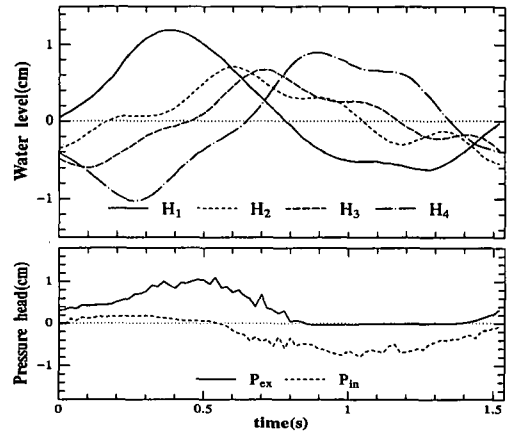


図-3 アンサンブル平均 (位相差 45°)

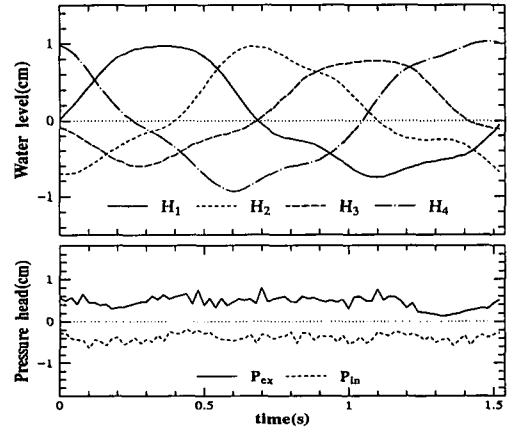


図-4 アンサンブル平均 (位相差 90°)

の効率 EB/EA を図-6 に示す。位相差 90° , 180° の効率がノズル比が小さいところで他よりも良いことがわかる。位相差 90° , 180° の時は各空気室からダクトへの空気流の排気および逆方向への吸気作用が交互に行われるため、空気流がなめらかになり水弁に負荷がかからないと考えられる。これに対して、位相差 0° , 45° については空気流の排気流、吸気流がほぼ同時に起こるため連成用ダクトでの集約作用に大きな負荷がかかり、それぞれの水弁を通過する空気流が抑えられたため効率が下がると思われる。これらのことは、図-3、図-4 の排気・吸気ダクトの圧力変動からみてとれる。位相差 45° では変動が大きく空気流が途切れているが、位相差 90° では変動無くほぼ一定の流れがあることから説明できる。

最終的なシステムの出力効率 EB/EI を図-7 に示す。波力空気室内の効率 EA/ET 、水弁の効率 EB/EA それぞれの最高点であったノズル比 $1/250$ で出力効率 EB/EI にピークが現れている。ノズル比が大きい場合は波力

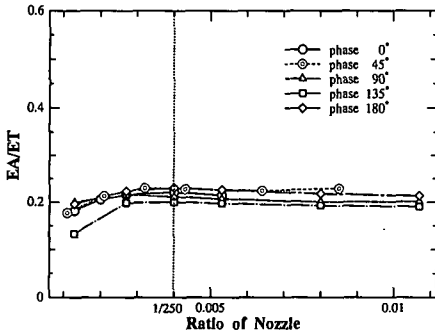


図-5 波力空気室の効率

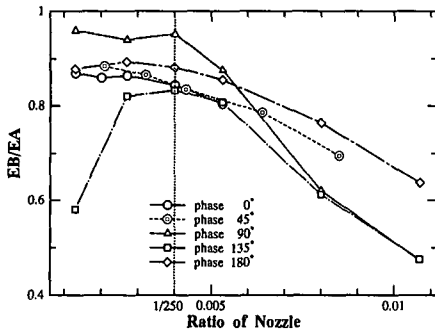


図-6 水弁の効率

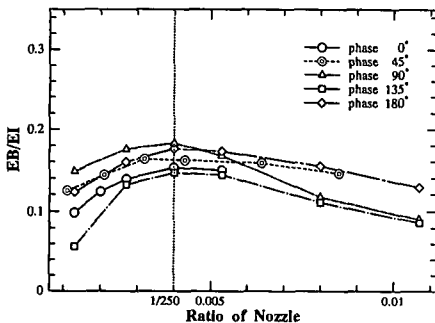


図-7 出力効率

空気室の効率が支配的となり、ノズル比が小さい場合は水弁の効率が支配的である。その均衡点で出力効率にピークが現れた結果となった。

位相差の違いによる効率の差は大きくは現れていないが、やや 90°, 180°の効率が良い。各空気室からの排気・吸気が交互に行われるため、ダクトでの空気流の集約がスムーズに働き損失が抑えられたからである。位相差による出力効率は、水弁の効率が支配的に働いている。しかし、その差はわずかであることから、最終的なシステム全体での出力効率を考えるうえでは位相差による影響は少ないと判断できる。

3. 波力空気室の効率特性

連成時の入射波位相差がシステム効率に及ぼす影響がわかった。波力空気室の効率アップを図ることは、全体的なシステムの効率アップにつながると考えられる。1つには、カーテンウォールの潜り水深が小さいほど反射波が抑えられるため、波力空気室に入射するパワーが大きくなり出力パワーも大きくなると考えられる。もう1つには、入射波周期と連成時の波力空気室内の固有周期との関係が、効率を左右することがあげられる(宮崎・堀田, 1985)。そこで、これらのことを実験より明らかにする。

(1) 実験ケース

カーテンウォールの潜り水深を 0.015 m, 0.025 m, 0.035 m と変化させた場合について実験をおこなった。カーテンウォールの潜り水深は、空気室前面の水位がカーテンウォール下端より下がり、空気パワーが逃げるような設定しなければならない。本実験ケースでは 0.015 m の時、空気室前面の水位がカーテンウォール下端まで下がる最小潜り水深となる。つぎに、波力空気室の固有周期を求める方法を説明する。波力空気室内の空気流路を遮断した後、空気を吸い上げることにより、水面を上昇させる。そこで一気に開放することで水面を振動させ、その周期を測定した。水面変動は水路にも伝わるため、水面変動を波力空気室内および水路にて容量式波高計を用いて測定した。実験ケースを表-2 に示す。

表-2 実験ケース (波力空気室特性)

位相差 (deg)	波高 (m)	周期 (s)	ノズル面積 (m ²)	潜り水深 (m)
0	0.054	1.30	0.0002	0.015
45			0.0004	
90			0.0006	
135	0.054	1.54	0.0008	0.025
180			0.0012	
			0.0016	0.035

(2) 結果および考察

ここではカーテンウォールの潜り水深についてのみ考察するため、ノズル比は前節で最適値となった 1/250 の時についてのみ示すことにする。カーテンウォールの潜り水深によるパワー効率 ET/EI を図-8 に示す。縦軸はパワー効率 ET/EI、横軸はカーテンウォールの潜り水深を表す。潜り水深が小さくなるほど効率は上がっている。これは、潜り水深が小さいほど反射率が抑えられるため、波力空気室に入射するパワーが大きくなり効率が上がったといえる。

波力空気室内効率 EA/ET を図-9 に示す。潜り水深

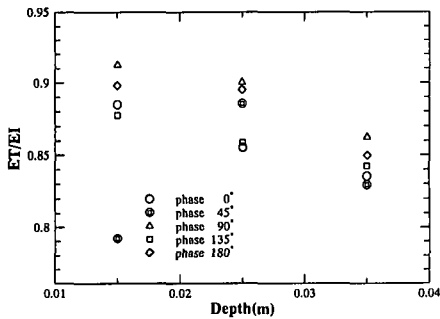


図-8 パワー効率ET/EI (没水深による)

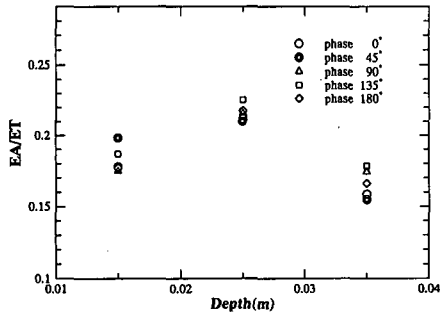


図-9 パワー効率EA/ET (没水深による)

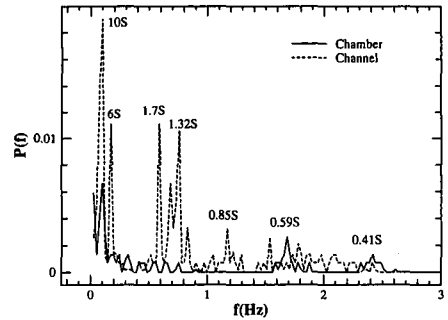


図-10 パワースペクトル

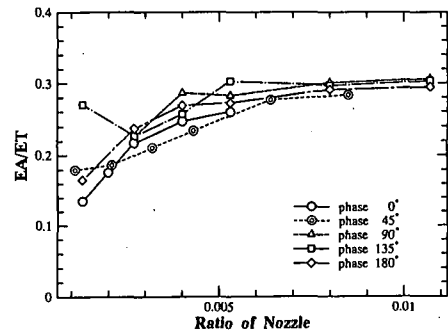


図-11 波力空気室内の効率EA/ET (入射波周期1.30秒)

0.025 m の効率が最も良くなっている。潜り水深 0.015 m, 0.035 m の時は空気室内でのパワー損失が大きいことになる。このことは次のように考えられる。潜り水深 0.035 m のときは、ET/EI より反射率が大きく波力空気室内への入射パワーが小さいために、空気室の圧力上昇までエネルギーが伝わらない。また、潜り水深 0.015 m のときには ET/EI が良いことから大きなパワーが入射する。しかし、パワーが大きすぎるために空気室の圧力上昇までエネルギーが伝わる前に排気が起こり始めてしまう。そのため、空気室のパワー EA が小さくなったものと考えられる。結果的に、潜り水深 0.025 m のときは、空気室のエネルギー伝達能力に適したパワーが入射されたため、効率が上がったといえる。このことは、波力空気室の圧力変動データにおいて、潜り水深 0.015 m と 0.025 m とで変動の大きさに差がないことから確かめられた。潜り水深が小さくなるに従い ET/EI が良くなったにもかかわらず、波力空気室内の効率 EA/ET はピークを持つ形となっている。このことから、水弁の潜り水深と重複波の振幅とに波力空気室内の効率が最良となる均衡点があるのではないかと予見される。

波力空気室内の固有周期には、測定データ処理には FFT 法を用い、スペクトル解析をおこなった。図-10 に波力空気室および水路における周波数ごとのパワースペクトルを示す。エネルギーのピークが現れるところにそ

の周期を表示した。低周波側、周期にして 10 秒、5 秒のところで大きなピークがあるが、これは水路の固有周期といえる。実験水路において、波を長波で近似すると、水路の水深 0.175 m, 水路長 7 m であるから、波速はおおよそ 1.3 m/s となり造波器で反射し空気室まで戻って来るのに約 10 秒となるからである。空気室には様々な固有周期が存在することがわかる。また、空気室内の水位変動によるスペクトルのエネルギーが小さくなっている。空気室内の水位変動は圧力変動により抑えられ、代わりに水路に変動エネルギーが移った結果であるといえる。

入射波の周期を変えた周期 1.30 秒のケースについて、波力空気室内の効率 EA/ET を図-11 に示す。図-5 と比べると明らかに周期が 1.30 秒のときの方が効率が良い。入射波の周期が 1.30 秒の時は、波力空気室の固有周期の 1 つである 1.32 秒とほぼ等しいことがわかる。そのため波力空気室内の効率が良くなったのである。

ここでカーテンウォール没水深 0.025 m, 入射波周期が 1.30 秒のときの出力効率 EB/EI を図-12 に示す。図-7 より効率が良くなっていることがわかる。これより波力空気室内の効率アップが、最終的な出力効率のアップにつながったことになる。

つまり、波力発電ケーソンの設計においてカーテンウォールの潜り水深、固有周期を入射波の周期にあわせるなどの改良によって、システムの効率アップが可能であ

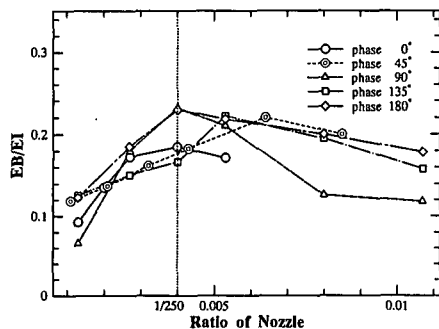


図-12 出力効率 (固有周期における)

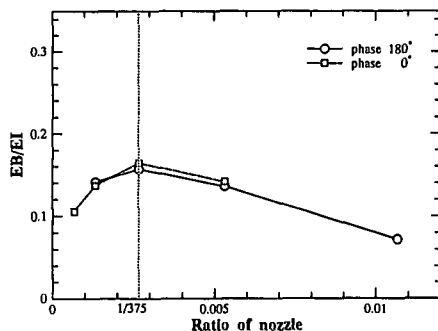


図-13 出力効率 EB/EI (2 連成ケースン)

ることが明らかとなった。

4. 2 連成と 4 連成の比較

前節までの実験から、位相差の異なる波の入射は、個々の空気室での現象には位相差による差が生じている。しかし、システム全体でみると位相差による差はさほど無いことがわかった。連成を増すことはそれぞれの現象を複雑にするため、明確にすることは困難である。

果たして装置の連成を増やすことは、効率アップにつながるのか、大規模な波力発電システムの開発に有効であるのか、を確かめる必要がある。2 連成ケースンと 4 連成ケースンとの効率特性について比較をおこない、連成の有効性を検証する。

2 連成時における最終出力効率 EB/EI を図-13 に示す。最終的に図-13 と図-12 の出力効率 EB/EI を比較する。効率のピークが 2 連成ではノズル比 1/375 であったのが、4 連成では 1/250 もしくは少し大きめにノズル比をとらなければならない。これは連成を増すことで大きな入力パワーが装置に作用するため、ノズルでの負荷が大きくなるためである。

4 連成に増すことで出力効率が上がっていることがわかる。連成による集約効果がスムーズな空気流を生み、損失を抑えたためと思われる。特に 2 連成時には、位相差 90°で空気流の逆流による圧力漏れを生じていた。ところが 4 連成になると排気・吸気の周期がそれぞれの空気室で等しく分割されるため、うまく釣り合うかたちとなり圧力漏れは無く、2 連成とは反対に効率がアップした。このように、連成を増すことでそれぞれの空気室からの吸気量・排気量がトータルとして差がなくなればなくなるほど出力効率に有効に働くと考えられる。連成効果は大規模な波力発電装置の開発に有効に働くことが確認さ

れた。

5. ま と め

結論をまとめると以下の通りである。

1. 排気と吸気によるトータルの空気流が、等しくなるような位相差の入力の際、連成による集約効果は有効に働き、効率アップにつながる。本実験では位相差 90°, 180°の時に相当する。
2. 最終効率にはノズル比が支配的であり、4 連成時における最適値は 1/250 程度であった。
3. カーテンウォールの潜り水深は波力空気室内の効率を支配する。潜り水深はある程度水深を持ったほうがよい。
4. 4 連成時における波力空気室内の固有周期が求められた。波力空気室内の固有周期と入射波の周期が一致するとき波力空気室の効率がアップし、最終効率の上昇につながる。
5. 2 連成と 4 連成を比較した結果、連成を増やすことは、システムの効率アップに有効に働く。

謝辞：本論文の公表にあたり小川記念基金の補助を受けた。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 高橋重雄 (1993): 波エネルギー変換装置の現状について, 第 29 回水工学に関する夏期研修会講義集, pp. 1-20.
- 津旨大輔・沢本正樹・花塚 恒・渡部國也 (1993): 水弁集約式波力発電装置の総合効率特性, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 936-940.
- 宮崎武晃, 堀田 平 (1985): マルチレゾナンス式振動水柱型波力発電装置の研究, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 707-711.