

遊水室型海水交換防波堤の効果と遊水室内 渦流れを利用する波エネルギー取得について

EFFECTIVENESS OF A CHAMBER-TYPE WATER EXCHANGE BREAKWATER AND ITS ABILITY OF WAVE POWER EXTERACTIONS BY WAVE INDUCED VORTEX FLOWS

中村孝幸¹・中橋一壽²

Takayuki NAKAMURA and Kazutoshi NAKAHASHI

¹正会員 工博 愛媛大学工学部環境建設工学科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番)

²正会員 工修 オリエンタル建設株式会社大阪支店開発企画部 (〒530-0012 大阪市北区芝田2-6-23)

In the previous study on the water exchange breakwater of a water-chamber type, we found out that unidirectional rotational flows are induced in the water chamber driven by wave induced vortex flows from the lower edge of a front curtain wall. In this study, we have examined the possibilities of such vortex flows for wave power extractions. Water mills with a few curved fins have been adopted as a device of wave energy extraction. By installing such water mills in the water chamber, rotational characteristics of the mill and its influences on the wave reflection and transmission as well as on the water exchange rate are clarified. It was confirmed that the water mill installed in the water chamber may be used as a wave power extraction device. It was also seen that the installation of the water mill in the water chamber has no influence on the original functions of the breakwater.

Key Words : Wave power, water-chamber type breakwater, wave induced vortex, water mill

1. まえがき

既に著者の中の一人¹⁾は、反射波災害の防止や港湾域の静穏化を目的として、直立護岸や直立堤などの不透過壁の前面に適切な間隔(遊水室)を設けて垂下版を設置した構造を有する垂下版式の反射波低減工を提案した。この低減工は、垂下版と不透過壁で構成される簡単な構造であるにもかかわらず、従来のスリット壁式や多孔壁式の反射波低減工に比較して遊水室幅を半減できるなど、比較的長周期の反射波の低減に有効であることなどが判明している。また、この垂下版式低減工の下部に通水部を設けて透過性防波堤に発展させた構造体は、波により垂下版下部に発生する渦流れの作用により、港内水を港外側に吸い出す機能を有するなど、港内の海水交換を効果的に促進できる構造体として有望視されている²⁾。

ここでは、波浪エネルギーを抽出する方法として、後者の海水交換促進型防波堤において、実験観測で見出された遊水室内での一方向回転渦に着目して、その運動エネルギーを利用する方法の可能性を検討する。

既に波エネルギーの取得に関しては、数多くの研究が

行われてきている。最もよく知られている方法としては、海面に設けた遊水室型構造物の空気室を密閉構造として、遊水室内の水面変動に伴う空気圧縮・希薄を利用する空気圧方式の発電方法がある(例えば、高橋ら³⁾)。一方、長内ら⁴⁾は、波運動を水没した受圧板の振り子運動に変換する方式の発電方法を提案している。また、大澤ら⁵⁾も、波運動を水面に設置した浮力体の上下運動に変換する方式の発電方法を示している。

従来の研究では、いずれも波による水面の上下運動を利用するため、往復運動を一方向回転運動に変換する機構が必要になるなど、発電機構が複雑になりやすく、その際に変換ロスも生じやすいなどの難点が見られる。

本研究では、上述した海水交換防波堤の遊水室内の一方向回転渦に着目して、その運動エネルギーを遊水室内に設けた水車により取得する方法の可能性を主に実験的に検討する。特に、この方法では、一方向に回転する渦流れの運動エネルギーを利用して直接的に水車を回す方式であり、発電のための機構も簡単で変換ロスも少なくできると考えられる。

一方、遊水室内に水車を設置することにより、本来の海水交換防波堤の機能に何らかの影響が現れることが懸

念される。このため、本研究では、水車の設置の有無による遊水室型海水交換防波堤の消波機能や海水交換機能への影響についても明らかにする。

2. 遊水室型海水交換防波堤の概要

最初に、後述する水車を設置した場合の防波堤の結果との比較や、水車を設置した動機などを紹介するため、この形式の防波堤の特徴や消波機構・平均流生成機構などについて記述しておく。これらは、著者らの中の一人²⁾の研究成果による。

遊水室型海水交換防波堤の一般的な断面を図-1に示す。堤体の港外側に設けた垂下版と背後壁の間に遊水室があり、底部の通水路を確保することおよび透過波の低減のため、遊水室底部には水平版が設けてある。また、堤体の港内側には、耐波安定性を高めるため、所要幅の矩形重量部がある。

この防波堤は、図-2に一括して示す機構により、港内水を港外側に吸い出す機能を有することや反射波および透過波の低減にも有効であることなどが確認されている²⁾。

図-3は、図-1に示す堤体断面で、背後の重量部がない基本断面に対する反射率 Cr と透過率 Ct の実験結果と算定結果を示す。算定には、渦流れによる波エネルギーの逸散を近似的に取り扱う、中村・井出による減衰波理

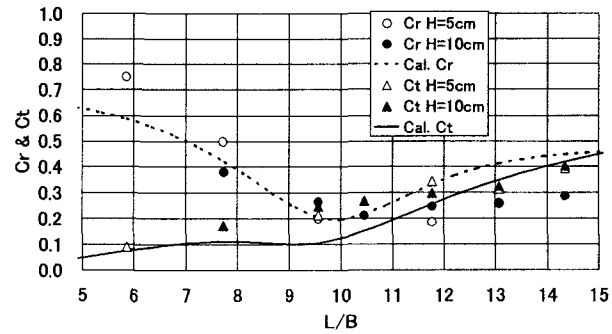


図-3 遊水室型防波堤の反射率 Cr と透過率 Ct
(重量部なし, $B=25\text{cm}$, $d=17\text{cm}$, $h=40\text{cm}$)

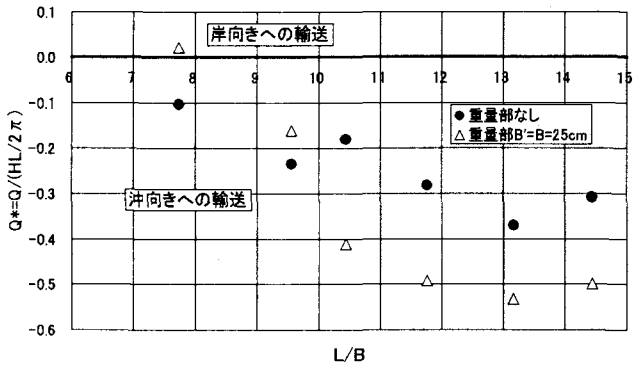


図-4 1波あたりの平均輸送流量 Q (入射波高 $H=10\text{cm}$)

論に基づく数値解析法が用いられている。図中では、波周期に関する無次元量として波長・遊水室幅比 L/B が採られており、波高値 H による差異も検討できるようにしてある。

この図より、反射率 Cr は特定の L/B の条件下で極小値を示す変化傾向にある。これは、図-2に示すように、遊水室内においてピストンモード波浪共振が生起することで結果的に強い渦が形成され、反射波エネルギーが減勢されることによる。このとき、透過率 Ct も比較的低いことなどが認められる。なお、透過率については、安定性向上のため重量部を付加することで、さらに低下することが報告されている²⁾。

図-4は、堤体下部の通水路を介しての平均輸送流量 Q を示すもので、重量部(幅 $B'=B=25\text{cm}$)を設けたときの結果も併せ示してある。図中では、一波当りの平均輸送流量 Q を波運動により半周期間に移動する水塊量($HL/2\pi$)で除した無次元流量 Q^* で表示してある。

この図より、平均輸送流量 Q は、波進行方向と逆方向である沖側に向かって生じることや、輸送流量は反射率が極小となる L/B の条件より長周期側で増大することなどが確認できる。また、重量部を付加することで、輸送流量は増加することなども分かる。このような平均流の生成機構は、図-2に示すように、水平版の存在により、垂下版の沖側に形成される渦が通水路の流体により強く影響することによるものと考えられている。

写真-1は、このような渦の生成状況を代表的な二つの時間位相について示す。下段の谷位相のとき、通水路の水が沖側に吸い出されるように輸送されているのが認められる。

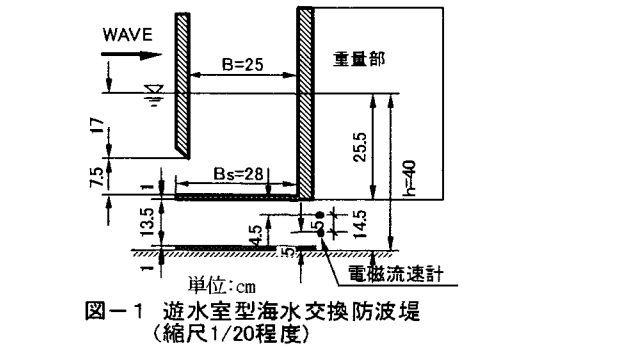


図-1 遊水室型海水交換防波堤
(縮尺1/20程度)

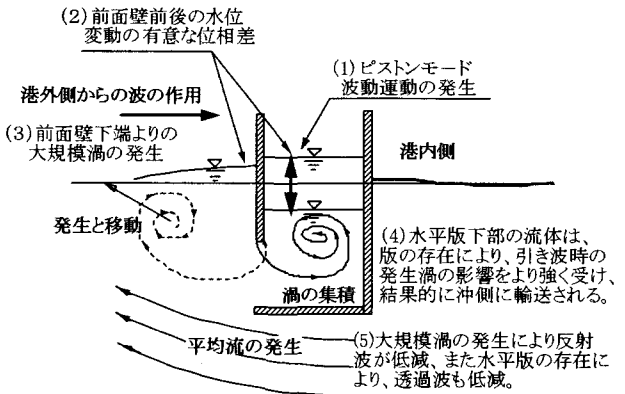
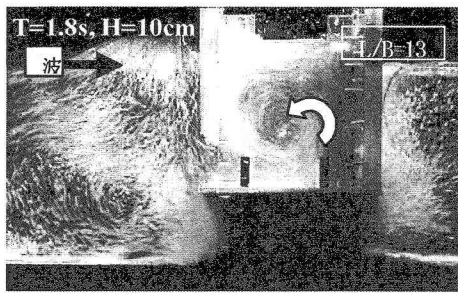
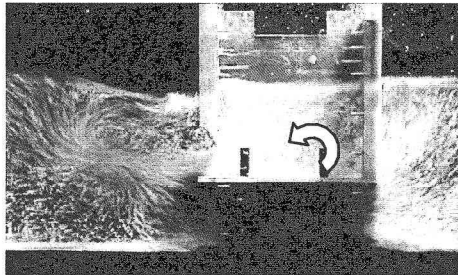


図-2 反射・透過波の低減機構と平均流の発生機構



a) 垂下版前面：波峰位相



b) 垂下版前面：波谷位相

写真-1 遊水室内の渦流れ

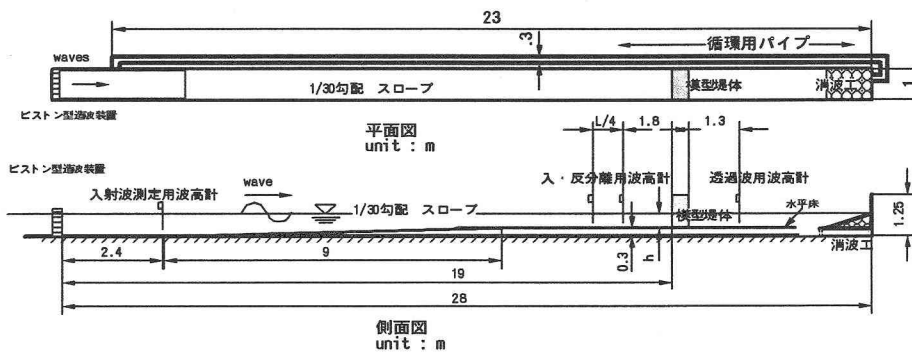


図-5 実験水槽および波高計設置位置

この際、遊水室内には、垂下版下端よりの渦の累積効果によると考えられる一方向回転流が発生しており、しかも波峰、波谷位相に関係なく渦流れの回転方向は一定方向(写真中では反時計方向)であることが確認できる。このように遊水室内に一方向回転流が生成される傾向は、特に反射率が極小を示す周期条件よりも長周期側で、しかも作用波高が大きいときに顕著になることが実験的に確認されている。

ここでは、このような一方向回転流の運動エネルギーを遊水室内に水車を設置することで取り出し、発電や曝気などの動力源として利用する可能性について以下検討してみる。

3. 実験装置および実験方法

(1) 実験水槽

実験には、愛媛大学工学部の長さ25m×幅1m×高さ1.25mの2次元造波水槽を用いた。水路内には、図-5で示すように1:30勾配の斜面が設置されており、それに滑らかに接続するように水平床が設けられている。模型堤体は、この水平床部に固定した。

水路の一端には、ピストン式造波機が設置されており、

他端には下部透過型の砕石消波工が設置してある。水路の横には、並行する形で循環用のパイプが設けられており、平均流の発生による堤体前後の水位差がなるべく生じないような水路構造にしてある。

(2) 模型堤体

模型堤体は、図-6に示すもので、図-1と同一断面である。ただし、背後の重量部は設けていない。そして、後述する水平軸水車を図中に示す位置に固定してある。

(3) 水車

水車には、図-7、8に示す2枚羽根と3枚羽根のものを用いた。これ以外に3枚羽根水車で羽根長が長いものについても実験を行ったが、以下では割愛してある。

水車の構造は、図-7に代表的に示すように、アルミ丸棒中心軸と塩ビパイプをボールベアリング軸受けで連結し、外側の塩ビパイプにやはり塩ビ製の羽根を接合して製作した。羽根は、円形薄肉パイプから切り出した円弧断面のものとした。これら水車の慣性半径および質量

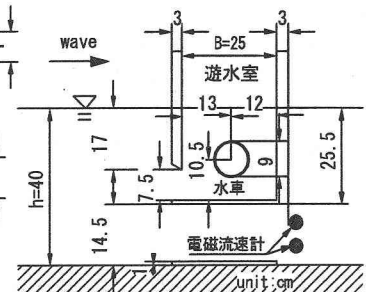


図-6 模型堤体および水車の設置状況

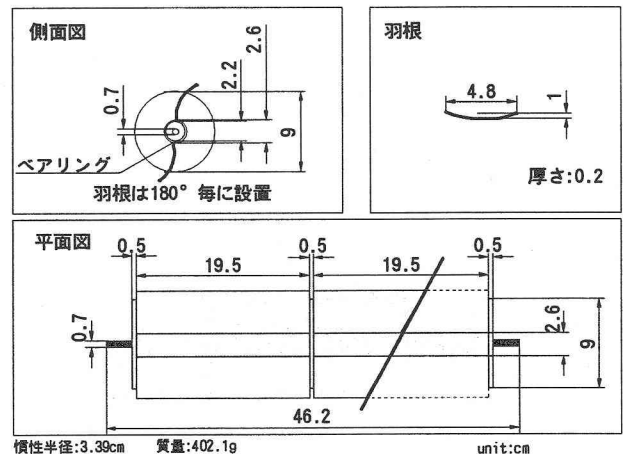


図-7 水車『2枚羽根』の構造諸元

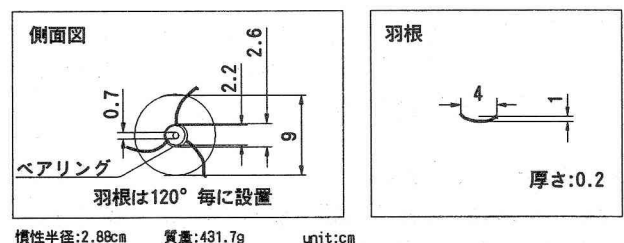


図-8 『3枚羽根』の構造諸元

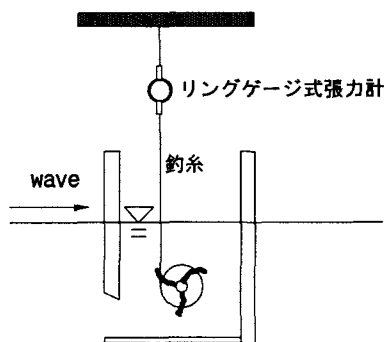


図-9 水車固定時のトルク測定法(Y字型位置の場合)

は図中に示す通りである。

遊水室内での水車の固定位置は、数回の予備実験を介して、同一波条件下で水車の回転数が最も多いと判定される位置を選定した。この最終位置を示すのが、図-6である。この固定位置は、概略的に遊水室の中央で、高さ方向には水車の回転中心がほぼ前面垂下版の下端に近い場所に相当する。

(4) 水車のトルク測定

波による水車の回転力モーメント(トルク)を知るため、図-3に示すように、釣糸を介して水車をリングゲージ式張力計で係留して、水車固定時のトルクを測定した。このとき、釣糸は、水車端部に設けた円板の外周に固定した。なお、図中に示すような釣糸係留支持としたのは、水車が図中で反時計方向への回転運動のみをすることを確認していることによる。そして、このような係留時において、逆方向の右回転運動は見られなかったことを確認している。

このトルク測定実験で対象にした水車は、同一波条件下で回転数が最も多かった3枚羽根水車に限定した。そして、羽根位置としては、図中に示すようなY字型配置と逆Y字型配置の2種類を対象にした。

(5) その他の測定装置

水車の回転実験やトルク測定実験のいずれにおいても、入射波、反射波、透過波を測定できるように計5台の容量式波高計を図-5に示すように配置した。なお、遊水室内の波高変動についても測定するため、1台の波高計を遊水室内に設置した。

一方、水車の設置による平均輸送流量への影響を知るため、図-6中に示すように、堤体通水部の透過側に計2台の電磁流速計を設置して主に水平流速を測定した。

水車の回転状況は、まずビデオカメラにより側面から水車端部の円板に設けたマークの運動を撮影した。その後、パソコンに水車の回転映像を取り込み、画像解析ソフト(PTV)を用いて解析した。

(6) 実験ケースと波条件

実験ケースは、大きく分類すると①水車の回転状況の把握実験と②トルク測定実験の2つである。両ケース共

に、堤体断面と設置水深の条件は固定した。設置水深は、過去の水車なしのときの結果との比較が行えるように同条件の $h=40\text{cm}$ とした。

前者の回転状況の観測実験では、波周期 $T=1.2\sim 2.2\text{s}$ の範囲で6種類、各周期条件下で作用波高 $H=5, 10, 15\text{cm}$ の3種類(砕波する場合を除く)の計18種類の波条件を原則的に用いた。

トルク測定実験では、前述したように、3枚羽根水車に限定して、波周期 $T=1.2\sim 2.2\text{s}$ の範囲で3種類、各周期条件下で作用波高 $H=5, 10, 15\text{cm}$ の3種類(砕波する場合を除く)の計9種類の波条件を用いた。

4. 水車の回転特性

ここでは、水車を拘束しない状況下での波による水車の回転特性を紹介する。

図-10は、代表例として、 $T=1.4\text{s}$ で波高 $H=5, 10\text{cm}$ のときに観測された2枚羽根水車の回転角速度の時系列

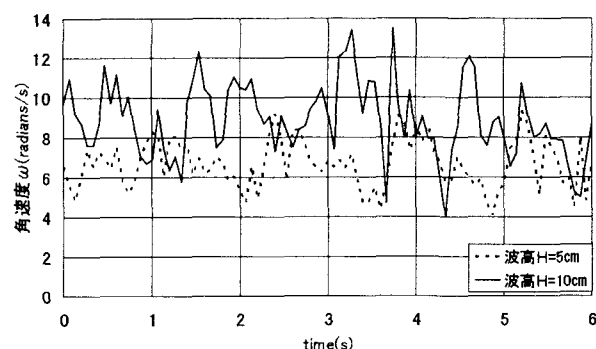


図-10 回転角速度の時間的な変化(2枚羽根, $T=1.4\text{s}$)

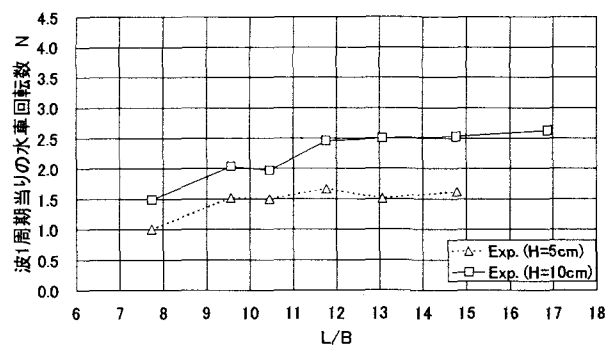


図-11 水車の1周期当りの水車回転数N(2枚羽根)

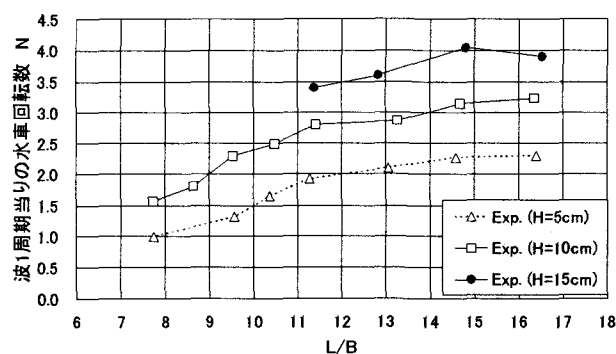


図-12 波1周期当りの水車回転数N(3枚羽根)

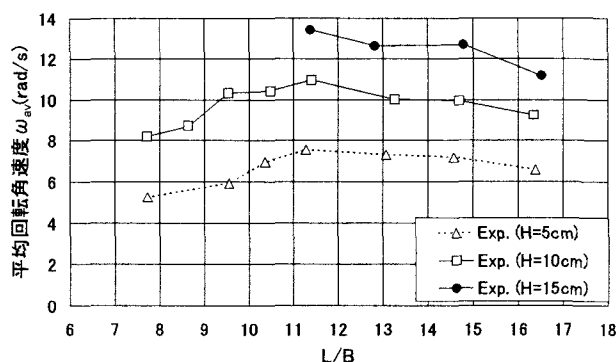


図-13 水車の平均回転角速度 ω_{av} (3枚羽根)

を示す。

この図より、水車の回転角速度は、時間的な変動成分を有するものの、定常成分が卓越する波形になっていることが分かる。また、回転角速度は、入射波高に伴い増大する傾向も認められる。

図-11, 12は、水車の1周期当りの平均回転数Nをそれぞれ2枚羽根、3枚羽根水車について、波長・遊水室幅比の変化で示す。これらの図の比較から、回転数は、2枚羽根よりも3枚羽根の方が多いことや、回転数は作用波の周期・波高に伴い増大することなどが分かる。これは、やはり周期・波高の増大に伴い、遊水室内に形成される渦の強さや規模が大きくなることによると考えられる。そして、水車は、3枚羽根の場合、波高15cmの条件で最大で1周期当り4回転程度することが分かる。

図-13は、3枚羽根水車の平均回転角速度 ω_{av} をやはりL/Bによる変化で示す。この図から、 ω_{av} は、周期条件に関係なく、ほぼ一定値に近づく傾向にあることが分かる。ただし、作用波高の影響はやはり見られ、波高値に伴い回転角速度は増大する傾向にある。

図-14は、この回転角速度と入射波高の関係を選定した波周期について両対数グラフで示す。この図に見られるように、回転角速度は、ほぼ入射波高の1/2乗に比例して増大する関係が確認できる。このような関係は、剥離渦の循環量が波高のほぼ2乗に比例して増大することなどを考慮すると、理論的には納得できず、今後の検討課題としたい。

以上の検討より、波の作用による水車の回転角速度は、特に作用波高による影響を受けやすく、波周期による影響はあまり受けないことなどが判明した。そして、この

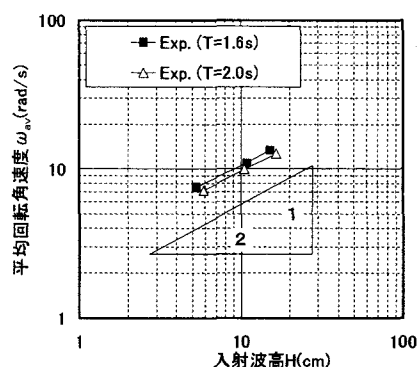


図-14 入射波高Hと平均回転角速度 ω_{av} の関係(3枚羽根)

ような特性は、発電等の動力源として必要な定常性がある程度は満足するものと考えられる。

5. 水車の回転力

ここでは、上記の検討で回転数が最多であることが確認された、3枚羽根水車を対象にして測定した回転力の結果を紹介する。このとき、水車は図-9に示すようなY字型の配置、それを逆転させた逆Y字型の2配置条件としてある。

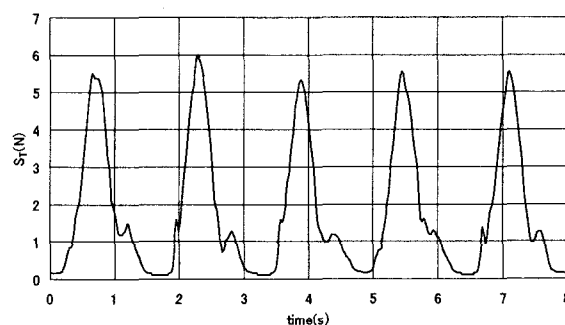


図-15 円板の外周に取り付けた張力計による張力の時間波形 (3枚羽根、Y字型位置、T=1.6s、H=10.4cm)

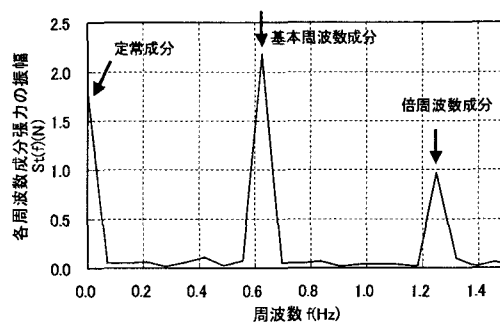


図-16 円板支持線の張力の調和解析結果 (3枚羽根、Y字型位置、T=1.6s、H=10.4cm、L/B=11.8)

図-15は、図-9に示すリングゲージ式張力計で測定した水車端部の円板外周に取り付けた支持線の張力の時間波形を示す。3枚羽根の位置は図-9に示すY字型位置の結果に相当する。この図より、支持線の張力は、常時正方向の引張力になっていることが分かる。そして、波形としては、定常張力と波周期で変動する張力成分が合成された波形に近くなっている。

図-16は、この張力の調和解析結果を示す。図中に見られるように、張力には卓越する定常成分と基本周波数成分が含まれることや倍周波数成分もある程度の大きさで含まれることが分かる。そして、定常成分が遊水室内の渦流れの回転流により、基本周波数成分がピストンモード波面運動により誘起されているものと考えられる。

図-17は、やはり3枚羽根、Y字型位置で測定した支持線張力 S_T の正ピーク値を式(1)により一旦モーメント M_S に換算し、それを式(2)で定義される、波圧が羽根を含む水車の射影面積に一樣に作用するものと仮定して算出した波力モーメント係数を示す。

$$M_S = S_T R_S \quad (1)$$

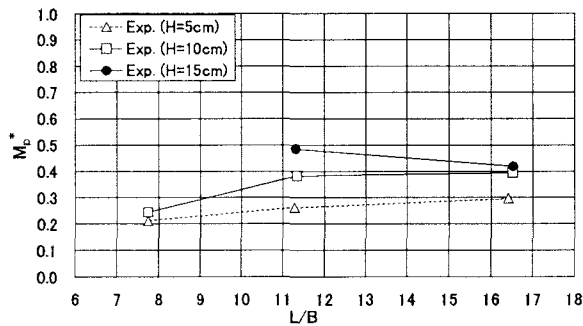


図-17 無次元波力回転モーメント M_p^* (Y字型位置)

$$M_p^* = M_S / (\rho g (H/2) A_p R_G) \quad (2)$$

ここに、 R_S :水車軸の中心から支持線の円板固定点までの距離、 ρ :流体密度、 g :重力加速度、 A_p :水車全体の射影面積、 R_G :水車軸の中心から羽根の中心までの距離である。

無次元波力モーメント係数 M_p^* は、図-17に見られるように、作用波高に伴い増大する傾向を示し、反射率が極小となる L/B が10以上ではほぼ一定となる傾向がある。

以上の検討より、回転拘束した水車に作用する波力モーメントは、入射波振幅相当の水頭圧力で無次元化した波力強度に換算して0.4程度の大きさであるなど、発電等の動力源として利用可能なものと推測される。

6. 防波堤機能への影響

ここでは、水車の回転拘束時を対象にして、波浪制御効果および海水交換効果に及ぼす水車の設置の影響を紹介する。図-18、19は、その代表例を示すもので、それぞれ反射・透過率および平均輸送流量の結果に相当する。

水車のないときの結果に対応する図-3、図-4と比較すると、多少ながら相違が見られるのは反射率であり、その他には有意な差異は見られない。反射率については、水車を設置することにより、極小となる L/B の条件が長周期側に移行するような傾向が見られる。これは、遊水室内に水車があることにより、遊水室内のピストンモード運動に寄与する水塊量が水車の付加質量分だけ増加することによって考えられる。

特に懸念されていた、海水交換量に及ぼす水車設置の影響については、むしろ海水交換量を増加させる方向に作用している。これは、海水交換量が図-2に示すように、主に前面垂下版の沖側に形成される渦流の作用により誘起されることによって考えられる。

7. 結語

(1) 遊水室内に設置された水車は、本実験で採用した波条件の範囲内では、渦流の作用により常に一定方向に回転する。その最大回転数は、3枚羽根水車の場合に現

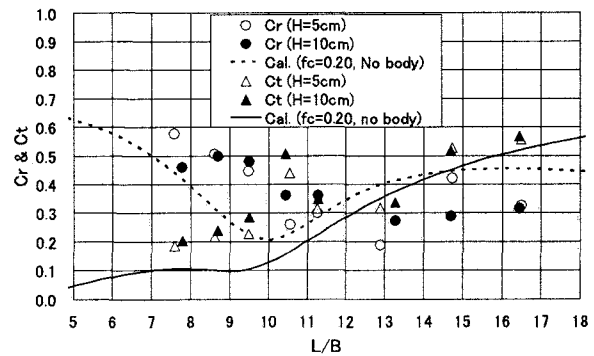


図-18 水車の回転拘束時の反射率と透過率
(3枚羽根水車のY字型固定時)

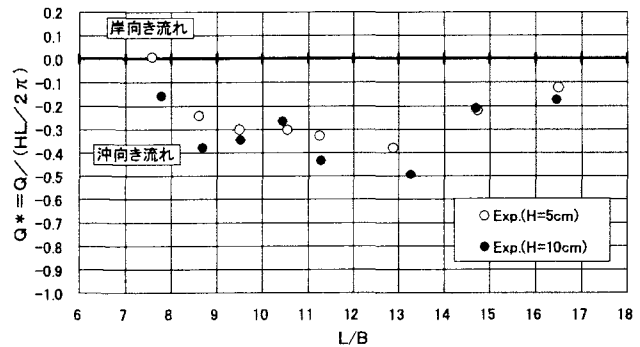


図-19 水車の回転拘束時の平均輸送流量 Q
(3枚羽根水車のY字型固定時)

れ、波1周期当り4回転程度である。

(2) 水車の平均回転角速度は入射波高に伴い増加し、入射波高のおよそ0.5乗に比例して増加する。

(3) 水車の回転拘束時に渦流から受ける回転モーメントは、3枚羽根水車の場合、入射波の変動水頭振幅と水車の受圧面積および羽根径で無次元化した強度で0.4程度であり、発電機などの負荷に耐えられると推測される。

(4) 遊水室型海水交換防波堤の反射・透過波の低減機能および海水交換機能に及ぼす水車設置の影響は、最終的に採用した3枚羽根水車の場合、最も影響が現れやすいと考えられる回転拘束時においてもほとんど見られない。

参考文献

- 1) 中村孝幸・神野充輝・西川嘉明・小野塚孝: 渦流れの増大現象を利用した垂下板式の反射波低減工について, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 796-800, 1999.
- 2) 中村 孝幸, 大村 智宏, 大井 邦昭: 渦流制御を利用する海水交換促進型防波堤の効果について, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 806-810, 2003.
- 3) 高橋重雄・小島朗史・鈴木諭司: 不規則波に対する波力発電ケーソンの空気出力に関する理論と実験, 海岸工学論文集, 第32巻, pp. 712-716, 1985.
- 4) 長内戦治・近藤徹郎・水野雄三・渡部富治: ロータリベーンポンプによる振り子式波力エネルギー変換装置の実用機開発, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 1221-1225, 1998.
- 5) 大澤弘敬・鷺尾幸久・今井正明・岡山修三・中川寛之: 沖合浮体式波力装置の発電出力の検討, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 1216-1220, 1998.