

垂下版式低反射工による波エネルギーの 取得について

WAVE POWER EXTERACTIONS BY A REFLECTION WAVE DISSIPATER OF VERTICAL BARRIER TYPE

中村孝幸¹・中村淳一²

Takayuki NAKAMURA and Junichi NAKAMURA

¹正会員 工博 愛媛大学大学院 理工学研究科 (愛媛県松山市文京町3番)

²株式会社トクヤマ (東京都渋谷区渋谷 3-3-1 渋谷金王ビル)

In order to utilize ocean wave energy, a reflection wave dissipater of vertical barrier type is used to extract wave energy. A water mill similar to Sabonius type is installed near the gap beneath the front curtain wall instead of inside water chamber. By using a water jet through the gap from the water chamber, it is able to extract more wave energy than the previous work, in which the rotational flow in the water chamber is used as a major driving force for the water mill motion. It is confirmed that the original function as a reflection wave dissipater can be held even when the water mill is installed at the mouth of the dissipater. The efficiency of wave energy extraction by the proposed dissipater is about 12 percents of the incident wave energy.

Key Words : Wave energy extraction, reflection wave dissipater, water chamber, piston mode wave resonance, water jet

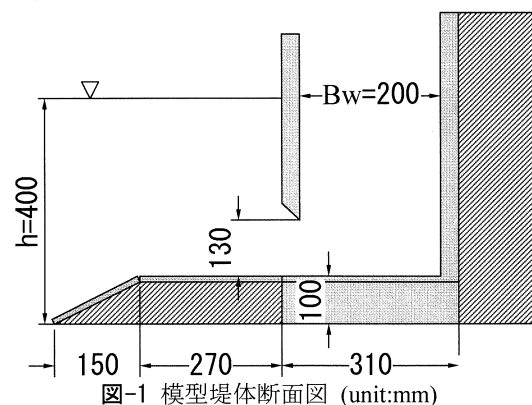
1. はじめに

既に著者らの中の一人¹⁾は、垂下版を前面壁とする遊水室型海水交換防波堤の遊水室内に形成される一方向回転渦を駆動源として、水車を回転させることで、波エネルギーの取得が可能であることを示した。本研究では、前研究に比較して図-1に示すような堤体構造を不透透性の低反射護岸に変更することで、遊水室内へ流入する波エネルギーを増大させ、水車による波エネルギーの取得効率を高めることを試みた。以下、この護岸構造を垂下版式低反射工と称することとしたい。

ここでは、主に前面垂下版下部の開口部に現れるジェット往復流を水車の駆動力として利用することで、波エネルギーの取得を目指す。この開口部ジェット流は、中村ら²⁾により、遊水室内のピストンモード波浪共振の作用により強化されることやこの共振条件は遊水室断面の特性長と波長の比に関係することなどが明らかにされている。

本研究はまず、水車の回転能率やトルクなどに着目して、最も効率的となる水車の設置位置の模索およびその時の消波効果などを明らかにする。そして、発電能力の検討を目的

として、水車に各種の大きさの機械的な負荷を作用させ、本方式による波エネルギーの取得効率を把握する。



2. 実験装置および実験方法

(1) 模型堤体および模型水車

実験で用いた垂下版式低反射工の模型は図-1に示すものであり、各寸法も併せて示す。堤体の背後は不透透構造であり、実際場を想定して基礎マウンド上に設けた低反射護岸とした。前面垂下版下端の開口長および遊水室

幅Bwはそれぞれ13cm, 25cmと固定した。模型縮尺は、約1/16程度であり、フルードの相似則を用いて縮尺化した。

模型水車の概要を図-2に示す。この水車はサボニウス型に類似した3枚羽根で構成される直径10cmの鋼製水車である。羽根の長さは4cmで図-2に示すように3枚の円板の間に120°毎に固定した。水車の中央に設けた円板には、1cmの溝が切っており、外部のプーリとベルトを介した連結が可能にしてある。水車の中央軸は、両側の支持板に埋め込んだボールベアリング軸受けに挿入して、回転による摩擦抵抗がなるべく小さくなるように支持してある。

遊水室内での水車の設置位置は、図-3に示すように水車を上下・左右方向に3cmずつ移動させ、計9ヶ所で検討した。図中では水車中心軸からの距離で表してある。ここで、③の水車位置は、従来の中村ら¹⁾の研究で遊水室内の渦流れを利用するときに用いられている位置にほぼ相当している。

(2) 実験水槽

実験には、長さ30m、幅1m、高さ1.2mの2次元造波水路を用いた。水路内には、1/30勾配の不透過な斜面を設け、この背後に斜面に接続するように長さ約13mの水平床部を設けた。水平床部には水路幅をほぼ二分するように隔壁を設け、一方の水路で入射波測定用の波高計が、もう一方の水路で模型堤体を設置して反射波が測定できるようにした。

(3) 波変形の測定

波変形の測定には、計4台の容量式波高計を用いた。具体的には、模型堤体の沖側に入射波測定用に1台、入・反射波の分離測定用に2台、隔壁を挟んだ堤体横に浅水変形後の入射波測定用に1台である。なお、反射波の推定には、合田ら³⁾の入・反射分離推定法を用いた。

(4) 水車の回転数の計測

水車の回転数の計測には(株)デジモ社のPTV画像解析ソフトを用いた。水車の回転状況を側面からビデオ撮影し、撮影した動画を1秒30コマの静止画像に変換した後に、水車側面に描かれたマーカを1コマずつ解析することで1分間の回転数(rpm)を算出した。

(5) 波力トルクの計測

水車に作用する波力トルクの計測にはリング式張力計を用いた。実験は、水車を図-4に

示すように片側を張力計で、もう一方を釣り糸で支持して、ほぼ固定に近い状態で水車に作用する波力を測定した。その際、水車の羽根の位置によって波力トルクが異なることから、図-4に示すように3枚羽根のうち1枚が水車下部に並ぶ「Y字型」と2枚が水車下部にある「逆Y字型」の2種類の位置で行った。

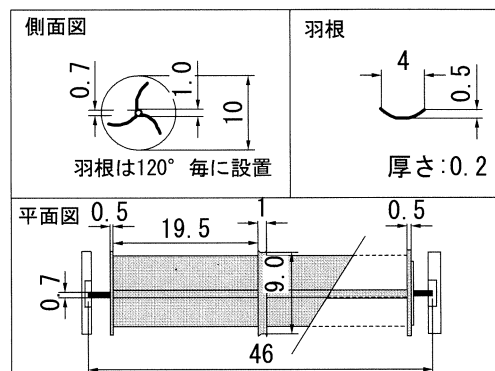


図-2 模型水車概略図 (unit:cm)

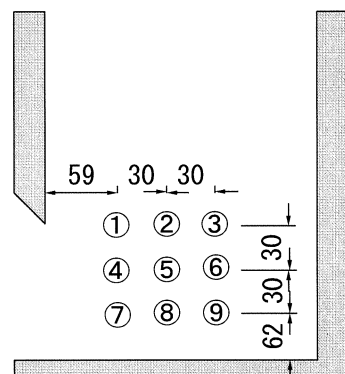


図-3 水車設置位置図 (unit:mm)

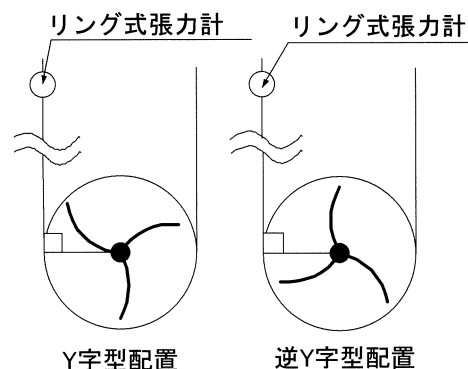


図-4 水車固定位置

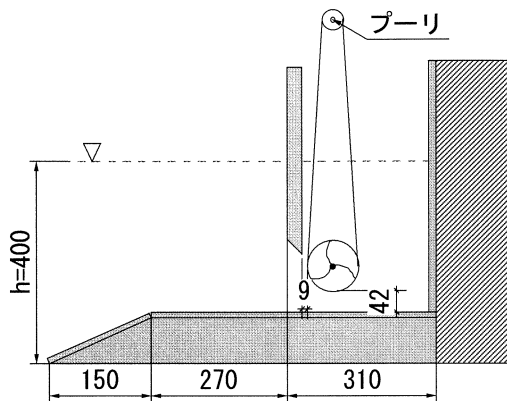


図-5 水車とプーリの連結図 (unit:mm)

(6) 水車のなす仕事率の検討

水車のなす仕事率の検討には、図-5に示すように、水中の水車と空気中のプーリをベルトで連結して行った。発電機による負荷を模擬して、空気中のプーリに各種の大きさの負荷トルクを作用させ、その時のプーリの平均回転数を用いて式(1)により平均仕事率 P を算出した。

$$P = (2\pi) T_f n / T \quad (1)$$

ここで、 T_f : 負荷トルク、 n : 波1周期間のプーリの回転数、 T : 波周期である。負荷トルクは、発電機の軸受けブラシによる回転抵抗トルクを模擬して、上側プーリの外輪に所定の力で鋼線を押付け、クーロン抵抗を与えることで実現させた。このとき、押し付け力は、3種類に変化させたが、いずれも水車の回転を停止させるまでには到らなかった。

(7) 実験条件

本実験で用いた水深 h は40cmに固定した。入射波は、規則波で波高 H が5cm, 10cmの2種類、周期 T が1.0s~2.0sの範囲内で複数の条件とした。ただし、水車による仕事率の測定実験では、波高 $H=10$ cmに限定した。

3. 効率的な水車設置位置の検討

図-6(a)~図-6(c)は、水車の設置位置を図-3に示すように種々に変化させた時の1分間の回転数 N (rpm)を、波周期の無次元量である波長・遊水室幅比 L/Bw の変化で示す。このとき、水車は軸受けによる回転抵抗のみが作用する状況で、無負荷に近い状況にある。これらの図より、水車の設置位置に関係なく、その回転数は波高に伴い増加する。これは、波高に伴い水車が受ける波力も増大すること

による。波周期の影響としては、波高および水車の設置位置に関わらず $L/Bw=9\sim11$ 付近で回転数が最も多くなり、その後は同程度の回転数が多少ながら減少する傾向にある。

水車の設置位置の影響としては、前面垂下版に近い①, ④, ⑦の位置における回転数が最も多く、前面垂下版から離れるにつれて少なくなる傾向が確認できる。特に波高 $H=10$ cmのときにこの傾向が顕著である。これは、水車の回転原動力であるジェット流の水力が、開口部付近で最も強くなるためと考えられる。

以上より、水車の回転能率が最も高い設置位置は、図-6(b)に示す④の位置であると

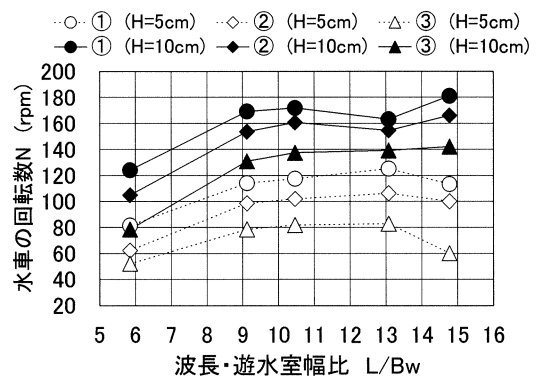


図-6(a) 水車の回転数の比較 (①~③)

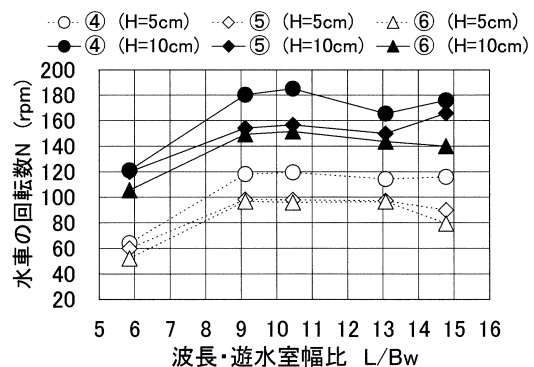


図-6(b) 水車の回転数の比較 (④~⑥)

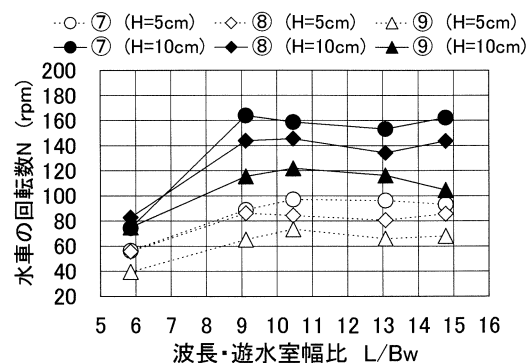


図-6(c) 水車の回転数の比較 (⑦~⑨)

判定される。一方、最も回転能率が悪くなるのは⑨の位置と判定される。これは、開口部ジェット流と遊水室内に形成される渦流れの干渉作用により、結果的に一方に向かう回転力が弱くなるためと考えられる。

以上、回転能率の高くなる水車の設置位置について検討してきたが、本研究では水車そのものの最適形状に関する検討は行っていない。これについては今後の検討課題であり、水車の羽根形状などを改良することで水車の回転能率をさらに高めることができると考えられる。

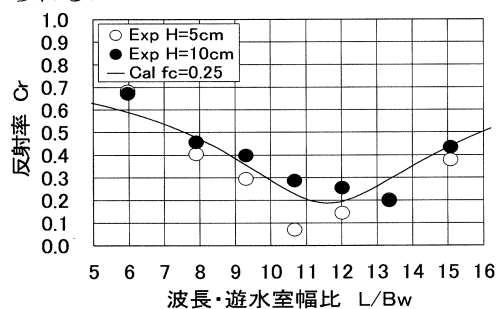


図-7 反射率 Cr (水車位置④)

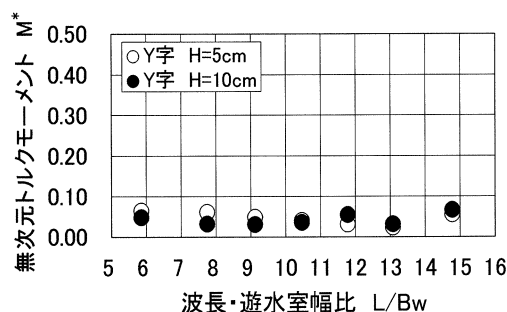


図-9 無次元波力モーメント (水車位置④)

4. 反射波の低減効果

図-7は、水車の回転能率が最も高いと判定された、④の位置に水車を設置したときの反射率 Cr を波長・遊水室幅比 L/Bw の変化で示す。図中には、実験結果と中村ら⁴⁾による渦流れなどの発生による、波エネルギーの逸散を近似的に考慮する減衰波理論による算定結果についても示す。ただし、算定では回転する水車の影響を直接的に考慮することが難しいため、前面垂下版の吃水深を水車の直径分だけ延伸させることで代用した。また、算定で必要となる線形抵抗係数 fc は、各種の fc 値を採用した検討の結果、実験結果との対応がよいと考えられる $fc=0.25$ の結果について示した。

これより、実験結果および算定結果ともに、

反射率は特定の L/Bw 付近で極小となり、その前後では増加する傾向にあることが認められる。しかしながら、概ね反射率は0.5以下であり、高い消波機能を有していることが分かる。波高による影響は、 $L/Bw=11$ 付近で2割程度の差が確認できるが、その他の周期帯では波高による差異は明確ではない。

図-8は、水車の回転能率が最も悪いと判断された、⑨の位置における反射率を示したものである。図-7と比較して反射率の極小値を示す周期条件が短周期側に移動していることが実験結果からも算定結果からも確認できる。

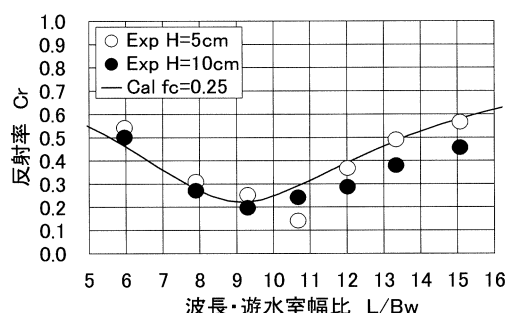


図-8 反射率 Cr (水車位置⑨)

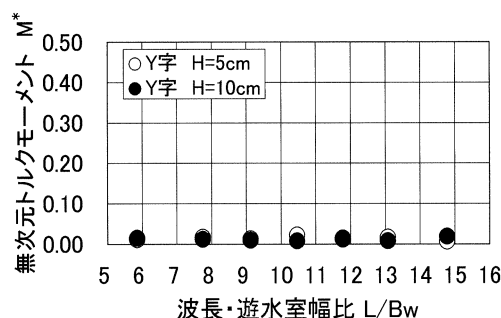


図-10 無次元波力モーメント (水車位置⑨)

垂下版式低反射工による反射波の低減機構は、遊水室内におけるピストンモード波浪共振による波高増幅と遊水室内外の有意な水面変動の位相差が発生することにより、垂下版下端より発生する渦流れの増大現象によってエネルギーが逸散されるためである²⁾。図-7では、水車が開口部付近に設置されており、短周期側で遊水室内への水塊流入が阻害されたため、極小反射率の条件が長周期側に移行したものと考えられる。

5. 水車に作用する波力トルク

(1) 「Y字型」での波力トルク

図-9は、水車の回転能率が良いと判定された④の位置において、2枚の羽根が水車下部

に並んだ「Y字型」配置での波力トルクを示す。図中の波力トルクは、波高相当圧が羽根を含む水車の射影面積に様に作用するものとして求めた基準トルクで除した無次元トルクモーメントに相当し、いわゆる波力強度的な表示に相当する。

これより、「Y字型」状態での無次元トルクモーメントは0.05程度であり、小さいことが認められる。周期および波高に伴う顕著な傾向は認められず、常に同程度の値を示す。

図-10は、水車の回転能率が最も悪いと判断された⑨の位置における「Y字型」の波力トルクを同様に示す。先ほどと同様、周期および波高に伴う顕著な傾向は確認されない。波力トルクは全体的に0.02以下とさらに小さい結果となった。やはり回転数の低い位置では波力トルクも小さく、波エネルギーの取得率も低くなることが予想される。

(2) 「逆Y字型」での波力トルク

図-11は、同様に羽根の位置を「逆Y字型」状態とした時の波力トルクを示したものである。水車の位置は回転能率が最も良い④の位置である。これより、「Y字型」とは大きく異なる傾向を示すことが認められる。全体的に絶対値が大きく、水車は有意な波力トルクを受けることが確認できる。

また、波高に伴い無次元トルクの絶対値も増加することが認められる。さらに、トルクが極大値を示す周期条件が存在することが確認できる。この極大値は $L/Bw=10\sim11$ 付近にあり、この条件は水車の回転数が極大値を示す周期条件とほぼ一致する。

図-12は、回転能率が最も悪い⑨の位置における「逆Y字型」状態での無次元波力トルクを示す。波高および周期による変化は顕著でなく、「Y字型」の傾向と同様であることが認められる。やはり水車の回転能力が高い前面版に近い位置で、水車は有意な波力トルクを受けていることが再確認でき、その差は明白である。

羽根の位置によって水車を受ける波力トルクが大きく異なる原因としては、遊水室内に水塊が流入する際の、前面版下端のくさび型に沿った流れが考えられる。「逆Y字型」は、羽根の一枚がくさびの延長線上の近くにあり、効率的に流体力の作用を受けたためと考えられる。以上の結果より、「Y字型」と「逆Y字型」の固定状態として得られた波力モーメントは、周期による増大傾向などの相違点がいくつか確認された。しかし、一連の実験は水車固定状態での結果であり、回転中の水車

で同様の結果が得られるかは明確でない。しかしながら、一時的にしても、水車は有意な波力モーメントを受けていると推測される。

6. 水車による波エネルギーの取得

水車の回転数およびトルクの結果より、水車による波エネルギーの取得には、水車の設置位置として図-3に示す④の位置が最適と判断される。図-13は、水車の設置位置を上記の④にして、発電機等の負荷を模擬した各種の摩擦トルクを空気中のプーリに作用させ、そのプーリの回転数を考慮して求めた平均仕事率 P を示す。横軸はこれまでと同様、波長・遊水室幅比 L/Bw で示す。このとき、波

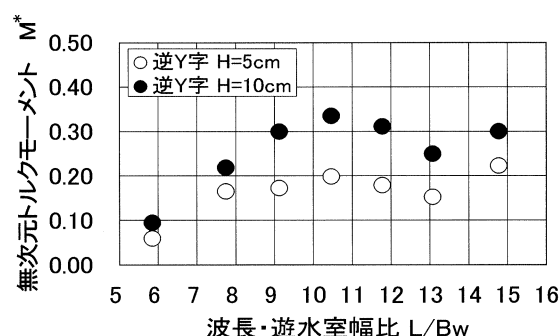


図-11 無次元波力モーメント(水車位置④)



図-12 無次元波力モーメント(水車位置⑨)

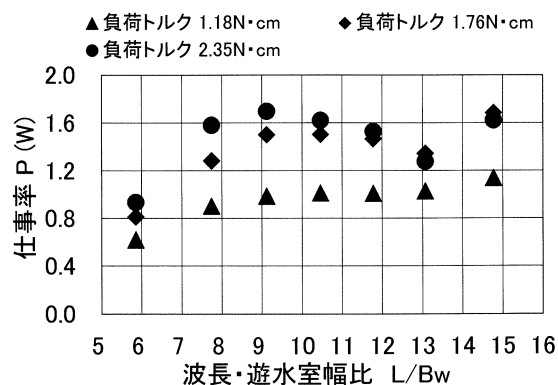


図-13 水車の仕事率(水車位置④)

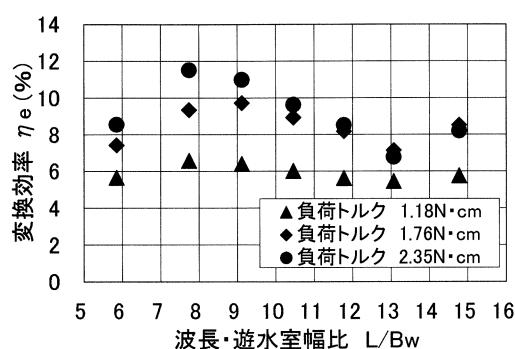


図-14 入射波パワーに対する変換効率

高 $H=10\text{cm}$ のみとした。また、図中の仕事率は水車の奥行き幅 1m あたりに換算したものである。

これより、本実験で作用させた負荷抵抗力の範囲内では、水車の仕事率は抵抗力の増加と共に増大することが確認できる。波周期による影響としては、反射率が低下し始める L/Bw の条件から、次第に増大し始めることや、反射率が極小となる条件でほぼ極大になることなどが認められる。そして、この極大値の出現は、負荷抵抗の増大とともに明確に見られる傾向にある。これは、前述してきたように、 $L/Bw=10$ 付近で水車の回転数が有意に上昇することや波力トルクも極大になるためであり、図-6(b)や図-11の結果から容易に推定できる結果である。

そして、図中に示されるように、本実験の範囲内では、仕事率の最大値は約 1.7W が得られた。この仕事率を現地量に換算すると、1基当たりの低反射工ではほぼ 28KW （堤体長 16m ）に相当する。この最大値は、負荷抵抗力を増すことでさらに大きくなると推測されるが、どの程度まで増加できるかは定かでない、今後さらに検討を進めていきたい。

図-14は、上記で明らかになった水車の仕事率と入射波のエネルギーの比で表した変換効率 η_e を示す。水車の仕事率と同様に、変換効率は負荷抵抗力とともに増加することや、特定の周期条件でピーク値を示すことなどが確認できる。仕事率の極大値は $L/Bw=9$ 付近に出現したのに対し、変換効率はさらに短周期側の条件となることやその変換効率は約 12% であることなどが確認できる。

本来であれば、水車の回転停止時まで負荷抵抗力を増加させていくべきであるが、今回はそれができておらず、この点については今後続く検討課題としたい。また、付加的な実験で実施した、干潮時を想定して水位を 5cm 程度下げた実験結果では、仕事率および

変換効率の最大値は、共に増加して、それぞれ 2.1W （現地換算量 35KW ）と 14% になることが確認されており、各種の条件を変えることにより、変換効率をさらに増進できるものと推定される。これについても、不規則波に対する検討を含めて、今後続く課題としたい。

7. 結語

- (1) 本実験の波高および周期条件内では、水車の回転数は、波高および周期とともに増大する。また、水車の設置位置が前面垂下版に近いところで回転数は増加し、逆に遠くなるほど減少する傾向にある。
- (2) 本構造体の反射波の低減効果は、反射率が極小値を示す周期条件が存在する。水車を開口部付近に設置することで、反射率の極小値を示す周期条件が従来の結果より長周期側に移行する。
- (3) 水車固定状態での波力トルクは、特定の周期条件で極大値を示す。また、水車の羽根の位置によって波力トルクは異なり、本研究で用いた3枚羽根の場合、2枚が水車下部に並んだ状態と1枚が水車下部にある状態では、前者の方が波力トルクは大きい。
- (4) 本研究で用いた負荷トルクの範囲内では、水車のなす仕事率は負荷トルクの大きさに伴い増加していく。水車の仕事率および入射波エネルギーに対する変換効率は同一の波高条件下でも、波周期の条件により変化する傾向が認められる。本研究で得られた仕事率および変換効率の最大は、限定された条件下ではあるが、それぞれ 1.7W と 12% である。

参考文献

- 1) 中村孝幸，中橋一壽：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，海洋開発論文集，第21巻，pp.547-552，2005
- 2) 中村孝幸，神野充輝，西川嘉明，小野塚孝：渦流れ増大現象を利用した垂下版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
- 3) 合田良実，鈴木康正，岸良安治，菊池治：不規則波実験における入・反射波の分離推定法，港湾技研資料，No248，1976
- 4) 中村孝幸，井出善彦：波の逸散現象を利用した隅角物体周りの波変形と作用波力の算定法，海洋開発論文集，第13巻，pp.177-182，1997。