縦スリット式直立消波工を利用した波力発電の試み

Development of Wave Power Generation using a Vertical Slit Type Breakwater

重松孝昌¹・加藤健司²・脇本辰郎³・吉岡真弥⁴・曾谷一慶⁵

Takaaki SHIGEMATSU, Kenji KATOH, Tatsuro WAKIMOTO
Shinya YOSHIOKA and Ikkei SOTANI

This study aims development of wave power generation system using wave energy in coastal zone. A wave power generation system using a vertical slit type breakwater widely used in Japanese ports and harbors is proposed by installing an improved Savonius windmill in a chamber of the breakwater. Laboratory experiment was carried out to examine the characteristics of power generation by measurement of the rotational speed and the torque of the windmill. According to the measurement results, the relationship between obtained power and wave condition was discussed. The effect of installing the windmill in a chamber of the breakwater on wave reflection was also discussed.

1. はじめに

地球温暖化対策として温室効果ガスの発生を抑制するようなエネルギー消費が求められ、さまざまな省エネ対策が取られるようになってきている。一方、エネルギー供給の観点からは、化石エネルギーから再生可能エネルギーへとエネルギー源をシフトすることが期待されている。経済産業省（2010）によれば、わが国の再生可能エネルギーの導入に係る実績や将来見通しは、主要各国と比較して遜色ないとのことであるが、2007年度の日本の一次エネルギー国内総供給に占める再生可能エネルギーの割合は約6%に過ぎない。再生可能エネルギーは、出力の不安定性やコスト・立地の制約などの課題がある一方、地理的・気候的な特性によって、国家あるいは地域によって大きなポテンシャルを秘めているととらえることもできる。

周囲を海洋に囲まれている我が国においては、波力発電を導入する試みは、これまでも積極的に成されている。従来の波力発電システムは、波浪エネルギーの一次変換方式によって、(1) 空気エネルギーに返還する方式、(2) 機械的エネルギーに変換する方式、(3) 水流エネルギーに変換する方式に大別される。これまでの開発においては、(1) の方式が最も多く、大野ら（1980）、高橋ら（1988）、宮崎ら（1994）などが、(2) の方式には、

長内ら（1998）、羽田野ら（2006）など挙げられる。しかし、波浪エネルギーや水流エネルギーの比較的大きな海洋・海流中に大規模な発電システムを建設することは、経済的な観点から考えれば困難になると推測される。また、浮体式のジャイロ型波浪発電システムの提案もなされている（例えば、神吉ら、2010）が、航行上の安全性を勘案すれば実用化には克服すべき課題が少なくないと思われる。このような観点から、既存の海岸・海洋構造物を活用した波浪発電装置の開発も始まりつつある（例えば、陸田ほか、2010）。

本研究は、港湾海で広く利用されている縦スリット式直立消波工を対象として、既設の縦スリット消波工の遊水室内にミニ発電システム（水車）を組み込み、消波メカニズムに密接に関係する水流エネルギーを利用して電力を得ることを目的とするものである。個々の発電システムとしては大きな電力を獲得することはできないが、港湾海域に存在する防波堤内に多くの発電システムを設置することができ、トータルとして比較的大きな電力を獲得することを期待している。

2. 実験概要

実験は、図-1に示すような、長さ20m、幅0.5m、高さ0.6mの二次元造波水槽を用いて行った。造波機から約

図-1 実験概要

1	正会員	博(工)	大阪市立大学教授	大学院工学研究科都市系専攻
2		工博	大阪市立大学教授	大学院工学研究科機械物理系専攻
3		博(工)	大阪市立大学准教授	大学院工学研究科機械物理系専攻
4		博(工)	大阪市立大学准教授	大学院工学研究科機械物理系専攻
5			大阪市立大学大学院工学研究科	機械物理系専攻

図-2 縦スリット消波工の諸元

表-1 波浪条件

周期 T [s]	波長 L [m]	波形勾配 H/L	波高 H [m]
1.15	1.48	0.01	0.018
		0.02	0.030
		0.03	0.055
1.44	2.01	0.01	0.025
		0.02	0.050
		0.03	0.075
1.73	2.53	0.01	0.032
		0.02	0.063

15m離れた位置に、幅 $D=0.1\text{m}$ 、厚さ $B=0.04\text{m}$ の柱体列からなり、開口率 $2a/(D+2a)=0.295$ 、消波室幅 $l=0.268\text{m}$ を有する縦スリット直立消波工(図-2)を設置し、水深 $h=0.41\text{m}$ と一定として規則波を作用させた。表-1に、作用波浪条件を示す。

スリット消波工の消波室内(スリット壁の岸側面から 0.06m の位置)の中央スリット部にサボニウス型水車を設置し、作用波条件と水車の動力との関係について検討した。サボニウス型水車は2枚の円弧でできた羽根を持ち、水流の向きに関わらず一定方向に回転する性質を持つ。通常のサボニウス型水車を用いて予め実施した実験によれば、波浪条件によっては十分なトルクが得られない回転角が存在することが明らかになった。そこで、図-3に示すような、羽根の位置が互いに 120° 異なる3段構造を有する新たなサボニウス型水車を考案した。

一般的には、水車に作用する軸トルクは、軸に歪みゲージを貼ってねじれ歪みを測定することによって求めるが、本実験装置では発生するトルクが極めて小さく、また、軸が 0.003m と細いためにゲージを貼ることも困難であるので、図-4に示すような動力検出部を製作し、これによって水車に作用する軸トルク、水車の回転角速度、および獲得動力を計測した。本研究で考案したサボニウス型水車は、水車軸を介してその上部に取り付けた

図-3 考案したサボニウス型水車

(a) 平面図

(b) 側面図

- ①光電センサ ②ひずみゲージ ③薄板 ④摩擦接触子
⑤水車回転軸 ⑥軸受け ⑦サボニウス水車

図-4 動力検出装置

表-2 反射率の実験結果

周期 T [s]	波長 H/L	K_R (水車無)	K_R (水車有)
1.15	0.01	0.623	0.551
	0.02	0.408	0.384
	0.03	0.308	0.334
1.44	0.01	0.688	0.653
	0.02	0.555	0.559
	0.03	0.486	0.500
1.73	0.01	0.805	0.773
	0.02	0.628	0.612

円盤と結合されており、水車の回転は、この円盤の回転を計測することによって求められる。円盤の周上には一定間隔で孔を開けており、光電センサを用いて水車の回転速度を計測した。水車で発生したトルク T_w は、この円盤と接触する摩擦接触子を取り付けたトルク検出部を、薄板を介して支持部と連結し、薄板の歪みを計測することによって求めた。摩擦接触子と円盤との間に作用する摩擦力を F_f とすれば、トルク T_w は、回転軸中心から摩擦接触子と円盤との接点までの距離 R_f を用いて次式で求められる。

$$T_w = F_f R_f \quad \dots\dots\dots (1)$$

一方、このトルク T_w は、トルク検出部から薄板を介してその支持部に伝わり、支持部の反力 F_s によるモーメントと釣り合う。薄板は荷重 F_s を受ける片持ち梁構造を有することになるので、薄板の歪みを歪みゲージで測定することによって F_s が得られ、結果としてトルク T_w が計測される。

$$T_w = F_f R_f = 2F_s R_s \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 R_s は薄板の支持部から摩擦接触子までの距離を表す。

なお、消波工より沖側約3mに2台の容量式波高計を設置して100Hzで水位変動を計測し、入反射分離推定法を用いて反射率を計測した。また、スリット壁の沖側面から0.06m離れた位置に容量式波高計を設置し、水面変動の計測を行った。

3. 実験結果

(1) 反射率

反射率の実験結果を表-2に示す。本実験では、サボニウス型水車を1基だけ設置して実験を行ったので、水車の有無による反射率の変化はほとんど見られなかった。

(2) 計測結果

図-5に、周期 $T=1.15$ 秒、波形勾配 $H/L=0.03$ の場合の水

(a) 水面変動

(b) 回転数

(c) 水車に作用するトルク

図-5 計測結果の一例 ($T=1.15$ 秒, $H/L=0.03$)

面変動および水車に作用するトルク、回転数の計測結果を示す。同図によれば、スリット前面壁沖側の水位がゼロダウクロスする位相で水車の回転数が増大し、ゼロアップする位相で回転数が減少する傾向が見られる。これは、入射波がスリット部を通過して消波室内に流入するときに回転数が増加することを意味すると同時に、遊水室から沖側へ流れが出て行くときには回転数が減少することを意味している。本研究で提案した新たなサボニウス型水車は、前述したように、スリット部を通過する流体の運動方向に可能な限り依存しないような構造を模索して開発されたものであるが、ここで提案した新たなサボニウス型水車であっても流向に影響を受けていることがわかる。すなわち、流向に依存しない水車のさらなる開発の必要性を示していると考えられる。一方、水車に作用するトルクは、回転数が極大値を取る位相よりもやや遅れて極大値を取る事がわかる。以上のように、図-4に示した動力検出装置を用いて、水車の回転軸の回転数及び風車に作用するトルクが計測できることが確認された。

図-6は、水車に作用するトルクを変化させた時の回転

(a) $T=1.15s$, $H/L=0.03$ (b) $T=1.44s$, $H/L=0.03$ (c) $T=1.73s$, $H/L=0.03$

図-6 作用トルクと動力

軸の回転数と獲得動力との関係を示したものである。トルクは、摩擦接触使子と円盤との間の摩擦力を変化させることによって変化させた。また、図-5に示したように、トルクや回転数は位相によって変化するが、ここでは一波あたりの平均値を用いて整理した。図-6によれば、トルクが増加するとともに、回転数は単調に減少する傾向が見られる。一方、トルクと回転数の積で求められる動力は、あるトルクで極大値を有する傾向を示しており、動力が効率的に得られるような摩擦接触子と水平円盤と

図-7 波形勾配と最大獲得動力の関係

図-8 一波あたりの波エネルギーと動力の関係

の最適摩擦力が存在すると考えられる。ただし、極大値が現れるトルクは周期によって異なり、また、そのときの獲得動力の大きさも異なっている。

実験によって得られた最大獲得動力と波形勾配との関係を示したものが、図-7である。同図によれば、本実験条件の下では、概ね、獲得動力は波形勾配に線形的に増加する傾向があることがわかる。図-8は、一波あたりの波の持つエネルギーと獲得動力との関係を示したものである。 $T=1.73s$ の場合は一波あたりの波エネルギーに対する獲得動力の割合が低いことがわかる。反射率の実験結果を顧みれば $T=1.73s$ の場合は反射率が比較的高く、スリット部を通過する際の流速が反射率と密接な関係にあることを考慮すれば、反射率が獲得動力に及ぼす影響と密接な関係があるのではないかと推測される。

微小振幅波理論に基づけば、水平方向の水流速度 u は、

$$u = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh k(z+h)}{\sin kh} \sin(kx - \sigma t) \dots\dots\dots (3)$$

で求められる。ここに、 k は波数、 σ は角周波数である。式(3)を用いて、水車に作用する流速を推定すれば、約0.16m/sとなる。さらに、縦スリット消波構造物の前面壁

開口率 $2a/D$ および水車の設置位置を考慮すれば、実効流速 u_w は、

$$u_w = \frac{0.6}{\sqrt{2}} \frac{D}{2a} \times 0.16 = 0.23 \text{ (m/s)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

と推定される。この実効流速を用いて水車に作用するエネルギー W を

$$W = \frac{1}{2} \rho A u_w^3 \quad \dots\dots\dots (5)$$

によって推定すれば、 $2.70 \times 10^{-2} \text{ W}$ と推定される。実験によればこのときの出力は $2.77 \times 10^{-2} \text{ W}$ であるので、本研究で提案したサボニウス型水車の変換効率は、約 10% と推定される。ただし、この推定には、上記のような反射率の影響は考慮されていない。今後、スリット通過流速の理論推定値（例えば、角野ら；1986）あるいは実験値を用いて検討する必要がある。

4. まとめ

本研究は、既存の縦スリット消波構造物に、ミニ発電システムを組み込むことによる新たな港湾海域における発電を試みようとするものであり、水理実験によって試行した。実験によって得られた結論を要約すると以下のようである。

- (1) 今回は、サボニウス式水車を 1 基だけ設置して実験を行ったので、水車の設置による反射率に及ぼす影響は見られなかった。
- (2) 水車に作用するトルクと水車の回転速度の間には位相差があることが分かった。
- (3) 水車に作用トルクと回転数および獲得動力との関係を検討した結果、作用トルクを増加させると回転数は概ね単調に減少することがわかった。一方、獲得動力

は、効率的に動力を得るための最適トルクが存在することが示唆された。

- (4) 本実験条件の下で得られた最大獲得動力は、波形勾配の増加とともに増加することが分かった。また、本研究で提案したサボニウス型水車の変換効率は約 10% であると推定された。

参 考 文 献

- 大野健一・益田善雄・甲斐源太郎・緑川弘毅・宮崎武晃・萩原良樹・中西幸一・大久保明・高橋賢一・続辰之介・横溝宏典・鷺尾幸久・渡辺正之（1980）：波力発電装置“海明”の実験（第2報），海洋科学技術センター試験研究報告，No.5，pp.109-124。
- 長内戦治・近藤俊郎・水野雄三・渡部富治（1998）：ロータリベ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。
- 角野昇八・小田一紀・村本哲二・芳田利春（1986）：複素係数の blockage coef. を導入した漸近展開接合法－スリットにおけるエネルギー損失量の評価－，第33回海岸工学講演会論文集，pp.407-411。
- 神吉 博・大豊晃祥・小林 譲・有井士郎・福井喜一郎（2010）：ジャイロ式波力発電装置の効率向上に関する研究，日本機械学科講演論文集，No.104-1，p.9-3。
- 経済産業省（2010）：エネルギーに関する年次報告（2010年版エネルギー白書），314p。
- 高橋重雄・安達 崇・田中 智（1988）：改良型波力発電ケーソン防波堤の特性－波エネルギーに関する研究，第7報－，港湾空港技術研究所，Vol.27，No.2，pp.23-59。
- 羽田野袈裟義・種浦圭輔・渡邊 誠・中野公彦・斉藤 俊・松浦正巳（2006）：浮体式波力エネルギー変換の力学，土木学会論文集B，Vol.26，No.3，pp.270-283。
- 宮崎武晃・堀田 平・鷺尾幸久・石井健一（1991）：沖合浮体式波力装置（マイティーホエール）の水理特性に関する研究，第3回波浪エネルギー利用シンポジウム論文集，pp.461-469。
- 陸田秀実・川上健太・平田真登・土井康明・田中義和・柳原大輔（2010）：弾性圧電デバイスを用いた波浪発電に関する研究，土木学会論文集B2（海岸工学），第66巻，pp.1281-1285。