

サボニウス水車と縦スリット式直立消波工を用いた 波力発電システムの総合的機能評価に関する研究

COMPREHENSIVE EVALUATION OF FUNCTION OF WAVE POWER GENERATION SYSTEM USING A VERTICAL-SLOTTED BREAKWATER WITH THE SAVONIUS-TYPE WATER MILLS

河海工学研究室 森本真司

River and Coastal Environmental Engineering Shinji MORIMOTO

本研究では、港湾海域で広く利用されている縦スリット式直立消波工に着目し、その遊水室内に発電機構としてサボニウス型水車を設置する波力発電システムを提案している。本波力発電システムを実用化させるためには、水車の獲得動力を見積もるだけでなく、それが縦スリット式直立消波工の消波機能や周辺環境に及ぼす影響についても検討する必要がある。本研究では、水理実験を行うことによって、発電量や消波機能、曝気能をそれぞれ評価・検討し、本波力発電システムを総合的に評価する。

Vertical slotted breakwater is constructed and used in port and harbor area in Japan. A wave power generation system with savonius-type watermills installed in the chamber of the breakwater has been developed after the Great East Japan Earthquake. For the practical use, not only electricity supply by the wave power generation system but also the influence on function of wave absorption and circumference environment. In this study, comprehensive evaluation of functions of the waver power generation system such as electricity supply, wave absorption, and reaeration is performed on the basis of the results of a series of laboratory experiments and numerical calculations.

1 研究背景・目的

原子力発電施設の安全性や気候変動への対応などの観点から、2016年4月から法律の改正により電力自由化が開始される。これにより、従来の地域ごとの電力会社だけでなく、様々な会社が電力を消費者に直接販売できるようになり、従来の地域の枠を超えて消費者が電気の契約先を選べるようになる。また、それに伴い電気料金とサービスとの一体化や再生可能エネルギーによる電力の販売など、多種多様なプランが消費者に提供されることになる。再生可能エネルギーの普及は、今後さらに必要不可欠のものになると考えられる。

このような背景の下、著者らは、港湾海域で広く利用されている縦スリット式直立消波工に着目し、その遊水室内に発電機構としてサボニウス型水車を設置する波力発電システム(図-1)を提案している。防波堤内部に水車を組み込むことで、(a) 洋上の障害物とならない、(b) 構造物内部を利用するため、設置ならびに保守が容易であり、建設費用を抑制できる、(c) 設置場所が沿岸部なので送電コストが低い、などの利点を挙げることができる。

本研究で提案している波力発電システムを実用化させるためには、発電量を見積もるだけでなく、それが縦スリット式直立消波工の消波機能や周辺環境に及ぼす影響についても検討する必要がある。本研究では、水



図-1. 波力発電システム

理実験や数値計算によって、これらをそれぞれ評価・検討し、本波力発電システムを総合的に評価することを目的とする。

2 本波力発電システムの消波機能

2.1 規則波に対する消波機能

2.1.1 実験概要

実験は、図-2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、水深 h を0.4mと一定として行った。消波工の開口率 $2a/D$ は0.25、遊水室幅 l は0.36m、角柱列の厚み b は0.08mとし、設置した水車の径 D_s は0.086m、高さ H_s は0.036mとした。沖側に容量式波高計(CHT6-100:(株)KENEK製)を2本設置し、合田ら¹⁾の入・反射波分離推定法により入射波高 H および反射率 K_r を求めた。スリット通過最大水粒子速度 V_{max} は、中央のスリット前面壁、静水面下0.10mの位置において、電磁流速計(ア

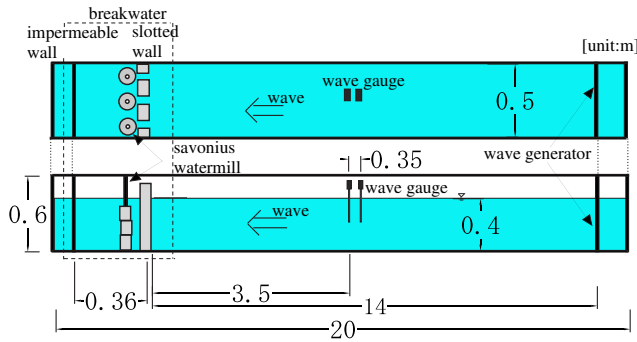


図-2. 実験概要 (規則波)

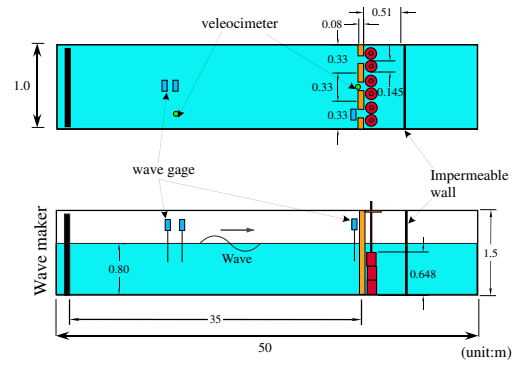


図-5. 実験概要 (不規則波)

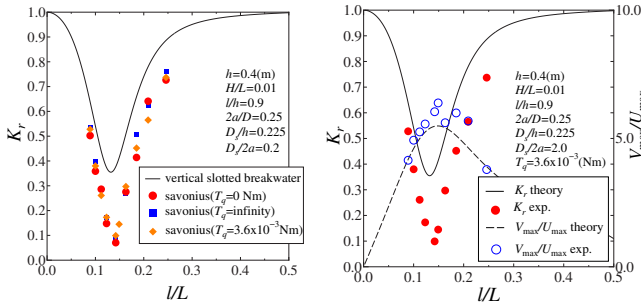


図-3. 反射率の実験結果

図-4. K_r と V_{\max}/U_{\max}

アレック電子(株)を用いて計測した。これらの計測器によるサンプリング周波数は100Hzとした。水車に作用させる負荷トルクは、パーマトルク(HC01:日本創販社製)を用いて与えた。

2.1.2 実験結果

本波力発電システムに波形勾配 $H/L = 0.010$ の規則波を作用させた実験結果を、角野ら²⁾のスリット消波工の理論解とともに図-3に示す。同図より、本波力発電システムの K_r が最小となる周期は、縦スリット式直立消波工のそれとほとんど変化しないことがわかる。また、いずれの周期帯においても本波力発電システムの K_r は縦スリット消波工のそれよりも低下することがわかる。すなわち、本波力発電システムは、幅広い周期帯で低反射特性を示すこととなり、周辺海域の静穏性を、一層、向上させる効果があると言える。図-4は、 K_r と流速比 V_{\max}/U_{\max} を示したものである。ここで、 U_{\max} は微小振幅波理論により求められる最大速度振幅である。同図より、流速比はほぼ理論解と一致することから、水車を設置してもスリット通過水粒子速度には影響を及ぼさず、したがって理論解を用いて予測が可能であることがわかる。

2.2 不規則波に対する消波機能

2.2.1 実験概要

実験は、図-5に示すような長さ50m、幅1.0m、高さ1.5mの片面ガラス張りの二次元造波水槽を用いて、水深 h を0.8mと一定として行った。開口率 $2a/D$ は0.24、遊水室幅 l は0.55m、角柱列の厚み b は0.08m、

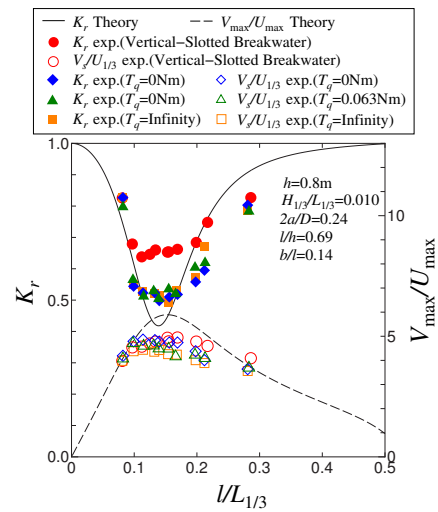


図-6. K_r と $V_{1/3}/U_{1/3}$

水車の径 D_s は0.145m、高さ H_s は0.0648m、水車重量 M は4.1kgとした。今回作用させた不規則波の周波数スペクトルは、修正 Bretschneider・光易型スペクトルである。沖側には容量式波高計(CHAT6-100:(株)KENEK製)を入・反射分離推定用に2本設置し、それらの間隔 dl は0.8mとした。スリット通過水粒子速度は、前面壁中央のスリットの静水面下0.33mの位置において、電磁流速計(アレック電子(株))を用いて計測した。これらの機器のサンプリング周波数は50Hzであった。有義波高 $H_{1/3}$ 、有義波周期 $T_{1/3}$ はゼロアップクロス法を用いて、反射率 K_r は合田ら¹⁾の入・反射分離推定法を用いて算出した。水車に作用させる負荷トルクは、パーマトルク(HC2-25J:日本創販社製)を用いて与えた。

2.2.2 実験結果

本波力発電システムに、不規則波を作用させたときの K_r と流速比 $V_{1/3}/U_{1/3}$ の実験結果を縦スリット式直立消波工の実験値と角野らの理論解とともに図-6に示す。ここで、 $V_{1/3}$ はスリット流速の有義値、 $U_{1/3}$ は有義波の波高と周期を用いて微小振幅波理論により求められる水粒子速度である。同図によれば、規則波と同様に幅広い周期帯で低反射特性を示す傾向を示した。

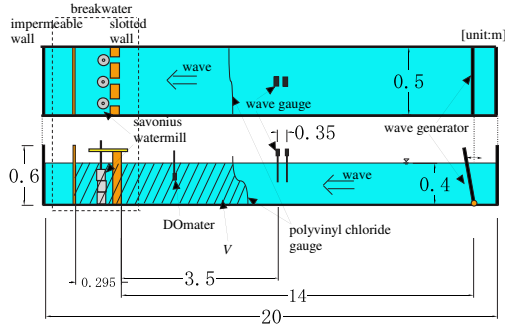


図-7. 実験概要 (エアレーション)

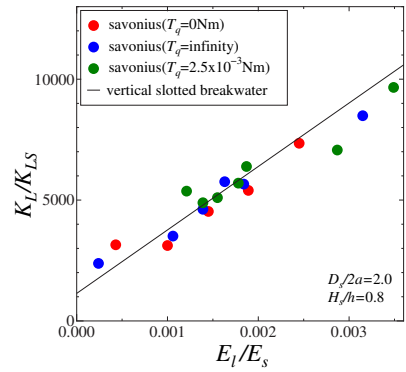


図-8. 波力発電システムの \$K_L\$

3 本波力発電システムの曝機能

3.1 実験概要

実験は、図-7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、水深 h を 0.4m と一定として行った。 $2a/D$ は 0.25、遊水室幅 l は 0.275m、角柱列の厚み b は 0.04m、水車の径 D_s は 0.072m、高さ H_s は 0.32m とした。入射波高 H および反射率 K_r の求め方や負荷のかけ方などは、前述の規則波実験と同じである。曝機能の実験は、角野ら³⁾の実験手法に倣い、不透壁から 3.1m 離れた位置を厚さ 0.02mm のビニール膜で区切り、曝気容積 V を限定した。曝気容積内には、不透壁から 1.5m 沖の水深 0.2m の位置に蛍光式 DO 計 (HQ40d: (株) HACH 社製) を 1 本設置し、溶存酸素濃度と水温を計測した。DO 計のサンプリング間隔は 30 秒で、造波開始後、約 3 時間計測した。また、実験に先立って、亜硫酸ナトリウムと触媒として塩化コバルトを用いて、曝気容積内の DO 濃度を 0.3mg/L 以下にし、貧酸素状態としてから実験を開始した。

3.2 実験結果

実験によって求められた本波力発電システムの物質移動係数 K_L を図-8に示す。ここで、 K_L は曝気能を表す指標の一つであり、以下の式で表される。

$$K_L = k_2 \frac{V}{A} \quad (1)$$

V は曝気容積、 A は曝気面積を表す。また、上式中の k_2 は再曝気係数と呼ばれ、溶存酸素濃度 C (mg/L) を初期溶存酸素濃度 C_0 と飽和溶存酸素濃度 C_s で無次元化した $C^* = (C - C_0)/(C_s - C_0)$ を用いて

$$k_2 = \frac{-\ln(1 - C^*)}{t} \quad (2)$$

として求められる。 K_{Ls} は静水時の物質移動係数であり、角野らを参考に 0.12×10^{-5} m/s としている。一方、図-8の横軸は、式(3)を用いて算出される損失エネルギー E_l を、静水時のエネルギー $E_s (= \rho gh^2/2)$ で

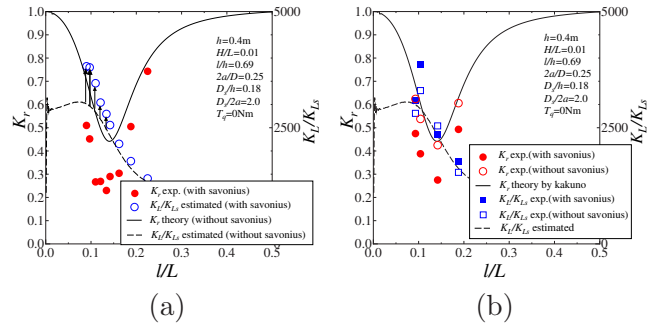


図-9. 波力発電システムの K_r と K_L/K_{Ls}

除したものである。

$$E_l = \frac{\rho g H^2}{8} (1 - K_r^2) \quad (3)$$

同図より、遊水室内に水車を設置した場合の K_L/K_{Ls} の値は、 E_l/E_s の 1 次関数で表すことができることがわかる。図中の直線は、角野らが縦スリット式直立消波工を対象として行った実験によって得られた K_L と E_l の関係式(4)である。

$$K_L/K_{Ls} = 2.6 \times 10^6 E_l/E_s + 1.1 \times 10^3 \quad (4)$$

図-8中の実験値と式(4)で表される直線との相関は概ね良好であることから、本波力発電システムの K_L は、縦スリット式直立消波工を対象として求められた式(4)によって推定できることがわかる。また、 K_L と E_l の関係は、水車への負荷トルクの大小、すなわち、水車の回転運動には依存しないことがわかる。図-9(a)は、本波力発電システムの K_r を実験によって求め、 K_r の実験値から式(4)によって K_L を推定した結果を示したものである。図中には、縦スリット式直立消波工の K_r の理論解と K_L/K_{Ls} の推定値も併せて示している。同図より、長周期側で本波力発電システムの K_L/K_{Ls} が縦スリット式直立消波工よりも値が大きくなっていることがわかる。前述で示したように、本波力発電システムの反射率 K_r は既存の消波工の K_r よりも低下しており、その結果として波力発電システムの K_L は縦スリット式直立消波工よりも大きな値を取ると考えられる。図-9(b)は、このような推測及び本推定手法の

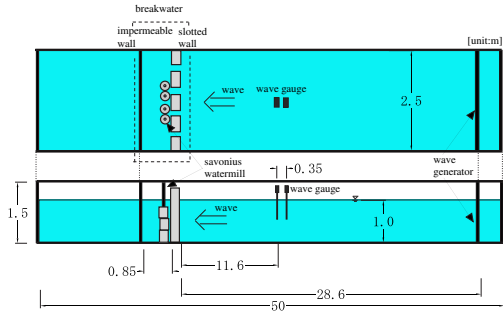


図-10. 実験概要 ($h = 1.0 \text{ m}$)

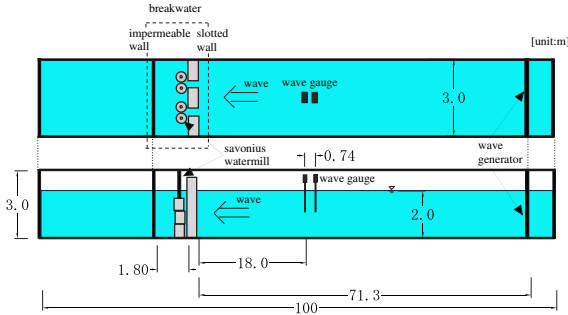


図-11. 実験概要 ($h = 2.0 \text{ m}$)

妥当性を検証したものである。同図より、 K_L/K_{Ls} は、図-9(b) に示されている結果とほぼ同じ傾向を示していることがわかる。すなわち、短周期側では縦スリット式直立消波工と波力発電システムの K_L/K_{Ls} の値はほとんど変わらないが、長周期側では波力発電システムの方が大きい値をとる。これらの結果から、本波力発電システムは、既存の縦スリット式直立消波工が本来有する曝気能に影響を与えることなく、むしろ長周期側では曝気能が向上し、さらに、既往の海岸構造物を対象とした物質移動係数と反射率の関係式から定量的に予測できることがわかった。

4 本波力発電システムの発電量の推定

4.1 水車の獲得動力の推定法

4.1.1 実験概要

実験は、水深やスリット消波工の構造諸元の影響を加味するためにそれらを変化させて行った。これらの実験は規則波を対象としており、実験概要および水車、消波工の諸元は、表-1 および図-2,10,11 を参考にされたい。ただし、本実験は1スリットあたり2本の水車を設置しているため、 $h = 0.4\text{m}$ の実験は図-2 で示されている水車の本数とは異なる。表中の d は水車軸径であり、 M は水車正味の重量である。不規則波を対象とした実験は、図-5 と同一のものとしている。

$h=0.4\text{m}$ の実験は、前術したものと同一のものであるため割愛する。 $h=1.0\text{m}$ の実験は、図-10 に示すような長さ 50m、幅 2.5m、高さ 1.5m の二次元造波水槽を用いた。沖側に容量式波高計 (CHT4-50: (株)KENEK 製)

表-1. 波浪条件および水車、消波工の諸元 (規則波)

h	$2a/D$	$l(\text{m})$	$b(\text{m})$	$D_s(\text{m})$	$H_s(\text{m})$	$d(\text{m})$
0.40m	0.25	0.275	0.040	0.072	0.32	0.004
1.0m	0.17	0.850	0.10	0.18	0.80	0.015
2.0m	0.17	1.80	0.40	0.40	1.6	0.020

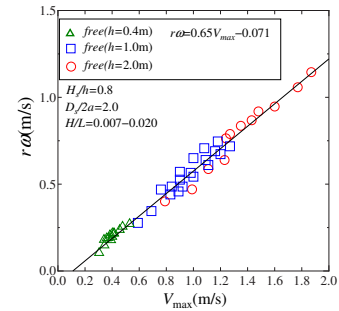
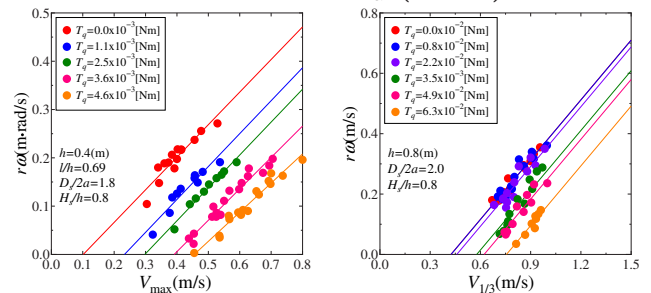


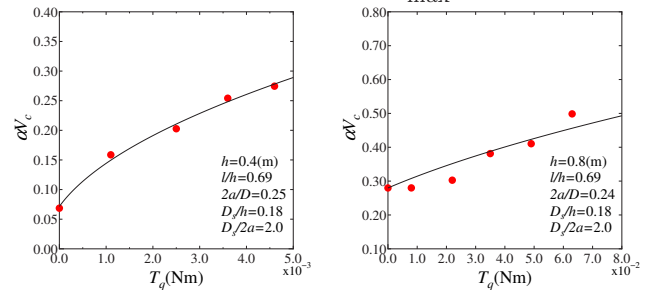
図-12. $r\omega$ と V_{max} (規則波)



(a) 規則波

(b) 不規則波

図-13. $r\omega$ と V_{max}



(a) 規則波

(b) 不規則波

図-14. T_q と αV_c

を2本設置し、スリットの中心では静水面下 0.30m の位置に、超音波流速計 (Vectrinoplus NORTEK AS 社製) を設置してスリット通過流速を計測した。 $h=2.0\text{m}$ の実験は、図-11 に示すような長さ 100m、幅 3.0m、高さ 3.0m の二次元造波水槽を用いた。沖側に容量式波高計 (CHT6-100: (株)KENEK 製) を2本設置し、スリットの中心では静水面下 0.55m の位置に、超音波流速計 (Vectrinoplus NORTEK 社製) を設置してスリット通過流速を計測した。負荷トルクは、ディスクプレーキに摩擦を与えることで作用させた。回転数 N_R は、すべての実験において加速度計 (TSND121, ATR-Promotions 社製) を用いて計測した。

4.1.2 実験結果

水車無負荷時に対して、規則波を作用させたときの水車の周速度 $r\omega = 0.5D_s\omega$ とスリット通過最大流速 V_{\max} との関係を図-12 に示す。同図によれば、両者はスケールに依存することなく、次式で表される唯一の線形関係で表現しうることがわかる。

$$r\omega = \alpha(V_{\max} - V_c) \quad (5)$$

式 (5) 中の V_c は、水車が回転し始めるために要する流速 (カットイン流速) を表しており、図-12 より、無負荷状態においてはスケールによらず、 $V_c = 0.11\text{m/s}$ と求められる。次に、水車軸に負荷トルク T_q を与えた際に、 T_q が式 (5) の関係に及ぼす影響について検討するために、水深 $h=0.4\text{m}$ において、 $0 \sim 4.6 \times 10^{-3}(\text{Nm})$ の負荷トルクを与えて実験を行った。このときの水車の周速度 $r\omega$ とスリット通過最大流速 V_{\max} の関係を図-13(a) に示す。同図によれば、式 (5) に含まれる比例係数 α はいずれの T_q に対してもほぼ同じ値を有している。すなわち、 α は水車形状などに依存する固有の値であると解釈でき、本実験結果によれば、概ね、 $\alpha = 0.65$ である。いま、図-13(a) よりそれぞれの T_q において αV_c を求め、 T_q と αV_c との関係が図-14(a) のように得られる。同図によれば、負荷トルク T_q が大きくなるとともに αV_c は大きくなる傾向があることがわかる。負荷トルクが作用するときの水車の回転運動方程式は、 β を係数として

$$I \frac{d\omega}{dt} = \frac{\beta}{2} \rho C_D H_s D_s V_c^2 \cdot \frac{D_s}{4} - T_q - \mu M g \frac{d}{2} \quad (6)$$

であるため、水車が定常的に回転すると仮定し、上式中の $\frac{d\omega}{dt} = 0$ とすると、次式を得る。

$$V_c = \frac{1}{\sqrt{\chi}} \sqrt{\frac{T_q}{M} + \mu g d} = \sqrt{\Gamma \frac{T_q}{M} + V_{c0}^2} \quad (7)$$

$V_{c0} = 0.11$ は無負荷状態におけるカットイン流速、 χ は $\frac{\beta}{4} C_D \frac{\rho H_s D_s^2}{M}$ を表す。式 (7) は、軸受けなどによる摩擦トルクと負荷トルク T_q を考慮したカットイン流速を表しており、無負荷状態 ($T_q = 0$) では $V = V_{c0}$ と等しくなる。上式中の実験定数 Γ は、式 (7) で求められる流速 V_c と図-14(a) で示されている V_c の実験結果から算定できる。その結果、 $\Gamma = 5.5$ を得た。

不規則波に対しては、 $V_{\max} = V_{1/3}$ と置き換えたうえで、図-13(b) と図-14(b) から $r\omega$ と $V_{1/3}$ の関係を求め、更に、 α と Γ 、 V_{c0} を求めた。結果、それぞれ 6.6、19.4、0.424 の値を取った。

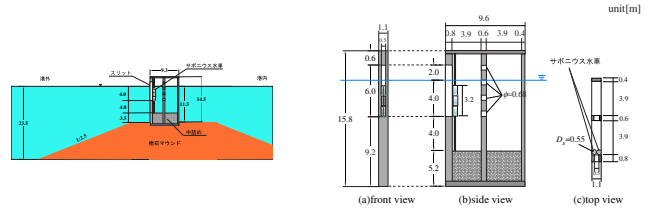


図-15. 波力発電システム (鞠山防波堤)

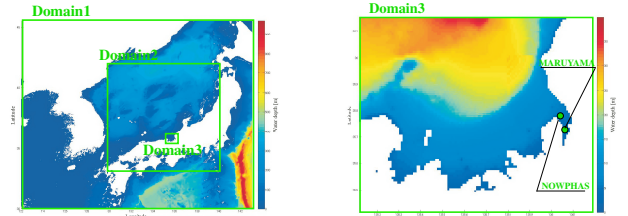


図-16. 計算領域

表-2. 計算条件

	計算大領域	計算中領域	計算小領域
経度 (degree)	122 ~ 143	130 ~ 140	135.12 ~ 136.19
緯度 (degree)	30 ~ 45.5	33 ~ 42	35.42 ~ 36.15
格子数	93×126	108×120	128×88
格子間隔	10'×10'	5'×5'	30"×30"
時間間隔	10分	5分	2分
境界条件	閉境界	ネストダウン	ネストダウン

以上の結果をまとめると、水車の周速度 $r\omega$ は、

$$r\omega = \alpha \left(V_{\max} - \sqrt{\Gamma \frac{T_q}{M} + V_{c0}^2} \right) \quad (8)$$

と定式化される。規則波なら $\alpha = 0.65$ 、 $\Gamma = 5.5$ 、 $V_{c0} = 0.11$ であり、不規則波なら $\alpha = 0.66$ 、 $\Gamma = 19.4$ 、 $V_{c0} = 0.42$ である。

4.2 発電量の推定

本研究では、福井県敦賀湾鞠山防波堤の遊水室内に水車を設置した波力発電システム (図-15) における発電量を推定した。ただし、水車は不規則波実験と同じものを想定し、重量は 278kg とした。

4.2.1 波浪推算

水車回転数の予測式 (8) を用いるためには、防波堤のスリット流速の有義値 $V_{1/3}$ の値が必要であり、それを算定するためには、防波堤付近における有義波高 $H_{1/3}$ と有義波周期 $T_{1/3}$ の値が必要である。本研究では、鞠山防波堤近傍における波浪推算を行うために、Delft University of Technology で開発された第三世代波浪推算モデル SWAN(ver.4101) を用いた。計算領域および計算条件は、図-16 と表-2 に示す通りである。図-17 は、2013年3月の敦賀において、国土交通省が提供している波浪連続観測値による有義波高 $H_{1/3}$ と有義波周期 $T_{1/3}$ 及び、それらの計算結果を比較した図である。同図に鞠山防波堤における波浪推算結果も付

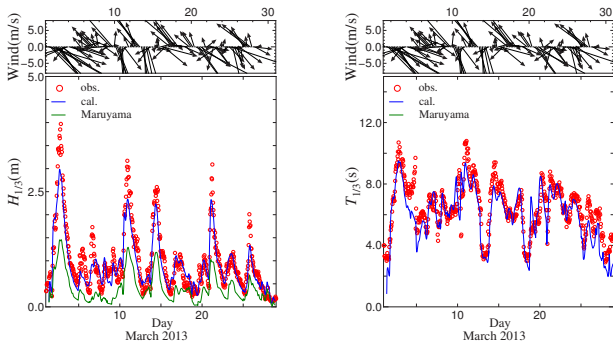


図-17. 波浪推算結果 (2013年3月)

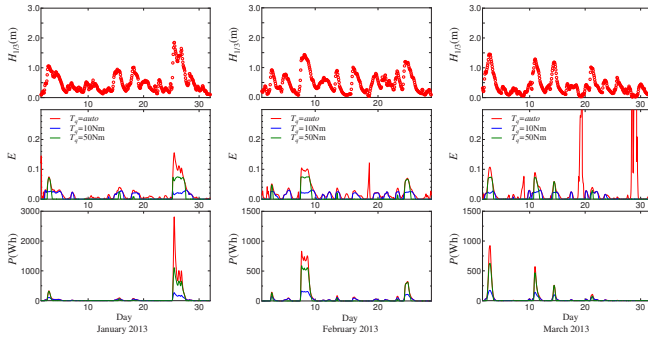


図-18. 発電量推定結果

表-3. 本波力発電システムの発電量

	負荷トルク T_q	発電量 (1スリット)(Wh)	総発電量 (kWh)	稼働率 η
2013年1月	$T_q = T_{q0}$	84.8	77	0.62
	$T_q = 10\text{Nm}$	21.5	20	0.36
	$T_q = 50\text{Nm}$	48.9	44	0.13
2013年2月	$T_q = T_{q0}$	55.7	51	0.64
	$T_q = 10\text{Nm}$	20.1	18	0.49
	$T_q = 50\text{Nm}$	37.4	34	0.13
2013年3月	$T_q = T_{q0}$	36.3	33	0.41
	$T_q = 10\text{Nm}$	13.7	13	0.30
	$T_q = 50\text{Nm}$	25.7	23	0.11

23.5m に対してわずか 4m しかなく、それ以外はマウンドや鉛直不透過壁から成る。そのため、角野らの理論解を用いるのは妥当でないと考え、水粒子の鉛直方向に対するフラックスが保存されることを仮定して $V_{1/3}$ 求めた。

図-18 より、 $H_{1/3}$ が 0.8m より小さい場合、本波力発電システムの発電量はほぼ 0 になるが、波高が 2m 以上になるとそれに伴ってエネルギー効率 E が上昇するため、かなりの発電量が見込むことができる。したがって、発電量は波エネルギーの大きさによって著しく変化し、高波浪場ではかなりの発電量が期待できることが明らかになった。一方、負荷トルク T_q の与え方によっても本波力発電システムの発電量はかなり異なるため、設置付近における波浪場を参考に最適な T_q を与える必要がある。

表-3 より、本システム 1 スリットあたりの発電量は数十 W 程度であるが、防波堤全長に渡って本システムを導入することにより、30 ~ 80kWh の発電が可能であり、これはジャイロ式波力発電 (45kWh)⁴⁾ やつるべ式発電装置 (50kWh)⁴⁾ に匹敵する。

5 結論

本波力発電システムは、既存の消波工よりも消波機能および曝気能が優れている。また、防波堤全長に本システムを導入したときの発電量は 30 ~ 80kWh である。

参考文献

- 1) 角野昇八：鉛直のスリットを有する海岸・海洋構造物の周辺波動場に関する研究、大阪市立大学学位論文、171p、1987.
- 2) 合田良美ら：不規則波における入・反射波の分離推定法、港湾技術研究所資料、No.248、1976.
- 3) 角野昇八ら：海岸構造物の曝気能に関する実験的再考察、海岸工学講演会論文集、第 35 巻、pp.1036-1040、1994.
- 4) 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構編：NEDO 再生可能エネルギー技術白書、第 6 章波力発電の技術の現状とロードマップ 54p、2011.

加してある。図-17 より、本計算結果は、全体的に観測値とほぼ一致していることがわかる。また、防波堤近傍では、敦賀湾湾口部の観測地点における波高が約 4 割ほどにまで減少する傾向が見られた。

4.2.2 発電量の推定結果

2013 年 1 月 ~ 3 月における本波力発電システムの 1 スリットあたりの発電量 P を図-18 および表-3 示す。図中に示している E は変換効率であり、波エネルギーを W として以下の式 (9) のように表される。

$$E = \frac{P}{W} \quad (9)$$

$$P = \frac{\alpha}{r} \left(V_{1/3} - \sqrt{\Gamma \frac{T_q}{M} + V_{c0}^2} \right) \cdot T_q \quad (10)$$

$$W = \frac{\rho g^2}{64\pi} T_{1/3} H_{1/3}^2 \times D \quad (11)$$

また、表中の総発電量は防波堤すべてのスリットに水車を組み込んだ場合を想定しており、防波堤の総延長は 1km としている。 η は稼働率、 $T_q = T_{q0}$ は常に最適負荷トルク T_{q0} を与えることを意味している。ここで、最適負荷トルクとは、 P が最大となる T_q であり、式 (10) を微分することで

$$T_{q0} = \frac{2M}{9\Gamma} (V_{1/3}^2 - 3V_{c0}^2 + V_{1/3} \sqrt{V_{1/3}^2 + 3V_{c0}^2}) \quad (12)$$

と表すことができる。一方で、今回対象とした防波堤は、図-15 のように縦スリット式直立消波工が全水深

討議

て、発電量も変化すると考えられます。今後は、干潮差を考慮して、水深に対する水車高さを変化させた実験も行う必要はあると思われます。

討議 [谷口徹郎]

規則波と不規則波は周期で調整するのか、反射波もあるのか？実際には反射波もあるのか？

回答

規則波と不規則波は、両者ともこちらで周期および波高も調整できます。実験は、現地を想定して入射波と反射波が重なり合った多重反射系を対象にしています。

討議 [大島先生]

本波力発電システムの欠点は？

回答

本波力発電システムの発電量は1スリットあたり、数十Wと他のシステムと比べて小さいのが欠点です。

討議 [西岡先生]

不規則波とは？不規則波の実験結果の傾きが規則波と異なるのはなぜか？

回答

不規則波とは、現地の波を再現したものであり、ブレットシュナイダ・光易型のスペクトルの波を指します。本予測式は、水車が定常的に回転するものと仮定しています。そのため、不規則波中においては、水車は定常的に回転せず、回転数に多少の誤差が生じたからだと考えられます。

討議 [重松先生]

今後、発電量を増やすにはどういった改善の余地があると考えているか？

回答

消波工の構造条件や水車のオーバーラップ比、アスペクト比、スリット幅に対する水車径などのパラメータによって発電量は変化すると考えられます。したがって、これらの最適なパラメータを見出すことが発電量の改善につながると思います。あと、整流板の影響を考慮することも発電量の改善につながると思います。

討議 [西岡先生]

干潮差によって発電量は変化するか？

回答

本計算では、干潮差は考慮しておりません。ただし、水深に対する水車高さによって、水車回転数が変化することは実験を行うことで見受けられました。したがっ