振り子式波力発電装置 (Wave Rudder) の 現地実証試験

小林 豪毅¹・林 昌奎²・丸山 康樹³

¹正会員 東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場四丁目6-1)

E-mail:h-koba@iis.u-tokyo.ac.jp

²東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場四丁目6-1)

E-mail:rheem@iis.u-tokyo.ac.jp

³東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場四丁目6-1)

E-mail:koki@iis.u-tokyo.ac.jp

岩手県久慈市に新方式の波力発電装置 (Wave Rudder) を設置し、現地実証試験を行った。開発した波力発電装置は振り子式をベースとしており、市販の油圧操舵機、永久磁石同期発電機、パワーコンディショナーを利用することにより、低コストで耐久性の高いシステムを実現している。数値モデル及び現地試験により Wave Rudder の特性について検討したところ、断面2次元の計算結果に比べてラダーの振れ角が大きく、回転軸モーメントが小さいことがわかった。高波浪時に発電機のトルクを変えながら発電機出力を計測したところ、発電負荷を適切に設定すれば効率0.32で発電できることが実証できた。久慈波力発電所は保安規程、系統連系、使用前検査等の一連の手続きを経て発電所として運転しており、波力発電の社会実装を考えるとその意義は大きい。

Key Words : wave energy converter, wave power plant, field demonstration, rudder, hydraulic system

1. はじめに

地球温暖化に伴う海面上昇や台風の強大化が進行すれば、世界中の海岸環境が数十年で激変する可能性が高い。それを緩和するために、化石燃料に代わるエネルギー源として再生可能エネルギーの研究開発が進められており、風力発電と太陽光発電については、すでに実用化されている。しかし、有力と言われている波力発電については、PelamisやOyster等の開発例はあるものの、商業ベースでの普及には至っていない。そこで、我々の研究チームでは、日本全国の港湾・漁港に波力発電装置を普及させるべく、Wave Rudderという名称の波力発電装置を開発している¹⁾。その第一段階として、岩手県久慈市に一号機を設置して現地実証試験を行ったので、その結果を報告する。

2. 久慈波力発電所の概要

(1) 全体構成

我々の研究目的は単なるデバイス開発ではなく、波力発電所としての技術を確認することである。そこで、定格43kWと小出力ながらも、一号機から経済産業省の使

用前検査を受け、東北電力に系統連系することで発電所として稼働させることとした。久慈波力発電所は図-1に示すように、久慈湾内の玉の脇漁港に設置した。発電所全体の様子を図-2に示す。この施設は発電所として運転しているため、保安規定に基づき2回の定期点検を行う必要がある。そのため、点検員が防波堤から波力発電装置に移動できるようにアクセス桟橋が設けられている。波力発電装置で発電した電力は、アクセス桟橋及び防波堤に設置した送電ケーブルにより陸上サブステーションに送電される。陸上サブステーションにはパワーコンディショナーや変圧器が格納されており、発電した電力を系統に逆潮流している。また、発電した電力の一部は地元

図-1 久慈波力発電所の位置

図-2 久慈波力発電所の全体構成

の漁業協同組合の冷凍冷蔵庫に供給することで、電力の地産地消を試みている。

この方式の利点の一つは、既存の防波堤を利用していることである。防波堤からの反射波により一次変換効率を向上させることができ、かつ、防波堤に沿って配線できるため、コストアップ要因となる海底ケーブルを用いる必要がない。また、港湾や漁港では電気を利用しているので、既存の系統に接続することができる。波力発電装置を設置する防波堤前面は漁場ではないので、漁業者の操業には影響しない。このような観点から Wave Rudder は港湾・漁港と相性の良い方式と言える。

(2) Wave Rudderの発電方式

久慈波力発電所の発電方式は、1980年代に室蘭工業大学によって開発された振り子式波力発電装置²⁾をベースとしており、そこに風力発電で培われた発電技術を導入し、かつ、市販品を使用することで低コスト化を図っている。我々はこの新方式の波力発電装置を Wave Rudder と呼称している。Wave Rudder 一号機の外形を 図-3 に示す。設置海域は岩場であるため、防波堤の前に捨石マウンドを形成し、その上に4本の脚柱で自立する重力式の鋼構造物を設置した。設置海域の水深は約6mであり、捨石マウンドは平均水位時の水深が3.6mになる高さに形成している。防水キャビンの中には油圧発電システムが据え付けられており、その回転軸から振り子（本論文ではラダーと呼ぶ）をぶら下げる構造となっている。回転軸の高さは平均水位から5m、ラダーの大きさは幅4m×高さ2mであり、20年確率波（最大波高5.5m、最大波周期12s）が作用しても油圧発電システムの許容トルク（102t・m）未満となるように設計している。ただし、設置当初は試験用としてラダー上端（平均水位の位置）に幅2m×高さ0.5mの板を取り付けていた。本論文で示すのはそのときの結果である。ラダーの岸沖方向距離は、重複波の節の位置に近く、かつ、海洋構造物が消波ブロックと干渉しないように、防波堤ケーソン前面から27.7mとしている。また、海洋構造物の沖側の脚柱には水圧式波高計が取り付けられており、リアルタイムで入

図-3 Wave Rudderの外形

図-4 Wave Rudderの油圧回路（簡略図）

射波を計測している。水圧式波高計の位置はラダーから5m沖側である。

Wave Rudderの特徴の一つは、ラダーで受けた波エネルギーを電気エネルギーに変換する機構として油圧回路を用いていることである。図-4に Wave Rudder の油圧回路の簡略図を示す。波によるラダーの往復運動をラムシリンダでオイルの流れに変換し、それを斜板オイルモータで回転運動に変えて発電機を回す方式となっている。油圧回路を用いる利点の一つは、さまざまな制御が可能なことである。例えば、発電所の要件として、停電等の異常時に安全に停止する機能が必須であるが、Wave Rudder は系統の異常をパワーコンディショナーが感知して自動的に解列するとともに、流量調整弁を閉止して発電機を回転させないようにしている。なお、この油圧回路は川崎重工業製の油圧舵取機を改造して製作しており、それが Wave Rudder という名称の由来となっている。Wave Rudder では基本的に市販品を利用することにより、低コストで耐久性の高いシステムが実現されている。

3. ラダー運動の理論と基本特性

振り子式波力発電装置の理論については、浅野³⁾により断面2次元のポテンシャル理論が示されている。室蘭工業大学によって開発された振り子式波力発電装置では、ケーソンの内部にラダーを取り付けることにより、この

理論に近い条件を実現している。しかし、ケーソンはコストの低減が難しいため、Wave Rudderでは採用しないことにした。したがって、ラダーの側方に壁は存在せず、防波堤前面には消波ブロックが設置されているため、ラダーの背後は完全反射条件になっていない。そこで、これらの条件の違いについて、数値モデルにより検討を行った。

ラダーの運動方程式は次のように表される。

$$(I_0 + I) \frac{d^2 \theta}{dt^2} + (N_0 + N) \frac{d\theta}{dt} + (K_0 + K) \theta = M_0 \sin \omega t \quad (1)$$

ここで、 t は時間、 θ はラダーの振れ角、 I_0 はラダー質量の慣性モーメント、 I は付加質量の慣性モーメント、 N_0 は負荷係数、 N は造波減衰係数、 K_0 はラダー質量による復元係数、 K は水室による復元係数、 M_0 は波力による加振モーメントの振幅、 ω は角周波数である。断面2次元問題に対しては、浅野により解析解が示されている。この解析解から得られる重要な知見は次の2つである。

- ・最大効率時の振れ角は、無負荷時の振れ角の半分となる。
- ・最大効率時の回転軸モーメントは、ラダー固定時の回転軸モーメント M_0 の半分となる。

発電機の状態で考えると、無負荷時はトルクが0であるため発電機出力は0である。また、発電機のトルクが大きすぎてラダーが動かない場合は、回転数が0であるため、発電機出力は0である。最大効率時はこの2つの中間の状態であり、そうなるように発電負荷 N_0 を設定することが制御の基本である。実際には入射波が不規則であるため、単純に設定することはできないが、この基本特性を押さえておくことが重要である。

Wave Rudderでは、ラダーの側方が壁ではなく、ラダーの背後が完全反射条件になっていない。この影響を調べるために、無負荷時とラダー固定時の条件に対して数値モデルにより計算を行った。数値モデルとしては、小林ら⁴⁾による解析手法を用いた。この数値モデルは、後野⁵⁾による連成振動方程式を用いており、変動圧力を未知数としてラダーと流体の相互作用を計算する。鉛直方向積分型の線形方程式であるため、少ない計算時間で3次元のケースを検討することができる。ラダーの側方が壁の場合は断面2次元のケースであり、防波堤前面にラダーが単独で存在している場合は3次元のケースとなる。そこで、本論文では、それらのケースをそれぞれ2次元、3次元と呼ぶことにする。なお、断面2次元のケースでは、ポテンシャル理論と数値モデルの結果が一致することを確認している。入射波は周期8sの規則波がラダーに直入射するものとし、ラダーの背後壁の反射率を1.0または0.4として計算を行った。計算条件は、久慈波力発電所の条件を基に表-1のように設定した。

前述のように、振り子式波力発電装置の基本特性では、

無負荷時の振れ角とラダー固定時の回転軸モーメントが重要となる。図-5は無負荷時について、波高に対する振れ角の変化を示したものである。2次元のケースに比べて、3次元のケースの方が振れ角が大きいことがわかる。ラダーの背後に水室が存在しない場合、ラダーの前面と背面の水圧差が小さいため、ラダーが動きやすい状態となる。背後壁の反射率が低くなると、2次元と3次元で同程度振れ角が低減する。図-6はラダー固定時の回転軸モーメントを比較したものである。2次元のケースではラダーの背後で波が生じないため、背後壁の反射率は影響しない。2次元と3次元のケースを比べると、3次元の方が回転軸モーメントが小さいことがわかる。これはラダーの側方から波が回折する影響と考えられる。

以上の結果から、3次元のケースでは2次元のケースに比べてラダーの振れ角が大きく、回転軸モーメントが小さくなることが確認された。これは発電機から考えると、2次元のケースに比べて高回転・低トルク型の発電になることを意味している。

表-1 数値モデルの計算条件

項目	記号	値
ラダーの慣性モーメント (t・m ²)	I_0	212
ラダーの復元係数 (kN・m)	K_0	378
ラダー幅 (m)	B	4.0
静水面から回転軸までの高さ (m)	z_c	5.0
設置水深 (m)	h	3.6
ラダーから背後壁までの距離 (m)	d	14
入射波 (規則波) の周期 (s)	T	8.0

図-5 無負荷時の振れ角の計算結果

図-6 ラダー固定時の回転軸モーメントの計算結果

4. 現地実証試験

(1) 無負荷試験

現地におけるラダー運動の基本特性を調べるため、発電負荷を0としてラダー振れ角の計測を行った。無負荷試験を行ったのは、2016年11月30日から12月2日までの3日間である。このときの水位とラダー振れ角の時間変化の例を図-7に示す。ラダーは水位変動に対応してスムーズに揺動していることがわかる。

図-8に波高とラダー振れ角の関係を調べた結果を示す。横軸は水位の時間波形から算出したエネルギー平均波高、縦軸はラダー振れ角のrms値としている。なお、ラダー振れ角のrms値を算出する際は、周期20s以上の成分をカットするハイパスフィルタをかけている。図中には、周期10sの規則波に対して数値モデルで計算した結果も示している。ラダーの背後壁の反射率は0.4として計算を行った。現地の状況は計算条件に比べて複雑であるため、単純に比較はできないが、計測値は3次元の計算値に近い結果となっている。現地においても無負荷時のラダー振れ角は断面2次元の計算結果より大きいことが確認された。

図-7 無負荷時の水位とラダー振れ角の時間変化

図-8 無負荷時のラダー振れ角の現地計測結果

(2) 最大負荷試験

ラダー固定時の回転軸トルクを計測するため、発電負荷を最大にしてラムシリンダ内の油圧の計測を行った。最大負荷試験を行ったのは、2016年12月9日から12月12日までの3日間である。このときの水位とラムシリンダ内の油圧の時間変化の例を図-9に示す。油圧回路には蓄圧器が入っているため、2MPa以上の圧力は平滑化された結果となっている。Wave Rudderでは波力によって生じた回転軸モーメントをチラー（舵柄）を介してラムシリンダ内に油圧として伝達している。したがって、ラムシリンダ内の油圧から回転軸モーメントを推定することができる。回転軸モーメントの振幅は平均油圧から次式で求めた。

$$\hat{M} = \frac{\pi}{2} \bar{P} A R \quad (2)$$

ここで、 $\hat{M}$ は回転軸モーメントの振幅、 $\bar{P}$ は平均油圧、 A はラムシリンダの断面積（2本分）、 R はチラー半径である。

図-10に波高と回転軸モーメントの振幅の関係を調べた結果を示す。無負荷試験の場合と同様に、ラダーの背後壁の反射率を0.4として、周期8sの規則波に対して計算した結果も示している。ただし、現地では水深3.6mに対してラダー高さが2mであるため、計算値は面積比を掛けた値としている。計測値と計算値を比べると、2次元の計算結果は明らかに過大である。3次元の計算結果も波高が小さい場合は大きめの値となっているが、計測値には機械的なロスの影響も含まれていると考えられる。いずれにしてもWave Rudderの回転軸トルクは断面2次元の計算結果に比べて小さい傾向となる。

図-9 ラダー固定時の水位と油圧の時間変化

図-10 ラダー固定時の回転軸モーメントの現地計測結果

(3) 発電試験

2016年12月22日から24日にかけて、久慈湾に高波浪が入射したため、発電試験を行った。このときの波浪条件を図-11に示す。発電試験では発電機のトルクを5分毎に変えながら計測することにより、基礎データを取得した。発電試験結果の例を図-12、図-13に示す。

図-12はこの期間中で最大の発電機出力が生じたときの結果である。このとき、発電機のトルクは $56.4\text{N} \cdot \text{m}$ (24%) と大きめに設定しており、瞬間的には 10.5kW の出力が生じた（油圧パワーは 22.5kW ）。しかし、ラダーが揺動せずに発電機出力が0になっている時間もあるため、平均入射パワーに比べて発電負荷が大きすぎると考えられる。

図-13はこの期間中で最大効率となったときの結果である。このとき、発電機のトルクは $42.3\text{N} \cdot \text{m}$ (18%) に設定している。ラダー振れ角と出力の時間変化を見ると、特に前半はラダーが揺動し続け、安定的に発電していることがわかる。効率を向上するためには、入射パワーに対して発電機のトルクを適切に設定する必要がある。図-13のケースでは、波パワー 8.2kW に対して、油圧パワーが平均 4.1kW 、発電機出力は平均 2.6kW であった。した

図-11 発電試験時の波浪条件

(a) 水位とラダー振れ角

(b) 発電機出力と油圧パワー

図-12 瞬間出力が大きい場合の時間変化

(a) 水位とラダーの振れ角

(b) 発電機出力と油圧パワー

図-13 効率が低い場合の時間変化

がって、1次変換効率0.5、2次変換効率0.63であり、システム全体の効率は0.32となる。Wave Rudderにより高効率の発電が可能なことを実証することができた。

5. おわりに

岩手県久慈市にWave Rudder一号機を設置して現地実証試験を行った。入射パワーに対して発電負荷を適切に設定すれば、効率0.32で発電できることを実証した。これは風力発電と同程度の効率であり、一号機としては十分な成果と考えている。また、実際に現地で試験してみると、ソフト面（制御アルゴリズム）でもハード面（ラダー、油圧発電システム）でも改良の余地が多そうであり、将来的にはさらなる効率の向上が期待される。一号

機については、現地データを基に不規則波に対する制御方法の改良を行っている。

久慈波力発電所は保安規程、系統連系、使用前検査等の一連の手続きを経て発電所として運転しており、波力発電の社会実装を考えるとその意義は大きい。出力を大規模化するには、基本的にはラダーの面積を拡大し、かつ、ユニット数を増やすことで実現できる。現在、我々の研究チームでは、改良型のWave Rudder二号機を製作すべく検討を進めているところである。

謝辞：本論文は、文部科学省の東北復興次世代エネルギー研究開発プロジェクト「課題1 三陸沿岸へ導入可能な波力等の海洋再生可能エネルギーの研究開発」による成果である。波力発電所の設置にあたっては、久慈市、久慈市漁業組合及び地元企業を含む多くの企業にご協力いただいた。ここに深く謝意を表す。

参考文献

- 1) 東北大学：東北復興次世代エネルギー研究開発プロジェクト 課題1 三陸沿岸へ導入可能な波力等の海洋再生可能エネルギーの研究開発，<http://umi-tohoku.sblo.jp/>
- 2) 近藤一郎，谷野賢二，渡部富治，奥田教海，松田敏彦，土手康彦：室蘭工業大学における波浪エネルギー利用研究（1976—86）の総括，室蘭工業大学研究報告（理工編），第37号，pp.251-266，1987.
- 3) 浅野誠一：岸壁部に設けられた振り子式波浪エネルギー回収装置の効率について，日本造船学会水槽委員会第2部会，SK-60-14，1980.
- 4) 小林豪毅，林昌奎，丸山康樹：不規則波に対する振り子式波力発電装置（Wave Rudder）の性能評価，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.69，No.2，pp.I_1321-I_1325，2013.
- 5) 後野正雄：緩勾配地形上の線形不規則波動場の支配方程式とその特性，海岸工学論文集，第40巻，pp.21-25，1993.

(2017.3.15 受付)

FIELD DEMONSTRATION OF PENDULUM TYPE WAVE POWER GENERATION SYSTEM (WAVE RUDDER)

Hidetaka KOBAYASHI, Chang-Kyu RHEEM and Koki MARUYAMA

The newly developed wave power generator (Wave Rudder) has been installed at Kuji City, Iwate Prefecture for field demonstration. The wave power generator is a pendulum type convertor (classified as a oscillating wave surge converter by EMEC) and uses commercially available hydraulic ship steering equipment, permanent magnet synchronous generator, and power conditioner to produce a low cost and high durability system. Measurements of generator output made by varying generator torque under high wave conditions shown that a generation efficiency of 32% can be achieved with optimal setting of generator load. The Kuji Wave Power Plant has met requirements including safety, grid connection and pre-operation inspections by the government and local utility company; compliance with regulatory and utility company requirements is an important factor for future deployment.