

# 小型の浮体模型による圧電素子を利用した発電実験

村井基彦<sup>\*1</sup>, 藤本大道<sup>\*2</sup>

## An experimental study on a small floating wave-power generation using piezoelectric device

Motohiko MURAI<sup>\*1</sup> and Hironori FUJIMOTO<sup>\*2</sup>

<sup>\*1</sup> Yokohama National Univ. Graduate School of Environment and Information Sciences  
Tokiwadai 79-7, Hodogaya-ku, Yokohama-Shi, Kanagawa, 240-8501 Japan

The effective utilization of wave energy is important. So wave power generation using a piezoelectric element is described by this thesis. A piezoelectric element is the device which changes vibration to electric energy. The efficiency of generation electricity is made expensive by using a pendulum on this thesis. A result is checked by an experiment. I also try to save the electricity invented by a piezoelectric element and make an LED light. The relation between the pitching movement of a floating body and the generation of electricity is also checked.

**Key Words** : Piezoelectric element, Wave-power generation, Floating structure

### 1. 緒 言

近年、世界全体で環境問題に対する取り組みがますます活発化している。その中でも、石油、天然ガス等の化石燃料に代わる代替エネルギーの研究開発は、資源小国と呼ばれる我が国での急務となっている。とりわけ、四方を海に囲まれた日本では、豊富な海洋エネルギーの有効活用への期待は大きいと言える。海洋エネルギーの中でも波エネルギーは比較的容易に得られるエネルギー源であり、我が国を含めた世界各国で、波エネルギーを回収する為の波力発電装置の研究が行われてきた。波力発電装置開発のトレンドとしては、設置海域はより水深の深く、波高の大きい沖合へと変わってきている。従って発電装置も浮体式のものが主となってきている。

波力発電装置は大きく、越波型・可動物体型・振動水柱型の3種類に分類できる。それぞれの特徴を以下に示す。

- ・越波型：波エネルギーを集めて高所貯留し、貯留した海水の位置エネルギーでタービン・発電機を回す。
- ・可動物体型：波エネルギーで水中の物体あるいは浮体を動揺させ、その運動エネルギーで発電機を回す。
- ・振動水柱型：波エネルギーを空気室の空気圧力に変換しタービンを回す。

本稿では、可動物体型の一つとして、圧電素子を利用し浮体の揺れを直接発電に利用するシステムを紹介する。圧電素子を利用した研究としては、浮体の揺れから圧電素子を用い電気エネルギーを取り出せる<sup>(1)</sup>ことが確認されている。こうした方式は筆者らの他にもいくつかの方式が提案されているが、浮体の動揺を起因として圧電素子に振動を励起するものである。

しかし、この方式の問題点として、「圧電素子は機械エネルギー・電気エネルギー変換効率が最も高くなるのは、その共振周波数(数十～数千[Hz])で加振された場合であるが、一般的に浮体式波力発電に利用される波周期は数秒から数十秒というオーダーであり、単に浮体の動揺周期に圧電素子の振動を同調させるだけでは、大きな電気エネルギーを得ることは難しい。」ということが挙げられる。

そこで、圧電素子に振動を与えるシステムとして、浮体と圧電素子の間に、振り子システムを導入する。すな

<sup>\*1</sup> 横浜国立大学大学院環境情報研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-7)

<sup>\*2</sup> 新日鉄エンジニアリング (研究当時：横浜国立大学大学院環境情報学府)

E-mail: m-murai@ynu.ac.jp

わち、振り子が浮体の動揺エネルギーを吸収し、振り子が圧電素子に衝突し機械的衝撃エネルギーを印加することで圧電素子にその共振周波数に近い周波数での振動を励起し、より効率的に電気エネルギーを取り出すというものである。図1にエネルギー変換のイメージ図を示す。これらの手法によりどの程度、発電の効率性が変化するのか検討を行う。

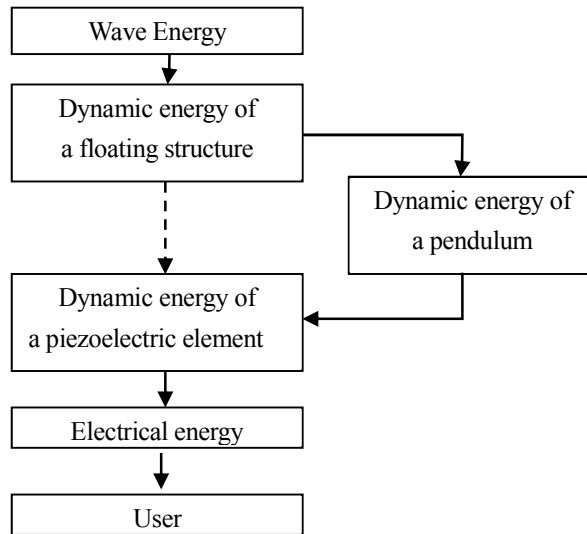


Figure 1 Energy conversion process

## 2. 発電模型

### 2・1 実験浮体

本実験では表1に示すプラスチック製の箱型浮体を用いた。また、図2に実験のイメージ図を示す。

Table 1 Specific of the floating structure

Density $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	791.9
Pitching natural period T[s]	1.40
Inertia moment I[m <sup>4</sup> ]	$7.39 \times 10^{-3}$

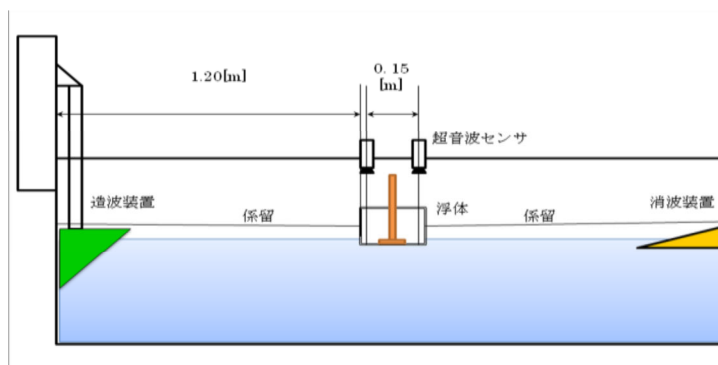


Figure 2 Image of a water tank experiment

本実験で用いた浮体に搭載した振り子は、錘の位置を変更することで、自由に固有周期を変更できる用に作られており、また、同時に複数の圧電素子に衝撃を与えられるように、先端に平行棒を通すなどの工夫をしている。ここで、振り子を固定したときと自由に振動させた時の浮体のピッチング運動の周波数応答関数を図3に示す。ここで横軸を入射波の周期、縦軸はピッチング運動の振幅を、波数を用いた最大傾斜で無次元化した値を表している。

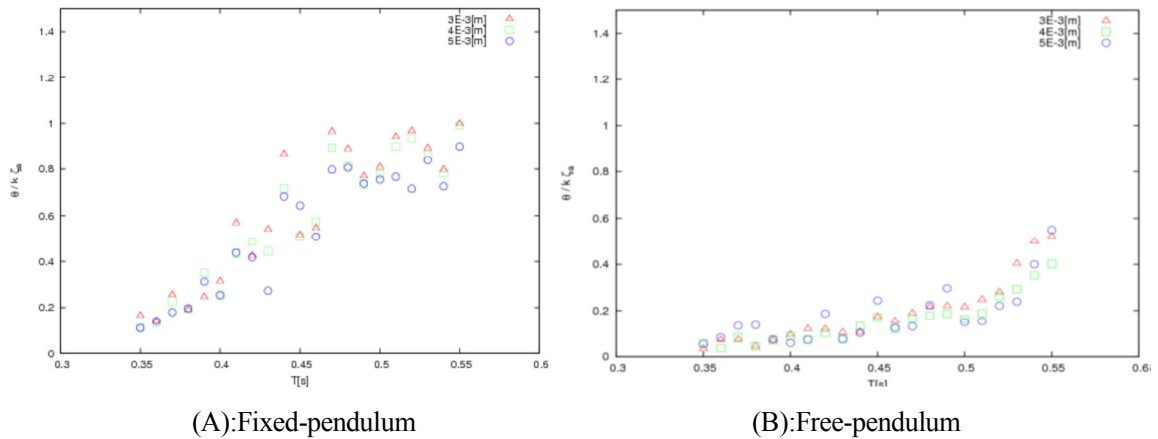


Figure 3 RAO of the pitching motion (free of pendulum)

図3を比較すると、振り子を波周期に同調させて振動させた場合、そうでない時よりも全波周期に渡って値が三分の一倍程になるなど、かなり小さくなっていることが分かる。このことから、振り子は浮体の運動エネルギーを吸収していることが分かる。

## 2・2 圧電素子

本実験では圧電フィルムと圧電セラミックの2種類の圧電素子を利用する。図4に両圧電素子の概観を示す。上から圧電セラミック、圧電フィルムである。

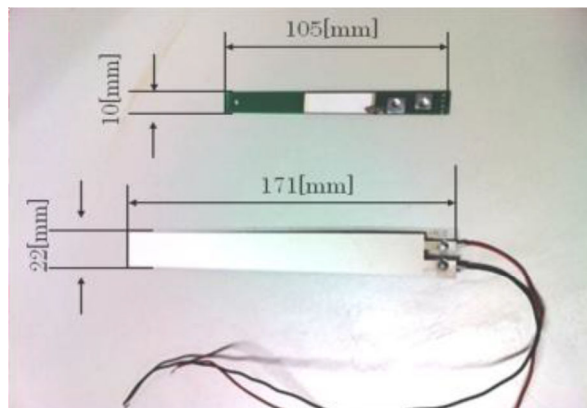


Figure 4 Devices (upper: piezo-ceramic, under: piezo-film)

### (1) 圧電フィルム

柔軟な構造をしており、多少長い周期で振動させても比較的大きな変位を得る事ができる。この特徴を利用して、浮体の揺れを起因として、圧電素子自身を振動させることで発電が可能となる。予備実験などからフィルム枚数が多すぎても、結果として発電効率が低下することが確認できたため、実験では圧電フィルム6枚を浮体に搭載した。

### (2) 圧電セラミック

圧電セラミックとしては市販の発電バイモルフモジュールを使用した。本実験で用いた発電バイモルフモジュールは、圧電セラミックを比較的硬い基盤に装着したもので、その固有振動数は162.6[Hz]と、波の周波数に比して高い値になっている。予備実験において、強制振動により振り子を振動させ、圧電素子に機械的衝撃エネルギーを与えたところ、大きな発電力を得ることが出来たため、浮体に搭載する発電バイモルフモジュールは2枚とした。

### 3. 発電実験

前章で示した模型を用いて、長さ3.1[mm]、巾0.4[mm]、水深0.5[mm]の小型水槽で波力発電実験を行った。以下、圧電素子として圧電フィルムを搭載した場合をCase1、圧電素子として圧電セラミックスを搭載した場合をCase2とする。

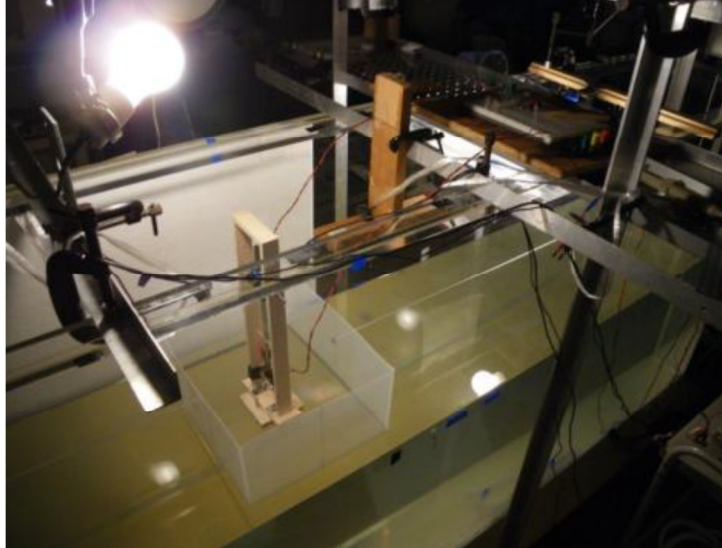


Figure 5 Overview of a water tank experiment

Case1) 浮体の動揺を起因とした波力発電

実験条件としては、波入射角は $0^\circ$ 、波振幅は5[mm]、入射波周期0.35~0.55[s] (0.05[s]刻み)で変化させ、計測を行う。陸上試験においてすでにその性能は分かっているため、浮体実験ではその発電傾向を見るのに必要最低限の、比較的少ない波周期で実験を行っている。図6にコンデンサに蓄電されるフィルム6枚分の電圧波形を示す。図6より、フィルムを浮体の動揺から直接振動させた場合でも、6枚分ではあるが、0.5[V]付近の電圧が生じていることが確認出来る。また、フィルム一枚当たりで生じる電力は、入射波の単位振幅当たり最大でも $0.001[\mu W]$ と非常に小さい値ではあるが、確かに発電できていることが確認出来る。

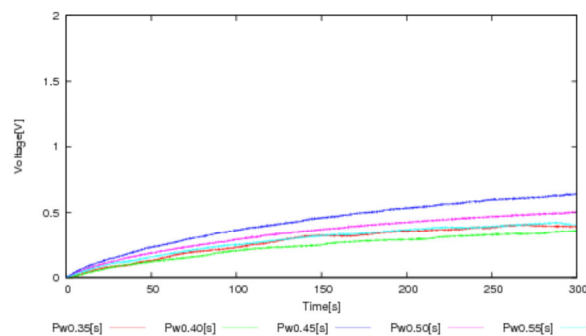


Figure 6 Time changes of the observed voltage at capacitor (Piezo-film)

Case2) 振り子による衝撃を起因とした波力発電

実験条件として、波入射角 $0^\circ$ 、波振幅は3~5[mm] (1[mm]刻み)、入射波周期は0.35~0.55[s] (0.01[s]刻み)で計測を行う。振り子を用いた発電実験は、浮体の運動にどのような影響を与えるのかが未知であるため、0.01[s]という比較的細かい波周期間隔で計測を行った。図7にコンデンサに蓄電される発電バイモジュール2枚分の電圧波形を示す。

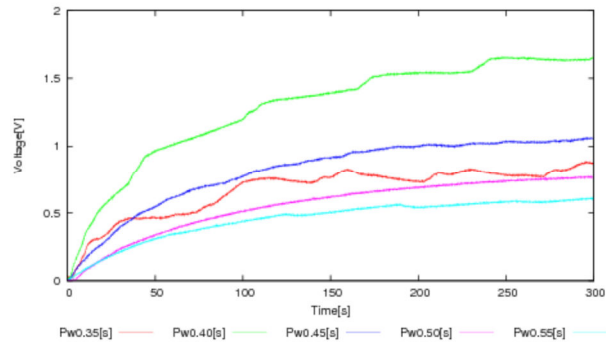
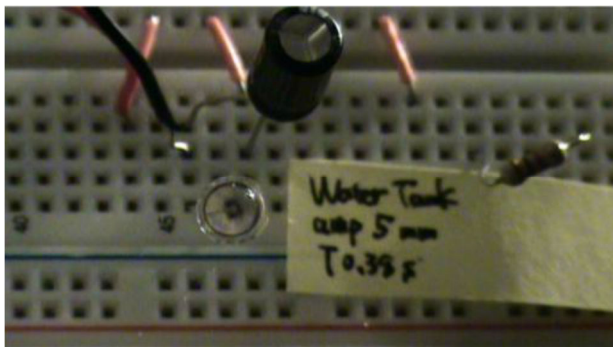


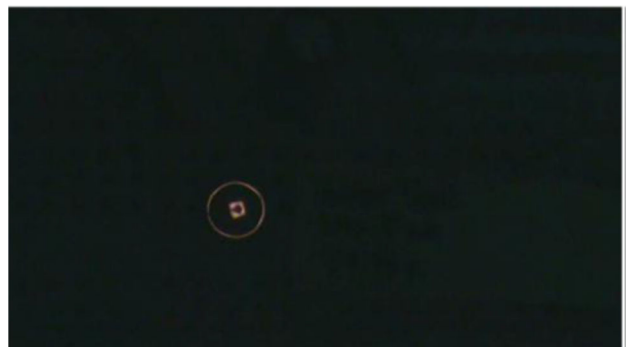
Figure 7 Time changes of the observed voltage at capacitor (piezo-ceramics)

図7を見ると、その最大電圧は1.7[V]付近となっており、圧電フィルム6枚分のもものと比較しても3倍近く大きくなっていることが分かる。波周期 $T_w$ 0.35[s]と0.45[s]において電圧波形が波打っているのは、その波周期における波長 $\lambda$ が、 $P_w=0.35[s]$ で $\lambda=0.191[m]$ 、 $T_w=0.40[s]$ で $\lambda=0.25[m]$ と双方とも浮体の全長 $L=0.254[m]$ よりも短いことから、浮体が波と共に揺られにくく、浮体前方で自ら生み出した反射波の影響を受けていると思われる。また、振り子を用いた発電の、単位波振幅当りの発生電力は最も小さい値でも $0.002[\mu W]$ となっており、Case1の最も大きい値である $0.001[\mu W]$ の倍以上の電力を生じていることが分かる。

また、波エネルギーにより振動する振り子を用いて、圧電素子に振動を印加する方式で得た電気エネルギーによって、実際にLEDを発光させることを試みた。図8(a)に今回点灯させるLEDを鉛直上方から撮った写真を、図8(b)に点灯させた状態のLEDを示す。発光量が微弱なこともあり、分かりやすくするため周囲の光は遮断してあるが、波から得た電力でLEDが実際に光っている様子が分かる。



(a) Overview of LED



(b) The LED emitting

Figure 8 A lighting experiment of LED

### 3・1 発電による浮体運動への影響

浮体の運動と発電量との関係について、次の4パターンの浮体のピッチング運動における周波数応答関数を調べた。縦軸はピッチング運動の振幅を、波数を用いた最大波傾斜で無次元化した値、横軸は波周期を表している。

(No. 1) 振り子を固定した状態の浮体

(No. 2) 振り子の固有周期を波周期に同調させて自由振動させた時の浮体

(No. 3 : Case1) 振り子を固定し、圧電フィルムによって浮体の運動エネルギーを電気エネルギーに変換した時の浮体

(No. 4 : Case2) 振り子を用いて圧電セラミックに衝撃を与え電気エネルギーを取り出した時の浮体

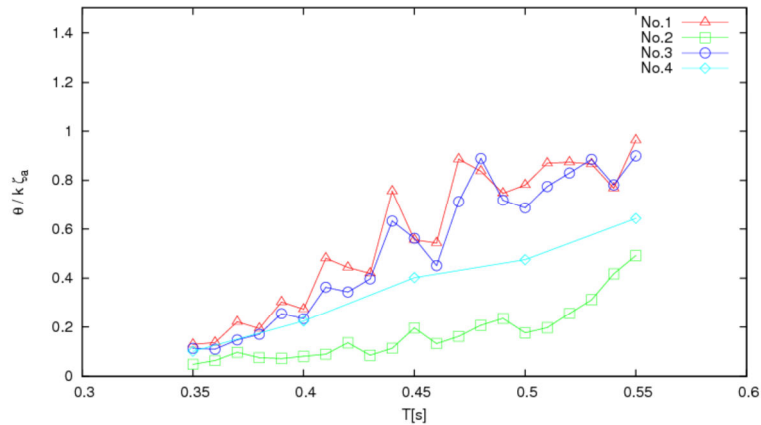


Figure 9 RAO of the pitching motion (No.1~4)

図9より、振り子を自由に振動させた場合は浮体のピッチング運動が大きく減少していることが分かる。また、No. 3の時の浮体の運動が、No. 1の時からあまり減少していないが、これは振り子が浮体の運動を十分に吸収しきる前に圧電セラミックに衝突させてしまっていたことが原因と考える。このことから、振り子に浮体の運動エネルギーを十分に吸収させた上で、圧電セラミックに衝撃を与えるシステムを考える事が、更に大きな電力を取り出すことに繋がると考えられる。No. 4では、圧電フィルムが大きく浮体のピッチング運動のエネルギーを吸収していることが分かる。しかし、浮体の運動エネルギーを多く吸収して振動しているにも関わらず、発電量が小さい一つの原因として、圧電フィルム1枚の厚さが28[ $\mu\text{m}$ ]と非常に薄いことから、その発電量が低下してしまうことが挙げられる

### 3・2 発電効率

波エネルギーを最終的な電気エネルギーに変換する総合効率 $E_f$ は次式で与えられる。

$$E_f = \frac{E_e}{E_w} \quad (1)$$

ここに、 $E_e$ は変換によって得られた電気エネルギー、 $E_w$ は入射波エネルギーである。次に今回効率計算に用いる電気エネルギー $E_e$ と、入射波エネルギー $E_w$ の算出方法について説明する。圧電素子1枚の間口の幅を $B$ とし、圧電素子5枚分の余裕を持って、波の進行方向に出来る限り密に敷き詰めた場合を想定する。その時の素子1枚に要する奥行き長さを $t$ とすると、圧電素子1枚当りに入射する入射波エネルギー $E_w$ は単位面積当りの波の全エネルギー $E$ を用いて次式で求めることが出来る。

$$E_w = B \cdot t \cdot E \quad (2)$$

以下、この仮定を基に効率計算を行う。図10に示すように、圧電フィルムの幅は $19 \times 10^{-3}$ [m]、5枚分の厚さは $0.14 \times 10^{-3}$ [m]である。また、圧電セラミックの幅は $9 \times 10^{-3}$ [m]、5枚分の厚さは $1.75 \times 10^{-3}$ [m]である。従って、圧電フィルムと圧電セラミック各1枚の専有面積 $S_f$ 、 $S_c$ はそれぞれ $2.66 \times 10^{-6}$ 、 $1.575 \times 10^{-5}$ [ $\text{m}^2$ ]となる。よって $a=1$ [mm]として $S_f$ と $S_c$ に作用する波のエネルギー $E_{wf}$ と $E_{wc}$ を計算するとそれぞれ $E_{wf}=0.026$ 、 $E_{wc}=0.154$  [ $\mu\text{J}$ ]となる。ただし $\rho:998.1$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] (20°Cの静水)、 $g:9.80665$ [ $\text{m}/\text{s}^2$ ]として計算している。



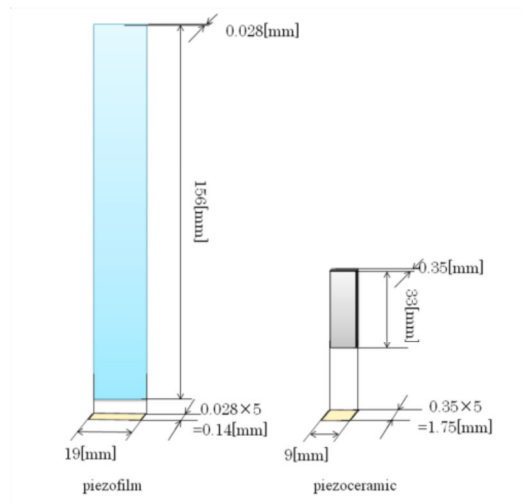


Figure 10 Occupied space by piezo-elements

ここで、圧電素子に変換した電気エネルギーを算出する。ただし、Case2 のバイモルフモジュールはその構造上、圧電セラミックを2枚使用しているため、電力はその半分の値とする。例えば、Case2 の波周期 0.40[s]の時の電力 0.016[ $\mu$ W]は、圧電セラミック1枚に換算すると 0.008[ $\mu$ W]であり、これに波周期 0.40[s]を乗じると、電気エネルギー $3.20 \times 10^{-3}$ [ $\mu$ J]が得られ、Case2 の波周期 0.40[s]の時の総合効率 Ef は、2.1 [%]となる。

上記の例に従い、Case1, Case2 の各波周期における効率を算出し、プロットしたものを図 11 に示す。

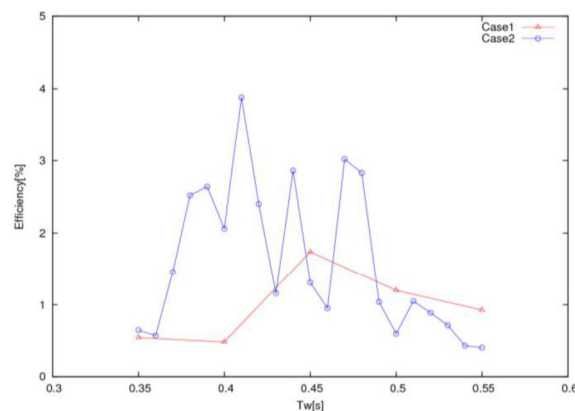


Figure 11 Total conversion efficiency (Case1 and Case2)

本図を見ても分かる様に、発電効率について Case1 と Case2 での大きな差がない。これは圧電フィルムが極端に薄く、単位面積当りで Case2 よりも大量の圧電素子を搭載出来ると仮定しているためである。ここで、Case1 の発電効率は最大で 1.7[%]と比較的小さい値となっているが、Case2 の発電効率は最大で 3.9[%]と 2 倍超の発電効率となっている。

また、Case1 の値は全体的に一定であり、波周期が長くなるに連れて発電効率が相対的に大きくなってきている。これは Case1 の方式が、浮体の運動エネルギーを効率よく利用出来ていることによるものと考えられる。しかし、Case1 の方式において圧電素子に与える振動の周期はそのシステム的特性上、波周期と同程度のものしか与えられないことから、一枚当りの効率向上の手段としては、素子自身の圧電性能の向上と良く揺れる浮体を開発する事が挙げられる。

一方、Case2 の波周期 Tw が 0.50[s]以降の発電効率は全体的に Case1 のものより小さくなっているが、これは波周期の長さに関係していると考えられる。つまり、波周期が長くなるに従い、振り子が圧電素子に

衝撃を与えるタイミングも長くなってしまふことから、放電のペースが早くなり、十分な蓄電が難しくなってしまう為と考えられる。

以上の結果から、一部の波周期において振り子を用いた発電方式の有効性が確認出来た。ただし、長い周期においては、振り子が1回振れる間に、複数回圧電素子へ衝撃を与えられるシステムを考える事で改善することが出来ると考える。

#### 4. 結 語

本研究では、圧電素子を利用した浮体式波力発電システムに振り子システムを導入し、発電効率の向上を試みた。そこで、「比較的柔軟な圧電素子を用いた、浮体の動揺を起因とし発電する方式」と、「比較的硬く、固有振動数の高い圧電セラミックに振り子を用いて機械的衝撃エネルギーを印加し発電する方式」とを比較するため、実際に水槽実験を行い、結果を比較した。その結果、以下のことを確認することが出来た。

- ・振り子を用いた発電システムの有効性を、実験により確認できた。
- ・実際に蓄電を行い、LEDを発光させることで、圧電素子によって生じた電力を利用する事ができる可能性のあることを示した。
- ・発電により浮体の運動にどのような影響を与えているかを確認できた。

今後の課題としては、更なる発電効率の向上の為、波エネルギーを効率よく運動エネルギーに変換できる浮体形状の開発、振り子に浮体の運動エネルギーを十分に吸収させた上で圧電素子に衝撃を印加し、発電できるシステムの開発、また、振り子が1回振動する間に、圧電素子に複数回の衝撃を与えられるシステムの開発等が挙げられる。

#### 文 献

- 1) 藤本大道, 村井基彦, 藤田修: 圧電素子を用いた波力発電に関する小型水槽実験, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第9E号, pp. 191-194, 2009
- 2) 中村僖良: 圧電材料の高性能化と先端技術, サイエンス&テクノロジー, 2007
- 3) 圧電セラミック テクニカル・ハンドブック, 株式会社富士セラミックス
- 4) 楠本慶二: 圧電セラミックス, 強誘電体読本, <http://www.geocities.jp/kusumotokeiji/yougo.htm>, 2011
- 5) 大熊康弘: はじめての電気回路, 技術評論社, 2009
- 6) 日本造船学会 海洋工学委員会性能部会: 実践 浮体の流体力学, 成山堂書店 2003
- 7) 磯崎一郎・鈴木靖: 波浪の解析と予報, 東海大学出版会, 1999