

# 振動水中型波力発電の高効率化に向けた研究

玉川学園高等部 坂下 万優架

指導者 矢崎 貴紀

## 研究背景

2011年3月11日に東日本大震災の津波による福島第一原発の原発事故をきっかけに、原子力発電のリスクと再生可能エネルギーの存在を知った。しかし、現状では再生可能エネルギーだけで日本のエネルギーを安定して供給することは難しい。これを機に再生可能エネルギーの発電効率の向上に貢献したいと考えるようになった。再生可能エネルギーには、太陽光発電、風力発電、地熱発電などいくつかの種類があるが、その中で私は面積効率がよく、実験室で装置のモデル作成が可能であると考えられる波力発電に焦点を置き研究を始めた。

## 現状分析と課題

波力発電におけるメリットは大きく分けて3つある。まず1つ目は、エネルギー源である波は枯渇の心配がないことである。2つ目に、波力はエネルギーの密度が太陽光などに比べて高く、効率がよいことがあげられる。1平方メートルの地表に入射する太陽光エネルギーが1kWなのに対し、1m幅の波の持つエネルギーは、沿岸部と沖で差はあるが、7kW~20kWほどだといわれている[1]。電気エネルギーへの変換効率も太陽光発電が10~20%なのに対し、波力発電は30%と高く

なっている[2]。3つ目に、波力発電は風力発電や太陽光発電のように天候や時間帯に作用されにくいため、比較的安定して電気を発電することが可能である。これらのメリットは、他の再生可能エネルギーにおいて課題とされていることであり、波力発電は他にはない魅力を持っているといえる。

一方で、懸念点の1つにコスト面が挙げられる。波力発電の装置は海上への設置となるため、陸上に設置する装置よりも時間や費用がかかり、送電するにも大幅なコストがかかる。また、海水による腐食、貝やフジツボの付着などのための定期的なメンテナンスや点検など、維持コストもかかるため、淡水の水力発電所と比較しても波力発電の維持コストは高くなる。2つ目の懸念点として、沖に発電装置を設置する場合の安全性が挙げられる。台風による大波や、津波などの災害の際でも安全面の確保が難しい可能性がある。3つ目の懸念点は漁業との兼ね合いである。波力発電所は、海流の流れがある程度活発な場所につくる方が良いが、それは魚が多くいる場所に建設するという事となる。そのため、波力発電所の建設には漁業関係者の理解や協力が必要となる。

波力発電とは波の運動エネルギーを利用

した発電方法であり、振動水柱型、可動物体型、超波型、ジャイロ式波力発電などが挙げられる[3]。この中で、振動水柱型波力発電に着目した。この発電方式は、中にある空気室と呼ばれる場所に海水が流れ込み、海面の上下運動によって空気が押し出され、その空気が風となり、タービンを回すことによって発電される仕組みである(図 1)。この発電方法に焦点を置いた理由は、タービンに直接波が当たらず、シンプルな構造であるため、故障や腐食に強く、また、空気による発電であることにより、台風などによる波浪に対しても比較的安全であるという特徴を持っているからである。このことから振動水中型波力発電の原理を参考にし、発電効率の上昇、装置の小型化、簡略化、維持コストダウンなどを目的とした研究を進めていくことに決めた。

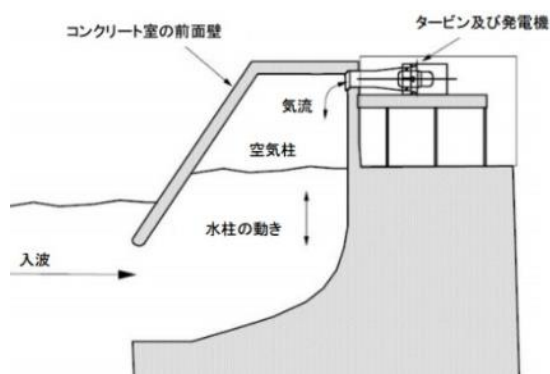


図 1 水柱振動型波力発電[3].

### 新たな発想内容

はじめに、振動水中型波力発電が、実験室レベルの発電装置として再現可能か検証することを目的とした。振動水柱型波力発電を、水槽、ペットボトル、漏斗、スタンド、まな

板、タービン、大型容器などを用いて再現した模型を作った(図 2)。しかし、水槽内で波を発生させる方法では、空気柱の圧力が小さく、タービンを回転させるほどの風量を発生させることができなかった。また、波が立つと同時に固定していた容器も上下に動いてしまい、波の力を存分に活かせていない。



図 2 作製した様々な波力発電モデル。どのタイプも発電に至らなかった。

そこで、実験室規模での模型装置では十分な波が得られないと考え、実験装置の空気室部分を直接水面に押し込む方法で実験を進めることにした。このような手法でも水面を動かすか実験装置を動かすかの違いであり、相対的に行っていることは変わらないと考え、実質波力を使えているとみなす。

まず、2L ペットボトル一つを用いて実験を行った。ペットボトルの底を切り取り、キャップに直径 4mm の空気孔となる穴をあけ、その上にタービンを近づけ、水面にペットボトルを押し込んだ。結果、タービンは回転し、

発電できることが確認された(図 3 上).

しかし、ペットボトルでは空気柱の体積が小さいため、より体積の大きい灰色の容器(空のごみ箱)に替え、4mm の空気孔を作った灰色の容器自体を押し込む方法で実験を行い、タービンの回転数の向上を期待した。しかし、空気柱の体積は増えたにもかかわらずタービンを回すほどの風速を生み出すことができなかった。発電するためにはペットボトルのように空気が 1 点に集中するような形状が適している可能性が考えられる。

そこで、流体シミュレーションソフト「flow square」を用いて考察を行った。図 3 のように赤いほど気体の速度が大きい。空気孔部分の気体の速度を比較すると、灰色の容器のような箱型に対し、ペットボトル型の空気孔部分は気体の速度が大きくなっていることが分かる(図 3)。すなわち、空気室の先端がペットボトル型のような空気孔に向かって徐々に細くなっていく形状になることで、空気孔に流れる気体の速度が大きくなると考えられる。

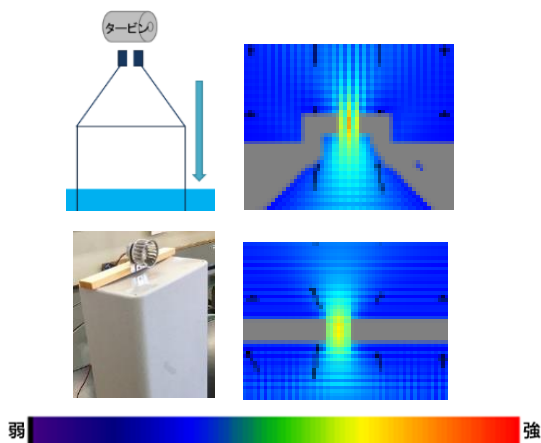


図 3 空気柱の形状の違いによる流体のシミュレーション.

ペットボトル型(上)箱型(下).

この結果から、容量が大きい灰色の容器にペットボトルを取り付けることで、双方のメリットを活かした実験を行う。灰色の容器にペットボトルの先端部分を取り付け、これまでと同じく水面に灰色の容器自体を押し込む方法で実験を行った(図 4)。

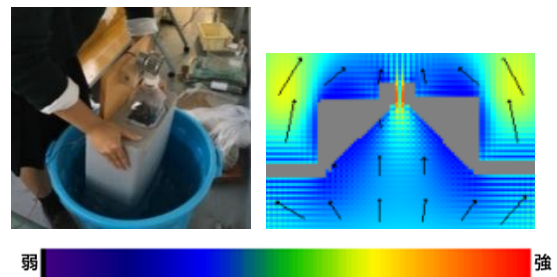


図 4 ペットボトル型と箱型を組み合わせたときの実験と流体シミュレーション.

### 新たな発想内容の評価結果

実験の結果、全体の発電時間は 7 秒間で約 0.98mJ の電力量を発電することができた。発電が可能となったのは、ペットボトルの先端の形状が空気の強い流れを作り出したことによるものであると考えられる。また、シミュレーションの結果から気体の速度が増すにつれ、空気孔側面で強い空気の流れがあることがわかる(図 5)。これはペットボトル形状により中心の空気よりも側面の空気が圧縮されたことによるものだと考えられる。

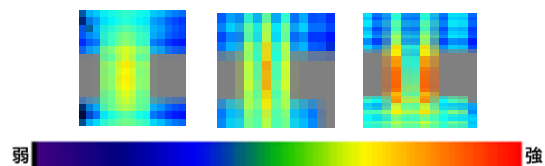


図 5 空気孔付近のシミュレーション. 勢いが増すにつれて

側面の空気の流れが速い。箱型(左), ペットボトル型(中央), ペットボトル型+箱型(右)。

ここまでの実験で「振動水中型波力発電が、実験室レベルの発電装置で再現が可能であるかの検証」が達成された。そこで、この装置を用いて研究を進めるにあたり、発電過程の状況の分析を行うことで、発電効率の改善、装置の小型化やコストダウンを目指すための方向性を定めるために、以下のような装置の評価実験を行った。

これまでは実験装置を人の手で押し込んでいたため、押し込む力が一定となるよう装置におもりを乗せ、自重で水に沈むよう改良した。2kg, 4kg, 6kg, 8kg, 10kgのおもりを乗せたときの発電過程における電流, 圧力, 加速度をそれぞれ計測した。空気柱内に入れた圧力センサー, 装置に取り付けた加速度センサー, タービンにつないだ電流計で, それぞれの時系列の値を測定し, また, 装置の動きも実験時にスマートフォンで撮影した。これらをまとめた結果, 発電が可能となった 101300 Pa 以上の圧力においては, 発電時の最大電流と空気室内の最大圧力が比例関係にあることが示唆される(図 7)。



図 6 評価実験の様子。おもりによって自重で水中に押し込

まれる。

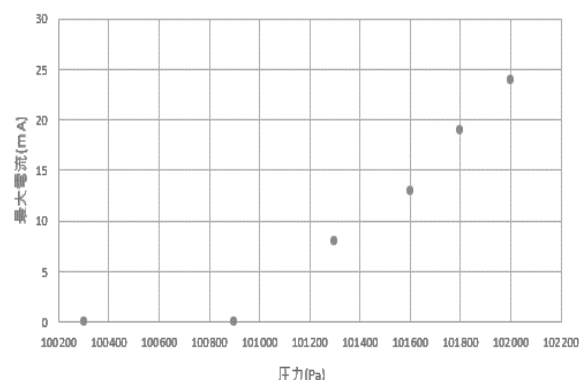


図 7 空気室内の圧力と発電時の最大電流の関係。比例関係と予想される。

なぜ比例関係を示したのか検証するため, モデルを立て物理法則から導いた。

$F$ : タービンにかかる力(発電中は時間によらず一定とする),  $M$ : タービンの質量,  $R$ : タービンの半径,  $\theta$ : タービンの回った角度,  $I$ : 慣性モーメント,  $N$ : 力のモーメント,  $d^2\theta/dt^2$ : 角加速度,  $\omega$ : 角速度,  $i$ : 電流,  $A$ : 力  $F$  が及ぼしている面積とし,

回転の運動方程式

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} = N$$

において,

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{d\omega}{dt}$$

より, 
$$I \frac{d\omega}{dt} = N \quad \dots \textcircled{1}$$

タービンを円盤と考えると円盤の慣性モーメントは

$$I = \frac{MR^2}{2}$$

より、①を代入して

$$\frac{MR^2 d\omega}{2 dt} = FR \quad .$$

すなわち、
$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{2}{MR} F$$

であり、この両辺を  $t$  で積分すると、

$$\int \frac{d\omega}{dt} dt = \int \frac{2}{MR} F dt$$

$$\omega = \frac{2}{MR} Ft + c \quad (c : \text{積分定数}).$$

初期条件が  $t=0$ ,  $\omega = 0$  であれば  $c=0$  となる。よって、 $\omega \propto F$  である。また、オームの法則  $i = V/R$  および、 $V_0$  は交流となるため  $V_0 \propto \omega$  より、 $i = V_0/R$  において  $i \propto \omega/R$  である。ここで、 $R$  は定数であるから  $i \propto \omega$  となり、 $\omega \propto F$  より、 $i \propto F$  となる。

一方で空気孔の圧力はパスカルの原理から、 $P = F/A$  より、 $i \propto P$  といえる。すなわち、回転の運動方程式と円盤の慣性モーメントから角速度とタービンにかかる力が比例関係にあるとわかり、オームの法則と電磁誘導による発電の原理から電流と角速度も比例関係になっていることが分かる。この二つの関係から、電流とタービンにかかる力が比例関係にあるとわかる。すなわち、圧力は力に比例していることから、電流と圧力はたしかに比例関係であることが確かめられた。

また、これらの計算過程からタービンの質量が小さいほど、力のかかる面積が大きいほ

ど最大電流値は大きくなることもわかった。

## まとめ

振動水中型波力発電が、実験室レベルの発電装置で再現が可能であるかの検証を目的に実験を行い、改良を重ね約 0.98mJ の発電に成功した。また、シミュレーションより、発電には空気室部分の先端の形状が関係していることがわかった。

評価実験において、発電過程における電流、圧力、加速度をそれぞれ計測した。これらの値の関係性を調べたところ最大電流と、そのときの空気室内の圧力が比例関係にあることが予想され、モデル化したところ確かに比例関係となっていることが示唆された。

今後も実験、解析を通して高効率化を達成できるか調べていく。そのために、電流と圧力の関係だけでなく、計測した他の物理量との関係性も模索していきたいと考えている。また、流体シミュレーションを用いた考察も、さらに様々な形状を試すなどして、より効率的な空気室の先端部分の形状を模索し、タービンを回す風力を大きくしていきたい。

## 参考文献

- [1] 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2版—再生可能エネルギー普及拡大にむけて克服すべき課題と処方箋—』森北出版、2014
- [2] 波力発電ドットコム <http://www.haryokuhatsuden.com/>(2019年9月閲覧)
- [3] Jahangir Khan and Gouri S. Bhuyan, OCEAN ENERGY: GLOBAL TECHNOLOGY DEVELOPMENT STATUS, IEA-OES Document No.: T0104.2009