# 弾性圧電デバイスを用いた波エネルギー利用技術の開発

## Advanced Technology of Electrical Energy Generated by Wave Using Flexible Piezoelectric Device

# 陸田秀実<sup>1</sup>·川上健太<sup>2</sup>·黒川剛幸<sup>3</sup>·土井康明<sup>4</sup>·田中義和<sup>5</sup>

### Hidemi MUTSUDA, Kenta KAWAKAMI, Takayuki KUROKAWA, Yasuaki DOI and Yoshikazu TANAKA

The ocean surface waves represent an important source in energy power. Renewable energy can be harvested from the flow using oscillated membranes composed of flexible piezoelectric device (PVDF). The deformation of PVDF caused by wave energy induces bending stresses which generate a voltage due to electrodes positioned on the surface of the materials. We designed several useful devices forced by the wave action at a characteristic wave height and frequency and showed some application for utilizing wave energy. We examined an advanced technology of electrical energy generated by wave force using flexible piezoelectric. We also performed a numerical simulation of fluid structure interaction to evaluate relations between the deformation of PVDF caused by wave force and electric power.

## 1. はじめに

四方を海に囲まれた我が国は、世界的にも波エネルギ ーの豊富な国の一つである.これまで、我が国では種々 のタイプの波力発電方式が提案・研究・開発され、実証 試験が行なわれてきた(例えば、マイティ・ホエールや 海明など).しかしながら、太陽光発電や風力発電に比べ て、発電効率、経済性、安全性、景観等の面で課題が多 く、本格的な導入には至っていない.一方、欧州諸国の 自然エネルギー利用・技術開発(European Ocean Energy Association, 2009)への関心・期待は高く、政府主導の 下、地球温暖化防止及び経済成長促進のための積極的な 施策がなされている.例えば、Wave Dragon、Pelamis, SeaGen、Stingray等が挙げられる.

近年,発電効率と機械的運動特性に優れた柔軟素材を 利用して,人工筋肉を用いたEPAM発電(千葉ら,2007), 圧電素材を用いた発電(William et al. 2006;Zurkinden et al. 2007;速水,2008)等,新しいタイプの発電技術が注目 を集めている.これらの発電技術は,現在主流のタービ ン型に比べて,発電コスト,建設コスト,設置条件,維 持管理コスト,異常波浪に対する破損等の面で,大幅な 改善が期待できるとされている.

このような背景から,著者ら(2009a, 2009b, 2009c)

1 正会員 博(	C) 広島大学 准教授 大学院工学研究科 社会
2	環境ンステム専攻 広島大学大学院 工学研究科 社会環境シ
3 学生会員	ステム専攻 広島大学大学院 工学研究科 社会環境シ
4 正会員 工博	ステム専攻 広島大学 教授 大学院工学研究科 社会環
5 博(	境システム専攻 青) 広島大学 助教 大学院工学研究科 社会環

は、波力、潮力、潮汐力、風力等の自然エネルギーを高 効率で回収することが可能な弾性圧電デバイスの考案・ 開発を行い、その基本特性を明らかにしてきた.本研究 では、特に、波浪外力によってしなやかに変形し、高効 率な電気エネルギー変換が見込まれる弾性圧電デバイス の開発を行い、従来型の波力発電方式とは全く異なるタ イプの波エネルギー利用技術の確立を目指す.

#### 2. 弾性圧電デバイスの構造と発電原理

圧電体(ここでは、高分子材料「ボリフッ化ビニリデン」、polyvinylidene fluoride; PVDF)は、応力を加えることにより分極(および電圧)が生じる誘電体のことである(図-1参照).逆に、電圧を負荷することにより応力および変形が生じる材料である。つまり、アクチュエータとして、電気エネルギーを機械エネルギーに変換して駆動する一方、機械エネルギーを電気エネルギーに変換できる。本研究では、揺らぎ等の微小な波・流れエネルギーをも回収できるように、厚さ40~110µmの超薄型圧電フィルム(呉羽化学工業(株))を使用する。この圧電フィルム(共羽化学工業(株))を使用する。この圧電フィルムは、超軽量、低コスト、柔軟な機械的運動特性、軽量素材との接合性、そして、どのような形にも加工が可能であるという長所を有している。



図-1 圧電体 (PVDF) によって生じる電荷

図-2に示すように、著者らは、シリコンシート(0.5mm), 高分子圧電フィルム(PVDF,厚さ110µm)および天然・ シリコンゴム(約5mm~10mm)からなる薄型積層タイ プの弾性圧電デバイスを考案・開発した.

このような薄型積層構造とした理由は、圧電フィルム を中立軸から遠ざけることで、同一圧電フィルム内の電 荷がキャンセリングされるのを防ぎ、大きな電圧を発生 させることが可能となるためである.この圧電フィルム の正極と負極の間を電気配線し、圧電フィルムに曲げ・ 圧縮・引張・せん断の応力が加わると、圧電フィルムの 表面に電荷が生じ、その時間的変化に比例する電流が流 れることになる.つまり、圧電効果を利用した発電デバ イスの一種であり、発電量は歪み量に基づく以下の圧電 方程式によって算定可能となる.

ここで、Qは圧電フィルム表面の電荷、Sは圧電材料の 接着面積、C<sub>0</sub>は圧電フィルムの特性および接着条件によ って決まる定数である。例えば、図-3に示すように、圧 電フィルムを弾性素材に接着し、弾性素材に応力が加わ ると、弾性素材の歪みが圧電フィルムに伝わり、圧電効 果によって、電気配線に電流が流れるという仕組みであ る. なお、外力が大きくても静的である場合は、歪み量 に時間変化が生じないため、電流は流れない.

著者ら(2009a, 2009b, 2009c)は、既往の研究におい て、電極配置、デバイスの長さ、厚さ、素材、積層構造 に関する種々の基礎的実験を行い、弾性圧電デバイスの



基本特性を明らかにしてきた.次章以降では,高効率な エネルギー変換機能を有する弾性圧電デバイスによる波 エネルギー回収効率の検証を行う.

#### 3. 規則波を利用した発電特性

著者らは、これまでに空気中および水中における加振 実験(2009a, 2009c)によって、弾性圧電デバイスの基本 的発電特性を検証してきた.それらの知見に基づいて、本 節では、規則波中での波エネルギー発電特性について検 証を行う.

図-4に示すように、2次元波浪水槽(長さ8m,幅0.2m, 高さ0.6m)中央付近に、波高計および弾性圧電デバイス (圧電フィルム間距離 $\delta$ =1~5mm,長さ28.5cm,幅4cm) を垂直に設置した(下端固定,上端自由).初期水深 35.5cmとし,規則波(波高1~8cm,周期1s)を作用させ, 波高と起電力の関係を調べるとともに、高速度ビデオカ メラ(125fps)およびPTV解析によって、弾性圧電デバイ スの変形量および局所歪み量の時間的変化を調べた.

図-5は、波の水面変動と弾性圧電デバイスの変形の様 子を示したものである.波位相に相応して、波のクレス ト通過時には波下側へ、トラフ通過時には波上側へ、弾 性圧電デバイスが変形していることが分かる.図-6は、こ の時、弾性圧電デバイスより発生した電圧V(起電力)の 時系列変化を示したものであり、図中の(a)~(d)は、



図-4 実験水槽および弾性圧電デバイスの設置状況



図-5 波の水面変動と弾性圧電デバイスの変形の様子

図-5に対応した時刻を示している.

図より,規則波の水粒子運動によって,弾性圧電デバ イスは弾性変形し,規則的な起電圧が発生していること が分かる.また,1/4周期程度の位相差が生じる理由は, デバイスの厚さや形状によって,流力弾性応答が異なり, その出力特性に違いが生じるためであると考えられる.

図-7は、入射波高と弾性圧電デバイスの起電力の関係 (全25ケース)を示したものであり、圧電フィルム間距離  $\delta$ が1mmと5mmの場合を同時に示している.また、図-8 は入射波高と電力換算値mWの関係を示したものである. この電力はA/D変換機の内部抵抗を考慮し換算したもの である.図より、波高が大きいほど、また圧電フィルム 間距離 $\delta$ が大きいほど発電量が大きくなることが分かる. 特に、圧電フィルム間距離は電力量を大幅に向上させる ものであり、弾性圧電デバイスの重要なパラメータと考 えられる.

図-9は,規則波中において弾性変形する圧電デバイス に白いマーキングポイントを14点記し(上図),高速ビデ オカメラ撮影を行った後,そのビデオ画像をPTV解析(左



time[s]

図-6 弾性圧電デバイスより発生した電圧の時系列変化(水 面変動も併せて表示)



Wave height [mm]

図-7 入射波高と弾性圧電デバイスによる起電力の関係(各 プロットは3回試行の平均値)

下図)することで、全マーキングポイントの軌跡を求めたものである(右下図).この軌跡から、曲率に相当する局所的な歪み $\varepsilon_i=d^2x_i/dy_i^2$ を求め、下式から局所的に発生する電力 $V_i$ を推定し、弾性圧電デバイスによる全起電力Vを算定した.

$$V_{i} = C_{1} \times \frac{d}{dt} \left[ \int (\varepsilon_{i}) dS_{i} \right] \dots (2)$$
$$V = \sum_{i=1}^{n} V_{i} \dots (3)$$

ここで, *dS*<sub>i</sub>はデバイスの微小部分の面積, *C*<sub>1</sub>は圧電フィルムの特性および接着条件によって決まる定数, *n*は画像解析に用いた総接点数である.



#### Wave height [mm]

図-8 入射波高と電力換算値(mW)の関係(各プロットは3 回試行の平均値)



図-9 規則波中における弾性圧電デバイスの変形(上図)お よびPTV解析結果(下図)



図-10 PTV画像解析と弾性圧電デバイスによる出力電圧の比較

図-10は、前述のPTV解析から求めた起電力と弾性圧電 デバイスの出力電圧の時系列変化を比較検証したもので ある.図より、両者は非常に良く一致していることが分 かる.このことから、本研究で行なったPTV解析法は、弾 性圧電デバイスの内部ひずみや変形を推定・算出する上 で非常に有効であり、今後の弾性圧電デバイスの開発支 援ツールの一つになり得ることが分かった.また、波浪 外力や衝撃圧の計測のみならず、構造体の内部歪み量を 計測する歪みセンサーとしても使用できる可能性がある と言える(陸田ら,2009d).

#### 4. 砕波エネルギーを利用した発電特性

本節では、潜堤によって強制砕波する際に生じる渦・ 流れエネルギーを利用した発電特性の検証を行う.実験 条件は、一様水深36.5cm、入射波高8cm、波周期1sとし、 潜堤(天端高30cm、天端幅39cm天端水深6.5cm)によっ て強制的に砕波現象を発生させる.弾性圧電デバイス(圧 電フィルム間距離 $\delta$ =5mm、長さ28.5cm,幅4cm)は、潜 堤の波上側(Case 1)及び波下側(Case 2)に5cm離れた 場所に下端を固定し、直立に設置した.また、同様の弾 性圧電デバイスを、潜堤の波上上端部に水平に片持支持 (支持点:没水深6.5cm、波上側上端部より約5cm)した場 合の実験(Case 3)も行った.なお、比較対象として、潜 堤なしの場合についても実験(Case 4)を行った.

図-11は,潜堤周辺の渦・流れ・砕波によって弾性圧電 デバイスが変形する様子を示したものである.図より, Case 1の場合,砕波前であるが,天端上の水平流れによ って波下側に弾性圧電デバイスが大きく変形しているこ とが分かる.また,Case 2の場合,砕波に伴う連行気泡 と水平渦によって波下側に弾性圧電デバイスが大きく変 形していることが分かる.さらに,Case 3の場合,砕波 前であるが,波動運動によって弾性圧電デバイスの自由 端が上下に大きく変形していることが分かる.Case 4の



Wave Water surface Piezoelectric device

#### (d) Case 4

図-11 潜堤周辺の渦・流れ・砕波によって弾性圧電デバイス が変形する様子

場合,弾性圧電デバイスは没水と冠出を繰り返しながら 大きく変形していることが分かる.

図-12は、Case 1~Case 4において弾性圧電デバイスか ら出力された起電力の時間的変化である.デバイス設置 位置における渦・流れ・砕波現象に応じて特徴的な起電 力波形となっている.これらのことから、いずれの流体 場であってもデバイスは柔軟に変形し、波エネルギーを 電気エネルギーに変化することが可能であることが分か る.これらの起電力波形を積分し平均電力値(mW)に換 算すると、Case 1の場合 0.0578mW、Case 2の場合 0.0394mW、Case 3の場合 0.0589mW、Case 4の場合 0.0557mWであった.なお、本デバイスのサイズであれば、 1波長当たり50~100個程度は設置可能である。この場合、 波の理論エネルギーに対して14~27%程度の発電効率(1 個当たり約0.27%)と推定される.

### 5. 結論

本研究では,新しい波エネルギーの利用技術を開発す ることを目的として,しなやかに変形する弾性圧電デバ



図-12 弾性圧電デバイスから出力された起電力の時系列変化

イスを独自開発し、その起電力特性を明らかにした.ま た、このデバイスを用いて、規則波および砕波によって 発生する渦・流れ・波エネルギーを電気エネルギーに変 換することに成功し、その有用性を確認した.さらに、本 研究で用いたPTV 画像解析法は、本発電デバイスの開発 支援ツールと成り得ることを示した.今後、デバイスの 厚さや長さ、素材、形状、構造形式を変更した実験を行 い、さらに高効率な弾性圧電デバイスの開発を行う予定 である.なお、本研究で開発された弾性圧電デバイスは、 その柔軟な特性から、波のみならず、流れ・振動力・引 張力・圧縮力等の外力や衝撃力によっても発電可能であ るため、波エネルギー利用の範囲は広範に及ぶものと期 待される.

謝辞:本研究は科学研究費補助金(課題番号20760330) の助成を受けた.ここに記して謝意を表する.

#### 参考文献

川上健太・陸田秀実・田中義和・松村啓太朗(2009a) :弾 性圧電デバイスを用いた流れエネルギー利用技術,第21 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム論文集, pp.641-646.

- 川上健太・陸田秀実・黒川剛幸(2009b):弾性圧電デバイス を用いた流力振動発電技術,第19回環境工学総合シンポ ジウム論文集, pp.374-377.
- 千葉正毅・R. Perline, R.Kornbluh, H.Prahlad, S.Stanford, J.Eckerle (2007) : 電磁応答人工筋肉アクチュエータ (EPAM)を用いた発電, 日本エネルギー学会誌, Vol.86, pp.743-747.
- 速水浩平(2008):振動力発電のすべて、日本実業出版社.
- 松村啓太郎・田中義和・陸田秀実・川上健太・新宅英司 (2009c) :圧電フィルムを利用した柔軟発電デバイスに 関する基礎研究,第21回「電磁力関連のダイナミクス」 シンポジウム講演会論文集, pp.635-640.
- 陸田秀実・栗原健浩・黒川剛幸・川上健太・土井康明 (2009d) :Lagrange粒子付Euler型スキームによる流体 構造連成解析法の適用性,海岸工学論文集,第56巻,印 刷中.
- European Ocean Energy Association (2009) : http://www.euoea.com/
- William P. Robbins, I. Marusic, T. O. Novak (2006) : Windgenerated electrical energy using flexible piezoelectric materials, Proc. of International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE2006-14050.
- Zurkinden A.S., F. Campanile, L. Martinelli (2007) : Wave energy converter through piezoelectric polymers, Proc. of the COMSOL Users Conference.