

弾性圧電デバイスを用いた波浪発電に関する研究

Study on Wave Power Generator Using Flexible Piezoelectric Device

陸田秀実¹・川上健太²・平田真登³・土井康明⁴・田中義和⁵・柳原大輔⁶

Hidemi MUTSUDA, Kenta KAWAKAMI, Masato HIRATA, Yasuaki DOI
Yoshikazu TANAKA and Daisuke YANAGIHARA

We have developed a new wave power generator using flexible piezoelectric device (FPED) which is a hydro-electric ocean energy unit designed to convert renewable energy harnessed from ocean energy into usable electricity. In our previous works, the FPED consisting of piezo-electric polymer film (PVDF) is a way of harvesting electrical energy from the ocean power, e.g. tide, current, wave, breaking wave and vortex. The concept of this study is that existing coastal and ocean structures (i.e. a breakwater, submerged obstacle, reef in shallow water and submerged plate in deep water) are utilized as a wave power generator sticking with the FPED to make a safety and disaster prevention. We examined the usefulness and electric performance of the FPED deformed by waves in experiments.

1. 緒論

四方海に囲まれた我が国は、世界的にも波浪エネルギーの豊富な国の一つである。これまで、国内外において種々のタイプの波浪発電方式が提案・研究・開発され、地球温暖化対策の一つとして実験・実証試験が行われてきた（例えば、マイティホエール、海明、Pelamis, Anaconda, Oysterなど）。しかしながら、これらはいずれも発電施設を新たに設置するものであり、建造コスト・拡張性・メンテナンス費用、そして海洋環境への負荷などクリアすべき多くの問題を抱えている。

本研究は、新たな波浪発電施設の建造・設置を行わずに、既設の海岸・海洋構造物（例えば、防波堤・潜堤（リーフ）・没水平板など）を有効活用し、低コスト・低負荷型の新たな波浪発電装置の開発を目指している。

これまでに、著者らは、波力、潮力、潮汐力等の流れエネルギーを効率良く回収することが可能な弾性圧電デバイスFPED（Flexible Piezoelectric Device）の開発に成功するとともに、波浪エネルギーの約10～15%を電気エネルギーに変換し、蓄電することにも成功した（陸田ら（2009a）、川上ら（2009））。加えて、複合材料としての特徴を生かせば、海象・設置・発電条件に合

わせたカスタマイズが容易であるという特徴を有しており、種々の改良案・最適化がなされている（例えば、陸田ら（2010））。

そこで本研究では、既存の直立防波堤、潜堤（リーフ）・没水平板などの消波構造物に、上述の弾性圧電デバイスを貼り合わせた全く新しいタイプの波浪発電方式を提案・開発し、その発電性能を検証する。

2. シート/ニットタイプの弾性圧電デバイス

著者らが開発した弾性圧電デバイスFPEDは、シリコンシート（0.5mm）、高分子圧電フィルム（PVDF、厚さ110 μ m）からなる超薄型積層タイプ（全厚1～5mm）である（図-1参照）。このデバイスは、波浪外力によって柔軟に変形し、デバイス内部に分極（電圧）が生じ、電気エネルギーを生み出すことができる（陸田ら（2009b）、特願2009-265726）。

図-2は、PVDFを1枚組み込んだSingle Core Type、2枚組み込んだDual Core Type、4枚組み込んだQuad Core

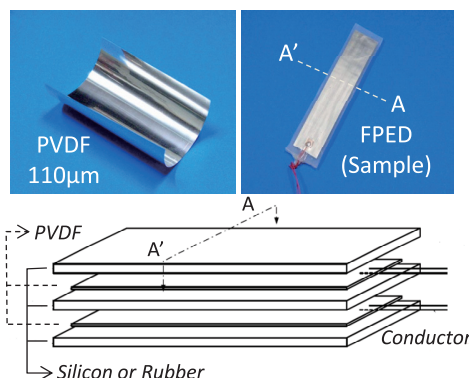


図-1 弾性圧電デバイスFPED（薄型積層タイプ）

1 正会員	博(工)	広島大学大学院 工学研究院 准教授 エネルギー・環境部門
2 学生会員		広島大学大学院 工学研究科 社会環境 システム専攻
3		広島大学大学院 工学研究科 輸送・環 境システム専攻
4 正会員	工博	広島大学大学院 工学研究院 教授 エ ネルギー・環境部門
5	博(工)	広島大学大学院 工学研究院 助教 機 械システム・応用力学部門
6	博(工)	愛媛大学大学院 理工学研究科 准教授 寄附講座

typeを示したものである。図に示すように、圧電フィルム間距離 δ は、本デバイスの最も重要なパラメータであり、発電量に大きな影響を及ぼす (Mutsuda et al. (2010), Tanaka et al. (2010))。例えば、図-3に示すように、1枚の圧電フィルム (Single Core type, PVDF間距離 δ がない場合に相当) でFPEDを製作し、起電力を調べると、Dual Core Typeのそれに比べて200分の1以下の起電力しか得られないことが分かる。つまり、デバイスの中心軸からPVDFを偏心させる (フィルム間距離 δ を大きくする) ことで、曲げ変形に関わる大きなせん断応力を電気エネルギーに変換することが可能になる。図-4は2枚のPVDFを組み込んだ場合のデバイスの電荷状態と回路設計の概念図を示す。このように、複数のPVDFを組み合わせた並列回路を構築することで、より大きな起電力を

生み出すことができる。

本研究は、既設の海岸・海洋構造物を有効活用した波浪発電装置の開発を目的としている。したがって、各種構造物の防災・安全機能を損なうことなく、発電機能という新しい付加価値を生み出すことを目標としている。そこで著者らは、図-5に示すように、シートタイプの発電デバイス (縦20cm×横20cm×厚1.5mm) と、短冊状 (縦20cm×横2cm×厚1.5mm) のデバイス9枚を十字に交差・編み込んだニットタイプの発電デバイスを新たに開発した。なお、積層はDual Core Typeとした (図-2b参

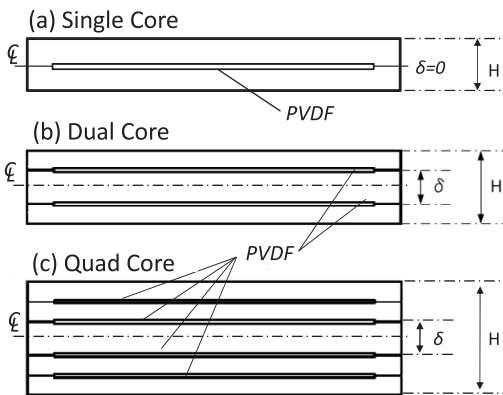
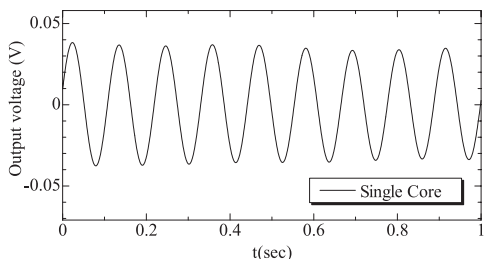
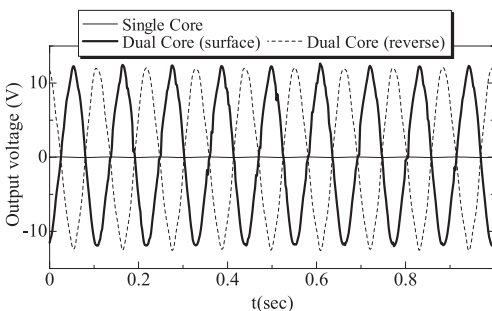


図-2 積層数の異なる弾性圧電デバイス



(a) Single Core type



(b) Dual Core type

図-3 Single CoreとDual Core typeによる起電力の比較

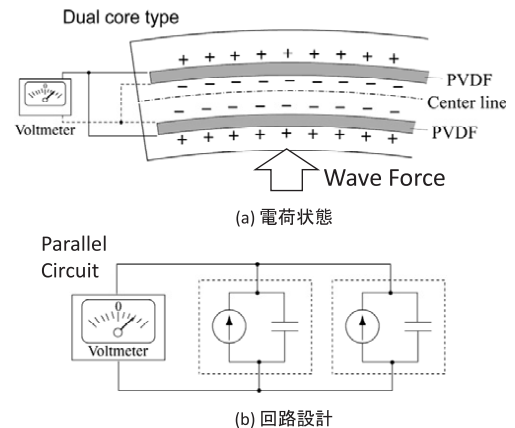
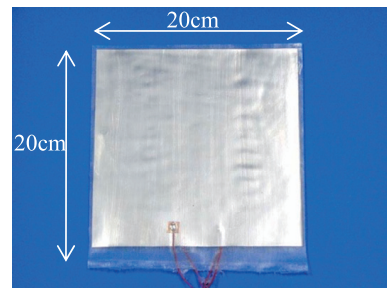
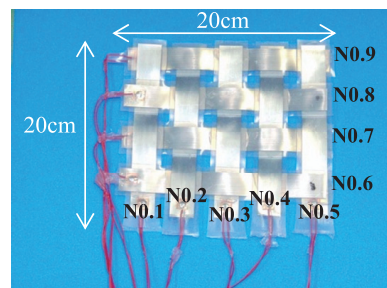


図-4 波浪エネルギーによって曲げ変形が生じた場合の弾性圧電デバイスFPEDの電荷状態と回路設計



(a) シートタイプ



(b) ニットタイプ

図-5 波浪発電に適した弾性圧電デバイスの試作品

照)。ここで、シートタイプはフラット面を有する構造物に適合する形状として、ニットタイプは複雑形状を有する構造物に適合するタイプとして考案したものである。比較対象のために、両タイプの表面積はほぼ同等とした。これらのデバイスの特徴は、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できるという点である。また、他の材料（例えば、鋼材、アルミ、スプリング、緩衝材など）との複合利用・融合性が高いことである。

3. 弾性圧電デバイスの基本性能試験

まず始めに、このデバイスの基本特性を把握するために、加振実験を行った。デバイスの一端を支持し、他端を自由端として、周期 $f=0.67\text{Hz}$ 、振幅 $H=50\sim 140\text{mm}$ で加振させた。図-6は、ヤング係数の異なる弾性体（シリコンと天然ゴム）について、変位・出力電圧の比較検証を調べたものである。加振振幅 H が増すにつれ、ほぼ比例的に最大変位 h （自由端）が増大し、出力電圧が増加する。また、同一加振条件であっても弾性素材によって

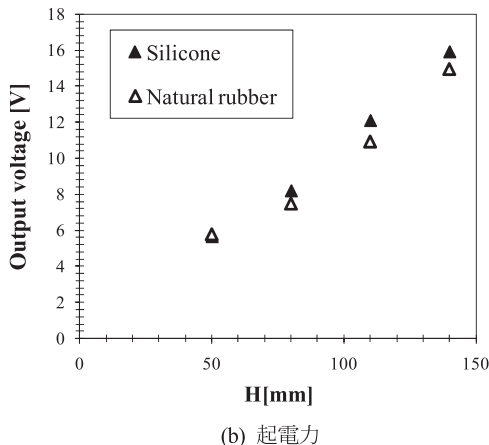
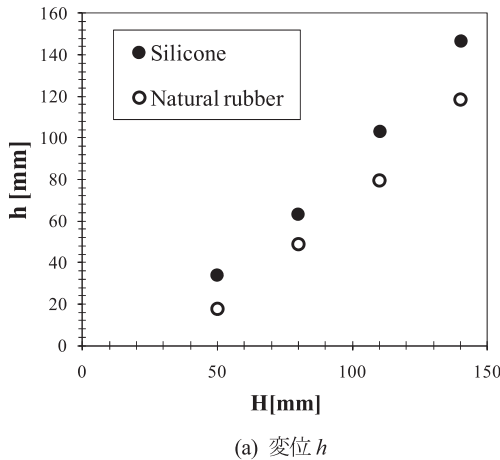


図-6 弾性素材の違いによる起電力の比較

出力電圧が異なり、シリコン素材が優位であることが分かる。図-7は、PVDF 間距離 δ (1mmと5mm)と出力電圧との関係を示したものである。なお、両者とも弾性素材としてシリコンを用いている。図より、フィルム間距離 δ が大きいほど、発電量が增大することが分かる。これは、PVDFを中立軸から遠ざけることで、せん断応力が増し、同一PVDF内の電荷が相殺されるのを防ぎ、大きな起電力を発生させることが可能になるためである。

4. 波浪発電の実験方法

ここでは、既設の代表的な海岸・海洋構造物として、直立防波堤、潜堤（リーフ）、没水平板などの消波構造物を取り上げ、これらに作用する波浪エネルギーを有効活用した波浪発電システムを考える。

実験は、図-8に示すように、広島大学所有の2次元波浪水槽（長さ8m、幅0.2m、高さ0.6m）で行った。規則波の条件は、波高15cm、波周期1secとし、一樣水深33cmとした。水槽の中央付近には、浅海域の波浪発電を想定した直立防波堤および潜堤（リーフ）を設置した場合と、深海域の波浪発電を想定した没水平板の場合を実験した。直立防波堤は、高さ40cm、幅30cmとし、波条件によって越波することもある。潜堤は、高さ30cm、幅78cm、天端水深3cmであり、Plunging型碎波が発生する条件となっている。また、深海域の消波装置として有効とされる没水平板は、幅20cm、没水深3cmとし、同様に

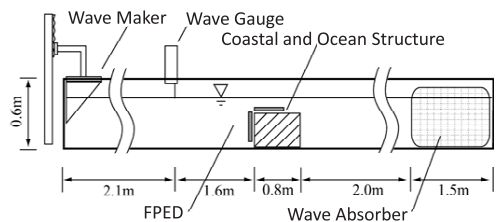
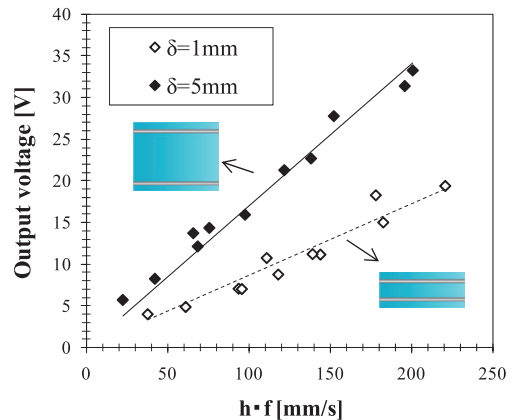


図-8 実験水槽の概略図

Plunging型碎波が発生する条件とした。ここでは、各種構造物に作用する波浪エネルギーが大きいと考えられる構造物表面に沿って弾性圧電デバイスを設置することとした。具体的には、直立防波堤の場合には波上前面部、潜堤の場合には碎波によるジェット着水点付近の天端上面とした。なお、没水平板の場合には本デバイス自体を消波構造物として利用することが可能となるため、両端支持のもとデバイスをそのまま水平設置した。

5. 波浪発電の実験結果

図-9～11は、各種構造物に、薄型シートタイプの弾性圧電デバイスFPED（太線）を設置した場合の波形変化・碎波現象のスナップショットである。直立防波堤の場合（図-9）は、重複波による静水圧がデバイス表面に繰り返し作用することで、波浪エネルギーを電気エネルギーに変換することになる。なお、本ケースでは越流現象が発生する波条件であるため、天端上面にも本デバイスを設置すると、さらにエネルギー変換効率が高くなるものと予想される。また、潜堤（リーフ）の場合（図-10）、潜堤上で碎波現象が発生し、本デバイスにジェット水塊が衝突している。この場合、衝撃碎波圧を電気エネルギーに変換することになる。もちろん、潜堤前面・後面・側面にも本デバイスを貼り合わせることは可能である。さらに、没水平板の場合（図-11）、本デバイス中央で碎波現象が発生し、碎波後の脈動的な流体運動がデバイス

上面・下面に作用している。このことから、本デバイスは微小な上下動を繰り返しながら電気エネルギーを生み出している。これらの図から、本デバイスは超薄型・軽量タイプであるため、いずれのタイプの海岸・海洋構造物に対しても、その防災・消波機能を損なうことはなく、発電体としての新たな付加価値を生み出していることが分かる。なお、ニットタイプであれば、捨石などの複雑な形状を有する構造物に対しても容易に適合可能であることを付記しておく。

図-12は、シートタイプの弾性圧電デバイスFPED（図-5a）によって得られた起電力の時系列変化の一例であり、下から順に、潜堤、防波堤、没水平板の場合を示している。図より、弾性圧電デバイスは、いずれの構造物においても顕著な起電力が発生しており、波浪発電装置としての機能を発揮していることが分かる。特に、構造物に作用する重複波圧、碎波圧、渦による振動圧のいずれも電気エネルギーに変換することが可能であることから、実用化・汎用化に際して有利と言える。図-13は、ニットタイプの弾性圧電デバイスFPED（図-5b）によって得られた起電力の時系列変化の一例である。なお、ニットタイプの場合、9枚の短冊状デバイス各々より起電力が得られるため、各デバイスで得られた起電力を表示している。

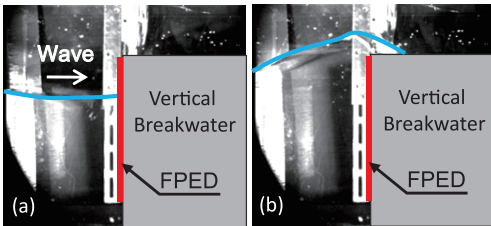


図-9 直立防波堤の波上前面部に貼り付けられた弾性圧電デバイスFPEDと波浪変形・越波の様子

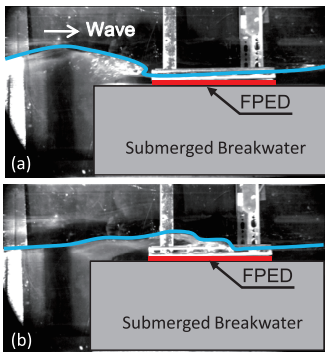


図-10 潜堤に貼り付けられた弾性圧電デバイスFPEDと碎波の様子

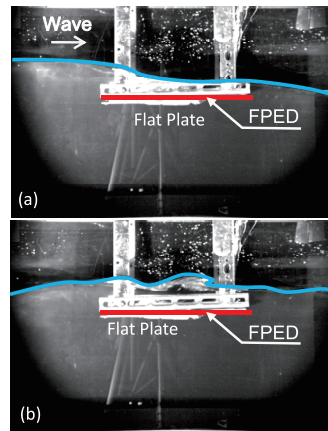


図-11 没水平板に貼り付けられた弾性圧電デバイスFPEDと波浪変形の様子

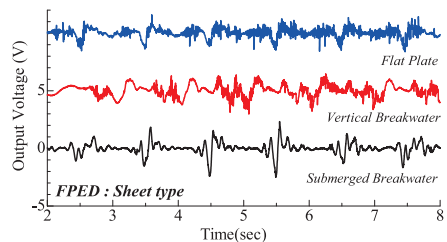


図-12 シートタイプによる起電力の時系列変化（下から順に潜堤、防波堤、没水平板の場合を示す）

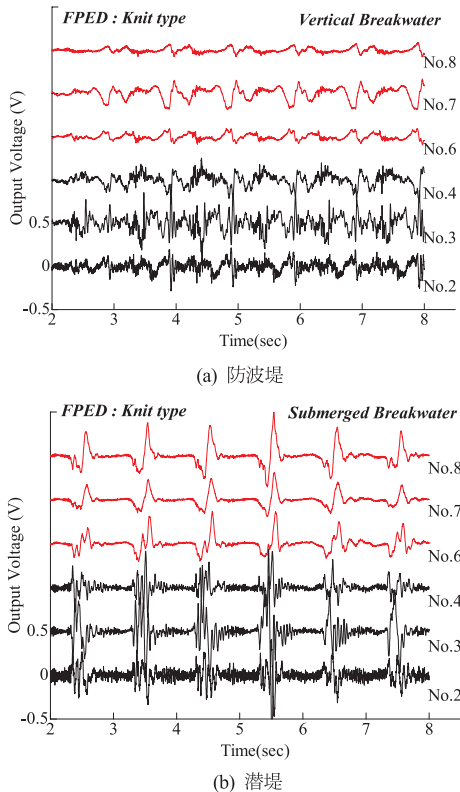


図-13 ニットタイプによる起電力の時系列変化

いずれの短冊状デバイスからも起電力が生じていることから、ニットタイプの有効性が確認できる。また、ニットタイプの場合、短冊状デバイス間の隙間を通り抜ける流れによって渦が形成され、微小な圧力変動を励起する。つまり、弾性圧電デバイスには、波自体の作用外力に加えて、渦作用による圧力振動が加わることで、より微小な流れエネルギーさえもトラップし、電気エネルギーに変換していると考えられる。

最後に、シートタイプとニットタイプの発電性能を比較検証する。図-14は、各デバイスから得られた起電力に基づき発電量を算出し、構造物ごとに比較したものである。今回の実験条件では、ニットタイプの没水平板の場合に一番発電量が高い結果となった。これはデバイスの上下面に繰り返し、波浪外力が作用するためである。また、各構造物によって、シートタイプとニットタイプの優位性に差が見られる。このことから、各々の海岸・海洋構造物に適合するタイプを選定・カスタマイズすることが必要であることが明らかとなった。

6. 結論

本研究では、既設の海岸・海洋構造物を有効活用し、低コスト・低負荷型の新たな波浪発電装置を開発するこ

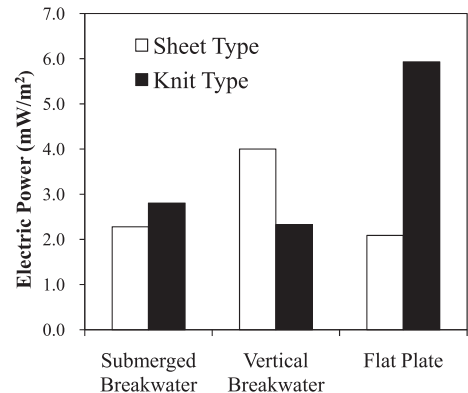


図-14 シートタイプとニットタイプによる発電量の比較

とを目的として、シートタイプとニットタイプの弾性圧電デバイスを開発した。本デバイスを各種構造物（防波堤・潜堤（リーフ）・没水平板など）に貼り合わせれば、静穏時の規則的な波エネルギーのみならず、碎波によるジェット水塊や渦運動によって発生した流れエネルギーも、電気エネルギーへと変換可能であることが分かった。特に、ニットタイプの没水平板の場合、波自体の作用外力に加えて、デバイス間の隙間を通り抜ける渦エネルギーによって圧力振動が誘起され、より微小な流れエネルギーをもトラップし、電気エネルギーに変換できる。

謝辞：本研究は、NEDO技術開発機構「洋上風力発電等技術研究開発」及びマツダ財団による研究助成を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 川上健太・陸田秀実・黒川剛幸（2009）：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講演会，pp. 374-377.
- 陸田秀実・川上健太・黒川剛幸・土井康明・田中義和（2009a）：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，土木学会論文集，B2，Vol. 65，No. 1，pp. 1296-1300.
- 陸田秀実・田中義和・川上健太・松村啓太郎（2009b）：海洋エネルギー発電デバイス及びこれを用いた蓄電装置，特願2009-265726.
- 陸田秀実・平田真登・川上健太・土井康明・田中義和・柳原大輔（2010）：弾性圧電デバイスを用いた海洋エネルギー利用技術に関する研究，土木学会論文集，B2，Vol. 66，No. 1，印刷中.
- Mutsuda, H., K. Kawakami, T. Kurokawa, Y. Doi, Y. Tanaka (2010): A Technology of Electrical Energy Generated from Ocean Power Using Flexible Piezoelectric Device, Proc. of the ASME 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OAE2010-20103, CD-ROM.
- Tanaka, Y., K. Matsumura, N. Inoue and H. Mutsuda (2010): Study on flexible power generation device using piezoelectric film, Proc. of 16th International Conference on Electrical Engineering, CD-ROM.