垂下式弾性浮体ユニット型海洋エネルギー発電方式の開発

学生会員 渡 邊 隆 太* 正会員 陸 田 秀 実*
 学生会員 平 田 真 登* 正会員 土 井 康 明*
 正会員 田 中 義 和* 正会員 柳 原 大 輔**

Ocean Power Generator of Elastic Floating Unit with Hanging Structures Using Flexible Piezoelectric Device

by Ryuta Watanabe, *Student Member* Hidemi Mutsuda, *Member*
 Masato Hirata, *Student Member* Yasuaki Doi, *Member*
 Yoshikazu Tanaka, *Member* Daisuke Yanagihara, *Member*

Summary

The purpose of this study is to improve the FPED (Flexible Piezoelectric Device) which we have developed and also to propose an elastic floating unit with a hanging structure using the FPED (EFHAS). 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. In this study, we performed vibration tests of the FPED with a bluff body having a specific gravity in water. We found that the electric power of the FPED with the bluff body is larger than that of the FPED without it. To investigate a mooring type with the FPED generating a maximum electric power, we also compared a floating type with a submerged type. We revealed that the floating type is better than the submerged one. We have developed the EFHAS with the improved FPED to obtain the electric power from ocean energy.

1. 緒 言

近年、地球環境問題の観点から、低炭素社会の実現に向けた世界的な取り組みが活発化している。例えば、我が国では、温室効果ガス排出量を削減するために、エネルギー基本計画（第2次改定、2010）が打ち出され、2030年までに電源構成に占めるゼロ・エミッション電源の比率を大幅に引き上げる目標が掲げられた。また、*Cool Earth* エネルギー革新技術計画（2010）では、新たな原理の活用、既存材料の新活用を含めた材料の革新要素技術の確立が謳われている。

約447万km²（世界第6位）の排他的経済水域を有する海洋大国日本では、とりわけ、海洋エネルギー利用技術の開発と積極的な導入が必要であり、その需要は近年益々高まって

いる。事実、海洋基本計画の施行や海洋基本法の制定等の社会環境の変革も相まって、各種海洋再生可能エネルギー（波力、洋上風力、潮流、海流など）の実用化に向けた研究開発¹⁾³⁾が盛んになりつつあり、国内外において種々のタイプの海洋エネルギー発電方式が提案・研究・開発されてきた（例えば、マイティホエール、海明、Pelamis、Anaconda、Wave Dragon、Oyster、SeaGen、ダリウス式水車⁴⁾、ジャイロ式⁵⁾など）。一方、近年では、発電効率と機械的運動特性に優れた柔軟素材を用いて、人工筋肉によるEPAM発電⁶⁾、圧電素材を利用した自然エネルギー発電⁷⁾¹⁰⁾など、新しいタイプのエネルギー・ハーベスティング技術が注目を集めている。

このような背景から、著者らは全ての海洋エネルギー（波浪、潮流・潮汐、砕波、潮汐変動など）を有効利用する弾性圧電デバイスFPED (Flexible Piezoelectric Device) を開発してきた^{11),12)}。このFPEDは、各種海洋エネルギー（波浪、潮流、渦、砕波など）を、柔軟変形（曲げ・せん断・引張・圧縮）によって運動エネルギーに変換し、FPEDの変形歪み速度に比例した電気エネルギーを生み出すデバイスであり、蓄電化にも成功している。これまでに、波浪・流れ場による発電の

* 広島大学大学院工学研究科

** 愛媛大学大学院理工学研究科

基本性能および形状寸法, 弾性圧電デバイス構造に関する研究, さらに, 防波堤やリーフ等の既設海岸構造物に本デバイスを張り合わせた発電方法に関する研究を行い, その有用性が確認されてきた¹³⁾⁻¹⁵⁾.

本研究では, 弾性圧電デバイス FPED のさらなる発電性能向上に向けた検討を行うと共に, FPED を複数枚組み合わせた垂下式弾性浮体ユニット型海洋エネルギー発電 (EFHAS: Elastic Floating Unit with Hanging Structures) の構造様式を新たに提案し, その概念設計および発電性能について検証する.

2. 弾性圧電デバイス

2.1 発電原理と特徴

著者らが開発¹¹⁾した弾性圧電デバイス FPED (Flexible Piezoelectric Device) の構造用式を Fig.1 に示す. この FPED は弾性素材 (ゴム, 機能性樹脂, シリコンなど) と一対の高分子圧電フィルム (PVDF: polyvinylidene fluoride: PVDF, 厚さ 40~110 μm 程度) から構成されている. 図は, 厚さ方向に中心軸を挟んで 2 枚の PVDF が配置された Dual Core Type のものである. このように, 中心軸を挟み一対の PVDF を何層も積層することが可能であるため, 発電エネルギー密度を高めることが出来る.

このデバイスに波浪, 流れ, 渦, 砕波などの海洋エネルギーが作用すると柔軟に変形し, 弾性圧電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という発電原理である. つまり, 弾性圧電デバイスの歪みエネルギーを圧電効果により電気エネルギーに変換し, 起電力を生じるというものである.

Fig.1 : Laminated structure of Flexible Piezoelectric Device (Dual Core type)

PVDF に加わる応力 $\mathbf{T}$ と電界 $\mathbf{E}$, 生じた電束密度 $\mathbf{D}$, 歪 $\mathbf{S}$ との関係は圧電方程式で表現できる.

$$\mathbf{S} = s^E \mathbf{T} + \mathbf{d}^t \mathbf{E} \quad (1)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{d} \mathbf{T} + \epsilon^T \mathbf{E}$$

ここで, s^E は $\mathbf{E} = 0$ のときのコンプライアンス, $\mathbf{d}$ は圧電歪み定数, ϵ^T は $\mathbf{T} = 0$ のときの誘電率, t は転置行列である.

また, Fig. 2(a) に示すように FPED に流体力が作用した際の応力状態を考える. FPED の幾何学的関係を考慮すると, 微小変形の場合, 中立軸から $\delta/2$ 離れた位置において, FPED の微小要素 i の歪 ϵ_i は,

$$\epsilon_i = \frac{\Delta dy_i}{dy_i} = \frac{\delta/2}{\rho_i} \quad (2)$$

ここで, ρ_i は微小要素 i における局所的な曲率半径で, δ は PVDF 間距離である. 藤本ら¹⁶⁾に倣い, 圧電方程式から式(2)を用いると, Fig.2(b) に示す FPED の微小要素 i の起電力 V_i は,

$$\begin{aligned} V_i &= R \cdot C_0 \cdot \frac{d}{dt} \int \epsilon_i dS_i \\ &= R \cdot C_0 \cdot \frac{d}{dt} \int \frac{\delta}{2} \cdot \frac{1}{\rho_i} dS_i \end{aligned} \quad (3)$$

ここで, R は電気抵抗で C_0 は圧電材料の特性・接着に関する定数, dS_i は FPED の微小要素 i の面積である. したがって, ある FPED の出力電圧 V は, 微小要素 i の起電力 V_i の総和として以下ようになる.

$$V = \sum_{i=1}^n V_i \quad (4)$$

ここで, n は微小要素の個数である.

式(3)によると, FPED の起電力量は, 歪み速度に比例し, さらに PVDF 間距離 δ にも比例する. つまり, 弾性圧電デバイスが大変形し, かつ, 振動数が高いほど, 発電性能は高くなる. また, PVDF を中立軸から遠ざけ, PVDF 間距離 δ を大きく設定すると, 大きな電圧を発生させることが可能となる.

Fig.2 : Geometric property of FPED and mechanism of electric power generation

ここでは、実験および数値シミュレーションによって、式(3)および式(4)より得られる理論的発電量を検証する。実験は、鉛直方向に片持ち指示された FPED (長さ 30cm×幅 4cm×厚 5mm) に規則波 (波高 10cm, 周期 1sec) を作用させ、高速ビデオカメラ (500fps) を用いて FPED を撮影し、その変形量を PTV 解析によって求め、式(3)から出力電圧 V を計算した。また、数値シミュレーションでは、著者らが開発した格子・粒子ハイブリッド CFD 計算法 (Lagrange 粒子付 Euler 型スキーム) を用いた¹⁷⁾。得られた FPED の内部歪み量から歪み速度を算出し、式(3)を用いて出力電力 P を計算した。

Fig.3 は、FPED より得られた出力電圧について比較検証したものである。図より、多少のノイズが見られるものの、実験および数値計算ともに実験結果に概ね一致していることから、式(3)および(4)に基づく発電量推定はある程度可能であることが分かる。今後、発電効率の向上に向けたデバイスの構造様式の改良および PVDF の最適配置を検討する上で、PTV 解析および本計算ツールは有用と考えられる。

Fig.3 : Comparison of time history of output voltage generated by FPED.

2.2 積層数による発電性能の向上

実機スケールで発電効率の高い FPED を考えた場合、弾性素材と PVDF の Multi-layer 方式 (PVDF 積層数 $N=4\sim 10$ 層以上) を導入することになる。この Multi-layer 方式による PVDF 面積の増加や PVDF 間距離 δ の増加は、発電性能の向上に大きく寄与することが期待できる。

本節では、FPED の発電性能の向上を目的として、PVDF の積層数 N が FPED の発電性能に与える影響を検証する。試験体となる FPED のサイズは長さ 200mm×幅 60mm×厚 6.2~13.2mm であり、PVDF 積層数を $N=2, 4, 6, 8, 10$ とした。また、それぞれの変形量を一定とした加振実験を行うために、加振方法は FPED の一方を完全固定、もう片方を加振機に固定し、一定の振幅 1mm~10mm 間で 12 通り、周波数 1sec で加振した。Fig. 4 は積層数 N と平均発電量の関係を示したものである。なお、平均発電量 W は起電力 V と計測

機の内部抵抗 R によって換算したものである。いずれの試験体も変形振幅が増すにつれて、平均電力量は増加している。また、 N の増加に伴って、平均発電量は急激に増加し、 $N=10$ の場合、 $N=2$ のそれと比較して、最大で 400 倍以上 (加振振幅 10mm の場合) になることが分かった。これは、積層数の増加に伴って、FPED の中心軸より外側に配置された PVDF に大きなせん断力・引っ張り歪が作用したためである。なお、全ての PVDF は並列接続で配線し、発電量のさらなる向上を図っている。

Fig.4 : Relationship between vibrate amplitude and averaged electric power.

2.3 付加物による発電性能の向上

ここでは、比重の異なる付加物を弾性圧電デバイスに装着し、弾性圧電デバイスと付加物の水中運動の位相をずらし、結果として、弾性圧電デバイス変形を促進させ、発電量を増加させる試験を行った。

Fig.5 に示すように、FPED 端部に付加物として、比重の異なる立方体 (比重 0.8~1.2 間で 5 通り) を装着し、水中において、弾性圧電デバイスの片持ち加振試験を行った。ここでは、波高波長比 $H/\lambda = 0.019\sim 0.077$ を想定し、加振振幅 19~77mm, 加振周期 0.8sec とした。なお、自由表面影響を避けるため、FPED の設置水深を可能な限り深くした。

Fig.5 : Experimental setup for vibration test of cantilever with a bluff body.

試験体となるFPEDのサイズは長さ340mm×幅100mm×厚5mmである。また、立方体付加物の1辺は100mmとした。Fig. 6は $H/\lambda = 0.077$ における発電量の増加率(付加物なしの場合で基準化)の一例を表わしている。図より、付加物の比重が1より遠ざかるほど、発電量の増加率は高くなるのが分かる。特に、比重1.0未満において、発電量の増加率は著しく、比重0.8の場合において最大50%程度の増加が期待できる。また、比重1の場合であっても、付加物を装着すれば、10%程度の発電量の増加が見込まれることが分かる。なお、他の H/λ に対しても同様の傾向を示したことを断わっておく。

Fig.6 : Relationship between increasing rate of electric power and specific gravity of bluff body.

3. 垂下式弾性浮体ユニット型海洋エネルギー発電方式

3.1 基本コンセプトと構造様式

前章において、弾性圧電デバイスFPEDの発電原理とその特徴を示してきた。本デバイスの出力はPVDF面積に比例することから、実海域を想定した場合、複数のデバイスを組み合わせて海洋エネルギーを効率的に回収する構造様式の提案が必要となる。

現在、著者らは、Fig.7に示すような垂下式弾性浮体ユニット型海洋エネルギー発電装置EFHASを考案¹²⁾している。なお、本発電装置は、対象とする海域の海象条件や要求される発電性能にあわせて実機スケールを決定することになる。このEFHASは浮体部(Floating Unit)と垂下部(Hanging Unit)の2つの構造体から成っている。浮体部とは、両端が浮力体に連結されたFPEDを図のようにトライアングルに組み合わせた構造体である。この浮体部のFPEDが、波浪・碎波等の海面変動に伴う運動エネルギーを吸収し発電を行う。一方、垂下部とは、6本のFPED(水平方向3本、垂直方向3本)を連結し、これをさらに水深方向に複数ジョイントした構造

体である。垂下部は浮体部の動揺運動に追従して運動するようにジョイントされているため、水平FPEDによって波浪エネルギーを吸収するとともに、垂直FPEDによって潮流・潮汐・渦に伴う流れエネルギーも吸収する。つまり、海洋の様々な力学的エネルギーを弾性圧電デバイスで吸収し、総発電量を稼ぐという発電ユニットである。その意味において、特定の外力条件に特化した従来型海洋エネルギー発電方式(例えば、波力発電、潮流発電、潮汐発電)とは全く異なるタイプの発電方式と言える。この発電方式であれば今まで回収が困難であった微小な流れエネルギーをも利用できる可能性がある。

このようにEFHASは、複数のFPEDによって発電する方式であるが、それらの出力は一般に電圧と位相がバラバラとなる。そこで、各FPEDを整流回路につなげ、それらを並列に接続することで、平滑化された出力電圧を得ることができる。例えば、実用化に際しては、この平滑化された出力で、蓄電媒体に電気エネルギーを蓄積することも考えられる。

また、Fig.7の1ユニットを複数連結すれば大規模化を図ることが可能であるため、発電規模、海域条件に合わせたカスタマイズが可能である。例えば、Fig.8に示すように、今後需要が見込まれる洋上風力発電施設との併用を考えた場合、EFHASは海洋エネルギー発電を行いつつ、その周辺海

Fig.7 : Schematic Illustration of Elastic Floating Unit with Hanging Structures, EFHAS.

Fig.8 : Image of ocean energy farm with offshore wind turbines.

域の波浪や流れエネルギーを軽減する役割も担っているため、洋上風力発電施設の安定性・発電性能を確保できる可能性も秘めている。

3.2 浮体部の発電特性

ここでは、Fig.9 に示すように EPHAS 浮体部の分割模型を制作し、波浪による浮体部の発電性能を水槽試験により検証する。浮体模型（高さ 115mm、幅 85mm）は Submerged Type と Floating Type の 2 種類を用いて検討を行った。図のように Submerged Type とは、浮力体の上方で FPED と連結した構造であり、FPED 自体は水面上に位置する。その一方で、Floating Type とは、浮力体の下方で FPED と連結した構造であり、FPED 自体は水面下に没水している。各浮体は水底から浮力体へ係留を行っており、緊張係留と緩係留の 2 ケースを行った。なお、両浮力体ともに PVDF 積層数 $N=2$ とした。波条件は波長 $\lambda = 1\text{m}$ 、波高 $H/\lambda = 0.077$ で固定した。試験体の FPED サイズはデバイス長 L と波長 λ の比 $L/\lambda = 0.1 \sim 0.5$ の 5 種類とした。ここで、 $L/\lambda > 0.5$ の場合、FPED には 2 次モードの変形が生じ、電荷のキャンセリングが発生し、発電量が低下する¹³⁾。そのため、前記条件で実験を行うこととした。その他、デバイス幅 100mm、厚さ 5mm は固定した。

Fig.10 は、Submerged Type（右図）と Floating Type（左図）の波浪中運動の様子である。この時の波向きは左から右であり、これに応じて両 Type とも Heave 運動によるデバイス変形（1 次モード）が顕著である。また、Floating Type の場合、

Fig.9 : Partitioned floating model of floating unit of EPHAS in experiment.

Fig.10 : Snapshots of floating unit motions in wave

Float 部の波上・波下側付近において砕波現象が発生しているが、Submerged Type の場合は顕著な確認はできない。

Fig.11 はデバイス長 L と平均発電量の関係を示したものである。この図から、発電性能が高い試験体は Floating Type であり、Submerged Type のそれの 3 倍程度になるケースもある。これは、Floating Type の場合、水面上の Float 部に波力が作用しピッチ運動が励起される。その結果、Float 下部に連結されたデバイスにかかる曲げモーメントが増大するとともに局部変形が発生し、発電量を増幅させたものと考えられる。以上、浮体部の構造様式としては Floating Type が望ましく、連結デバイス長は $L/\lambda = 0.3 \sim 0.4$ 程度が適切であることが明らかとなった。なお、発電量を最大とする浮体部の縦横比（最適サイズ等）の検証は今後の課題とする。

Fig.11 : Comparison of averaged electric power versus length of PVDF.

3.3 垂下部の発電特性

Fig.12 は、EPHAS 垂下部の概念図と制作模型である。海洋エネルギーを回収する為に、水平配置となるデバイス 3 本と垂直配置となるデバイス 3 本で構成された上段部（Upper）、中段部（Middle）、下段部（Lower）から成る垂下連タイプの構造様式となっており、それぞれチェーンで連結されている。1 本の弾性圧電デバイスのサイズは長さ 300mm×幅 90mm×厚 5mm であり、合計 18 本の FPED が組み合わされている。ここでは、この垂下部模型の水中強制動揺試験を行い、FPED の変形運動および発電特性を検証する。

Fig.12 : Illustration of hanging structure of EPHAS

試験は、動揺振幅 $a = 1.3 \sim 10.3 \text{ cm}$ 、同様周期 $T = 0.8 \text{ sec}$ 、垂下蓮間距離 $15 \sim 35 \text{ cm}$ とし、合計 24 ケースの試験を行った。計測項目は各デバイスの起電力量（デバイス端子は並列接続）、ひずみ量とし、デバイス変形・運動は水中ビデオカメラで録画した。

Fig.13 は、水中ビデオカメラより撮影された垂下部の運動の様子を示したものである。全ての垂下蓮において水平デバイスが大きく撓み変形していることが分かる。なお、目視による観察で、水平デバイスの運動に伴う渦攪乱によって、垂直デバイスも微小振動し発電していることが確認されたことを付記しておく。

Fig.13 : Snapshots of EPHAS motions excited by forced oscillation device in water

Fig.14 : Time history of output voltage

Fig.15 : Averaged electric power generated from Upper, Middle and Lower units.

Fig.14 は上段部、中段部および下段部の各垂下蓮から得られた起電力の時系列を示したものである。また、Fig.15 は起電力を基に単位面積当たりの平均発電量を算出したものである。

これらの図から、動揺振幅が増すにつれて発電量は頭落ちすることなく増大し、かつ、各垂下蓮の発電量に差が表れないことが分かる。このことから、実海域では、波浪運動によって浮体部や上部垂下蓮が Heave 運動し、これに伴って中下段の垂下部が運動する。そのため、波の水粒子運動の少ない没水深でも発電量を獲得できる可能性があり、垂下蓮タイプの構造様式は有用であることを示唆している。

3.4 波浪中における垂下部の発電試験

ここでは、前節で用いた垂下部試験体に Fig.16 のような簡易浮体を取り付け、波浪中における発電性能試験を行う。なお、各垂下蓮間はフレームにより連結し、浮体部は 2 点で緩係留・緊張係留した。試験は波振幅 $H/\lambda = 0.013 \sim 0.13$ 、波周期 $T = 0.8, 1.0, 1.5 \text{ sec}$ 、垂下蓮の外縁径 D と波長 L の比 $D/\lambda = 0.39 \sim 0.88$ 、垂下蓮間距離 $l/\lambda = 0.16 \sim 0.35$ とし、合計 24 ケース行った。計測項目はデバイスの起電力量（デバイス端子は並列接続）およびデバイスの内部歪みとした。

Fig.17 は、Fig.12 に示す Upper 部の水平デバイスで得られた内部歪み速度と起電力の時系列変化を示したものである。

Fig.16 : Simple model of EPHAS in wave experiment.

Fig.17 : Time histories of internal strain rate of PVDF and output voltage.

これによると、水面変位に追従したデバイスの歪み速度（＝変位速度）が発生し、それに伴って同位相の起電力が得られている。

Fig.18 は、 $T=0.8\text{sec}$ における Upper 部と Lower 部の平均発電量の比較である。Heave 運動する水平デバイスは鉛直デバイスよりも平均発電量が高いことが分かる。また、水平および鉛直デバイスともに、Upper 部と Lower 部の発電量に優位な差は見られない。これは、垂下蓮間をフレーム連結したことによって、没水深の深い Lower 部も Upper 部同様に Heave 運動し、デバイスが変形・振動したためである。

Fig.19 は、垂下蓮の外縁径 D と波長 L の比 D/λ が発電量に及ぼす影響を調べたものである。図より、 $D/\lambda \leq 0.56$ であれば各波高に対する発電効率は良く、右肩上がりを示す。それに対して、 D/λ が大きい場合、波高の増大に伴って、発電量は低下してしまう。これは、波長に対して、垂下蓮サイズおよびデバイスサイズが相対的に大きくなることによって、垂下蓮とデバイスが複数の運動モードで振動し、デバイス内部の電荷にキャンセリングが発生したためであると考えられる。

Fig.18 : Comparison of averaged electric power generated from horizontal and vertical PVDFs.

Fig.19 : Comparison of averaged electric power versus D/λ

4. 結言

本研究では、著者らが開発している弾性圧電デバイス FPED の発電性能向上に向けた検討を行うと共に、FPED を複数枚組み合わせた垂下式弾性浮体ユニット型海洋エネルギー発電装置 EPHAS を考案し、その発電特性を検証した。

その結果、FPED 内部に組み込まれる PVDF 枚数を増加させた場合（例えば 10 枚の場合は 2 枚の場合の 400 倍超の発電量）、大幅に発電量を増加させることが可能である。また、比重の異なる付加物をデバイスに装着した場合、最大 50% 程度の発電量増加が見込める。さらに、EPHAS の浮体部は Floating Type の方が発電効率は良く、Float 間の連結デバイス長 $L/\lambda=0.4$ が適切であることが分かった。また、垂下部は垂下蓮数を増やせば、投影面積当たりの発電量（エネルギー密度）を高めることが可能である。

以上、本研究は模型スケールの実験結果に留まっており、実機スケールの平均発電量を推定する新たな相似則が必要となる。また、さらなる発電量の増大に向けたデバイスの構造様式の改良、種々の弾性素材との組み合わせ等について検証を行う予定である。

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（海洋エネルギー先導研究）」、科学研究費補助金および（財）ひろしま産業振興機構、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

- 1) Global Wind Energy Council : <http://www.gwec.net/> (2009).
- 2) NEDO : 洋上風力発電実証研究 F/S に関わる先行調査報告書 (2008), 64p.
- 3) NREL (National Renewable Energy Laboratory) : Technical Report (2007), NREL/TP-500-41958, Nov.
- 4) 経塚雄策, 尾川協一郎, 若濱久敬 : 潮流発電用ダリウス形水車の流力特性について, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 4 号 (2006), pp. 39-45.
- 5) 神吉 博 : ジャイロ式波力発電装置およびそれを使用した消波装置. 特願 2002-575397, 科学技術振興機構.
- 6) 千葉正毅・R. Perline, R.Kornbluh, H.Prahlad, S.Stanford, J.Eckerle : 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 (2007), pp.743-747.

- 7) William P. Robbins, I. Marusic, T. O. Novak : Wind-generated electrical energy using flexible piezoelectric materials, Proc. of International Mechanical Engineering Congress and Exposition (2006), IMECE2006-14050.
 - 8) Zurkinden A.S., F. Campanile, L. Martinelli : Wave energy converter through piezoelectric polymers, Proc. of the COMSOL Users Conference (2007).
 - 9) George W. T., J. R. Burns, S. M. Kammann, W. B. Power and T. R. Welsh : The energy harvesting eel, a small subsurface ocean/river power generator, IEEE Journal of Ocean Engineering, Vol.26, No.4 (2001), pp.539-547.
 - 10) 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, 日本船舶海洋工学講演会論文集, 第 9 号 (2009) pp.191-194.
 - 11) 陸田秀実, 田中義和, 川上健太・松村啓太郎 : 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, 2009, 広島大学.
 - 12) 陸田秀実, 田中義和, 平田真登, 渡邊隆太, 松村啓太郎, 柳原大輔 : 発電装置、及び発電デバイス, 特願 2011-107680, 2011, 広島大学.
 - 13) 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, ISBN:978-89-86510-10-2 98560, Busan.
 - 14) 陸田秀実, 川上健太, 黒川剛幸, 土井康明, 田中義和 : 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 (2009), pp.1296-1300.
 - 15) 陸田秀実, 川上健太, 平田真登, 土井康明, 田中義和, 柳原大輔 : 弾性圧電デバイスを用いた波浪発電に関する研究, 土木学会論文集, B2, Vol.66, No.1 (2010), pp.1281-1285.
 - 16) 藤本由紀夫, 新宅英司, Gernot Pirker, 田中義和 : 圧電センサーを用いた二次元き裂の応力拡大係数の測定, 日本機械学会論文集, A 編, 68 巻, 672 号(2002), pp.1212-1219.
 - 17) 陸田秀実, 栗原健治, 黒川剛幸, Suandar Baso, 土井康明, 施建剛 : Lagrange 粒子付 Euler 型スキームによる波浪中耐航性能評価のための CFD ツールの開発, 日本船舶海洋工学論文集, No.11 (2010), pp.7-16.
-