

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

A Technology of Electrical Energy Generated From Ocean Power using Flexible Piezoelectric Device

陸田秀実¹・平田真登²・川上健太³・土井康明⁴・田中義和⁵・柳原大輔⁶

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

We have developed a way of harvesting electrical energy from the ocean power, e.g. tide, current, wave, breaking wave and vortex, using a flexible piezoelectric device consisting of piezo-electric polymer film (PVDF), silicon and natural rubber. The flexible piezoelectric device (FPED) is a hydro-electric ocean energy unit designed to convert renewable energy harnessed from ocean energy into usable electricity. The basic concept generating electric power using FPED is to utilize fluid structure interaction, e.g. fluttering, flapping and periodic bending, caused by ocean energy. The FPED deformed by kinetic energy of the ocean power stores elastic energy and also converts it to the electric energy. We carried out some experiments using wave tank and the water tunnel with a bluff body. We have confirmed the electricity generated by wave, current and vortex using the FPED.

1. 緒論

平地が狭小で海岸線が長く、かつ、排他的経済水域 (EEZ) が世界第6位 (陸域の12倍) である我が国において、再生可能エネルギーの利用割合を大幅に引き上げるためには、気象・海象・地形特性を踏まえた着床式・浮体式の洋上風力発電システムの研究・開発が必要であり、国内外で導入が本格化しつつある (例えば、NREL (2007), Global Wind Energy Council (2009), NEDO報告書 (2008))。現在、日本の気象・海象条件に耐え得る浮体構造として、セミサブ型、スパー型、ハイブリッド型、ボックスガーダー型、曳航着座型などの洋上風力発電システムに関する基礎研究・実証試験が進められている。しかしながら、洋上風力による発電量が期待できる海域は年間を通じて安定した風が吹くものの、自ずと波浪が発達する海域であり、また、有義波高やうねりが高い海域であることが多い。これら海洋エネルギーは無尽蔵かつ膨大であるものの、洋上風力発電システムの建造・維持・管理の点からすれば、耐外力性能を向上させる必要があり、自ずとコスト増につながってしまう。

このような背景から、著者らは、洋上風力発電システ

ムの発電性能・安全性・耐外力性能を維持しつつ、浮体部において海洋エネルギー (潮流・潮汐・波浪・碎波・渦など) を回収することが可能な洋上ハイブリッド型発電システムの浮体構造様式の開発を進めている。その過程において、波・流れ等の流体エネルギーを、運動エネルギーに変換し、電気エネルギーを生み出す柔軟発電体 (以下、弾性圧電デバイスFPED (Flexible Piezoelectric Device) と称す) を開発 (特願2009-265726: 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) し、その蓄電化にも成功した (田中ら (2009), 松村ら (2009), 陸田ら (2009))。また、既設の海岸・海洋構造物を有効利用した波浪発電装置の開発も進めている (陸田ら (2010))。

そこで本研究では、洋上風力発電システムの浮体部および水面下に、この弾性圧電デバイスを適用し、海洋エネルギーを効率的に利用可能な技術開発を目的とする。特に、波・流れ作用下における弾性圧電デバイスのさらなる汎用化、実用化、低コスト化に向けて、デバイスの構造様式やサイズ・形状を種々変化させ、発電性能を検証する。また、波・流れエネルギーに適合したデバイス開発の設計指針を得ることを目的とする。

2. 弾性圧電デバイスの構造様式と発電性能

著者らは、波力発電・潮流発電・海流発電といった特定の海洋エネルギーに特化した従来型発電方式とは異なり、全ての海洋エネルギーを利用可能とする薄型積層タイプの弾性圧電デバイスFPED (Flexible Piezoelectric Device) の考案・開発を行っている (図-1参照)。このデバイスの発電原理は、種々の海洋エネルギーによって曲げ・圧縮・引張・せん断の応力が加わると、高分子圧電

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		広島大学大学院 工学研究科 輸送・環境システム専攻
3 学会員		広島大学大学院 工学研究科 社会環境システム専攻
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 生産環境工学専攻

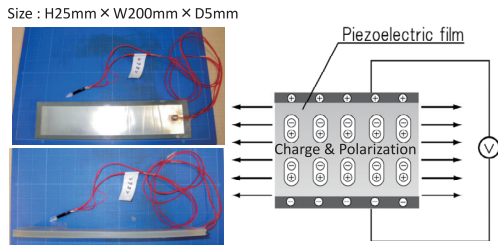


図-1 製作した弾性圧電デバイスと分極の様子

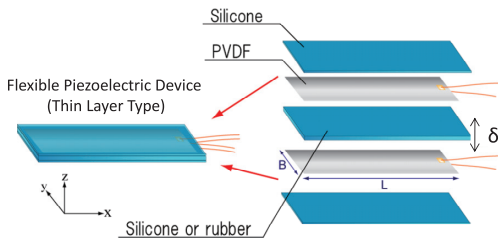


図-2 弾性圧電デバイスの基本構造

フィルム PVDF (polyvinylidene fluoride) に電界 (分極・電荷) が生じるというものであり、一種の圧電効果を利用した発電体と位置付けられる。これまでに、デバイスのひずみ速度に比例した発電性能が得られることが分かっている。したがって、静荷重ではなく動荷重に対して有効に働くため、非定常・無尽蔵な海洋エネルギーには非常に適していると言える。その他、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可能 (カスタマイズが容易) という特徴を有している。

この弾性圧電デバイスの基本構造は、図-2に示す通りである。2対の PVDF (厚さ $100\mu\text{m}$) と弾性体 (例えば、厚さ 5mm 程度のシリコンや天然ゴムなど) を積層させた構造様式となっている。これら PVDF と弾性素材は圧着され、弾性素材に外力が加わると、弾性素材にかかる応力が PVDF 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。ここで、 δ は PVDF 間距離であり、中心軸からの偏心距離に相当する重要なパラメータである。

ここでは、PVDF 形状と構造様式が発電性能に与える影響を把握することを目的とした基本性能試験を始めに行う。試験は、空気中および水中において、加振装置による振動試験を行い、弾性圧電デバイスに作用する繰り返し流体力によって、どの程度のデバイス変形と出力電圧が得られるのかを検証する。なお、加振周期は $1\sim 3\text{sec}$ で計 3 通り、加振振幅は $10\sim 150\text{mm}$ 間で計 8 通りとした。

図-3は、ここで使用した試験体の概略図である。Type 1 は、比較対象となる基本形であり、長方形 PVDF を挟み

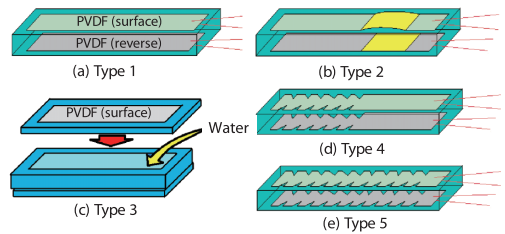
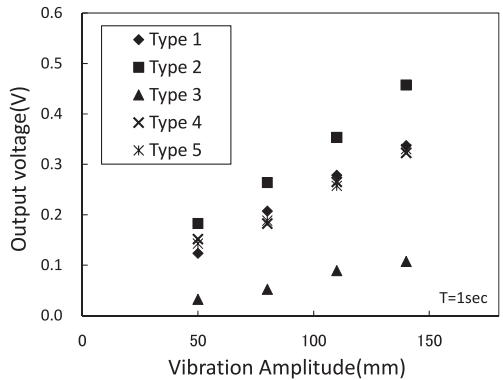
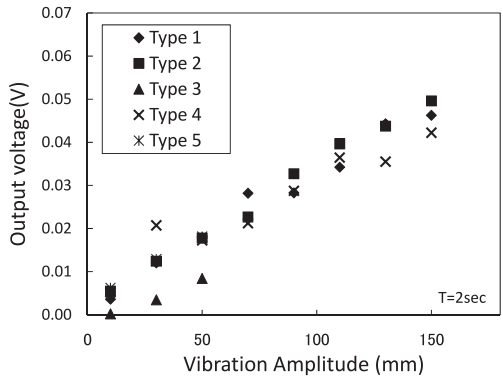


図-3 異なる形状・サイズを有する試験体



(a) 加振周期 1sec

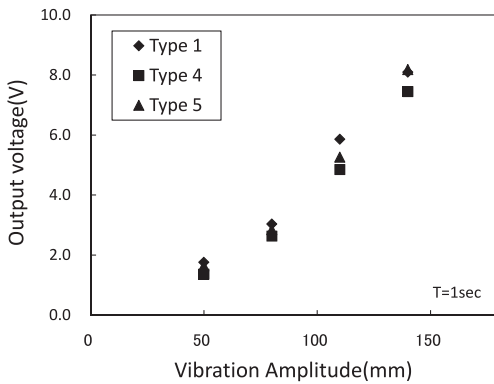


(b) 加振周期 2sec

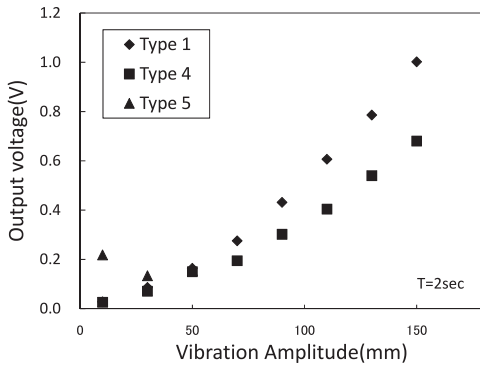
図-4 大気中加振実験による出力電圧の比較

込むタイプである。Type 2 は曲げ変形の促進と局部座屈による PVDF の剥離現象を防ぐことを目的として、PVDF を一部圧着しないタイプとした。また、Type 3 は素材の剛性・比重を変化させることを目的として、内部に水塊を注入するタイプとした。さらに、Type 4 および Type 5 はデバイスの曲げ変形に対する剛性を小さくし、海洋エネルギーをより柔軟に回収することを目的として、鋸状刻みを入れたタイプである。なお、いずれの Type も PVDF 間距離 δ は 5mm であり、Dual Core Type と称するデバイスを用いることとした。

図-4は、大気中において加振した場合の起電力結果 (加振周期 1sec と 2sec) である。図より、加振周期 2sec の



(a) 加振周期 1sec



(b) 加振周期 2sec

図-5 水中加振実験による出力電圧の比較

場合、いずれのデバイスもほぼ同じ出力電圧が得られていることが分かる。その一方で、加振周期 1sec の場合、Type 2 において最大の出力電圧が発生し、また、Type 4 と 5 は、Type 1 (基本形状) とほぼ同等の出力性能を有していることが分かる。図-5 は水中において加振した場合の起電力結果 (加振周期 1sec と 2sec) である。なお、水中の場合、デバイスの都合上、Type 2 と Type 3 は実験不可能であったため、比較対象から除外した。図より、加振周期 1sec の場合、いずれのデバイスもほぼ同じ出力電圧が得られている。一方、加振周期 2sec の場合、Type 1 の出力性能が高く、その傾向は加振振幅が大きくなるにつれて顕著である。なお、デバイスの固有振動特性については、既往研究 (田中ら, 2009; 松村ら, 2009) を参照されたい。以上のことから、低コストで、かつ、より発電性能を高めるためには、Type 2 や Type 4, Type 5 のような構造様式・PVDF 形状が改良案として考えられることが分かる。しかしながら、耐久性・製作上の観点など、総合的に判断して Type 1 の基本形も有望な構造様式であることには間違いがない。

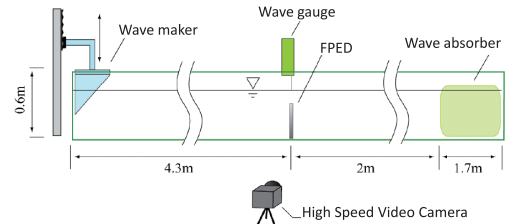


図-6 波浪水槽実験の概要

3. 波エネルギー利用に関する実験

図-6 に示すように、実験は広島大学所有の 2 次元波浪水槽 (長さ 8m, 幅 0.2m, 高さ 0.6m) を用いて、水槽中央付近に、波高計および弾性圧電デバイス (PVDF 間距離 $\delta=5\text{mm}$, デバイス長 $L=30\text{cm}$, 幅 $B=4\text{cm}$) を垂直に設置した (下端固定, 上端自由)。初期水深 41cm とし、規則波 (波高 1~13cm, 周期 1sec) を作用させ、波高と起電力の関係を調べた。なお、デバイス内に挟み込む PVDF 長 l が、弾性変形・波浪中挙動および出力電圧に与える影響を調べるため、 $l/L=1.0, 0.75, 0.5, 0.25$ の 4 種類のデバイスを製作した。

図-7 は、波浪外力が作用した時の弾性圧電デバイスの変形の様子を示したものである。これらは波周期 T_w に対して $t/T_w=0.5$ および 1.0 に相当する時刻のものである。また、Top は弾性圧電デバイス FPED 内部に組み込まれた PVDF の上端位置を示している。いずれのケースも波周期に応じて、波上・波下側に往復運動しているが、弾性圧電デバイスの変形度合いや形状は、PVDF 長 l によって大きく異なることが分かる。具体的には、 $l/L=1.0$ や 0.75 の場合、弾性圧電デバイスは上端から下端までほぼ一定の変形曲率を保持したまま、往復振動している。その一方で、 $l/L=0.25$ や 0.5 の場合、PVDF 上端位置 (Top) において、変形曲率は大きいものの、それより下方では、ほとんど変形していないことが分かる。特に、 $l/L=0.25$ の場合、弾性圧電デバイスは常に波下側に傾き、上端部がフラッタリングした状態となっている。このような PVDF 長 l とデバイス変形の様子が、起電力量に与える影響を調べたものが図-8 である。 $l/L=1.0$ と 0.75 の場合、入射波高が大きくなるにつれて、発電量は波高の 2 乗にほぼ比例して増大していることが分かる。その一方で、 $l/L=0.25$ と 0.50 の場合、顕著な発電量はほとんど見込めないことが分かる。以上のことから、少なくとも弾性圧電デバイスに組み込む PVDF 長は $l/L=0.75$ 以上必要であることが明らかとなった。

次いで、実海域における種々の波条件を想定し、これに対する弾性圧電デバイスの最適寸法を明らかにする実験を行う。ここでは、波長 λ を無次元量として、デバイ

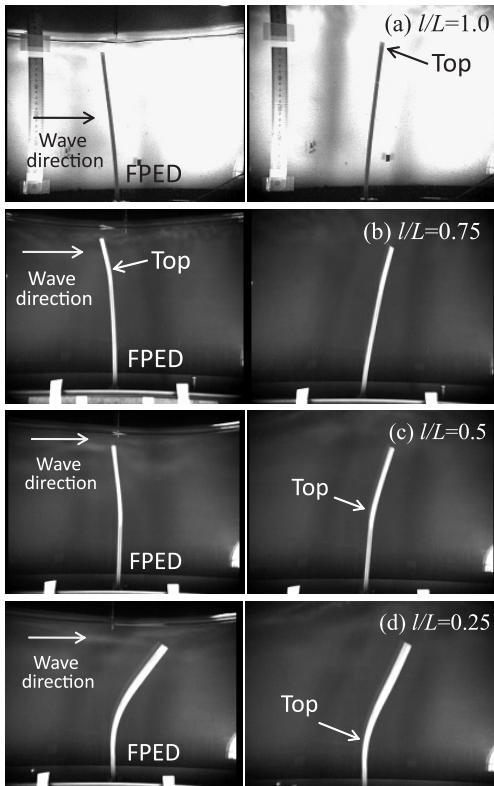


図-7 波浪外力による弾性圧電デバイスの変形の様子 (TopはFPED内部に組み込まれたPVDFの上端位置を示す, 左図: $t/T_w=0.5$, 右図: $t/T_w=1.0$)

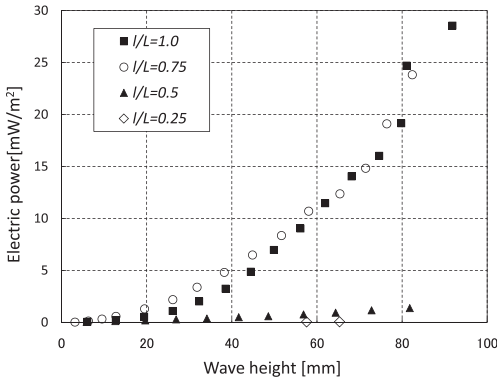
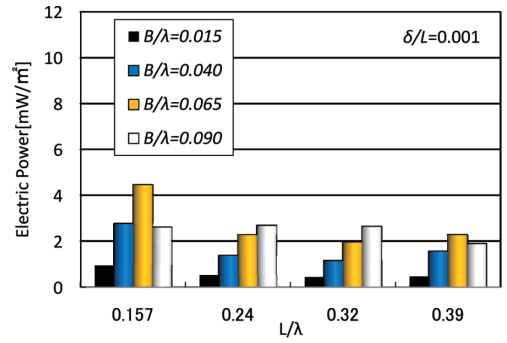
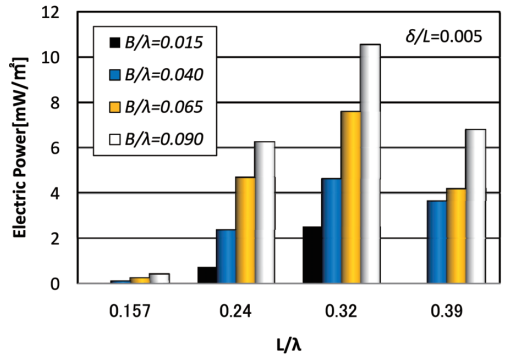


図-8 PVDF長の違いによる波高と発電量の関係

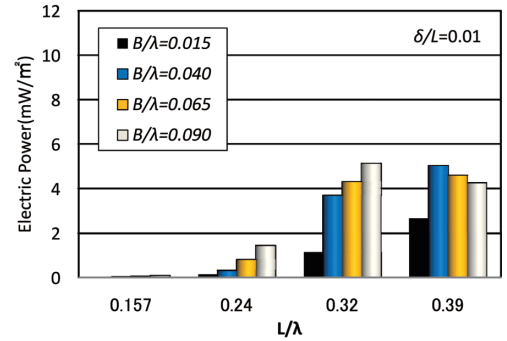
ス長さ $L/\lambda=0.156 \sim 0.4$, デバイス幅 $B/\lambda=0.015 \sim 0.09$, PVDF間距離 $\delta/L=0.01 \sim 0.001$, 波高 $H/\lambda=0.02 \sim 0.08$ の諸条件下で動揺試験 (48 ケース) を行うことにした。図-9 は, 平常時の波高条件下 ($H/\lambda=0.03$) における単位面積当たりの発電量を比較したものである。図より, $L/\lambda=0.32$, $B/\lambda=0.09$, $\delta/L=0.005$ の時に単位面積当たりの発電量が最大となることが分かる。また, このサイズの場合, サババル条件下で最大発電量 $32 \text{ (mW/m}^2\text{)}$ が計測された。



(a) $\delta/L=0.001$



(b) $\delta/L=0.005$



(c) $\delta/L=0.01$

図-9 PVDFサイズの違いによる発電量の比較

以上, 総合的に判断して, デバイス幅 B は大きいほど良いが, デバイス長 L や PVDF 間距離 δ には, 波条件による最適サイズが存在することが分かった。

4. 流れエネルギー利用に関する実験

実験は, 広島大学所有の回流水槽 (計測部寸法の長さ 4.0m , 幅 1.4m , 水深 1.0m) を用いる。水槽中央付近に, 弾性圧電デバイス (PVDF 間距離 $\delta=5\text{mm}$, デバイス長 $=33\text{cm}$, 幅 $=10\text{cm}$) を水平に設置し, 一様流れを作用させ, 流速と起電力の関係を調べた。一様流の条件は, 流速 $0.16 \sim 0.80\text{m/sec}$ (5 通り), 流入角度 $\theta=0 \sim 180^\circ$ (5 通

り)とした。ここで、流入角度 $\theta=0^\circ$ は流れに並行に設置した場合(下流方向)、流入角度 $\theta=90^\circ$ は流れに直角に設置した場合に相当する。また、渦励起によるデバイスの振動促進を図る目的で、デバイス先端にBluff body(一辺が10cmの立方体)を付加した場合も実験した。

図-10は、流れエネルギーによって得られた弾性圧電デバイスの起電力の時系列変化の一例を示しており、Bluff bodyの有無による比較である。図より、両者ともデバイスの上下振動によってランダムな起電力が得られている。特に、Bluff body有りの場合に、渦励起による圧力差からデバイスの弾性変形が促進され、無の場合のそれよりも大きな起電力が発生することが分かる。このことを詳しく調べるため、流速ごとの発電量の比較(流入角度 $\theta=45^\circ$ の場合)を行った(図-11)。図より、Bluff Bodyの有無に関わらず、流速が大きいと発電量は急増することが分かる。また、Bluff Body有りの場合の発電量は、無の場合のそれよりも高速域で顕著な差となって現れ、最大で約3倍近くの発電性能の増加が見込めることが分かる。また、図-12は流入角度に対する発電性能の比較(Bluff body有の場合)を行ったものである。図より、流入角 $\theta=45^\circ$ において最も発電量が見込めることが分かる。その値は、通常の設定状態(Bluff Body無しで流入角 $\theta=0^\circ$ の場合)に比べて、約20倍の発電量であった。

5. 結論

本研究では、様々な海洋エネルギー(潮流・潮汐・波浪・砕波・渦など)を利用することが可能な新しいタイプの発電装置を開発した。また、著者らが独自開発している発電体(弾性圧電デバイスPVDF)の積層構造や材料、さらには、PVDF寸法と、その発電性能を検証した。その結果、より効率的に波エネルギー発電を行うには、デバイス寸法を $L/\lambda=0.32$, $B/\lambda=0.09$, $\delta/\lambda=0.005$, PVDF長 $l/L=0.75$ 以上とすると良い。また、流れエネルギー発電を行う場合、Bluff bodyを付加し、流入角度 45° とすれば約20倍の発電性能が期待できることが分かった。なお、実用化に際して、機能的弾性樹脂材料の選定、それらを用いたデバイス剛性、運動・起電力性能などの関係を明らかにする予定である。

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(海洋エネルギー先端研究)」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

- 田中義和・井上直子・松村啓太郎、陸田秀実(2009)：PVDFを用いた柔軟発電体の試作と基礎実験、第18回MAGDAコンファレンス、CD-ROM、日本AEM学会。
陸田秀実・川上健太・黒川剛幸・土井康明・田中義和

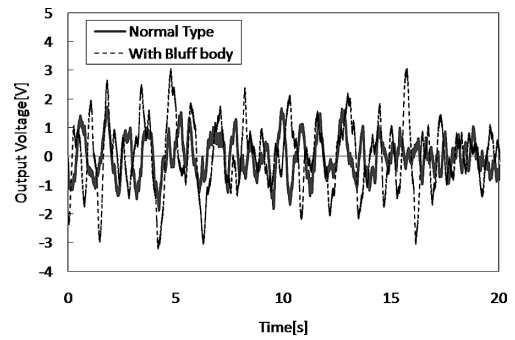


図-10 流れエネルギーによって得られた起電力の時系列比較(ストローハル数0.125, レイノルズ数 2.6×10^5)

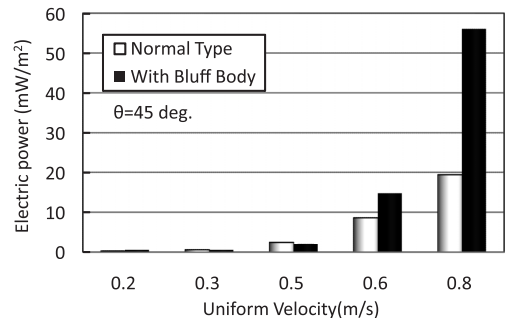


図-11 Bluff Bodyの有無による発電量の比較

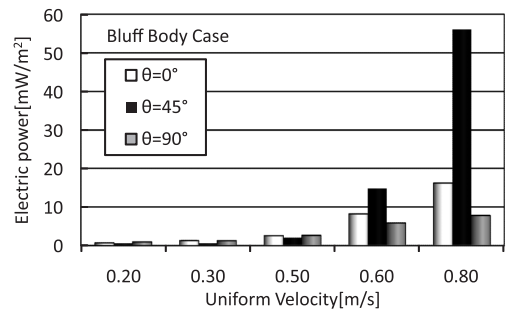


図-12 流入角の違いによる発電量の比較

(2009)：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・川上健太・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波浪発電に関する研究，土木学会論文集，B2，Vol.66，No.1，pp.1281-1285。

松村啓太郎・田中義和・陸田秀実・川上健太・新宅英司(2009)：PVDFを利用した柔軟発電デバイスに関する基礎研究，第21回「電磁気関連のダイナミクス」シンポジウム講演会，pp.635-640。

Global Wind Energy Council (2009)：http://www.gwec.net/

NEDO(2008)：洋上風力発電実証研究F/Sに関わる先行調査報告書，64p。

NREL (National Renewable Energy Laboratory) (2007)：Technical Report, NREL/TP-500-41958, Nov.