
ノッティンガム大学（イギリス） 研修報告書

柔軟発電素材による浮漁礁型海洋エネルギー利用技術に関する研究

工学研究科 輸送・環境システム専攻 横田 俊介

1. はじめに

2015年8月31日から9月30日まで、イギリスのノッティンガム大学において研究を行った。その報告を以下に示す。

2. 共同研究テーマ

ノッティンガム大学では、モード分離型解法に基づく発電理論を使用し、梁の運動理論と圧電方程式の連成によって柔軟発電素材の発電量、変位量の推定が行われてきた。この発電理論計算をもとに、柔軟発電素材に波力や潮流力といった海洋外力が作用する際の発電量、変位量を求める理論計算ツールの開発を行う。理論計算を踏まえ、柔軟発電デバイスを製作し、広島大学所有の曳航水槽で発電性能を把握した後、沖縄にてフィールド試験を行う。

3. 共同研究スケジュール

8/31-9/1 出国
9/2-9/28 研究
9/29-9/30 帰国

4. 共同研究派遣先の概要

大学名：University of Nottingham
所在地：イギリス イングランド ノッティンガム
指導教員：Prof.A.A.Popov

5. 共同研究内容

5.1 緒言

近年、環境汚染、資源枯渇、エネルギー供給安全性の観点から風力や水力、太陽光等の自然エネルギーを用いた発電技術の需要が高まっている。特に、周辺を海に囲まれた日本は、波浪や潮流等の海洋エネルギーが豊富に存在するため、これらを用いた発電技術の開発と発電性能の検討を行う。現在までの波力発電や潮流発電等の海洋エネルギー発電の開発傾向として、集約型電源の確保とその効率化によって大型化が進行している。しかしながら、このような傾向は、建造やメンテナンスコスト費用の増大、安全面の低下等の問題を引き起こすため、本格的な普及・実用化が進まない大きな原因の一つとなっている。また、漁業権等の既得権益および雇用を損なう問題も発生している。

このような諸問題を解決するための方策の一つとして、集魚を目的とした浮体式の浮漁礁を、海洋エネルギー発電のプラットフォームとして利用できると考えられる。一般的な浮漁礁は、耐用年数が約10年であるため、材料費、維持管理費、施工費等のライフサイクルコストが大幅に削減できると考えられる。また、新たな漁場を創出するため、漁業活動との協調を図ることができる。さらに、得られた電力は、集魚灯、航路灯、海洋環境および防災情報などの通信機器の補助電源として有効活用できると考えられる。

そこで、本研究では、当研究室で開発してきた柔軟発電素材(Flexible Piezoelectric Device, FPED)を浮漁礁型プラットフォームに適用し、波浪、潮流等の海洋エネルギーから小規模・分散型の電気エネルギーに変換する発電方法に関する基礎的研究を行う。そのための第一段階として、ノッティンガム大学で開発されたFPEDの発電理論計算法を習得し、海洋外力が作用することによる発電量および変位量の試算を行い、計算結果を踏まえ、FPEDを製作後、広島大学所有の曳航水槽にて発電性能を把握した。その後、沖縄においてフィールド試験を行った。

5. 2 発電理論計算法

本研究では、Rupesh らによって構築されたモード分離型解法に基づく発電理論計算を用いて、海洋外力による FPED の発電量および変位量試算を行う。Fig. 1 に示すような両端支持された梁について、力とモーメントの釣り合いを考慮すると、梁の変位に関する振動方程式を得ることができる。さらに、梁の変位をモード形とモード振幅の積で表すと、モード分離した梁の運動方程式は以下のように得られる。また、オームの法則と梁の変位理論式を考慮すると、電気回路での圧電方程式は以下のように得られる。

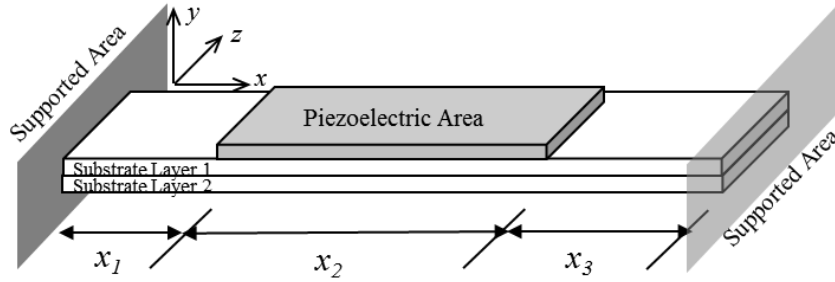


Fig.1 Cross section of FPED clamped in both sides

$$\begin{aligned} & \ddot{\eta}_q(t) + 2\gamma_q \omega_q \dot{\eta}_q(t) + \omega_q^2 \eta_q(t) + \varepsilon V(t) [W'_q(x_1 - x_2) - W'_q(x_1)] \\ & = \ddot{\eta}_q(t) \int_0^L m(x) W_q(x) dx \end{aligned} \quad (1)$$

$$C_p \frac{\partial V(t)}{\partial t} + \frac{V(t)}{R_{load}} = \sum_{r=1}^{\infty} -E_p d_{31} t_{pc} b_p \left[\frac{\partial W_r(x)}{\partial x} \right]_{x_1}^{x_1+x_2} \dot{\eta}_r(t) \quad (2)$$

これらの方程式に対して Transfer Matrix 法を使用し、固有振動数と振動モードを求めることができる。次いで、モードシェイプを求める。これにより、モード振幅と起電力以外の全ての項を求めることが出来る。この変位量の非定常計算には、ニューマーク β 法を、起電力の計算には 4 次のルンゲ・クッタ法を用いた。上述の運動方程式に考慮すべき波と流れの外力は、浮漁礁の設計マニュアルに基づいて、水平方向および垂直方向の最大流体力、定常流体力を算定した。

5. 3 曳航水槽試験

本実験は、Fig.2 に示す通り、広島大学所有の曳航水槽で波高 0.1~0.2m、周期 1~2s、流れ 0.5~2.0m/s に対して、波のみが作用する場合、流れのみが作用する場合、波と流れが作用する場合の計 13 ケースの試験を行った。喫水面は FPED の長辺の半分とした。ここで使用した FPED の諸元は、前節の理論計算結果に基づいて、Fig.3 と Table1 に示す 4 種類(CH1~CH4)とした。

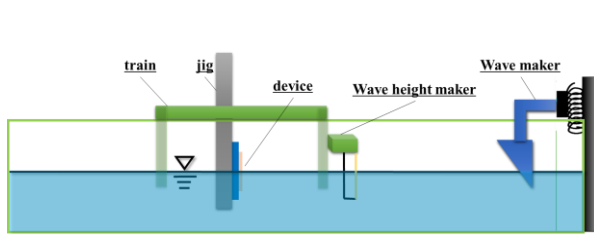


Fig.2 Experimental set up in towing tank

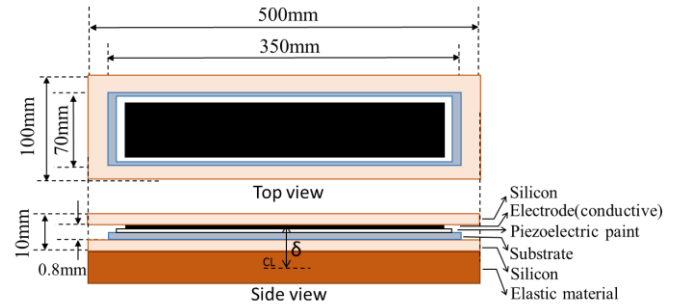


Fig.3 Cross section and size of FPED with piezoelectric paint type

Table1 Specification of FPED

	Thickness	
	Substrate 1	Substrate 2
CH1	Silicon 10mm	None
CH2	Silicon 10mm	Silicon 10mm
CH3	Silicon 10mm	Acrylic 2mm
CH4	Silicon 10mm	Acrylic 5mm

Fig.4 は、波のみが作用する場合における FPED の出力電圧について CH1~CH4 を比較したものである。図より、曲げ剛性の小さい場合(CH1 および CH2), 波の先鋭度である波形勾配 $H/\lambda=0.1$ に至るまで、出力傾向は増加し、その後、低下傾向に向かう。その一方で、剛性が大きい場合(CH3 および CH4), 本条件下では一様に増加傾向となる。

Fig.5 は、流れのみが作用する場合における FPED の出力電圧の比較を示したものである。低流速(1.0m/s 以下)の場合、剛性が小さい CH1 および CH2 において、出力電圧は増加傾向となる。その一方で、剛性が大きい CH3 および CH4 において、逆傾向となっている。高流速($U=1.5\text{m/s}$)の場合は、CH4 が最も出力電圧が高く、逆に CH1~CH3 は、ほぼ同様の傾向であった。

Fig.6 は、波と流れの共存場における FPED の出力電圧を比較したものである。この比較においては、波条件は波高 0.1m, 周期 1s で統一した。図より、CH1 および CH2 は流れが速くなるほど出力電圧は低下傾向にあり、CH4 は逆に増加傾向となる。CH3 は 1.0m/s の時に最も出力電圧が高くなる。

これらの結果より、波および流れの各条件下において、FPED の出力電圧は大きく異なる。したがって、対象となる外力条件が一定の場合は FPED の最適設計が可能といえる。その一方で、外力条件が大きく異なる場合は、その外力レンジ域に適合した FPED を複数個設置し、それらの総出力が最大となるようなバランス設計を行う必要がある。

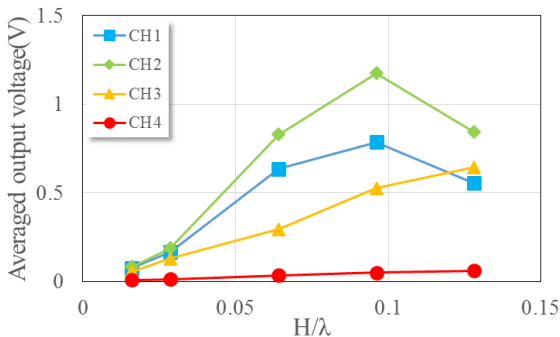


Fig.4 Relations between averaged output voltage and wave conditions

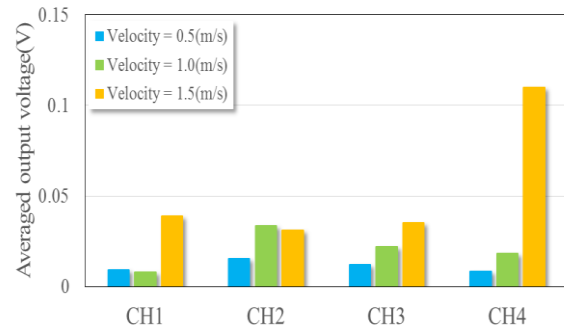


Fig.5 Relations between averaged output voltage and flow velocity

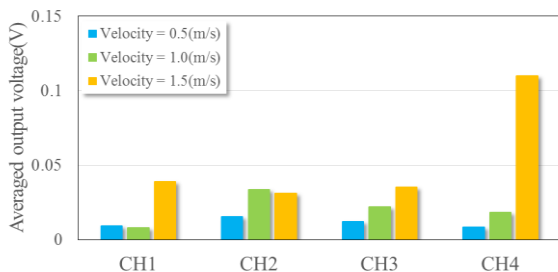


Fig.6 Relations between averaged output voltage and flow velocity

5. 4 実海域フィールド試験

前節において、諸特性が明らかとなった FPED について、実海域フィールド試験を行うこととした。今回のフィールド試験 Fig.7 は、沖縄県北部の内湾生簀に簡易係留したテストを計 3 回 (Test1: 2016 年 1 月 19 日 pm1:30~pm4:00, Test2: 2016 年 1 月 19 日 pm4:30~1 月 20 日 am9:00, Test3: 2016 年 1 月 20 日 am9:00~pm4:00) と沖合係留された浮漁礁型プラットフォーム Fig.8 に装着したテストを 1 回の計 4 回実施した。使用する FPED は Table2 に示す 6 種類とした。ここで、CH6 は FPED 背面に波状樹脂パネル (振幅約 10mm, 半波長約 15mm, 厚さ約 1mm) を装着したものである。これは、実海域の海象条件を踏まえ、波峰に対して直角方向の曲げ変形を拘束することで、波峰線方向の屈曲を促すことで、圧電素材の 1 次モード変形を励起させる狙いがある。全ての FPED には加速度計を装着し、水面付近に設置することとした。なお、Test4 は CH1 および CH2 のみ実施した。

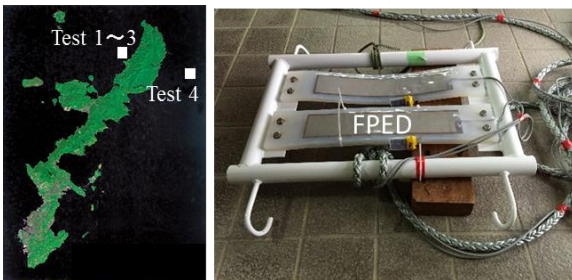


Fig.7 Field test site (Okinawa) and FPED

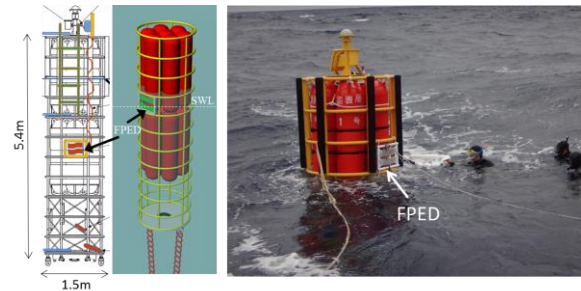


Fig.8 FPED supported on the floating fish nest in ocean field

Table2 Specification of FPED

	Thickness		Back face
	Substrate 1	Substrate 2	Substrate 3
CH1	Silicon 10mm	None	None
CH2	Silicon 10mm	Silicon 5mm	None
CH3	Silicon 10mm	Silicon 10mm	None
CH4	Silicon 10mm	Acrylic 2mm	None
CH5	Silicon 10mm	Acrylic 5mm	None
CH6	Silicon 10mm	None	Wavy panel Amp.10mm

Fig.9 は各 FPED のフィールド試験期間内における平均出力電圧を示したものである。それぞれの波条件は異なるものの、前節の水槽試験同様に FPED の剛性が小さくなるほど、出力電圧は高くなる傾向にあるが、その一方で波条件によるバラつきも大きくなっている。これは、合成が小さいほど、不規則波による外力影響を受けやすいため、FPED に 3 次元的な面内応力が作用し、複数の振動モードが現れ、その結果として電荷のキャンセリングが発生したと考えられる。一方で、CH6 は各波条件下において、比較的安定した高い出力電圧を発生していることが分かる。これは、FPED 背面に装着された波板樹脂パネルの影響によって、様々の不規則波が作用したとしても 1 次モードの変形が強制的に励起されたことによるものと考えられる。

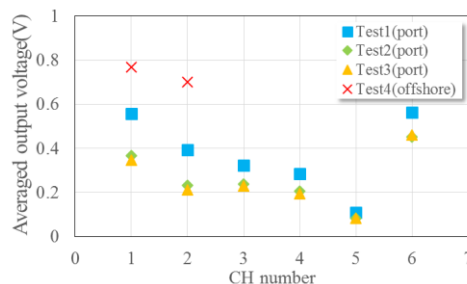


Fig.9 Averaged output voltage at each FPED

今回のフィールド試験では、沖合の Test4 において一番大きな出力電圧を示す結果となった。この時のデバイスの加速度(CH1)を示したものが Fig.10 である。図より、卓越する加速度成分は確認されず、いずれの成分もほぼ $\pm 1.0g$ 程度であることが分かる。このことから、CH1 は外洋の波エネルギーが大きいため出力電圧も大きくなったが、卓越する振動モードを得ることができないため、エネルギー変換効率として悪いと言える。今後は、CH6 のような基盤材の適用が必要となる。

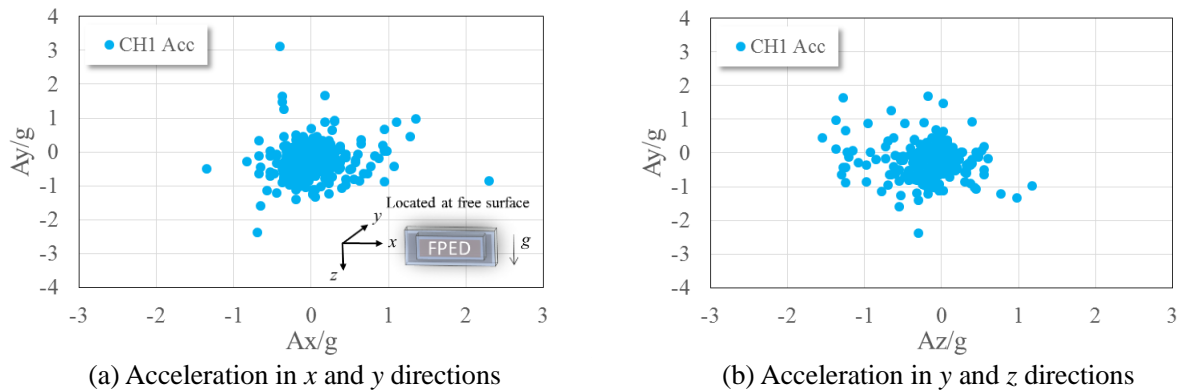


Fig.10 Motions of FPED at offshore region

FPED は単体で使用することも可能であるが、必要となる発電量に応じて複数個を配置する場面が多いと考えられる。また、実用的には蓄電デバイスと同時に設置されるものである。Fig.11 は複数の FPED を設置した場合の総発電量について試算したものである。ここでは、個々波の水塊体積に対するデバイス設置可能エリアを FPED 占有率(%)と定義し、総発電量を推定した。仮に、波長 40m(周期約 5s)の規則波 1 個(奥行単位長さ 1m, 波粒子運動が作用する深さ 20m)の水塊退席に対して、FPED 占有率が 0.1~1%であった場合、最大 60mW・s 程度となった。例えば、占有率 1%で 24 時間連続的に波が作用した場合は約 1.1kW・day と推定される。今後、1 波当たり可能な設置本数(占有率)と配置方法を検討する必要がある。

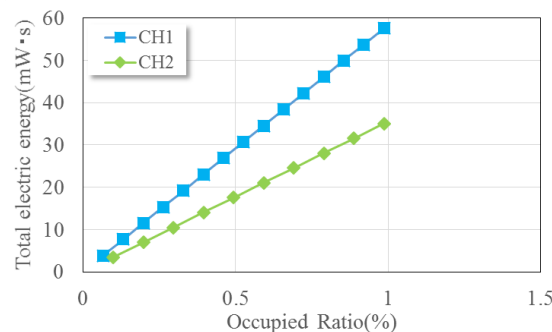


Fig.11 Estimated total electric energy generated by wave

5. 5 結言

本研究は、波や流れの海洋エネルギーを電気エネルギーに変換することが可能な柔軟発電素材 FPED を有する浮漁礁型海洋エネルギープラットフォームの基礎的研究を行った。理論計算によって発電量の理論推定を行うとともに、FPED 自体の構造様式を検討し、基盤材と波・流れエネルギーとの関係性を明らかにした。さらに、設計された FPED を製作し、室内試験および実海域フィールド試験を行った。その結果、FPED の出力電圧特性と耐波性を検証し、その有用性を確認した。

6. まとめ

約1ヶ月の短い派遣期間ではあったが、現地の方と英語でコミュニケーションをとったり、他国の文化や歴史を理解したり、研究以外の重要な要素を学ぶことができた。派遣先大学の研究室には、イギリス出身の方は数名しかおらず、他のヨーロッパやアジア、中東諸国出身者が多く、母国語を英語としない方々と英語を使ってコミュニケーションをとることの大切さも実感できた。何より、伝えようとする意思を持ち、積極的に話しかけることが大切である。また、研究に対する積極的な姿勢、研究と余暇のメリハリ、日常生活における他人の思いやり等、お手本とすべき点を数多く感じることもできた。今後仕事や旅行で海外に行く機会が増えるが、今回の海外共同研究を通じて得たことが必ず役に立つものと信じている。

7. 謝辞

本共同研究を指導していただいた Atanas Popov 先生、陸田秀実准教授、田中義和助教、研究の助力や現地での生活を支援していただいた Ph.D の Rupesh さん、温かく受け入れてくださったイギリスの研究室のみなさん、また、共同研究先関連会社のみなさま、そして海外共同研究プログラムをサポートしてくださいました実行委員会の諸先生方、支援室国際事業担当の皆様に深く御礼申し上げます。
