
ノッティンガム大学（イギリス） 研修報告書

柔軟発電デバイスを用いた風力発電理論計算ツールの開発

工学研究科 輸送・環境システム専攻 森崎 健一

1. はじめに

平成26年8月5日から平成26年9月5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. 共同研究課題の決定

ノッティンガム大学が保有している発電体の発電方程式を応用し理論式に基づく風力発電量の理論計算ツールを開発する。その後、広島大学所有のゲッチンゲン型風洞にて行った風力発電性能実験結果と理論計算結果比較による精度検証を行い、風力発電ポテンシャルを推定する。

3. 共同研究スケジュール

8/5-8/6	出国
8/7-9/3	研究
9/4-9/5	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・安全性等の面から再生可能エネルギーへの注目が集まっている。中でも風力エネルギーは無尽蔵に広がっており、風速の3乗に比例するエネルギー量を持っているため利用価値が高いと言える。その一方、乱れによる様々な周波数スペクトルの存在が風力発電導入の妨げとなっている。そこで、風の乱れを利用し、環境負荷のより小さい発電手段の一つとして、Liらは圧電素材を用いた風力エネルギー獲得方法を提案している。また、川上らによって、高分子圧電素材と弾性材の積層構造を有する柔軟発電デバイス(Fig.1)が開発され、その風力エネルギー利用技術が宮城らによって研究されている。風力発電性能に影響を与えるキーパラメータとして、圧電素材厚さ、デバイスアスペクト比、張力、固定方式、変形モード、固有振動数等が明らかとなっている。このことから、各風速域にあわせたデバイス設計を行うことで発電性能向上に繋がると考えられるが、キーパラメータは相互に関係しているため、実験におけるデバイスの最適化が困難となっている。

以上の背景を踏まえ、本研究では、上述したパラメータの最適化を可能とする、風外力を考慮した風力発電理論計算法の開発を目的とする。本計算法は、「柔軟発電デバイスの変形モードにおけるモード分離型解法を用いた理論計算法」によって構成されている。本稿では、数値計算法の概要を述べるとともに、風洞実験結果と理論計算結果を比較し、変形量と発電量について精度検証を行い、デバイスを最適化した際の風力発電ポテンシャルの推定を行う。

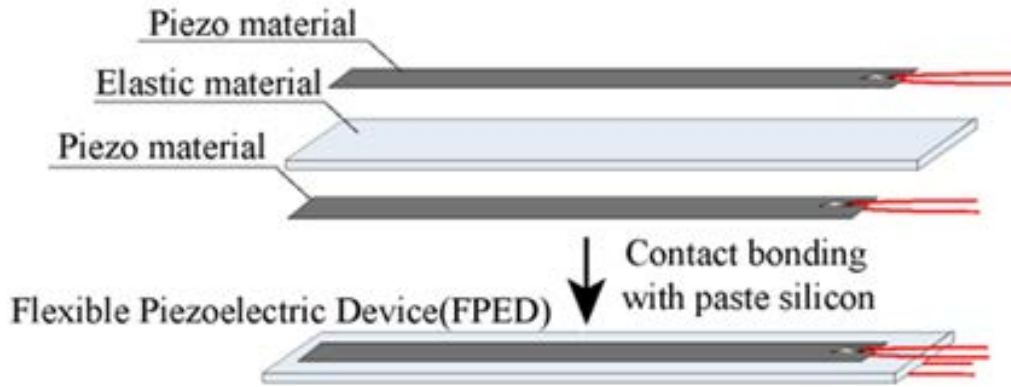


Fig. 1 Basic structure of the FPED

5. 2 発電理論計算法

➤ モード分離型解法

本章では、ノッティンガム大学の Patel らによって導出された圧電素材と弾性材から構成されるはり部材を対象とした材料力学理論を用いて発電理論計算法の開発を行う。本理論モデルでは加振条件によって振動モードが予測されるため、計算負荷が小さなモード分離型解法を用いている。以下に、本計算に用いた支配方程式を示す。本計算手法では、まず始めに Transfer Matrix Method を用いて固有角振動数 ω を求め、その後、空間依存項であるモードシェイプ W を求める。これによって、時間依存項であるモード振幅 η と起電力 V の 2 個の変数以外のすべての項を求めることができる。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・クッタ法を用いることとした。

$$\begin{aligned} & \ddot{\eta}(t) + 2\gamma\omega\dot{\eta}(t) + \omega^2\eta(t) \\ & = \ddot{w}_{base}(t) \int_0^L \mu(x)W(x)dx - \varepsilon V(t)[W(x_1 + x_2) - W(x_1)] \end{aligned} \quad (1)$$

$$C_p \frac{\partial V(t)}{\partial t} + \frac{V(t)}{R_{load}} = -E_p d_{yx} t_{pc} b_p \left[\frac{\partial W(x)}{\partial x} \right]_{x_1+x_2}^{x_1} \dot{\eta}(t) \quad (2)$$

➤ 初期張力を考慮した固有振動数の算出と風外力の組み込み

風力発電実験を再現するための簡易モデルを Fig.2 に示す。デバイスが固有振動数で振動することは発電性能向上にあたって重要な要素となる。したがって本計算では、風力発電性能のキーパラメータの 1 つである初期張力をデバイスに加えた際の固有振動数影響を考慮した。また、定常風外力として等分布荷重を与えた。このとき、張力影響を考慮した固有振動数 ω_i は以下の式で表される。

$$\omega_i = \left(\frac{i\pi}{l} \right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\mu}} \sqrt{1 + \frac{T_0}{i^2(\pi^2 EI/l^2)}} \quad (i = 1, 2, \dots) \quad (3)$$

ここで、 l はデバイス長さ、 EI はデバイスの曲げ剛性、 μ は密度である。初期張力 T_0 を入力することにより、固有振動数が算出可能である。本計算では、 $i = 1$ の1次振動モードを考慮した。また、定常風外力 w は以下で示される。

$$W = \frac{\varepsilon 24EI}{3l^2 z} \times \alpha \left| \frac{\omega_n^2 - \omega^2 + 2\gamma\omega\omega_n}{\omega_n^2} \right| \quad (4)$$

ここで、 ε はひずみ、 z は中立軸からの距離、 α は外力係数、 ω_n は固有振動数、 ω は加振振動数、 γ は減衰比である。実験で得られたデバイス表面のひずみ量を入力することで、風外力を間接的に理論計算法の初期条件として与え、デバイスの固有振動数に考慮される。なお、本モデルは、非定常風外力およびデバイス面内変形による非線形振動モードは考慮されていない。

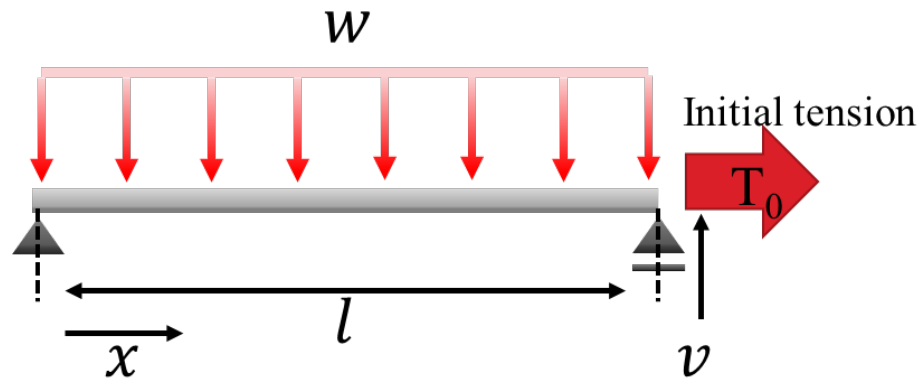


Fig. 2 Simplified model of theoretical method

5. 3 計算結果

➤ 風洞実験結果との比較による精度検証

ここでは、卓越モードである1次振動モードにおける発電量及びデバイス中央部の変位量について、実験結果と比較検証する。Fig.3 と Fig.4 にアスペクト比 12.5, 初期張力 1.03N のデバイスと、アスペクト比 25.0, 初期張力 0.54N のデバイスにおける計算結果と実験結果を示す。両ケースにおける電圧、変位ともに、理論計算結果は実験結果と概ね良好な一致を示しており、本計算手法の妥当性が示された。しかしながら、本計算は高速域においてやや過小評価の傾向にある。これは、同計算法ではデバイス長さ方向のひずみ量のみが考慮されているのに対して、実際にはデバイス幅方向のひずみ量も発生しており、その分の発電量が考慮されていないためである。

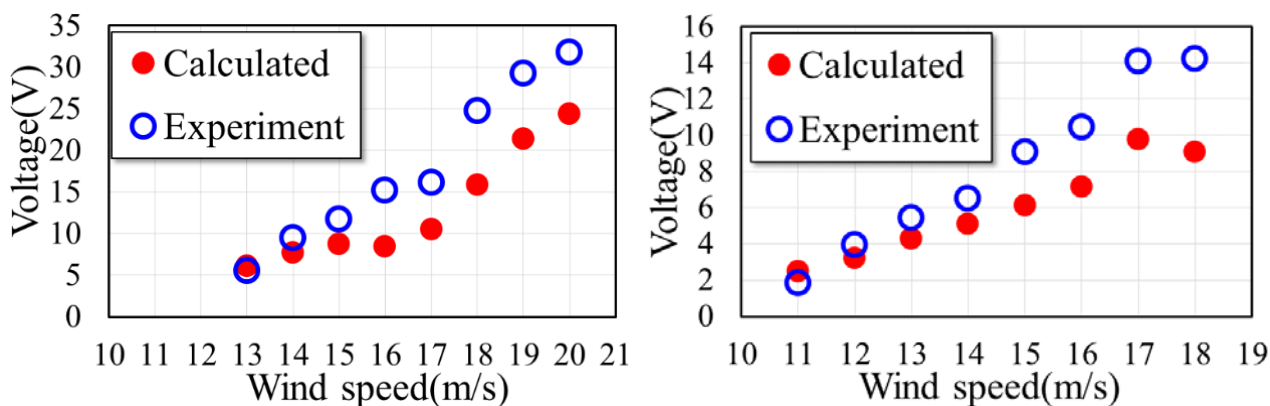


Fig. 3 Comparison of output voltage generated by device between theoretical results and experiment ones

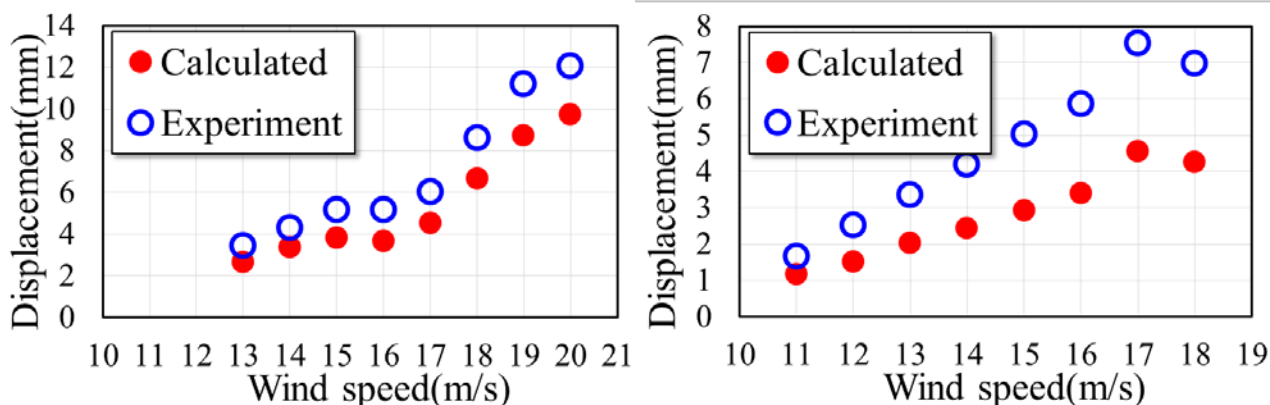


Fig. 4 Comparison of displacement at center point of device between theoretical results and experiment ones

➤ 風力発電ポテンシャルの推定

開発された理論計算法を用いて、弾性材のヤング率、密度、デバイスアスペクト比、中心材の厚さをパラメータとして、デバイスの最適設計を行い、同デバイスの風力発電ポテンシャル推定を行った。パラメータスタディにより、中心材の厚さ、圧電素材の幅を大きくすると発電性能に大きく影響を与えることが明らかとなった。また、固有振動数影響を考慮した場合を検討した結果を Fig.5 に示す。この図に示すような、圧電素材アスペクト比 12.5、中心材 1mm 厚、固有振動数 7Hz で振動させた場合において、さらに約3倍の発電性能向上が期待できることが分かった。このことから、中心材を厚くし、かつ、固有振動数付近で振動するように弾性材のヤング率、密度を最適化すれば、発電性能向上に効果的であることを示した。

AR12.5 E=28.1MPa $\rho=2600\text{kg/m}^3$ T=1N

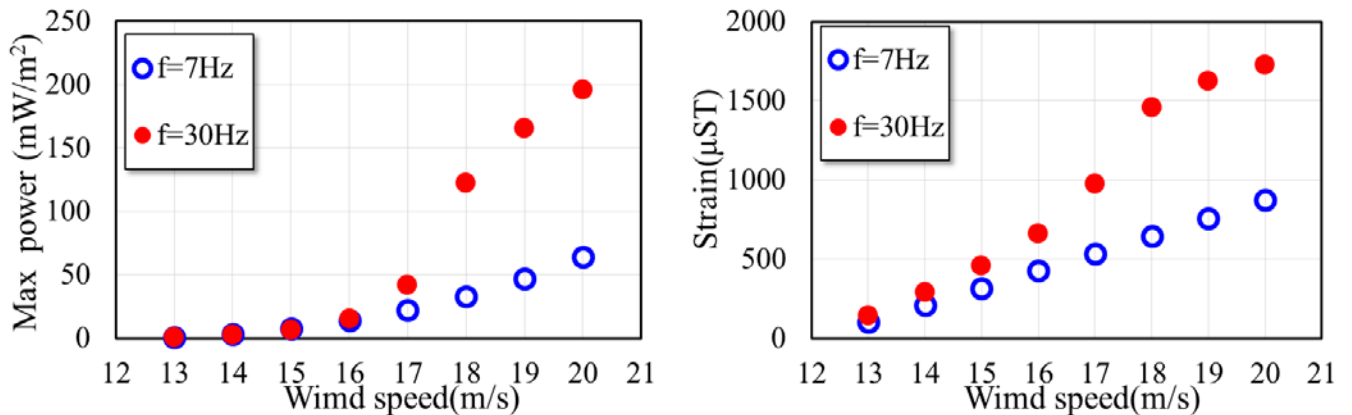


Fig. 5 Estimation of potential for electric performance

5. 4 結言

本研究では、既往研究において開発された柔軟発電デバイスの理論的設計ツールを応用した、風力発電理論計算法の開発を目的として、ノッティンガム大学が保有しているモードカップリングに基づく理論計算法に、初期張力を考慮した固有振動数影響と定常風外力として等分布荷重を与えることで新しい風力発電理論シミュレーション法を開発した。次いで、本理論計算法を風洞実験結果と比較し、精度検証を行った。その結果、発電量およびデバイス中央部の最大変位を比較検証し、概ね良好な計算結果を得ることができた。さらに、弾性材のヤング率、密度、デバイスアスペクト比、中心材の厚さによるパラメータスタディと、デバイスを固有振動数で振動させた場合の風力発電ポテンシャルの推定を行い、デバイスを最適化することで最大で約3倍の発電性能向上が可能であることを示した。しかしながら、高次の振動モードや、デバイス幅方向の変形を考慮するには至っていない。今後の課題として、更なる発電性能向上のためのより深いパラメータスタディを行うことや、他のモードや多方向変形を考慮した風力発電理論計算法の開発等が挙げられる。

6. まとめ・謝辞

約1ヶ月の滞在の中で、純粋な英語力だけでなく、他国の文化の理解や、積極的なコミュニケーションをとることが外国の方と関わるにあたって重要な要素であることを学ぶことができました。自分の英語力が未熟と感じるときでも、伝えようとする強い意思をもってコミュニケーションをとることでお互いの理解につながることができると感じました。また、イギリスの学生たちの研究に対する姿勢や、日常生活における紳士な態度等、お手本とすべき点を学ぶことも出来ました。この経験を糧に、海外でも活躍できる技術者になるために必要な国際的視野を得るための礎を築くことができたと思います。

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、田中義和助教授、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、共同研究先の自動車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、学生支援グループ国際事業担当の皆様へ深く御礼申し上げます。