
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 山田 泰地

1. はじめに

平成 31 年 8 月 19 日から平成 31 年 9 月 17 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. 研修（共同研究）スケジュール

8/1-8/20	出国
8/20-9/15	研究
9/16-9/17	帰国

4. 研修先（共同研究派遣先）の概要

大学名：The University of Nottingham

所在地：University Park, Nottingham NG7 2RD, United Kingdom

指導教員：Associate Professor Xuerui Mao

5. 研修（共同研究）の内容

5.1 緒言

近年、エネルギー自給率の拡大や環境負荷低減等の観点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、風力エネルギーは広大な獲得領域を有しており、風速の 3 乗に比例するエネルギー量を持っているため発電利用価値が高いと言える。その一方、風速・風向の時間的・空間的变化や乱れによる様々な周波数スペクトルを持つなどの

導入の妨げとなる要因がある。そこで、本研究室では、風速・風向の変化や乱れに左右されることなく、より効率的な風力発電手法の一つとして、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。既往研究より、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、微小な風外力によって柔軟に変形し、電気エネルギーを獲得可能なことが確認されている。また、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、デバイスのアスペクト比、張力、ブラフボディの有効活用等が明らかとなっている。このことから、アプリケーション先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，本理論計算法の有用性を検討する．

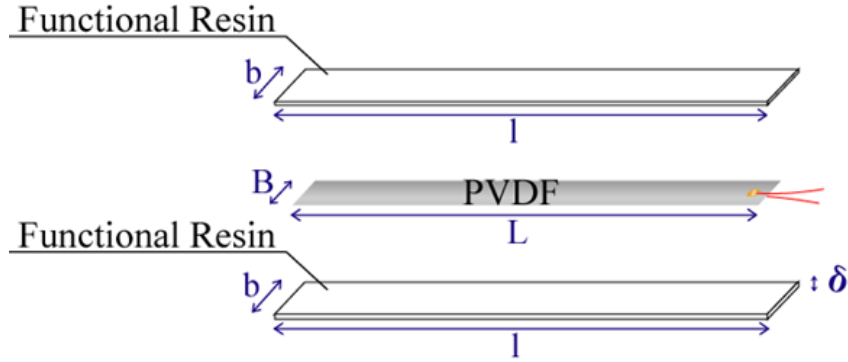


Fig. 1 Basic structure of FPED

5.2 発電理論計算法

5.2.1 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．

$$\ddot{\eta}_q(t) + 2\gamma_q \omega_q \dot{\eta}_q(t) + \omega_q^2 \eta_q(t) + \epsilon V(t) [W'_q(x_1 + x_2) - W'_q(x_1)] = \ddot{w}_b(t) \int_0^L m(x) W_q(x) dx$$

$$C_p \frac{\partial V(t)}{\partial t} + \frac{V(t)}{R_{load}} = \sum_{q=1}^{\infty} -E_p d_{yx} t_{pc} b_p \left[\frac{\partial W_q(x)}{\partial x} \right]_{x_1}^{x_1+x_2} \dot{\eta}_q(t)$$

5.2.2 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．

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

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．

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

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．

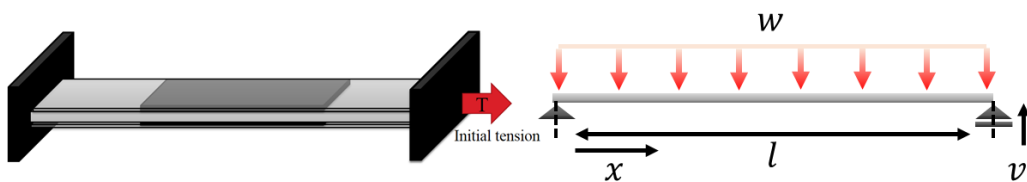


Fig. 2 Simplified model of theoretical method

5.3 計算結果

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 にアスペクト比 12.5，初期張力 1.03N の弾性材高度の異なる 2 種類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と推察される．

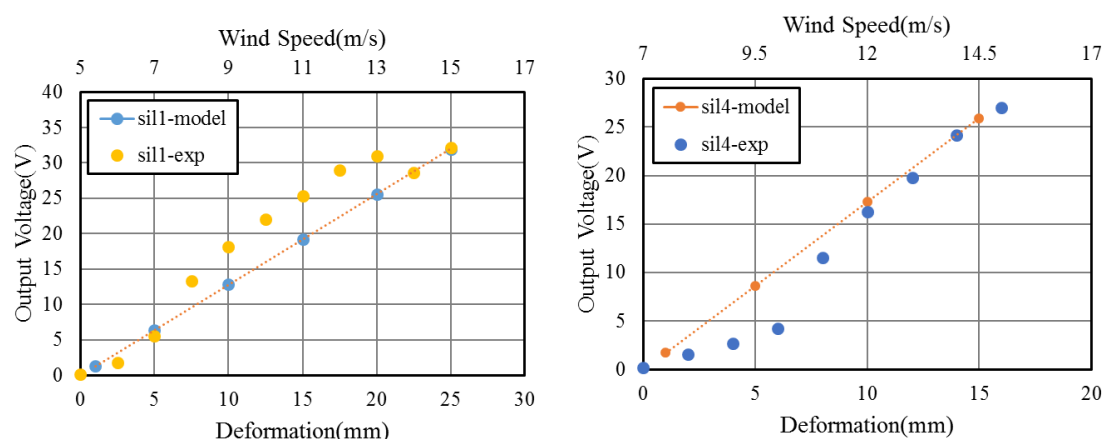


Fig. 3 Comparison between experimental and calculated results

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。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

約1か月にわたる英国での短期留学を通じ、自身の英語力の至らなさを痛感しました。英語でコミュニケーションをとるためには、「話す」能力や異文化に対する理解を含めた総合的な英語力が必要であると感じると同時に、英語学習に対する意欲を向上させることができました。また、異なる文化・慣習を持つ現地の方々の思いやりのある言動に触れ、自身の価値観を広げる貴重な機会を得ることができました。この経験で学んだことを糧に、将来、国際的に活躍できるエンジニアとなれるように精進していきます。

7. 謝辞

本共同研究を指導していただいた Xuerui Mao 先生、陸田秀実准教授、現地での生活を支援していただいた Rupesh さん、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に深く御礼申し上げます。