
ノッティンガム大学（イギリス） 研修報告書

エンジン振動を用いた発電とそのモデリング技術

工学研究科 輸送・環境システム専攻 小山 浩明

1. はじめに

2015年9月1日から同年9月29日の間、イギリスのノッティンガム大学において研究を行った。以下にその報告内容を示す。

2. 共同研究テーマ

ノッティンガム大学は圧電素材を用いたエネルギーハーベスティングに関する研究に取り組んでおり、そこでは数値シミュレーションを用いた研究が盛んに行われている。また広島大学はエンジン振動を利用したエネルギーハーベスティング技術の開発に取り組んでいる。そこでノッティンガム大学とエンジン振動下での発電シミュレーション技術に関する研究を行う。

3. 共同研究スケジュール

9月1日 出国
9月2日～9月29日 研究、プレゼンテーション
10月1日 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. Atanas Popov

5. 共同研究内容

5.1 緒言

近年、エネルギー需要の増大や地球温暖化などの問題から再生可能エネルギーや自然エネルギーといったクリーンエネルギーを使用した発電技術の利用割合の増加が求められている。太陽光発電や風力発電は広く実用化が行われており、ソーラー発電システムは一般家庭への導入が加速化している。その中で、クリーンな発電方法として圧電材料を用いたエネルギー回生技術にも注目が集まっており、多くの研究者が実用化に向けた取り組みを行っている。私の研究室でも圧電フィルム(PVDF)を用いたFig. 1に示す柔軟発電体(Flexible Piezoelectric Device:以下FPED)を提案し、エネルギー回生技術の開発を行ってきた。また、地球温暖化や燃料価格の高騰といった問題に対し、自動車の分野でもエネルギー回生技術に注目し、省エネルギー化に対する多くの取り組みが行われている。環境性能やエネルギー効率の面で優れた電気自動車EV・PHV)や燃料電池車(FCV)に関しては、普及に向けた取り組みが日本のみならず世界各国で活発に進められている。しかし、燃料電池車(FCV)に関しては水素ステーション等の充電インフラの整備や価格、電気自動車(EV・PHV)に関しては航続距離の長さなどの課題が残っており、普及に関しては10年以上の普及施策が必要である。これらの要因から、エンジン車が当面の間も主流な方式として活躍することは確実である。ガソリンエンジンやディーゼルエンジンの燃焼技術に関する研究は現在も行われており、代表されるものとしてHCCIがある。燃焼技術に関しての技術的な成熟度を考慮すると、今後はエンジンそのものの燃焼技術とともに、周辺領域でエネルギーを回生する技術の重要度が高まってくると考えられる。有効利用が期待されるエネルギーとして、熱エネルギーや振動エネルギーなどが挙げられる。こうした背景から、私の研究室では回生エネルギーの1つとしてエンジン振動に着目し、エンジン振動を利用した発電方法の開発に取り組んでいる。

以上の背景を踏まえ、本研究ではエンジン振動下でのFPEDの構造を最適化するための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、エンジン振動下でのFPEDの発電実験結果と理論計算結果を比較し、発電理論計算法の精度検証を行う。

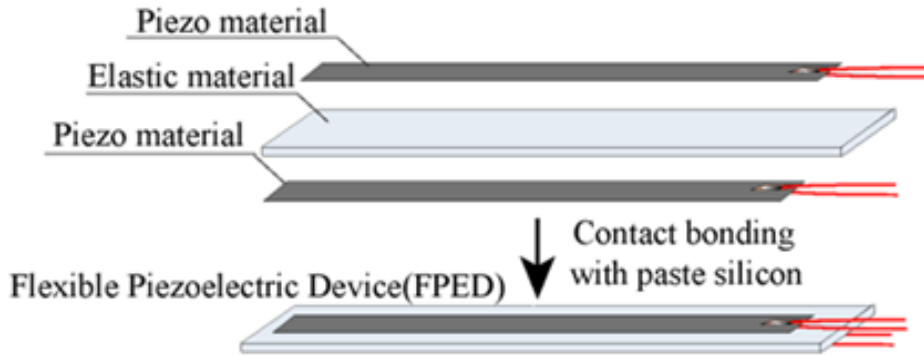


Fig. 1 Basic structure of the FPED

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。

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

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

➤ エンジン振動下における FPED の理論計算法

エンジン振動下における FPED の理論計算法を開発するためには(1)式における加振機の振動変位 w_{base} をエンジンの振動変位に置き換える必要がある。そこでエンジンの振動変位を計算する

ためのモデルを Fig. 2 に示す. Fig. 2 からエンジンの運動方程式は以下の式で表される.

$$m_e \ddot{z}_e + c_e \dot{z}_e + k_e z_e = f_e + f_d \quad (3)$$

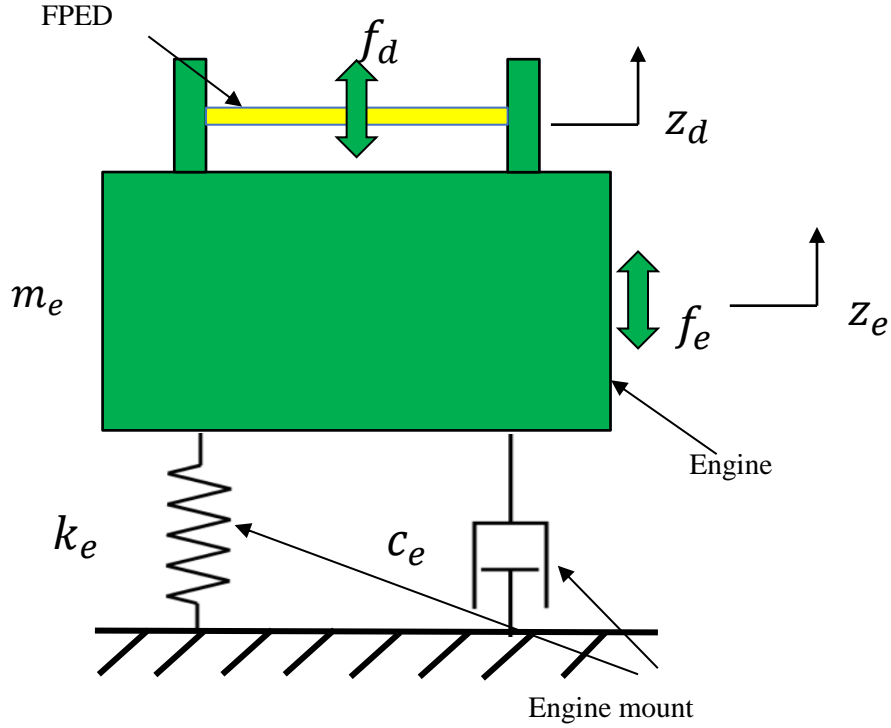


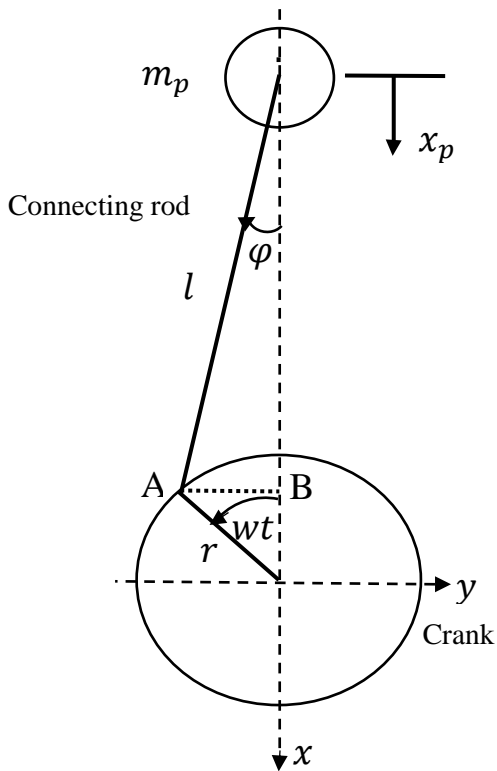
Fig. 2 Engine model

(3)式において m_e はエンジン質量, c_e はエンジンマウントの減衰係数, k_e はエンジンマウントのばね定数, z_e はエンジンの振動変位, f_e はエンジン内部のピストン運動によってエンジン本体に与える慣性力, f_d は FPED の振動によってエンジン本体に与える慣性力を表している. また FPED の振動によってエンジン本体に与える慣性力 f_d は以下の式で表される.

$$f_d = \int m_{FPED} \ddot{z}_d dx = \ddot{\eta}_q m_{FPED} W_q dx \quad (4)$$

(4)式において m_{FPED} は FPED の質量, z_d はデバイスの質量を表している. 次にエンジン内部のピストン運動によってエンジン本体に与える慣性力 f_e を計算するためのピストンクランク概念図を Fig. 3 に示す. Fig. 3 からピストンの振動加速度 \ddot{x} は以下の式で与えられる.

$$\ddot{x}_p = r\omega^2 \left[\cos\omega t + \frac{r}{l} \cos 2\omega t \right] \quad (5)$$



(5)式において r はクランク半径, w は各周波数, l はコネクションロッド長さを表している. (5)で求めたピストンの振動加速度とピストン質量 m_p の積によってピストンがエンジンに与える慣性力を求める.

Fig. 3 Piston-Crank model

5. 3 実験結果と理論計算結果の比較

直列4気筒エンジンに Fig. 4 に示す FPED を取り付け, FPED の発電実験を行った. 以下に発電実験結果と理論計算結果を示す.

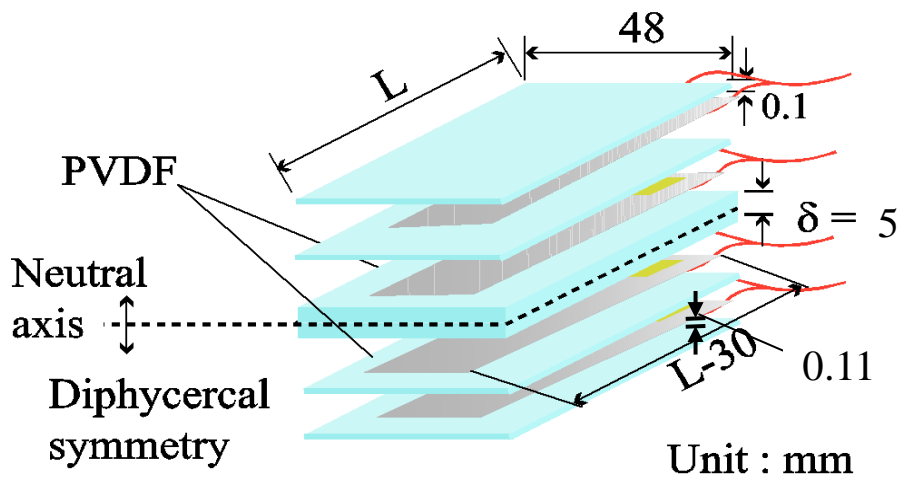


Fig. 4 FPED model

➤ 振動加速度

エンジン回転数に対するエンジンの振動加速度の実験結果と理論計算結果を Fig. 5 に示す. 尚, FPED の固有振動数での実験結果と理論計算結果の振動加速度を一致させるため, エンジン質量, ピストン質量, コネクションロッド長さ, クランク半径, エンジンマウントばね定数の各種パラメータを調節した. Fig. 5 から実験結果, 理論計算結果ともにエンジン回転数が増加することによって, 振動加速度が増加することが確認出来る.

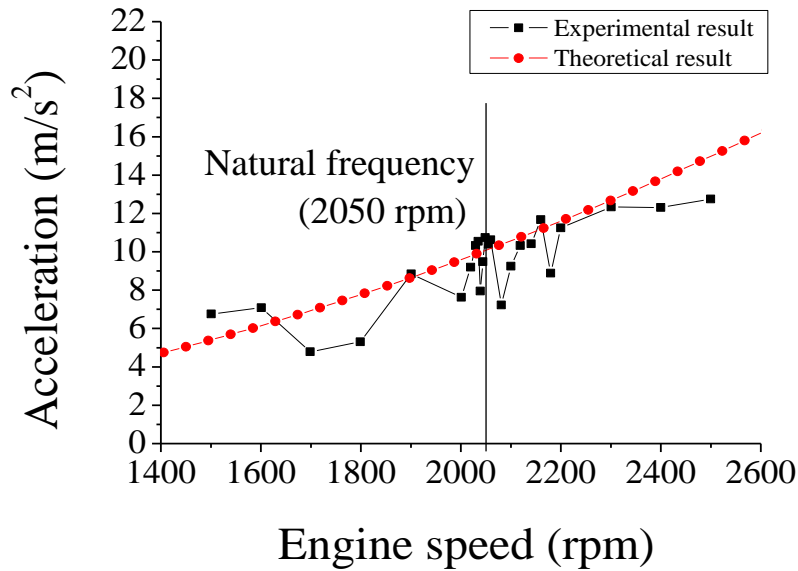


Fig. 5 Experimental result and Theoretical result of engine acceleration for rpm

FPED の共振点 2050 rpm の時刻歴応答に対するエンジンの振動加速度について, 実験結果と理論計算結果を Fig. 6 に示す. Fig. 6 から実験結果と理論計算結果の良い一致が確認出来る.

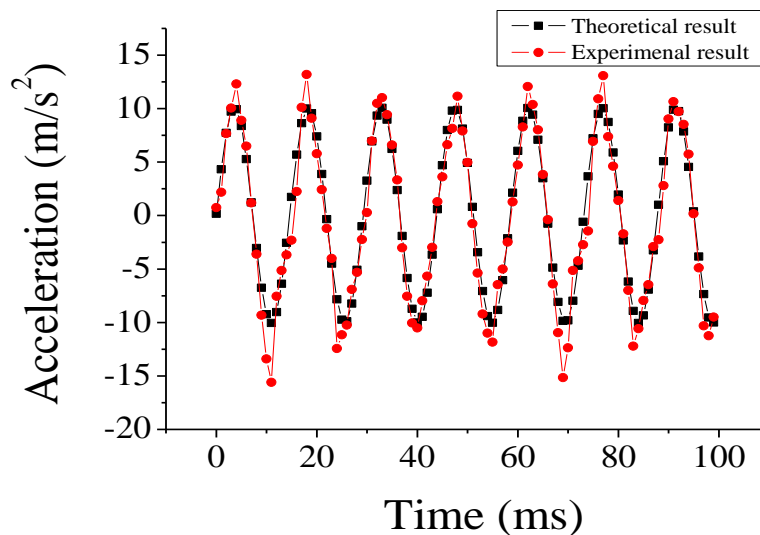


Fig. 6 Experimental result and Theoretical result of engine acceleration for the time history

➤ 発生電力

エンジン回転数に対する FPED の発生電力の実験結果と理論計算結果を Fig. 7 に示す。約 0.005 W の誤差が発生しているが、傾向として概ね一致していることが確認できる。

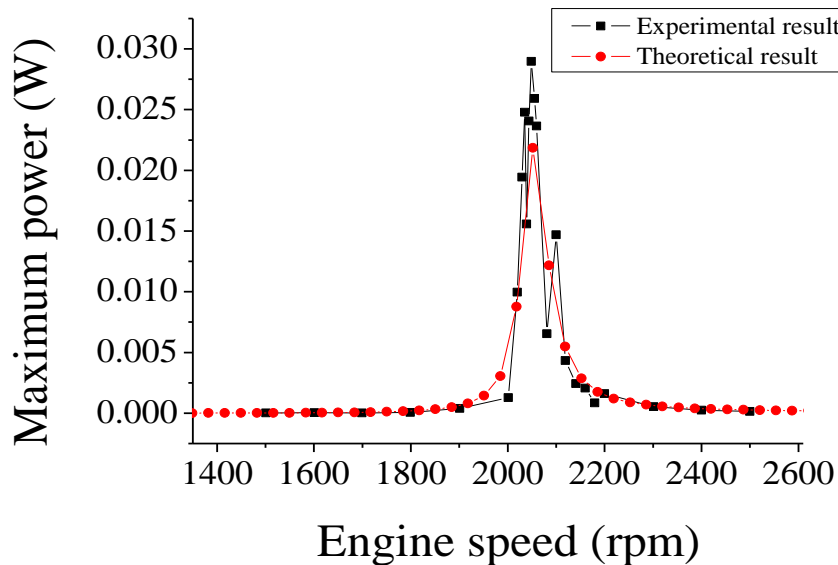


Fig. 7 Experimental result and Theoretical result of power generation of FPED

6. まとめ

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、エンジン振動下での FPED の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エンジン変位を代入することで新しい発電理論シミュレーション法を開発した。次いで、本理論計算法をエンジン振動下での FPED の発電実験と比較し、精度検証を行った。その結果、エンジンの振動加速度及び FPED の発生電力共に概ね良好な計算結果を得ることが出来た。今後の課題として直列 4 気筒エンジンだけでなく様々な種類のエンジンに対応したモデルの開発を行っていく。

7. 謝辞

約 1 ヶ月間の海外共同研究を通して、さまざまな経験を得ることが出来、勉強になることがたくさんありました。

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 Dr の Rupesh さん、海外共同研究をサポートしてくださいました実行委員の先生方、支援室国際事業担当の皆様深く御礼申し上げます。