歩行による振動を模擬した低周波振動における圧電素子を用いた振動発電
－ クリーンなエネルギーはその一歩から －

中島 悠花（神戸市立工業高等専門学校 電気工学科 3 年）
指導教員 南 政孝

1. はじめに

2015 年 9 月の国連サミットで, 2030 年までに持続可能でより良い世界を目指す目標として 17 の国際目標で構成された SDGs が成立した(1). その中に「7. エネルギーをみんなに そしてクリーンに」という目標がある(1). 私たちの身の周りには, 光・熱(温度差)・振動・電波など様々な形態で環境中にエネルギーが存在する. そして, これらのエネルギーを電力に変換するエネルギーハーベスティング(別称：環境発電)という技術が近年注目されている(2). その中で本研究では, 振動によるエネルギーを電気エネルギーに変換する振動発電(3), (4)に注目している.

本研究では, 私たち(人)が「歩く」という日常生活の中で必ず生まれる動作に着目し, その振動エネルギーを回収することができれば, 全ての人が安定した持続可能なエネルギーを得ることができるのではないかと考えた. そして, そのエネルギーを応用する先として, 日常生活に必要不可欠なスマートフォンの充電を考えている.

そのため本論文では, 歩く動作(歩行)を模擬した低周波振動(1Hz)を用いて, 圧電素子によるエネルギー回収の評価を数値的に実施し, 実機検証の準備に取り掛かっている. 特に, 圧電素子のエネルギー回収に必要な整流器の種類に着目し, その出力特性を数値的に評価したことを報告する.

2. 現状分析と課題

従来, 発電するデバイスの観点と機械的な共振を合わせる観点から, 振動発電には, 高周波(数十 Hz から数百 Hz)の振動が用いられている. 一方, 歩行による振動は, 低周波(1Hz 前後)であるため, 従来の方法ではエネルギーを得ることは非常に難しい. また, 振動の種類として, 歩行時の腕や足の揺れを再現する, 前後回転の運動を想定しているため, 単調な励振ではない. したがって, 検証するための実機製作にあたり, どのような物理的な振動発生機構(構造)を用いるのかを考える必要がある.

本発表では, 低周波(1Hz)の振動によって圧電素子による発生エネルギーを数値解析により検証し, 振動発生機構の製作成果をまとめる.

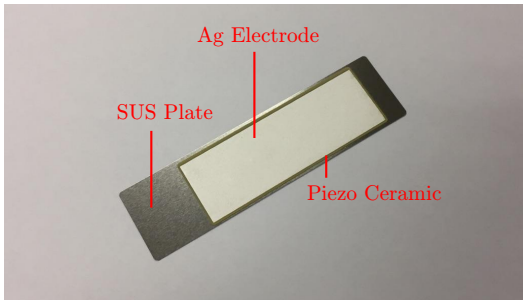

図 1：使用する圧電素子(K7520BS3)

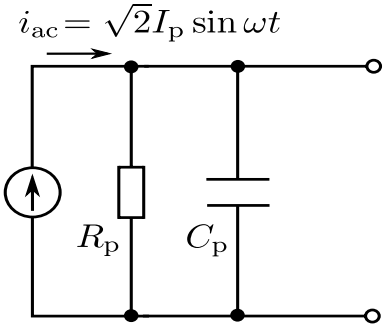

図 2：圧電素子の等価回路

3. 圧電素子の等価回路と整流器

〈3･1〉 圧電素子と等価回路 図 1 に本研究で使用する圧電素子(THRIVE 社製, K7520BS3)を示す. 圧電素子は圧電性セラミックを電極で挟んだ構造をしており, 中心のステンレス鋼の電極の両面に圧電性セラミックがあり, それを銀の電極で挟み込んだ構造をしている.

次に圧電素子の等価回路について説明する. 図 2 に示すように, 圧電素子は機械的特性および電気的特性を等価回路モデルとして表すことができる.機械部からのエネルギー源が電荷として送られるため交流電流源 i_{ac} として表現され, 圧電素子部分は内部静電容量 C_p として表される. また, 内部抵抗 R_p は, 交流電流源 i_{ac} と内部静電容量 C_p と並列に存在する.

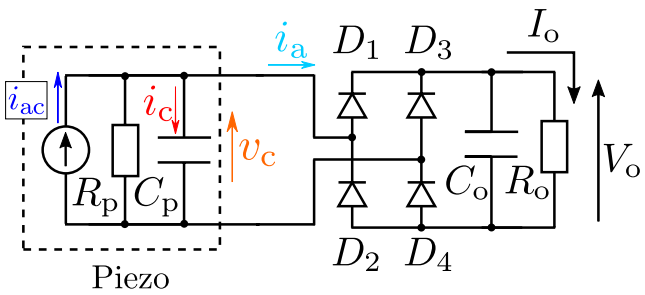

図 3：ダイオードブリッジ整流器(略称：DB)

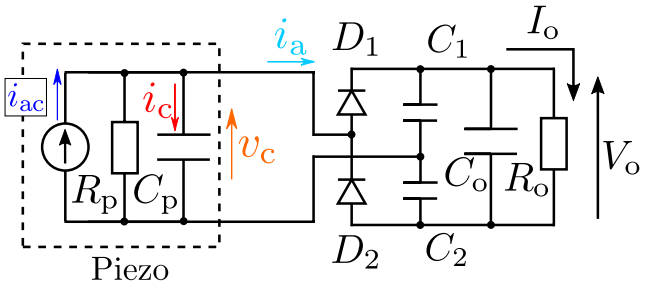

図 4：倍電圧整流器(略称：VD)

〈3･2〉　整流器　　圧電素子を用いた振動発電の出力電力は交流であるため，振動発電で得た電力を利用するためには直流への変換する整流器が必要となる．また，本研究で対象とするエネルギーは微小であるため，ドライブに電力が必要なアクティブ素子を用いずにパッシブ素子のみで構成された整流器を対象とする．そのため，一般的に広く用いられるダイオードブリッジ整流器(略称：DB (Diode Bridge Rectifier))[5]を用いる．しかしながら，ダイオードブリッジ整流器の回路構成は簡単であるが，効率が良くないため，出力電圧と出力電力がともに低いと言われている．振動発電の出力電力は小さいので，直流に変換すると出力電力がさらに小さくなるという問題がある．これに対して，ダイオードブリッジ整流器よりも出力電圧が高く得られるような整流器として倍電圧整流器(略称：VD (Voltage Doubler Rectifier))がある．この整流器は，出力電圧は高いが，出力電力が小さいという特徴がある．本発表ではこれら 2 つ(ダイオードブリッジ整流器と倍電圧整流器)の整流器をそれぞれ振動発電の回路に組み込み，数値解析により，その効果を検証する．

4.　数値解析

〈4･1〉　解析条件と解析方法　　数値解析に用いる回路シミュレータは，PLECS4.4.1 を用いている．そして，圧電素子の電気的特性は、先行研究[6]を参考に，振幅を 10mA，角周波数 $\omega=2\pi\times(1\mathrm{Hz})$，$R_p$=3.6kΩ，$C_p$=1.06μF と設定する．図 3，4 に対象とする整流器を圧電素子に接続した回路を示す．

ここで，ダイオードブリッジ整流器および倍電圧整流器に用いるダイオードは理想素子であるとする．このとき，平滑用キャパシタ C_o の容量は 10μF とし，初期電圧は 0V とする．また，図 4 の倍電圧整流器に使用する C_1 および C_2 については容量を 10μF，初期電圧を 10V とする．このとき，平滑用キャパシタ C_o の容量は 10μF，初期電圧は 20V とする．計算時間は回路が十分定常状態に収束した 5 秒間に設定している．

負荷抵抗 R_o を E12 系列で 1.0Ω から 4.8MΩ まで変化させ，収束値(出力電圧 V_o と出力電流 I_o)を測定する．ここで出力は直流なので，出力電力は $P_o=V_oI_o$ として算出している．

〈4･2〉　解析結果　　図 5 および図 6 に数値解析結果を示す．それぞれの回路を略称である DB(ダイオードブリッジ整流器)と VD(倍電圧整流器)と表記している．図 5 において，横軸が電圧(単位:V)，縦軸が電流(単位:mA)を表す．図 6 において，横軸が電圧(単位:V)，縦軸が電力(単位:mW)を表す．図 6 の P-V 特性について，ダイオードブリッジ整流器と倍電圧整流器を比較すると，電圧が 0V から 24V の範囲では，ダイオードブリッジ整流器の方が得られる電力が大きいことがわかる．全領域で，最大電力を比べると，ダイオードブリッジ整流器の方が倍電圧整流器の 2 倍の電力を出力している．このとき，ダイオードブリッジ整流器では 44.38mW，倍電圧整流器では 19.68mW の電力を得ることができている．

一方で，高い出力電圧を用いて大電力を得るには倍電圧整流器の方が優れていることがわかる．以上のことから，出力の要求(電圧値や電力値)に合わせた設計が必要である．

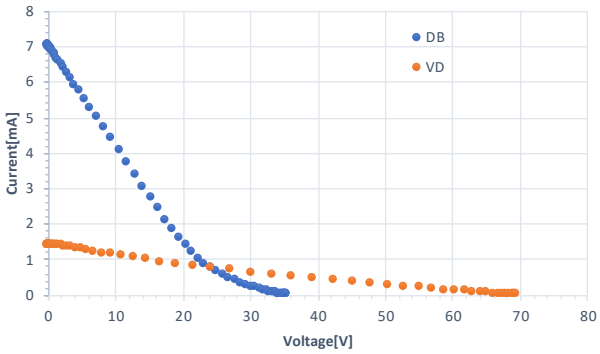

図 5：出力電流と出力電圧の関係

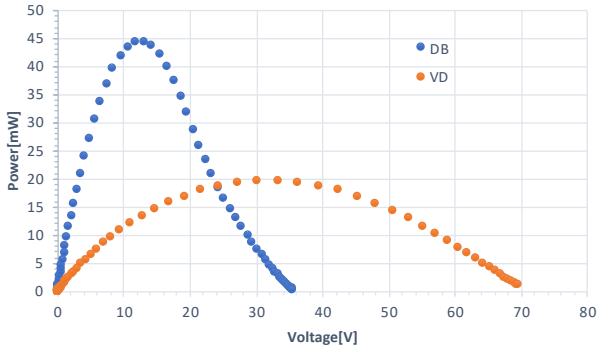

図 6：出力電力と出力電圧の関係

5. 振動模擬試作機を用いた低周波振動の検証

前章の数値計算で用いた圧電素子の電気的特性(特に電流の振幅値)は，先行研究[6]の値を参考に決定したものである．今後は本研究で対象とする歩行による低周波振動を模擬した実験により，電気的特性の妥当性を調査する必要がある．そのため，ここでは，振動模擬試作機を製作して，振動を模擬させることが可能かを検証する．

〈5･1〉 振動模擬試作機 図 7 に製作した振動模擬試作機を示す．回転式 DC モータ(自作)を用いて加振させ，プラスチックの板の先端に取り付けた圧電素子を振動させる構造(図 7 中には圧電素子は未実装である)となっている．回転式 DC モータの電圧を調整することで，周波数を調整する設計にしている．なお本研究では，歩行によって生じる振動エネルギーを対象としているため，1Hz 程度の周波数が対象である．

〈5･2〉 検証結果 図 7 に示した振動模擬試作機を用いて振動させる検証をしようとしたが，電圧を印加しても微動だにせず，振動動作が確認できなかった．その原因として，試作機の推力不足が考えられる．今後は，力学的な設計を踏まえて，推力を増強させ実験を続ける予定である．

6. おわりに

本研究では「歩く」という日常生活の中で必ず生まれる動作に着目し，その振動エネルギーを回収することができれば，歩行するだけで誰でもいつでもスマートフォンが充電できるのではないかと考え，回収エネルギーの数値解析による評価と実証実験に向けた準備を報告した．今回検証した条件では，より低電圧で大きな電力を取り出すことができるという点からダイオードブリッジ整流器を用いた振動発電の方が適していることがわかった．また，高電圧にて動作させたい場合には，倍電圧整流器が適していることがわかった．振動模擬試作器は残念ながら推力不足により動作しなかったので，今後再設計して実機検証を進めていきたい．

今後の展望として，1. デバイス，2 整流器，3 振動機構のそれぞれの観点で研究を進めていく予定である．現状は圧電素子を用いた振動発電を想定しているが，それ以外のデバイス(例えば，磁歪材料[7])の適用を考えている．また，整流器は本論文でダイオードブリッジ整流器と倍電圧整流器の 2 種類を対象にしたが，パッシブ素子のみで構成されるその他の整流器[例えば(8), (9)]を扱っていきたい．そして，本論文では動作しなかった振動模擬試作機の改良とそれによる実機検証を進めていきたい．

これら 3 点を進めることにより，誰でもいつでもスマートフォンを充電できるクリーンなエネルギー供給装置の開発を将来的に考えている．

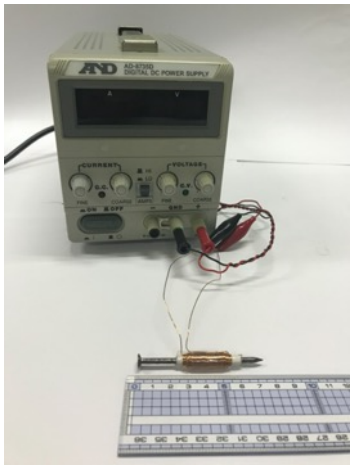

図 7：製作した振動模擬試作機

謝辞

本研究は，神戸市立工業高等専門学校 電気工学科 南 政孝先生の元で実施した．南先生には，研究全般に渡ってアドバイスをいただくとともに，数値解析や論文調査について事細かなご指導をいただきました．ここに感謝の意を評します．

また，実機製作に関しては，同所属 酒井 昌彦先生に加工や機構のアドバイスをいただきました．感謝申し上げます．

文　　献

（1） 国際連合広報センター2030 アジェンダ https://www.unic.or.jp/activities/economic_social_development/sustainable_development/2030agenda/

（2） 堀越 智・竹内 敬治・篠原 真毅：「エネルギーハーベスティング：身の周りの微小エネルギーから電気を創る”環境発電”」，日刊工業新聞社，第 1 章 (2014)

（3） 速水 浩平：「振動力発電のすべて」，日本実業出版社，第 1, 2 章 (2008)

（4） 上野 敏幸：「磁歪振動発電と応用展開 電池フリーIoT から電力回生へ，現状と課題，将来展望」，クリーンテクノロジー, Vol. 29, No. 11, pp. 58-61 (2019)

（5） 電気学会・半導体電力変換システム調査専門委員会：「パワーエレクトロニクス回路」，オーム社，第 4 章 (2010)

（6） 南 政孝・阪部 智城・茂木 進一・道平 雅一：「パッシブ素子を用いた圧電素子による振動発電の出力電力向上に関する提案」，電気学会論文誌 D, Vol. 137, No. 12, pp. 918-923 (2017)

（7） 鈴木 雄二，篠原 真毅，中寺 和哉，宮崎 康次，竹内 敬治：「環境発電ハンドブック―電池レスワールドによる豊かな環境低負荷型社会を目指して」エヌティーエス，1 章 11 節「磁歪材料」 (2012)

（8） 藤原 憲一郎・野村 弘：「高調波ガイドライン適合型単相ダイオード整流回路」，電気学会論文誌 D, Vol. 119, No. 1pp. 103-108 (1999)

（9） 茂木 進一：「IEC 61000-3-2（Class A）に適合するスイッチング素子を用いない欧州向け 3.5kW 単相倍電圧ダイオード整流器」，電気学会論文誌 D, Vol. 138, No. 11, pp. 841-847 (2018)