

技術紹介

1

ポータブルデバイスに適した振動発電モジュールの開発

Development of portable vibration power generation module

山根 康平	Kohei Yamane	商品開発センター
松崎 政彦	Masahiko Matsusaki	商品開発センター 主任
田村 博規	Hironori Tamura	商品開発センター 主任
市川 真太郎	Shintaro Ichikawa	商品開発センター 技術マネージャー

キーワード: 振動発電、IoT 独立電源、EDLC 充電・放電、エナジーハーベスティング

Keywords: Vibration power generation , IoT independent power supply , EDLC charge / discharge , Energy harvesting

要 旨

新型コロナウイルスの流行を機にあらゆる業種でニューノーマルへの対応が求められており、リモートワークおよび働き方改革の導入が進んでいます。例えば工場や建設現場においては、作業員の健康状態を定量的に把握し改善サイクルを回すことで労働環境の改善を図っています。従来、作業員の健康状態把握には朝礼または休憩中の対面による健康チェックが行われてきましたが、熱中症予防などのリアルタイム性が求められる場合や非対面を維持したい状況ではポータブルデバイスによる遠隔モニタリングが有効であると考えられます。一方で物資運搬や電源確保が困難な現場においては、ポータブルデバイスの充電や電池交換頻度を少なくすることが求められます。そこで今回は、このような現場に適用可能なポータブルデバイスならびに振動発電モジュールについて報告いたします。

SUMMARY

The new coronavirus epidemic has prompted all kinds of industries to respond to the new normal, and remote work and work style reforms have been introduced. For example, in factories and construction sites, the working environment is being improved by the quantitative health check of workers to utilize the PDCA cycle. Conventionally, face-to-face health checks at morning meetings or during breaks have been used to monitor the health of workers. But in situations where real-time monitoring is required to prevent heat stroke or keep a distance, remote monitoring with portable devices is considered as an effective method. On the other hand, at sites where it is difficult to transport supplies and secure power sources, it is necessary to reduce the frequency of recharging and battery replacement of portable devices. In this paper, we report on portable devices and vibration power generation modules that can be applied to such sites.

1. はじめに

クラウドコンピューティングの普及、無線通信インフラの整備、GPU(Graphics Processing Unit)の登場による第三次 AI(Artificial Intelligence)ブーム、情報産業でのビッグテックの台頭などにより、ビッグデータ活用への期待があります。それに伴い第三次産業革命を担ってきた単純作業の自動化や IT 化から、より高度な自律・協調制御へとシフトしていくことが予想されます。IoT(Internet of Things)はその中で物理情報を集める手段として注目を集めています。また現在は新型コロナ感染症の流行による変革も活発化しており、IoT の活用先として社会問題の解決や社員の働き方改善などにも目が向けられています。例えば蓄積したバイタルデータを用いてプラント作業員の体調の異常を検出するという取り組みがあります。¹⁾ また物流倉庫でのピッキング作業者に付けた加速度センサから行動推定を行うことで商品位置の改善につなげる事例や²⁾、高齢者の介護や防災分野への活用³⁾が行われています。

これらの IoT 技術においては、センシングする物理量を増やすことや蓄積データ数を増やすことが予測や検出の精度向上につながると考えられます。しかしそのためには無数の IoT デバイスを長期間動作させることが必要であり、一方で IoT デバイスは無線を使ってデータを転送することから電磁波エネルギーを放出して電力を消費してしまいます。それゆえデバイス自身の低消費電力制御及び、電力源の確保が重要になってきます。電力源として一次電池が用いられることが多い中、再生可能エネルギーを用いてそれを置き換える取り組みがあります。^{4,5)}しかしながら設置する環境に応じて収集できるエネルギーの形態が異なるため、一次電池を完全に置き換える場合はデバイスの細分化や棲み分けが適していると考えられます。そこで当社では環境発電の中でも振動発電に注目し、さらにその低周波数領域で動作する電磁誘導型の環境発電デバイスの開発を行っています。

環境発電は一般的に単位時間当たりの発電量が物理的に限られます。また発電量が条件によって大きく変動し、負荷回路を駆動させるだけの十分な電力が得られないケースがあります。そのため負荷回路の休止時間に蓄積した電力を起動時に供給することで、負荷回路を断続駆動させる充放電回路を試作いたしました。本稿では作業員が持ち運び可能なサイズの振動発電デバイスとその充放電回路を用いて省電力無線モジュールを駆動し、クラウドに温度データをアップロードするシステムの試作について報告いたします。

2. 用途とシステム構成

従来、作業員の健康状態把握には朝礼または休憩中のきづきなど対面による健康チェックが行われてきました。その仕事を IoT デバイスで補完することで、熱中症の予防などのリアルタイム性が求められる場面や非対面を維持したい状況に対応できるようになることが期待できます。そこで振動発電モジュールを用いて温度や位置データを観測するシステムを目標としました。システム構成を図 1 に示します。センサデータは長距離・低消費電力・低ビットレートを特長とした無線技術である LPWA(Low Power Wide Area)で送信されます。受信機は LPWA ゲートウェイの機能を果たし、屋外の使用を想定して 4G などの移動体通信回線からクラウドへデータをアップロードします。

寒冷地や高所作業などでの現場では物資運搬や電源確保が手軽に行えないケースがあり、センサデバイスの充電や電池交換頻度を少なくすること、動作温度範囲が広いことが求められます。そこであらゆる条件下においてデバイスに電源を供給できることが望めるように、電気二重層キャパシタ EDLC(Electrical Double Layer Capacitor)を用いた充放電回路と振動発電でポータブルデバイスを構成いたしました。



図 1. 携帯型デバイスの通信システム

3. ポータブルデバイスの構成

3.1 振動発電モジュール

振動発電モジュールの概略を図 2 に示します。誘導起電力による振動発電部では薄型化に適したコイルまたは磁石を平行に動かす機構となっており、振動子のヨーク部分は磁気回路の形成と運動エネルギーを確保するための重りの役割を果たします。電源回路部では発電した起電力を EDLC に蓄えます。そのことで振動発電素子の発電電力の変動と負荷回路の消費電力の差を吸収します。

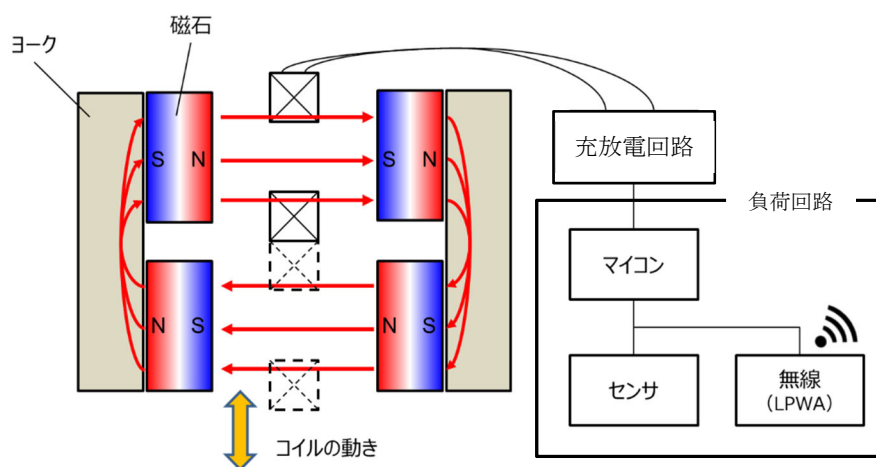


図 2. 振動発電モジュールの概要

3.2 振動発電素子の設計

振動子の運動エネルギーを電気エネルギーに変換させるため、摩擦やケースとの干渉をなくすることが必要です。それに加え磁石とコイルの隙間を狭めて発電量向上と小型化を図りました。それらの発電電力と携帯性はトレードオフの関係にあり、また内部の設計パラメータも相互依存します(図 3)。

例えば負荷回路の仕様が変更したために高出力化を図りたいとします。高出力化のためには振動子を重くして運動エネルギーを大きくするのが有利です。運動エネルギーが大きいと電磁誘導により電気エネルギーに変換された際も振動の振幅が小さくなりにくいいため、コイルを貫く磁束の変化を保てるためです。一方で直動振動系の機械設計の面からみると単純に重さを増やせばよいだけではありません。重量を増やそうとすると斜め振動時の軸受け摩擦が大きくなり、振動子の厚みが増すと直動軸受けにモーメントが発生するなどの問題が生じるからです。

これらの設計パラメータは相互依存性があるため妥協の範囲を探っていく必要があります。今回は持ち運び可能であるというコンセプトから、名刺入れのサイズと同等のデバイス寸法を基準とし、歩行の周波数約 1.8 Hz^⑥を目標に各パラメータを設計しました。

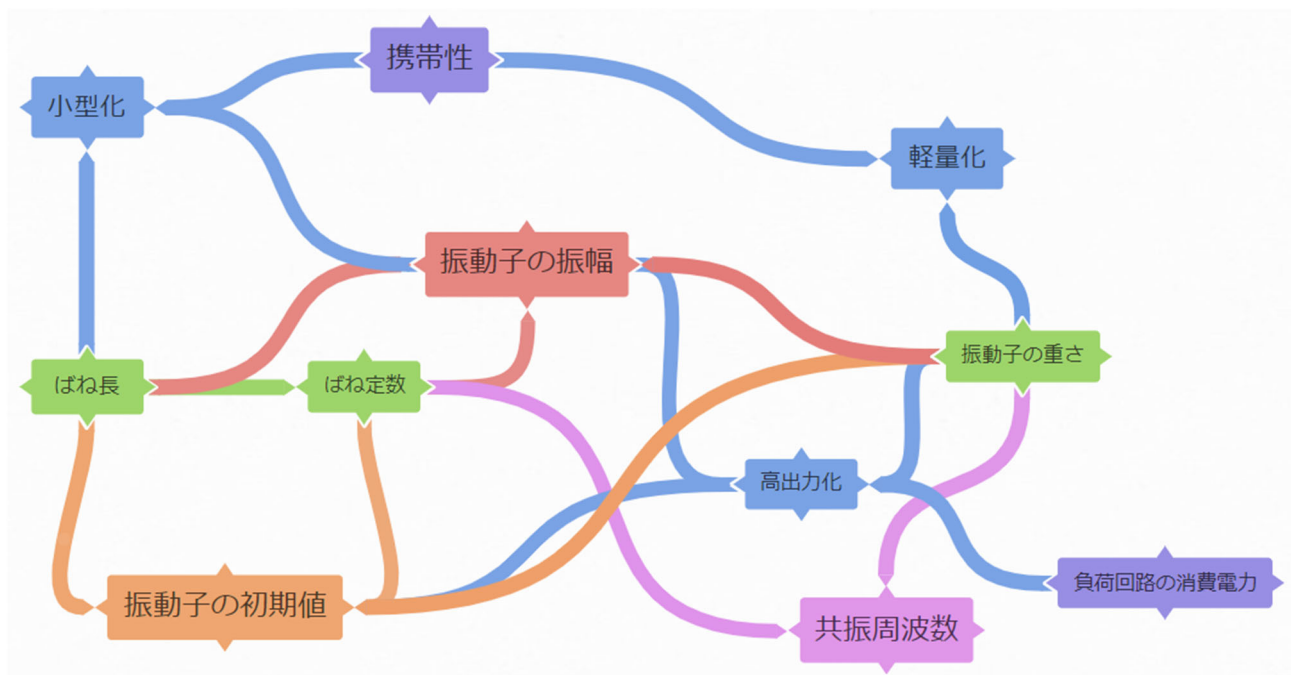


図 3. 振動発電素子の設計項目の相互依存

3.3 充放電回路の構成

実際のユースケースでは発電が頻繁に止まるなど電力変動が大きいことが考えられます。そのため変動する電力を充電して、センサが必要とする一定電力を放電する機構が必要であり、そのための充放電回路の設計を行いました。充放電回路のブロック図を図 4、動作の様子を図 5 に示します。最初に交流の振動発電素子出力を全波整流し、コンデンサに電荷を蓄積します。電圧監視部では充電電圧を常に監視しています。立ち上がり閾値を超えると **Enable** 信号を出力し、昇降圧レギュレータを駆動します。そのことで放電時に変動する充電電圧を定電圧に変換します。定電圧出力は充電電圧の立下り閾値を下回るまで行われます。このことにより振動発電素子の電力を上回る出力電力を断続的に取り出すことが可能になります。

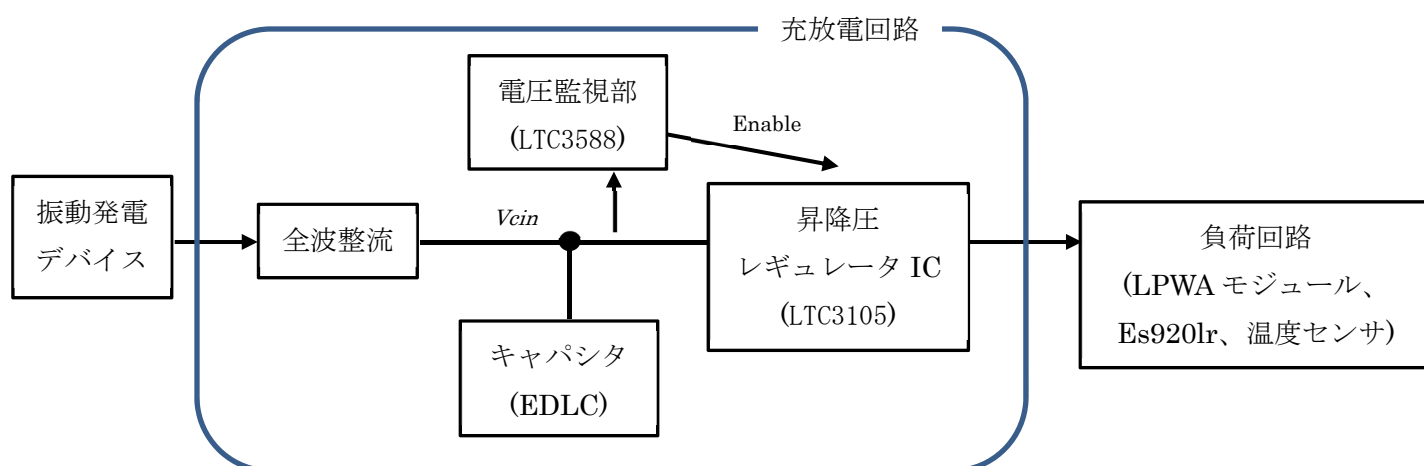


図 4. 充放電回路のブロック図

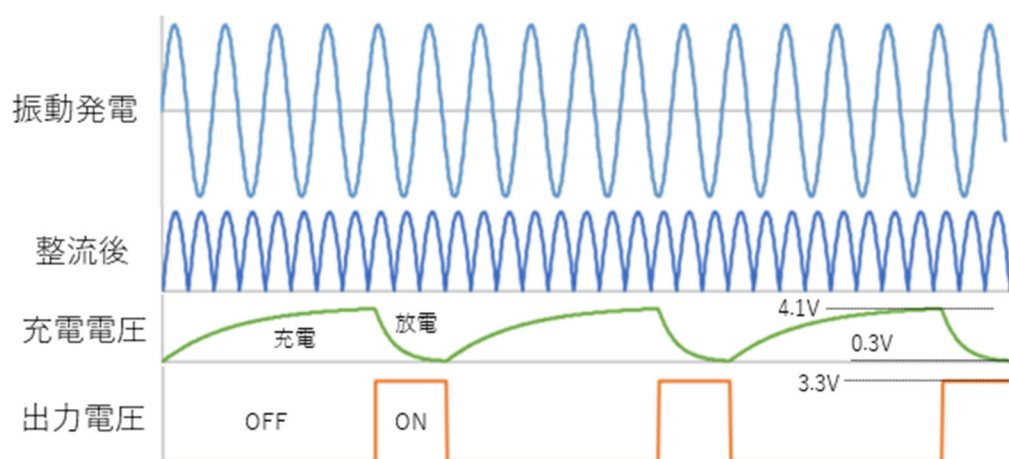


図 5. 充放電制御による負荷回路の間欠動作

アナログ・デバイセズ社製の環境発電用レギュレータ LTC3105 は、EDLC の充電電圧 V_{cin} を昇降圧して負荷回路へ定電圧出力します。今回の電源回路では昇降圧レギュレータの入力は 0V から徐々に上昇します。LTC3105 は自身で昇圧した電圧を内部回路に供給することで広い入力電圧範囲を確保していますが、Enable 信号を入力につなぐとキャパシタの充電が完了する前に起動してしまいます。よって放電の開始閾値が停止閾値よりも十分に高いヒステリシス信号を作り出す必要があります。同じく LTC3588 も低消費電力性に優れますが、試作した振動発電素子に対して入力電圧範囲が高いため電圧監視機構として使用しています。LTC3588 は $V_{cin} > \text{約 } 4.1 \text{ V}$ となると動作を開始して、 $V_{cin} = \text{約 } 2.9 \text{ V}$ になるまで降圧動作を続けます。LTC3105 の Enable は高入力インピーダンスであるので、LTC3588 がストップした後は Enable 端子電圧は V_{cin} に連動します。そのように LTC3588 出力電圧を LTC3105 の Enable へ接続することで充電電圧 0.3 V ~ 4.1 V のヒステリシスを実現しました。

4. 試作結果

4.1 試作品外観

試作したポータブルデバイスを図 6 に示します。負荷回路として LPWA モジュールと温度センサを組み込み、デバイスを振動させると温度データが無線送信される構成にしました。

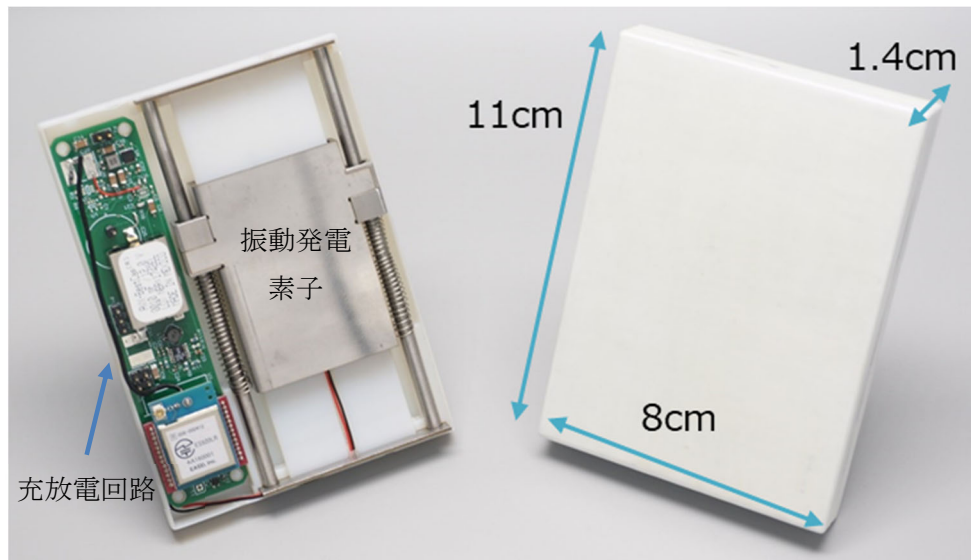
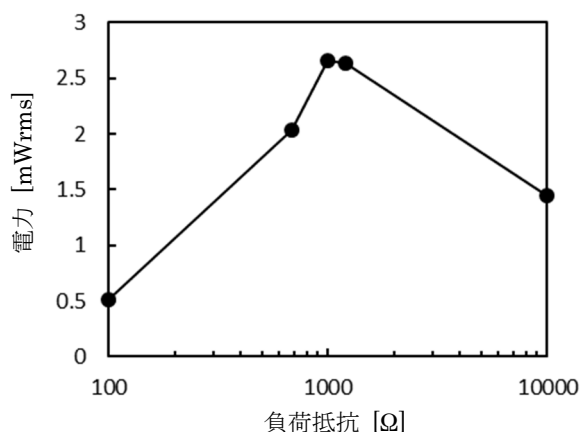


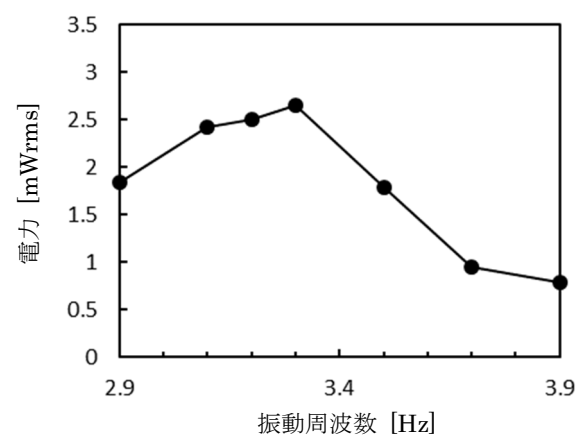
図 6. 振動発電モジュール(振動発電素子+充放電回路)

4.2 振動発電素子の評価結果

振動試験機に振動発電素子を固定し、出力に抵抗を接続して、その両端の電圧をオシロスコープで取得することで最大電力及び共振周波数を計測いたしました(図 7)。その結果振動周波数 3.3 Hz で電力の極大が取れ、負荷抵抗 1 k Ω の際に最大電力 2.7 mW を取得することができました。



(a) 負荷抵抗対電力(振動周波=3.3 Hz、加速度=0.18 G)



(b) 負荷抵抗対振動周波数(負荷抵抗=1 k Ω 、加速度=0.18 G)

図 7. 振動発電デバイスの計測結果

4.3 充放電回路

電力効率

振動発電素子と充放電回路を接続し、加速度 = 0.18 G、周波数 = 3.3 Hz の振動を加えた際のキャパシタの(10 mF)充電時間を計測いたしました(図 8)。

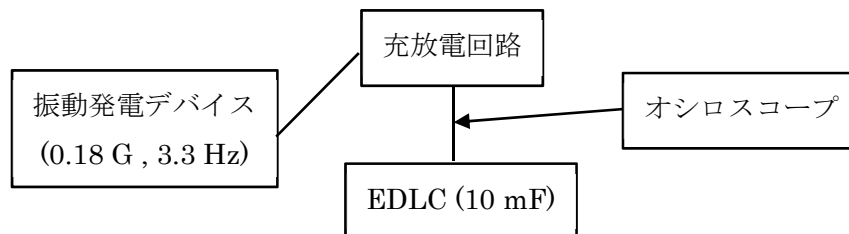


図 8. 振動発電デバイスの電力効率測定

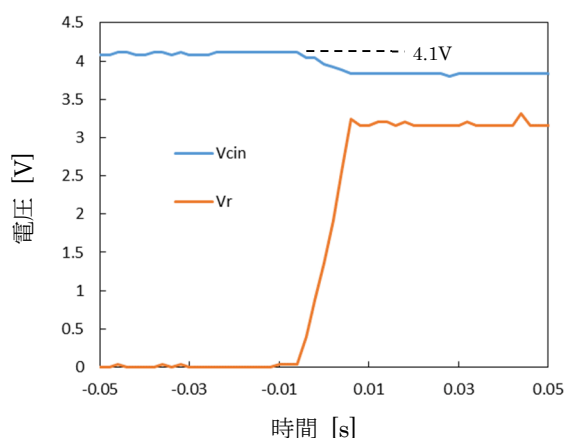
0 ~ 4.1 V までの充電に要した時間は約 120 秒でした。振動発電素子の最大電力は 2.7 mW であることから以下のように電力効率が求められます。

$$\begin{aligned}
 \text{電力効率} &= (\text{コンデンサに蓄えられたエネルギー}) / (\text{振動発電素子の最大電力量}) \\
 &= (0.5 \times 10 \text{ mF} \times 4.1 \text{ V}^2) / (2.7 \text{ mW} \times 120 \text{ s}) \\
 &= 26\%
 \end{aligned}$$

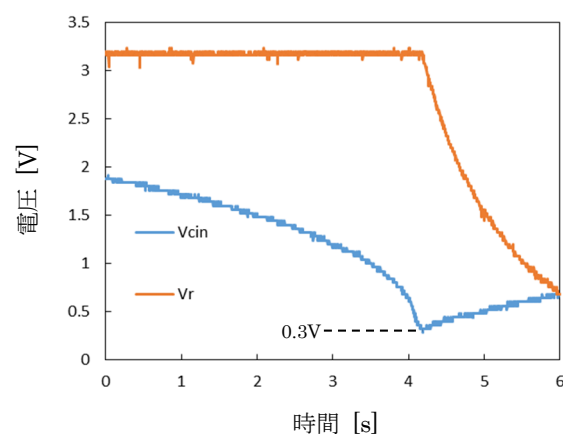
蓄積した電荷の利用率

キャパシタへ充電したエネルギーの内、実際に利用されるエネルギーの割合を試算いたしました。図 8 の充放電回路出力に 3300 Ω 負荷を接続し、放電開始電圧と終了電圧の実測を行いました(図 9)。

V_{cin} はコンデンサの充電電圧、V_r は充放電回路の出力電圧を示しています。



(a) 放電開始時



(b) 放電終了時

図 9. 充放電電圧範囲の実測

放電開始及び終了の閾値電圧は設計通り、それぞれ 4.1 V と 0.3 V であることが確認できました。よってエネルギーの利用率は以下ようになります。

$$\begin{aligned}\text{利用率} &= \text{放電終了まで消費したエネルギー} / \text{充電した全エネルギー} \\ &= (0.5 \times 10 \text{mF} \times (4.1 \text{V}^2 - 0.3 \text{V}^2)) / (0.5 \times 10 \text{mF} \times 4.1 \text{V}^2) \\ &= 99\%\end{aligned}$$

上記の電力効率と利用率に加えて実際には昇降回路の効率(70 ~ 90 %)も影響してきます。しかしながらボトルネックになっているのは電力効率の項目です。本稿で紹介した充放電回路においては振動発電素子出力の整流電圧を直接キャパシタに蓄えています。このことが効率悪化に影響を及ぼしています。キャパシタは 0 V から徐々に充電されていきます。さらにそのキャパシタは負荷回路を駆動するためのエネルギー貯蔵源となっているため容量を大きくする必要があります。よって充電初期状態では出力インピーダンスの比較的高い振動発電素子から見れば、出力端子を短絡させていることと同等に近くインピーダンスマッチングの観点から発電デバイス内部での損失が大きくなってしまいます。加えてこのような状況では低電圧・高電流に動作点があるため、ダイオードの順方向電圧分のロスが相対的に大きくなってしまい、ダイオード整流器での損失も大きくなってしまいます。今後は、これらを防ぐため入力段に素子出力のインピーダンスマッチングを行う回路ブロックの追加を進めていきます。

4.4 試作品評価結果

図 8 の充放電回路において出力負荷に LPWA 無線モジュール(Es9201r)を取り付け振動発電での駆動を行いました。無線モジュールではADコンバータを用いてアナログ出力温度センサ(TMP235A2DCKR)から温度データを読み取り無線送信します。その際の送信電力は-4 dB に設定してあり、10 秒間隔でデータ送信とスリープを繰り返します。その動作の様子を図 10 に示します。

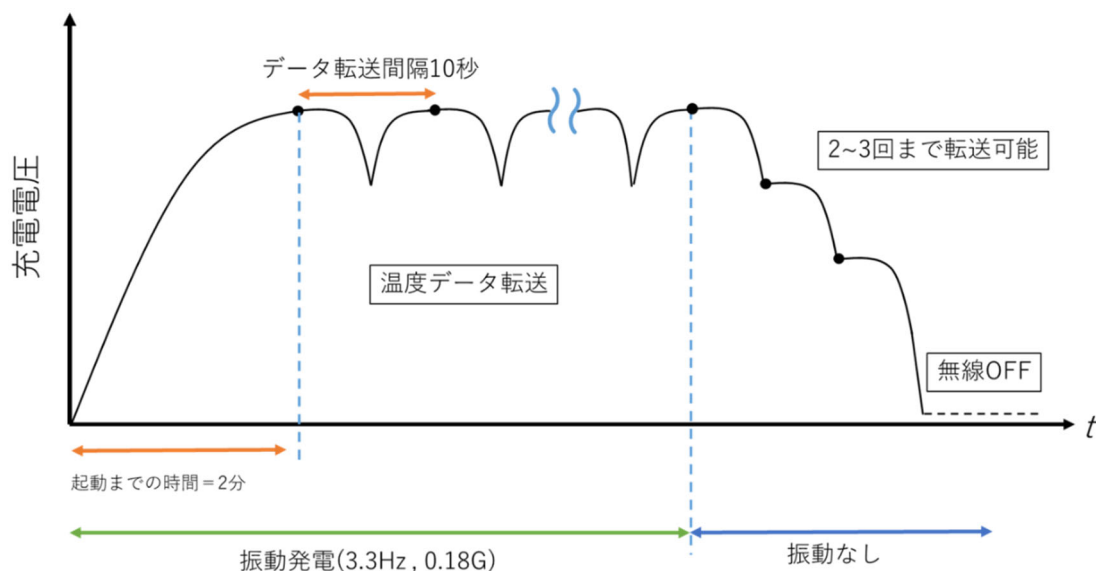


図 10. 振動発電モジュールの実証実験

実際の環境下では振動発電モジュールの発電量が大きく変動することが予想されます。例えばポケットなどに入れて持ち運びするなどの場合は振動方向に対して、振動子を垂直に固定できないため直動振動の軸受け部における摩擦が大きくなります。一方でモジュールを持ち運びすると想定するよりも大きな瞬時加速度が加わり、振動子が振り切れる場合があります。そのためケースへの衝突エネルギーを有効に活用するばねを追加するなどの工夫が考えられます。

5. まとめ

振動発電モジュールの試作を行いました。設置のしやすさや携帯性を重視した小型化に努め、実際にセンサや無線モジュールを駆動するための充放電回路を作製いたしました。太陽光や小型風力などの環境発電では飛ばされてきたチリが積もり、枯れ枝が引っかかるなどの可能性があります。振動発電モジュールは可動域が外部と非接触であるため高信頼性が期待できる構成となっており、携帯型 IoT デバイスのメンテナンスフリー化に貢献できると考えられます。

また人が頻繁にアクセスできない場所への応用も考えられ、水産業の IoT に向けて波力による振動発電デバイの開発も行っております。漁業支援サービスや魚群探知システムにおいては、時間的な密度が高いデータが必要になるので高い発電量が必要であり、アクセスしにくい場所なのでメンテナンスフリー性が重要です。そのような振動発電モジュールの優位性が発揮できる用途の開拓を進めるとともに、デバイスの適応範囲を広げる改善を推進していきたいと考えております。

[参考文献]

- 1) 井上和佳, “製造・物流業における IoT ～AR・ウェアラブル技術の活用～”, 横幹 11, 27-31 (2017).
- 2) 兵頭靖得, 小橋武弘, 山中泰介, “IoT 行動センシングを用いた作業分析技術”, 東芝レビュー 71, 72-75 (2016).
- 3) 下條真司, 赤阪晋介, 田淵雄一郎, 田口一徹, “社会を変える IoT : 1. 国内外における IoT による社会変革・サービス創出の取り組み”, 情報処理 60, 112-115 (2019).
- 4) 上野敏幸, “磁歪式振動発電デバイスによる電池不要 IoT の実用化展開”, システム/制御/情報 62, 111-116 (2018).
- 5) 積知範, “センサネットワーク電源向けエレクトレット振動発電デバイスの開発”, MES2014 (第 24 回マイクロエレクトロニクスシンポジウム) 予稿集, 239-242 (2014).
- 6) 米田昌弘, “加速度波形のパワースペクトルを用いた歩行者の歩行特性簡易算定法”, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) 67, 539-544 (2011).