磁束集中型振動発電装置を用いた歩行発電

Generating Electricity during Walking with Concentrated Flux Type Vibration Generator

佐藤 駿^{*1}(学生員), 北山 文矢^{*1}(正員), 岡田 養二^{*1}(正員), 近藤 良^{*1}

Shun SATO (Stu. Mem.), Fumiya KITAYAMA (Mem.), Yohji OKADA (Mem.), Ryou KONDO

This paper presents an electromagnetic vibration generator for harvesting walking energy, which is used a concentrated flux array. This array is arrangement of magnets which concentrates magnetic fluxes on one side of the array and prevents the magnetic saturation in the yoke. The generation electricity in walking is calculated with the acceleration which is measured on leg. By comparing the calculated electric power of the proposed and the conventional generator which uses N-S array, we clarified that the proposed generator produces 14% higher power than the conventional generator.

Keywords: energy harvesting, electromagnetic vibration generator, concentrated flux array, halbach array, vibration of moving body, induced voltage.

(2018 年 10 月 20 日受付, 2019 年 2 月 27 日再受付, 2019 年 4 月 5 日再々受付)

1 緒言

現在, 電池を代替する持続的電源として環境発電(エネルギーハーベスティング)に対する注目が高まってきた[1]。環境発電とは我々の身の回りにある微小なエネルギー, 例えば太陽光や風力, 振動を電力に変換する技術である。環境発電の応用として IoT(Internet of Things)機器用のセンサへの電源供給が挙げられる[2]。従来の電池による電源供給では定期的な電池交換が必要であること, さらに交換済み電池によるごみの増加を招くということが課題として認識されている[3]。電源供給として環境発電を活用することでこのような問題を解決できると考えられる。

IoT の応用としては構造物のセンシングやインフラ設備のモニタリング[4]などが挙げられるが, 筆者は移動体のモニタリングの一つである小児や老人の見守りシステムに注目した。これは, センサによって得られた見守り対象者の位置情報を保護者に伝えるシステムである。これにより迷子や徘徊などを防止し, 介護・福祉分野へ貢献できる。ここで, 位置情報を伝えるセンサの電源として電磁誘導型振動発電装置が用いられている[5]。電磁誘導方式の特徴は電気的な内部抵抗が低く[3], 磁気回路設計の自由度が高い点である。発電

装置は見守り対象者の脚部に取り付けられ, 振動エネルギーを電気エネルギーに変換している。

このような電源供給を用いた見守りシステムの利便性向上のためには, 頻繁な通信をすることや長時間駆動すること, 心拍数などの位置情報以外のデータを送ることなどが必要とされる。これらの要求を満たすためには更なる発電量の向上が求められる。電磁誘導を用いた歩行発電では最適な負荷抵抗の選定[6]やコイルターン数の増加が発電量の向上のために有効であるが, 磁石配置の影響は未だ明らかにされていない。そこで, 本研究ではハルバッハ配置[7]を基にした磁束集中配置を発電装置へ適用し, 発電量への寄与を明らかにする。まず, 電磁誘導型振動発電装置の基本構造, 発電原理, 磁石配置を示す。本稿では比較のために, 従来の見守り用振動発電装置で採用されている N-S 配置もしくは磁束集中配置を適用する。次に, 各磁石配置を適用した発電装置における逆起電圧定数と磁束密度分布を磁場解析より求める。また, 各磁石配置の簡易モデルを製作し, 磁石表面の磁束密度を測定し, 解析結果と比較する。逆起電圧定数および歩行時の脚部加速度を用いて発電量を数値計算により求め, 磁束集中配置の効果を明らかにする。

2 電磁誘導型振動発電

2.1 発電装置の基本構造

Fig. 1 に本研究で対象とする発電装置の基本構造を

連絡先: 北山 文矢, 〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1, 茨城大学工学部機械システム工学科
e-mail: fumiya.kitayama.amayatik@vc.ibaraki.ac.jp

^{*1} 茨城大学

示す。本装置は可動子と固定子で構成される。可動子は残留磁束密度 1.3 T のネオジム磁石とヨーク、そしてヨークを保持するための塩化ビニル製部品からなり、可動子質量は約 15 g である。ここで、保持部品は摺動部としても使用する。小型化の観点からヨークの厚さは 1 mm に制限する。一方、固定子は線径 0.3 mm、ターン数 85 Turns のコイルとボビン、ケースから構成される。可動子はバネで繋がれており、ケース内部で支持され、ボビンに沿って振動する。デバイスの小型な外形を維持しつつ、可動子の共振周波数を脚部の振動の周波数にできるだけ近づけるためにバネは 3 N/m のものを使用する。また、ケースにはスリットが設けられており、保持部品はこのスリットと摺動接触できるように突起を持たせてある。スリットの長さは 10 mm とした。

次に発電原理について示す。まず、歩行動作によって本装置の固定子が励振され、それに伴い可動子がバネの復元力によって振動する。そして、コイルの鎖交磁束数の変化により、逆起電力が発生し、コイルに接続された外部回路に電力が蓄えられる。このとき誘導電流によって可動子に電磁力が生じる。したがって、本発電装置の運動系は Fig. 2 に示すようなバネ-マス-ダンパ系とみなせ、下式の運動方程式で表される。

$$m\ddot{x}_2(t) + c\dot{x}_2(t) + kx_2(t) = c\dot{x}_1(t) + kx_1(t) + F(t) \quad (1)$$

ここで、 $x_1(t)$ と $x_2(t)$ はそれぞれ固定子の変位、可動子の変位であり、 m は可動子の質量、 c は粘性減衰係数、 k はバネ定数である。また、電磁力 $F(t)$ は逆起電圧定数 α と誘導電流 $I(t)$ を用いて $F(t) = \alpha I(t)$ と表すことができる。さらに、相対変位 $x_r(t) = (x_2(t) - x_1(t))$ を用いることで式(1)は次のように書き換えられる。

$$m\ddot{x}_r(t) + c\dot{x}_r(t) + kx_r(t) = -m\ddot{x}_1(t) + \alpha I(t) \quad (2)$$

また、本装置の電気回路はコイルとセンサなどの負荷から構成され、式(3)の電気回路方程式で表される。

$$\frac{\partial \phi(x_r, I)}{\partial x_r(t)} \frac{dx_r(t)}{dt} + \frac{\partial \phi(x_r, I)}{\partial I(t)} \frac{dI(t)}{dt} + RI(t) = 0 \quad (3)$$

ここで $\phi(x_r, I)$ はコイルの鎖交磁束数、 I は誘導電流、 R はコイル抵抗 R_1 と負荷抵抗 R_2 を用いて $R = R_1 + R_2$ で表される電気回路全体における抵抗値である。

Fig. 1 Structure of vibration generator.

Fig. 2 Dynamic model of vibration generator.

2.2 磁石配置

2.2.1 N-S 配置

本稿では 2 種類の磁石配置を用いる。1 つは従来の見守り用振動発電装置にも使われている磁石配置であり、N-S 配置と呼ぶこととする。N-S 配置は上下に磁化された磁石を使用し、磁極を逆向きにして並べる。磁石は幅 7.5 mm、長さ 21 mm、厚さ 1 mm のものを 4 枚使用する。このように使用する磁石が同形状かつ少数であることが特徴である。Fig. 3 に可動子の磁気回路とコイルを抽出した発電装置の全体図を示し、断面 S を定義する。Fig. 4 に断面 S における N-S 配置を用いた発電装置と磁束の流れを示す。図中の x 軸が可動子の振動する方向である。Fig. 4 の状態では z 軸の正と負の方向にコイルに対して同数の磁束が直交するため、鎖交磁束が 0 Wb となる。しかし、磁石が x 軸方向に動くと、磁束がコイルに対して鎖交状に流れ、鎖交磁束数が正もしくは負の値となる。これにより十分な発電量の確保が可能である。

Fig. 3 Detail view of device without non-ferromagnetic materials.

Fig. 4 N-S array.

2.2.2 磁束集中配置

2 つ目の磁石配置はハルバツハ配置を基に磁石を配置した磁束集中配置である。Fig. 5 に断面Sにおける磁束集中配置と磁束の流れを示す。磁束集中配置では、N-S 配置の磁石の間に、N-S 配置に対して垂直な磁化方向を持つ磁石が追加されている。それぞれの磁石は長さが 21 mm, 厚さが 1 mm である。幅は左右の磁石が 6 mm, 中央の磁石は 3 mm である。Fig. 5 に示すように、エアギャップ領域で磁束の強めあいが起こる。これにより、局所的に鎖交磁束数が増加する。さらに、上下のヨーク部分では磁束の弱めあいが起こり、磁気飽和を防ぐことができる。このように、磁束集中配置を適用することで鎖交磁束数およびその変化量が増加し、発電量も向上できると考える。

Fig. 5 Concentrated flux array.

3 逆起電圧定数および磁束密度の評価

3.1 磁場解析による逆起電圧定数の算出

鎖交磁束 ϕ を位置と電流の関数 $\phi(x, I)$ であると仮定すると、電磁誘導によって生じる誘導起電圧は式(3)の左辺第一項と第二項で表される。本稿で対象とする発電装置では第一項により発電される。ここで、

$$\alpha = \frac{\partial \phi(x, I)}{\partial x} \quad (4)$$

とおき、逆起電圧定数 α を定義する。このように可動子速度による逆起電圧は逆起電圧定数 α と相対速度 $dx_r(t)/dt$ に比例して大きくなる。三次元有限要素法を用いた磁場解析ソフトウェア femem[8]を使用して、可動子と固定子の相対変位を -10 mm から 10 mm まで 1 mm 毎に固定した際の鎖交磁束数を求めた。そして鎖交磁束数の差と相対変位の差から逆起電圧定数を式(4)により算出した。Fig. 6 に鎖交磁束数, Fig. 7 に逆起電圧定数を示す。Fig. 6, Fig. 7 より磁束集中配置にすることで鎖交磁束数が増加し、逆起電圧定数が大きくなったことがわかる。Fig. 8 に相対変位 0 mm における磁束密度のコンター図と発電装置中心の断面のベクトル図を示す。Fig. 8(a)の N-S 配置ではヨークの上下面で磁気飽和が起こっており、磁束密度の最大値は約 2.1 T であった。Fig. 8(b)の磁束集中配置ではヨーク内の最大磁束密度は約 1.8 T であり、磁気飽和を起していなかった。また、Fig. 8(c)と Fig. 8(d)より、磁束集中配置では前述した磁束の弱めあいが起こっている。これにより磁気飽和を回避していると考えられる。また、Fig. 8(c)と Fig. 8(d)におけるヨーク内の最大磁束密度はそれぞれ約 2.1 T, 約 1.7 T であった。

Fig. 6 Analytic value of flux linkage.

Fig. 7 Back electromotive force constant.

Fig. 8 Magnetic flux density.

3.2 簡易モデルを用いた磁束密度の測定

次に可動子の一部を模擬した簡易モデルの試作機を用いて、磁束集中配置の効果を検証する。Fig. 3における Mover をフルモデルとすると、簡易モデルはフルモデルの下側を模擬しており、幅 3 mm、長さ 14 mm、厚さ 1 mm の磁石とヨークで構成する。まず、簡易モデルがフルモデルと同様の特性であることを静磁場解析により確認する。Fig. 9 に簡易モデルの短手方向の中心において切り出した断面図における、磁束密度分布を示す。Fig. 9(a)と Fig. 9(b)は z 方向の磁束密度分布、Fig. 9(c)と Fig. 9(d)は三軸方向の磁束密度の分布である。上から一層目が磁石、二層目がヨークである。磁石側の空気層を見ると、Fig. 9(a)に比べ、Fig. 9(b)では一層目の両側にある磁石の近傍で磁束密度が大きくなっている。また、Fig. 9(c)と Fig. 9(d)より、磁束集中配置では磁束の打ち消しあいを確認できる。これにより磁気飽和を防止できると考えられる。また、Fig. 9(c)と Fig. 9(d)におけるヨーク内の最大磁束密度はそれぞれ約 2.4 T、約 2.0 T であった。以上より、簡易モデルでも磁束集中配置における磁気飽和の防止効果および磁石表面における磁束の増加がみられるため、フルモデルと同様の傾向があると判断した。次に、 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ の磁石を 6 個、 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ の磁石を 4

個組み合わせで簡易モデルを製作し、 z 方向における磁石表面の磁束密度を測定した。また、比較のために測定位置の z 方向の磁束密度を磁場解析でも求める。測定に用いた磁石の残留磁束密度はカタログ値で 1.17 ~ 1.22 T である。実験装置を Fig. 10 に示す。レーザ変位センサ (オプテックス・エフエー, CD22-35V) を用いてガウスメーター (Lake Shore Cryotronics Inc., Model 421 Gaussmeter) のプローブを簡易モデルの磁石表面と平行に設置した。この時、磁石表面とプローブの測定面の間隔は約 1.15 mm であった。次に、XY 軸ステージ (中央精機, LD-149-C1) によってプローブの測定点を試作機の短手方向へ移動させ、最大磁束密度を計測した位置で固定した。その後、長手方向へ移動させることで z 方向の磁束密度分布を測定した。次に、短手方向の近傍 $\pm 0.1\text{ mm}$ で固定し同様に測定した。そして、合計 3 回の算術平均を求めた。解析ではプローブの厚さ 1 mm を考慮し、磁石表面から z 方向 1.15 mm ~ 1.65 mm 間の磁束密度の平均値を測定位置毎に求めた。測定値と解析値の比較を Fig. 11 に示す。Fig. 11 を見ると、解析では測定位置 x が $x \leq -2\text{ mm}$ と $2\text{ mm} \leq x$ の範囲で磁束集中配置の磁束密度が大きくなっている。しかし、測定では $x \leq -2\text{ mm}$ と $2\text{ mm} \leq x$ の範囲で解析と同様の傾向は見られず、解析値と測定値が同じ傾向を示しているとは言えない。さらに、 $x = -3\text{ mm}$ の時の N-S 配置の実験値を見ると、近傍の値に比べて磁束密度が著しく小さかった。本実験方法では、プローブは各軸方向に拘束されているため、プローブのずれによって解析値と測定値の誤差が生じたとは考えにくい。一方で、簡易モデルの製作方法に着目すると、磁石を多数貼りつけるためにすき間が多くなる。それにより、特定位置での磁束密度の低下が生じたと考えられる。このように、試作機が解析モデルと同様の磁気回路でないため、測定値が解析値と異なる傾向を示した。そのため、製作方法を改善して再検証をする必要がある。

Fig. 9 Magnetic flux density in simple model.

Fig. 9 Magnetic flux density in simple model (continued).

Fig. 10 Magnetic flux density measurement.

Fig. 11 Comparison of analyzed and experimental values.

4 発電量の評価

4.1 脚部加速度の測定

歩行発電における発電量を算出するために、発電源となる歩行時の脚部振動を測定する。脚部加速度の測定には3軸加速度センサ (Arduino LLC, Genuino101) を用いた。被験者は20代男性2名である。Fig. 12に示すように大腿部の横側に加速度センサを取り付け、平坦路を約1分間歩行し、加速度を測定した。加速度センサはPCとケーブルを介して接続され、10 ms 毎にデータが送信される。また、ケーブルが歩行の邪魔にならないように被験者の他に実験者がPCを持ち、自然な歩行ができるように配慮した。Fig. 13に測定開始から10秒までの被験者1の鉛直方向における脚部加速度を示す。本測定および文献[9]では、3軸方向の中で、鉛直方向の加速度振幅が一番大きいため、鉛直方向の振動に着目した。Fig. 13に示すように、脚部の振動は重畳振動であることがわかる。また、センサが鉛直方向に-1 Gの重力加速度を検知している。厳密な

Fig. 12 Measurement of leg acceleration.

Fig. 13 Acceleration in waking.

Fig. 14 FFT analyzed result in walking vibration.

評価のためにはこの成分を除去する必要があるが、本稿では簡易的な検討とし、補正として測定値に1 Gを加算して補正した加速度を発電シミュレーションにおける入力波形とする。さらに、脚部に発生する振動の周波数を推定するため、FFT(Fast Fourier Transformation)解析を行い、その結果をFig. 14に示す。Fig. 14に示す通り、脚部における振動にはいくつかの周波数成分が見られるが、脚部振動の加速度振幅が最大となる周波数は約1.9 Hzであった。これは文献[9]の結果とおおむね一致しているため、測定精度は十分であると考えた。

4.2 数値計算による発電量の比較

N-S配置と磁束集中配置において、歩行時の脚部加速度を入力とした発電シミュレーションを行う。式(2)と式(3)から誘導電流 $I(t)$ を求め、以下の(5)式から負荷における消費電力 $P(t)$ を計算し、シミュレーション時間30 sで除した平均電力で比較する。また、シミュレーションの計算周期は 1×10^{-4} sとした。

$$P(t) = I(t)^2 R_2 \quad (5)$$

シミュレーションでは可動子質量を 15 g とし、磁石配置を変えることによる摩擦力の変化は無いため粘性減衰係数を一定値(1 Ns/m)とした。また、バネ定数を 3 N/m, コイルターン数を 85 Turns, インダクタンスは静磁場解析から算出した定数 2.37×10^{-4} H とした。そして、コイル抵抗と負荷抵抗をともに 1.03 Ω とした。ここで、可動子共振周波数は 2.25 Hz となる。Fig. 7 の結果は線形補間され、相対変位 x_r に応じて値を出力するようにした。このときの N-S 配置と磁束集中配置における電力の差と誘導電流の差を Fig. 15 に示す。また、シミュレーション開始時から 2.5 秒までの相対変位-相対速度のグラフを Fig. 16 に示す。Fig. 15 より、磁束集中配置にすることで最大で 0.2 mW 電力が上昇した。また、平均電力は N-S 配置が 0.0463 mW, 磁束集中配置が 0.0529 mW となり、提案した磁石配置にすることで約 14% 発電量が向上した。また、誘導電流は磁束集中配置にすることで最大 2.5 mA 上昇したが、最大値は 40 mA 以内であり、発熱の心配はない。そして、Fig. 16 から振幅は約 6 mm であり、ケースのスリッドの範囲内である。また、相対速度が 30 mm/s 以上のとき、相対変位は $-5 \text{ mm} \leq x_r \leq 5 \text{ mm}$ となる。この範囲では相対速度が大きいため、逆起電圧が得られるといえる。相対変位がこの範囲にあるとき、逆起電圧定数は Fig. 7 に示すように磁束集中配置の方が大きくなる。したがって、磁束集中配置を用いることで相対変位が $-5 \text{ mm} \leq x_r \leq 5 \text{ mm}$ での逆起電圧定数が増加し、発電量が向上したと考えられる。

Fig. 15 Difference in N-S and concentrated flux array.

Fig. 16 Relative displacement against velocity.

5 結言

本稿では、ハルバツハ配置を基にした磁束集中配置を電磁誘導型振動発電装置に適用した。磁場解析から逆起電圧定数を算出した結果、従来の磁石配置と比べて、磁束集中配置を用いた発電装置では相対変位が -5 mm から 5 mm の範囲で大きな逆起電圧定数が得られた。脚部加速度を用いた発電シミュレーションの結果から、磁束集中配置が発電量に寄与することを示した。今後は、試作機の製作方法、および製作性を考慮した最適化形状の検討および磁束集中配置を適用した発電装置の製作をする。そして、脚部に取り付けた状態で歩行し、発電量を測定した後、解析値と比較する。

参考文献

- [1] 神野伊策, 振動発電による MEMS エナジーハーベスト技術, システム/制御/情報, Vol.58, No. 11, pp. 443-448, 2014.
- [2] 鈴木雄二, 環境発電技術の展望, 日本 AEM 学会誌, Vol.22, No.3, pp. 339-342, 2014.
- [3] 井上竜太, 振動発電を利用したエコ工事振動対策技術の開発, 竹中技術研究報告, No. 68, pp. 1-8, 2012.
- [4] 神野伊策, 振動エネルギーによる環境発電 (振動発電), 表面技術, Vol.67, No.7, pp. 348-352, 2016.
- [5] 保坂寛, ウェアラブル情報機器のための振動発電技術, 電気学会誌, 126 巻, 4 号, 2006.
- [6] N.G. Stephen, On energy harvesting from ambient vibration, *Journal of Sound and Vibration* 293, pp. 409-425, 2006.
- [7] 木村貴裕, 高山佳久, 近藤孝広, 雉本信哉, 組み合わせ磁石を用いた磁気ダンパの研究 (基本ハルバツハ配列磁石を用いた磁気ダンパ), 日本機械学会論文集 (C 編), 78 巻, 789 号, pp. 1693-1694, 2012.
- [8] 河瀬順洋, 山口忠, 北川亘, 回転機の電磁場解析実用化技術と設計法, 科学情報出版株式会社, 2016.
- [9] 大上裕也, 橋山智訓, 岩田満, 田野俊一, 3 軸加速度センサを用いた歩行パターンの分類, ファジィシステムシンポジウム講演論文集, Vol.22, pp. 506-511, 2006.