超小型磁歪式振動発電デバイスと高効率電力変換回路の提案

Proposal of Miniature Magnetostrictive Vibrational Power Generator and High Efficient Energy Conversion Circuit

上野 敏幸^{*1}(正員), 北 翔太^{*1}

Toshiyuki UENO(Mem.), Shota KITA

In this study, a magnetostrictive vibrational power generator was proposed for high-frequency vibration occurring in a machine tool and high-efficiency power conversion circuit for a battery-free wireless sensor. A conventional device was miniaturized according to the scale effect, and a device composed of a Fe-Ga alloy plate, of $2 \times 0.25 \times 8 \text{ mm}^3$ with a frame of 0.5 mm thickness, was fabricated and evaluated. As a result, a generated voltage of 2 V and effective power of 234 μW were confirmed at a vibration of 522 Hz and 10 m/s^2 . In addition, the operating principle was verified in the power conversion circuit composed of an LC circuit (resonant circuit), a diode and a storage capacitor. As a result, it was confirmed that by using a large inductance, the Q value could be increased, and a considerable amount of energy could be stored in a 330 μF capacitor.

Keywords: magnetostrictive vibrational power generator, machine tool, miniature device, LC resonance.

(2020 年 5 月 20 日受付, 2021 年 5 月 17 日再受付)

1 緒言

近年, 工作機械や生産機械に無線センサを導入する気運が高まっている[1]。例えば金型の加工で, エンドミルの摩耗は, 仕上げ面の粗さや精度を低下させるため, これをいち早く検知したいニーズがある。一般に, 切削加工では工具の摩耗で特徴的な振動が発生する[2]。つまり, この振動の発生を即座に知らせることで, 工具を適切なタイミングで交換できる。また生産機械では, 不具合や異常で振動の発生や温度が上昇する場合が多く, このような状態変化を即座に知らせることで, 機械の停止や故障を防ぐ対策が取れる。一方, これを行う無線センサは電池で動作し, これが運用上の課題である。電池は消費する度に交換が必要で, その寿命管理も面倒である。工場のようにセンサが十個, 百個もある場合, この手間や作業は無視できない。これを解決するのが振動発電である。これら機械では, モータやアクチュエータなどの過渡や周期的な力, 変位で何らかの振動が発生している。これら振動を電源に利用することで電池不要な無線センサが実現する。我々は, 鉄系磁歪材料 (Fe-Ga 合金[3]) を利用した振動発電デバイスを開発している[4][5]。デバイスはシン

ブルで堅牢, 高感度, 高出力の特徴を有する。これまでに $4 \times 0.5 \times 16 \text{ mm}^3$ の Fe-Ga 合金を利用したデバイスにおいて 30 Hz から 100 Hz の振動において, サブ mW から mW の実効電力, また 1 億回の振動でも出力が劣化しないことを確認している。一般に工作機械や生産機械は堅牢に作られ, 振動は概して小さく, その卓越周波数も高い。本論文では, スケール効果を考慮し, 工作機械で発生する高周波数 (200 Hz~1 kHz) の振動で共振するデバイスの設計指針と, その試作評価について述べる。また実際の利用においては, 簡単な機械への設置, 共振周波数の調整も重要で, これを行う実用構造を説明する。またデバイスが発生する小さな交流電圧を低損失で無線センサの入力電圧 (直流 3.3 V) に適するよう変換する回路が必要である。本論文では, LC 共振と半波整流回路で構成される電力変換回路を提案し, この動作と従来回路に対する比較を実験, シミュレーションで検証したので報告する。

2 発電デバイスの設計方針と試作結果

2.1 デバイスの構造と原理

我々は様々な機械の振動を計測し, 工作機械に特徴的な振動の周波数は, およそ 200 Hz~1 kHz の間にあり, 加速度は概して小さく, 一方, 異常振動が発生した場合, その振動の加速度は 1 G ($= 9.8 \text{ m/s}^2$) 程度あるとの知見を得た。磁歪式振動発電デバイスでは, ス

連絡先: 上野 敏幸, 〒920-1192 石川県金沢市角間町,
金沢大学理工研究域電子情報通信学系
e-mail: ueno@ec.t.kanazawa-u.ac.jp

^{*1} 金沢大学

ケール効果[6]が成り立ち、共振周波数は長さに反比例して減少、電力は体積に比例して増加する。つまり高い周波数で共振させる場合、デバイスを小型化すればよい。小型化に伴い電力も減少するが、乾電池以上の出力と耐久性を有すれば、電池を代替できると考える。つまりデバイスにおいては、半永久の寿命と、マンガン単 3 電池 (容量: 放電特性 10 mA の場合, 100 時間) に対し、これを 3 年間で使う平均電力 $57 \mu\text{W}$ を上回る出力を発生することが目標である。

まず発電デバイスの構造と動作原理を述べる。Fig. 1 上はデバイスの基本的な構造で、鋼板の U 字フレームの上面に板状の Fe-Ga 合金 ($\text{Fe}_{81.6}\text{Ga}_{18.4}$, 長手方向に磁化容易方向) [7]を接合し、積層部を構成し、この積層部にコイルを巻く。またフレームの下部の内側に合金を適度に磁化させるバイアス用の永久磁石を配置する。Fig. 1 下は発電原理で、フレームの下部を振動する機械に固定し、上部の先端に錘を取り付け振動させる。この時、錘に作用する垂直方向の慣性力でフレームの開閉部が開閉するよう変形し、合金に長手方向に引張りや圧縮の力が交互に作用する。積層構造において、合金とフレームのヤング率、厚さの関係から、応力がゼロになる中立軸はフレーム中に存在する。結果、合金の長手方向の応力は、引張りもしくは圧縮の一方方向で一样になる。逆磁歪効果で、この応力で磁束が増減し、この時間変化に比例した速度起電力がコイルに発生する。フレームが U 字構造で、錘と固定端が近い位置にあるため曲げモーメントに起因した損失が少なく、感度が高い。また摺動部がないため劣化する部分が少なく、耐久性が高いのも特徴である。

2.2 試作と出力特性

200 Hz~1k Hz の間に共振周波数を有するようデバ

Fig. 1 Device configuration (top) and principle of power generation (bottom).

イスを小型化する。この設計指針として上記の実績のあるデバイス[4]を等尺で半分にする。これによりスケール効果で共振周波数が 2 倍に増加する。フレームの厚さで剛性が調整でき、合金とフレームの厚さの比率を従来の 1:1 から 1:2 に増加する。これによりバネ定数が増加し、共振周波数が更に高くなる。またフレームの材質としてバネ鋼を利用し、耐久性を高める。Fig. 2 は、この指針で設計したデバイス[8]で、Fig. 3 がこれを試作した写真である。 $2 \times 0.25 \times 8 \text{ mm}^3$ の Fe-Ga 合金の板材は福田結晶技術研究所[9][10]で製作した単結晶インゴットから切り出し、フレームは厚さ 0.5 mm のベーナイト製からワイヤー放電と曲げ加工で成形した。またコイルは線径 0.03 mm, 巻数 3500 とし、シリコン樹脂でフレームに固定した。バイアス用の永久磁石として $2 \times 2 \times 1 \text{ mm}^3$ の Nb-Fe-B 磁石を利用した。質量(錘を除く)は 1 g で長さは 20 mm 程度、隣はコイン電池 (CR2032) である。

この先端に 0.3 g の錘を付け、加振機に設置し、特性を評価した。結果、1 次の共振周波数は 522.2 Hz で、Fig. 4 のように加速度 10.0 m/s^2 の場合において、2 V 程度の電圧が発生することを確認した。Fig. 5 は 10.0 m/s^2 の振動でデバイスに抵抗を繋げ、そのジュール損で電力を計測した結果で、 $1.5 \text{ k}\Omega$ で、 $234 \mu\text{W}$ の実効電力が取り出せることがわかった。これは単 3 乾電池を 3 年で利用する場合の平均出力 $57 \mu\text{W}$ の約 4 倍である。この出力の裏付けとして、LED を繋げると Fig. 6 の写真のように点灯した。522 Hz は切削加工で発生する特徴的な振動の周波数帯域にあり、例えばこれを知らせる無線センサの電源に利用できる。実際、この電力で

Fig. 2 Dimension of device.

Fig. 3 Prototype device.

Fig. 4 Open voltage at 522 Hz.

Fig. 5 Power vs. resistance at 522 Hz, 10.0 m/s² vibration.

Fig. 6 LED lighting by the power of the device.

MONO WIRELESS 社[11]の無線通信モジュール TWELITE を利用し、数秒おきに温度と照度センサの情報を無線送信することに成功した。

2.3 設置と共振調整機構

無線センサを設置する機械は鉄製であるものが多い。デバイスは、これに簡単に設置でき、その共振を簡単に調整できる必要がある。Fig. 7 の写真は、先のデバイスを鉄製のベース板（厚さ 1 mm）に固定し、これをその下面に配置した 2 個の永久磁石（Nb-Fe-B, 6×3×2 mm³）で容易に機械に固定できるようにしたものである。またデバイスに付ける錘は、2 つの四角を薄い板で連結した形状で、1 次の共振周波数に加え、

Fig. 7 Device for machine vibration.

Fig. 8 Frequency response varied by additional mass and gap adjustment of two magnets.

2 次の共振周波数も発生しやすい形状とした。この錘の材質は磁性体で、先端の四角には穴も開いており、磁石（Nb-Fe-B, 2×2×2 mm³, 0.09 g）や、ネジ（ナット）を追加の錘（周波数を下げる）として付けることができる。またこれとは別に、この錘とネジ（ダブルナットで固定）に取り付けた丸形の磁石（Nb-Fe-B 2×1 mm²）の磁気力で、デバイスのばね定数を調整する機構がついている。磁気力は反発力で、この大きさは 2 個の磁石間の距離（ネジ）で変化できる[12]。距離の減少と共に反発力が増加（ばね定数を下げる方向に作用）結果、共振周波数は低下、これがネジで精密に調整できる。Fig. 8 は鉄製の振動体にデバイスを取り付け、上記の錘やネジによる調整をパラメータとした電圧の感度（電圧 V / 加速度 a ）の周波数応答である。まずデバイスは簡単に鉄板に固定できた。また追加の錘 0.27 g（磁石を 3 個）を取り付けることで、共振周波数が 311 Hz から 190 Hz と 39 % 減少した。更に、ネジによるギャップの調整（2mm から 0.5mm 程度）で 311 Hz から 289 Hz と 7 % 減少した。また 1 次の共振に加え、600 Hz から 700 Hz 付近にある 2 次の共振も発電に利用できることがわかった。

3 電力変換回路

3.1 回路の動作原理

デバイスの電圧は、小型化とともに小さくなり交流で 0.2~2 V 程度である。一方、無線通信モジュールは 2.5~3.3 V の直流電圧で動作するものが多く、またその起動に 0.5~5 mJ 程度のエネルギーが必要である。つまりデバイスが発生する小さな交流電圧を昇圧、整流し、所望のエネルギーをキャパシタに蓄電する回路が必要である。これを行う回路として例えば Fig. 9 に示す多段倍電圧整流回路[13]が用いられる。この回路でデバイスは交流電源とインダクタ L 、抵抗 R 、機械系の抵抗 R_m (減衰) で模擬している[13]。この動作として、負の電圧でダイオード D1 を経由し電流が流れ、コンデンサ C1 に電圧が印加、正の電圧で、ダイオード D2 を経由し電流が流れ、コンデンサ C2 に電圧が印加される。この時 C2 の電圧 (電位) は C1 の電圧が足し合わされたものになる。次の負の電圧ではダイオード D3 を経由し、C2 の電圧が足し合わされた電圧が C3 に発生する。この最終段には蓄電用コンデンサ C_{st} が繋がり、上記を繰り返し足し合わされた電圧がこれに発生、エネルギーが蓄積される。Fig. 9 の回路では、最終的に片振幅の 10 倍の直流電圧が C_{st} に発生する原理である。この回路の問題点は、ダイオードの電圧降下による損失である。ダイオードの導通には、ショットキーバリアダイオードでも 0.2 V 程度の電圧が必要で、この電圧×電流の損失が発生する。損失はダイオードの個数に比例して増加し、Fig. 9 の場合、かなりの損失が発生する。この損失は、発生電圧が小さい場合、変換効率に顕著な影響を及ぼす。

この電力変換回路として LC 共振を利用する Fig. 10 の回路を提案する。デバイスにインダクタ L' とコンデンサ C' の直列回路を接続する。 C' の容量は、デバイスの共振周波数 f_r より以下の値にする。

$$C' = \frac{1}{(2\pi)^2 (L+L') f_r^2} \quad (1)$$

共振では L' と C' の電圧は逆相で、 C' には以下の式で示すデバイスの発生電圧 e が Q 倍に増幅された電圧が発生する。

$$V_c = Qe \quad (2)$$

$$Q = \frac{1}{2\pi f_r C' (R+R_m+R')} \quad (3)$$

この C' と並列にダイオードと蓄電用コンデンサ C_{st} の

直列回路を接続する。この際に C_{st} を $C_{st} \gg C'$ とするよう選定する。 C_{st} には C' と同じ電圧が発生するが $L'C'$ の共振に大きな影響を与えず、一方、電流の大部分は、インピーダンスが小さい C_{st} に流れ込む。またダイオードによる半波整流で C_{st} の電圧は直流電圧になる。結果、 C_{st} には電圧 e が増幅された直流電圧が発生し、また大きな静電エネルギーを蓄電することができる。この回路のメリットとして、まずダイオードを 1 個しか利用しないことで、電力損失を小さくできる。また発生電圧が LC 共振で増幅される。この回路の設計指針について、 L' として、インダクタンスができるだけ大きく、直流抵抗が小さいものを選定する。またデバイスのコイルの線径を太くし、抵抗 R を小さくする。巻き数が少ないことで発生電圧 e も小さくなるが、式 (3) に示す Q 値を大きくできる。この場合、ジュール損失を小さくできることで、全体の損失を大きく低減でき、結果、変換効率が向上する。

Fig. 9 Half doubler voltage rectifier circuit.

Fig. 10 LC resonance half rectifier circuit.

3.2 動作検証

この回路の動作検証として、加振周波数を 525 Hz とし、公称 100 mH のインダクタンス L' (コモンモードチョーク, DKFP-G22G-D5J0, Schurter 社) と 0.12 μF の電解コンデンサ C' で共振回路を構成した。なお LCR メータで測定した 525 Hz での L' のインダクタンスは 737 mH, 抵抗は 456 Ω であった。また C' と並列にショットキーダイオードと 330 μF の電解コンデンサ C_{st} の直列回路を接続し、コンデンサの電圧 V_{Cst} を測定した。比較として, Fig. 11 のようにデバイスに半波整流で C_{st} に蓄電した場合も測定した。Fig. 12 は加速度 10 m/s^2 で励振した場合の V_{Cst} である。立ち上がりは遅いが, 共振でより大きなエネルギーを蓄電できることがわかった。LT-SPICE のシミュレーションで実験の裏付けと設計指針を検証した。別途 525 Hz でのデバイスのインダクタンス, 抵抗を計測したところそれぞれ 52 mH, 962 Ω で, デバイスの発生 (電源) 電圧 e を 2 V として計算を行った。(R_m は 204 Ω) Fig. 13 はその結果で, 実験と同じく共振回路を構成した方が最終的により大きなエネルギーを蓄電できることを確認した。なお Fig. 12 の計算と Fig. 13 の実験のずれは, 電圧の歪みや実際のダイオード特性, 漏れ電流に起因している。 L' を付けずデバイスの L と共振する 1.76 μF の C' と, これに並列に蓄電回路をつけた場合も計算した。結果, 増幅の効果がほとんどなく, 逆に電圧は発生電圧よりも小さくなった。前述のように Q 値と効率を上げるには, デバイスの L と R を小さくし, 大きなインダクタンスを持つ L' を利用するのが望ましい。この改善の可能性を検証した。デバイスのコイルの巻き数を 1/10 にした場合を仮定し, 発生 (電源) 電圧を 1/10 (0.2 V), 抵抗を 1/100, インダクタンスを 1/100 にする。これにインダクタンス 100 mH, 抵抗 2 Ω (鉄損が小さいと仮定) の L' , 0.92 μF の C' で共振させ蓄電した場合を計算した。結果, 20 秒後電圧は, 改善前の 2.5 V から 3.9 V と 1.56 倍, 静電エネルギーは 2.4 倍に増加した。

Fig. 11 Half rectifier circuit.

Fig. 12 Time response of V_{Cst} (experiment). Fig. 13 Time response of V_{Cst} (LT-SPICE).

Fig. 14 Time response of voltages (LT-SPICE).

Fig. 15 Time response of V_{Cst} of LC and half 10x.

Fig. 14 はこの巻き数 1/10 の場合の e , V_c , V_{cst} の時間応答で, e が共振回路で増幅され, V_c の包絡線からダイオードの順方向電圧降下を引いた電圧が V_{cst} となることがわかる。 V_{cst} の飽和値は 4.0 V で, 式 (2) で計算した 4.9 V より小さいが, ほぼ理論に近い電圧が発生することが確認できた。最後に Fig. 15 はこの巻き数 1/10 と Fig. 9 の倍電圧整流回路の応答を比較した結果である。10 秒後の C_s の電圧は, 倍電圧回路の 2 V に対し, LC 共振は 3.4 V と 1.7 倍大きく, LC 共振の方がエネルギーを蓄電する効率が 2.9 倍以上高いことを確認した。

4 結言

本研究では, 磁歪式振動発電を工作機械等で発生する高周波数の振動で利用する場合のデバイスと電力変換回路を提案, 試作実験によりその評価や動作原理を検証した。デバイスにおいては, 小型化で 500 Hz 程度で共振周波数し, 乾電池を代替する電力が発生すること, その共振周波数が手動で粗動, 微動調整可能であることがわかった。論文[4]とスケール効果から推測するにこのデバイスの共振周波数は錘により 300 Hz から 700 Hz の間で設定, 調整可能と思われる。また電力変換回路においては, LC 共振で大容量のコンデンサに昇圧, 蓄電できる回路について, その有用性を確認した。この回路を実用的に使うには, 鉄損が小さく, 大きなインダクタンスを持つインダクタが必要である。今後の予定として, 鉄心をパーマロイやアモルファスなどの高透磁率材料の薄帯の積層で構成したインダクタを製作し, 効率と損失を改善する。これらデバイスと電力変換回路, LPWA や BLE 等の無線通信モジュールで無線センサを製作し, その動作を実機で実証, 実用化を目指す。

謝辞

本研究は, 文部科学省 地域イノベーション・エコシステム形成プログラム「楽して安全, 振動発電を用いた電池フリー無線センサの事業化とその応用展開」の研究課題として実施された。

参考文献

- [1] 松田, 新堂, 廣垣, 青山, 無線多機能ホルダシステムとサーボ内部情報モニタを用いたエンドミル加工現象の解明, 砥粒加工学会誌, Vol.63, No1, p. 24, 2019.
- [2] 鈴木, 切削加工におけるびびり振動 (前編), 精密工学会誌, Vol. 76, No.3, p.280, 2010.
- [3] J. Atulasimha and A. B Flatau, A review of magnetostrictive iron-gallium alloys, *Smart Materials and Structures*, Vol.20, No.4, 2011.
- [4] 上野敏幸, 電池フリーIoT の実現に向けた磁歪式振動発電デバイスの量産構造の提案, 日本 AEM 学会誌, Vol. 26, No.1, p.185, 2018.
- [5] 上野敏幸, 発電素子, 発電素子の製造方法及びアクチュエータ, 特許第 6343852.
- [6] 上野敏幸, 磁歪式振動発電技術の実用化展開, 日本 AEM 学会誌, Vol. 22, No.3, p.368, 2014.
- [7] A.E.Clark, M.Wun-Fogle, J.b.Restorff, "Magnetostrictive Properties of Body-Centered Cubic Fe-Ga and Fe-Ga-Al Alloy", *IEEE, Trans.Mag.*, Vol.37, p.3238, 2000.
- [8] 上野敏幸, 超小型磁歪振動発電デバイスの出力特性と実用構造, 第 16 回「運動と振動の制御」シンポジウム (MoViC2019), 2019.
- [9] 福田結晶技術研究所 HP, <http://www.fxtal.co.jp/>
- [10] 南都, 安藤, 渡邊, 高橋, 福田, 上野, 藤枝, 鈴木, チョクラスキー法による Fe-Ga 基磁歪合金の大型単結晶製造技術の開発, までりあ, Vol 56, No1, p. 27, 2017.
- [11] MONO WIRELESS HP, <https://mono-wireless.com/jp/>, (cited 2021-5-17).
- [12] 牧野, 上野, 磁歪式振動発電デバイスの磁気力を利用した共振周波数調整機構の検討, 第 27 回 MAGDA コンファレンス in 葛飾 講演論文集, p.212, 2018.
- [13] 北, 上野, 超小型磁歪振動発電の実用化に向けた電力変換回路の効率向上, 第 16 回「運動と振動の制御」シンポジウム (MoViC2019), 2019.