設備振動を電力に変換するワイドバンド型振動発電技術の開発

DEVELOPMENT OF VIBRATION ENERGY HARVESTER USING BUILDING EQUIPMENT

井上竜太 ————— * 1

キーワード:

振動発電, エネルギーハーベスティング, 環境振動, ダクト, ワイドバンド, 温湿度センサ

Keywords:

Vibration power generator, Energy harvesting, Environmental vibration, Air-conditioning ducts, Wide frequency range, Temperature and humidity sensor

Ryota INOUE ————— * 1

Vibration energy harvesting has been studied as a candidate for powering next generation wireless sensor networks. It is difficult to harness the actual vibration because the amplitude and frequency are not constant. The combination of a vibration generator and an amplification mechanism, achieved increasing the amount of generated power in a wide frequency range. By using the new vibration energy harvester, sufficient energy was harvested from micro-vibration of the air-conditioning ducts to supply a temperature and humidity sensor and a RF transmitter.

1. はじめに

近年、ネットワークに繋がったモノ同士が人を介さずに情報交換や自動制御を行う Internet of Things (IoT, モノのインターネット) への期待が高まっている。一方、期待の高まりに呼応して、これらのモノに取り付けられる膨大な数のセンサへの配線による電源供給や電池交換が、センサネットワーク社会の実現や普及への大きな課題として取り上げられることが多くなってきた。

この問題を解決する技術として注目を集めているのが、今まで注目されることなく捨てられてきた光, 振動, 熱, 電磁波などの環境中に希薄に分散しているエネルギーから電力を得る「エネルギーハーベスティング」である。得られる発電量は数 μW 程度にとどまるが、センサや無線通信機などの小型電子機器の低消費電力化が進んだことで、この微小な電力でも十分活用できるアプリケーション例が徐々に登場するようになってきた^{1)~7)}。

本稿は、振動をエネルギー源とする振動発電に関して、空調ダクトや設備機器などの設備振動を電力に変換するワイドバンド振動発電技術の開発と適用^{8), 9)}について報告するものである。以降2章では、振動発電の特徴、課題について述べる。3章では、空調ダクトの振動を利用するシステムを取り上げ、ダクトの振動性状や利用する上での課題について述べるとともに、課題を解決すべく開発した発電デバイスやセンサモジュールについて紹介する。4章では、実稼働オフィスのダクト振動から得た電力でセンサモジュールを駆動し、温湿度の測定およびデータの無線送信ができることを確認した環境モニタリング検証試験について述べる。5章では、加速度センサへの電源供給の実現性および設備機器や土木構造物などのインフラの健全性モニタリングへの適用の可能性について述べる。

2. 振動発電とは

振動をエネルギー源とする振動発電は、取り出せるエネルギーが他のエネルギー源と比べて高いという特徴を持っている。表1に示すように、直

射日光を除くと、振動が潜在的に有している抽出可能なエネルギーは他のエネルギー源の10~100倍となっている^{1)~4)}。直射日光に比べると得られるエネルギーは微小だが、自動車、鉄道、機械、人などが動く度に必ず発生する振動は、気象や天候に左右されないエネルギー源であるといえる。

振動発電に関する研究開発は、大学や電子デバイスメーカーを中心にに行われており^{1)~3), 5)~12)}、基本的にそれらの発電方式は以下の4つに分類される。

- ①電磁誘導: 磁石とコイルの相対移動による磁束変化で発電する方式
- ②圧電: 圧電素子に応力を加えて起電する圧電効果を利用した方式
- ③静電誘導: 電荷を帯びた基板と、その基盤に対向する基板の相対移動により発電する方式
- ④磁歪: 応力を加えることで発生する金属内部の磁場の変化のうち外部への漏れた分を巻き付けたコイルを通じて電気に変換する方式

いずれの方式においても、一般的な振動発電デバイスは、基本的に一質点系の振動モデルの構造を有しており、振動源の振動数が質点系の固有振動数と一致した共振時には大きな発電量が得られる反面、振動源の振動数が共振から外れた時に発電量が低下するという弱点も併せ持っている^{1)~3)}。一方で、様々な環境下で発生している実際の環境振動は、振幅や振動数が一定のものは少なく、ほとんどがランダム性を有している。設置環境ごとに性状が異なる振動源に対して発電デバイスの発電特性をいかにマッチングさせるかが、振動発電の実用化への最大の課題といっても過言ではない。

振動発電の代表事例としては、スイッチを押すことで振動を発生させ、そのエネルギーから得た電力で無線信号を送信する無線スイッチが挙げられる^{1)~3), 13), 14)}。海外を中心に、主に照明のOn/Off信

表1 ハーベスティング可能なエネルギー量^{1)~4)}

エネルギー源	具体例	単位面積当たりのエネルギー量
振動	人, 機械, 橋梁, 建築物	$10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ W/cm}^2$
	直射日光	10^{-1} W/cm^2
光	照明, 室内日光	10^{-4} W/cm^2
	体温, 車の廃熱	10^{-5} W/cm^2
熱	放送波, 無線LANの電波	10^{-6} W/cm^2
電磁波		

本稿は文献8), 9)を再構成し、加筆・修正したものである。

*1 ㈱竹中工務店技術研究所 主任研究員・博士(工学)
(〒270-1395 千葉県印西市大塚1-5-1)

*1 Chief Researcher, Takenaka Research & Development Institute, Dr. Eng.

図6 センサモジュールのブロック図 ※提供:ミツミ電機

写真2 検証試験の実施状況

図7 実稼働オフィスの検証試験の結果 ○:モジュール駆動OK ●:モジュール駆動NG

写真3 実稼働オフィスの実証試験

写真4 データ受信機およびモニタリング画面

号や、カードキーの差し込みによるホテル客室扉の開閉信号などへの適用が報告されている他、国内メーカによるデバイス開発も進められている。また、人の歩行などの動作で床パネルを加振した際に電気を発生させる床発電システムについても駅改札での試験¹⁰⁾などの例が報告されている。しかし、これらの事例のように、発電デバイスに人力を直接加えることによって強制的に振動を発生させる例は報告されているものの、上述の共振に係る理由などから、日常的に発生している環境振動を振動源、エネルギー源として利用した例は見受けられない。

3. ワイドバンド振動発電技術の開発

建物内のどこにでも在る環境振動によってセンサの電源が確保できれば、エネルギー源を人の触る所に限定する必要がなくなり、振動利用の選択肢や用途をさらに広げることができる。そこで筆者は、発電デバイス側で発電できる振動数帯域のワイドバンド化により、微小かつランダムな環境振動による発電の実現を目指すこととした。

3. 1 建物の至る所に存在する振動源(空調ダクト)の振動特性

発電デバイスのワイドバンド化の目標を定めるために、建物の至る所に存在する振動源として空調ダクトを選択し、実稼働中のオフィス、機械室、倉庫において、ダクト19箇所の振動調査を実施した。

図1 空調ダクト振動の周波数分析結果例

図2 空調ダクトの振動分布

図3 2質点系の構成と効果(概念図)

写真1 振動発電デバイスと無線センサモジュール
〔設計・開発協力:ミツミ電機〕

図4 振動発電デバイスの発電特性

図5 ビル空調設備用の温湿度モニタリングのイメージ

3. 2 ワイドバンド振動発電デバイス

空調ダクト用の発電デバイスの発電方式には、電磁誘導を採用した。一般的な電磁誘導型の発電デバイスは、磁石またはコイルをバネ材で支持した1質点系で構成され、デバイスと振動源の振動数が一致した共振時に大きな発電量が得られるよう設計される。しかし、不一致時には発電量が著しく低下する弱点を併せ持っている点は先述の通りである。

今回、広帯域に分布するダクト振動に対して発電デバイスのワイドバンド化を図るため2質点系の構成を用いた。図3に、2質点系の構成と効果の概念図を示す。発電部や振動増幅機の質量や剛性のバランスによって、発電量の向上や帯域のワイドバンド化が実現可能となっている。写真1に、開発した振動発電デバイスを示す。発電デバイスは、発電デバイスとして許容される寸法、重さ、ダクトの振動特性とのマッチングなどを考慮し設計した。

発電デバイスの発電特性を、図4に示す。図には、振動台上に発電デバイスを設置し、スウィープ加振により一定の加速度 10mG_{0-p} を与えた時の発電量を示した。発電特性は2質点系特有の二峰形の形状となり、 $12\text{Hz}\sim 41\text{Hz}$ の範囲で極小値 $2\mu\text{W}$ 以上の発電量が得られるようになっている。すなわち、本デバイス1台で、ダクト振動の最大ピークの振動数範囲を包含するワイドバンドな発電特性を有している。

3. 3 低消費電力型無線センサモジュール

発電デバイスのワイドバンド化により、建物の至る所に存在する空調ダクトの振動を電源として利用できる可能性を広げることができた。この電源を利用する用途としては様々なものが考えられるが、ここでは一例として、図5に示すようなオフィス空間における温湿度などの環境モニタリングを行うセンサモジュールについて述べる。

図6に、センサモジュールのブロック図を示す。センサモジュールは、整流回路、コンデンサ、電源監視回路、DC-DCコンバータ、温湿度センサ、無線通信用IC(図中“RF-IC”と記す)で構成される。無線通信の方式は、汎用性や低消費電力性を考慮し ZigBee Green Power の規格に準拠したものとした。発電デバイスによって得られる交流電力は、まず、整流回路を通じて直流に変換されコンデンサに蓄えられる。次に、コンデンサの蓄電電圧が 1.4V を上回ると DC-DC コンバータが起動し、電圧 2.2V が温湿度センサと無線通信用ICに供給され、温湿度データの取得と送信が実行される。一回のデータの取得と送信には $450\mu\text{J}$ の電力量が必要である。データの取得と送信の時間間隔は、モニタリングする居室の用途などに応じて任意に設定することができる。設定した時間の間に $450\mu\text{J}$ 以上の電力量が供給されれば、空調稼働時にはセンサモジュールは停止することなく稼働し、データを送り続けることができる。上述の発電デバイスを 10mG_{0-p} 程度の振動環境下に5分間設置して得られる発電量は $600\mu\text{J}(=2\mu\text{W}\times 300\text{秒})$ 以上であり、急激な温湿度変化が生じないオフィス空間において十分

図8 温湿度の長期モニタリングのデータ例(5週間分)

ともいえる5分間隔でのモニタリングが行える仕様となっている。

空調停止によって振動エネルギーの供給が途絶えた場合は、コンデンサの蓄電電力によって最長で約100分(=5分/回×20回)の測定が可能で、蓄電電圧が 0.9V を下回った時点で停止する仕様となっている。空調稼働時の環境モニタリング用途であれば、本センサモジュールは十分に役割を果たすことができる。空調停止時にもデータ収集が必要な用途では、停止中もセンサモジュールが駆動し続ける容量を持ったコンデンサが必要となる。

4. 空調ダクトの振動利用による温湿度モニタリング検証試験

空調ダクトの振動により電源を供給されたセンサモジュールによって温湿度モニタリングができることを検証するため、平面寸法 $8\text{m}\times 48\text{m}$ の実稼働オフィスにおいて試験を行った。検証試験の実施状況として、写真2に天井懐側のダクトおよび発電デバイスの設置状況を、写真3にオフィス空間側の様子を示す。

4. 1 センサモジュール駆動、通信の確認

検証試験の結果、ダクト振動からの電源供給によりセンサモジュールの駆動が確認できた箇所を、図7に示す。無作為に選んだ天井懐内のダクトのほぼ全数にあたる92%(12/13箇所)において空調吹出口の温湿度データを測定できることが確認、検証できた。オフィス両端の空調機から離れるほどダクト振動は小さくなる傾向があり、中央付近の1箇所だけはセンサモジュールの駆動を確認できなかった。

写真4に、データ受信機およびモニタリング画面を示す。センサモジュールから送信された温湿度データは、受信機(USB Dongle)にて受信され、PCに保存される。保存データは参照でき、モニタリングソフトを用いて現在の温湿度や履歴を確認することができる。現時点のシステムでも、センサモジュール12台のデータを保存、表示することが可能で、将来的にはさらに対応台数を増やす予定である。

振動発電による電源供給と並んで、無線によってデータを送受信できる通信距離やその信頼性の確認は、検証すべき重要な項目である。今回、敢えて厳しい通信条件として、軽鉄下地で吊り下げられた天井懐内のボード上側にセンサモジュールを移設した場合について、通信テストを実施している。その結果、天井懐のセンサモジュールから送信されたデータを、約30m離れたオフィス空間内において100%の受信率で受信できることが確認できた。意匠的に送信アンテナを室内側に設けることができない場合でも、同一室内であれば、天井懐内と居室の間で十分にデータ送受信ができることが確認できた。

4. 2 温湿度の長期モニタリング試験

検証試験後、センサモジュールと同じ位置に電池駆動の市販の温湿度センサを設置し、同一建物内において温湿度の長期モニタリング試験を実施した。2013年1月の設置から2年を経た現在でもシステムは正常に駆動している。5週間分(2013年8月26日～9月30日)の結果を示した図8より、空調稼働時(夜間、休日以外)は、市販センサとほぼ同じ温湿度をセンサモジュールで測定できること、すなわち、電池交換や電源配線なしに温湿度モニタリングができていることがわかる。今後、センサ数を増やしきめ細かく温湿度分布を把握することで、居室の快適性向上や空調の効率運転に繋げていきたいと考える。

5. 温湿度モニタリング以外の用途への適用検討

5. 1 加速度センサへの電源供給

本技術が電源を供給できるセンサは、温湿度センサに限らない。

図9に、各種センサの消費電流の目安⁶⁾を示す。いずれのセンサも、温度センサより消費電流が大きいが、センシング頻度や駆動時間が少ない用途であれば振動発電でも十分に駆動できる可能性がある。

ここでは、様々なセンサの中から、特に、インフラの健全性モニタリングなどへの活用が期待されている加速度センサを取り上げ試算することとする。図9を参考に、仮に消費する電流を200 μ A、電圧を2Vとすると、1分間の駆動に必要な電力量は24,000 μ Jとなる。発電デバイスを10mG_{0-P}の振動環境下(発電量2 μ W)に設置した場合にはこの電力量を200分で供給できる計算となる。

5. 2 インフラの健全性モニタリングへの適用の可能性

加速度センサのインフラへの適用用途としては、まず、回転機器の状態監視が挙げられる。1日に1回程度の頻度で、1分間の加速度波形が計測できれば、経年劣化による軸ブレなどの検知が可能であり、振動発電での電源供給が十分可能な頻度、駆動時間となっている。本技術を適用することで、従来は人が巡回し判断していた機器の維持管理の省力化を図ることができる上、発電の履歴などから機器の実稼働時間の記録を参照することで、適切な時期に部品交換や機器更新を行えるようになる。

回転機器の状態監視の用途では、エネルギー源としてダクト振動ではなく監視対象の機器振動から電力を得た方が効率的である。そこで、写真5に示す4種の設備機器について振動測定を実施した。測定データの1/3オクターブ周波数分析結果を、図10に示す。ピーク振動数は異なるものの、いずれの設備機器でも10mG_{0-P}の以上の振動が発生していることがわかる。この結果と、本振動発電デバイスの発電特性および5.1にて述べた電力量から、機器の振動から加速度センサの電源を供給し、状態監視を行える可能性は十分にあると考えられる。

加速度センサは、機器以外にも、橋梁、トンネルなどの土木構造物のモニタリングへの活用も期待されている。これらのモニタリングには、(1)構造物のデータを正確に把握するセンシング、(2)センシングしたデータから構造物の状態を判定する解析技術、(3)取得したデータを正確にサーバに送る無線通信、(4)センサや無線を駆動するための自立電源、の4要素が求められる^{6), 7)}。(1)や(2)の面で解決すべき課題が多く残されている現状ではあるものの、本稿で紹介した振動発電は(3)と(4)において一定の役割を果たせる技術であり、今後、土木構造物の健全性モニタリングなどへの適用も図りたい。

6. おわりに

本稿では、ワイドバンド振動発電デバイスと低消費電力型センサモジュールを開発し、空調ダクトの振動を温湿度センサの電源として利用した環境モニタリング検証試験について述べた。また、加速度センサへの電源供

給の実現性を示すとともに、加速度センサを用いた設備機器や土木構造物などのインフラの健全性モニタリングへの適用の可能性について述べた。

エネルギーハーベスティングに関する研究開発の例は国内外で多数見受けられるようになってきたが、今まで電力として利用できなかった微小かつランダムな環境振動をセンサ電源として利用可能とする本技術は、海外を含めて例をみない先駆的な取り組みであるといえる。また本技術は、本稿で例示した用途以外にも、建設、設備やインフラの管理、防災、セキュリティ、交通、流通など様々な分野に展開できる汎用性と可能性を有している。Internet of Things(IoT, モノのインターネット)に代表されるセンサネットワーク社会の実現に向け、膨大な数のセンサへの電源供給が大きな課題と考えられる中、今後も本技術の適用、展開を進め、産業発展に貢献したい。

謝辞

振動発電デバイス、無線センサモジュールの設計、開発に御協力いただいたミツミ電機株式会社の関係各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 鈴木雄二監修：環境発電ハンドブック，エヌ・ティ・エス出版，2012.11
- 2) 桑野博喜監修：エネルギーハーベスティング技術の最新動向，シーエムシー出版，2010.10
- 3) 久米秀尚：エネルギー・ハーベスティングで「ローパワー」から「ノーパワ」へ，日経エレクトロニクス，No.1038，pp.67-75，2010.9
- 4) Tony Armstrong：エネルギー・ハーベスティング電源回路の効率向上がカギ，日経エレクトロニクス，No.1047，pp.83-90，2011.1
- 5) 野澤哲生：環境発電の省エネが進展 1 μ W以下で動作可能に，日経エレクトロニクス，No.1065，pp.73-80，2011.9
- 6) 久米秀尚，中道理：朽ちないインフラ 電子技術が建造物を守る，日経エレクトロニクス，No.1106，pp.23-39，2013.4
- 7) 久米秀尚：インフラ監視 期待と現実，日経エレクトロニクス，No.1114，pp.49-57，2013.8
- 8) 阿部隆之，井上竜太，平林信二：空調設備の振動発電利用に関する研究 その1 ダクトの振動特性に適した振動発電デバイスの検討，日本建築学会大会学術講演梗概集D2，pp.1349-1350，2013.8
- 9) 井上竜太，阿部隆之，平林信二：空調設備の振動発電利用に関する研究 その2 振動発電デバイスと低消費電力型無線センサモジュールを用いた検証試験，日本建築学会大会学術講演梗概集D2，pp.1351-1352，2013.8
- 10) 鈴木雄二：エレクトレットを用いた静電誘導型MEMS発電器，静電気学会誌，Vol.35 No.5，pp.197-202，2011.9
- 11) 上野敏幸：磁歪材料を用いたマイクロ振動発電素子，ケミカルエンジニアリング，Vol.56 No.1，pp.39-44，2011.1
- 12) 上野敏幸：磁歪材料を用いた振動発電，日本磁気学会誌まぐね，Vol.6 No.3，pp.140-145，2011.6
- 13) EnOcean 社ホームページ：http://www.enocean.com/
- 14) 河合基伸：用途広がるエネルギー・ハーベスティング，日経エレクトロニクス，No.1065，pp.151，2011.9
- 15) 小林三昭，林寛子，坂本圭司，佐藤敏彦：環境発電「床発電システム」の開発，アーバンインフラ・テクノロジー推進会議 第21回技術研究発表会，A2，2009.11

図9 各種センサの消費電流の目安

写真5 設備機器の振動測定状況

図10 設備機器の振動分布

[2015年2月18日原稿受理 2015年4月1日採用決定]