

1. はじめに

近年、ありとあらゆるモノがネットワークに繋がる Machine to Machine(M2M) や、自律的な通信機能を持ったモノ同士が人を介さずに情報交換・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。しかし、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、センサーネットワーク社会の実現、普及への大きな課題として取り上げられることも多くなってきた。

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」技術である。得られる発電量は数 μW 程度にとどまるが、近年、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の登場が徐々にみられ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、取り出すことができるエネルギー密度が他のエネルギー源に対して高いという特徴を持っている。表 1 に示すように、直射日光は別として、振動発電は他のエネルギー源に比べて 10~100 倍の抽出可能なエネルギーを潜在的に有している^{1)~4)}。また、太陽光や風に比べ得られるエネルギー量は微小であるが、振動は自動車、鉄道、機械、人などが動く度に必ず発生するため、気象や天候に左右されないエネルギー源であるともいえる。

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で行われており^{1)~3), 5)~12)}、それらの発電方式は基本的には以下に示す 4 分類のいずれかに属される。

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

圧電：圧電素子に応力を加えることで起電する圧電効果を利用した方式

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

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共振した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)}。

表1 ハーベスティング可能なエネルギー量

| 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 | $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ W/cm}^2$ |
| 光 | 直射日光 | 10^{-1} W/cm^2 |
| | 照明, 室内日光 | 10^{-4} W/cm^2 |
| 熱 | 体温, 車の廃熱 | 10^{-5} W/cm^2 |
| 電磁波 | 放送波, 無線LANの電波 | 10^{-6} W/cm^2 |

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、国内でもデバイス開発が進められている。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^{9),15)}やスポーツ施設への適用¹⁶⁾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た例は報告されているものの、上述の共振に係る理由から、日常的に発生している環境振動を振動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 に、調査結果の例として、2 箇所（ダクト A, B）で測定した加速度波形の FFT 周波数分析結果を示す。図中 で示した最大ピークの振動数について比較すると、ダクト A が 20.4Hz であるのに対し、ダクト B では 34.3Hz となっており、倍率にして約 1.7 倍の差が生じている。最大ピークの外に、加速度が 10mG を超えるピークを図中 で示したが、最大ピークと同様、ダクト A, B のピークで同じ振動数のものはなくばらついている。これらの振動数のばらつきは、鋼板の大きさ、リブ間隔、吊りピッチなどのダクト側の振動特性や、回転数などの送風機側の特性との共振具合などに起因して発生していると考えられる。

図 2 に、全 19 箇所のダクトの測定結果のうち、加速度 10mG 以上のピークを抜きだす形でプロットした加速度と振動数の分布図を示す。図中、最大ピークを で示し、それ以外のピークを で示した。10mG 以上のピークは 8Hz ~ 68Hz の広帯域に分布し、最大ピークに限っても 16Hz ~ 38Hz(倍率 2.4 倍), 11mG ~ 120mG と広帯域に分布している。

この結果から、少なくとも、最大ピークの振動数分布範囲をカバーできるワイドバンドな発電特性と、加速度 10mG 程度でもセンサ、無線通信の電源を供給できる電力が得られる発電能力の両方が、空調ダクトを振動源として利用する発電デバイスに求められる性能であるといえる。

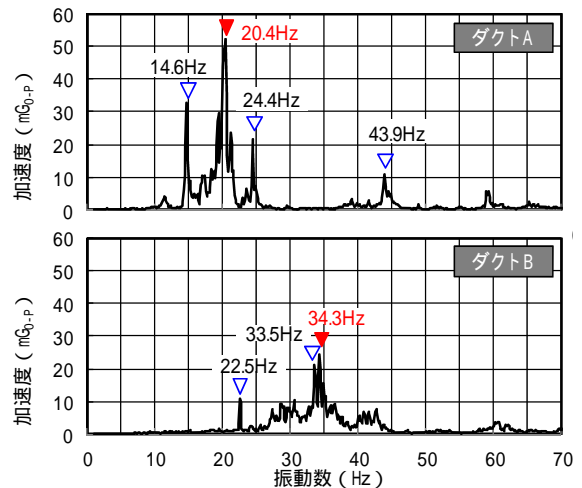


図1 空調ダクト振動の周波数分析結果例

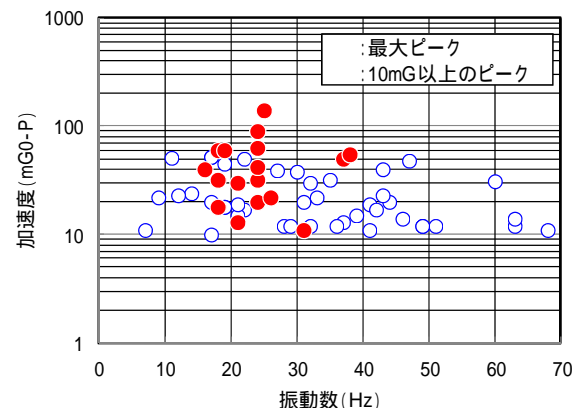


図2 空調ダクトの振動分布

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の一致(共振)時には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、様々な振動数で $10mG_{0-p}$ の振動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、12Hz~41Hzの範囲で極小値 $2\mu W$ 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を電源として利用できる可能性が広がった。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、RF-ICで構成される。RF-ICの通信方式は、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た交流電力は、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RF-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 $450\mu J$ の電力量が必要である。

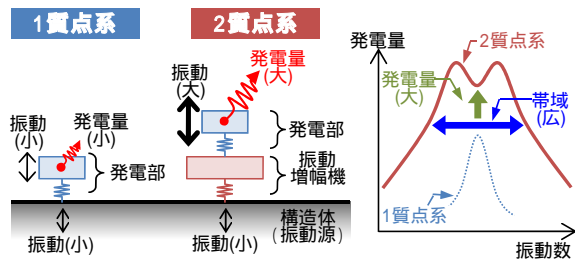


図3 2質点系の構成と効果(概念図)



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]

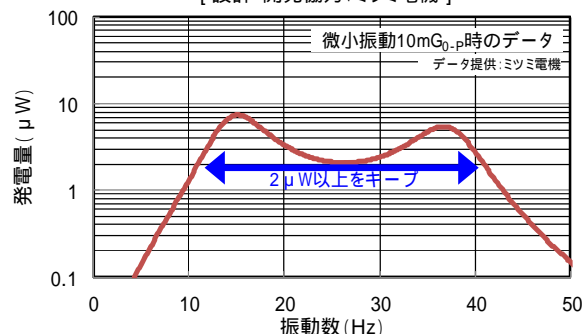


図4 振動発電デバイスの発電特性

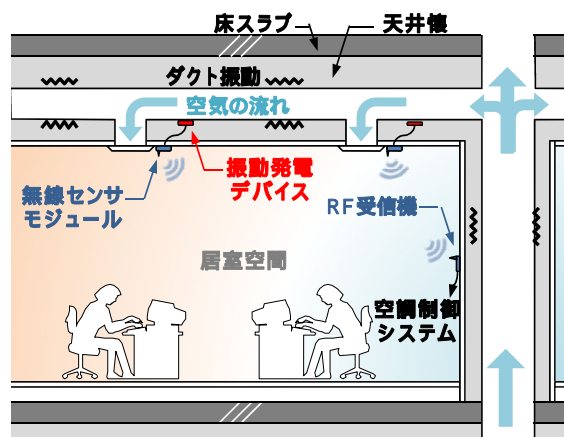


図5 オフィス空間の温湿度モニタリングのイメージ

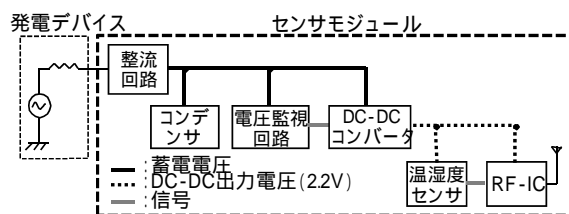


図6 センサモジュールのブロック図

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 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 5 分間隔のモニタリングなどが行える仕様となっている。

空調停止によってダクトからの振動エネルギーの供給が途絶えた場合には、コンデンサに蓄電された電力によってセンサモジュールを駆動させ、コンデンサの電圧が 0.9V を下回った時点で停止するようになっている。空調稼働時だけ温湿度などを把握する環境モニタリングの用途であれば、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の収集が必要な場合は、停止期間にもセンサモジュールを駆動し続けさせ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 $48\text{m} \times 8\text{m}$ 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。



写真2 検証試験の実施状況

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 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。



写真3 実稼働オフィスの実証試験

写真 4 に、データ受信機およびモニタリングソフト画面を示す。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 ドングル) にて受信され、PC に保存される。モニタリングソフトにて保存データを参照し、現在の温湿度や履歴を確認することができる。現時点の試作システムでも、センサモジュール 4 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。

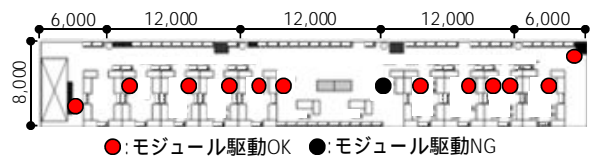


図7 実稼働オフィスの検証試験の結果

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も、通信テストを実施した。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、 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を実証した。

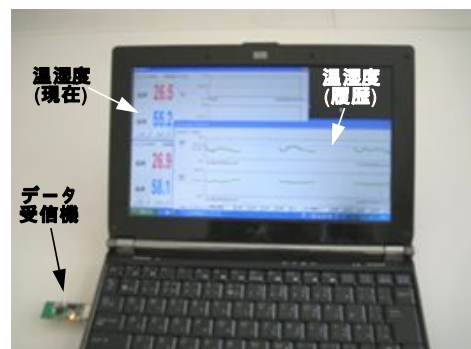


写真4 データ受信機およびモニタリングソフト画面
[設計・開発協力: ミツミ電機]

4.2 発電デバイス設置前後のダクト振動

本試験では、写真2に示すように加速度センサを設置し、発電デバイスの有無によるダクト振動の違いについても測定を行った。加速度波形を図8に、FFT周波数分析結果を図9に示す。主に17Hz~21Hzおよび27Hzの複数の振動数成分の振動が電力に変換されて小さくなっており、ワイドバンドな発電特性を持つ本発電デバイス特有の効果が表れている。

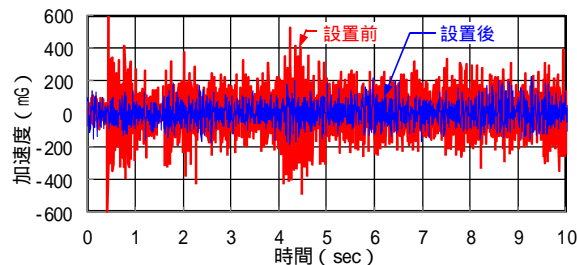


図8 発電デバイス設置前後のダクト振動の波形

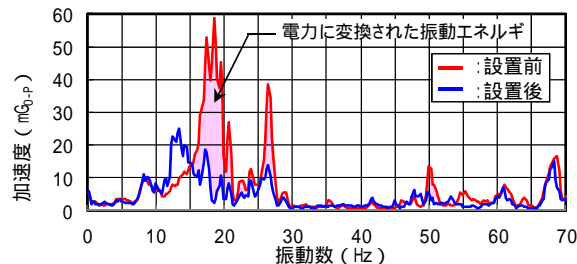


図9 発電デバイス設置前後のダクト振動の周波数分析結果

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10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、温度センサよりは消費電流が大きい、センシングの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させることが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への活用が期待されている加速度センサを取り上げる。図10を参考に、仮に消費する電流を200μA、電圧を2Vとすると、1分間の駆動に必要な電力量は24,000μJとなる。発電デバイスを10mGの振動環境下(発電量2μW)に設置した場合にはこの電力量を200分で供給できる。

5.2 インフラの健全性モニタリングの可能性

加速度センサのインフラへの適用用途としては、まず、図11に示す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に示す設備機器について振動測定を実施した。結果を図12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_{r.p.p.}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。

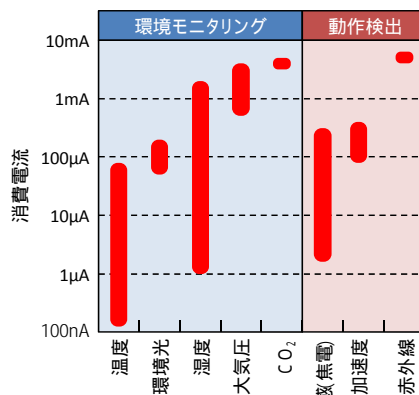


図10 各種センサの消費電流

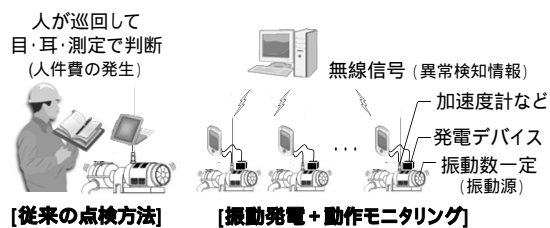


図11 回転機器の動作モニタリング

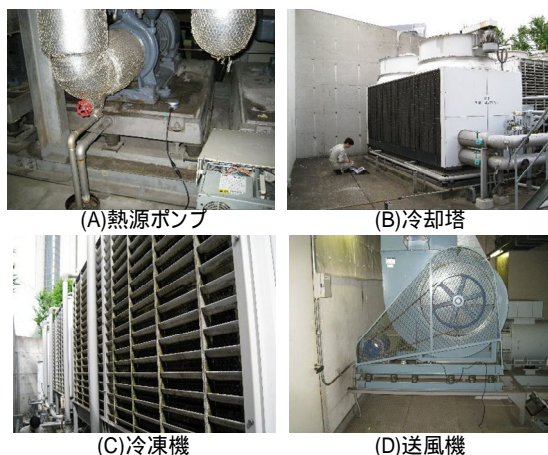


写真5 設備機器の振動測定状況

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、構造物のデータを正確に把握するセンシング，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，取得したデータを正確にサーバに送る無線通信，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)}。こ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技術は、において一定の価値を提供できるものであり、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。

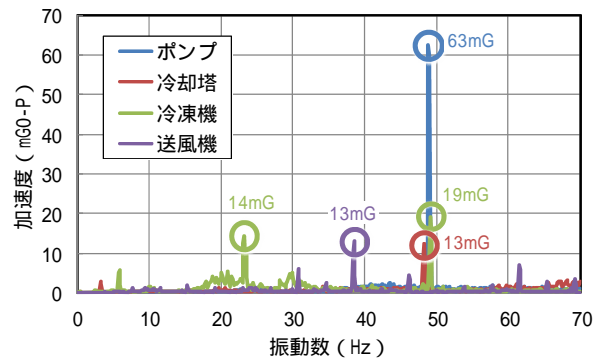


図12 設備機器の振動測定例

6. おわりに

本稿では、ワイドバンド振動発電デバイスおよび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て環境モニタリングを行った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捉えている。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持っている。Machine to Machine (M2M) や Internet of Things (IoT, モノのインターネット) 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を進め、産業発展に貢献したい。

[参考文献]

- 1) 鈴木雄二監修：環境発電ハンドブック，エヌ・ティー・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「ノーパワー」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.1106，pp.49-57，2013.8
- 8) 堀口睦弘：圧電振動発電技術の紹介，計測技術，2011年5月号，pp.35-38，2011.5
- 9) 速水浩平著：振動力発電のすべて，日本実業出版社，2008.1
- 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) 小林三昭他：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
- 16) 小林三昭他：床発電システムの一般施設・スポーツ施設への適用，アーバンインフラ・テクノロジー推進会議 第22回技術研究発表会，A5

[備考]

本稿は、空気調和・衛生工学 第87巻 第2号および2013年度日本建築学会大会にて発表済みの内容を含んでいる。