

環境発電における出力増加手法の検討

石山 俊彦*

論文要約

環境発電における出力増加の手法として、複数のエネルギー源を利用する「ハイブリッド・エネルギー・ハーベスティング」において、一方のエネルギー源が他方のエネルギー源の出力増加に使われる手法を検討した。実験では、送風を「副エネルギー源」として使用し、排熱（温水）による熱電発電の出力の増加特性を検討した。実験の結果から、「副エネルギー源」を利用することで、「主エネルギー源（温水）」の出力を増加させられることができた。身の回りの環境にあるエネルギー源を見つけることで、環境発電の出力を増加させることができることを示した。

キーワード：環境発電、熱電発電、ハイブリッドエネルギーハーベスティング、排熱

A Study on Increasing Output Power of Energy Harvesting

Toshihiko ISHIYAMA *

ABSTRACT

As a method of increasing output power in energy harvesting, the author examined the method of "hybrid energy harvesting" in which one energy source is used to increase the output power by the other energy source. In the experiment, air blowing was used as a "sub-energy source" to study the characteristics of increasing the output power of thermoelectric generation. The experimental results showed that the output power of the "main energy source" could be increased by using the "secondary energy source".

Keywords: *Energy harvesting, Thermoelectric generation, Hybrid energy harvesting, waste heat*

1. 緒言

Industry4.0 や Society5.0 など、我々の生活する空間（実空間）とインターネット空間（仮想空間）を有機的に接続することで、生産性や生活の質の向上につながる試みが進んでいる^{1),2)}。こうした動きを支える技術に IoT（Internet of Things）があげられる。

IoT では、「モノ」にセンサが搭載され、それら搭載センサによって得た情報をもとに、「モノ」が情報を発信する。センサは実空間とインターネット仮想空間をつなぐ重要なデバイスである。また、IoT が社会の中に浸透することで、センサおよびセンサノード（端末）の出荷量は、近い将来、急速に増えていくことが指摘されている。特に、米国では「トリリオンセンサ（2030～40年頃にセンサの出荷個数は年間1兆個のオーダーになる）」が予想されている³⁾。

急速に増加するセンサノードが、これからの IoT を支えるためには、これらデバイスが24時間365日の間、トラブルなく動作することが求められる。特に、センサノードは、家庭の室内、オフィス、工場、倉庫などの屋内で利用されることが想定されている。こうした室内空間において、多数のセンサノードを長期間安定して運用するためには、メンテナンスフリー化を進める必要がある。すなわち、身の回りにはあるセンサの数は膨大となり、ユーザにとって保守や管理が極めて困難になる。さらには、IoT の役割を果たすセンサノードは「移動性」が確保されていることが前提であることを考慮すると、電力については、1年程度で交換を要する乾電池やケーブルの束縛を受ける家庭用電源（AC100V）の使用は制限を受ける。特に、センサノードの寿命から考えると、数年～十年レベルの長期間の運用が想定されるので、こうした観点からも家庭用電源や乾電池による運用は困難である⁴⁾。

センサノードへの電力供給方法の候補として、無線電力伝送と環境発電があげられる^{5),6)}。無線電力伝送は数mの距離で数十～数百Wの電力を無線で供給する技術である。その技術開発の方向性は、より大きな電力の伝送を志向している。また、複数の端末への無線電力伝送については検討の途上にある。

環境発電（エネルギーハーベスティング）は、振動など身の回りの僅かなゆらぎをもとに発電する技術である。環境発電では作り出される電力は小さいものの、周辺環境に変化がなければ継続的に発電することが強みである。しかし、環境発電は出力が小さく、使い方の工夫にも限度がある。そのため、出力の増加が望まれている。

本稿では、環境発電における出力増加の試みについて検討した。

2. 環境発電の出力特性

図1に、各種発表をもとに作成した環境発電機構のサイズと出力の関係を示す。図中の黒丸が力学的エネルギー（主に振動）による発電機構をもとにしたサイズと出力の関係を表す。その他のマークは環境発電で用いられるエネルギー源（光・電磁波・熱）の比較である。

一般に、出力は発電機の筐体の長さに依存する。この関係は、力学的エネルギーをもとにした環境発電においても成り立つ。そのため、出力を大きくしたければ、発電機構のサイズを大きくすればよい。ただし、図中の他の環境発電エネルギー源に示したように環境発電の出力は発電機のサイズだけでなく、発電に利用するエネルギー源（ハーベスト源）のエネルギー密度にも依存する。例えば、太陽電池を発電機構として採用する場合は、電池パネルの面積に比例した出力が得られるものの、太陽電池を搭載する筐体が小さい。一般に、室内照明を光源とした出力は日中の太陽光による出力の1/100～1/1,000と言われている。

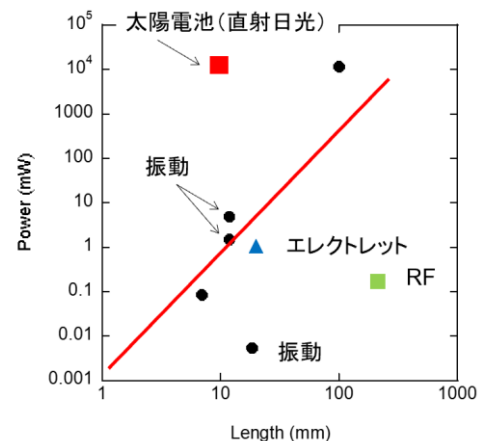


図1. 環境発電機構の筐体長さとお出力の比較

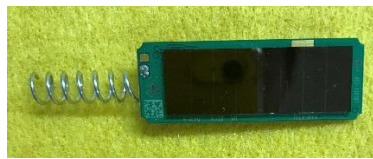
発電技術としての環境発電は、以下に示したような脆弱性を抱えている。

- 微弱な電力しか供給できない(μ W～mWレベル)。
- 安定なエネルギー環境の確保を必要とする。
- 周波数の変更、振動源や電波源がなくなるなどの周囲の環境の変化に対応できるか。

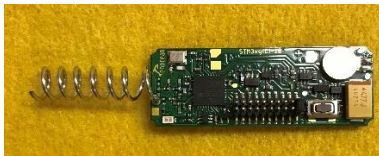
一例として、振動型発電機構を発電機構として利用する場合は、振動源の振動の周期や振幅によって出力は影響を受ける。多くの場合、振動の周期や振幅の変動は最適値からずれることを意味するため、出力の低下をもたらす。このほかにもタイヤや陸橋からの振動をエネルギー源とする場合は、車の停止時や夜間などの環境の変化で電力供給が停止されることも考慮する必要がある。

環境発電の発電機構をセンサノードに搭載するためには、センサノードの筐体サイズを考慮する必要がある。センサノードの筐体サイズは、規格化されていない

め、様々な大きさがあるものの、おおむね数 cm 角である。このサイズに環境発電機構を搭載すると、サブ mW～数 mW 程度の電力しか得られないことが予想される。また、センサノードには、マイクロプロセッサ、メモリ、無線デバイス、アンテナ、センサなどを搭載するので、環境発電機構が使用できるスペースは小さくなる。ただし、表面に太陽電池、裏面に半導体素子を実装することで、センサノードのサイズを有効利用する方法もある。図 2 では、EnOcean 社の製品例で、表面に太陽電池（環境発電機構）、裏面に半導体素子を実装することで、環境発電機構の専有面積を大きくした例である。



(a) デバイス表面



(b) デバイス裏面

図 2. EnOcean 社によるデバイスの両面実装例

3. 環境発電における出力増加手法

3.1. 環境発電における出力増加手法の分類

環境発電において出力を増加させるには、以下の 3 つの方法が提案されている⁷⁾。

- (1) 同種エネルギー源の出力を合算して利用する。
- (2) 異種のエネルギー源を使用し、合算した出力を使用する。
- (3) 一方のエネルギー源は他方のエネルギー源の出力増加に利用する。

上記の各項目の手法について説明する。

(1) 同種エネルギー源の出力を合算して利用する手法

「エネルギー源 A」と「エネルギー源 A'」は同種のエネルギー源を利用する方式である（図 3）。太陽電池を例として、本方式を考える。複数箇所に太陽電池を設置（太陽電池 A と A'）する。それらの太陽電池と電力マネジメント回路をケーブルで接続することで、双方から得られた電力を合算して利用できる。この場合、太陽電池はセンサノードの筐体の範囲には収まらないものの、離れた場所のエネルギー源を利用することができる。

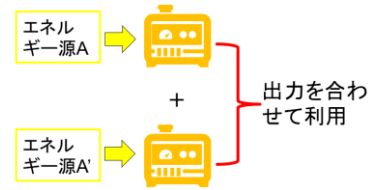


図 3. 同種エネルギー源の出力を合算して利用する例

太陽電池以外でも、同種のエネルギー源であれば、コンバータやインバータなどを共用することができることも長所である。ただし、本方式では、筐体上に十分なスペースが確保されていれば、2 枚の太陽電池の合計面積に相当する 1 枚の太陽電池を準備すれば良い。そのため、本方式が有効である場合は、2 箇所の同種エネルギー源が利用できる場合などに限られる。

(2) 異種のエネルギー源でそれぞれ発電し、合算した出力を使用する手法

「エネルギー源 A」と「エネルギー源 B」は異種のエネルギー源であり、それぞれのエネルギー源に対応した発電機構を持ち、合算した出力を利用する方式である（図 4）。文献[8]では、太陽電池と熱電発電素子を組み合わせた例が報告されている。夏季の気温上昇による太陽電池発電効率低下を、熱電発電により補う事例が報告されている。

本方式の長所として、エネルギー源 A、B の両方の出力を合算して利用できるため、大きな出力を得られる可能性がある。また、一方のエネルギー源（例えば太陽電池など）が発電できない場合でも、もう一方のエネルギー源（例えば熱電発電素子）が発電することで電力供給を途絶えずに、続けることができる。

本方式の短所として、2 種類のエネルギー源は異種であるため、それぞれのエネルギー源に対応した発電機構や電力マネジメント機構を搭載しなければならず、筐体上でのスペース確保が課題である。

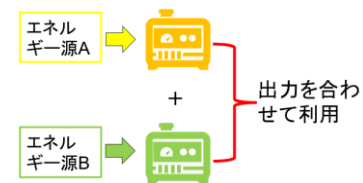


図 4. それぞれの発電機構で合算した出力を利用する例

(3) 一方のエネルギー源は他方のエネルギー源の出力増加に使われる手法

「エネルギー源 B（副エネルギー源）」は、「エネルギー源 A（主エネルギー源）」の発電特性を向上させるために利用される方式を考える（図 5）。「エネルギー源 B」によって得られる出力が「エネルギー源 A」によって得られる出力と比較して、オーダーレベルで小さい場

合、「エネルギー源 B」は自ら発電せずに、「エネルギー源 A」の出力特性を向上させることに使われる。

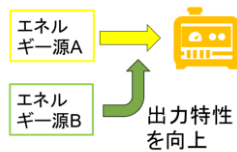


図5. 一方のエネルギー源が他方のエネルギー源の出力増加に使われる例

本方式の利点は、「エネルギー源 B」で得られる出力は小さすぎるので、(2)の方式では、捨てられていたエネルギー源を利用して、「エネルギー源 A」の出力を向上させることができる。また、「エネルギー源 B」用の発電機構を搭載する必要がないことも長所である。

一方で、「エネルギー源 A」の出力が向上しても、数%~数十%程度の出力増加であれば、(2)の方式よりも得られる合計出力は小さくなる。

3.2. ハイブリッド・エネルギー・ハーベスティングによる出力増加

複数種のエネルギー源を用いた発電方法を、ハイブリッド・エネルギー・ハーベスティング (Hybrid Energy Harvesting; HEH) とよぶ。3.1.節に示したように、複数種類のエネルギー源を利用することで、環境発電の脆弱性を補い、出力の増加が見込まれる手法である。

本稿では、従来型のハイブリッド・エネルギー・ハーベスティングではなく、「一方のエネルギー源は他方のエネルギー源の出力増加に使われる手法」により、環境発電の出力増加を検討した。

環境発電の出力増加手法として、「副エネルギー源 (送風)」による「主エネルギー源 (排熱を模擬した温水)」の発電効率を検討した(図6)⁹⁾。実験では、通常、室温雰囲気による冷却を、送風による冷却とすることで、熱電変換における温度差 (熱源 - 室温雰囲気) の差を広げることで、出力の増加を目指した。実験では、家庭で見られる送風である窓からの風や扇風機の風を模擬して工業用ドライヤーを使用した。

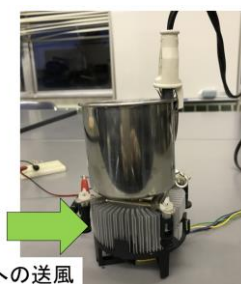


図6. 実験方法⁹⁾

図7に、送風の有無による発電特性の実験結果を示す。冷却用フィンに送風することで、熱電発電の出力は増加した。送風を「副エネルギー源」とすることで、「主エネルギー源 (温水)」による発電の出力を増加させられる。

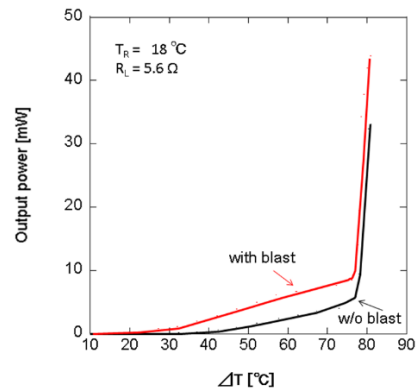


図7. 送風の有無による発電特性⁹⁾

図8に、風速による出力の増加特性を示す。風速が増加することで (副エネルギー源の量が増加する)、出力 (主エネルギー源による発電量) も増加することがわかる。その効果は、風量が多い環境であれば、出力を増加させることができる。ただし、風速がある値以上 (10m/s 程度以上) になると、副エネルギー源による効果は飽和する。

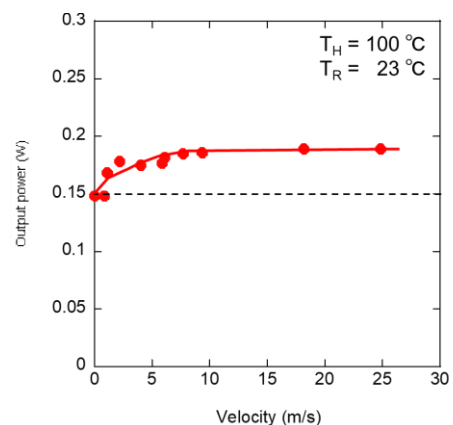


図8. 出力の風速依存性

家庭内の環境を考えると、窓 (自然の換気) や換気扇などの近くに熱電発電素子によるシステムを設置することで、温度差だけでなく、風のエネルギーも利用できる。本検討では送風の効果を検討したが、「副エネルギー源」としては水流などを利用して同様の効果が得られることが示されている⁷⁾。そのため、身の回りの環境にあるエネルギー源を見つけることで、環境発電の出力

を増加させることができる。以上のことから、環境発電では、それを搭載すべきセンサノードの筐体サイズや設置場所についての課題がある。電力供給源としての環境発電の利用には制約があるものの、課題のひとつであった出力の増加については、ハイブリッド・エネルギー・ハーベスティングの利用により改善が期待できる。

4. 結言

Industry4.0 や Society5.0 を支えるセンサノードにおける電力供給について検討した。環境発電は μW ~ mW 級の電力で動作デバイスへの電力供給手段として乾電池を置き換える技術として期待されている。

環境発電が mW 級の電力供給技術としての地位を確立するためには、発電量の増加や安定な発電環境の確保などが課題としてあげられる。その中でも、発電量の増加は使用できるセンサの種類や数が増加できる他、安定な運用のためにも要請されることである。

環境発電における出力増加の手法として、「ハイブリッド・エネルギー・ハーベスティング」をとりあげた。環境発電の出力増加の手法には 3 種類あるが、本稿では、「異種のエネルギー源でそれぞれ発電し、合算した出力を使用」する従来型のハイブリッド・エネルギー・ハーベスティングではなく、「一方のエネルギー源は他方のエネルギー源の出力増加に使われる手法」を用いた。

実験では、送風を「副エネルギー源」として使用し、熱電発電の出力の増加特性を検討した。実験の結果から、「副エネルギー源」とすることで、「主エネルギー源（温水）」の出力を増加させられることができた。これは、身の周りの環境にあるエネルギー源を見つけることで、環境発電の出力を増加させることができることを示している。

センサノードへの環境発電の利用には制約があるものの、ハイブリッド・エネルギー・ハーベスティングの利用により出力増加が期待できる。

参考文献

- 1) 森川博之：「データ・ドリブン・エコノミー」, ダイヤモンド社, 2019.
- 2) 経済産業省情報経済小委員会, “CPS によるデータ駆動型社会の到来を見据えた変革,” , https://www.meti.go.jp/committee/sankoushin/shojo/johokeizai/report_001.html
- 3) J. Bryzek: “Roadmap for the trillion sensor universe, Berkeley,” CA, April 2013.
- 4) N. Roberts, K. Craig, A. Shrivastava, S. Wooters, Y. Shakhsheer, B. Calhoun, D. Wentzloff: “A 236nW -56.5dBm-Sensitivity Bluetooth Low-Energy Wakeup Receiver with Energy Harvesting in 65nm CMOS”, 2016 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), no.26.8, pp.450-451, San Francisco , USA, Jan. 2016.
- 5) 竹内敬治, “エネルギーハーベスティングの最新動向,” 表面技術, vol.67, no.7, pp.334-338, July 2016.
- 6) L. Xie et al., “Wireless Power Transfer and Applications to Sensor Networks,” IEEE Wireless Communications, Vol. 20 , No. 4 , pp. 140-145, Aug. 2013.
- 7) T. Ishiyama, “Output Characteristics of Energy Harvesting Using Multiple Energy Sources,” 2019 8th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), pp. 224-228, 2019.
- 8) 梶川武信, 太田敏隆, 西田勲夫, 松浦虔士, 松原覚衛, “熱電変換システム技術総覧,” リアライズ社, pp. 194-195, 1995.
- 9) 石山俊彦: “トリリオンセンサシステムを支える環境発電技術”, 2019年電子情報通信学会総合大会, 電子情報通信学会, BS-6-2, 2019.