

エネルギー・ハーベスティング 技術の動向と未来

Energy Harvesting Trends and the Future



やまもと ひろし 1) たけふじ よしやす 2)
山本 浩之¹⁾ 武藤 佳恭²⁾

キーワード：エネルギー・ハーベスティング，発電，新エネルギー，二元性，LPWAN

1. はじめに

著者である武藤は、1990年代にアメリカ合衆国防総省の研究プロジェクトを推進する中で、エネルギー・ハーベスティングを知った。慶應義塾大学環境情報学部へ移籍後から、様々な環境に存在するエネルギーを活用した発電システムの研究と開発に取り組んでいる。著者である山本は、温度差発電以降の研究プロジェクトに参加している。これまで著者らが取り組んだエネルギー・ハーベスティングに関する研究プロジェクトの中で、代表的なものの経緯と技術について紹介する¹⁾。

2. 床発電

床発電は、床材に圧電素子(ピエゾ素子)を内蔵させ、人間が床を踏んだ際の圧力によって素子から起電力が発生する発電方法である²⁾。2003年にJR東日本にプロジェクトを提案し、2006年から東京駅の改札で実証実験を開始した³⁾。この様子は多くのメディアで取り上げられた。装置の改良の末、2009年には総面積25m²の発電床で、1日当たり940kW秒の発電に成功した。

床発電は、風力や太陽光といった自然エネルギーを利用した発電とは異なり、人間参加型、若しくは体験型の発電といえる(写真-1)。

この特徴によって、公開実験や展示等では人々の興味をよく惹き、2010年には中国上海市で開催された上海国際博覧会の日本館に展示され人気を博した他(写真

-2)、兵庫県のノエビアスタジアム神戸(御崎公園球場)では観客席に導入された(写真-3)。ここでは、試合応援時の足踏みなどによる振動から発電を行い、その電力が照明として利用されている。試合の盛り上がりと発電量には相関があり、試合のどの時間帯が盛り上がったのかを発電量から観察することもできる(図-1)。

床発電における技術的な課題は、耐久性と蓄電機構であった。耐久性に関しては、発電のために圧電素子に圧力を与える必要がある一方で、ハイヒール靴等による局



写真-1 東京駅改札での床発電の実証実験



写真-2 上海国際博覧会での発電床の展示

1) 慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科。1979年生まれ、静岡県出身。政策・メディア修士(慶應義塾大学)。
2) 慶應義塾大学環境情報学部。1955年生まれ、長崎県出身。工学博士(慶應義塾大学)。



写真-3 ノエビアスタジアム神戸での発電床の設置

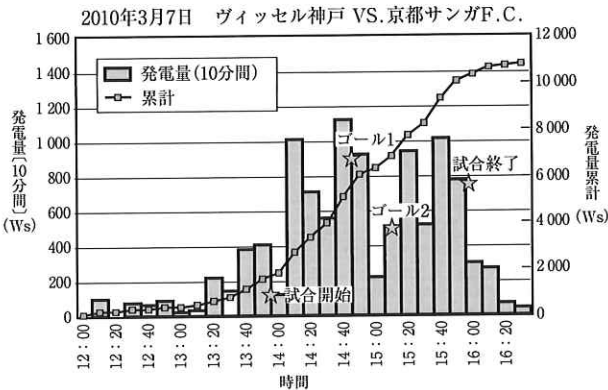


図-1 試合の盛り上がりりと発電量

所的な強い圧力や、膨大な人の往来によって素子が破損してしまう問題があったが、床材の内層に石板を用いることでこれを解決した。蓄電機構に関する課題としては、発電床が一步踏まれた際の発電量は最新の圧電素子でも6mW秒ほどであり、何らかの電力源とするためには発電した電荷を蓄える回路が必要だった。考案した床発電の回路では、圧電素子を並列接続し、ダイオードブリッジから逆流防止のダイオードを経て、電気二重層キャパシタに電荷を蓄積した。圧電素子は、圧力を受けていないときにはキャパシタとして作用し、発電の障害とならない性質を発見したことで、本回路では素子の並列接続が可能となった⁴⁾。

3. 温度差発電

床発電は、人の往来がなければ発電できないため、永続的に発電を行うことができるシステムとして温度差発電に着目した。温度差発電は、高温の熱源と低温の熱源がある環境でのゼーベック効果を利用した発電方法であ

る。装置に使用するゼーベック素子は板状の熱電素子であり、片面に高温の熱源を、もう片面に低温の熱源を接触させると、熱の移動によって内部の半導体が起電力を生じる⁵⁾。

ゼーベック効果は、1821年に物理学者のThomas Johann Seebeckによって発見され、この効果を利用した発電は昔から試みられてきたが、これまでは実用できるほどの電力を得ることができなかった。その原因として、熱電素子に対して熱の流れを効率良く与えることができなかったことが挙げられる。この問題を解決するために、熱の伝達にヒートパイプを用いることで発熱源(高温熱源)から発電装置を介して冷却部(低温熱源)まで素早く、効率的に熱を伝達させる方法を考案した。ヒートパイプは熱交換器などに使用される部材であり、金属製のパイプに揮発性の作動液が真空中で封入されている。パイプが加熱された際には、作動液が蒸発し、蒸気が低温部へ移動すると同時に熱を伝達させる。その後、蒸気は凝縮して加熱部に戻る。パイプの内部は気圧が低いいため、作動液は低い温度で蒸発して熱伝達を行う。また、真空中の気体分子は、理論的には音速に近い速度で移動するため、非常に高速で熱伝達できる。このヒートパイプを使った温度差発電装置は、従来の装置と比較して2.89倍の発電量を得ることに成功し、様々な場面で排熱を発電に利用できる可能性が生まれた。

初めて公開した温度差発電装置は、手の体温と空冷の温度差によってDCモータとプロペラを駆動させるものであり、2007年に制作した。この装置は、動画投稿サイトのYouTubeへの投稿が人気を博している。その後、ロウソクの炎と空冷によって携帯電話を充電できる装置⁶⁾を制作するなどして実用度を高めていった(写真-4)。

プロジェクトとしては、2010年から2015年まで行った静岡県熱海市の温泉施設での実証実験を代表として^{6)~8)}、日本各地の温泉で湯や湯気を利用した温度差

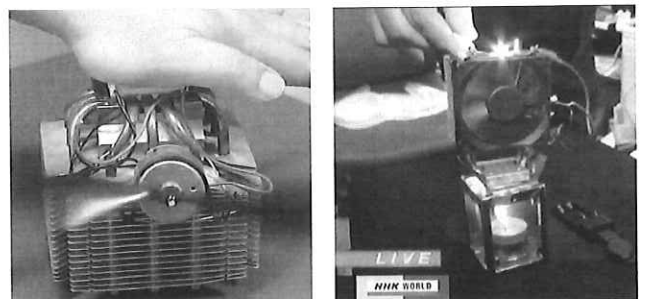


写真-4 手のひら及びロウソクでの温度差発電

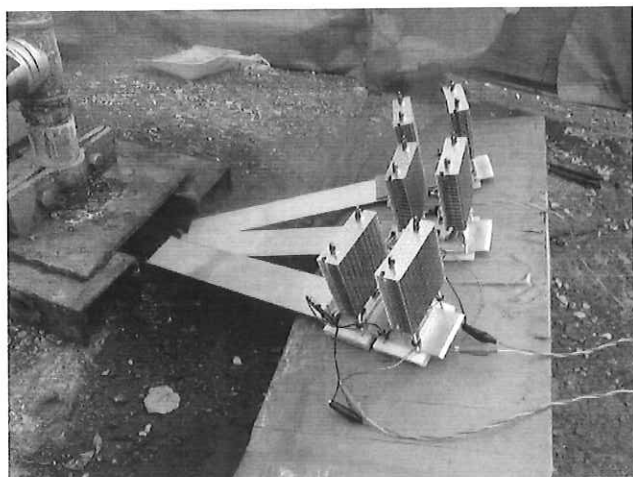


写真-5 温泉湯気発電の実験風景(日航亭大湯)

発電を推進した他(写真-5)、様々な企業の工場などで排熱を利用した実験を行っている。

温度差発電の技術的な課題は、耐久性と温度差の維持であった。耐久性に関しては、屋外への設置や、とりわけ温泉への設置の場合に部材が腐食してしまう問題があった。これを防ぐために、耐腐食性があり、かつ、熱伝導率の高い材料や塗装に関するノウハウを蓄積した。温度差の維持に関する課題としては、熱平衡によって冷却部が温まってしまうことや、逆に熱源が冷えてしまうことがあった。温度差発電装置では冷却の調整が重要であるが、これは熱源の温度や設置環境によってその都度設計が異なるため、ユニット化することが難しく、現在でも研究の余地がある^{9), 10)}。

温度差発電で使用するゼーベック素子は、発電効率が約5%と発電量こそ小さいが、発電装置の部品点数が少なく小型化でき、短期間で製作技術を習得できるものも多いため、教育へ活用も有効だった。例として、科学技術振興機構が支援するサイエンス・パートナーシップ・プログラム(SPP)の参加校や、その他のものづくりに関するワークショップ、及び企業研修等において、講義や教材として利用した実績が数多くある。

4. マグマ発電

温度差発電に取り組む中でヒートパイプの有用性を認識したことから、より大規模で日本の環境を活かしたエネルギー源を発電に利用したいと考えた。それが火山である。

火山は、火口付近に露出した溶岩であっても約1000℃という極めて高いエネルギー源であり、この熱をヒートパイプで輸送して蒸気タービンを駆動させる

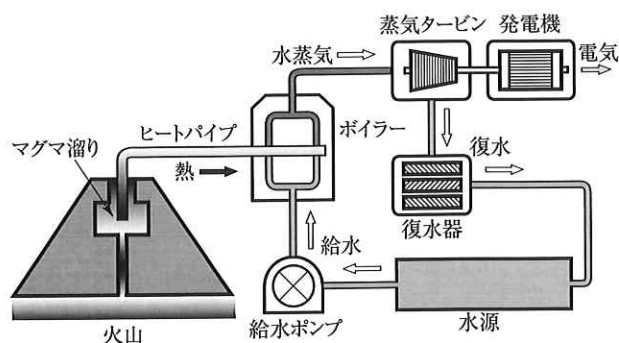


図-2 マグマ発電の概要図

マグマ発電は(図-2)、九州の新燃岳ほどの規模の火山一つで原子力発電所2基分の年間発電量を得られると試算した。地熱ではなく、溶岩の熱を直接利用することで、大きな発電量を得る。また、マグマ発電は原子力発電や火力発電とは異なり、燃料費が不要である上、環境を汚染せず、二酸化炭素も発生させないクリーンエネルギーである¹¹⁾。

マグマ発電の実証実験は、まだ行っていないが、2012年に再生可能エネルギー分野の規制緩和が施行された際に、活火山の多くが含まれている国立公園内で発電所の建設や実験を行うことができるように内容を盛り込んでもらうことができた。また、発電装置に利用するヒートパイプは、溶岩の熱に耐えられるものが既に開発されており、蒸気タービンや発電機は火力発電のものを流用できるため、プロジェクトを進める準備は整いつつある。

5. 消火器発電

小規模でのエネルギー・ハーベスティングのプロジェクトとして近年取り組んでいるのが、消火器発電である。Internet of Things(IoT)で使用される装置に向けて、Bluetooth Low Energy(BLE)やLow Power Wide Area Network(LPWAN), RoLaWANといった低消費電力の通信モジュールが普及してきた背景から着目した発電方法である。

消火器発電では、消火器を使用する際に生じる消火剤が噴出される圧力によって水力発電機を駆動させる。水力発電機は、消火器とホースの間に接続できる小型のもので、毎分2.5~25Lの水量で最大5V, 150mAの電力を出力するものなどがある。これを利用したバッテリーレス・スマート消火器を2016年に提案し¹²⁾、2018年にはLPWANのサービスの一つであるSigfoxを使ったプロトタイピングのコンテストで最優秀賞に選ばれた(写真-6)。この消火器は、使用された際に発電する電

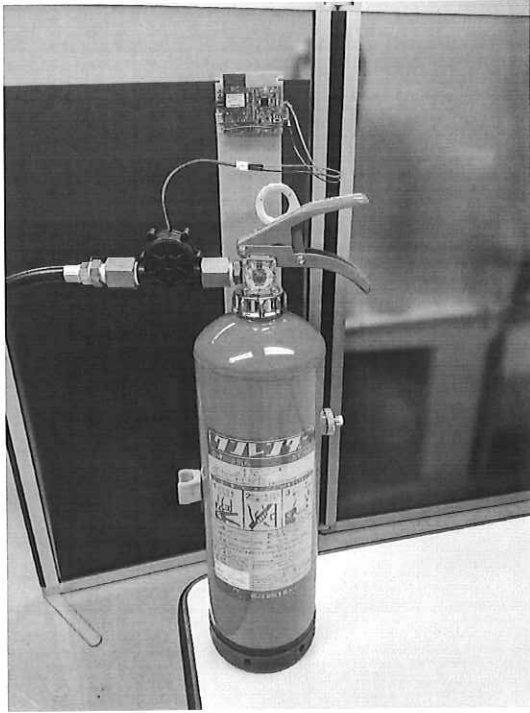


写真-6 バッテリーレス・スマート消火器

力によってマイクロコントローラとSigfox通信モジュールを稼働させて、外部の基地局まで最大50kmほどの通信を行うことができ、火災時に消火器の使用と同時に消防署等への通報を行うことを想定している。従来のスマート消火器とは異なり、通信にLAN環境や電気設備、及び電池を必要としないため、自由な場所に設置でき、また停電に強く、メンテナンスも不要なことが特徴である。装置は、起動から数秒でデータ送信を行うことができるため、消火器が稼働する10秒程度の時間内に通信が完了する。

バッテリーレス・スマート消火器の課題としては、消火器として実用化するための法的な認証の他、泡沫や粉末の消火剤が水力発電機の内部に詰まらないようにするためのタービンの改良などが挙げられる。また、この発電システムは、消火器以外にも配管や水流などの物の流れ、及び噴出がある環境へ応用することができる。

6. おわりに

身の回りには、いまだ利用されていないエネルギーが多く存在する。本稿では、著者らが2003年から行ってきたエネルギー・ハーベスティングに関する研究プロジェクトの中から、床発電、温度差発電、マグマ発電及び消火器発電について紹介した。これら以外にも様々な

発電装置に取り組んできており、例えば、圧電素子を使った貧乏ゆすり発電や、熱電素子を使った白金カイロ発電、焚き火発電及びバイクマフラー熱発電などがある。

電力を与えて何らかの出力を起こす電子部品には、逆に入力から起電力を発生させるという二元性をもつものがある。スピーカに対する圧電素子や、ペルチェ素子に対するゼーベック素子などがこれに当たる。この性質から新しい発電の着想を得られることも多い。

ミリワット級などの小規模なエネルギー・ハーベスティングは、エネルギー源が微小なことや素子の発電効率が低いことなどの理由から、実験や展示には成功しても、実用化には課題が多かった。しかしながら、消火器発電の章で触れたように、近年ではIoTで利用される装置に向けて様々な低消費電力のモジュールが登場しており、これらの電力源として小規模のエネルギー・ハーベスティングを活用できるようになってきたと感じている。

参考文献

- 1) Y. Takefuji: "Energy harvesting: from research to products", JSAP, 82, 11, 2013, pp964-968
- 2) Y. Takefuji: "Known and unknown phenomena of nonlinear behaviors in the power harvesting mat and the transverse wave speaker", Proc. of international symposium on nonlinear theory and its applications, 2008 sept.7-10
- 3) 武藤佳恭, 小林三昭, 林 寛子: 床発電システム開発の取り組み, 静電気学会, 35, 5, 2011, pp.203-207
- 4) Y. Takefuji: "And if public transport does not consume more of energy?", Le Rail, April 2008, pp31-33
- 5) 武藤佳恭: ゼーベック温度差発電とは?, Material Stage, vol.10, no.1, 2010
- 6) Y. Takefuji: "Candle to bonfire power generation", KHK, 2014, pp28-30
- 7) 武藤佳恭: 熱海温泉での温度差発電, 日本熱電学会誌, vol.7, no.3, 2011年3月, pp11-14
- 8) 武藤佳恭, 小路幸市郎, 瀬戸口広樹: 温度差発電の仕組みと実証事例, 電気計算, 2012年8月
- 9) Y. Takefuji: "Balanced heat flux(flow) is needed in thermoelectric power generation", Science(eLetter, 6 October 2017)
- 10) Y. Takefuji, H. Yamamoto: "Energy harvesting floor and thermoelectric power generation", IEICE trans. J96-B, No.12, Dec.2013, pp 1 326-1 321
- 11) Y. Takefuji: "Magma energy power plant", science (eLetter, March 11 2017)
- 12) H. Yamamoto, S. Tomita, Y. Takefuji: "New Product Developments by a New Combination of Existing Technologies and Open Innovation Strategy: A Case Study of Batteryless Auto Alert Fire Extinguishers", Proc. of Global Conf. on Business and Finance, 2018