

床発電から温度差発電

武藤 佳恭^{†a)} 山本 浩之^{†b)}

Energy Harvesting Floor and Thermoelectric Power Generation

Yoshiyasu TAKEFUJI^{†a)} and Hiroshi YAMAMOTO^{†b)}

あらまし 本論文は、(1)床発電の研究のはじまり、(2)床発電の実証実験と床発電商品としての実施例、(3)熱海市での温泉排熱を利用した温度差発電、(4)ロウソク熱を使った温度差発電、(5)たき火熱、薪ストーブの廃熱、バイクマフラー廃熱、懐炉（カイロ）廃熱などを利用した温度差発電、(6)自然廃熱を利用したマグマ熱発電まで網羅的に紹介する。エネルギーハーベスティングまたはパワーハーベスティングの研究は、新産業創出に貢献できるものと著者らは期待している。関連する測定技術や性能向上のための技術問題についても簡単に述べる。上記のうち、(1)~(5)は、実証実験、(6)は日本国が実施すべきマグマ熱発電の概要を説明する。

キーワード 床発電、温度差発電、人工廃熱（ロウソク、たき火、バイク・自動車）、自然廃熱（温泉廃熱、マグマ熱）

1. ま え が き

著者は、米国政府の国防総省のプロジェクトを遂行する中で、エネルギーハーベスティングまたはパワーハーベスティングの研究を知った。2003年、JR東日本のパーティーに呼ばれ、その会場で当時のJR東日本の代表取締役の大塚社長に床発電のアイデアを提案した[1]~[6],[13]。床発電は、人間参加型の発電なので、小電力の発電でありながら、世界中にそのニュースは配信された。2006年の我々の実験では、10歩で47 μ Fのキャパシタを8Vに充電する発電能力であった。これは、0.15mWs/歩を意味している。現在は、40倍ほどに性能向上し、6mWsになった。ここで、mWsとは、ミリワット秒を表す。JR東日本の商品としての床発電システムは、ピエッセル神戸スタジアムに常設してある。

JR東日本では、東京の首都圏を除いて過疎駅が多く、過疎駅では床発電は、全く活躍できない。熱エネルギーであれば使えそうである。2007年、最初の温度差発電機を製作し、その動画をYouTubeにアッ

プロードした。その動画は、“thermoelectric power generator”のGoogle検索で世界一位を獲得し、一躍、熱電発電の分野で評判になった。2013年3月の時点で、23万7千以上のアクセスがある。

この温度差発電の作品が成功したのは、手の温もりと空気の温度差だけで、モーターを駆動するためにヒートパイプを利用したからである。ゼーベック効果を利用した発電では、ゼーベック係数の向上と温度差の向上の2点が重要である。我々は、後者の温度差の向上に着目した。我々の実験では、ヒートパイプを用いない従来の手法に比べてヒートパイプを用いることによって最大3倍の発電性能を得ることができた。

ヒートパイプを使った、温泉廃熱発電[7]~[13]を、熱海市の日航亭で実験し、現在、稼働中である。日航亭の源泉温度は100度に近く、実験場所としては理想的である。温泉水と水道水の温度差が75度で、4cm×4cmのゼーベック素子一枚で、5Wの発電を達成した。現在は、温泉水でなく、源泉井戸からの湯気を使って発電している（湯気発電）。

2011年3月11日に東日本大震災があり、電池の要らない充電器が欲しいと言う連絡が入り、ロウソク熱温度差発電機を製作した。また、焚き火、車やバイクの廃熱、懐炉の熱を使った温度差発電装置を製作した。

最後に、日本政府に提案しているのがマグマ熱発電である。マグマ熱をヒートパイプで熱輸送し、従来の

[†] 慶應義塾大学大学院政策メディア研究科，藤沢市
Graduate School of Media and Governance, Keio University,
5322 Endo, Fujisawa-shi, 252-0882 Japan

a) E-mail: takefuji@sfc.keio.ac.jp

b) E-mail: yama@sfc.keio.ac.jp

蒸気タービンを駆動させるプロジェクトである。マグマ熱発電達成のために、国立公園内での規制法律を2012年に変えてもらった。

2. 床発電 [1]～[6], [13]

床発電で重要な役割を果たすのがピエゾ素子である。ピエゾ素子は一般に硬いので、ハイヒールなどで踏まれると瞬間に壊れてしまう。床発電研究で重要な点は二つある。一つは発電性能の向上、二つ目は耐久性を向上させることである。

ピエゾ素子の発電性能は、ピエゾ材料の体積に比例することがわかった。また、ピエゾ素子の耐久性を増すためにゴムで挟んだだけではピエゾ素子が簡単に壊れてしまった。ピエゾ素子をゴムで挟んで、更にステンレス板の上に敷いてみたが、1日に何万人もの通勤客の通過で、ステンレス板は反り返ってしまった。耐久性を向上させるために様々な材料を試みたが、発電床の表面に石板を敷くことで反り返りと耐久性問題を解決できた。

発電した電荷を貯める回路を2種類考案した。いずれの回路でもシミュレーションでは、ほぼ同等の性能であったが、実際の実験では図1上の回路の性能が良かった。図1上の床発電回路では、ピエゾ素子を並列接続し、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する。図1下の回路ではポンプ回路になっている。JR東日本から売り出されている床発電システムでは、図1上の回路を採用している。ピエゾ素子を並列接続できた理由は、踏まれていないピエゾ素子は、キャパシタとして作用し発電の邪魔をしないことが分かったからである。

図2のようにピエゾ素子を敷き詰めた床発電マットの上を歩くと発電する。発生される電気エネルギー E は、次式で表現できる。

$$E = CV^2/2 \text{ (単位はジュール)}$$

ここで、 V は電気二重層キャパシタ (Super-C) C に充電される電圧である。つまり、「床発電マットを踏む」という力学的エネルギーは、本式の電気エネルギーとして変換され、電気二重層キャパシタ (Super-C) C に蓄積される。

2.1 床発電の実験

最初に実験したのは新宿のJR東日本本社である。本格的な最初の実験は、2006年の東京駅丸の内北口

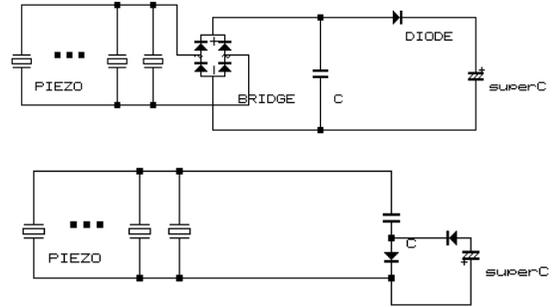


図1 床発電回路

Fig.1 Circuits of power harvesting floor.

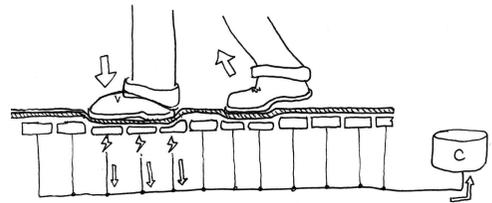


図2 床発電

Fig.2 Power harvesting floor.



図3 2006年の東京駅丸の内北口改札の発電床実験

Fig.3 Power harvesting floor experiment at Marunouchi North gate of Tokyo station in 2006.

の改札での実験である (図3)。2008年の東京駅の実験では、総面積 94m^2 の発電床を敷き、土日を除いて一日に 500kWs の発電を達成した (図4(a), (b))。通勤客がピークの日には一日で 766kWs の発電量を測定した。2009年の実験では、総面積 25m^2 の床発電で一日当たり 940kWs を発電した。

図5に示す2010年の上海万博では床発電は大人気であった。現在、床発電が常設されているのは図6に示したピッセル神戸スタジアムのシステムである。図7に示すように、発電量でゲーム開始、最初のゴール、2回目ゴール、試合終了などの客の興奮度をモニ



(a) SUICA ゲートでの床発電実験 (2008 年)
 (a) Power harvesting at SUICA ticket gates in 2008.



(b) 2008 年の東京駅での階段発電実験
 (b) Power harvesting on Tokyo station stairs in 2008.

図 4 東京駅での床発電実験

Fig. 4 Power harvesting experiments at Tokyo station.



図 5 2010 年の上海万博で展示された床発電
 Fig. 5 Power harvesting floor at Shanghai Expo 2010.

ターできることが分かった。客の興奮エネルギーは、「床発電マットを踏む」という力学的エネルギーで表現され、当たり前であるが、発電量で表現できる。ゴールに失敗しても、客が興奮する場面を発電量は、明確に表現している。



図 6 ビッセル神戸スタジアムの床発電
 Fig. 6 Power harvesting at Vissel Kobe Stadium.

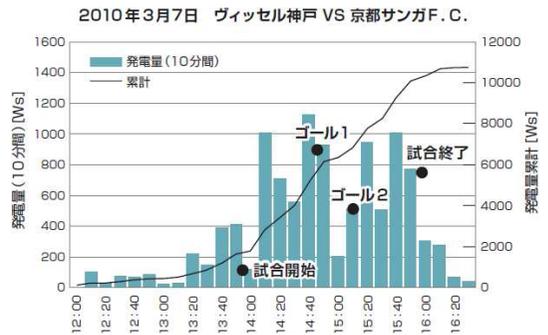


図 7 床発電による興奮度の測定
 Fig. 7 Measuring enthusiasms at Vissel Kobe Stadium by power harvesting floor.

3. 温度差発電のはじまり [7]~[13]

過疎駅では床発電が活かせないので、温度差発電の研究を始めた。温度差発電では、ゼーベック効果を利用して発電する。その発電電力 P は、次式で与えられる。

$$P = V^2 / (4R) = S^2 \Delta T^2 / 4R$$

ここで、 V は発生した電圧、 S はゼーベック係数、 ΔT は温度差、 R はゼーベック素子の内部インピーダンスである。発電電力を大きくするには、ゼーベック係数を大きくし、温度差を大きくし、ゼーベック素子の内部インピーダンスを小さくすることである。

我々は、 ΔT の温度差に着目した。 ΔT の温度差を向上させるために、ヒートパイプを活用した。ヒートパイプを利用することで、従来方式（ヒートパイプを使用しない）に比べて最大 3 倍の性能を向上させることに成功した。従来方式では、ゼーベック素子に熱を伝えるために金属だけを用いているが、温泉での実効温度差係数は、0.588 である。一般に温度差発電では、

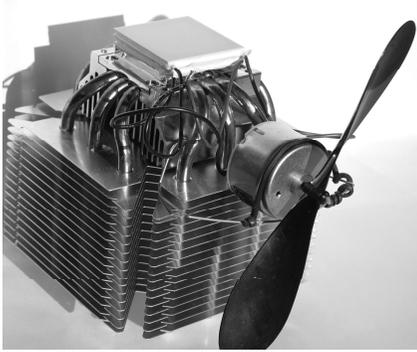


図 8 手の温もりで温度差発電

Fig. 8 Thermoelectric power generator by hand heat.

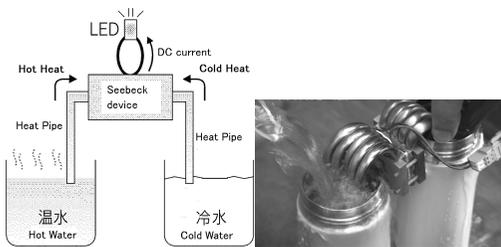


図 9 10本のヒートパイプを用いたディップ型温度差発電装置

Fig. 9 Dip-type thermoelectric power generator with 10 heat pipes.

温度差 ΔT に実効温度差係数を掛け算したものが、実効温度差となる。実効温度差係数は、0~1の値である。

3.1 手の温もりで温度差発電

図 8 に、初めて製作した第一号機の温度差発電装置を示す。この装置の動画は、YouTube サイトで ytakefuji で検索せよ。この発電装置の製作方法をエレクトロニクス 2008 年 3 月号に掲載した [12]。

3.2 温泉廃熱発電 [8]

温泉水と水道水に浸けるだけのディップ式の発電機を図 9 に示す。図 8 の装置と違って、ゼーベック素子の温水側と冷水側それぞれに 5 本ヒートパイプを導入した。4cm × 4cm のゼーベック素子 1 枚使う装置で、5W の発電性能を達成した。熱海市の日航亭でのお湯と水の温度差は約 75 度であった。

従来方式では、実効温度は実際の温度差 ΔT と温度係数 $T_0 = 0.588$ の掛け算となる。例えば、95 度の温水と 10 度の冷水の場合、実効温度は $(95 - 10) \times 0.588 \approx 50$ 度となる。我々のヒートパイプ方式では、 $T_0 \approx 1$ なので、実効温度は $\Delta T \times T_0 = \Delta T = 85$ 度となる。ヒートパイプ方式は、従来方式に比べて、ゼーベック発電



図 10 湯気温度差発電機

Fig. 10 Steam thermoelectric power generator.

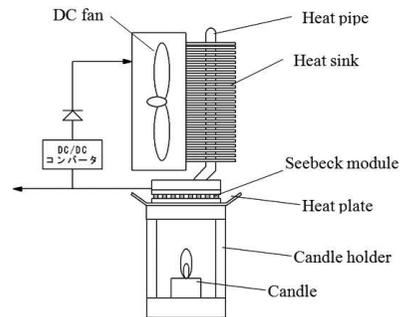


図 11 ロウソク熱温度差発電

Fig. 11 Candle thermoelectric power generator.

の式から $1/(T_0)^2$ なので約 3 倍に性能向上する。

熱海市の日航亭源泉に設置されている湯気を利用して湯気温度差発電 (25W から 30W) を図 10 に示す。装置は 5 ユニットからなり、1 ユニットは 4cm × 4cm のゼーベック素子を一枚使用し、湯気側と冷水側それぞれに 10mm のヒートパイプを 4 本使用している。発電ユニットは図 9 で示す温度差発電装置とほぼ同じである。源泉に 4 台湯気発電器を設置すれば 100W の発電機が完成する。

3.3 ロウソク熱温度差発電 [10]

東日本大震災で、携帯充電用の電池が市場から無くなったので、電池の要らない充電器を作ってくれと言う被災者の要望があった。図 11 に示す電池の要らない試作発電機が、ロウソク熱温度差発電機である。できるだけ発電機を小型にするため、DC ファンを取り付けることでヒートシンク (空冷式冷却装置) を小さくできた。世界中から性能の良い DC ファンを見つけ出しその消費電力は 0.5W 以下である。発電機自体の性能は、ロウソクの芯の太さによって決まるが、2W から 5 W 程度である。この装置に 5 V レギュレータ

を取り付ければ、USB 携帯電話バッテリー充電器となる。

ロウソクを燃料に選んだ理由は、安価でどこでも入手可能な燃料でありながら、経年変化を起こさず、爆発することも無い安全な燃料であるからである。

3.4 その他の温度差発電 [7]~[12]

人間が作り出している人工廃熱の代表が自動車やバイクからの廃熱である。燃料の75%が廃熱であると言われている。工場からの廃熱、焚き火の熱、薪ストーブからの廃熱、厨房のガスコンロからの廃熱、風呂釜からの廃熱、懐炉の熱など様々な大小の熱が無駄に捨てられている。

現在のゼーベック素子の低温差発電の効率は約5%である。現在市販されている、ゼーベック素子の多くが熱伝達の良くないセラミックであり、ゼーベック素子の性能を自ら落としている。ヒートパイプは、-200 度から 2000 度までの耐熱のものが市販されている。ヒートパイプは、高価だと思われるので CPU クーラー以外ではあまり利用されていない。実際は、ゼーベック素子に比べて安価である。

3.5 マグマ熱発電 [13]

日本は資源小国であると言われているが、大きな間違いである。火力発電では蒸気を起こして、タービンを駆動させているが、大量の蒸気を起こす熱源を日本はもっている。多くのマグマを噴出している日本は、エネルギー大国である。燃料を輸入して燃焼させ蒸気を起こすのではなく、マグマ熱を利用して蒸気を起こせば良いのである。

マグマについてここで簡単に説明する。マグマの寿命は 10 万年から 100 万年と言われている。マグマの温度は約 1000 度で、マグマの比重は 2.5g/cm^3 である。1kg 当たりのマグマがもつエネルギーは 100 万 J (ジュール) に相当する。九州の新燃岳のマグマ黙りの大きさは 2000 万 m^3 なので、マグマ黙りのエネルギー量は次式で計算できる。

$$\begin{aligned} & (20 \times 10^6) \times (2.5 \times 10^3) \times 10^6 / (3600 \times 1000) \\ & = 139 \times 10^8 \text{ kWh} \end{aligned}$$

原子力発電所の 1 基当たりの 1 年間の平均発電量は 70 億 kWh なので、新燃岳のマグマ黙りだけで原子力発電所の 2 基分に相当する。2000 度まで耐えられるヒートパイプが市販されているので、マグマの熱をヒートパイプで輸送し、その熱で蒸気を起こし、従来の火力発電所の蒸気タービンを利用すればよいのであ

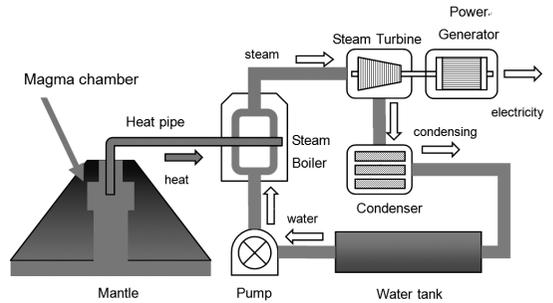


図 12 従来の蒸気タービンを利用したマグマ発電
Fig. 12 Magma power plant using the conventional steam turbine.

る。図 12 にマグマ熱発電所の概念図を示す。

2012 年に法改正していただき、国立公園内でのマグマ発電が可能となった。

4. むすび

捨てられているエネルギーは至る所に存在している。本論文では、エネルギーハーベスティング分野の床発電と温度差発電を紹介した。2012 年 5 月に東京のイギリス大使館で開催された Nature Café でマグマ熱発電の発表をした [11]。近日中に、マグマ熱を利用した大規模な発電が実現できることを期待したい。

文 献

- [1] Y. Takefuji, "And if public transport does not consume more of energy?," Le Rail, pp.31-33, April 2008.
- [2] Y. Takefuji, "Known and unknown phenomena of nonlinear behaviors in the power harvesting mat and the transverse wave speaker," Proc. International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications, Sept. 2008.
- [3] 小林三昭, 林 寛子, 武藤佳恭, "圧電素子を駆使した床発電システムの開発," 日本工業出版「超音波テクノ」, pp.48-52, April 2010.
- [4] 小林三昭, 林 寛子, 武藤佳恭, "床発電システム, エネルギーハーベスティングの最新動向," p.10, CMC Book 2010.
- [5] 武藤佳恭, 小林三昭, 林 寛子, "人の歩行で電気を生み出す床発電システム," pp.27-30, Dec. OHM 2010.
- [6] 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, vol.35, no.5, pp.203-207, 2011.
- [7] 武藤佳恭, "ゼーベック温度差発電とは?," 巻頭, Material Stage, vol.10, no.1, 2010.
- [8] 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, pp.11-14, March 2011.
- [9] 武藤佳恭, "温泉廃熱利用温度差発電," クリーンエネルギー, vol.20, no.10, pp.55-59, 2011.
- [10] 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, pp.34-38, Aug. 2012.

[11] 武藤佳恭, エネルギー大国・日本, 環 vol.52, pp.257-260, Jan. 2013.

[12] 武藤佳恭, 温度差発電, エレキジャック, 2008.

[13] 武藤佳恭, 発明の極意, 近代科学社, 2013.

(平成 25 年 3 月 15 日受付, 6 月 12 日再受付)



武藤 佳恭

1978 慶應義塾大学・電工卒. 1980 同大大学院修士課程了. 1983 同大大学院博士課程了. 工学博士. 慶應義塾大学環境学部教授. 現在, エネルギーハーベスト, セキュリティ, クラウドガジェット研究に従事.



山本 浩之

2007 慶應義塾大学・環境情報学部卒. 2009 同大大学院修士課程了. 現在, 同大大学院政策・メディア研究科後期博士課程在籍.