



温泉廃熱利用温度差発電

慶應義塾大学 武藤 佳恭

はじめに

廃熱利用の温度差発電には、2つの方法がある。一つの発電方法は、温度差でタービン（発電機）を機械的に回転させ発電するスターリングエンジン発電等である。もう一つの発電方法は半導体のゼーベック効果を利用したゼーベック温度差発電がある。両方の温度差発電とも、温度差が大きいほど発電量は大きくなる。ここで紹介するゼーベック温度差発電での利点は、片手で持てるぐらいの小型化可能な発電装置になる点である。また、ゼーベック素子は半導体であるため機械稼働部分がなく、低温度差発電では、特に、発電装置の長寿命化が期待できる。

温度差発電の温度差を作るためには、必ず高温熱源と低温熱源の2つが必要である。高温熱源には、自然高温熱源と人工高温熱源がある。自然高温熱源の例としては、マグマ熱、太陽熱、温泉の源泉、高熱岩盤、地中熱などある。人工高温熱源の例は、工場や製鉄所の廃熱、エンジン（自動車・バイク）廃熱、電車のモータやブレーキの廃熱、厨房ガスレンジ・給湯器の廃熱、風呂釜の廃熱、パソコンやサーバーの廃熱、摩擦熱、原子力発電所の廃熱、等々、様々な廃熱がある。低温熱源では、自然低温熱源の例として空気、地下水、川の水、海水などがある。人工低温熱源には、DCファン、LNG基地などがある。

我々が温度差発電研究を始めたきっかけは、

2003年から始まったJR東日本との床発電共同研究^{(1)~(3)}である。床発電では、発電素子として使われているピエゾ素子の発電量が極めて小さいので、発電量の大きい別の発電方法を研究していた。2006年での床発電の実験測定値では、10歩当たり、47 μ Fのキャパシタが8Vにチャージできる発電量が得られた。歩数あたりに換算すると、0.15mW秒/歩となる。床発電では、キャパシタCに蓄えられた起電エネルギー量Eは、（単位はJoule）として計算される。床発電装置は、現在、Jリーグ・ヴィッセル神戸のサッカースタジアムなどに常設されている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

ここでは、ディップ型の水冷式温度差発電と空冷式温度差発電を紹介する。

発電の基礎：ゼーベック温度差発電とは

今から190年程前の1821年に、トーマス・ゼーベックがゼーベック温度差発電の原理を、“偶然”発見した。ゼーベック発電では、異なる2種類の金属や半導体に温度差を設けると直流の起電圧が発生する物理現象を利用している。この物理現象は、ゼーベック効果と呼ばれている。ゼーベック発電では、起電圧Vは次式で与えられる。

$$V = (S_A - S_B) \cdot \Delta T \quad \dots(1)$$

ここで、 S_A 、 S_B は半導体Aと半導体Bのゼーベック係数、 ΔT は半導体ABの温度差である。

起電圧を大きくするために、ゼーベック係数の差を大きくする様々な半導体の研究・改良が

なされてきている。我々の温度差発電の研究では、温度差 ΔT に着目した。

ゼーベック素子は、P型半導体とN型半導体を導体でサンドイッチした構造をしている。図1に示すように、ゼーベック素子の下を加熱し、素子の upper を吸熱してやるとN型半導体とP型半導体の間に直流の起電圧が発生する。ゼーベック素子の起電圧は、N型半導体が+電位、P型半導体が-電位になる。逆に、ゼーベック素子の upper を加熱し、素子の lower を吸熱するとP型半導体が+電位に、N型半導体が-電位になる。

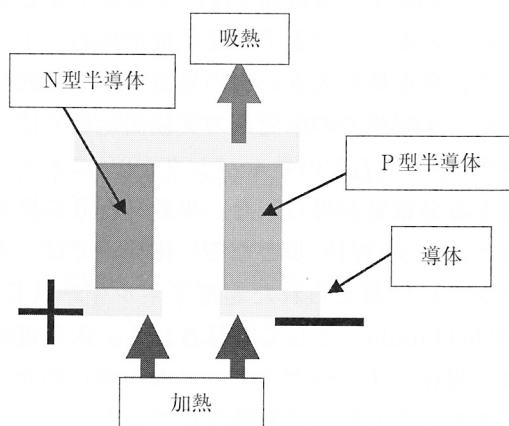


図1 ゼーベック素子とゼーベック発電

実際のゼーベック素子では、図1のP型半導体とN型半導体ペアを多数用いる。したがって、P型・N型半導体ペアを接続する導体同士が接触しないように導体の上に絶縁層を加える必要がある。多くの場合、ゼーベック素子の表面は、絶縁体であるセラミックを用いているが、セラミックの熱伝導率はあまりよくない。

ゼーベック素子からの直流起電力を取り出すためのゼーベック素子回路モデルを図2に示す。

図2のゼーベック素子の両端に抵抗 R を接続すると、抵抗 R を流れる電流 I は、

$$I = \frac{V}{R_i + R} \quad \dots(2)$$

となる。

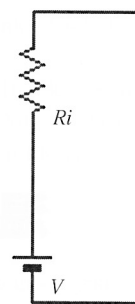


図2 ゼーベック素子の起電圧回路モデル

R_i は内部インピーダンスと呼ばれる。また、抵抗 R の電力 P は、

$$P = I^2 R = R \frac{V^2}{(R_i + R)^2} \quad \dots(3)$$

となる。ゼーベック素子から取り出せる最大の電力 $P(R)$ は、 R を変数とする関数と考え、 $R = R_i$ の時に $P(R)$ を最大にする。何故ならば、 $R = R_i$ の時、

$$\frac{dP(R)}{dR} = 0 \quad \dots(4)$$

になる。

$$\frac{dP(R)}{dR} = V^2 \frac{(R_i - R)}{(R_i + R)^3} = 0 \quad \dots(5)$$

インピーダンスマッチングを考えると、ゼーベック素子から取り出せる最大電力 P は、 $R = R_i$ の時、

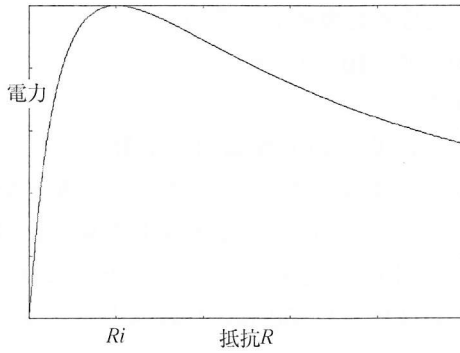
$$P = \frac{V^2}{4R_i} \quad \dots(6)$$

となる。

図3に抵抗値 R と取り出せる電力 P の関係図を示す。

熱量と発電量の計算法

お風呂の廃熱をここで考えて見る。日本には4,953万所帯があるので、すべての所帯が毎日風呂に入るものとして、バスタブの大きさを250リットルとして、水温の平均温度15度を40度に沸かして、その温水を廃棄した時の捨てられたエネルギー量は、一日当たり、



P は $R=R_i$ の時、最大値を取る： $P=R \frac{V^2}{(R_i+R)^2}$

図3 電力 P は抵抗値 R の関数

250L・(40℃-15℃)・4,953万所帯=309.5Tcal
1年では11.3万Tcalとなる。このエネルギー量は、鳩山元首相のCO₂削減、4.3%に相当する。

1cal (カロリー) は4.186J (ジュール) であり、1Jは1Ws (ワット秒) である。1cal (カロリー) とは、1グラムの水の温度を標準大気圧下で1℃上げるのに必要な熱量なので、電気に換算すると、

$$250 \times 1,000 \times (40-15) \times 4,953 \times 10^4 \times 365 \times 4.186 / (3,600 \times 1,000 \times 10^8) = 1313.8 \text{億kWh}$$

となる。

日本中で風呂のお湯を捨てることは、1年間で1,313.8億kWhの電力をゴミとして捨てていることに等しくなる。追い炊きするバスタブの場合は、さらに捨てるエネルギーが増加する。つまり、効率の良い無駄のないお風呂とは、魔法瓶のように保温が良く、沸かしたお湯の熱は、翌日のために熱回収できその熱を再利用できることが重要である。現在の技術では電気エネルギーを溜めることは難しいが、エネルギーを熱として溜めることはそれほど難しくはない。

我々のデッド型の水冷式温度差発電装置は、熱エネルギーの約5%が電気に変換される。ここで紹介する空冷方式温度差発電は、熱エネルギーの5%以下が電気に変換される。

本方式では、X度の温度差を取れるYリットルの温熱源エネルギーからは、

$0.05 \times X \times Y \times 1,000 \times 4.186 / 3,600$
の電気エネルギー (Wh:ワット時) を生み出すことが可能である。

初代の空冷式温度差発電

図4に示す発電装置は、初代の温度差発電装置である。YouTubeに2007年12月から公開したところ、2011年5月31日の時点で、20万件ほどのアクセスがある。初代の温度差発電装置のデモ動画のアクセスには、YouTubeサイトでtakefujiをキーワードに検索して頂きたい。

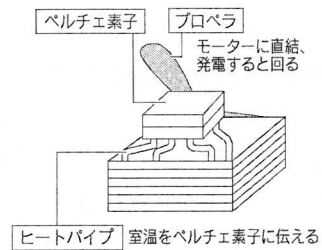


図4 ヒートパイプを用いた温度差発電装置
ペルチェ素子の上に、冷たい保冷剤、温かいおにぎり、手などを置くとプロベラが回転する (4cm×4cmのペルチェ素子使用)。

デッド型水冷式温度差発電

ここでは、図5に示すヒートパイプを用いたデッド型の温度差発電装置を紹介する。デッド型温度差発電では、装置を温水と冷水に浸けるだけで発電できる。一般家庭への普及を念頭に、設計した試作機を、2010年に熱海温泉で

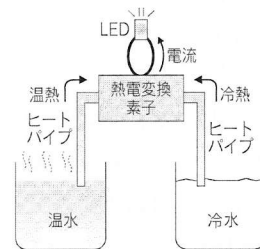


図5 デッド型ヒートパイプ・温度差発電
デッド型温度差発電装置はヒートパイプを使った温度差発電装置で、温水と冷水に浸けるだけでゼーベック素子の性能を最大限に引き出す技術である。

クリスマスツリー点灯のために実験的に使用した。

ディップ型の温度差発電装置では、市販品のゼーベック素子 (4cm×4cm) 1枚を使用した。利用した素子は、100度の温度差で10Wの発電性能を有し、内部抵抗は、1.67Ωである。装置には、片側あたり5本のヒートパイプ (φ8mm×4、φ6mm×1) を使用している。

従来の温度差発電の研究では、ゼーベック素子自身の発電効率向上に関する研究が多く、温度差に着目した研究はあまり見られない。ヒートパイプを用いたディップ型の温度差発電装置は従来に比べて性能向上を達成できる。

従来、温泉熱利用の温度差発電では、温水 (温度 T_h) と冷水 (温度 T_c) をそれぞれのパイプに流し込み、複数のゼーベック素子を温水パイプと冷水パイプ間に挟んで装着する方法が多く採用されてきた。発電量を増やすためには、ゼーベック素子の接触表面積を大きくすることが求められるが、この様式を用いると、温水パイプ・冷水パイプ長が長くなり、結果として温度差発電装置が大きくなってしまう。実効温度差は真の温度差の6割以下であり、真の温度差をうまく利用できていない。ここで提案するヒートパイプを用いたディップ型水冷式温度差発電を用いれば、熱フラックスの移動を大きくすることで実効温度差を真の温度差に近づけ、温度差発電装置の発電量を最大3倍向上させることが可能である。

ゼーベック素子一枚あたりの発電量 P は、

$$P = \frac{V^2}{4Ri} = \frac{S^2 \Delta T^2}{4Ri} \quad \dots(7)$$

で与えられる。式(7)で、 V はゼーベック素子の起電圧、 S はゼーベック係数、 Ri はゼーベック素子の内部抵抗、 ΔT は温度差である。ゼーベック素子の起電圧は、ゼーベック係数と温度差に比例するので、発電量 P は、温度差の2乗に比例する。

ヒートパイプを使わない流し込み方式では⁽⁶⁾、

実効温度差は真の温度差の、

$$50 / (95 - 10) \approx 0.59 \text{倍}$$

である。

式(7)に基づいて理論値を計算すると、ヒートパイプを用いたディップ型の温度差発電において、 $\Delta T \approx T_h - T_c$ が実現した場合には、その発電性能は従来の流し込み方式に比べて、最大約3倍 ($1 / (50/85)^2$) に向上することが期待される。

熱海で使用した温度差発電装置の実験室での性能評価では、温水98℃、冷水5℃の場合、ゼーベック素子のオープン起電圧が5.86Vであり、式(7)から計算すると5.14Wであることが分かる。

素子メーカーのデータから予想すると、ゼーベック素子の温度差が100度の場合、式(7)からオープン起電圧 V は、

$$V = \sqrt{4RiP} \quad \dots(8)$$

であり、ゼーベック素子のオープン起電圧は、100度の温度差で8.17Vとなる。

起電圧から、ヒートパイプを用いたディップ型素子で実現した実効温度係数を計算すると、

$$\frac{5.86}{8.17 \left(\frac{93}{100} \right)} \approx 0.77 \quad \dots(9)$$

になる。この値を用いると、実効温度は72℃ ($\approx 0.77 \times 93^\circ\text{C}$) になる。つまり実効温度は約72℃と予想される。

DCファン空冷式温度差発電

空冷式では、空気と温泉湯の温度差を利用する。空冷式性能向上のために、性能の良いDCファンを用いて空気冷却向上を達成した。95度の温水と25度室温で、約0.5Wの性能を達成した。発電装置では、3cm×3cmのゼーベック素子を1枚使っている。図2に示す起電圧回路モデルでは、発電した電力を消費すると、ゼーベック素子両端の電圧は急激に下がるためDCファンは止まってしまう発電量は落ちる。空冷の

ためのDCファンを安定して駆動するために、本方式ではゼーベック素子の出力端子に電流制御したDCDC昇圧回路を接続している。実験ではDCファンの消費電力は約100mWに抑えているので、本方式の空冷式温度差発電によって0.4Wの電力が利用できる(図6)。

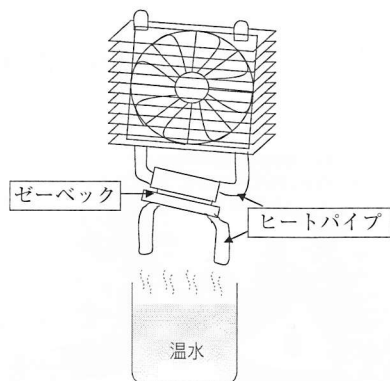


図6 空冷式温度差発電機

空冷式温度差発電装置は、2つのヒートシンクとゼーベック素子により構成される。1つのヒートパイプ方式のヒートシンクをDCファンで冷やし、ゼーベック素子を挟んでもう1つのヒートパイプ方式のヒートシンクで温熱を伝えることによって、温度差発電する。

おわりに：今後の展開

本稿では、温泉などの廃熱を利用した水冷式温度差発電装置、空冷式温度差発電装置を紹介した。ヒートパイプを用いた温度差発電装置は、従来に比べ、最大3倍ほどの性能を発揮する。4cm×4cmゼーベック素子一枚で、温泉熱と冷水で5Wの温度差発電を達成した。熱湯だけの空冷式温度差発電では、3cm×3cmゼーベック素子一枚で、気温25度の時0.5Wの温度差発電

を確認した。

現在、温泉の廃熱だけでなく、ロウソクや自動車・バイクの廃熱を利用した空冷式温度差発電装置を構築中である。現在のところ、100円ショップのロウソク1本で、2W程度の空冷式温度差発電が可能である。今後、小型ユニットで数十Wの空冷式廃熱利用温度差発電装置を構築する予定である。

<参考文献>

- (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. of international symposium on nonlinear theory and its applications, sept. pp.7-10 (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(2010.4)
- (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、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、OHM (2010)
- (6) (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構：温排水パイプに装着可能な熱電発電モジュール研究の可能性調査、成果報告書(平成20年3月)

【筆者紹介】

武藤 佳恭

慶應義塾大学 環境情報学部 教授
〒252-8520 神奈川県藤沢市遠藤5322
湘南藤沢キャンパス
E-mail: takefuji@sfc.keio.ac.jp

優良技術図書案内

● Exaflops 米国ハイテク戦略の全貌

畑 次郎著 A5判 176頁 定価：1,890円(本体：1,800円)

お問い合わせは日本工業出版(株)販売課まで 販売直通 03(3944)8001 FAX 03(3944)0389