

# 温度差発電の仕組みと実証事例

慶應義塾大学 環境情報学部 武藤 佳恭  
サイエンスパーク株式会社 小路 幸市郎・瀬戸口 広樹

新しい発電方法の一つとして、温度差発電がある。温度差発電はゼーベック素子（熱電素子）と呼ばれる半導体素子を使用して、熱エネルギーを電気に変える発電方法である。温度差発電は、われわれの身の回りに存在し、使われることなく捨てられている熱（廃熱）を有効活用できる発電方法として期待されている。

温度差を作るためには温熱源と冷熱源（熱源とはこの二つを指す。）が必要である。例を挙げると、温熱源は、工場や製鉄所の廃熱、エンジン（自動車・バイク）廃熱、厨房ガスレンジ・給湯器・風呂釜の廃熱、パソコンやサーバーの廃熱、原子力発電所の廃熱等、さまざまな廃熱がある。そのほかにも自然界に目を向けると、温泉熱、太陽熱、地中熱、マグマ熱などがある。冷熱源には、空気、地下水、川の水、海水、雪などがある。温熱源と冷熱源の組み合わせで温度差を作り発電することができる。

温度差発電の利点として、ゼーベック素子が半導体であるため機械稼働部分がなく、小形化が可能であることと、耐久性に優れメンテナン

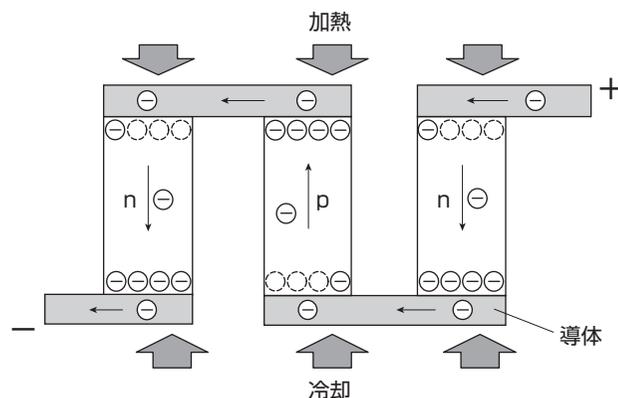
ス性が良いことが挙げられる。

## 1. 発電の仕組み

温度差発電は、ゼーベック効果を利用して発電する。ゼーベック効果は、金属の内部に温度差があると、起電力を生じる現象で、1821年トーマス・ゼーベックによって、偶然発見された。金属は温度差がない状態では、電子が安定状態にあり、電子が均等に分布している。温度差を与えてやると、電子が移動することによって偏りが生じ、電位差（起電力）が発生する。この効果を利用し、異なる性質を持つp形とn形の半導体を導体で交互に連結したものがゼーベック素子である。

n形半導体は冷却側に電子が移動するのに対し、p形半導体は加熱側に電子が移動する。移動した電子は導体を伝って、隣の半導体へ移動する。この電子の移動が電流となる。連結された半導体の両端がゼーベック素子の起電圧とな

第1図 ゼーベック素子



## 特集 新エネルギーの仕組みと事例

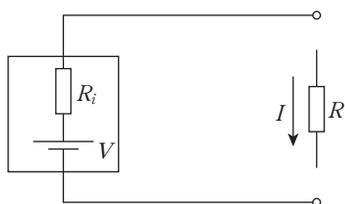
る。ゼーベック発電の起電圧  $V$  は次式で与えられる。

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

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、 $\Delta T$  は半導体 AB の温度差である。

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第2図に示す。

第2図 ゼーベック素子の起電圧回路モデル



第2図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、

$$I = \frac{V}{R_i + R}$$

となる。

$R_i$  はゼーベック素子の内部インピーダンスである。また、抵抗  $R$  の電力  $P$  は、

$$\begin{aligned} P &= I^2 R \\ &= R \frac{V^2}{(R_i + R)^2} \end{aligned}$$

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、 $R = R_i$  のときに  $P$  が最大となるため、そのときの電力  $P_{max}$  は、

$$P_{max} = \frac{V^2}{4R_i} \quad (2)$$

となる。さらに、(1)、(2)式からゼーベック素子一枚当たりの発電量  $P_1$  は、

$$P_1 = \frac{V^2}{4R_i} = \frac{S^2 \Delta T^2}{4R_i} \quad (3)$$

で与えられる。(3)式で、 $V$  はゼーベック素子の起電圧、 $S$  はゼーベック係数、 $R_i$  はゼーベック素子の内部抵抗、 $\Delta T$  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。この式からもわかるように、発電量を増やすためには半導体のゼーベック係数を上げるか、温度差を大きくする必要がある。

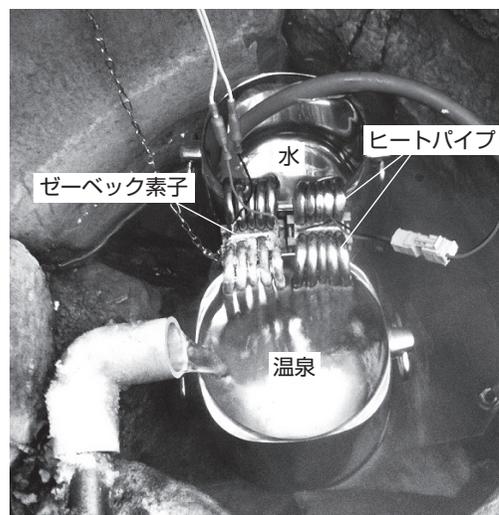
従来の温度差発電の研究では、ゼーベック素子自身の発電効率向上に関する研究が多く、温度差に着目した研究はあまり見られない。われわれは温度差に着目し、研究を進めている。

それでは、実際に温度差発電装置を紹介する。

## 2. ディップ形水冷式温度差発電

ここでは、第3図に示すディップ形の温度差発電装置を紹介する。ディップとは「浸ける」の意味である。ディップ形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。

第3図 ディップ形ヒートパイプ・温度差発電



一般家庭への普及を念頭に、設計した試作機を使用して2010年、2011年にクリスマスツリーを2週間点灯させた。また、2011年12月からは、熱海の温泉施設に設置し、施設内の照明としてLEDライトを点灯させている。

ディップ形の温度差発電装置では、市販品のゼーベック素子 (4 [cm] × 4 [cm]) 1枚を使用

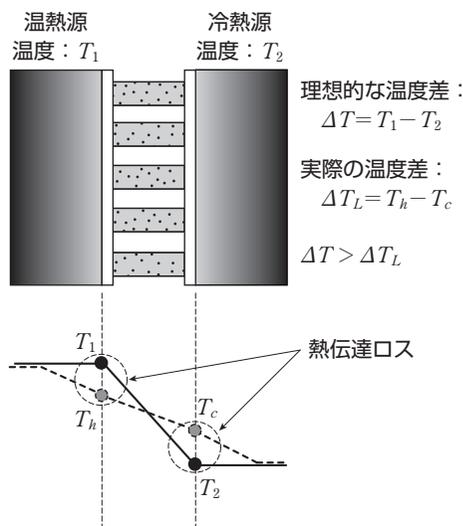
第4図 温度差発電で点灯させたクリスマスツリー



した。利用した素子は、100〔°C〕の温度差で10〔W〕の発電性能を有し、内部抵抗は1.67〔Ω〕である。装置には、片側当たり5本のヒートパイプ（φ8〔mm〕×4、φ6〔mm〕×1）を使用している。

それではここでヒートパイプの効果とその仕組みについて説明する。ゼーベック素子は熱を通過させるため、ゼーベック素子への熱伝達が悪いと、ゼーベック素子の両面温度は等しくなろうとする。さらに発電装置を構成する部材の比熱や熱抵抗の影響で熱伝達ロスが生じ、温度差の低下をもたらす（第5図）。

第5図 熱伝達ロス



理想的な温度差に近づけるには、ゼーベック素子への熱伝達をよくする必要がある。本装置

ではヒートパイプを使用して熱伝達をよくしている。

ヒートパイプは、銅のパイプにわずかな作動液が密封されており、中は真空になっている。ヒートパイプの片側を温めると、真空であるため、大気中より低い温度で気化（蒸発）する。標高の高い山の上でお湯が100〔°C〕より低い温度で沸騰するのと同じ現象である。気化した蒸気は熱とともに反対側に移動し、反対側で冷やされ（放熱）凝結する。冷えた液体はパイプの内側を這って戻る。この気化と凝結による熱輸送が音速で繰り返されることにより、熱伝導率を上げている。

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。しかし、この方式では、温度差発電装置が大きくなってしまふ。さらに、実効温度差は真の温度差（熱源の温度差）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形水冷式温度差発電を用いれば、熱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。

ヒートパイプを使わない流し込み方式では、お湯が95〔°C〕、水が10〔°C〕の場合、実効温度差は50〔°C〕であり、真の温度差の

$$\frac{50}{95-10} \cong 0.59 \text{〔倍〕}$$

である。

(3)式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形の温度差発電において、

$$\Delta T \cong T_h - T_c$$

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、

$$\text{最大約} 3 \left( \frac{1}{(50/85)^2} \cong 2.89 \right) \text{〔倍〕}$$

## 特集 新エネルギーの仕組みと事例

に向上することが期待されている。

熱海で使用した温度差発電装置の実験室での性能評価において、温水98〔°C〕、冷水5〔°C〕の場合、実効温度差は72〔°C〕のであり、真の温度差の

$$\frac{72}{98-5} \doteq 0.77 \text{ [倍]}$$

である。

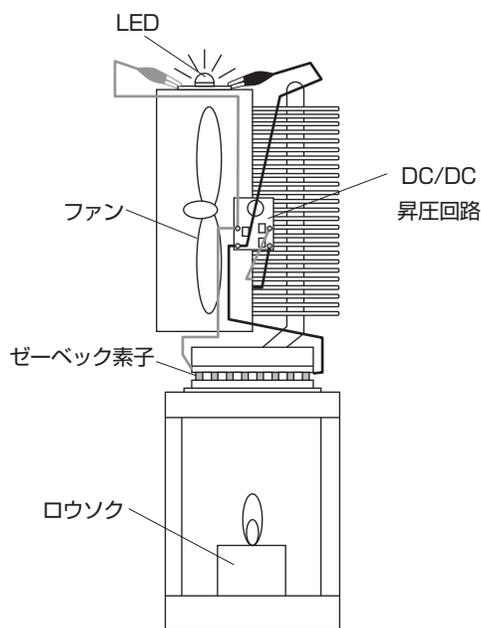
流し込み方式に比べ温度差のロスが少なく、性能が向上したことがわかる。

### 3. ロウソク発電

次に紹介するのはロウソク発電装置である。ロウソク発電装置はロウソクの炎の温度と外気温との温度差で発電する空冷式温度差発電装置である。

ロウソクは2000年以上前から使われている優れた燃料である。安価で入手しやすい、劣化しにくい、水にぬれても乾けば使える、爆発しないため安全などの利点を考慮して使用した。

第6図 ロウソク発電機



用途としては、災害時などの非常用電源として開発した。ロウソクを点灯するだけで、携帯電話を充電したりLEDを点灯したりすることができる。

ロウソク発電機の冷却にはヒートシンクを使用しているが、自然放熱の空冷では冷却性が乏しいため、性能のよいDCファンを用いて空気冷却向上を実現した。ロウソク排熱と室温の温度差60〔°C〕で、約2〔W〕の性能を達成した。発電装置では、3〔cm〕×3〔cm〕のゼーベック素子を1枚使用している。第2図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。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DC/DC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100〔mW〕に抑えているので、本方式の空冷式温度差発電によって2〔W〕の電力が利用できる。

ロウソクに点火し、しばらくするとDCファンが回りだす。その後LEDが点灯する。接続を換えれば携帯電話の充電も可能である。

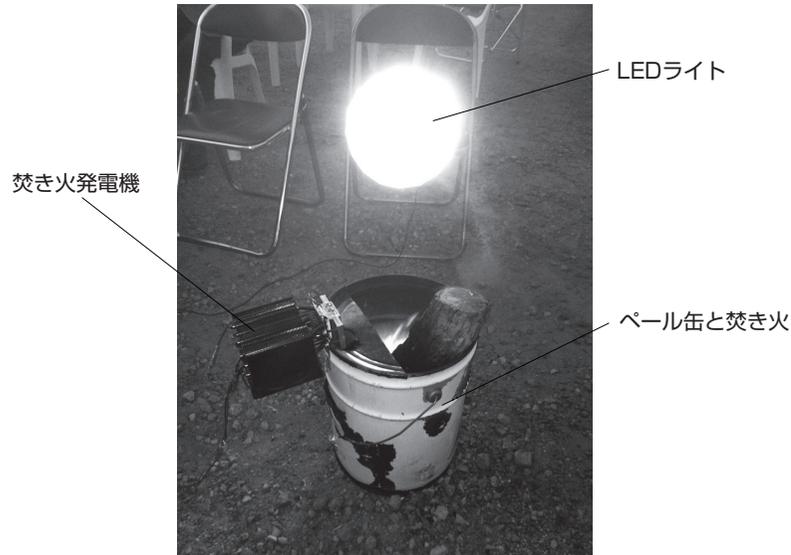
### 4. 焚き火発電

次に紹介するのは焚き火発電である。こちらも災害時の利用を想定した温度差発電装置である。焚き火発電機もロウソク発電機と同様の空冷式温度差発電装置である。

東日本大震災のとき、電気やガス、石油などの燃料不足が問題となった。中でも薪は比較的入手しやすいことから、煮炊きや暖を取るのに焚き火が使われていた。

焚き火発電では焚き火の排熱250〔°C〕と外気10〔°C〕（12月）の温度差で10〔W〕の性能を達成した。10〔W〕の電力があれば、携帯電話・スマートフォンの充電はもちろんのこと、LEDライトの点灯やUSB機器、小形テレビな

第7図 焚き火発電機とLEDライト



ども駆動できる。複数連結することで、さらに消費電力の大きい家電も動作可能である。4〔cm〕×4〔cm〕のゼーバック素子を使用し、冷却側はヒートシンク1台とDCファン2個を使用している。加熱側は、焚き火の熱を効率よく回収するため、独自に熱回収治具を作成した。ペール缶内で焚き火をし、ペール缶に焚き火発電器を装着して発電する。

焚き火発電では、焚き火の熱量が豊富であるため、加熱側の熱供給力は十分であることが実験でわかった。そこで、重要となってくるのが冷却側である。冷却能力を強化するために、DCファンを二つ使用した。DCファンの消費電力が0.6〔W〕であるのに対し、DCファンを追加することにより得られた電力が1.5〔W〕で0.9〔W〕の性能向上を達成した。

## 5. 今後の展開

今回は、温泉、ロウソク、焚き火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。熱海の温泉では、施設の照明として4か月連続点灯させている。今後は、

発電装置の増設、ほかの温泉施設への導入を進めていく。

また、ロウソク発電や焚き火発電については実用化を目指して、耐久性の向上などの取り組みをしている。

そのほか、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。また、ガスレンジや給湯器などで発電してほしいとの要求もある。今後、小形ユニットで数十〔W〕の温度差発電装置を構築する予定である。

### 【参考文献】

- (1) 武藤佳恭：「温泉廃熱利用温度差発電」日本熱電学会誌 2012