

# 熱海温泉での温度差発電

武藤 佳恭 (慶應義塾大学)



JR 東日本との共同研究として 2003 年から始まった床発電<sup>1-3)</sup>が、本論文で紹介する温度差発電研究のきっかけになりました。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小さいこと、過疎駅での利用に限られることなどが問題となりました。2006 年での実験測定値では、10 歩当たり、47  $\mu$ F のキャパシタが 8 V にチャージできる発電量が得られました。歩数あたりに換算すると、0.15 mW 秒 / 歩となります。

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、 $E = (1/2)CV^2$  (単位は Joule) として計算できます。

床発電の場合、その発電量は小さくても、人間・参加型の発電であり、意外と人気があります。

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ます<sup>4,5)</sup>。また、2010 年に開催された上海国際博覧会の日本館でも、試作品が展示されました<sup>4,5)</sup>。また、SUICA ゲートのセンサーとして利用されようとしています。我々は、床発電の研究を踏まえて、捨てられているエネルギーから電気を生み出す方法 (エネルギー・ハーベストまたはパワー・ハーベスト技術) を模索しているうちに温度差発電の研究にたどり着きました。

我々の研究グループは材料・素子開発の研究グループではなく、性能向上のためのパワー・ハーベスト・アーキテクチャ研究グループです。

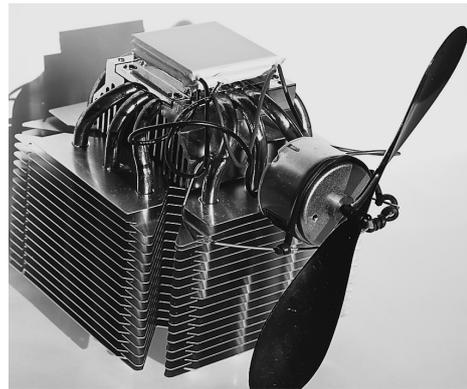
本論文で紹介する温度差発電装置のアーキテクチャは、初代の温度差発電装置 (図 1 参照) を発展させたものです。初代の温度差発電装置は、2008 年 2 月号の雑誌エレキジャックで設計を公開しました<sup>6)</sup>。また、その温度差発電装置の動画を YouTube に 2007 年 12 月から公開したところ、2011 年 1 月 3 日の時点で、16 万件以上のアクセスがありました<sup>7)</sup>。ほとんどは、日本国以外からのアクセスでした。動画アクセスするには YouTube サイトで ytakefuji をキーワードに検索してください。

google.com サイトで “thermoelectric power generator” をキーワードにフレーズ検索すると、2011 年 1 月 21 日の時点で、108,000 件の結果を表示しますが、我々の温

度差発電の動画は 1 ページ目の先頭に表示されます。

初代の温度差発電装置の研究は、室温と手のぬくもりの小さな温度差だけで、モータを駆動することを目的としました。温度差が小さいので通常の方法ではモータを駆動できるだけの十分な電力が生み出せなかったのが、ヒートパイプを活用することで温度差を大きくすることを思いつきました。そこで、ヒートパイプが付属した市販の CPU クーラーをそのまま利用し、初代の温度差発電装置に組み込みました。

YouTube にアップロードした初代の温度差発電装置の動画へのアクセスが急増したことで、新聞・テレビ・雑誌 (R 25) などで我々の温度差発電装置が報道されるよ



「温度差発電」装置の仕組み

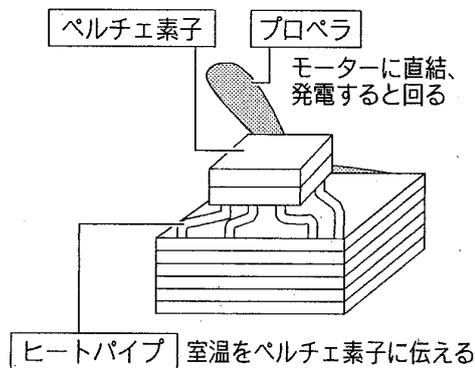


図 1 ヒートパイプを用いた温度差発電装置  
ペルチェ素子の上に、冷たい保冷剤、温かいおにぎり、手などを置くとプロペラが回転します。  
(4cm×4cm のペルチェ素子使用)

うになりました。それらの報道が熱海市の市職員の心を動かし、熱海での温泉熱温度差発電実験やプロジェクトが始まりました<sup>8)</sup>。

熱海温泉を選んだ理由は、3つあります。

1. 源泉温度が高く温泉の排熱を利用できる、
2. 熱海市長・市職員がやる気があり、温度差発電の実験を我々に依頼してきた、
3. 本論文著者の自宅から近いことなどです。

従来の温泉熱を利用した温度差発電装置は大掛かりな装置であるため、高価であり、一般家庭には普及しにくいシステムであると考えられます<sup>9,10)</sup>。この問題を解決する素子形状として、本論文では、図2に示すヒートパイプを用いたディップ型の温度差発電装置を提案します<sup>9)</sup>。ディップ型とは、温水と冷水に浸けるだけで動作することを意味します。一般家庭への普及を念頭に、この様式を用いて設計した試作機を、2010年に熱海温泉でクリスマスツリー点灯のために実験的に使用しました。この温度差発電装置は、2つの市販CPUクーラーを加工して製作しました。著者は、本論文で紹介する温度差発電装置に満足していませんが、安価で比較的性能の良い小型の温度差発電装置であることには間違いありません。

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枚を使用しました。利用した素子は、100度の温度差で10W発生できる発電性能を有し、内部抵抗は、1.67Ωです。装置には、片側あたり5本のヒートパイプ(φ8mm×4, φ6mm×1)を使用しています。

## 温度差発電の仕組み

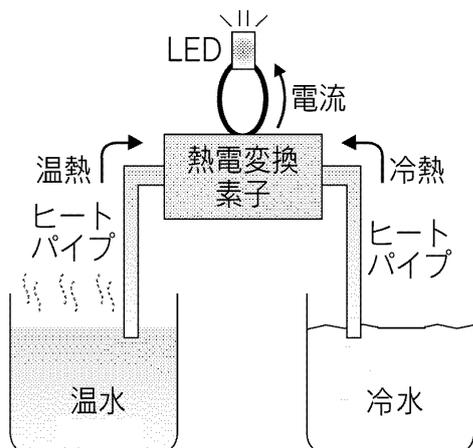


図2 ディップ型ヒートパイプ・温度差発電  
ディップ型発電装置はヒートパイプを使った温度差発電装置で、温水と冷水に浸けるだけでゼーベック素子の性能を最大限に引き出す技術です。

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、発電装置のアーキテクチャ工夫による温度差発電の発電量性能向上の研究はあまり見られません。アーキテクチャ研究の中では、発電量性能向上のために、ゼーベック素子との接触面積を増やすための複数の方法が今まで提案されています。

以下に、ヒートパイプを用いたディップ型のアーキテクチャ装置を利用することでの性能向上を検証します。

従来、温泉熱利用の温度差発電では、温水(温度Th)と冷水(温度Tc)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ました。発電量を増やすためには、ゼーベック素子の接触面積を大きくすることが求められますが、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います。しかも、従来の温水・冷水パイプ流し込み方式では二次元的配置をとらざるを得ません。さらに、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ません。また、温水・冷水パイプ流し込み方式では、水を流すために、余分なエネルギー(水圧や落差エネルギー)を利用する必要があります。

平成20年3月の独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構の成果報告書<sup>10)</sup>によると、草津温泉の高温源95度、低温源10度で、実効温度差が約50度であると報告されています。この装置のゼーベック素子総面積は0.7m<sup>2</sup>で、出力100Wの発電能力がありますが、真の温度差85度に対して、実効温度差が著しく低下しています。

提案するヒートパイプを用いたディップ型アーキテクチャを用いれば、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向上させることが可能です。本方式の2つ目の利点として、ヒートパイプを使うことによって、温水・冷水の流し込みなしでも、熱の移動が可能となります。また、提案する方式では、熱流が大きくなることで、素子の両端の温度が均一になる特徴を有しています。

提案するヒートパイプを用いたディップ型温度差発電装置のアーキテクチャが、どの程度発電量を増やすことが出来るか、具体的に計算してみます。

ゼーベック素子一枚あたりの発電量Pは、

$$P = \frac{V^2}{4Ri} = \frac{S^2 \Delta T^2}{4Ri} \quad (1)$$

で与えられます。式(1)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,  $\Delta T$  は温度差です. 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しますので, 発電量  $P$  は, 温度差の 2 乗に比例します. このことから, 実効温度差  $\Delta T$  を真の温度差 ( $T_h - T_c$ ) に限りなく近づけることが, 発電量向上では重要であることがわかります. もちろん, ゼーベック係数を大きくすることも重要です.

ヒートパイプを使わない流し込み方式 (草津方式) では, 実効温度差は真の温度差の  $50/(95-10) \approx 0.59$  倍です. ゼーベック素子の性能を最大限に引き出す為には, この値を 1 にする, すなわち,  $\Delta T \approx T_h - T_c$  を満たす必要があります. 実効温度係数を 1 に近づけることが, 本論文で提案する温度差発電の性能向上の方法です.

式 (1) は, ゼーベック素子表面温度が均一であることが前提になっています. ゼーベック素子表面の温度差不均衡は, 著しい発電量低下を生じさせるはずで, 提案手法では, ヒートパイプによって, 短時間にゼーベック素子の表面温度は均一になり, 素子表面温度の不均一性は問題になりません.

提案する温度差発電方式では, 図 2 に示すように, 装置にヒートパイプを配置して, ディップ型にすることで小型化を実現しています.

従来の流し込み方式では, 冷水パイプと温水パイプとの間に挟まれたゼーベック素子の表面積に比例して電力を増やしています. 本論文で提案する手法では, ヒートパイプを使って熱を移動させていますので, ゼーベック素子を自由に配置でき, 立体的に温度差発電装置を設計できます. つまり, ヒートパイプを活用することで, 素子の配置に関する拘束条件が緩和され, 2次元の面設計から 3次元の体積設計が可能になり, ゼーベック温度差発電装置の小型化が実現できます.

次にヒートパイプを使うことで得られる性能向上を定量的に評価します. 式 (1) 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 ( $\approx 1/0.558^2$ ) に向上することが試算されます. 仮に, 従来の流し込み方式で実現する実効温度差が真の温度差の半分であれば, 提案するヒートパイプ発電性能は従来の流し込み方式の 4 倍になります.

ヒートパイプの性能は, 通常, 重力と関係しますが, 重力に頼らないヒートパイプを用いたり, 複数のヒートパイプを多段にしたりすることによって, 熱抵抗を減らし, 熱フラックスの移動を大きくすることで, 温度差発電装

置の発電量を増やすことができます.

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  $98^\circ\text{C}$ , 冷水  $5^\circ\text{C}$  の場合, ゼーベック素子のオープン起電圧が  $5.86\text{ V}$  であり, 式 (1) から計算すると  $5.14\text{ W}$  であることが分かります.

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 (1) からオープン起電圧  $V$  は

$$V = \sqrt{4R_i P}$$

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  $8.17\text{ V}$  となります.

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,

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

になります. この値を用いると, 実効温度は  $72^\circ\text{C}$  ( $\approx 0.77 \times 93^\circ\text{C}$ ) になります. つまり実効温度は約  $72^\circ\text{C}$  と予想されます.

本論文で提案するヒートパイプ用いたディップ方式のアーキテクチャの性能向上を式 (2) で計算すると,

$$\left( \frac{5.86}{(8.17 * (93/100))} \right)^2 / \left( \frac{50}{85} \right)^2 \approx 1.7 \quad (2)$$

従来方式に比べて約 1.7 倍となります. つまり,  $\Delta T \approx T_h - T_c$  が実現した場合に得られる 2.89 倍の性能に対して, 実際の性能向上は 1.7 倍にとどまりました. 今回の実験では, 市販の CPU クーラーを加工して温度差発電装置を構築したので, 理論値を満たすだけの熱フラックスの移動をヒートパイプが供給できませんでしたが, ヒートパイプ数をさらに増やすなどの改良を施すことで, 理論値に近づけるはずで,

現在, ヒートパイプ数をさらに増やした温度差発電装置を開発中です. 開発中のディップ型装置では, 1 ユニットで,  $100^\circ\text{C}$  の温度差で  $40\text{ W}$ ,  $200^\circ\text{C}$  の温度差で  $160\text{ W}$  の発電能力の実現を目指しています.

本論文では, ヒートパイプを用いたディップ型の温度差発電装置を提案しました. ヒートパイプを活用することで, 実効温度差を真の温度差に近づけることで現在の二次元流し込み式に比べ最大約 3 倍の性能向上を達成できます. また, ヒートパイプの活用によって, 温水・冷水の流し込みなしでも熱フラックスの移動が可能になり, ゼーベック素子の自由な 3次元配置が可能になり, 温度差発電装置の小型化が実現できます.

本論文で提案する温度差発電の性能を更に向上させるためには、

1. 安価で性能の良いゼーベック素子の開発、
2. 安価で性能の良い熱伝導素子（ヒートパイプ、その他の材料など）の開発、
3. 熱伝導率の高い絶縁接着技術や接着剤の開発など、3つの改良が必要です。

#### 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. 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年4月号.
- 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) 武藤佳恭: ペルチェ素子を使った温度差発電, エレキジャック 2008年2月.
- 7) <http://www.youtube.com/user/ytakefuji>
- 8) <http://www.city.atami.shizuoka.jp> 熱海市発「温泉イノベーション」.
- 9) 武藤佳恭: ゼーベック温度差発電とは?, Material Stage, vol. 10, no. 1, 2010.
- 10) 「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 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構.

## 熱電素子モジュールを教材とした学生実験 ～宇奈月温泉での温度差発電システムの開発を目指して～

丁子 哲治 (富山高等専門学校)



### 1. はじめに

地球環境問題の高まりから、熱エネルギーを電気エネルギーに変換する熱電素子モジュールは格好の環境教育用教材としてよく使用されている<sup>1)</sup>。一方、この熱電素子モジュールは単なる教材としてばかりではなく、低炭素化技術の一つとして種々の低品位の排熱エネルギーから有用な電気エネルギーに直接変換する実用的な熱電変換技術としても利用されているところが興味深いところである。

著者らは、平成20年度から富山高等専門学校における学生実験において、市販されている熱電素子モジュールを用いた教育プログラムを新たに開発している。すなわち、学生たちの学習成果が、形になって見えるようになったり、人の役に立ったりすることが実感できることが学生の創造性を引き出すのに重要であると考え、そのための教材として熱電素子モジュールが最適と考えた事例についてここに報告する。

### 2. 教育プログラム開発の背景

#### 2. 1. 創造性教育として

1955年に始まったわが国の高度経済成長期は、欧米技術のキャッチアップの時代であり、そのことによる工業技術の高度化に対応する技術者の早急な育成が必要であった。このような産業界からの強い要請にこたえて、高等専門学校（以下、高専と称する）が制度化され、1962年から各地に設置されることとなった。

しかしながら、わが国は既に技術先進国としてのフロントランナーとなった今日、産業界はこれまでとは違う道を歩まなければならない。産業技術のあらゆる分野において、国際化、複合・融合化が不可欠となってきているのが現状である。このような産業界に人材供給を使命とする高専における教育も、これまでの設立当時のままの延長上で良いわけがない。すなわち、キャッチアップ時代の「問題対処型」教育から脱却し、フロントランナー時代の今日、学生たちが自ら疑問を持ち課題を発見し、生き生きと意欲的・創造的に取り組み、成果