

# エネルギーハーベスティング（床発電と温度差発電）

研究から商品化への歩み

武藤 佳恭

# エネルギーハーベスティング (床発電と温度差発電)

## 研究から商品化への歩み

### 武藤 佳恭



慶應義塾大学環境情報学部教授。1978年慶應義塾大学・電工卒。80年同大大学院修士修了。83年同大大学院博士修了。工学博士。83年～85年南フロリダ大学コンピュータ学科助教授。85年～88年南カロライナ大学コンピュータ工学助教授。88年～96年ケースウエスタンリザーブ大電気工学科准教授。92年 tenured 受賞。92～97年慶大環境情報学部助教授。97年～現在同大教授。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。

著者は、2003年、当時のJR東日本の代表取締役 大塚陸毅社長に床発電のアイデアを提案し、ピエゾ素子を用いた床発電プロジェクトを開始した。床発電研究から商品化に至るまでの歩みを簡単に紹介する。JR東日本には、過疎駅が多く、床発電はほとんど活躍できない。我々は、床発電以外のエネルギーハーベスティング技術も同時に研究している。その中でも、エネルギーハーベスティングで有望な研究は温度差発電である。本稿では、温度差発電研究の現状と将来期待される商品化についても簡単に紹介する。最後に日本が実施すべきマグマ熱発電を提案する。

### ■ いくつかのアイデアから

著者は、10年以上、米国大学で国防技術の研究をしたことがあり、特にエネルギーハーベスティング研究やセンサ技術に関心があった。GPS研究の縁から、たまたまJR東日本のパーティー(2003年)に招待され、口頭で、JR東日本の大塚陸毅社長に、床発電のアイデアを提案するプレゼンの機会を得た。どの国でも、企業トップへのプレゼンは大事である。我々は、JR東日本に対して(著者が思っている)面白い研究をいくつか提案してきている。JR東日本に提案した研究は、GPS、床発電<sup>+1~+6</sup>、横波スピーカ<sup>+2</sup>(消費電力が従来スピーカの100分の1)、温度差発電<sup>+7~+13</sup>、クラウドガジェット<sup>+13</sup>、PLC(電力線搬送)、無線LAN、不揮発性液晶、センサなどさまざまである。

GPS研究では、現在、我々の提案で、全貨物列車にGPSが取り付けられ、JR東日本本部で全貨物車両の位置を正確にリアルタイムで把握できる。床発電研究では、長年にわたって、床

発電プロトタイプを何度も実証実験した。現在、商品化された床発電装置は、ノビアスタジアム神戸に約50枚設置されており、観客の興奮度測定を可能にしている。JR東日本には過疎駅が多く、床発電は発電電力も小さくほとんど活躍できない。過疎駅でも活躍できる発電が、温度差発電である。

熱海市、日航亭大湯での温度差発電研究は数年にわたっている。その実証実験の結果を踏まえて、JR東日本は熱海駅の新駅舎ビルに温度差発電装置を設置する予定である。研究中の横波スピーカは、日本企業よりも先に韓国企業が製品化し、現在、ソウル地下鉄2号線(環状線)の車内に650台のスピーカが設置されている。クラウドガジェットは、気象協会と共同研究中であり、2013年度中に商品化の予定である。本稿では、エネルギーハーベスティングの中で床発電と温度差発電研究を概説し、最後に日本国が実施すべきマグマ熱発電を提案する。

### ■ 床発電<sup>+1~+6</sup>

床発電では、ピエゾ素子(圧電素子)を用いた、ピエゾ素子に機械的振動を加えて、電気を起こすプロジェクトである。ピエゾ素子を床に敷き詰めて、その上を通勤客が歩くことで機械振動がピエゾ素子に与えられる。その発生する電気をキャパシタに集めて電気エネルギーを貯めようと考えた。実験する前に、回路シミュレーションするのが当たり前であるが、現在、満足できるピエゾ素子の発電回路モデルはなく、実測するしかない。しかしながら、ここで紹介する2つの回路モデル<sup>+14</sup>は、我々が開発したピエゾ発電モジュールの説明に役立つ。

ピエゾ素子の特徴は、高い電圧と高いインピーダンスの出力である。発電電流が極めて小さいので、残念ながら、ピエゾ素子の発電量は小さい。2006年、我々のピエゾ素子実験では、10歩で47 $\mu$ Fのキャパシタが8Vに充電できる。つまり、ピエゾ素子の発電量は、0.15 mWs/歩を意味する。mWsはミリワット秒である。現在は、その40倍

上写真= NHK ワールドで紹介されたローソク温度差発電装置。

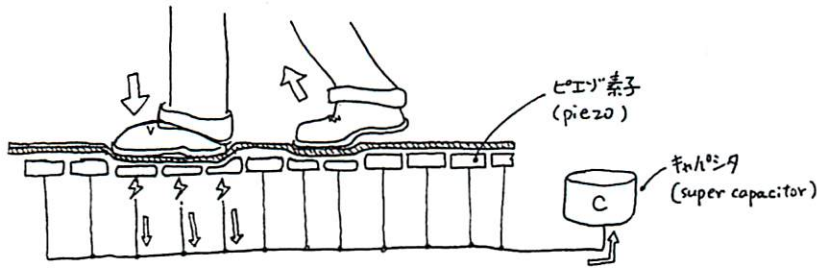


図1 床発電の原理図。

の性能で、6 mWs/歩である。床発電の原理図を図1に示す。1つひとつの発電モジュールは小電力発電であっても、たくさんのモジュールを寄せ集めて使うと、利用できる電力は大きくなる。電気エネルギー  $E$  はキャパシタ  $C$  に蓄えられ、キャパシタ  $C$  (ファラッド) の電圧を  $V$  (ボルト) とすると、 $E = CV^2/2$  (単位は Joule) で表現できる。また、 $1 \text{Ws} = 1 \text{Joule}$  である。

図2に示す回路は、ピエゾ素子の発電用等価回路モデルである。最終段の抵抗値は、一般に  $10^{12} \Omega$  以上ある。単純化したピエゾ素子の等価回路モデルを図3に示す。機械振動をピエゾ素子に与えると交流電気が発生する。振動がない場合は、ピエゾ素子は、単純に、キャパシタとして動作する。

ここで、ピエゾ素子の発電量に関して簡単に述べる。我々の実験では、発生する発電量はピエゾ素子の体積に比例することがわかった。ピエゾ素子は焼き物なので硬くて脆く、発生電力を増やすために、単純に体積を増やすと

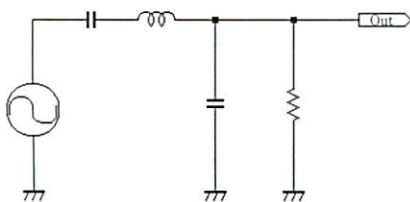


図2 ピエゾ素子発電用等価回路モデル。

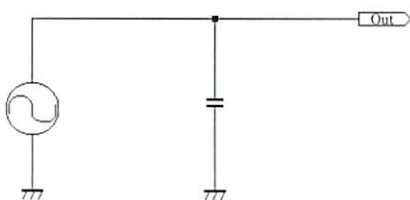


図3 ピエゾ素子発電用単純等価回路モデル。

割れてしまう。ピエゾ素子を薄くすると壊れにくくなるが、発電量が小さくなる。絶妙なバランスのピエゾ素子が床発電モジュールに使われている。

図4と図5に示すように、我々のピエゾ発電モジュールでは、ピエゾ素子を並列に接続している。先ほど述べたように、機械振動が与えられたピエゾ素子は交流電気を発生する。振動が与えられないピエゾ素子はキャパシタとして動作し、発生した電気の邪魔をしないことがわかっている。発生した高圧の電気は、図4ではブリッジ回路で整流されて、電気二重層キャパシタに充電される。図4に示した、逆流防止のダイオードの役割は重要である。図5では、タンク回路で電気二重層キャパシタに充電される。電子回路 (SPICE) シミュレーションでは2つの回路とも互角の性能であったが、実際に測定すると図4の回路のほうが性能がよく、JR東日本の商品では図4の発電モジュール回路が採用されている。

最初に述べたように、ピエゾ素子出力は高インピーダンスなので、インピーダンスマッチングをあまり考慮する必要はない。

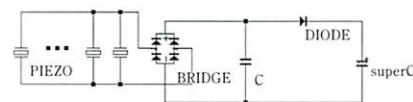


図4 並列接続されたピエゾ素子の発電モジュール (ブリッジ回路)。



図5 並列接続されたピエゾ素子の発電モジュール (タンク回路)。

図1に床発電の原理図を示したが、駅では何万人もの通勤客がピエゾ素子を踏むので、何も対策していないとピエゾ素子はすぐに割れて壊れてしまう。ピエゾ発電モジュールの耐久性を向上させるために、ゴムで挟んだりしたが、数日で壊れる。原因の多くはハイヒールなどによる破壊である。ハイヒールによる破壊防止のために、ピエゾ発電モジュールの上にステンレス板を敷いてみた。1日でステンレス板が反り返り、逆に通勤客に危険を及ぼす状態になる。いろいろ試行錯誤の結果、ピエゾ発電モジュールの耐久性向上には、発電モジュールの上に敷く板は、石板がよいことがわかった (図6)。

床発電は極めて人気が高く、マスコミへの露出度も高い。理由は、人間参加型の発電であり、人が参加することで発電する。他の発電と違って (風まかせ、太陽まかせ、…でなく)、参加しながら自らの力で発電するので、人々が興味をもつようである。

図7に (a) 2006年、(b) 2007年、(c) 2008年、(d) 2009年の床発電実験の様子を示す。また、図8に2010年の上海万博の床発電の様子を紹介する。上海万博では、床発電装置が故障するほど、多くの人間が発電床を踏んでいった。床発電は、日本展示館の人気展示物であった。

図9にノエビアスタジアム神戸に設置された床発電装置による、観客の興奮度測定結果を示す。観客が興奮すると、床発電の電力が上がるということがわかった。また、試合中にさまざまな興奮があることもわかった。



図6 石板を敷いたピエゾ発電モジュール。



(a)2006年東京駅丸の内北口改札での床発電実験.



(b)2007年福田首相が床発電プロジェクト訪問.



(c)2008年東京駅での床発電実験. 床発電総面積が94 m<sup>2</sup>. 平日1日平均が500 kWの発電量.



(d)2009年東京駅での床発電実験. 床発電総面積は25 m<sup>2</sup>. 1日平均940 kWの発電量.



図7 床発電実験の様子.

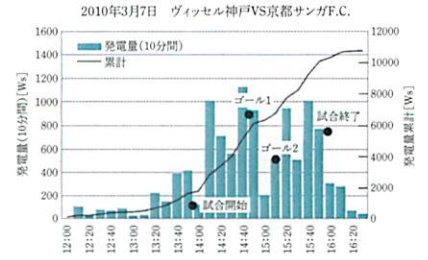


図9 床発電による興奮度の測定.

### 温度差発電<sup>+7~+13</sup>

温度差発電の最初の作品を、2007年にYouTubeに公開した。瞬間に、動画へのアクセス数は、温度差発電の分野で世界一となった(動画へのアクセスは、YouTubeにてytakefujiで検索せよ)。図10に初代の温度差発電装置を示す。この装置では、ゼーベック素子の代わりに安いペルチェ素子を2枚直列に接続している。ペルチェ素子の上に手を置くと、空気の温度と手のぬくもりの温度差で電気を発生させ、モータが回転する。この装置の作り方は、エレキジャックに公開した<sup>+15</sup>。その後、高専や高校でこの装置の試作実験が行われている。

温度差発電の原理は1821年、トーマスヨハンゼーベックによって発見された。長い歴史をもちながら、温度差発電は発電効率が低いためにあまり注目されなかった。温度差発電の発生電力は、次式で与えられる<sup>+13</sup>。

$$P = \frac{V^2}{4R} = \frac{S^2 \Delta T^2}{4R}$$

ここで、 $V$ はゼーベック効果で発生した電圧、 $S$ はゼーベック係数、 $\Delta T$ は温度差、 $R$ はゼーベック素子の内部イン



図8 上海万博での床発電展示.

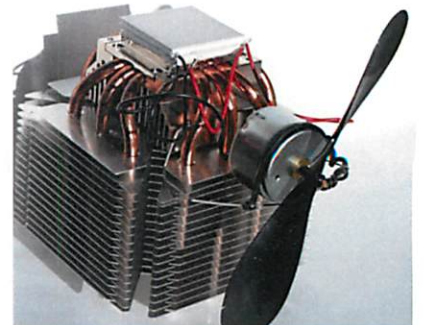


図10 初代の温度差発電装置(ヒートパイプ使用).

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、ゼーベック素子の係数を研究するのではなく、 $\Delta T$ の温度差に着目した。ゼーベック素子の内部インピーダンスは、ソーラーセルと異なり、ほとんど変化しない。

我々の研究ではヒートパイプを用いることで、 $\Delta T$ の温度差を大きくすることに成功した。温度差発電の専門家の多くは、ヒートパイプでは性能向上はありえないと思っていたらしく、熱電学会にヒートパイプ効用の招待論文が掲載された<sup>†8</sup>。

2号機の温度差発電装置で、世の中の注目を浴びることができた(図11)。8mmのヒートパイプを片面5本使い、両面で10本のヒートパイプを用いると、4cm×4cmのゼーベック素子1枚で、お湯と水だけで5Wの発電を達成した。

$\Delta T$ の温度差には、隠れたパラメータがある。 $\Delta T$ の温度差は、正しくは、実効温度差である。 $\Delta T$ の温度差に温度係数 $T_0$ を掛け算した値が実効温度差となる<sup>†8</sup>。

例えば、お湯が95°C、水が10°Cで、温度差が85°Cであっても、85°Cの温度差が先ほどの発生電力の式に使われるわけではない。最新の研究では、ゼーベック素子の両面にそれぞれ直接金属板を密着させる方式の場合、その温度係数は $T_0=0.588$ <sup>12</sup>である。したがって、従来の金属板を用いた場合は、実効温度差は85°Cでなく $T_0 \times 85=50$ °Cでしかない。金属板の代わりにヒートパイプを用いると、この温度係数を限りなく $T_0 \approx 1$ に近づけることができる。先ほどの温度差発電の式に当てはめると理論的には、従来方式に比べて、約3倍の発電が可能となる<sup>†8</sup>。

$$(1/0.588)^2=2.9$$

熱海市の日航亭大湯で、源泉のお湯と水道水を用いた温度差発電や、源泉の湯気と水を用いた温度差発電を

実証実験している。熱海市湯前神社に設置されている源泉湯気発電装置は15W程度の温度差発電装置である。24時間発電している電力は、リアルタイムにWi-Fiインターネットサービスの無線ルータ、横波スピーカの音声案内のスピーカとアンプ、LED照明、携帯電話充電の4つのサービスで消費されている。

### 温度差発電でのインピーダンスマッチング

ソーラー発電に比べると温度差発電では、比較的、発生した電力を取り出しやすい。ソーラー発電では、ソーラーセルを直列に接続しているので、1枚の葉っぱがソーラーセルに落ちただけでそのセルのインピーダンスが上がり、発生電力を急激に落としてしまう。ソーラー発電では、そのようなことを避けるためにバイパスダイオードが用いられている。温度差発電でも、ソーラー発電同様、ゼーベック素子を直列接続ができる。しかしながらソーラー発電と違って、発電量が落ちたゼーベック素子であってもインピーダンスは一定であり、バイパスダイオードなどの手当ては必要ない。

ソーラー発電では、インピーダンスが急激に変化するので、インピーダンスマッチングのための回路Maximum Power Point Tracking (MPPT)が必要である。温度差発電では、インピーダンスは、ほぼ一定であるので、効率のよいDCDCコンバータを用いるだけでよい。しかしながら、ゼーベック素子はインピーダンスの変化はなくても、ソーラー発電と同様、出力電圧が大幅に変化するので、入力電圧範囲の広いDCDCコンバータが必要である。

### ローソク温度差発電<sup>†13</sup>

ヒートパイプ方式で、開発したのがローソク熱を用いた温度差発電装置である。東日本大震災のとき、乾電池が市場から消え、携帯電話の充電器が求められることを知った。ローソクは大震災のときでも簡単に手に入れられる安価なものである。ローソクは、濡れても乾かせばよく、簡単に爆発せず、経

年変化せず、持ち運びも簡単で、何百年も利用されている燃料である。

早速、100円ショップのローソクを使った携帯電話充電用の温度差発電装置を製作した。図12にそのローソク温度差発電装置を示す。この装置はNHKワールドで、数回世界配信された(図13)。装置は、ローソクホルダーを加工して作った。ゼーベック素子の片面をローソクの炎であぶり、ゼーベック素子のもう一方の面を冷却するためにヒートパイプ付きのヒートシンクが取

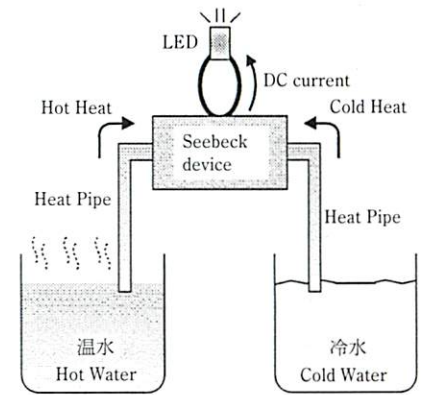


図11 お湯と水を使った温度差発電。

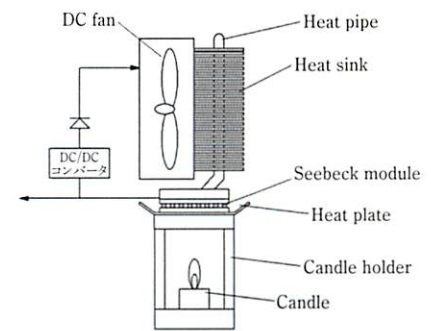


図12 ローソク温度差発電機。

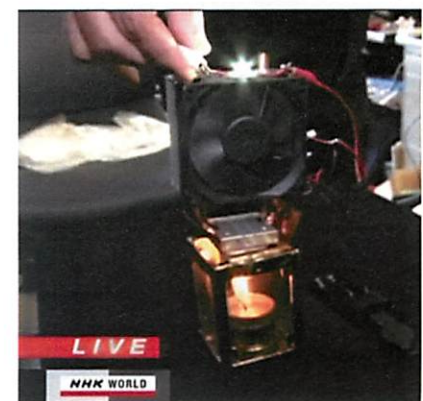


図13 NHKワールドで世界配信。

り付けられている。ローソクの炎は温度が高いが、ゼーベック素子の空冷のほかに温度が引っ張られるので、冷却側のゼーベック素子に触れてもそれほど熱くならない。カセットガスコンロで使う紙鍋と同じ原理である。紙鍋に水を入れているので、紙の外側も燃焼温度に達せず紙でも燃えない。

冷却を強力にするために DC ファンをヒートシンクに取り付けてある。DC ファンは昇圧が必要なため、高効率の DCDC コンバータを用いている。装置は、DC ファンへの電力を供給しながら、携帯電話に充電できる。発電能力は 2 W から 5 W 程度である。我々が製品化する前に、この装置のコピー物が中国から売り出されている。その性能は不明である。

温度差発電で重要なことは、熱のバランスである。つまり、熱の与え方と冷却のバランスをうまく保つ必要がある。また、ゼーベック素子への熱抵抗をできるだけ小さくすることが重要である。

#### ハッキンカイロ温度差発電<sup>†13</sup>

ハッキンカイロは触媒作用で炎を出すことなく、8 時間ほど、低温ではあるが熱を出し続けることができる (図 14)。ハッキンカイロからの熱量が小さいので、ローソク発電と違って DC ファンは必要ない。発電性能は、0.1 W 程度である。

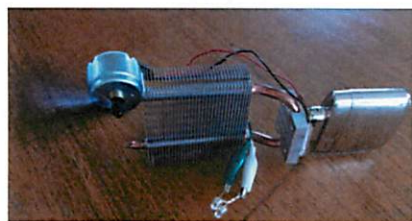


図 14 ハッキンカイロ温度差発電。

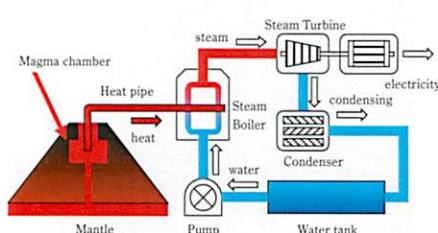


図 15 マグマ熱発電<sup>†13</sup>。

#### そのほかの温度差発電

小電力ではあるが、装置は小さく軽いので、持ち運びが可能である。現在、複数のプロジェクトが進行中で、1 つは薪ストーブ発電である。大型薪ストーブでは、DC ファンの役割は極めて重要で、新鮮な空気を取り入れ、有害な燃焼ガスを室外に出す。つまり、電気がないと、大型薪ストーブは利用できない。我々は、温度差発電によって DC ファンに供給する電気を、薪ストーブの熱から生成する。水冷式と空冷式が考えられるが、できるだけ空冷式にして水が要らない装置を開発中である。

#### 巨大なマグマ熱発電<sup>†13</sup>

日本に眠る強大なエネルギーは、マグマ熱である。マグマの寿命は 10 万年から 100 万年あり、そのマグマの温度は約 1000°C である。著者が提案するマグマ熱発電 (図 15) は、地熱発電とよく誤解されているが、全く違うものである。マグマ熱発電は、マグマの熱を直接利用する全く新しい発電方式である。提案する発電方法は、マグマ熱をヒートパイプで運び、蒸気を起こす発電方式である。マグマ熱で蒸気を発生させ、タービンを駆動し発電する方法は、従来の火力発電技術をそのまま利用できる。火力発電所と違うところは化石燃料などを燃やさずに蒸気を起こすところだけである。1000°C に耐える

ヒートパイプが存在するのとかよく聞かれるが、2000°C まで耐えられるヒートパイプがマーケットで販売されている。マグマ熱発電は日本国に必要な発電である。火山ではマグマは地表まで来ていて、地中深くマグマはつながっている。そのマグマの表面に、ヒートパイプを浸けて熱を運ぶだけである。ヒートパイプのマグマによる腐食、ヒートパイプの設置方法 (危険区域でのロボット技術の活用) などいくつかの課題はあるが、日本がやるべき発電方法である。

#### エネルギー問題の解決に向けて

エネルギーハーベスティングの中でも、床発電と温度差発電の研究を中心に概要を述べた。今後の課題として、微小の電力を集めて束ねる技術はこれから重要である。また、インピーダンスマッチングが最高の手法とされているが、非線形回路の分野から考えると、ベストな手法との証明はいまだにない。インピーダンスマッチングは最大でも 50% しか発電電力を抽出できない。インピーダンスマッチングを超える技術が出てくることに期待したい。最後に日本国が実施すべきマグマ熱発電を提案したが、日本のエネルギー問題を解決できる技術になりうると思われる。また、マグマ熱発電は、ロボット技術などを発展させるきっかけとなりうる。

<sup>†1</sup> Y. Takefuji: "And if public transport does not consume more of energy?", *Le Rail* 145, 31 (2008).

<sup>†2</sup> 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, Budapest, 2008*.

<sup>†3</sup> 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」, *超音波テクノ* 4月号 (2010).

<sup>†4</sup> 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 出版, 2010).

<sup>†5</sup> 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」, *OHM12* 月号 (2010).

<sup>†6</sup> 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, 203 (2011).

<sup>†7</sup> 武藤佳恭: 「ゼーベック温度差発電とは?」, *Material Stage* 10(1) (2010).

<sup>†8</sup> 武藤佳恭: 「熱海温泉での温度差発電」, *日本熱電学会誌* 7(3), 11 (2011).

<sup>†9</sup> 武藤佳恭: 「温泉廃熱利用温度差発電」, *クリーンエネルギー* 20(10), 55 (2011).

<sup>†10</sup> 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* (8) (2012).

<sup>†11</sup> 武藤佳恭: 「エネルギー大国・日本」, *環* 52, 257 (2013).

<sup>†12</sup> (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 (2008).

<sup>†13</sup> 武藤佳恭: *発明の極意* (近代科学社, 2013).

<sup>†14</sup> A. V. Carazo: "Novel Piezoelectric Transducers for High Voltage Measurements", *Universitat Politècnica de Catalunya*, 242 (2000).

<sup>†15</sup> 武藤佳恭: 「温度差発電」, *エレキジャック* 5, 156 (2008).