

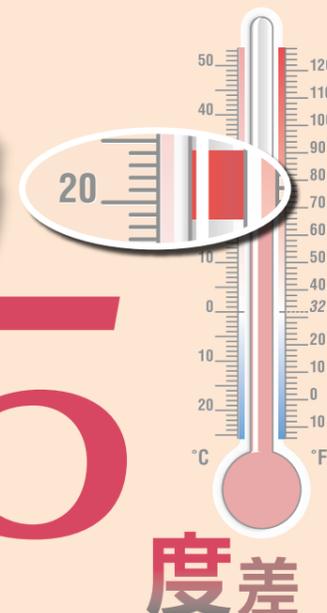
数字に見る 科学と未来 Vol.3

5度の温度差が 電気を生み出す

わたなべ たかのぶ
渡邊 孝信

早稲田大学
理工学術院 教授

1999年 早稲田大学大学院理工学研究所博士後期課程修了。博士(工学)。2003年 早稲田大学大学院理工学研究所講師、さきかけ研究者。05年 早稲田大学理工学術院助教授などを経て、12年より現職。15年よりCREST研究代表者。

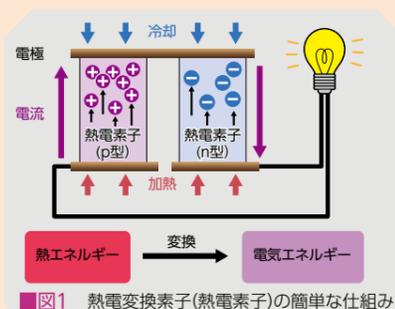


モノのインターネット (IoT) 社会の到来に向けて注目を集めているのが、センサー類に搭載する自立電源として、熱を直接電気に変換できる「熱電変換素子」だ。早稲田大学の渡邊孝信教授はシリコン半導体技術を武器に、たった5度の温度差で電気を生み出すことに成功した。身の回りの温度差を利用した環境発電の実現に向け、期待がかかる。

シリコンに着目し研究を開始

私たちの身の回りには多くの温度差が存在する。例えば、日傘などで日差しを避けると、温度が5度程度下がるといわれている。身近に生じるわずかな温度差をエネルギーとして利用できるか。そんな研究が進められている。

利用するのは、温度差によって物質内で生じる熱の流れを、直接電気に変換できる「熱電材料」だ。「熱電変換素子(以下、熱電素子)」は、その熱電材料からp型とn型の2種類の半導体を作って並べ、それぞれの両端を接合した構造をしている(図1)。p型はプラスの電荷、n型はマイナスの電荷を運ぶため、両端に温度差をつけると電荷が熱によって拡散する。その結果、電気が流れや



すくなり、より大きな起電力が得られるのだ。

実は熱電素子は40年以上も前に実用化されている。1977年に打ち上げられた米国航空宇宙局(NASA)の宇宙探査機に太陽電池の代わりに積み込まれ、太陽光の届かない宇宙の観測を陰で支えた。しかし民間ではほとんど普及しなかった。最大の理由は、エネルギーの変換効率が低いからだ。また、室温付近で性能を発揮する実用的な熱電材料は高価なレアメタルしかないことも普及の障害となった。

しかし、2008年に海外の研究チームが英国の科学雑誌「ネイチャー」に発表した論文により風向きが変わる。CPUやメモリーなど半導体素子の材料であるシリコンは熱伝導率が高いため、極小の素子の中で温度差をつけることが非常に難しく、熱電材料としては使えないと考えられてきた。ところが、数十ナノメートル(ナノは10億分の1)幅の極細のワイヤにすると、熱が極端に伝わりにくくなる一方で電気は流れるため、熱電材料として有望だというのだ。

「現在、半導体基板の市場の9割はシ

リコンで占められていて、微細加工技術が確立しています。シリコンを使って熱電素子を作ることができれば、高効率で小型の熱電素子が低コストになるのではないかと考え、研究開発を始めました」と早稲田大学の渡邊孝信教授は振り返る。

渡邊さんの専門は、シリコン半導体素子の小型化・高性能化に関する研究だ。長年培ってきた知識を、熱電素子の開発に生かそうと考えた。

近年取り組みが加速するIoT社会への移行も研究開発を後押しした。IoT社会ではさまざまな物や場所に小型のセンサーや通信機能を持つ機器が設置される。これらの機器は小さな電力で十分に動くが、数が多いため電池を替えるといったメンテナンスは困難だ。そこで、太陽光や太陽熱、風など周囲の環境から電力を得る「環境発電」技術が盛んに研究され、熱電素子への関心も高まってきたのだ。

「ちょうどその頃、CREST「微小エネルギーを利用した革新的な環境発電技術の創出」研究領域が立ち上がったのです。これは渡りに船だと思い、迷わず応募しました」。

温度差を生み出す構造を探る

熱電素子の開発に当たり、渡邊さんがまず注力したのが構造である。「温度差をつけるため、さまざまな構造を考案しました。試行錯誤を繰り返していた時に修士課程の学生だった徐泰宇さんがコンピューターシミュレーションにより、狭い範囲内で急峻な温度差をつけられる方法を発見しました。この発見が新構造の発明につながりました」。

開発した構造のポイントは、シリコンナノワイヤが基板上に貼り付いた形になっていることだ(図2)。この状態では普通はシリコンナノワイヤに温度差がつかないが、ワイヤの長さを数百ナノメートルまで短くすれば内部に大きな温度差をつけられるのだ。

早速、実際に熱電素子(図3)を作製したが、最初から上手くいったわけではない。温度差が大きいほど発電量を増やすことができるが、高温で温めると熱がナノワイヤ全体に行き渡ってしまい、温度差がつかなかった。

「さまざまな条件で実験を繰り返した結果、基板表面への熱の注入方法を最適化し、温度差を5度にするとう熱電素子1平方センチメートルあたり1.0マイクロワット(マイクロは100万分の1)の発電量が得られることがわかったのです」。

世界最高レベルの発電に成功

しかし、1.0マイクロワットでは発電量が小さい。IoTデバイスで最も電力を消費する無線通信素子では、ブルートゥース(Bluetooth)やジグビー(Zigbee)など低消費電力で知られる規格でも待機電力だけで2.6~3.3マイクロワットが必要となる。そこで試みたのが、熱電素子を載せているシリコン基板を薄くすることだ。「片側の金属は、シリコン基板を通して冷却しています。熱電素子の部分は、最短で0.25マ

イクロメートルしかない一方、シリコン基板の厚さは745マイクロメートルもありました。この厚みが冷却効果を弱め、発電効率を低下させていると考えたのです」。

そこで、熱電素子の設計図の作製などを担当する早稲田大学の富田基裕次席研究員は、シミュレーションにより最適な厚みを導き出した。企業に特注して熱電素子の基板を厚さ50マイクロメートルまで削ったところ、なんと、シリコンナノワイヤを使った熱電素子としては世界最高レベルの1平方センチメートル当たり12.3マイクロワットの発電量を記録した。2017年12月のことだった。

「研究室で実験を進めていた学生から報告を受けたのはCRESTの成果報告会に出席している最中で、送られてきた結果を急いで発表スライドに加えました。最高にうれしかったですね」。

新たに設計した熱電素子の作製では、同じCRESTチームの産業技術総合研究所(産総研)の松川貴ナノCMOS集積グループ長、松木武雄TIA推進センター研究員との連携が生きた。

「産総研の最先端の半導体製造技術がなければ、熱電素子を試作することができず、世界最高記録も出せなかったでしょう」。

現在は、さらなる発電量の向上と早期の実用化を目指している。「常温、5度の温度差で発電する環境として、まずは体温を使った健康のモニタリング

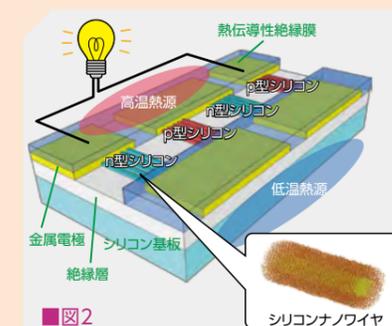


図2 p型とn型のナノワイヤをそれぞれシリコン基板上に作り、これを交互に横に並べていき、電極で結び付ける。ナノワイヤの片側を、絶縁層を介してヒーターで温め、もう片側をシリコン基板の下から冷却することで、ナノワイヤの両端に温度差をつけ、発電させるという仕組みだ。

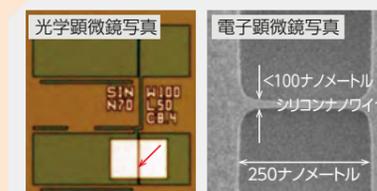
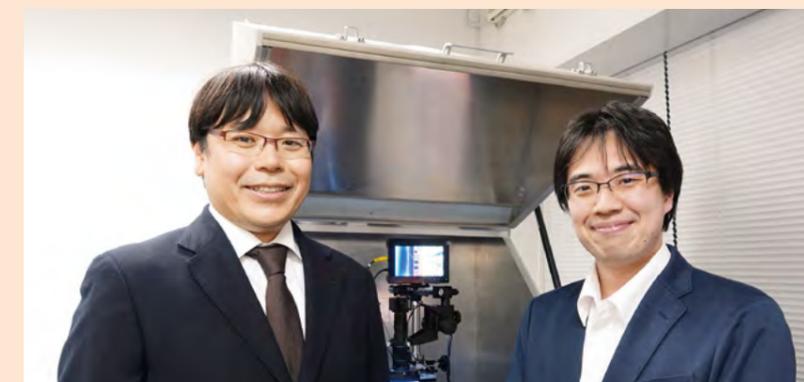


図3 実際に作製した熱電素子。薄いシリコン結晶層の下に絶縁層が挿入されたシリコン基板上に、シリコンナノワイヤを数十本、平行に削り出す。左図では矢印の部分に幅は数十ナノメートル、長さは250ナノメートルのナノワイヤ70本が並んでいる。1本のナノワイヤを拡大したのが右図。

デバイスやウェアラブルデバイスが考えられます。また、IoT用センサーの電源として、日なたと日陰、昼と夜などの温度差を利用した環境発電も可能でしょう。機器の故障に伴い発生した熱を使って発電し、その電気で通信して故障を知らせてくれるセンサーとしても利用できそうです」と渡邊さん。アイデア次第で、応用先は果てしなく広がっていきそうだ。



渡邊さんと富田基裕さん。中央にあるのは熱電素子の発電量を測定する実験装置。

CREST「微小エネルギー」領域の公開シンポジウム「環境発電技術を使ってみよう」を開催
日時：11月7日(水)13時~17時30分 場所：早稲田大学西早稲田キャンパス
URL：<https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research/activity/1111088/eh-symp/index.html>

