

# 微小熱エネルギーを利用した土壌センサー用発電デバイスの性能評価

聖光学院高等学校 2年 川埜雄

## はじめに

### 研究背景

スマート農業の一環として用いられるデバイスの1つとして、土壌の温度や含水率、電気伝導度などを計測するIoTセンサーの活用が期待されている。主に追肥のタイミングの決定指標などに用いられ、農業の効率化や、新規農業就業者に大きく貢献しうるものである。

しかし、農業の現場でのIoTセンサーは広大な面積での設置が必要であり、バッテリー交換の際の人的費用、測定の連続性など、電力供給に課題があるとされてきた。こうした経緯から、身の回りのエネルギーを用いて発電を行う環境発電が土壌センサーの稼働源として注目されている。[1][2][3]

### 熱電変換技術

環境発電に用いられる技術の一つとして熱電変換技術がある。金属や半導体の棒状の試料の両端に温度差を与えると、温度差に比例した電圧が生じることが知られている。この現象はゼーベック効果と呼ばれ、ゼーベック効果を利用して熱と電気を変換する技術は熱電変換と呼ばれる。

また、実際に熱電変換により電力が取り出せるようにした図1下図のような構造を複数個つなげたものを熱電変換素子などと呼ぶ。

熱電変換によって発生する電圧は以下

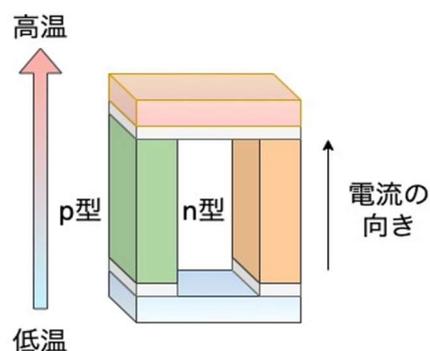


図1 熱電変換素子：TEC1-12706 (上)とその基本的構造 (下)。

のように表すことができる。

$$V = -\alpha \Delta T$$

ただし、 $V$ は起電圧、 $\Delta T$ は温度差であり、 $\alpha$ はゼーベック係数と呼ばれる物質に依存する値である。伝導キャリアが電子ならば $\alpha < 0$ 、ホールならば $\alpha > 0$ となる[4]。

### 研究目的

文献[3]において、地中と空気間に生まれる微小な温度差を、この熱電変換によって電力に変換する土壌センサー用の発電デバイスが考案されている。土壌物理学の解析によれば地中約30cm以深の温度が時間帯によらずほぼ一定であり[5]、比較的温度が大きく変動する空気との間で温度差が生まれやすいという性質に基づいたものである。

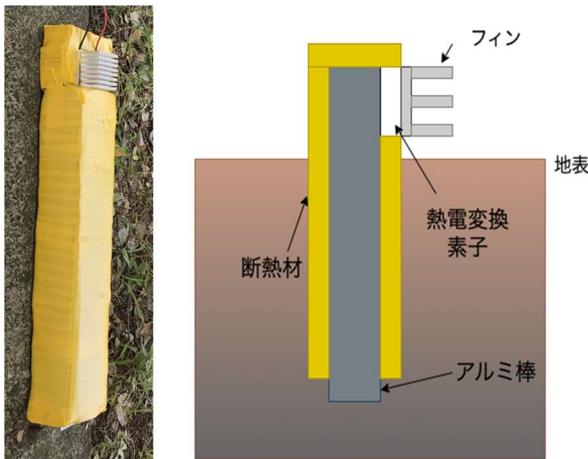


図2 作成した土壌センサー用発電デバイス（左）と地面に挿入した際の模式図（右）。

この地中と空気の温度差を利用した土壌用センサーの発電デバイスは、植物の成長、泥の付着などで太陽光がない環境下でも発電可能であることが長所とされる。一方で、文献[3]のデータによれば、得られた電力では安定したセンサーの稼働が困難な場合も見られ、実用的な運用に向けては実証実験と理論解析の両面からの発電効率向上が望まれる。

そこで、本研究では浅い地中と空気の温度差を利用して発電を行うデバイスを作製し性能評価を行うとともに、作製したデバイスの伝熱解析を行い、発電効率向上に向け議論をした。

### 発電デバイスの性能評価

地中と空気の温度差を利用した土壌センサー用の発電デバイスの性能を確認するため、実際に作製して発電量の測定を行った。作製した発電デバイスは熱伝導体（アルミ棒）に熱電変換素子を取り付けたものである。地中に差し込んだ熱伝導体によって、熱電変換素子の片側に土の温度による影響を及ぼす。また、熱電変換素子のもう片側に空気の温度による影響を及ぼす。



図3 実験の様子

す。こうして土と空気の温度差によって生じた熱電変換素子の温度差を、電力に変換するという構造である。（図2）

熱伝導素材にはアルミニウム（A5083）を、熱電変換素子には TEC-1 12706 を使用し、空気と触れる面にフィンを取り付けた。また、厚さ計 20 mm のポリエチレン板（PE ライト）を断熱材として熱伝導素材の外側に取り付け、ビニールテープを巻くことで防水効果を施した。熱伝導素材とペルチェ素子の接着には放熱用接着シートを使用し、接触による熱抵抗を小さくすることを図った。

この土壌センサー用発電デバイスを深さ 30 cm 強の土に差し込んで、電圧を計測した。また、空気、地中の温度差との相関も調べるため、空気の温度および地中の温度も計測した。地中の温度の計測は深さ約 3, 10, 20, 30 cm の 4 点で行い、空気の温度の計測は、実験場所近辺に設置した実験箱内で行った。空気の温度の計測にあたって、実験箱には一箇所直径 22 mm の穴を開けた。（図3）

実験は 2022 年 10 月 4 日から 10 月 7 日の計 4 日間にわたって、東京大学工学部 9 号館前（北緯 35.72 度、東経 139.76 度）の地面で行い、計測には電圧に LS-200V、温度に温度ロガー（SK-L400T）と

## 有限要素法を用いた伝熱解析

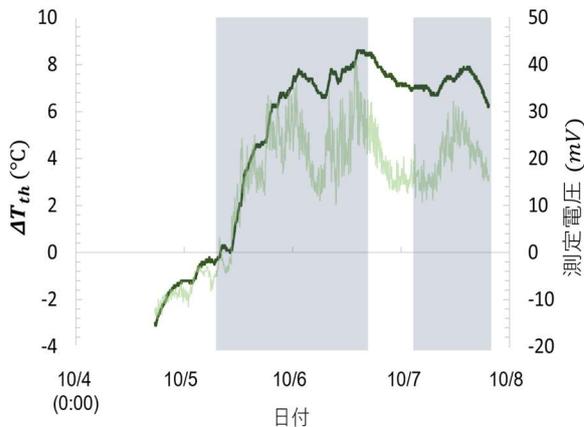


図 4 測定電圧と温度差の関係：濃線が温度差、薄線が測定電圧を示す。灰色の長方形は降雨が見られた時間帯を表す。

SwitchBot 温湿度計を用いた。

図 4 は地中 30cm の温度から気温を引いた値と測定電圧の関係を示したものである。ただし、測定電圧は前後 2 分間を含んだ移動平均であり、実験地に近い東京のアメダスのデータから、降水が見られた時間帯を灰色の長方形で示した<sup>[6]</sup>。

図 4 から、起電圧は昼に上がって夜に下がる傾向にあることがわかり、これは気温と地中の温度差の上下と一致している。このことから、実際に気温と地中の温度差により熱電変換素子の起電圧が発生していることが確認できた。

一方、実験地では 10 月 5 日午前 10 時頃から降水が見られることがわかり、図を見ると、降雨以降では降雨以前と比較して温度差に比較して電圧が発生しにくい傾向が見られる。熱電変換素子側面への降水が温度差を生じにくくさせたことが一因として考えられる。

なお、実験期間中に得られた平均電圧は 36 mV であり、これはセンサーの稼働に必要な目安とされる 20 mV を上回る形となった。

上記のフィールドワークにより、気温と地中の温度差を利用して土壌センサーを稼働する目処が得られた。一方、より高頻度のデータ送信や温度差の小さい環境下での稼働を実現するには、熱電変換素子における温度差を向上させることが望ましい。そこで、後述の(i)~(vii)に基づき農業用センサーの構造を近似し、土・空気の温度と熱電変換素子に発生する温度差の関係を解析した。

以下、土の温度を $T_{air}$ 、空気の温度を $T_{soil}$ とし、熱電変換素子に発生する温度を $\Delta T_{th}$ とする。 $T_{soil} = 20^\circ\text{C}$ で固定し、 $T_{air} = 10, 15, 25, 30^\circ\text{C}$ の 4 種類の条件で熱伝達率と熱電変換素子の温度差の関係を計算した。また、 $T_{air} = 30^\circ\text{C}$ のとき、熱伝導体に銅を用いた場合も解析した。

なお、解析には有限要素法を用いた。この手法は、計算領域を有限要素と呼ばれる有限個の小さい部分領域に分割した後、各有限要素内で熱伝導方程式がもっともよく成り立つように温度を定めるものである<sup>[7][8]</sup>。本研究では熱電変換素子の部分をアルミ (A5083) に比べて細かい要素に分割して計算を行った (図 6)。また、計算はソフトウェア COMSOL Multiphysics®により行い、物性値として表 5 に示した値を利用した。

(i) フーリエの法則とニュートンの冷却法則に基づいて解析を行う。

(ii) A5083 を実物に基づいて、直方体  $1\text{ cm} \times 4\text{ cm} \times 40\text{ cm}$  とする。

(iii) 熱電変換素子について、アルミナ  $4\text{ cm} \times 4\text{ cm} \times 0.1\text{ cm}$  の直方体 2 つで、ビスマスレル  $1.6\text{ cm} \times 1.6\text{ cm} \times 0.18\text{ cm}$  の直方体を挟んでいるとみなす。 $\Delta T_{th}$  はビスマ

表 5 有限要素法による伝熱解析で用いた物性値

	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	比熱 (J/kg · K)	熱伝導率 (W/m · K)
A5083	2660	900	117
アルミナ	3900	900	27
ビスマステルル	7770	154	1.5
銅	8960	385	400

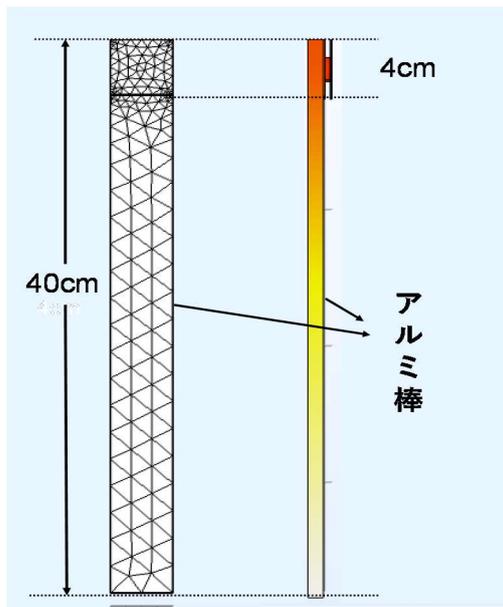


図 6 有限要素法による伝熱解析:有限要素への分割(左)と温度分布の一例(右)。赤は低温、白は高温を表す。

ステルルの両端の温度差とした。

(iv) アルミ棒の下端を土の温度で固定し、棒の側面および熱電変換素子の側面を断熱とする。(境界条件)

(v) 熱電変換素子の一面で空気との間で熱伝達が行われていると仮定する。熱伝達率はアルミナの断面積  $1\text{ m}^2$  あたりの熱の移動量から計算される値とし、フィンの効果などの補正を可能とした。

(vi) アルミ・熱電変換素子間やアルミナ・ビスマステルル間などの接触熱抵抗、界面抵抗、放射熱はいずれも考慮しない。

(vii) 温度分布はいずれも熱平衡状態を仮定する。

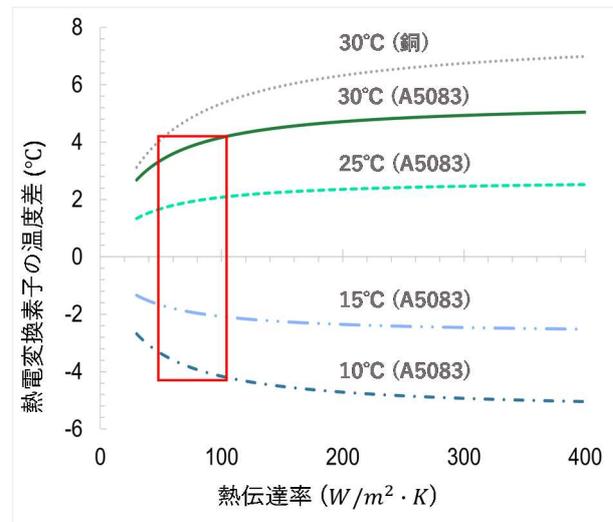


図 7 熱伝達率と熱電変換素子の温度差の関係: 地中温度は  $20\text{ }^\circ\text{C}$  で固定し、異なる気温と伝導体における結果を示した。囲いは現状の構造での目安値を表す。

現状の発電デバイスの場合、フィンが熱伝達率に影響を与えている。用いたフィンはアルミニウム製のもので、 $4\text{ cm} \times 4\text{ cm} \times 0.3\text{ cm}$  の薄い基板に  $0.3\text{ cm} \times 0.1\text{ cm} \times 2.2\text{ cm}$  の直方体状のものが 96 個取り付けられたものである。構造からフィンの表面積は約  $220\text{ cm}^2$  でアルミナの断面積の約 14 倍であるが、フィンの密な形状から、熱の移動量が表面積による効果に比べて減少すると考えられる。その減少率を 25% と仮定し、空気の熱伝達率の値として  $5\sim 10\text{ W m}^{-2}\text{ K}^{-1}$  を利用すると、現状の発電デバイスでは熱伝達率が約  $50\sim 100\text{ W m}^{-2}\text{ K}^{-1}$  になるとみなせる。

このとき、図 7 から、現状の発電デバイスの場合、土と空気の温度差の約 34~42 % ( $T_{air} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$  のとき、 $\Delta T_{th} = 3.4\sim 4.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) が熱電変換素子の温度差としてつくことが分かる。また、A5083 の代わりに銅を熱伝導体として用いた場合、土と空気の温度差のうち熱電変換素子の温度差としてついた割合は約 41~54 % ( $T_{air} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$  のとき、 $\Delta T_{th} = 4.1\sim 5.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) となり、熱伝導体の熱抵抗を小さくすることで、一定の発電効率向上が見込まれることが分かる。

その他にも、フィンの表面積を大きくすることで熱電変換素子と空気間の熱移動を増やす、フィンを黒くすることで放射率を上げるなどによっても、熱伝達率は大きくなるとみなせると考えられる。この場合でも、図 7 から発電効率向上が見込まれると分かる。

## 結論

本研究では、地中と空気の温度差を熱電変換によって電力へと変換する、土壌センサー用の発電デバイスの性能評価を実験と理論解析を用いて行った。実証実験では、測定期間内に平均 36 mV の電圧が記録され、本発電システムを利用して土壌センサを稼働する目処が得られた。また降雨が起電圧に影響を与えていた可能性があることを示した。理論解析からのアプローチでは、有限要素法を用いて作製した発電デバイスの伝熱解析を行い、土と空気の温度差の約 34~42 % が熱電変換素子の温度差としてつくという結果を示した。また、その結果をもとに発電効率向上に向けた具体策を示した。

## 謝辞

本研究は、JST グローバルサイエンスキャンパスの一環として、東京大学グローバルサイエンスキャンパスで行われたもの

である。研究の実施にあたって、日頃より多くのご指導をいただいた、東京大学工学系研究科熱エネルギー工学研究室の、塩見淳一郎先生、大西正人先生、鬼頭壮平様に心より感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] 三輪泰史,『図解よくわかる スマート農業 デジタル化が実現する儲かる農業』, 日刊工業新聞社, 2020.
- [2] S. Zeadally, F. K. Shaikh, A. Talpur, and Q. Z.Sheng, Design architectures for energy harvesting in the Internet of Things, Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 128, August 2020, 109901.
- [3] N. Ikeda, R. Shigeta, J. Shiomi, and Y. Kawahara. Soil-Monitoring Sensor Powered by Temperature Difference between Air and Shallow Underground Soil. Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies Volume 4, Issue 1 March 2020.
- [4] 寺崎一郎,『熱電材料の物質科学』, 内田老鶴圃, 2017.
- [5] G.S.Campbell, 1985, Soil Physics With Basic. Elsevier Science.
- [6] 気象庁 | アメダス <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>, (2022 年 10 月 16 日閲覧).
- [7] D・W・ベッパ, A・J・ベッカー共著. 横山正明訳 『有限要素法 1・2・3』, 開発社, 1966. 庄司正弘,『伝熱工学』, 東京大学出版会.
- [8] 庄司正弘,『伝熱工学』, 東京大学出版会, 1995.

