

土中温度差発電駆動型土壌水分プロファイルプローブの実装

池田 夏輝¹ 繁田 亮¹ 塩見 淳一郎² 川原 圭博¹

概要: 土壌センサシステムを電池駆動する場合, 大規模かつ継続的な運用には電池交換による人的コストが大きくなる問題となるため, エネルギーハーベスティング (EH) を用いたバッテリーレス化が期待されている. 日射や大気の影響を受けにくい土中の温度変化は小さい一方で, その影響を直接受ける地表付近の温度変化は大きい, 地表付近と土中には温度差が生じている. 本論文では, 温度差を電力に変換できる熱電素子を用いることで, 様々な種類の圃場においてもバッテリーレスで駆動可能な土壌水分プロファイルプローブの開発を行った. 様々な種類の圃場における地表付近と土中 30 cm の実測温度データと, 熱・電気回路網を利用した提案システムのモデル化を通じ, 圃場において平均 $80 \mu\text{W}$ – $725 \mu\text{W}$ の電力を得られることを示した. また, 提案システムを実装し, 圃場環境を再現した状況下での実験にて検証したところ, 発電可能な電力はモデル化により求まる理論値の 50 %–70 % 前後であった. 近年の無線通信機能付き超低消費電力マイコンは, 待機時消費電力が $2.1 \mu\text{W}$, 1 回のセンシングに要する電力量は $100 \mu\text{J}$ 前後であるため, 土壌センシングで一般的な 1 時間周期の測定は十分可能である. 以上のことから, 地表付近と土中との温度差で駆動される, バッテリーレス土壌センサシステムの実現可能性が示された.

Implementation of Soil Moisture Profile Probe Driven by Soil Temperature Difference

Natsuki Ikeda¹ Ryo Shigeta¹ Junichiro Shiomi² Yoshihiro Kawahara¹

1. はじめに

近年, 農業のオートメーション化や栽培のノウハウ管理を目的とした農業センシングの重要性が唱えられており, 中でも, 農作物の生育に決定的な役割を果たす土壌水分量や地温を測定可能な土壌センサへの関心が高まっている. 例えば, 土壌センサのセンサデータに基づいて灌水量を管理することで, 地球上の淡水の 70 % 以上を消費していると言われる農業用水の使用量削減, 農業生産性の向上, 農作物の高付加価値化が期待できる [1]. しかし, その他の農業用センサ同様, 現在市販されている土壌センサのほとんどは乾電池で駆動されており, 土壌センサを大規模農業に導入し, 広大な農地へ展開することを想定すると, 電池交換に要する人的・時間的・経済的コストが大きくなる問題とな

る. 図 1 (a) に示す, 我々が従来開発してきた電池駆動式の土壌水分プロファイルプローブを例に挙げると [2], 1 時間に 1 回程度のセンシング頻度としても電池寿命の理論値は 1 年前後に限定される. 更には実証実験より, 寒冷地や高温多湿の圃場環境で運用する場合, 電池の劣化が激しく, 電池寿命が理論値の約 30 %–50 % に限定されることが明らかとなった. また, 設置する土壌の影響, 降雨や霜などの水の影響を直接受けるため, 土壌センサには防水・防塵加工が必須であるが, 電池交換可能にするという制約のもとで防水・防塵加工を実現しようとする, パッキン等の追加部品が必要となり, さらに筐体の構造も複雑となって製造コストが増加する. 以上より, 電池を必要とせず環境から電力を回収することのできるエネルギーハーベスティング (EH) を用いたバッテリーレス化が期待されている.

太陽光 [3]・風力 [4]・RF (マイクロ波) [5]・発電菌 [6] などの手法を利用することも考えられるが, 設置環境に左右されず環境から電力を回収可能な土壌センサの開発を目指す場合, これらの手法の欠点が問題となってくる. EH

¹ 東京大学大学院情報理工学系研究科
Graduate School of Information Science and Technology,
The University of Tokyo

² 東京大学大学院工学系研究科
Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

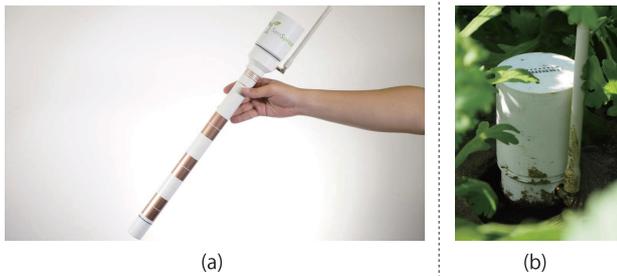
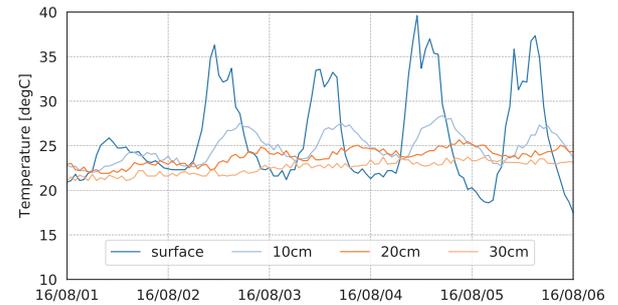


図 1 (a) Senssprout 土壌水分プロファイルプローブ. (b) 土壌水分プロファイルプローブの周囲が植生に覆われている様子.

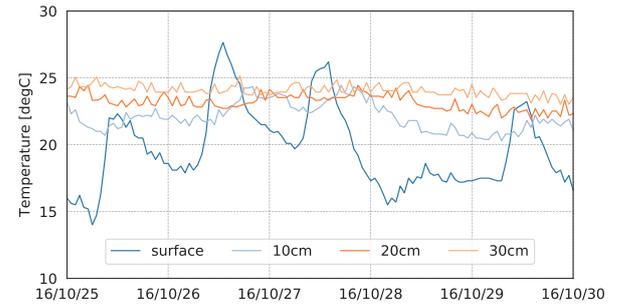
の手法として一般的な太陽光発電は、太陽光が届く状況下での出力が非常に高くなる一方、図 1 (b) に示すような太陽光が届かない状況下での出力は著しく低下する。土壌センサは地表面近くに設置される都合上、生育する農作物に周囲を覆われた場合、太陽光発電では十分な発電量の確保が難しくなる可能性が高く、土壌センサと太陽光発電は相性が悪い。風力発電は可動部品があるために故障のリスクが高いことに加え、温室などの風の吹かない場所では使用することができない。RF (マイクロ波) や発電菌が適さない理由としてはそれぞれ、農地において TV 電波などの環境電波が期待できないということ、発電菌が生存する土壌が限られるということが挙げられる。

土壌センサに適した EH の手法として、温度差を電力に変換 (温度差発電) できる熱電素子を用いた熱電発電が考えられる。地表面付近の温度変動は時間遅延を伴って土中へと伝播することから、図 2 に示すように、地表面付近と土中には、短期的に見れば 1 日周期、長期的に見れば 1 年周期で温度差が生じている [7]。土耕であればほぼ全ての圃場で本現象が通年を通して発生しており、熱電発電は土壌センサの電力源として有望である。そこで本論文では、熱電素子を用い、いかなる圃場においてもバッテリーレスで駆動可能な土壌水分プロファイルプローブ (土中温度差発電駆動型土壌水分プロファイルプローブ) の開発を行った。提案システムでは、図 1 (a) に示す土壌水分プロファイルプローブの下端である土中 30 cm の温度と地表面付近の温度との差を用いて発電を行う。プローブ内部に設置した銅棒にて土中 30 cm から地表面まで温度を導いて熱電素子の片面に接続し、熱電素子の反対面には、地表面付近の外気との熱交換が行われるようにヒートシンクを貼り付けた構造とする。地表面付近と土中との温度差は絶えず変動し、時間帯によって熱流の方向性が反転するため、熱電素子出力電圧の大きさ及び極性は変化する。そこで、熱電素子の出力には整流回路を接続し、更に発電量の不安定性を補うため、余剰電力量をキャパシタに蓄積する回路構成とする。

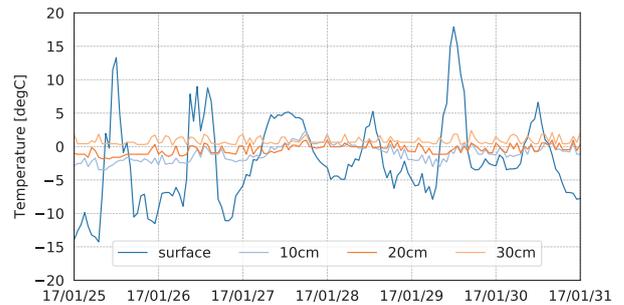
露地・ハウス・凍結土壌・熱帯乾季といった、様々な種類の圃場における地表面付近と土中 30 cm の実測温度デー



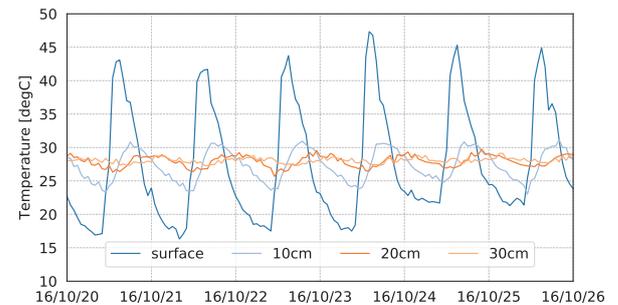
(a)



(b)



(c)



(d)

図 2 様々な種類の圃場における実測地温データ. (a) 露地栽培 (北海道帯広市). (b) ハウス栽培 (茨城県小美玉市). (c) 凍結土壌 (北海道新ひだか市). (d) 熱帯乾季 (インド ペナダ).

々と、熱・電気回路網を利用した提案システムのモデル化を通して、圃場において平均 $80 \mu\text{W}$ – $725 \mu\text{W}$ の電力を温度差発電によって得られることを示した。また、提案システムを実装し、圃場環境を再現した状況下での実験にて検証したところ、発電可能な電力はモデル化により求まる理論値の 50%–70% 前後であった。近年の無線通信機能付き超低消費電力マイコンは、待機時消費電力が $2.1 \mu\text{W}$ 、1 回の

表 1 CC2650 の消費電力特性 [8].

動作電圧	2.1 V
Standby-Mode 消費電流	1 μ A
Standby-Mode 消費電力	2.1 μ W
データ送信時の消費電力量	85 μ J

表 2 KTGM199-2 の特性 [9].

使用最大温度	200 °C
内部抵抗	5.6 Ω
熱抵抗 (27 °C)	0.954 K/W
熱起電力	0.72 V/K
サイズ	48 × 56.5 × 1.35 mm

センシングに要する電力量は 100 μ J 前後であるため、土壌センシングで一般的な 1 時間周期の測定は十分可能である。以上のことから、土中温度差発電によって土壌センサを駆動する、バッテリーレス土壌センサシステムの実現可能性が示された。

本論文の構成は以下の通りである。2 章において、開発する温度差発電駆動型土壌水分プロファイルプローブのシステム要件と設計に関する説明を行い、3 章において、様々な種類の圃場における実地温度データとシステムのモデル化を用いた発電量シミュレーションを行う。2 章の設計に基づいて行った実装と実証実験の結果を 4 章で説明し、5 章にて結論と今後の展望を示す。

2. システム要件と設計

2.1 システム要件

土中に穴を掘って土壌水分プロファイルプローブを設置する必要があるため、筐体構造は設置コストを考慮して設計しなくてはならない。設置を可能な限り容易にするため、図 1 (a) に示すように、センシングを行うプローブ部分の直径を小さくするのが一般的である。我々はこれまで、手動のアースオーガを用いて圃場に穴を掘り、塩ビ管規格 (VP 規格) VP30 相当の太さを持つ土壌水分プロファイルプローブを設置して実証実験を行ってきた。直径が大きくなることにより設置時間・設置コストが大幅に増加し、さらに、穴の壁面に凹凸が生じてプローブ部分と土との密着が弱くなることによりセンサ精度が悪化する。以上を踏まえ、VP30 の外径 38 mm を土中部分で許容される最大外径寸法に設定する。

土壌水分センシングの目的はセンサシステムを導入する個々の農家ごとに様々であるものの、センシング頻度に関してはある程度の典型化が可能である。営農用途では、灌水の時期を見極める必要性から土が乾燥していく過程への関心が高い。乾燥は急激に発生する現象ではないため、センシング頻度としては 10 分に 1 回程度という短い周期ではなく、1 時間に 1 回程度の周期が好まれる傾向にある。本論文でも 1 時間おきのセンシングが可能であるかを判断

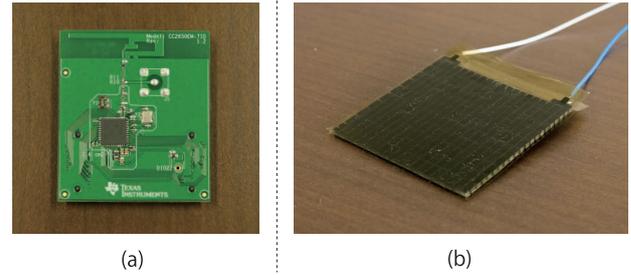


図 3 (a) Texas Instruments 製, CC2650EM-7ID-RD [8]. (b) KELK 製, KTGM199-2 [9].

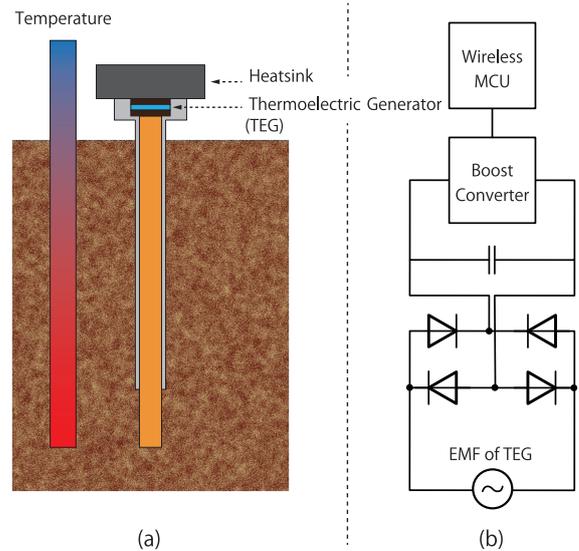


図 4 (a) 土中温度差発電駆動型土壌水分プロファイルプローブの概略. (b) 回路図の概略.

材料として用いる。

無線センサノードとして図 3 (a) に示す Texas Instruments 製の CC2650EM-7ID-RD (以下, CC2650) を使用する [8]. CC2650 はイベント発生時, つまりセンシング・データ送信を行う時のみ Active-Mode となり, それ以外の大部分の時間は Standby-Mode (RTC Running and RAM/CPU Retention) となる. CC2650 の消費電力特性を表 1 に示す. また, 熱電素子として図 3 (b) に示す KELK 製の高効率熱電素子 KTGM199-2 を使用する [9]. 特性を表 2 に示す.

2.2 設計

整理したシステム要件を元に設計されたシステム構造について述べる。図 4 は提案システムの概略である。想定するシステムでは、図 1 (a) に示す土壌水分プロファイルプローブと同様に、土中 10 cm, 土中 20 cm, 土中 30 cm の土壌水分を測定するものとし、土中 30 cm の温度と地表面付近の温度との差を用いて発電する。センシングを行うプローブの内部に銅棒を設置し、銅棒にて土中 30 cm から地表面まで温度を導いて熱電素子の片面に接続する。銅棒上面と熱電素子底面との形状差を吸収するため、厚さ 10 mm

表 3 熱・電気 の相似性 [10].

ポテンシャル	流量	抵抗
温度 [K]	熱流量 [W]	熱抵抗 [K/W]
電圧 [V]	電流 [A]	電気抵抗 [Ω]

の銅板を両者で挟み込み、銅ヒートスプレッドとして用いる。熱電素子の反対面には、地表面付近の外気との熱交換が行われるようにヒートシンクを貼り付けた構造とする。熱電素子と金属間の部品の接着における大きな熱のロスを避けるため、高熱伝導接着剤を用いる。また、土中 30 cm と地表面付近以外との熱のやり取りを避けるため、断熱材で銅棒や熱電素子の周囲を覆う。断熱材厚みを 5 mm、プローブの筐体厚みを 3 mm に設定して、前節より導かれる最大外径寸法を踏まえ、銅棒の直径を 20 mm に設定する。地表面付近と土中との温度差は概ね周期的に変動し、時間帯によって熱流の向きが反転するため、熱電素子出力電圧の大きさ及び極性は変化する。そこで、図 4 (b) に示すように熱電素子の出力には整流回路を接続し、更に発電量の不安定性を補うため、余剰電力量をキャパシタに蓄積する回路構成とする。

3. 発電量シミュレーション

本章では、様々な種類の圃場にて長期間実測された地温データを基にして、提案システムが発電可能な電力を求めていく。シミュレーションを行うには、設計されたシステムのモデル化・熱解析を行う必要がある。システムのモデル化・熱解析の手法には、一般に用いられている物理シミュレータ以外にも熱回路網法という手法が存在する。表 3 に示す熱と電気 の相似性に基つき、電気回路手法を用いて熱の問題を解くのが熱回路網法である [10]。長期間の非定常状態のシミュレーションを行う場合、熱回路網法と比較し、物理シミュレータでの解析には多大な時間と計算量を要する。本論文では、従来から数多くなされてきた熱電発電を用いた試み [11], [12], [13] とは異なり、発電量を導くために熱電素子両面の温度変動を考慮した非定常状態のシミュレーションを行う必要がある。そこで本章では、熱回路網法を応用したシステムの熱・電気回路モデルを提示し、様々な種類の圃場における地表面付近と土中 30 cm の実測温度データをモデルに当てはめることにより発電量シミュレーションを行っていく。

3.1 熱回路網法

図 5 (a) に示すように、節点 N_i に j 個の節点を接続した熱等価回路では、「熱のキルヒホッフの法則」が成り立つ。この法則は熱エネルギーの保存を表すもので、以下の式で表される。

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \frac{1}{R_{ij}} (T_i - T_j) = Q_i \quad (1)$$

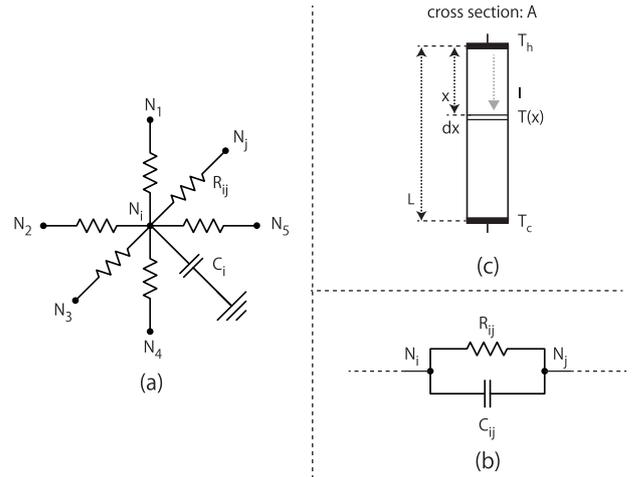


図 5 (a) 熱回路網. (b) 節点間に熱容量が存在する場合. (c) 熱電素子のモデル.

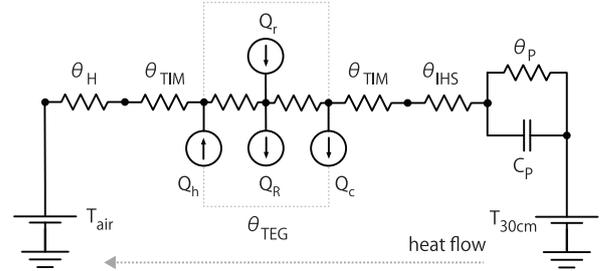


図 6 システムの熱・電気回路モデル

T_i, T_j が接続される節点の温度、 R_{ij} が N_i と N_j を結合する熱抵抗、 Q_i が節点 N_i の発熱量である。この方程式は、節点方程式と呼ばれ、節点の数だけ存在する。つまり、未知数の数と式の数と同じになるため、全ての未知数（節点温度）を求めることができる。また、熱回路網法では非定常（時間変化を伴う）問題も容易に解くことができる。非定常では以下の式のように $\Delta\tau$ 時間の間の蓄熱量が加わる。

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \frac{1}{R_{ij}} (T_i - T_j) = Q_i - \frac{C_i}{\Delta\tau} (T_i - T'_i) \quad (2)$$

T_i が現在の温度、 T'_i が 1 ステップ前の時間の温度、 $\Delta\tau$ が計算時間のステップ幅、 C_i が節点 i の熱容量である。なお、図 5 (b) のように節点間に熱容量が存在する場合、つまり電気回路でいう Foster 型回路の場合、各節点は以下の式で表される。

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \frac{1}{R_{ij}} (T_i - T_j) = Q_i - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \frac{C_{ij}}{\Delta\tau} (\Delta T_{ij} - \Delta T'_{ij}) \quad (3)$$

$\Delta T'_{ij} = T'_i - T'_j$, $\Delta T_{ij} = T_i - T_j$ であり、 C_{ij} が節点 i, j 間の熱容量である。

表 4 システムの熱・電気回路モデルにおける回路素子の値

素子名	SI 単位	素子の変数名
ヒートシンクの熱抵抗 (風速 0.25 m/s) [14]	0.8 K/W	θ_H
ヒートシンクの熱抵抗 (風速 3 m/s) [14]	0.27 K/W	θ_H
高熱伝導接着剤の熱抵抗 (厚さ 100 μm) [15]	0.0025 K/W	θ_{TIM}
熱電素子の熱抵抗 [9]	0.954 K/W	θ_{TEG}
銅ヒートスプレッドの熱抵抗	0.01 K/W	θ_{IHS}
銅棒の熱抵抗 (直径 20 mm)	2.38 K/W	θ_P
熱電素子の熱起電力 [9]	0.072 V/K	α
熱電素子の電気抵抗 [9]	5.6 Ω	r
センサ回路の電気抵抗	5.6 Ω	R
銅棒の熱容量 (直径 20 mm)	320 J/K	C_P

3.2 システムの熱・電気回路モデル

3.2.1 固体内の熱抵抗・熱容量

熱抵抗 R_T [K/W] は、断面積 A [m^2], 熱伝導率 λ [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$], 熱が伝わる方向の長さ L [m] とすると,

$$R_T = \frac{L}{A\lambda} \quad (4)$$

と表される。また、熱容量 C [J/K] は重量 M [kg], 体積 V [m^3], 密度 ρ [kg/m^3], 比熱 C_p [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$] を用いて,

$$C = MC_p = \rho VC_p \quad (5)$$

と表される。「 $R_T C$ 」は「時定数 τ 」と呼ばれ、電気回路と同様に、時定数が大きくなると温度変化は遅くなる。

3.2.2 熱電素子の発熱量・吸熱量

図 5 (c) のように、長さ l [m], 断面積 A [m^2], 抵抗率 ρ [$\Omega\cdot\text{m}$], 熱伝導率 κ [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$] の金属あるいは半導体があり、上部から単位時間あたり Q [W] の熱が定常的に与えられている。上部高温部 T_h [K] からの距離 x [m] での温度を T [K] とし、電流 I [A] が流れているとする。底部低温部を T_c [K] とする。この導体のペルチェ係数を π [$\text{J}/(\text{s}\cdot\text{A})$], 単位温度あたりの熱起電力を α [V/K] とすると、この導体での単位時間あたり、単位面積あたりのエネルギー収支 [W/m^2] は、

$$q - \pi(T)J + \kappa \frac{dT}{dx} = 0 \quad (6)$$

で与えられる。ここで、熱流束 $q = Q/A$ [W/m^2], 電流密度 $J = I/A$ [A/m^2] である。これを x で微分して微小長さ dx に注目すると、エネルギー収支 [W/m^3] は、

$$J \frac{d\pi(T)}{dx} + \kappa \frac{d^2T}{dx^2} = 0 \quad (7)$$

となる。 $\pi(T) = \alpha T$ および $\alpha = dV/dT$, $dV/dx = \rho J$ と書けることから、

$$\rho J^2 + \kappa \frac{d^2T}{dx^2} = 0 \quad (8)$$

となる。境界条件、 $T(0) = T_h$, $T(l) = T_c$ を与えると、各位置での温度 $T(x)$ [K] が、

$$T(x) = -\frac{1}{2} \frac{\rho J^2}{\kappa} x^2 + \frac{1}{2} \frac{\rho J^2}{\kappa} lx - \frac{T_h - T_c}{l} x + T_h \quad (9)$$

と求まる。これを式 (6) に代入し、断面積 A をかけると、エネルギー収支 [W] は、

$$qA - \alpha T J A + \kappa A \left\{ -\frac{\rho J^2}{\kappa} x + \frac{1}{2} \frac{\rho J^2}{\kappa} l - \frac{T_h - T_c}{l} \right\} = 0 \quad (10)$$

となる。熱コンダクタンス $K = \kappa \frac{A}{l}$ [W/K], 電気抵抗 $r = \rho \frac{l}{A}$ [Ω] である。よって、高温点 ($x = 0$), 低温面 ($x = l$) でのエネルギー収支 [W] はそれぞれ、

$$Q_h = \alpha T_h I + K(T_h - T_c) - \frac{1}{2} r I^2 \quad (11)$$

$$Q_c = -\alpha T_c I - K(T_h - T_c) - \frac{1}{2} r I^2 \quad (12)$$

となり、熱電素子の発熱量・吸熱量が導出される。

3.2.3 ヒートシンクの熱抵抗

ヒートシンクの熱抵抗 θ_H は、ヒートシンク自身の熱抵抗 θ_S とヒートシンクから空気への熱抵抗 θ_{SA} に分けられ、

$$\theta_H = \theta_S + \theta_{SA} \quad (13)$$

と表される。 θ_S はヒートシンクの材質や表面の面積に、 θ_{SA} はヒートシンク周辺の風速に左右される。周辺風速の上昇に伴い、 θ_{SA} が減少するため、ヒートシンクの熱抵抗 θ_H も減少していく。風速の目安として用いられるビューフォート風力階級を参考とし [16], 本論文では、圃場でほとんど風が吹いていない状況として風力階級 0 と風力階級 1 の間に相当する風速 0.25 m/s を、圃場に体感可能な風が吹いている状況として風力階級 3 の風速 3 m/s を対応させて議論を進めていく。

3.2.4 システムの熱・電気回路モデルのまとめ

以上より、周辺環境を含めたシステム全体は、図 6 に示す熱・電気回路モデルにて表現可能となる。回路素子の値を表 4 に示す。土中から地表面へと熱が伝導していく様子のみではなく、発電を行うことによって流れる電流により引き起こされるペルチェ効果や内部抵抗で消費される電気エネルギーなどの影響もこの熱・電気回路モデルで考慮することが可能となる。熱電素子中央から外向きに出ている熱流源 Q_R [W] が、温度差発電による発電量に相当する。

表 5 実際の圃場データ

種別	地点	期間
a 露地栽培	北海道帯広市	2016/07-2016/10
b ハウス栽培	茨城県小美玉市	2016/10-2017/01
c 凍結土壌	北海道新ひだか市	2016/10-2017/02
d 熱帯乾季	インド ベノダ	2016/08-2016/11

表 6 シミュレーション結果

	平均温度差 [K]	平均発電量 [μ W]
周辺風速 0.25 m/s	a	0.66
	b	0.89
	c	1.53
	d	0.59
周辺風速 3 m/s	a	0.77
	b	1.03
	c	1.77
	d	0.69

圃場で実測した地表面付近と土中 30 cm の時系列温度データを図 6 の T_{air} [K], T_{soil} [K] にそれぞれ対応させることで、発電量を見積もることができる。なお、図 6 では、土中 30 cm の温度が地表面付近の温度よりも高い場合を仮定しており、温度勾配が逆転する場合には図を読み替える必要がある。

3.3 実測地温データを用いた発電量シミュレーション

従来開発してきた、乾電池駆動の土壌プロファイルプローブを用いて、表 5 に示す各圃場にて実際に地表面付近と土中の温度測定を行った。1 章の図 2 において、各圃場の実測地温データをそれぞれ 5 日分示した。3.2 節で導出したシステムの熱・電気回路モデルの $T_{\text{air}} \cdot T_{\text{soil}}$ に、各圃場の地表面付近・土中 30 cm の時系列温度データを当てはめ、熱電素子両面の平均温度差・平均発電量を求めた結果を表 6 に記す。なおハウス栽培（茨城県小美玉市）の圃場において、ハウス内に強風が吹くことは構造上ないため、表 6 の周辺風速 3 m/s における当該項目は参考値として示す。圃場の種類によって発電量は様々な変化を示すが、シミュレーションに用いたデータの中では、凍結土壌（北海道新ひだか市）における温度差が一番大きい結果となっている。これは、土中が凍結しており、土中 30 cm 温度が 0°C から動くことなく、土中温度変動が地表面付近の温度変動に追従する現象が他の圃場と異なって発生しないためと考えられる。表 6 より、風速 0.25 m/s 時と風速 3 m/s 時では平均発電量に約 15% の違いが生じる。これは、3.2.3 節で言及した、 θ_{SA} の値が風速によって大きく変わり、熱電素子両面に生じる温度差が小さくなったためである。

表 1 の CC2650 消費電力特性を参照すると、1 時間に 1 回以上のセンシングを行うためには、5 μ W 前後の発電量を要する。従って、いずれの圃場においても 1 時間に 1 回以上のセンシングが可能であることが示された。



図 7 実装したプローブ

4. 実装と実証

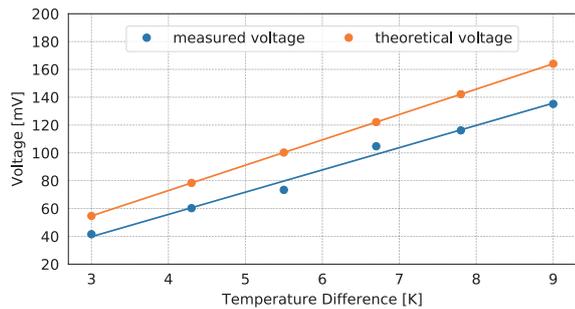
4.1 システムの実装

2 章にて決定された土中温度差発電駆動型土壌水分プロファイルプローブの構造に基づき、実装を行った。その様子を図 7 に示す。銅棒と熱電素子との間に設置した銅ヒートスプレッドをネジ等で挟み込んで固定した場合、その部分が余計な熱のパスとなってしまいうため、銅ヒートスプレッドと熱電素子は高熱伝導接着剤にて、銅ヒートスプレッドと銅棒はねじ切りにて固定を行った。土中から地表面に至るまで、一直線の熱流となることを目的として、銅棒や熱電素子の周囲を断熱材で覆っており、素材には断熱性に優れたポリウレタンフォームを用いている。なお、筐体部分は塩ビパイプ (VP30) や 3D プリンタで作成した部品から構成される。

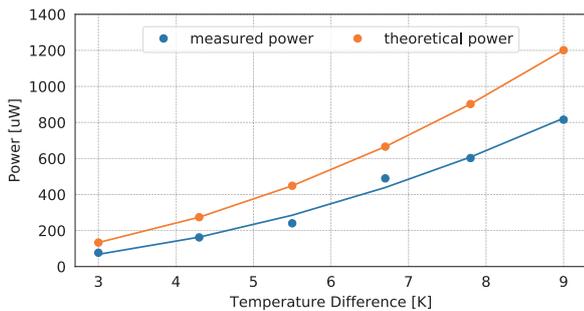
4.2 システムの実証

システムの実証を行うため、圃場環境を模した実験環境を準備した。断熱材で覆われた高さ約 40 cm の箱を土で満たし、中央にプローブを埋める。土中鉛直方向に温度勾配が生じている圃場環境を再現するために箱下を実験用ホットプレートで加熱し、風が吹いている圃場環境を再現するために地表面付近に扇風機を設置する。銅棒の下端 30 cm と地表面付近との温度差を様々に変化させ、熱電素子の熱起電力の測定を行い、熱・電気回路モデルで導かれる理論値との比較検討を行った。3.2.3 節より、ヒートシンクの熱抵抗値は風速に依存するため、風速測定を併せて行う。

まず、周辺風速を 1 m/s に設定し、地表面付近と土中 30 cm との温度差を 3°C-9°C まで様々に変化させ、熱電素子の熱起電力を測定した。結果を図 8 に示す。システムの熱・電気回路モデルを用いて求めた理論値と比較し、実測値は電圧が理論値の 70%-80% 程度、発電量が理論値の 50%-70% 程度であった。また、周辺風速を 3 m/s に変化させた場合も同様に、電圧実測値が理論値の 70%-80% 程度の範囲に収まる結果となった。発電量が理論値の 50% 程度にとどまる場合でも、3.3 章の議論より、営農用途で要求される 1 時間に 1 回以上のセンシングを温度差発電で実



(a)



(b)

図 8 システムの実装したものを用いた実測値（青）とシステムの熱・電気回路モデルを用いた理論値（橙）との比較。周辺風速は 1 m/s。横軸が地表面付近と土中 30 cm との温度差 [K]。縦軸は (a) が熱電素子の熱起電力 [mV]、(b) が熱電素子の発電量 [μW]

現可能である。

5. おわりに

本論文では、土中温度差発電を用い、いかなる圃場においてもバッテリーレスで駆動可能な土壤センサシステムの実装と評価を行った。まずはじめに、露地・ハウス・凍結土壌・熱帯乾季といった、様々な種類の圃場における地表面付近と土中 30 cm の実測地温データ、及び熱・電気回路網を利用した提案システムのモデル化を通じて発電量の算出を行った。シミュレーション結果より、圃場において平均 80 μW–725 μW の電力を温度差発電によって得られることが示された。近年の無線通信機能付き超低消費電力マイコンは、待機時消費電力が 2.1 μW、1 回のセンシングに要する電力量は 100 μJ 前後であるため、土壤センシングで一般的な 1 時間周期の測定は十分可能である。次に、提案システムを実装し、圃場環境を再現した状況下で実験を行った。発電可能な電力はモデル化によって求まる理論値の 50%–70% 前後であったが、実装の更なる精密化での性能向上も十分期待できる。今後は実際の圃場にシステムを設置し、土壤センシングを継続的に行うことができるかどうかの検証を行い、土中温度差発電駆動型土壤センサシステムとしての完成を目指す。

謝辞 研究データ提供にご協力いただきました、北海道帯広市の池守明裕様、茨城県小美玉市のユニオンファーム

様、北海道大学土壌学研究室の皆様、Indian Institute of Technology Bombay J. Adinarayana 教授に感謝いたします。本稿は、ERATO 川原万有情報網プロジェクト（グラント番号 JPMJER1501）の研究成果を含みます。

参考文献

- [1] OECD: Water Use in Agriculture, OECD (online), available from (<http://www.oecd.org/agriculture/wateruseinagriculture.htm>) (accessed 2017-09-14).
- [2] Shirahama, Y., Shigeta, R., Kawahara, Y. and Asami, T.: Implementation of Wide Range Soil Moisture Profile Probe by Coplanar Plate Capacitor on Film Substrate, *Proc. 2015 IEEE SENSORS*, IEEE, pp. 1–4 (2015).
- [3] Raghunathan, V., Kansal, A., Hsu, J., Friedman, J. and Srivastava, M.: Design Considerations for Solar Energy Harvesting Wireless Embedded Systems, *Proc. 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN 2005)*, IEEE, pp. 457–462 (2005).
- [4] Li, S., Yuan, J. and Lipson, H.: Ambient Wind Energy Harvesting Using Cross-Flow Fluttering, *J. Appl. Phys.*, Vol. 109, No. 2, pp. 1–4 (2011).
- [5] Shigeta, R., Sasaki, T., Quan, D. M., Kawahara, Y., Vyas, R. J., Tentzeris, M. M. and Asami, T.: Ambient RF Energy Harvesting Sensor Device with Capacitor-Leakage-Aware Duty Cycle Control, *IEEE Sens. J.*, Vol. 13, No. 8, pp. 2973–2983 (2013).
- [6] Liu, H., Ramnarayanan, R. and Logan, B. E.: Production of Electricity During Wastewater Treatment Using a Single Chamber Microbial Fuel Cell, *Envir. Sci. Tech.*, Vol. 13, No. 7, pp. 2281–2285 (2004).
- [7] Jury, W. A. and Horton, R.: *Soil physics*, John Wiley & Sons (2004).
- [8] Instruments, T.: CC2650 SimpleLink Multistandard Wireless MCU, Texas Instruments (online), available from (<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2650.pdf>) (accessed 2017-09-14).
- [9] KELK: Thermo Generation Module Data, KELK (online), available from (https://www.kelk.co.jp/generation/data_1.html) (accessed 2017-09-14).
- [10] Kunimine, N. and Nakamura, A.: 熱設計と数値シミュレーション, オーム社 (2015).
- [11] Kaibe, H., Kajihara, T. and Fujimoto, S.: Recovery of Plant Waste Heat by a Thermoelectric Generating System (2011).
- [12] Leonov, V., Torfs, T., Fiorini, P. and Hoof, C. V.: Thermoelectric Converters of Human Warmth for Self-Powered Wireless Sensor Nodes, *IEEE Sens. J.*, Vol. 7, No. 5, pp. 650–657 (2007).
- [13] Tan, Y. K. and Panda, S. K.: Energy Harvesting from Hybrid Indoor Ambient Light and Thermal Energy Sources for Enhanced Performance of Wireless Sensor Nodes, *IEEE on Trans. Ind. Electron.*, Vol. 58, No. 9, pp. 4424–4435 (2011).
- [14] ALPHA: ALPHA LC100, ALPHA (online), available from (<https://www.micforg.co.jp/dxf/LC.pdf>) (accessed 2017-09-14).
- [15] AD-DA: Arctic Silver Thermal Adhesive, AD-DA (accessed 2017-09-14).
- [16] Center, S. P.: Beaufort Wind Scale, Storm Prediction Center (online), available from (<http://www.spc.noaa.gov/faq/tornado/beaufort.html>) (accessed 2017-09-14).