

## センサーによる物理測定

日時： 2023年5月10日（水）13:00-

場所： 学生実験室（2号館別館351）

### 【能書き1】なぜこの実験実習をするのか？

- ・データサイエンティスト人材が不足?! AI だって?!
- ・データを自分で取ったこともない人に何がわかる!
- ・誰かの論評や解説で理解した気になっている頭でっかち東大生を駆逐するゾ!

### 【能書き2】1次データの重要性

- ・エビデンスとは何か?
- ・1次データを取得するのはとにかく面倒くさくて、泥臭くて、難しい!
- ・どこまでが本当か?そもそもデータは信頼できるのか?
- ・データ取得者に対するリスペクトが必要
- ・似非1次データ→2次データ→・・・→噂→風評被害→・・・社会が誤った方向に流される

### 【能書き3】人生は感動だ!

- ・おおー、凄げえ!（感動は学問のスタートライン）
- ・しまった! やっちまったよ orz（失敗は成功の道しるべ）

（追記 2021. 5. 12）

### 【能書き4】AI は実験を楽しめない

- ・ChatGPT がどんなに高性能になっても実験実習で得られる感動にはかなわない

（追記 2023. 5. 10）

----- 以下は例年通りのつまらない解説-----でも IoT センサーの基本を理解するにはすごく重要!

### センサー 【 sensor 】

センサーとは、物理現象や対象の物理状態の変化などを捉え、信号やデータに変換して出力する装置や機器。光や音、温度、圧力、電気、磁気、距離、速度、加速度、角速度など、様々な現象や対象に対応するセンサーが存在する。

## I. 熱電対による温度測定

### 目的

温度の測定/計測は、私たちの生活のいろんな場面で行われている。本実験では、温度センサ

一（熱電対：ねつでんつい）の原理を理解すると共に、熱電対温度計を自作して、土壌温度を計測する技術を学ぶ。（最も簡単で正確なセンサーの一つ）

## 熱電対の原理

（重要な用語） 熱電効果

- 1) セーベック効果(Seebeck effect, 1821)： 異種金属導線の両端を接合して回路をつくり、両接点を異なる温度に保つと、電流が流れる現象。
- 2) ペルチェー効果(Peltier effect, 1834)： 異種金属の接点を通し電流を流すと、接点で熱の吸収または発生が生じる現象。
- 3) トムソン効果(Thomson effect, 1854)： 温度勾配がある導線に電流を流すと、熱の吸収または発生を生じる現象。
- 4) 熱電対(Thermocouple)： 異種金属導線の両端を接合して回路をつくり、発生した熱起電力から両端の温度差を測定する機器。

（解説）

温度を測る簡単な道具の一つに熱電対（thermocouple）がある。熱電対は種類に応じて $-200^{\circ}\text{C}$ ～ $2000^{\circ}\text{C}$ 程度までの広い測定範囲をもち、比較的安価であること、遠隔測定ができること、測温部が小さいことなどの特徴がある。

熱電対は、その名の通り 1 対の金属線からなる。ある金属に温度差を与えると、金属内の自由電子が熱によって移動し低温側の密度が小さくなる(図-1)。このため、この金属の低温側は負に、高温側は正に帯電する。こうした自由電子の密度の変化は金属の種類によって異なる。そこで、2 種類の金属線を図-2 や図-3 のようにつなぎ、接点 A, B に異なる温度を与えると、接点間に起電力（熱起電力）E が発生することになる。この現象は発見者 T. Seebeck (1821) にちなみ、ゼーベック効果と呼ばれる。

熱起電力の大きさは、金属がそれぞれ均質であれば金属線の組合せと接点間の温度差だけによって決まり、金属線の長さや太さ、接点以外の部分の温度などには無関係である。そこで、一方の接点を基準温度に保ち熱起電力を求めれば、もう一方の接点の温度が測定できる。銅-コンスタンタンの場合、 $1^{\circ}\text{C}$ あたりの熱起電力はおおよそ  $40\ \mu\text{V}$ （熱起電力  $1\text{mV}$  のときの温度差は  $25^{\circ}\text{C}$ ）である。

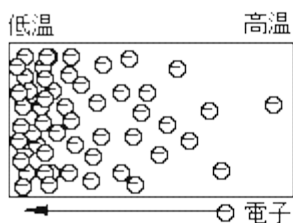


図-1

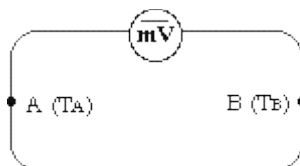


図-2

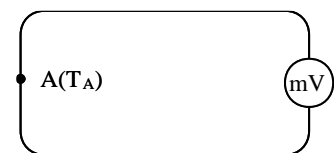


図-3

図-1 ある金属内の温度勾配下の電子密度

図-2 起電力の発生（接点が2つの場合）

図-3 起電力の発生（接点が1つの場合）

（熱電対の種類） JIS 規格の熱電対

記号	+側金属	－側金属	使用温度範囲	過熱使用限度	特徴
K	クロメル	アルメル	-200～1000℃	1200℃	温度と熱起電力との関係が直線的であり、工業用として最も多く使用されている。
J	鉄	コンスタンタン	0～600	750	E 熱電対に次いで熱起電力特性高く、工業用として中温域で使用されている。
T	銅	コンスタンタン	-200～300	350	電気抵抗が小さく、熱起電力が安定。低温での精密測定に広く利用されている。
E	クロメル	コンスタンタン	-200～700	800	JIS に定められた熱電対の中で最も高い熱起電力特性を有している。

クロメル（合金）、コンスタンタン（合金）

過熱使用温度：必要上やむを得ない場合に、短時間使用できる温度の限度

（熱電対による温度測定誤差の原因）

1. 挿入深度による誤差： 浅いと外気や壁の影響で誤差を生じる。
2. 応答遅れによる誤差： 熱電対の被覆の厚みや材質の違いで熱の伝わる速度に違いが生じる。
3. 放射熱による誤差： 熱電対端子部との温度差の大きな物体が近くにあるときに生じる。
4. 高速気流による誤差： 気体の圧縮や内部摩擦で熱を発生し、誤差を生じる。
5. 寄生熱起電力誤差： 導線間に温度勾配があると生じる。

（その他の温度計）

1. 抵抗温度計／サーミスタ ←今年はこちらを使って水温測定に挑戦してもらう予定
2. 放射温度計
3. 半導体

コラム：なぜ熱移動と電子の流れが同時に起こるのか（自然の不思議） ←ヲタク向け解説

もともと自然には変化を嫌う傾向がある。すなわち、温度勾配下で熱が流れようとするとその変化を嫌うように電子が流れようとする。その逆も成り立つ。定常状態では、この傾向が系のエントロピー生成速度が極小になるように現れる。自然界で起こる移動現象（例えば、土壌などの多孔質体中で生じる熱移動：Fourier の法則、拡散：Fick の法則、水分移動：Darcy の法則）は、本当は、単独で生じているのではなく、全ての移動が同時に起こる。ただし、この法則が成り立つのは平衡状態からのずれ（変化）が小さい範囲に限られる。では、平衡状態から大きくずれる（変化する）場合にはどうなるのだろうか？ 関心のある人は、不可逆過程の熱力学 (Irreversible thermodynamics) を勉強すると面白いだろう。

### 実験 I - 1 熱電対の自作検定 （個別実験の希望者対象）

目的： 熱電対の熱起電力が温度によって変化することを確認する。

準備するもの

1. 水 (氷, 湯)
2. 熱電対 2本 (A, B: 長さ 1m のもの)
3. 魔法瓶 2個 (A, B)
4. テスタ (デジタルマルチメータ) 1台
5. 温度計 1本 (0-100°C)

実験手順

1. 魔法瓶 A に氷水, 魔法瓶 B に湯を入れるなどして, 魔法瓶 A, B に温度差をつくる。
2. 温度計を使って魔法瓶 A, B の液体の温度を記録する。
3. 熱電対 A, B それぞれを魔法瓶 A, B に入れる。
4. 熱電対をテスタに正しく接続する。(図 4)
5. テスタを使って熱電対の熱起電力 (mV) を記録する。
6. 温度計を使って魔法瓶 B の液体の温度を記録する。
7. 1に戻る。(温度差を最低 7 回変えること。熱電対 A, B を入れ替えると良い)
8. 縦軸に魔法瓶 A, B の温度差 (°C), 横軸に熱起電力 (mV) をとり、グラフ用紙にプロットする。
9. プロットから最小二乗法により 1 次式の係数を求める。

	魔法瓶 A の温度 [°C]	魔法瓶 B の温度 [°C]	温度差 [°C] y	熱起電力 [mV] x
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				

$$y = a * x + b$$

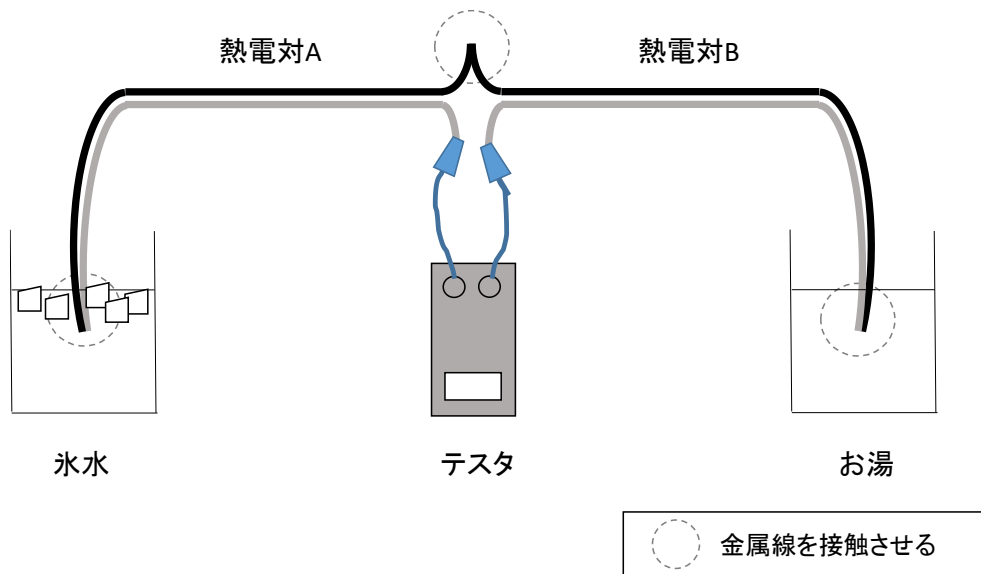


図4 熱電対の接続

**実験 I – II 指先熱起電力の測定（個別実験の希望者対象）**

実験手順

1. 2人1組になり，熱電対の両端を各人が指先で強く挟む。
2. テスタを見ながら，熱電対の熱起電力（mV）を記録する。
3. 総当たり戦で，班員全員の熱起電力を測定する。
4. 結果を表にまとめて，実験 I で決定した関係式から温度差を計算する。
5. 班の中で最も指先の温度が高かった人を特定する。

	A	B	C	D
A				
B				
C				
D				

## II. データロガーと水位センサーを用いた水位測定（個別実験の希望者対象）

目的： センサーデータをいちいちテストで読むのは大変である。そのため、最近ではセンサーにより計測・収集した各種データを保存するデータロガー（data logger）が使われる。データロガーは記録計とかデータレコーダーとも呼ばれる。本実験ではデータロガーを使ってデータを取得する技術を学ぶ。

### 準備するもの：

- |                   |     |       |
|-------------------|-----|-------|
| 1. データロガー Em5b    | 1 台 |       |
| 2. 水位センサー         | 1 本 | (Ch2) |
| 3. その他の各種センサー（任意） | 1 本 | (Ch3) |
| ・ 土壌水分センサー        |     |       |
| ・ 温湿度計            |     |       |
| ・ 雨量計             |     |       |
| ・ 日射計             |     |       |
| 5. データ回収用 PC      | 1 台 |       |

### データロガーの設定

1. コンピュータを立ち上げる。
2. デスクトップ上の ECH20U-tility を起動させる。
3. データロガー接続用のケーブルを PC の USB ポートとデータロガー（Em5b）の COM PORT に差し込む。
4. Connect Via: で Direct COM を選ぶ。
5. 画面右上の Connect アイコンをクリック。（正しく接続されれば緑の Connect アイコンが赤の Disconnect アイコンに変わり、その右の Download アイコン、Scan アイコン、にも色がつく）
6. データロガーにつなぐ好きなセンサーを選んで各ポートに接続する。
7. 各ポートのセンサーに合わせて、画面右下のチェックボックス Port 1 sensor~Port 4 sensor を設定する。
8. データ測定の間隔（ここでは1 min）を決め、画面右中央のチェックボックス Measurement Interval で選択する。

- |                 |
|-----------------|
| ① 電池の電圧を確認する    |
| ② データロガーに電池を入れる |

### センサーの動作確認

1. 画面右上の Scan アイコンをクリックする。
2. センサーを握るなどして画面右下の Scan Again をクリックし、数値に変化があったら OK。
3. 画面上部の Disconnect アイコンをクリック

## 実験Ⅱ－1 水位センサーによる水位測定（個別実験の希望者対象）

目的： イネの栽培では水田の水管理が重要である。本実験では水位センサーの出力値が水深によって変化することを確認する。

準備するもの

1. バケツ
2. 水差し
3. 水
4. 水位センサー 1本
5. データロガー&PC 1式

実験手順

1. 水差しに水を入れる。
2. 水位センサーをデータロガーに正しく接続する。
3. 水位センサーを水差しに立てる。
5. ロガーを使って水位センサーの出力値（mV）を記録する。
6. ものさしを使って水深を記録する。
7. 1に戻る。（水深を最低5回変えること）

### 注目！

農場実習@生態調和農学機構で環境計測機器を導入し、トウモロコシの生長と気象の変化を遠隔地から観察しながら ICT 農業の触りの部分を見学してもらう予定。

### 参考：最小二乗法

1805年にアドリアン＝マリ・ルジャンドルが出版したのが初出。しかし、1809年にカール・フリードリヒ・ガウスが出版した際に1795年には最小二乗法を考案済みだったと主張したことで、最小二乗法の発明者が誰であるかについては長い間論争になっている。

前提：

- ・ 定値の誤差には偏りがない。すなわち誤差の平均値は 0 である。
- ・ 各測定は互いに独立であり、誤差の共分散は 0 である。
- ・ 差は正規分布する。
- ・ フィッティングパラメータを含むモデル関数  $f$  が知られている。

一次関数の場合  $y = ax + b$

最小二乗和：
$$S = \sum (ax_i + b - y_i)^2$$

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 2 \sum x_i (ax_i + b - y_i) = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial b} = 2 \sum (ax_i + b - y_i) = 0 \quad \leftarrow S \text{ が最小値をとる条件}$$

$$a \sum x_i^2 + b \sum x_i = \sum x_i y_i, \quad a \sum x_i + b \sum 1 = \sum y_i \quad \leftarrow \text{連立方程式 (行列表示可)}$$

$$a = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}, \quad b = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i y_i \sum x_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad \leftarrow \text{連立方程式の}$$

計算表

i	$x_i$	$y_i$	$x_i^2$	$x_i y_i$
1				
2				
3				
4				
5				
$\Sigma$				

	x:出力値 (mV)	y:水深 (cm)
1	1560	7
2	1700	14
3	1930	21
4	2200	27
5	2280	30

$a =$                        $b =$

**演習問題**    上記の右表の数値を使って、グラフを作成し、左表の空欄を埋め込んで a と b の値を求めよ。EXCEL 等のソフトを使って求めた a と b と比較して考察せよ。

**実験Ⅲ 農業 IoT 実習 温湿度モニタリング機器を作ってみよう！（今年はこれ！）**

**レポートの提出**

提出先： ITC-LMS  
 締切： 6月11日（日）  
 内容： （1）上記の演習問題  
           （2）Lチカの3秒動画を提出  
           （3）自室の温湿度変化のグラフ（12時間分）