伝熱実験
–熱電対を使った温度計測と熱伝導実験及び熱交換器実験–
1. 熱伝導実験

九州工業大学 機械知能工学科　機械コース
3 年 学籍番号:13104069 坂本 悠作

実験日 1:平成 27 年 7 月　1 日
提出日 :平成 27 年 7 月 15 日
共同実験者
川内　諒
川上　晃弘
金城　悟
草場　悠真
石井　敦
一ノ宮　浩祐
砂野　仁輝
高野　真里
是永　遼介
酒井　淳
里中　花実
白石　大輔
高木　怜

1 目的

円柱内の 1 次元定常熱伝導実験からフーリエの法則について学ぶ

2 フーリエの法則

熱伝導は、温度分布の存在する物体、主として固体内において、温度差より熱エネルギーが高温側から低温側へ移動する現象である。物体内の単位面積を単位時間に通過する熱量 $q[W/m^2]$(熱流速) は、一般に熱の流れる方向の温度勾配 dT/dx[K/m] に比例する。この法則をフーリエの法則という。

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \tag{1}$$

3 実験方法

実験に試用するブロック (金属円柱: 外形 50[mm], 高さ 60[mm]) は、銅、アルミニウム、黄銅の 3 種類である。ただし、どれがどの材料かは特定できないようにしている。実験では、任意の選択した 1 つの試験ブロックの下面を電気加熱した銅製ブロックに接触させて加熱し、上面を水道水によって冷却する。円柱側面は断熱材で断熱されているので、熱は下面から上面へ 1 方向 (1 次元的) に伝わる。軸方向に 5 箇所開けられた穴に挿入した T 型熱電対で中心の温度分布を測定し記録する。

4 実験手順

1. 試験ブロックを加熱し、中心 5 点及び、冷却水の温度を測定する
2. 軸方向の温度分布をグラフに書き、ヒーター加熱量 Q に対する勾配を最小二乗法によって求める
3. ヒーター加熱量から求まる熱流速 (Q/A) と温度勾配との関係をグラフに表し、式 1 の関係について考察する
4. 上面の表面温度を外挿により求め、冷却水温度との差について比較する
5. 熱伝達について調べ、まとめる。

5 結果の整理 (レポート課題)

5.1 試験ブロックを加熱し、中心 5 点および冷却水の温度を測定する。

測定した結果を表 1-3 に示す。

5.2 軸方向の温度分布をグラフに描き、ヒーター加熱量 Q に対する勾配を最小二乗法により求める。

5.2.1 最小二乗法の計算

最小二乗法は、誤差の自乗が最小になるように係数 a,b を設定したものである。今回の実験では取得した値が 5 点であったので、5 点の場合の計算方法を以下に示す。求めたい曲線を y=ax+b と仮定する今、データ点が $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), (x_4, y_4), (x_5, y_5)$ とすると、最小二乗法の考え方より、評価式 S が以下のようになる

$$
\begin{aligned}
S &= d_1^2 + d_2^2 + d_3^2 + d_4^2 + d_5^2 \\
&= (y_1 - ax_1 - b)^2 + (y_2 - ax_2 - b)^2 + (y_3 - ax_3 - b)^2 + (y_4 - ax_4 - b)^2 + (y_5 - ax_5 - b)^2 \\
&= (y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + y_4^2 + y_5^2) \\
&\quad +a^2(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 + x_5^2) \\
&\quad +5b^2 \\
&\quad -2b(y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5) \\
&\quad -2a(x_1y_1 + x_2y_2 + +x_3y_3 + +x_4y_4 + +x_5y_5) \\
&\quad +2ab(x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5)
\end{aligned} \tag{2}
$$

ここで、次の変数を宣言する

$$
\begin{aligned}
A &= (y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + y_4^2 + y_5^2) \\
B &= (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 + x_5^2) \\
C &= (y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5) \\
D &= (x_1y_1 + x_2y_2 + +x_3y_3 + +x_4y_4 + +x_5y_5) \\
E &= (x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5) \\
S &= A + a^2B + 5b^2 - 2bC - 2aD + 2abE
\end{aligned} \tag{3}
$$

この評価式が最小となるように偏微分すると、

$$
\frac{\partial S}{\partial a} = 2aB - 2D + 2bE = 0
$$

$$
\frac{\partial S}{\partial b} = 10b - 2C + 2aE = 0
$$

これを解いて、

$$
a = \frac{5D - CE}{5B - E^2}
$$

$$
b = \frac{BC - DE}{5B - E^2} \tag{4}
$$

最小二乗法の計算によって、以下の式が求められた。

$$
y = -0.092x + 302.45 \tag{5}
$$

$$
y = -0.1315x + 305.887 \tag{6}
$$

$$
y = -0.202x + 311.63 \tag{7}
$$

$$
y = -0.253x + 316.395 \tag{8}
$$

5.2.2 計算結果

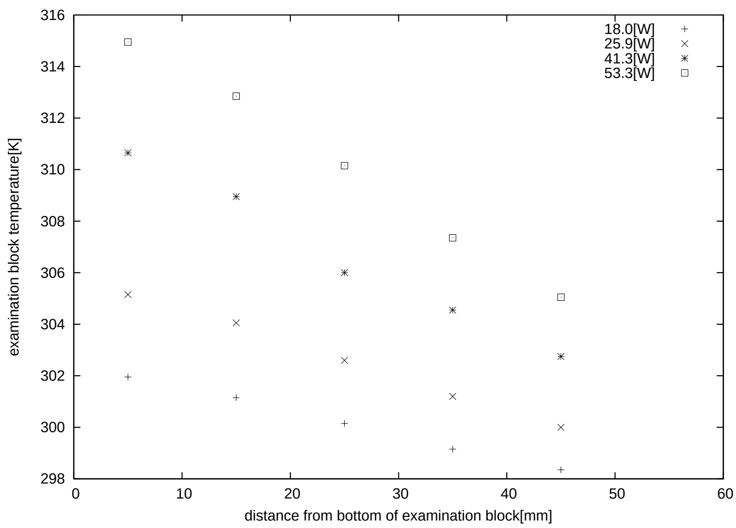

図 1: 軸方向温度分布

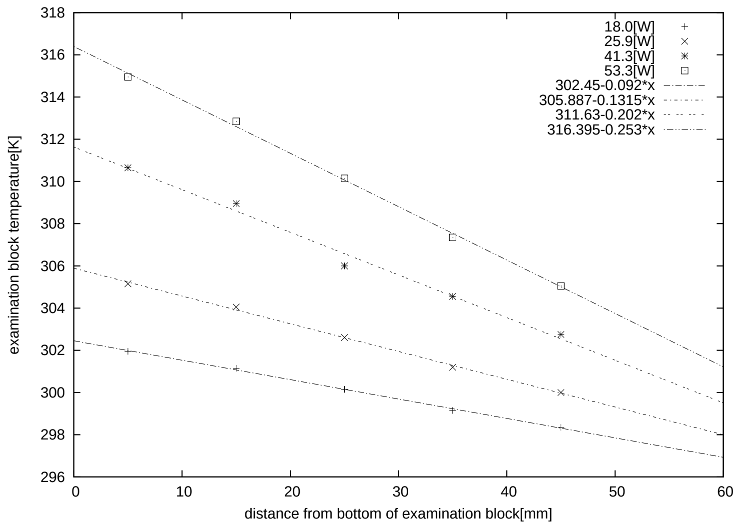

図 2: 軸方向温度分布 (最小二乗法)

5.3 ヒーター加熱量から求まる熱流速 (Q/A) と温度勾配との関係をグラフに表し、式 (1) の関係について考察する。また、材料の熱伝導率を求め、表 1-1 の値と比較し、試験ブロックの材質を特定する。

実験結果より得られたデータから、熱伝導率を導出する。

$$\begin{aligned} \text{熱流速}\,[W/m^2] &= \text{ヒーター加熱量}\,[W]/\ \text{断面積}\,[m^2] \\ &= 18.0/(0.025^2\pi) \\ &= 9167.3[W/m^2] \end{aligned} \tag{9}$$

5.3.1 $Q - \frac{dT}{dx}$ のグラフ

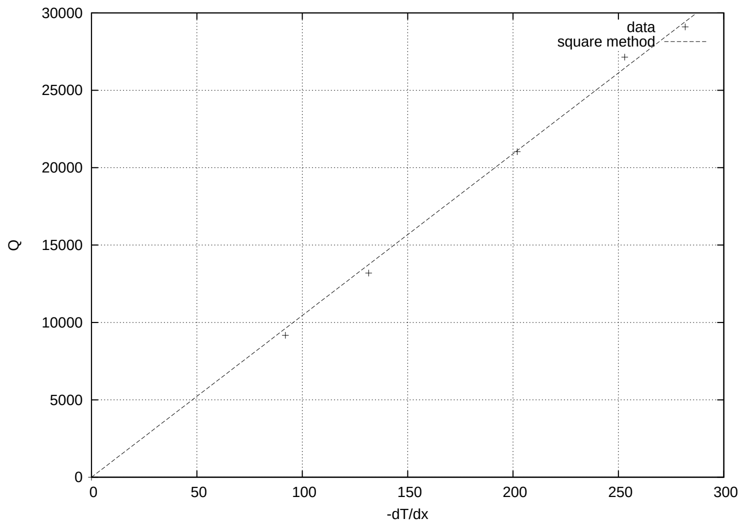

図 3: 加熱量に対する勾配

熱伝導率は、図 1 から最小自乗法により求めた。

$$Q = 104.494\frac{dT}{dx} \tag{10}$$

実験では、同じ実験装置を用いて実験をしたので、伝熱面積 A は一定の値を取る。よって、熱流速と温度勾配のグラフは図 3 のグラフの縦軸を A で割ったものである。このことから、熱流速と温度勾配には比例関係が成り立つものと考えられる。この関係は式 (1) のフーリエの関係式と等しい。

計算によって得られた熱伝達率は 104.494 であるので、銅・アルミニウム・黄銅のいずれかだとすれば、この試験片は黄銅であることがわかる。

表 1: 熱伝達率の物質値概要

物質	熱伝達率 $[W/(m \cdot K)]$
銅	398
アルミニウム	237
黄銅	121

5.4 上面の表面温度を外挿により求め、冷却水温との差について考察する。

試験ブロックの最上端の温度を求めるために、最小自乗法によって求めた式に x=60 を代入する。

$$y = -0.092x + 302.45 = 296.93 \tag{11}$$
$$y = -0.1315x + 305.887 = 297.997 \tag{12}$$
$$y = -0.202x + 311.63 = 299.51 \tag{13}$$
$$y = -0.253x + 316.395 = 301.22 \tag{14}$$

水温は 294.65K(21.5 ℃) であるので、ブロック最上端の温度と水温に温度差が残っていることがわかる。これは、固体と気体または液体の間の熱交換が行われているためであると考えられる。この現象を法則としてまとめたものがニュートンの冷却の法則であり、次の式で与えられる。

$$\dot{q} = \alpha(T - T_m) \tag{15}$$

5.5 熱電対についてまとめ、考察する。

5.5.1 補償導線の必要性

コンピュータで情報を収集するために、熱電対とコンピュータが数百メートル離れてしまうということがある。このような場合、全ての導線が熱電対と同じ導線だと理想的ではあるがコストがかかってしまうため、補償導線という導線に繋ぎ直して長距離を補完する。この補償導線は接続状況によって熱電対の精度を大きく下げてしまうおそれがあるので、以下の点に注意する必要が有る。

1. 熱電対とほぼ同等の熱起電力を持つ導線を補償導線として選定する
   ほぼ同等の熱起電力でなければ、補償導線区間の温度勾配に反応することができない。もしも補償導線区間に温度勾配が無い場合には補償導線として導線を使用しても良い。

2. 熱電対を十分に長く取る
   熱電対部分の長さを極端に短くしてしまうと、熱電対と補償導線の接合点である補償接点と基準温度接点との間に温度勾配が生じてしまうため、熱電対の性能よりも補償導線の性能が誤差に大きく影響してしまう。

5.5.2 定点法

物質の融点や沸点では温度が一定になる現象を利用したもので、±0.001 ℃の精度で校正が可能である。

5.5.3 比較法

標準熱電対と比較して校正する方法で、定点法に比べると精度は落ちるが、任意の温度で校正ができる。

5.5.4 保護管と被覆

保護管もしくは被覆をした製品がある。これらは外部の環境から熱電対の素線を守るために施す処理で、保護管は金属や非金属で素線を保護し耐熱性の向上や防滴効果、耐振動性、耐圧性など、様々な環境に対して熱電対が使えるようになる。それに対して被覆熱電対は柔軟性があり、自由な使い方ができ経済的であるが被覆を施しているだけなので脆い。

5.5.5 金属保護管の種類

材質の種類

- SUS-(Steel Use Stainless) ステンレス鋼材の頭文字を示す材料
  - SUS304-(18Cr-8Ni) 耐食性、溶接性、機械的性質が良好
  - SUS316-(18Cr-12Ni-2.5Mo)SUS304 よりも耐食性を向上させたもの
  - SUS310S-(25Cr-20Ni) 耐熱鋼として用いられる
- サンドビック P4(SUH446)-(25Cr-N)SUH(Steel Use Heat Resisting) とは、耐熱性に特化したもので、SUH446 は腐食に強い鋼。
- インコネル 600-(72Ni-15Cr-10Fe) 切削性が非常に悪い。高温における耐酸化性が極めて優れている高級耐熱合金で、酸・アルカリに極めて強い耐食合金でもある。
- カンタル A1-(22Cr-5.8Al)1400 ℃までの高温に耐えられる。
- ニッケル合金の 1 種で、耐熱性、耐食性に優れた材料切削性は悪い。

5.5.6 非金属管の種類

- シリコンカーバイド (SiC)-耐熱性があり、バンドギャップが広いことから次世代パワー半導体として使用され、機器の小型化、高効率化が進められている。
- シリコンナイトライド (Si_3N_4)-高温環境下で高強度、ベアリング部品やシャフト、軸受けにも利用される。

5.6 自作熱電対の挙動

実験で熱電対を作成し、温度と熱電対が生み出す起電力を測定した。

表 2: 金属保護管の種類 (参考文献 3 より)

材質	常用温度	最高使用温度	特性
普通鋼	800	800	耐酸性、酸化に弱く、還元に強い。
SuS-304	900	1,000	耐熱、耐食性に優れている。
SuS-316	900	1,000	Mo を含み耐熱、耐酸、耐アルカリに優れている。
SuS-310S	950	1,050	Ni- Cr を多く含み、高温での酸化性に優れている。
サンドビック P4	1,050	1,125	27Cr 鋼で、耐熱、耐蝕性に優れている。
インコネル 600	1,180	1,250	高温での酸化、還元雰囲気に優れている。
カンタル- A1	1,000	1,400	高温域での耐熱性良好。
ハステロイ- C	1,000	1,100	高温域での酸化、還元雰囲気、塩素ガスに強い。
ハステロイ- X	1,175	1,260	耐熱鋼、高温域での強度も大きい。
チタン	酸化 250 還元 1.000		低温域での耐食性良好、高温では酸化されやすい。
80Ni20Cr.	1,100	1,250	高温酸化雰囲気中で強度、耐食性良好、 硫化雰囲気には不適当。

表 3: 非金属熱電対の種類 (参考文献 3 より)

材質	常用温度	最高使用温度	型記号	特性
不透明石英管, 透明石英管	1,000	1,100	QT	透明の方が耐熱性良好、急熱、急冷に強い。
再結晶アルミナ	1,600	1,800	PT-0	PT-1 よりさらに優秀
JIS1 種アルミナ	1,500	1,600	PT-1	PT-2 より優れているが、急熱、急冷にやや弱い。
JIS2 種アルミナ	1,400	1,500	PT-2	熱ショック抵抗が良好。
シリコンカーバイト	1,500	1,700	SiC	熱伝導性、熱衝撃性良好。
シリコンナイトライド	1,550	1,750	SiN	上記性能に Si3N4 を含み溶融アルミ用に適す。

6 まとめ

この実験では、フーリエの法則が成り立つことを実験により求め、熱電対について調べ学習を行った。

7 参考文献

1. http://szksrv.isc.chubu.ac.jp/lms/lms1.html#section2
2. http://www.keyence.co.jp/keisokuki/special/labo/thermometry/point.jsp
3. http://www.daiko-ew.co.jp/tainetutai1-1.htm
4. https://www.semicon.sanken-ele.co.jp/guide/GaNSiC.html

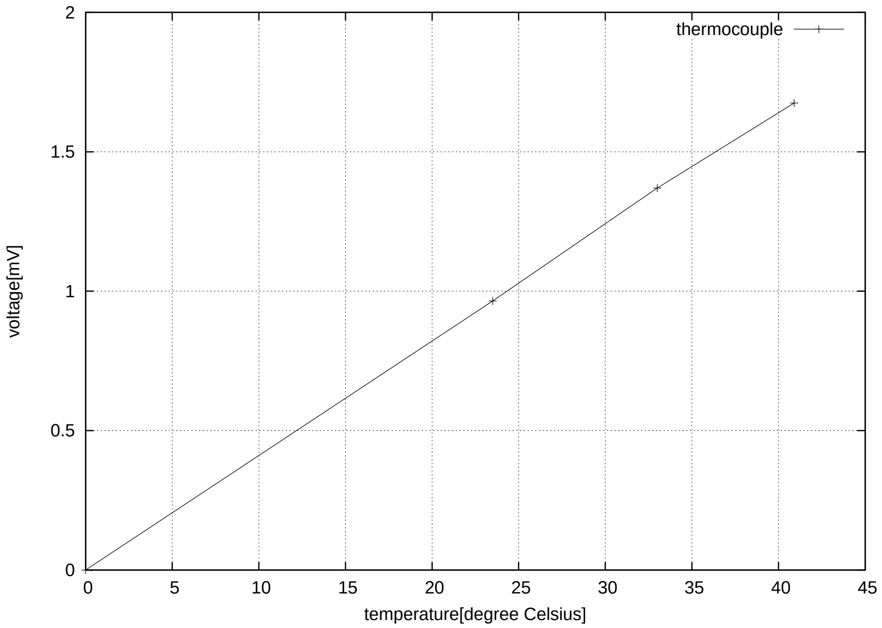

図 4: 熱電対の挙動

8　参考資料

今回の実験で最小二乗法を計算するために作成したプログラムを参考として添付します。

```
/*-------------------------------------------------------
title:最小二乗法プログラム
author:yusaku sakamoto
last update:2015.07.10
mail:n104069y@mail.kyuteck.jp
how to use:
このプログラムは、第 1 列に横軸データ、2 列目以降に縦軸データが入っているデータファイルを読み取る
ことを前提として作った最小二乗法の計算プログラムです。

コンパイルは g++を用いて行います。
$ make clean
$ make

で行って下さい。
実行方法は、行数× 列数を引数として設定して下さい。
$ ./main 行数 列数 ファイル名
[例]
$ ./main 5 5 ../data.dat
-------------------------------------------------------*/
#include <iostream>
#include <fstream>
#include <stdlib.h>
using namespace std;

#define BUF 20

int main(int argc,char *argv[])
```

```
{
  //引数の文字列を数字に変換
  //----------------------------------------------------
  const int row = atoi(argv[1]);
  const int column = atoi(argv[2]);
  const char *filename = argv[3];

  //ファイル読み取り用プログラム
  //----------------------------------------------------
  int i,j;
  double figure[row*column];
  fstream file;
  char character;
  char str[ row*column ][BUF];

  file.open(filename,ios::in);
  if( !file.is_open() ) perror("file open error");

  i=j=0;

  while(  file.read(&character, sizeof(character)) )
{
  if(character == '\t' || character == '\n'){
figure[i] = atof(str[i]);
i++;
j=0;
  }
  else str[i][j++] = character;
}
  file.close();

  //最小二乗法計算
  //----------------------------------------------------
  double x[row];
  double y[column-1][row];
  double A=0,B=0,C=0,D=0,E=0;
  double a[column-1];
  double b[column-1];
  int k;
  i=j=0;

  for(i=0;i<row;i++){
x[i] = figure[j++];
for(k=0;k<column-1;k++) y[k][i] = figure[j++];
  }

  for(j=0;j<column-1;j++){
A=0;
B=0;
C=0;
D=0;
E=0;

for(i=0;i<row;i++){
  A += y[j][i]*y[j][i];
  B += x[i]*x[i];
```

```
    C += y[j][i];
    D += x[i]*y[j][i];
    E += x[i];
  }

  a[j] = (row*D-C*E)/(row*B-E*E);
  b[j] = (B*C-D*E)/(row*B-E*E);

  cout << "第" << j+2 << "列目の計算結果" << endl;
  cout << "\t---->>a:" << a[j] << endl;
  cout << "\t---->>b:" << b[j] << endl;
    }

    return 0;
  }
```