

# 惑星探査用気象測器の開発： 3色温度計による気温測定

岡山大学 理学部 地球科学科

05427519 丸山 敬貴

# 要旨

火星着陸探査機に搭載する測器には、厳しい重量制限が課されており、小型軽量の測器が必要である。岡山大学地球および惑星大気科学研究室では、火星着陸探査機に搭載する次世代型の小型軽量な気温測定装置として「3色温度計」の開発を行っている。本研究は、「3色温度計の基礎実験」(大田, 2018)を発展させるべく、野外で実験を行い、実験で得られたデータから気温を導出し、3色温度計の性能評価を行った。実験をおこなった範囲において、昼と夜の気温測定にはそれぞれ0.4度、0.1度程度の誤差があった。誤差が生じた原因は不明であるが、気温導出に用いた各種のパラメタに含まれる誤差によって気温に誤差が生じた可能性が考えられる。また、気温の導出で風速を使っていることから、風速の測定精度も誤差要因となった可能性がある。

# 目次

## 第1章 火星表層環境探査

## 第2章 K型熱電対

### 2.1 器差補正

## 第3章 3色温度計

### 3.1 温度計の熱収支の式

### 3.2 3色温度計の気温測定原理

### 3.3 3色温度計の作成

### 3.4 3色温度計による気温導出

#### 3.4.1 熱交換係数

#### 3.4.2 日射の吸収率と熱放射の放射率

#### 3.4.3 表面積

## 第4章 実験

### 4.1 実験概要

### 4.2 実験(昼)

#### 4.2.1 実験結果

#### 4.2.2 考察

### 4.3 実験(夜)

#### 4.3.1 実験結果

#### 4.3.2 考察

## 第5章 まとめ

## 謝辞

## 参考文献

## 第1章 火星表層環境探査

火星無人探査は近年活発に行われており，その一例として，図1のような火星ローバーなどがある．この火星ローバーのような火星着陸探査機に搭載される測器には，厳しい重量制限があるため，小型軽量の測器が必要とされる．

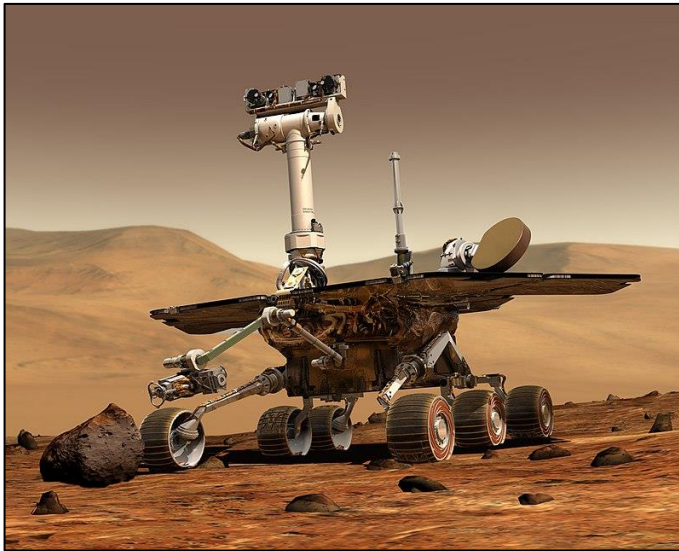


図1：火星ローバー

(写真は「<http://www.wikiwand.com/ja/火星探査機>」)

岡山大学地球および惑星大気科学研究室では，火星着陸探査機に搭載する次世代型の小型軽量の気温測定装置として「3色温度計」の開発を行っている．同研究室の大田は2018年の卒業研究で，「3色温度計」の基礎実験を行った(大田，2018)．大田は「3色温度計」を自作し，実験室で試験を行った．また，1回だけだが野外でも3色温度計で測定を行った．しかし，野外実験で得られたデータから気温を求めることは行っていない．また，大田(2018)は，熱交換係数に風速依存性があり，それを無視することはできないと指摘しているが，風速が気温測定にどれくらい影響を持っているか，定量的な評価をおこなっていない．

本研究は，大田の「3色温度計の基礎実験」を発展させるべく，野外で3色温度計と風速計を用いた同時観測をおこない，観測で得られたデータから気温を導出し，3色温度計の性能評価をおこなった．

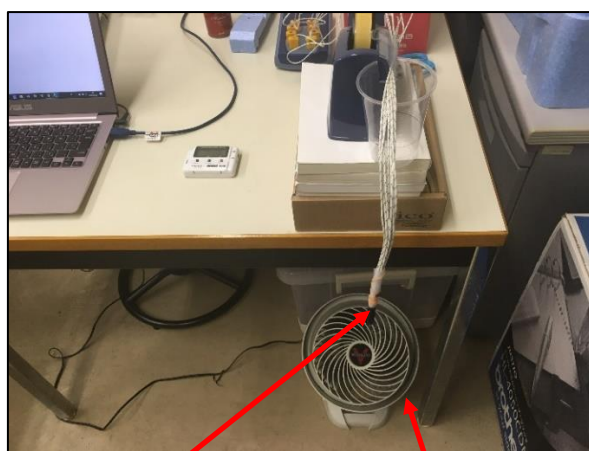
## 第2章 K型熱電対

本研究は、K型熱電対を用いて3色温度計を作成した。K型熱電対とは、クロメルとアルメルを構成材料とした温度センサで、測定範囲は-200～1200℃である(八光電機, 熱電対について: 熱電対の種類と特徴, <https://www.hakko.co.jp/qa/qakit/html/h05010.htm>)。本研究は8対のK型熱電対を使用し、それぞれにA, B, C, D, F, G, H, Jと識別のための符号を割りあてた<sup>1</sup>。熱電対の出力は、Pico Technology社のThermocouple Data Logger (TC-08)を用いて記録した。

### 2.1 器差補正

器差とは、温度計が実際に示す値と本来示すべき値の差である。それぞれの温度計が持つ器差をあらかじめ調べておいて、測定結果に含まれる器差を補正する。これを器差補正と呼ぶ。

夜間に、電気を消して空調を切った室内で、熱電対に送風機で風を送りながら空気の温度を測定した。8対の熱電対は束にして、8対が同じ空気の温度を測定するようにした。図2は、測定の様子である。図3は、束にした熱電対の測温部の写真である。



熱電対

送風機

図2：熱電対の器差補正実験



図3：熱電対の測温部

<sup>1</sup> 熱電対 E も存在しているのだが、故障の可能性があるため使用しないことにした。

夜間空気中測定は表 1 にまとめられているように、計 3 回行った。1 分おきに温度を測定した。

表 1：夜間空気中測定

|              |                        |
|--------------|------------------------|
| 夜間空気中測定 1 回目 | 2018/12/27 03:12-11:12 |
| 03:12        | 測定開始                   |
| 03:15        | 部屋の電気を消し、部屋退出          |
| 03:15-11:10  | (人の出入りなし)              |
| 11:10        | 部屋入室、電気をつける            |
| 11:12        | 測定終了                   |
| 夜間空気中測定 2 回目 | 2018/12/28 02:00-09:00 |
| 02:00        | 測定開始                   |
| 02:03        | 部屋の電気を消し、部屋退出          |
| 02:03-09:00  | (人の出入りなし)              |
| 09:00        | 測定終了                   |
| 夜間空気中測定 3 回目 | 2018/12/29 04:29-12:29 |
| 04:29        | 測定開始                   |
| 05:17        | 部屋の電気を消し、部屋退出          |
| 05:17-12:29  | (人の出入りなし)              |
| 12:29        | 測定終了                   |

図 4, 6, 8 は夜間空気中測定の結果である。図 5, 7, 9 は 8 対の熱電対が測定した温度の平均 $\bar{T}$ に対して、各熱電対が測定した温度 $T_x^*$ のずれ $T_x^*-\bar{T}$ を図にしたものである。X には A, B, C, D, F, G, H, J が入る。

$$\bar{T} = \frac{T_A^* + T_B^* + T_C^* + T_D^* + T_F^* + T_G^* + T_H^* + T_J^*}{8}$$

各熱電対の器差補正後の温度  $T_x$  は以下で与えられるものとして、各熱電対の補正量  $\Delta T_x$  を求めた。

$$T_x = T_x^* + \Delta T_x$$

$\Delta T_x$  を求めるためには、正確な温度が必要となる。本研究では、8 対の熱電対の平均である  $\bar{T}$  が正確な温度であると仮定して、 $\Delta T_x$  を以下の式で求めた。

$$\Delta T_x = \bar{T} - T_x^*$$

$\Delta T_x$  は、夜間空气中測定 1 回目と夜間空气中測定 2 回目の図 4, 5, 6, 7 においてオレンジ色で網掛けした時間(表 2)内に測定された  $\bar{T} - T_x^*$  の平均を用いて算出した(表 3). 夜間空气中測定 3 回目は、測定開始時刻が遅く、測定が安定する前に陽が昇ってしまったため、補正量の算出には用いないことにした.

表 2：夜間空气中測定 1, 2 回目の網掛けした時間

|      | 網掛けした時間                                         |
|------|-------------------------------------------------|
| 1 回目 | 04:32(測定開始の 1 時間 30 分後)-07:00(日射の影響がないと判断できる時間) |
| 2 回目 | 03:30(測定開始の 1 時間 30 分後)-07:00(日射の影響がないと判断できる時間) |

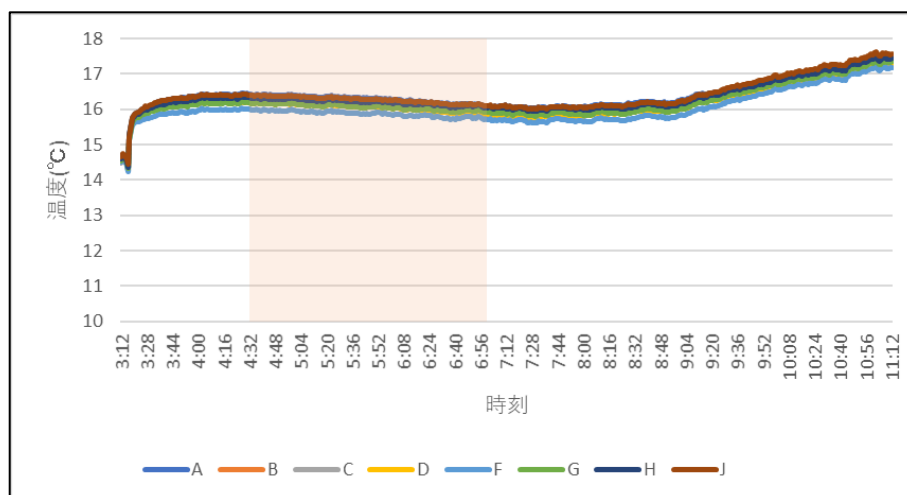


図 4：夜間空气中測定 1 回目の測定結果

横軸は時刻，縦軸は熱電対の示度(°C). 測定時間 480 分(12/27 03:12-11:12).

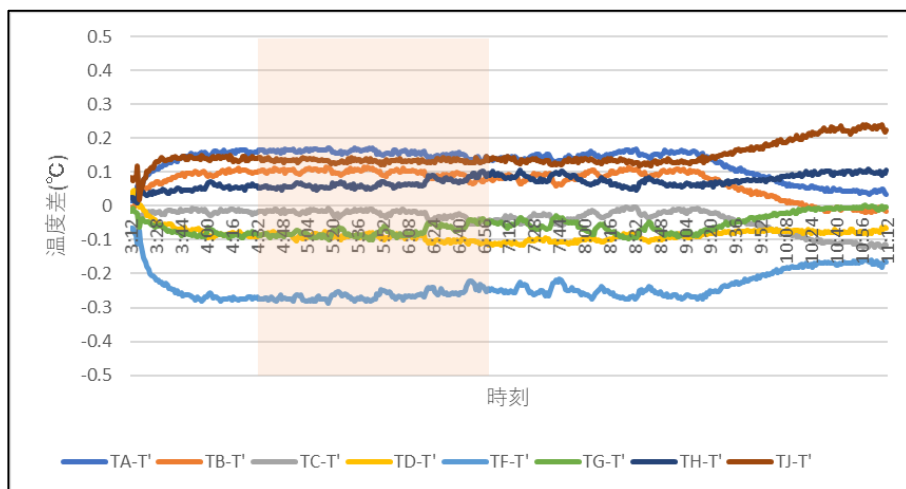


図 5：夜間空气中測定 1 回目の $T_x^* - \bar{T}$ の推移

横軸は時刻，縦軸が $T_x^* - \bar{T}$  (°C)．ここで $T_x^*$ は，X に A, B, C, D, F, G, H, J が入り，各熱電対の示度(°C)である． $\bar{T}$ は，熱電対 8 つの示度の平均(°C)である．

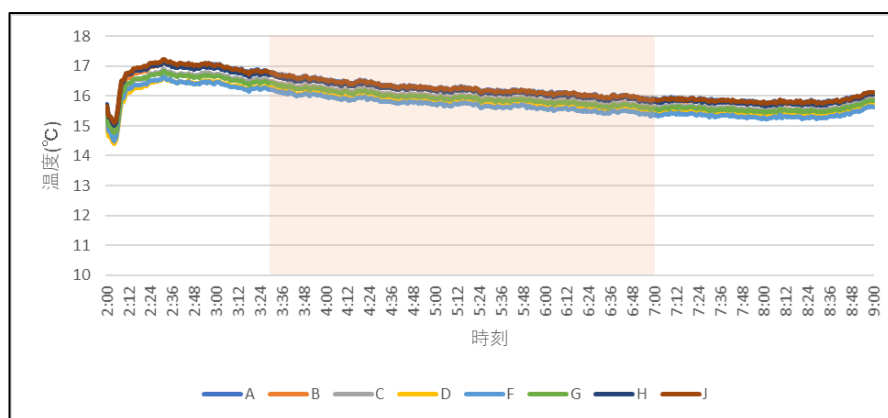


図 6：夜間空气中測定 2 回目の測定結果

横軸は時刻，縦軸は熱電対の示度(°C)．測定時間 420 分(12/28 02:00-09:00)．



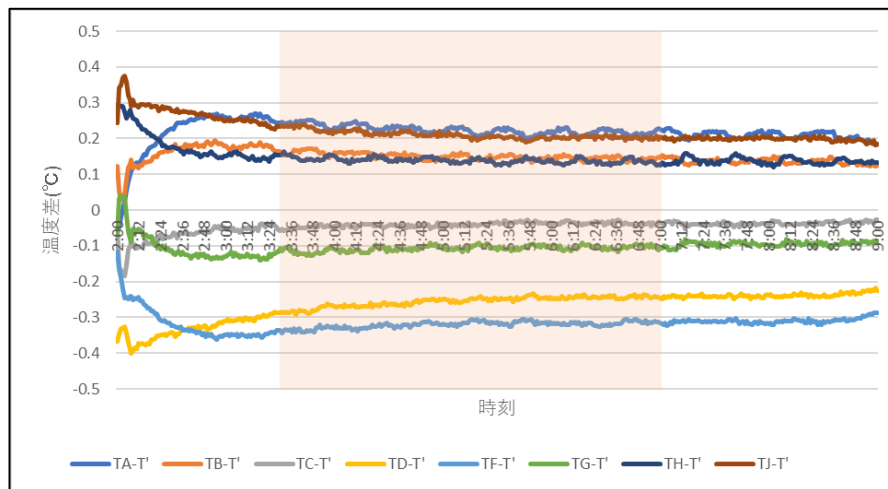


図 7：夜間空气中測定 2 回目の $T_x^* - \bar{T}$ の推移

横軸は時刻，縦軸が $T_x^* - \bar{T}$  (°C)．ここで $T_x^*$ は，X に A, B, C, D, F, G, H, J が入り，各熱電対の示度(°C)である． $\bar{T}$ は，熱電対 8 つの示度の平均(°C)である．

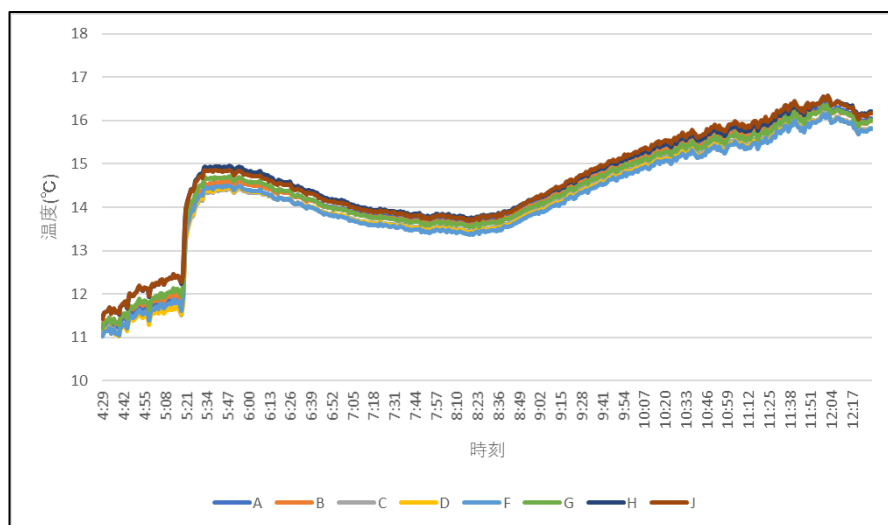


図 8：夜間空气中測定 3 回目の測定結果

横軸は時刻，縦軸は熱電対の示度(°C)．測定時間 480 分(12/29 04:29-12:29)．

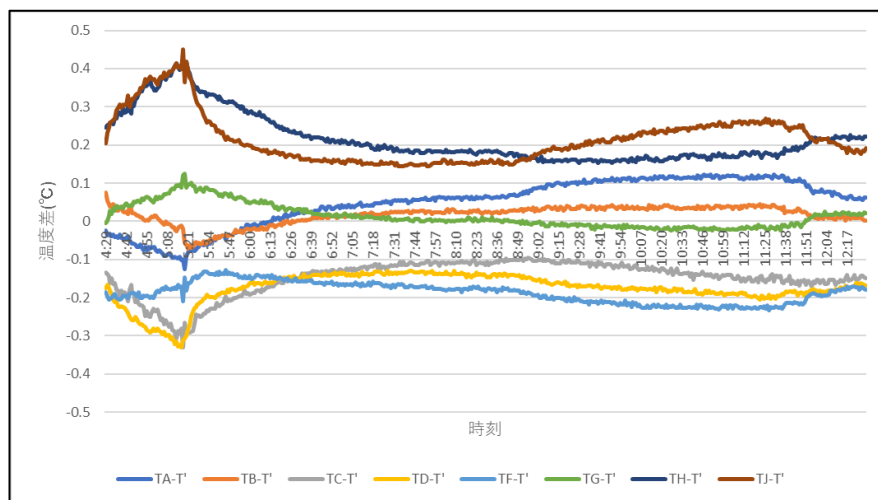


図 9：夜間空气中測定 2 回目の $T_x^* - \bar{T}$ の推移

横軸は時刻，縦軸が $T_x^* - \bar{T}$  (°C)．ここで $T_x^*$ は，X に A, B, C, D, F, G, H, J が入り，各熱電対の示度(°C)である． $\bar{T}$ は，熱電対 8 つの示度の平均(°C)である．

表 3：各熱電対の補正量 $\Delta T_x$

|   |       |
|---|-------|
| A | -0.20 |
| B | -0.13 |
| C | 0.03  |
| D | 0.19  |
| F | 0.30  |
| G | 0.09  |
| H | -0.11 |
| J | -0.18 |

### 第3章 3色温度計

#### 3.1 温度計の熱収支の式

温度計の熱収支の式は

$$C \frac{dT_c}{dt} = kA(T - T_c) + \alpha S + \varepsilon L - \varepsilon A \sigma T_c^4$$

ここで、それぞれの文字が示すものは表4にまとめた通りである。

表4：各文字の示すもの

|               |                                                                                     |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| $C$           | 温度計の熱容量[J/K]                                                                        |
| $T_c$         | 温度計の温度[K]                                                                           |
| $t$           | 時刻                                                                                  |
| $k$           | 熱交換係数[W/m <sup>2</sup> /K]                                                          |
| $A$           | 温度計の表面積[m <sup>2</sup> ]                                                            |
| $T$           | 気温[K]                                                                               |
| $\alpha$      | 日射の吸収率                                                                              |
| $S$           | 温度計に入射する日射強度[W]                                                                     |
| $\varepsilon$ | 熱放射の放射率                                                                             |
| $L$           | 温度計に入射する熱放射強度[W]                                                                    |
| $\sigma$      | ステファン・ボルツマン定数[W/m <sup>2</sup> /K <sup>4</sup> ] ( $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ ) |

左辺は温度計がもつ熱の変化率である。右辺第1項は温度計と周囲の空気との温度差によって生じる伝導による熱の輸送、右辺第2項は温度計に入射する日射による加熱、右辺第3項は温度計に入射する熱放射による加熱、右辺第4項は温度計が射出する熱放射による冷却、である。

温度計の熱収支の式には、温度計固有のパラメタ( $C$ ,  $k$ ,  $A$ ,  $\alpha$ ,  $\varepsilon$ )の他、環境によって値が変化するパラメタが3つ存在する。気温  $T$ 、日射強度  $S$ 、熱放射強度  $L$  である。よって、温度計の温度  $T_c$  を測っただけでは、気温  $T$  を知ることはできない。

アメダスの気温測定装置(図 10)は日除けと換気扇を使って気温の測定を行っている(気象庁ウェブページ, 観測測器について). 日除けを使うことで温度計に入射する日射を 0 にする(温度計の熱収支の式の右辺第 2 項を 0 にする). また, 換気扇を使うことで温度計とその周囲(日除けの内壁)の温度を大気と同じ温度にして, 温度計の熱収支の式の右辺第 3 項と右辺第 4 項がキャンセルするようにする. このようにすることで日射  $S$  と熱放射  $L$  の影響を取り除いて気温の測定をおこなう. アメダスは気温測定装置としてその性能が実証されたものであるが, 惑星探査機への搭載を考えると, 日除けと換気扇によって重量が大きくなることが問題となる.

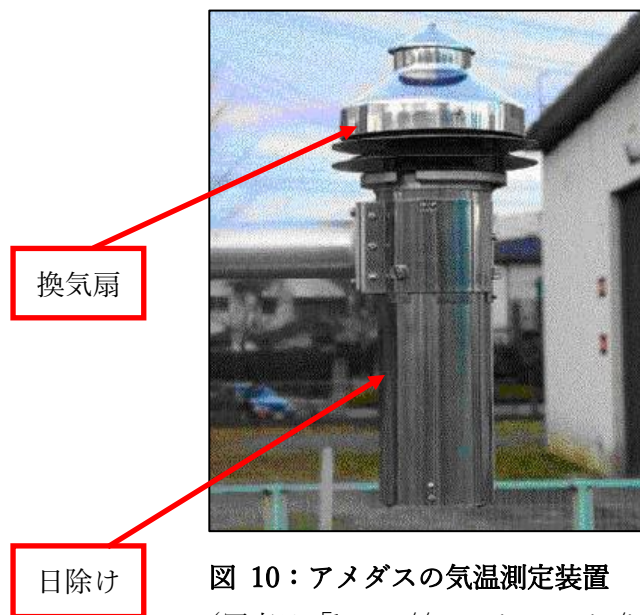


図 10 : アメダスの気温測定装置  
(写真は「<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/faq/faq11.html>」)

### 3.2 3 色温度計の気温測定原理

3 色温度計の「色」とは，日射の吸収率 $\alpha$ と熱放射の放射率 $\varepsilon$ である．色が異なる 3 つの温度計を用意して，それぞれで温度を測定すれば，熱収支の式を 3 つ立てることができる．例えば，白色，銀色，黒色の 3 色の温度計を用いると，以下の 3 つの式を得る．

$$C \frac{dT_w}{dt} = kA(T - T_w) + \alpha_w S + \varepsilon_w L - \varepsilon_w A \sigma T_w^4 \quad (1)$$

$$C \frac{dT_a}{dt} = kA(T - T_a) + \alpha_a S + \varepsilon_a L - \varepsilon_a A \sigma T_a^4 \quad (2)$$

$$C \frac{dT_b}{dt} = kA(T - T_b) + \alpha_b S + \varepsilon_b L - \varepsilon_b A \sigma T_b^4 \quad (3)$$

ここで各文字が示すものは表 5 にまとめたとおりである．

表 5：各文字が示すもの

|                 |               |
|-----------------|---------------|
| $T_w$           | 白色温度計の温度[K]   |
| $T_a$           | 銀色温度計の温度[K]   |
| $T_b$           | 黒色温度計の温度[K]   |
| $\alpha_w$      | 白色温度計の日射の吸収率  |
| $\alpha_a$      | 銀色温度計の日射の吸収率  |
| $\alpha_b$      | 黒色温度計の日射の吸収率  |
| $\varepsilon_w$ | 白色温度計の熱放射の放射率 |
| $\varepsilon_a$ | 銀色温度計の熱放射の放射率 |
| $\varepsilon_b$ | 黒色温度計の熱放射の放射率 |

色が異なれば 3 つの式は独立となる．温度計に固有のパラメタが既知であれば，3 つの式を連立して，3 つの未知数(気温  $T$ ，日射強度  $S$ ，熱放射強度  $L$ )を求めることができる．これが 3 色温度計の気温測定原理である (Schmidlin et al., 1986)．

### 3.3 3 色温度計の作成

図 11 は本研究で作成した 3 色温度計である．器差補正済みの K 型熱電対 A, B, C, D, F, G の測温部に，熱電対テープを貼りつけて，薄い板の形に成形した．厚さは約 0.2mm．大きさは大(10mm×10mm)と小(5mm×5mm)である．着色は，白色と黒色の絵の具とアルミホイルを用いて行った．作成した各熱電対の大きさと色は表 6 にまとめた通りである．



図 11：作成した 3 色温度計

熱電対は左から A, B, C, D, G. 熱電対 A の左にある円盤は 10 円硬貨.

表 6：各熱電対の大きさと色

| 熱電対 | 大きさ | 色 |
|-----|-----|---|
| A   | 大   | 白 |
| B   | 大   | 銀 |
| C   | 大   | 黒 |
| D   | 小   | 白 |
| F   | 小   | 銀 |
| G   | 小   | 黒 |

### 3.4 3 色温度計による気温導出

3 色温度計によって測定した温度と，風速計によって測定した風速を用いて，以下の手順で気温の導出を行った．

各温度計の熱収支の式は

$$C \frac{dT_w}{dt} = kA(T - T_w) + \alpha_w S + \varepsilon_w L - \varepsilon_w A \sigma T_w^4 \quad (1)$$

$$C \frac{dT_a}{dt} = kA(T - T_a) + \alpha_a S + \varepsilon_a L - \varepsilon_a A \sigma T_a^4 \quad (2)$$

$$C \frac{dT_b}{dt} = kA(T - T_b) + \alpha_b S + \varepsilon_b L - \varepsilon_b A \sigma T_b^4 \quad (3)$$

である．式を簡単にするため， $d/dt=0$  とした．

$$0 = kA(T - T_w) + \alpha_w S + \varepsilon_w L - \varepsilon_w A \sigma T_w^4 \quad (4)$$

$$0 = kA(T - T_a) + \alpha_a S + \varepsilon_a L - \varepsilon_a A \sigma T_a^4 \quad (5)$$

$$0 = kA(T - T_b) + \alpha_b S + \varepsilon_b L - \varepsilon_b A \sigma T_b^4 \quad (6)$$

$\varepsilon_w = \varepsilon_b$  を仮定し，(4)式-(6)式より  $L$  を消去して， $S$  の式を得る．

$$S = \frac{kA(T_w - T_b) + \varepsilon_w A \sigma (T_w^4 - T_b^4)}{\alpha_w - \alpha_b} \quad (7)$$

(4)式-(5)式  $\times \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_a}$  より， $L$  を消去する．

$$T = \frac{\varepsilon_w T_a - \varepsilon_a T_w - \frac{\varepsilon_w \varepsilon_a \sigma (T_w^4 - T_a^4)}{k} + \frac{S(\varepsilon_a \alpha_w - \varepsilon_w \alpha_a)}{kA}}{\varepsilon_w - \varepsilon_a}$$

上式に(7)式を代入して， $T$  の式を得る．

$$T = \frac{\varepsilon_w T_a - \varepsilon_a T_w - \frac{\varepsilon_w \varepsilon_a \sigma (T_w^4 - T_a^4)}{k} + \frac{(T_w - T_b) + \frac{\varepsilon_w \sigma (T_w^4 - T_b^4)}{k}}{\alpha_w - \alpha_b} (\varepsilon_a \alpha_w - \varepsilon_w \alpha_a)}{\varepsilon_w - \varepsilon_a}$$

(4)式  $\times \frac{\alpha_b}{\alpha_w}$  -(6)式より， $L$  の式を得る．

$$L = \frac{kAT(\alpha_w - \alpha_b) + kA(\alpha_b T_w - \alpha_w T_b) + \varepsilon_w A \sigma (\alpha_b T_w^4 - \alpha_w T_b^4)}{\varepsilon_w (\alpha_b - \alpha_w)}$$

### 3.4.1 熱交換係数

熱交換係数  $k$  は, 田中(1995)によって与えられた式を使用した.

$$k = 3.2 + 2.6V - 0.0065V^2$$

ここで  $V$  は風速(m/s)である.

### 3.4.2 日射の吸収率と熱放射の放射率

温度計の日射の吸収率 $\alpha$ と熱放射の放射率 $\varepsilon$ は表 7 の値を使用した. これは, 塗料の典型的な値として小林(2001)にまとめられているものである.

表 7: 日射の吸収率 $\alpha$ と熱放射の放射率 $\varepsilon$  (小林, 2001)

|     | 日射の吸収率 $\alpha$ | 熱放射の放射率 $\varepsilon$ |
|-----|-----------------|-----------------------|
| 白   | 0.2             | 0.9                   |
| アルミ | 0.13            | 0.065                 |
| 黒   | 0.9             | 0.9                   |

### 3.4.3 表面積

温度計の表面積  $A$  は大と小でそれぞれ以下の値を用いた. 本研究は厚さは無視した.

$$A_{大} = 10^{-2} \times 10^{-2} \times 2 = 2 \times 10^{-4} [\text{m}^2]$$

$$A_{小} = (5 \times 10^{-3}) \times (5 \times 10^{-3}) \times 2 = 5 \times 10^{-5} [\text{m}^2]$$



## 第4章 実験

### 4.1 実験概要

3色温度計の性能を評価するため、3色温度計と風速計を用いて野外実験を行った。場所はアメダス(岡山)の隣、水平距離約10mの位置である。図12は野外実験の時の写真である。脚立を設置し、脚立の上部に3色温度計を取り付けた。3色温度計の測温部は、脚立から南の方向に飛び出すように取り付けた。アメダスで測定される気温と直接比較できるようにするため、3色温度計の測温部の高さはアメダス(気象庁ウェブページ、観測測器について)と同じ地上1.5mとした。また、脚立の上に超音波風速計(Netatmo)を設置した。昼5回と夜3回の観測をおこなった(表8)。



図12：野外実験

この写真の撮影時には、風速計を設置していないため、風速計は写っていない。

表 8：観測日時

|            |             |   |
|------------|-------------|---|
| 2018/12/29 | 18:10-20:00 | 夜 |
| 2018/12/30 | 11:50-14:50 | 昼 |
| 2019/01/12 | 19:05-22:05 | 夜 |
| 2019/01/13 | 12:35-15:16 | 昼 |
| 2019/01/18 | 09:36-12:11 | 昼 |
| 2019/01/18 | 14:13-16:47 | 昼 |
| 2019/01/22 | 02:18-06:18 | 夜 |
| 2019/01/22 | 09:35-11:35 | 昼 |

## 4.2 実験(昼)

昼の実験結果と、実験結果を用いて導出した気温、日射強度、熱放射強度の結果を示す。天候は岡山大学理学部望遠鏡のスカイモニター(<https://epa.desc.okayama-u.ac.jp/~astro/>)を用いて確認した。風速をすべての観測で測定することができなかったため、風速の測定がない観測はアメダスの風速を代用した。アメダスの風速測定は、観測点から約 2.8km 離れたビルの屋上(地上 69.9m)でおこなわれている(気象庁(2018) 地域観測所一覧。 [https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/amedas/ame\\_master.pdf](https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/amedas/ame_master.pdf))。

### 4.2.1 実験結果

- 2018/12/30 11:50-14:50

この時の天候は、晴れ時々曇りであった。図 13 は 3 色温度計の測定結果、図 14 はアメダスの風速である。この観測では風速の測定をおこなわなかったため、アメダスの風速を利用した。図 15 と 16 は、測定結果から導出した気温、日射強度、熱放射強度である。

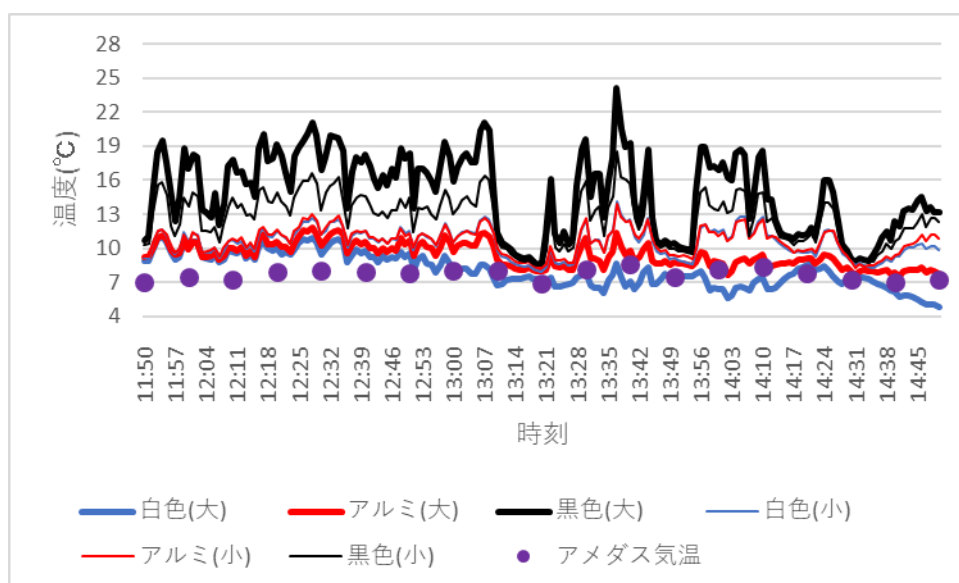


図 13：3 色温度計の測定結果

横軸は時刻，縦軸は温度(°C)．青色は白色温度計の温度，赤色は銀色温度計の温度，黒色は黒色温度計の温度で，太線は大きい温度計，細線は小さい温度計である．紫の点はアメダス(岡山)の気温([https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min\\_s1.php?prec\\_no=66&block\\_no=47768&year=2018&month=12&day=30&view=](https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min_s1.php?prec_no=66&block_no=47768&year=2018&month=12&day=30&view=))．

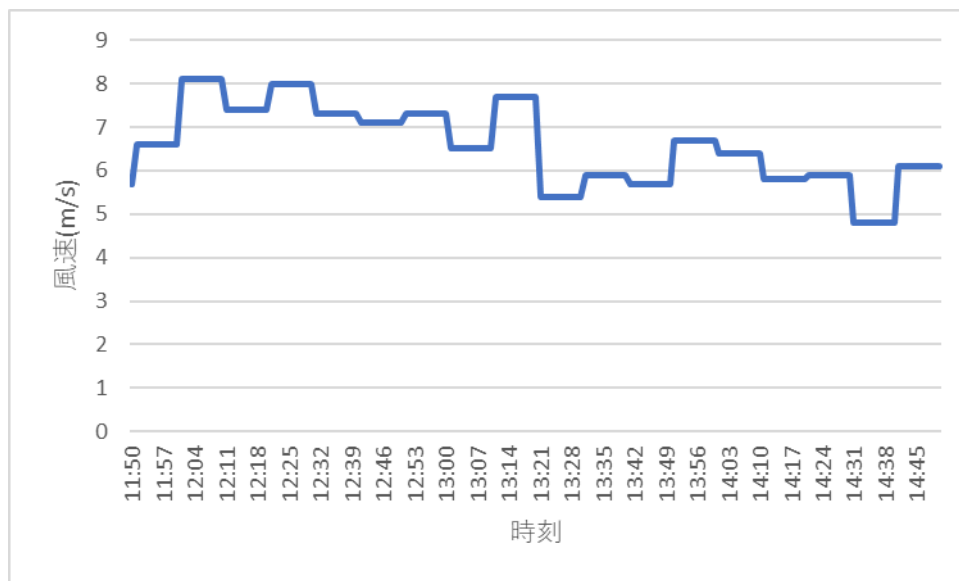


図 14：風速(アメダス)

横軸は時刻，縦軸は風速(m/s)。

([https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min\\_s1.php?prec\\_no=66&block\\_no=47768&year=2018&month=12&day=30&view=](https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min_s1.php?prec_no=66&block_no=47768&year=2018&month=12&day=30&view=))

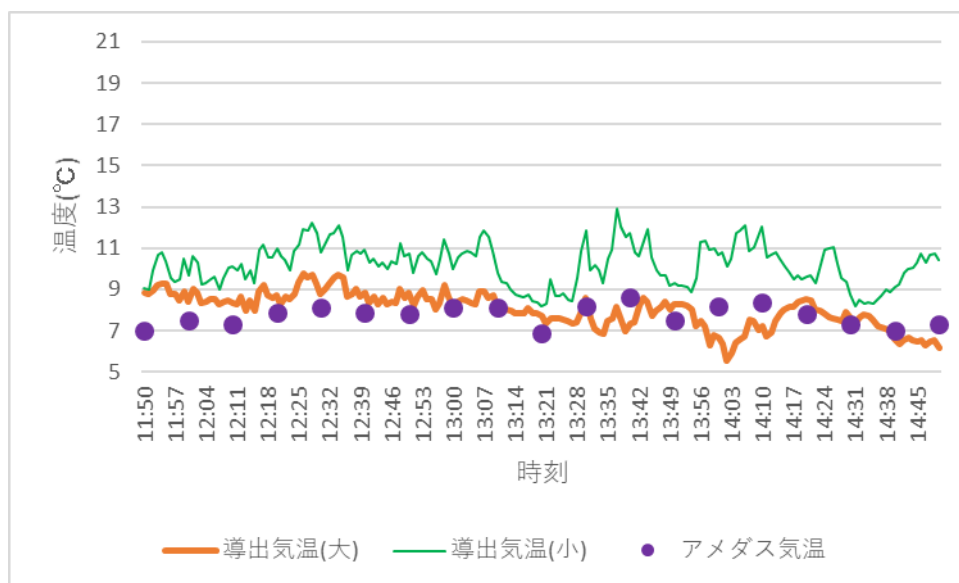


図 15：3色温度計によって導出した気温とアメダス気温の比較

横軸は時刻，縦軸は温度(°C)。オレンジの太線は大きさが大の3色温度計で導出した気温，緑の細線は小の3色温度計で導出した気温。紫の点はアメダス(岡山)の気温  
([https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min\\_s1.php?prec\\_no=66&block\\_no=47768&year=2018&month=12&day=30&view=](https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min_s1.php?prec_no=66&block_no=47768&year=2018&month=12&day=30&view=)).

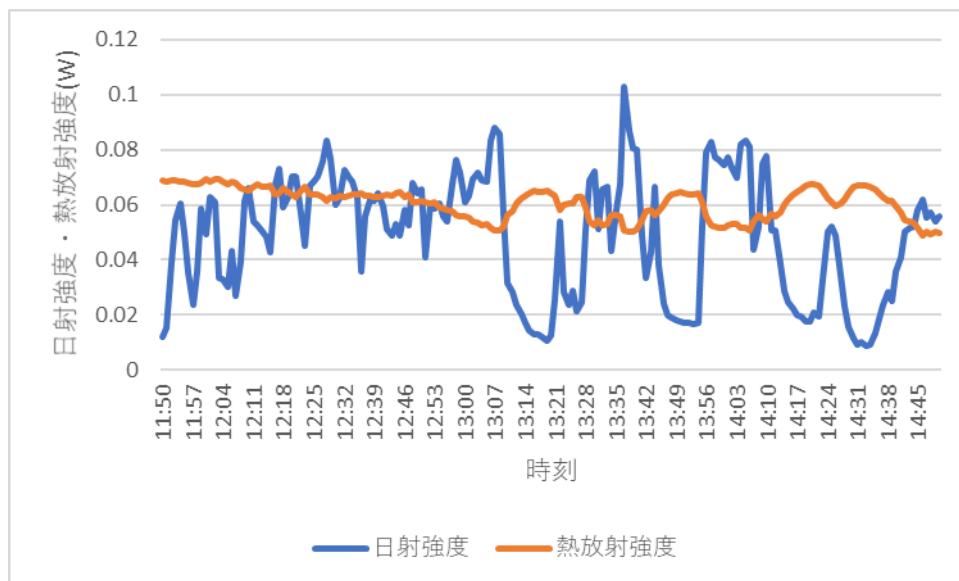


図 16：3 色温度計によって導出した日射強度と熱放射強度

横軸は時刻，縦軸は日射強度(W)と熱放射強度(W)．大きさが大の 3 色温度計を用いて導出した値．

● 2019/01/13 12:35-15:16

この時の天候は，少し雲が出ている晴れであった．図 17 は 3 色温度計の測定結果，図 18 はアメダスの風速である．この観測では風速の測定をおこなわなかったため，アメダスの風速を利用した．図 19 と 20 は，測定結果から導出した気温，日射強度，熱放射強度である．14:11 から 14:13 は，建物の影が 3 色温度計を覆いそうだったので，影から遠ざかるほうに 3 色温度計を移動させた．

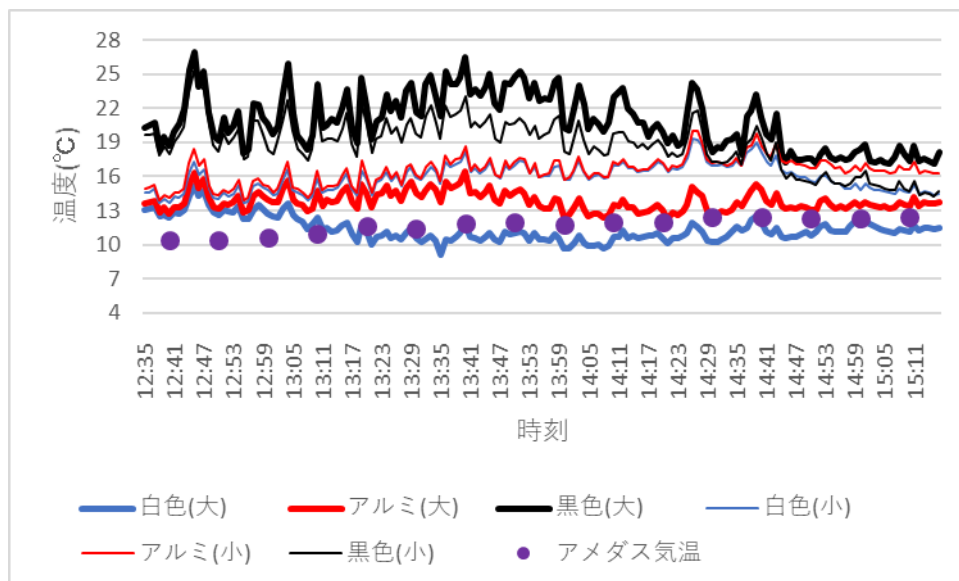


図 17：3 色温度計の測定結果

横軸は時刻，縦軸は温度(°C)．青色は白色温度計の温度，赤色は銀色温度計の温度，黒色は黒色温度計の温度で，太線は大きい温度計，細線は小さい温度計である．紫の点はアメダス(岡山)の気温([https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min\\_s1.php?prec\\_no=66&block\\_no=47768&year=2019&month=1&day=13&view=](https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min_s1.php?prec_no=66&block_no=47768&year=2019&month=1&day=13&view=)).

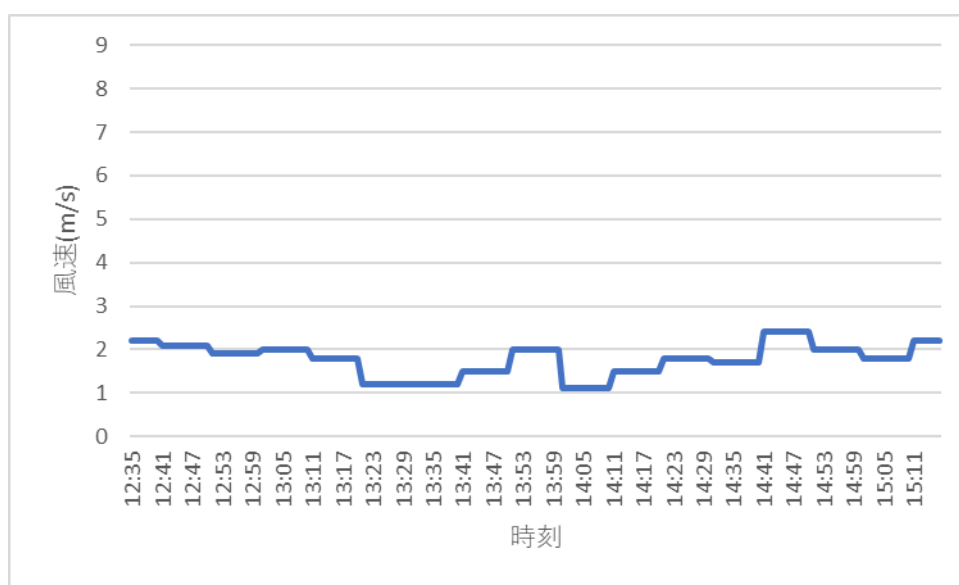


図 18：風速(アメダス)

横軸は時刻，縦軸は風速(m/s)．

([https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min\\_s1.php?prec\\_no=66&block\\_no=47768&year=2019&month=1&day=13&view=](https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min_s1.php?prec_no=66&block_no=47768&year=2019&month=1&day=13&view=))

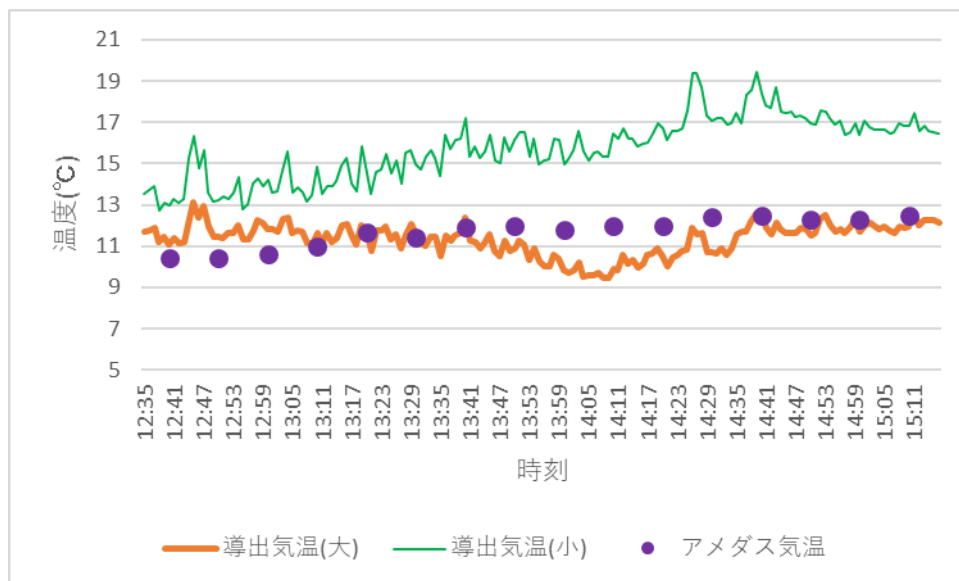


図 19：3 色温度計によって導出した気温とアメダス気温の比較

横軸は時刻，縦軸は温度(°C)．オレンジの太線は大きさが大の 3 色温度計で導出した気温，緑の細線は小の 3 色温度計で導出した気温．紫の点はアメダス(岡山)の気温 ([https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min\\_s1.php?prec\\_no=66&block\\_no=47768&year=2019&month=1&day=13&view=](https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min_s1.php?prec_no=66&block_no=47768&year=2019&month=1&day=13&view=)).

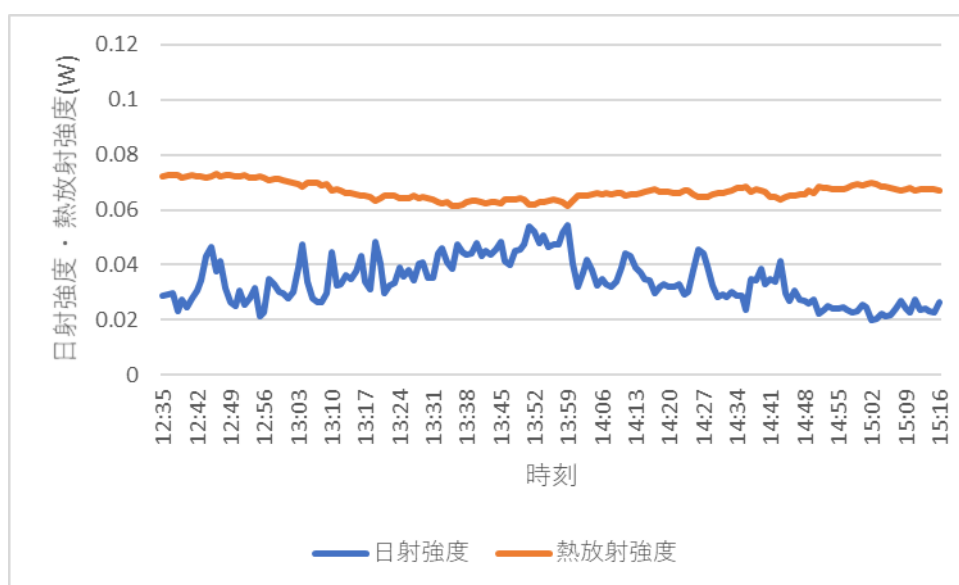


図 20：3 色温度計によって導出した日射強度と熱放射強度

横軸は時刻，縦軸は日射強度(W)と熱放射強度(W)．大きさが大の 3 色温度計を用いて導出した値．

● 2019/01/18 09:36-12:11

この時の天候は、曇りであった。図 21 は 3 色温度計の測定結果、図 22 はアメダスの風速である。この観測では風速の測定をおこなわなかったため、アメダスの風速を利用した。図 23 と 24 は、測定結果から導出した気温、日射強度、熱放射強度である。12:09 から雪が降った。

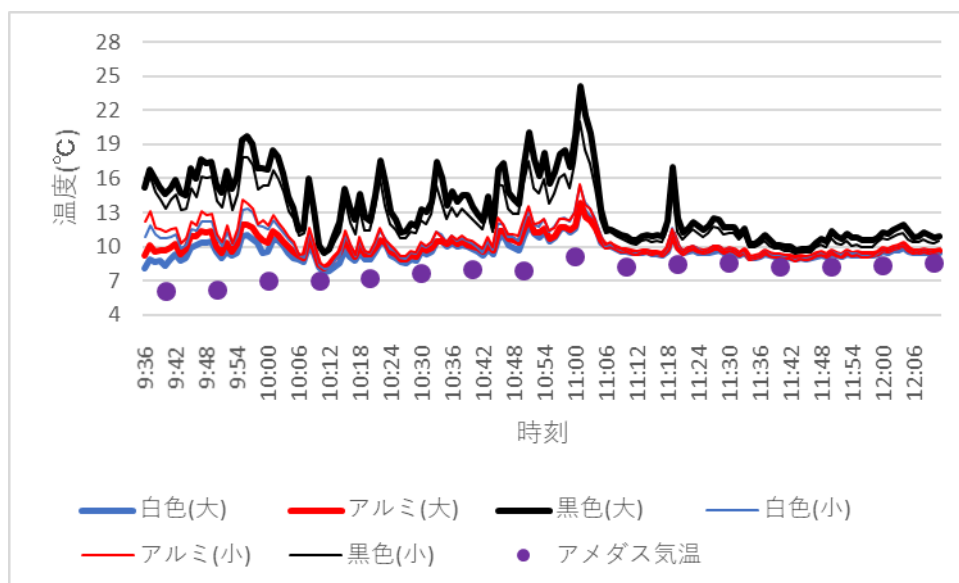


図 21 : 3 色温度計の測定結果

横軸は時刻、縦軸は温度(°C)。青色は白色温度計の温度、赤色は銀色温度計の温度、黒色は黒色温度計の温度で、太線は大きい温度計、細線は小さい温度計である。紫の点はアメダス(岡山)の気温([https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min\\_s1.php?prec\\_no=66&block\\_no=47768&year=2019&month=1&day=18&view=](https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min_s1.php?prec_no=66&block_no=47768&year=2019&month=1&day=18&view=))。12:09 から雪が降った。



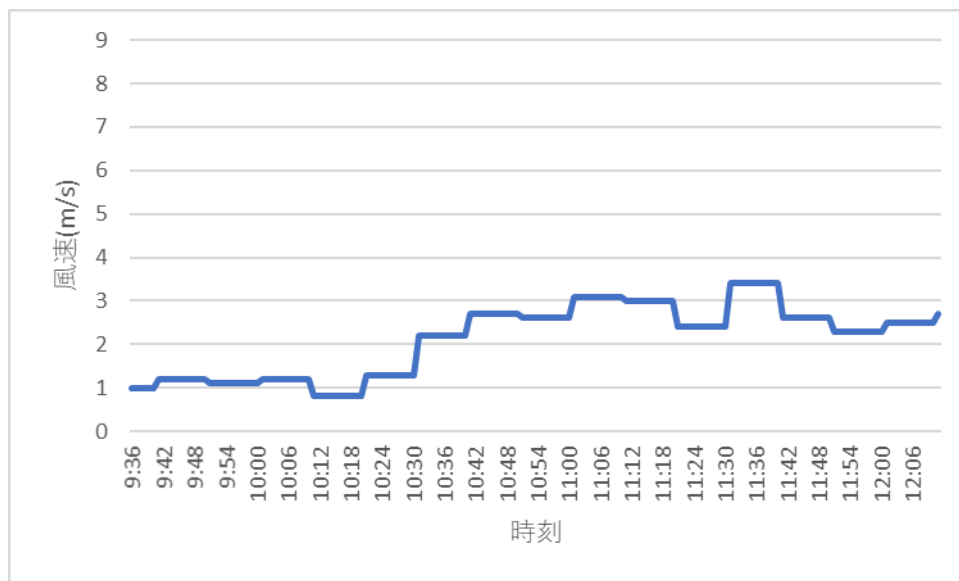


図 22：風速(アメダス)

横軸は時刻，縦軸は風速(m/s).

([https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min\\_s1.php?prec\\_no=66&block\\_no=47768&year=2019&month=1&day=18&view=](https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min_s1.php?prec_no=66&block_no=47768&year=2019&month=1&day=18&view=))

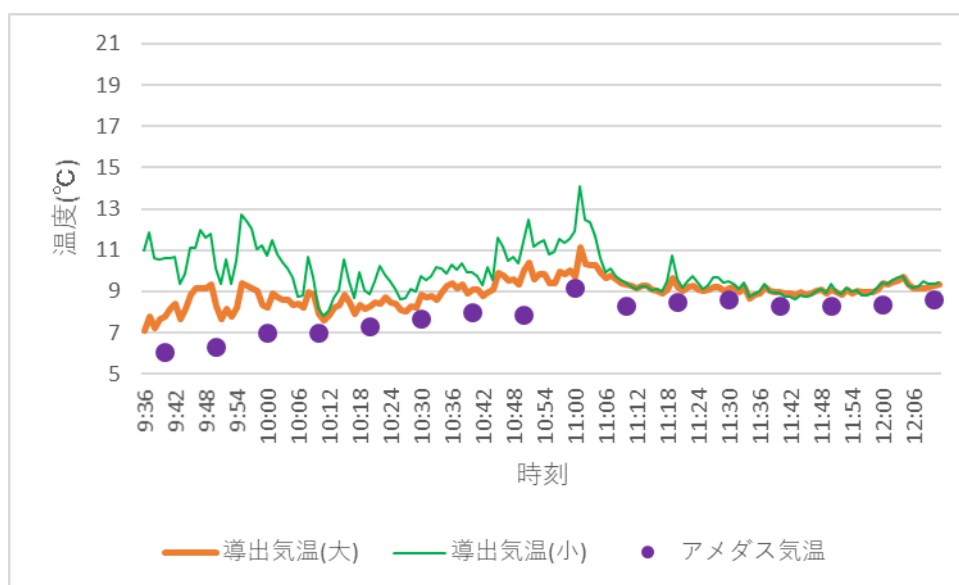


図 23：3色温度計によって導出した気温とアメダス気温の比較

横軸は時刻，縦軸は温度(°C). オレンジの太線は大きさが大の3色温度計で導出した気温，緑の細線は小の3色温度計で導出した気温. 紫の点はアメダス(岡山)の気温  
([https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min\\_s1.php?prec\\_no=66&block\\_no=47768&year=2019&month=1&day=18&view=](https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min_s1.php?prec_no=66&block_no=47768&year=2019&month=1&day=18&view=)).

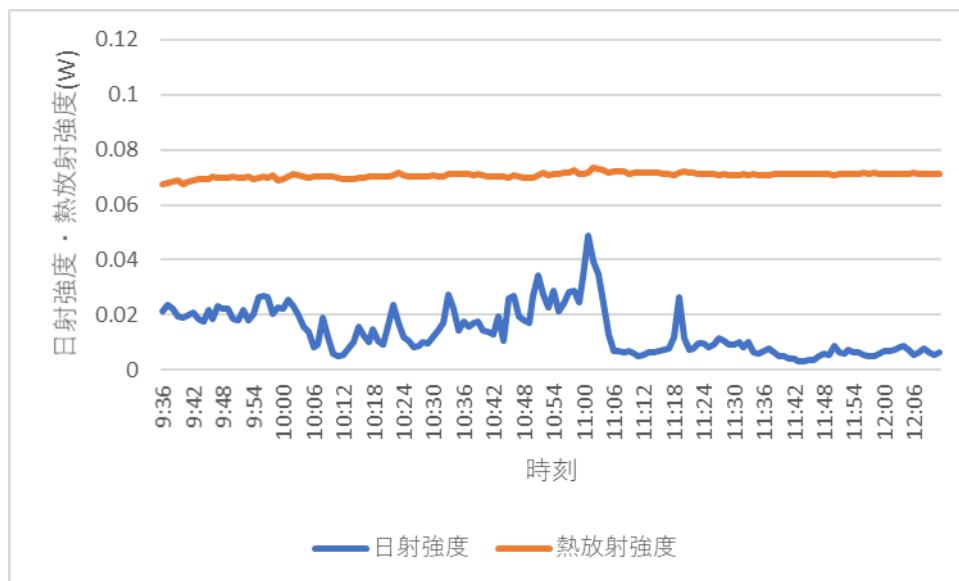


図 24：3 色温度計によって導出した日射強度と熱放射強度

横軸は時刻，縦軸は日射強度(W)と熱放射強度(W)．大きさが大の 3 色温度計を用いて導出した値．

- 2019/01/18 14:13-16:47

この時の天候は，曇りであった．図 25 は 3 色温度計の測定結果，図 26 はアメダスの風速である．この観測では風速の測定をおこなわなかったため，アメダスの風速を利用した．図 27 と 28 は，測定結果から導出した気温，日射強度，熱放射強度である．15:37 から建物の影が 3 色温度計を覆った

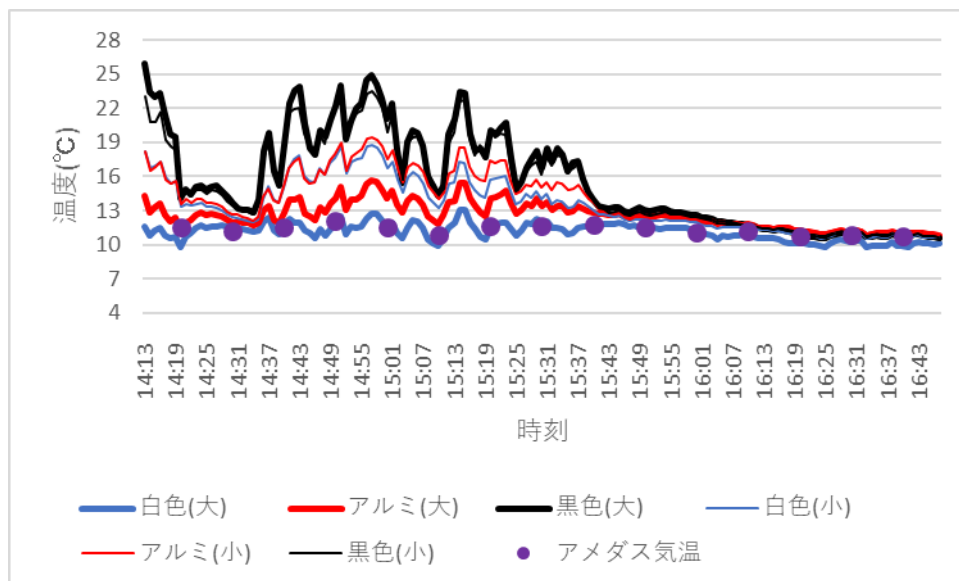


図 25 : 3 色温度計の測定結果

横軸は時刻，縦軸は温度(°C)．青色は白色温度計の温度，赤色は銀色温度計の温度，黒色は黒色温度計の温度で，太線は大きい温度計，細線は小さい温度計である．紫の点はアメダス(岡山)の気温([https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min\\_s1.php?prec\\_no=66&block\\_no=47768&year=2019&month=1&day=18&view=](https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min_s1.php?prec_no=66&block_no=47768&year=2019&month=1&day=18&view=)).

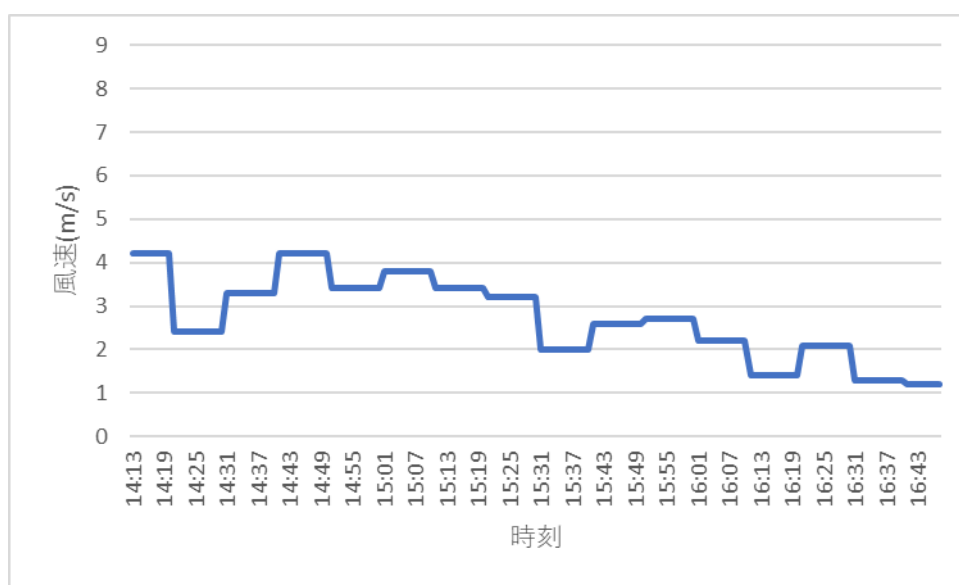


図 26 : 風速(アメダス)

横軸は時刻，縦軸は風速(m/s)．

([https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min\\_s1.php?prec\\_no=66&block\\_no=47768&year=2019&month=1&day=18&view=](https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min_s1.php?prec_no=66&block_no=47768&year=2019&month=1&day=18&view=))

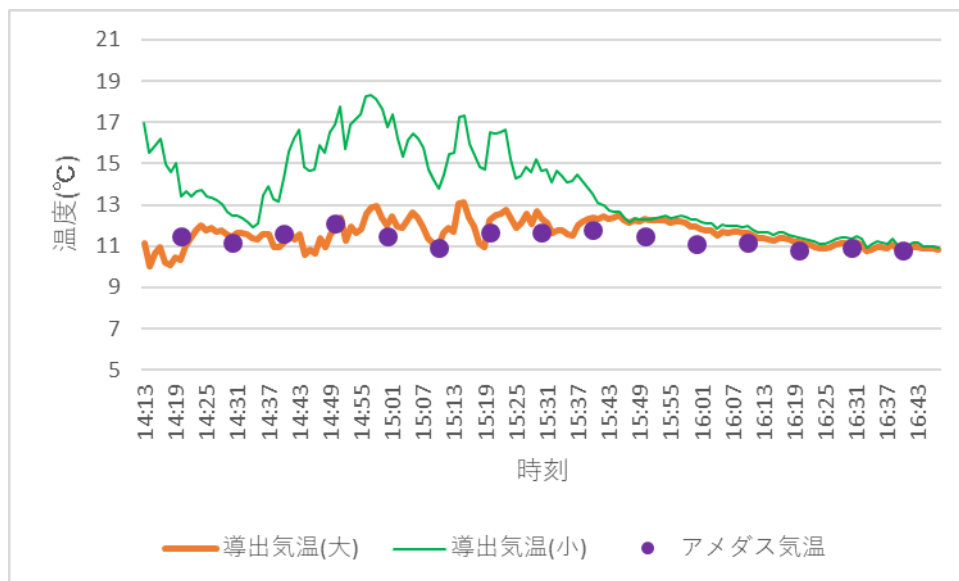


図 27：3 色温度計によって導出した気温とアメダス気温の比較

横軸は時刻，縦軸温度(°C)．オレンジの太線は大きさが大の 3 色温度計で導出した気温，緑の細線は小の 3 色温度計で導出した気温．紫の点はアメダス(岡山)の気温 ([https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min\\_s1.php?prec\\_no=66&block\\_no=47768&year=2019&month=1&day=18&view=](https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min_s1.php?prec_no=66&block_no=47768&year=2019&month=1&day=18&view=))．

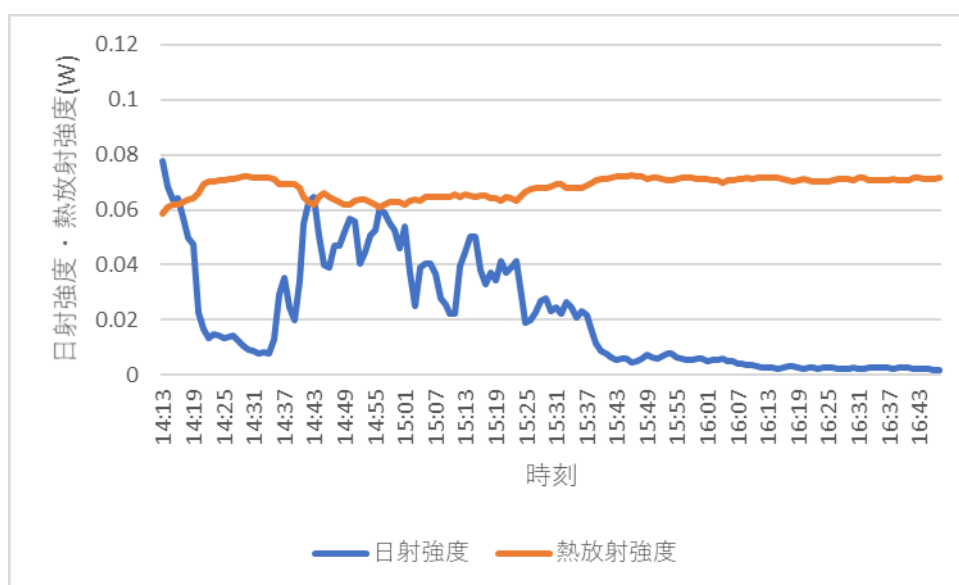


図 28：3 色温度計によって導出した日射強度と熱放射強度

横軸は時刻，縦軸は日射強度(W)と熱放射強度(W)．大きさが大の 3 色温度計を用いて導出した値．

● 2019/01/22 09:35-11:35

この時の天候は、晴れ時々曇りであった。図 29 は 3 色温度計の測定結果、図 30 は同じ場所で測定した風速である。図 31 と 32 は、測定結果から導出した気温、日射強度、熱放射強度である。

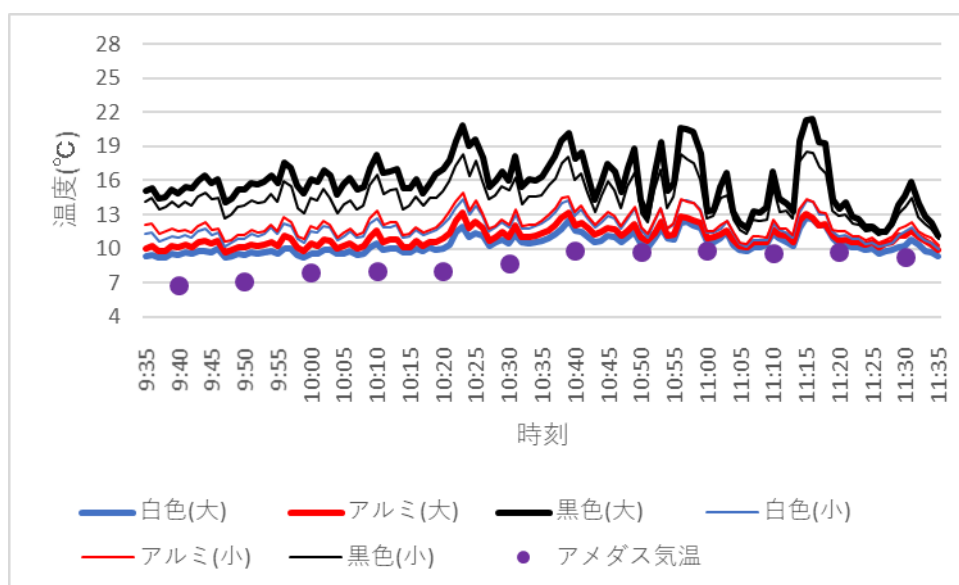


図 29 : 3 色温度計の測定結果

横軸は時刻，縦軸は温度(°C)．青色は白色温度計の温度，赤色は銀色温度計の温度，黒色は黒色温度計の温度で，太線は大きい温度計，細線は小さい温度計である．紫の点はアメダス(岡山)の気温([https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min\\_s1.php?prec\\_no=66&block\\_no=47768&year=2019&month=1&day=22&view=](https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min_s1.php?prec_no=66&block_no=47768&year=2019&month=1&day=22&view=)).

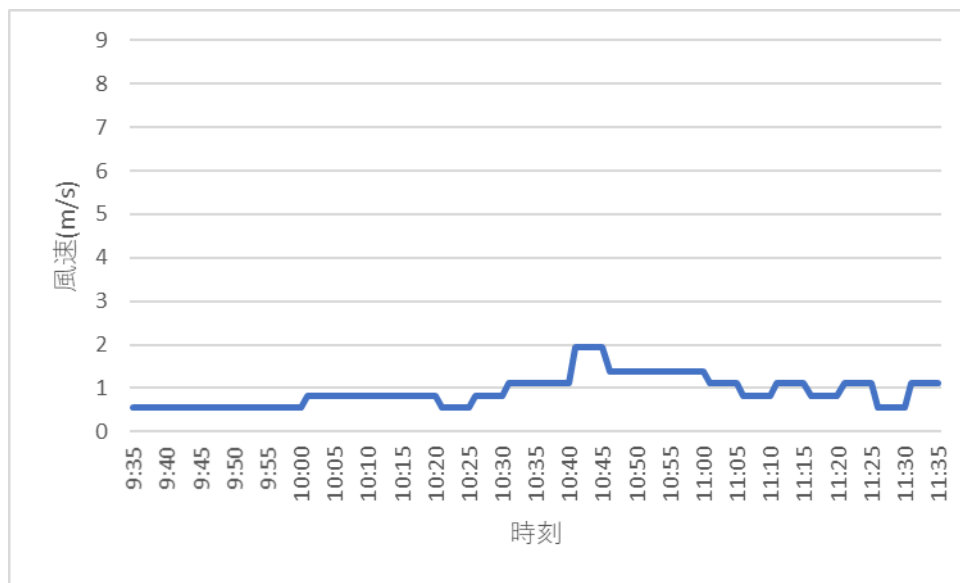


図 30：風速(Netatmo)

横軸は時刻，縦軸は風速(m/s).

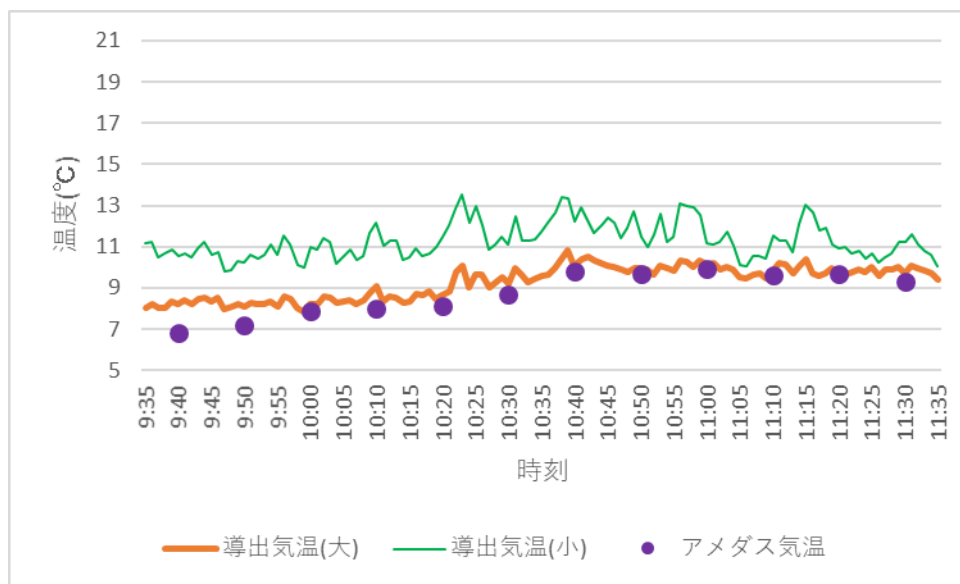


図 31：3色温度計によって導出した気温とアメダス気温の比較

横軸は時刻，縦軸は温度(°C). オレンジの太線は大きさが大の3色温度計で導出した気温，緑の細線は小の3色温度計で導出した気温. 紫の点はアメダス(岡山)の気温 ([https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min\\_s1.php?prec\\_no=66&block\\_no=47768&year=2019&month=1&day=22&view=](https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min_s1.php?prec_no=66&block_no=47768&year=2019&month=1&day=22&view=)).

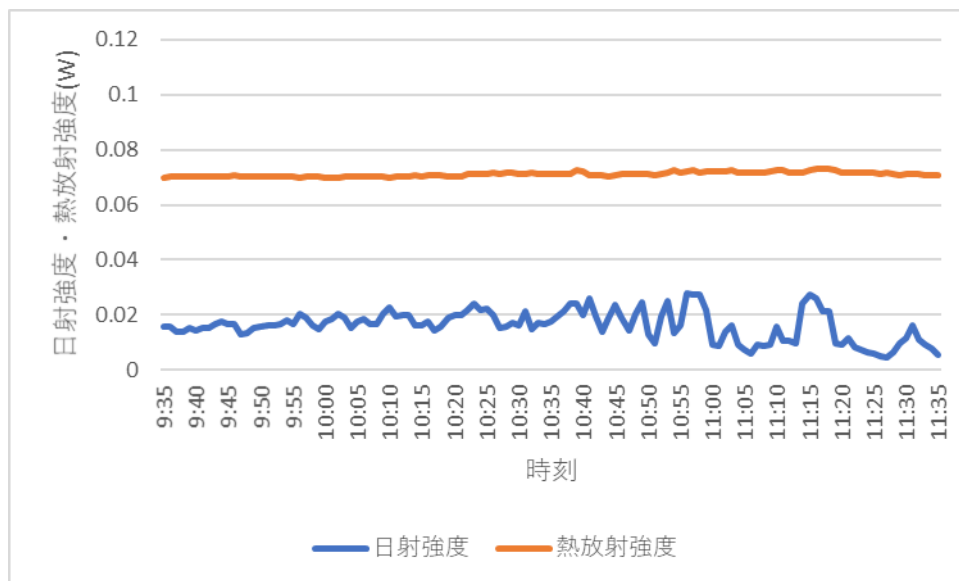


図 32：3 色温度計によって導出した日射強度と熱放射強度

横軸は時刻，縦軸は日射強度(W)と熱放射強度(W)．大きさが大の 3 色温度計を用いて導出した値．

#### 4.2.2 考察

全ての実験において，大きさが大の 3 色温度計を使って導出した気温は，小の 3 色温度計を使って導出した気温よりも，アメダスの気温に近かった．しかし，の大きさが大の 3 色温度計によって導出した気温も，アメダスの気温からのずれが大きく(例，図 19 の両者のずれの最大は  $2.1^{\circ}\text{C}$ ，平均は  $0.4^{\circ}\text{C}$ )，3 色温度計による気温測定には失敗したと言わざるを得ない結果となった．日射強度と熱放射強度については，正解がわからないため測定精度の検証をおこなうことができなかった．図 16 では，日射強度の低下と熱放射強度の上昇に相関が見られ(例えば 14:10-14:45)，3 色温度計による日射強度と熱放射強度の導出にも問題があることが示唆された．

### 4.3 実験(夜)

夜の実験結果と、実験結果を用いて導出した気温、日射強度、熱放射強度の結果を示す。天候は岡山大学理学部望遠鏡のスカイモニター (<https://epa.desc.okayama-u.ac.jp/~astro/>)を用いて確認した。風速をすべての観測で測定することができなかったため、風速の測定がない観測はアメダスの風速を代用した。アメダスの風速測定は、観測点から約 2.8km 離れたビルの屋上(地上 69.9m)でおこなわれている(気象庁(2018) 地域観測所一覧. [https://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/amedas/ame\\_master.pdf](https://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/amedas/ame_master.pdf)).

#### 4.3.1 実験結果

- 2018/12/29 18:10-20:00

この時の天候は、快晴であった。図 33 は 3 色温度計の測定結果、図 32 はアメダスの風速である。この観測では風速の測定をおこなわなかったため、アメダスの風速を利用した。図 33 と 34 は、測定結果から導出した気温、日射強度、熱放射強度である。

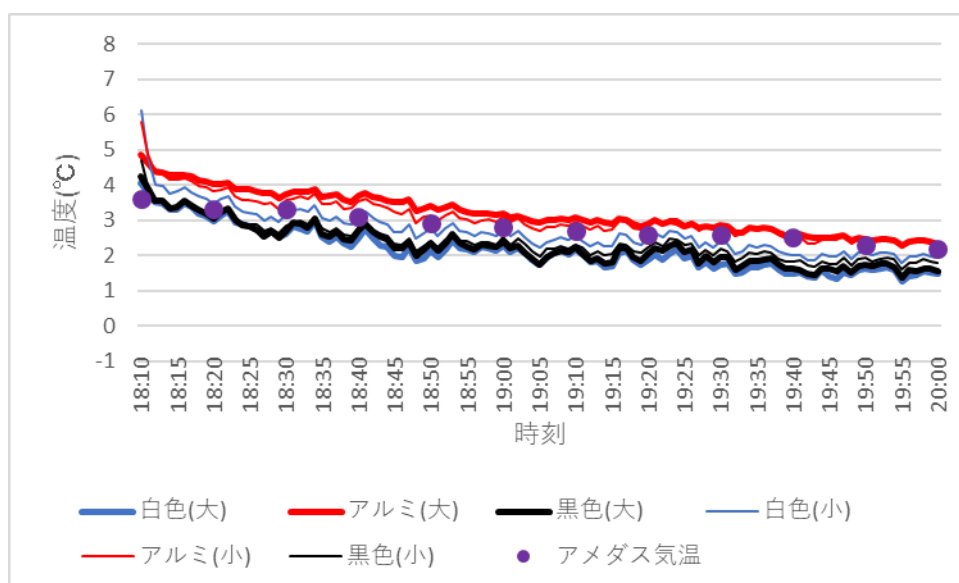


図 33 : 3 色温度計の測定結果

横軸は時刻、縦軸は温度(°C)。青色は白色温度計の温度、赤色は銀色温度計の温度、黒色は黒色温度計の温度で、太線は大きい温度計、細線は小さい温度計である。紫の点はアメダス(岡山)の気温([https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min\\_s1.php?prec\\_no=66&block\\_no=47768&year=2018&month=12&day=29&view=](https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min_s1.php?prec_no=66&block_no=47768&year=2018&month=12&day=29&view=)).



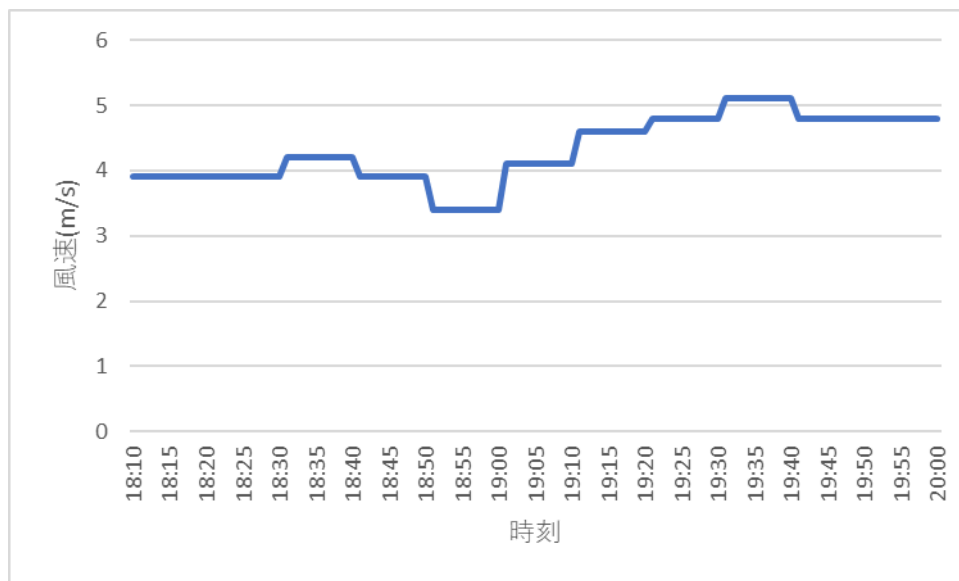


図 34：風速(アメダス)

横軸は時刻，縦軸は風速(m/s)。

([https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min\\_s1.php?prec\\_no=66&block\\_no=47768&year=2018&month=12&day=29&view=](https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min_s1.php?prec_no=66&block_no=47768&year=2018&month=12&day=29&view=))

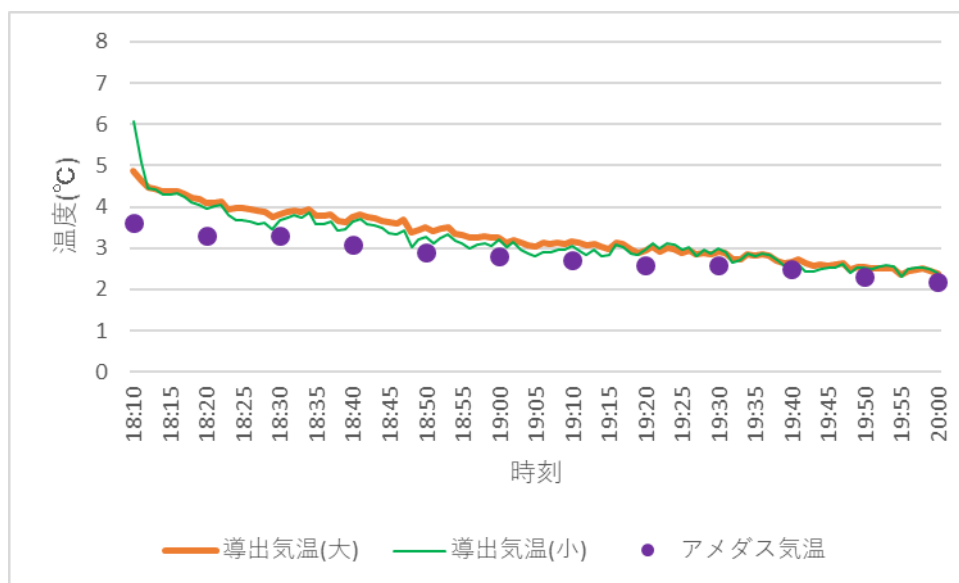


図 35：3色温度計によって導出した気温とアメダス気温の比較

横軸は時刻，縦軸は温度(°C)。オレンジの太線は大きさが大の3色温度計で導出した気温，緑の細線は小の3色温度計で導出した気温。紫の点はアメダス(岡山)の気温  
([https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min\\_s1.php?prec\\_no=66&block\\_no=47768&year=2018&month=12&day=29&view=](https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min_s1.php?prec_no=66&block_no=47768&year=2018&month=12&day=29&view=))。)

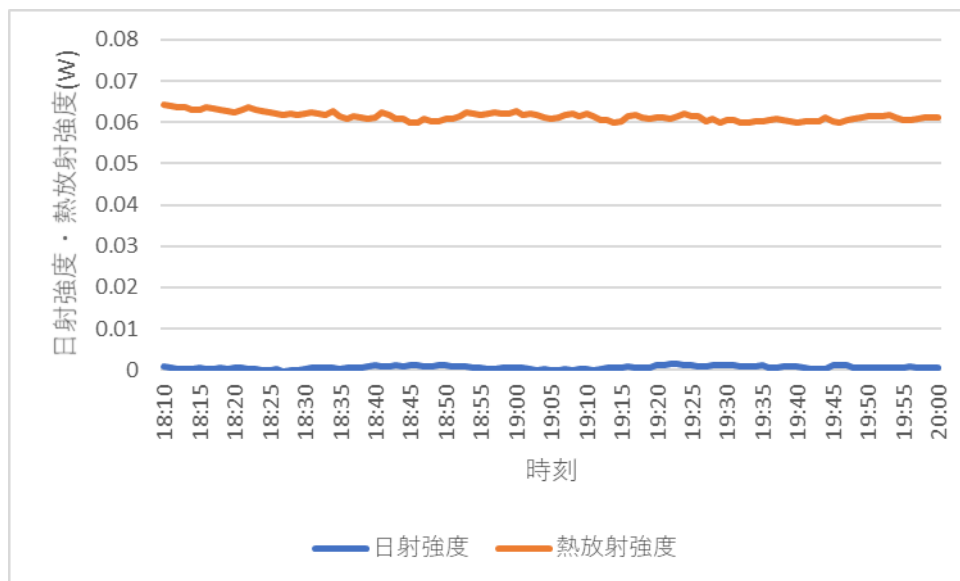


図 36：3 色温度計によって導出した日射強度と熱放射強度

横軸は時刻，縦軸は日射強度(W)と熱放射強度(W)．大きさが大の 3 色温度計を用いて導出した値.

● 2019/01/12 19:05-22:05

この時の天候は，曇りであった．図 37 は 3 色温度計の測定結果，図 38 はアメダスの風速である．この観測では風速の測定をおこなわなかったため，アメダスの風速を利用した．図 39 と 40 は，測定結果から導出した気温，日射強度，熱放射強度である．

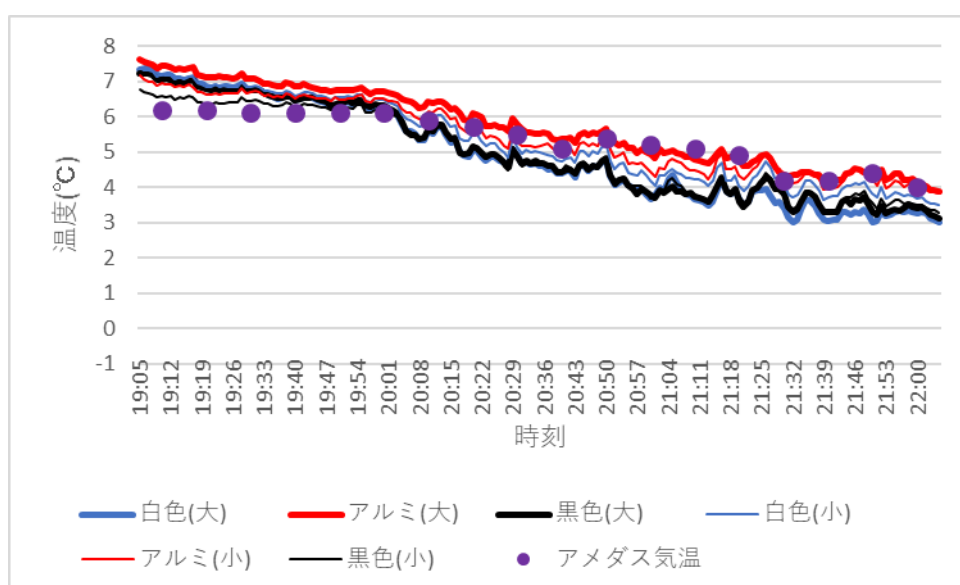


図 37 : 3 色温度計の測定結果

横軸は時刻，縦軸は温度(°C)．青色は白色温度計の温度，赤色は銀色温度計の温度，黒色は黒色温度計の温度で，太線は大きい温度計，細線は小さい温度計である．紫の点はアメダス(岡山)の気温([https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min\\_s1.php?prec\\_no=66&block\\_no=47768&year=2019&month=1&day=12&view=](https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min_s1.php?prec_no=66&block_no=47768&year=2019&month=1&day=12&view=)).

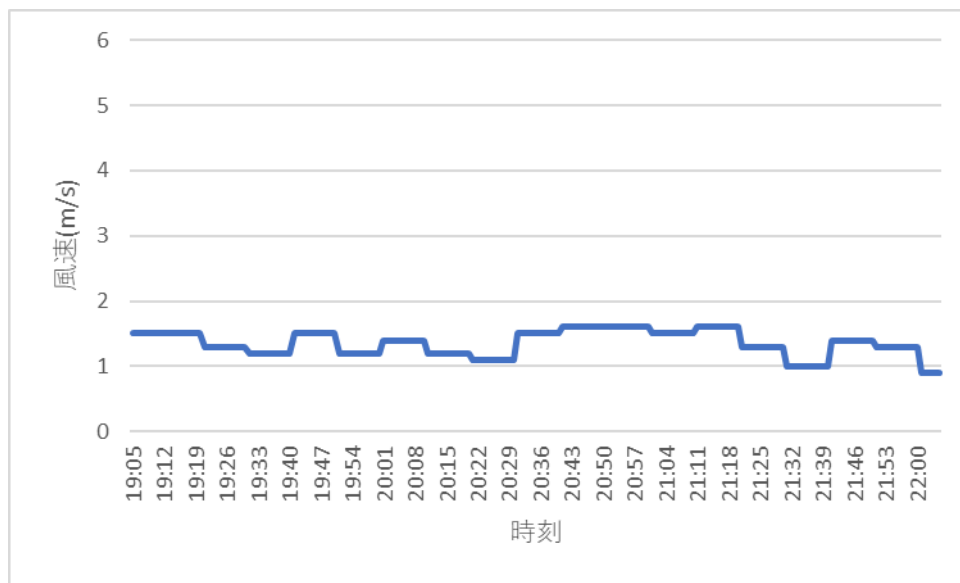


図 38 : 風速(アメダス)

横軸は時刻，縦軸は風速(m/s)．

([https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min\\_s1.php?prec\\_no=66&block\\_no=47768&year=2019&month=1&day=12&view=](https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min_s1.php?prec_no=66&block_no=47768&year=2019&month=1&day=12&view=))

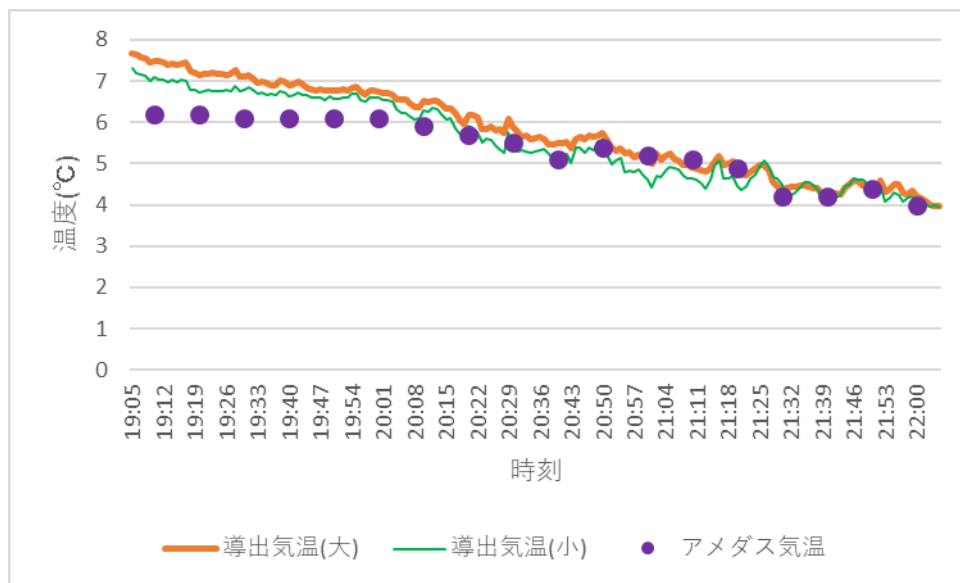


図 39：3 色温度計によって導出した気温とアメダス気温の比較

横軸は時刻，縦軸は温度(°C)．オレンジの太線は大きさが大の 3 色温度計で導出した気温，緑の細線は小の 3 色温度計で導出した気温．紫の点はアメダス(岡山)の気温 ([https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min\\_s1.php?prec\\_no=66&block\\_no=47768&year=2019&month=1&day=12&view=](https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min_s1.php?prec_no=66&block_no=47768&year=2019&month=1&day=12&view=)).

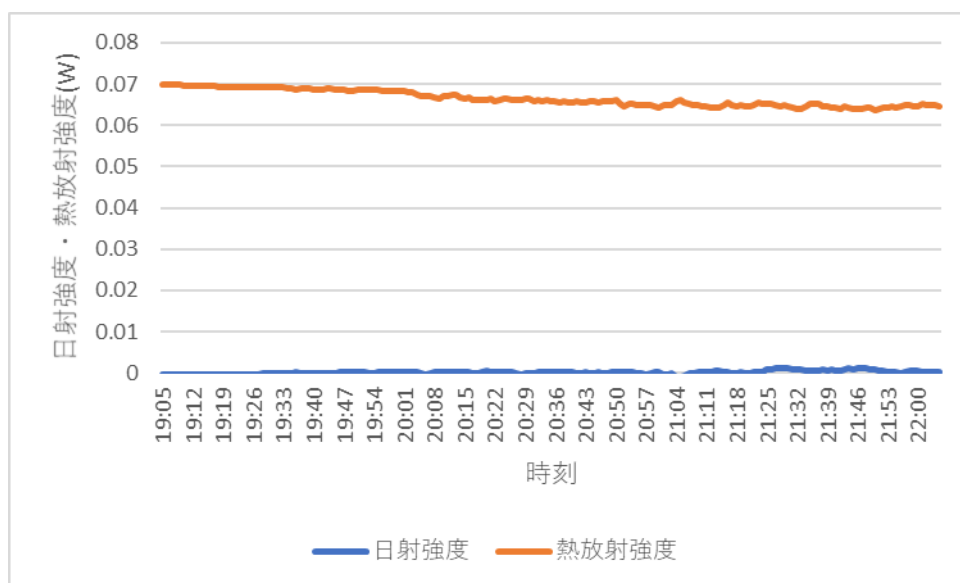


図 40：3 色温度計によって導出した日射強度と熱放射強度

横軸は時刻，縦軸は日射強度(W)と熱放射強度(W)．大きさが大の 3 色温度計を用いて導出した値．

● 2019/01/22 02:18-06:18

この時の天候は、晴れ時々曇りであった。図 41 は 3 色温度計の測定結果、図 42 は同じ場所で測定した風速である。図 43 と 44 は、測定結果から導出した気温、日射強度、熱放射強度である。

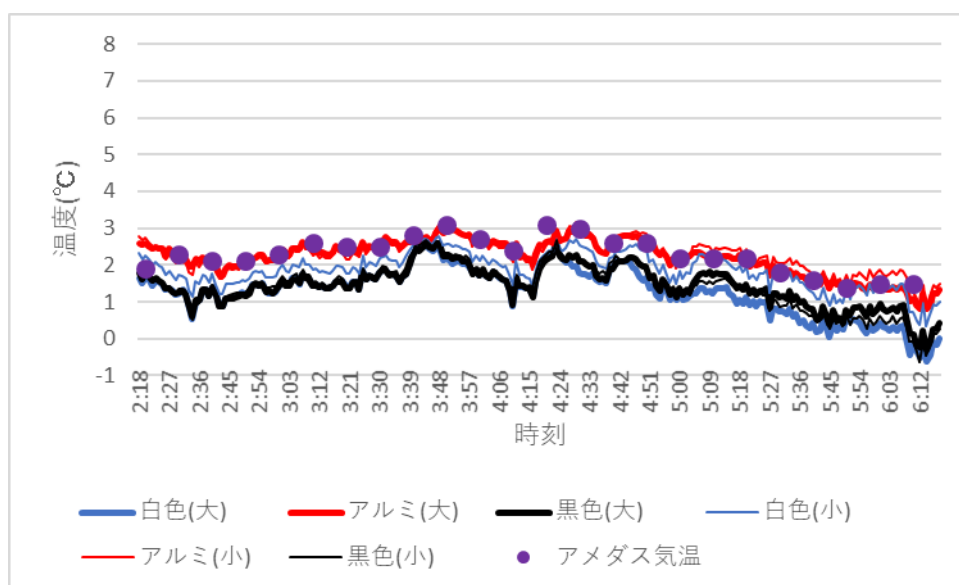


図 41 : 3 色温度計の測定結果

横軸は時刻，縦軸は温度(°C)．青色は白色温度計の温度，赤色は銀色温度計の温度，黒色は黒色温度計の温度で，太線は大きい温度計，細線は小さい温度計である．紫の点はアメダス(岡山)の気温([https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min\\_s1.php?prec\\_no=66&block\\_no=47768&year=2019&month=1&day=22&view=](https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min_s1.php?prec_no=66&block_no=47768&year=2019&month=1&day=22&view=)).

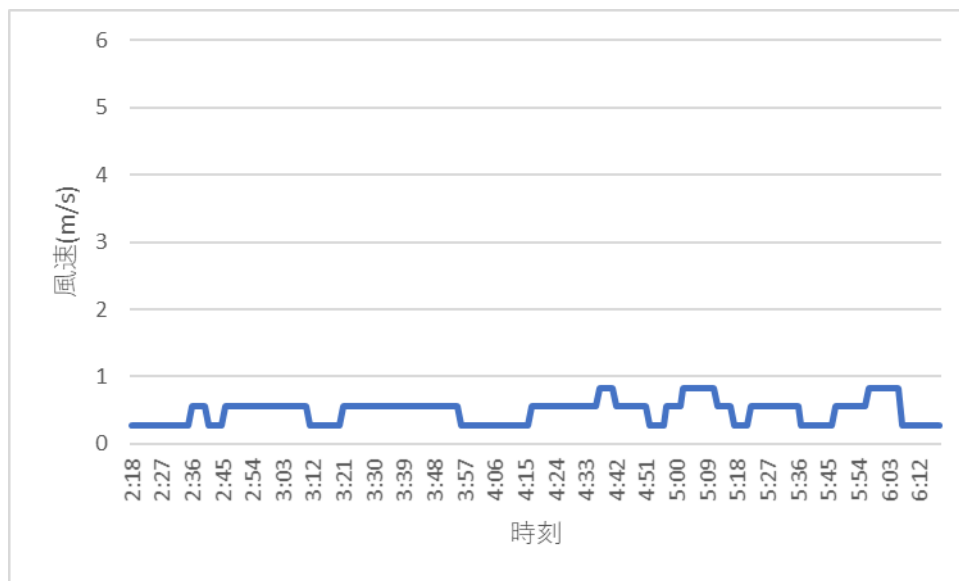


図 42：風速(Netatmo)

横軸は時刻，縦軸は風速(m/s).

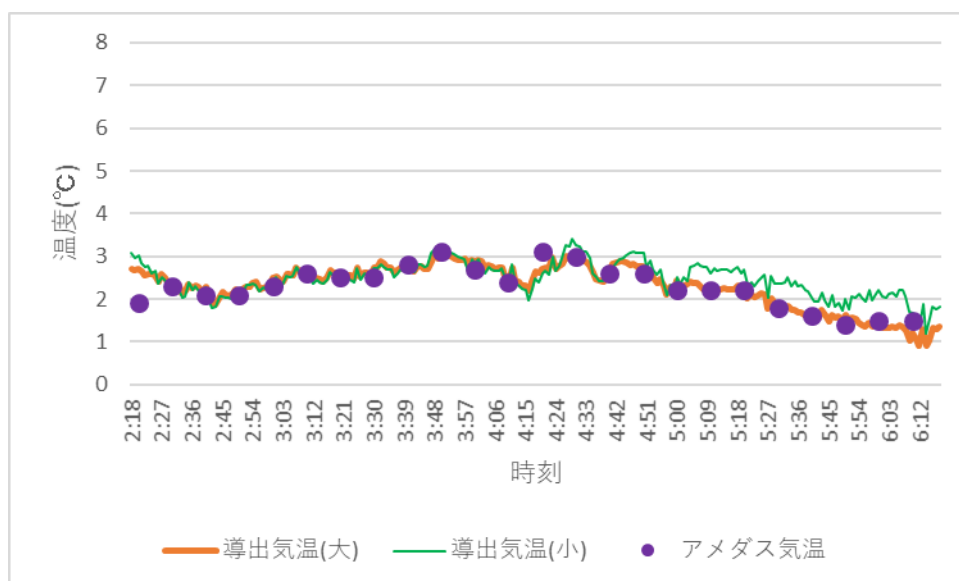


図 43：3 色温度計によって導出した気温とアメダス気温の比較

横軸は時刻，縦軸は温度(°C). オレンジの太線は大きさが大の 3 色温度計で導出した気温，緑の細線は小の 3 色温度計で導出した気温. 紫の点はアメダス(岡山)の気温 ([https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min\\_s1.php?prec\\_no=66&block\\_no=47768&year=2019&month=1&day=22&view=](https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min_s1.php?prec_no=66&block_no=47768&year=2019&month=1&day=22&view=)).

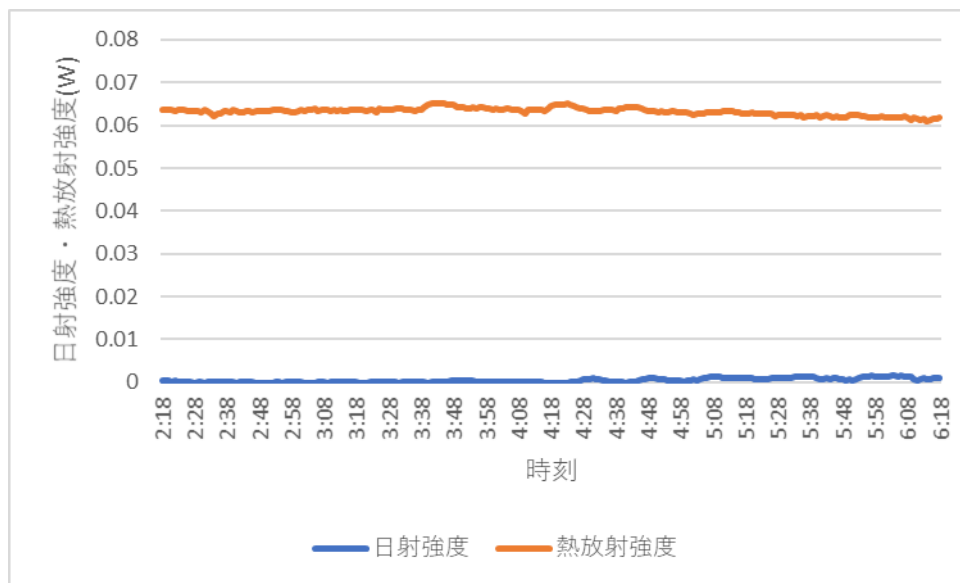


図 44：3 色温度計によって導出した日射強度と熱放射強度

横軸は時刻，縦軸は日射強度(W)と熱放射強度(W)．大きさが大の 3 色温度計を用いて導出した値．

#### 4.3.2 考察

昼の実験と異なり，大と小の 3 色温度計から導出された気温は，ほぼ同じになった．また，昼の実験に比べてアメダスの気温からのずれが小さく(図 43 の両者のずれの最大は  $0.8^{\circ}\text{C}$ ，平均は  $0.1^{\circ}\text{C}$ )，夜間について，3 色温度計による気温測定は成功したように思われる．全ての実験において，3 色温度計によって導出した日射強度はほぼ  $0\text{ W/m}^2$  となり，正しく日射強度を測定できた．熱放射強度は正解がわからないため，測定精度を議論することはできなかった．

## 第5章 まとめ

熱電対を用いて3色温度計を作成した。計8回の野外実験を実施し、測定データから気温、日射強度、熱放射強度を導出し、3色温度計の性能評価を行った。性能評価の結果を表9に示す。

表 9：3色温度計の性能評価結果

| 評価結果 | 気温 | 日射強度 | 熱放射強度 |
|------|----|------|-------|
| 昼    | ×  | ?    | ?     |
| 夜    | △  | ○    | ?     |

昼の気温測定に失敗した理由は不明だが、本研究で仮定した温度計のパラメタである熱交換係数  $k$ 、日射の吸収率  $\alpha$ 、熱放射の放射率  $\varepsilon$  の値に問題があったのかもしれない。また、風速の測定頻度と精度が十分でなかった可能性もある。導出の過程で  $d/dt=0$  と仮定したことも問題である。3色温度計を用いて昼に測定をおこなうには、さらなる検討が必要である。夜の測定について、今回おこなった実験はおおむね良好な結果となった。しかし、観測条件がかたよっており、たまたま測定できただけである可能性は否定できない。夜の測定についても、さらなる検討が必要である。



## 謝辞

本研究を行うにあたり，御指導いただきましたはしもとじょーじ准教授，実験道具を貸してくださった野沢徹教授に深く感謝いたします．

また，同研究室の先輩方，去年卒業された大田さんから多くの助言をいただきました．深く感謝いたします．

## 参考文献

Schmidlin, F. J., J.K. Luers, P.D. Huffman (1986) "Preliminary Estimates of Radiosonde Thermistor Errors" NASA Technical Paper 2637, 15pp.

大田凌平 (2018) 惑星探査用気象測器の開発：3 色温度計による気温測定の基礎実験. 岡山大学理学部地球科学科 卒業論文.

岡山大学理学部望遠鏡, スカイモニター.

<https://epa.desc.okayama-u.ac.jp/~astro/>

気象庁ウェブページ「過去の気象データ検索」

<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.pdf>

気象庁ウェブページ「観測測器について」

<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/knownow/faq/faq11.html>

気象庁(2018)地域気象観測所一覧.

[https://www.jma.go.jp/jma/kishou/knownow/amedas/ame\\_master.pdf](https://www.jma.go.jp/jma/kishou/knownow/amedas/ame_master.pdf)

小林繁夫 (2001) 「宇宙工学概論」, 丸善, 299pp.

田中章浩, 奥島里美, 佐瀬勘紀, 伊藤實 (1995) 「対流熱伝達率におよぼす風向・風速の影響」, 農業施設 26 巻 1 号, p.3-11.

八光電機ウェブページ「熱電対について：熱電対の種類と特徴」

<https://www.hakko.co.jp/qa/qakit/html/h05010.htm>