

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

05426504 大田 凌平

2018/02/15

要旨

気温は惑星表層環境探査における最重要測定項目のひとつである。気象庁が業務としておこなっている気温の測定においては、温度計を換気扇の付いたステンレス製の筒に入れて日射を遮るとともに通風して気温の測定をおこなうが、惑星探査においては重量に厳しい制限があるため、換気扇やステンレス筒を使用しない小型軽量な測器が必要とされる。本研究は、小型軽量な気温計測システムの開発を念頭において、K型熱電対に黒(α 大, ε 大), 白(α 小, ε 大), アルミ(α 小, ε 小)の着色を施した3色の温度計を作成し、室内と野外で実験をおこなうことで3色温度計による気温測定の実現可能性について検討した。実験によって、日射の吸収率と熱放射の放射率の違いによって3色の温度計はそれぞれに異なる振る舞いをすることを確認し、小型軽量な3色温度計によって気温の測定は原理的に可能であることを示した。一方で、3色温度計で気温を決定するには、別途、風速測定が必要であることが示された。風速を測定しない場合には、温度計をもう1つ追加して気温と風速を同時に決定する必要がある。

目次

第 1 章 3 色温度計	4
1.1 惑星着陸探査機搭載用気象測器	4
1.2 温度計の熱収支	4
第 2 章 温度計の作製	6
2.1 熱電対	6
2.2 器差補正	6
2.3 3 色温度計の作製	10
第 3 章 実験(屋内)	12
3.1 実験	12
3.2 実験結果	13
第 4 章 実験(野外)	18
4.1 実験	18
4.2 実験結果	21

第5章まとめ23

謝辞24

参考文献25

第 1 章 3 色温度計

1.1 惑星着陸探査機搭載用気象測器

気温は惑星表層環境探査における最重要測定項目のひとつである。気象庁が業務としておこなっている気温の測定においては、温度計を換気扇の付いたステンレス製の筒に入れて日射を遮るとともに通風して気温の測定をおこなう(図 1.1)が、惑星探査においては重量に厳しい制限があるため、換気扇やステンレス筒を使用しない、小型軽量の測器が必要とされる。ゾンデを用いた高層気象観測においては、日除けを用いない測器として、複数の温度計を用いる方法が考えられている(Schmidlin et al. 1986)。本研究では、Schmidlin et al. (1986)を参考にして、換気扇やステンレス筒を使用しない気温測定システムを開発するための基礎実験をおこなった。



図 1.1： アメダスの観測測器(温度計)。

(www.tenki.jp/docs/note/amedas/page_2)

1.2 温度計の熱収支

温度計に出入りする熱の収支は以下の式で表される。

$$C \frac{dT_c}{dt} = k(T_a - T_c) + \alpha S + \varepsilon L - \varepsilon \sigma T_c^4 \quad (1.1)$$

ここで、 C は温度計の熱容量、 T_c は温度計の温度、 t は時間、 k は熱交換係数、 T_a は気温、 α は日射の吸収率、 S は温度計に入射する日射の強度、 ε は熱放射の放射率、 L は温度計に入射する熱放射の強度、 σ はステファン・ボルツマン定数、である。この式の右辺の第 1 項は周囲の空気との間の熱の出入り、第 2 項は入射する日射による加熱、第 3 項は入射する

熱放射による加熱, 第 4 項は射出する熱放射による冷却, である. 定常状態にあるとき左辺は 0 になる.

日除けを使って日射を遮ると, 右辺の第 2 項は 0 になる. 強制的に通風することで, 温度計を覆う日除けの温度と温度計の温度が同じようなものになれば, 右辺の第 3 項と右辺の第 4 項はキャンセルする. 通風して熱交換係数 k を大きくしたとき, この式が成り立つためには右辺の第 1 項の $(T_a - T_c)$ が 0 に近づかなければならない. すなわち, 温度計の温度は気温を示すようになる. これが日除けを使って気温を測る理屈である.

日除けがないときには, 右辺の第 2 項は 0 にならない. また, 周囲に熱い地面などがあって, そこから強い熱放射があると, 右辺の第 3 項と右辺の第 4 項はキャンセルしない. このとき, 温度計の示す温度は気温と異なる温度になる. 温度計の温度を見ただけでは気温を知ることはできず, 日射と熱放射の強度が分からないと気温を決定することはできない.

このように, 温度計が 1 つのときは 3 つの未知数 (T_a , S , L) があるため気温を決めることはできないが, 温度計が 3 つあれば 3 つの未知数に対して式が 3 本になるので, 気温 T_a と日射 S と熱放射 L を決定することができる. そのような原理に基づいた気温測定の方法として, Schmidlin et al. (1986) は色が異なる 3 つの温度計を使う方法を提案した. 色が異なるというのは吸収率・放射率が異なるということである. 3 つの温度計が日射や熱放射に対して異なる振る舞いをすることで, そこから日射や熱放射の強度を推定するという理屈である.

本研究では, この原理で気温が測れることを確認するため, 色の異なる 3 本の温度計を自作し, 屋内と野外で測定をおこなった.

第 2 章 温度計の作製

2.1 熱電対

本研究は温度計として K 型熱電対を使用し，熱電対の電圧は，Pico Technology 社の Thermocouple Data Logger (TC-08)を用いて記録した。

2.2 器差補正

実験で使用する熱電対の較正は，以下の手順でおこなった。水槽に水を入れて，そこに熱電対と標準温度計を入れて温度を測定した(図 2.1, 図 2.2)。標準温度計に熱電対を巻き付けて測定することで，熱電対と標準温度計が同じ水の温度を測定するようにした。氷とお湯を使って水の温度を変えて測定をおこない，器差の温度依存性を調べた。

図 2.3~図 2.7 は水温を変えておこなった 5 つの実験で，熱電対と標準温度計が示した温度である。それぞれ測定は 500 秒間おこなった。500 秒間の平均を表 2.1 に示す。

図 2.8 は標準温度計の示度と熱電対 A の示度の関係を図にしたものである。実験結果(表 2.1)は青丸で示されている。器差補正は，実験がある温度範囲(3.18°C ~ 42.75°C)については線形に内挿し，それ以外は線形に外挿するものとした。

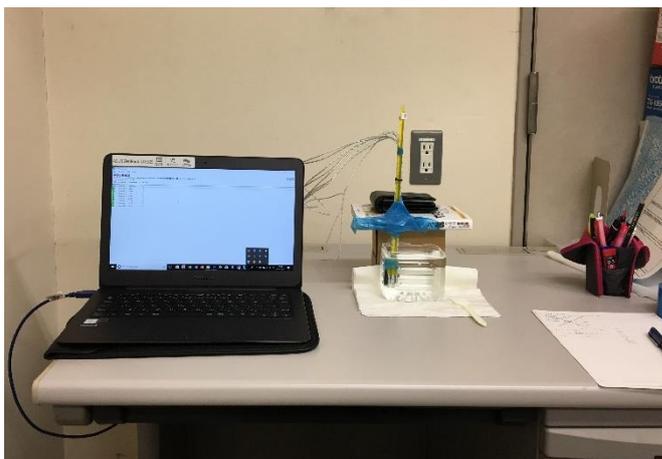


図 2.1：熱電対の較正実験。



図 2.2：熱電対の較正実験
(測温部を拡大)。

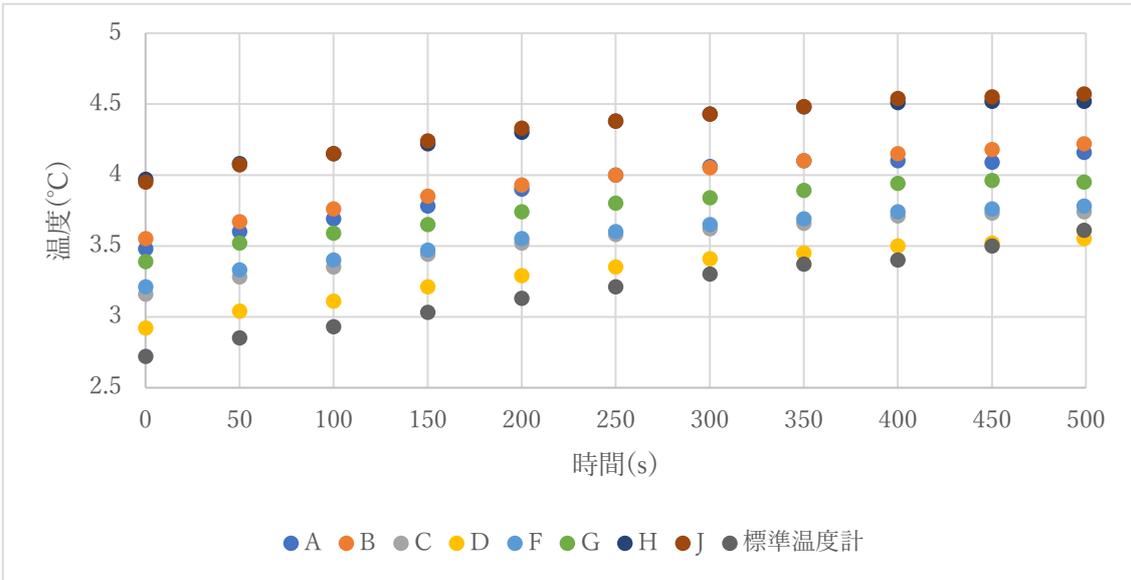


図 2.3： 熱電対(8つ)と標準温度計の水温の測定結果.

縦軸は熱電対の示度(°C)と標準温度計の示度(°C), 横軸は時間(s). A, B, C, D, F, G, H, J は K 型の熱電対である.

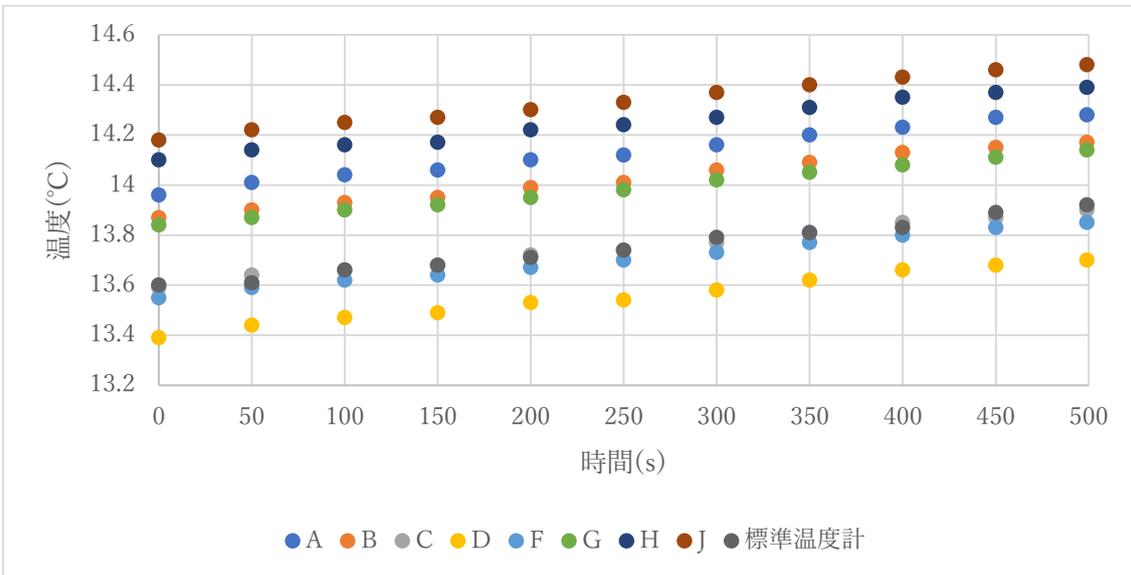


図 2.4： 熱電対(8つ)と標準温度計の水温の測定結果.

縦軸は熱電対の示度(°C)と標準温度計の示度(°C), 横軸は時間(s). A, B, C, D, F, G, H, J は K 型の熱電対である.

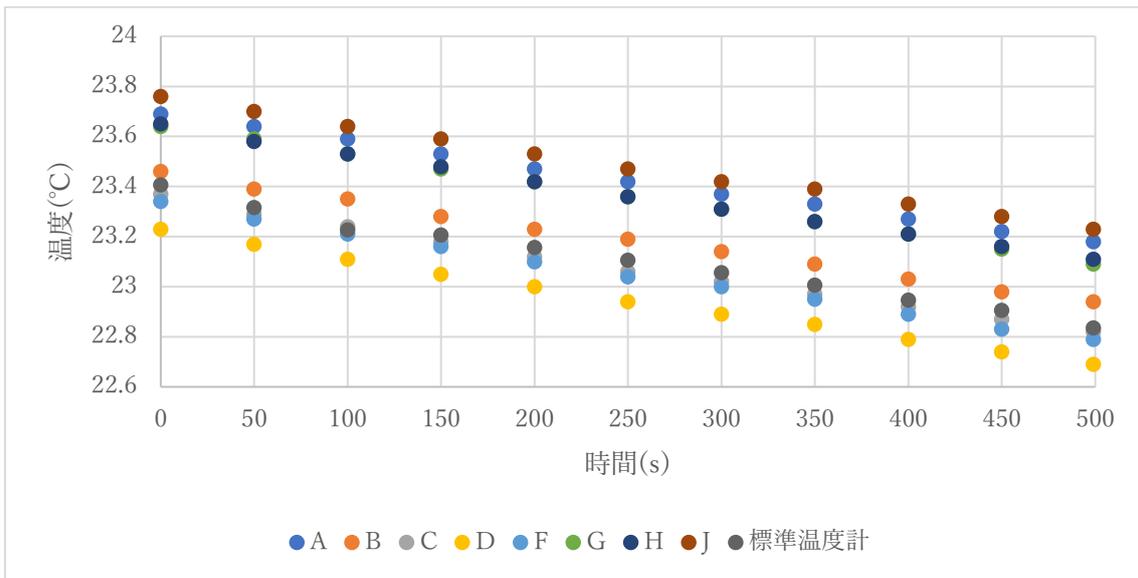


図 2.5： 熱電対(8つ)と標準温度計の水温の測定結果.

縦軸は熱電対の示度(°C)と標準温度計の示度(°C), 横軸は時間(s). A, B, C, D, F, G, H, J は K 型の熱電対である.

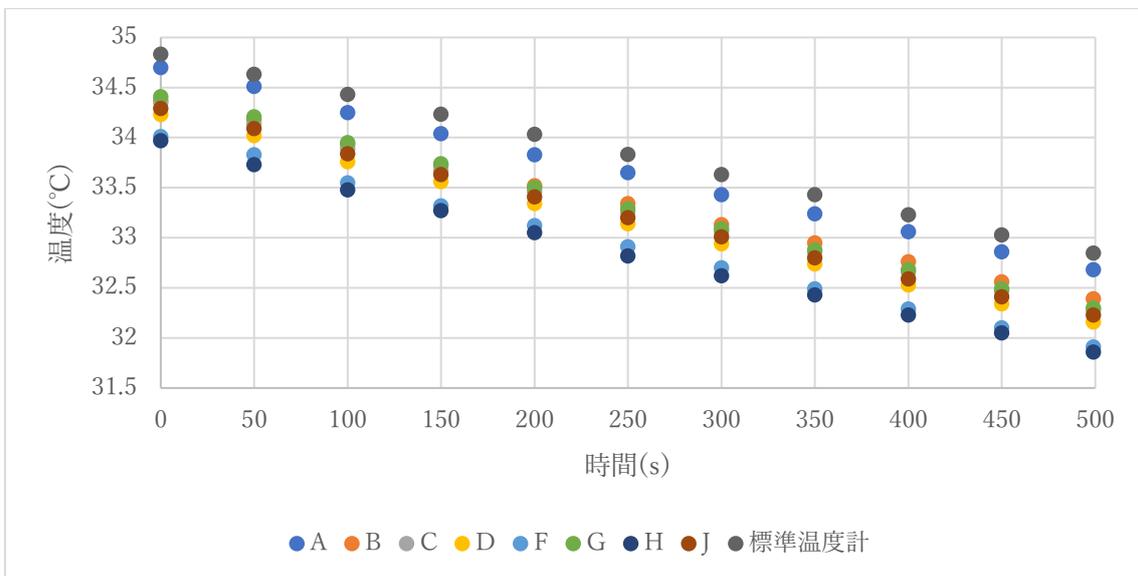


図 2.6： 熱電対(8つ)と標準温度計の水温の測定結果.

縦軸は熱電対の示度(°C)と標準温度計の示度(°C), 横軸は時間(s). A, B, C, D, F, G, H, J は K 型の熱電対である.

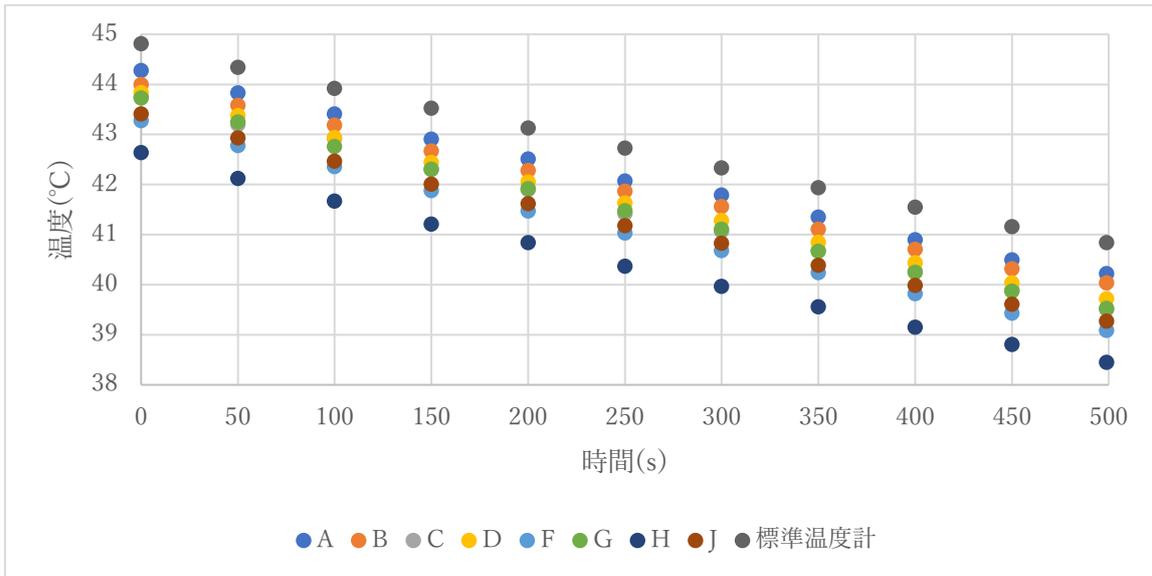


図 2.7： 熱電対(8つ)と標準温度計の水温の測定結果.

縦軸は熱電対の示度(°C)と標準温度計の示度(°C), 横軸は時間(s). A, B, C, D, F, G, H, J は K 型の熱電対である.

表 2.1： 測定結果の平均.

	標準温度計	熱電対A	熱電対B	熱電対C	熱電対D	熱電対F	熱電対G	熱電対H	熱電対J
図2.3	3.19	3.91	3.95	3.53	3.30	3.56	3.75	4.32	4.34
図2.4	13.75	14.13	14.02	13.75	13.55	13.70	13.99	14.25	14.34
図2.5	23.11	23.43	23.19	23.08	22.95	23.05	23.37	23.37	23.49
図2.6	33.83	33.66	33.35	33.28	33.16	32.93	33.32	32.86	33.23
図2.7	42.75	42.16	41.94	41.54	41.69	41.10	41.53	40.44	41.25

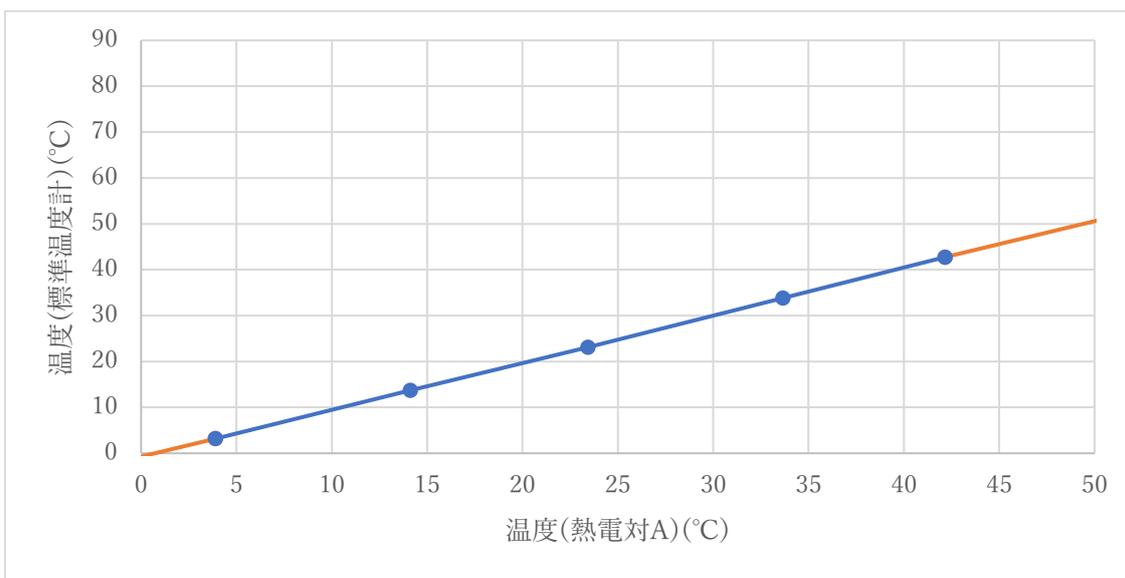


図 2.8： 標準温度計の示度と熱電対 A の示度の関係.

縦軸は標準温度計の示度(°C), 横軸は熱電対 A の示度(°C). 青丸は各実験の 500 秒間の平均値(表 2.1). 青線は各実験の間を線形に内挿したもので, 赤は外挿.

2.3 3 色温度計の作製

図 2.9 は本研究で作製した 3 色温度計の写真である. 表 2.2 は熱電対の識別符号(A, B, C, D, F, G, H, J)と, それぞれの大きさの色をまとめたものである. 大きさは, 大(10mm × 10mm)と小(5mm × 5mm)の 2 種類, 色は白, アルミ, 黒の 3 種類, 計 6 種の温度計を作製した.



図 2.9： 3 色温度計.

左から A, D, B, F, C, G.

表 2.2： 温度計の大きさの色.

熱電対	大きさ	色
A	大	白
B	大	アルミ
C	大	黒
D	小	白
F	小	アルミ
G	小	黒

大きさと形は、熱電対に熱伝導テープを貼り付けて整えた。白と黒は熱伝導テープに白色と黒色の絵具を塗り、アルミは熱伝導テープにアルミホイルを貼り付けた。日射の吸収率と熱放射の放射率は表 2.3 の値に近いものになっていると期待される。

表 2.3： 日射の吸収率と熱放射の放射率.

	α	ε
白	0.2	0.9
アルミ	0.09-0.17	0.03-0.10
黒	0.9	0.9

小林 (2001)

第3章 実験(屋内)

3.1 実験

図 3.1 と図 3.2 は実験で使用した装置の写真である。ライトは熱電対を上から照らすように設置し、ヒーターは熱電対の下に設置した。扇風機は熱電対に斜め上から風を送るように設置し、標準温度計を扇風機の後ろに設置した。

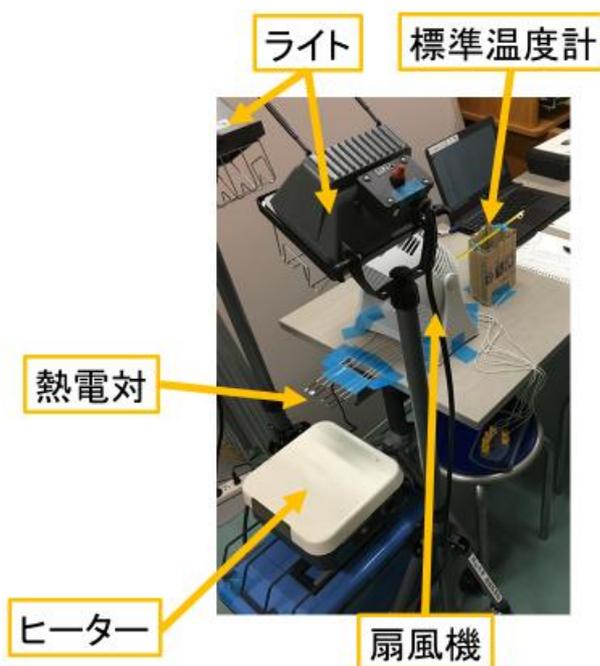


図 3.1： 実験装置。

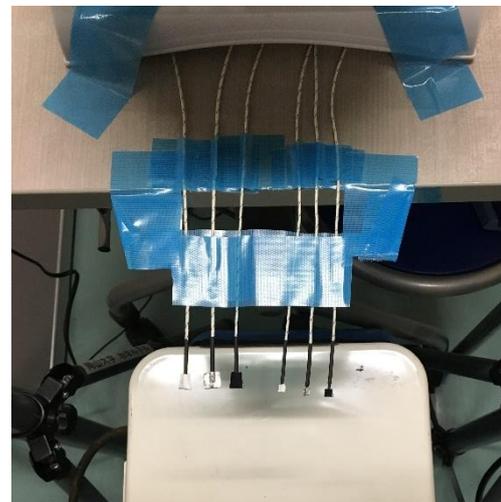


図 3.2： 実験装置
(熱電対を上から撮影)。

ライトは日射を模擬するもので、点灯・消灯によって強度を変える。ヒーターは熱い地面が射出する熱放射を模擬し、運転強度によって強度を制御する。扇風機を使って送風することで、熱電対の風速に対する応答も調べた。熱電対による温度の測定は1秒ごとにおこない、標準温度計は1分おきに温度を読み取った。

2灯のライトの点灯・消灯により3通り、ヒーターの運転強度により4通り、扇風機の風量により4通り、計48通りの条件で実験をおこなった。

3.2 実験結果

図 3.3 と図 3.4 に結果の 1 例を示す. ここに示した実験では, 黄色の点線(15:55 過ぎ)より前の時刻においてライトは消灯していて, 黄色の点線の時刻でライトを点灯した. それ以外の条件は変えていない. ライトを点灯することで, 熱電対に熱が加わり, 熱電対の温度が上昇している. しばらく時間がたつと, 熱電対の温度上昇は止まり, ほぼ一定の温度を示した. ライトの点灯前後をみると, ライト点灯後 1 分以内に急激に温度が上昇していることが分かる. 実験結果の解析にあたっては, 実験条件を変えてから十分に時間が経過して温度の時間変化率が小さくなったほぼ定常状態とみられるところを使用することとした. この実験では, 黒色の点線で挟まれた 2 分間の平均温度を用いた. ほぼ定常状態といっても温度にふらつきは見られるが, 2 分間の平均をとることで温度がふらつくことの影響を小さくした.

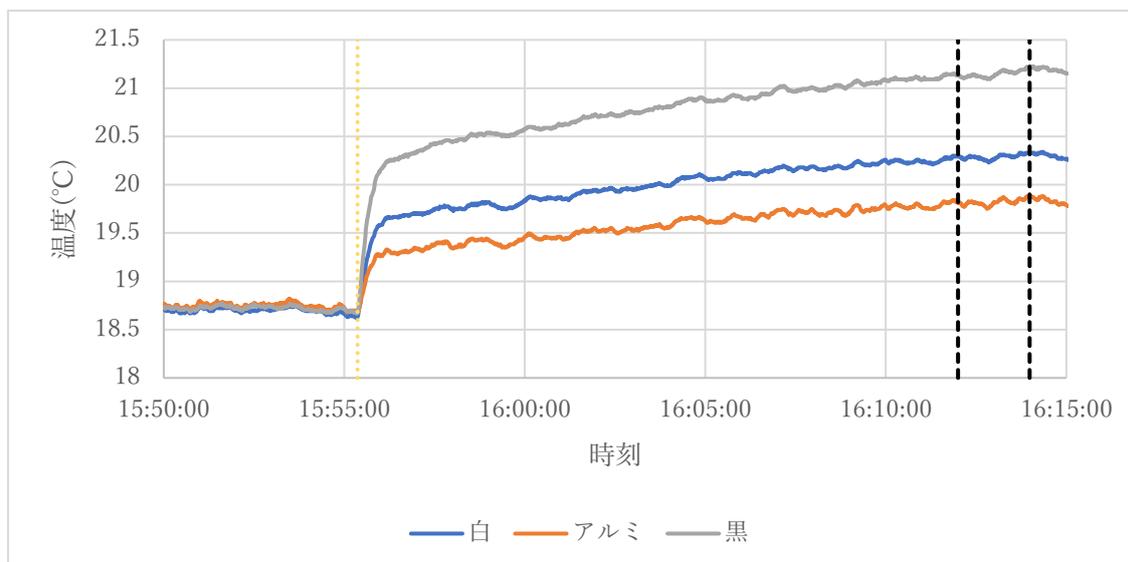


図 3.3： 熱電対(大)の測定結果.

縦軸は熱電対の示度(°C), 横軸は時刻. 青色は白の熱電対, 橙色はアルミの熱電対, 灰色は黒の熱電対.

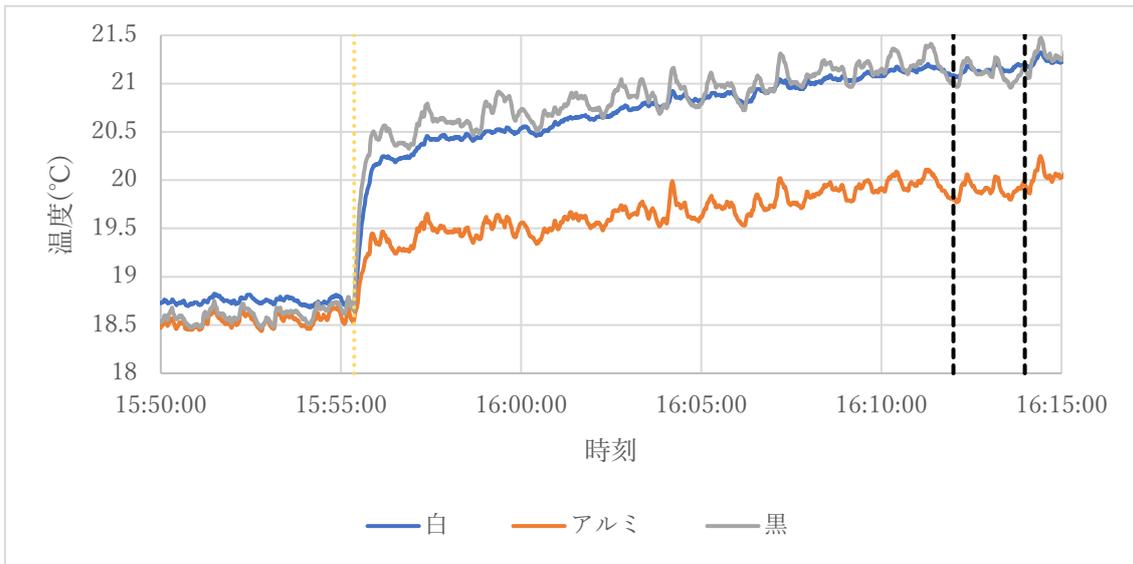


図 3.4： 熱電対(小)の測定結果.

縦軸は熱電対の示度(°C), 横軸は時刻. 青色は白の熱電対, 橙色はアルミの熱電対, 灰色は黒の熱電対.

図 3.5 と図 3.6 はヒーターの運転強度に対する応答を示した図である. 白と黒の熱電対はヒーター強度によって熱電対の示度が大きく変化しているのに対し, アルミの熱電対は変化が小さい. 白と黒の変化が大きいのは, 白色と黒色は熱放射の放射率が大きいためであると考えられる(表 2.3). また, アルミの示度の変化が小さいのは, アルミホイルの熱放射の放射率が小さいためであると考えられる(表 2.3). このように熱放射の放射率によって温度に明瞭な違いがでたことは, 3色温度計によって熱放射強度の評価が可能であることを示している.

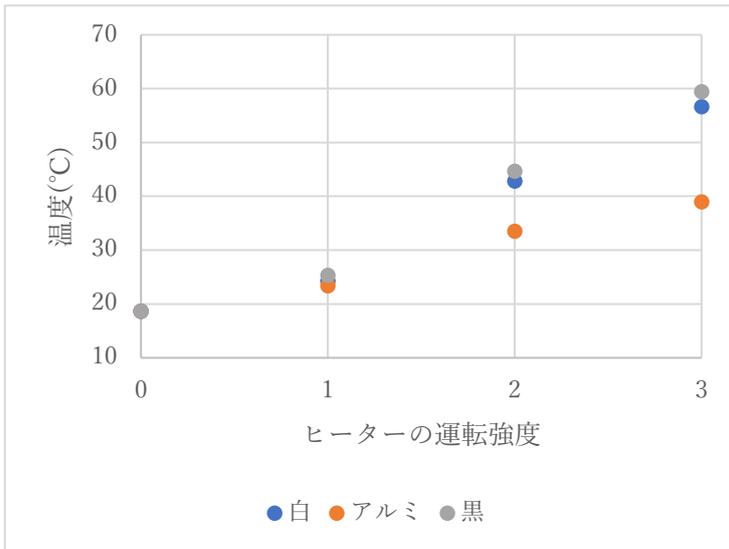


図 3.5： ヒーターの運転強度に対する熱電対(大)の測定結果.

縦軸は熱電対の示度(°C), 横軸はヒーターの運転強度で, 0 はヒーターを切った場合, 1 はヒーターの運転強度が最小の場合, 2 はヒーターの運転強度が中間の場合, 3 はヒーターの運転強度が最大の場合である. ライトは切っており, 扇風機も切っている. 青色は白の熱電対, 橙色はアルミの熱電対, 灰色は黒の熱電対.

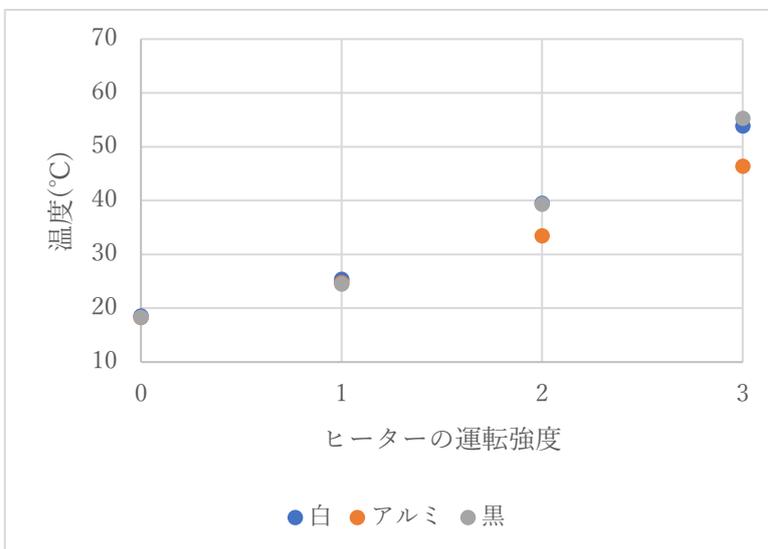


図 3.6： ヒーターの運転強度に対する熱電対(小)の測定結果.

縦軸は熱電対の示度(°C), 横軸はヒーターの運転強度で, 0 はヒーターを切った場合, 1 はヒーターの運転強度が最小の場合, 2 はヒーターの運転強度が中間の場合, 3 はヒーターの運転強度が最大の場合である. ライトは切っており, 扇風機も切っている. 青色は白の熱電対, 橙色はアルミの熱電対, 灰色は黒の熱電対.

図 3.7 と図 3.8 は扇風機の風速に対する応答を示した図である。風速が遅いときに熱電対の示度と気温の差が大きく、風速が速いときに差が小さくなっている。これは、風速が遅いときに熱交換係数が小さく、風速が速いときに熱交換係数が大きくなるためであると考えられる。熱交換係数に風速依存性があることは、気温を決定するためには風速を測定(または推定)して熱交換係数の値を決める必要があることを示している。

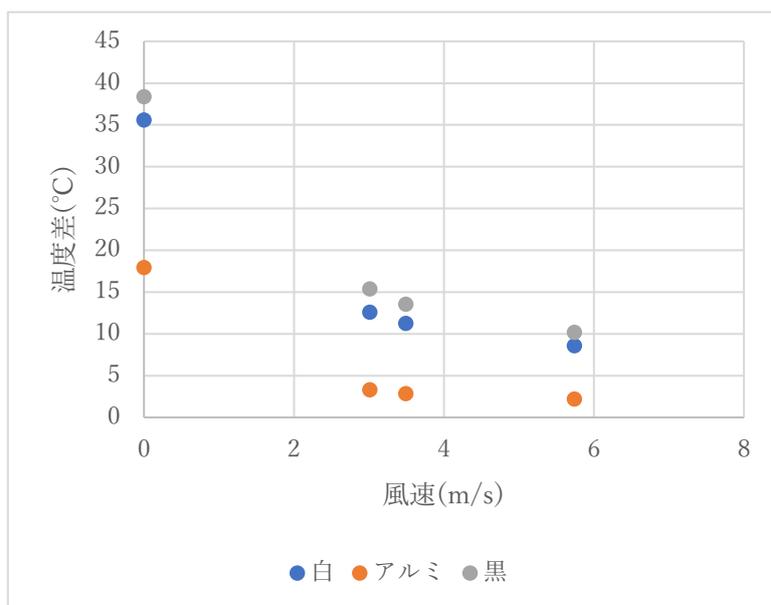


図 3.7： 風速に対する熱電対(大)の測定温度と気温の差。

縦軸は熱電対の示度と気温の差，横軸は扇風機の風速。ライトは切っており，ヒーターの運転強度は最大である。青色は白の熱電対，橙色はアルミの熱電対，灰色は黒の熱電対。

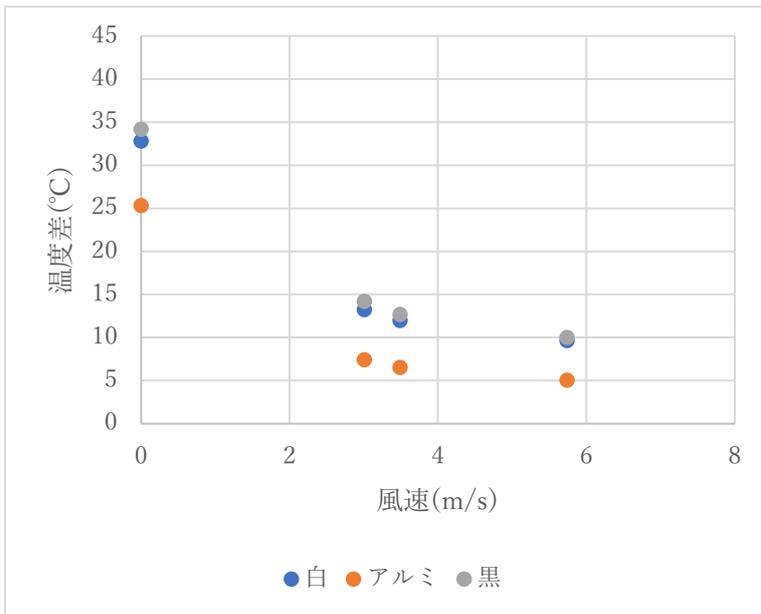


図 3.8： 風速に対する熱電対(小)の示度と気温の差。
 縦軸は熱電対の示度と気温の差，横軸は扇風機の風速．ライトは切っており，ヒーターの運
 転強度は最大である．青色は白の熱電対，橙色はアルミの熱電対，灰色は黒の熱電対．

第4章 実験(野外)

4.1 実験

2018年1月12日の13:01~14:24に、アメダス(岡山県岡山市北区津島中)の隣で測定をおこなった。図4.1と図4.2は測定したときの写真である。脚立を用いて、熱電対を地上から1.3mの位置に取り付けて1秒おきに温度を測定した。

2018年1月12日の13:00~14:30の10分毎の気温と風速を図4.3と図4.4に示す。空模様は岡山大学天文台に設置されたスカイモニターが記録した13:00~14:25の1分毎の空の画像(図4.5)によって確認した。観測日は普段よりも気温が低かった(図4.3)。ビルの屋上で測定している風速は5.5m/s以上となっているが(図4.4)、3色温度計を設置したアメダス観測点のとなりでは、それほど強い風は吹いていなかった。空にはかたまり状の雲が浮かんでおり、それらが風で流されることで短時間のうちに太陽が雲に隠されたり雲の外に出たりといったことがくり返されていた(図4.5)。

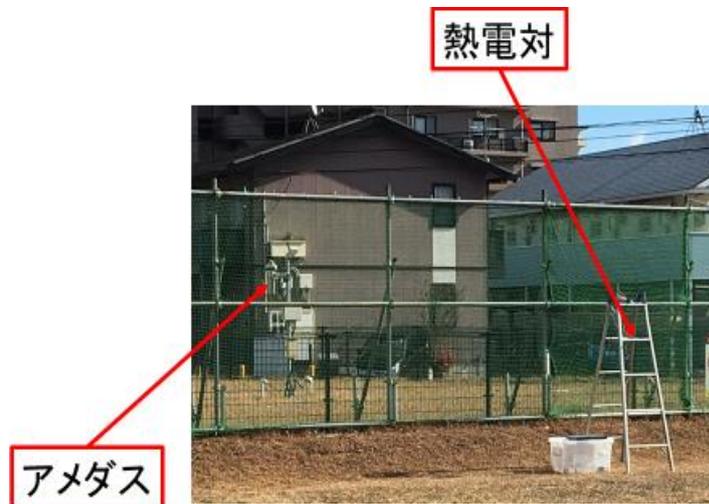


図4.1： 野外での測定.

左奥にアメダス(岡山県岡山市北区津島中)、右手前にある脚立に3色温度計を設置.



図4.2： 野外での測定

(熱電対を斜め上から撮影).

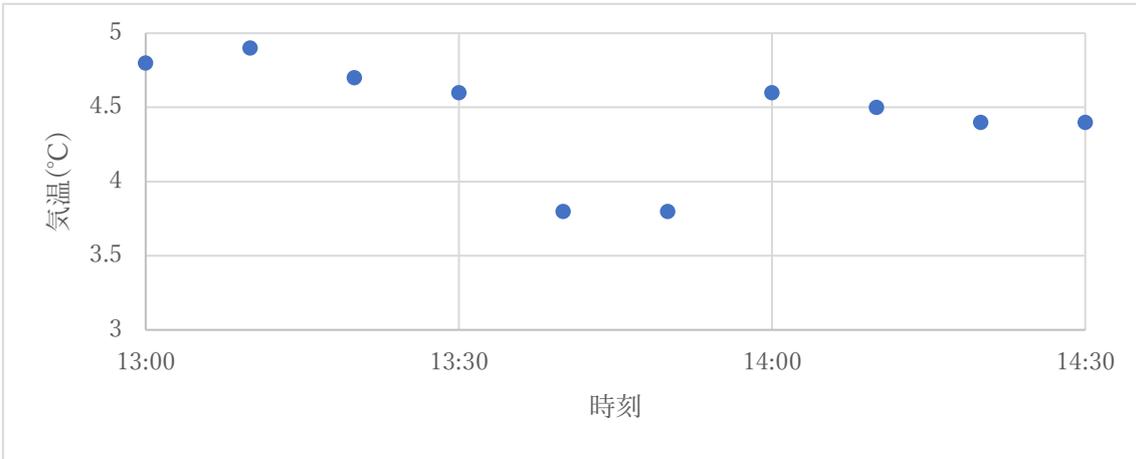


図 4.3： アメダス(岡山県岡山市北区津島中)の気温の測定結果。
 縦軸は気温(°C)，横軸は時刻。アメダスの温度計は地上から 1.5m に設置されている。
 (www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min_s1.php?prec_no=66&block_no=47768&year=2018&month=01&day=12&view=p1)

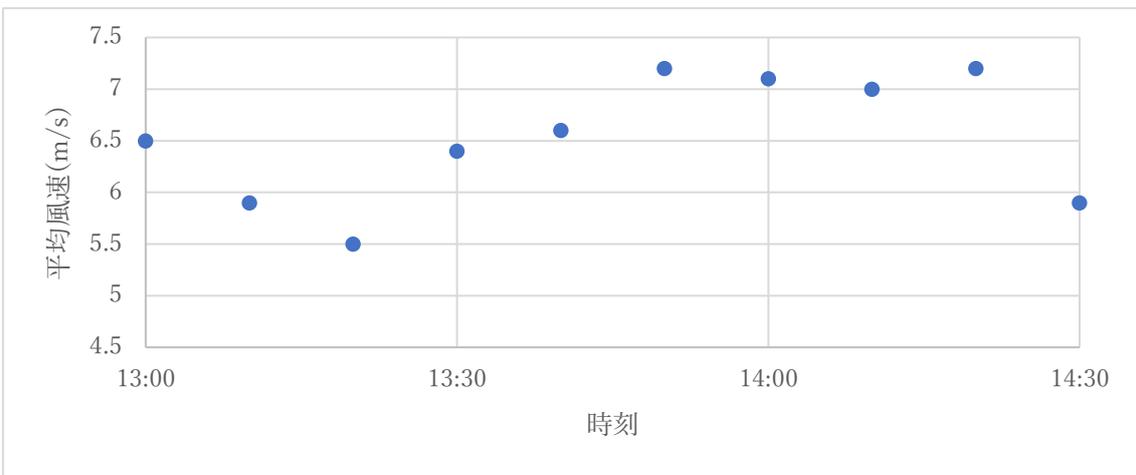


図 4.4： アメダス(岡山県岡山市北区下石井)の風速の測定結果。
 縦軸は平均風速(m/s)，横軸は時刻。平均風速は観測前 10 分間の風速の平均値。アメダスの風速計は地上から 69.9m に設置されている。
 (www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min_s1.php?prec_no=66&block_no=47768&year=2018&month=01&day=12&view=p1)



図 4.5 : スカイモニターが記録した空の画像(13:00).

(<http://epa.desc.okayama-u.ac.jp/~astro/skymonitor/2018/01/20180112/201801121300.jpg>)

4.2 実験結果

図 4.3 と図 4.4 は野外での測定結果である。黄色で色を付けた時刻は、太陽が雲に隠されていなかったときである。日射が遮られたときと遮られなかったときを比べると、日射が遮られなかったときに黒の熱電対の示度の変動が大きい。すなわち、黒の示度の変動が大きくなるのは日射に原因があると推測される。黒は白やアルミに比べ、日射の吸収率が大きく、日射の影響をより強く受ける。逆に、日射の吸収率が小さい白とアルミは、日射の影響を受けにくいので、日射によって示度はあまり変わらない。このように、日射の吸収率によって温度に違いがでたことは、3色温度計によって日射強度の評価が可能であることを示している。

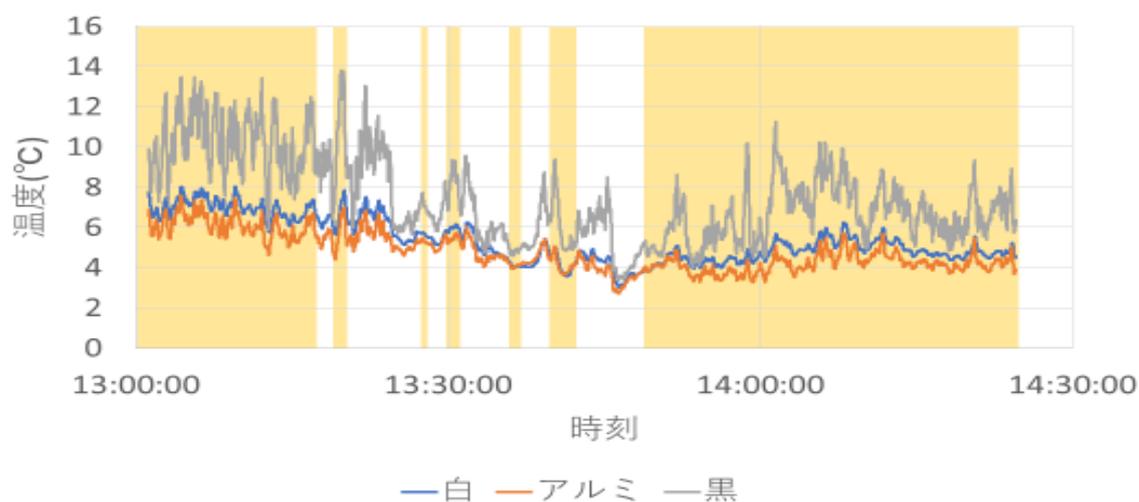


図 4.3： 熱電対(大)の測定結果.

縦軸は熱電対の示度(°C)，横軸は時刻。青色は白の熱電対，橙色はアルミの熱電対，灰色は黒の熱電対。岡山大学天文台に設置されたスカイモニターが記録した 13:00~14:25 の 1 分毎の空の画像を見て、日射が雲に遮られているかどうかを判別し、遮られていなかった時間を黄色く塗った。

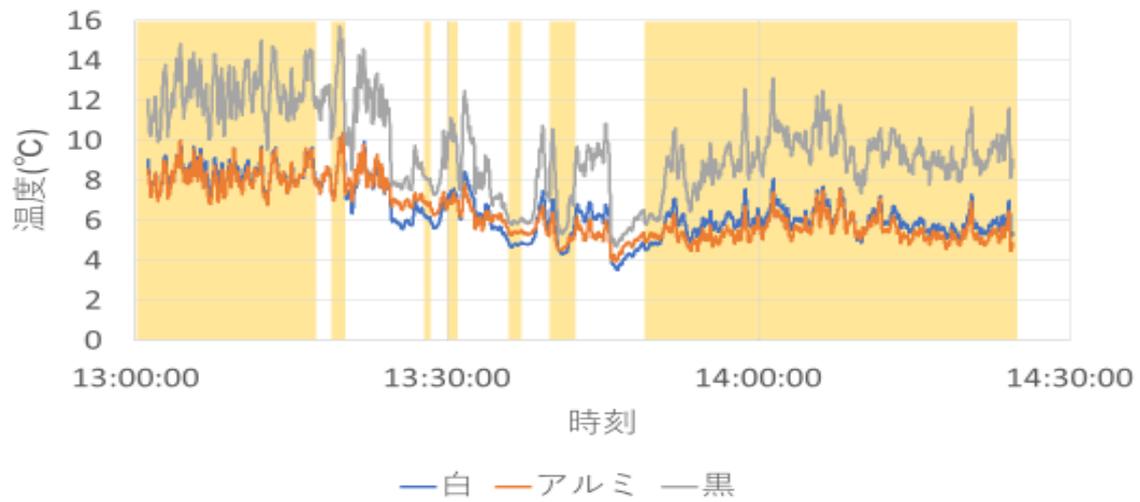


図 4.4： 熱電対(小)の測定結果.

縦軸は熱電対の示度(°C), 横軸は時刻. 青色は白の熱電対, 橙色はアルミの熱電対, 灰色は黒の熱電対. 岡山大学天文台に設置されたスカイモニターが記録した 13:00~14:25 の 1 分毎の空の画像を見て, 日射が雲に遮られているかどうかを判別し, 遮られていなかった時間を黄色く塗った.

第 5 章 まとめ

惑星着陸探査機による惑星表層環境のその場観測を想定して、換気扇やステンレス筒を使用しない小型軽量な気温計測システムを開発するための基礎実験をおこなった。器差補正をおこなった熱電対を用いて 3 色の温度計を作製し、作製した温度計を用いて屋内と野外で測定をおこなった。その結果、熱放射強度の評価は可能であること、熱交換係数に風速依存性があること、日射強度の評価が可能であること、を示した。熱交換係数に風速依存性があるため、3 色温度計で気温を決定するには、別途、風速測定が必要である。風速を測定しない場合には、温度計をもう 1 つ追加することで気温と風速を同時に決定することができるかもしれない。

謝辞

本研究を行うにあたり，ご指導いただきました指導教員である はしもとじょーじ准教授，実験道具を貸して下さった岡野修助教と野沢徹教授に深く感謝いたします。

同研究室の先輩方から多くの知識を授かりました，感謝いたします。

参考文献

- [1] Schmidlin, F.J., J.K. Luers, P. Huffman (1986) Preliminary estimates of radiosonde thermistor errors. NASA Tech. Paper 2637. 15pp.

- [2] 小林繁夫 (2001) 宇宙工学概論, 丸善.

- [3] アメダス観測測器
(www.tenki.jp/docs/note/amedas/page_2)

- [4] 気象庁
(www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min_s1.php?prec_no=66&block_no=47768&year=2018&month=01&day=12&view=p1)

- [5] スカイモニター
(<http://epa.desc.okayama-u.ac.jp/~astro/skymonitor/2018/01/20180112/201801121300.jpg>)

- [6] 地域気象観測所一覧
(www.jma.go.jp/jma/kishou/known/amedas/ame_master.pdf)