

サーミスタを用いた多色温度計による 気象4要素の測定

岡山大学大学院 自然科学研究科 地球科学専攻
41M21512 竹本 悠人

2023/02/10

要旨

火星着陸機に搭載することを想定して、多色温度計の開発をおこなった。多色温度計は、色（日射吸収率と熱放射率）が異なる温度センサを並べて温度の測定をおこなうことで、気温、日射量、熱放射量、風速などを測定する装置である。本研究は、サーミスタに着色して色の異なる温度センサを作成し、放射環境を制御した室内実験によって温度センサの日射吸収率と熱放射率を測定した。作成した多色温度計を用いて野外で観測をおこない、気温、日射量、熱放射量などの推定が可能性であることを示した。また、作成した多色温度計を温度調整のできる真空チャンバーに入れて、火星模擬環境下で多色温度計が動作することを確認した。

Abstract

We have developed an environment sensor designed to be installed on a Mars lander. Our environment sensor uses multiple thermistors of different colors and measures air temperature, solar radiation, thermal radiation, and wind speed. The thermistors were painted in different colors to give them different emissivities to solar radiation and thermal radiation. The emissivities of colored thermistors were measured in a controlled radiation environment in a laboratory. Our developed multiple thermistors were used for the field observations, and air temperature, solar radiation, and thermal radiation were measured. In addition, the multiple thermistors was tested in a temperature-controlled vacuum chamber, and it was confirmed that it works in a Martian surface environment.

目次

第 1 章	序論	5
1.1	研究背景	5
1.2	研究目的	5
第 2 章	多色温度計	6
2.1	温度センサの熱収支	6
2.2	気象要素の測定原理	7
第 3 章	測定装置	8
3.1	サーミスタ	8
3.2	多色温度計	10
3.3	データロガー	11
第 4 章	多色温度計の改良	12
4.1	測定精度	12
4.2	色の探索	13
4.3	放射環境を制御した実験	14
4.3.1	概要	14

サーミスタを用いた多色温度計による気象 4 要素の測定	4
4.3.2 結果	15
4.4 日射吸収率と熱放射射出率	29
第 5 章 実証実験	32
5.1 器差補正	32
5.2 野外観測	35
5.2.1 概要	35
5.2.2 結果	35
5.3 気象 4 要素の推定	41
第 6 章 火星模擬環境下での動作試験	45
6.1 概要	45
6.2 測定結果	46
第 7 章 まとめ	47

第1章 序論

1.1 研究背景

火星に人間を送り込む有人探査の計画がある。宇宙飛行士の活動は、降下した場所の環境によって制約を受けるため、有人探査の前に降下候補地点の局地的な環境を知っておく必要がある。局地的な環境を知るのに最もよい方法は、その場所に着陸して観測することである。火星の地表に着陸する探査機があるなら、そこに環境計測のための測器を搭載し、着陸地点の環境を観測することが望まれる。探査機に搭載する測器には、重量やサイズ等に厳しい制限が課せられており、頑健である必要もある。火星地表の環境測定に適した測器の開発が必要とされている。

1.2 研究目的

岡山大学地球および惑星大気科学研究室では、火星探査機に搭載する次世代型の小形軽量で頑健な測器として、「多色温度計」の開発を行ってきた(大田 2018, 丸山 2019, 竹本 2021)。多色温度計は、日射の吸収率や熱放射の射出率が異なる複数の温度センサを用いて、気温、日射量、熱放射量、風速、などを測定する測器である。竹本(2021)は、6本のサーミスタを用いた多色温度計を自作し、それを用いて観測をおこなうことで、気温、日射量、熱放射量、風速の測定が原理的に可能であることを示した。

本研究は、竹本(2021)の多色温度計を改良し、観測結果から実際に気温、日射量、熱放射量、風速の推定を行った。

第2章 多色温度計

2.1 温度センサの熱収支

温度センサの熱収支は以下の式で表される.

$$C_x \frac{dT_x}{dt} = -h_x A_x (T_x - T) - \varepsilon_x \sigma T_x^4 A_x + \varepsilon_x L A_x + \alpha_x S A_x + Q_x \quad (2.1)$$

式に出てくる各変数は, 表 2.1 に示す通りである. なお, 添字に x がついた変数は全て温度センサに紐付けされた量で, 添字が付いていない変数は温度センサに依らない量である.

表 2.1: 熱収支の式に関わるパラメータ

パラメータ	記号	単位	備考
温度センサの温度	T_x	K	
熱容量	C_x	JK^{-1}	
温度センサの表面積	A_x	m^2	
熱放射の射出率	ε_x		
日射の吸収率	α_x		
センサの発熱	Q_x	W	
時刻	t		
ステファン・ボルツマン定数	σ	$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$	$\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$
気温	T	K	
センサに入射する日射量	S	Wm^{-2}	センサの単位表面積あたり
センサに入射する熱放射量	L	Wm^{-2}	センサの単位表面積あたり
熱伝達係数	h_x	$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$	風速に依存

温度センサの熱収支の式において、左辺は温度センサが保持する熱量の時間変化率、右辺第 1 項は温度センサと周囲の空気との間の熱交換、第 2 項は温度センサから射出される熱放射による温度センサの冷却、第 3 項は入射する日射による加熱、第 4 項は入射する熱放射による加熱、第 5 項は温度センサ自身の発熱による加熱、である。

温度センサの示す温度は T_x であるが、式に示されるように T_x は気温 T に一致せず、日射や熱放射、周囲の空気との熱交換によって、気温 T と異なる温度になる。すなわち、空気中に剥き出しの状態で置かれた温度センサは、周囲の環境の影響を受けるため、それだけでは気温を知ることはできない。

2.2 気象要素の測定原理

温度センサの熱収支の式 (2.1) は、 T , S , L , h_x の計 4 つの未知数を含む。このうち、熱伝達係数 h_x は風速に依存する。 h_x の風速依存性を前もって実験室で調べておけば、 h_x の代わりに風速 v が未知数となる。

ここで、複数の温度センサを並べて測定することを考える。使用する温度センサとして、固有パラメタ (日射の吸収率 α_x , 熱放射の射出率 ε_x , 発熱量 Q_x , など) が異なるものを用いることにすると、測定に使った温度センサの数と同じ数の熱収支の式が得られる。固有パラメタが異なる 4 つ以上の温度センサで測定を行い、各温度センサの熱収支の式を連立して解けば、気温 T , 日射量 S , 熱放射量 L , 風速 v の値を得ることができる。

温度計の熱収支の式を利用した測器に、3 色温度計 (Schmidlin et al. 1986) がある。3 色温度計はゾンデに搭載され、3 色の温度センサを用いて気温、日射量、熱放射量の観測が行われた。一定速度で上昇するゾンデにおいては、熱伝達係数は一定となるため、未知数の数が減って、3 色の温度センサで気温、日射量、熱放射量の測定が可能となる。地上に設置して観測をおこなう場合には、風速一定を仮定することはできないため、4 色以上の温度センサが必要になる。

第3章 測定装置

3.1 サーミスタ

本研究は、竹本 (2021) と同様に、NTC サーミスタと呼ばれる種類のサーミスタを用いて多色温度計を作成した。サーミスタは、英語では thermistor = thermally sensitive resistor と表される、温度が変わると抵抗値が変化する電子部品である。

NTC サーミスタの抵抗値 R は温度 T の関数として以下の式で与えられる。

$$R = R_0 \exp \left[B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (3.1)$$

ここで、 R_0 は温度 T_0 の時のサーミスタの抵抗値、 B はサーミスタの B 定数と呼ばれ、サーミスタの感度を示す定数である。今回使用したサーミスタ (型番: 103 JT-050) の諸元は、表 3.1 の通りである (SEMITEC 「製品情報 (JT サーミスタ (高精度・薄形))」, https://www.semitec.co.jp/products/thermistor_jt)。

表 3.1: サーミスタ (型番: 103 JT-050) の諸元

R_0	10k Ω
T_0	25°C
B	3435 $\pm$ 1%K

サーミスタと抵抗 R_c を直列にした回路 (図 3.1) を作り、そこに一定の電圧 V_c をかけ、サーミスタにかかる電圧 V を測定する。今回作製した多色温度計は、 $V_c = 3.3(\text{V})$, $R_c = 10(\text{k}\Omega)$ である。

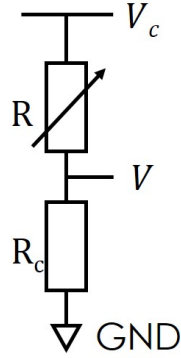


図 3.1: サーミスタと抵抗の分圧回路図

サーミスタの抵抗値 R は，測定した電圧 V から以下の式で計算される．

$$R = \frac{V}{V_c - V} R_c \quad (3.2)$$

これを式 (3.1) に代入して，温度 T について解くと，以下の式が導かれる．

$$T = \frac{1}{\frac{1}{B} \ln \left(\frac{R}{R_0} \right) + \frac{1}{T_0}} \quad (3.3)$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{B} \ln \left(\frac{V}{V_c - V} \frac{R_c}{R_0} \right) + \frac{1}{T_0}} \quad (3.4)$$

また，サーミスタは電気抵抗を持つ素子であることから，電流が流れると発熱する．サーミスタのジュール熱 Q は，サーミスタの抵抗値 R から以下の式で計算される．

$$Q = \left(\frac{V_c}{R_c + R} \right)^2 R \quad (3.5)$$

温度センサの熱収支 (式 (2.1)) に現れるセンサの自己発熱 Q_x は，このサーミスタのジュール熱 Q を含む．

3.2 多色温度計

図 3.2 に、本研究で作成したサーミスタを用いた多色温度計を示す。この装置は、竹本 (2021) と同様に、マイコンに Arduino 互換ボード (Adafruit Feather M0 Adalogger) を用いている。マイコンは、サーミスタと抵抗によって分圧された電圧を 1 秒ごとに 10bit で AD 変換して測定する。測定した電圧は式 (3.4) を用いて温度に換算され、USB シリアル変換して USB ポートから出力される。気象 4 要素を測定するため、4 本のサーミスタで同時測定ができるようになっている。この装置を 2 つ作成し、多色温度計 1 と多色温度計 2 とした。

この装置は、竹本 (2021) で作成した装置と同一の機能を持った装置であるが、サーミスタと回路基板を接続するコネクタを変更したことで、サーミスタの交換が容易になっている。

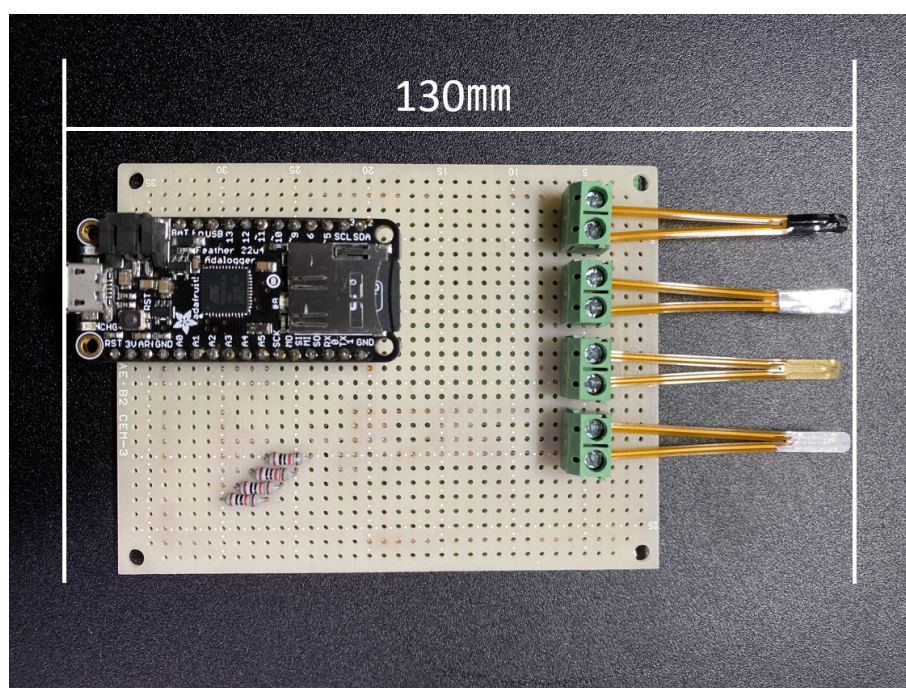


図 3.2: 作成した多色温度計.

3.3 データロガー

多色温度計やその他の測器が出力するデータは、Raspberry Pi 3 Model B+ を用いて記録した。データは測定開始時刻をファイル名とした CSV ファイルに記録される。Raspberry Pi 上ではデータをロギングするプログラムが 1 つ走っていて、それが複数の測器が吐き出すデータをまとめて記録する。測定時刻として記録されるのは Raspberry Pi 自身がつもつ時計の時刻であるため、測器間で時計合わせをする必要はない。Raspberry Pi の時刻は、Raspberry Pi に接続した GPS の時刻、ネットワーク経由の NTP、手入力、のいずれかの方法で合わせることができる。

例として、図 3.3 に、多色温度計 1 つ、超音波風速計 1 つをデータロガーに接続した時の構成図を示す。

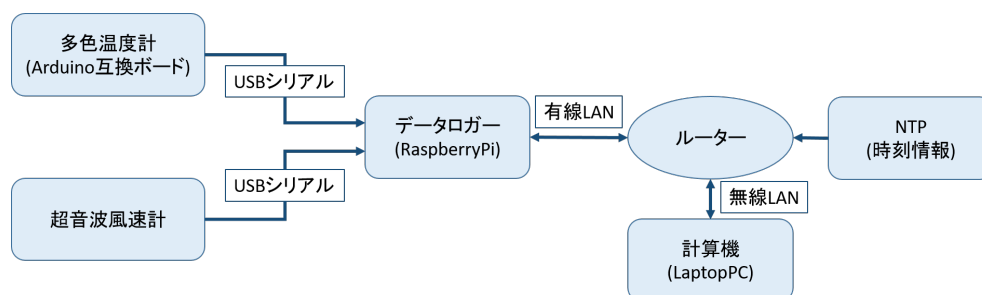


図 3.3: データロガーを使った測定時の構成例

第4章 多色温度計の改良

4.1 測定精度

多色温度計による気象要素推定の精度は、温度センサの固有パラメタに依存する。固有パラメタの値が似ている温度センサがあると、熱収支の式は独立とみなせなくなり、気象要素推定の精度は悪くなる。気象要素を精度よく推定するためには、得られる熱収支の式が互いに独立となるように、固有パラメタの値が大きく異なる温度センサを使用する必要がある。

温度センサの固有パラメタが気象要素推定に及ぼす影響を、もう少し詳しく説明する。例えば、日射の吸収率 α_x だけが異なり、他の固有パラメタが同じであるような3つの温度センサ A, B, C を考える。温度センサに日射があたると、各温度センサは日射の吸収率 α_x の値に応じて日射を吸収して、それぞれ温度が変化する。日射量の推定は、各温度計が示した温度の差に基づいておこなうのであるから、温度差が大きいほど日射量の推定精度は高くなる。すなわち、日射吸収量の大きいセンサと小さいセンサを組み合わせるのがよいということである。同様に、熱放射量の推定をおこなうには、熱放射の射出率 ε_x の大きいセンサと小さいセンサを組み合わせるのがよい。

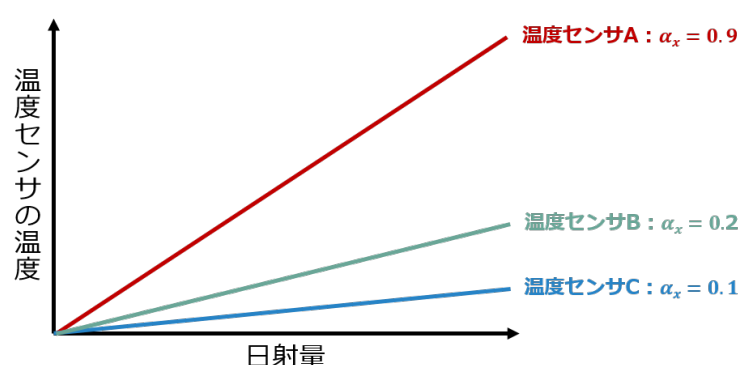


図 4.1: 日射吸収率の異なる温度センサの日射量に対する応答。

4.2 色の探索

本研究では、温度センサにテープを貼るか塗料を塗布することで、吸収率・射出率の異なる温度センサを作成した。また、放射環境を制御した実験をおこなうことで、作成した温度センサの吸収率・射出率を測定した。以下、日射の吸収率および熱放射の射出率を合わせて、色と呼ぶことにする。色が異なるとは、日射の吸収率と熱放射の吸収率の少なくとも 1 つ以上について値が異なることである。本研究で検討した色を、表 4.1 に示す。

表 4.1: サーミスタの色

名称	テープ	塗料
黒		マーカーペン
白		マーカーペン
アルミ	アルミテープ	
銅	銅箔テープ	
アルミ黒	アルミテープ	マーカーペン
金		プラモデル用
銀		プラモデル用
ガンメタ		プラモデル用

4.3 放射環境を制御した実験

4.3.1 概要

図 4.2 に実験で使用した装置を設置した部屋の写真を示す。投光器は日射を模擬するものとして、ホットプレートは地面からの熱放射を模擬するものとして設置した。また、送風機を用いて風の強弱が温度計の出力に及ぼす影響を調べられるようにした。

実験は、2022 年 6 月 29 日、2022 年 7 月 22 日、2022 年 10 月 21 日に行った。各実験日に測定した温度センサの色を表 4.2 に示す。なお、実験日によって装置の配置が異なっているため、名目上は同じ設定の実験であっても、実験日が異なるものは異なる放射環境として取り扱う必要がある。



図 4.2: 装置を設置した実験室

表 4.2: 実験日時

実験日時	色
2022 年 6 月 29 日	黒, 白, アルミ, 銅
2022 年 7 月 22 日	黒, 白, アルミ, 銅
2022 年 10 月 21 日	黒, 白, アルミ, アルミ黒, 金, 銀, ガンメタ

4.3.2 結果

2022 年 6 月 29 日の実験の設定を表 4.3, 2022 年 7 月 29 日の実験の設定を表 4.4, 2022 年 10 月 21 日の実験の設定を表 4.5 に示す. また, 2022 年 6 月 29 日の実験結果を図 4.3 から図 4.6 に, 2022 年 7 月 22 日の実験結果を図 4.7 から図 4.10 に, 2022 年 10 月 21 日の実験結果を図 4.11 から図 4.33 に示す. 表 4.6 から表 4.9 に, 各実験でほぼ定常状態となったときの各温度センサの温度をまとめた.

表 4.3: 2022 年 6 月 29 日の設定

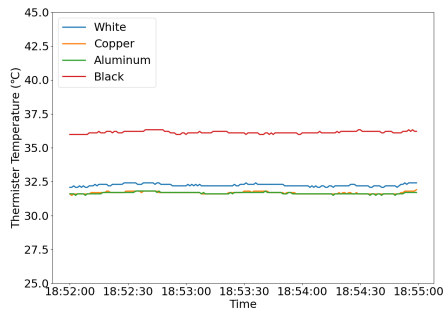
	投光器	ホットプレート	送風機
実験 1-1	1 つオン	オフ	オフ
実験 1-2	1 つオン	オフ	弱
実験 1-3	1 つオン	オフ	強
実験 1-4	2 つオン	オフ	オフ

表 4.4: 2022 年 7 月 22 日の設定

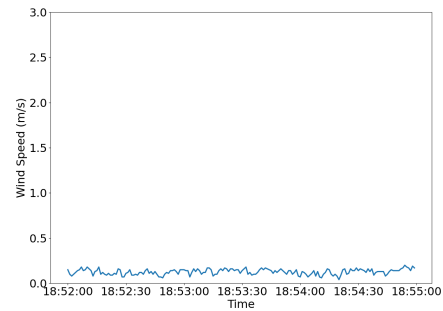
	投光器	ホットプレート	送風機
実験 2-1	オフ	150°C	オフ
実験 2-2	オフ	250°C	オフ
実験 2-3	1 つオン	オフ	オフ
実験 2-4	1 つオン	オフ	弱

表 4.5: 2022 年 10 月 21 日の設定

	投光器	ホットプレート	送風機
実験 3-1	オフ	オフ	オフ
実験 3-2	オフ	オフ	強
実験 3-3	オフ	200°C	オフ
実験 3-4	オフ	200°C	弱
実験 3-5	オフ	200°C	強
実験 3-6	オフ	400°C	オフ
実験 3-7	オフ	400°C	弱
実験 3-8	オフ	400°C	強
実験 3-9	1 つオン	オフ	オフ
実験 3-10	1 つオン	オフ	弱
実験 3-11	1 つオン	オフ	強
実験 3-12	1 つオン	200°C	オフ
実験 3-13	1 つオン	200°C	弱
実験 3-14	1 つオン	200°C	強
実験 3-15	2 つオン	オフ	オフ
実験 3-16	2 つオン	オフ	弱
実験 3-17	2 つオン	オフ	強
実験 3-18	2 つオン	200°C	オフ
実験 3-19	2 つオン	200°C	弱
実験 3-20	2 つオン	200°C	強
実験 3-21	2 つオン	400°C	オフ
実験 3-22	2 つオン	400°C	弱
実験 3-23	2 つオン	400°C	強

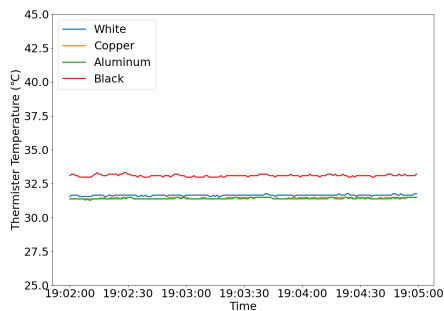


(a) サーミスタ温度 (器差補正無し)

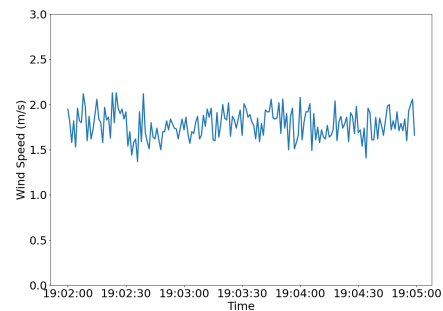


(b) 超音波風速計で測定した風速

図 4.3: 実験 1-1(投光器：1 つオン, ホットプレート：オフ, 送風機：オフ)
ほぼ定常状態となった 180 秒間の切り抜き.

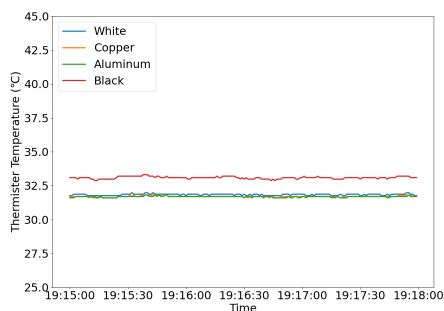


(a) サーミスタ温度 (器差補正無し)

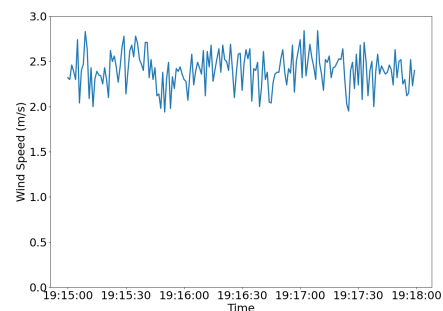


(b) 超音波風速計で測定した風速

図 4.4: 実験 1-2(投光器：1 つオン, ホットプレート：オフ, 送風機：弱)
ほぼ定常状態となった 180 秒間の切り抜き.

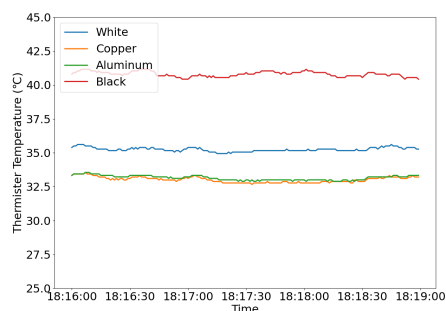


(a) サーミスタ温度 (器差補正無し)

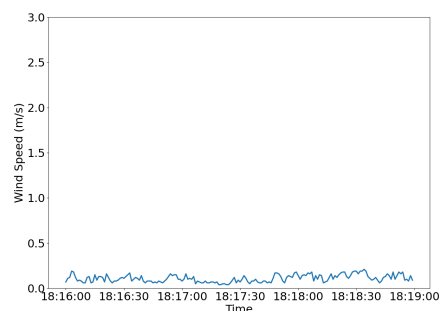


(b) 超音波風速計で測定した風速

図 4.5: 実験 1-3(投光器：1 つオン, ホットプレート：オフ, 送風機：強)
ほぼ定常状態となった 180 秒間の切り抜き.

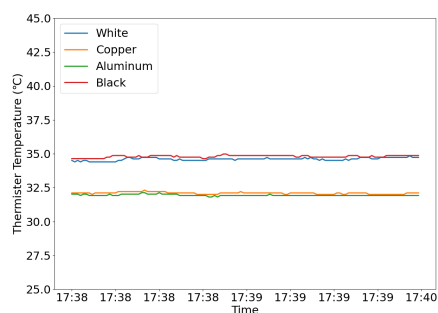


(a) サーミスタ温度 (器差補正無し)

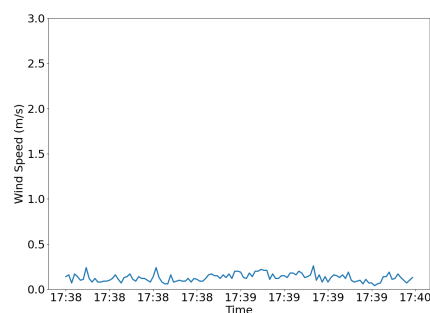


(b) 超音波風速計で測定した風速

図 4.6: 実験 1-4(投光器：2つオン, ホットプレート：オフ, 送風機：オフ)
ほぼ定常状態となった 180 秒間の切り抜き。

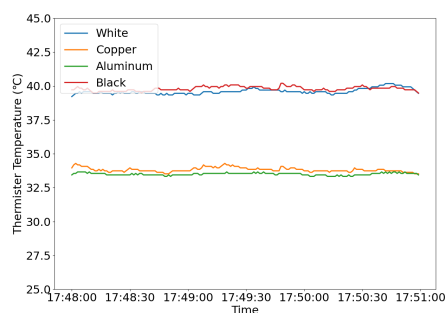


(a) サーミスタ温度 (器差補正無し)

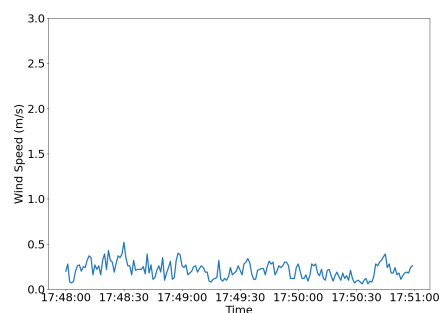


(b) 超音波風速計で測定した風速

図 4.7: 実験 2-1(投光器：オフ, ホットプレート：150°C, 送風機：オフ)
ほぼ定常状態となった 120 秒間の切り抜き。

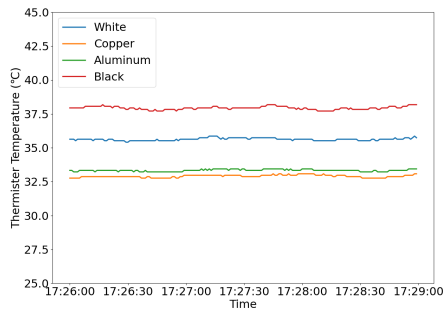


(a) サーミスタ温度 (器差補正無し)

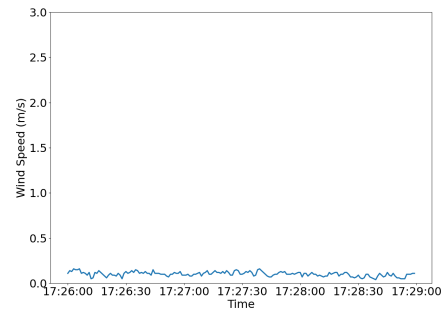


(b) 超音波風速計で測定した風速

図 4.8: 実験 2-2(投光器：オフ, ホットプレート：250°C, 送風機：オフ)
ほぼ定常状態となった 180 秒間の切り抜き。

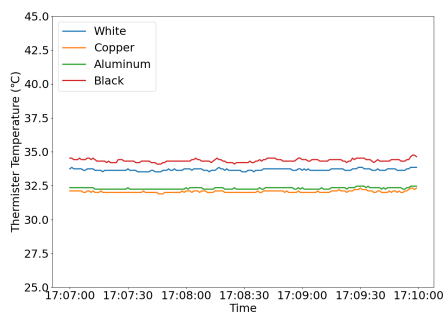


(a) サーミスタ温度 (器差補正無し)

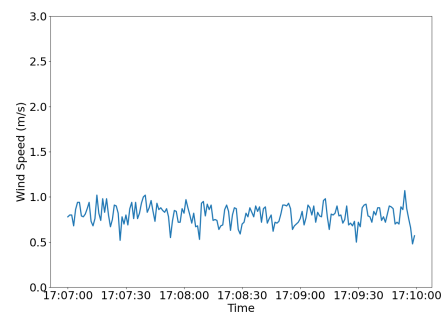


(b) 超音波風速計で測定した風速

図 4.9: 実験 2-3(投光器：1つオン, ホットプレート：オフ, 送風機：オフ)
ほぼ定常状態となった180秒間の切り抜き.

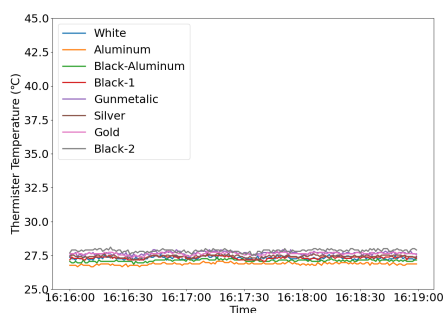


(a) サーミスタ温度 (器差補正無し)

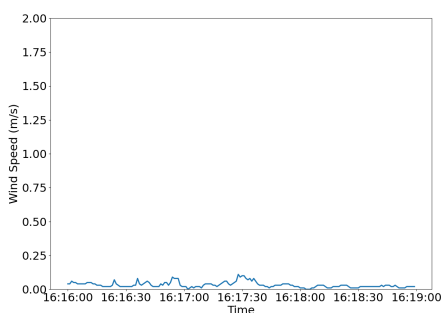


(b) 超音波風速計で測定した風速

図 4.10: 実験 2-4(投光器：1つオン, ホットプレート：オフ, 送風機：弱)
ほぼ定常状態となった180秒間の切り抜き.

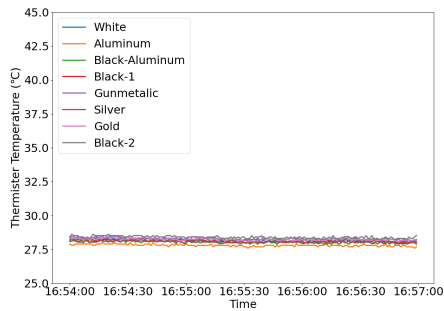


(a) サーミスタ温度 (器差補正無し)

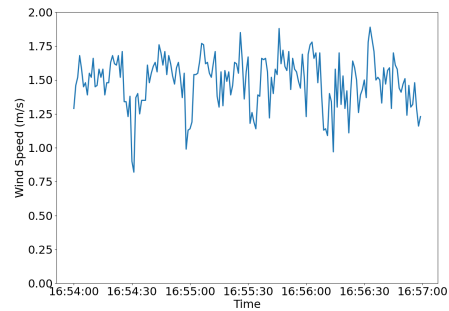


(b) 超音波風速計で測定した風速

図 4.11: 実験 3-1(投光器：オフ, ホットプレート：オフ, 送風機：オフ)
ほぼ定常状態となった180秒間の切り抜き.

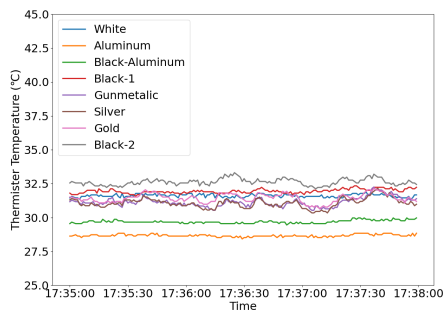


(a) サーミスタ温度 (器差補正無し)

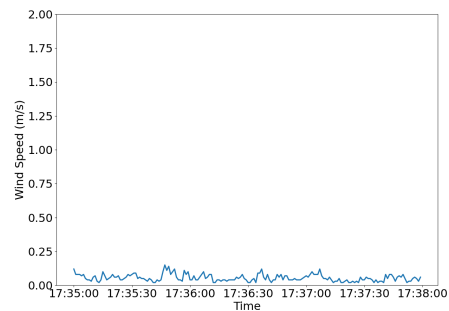


(b) 超音波風速計で測定した風速

図 4.12: 実験 3-2(投光器：オフ, ホットプレート：オフ, 送風機：強)
ほぼ定常状態となった 180 秒間の切り抜き.

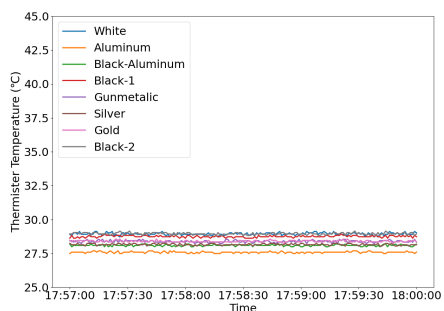


(a) サーミスタ温度 (器差補正無し)

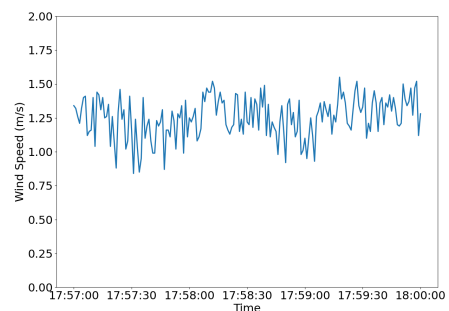


(b) 超音波風速計で測定した風速

図 4.13: 実験 3-3(投光器：オフ, ホットプレート：200°C, 送風機：オフ)
ほぼ定常状態となった 180 秒間の切り抜き.

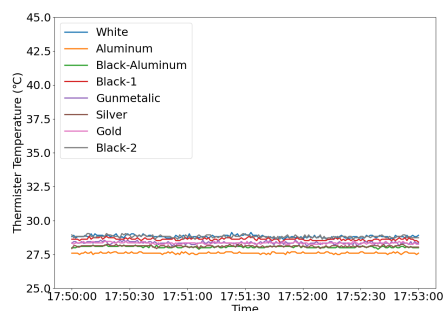


(a) サーミスタ温度 (器差補正無し)

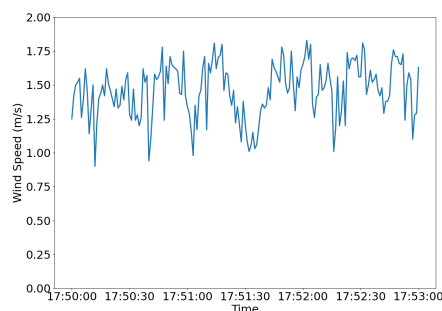


(b) 超音波風速計で測定した風速

図 4.14: 実験 3-4(投光器：オフ, ホットプレート：200°C, 送風機：弱)
ほぼ定常状態となった 180 秒間の切り抜き.

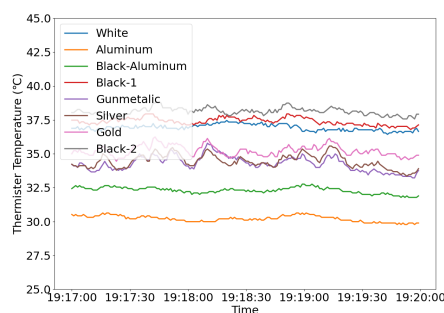


(a) サーミスタ温度 (器差補正無し)

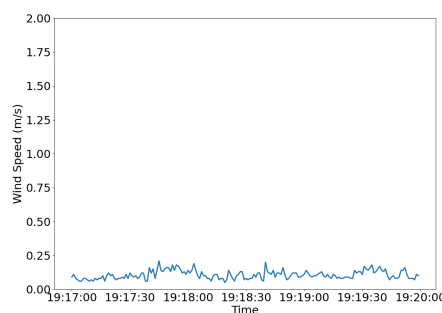


(b) 超音波風速計で測定した風速

図 4.15: 実験 3-5(投光器：オフ, ホットプレート：200°C, 送風機：強)
ほぼ定常状態となった 180 秒間の切り抜き.

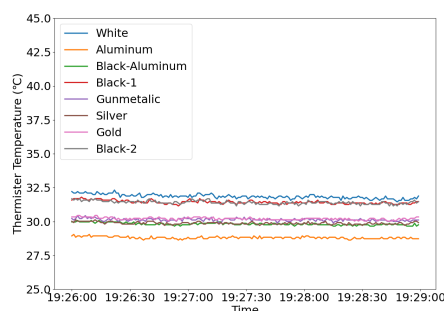


(a) サーミスタ温度 (器差補正無し)

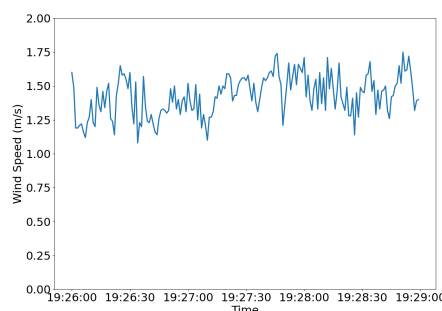


(b) 超音波風速計で測定した風速

図 4.16: 実験 3-6(投光器：オフ, ホットプレート：400°C, 送風機：オフ)
ほぼ定常状態となった 180 秒間の切り抜き.

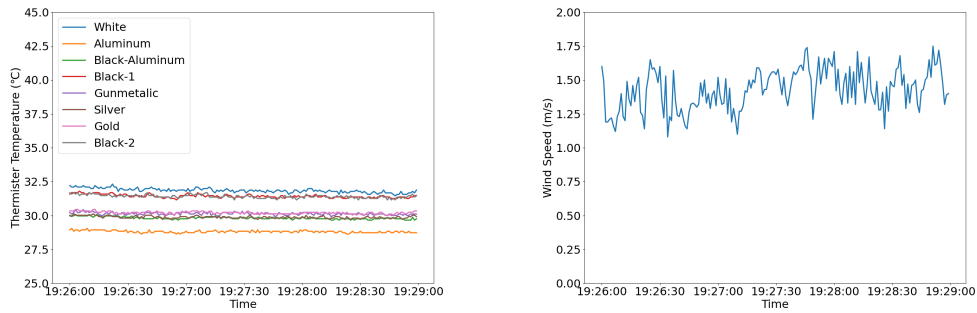


(a) サーミスタ温度 (器差補正無し)



(b) 超音波風速計で測定した風速

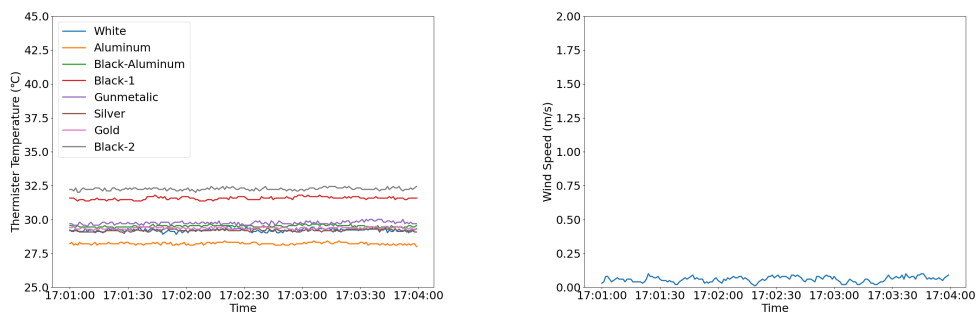
図 4.17: 実験 3-7(投光器：オフ, ホットプレート：400°C, 送風機：弱)
ほぼ定常状態となった 180 秒間の切り抜き.



(a) サーミスタ温度 (器差補正無し)

(b) 超音波風速計で測定した風速

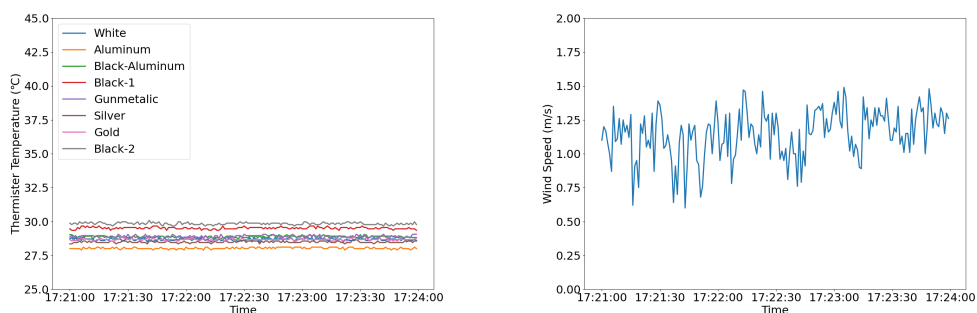
図 4.18: 実験 3-8(投光器：オフ, ホットプレート：400°C, 送風機：強)
ほぼ定常状態となった 180 秒間の切り抜き.



(a) サーミスタ温度 (器差補正無し)

(b) 超音波風速計で測定した風速

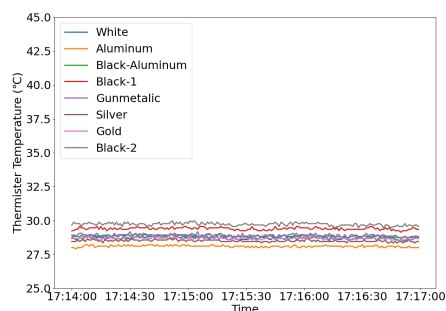
図 4.19: 実験 3-9(投光器：1つオン, ホットプレート：オフ, 送風機：オフ)
ほぼ定常状態となった 180 秒間の切り抜き.



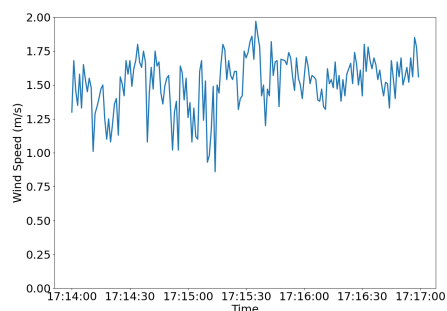
(a) サーミスタ温度 (器差補正無し)

(b) 超音波風速計で測定した風速

図 4.20: 実験 3-10(投光器：1つオン, ホットプレート：オフ, 送風機：弱)
ほぼ定常状態となった 180 秒間の切り抜き.

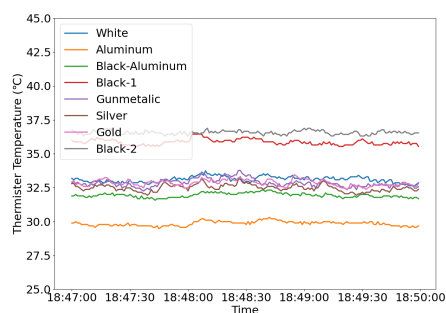


(a) サーミスタ温度 (器差補正無し)

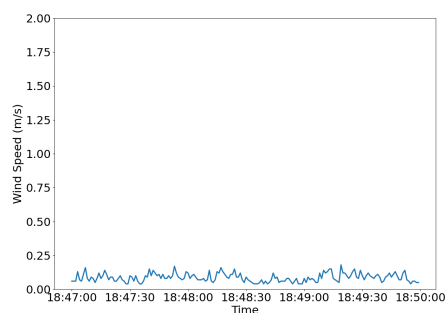


(b) 超音波風速計で測定した風速

図 4.21: 実験 3-11(投光器：1 つオン, ホットプレート：オフ, 送風機：強)
ほぼ定常状態となった 180 秒間の切り抜き.

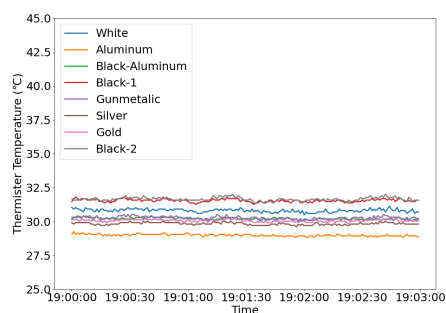


(a) サーミスタ温度 (器差補正無し)

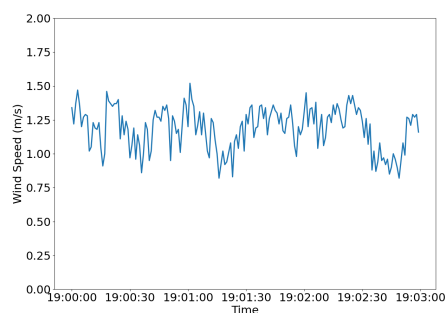


(b) 超音波風速計で測定した風速

図 4.22: 実験 3-12(投光器：1 つオン, ホットプレート：200°C, 送風機：オフ)
ほぼ定常状態となった 180 秒間の切り抜き.

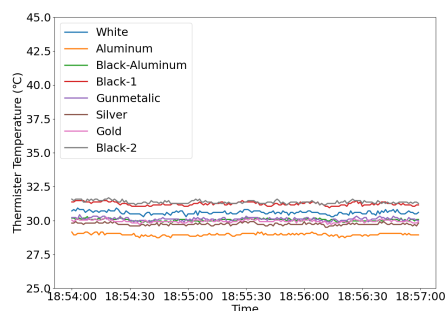


(a) サーミスタ温度 (器差補正無し)

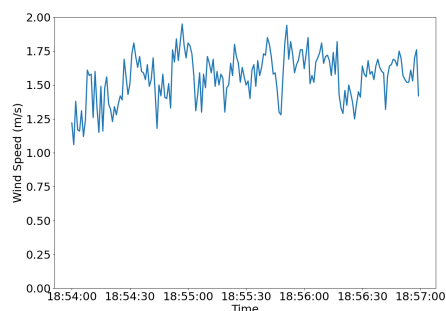


(b) 超音波風速計で測定した風速

図 4.23: 実験 3-13(投光器：1 つオン, ホットプレート：200°C, 送風機：弱)
ほぼ定常状態となった 180 秒間の切り抜き.

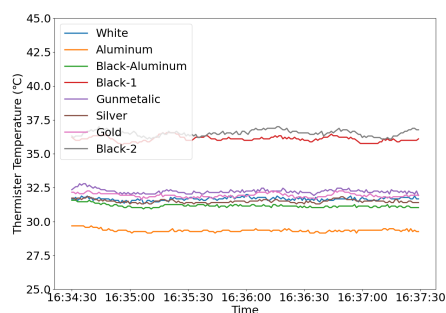


(a) サーミスタ温度 (器差補正無し)

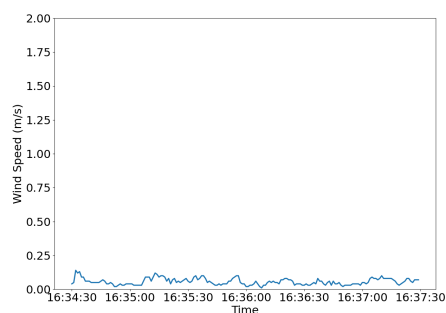


(b) 超音波風速計で測定した風速

図 4.24: 実験 3-14(投光器：1 つオン, ホットプレート：200°C, 送風機：強) ほぼ定常状態となった 180 秒間の切り抜き.

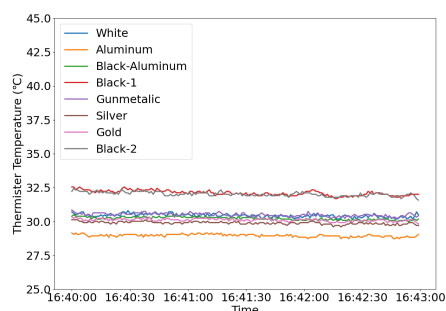


(a) サーミスタ温度 (器差補正無し)

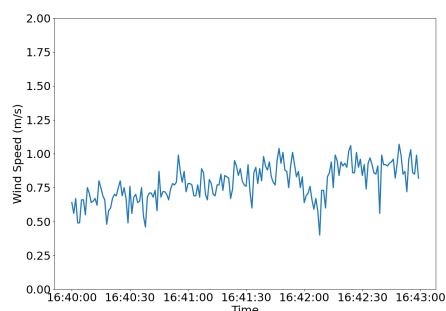


(b) 超音波風速計で測定した風速

図 4.25: 実験 3-15(投光器：2 つオン, ホットプレート：オフ, 送風機：オフ) ほぼ定常状態となった 180 秒間の切り抜き.

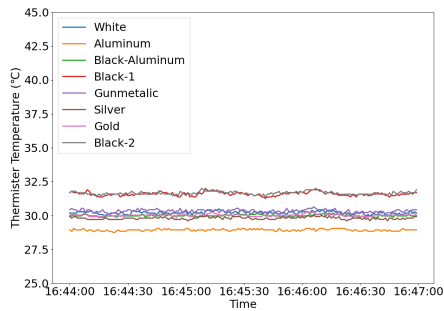


(a) サーミスタ温度 (器差補正無し)

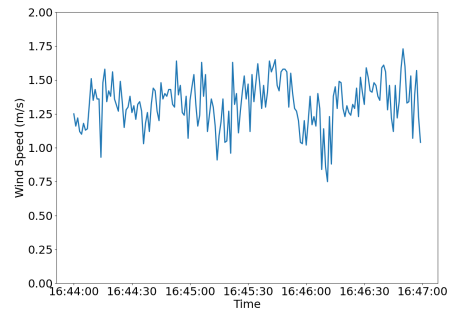


(b) 超音波風速計で測定した風速

図 4.26: 実験 3-16(投光器：2 つオン, ホットプレート：オフ, 送風機：弱) ほぼ定常状態となった 180 秒間の切り抜き.

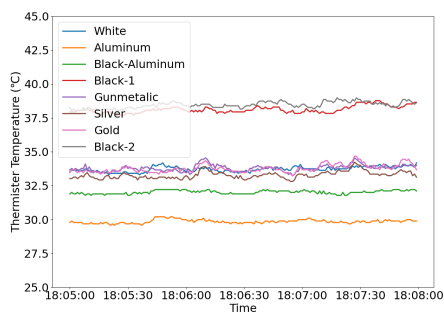


(a) サーミスタ温度 (器差補正無し)

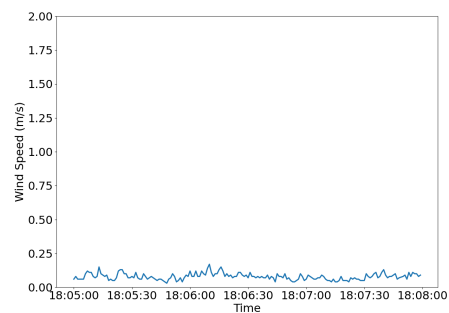


(b) 超音波風速計で測定した風速

図 4.27: 実験 3-17(投光器：2つオン, ホットプレート：オフ, 送風機：強)
ほぼ定常状態となった180秒間の切り抜き.

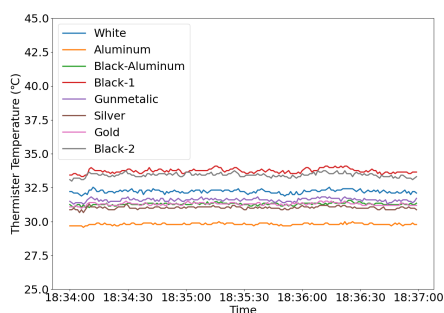


(a) サーミスタ温度 (器差補正無し)

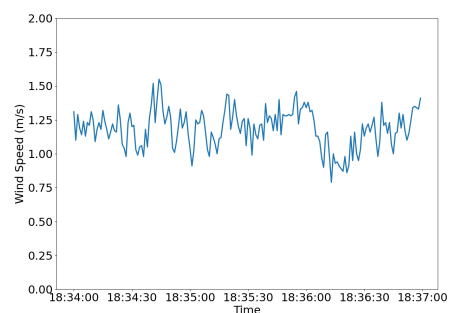


(b) 超音波風速計で測定した風速

図 4.28: 実験 3-18(投光器：2つオン, ホットプレート：200°C, 送風機：オフ)
ほぼ定常状態となった180秒間の切り抜き.

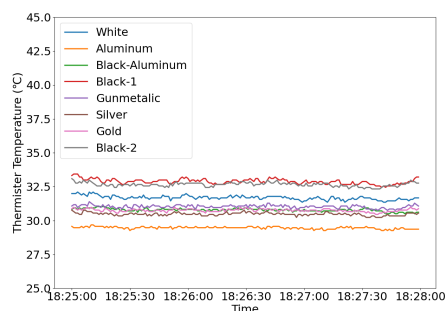


(a) サーミスタ温度 (器差補正無し)

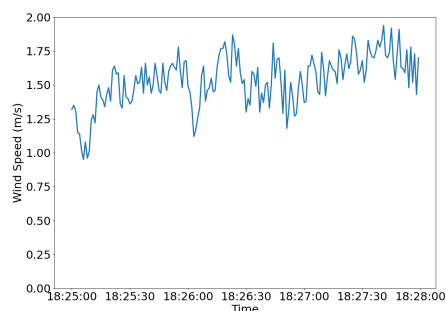


(b) 超音波風速計で測定した風速

図 4.29: 実験 3-19(投光器：2つオン, ホットプレート：200°C, 送風機：弱)
ほぼ定常状態となった180秒間の切り抜き.

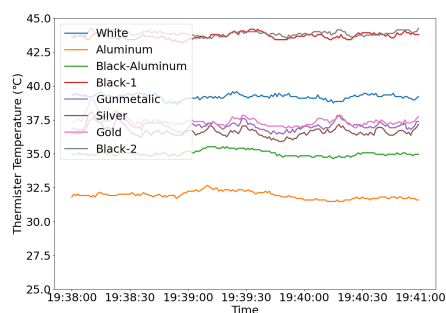


(a) サーミスタ温度 (器差補正無し)

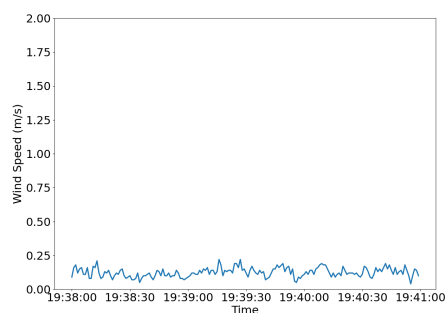


(b) 超音波風速計で測定した風速

図 4.30: 実験 3-20(投光器：2 つオン, ホットプレート：200°C, 送風機：強) ほぼ定常状態となった 180 秒間の切り抜き.

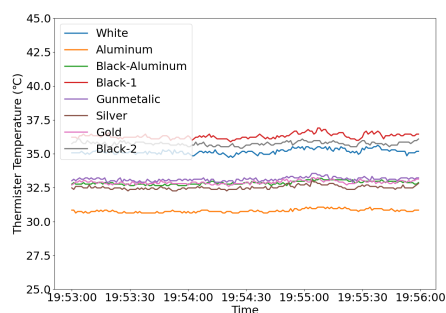


(a) サーミスタ温度 (器差補正無し)

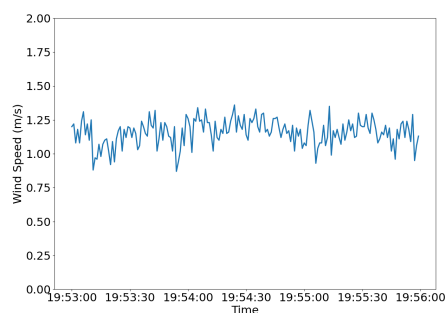


(b) 超音波風速計で測定した風速

図 4.31: 実験 3-21(投光器：2 つオン, ホットプレート：400°C, 送風機：オフ) ほぼ定常状態となった 180 秒間の切り抜き.

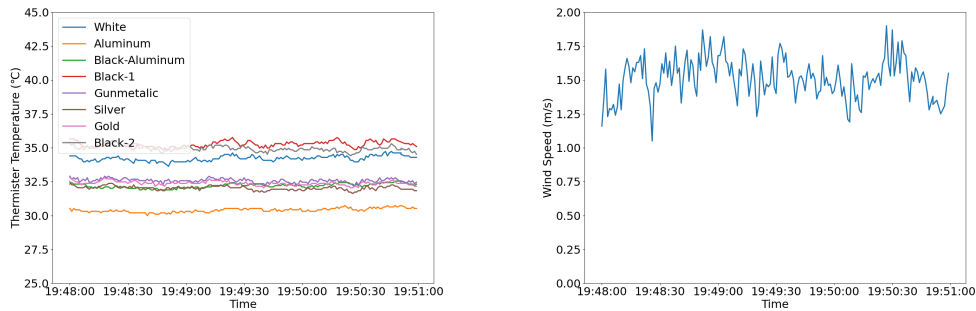


(a) サーミスタ温度 (器差補正無し)



(b) 超音波風速計で測定した風速

図 4.32: 実験 3-22(投光器：2 つオン, ホットプレート：400°C, 送風機：弱) ほぼ定常状態となった 180 秒間の切り抜き.



(a) サーミスタ温度 (器差補正無し)

(b) 超音波風速計で測定した風速

図 4.33: 実験 3-23(投光器：2 つオン, ホットプレート：400°C, 送風機：強) ほぼ定常状態となった 180 秒間の切り抜き.

表 4.6: 2022 年 6 月 29 日の実験における投光器の状態に対する各センサの温度 (ホットプレート：オフ, 送風機：オフ).

	オフ	1 つオン	2 つオン	2 つオン - 1 つオン
黒	-	36.14	40.80	4.66
白	-	32.24	35.24	3.00
アルミ	-	31.65	33.15	1.50
銅	-	31.67	33.01	1.34

表 4.7: 2022 年 7 月 22 日の実験におけるホットプレートの温度に対する各センサの温度 (投光器：オフ, 送風機：オフ).

	オフ	150°C	250°C	250°C - 150°C
黒	-	34.80	39.80	5.00
白	-	34.60	39.60	5.00
アルミ	-	32.10	33.82	1.72
銅	-	31.94	33.50	1.56

表 4.8: 2022 年 10 月 21 日の実験における投光器の状態に対する各センサの温度 (ホットプレート：オフ, 送風機：オフ).

	オフ	1 つオン	2 つオン	1 つオン - オフ	2 つオン - オフ
黒 1	27.33	31.57	36.09	4.24	8.76
黒 2	27.85	32.26	36.52	4.41	8.87
白	27.32	29.22	31.66	1.90	4.34
アルミ	26.87	28.23	29.33	1.36	2.46
アルミ黒	27.11	29.51	31.59	2.40	4.48
金	27.63	29.37	31.93	1.74	4.30
銀	27.43	29.19	31.49	1.76	4.06
ガンメタ	27.67	29.75	32.23	2.08	4.56

表 4.9: 2022 年 10 月 21 日の実験におけるホットプレートの温度に対する各センサの温度 (投光器：オフ, 送風機：オフ).

	オフ	200°C	400°C	200°C - オフ	400°C - オフ
黒 1	27.33	31.94	37.40	4.61	10.07
黒 2	27.85	32.62	38.12	4.77	10.27
白	27.32	31.61	36.93	4.29	9.61
アルミ	26.87	28.67	30.21	1.80	3.34
アルミ黒	27.11	29.69	32.30	2.58	5.19
金	27.63	31.43	35.23	3.80	7.60
銀	27.43	31.07	34.44	3.64	7.01
ガンメタ	27.67	31.14	34.27	3.47	6.60

4.4 日射吸収率と熱放射射出率

定常状態で日射がない場合を考える．このとき，温度センサの熱収支の式は以下のようになる．

$$0 = -h_x A_x (T_x - T) - \varepsilon_x \sigma T_x^4 A_x + \varepsilon_x L A_x + Q_x \quad (4.1)$$

ここで，温度センサの温度と気温の差を

$$\Delta_x = T_x - T \quad (4.2)$$

として， $\Delta_x/T \ll 1$ の場合を考えると，温度センサの熱収支の式は以下のようになる．

$$0 \simeq -h_x A_x \Delta_x - \varepsilon_x (\sigma T^4 + 4\sigma T^3 \Delta_x) A_x + \varepsilon_x L A_x + Q_x \quad (4.3)$$

これを， Δ_x について解けば，

$$\Delta_x \simeq \frac{L - \sigma T^4 + (Q_x/A_x)/\varepsilon_x}{(4\sigma T^3) + h_x/\varepsilon_x} \quad (4.4)$$

ホットプレートで温度センサを強く加熱している場合は，自己発熱 Q_x を無視することができ，そのとき温度センサの温度と気温の差 Δ_x は，熱放射の射出率 ε_x が大きいものほど，大きくなる．このことより，表 4.9 にまとめた結果は，温度センサの熱放射の射出率の大小が，アルミ < アルミ黒 < ガンメタ，銀，金 < 白 < 黒，であることを示している．

次に，日射がある場合の熱収支を考える．日射以外の条件は変わらず，日射がないときに T_x であった温度センサの温度が，日射があることで T'_x になると，

$$0 = -h_x A_x (T'_x - T) - \varepsilon_x \sigma T_x'^4 A_x + \varepsilon_x L A_x + \alpha_x S A_x + Q_x \quad (4.5)$$

この式から、日射がない場合の熱収支の式 (4.1) を引くと、

$$0 = -h_x(T'_x - T_x) - \varepsilon\sigma T_x'^4 + \varepsilon\sigma T_x^4 + \alpha_x S \quad (4.6)$$

日射がある時とない時の温度センサの温度差を

$$\delta_x = T'_x - T_x \quad (4.7)$$

として、 $\delta/T_x \ll 1$ の場合について式を書き直すと、

$$0 \simeq -h_x\delta_x - \varepsilon_x(4\sigma T_x^3\delta_x) + \alpha_x S \quad (4.8)$$

$$\delta_x \simeq \frac{\alpha_x S}{\varepsilon_x(4\sigma T_x^3) + h_x} \quad (4.9)$$

日射による温度センサの温度上昇 δ_x は、日射の吸収率 α_x に比例し、熱放射の射出率 ε_x が大きいと小さくなる。

日射によるセンサの温度上昇 δ_x は、日射の吸収率に比例するが、それだけでなく熱放射の射出率にも依存するため、これだけで日射吸収率の大小を議論することはできない。ここでは簡単に、温度上昇の大きさは日射吸収率に比例すると考えて、表 4.8 の結果から、各温度センサの日射吸収率の大小は、アルミ < アルミ黒、銀、金、白、ガンメタ < 黒、であるとしておく。繰り返すが、この結果はおおまかな傾向を表しているだけであり、詳細な解析をすれば、大小が入れ替わる可能性があることに、注意が必要である。

日射の吸収率の推定については、実験にも問題があったことを指摘しておく。式 (4.10) は、日射以外の条件が変わらないとして導いたものであるが、実験室で投光器を使用したときは、投光器によって照らされた床や机の温度が上昇してしまったため、熱放射の大きさ L が同じになっていない。また、投光器の配置などに問題があったため、温度センサの位置によって投光器による加熱の大きさ S が異なっていた。加熱量の違いはそのまま温度上昇の大きさに直結するため、実験で示された温度上昇が日射の吸収率に対応していない可能性が高い。日射吸収率の推定をおこなうには、実験方法の改良が必要である。

表 4.10 に、本研究で用意した 8 色の温度センサの、日射の吸収率 α_x と、熱放射の射出率 ε_x を大まかに分類した結果を示す。

表 4.10: 各サーミスタの放射特性

センサの色	日射の吸収率 α_x	熱放射の射出率 ε_x
黒	大	大
白	中	大
アルミ	小	小
銅	小	小
アルミ黒	中	中
金	中	中
銀	中	中
ガンメタ	中	中

* 実験に問題があるため、日射の吸収率の大小は入れ替わりがあるかもしれない。

実験結果に基づいて、多色温度計のセンサとして、黒、白、アルミ、金、の 4 色を採用することにした。黒は、日射の吸収率 α_x が大きく、熱放射の射出率 ε_x も大きい。白は、日射の吸収率 α_x が小さく、熱放射の射出率 ε_x が大きい。この 2 色を用いることで、日射量を精度よく推定することができると考えた。次に、熱放射の射出率が異なるセンサとして、アルミを採用した。ちなみに、アルミと銅は、どちらもテープを使用しているため、塗料を塗布したものとはセンサの熱容量が異なる可能性がある。塗料でテープと同じ放射特性を持つものが見つければ、置き換えるのがよいだろう。4 つ目のセンサは、これまでに選定した 3 つと比較的に異なるパラメータを持つ、金を選んだ。

ここでは、日射の吸収率と熱放射の射出率という、放射に関係したパラメータに基づいて温度センサを選定したが、温度センサ固有のパラメータは放射特性以外にもある。例えば、熱伝達係数 h_x が異なるセンサを選んでもよいし、自己発熱 Q_x の大きさが違うセンサを使うのでもよい。特に、風速の測定を考えるなら、熱伝達係数や自己発熱の大きさが異なるセンサを選定することで、風速の推定精度を向上させることができる可能性がある。熱伝達係数や自己発熱の大きさを変えたセンサの利用は、今後の課題である。

第5章 実証実験

5.1 器差補正

器差は、測器が示す値と本来示すべき値の差である。本研究は、竹本 (2021) と同様の方法で器差補正を行った。まず、黒、白、アルミ、金、それぞれ 2 本ずつの計 8 本のサーミスタを水に浸け、2 時間の連続測定を行った (図 5.1)。水の温度を調整することをしなかったため、最初は約 50°C であった水温は徐々に冷えて最後は 20°C くらいになった。8 本のサーミスタの示した温度の平均を計算し、それをサーミスタが本来示すべき温度とした。各サーミスタの器差は、8 本の平均からのずれとして求めた。図 5.2 は、多色温度計 1 と多色温度計 2 に接続されたサーミスタの示した 8 本の平均からのずれを描いたものである。表 5.1 は実験によって決定された各サーミスタの器差である。

図 5.1 では 8 本の温度センサがほとんど重なっていて差が見えにくくなっているが、図 5.2 を見ると温度センサごとに違いがあるとわかる。多くの温度センサは、水温に依らず、ほぼ一定の器差を示した。一方で、いくつかのセンサは、水温によって器差の大きさが変化するように見える。ここでは、器差は温度に依らず一定であると仮定して、各温度センサの器差を求めた (表 5.1)。温度によって器差の大きさが変わるように見えるセンサがあったことを考えると、器差の温度依存性を考慮した補正をおこなうべきであったかもしれない。あるいは、器差に温度依存性があるように見えたセンサを捨てて、器差の温度依存性が小さいセンサのみを使用すべきであったかもしれない。これらは、今後の課題である。

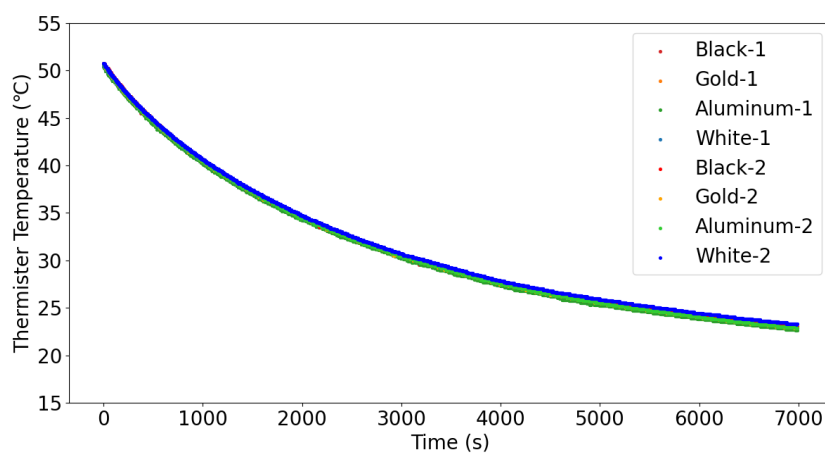


図 5.1: 水に浸けた 8 本のサーミスタが測定した温度. 横軸は測定開始からの時間.

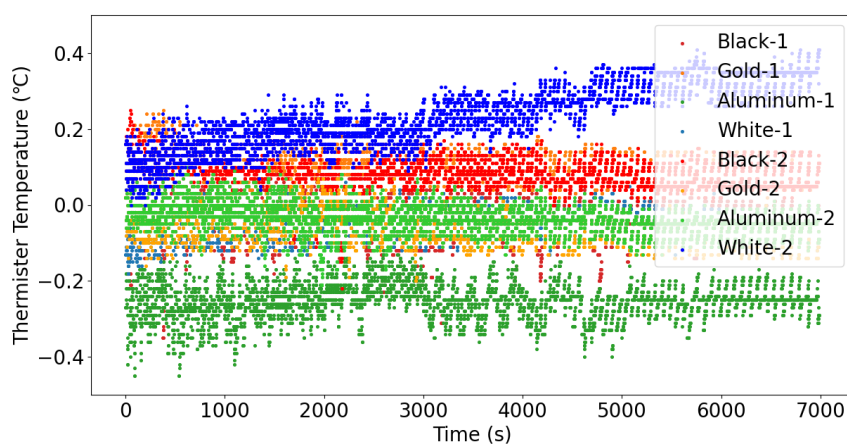


図 5.2: 水に浸けた 8 本のサーミスタが示した温度のずれ. 8 本の平均と一致するとき 0, 8 本の平均より高い時に正, 低いときに負. 横軸は測定開始からの時間.

表 5.1: 各サーミスタの補正量

色	2 時間平均 (°C)	平均からのずれ (°C)
白 1	31.19	-0.04
黒 1	31.20	-0.03
アルミ 1	30.98	-0.25
金 1	31.33	0.09
白 2	31.47	0.24
黒 2	31.31	0.08
アルミ 2	30.19	-0.04
金 2	31.47	-0.05
平均	31.23	

5.2 野外観測

5.2.1 概要

図 5.3 に野外観測のために設置した装置の全景写真を示す。また、図 5.4 に設置した装置の拡大写真を示す。野外観測のために設置した三脚の上に超音波風速計を固定し、その上に作成した多色温度計 1 を固定した。場所はアメダス (岡山) の横、約 10 m、測温部が地表からおおよそ 1.4 m の高さに位置するように設置して、温度、風速、風向を 1 秒間隔で測定した。表 5.2 に、観測日時を示す。なお、夜は超音波風速計を用いず、多色温度計のみで観測を行った。



図 5.3: 設置した装置の全景



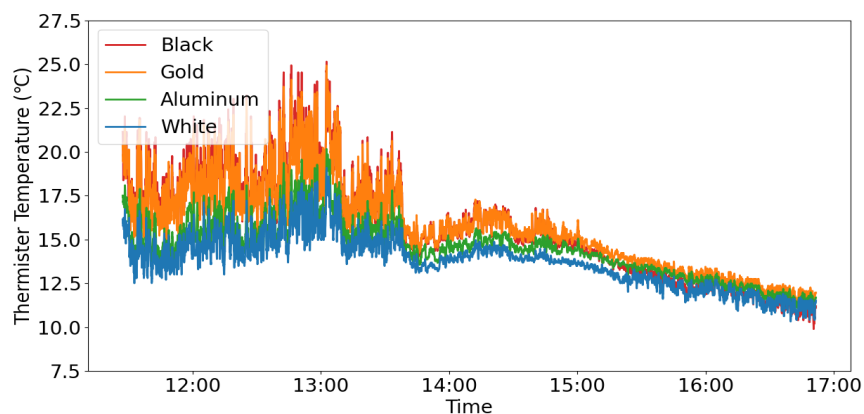
図 5.4: 設置した装置の拡大写真

表 5.2: 観測日時

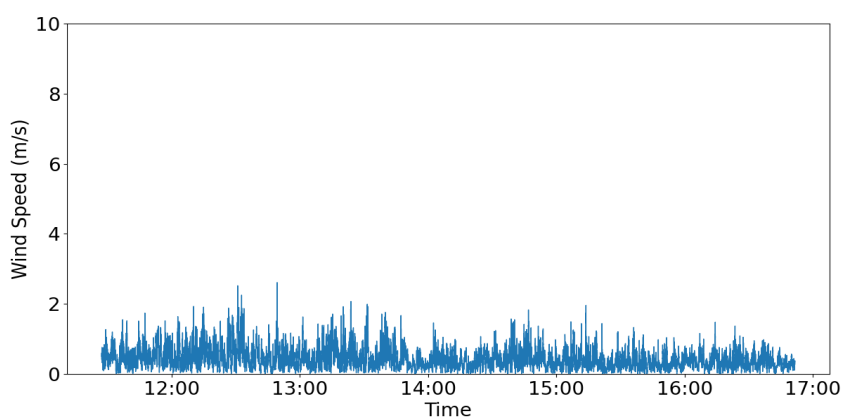
観測日	観測時刻
2022 年 12 月 9 日	11:27 - 16:51
2022 年 12 月 9 日	17:04 - 22:59
2022 年 12 月 10 日	09:30 - 19:19
2022 年 12 月 10 日	19:31 - 31:34
2022 年 12 月 11 日	08:41 - 17:10
2022 年 12 月 13 日	08:29 - 17:40
2022 年 12 月 13 日	17:48 - 29:52
2022 年 12 月 14 日	13:19 - 20:13

5.2.2 結果

観測結果を図 5.5 から図 5.12 に示す。



(a) 多色温度計 1 のサーミスタ温度 (器差補正あり)



(b) 超音波風速計で測定した風速

図 5.5: 2022 年 12 月 9 日 (昼) の観測結果

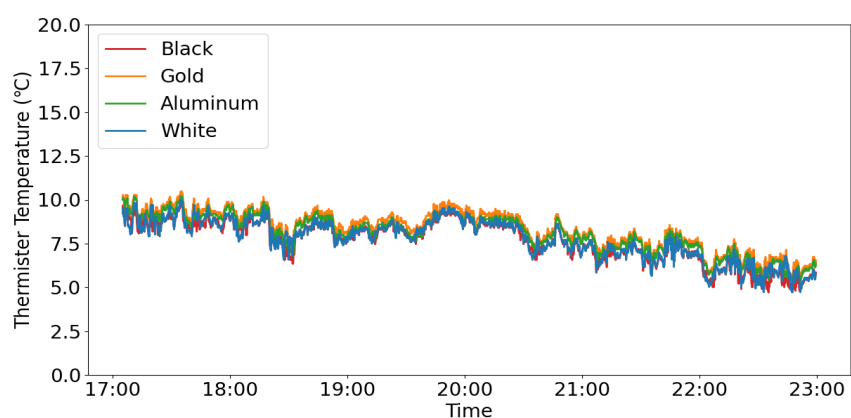
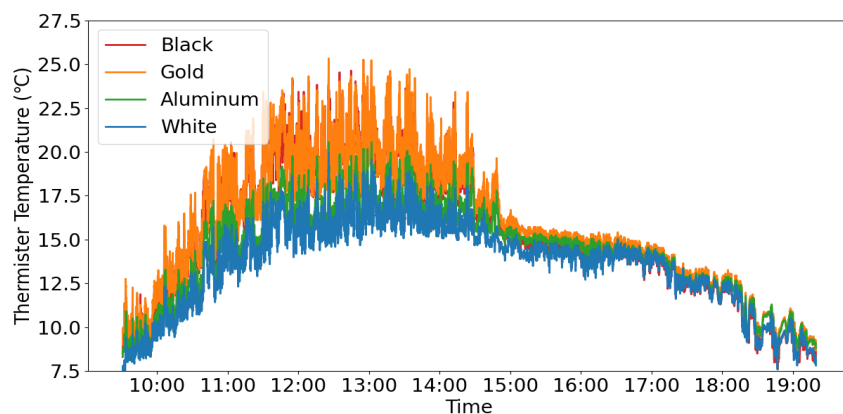
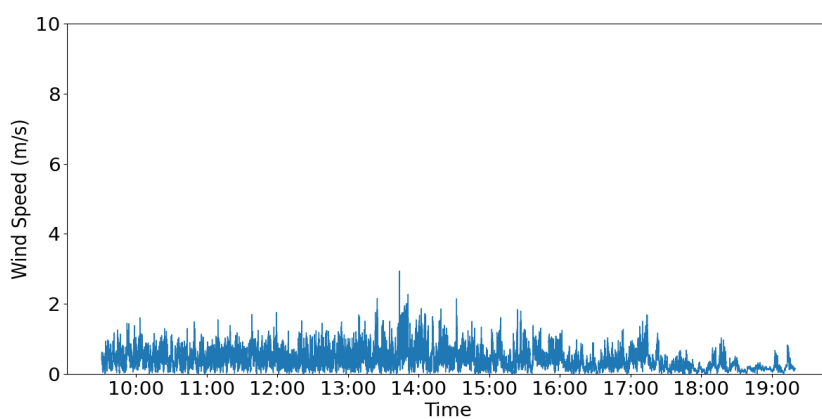


図 5.6: 2022 年 12 月 9 日 (夜) の観測結果. 横軸は時刻, 縦軸は多色温度計 1 のサーミスタ温度 (器差補正あり).



(a) 多色温度計 1 のサーミスタ温度 (器差補正あり)



(b) 超音波風速計で測定した風速

図 5.7: 2022 年 12 月 10 日 (昼) の観測結果

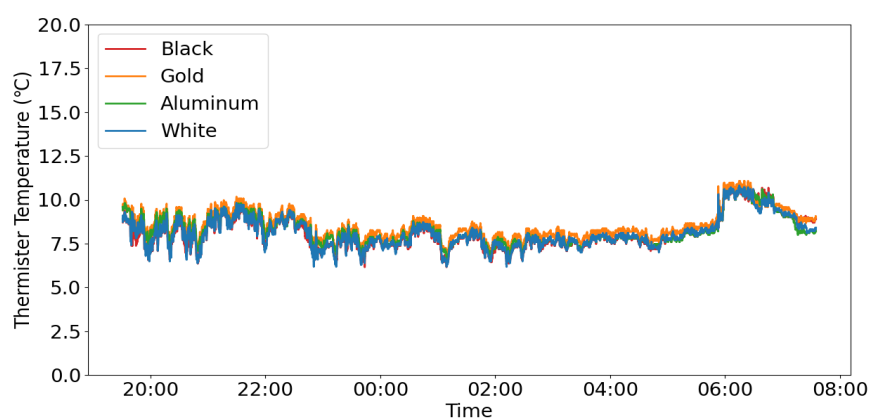
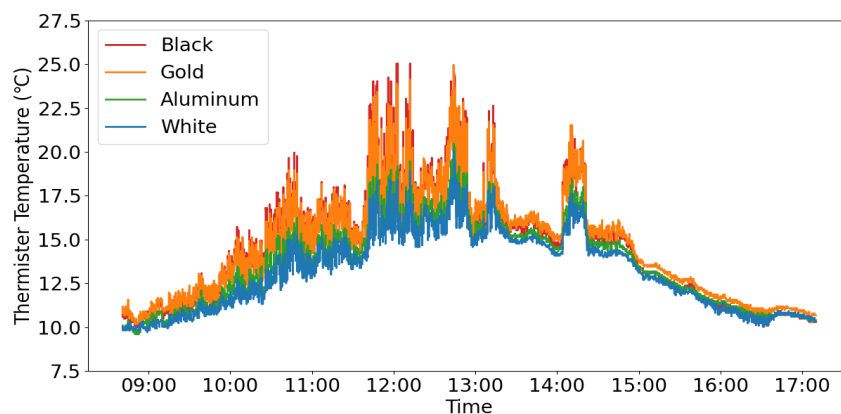
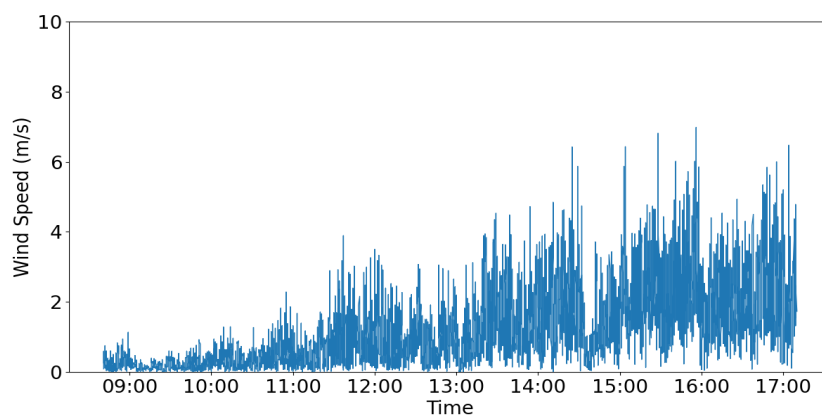


図 5.8: 2022 年 12 月 10 日 (夜) の観測結果. 横軸は時刻, 縦軸は多色温度計 1 のサーミスタ温度 (器差補正あり).

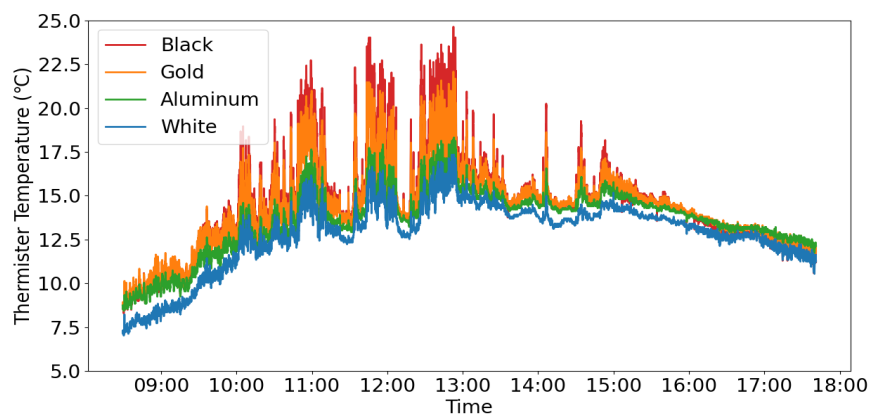


(a) 多色温度計 1 のサーミスタ温度 (器差補正あり)

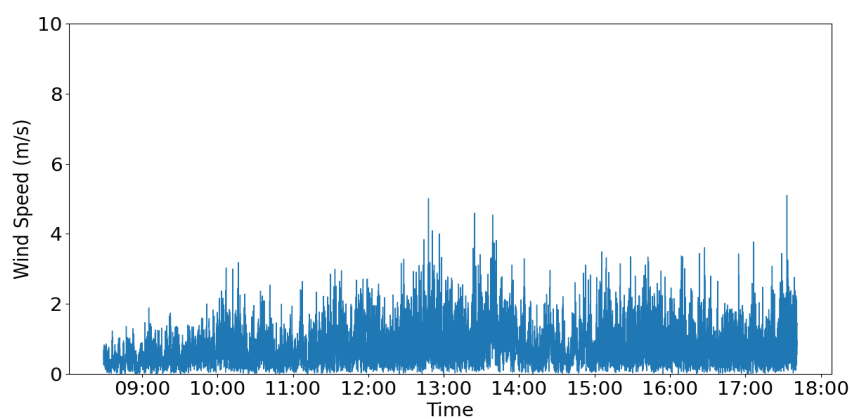


(b) 超音波風速計で測定した風速

図 5.9: 2022 年 12 月 11 日 (昼) の観測結果



(a) 多色温度計 1 のサーミスタ温度 (器差補正あり)



(b) 超音波風速計で測定した風速

図 5.10: 2022 年 12 月 13 日 (昼) の観測結果

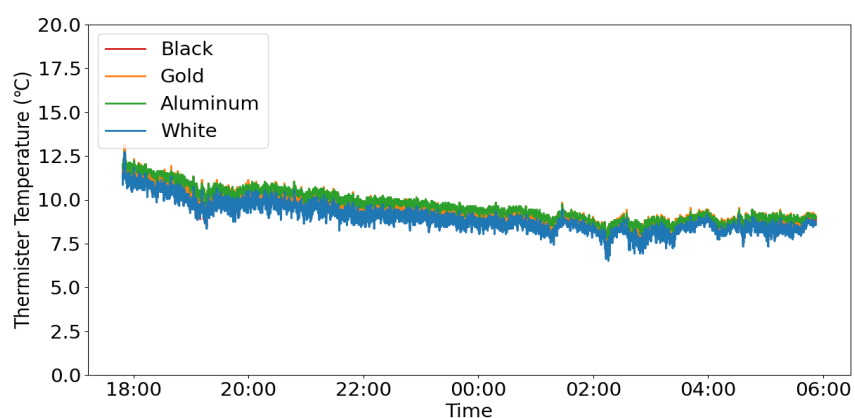
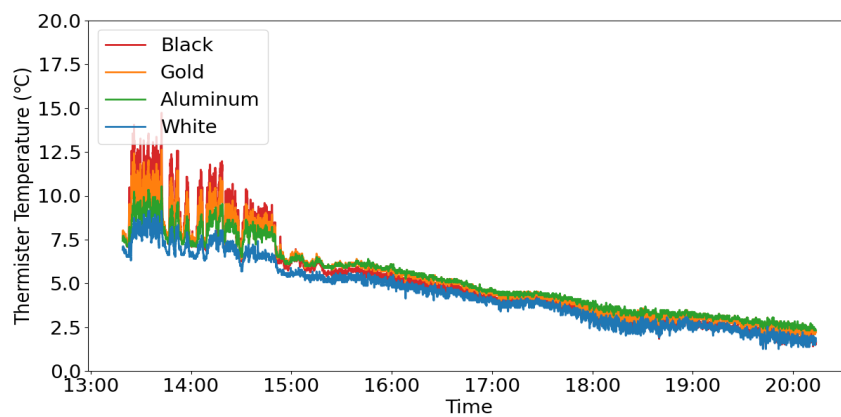
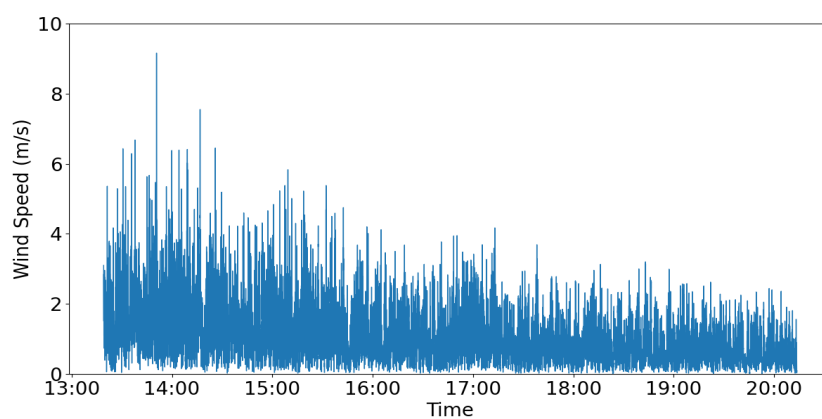


図 5.11: 2022 年 12 月 10 日 (夜) の観測結果. 横軸は時刻, 縦軸は多色温度計 1 のサーミスタ温度 (器差補正あり).



(a) 多色温度計 1 のサーミスタ温度 (器差補正あり)



(b) 超音波風速計で測定した風速

図 5.12: 2022 年 12 月 14 日 (昼) の観測結果

5.3 気象 4 要素の推定

2022 年 12 月 13 日 (昼) の観測結果を用いて、気象 4 要素の推定を行った。推定結果を図 5.13 から図 5.17 に示す。計算に用いた熱収支の式における温度計に固有のパラメタの値は表 5.3 の通りである。この日は、太陽が雲に隠されたり雲から出たりと、日射量がころころ変わる天気だった。

推定された気温 (図 5.13) は、アメダスの気温に対して多少のずれはあるものの、だいたい同じくらいとなった。温度センサの温度そのものは気温と大きく異なっている時間帯もあること (図 5.13) を考えると、多色温度計の動作原理が実証されたといえる。

推定された日射量 (図 5.14) は、太陽が雲から出たり雲に隠されたりした時刻に対応して変化しており、日射量の時間変化を捉えることができている。太陽が雲に隠された時間は、多色温度計の観測地点から 400 m 程度離れた場所に設置されたスカイモニターが撮影した画像を使って判定した。日射量の変化する時刻が少しずれている場合があるのは、設置場所の違いによるものと考えられる。一方、多色温度計で推定した日射量の値は、地表に入射する日射量に比べて小さいように思われる。ただし、推定した日射量は温度センサの全表面積に対する量になっていることに注意が必要である。地面に入射する日射量と比較するためには、温度センサの形状を考慮に入れて日射に対する断面積を計算し、日射量を求める必要がある。地表に入射する日射量と対比できる日射量の値を求める手法の開発は、今後の課題である。

推定された熱放射量 (図 5.15) は、アメダスの気温と同じ温度の黒体が射出する熱放射と同程度であることから、それらしい値が推定されたといえる。また、推定された熱放射量は日射量と相関があるように見え、日射量が大きいとき熱放射量も大きくなっている。これは日射によって地表面が温められたことが原因と考えられる。

推定された熱伝達係数は図 5.16 に示されているが、熱伝達係数は風速に依存するので、同時に測定した超音波風速計の風速と比較する (図 5.17)。超音波風速計は多色温度計と接するように設置して測定をおこなっているため、多色温度計の温度センサにあたった風の速度と超音波風速計の測定した風速は、ほぼ等しいと考えてよいだろう。しかしながら、図 5.17 を見る限り、熱伝達係数が風速に依存しているようには見えない。観測時の風速は最も速いときでも 2 ms^{-1} でしかないため、熱伝達係数の風速依存性が見えないのかもしれない。強い風が吹いているときに観測をおこなって、熱伝達係数の風速依存性を確認することは、今後の課

題である。

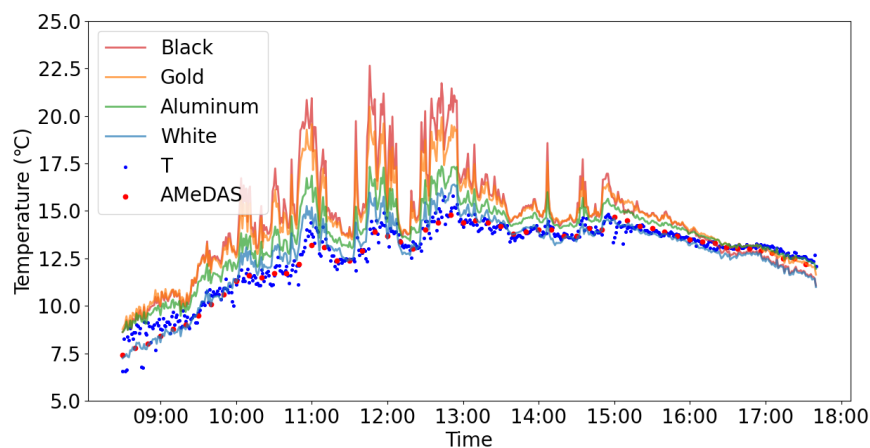


図 5.13: 2022 年 12 月 13 日 (昼) の観測結果 (1 分平均値) から推定された結果及び観測値。横軸は時刻、縦軸はサーミスタ温度、気温の推定値、アメダス観測値。

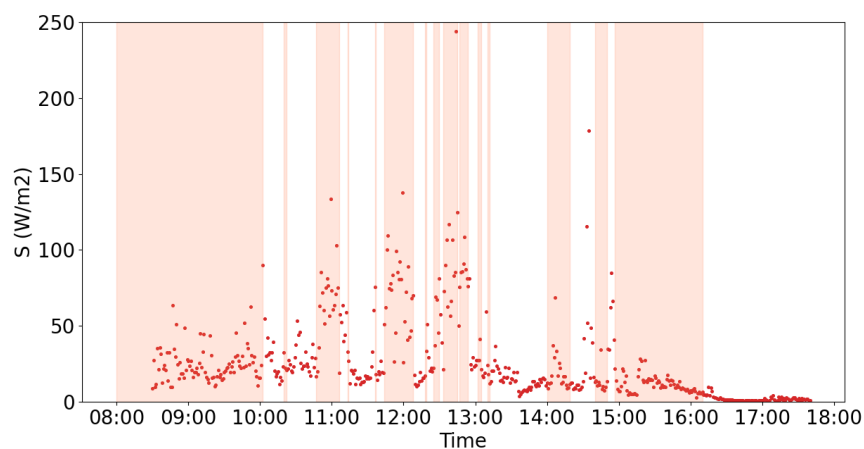


図 5.14: 2022 年 12 月 13 日 (昼) の観測結果 (1 分平均値) から推定された結果。横軸は時刻、縦軸は日射量の推定値。網掛けの着色部はスカイモニターから太陽が出ていたと判断した時間帯。

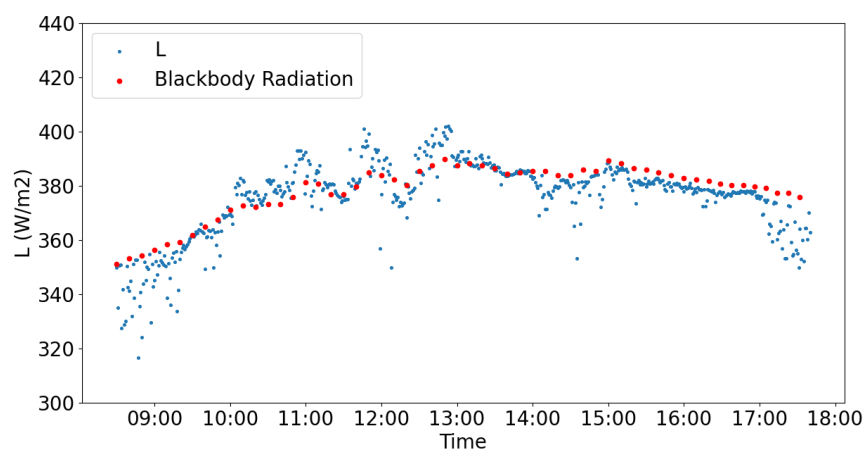


図 5.15: 2022 年 12 月 13 日 (昼) の観測結果 (1 分平均値) から推定された結果. 青は熱放射量の推定値, 赤はアメダス観測値から黒体放射としてステファン・ボルツマンの法則で計算した熱放射量. 横軸は時刻.

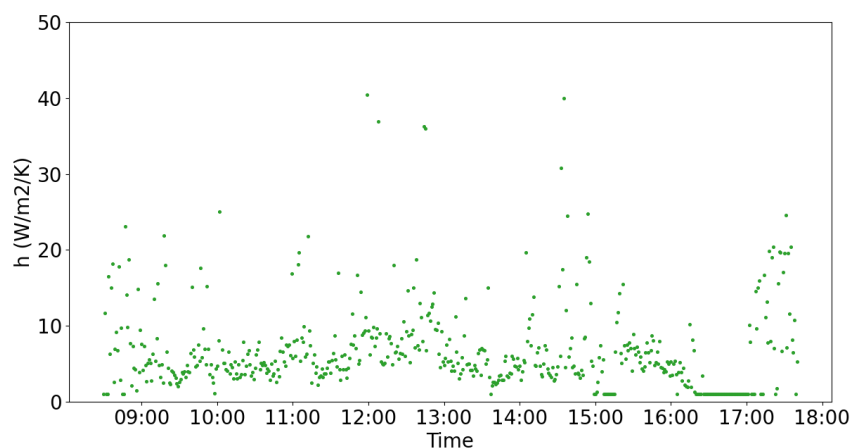


図 5.16: 2022 年 12 月 13 日 (昼) の観測結果 (1 分平均値) から推定された結果. 横軸は時刻, 縦軸は熱伝達係数の推定値.

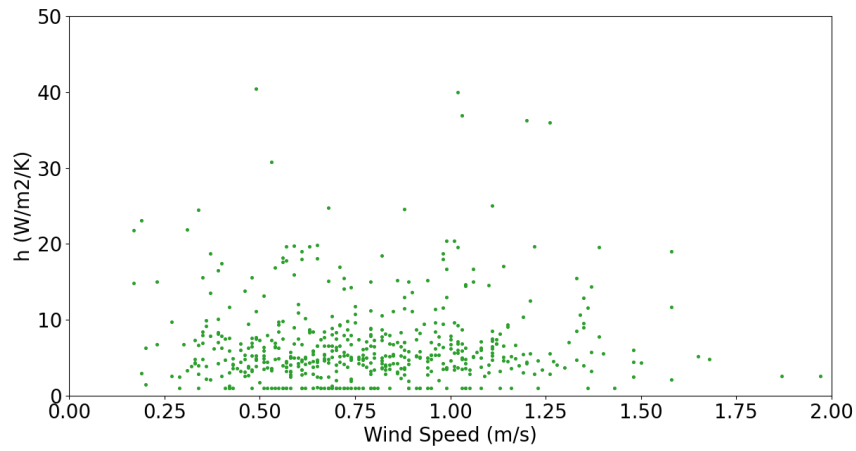


図 5.17: 2022 年 12 月 13 日 (昼) の観測結果 (1 分平均値) から推定された結果. 横軸は風速, 縦軸は推定した熱伝達係数.

表 5.3: 温度計に固有のパラメタの値

温度計の色	日射の吸収率 α_x	熱放射の射出率 ε_x	表面積 A_x	熱容量 C_x
黒	0.95	0.90	0.0008 m ²	0.0025 JK ⁻¹
白	0.10	0.90	0.0008 m ²	0.0025 JK ⁻¹
アルミ	0.25	0.10	0.0008 m ²	0.0025 JK ⁻¹
金	0.55	0.30	0.0008 m ²	0.0025 JK ⁻¹

第6章 火星模擬環境下での動作試験

6.1 概要

2022 年 1 月 16 日から 2022 年 1 月 17 日に、千葉工業大学惑星探査研究センターに設置されている火星環境模擬チャンバ(千葉工業大学 惑星探査研究センター「施設・設備」, <http://www.perc.it-chiba.ac.jp/about/facilities>)を用いて、火星地表に相当する低温・低圧下で多色温度計の動作試験をおこなった。図 6.1 は火星環境模擬チャンバ内に測器を設置した写真、図 6.2 はチャンバ内に設置した多色温度計の拡大写真である。

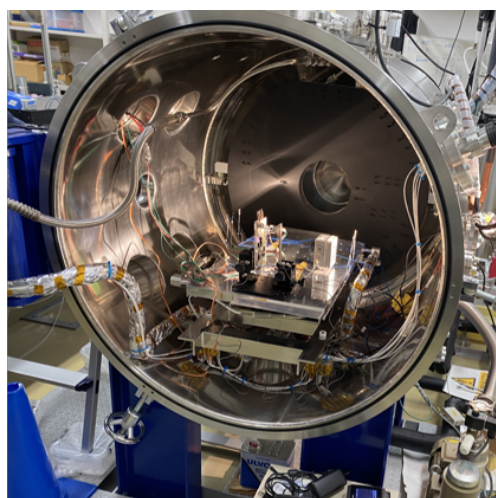


図 6.1: 火星環境模擬チャンバ.

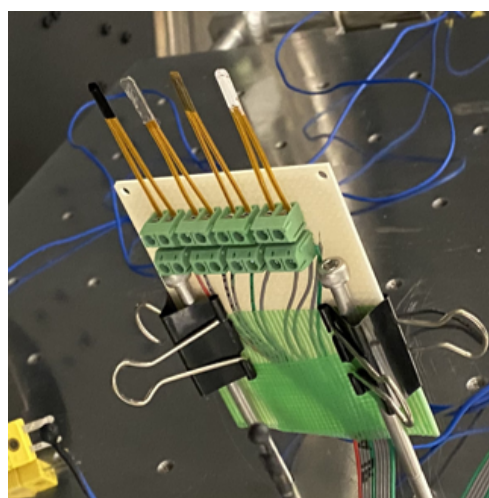


図 6.2: 設置した多色温度計.

6.2 測定結果

図 6.3 は、低圧環境下 (10 hPa) で、チャンバ内の温度を下げていく途中に、多色温度計が記録した各温度センサの温度である。17:15 に、に設置した熱電対が示した温度は 190 K で、火星地表に相当する低温、低圧環境でも多色温度計は動作することが確認できた。

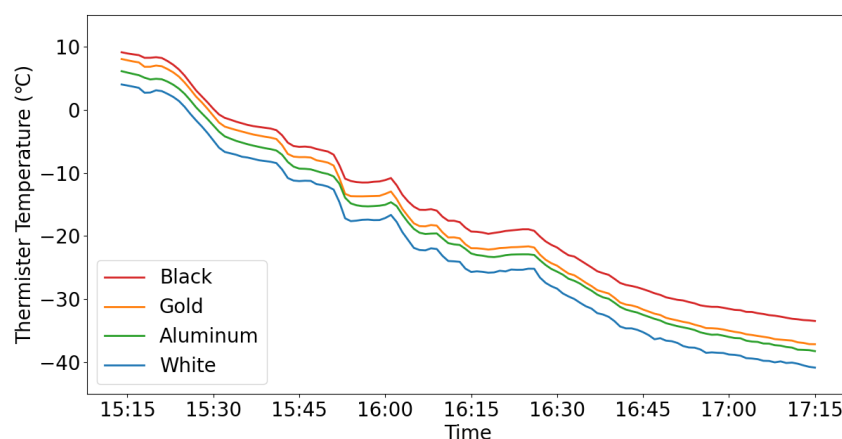


図 6.3: 火星チャンバ内での多色温度計の測定結果 (器差補正無し). 値は 1 分平均値.

第7章 まとめ

サーミスタを用いた多色温度計を作成した。

8 色の温度センサを作成し、放射環境を制御した実験を行うことで、各色の日射の吸収率 α_x と、熱放射の射出率 ε_x を大まかに分類した。測定結果に基づいて、多色温度計として用いる温度センサの色の組み合わせを選定した。

作成した多色温度計を用いて野外で観測を行い、観測結果から気温、日射量、熱放射量、風速の気象 4 要素を推定した。気温、日射量、熱放射量、は、おおよそ正解に近いと思われる値を推定することができた。一方で、推定した熱伝達係数は超音波風速計で測定した風速と相関が見られなかった。相関が見られなかったのは、観測した風速の範囲が狭かったためかもしれない。より広い範囲の風速で観測をおこなって、熱伝達係数と風速の相関を確認する必要がある。

火星地表に相当する低温、低圧環境において多色温度計の動作試験をおこなって、多色温度計が火星環境下でも動作することを確認した。

謝辞

本研究を行うにあたり，熱心なご指導をいただきました指導教員であるはしもとじょーじ教授に心より感謝いたします。室内実験で使用した器材を貸して下さった山下勝行准教授，火星環境模擬チャンバを用いた実験時に助言を下さいました千葉工業大学 千秋博紀上席研究員と福岡大学 乙部直人助教に，厚く御礼申し上げます。

最後に，研究室の皆様には，様々な面で支えて頂きました。ありがとうございました。

参考文献

Schmidlin, F. J., J. K. Luers, P. D. Huffman (1986) “ Preliminary Estimates of Radiosonde Thermistor Errors ”
NASA Thechnical 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.

丸山敬貴 (2019) 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 卒業論文.

竹本悠人 (2021) サーミスタを用いた惑星探査機搭載用気象測器の開発.
岡山大学理学部地球科学科 卒業論文.

SEMITEC ウェブページ「製品情報 (JT サーミスタ (高精度・薄形))」
https://www.semitec.co.jp/products/thermistor_jt

千葉工業大学 惑星探査研究センター ウェブページ「施設・設備」
<http://www.perc.it-chiba.ac.jp/about/facilities>