

火星用4色温度計の性能評価：  
温度センサの大きさと発熱率

岡山大学 理学部 地球科学科  
05B21524 井上 知束

2025/02/10

## 要旨

火星着陸探査機に搭載することを想定して開発が進められている4色温度計は、異なる特性を備えた複数の温度計で温度を測定することで、気温、風速、日射量、熱放射量を導出する測器である。4色温度計の性能は、温度計の特性(日射の吸収率、熱放射の射出率、発熱率、センサの大きさ)により決まる。本研究は、温度計の特性が4色温度計の性能に与える影響をシミュレーションにより評価した。黒、白、金メッキ、アルミメッキの4色から3色を取り出して組み合わせ、発熱率や大きさの異なる4色温度計を18通り設定し、それぞれの性能を評価した。4色温度計の性能を向上させるには、温度センサを小型化することと、一部センサの発熱率を大きくすることが有効であることが示された。

# 目次

<b>第1章 序論</b>	<b>2</b>
1.1 火星地表における気象観測 . . . . .	2
<b>第2章 4色温度計</b>	<b>3</b>
2.1 温度計の熱収支 . . . . .	3
2.2 4色温度計による気温, 風速, 熱放射量, 日射量の導出原理 . . . . .	4
2.3 熱伝達係数 . . . . .	5
<b>第3章 性能評価</b>	<b>7</b>
3.1 温度計の特性 . . . . .	7
3.2 火星表層環境 . . . . .	13
3.3 4つの温度計の温度 . . . . .	16
3.4 4色温度計の性能評価 . . . . .	19
3.4.1 温度測定に含まれる誤差の影響 . . . . .	19
3.4.2 個々の温度計に含まれる誤差の影響 . . . . .	21
<b>第4章 まとめ</b>	<b>35</b>

# 第1章 序論

## 1.1 火星地表における気象観測

火星に地球の気象観測で使用している測器と同じものを持っていくことはできない。火星探査機に搭載する測器にはサイズや重量に厳しい制限があり、地球で使用されている測器はそのままだと大きすぎるからである。また、火星は地球とは温度、圧力、大気組成が異なるため、火星地表での気象観測に適した測器の開発が必要とされている。

火星着陸機に搭載することを想定して開発されている測器のひとつに、4色温度計がある。4色温度計は、日射吸収率、熱放射の放射率、発熱率が異なる4つの温度計を用いて、気温、風速、熱放射量、日射量を導出する測器である。測器の精度は、温度計の特性(日射吸収率、熱放射の放射率、温度センサ測温部の大きさ、センサの発熱率)により変わる。本研究では、温度計の特性が4色温度計の性能に与える影響をシミュレーションにより評価した。

## 第2章 4色温度計

### 2.1 温度計の熱収支

温度計に出入りする熱エネルギーの収支は以下の式で表される。

$$\frac{C_i}{A} \frac{dT_i}{dt} = -h(T_i - \theta) - \varepsilon_i \sigma T_i^4 + \varepsilon_i L + \alpha_i S + \frac{Q_i}{A} \quad (2.1)$$

式中の文字が表すものは、表 2.1 に示す通りである。添え字の  $i$  が付いている文字は温度計に紐づけされた変数であり、添え字が付いていない文字は温度計によらない量である。

右辺第 1 項は周囲の空気との熱交換、第 2 項は自身が射出する熱放射による冷却、第 3 項は周囲が射出する熱放射を吸収することによる加熱、第 4 項は日射を吸収することによる加熱、第 5 項はセンサ自身の発熱による加熱を表している。

表 2.1: パラメタの一覧表。

	単位	備考
$C_i$ 温度計の熱容量	J/K	
$A$ 温度計の表面積	$m^2$	$\pi d^2$
$T_i$ 温度計の温度	K	
$h$ 熱伝達係数	$W/m^2/K$	風速に依存
$\theta$ 気温	K	
$\varepsilon_i$ 熱放射の射出率		
$\sigma$ ステファン・ボルツマン定数	$W/m^2/K^4$	$\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$
$L$ 周囲の熱放射量	$W/m^2$	
$\alpha_i$ 日射の吸収率		
$S$ 日射量	$W/m^2$	
$Q_i$ 温度計内の発熱率	W	センサに加える電圧に依存
$d$ 温度センサの直径	m	

温度計の温度  $T_i$  は、気温  $\theta$  だけでなく、日射量  $S$  と周囲の熱放射量  $L$  にも依存する。また、熱伝達係数  $h$  は風速  $u$  に依存する。したがって、大気中に剥き出しの状態で置いた温度計で温度を測定しても、気温を知ることはできない。

## 2.2 4色温度計による気温，風速，熱放射量，日射量の導出原理

2.1 節で説明したように、温度計が示す温度は気温だけではなく、風速、熱放射量、日射量の影響を受けているため、測定された温度そのものを環境場の物理量に対応させることはできない。しかし、逆に考えると、1本の温度計に4つの物理量の情報が入っていると解釈することができる。すなわち、特性(日射吸収率  $\alpha_i$ 、熱放射の射出率  $\varepsilon_i$ 、発熱率  $Q_i$  など)の異なる4つの温度センサを並べて測定を行い、4つの独立な熱収支の式を立てることができれば、それらを連立して解くことで、気温、風速、熱放射量、日射量を導出することができる。4つの温度計の熱収支の式は

$$\frac{C_1}{A} \frac{dT_1}{dt} = -h(T_1 - \theta) - \varepsilon_1 \sigma T_1^4 + \varepsilon_1 L + \alpha_1 S + \frac{Q_1}{A} \quad (2.2)$$

$$\frac{C_2}{A} \frac{dT_2}{dt} = -h(T_2 - \theta) - \varepsilon_2 \sigma T_2^4 + \varepsilon_2 L + \alpha_2 S + \frac{Q_2}{A} \quad (2.3)$$

$$\frac{C_3}{A} \frac{dT_3}{dt} = -h(T_3 - \theta) - \varepsilon_3 \sigma T_3^4 + \varepsilon_3 L + \alpha_3 S + \frac{Q_3}{A} \quad (2.4)$$

$$\frac{C_4}{A} \frac{dT_4}{dt} = -h(T_4 - \theta) - \varepsilon_4 \sigma T_4^4 + \varepsilon_4 L + \alpha_4 S + \frac{Q_4}{A} \quad (2.5)$$

これらの式を未知数(気温  $\theta$ 、熱伝達係数  $h$ 、熱放射量  $L$ 、日射量  $S$ )について整理して書き直すと以下のようなになる。

$$\begin{pmatrix} -T_1 & 1 & \varepsilon_1 & \alpha_1 \\ -T_2 & 1 & \varepsilon_2 & \alpha_2 \\ -T_3 & 1 & \varepsilon_3 & \alpha_3 \\ -T_4 & 1 & \varepsilon_4 & \alpha_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h \\ h\theta \\ L \\ S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \sigma T_1^4 - \frac{Q_1}{A} + \frac{C_1}{A} \frac{dT_1}{dt} \\ \varepsilon_2 \sigma T_2^4 - \frac{Q_2}{A} + \frac{C_2}{A} \frac{dT_2}{dt} \\ \varepsilon_3 \sigma T_3^4 - \frac{Q_3}{A} + \frac{C_3}{A} \frac{dT_3}{dt} \\ \varepsilon_4 \sigma T_4^4 - \frac{Q_4}{A} + \frac{C_4}{A} \frac{dT_4}{dt} \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

4つの熱収支の式が独立であれば、上の式を解いて、気温  $\theta$ 、熱伝達係数  $h$ 、熱放射量  $L$ 、日射量  $S$  を求めることができる。

## 2.3 熱伝達係数

熱伝達係数  $h$  は、ヌセルト数  $N$  を使って以下の式で与えられる (田坂, 2005).

$$h = N \frac{k}{d} \quad (2.7)$$

ここで、 $k$  は空気の熱伝導率、 $d$  はセンサの直径である。代表的長さ  $d$  の物体の周囲の流れのヌセルト数は、以下で与えられる。

$$N = 1.11 c Re^m Pr^{0.31} \quad (2.8)$$

ここで、 $Re$  はレイノルズ数、 $Pr$  はプラントル数で、 $c$  と  $m$  は定数である。レイノルズ数とプラントル数はそれぞれ

$$Re = \frac{ud}{\nu} \quad (2.9)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (2.10)$$

ここで、 $u$  は風速、 $\nu$  は空気の動粘性係数、 $\alpha$  は空気の熱拡散率である。式 (2.8) に出てくる定数は、レイノルズ数に依存して以下の表で与えられる。

$Re$	$c$	$m$
$4 \times 10^{-1} \sim 4$	0.891	0.330
$4 \sim 4 \times 10$	0.821	0.385
$4 \times 10 \sim 4 \times 10^3$	0.615	0.466
$4 \times 10^3 \sim 4 \times 10^4$	0.174	0.618
$4 \times 10^4 \sim 4 \times 10^5$	0.0239	0.805

熱拡散率  $\alpha$  は空気の密度  $\rho$  の関数で与えられる。

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (2.11)$$

ここで  $C_p$  は空気の定圧比熱である。空気の密度は、理想気体の状態方程式を用いて、気温  $\theta$  と気圧  $p$  から求めた。

$$p = \rho \frac{R}{m} \theta \quad (2.12)$$

ここで、 $R$  (J/K/mol) は気体定数、 $m$  は空気の平均分子量である。  
火星地表における熱伝達係数の計算にあたっては、表 2.2 の数値を用いた。

表 2.2: 熱伝達係数の計算に用いたパラメタ。

		値	
熱伝導率	$k$	$1.35 \times 10^{-2}$	(W/K/m)
動粘性係数	$\nu$	$5.93 \times 10^{-6}$	(m <sup>2</sup> /s)
定圧比熱	$C_p$	$7.97 \times 10^2$	(J/K/kg)
気体定数	$R$	8.314	(J/K/mol)
平均分子量	$m$	43.5	(g/mol)



## 第3章 性能評価

### 3.1 温度計の特性

現在、温度計の光学特性として、黒、白、金メッキ、アルミメッキの4色が製作可能なものとして検討されている。それぞれの光学特性を表3.1に示す。

表 3.1: 温度計の色と光学特性 (日射吸収率  $\alpha$  と熱放射射出率  $\varepsilon$ ) .

	$\alpha$	$\varepsilon$
黒	0.96	1.00
白	0.15	0.99
金メッキ	0.20	0.01
アルミメッキ	0.10	0.02

本研究では、黒、白、金メッキ、アルミメッキの4色から3色を取り出し、色(光学特性)の組み合わせとしてA~Fの6種類の4色温度計を設定した(表3.2)。温度センサの大きさは、現在試作中のものと同等の  $d = 4 \times 10^{-3}(\text{m})$  を標準とした。また、発熱率は  $Q = 1 \times 10^{-4}(\text{W})$  を標準とし、各組み合わせに含まれる同色の温度計のうち1つは発熱率を10倍 ( $Q = 1 \times 10^{-3}(\text{W})$ ) にした。さらに、温度センサを小型化した場合(標準の0.5倍,  $d = 2 \times 10^{-3}(\text{m})$ ) と、高発熱率の温度センサの発熱をさらに大きくした場合(標準の10倍,  $Q = 1 \times 10^{-2}(\text{W})$ ) についても、性能評価をおこなった。

表 3.2: 4色温度計の組み合わせ.

	標準	小型化	高発熱化
黒, 白, 金メッキ, 白	A	As	Ah
黒, 白, 金メッキ, 黒	B	Bs	Bh
黒, 白, 金メッキ, 金メッキ	C	Cs	Ch
黒, 白, アルミメッキ, 白	D	Ds	Dh
黒, 白, アルミメッキ, 黒	E	Es	Eh
黒, 白, アルミメッキ, アルミメッキ	F	Fs	Fh

表 3.3: 4色温度計 A の特性値.

	$\alpha$	$\varepsilon$	$Q$ (W/m <sup>2</sup> )	$d$ (m)
温度計 1(黒)	0.96	1.00	$1.0 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-3}$
温度計 2(白)	0.15	0.99	$1.0 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-3}$
温度計 3(金メッキ)	0.20	0.01	$1.0 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-3}$
温度計 4(白)	0.15	0.99	$1.0 \times 10^{-3}$	$4.0 \times 10^{-3}$

表 3.4: 4色温度計 As の特性値.

	$\alpha$	$\varepsilon$	$Q$ (W/m <sup>2</sup> )	$d$ (m)
温度計 1(黒)	0.96	1.00	$1.0 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-3}$
温度計 2(白)	0.15	0.99	$1.0 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-3}$
温度計 3(金メッキ)	0.20	0.01	$1.0 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-3}$
温度計 4(白)	0.15	0.99	$1.0 \times 10^{-3}$	$2.0 \times 10^{-3}$

表 3.5: 4色温度計 Ah の特性値.

	$\alpha$	$\varepsilon$	$Q$ (W/m <sup>2</sup> )	$d$ (m)
温度計 1(黒)	0.96	1.00	$1.0 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-3}$
温度計 2(白)	0.15	0.99	$1.0 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-3}$
温度計 3(金メッキ)	0.20	0.01	$1.0 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-3}$
温度計 4(白)	0.15	0.99	$1.0 \times 10^{-2}$	$4.0 \times 10^{-3}$

表 3.6: 4色温度計 B の特性値.

	$\alpha$	$\varepsilon$	$Q$ (W/m <sup>2</sup> )	$d$ (m)
温度計 1(黒)	0.96	1.00	$1.0 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-3}$
温度計 2(白)	0.15	0.99	$1.0 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-3}$
温度計 3(金メッキ)	0.20	0.01	$1.0 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-3}$
温度計 4(黒)	0.96	1.00	$1.0 \times 10^{-3}$	$4.0 \times 10^{-3}$

表 3.7: 4色温度計 Bs の特性値.

	$\alpha$	$\varepsilon$	$Q$ (W/m <sup>2</sup> )	$d$ (m)
温度計 1(黒)	0.96	1.00	$1.0 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-3}$
温度計 2(白)	0.15	0.99	$1.0 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-3}$
温度計 3(金メッキ)	0.20	0.01	$1.0 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-3}$
温度計 4(黒)	0.96	1.00	$1.0 \times 10^{-3}$	$2.0 \times 10^{-3}$

表 3.8: 4色温度計 Bh の特性値.

	$\alpha$	$\varepsilon$	$Q$ (W/m <sup>2</sup> )	$d$ (m)
温度計 1(黒)	0.96	1.00	$1.0 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-3}$
温度計 2(白)	0.15	0.99	$1.0 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-3}$
温度計 3(金メッキ)	0.20	0.01	$1.0 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-3}$
温度計 4(黒)	0.96	1.00	$1.0 \times 10^{-2}$	$4.0 \times 10^{-3}$

表 3.9: 4色温度計 C の特性値.

	$\alpha$	$\varepsilon$	$Q$ (W/m <sup>2</sup> )	$d$ (m)
温度計 1(黒)	0.96	1.00	$1.0 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-3}$
温度計 2(白)	0.15	0.99	$1.0 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-3}$
温度計 3(金メッキ)	0.20	0.01	$1.0 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-3}$
温度計 4(金メッキ)	0.20	0.01	$1.0 \times 10^{-3}$	$4.0 \times 10^{-3}$

表 3.10: 4 色温度計 Cs の特性値.

	$\alpha$	$\varepsilon$	$Q$ (W/m <sup>2</sup> )	$d$ (m)
温度計 1(黒)	0.96	1.00	$1.0 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-3}$
温度計 2(白)	0.15	0.99	$1.0 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-3}$
温度計 3(金メッキ)	0.20	0.01	$1.0 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-3}$
温度計 4(金メッキ)	0.20	0.01	$1.0 \times 10^{-3}$	$2.0 \times 10^{-3}$

表 3.11: 4 色温度計 Ch の特性値.

	$\alpha$	$\varepsilon$	$Q$ (W/m <sup>2</sup> )	$d$ (m)
温度計 1(黒)	0.96	1.00	$1.0 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-3}$
温度計 2(白)	0.15	0.99	$1.0 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-3}$
温度計 3(金メッキ)	0.20	0.01	$1.0 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-3}$
温度計 4(金メッキ)	0.20	0.01	$1.0 \times 10^{-2}$	$4.0 \times 10^{-3}$

表 3.12: 4 色温度計 D の特性値.

	$\alpha$	$\varepsilon$	$Q$ (W/m <sup>2</sup> )	$d$ (m)
温度計 1(黒)	0.96	1.00	$1.0 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-3}$
温度計 2(白)	0.15	0.99	$1.0 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-3}$
温度計 3(アルミメッキ)	0.10	0.02	$1.0 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-3}$
温度計 4(白)	0.15	0.99	$1.0 \times 10^{-3}$	$4.0 \times 10^{-3}$

表 3.13: 4 色温度計 Ds の特性値.

	$\alpha$	$\varepsilon$	$Q$ (W/m <sup>2</sup> )	$d$ (m)
温度計 1(黒)	0.96	1.00	$1.0 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-3}$
温度計 2(白)	0.15	0.99	$1.0 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-3}$
温度計 3(アルミメッキ)	0.10	0.02	$1.0 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-3}$
温度計 4(白)	0.15	0.99	$1.0 \times 10^{-3}$	$2.0 \times 10^{-3}$

表 3.14: 4色温度計 Dh の特性値.

	$\alpha$	$\varepsilon$	$Q$ (W/m <sup>2</sup> )	$d$ (m)
温度計 1(黒)	0.96	1.00	$1.0 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-3}$
温度計 2(白)	0.15	0.99	$1.0 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-3}$
温度計 3(アルミメッキ)	0.10	0.02	$1.0 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-3}$
温度計 4(白)	0.15	0.99	$1.0 \times 10^{-3}$	$4.0 \times 10^{-3}$

表 3.15: 4色温度計 E の特性値.

	$\alpha$	$\varepsilon$	$Q$ (W/m <sup>2</sup> )	$d$ (m)
温度計 1(黒)	0.96	1.00	$1.0 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-3}$
温度計 2(白)	0.15	0.99	$1.0 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-3}$
温度計 3(アルミメッキ)	0.10	0.02	$1.0 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-3}$
温度計 4(黒)	0.96	1.00	$1.0 \times 10^{-3}$	$4.0 \times 10^{-3}$

表 3.16: 4色温度計 Es の特性値.

	$\alpha$	$\varepsilon$	$Q$ (W/m <sup>2</sup> )	$d$ (m)
温度計 1(黒)	0.96	1.00	$1.0 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-3}$
温度計 2(白)	0.15	0.99	$1.0 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-3}$
温度計 3(アルミメッキ)	0.10	0.02	$1.0 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-3}$
温度計 4(黒)	0.96	1.00	$1.0 \times 10^{-3}$	$2.0 \times 10^{-3}$

表 3.17: 4色温度計 Eh の特性値.

	$\alpha$	$\varepsilon$	$Q$ (W/m <sup>2</sup> )	$d$ (m)
温度計 1(黒)	0.96	1.00	$1.0 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-3}$
温度計 2(白)	0.15	0.99	$1.0 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-3}$
温度計 3(アルミメッキ)	0.10	0.02	$1.0 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-3}$
温度計 4(黒)	0.96	1.00	$1.0 \times 10^{-2}$	$4.0 \times 10^{-3}$

表 3.18: 4色温度計 F の特性値.

	$\alpha$	$\varepsilon$	$Q$ (W/m <sup>2</sup> )	$d$ (m)
温度計 1(黒)	0.96	1.00	$1.0 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-3}$
温度計 2(白)	0.15	0.99	$1.0 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-3}$
温度計 3(アルミメッキ)	0.10	0.02	$1.0 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-3}$
温度計 4(アルミメッキ)	0.10	0.02	$1.0 \times 10^{-3}$	$4.0 \times 10^{-3}$

表 3.19: 4色温度計 F<sub>s</sub> の特性値.

	$\alpha$	$\varepsilon$	$Q$ (W/m <sup>2</sup> )	$d$ (m)
温度計 1(黒)	0.96	1.00	$1.0 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-3}$
温度計 2(白)	0.15	0.99	$1.0 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-3}$
温度計 3(アルミメッキ)	0.10	0.02	$1.0 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-3}$
温度計 4(アルミメッキ)	0.10	0.02	$1.0 \times 10^{-3}$	$2.0 \times 10^{-3}$

表 3.20: 4色温度計 F<sub>h</sub> の特性値.

	$\alpha$	$\varepsilon$	$Q$ (W/m <sup>2</sup> )	$d$ (m)
温度計 1(黒)	0.96	1.00	$1.0 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-3}$
温度計 2(白)	0.15	0.99	$1.0 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-3}$
温度計 3(アルミメッキ)	0.10	0.02	$1.0 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-3}$
温度計 4(アルミメッキ)	0.10	0.02	$1.0 \times 10^{-2}$	$4.0 \times 10^{-3}$

## 3.2 火星表層環境

火星着陸探査候補地点のひとつである Juventae Chasma で春分の日に観測をおこなう場合を想定して、測器の性能評価をおこなった。同地点における環境場は、火星表層環境評価プロジェクト(杉山ほか)のデータを用いた(表3.21, 図3.1)。火星表層環境評価プロジェクトでは、各季節における、平均的な気温、風速、日射量、などの日変化が、数値データとして提供されている。

表 3.21: 着陸候補地点 Juventae Chasma の、気温  $\theta$ 、風速  $u$ 、熱放射量  $L$ 、日射量  $S$  の日変化。火星表層環境評価プロジェクト(杉山ほか)の春分の日のデータを基に作成。

時	気温 $\theta$ (K)	風速 $u$ (m/s)	熱放射量 $L$ (W/m <sup>2</sup> )	日射量 $S$ (W/m <sup>2</sup> )
0	192.79956778276667	2.1192861246665053	42.677039248295394	0.0000000000000000
1	190.65936759832363	1.9583920587920147	40.718092281821129	0.0000000000000000
2	188.86356834406280	2.1723186420195404	39.126726864416554	0.0000000000000000
3	187.18799723768529	2.5390045792007307	37.955941875952249	0.0000000000000000
4	185.83317513222070	2.3165837861718290	36.937301355664012	0.0000000000000000
5	184.65121764318980	2.0761842395594932	36.182587289691249	0.0000000000000000
6	192.80889246520340	2.1315762358580925	47.984577609946619	0.0000000000000000
7	210.91706726914200	4.4046840331639485	73.550702037446868	123.10439510772183
8	226.58232148355359	5.2823662226282080	109.19434418157772	260.36353211149952
9	237.36995326141292	4.8324775644972755	142.85327139064873	380.69145312128182
10	245.83055301664967	5.1794408308762812	171.44069117630931	473.15316525611433
11	252.39113147795925	5.5271138731277238	191.24641718270320	530.62612281219185
12	255.69897670615450	5.5763234905166552	196.94162009758688	550.38755838123097
13	256.18745397646069	5.0528721444709870	190.72448466512634	530.72323924290481
14	253.79214971243590	4.4896702632870094	170.83371834275127	473.15217534814605
15	249.12093906976770	4.6104401241293482	143.46536172685481	380.65513295388251
16	241.92499403756983	4.9339565130549818	111.55681518737180	260.17528077478863
17	226.41907235565151	2.6947668111920704	78.373017309945965	122.48108107733532
18	216.86540526670964	2.7597813296822702	66.412762556242456	0.0000000000000000
19	210.31432658898265	3.0424825051872020	59.398456669970152	0.0000000000000000
20	205.26717903535882	2.2676430713923721	53.962603014361157	0.0000000000000000
21	201.45125609468215	2.2299394986926013	50.190265162910585	0.0000000000000000
22	198.14904941093377	2.5839130946851538	47.100400977362362	0.0000000000000000
23	195.12324501472978	2.4155343675553298	44.601964385488252	0.0000000000000000

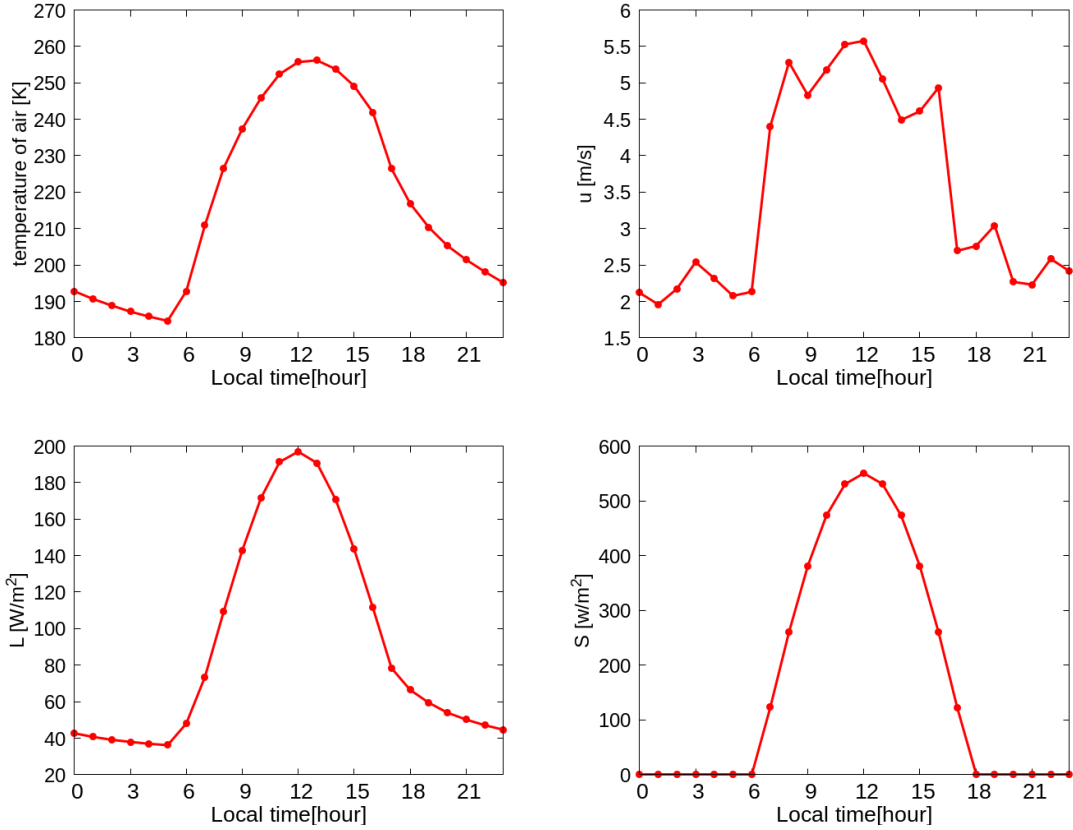


図 3.1: 着陸候補地点 Juventae Chasma の気温  $\theta$ (左上), 風速  $u$ (右上), 熱放射量  $L$ (左下), 日射量  $S$ (右下) の日変化. 火星表層環境評価プロジェクト (杉山ほか) の春分の日の日データを基に作成.

4 色温度計の測定に影響するのは, 気温  $\theta$ , 風速  $u$ , 熱放射量  $L$ , 日射量  $S$  である. このうち, 気温と風速は地表 1m の値を用いた. 熱放射量  $L$  は, 地表面温度  $T_{surface}$  と空温度  $T_{sky}$  から, 以下の式を用いて計算した.

$$L = \frac{\sigma T_{surface}^4 + \sigma T_{sky}^4}{2} \quad (3.1)$$

日射量  $S$  は, 温度センサが球形であることを考慮して, 以下の式でセンサに入射する量を計算した.

$$S = (S_{dir}/\mu)/4 + S_{diff}/2 + r_{surface}(S_{dir} + S_{diff})/2 \quad (3.2)$$

ここで,  $S_{dir}$  は太陽放射直達光,  $S_{diff}$  は太陽放射散乱光,  $\mu$  は太陽天頂角の余弦,  $r_{surface}$  は地表の太陽放射反射率である. . 本研究では地表の太陽放射反射率を  $r_{surface} = 0.2$  とした. また, 太陽天頂角は火星表層環境評価プロジェクトが提供している各地方時の値を用いた.



熱伝達係数  $h$  を求めるにあたっては、さらに火星表層環境評価プロジェクトが提供している地表気圧を用いた。気温と気圧から、式 (2.12) を用いて空気の密度  $\rho$  を計算し、式 (2.7) から (2.11) を用いて熱伝達係数を計算した。Juventae Chasma の春分の日について計算された熱伝達係数を図 3.2 に示す。

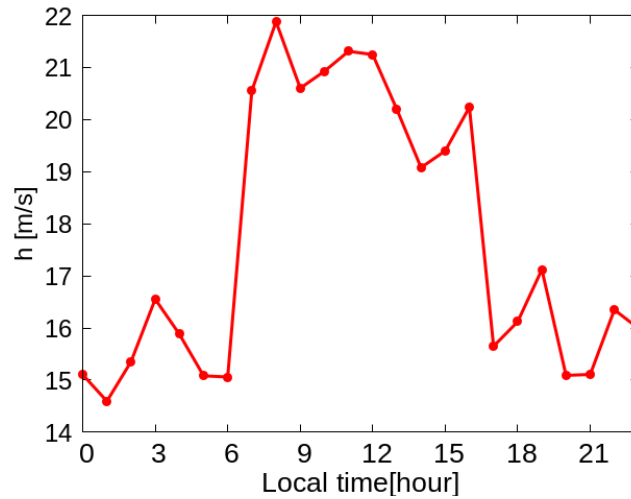


図 3.2: 熱伝達係数の日変化。春分の日 of Juventae Chasma. (センサの直径  $d = 4.0\text{mm}$ )

### 3.3 4つの温度計の温度

春分の日 of Juveatae Chasma で4色温度計を用いて測定した場合を想定して、4色温度計の温度をシミュレーションした。温度計の温度は、熱収支の式(2.1)から求めた。温度の時間変化率は小さいと仮定すると、熱収支の式は以下のようになる。

$$0 = -h(T_i - \theta) - \varepsilon_i \sigma T_i^4 + \varepsilon_i L + \alpha_i S + \frac{Q_i}{A} \quad (3.3)$$

気温  $\theta$ 、熱放射量  $L$ 、日射量  $S$  は表(3.21)の値を用い、熱伝達係数は2.3節で説明した方法を用いて計算した結果(図3.2)を用いた。各温度計に対応する熱放射率  $\varepsilon_i$ 、センサ表面積  $A$ 、日射吸収率  $\alpha_i$ 、センサ発熱率  $Q_i$  を与えると、熱収支の式の未知数はセンサ温度  $T_i$  だけとなるので、各地方時における  $T_i$  をニュートン法を用いて求めた。

18通りの4色温度計(3.1節)の温度をシミュレーションした(図3.3から3.20)。温度計の特性に合わせて、4つの温度計はそれぞれ異なる温度を示す。日射のある日中は、日射を吸収することによる加熱の影響が大きく、日射吸収率  $\alpha$  の値が大きい黒色の温度計の温度が高くなった。日射のない夜間は、センサの発熱と熱放射の射出による冷却がバランスするようになり、熱放射率  $\varepsilon$  の値が小さいメッキの温度計の温度が高くなった。また、センサ発熱率の大きい温度計の温度は、日射のあるなしに依らず、1日を通してセンサ発熱率の小さい温度計に比べて高くなった。

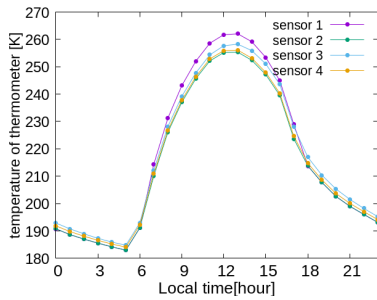


図 3.3: 4 色温度計 A の温度.

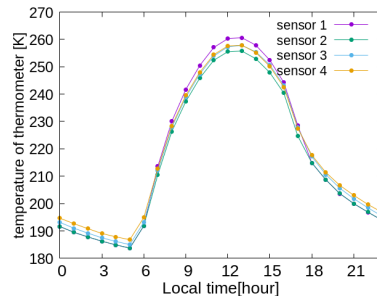


図 3.4: 4 色温度計 As の温度.

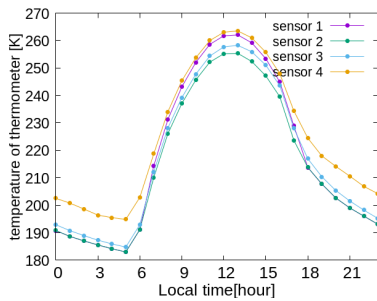


図 3.5: 4 色温度計 Ah の温度.

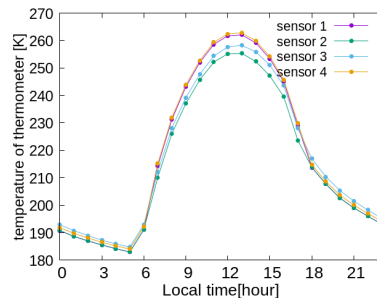


図 3.6: 4 色温度計 B の温度.

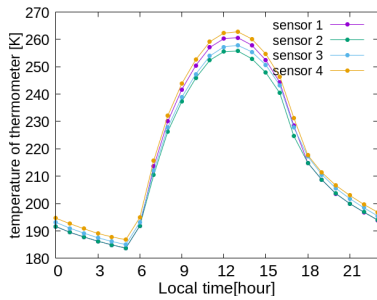


図 3.7: 4 色温度計 Bs の温度.

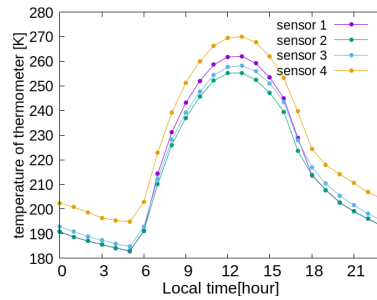


図 3.8: 4 色温度計 Bh の温度.

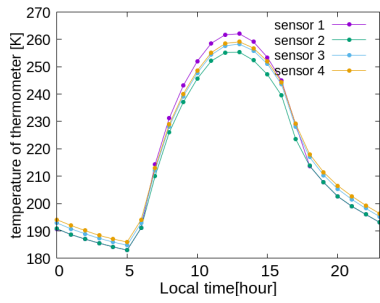


図 3.9: 4 色温度計 C の温度.

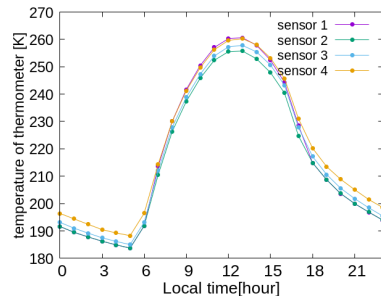


図 3.10: 4 色温度計 Cs の温度.

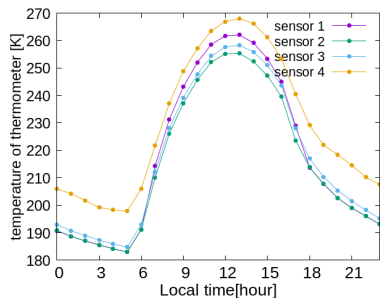


図 3.11: 4 色温度計 Ch の温度.

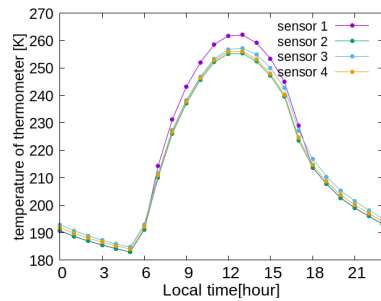


図 3.12: 4 色温度計 D の温度.

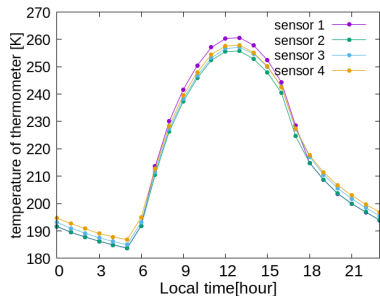


図 3.13: 4 色温度計 Ds の温度.

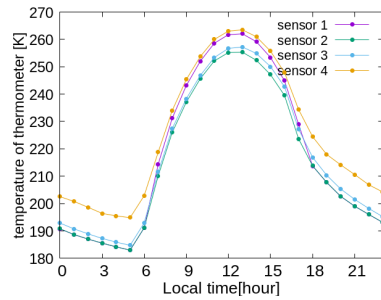


図 3.14: 4 色温度計 Dh の温度.

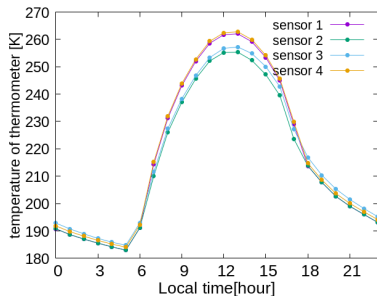


図 3.15: 4色温度計 E の温度.

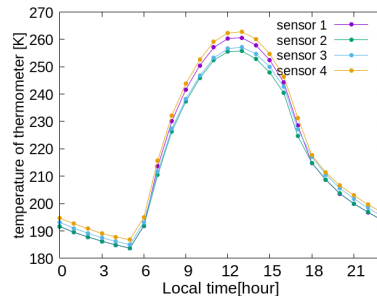


図 3.16: 4色温度計 Es の温度.

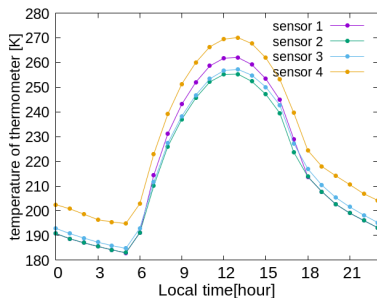


図 3.17: 4色温度計 Eh の温度.

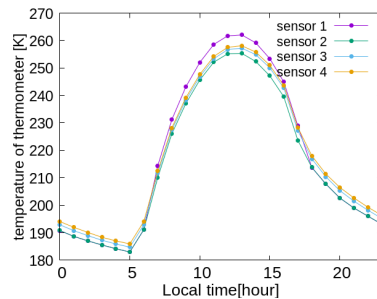


図 3.18: 4色温度計 F の温度.

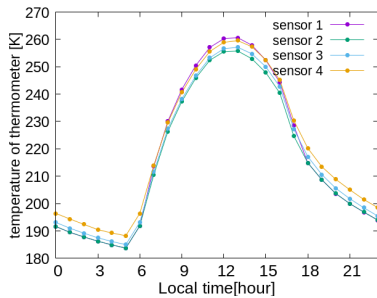


図 3.19: 4色温度計 Fs の温度.

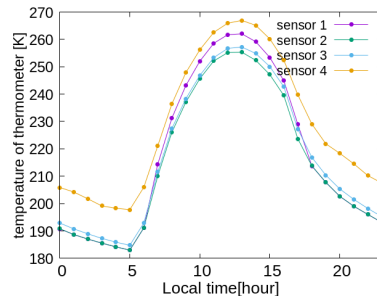


図 3.20: 4色温度計 Fh の温度.

## 3.4 4色温度計の性能評価

### 3.4.1 温度測定に含まれる誤差の影響

温度測定に含まれる誤差が、4色温度計による気温、風速、熱放射量、日射量の推定に及ぼす影響について考える。以下では、温度測定に含まれる誤差が日射量の導出に及ぼす影響を例にして説明する。

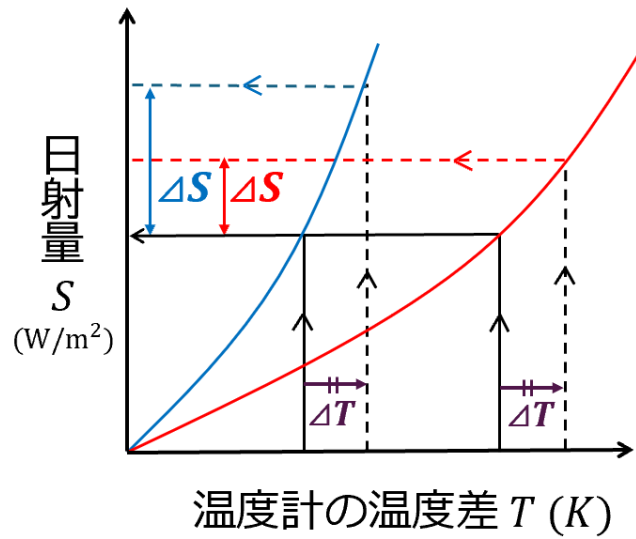


図 3.21: 温度測定に含まれる誤差が導出される日射量に及ぼす影響の模式図. 縦軸は日射量, 横軸は2つの温度計の温度差. 赤と青の曲線は, 温度計の温度差と日射量の関係を表す.

日射量は、日射吸収率の異なる2つの温度計の温度差から導出される。日射があると、日射を吸収することで温度計の温度は上がる。日射を吸収することによる加熱の大きさは、日射吸収率と日射量に比例するので、温度計の温度上昇も概ね日射吸収率と日射量に比例する。したがって、日射吸収率の異なる温度計の温度差は、日射量が大きくなると大きくなる(図3.40)。

2つの温度計の温度差と日射量の関係は、温度計の特性によって決まる。2つの温度計の温度差と日射量の関係が、図3.40の赤い曲線と青い曲線で表される2組の4色温度計について考える。どちらの組の温度計も、温度計の温度差が測定されたら、それに対応する日射量が決まる。ここで、温度の測定が正確でなく、2つの温度計の温度差に $\Delta T$ の誤差がある場合、赤い曲線の4色温度計と青い曲線の4色温度計で導出される日射量には、それぞれ赤色の $\Delta S$ と青色の $\Delta S$ だけズレが生じる。このズレの大きさは、図から明らかなように、温度測定の精度 $\Delta T$ と温度計の温度差と日射量の関係を表す曲線の傾き(微分係数) $(\partial S/\partial T)$ に比例する。

$$\Delta S \simeq \frac{\partial S}{\partial T} \Delta T \quad (3.4)$$

温度測定に含まれる誤差の影響を受けにくい4色温度計を、性能の良い4色温度計であると定義するならば、性能のよい4色温度計とは、温度測定に含まれる誤差 $\Delta T$ が小さく微分係数 $(\partial S/\partial T)$ が小さい4色温度計ということになる。

### 3.4.2 個々の温度計に含まれる誤差の影響

4色温度計は4つの温度計によって構成されており、4つの温度計が計測する4つの温度はそれぞれ誤差を含んでいる。導出される物理量 $X$ に対して、 $i$ の温度計の温度 $T_i$ に含まれる誤差 $\Delta T_i$ の影響は、 $(\partial X/\partial T_i)\Delta T_i$ である。4色温度計の性能を評価するには、4つの物理量(気温 $\theta$ 、風速 $u$ 、熱放射量 $L$ 、日射量 $S$ )に対する、4つの温度計の温度の誤差( $\Delta T_i, i = 1, 2, 3, 4$ )の影響を評価する必要がある。

図3.22から3.39は、18通りの4色温度計(3.1節)のそれぞれについて、16個の微分係数 $(\partial X/\partial T_i)$ を計算した結果である。導出される物理量に及ぼす影響の大きさは、4つの温度計で同じでなく、また、影響の大きい温度計も4つの温度計の組み合わせによって変わる。

4色温度計の全体としての性能は、4つの温度計から生じる4つの誤差を足し合わせたものとして評価される。4つの誤差を足し合わせた影響の大きさを見るため、4つの微分係数の2乗平均平方根を計算した(図3.40から3.45)。4つの色の組み合わせが同じものについて、標準、小型化、高発熱化した3つを比べると、

標準よりも小型化，高発熱化したものの方が微分係数が小さくなった。これは，色の組み合わせに依らず，小型化あるいは高発熱化することで，4色温度計の性能が向上することを意味している。また，標準の4色温度計 A~F を比べて色の組み合わせによる性能の違いを見ると，気温は E(黒，白，アルミメッキ，黒(発熱大))，風速は Cと F(黒，白，メッキ，メッキ(発熱大))，熱放射量は D(黒，白，アルミメッキ，白(発熱大)) が高い性能を示した。日射量は，色の組み合わせによる4色温度計の性能の違いはあまり見られなかった。

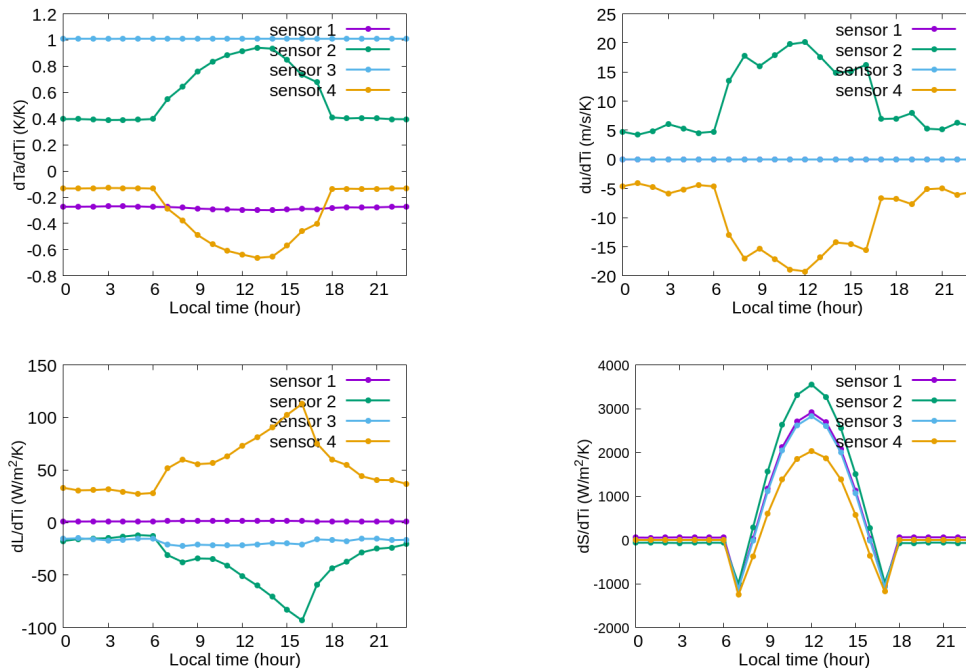


図 3.22: 4色温度計 A で導出した，気温  $\theta$ (左上)，風速  $u$ (右上)，熱放射量  $L$ (左下)，日射量  $S$ (右下) の微分係数  $(\partial X/\partial T_i)$  の日変化。



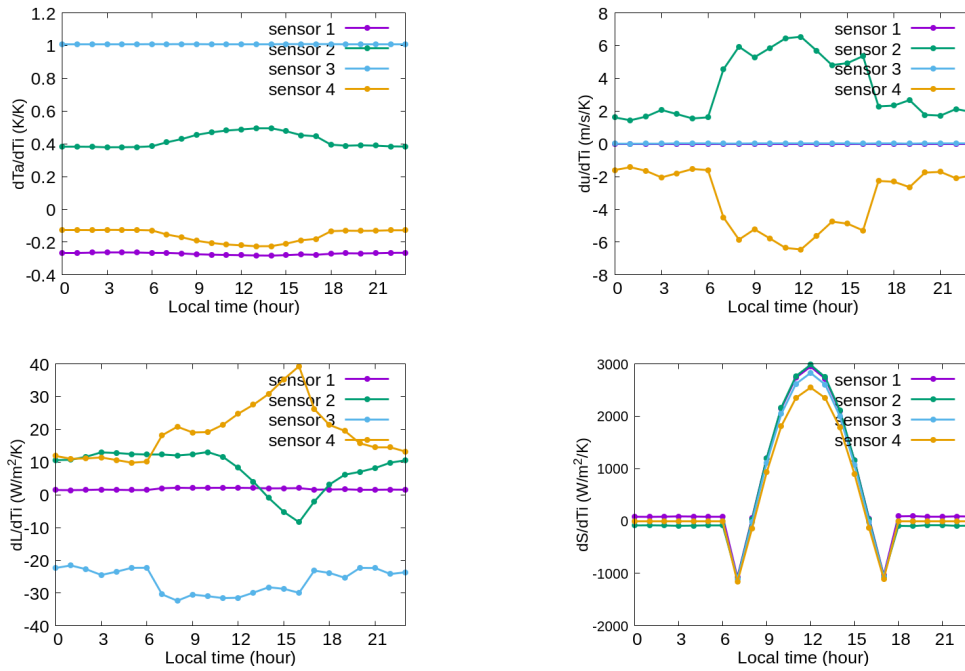


図 3.23: 4色温度計 As で導出した、気温  $\theta$ (左上)、風速  $u$ (右上)、熱放射量  $L$ (左下)、日射量  $S$ (右下) の微分係数 ( $\partial X/\partial T_i$ ) の日変化.

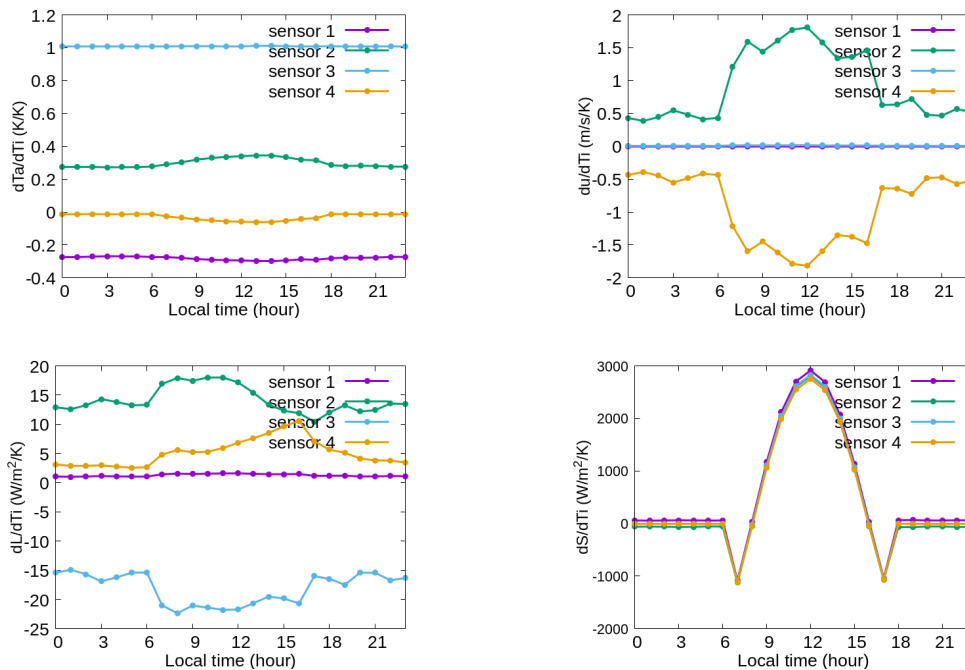


図 3.24: 4色温度計 Ah で導出した、気温  $\theta$ (左上)、風速  $u$ (右上)、熱放射量  $L$ (左下)、日射量  $S$ (右下) の微分係数 ( $\partial X/\partial T_i$ ) の日変化.

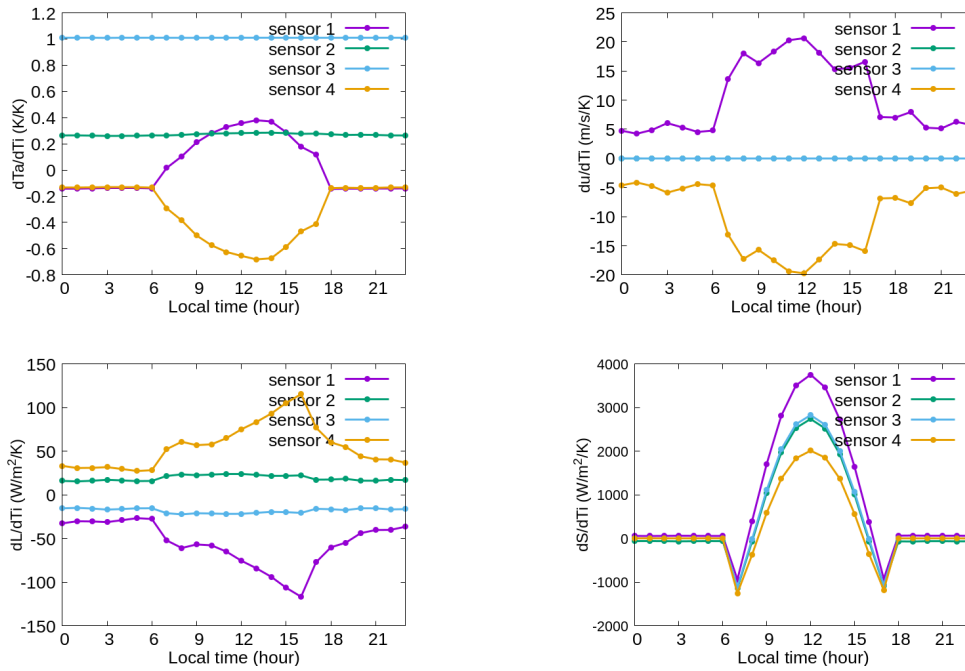


図 3.25: 4色温度計 B で導出した、気温  $\theta$ (左上)、風速  $u$ (右上)、熱放射量  $L$ (左下)、日射量  $S$ (右下) の微分係数 ( $\partial X/\partial T_i$ ) の日変化。

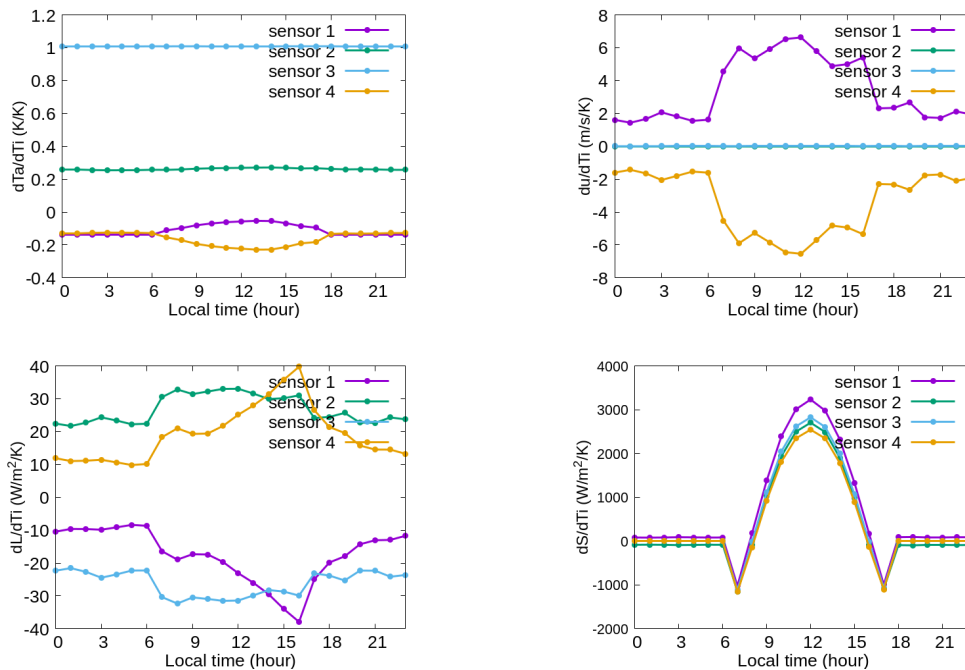


図 3.26: 4色温度計 Bs で導出した、気温  $\theta$ (左上)、風速  $u$ (右上)、熱放射量  $L$ (左下)、日射量  $S$ (右下) の微分係数 ( $\partial X/\partial T_i$ ) の日変化。

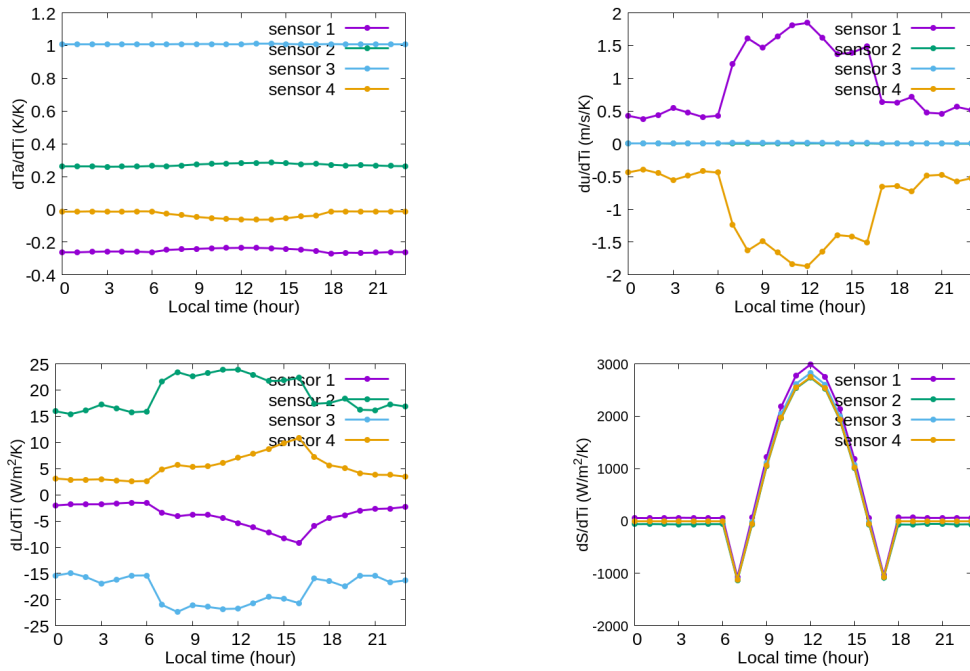


図 3.27: 4色温度計 Bh で導出した、気温  $\theta$ (左上)、風速  $u$ (右上)、熱放射量  $L$ (左下)、日射量  $S$ (右下) の微分係数 ( $\partial X/\partial T_i$ ) の日変化.

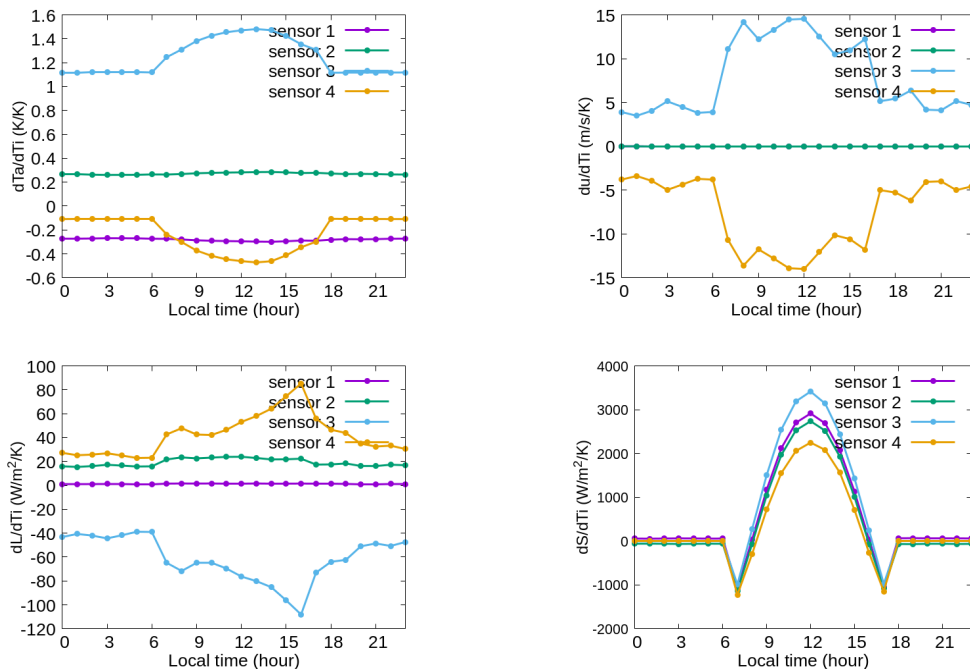


図 3.28: 4色温度計 C で導出した、気温  $\theta$ (左上)、風速  $u$ (右上)、熱放射量  $L$ (左下)、日射量  $S$ (右下) の微分係数 ( $\partial X/\partial T_i$ ) の日変化.

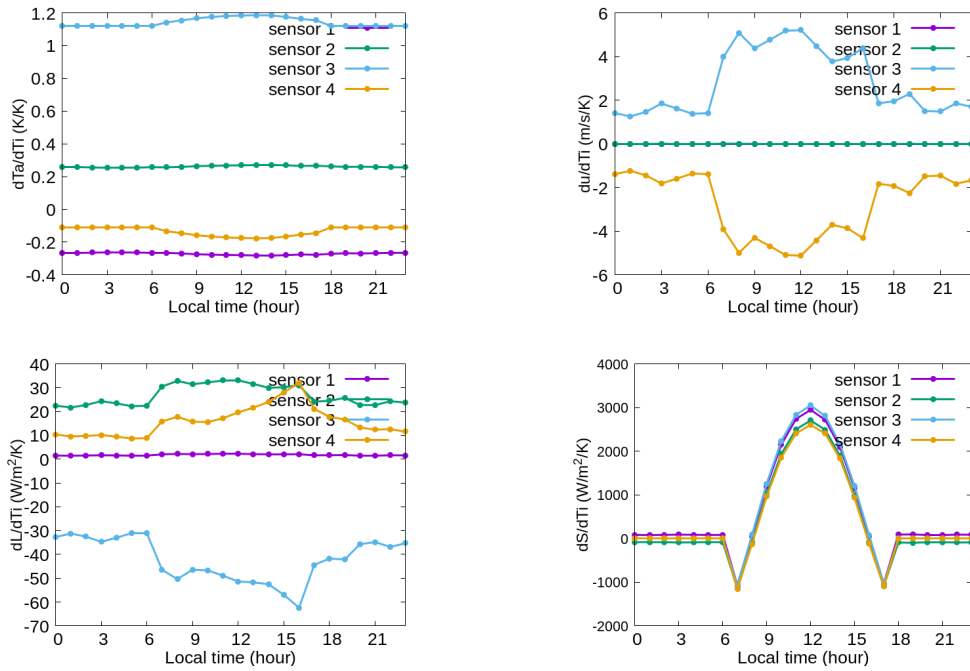


図 3.29: 4色温度計 Cs で導出した、気温  $\theta$ (左上)、風速  $u$ (右上)、熱放射量  $L$ (左下)、日射量  $S$ (右下) の微分係数 ( $\partial X/\partial T_i$ ) の日変化.

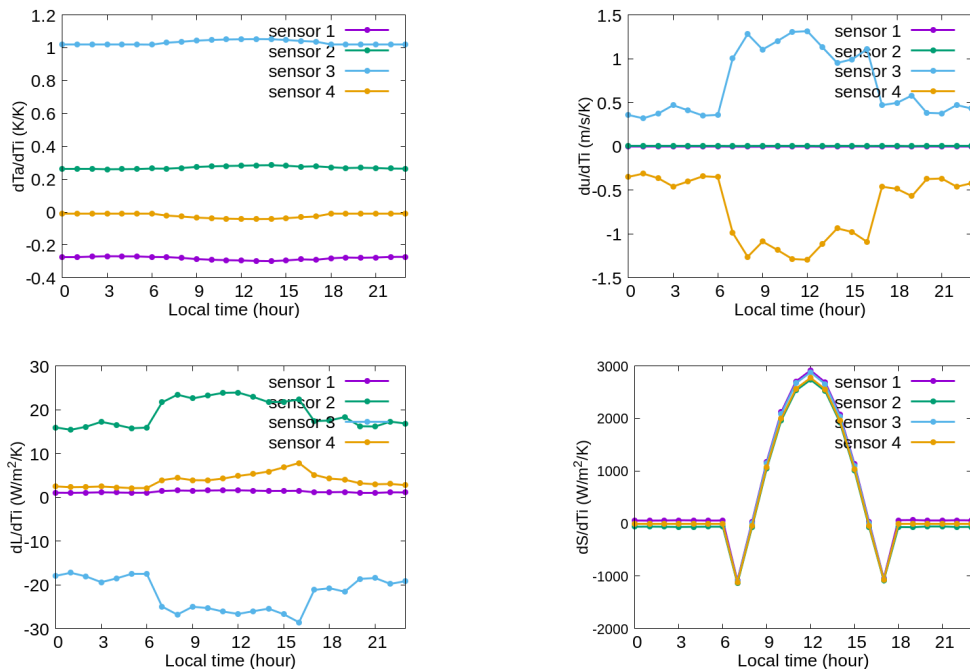


図 3.30: 4色温度計 Ch で導出した、気温  $\theta$ (左上)、風速  $u$ (右上)、熱放射量  $L$ (左下)、日射量  $S$ (右下) の微分係数 ( $\partial X/\partial T_i$ ) の日変化.

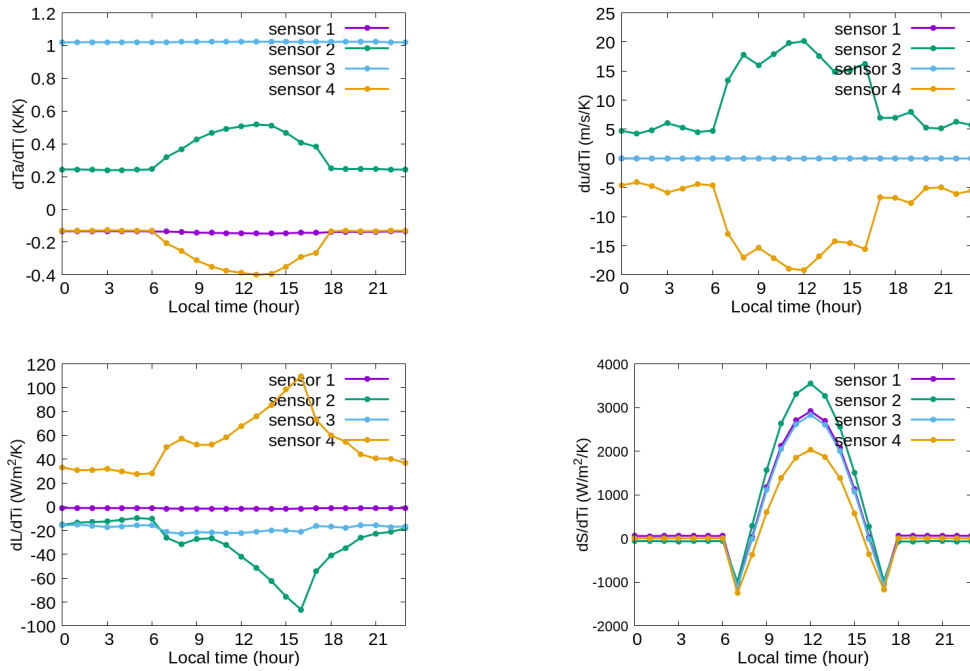


図 3.31: 4色温度計Dで導出した、気温 $\theta$ (左上)、風速 $u$ (右上)、熱放射量 $L$ (左下)、日射量 $S$ (右下)の微分係数 $(\partial X/\partial T_i)$ の日変化。

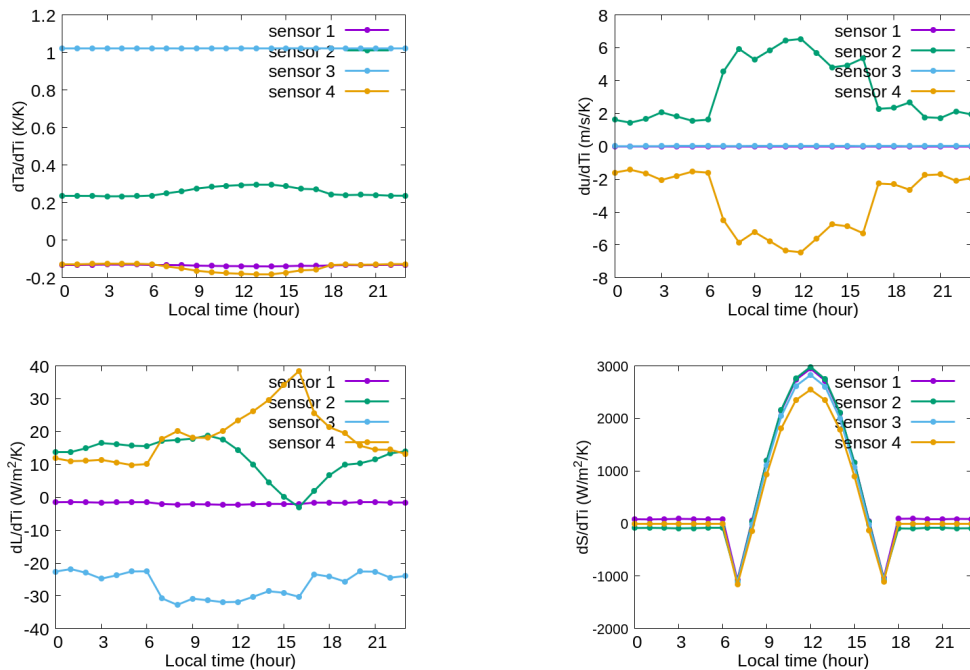


図 3.32: 4色温度計Dsで導出した、気温 $\theta$ (左上)、風速 $u$ (右上)、熱放射量 $L$ (左下)、日射量 $S$ (右下)の微分係数 $(\partial X/\partial T_i)$ の日変化。

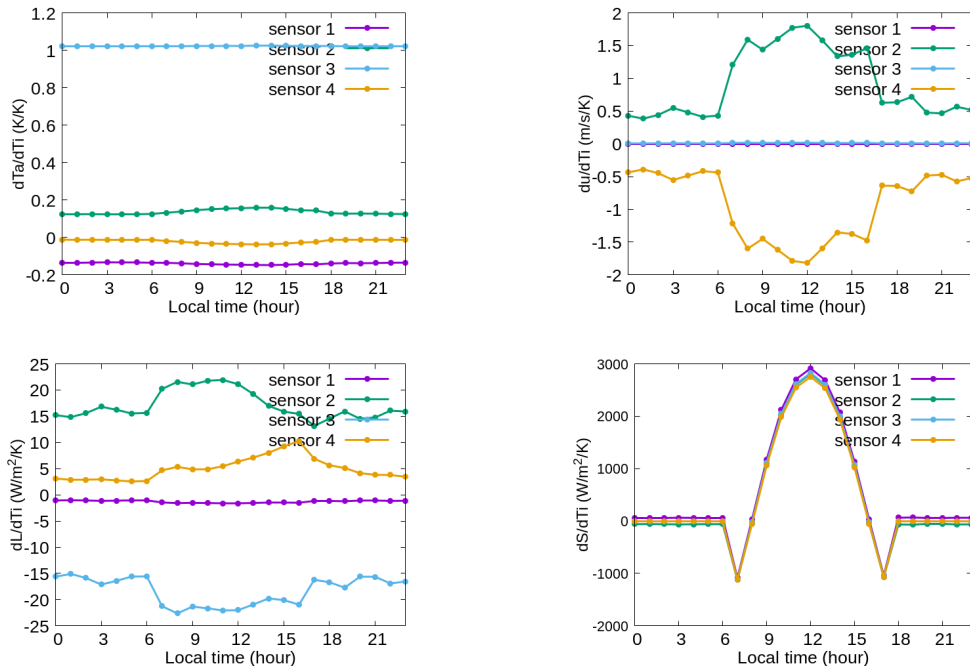


図 3.33: 4色温度計 Dh で導出した, 気温  $\theta$ (左上), 風速  $u$ (右上), 熱放射量  $L$ (左下), 日射量  $S$ (右下) の微分係数 ( $\partial X/\partial T_i$ ) の日変化.

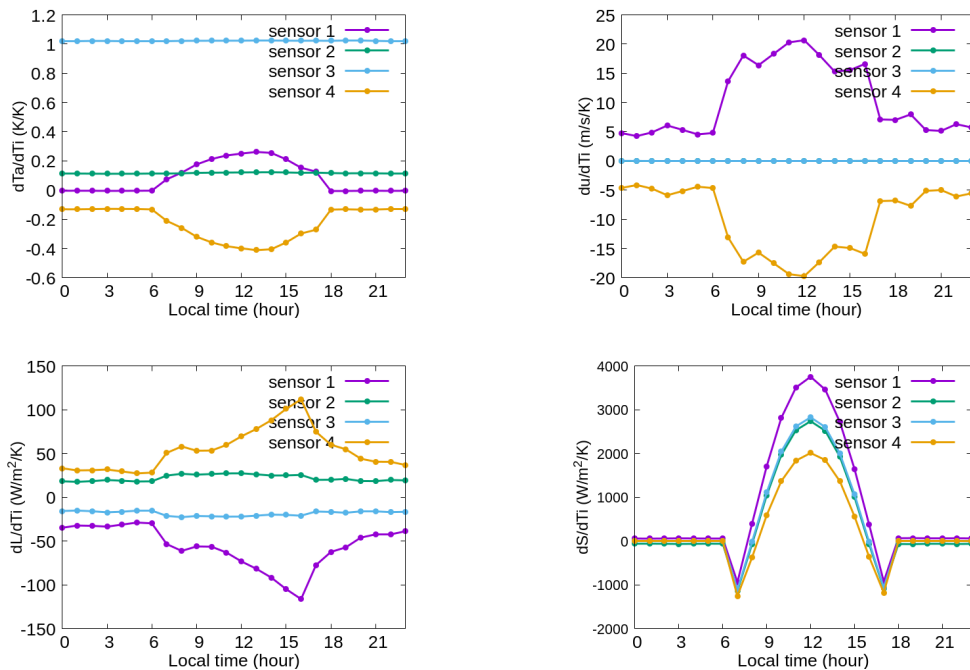


図 3.34: 4色温度計 E で導出した, 気温  $\theta$ (左上), 風速  $u$ (右上), 熱放射量  $L$ (左下), 日射量  $S$ (右下) の微分係数 ( $\partial X/\partial T_i$ ) の日変化.

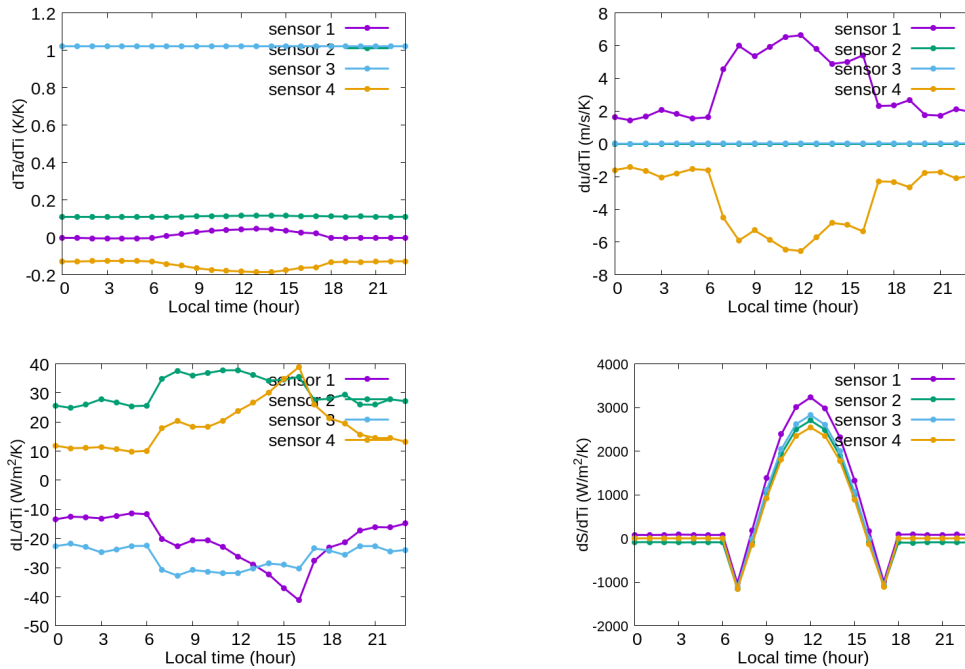


図 3.35: 4色温度計 Es で導出した、気温  $\theta$ (左上)、風速  $u$ (右上)、熱放射量  $L$ (左下)、日射量  $S$ (右下) の微分係数 ( $\partial X/\partial T_i$ ) の日変化。

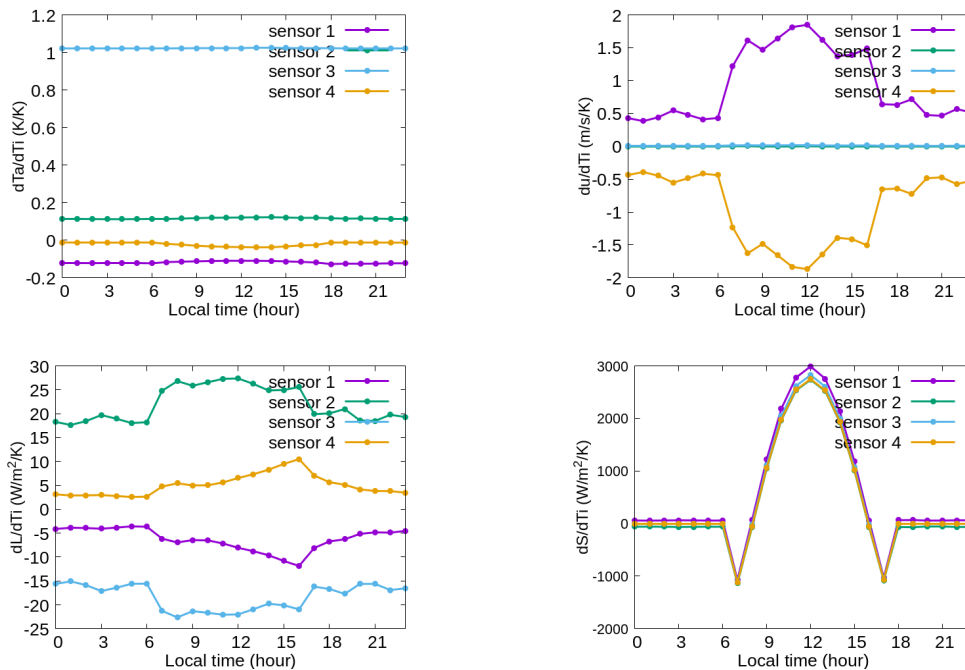


図 3.36: 4色温度計 Eh で導出した、気温  $\theta$ (左上)、風速  $u$ (右上)、熱放射量  $L$ (左下)、日射量  $S$ (右下) の微分係数 ( $\partial X/\partial T_i$ ) の日変化。

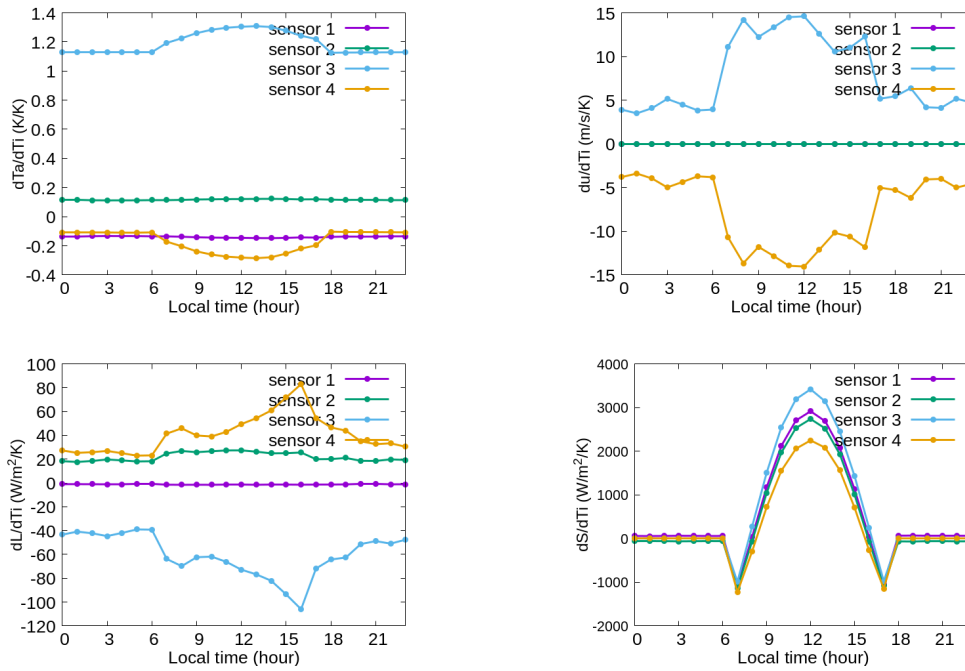


図 3.37: 4色温度計 F で導出した、気温  $\theta$ (左上)、風速  $u$ (右上)、熱放射量  $L$ (左下)、日射量  $S$ (右下) の微分係数 ( $\partial X/\partial T_i$ ) の日変化。

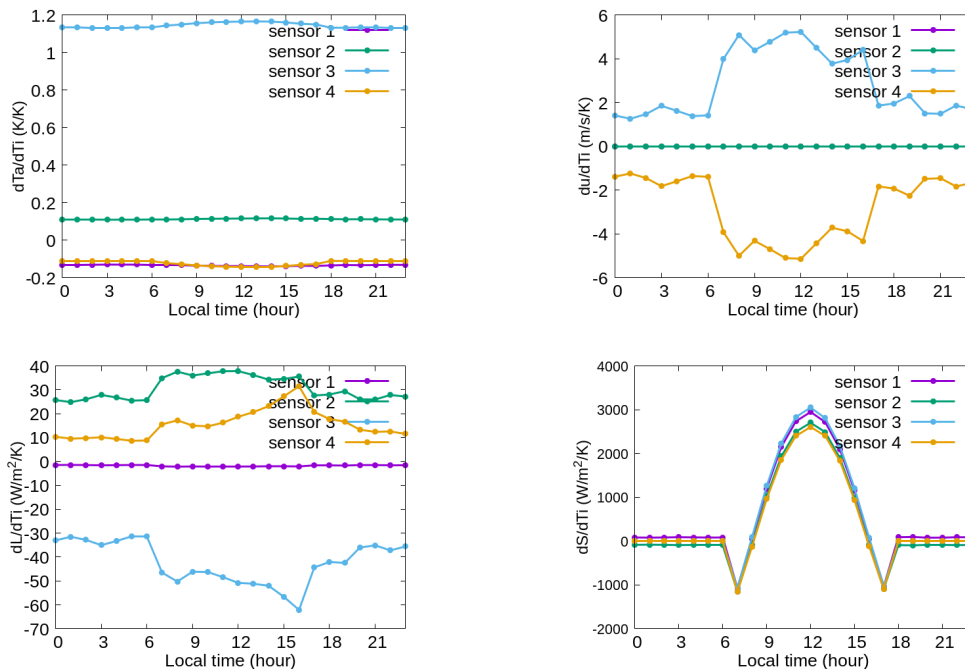


図 3.38: 4色温度計 F<sub>s</sub> で導出した、気温  $\theta$ (左上)、風速  $u$ (右上)、熱放射量  $L$ (左下)、日射量  $S$ (右下) の微分係数 ( $\partial X/\partial T_i$ ) の日変化。



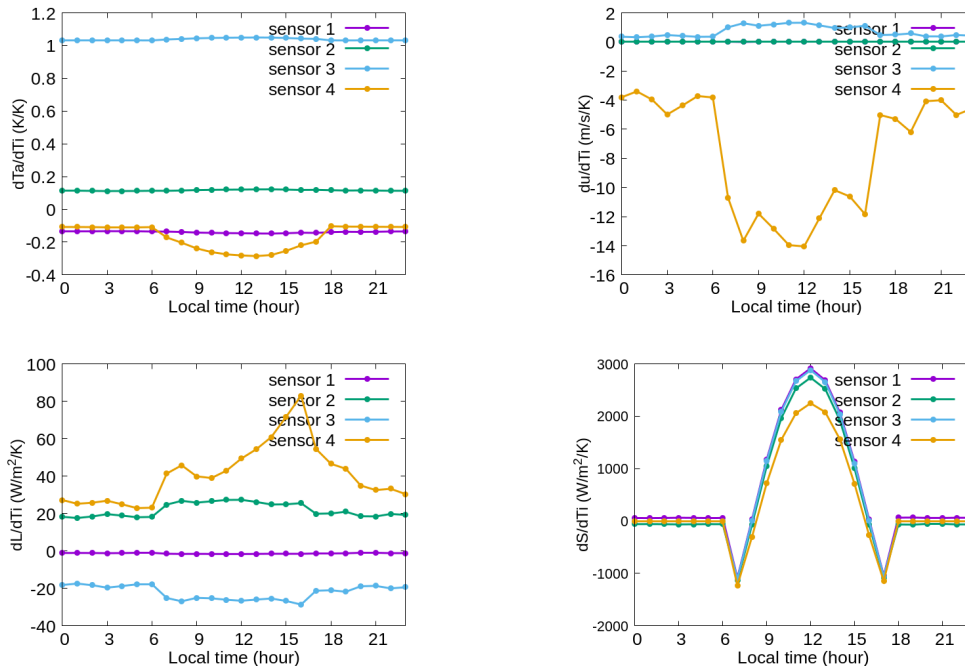


図 3.39: 4色温度計 Fh で導出した, 気温  $\theta$ (左上), 風速  $u$ (右上), 熱放射量  $L$ (左下), 日射量  $S$ (右下) の微分係数 ( $\partial X/\partial T_i$ ) の日変化.

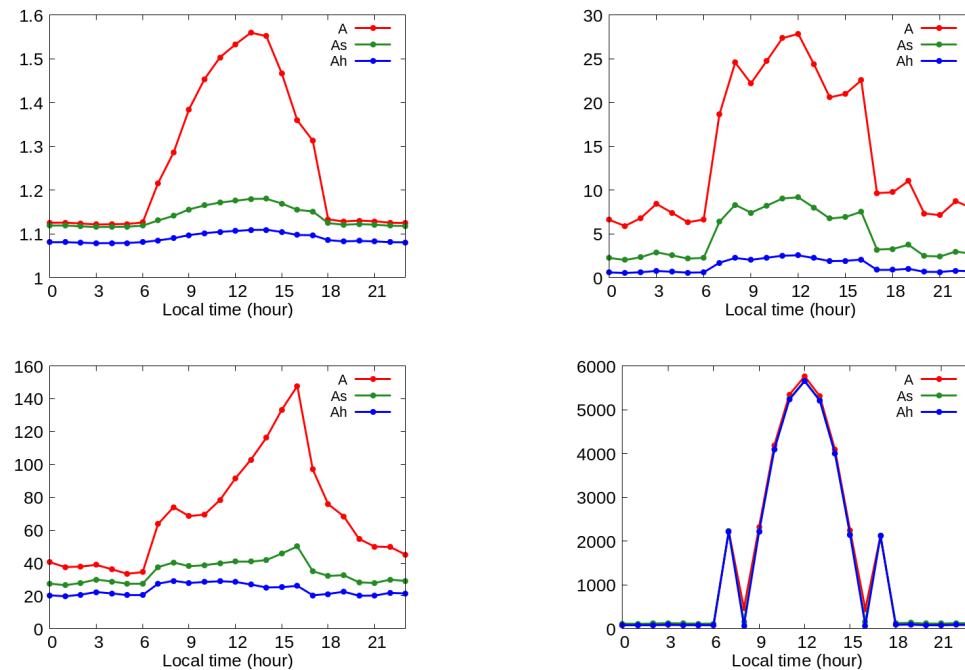


図 3.40: 4色温度計 A, As, Ah で導出した気温  $\theta$ (左上), 風速  $u$ (右上), 熱放射量  $L$ (左下), 日射量  $S$ (右下) の微分係数 ( $\partial X/\partial T_i$ ) の二乗和平方根の日変化.

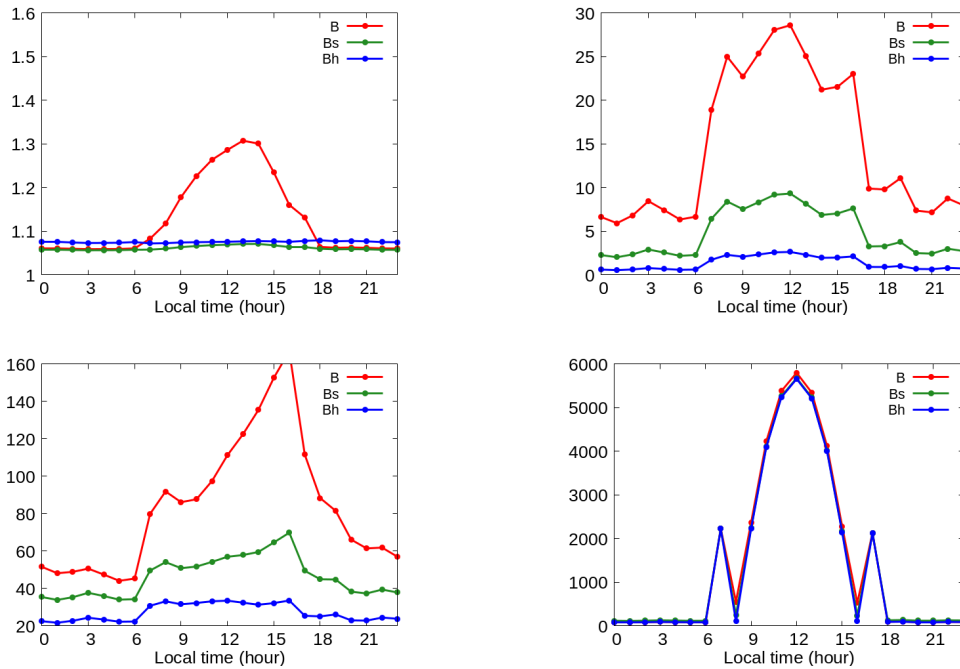


図 3.41: 4色温度計 B, Bs, Bh で導出した気温  $\theta$ (左上), 風速  $u$ (右上), 熱放射量  $L$ (左下), 日射量  $S$ (右下) の微分係数  $(\partial X/\partial T_i)$  の二乗和平方根の日変化。

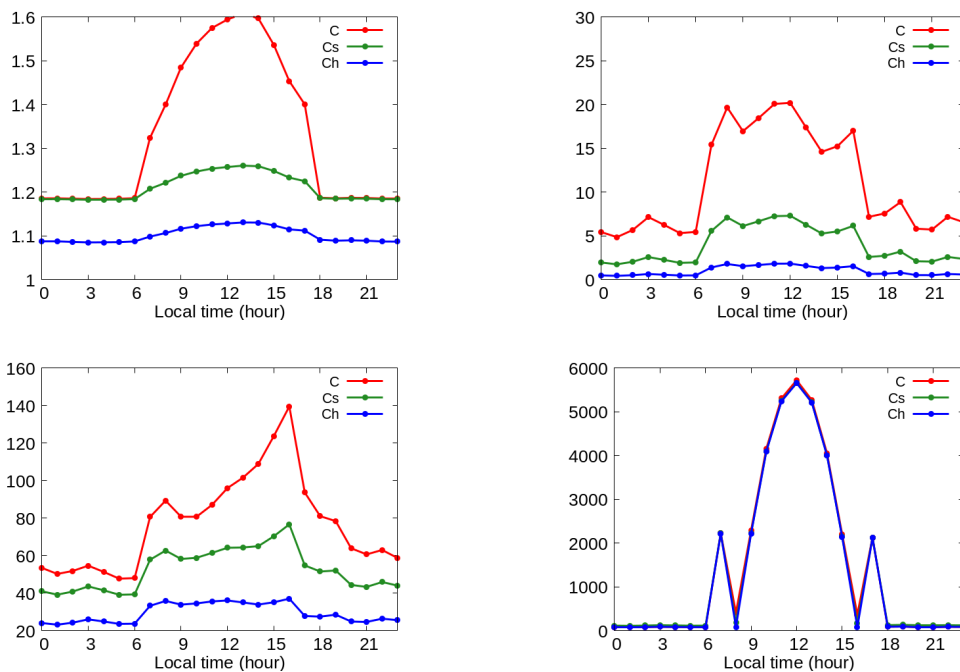


図 3.42: 4色温度計 C, Cs, Ch で導出した気温  $\theta$ (左上), 風速  $u$ (右上), 熱放射量  $L$ (左下), 日射量  $S$ (右下) の微分係数  $(\partial X/\partial T_i)$  の二乗和平方根の日変化。

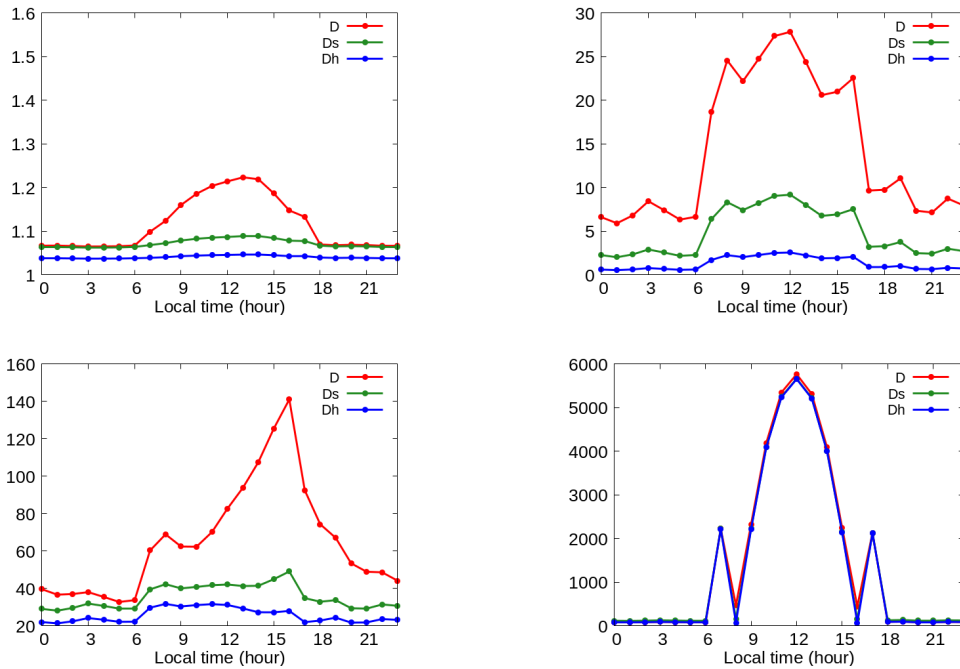


図 3.43: 4色温度計 D, Ds, Dh で導出した気温  $\theta$ (左上), 風速  $u$ (右上), 熱放射量  $L$ (左下), 日射量  $S$ (右下) の微分係数  $(\partial X/\partial T_i)$  の二乗和平方根の日変化。

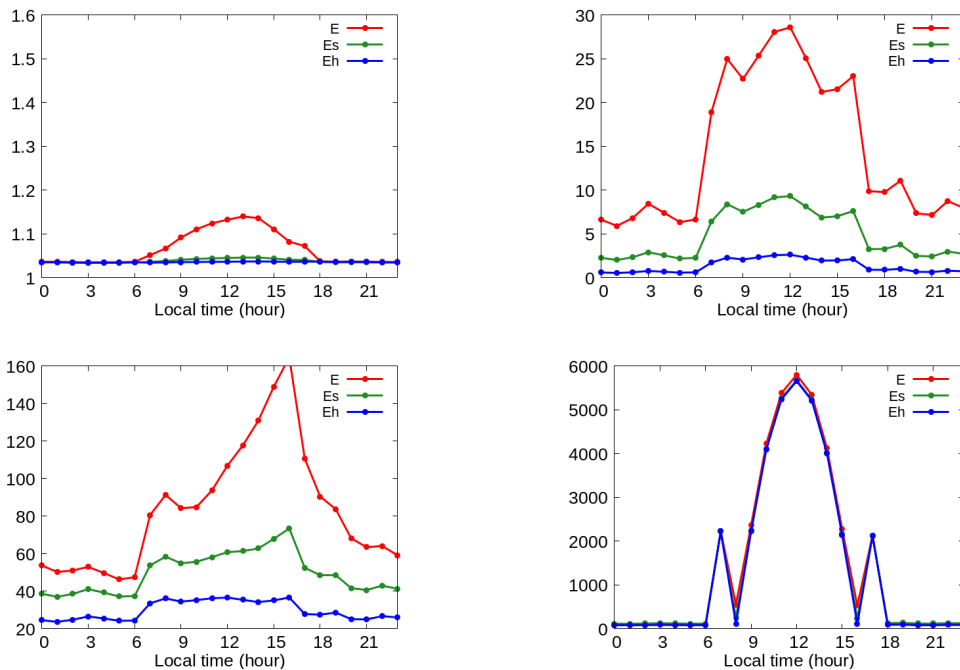


図 3.44: 4色温度計 E, Es, Eh で導出した気温  $\theta$ (左上), 風速  $u$ (右上), 熱放射量  $L$ (左下), 日射量  $S$ (右下) の微分係数  $(\partial X/\partial T_i)$  の二乗和平方根の日変化。

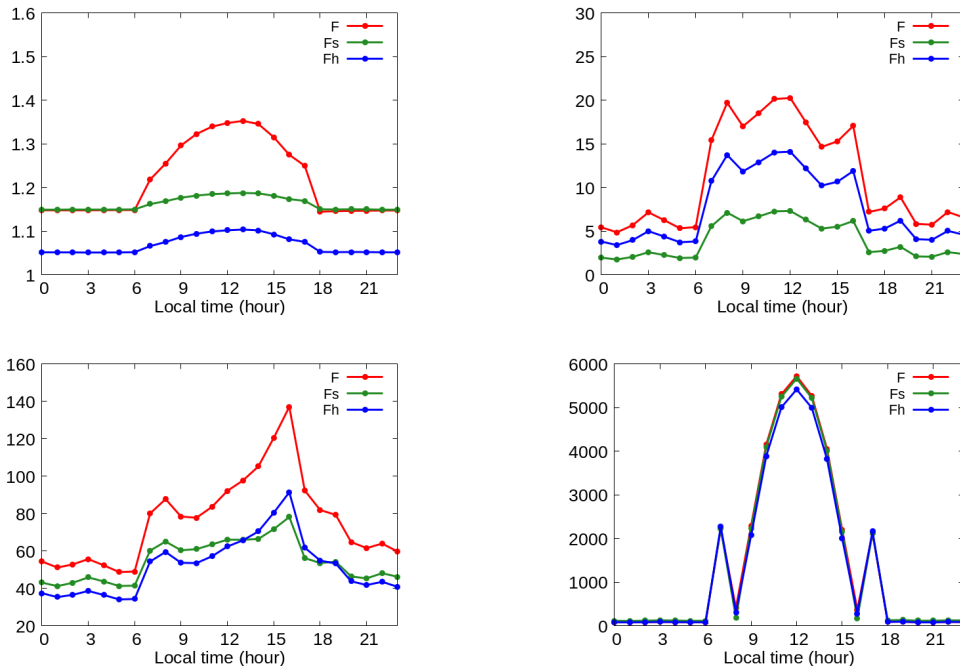


図 3.45: 4色温度計 F, Fs, Fh で導出した気温  $\theta$ (左上), 風速  $u$ (右上), 熱放射量  $L$ (左下), 日射量  $S$ (右下) の微分係数  $(\partial X/\partial T_i)$  の二乗和平方根の日変化.

## 第4章 まとめ

想定される火星表層環境の下で4色温度計の性能をシミュレーションにより評価した。4色温度計の性能は火星表層環境の日変化の影響を受け、夜間に比べ日中に低下することが分かった。また、4色温度計Aによる温度測定の精度が0.01Kの時の最大誤差は、気温で約0.006%、風速で約5%、熱放射量で約1%、日射量で約10%となった。センサを小型化、または一部温度計の発熱率を大きくすることで、4色温度計の性能は向上した。導出する物理量によって最適な色の組み合わせは変わり、今回試した範囲では、気温は黒・白・アルミメッキ・黒(発熱大)、風速は黒・白・メッキ・メッキ(発熱大)、熱放射量は黒・白・アルミメッキ・白(発熱大)、とした組み合わせが最適となった。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導いただきました主指導教員であるはしもとじょーじ教授には心より感謝申し上げます。また、研究室の皆様には本研究に関してたくさんの助言をいただきました。ありがとうございました。

## 参考文献

田坂英紀 (2005) 電熱工学 (第2版)[機械工学入門講座], 森北出版株式会社

地球流体電脳倶楽部 「火星表層環境評価プロジェクト」  
<https://www.gfd-dennou.org/arch/cress/>

竹本悠人 (2023) 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.  
岡山大学理学部地球科学科 修士論文

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

# 付録

## 計算をする際に使用したスクリプト

### 環境場から温度計の温度を計算

気温、風速、熱放射量、日射量から、ニュートン法を用いて4つの温度計の温度を計算する際に用いたスクリプトを載せる。

Listing 4.1: 温度計の温度の計算

```
1 PROGRAM Newton
2
3   IMPLICIT NONE
4
5   INTEGER, PARAMETER :: N = 4
6   DOUBLE PRECISION, DIMENSION(1:N) :: T, eps, alpha, Q
7   DOUBLE PRECISION :: f, g, h, Ta, L, A, SA, LT
8   DOUBLE PRECISION, PARAMETER :: sig = 5.67d-8, diameter = 4.0d
   -3
9   DOUBLE PRECISION, PARAMETER :: T1 = 300.0, pi = 3.14159d0
10  INTEGER :: i, j, iunit, x, xmax = 1608
11
12  eps(1) = 1.00d0 !kuro
13  eps(2) = 0.99d0 !shiro
14  eps(3) = 0.01d0 !kin
15  eps(4) = 0.99d0 !shiro(heat)
16  alpha(1) = 0.96d0
17  alpha(2) = 0.15d0
18  alpha(3) = 0.20d0
19  alpha(4) = 0.15d0
20  Q(1) = 1.0d-4
21  Q(2) = 1.0d-4
22  Q(3) = 1.0d-4
23  Q(4) = 1.0d-3
24  A = 4.0d0 * pi * (diameter / 2.0d0)**2.0d0
25
26  DO i = 1, N
27
28      T(i) = T1
```



```
29
30 END DO
31
32 OPEN(30, FILE = 'Mars-detail.txt')
33
34 LT = - 1
35
36 DO x = 1, xmax
37     LT = LT + 1
38
39     READ(30,*) h, Ta, L, SA
40
41     DO i = 1, N
42
43         DO
44             f = - eps(i)*sig*A*(T(i)**4) - h*A*T(i) + h*A*Ta + eps(i)*
                L*A + alpha(i)*SA + Q(i)
45             g = - 4.0*eps(i)*sig*A*(T(i)**3) - h*A
46             T(i) = T(i) - f/g
47
48             IF ((abs(f/g)/T(i)) < 1.0d-15)then
49                 EXIT
50             END IF
51
52         END DO
53
54     END DO
55
56     WRITE(*,*) LT, T(1), T(2), T(3), T(4)
57
58 END DO
59
60 END PROGRAM Newton
```

## 温度計の温度から環境場を計算

4つの温度計の温度から、ガウス消去法を用いて気温、風速、熱放射量、日射量を計算する際に用いたスクリプトを載せる。

Listing 4.2: 環境場の計算

```

1 PROGRAM gausu
2
3   IMPLICIT NONE
4
5   INTEGER :: m, i, j, k, l, p, time
6   INTEGER, PARAMETER :: n = 4
7   DOUBLE PRECISION, PARAMETER :: sig = 5.67d-8, pi = 3.14159d0,
      albedo = 0.2d0
8   DOUBLE PRECISION :: eps(n) = (/1.00d0, 0.99d0, 0.01d0, 0.99d0
      /) ! epsilon : Emissivity of thermal radiation
9   DOUBLE PRECISION :: alpha(n) = [0.96d0, 0.15d0, 0.20d0, 0.15d0
      ], Q(4) = [1.0d-4, 1.0d-4, 1.0d-4, 1.0d-3] ! Absorption
      rate of solar radiation, Thermometer fever
10  DOUBLE PRECISION, PARAMETER :: delta = 0.01d0
11  DOUBLE PRECISION, DIMENSION(1:4) :: a, b, c, d, T, Tc
12  CHARACTER(len = 256) :: line
13  DOUBLE PRECISION :: sum, Y(n), T1, T2, T3, T4, sa, Z(n, n), x(
      n), factor
14  DOUBLE PRECISION :: diameter = 4.0d-3 ! diameter of mesuring
      part of Thermistor
15  DOUBLE PRECISION :: LT1, LT2, Sdir, Stddev, cosZ
16
17  sa = 4.0d0 * pi * (diameter/2.0d0)**2.0d0 ! surface area of
      measuring part
18
19  OPEN (30, FILE = 'Ti.txt') ! temperature to be observed
20  OPEN (31, FILE = 'Dir.txt') ! to use cos(z)
21
22  time = -1
23
24  DO
25  READ(30, '(A)', iostat = i) line
26  IF (i /= 0) EXIT
27  IF (line(1:1) /= '!') THEN
28    READ(line, *) LT1, T1, T2, T3, T4
29  END IF
30
31  READ(31, '(A)', iostat = i) line
32  IF (i /= 0) EXIT
33  IF (line(1:1) /= '!') THEN

```

```

34     READ(line, *) LT2, Sdir, Stddev, cosZ
35     END IF
36
37     T(1) = T1 !+ delta
38     T(2) = T2 !+ delta
39     T(3) = T3 !+ delta
40     T(4) = T4 !+ delta
41
42     time = time + 1
43
44 ! eps(n)*sig*(T(n)**4)*sa - Q(n) = -h*sa*T(n) + h*sa*Ta + eps(n
    )*L*sa + alpha(n)*S*((1/(4*cos(Z)))+(x/2))*A
45
46 DO m = 1, n
47     a(m) = - sa*T(m)
48     b(m) = sa
49     c(m) = eps(m)*sa
50
51     IF (cosZ <= 0.01d0 .OR. cosZ <= 0.0d0) THEN
52         d(m) = alpha(m)*((1.0d0/(4.0d0)) + (albedo/2.0d0)) * sa
53     ELSE
54         d(m) = alpha(m)*((1.0d0/(4.0d0*cosZ)) + (albedo/2.0d0
    )) * sa
55     END IF
56     Y(m) = eps(m)*sig*(T(m)**4.0)*sa-Q(m)
57 END DO
58
59 DO m = 1, n
60     Z(m,1) = a(m)
61     Z(m,2) = b(m)
62     Z(m,3) = c(m)
63     Z(m,4) = d(m)
64 END DO
65
66 DO k = 1, n-1
67     DO i = k+1, n
68         factor = Z(i,k) / Z(k,k)
69         DO j = k+1, n
70             Z(i,j) = Z(i,j) - factor * Z(k,j)
71         END DO
72         Y(i) = Y(i) - factor * Y(k)
73     END DO
74 END DO
75
76 x(n) = Y(n) / Z(n, n)
77

```

```
78 DO i = n-1, 1, -1
79     sum = 0.0
80     DO l = i + 1, n
81         sum = sum + Z(i, l)*x(l)
82     END DO
83     x(i) = (Y(i)-sum) / Z(i,i)
84 END DO
85
86 x(2) = x(2) / x(1)
87
88 WRITE(*,*) time, x ! x = h, Ta, L, S
89
90 END DO
91
92 END PROGRAM gausu
```

---

## 微分係数の計算

微分係数を計算する際に用いたスクリプトを載せる.

Listing 4.3: 微分係数の計算

```
1 PROGRAM differential_coefficient
2
3   IMPLICIT NONE
4
5   DOUBLE PRECISION :: u1, Ta1, L1, S1, u2, Ta2, L2, S2, udiff,
6     Tadiff, Ldiff, Sdiff, LT
7   CHARACTER(len = 256) :: line
8   INTEGER :: i, n, nmax = 1608, time = -1
9   DOUBLE PRECISION, PARAMETER :: delta = 0.01d0
10
11  OPEN (30, FILE = 'element.txt')
12  OPEN (31, FILE = 'est-element.txt')
13
14  DO n = 1, nmax
15    READ(30,*) u1, Ta1, L1, S1
16    READ(31,*) LT, u2, Ta2, L2, S2
17
18    udiff = (u2 - u1)/delta
19    Tadiff = (Ta2 - Ta1)/delta
20    Ldiff = (L2 - L1)/delta
21    Sdiff = (S2 - S1)/delta
22    time = time + 1
23
24    WRITE(*,*) time, udiff, Tadiff, Ldiff, Sdiff
25  END DO
26
27 END PROGRAM differential_coefficient
```