

# 発熱者検知用サーモグラフィー の課題と信頼性向上

産業技術総合研究所 物理計測標準研究部門  
光温度計測研究グループ

笹嶋 尚彦

# 発熱者検知用サーモグラフィーの普及

新型コロナウイルス感染拡大により、様々な場所でサーモグラフィーを用いた発熱者検知が実施されている。

→ サーモグラフィーの性能向上、低コスト化

## サーモグラフィーによる発熱者検知の特徴

- 非接触測定により、感染リスク低減。
- AI顔認識により、非接触多人数、同時モニターが可能。
- 検疫現場等における時短、負担低減が可能。



- サーモグラフィーに表示される温度値の信頼性は？
- 発熱者検知のためには、サーモグラフィーをどのように運用したらよいか？

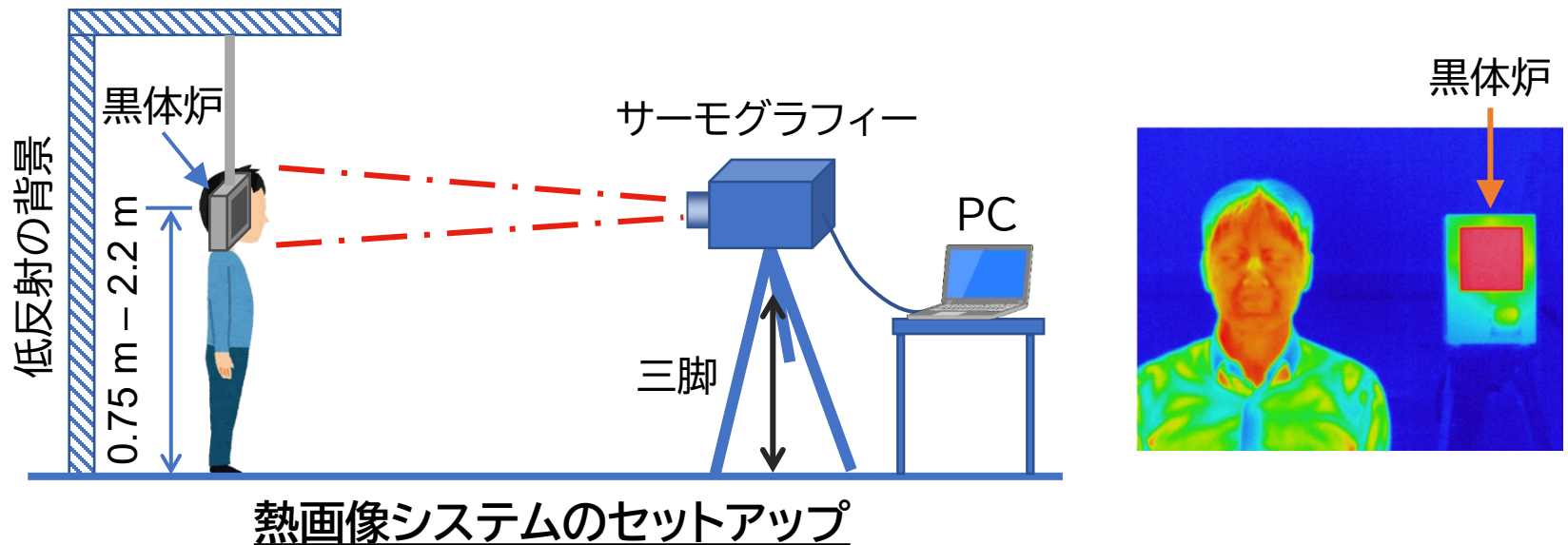


# 発熱者検知システムの全体のイメージ

## 米国食品医薬品局(FDA)のレポート

- 対象者の顔の温度分布を測定して、閾値以上の温度であるかを判定
- サーモグラフィと現場温度基準(黒体炉)をセットで使用
- 複数人の同時計測に使用しないこと
- 背景の反射、ヒーター等の放射がある環境や直射日光を避けること

検知の方法や使用する機器の性能とその評価方法は国際規格で規定



# サーモグラフィーによる発熱者 スクリーニングに関する国際規格

## IEC 80601-2-59 (2017-09)

サーモグラフィーによる発熱者スクリーニングの方法、及び装置の性能や試験方法等を定めた規格

### サーモグラフィ装置のスペックへの要求

- 画素数、空間分解能、温度範囲、温度分解能など

### サーモグラフィの設置条件・方法への要求

- 環境温度・湿度、測定対象との距離、地面からの高さなど
- 熱画像に占める顔・現場用黒体炉の割合

### 実験室レベルでの測定精度への要求

- サーモグラフィーと現場用黒体炉の不確かさが規定
- 校正用標準黒体炉を測定対象として評価

# スクリーニングサーモグラフィーに 対する主な要求事項

## スクリーニングサーモグラフィーの評価項目

- ドリフト
- 安定性 (Stability)
- 最小分解可能温度差 (MRTD)
- サーモグラフィの面内一様性
- 現場用黒体炉の輝度温度の不確かさ
- $| \text{標準黒体の温度} - \text{温度測定値} | + | \text{測定の不確かさ} | \leq 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$

## 温度基準(黒体炉)の主な要求仕様

	放射率	温度範囲	輝度温度の 拡張不確かさ	安定性と ドリフト合計
現場用	既知であること*	33 °C ~ 40 °C	±0.3 °C以内	±0.1 °C以内
校正室用	0.998以上	—	±0.2 °C以内	±0.05 °C以内

\*0.95~0.96ぐらいが多い

# サーモグラフィーの評価

## サーモグラフィーA

有効画素数: 640 (H) × 480 (V)  
検出素子: 非冷却マイクロボロメータ  
仕様精度:  $\pm 2.0$  °C

## サーモグラフィーB

有効画素数: 320 (H) × 240 (V)  
検出素子: 非冷却マイクロボロメータ  
仕様精度:  $\pm 1.0$  °C

## 測定条件

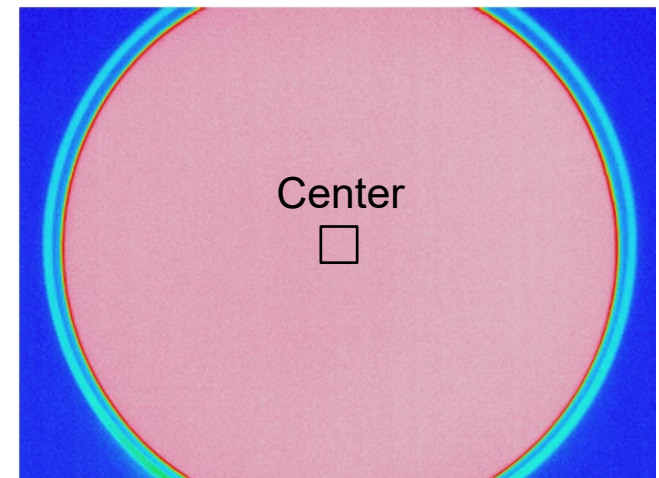
データは30秒に1回測定、測定時間は8時間  
測定前日からサーモグラフィーの電源ON  
放射率は1に設定

## 実験室環境

室温:  $23.5$  °C  $\pm 1$  °C  
湿度: 50 %  $\pm 20$  %

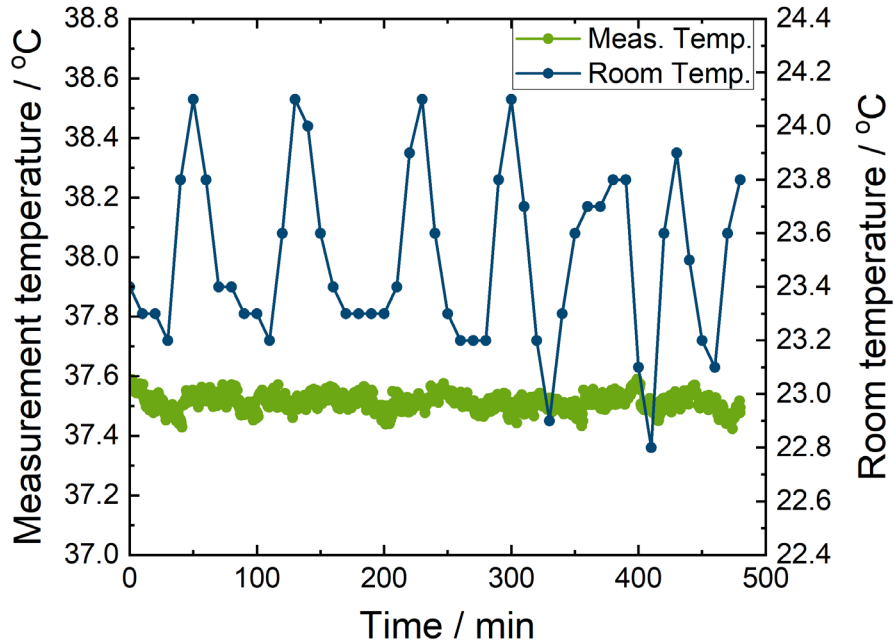
## 面黒体炉

放射率: 0.95  
設定温度:  $37$  °C  
面黒体の中心10 mm × 10 mmの平均温度を評価



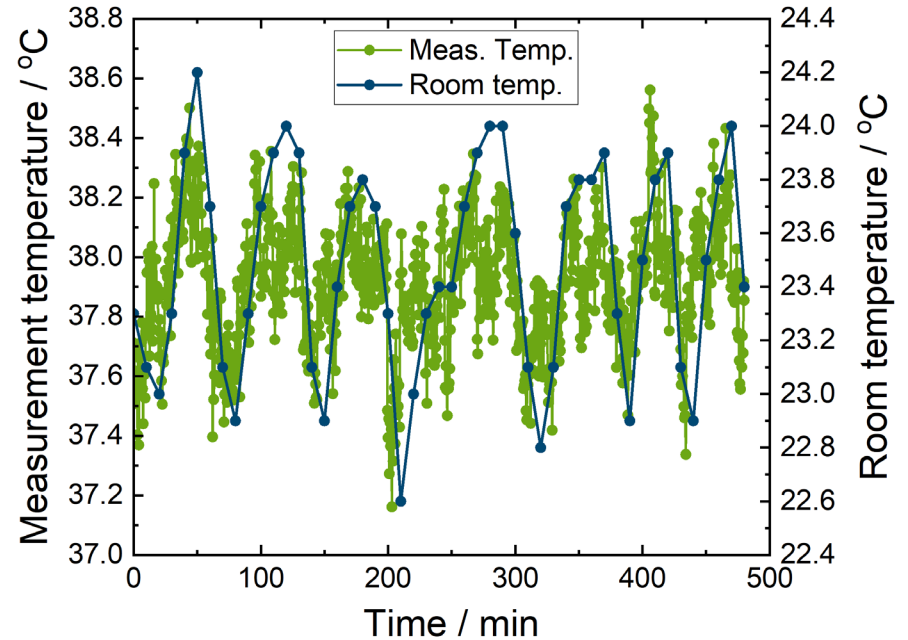
実際の熱画像

# サーモグラフィーの測定結果



## サーモグラフィーA

室温変動: 1.3 °C  
表示温度変動: 0.17 °C



## サーモグラフィーB

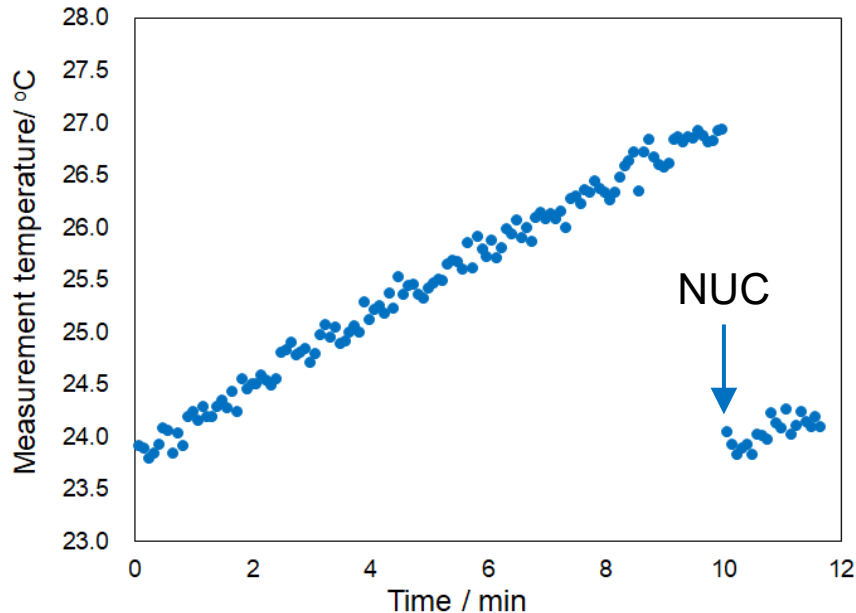
室温変動: 1.6 °C  
表示温度変動: 1.4 °C

測定温度値の変動の原因は？

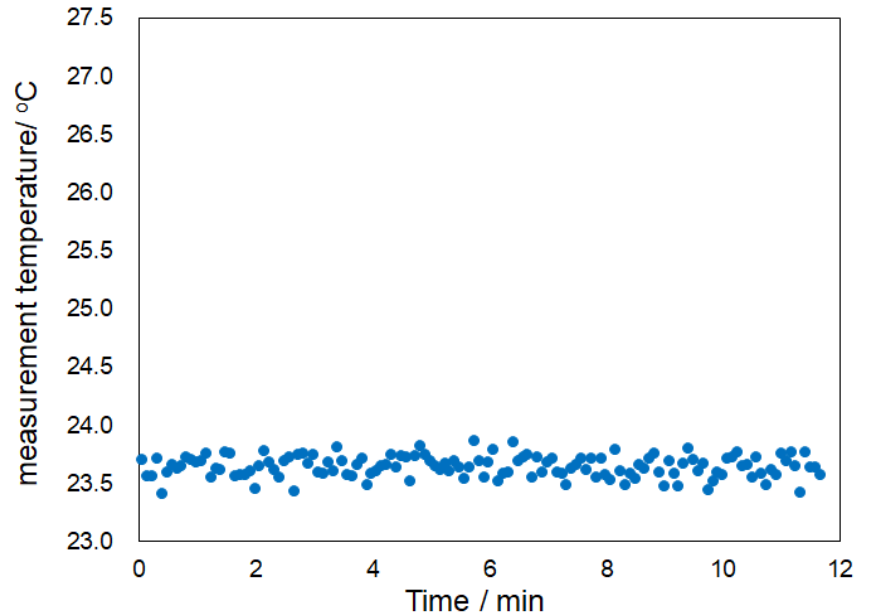
# サーモグラフィーの安定性試験

## 米国食品医薬品局(FDA)のレポート

- 使用する30分前にはシステム全体の電源を入れること。  
→ サーモグラフィーCを用いた安定性試験の実施  
(産総研の標準黒体炉を使用)



電源を入れてから30分後



電源を入れてから6時間後

温度値変動の原因は？

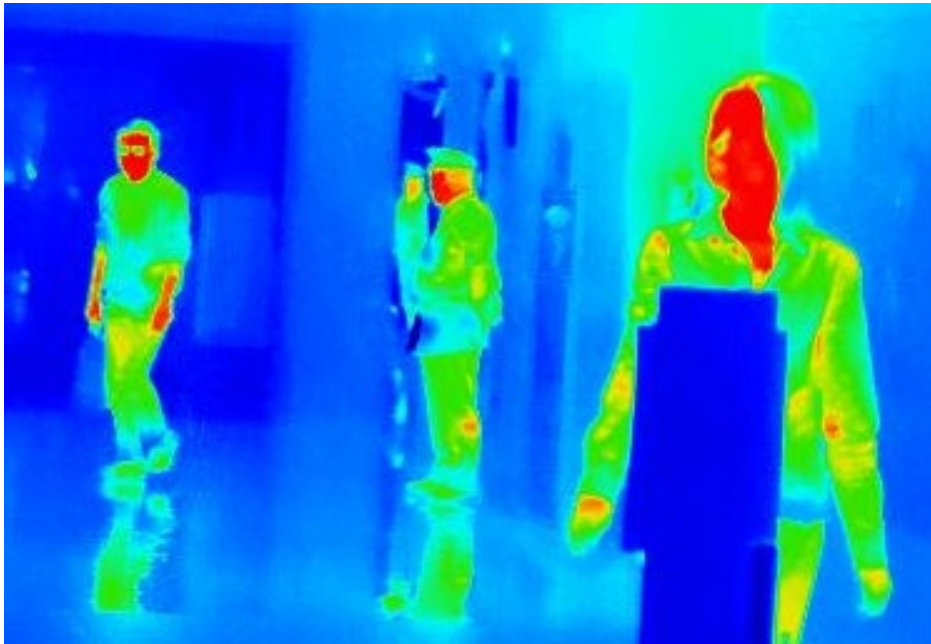


# サーモグラフィーとは？

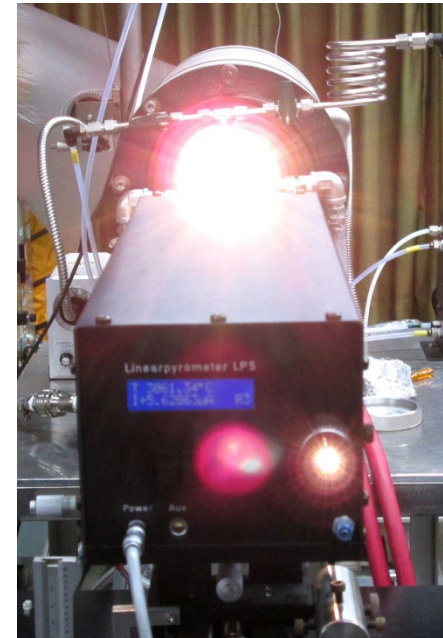
- 放射温度計(サーモグラフィー)の測定原理
- 測定上の注意点(放射率等の影響)
- 安定性の原因
- 面積効果とその影響
- サーモグラフィーで顔のどの部分を測定すべきか？

# 放射温度計(サーモグラフィ)とは

- 全ての物体から、その温度に応じた電磁波が放射されている。
- この電磁波の測定(強度、スペクトル)から、物体の温度を求める。
  - 広い温度範囲で温度測定が可能。



室温付近での温度測定



3000 °C近辺での温度測定

# 放射温度計の例

測定したい対象物からの熱放射(光)をとらえて温度を測定する温度計

→ 測定対象に接触させずに温度を測定することができる。



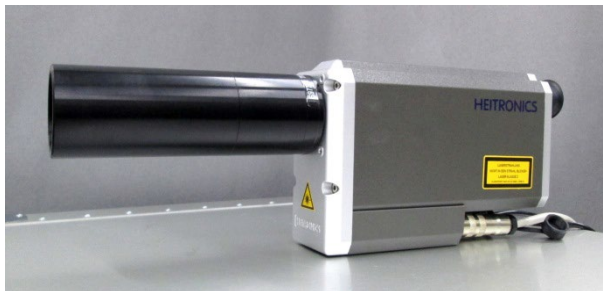
耳式体温計



非接触温度計



サーモグラフィー



赤外放射温度計



2色放射温度計

# 放射温度計測の原理

物体からの熱放射を放射温度計でとらえ、**プランクの放射則**を使って**温度**を求める。

$$L(\lambda, T) = \frac{c_{1L}}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1}$$

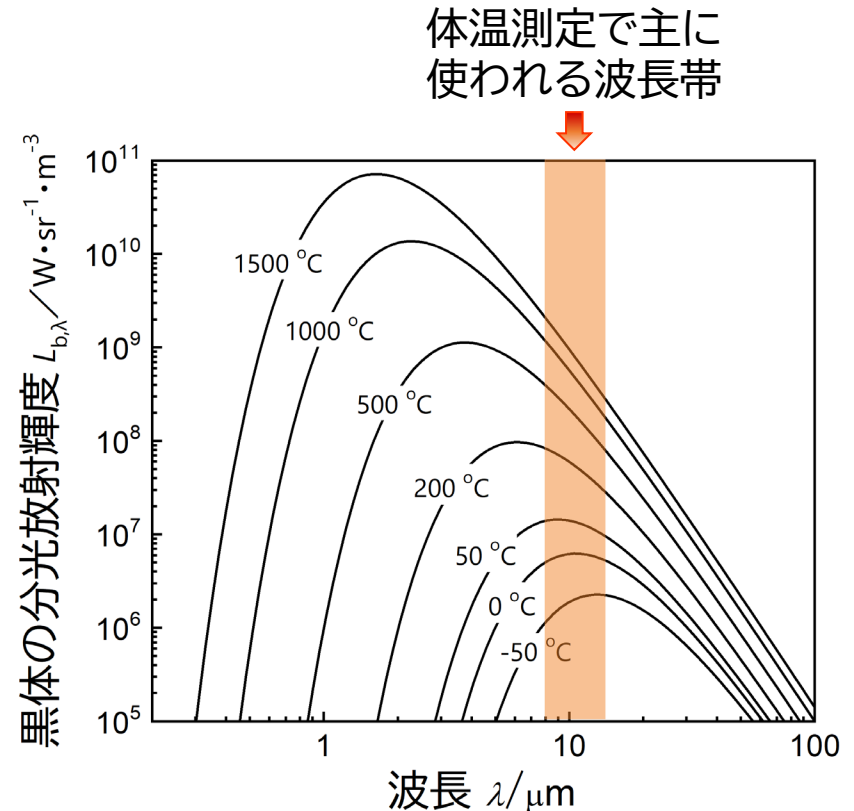
$L(\lambda, T)$ : 分光放射輝度 [ $\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

$T$ : 熱力学温度 [K]

$\lambda$ : 物体から発散する放射の波長 [m]

$c_{1L}$ : 放射の第1定数 ( $1.1910 \times 10^{-16} [\text{W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1}]$ )

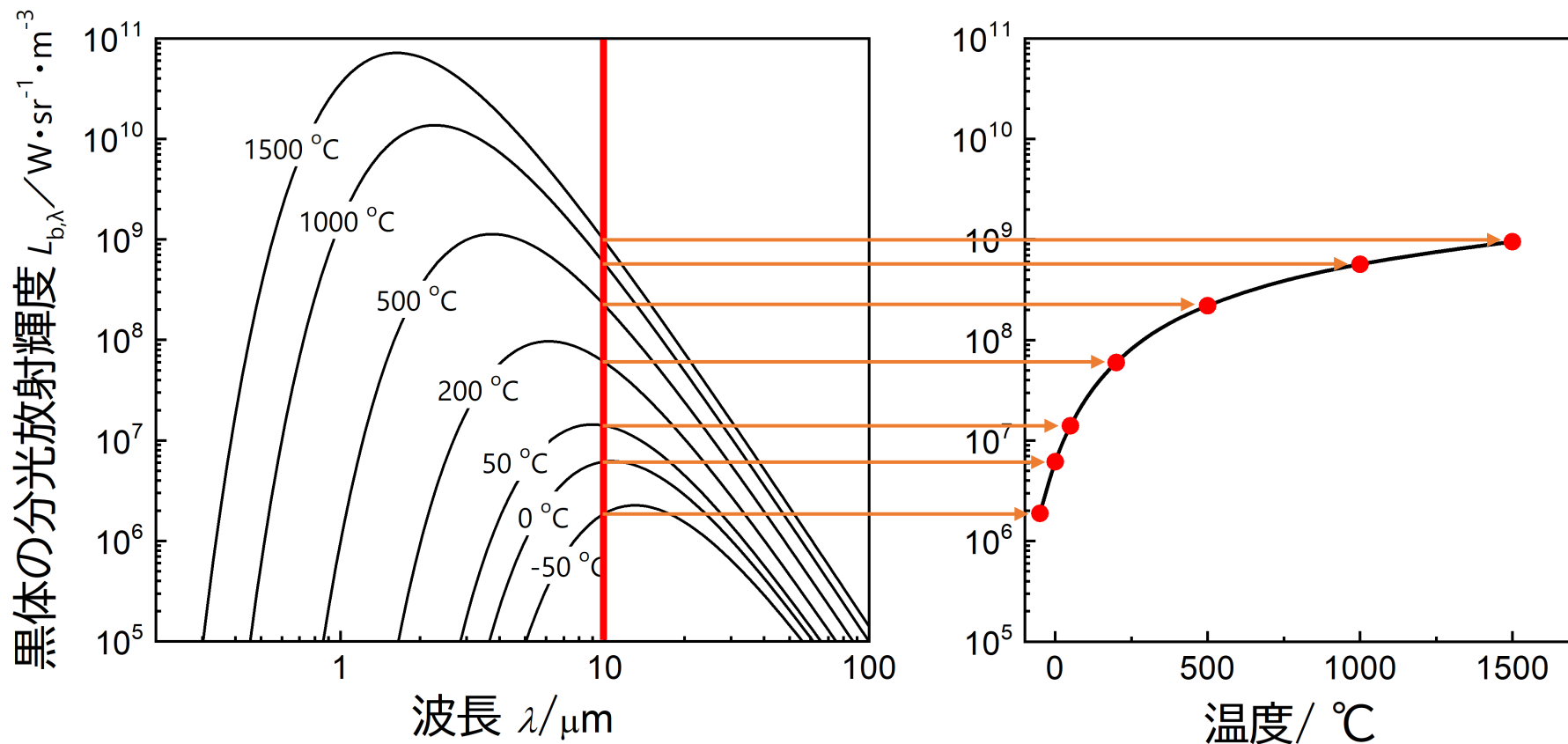
$c_2$ : 放射の第2定数 ( $0.014388 [\text{m} \cdot \text{K}]$ )



各温度における黒体の  
分光放射輝度

# 放射温度計測の原理

ある測定波長を持つ放射温度計で測定した分光放射輝度とプランクの式から温度が求まる。



# 放射温度計の特徴

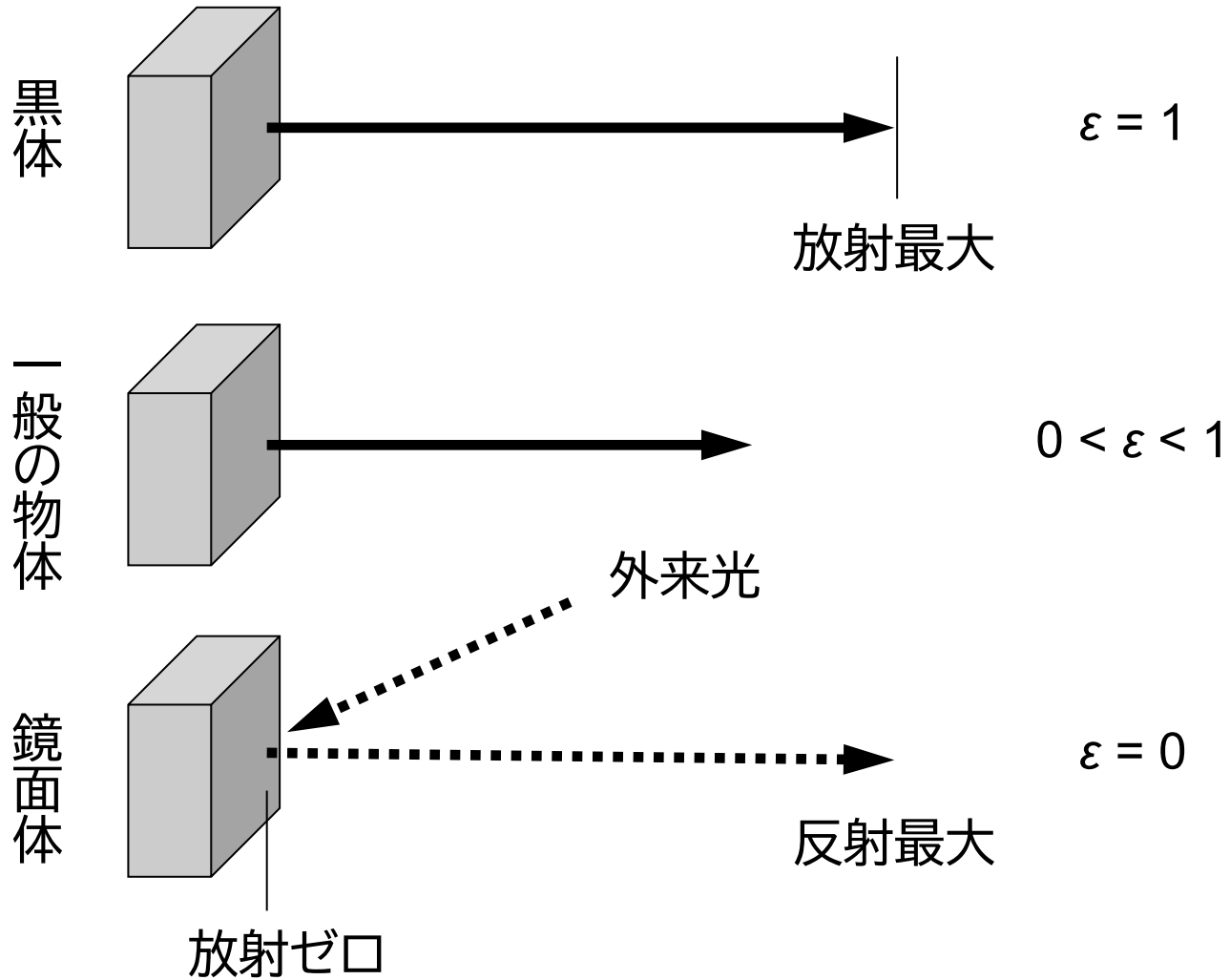
## 特長

- **非接触・非破壊計測**  
→ 測温対象の熱じょう乱を起こさない。非接触での体温測定や人工衛星からの気象観測等、遠隔測定が可能。
- **高速応答**  
→ 温度が短時間で急激に変化する対象等の測温が可能。
- **室温以下から超高温まで測定可能**  
→ 2000 °C以上では接触式温度計での計測は困難。

## 問題点

- 測定対象の**放射率**により測定値が変化する。
- 測定対象の**周囲の熱放射源**により測定値が変化する。

# 放射率とは



# 実際の物体(非黒体)からの熱放射

$$L(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda) \cdot L_b(\lambda, T) \quad 0 \leq \varepsilon \leq 1$$

$\varepsilon(\lambda)$ : 分光放射率

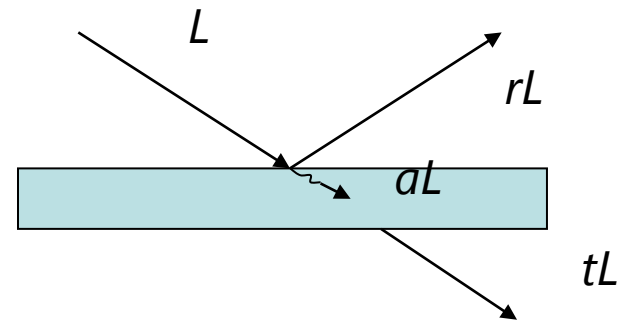
$L(\lambda, T)$ : 分光放射輝度

$L_b(\lambda, T)$ : 黒体分光放射輝度

輝度温度を  $T_s$  とすると、

$$L_b(\lambda, T_s) = \varepsilon(\lambda) \cdot L_b(\lambda, T)$$

$r(l)$ : 反射率、 $a(l)$ : 吸収率、  
 $t(l)$ : 透過率、  
 とすると以下の関係が成り立つ。



キルヒホッフの法則より、

$$\varepsilon(\lambda) = \alpha(\lambda)$$

エネルギー保存則より

$$\rho(\lambda) + \alpha(\lambda) + \tau(\lambda) = 1$$

不透明な表面 ( $t = 0$ )

$$\varepsilon(\lambda) = 1 - \rho(\lambda)$$



# 測定対象の放射率と背景放射の影響

放射率 $\varepsilon_\lambda$ 、反射率 $\rho_\lambda$ の対象物(不透明体)を測定する場合

$$\varepsilon_\lambda + \rho_\lambda = 1$$

が成り立ち、放射温度計の輝度信号 $L$ は、以下のようにになる。

$$L = \varepsilon_\lambda \cdot L_{b,\lambda}(\lambda, T_{obj}) + (1 - \varepsilon_\lambda) \cdot L_{b,\lambda}(\lambda, T_{amb})$$

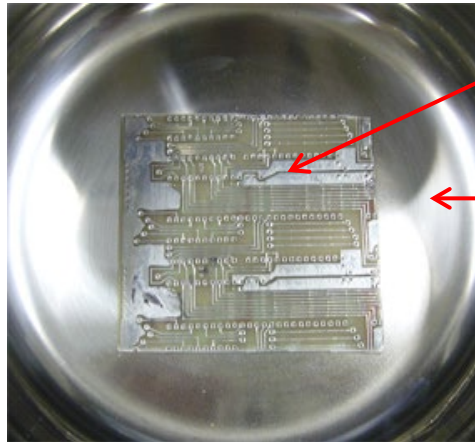
$T_{obj}$ : 測定対象の温度、 $T_{amb}$ : 周囲温度

## 室温( $T_{amb} = 20\text{ °C}$ )で放射温度計で测温した場合の背景放射の影響

波長: 10  $\mu\text{m}$

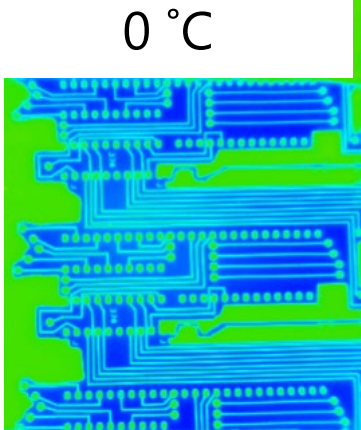
温度	対象の放射率による測定温度への影響		
	$\varepsilon = 0.98$	$\varepsilon = 0.9$	$\varepsilon = 0.8$
0 °C	0.4 °C	2.2 °C	4.4 °C
20 °C	20.0 °C	20.0 °C	20.0 °C
30 °C	29.8 °C	29.0 °C	28.1 °C
40 °C	39.6 °C	38.2 °C	36.3 °C

# 各温度での室温背景放射の影響



プリント基板

温度可変  
容器



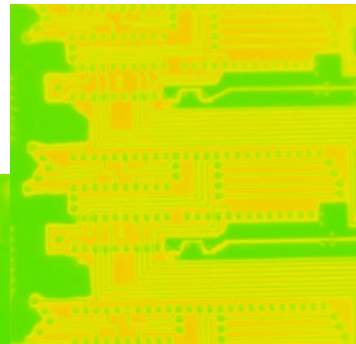
0 °C



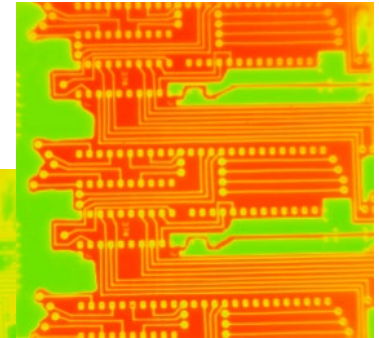
10 °C



20 °C



30 °C



40 °C

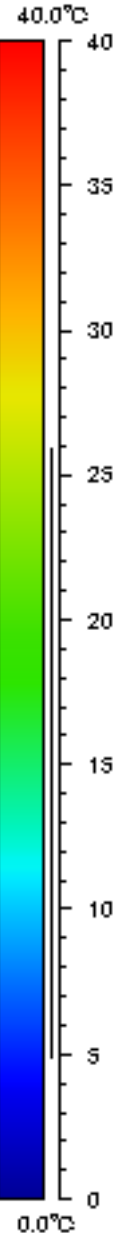


$$T_{\text{object}} = T_{\text{ambient}}$$

$$L = \varepsilon_{\lambda} \cdot L_{\text{b},\lambda}(\lambda, T_{\text{obj}}) + (1 - \varepsilon_{\lambda}) \cdot L_{\text{b},\lambda}(\lambda, T_{\text{amb}})$$

- サーモグラフィーの放射率を1に設定
- 室温約20 °Cで、基板温度を変化させて温度を測定。

[Y. Yamada and J. Ishii, Jpn. J. Appl. Phys. 50 (2011) 11RE04]

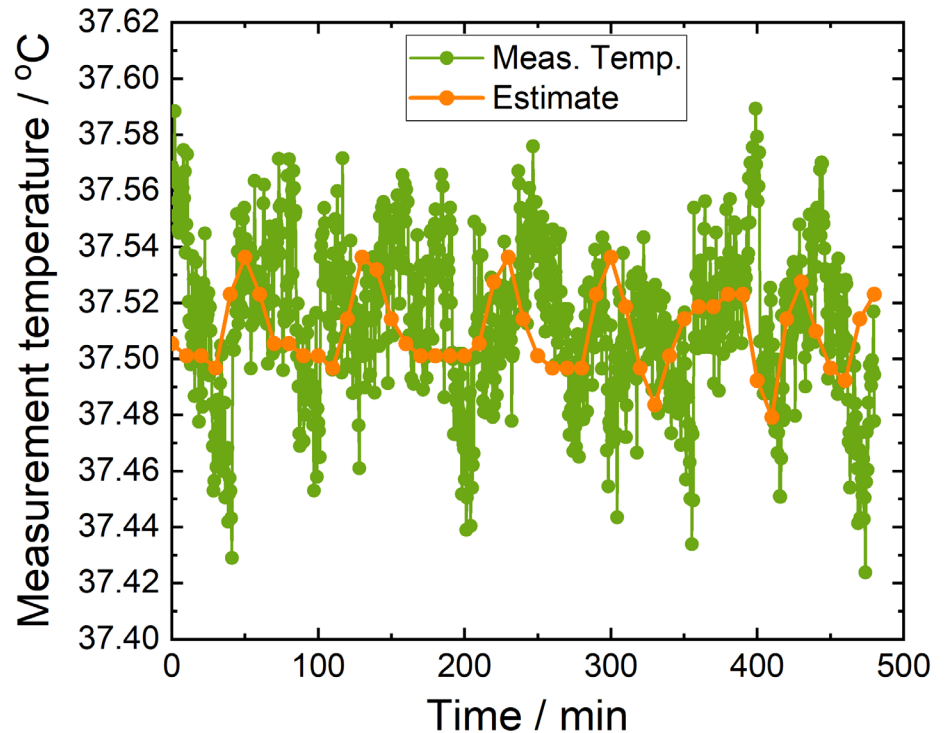
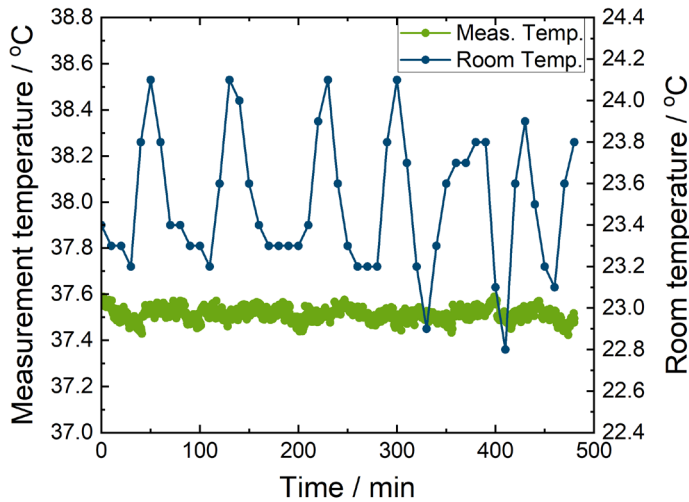


# サーモグラフィーによる測定結果

室温変動が1.3 °Cの時、サーモグラフィーの温度変動は0.17 °Cだった。

- サーモグラフィーの放射率を1、面黒体炉の放射率を0.95とした場合に、観測される温度値を計算。
- 室温変動1.3 °Cの時、観測される温度変動:0.06 °C
- 炉の安定度(仕様):0.1 °C、サーモグラフィーの安定度:記載なし。

→ 0.17 °Cの温度変動は妥当



# サーモグラフィーのドリフト

## 筐体内部の温度変化

赤外放射温度計の場合、筐体温度の変動そのものが赤外線入射の外乱になる。

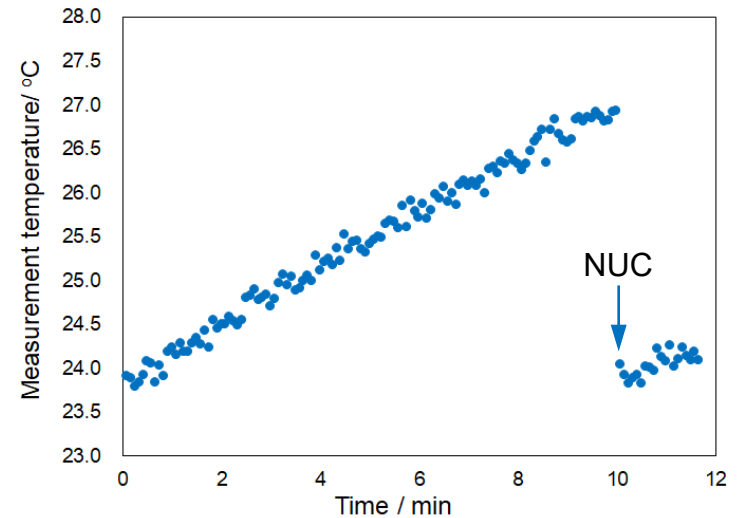
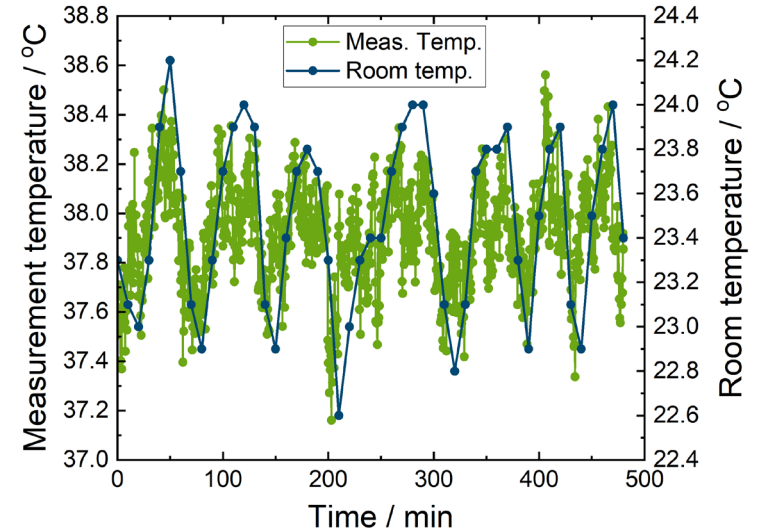
- 周囲環境の温度変化
- 内部電気回路の温度上昇



内部温度補正が適切に行われないと、ドリフトが発生する。

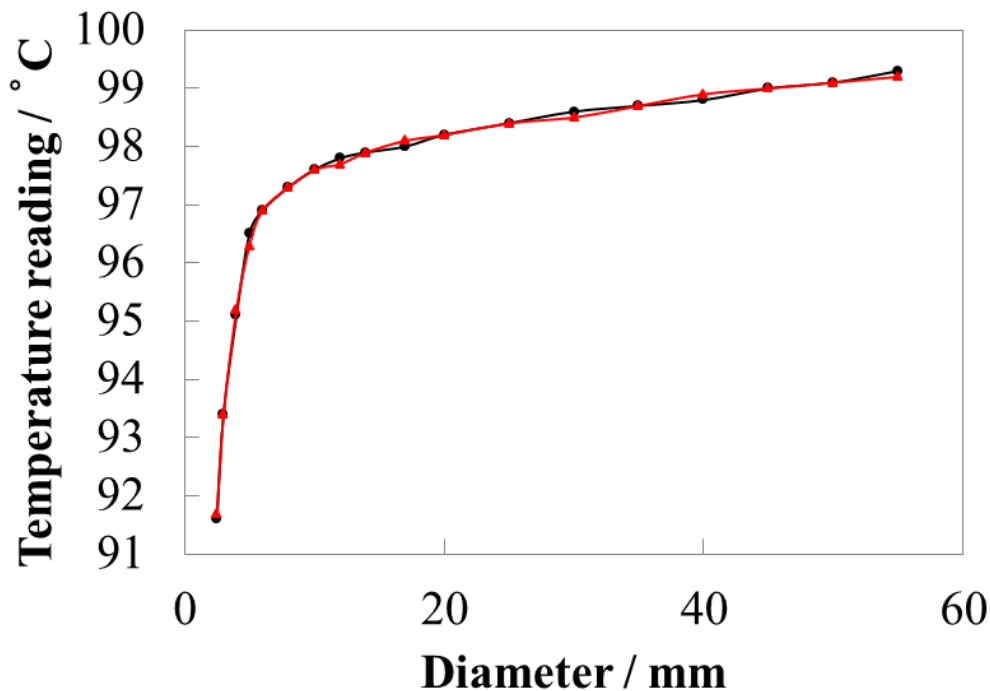
## 解決策

- 筐体と内部を熱的・光的に遮断する。
- 内部温度の変化に合わせて温度補正を行う。  
(環境温度変化に合わせた補正を行う。)
- 現場校正用黒体炉とセットで測定する。



## 面積効果: Size-of-source effect (SSE)

- 結像光学系の不完全性(散乱・回折等)の影響
- 小さい測定対象ほど周囲温度の影響を受けやすい
- 校正に用いた放射源(黒体炉等)と異なるサイズの対象物を測定した場合、正しい温度値が得られない



直径50 mmの黒体炉で校正した場合、同じ温度の直径10 mmの対象物を見ると、約1.5 °C低く表示される。

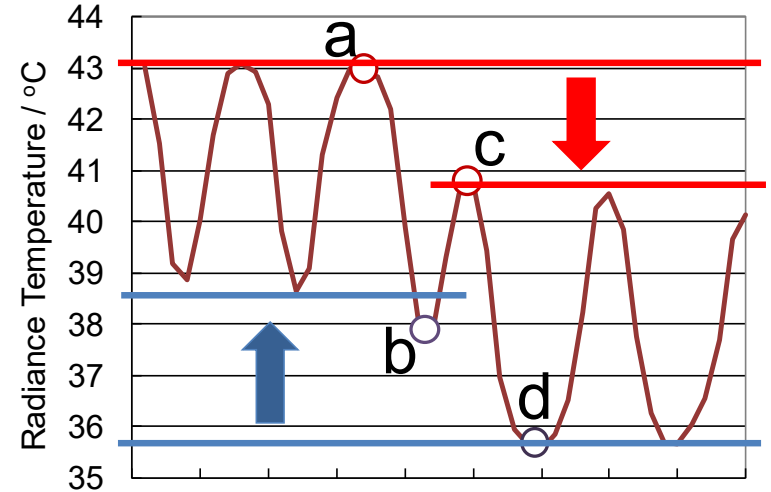
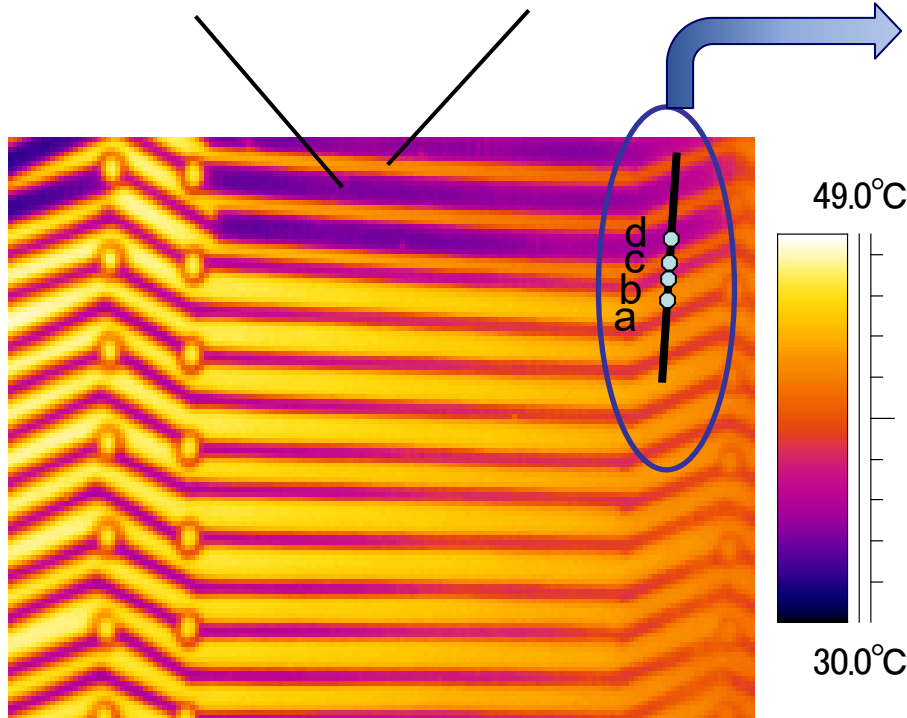
サーモグラフィーDの面積効果

# サーモグラフィーの面積効果

## 均一に定常的に加熱されたプリント基板の温度測定

金属部:  
放射率が低い

基板部:  
放射率が高い



画像としては解像されているように見えても、細かい構造部の温度測定には大きな誤差が生じる

# 顔のどの部分の温度を測定すべきか？

## IEC 80601-2-59 (2017-09)

- 皮膚の放射率は0.98とする。
- 内眼角 (inner canthi) の内側に隣接する領域を測定するのが好ましい。  
(内頸動脈の真上にあるため。)



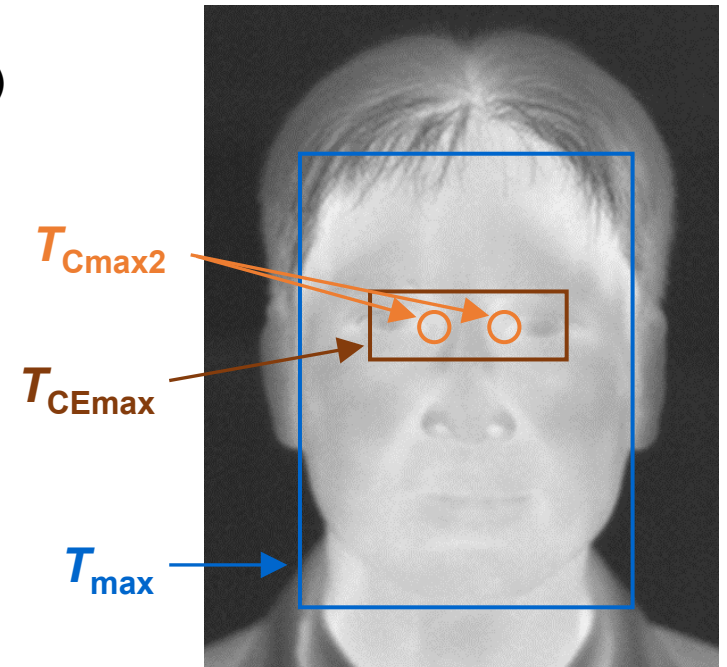
## FDAの最近の論文\*

以下の順で測定精度がよい(舌下温との比較)

- 顔全体の中の最高温度 ( $T_{max}$ )
- 拡張内眼角エリアの最高温度 ( $T_{CEmax}$ )
- 内眼角エリアの最高温度 ( $T_{Cmax2}$ )

## 測定条件

- IEC 80601-2-59及び  
ISO/TR 13154に準拠
- 被験者は測定前に室内で15分待機



\*Y. Zhou, et al., J. Biomedical Optics 25(9), 097002 (2020)

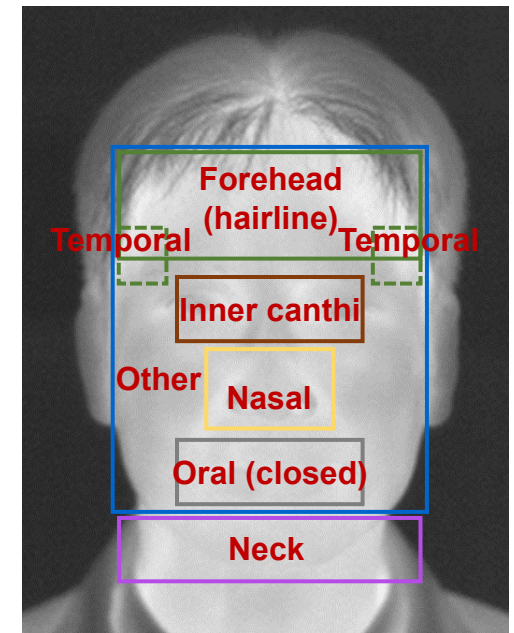
# 皮膚温度と舌下温度の差は？

FDAの論文\*より

	額領域	内眼角領域	閉じた口の領域	顔全体の最高温度
舌下温との差	1.6 °C ~ 2.8 °C	1.4 °C ~ 2.4 °C	1.7 °C ~ 1.8 °C	1.2 °C ~ 1.3 °C

最高温度を示した領域

領域	割合
内眼角	59.5 %
閉じた口	21.7 %
額(生え際)	8.8 %
鼻	4.1 %
こめかみ	3.6 %
首、その他	2.4 %



\*Y. Zhou, et al., J. Biomedical Optics 25(9), 097002 (2020)



# サーモグラフィーを発熱者検知に使うには？

- IECやISO等の規格に沿った運用が非常に重要。
- 現場用黒体炉とサーモグラフィーを一体で運用する必要がある。
- 周囲環境等の影響を考慮すること。
- サーモグラフィーの校正や評価を適切に行うこと。

