非冷却型赤外線カメラによる 放射率分布と温度分布の同時測定

防衛大学校 システム工学群 機械工学科 中村 元

1. はじめに

最近低価格化が進んでいる非冷却型の赤外線カメラを用いて,放射率が未知である物体 表面の温度分布を測定する方法について検討した.「測定面を一旦等温にするにする方法」 と「周囲環境温度を変化させる方法」の2つを試みたが,本報では,良好な結果が得られ た後者の方法について紹介する.

2. 測定原理

赤外線カメラの各画素の出力(輝度値)Uは,測定面からの距離が1m程度以下の場合 (大気による赤外線の吸収や放射が無視できる場合)は次式で表すことができる⁽¹⁾.

$$U = \varepsilon_w \cdot U_b(T_w) + (1 - \varepsilon_w) \cdot U_b(T_a)$$
⁽¹⁾

 T_w は測定面の温度, ε_w は測定面の放射率(赤外線検知波長帯における値), T_a は周囲環境 温度であり, $U_b(T)$ は赤外線カメラの校正関数(黒体面を測定した時の温度 T と輝度値 U_b の関係)である.右辺の第1項は測定面からの放射による出力を,第2項は周囲環境から の放射が測定面で反射することによる出力を表している.ここで,図1のように周囲環境 温度が T_{a1} の時の出力を U_1 ,周囲環境温度が T_{a2} の時の出力を U_2 とすると,以下の2式が 成り立つ.

$$U_1 = \varepsilon_w \cdot U_b(T_w) + (1 - \varepsilon_w) \cdot U_b(T_{a1})$$
⁽²⁾

$$U_2 = \varepsilon_w \cdot U_b(T_w) + (1 - \varepsilon_w) \cdot U_b(T_{a2})$$
(3)

 U_1, T_{a1}, U_2, T_{a2} を測定すると,上の2式の未知数が測定面の放射率 ε_w と温度 T_w の2つになるため,2式を連立させて,放射率 ε_w と温度 T_w を同時に求めることができる.



3. 赤外線カメラの校正

本実験では,非冷却型の赤外線カメラ(ULVIPS-04272S,ビジョンセンシング)を用いて測定を行った.冷却型のカメラであれば,図 2(a)のように赤外線検出素子およびその周

囲が-200 程度まで冷却されているため,素子周囲からの赤外線放射は十分小さく,観測 対象からの放射光強度に比べて無視することができる.一方,非冷却型のカメラでは筐体 内部が常温であるため,素子周囲からの赤外線放射が大きく,筐体温度が変化すると素子 の出力(輝度値)が変化する.そこで,本研究では筐体内の素子周囲温度 T_cの変化も考慮 した校正関数 U_b(T, T_c)を作成した.



図2 赤外線カメラで検知される放射光

校正は,平面黒体炉(CES100-04MG,日本バーンズ:放射率 0.99±0.004)を用いて行った.黒体面の温度 Tは 10~50 の範囲で変化させた.また,本研究で用いた赤外線カメラの検出素子基板には温度センサが設置されているため,その温度を素子周囲温度 T_c とした. 部屋の空調温度を 25~28 に変化させることにより,素子周囲温度 T_c を 38~40 の範囲で変化させた.



校正で得られた輝度値 Ubの変化を図 3(a)に示す.黒体炉の温度 Tが上昇すると輝度値が 高くなっており,素子周囲温度 Tcの上昇によっても輝度値が大きく変化していることがわ かる.本校正の温度範囲では,輝度値 Ubの値は素子周囲温度 Tc に対して直線的に上昇することを確認した.

以上の結果を基に,赤外線カメラの出力(輝度値)U_bを次式を用いて近似した.

$$U_b(T, T_c) = a_3 T^3 + a_2 T^2 + a_1 T + a_0 + b(T_c - T_{c0})$$
(4)

*a*₃, *a*₂, *a*₁, *a*₀, *b*, *T*_c₀ は定数である.黒体炉の温度*T*に起因した出力は従来の近似式を参考に 3 次関数で近似しており⁽¹⁾,素子周囲温度に起因した出力は図 3(a)を基に1 次関数で近似し ている.式(1)の6つの定数は,校正データ(*U*_b, *T*, *T*_c, 図 3(a)参照)を基に決定した.式(4) の左辺 *U*_b(*T*, *T*_c) をここでは校正関数として用いる.

校正関数 $U_b(T, T_c)$ の値(式(4)に $T \ge T_c$ の測定値を代入した値) と輝度値 U_b の実測値の 関係を図 3(b)に示す.両者の差の rms 値は黒体温度に換算して±0.13 であった.すなわ ち,式(4)の校正関数の精度は,本校正の温度範囲では黒体温度に換算して±0.26 (95% の確からしさ)である.

ここで評価した校正関数を用いると,式(2),(3)は次式で表される.

$$U_{1} = \varepsilon_{w} \cdot U_{b}(T_{w}, T_{c1}) + (1 - \varepsilon_{w}) \cdot U_{b}(T_{a1}, T_{c1})$$
(5)

$$U_2 = \varepsilon_w \cdot U_b(T_w, T_{c2}) + (1 - \varepsilon_w) \cdot U_b(T_{a2} T_{c2})$$
(6)

4. 放射率分布と温度分布の同時測定

4.1 実験装置

図 4(a)に実験装置の写真を示す.赤外線カメラを用いて測定面(図 4(b))の熱画像を撮影した.本測定面は,RC181研究分科会の熱WGで使用したベンチマークモデルの基板⁽²⁾である.基板の中央部には辺長 45 mmの発熱パッケージが搭載されており,その上に辺長30 mmのヒートスプレッダーが設置されている.基板表面の温度を検証するため,基板上の3カ所に φ0.1 の K 熱電対が設置されている.熱電対の測温接点は高熱伝導率接着剤で接着すると共に,リード線を可能な範囲で等温面に這うように設置し,測定誤差を低減した⁽³⁾.また,測定面の周囲環境温度 *T_a*(図 1 参照)を規定するため,図 4(a)に示すように,赤外線カメラの対向側に図 4(c)に示す対向板を設置した.対向板は,等温でかつ放射率が1 で近似できるように,銅板(辺長 150 mm,厚さ 5 mm)の表面に黒体ペイント(JSC-3 号,ジャパンセンサー)を塗布したものを使用した.対向板の温度は,内部に埋め込まれた熱電対で測定した.

4.2 測定手順

まず,対向板の背面をハロゲンスポットヒーターで照射し,対向板の温度が室温+20 程度になるまで加熱した.ヒーターを切ってから対向板の温度が十分に一様になるように 1分程度待ってから赤外線カメラで熱画像(輝度値 U_1)を取得すると同時に対向板の温度 T_{a1} とカメラの素子周囲温度 T_{c1} を測定した.その後,対向板の温度が T_{a1} より10 程度低 下した時(約9分後)に再度熱画像(輝度値 U_2)を取得すると同時に対向板温度 T_{a2} と素 子周囲温度 *T*_{c2}を測定した.以上の測定結果を式(5),(6)に代入して,測定面の放射率 ε_wと 温度 *T*_wを画素毎に求めた.



4.3 測定結果-1(対向板の放射率を1と仮定した場合)

対抗板の温度が $T_{a1} = 40.7$ になった時の測定面の熱画像(輝度値分布) U_1 を図 5(a)に, 対抗板の温度が $T_{a2} = 30.8$ まで低下した時の熱画像(輝度値分布) U_2 を図 5(b)に示す.図 5(a)と(b)では測定面の温度は変化していないが,対抗板温度の低下により輝度値が低下し ている.これは,対抗板からの放射の一部が測定面で反射して赤外線カメラに入射するが, 対向板の温度が低下するとこの放射が弱くなるためである.特に,中央のヒートスプレッ ダーは反射率が高いため,対抗板の温度変化の影響を大きく受けている.



図 5 赤外線カメラで測定した測定面の輝度値分布

以上の測定データ (*U*₁, *T*_{a1}, *T*_{c1}, U₂, *T*_{a2}, *T*_{c2})を式(5), (6)に代入して測定面の放射率 ε_w分 布および温度 *T*_w分布を算出した.結果を図 6(a), (b)に示す.絶縁物である発熱パッケージ

表面及び基板上では放射率が 0.9 程度と高く,金属面のヒートスプレッダー上では 0.1 程度と低くなっており,妥当な分布が得られている.

算出した温度 T_w を熱電対で測定した温度 T_{tc} (図4(b)参照)と比較すると,位置1(ヒートスプレッダー中央)では T_{tc1} = 44.2 に対して T_{w1} = 43.6 ,位置2(加熱パッケージの 右側)では T_{tc2} = 39.2 に対して T_{w1} = 39.0 ,位置3(加熱パッケージ左の基板上)では T_{tc3} = 29.1 に対して T_{w1} = 29.4 となっている.温度の相違は最大で0.6 であり,本手法 によりほぼ正しい温度を評価できている.ただし,図6(b)を見ると,本来であれば位置1 の熱電対とヒートスプレッダーはほぼ同じ温度になるはずであるが,ヒートスプレッダー の温度がかなり低く評価されていることがわかる.また,ヒートスプレッダーと加熱パッ ケージの間にも不自然な温度変化が見られる.つまり,放射率の低い(反射率の高い)金 属面上では誤差が大きくなっていると考えられる.



図6 測定面の放射率分布と温度分布

4.4 測定結果-2(対向板の放射率に実測値 ε_aを与えた場合)

上記誤差の原因として,対抗板からの放射光強度が過大に評価されていることが考えられたため,次に,対抗板の放射率 ε_a を実測した上で,4.3 節と同様な解析を行った.対抗板の放射率は,図4(a)の装置の測定面と対向板の位置にそれぞれ図4(c)の対抗板を設置し,4.2 節の手順により評価した.その結果,対抗板の放射率は ε_a = 0.96 と評価された.

対抗板の放射率 ε_a を考慮した場合,対抗板の周囲環境温度を T_0 とすると,式(5),(6)は次式で表すことができる.

$$U_1 = \varepsilon_w \cdot U_b(T_w, T_{c1}) + (1 - \varepsilon_w) \{\varepsilon_a U_b(T_{a1}, T_{c1}) + (1 - \varepsilon_a) U_b(T_0, T_{c1})\}$$
(7)

$$U_2 = \varepsilon_w \cdot U_b(T_w, T_{c2}) + (1 - \varepsilon_w) \{ \varepsilon_a U_b(T_{a2}, T_{c2}) + (1 - \varepsilon_a) U_b(T_0, T_{c2}) \}$$
(8)

対向板の周囲環境は,図4(a)からも想像できるように,測定面とそれ以外の周囲壁面から 成っており,周囲環境温度T₀は実際には一様ではない.しかし,解析を複雑にしないため, ここではT₀を室温(T₀=24.2)として解析を行った.

4.3 節の測定データ (*U*₁, *T*_{a1}, *T*_{c1}, U₂, *T*_{a2}, *T*_{c2}) および *T*₀を式(7), (8)に代入して測定面の 放射率 ε_w分布および温度 *T_w*分布を算出した.結果を図 7(a), (b)に示す.図 7(a)の放射率 分布は前節の結果(図 6(a))とほぼ同一となっている.また,図 7(b)の温度 T_w 分布を熱電 対温度 T_{tc} (図 4(b)参照)と比較すると,位置 1(ヒートスプレッダー中央)では T_{tc1} = 44.2 に対して T_{w1} = 43.7 ,位置 2(加熱パッケージの右側)では T_{tc2} = 39.2 に対して T_{w1} = 39.0 ,位置 3(加熱パッケージ左の基板上)では T_{tc3} = 29.1 に対して T_{w1} = 29.4 となっ た.つまり,温度の相違は最大で 0.5 であり,4.3 節と同様にほぼ正しい温度を評価でき ていることがわかる.以上の結果から,対向板の温度を 1 と近似た 4.3 節の解析であって も,放射率が極端に低い金属面を除けば,本手法により放射率分布と温度分布を同時に評 価することが可能である.

ここで,ヒートスプレッダー上の温度に着目すると,前節の結果(図 6(b))と比較して 図 7(b)の温度は高めになっており,図 6(b)で見られた温度分布の不連続が緩和されている ことがわかる.つまり,対向板の放射率を1と近似するのではなく,実測値を基により正 確な値を用いることにより,放射率の極端に低い金属面上であっても妥当な温度を評価す ることが可能である.ただし,ヒートスプレッダーの温度は実際はほぼ一様になっている と考えられるが,図 7(b)の温度分布を見ると,ヒートスプレッダー上の温度は中央から右 上にかけて高くなっており,不自然さが残っている.これは,対向板の周囲環境温度 T₀ が実際には一様でないにもかかわらず一様と仮定したためであると考えられる.



図7 測定面の放射率分布と温度分布

5. 結言

非冷却型の赤外線カメラを用いて,放射率分布と温度分布を同時に測定する方法につい て検討した.主要な結果を以下にまとめる.

非冷却型赤外線カメラの校正関数(黒体面を撮像した時の各画素の輝度値)Ubは,黒体温度をT(10~50),カメラ内の素子周囲温度をT_c(38~40)として,次式の形で近似することができた.

 $U_b(T, T_c) = a_3T^3 + a_2T^2 + a_1T + a_0 + b(T_c - T_{c0})$, $a_3, a_2, a_1, a_0, b, T_{c0}$ は定数

2.赤外線カメラの対向側に等温でかつ黒体とみなせる対向板を設置し,対向板の温度を 変化させた時の赤外線カメラの輝度値 U,対向板温度 T_a,素子周囲温度 T_cを測定する ことにより,放射率分布と温度分布を同時に評価することができる.

3.測定面の放射率が低い場合は温度の誤差が大きくなるが,対向板の放射率を実測して 正確な値を用いると,誤差が低減することを確認した.

参考文献

- (1) 中村 元, "サーモグラフィによる温度計測 =正確な温度を測定するには=", 光アライア ンス, 第 27 巻, 第 8 号, pp. 1-6, 日本工業出版, 2016.
- (2) 中山 恒, "6.1.3 ベンチマークモデル", RC181 研究分科会研究報告書, pp.659-666, 2002.
- (3) 中村 元, "熱電対による表面温度測定の誤差解析", 日本機械学会論文集, Vol.84, No.867, DOI: 10.1299/transjsme.18-00216, 2018.