

研究開発者向 赤外線サーモグラフィガイドブック

研究開発用 赤外線リソースガイド

目次

赤外線サーモグラフィの原理	1
サーモグラフィ用赤外線検出器	7
赤外線カメラを最大限活用するために	14
フィルタ活用による赤外線サーモグラフィの用途拡大	25
超高速サーモグラフィ	35

第1章

赤外線サーモグラフィの原理

赤外線サーモグラフィ

赤外線は肉眼では見えませんが、赤外線カメラを使うことで、対象物や状況の温度変化を熱画像として可視化できます。赤外線カメラが利用する赤外線は電磁スペクトルの約900~14,000nm (0.9-14 μ m) に分布します。赤外線は絶対ゼロ度以上のあらゆる物質から放射されており、温度上昇に伴い赤外線放射量は増加します。

赤外線サーモグラフィは、赤外線放射を温度換算して表示するカメラで、非接触で対象物の温度を測定することが可能です。

赤外線カメラの構造はデジタルビデオカメラとよく似ています。主要部品は赤外線を検出素子上に結像させるレンズ、そして信号や画像を処理・表示する電子機器とソフトウェアです。赤外線カメラの検出器には、ビデオやデジタルスチールカメラで使用する電荷結合素子 (CCD) ではなく、焦点面アレイ (FPA) を使用しています。この焦点面アレイは、赤外線波長領域に感度を有する検出素子から構成されており、画素サイズは μ m、解像度は60x60

~1280x1240ピクセルです。内蔵ソフトウェアで焦点面アレイの特定エリアを指定して温度を計測するシステムと、コンピュータやデータシステム上で温度解析機能付きの専用ソフトウェアを利用するシステムがあります。どちらの方法でも、 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以下の精度で温度解析が可能です。

FPA検出器テクノロジーには、熱型検出器と量子型検出器の2種類があります。一般的な熱型検出器には、金属や半導体を材料とする非冷却マイクロボロメータが主流となっています。非冷却マイクロボロメータは、低コストで、量子型よりも広い感度波長帯域をカバーするのが特長です。しかし、マイクロボロメータは、量子型に比べ、入射エネルギーに対する応答が遅く、感度が低いなどの欠点もあります。量子型検出素子は、InSb、InGaAs、PtSi、HgCdTe (MCT)、およびQWIP (量子井戸型赤外線検出器) 用にGaAs/AlGaAs等の材料によって作られています。量子型検出器は、入射光に反応する結晶構造内の電子の状態の変化に基づいて動作するため、一般に、熱型よりも応答が速く、高感度であるのが特長です。しかし、液体窒素やスターリングサイクルクーラーなどで極低温にまで冷却する必要があります。

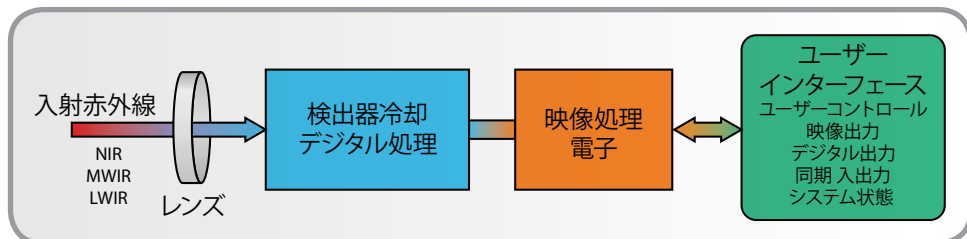


図1: 赤外線カメラの概略図

▶ 第1章

赤外線波長域に関する考察

一般に、赤外線カメラは特定の赤外線波長域をとらえ、温度測定できるように設計されています。いいかえると、最適な波長域を検出するためには、レンズと検出素子の材料を正しく選択する必要があります。図2は多様な検出素子材の感度波長域を示しています。

赤外線には、反射、屈折、透過といった可視光線と同じ特性があるため、サーマルカメラの光学部品は通常のカメラと同様に設計されます。ただし、通常のカメラに使用される種類のガラスは、赤外線放射を十分に通さないため使用できません。逆に赤外線を透過する材料の多くは可視光線を通しません。

一般に、赤外線カメラのレンズの材料にはシリコン (Si) やゲルマニウム (Ge) が使用されます。通常、シリコンは中波赤外線 (MWIR) カメラ、ゲルマニウムは長派赤外線 (LWIR) カメラに使用されます。ゲルマニウムやシリコンは非吸湿性であり、耐破損性に優れており、最新のターニング技術により多様な成型が可能であるため、レンズの材料として最適です。通常のカメラと同

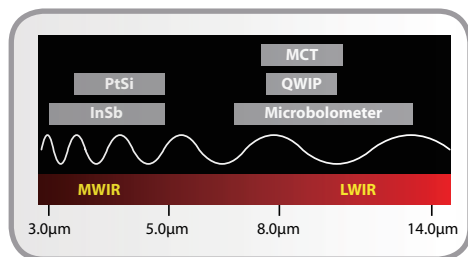


図2: 検出素子材ごとの中波長 (MW) および長波長 (LW) 赤外線に対するスペクトル感度

様に、赤外線カメラのレンズには反射防止コーティング

が施されています。設計が適切であれば、赤外線カメラレンズは、入射赤外線をほぼ100%透過できます。

熱放射の原則

ある物体からの放射エネルギーの強度は温度と放射波長に依存します。もし、物体の温度が500°C未満であれば、放射波長は完全に赤外線波長域に含まれます。放射波長に加え、物体は周囲からの放射の一部を吸収、反射、あるいは透過 (レンズのように) します。この物理的原則から、全放射率を算出する次の関係式が成り立ちます。

$$W = \alpha W + \rho W + \tau W,$$

この式を単純化すると以下の式になります。

$$1 = \alpha + \rho + \tau.$$

α 、 ρ 、 τ は0~1の値で、物体に入射した光の吸収係数、反射率、透過率を示します。例えば、 $\rho=0$ 、 $\tau=0$ 、 $\alpha=1$ であれば、この物体は反射も透過もせず、入射する光を100%吸収します。このような物体を完全黒体といいます。完全な吸収体、反射体、透過体というものは存在せず、極めて近いものはありますが、厳密には、赤外線放射と物体の温度の関係性の基礎となるため、完全黒体という概念はサーモグラフィ科学においてきわめて重要です。

完全黒体は完全な吸収体であり、放射エネルギーの完全な放射体です。これをキルヒホッフの法則から「吸収率 (α) = 放射率 (ε)」と表すことができます。物体の放射特性を記号 ε つまり放射率で表します。なお、吸収係数と放射率は波長によって異なります。以上から係数は「 $1 = \alpha + \rho + \tau$ 」という式で表すことができ、不透明体 ($\tau = 0$) の場合は、 $1 = \varepsilon + r$ 、または $r = 1 - \text{放射率}$ ($= 1 - \text{放射率}$) となります。完全黒体は完全吸収体であるため、 $r = 0$ かつ $\varepsilon = 1$ となります。

完全黒体の放射特性についてはプランクの法則でも示すことができます。プランクの法則は、黒体の放射特性を温度と放射波長の関数で示す複雑な公式であるため、通常は一連の曲線で示されます (図3)。

これらの曲線は、黒体の分光放射輝度と呼ばれ、各波長での面積ごとの放射エネルギーを求めたものです。温度が高くなるほど、放射強度も強くなりますが、それぞれの放射カーブが最大になる波長があります。

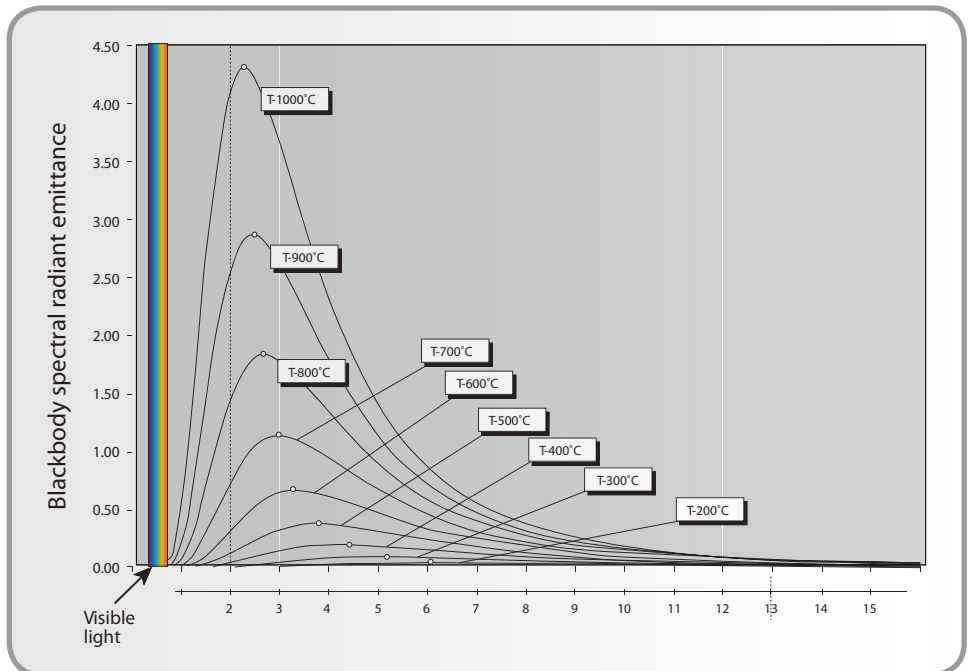


図3: プランクの法則

▶ 第1章

この最大となる波長を求める法則は「ウィーンの変位則」($\lambda_{\max}=2898/T$)と呼ばれ、 T は黒体の絶対温度(単位はK、ケルビン)で、 λ_{\max} は最大分光放射輝度を生じる波長です。黒体の放射曲線を用いれば、ある物体が30°Cでのピーク値はおおよそ10 μm であり、1000°Cではおおよそ2.3 μm であることがわかります。1000°Cのとき、この物質の最大分光放射輝度は、30°Cでの黒体が放出する1,400倍で、放射の大部分は可視スペクトルに含まれます。

プランクの法則から、黒体から放出される全放射エネルギーを算出できます。これはシュテファン=ボルツマンの法則と呼ばれる公式です。

$$W = \sigma T^4 \text{ (W/m}^2\text{)},$$

σ は、シュテファン・ボルツマン定数(5.67 $\times 10^{-8}$ W/m²K⁴)です。例えば、人の体温(約300K)から放射されるエネルギーは、有効体表面積あたり約500W/m²となります。有効体表面積1m²からの放射は0.5kWであり、放射熱損失はかなり大きくなります。

本項で示した関係式から、完全黒体の放射と温度の重要な関係が導き出されます。しかし、サーモグラフィ検査の対象物の多くは完全黒体ではないため、赤外線カメラには一般の物体の温度グラフが必要となります。

放射率

物体の放射特性は通常、完全黒体(完全放射体)との関係において示されます。黒体から放出された放射エネルギー(W_{bb})と同じ温度の一般の物体の放射エネルギー(W_{obj})の比が、その物体の放射率(ϵ)となります。

$$\epsilon = W_{\text{obj}} / W_{\text{bb}}$$

したがって、放射率は0と1の間にあります。放射特性の高い物体ほど放射率は高くなります。波長にかかわらず、放射率を1より小さい定数としたものを灰色体と呼びます。シュテファン・ボルツマンの法則から、灰色体の全放射強度は、同じ温度での黒体の全放射強度を灰色体の放射率(ϵ)に応じて減少させた値になります。

$$W = \epsilon \sigma T^4 \text{ (W/m}^2\text{)},$$

しかし、サーモグラフィは限定された波長域内でのみ動作するため、実際には物体を灰色体として扱うことが可能であることが多いのです。あるいは、放射率が波長によって大きく変わることから「選択放射体」と呼ぶことも可能で、例えば、ガラスは波長によっては黒体のようですが、別の波長では全く逆のふるまいを示します。

大気の影響

赤外線カメラと対象物の間には大気があります。放射された赤外線は、大気的气体によって吸収され、大気中粒子によって拡散するため、赤外線放射は減衰する傾向にあります。減衰の度合いは波長域に大きく依

存します。通常、大気は可視光線をよく透過しますが、霧や雲、雨や雪によって遠くのものが見えにくくなることがあります。同じ原理が赤外線放射にも該当します。

サーモグラフィによる熱測定では「大気の窓」と呼ばれる波長域を利用しなければなりません。図4に示すように、 $2\sim 5\mu\text{m}$ (中波長域) と $7.5\sim 13.5\mu\text{m}$ (長波長域) に大気の窓があります。大気減衰により物体の全放射がカメラに届かないため、減衰を修正しなければ、距離が延びるに従って、みかけの測定温度は低くなります。赤外線カメラ用のソフトウェアには大気減衰を修正する機能が付いています。

一般に、長波長赤外線カメラ ($7.5\sim 13.5\mu\text{m}$) は、大気減衰が関与する場合でも、問題なく撮影できます。これは、大気が $7.5\mu\text{m}$ 以上ハイパスフィルターとして機能するためです。(図4)。

一方、中波長域 ($3\sim 5\mu\text{m}$) では、高感度でハイエンドR&Dや防衛用途で使用されることが多くあります。また、中波長赤外線カメラによって大気から信号を読み取るには、減衰があまり起こらない波長領域を選んで用いる必要があります。

温度測定

赤外線カメラのレンズに入射する放射エネルギーは3つの異なる放射源からなります。カメラは対象物からの放射エネルギーを受け取るとともに、その物体の表面上で反射した周囲からの放射エネルギーを受け取っています。この放射エネルギーはいずれも大気中を通ってくる時に減衰します。大気はこの放射エネルギーの一部を吸収するため、大気自体も一定の放射エネルギーを出しています(キルヒホッフの法則)。

こうした点を踏まえると、較正済みカメラの測定値から物体の温度を算出する式を導くことができます。

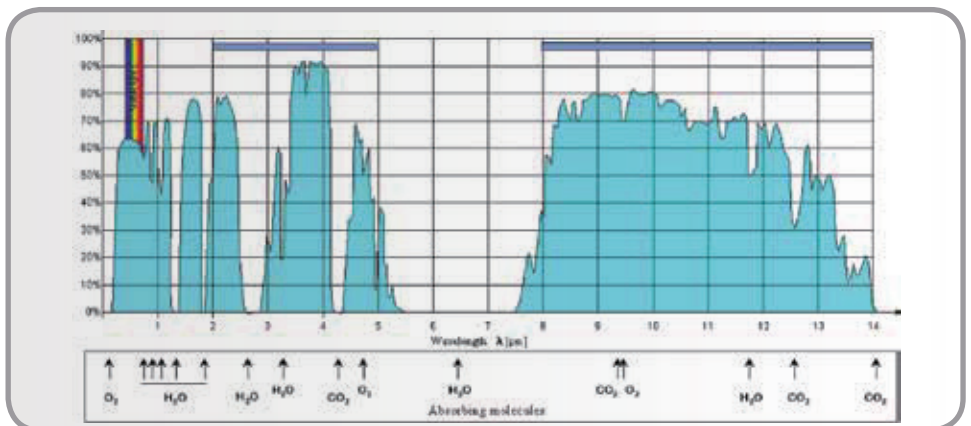


図4：赤外線の分光透過率。大気による減衰は大半がCO₂および水蒸気による。

▶ 第1章

1. 物体からの放射 = $\varepsilon \tau W_{obj}$

ε : 物体からの放射率、 τ : 大気の透過率

2. 周囲から反射された放射 = $(1 - \varepsilon) \tau W_{amb}$,

$(1 - \varepsilon)$: 物体の反射率 (周囲の温度 T_{amb} が物体の表面上の1点から見た半球内の放射面全体で同一と仮定する)

3. 大気からの放射 = $(1 - \tau) W_{atm}$, $(1 - \tau)$: 大気の放射率

以上より、カメラが受け取る全放射強度を以下のように表すことができます。

$W_{tot} = (\varepsilon \tau) \cdot W_{obj} + (1 - \varepsilon) \cdot \tau \cdot W_{amb} +$

$(1 - \tau) \cdot W_{atm}$,

ε : 物体の放射率

τ : 大気の透過度

W_{amb} : 物体周辺環境の放射強度

W_{atm} : 大気強度

対象物の正確な温度を測定するためには、赤外線カメラのソフトウェアに物体の放射率、大気減衰、大気温度、周辺環境の温度を入力する必要があります。こうした値は、状況に応じて、測定、推定、又は参照表により得ることができます。

➤ 第2章

サーモグラフィ用 赤外線検出器

赤外線カメラ

サーモグラフィは、赤外線を可視化して、物体や状況の温度差を示す画像に変換する

ための機能を内蔵しています。赤外線カメラの主要部品は、レンズ、焦点面アレイ（FPA）検出器（および検出器用冷却装置）、画像処理・表示用の電子機器とソフトウェアです（図1）。検出器のほとんどは、赤外線カメラが利用する赤外線波長全体（900～14,000ナノメートル又は0.9～14 μm ）よりも狭い応答曲線を示します。したがって、用途に適した赤外線波長応答のある検出器（又はカメラ）を選択する必要があります。検出素子の波長応答以外の重要な特性には、感度、マイクロメートルサイズ画素のFPA検出器の製造しやすさ、ならびに必要な冷却の程度などがあります。

赤外線カメラは、通常、大気を透過して熱を放射している物体を画像化します。したがって、検出器の応答曲線を「大気の窓」に対応させるといった点が重要になります。

窓領域は大気透過率が高く、大気による減衰が少ない赤外線波長域です。基本的に、窓領域のうち、短・中波長赤外線（2～5.6 μm ）および長波長赤外線領域（8～14 μm ）の2波長帯域がよく用いられます。多くの検出器材料やカメラの応答曲線は、この波長帯域に感度があります。

量子型 対 非量子型検出器

赤外線カメラの大多数は、コスト面でのメリットからマイクロボロメータ型検出器を使用しています。マイクロボロメータFPAの材料は金属や半導体であり、非量子原理によって動作します。いいかえると、マイクロボロメータFPAは、放射エネルギーによるバルク材の状態変化に応答します（ボロメータ効果）。一般に、マイクロボロメータには冷却の必要がないため、比較的低コストでカメラの小型化を実現できます。他に、マイクロボロメータには以下のような特徴があります。

- 比較的低感度（検出感度）
- 広い（平坦な）応答曲線
- 応答速度が遅い（時定数は約12ms）

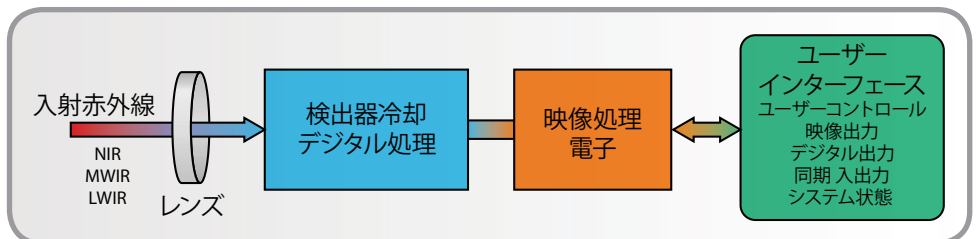


図1：赤外線カメラの概略図

▶ 第2章

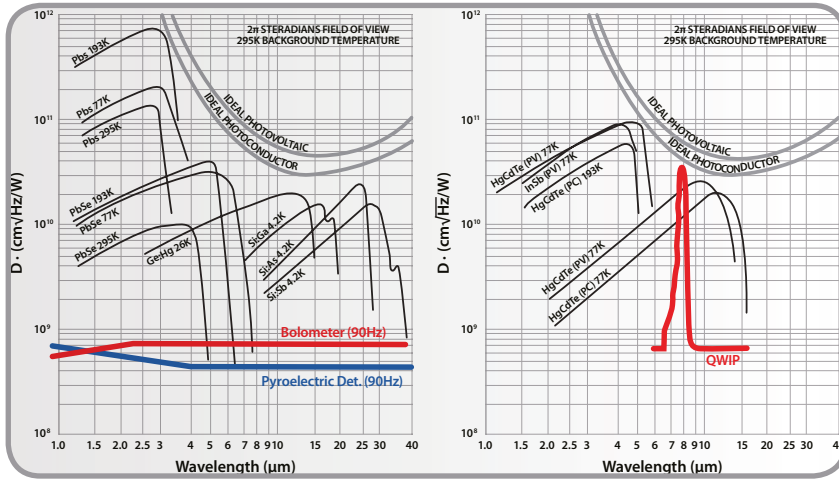


図2: 様々な検出素子の検出効率 (D*) 曲線

高い赤外線感度が求められる用途では、赤外光による光電効果を用いる量子型検出器が用いられます。量子型では、物質が光を吸収した際に、物質内の電子が励起され高エネルギー状態になることで、伝導度、電圧、電流が変化することを利用して、赤外線に応答します。量子型は、極低温に冷却すれば熱雑音がなくなり、赤外線に対し極めて高感度になります。また、赤外線レベル（温度）の変化に極めて迅速に応答し、約 $1\mu\text{s}$ という安定した応答速度を保ちます。したがって、量子型検出器付きのカメラは、一過性の熱イベントを記録するのに非常に有用です。しかし、量子型検出器の応答曲線の検出感度は波長域に大きく依存します（図2）。赤外線カメラに現在最も多く使用されている検出器の例を表1に示します。

表1. 赤外線に一般的に使用される検出器の種類および材質

Detector Type/ Material	Operation	Operating Temp.
マイクロボロメータ	広帯域検出器	冷却不要 (約 30°C)
HgCdTe	SW光子検出器	200 K
HgCdTe	LW 光子検出器	77 K
InSb	MW 光子* 検出器	77 K
PtSi	MW 光子 検出器	77 K
QWIP	LW 光子 検出器	70 K

量子型検出器の動作原理

量子型検出器に使用されている材料内の電子は、室温ではさまざまなエネルギーレベルにあります。なかには伝導帯にあり、十分な熱エネルギーをもって、自由に動き回って電荷を運

ぶことができる電子もありますが、ほとんどの電子は価電子帯にあり、自由に動けないため電荷を運ぶことはできません(図3の一番左を参照)。

素子が十分に冷却されると(冷却温度は素子材料によって異なる)、電子の熱エネルギーが低くなるため、伝導帯に電子が全くいない状態になります(図3の中央上)。したがって、素子は電荷を運ぶことはできません。素子が十分なエネルギーを有する入射光子にさらされると、電子が価電子帯から伝導帯に励起されます(図3の右上)。このとき、検出素子に、入射光の強度に比例した光電流が流れます。

電子を価電子帯から伝導帯に励起するために必要な入射光子のエネルギーには、極めて厳密な下限値が存在しま

す。この値は、一定の波長(カットオフ波長)に関連します。光エネルギーは波長に逆比例するため、短波(SW) / 中波(MW) 帯域ではエネルギーは高く、長波(LW) 帯域では低くなります。したがって、LW検出器の動作温度はSW/MW検出器よりも低くなります。InSbを用いたMW検出器では、最低でも173K(-100°C)に冷却する必要がありますが、これよりはるかに低温でも動作可能です。HgCdTe(MCT)を用いたLW検出器は77K(-196°C)以下に、QWIP検出器は一般的に70K(-203°C)以下に冷却する必要があります。図3の中央下及び右は、量子型検出器の波長依存性を示しています。入射光子は、バンドギャップのエネルギー差 ΔE を超えるのに必要な波長とエネルギーを有している必要があります。

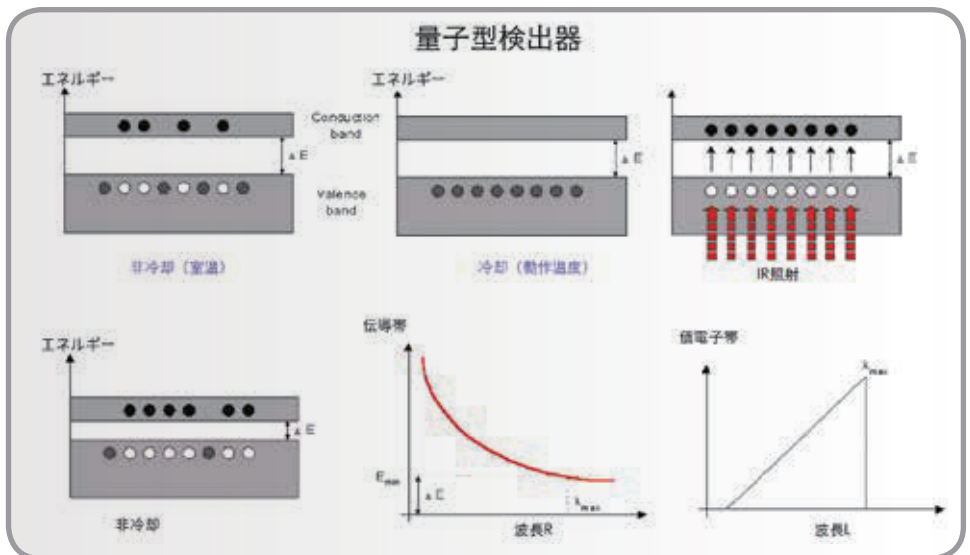


図3. 量子型検出器の動作原理

▶ 第2章

冷却方法

初期の赤外線放射熱測定器の検出器の冷却には液体窒素が使用されていました。検出器は液体窒素のデュワー瓶に取り付けられており、極めて安定した低温（ -196°C ）に保たれました。

その後、他の冷却方法が開発されました。冷却問題に半導体を用いたソリューションを最初に提示したのはAGEMA社です。同社は、1986年に商業用赤外線カメラ用にペルチェ効果を利用した冷却システムを導入しました。ペルチェ冷却システムでは、直流電流を熱伝材に流すことで、一方の面から熱を移動させ、冷却面と発熱面を作ることができます。この発熱面をヒートシンクにつなぐことで、冷却面に取り付けられた部品が冷却されます（図4及び5を参照）。

極めて高感度が求められる用途で極低温冷却が必要であったため、スターリングクーラーが開発されました。スターリングクーラーの冷却寿命は、ここ15~20年という短い期間で、8,000時間以上にまで延長され、サーマルカメラへの導入が可能となりました。

スターリングクーラーは、コールドフィンガー（図6）から除去した熱を廃熱側に移します。スターリングクーラーの冷却効率は比較的低いのですが、赤外線カメラの検出器の冷却には十分です。

いずれの冷却方法でも、効率的な熱交換が行われるように、検出器の焦点面がクーラーの冷却側に取り付けられます。焦点面アレイは小さいため、取り付け部分やクーラー自体の大きさも比較的小さくなります。

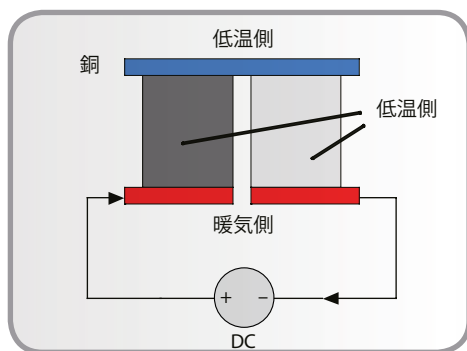


図4：一段式ペルチェクーラー

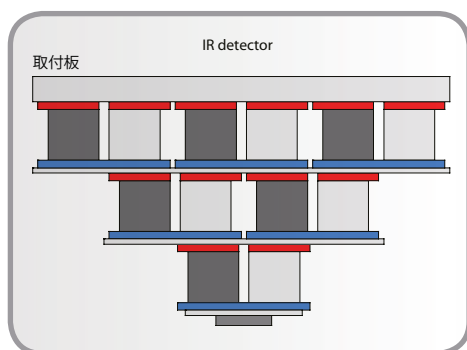


図5：三段式ペルチェクーラー

焦点面アレイアセンブリ

FPAアセンブリは、サイズ／解像度によって異なるものの、約60,000~1,000,000以上の検出素子を装備しています。単純化のため、これを各ピクセル（検出素子）がマイクロメートルサイズの

二次元ピクセルマトリックスと表すことができます。FPA解像度は60x60~1280x1240ピクセルです。

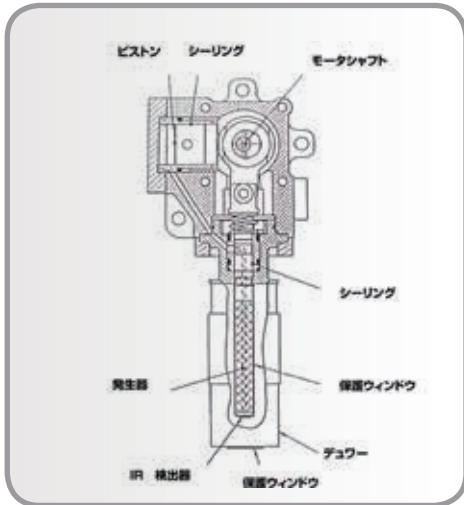


図6：ヘリウムガスを使用しスターリングクーラー（196℃以下に冷却可能）

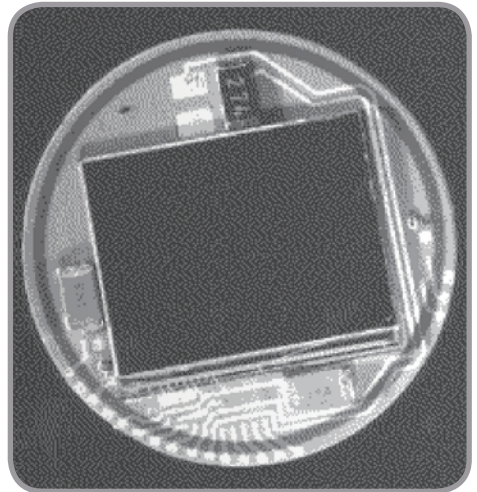


図8：セラミック基質上に装着され、外部機器に取り付けられたQWIP FPA

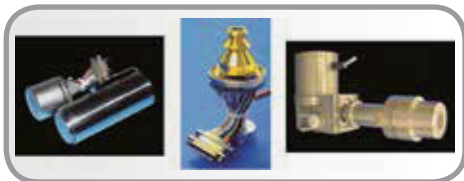


図7：赤外線カメラで使用される冷却された焦点面アレイアセンブリ

実際には、アセンブリの構造はもう少し複雑です。検出素子材料とその動作原理にもよりますが、光格子がFPAアセンブリに組み込まれている場合があります。例えば、QWIP検出器などでは、検出素子材の結晶格子の方向感度を利用して、光格子が入射光を分散します。これによってQWIP検出器全体の感度が向上します。さらに、FPAをIRカメラの読み出し電子機器に取り付けなければなりません。完成したQWIP

検出器とIC電子機器アセンブリを図8に示します。これが図7のようなデュワーあるいはスターリングクーラーアセンブリに組み込まれます。

その他に複雑な点として、FPAの検出素子はそれぞれわずかに異なるゲインおよびゼロオフセットを有しています。有効な熱画像を作成するには、異なるゲインとオフセットを補正しなければなりません。このためにカメラソフトウェアで段階的な較正プロセスを実施します（図9から11を参照）。

最終的な熱画像は、対象物の相対温度を正確に描出しています（図12）。さらに、実際の温度を約±1℃の誤差で算出可能です。

▶ 第2章

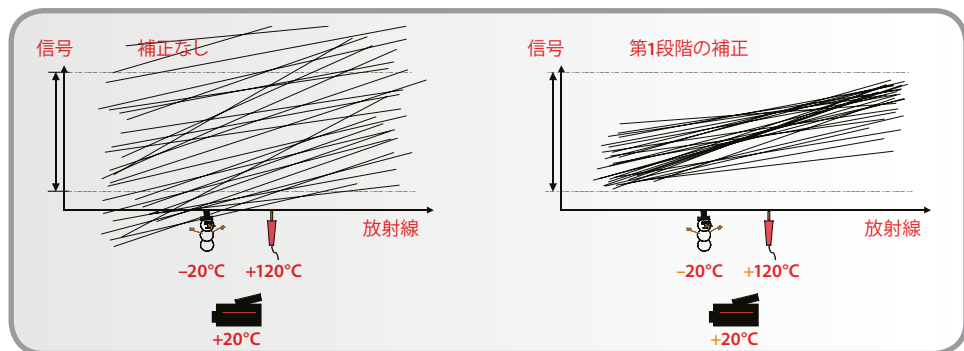


図9：FPA検出素子の異なるゲインとオフセットを補正するための最初の段階であるオフセット補正。各検出素子の応答範囲がカメラのA/D変換器のダイナミックレンジ内で変動するように補正する。

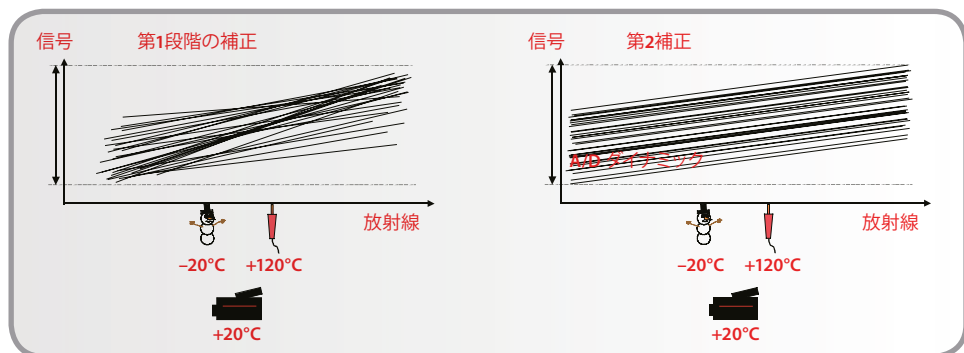


図10：オフセット補正後に行う勾配補正

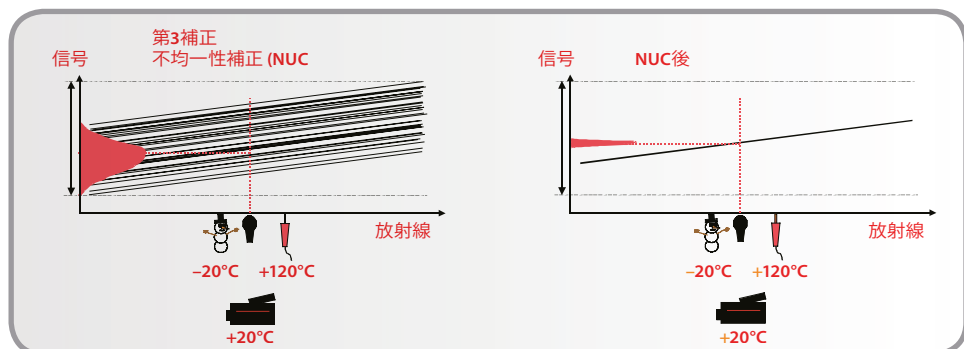


図11：ゲインが同じ値になった後、不均一性補正を行い、全ての検出素子が基本的に同じ電子特性を有するようにする



図12: 1024×1024ピクセルのInSb検出器を装備したカメラの熱画像

選択基準

前述のとおり、検出器によって熱及び光感度は異なります。さらに、製造しやすさにも差があるために費用構造も異なります。その他の点で適用可能であれば、InSbおよびQWIPの光検出器には、以下のような多くのメリットがあります。

電子機器の利用により、検出器の絶対感度を変更することも可能です。例えば、高感度であるため、高い熱強度で検出器が飽和する場合は口径制御や減光フィルタでFPA上に入射する放射エネルギーを減らすことで問題を解消できます。

- 熱感度が高い
- 検出素子の均質性が高い
- (固定パターン雑音が極めて少ない)
- 波長感度のある程度選択可能
- 量産可能
- 高温及び高放射に耐える
- 極めて高画質の画像が作成できる

特定用途で検出器やカメラを選ぶにあたり重視されることが多い特性は、波長感度です。検出器を選択した後、レンズの材料やフィルタの選択により赤外線カメラシステムの全般的な応答特性を変更することもできます。図13にさまざまな検出器のシステム応答を示します。

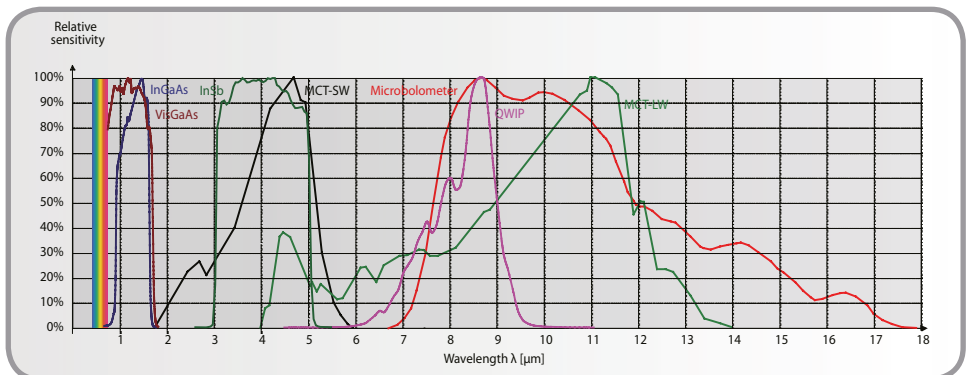


図13: 様々な赤外線カメラの相対応答曲線

物体から放射される放射熱を温度モデルが得られる 赤外線カメラを最大限活用する

・ラジオメトリック装置を用いると、重要赤外線カメラの較正や補正について理解することで、正確な温度測定と熱分布画像の作成が可能になります。

・物体間の放射熱を比較すると、放射率が問題とならないため不確定性が少なくなる(ただし、大気およびスペクトルバンド

赤外線カメラによる定量的温度測定パスの影響については考慮すること)。

赤外線カメラのユーザは、目的にあった温度測定方法を慎重に検討し、カメラを補助的な較正方法を併用し、検出された放射強度から放射率を算出し、黒体温度に変換できるように、温度情報が放射強度から自動的に換算された機能とソフトウェアの付属したカメラを選ぶことです。

カメラを選ぶに当たり、サーモグラフィ(熱測定法)とラジオメトリ(放射測定法)の違いを理解しておくことが非常に役立ちます。

赤外線カメラシステムを用いてラジオメトリック又はサーモグラフィック測定の基本的な工程を以下に示します。

900~14,000ナノメートル(0.9~14 μm)の波長の放射を赤外線カメラで検出し、画像体の赤外線映像装置の一種を通す。一般赤外線カメラの入射は、物体や対象の表面温度の差を測定するのに用いられ、単色カメラのような熱検出器の場合は、熱エネルギーの収集を行う。

ラジオメトリック赤外線カメラは、検出器が放射熱を捉えた後、測定する方法です。もっと単純に、放射熱を測定し、計算することができます。一般例を以下に示す。測定単位は放射輝度(W/(sr-cm²))の検出器で、ピクセルはステライオグラフィックの略語を備えて、3D球の半径を捉え、検出面積の球面部分の中心に対する立体(円錐)角を示す無次元の幾何比)。

単波長域内の赤外線エネルギーは、物体の温度を測定し、放射熱は、物体の放射するエネルギー量の測定と考えることができます。この方法が適用され、放射熱は、放射率の放射熱強度に変換されます。同じものでは、赤外線カメラの較正は、放射率の温度モデルを放射熱強度に変換しますが、放射率を用いて放射強度を温度に変換するため、有効黒体放射輝度と温度を使って較正/測定を行います。このため、正確な温度測定には、対象物の放射率が必須である物体の放射輝度の有効黒体と比較した相対放射較正、温度対放射輝度モデル、対象物の放射率を適用すれば、有効黒体温度を得ることができます。精密測定用のラジオメトリック型カメラを備える初心者の赤外線カメラは、非量子原理に基づく較正と、検出器は規定温度、放射輝度値、放射率、距離を測定して、適切なパラメータの放射率(例えば、電気抵抗または電気容量)が変化します。そしてカメラ内で較正されて温度表示されます。光子検出器を備えるハイエンド赤外線カメラは、黒体温度の値が較正動作します。画像の解像度が高いほど、帯域内放射輝度曲線が高性能であるため、放射率と温度の正確な測算が補正された帯域内放射輝度とデジタル値の関係が得られます。これにより、黒体各温度のデータを得た下の帯域内放射輝度[W/(sr-cm²)]に基づきデジタル値のラジオメトリック較正がなされ、較正曲線が得られます。図1は較正点がどのくらい得られるか、測定された放射輝度は入射エネルギーに対し線形性を有しているが、リニアセンサであっても温度は未処理デジタルカウントに対し非線形である。

- 放射輝度と物体の面積が分かれば、放射強度を算出できる。物体の総放射強度が分かれば、ラジオメトリック解析により、多様な幾何学的条件や大気条件で、対象

影響を補正した値を出力します。この機能は通常、周囲温度ドリフト補正と呼ばれます。最終的に、カメラは総放射に関する法則を用いて、物体の放射率、周囲から反射した放射、大気放射を基に物体の温度を算出しなければなりません。カメラが受け取る全放射強度は以下のように表すことができます。

$$W_{\text{rad}} = \epsilon \cdot t \cdot W_{\text{obj}} + (1 - \epsilon) \cdot t \cdot W_{\text{amb}} + (1 - \tau) \cdot W_{\text{atm}}$$

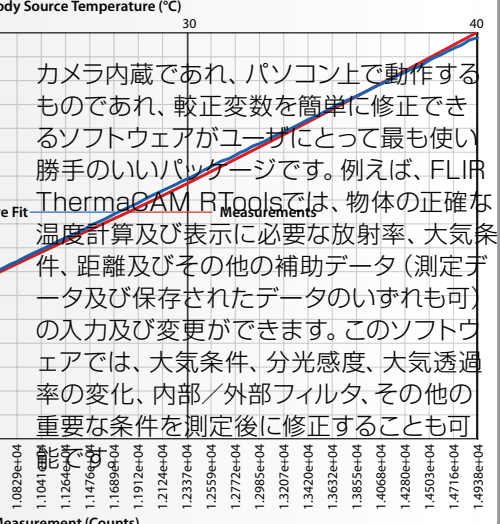
ϵ : 物体の放射率
 t : 大気の透過率
 W_{amb} : 物体周囲からの放射強度または放射源の放射強度
 W_{atm} : 大気からの放射強度

図1: 一定の黒体温度でのカメラ測定値と対応する帯域内放射強度の例。校正曲線を比較したカーブ

正確な測定値を得るためには、カメラの校正曲線は測定値と黒体温度の関係を示す力強い数式が大切です。多様な物質の放射率の表が入手可能ですが、放射測定を正確である場合は、測定値の信頼性高い値を準に入れる適切な校正表を参照して、温度を算出しなければなりません。最終的な結果を表示する前に、大気減衰、反射周囲温度解析用カメラの周囲温度ドリフトが改善可能な内部補正されているとも属意します。ソフトウェア機能が充実した高性能カメラ以外では、PCで動作する外部ソフトウェア周囲温度ドリフト補正 (ADC)

校正プロセスにおいて重要なもう一つの問題は、カメラ自体の発熱及び冷却です。内部校正、補正及び解析機能を拡張するには、PC接続ソフトウェアは必要ありません。例えば、ThermaCAM ProTools™ は、内部の温度変動があれば、検出器が検知す

アルタイムの画像撮影から撮影後の解析まで幅広い機能を備えたソフトウェアです。



以下は、カメラ内蔵・外付けのファームウェア領域内放射強度の例。校正曲線を比較したカーブ

こうした機能が内蔵であるか、外付けであるかは、カメラの機種によって異なる放射強度に影響を及ぼします。カメラに直接起因する放射を寄生放射といいます。寄生放射はカメラの測定値、特にサーモグラフィック校正されたカメラの測定値の精度に影響します。赤外線カメラのなかに赤外線カメラは、異なる使用条件下で正確な温度測定を行う温度変化をも操作するセドを備内蔵するもの以下は一般的な校正機能の一環として、こうしたカメラを環境室におき、参照用黒体に焦点を当てて撮影します。環境室と参照用黒体の温度を様々なバリエーションに変化させ、内部センサからのデータを収集し、補正係数を作成して、カメラに記憶させておく。リアルタイム操作では、カメラセンサ温度を常時モニタし、カメラのプロセッサにフィードバックを送ります。こうすることで、カメラは全ての寄生放射の

▶ 第3章

- 温度範囲指定
- カラー又はグレースケール設定

カーソル機能を利用すると、図2に示すようなスポット測定画像上で、十字カーソルによって簡単に特定エリアを選択できます。さらに、カーソルで、円、四角形、任意形状の多角形状選択や、温度プロファイルを作成するためにラインを引くことができます。指定したエリアを固定し、そのエリアのスナップショットを撮ることも可能です。若しくは、カメラ画像をライブ映像にすることで温度変化の観察もできます。

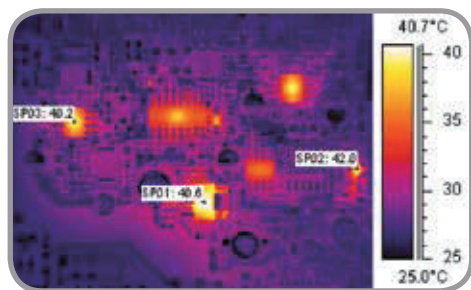


図2：三点の温度測定値を示すプリント基板の赤外線画像。画像の色は右側の温度スケールに対応。

スポットメータは、特定ポイントの温度を測定する機能です。カメラによって異なりますが、スポットメータ機能により10箇所以上の可動スポットを指定でき、画像内で温度が最も高い点（1点又は数点）を自動的に探します。エリア機能は物体の一定エリアを指定し、エリア内の最高、最低、平均温度を測定します。等温線機能は、高温部の温度分布を描出します。マルチアインサームという機能もあります。ライン・プロフ

イルは物体の一部の温度差を表示する機能で、グラフ表示も可能です（図3）。

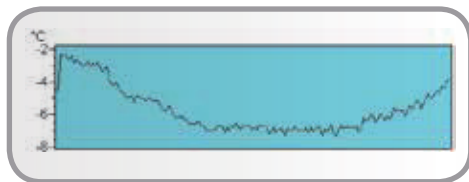


図3：カメラのプロファイル機能を用いた対象物の指定エリアの温度グラフ

一般に、温度測定範囲の指定はユーザが行います。この機能は、カメラの最大測定範囲よりも狭い温度範囲の事象を撮影する場に役立ちます。温度範囲を狭く設定することで、画像解像度が高くなり、測定温度の精度が向上するため、わずかな温度差まで検出できます。逆に、温度幅を広げたり、最高温度を高くすることで、最高温度箇所が飽和するのを防ぐことができます。

多くのカメラは、画像を最適化するための機能として、温度測定範囲指定に加え、カラー／グレースケールの指定が可能です。図4は2種類のグレースケール設定を示しています。

図2では、色調の表現として「アイアンスケール」を使用しています。図4のグレースケールと似ていますが、最高温度を明るい色又は暗い色で表現できます。その他に、レインボースケール（図5）と呼ばれる方法もあります。また、グレーを検出素子の飽和箇所（温度が測定範囲を大幅に上回っている箇所）を示すために使用するカラー画像もあります。

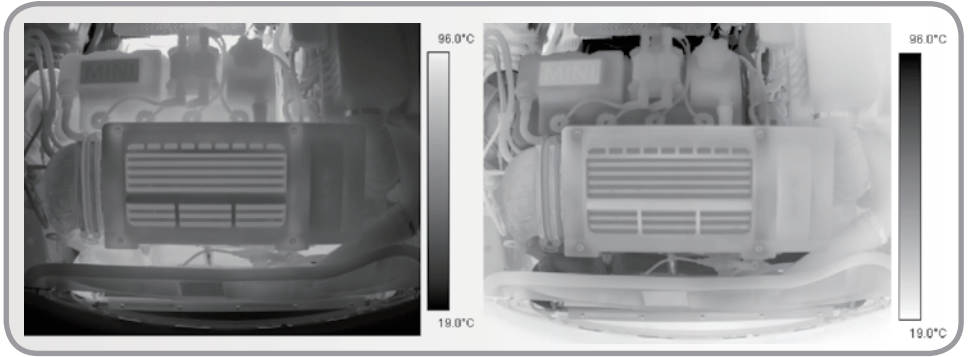


図4：車のエンジンのグレースケール画像。左側は最高温度が白、右側は最高温度が黒。

カラースケールの選択は個人的な好みの問題である場合も多いのですが、状況によっては、あるスケールが他のスケールより適していることがあります。

等温線測定では、熱放射輝度が等しいエリアがハイライトされます。この時、画像内に10本の等温線を示す10色カラースケールを使用すると、物体表面の温度分布が分かりやすくなります。図6は、各色が2°Cの温度差の等温線を示すように指定した温度スケールです。

ただし、アインサームスケールは、ハイライトされたエリアの放射率が一律であり、かつ周囲温度がエリア内の全物質と同じ場合にのみ正確に表示されることを認識しておく必要があります。これは赤外線カメラに共通する問題です。多くの場合、カメラの初期設定値と異なる大気条件による周囲温度の変化に伴い、物体における放射率は変化します。そのため赤外線カメラには補正機能や較正機能が付属しているのです。

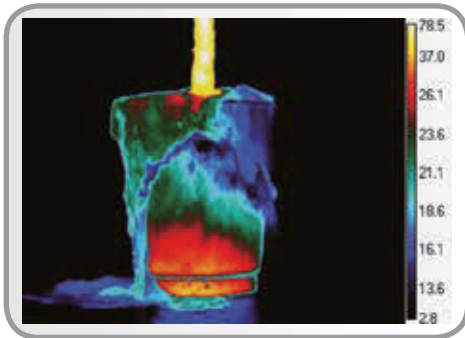


図5：レインボースケール。スペクトルの青色側が低い温度を示す。

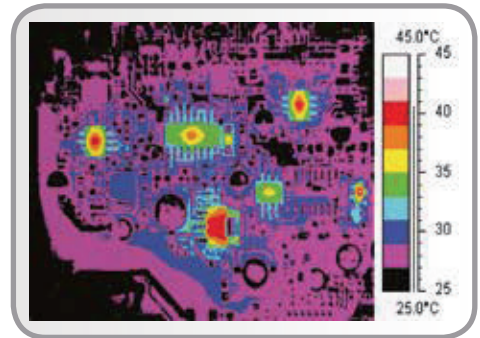


図6：等温線カラースケール。等温線の各色は2°Cの幅を示す。

▶ 第3章

放射率補正

ほとんどの事例では、放射率表を参照して物体の放射率を設定します。ソフトウェアに放射率表が組み込まれている場合もありますが、ユーザが0.1~1.0の範囲で物質の放射率を入力することもできます。また、多くのカメラには、ユーザの入力した反射周囲温度、撮影距離、相対湿度、大気透過率、外部レンズに基づく自動補正機能が付いています。

前述したように、赤外線カメラは放射輝度測定値と物体の放射率に基づいて温度を計算します。しかし、放射率が不明又は不正確である場合、行程を逆にし、既知の物体の温度から放射率を計算できます。こうした方法は、通常、正確な放射率が必要な場合に行われ、一般に2種類の方法があります。

第一の方法は、温度制御室を用いて既知の温度を確立する方法です。温度制御室では基本的に温風が循環する温度制御室に物質を置き、測定対象物全体が均一の温度になるまで待ちます。さらに、周囲と異なる温度で実際に測定を行うのですが、その温度でもその対象物が安定していることが絶対に必要になります。通常は、熱力学的に有効な測定を行うため、周囲よりも10℃以上高い温度まで対象物体を温めます。

対象物が設定温度になったところで、箱の蓋を外し、対象物の温度をサーモグラムに記録します。サーモグラム処理用のカメラやソフトウェアを使用すれば、放射率を得ることができます。

もうひとつの方法（隣接スポット法）はさらに単純ですが、かなり正確な放射率が得られます。この場合は、放射率が分かっているエリアを用います。まず、通常通りカメラで対象物の温度を測定します。放射率が不明なエリアを放射率が既知であるエリアに、エリア間の温度差がなくなるまで近づけ、測定温度から未知のエリアの放射率を計算するのです。

図7は、この隣接スポット法の問題を示しています。均一温度68.7℃に加熱したプリント基板（PCB）の画像ですが、図7aに示すように放射率の異なる二つのエリアの温度が異なっています。この場合、68.7℃を示す参照スポットを見つけることで放射率補正が行われ、そのスポットの放射率を計算します。参照スポットの放射率が分かれば、対象スポットの放射率を計算できます。補正温度を図7bに示します。

各図に示されるように、この方法ではカメラのエリア指定機能（図のAR）の指定エリアの平均温度を使用することが可能です。参照エリアの平均温度を用いる理由は、エリア内、特に放射率が低い物質内の温度

は通常ばらつきがあるためです。このとき、スポットメータやエリアの最高温度値を用いると、安定した結果を得ることができません。等温線機能も、平均的な結果を得ることができないため、お勧めできません。

接触型センサを用いて放射率不明エリアの温度を測定することも可能ですが、接触型測定には解決の難しい別の問題があり

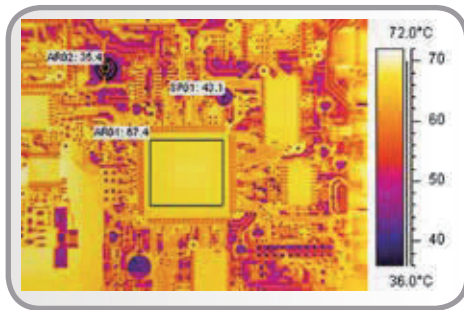


図7a: 68.7°Cで均一に熱したPCB。デジタル測定値

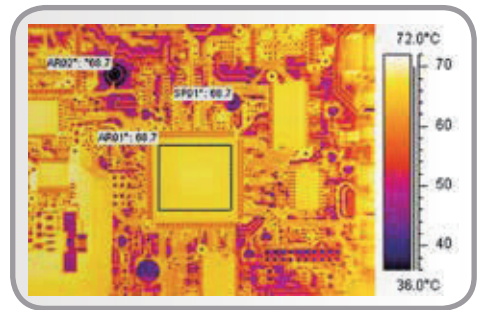


図7b: 隣接スポット法を用いて放射率を補正したPCB。

ます。さらに、反射した周囲温度と同じ温度の物体の放射率を測定することは不可能です。

一般的なカメラでは、対象物の周囲温度や大気減衰など補正に必要な変数をユーザ入力できます。

赤外線カメラの性能について考察する時、ユーザの多くは、微小な対象物の温度測定が可能かどうか、一定距離から正確な測定ができるかどうか、などに関心があります。

カメラの視野角 (FOV) を知ることで、この点が判断できます。

視野角 (FOV) : このパラメータはカメラレンズと焦点面の大きさによって異なり、 $35.5 \times 28.7^\circ$ や $18.2 \times 14.6^\circ$ のような度数で表されます。撮影距離によって、カメラが見える表面エリア範囲が決ま

ります。(図8)。例えば、25mmレンズ付きFLIR ThermoVision SC6000は、1m離れた場合のFOVは $0.64 \times 0.51\text{m}$ で、10メートル離れるとFOVは $6.4 \times 5.1\text{m}$ となります。

瞬間視野角 (IFOV) : カメラの焦点面アレイ (FPA) 検出素子の空間分解能を示すパラメータです。FLIR ThermoVision SC6000のFPAは 640×512 (計327,680) の検出画素 (ピクセル) から構成されています。このカメラを持って、1メートルの距離からある物体を見ているとします。検出可能な最小物体を判断するには、アレイ内の各ピクセルがカバーするエリアのIFOVを知ることが重要です。1メートルの距離での総FOVは 0.64×0.51 メートルです。このFOVの

サイズを縦横それぞれの画素数で割ると、この距離での1画素あたりのIFOVがほぼ $1.0 \times 1.0\text{mm}$ であることが分かります。図9はこの概念を説明するものです。

▶ 第3章

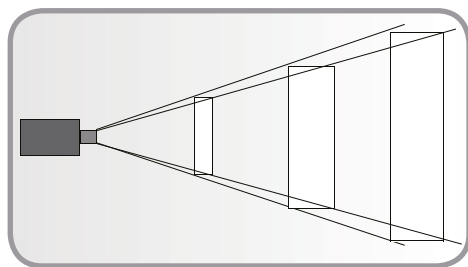


図8：カメラの視野角 (FOV) は撮影距離によって変わる。

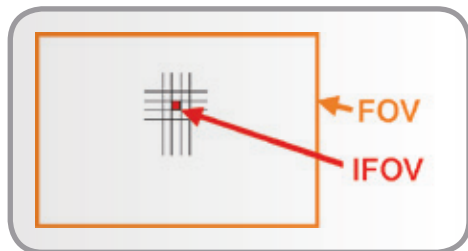


図9：カメラの空間分解能 (IFOV) はレンズとFPA構成によって決まる。

このIFOVの情報を使用する際には、対象物のサイズとIFOVを比較します (図10)。図10の左では、測定対象面がIFOVを完全にカバーしています。したがって、検出画素は対象物からの放射のみを受け取るため、正確な温度測定が可能です。

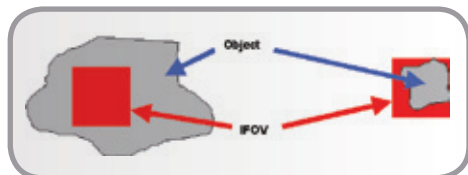


図10：IFOV (赤い四角) と物体サイズの比較

図10の右では、検出画素が対象面以上の範囲をカバーしており、対象物以外からの放射を受け取ることになり、隣

接又は背後の物体よりも対象物の温度が高い場合、温度測定値は実際より低くなり、逆の場合は高くなります。したがって、それぞれの測定時の状況に応じて、対象物のサイズを推定し、IFOVと比較することが重要です。

スポットサイズ比 (SSR)：測定開始に当たり、カメラと対象物の距離について考慮しなければなりません。スポットサイズを較正していないカメラでは、スポットサイズ比率を使って測定値を最適化できます。SSRは、一定サイズの対象物の温度を正確に測定できる最大距離を示す数値です。一般的なSSR値は1,000:1 (1,000/1又は1000と表記することもある) です。これは、対象物から1,000mm離れると、カメラは1mmの平均温度を測定するというを示します。

SSRは遠距離の対象にのみ適用するものではなく、接写でも重要です。ただし、このときカメラの最小撮影距離も考慮に入れなければなりません。メーカーによっては、近距離撮影には接写レンズを推奨しています。

どのような用途、カメラ/レンズの組み合わせであっても、以下の関係式が適用できます。

$$\frac{D}{S} = \frac{SSR}{1}, \quad \text{where}$$

D：カメラと対象物の距離

S：対象最小測定面積の1辺の長さ

SSR：スポットサイズ比

DとSの単位は同じ

カメラを選ぶ際には、IFOVが性能を示すよい指標となります。全視野角が一定であれば、カメラのIFOVが小さいほど、カメラの性能が高いこととなります。

カメラユーザが利用できるその他のツール

前述の通り、赤外線カメラの現場での較正は工場で行うものであり、実際に現場では行いません。しかし、なかには黒体を内蔵し、簡易較正チェックが可能なカメラもあります。定期的にこうしたチェックを行うことでカメラの測定値の有効性を確認できます。

赤外線カメラの同梱オプションのデータ収集ソフトウェアを使えば、データ収集、表示、解析及び保存が簡単に行えます。ソフトウェアの機能には、放射輝度、放射強度、温度、対象物の長さ／面積の測定などのリアルタイム出力が含まれます。また、以下のような機能を備えた空間較正及びスペクトルのラジオメトリック較正用のソフトウェアプログラムもオプションで利用可能です。

- 放射輝度、放射照度、温度の較正機能
- 感度および波長域を設定するために必要なラジオメトリックデータ
- 様々な透過率や放射率曲線又は定数の適用による較正データ点の取得

• 大気の影響の調整

さらに、温度測定値の精度を高めるために、ユーザが赤外線カメラのソフトウェアやファームウェアに入力できる項目があります。最も重要なものとして、検出器FPAの不均一性補正 (NUC) があります。これはFPAの各検出素子にわずかに異なるゲインとゼロオフセットがあるため必要な補正です。有効な熱画像を作成するには、異なるゲインとオフセットを補正する必要があります。

ソフトウェアで複数の段階からなるNUCプロセスを実行しますが、ソフトウェアによっては、一点補正又は二点補正を指定できるものなど、NUCの方法をメニューオプションのリストからユーザが選択できるものもあります。一点補正ではピクセルオフセットのみに対応し、二点補正では、ゲインとオフセットの両方のピクセル間補正を行います。

NUCに関しては、半導体ウエハー加工時に由来するFPAによくみられる不具合にどう対処するかという別の重要点があります。出力信号を全く発しない不良ピクセルや補正可能な範囲を大幅に超えた出力値などにより不具合が明らかになることもあります。理想的には、NUCプロセスで不良ピクセルを特定し、置換アルゴリズムを適用して、直近のピクセルと代替します。

▶ 第3章

ユーザが平均応答性や絶対オフセットレベルから設定するポイント外に応答性やオフセットレベルがあるものを不良ピクセルと特定します。

このタイプのソフトウェアに含まれるNUC機能は数多くあり、ここで説明したものは一部の機能です。また、市販ソフトウェアにも、熱画像表示／解析、データファイル保存／操作／編集が簡単にできる機能などが備わっています。赤外線カメラを選択する際には、ソフトウェアが使用用途や使用環境に適しているかどうかを考慮することも重要となります。

結論

赤外線カメラの改良が進み、使いやすさは顕著に向上しています。ファームウェアにより、セットアップや操作は従来のビデオカメラ並みにシンプルになっています。カメラ内蔵型やPC起動型のソフトウェアは充実した測定及び解析ツールを提供しています。それでもなお、ユーザは正確な測定値を得るために赤外線カメラの光学原理や較正方法を理解しておく必要があります。放射率表を利用できない場合は、最低でも、対象物の放射率をカメラのデータベースに入力する必要があります。

▶ 第4章

フィルタ活用による赤外線サーモグラフィの用途拡大

フィルタが役立つ場面

赤外線サーモグラフィによる非接触型温度測定においては、物質が赤外線透過性であっても、不透過性であっても問題が生じません。対象物が透過性である場合、カメラは対象物とその背後にあるものの混合温度を記録してしまいます。また、不透過性の物質の背後にある対象物の温度測定が必要な場合、信号減衰や周囲反射により、正確な温度測定は困難または不可能です。そのような場合にカメラの光学経路に赤外線フィルタを適用することで問題を解決することができます。

スペクトル応答が鍵

IR 赤外線カメラは、基本的に温度ではなく放射強度を測定します。さらに、内蔵ソフトウェアが、対象物の既知の放射率および内蔵されたスペクトル応答の温度校正データを適用することで、放射強度を温度に変換します。

スペクトル応答は主にカメラのレンズと検出器によって決定されます。図1は、様々なスペクトル応答を有する赤外線カメラのスペクトル応答を示しています。一般に、赤外線カメラのユーザマニュアルや仕様書に、スペクトル応答が記載されています。

多くの物質の放射率は放射波長によって変化し、さらに、温度や撮影角度などに影響を受けます。放射率が波長によって大きく変動する物質を選択放射体といいます。放射率が波長に依存しない物質を灰色体といいます。一般にガラスやプラスチックなどで透明な物質は選択放射体です。言いかえすと、透明な物質の透過性は波長に依存しています。ですから、透明物質でも吸収により不透過となる赤外線波長があります。キルヒホッフの法則によれば、吸収率が高い物質は放射率も高いので、ある一定の波長では選択放射体の放射強度や温度を測定することができる可能性があると言えます。

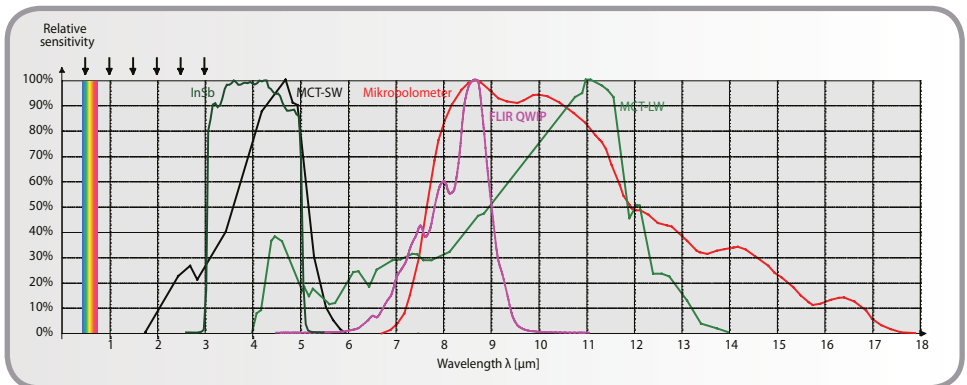


図1: 多数の赤外線カメラの相対応答曲線

▶ 第4章

スペクトル適応

スペクトルフィルタをカメラの光学経路に挿入することをスペクトル調整といいます。測定対象物が半透過性である場合、スペクトル調整の第一段階として、温度測定をしようとしている対象物、すなわち半透過性物質のスペクトル特性の解析です。一般的な物質であれば、データが公表されていますが、データがない場合は、分光光度計による解析が必要です（カメラメーカー又はコンサルティング企業がこのサービスを提供しています）。いずれの場合でも、解析の目的は赤外線カメラの応答曲線内にある完全吸収帯のスペクトル位置を確認することにあります。

マイクロボロメータ検出器は応答曲線が幅広いため、吸収帯の確認で問題が生じる可能性は低くなります。しかし、フィルタを挿入することでカメラのスペクトル範囲が狭くなるため全体の感度が低くなります。感度はフィルタのスペクトル曲線下面積とカメラのスペクトル曲線下面積の比で低下します。マイクロボロメータシステムは元々感度が比較的低く、スペクトルが広いため、この点が問題となる場合があります。逆に、例えば、QWIP検出器のカメラを用いる場合は、感度は非常に高いのでフィルターを挿入してスペクトル曲線が狭くなっても十分感度が残ります。こうしたカメラではこの狭いスペクトル範囲により、アプリケーションは限定されます。

最終的に、対象物の吸収帯域以外の全波長を阻害するような光学（赤外線）フィルタを選択しなければなりません。こうすることで、対象物の帯域内での放射率が高くなります。

半透過性の固体以外に、気体にも波長選択的フィルタの適用が可能です。しかし、気体の吸収帯は狭いため、その選択には極めて幅が狭いフィルタが必要となります。しかし、適切なフィルタを適用したとしても、気体密度が分からないため気体の温度測定は困難です。ただし、単に気体検出が目的であれば、定量的精度がそれほど厳格には求められないため、フィルターが効を奏す可能性は高くなります。その場合、感度が非常に重要であり、吸収率が極めて高い気体であれば測定も可能かもしれません。

スペクトル調整を逆に利用することも可能です。つまり、ある媒介物をできるだけ透過するスペクトル波長を選択するのです。この場合、その媒介物を最大限、透過することで対象物の測定が可能となります。媒介物は、一般に、大気、炉内の燃焼ガス、又は窓（若しくはその他の固体）などで、それを透過して対象物の温度を測定することが目的となります。

フィルタの種類

最も単純なフィルタは、光の透過を減らし、高温での検出器飽和を防ぐためだけに用いられる広帯域減光フィルタです。こうした措置が必要な場合もありますが、これはスペクトル適応ではありません。

スペクトル適応では、フィルタを使用してある波長領域を阻害または透過します。ここでは、フィルタをショートパス（SP）、ロングパス（LP）バンドパス（BP）、およびナローバンドパス（NBP）に分類します（図2を参照）

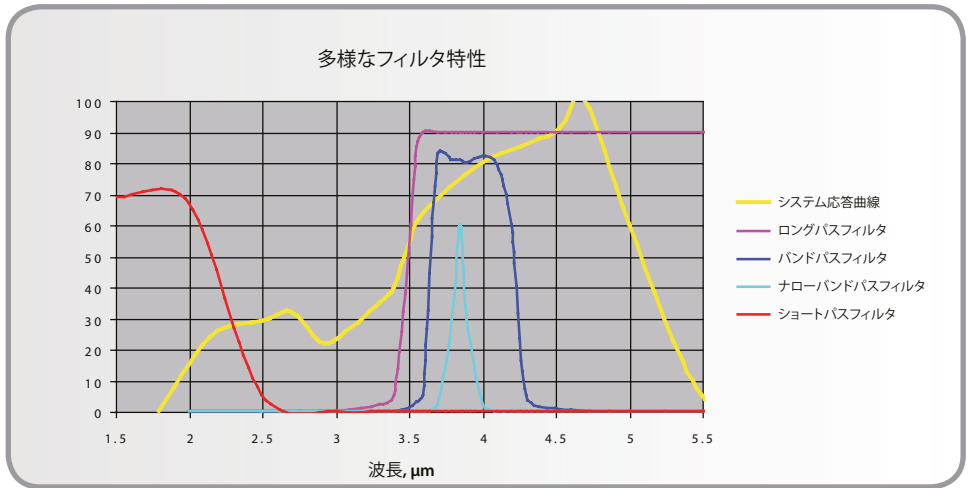


図2：多様なフィルタの応答曲線

SP及びLPフィルタはカットオン及びカットオフ波長用です。BPとNBPフィルタは中心波長と半値幅に対応します。半値幅はスペクトル応答がピーク値の50%下がったところの波長です。

透明な物質の温度測定では、基本的に、選択したフィルタはある波長域を完全に吸収する必要があります。ただし、吸収率と反射率がともに分かっており、吸収帯域で安定しているとき、少なくとも理論的には、不完全な吸収を提供するフィルタを使用することも可能です。ただし、多くの場合、吸収率は物体の温度や厚さによってばらつきがあります。

NBPフィルタをポリエチレンフィルムの温度測定に使用した例を図3に示します。図内の青い曲線はポリエチレンフィルムの吸収帯を示します。赤い曲線はポリエチレンフィルムに対応した $3.45\mu\text{m}$ のNBPフィルタ

の透過性を示しています。緑の曲線は、フィルムとフィルタの最終的な透過性です。この曲線はゼロラインのわずかに上にあり、フィルタによる調整がうまくいっていることを示しています。つまり、フィルムはカメラには不透明に見えており、背景放射はフィルム温度測定に対する妨げになっていません。

フィルタを適用温度によって分類することも可能です。従来は、検出器と同じ温度又はほぼ同じ温度を維持するコールドフィルタが熱シグネチャ測定において最も正確で望ましいとされてきました。また、検出器/クーラーの外の光学レンズの背部に取り付けられるウォームフィルタも一般的に使用されますが、周囲温度の変化により赤外線放射が変動するため、ラジオメトリック校正の不確実性につながりがちです。

▶ 第4章

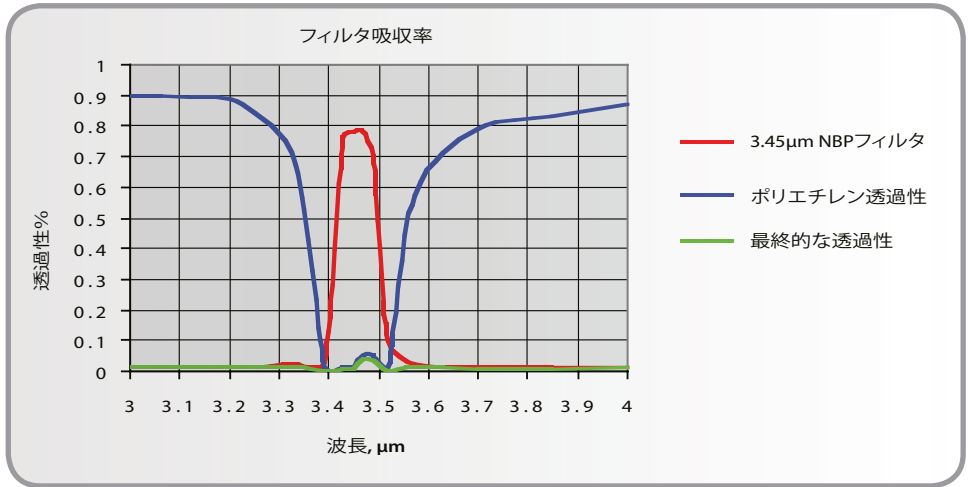


図3：ポリエチレンフィルムの温度測定のため、完全に近い吸収率とフィルムからの高放射率を実現する NBPフィルタの適用

カメラに使用するフィルタを選択した後は、カメラ／フィルタを組み合わせたシステムをカメラメーカーに較正してもらう必要があります。検出器に入射するエネルギー量の減少により精度と感度への影響があるため、システムの性能分析は較正後に行います。

透明な物質の測定テクニック

板ガラスや薄いプラスチックフィルムの製造において品質と生産効率を最大化するためにはかなり厳密な温度管理が必要です。従来は温度センサを押し出し機の開口部に設置し、板ガラスやフィルムの大まかな情報を得ていましたが、赤外線マシンビジョンシステムにより非接触型温度測定が可能になり、押し出される対象物の高精度データが得られるようになりました。しかし、前述の通り、適切なフィルタを使用し、赤外線カメラで透明な物質の不透明化が必要です。

適切なフィルタ選択がなされたかを確認するため、カメラメーカーがカメラ／フィルタシステムのスペクトル応答曲線を作成することがあります（図3の緑の曲線）。この曲線は、フィルタ応答をバリデータするための恒久的コールドフィルタの適用時に必要です。応答曲線がない場合（補助的なスペクトルデータがあれば）、ユーザはまず放射率をチェックすることができます。これは、対象物とフィルタを適用したカメラを含む全システム応答の放射効率の確認となります。キルヒホッフの法則をもういちど考えてみましょう。

$$\rho_{\lambda} + \varepsilon_{\lambda} + \tau_{\lambda} = 1, \text{ or } \varepsilon_{\lambda} = 1 - \tau_{\lambda} - \rho_{\lambda}$$

放射率を知るには、フィルタの通過帯域での透過率と反射率が必要です。透過率 (τ) については図3のような透過図から得ることもできます（この例では約0.02）。

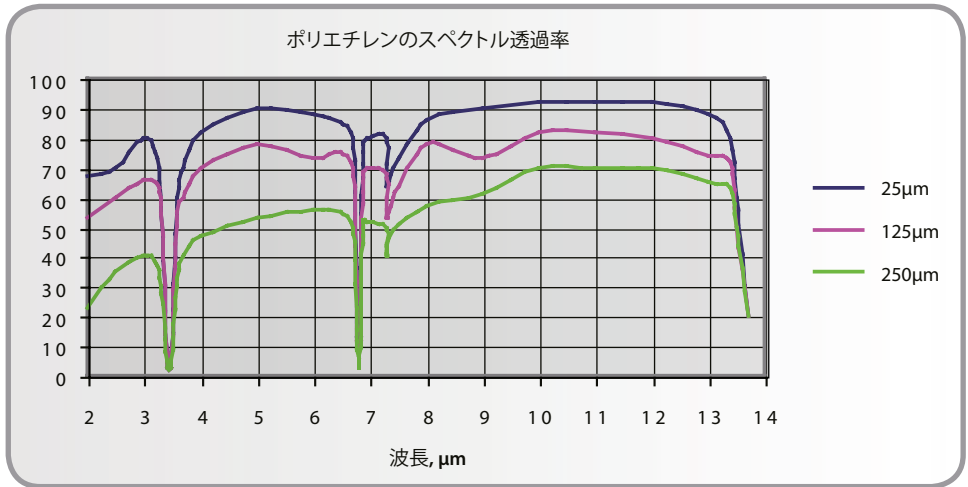


図4: 厚みが3段階に異なるポリエチレンフィルムの透過率

反射率の推定はそれほど容易ではありません。一般的に、反射率は物質の厚みによって変わります。しかし、図4のような透過図から、このパラメータの推定値が得られます。図4の最も薄いポリエチレンフィルムを示す青い曲線の吸収率が最も低く、吸収帯と吸収帯の間隔の透過率は約90%です。したがって、吸収帯が全く存在しない場合、反射率は10%であると結論付けることが可能です。曲線下に狭い吸収帯があるため、吸収率が極めて低いスペクトル帯域の反射率は8%であると推定できます。しかしながら、必要なのは、吸収率が高い場所（物質が不透明に見える箇所）での反射率です。

このポリエチレンフィルムの反射率を推定するには、まずフィルム表面の反射率が

吸収帯上で一定であるという合理的仮説を立てる必要があります。その後、フィルムの

両面からの反射率が8%である（各表面で約4%）事を確認します。しかし、吸収帯ではほぼ100%の吸収率であるため、測定では、反射は一面のみであるため、 $r_t = 0.04$ となります。

この反射率 (r_t) および透過グラフ（この例では図3）から得られた透過率 (T_t) より、放射率を算出できます。

:

$$\epsilon_\lambda = 1 - 0.02 - 0.04 = 0.94.$$

放射強度測定値から温度を計算する前に、この値をカメラの測定データベースに入力します。

板ガラス製造工程での温度測定要件はほぼ同じです。ガラス業界で最も一般的なのはソーダライム-シリカガラスです。

▶ 第4章

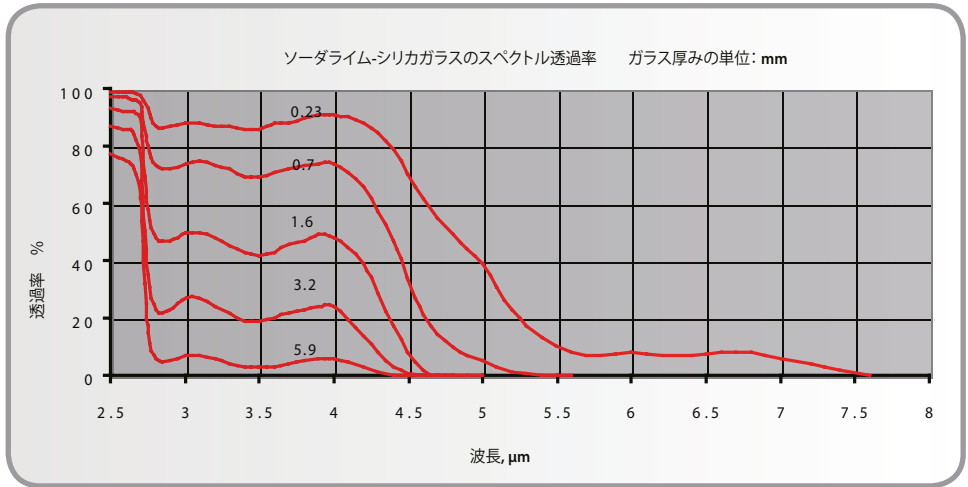


図5：厚みが5段階に異なる(0.23~5.9mm)一般的な産業ガラスの透過曲線

ソーダライム-シリカガラスは、成分、色などの点でばらつきがありますが、スペクトル特性はほぼ同じです。さまざまな厚さのガラスのスペクトル透過率(図5)から、赤外線カメラでガラスの温度を測定するには4.3 μm 以上の波長に限定しなければいけないことがわかります。ガラスの厚みによって、中波長(MW)または長波長(LW)赤外線カメラ/検出器が必要となります。MWカメラは2~5 μm の波長域を、LWカメラは8~12 μm の波長域をカバーします。

フィルタを選ぶに当たって、透過率がゼロに近い点付近のカットオン波長を有するLP型を選びたいのかもしれません。しかし、他の要因も考慮しなければなりません。例えば、LPフィルタは、MW、LWカメラのいずれでも使用できる熱電気冷却型のHgCdTe(MCT)素子のスペクトル応答曲線の負勾配を妨害する可能性があります。したがって、NBPフィルタの方が選択肢としては賢明です。

図6では、ガラス、SWカメラ及び2種類のフィルタの透過特性を重ね合わせ表示しています。LPフィルタの応答曲線は緑、NBPフィルタの応答曲線は青です。NBPフィルタはガラスが「黒」になるスペクトル位置で、中心波長が5.0 μm のフィルタを選択しています。

ガラスの反射率を図7に示します。ピークが8~12 μm の間にあることに注意してください。LWカメラでガラスの測定を行う場合、この波長は避けなければなりません。

その他に、ガラスの反射率は入射角によって異なるため、カメラの視野角が問題となります。幸いにも、約45度の角度までは、反射率は垂直入射の反射率とそれほど変動しません(図8)。

図8から、4.7 μm のLP又は5.0 μm のNBPフィルタのいずれかを使用する場合、どちらも5 μm 領域で動作するため、ガラスの反射率0.025が妥当であることがわかります(図6)。したがって、こ

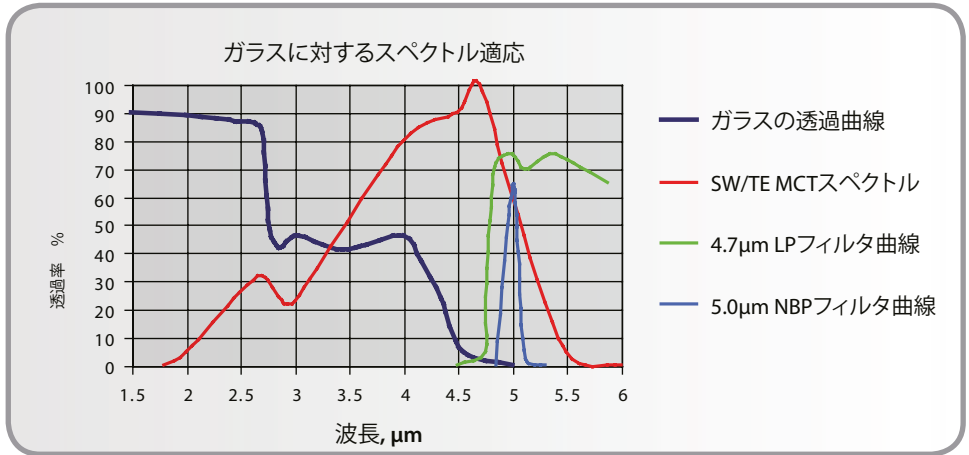


図6：2種類のフィルタを適用したSWカメラによるガラス測定

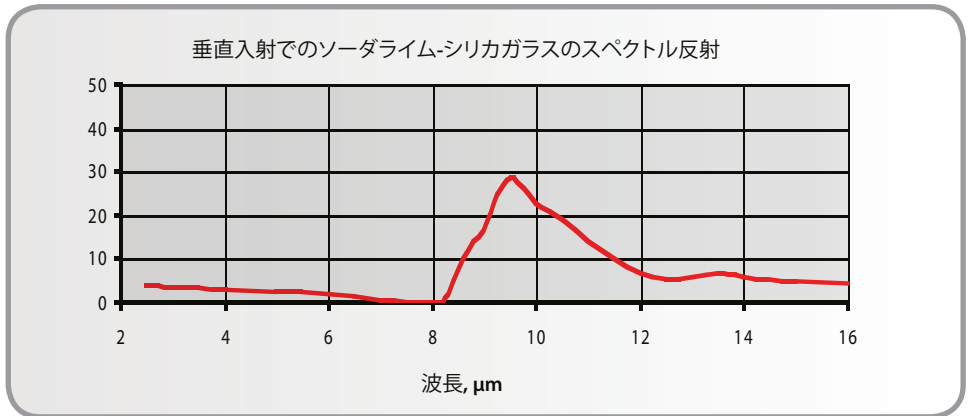


図7：垂直入射での一般的なガラスの反射率

の場合のガラス放射率として適切な値は $1 - 0.025 = 0.975$ となります。

透過帯でのフィルタ適用

多くの事例で、中間物が測定に及ぼす影響

を最小限にするスペクトル帯域を探す必要があります。対象物は測定経路の最終点にあり、カメラと対象物の間に中間物があります。中間物はたいてい普通の気体ですが、気体や混合ガス（燃焼ガスや炎）、窓、半透明の固体などの場合もあります。

▶ 第4章

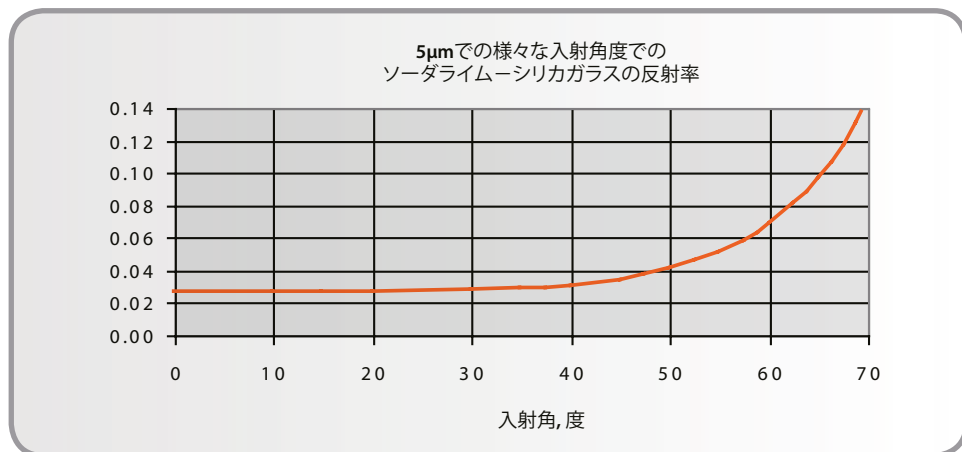


図8：垂直入射に対する視野角ごとのガラスの反射率

吸収帯でのフィルタ適用と同様に、透過帯でフィルタを適用するにあたっては実際の中間物のスペクトル透過率をまず測定すべきです。この目的は、カメラの応答波長内で対象物からの赤外線透過に対する中間物の影響を最小限にする帯域を見つけることです。しかし、特に高温の気体では、こうした測定が実用的でない場合が少なくありません。そのような場合でも、赤外線に関する文献で気体の構成要素（又はその他の中間物）のスペクトル特性を探し、測定に適したスペクトルを見つけることが可能であることもあります。

大気減衰については、カメラメーカーが既に対応している場合がほとんどです。一般的な赤外線カメラには、大気パラメータの不正確性や変動による測定エラーを軽減するため、気体成分や水蒸気の吸収帯を避けるフィルタが追加されています。このフィル

タは長距離での測定や短い波長領域での測定で特に必要となります。MWカメラでは、H₂O+CO₂の吸収帯である3 μm 帯、又はCO₂の吸収帯である4.2 μm 帯の間の窓領域を利用したフィルタが適切です。

LWカメラでは、8~12 μm の窓領域があるため大気の影響はずっと少なくなります。しかし、広い応答曲線を有し、MWスペクトルに至るカメラではLPフィルタが必要となる場合があります。特に、高温の測定では、放射輝度が短波長へ移行し、大気の影響が増えるためにLPフィルタが必要となるでしょう。カットオン波長が7.4 μm のLPフィルタはカメラのその波長以下を遮断します。

ガス燃焼炉、オープン、又は同様の加熱器材の温度測定でも透過帯フィルタを適用します。ここでの目的は、炎の温度測定や炉

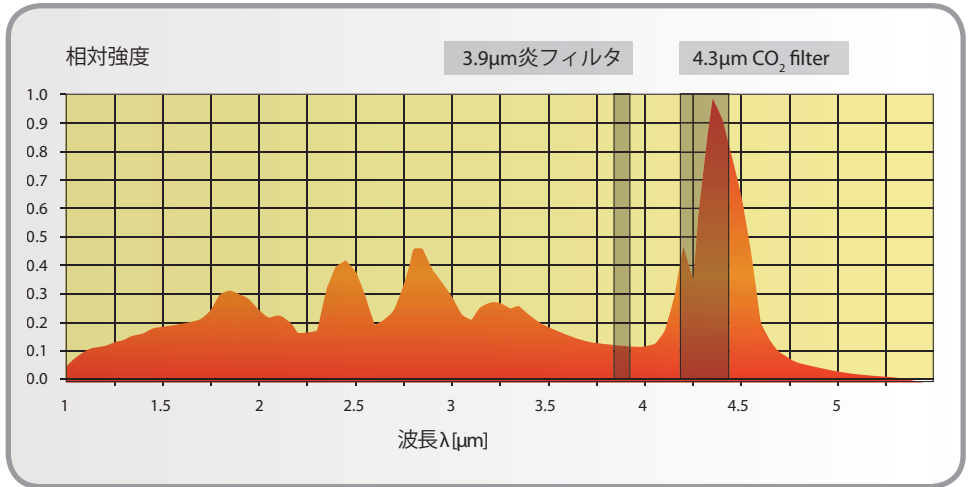


図9：異なる測定用途で2種類のフィルタを使用したガス燃焼炉の炎の吸収スペクトル

内の物質の温度を炎越しに測定することにあります。後者の場合、フィルタを設置していない赤外線カメラでは、炎からの強烈な放射により検出器が飽和し、内部の測定対象物からのはるかに弱い放射を測定することは不可能です。逆に、炎よりも温度が低い内部の物質からの放射が炎を透過するため、炎の温度測定値も不正確になります。

図9の炎の吸収スペクトルから、この2種類の測定に使用できるスペクトル領域が分かります。3.9 μm領域では炎からの放射が極めて少なく、4.2~4.4 μm領域では炎からの放射が非常に多くなっています。したがって、望ましい測定値を得るためにはこれらのスペクトル領域をカバーするフィルタを使用すればいいのです。

強い吸収帯は、対象物からの放射を減衰させ、高いガス温度により放射が激しいため、

炉内物質の測定では避ける必要があります。ガス燃焼炉内の気体の大半はCO2と水蒸気ですが、気体濃度と温度がはるかに高いため、大気フィルタは適しません。気体濃度が高く、高温であるため、吸収帯が深く、広がっています。こうした場合、炎フィルタが必要となります。図9は、3.75~4.02 μmを透過するBPフィルタです。このフィルタを設置したカメラによる画像では、炎を透かして炉内構造がはっきりと視覚化されています(図10)。

炎の最高温度を測定する場合、CO2フィルタを使用すれば1400℃もの高温が測定できます。対して、炎フィルタを使用すれば炉の壁が比較的低温の700℃であることが分かります。

▶ 第4章

結論

フィルタを使用することで限定されていた赤外線カメラの用途を広げることが可能です。ただし、文献でスペクトル情報が入手できない場合、準備として分光光度計による対象物や中間物のスペクトル測定が必要となることがあります。また、フィルタを選択し、設置した後に、カメラメーカーによるカメラ／フィルタシステムの較正が必要となります。十分に較正されたシステムであっても、測定誤差を避けるため、カメラ／フィルタシステムの応答スペクトルに対する吸収率が不明、又は変動するスペクトル領域を使用しないことが重要です。

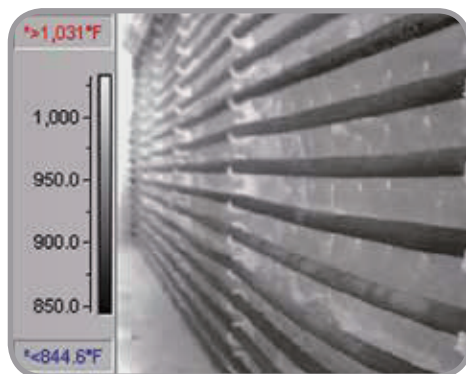


図10：正確な温度測定のため、炎フィルタを適用したFLIR ThermoCAMIによる煙管画像

▶ 第5章

超高速サーモグラフィ

最新サーマルイメージング技術

飛行中のミサイルの映像や羽ばたきをするハチドリのスロー再生映像など、誰もが一度は高速画像を目にしたことがあるはずです。前述の例はいずれも、高速可視光カメラで、露出時間をごく短くして、ストロボ撮影することで画像のぶれを抑え、通常は高フレームレートにより映像をスムーズに再生できるようにしています。最近まで、商業用赤外線カメラでは高速ダイナミック映像の撮影は不可能でしたが、現在、検出器出力の高速化や電子機器性能の向上など赤外線カメラ技術の急速な進化により高速赤外線映像の撮影が可能となっています。

これまで高速赤外線カメラの実現を妨げていた主要な要因は、読み出し回路、カメラのピクセルクロック、バックエンドデータ収集システムが遅いことに起因するものでした。読み出し回路の積分時間は約 $10\mu\text{s}$ にまで短縮されていましたが、これでは画像のぶれを抑えながら、高速で動く対象物の動きを止めるには不十分でした。同様に、温度変化の極めて速い対象物の場合、正確な解析に適したフレーム率でのサンプリングができませんでした。高速化を実現した赤外線カメラであっても、データ収集システムを飽和させず、フレームロスを起こさずに、いかに高解像度・高速データを収集するかなどの課題が残っていました。

高速赤外線カメラの課題は技術的境界によるものだけではありませんでした。その他の

条件により最大フレームレートが制限される場合もありました。例えば、アナログビデオ出力を必要とするカメラは当然ながら、NTSC (30Hz) 及びPAL (25Hz) フォーマットの要件により最大フレーム率が制限されます。ビデオモニタのピクセルレートはNTSCやPALのタイミングパラメータ(垂直及び水平ブランキング時間)により決定するため、検出器の焦点面アレイ(FPA)のピクセルレートに関わらずこうした問題が発生していました。

しかし、高性能な研究開発用カメラ技術の革新により、このような課題はすべて解決され、高速赤外線カメラ技術のメリットを十分に享受できる時代になりました。なかでも、画像のぶれを防ぎながら高速で動く対象物を撮影し、温度変動の激しい対象物を解析するために、必要なデータを収集し、1秒当たりのフレーム数を減らさずにダイナミックレンジを増やすことができるなど、技術革新は大きな成果をもたらしています。

積分時間の短縮による画像のぶれ防止

最新のFPA読み出し集積回路(ROIC)により、赤外線カメラの積分時間(可視光カメラの露出時間又はシャッタースピードに相当)は500nsまで短縮されました。さらに、新たなROICの設計では、積分時間の下限まで線形応答を維持できるようになりました。これはほんの数年前まで実現できなかった技術です。

この技術革新によってもたらされる大きな利点は、カメラの視野角のなかで対象が動

▶ 第5章

く又は振動するときに画像のぶれを防ぐという点です。マイクロ秒以下の積分時間の最新カメラでは、ミサイルや飛行中の弾

丸など高速で動く対象をぶれなく撮影することが可能です。

弾丸よりも速く

以下の実験では、高速赤外線カメラを使用し、飛行中の0.30口径ライフルの弾丸の温度を測定しました。画像撮影時点で、弾丸は超音速 (800~900m/s) で飛行中であり、ライフルの銃身内の摩擦、推進剤、空気力学的な力により加熱しています。この熱負荷があるため、赤外線カメラでは、 $1\mu\text{s}$ という非常に短い積分時間であっても、弾丸を簡単に見分けることができるため、可視光カメラと異なりストロボ光源は必要ありません。

フレーム撮影時に銃口から数センチの距離の射撃軸上に位置する視野角 (FOV) に弾

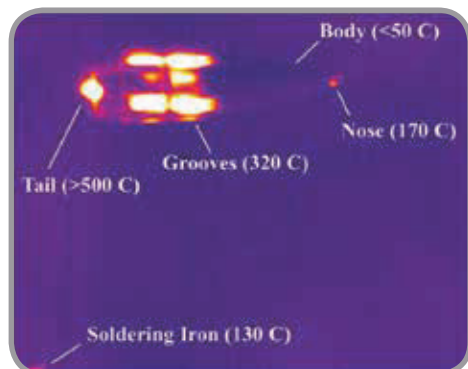


図1a: 飛行中の0.30口径の弾丸の温度を示す熱画像

丸が入るように、ライフルの銃声をトリガとしてカメラの積分時間を開始しました。

図1aは840m/s (~3000mph) で飛行する弾丸の拡大熱画像です。 $1\mu\text{s}$ の積分時間を使うことで、画像のブレは約5ピクセルまでに抑えられています。

図1bは、2マイクロ秒の積分時間で撮影した可視光カメラによる同じ弾丸の参考画像です。2つの画像の弾丸の方向は同じで、左から右に動いています。画像のなかほどの明るい光は露出中に弾丸に十分な光を当てていたスタジオライトの反射です。弾丸は可視光スペクトル帯域では十分な光を放っていないため、可視光画像では照明が必要でした。

高速過渡現象の高速撮影

短い積分時間と高速フレームレートを併せもつ赤外線カメラは少なく、多くのカメラにはどちらか一方のみが装備されています。対象物の温度変化が極めて速い場合に正

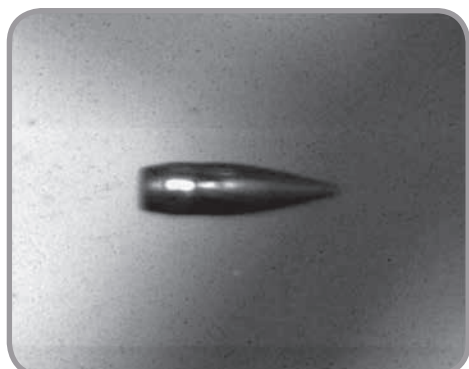


図1b: 同じ飛行中の0.30口径の弾丸の可視光画像

確な温度解析を行うためには、高速フレームレートが極めて重要です。

短い積分時間と高速フレームレートの両方が必要な事例として、集積回路 (IC) の過負荷試験があります (図2参照)。この試験の目的は、設計上の上限を上回るバイアス又は逆バイアス電流を印加したときにICの最大熱負荷をモニターすることにあります。高速赤外線技術なしでは、サンプリング不足によりICの熱過渡解析に必要なデータを得ることはできません。また、解析データ不足だけでなく、最高温度の測定誤差が生じる恐れもありました。

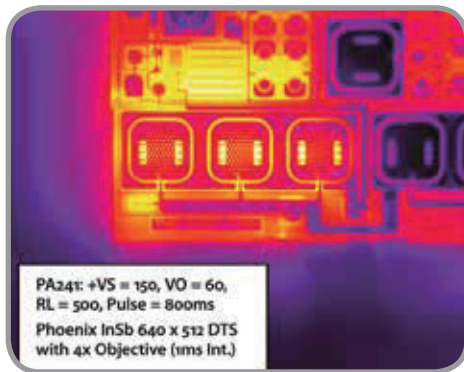


図2：800msの過電流パルスを印加した集積回路

ICをフレームレート1000Hzでサンプリングすると、最高温度は95℃と報告されました。しかし、500Hzでサンプリングすると、最高温度は欠測し、誤った最高温度80℃が報告されました (図3)。

この1例だけを見てもお分かりのように、一見、高速化によるメリットが必要ないよう

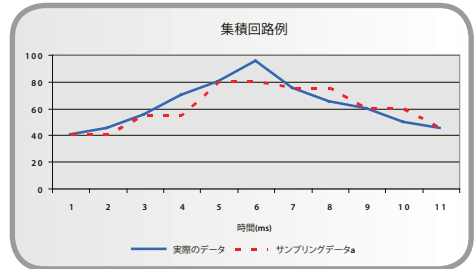


図3：ICの最高温度データ-実際の温度 対 サンプリング不足

に思える単純な用途においても高速度赤外線カメラは有用です。

ピクセルクロック 対 アナログ・デジタルコンバータ

高速ピクセルクロックと多数のアナログ・デジタル (A/D) コンバータ (チャンネル又はタップ) を備えていることが高速度IRカメラの必須条件となります。基準として、最も性能が低いカメラは2つのA/Dコンバータ (チャンネル) を有し、40メガピクセル/秒以下のクロックスピードで動作します。速いように聞こえるかもしれませんが、データ量に変換するとクロックスピードは60Hz前後になります。

一方、高速赤外線カメラは少なくとも4チャンネルを備え、クロックスピードは50メガピクセル/秒以上です。また、ウインドウサイズ640×512で、120Hzを超えるフレームレートで14ビットのデジタルデータを出力が可能です。フレームレートを更に上げるため、通常のIRカメラではユーザはウインドウサイズを小さくする又はFPAから読みだすピクセル数を減らすことができます。こうすることで、フレーム当たりのデジタル

▶ 第5章

及び転送データ量が減るため、全体のフレームレートが上がります。図4では、ユーザーの指定したウィンドウサイズに応じてフレームレートが上がっています。

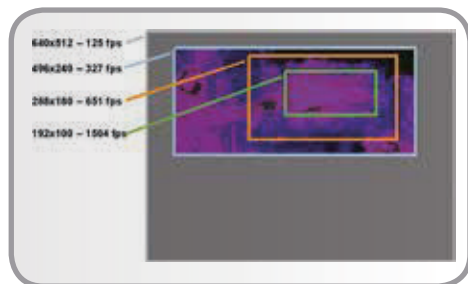
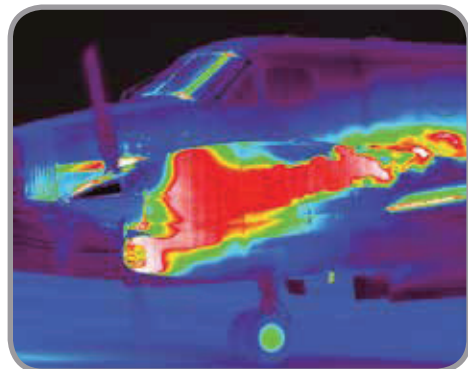


図4：フレームレートとFPAウィンドウサイズの関係

最新のカメラでは、16チャンネルで最高205メガピクセル/秒のピクセルクロックを備えたものもあり、ウィンドウサイズや全体の解像度を下げずに高フレームレートが実現できます。

プリセットシーケンス機能によるダイナミックレンジの拡大



高速赤外線カメラには、高速対象に関するもの以外にも、ダイナミックレンジの拡大というメリットがあります。高速赤外線カメラとスーパーフレーミングと呼ばれるデータ収集方法を組み合わせることで、カメラのダイナミックレンジをフレーム当たり14ビットから18~22ビットにまで拡大可能です。

スーパーフレーミングでは、最大4つの任意設定した積分時間（プリセット）を周期的に変え、各プリセットで1フレームを撮影する機能です。この機能を使うことで、各プリセットで1つのユニークデータムービーファイルを得ることができます。このデータを市販のABATERソフトウェアで組み合わせます。ソフトウェアは各ユニークフレームから最適ピクセルを選択し、積分時間の異なる全データムービーファイルからのデータで構成される最終的なフレームを作成します。

この方法は、特に同じ視野角に高温と低温の物体がある状況の撮影時に有用で

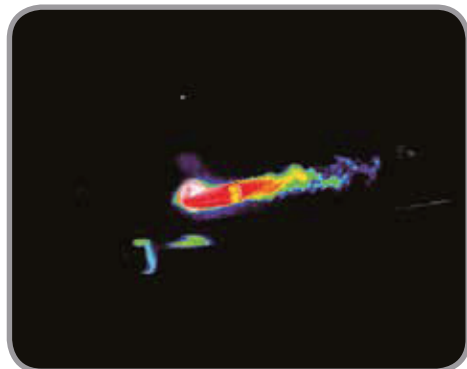


図5：2ms（左）と30µs（右）の積分時間で撮影した航空機エンジン

す。14ビットカメラでは通常熱い物体と冷たい物体を単一積分時間で撮影することはできません。熱い物体上で露出オーバーとなり、冷たい物体上で露出不足となるためです。

図5は、スーパーフレーミング機能により、2つの異なる積分時間で撮影したビーチクラフト・キングエア航空機の画像です。

左側の図（プリセット0 = 2msの積分時間）では、航空機ははっきり映っていますが、エンジン部分が明らかに露出オーバーです。逆に、右側の図（プリセット1 = 30 μ sの積分時間）は、エンジンの吸気及び排気の詳細が映っていますが、航空機他の箇所は露出不足です。

図5の2つの画像をABATERソフトウェアで処理し、最適ピクセルを選択し、露出の過不足がない最終的なスーパーフレーミング処理画像が得られます（図6）。

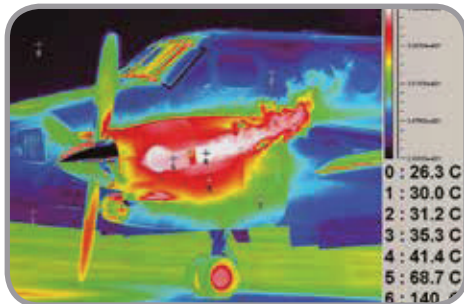


図6：プリセット0及びプリセット1データからABATERソフトウェアで作成したスーパーフレーミング処理画像

ただし、このデータ収集及び解析法には、プリセット数ごとのフレームレートが低下するというマイナス面があります。

100Hzのカメラに2つのプリセットとして、単純に計算すると、全体のフレームレートは50Hzになり、前述の高速赤外線カメラの基準を大きく下回ります。そのため、カメラの高速化がさらに求められることになります。つまり、305Hzカメラで前述のスーパーフレーミング機能を使用すれば、プリセットあたりのフレームレートは150Hz以上となります。これは高速赤外線撮影の基準範囲に十分含まれる値です。

結論

高精度読み出し回路や高速ピクセルクロックを装備した高性能赤外線カメラが利用できるようになり、高速赤外線画像の撮影が可能となりました。その結果、高性能赤外線カメラ技術の用途をこれまで以上に広げることができます。さらに、高速で動く対象物、温度変化の激しい対象物、ダイナミックレンジが広い事象など難度の高い用途でも、撮影データ量を増やし、測定精度を上げることが可能です。こうした最新技術の普及に伴い、これまで可視光カメラでのみ享受されていた高速データ収集のメリットが赤外線カメラの世界でも享受できるようになるでしょう。

多種多様な研究開発用サーモグラフィ

フリーシステムズは、初心者から専門家まで幅広い層に満足いただける多種多様な研究開発用赤外線サーモグラフィを提供しています。

フリーシステムズは赤外線サーモグラフィ業界のマーケットリーダーとして、豊富な品揃えで、多様なニーズにお応えします。



FLIR A325sc



FLIR A655sc



FLIR SC660



FLIR SC2500



FLIR SC5000



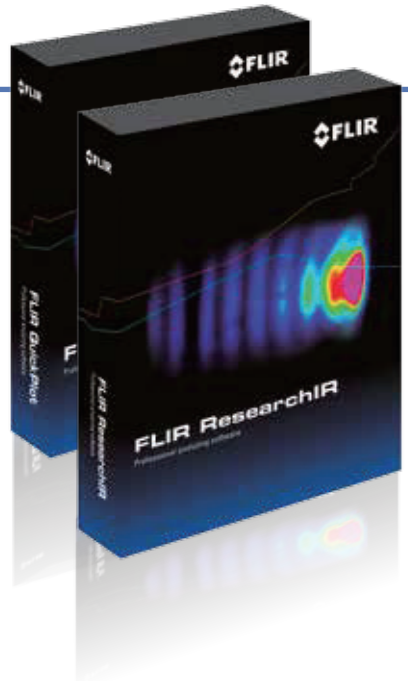
FLIR SC7000



FLIR SC7900-VL



FLIR Orion SC7000

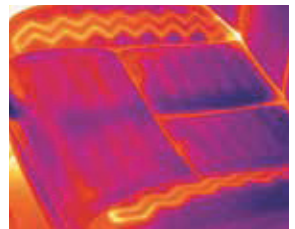
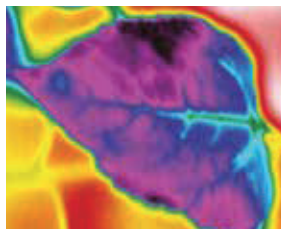
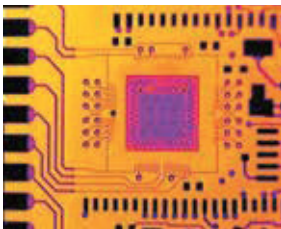


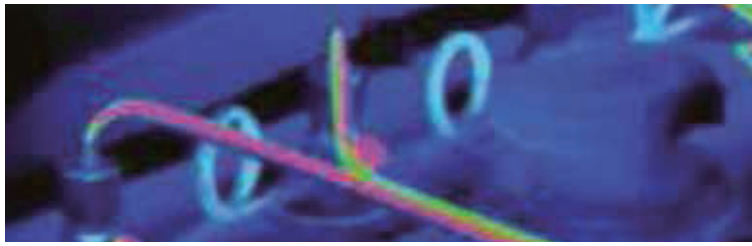
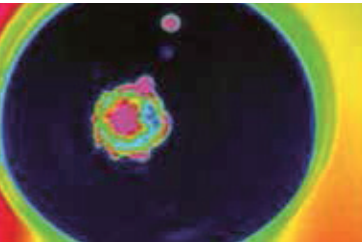
専門的なニーズに応える 赤外線サーモグラフィ用 ソフトウェア

フリーシステムズは、最高の赤外線サーモグラフィを作るだけにとどまらず、弊社サーモグラフィをお使いのすべてのお客様が効率的かつ生産的に作業ができるように、サーモグラフィに対応した専門的なソフトウェアの開発にも取り組んでいます。

弊社の赤外線技術のスペシャリストが、プロフェッショナルの皆さまに満足いただける使い勝手の良い優れた新規ソフトウェアの開発に力を注いでいます。弊社のソフトウェアは、すべてWindowsで動作し、サーモグラフィ検査結果の迅速かつ正確で詳細な解析と評価に役立ちます。

フリーシステムズの製品およびソフトウェアに関する詳細情報については、最寄りの代理店にお問い合わせいただくか、弊社ウェブサイト (www.flir.com) をご覧ください。





フリーシステムズなら、お客様の用途やニーズに合わせた赤外線サーモグラフィをお選びいただけます。ご遠慮なくお問い合わせください：

azbil

アズビルレーディング株式会社

<https://at.azbil.com/>

本 社 〒105-0014 東京都港区芝 3-23-1 セレスティン芝三井ビルディング8階 03-4233-7853

東京支店 03-4233-7863	福島営業所 024-927-0530	静岡営業所 054-272-5300
北関東支店 048-600-3931	つくば営業所 029-817-4755	神戸営業所 078-341-3581
名古屋支店 052-218-5080	群馬営業所 027-310-3381	兵庫営業所 079-456-1581
大阪支店 06-7668-0023	千葉営業所 043-246-6652	岡山営業所 086-460-0050
広島支店 082-568-6181	神奈川営業所 046-400-3433	鳥栖営業所 0942-84-4331
九州支店 093-777-0431	諏訪営業所 0266-71-1112	

※外観、仕様、価格等は製品改良のため予告なく変更することがあります。

241015-0000-1-AT