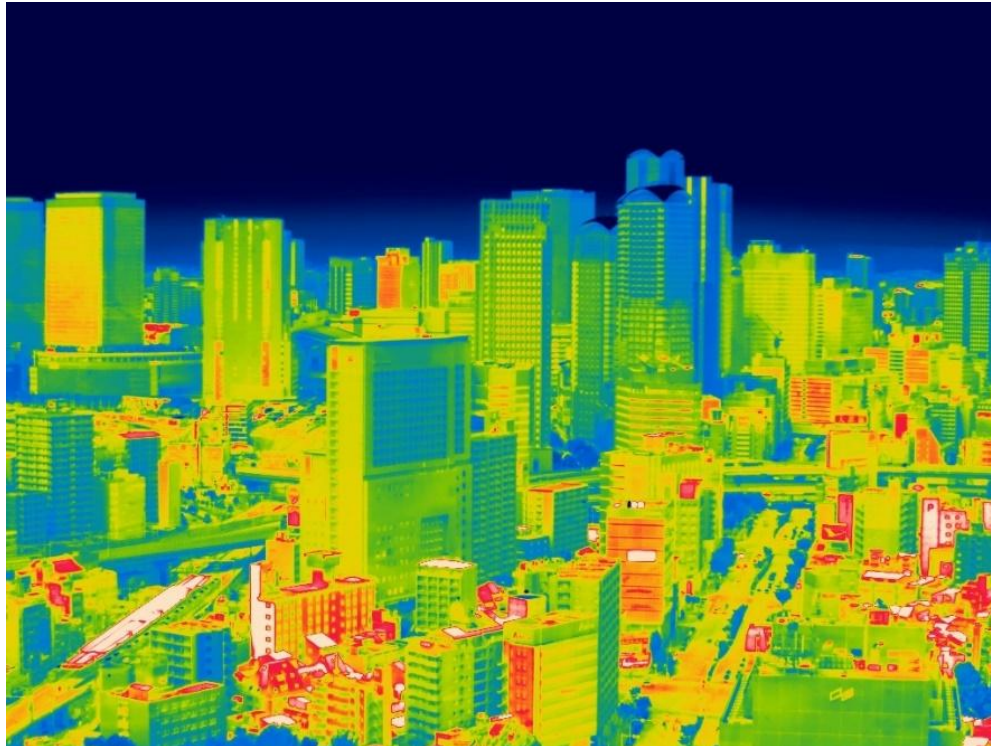


サーモグラフィの変遷と今後

アプライドインフラレッドテクノロジー株式会社



サーモグラフィの変遷と今後

基礎編	1	赤外線って何？	波長が視光線の赤色よりも長く、マイクロ波よりも短い電磁波
	2	赤外線のはじまり	赤外線はいつ、どのように発見されたの？
	3	赤外線放射の法則	物体から放射される赤外線はどのようなもの？
	4	サーモグラフィの温度計測	どのようにして、温度を計測しているの？
	5	測定対象物の特性	測定対象物の特性による温度計測への影響
	6	伝搬路の特性	伝搬路での吸収透過
	7	サーモグラフィの構造	赤外線センサ：UFPAと温度校正
	8	サーモグラフィの変遷	1960年～2025年
	9	赤外線センサの変遷	UFPAの画素ピッチと画素数
	10	アプリケーション	機械設備診断、電気設備診断、ソーラー設備診断、 熱損失測定
応用編	11	サーモグラフィの今後	技術動向と適用アプリケーション

赤外線の世界は、1800年、W. Herschel（英）が発見したことから始まり、その後多くの研究がなされ、現在では広い分野でその技術が応用されている。

その一つに赤外線カメラがあり、「全ての物体からは、その温度に関係付けられるエネルギー（プランクの放射則）の赤外線が放射される」という原理から、その赤外線を画像化する暗視カメラや、定量化し温度計測カメラなどに利用されている。

近年、非冷却二次元赤外線センサ（UFPA）が開発され、MEMS技術の向上などにより、狭ピッチ・多画素化、高性能化、低価格化が進み、赤外線カメラの様々な分野での利用が拡大している。

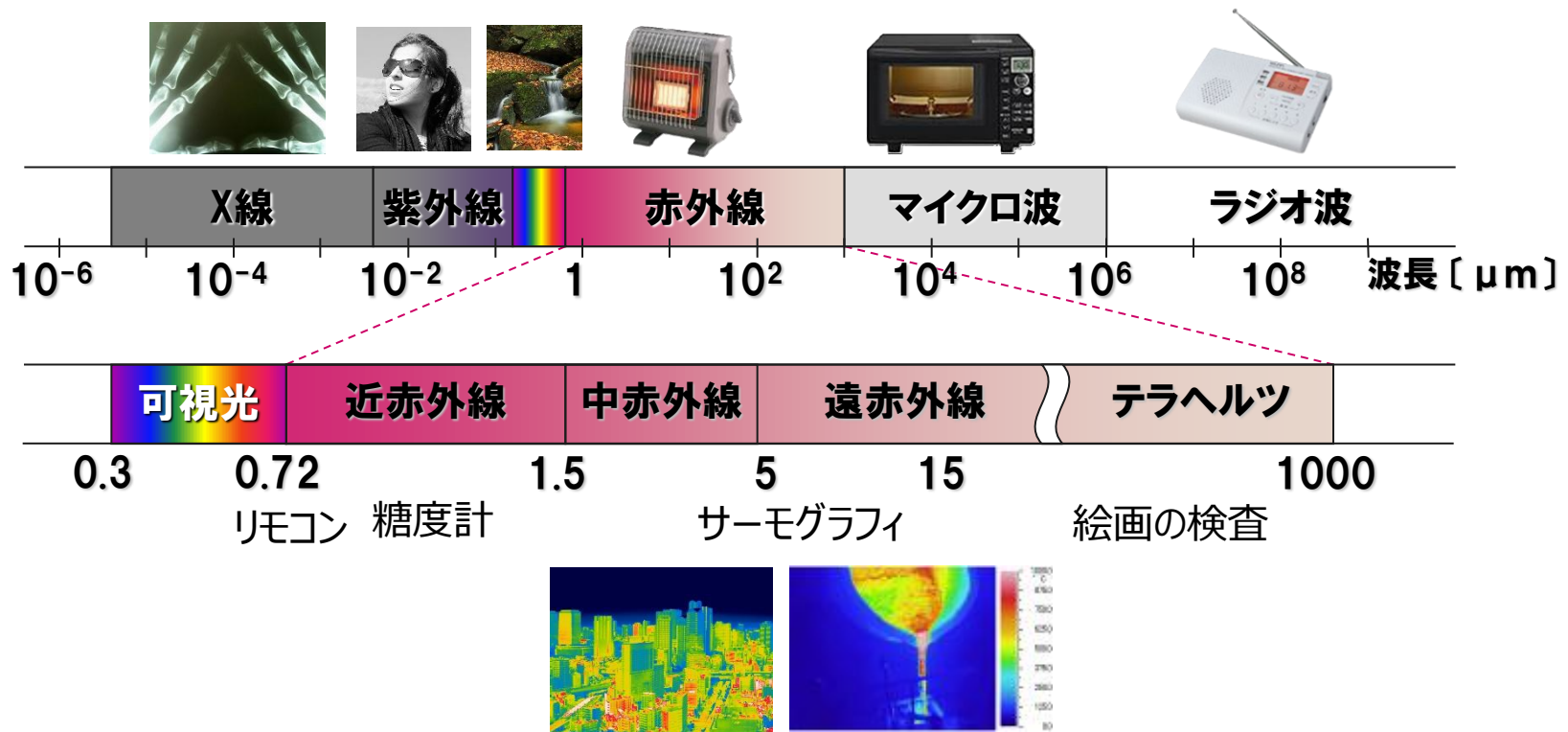
本稿のテーマであるサーモグラフィは赤外線カメラの利用形態の一種で、測定対象物の表面からの赤外線放射量を定量的にとらえ、それを温度に変換し2次元画像として温度分布を表示する装置である。使用目的により、保守保全用ハンディタイプ型、研究開発用高性能多機能型、特殊計測用光学フィルタ内蔵型、計測システム用固定設置型など多岐にわたる。

本稿では、測定対象物の赤外線放射、伝搬路、サーモグラフィ技術について、原理から議論し、その変遷を振り返り、今後の展開を考察する。

基礎編

赤外線ってなに？

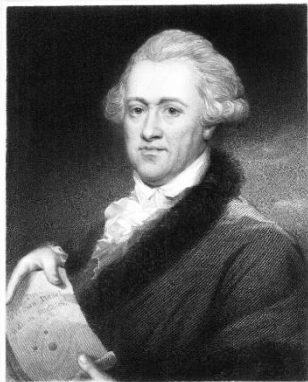
- ◆ 幅広い波長を有する光で、以下の波長領域の光を赤外線と呼ぶ
可視光の赤色(波長 $0.72\mu\text{m}$) < 赤外線の波長 < マイクロ波(波長 1mm)
- ◆ さらに波長帯によって、近／中／遠／超遠（テラヘルツ）赤外線に分類され、それぞれの特性に応じてさまざまな分野で利用されてる。



赤外線のはじまり

- ◆ 1800年イギリスの天文学者ウィリアム・ハーシェルによって発見される
 - 太陽光の分光実験中に、可視光の“赤の外側”に目に見えない加熱効果の高い光が存在することを発見
- ◆ 赤外線は、絶対零度（約-273℃）以上の**全ての物質から放射されている目に見えない領域の光**
- ◆ 放射エネルギーは、温度に関係して大きくなる

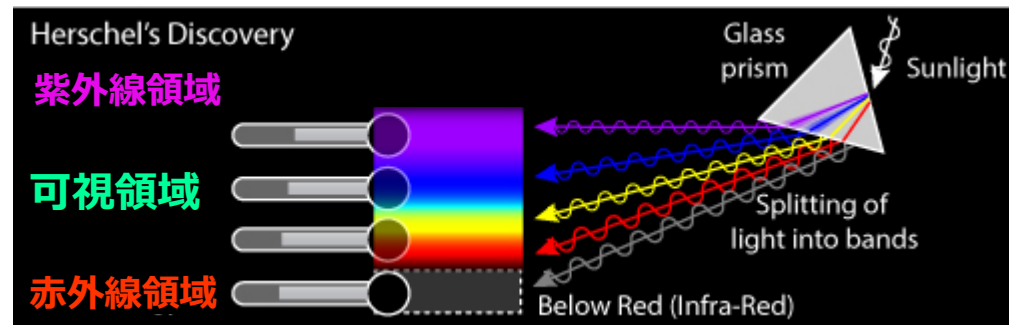
赤外線の見



WILLIAM HERSCHEL.
From a Copper Plate by the late J. Baskett Esq. R.S.
on the suggestion of Sir John Herschel.

Frederick William Herschel 1738 - 1822

ドイツのハノーファで生まれ、イギリス天文学者、音楽家、望遠鏡製作者
天王星の発見や赤外線放射の発見など、数多くの業績を残した。



赤外放射の法則

◆ 赤外放射の法則（プランク法則、ウィーン法則、ステファン・ボルツマン法則）

- 放射エネルギーは物体の温度の関数である
- 物体の温度が高温になると、赤外線放射量は高くなる
- その放射量は、物体の温度の4乗に比例して大きくなる



$$W_\lambda = \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{C_2/\lambda T} - 1}$$

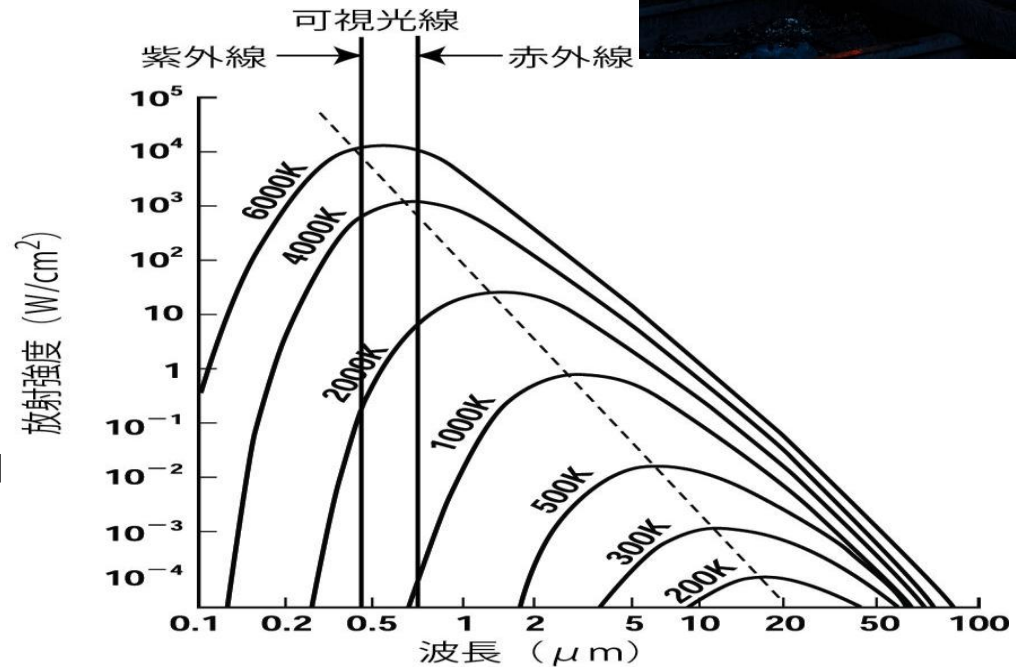
W_λ : 分光放射発散度 [$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$]

λ : 波長 [μm]

T : 絶対温度 [K]

C_1 : 第1放射定数、 $3.7418[10^4 \text{W} \cdot \text{cm}^2 \cdot \mu\text{m}^4]$

C_2 : 第2放射定数、 $1.4388[10^4 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{K}]$

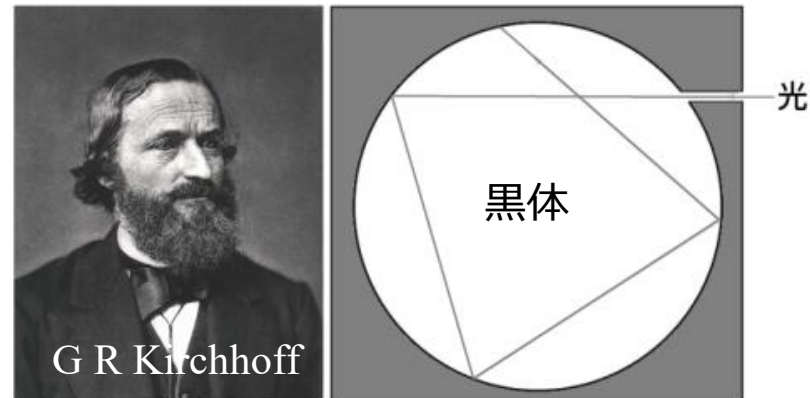
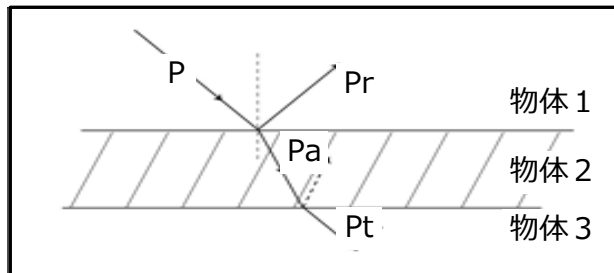


赤外放射 プランク法則とは？

ナトリウムの黄色線とフ라운ホーファーのD線とが一致する、スペクトルの反転を発見。

これを説明するために黒体概念を導入

- ◆ 放射率 = 吸収率
- ◆ 反射率 + 透過率 + 吸収率 = 1



紫外部の破局

Rayleigh-Leansは、古典的な熱力学、統計力学で黒体放射の説明を試みたが、失敗した。

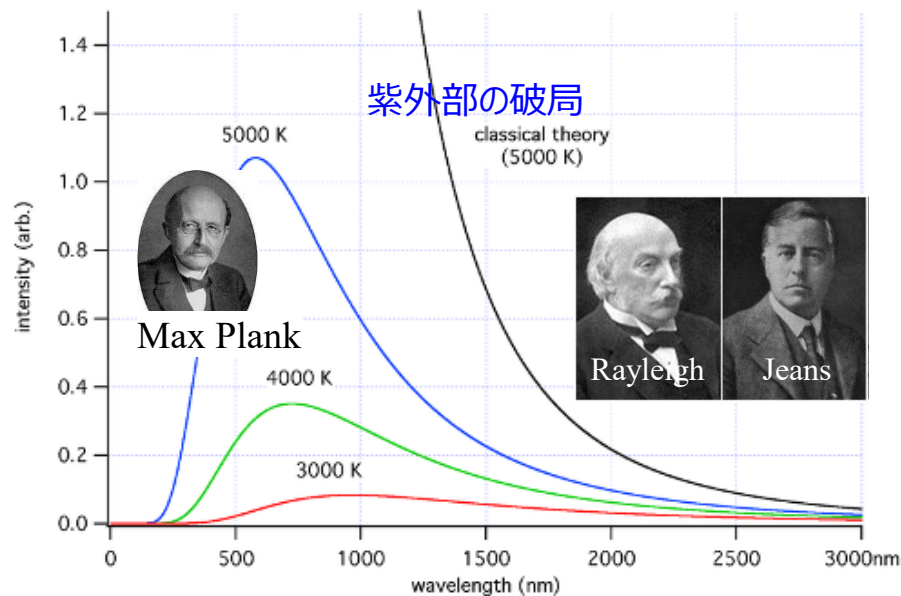
【仮説】

- ① 黒体内の電磁波は定常波として空間にエネルギーを貯える
- ② エネルギー均分則：1自由度あたり $kT/2$ 、 k はボルツマン定数気体分子運動論では、
気体の比熱に関して説明がつく
- ③ エネルギーは連続的に任意の値をとる波動のエネルギーは振幅の2乗に比例する

【結果】

長さLの中に存在する波長数nは、波長 λ が短くなるにつれて多くなる。各波長に自由度4(進行波に対してx、yの偏光)を与えて計算すると次項図のようになり、“**紫外部の破局**”となり、説明できない

赤外放射 プランク法則とは？



Max Planckは、

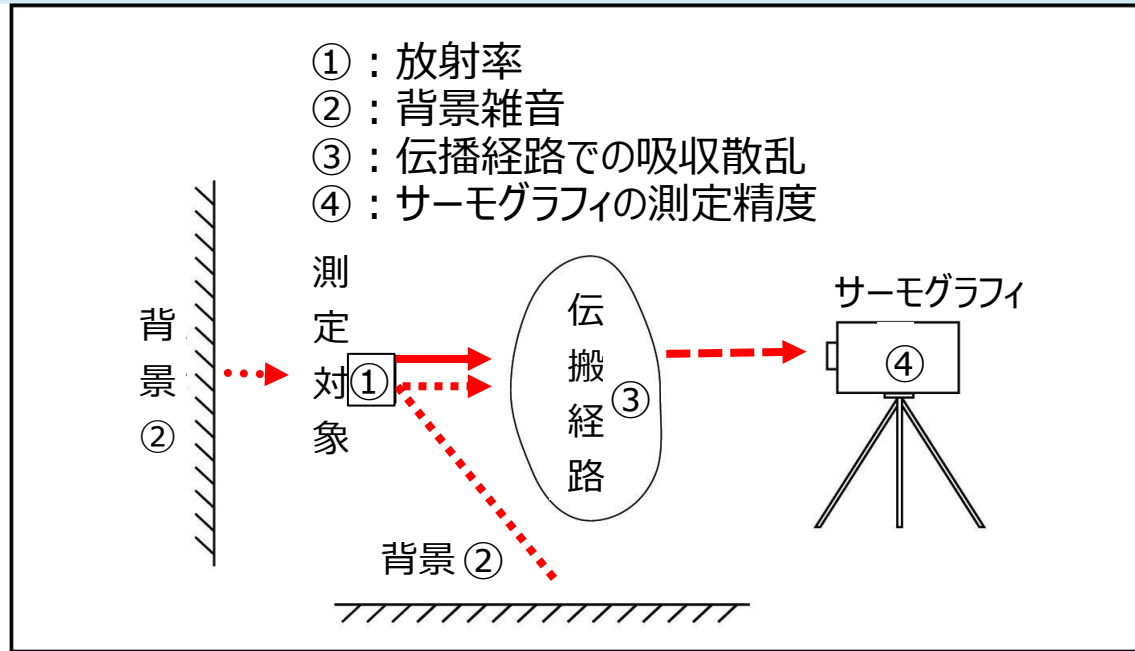
R-Jの仮設③は間違いで、ある波長の電磁波が取りえるエネルギー $E = h\nu$ と仮説を修正した

- ① Rayleigh-Jeans : ・エネルギー準位は0から ∞ まで連続、・分布はボルツマン統計に従う
(理想気体のエネルギー分布の説明では成功した) $\Rightarrow$ 平均エネルギー $E_{ave} = kT$
- ② Max Planckは、エネルギー $E = h\nu$ (h はプランク定数)とした
 $\Rightarrow$ 平均エネルギー $E_{ave} = h\nu / (e^{h\nu/kT} - 1)$

平均エネルギー計算は、

- ① ボルツマン統計を用いてエネルギー順位にある成分系の数を求め、
- ② 各順位のエネルギーの積和を求め、成分系の総数で割ることにより求める

サーモグラフィの温度測定



**I 測定対象物
赤外線放射**

**II 伝搬路の特性
透過・吸収**

**III 入射赤外線
vs温度計測**

**赤外線
エネルギー**

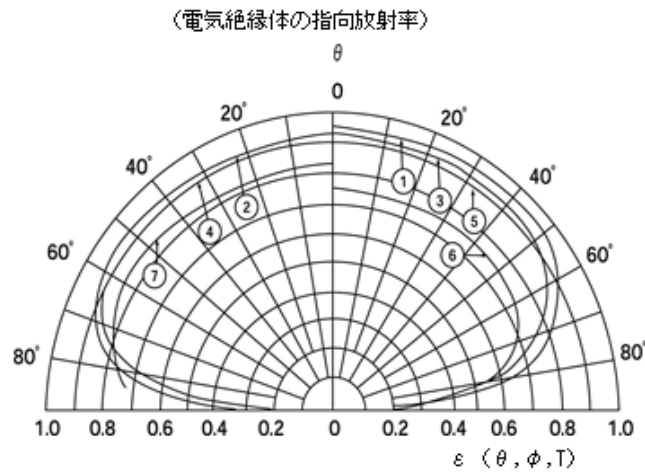
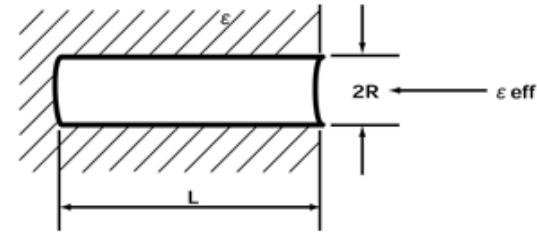
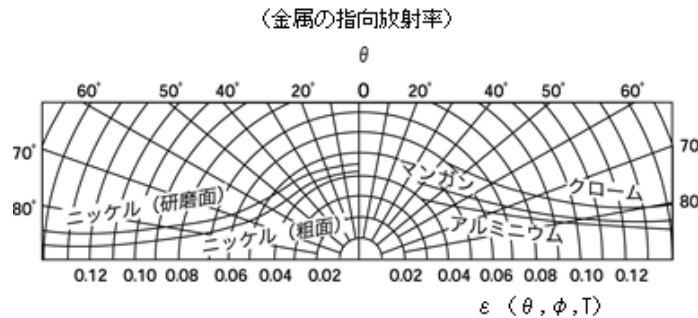


**熱画像表示
温度計測**

**エネルギー量を
温度に換算**

測定対象物の特性

測定対象物の特性 (放射率)



- ① 湿った氷 ② 木材 ③ ガラス
- ④ 紙 ⑤ 粘土 ⑥ 酸化銅
- ⑦ 酸化アルミニウム

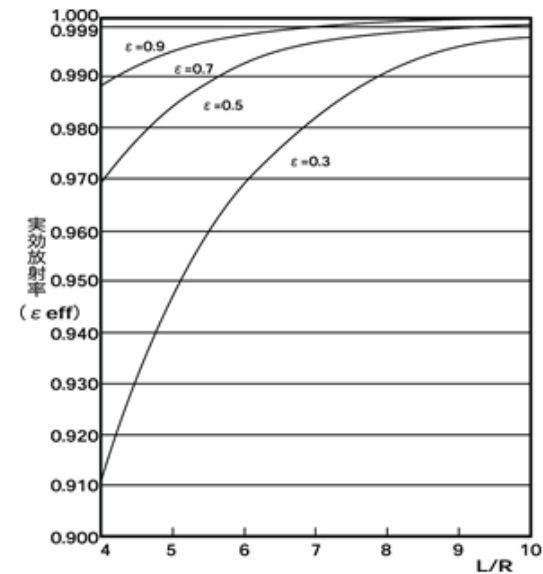


図8.放射率の指向特性

図9.実効放射率

測定対象物の特性：赤外線放射を調べてみる

1. プランク法則を詳しく調べてみると

- ◆ 放射発散度は温度と波長の関数となっている
- ◆ 検出される赤外線は幅のある波長帯になる
⇒ 赤外線エネルギーはプランク式を波長で積分して使う
- ◆ 温度を切り口に考える(利用する)
- ◆ 波長を切り口に考える(利用する)

2. 赤外線放射は、すべてのものから放射されている

- ◆ 測定対象物だけではなく 背景、経路、サーモグラフィ構成部品
(筐体、レンズ、センサパッケージ、ウィンドー、センサ自身など)

3. プランク法則の活用と計算

- ◆ サーモグラフィを検討する際、積分を行う計算シート (EXCEL)
⇒ 計算を見ながら赤外線の波長帯ごとの特徴を見してみる

波長・温度 vs 放射発散度の特徴 **A³IRTec**

1. LWIR(Long Wave Infrared) : 8-12 μ

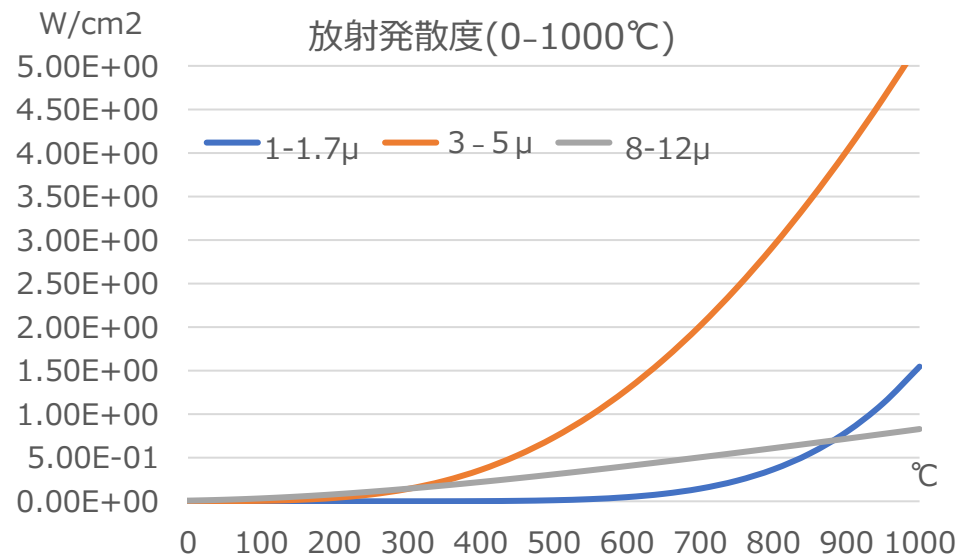
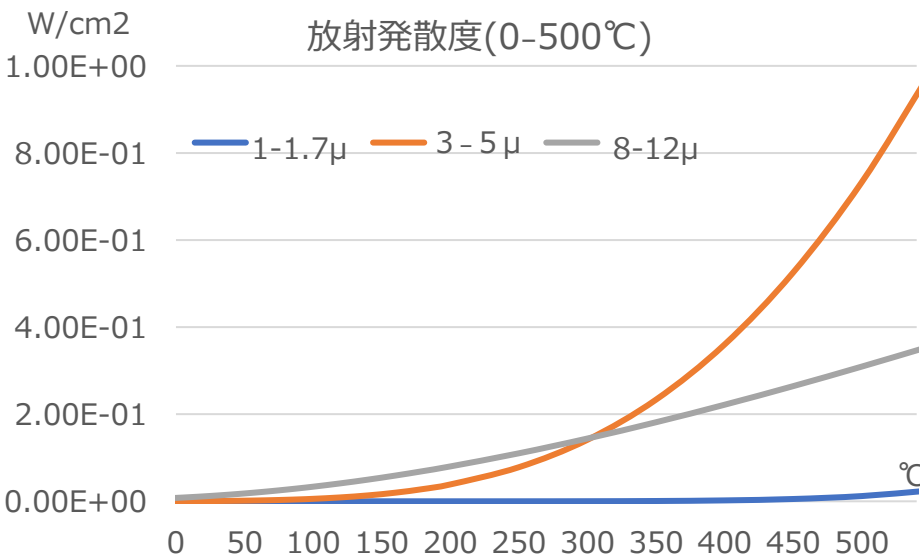
- ◆ 温度に対する放射発散度の変化は直線的で、測定ダイナミックレンジが広くとれる

2. MWIR(Middle Wave Infrared) : 3-5 μ

- ◆ 300℃以上で放射発散度が増加するため、測定ダイナミックレンジが狭くなる
⇒ 測定温度レンジの設計に注意を要する

3. SWIR (Short Wave Infrared) : 1.0-1.7 μ

- ◆ 800℃以上で放射発散度が増加するため、MWIR同様に測定レンジの設定に注意を要する



波長・温度 vs 放射発散度の特徴 **A³IRTec**

1. LWIR(Long Wave Infrared) : 8-12 μ

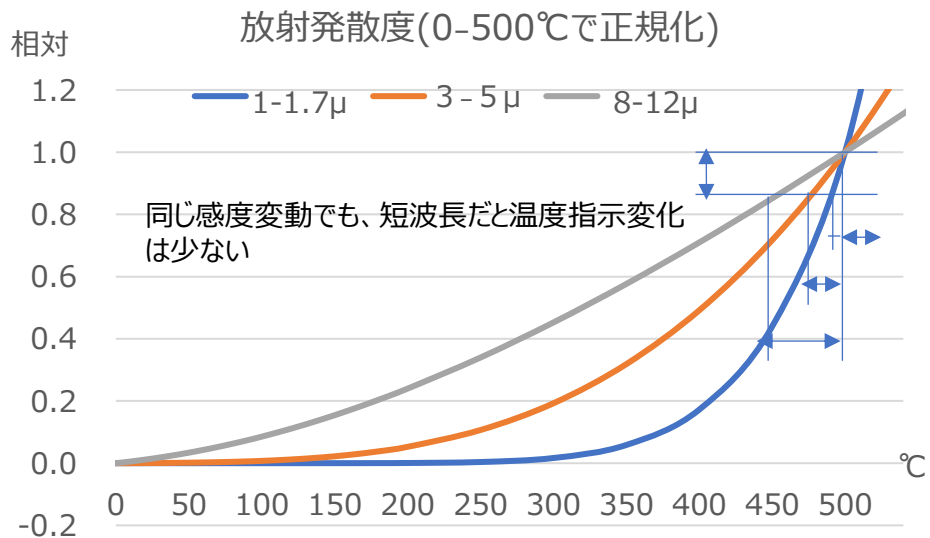
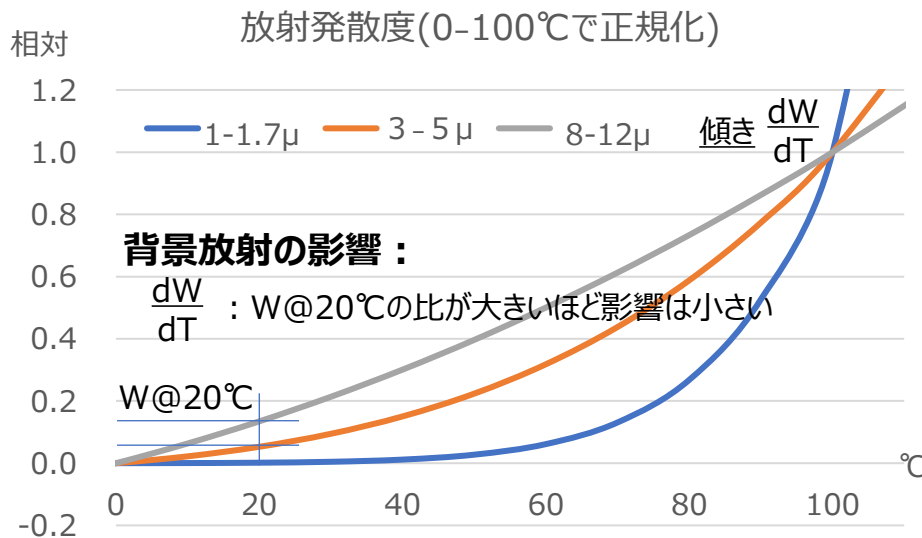
- ◆ 常温付近では、放射発散度と温度の関係が、直線に近い特性を示し、NETDの点で有利
- ◆ 低温(0℃付近)と高温(500℃)での傾きの変化が小さく、分解能の変化が小さい

2. MWIR(Middle Wave Infrared) : 3-5 μ

- ◆ 常温付近では、放射発散度の傾き(対温度)が小さく、LWIRと比較して温度校正が難しい
- ◆ 300℃以上では、放射発散度の傾きが小さく、LWIRと比較して放射率の影響が小さい

3. SWIR (Short Wave Infrared) : 1-1.7 μ

- ◆ 常温付近での放射は“0”とみなせ、環境からの反射の影響が小さい $\Rightarrow$ 低放射率が可能
- ◆ 400℃以上では、さらに放射率の影響が小さい $\Rightarrow$ 高温物体の測定に有利

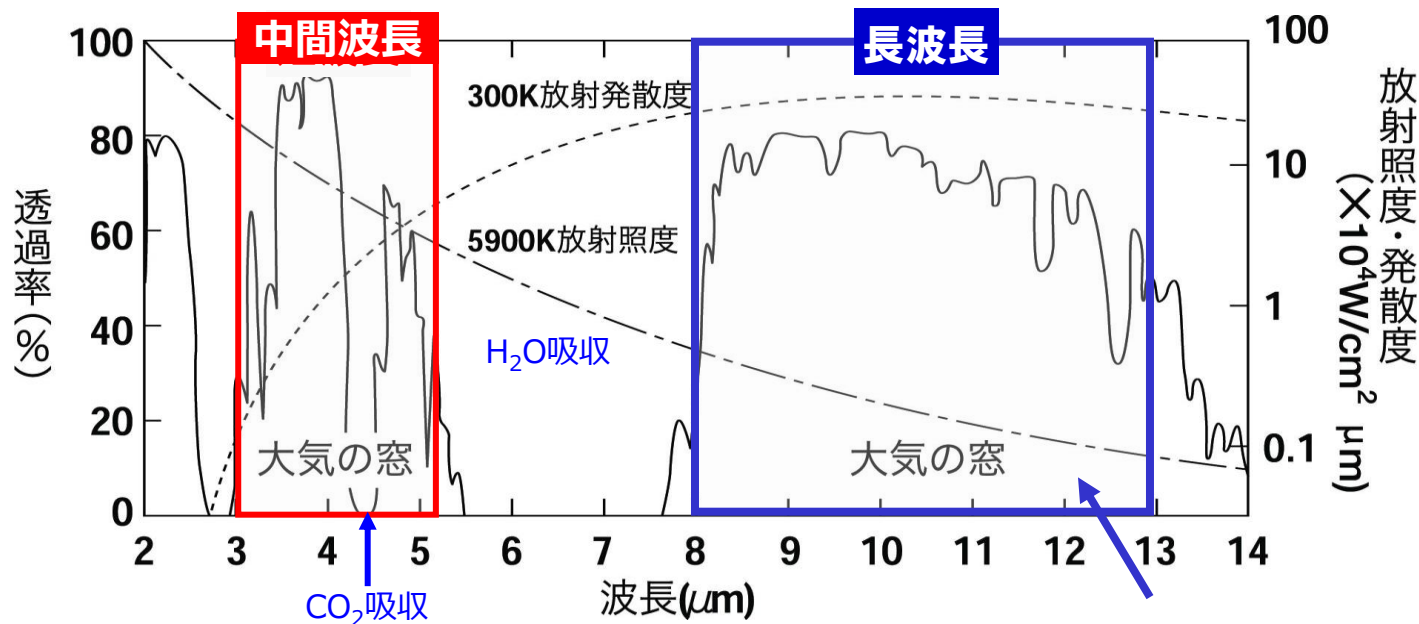


伝搬路の特性

伝播経路の特性：吸収透過

1. 大気中を通過する赤外線吸収：大気の透過特性

- ◆ 水蒸気 (H_2O)、炭酸ガス (CO_2)、オゾン (O_3)、一酸化炭素 (CO)、亜酸化窒素 (N_2O)、メタン (CH_4) などがある。
- ◆ 3～5 μm または8～12 μm がその波長で、一般にこの波長帯を“**大気の窓**”と呼ぶ。



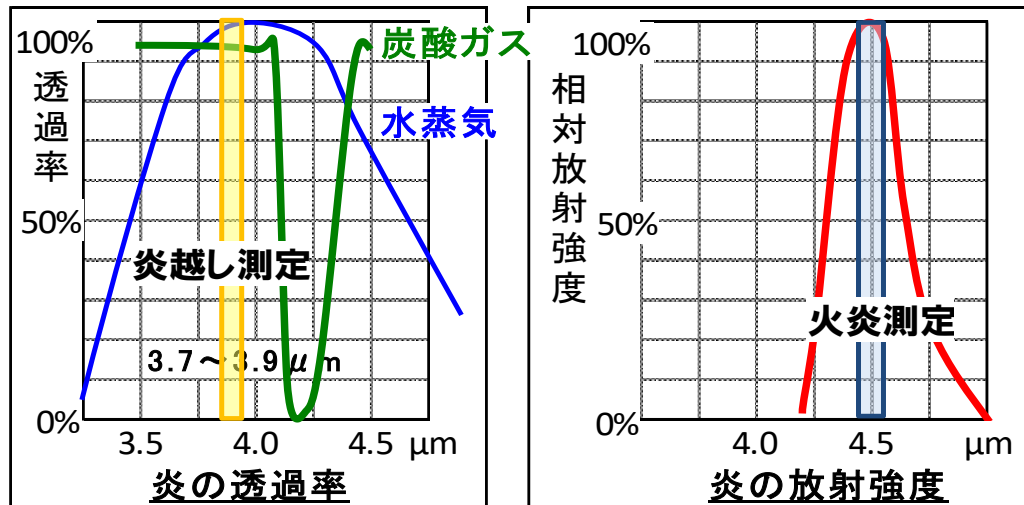
◆ 対策

- 高透過率波長を選択
- 赤外線カメラ機能の距離補正（距離，湿度，環境温度）を使用

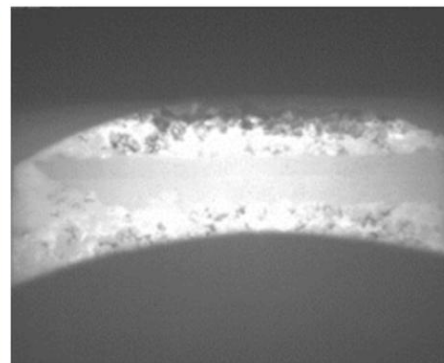
太陽光エネルギーが小さく、反射の影響を抑えることが出来る

◆ 高透過率波長を選択

- 火炎測定フィルタと火炎除去フィルタ



炉内監視：可視画像



炎越し赤外線(3.9μ)画像

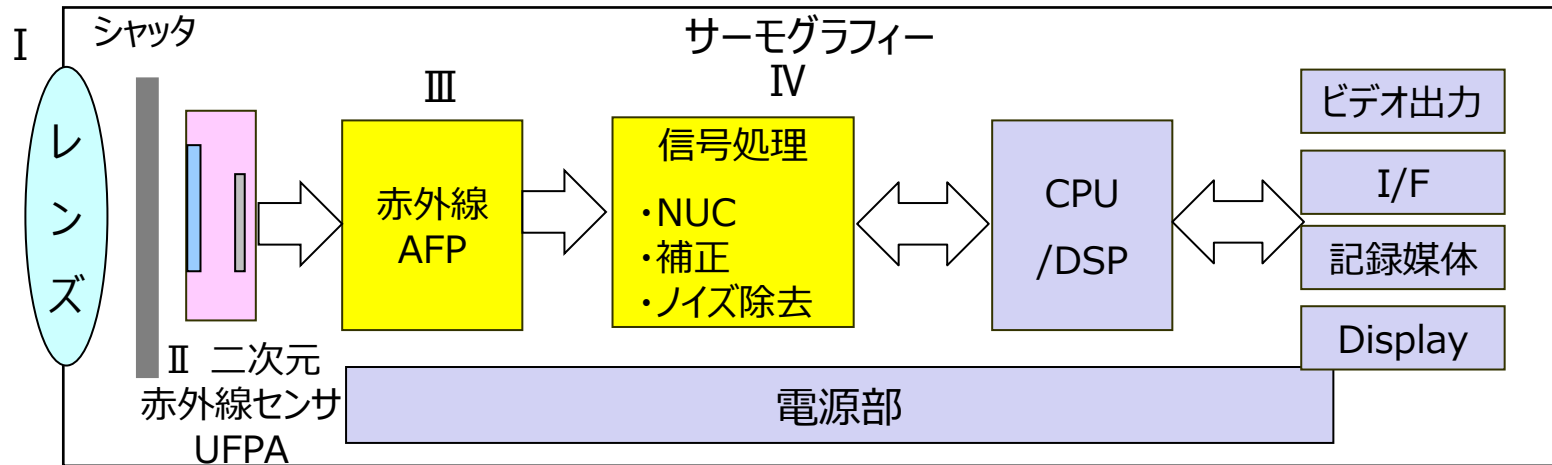
資料提供：(株)ビジョンセンシング

サーモグラフィの構造

サーモグラフィの構成

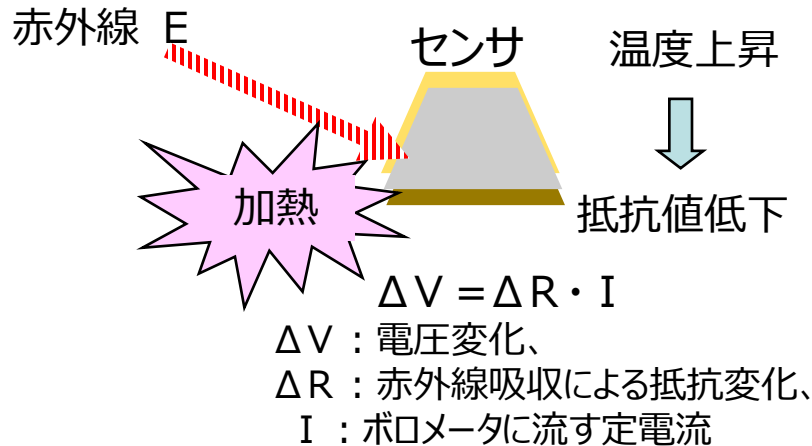
◆ 赤外線カメラの構成

- I レンズ : 入射光を赤外線センサ面に集光/結像する
- II 赤外線センサ : 入射光に対応した電気信号に変換する
- III 赤外線AFP : 赤外線センサに駆動信号を供給し、センサから信号を最適化する
- IV 信号処理部 : 赤外線信号を画像化する

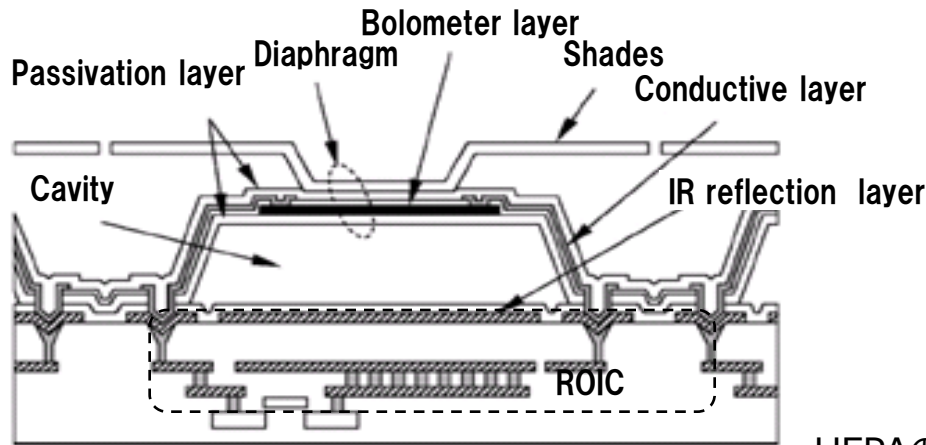


赤外線センサ UFPA : Uncooled Focal Plane Array

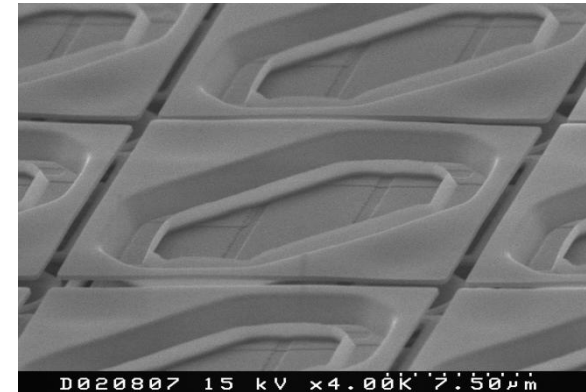
◆ ボロメータの動作（熱型検出器で代表的な赤外線センサ）



- ① 赤外線が赤外線センサに入射
- ② センサが温度上昇し抵抗値が低下
 - ・ (熱時定数)^{-1/2} ∝ (感度)
 - ・ 抵抗値の変化量は、センサ温度に依存する
- ③ 抵抗値変化を電位信号（電圧）として読出



UFPAの構造

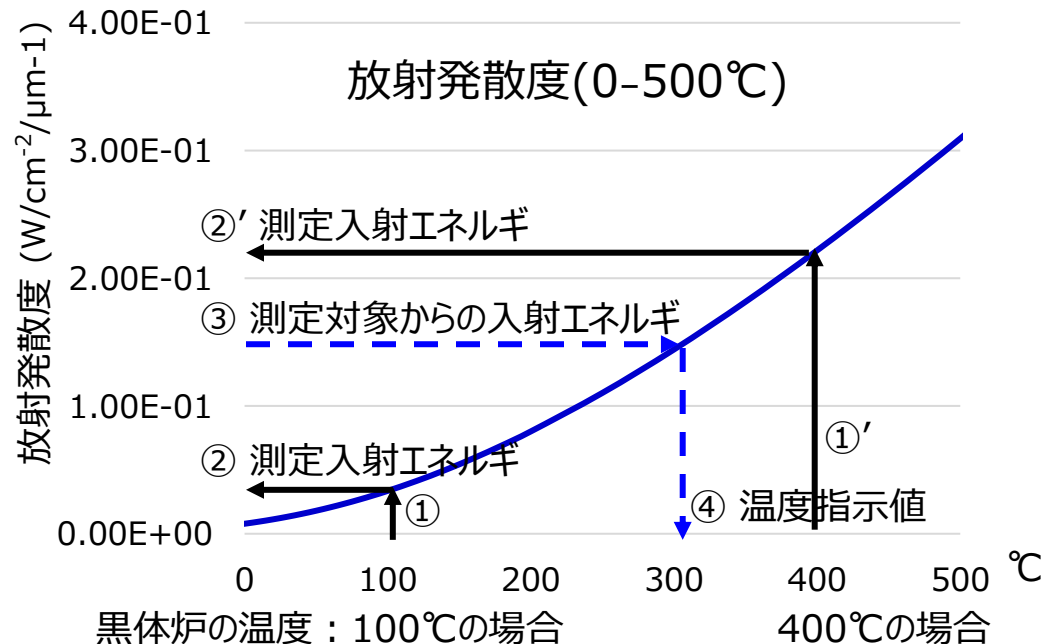


New thermally isolated pixel structure for high resolution 640x480 uncooled infrared focal plane arrays,
Optical Engineering 45_1_, 014001 _January 2006、NEC Corporation Guidance and Electro-Optics Division, Shigeru Tohyama他,

温度校正 黒体による温度目盛付け

温度校正の原理： 黒体炉(基準)の温度と測定される赤外線エネルギーを紐づける

- 1)黒体炉①を測定したときの入射エネルギー(赤外線センサの出力)②を測定する。
- 2)黒体炉①'を測定したときの入射エネルギー(赤外線センサの出力)②'を測定する。
- 3)黒体温度①、①'の測定される入射エネルギー②、②'との関係で、プランクの式から計算される入射エネルギーと温度の関係を比例計算で実測値(①, ②)、(①', ②')に合わせこむ
- 4)上記3)で求めた関係式より、③実測時の入射エネルギーを④温度値に変換する



温度指示値補正 环境温度ドリフト補正

光路中の部品は赤外線放射し、背景のイズとなる

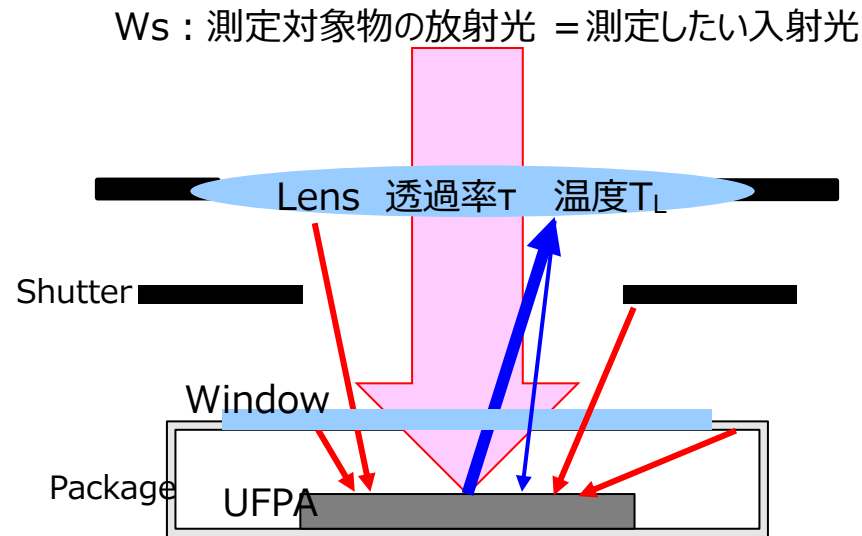
1. 測定したい入射光 W_s に背景放射光(外乱)が加わり、入射される赤外エネルギー W は、

$$W = \text{対象物からの赤外線放射} + \text{背景放射(外乱)} - \text{センサ面の反射}$$

2. 背景放射補正

背景放射光もプランク法則に従い、その量は背景物の温度に依存する

⇒ 背景温度ごとに、背景放射補正(オフセット補正)が必要



サーモグラフィの変遷

サーモグラフィの変遷

赤外線センサ

1次元センサ
Arガス、LN₂冷却 機械走査

1次元センサ
スターリング冷却
機械走査

2次元センサ
スターリング冷却
電子走査

2次元センサ スターリング冷却
InSb、MCT、QWIP、T2SL 長波長/2波長

2次元センサ 非冷却
マイクロボロメータ 低価格・軽量小型

非冷却・冷却 FPA赤外線センサ+ROIC

【改善】1. 低価格 2. 軽量・小型
3. 中速画像更新 3. 高画質

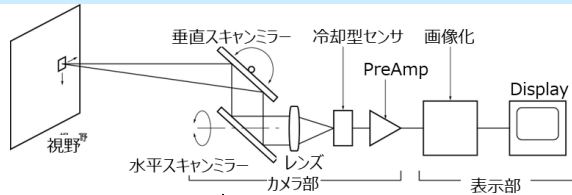
冷却型FPA赤外線センサ+ROIC

【改善】1. 高速画像更新 2. 高画質

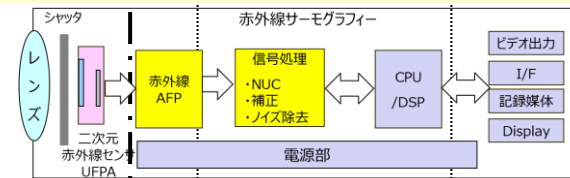
【課題】1. 高価格 2. 装置が中・重

サーモグラフィ(製品)

冷却型1~10素子赤外線センサ+センサミラースキャン



【課題】1. 装置が大・重 2. 低速画像更新 3. 低画質 4 高価格



1960

1970

1980

1990

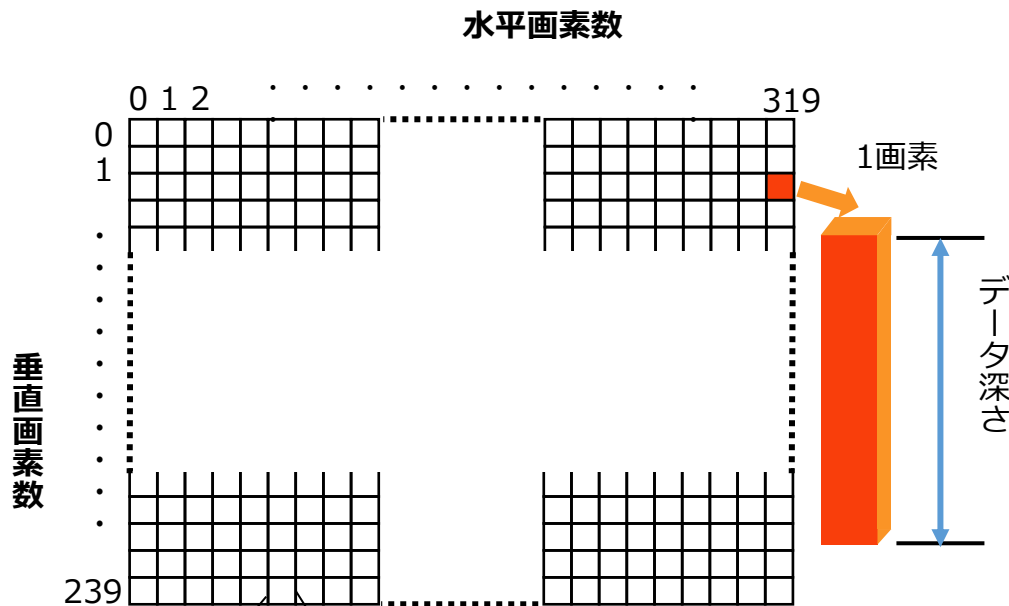
2000

2010

2020

資料提供：フリアシステムジャパン(株)、(株)ビジョンセンシング、(一社)日本赤外線サーモグラフィ協会

赤外線センサ画素配列と画像

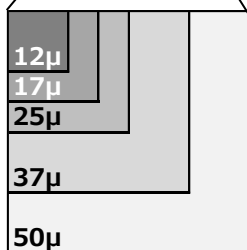


温度分布画像：
画素単位に温度別に色付け



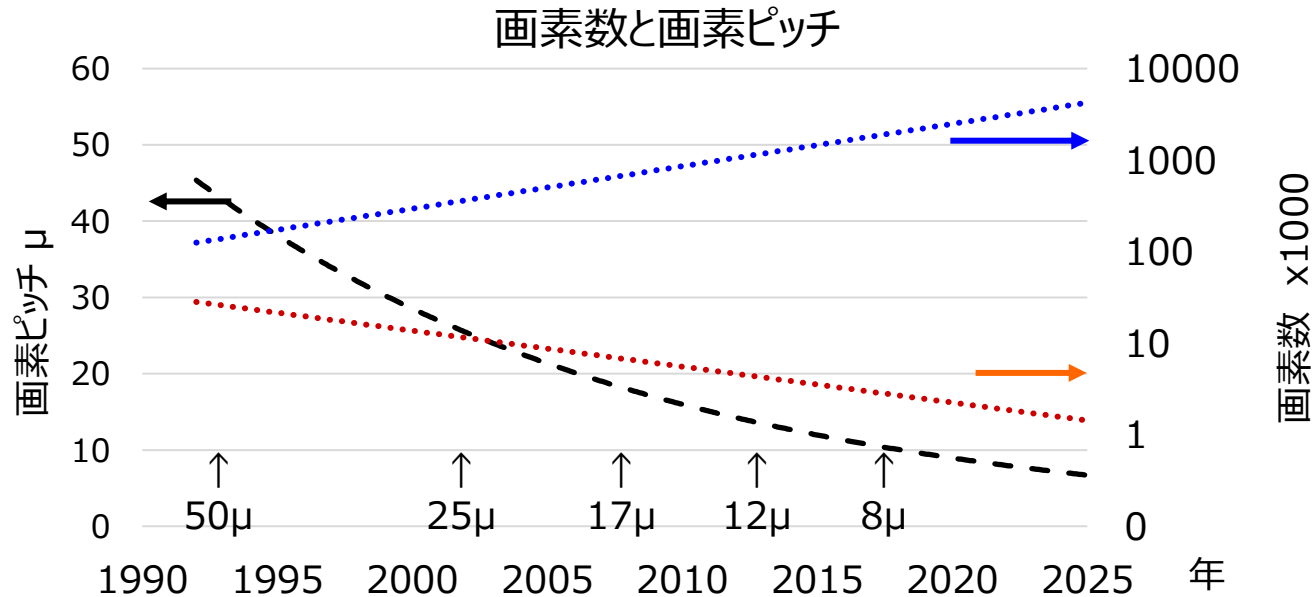
赤外線センサ画素サイズ

1992年 50 μ 2001年 25 μ → 2010年 12 μ → 2015年 8 μ



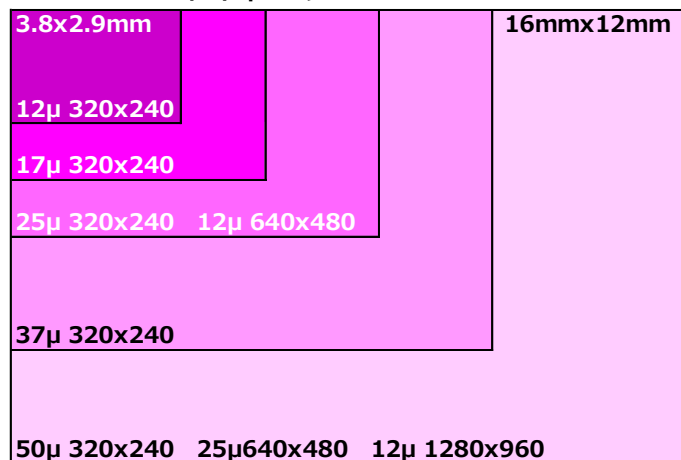
資料提供：（一社）日本赤外線サーモグラフィ協会

UFPA画素ピッチと画素数の変遷



資料提供：元 立命館大学教授 木股 雅章 先生

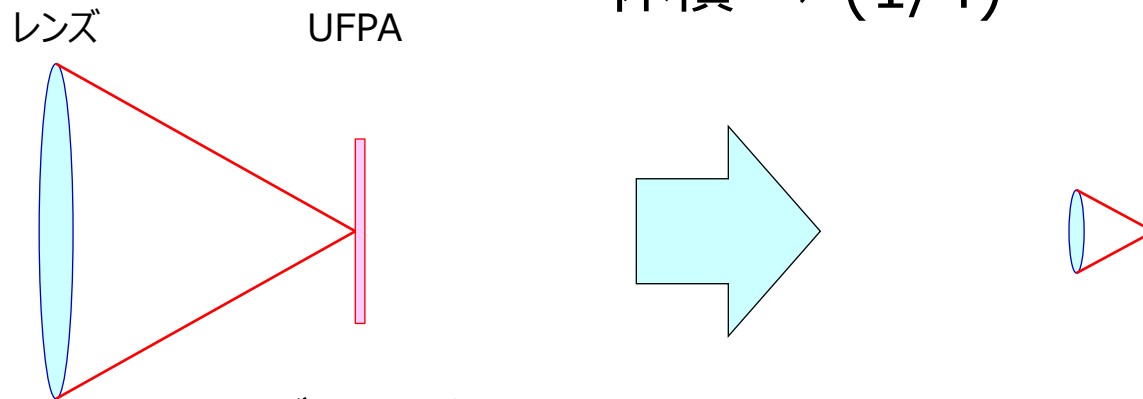
センサの画素ピッチとセンサのサイズ



- ◆ サーマグラフィは、新しいセンサ発売から3年程度後に、搭載した製品が市場投入される
- ◆ 12μ以降は、サーモの製品化が進んでいない
- ◆ 17μの製品も計測して販売されている

UFPA画素ピッチと画素数の変遷

センサピッチが1/4、相似形で全てが1/4となる
体積 $\Rightarrow (1/4)^3$



サーモグラフィが小形軽量、性能向上

◆ 熱容量：小 $\Rightarrow$ 熱平衡到達時間：短

◆ 構成部品間の温度差：小 $\Rightarrow$ 背景放射補正の精度：高

【サーモグラフィに使われるセンサ】

以上要求に応じて、センサーの高画素化は進む一方、現状サーモグラフィは、画素ピッチ17～12 μ 、画素数160x120 ～ 640x480が多く使われている。

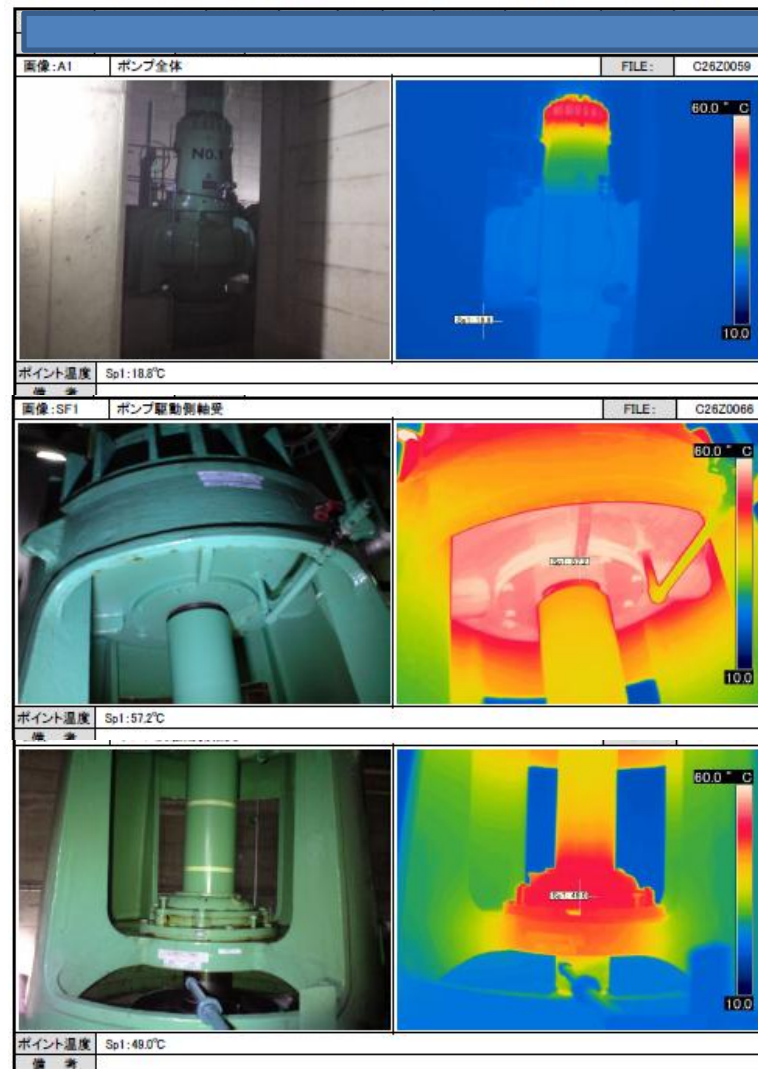
(求められる分解能/形状(大きさ)/質量/価格から選択されている)

アプリケーション：機械設備診断

診断事例：大型斜流ポンプ軸受

設備番号	310010979	機器名称	No.1放流ポンプ	
負荷電流値	—	機器仕様	計測時 パラメータ	
	—			
	—			
備 考	ポンプ全体は、周囲の温度分布状況把握及び零負荷時温度の抽出を目的にデータ採取を行っている。			
測定機器情報	メーカー名	FLIR SYSTEMS,INC	測定機器	SC660

			評価年月日		2019年08月13日		評価者		山田 浩文	
取得データ 評価 (絶対評価)	記号	測定箇所	位置	測定値	零負荷	上昇値	判定	管理基準(上昇限度)	管理基準(上昇限度)	
	A	ポンプ全体	A1				—	限界	限界	
			A2				—	注意	注意	
	SF	ポンプ駆動側軸受 JIS B8301	SF1	57.2℃	18.8℃	38.4K	注意	75℃	限界 40K	
			SF2	57.4℃	18.8℃	38.6K	注意	70℃	注意 35K	
	SR	ポンプ反駆動側軸受 JIS B8301	SR1	49.0℃	18.8℃	30.2K	注意	75℃	限界 40K	
			SR2	49.3℃	18.8℃	30.5K	注意	70℃	注意 35K	
							—	監視 65℃	監視 30K	
絶対評価	ポンプ駆動側軸受が管理基準値(温度上昇限度:注意値)を超えている。 ポンプ反駆動側軸受が管理基準値(温度上昇限度:監視強化値)を超えている。 (詳細解析は絶対評価報告書を参照)							判定 注意		
	ポンプ反駆動側軸受が相互評価基準値を超えている。 ポンプ駆動側軸受は若干の温度上昇が確認されるが許容範囲内である。 (詳細解析は相互評価報告書を参照)							判定 監視 強化		
相互評価										
相対評価	初期データ採取。							判定 —		
総合評価	所見	当該ポンプ軸受けの温度値、温度上昇値ともにNo.2と比較しても高い値である。 ポンプ回転数483rpmに対しても高い温度である。 また、減速機～ポンプにかけて潤滑油の漏洩による油漬が多く確認される。 その他の部位の発熱パターンに不具合は見受けられず、正常と判断する。					判定 注意			
評価基準	絶対評価基準			相互評価基準			相対評価基準			
	高熱	異常許容温度(℃)以下	温度上昇限度(K)以下	高熱	異常許容温度(℃)以下	温度上昇限度(K)以下	高熱	異常許容温度(℃)以下	温度上昇限度(K)以下	
	注意	異常許容温度(℃)以下	温度上昇限度(K)以下	注意	異常許容温度(℃)以下	温度上昇限度(K)以下	注意	異常許容温度(℃)以下	温度上昇限度(K)以下	
	監視	異常許容温度(℃)以下	温度上昇限度(K)以下	監視	異常許容温度(℃)以下	温度上昇限度(K)以下	監視	異常許容温度(℃)以下	温度上昇限度(K)以下	
	正常	異常許容温度(℃)以下	温度上昇限度(K)以下	正常	異常許容温度(℃)以下	温度上昇限度(K)以下	正常	異常許容温度(℃)以下	温度上昇限度(K)以下	



資料提供：株式会社サーモグラフィ

アプリケーション：電気設備診断

電気設備点検

全体の撮影で発熱個所を発見



熱画像データ No.1



近接して更に詳細の情報を取得



熱画像データ No.2



目的：工場内設備調査業務

内容：赤外線カメラを使用して工場内電気設備の状態データを採取し、その劣化状況及び不具合状態の調査、診断を行った。

実施日：2011年12月

使用機器：FLIR社製 SC660

調査結果

測定箇所：高圧受電盤

対象機器：LRS(高圧交流負荷開閉器)

発熱部位：R相1次側短絡ヒューズクラップ部

発熱箇所温度：40.0度

原因：短絡ヒューズクラップの接触抵抗増加による発熱と判断します。

電気設備点検

全体の撮影で発熱個所を発見



熱画像データ No.9



近接して更に詳細の情報を取得



熱画像データ No.10



目的：工場内設備調査業務

内容：赤外線カメラを使用して工場内電気設備の状態データを採取し、その劣化状況及び不具合状態の調査、診断を行った。

実施日：2012年2月

使用機器：FLIR社製 SC660

調査結果

測定箇所：設備操作盤

対象機器：MCCB(配電遮断器)

発熱部位：S相1次側端子接続部

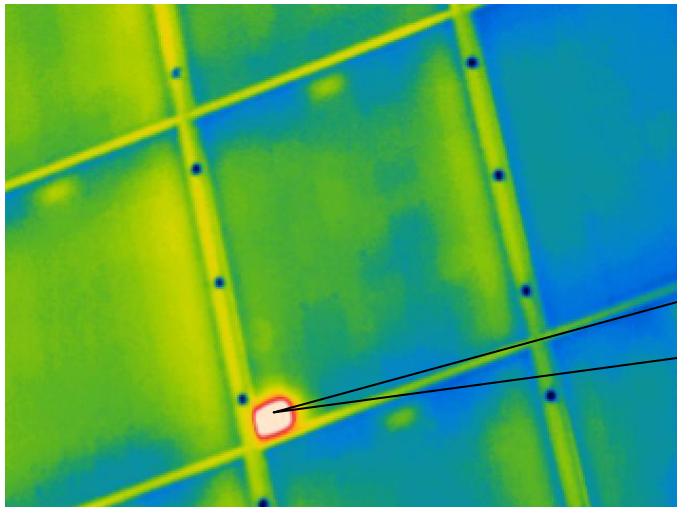
発熱箇所温度：66.9℃

負荷状況：定格200A R相42A, S相44A, T相43A

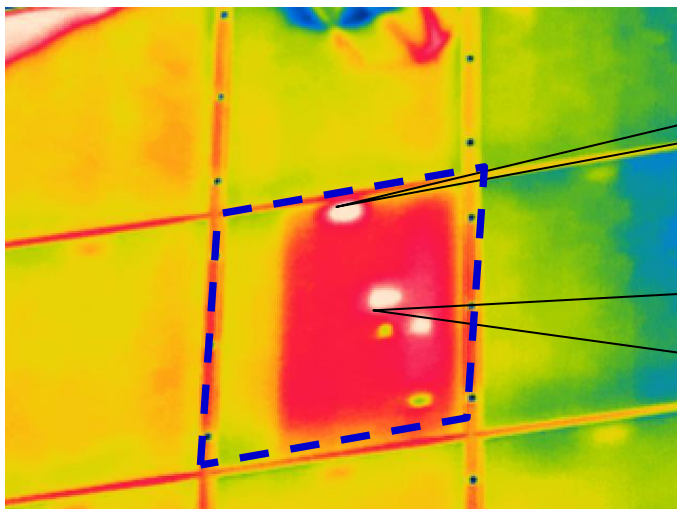
原因：当該機器の負荷バランスに問題は無く、S相1次側端子接続部の接触抵抗増加による発熱と判断します。尚、負荷電流62Aにて100℃を超えると推測されます。

アプリケーション：ソーラー設備診断 **A³IRTec**

シリコン結晶型 ソーラパネル



劣化したセル
モジュールのバイパスは起こっていない
モジュールの発電能力が数%低下している

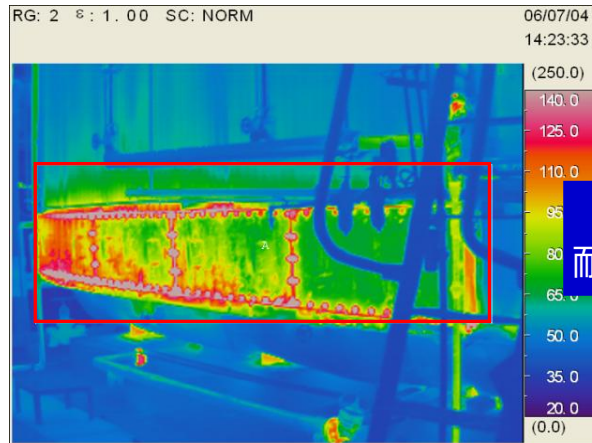


バイパスダイオード動作発熱

複数の劣化したセル
モジュールのバイパスが起きている（サブストリング 3 列）
ストリングの発電能力が数%低下している

アプリケーション：熱損失測定

熱損失の測定：省エネルギー、CO₂ガス排出の低減



改修：
耐火煉瓦交換



領域内の総放散熱量	1501.685kcal/hr
領域内の実熱損失量	1122.565kcal/hr

領域内の総放散熱量	1184.863kcal/hr
領域内の実熱損失量	796.685kcal/hr

改修前の燃料の損失

LPGの発熱量	11992.00kcal/kg
熱効率（推定）	80.00%
1時間あたりのLPGロス	0.1170kg/hr (1,025kg/y)

改修後の燃料の損失

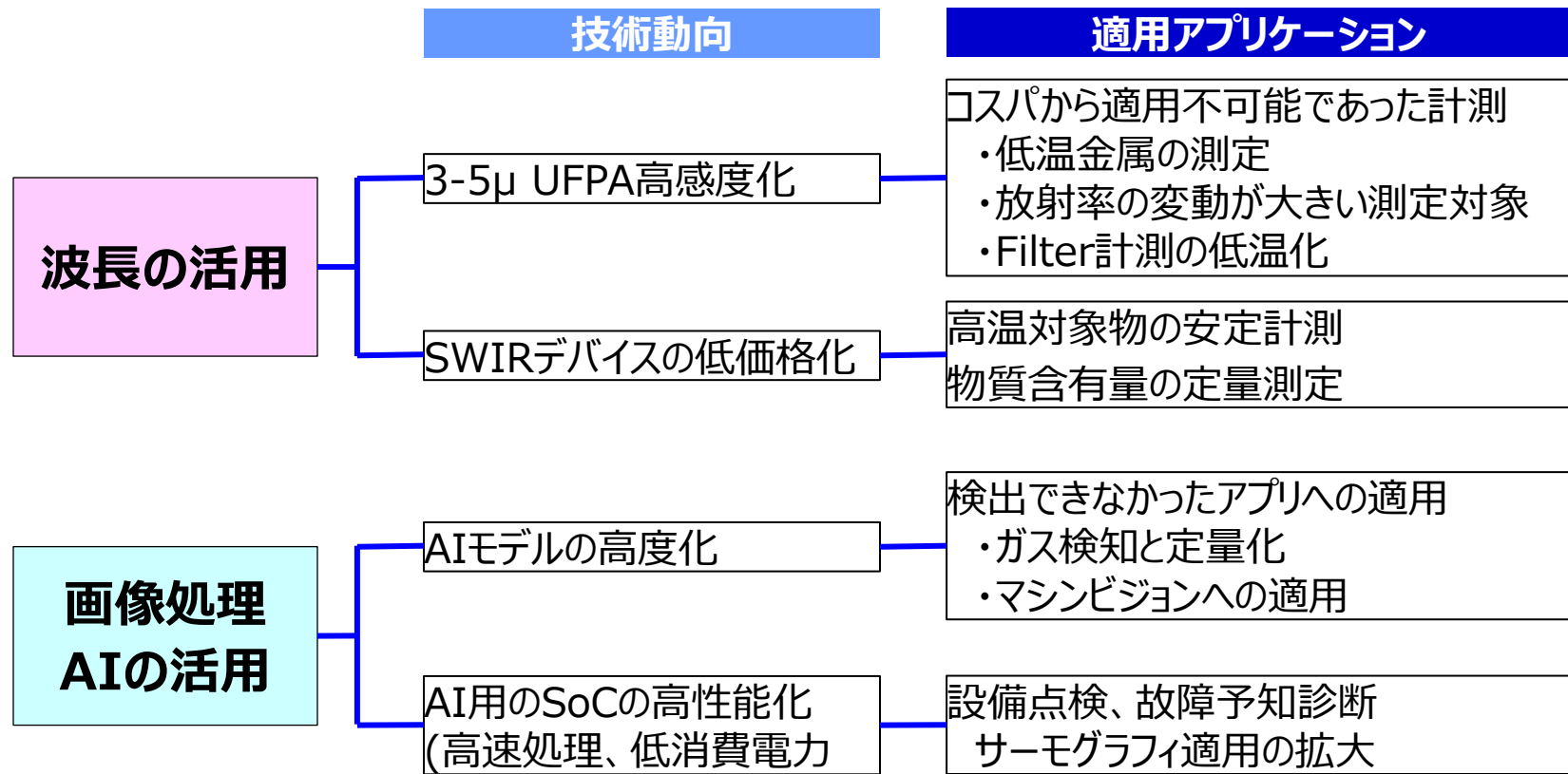
LPGの発熱量	11992.00kcal/kg
熱効率（推定）	80.00%
1時間あたりのLPGロス	0.0830 kg/hr (727kg/y)

LPG原料価格：約700 \$ / t

サーモグラフィの今後

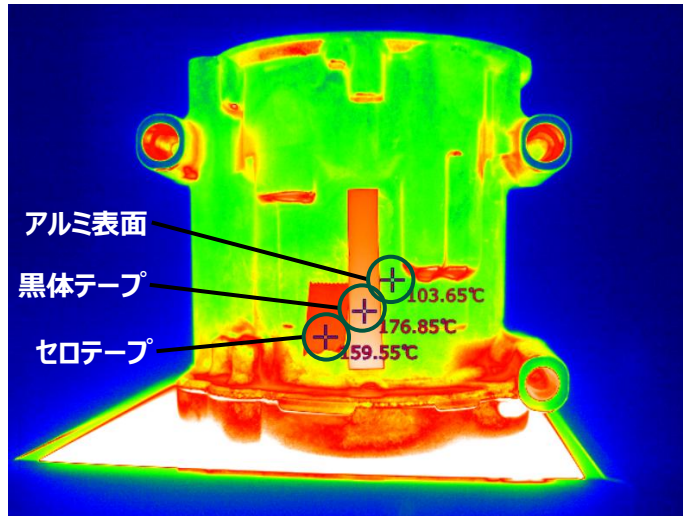
サーモグラフィの今後の展開(過去の変遷と同様に)

赤外線カメラの高性能化・高機能化が先行 ⇒ サーモグラフィに適用：良いところ取り
(サーモグラフィ検討の範囲を温度計測だけではなく、定量化測定に拡大して検討)



サーモグラフィの今後

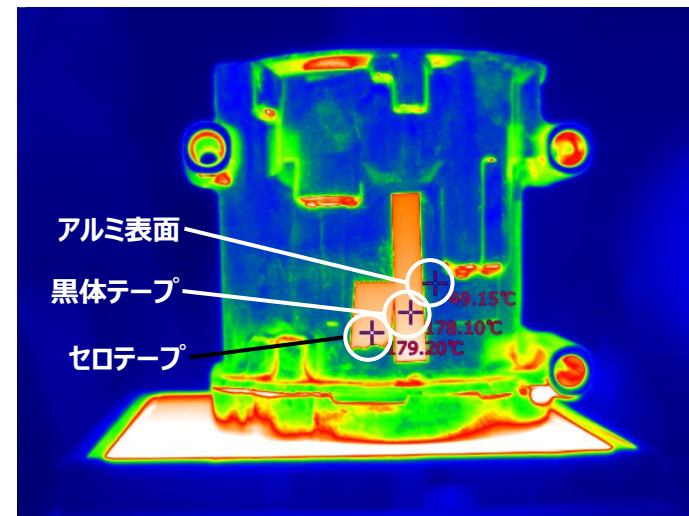
3-5μサーモグラフィ



	指示温度℃
アルミ表面	103.7※
黒体テープ	176.9

実測放射率 : 0.28

従来品8-13μ



	指示温度℃
アルミ表面	49.2※
黒体テープ	178.1

実測放射率 : 0.13

誤差
<

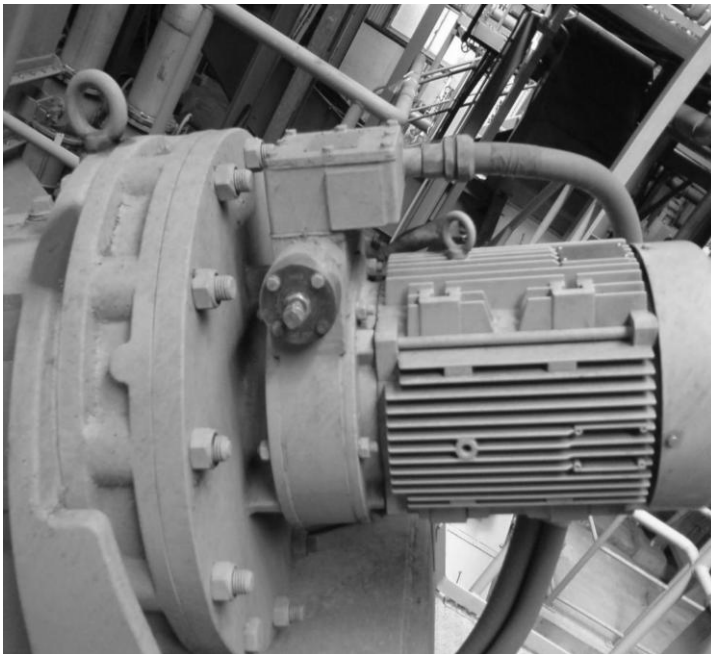
放射率
>

	鉄		アルミ	
測定波長	3-5μ	8-12μ	3-5μ	8-12μ
平均放射率	0.16	0.08	0.14	0.04
放射率変化の影響度	5.8	1	10.2	1

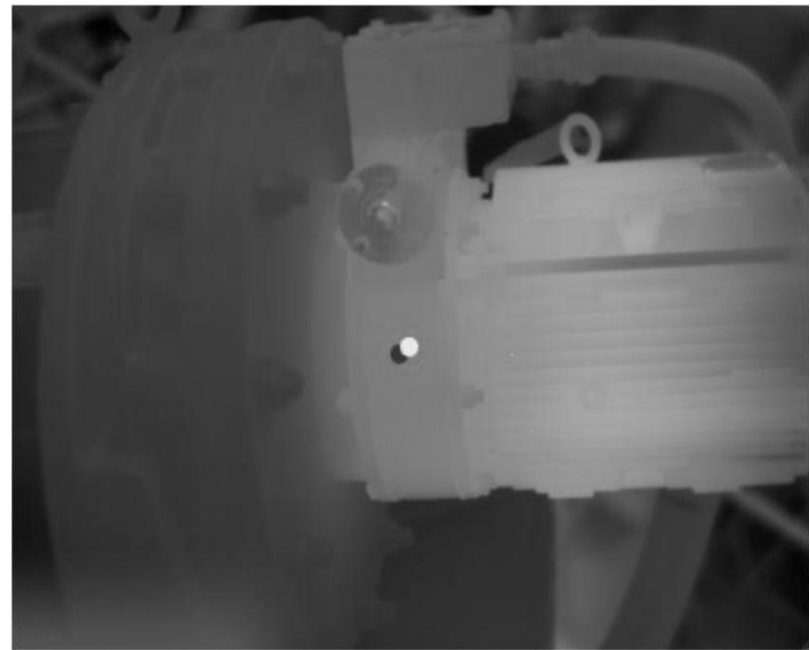
放射率による温度指示誤差

- ・鉄の場合 約1/6
- ・アルミの場合 約1/10

AIによる測定点の指定例



可視画像



サーモグラフィ

白丸： AIが指定した測定点

黒丸： 熟練技術者による測定指定点