

赤外線映像装置

目次

1. 自己紹介
2. 赤外線映像とは？
 - (1) 物体温度差 = 赤外線放射量の差の映像化
 - (2) Low Light Level TVとの比較
 - (3) 2次元画面を作る方法
 - (4) 可視光映像との比較
3. システムの構成要素
発光体、大気の窓、光学材料、検知器、冷却器
4. 評価方法
NETD, MTF
5. 応用分野
6. 最新事情、動向

自己紹介

名前: 別所 慶郷 (べっしょ よしさと) 1973年電子物理卒

学歴: 三重県津市生まれ、浜松鴨江小学校、横浜岩崎中学校、横浜翠嵐高校、(駿台予備校)を経て
1969年東工大入学、入学式は無し、バスケードの脇が校門、8月まで「寺子屋」にて授業。

職歴: 1973年 富士通入社、明石工場特殊機器技術部に配属。

前方監視型赤外線映像装置 (FLIR) の開発設計 (飛行機搭乗の初体験がP2J)

1979年 日本IBM入社、野洲工場プラスト技術部に配属 (宮本先輩のご指導が始まる)

1982年～83年ノースカロライナ州シャーロット工場に赴任(上司が米国人を初体験)

1990年～91年六本木の本社に赴任、役員補佐。(いわゆる「秘書」という職業を体験)

1992年 半導体の後工程(ウェーハテスタ、実装、最終出荷検査)の技術/製造を担当

2001年 有機高密度基板 (SLC: Surface Laminar Circuit) のビジネス企画を担当

2003年 京セラSLCテクノロジーズ株 (基板事業の京セラへの営業譲渡による新会社)に転入

2006年 取締役SLC事業部長、高密度基板の開発製造を担当 (アメンバー経営学を体験)

2010年 監査役 (内部統制システムとは?) を体験学習)

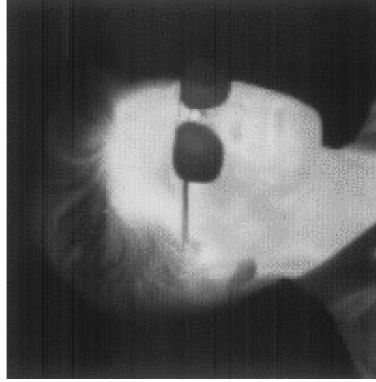
2015年3月 退職、現在に至る。(自由人を体験中)

スポーツ: 昔(ハンドボール、空手、バドミントン)、今(テニス、スイミング)

趣味: 昔(コントラクトブリッジ、ブラックジャック、釣り)、今(家庭菜園、麻雀)

赤外線映像とは？

物体温度差 = 赤外線放射量の強さの差を映像化する



出典：富士通HPより抜粋

常温物体はその表面から波長 **10 um** をピークとする赤外線を放射している。

赤外線の放射強度は温度が高いほど強い。
(絶対温度の4乗に比例する)

背景と比較してより強い放射はより白く、弱い放射はより黒くして放射強度の揺らぎ (パターン) を映像化する。

肌は温度が高いため白く見え、髪の毛は温度が低いいため黒く見える。耳たぶも少し温度が低い。

眼鏡は肌よりも温度が低いため黒く見える、いっともにガラスは肌からの赤外線を透過しないことが分かる。
(サングラスをかけているわけではない。。。)

赤外線映像とは？ L³ TVとの比較

Low Light Level TV



赤外線映像装置



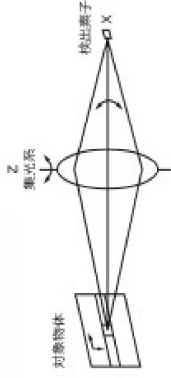
出典 FLIR Systems HP

僅かでも光が必要

光があたっていない人物がはっきりとみえる。

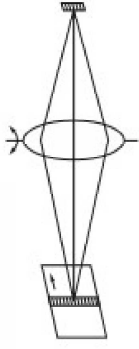
赤外線映像とは？ 二次元画面を作る方法

第1世代(単素子による走査)



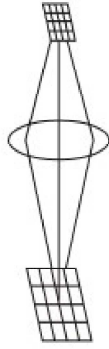
縦、横方向に機械走査することで2次元の画面を作る。
 フレーム枚数は1枚/秒程度で静止画がや々と撮れる。
 横方向だけ機械走査するものを飛行機に積んで下を見ながら縦方向は飛行機の進行としたものがあった。
DLIR (Down Looking InfraRed System)

第2世代(一次元アレイによる走査)



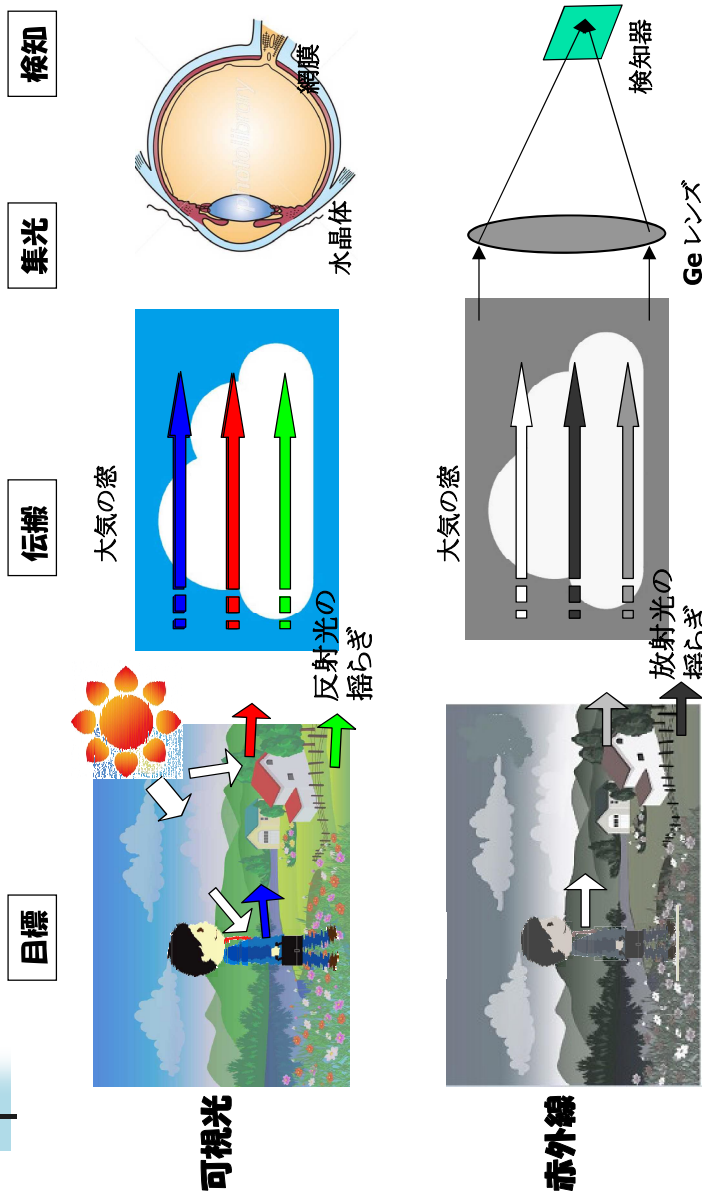
縦に一次元の検知器を並べ、横方向に機械走査すること
 で2次元の画面を作る。フレーム枚数は**30枚/秒**を達
 成することで初めて白黒テレビ同様の赤外線動画が撮
 れるようになった。下を向いて飛行機の進行を使うこと
 なく、前を向いていても2次元画像が得られることから第
 2世代から **FLIR (Forward Looking InfraRed System)** と呼ばれるようになった。

第3世代(二次元アレイ=フォーカルアレイ)



半導体技術の進歩により検知器は**2次元アレイ (FPA: Focal Plane Array)**となり機械走査系が消失。
 感度、分解能ともに飛躍的に改善。

赤外線映像とは？ 可視光映像との比較



発光体の放射特性 Black Body(黒体)

プランクの法則

黒体の単色放射能

$$E_{b\lambda}(\lambda, T) = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp[C_2/(\lambda T)] - 1} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})]$$

λ : 波長 [μm]

T : 温度 (絶対温度) [K]

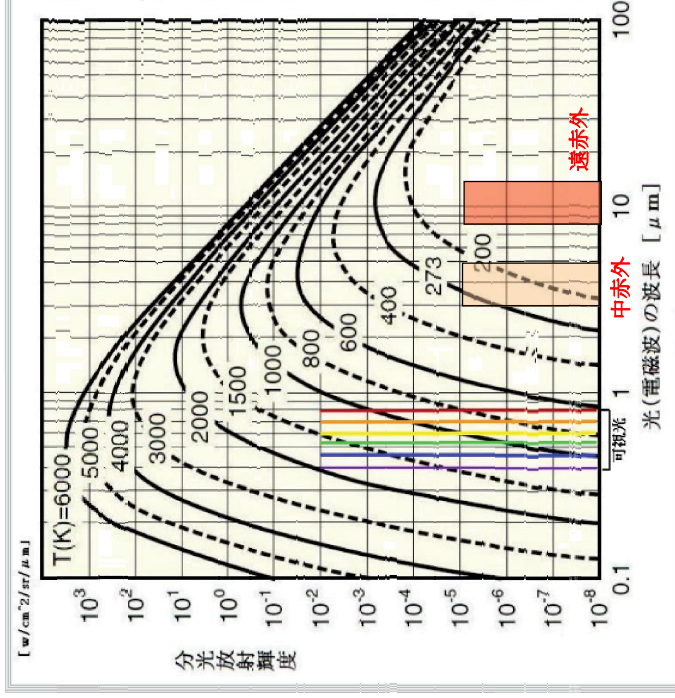
$C_1 = 3.743 \times 10^8 \quad [\text{W} \cdot \mu\text{m}^5/\text{m}^2]$

$C_2 = 1.439 \times 10^4 \quad [\mu\text{m} \cdot \text{K}]$

② スティュージェン・ボルツマンの法則

$$M = \sigma T^4 \quad [\text{W}/\text{m}^2]$$

$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \quad [\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4]$



出典 Fintech co ltd. HP より抜粋

Page 7

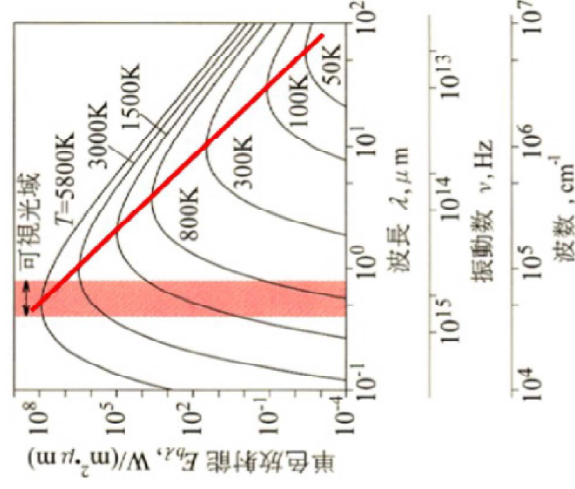
発光体の放射特性 Black Body(黒体)

ウィーンの変位則

黒体の単色放射能 $E_{b\lambda}$ が
最大となる波長 λ_{max}

$$\lambda_{max} T = 2897 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

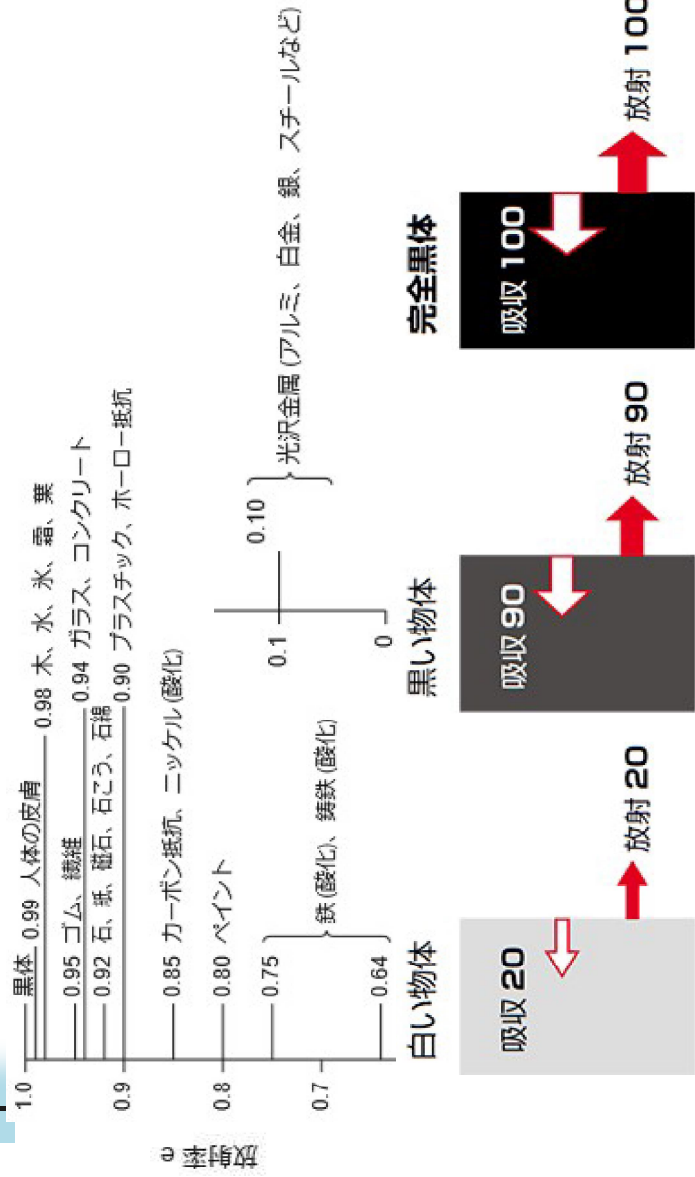
※ 室温では、 $\lambda = 10 \mu\text{m}$ の波長帯で
単色放射能が最大となる。



黒体の単色放射能の波長分布

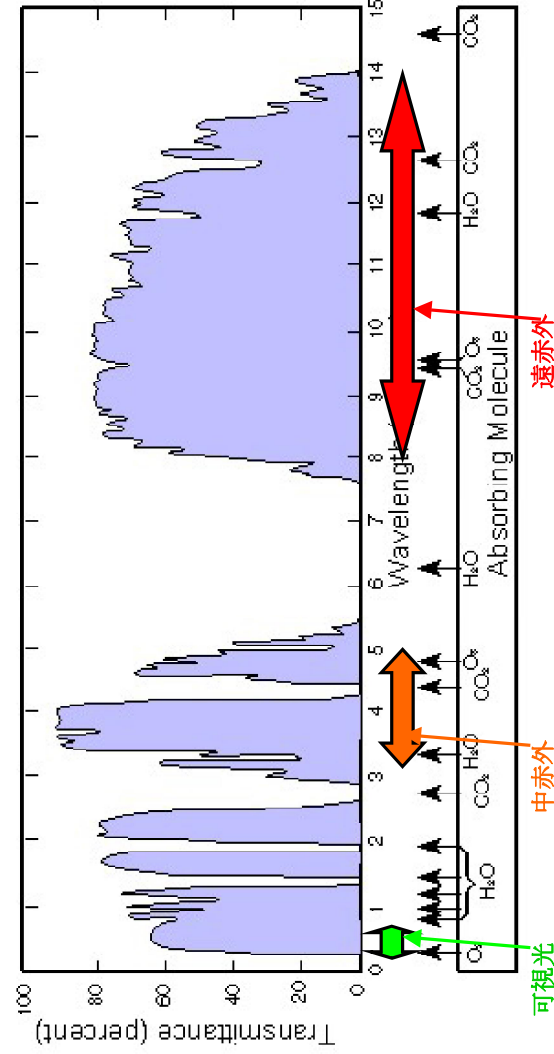
出典: 赤外線放射温度計の基礎 日本機械学会 熱工学部門講習会, 2009年7月29-30日 Page 8

発光体の放射特性 放射率



出典 「技術資料 赤外線検出素子の特性と使い方」. 浜松ホトニクス株式会社 Page 9

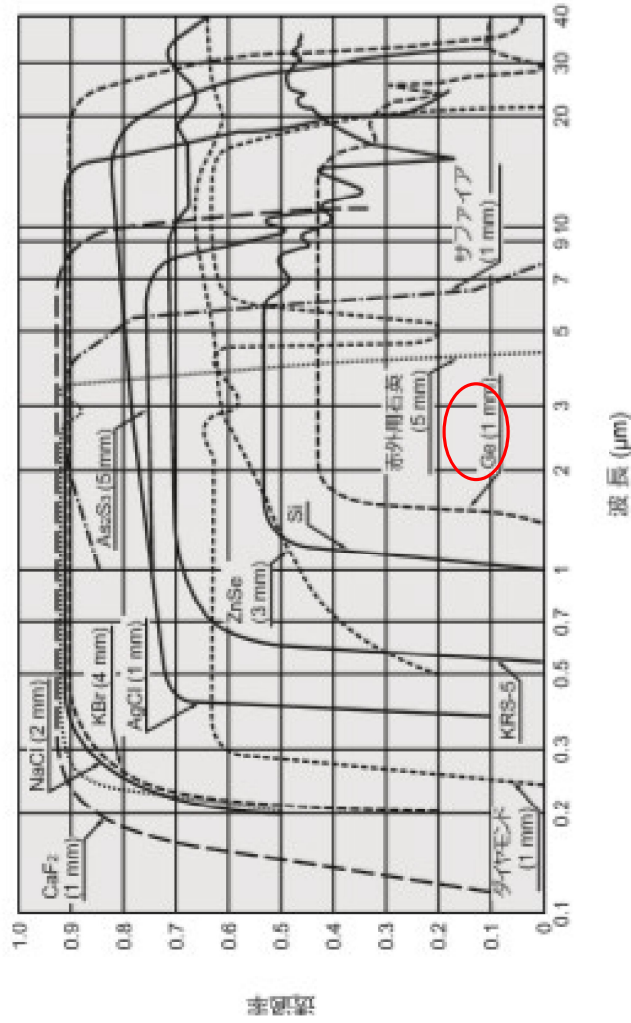
大気の窓



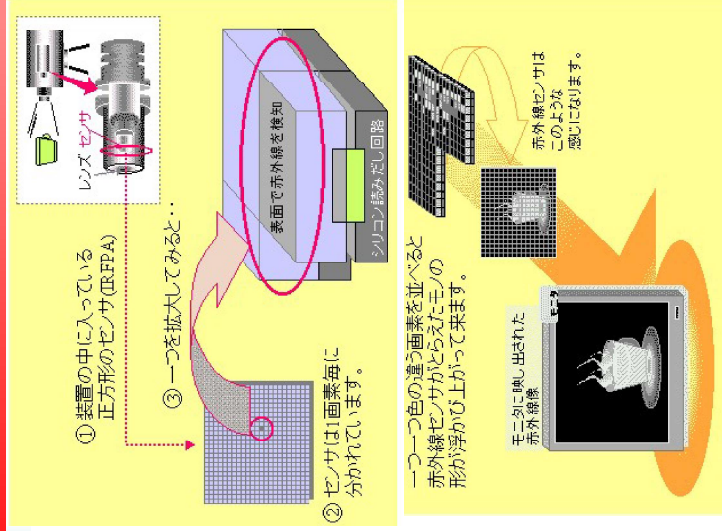
発光体の放射ピーク波長と大気の窓波長域が一致する。(自然の不思議？生命体への恩恵？)

太陽 $\lambda_p = 0.5\mu\text{m}$, 人物 (常温物体) $\lambda_p = 10\mu\text{m}$

光学材料の透過率



赤外線検知器

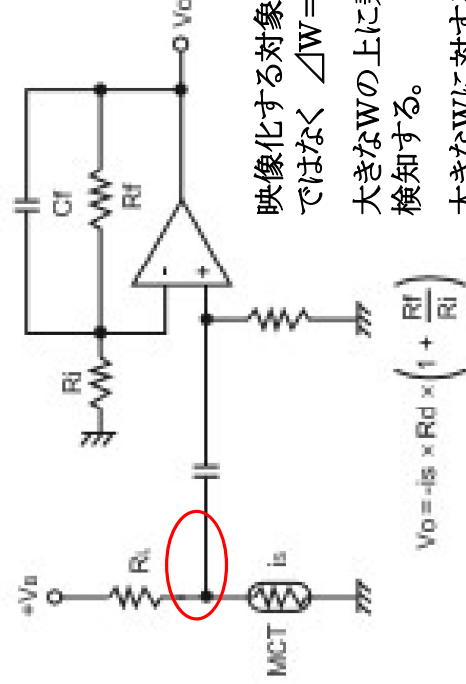


可視光映像装置との比較まとめ

発光体	大気の色	光学材料	検知器
太陽 6000°C λp=0.5um	0.3-1.3um	ガラス 水晶体	PD 網膜 (非冷却)
常温物体 300°C λp=10um	8-14um	Ge	HgCdTe (冷却)

検知器出力の増幅回路

図9-6] 動作回路例 (MCT光導電素子)



$$V_o = -i_s \times R_d \times \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right)$$

is: 信号電流
Rd: 素子の抵抗値

映像化する対象は $W = \sigma T^4$ という絶対強度ではなく $\Delta W = 4\sigma T^3 \Delta T$ という相対強度。大きなWの上に乗った小さなΔWの揺らぎを検知する。

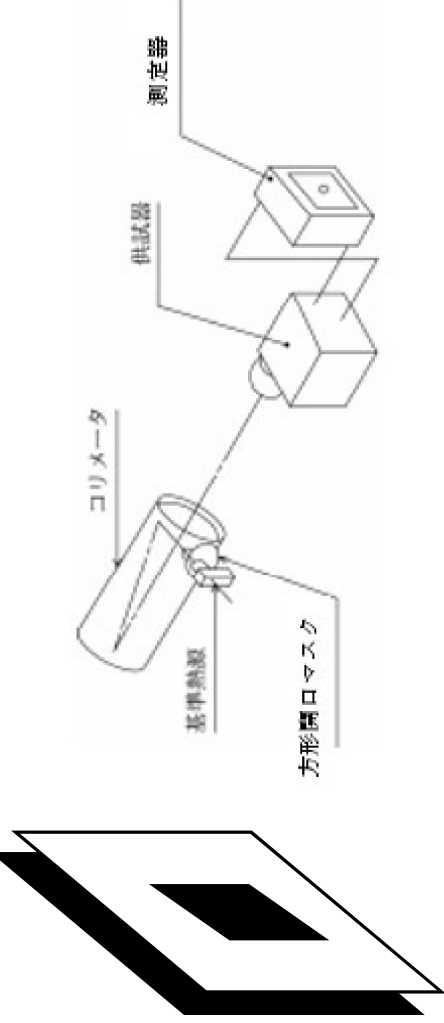
大きなWに対するバイアス電圧を各素子間で一定にすることは困難。。。交流結合が必要。

温度分解能:NETD

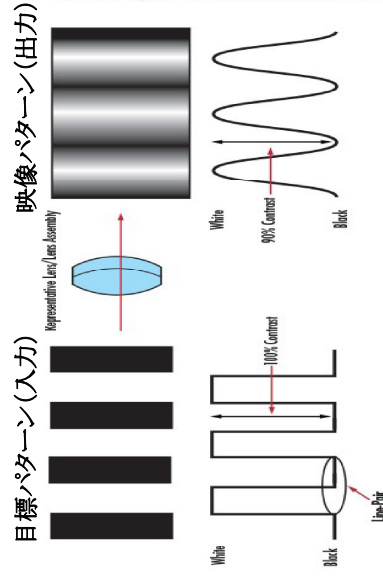
温度が異なる二つの十分に大きな目標を赤外線映像装置で見た時、装置のノイズレベルと同じ強さの信号を出すことができる目標の温度差。

NETD:Noise Equivalent Temperature Difference , 雑音等価温度差とも言う。

目標の放射率は100%、大気の透過率も100%として、映像装置自体の性能指数としている。十分に大きな目標を見ることで分解能の影響を排除した数値を得るようにしている。

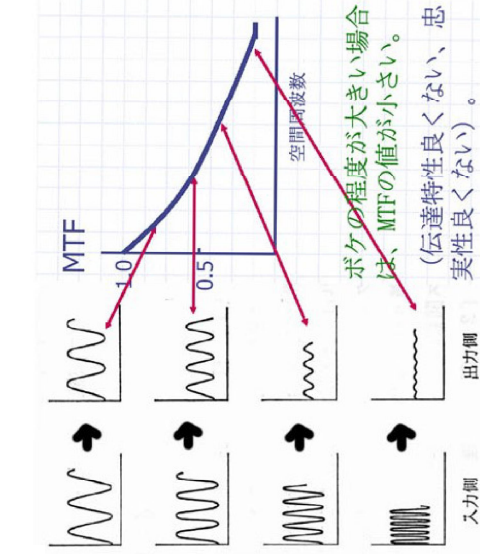


空間分解能:MTF



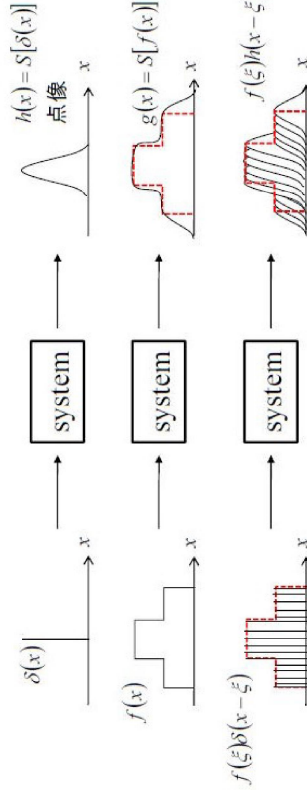
映像系は空間周波数に対して**Low Pass Filter**の特性を持つ。人間の眼も同様で大きいものは見えるが細かいものは見えにくい、非常に細かいものは見えなくなる。

目標の細かさ(空間周波数)を横軸にして、物体の明暗の強度と映像の明暗の強度の比を縦軸に取ったグラフを**MTF (Modulation Transfer Function)** 空間分解能 と、呼ぶ。



NETD=0.1℃という映像装置では、例えば **MTF=0.5**である細かさの物体の探知可能温度差は**0.2℃**となる。

物体と像の関係



$h(x)$ はPSF(点像広がり関数)と言われる。電気ですぐにわかるインパルス応答である。

物体を点の集合とした場合、**点の集合(和)の写像は点の写像の集合(和)になる。**

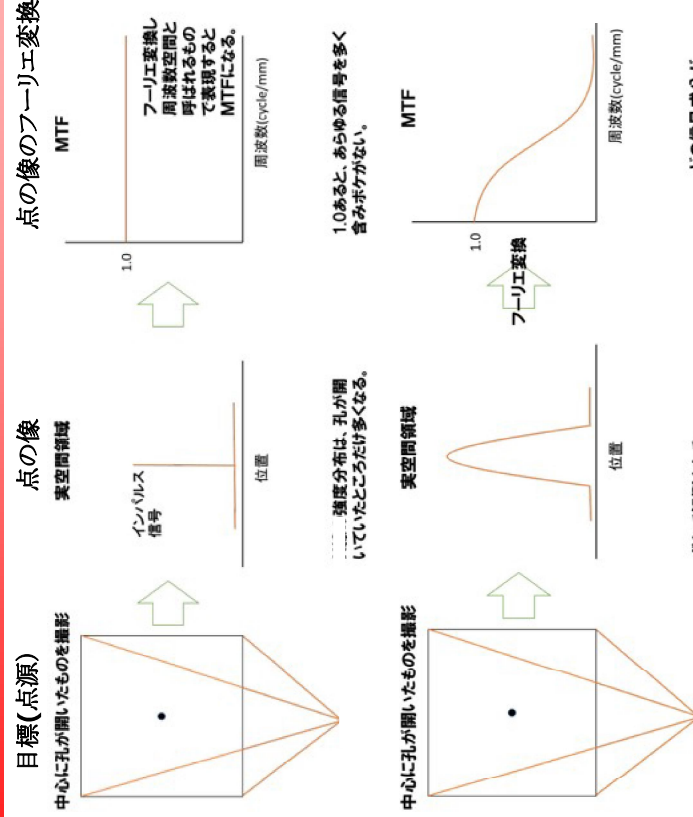
$g(x)$ のフーリエ変換を $G(u)$ 、 $f(x)$ のフーリエ変換を $F(u)$ 、 $h(x)$ のフーリエ変換を $H(u)$ とすれば
 $G(u) = F(u) \cdot H(u)$
 $H(u)$ は前ページにおけるMTFFに相当する。

すなわち像の周波数特性は物体の周波数特性に点像の周波数特性(MTF)をかけたものとして表される。

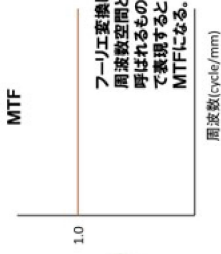
像 $g(x)$ は物体 $f(x)$ と点像広がり関数 $h(x)$ との**コンボリューション**になっている。

出典: 分かりやすい物理 HP <http://eulersformula822.toypark.in/> Page 19

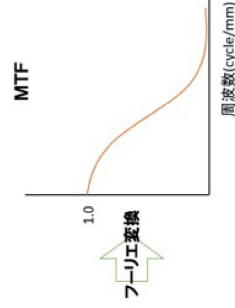
点源像とMTF



点の像のフーリエ変換



1.0あると、あらゆる信号を多く含むボケがない。

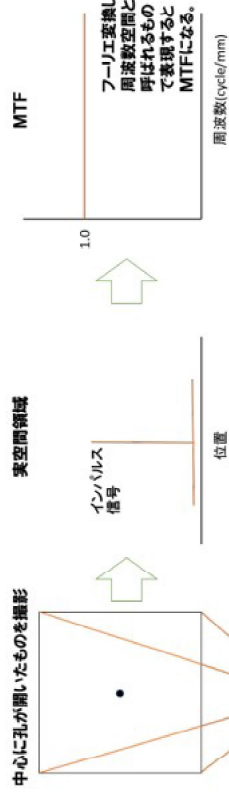


ボケて観測される。PSF(点広がり関数)と呼ばれる。

どの信号成分がどの程度減少したか

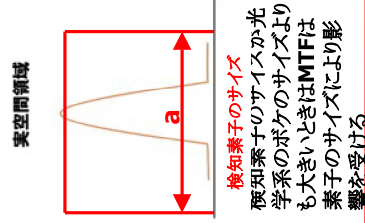
出典: ぎもんラボHP <http://rad-base.com/> Page 20

検知器サイズに起因するMTF



強度分布は、孔が開いていたところだけ多くなる。

中心に孔が開いたものを撮影



素子のサイズが a である時、Cut off 周波数は $1/a$ となる。
多素子化、高精細化は分解能改善に必須

出典: ざんろHP <http://rad-base.com/> Page21

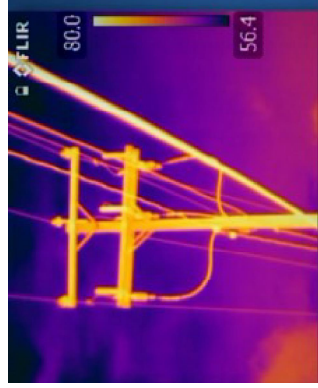
応用分野



FLIRの用途

- **捜索救難活動**
- 流域の温度や**野生動物**(狩猟動物)の生息地のモニタリング
- **エネルギー**損失の検出や**省エネルギー**のための断熱性の検証
- 軍用機における標的捕捉と追尾
- **計器飛行(IFR)**における**航空機**の先導
- 道路上での**塵**や他の車を運転者に警告
- 消防活動において**煙**や壁を透過して生存者を探す
- **森林**や水上における**捜索救難**任務
- **天然ガス**や他の**ガス**の漏れの検出
- **活火山**の監視
- **配電盤**などの機器内部における過熱部位の検出

应用分野：工業用途、防犯/警備



出典：FLIR Systems HP Page23

应用分野：医療用途

インフラアイ3000 (改正薬事法対応)

INFRA-EYE3000/赤外線サーモグラフィ装置(医療機器承認番号:21900BZX01126000)
 区分分類：管理医療機器 特定保守管理医療機器



二次元の赤外線センサーで高画質を実現!

【主要諸元】

測定温度範囲	0~70.4℃
赤外線検知器	二次元マイクログローブ (非冷却)
最小検知温度差	0.08℃
表示画素数	320×240ドット
撮像視野	水平 33度×垂直 24度
フレームタイム	1/60秒
制御表示部	汎用PC

(撮像部/制御表示部 分離型)

2008年度開発(～生産中～)
 製造元:富士通特種システム㈱ 販売元:日本光電工業㈱

应用分野：防衛用途



出典：日本航空宇宙工業会会報平成28年7月号 Page25

ヘリコプター搭載FLIR



出典：FLIR Systems HP Page26

最新装置の諸元



Star SAFIRE 380-HLDC

Long Range Targeting Performance in a Compact System

Introducing the Star SAFIRE 380-HLDC compact, high-definition, multisensor targeting system designed specifically for use on light rotorwing aircraft. The 380-HLDC provides an unmatched "SWaP-T" advantage – Size, Weight and Power plus true Targeting capabilities – in a sensor package tailored to give light attack helicopters the uncompromising Intelligence, Surveillance, Reconnaissance and Targeting (ISR&T) performance required to locate, identify, and engage targets at maximum range.

Specifications

THERMAL IMAGER	
Sensor type	1280 x 720 μ WIR FPA (standard) 640 x 512 μ WIR FPA (optional)
Resolution	720p/1080p HD and NTSC/PAL
Wavelength	3-5 μm response
FOVs	40° to 1.0° continuous zoom (with standard FPA)

出典： FLIR Systems HP Page27

赤外線検知器の最新動向

高性能製品（量子型：InSb, MCT, QWIP）

画素数	～ 1024 × 1024
雑音等価温度差	0.02 °C 程度
フレームレート	120 Hz（～ 640 × 512 pixel） 420 Hz（～ 320 × 256 pixel）

小型・軽量製品（熱型：非冷却マイクロボロメータ）

画素数	160 × 120 ～ 320 × 240
雑音等価温度差	0.1 °C 程度
フレームレート	8 ～ 30 Hz
重量	300 g ～
価格	100万円以下

非冷却検知器

MEMS技術による高精度

画像解像度が向上した非冷却赤外線イメージセンサ

Uncooled Infrared Radiation Image Sensor

表 1. 非冷却赤外線イメージセンサの基本仕様

Basic specifications of Toshiba Infrared image sensor

項目	基本仕様
画素ピッチ	22 μm
有効画素数	320 × 240画素
チップサイズ	8.5 × 8.5 mm
イメージエリアサイズ	7.04 × 5.26 mm
パッケージサイズ	16 × 16 × 1.75 mm
F値*	1.0
フレームレート	30フレーム/秒
NETD	0.25 K

*レンズの焦点距離を有効口径で割った値で、レンズの明るさを示す指標

NEC 抵抗ボロメータ

12μm

640x480 画素

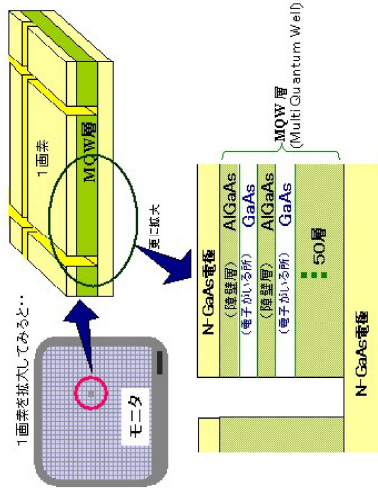
出典: 東芝HP 2010年

出典: OPTRONICS Online 2013年

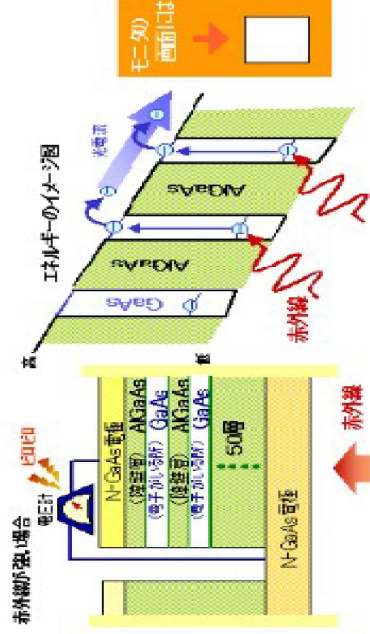
Page29

QWIP

(Quantum Well Infrared Photodetectors)



QWIPはバンドギャップの異なる半導体で障壁層と井戸層を形成し、井戸内に生じる量子準位間の光励起により赤外線を検出する。吸収波長は障壁層高さと井戸幅で調整する。



出典: 富士通 HP Page30

最新のNEWSから

日本経済新聞

個人の不正輸出、チエック困難 軍事転用可能品が流出

2018/1/6 12:22 | 日本経済新聞 電子版

警視庁が2017年11月に外為法違反(無許可輸出)容疑で書類送検した中国人留学生は「メーカーの完成品で米軍のものです。買いたい人を知りませんか」などと中国語のチャットアプリを使って転売先を探していた。

この米国製カメラは国土交通省のヘリに搭載されていた。設備更新を担当したメーカーが廃棄したが、処理を委託された業者から流出。最終的にネットオークションに出品された。定価は数千円だが、中国人留学生は約55万円で落札していた。

留学生の呼びかけに応じたのは中国・広州の軍事関連企業に勤める男性で、約250万円で購入したという。留学生は送り状の品目に規制対象外の「パノラマカメラ」と嘘を書き、男性が指定した香港へ航空便で送った。男性は赤外線カメラを中国に持ち込んだが、その後どう使われたかは分からないままだ。



Page31

使い方の最新動向：2波長比較



図5 ライターの火炎の画像^{①)}

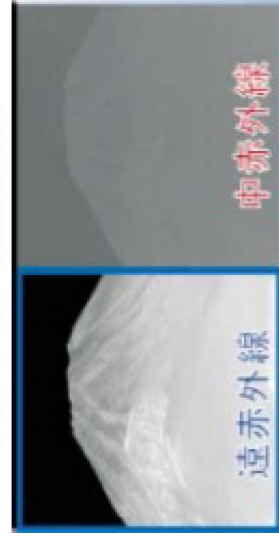


図6 夜間の富士山の画像^{②)}

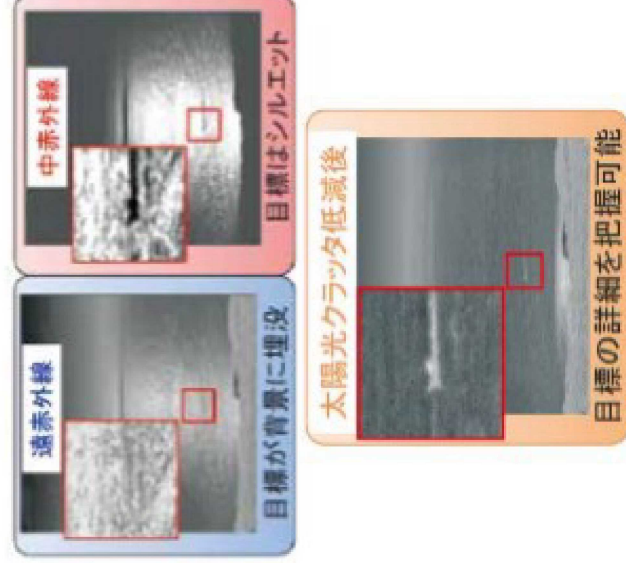


図8 太陽光クラッタ低減処理^{③)}