

赤外線技術資料

レベル★ : 初歩、入門
レベル★★ : 応用、調整、修理
レベル★★★ : 理論、設計

赤外線概要	★	IR01010
電磁波	★	IR02010
赤外線の発生	★	IR03010
熱放射に関する物理法則	★★★	IR04010
放射測定 of 諸量	★★★	IR05010
放射率	★	IR06010
放射率の波長依存性	★★	IR07010
反射率と透過率	★	IR08010
吸収	★★	IR09010
大気の透過	★★	IR10010
赤外線光源	★	IR10110
検出素子		
分類	★	IR21010
受光感度	★★★	IR21020
雑音等価電力と比検出能力	★★★	IR21030
熱型	★★	IR21040
量子型	★★	IR21050
赤外線関係参考資料	★★★	IR90010

赤外線概要

[歴史]

1800年にドイツ人の天文学者ハーシェル(Sir William Hershel)が、プリズムを通り抜けた太陽光のスペクトルがそれぞれどんな熱作用を持っているかを調べるため、寒暖計を紫から赤の方へ動かしていき、赤を通り過ぎて少しも光がない所に最も強い熱作用があることを発見し、これを赤外線(Infrared rays)と名づけました。熱作用が強いので熱線ともいわれます。

1853年になってフランスの物理学者アンペール(André-Marie Ampère)はこれが可視光線と同じ光波であることを示しました。その後1900年に至ってドイツの物理学者プランク(Max Karl Ernst Ludwig Planck)が黒体放射のスペクトル分布に関する量子論を確立し、赤外放射に対する理論の基礎が固まりました。

赤外線の利用面では1900年頃までは遅々たるものでしたが、1930年代にドイツで赤外線検出素子、光学材料、走査方式および赤外線の放出、大気中の減衰等の基礎的な研究が行われました。第二次大戦中にはドイツ、アメリカなどで軍需目的として海陸用の赤外線通信方式、航空機用のビーコン、ミサイルの誘導装置、目標物の追尾、赤外線照準器、赤外線暗視鏡等の研究が行われ、技術が発展しました。また、アメリカで赤外線分光計が市販されました。

[性質]

1)赤外線は可視光線の長波長端 $0.76\sim 0.8\mu\text{m}$ を下限とし、上限は 1mm くらいまでの電磁波です。

上限はあまり明確でなく、マイクロ波の一部と重なります。(注. $1\mu\text{m}=1/1000\text{mm}$)

分光学上での波数(1cm あたりの波の数)では $12500\sim 10$ カイザー(cm^{-1})の範囲です。

真空中でも伝わります。

2)人間の目には見えません。

3)絶対0度以上のすべての物体から放射され、放射量は物体の温度と相関があります。

4)物体を温めます。

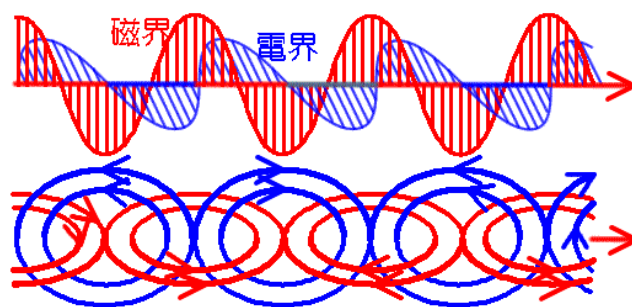
5)物体から放射されますが、いわゆる放射線(放射能)とは異なりますので安全です。

[応用]

現在では、リモートセンシング、赤外線天文学、光通信、医療・診断装置、温度測定、物体検知、人体検知、リモコン、赤外線通信、遠赤外線加熱、赤外線分光計による化学製品の分析等多岐にわたっています。

電磁波(Electromagnetic wave)

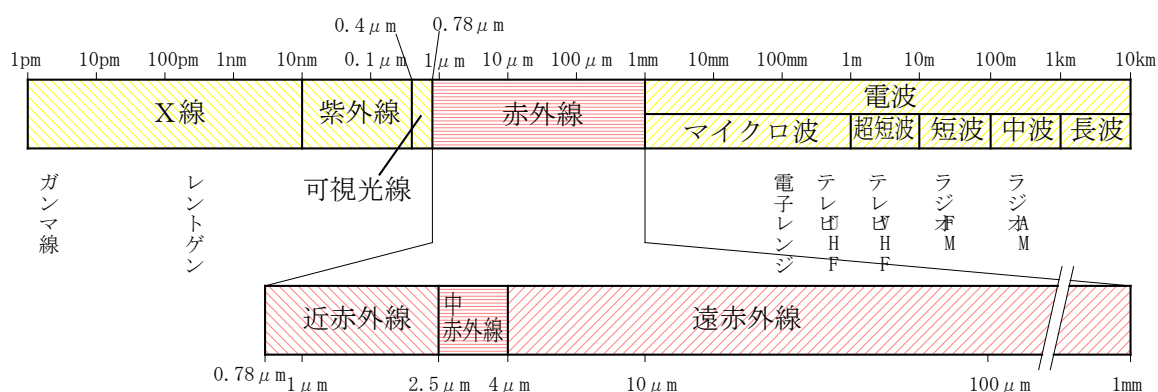
電界または磁界の周期的変化により形成された波です。電界と磁界がお互いの電磁誘導によって交互に相手を発生しあうことで、空間そのものが振動する状態が生まれて、この電磁場の周期的な変動が周囲の空間に横波となって伝播していく、エネルギーの放射現象の一種です。



電界 磁界 電界 磁界 電界 磁界

電波と磁波はともに横波であって、それぞれの振動面は互いに直交し、波動の進行は電界および磁界を含む面に垂直です。

電波、赤外線、可視光線、紫外線、X線、ガンマ線などはすべて電磁波に属します。また、電磁波は真空中を毎秒 $3 \times 10^8 \text{m}$ の速度で進行します。



○紫外線(Ultraviolet rays)

0.01 μm くらいを下限とし、0.4 μm くらいを上限とします。化学作用の強い光線で、殺菌力が強く化学線ともいわれます。波長がこの程度に短いと、物質の分子や原子の中に入り込み吸収され、物質の分子や原子の状態を変化させることができるからです。紫外線源として石英水銀灯、水素または希ガス放電、キセノンフラッシュランプ、紫外LEDなどがあります。

○可視光線(Visible rays)

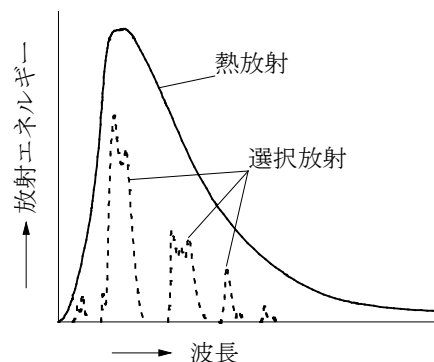
電磁波のうち人間の目に光として感じる波長範囲で、個人差がありますが下限は 0.38~0.4 μm 、上限は 0.76~0.8 μm です。可視光線の放射体には太陽とか白色電球、可視光LED、レーザなどがあります。

○赤外線(Infrared rays)

0.76~0.8 μm を下限とし、上限は 1mm ぐらい。さらに境界はあいまいですが 2.5 μm 以下を近赤外、2.5~4 μm 程度を中赤外、4 μm 以上を遠赤外と呼びます。熱作用が強く、暖房、医療、写真術などに利用されます。

赤外線の発生

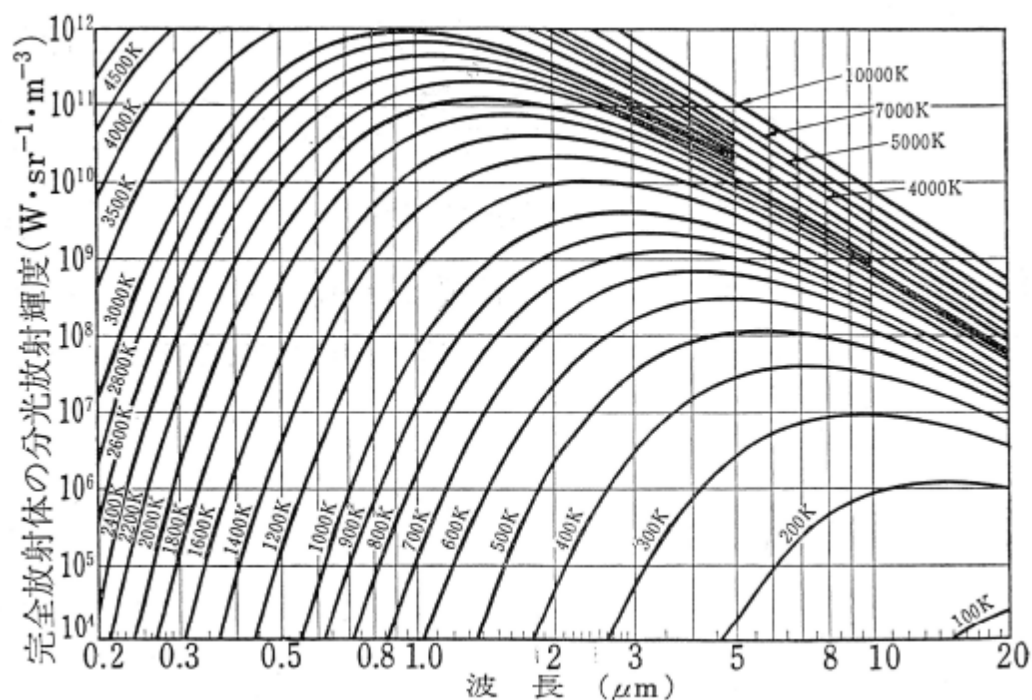
種々の放射源から出てくる赤外線スペクトルは波長に対して連続に分布するもの(熱放射)と、特定の不連続的な波長領域に分布するもの(選択放射)との二種類に大別されます。



1) 熱放射

物質の電気双極子(正電荷 q と負電荷 $-q$ が微小距離 d 離れて存在する状態)が振動して発生するとされています。物質は温度が高くなるほどそれを構成している原子が激しく揺さぶられ、お互いにぶつかり合い、それとともに原子核まわりの電子も様々な周波数で振動します。荷電粒子がこのような加速度運動をすると電磁波が発生します。

熱放射は温度が高くなるほど大きくなり、各波長での放射の強さ(放射輝度)は、プランクの放射則(Planck's law)で示され下図のようになり、温度が高くなるほどエネルギー分布のピークが波長の短いほうへずれます。太陽表面の 5778K では波長 $0.5\ \mu\text{m}$ の青緑色にピークがきます。



2) 選択放射

気体放電などからの放射で観測され、エネルギー分布は狭い波長領域に限定されます。放射は分子の振動および回転によるエネルギー準位間で起こります。エネルギーは、温度が上昇し、分子あるいは固体の運動が活発になるほど大きくなります。

水銀ランプ、キセノンランプ、レーザ等。

熱放射に関する物理法則

1) プランクの放射則(Planck's law)

ドイツの物理学者プランク(Max Karl Ernst Ludwig Planck)が1900年に確立した放射測定に用いられる基本的な式です。分光放射輝度(波長 λ での単位波長幅あたり、単位立体角あたり、単位投影面積あたりの放射束) $L(\lambda, T)$ と熱力学的温度 T との関係はプランクの放射則から次式で求められます。

$$L(\lambda, T) = \frac{2C_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1}$$

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

λ ; 物体から発散する放射の波長(m)

T ; 物体の絶対温度(K)

C_1, C_2 ; 放射の第1定数、第2定数

$$C_1 = c^2 h = 5.9548 \times 10^{-17} (W \cdot m^2)$$

$$C_2 = ch/k = 0.014388 (m \cdot K)$$

c ; 真空中の光の速度($c = 2.99792458 \times 10^8 m \cdot s^{-1}$)

h ; プランク定数($h = 6.6256 \times 10^{-34} J \cdot s$)

k ; ボルツマン定数($k = 1.38054 \times 10^{-23} J \cdot K^{-1}$)

2) ヴィーンの変位則(Wien's displacement law)

ドイツの物理学者ヴィルヘルム・ヴィーン(Wilhelm Wien)によって1893年に発見されました。分光放射輝度が最大となる波長 λ_m と、その放射体の温度 T との積 $\lambda_m T$ は一定値となります。

$$\lambda_m T = 2.8978 \times 10^{-3} (m \cdot K)$$

3) シュテファン・ボルツマンの法則(Stefan-Boltzmann law)

オーストリアの物理学者ヨーゼフ・シュテファン(Joseph Stefan)が1879年に実験的に明らかにし、弟子のルートヴィッヒ・ボルツマン(Ludwig Boltzmann)が1884年に理論的証明を与えました。

分光放射輝度(プランクの放射則より求められる)を、全波長域にわたって積分した放射発散度(全放射エネルギー)は、物体の絶対温度の4乗に比例します。

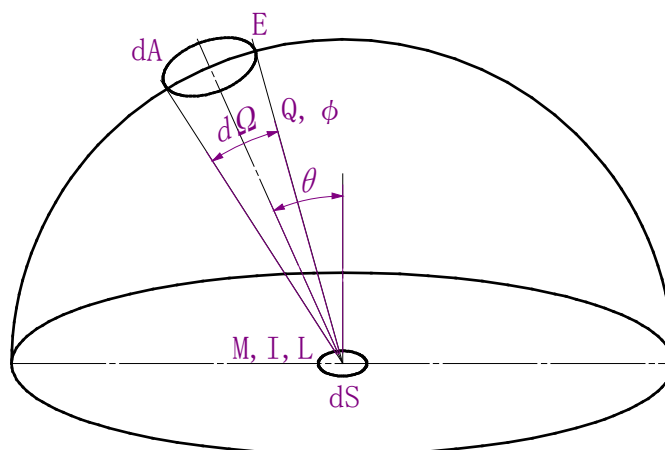
$$Me(T) = \frac{2}{15} \cdot \frac{\pi^5 C_1}{C_2^4} \cdot T^4 = \sigma T^4$$

$Me(T)$; 放射発散度($W \cdot m^{-2}$)

σ ; シュテファン・ボルツマン定数($\sigma = 5.6696 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$)

注) シュテファン・ボルツマンの法則は全波長域でのみ使用可能で、波長が限定される一般の放射测温には適用できません。プランクの放射則を測定波長で積分した放射輝度を使用します。

放射測定に関する諸量



量の名称	記号、式 単位	定義
放射エネルギー radiant energy	$Q = \Phi t$ (J)	エネルギーの発生源から自由空間に移動するエネルギーの量を示します。
放射束 radiant flux	$\Phi = dQ/dt$ (W)	一定時間中にエネルギーの発生源から自由空間に移動するエネルギーの量を示します。 単位時間(t)あたりの放射エネルギー。
放射発散度 radiant emittance	$M = d\Phi/dS$ ($W \cdot m^{-2}$) $M = \pi L$	平面状の放射源から半球空間(2π)に放射された放射源の単位面積(S)あたりの放射束を示します。
放射強度 radiant intensity	$I = d\Phi/d\Omega$ ($W \cdot sr^{-1}$)	エネルギーの発生源からある方向に放射された単位立体角(Ω)あたりのエネルギーを示します。
放射輝度 radiance	$L = dI/(dS \cdot \cos \theta)$ ($W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$)	単位立体角(Ω)あたり、単位投影面積(A)あたりの放射束を示します。
放射照度 irradiance	$E = d\Phi/dA$ ($W \cdot m^{-2}$)	放射源から平面状の物体に照射された単位面積(A)あたりの放射束(Φ)の量を示します。
分光放射エネルギー spectral radiant energy	$Q_\lambda = dQ/d\lambda$ ($J \cdot m^{-1}$)	波長 λ での単位波長幅あたりの放射エネルギー(Q)を示します。
分光放射束 spectral radiant flux	$\Phi_\lambda = d\Phi/d\lambda$ ($W \cdot m^{-1}$)	波長 λ での単位波長幅あたりの放射束(Φ)を示します。
分光放射発散度 spectral radiant emittance	$M_\lambda = dM/d\lambda$ ($W \cdot m^{-3}$)	波長 λ での単位波長幅あたりの放射発散度(M)を示します。
分光放射強度 spectral radiant intensity	$I_\lambda = dI/d\lambda$ ($W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-1}$)	波長 λ での単位波長幅あたりの放射強度(I)を示します。
分光放射輝度 spectral radiance	$L_\lambda = dL/d\lambda$ ($W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-3}$)	波長 λ での単位波長幅あたりの放射輝度(L)を示します。
分光放射照度 spectral irradiance	$E_\lambda = dE/d\lambda$ ($W \cdot m^{-3}$)	波長 λ での単位波長幅あたりの放射照度(E)を示します。

放射率(Emissivity)

熱放射の各法則(プランクの放射則、ヴィーンの変位則、シュテファン・ボルツマンの法則)は、物質の持つ全放射エネルギーを 100%放射した場合のもので、このようにすべての温度、すべての波長に対して理想的な、あるいは完全な放射または吸収を行うものを黒体(こくたい black body)といいます。ところが、実際に遭遇するたいていの物体は黒体ではなく、同じ温度にある黒体よりも放射も吸収も少ないものです。

黒体と物体の放射発散度(平面状の放射源から半球空間に放射された放射源の単位面積あたりの放射束)をそれぞれ M, M' として、次式で定義される ε を物体の放射率と呼びます。

$$\varepsilon = \frac{M'}{M} = \frac{\text{物体の放射発散度}}{\text{同じ温度の黒体の放射発散度}}$$

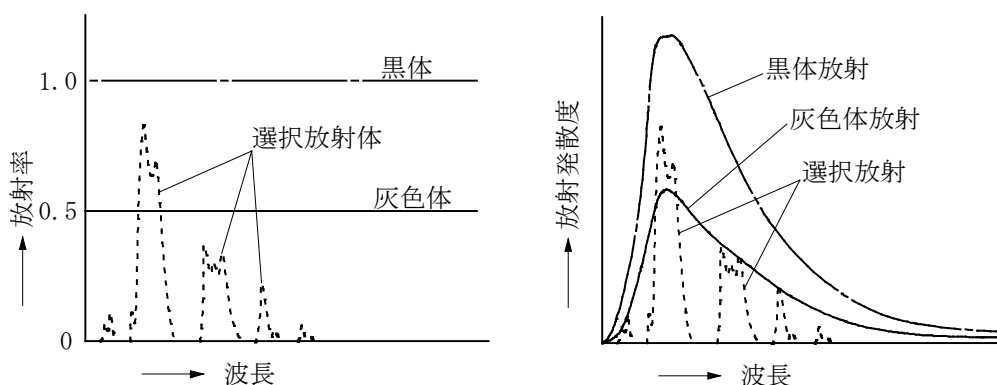
放射率 ε はその物体の放射(および吸収)の能率を表す尺度で、0 から黒体の値である 1 の間の値をとります。全波長についての比率を全放射率、特定波長における比率を分光放射率といいます。放射率は物体の材質、表面状態(酸化、汚れ等)、表面形状(粗さ、凹凸)、温度により変化する他、波長、放射角度によっても変化します。一般に光沢のある金属面は放射率が小さく、表面が酸化されたり汚染されると放射率が大きくなります。また、絶縁物は一般的に放射率が大きくなります。

主な物質の放射率

物質	状態	温度(0K=-273.15°C)	放射率
アルミニウム(AL)	研磨 真空蒸着 ひどく酸化	370-630K 20°C 360-810K	0.04-0.06 0.04 0.2-0.33
金(Au)	研磨	80-1100K	0.01-0.07
炭素(C)	荒い	1200-2000K	0.81-0.84
銅(Cu)	研磨 酸化	80-800K 300-600-800-1100K	0.02-0.03 0.38-0.47-0.59-0.87
鋳鉄	研磨 酸化	300-915-1355K 360-800-1350K	0.21-0.21-0.28 0.62-0.73-0.73
ステンレス鋼	310 18-8(酸化)	800-1400K 350-650K	0.25 0.84
真鍮	普通の研磨 酸化	373K 450-590K	0.06 0.56-0.64
アスファルト		常温	0.9-0.98
コンクリート		0-100°C	0.94
砂		常温	0.9
土		常温	0.92-0.96
水		常温	0.92-0.96
アルミ		1220-1500-1800°C	0.25-0.32-0.38
布(黒色)		20°C	0.98
皮膚(人)		32°C	0.98
木	地上に生えている木 削ったかしの木	20°C	0.5-0.7 0.90
塗料	AL入り 黒色つや消し 白色ラッカ	0-100°C 0-100°C 40-100°C	0.55 0.95 0.8-0.95
ゴム	黒色硬質	20°C	0.94
半田	銅板上	295K	0.032
紙			0.7-0.94

放射率の波長依存性

下図に代表的な熱放射体の放射率スペクトル ε_λ と放射発散度スペクトル M_λ を示します。



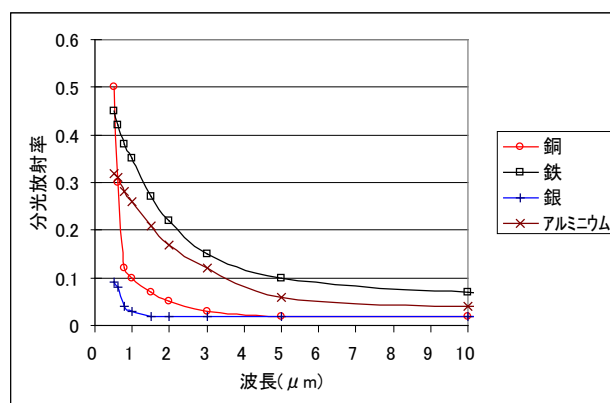
黒体(こくたい) ; 波長に関係なく $\varepsilon_\lambda = \varepsilon = 1.0$ で一定です。

灰色体(かいしょくたい) ; 波長に関係なく $\varepsilon_\lambda = \varepsilon$ で一定であるが ε は物体によって異なり、1.0 より小さい値です。

選択放射体 ; 波長により ε_λ が変化します。

放射率の波長依存性の例を右図に示します。

一般に金属では、波長が長くなるにつれて放射率が低くなります。放射率だけの観点からいえば、放射温度計で金属の表面温度を測定しようとする場合、波長の短い検出素子で測定する方が、放射率が高いので放射エネルギーが大きく、逆に反射率が小さく外乱光による影響が少ないため、より安定な測定ができることとなります。



塗料や布など一般的に可視光の領域では、黒い

ものほど放射率が高く白いものほど放射率が低くなります。ところが赤外の領域では色に関係なく、放射率が高くなります。我々は経験的に黒いもののほうが熱を吸収しやすいということを知っていますが、これは可視光に放射エネルギーのピークを持つ太陽光の下での話しであって、温度が低く放射エネルギーのピークが赤外の領域にあるストーブで温める場合は、いずれも放射率(吸収率)が高いので色には関係しません。

全波長にわたって放射率を求めたものが、全放射率 ε_T で

$$\varepsilon_T = \frac{\int_0^\infty \varepsilon_\lambda L(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^\infty L(\lambda, T) d\lambda}$$

$L(\lambda, T)$; 分光放射輝度
 ε_λ ; 分光放射率

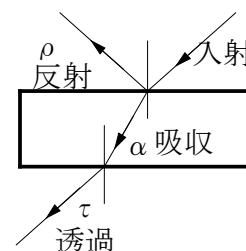
となります。

温度によって放射エネルギースペクトルが変わるため、波長依存性のあるものの全放射率 ε_T は温度によって変わります。

反射率(reflectance)と透過率(transmissivity)

放射エネルギーが物質表面に入射すると、右図のように入力エネルギーの一部 ρ は反射され、一部 α は吸収され、残り τ は透過します。これらの量の間にはエネルギー保存則から次式が成立します。

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

**[キルヒホフの放射法則] (Kirchhoff's law of thermal radiation)**

ドイツの物理学者グスタフ・キルヒホフ(Gustav Robert Kirchhoff)によって1859年に発見されました。物質の放射率 ε はその温度の吸収率 α に等しい。

ただし、同じ温度についてののみいえることであり、温度の異なる放射源からの放射スペクトルに対しては適用されないことに注意をする必要があります。

一般にガラスのように可視光で透明な物体でも、波長が長くなると、赤外光が透過しなくなります。また逆にゲルマニウム(Ge)、シリコン(Si)のように、可視光で不透明でも、赤外光をよく透過する物質もあります。

不透明な物質では、透過率 $\tau = 0$ ですから上式は $\rho + \alpha = 1$ または $\rho + \varepsilon = 1$ となります。

吸収(absorption)

[ランベルトーベールの法則] (Beer-Lambert-Bouguer law)

フランスの数学者ピエール・ブーゲ(Pierre Bouguer)が1729年に大気中を透過した光が減衰していることを発見しました。つぎに1760年にドイツの物理学者ヨハン・ハインリッヒ・ランベルト(Johann Heinrich Lambert)が吸光度は光の透過する長さに比例することを発見しました。さらに1852年にドイツの物理学者アウグスト・ベール(August Beer)が透過する物質濃度に応じて光の強度が一定の割合で減少することを示しました。

吸光度 A は次式で示されます。

$$A = -\log_{10} \left(\frac{I_1}{I_0} \right) = \alpha L = \varepsilon c L$$

α ; 吸収係数

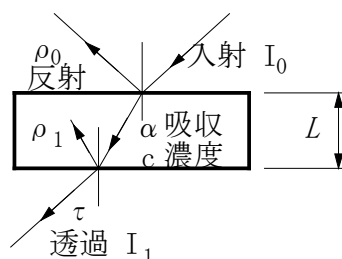
L ; 媒質中の距離

ε ; モル吸光係数

c ; 濃度

I_0 ; 入射前の光の強度

I_1 ; 入射後の光の強度



吸光度 A が距離 L に比例することをランベルトの法則といい、濃度に比例することをベールの法則といいます。ただし、上式は媒質表面での反射および媒質内、表面での散乱がないとした場合のもので、媒質表面での反射率を ρ_0 ρ_1 とし散乱がないとした場合、次式で表されます。

$$A = -\log_{10} \left(\frac{I_1}{I_0} \cdot \frac{1}{(1-\rho_0)(1-\rho_1)} \right) = \alpha L = \varepsilon c L$$

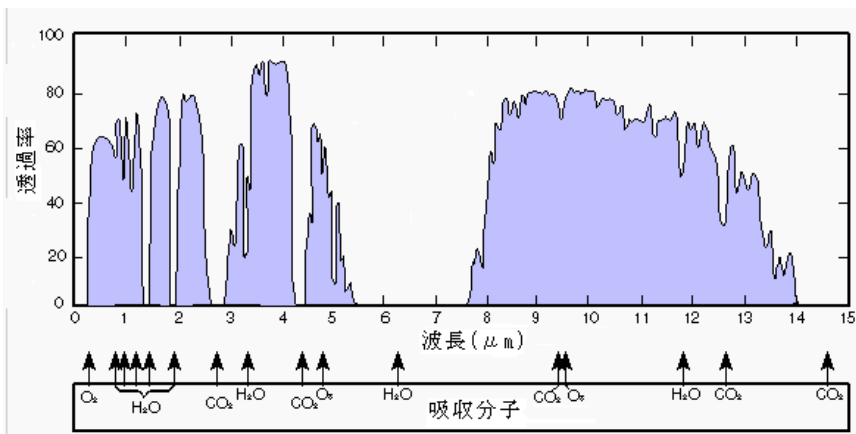
吸収係数 α は波長によって異なります。媒質がガラスの場合、波長の短い領域においては $\alpha=0$ で赤外線を透過します。ただし表面での反射がありますので透過率(I_1/I_0)は0.9~0.95程度です。この領域においてはガラスの厚さ L が厚くなっても、透過率はほとんど変わりません。波長の長い領域においては α が大きくなり、ガラスの厚さ L が厚くなるほど吸収量が多くなり、透過率が小さくなります。

$$I_1 = (1-\rho_0)(1-\rho_1) \cdot I_0 \cdot 10^{-\alpha L}$$

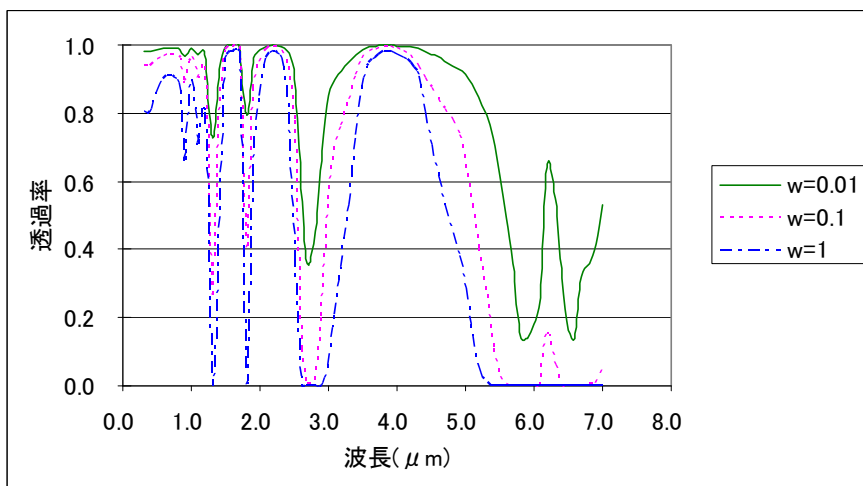
赤外線厚さ計はこの原理を利用して、透過率を測定することにより厚さ L を求めています。

大気の透過

人工衛星による赤外線を用いたリモートセンシングや、屋外での放射温度測定では大気の透過率が問題になります。大気中の水蒸気(H₂O)や、二酸化炭素(CO₂)などは、特定波長で赤外線を吸収するため、正確な測定をする場合には、透過率の良い波長で行う必要があります。右図に大気の透過率を示します。このうち、透過率の高い波長域を大気の窓と呼びます。



水蒸気(H₂O)の透過率



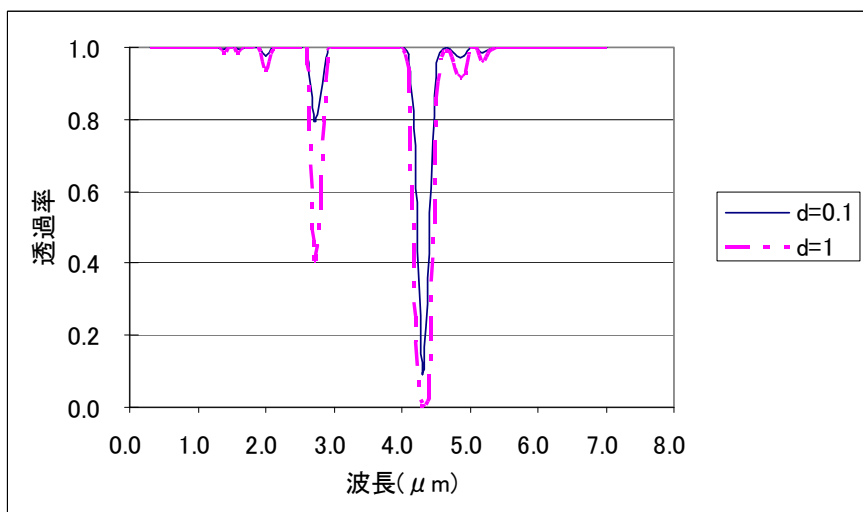
海拔 0m

w=凝結した水の厚さ cm

温度 20℃、相対湿度 50%の時

w=0.875cm/km

二酸化炭素(CO₂)の透過率



海拔 0m

d=光路長 km

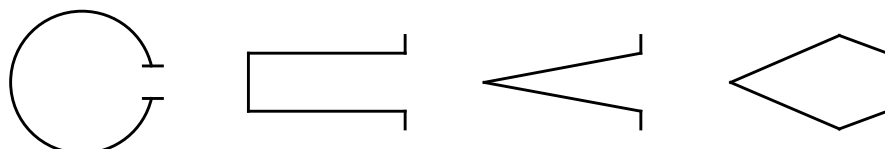
参照 赤外線 (赤外線概要 | 反射率と透過率) 光学系(基礎／反射と散乱) 温度計(放射温度計／光路の影響)

赤外線光源

1) 黒体炉

物質の放射率はその温度での吸収率に等しいので、黒体の吸収率はその放射率と同じく 1 になります。温度が等しい物質で囲まれた空間での放射は内部で多重反射されるため黒体放射となり、この空間から微小な穴を通じて取り出した放射も近似的に黒体放射と見なすことができます。

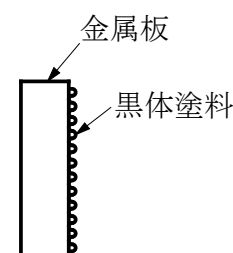
赤外線の基準として装置の校正などに用いられるのは、このような擬似黒体の穴から得られる放射であって、放射量を大きくするために、空間内部の壁を一定に保つ場合が多く、普通黒体炉と呼ばれます。黒体炉には下図のような形状のものがあります。(筒型)



黒体炉の設計に際して次のことに留意する必要があります。

- I) 内部壁の温度を均一に保つ。
- II) 壁材は放射率の大きいものを使用する。
- III) 内部壁の表面は平滑よりも小さい凹凸仕上げとする。
- IV) 内部構造は取出口からの入射線が再び外へ出るまでの反射回数が大きくなるような形状とする。

通常、放射率は 0.99 以上です。また、上図のような形状で開口部を大きくするためには、全体の形状が相対的に大きくなり製作上困難になります。この場合には金属平面に放射率の高い塗料(黒体塗料)を塗布した形状のものを使用します。ただし黒体塗料の放射率があまり大きくない(0.90~0.94)ため、放射温度計により表面を測定し筒形の黒体炉との校正を行う必要があります。



平面黒体炉

2) 太陽

定性的に約 5500°C (5778K)の黒体放射と考えられます。ただし、大気による吸収と散乱があります。

3) タングステン電球、ハロゲン電球

タングステン電球のフィラメントは 2700°C 以上の高温でも使用できるので、屋外でも簡単に使用できる赤外光源となります。しかしバルブ材料の硝子は $4\mu\text{m}$ 位より長波長側では赤外線を透過しないので、近赤外領域でしか使用できない点に留意する必要があります。

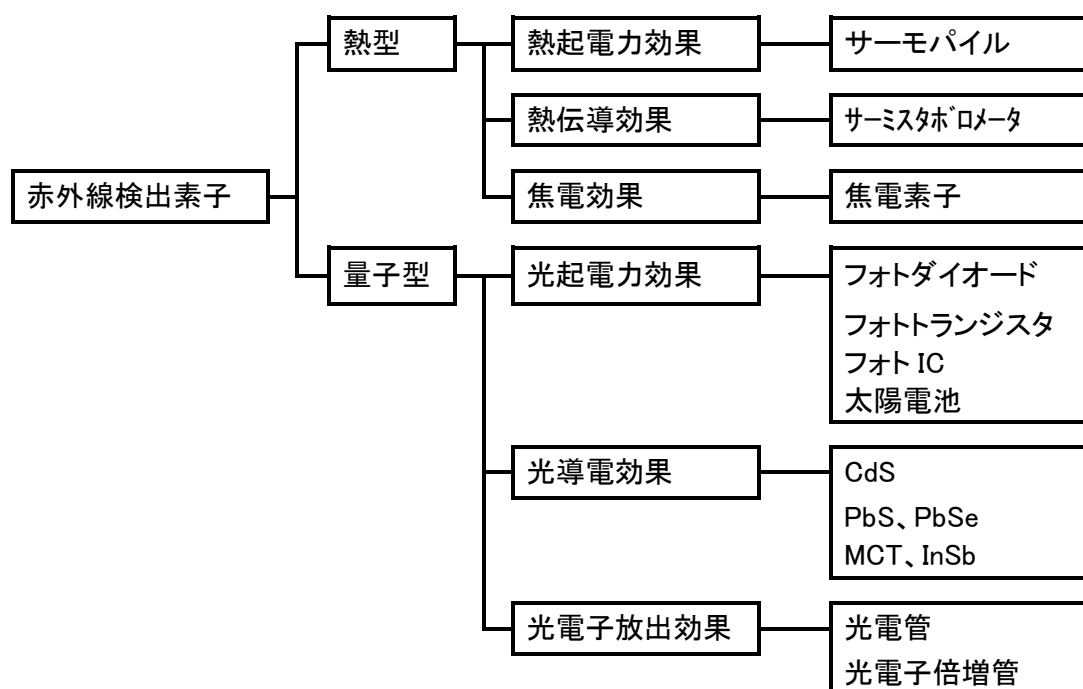
その放射率は 2500°C で $2\sim 3\mu\text{m}$ にかけて約 0.23 であり、温度によって大幅に変化します。タングステン電球からの放射はフィラメントからの熱放射が硝子バルブを通して外部に出たものと、熱せられた硝子バルブ全体からの熱放射から成り立つことになり、両者の放射源としての寸法も大きく異なるので注意が必要です。

4) その他

- I) グローバー ; 炭化ケイ素棒に電流を通じたもの。赤外分光器の光源用。
- II) クセノンランプ ; クセノンのアークを使用したランプ
- III) 赤外線発光ダイオード ; 半導体ダイオードで、 $1.2\mu\text{m}$ 以下の赤外光を出す。
- IV) 赤外レーザ ; ガスレーザ、固体レーザ、半導体レーザなどがある。

赤外線検出素子の分類

検出素子は熱型(thermal detector)と量子型(photon detector)に大別されます。



検出素子の受光感度

雑音を考慮しないときの 1W あたりの出力電圧または電流で示されます。

$$R = \frac{S}{PA} \quad (V/W)$$

S ; 信号出力(V)
P ; 入射エネルギー(W/cm²)
A ; 検出素子の受光面積(cm²)

光起電力素子の場合、一般的に信号は電流として取り出すため、受光感度の単位は(A/W)です。

ある特定の波長の光が入射した場合、光電流 I_{sc} は次式で表されます。

$$I_{sc} = \eta q \frac{PA}{h \frac{c}{\lambda}} = \frac{\eta q PA \lambda}{hc}$$

q ; 電子の電荷
η ; 量子効率
h ; プランク定数 $6.626 \times 10^{-34}(\text{J} \cdot \text{S})$
c ; 光速 $3 \times 10^{10}(\text{cm/S})$
λ ; 波長(μm)

したがって受光感度 R_λ は次式で表されます。

$$R_\lambda = \frac{I_{sc}}{PA} = \frac{\eta q \lambda}{hc} = \frac{\eta \lambda}{1.24}$$

量子効率 η と受光感度 R_λ は次のような関係になります。

$$\eta = 1.24 \frac{R_\lambda}{\lambda}$$

一方光導電素子の場合、次図のような回路で取り出すため受光感度の単位は(V/W)です。

出力電圧 V_o は以下の式で表されます。

$$V_o = \frac{R_L}{R_d + R_L} \cdot V_B$$

光が入射した時、 R_d の変化 ΔR_d による V_o の変化は

$$\Delta V_o = -\frac{R_L V_B}{(R_d + R_L)^2} \cdot \Delta R_d$$

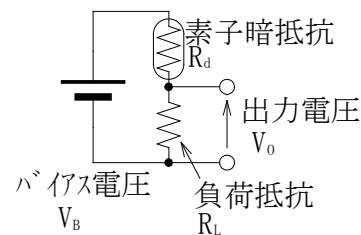
となります。また、 ΔR_d は以下の式で表されます。

$$\Delta R_d = -R_d \frac{q(\mu_e + \mu_h) \cdot \eta \tau \lambda PA}{\sigma lwdhc}$$

τ ; キャリアの寿命 l ; 検出素子の長さ
μ_e ; 電子の移動度 w ; 検出素子の幅
μ_h ; 正孔の移動度 d ; 検出素子の厚さ
σ ; 電気伝導度

そのため受光感度は以下の式で表されます。

$$R_\lambda = \frac{\Delta V_o}{PA} = \frac{q \eta \tau \lambda (\mu_e + \mu_h) \cdot R_L R_d V_B}{\sigma lwdhc (R_d + R_L)^2}$$



検出素子の雑音等価電力と比検出能力

1. 雑音等価電力(NEP; Noise Equivalent Power)

雑音量に等しい入射光量、つまり信号対雑音(S/N)が1となる時の入射光量で示されます。

$$NEP = \frac{PA}{S/N \cdot \Delta f^{1/2}} \quad (W/Hz^{1/2})$$

P ; 入射エネルギー(W/cm²)
 A ; 検出素子の受光面積(cm²)
 S ; 信号出力(V)
 N ; ノイズ出力(V)
 Δf; 雑音帯域幅(Hz)

2. 比検出能力(D*; ディスター)

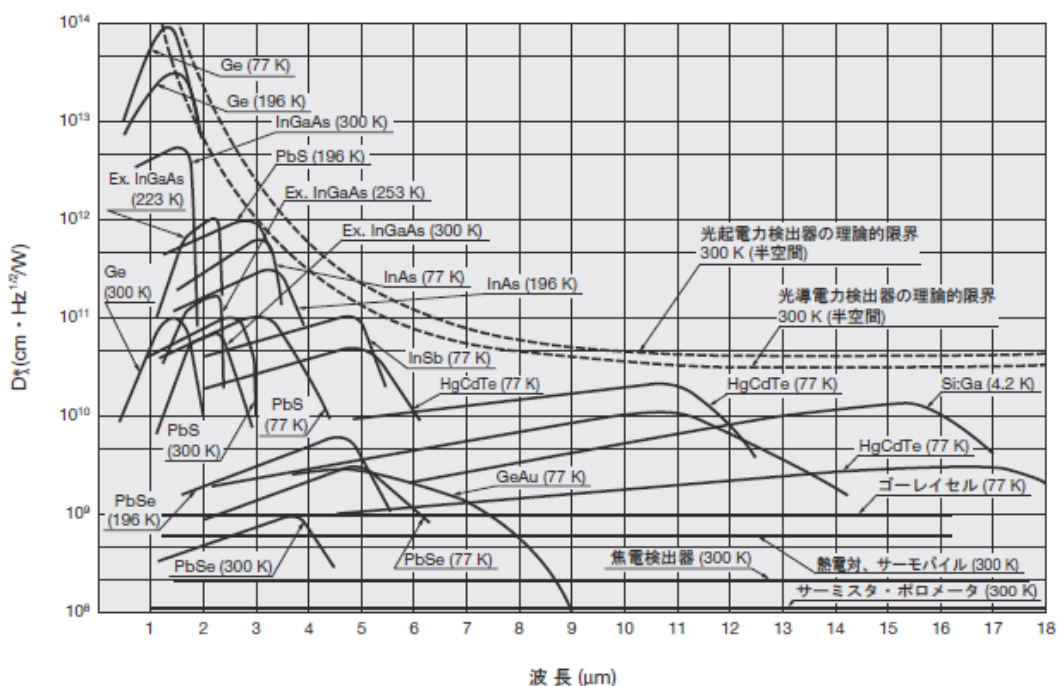
1 W の光入力があった時の、検出素子の交流的な S/N がどれだけあるかを示します。検出面積によらずに材料の特性そのものを比べられるように、検出素子面積 1cm²、電気回路の雑音帯域 1Hz で規格化されています。D*の表示は一般的に D*(A,B,C)のように表し、A は光源の温度(K)または波長(μm)、B はチョッピング周波数(Hz)、C は雑音帯域幅(Hz)を意味します。単位は cm · Hz^{1/2}/W で D*が高いほど、よい検出素子といえます。なお D*は次式で求められます。

$$D^* = \frac{S/N \cdot \Delta f^{1/2}}{P \cdot A^{1/2}}$$

S は信号、N は雑音、P は入射エネルギー(W/cm²)、A は受光面積(cm²)、Δf は雑音帯域幅(Hz)を表します。また、D*と NEP の間には以下の関係が成り立ちます。

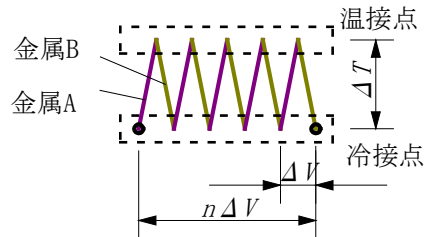
$$D^* = \frac{A^{1/2}}{NEP}$$

下図に代表的な検出素子の D*を示します。光電形は鋭いカットオフ波長を有し、波長選択性を生じます。D*はその値が大きいほど検出能力が高く、分解能がすぐれていますが测温範囲の下限とは直接関係がありません。これは黒体放射エネルギーのピークが温度によって変化するためです。長波長側で高い検出能力を有する検出素子が低温まで測定できる能力を有します。一般に検出素子自身の温度が低いほど、D*が高くなります。



熱型検出素子

放射エネルギーが入射すると受光面がわずかに昇温されます。熱型検出素子はこの温度変化を電気信号に変換します。この素子は可視から赤外域まではほぼ一樣な感度を有しますが、量子型に比べ特定波長域での検出能力は低くなります。応答速度は受熱面の熱容量と素子基板からの熱拡散の程度によって決まり、量子型に比べて遅くなります。また、受光面の熱拡散により実効的な受光面積は素子自体の面積よりも大きくなります。このために測定面積を最高感度の半値幅とした場合には、実効的な受光面積は半値幅の2~4倍におよぶので注意する必要があります。検出素子はとくに冷却を必要とせず、常温で使用されます。

- 1) サーマピイル ; 熱電対を直列に接続して熱起電力を高めた熱起電力形検出素子で直流モードでの使用が可能です。
 
- 2) サーミスタボロメータ ; 熱による抵抗変化を利用した熱伝導形検出素子で半導体サーミスタがよく使われます。
- 3) 焦電素子 ; 強誘電体で、温度が上がると自発分極して電荷を生ずる焦電効果を利用した素子で、コンデンサに電荷を蓄えて電圧で取り出します。温度測定用としては光チョップが必要ですが、人体検知用では人の動きを検知するため不要です。

各種熱型検出素子の特長

検出素子	波長(μm)		内部抵抗	D*	時定数	使用温度	光 チョップ ^o
	帯域	ピーク					
サーモピイル	1~40	—	1Ω~50kΩ	1×10 ⁷	20~100mS	常温	不要
サーミスタボロメータ	0.2~40	—	1~5MΩ	4×10 ⁸	1~20mS	常温	要
焦電素子	1~20	—	—	1×10 ⁸ ~2×10 ⁹	1~100mS	常温	要

量子型検出素子

素子に入射した光子(photon)は電子と直接相互作用して、光子数に比例した電気信号が得られます。従って熱型検出素子に比べると応答速度は速く、感度も10～100倍になります。一方、半導体素子なのでバンド幅から規制されて、狭い波長帯域の分光感度を示します。光チョッピングが必要であったり、冷却が必要な素子も多くあります。受光面積は素子の幾何形状によく対応するので測定面積は半値幅とあまり変わりません。ただし、ペルチェ素子を使用した電子クーラによる冷却の場合には、入射光が電子クーラ温度検出素子(サーミスタ)に影響を与え、検出素子温度が変化し、等価的に測定面積が大きくなるので注意が必要です。光起電力形と光導電形があります。

各種量子型検出素子の特長

検出素子	波長(μm)		内部抵抗	D^*	時定数	使用温度	光 チョッ パ
	帯域	ピーク					
Si	0.3～1.1	0.5～0.96	0.1～50G Ω	$1\sim 2\times 10^{14}$	0.4～30 μS	常温	不要
InGaAS	0.9～1.7	1.55	3～1000M Ω	$1\sim 5\times 10^{12}$	0.01～10 μS	常温	不要
InGaAS 冷却	0.9～2.6	2.3	0.3～600k Ω	$5\times 10^{10}\sim 2\times 10^{11}$	0.1～5 μS	-50～0 $^{\circ}\text{C}$ 常温 注2	不要
InSb(光起電力)	2～6.8	5.0	100～200 k Ω			常温	不要
PbS	0.6～3.2	2.2～2.5	0.05～10M Ω	$5\times 10^{10}\sim 2\times 10^{11}$	200～600 μS	-40～0 $^{\circ}\text{C}$ 常温 注2	要
PbSe	1.3～5.2	4～4.2	0.3～8M Ω	$8\times 10^8\sim 4\times 10^9$	3～5 μS	-40～0 $^{\circ}\text{C}$ 常温 注2	要
InAs	1～3.5	3.3		$1\times 10^9\sim 3\times 10^{10}$	0.1～0.7 μS	-50～0 $^{\circ}\text{C}$ 常温 注2	不要
InSb(光導電)	0.5～6.5	5.5	20～150 Ω 50k～10M Ω	$7\times 10^7\sim 1.6\times 10^{11}$	0.03～0.6 μS	-50～0 $^{\circ}\text{C}$ 77K 冷却	要 不要
MCT (HgCdTe)	2～22	3～17	30～600 Ω	$2\times 10^5\sim 1\times 10^{11}$	0.001～3 μS	-50～0 $^{\circ}\text{C}$ 77K 冷却	要
Ge	1～9	5.4	0.1～10M Ω	0.3～ 1×10^{10}	1 μS	77K 冷却 注1	要

注 1)77K は液体窒素による冷却

注 2)感度により電子クーラにて-50 $^{\circ}\text{C}$ ～0 $^{\circ}\text{C}$ に冷却するタイプと常温で使用するタイプがあります。

赤外線関係参考資料

1. 「温度計測」温度計測部会編、社団法人計測自動制御学会発行 1981年
2. 計量管理技術双書(16)「温度」、計量管理協会編、芝 亀吉著、コロナ社発行 1959年
3. 計測技術 '82・7月～'84・9月 「赤外線技術講座」 山香英三
4. 技術資料Ⅱ Emissivity 赤外線技術 第9号 真鍋 隆 1984年
5. 赤外線工学 近代科学社 和田正信、中野朝安 1963年
6. 赤外線工学 オーム社 赤外線技術研究会編 1991年
7. 浜松ホトニクス㈱ 技術資料 赤外線検出素子の特性と使い方
8. Wikipedia