

赤外放射率の精密測定技術に関する調査研究

井邊真俊*

(平成 30 年 2 月 16 日受理)

Survey of Infrared Emissivity Measurement Techniques

Masatoshi IMBE

Abstract

Emissivity measurement is essential information for radiometric temperature measurement and thermal design. This paper surveys infrared emissivity measurement techniques. They are categorized into three groups according to measured object properties, experimental condition such as temperature and detection wavelength, and the kind of emissivity to be measured. National Metrology Institute of Japan has developed high precision normal-spectral emissivity measurement system for room temperature range. To extend the temperature range, development of another measurement system suitable for high temperature range is in progress. Technical issues to be solved toward the establishment of the system are also discussed.

1. はじめに

全ての物体はその温度に応じた熱エネルギーをもつ。熱の一部は電磁波に変換されて空間へ放射 (emission) される。それが空間を伝搬して別の物体に入射すると、一部は吸収 (absorption) され熱に変換される。この熱から変換および熱へ変換する電磁波が熱放射 (thermal radiation) である。これら変換の度合いを示す物性値が放射率 (emissivity) であり、その物体の材質に加え温度や表面状態、熱放射の波長や方向にも依存する¹⁾⁻³⁾。放射率の高い物体は熱を熱放射に変換して放射しやすく、かつ、熱放射を吸収して熱に変換しやすい物体といえる。そのため、放射率は熱設計において重要なパラメーターである。熱設計では、3つの熱の移動の形態、すなわち、伝導伝熱、対流熱伝達、放射伝熱による熱の移動量を計算する。このうち、放射伝熱が熱放射による熱の移動の形態であり、放射率はこの計算に用いる。特に、放射伝熱による熱の移動量は後述するように温度の4乗に比例する。そのため、高い温度域では放射率は特

に重要である。加えて、物体の温度を非接触に測定できる放射温度測定のためにも放射率は不可欠である。後述するように熱放射は温度に依存する。そのため、その物体からの熱放射を測定し、かつ、放射率が既知であれば、温度を求めることができる。

放射率の情報は多様な分野で求められる。例えば、エレクトロニクス分野では、電子デバイスを正常に動作させるためにその熱を制御する必要がある。そのための熱設計にはデバイス自身や周辺の材料の放射率が必要になる^{4),5)}。特に、小型・省スペース化の進んだ電子機器では、空冷ファンなどによる強制冷却がスペース上困難な場合がある。その場合、放射伝熱による自然冷却に頼らざるを得ず、放射率は特に重要になる。また、放射温度測定による発熱のモニタにも放射率は必要である。さらに、鉄鋼分野では、鋼板の品質管理のためには温度情報が重要になる^{6),7)}。先述のように、放射温度測定は非接触、すなわち、離れた位置から温度を測定することができる。鉄鋼分野では 2000℃を超えるような高い温度の測定を必要とする場合がある。このような温度域では接触式温度計では正常に測定できない。そのため、放射温度測定に必要な放射率は重要である。このように、対象

*物理計測標準研究部門応用熱計測研究グループ

とする材料やデバイスの放射率の測定が、熱設計や放射温度測定のために不可欠である。例に挙げたエレクトロニクスや鉄鋼分野だけでなく、建築^{8),9)}、発電プラント^{10),11)}、宇宙・航空^{12),13)}、軍事・防衛¹⁴⁾など多様な分野で求められている。

特に近年ではエネルギー問題に関して放射率が重要である。2015年には気候変動枠組条約第21回締約国会議(Twenty First Session of the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change: COP 21)が開催され、2020年以降の温暖化対策の国際枠組みであるパリ協定が採択された¹⁵⁾。温室効果ガスの排出量削減に向けて、各国に削減目標の報告およびその達成に向けた国内対策の実施を義務付けている。日本は約束草案に2030年までに2013年比26%の削減を掲げている^{16),17)}。これを達成するためには、産業界だけでなく一般家庭からの排出量の削減が重要視されている¹⁸⁾。そのため、建築分野において省エネルギー部材が開発され、普及が進んでいる¹⁹⁾。代表的なものに低放射・遮熱ガラスおよびフィルムがあり、この評価に放射率の測定が必要である。この測定方法はJIS規格が定められている。しかし、後述するように、現行の測定のJIS規格²⁰⁾では、正しい値を測定できない²¹⁾。また、屋外における使用を想定した簡易測定装置も存在する。しかし、値が他の測定手法の結果と一致せず²²⁾、評価に使用できないといったケースもある。他にも、エネルギー問題に関して放射率が必要な分野として太陽光熱発電がある。この発電技術では、半導体から成るソーラーパネルを用いた太陽光発電とは異なり、太陽光の吸収により生じた熱を電気に変化する。温室効果ガスを排出しない発電技術として有力視されている。電力量の計算のために放射率が必要である¹⁰⁾。

以上のようなエネルギー問題に関してだけでなく、その製品の性能の評価に放射率を用いる場合、正しい値を得られないことは、性能の過大または過小評価につながる。その結果、製品の公正な競争の妨げになる。鉄鋼や発電などの高温を扱う分野では、安全面からも放射率の情報は不可欠である。また、新規の材料に対してだけでなく、放射率の測定は既存の材料に対しても必要である。放射率は同じ材料であっても、先述のように材質だけでなくその表面状態や温度、対象とする熱放射の波長や方向にも依存して変化する。表面状態においては酸化や傷によっても変化する。したがって、過去に測定が実施され、文献に値が示されていたとしても、それを使用できるとは限らない。実際に使用条件を再現した上で測定した値を用いるべきである。

産業技術総合研究所計量標準総合センター(National Metrology Institute of Japan: NMIJ)では、後述するように常温域における方向分光放射率の精密測定技術を既に確立した^{23),24)}。現在では、より高温域における方向分光放射率の測定技術の研究開発を進めている²⁵⁾。この技術の確立のために、各国の計量標準機関(National Metrology Institute: NMI)や大学で研究されている放射率の測定技術の特徴や課題を調査した。さらに、現行のJIS規格や簡易測定器の特徴および課題も調査した。

本論文の構成を以下に示す。はじめに、放射率の概要を述べ、放射率の種類および吸収率との関係を示す。次に、放射率の測定原理について述べる。測定技術を3種類に区分し、特徴、技術課題、提案されている解決方法を述べる。これらに基づいた放射率測定のJIS規格および簡易測定装置についても述べる。その後、NMIJで確立されている放射率の精密測定技術を述べる。最後に、現在開発中の測定技術について述べ、その技術課題および解決方法を本調査研究結果から検討する。

2. 放射率の種類

放射率は黒体からの熱放射に対する物体からの熱放射の比である^{1),2)}。その熱放射の物理量により、放射率は図1のように分類できる。図1では、対象とする熱放射の方向および波長が単一か全範囲かで分類している。それぞれの放射率の名称の下の括弧内には、対象とする熱放射の物理量を示している。以下では、それぞれの放射率を導出する。その後、特定の条件を満たす物体に対する各放射率の関係を示し、吸収率との関係を述べる。最後に、各放射率が必要な分野を述べる。

2.1. 方向分光放射率

黒体からの熱放射の分光放射輝度に対する、物体からの熱放射の分光放射輝度の比が方向分光放射率

	方向	半球分光放射率 (分光放射発散度)
	波長	方向分光放射率 (分光放射輝度)
	波長	半球全放射率 (放射発散度)
	波長	方向全放射率 (放射輝度)

図1 放射率の分類。

(directional spectral emissivity) である。分光放射輝度 (spectral radiance) は、放射源から特定の方向へ放射される単位面積、単位立体角、単位波長あたりの放射束であり、その単位は $\text{W m}^{-3}\text{sr}^{-1}$ である。放射束 (radiant flux) とは、単位時間あたりの放射エネルギーをあらわす物理量であり、その単位は W である。黒体 (blackbody) とは、あらゆる波長および方向から入射する電磁波を完全に吸収する理想的な物体である。その放射率は温度、波長、方向に依存せず 1 である。波長および温度をそれぞれ λ および T とし、黒体からの熱放射の分光放射輝度を $L_{b,\lambda}(\lambda, T)$ とする。なお、単位波長あたりの物理量であることを添字の λ であらわす。プランクの法則から

$$L_{b,\lambda}(\lambda, T) = \frac{c_{1\lambda}}{\lambda^5} \left\{ \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right\}^{-1} \quad (1)$$

である²⁷⁾。 $c_{1\lambda} = 1.191\,042\,972 \times 10^{-16} \text{ W m}^2 \text{ sr}^{-1}$ は放射の第一定数であり、 $c_2 = 1.438\,776\,85 \times 10^{-2} \text{ m K}$ は放射の第二定数である。 $c_{1\lambda}$ および c_2 は、科学技術データ委員会 (Committee on Data for Science and Technology: CODATA) が公開しているプランク定数およびボルツマン定数の 2017 年における調整値²⁸⁾を用いて算出した。黒体は表面が完全拡散面であり、放射輝度は方向に依存せず一定である。そのため、 $L_{b,\lambda}(\lambda, T)$ は波長および温度のみの関数である。これに対して、方向にも依存する、物体からの熱放射の分光放射輝度を $L_\lambda(\lambda, \theta, \phi, T)$ とする。その物体の方向分光放射率 $\varepsilon_\lambda^d(\lambda, \theta, \phi, T)$ は

$$\varepsilon_\lambda^d(\lambda, \theta, \phi, T) = \frac{L_\lambda(\lambda, \theta, \phi, T)}{L_{b,\lambda}(\lambda, T)} \quad (2)$$

である。 θ および ϕ はそれぞれ図 2 に示すように放射源表面における天頂角 (zenith angle) および方位角 (azimuthal angle) であり、放射の方向をあらわす。式 (2) から、物体からの熱放射の分光放射輝度は、黒体からの熱放射の分光放射輝度と、その物体の方向分光放射率の

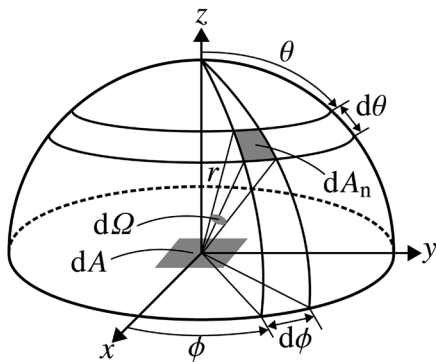


図 2 放射源表面における天頂角、方位角、立体角の関係。

積である。

以上のように方向分光放射率は黒体および物体からの熱放射の分光放射輝度の測定により求める。または、3.1 で述べるように分光反射率の測定により間接的に求める。

2. 2. 半球分光放射率

黒体からの熱放射の分光放射発散度に対する、物体からの熱放射の分光放射発散度の比が半球分光放射率 (hemispherical spectral emissivity) である。分光放射発散度 (spectral radiant exitance) とは、放射源表面から放射される単位面積、単位波長あたりの放射束であり、その単位は W m^{-3} である。分光放射輝度が特定の方向への放射をあらわすのに対し、分光放射発散度は半球方向への放射をあらわす。

分光放射発散度を分光放射輝度から導出する。図 2 に示すような放射源表面を考える。放射源表面の微小面積 dA から放射される放射束を dq とする。天頂角 θ および方位角 ϕ であらわされる方向への分光放射輝度 $L_\lambda(\lambda, \theta, \phi, T)$ は、その立体角を $d\Omega$ とすると

$$L_\lambda(\lambda, \theta, \phi, T) = \frac{dq}{dA \cos\theta d\Omega d\lambda} \quad (3)$$

である。分母の $dA \cos\theta$ は検出側からの見かけの放射源表面の面積をあらわす。 $d\Omega$ は図 2 のように半球表面における微小面積 dA_n とその半径 r から

$$\begin{aligned} d\Omega &= \frac{dA_n}{r^2} \\ &= \frac{r d\theta r \sin\theta d\phi}{r^2} \\ &= \sin\theta d\theta d\phi \end{aligned} \quad (4)$$

である。式 (3) および式 (4) から、 dA から半球方向への放射である熱放射の分光放射発散度 dM_λ は

$$\begin{aligned} dM_\lambda &= \frac{dq}{dA d\lambda} \\ &= L_\lambda(\lambda, \theta, \phi, T) \cos\theta d\Omega \\ &= L_\lambda(\lambda, \theta, \phi, T) \sin\theta \cos\theta d\theta d\phi \end{aligned} \quad (5)$$

である。したがって、この放射源表面からの熱放射の分光放射発散度 $M_\lambda(\lambda, T)$ は、 dM_λ を方向で積分することにより

$$M_\lambda(\lambda, T) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L_\lambda(\lambda, \theta, \phi, T) \sin\theta \cos\theta d\theta d\phi \quad (6)$$

である。ここで、放射源が黒体の場合は式 (6) における $L_\lambda(\lambda, \theta, \phi, T)$ は $L_{b,\lambda}(\lambda, T)$ に代わる。黒体からの熱放射の分光放射輝度は方向に依存しないので、黒体から

の熱放射の分光放射発散度 $M_{b,\lambda}(\lambda, T)$ は

$$M_{b,\lambda}(\lambda, T) = \pi L_{b,\lambda}(\lambda, T) \quad (7)$$

である。式 (2)、式 (6) および式 (7) から、物体の半球分光放射率 $\varepsilon_{\lambda}^h(\lambda, T)$ は

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\lambda}^h(\lambda, T) &= \frac{M_{\lambda}(\lambda, T)}{M_{b,\lambda}(\lambda, T)} \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \varepsilon_{\lambda}^d(\lambda, \theta, \phi, T) \sin\theta \cos\theta \, d\theta d\phi \end{aligned} \quad (8)$$

である。

以上のように、方向分光放射率を各方向で取得し、それを用いて方向で積分の計算をすることにより半球分光放射率を得る。

2.3. 方向全放射率

黒体からの熱放射の放射輝度に対する物体からの熱放射の放射輝度の比が方向全放射率 (directional total emissivity) である。放射輝度 (radiance) とは、単位面積、単位立体角あたりの放射束であり、その単位は $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$ である。分光放射輝度が単位波長あたりの放射をあらわしたのに対し、放射輝度はすべての波長における放射をあらわす。

放射輝度は分光放射輝度を波長で積分することにより得られる。物体からの熱放射の放射輝度 $L(\theta, \phi, T)$ は

$$L(\theta, \phi, T) = \int_0^{\infty} L_{\lambda}(\lambda, \theta, \phi, T) \, d\lambda \quad (9)$$

である。一方、黒体からの熱放射の放射輝度 $L_b(T)$ は、同様に $L_{b,\lambda}(\lambda, T)$ を波長で積分すると、ステファン・ボルツマンの法則により

$$\begin{aligned} L_b(T) &= \int_0^{\infty} L_{b,\lambda}(\lambda, T) \, d\lambda \\ &= \frac{\sigma T^4}{\pi} \end{aligned} \quad (10)$$

である²⁸⁾。 $\sigma = 5.6703749 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{K}^{-4}$ はステファン・ボルツマン定数である。この値も c_{11} および c_2 と同様に CODATA の調整値²⁶⁾ を用いて算出した。式 (2)、式 (9) および式 (10) から、物体の方向全放射率 $\varepsilon_{\lambda}^d(\theta, \phi, T)$ は

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\lambda}^d(\theta, \phi, T) &= \frac{L(\theta, \phi, T)}{L_b(T)} \\ &= \frac{\pi}{\sigma T^4} \int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda}^d(\lambda, \theta, \phi, T) L_{b,\lambda}(\lambda, T) \, d\lambda \end{aligned} \quad (11)$$

である。

以上のように、方向分光放射率を各波長で取得し、それを用いて波長で積分の計算をすることにより方向全放

射率を得る。

2.4. 半球全放射率

黒体からの熱放射の放射発散度に対する物体からの熱放射の放射発散度の比が半球全放射率 (hemispherical total emissivity) である。放射発散度 (radiant exitance) とは、単位面積あたりの放射束であり、その単位は W m^{-2} である。分光放射発散度が単位波長あたりの放射をあらわしたのに対し、放射発散度はすべての波長における放射をあらわす。

放射発散度は、分光放射発散度を波長で積分するか、放射輝度を方向で積分することにより得る。物体からの熱放射の放射発散度 $M(T)$ は式 (6) および式 (9) から

$$\begin{aligned} M(T) &= \int_0^{\infty} M_{\lambda}(\lambda, T) \, d\lambda \\ &= \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L(\theta, \phi, T) \sin\theta \cos\theta \, d\theta d\phi \\ &= \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L_{\lambda}(\lambda, \theta, \phi, T) \\ &\quad \times \sin\theta \cos\theta \, d\theta d\phi \, d\lambda \end{aligned} \quad (12)$$

である。一方、黒体からの熱放射の放射発散度 $M_b(T)$ は式 (7) および式 (10) から

$$M_b(T) = \sigma T^4 \quad (13)$$

である。したがって、物体の半球全放射率 $\varepsilon_t^h(T)$ は式 (12) および式 (13) から

$$\begin{aligned} \varepsilon_t^h(T) &= \frac{M(T)}{M_b(T)} \\ &= \frac{1}{\sigma T^4} \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \varepsilon_{\lambda}^d(\lambda, \theta, \phi, T) L_{b,\lambda}(\lambda, T) \\ &\quad \times \sin\theta \cos\theta \, d\theta d\phi \, d\lambda \end{aligned} \quad (14)$$

である。なお、 $\varepsilon_t^h(T)$ を、 $\varepsilon_{\lambda}^h(\lambda, T)$ および $\varepsilon_t^d(\theta, \phi, T)$ を用いてあらわすと、それぞれ

$$\varepsilon_t^h(T) = \frac{\pi}{\sigma T^4} \int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda}^h(\lambda, T) L_{b,\lambda}(\lambda, T) \, d\lambda, \quad (15)$$

$$\varepsilon_t^h(T) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \varepsilon_t^d(\theta, \phi, T) \sin\theta \cos\theta \, d\theta d\phi \quad (16)$$

である。

以上のように、方向分光放射率を各方向および各波長で取得し、それを用いて方向および波長で積分の計算をすることにより半球全放射率を得る。また、積分の計算を用いずに、直接、半球全放射率を測定できる方法もある。この詳細は 3.3 で述べる。

2. 5. 特定の条件における各放射率の関係

物体が特定の条件を満たすとき、各放射率には等号の関係が成り立つ。物体の表面が完全拡散面の場合は、その物体からの熱放射の分光放射輝度および放射輝度は方向に依存しない。すなわち、

$$\varepsilon_{\lambda}^d(\lambda, \theta, \phi, T) = \varepsilon_{\lambda}^h(\lambda, T), \quad (17)$$

$$\varepsilon_t^d(\theta, \phi, T) = \varepsilon_t^h(T) \quad (18)$$

が成立する。対して、物体に波長依存性がない場合、すなわち、その物体の波長特性が灰色の場合は

$$\varepsilon_{\lambda}^d(\lambda, \theta, \phi, T) = \varepsilon_t^d(\theta, \phi, T), \quad (19)$$

$$\varepsilon_{\lambda}^h(\lambda, T) = \varepsilon_t^h(T) \quad (20)$$

が成立する。さらに、表面が完全拡散面であり、かつ、波長特性が灰色の物体の場合は

$$\varepsilon_{\lambda}^d(\lambda, \theta, \phi, T) = \varepsilon_t^h(T) \quad (21)$$

が成立する。以上のように、物体が特定の条件を満たせば、方向分光放射率の測定結果を他の放射率に代えることができる。

2. 6. 放射率と吸収率の関係

吸収率 (absorptivity^{*1}) は、その物体へ入射した光に対する吸収された光の比である²⁹⁾。吸収率も放射率と同じく対象とする光の物理量、すなわち、方向および波長が単一か全範囲かで分類できる。このうち、方向分光吸収率 (directional spectral absorptivity) は、物体へ入射する光の分光放射輝度に対する吸収された光の分光放射輝度の比である。すなわち、入射する光および吸収された光の分光放射輝度をそれぞれ $L_{i,\lambda}(\lambda, \theta, \phi)$ および $L_{\text{abs},\lambda}(\lambda, \theta, \phi, T)$ とすると、方向分光吸収率 $\alpha_{\lambda}^d(\lambda, \theta, \phi, T)$ は

$$\alpha_{\lambda}^d(\lambda, \theta, \phi, T) = \frac{L_{\text{abs},\lambda}(\lambda, \theta, \phi, T)}{L_{i,\lambda}(\lambda, \theta, \phi)} \quad (22)$$

である。式 (22) は波長 λ 、方向を θ および ϕ であらわされる光が、温度 T の物体に入射した際に、その物体に吸収される割合を示している。ただし、入射する光自体は物体とは独立なので T に依存しない。

*1 吸収率の英訳は absorptance の方が一般的である。しかし、本論文では放射率の英訳 emissivity との整合性をとるため absorptivity とする。同様に、反射率の英訳も reflectivity とする。

方向分光吸収率も放射率の場合と同様に、方向と波長の積分により、対応する各吸収率を求められる。すなわち、半球分光吸収率 (hemispherical spectral absorptivity)、方向全吸収率 (directional total absorptivity)、半球全吸収率 (hemispherical total absorptivity) を求めることができる。例えば、方向全吸収率 $\alpha_t^d(\theta, \phi, T)$ は式 (11) と同様に放射輝度の比であり、

$$\alpha_t^d(\theta, \phi, T) = \frac{\int_0^{\infty} \alpha_{\lambda}^d(\lambda, \theta, \phi, T) L_{i,\lambda}(\lambda, \theta, \phi) d\lambda}{\int_0^{\infty} L_{i,\lambda}(\lambda, \theta, \phi) d\lambda} \quad (23)$$

である。

吸収率と放射率を結びつける物理法則がキルヒホッフの法則である。方向分光吸収率と方向分光放射率は等しい。すなわち、

$$\varepsilon_{\lambda}^d(\lambda, \theta, \phi, T) = \alpha_{\lambda}^d(\lambda, \theta, \phi, T) \quad (24)$$

である³⁰⁾。式 (24) は、吸収により非線形効果が生じるような特殊な条件を除き成立する。3.1 で述べる反射法では、この法則から放射率測定結果を用いて方向分光放射率を求めている。ただし、一般に、それ以外の吸収率は、方向分光吸収率とは異なり、対応する放射率とは等しくならない。例えば、 $\varepsilon_t^d(\theta, \phi, T) = \alpha_t^d(\theta, \phi, T)$ が成立するためには、式 (11) および式 (23) から $L_{i,\lambda}(\lambda, \theta, \phi) = L_{\text{b},\lambda}(\lambda, \theta, \phi, T)$ を満たす必要がある。もしくは、式 (19) からその物体の波長特性が灰色の場合である。

吸収率、反射率、透過率の和は 1 である。単一の方向および波長の場合だけでなく、それらで積分した場合も成立する。そのため、例えば、方向全吸収率は分光測定ではなく広帯域光源を用いた放射率および透過率の測定結果から求めることができる。しかし、一般に、このような方法で求めた方向全吸収率は方向全放射率と等しくならない。等しくなる条件は、その照明光が物体と同じ温度の黒体放射か、その物体の波長特性が灰色かである。方向についても、式 (7) からその照明が方向に依存せず一様であるか、もしくは、その表面が完全拡散面である必要がある。実際に、居住空間の放射伝熱の研究分野では、壁面の表面が完全拡散面かつ灰色の波長特性をもつと仮定しておこなっている^{2),31)}。

以上のように、キルヒホッフの法則から方向分光吸収率と方向分光放射率は等しい。3.1 で述べる反射法では、この関係から放射率測定結果を用いて方向分光放射率を求めている。しかし、それ以外の吸収率と放射率が等しくなるためには、特殊な条件を満たす必要がある。

2.7. 各放射率の必要な分野

方向分光放射率は、主に放射温度測定のために必要である。放射温度測定ではプランクの法則に基づき温度域に応じて波長を選択し、特定の方向への熱放射を測定する。そのため、温度、波長、方向の関数である方向分光放射率が必要である²⁷⁾。他にも、方向分光放射率はリモートセンシング用分光放射計の校正装置である黒体放射源の評価に必要である^{32), 33)}。

さらに、方向分光放射率は方向分光吸収率に等しい。そのため、方向依存性および波長依存性のある物体の各吸収率を算出するためにも、方向分光放射率は必要である。例えば、太陽光熱発電に用いられる選択吸収材料は、太陽光吸収率が高く、半球全放射率の低い性質が要求される³⁴⁾。太陽光は温度が6000 Kのときの式(1)であらわされる熱放射とよく似たスペクトルをもつので、太陽光は可視域の光を含む。この光を効率よく吸収し、熱に変換するためには太陽光吸収率を高くする必要がある。一方、吸収により得られた熱を効率よく発電に用いるためには、その伝達の過程において熱放射による損失を低く抑える必要がある。この熱放射では赤外域が支配的である。そのため、赤外域の放射を抑えるために、半球全放射率を低くする必要がある。太陽光吸収率は式(23)において $L_{\lambda}(\lambda, \theta, \phi)$ を太陽光の分光放射輝度とすることにより求める³⁵⁾。すなわち、その材料の方向分光放射率を測定すれば、計算により太陽光吸収率を求めることができる。ただし、そのときの方向分光吸収率は使用時の温度でなければならない¹⁰⁾。したがって、その材料の温度依存性も知る必要がある。

半球分光放射率および方向全放射率は、それぞれ熱設計において、放射による熱の移動の波長依存性および方向依存性を知るために必要である³¹⁾。すべての方向およびすべての波長における熱の移動量の計算のためには、半球全放射率が必要である。ステファン・ボルツマンの法則に基づき物体の温度、面積、半球全放射率から放射束を算出できるからである³¹⁾。

以上から、他の放射率を算出できる汎用性および厳密性から、最も要求される放射率は方向分光放射率といえる。

3. 放射率の測定技術

放射率の測定技術は、測定原理と測定可能な放射率の種類により3種類に区分できる。それらの特徴、技術課題、およびその解決のために提案されている方法を述べる。その後、放射率測定の現行のJIS規格^{20), 36-38)}および

実験室外においての使用を想定した簡易測定装置^{22), 39-41)}についても述べる。

3.1. 反射法

反射法では、反射率測定結果から放射率を求める。物体が不透明の場合、反射率と吸収率の和は1になる。外部光源を用いて物体を照明し、反射率を測定する。この測定結果を用いて、 $1 - \text{反射率} = \text{吸収率}$ の関係から吸収率を算出する。この吸収率が方向分光吸収率の場合、キルヒホッフの法則から方向分光放射率と等しい。したがって、反射法で測定する反射率も、方向分光吸収率と同じく、方向、波長、温度の関数である。なお、上述のように、本論文では物体は不透明とする。

一般に、方向に関して、方向分光放射率および方向分光吸収率は、放射の角度(射出角)および照明光の入射角にそれぞれ依存する。これに対して、反射率はその両方に依存する。これを示す関数が双方向反射率分布関数(Bidirectional Reflectance Distribution Function: BRDF)であり⁴²⁾、 $f_r(\lambda, \theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, T)$ とする。 $\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r$ は、それぞれ入射光および反射光の天頂角および方位角である。BRDFは特定の方向から入射した光が、それぞれの方向へ、どれだけの光が反射するかをあらわす。したがって、BRDFは物体の反射特性を完全に表現できる。

BRDFは、配光法と呼ばれる、外部光源と検出器の両方を移動させて逐次測定する方法^{42), 43)}や外部光源または検出器の内一方を固定して測定対象面を傾けて測定⁴⁴⁾する方法、半球状のスクリーンとカメラを用いたイメージングに基づいて測定する方法⁴⁵⁾により得られる。しかしながら、BRDFは方向分光放射率の算出には冗長である。入射角と反射角の両方ではなく、そのどちらかの関数である反射率の測定結果から方向分光放射率は算出できる。

方向分光放射率の算出に必要な反射率は図3のような方向入射-半球分光反射率(directional-hemispherical spectral reflectivity) $\rho_{\lambda}^{\text{dh}}(\lambda, \theta_i, \phi_i, T)$ であり、

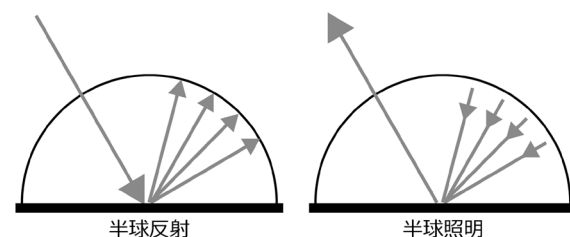


図3 半球反射と半球照明。

$$\rho_{\lambda}^{\text{dh}}(\lambda, \theta_i, \phi_i, T) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} f_r(\lambda, \theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, T) \times \sin \theta_r \cos \theta_r d\theta_r d\phi_r \quad (25)$$

である。これは、入射角 θ_i および ϕ_i の方向から入射した光に対するすべての方向への反射光の成分（半球反射）の比である。式(8)と同様の積分により求められる。ここで、光の相反則（reciprocity）より

$$f_r(\lambda, \theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, T) = f_r(\lambda, \theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i, T) \quad (26)$$

であり、BRDFは入射光と反射光の角度を入れ替えても同じである。この関係から理想条件：1. 半球反射を完全に検出可能、2. すべての方向からの一様な照明（半球照明）が可能が成立するとき、 $\rho_{\lambda}^{\text{dh}}(\lambda, \theta_i, \phi_i, T)$ は、入射光が半球照明の際の θ_i および ϕ_i で示される方向へ反射する光の反射率に等しい^{42, 46)}。これが図3のような半球入射-方向分光反射率（hemispherical-directional spectral reflectivity）であり、 $\rho_{\lambda}^{\text{hd}}(\lambda, \theta_r, \phi_r, T)$ とすると、

$$\rho_{\lambda}^{\text{dh}}(\lambda, \theta_i, \phi_i, T) = \rho_{\lambda}^{\text{hd}}(\lambda, \theta_r, \phi_r, T) \quad (27)$$

である。このとき $\theta_i = \theta_r$ および $\phi_i = \phi_r$ である。以上から、方向の変数を $\theta = \theta_i$ および $\phi = \phi_i$ と書き直すと、式(24)から

$$\begin{aligned} 1 - \rho_{\lambda}^{\text{dh}}(\lambda, \theta, \phi, T) &= 1 - \rho_{\lambda}^{\text{hd}}(\lambda, \theta, \phi, T) \\ &= \alpha_{\lambda}^{\text{d}}(\lambda, \theta, \phi, T) \\ &= \varepsilon_{\lambda}^{\text{d}}(\lambda, \theta, \phi, T) \end{aligned} \quad (28)$$

が成立する。 $\rho_{\lambda}^{\text{hd}}(\lambda, \theta, \phi, T)$ または $\rho_{\lambda}^{\text{dh}}(\lambda, \theta, \phi, T)$ の測定により、方向分光放射率を算出できる。

以上で述べた反射率の測定には、それぞれ半球反射の測定および一様な半球照明を実現する必要がある。これを可能にする素子が積分球である。積分球を用いた反射法概念図を図4に示す。図4は半球反射の測定の場合を示している。

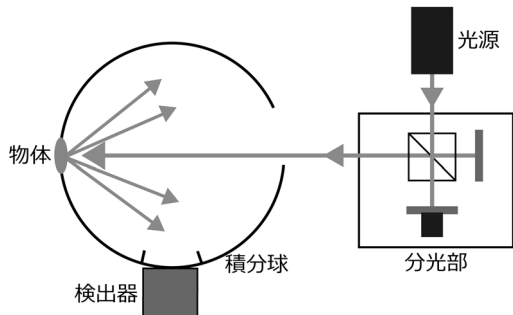


図4 反射法概念図。

積分球内部は、拡散性の高い素材で作製されている。半球反射の測定の場合、入射ポートを介して測定対象の物体へ一方向から入射した後、多重反射を繰り返し、検出器へ入射する。したがって、物体の反射の方向依存性が未知でも、その反射を一様に拡散できるので、半球反射を測定できる。反射率が既知の参照試料の測定結果との比較により物体の反射率は求まる。また、参照試料が不要な絶対測定も提案されている⁴⁷⁾。半球照明については、物体への入射の前に多重反射し、一様な半球照明を実現する⁴⁸⁾。この場合は、反射光は射出ポートを介して外部に配置した検出器に入射する。

ただし、積分球は、一般に、特定の方向からの光の入射、または、特定の方向への光の反射に対して専用設計された素子である。したがって、積分球を使用する場合は、方向分光放射率は一方向のみの測定に限定される。また、物体に対して垂直から光が入射する場合、その鏡面反射成分は、入射ポートを介して積分球の外へと反射してしまう。そのため、垂直方向の方向分光放射率を得ることは困難であり、垂直方向に対して 8° 程度の入射角による測定がおこなわれている^{48), 49)}。

他にも、物体が鏡面の場合は入射角と反射角は等しいので、鏡面反射成分のみの測定で反射率を求める方法もある。このうち、エリプソメータでは屈折率と消衰係数を得ることができる。この結果からスネルの法則により、一度の測定で方向依存性を知ることができる⁵⁰⁾。しかし、この方法は当然、鏡面物体にしか適用できず、拡散成分をも含んだ反射率の測定は不可能である。

以上のように、BRDFの測定、積分球を用いた半球反射および半球照明による測定、および鏡面反射成分のみの測定は、方向に関して、それぞれ測定できる反射率が異なる。このうち、厳密性と実用性の点から、反射法による方向分光放射率の測定では、積分球を用いた方法が主流である。

3.2. 分離黒体法

分離黒体法では、式(2)で示した定義通りに方向分光放射率を測定する。すなわち、反射法とは異なり外部光源は使用せず、物体および黒体自身からの熱放射の分光放射輝度をそれぞれ測定し、それらの比から算出する^{6), 7), 51)-55)}。

分離黒体法概念図を図5に示す。物体はチャンバ内で加熱し、その温度を制御する。一方、黒体には、空洞構造により放射率の値を1に近づけた黒体炉を用いる。物体と検出器および黒体炉と検出器の位置関係および途中の光学素子を同一にする。この状態で物体および黒体

炉からの熱放射を逐次測定し、その比により方向分光放射率を求める。この際、物体を傾けて測定すれば、放射の方向を変えた測定が可能である。したがって、分離黒体法では各方向における方向分光放射率を求めることができる。

ただし、式(2)から方向分光放射率を求めるためには、物体と黒体の熱放射は、同一の波長および温度である必要がある。波長については、分光測定をおこない、対応する波長において比をとる。温度については、物体の表面温度を測定し、黒体炉の温度をそれに一致、もしくは、近い状態にする。物体の表面温度が既知であれば、プランクの法則に基づいて黒体炉からの熱放射の測定結果は補正できるので、その物体の温度における方向分光放射率を求めることができる⁵³⁾。

しかし、その温度測定が分離黒体法の最も重要な技術課題である。放射率測定における物体表面の温度測定には、一般に、抵抗温度計や熱電対温度計のような接触式温度計を用いる。放射温度計では、その温度測定のために放射率の情報が必要だからである。しかし、これら接触式温度計は熱放射の測定の際に視野の妨げにならないように、その視野外に配置しなければならない。すなわち、放射率測定の箇所と温度測定の箇所が異なるので、温度差が生じることになる。

この課題を解決するための手法が各種提案されている。これらは

- (1) 物体全体が均一な温度になるよう加熱し、放射率測定の箇所と温度測定の箇所の温度を同じにする。
- (2) 物体の側面または背面の温度を測定し、物体表面への熱移動を計算し、放射率の測定に必要な物体表面の温度を求める。
- (3) 放射温度測定により、放射率測定箇所と同じ箇所の温度を測定する。

に分けることができる。

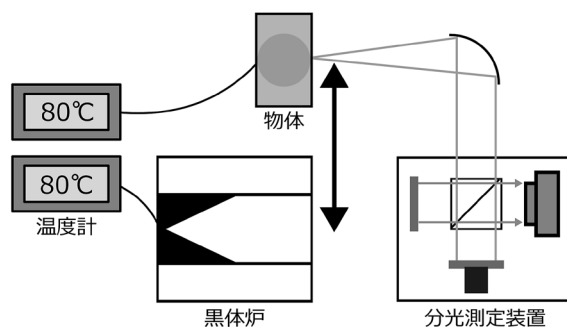


図5 分離黒体法概念図。

(1) に属する解決手法として、National Physical Laboratory (NPL, 英)⁵⁶⁾の手法の概念図を図6に示す。この手法では空洞黒体と物体を同じブロック内に閉じ込め、全体を均一に加熱する。そのため、物体に温度計を接触させず、チャンバ内の温度を接触式温度計を用いて測定することにより、黒体と物体の温度としている。放射率の測定の際には、図6における右端部のシャッターを開放し、熱放射を測定する。しかし、開放とともに温度は低下するので、温度および熱放射の時間変化を測定する。この結果の補外によりシャッターを開放した瞬間の熱放射を計算し、方向分光放射率を求める。

(2) に属する解決手法として、Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB, 独)の手法⁵⁷⁾の概念図を図7に示す。物体内部に抵抗温度計を挿入し、その箇所の温度を用いて物体表面までの熱の移動量を計算し、表面の温度を求めている。この際、図7のように対流熱伝達までもを含めた厳密な計算をおこなっている。この手法では大気中の測定であるが、PTBでは真空状態で方向分光放射率を測定する手法も提案している^{58), 59)}。真空状態にすることにより、熱対流の影響を除去し、大気中の水などによる吸収も低減させている。

(3) については、一見、矛盾した方法に見える。しかし、これを実現するために Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM, 伊)が提案し⁶⁰⁾、National Institute of Standards and Technology (NIST, 米)が発展させた^{48), 49), 61)}。その手法の概念図を図8に示す。この手法は分離黒体法に反射法を組み込んだものであり、ハイブリッド法と称されている。黒体炉と積分球からの熱放射、および放射計および分光測定装置への伝搬はミラーで切り替える。その配置とともに、この手法の手順を示すと

1 (積分球-放射計)

物体の加熱機能をもった積分球により、加熱状態で反射法を実施する。外部光源からの光を光ファイバにより積分球内に入射させる。ファイバ先端には拡散板が

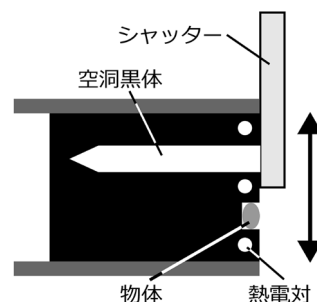


図6 NPLの手法概念図。

あり、これによる拡散照明と積分球内の反射により物体への一様な半球照明を実現する。この積分球と波長フィルタを内蔵した放射計により反射法を実施する。これにより、その波長、温度における物体の方向分光放射率を算出する。ただし、この時点では物体の温度は不明である。

2 (物体-放射計)

物体の位置はそのままの状態です。積分球のみを取り外す。1と同じ加熱状態のまま、今度は物体自身からの熱放射を放射計で測定する。

3 (物体-放射計)

黒体炉からの熱放射を放射計で測定する。これと、1で求めた方向分光放射率および2で測定した物体からの熱放射から、その物体の温度を決定する。

4 (物体-分光測定装置)

物体からの熱放射を分光測定装置で測定する。

5 (黒体炉-分光測定装置)

黒体炉からの熱放射を分光測定装置で測定する。これに対する3で測定した物体からの熱放射から、そのときの温度における物体の方向分光放射率を算出できる。

である。反射法で得られる方向分光放射率は温度測定のためのものであり、単一の方向および波長のみの値である。これを用いて物体表面の温度を決定し、各方向および各波長における方向分光放射率を黒体炉からの熱放射

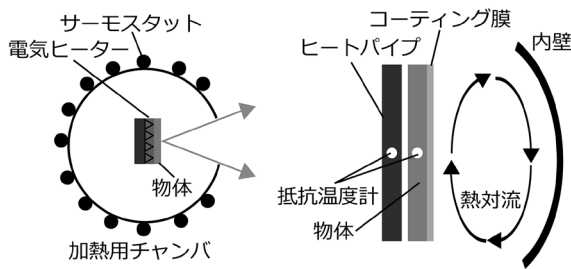


図7 PTBの手法の概念図。

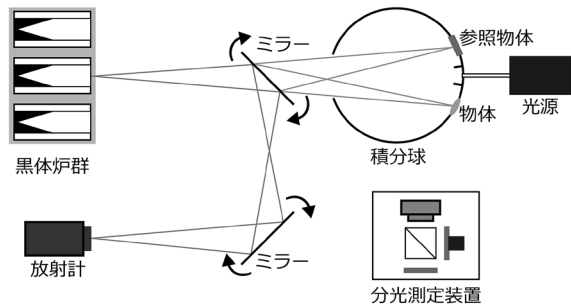


図8 NISTの手法の概念図。

との比により得ることができる。NISTでは温度域に応じた複数の黒体炉を用いて広範な温度域における測定を可能にしている⁶¹⁾。

温度測定の解決手法を比較すると、厳密性かつ汎用性の両方で最も優れた手法は(3)といえる。(1)は測定結果の外挿が必要であり、(2)では熱伝導などの他の物性値の情報が別途必要だからである。また、熱容量が低い、剛性が低いなどの、接触式温度計の使用が困難な物体にも放射温度計は使用可能な点でも優れている。

分離黒体法のもう1つの技術課題は背景放射である。背景放射とは測定対象の物体以外からの熱放射による不要な光である。主に、物体加熱用のチャンバ内壁からの熱放射や、分光装置内部からの熱放射が原因である。このうち、チャンバ内壁からの熱放射については、検出器に直接入射するものと、試料表面に反射したものがある。これらの影響の除去のために、温度の異なる複数の黒体炉からの熱放射を測定し、それらを用いた演算による補正方法が提案されている^{53), 62), 63)}。

3.3. 熱量法

反射法および分離黒体法は光を用いた測定方法であったのに対し、熱量法では熱の移動量の測定から放射率を求める。測定の際に熱放射を測定するのではなく、黒体も使用しない。さらに、反射法および分離黒体法とは異なり、半球全放射率を直接測定する⁶⁴⁾⁻⁶⁶⁾。

熱量法概念図を図9に示す。チャンバ内で加熱装置により物体に伝熱量 Q (単位はW)を与えている場合を考える。加熱装置が通電によるジュール発熱の場合はその電流値と電圧値から伝熱量は既知である。また、その物体に直接通電加熱する方法もある。図9において、熱伝導、熱対流による熱の損失および物体固定器具などによる熱の擾乱は無視できるとする。物体の半球全放射率、比熱容量、質量、表面積をそれぞれ $\epsilon_t^h(T)$ 、 $c_p(T)$ 、 m 、 A とし、物体および周辺(チャンバ内壁)の温度をそれぞれ T および T_0 とすると

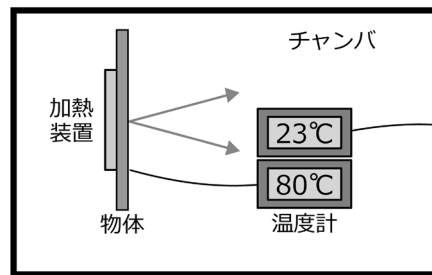


図9 熱量法の概念図。

$$mc_p(T) \frac{dT}{dt} = Q - \epsilon_t^h(T) A \sigma (T^4 - T_0^4) \quad (29)$$

が成立する。 dT/dt は温度の時間変化をあらわす。したがって、 $\epsilon_t^h(T)$ 以外の物体の値 $c_p(T)$, m , A が既知のとき、 Q , dT/dt , T , T_0 の測定により $\epsilon_t^h(T)$ を求めることができる。また、熱平衡状態にすれば、式 (29) の左辺を 0 にできるので、 $c_p(T)$ および m が未知の場合も $\epsilon_t^h(T)$ を求めることができる。

以上のように熱量法では半球全放射率を、方向分光放射率を用いた計算ではなく、直接測定できる。一方、反射法や分離黒体法では半球全放射率を算出するためには、得られた方向分光放射率を積分する。しかし、現実には光学系や検出器の制約により積分範囲に制限がある。これに対して、熱量法では原理的にすべての範囲において積分した結果である半球全放射率を直接得ることができる²²⁾。ただし、換言すると、熱量法では方向分光放射率を測定できないので、波長依存性や方向依存性を知ることができない。

熱量法の技術課題に寄生熱損失がある。寄生熱損失とは、式 (29) で想定していない物体からの熱の損失である。主に物体固定用のワイヤーや温度測定のために接触させている熱電対が原因である。熱電対が原因の寄生熱損失については、その代わりに放射温度計の使用など、解決が必要である。しかし、そのためには方向分光放射率が必要であり、別途測定が必要である。

寄生熱損失の影響を除去するために Massachusetts Institute of Technology (MIT, 米) が提案した手法¹¹⁾の概念図を図 10 に示す。図 10 では通電加熱によるヒーターを用いて物体への熱を与え、それに伴い物体から熱放射が生じている。同時に導線、ヒーター、熱電対から寄生熱損失が発生している。この手法では図 10 のように互いに反対方向に配置して測定した結果と、重ねあわせて測定した結果を用いる。重ねあわせた測定では試料からの熱放射が打ち消され、通電加熱と寄生熱損失による熱の出入りのみを測定できる。これら 3 種類の測定結

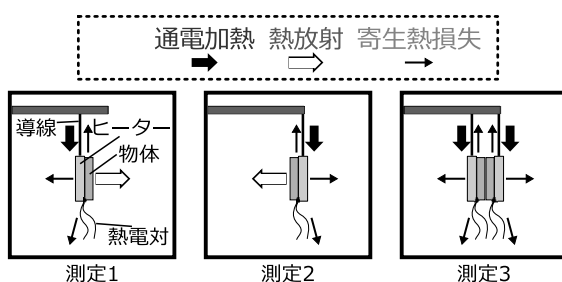


図 10 MIT の手法の概念図。

果から寄生熱損失の影響を除去している。

3. 4. 各測定方法の比較

反射法では、積分球を用いた測定では一方向の分光放射率の測定に限定される。配向法により BRDF を測定すれば全方向の分光放射率を得られるが、かなり大掛かりな系となる。また、これらは室温における測定であり、温度依存性は知ることができない。一方、分離黒体法では方向を変えての測定が可能であり、かつ、熱放射を測定する系であるので、温度依存性も知ることができる。以上から、反射法および分離黒体法ともに方向分光放射率を測定でき、それを用いた計算から他の 3 つの放射率を計算できる。しかし、温度依存性を知るには分離黒体法がより適している。一方、熱量法は、他の二手法とは異なり、方向分光放射率は測定できず、半球全放射率を直接測定できる。

以上を総括すると、すべての種類の放射率を算出でき、かつ、方向依存性および温度依存性も得られることから、分離黒体法が最も汎用的かつ実用的な測定方法といえる。特に、1 で述べたような省エネルギー部材や選択吸収材料の評価には方向分光放射率が必要であり、温度依存性も知る必要がある。これを可能にする測定方法は三手法のうち分離黒体法のみである。

3. 5. 放射率測定 の JIS 規格

放射率測定 の現行の JIS 規格^{20), 36)-38)} は 3.1~3.3 で述べた反射法、分離黒体法、および熱量法に基づいている。ただし、これら精密測定技術とは異なり、表面温度測定は接触式温度計による測定など、簡略化している。

低放射・遮熱ガラスおよびフィルムを含む板ガラス類の放射率測定である A1423²⁰⁾ では半球全放射率の算出を目的として、鏡面反射成分のみの測定の反射法が用いられている。しかし、これでは拡散反射成分を検出できず、実際よりも低い反射率としてしまう²¹⁾。その結果、高い放射率を示し、省エネルギー部材としての性能を低く評価してしまう。さらに、この規格では、一方向の測定のみをおこない、その結果に応じた係数を乗算して半球全放射率としている。しかし、その係数は物体に依存せず一律である。すなわち、この JIS 規格²⁰⁾ で得られる放射率は、厳密には半球全放射率とはいえない。

3. 6. 簡易測定装置の原理

3.1~3.3 では、実験室内でおこなわれる精密測定について述べた。これに対して、実験室外においての使用を想定した可搬型の簡易測定装置がある。これらは、建築

物の壁面の断熱性の評価や、路面の検査³⁹⁾に用いられている。

主な簡易測定装置の概念図を図11に示す。(a)は反射法に基づいた測定を示している。ヘッドを物体に近接させ、ヘッド部内壁からの熱放射を照明光源とし、簡易な半球照明を実現している。その物体における反射をヘッド内の検出器で測定している。したがって、反射法に基づき吸収率を算出し、それを放射率としている。

この装置では分光測定をおこなわない。バンドパスフィルタを介して、一定の波長幅における反射光を測定している。そのため、方向全放射率を直接測定できるように見える。しかし、2.6で述べたように、一般に、方向全放射率は方向全吸収率と等しくならない。そのため、この装置を適用できるのは波長特性が灰色の物体に対してのみである。この場合は、方向全放射率は方向分光放射率と等しいので、その値を得ることができる。対して、波長依存性の大きい物体には誤った値を示してしまう。波長依存性の大きい物体にも適用するためには、方向全放射率と方向全吸収率が等しくなるもう一つの条件、すなわち、照明光を物体と同じ温度の熱放射とする必要がある。これを達成するために、ヘッド内部を放射率の高い素材で作製し、物体およびヘッドの温度を接触式温度計で測定および温度差を低減した装置が提案されている³⁹⁾。

一方、(b)は熱量法に基づいた測定を示している。ヘッドを物体に対して近接させ、物体から検出器への正味の放射束を測定している。正味の放射束とは、物体から検出器への熱放射からその逆を差し引いたものである。それぞれの表面における放射、吸収、反射の結果が正味の放射束である。その検出器は(b)のように放射率の高い部分(図中の黒)と放射率の低い部分(図中の白)から構成される。これは、物体および検出器間の伝熱のうち、放射伝熱による熱の移動量のみを測定するた

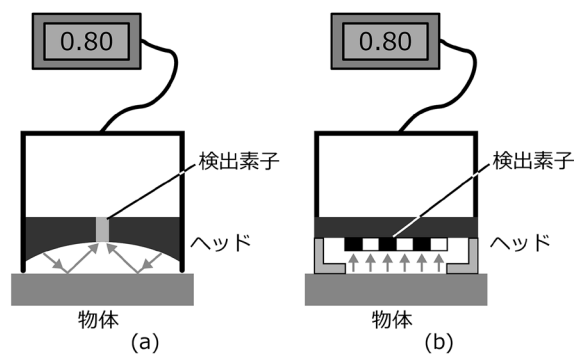


図11 簡易測定装置の概念図：(a) 反射法、(b) 熱量法にそれぞれ基づく。

めである。ヘッドと物体は非接触であるので、熱伝導は生じない。熱対流は検出器の表面において一様であるのに対し、熱放射は放射率の差により熱の移動量が異なる。これにより、放射伝熱による熱の移動量のみを測定できる。

この装置は熱量法に基づくので、半球全放射率を測定できるように見える。しかし、先述のように検出器と物体間では、放射の他に反射および吸収がある。(a)の場合と同様に、一般に、半球全放射率は半球全吸収率と等しくならない。したがって、この装置で半球全放射率を測定するためには、物体の波長特性が灰色、かつ、その表面が完全拡散面である必要がある。これを満たさない物体の場合、誤った値を得てしまう。さらに、有限の広さの表面間の放射伝熱を計算するには、形態係数と呼ばれる、検出器と物体との位置関係で決まる係数を求める必要がある²⁾。一般の熱量法に基づく簡易測定器では、無限広さの平面間を想定し、形態係数を考慮していない⁶⁷⁾。そのため、半球全放射率の測定をできておらず、実際には方向と半球の中間と捉えられている⁴¹⁾。これを解決するために、形態係数も考慮した装置が提案されている⁶⁸⁾。

以上のように、簡易測定装置は対象とする物体によっては、その簡便さから有用である。しかし、物体の特性を把握せずに用いた場合は誤った値を得てしまう。例えば、方向依存性の大きい鏡面の金属や、波長依存性の大きいフィルムなどには不適である。また、一般に、簡易測定装置には物体の温度測定の機能は備わっていないので、温度依存性の大きい物体にも不適である。これが1で述べた測定結果が一致しない一因である。

4. NMIJの放射率の精密測定技術

3では他国のNMIや学術機関で実施されている精密測定技術について述べた。以下では、NMIJで既に確立している放射率の精密測定技術を述べる。

4.1. 常温域における方向分光放射率の精密測定技術

NMIJでは $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ～ $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ の常温域における方向分光放射率の精密測定技術を確立している^{23),24)}。ただし、方向については一方向のみ(垂直方向に対して 8° の方向)であり、波長範囲は $5\text{ }\mu\text{m}$ ～ $12\text{ }\mu\text{m}$ である。

この測定系の概念図を図12に示す。これは分離黒体法に基づいている。図12には示していないが、後述するように3つの黒体炉を有している。これら黒体炉および物体からの熱放射をミラーで切り替え、分光器部

(フーリエ変換赤外分光光度計, Fourier transform infrared spectrometer: FTIR)に導き, 分光測定をおこなう。これらの熱放射の比から物体の方向分光放射率を求める。

黒体炉は常温域用の温度可変黒体炉を使用する。内部ではこの温度範囲で常に液体である, 水およびエチレングルコールの混合液体(以下, 液体)を循環させる。この温度を白金抵抗温度計で測定する。物体の温度も同様の方法で温度を測定および制御する。図13にその概念図を示す。液体を循環させ物体背面に直接, または, 物体背面に接した金属板に浴びせている。このときの液体の温度を白金抵抗温度計で測定し, 液体の温度を制御する。循環させているので, この値を物体背面の温度とすることができる。その温度を用いて物体表面までの熱の移動量を計算し, 物体表面の温度を求めている。

この測定技術では, 温度測定以外にも精密測定のための技術が凝らされている。まず, インターフェログラムの位相補正である⁶⁹⁾。FTIRでは干渉計により取得したインターフェログラムをフーリエ変換することによりスペクトルを得る。インターフェログラムは本来, 干渉計におけるミラーの光路差が0の位置を基準として対称になる。しかし, 実際には外乱などの影響で対象にならず, これが得られるスペクトルに影響する。この影響を取り除くために, インターフェログラムを補正している⁶⁹⁾。次に, 低温黒体炉を用いた背景放射の除去である。先述の温度可変黒体炉とは別に液体窒素を用いて冷却した温度77Kの黒体炉を別途用いる。常温域の測定では, 壁面や光学素子からの熱放射が物体からのそれと同等の大きさになる。そこで, この温度域よりも十分に低い低温黒体炉からの熱放射を測定し, これを零点として補正に用いている。さらに, 第3の黒体炉として, もう1台温度可変黒体炉を使用する。先の1番目の温度可変黒体炉

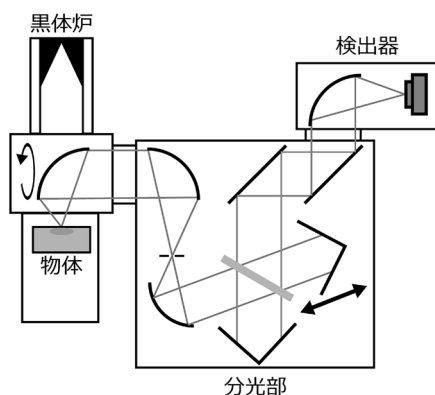


図12 NMIJにおける方向分光放射率の精密測定技術の概念図。

と同じ温度に設定し, それらの熱放射の比を求め, 測定系の非線形性の評価をおこなっている。これらに加え, 装置全体を真空状態にし, 赤外域の測定で問題になる大気中の水蒸気および二酸化炭素などの吸収の影響を取り除いている。この測定技術は, 液体を循環させることにより物体背面と白金抵抗温度計による温度測定箇所の温度を同じにし, かつ, 物体背面から表面までの熱の移動を計算している。そのため, 3.2で述べた(1)と(2)の中間に位置する手法といえる。ただし, 物体表面までの熱移動の計算にはその物体の熱伝導率などの物性値が必要である。その情報が無い場合には背面の温度を表面の温度とする。

以上のように, 3.2で述べたような分離黒体法の技術課題を解決し, 常温域における方向分光放射率の精密測定を実現している。拡張不確かさ1%以下を実現し, NISTとの国際比較によりこの精度を実証している⁷⁰⁾。ただし, 物体背面に液体を浴びせる原理故に, 検出器に対する物体の角度を変えることはできない。そのため, 一方向の方向分光放射率の測定に限られる。また, 同じくその原理故にフィルムなどの薄い剛性の低い物体の測定には不向きである。

4.2. 高温域における半球全放射率の精密測定

NMIJでは500℃~2500℃超を対象とした高温域における半球全放射率の精密測定技術を確立している⁷¹⁾。測定系の概念図を図14に示す。これは熱量法に基づいている。導電性の物体を対象とし, パルス通電加熱により物体に熱を与える^{72), 73)}。図15のように温度変化と電流・電圧変化から, 半球全放射率だけでなく複数の熱物性値を瞬時に測定可能である⁷¹⁾。

パルス通電加熱により瞬時に物体を目的の温度まで加熱する。電流・電圧を変化させ, それに伴う温度下降から比熱および電気抵抗率を算出する。その後の, 温度が時間変化に対して一定になったときに, 左辺を0とした

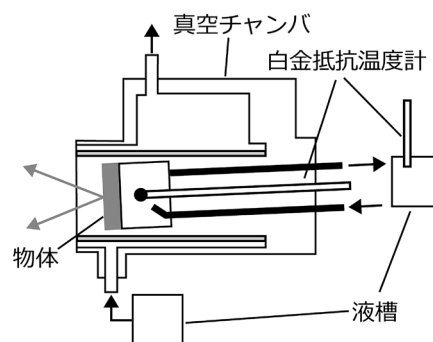


図13 水の循環による物体の温度測定概念図。

式 (29) に基づき半球全放射率を算出する。さらに、パルスレーザーを照射し、温度を上昇させ、その変化から熱拡散率および熱伝導率を算出する。

以上のように複数の熱物性値を 500℃～2500℃超において 1 秒以内の測定が可能である。そのために必要になる温度変化は放射温度計により測定している。その際に必要な方向分光放射率はエリプソメータにより求めている。

5. 調査研究結果と今後の研究課題

2～4 では、放射率の種類、精密測定技術、JIS 規格および簡易測定装置、NMIJ の精密測定技術に対する調査結果を述べた。その結果を整理し、今後の研究の方向性を示す。それを踏まえて、今後の研究課題として、現在開発中の高温域における放射率の測定技術について述べる。特徴および技術課題を示し、調査研究結果から、その解決を検討する。

5.1. 調査研究結果

2 では放射率の種類について述べた。4 種類の放射率のうち、汎用性および厳密性から最も求められている放射率は方向分光放射率と結論づけた。各方向および波長において測定した結果を積分すれば、計算により他の放射率を求めることができる。また、方向分光放射率は方向分光吸収率と等しいので、放射率と同様に、その測定結果から各吸収率を求めることができる。方向分光放射率は、それ自体は放射温度測定や黒体材料、省エネルギー部材、選択吸収材料などの評価に必要である。その積分結果である半球全放射率や太陽光吸収率（全吸収率において入射光を太陽光とした場合）は熱設計において

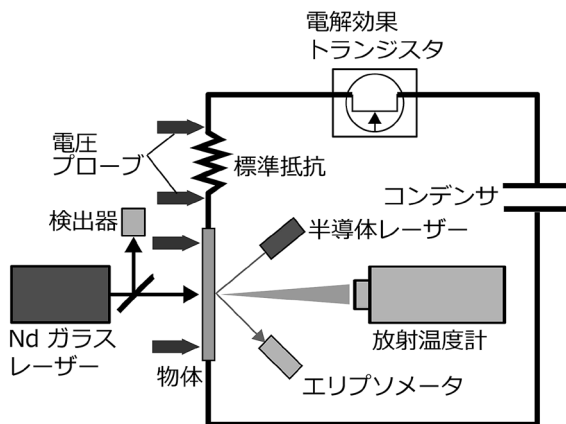


図 14 NMIJ における複数の熱物性値の精密測定技術の概念図。

必要である。したがって、各方向および波長における方向分光放射率の測定技術を確立すれば、これらのニーズに応えることができる。ただし、放射率は方向と波長に加えて温度にも依存するので、その測定技術には温度制御の機能が求められる。

3 では放射率の測定原理について述べた。放射率の測定技術は、反射法、分離黒体法、熱量法に区分できる。このうち、方向分光放射率を測定でき、かつ、方向依存性、波長依存性および温度依存性を知ることができる測定技術は分離黒体法である。しかし、物体の表面温度情報が必要であり、その測定が技術課題である。接触式温度計では、放射率の測定箇所と温度測定箇所が異なるので、本質的に温度が異なるからである。この解決のために、接触式温度計による温度測定の高精度化および非接触温度測定がある。厳密性および汎用性の点から、光学的な非接触温度測定が優れていると結論づけた。

JIS 規格も反射法、分離黒体法、熱量法に区分できる。ただし、温度測定などの技術課題はそのまま残されている。板ガラスやフィルムの評価は反射法に基づくが、鏡面反射測定であり、実際よりも低い反射率が得られてしまう。

簡易測定装置は、波長依存性や方向依存性の大きい物体には適さない。そのため、省エネルギー部材や選択吸収材料の評価には不適である。また、一般にこれら簡易測定装置には温度測定機能をもたないので、温度依存性の大きい物体にも不適である。

4 では、NMIJ で確立している放射率の精密測定技術について述べた。NMIJ では、常温域における方向分光放射率の精密測定技術と高温域における半球全放射率の精密測定技術をそれぞれ確立している。

以上を総括すると、各方向、波長、温度域において測定可能な精密測定技術を確立すれば、産業界のニーズに応えることができ、有用と考えられる。これらの依存性の大きな物体に対しての各放射率および吸収率の情報が求められているからである。しかし、NMIJ で確立して

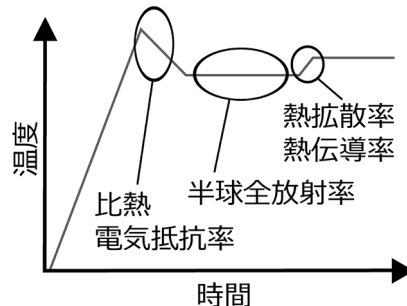


図 15 温度変化による複数の熱物性値の算出。

いる精密測定技術は常温域およびそれに対応する赤外の波長域に対してのみである。これに対して、他国のNMIでは各温度域およびそれに対応した波長域における放射率の精密測定技術を確立している。その性能の比較表を表1に示す⁷⁴⁾。この表の値は放射率測定の国際比較に使用された精密測定技術に基づいている。特に、NISTおよびPTBでは広範な温度域および波長域において高精度な測定を実現している。これに対して、NMIJではこれらが限定されていることがわかる。この温度域および波長域の拡大が必要である。

さらに、精密測定技術をJIS規格や簡易測定装置へと応用できれば、実用現場測定として有用と考えられる。そのために、JIS規格では、物体表面の温度測定などの技術課題の解決が必要である。簡易測定装置では、JIS規格と同様に温度測定と、方向および波長依存性の大きな物体に対して測定できるようにする必要がある。そのためには、やはり、その礎となる分離黒体法に基づく精密測定技術の確立が必要と考えられる。

5.2. 今後の研究課題

NMIJでは現在300℃～900℃、0.5μm～15μmにおける方向分光放射率の測定技術の研究を進めている²⁵⁾。この技術が確立すれば、温度域および波長域を拡大できる。

図16に測定系の概念図を示す。この測定技術は分離黒体法に基づく。しかしながら、図5のように黒体炉を用いていない。その代わりに、黒体として、垂直配向型カーボンナノチューブを表面に形成させたものを用いている。これは測定波長域において常に0.98以上の高い放射率をもつので⁷⁵⁾、空洞にすることなくそのまま黒体として用いている。これを図17のように測定対象の物体と並列に配置し、面状ヒーターで加熱する。これにより、従来までの分離黒体法に比べ小型な測定系とすることができ、かつ、同じ条件で加熱できる。また、物体お

よび黒体は方向可変であり、方向依存性を知ることにも可能である。

現在の主要な技術課題は物体および黒体の温度測定である。温度測定は物体および黒体の表面に、放射率測定の視野外となるように、それらの端部に熱電対を装着し、測定している。すなわち、3.2で述べた分離黒体法の技術課題がそのまま残っている。

この技術課題の解決として、物体表面の温度の光学的な測定を考える。すなわち、3.2で述べた技術課題解決方法の(3)に属する方法である。これにはNMIJで提案された放射率補正型の実接触温度測定技術⁷⁶⁾⁻⁷⁸⁾を用いることを考えている。この手法では、波長、偏光、または測定箇所などにおいて物体の放射率が異なることを利用し、それらの反射率比を放射率の算出に用いる。放射率測定に必要な方向分光放射率の情報を事前に知る

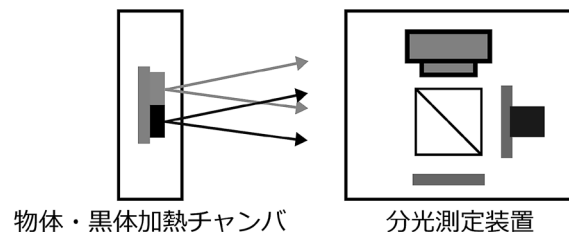


図16 NMIJの開発中の高温域における方向分光放射率の精密測定技術の概念図。

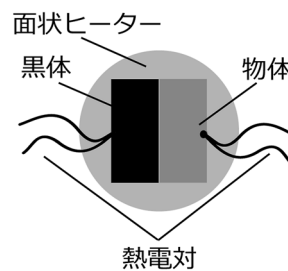


図17 検出器側から物体・黒体を真正面から見た図。

表1 各国のNMIの保有する方向分光放射率の精密測定技術の性能の比較。

	測定方法	温度 / °C	波長 / μm	相対拡張不確かさ × 100 %
NMIJ (日)	分離黒体法	-20 ~ 100	5 ~ 12	1
NIST (米)	反射法, 分離黒体法	23 ~ 900	1 ~ 20	1
PTB (独)	分離黒体法	-40 ~ 450	4 ~ 100	1
LNE (仏)	反射法, 分離黒体法	23, 100 ~ 800	1 ~ 14	3
INRIM (伊)	反射法, 分離黒体法	23, 250 ~ 1000	1 ~ 15	3
NPL (英)	分離黒体法	150 ~ 1800	0.6 ~ 9.6	6

ことなく、温度測定が可能である。目的の方向分光放射率の測定手順は、

1. 単一波長における単一方向の熱放射を測定し、放射率補正型温度測定により物体の温度を決定する。
2. 分光測定および物体の角度を変えた測定により、目的の方向分光放射率を測定する。

である。反射率の値そのものではなく、その比を用いるので、3.2で述べたハイブリッド法のような積分球の使用が不要である。また、エリプソメータとは異なり物体が粗面であっても適用可能である。放射率補正型の非接触温度測定技術の適用により、温度測定の技術課題を解決できると考えられる。

6. まとめ

本調査研究では、放射率のニーズ、既存の測定技術の特徴およびその技術課題を調査し、今後の研究の方向性を示した。

まず、放射率は方向と波長が単一か全範囲かで4種類に区分でき、それぞれ求められている分野が異なることを示した。本調査研究では、4種類の放射率のうち、汎用および厳密性から最も求められている放射率は方向分光放射率と結論づけた。特に近年ではエネルギー問題に材料の評価のために放射率の情報が求められ、それには方向分光放射率が必要であることを示した。

次に、放射率の測定技術では、測定原理および測定可能な放射率の種類から3種類に区分でき、それらの特徴および技術課題を示した。これらのうち、方向分光放射率を測定でき、かつ、方向依存性、波長依存性、温度依存性を知ることができる分離黒体法を最も汎用的な測定方法と結論づけた。主な技術課題は、物体表面の温度測定であり、精密測定技術においては、各国のNMIや学術機関が実施している取り組みを3種類に分類して示した。そのうち、厳密性と汎用性の両方で優れているのは、光学的な非接触温度測定であると結論づけた。精密測定技術を簡略化したJIS規格もあるが、これらは温度測定などの技術課題は依然残ったままである。簡易測定装置も市販されているが、特定の条件を満たす物体にしか適用できない。以上から、各温度域、波長域に適用可能な分離黒体法に基づく精密測定技術を確立すれば、産業界のニーズに応えることができると判断した。精密測定技術の確立は、JIS規格や簡易測定装置の礎になり、これらの高度化に寄与できると考えられる。

しかし、現在NMIJが保有する方向分光放射率の精密

測定技術は常温域および赤外の波長域に限定される。これら範囲拡大のために、現在開発中の高温域における方向分光放射率の精密測定技術の特徴および技術課題を示し、調査研究結果からその解決を検討した。主要な技術課題である物体表面の温度測定は、放射率補正型の光学的な非接触温度測定を適用することを検討した。

謝辞

技術的な内容の研鑽も含め、本調査研究において終始熱心なご指導・ご意見を賜りました物理計測標準研究部門の山田善郎首席研究員に深く感謝の意を表すとともに厚く御礼申し上げます。本調査研究報告の執筆および発表のプレゼンテーションにおいて有益なご意見を賜りました物理計測標準研究部門の丹波純総括研究主幹に深く感謝します。調査を進める上で、その方向性について有益なご意見を賜りました企画本部総合企画室の石井順太郎室長に深く感謝します。最後に、本調査研究において、さまざまな面から支援してくださった物理計測標準研究部門応用熱計測研究グループの皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Z. M. Zhang, B. K. Tsai, and G. Machin ed., "3.1 emissivity," in *Radiometric Temperature Measurements I. Fundamentals* (Academic Press, 2010), pp. 85-88.
- 2) 円山重直 編, "第4章ふく射伝熱" 伝熱工学 (丸善, 2005), pp. 99-122.
- 3) 計測自動制御学会温度計測部会編, "5.3 放射率," 温度計測 - 基礎と応用 - (コロナ社, 2018), pp. 284-300.
- 4) T. Walach, "Emissivity measurements on electronic microcircuits," *Meas.* **41**, 503-515 (2008).
- 5) H.-C. Lee, E.-J. Kim, J.-W. Kim, and H.-K. Oh, "Temperature behavior of pellicles in extreme ultraviolet lithography," *J. Korean Phys. Soc.* **61**, 1093-1096 (2012).
- 6) T. Furukawa and T. Iuchi, "Experimental apparatus for radiometric emissivity measurements of metals," *Rev. Sci. Instrum.* **71**, 2843-2847 (2000).
- 7) T. Iuchi and T. Furukawa, "Some considerations for a method that simultaneously measures the temperature and emissivity of a metal in a high temperature furnace," *Rev. Sci. Instrum.* **75**, 5326-5332 (2004).
- 8) N. Avdelidis and A. Moropoulou, "Emissivity consid-

- erations in building thermography,” *Energy Build.* **35**, 663–667 (2003).
- 9) Z. Song, W. Zhang, Y. Shi, J. Song, J. Qu, J. Qin, T. Zhang, Y. Li, H. Zhang, and R. Zhang, “Optical properties across the solar spectrum and indoor thermal performance of cool white coatings for building energy efficiency,” *Energy Build.* **63**, 49–58 (2013).
 - 10) T. Echániz, I. Setién-Fernández, R. Pérez-Sáez, C. Prieto, R. E. Galindo, and M. Tello, “Importance of the spectral emissivity measurements at working temperature to determine the efficiency of a solar selective coating,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **140**, 249–252 (2015).
 - 11) D. Kraemer, K. McEnaney, F. Cao, Z. Ren, and G. Chen, “Accurate determination of the total hemispherical emittance and solar absorptance of opaque surfaces at elevated temperatures,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **132**, 640–649 (2015).
 - 12) L. Del Campo, R. Perez-Saez, L. González- Fernández, X. Esquisabel, I. Fernández, P. González-Martín, and M. Tello, “Emissivity measurements on aeronautical alloys,” *J. Alloys. Compd.* **489**, 482–487 (2010).
 - 13) 太刀川純孝, “宇宙機の熱設計と熱物性” 計測と制御 **54**, 315–320 (2015).
 - 14) K. E. Andersson and C. Åkerlind, “A review of materials for spectral design coatings in signature management applications,” *SPIE Proc.* **9253**, 92530Y (2014).
 - 15) “Outcomes of the u.n. climate change conference in paris,” (Center for Climate and Energy Solutions, 2015), pp. 1–8.
 - 16) “国連気候変動枠組条約第21回締約国会議(COP21) 京都議定書第11回締約国会合(CMP11)等(概要と評価)” (2015).
 - 17) “COP21 閣僚級セッション丸川環境大臣ステートメント” (2015).
 - 18) “省エネルギー政策の動向2016以降の展開” (2016).
 - 19) “リビング・インダストリー42020年省エネ義務化で激変する住宅建築産業” *Nanto Monthly Report* **12**, 1–8 (2012).
 - 20) “JIS R 3106: 1998. 板ガラス類の透過率・反射率・放射率・日射熱取得率の試験方法”.
 - 21) 萩原伸治, “低放射率材料を用いた部材の性能評価方法に関する研究(その1)放射率測定方法の検討” *建材試験情報* **3**, 9–12 (2011).
 - 22) J. P. Millard and E. R. Streed, “A comparison of infrared-emittance measurements and measurement techniques,” *Appl. Opt.* **8**, 1485–1492 (1969).
 - 23) J. Ishii and A. Ono, “Uncertainty estimation for emissivity measurements near room temperature with a Fourier transform spectrometer,” *Meas. Sci. Technol.* **12**, 2103–2112 (2001).
 - 24) J. Ishii and A. Ono, “A Fourier-transform spectrometer for accurate thermometric applications at low temperatures,” in *TEMPERATURE*, Vol. 684 (2003), pp. 705–710.
 - 25) 石井順太郎, “中温度域赤外分光放射率測定システムの開発” 第34回日本熱物性シンポジウム講演論文集, C113 (2013).
 - 26) D. B. Newell, F. Cabiati, J. Fischer, K. Fujii, S. G. Karshenboim, H. S. Margolis, E. de Mirandés, P. J. Mohr, F. Nez, K. Pachucki, T. J. Quinn, B. N. Taylor, M. Wang, B. M. Wood, and Z. Zhang, “The CODATA 2017 values of h , e , k , and N_A for the revision of the SI,” *Metrologia* **55**, L13 (2018).
 - 27) Z. M. Zhang, B. K. Tsai, and G. Machin ed., “2.4 planck’s law of blackbody radiation,” in *Radiometric Temperature Measurements I. Fundamentals*, (Academic Press, 2010), pp. 81–85.
 - 28) Z. M. Zhang, B. K. Tsai, and G. Machin ed., “2.3 entropy and the stefan-boltzmann law,” in *Radiometric Temperature Measurements I. Fundamentals*, (Academic Press, 2010), pp. 80–81.
 - 29) Z. M. Zhang, B. K. Tsai, and G. Machin ed., “3.2 absorptivity,” in *Radiometric Temperature Measurements I. Fundamentals*, (Academic Press, 2010), pp. 88–89.
 - 30) Z. M. Zhang, B. K. Tsai, and G. Machin ed., “3.3 kirchhoff’s law,” in *Radiometric Temperature Measurements I. Fundamentals*, (Academic Press, 2010), pp. 89–90.
 - 31) 牧野俊郎, “ふく射伝熱と熱ふく射表面診断” *高温学会誌* **34**, 196–201 (2008).
 - 32) F. Olschewski, A. Ebersoldt, F. Friedl-Vallon, B. Gutschwager, J. Hollandt, A. Kleinert, C. Monte, C. Piesch, P. Preusse, C. Rolf, P. Steffens, and R. Koppmann, “The in-flight blackbody calibration system for the gloria interferometer on board an airborne research platform,” *Atmos. Meas. Tech.* **6**, 3067–3082 (2013).
 - 33) C. Monte, B. Gutschwager, A. Adibekyan, M. Kehrt, A. Ebersoldt, F. Olschewski, and J. Hollandt, “Radiometric calibration of the in-flight blackbody calibration system of the gloria interferometer,” *Atmos. Meas. Tech.* **7**,

- 13-27 (2014).
- 34) 櫻井 篤, “メタマテリアルによる自由自在な熱ふく射制御: 熱と光の新たなエネルギー変換に向けて” 伝熱 **55**, 18-23 (2016).
- 35) 若林英信, 牧野俊郎, “生活空間を構成する表面の垂直入射吸収率スペクトルの測定” 熱物性 **25**, 8-14 (2014).
- 36) “JIS R 1693-1: 2012. ファインセラミックス及びセラミックス複合材料の放射率測定法-第1部: FTIRを用いた分離黒体法による垂直分光放射率”.
- 37) “JIS R 1693-2: 2012. ファインセラミックス及びセラミックス複合材料の放射率測定法-第2部: FTIRを用いた反射法による垂直放射率”.
- 38) “JIS R 1693-3: 2012. ファインセラミックス及びセラミックス複合材料の放射率測定法-第3部: 直接加熱熱量法による半球全放射率”.
- 39) L. Ibos, M. Marchetti, A. Boudenne, S. Datcu, L. Ibos, M. Marchetti, A. Boudenne, S. Datcu, Y. Candau, and J. Livet, “Infrared emissivity measurement device: principle and applications,” *Meas. Sci. Technol.* **17**, 2950-2956 (2006).
- 40) Y.-C. M. Li, “Improved uncertainty for a modified commercial emissometer,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **91**, 735-739 (2007).
- 41) “AMST C 1371: 2004. Standard test method for determination of emittance of materials near room temperature using portable emissometers”.
- 42) Z. M. Zhang, B. K. Tsai, and G. Machin ed., “3.4 reflectivity,” in *Radiometric Temperature Measurements I. Fundamentals*, (Academic Press, 2010), pp. 90-94.
- 43) S. Kaplan and L. Hanssen, “Infrared regular reflectance and transmittance instrumentation and standards at NIST,” *Anal. Chim. Acta* **380**, 303-310 (1999).
- 44) Y. J. Shen, Q. Z. Zhu, and Z. M. Zhang, “A scatterometer for measuring the bidirectional reflectance and transmittance of semiconductor wafers with rough surfaces,” *Rev. Sci. Instrum.* **74**, 4885-4892 (2003).
- 45) H. Kostal, D. Kreysar, and R. Rykowski, “Application of Imaging Sphere for BSDF Measurements of Arbitrary Materials,” in *Frontiers in Optics 2008/Laser Science XXIV/Plasmonics and Metamaterials/Optical Fabrication and Testing*, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2008), paper FMJ6.
- 46) 牧野俊郎, 若林英信, “熱工学の実在表面の熱ふく射性質の全ほうを測定するスペクトル装置の開発,” 日本機械学会論文集 B 編 **76**, 1571-1578 (2010).
- 47) L. Hanssen, “Integrating-sphere system and method for absolute measurement of transmittance, reflectance, and absorptance of specular samples,” *Appl. Opt.* **40**, 3196-3204 (2001).
- 48) L. M. Hanssen, C. P. Cagran, A. V. Prokhorov, S. N. Mekhontsev, and V. B. Khromchenko, “Use of a high-temperature integrating sphere reflectometer for surface-temperature measurements,” *Int. J. Thermophys.* **28**, 566-580 (2007).
- 49) C. P. Cagran, L. M. Hanssen, M. Noorma, A. V. Gura, and S. N. Mekhontsev, “Temperature-resolved infrared spectral emissivity of SiC and Pt-10Rh for temperatures up to 900 °C,” *Int. J. Thermophys.* **28**, 581-597 (2007).
- 50) A. Cezairliyan, S. Krishanan, and J. McClure, “Simultaneous measurements of normal spectral emissivity by spectral radiometry and laser polarimetry at high temperatures in millisecond-resolution pulse-heating experiments: Application to molybdenum and tungsten,” *Int. J. Thermophys.* **17**, 1455-1473 (1996).
- 51) L. del Campo, R. B. Pérez-Sáez, X. Esquisabel, I. Fernández, and M. J. Tello, “New experimental device for infrared spectral directional emissivity measurements in a controlled environment,” *Rev. Sci. Instrum.* **77**, 113111 (2006).
- 52) P. Honnerová, J. Martan, M. Kučera, M. Honner, and J. Hameury, “New experimental device for high-temperature normal spectral emissivity measurements of coatings,” *Meas. Sci. Technol.* **25**, 095501 (2014).
- 53) M. Honner and P. Honnerová, “Survey of emissivity measurement by radiometric methods,” *Appl. Opt.* **54**, 669-683 (2015).
- 54) B. Hay, J. Hameury, N. Fleurence, P. Lacièriè, M. Grelard, V. Scoarnec, and G. Davee, “New facilities for the measurements of high-temperature thermophysical properties at LNE,” *Int. J. Thermophys.* **35**, 1712-1724 (2014).
- 55) L. Mercatelli, M. Meucci, and E. Sani, “Facility for assessing spectral normal emittance of solid materials at high temperature,” *Appl. Opt.* **54**, 8700-8705 (2015).
- 56) B. Zhang, J. Redgrove, and J. Clark, “New apparatus for measurement of the spectral, angular, and total emissivity of solids,” *High Temp.s-High Press.* **36**, 289-302 (2004).
- 57) C. Monte and J. Hollandt, “The determination of the

- uncertainties of spectral emissivity measurements in air at the PTB," *Metrologia* **47**, S172–S181 (2010).
- 58) C. Monte, B. Gutschwager, S. Morozova, and J. Hollandt, "Radiation thermometry and emissivity measurements under vacuum at the PTB," *Int. J. Thermophys.* **30**, 203–219 (2009).
- 59) A. Adibekyan, C. Monte, M. Kehrt, B. Gutschwager, and J. Hollandt, "Emissivity measurement under vacuum from 4 μm to 100 μm and from -40°C to 450°C at PTB," *Int. J. Thermophys.* **36**, 283–289 (2015).
- 60) M. Battuello and T. Ricolfi, "A technique for deriving emissivity data for infrared pyrometry," *High Temp.-High Press.* **21**, 303–309 (1989).
- 61) L. M. Hanssen, S. N. Mekhontsev, and V. B. Khromchenko, "Infrared spectral emissivity characterization facility at NIST," *SPIE Proc.* **5405**, 1–12 (2004).
- 62) R. B. Pérez-Sáez, L. del Campo, and M. J. Tello, "Analysis of the accuracy of methods for the direct measurement of emissivity," *Int. J. Thermophys.* **29**, 1141–1155 (2008).
- 63) L. González-Fernández, R. B. Pérez-Sáez, L. del Campo, and M. J. Tello, "Analysis of calibration methods for direct emissivity measurements," *Appl. Opt.* **49**, 2728–2735 (2010).
- 64) E. Schleiger, "Measurement of total hemispherical emittance of transparent materials at low temperature," *Appl. Opt.* **6**, 919–923 (1967).
- 65) A. Otsuka, K. Hosono, R. Tanaka, K. Kitagawa, and N. Arai, "A survey of hemispherical total emissivity of the refractory metals in practical use," *Energy* **30**, 535–543 (2005).
- 66) J. Hameury, B. Hay, and J. Filtz, "Measurement of total hemispherical emissivity using a calorimetric technique," *Int. J. Thermophys.* **28**, 1607–1620 (2007).
- 67) 牧野俊郎, "室温の測定・暑い／寒い・ふく射伝熱伝熱" **48**, 14–19 (2009).
- 68) 若林英信, 牧野俊郎, "室温の表面の全半球放射率測定器の開発" *日本伝熱学会論文集* **19**, 37–42 (2011).
- 69) A. Shimota, H. Kobayashi, and S. Kadokura, "Radiometric calibration for the airborne interferometric monitor for greenhouse gases simulator," *Appl. Opt.* **38**, 571–576 (1999).
- 70) J. Ishii and L. Hanssen, "Comparison of midinfrared absorptance scales at NMIJ and NIST".
- 71) 渡辺博道, "光通電ハイブリッド・パルス加熱法による高速多重物性測定装置の開発" *金属* **84**, 112–116 (2014).
- 72) H. Watanabe and T. Baba, "Electrical-optical hybrid pulse-heating method for rapid measurement of high-temperature thermal diffusivity," *Appl. Phys. Lett.* **88**, 241901 (2006).
- 73) H. Watanabe, "Novel pulse calorimetry taking non-uniform temperature distribution into account," *Rev. Sci. Instrum.* **77**, 036110 (2006).
- 74) L. Hanssen, B. Wilthan, C. Monte, J. Hollandt, J. Hameury, J. Filtz, F. Girard, M. Battuello, and J. Ishii, "Report on the CCT supplementary comparison S1 of infrared spectral normal emittance/emissivity," *Metrologia* **53**, Technical Suppl. (2016).
- 75) K. Mizuno, J. Ishii, H. Kishida, Y. Hayamizu, S. Yasuda, D. N. Futaba, M. Yumura, and K. Hata, "A black body absorber from vertically aligned single-walled carbon nanotubes," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **106**, 6044–6047 (2009).
- 76) Y. Yamada, T. Aoyama, H. Chino, K. Hiraka, J. Ishii, S. Kadoya, S. Kato, H. Kiyama, H. Kondo, T. Kuroiwa, K. Matsuo, T. Owada, T. Shimizu, and T. Yokomori, "In situ wafer surface temperature measurement during flash lamp annealing," *Jpn. J. Appl. Phys.* **49**, 04DA20 (2010).
- 77) Y. Yamada and J. Ishii, "Emissivity compensation utilizing radiance distribution in thermal images for temperature measurement of electronic devices," *Jpn. J. Appl. Phys.* **50**, 11RE04 (2011).
- 78) Y. Yamada and J. Ishii, "Toward reliable industrial radiation thermometry," *Int. J. Thermophys.* **36**, 1699–1712 (2015).