回転だ円体面鏡式垂直入射半球反射率 スペクトル測定装置の開発*

吉田 敏 實^{*1}, 田 中 貞 行^{*1}, 牧 野 俊 郎^{*2}

A New Ellipsoidal Mirror-type Reflectometer for Measuring Normal-Incident Hemispherical Reflectance Spectrum

Toshimi YOSHIDA, Sadayuki TANAKA and Toshiro MAKINO

A new reflectometer system is developed for measuring the radiative characteristics of solid materials from a thermal engineering point of view. This system employs an ellipsoidal mirror in a simple optical alignment, and measures the spectrum of the normal-incident hemispherical reflectance in a wavelength region from 0.35 to 1.10 μm . A single spectral scanning offers the hemispherical reflectance spectrum which completely covers both of the specular and diffuse components of reflection. The reflectance is directly interpreted into the absorptance for the normal incidence. The system also measures the angular dependence of reflection readily. The system is applied to a systematic study on the reflection characteristics of rough metallic surfaces. The predominant contribution of the specular component in the angular characteristics is demonstrated.

Key Words: Thermal Radiation, Heat Transfer, Thermophysical Property, Spectroscopic Measurement, Hemispherical Reflectance, Optical Absorption, Angular Characteristics, Real Surface, Surface Roughness

1. 緒 言

熱工学の対象となる実在表面は複雑かつ多様であるが、その熱ふく射性質を系統的に明らかにするためには、理論モデルの研究を進めると同時に、この研究にふさわしい実験方法の可能性を拡大することが望まれる。一方、熱工学の応用の立場からすれば、個々の表面のふく射 (radiation) の吸収 (absorption)・放射 (emission) 性質を適宜簡易的に調べることは重要であり、そのための実験手法の確立が望まれる。

ところで、熱工学は一般に温度差のある灰色ではない表面間のふく射伝熱を取扱い、この場合全吸収率は全放射率に等しくないのが、実験は分光学的になされることが重要である。また、放射測定の困難な、温度のあまり高くない表面の可視・近赤外域での性質を調べるには反射測定がふさわしいが、一般に実在表面は光学鏡面でも完全拡散反射面でもないのが、実験では吸収エネルギーの評価につながる量である半球反射率やその鏡面・拡散反射成分、さらには表面反射の角度特性に注目することが重要である。

本研究では、以上の点を考えて、実在表面の反射性質の波長・角度特性に注目する熱工学の分光実験のひとつの方法を提案することを目的とする。可視・近赤外域用の垂直入射半球反射率スペクトル測定装置を開発し、これをあらい金属表面の反射性質の研究に応用してその有効性を示す。

記 号

A_N : 垂直入射吸収率
 R_{NH} : 垂直入射半球反射率
 R_{NN} : 垂直入射鏡面反射方向反射率
 $R(0 \sim \theta)$: 垂直入射するふく射エネルギーに対する反射角 ($0 \sim \theta$) の方向への反射エネルギーの比
 ϵ_N : 垂直放射率
 λ : 真空中でのふく射の波長, m
 Σ : 試料表面の平均二乗 (rms) あらさ, m
 θ : 反射角 (試料で反射されるふく射の伝搬方向の天頂角)
 $\rho(\theta)$: 反射角 θ の方向への強度反射率

2. 測定装置開発の構想

本研究で拡散反射性 (不透明) の表面を対象とする反射率測定装置を開発するにあたって、まず、従来の

* 平成2年11月6日 第11回日本熱物性シンポジウムにおいて講演, 原稿受付 平成3年1月16日。

^{*1} 正員, 福井工業高等専門学校 (〒916 鯖江市下司町)。

^{*2} 正員, 京都大学工学部 (〒606 京都市左京区吉田本町)。

方法の熱工学的意味を分析し、装置の具備すべき要件を定める。

従来の方法^{(1)~(3)}のうち、2方向反射率 (bi-angular reflectance) 法は、反射の角度特性をもっとも詳細に調べるものであるが、この方法で多くの測定値から煩雑な手つづきを経て求められる吸収率には測定誤差が累積されるため、熱工学の研究には必ずしも有効ではない。積分球法は、簡便であり吸収の波長に注目する化学分析によいが、この方法で測定される反射率はとくに角度特性について明確に定義されないものである。黒体空洞法は、半球等強度入射指向反射率を与えるが、原理的に赤外の限られた波長域、また実質的に室温の試料についてのみで有効である。熱工学の分野で提案された回転放物面鏡⁽⁴⁾や回転だ円体面鏡⁽⁵⁾を用いる垂直入射半球反射率測定法や半球等強度入射垂直反射率測定法⁽⁶⁾は吸収率の評価につながる測定法であるが、文献(4)~(6)の段階のものでは鏡面反射成分を別途に測定しなければならないなど不備を残している。そこで、本研究の測定装置ではつぎの4点を要件とする：

- (1) 測定の原理が簡明である。
- (2) 垂直入射半球反射率を1回の走査で測定し、吸収率(の絶対値の)スペクトルを求めることができる。
- (3) 反射の角度特性が、拡散反射性の程度を検討できる程度に(適当に雑に)考慮できる。
- (4) 可視~赤外域で、高温・低温の試料にも対応できる可能性をもつ。

装置は、立体角(2π)以上の方向への反射光をもとらえるほどに十分に大きな回転だ円体面鏡を用いる点を特

色とする。

3. 測定装置および測定方法

本研究で開発する測定装置は、単色光を試料に垂直入射しその半球方向への反射光束を測定する方式のものである。測定の波長域は $0.35\sim 1.10\ \mu\text{m}$ である。

3.1 測定装置 図1に測定装置の概要を示す。光源は発光部が $0.5\times 2.0\ \text{mm}$ の大きさのタングステン・よう素ランプ①である。この光源からの光を光学チョップ②、回折格子分光器(焦点距離 $100\ \text{mm}$)④、高次回折光除去フィルタ③により $237\ \text{Hz}$ の断続単色光とし、入射光学系部⑤、⑥を通して試料⑦の表面に入射する。試料は直径 $10\ \text{mm}$ 、厚さ $1\sim 2\ \text{mm}$ の(不透明)平板であり、回転だ円体面鏡⑧の第1焦点に設置する。だ円体面鏡は長径 $490\ \text{mm}$ 、短径 $270\ \text{mm}$ (焦点距離 $40, 450\ \text{mm}$)、口径 $220\ \text{mm}$ のアルミニウム蒸着鏡(無保護被膜)であり、その中央には入射光束が通過する直径 $20\ \text{mm}$ の開孔を備えている。その主軸は入射光軸に一致させる。試料は、その鏡面反射成分が開孔から逃げないように、入射光軸に対して 15° 上方に傾けて設置する(図1の右側の図参照)。多くの場合、 15° 入射に対する反射特性は垂直入射に対する特性に近似できる。だ円体面鏡は十分に大きいので、試料から反射角(反射の天頂角) $\theta=0\sim 90^\circ$ の方向に向かう半球反射光束のほぼすべてをとらえ、その光束をだ円体面鏡の第2焦点に設置される検知器⑩に導く。検知器は受光面積 $10\times 10\ \text{mm}$ のシリコン・フォトダイオードである。検知器の受光面は、受光面での鏡面反射光が試料に再入射しないようにだ円体面鏡の主軸に対して 18° だけ傾けてある。検知器の出力は位相検波増幅

図1 垂直入射半球反射率スペクトル測定装置の概要

し記録する。

3・2 測定方法 半球反射率を測定するには、図1の光束絞り⑨を全開の状態に設定し、まず、試料について半球反射スペクトルを測定する。ついで、アルミニウム蒸着鏡参照表面を対象として同様の測定を行う。この表面の光学定数は既知でありその絶対反射率は計算できる。2種のスペクトル測定値を比較し15°入射半球反射率のスペクトルを求める。この反射率は垂直入射半球反射率 R_{NH} に近似できる。反射率 R_{NH} は垂直入射吸収率 A_N と、

$$A_N = 1 - R_{NH}$$

で関係し、 A_N は熱平衡条件下で垂直放射率 ϵ_N に等しい。

反射の角度特性を調べるには、ひとつずつの波長点で光束絞り⑨を開閉・設定し同様の測定を繰返す。この測定により、反射角 ($0 \sim \theta_j$) のすい状の立体角に反射されるエネルギーの入射エネルギーに対する比である反射率 R ($0 \sim \theta_j$) を求める。この一連の値 ($j=1, 2, 3, \dots$) をもとにして、次式に定義する反射角 θ_i の方向への強度反射率 $\rho(\theta_i)$ の分布を計算する。

$$\rho(\theta_i) = \frac{R(0 \sim \theta_{j+1}) - R(0 \sim \theta_j)}{2 \cdot \Delta(\sin^2 \theta_i)} \\ = \frac{\int_{\sin^2 \theta_j}^{\sin^2 \theta_{j+1}} \rho(\theta) d(\sin^2 \theta)}{\sin^2 \theta_{j+1} - \sin^2 \theta_j} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、

$$\Delta(\sin^2 \theta_i) = (\sin^2 \theta_{j+1} - \sin^2 \theta_j) / 2 \dots\dots\dots (2)$$

$$\sin^2 \theta_i = (\sin^2 \theta_{j+1} + \sin^2 \theta_j) / 2 \dots\dots\dots (3)$$

である。ここでは、垂直に近い方向からの入射に対して反射特性の方位角依存性は弱いとみなしている。反射率 $\rho(\theta)$ は、これを $\sin^2 \theta$ に対して曲線で示すと曲線の下部の面積が対応する θ 領域に反射されるエネルギーの割合を表す性質のものである。曲線は光学鏡面の場合には $\theta=0$ でデルタ関数的になり、完全拡散反射面の場合には横軸に平行な直線となる。したがって、このような測定からは拡散反射性の傾向がよく評価できる。

3・3 測定装置の性質

3・3・1 測定誤差の要因 測定の系統誤差の主たる要因としてつぎの3点を検討する。まず、試料での拡散反射光束の一部がだ円体面鏡の開孔から逃げる分

と試料ホルダが光束を遮って検知器に達するのを阻む分の立体角割合は合せて4%以内である。また、だ円体面鏡への入射光束の入射角は45°以内であり、この範囲でアルミニウム鏡面の反射率の入射角依存性は、本測定装置における入射光の偏光特性を考慮して、2%以内である。さらに、検知器への21°以内の入射角の入射に対する出力の入射角依存性は2%以内である。測定の偶然誤差については4・2節で言及する。

3・3・2 測定の対象となる表面 本測定において検知器が観測する反射光束は、入射光束が試料表面につくる1×1mm程度の像のうちの0.9×0.9mmの程度の部分からのものである。したがって、本測定が対象とするのはこの実効的な被測定部に含まれる微視構造の平均的な特性である。試料は、原理的に高温あるいは低温であってもよい。試料などからの放射(emission)分は位相検波増幅の過程で分離され、純粋な反射分が測定される。測定の正確度を厳密にするには光学チョップ面を冷却することができる。

3・3・3 波長域・偏光特性・応用性 本装置の測定波長域は0.35～1.10 μm であるが、光源・検知器などを交換すれば、これを長波長側に拡張することは原理的に可能である。反射の偏光特性を調べるには入射光路に偏光子を設けて測定を行えばよいが、入射が垂直に近い本測定法では、試料が(表面に平行な二次元平面内で)等方的なものである限りこの点は重要ではない。

4. あらい表面の反射性質に関する実験

本測定法が実在表面のふく射性質の系統的な研究において有効であることを示すために、これをあらい金属表面の反射性質の実験研究に応用する。

4・1 供試試料 供試試料の素材は表1に化学組成を示す軟鋼の圧延平板であり、その平均結晶粒径は35 μm の程度である。試料は、その表面を最大あらし

表1 供試試料の化学組成 (wt.%)

C	Si	Mn	P	S
0.003	0.1	0.2	0.02	0.01

表2 供試試料の表面あらし Σ (*:乾式研磨面, その他は湿式研磨面)

JIS #	(buffed)	2000*	1200	800	400	240	120*
Σ μm	0.012	0.036	0.040	0.077	0.22	0.63	0.93

が(光干渉法による測定で)30 nm 以下になるようにバフ研磨して光学鏡面とし,あるいはこれを計6種のJIS研磨紙で一定の方向に湿式または乾式研磨してあらい表面としたものである。触針式のあらさ計で測定した研磨方向に垂直な方向の平均二乗あらさ Σ は表2に示す程度のものである。ただし,この測定では表面のうねりを除くカットオフ値を0.08 mmに設定した。これらの試料を表面の研磨方向が回折格子の溝の方向に一致するように設置し,その場合の反射特性を調べる。

4.2 半球反射率スペクトル 図2にあらい表面の半球反射率 R_{NH} のスペクトルの実験結果を示す。 λ は真空中でのふく射の波長である。図3に R_{NH} のあらさ Σ に対する関係を示す。 R_{NH} 測定の再現性はおおむね図3の実験点の大きさの範囲内である。測定値のばらつきはおもに試料研磨の際の表面状態の再現性に起因する。図2で,光学鏡面の場合には,鏡面反射方向反射率 R_{NN} は半球反射率 R_{NH} に等しいが,本実験の

R_{NH} スペクトル(specular, ○印)は従来の研究⁽⁷⁾における軟鋼についての R_{NN} の結果(△印)とよく一致する。あらい表面の R_{NH} は光学鏡面のそれに比べて小さいが,この場合にも R_{NH} は波長 λ の増加とともに増加する。また,湿式研磨面では, R_{NH} はあらさ Σ の増加とともに単調に減少する。しかし,表面のあらさがふく射の波長に比べて同程度に大きい表面や乾式研磨面の場合には R_{NH} の λ, Σ 特性は異質である。この点は,表面のふく射性質に関しては, Σ がその微視形状を特徴づけるに十分な量ではないこと⁽⁸⁾を示唆する。この点は, R_{NH} の無次元波長(λ/Σ)に対する関係を示す図4においても検討される。すなわち,表面の光学定数が波長に依存しない場合(λ/Σ)はあらい表面の鏡面反射方向への反射性質を特徴づけるが⁽⁹⁾,この見積もりの R_{NH} についての妥当性の程度は図4に破線で示す領域の程度である。

4.3 反射の角度特性 図5に反射の角度特性を調べる。図5は強度反射率 $\rho(\theta)$ を $\sin^2 \theta$ に対して示すものであり,図5中の点は,反射角 $\theta=10, 23, 38,$

図2 あらい金属表面の R_{NH} スペクトル

図3 あらい金属表面の Σ と R_{NH} の関係

図4 規格化した波長(λ/Σ)に対するあらい金属表面の R_{NH} スペクトル

図5 あらい金属表面の $\rho(\theta)$ 対 $\sin^2 \theta$ 特性

52, 67, 80°に対応する。ここで、本実験の試料は明らかに非等方的なものであるがこの点を考慮しなければならないが、定性的な議論は可能である。すなわち、# 2000 研磨面の場合にはほぼ鏡面反射的である。あらさ Σ の増加とともに表面の拡散反射性は有意に増加する。一方、 Σ が 0.22 μm の程度に大きい # 400 研磨面の場合にも鏡面反射性はなお強く、完全拡散反射の近似（ディフューズ近似）が妥当である程度には遠い。この点は著者らのひとりの理論計算・実験の結果⁽⁸⁾と定性的に一致する。

5. 結 言

本研究では、熱工学の基礎研究と簡易測定のために、垂直入射半球反射率と反射の角度特性に注目するスペクトル測定装置を開発した。また、この装置をあらわい金属表面の反射性質の基礎研究に応用して装置の有効性を例証した。その測定では、表面あらさが半球反射率スペクトルに及ぼす効果の程度を示し、反射性質における強い鏡面反射性を明らかにした。なお、熱工学へのより直接的な応用のためには、さらに半球等強度

入射半球反射率スペクトル測定装置が開発され半球放射率が評価されることが望ましい。

最後に、本研究経費の一部は文部省科学研究費補助金によったことを記して感謝する。

文 献

- (1) Eckert, E. R. G. and Goldstein, R. J. 編, *Measurements in Heat Transfer*, 2nd Ed., (1976), 425, Hemisphere.
- (2) 日本機械学会編, 熱測定技術, (1986), 60, 朝倉書店.
- (3) DeWitt, D. P. and Nutter, G. D. 編, *Theory and Practice of Radiation Thermometry*, (1988), 91, John Wiley and Sons.
- (4) Shafey, H. M., ほか 4 名, *AIAA J.*, 20-12 (1982), 1747.
- (5) Terada, N., ほか 3 名, *Int. J. Thermophys.*, 7-5 (1986), 1101.
- (6) Makino, T., ほか 2 名, *Int. J. Thermophys.*, 9-6 (1988), 1121.
- (7) Makino, T. and Kunitomo, T., *Bull. JSME*, 20-150 (1977), 1607.
- (8) Makino, T. and Kaga, K., *Proc. 3rd ASME/JSME Thermal Eng. Joint Conf.* 1991, 4 (1991), 27.
- (9) Siegel, R. and Howell, J. R., *Thermal Radiation Heat Transfer*, 2nd Ed., (1981), 127, Hemisphere.