

熱工学の実在表面の熱ふく射性質の全ぼうを測定する スペクトル装置の開発*

牧野 俊郎*¹, 若林 英信*²

A New Spectrophotometer System for Measuring Thermal Radiation Characteristics of Real Surfaces of Thermal Engineering Entirely

Toshiro MAKINO*³ and Hidenobu WAKABAYASHI*³

*³ Department of Mechanical Engineering and Science, Kyoto University, Kyoto 606-8501, Japan.

In this work we develop a new spectrophotometer system for measuring thermal radiation characteristics of real surfaces of thermal engineering entirely. This system measures transition of spectra of normal incidence hemispherical reflectance R_{NH} , normal incidence specular reflectance R_{NN} , normal incidence diffuse reflectance R_{ND} , normal absorptance A_N and normal emittance ε_N of real surfaces in a near-ultraviolet through infrared region of wavelength 0.30~10.9 μm simultaneously and repeatedly with a cycle time of 6 s. The system is applied to measure the spectrum transition of the reflectances, absorptance and emittance of a nickel surface which is prepared as a clean optically smooth surface and is oxidized in high-temperature air to be changed to an oxidized rough real surface. Microscopic mechanisms of the spectrum transition are discussed, to illustrate the ability of the developed spectrophotometer system for thermal engineering.

Key Words : Thermal Radiation, Spectroscopic Measurement, Simultaneous Measurement, Reflectance, Absorptance, Emittance, Real Surface.

1. 緒 言

熱工学の基礎研究として表面の熱ふく射性質の研究は重要である。熱工学の表面は工業装置や自然界の実環境下にある実在表面であり、多かれ少なかれ拡散反射性のものである。その表面状態は実環境下で時々刻々にも変化し、あるいは表面のマイクロ加工プロセスにおいては積極的に変化させられる。

このような実在表面のふく射(radiation)の反射(reflection)・吸収(absorption)・放射(emission)性質を研究するには、熱工学のための独自の測定装置を開発することが望まれる^{(1),(2)}。すなわち、(1) 研究は分光学的に行われるべきであり、装置は Planck 分布の及ぶ可視~赤外の広い波長域をカバーすべきである。(2) ふく射性質の方向特性は重要であり、装置は、とくに半球反射・鏡面反射・拡散反射の大きさを評価できるものであるべきである。(3) 装置は、また、

表面状態の時間変化にともなうふく射性質の変化を実時間的に追尾できるものであるべきである。

著者らは、2001 年に、近紫外~赤外の波長域の垂直入射鏡面反射率 R_{NN} と垂直放射率 ε_N のスペクトルの経時変化を同時測定するスペクトル装置を開発した⁽³⁾。この装置は、金属実在表面のふく射特性の推移のダイナミックスを明らかにし、表面の温度・マイクロ構造を実時間診断することを可能にし⁽⁴⁾、あるいは、ふく射スペクトル機能性表面の開発の可能性を示唆した⁽⁵⁾。著者らは、また、その装置を基礎として、垂直入射半球反射率 R_{NH} と垂直放射率 ε_N のスペクトルを同時測定する装置を開発した⁽⁶⁾。この装置は、厳密に定義された半球反射率 R_{NH} を測定することにより、垂直入射吸収率 A_N スペクトルの評価を可能にした。この装置を用いて、Kirchhoff の法則の検証を試み⁽⁷⁾、また、高温の金属における新しいふく射現象を見出した⁽⁸⁾。

熱工学のふく射性質の全ぼうを明らかにするためには、さらに測定装置の開発を進めることが望まれる。すなわち、図 1 に示す垂直入射半球反射率 R_{NH} 、垂直入射鏡面反射率 R_{NN} 、垂直入射拡散反射率 R_{ND} 、垂直入射吸収率 A_N 、垂直放射率 ε_N の広い波長域に

* 原稿受付 2010年 4月 日。

*¹ 正員, フェロー, 京都大学大学院工学研究科
(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)。

*² 正員, 京都大学大学院工学研究科。

E-mail: makino.toshiro.2a@kyoto-u.ac.jp

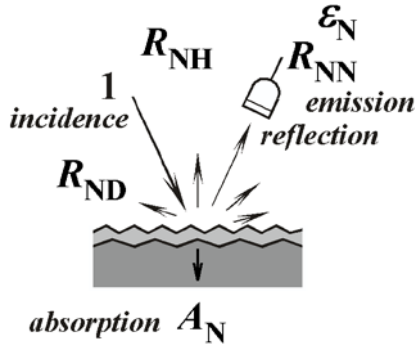


Fig.1 Concepts of normal incidence hemispherical reflectance R_{NH} , normal incidence specular reflectance R_{NN} , normal incidence diffuse reflectance R_{ND} , normal absorptance A_N and normal emittance ϵ_N

おけるスペクトルの推移を同時に測定できるようにするのが望ましい。図1では、「垂直」を垂直に近い方向に置き換えて描いている。

本研究では、これまでの測定装置^{(3),(6)}を基礎として、図1に示す反射・吸収・放射の量の近紫外～赤外の波長域におけるスペクトルの推移の全ぼうを測定できるスペクトル測定装置を開発する。ニッケルの清浄な光学鏡面が大気中で高温酸化されて被膜のあるあるいは実在表面に推移する過程におけるスペクトルの推移を測定し、開発した装置の有効性を例証する。

おもな記号

- A_N : 垂直入射吸収率
 d : 表面被膜の厚さ, m
 n : 屈折率
 R_{HN} : 半球等強度入射垂直反射率
 R_{ND} : 垂直入射拡散反射率, R_{NH} の拡散反射成分
 R_{NH} : 垂直入射半球反射率
 R_{NN} : 垂直入射鏡面反射率, R_{NH} の鏡面反射成分
 t : 表面の加熱開始後の時刻, s
 ϵ_N : 垂直放射率
 λ : 真空中でのふく射の波長, m
 $\lambda_{(1)}$: 反射率 R_{NN} スペクトルの第1次干渉のうねりの谷の波長
 σ : 表面の rms あらさ, m
(添字)
B : 黒体
H : 半球等強度入射, 半球反射
N : 垂直, 実験では 15° 方向入射・反射・放射

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置の構想 図1に示す反射・吸収・放射の量の中で、垂直入射半球反射率 R_{NH} はもっとも重要な測定量の1つであるが、実験装置設計の容易さからすれば、垂直入射半球反射率 R_{NH} を直接に測定するより、半球等強度入射垂直反射率 R_{HN} を測定し、Helmholtzの相反則(reciprocal law)⁽⁹⁾

$$R_{NH}=R_{HN} \quad (1)$$

によって垂直入射半球反射率 R_{NH} を求めるのが有利である。加えて半球反射率 R_{NH} の鏡面反射成分である垂直入射鏡面反射率 R_{NN} を同時に測定すれば、半球反射率 R_{NH} の拡散反射成分である垂直入射拡散反射率 R_{ND} は、式、

$$R_{ND}=R_{NH}-R_{NN} \quad (2)$$

によって計算される。また、垂直入射吸収率 A_N は、式、

$$A_N=1-R_{NH} \quad (3)$$

によって計算される。

そこで、半球等強度入射垂直反射率 R_{HN} 、垂直入射鏡面反射率 R_{NN} 、垂直放射率 ϵ_N のスペクトルを同時に測定するスペクトル測定装置を開発する。ただし、実際には「垂直入射鏡面反射」の測定は難しいので、入射角・反射角・放射角が 15° の方向についての実験をもって代える。

2.2 スペクトル測定装置 図2に、本研究で開発した半球等強度入射垂直反射率 R_{HN} 、垂直入射鏡面反射率 R_{NN} 、垂直放射率 ϵ_N の測定のための光学系の概要を示す。この光学系を、さきに開発した測定装置^{(3),(6)}に結合する。図3に、その光学系を結合したスペクトル測定装置の概要を示す。

図2、図3で、直径120 mmの2つの回転放物面鏡③、④をたがいに向き合わせて設置する。放物面鏡③、④の中央には直径12 mmの小孔がある。放物面鏡③の焦点に 3.3×0.6 mmの近紫外～近赤外ふく射光源①または 4.7×1.3 mmの赤外ふく射光源②を置く。これらの光源は近似的に強度が等方的なふく射を放射する。2つの光源のうちの1つが焦点にあるときには、放射されたふく射は放物面鏡③で平行光束に変換されてもう1つの放物面鏡④に進む。放物面鏡④の焦点に試料⑤の表面を、放物面鏡④の光軸から 15° 傾けて設置する。その表面には放物面鏡④から近似的に半球等強度のふく射が入射する。表面で半球的に反射されたエネルギーのうち 15° 反射(垂直反射とみなす)の方向に進む成分(半球等強度入射垂直反射成分)が放物面鏡④の小孔を通してス

ペクトル測定装置の分光・検知系に導かれ測定される。この分光・検知系については、文献(3)に詳述している。

15° 入射(垂直入射とみなす)鏡面反射が測定できるように、2つの放物面鏡③、④の間に直径 130 mm のシャッター円板⑦が挿入・除去できるようにしてある。その円板⑦には中心から 16 mm 離れた位置に直径 13 mm の小孔がある。その円板⑦が平行光束を遮らない場合には試料⑤の表面には、上述の半球等強度のふく射が入射する。その円板⑦が平行光束を遮る場合には試料⑤の表面には円板の小孔を通してふく射が 15° 方向(垂直入射とみなす)から入射する。このときには、試料⑤の表面において鏡面反射方向に反射される成分(垂直入射鏡面反射成分)がスペクトル測定装置の分光・検知系に導かれ測定される。

試料⑤の表面からは、上述の反射成分のほかに、放射のうち放射角 15° の方向(垂直放射とみなす)に進む成分が放物面鏡④の小孔を通してスペクトル測定装置の分光・検知系に導かれ測定される。すなわち、(反射+放射)が測定される。いっぽう、光源①と②のいずれもが焦点から外れた位置に置かれるときには、試料⑤の表面への入射はなく、放射だけが測定される。この2種の測定から半球等強度入射垂直反射の分あるいは垂直入射鏡面反射の分と垂直放射の分とを分離する。

スペクトル測定では、 $\lambda=0.30\sim10.9\ \mu\text{m}$ の 93 波長点における反射と $\lambda=1.93\sim10.9\ \mu\text{m}$ の 42 波長点における放射のスペクトルを同時に 6 s ごとにくり返し測定する。半球等強度入射垂直反射率 R_{HN} と垂直入射鏡面反射率 R_{NN} の絶対値は、 $t=0\ \text{s}$ の清浄なニッ

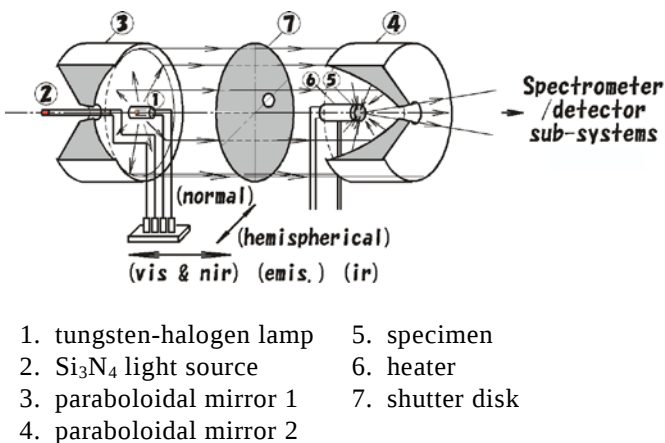
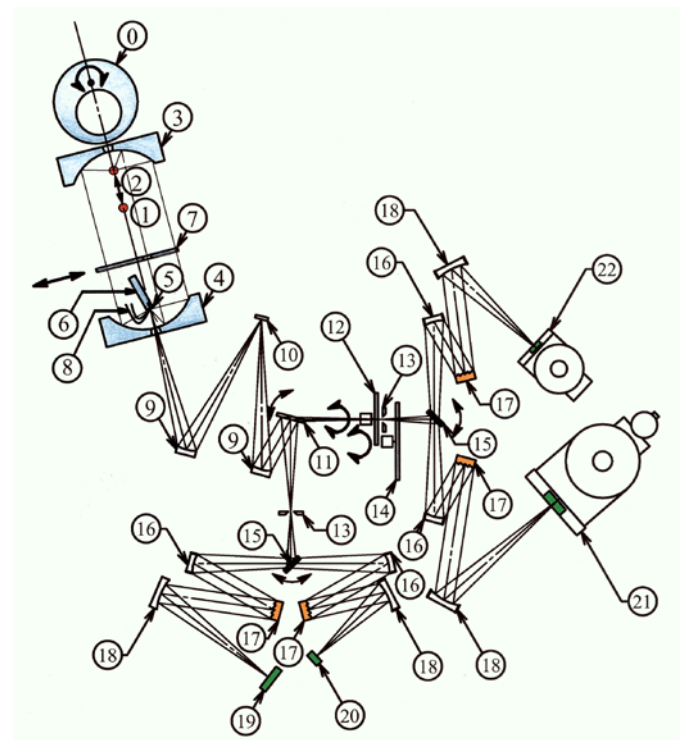


Fig.2 Sketch of optical sub-system for measuring normal reflectance R_{HN} for hemispherically homogeneous incidence, normal incidence specular reflectance R_{NN} and emittance ε_{N}

ケルの光学鏡面について測定した鏡面反射スペクトルと文献(10)の示す光学定数スペクトルに基づいて決定する。垂直放射率 ε_{N} の絶対値は、見かけの垂直放射率が 0.99 の疑似黒体⁽⁶⁾について測定した垂直放射スペクトルに基づいて決定する。測定した半球等強度入射垂直反射率 R_{HN} 、垂直入射鏡面反射率 R_{NN} 、垂直放射率 ε_{N} をもとにして、式(1)~(3)を通じて垂直入射半球反射率 R_{NH} 、垂直入射拡散反射率 R_{ND} 、垂直入射吸収率 A_{N} を決定する。

以下の節では、簡単のために、垂直入射半球反射率 R_{NH} 、垂直入射鏡面反射率 R_{NN} と垂直入射拡散反射率 R_{ND} をそれぞれ半球反射率、鏡面反射率、拡散



- | | |
|--|--|
| 0. cam mechanics | 13. entrance slit |
| 1. tungsten-halogen lamp | 14. filter disk |
| 2. Si ₃ N ₄ light source | 15. rotational plane mirror |
| 3. paraboloidal mirror 1 | 16. collimator |
| 4. paraboloidal mirror 2 | 17. diffraction grating |
| 5. specimen | 18. camera mirror |
| 6. heater | 19. 35-Si photodiode array |
| 7. shutter disk | 20. 16-Ge photodiode array |
| 8. thermocouple | 21. 32-InSb photovoltaic detector array |
| 9. concave mirror | 22. 16-HgCdTe photoconductive detector array |
| 10. plane mirror | |
| 11. rotational plane mirror | |
| 12. chopper | |

Fig.3 Schematic diagram of wide-spectral-range high-speed spectrophotometer system for measuring spectra of normal reflectance R_{HN} for hemispherically homogeneous incidence, normal incidence specular reflectance R_{NN} and normal emittance ε_{N}

反射率と略称する．垂直入射吸収率 A_N と垂直放射率 ε_N をそれぞれ吸収率，放射率と略称する．

2.3 実験方法 ニッケルの試料の素材は，純度 99.9 % の多結晶の板材である．この板材を直径 10.5 mm，厚さ 1 mm の円板に加工し，その表面をバフ研磨して最大あらしが 30 nm 以下の光学鏡面にし，その表面を試料とする．その表面は仕上げ時には可視ふく射を鏡面反射する．§2.2 に示したスペクトル測定装置を用いて，この表面の高温大気酸化過程における半球等強度入射垂直反射率 R_{NH} ，鏡面反射率 R_{NN} ，放射率 ε_N のスペクトルの推移を測定する．

試料はその裏面に取り付けたヒーター⑥で加熱し，表面の温度は表面に溶接した直径 100 μm の K 熱電対で測定する．表面温度は次のように走査する：(1) 室温から 1100 K まで加熱し，(2) その後，約 1 h の間 1100 K に保った後，(3) 自然冷却する．

この実験は，実験室の理想的な表面から熱工学の实在表面への推移にともなうふく射現象の推移を代表的に示すものである．表面には被膜が成長し，被膜の表面にはあらしが発生し成長する．その表面の現象に呼応して，ふく射波の干渉・回折現象が起こ

り，反射率・吸収率・放射率のスペクトルはドラスティックに変化する．

3. 実験結果

3.1 実験結果 図 4~8 に，半球反射率 R_{NH} ，鏡面反射率 R_{NN} ，拡散反射率 R_{ND} ，吸収率 A_N ，放射率 ε_N の実験結果を示す．図 4 と図 5 は，それぞれ，半球反射率 R_{NH} ，鏡面反射率 R_{NN} ，拡散反射率 R_{ND} のスペクトルと吸収率 A_N ，放射率 ε_N のスペクトルの推移の概要を表すものである．横軸の λ は真空中でのふく射の波長，時刻 t は表面の加熱開始後の時刻である．これらの図で時刻 t は奥から手前に進行する．図 6 と図 7 は，それぞれ，半球反射率 R_{NH} ，鏡面反射率 R_{NN} ，拡散反射率 R_{ND} と吸収率 A_N ，放射率 ε_N の時間推移を表す．図 6 と図 7 は，図 4 と図 5 と同じ実験の結果を個々の波長における R_{NH} ， R_{NN} ， R_{ND} と A_N ， ε_N の時間推移として示すものである．図 6 と図 7 では，縦軸を対数軸にとって，反射率・吸収率・放射率の値が有効数字 1 桁までは読めるようにしている．4 段の図の上方には短波長側の値を下方には長波長側の値を示

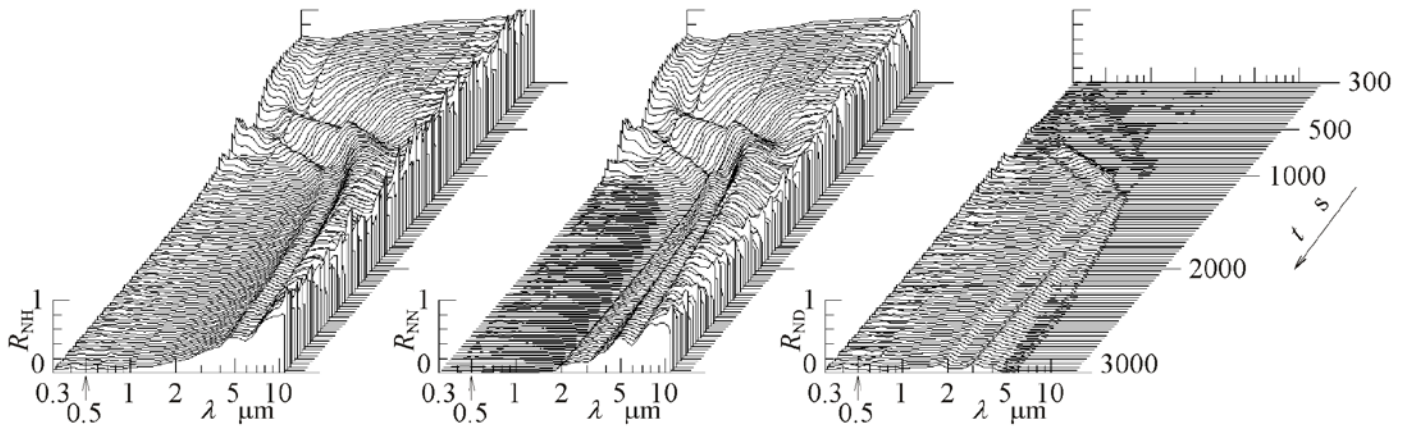


Fig.4 Spectrum transition of hemispherical reflectance R_{NH} , specular reflectance R_{NN} and diffuse reflectance R_{ND}

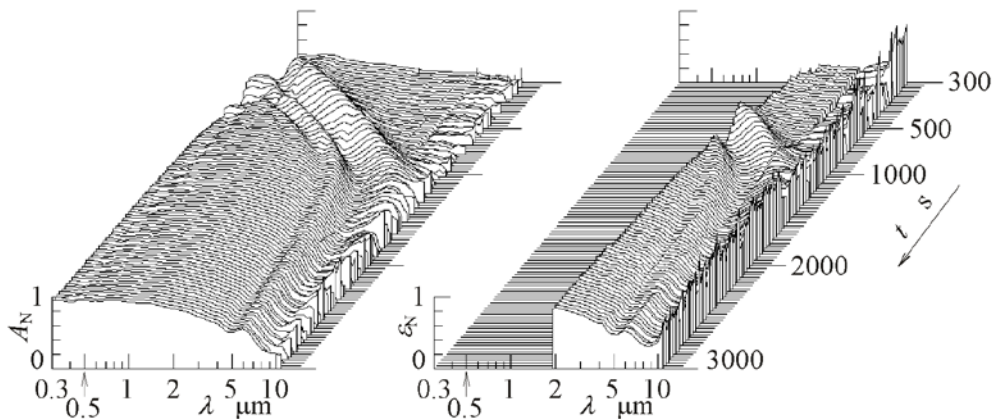


Fig.5 Spectrum transition of absorptance A_N and emittance ε_N

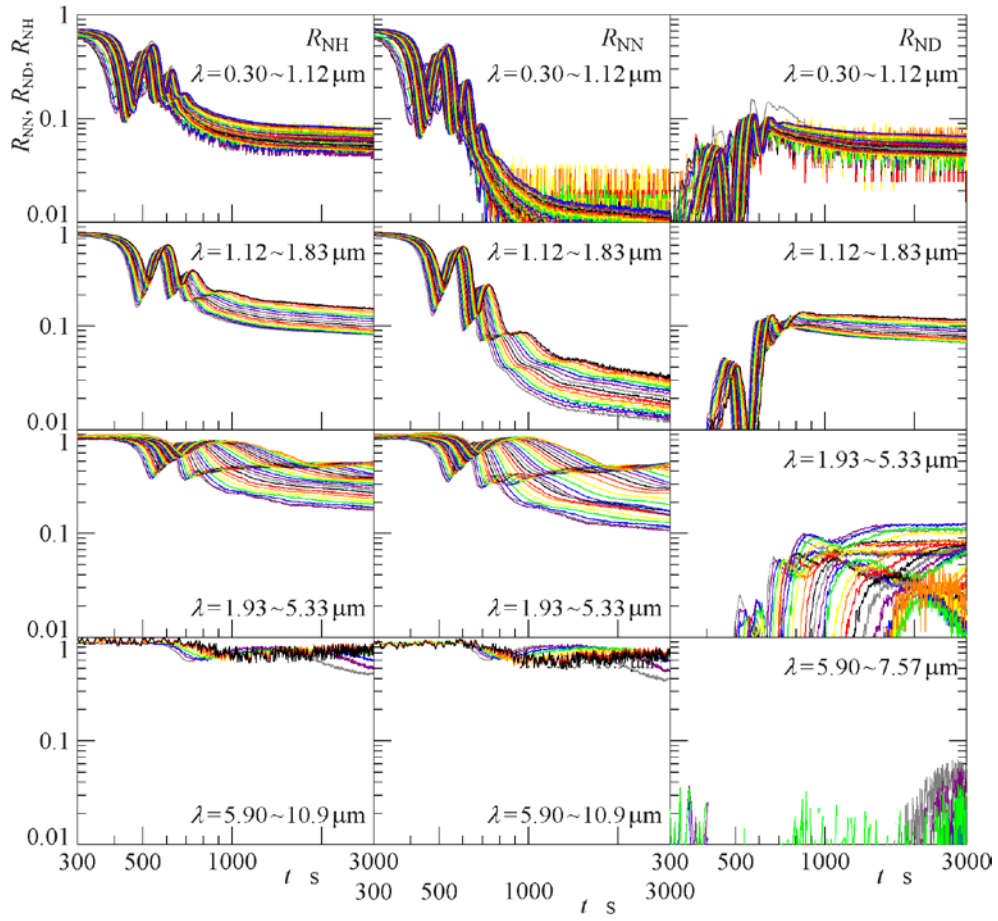


Fig.6 Time transition of hemispherical reflectance R_{NH} , specular reflectance R_{NN} and diffuse reflectance R_{ND}

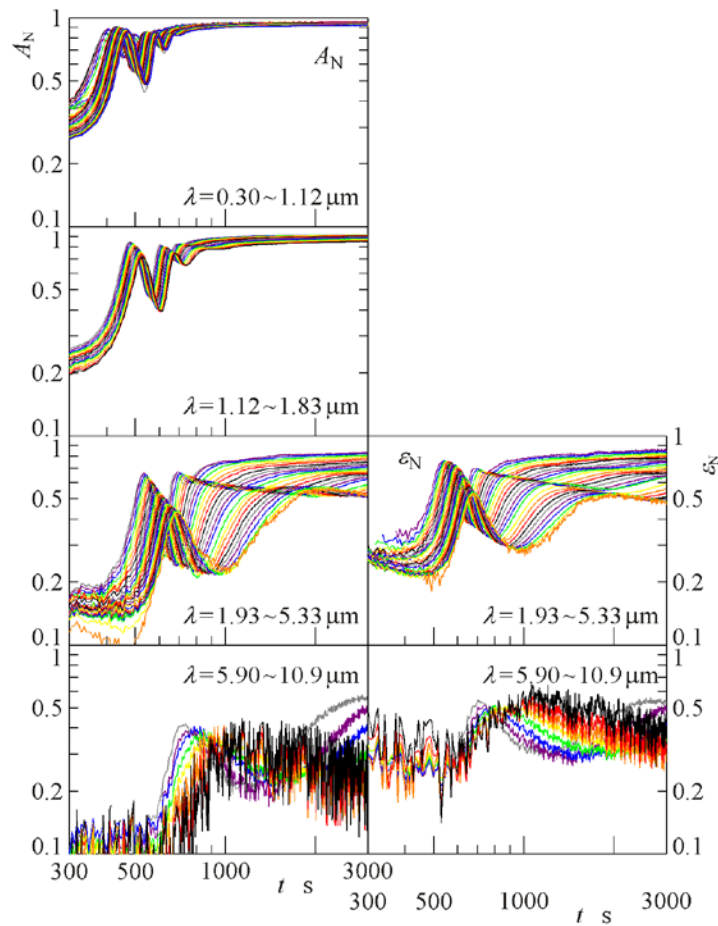


Fig.7 Time transition of absorptance A_N and emittance ε_N

す．図 6 や図 7 の多数の曲線のうち，ふく射干渉のうねりの谷や山が左に現れる曲線がより短波長側の波長に対応する．

3.2 初期の表面 $t=0$ s の初期状態において，表面は金属の清浄な光学鏡面である．拡散反射率 R_{ND} は本実験の全波長域にわたって 0 である．半球反射率 R_{NH} は鏡面反射率 R_{NN} に等しく，その鏡面反射率 R_{NN} は金属の光学定数⁽¹⁰⁾から計算される．鏡面反射率 R_{NN} は波長 λ の増加とともに単調に増加し，吸収率 $A_N (=1-R_{NH})$ は単調に減少する．

3.3 ふく射の干渉 表面が加熱されると，表面には酸化被膜が生成される．図 4 で，半球反射率 R_{NH} と鏡面反射率 R_{NN} のスペクトルの短波長側にはふく射干渉のうねりの谷が現れ，次いで山が現れる．それに対応して，図 5 で，吸収率 A_N のスペクトルの短波長側には干渉のうねりの山が現れ，次いで谷が現れる．被膜が成長してその厚さが増加すると，半球反射率 R_{NH} と鏡面反射率 R_{NN} スペクトルのうねりの谷と山は次第に長波長側に移行する．吸収率 A_N のスペクトルのうねりの山と谷も長波長側に移行する．短波長側では第 2 次・第 3 次干渉の谷や山が現れ長波長側に移行する．放射率 ε_N は $\lambda \geq 1.93 \mu\text{m}$ の長波長域で測定したが，その波長域では，吸収率 A_N におけると同様の干渉現象が見られる．これらの干渉の挙動は，縦軸を対数軸にして表した図 6 と図 7 の R_{NH} - t 曲線， R_{NN} - t 曲線， A_N - t 曲線， ε_N - t 曲線でより明瞭である．干渉の挙動は， $\lambda \leq 2 \mu\text{m}$ の短波長側では，第 3 次の干渉のうねりが現れ始めた後には消滅する．

3.4 ふく射の拡散反射 多結晶金属の表面で被膜の結晶粒は非均質成長し，被膜の表面にはあらさが生じる．そのため，スペクトルの短波長側から拡散反射が現れ，初期には 0 であった拡散反射率 R_{ND} が増加する．この現象は次第に長波長側に及ぶ．そのような，図 4 にも認められるが，定量的には図 6 でより明らかである．図 4 と図 6 では拡散反射率 R_{ND} にも明瞭なふく射干渉の挙動が現れるのが確認される．この現象は，本研究で拡散反射率 R_{ND} の推移が測定できるようになって初めて見出されたものである．

図 6 で鏡面反射率 R_{NN} と拡散反射率 R_{ND} の値を比較すると， $\lambda \leq 1.12 \mu\text{m}$ の短波長域では，被膜成長の初期には鏡面反射率 R_{NN} の方が高いが，後期には拡散反射率 R_{ND} の方が高くなる． $\lambda \geq 1.93 \mu\text{m}$ の長波長域では，後期にも鏡面反射率 R_{NN} の方が高い．拡散反射率 R_{ND} は，被膜の成長とともに，初期には増加するが，その後少しずつ減少するようになる．

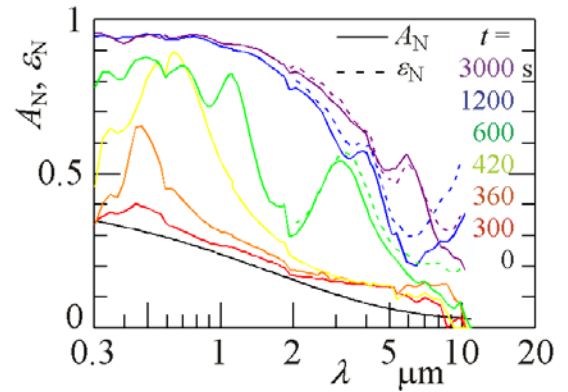


Fig.8 Spectrum transition of absorbance A_N and emittance ε_N

3.5 吸収と放射 吸収率 A_N は，干渉の影響を除いて評価すれば，実験の全波長域で被膜の成長とともに増加する．この吸収率 A_N の増加はとくに短波長域で顕著である．可視域における吸収率 A_N は，被膜成長の後期には 95 % の程度に及ぶ．その大部分は被膜を構成する酸化物に固有の吸収によるものである．図 5 と図 7 において，放射率 ε_N の大きさとその干渉の挙動は吸収率 A_N のそれに近い．図 8 は，吸収率 A_N と放射率 ε_N の値を定量的に比較しやすくするために示すものである．ただし，放射率 ε_N の測定の正確さ(accuracy)は赤外の長波長側では高くない．その点を考慮すると， $\lambda=2\sim7 \mu\text{m}$ の波長域では Kirchhoff の法則 $A_N=\varepsilon_N$ がふたたび検証されたと言える⁽⁷⁾．

4. 表面の現象とふく射現象

本実験は，実験室の理想的な表面から熱工学の実在表面への推移にともなう表面のふく射現象の推移を代表的に示すものである．その推移を特徴づけるのは，被膜の平均厚さ d ，被膜の表面の rms あらさ σ ，ふく射の波長 λ である．実験の波長域が広いので，そのために，ふく射現象はいつけん複雑に見える．

4.1 表面あらさと拡散反射 被膜の平均厚さ d は，鏡面反射率 R_{NN} のスペクトルの第 1 次干渉のうねりの谷の波長を $\lambda_{(1)}$ ，屈折率を n として近似的に $d=\lambda_{(1)}/(4n)$ によって評価される．屈折率 n は本実験の全波長域で 2 の程度である．被膜の表面の rms あらさ σ は厚さ d の 5~20 % の程度に成長することが知られている⁽⁴⁾．したがって，図 6 の鏡面反射率 R_{NN} の挙動から，時刻 $t=700$ s では $d=0.7 \mu\text{m}$ ， $\sigma=0.1 \mu\text{m}$ の程度，時刻 $t=1200$ s では $d=1.4 \mu\text{m}$ ， $\sigma=0.2 \mu\text{m}$ の程度であると推定される．実験後に室温に冷却した表面について光学顕微鏡で測定したあらさ σ は $0.2 \mu\text{m}$ の程度であった．拡散反射は，あらさ σ が注目するふく射の波長 λ の 1 % の程度に近づいたときに

顕著になる．拡散反射はまず短波長側で現れ，次第に長波長側に及ぶ(図 4, 図 6)．

4.2 拡散反射における干渉 図 6 で拡散反射率 R_{ND} と鏡面反射率 R_{NN} の時間変化の曲線を比較する． $\lambda \leq 1.12 \mu\text{m}$ の短波長域の拡散反射率 R_{ND} の曲線で第 1 次の干渉の谷は R_{ND} の値が小さくて見えないが，それに引きつづく第 1 次の干渉の山から第 3 次の山までは明瞭に観察できる．1 つの波長 λ の曲線に注目すると，拡散反射率 R_{ND} の曲線の干渉の谷や山は鏡面反射率 R_{NN} の曲線の谷や山よりも前の時刻に，すなわち被膜が薄いときに現れるのがわかる．たとえば，図 6 の上から 2 段めの拡散反射率 R_{ND} と鏡面反射率 R_{NN} の図で， $\lambda = 1.83 \mu\text{m}$ の曲線(いちばん右の曲線)に注目すると，1 つめの山は拡散反射率 R_{ND} の曲線では $t = 500 \text{ s}$ に現れるが，鏡面反射率 R_{NN} の曲線では $t = 600 \text{ s}$ になって現れる．また，1 つの時刻 t で同一の厚さ d の被膜について，たとえば，図 6 の上から 2 段めの拡散反射率 R_{ND} と鏡面反射率 R_{NN} の図の， $t = 600 \text{ s}$ では，拡散反射率 R_{ND} の曲線(いちばん左の曲線)には $\lambda = 1.12 \mu\text{m}$ の 2 つめの干渉の山が現れ，鏡面反射率 R_{NN} の曲線(いちばん右の曲線)には $\lambda = 1.83 \mu\text{m}$ の 1 つめの干渉の山が現れる．このことは，表面の拡散反射率 R_{ND} における干渉を特徴づける被膜内でのふく射の光路長が鏡面反射率 R_{NN} におけるそれに比べて， $2 \times 1.12 / (1 \times 1.83)$ 倍 ($= 1.2$ 倍)の程度に長いことを意味する．すなわち，拡散反射率 R_{ND} における干渉は鏡面反射率 R_{NN} における干渉に比べて，被膜内をより斜めに進む回折波によるものであることを示す．

4.3 吸収・放射と散乱の大きさ 被膜が成長すると，干渉の影響を除いて評価すれば，短波長域で鏡面反射率 R_{NN} は単調に減少する．拡散反射率 R_{ND} は初期には増加するがやがて減少する．半球反射率 R_{NH} は単調に減少し，吸収率 A_N は単調に増加する．放射率 ε_N は単調に増加する．このような反射率・吸収率・放射率の変化の挙動を特徴づける要因は 2 つある．被膜内におけるふく射の吸収と被膜表面におけるふく射の散乱であり，その影響はいずれも短波長側で強い．

被膜が成長し厚さ d が増加すると，被膜内を進むふく射の吸収が増加する．この吸収は被膜を構成する物質による吸収である．この吸収は反射率 R_{NN} ， R_{ND} ， R_{NH} を減少し，吸収率 A_N と放射率 ε_N を増加する側に効く．いっぽう，被膜が成長しあらさ σ が増加すると，被膜表面におけるふく射散乱の影響が現れる．この散乱は被膜表面におけるふく射反射にお

ける鏡面反射を減少し拡散反射を生み増加すると同時に，表面での多重的なふく射の回折・干渉を引き起こして結果的に表面における鏡面反射・拡散反射をともに減少し，この被膜系の吸収を増加させる．拡散反射率 R_{ND} がいったん増加し，やがて減少に転じるのはこの 2 つの要因の大きさ関係の推移に起因する．

4.4 干渉現象の寿命 表面酸化が進行すると，図 4~7 において， $\lambda \leq 5 \mu\text{m}$ の短波長側では，いったん明瞭に現れた反射率・吸収率・放射率のふく射干渉の挙動が消える．その要因も § 4.3 に述べた被膜内におけるふく射吸収と被膜表面におけるふく射散乱である．その影響はいずれも短波長側で強い．被膜が厚くなると，被膜内を進む波がより強く吸収され減衰されて，被膜表面で反射された波との対等な強度をもって干渉できなくなる．被膜がさらに光学的に厚くなると，いったん被膜に入った波が被膜表面にもどらなくなる．また，被膜の表面のあらさの波長に対する比 (σ/λ) が増加すると，被膜の上下界面の平行性が悪くなって明瞭な干渉が生じにくくなる．この 2 つの要因のために，結果的に，本実験の鏡面仕上げしたニッケル表面の場合には，明瞭なふく射干渉は，短波長域では第 3 次の干渉までが観測されるにとどまった．本実験のもっとも長い波長 $\lambda = 10.9 \mu\text{m}$ においては，吸収が弱く散乱も弱く，干渉の挙動は本実験の最後の時刻 $t = 4000 \text{ s}$ においても明瞭であった．なお，この干渉現象の寿命は，金属の種類・多結晶性の程度・表面仕上げの手法に強く依存する．同様の表面仕上げをしたクロムの鏡面反射率 R_{NN} においては，短波長域においても第 6 次までの干渉の挙動が観測されている⁽⁸⁾．

4.5 実験装置の有効性 本研究で開発したスペクトル測定装置は，図 1 に示した反射・吸収・放射の量の近紫外~赤外域におけるスペクトルの推移の全ぼうを上述のように明らかにするものであることが例証された．測定の誤差については，前報⁽⁶⁾に詳述している．反射率・吸収率の測定に見込まれる誤差は，相対値で， $\lambda = 0.70 \mu\text{m}$ で $\pm 0.3 \%$ ， $\lambda = 8.0 \mu\text{m}$ で $\pm 1.0 \%$ の程度， 1100 K の表面の放射率 ε_N の測定に見込まれる誤差は，相対値で， $\lambda = 3.5 \mu\text{m}$ で $\pm 0.7 \%$ ， $\lambda = 8.0 \mu\text{m}$ で $\pm 1.0 \%$ の程度である．ただし，放射率 ε_N の測定の短波長限界や測定の誤差は，試料の温度に強く依存する．

5. 結 言

本研究では， $\lambda = 0.30 \sim 10.9 \mu\text{m}$ の波長域で表面の半

球反射率 R_{NH} , 鏡面反射率 R_{NN} , 拡散反射率 R_{ND} , 吸収率 A_N , 放射率 ε_N のスペクトルを 6 s ごとに同時にくり返し測定するスペクトル測定装置を開発した。その装置を用いて、高温大気酸化過程にある金属表面のスペクトルの推移を測定し、装置の有効性を例証した。得られた結論を以下に示す。

(1) 開発したスペクトル測定装置は、近紫外~赤外の広い波長域でふく射の干渉・回折現象の推移を定量的に把握するものであり、熱工学の多様な実在表面のふく射性質の全ぼうを多角的に明らかにするものであることが示された。

(2) 理想的な表面から実在表面への変化の過程におけるいっけん複雑なふく射の反射・吸収・放射性質の推移は、被膜の厚さ、被膜の表面のあらさ、被膜のふく射吸収と、ふく射の波長の関係の変化にともなうものであることが明らかにされた。

(3) 被膜の成長にともなう被膜系の吸収の増加は、被膜内におけるふく射吸収の増加のみならず、被膜表面におけるふく射散乱の増加にともなう界面反射の減少によるものであることが明らかにされた。

(4) 拡散反射されるふく射においても明瞭な干渉現象が起こることが見出された。その干渉は被膜内を斜めに進む光路長の長いふく射によって起こることが明らかにされた。

(5) 吸収率 A_N と放射率 ε_N の関係についての Kirchhoff の法則がふたたび例証された。

本研究の経費の一部は、文部科学省科学研究費補助金(基盤研究(A)20246039)によった。その研究の共同研究者である、東京工業大学・花村克悟教授、芝浦工業大学・山田純教授、九州工業大学・宮崎康次准教授、京都大学・松本充弘准教授からは貴重なご議論をいただいた。ここに記して感謝する。

文 献

- (1) Makino, T., Thermal Radiation Spectroscopy for Heat Transfer Science and for Engineering Surface Diagnosis, *Heat Transfer 2002*, vol. 1, Taine, J. ed., (2002), pp. 55-66, Elsevier, Paris.
- (2) Makino, T., Spectroscopic Approach to Thermal Radiation Science and Engineering of Solid Surfaces, *The 18th International Symposium on Transport Phenomena*, CD-ROM, (2007), pp. 136-145, no. Keynote 116.
- (3) Wakabayashi, H. and Makino, T., A New Spectrophotometer System for Measuring Thermal Radiation Phenomena in a 0.30-11 μm Wavelength Region, *Measurement Science and Technology*, vol. 12, no. 12 (2001), pp. 2113-2120.
- (4) Makino, T. and Wakabayashi, H., Thermal Radiation Spectroscopy Diagnosis for Temperature and Microstructure of Surfaces, *JSME International Journal*, ser. B, vol. 46, no. 11 (2003), pp. 500-509.
- (5) Makino, T. and Wakabayashi, H., A Spectroscopic Approach for Controlling a Spectrally Functional Thermal Radiation, *Proceedings of the 13th International Heat Transfer Conference*, CD-ROM, (2006), no. RAD-11.
- (6) Makino, T. and Wakabayashi, H., Development of a Wide-Spectral-Range High-Speed Spectrophotometer System for Measuring Hemispherical Reflectance and Emittance of Surfaces Simultaneously, *Transactions of the JSME*, ser. B, vol. 75, no. 754 (2009), pp. 1329-1335, (in Japanese).
- (7) Makino, T. and Wakabayashi, H., Experimental Verification of Kirchhoff's Law on Thermal Radiation, *Transactions of the JSME*, ser. B, (2010), to be published, (in Japanese).
- (8) Wakabayashi, H. and Makino, T., Thermal Radiation Phenomena of Surfaces of Chromium and Palladium in a High Temperature Environment, *Transactions of the JSME*, ser. B, submitted, Nov. 2009, (in Japanese).
- (9) Siegel, R. and Howell, J. R., *Thermal Radiation Heat Transfer*, 3rd ed., (1992), pp. 47-91, Taylor & Francis, Bristol.
- (10) Makino, T., Kawasaki, H. and Kunitomo, T., Study of the Radiative Properties of Heat Resisting Metals and Alloys (1st Report, Optical Constants and Emissivities of Nickel, Cobalt and Chromium), *Bulletin of the JSME*, vol. 25, no. 203 (1982), pp. 804-811.

Abstract

本研究では、熱工学の实在表面の熱ふく射性質の全ぼうを測定できるスペクトル測定装置を開発する。その装置は、波長 $0.30\sim 10.9\ \mu\text{m}$ の近紫外～赤外域で实在表面の垂直入射半球反射率 R_{NH} 、垂直入射鏡面反射率 R_{NN} 、垂直入射拡散反射率 R_{ND} 、垂直入射吸収率 A_{N} 、垂直放射率 ε_{N} のスペクトルの推移を 6 s の cycle time で同時にくり返し測定する。その装置を用いて、ニッケルの清浄な光学鏡面が高温大気中で酸化されてあらい实在表面に推移する過程における反射率・吸収率・放射率のスペクトルの推移を測定し、そのスペクトル推移のミクロな機構を検討し、開発したスペクトル装置の熱工学のための有効性を例証する。

原稿表紙

貴論文で読者に特にアピールしたい点を箇条書きでご記入下さい。

1. 近紫外～赤外の広い波長域において、熱工学の实在表面の熱ふく射性質の全ぼうを同時に繰り返し測定できるスペクトル測定装置を開発した。この装置は歴史的に最高のものである。
2. 实在表面のふく射の反射・吸収・放射スペクトルの推移のメカニズムを系統的に明らかにすることができた。
3. 酸化されたあらい金属表面の拡散反射率のスペクトルにも明瞭なふく射干渉の挙動が現れることを発見した。

和文抄録(200～300 字, 273 字)

本研究では、熱工学の实在表面の熱ふく射性質の全ぼうを測定できるスペクトル測定装置を開発する。その装置は、波長 $0.30\sim 10.9\ \mu\text{m}$ の近紫外～赤外域で实在表面の垂直入射半球反射率、垂直入射鏡面反射率、垂直入射拡散反射率、垂直入射吸収率、垂直放射率のスペクトルの推移を 6 s ごとに同時にくり返し測定する。その装置を用いて、ニッケルの清浄な光学鏡面が高温大気中で酸化されてあらい实在表面に推移する過程における反射率・吸収率・放射率のスペクトルの推移を測定し、その推移のメカニズム機構を検討し、開発したスペクトル装置の熱工学のための有効性を例証する。

本研究の意義を教育の場で主張するとき：

熱工学で、表面間のふく射エネルギー交換の計算において、完全拡散流束、完全拡散反射・放射の仮定をもとにして 形態係数を使う計算を行ってよいのか。放射の角度特性は弱い、反射の角度特性は強い。したがって、拡散反射、拡散流束の程度を知っておいて計算に入るべきである。については、鏡面反射率や拡散反射率のスペクトルを得ることは重要である。

回折・散乱・拡散反射の効き方：

$$2nd=(1/2)\lambda_{(1)}, \quad d=\lambda/(4n), \quad \sigma/d=0.14, \quad \sigma=0.14d$$

$$t=400\ \text{s} \quad \lambda_{(1)}=0.3\ \mu\text{m} \quad d=0.04\ \mu\text{m} \quad \sigma=0.005\ \mu\text{m}$$

$$t=700\ \text{s} \quad \lambda_{(1)}=5.33\ \mu\text{m} \quad d=0.67\ \mu\text{m} \quad \sigma=0.09\ \mu\text{m}$$

$$t=1200\ \text{s} \quad \lambda_{(1)}=10.9\ \mu\text{m} \quad d=1.40\ \mu\text{m} \quad \sigma=0.19\ \mu\text{m}$$