ふく射伝熱と熱ふく射表面診断

Radiation Heat Transfer and Thermal Radiation Surface Diagnosis

牧野 俊郎*

Toshiro MAKINO

Key Words: Radiative Heat Transfer, Thermal Radiation Measurement, Surface Temperature, Surface Microstructure, Comfortable Bathroom

1. はじめに

熱工学の分野では、多くの場合、エネルギーと環境をキーワードとして研究が進められる。そこで論じられるのはおもに熱と温度であるが、ふく射というもう一つの物理に考えが及ぶと、熱工学の視野は広がることになる。手のひらを太陽にかざしてみれば温かいので、太陽から熱がやって来たと感じるのはいささかかもしれないが、太陽からやって来るのはふく射であり熱ではない。ふく射が手のひらで熱に変換され、われわれは温かいと感じる。

ふく射 (radiation) は電磁波の総称であり広い意味での光である。そのうち、熱工学でとくに重要であるのが、熱からふく射に変換されやすく、ふく射から熱に変換されやすい、可視光よりも波長の長い赤外域のふく射である。この熱からふく射に、ふく射から熱に変換されやすいふく射を指して熱ふく射 (thermal radiation) という。ふく射熱・太陽熱などという紛らわしい表現が横行しているが、熱ふく射はふく射であって熱ではない。

その熱ふく射が高温工学の設計や温度の診断、生活環境の設計などに関係する局面は多い。本稿では、ふく射伝熱と熱ふく射計測の基礎、そして身近なあたりで熱ふく射を制御する方法について、おもに京都大学での金属の表面についての研究をもとにして述べる。

2. ふく射伝熱

2.1 ふく射伝熱

図1は、ふく射伝熱をもっとも簡単な場合について説明するものである¹⁾。左側に物質の壁がある。この物質は電子・イオンなどの質量と電荷をもつ小さい粒子を含む。これらの粒子は、運動エネルギーすなわち熱のエネルギーをもってその物質の温度を保つと同時に、電荷の運動を通じて電磁波を生む。この現象をふく射の放射 (emission) と呼ぶ。放射された電磁波は空間を伝搬し、他の物質 (あるいは同

じ物質の他の部分) に至ると、その物質内の電子・イオンなどと相互作用し、電磁波のエネルギーはその物質の熱のエネルギーに変換されることがある。この現象をふく射の吸収 (absorption) と呼ぶ。かくして、ある物質のもつ熱のエネルギーが、ふく射のエネルギーに変換されて空間を伝搬し、他の物質に至って、ふたたび熱のエネルギーに変換される。この《熱→ふく射→熱》の形をとる間接的な熱エネルギーの輸送の過程がふく射伝熱 (radiation heat transfer) である。

2.2 固体表面間のふく射エネルギー交換

図1では、簡単のために左の壁が一方的にふく射を放射し右の壁はひたすらふく射を吸収するとしているが、実際の工学系における現象は双方向的である。また、壁の表面ではふく射の入射 (incidence)・反射 (reflection) という現象が起こる。図2は、より一般的に工学系におけるふく射エ

Figure 1 Radiation heat transfer

* 京都大学大学院工学研究科 機械理工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

Department of Mechanical Engineering and Science, Kyoto University (Yoshida-Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501, Japan)

Figure 2 Radiation energy exchange among walls in an engineering system

エネルギー交換を考えるものである。工学系は多数の壁からなる。その多数の壁ではふく射の放射・入射（照射）・反射・吸収現象が起こり、ふく射エネルギーバランスが成立する。この状況では、ふく射流束と表面反射特性が等方的であり、各表面について、

$$(\text{放射率}) = (\text{吸収率}) = 1 - (\text{反射率}) \quad (1)$$

という関係が成立するとする。このとき、壁の状態を記述する量は、壁の温度と（半球）放射率である。工学設計で評価すべき量は、ある壁からある壁へのふく射流束である。あるいは、所要のふく射流束を実現するために壁の温度はいかにあるべきかという問題になる。いずれにしても、複数の壁は、設計に求められる正確さに照らして、その温度と放射率が一樣であると見なせるまで細かく分割する。一つあるいは複数の壁が開放的なものである場合には、その壁に適切な温度と放射率の値を与えて評価する。たとえば、壁の一つが実際にはなくて宇宙空間に面している場合には 3 K の（放射率）=1 の壁が仮想的にあるとする。このようにして、複数の壁の間のふく射エネルギー交換を評価し、工学系の設計を行う。そのようなとり扱いについては伝熱工学の教科書²⁾に示されている。その問題は、放射率の値を推定し、多元の連立方程式を解いて温度分布あるいはふく射エネルギー流束を推定する問題である。

2.3 分光学的なとり扱いの重要性

§ 2.2 の議論において、高温の壁から放射されるふく射はさまざまな波長のふく射からなるが、放射率はそのふく射の波長に依存する。各波長のふく射については式 (1) が成立するが、さまざまな波長のふく射の混合した全ふく射 (total radiation) について式 (1) が成立するのではない。原理的には、放射率がふく射の波長に依存せず灰色体の仮定が成立し全ふく射について式 (1) が成立することもありうるが、高温工学におけるリスクマネジメントを考えると、トータル量を扱う方法はお勧めできない。§ 2.2 の問題を解くについては、各壁の放射率スペクトルを推定したうえで、

Figure 3 Radiation energy exchange between two infinitely wide parallel plates

各波長のふく射が運ぶエネルギーの総量を評価する分光学的な方法をとるのが望ましい。

図 3 は、かつて臨界プラズマ実験装置 JT-60 の厚く TiC 被覆した Mo の第一壁から Inconel 625 の真空壁へのふく射流束を計算し熱除去性能を評価したときの計算例である³⁾。計算は、図中に示すように、もっとも簡単に無限に広い平板間のふく射エネルギー交換の問題として扱った。横軸に高温側の第一壁の温度 T_1 、パラメーターとして低温側の真空壁の温度 T_2 をとり、総括的なふく射流束 q^* を規格化して縦軸に示している。ふく射は高温の壁でも低温の壁でも放射・吸収されるが、その差し引きされた総括的な流束 (net flux) は高温の壁から低温の壁に流れる。実線は、2つの壁の放射率の波長依存性・温度依存性を考慮して分光学的 (spectral) に計算したものである。破線は、放射率の波長依存性を考慮することなく、温度依存性だけを考慮して計算したものである。一点鎖線は、放射率の波長依存性・温度依存性を考慮することなく全放射率 (total emittance) を用いてトータルに計算したものである。分光学的なとり扱いとトータルなとり扱いで、実線と一点鎖線の評価の差が出る。その差は、高温の壁と低温の壁の温度差が大きい場合ほど大きい。その差は、全放射率が全吸収率に等しくはなく、Kirchhoff の法則が全ふく射については成立しないこと、あるいは灰色体の仮定が成立しないことに起因する。この図における最大で 2 倍程度のエネルギー流束の評価誤差を避けたい場合には、分光学的な物性値評価に基づくことが必要になる。

Figure 4 Ideal surface and real surface

Figure 5 Scattering of spectra of reflectance of aluminum in a Databook

Figure 6 Transition of reflectance R_{NN} and emittance ε_N of specular-finished chromium in an air-oxidation process

2.4 物性値評価のむずかしさ

ところで、放射率に代表されるふく射物性値の評価はやさしくない。そのいちばんの理由は、物性値を評価すべき表面が実在表面であることである (図4)⁴⁾。工学系を構成する表面は実験室の清浄で平滑な理想的な表面とは異なり、また表面の微視構造は時々刻々にも変化する。表面のマイクロ加工プロセスでは、表面の微視構造は積極的に変化させられる。表面のふく射物性はその微視構造の変化に応じて敏感に変化する。

図5は、Alの(垂直入射垂直)反射率 R_{NN} のスペクトルを集めたデータブック⁵⁾の1頁を示すものである。図の横軸はふく射の波長 λ で0.1～100 μm である。縦軸の反射率 R_{NN} は原理的に0～1の値をとるが、曲線は図の一面に散乱している。これは、当時の分光測定技術の不備によるのではなく化学組成の多様さのためでもなく、表面の微視構

造・表面被膜の多様さのためである。実在表面のふく射特性がいかに多様であるかがわかる。あるいは、ふく射伝熱の設計がいかにむずかしいかがわかる。

3. 熱工学におけるふく射特性研究

3.1 実在表面のふく射特性の研究

筆者らは、上述のような熱工学のエネルギー交換の評価のために広波長域高速スペクトル測定装置を開発した⁶⁾。この装置は $\lambda=0.30\sim 11\mu\text{m}$ の近紫外～赤外の波長域で垂直入射垂直反射率 R_{NN} と垂直放射率 ε_N を2sごとに同時にくり返し測定する。筆者らはその装置を用いて実在表面のふく射特性の研究を進めた。図6は、光学鏡面研磨したCrの清浄表面を大気中で高温酸化させる過程での反射率 R_{NN} と放射率 ε_N のスペクトルの推移を示すものである。横軸はふく射の波長 λ であり、時刻 t は図の奥から手前に流れる。

スペクトルは、表面の微視構造の変化に応じてドラスティックにしかし系統的に変化する。

このような一連の研究のもっとも重要な結論は、表面のふく射特性は、普遍的な物性値としてではなくスペクトルの過渡現象であるとしてとり扱われるべきであるということであった。

3.2 最適設計と安全設計

§ 2.4 や § 3.1 に示したような物性値の変化の範囲を見込んで工学系の設計ができる場合は、それはそれでよい。最適設計が求められる場合には、物性値のスペクトルの研究が始められるべきである。最適設計以前に安全設計が求められる場合には、どちらが安全側であるのかに応じて、起こりうる最大のふく射流束を評価し、また起こりうる最小のふく射流束を評価し、その間で安全な工学系を実現するように計るしかない。最大のふく射流束は、工学系の壁のすべてが黒体表面であるとして評価される。最小のふく射流束は、清浄な光学鏡面についての（半球）放射率スペクトルをもって評価する。そのような放射率のスペクトルは物質の光学定数スペクトル^{7),8)}から計算するのがよい。放射率や光学定数は波長のみならず物質の温度にも依存するので、文献によるとときには注意が必要である。波長域は、Planck 分布の及ぶ可視～赤外の広い領域を想定すべきである。図3の系のふく射エネルギー交換はそのような表面と波長域について計算されたものである。

4. ふく射温度診断

4.1 ふく射温度診断の信頼性

ふく射温度診断は非接触・その場測定のよい温度診断手段である。しかし、本質的な意味で注意すべきことがある。それは、ふく射温度診断法が極めて精密な (precise) しかし極めて不正確な (in-accurate) 方法であるということである。ふく射温度診断は表面の温度を測定するのではなく、表面が放射するふく射を測定し、測定したふく射を温度に翻訳するものである。その間には放射率スペクトルの知見があるべきであるが、温度診断の対象となる多くの表面についてそのようなデータはない。しかも、たいていの場合、表面状態は変化しつつあり放射率も変化しつつある。その変化の程度は図6に見た程度である。実際的には、ふく射温度計あるいはサーモグラフィーの放射率設定ボタンをいかなる値に設定するかに応じて、表面温度はいかようにも表示されるということが起こる。

表1にそのことを例示する⁹⁾。いま、放射率 ϵ_N が波長 λ によらず実は 0.70 である 1000 K の表面から放射されるふく射を測定したとする。測定者はもちろん温度 T も放射率 ϵ_N も知らない。しかし、放射率 ϵ_N が 0.5 ～ 0.9 くらいであることは推定できるとする。このとき、注目するふく射温度計の波長が $\lambda=2.0 \mu\text{m}$ であれば、診断される温度は

Table 1 Accuracy of emittance evaluation and temperature Diagnosis

ϵ_N	$\lambda=1 \mu\text{m}$	$2 \mu\text{m}$	$5 \mu\text{m}$
1.00	976 K	953 K	894 K
0.90	983	966	923
0.80	991	982	958
0.75	995	991	978
0.70	1000	1000	1000
0.65	1005	1010	1025
0.60	1011	1022	1053
0.50	1024	1049	1123
0.20	1096	1210	1638

$\epsilon_N = 0.50 \sim 0.90$ の仮定に対して $T = 1049 \sim 966 \text{ K}$ の程度の不正確さを伴う。 $\lambda = 5.0 \mu\text{m}$ の温度計であれば、診断の正確さはもっと悪い。すなわち、ふく射温度診断は、放射率 ϵ_N の値が有効数字 1 桁の程度で正確ではない場合、この程度に不正確なものになる。

このふく射温度診断の不正確さを緩和するものとして二色温度計が考えられ市販されている。これは、たがいに隣接する 2 つの波長のふく射を測定しその 2 つの波長での放射率がたがいに等しいなどと仮定して温度を診断するものである。これは、放射率の絶対値推定のむずかしさを排除するので原初的なふく射温度計よりよいものではあるが、実在表面の放射率スペクトルは図6に見られるように平滑（灰色的）からはほど遠く、また変化することも多い。安全管理のための温度診断に用いるときには十分な誤差を見込んで対処すべきである。この点については、§ 4.2 にふたたび言及する。

4.2 ふく射温度診断の最前線

筆者ら¹⁰⁾は、1988年に、多くの波長点で表面からのふく射の放射と反射を測定しその測定値を解析して時々刻々に表面の温度を正確に診断する新しいふく射温度診断法のアルゴリズムを提案した。その要点は、(1) スペクトル温度計の方法、(2) アクティブな方法、(3) 最小 2 乗処理の方法の 3 つであった。(1) はなるべく多数の波長点でのふく射の情報を得ること、(2) は表面が発信する情報を受動的に受けるのみならず、われわれから表面にふく射を照射してその応答を得ること、そして、(3) は得られた多数の情報に含まれる測定の誤差や仮定の不備を緩和するためなるべく多数の測定量の顔を立てるという、至って日本的な妥協の道を探るものであった。

この方法は、2001年に開発されたより強力なハードウェア⁶⁾を基礎として、現在国際的かつ歴史的に最高のふく射温度診断技術としてある¹¹⁾。図7と図8にその性能を例示する。図6の実験と同様の実験を行い表面のふく射の放射量 u と反射量 v のスペクトルを時々刻々に同時測定する。図7には各波長における u と v の測定量の推移を示す。上記のアルゴリズムに基づいて u と v の測定量を解析し、表

 Figure 7 Measured quantities of emission u and reflection v

 Figure 8 Diagnosed temperature T^{opt} , average film thickness d and rms roughness σ

面の温度 T^{opt} を時々刻々に診断する。図 8 に診断された温度 T^{opt} の結果を示す。図には表面に溶接した熱電対で測定した温度 T^{tc} をあわせて示すが、その一致はすぐれてよい。1000 K 以上の温度域でその偏差は最大 5 K の程度である。

図中の $T_{1.8}$ は波長 1.12 μm と 1.45 μm における放射測定値

を用いて二色温度計の方法で求めた温度であるが、放射スペクトルが強いうねりを生じる場合には、最大 300 K もの温度診断誤差を生む。同時に、実際には起こっていない急激な温度変動を示唆することになる。

4.3 ふく射温度診断における背景ふく射

§ 4.1 ~ 4.2 では、ふく射温度診断は精度のよいものであるが正確さに欠ける方法であることを強調した。二色温度計についても同様の注意を要することを述べた。これらの不正確さの要因は放射率についての仮定にある。最高の技術であると自賛した筆者らの技術はこの点を克服したものであるが、その場合にも解決の手をつけられていないふく射温度診断の不正確さの要因がある。それは背景ふく射をいかに考慮するかという問題である。

ふく射温度測定の対象となる表面は、基本的に図 2 に見られるような工学系のなかにあり、1 つの表面だけが高温であるのではないのが普通である。その場合、温度測定の対象となる表面は、その表面から放射されたふく射のみならず他の表面から照射されたふく射の反射ふく射を放出する。個々の工学系の実情に応じて適切に処理しないと、温度は過大評価される。注意が必要である。

4.4 表面の微視構造の実時間診断

図 6 の実験では、表面に酸化被膜が成長し、表面に被膜の結晶粒の不均質成長のためにあらさが生じると、反射率や放射率のスペクトルはその表面の微視構造の変化に敏感に応じて変化する。これは、工学系の熱設計の立場からすれば困ったことであるが、そのスペクトル現象を通じて表面の微視構造を診断する技術を開発することに繋がるものでもあった。

筆者ら¹¹⁾は、さきに述べた表面温度診断と併せて表面の微視構造を診断することを考えた。ここで、微視構造とは表面被膜の平均厚さ d と表面の平均 2 乗あらさ σ を指す。当然のことながら、その診断のためには適切な表面モデルが必要である。表面でのふく射の干渉・回折のモデルを提案して、図 7 に示すような放射の測定量 u と反射の測定量 v のスペクトルを解析し、厚さ d とあらさ σ を図 8 に示すように時々刻々に実時間診断することを可能にした。厚さ d は 100 nm ~ 3 μm 、あらさ σ は 10 nm ~ 1 μm についてよく診断されている。このように広い大きさ領域にわたる微視構造が診断されるのは、スペクトル測定の対象とするふく射の波長域が広いことによる。ふく射はその波長と同程度の大きさの構造とよく干渉するからである。

5. 生活空間におけるふく射伝熱

さて、以上には、高温学会の諸兄に向かって高温のふく射のことを記した。しかし、諸兄も家庭にもどれば生活者であり、風呂にも入られるであろう。本稿の最後には、生活空間におけるふく射伝熱について、「冬のお風呂場を温か

figure 9 Comfortable bathroom in winter

く」という筆者の実践を紹介し、ふく射が高温ならずとも室温でも重要なものであることを示す。

寒い冬の日に風呂に入るには勇気が要る。身にしみて寒いからである。お年寄りには勇気ではなく心臓への負担も考えなければならない。そこで、お風呂場の床暖房が考えられたこともあったが¹²⁾、ポイントは床というより壁である。寒いというのは、人体から出て行くエネルギーが大きいからであり、人体から出て行くエネルギーを少なくする方向をめざすのが筋である。冬にお風呂場で裸になった人体から出て行くエネルギーのうちの主たるものは人体が接するお風呂場の空気への対流伝熱分ではなく、人体から風呂場の壁へのふく射伝熱分である。

お風呂場はたいてい室外に面したところに設けられるので、冬には空気のみならずその壁が外気温に近いまでに冷却される。お風呂場の空気はなんか風呂の蓋を開けておけばそれなりの温度になるが、熱容量の大きい壁はそうは行かない。これが「寒い」の主たる原因になる。

ならば、暖房ではなく、温かい壁を作る方向に走るのが望ましい¹³⁾。冷えた壁の前に温かい壁を作る。熱容量の小さい壁をお風呂場に作る。そのためにはホームセンターなどで売っている“ぶちぶち”を新しい壁にするのがよい。これを図9に示すように壁から少し離して垂らす。“ぶちぶち”

は風呂の湯気ですぐに温まる。そして、冬の寒いお風呂場が暖かい空間と化す、少しだけふく射伝熱に想いを馳せることによって。

おわりに

本稿では、高温の工学系におけるふく射伝熱と熱ふく射表面診断について解説し、また、生活空間におけるふく射伝熱についてコメントした。ふく射 / 光 / 電磁波に着眼することによって、よりよい生産と生活への可能性が拡大されるかもしれない。

参考文献

- 1) 牧野俊郎：固体の熱ふく射性質の測定法、“新編 伝熱工学の進展”、第2巻、日本機械学会編、養賢堂、pp. 169-250, 1996.
- 2) 日本機械学会編：“伝熱工学”、丸善、pp. 99-122, 2005.
- 3) 中村博雄、清水正亜、牧野俊郎、国友 孟：JT-60 第一壁の輻射率の測定 (Inconel 625, Mo, TiC 被覆 Mo), *JAERI-M*, no. 85-007, 日本原子力研究所、pp. i-30, 1985.
- 4) Makino, T.: Spectroscopic Approach to Thermal Radiation Science and Engineering of Solid Surfaces, *The 18th International Symposium on Transport Phenomena*, Daejeon, Korea; CD-ROM no. Keynote 116, pp. 136-145, 2007.
- 5) Touloukian, Y. S. and DeWitt, D. P.: “*Thermophysical Properties of Matter*”, vol. 7, IFI/Plenum, 1970.
- 6) 若林英信、羽田 哲、瀬戸尚人、牧野俊郎：実在表面の熱ふく射現象研究のためのスペクトル測定装置、日本機械学会論文集 (B 編)、第 67 巻、660 号、pp. 2121-2128, 2001.
- 7) Palik, E. D., “*Handbook of Optical Constants of Solids*”, Academic Press, Inc., 1985.
- 8) Makino, T.: Present Research on Thermal Radiation Properties and Characteristics of Materials, *International Journal of Thermophysics*, vol. 11, no. 2, pp. 339-352, 1990.
- 9) 牧野俊郎：表面のふく射診断の正確さ、*トライボロジスト*、第 53 巻、5 号、pp. 301-306, 2008.
- 10) 牧野俊郎、小坂 武、有馬二郎、青山 聡、辻村裕次：放射・反射同時遠隔計測型の多波長点温度計の方法、計測自動制御学会論文集、第 24 巻、4 号、pp. 331-336, 1988.
- 11) 牧野俊郎、若林英信：実在表面の温度・マイクロ構造の熱ふく射診断法、日本機械学会論文集 (B 編)、第 69 巻、687 号、pp. 2501-2509, 2003.
- 12) 北村孝男、丹羽哲也：お風呂や脱衣室の暖房と健康、*熱物性*、第 8 巻、1 号、pp. 43-45, 1994.
- 13) 牧野俊郎：浴室を暖かく / 駐車場には樹を植えよう！、http://www.netsubusse.jp/public_html/group.html