



# 入門講座

伝熱工学-3

## ふく射伝熱 Radiative Heat Transfer

櫻井 篤 新潟大学 工学部工学科  
機械システムプログラム  
Atsushi Sakurai 准教授

### 1 はじめに

ふく射伝熱や熱ふく射という専門用語は、電磁波の伝播によってエネルギーが伝達される物理現象のことを指す。全ての物質は連続的に電磁波（フォトン）を放射・吸収しており、その強度や波長は、物質の温度に依存する。第1章で述べられたように温度  $T$  [K] の物体が放射することができる最大の熱放射エネルギーはステファン・ボルツマンの法則で与えられるが、その温度が高ければ高いほど熱ふく射の効果は大きくなる。鉄鋼業においては、鉄のスラブを成型する際に1000度以上の高温で鋳造プロセスが進行する。この場合、高温となった鉄のスラブからは白熱した光が放射されているが、この光はまさに熱ふく射による発光である。強力な熱ふく射の放射スペクトルが可視光にまで及ぶため、我々の目には白く見えるのである。したがって熱ふく射という物理現象は、鉄鋼業においては非常に大きな重要な役割を果たすと考えられる。

このように空間を伝播する電磁波をふく射 (Radiation) というが、物質の内部エネルギーの一部が電磁波として放射される放射 (Emission) とは区別される<sup>1)</sup>。具体的に言うと、ふく射という言葉を用いる際には、その伝達される電磁波エネルギーの中に、物質自身が放射した発光もあれば、外部からの反射光が含まれていても良い。あくまで物体間の電磁波エネルギーの移動によって伝熱が達成されるという物理現象の総称として使われる。一方で、放射という言葉は物質自身が放つ光であることを暗黙的に指している。研究分野によっては特に区別せずに「放射」が主に使われることもあるが、機械工学の分野では物体間のエネルギー伝達が非常に重要であるため、厳密にはふく射と放射は区別して考えた方が望ましい。

### 2 Planckの法則

あらゆる物体は分子や原子から構成され、その絶対温度に応じてランダムな熱運動をしている。物質内部における電子や原子核のランダムな相互作用から放射される光（電磁波）を熱放射という。例えば、ある分子が振動する場合、その内部の電荷分布が振動するから、その振動数に応じた電磁波が放射される。

熱ふく射による伝熱の起源は次のように考えられる。低温物体も高温物体も両方、その温度に応じた電磁波を放射しているが、相手側の原子・分子が電磁波エネルギーを吸収し、それが振動エネルギーに変換される。この振動エネルギーが熱の正体である。すなわち、高温物体からの電磁波エネルギーの方が大きいので、正味のエネルギー移動として高温側から低温側の物体へ伝熱が起こる、というのが熱ふく射の起源として考えられる。

熱放射スペクトルの強度は物質の温度に応じて決まる。その波長とスペクトル強度の実験値と理論値を完全に一致させたのが、次のPlanckの式である<sup>2)</sup>。

$$E_{b\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 (\exp[C_2/\lambda T] - 1)} \dots\dots\dots (3-1)$$

ここで、 $E_{b\lambda}$  は単色黒体放射能、 $\lambda$  は波長、 $C$  は定数である。図3-1に、各温度における黒体放射スペクトルを示している。図のように高温になるほど、光の波長は短波長側にシフトしていき、やがて赤外光だけでなく可視光まで含むことがわかる。

このプランクの式が導出された歴史的経緯は極めて興味深い。プランクの式の“-1”の解釈については、当時世界最高の物理学者たちが活発に議論した結果、光を量子化しなければ導かれなないものであることがわかり、これが量子力学の発端となったのは有名な話である<sup>3)</sup>。興味のある読者はぜひ調べて頂きたい。

ここで、黒体とは、全ての電磁波を吸収し、放射する理想

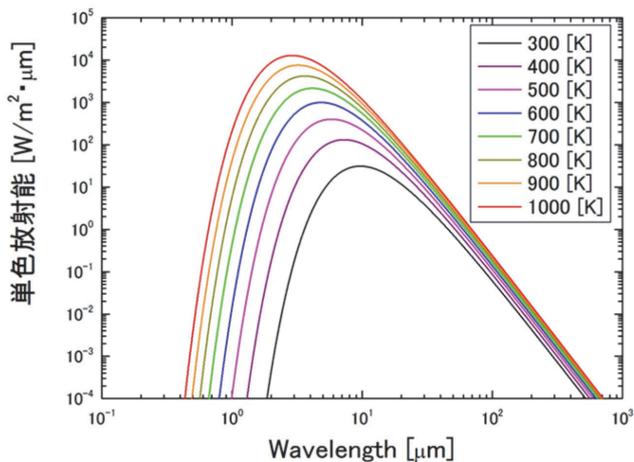


図3-1 黒体放射スペクトル (Online version in color.)

的な物体のことである。プランクの式を波長積分すると、

$$E_b = \sigma T^4 \dots\dots\dots (3-2)$$

となり、ステファン・ボルツマンの法則が導かれる。ここでステファン・ボルツマン定数  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W (m}^2 \text{ K}^4)$  である。

### 3 物体間における熱ふく射の輸送

現実には、物体間に大気が存在するため、ふく射は大気中で吸収・放射が行われる。これについては次節で扱う。ここでは、理想的に物体間に大気が存在しない状況を考える。ただ、宇宙空間など真空下では、物体間において熱エネルギーはふく射のみによって輸送されるため、宇宙衛星の熱防御システムや、真空加熱装置などの設計にはそのまま使用できる知識である。

まず放射率  $\epsilon_\lambda$  について定義する。ほぼ全ての实在面は、黒体ではない。そこで、黒体の放射エネルギーに対して、实在面の放射エネルギーの割合を次式で定義する。

$$\epsilon_\lambda = \frac{E_\lambda}{E_{b\lambda}} \dots\dots\dots (3-3)$$

ここで  $E_\lambda$  は实在面の放射能である。

局所熱平衡が成立するとき、吸収率  $\alpha_\lambda$  と放射率  $\epsilon_\lambda$  は等しい。これをキルヒホッフの法則という。材料の反射率  $\rho_\lambda$  がわかっている場合は、放射率は次式で求められる。

$$\epsilon_\lambda = \alpha_\lambda = 1 - \rho_\lambda \dots\dots\dots (3-4)$$

放射率が波長に依存しないとすると、实在面からの波長積分した放射エネルギーは、

$$E = \epsilon E_b = \epsilon \sigma T^4 \dots\dots\dots (3-5)$$

となる。ここで式 (3-2) のステファン・ボルツマンの法則を適用している。このような物体を灰色体 (Gray body) という。しかし、ほとんどの实在表面は波長依存性を持つことが多く、灰色体に対して非灰色体 (Nongray body) という。

次に、物体間の熱ふく射輸送を扱う上で重要な形態係数について解説する。形態係数の数学的な導出は、JSMEテキストシリーズ「伝熱工学」等を参照していただきたい<sup>2)</sup>。ここでは、簡単に形態係数の本質の意味を紹介する。形態係数をイメージしやすく説明するならば、ある物体表面  $A_1$  が、別の物体表面  $A_2$  をどのくらい“視ているのか”という割合のことを意味している。エネルギーの伝達という観点からは、物体表面  $A_1$  の自己放射エネルギーのうち、物体表面  $A_2$  に到達したふく射エネルギーの割合ということもできる。この形態係数を  $F_{12}$  とする。

形態係数は、長方形や円筒形など単純な2物体間の場合であれば、熱ふく射の教科書<sup>4)</sup> や Web カタログ<sup>5)</sup> などを参照すれば容易に算出できる。一方、複雑な形状を持つ物体間の形態係数においては、光線追跡法 (Raytracing 法) 等を用いて数値的にエネルギーの伝達割合を計算するのが一般的である。

以下では、一般的な形状を持つ2つの黒体表面間における熱ふく射輸送の計算例を示す。温度  $T_1$ 、表面積  $A_1$  の黒体面から温度  $T_2$ 、表面積  $A_2$  の黒体面に到達する熱ふく射エネルギー量  $Q_{12}$  は、

$$Q_{12} = A_1 F_{12} \sigma T_1^4 \dots\dots\dots (3-6)$$

であり、反対に黒体面  $A_2$  から黒体面  $A_1$  に到達する熱ふく射エネルギー量  $Q_{21}$  は、

$$Q_{21} = A_2 F_{21} \sigma T_2^4 \dots\dots\dots (3-7)$$

となる。よって、この2つの黒体表面間における正味の熱ふく射エネルギー伝達量  $Q_{net}$  は

$$Q_{net} = A_1 F_{12} \sigma T_1^4 - A_2 F_{21} \sigma T_2^4 \dots\dots\dots (3-8)$$

である。ここで形態係数の相互則  $A_1 F_{12} = A_2 F_{21}$  を用いると、

$$Q_{net} = A_1 F_{12} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \dots\dots\dots (3-9)$$

と書くこともできる。もし、黒体面  $A_1$  に対して、相手側の表面が  $n$  個ある場合は、その正味の熱ふく射エネルギー伝達量はその総和を取れば良い。すなわち、

$$\begin{aligned} Q_{net} &= A_1 F_{12} \sigma T_1^4 + A_1 F_{13} \sigma T_1^4 + \dots \\ &\quad - A_2 F_{21} \sigma T_2^4 - A_3 F_{31} \sigma T_3^4 - \dots \\ &= A_1 \sigma T_1^4 \sum_{i=2}^n F_{1i} - \sum_{i=2}^n A_i F_{i1} \sigma T_i^4 \dots\dots\dots (3-10) \\ &= A_1 \sigma T_1^4 - \sum_{i=2}^n A_i F_{i1} \sigma T_i^4 \end{aligned}$$

と表される。ここで形態係数の総和則  $\sum_{i=2}^n F_{1i} = 1$  を用いている。なお、熱放射を放つ表面が平面である場合には、その表面自身へのエネルギー伝達はないので  $F_{11} = 0$  である。

(例題1)

鉄のスラブ ( $T_1 = 1500\text{K}$ ,  $A_1 = 25\text{m}^2$ ) を理想的に黒体として考えよう。このスラブが、図3-2に示すようなある密閉された立方体の空間中に存在していたとする。周囲の壁面は室温 ( $T_{2-6} = 300\text{K}$ ) で、黒体面 ( $A_{2-6} = 25\text{m}^2$ ) であったとすると、スラブ面から他の5つの壁面へ到達する正味のふく射伝熱エネルギー量はいくらか計算してみよう。ただし、空間中のふく射の吸収や放射は無視できる。

(解答例)

立方体で構成された空間内で、正方形同士が正面から向かい合う場合、および垂直に並んで向かい合う場合の形態係数は、全て0.2である。式 (3-10) に数値を代入していくと、

$$Q_{net} = A_1 \sigma T_1^4 \sum_{i=2}^n F_{1i} - \sum_{i=2}^n A_i F_{i1} \sigma T_i^4 = 7176 \times 10^3 - 2296 = 7.165 [\text{MW}]$$

となる。このように高温スラブ面からの熱放射は非常に強力であり、室温程度の壁面からの熱放射は微々たるものであることがわかる。

次に、物体面が黒体ではなく、反射もするような物体表面間でのふく射エネルギー交換量の計算手法について解説する。灰色面は黒体面とは異なり、外来照射量 (Irradiation)  $G$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) の一部を反射し、一部を放射する。ある表面から出て行く全ふく射エネルギー量を射度 (Radiosity)  $J$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) とすると

$$J = \varepsilon E_b + \rho G = \varepsilon E_b + (1 - \varepsilon) G \quad (3-11)$$

よって、単位面積あたりの正味ふく射伝熱量は以下のようになる。

$$\frac{Q}{A} = J - G = \varepsilon (E_b - G) \quad (3-12)$$

これが任意の  $i$  個の灰色面において、ふく射エネルギー輸送

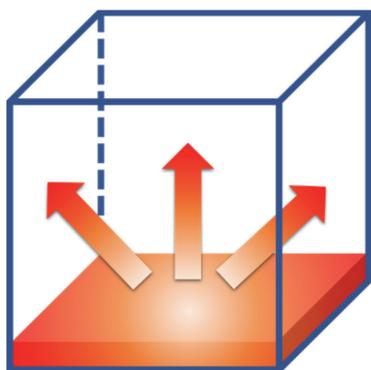


図3-2 鉄のスラブからの熱ふく射輸送 (Online version in color.)

が行われたとすると、外来照射量  $G_i$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) は形態係数を用いて、次のように書ける。

$$G_i = \sum_{j=1}^n F_{ij} J_j \quad (3-13)$$

従って、射度  $J_i$  は式 (3-11) を参照して、

$$J_i = \varepsilon_i E_{bi} + (1 - \varepsilon_i) \sum_{j=1}^n F_{ij} J_j \quad (3-14)$$

$i$  面から他の全ての面へ向かうふく射エネルギー量は、

$$\frac{Q_{Xi}}{A_i} = \varepsilon_i E_{bi} - \varepsilon_i \sum_{j=1}^n F_{ij} J_j \quad (3-15)$$

すなわち、各面で温度  $T_i$  や熱量  $Q_i$  がわかれば、 $n$  個の連立方程式により  $T_i$  あるいは  $Q_i$  が求まることになる。

この行列計算をもう少し単純化するために、次のような吸収形態係数  $F_{ij}^A = \varepsilon_j F_{ij}$  と、拡散反射形態係数  $F_{ij}^D = (1 - \varepsilon_j) F_{ij}$  を導入する。また、熱流束の単位 ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) を持つ黒体放射能  $E_{bi}$  や射度  $J_i$  について、面積を掛けた熱流量 ( $\text{W}$ ) として  $Q_{Ti} = A_i \varepsilon_j E_{bi}$ ,  $Q_{ji} = A_i J_j$  を定義すれば、式 (3-14) および式 (3-15) は次のように書ける。

$$Q_{ji} = Q_{Ti} + \sum_{j=1}^n F_{ij}^D Q_{ji} \quad (3-16)$$

$$Q_{Xi} = Q_{Ti} - \sum_{j=1}^n F_{ij}^A Q_{ji} \quad (3-17)$$

この2つの式において、 $Q_{ji}$  を消去し、ベクトル行列で書き直すと

$$\mathbf{F}_X \bar{Q}_T = \mathbf{I} \bar{Q}_X \quad (3-18)$$

となる。ここで、左辺の形態係数マトリックスは  $\mathbf{F}_X = \mathbf{I} - \mathbf{F}^A (\mathbf{I} - \mathbf{F}^D)^{-1}$  で表される。

(例題2)

図3-3のように高温の鉄スラブ面 ( $T_1 = 1500\text{K}$ ,  $A_1 = 25\text{m}^2$ ,  $\varepsilon_1 = 0.8$ ) に直交して、高反射防護壁 ( $T_2 = 600\text{K}$ ,  $A_2 = 25\text{m}^2$ ,  $\varepsilon_2 = 0.2$ ) が存在しているケースを考えよう。周囲環境の温度、有効面積、放射率を  $T_3 = 300\text{K}$ ,  $A_3 = 250\text{m}^2$ ,  $\varepsilon_3 = 1.0$  と仮定して、スラブ面、防護壁、周囲環境に対するふく射伝熱エネルギー量を求めよう。ただし、空間中のふく射の吸収や放射は無視できる。

(解答例)

例題1を参照して、同面積の直交2正方形の場合において形態係数は0.2である。形態係数の相互則と総和則を適用すると、形態係数のマトリックスは次のようにかける。

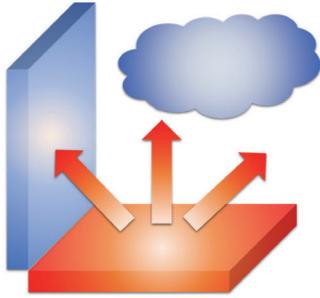


図3-3 直交した2正方形および周囲環境とのふく射伝熱エネルギー量 (Online version in color.)

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 & 0.8 \\ 0.2 & 0 & 0.8 \\ 0.08 & 0.08 & 0.84 \end{bmatrix}$$

ここで吸収形態係数および拡散反射形態係数は、

$$\mathbf{F}^A = \text{diag}(\varepsilon_1 \quad \varepsilon_2 \quad \varepsilon_3)\mathbf{F}^T$$

$$\mathbf{F}^D = \text{diag}((1-\varepsilon_1) \quad (1-\varepsilon_2) \quad (1-\varepsilon_3))\mathbf{F}^T$$

ここでdiag ( ) は対角行列であることを示し、( )<sup>T</sup>は転置行列である。これらより、

$$\mathbf{F}_X = \mathbf{I} - \mathbf{F}^A (\mathbf{I} - \mathbf{F}^D)^{-1} = \begin{bmatrix} 0.9742 & -0.1610 & -0.0747 \\ -0.0403 & 0.9984 & -0.0167 \\ -0.9340 & -0.8374 & 0.0915 \end{bmatrix}$$

各面における温度と放射率がわかっているのです、境界条件として次のベクトル量を考える。

$$\bar{Q}_T = \begin{pmatrix} A_1 \varepsilon_1 \sigma T_1^4 \\ A_2 \varepsilon_2 \sigma T_2^4 \\ A_3 \varepsilon_3 \sigma T_3^4 \end{pmatrix}$$

最終的に式 (3-18) を参照して、

$$\bar{Q}_X = \begin{pmatrix} Q_{X1} \\ Q_{X2} \\ Q_{X3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5.579 \\ -0.1964 \\ -5.382 \end{pmatrix} [\text{MW}]$$

このように例題1と比べると当然、スラブ面からのふく射伝熱エネルギー量は約7.2 MWから約5.6 MWへ減少するものの、高反射防護壁におけるふく射伝熱エネルギー量 (壁面が吸収するふく射エネルギー) は、約0.2 MWもある。放射率を可能な限り0に近づければ良いが、全波長帯域において実現するのは難しい。

以上の解析は、拡散反射 (入射してきた光が等方散乱する

こと) を仮定しているため、比較的容易に計算できるが、手計算では煩雑なのでこれもMATLAB等の数値解析ソフトウェアを使うことが推奨される。一方、反射面には鏡面反射が混在することもあるし、入射光に対して反射光の方向が変わる異方性反射も考慮する場合があって、それらには全て波長依存性がある。次節に紹介するふく射性媒体が存在するとさらに問題が複雑になる。これらを統一的に数値解析する手法として圓山・相原らによる光線追跡法によるふく射要素法 (REM<sup>2</sup>) があるので、より詳しい内容については参考文献を参照されたい<sup>1)</sup>。

## 4 ふく射性媒体内における熱ふく射の輸送

ふく射性媒体とは、主に大気中に存在するガスのことであり、ふく射を吸収・放射させる媒体のことである。二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) や水蒸気 (H<sub>2</sub>O) といった3原子以上で構成される分子は、その分子振動に伴って非対称な電荷変動を持つため、空間中を伝播する電磁波と相互作用する。特に、これらの分子は、赤外光領域に強い吸収帯を持つために、室温程度の熱ふく射をよく吸収する。これが、温室効果ガスと呼ばれる所以である。一方、大気中に多く含まれる窒素 (N<sub>2</sub>) や酸素 (O<sub>2</sub>) は2原子から構成されているので、空間中を伝播する電磁波と相互作用しない。これは、2原子分子の分子振動は対称的であるため、時間平均すると分子内の電荷変動が無いことになるためである。さらには、大気中に雲 (水滴、氷) や煤といった微粒子が含まれる場合は、電磁波の屈折や回折を起こすため、散乱を伴うふく射輸送を丁寧に取り扱う必要がある。

次に示すふく射輸送方程式は、空間中を伝播するふく射エネルギーの吸収・放射・散乱を統一的に記述できる<sup>1)</sup>。

$$\frac{dI(\vec{r}, s)}{ds} = -(\kappa + \sigma_s) I(\vec{r}, s) + \kappa I_b(\vec{r}) + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_{4\pi} I(\vec{r}, s') \Phi(s' \rightarrow s) d\Omega' \tag{3-19}$$

この数式を理解するために、あるふく射性媒体の中を距離dsだけ通過するふく射エネルギーがどのように変化するか見ていこう。まず、右辺第2項は、ふく射エネルギーの吸収と散乱によるふく射エネルギーの減衰を示している。次に第3項は、媒体自身が放つ自己放射エネルギーを示している。最後に、ふく射性媒体から出ていくふく射エネルギーには外部から入射した光の散乱光がプラスされる。このようにふく射輸送方程式は、ふく射エネルギーの保存則を示している。

一般的に、大気中のガスは波長依存性を持っている。例として、図3-4にガスの吸収係数の波長分布を示す。これは大気

中に二酸化炭素と水蒸気が存在しているとき、この混合ガスの吸収係数をLine-by-Line法<sup>1)</sup>によって算出するものである。この例でわかるように、波長4.2 μm付近に強い吸収帯があるが、これは二酸化炭素の固有振動数に起因している。さらに、図3-5で詳しく見てみよう。これは、図3-4において波長4.2 μm付近を拡大したものである。このように一まとまりに見える吸収バンドも、細かく見るとさらに分割されている。これは量子効果によって数多くのエネルギー準位差があるため、吸収バンドとは多くの吸収線の集まりであることがわかる。大気中の分子による吸収線は、HITRANと呼ばれる詳細なデータベースがある<sup>6)</sup>。これには通常、数百万本もの吸収線があるため、ガスの波長依存性をまともに計算しようとすると、その吸収線の数だけふく射輸送方程式を積分する必要がある。その煩雑性を回避するために現在は様々なガスモデルが提案されている。実用的には、統計狭域バンドモデルやk-distribution法等が用いられる<sup>4)</sup>。

前述したように、大気中に水滴や氷、煤といった散乱性媒体が加わると物理現象は非常に複雑になる。ふく射輸送方程式において第4項に含まれる散乱位相関数は、ある方向から来た光が他のある方向へ散乱する確率密度関数を示している。これは、散乱体の形状や複素屈折率、さらにその波長依存性まで考慮してMie散乱理論やHeney-Greenstein位相関数モデルによって全立体角積分することが必要となる。また、その外部からやってくる光は、検査体積内の全ての方向および全ての空間からやってくる散乱光である。したがって実際に数値計算を行う際には、検査体積内でエネルギー保存が達成されるまで収束計算を行わなくてはならない。こういった非常に煩雑な計算を行うために、多くの数値計算法の開発が精力的に行われてきている。汎用熱流体ソフトFLUENT<sup>7)</sup>やオープンソフトウェアOpenFOAM<sup>8)</sup>等に実装されているモデルとしては、離散方位法 (Discrete Ordinate Model)、離散

伝達法 (Discrete Transfer Model) が最もよく用いられている。ふく射輸送方程式は、機械工学のみならず様々な分野で使われる方程式であるため、各分野で同様の数値解法が発展している。そのため、気象学や宇宙物理学、原子核物理学まで範囲を拡げ、各分野におけるふく射輸送方程式の数値解法について詳しく調査した結果は、参考文献<sup>9)</sup>にまとまっている。各手法の得意・不得意な物理対象についてもわかりやすくまとめたので、興味のある読者は是非参考にして頂きたい。

最後に、ふく射性媒体内における熱ふく射の輸送の例として、次のような簡単な例題を考えよう。

(例題2)

ある鉄スラブ ( $T_1=1500$  K) 上に、水蒸気が存在している。水蒸気はまだ加熱されておらず室温程度とすると、水蒸気自身の自己放射エネルギーは無視できる。また、スラブ上の蒸気中では水滴を含まず、光を散乱しないものとする。この場合のガス吸収係数を  $1.0 \text{ m}^{-1}$  としたとき、鉄スラブ面から5 m離れた場所では、減衰されたふく射エネルギー強度はいくらだろうか？

(解答例)

スラブ上における水蒸気層は、熱ふく射を放射・散乱しないと仮定できるのでふく射輸送方程式は次のように非常に簡単な形になる。

$$\frac{dI(\vec{r}, \hat{s})}{ds} = -\kappa I(\vec{r}, \hat{s})$$

この微分方程式は、Beerの法則としてよく知られており、容易に解が得られる。鉄スラブ表面から  $S$  [m] 離れた場所において、ふく射エネルギー強度は

$$I(\vec{r}, \hat{s}) = I_b(\vec{r}_0, \hat{s}) \exp(-\kappa S) = \left( \frac{\sigma T_s^4}{\pi} \right) \exp(-\kappa S) = 615 \text{ [W/m}^2\text{sr]}$$

となる。ここで、鉄スラブを黒体と仮定しているため、

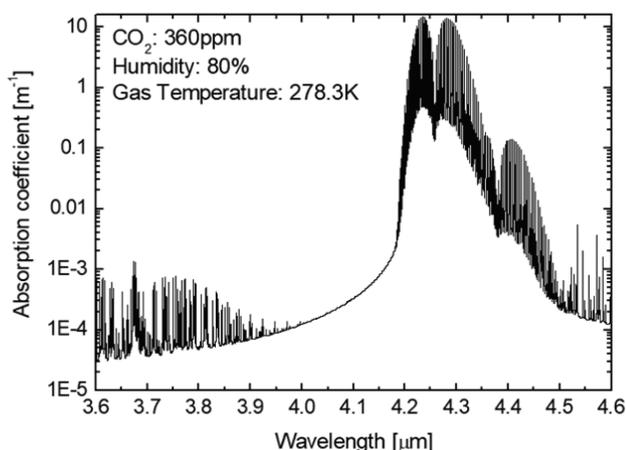


図3-4 大気中の二酸化炭素、水蒸気による吸収係数

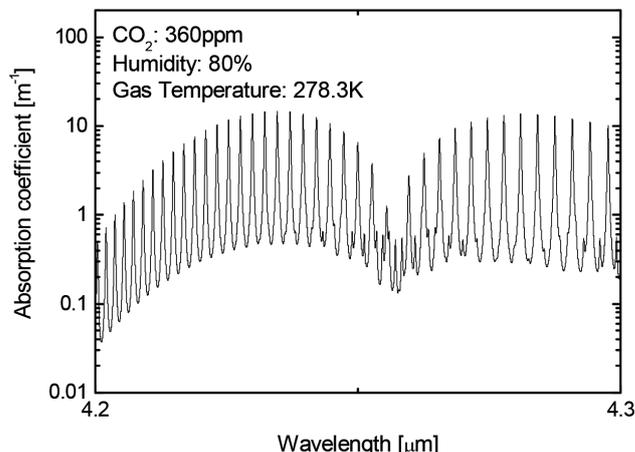


図3-5 図3-4において波長4.2 μm付近を拡大したもの

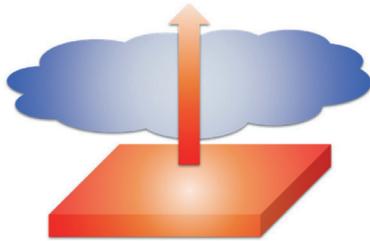


図3-6 鉄のスラブ面と水蒸気層 (Online version in color.)

$E_b = \sigma T_s^4 = \pi I_b$  の関係を用いている。高温の鉄スラブから放射されるふく射エネルギー強度は、 $91 \text{ [kW/m}^2\text{sr]}$  であるから、水蒸気の層から出ていく際には0.6%にまで減衰されていることになる。この減衰の強さについては、光学厚さ  $\tau = \kappa S$  という無次元数が重要なパラメーターとなる。上式を変形してみると

$$T_r = \frac{I(\vec{r}, \hat{s})}{I_b(\vec{r}_0, \hat{s})} = \exp(-\kappa S) = \exp(-\tau)$$

となる。ここで  $T_r$  は、入射エネルギーのうち、減衰されたふく射エネルギーの割合を示していることから透過率そのものに他ならない。図3-7に、透過率と光学厚さの関係を示す。この例題では光学厚さ  $1.0 \text{ m}^{-1} \times 5 \text{ m} = 5$  であったので図を見てもほとんどが減衰されてしまっていることがわかり、それより光学厚さが大きい場合、透過率はほとんど変化しない。

しかし、この例題では水滴による光散乱を無視しており、さらに時間経過と共に水蒸気自身が加熱され、過熱水蒸気状態となるとその自己放射エネルギーは相当大きくなるはずである。このように光散乱・自己放射が無視できない場合は手計算で解析することは不可能であるため、前述のふく射輸送方程式を数値的に解くことが一般的である。また、実際の物理現象では、ふく射に加えて、水滴の蒸発潜熱や、対流熱輸送も加わるためにより一層複雑となる。この場合は市販の汎用熱流体ソフトウェア等を活用するのが効率的ではあるが、どのようなモデルを正しく選択するのか、数値計算結果の妥当性を厳しく評価してから、現実の物理問題に対応するのが理想的だと思われる。

記号表

- A : 伝熱面積 ( $\text{m}^2$ )
- E : 放射能 ( $\text{W/m}^2$ )
- $E_{b_i}$  : 黒体放射能 ( $\text{W/m}^2$ )
- $F_{ij}$  : 要素*i*から要素*j*への形態係数
- G : 外来照射量 ( $\text{W/m}^2$ )
- J : 射度 ( $\text{W/m}^2$ )
- $I_b$  : 黒体放射強度 ( $\text{W} / (\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ )
- Q : 熱ふく射エネルギー量 (W)
- $\vec{r}$  : 位置ベクトル
- $\hat{s}$  : 方向ベクトル

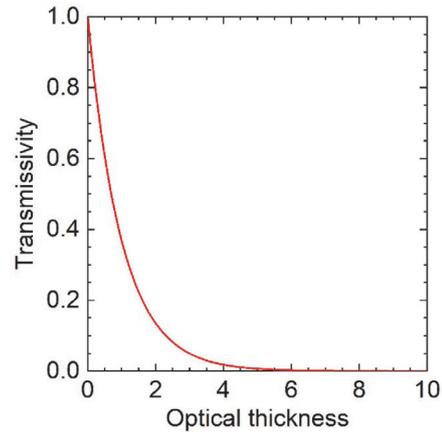


図3-7 光学厚さと透過率の関係 (Online version in color.)

- T : 温度 (K, °C)
- $T_r$  : 透過率

ギリシャ文字

- $\alpha$  : 吸収率
- $\varepsilon$  : 放射率
- $\Phi$  : 散乱位相関数
- $\kappa$  : 吸収係数 ( $\text{m}^{-1}$ )
- $\lambda$  : 波長 ( $\mu\text{m}$ )
- $\rho$  : 反射率
- $\sigma$  : Stefan-Boltzmann 定数 ( $\text{W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ )
- $\sigma_s$  : 散乱係数 ( $\text{m}^{-1}$ )
- $\Omega$  : 立体角 (sr)

参考文献

- 1) 円山重直 : 光エネルギー工学, 養賢堂, (2004).
- 2) JSME テキストシリーズ「伝熱工学」, 日本機械学会, (2003).
- 3) D.J.E.Ingram, 土方克法 : 輻射と量子物理, 丸善, (1977).
- 4) M.F.Modest : Radiative Heat Transfer, Academic Press, (2003).
- 5) A Catalog of Radiation Heat Transfer Configuration Factors, <http://www.thermalradiation.net/indexCat.html>
- 6) The HITRAN Database, <https://hitran.org/>
- 7) ANSYS FLUENT, <https://www.ansys.com/ja-jp/products/fluids/ansys-fluent>
- 8) OpenFOAM, <https://www.openfoam.com/>
- 9) 岩淵弘信, 石田春磨, 櫻井篤 : 気象研究ノート「気象・気候学のための最新放射計算技術とその応用」第二章3次元大気中の放射伝達, (2011).

(2021年11月9日受付)