大気放射の基礎
–Liou 著 藤枝・深堀訳 (2014) の講読–

北海道大学理学部 人見祥磨

令和 2 年 1 月 28 日

目次

動機

動機

- 惑星大気の熱輸送について興味があった
- 惑星大気について、自転周期や地軸の傾きによって、どのように熱輸送が変化するかシミュレーションしたい
- そのために、大気の温度分布を知りたい
- 放射に関する基本的な事項の知識の確認
- 放射に関して、観測なども含めて、基礎事項を解説している Liou の教科書を読むことにした
    - 大気放射学 —衛星リモートセンシングと気候問題へのアプローチ—
      K.N.Liou（著）藤枝 鋼、深堀 正志（翻訳）
      共立出版 (2014) 672 ページ

基本的な放射量

放射が進行することで、放射は相互作用により増減する。これを記述する**放射伝達方程式**を導くことが目的である。

そのために、放射量を表すための物理量の定義について確認する。

基本的な放射量

単色の放射強度 I_λ

面積 dA **を横切り、**dA **の法線からなす角** θ **の方向にある微小立体角** $d\Omega$ **から入射する、ある波長区間** $\lambda \sim \lambda + d\lambda$ **における、微小時間** dt **の間の微小放射エネルギー量** dE_λ

$$dE_\lambda = I_\lambda \cos[\theta]\, dA\, d\Omega\, d\lambda\, dt$$

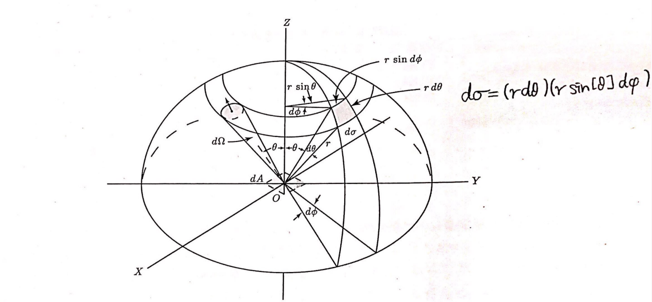

図 1.3　極座標で表された微小立体角の図．説明のため，立体角 $d\Omega$ で限定された方向の面積 dA を通る放射束が示されている．そのほかの記号は，本文で定義されている．

基本的な放射量

単色の放射フラックス密度 F_λ

単色の放射輝度を、半球の全立体角にわたって積分したものの、法線成分

$$F_\lambda = \int_\Omega I_\lambda \cos[\theta] \, d\Omega$$

全放射フラックス密度 F

単色の放射フラックス密度を、波長全体で積分

$$F = \int_0^\infty F_\lambda \, d\lambda$$

全放射フラックス f

全放射フラックス密度を、面全体で積分

$$f = \int_A F \, dA$$

散乱と吸収の概念

放射は、散乱や吸収の過程を経て、強度が変化する。

このことは、放射伝達方程式に記述されるが、実際にどのような現象が発生しているか確認する。

散乱と吸収の概念

散乱 入射波と衝突した粒子が、入射した電磁波のエネルギーを、あらゆる方向に再放射する過程。すべての波長で発生し、粒子の大きさが影響する。

独立散乱 粒子が少ないとき、個々の粒子が全く同じように散乱する。

多重散乱 粒子が多量にあるとき、散乱が繰り返される。

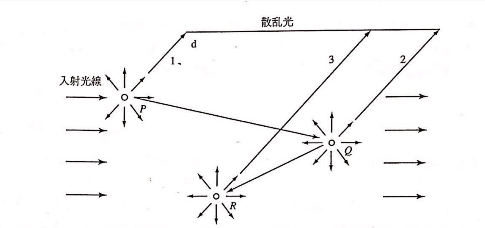

図 1.5　d で示す方向に 1 番目 (*P*)，2 番目 (*Q*)，3 番目 (*R*) の順に散乱する多重散乱過程.

散乱の種類

散乱にはサイズパラメーター $x = 2\pi a/\lambda$（a は粒径）が影響

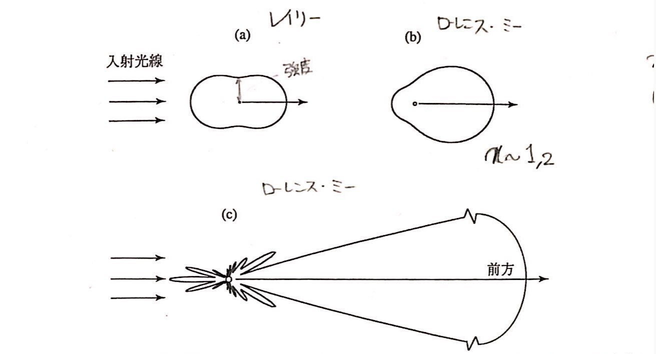

図 1.4　0.5 μm の可視光で照らされた (a) 10^{-4} μm，(b) 0.1 μm，(c) 1 μm という三つの大きさの球形エーロゾルによる散乱強度の説明のための角度パターン．1 μm のエーロゾルの前方散乱のパターンは非常に大きいため，説明用に縮小されている．

黒体放射の法則

黒体とは吸収のない理想的な物体である。放射を考える上で、最も基本的な物体として黒体を考える。

黒体の放射を支配する 4 つの法則について述べる。

プランクの法則

振動子が持つエネルギーは $E = nh\tilde{\nu}$ **に量子化されると仮定する**

プランク関数： $B_{\tilde{\nu}}[T] = \dfrac{2h\tilde{\nu}^3}{c^2(\exp[h\tilde{\nu}/k_B T] - 1)}$

($\tilde{\nu}$**：周波数、**h**：プランク定数、**k_B**：ボルツマン定数、**c**：光速、**T**：絶対温度)**

射出された単色の放射強度を、周波数と射出する物質の温度に関連付ける

波長 λ **に関するプランク関数：**

$$B_\lambda[T] = \frac{2hc^2}{\lambda^5(\exp[hc/k_B\lambda T] - 1} = \frac{C_1\lambda^{-5}}{\pi(\exp[C_2/\lambda T] - 1)}$$

($C_1 = 2\pi hc^2, C_2 = hc/k_B$**)**

プランクの法則

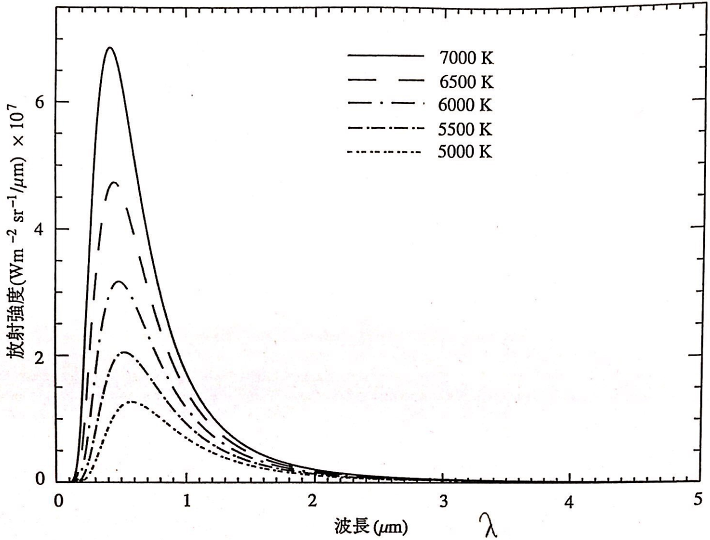

図 1.7　いくつかの射出温度における波長に対する黒体の放射強度（プランク関数）.

ステファン・ボルツマンの法則

黒体の全放射強度: プランク関数を波長全体で積分

$$B[T] = \int_0^\infty B_\lambda[T]\, d\lambda = bT^4, \qquad b = \frac{2\pi^4 k_B^4}{15c^2h^3}$$

等方な黒体によって放射される放射フラックス密度:

$$F = \pi B[T] = \sigma T^4$$

$\sigma = 5.67 \times 10^{-8}\, \mathrm{J\, m{-}2\, s^{-1}\, k_B^{-4}}$**; ステファン・ボルツマン定数**

広い波長域での赤外放射伝達の解析の基礎となる

ウィーンの変位則

黒体放射の最大放射強度の波長が、温度に反比例する

$$\frac{\partial B_\lambda[T]}{\partial \lambda} = 0 \quad \textbf{これを解くと} \quad \lambda_m = \frac{a}{T}$$

($a = 2.897 \times 10^{-3}\ \mathrm{m\,K}$**; ウィーンの変位定数)**

キルヒホッフの法則

以下の条件を満たしているとき、射出と吸収が等しくなる

- 一様な温度
- 等方性放射
- 熱力学的平衡

中間圏よりも高度が低い、局所的に限られた空間では、エネルギー遷移が分子の衝突によって支配される範囲内で、精度良く成り立つと考えて良い

放射伝達の基礎

ある方向に進む放射が、吸収や散乱などの相互作用で、どのように増減するか記述するのが、放射伝達方程式である。

放射伝達方程式を導き、特定の状況での放射伝達方程式の解を求める。

放射伝達方程式

放射伝達強度 I_λ^d が、放射の伝搬方向に厚さ ds で密度 ρ の媒質を横切った後に、$I_\lambda^d + dI_\lambda^d$ になるとする

$$dI_\lambda^d = -k_\lambda \rho i_\lambda \, ds$$

k_λ は質量消散断面積と呼ばれる

射出と多重散乱による放射強度の増加が以下で与えられるように、放射源係数 j_λ を定義する

$$dI_\lambda^s = j_\lambda \rho \, ds$$

放射伝達方程式

ふたつの式を関連付けて、

$$dI_\lambda = dI_\lambda^d + dI_\lambda^s = -k_\lambda \rho I_\lambda \, ds + j_\lambda \rho \, ds$$

放射源関数 $J_\lambda \equiv j_\lambda / k_\lambda$ を導入すると、

$$\frac{dI_\lambda}{k_\lambda \rho \, ds} = -I_\lambda + J_\lambda \quad \text{……放射伝達方程式}$$

ビーアー・ブーゲー・ランバートの法則

大気系からの射出の寄与を無視できる

$$\frac{dI_\lambda}{k_\lambda \rho \, ds} = -I_\lambda$$

積分すると

$$I_\lambda[s_1] = I_\lambda[0] \exp[-k_\lambda u], \qquad u = \int_0^{s_1} \rho \, ds \quad \text{（光路長）}$$

一様に消散する媒質を横切る放射強度の低下が、質量消散断面積と光路長の積の指数関数に従う

シュワルツシルトの方程式

地球と大気から射出される熱赤外放射伝達
放射源関数はプランク関数で与えられる

放射伝達方程式: シュワルツシルトの式

$$\frac{dI_\lambda}{k_\lambda \rho \, ds} = -I_\lambda + B_\lambda[T]$$

シュワルツシルトの式の解:

$$I_\lambda[s_1] = I_\lambda[0] \exp\left[-\tau_\lambda[s_1, 0]\right] + \int_0^{s_1} B_\lambda\left[T[s]\right] \exp\left[-\tau_\lambda[s_1, s]\right] k_\lambda \rho \, ds$$

$$\tau_\lambda[s_1, s] = \int_s^{s_1} k_\lambda \rho \, ds \qquad (s \text{ と } s_1 \text{ の間の光学的厚さ})$$

まとめ

まとめ・今後の展望

- 基礎方程式の概念がわかった
- 特定の状況（大気系からの射出を無視できる場合や、シュワルツシルトの方程式）での、放射伝達方程式の解法を学んだ
- 放射伝達方程式から計算できるもの
    - 放射伝達方程式から吸収の鉛直分布を求めることができる
    - その結果、気温の鉛直分布がわかるようになる
- 実際に応用する方法がわかっていないので、第 8 章を読み進めているところ