2019年度大気物理学II レポート課題　　　　　　　　　　　佐藤正樹　2019年11月13日

<u>**問題 A**</u>：CO_2の増加等の原因で温暖化した場合に、大気の循環の強さがどう変化するか論ぜよ。次の各問題に答える形で、放射対流平衡モデルにおける光学的厚さに対する依存性の形で議論せよ。

1. 灰色放射平衡の大気構造を求め、地表面温度 T_s と大気下端温度 T_0 の全光学的厚さ τ_s に対する依存性を示せ。ただし、大気の光学的厚さ τ と気圧 p の関係を、

$$\frac{\tau}{\tau_s} = \left(\frac{p}{p_s}\right)^{1+\alpha},$$

日射の流入量を F=240 W/m²、α=4、現在気候で τ_s=4 とし、τ_s=1-8 の間で変化を調べよ。灰色放射については Satoh (2013, Section 10.6, 14.3) を参照。

2. 湿潤断熱線が大気下端温度 T_0 に応じてどのように変化するか、グラフを描け。T_0=250-320K　とし、5K きざみで湿潤断熱線を描け。湿潤断熱温度勾配、飽和水蒸気圧の計算に以下を用いよ。ただし、$\varepsilon = R_d/R_v$ である。

$$\Gamma_m = \frac{1 + \frac{\varepsilon L}{R_d T}\frac{p^*(T)}{p}}{1 + \frac{\varepsilon^2 L^2}{C_p R_d T^2}\frac{p^*(T)}{p}} \frac{g}{C_p},$$

$$p^*(T) = p^*{}_0 \exp\left[\frac{L}{R_v}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right]$$

3. 灰色大気の湿潤断熱調節を用いた鉛直1次元放射対流平衡の温度構造を求め、全光学的厚さ τ_s に対する依存性を求めよ。ただし、$Ts=T_0$ とし、大気中の放射冷却率が、ニュートン冷却、

$$-Q = -\frac{T - T_R}{\tau_R}.$$

で与えられるとする。T_Rは1で求めた放射平衡温度であり、τ_Rは放射緩和時間である。

　地表面のエネルギーバランスを求める際に、大気からのエネルギー流入量が変わらないとしてよい。そうすると、地表面から大気下端への潜熱・顕熱によるエネルギーフラックスは、$F = \sigma_B\left(T_{Rs}{}^4 - T_0{}^4\right)$ で与えられる。T_{Rs}は1で求めた地表面温度である。大気下端、圏界面の気圧を p_s, p_Tとすれば、エネルギーバランスは次のように与えられる。

$$\int_{p_T}^{p_s} C_p Q \frac{dp}{g} = F.$$

4. 放射対流平衡解における大気下端の比湿、降水量、質量フラックスの全光学的厚さに対する依存性を示せ。大気下端の比湿は $q_0 = rq^*(T_s)$ （r=80%は大気下端における相対湿度)、降水量 $P = F / L$ (L は潜熱)、質量フラックス M は次のように与えられる：

$$M = \frac{P}{q_0}.$$

<u>**問題 B**</u>：Walker 循環の上昇流域の面積の依存性を論ぜよ。以下の式で、特に断らない限り notation は Bretherton and Sobel (2002) に従うとする。

空間方向に無次元化し、赤道上の $0 < x < 1$ の領域で、海面水温分布が, $T_s = T_{s0} + \Delta SST \cos \pi x$ [K] と与えられる。$0 < x < f_c$ の範囲で上昇流が生じるものとする。水蒸気バランスの式、温度バランスの式、連続の式：

$$-\frac{\omega M_q}{g} = -P + E + \frac{\Delta p_T}{g} u \frac{dM_q}{dx},$$

$$-\frac{\omega M_s}{g} = -P + R,$$

$$\frac{du}{dx} = \frac{\omega}{\Delta p_T}.$$

$M_s = M_{s0} + M_{sp} T$、$M_q = M_{q0} + M_{qp}\, q$ であり、放射対流平衡解を M_{s0}= 3017 J/kg, M_{q0}= 2431 J/kg とし、また、M_{sp} = 0.0435, M_{qp} = 0.0507 とする。T は x によらず一定とし、対流域 $0 < x < f_c$ で T=q であるとする。潜熱フラックス E、降水加熱量 P、放射冷却 R は次のようにおけるものとする。いずれも単位はエネルギーフラックス W/m^2 である。

$$E = E_0 + a(T_s - T_{s0}) = E_0 + a\Delta SST \cos \pi x,$$

$$P = \begin{cases} P(x); & 0 < x < f_c, \\ 0; & f_c < x < 1, \end{cases}$$

$$R = F - rP,$$

ここで、E_0 =125 [W/m^2]、$a = c_q \gamma_s C_p = 28$ [W/m^2/K]、雲放射フィードバックは r = 0.2 とする。

1. 水蒸気バランス式を解いて、ΔSST のいくつかの値について M_q の空間分布を求めよ。
2. ΔSST の関数として f_c の依存性を求めよ。

問題 C：Hadley 循環について以下の点を論ぜよ。φ を緯度として、海面水温分布が $T_s = T_{s0} - \Delta T_s \left|\sin\varphi - \sin\varphi_0\right|^n$ [K] と与えられるとする。ITCZ は緯度 φ_0 に集中化されているとし、ITCZ 以外の Hadley 循環域にわたって下向き質量フラックス M_d [kg/m^2] は一定であるとする。Hadley 循環の緯度方向の流れは、高度 $z = 0, H$ 付近に局在化しているとする。その他の仮定は Satoh（1994）、Held and Hou（1980）に準じる。$T_{s0} = 300$ K、$\Delta T_s = 40$ K、$H = 15$ km とする。

1. Hadley 循環の上層の東西風分布を求めよ。緯度 φ_0 で東西風はゼロとする。
2. n =2 について Hadley 循環の到達緯度を φ_0 の関数として、南北半球についてそれぞれ求めよ。
3. Hadley 循環領域における角運動量バランス

$$\frac{1}{R\cos^2\varphi}\frac{\partial}{\partial\varphi}\left(\frac{1}{H}\int_0^H uv\cos^2\varphi dz\right) = -\frac{Cu(0)}{H}$$

から、C の typical な値を見積もった上で、下層風 $u(0)$の緯度分布を求めよ。

4. $n = 3, 4$ と変化させたときの Hadley 循環の性質について論ぜよ。

問題 D：Satoh and Hayashi (1992) の Section 5b に従って、時間変化する 2 コラムモデルを仮定し、放射冷却分布 $Q^{\mathrm{rad}}(z)$ が与えられているもとでの、時間平均した対流質量フラックス Mc の鉛直分布を求めよ。上昇流域は地表面から中立層 z_Nまで飽和しており、湿潤断熱に従う。地表面気温は $T_s = 300$ K とし、上昇流域下端の温度は T_s に一致するとする。中立高度 z_N は、地表から初めて上昇流域と下降流域の密度が一致する高度とする：

$\rho^u(z_N) = \rho^d(z_N)$、$\rho^u(z) < \rho^d(z)$ $(0 < z < z_N)$。

下降流域の水蒸気、温度は以下の式に従う。$z > z_N$ において、

$$\rho^d \frac{\partial q^d}{\partial t} = 0,$$

$$C_p\rho^d \frac{\partial T^d}{\partial t} = -Q^{rad},$$

$z < z_N$ において、

$$\rho^d \frac{\partial q^d}{\partial t} = M_c \frac{\partial q_d}{\partial z},$$

$$C_p\rho^d \frac{\partial T^d}{\partial t} = C_p M_c\left(\frac{\partial T^d}{\partial z} + \frac{g}{C_p}\right) - Q^{rad},$$

とし、中立層付近の薄い層内$\left|z - z_N\right| < \Delta z$で、上昇流域から下降流域へ水蒸気、エネルギーの輸送があるとする。

$$\rho^d \Delta z \frac{\partial q^d}{\partial t} = M_c\left(q^u - q^d\right),$$

$$C_p \rho^d \Delta z \frac{\partial T^d}{\partial t} = C_p M_c\left(T^u - T^d\right) - Q^{rad}.$$

質量フラックスは、

$$M_c = C\sqrt{W},$$

$$W = \int_0^{z_N} \frac{\rho^d - \rho^u}{\rho^d} g dz,$$

と与えられるとする。

1. 簡単のために、$Q^{\mathrm{rad}}(z)$ は時間的に変化せず、$0 < z < z_T$（$z_T = 15$ km）において放射冷却率は一定値 2 K/day をとるとする。$\Delta z = 100$ m 程度で鉛直方向に離散化して数値積分せよ。$C = 10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}$ kg/m^3 の値について調べよ。
2. 質量フラックスの分布は $Q^{\mathrm{rad}}(z)$の鉛直分布に依存することが予想される。$Q^{\mathrm{rad}}(z)$の鉛直分布依存性について感度実験を行い、Mc と $Q^{\mathrm{rad}}(z)$の関係を論ぜよ。

<u>**問題 E**</u>：

問題 A の条件設定の下で、灰色放射の放射伝達方程式を用いて、以下の解を時間発展して求めよ。

1. 放射平衡解。
2. 放射対流平衡解。対流層の温度減率を 6.5 K/km として、対流調節を用いる。
3. 放射対流平衡解。対流層の温度減率を乾燥断熱減率として、対流調節を用いる。
4. 放射対流平衡解。対流層の温度減率を湿潤断熱減率として、対流調節を用いる。
5. 放射対流平衡解。対流層の対流フラックスを混合距離理論を用いて求める。

参考文献：

Bretherton, C. S., Sobel, A. H., 2002: A simple model of a convectively coupled Walker circulation using the weak temperature gradient approximation. *J. Climate*, **15**, 2907-2920.

Held, I. M. Hou, A.Y., 1980: Nonlinear axially symmetric circulations in a nearly inviscid atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, **37**, 515-533.

Held, I. M., Soden, B. J., 2006: Robust responses of the hydrological cycle to global warming. *J. Climate*, **19**, 5686-5705.

Satoh, M., Hayashi, Y.-Y., 1992: Simple cumulus models in one-dimensional radiative convective equilibrium problems. *J. Atmos. Sci.*, **49**, 1202-1220.

Satoh, M., 1994: Hadley circulations in radiative-convective equilibrium in an axially symmetric atmosphere. *J.Atmos. Sci.*, **51** , 1947-1968.

Satoh, M., 2013: Atmospheric Circulation Dynamics and General Circulation Models, 2nd edition. Springer-PRAXIS, 757pp, ISBN 978-3-642-13573-6, doi:10.1007/978-3-642-13574-3.