

1次元放射対流平衡モデルを用いた湿潤大気温度構造の考察

井谷 優花

地球および惑星大気科学研究室

1. はじめに

大気温度構造はどのような仕組みで決まっているのか？その理解の第一歩として本研究では、大気の放射限界と温度構造に関する研究(Nakajima et al., 1992)に従って、まず放射平衡にある成層圏と飽和している対流圏をもつ大気の放射限界を再現した。次に大気温度構造と放射限界の関係について考察を行った。

2. モデル設定

本研究では、1次元放射対流平衡モデルを用いる。

< 1次元放射対流平衡モデルとは？ >

放射平衡と対流の影響を考慮した温度構造モデル。次のような系を考える。

- 平行平板大気……水平方向には放射が等方的
- 局所熱力学平衡…高度 40 km 以下の気層では熱平衡状態が成立
- 対流調節…ある高度での温度減率が、あらかじめ与えている温度減率を超える時には、対流が生じて与えた温度減率に調節されるとする。

さらに、Nakajima et al. (1992) に従い以下の仮定をおく。

大気について

- 放射平衡状態の成層圏 + 飽和している対流圏
- 静水圧平衡状態
- 大気成分
 - 凝結性成分 (v) と非凝結性成分 (n) の 2 つ
 - 理想気体
 - 分子量 m_v, m_n は等しい
 - 潜熱 l , 定圧モル比熱 C_{pv}, C_{pn} は温度によらず一定
 - 成層圏での混合比は対流圏界面と等しい

凝結性成分について

- 固体相はない
- 液体相の体積は無視できる

• 気体定数 : $R = 8.314[\text{JK}^{-1}\text{mol}^{-1}]$

• 潜熱 : $l = 43655[\text{Jmol}^{-1}]$

• 定圧比熱 : $C_{pv} = 4R, C_{pn} = 3.5R$

放射伝達について

- 太陽放射に対しては透明。
- 凝結性成分だけが赤外放射を吸収。
- 灰色大気 (吸収係数は放射の波長によらない)
- 大気上端から入射する赤外放射はない。
- 大気下端の温度は地表面温度と等しい
- 散乱の効果は無視出来る

支配方程式

• 光学的深さ $\chi_v m_v + \kappa_n \chi_n m_n \frac{dp}{mg}$

• 放射束密度
• 上向き $\frac{3}{2} \int_0^\tau \pi B(\tau') \exp\left(-\frac{3}{2}(\tau - \tau')\right) d\tau' - \frac{3}{2} \int_{\tau_b}^\tau \pi B(\tau') \exp\left(-\frac{3}{2}(\tau' - \tau)\right) d\tau'$

• 下向き $\pi B(\tau_b) \exp\left(\frac{3}{2}(\tau - \tau_b)\right)$

• 擬湿潤断熱減率 $\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right) = \frac{\frac{RT}{C_{pn}p} + \frac{\chi_v^* l}{\chi_n C_{pn}p}}{\chi_n + \chi_v \frac{C_{pv}}{C_{pn}} + \frac{\chi_v^* l^2}{\chi_n RT^2 C_{pn}}}$

…相変化によって生じる水滴を瞬間的に系から取り除いて考える
 $\chi_v^* = \frac{p^*(T)}{p}$ 飽和水蒸気圧

• 凝結性成分のモル分率 (飽和状態): $\chi_v^* = \frac{p^*(T)}{p}$

• プランク関数: B

• 黒体放射: $\pi B = \sigma T^4$

<物理定数>

• 重力加速度: $g = 9.80 [\text{ms}^{-2}]$

• ステファン・ボルツマン定数:

$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} [\text{W m}^{-2}\text{K}^{-4}]$

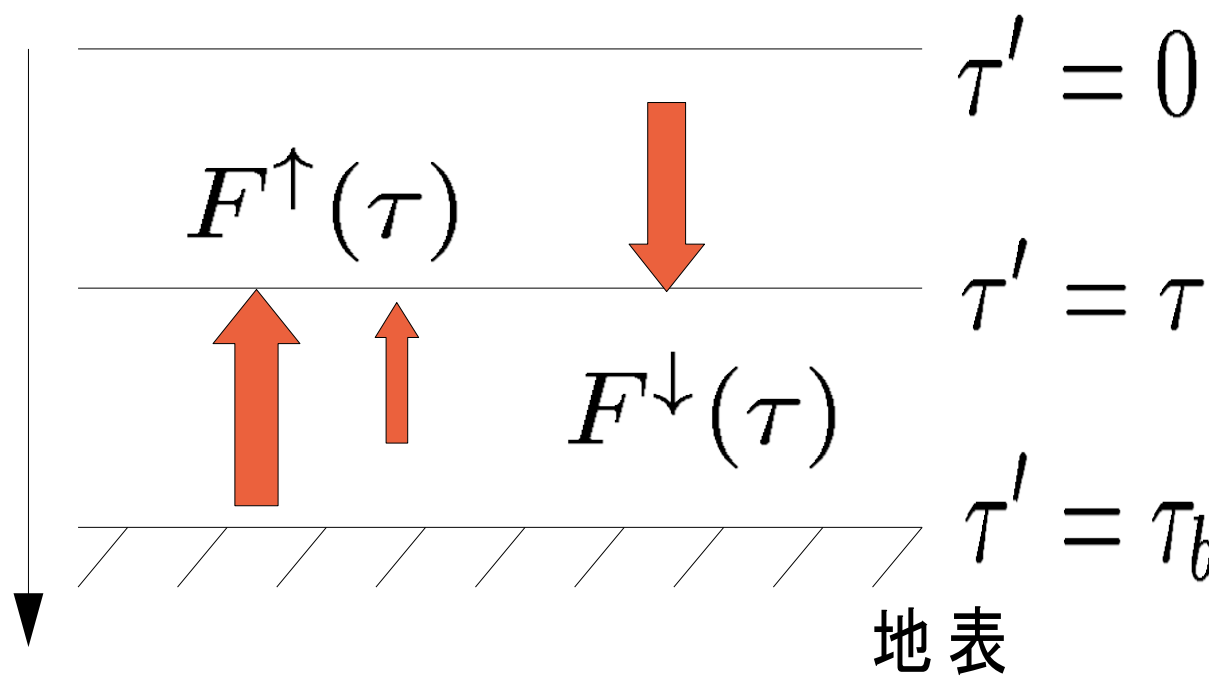
<変数>

• 吸収係数: $\kappa_v, \kappa_n [\text{m}^2\text{kg}^{-1}]$

• モル分率: χ_v, χ_n

• 分子量: $m_v, m_n = 18.0 \times 10^{-3} [\text{kgmol}^{-1}]$

• 飽和蒸気圧定数: $p_0 = 1.4 \times 10^{11} [\text{Pa}]$



3. 成層圏の放射限界

放射平衡にある成層圏 + 水蒸気で飽和している対流圏界面

…大気が外向きに放射できるエネルギーの大きさに上限がある

対流圏界面の光学的深さと温度の関係式

• 成層圏が放射平衡であることから:

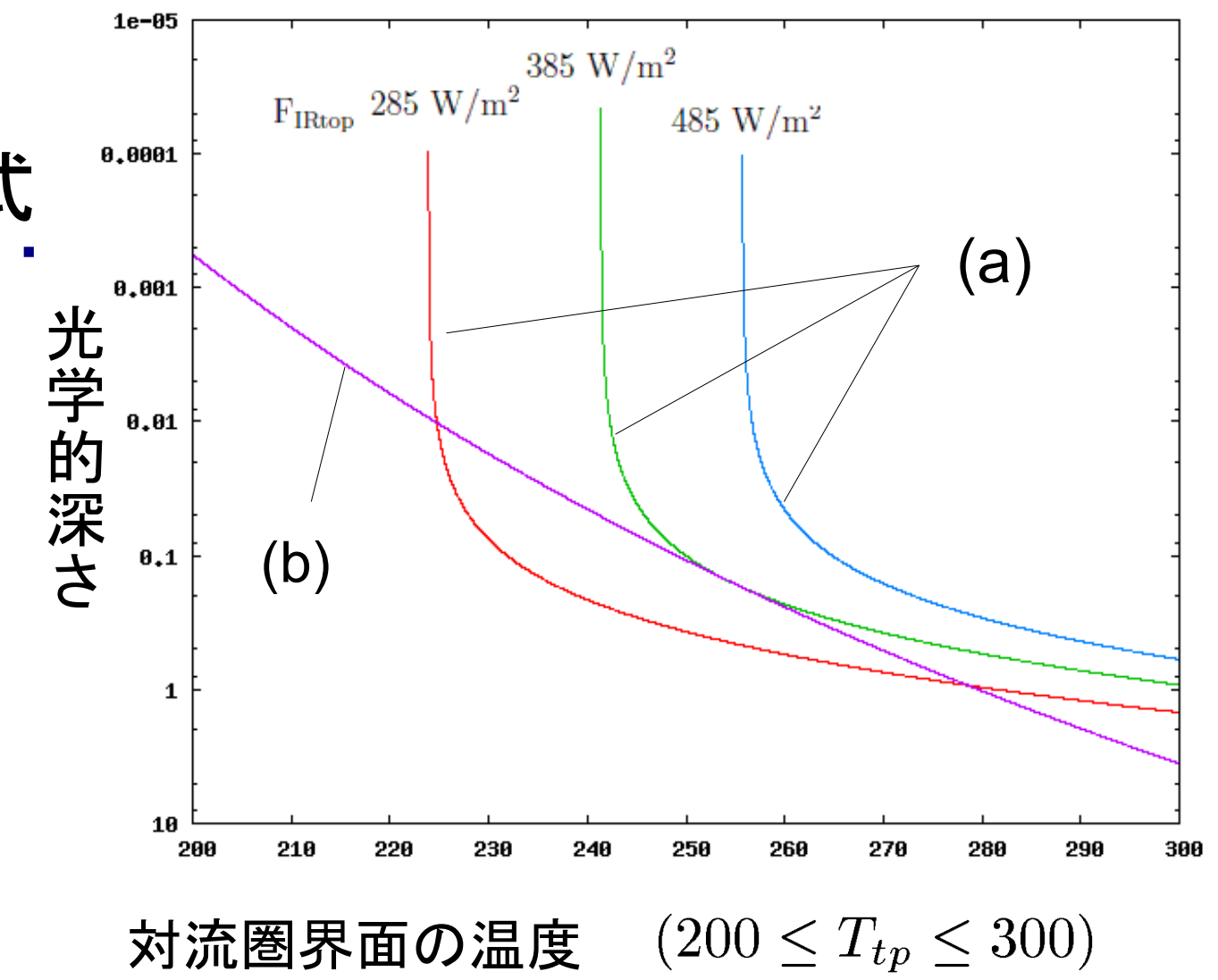
$$\frac{1}{2} F_{\text{top}}^\uparrow \left(\frac{3}{2} \tau_{\text{tp}} + 1 \right) = \sigma T_{\text{tp}}^4, \dots (a)$$

• 対流圏界面が飽和していることから:

$$\tau_{\text{tp}} = \kappa_v p^*(T_{\text{tp}}) \frac{1}{g} \frac{m_v}{\bar{m}} \dots (b)$$

T_{tp} : 対流圏界面の温度

$p^*(T_{\text{tp}})$: 飽和水蒸気圧



対流圏界面の温度 ($200 \leq T_{\text{tp}} \leq 300$)

$\kappa_v = 0.01$

F_{top}^\uparrow を与えて (a), (b) それぞれ $T_{\text{tp}} - \tau$ 平面にプロット. $F_{\text{top}}^\uparrow > 385$ では (a), (b) 両方を満たす解がない

考察 - 放射限界が生じる理由 -

385 W/m²より多く放射するとき、放射平衡になるために必要な吸収物質の量 (光学的深さ) が対流圏界面が飽和するために必要な量より少ない。

言い換えると、

たくさん放射したい → T_s が高くなる → 必要以上に吸収物質が多い → 放射できない

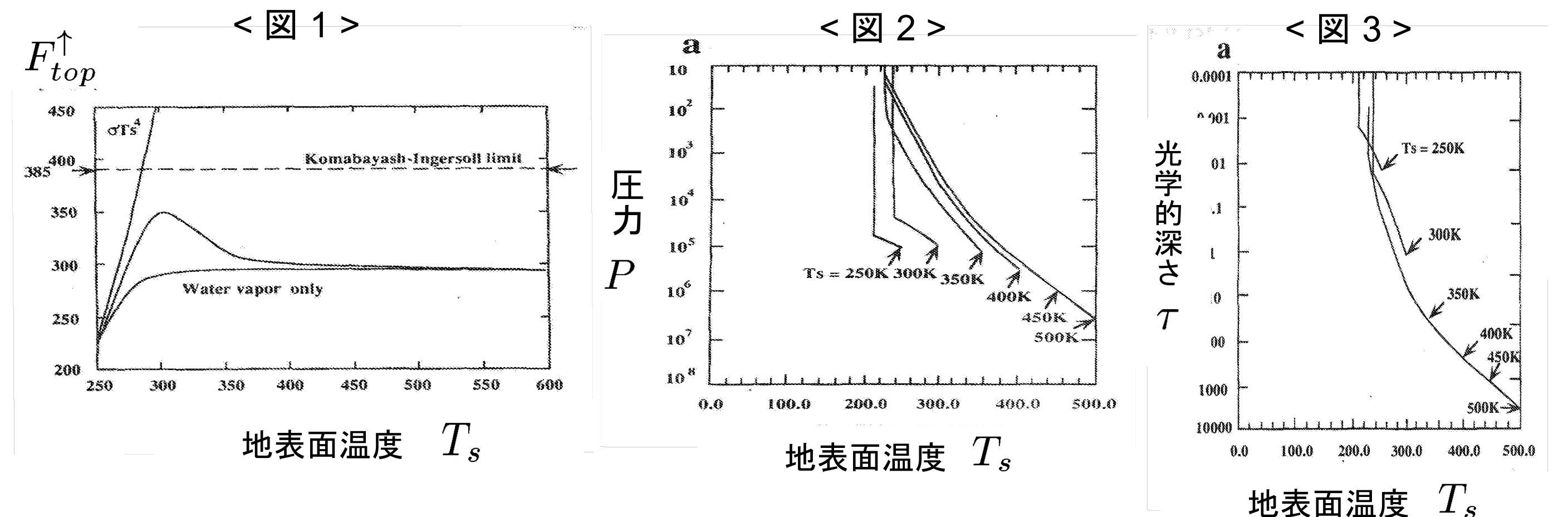
なお、この放射限界は駒林-Ingersoll 限界と呼ばれる

4. 対流圏を含めた場合

放射平衡にある成層圏 + 水蒸気で飽和している対流圏

- 上限の他に下限もある
- 地表面温度が十分に高いとき、温度によらず一定

吸収係数: $\kappa_v = 0.01$, 大気下端における非凝結性成分の分圧: 10^5Pa .



• 図 1: 地表面温度と F_{top}^\uparrow の関係。
 F_{top}^\uparrow は地表面の黒体放射 σT_s^4 や駒林-Ingersoll 限界より小さい。水蒸気大気の F_{top}^\uparrow より大きく、地表面温度が高いと一定値に漸近する。

• 図 2: 地表面温度と高度 (気圧) の関係。
 T_s が大きくなると、飽和している領域 (対流圏) の高度が高くなる。

• 図 3: 地表面温度と高度 (光学手深さ) の関係。
 T_s が大きくなると、光学的深さ構造が T_s によらず同じになる。
 $T_s > 300$ では光学的深さが 1 より大きい。

考察 - F_{top}^\uparrow が一度ピーク値に達したあと一定値に漸近する理由 -

地表面温度 T_s が

- 低い時 → $\tau < 1$ であり、 F_{top}^\uparrow は T_s に依存する。
- 300 K より高いとき ($\tau > 1$)
 - $\tau = 1$ 付近の温度構造が同じになる
 - F_{top}^\uparrow は $\tau = 1$ にある大気からの放射に最も依存する性質がある。

⇒ F_{top}^\uparrow が一定値になる

(図は Nakajima et al. (1992) より引用)

5. まとめと今後の課題

- 放射平衡状態の成層圏と飽和状態の対流圏界面が平衡状態で存在するためには、放射限界 (駒林-Ingersoll 限界) を超えられないことを再現した。
- 駒林-Ingersoll 限界が生じるのは、放射平衡に必要な吸収物質の量と飽和状態で必要な量に矛盾が起きてしまうからである。

参考文献

- 会田 勝, 1954: 気象学のプロムナード 8 大気と放射過程 - 大気の熱源と放射収支を探る -, 東京堂出版, 280pp.
- 柴田清孝, 1999: 応用気象学シリーズ 1 光の気象学, 朝倉書店, 182pp.

- Nakajima, S., Hayashi, Y.-Y., Abe, Y., 1992: A Study on the "Runaway Greenhouse effect" with a One-Dimensional Radiative-Convective Equilibrium Model, J. Atmos. Sci., 49, 2256-2266.
- 中島美紀, 2007: 惑星質量と大気組成の違いが水惑星の大気の射出限界に与える影響, 東京工業大学卒業論文
- 安田延寿, 1994: 基礎大気科学, 朝倉書店, 204pp.

- 対流圏を含めると、 F_{top}^\uparrow には下限も存在する
- 下限の存在は、大気温度構造と光学的深さの関連と、 F_{top}^\uparrow の性質で説明できる。

<今後の課題>

Nakajima et al. (1992) を読み進め、水蒸気量や大気成分の比熱、吸収係数を変化させた場合に、放射量と温度構造がどのように変化するかを調べる。