

# 多様な惑星の放射計算に向けて —Nakajima et al. (1992) の再現実験

---

北海道大学大学院理学院 地球流体力学研究室 M1 人見祥磨

February 5, 2021

## 動機

---

- 惑星の生命居住可能性を調べたい
- 生命が存在するためには、惑星表面に液体の水があることが重要だと考えられる
- 惑星の温度を計算することで、惑星表面に液体の水が存在しうるかを検討することができる
- 数値計算で温度決定をする第一歩として、放射対流平衡の計算をしている
  - Nakajima et al. (1992) の再現計算を行っている

## Nakajima et al. (1992)

---

- 表面温度と大気上端での上向き放射フラックス (Outgoing longwave radiation; OLR) の関係を調べたもの
- OLR には上限が存在することがわかった
  - Komabayashi (1967, 1968) や Ingersoll (1969) によって得られた OLR の上限とは異なる上限である

# Komabayashi–Ingersoll Limit

- Komabayashi や Ingersoll が外向き赤外放射の上限を得た

## 放射フラックス密度

$$F^{\uparrow}[\tau] = \pi B[\tau] - \int_{\tau_b}^{\tau} \left[ \frac{d}{d\tau'} [\pi B[\tau']] \exp \left[ -\frac{3}{2}(\tau' - \tau) \right] \right] d\tau' \quad (1)$$

$$F^{\downarrow}[\tau] = \pi B[\tau] - \int_0^{\tau} \left[ \frac{d}{d\tau'} [\pi B[\tau']] \exp \left[ -\frac{3}{2}(\tau - \tau') \right] \right] d\tau' - \pi B[0] \exp \left[ -\frac{3}{2}\tau \right] \quad (2)$$

この2式より

$$\pi B[\tau] = \frac{1}{2} F_{\text{TOA}}^{\uparrow} \left( \frac{3}{2}\tau + 1 \right) \quad (3)$$

## 光学的厚さの式

$$d\tau = (\kappa_v x_v m_v + \kappa_n x_n m_n) \frac{dp}{\bar{m}g} \quad (4)$$

これを積分して

$$\tau = (\kappa_v m_v p^*[T_{\text{tp}}] + \kappa_n m + n(p_{\text{tp}} - p^*[T_{\text{tp}}])) \frac{p}{p_{\text{tp}}} \frac{1}{\bar{m}g} \quad (5)$$

ただし、 $p^*$  は飽和水蒸気圧で、添字 tp は対流圏界面での値

## (3) 式 (5) 式の対流圏界面での値

$$(1/2)F_{\text{TOA}}^{\uparrow} ((3/2)\tau_{\text{tp}} + 1) = \sigma T_{\text{tp}}^4 \quad (6)$$

$$\tau_{\text{tp}} = \kappa_v p^*[T_{\text{tp}}] m_v / (\bar{m}g) \quad (7)$$

この2式が解をもつ条件が Komabayashi–Ingersoll limit

- 一次元放射対流平衡モデル
- 成層圏は放射平衡
- 対流圏の放射過程・熱力学過程を考慮
- 気体は凝結成分と非凝結成分の 2 成分

成層圏	放射平衡
対流圏界面	飽和水蒸気
対流圏	飽和断熱減率
放射過程	散乱なし、灰色
成分	理想気体、2 成分
臨界点	なし

気体定数	$R = 7.314 \text{ J/mol K}$
重力加速度	$g = 9.7 \text{ m/s}^2$
ステファンボルツマン定数	$\sigma = 5.67 \times 10^{-7} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$
非凝縮成分の分子量	$m_n = 17 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$
凝縮成分の分子量	$m_v = 17 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$
凝縮成分の定圧モル比熱	$c_{pv} = 4R$
凝縮成分の潜熱	$l = 43655 \text{ J/mol}$
飽和水蒸気曲線の定数	$p_0^* = 1.4 \times 10^{11} \text{ Pa}$
非凝縮成分の定圧モル比熱	$c_{pn} \cdots \cdots \text{複数ケース}$
大気の下での非凝縮成分の量	$p_{n0} \cdots \cdots \text{複数ケース}$
凝縮成分の吸収係数	$\kappa_v \cdots \cdots \text{複数ケース}$
非凝縮成分の吸収係数	$\kappa_n \cdots \cdots \text{複数ケース}$

## Nakajima et al. (1992) 再現実験

---

- 神戸大学の大西さんが2012年に作成したプログラムを用いて、再現実験を行っている
- 地表面温度がある値のときに、OLR がどのような値をとるか計算するプログラム

# 大西プログラムの計算の流れ

1. 初期値設定
2. 湿潤断熱減率に従って、上空まで温度、フラックスを計算  
(calc\_MoistAd)
3. 対流圏界面の計算 (calc\_Tropopause)
4. 対流圏界面を挿入
5. 圏界面水蒸気混合比で飽和
6. 光学的厚さの計算
7. 放射平衡計算（以下をループ）
  - 7.1 加熱 (calc\_RaiseTemp)
  - 7.2 圏界面の計算 (calc\_Tropopause)
  - 7.3 圏界面移動
  - 7.4 収束判定
  - 7.5 圏界面の計算 (calc\_Tropopause)
  - 7.6 圏界面移動

## 湿潤偽断熱減率

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_{\text{湿潤偽断熱}} = \left(\frac{RT}{p c_{pn}} + \frac{x_v}{x_n} \frac{l}{p c_{pn}}\right) \bigg/ \left(x_n + x_v \frac{c_{pv}}{c_{pn}} + \frac{x_v}{x_n} \frac{l^2}{RT^2 c_{pn}}\right) \quad (8)$$

## 光学的厚さ

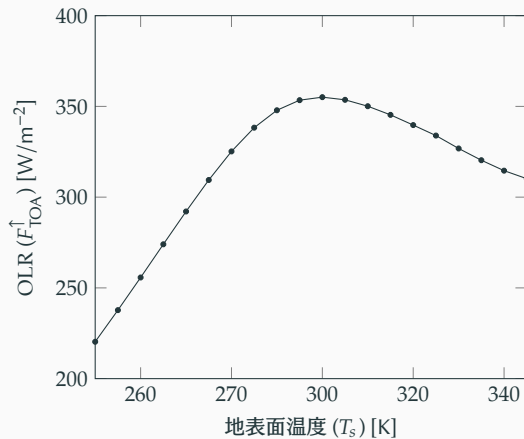
$$\frac{d\tau}{dp} = \frac{\kappa_v x_v m_v + \kappa_n x_n m_n}{\bar{m} g} \quad (9)$$

## 放射フラックスの計算

$$A = \frac{3}{2} \pi B[\tau'] \exp\left[-\frac{3}{2}(\tau' - \tau)\right] \quad (10)$$



再現実験で得られた結果



# DCPAM の概要

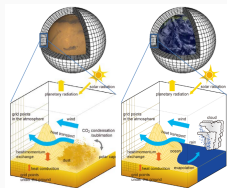
- GFD 研究室で利用している、大気大循環モデル
- 惑星全体の温度、風速、密度分布を計算
- 力学過程と物理過程から構成

**力学過程** モデル格子で表現できる運動

- プリミティブ方程式系

**物理過程** モデル格子より小さなスケールの運動や流体運動以外の効果

- 乱流混合過程
- 放射過程
- 凝結過程
- 雲過程
- 陸面過程



「DCPAM の概要」より