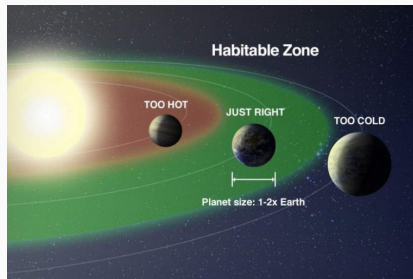


多様な惑星の放射計算に向けて —Nakajima et al. (1992) の再現実験

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 7, 2021

- 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
 - 惑星表面に液体の水が存在する領域は、ハビタブルゾーン (HZ) と呼ばれる
- 惑星表面に液体の水が存在しうるかを、惑星の温度を計算することで検討することができる
- 惑星の温度決定の第一歩として、一次元放射対流平衡計算を行うことにした



HZ の概要図。Image credit: NASA

- 一方、惑星の居住可能性に関して、暴走温室状態が議論されてきた
 - 惑星が射出できる放射フラックスには上限（射出限界）があること示された
 - 射出限界を超えた太陽放射が入射すると、暴走温室状態になる
- 現在、射出限界について整理した Nakajima et al. (1992) の再現計算を行っている
- 射出限界に関して述べた、Komabayashi (1967, 1968), Ingersoll (1969) のレビューを行い、現在行っている再現実験の結果を報告する

暴走温室状態とは

温度が上昇すると水蒸気量が増え、温室効果をもつ水蒸気が増大することでさらに地表面温度が上昇する、正のフィードバックによって、温度が上昇し続ける状態

Komabayashi (1967, 1968)、Ingersoll (1969) のモデル

	Komabayashi	Ingersoll
成層圏	放射平衡	放射平衡
成層圏	飽和水蒸気	一定のモル分率
対流圏界面	考慮されていない	飽和水蒸気
対流圏	考慮されていない	考慮されていない
放射過程	散乱なし、灰色	散乱なし、灰色
成分	理想気体、1 成分	理想気体、2 成分
臨界点	なし	

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

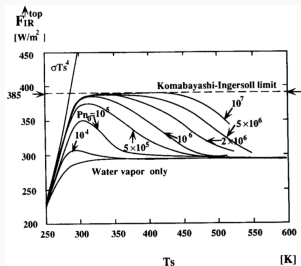
(3) 式 (5) 式の対流圏界面での値

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

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

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

- 表面温度 T_s と大気上端での上向き放射フラックス (Outgoing longwave radiation; OLR, $F_{\text{TOA}}^{\uparrow}$) 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
- 大気の水蒸気量（凝結成分量）に応じて、異なる上限が現れる
 - 水蒸気量が極端に少ないときに現れる、Komabayashi-Ingersoll limit (Komabayashi 1967, 1968, Ingersoll 1969)
 - ある程度水蒸気が存在するときに現れる上限



大気下端の水蒸気量 p_0 を変化させたときの $F_{\text{TOA}}^{\uparrow}$ と T_s の関係
(Nakajima et al Fig. 6)

- 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	$\kappa_n \cdots \cdots \text{複数ケース}$

- (Fig. 3 の説明)

- 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

モデルの変数

- Nakajima et al. Fig. 3 と同様の条件
- $c_{pn} = 3.5R, c_{pv} = 4R, \kappa_v = 0.01, \kappa_n = 0, p_{n0} = 1 \times 10^5 \text{ Pa}$

グリッドの与え方

- 鉛直 1 次 to グリッドを設ける
- グリッド上に $p, T, \tau, F^\uparrow, F^\downarrow$ を与える
- グリッド間に F_{conv} を与える
 - $F_{\text{conv}}[k] = (F^\uparrow[k+1] - F^\uparrow[k]) - (F^\downarrow[k+1] - F^\downarrow[k])$

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

湿潤偽断熱減率

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

3. 対流圏界面の計算
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

光学的厚さ

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

7. 放射平衡計算（これをループする）

7.1. 加熱 (calc_RaiseTemp)

7.2. 圏界面の計算 (calc_Tropopause)

放射フラックスの計算

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

7.3. 圏界面移動

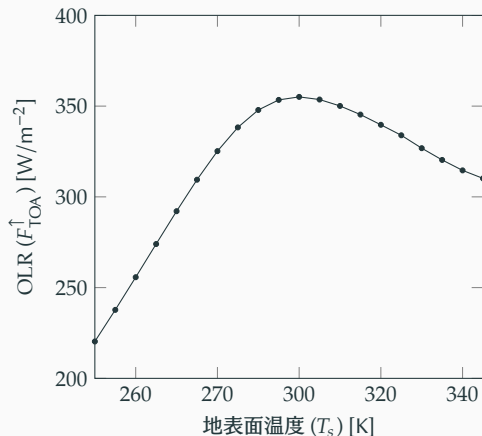
7.4. 収束判定

7.5. 圏界面の計算 (calc_Tropopause)

7.6. 圏界面移動

計算結果

再現実験で得られた結果



- Nakajima et al. (1992) と同様の結果を得られた
- $T_s \geq 350$ K では計算をすることに失敗している
 - 収束条件に達しない
 - プログラムが実行中に落ちる

まとめと今後の展望

まとめ

- OLR には、大気の成分に応じて異なる上限がある
 - 水蒸気量が極端に少ないときに現れる、Komabayashi–Ingersoll limit
 - ある程度水蒸気が存在するときに現れる上限
- Nakajima et al. の再現実験を行ったところ、同様の結果を得られた

今後の展望

- 大西プログラムが実行中に落ちる原因を究明する必要
- 地球放射での射出限界について詳しく検討したい
 - さらに、系外惑星に関しても検討したい
 - 系外惑星の放射計算ためには、研究室で用いられる GCM の改良が必要になるだろう

DCPAM の概要

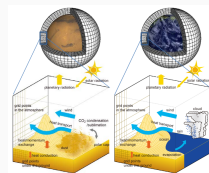
- GFD 研究室で利用している、大気大循環モデル
- 惑星全体の温度、風速、密度分布を計算
- 力学過程と物理過程から構成

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