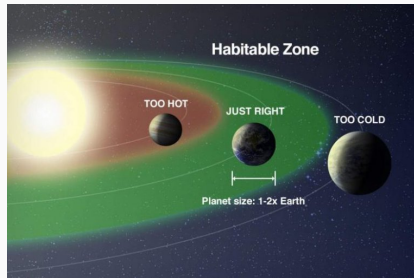


多様な惑星の放射計算に向けて —Nakajima et al. (1992) の再現実験

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 9, 2021

- 惑星の生命居住可能性が議論されている
- 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条件は、惑星の表面温度で決まる
 - 1気圧なら 0°C から 100°C
- 惑星表面に液体の水が存在しうる領域は、ハビタブルゾーン (HZ) と呼ばれる
- HZ の内側境界を決定したい



HZ の概要図。Image credit: NASA

- HZ の内側境界を決定する重要な事象として、暴走温室状態が議論されている
 - 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と想像される状態
 - 惑星が射出する放射フラックスを超えた太陽放射が入射すると、海洋と大気が平衡状態になれず、海洋が蒸発し、暴走温室状態になる (Nakajima *et al.*, 1992)
 - 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 (Komabayashi, 1967, 1968; Ingersoll, 1969)
- 暴走温室状態を理解するため、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
- この発表では、射出限界に関する先行研究の紹介を行い、現在行っている再現実験の結果を報告する

成層圏モデル

- Komabayashi (1967, 1968), Ingersoll (1969)
- いずれも、成層圏のみを考慮したモデル

	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	不明確	不明確

- この単純なモデルから、大気上端での上向き放射フラックス (Outgoing longwave radiation; OLR, $F_{\text{TOA}}^{\uparrow}$) に上限があることを示した (Komabayashi–Ingersoll limit)

Komabayashi-Ingersoll Limit

- モデルの基礎方程式から導くことができる
- 非凝縮成分の吸収係数は 0 とする

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 $F_{\text{TOA}}^{\uparrow}$ の上限が Komabayashi-Ingersoll limit

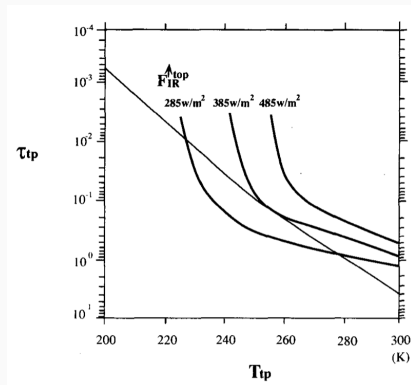
Komabayashi–Ingersoll limit

(6) 式 (7) 式 (再掲)

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

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

- $F_{\text{TOA}}^{\uparrow}$ がある値を超えると、 τ_{tp} と T_{tp} の平衡解が存在しなくなる
- 地球的パラメータのもとでは 375 W/m^2 (Nakajima *et al.*, 1992)

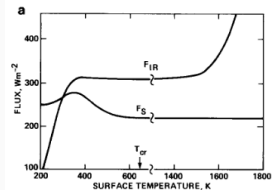


τ_{tp} と T_{tp} の関係図
直線が式 (7) で、曲線が式 (6)
(Nakajima *et al.* Fig. 1)

対流圏モデル

- Kasting (1988), Abe and Matsui (1988)
- より精密な過程を持ち、対流圏も考慮したモデルを用いた研究

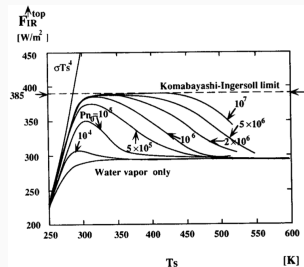
	Kasting	Abe and Matsui
成層圏	等温	放射平衡
成層圏	一定のモル分率	一定のモル分率
対流圏界面	飽和水蒸気	飽和水蒸気
対流圏	飽和、断熱減率	飽和、断熱減率
放射過程	散乱あり、吸収は波長依存	散乱あり、吸収は波長依存
成分	N ₂ , O ₂ , CO ₂ , H ₂ O	CO ₂ , H ₂ O
臨界点	647.1 K	647.1 K



Kasting による、表面温度 T_s と外向き赤外放射 F_{IR} の関係 (Kasting Fig. 7a)

- いずれの結果も 300 W/m^2 付近に射出限界がある (Nakajima *et al.*, 1992)
 - Kasting では、 $F_{TOA}^{\uparrow} \sim 300 \text{ W/m}^2$ で T_s が急激に上昇する
 - Abe and Matsui は $F_{TOA}^{\uparrow} \sim 305 \text{ W/m}^2$ で大気と海洋が平衡状態で共存できないと示した

- 表面温度 T_s と OLR の関係を調べ、考察したもの
- OLR には上限が存在することがわかった
 - Abe and Matsui や Kasting による上限と、Komabayashi–Ingersoll limit は別の原因であるとわかった
- 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



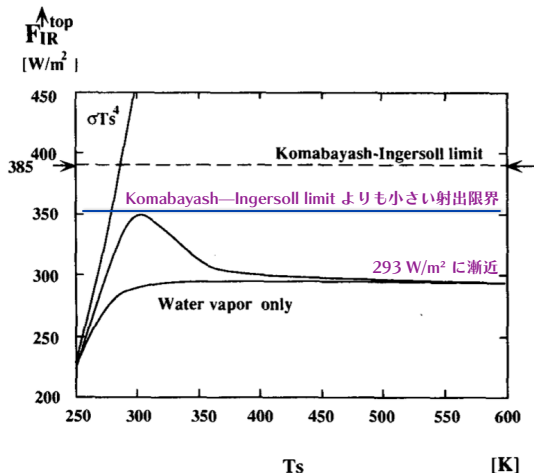
大気下端の水蒸気量 p_0 を変化させたときの F_{TOA}^{\uparrow} と T_s の関係
(Nakajima et al. Fig. 6)

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

Nakajima et al. の結果



- $\kappa_v = 0, p_{n0} = 10^5 \text{ Pa}$ のときの T_s と OLR の関係 (Nakajima *et al.* Fig. 3 を改変)
- Komabayashi-Ingersoll limit より小さい値で射出限界になる
- $T_s > 400 \text{ K}$ で $F_{\text{TOA}}^{\uparrow} \sim 293 \text{ W/m}^2$ に漸近

- 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、Nakajima *et al.* (1992) Fig. 3 を再現する実験を行っている
- モデルの設定は Nakajima *et al.* (1992) と同様
 - 対流圏も考慮した鉛直 1 次元モデル
 - モデル変数も Nakajima *et al.* (1992) と同様に、 $c_{pn} = 3.5R, c_{pv} = 4R, \kappa_v = 0.01 \text{ m}^2/\text{kg}, \kappa_n = 0, p_{n0} = 1 \times 10^5 \text{ Pa}$

大西プログラムの計算手順

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

- フラックスの発散 F_{conv} が 0 になる場所を決定

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

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

7. 放射平衡計算（これをループする）

7.1. 加熱

- F_{conv} と大気の熱容量から成層圏の温度を上昇させる

$$\Delta T = \frac{m g}{c_p} \frac{F_{\text{conv}}[k]}{p[k+1] - p[k]} \delta t \quad (10)$$

- 対流圏は湿潤偽断熱減率に従う

7.2. 圏界面の計算

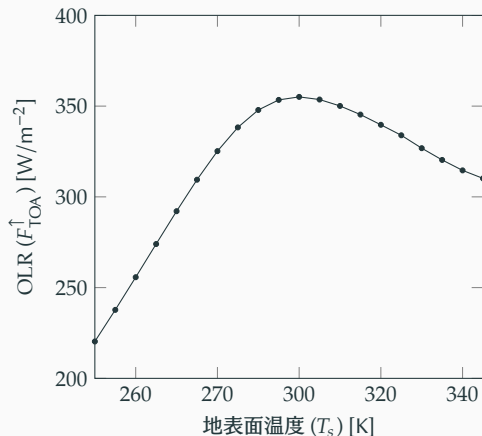
7.3. 圏界面移動

7.4. 収束判定

- F_{conv} の総和が十分小さくなれば計算終了

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
 - F_{conv} の和が $10^{-6} W/m^2$ 未満にならない
 - 345 K は収束が遅かったので、 F_{conv} の和が $10^{-1} W/m^2$ 未満で計算終了とした
 - 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、Nakajima *et al.* と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

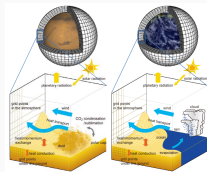
- GFD 研究室で利用している、大気大循環モデル
- 惑星全体の温度、風速、密度分布を計算
- 力学過程と物理過程から構成

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
- 放射過程で、太陽放射と同じスペクトルの入射を仮定しているため、太陽放射以外も扱えるように改良する必要



「DCPAM の概要」より