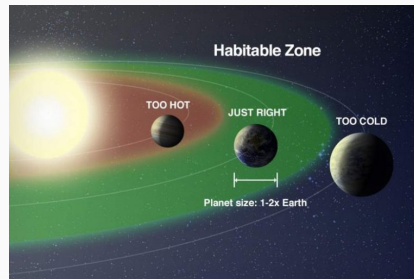


多様な地球型惑星の射出限界の考察に向けて —Nakajima et al. (1992) の再現実験

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 10, 2021

- 観測によって、太陽系外の恒星にも惑星が存在することが明らかになった
- 系外惑星にも生命が存在するのかが議論になっている
- 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



HZ の概要図。Image credit: NASA

- 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 の内側の、比較的高温な領域で起こる現象に興味がある
- HZ の内側境界を決定したい

- 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
 - 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)
 - 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)
 - 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
- 暴走温室状態や射出限界について、Nakajima *et al.* (1992) が整理を行った
- 現在、Nakajima *et al.* (1992) を理解することを目的としている
- 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

- Komabayashi (1967, 1968), Ingersoll (1969)
 - Komabayashi は気候の安定性について、Ingersoll は金星大気の進化について調べた
- いずれも、成層圏のみを考慮したモデル

	Komabayashi (1967)	Ingersoll (1969)
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	陽には考慮せず	陽には考慮せず

- 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, $F_{\text{TOA}}^{\uparrow}$) に上限があると示した (**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

- 放射フラックス密度の式

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

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

- 光学的厚さの式

$$d\tau = (\kappa_v x_v m_v + \kappa_n x_n m_n) \frac{dp}{\bar{m}g} \quad (3)$$

- (1) (2) より以下の式を得る

$$\pi B[\tau] = (1/2)F_{\text{TOA}}^{\uparrow} ((3/2)\tau + 1) \quad (4)$$

- (3) を大気上端から圧力 p の高度まで積分して以下を得る

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

ただし、 $p^* = p_0^* \exp[-l/(RT)]$ は飽和水蒸気圧で、添字 tp は対流圏界面での値

- (4) 式 (5) 式の対流圏界面での値を求める（非凝縮成分の吸収係数は 0 とする）

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

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

この 2 式が解をもつ $F_{\text{TOA}}^{\uparrow}$ の上限が Komabayashi-Ingersoll limit

F^{\uparrow}	上向き放射フラックス
F^{\downarrow}	下向き放射フラックス
τ	光学的厚さ
τ_b	大気的全光学的厚さ
B	プランク関数
κ	吸収係数
x	分圧
m	分子量
添字 n	乾燥空気の値
添字 v	水蒸気の値
p	圧力
\bar{m}	平均分子量
g	重力加速度
p^*	飽和水蒸気圧
T	温度
R	気体定数
l	水の潜熱

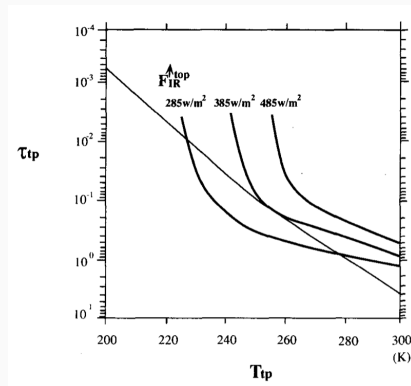
Komabayashi–Ingersoll limit

(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
Komabayashi–Ingersoll limit は 385 W/m^2
(Nakajima *et al.*, 1992)

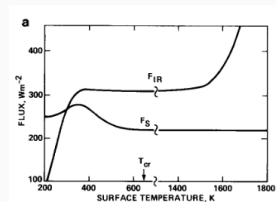


τ_{tp} と T_{tp} の関係図
直線が式 (7) で、曲線が式 (6)
(Nakajima *et al.* Fig. 1)

対流圏も考慮した複雑モデル

- Kasting (1988), Abe and Matsui (1988)
 - 地球型惑星の初期進化について考察した
- 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 (1988)	Abe and Matsui (1988)
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)

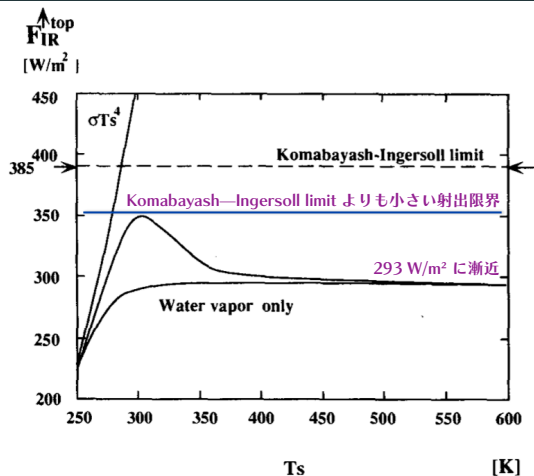
- いずれの結果も 300 W/m^2 付近に射出限界がある (Nakajima *et al.*, 1992)
 - Kasting では、 $F_{TOA}^{\uparrow} \sim 300 \text{ W/m}^2$ で T_s が急激に上昇する
 - Abe and Matsui は $F_{TOA}^{\uparrow} \sim 305 \text{ W/m}^2$ で大気と海洋が平衡状態で共存できないと示した
 - このふたつが Komabayashi-Ingersoll limit と同じプロセスで得られるものなのかは理解されてなかった

- Nakajima *et al.* (1992)
 - 暴走温室状態の概念の整理をおこなった
- 一次元放射対流平衡モデルを用いた研究

	Nakajima <i>et al.</i> (1992)
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（水蒸気・乾燥空気）
臨界点	なし

気体定数	$R = 8.314 \text{ J/mol K}$
重力加速度	$g = 9.8 \text{ m/s}^2$
ステファンボルツマン定数	$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$
非凝縮成分の分子量	$m_n = 18 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$
凝縮成分の分子量	$m_v = 18 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$
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	$p_0^* = 1.4 \times 10^{11} \text{ Pa}$

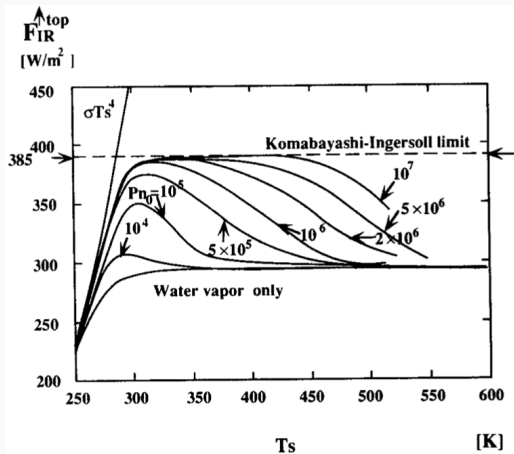
- 表面温度 T_s と OLR の関係を調べ、考察したもの
- OLR には上限が存在することがわかった
 - Abe and Matsui や Kasting による上限と、Komabayashi–Ingersoll limit は別の原因であるとわかった



$\kappa_v = 0, p_{n0} = 10^5 \text{ Pa}$ 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 (Kasting (1988) や Abe and Matsui (1988) が得たものに対応)

Nakajima et al. の結果（水蒸気量を変化させた場合）



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)

- 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 Komabayashi-Ingersoll limit が現れる
 - ある程度水蒸気が存在するときには、Komabayashi-Ingersoll limit よりも小さい上限となる

- いろいろな大気について、射出限界を求めようと思っている
- 手始めに、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) Fig. 3 と同様に、 $c_{pn} = 3.5R, c_{pv} = 4R, \kappa_v = 0.01 \text{ m}^2/\text{kg}, \kappa_n = 0, p_{n0} = 1 \times 10^5 \text{ Pa}$

1. 湿潤擬断熱減率に従って、上空まで温度、フラックスを計算する

- 湿潤擬断熱減率

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

2. 対流圏界面の計算

- モデル格子間で、フラックスの発散 F_{conv} が 0 になる場所を対流圏界面とする
- 対流圏と成層圏で、温度の決め方が異なるので、対流圏界面を決定するのは重要

3. 光学的厚さの計算

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

4. 放射平衡計算（これをループする）

4.1. 温度構造を決定する

- 成層圏は F_{conv} と大気の熱容量から温度を決定する

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

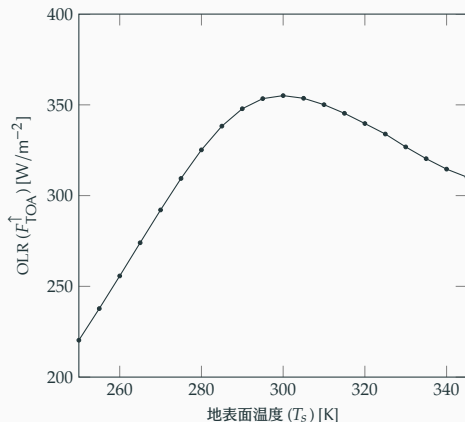
- 対流圏は湿潤偽断熱減率に従う

4.2. 光学的厚さとフラックスを再計算し、対流圏界面を再計算する

4.3. 収束判定

- F_{conv} の総和が十分小さくなれば、放射平衡に至ったと判断して、計算終了

再現実験で得られた結果



- 低温の領域では、Nakajima *et al.* (1992) と同様の結果を得られた
 - 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
 - $T_s \leq 340 K$ での収束条件は、 F_{conv} の和が $10^{-6} W/m^2$ 未満
- $T_s \geq 350 K$ 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} の和が小さくならない
 - プログラムが実行中に落ちる

- まとめ
 - OLR には、大気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
 - 灰色大気での射出限界について詳しく検討したい
 - さらに、地球大気や、系外惑星の大気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

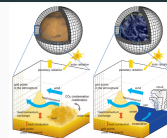
- GFD 研究室で利用している、大気大循環モデル
- 惑星全体の温度、風速、密度分布を計算
- 力学過程と物理過程から構成

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