

地球型惑星の射出限界の考察に向けて

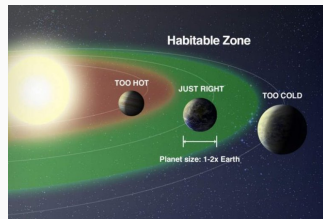
Ishiwatari *et al.* (2002) のレビュー

人見祥磨

July 13, 2021

北海道大学大学院理学院 地球流体力学研究室 M2

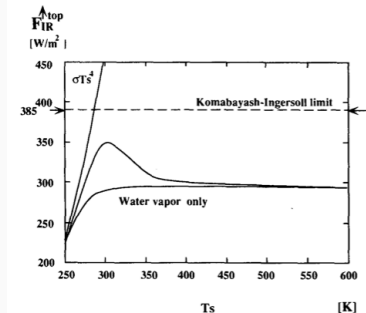
- 系外惑星に生命が存在するためには、惑星表面に液体の水があることが重要だと考えられる
- 惑星表面に液体の水が存在しうる領域は、ハビタブルゾーン (HZ) と呼ばれる
- 惑星表面に液体の水が存在する条件の一つは、惑星の表面温度である
- HZ の内側の、比較的高温な領域で起こる現象に興味があり、内側境界を決定したい
- HZ の内側境界を決定する重要な事象として、暴走温室状態が議論されている
 - 惑星が射出できる放射フラックス (Outgoing Longwave Radiation; OLR) には上限 (射出限界) がある (Komabayashi, 1967, 1968; Ingersoll, 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している状態が暴走温室状態 (Nakajima *et al.*, 1992)
 - 海洋と大気が平衡状態になれず、海洋が蒸発しきってしまう
 - 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



HZ の概要図。Image credit: NASA

- 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
 - Nakajima *et al.* (1992) 以前は様々なモデルで暴走温室状態の研究が進められていた
 - 放射平衡にある灰色の成層圏のみからなるモデルには放射上限がある (Komabayashi, 1967, 1968; Ingersoll, 1969)
 - より精密な放射過程・熱力学過程をもち、対流圏まで考慮したモデルでも放射上限があらわれる (Kasting 1988; Abe and Matsui 1988)
- Nakajima *et al.* (1992) は 1 次元放射対流平衡モデルを用いて OLR に 2 種類の上限があると示した
 - 大気に水蒸気が少ないときにあらわれる Komabayashi-Ingersoll Limit
 - 対流圏の構造によって与えられる放射上限 (Kasting や Abe and Matsui の上限に対応)
 - このふたつの上限は異なる原因によるとわかった

Nakajima <i>et al.</i> (1992) モデル設定	
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



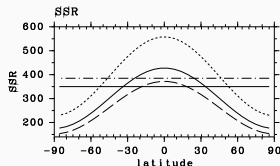
Nakajima *et al.* (1992) Fig. 4
地表面温度と OLR の関係

- Nakajima *et al.* (1992) では以下の点が問題であった
 - 1次元モデルでの結果を3次元モデルに適用する方法が不明である
 - 3次元だと入射するエネルギーフラックス (surface shortwave radiation: SSR) に緯度分布がある
 - ハドレー循環といった大気の運動の効果も取り入れる必要がある
 - 1次元放射対流平衡モデルでは平衡解が得られるだけである
 - その平衡解が安定かどうかはわからない
 - 入射フラックスが射出限界を超え、平衡解が存在しなくなった場合の振る舞いが不明
- Nakajima *et al.* (1992) の枠組みを自然に拡張して3次元でも計算を行った
- 試算を行ったところ、上層大気で内部重力波が増幅して、計算不安定が起きた
 - 内部重力波に対して、強い人工的散逸を導入した
 - ハドレー循環や傾圧不安定などの対流圏の大気循環の基本的な構造は表現されているので、大きな影響はないとした
- 太陽定数 S を変化させて実験を行った
 - 実験した太陽定数は以下の8つ。実験名の S の後ろが太陽定数
 - 実験 S1380 が現在の地球に相当
 - 全球平均 OLR は S の $1/4$

実験名	S1200	S1380	S1500	S1550	S1570	S1600	S1700	S1800
全球平均 SSR(W/m ²)	300.0	345.0	375.0	387.5	392.5	400.0	425.0	450.0

モデル設定

- 大気的成分は、凝結成分（水蒸気）と非凝結成分（乾燥空気）からなる
 - 両成分とも理想気体で、比熱と分子量は等しいとする
 - 大気の密度は実際よりも軽くなるが、それによる影響は力学的構造を変えてしまうほど大きくないとする
- 放射吸収物質は水蒸気のみとする
- 雲の存在や散乱は考慮しない
- 地表面で熱バランスが成り立ち、湿り度は1とする（すべて海で覆われている）



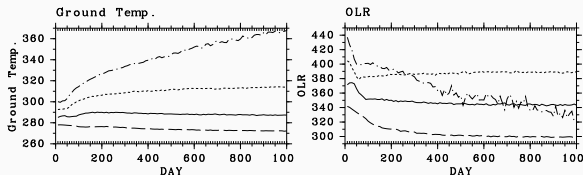
Ishiwatari *et al.* (2002) Fig. 1

モデルに与える SSR の緯度分布と Komabayashi-Ingersoll limit, 及び Nakajima *et al.* (1992) で得られた放射上限 (W/m^2)

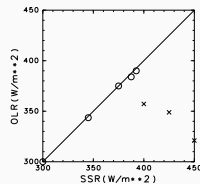
モデル設定	
成層圏	放射平衡
対流圏	飽和断熱減率
放射過程	散乱なし、灰色
成分	理想気体、水蒸気・乾燥空気
臨界点	なし
気体定数	$R = 8.314 \text{ J/kg/K}$
重力加速度	$g = 9.8 \text{ m/s}^2$
非凝縮成分の分子量	$m_n = 18 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$
凝縮成分の分子量	$m_v = 18 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$
凝縮成分の定圧モル比熱	$c_{pv} = 3.5R$
非凝縮成分の定圧モル比熱	$c_{pn} = 3.5R$
凝縮成分の潜熱	$L = 2.4253 \times 10^6 \text{ J/kg}$
飽和水蒸気曲線の定数	$p_0^* = 1.4 \times 10^{11} \text{ Pa}$
地表面での非凝縮成分の量	$p_{n0} = 10^5 \text{ Pa}$
凝縮成分の吸収係数	$\kappa_v = 0.01 \text{ m}^2/\text{kg}$
非凝縮成分の吸収係数	$\kappa_n = 0 \text{ m}^2/\text{kg}$
地表面の比熱	0
地表面のアルベド	0

熱的暴走状態の発生

- $S \leq 1570 \text{ W/m}^2$ の場合、全球平均 OLR と全球平均 SSR が一致し、平衡状態になる
- $S = 1800 \text{ W/m}^2$ の場合、全球平均 SSR 450 W/m^2 と全球平均 OLR との差が広がり続け、平衡状態にならない
 - OLR は減少し続け、表面温度は増加し続ける
- $S > 1600 \text{ W/m}^2$ では平衡状態にならない



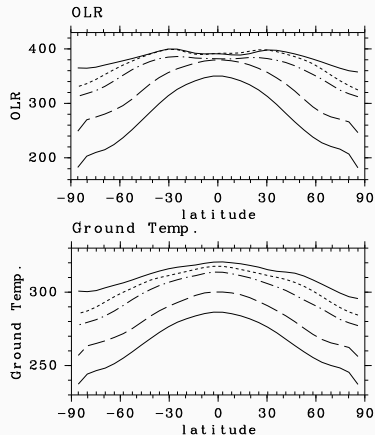
Ishiwatari *et al.* (2002) Fig. 2
全球平均 OLR (W/m^2) と全球平均表面温度 (K) の時間変化
S1200, S1380, S1570, S1800 の結果



Ishiwatari *et al.* (2002) Fig. 3
1000 日での SSR と OLR の関係
(S1600 では 2000 日)
□ では熱的平衡、× 印では熱的暴走

熱的暴走の発生

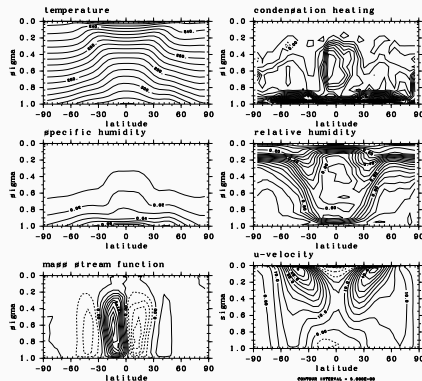
- 赤道付近の OLR は約 390 W/m^2 で頭打ち
- 中高緯度の OLR は太陽定数の増加に伴って 400 W/m^2 に漸近
- 東西平均温度も OLR と同様に平坦化の傾向
- 以上から熱的平衡状態が得られる太陽定数の上限は概ね 1600 W/m^2
- これらが Nakajima *et al.* (1992) で指摘された放射上限に対応するものかを考察する



Ishiwatari *et al.* (2002) Fig. 4
平衡状態における OLR と東西平均値表面温度
実験 S1570, S1550, S1500, S1380, S1200 の結果

1 次元系との比較

- 実験 S1570 では、圏界面の相対湿度は 50 % 程度
- この場合の Komabayashi-Ingersoll limit を計算すると約 450 W/m^2 になる
 - 得られた漸近値より大きい
- 実験 S1570 での赤道域対流圏相対湿度は 60 % 程度
- 大気の相対湿度を 60 % に固定して、1 次元放射対流平衡モデルで放射上限を計算すると、 385 W/m^2
 - 得られた漸近値に近い



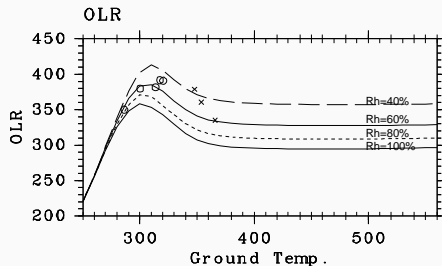
Ishiwatari *et al.* (2002) Fig. 9

実験 S1570 の子午面構造

温度・凝結加熱・比湿・相対湿度・質量流線関数・東西風

1 次元系との比較

- 1次元系で相対湿度を変化させて放射上限を求めている
- その結果は、3次元計算と若干のずれはあるものの、対応を示しているように見える
- 前頁の結果からも、3次元計算で得られた漸近値は、Nakajima *et al.* (1992) が得た放射上限に対応していると言える



Ishiwatari *et al.* Fig. 7

曲線: 相対湿度 R_h を変化させた時の1次元放射対流平衡計算の結果

Nakajima *et al.* (1992) は $R_h = 100\%$

○×印: 3次元計算での赤道東西平均のOLRと地表面温度の関係

- この実験に利用した GCM (AGCM) にはバグが含まれていた (Ishiwatari *et al.* (2021))
 - Ishiwatari *et al.* (2021) は Ishiwatari *et al.* (2007) で利用したバグを含む GCM (AGCM) を DCPAM に差し替えて再計算したもの
- 湿潤対流調節スキームが動作する条件が逆になっていた
 - 鉛直成層が湿潤断熱減率よりも安定しているときに、対流調節が働くようになっていた
 - DCPAM にこのバグを意図的に導入すると、AGCM の結果が再現できた
- バグを修正しても、内部重力波の振幅が増大することによる計算不安定は解消できていない