

# 木星を想定した大気中の 放射場の計算

2024/06/13

流体地球物理学教育研究分野 M2

岩谷菜々子

# 目次

- はじめに
- モデル
- 計算条件
- 計算結果
- まとめ
- 今後の取り組み
- 参考文献

はじめに

# はじめに：概要と目的

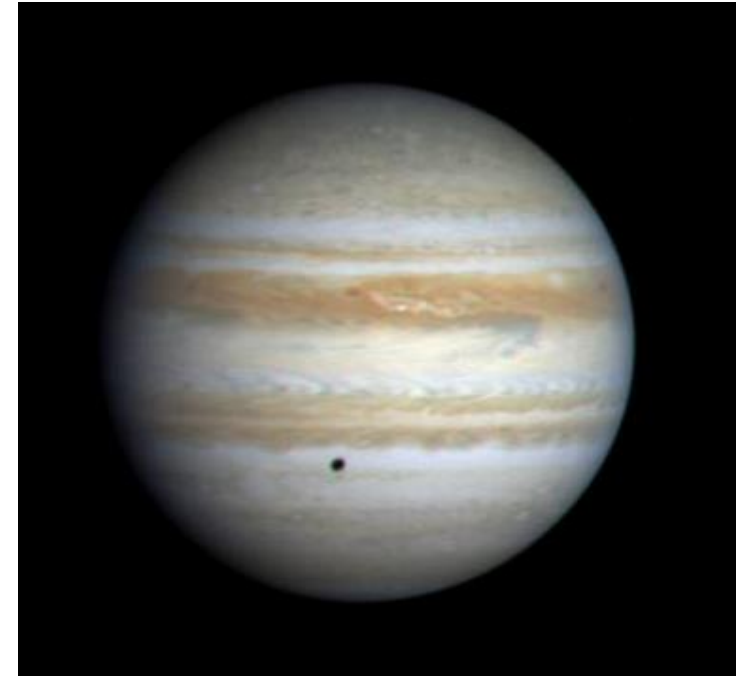
木星大気の成り立ちや運動はエネルギー収支によって支配されている。

大気上端においては観測によるデータからの

エネルギー収支が議論されているが、雲頂高度以深においては観測が乏しく未解明である。

本研究ではその領域における木星大気中の放射と対流によるエネルギー分配を考察したい。

今回はその第一歩として、木星を想定して理想的な温度分布と気体分布を与え、放射伝達方程式を解くことで放射場を求めた結果を紹介する。



# はじめに：木星と地球の基本情報

	太陽からの距離	太陽定数	惑星半径	重力加速度 (平均, 1 bar)	大気組成 (割合)	スケールハイト	ボンドアルベド
木星	5.2 AU	50.26 $\text{Wm}^{-2}$	69,911 km	25.92 $\text{m/s}^2$	H <sub>2</sub> (89.8%) He(10.2%), H <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub> , NH <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> S	27 km	0.343
地球	1 AU	1361.0 $\text{Wm}^{-2}$	6,371.0 km	9.82 $\text{m/s}^2$	N <sub>2</sub> (78.08%), O <sub>2</sub> (20.95%), H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub>	8.5 km	0.294

モデル

# モデル：概要

- Takahashi et al. (2023) のラインバイラインモデル
  - ラインバイラインモデル
    - 吸収線を解像出来るほどの波数解像度で放射伝達方程式を計算する
    - 正確だが計算負荷が大きい
  - 一般化した二流近似放射伝達方程式を用いる
- 利用する光学パラメータ
  - 気体による吸収
    - 吸収線パラメータ (HITRAN2012 (Rothman et al., 2013))
    - H<sub>2</sub>O による連続吸収 (MT\_CKD (Mlawer et al., 2012))
    - H<sub>2</sub> と He による衝突誘起吸収 (Richard et al., 2012)
  - レイリー散乱
    - 散乱断面積 (Pierrehumbert, 2010)

# モデル：放射伝達方程式

- 放射伝達方程式

- 一般化した二流近似の放射伝達方程式

- 放射輝度を上向き放射フラックス, 下向き放射フラックスにまとめ, ルジャンドル多項式を用いて一次の項までで近似した式

$$\frac{dF^+}{d\tau} = \gamma_1 F^+ - \gamma_2 F^- + \gamma_3 \pi F_s e^{-\tau/\mu_0} - 2\pi(1 - \omega)B$$

$$\frac{dF^-}{d\tau} = \gamma_2 F^+ - \gamma_1 F^- - \gamma_3 \pi F_s e^{-\tau/\mu_0} - 2\pi(1 - \omega)B$$

$$\gamma_1 = \frac{7 - \omega(4 + 3g)}{4}, \gamma_2 = \frac{1 - \omega(4 - 3g)}{4}, \gamma_3 = \frac{\omega(2 - 3g\mu_0)}{4}$$

$$g = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 P(\mu'; \mu) \mu d\mu$$

吸収, 散乱のどちらも考慮している

$F^+$  : 上向き放射フラックス

$F^-$  : 下向き放射フラックス

$\tau$  : 光学的深さ

$F_s$  : 太陽放射フラックス

$P$  : 散乱位相関数

$\mu$  : 散乱光の角度

$\mu'$  : 入射光の角度

$\mu_0$  : 太陽光の直達成分の入

$\omega$  : 一次散乱アルベド

$B$  : プランク関数



計算条件

# 計算条件：与えた大気構造

- 圧力
  - 範囲  $0.01e5 \text{ Pa} \sim 100e5 \text{ Pa}$
  - 間隔 0.2 スケールハイト
- 温度
  - 対流圏：中立
  - 成層圏：等温
- 気体の混合比
  - 非凝結物質 ( $\text{H}_2, \text{He}$ )
    - 混合比一様
  - 凝結物質 ( $\text{H}_2\text{O}, \text{CH}_4, \text{NH}_3, \text{H}_2\text{S}$ )
    - 下層(飽和高度以下)：混合比一定
    - 上層(飽和高度以上)：飽和混合比またはそれより下の最小混合比
- 雲粒の混合比
  - ゼロ

# 計算条件：与えた大気構造/温度

- 温度の式

- 対流圏 (温度が 105.6 K 以上) : 中立

$$T = \theta_0 \left( \frac{p}{p_0} \right)^{\left( \frac{R}{c_p} \right)}$$

$R$ : 単位質量あたりの気体定数

$c_p$ : 定圧比熱

に従う.

基準として,  $T(p = 2.2 \times 10^6) = 428 \text{ K}$  (Seiff et al., 1998)

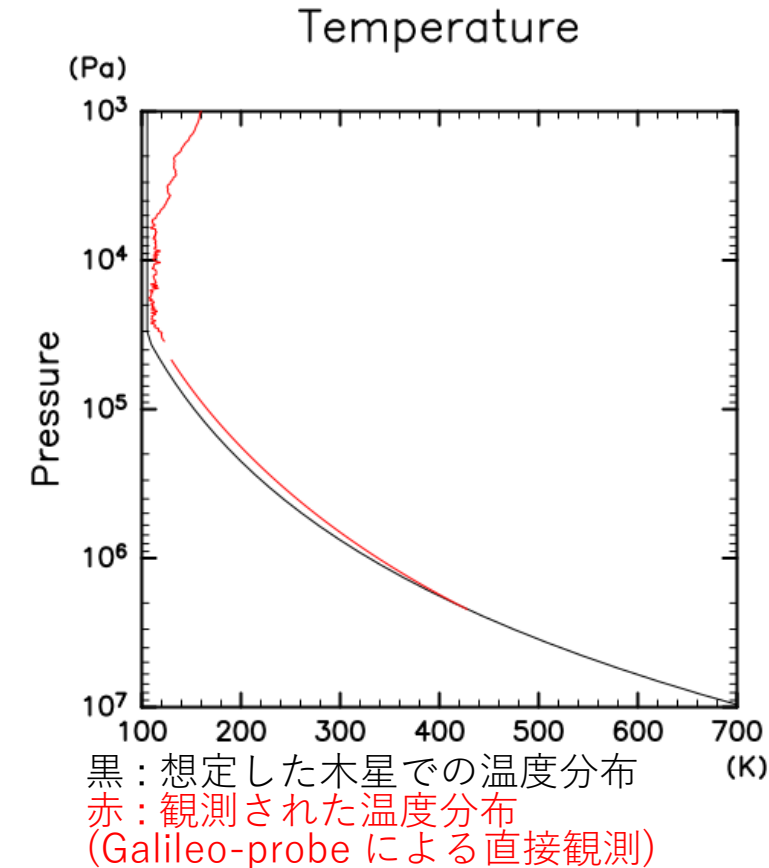
を用いる

- 成層圏 : 等温

105.6 K で等温

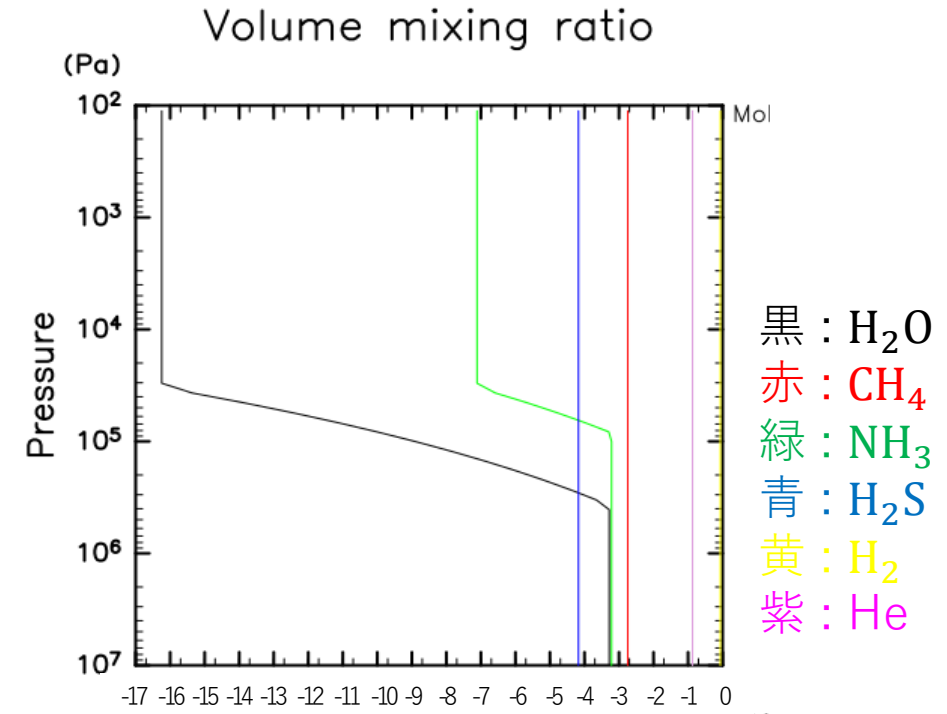
木星の有効放射温度 125.57 K (Li et al., 2012) を用いて求めた「成層圏温度」.

$$\frac{125.57}{2^{0.25}}$$



# 計算条件：与えた大気構造/混合比

- 非凝結物質
  - 一様
    - H<sub>2</sub> : 0.862 (1 から他の値を引いた数値)
    - He : 0.135 (Von Zahn et al., 1998, Niemann et al., 1998)
- 凝結物質
  - 未飽和の下層では体積混合比一様
    - H<sub>2</sub>O :  $5.2 \times 10^{-4}$  (Niemann et al., 1998, Atreya et al., 1999)
    - CH<sub>4</sub> :  $5.8 \times 10^{-3}$  (Niemann et al., 1998, Wong et al., 2014b)
    - NH<sub>3</sub> :  $6.1 \times 10^{-4}$  (Atreya et al., 1999)
    - H<sub>2</sub>S :  $6.7 \times 10^{-5}$  (Niemann et al., 1998)
  - 飽和高度以上ではそれより下層における最小の飽和体積混合比
    - 飽和混合比はクラウジウス・クラペイロンの式から求める
      - $p_{sat}/p$  : 飽和体積混合比
      - $p$  : 気圧
      - $p_{sat}$  : 飽和蒸気圧
      - $p_{sat} = \exp(A - B/T)$  [bar]
      - $A, B$  : 物質ごとの定数 ( )
      - $T$  : 温度 [K]



	A	B [K]
H <sub>2</sub> O	17.477	6164.65
CH <sub>4</sub>	10.682	1163.8
NH <sub>3</sub>	17.347	3930.6
H <sub>2</sub> S	12.884	2702.4

A, B の値は Irwin et al. (2009) から得た

# 計算条件：与えたパラメータ

- 波数解像度  
10.0  $\text{cm}^{-1}$
- 太陽定数  
50.5  $\text{Wm}^{-2}$
- 太陽放射を計算する際の太陽天頂角
  - 37.9°
  - 77.9°
- モデル下端のアルベド
  - 太陽放射アルベド 0
  - 惑星放射アルベド 0
- 定圧比熱
  - 10998  $\text{JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$

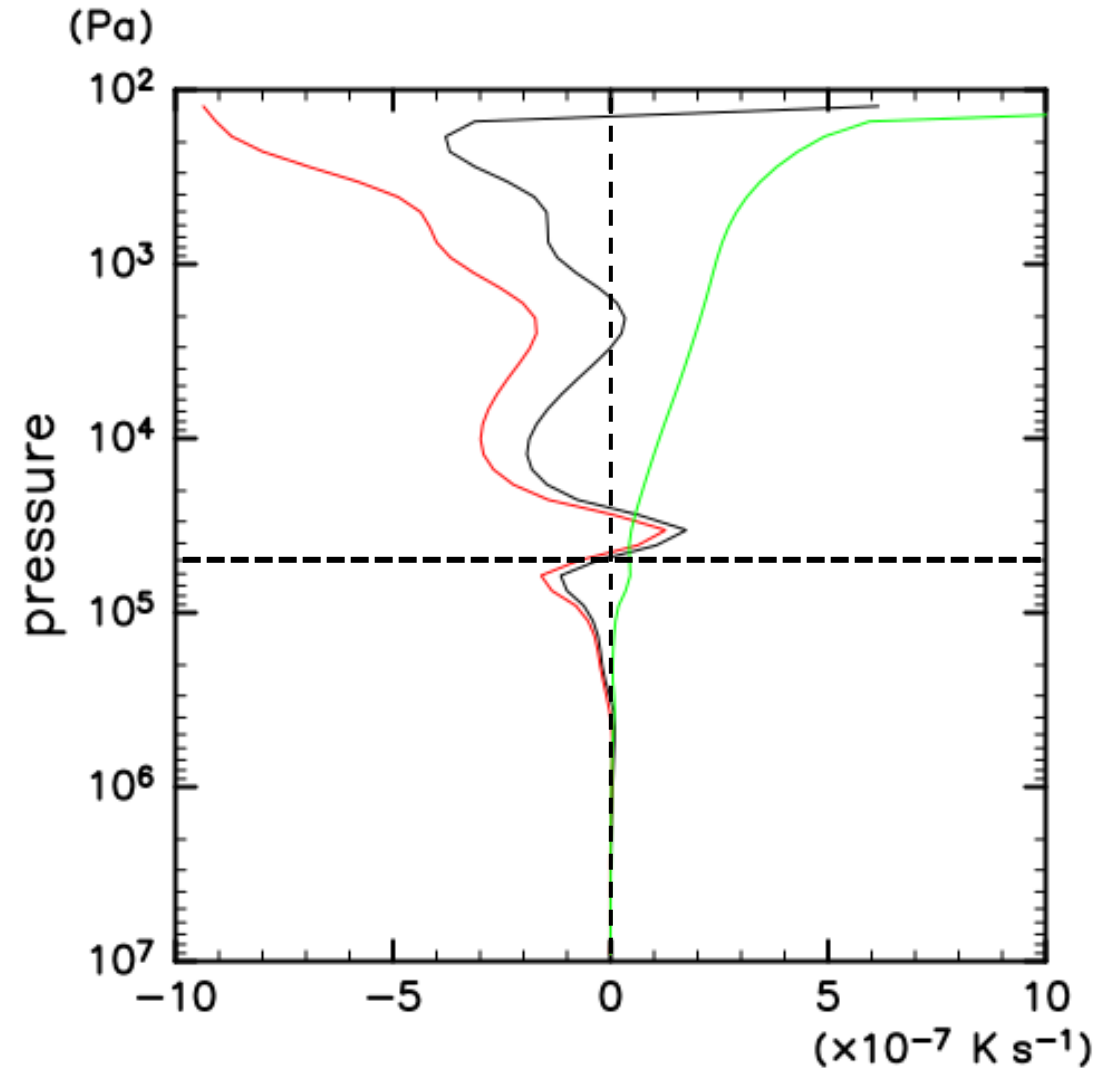
計算結果

# 計算結果：大気上端での放射収支

- アルベド
  - 計算結果
    - 0.47
  - 観測結果
    - $0.343 \pm 0.032$ 
      - Pioneer と Voyager の観測 (Hanel et al., 1981)
- 外向き惑星放射フラックス
  - 計算結果
    - $9.07 \text{ Wm}^{-2}$
  - 観測結果
    - $13.8 \pm 1.4 \text{ Wm}^{-2}$ 
      - Pioneer 10/11 の観測 (Ingersoll et al., 1975)
    - $13.8 \pm 0.14 \text{ Wm}^{-2}$ 
      - Pioneer と Voyager の観測 (Hanel et al., 1981)
    - $14.1 \pm 0.02 \text{ Wm}^{-2}$ 
      - Cassini の観測結果 (Li et al., 2012)

# 計算結果：加熱率

- 惑星放射は主に冷却, 太陽放射は主に加熱に働いている
- 対流圏界面 ( $5.0 \times 10^4$  Pa) 付近での加熱は平衡での温度より低いために起きていると考えられる



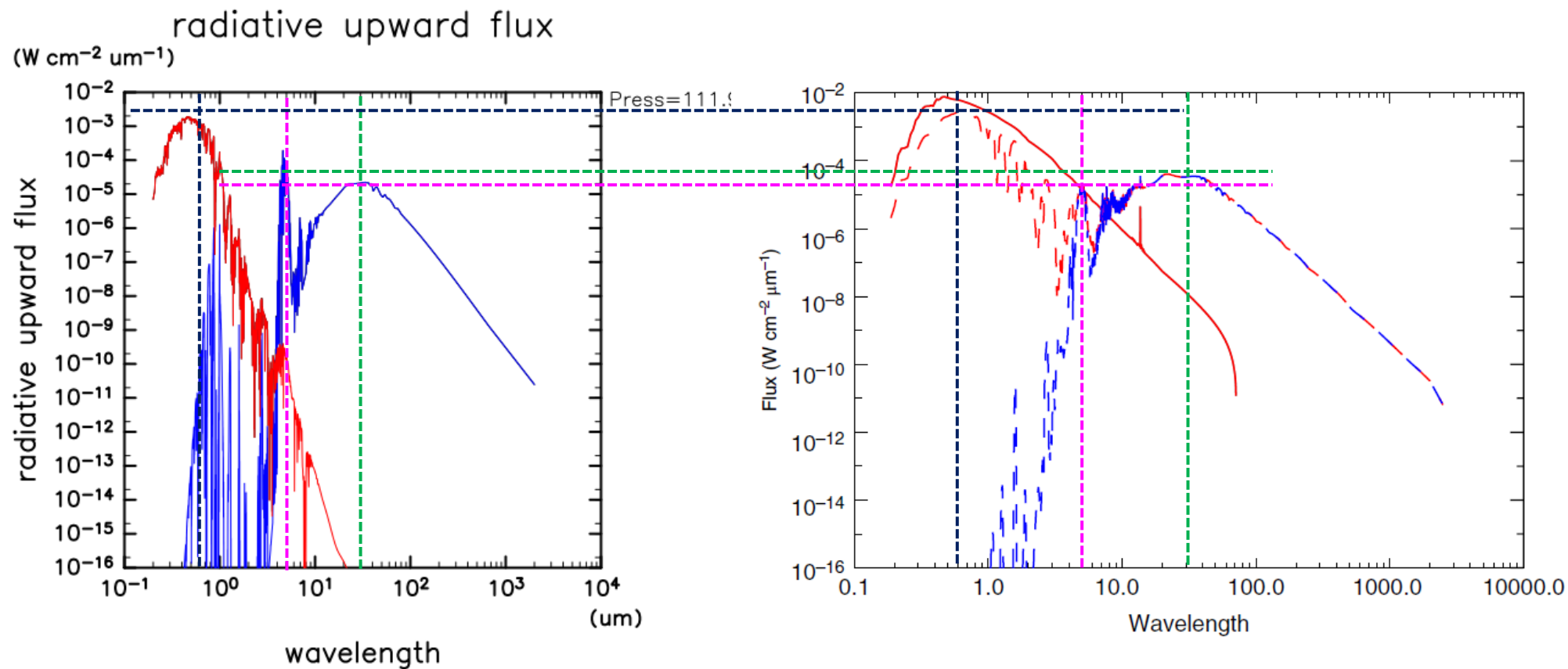
温度変化率

赤：惑星放射の温度変化率

緑：太陽放射の温度変化率



# 計算結果： 大気上端での上向き放射フラックスの比較

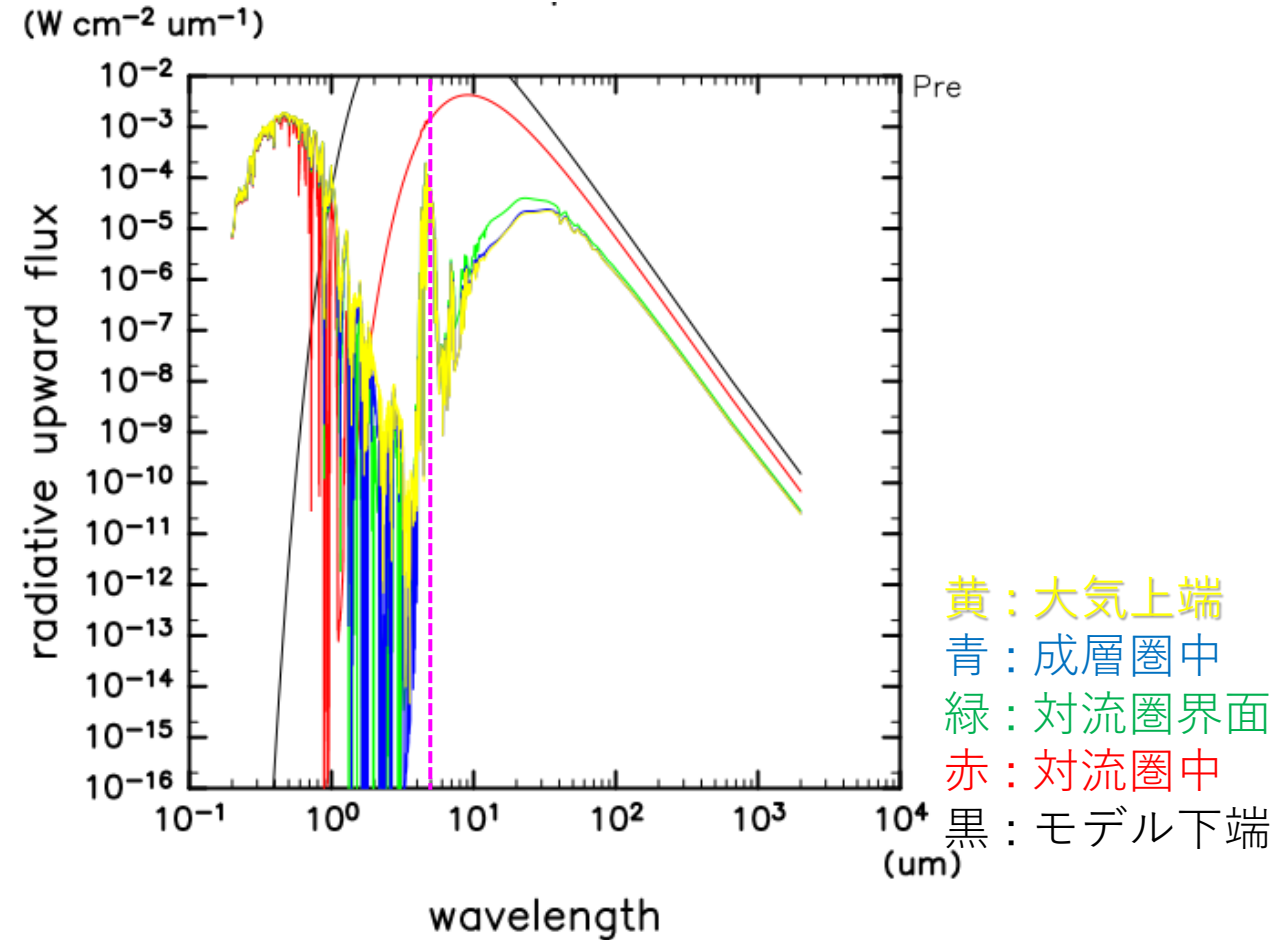


青：惑星放射  
赤：太陽放射

Figure 8 (P713) of Read et al., 2016

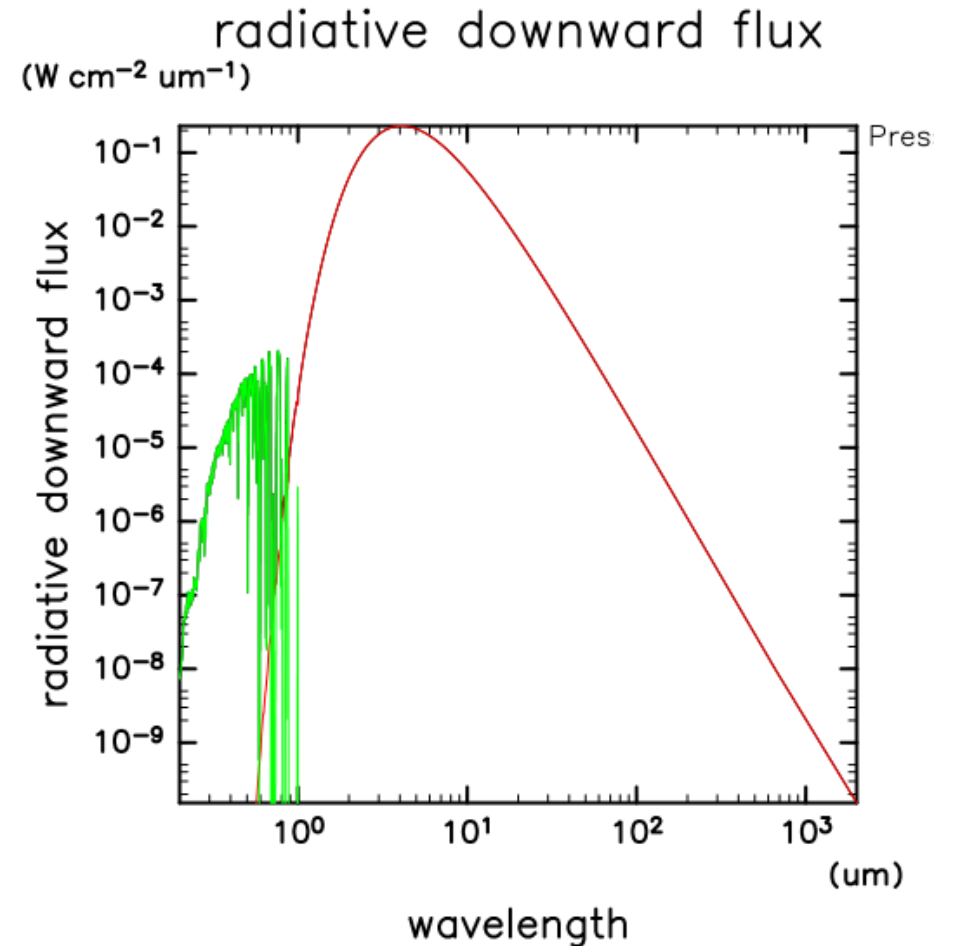
# 計算結果： 全上向き放射フラックスの高度毎の比較

- $5\ \mu\text{m}$  付近は大気の窓の領域のため、ほぼ対流圏中で取った高度よりも高い高度でもほぼ同じ大きさのフラックスが見えている
- スペクトル中で太陽放射と惑星放射の切り替わる波長が高度によって異なる



# 計算結果：モデル下端での下向き放射フラックスのスペクトル

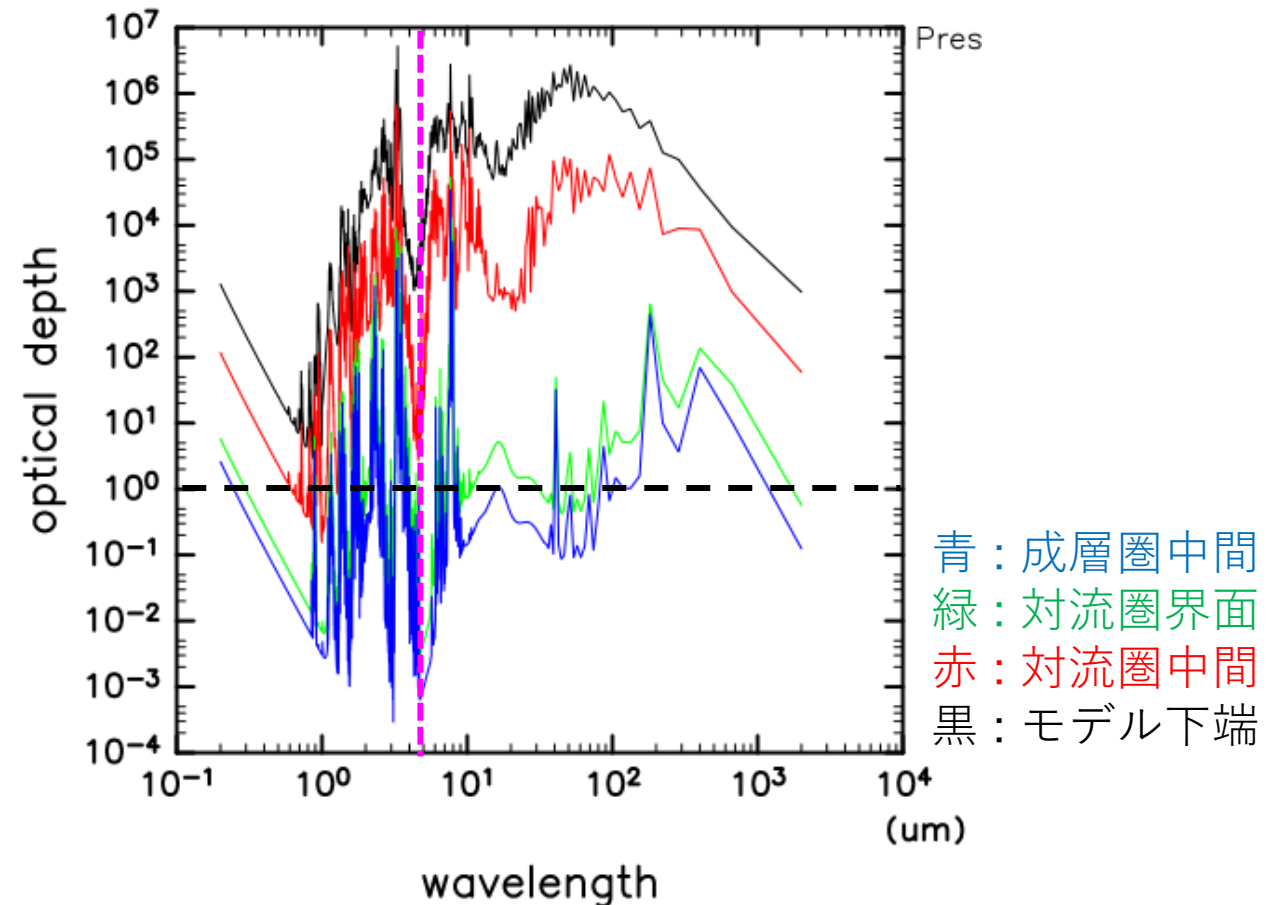
- 1  $\mu\text{m}$  以下の波長では太陽放射フラックスがみえている
- 大気上端での入射フラックスの約 2% ほどである
- 下部境界条件を検討する必要がある



黒：全下向き放射フラックス  
赤：下向き惑星放射フラックス  
緑：下向き太陽放射フラックス

# 計算結果：光学的深さ

- モデル下端では光学的厚さが全て 1 以上であり,十分に太陽放射がどの波長帯でも吸収されていると考えられる
- $5\ \mu\text{m}$  付近は大気の窓の領域であり,どの高度でも光学的深さが小さい
- $20\ \mu\text{m} \sim 80\ \mu\text{m}$  付近では対流圏界面での光学的厚さがほぼ 1 なのでその波長帯で見えている放射は対流圏界面の高度からだと考えられる



まとめ

# まとめ

- 木星を想定した理想的な大気構造を与えて放射伝達を計算してみた
- 計算結果は観測と、大気上端での上向き放射フラックスのスペクトルで惑星放射のピークの波長帯, 波長  $5 \mu\text{m}$  付近の大気の窓の領域の特徴で一致している
- 計算結果は観測と外向き放射フラックスやアルベドでずれが見えるが, それは与えた大気構造には雲がないことや実際の温度分布とはずれていることなどが原因として考えられる
- 計算結果のモデル下端での光学的厚さは1より大きくなり, 雲がない想定ではあるが, 太陽放射が全て吸収される深さまで計算できていると考えられるが, 太陽放射のフラックスがまだ残っている.

今後の課題

# 今後の課題

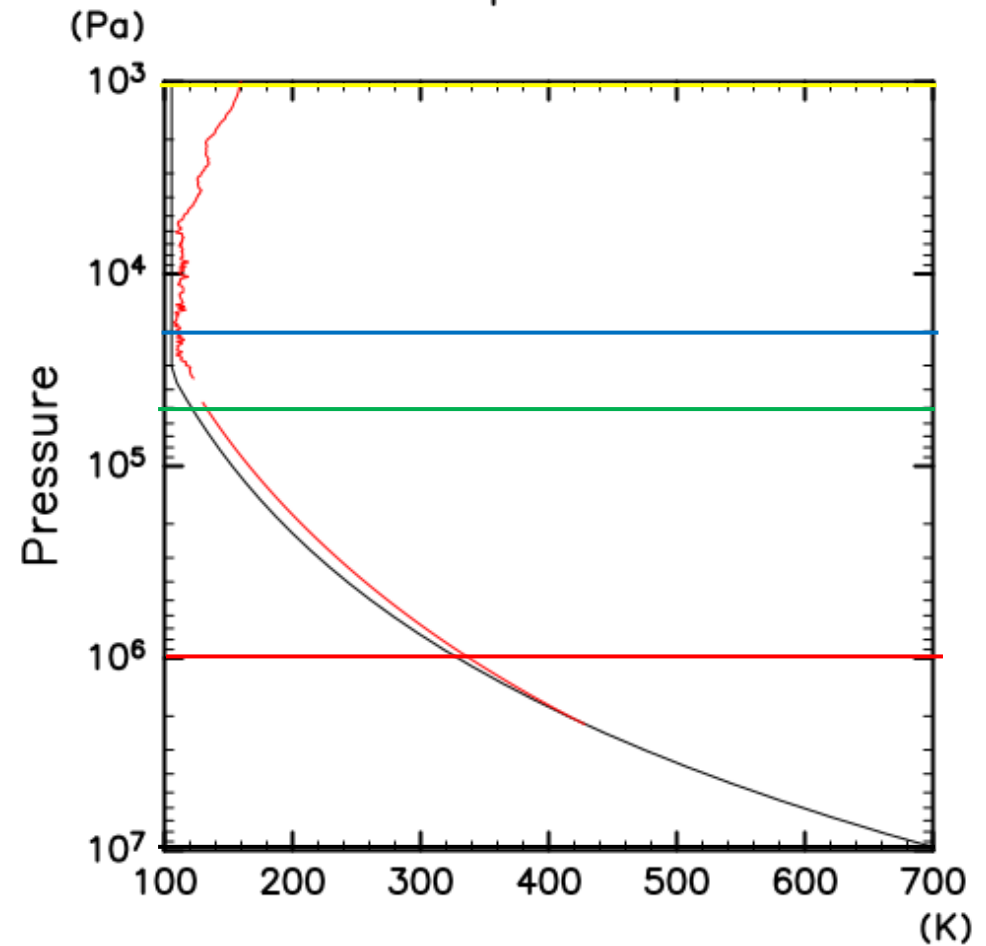
- 計算結果の高度依存性の確認
- 計算結果の波数解像度依存性の確認
- 与える大気構造の更新
  - 温度分布
  - 微量成分分布
  - 雲の分布



補足資料

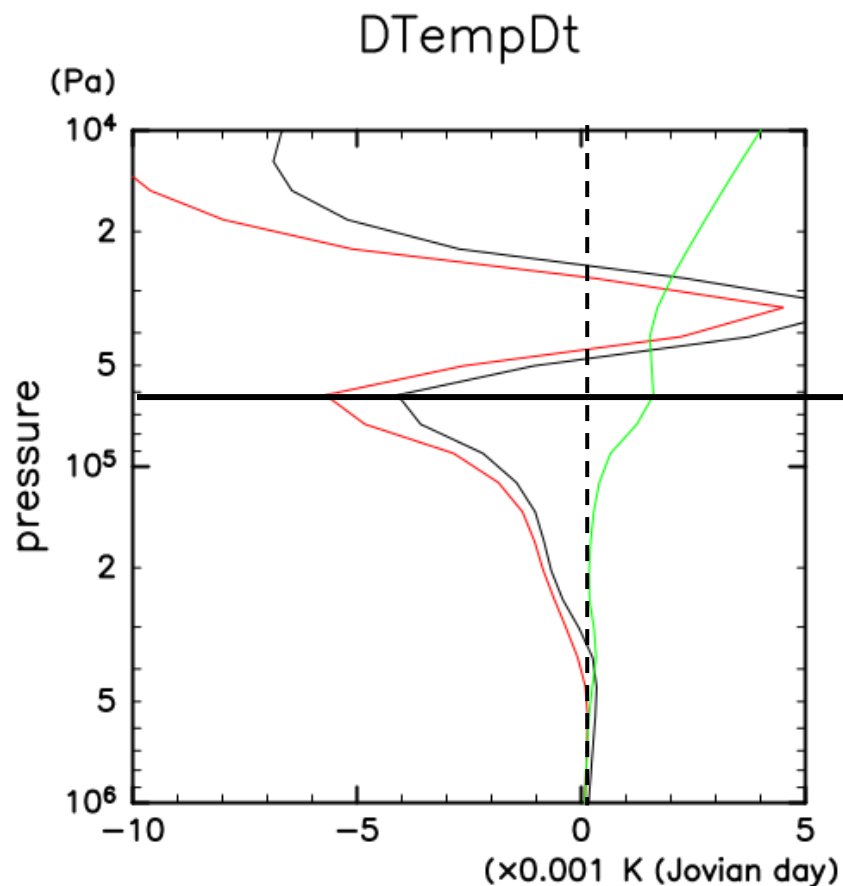
# 計算条件/計算結果

- 黄：大気上端  $100 \text{ Pa}$
- 青：成層圏中  $2.0 \times 10^4 \text{ Pa}$
- 緑：対流圏界面  $5.0 \times 10^4 \text{ Pa}$
- 赤：対流圏中  $1.0 \times 10^6 \text{ Pa}$
- 黒：モデル下端  $1.0 \times 10^7 \text{ Pa}$



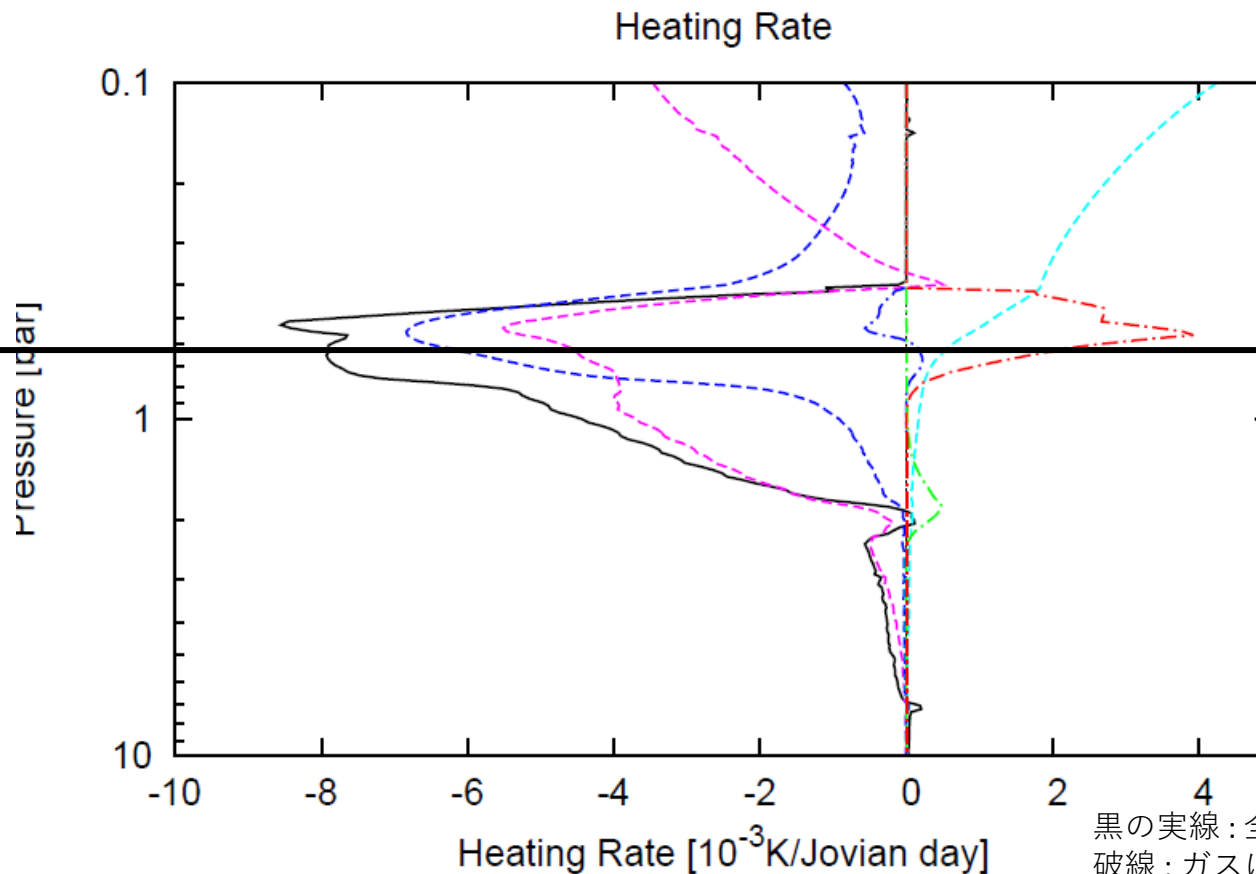
黒：与えた温度分布  
赤：観測結果(Galileo-probe)

# 計算結果：加熱率の比較



黒：加熱率  
 赤：惑星放射による加熱率  
 緑：太陽放射による加熱率

計算結果

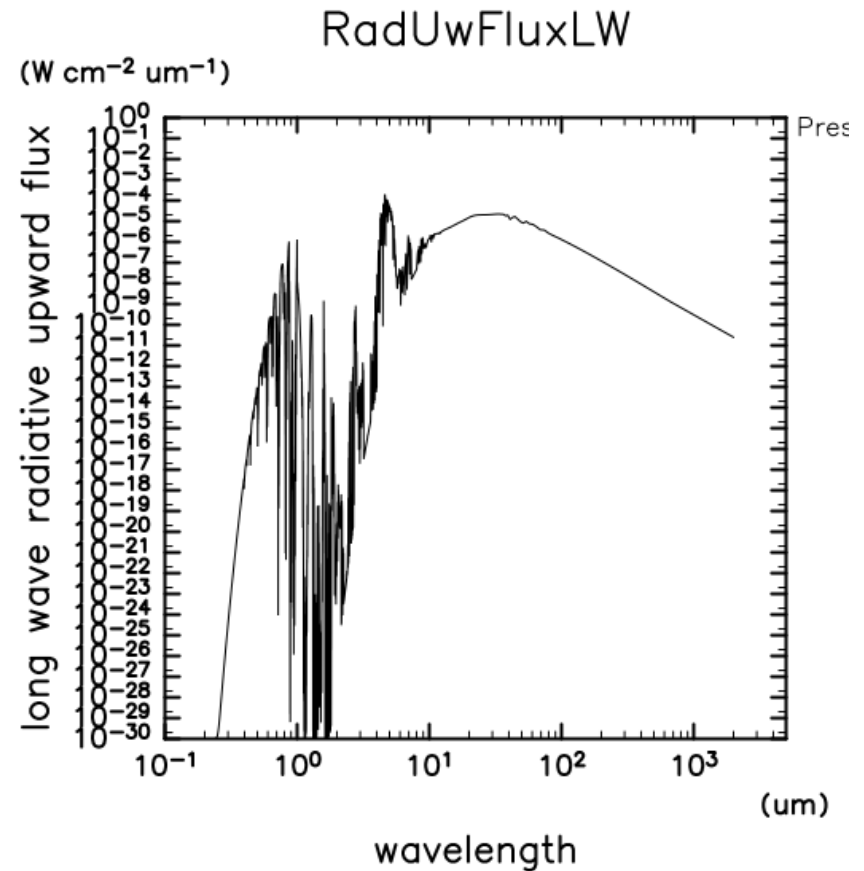


黒の実線：全加熱率  
 破線：ガスによる加熱・冷却  
 一点鎖線：粒子による加熱・冷却  
 青：NH<sub>3</sub> ガス及び雲  
 マゼンタ：H<sub>2</sub> ガス  
 シアン：CH<sub>4</sub> ガス  
 赤：着色物質  
 緑：NH<sub>4</sub>SH 雲

Takahashi. 2018

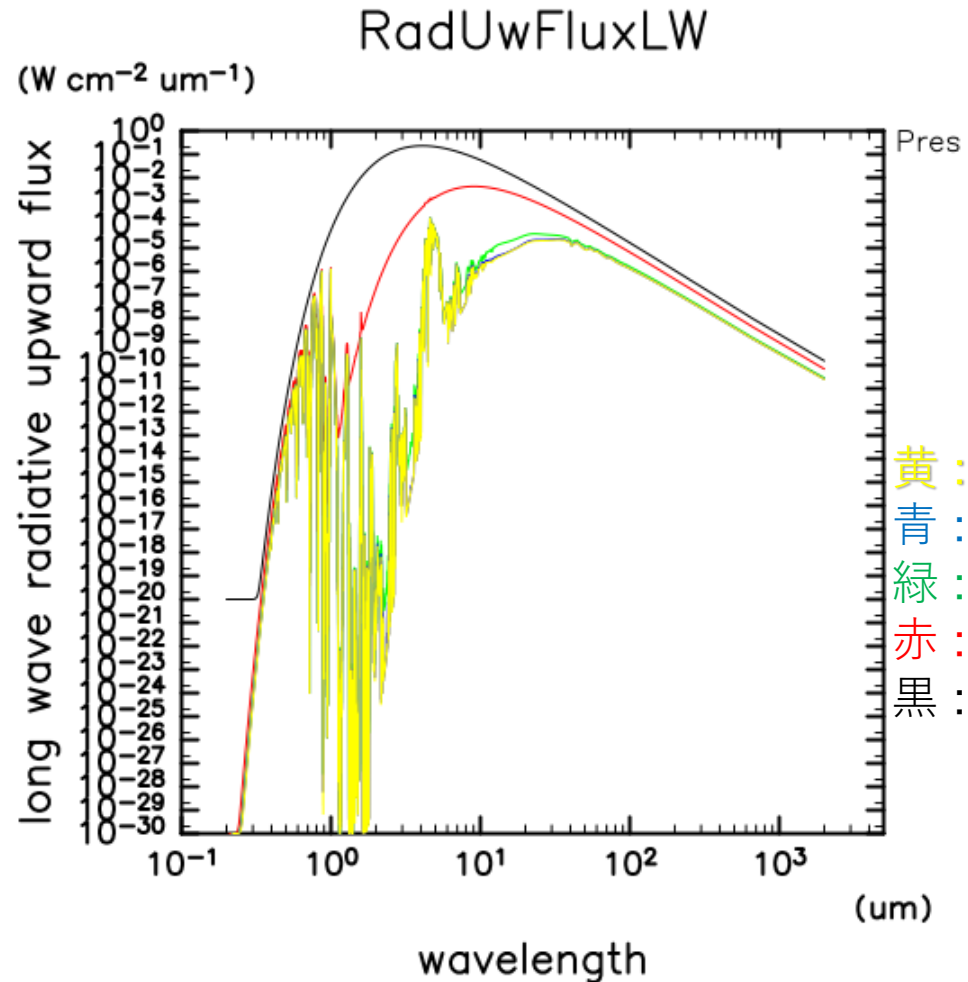
# 計算結果：OLR のスペクトル

- OLR (outgoing longwave radiation) : 上向き惑星放射放射フラックス



# 計算結果：OLR のスペクトルの高度毎の比較

- OLR (outgoing longwave radiation) : 上向き惑星放射放射フラックス



# 計算結果： 下向き全放射フラックスの高度毎の比較

