地球大気の放射伝達計算と木星大気の計算への準備

2021/07/07

神戸大学理学研究科惑星学専攻
流体地球物理学教育分野 M1
岩谷 菜々子

目次

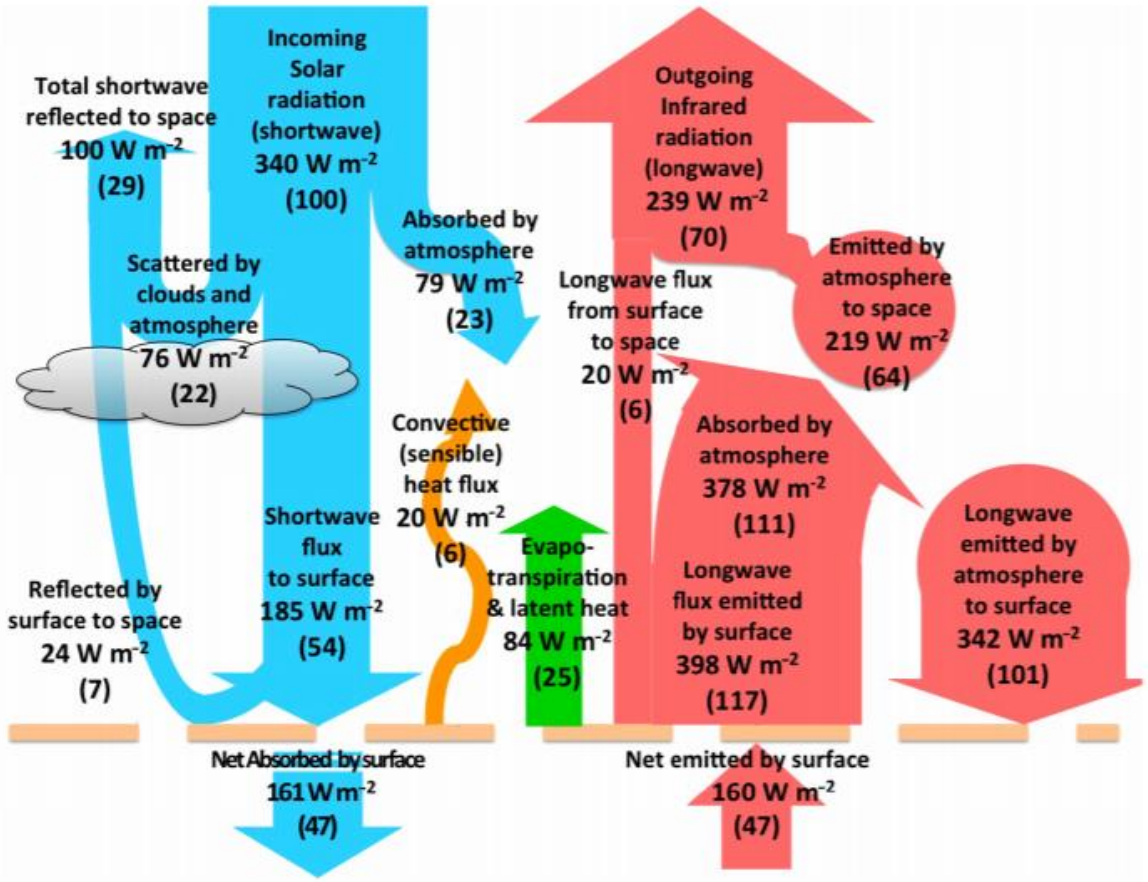
1. はじめに
2. 放射の基本物理法則
2. 地球大気の放射伝達計算
3. 木星のエネルギー収支 (Read et al., 2017)
4. 木星の放射伝達計算の準備

はじめに

はじめに

惑星の気候は, 惑星放射と太陽放射の収支によって決定されている

放射を計算すること
→エネルギーの流れを
理解することにつながる

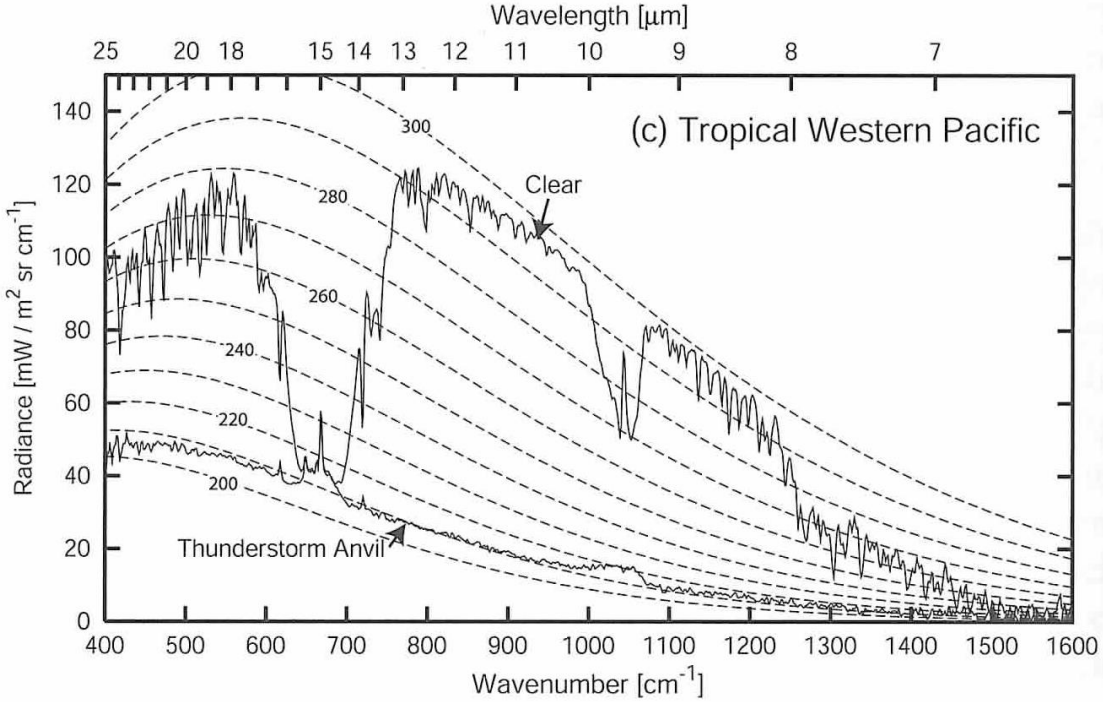


地球大気のエネルギーフローの概略図(Read et al., 2017)

放射の基本物理法則

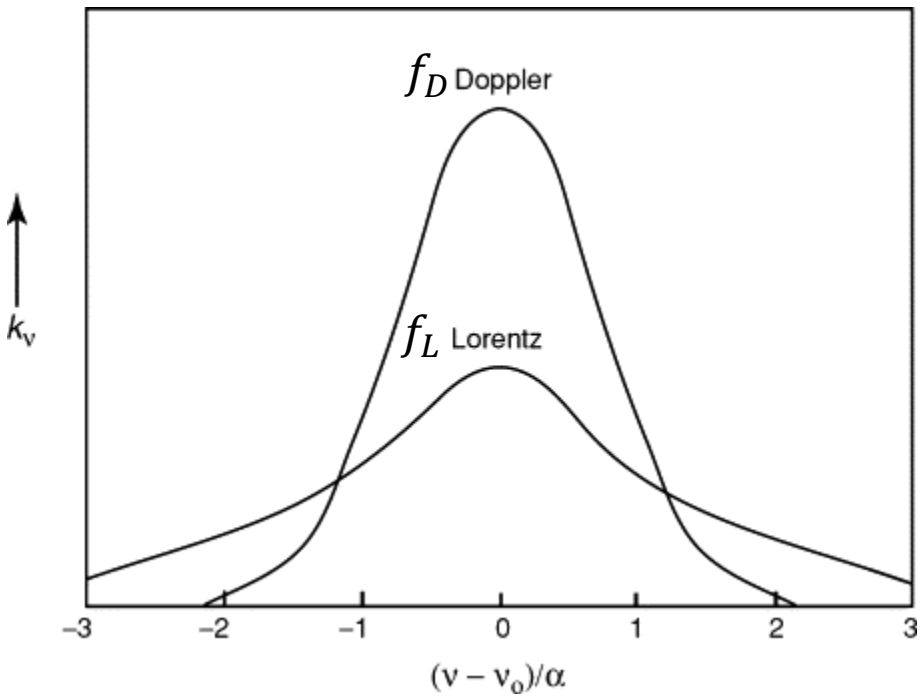
惑星大気中の放射フラックスの計算

1. ラインバイラインモデル
   - 吸収線それぞれを解像して計算する
   - 正確だが計算量が多い
2. k 分布モデル
   - 吸収係数を並べ変えて計算
   - ラインバイラインモデルに比べて計算量が圧倒的に少ない
3. バンドモデル
   - バンド内の吸収線について統計的な分布を仮定し平均値を計算する
   - k 分布モデルよりも計算量が圧倒的に少ない



吸収線の表現

- 吸収線パラメータ
  - HITRAN などの吸収線データベースから取得



$$d\tau(\nu) = -\sum_{i=1}^{N}\sum_{l=1}^{L} k_{i,l}(\nu)\,\rho_i\,dz - \sum_{i=1}^{N} k_{cnt,i}\ (\nu)\rho_i\,dz - \sum_{j=1}^{N}\sigma_j(\nu)\rho_j\,dz$$

τ:光学的厚さ　　ν:振動数　ρ: 気体の密度
k:気体の吸収係数　k_{cnt} :気体の連続吸収
σ: レイリー散乱係数

$$k_{i,l}(\nu) = S_{i,l} f\ (\nu - \nu_{0.i.l})$$

$$f\ (\nu - \nu_{0,i,l}) = \int_{-\infty}^{\infty} f_L(\nu' - \nu_{0,i,l})\, f_D(\nu' - \nu_{0,i,l})\, d\nu'$$

$$= \frac{1}{\pi^{3/2}}\frac{\alpha_L}{\alpha_D}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{1}{(\nu' - \nu_{0,i,l})^2 + \alpha_L^2}\exp\left(-\frac{(\nu' - \nu_{0,i,l})^2}{\alpha_L^2}\right)d\nu'$$

地球大気での放射伝達計算

地球大気での放射伝達計算

- ここでは
  - 気体による吸収とレイリー散乱を考慮して放射伝達を計算
  - 計算される放射スペクトルと加熱率について考察

使用したモデルの概要

- 惑星大気放射モデル (Takahashi et al., 準備中)
  - ラインバイラインモデル
    - 吸収線のデータ(S, ν)はHITRAN2012から引用
      - 吸収線形はボイト型を仮定

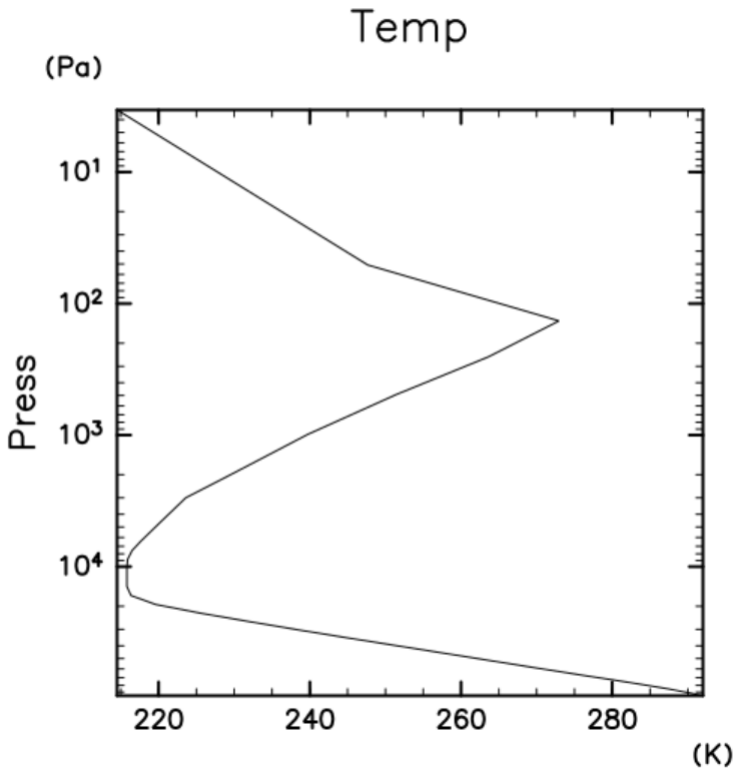
- 一般化された二流近似の放射伝達方程式を使用(Toon et al., 1989)

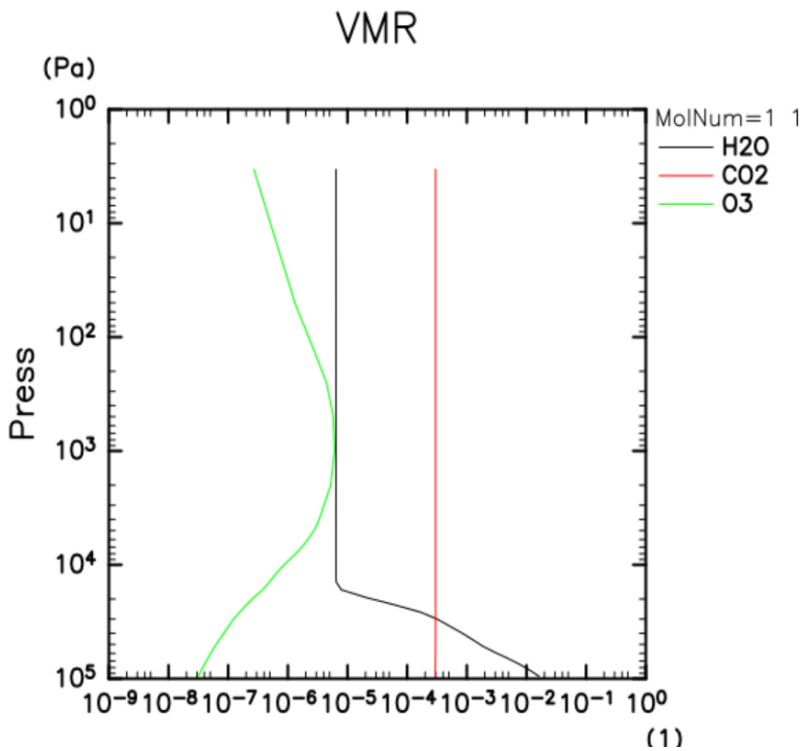
$$\frac{\partial F_n^+}{\partial \tau_n} = \gamma_{1n} F_n^+ - \gamma_{2n} F_n^- - S_n^+$$

$$\frac{\partial F_n^-}{\partial \tau_n} = \gamma_{2n} F_n^+ - \gamma_{1n} F_n^- - S_n^+$$

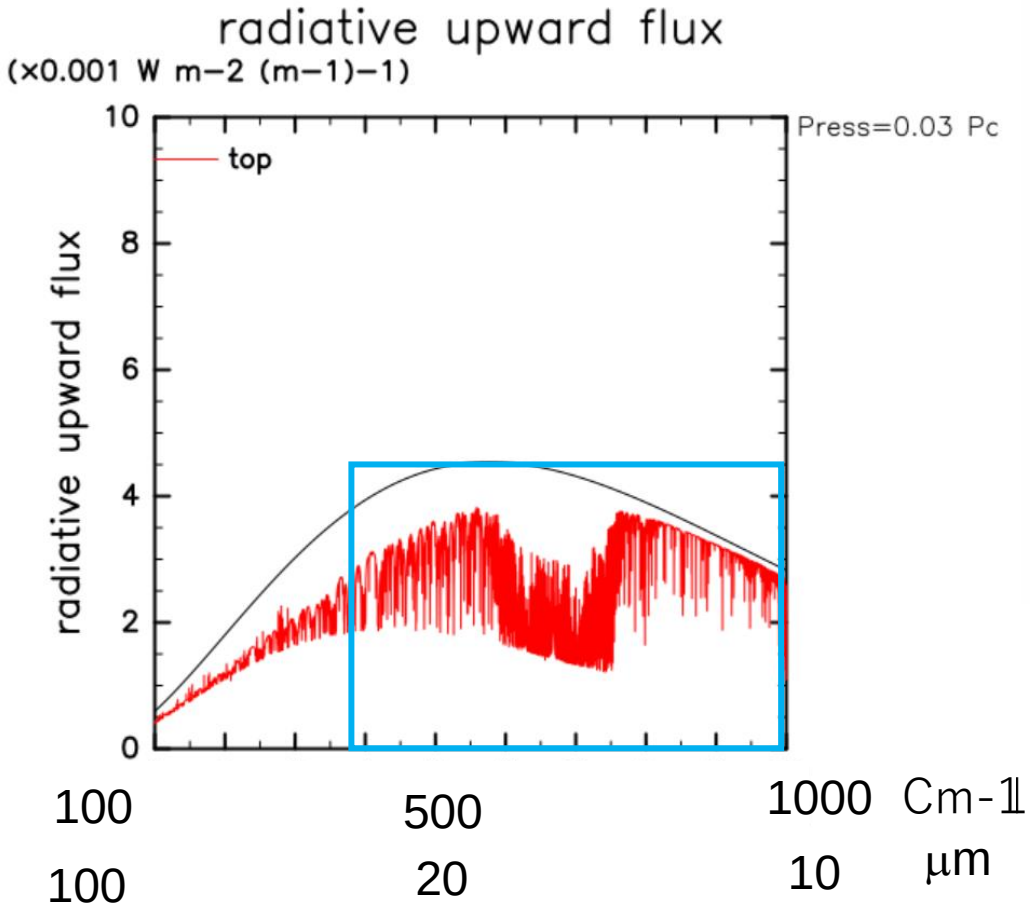
地球中緯度の夏季における実験

- 計算条件
  - 地球中緯度の夏季温度分布(左図)
  - 考慮する吸収物質の組成(右図)
    - H_2O
    - CO_2
    - O_3
- 波数解像度
  - 0.01 c m^{-1}

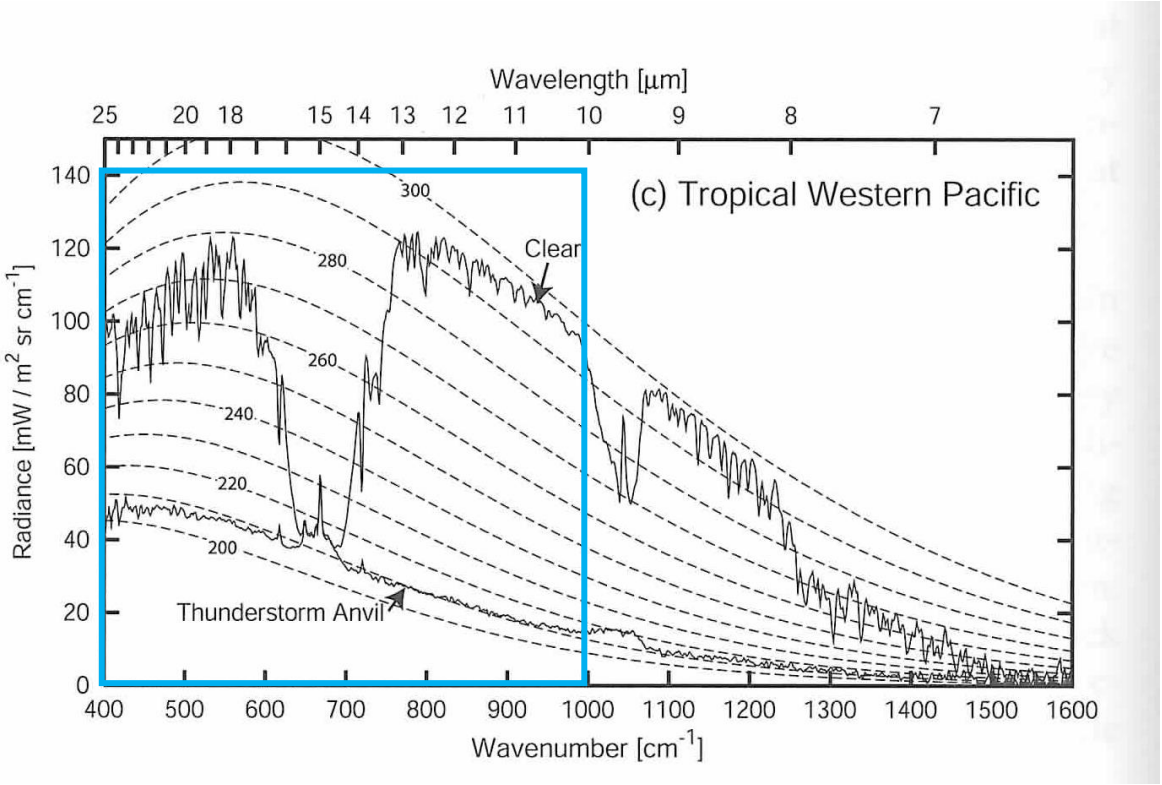




計算された大気上端での上向き放射スペクトル



波数/波長

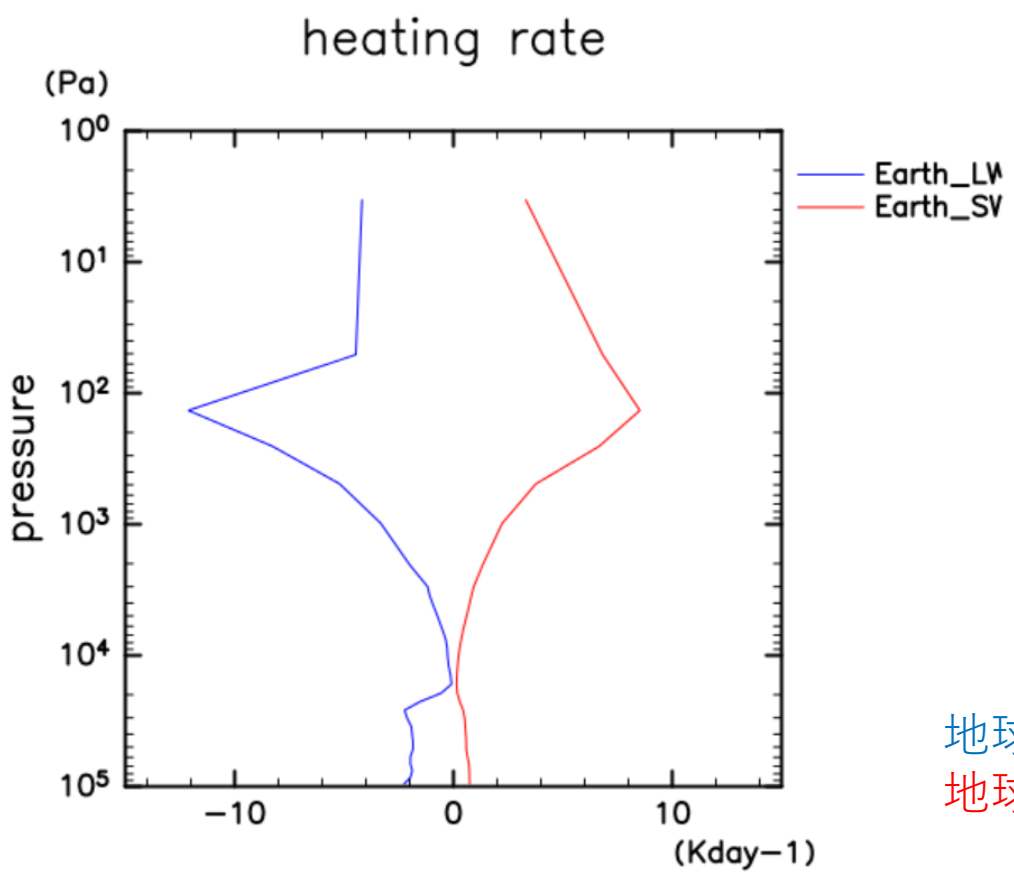


衛星観測による熱帯西太平洋のスペクトル(Petty ., 2006

- 観測されているような吸収がみられる

図. 計算された上向き放射スペクトル：
大気上端でのスペクトル(赤線)
地球表面でのスペクトル(294 K 黒体放射, 黒線)

計算された加熱率

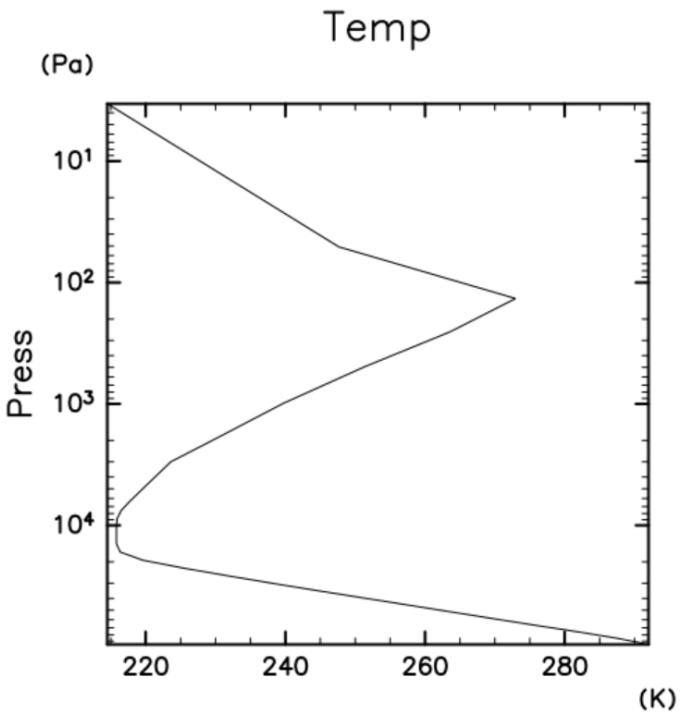


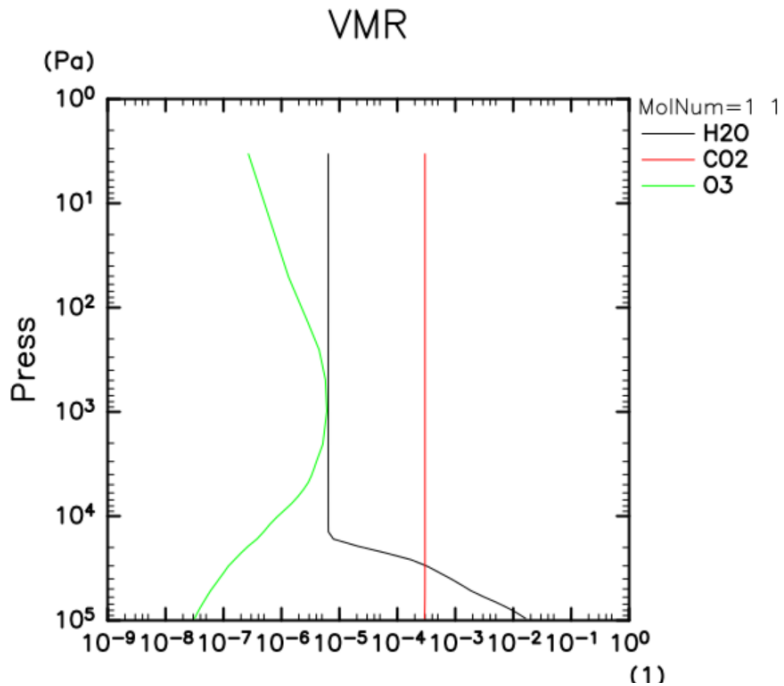
- 対流圏
  - 長波冷却 ~ 2 K/day
  - 短波加熱 ~ 1 K/day
- 成層圏
  - 長波冷却 ~ 10 K/day
  - 短波加熱 ~ 10 K/day

地球中緯度夏季長波（青線）
地球中緯度夏季短波（赤線）

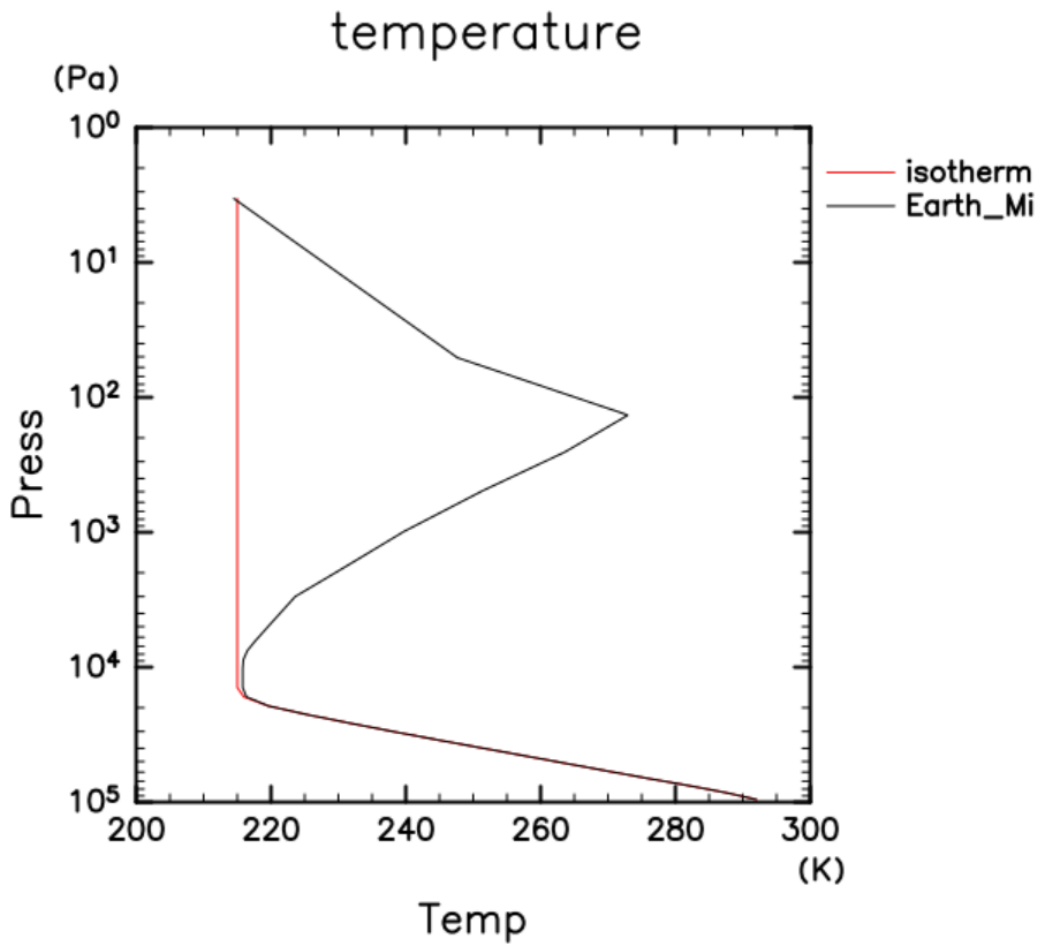
大気構造変更実験

- 温度分布変更実験
  - 成層圏等温
  - 等温
  - 単調減少
  - 単調増加
- 吸収物質組成変更実験
  - CO_2
  - H_2O
  - O_3





大気構造変更実験
成層圏等温大気/問題設定



成層圏での温度を対流圏界面の温度215Kに設定

図 温度分布：
成層圏等温大気(赤線)
地球中緯度夏季(黒)

大気構造変更実験
成層圏等温大気　計算されたスペクトル

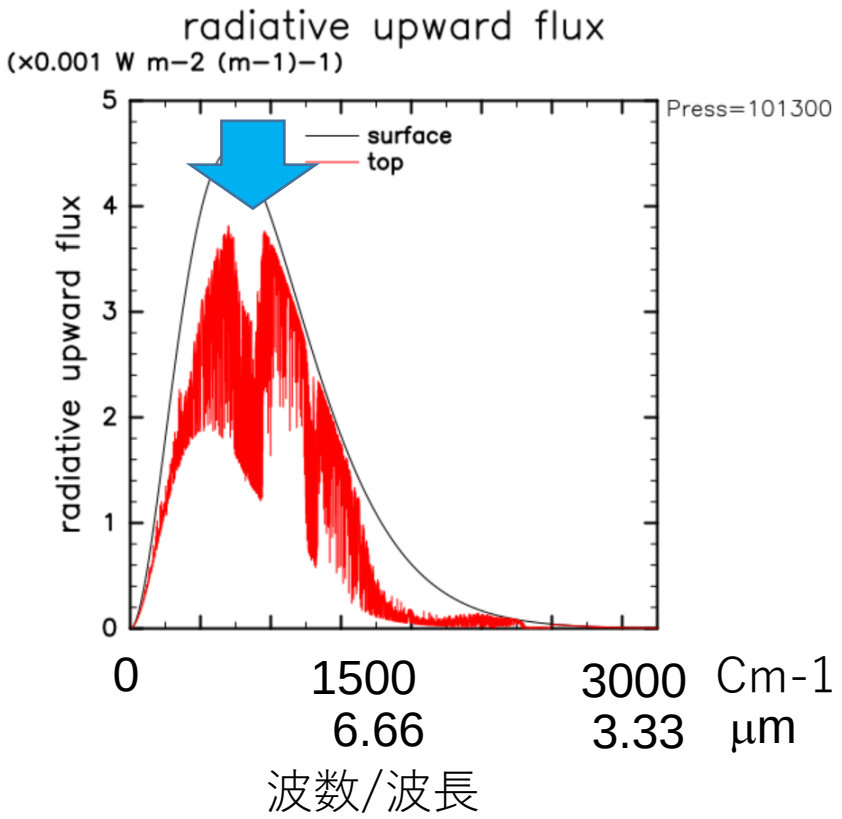
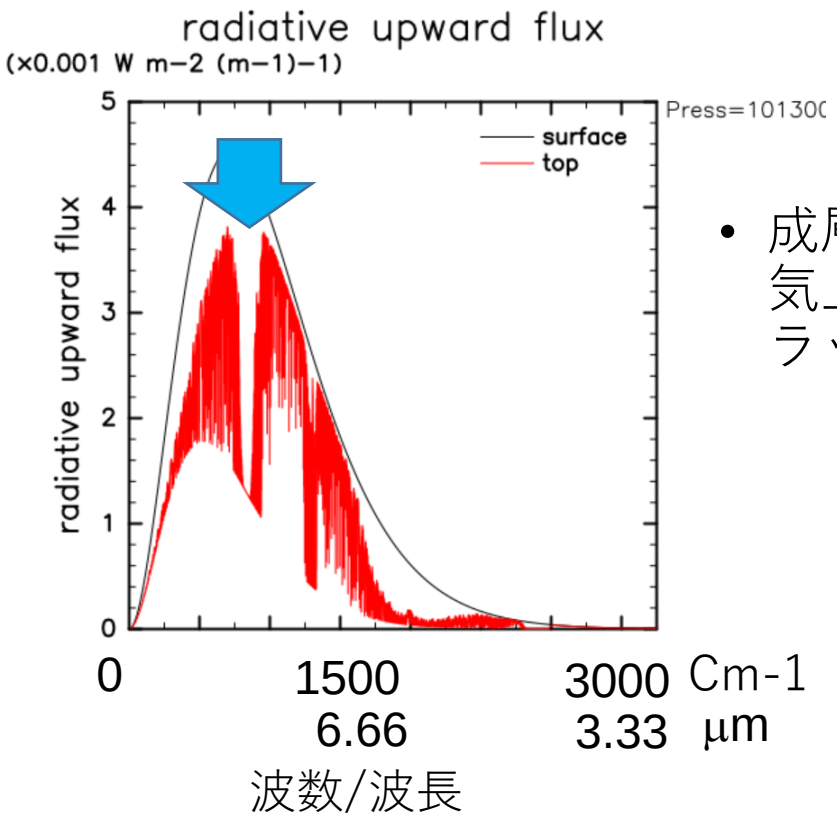


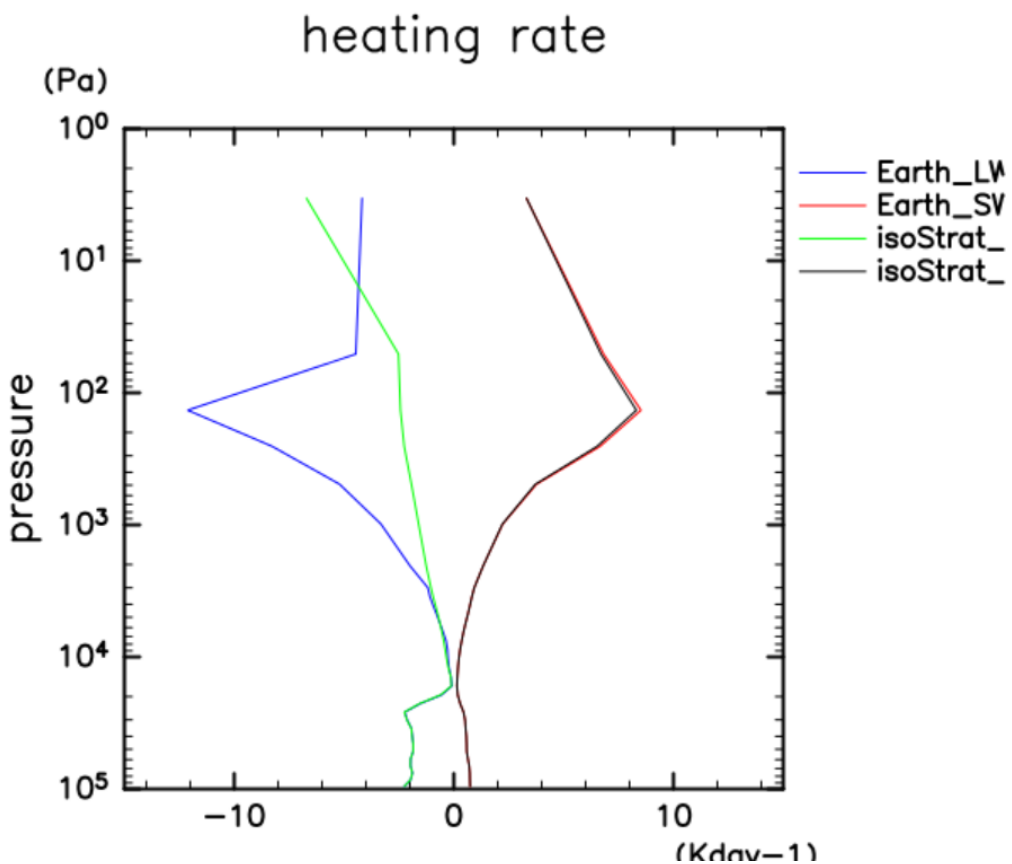
図. 地球中緯度の夏季上向き放射スペクトル：
大気上端でのスペクトル(赤線)
地球表面でのスペクトル(294 K 黒体放射,黒線)



- 成層圏が低温になったため, 大気上端の15μm 付近の放射フラックスが小さくなる.

図. 成層圏等温大気上向き放射スペクトル：
大気上端でのスペクトル(赤線)
地球表面でのスペクトル(294 K 黒体放射, 黒線)

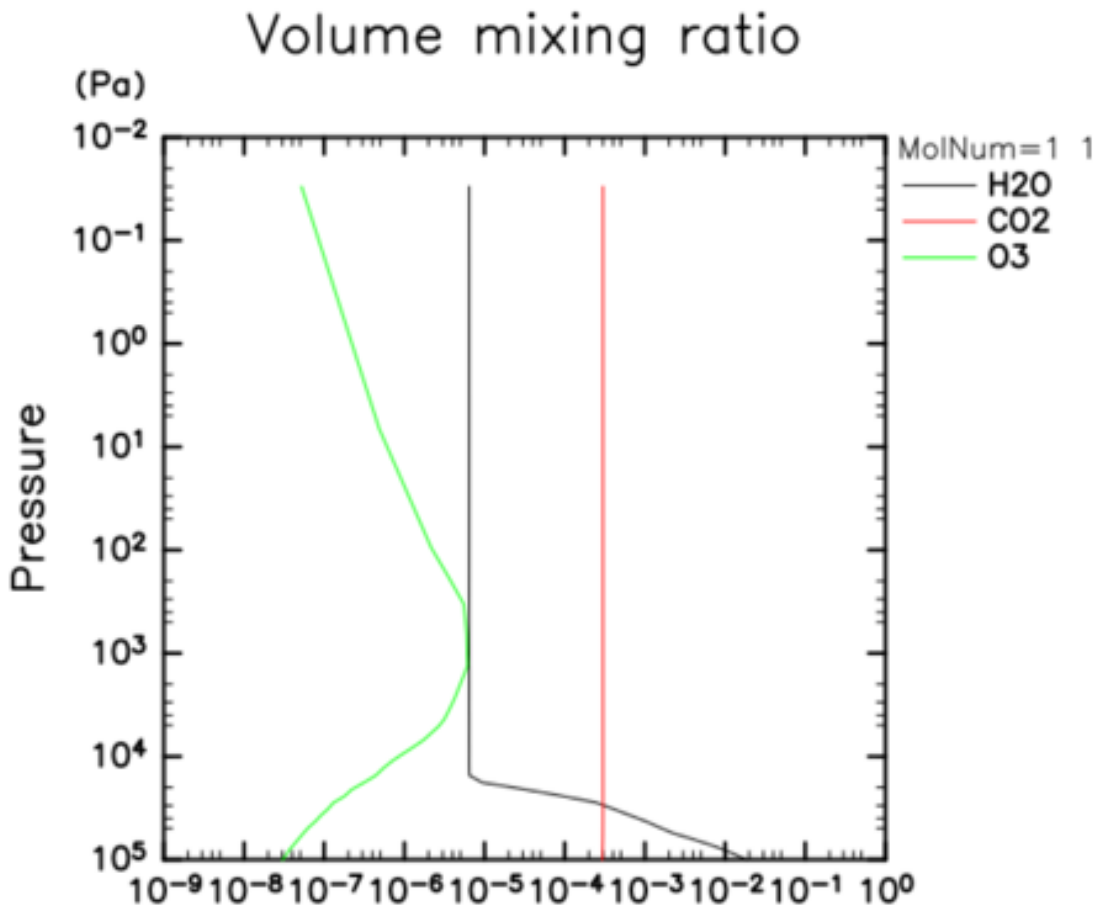
大気構造変更実験
成層圏等温大気　計算された加熱率



- 本来の成層圏よりも低温になっているため, 成層圏等温大気のほうでは長波冷却が小さい

地球中緯度夏季長波(青線)
地球中緯度夏季短波(赤線)
成層圏等温大気長波(緑線)
成層圏等温大気短波(黒線)

大気構造変更実験
吸収物質組成変更実験/問題設定



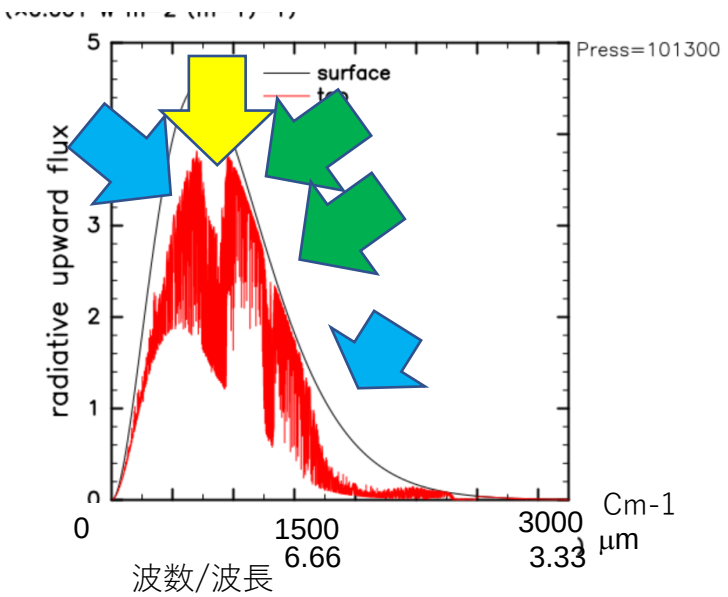
温度構造は地球中緯度の夏季のまま

- H_2O **のみ** (CO_2 , O_3 **はゼロ**)
- CO_2 のみ (H_2O, O_3 はゼロ)
- O_3 のみ (H_2O, CO_2 はゼロ)

を含む大気として計算
(体積混合比は変更していない)

大気構造変更実験/吸収物質組成変更実験
計算されたスペクトル

地球中緯度夏季スペクトル

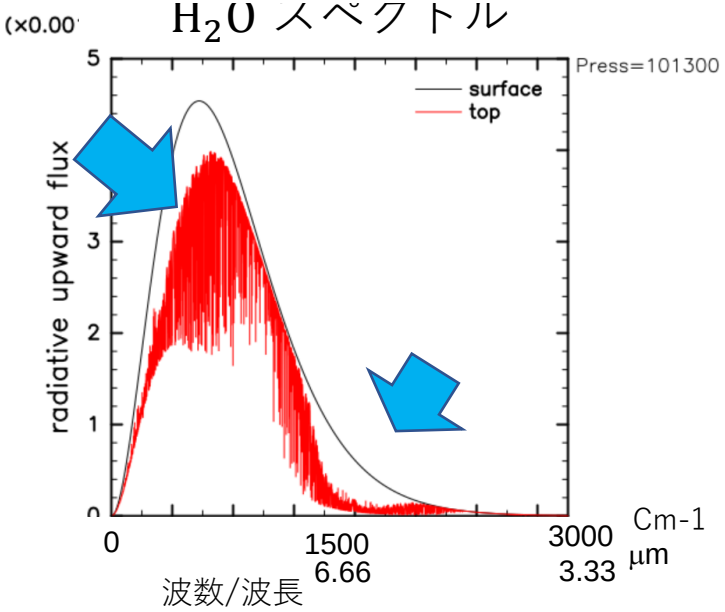


H_2O による吸収が見られる

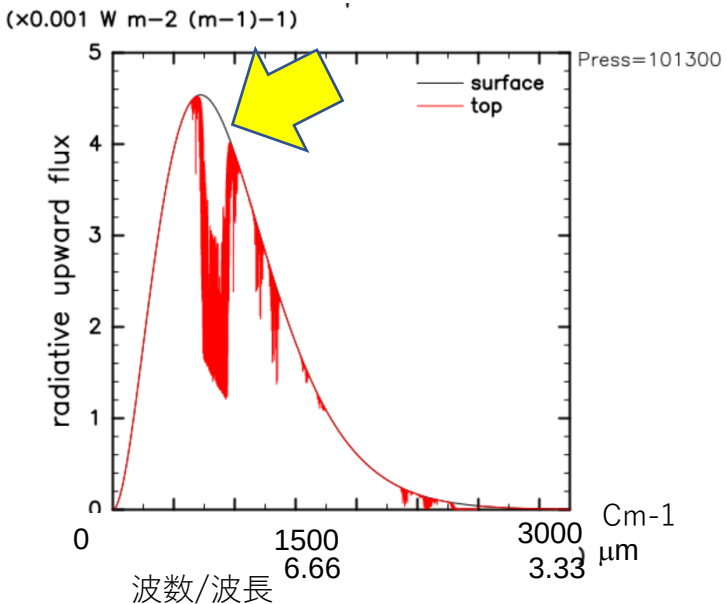
CO_2による吸収が見られる

O_3による吸収が見られる

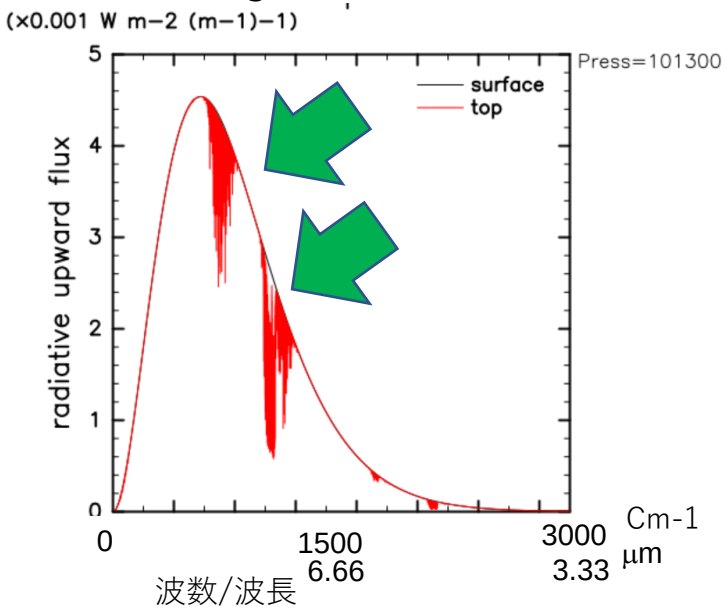
H_2O スペクトル



CO_2 スペクトル

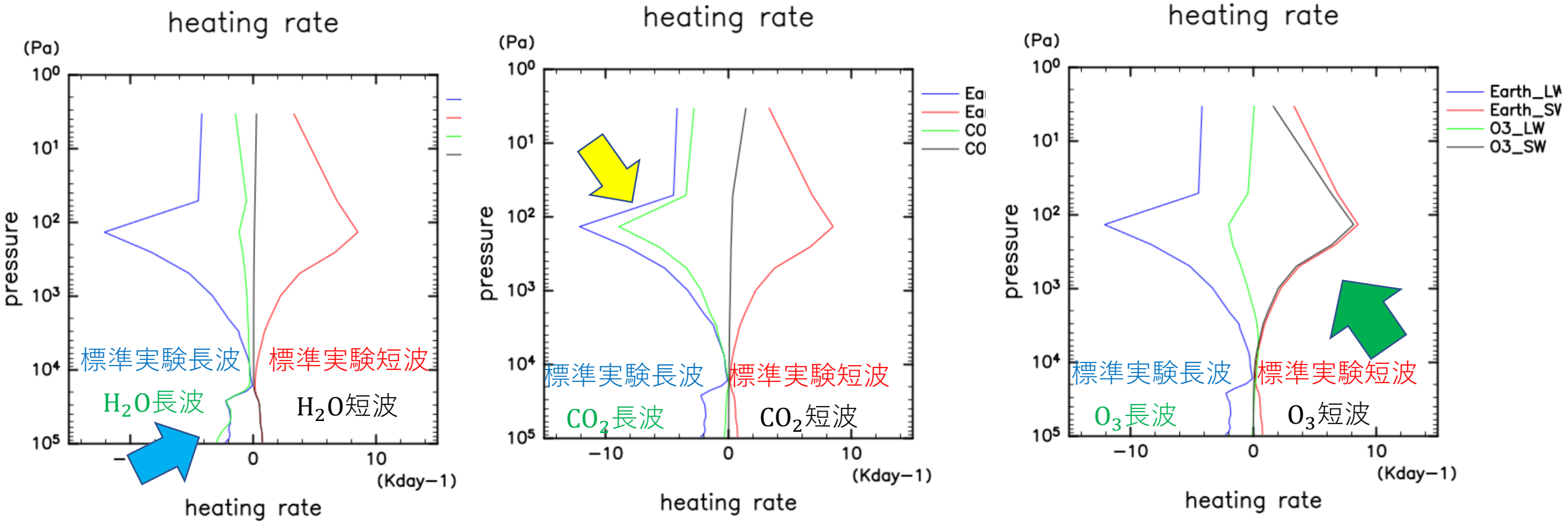


O_3 スペクトル



大気構造変更実験
吸収物質組成変更実験　計算された加熱率

H_2O　　CO_2　　O_3



それぞれの成分の主要な加熱冷却高度

H_2O：対流圏冷却　　CO_2 ： 成層圏冷却　　O_3 ：成層圏加熱

地球大気の放射伝達計算のまとめ

地球大気で放射を計算した

– 地球中緯度の夏季の条件を与えると衛星観測されたスペクトルと同様の吸収が見られるスペクトルが得られた

– 温度分布変更実験では
  - スペクトルは温度構造に対応した変化が見られた

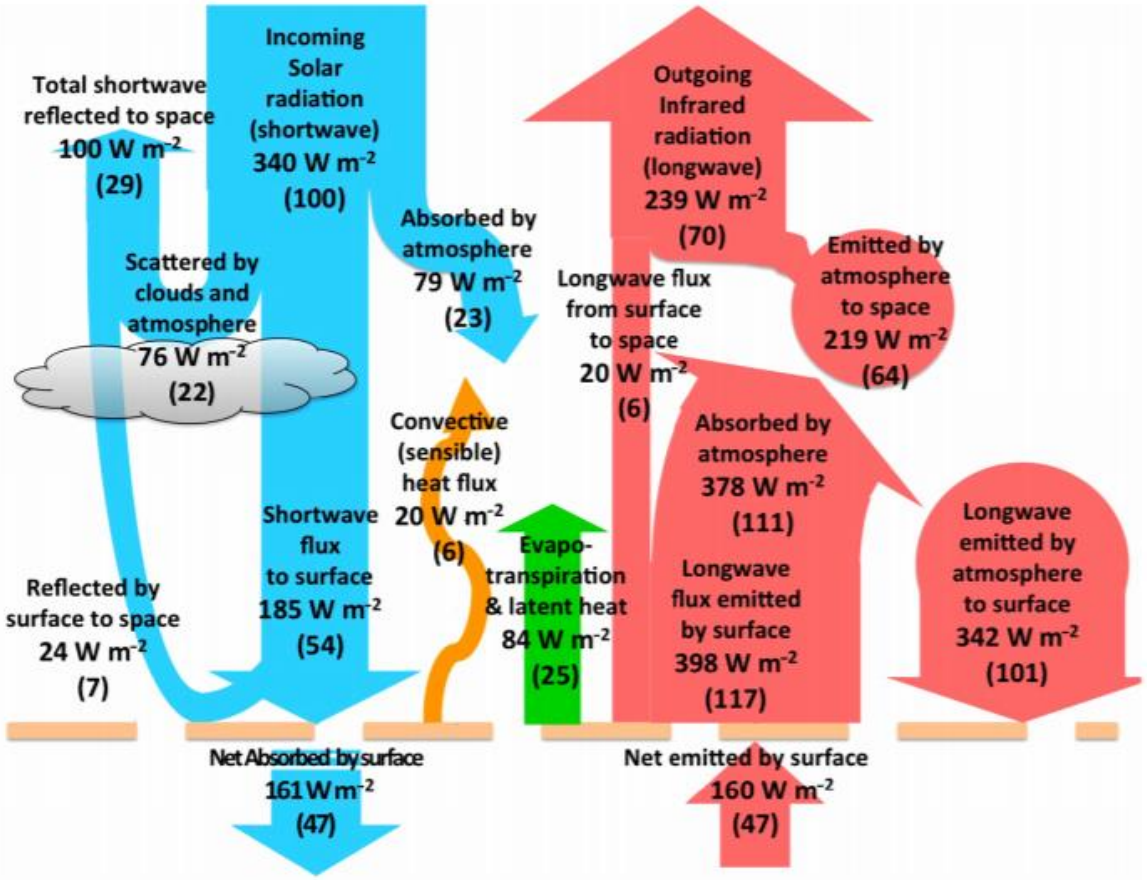
– 吸収物質組成変更実験では
  - それぞれの吸収スペクトルが確認された
  - それぞれの組成が異なる高度領域の加熱冷却に寄与していることが確認された

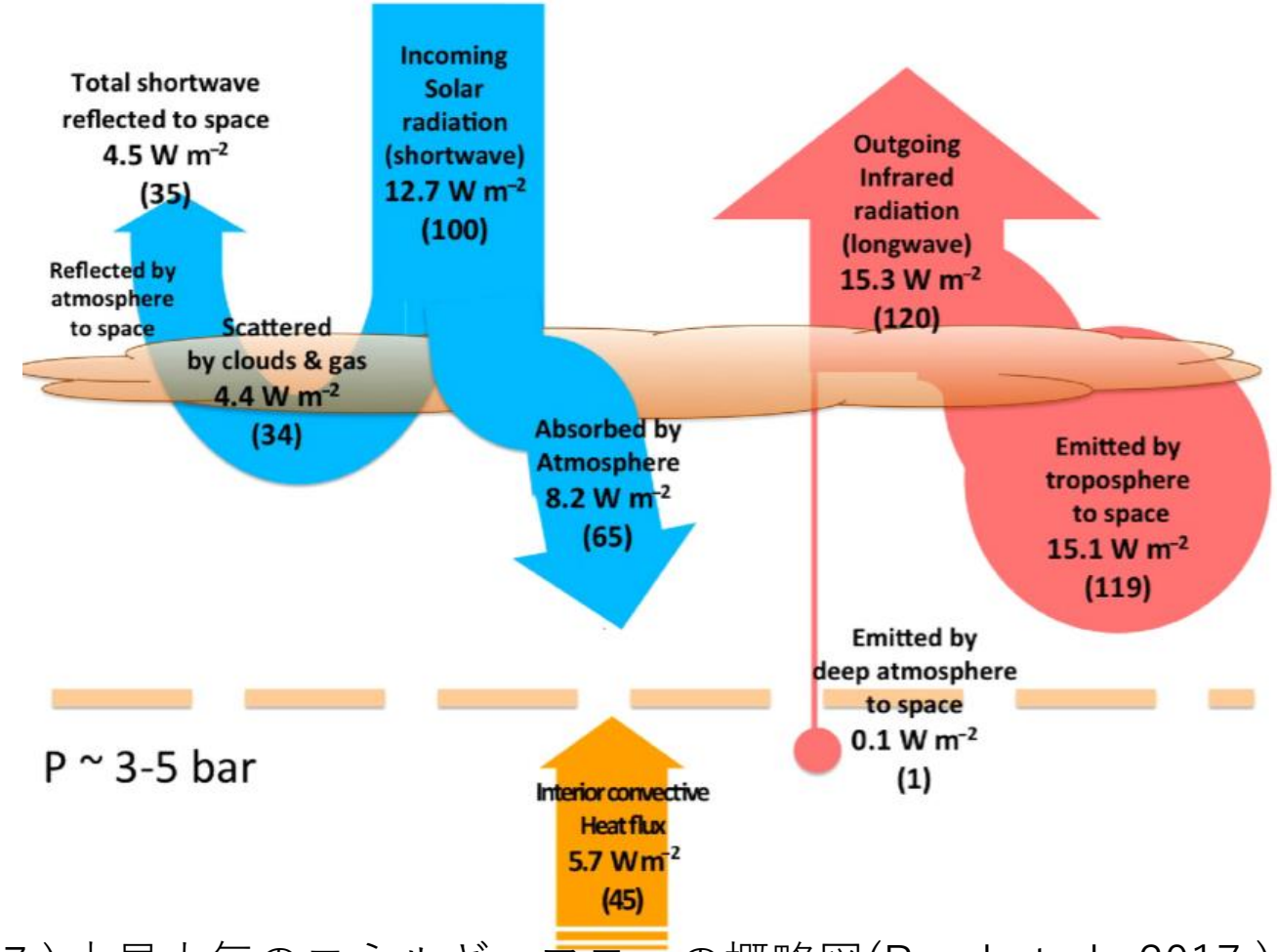
木星のエネルギー収支
(Read et al., 2017)

木星のエネルギー収支 (Read et al., 2017)

- 木星の大気のエネルギー収支を計算するにあたって注意するべきこと
  - 地球型惑星と異なって地面がないので境界を定義する必要がある
    - 対流による熱輸送が支配的となる領域
  - 内部熱源がある
    - 現在も木星そのものは収縮しており、重力ポテンシャルが熱に変換され深部から供給されている
    - 大気上端において太陽放射より惑星放射のほうが大きい

岩石惑星とガス惑星





地球大気のエネルギーフローの概略図(Read et al., 2017) 木星大気のエネルギーフローの概略図(Read et al., 2017)

先行研究(Read et al., 2017)まとめ

・木星のような形のエネルギー収支では、太陽からの放射のエネルギーと内部からの熱により対流圏及び成層圏が動的に活発である可能性がある

・他の太陽系の巨大惑星も内部熱源を持っていれば同様のエネルギーフローを持つかもしれない

木星の計算に向けて

地球と木星

地球

- 大気組成分布
  - N_2, O_2, H_2O, CO_2, O_3
  - 雲（H_2O）
- 岩石惑星
- 内部熱源なし
- 太陽からの距離 ~ 1 AU

木星

- 大気組成
  - H_2, He , CH_4, NH_3, H_2S
  - 雲（NH_3, NH_4SH, H_2O）
- ガス惑星
- 内部熱源あり
- 太陽からの距離 ~ 5.2 AU

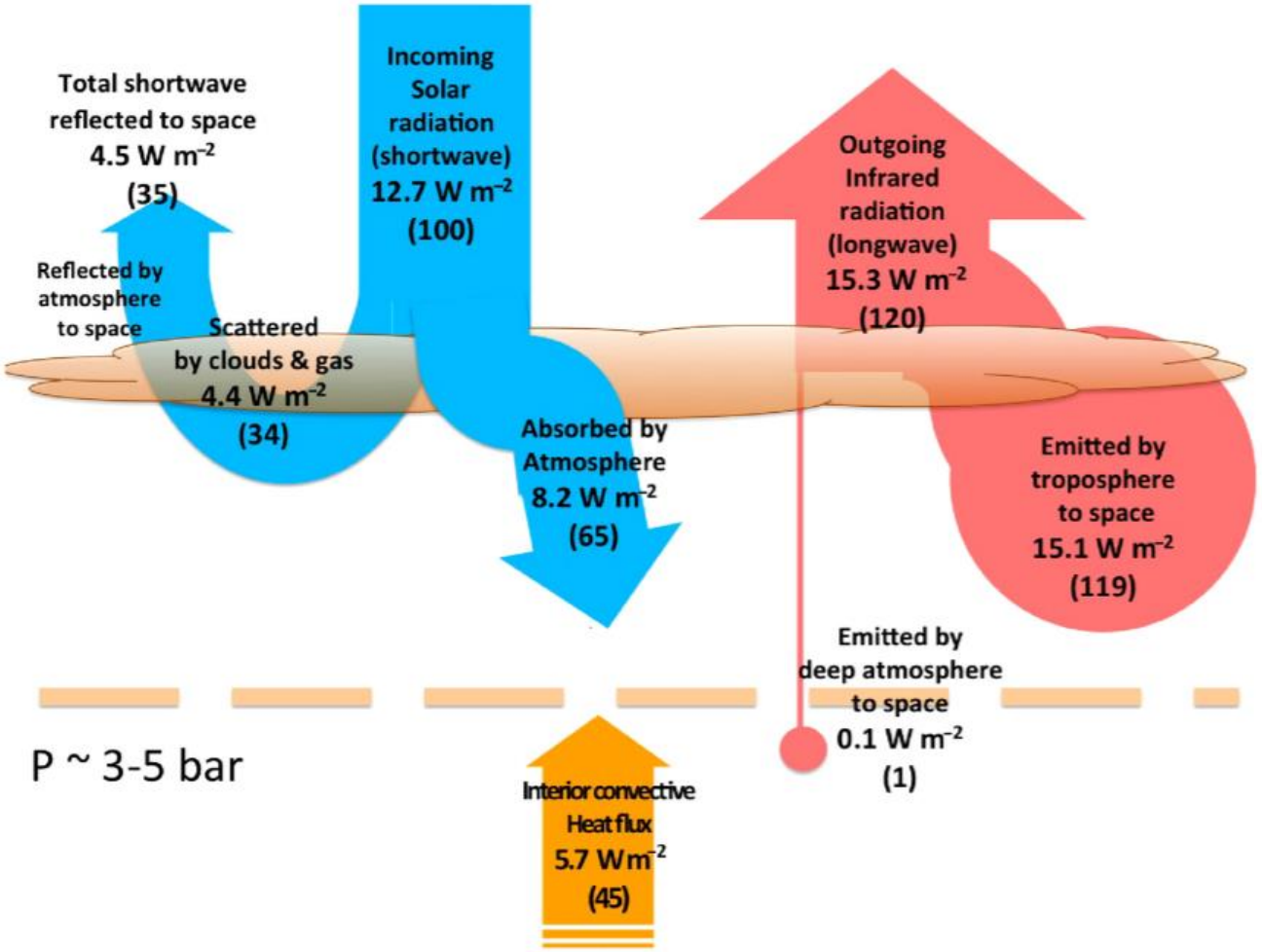
木星計算への準備

- Read et al. (2017) に倣って木星の放射を計算したい

- 地球大気の放射伝達計算からの変更箇所
  - 大気圧力範囲
  - 大気温度分布
  - 大気組成分布

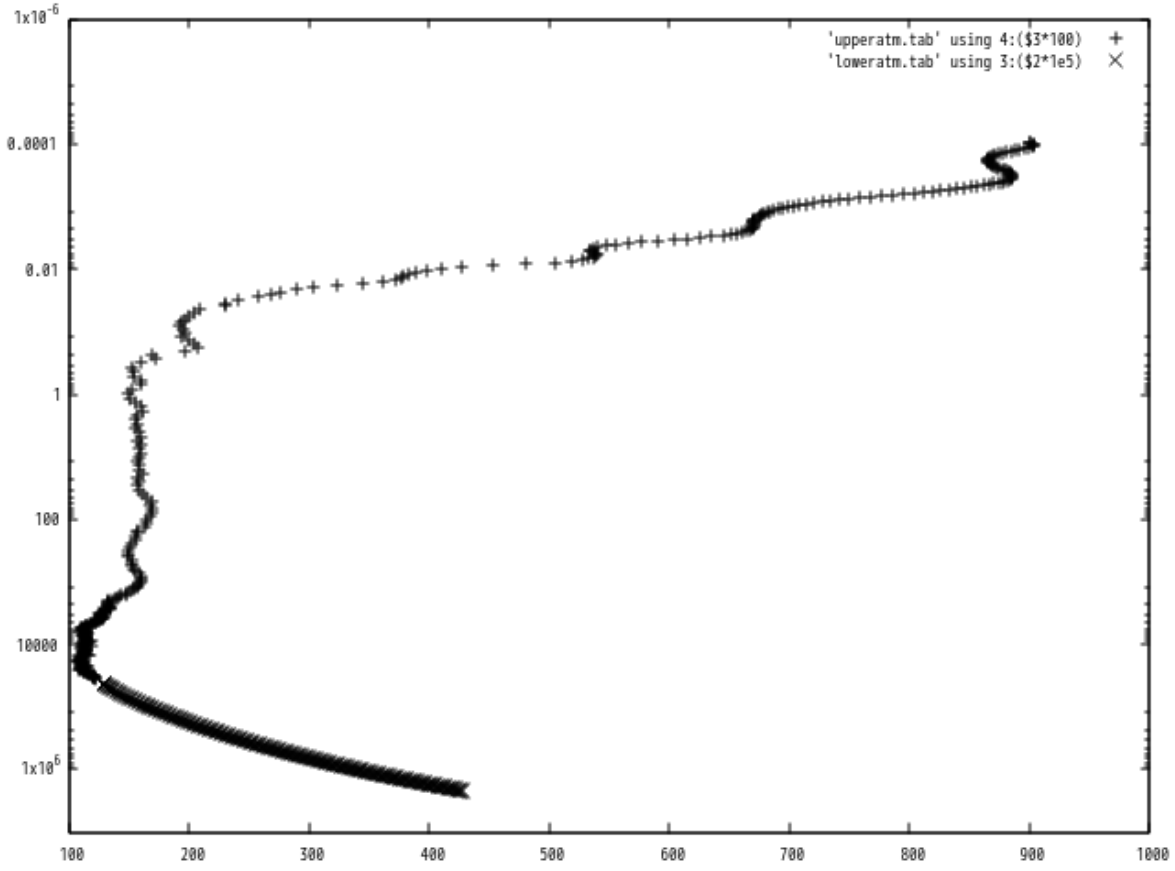
大気圧力範囲

- 木星では固体表面がないため適切な下部境界を設定する必要がある
  - Read et al. (2017) では太陽放射がほぼ完全に吸収される深さ(3~5 bar)に設定した



大気温度分布

- Galileo probe の観測に基づいて与える (Seiff et al., 1998 より取得)

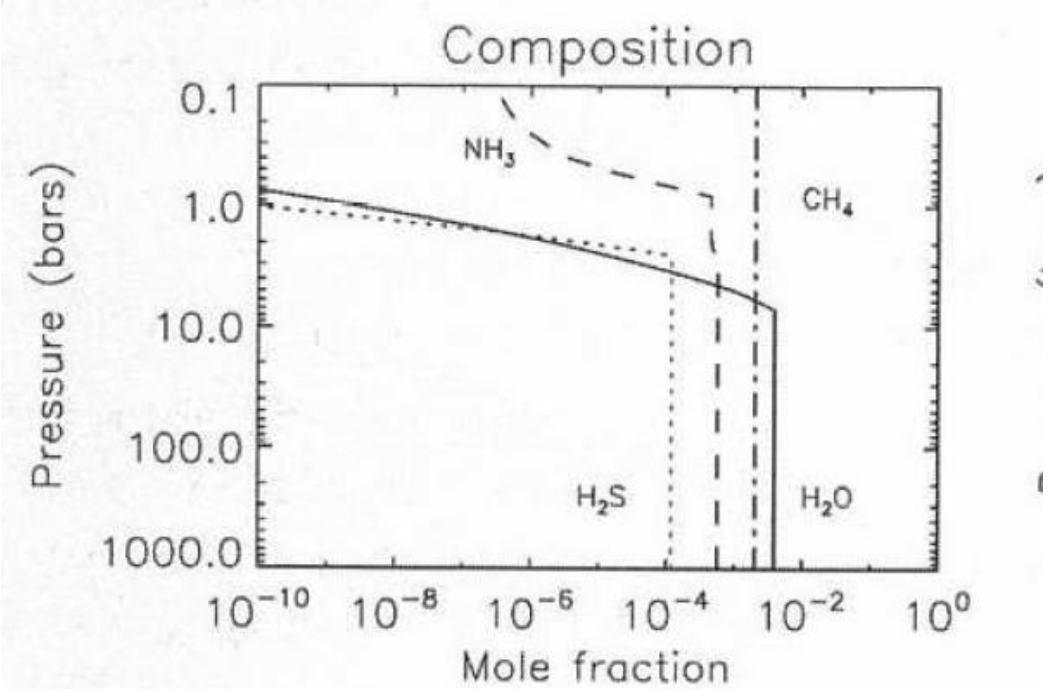


木星上層部の温度分布
(Galileo probe より)

大気組成分布

- 主成分に関しては一様
  - H_2　86%
  - He　14%
  - CH_4　0.2%
- ECCM (Equilibrium Cloud and Condensation Model) に基づいて決定する

- それらの成分に対応する吸収線パラメータは HITRAN から取得する



木星計算準備まとめ

- 地球大気の放射伝達計算に変更を加えることで計算する
  - 変更箇所
    - 大気圧力範囲
    - 大気温度分布
    - 大気組成分布

まとめ

- 地球大気で放射計算
  - 地球中緯度の夏季の条件を与えると衛星観測されたスペクトルと同様の吸収が見られるスペクトルが得られた
  - 大気構造変更実験では
    - スペクトルは温度構造に対応した変化が見られた
    - 吸収物質の組成分布が異なる高度領域の加熱冷却に寄与していることが確認された
- 先行研究 (Read et al., 2017) では
  - 木星のエネルギーフローが地球とは大きく異なる可能性がある
- 木星の放射伝達計算準備
  - 地球大気での放射伝達計算に変更を加え計算する

参考文献

- Read et al. (2017)
- Irwin et al. (2005)
- Toon et al.,1989: Rapid Calculation of Radiative Heating Rates and Photodissociation Rates in Inhomogeneous Multiple Scattering Atmospheres
- J,Houghton, 2002: The physics of atmospheres 3rd edition: Cambridge Univ.Press. 北海道大学Houghton ゼミ訳
- Ellingson, R. G., J. Ellis, and S. Fels 1991:The intercomparison of radiation codes used in climate models: Long wave results, J. Geophys. Res., 96,8929.
- Hansen, J. E., and L. D. Travis, (1974) Light scattering in planetary atmospheres, Space Sci. Rev., 16, 527-610.
- Pierrehumbert, R. T., (2010) Principles of Planetary Climate, Cambridge University Press
- Seiff et al. (1998)
- Encyclopedia of the Solar System 2nd Edition : chapter 4
- Giant Planets of Our Solar System Atmospheres, Composition, and Structure
- Petty. (2006)