

系外惑星の放射モデル開発と ハビタブルゾーンの内側限界



大西将徳¹, はしもとじょーじ²,
倉本圭³, 高橋芳幸¹,
高橋康人³, 石渡正樹³, 林祥介¹

1. 神戸大学, 2. 岡山大学, 3. 北海道大学

1. はじめに

1.1 ハビタブルゾーンの内側限界

ハビタブルゾーンの内側限界:

1. Runaway greenhouse limit:

正味入射太陽放射 = 射出限界

Kasting+1993: 0.84 AU

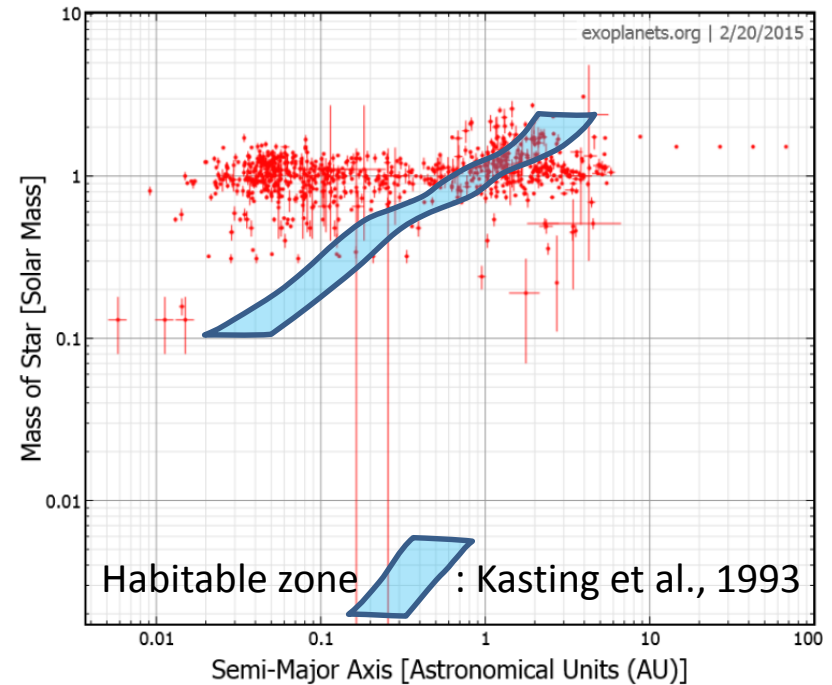
Kopparapu+2013: 0.97 AU

2. Water loss limit:

海を46億年程度の時間保持できる条件

Kasting+1993: 0.95AU

Kopparapu+2013: 0.99AU



1. はじめに

1.1 ハビタブルゾーンの内側限界

1. Runaway green house limit

正味入射太陽放射 = 射出限界

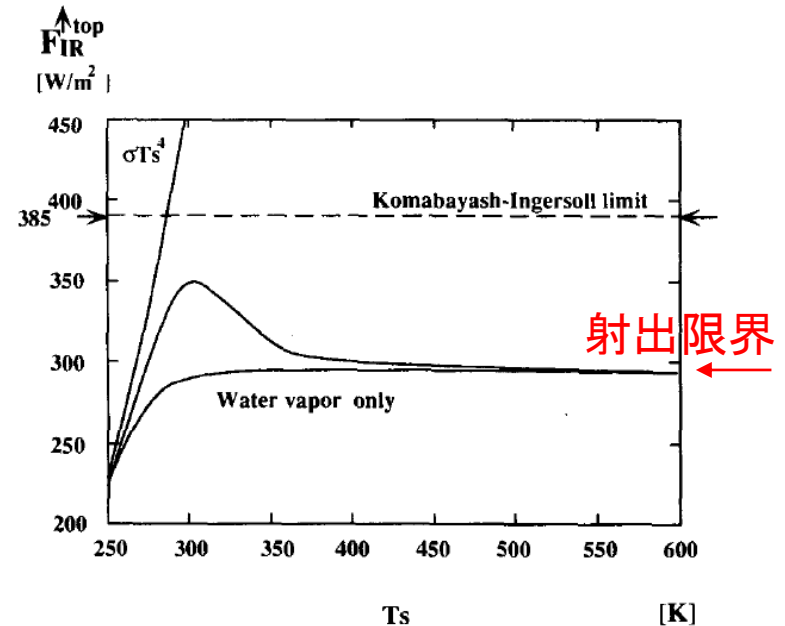
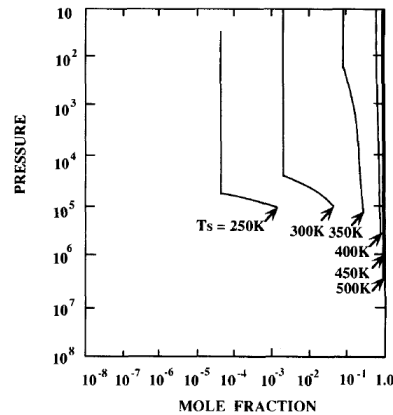
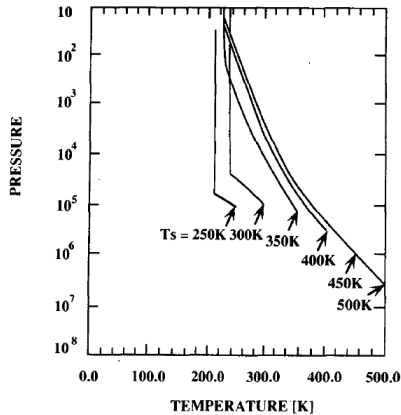


アルベド



水の物性(蒸気圧曲線, 水蒸気の吸収スペクトル)

Nakajima et al., 1992

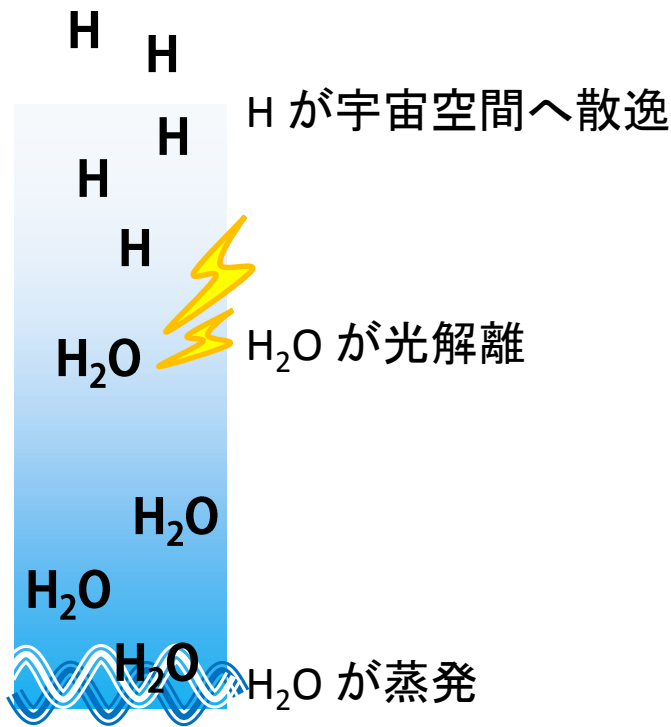


水蒸気の物性(蒸気圧曲線, 水蒸気の吸収スペクトル, 散乱特性)が Runaway green house limit を決めている

1. はじめに

1.1 ハビタブルゾーンの内側限界

2. Water loss limit



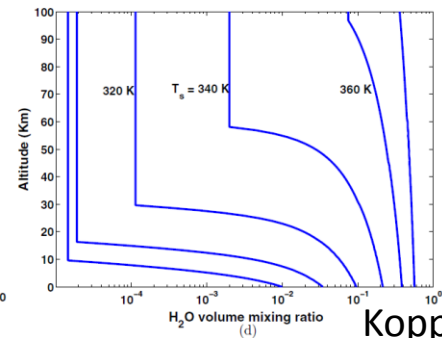
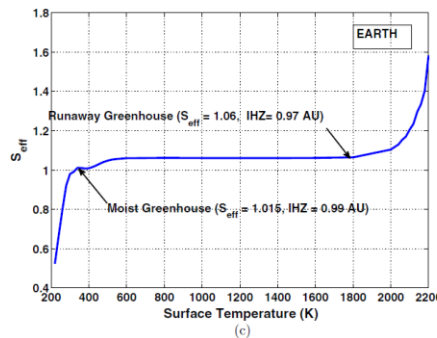
・上空の H の量と拡散の強さが H の宇宙空間への散逸量を決める

・Kasting+1993 (Hunten 1973) では等温大気上端から散逸する H 量を以下のように見積もっている。

$$\Phi_{\text{esc}}(\text{H}) \approx 2 \times 10^{13} f_t(\text{H}) \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$$

($\Phi_{\text{esc}}(\text{H})$: H の散逸量, $f_t(\text{H})$: H の体積混合比)

・H₂O 1分子に対し, H 2分子が散逸すると考え, 46億年で, 現在の海洋質量が蒸発するとすると,
 $f_t(\text{H}_2\text{O}) \sim 3\text{e-}3$. (Kasting+1993, Kopparapu+2013)



Kopparapu+2013

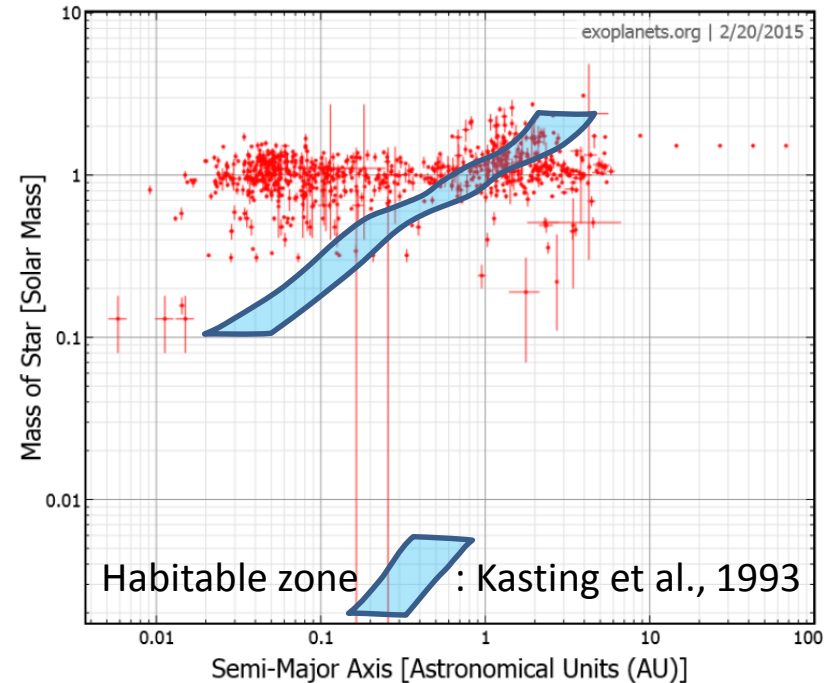
- ・成層圏のH₂O 混合比が 3e-3 になるのは地表温度が 340K のとき
- ・地表面温度が 340K のときの惑星放射と入射太陽光がつりあう位置 = water loss limit

1. はじめに

1.1 ハビタブルゾーンの内側限界

ハビタブルゾーンの内側限界を
決めているものは何か？

1. Runaway greenhouse limit: H_2O の物性
2. Water loss limit: 上空の H_2O の存在量
(温度プロファイルに強く依存)



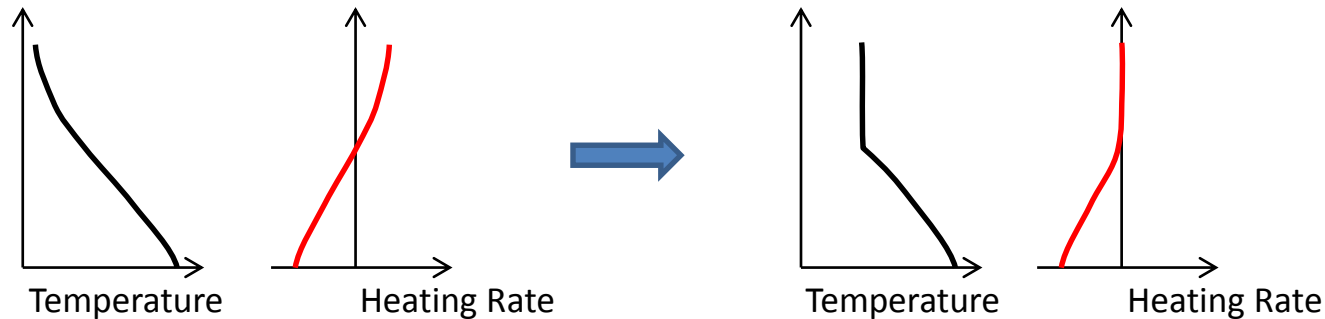
*The model stratosphere was taken to be isothermal at 200K; this assumption has negligible effect on the runaway greenhouse limit but **may have a significant effect on the “water loss” limit.** (Kasting+2013)*

1. はじめに

1.2 温度プロファイルはどのように決まるのか? (決めるのか)

Nakajima et al., 1992: 灰色大気で1次元放射対流平衡

上空まで対流していると仮定した温度プロファイルで加熱率を計算
加熱率にしたがって上空の温度を上昇させる



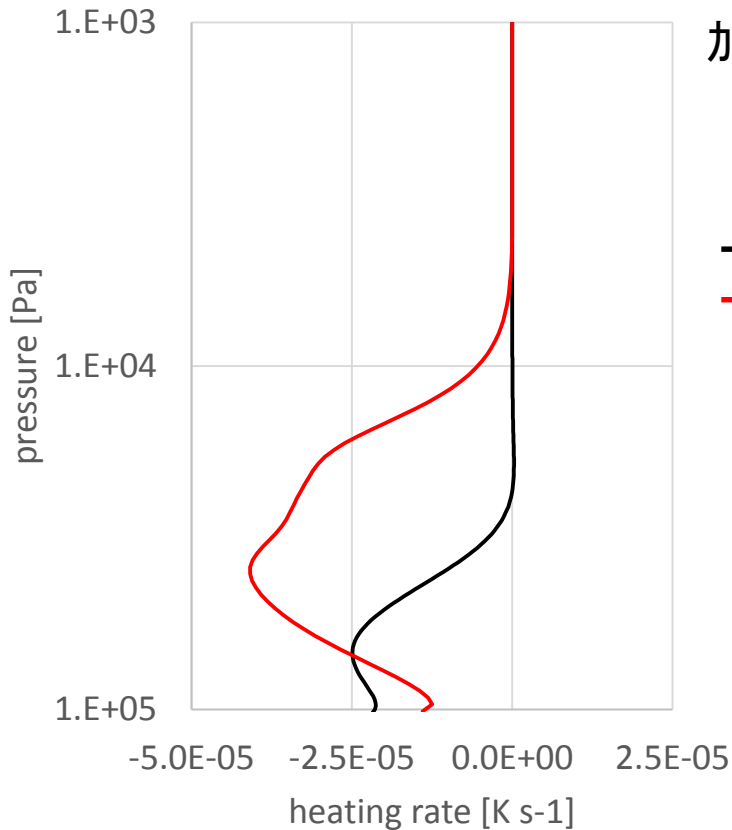
(1次元灰色大気では)

はじめに加熱率が負から正になった付近に圏界面が計算される

1. はじめに

1.2 温度プロファイルはどのように決まるのか? (決めるのか)

灰色 vs 非灰色



加熱率の鉛直分布:

地表面温度 300K, H₂O + 非吸収大気(10⁵[Pa])

大気は上空まで対流しており、水蒸気は飽和していると仮定

— 灰色大気(吸収係数= 0.01[m kg⁻¹])の加熱率分布

— Line-by-line 計算による加熱率分布
(HITRAN2008, 0-2500cm⁻¹, 散乱なし)

非灰色大気では、上空までなかなか加熱にならない。



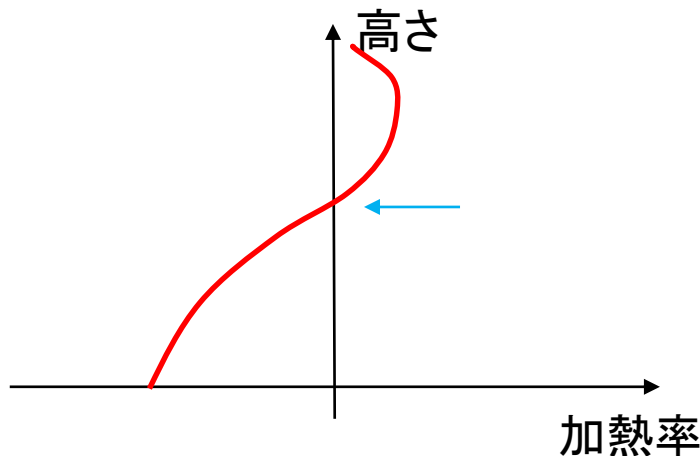
圏界面は先行研究よりも上空にあり、
Water loss limit はもっと内側にあるのかもしれない。
→ 1-D line-by-line 計算で圏界面を見積もる。

2. 目的

- ・水蒸気大気の大気対流圏界面の位置を1次元 line-by-line 放射モデルを用いて推定し、water loss limit について考察する。

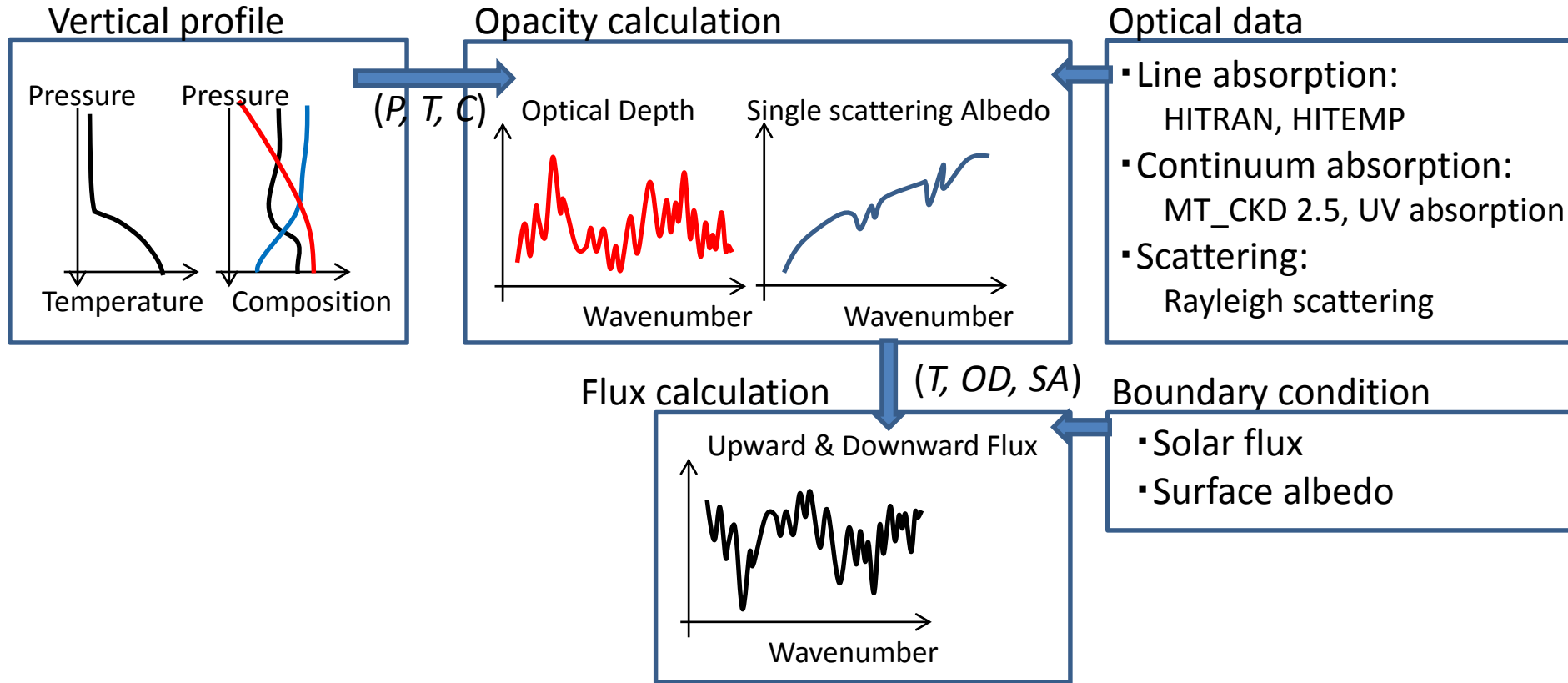
圏界面の推定の仕方:

- ・上空まで対流している大気の大気放射計算を行い、加熱率が冷却から加熱に転じる点付近に圏界面があると考え、加熱率が冷却から加熱に転じる点を見積もる。



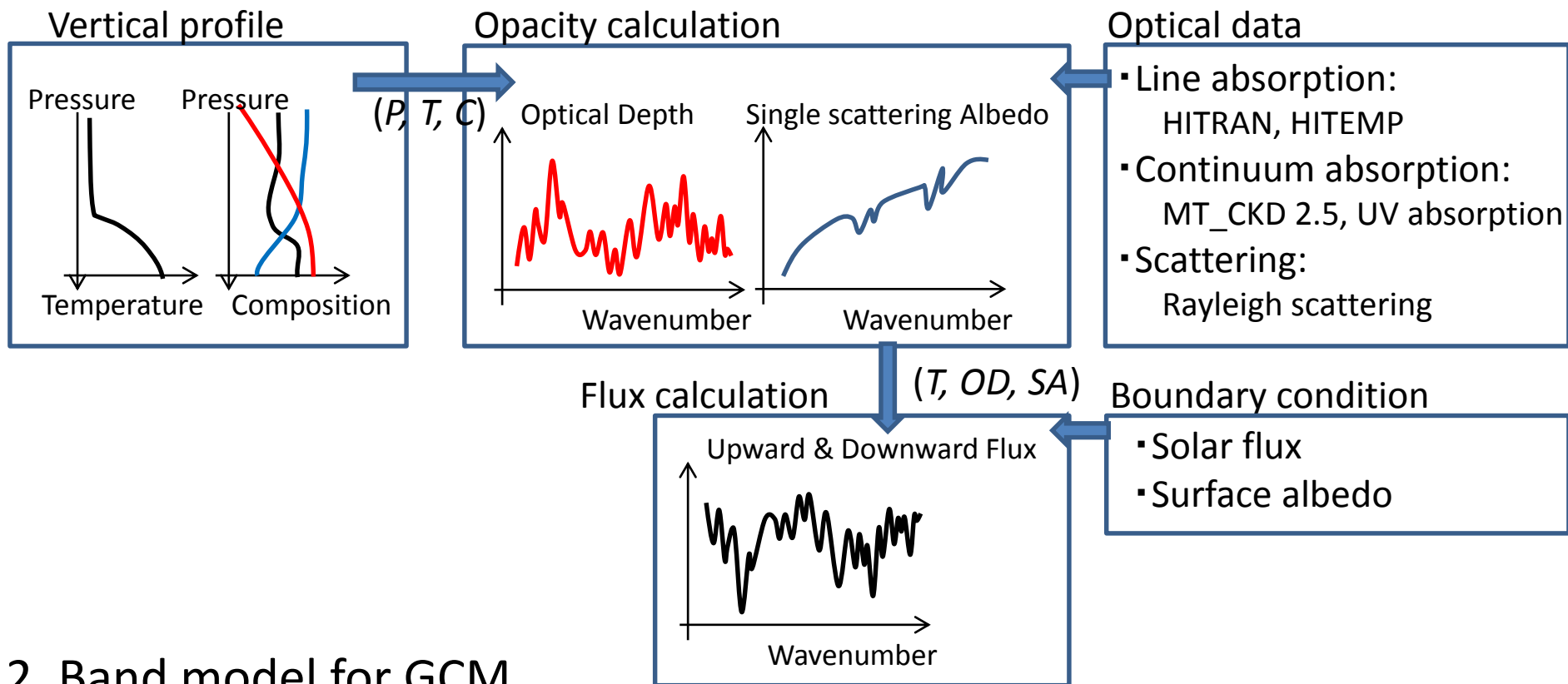
3. モデル概要

1. Line-by-line model

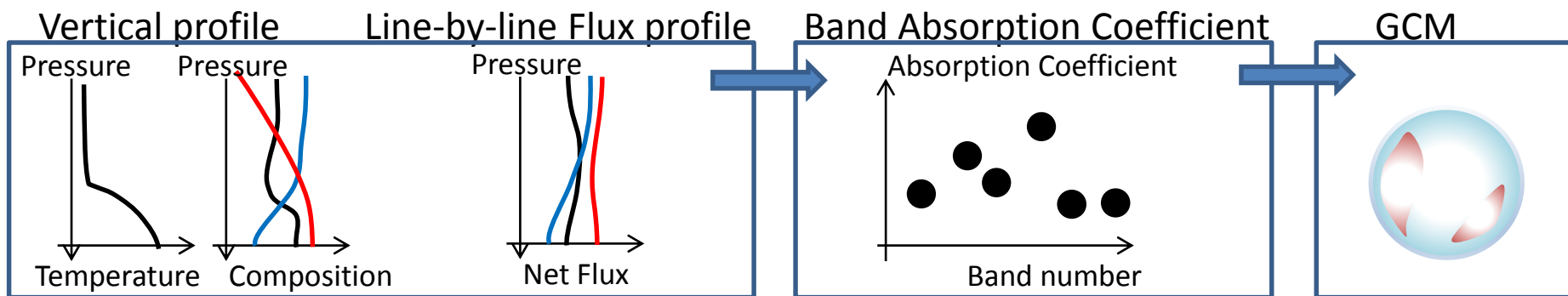


3. モデル概要

1. Line-by-line model

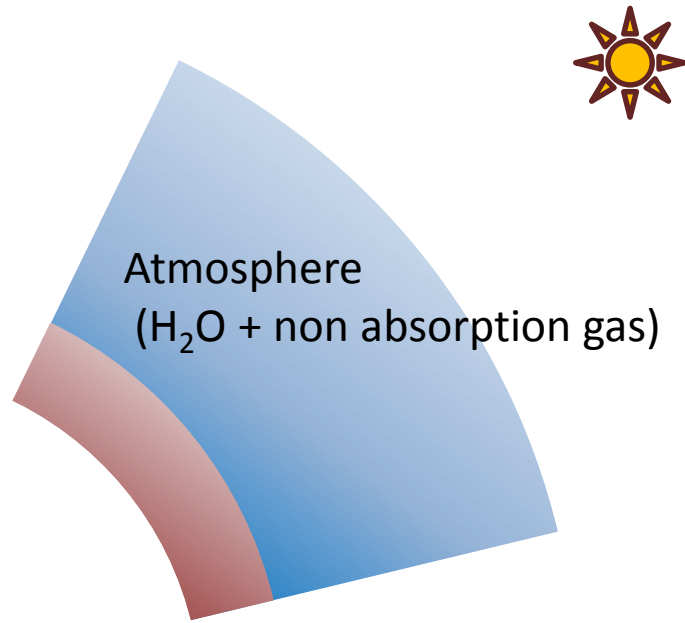


2. Band model for GCM

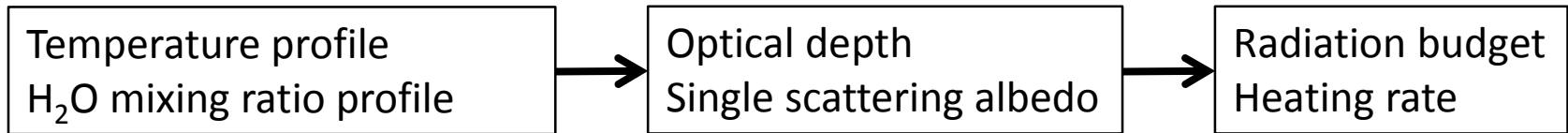
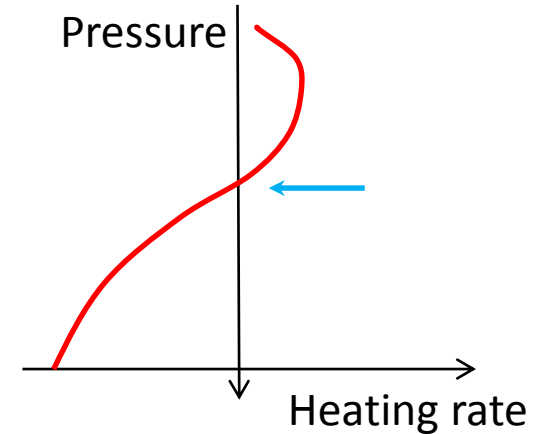


4. 計算設定

計算設定



Estimate of tropopause



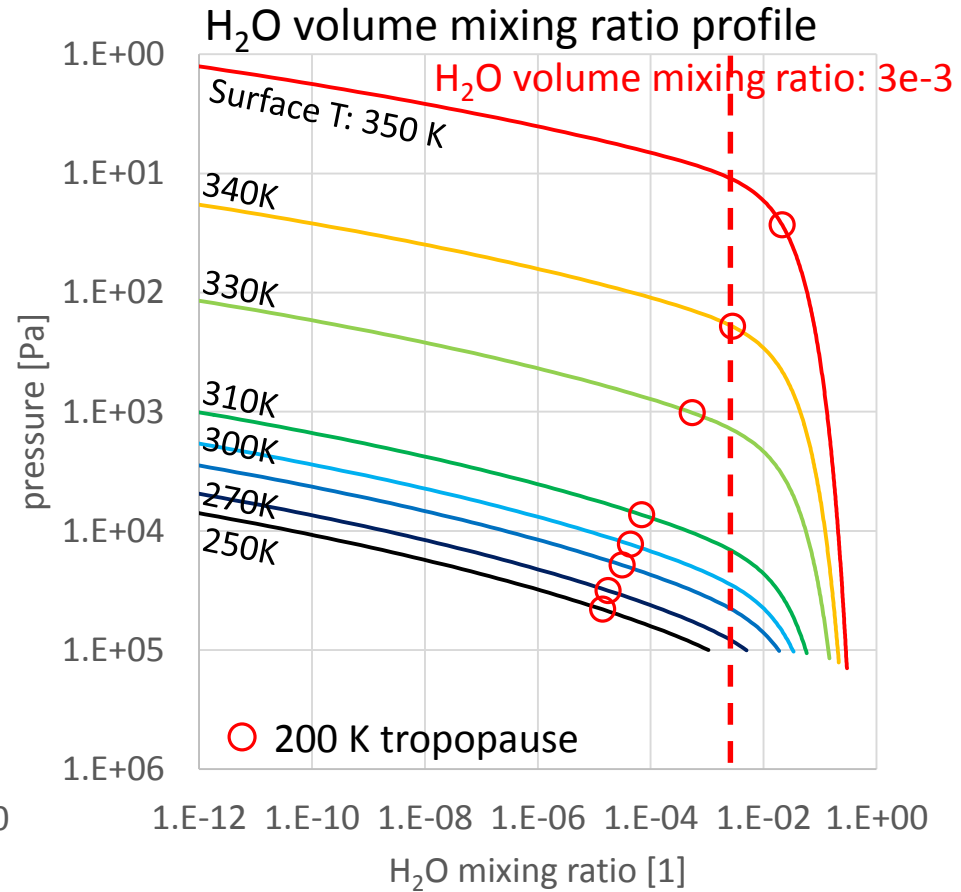
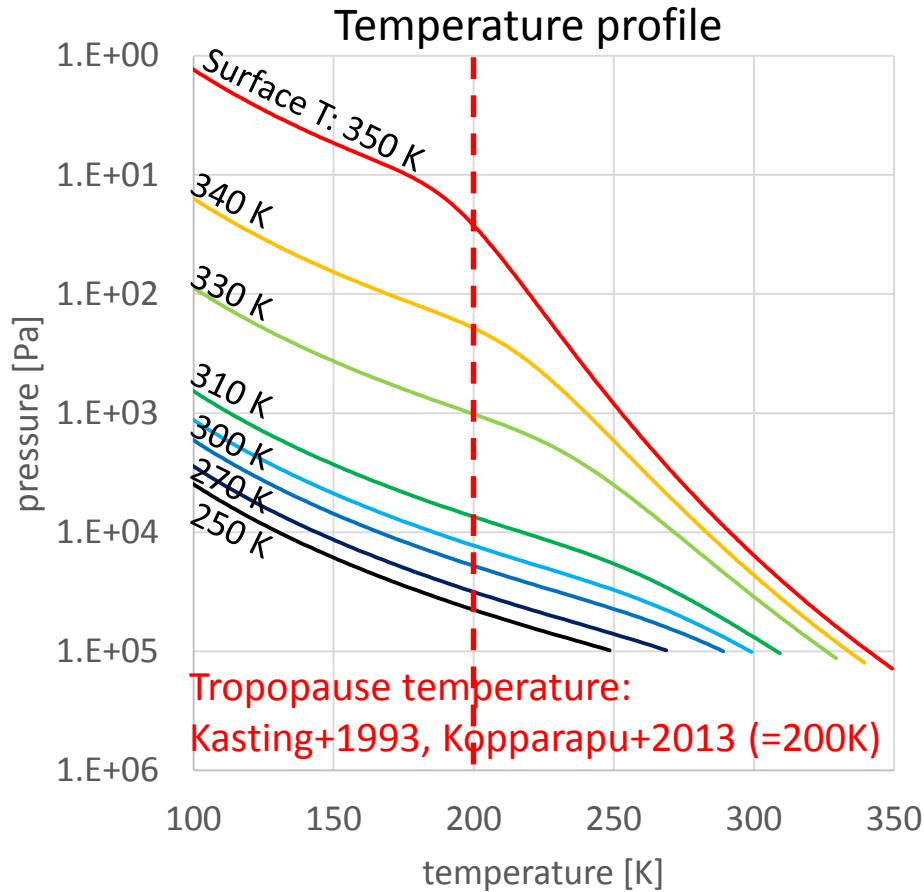
- H_2O + non-absorption gas (10^5 [Pa])
- Convective atmosphere up to TOA
- Moist pseudoadiabatic lapse rate
- Surface temperature:
250, 270, 290, 300, 310, 330, 340, 350 [K]

- Line absorption:
HITRAN 2008
- Continuum absorption:
MT_CKD 2.5, Chan et al., 1993
- Rayleigh scattering cross section:
Goldblatt et al., 2013

- Solar irradiance:
5800[K] black body
- Surface albedo:
0 – 3000 cm^{-1} : 0.0
> 3000 cm^{-1} : 0.2
- Wavenumber range:
0 – 100000 cm^{-1}

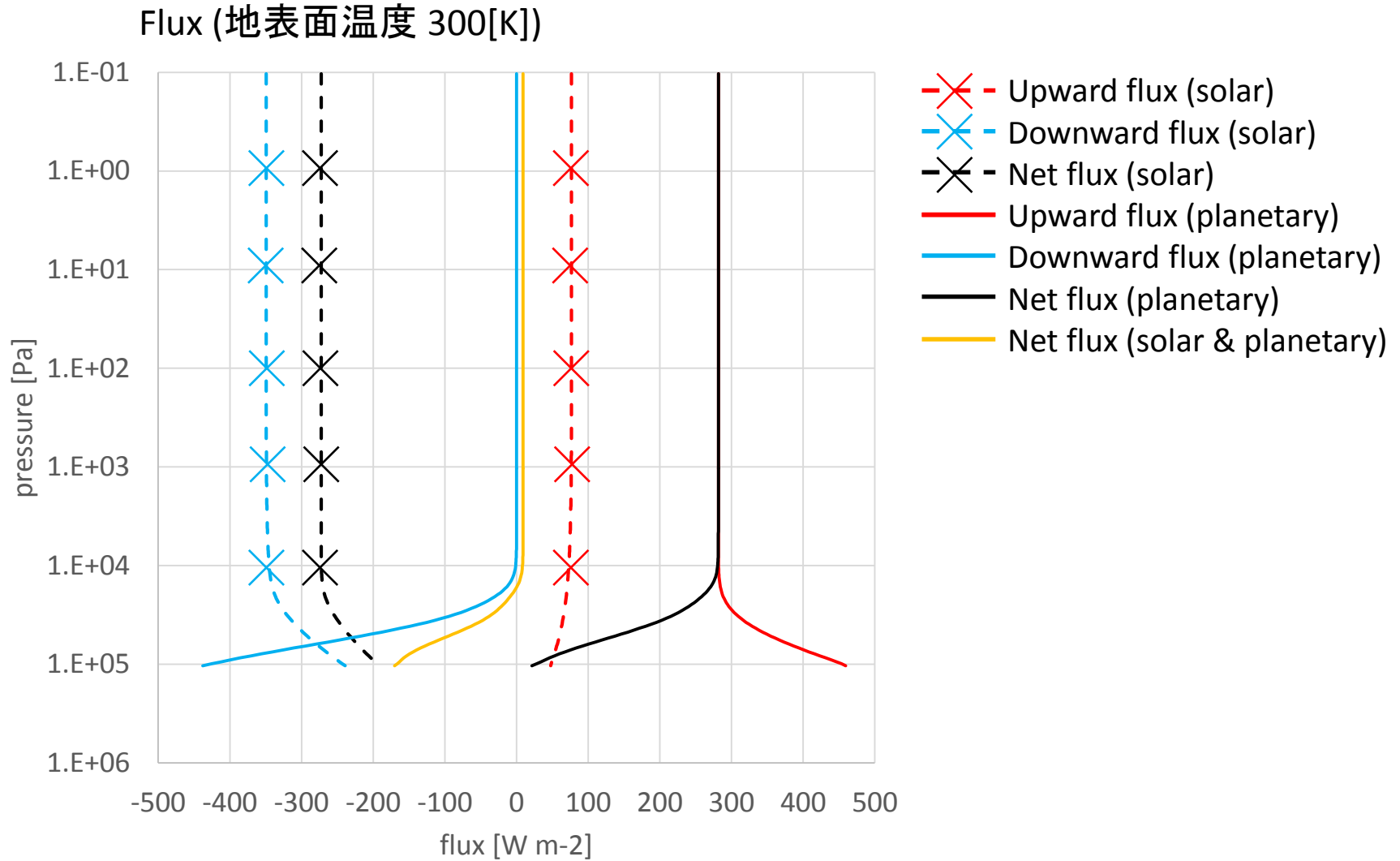
4. 計算設定

鉛直プロファイル



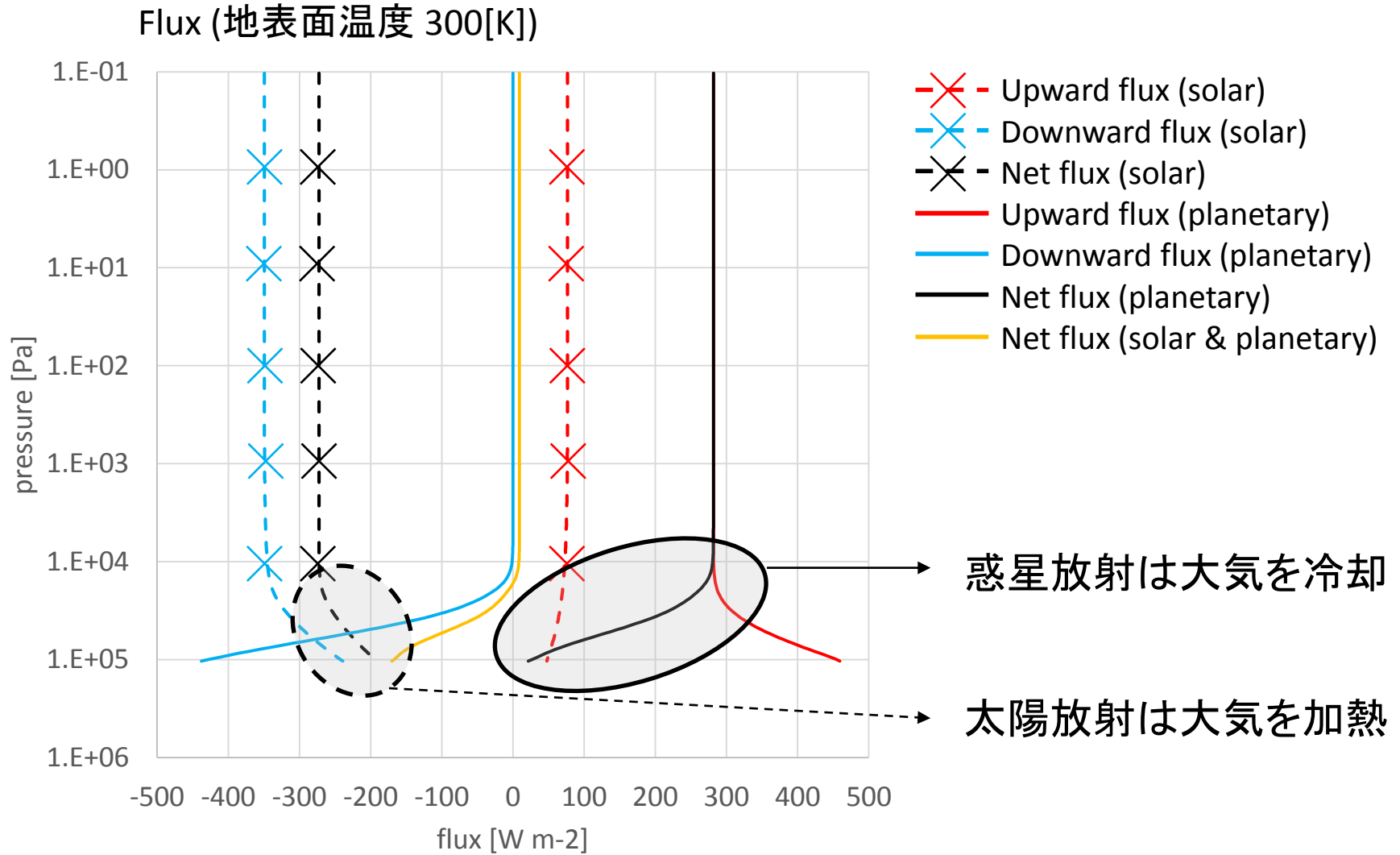
5. 計算結果

Flux の鉛直プロファイル



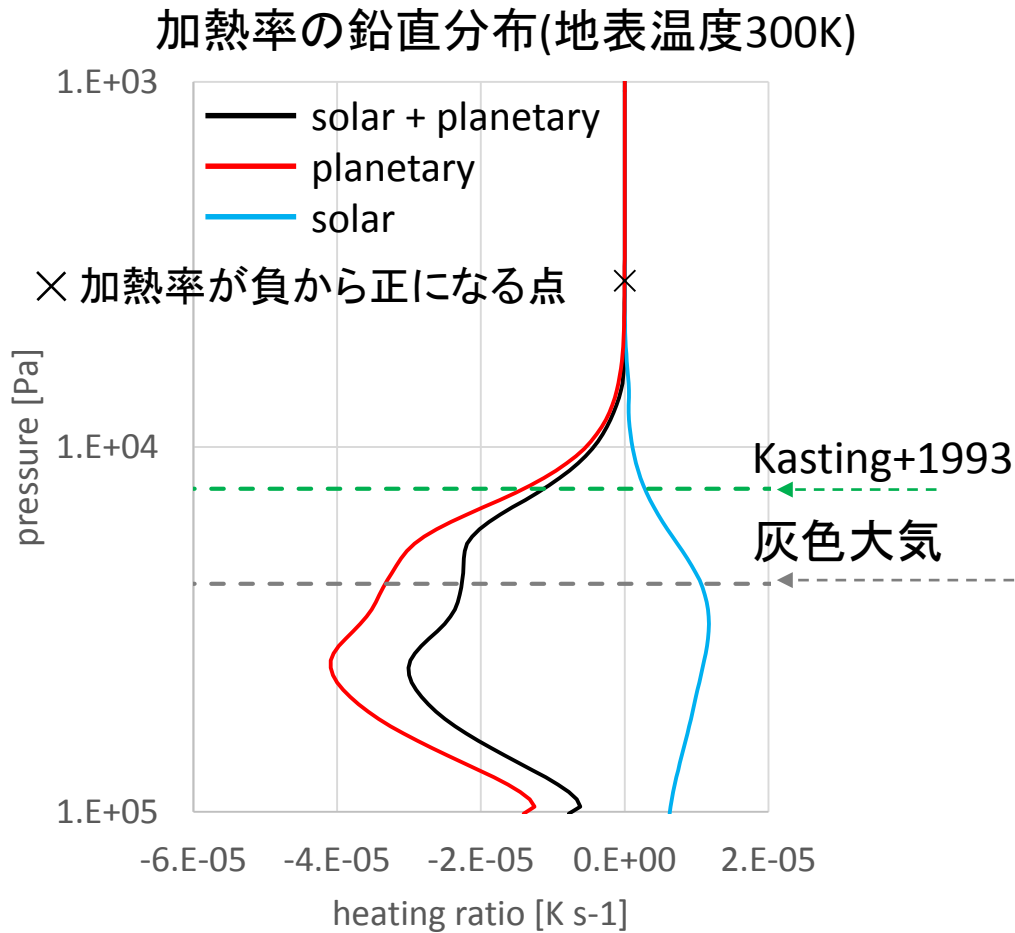
5. 計算結果

Flux の鉛直プロファイル

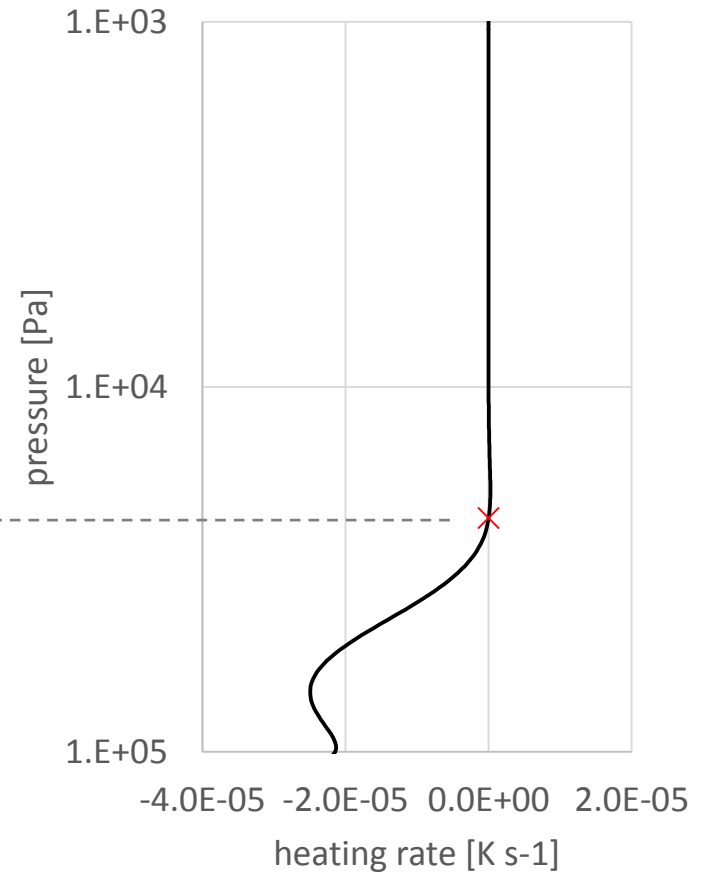


5. 計算結果

加熱率の鉛直分布と圏界面の推定



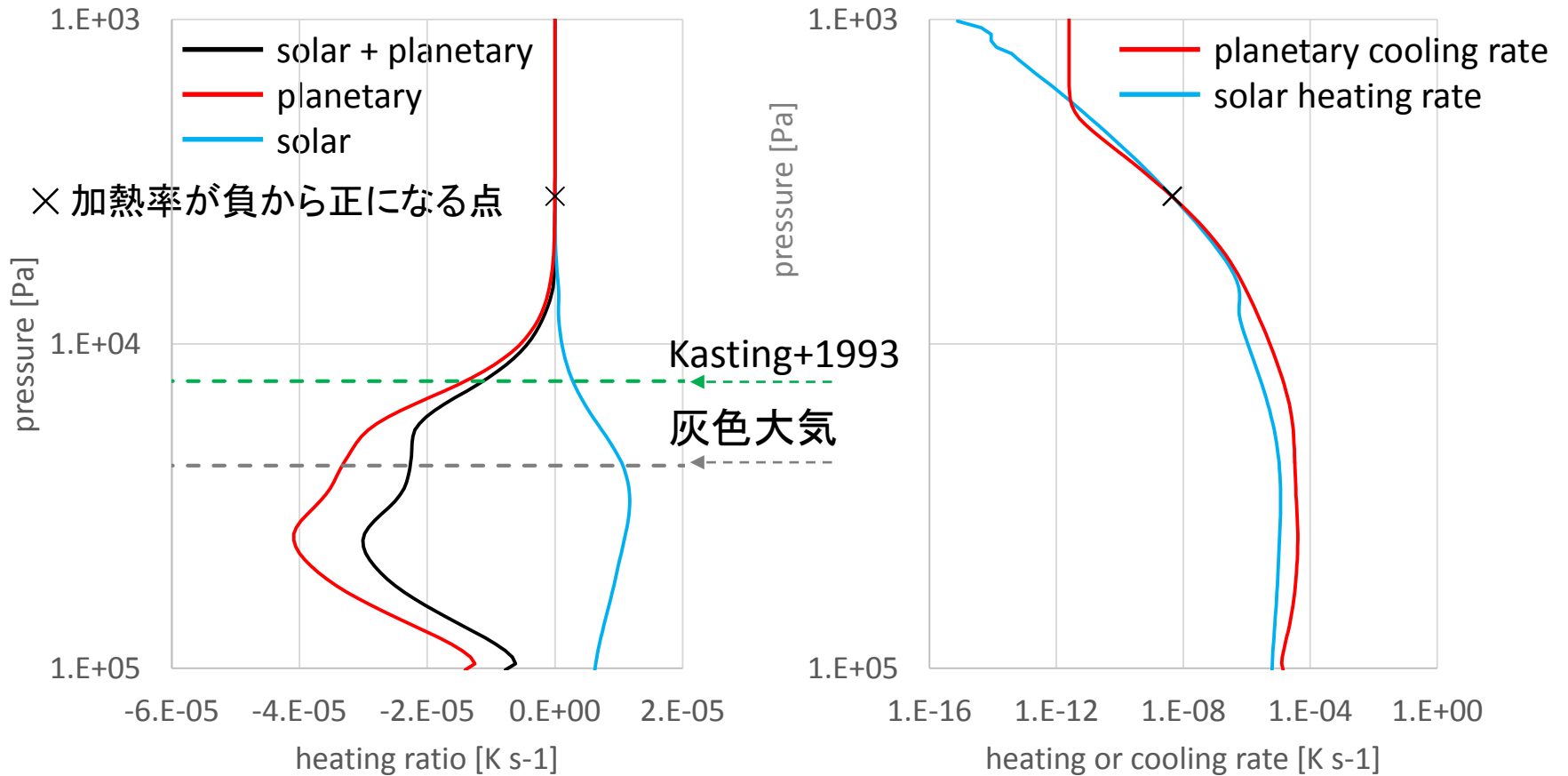
灰色大気 (吸収係数 = 0.01 [m² kg⁻¹])
加熱率の鉛直分布(地表温度300K)



5. 計算結果

加熱率の鉛直分布と圏界面の推定

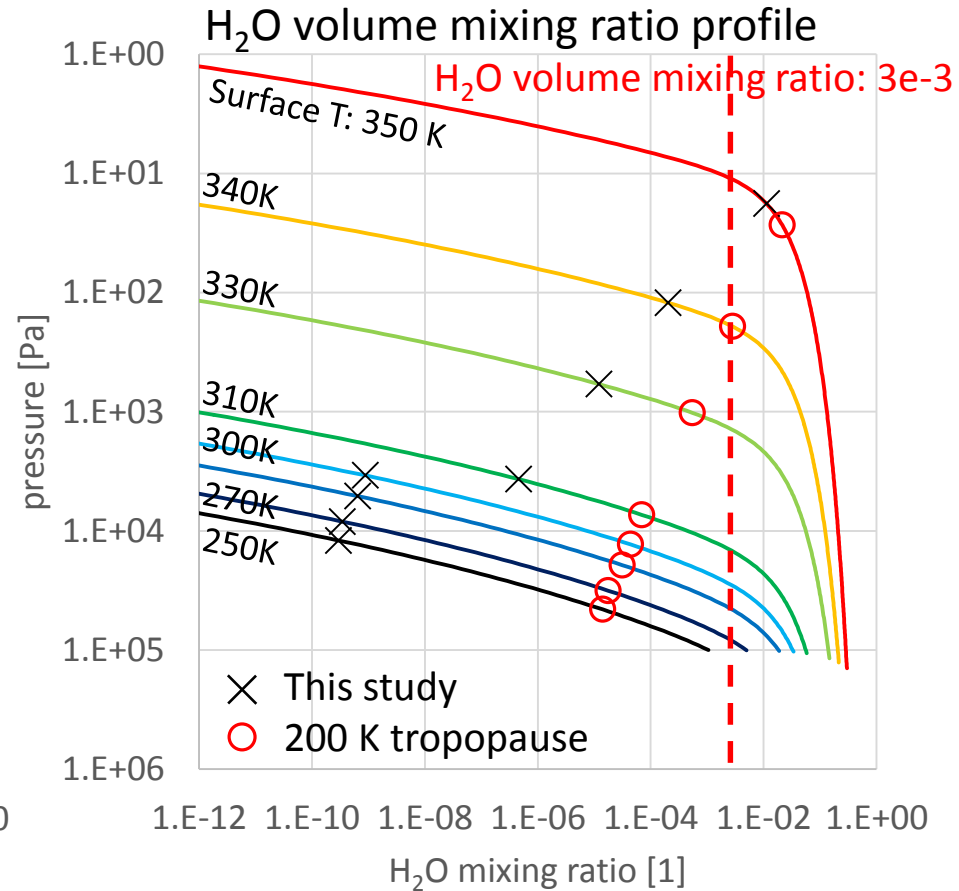
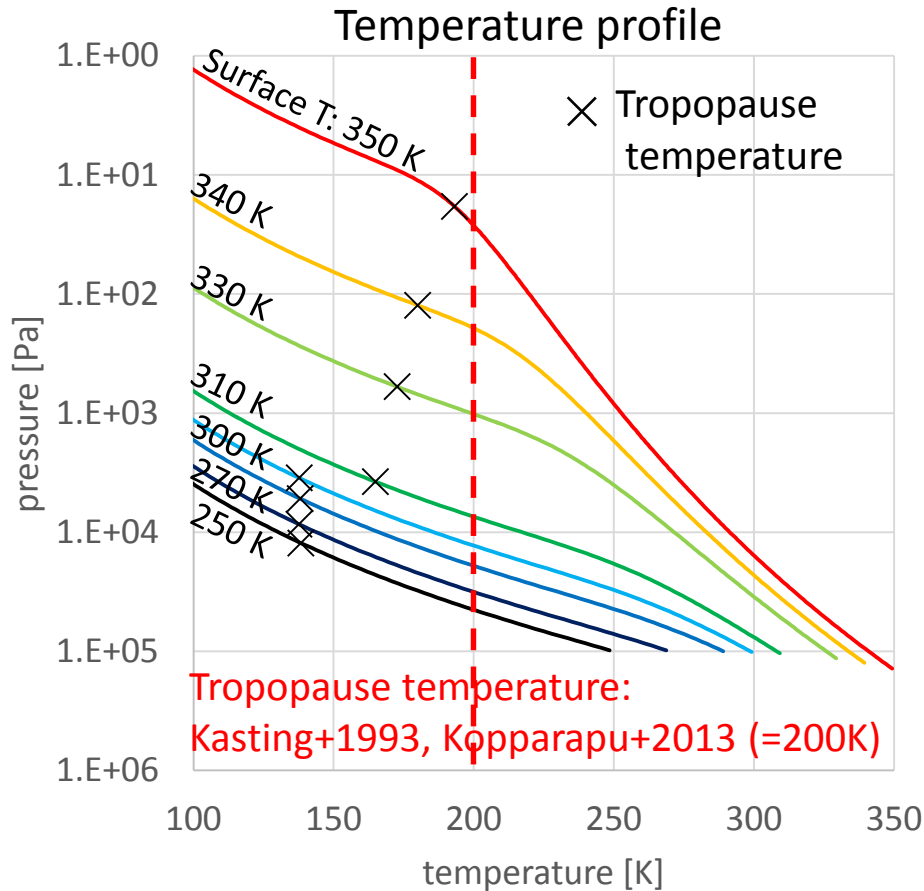
加熱率の鉛直分布(地表温度300K)



・灰色, Kasting+1993 より圏界面は上空

5. 計算結果

加熱率の鉛直分布と圏界面の推定



推定された圏界面温度は 200 K よりも低い。

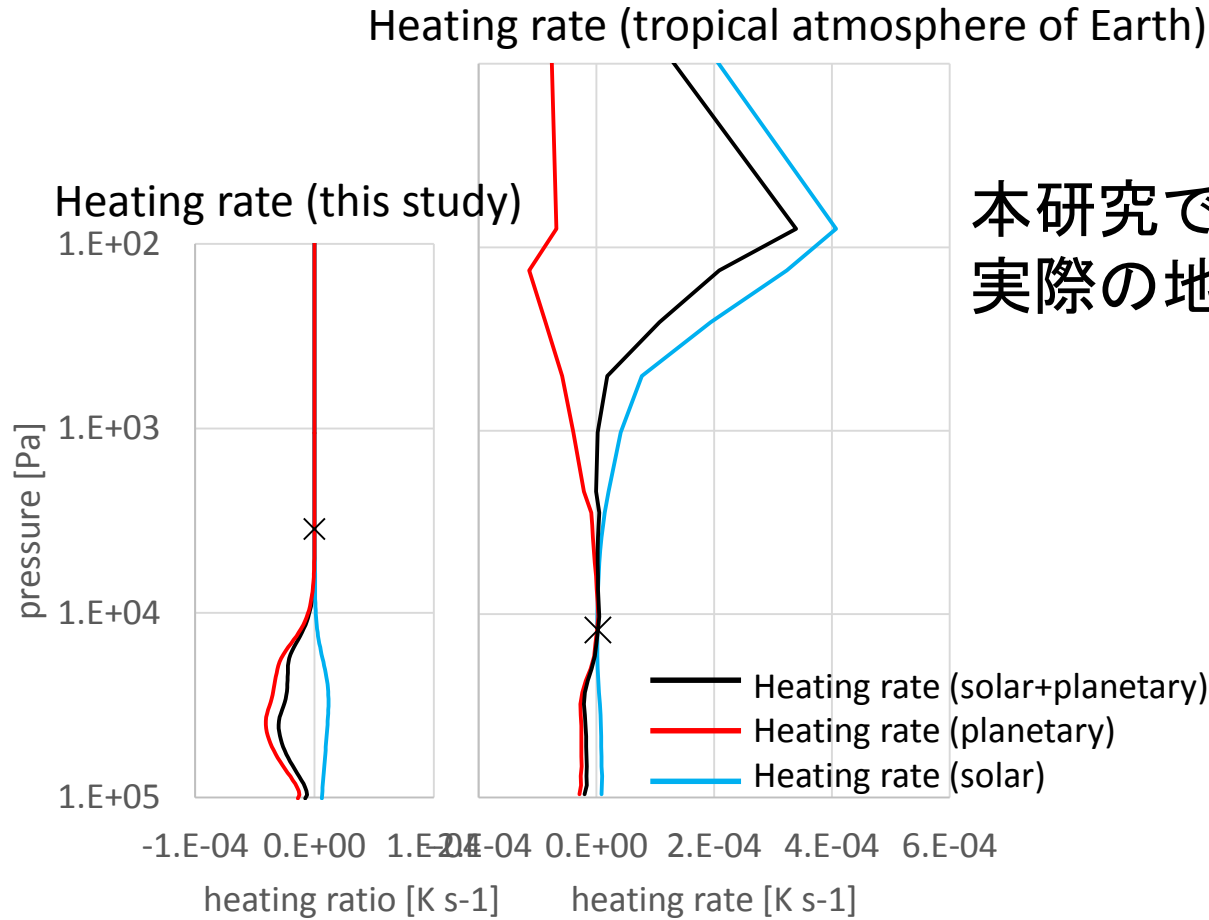
上空の H₂O の体積混合比が 3e-3 になるのは、地表温度が 340 K と 350 K の間。



Water loss limit は先行研究で推定された位置と大きく変わらない。

6. 考察

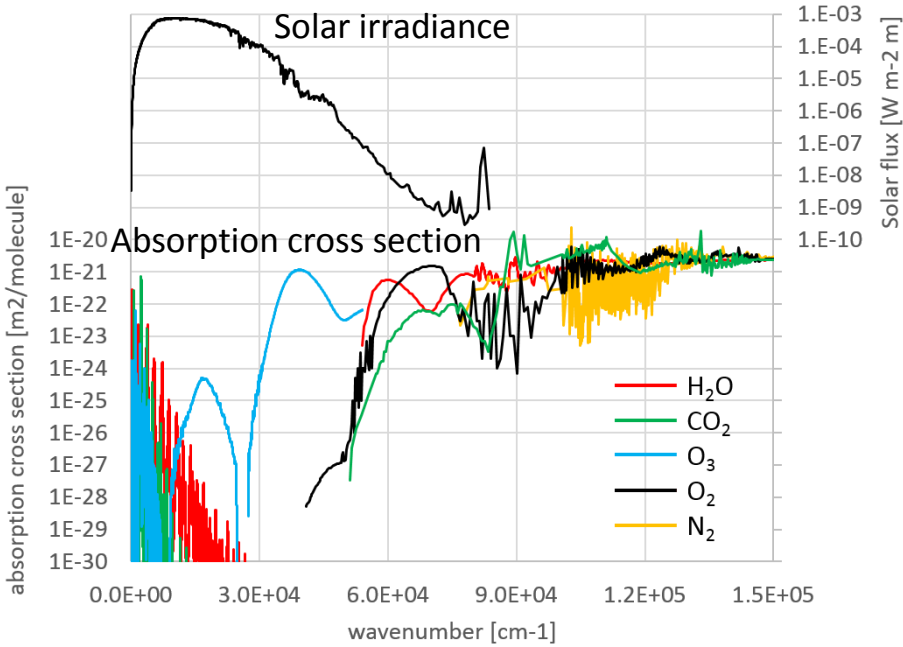
地球大気との比較



本研究で推定された圏界面は
実際の地球よりも高高度に存在

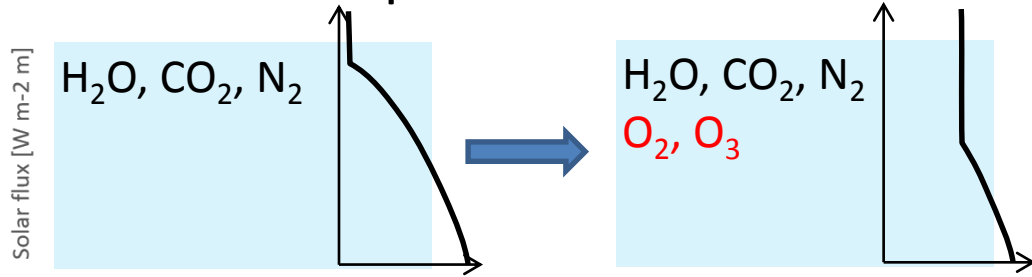
6. 考察

大気進化と圏界面レベルについての考察

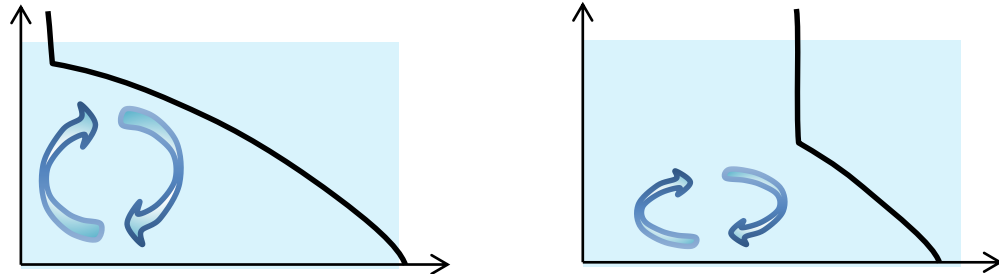


Solar radiation: NREL, 2000 ASTM Standard Extraterrestrial Spectrum Reference E-490-00
 H₂O: HITRAN2008, MT_CKD2.5, Chan+1993
 CO₂: HITRAN2008, MT_CKD2.5, Cairns&Samson 1966, Cook&Metzger 1964, Edward et al., 1953, Thompson et al., 1963
 O₃: HITRAN2008, MT_CKD2.5
 O₂: Hudson 1971, Cook&Metzger 1964, Watanabe&Marmo 1956, Nagata&Todomatsu 1973
 N₂: Hudson 1971, Cook&Metzger 1964, Watanabe&Marmo 1956

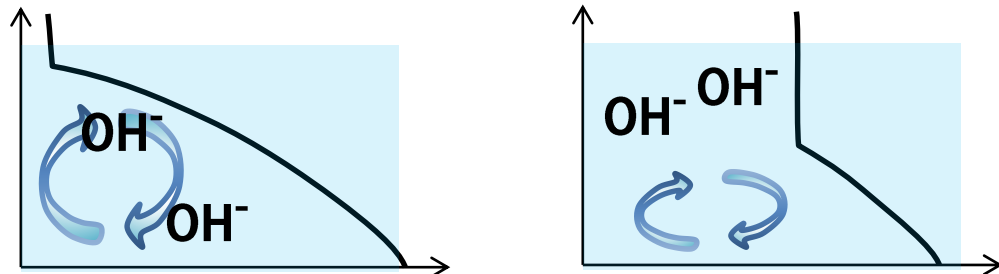
Atmospheric evolution



1. General circulation is modified?



2. Chemical radical is well mixed?



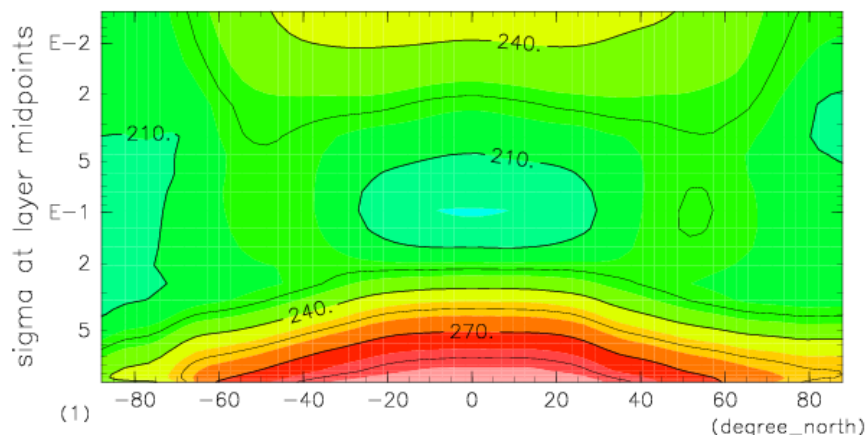
6. 考察

GCM による“オゾンなし地球” の計算

大気大循環モデル DCPAM を使った “オゾンあり地球”, “オゾンなし地球” の計算結果
(石渡さんによる計算)

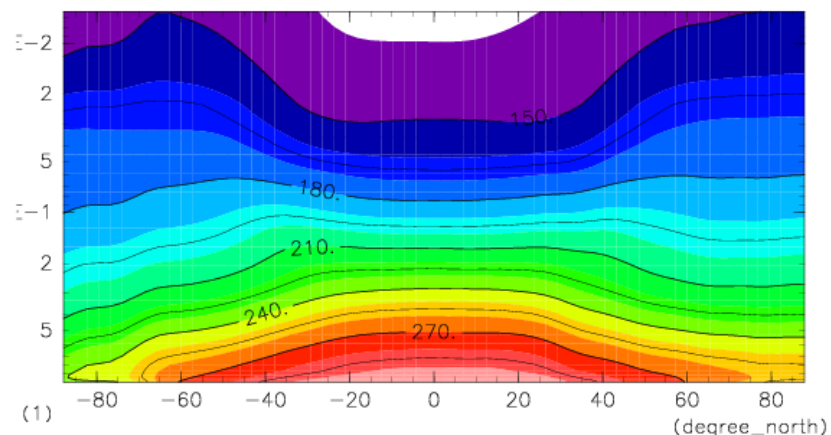
オゾンあり地球の気温の鉛直分布(東西平均)

temperature



オゾンなし地球の気温の鉛直分布(東西平均)

temperature



7. まとめ

- H_2O + 非吸収大気の圏界面の推定を行った.
- 圏界面の推定は, 上空まで対流している大気の加熱率が負から正になる点を解析することにより行った.
- 圏界面温度は, 200K より低く推定された.
- Water loss limit は先行研究と大きく変わらないことが示唆された.
- 地球に似た条件(地表面温度300K, 非吸収大気 10^5Pa)では, 実際の対流圏界面よりも高高度に圏界面が推定された.