

系外惑星の放射モデル開発と 水蒸気大気への応用

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 系外惑星探査

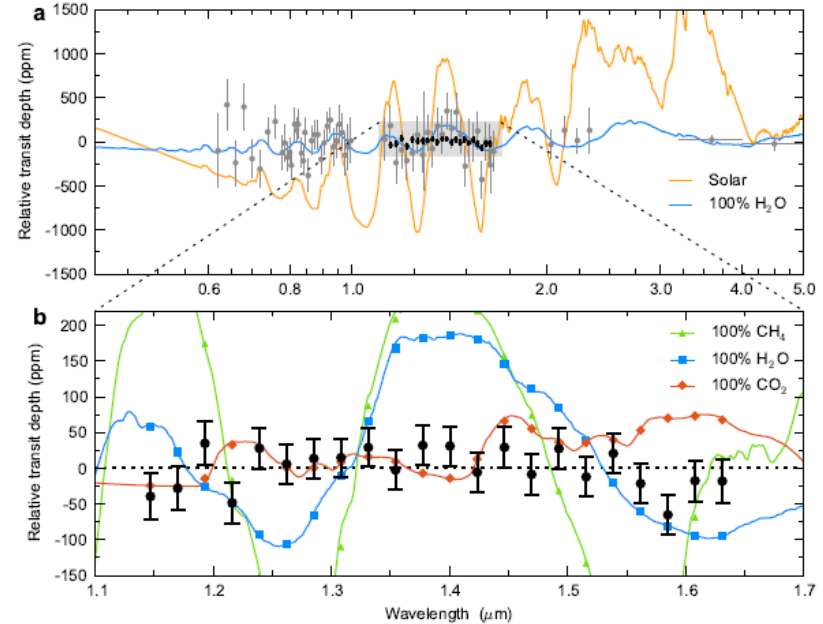
発見フェーズ → 惑星環境推定フェーズ

惑星大気の放射スペクトル

地上の私たち



GJ1214b



Kreidberg et al., 2014

- ・エネルギー収支を計算: 大気進化の議論
- ・スペクトルを計算: 物質の推定

1. はじめに

1.2 放射スペクトル計算

- ・スペクトルを計算: 物質の推定

高分解能の計算が必要

- ・エネルギー収支を計算: 大気進化の議論

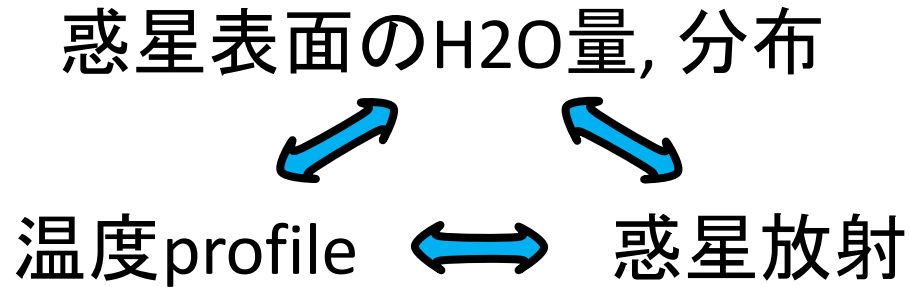
広い波数領域を速く計算することが必要

flexibleな放射モデルの必要性

1. はじめに

1.3 H₂Oの重要性

- ・大気進化の議論



- ・ハビタビリティの議論

(地球人の知っている?)生命にとってH₂Oは不可欠

H₂O大気モデリングの重要性

2. 目的

- ・系外惑星観測への提案、また観測から得られた放射スペクトルをもとに系外惑星環境の推定を行う、地球型系外惑星の放射スペクトルを計算するプログラムを開発する
- ・H₂O大気の放射特性を計算する

3. モデル概要

Step1 惑星大気放射スペクトルの計算

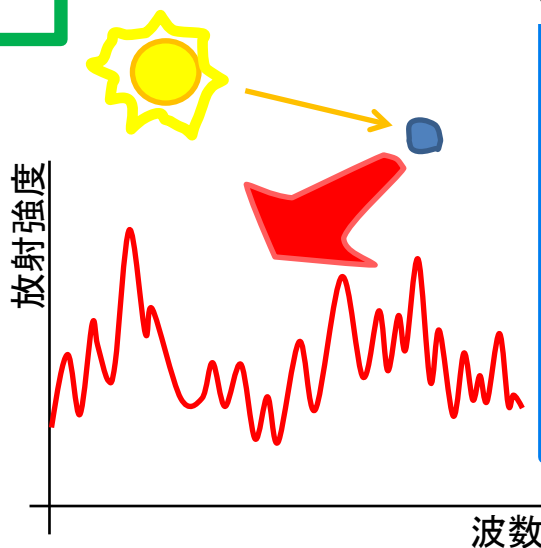
- ・任意の温度、任意の光学特性
- ・input(大気温度; 光学特性; 中心星からの入射光)

ハビタブルゾーンの議論

- ・1次元放射対流モデル

観測との絡み

- 1) 惑星スペクトル観測前
 - ・スペクトルの予測
 - ・観測の提案
- 2) 惑星スペクトルの観測後
 - ・惑星環境の推定



光学的性質の計算

- ・ガス、粒(雲、エアロゾル)、地面
- ・吸収、散乱

吸収係数の計算

- ・input(大気組成、圧力、温度)
- ・Data: HITRAN, HITEMP

Step2

惑星大気GCMへの放射過程の組み込み

- ・k-分布法

GCMによる惑星大気大循環

- ・大気の3次元計算

3. モデル概要

1. 光学特性の計算

吸収断面積の計算

data source:

線吸収: HITEMP2010 (Rothman et al., 2010), HITRAN2008 (Rothman et al., 2008)

連続吸収: MT_CKD (Mlawer et al., 2012, Clough et al., 1989)

散乱断面積の計算

Rayleigh 散乱



2. 放射伝達の計算

2方向近似 (Toon et al., 1989)

**計算がとっても重い！
連続吸収をどう扱うか**

3. モデル概要

吸収断面積の計算 1: 線吸収について

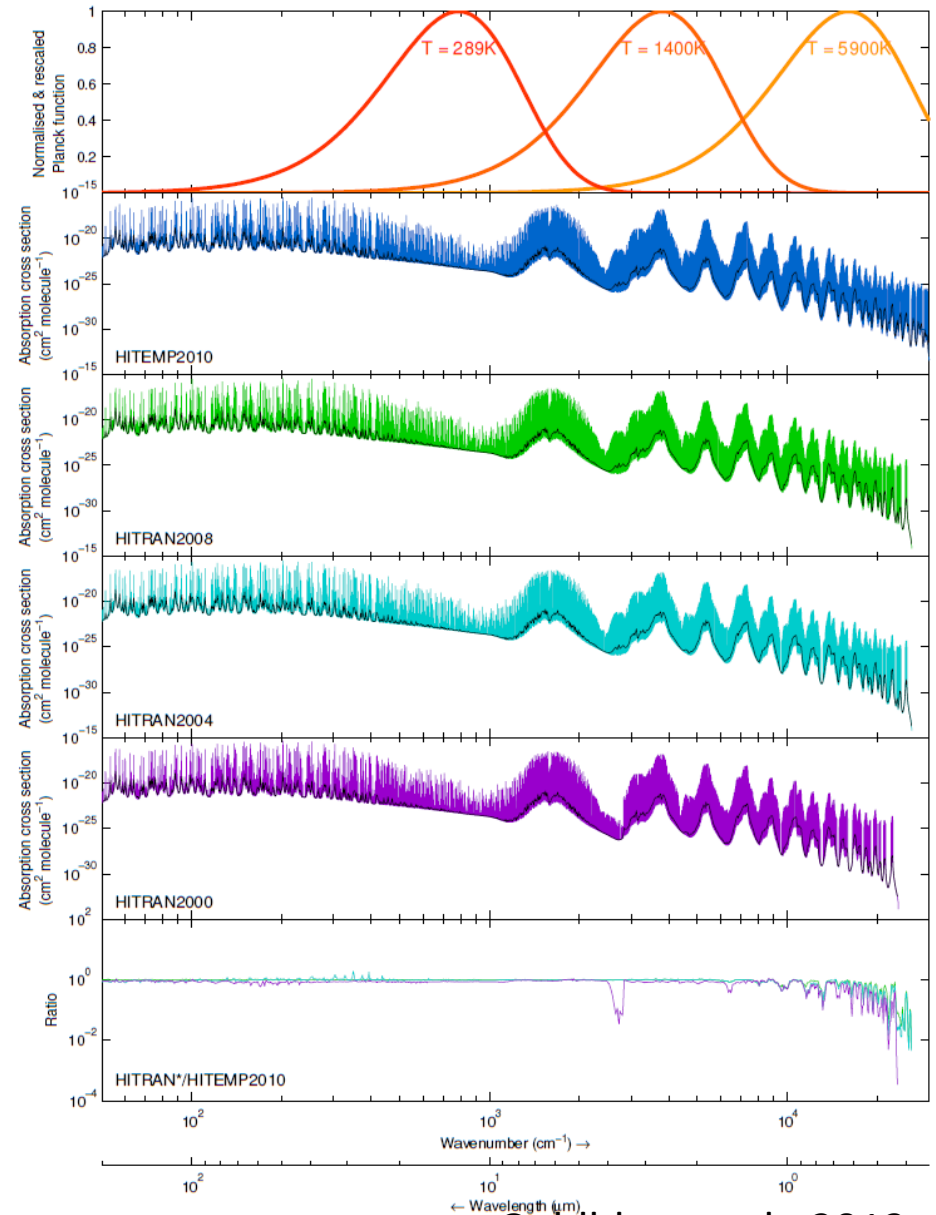
(1) line data base の例

- HITRAN (Rothman et al., 2008)
- HITEMP (Rothman et al., 2010)
- GEISA (Jacquinet-Husson et al., 2011)

H₂Oのline の数

- HITRAN2008: 69,201本
- HITRAN2012: 224,515本
- HITEMP2010: 114,241,164本
- GEISA2009: 58,726本

更新されるたびにline dataは増えている!



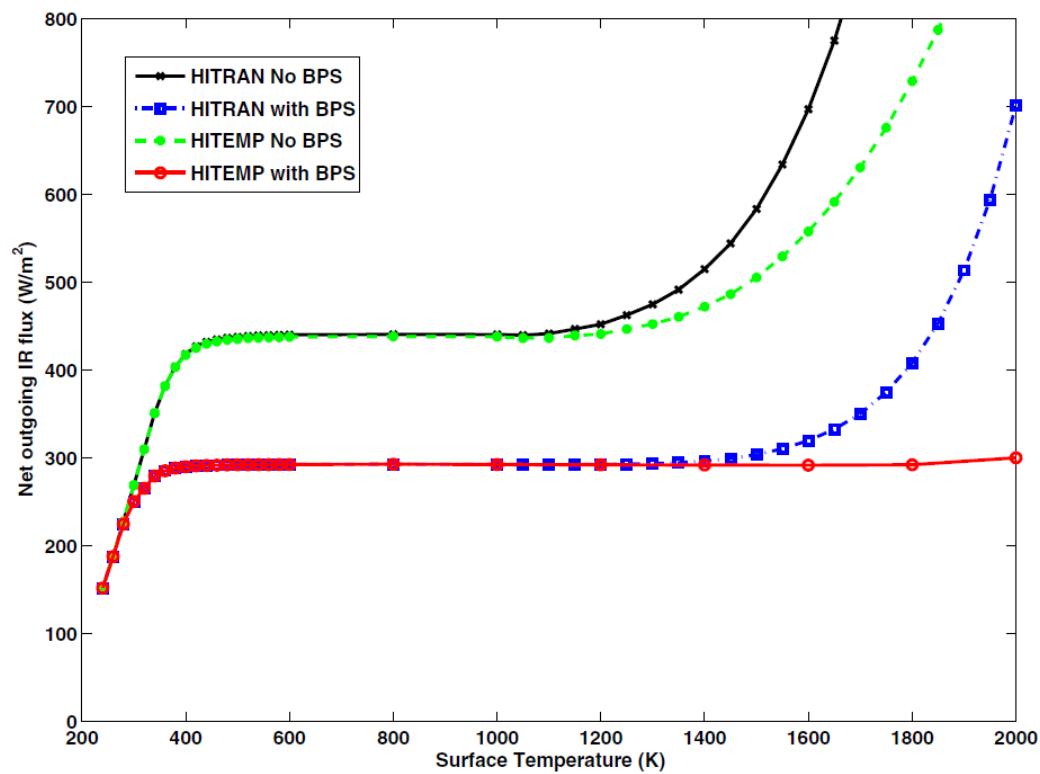
Goldblatt et al., 2013

3. モデル概要

吸収断面積の計算 1: 線吸収について

(2) HITRAN, HITEMPの違い

HITEMP は高温条件で吸収に寄与が大きくなる吸収線を考慮



1000 [K] より高温の計算には
HITEMP を使う必要がある

3. モデル概要

吸収断面積の計算 1: 線吸収について

(3) 吸収断面積の計算をどう効率的に行うか

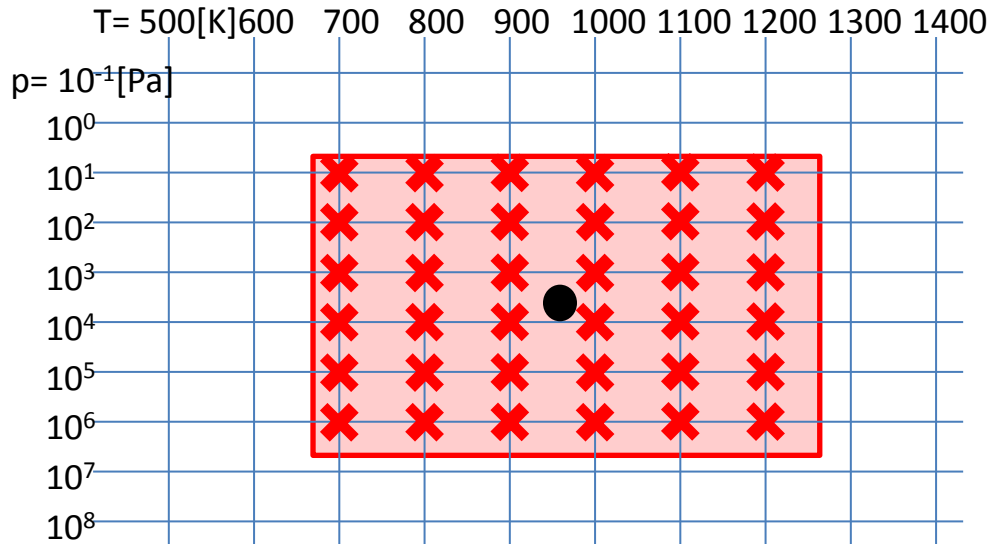
→ あらかじめ用意した吸収断面積のテーブルから
必要な温度圧力の吸収断面積を計算する

・ 吸収断面積テーブルの温度、圧力範囲

$p[\text{Pa}] = (10^{-2}, 10^{-1}, 1, 10^1, 10^2, 10^3, 10^4, 10^5, 10^6, 10^7, 10^8)$

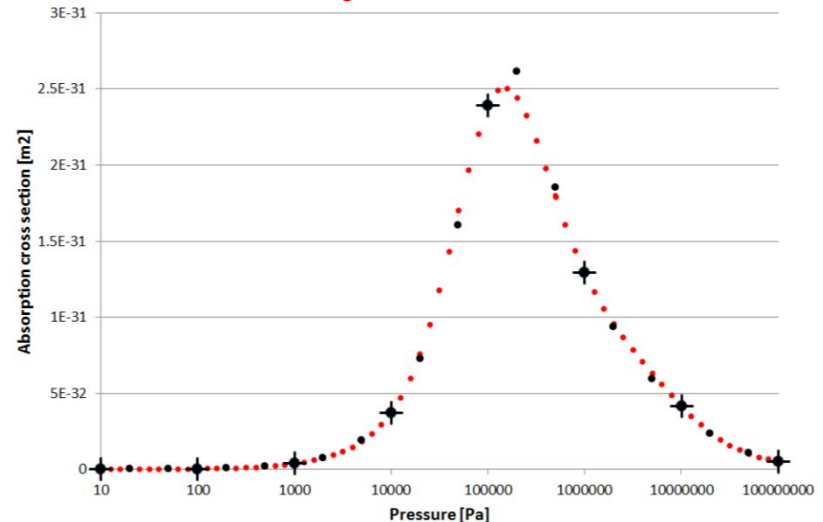
$T[\text{K}] = (99, 100, 200, 300, \dots, 2800, 2900)$

・ 3次Spline 補間により必要な吸収断面積を計算



- 計算したい吸収断面積
- ✕ Spline 補間に使う吸収断面積

- : 吸収断面積(真値)
- ✕ : 補間に使用した吸収断面積
- : log-log Spline 補間



Spline 補間の例

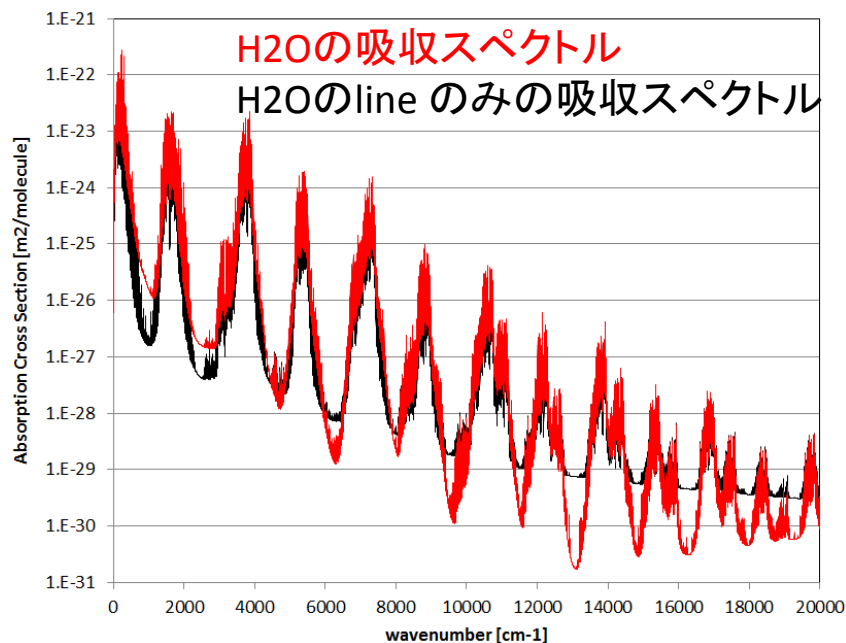
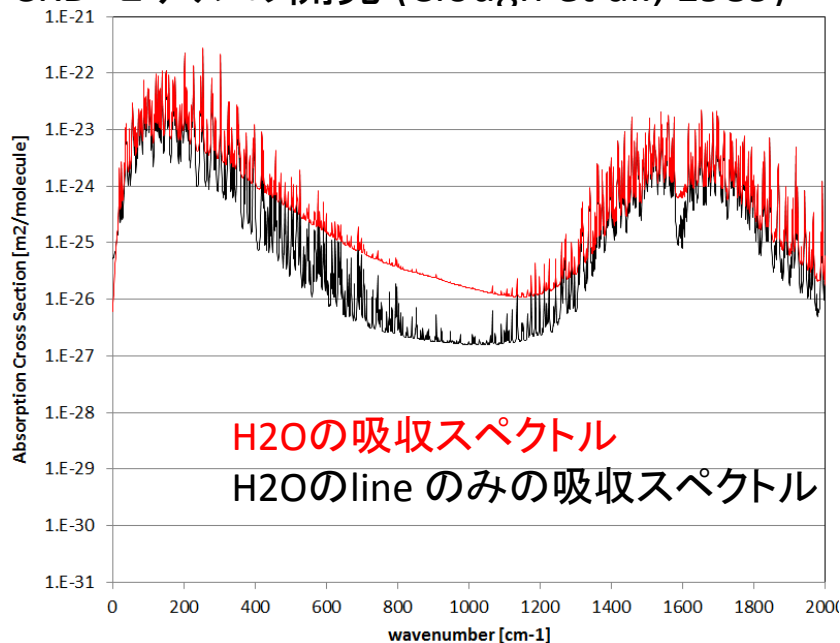
3. モデル概要

吸収断面積の計算 2: 連続吸収について

H₂Oの吸収には“線吸収”と“連続吸収”がある

連続吸収の認識と扱い

- ・大気の窓領域には吸収線はほとんどない。
しかしわずかに吸収があることが知られていた(Rubens & Aschkinass 1898, Hettner 1918)
- ・線吸収の重ね合わせで表現することが試みられた(Elsasser 1938)
- ・Roach and Goody(1958) が初めて‘continuum’という言葉を使う
- ・連続吸収の温度依存性は線吸収の重ね合わせよりも
dimer による吸収の寄与と考えた方が整合的(Viktoriva & Zhevakin 1966, Bignell 1970)
- ・CKD モデルの開発 (Clough et al., 1989)



3. モデル概要

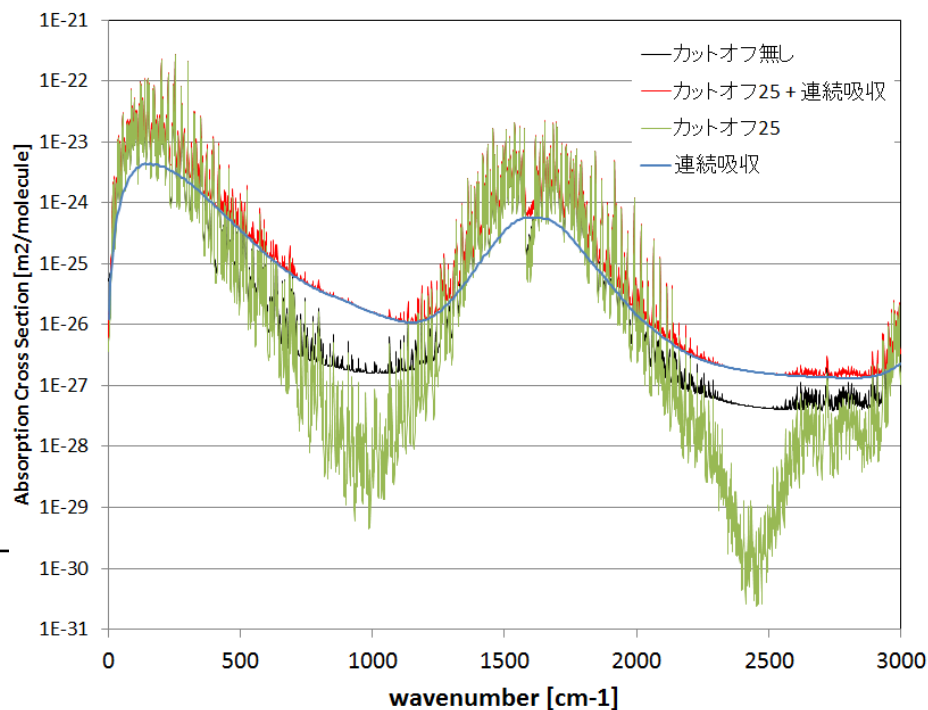
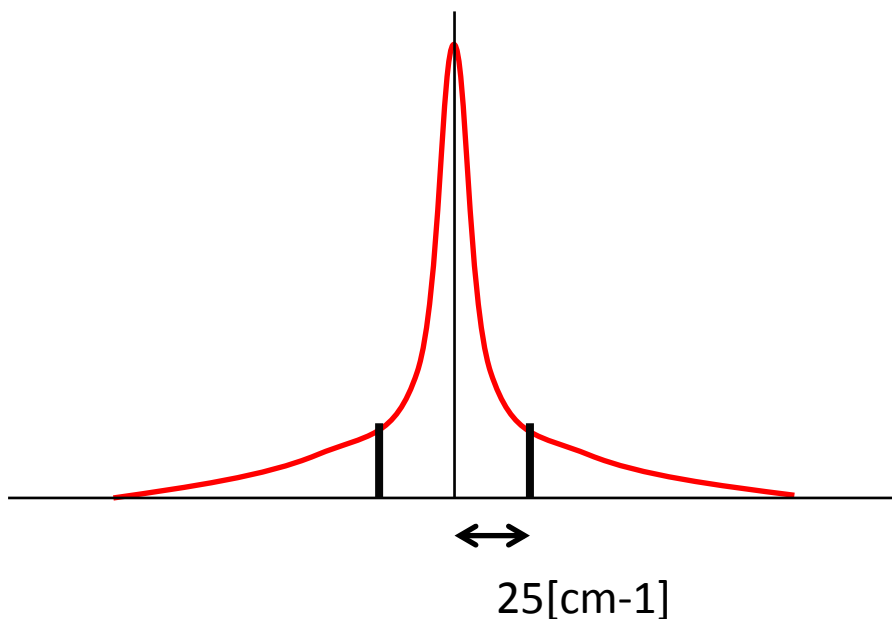
吸収断面積の計算 2: 連続吸収について

CKD model (Clough, Kneizys, and Davies 1989), MT_CKD model (Mlawer et al, 2012)について
[Mlawer, Tobin, Clough, Kneizys and Davies]

分子の吸収断面積を

line center から 25 [cm-1] までの”線吸収”と

line center から 25 [cm-1] 以遠の”連続吸収”に分けて表現

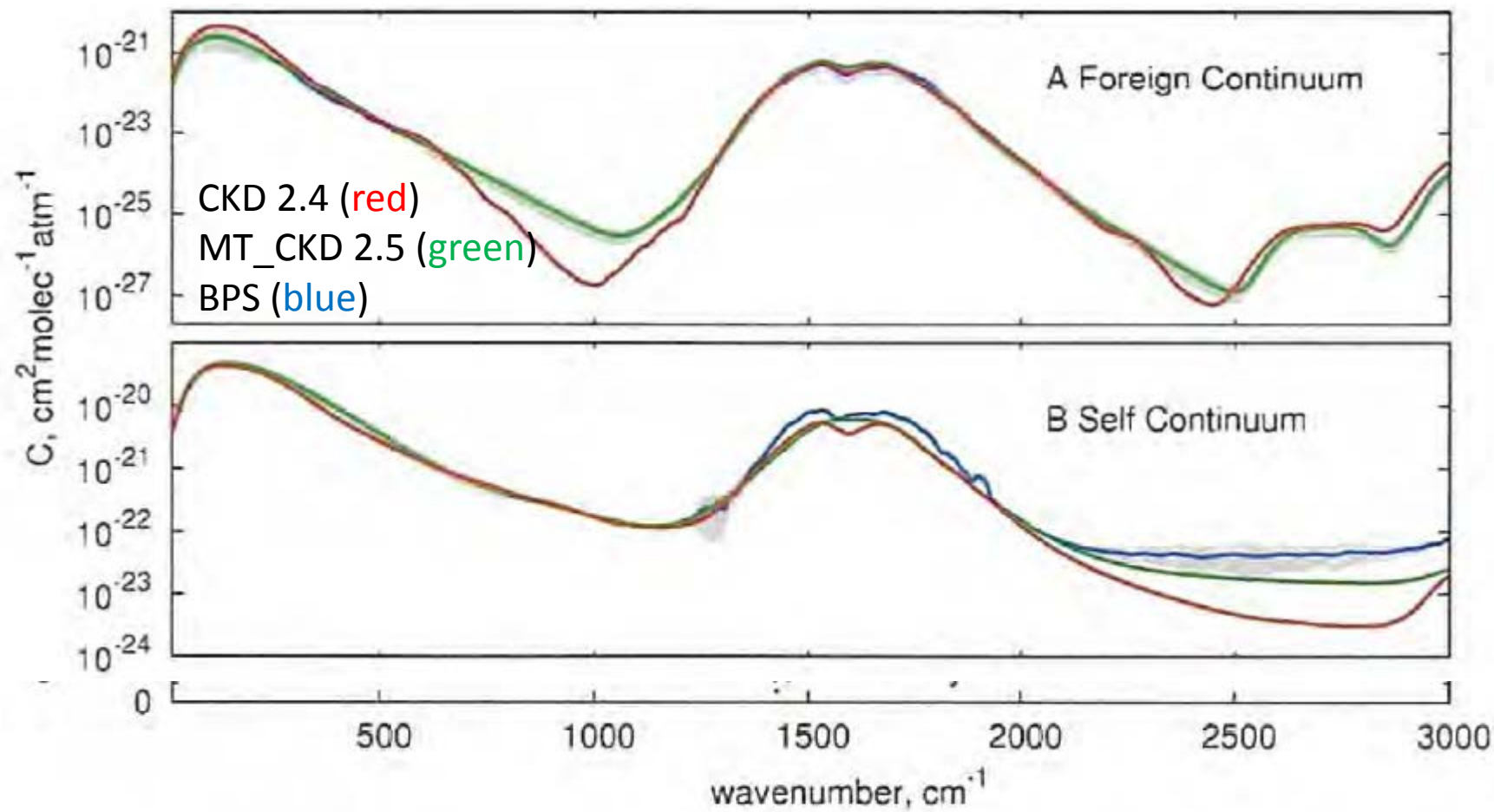


3. モデル概要

吸収断面積の計算 2: 連続吸収について

最近の動向: MT_CKD とBPS(Paynter & Ramaswamy 2011)の比較

Paynter & Ramaswamy 2011



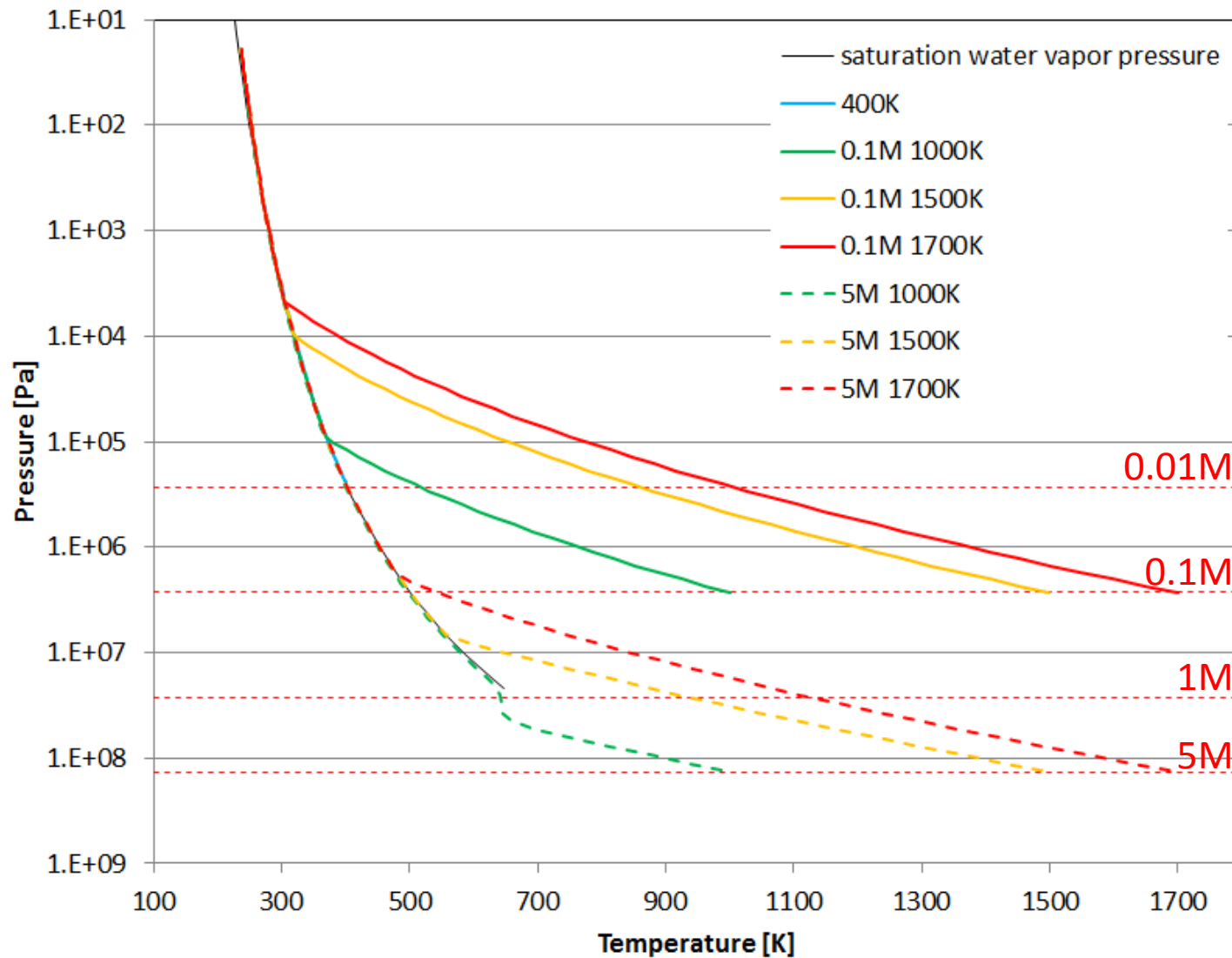
4. 水蒸気大気の計算

計算設定

- ・温度プロファイル
 - 上空まで対流混合している大気を仮定
 - ・H₂Oの状態方程式: Peng-Robinson equation (profile data は濱野さんから提供)
 - ・飽和水蒸気圧曲線:
 - 268.15K < T < 647.26K: Osborne-Mayer's formula
 - T < 268.15K: Washburn's equation
- ・惑星表面のH₂O量
 - 0,01M, 0.1M, 1M, 5M (M: current ocean mass of Earth = 270[bar])
- ・惑星表面温度
 - 250, 260, 270, 280, 290, 300, 350, 400, 600, 1000, 1500, 1700[K]
- ・計算波数領域
 - range of wavenumber: 0.01 to 5000 (Ts < 600K) or 8000 (Ts = 1000K) or 10000[cm⁻¹] (Ts = 1500, 1700K)
 - resolution of wavenumber: 0.01 [cm⁻¹]

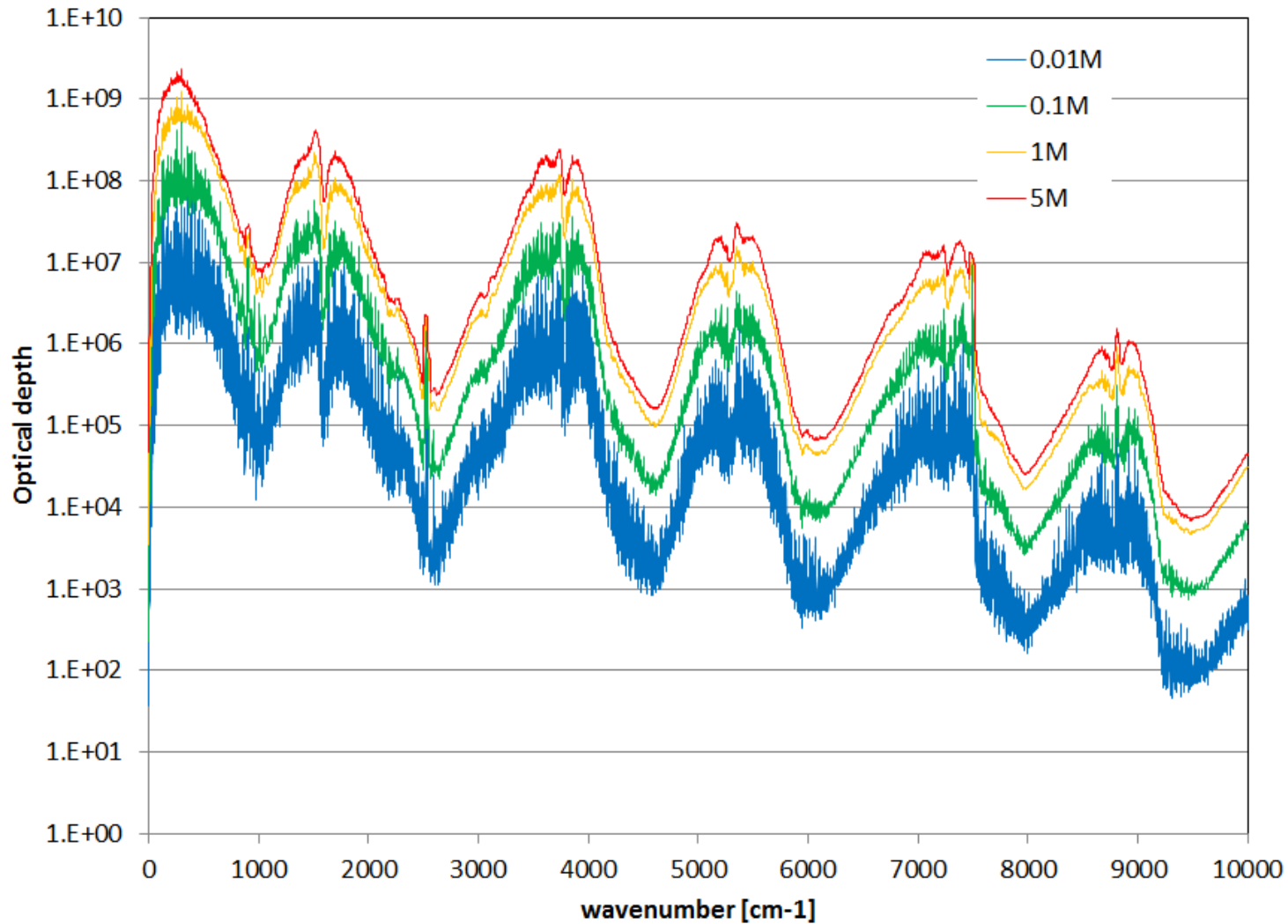
4. 水蒸気大気の計算

鉛直プロファイル



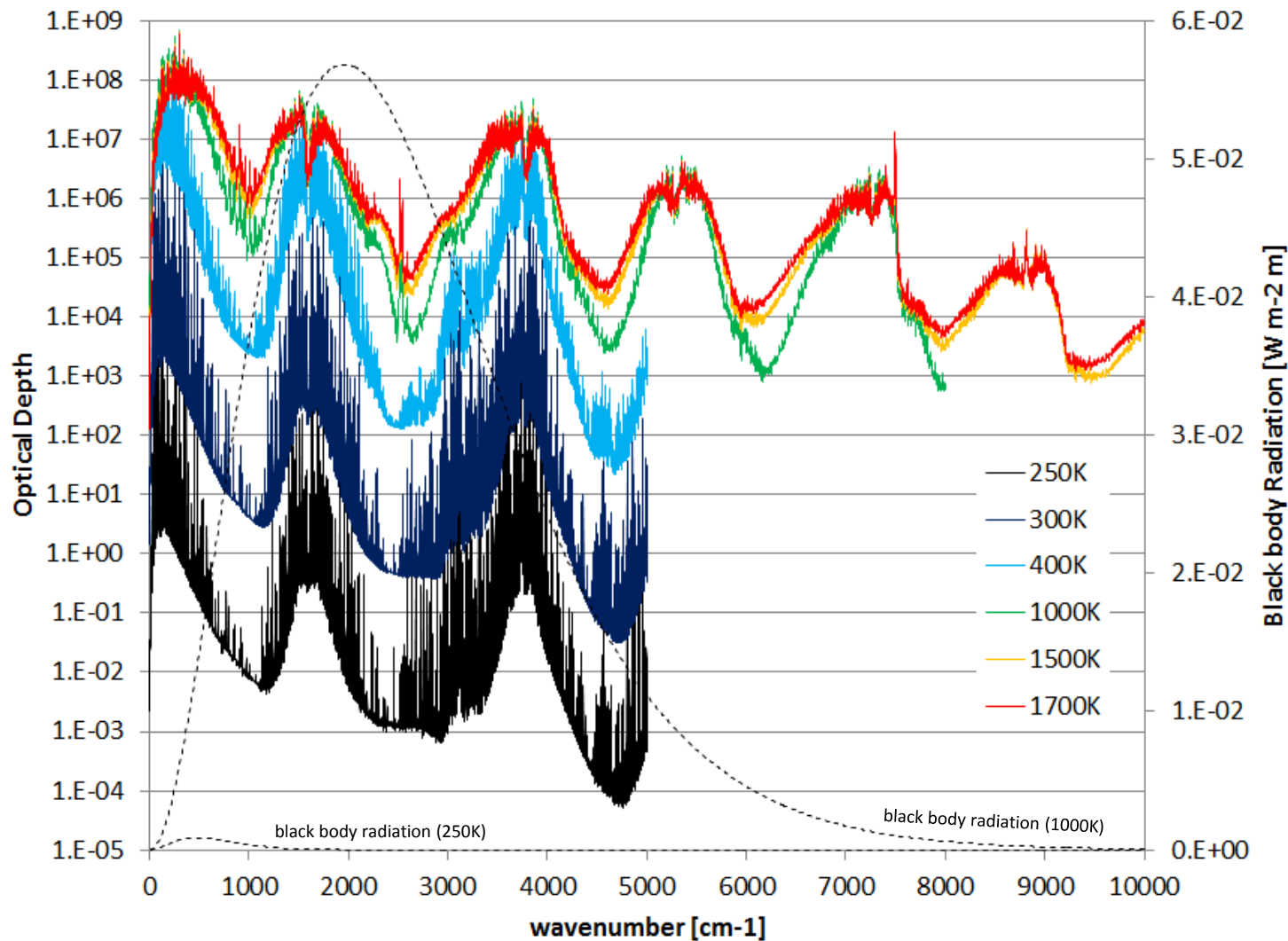
4. 水蒸気大気の計算

光学的厚さ(地表温度: 1500K)



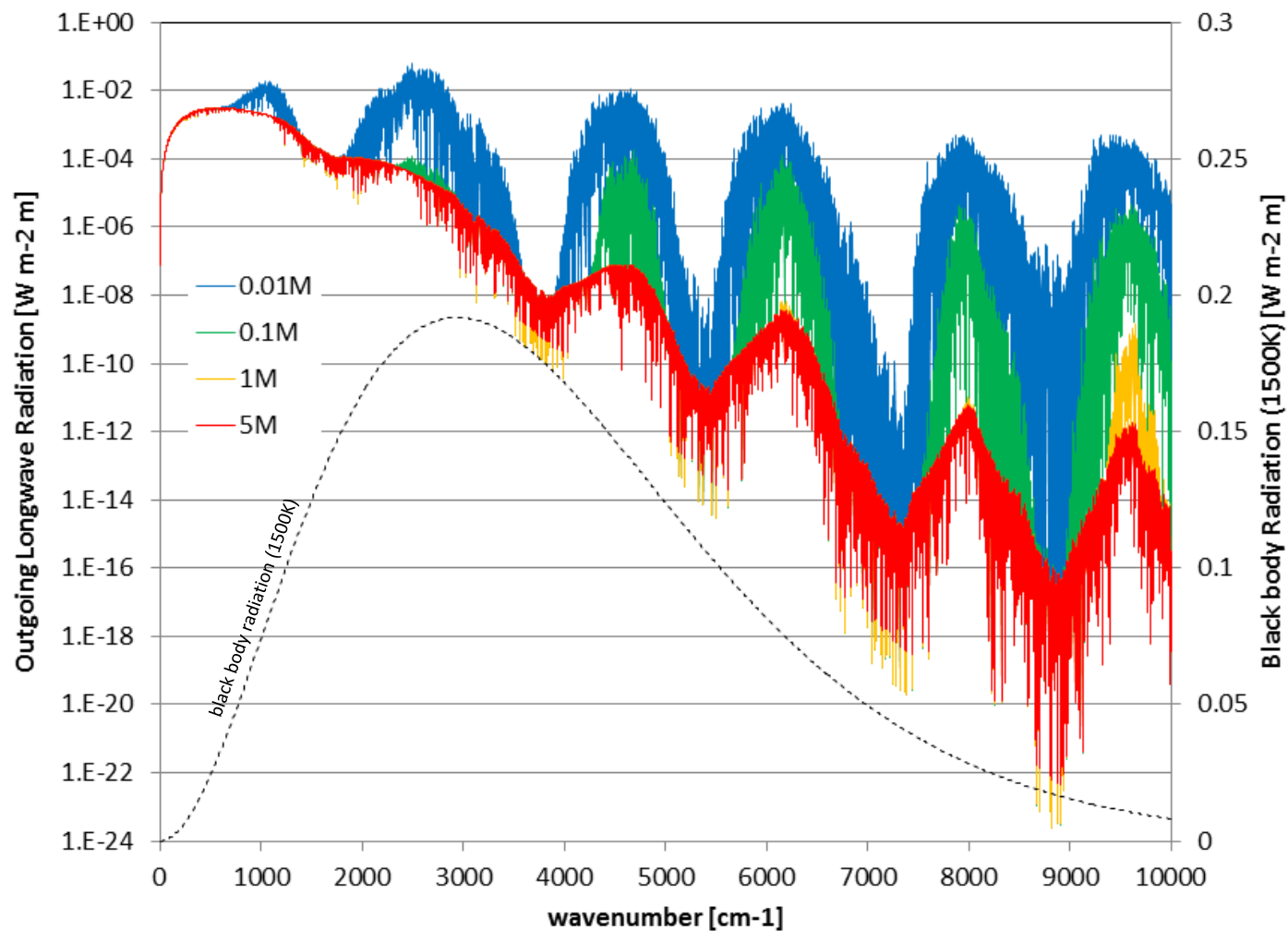
4. 水蒸気大気の計算

光学的厚さ(H₂O量: 0.1 M)



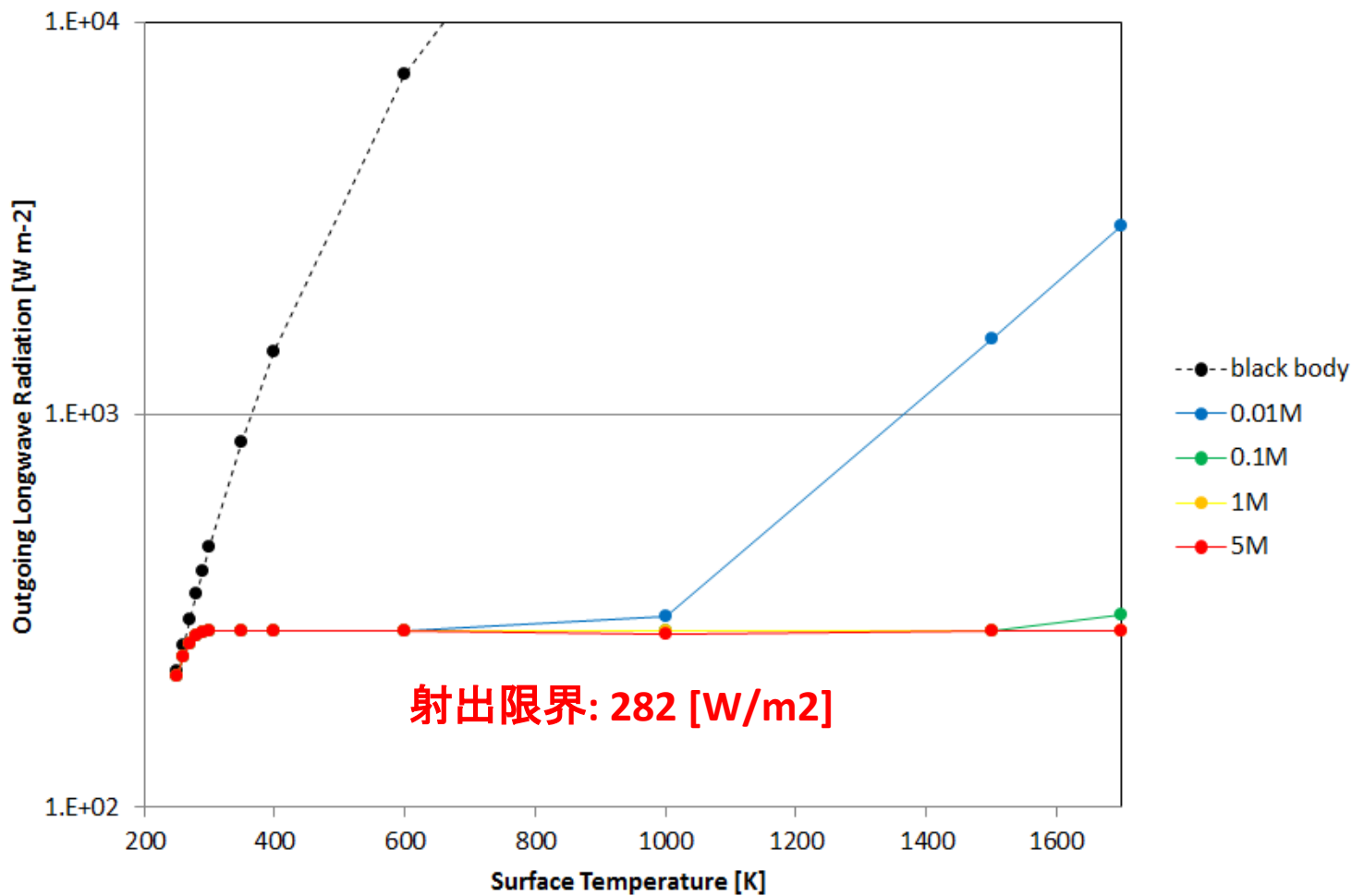
4. 水蒸気大気の計算

大気上端からの上向き放射 (地表温度: 1500K)



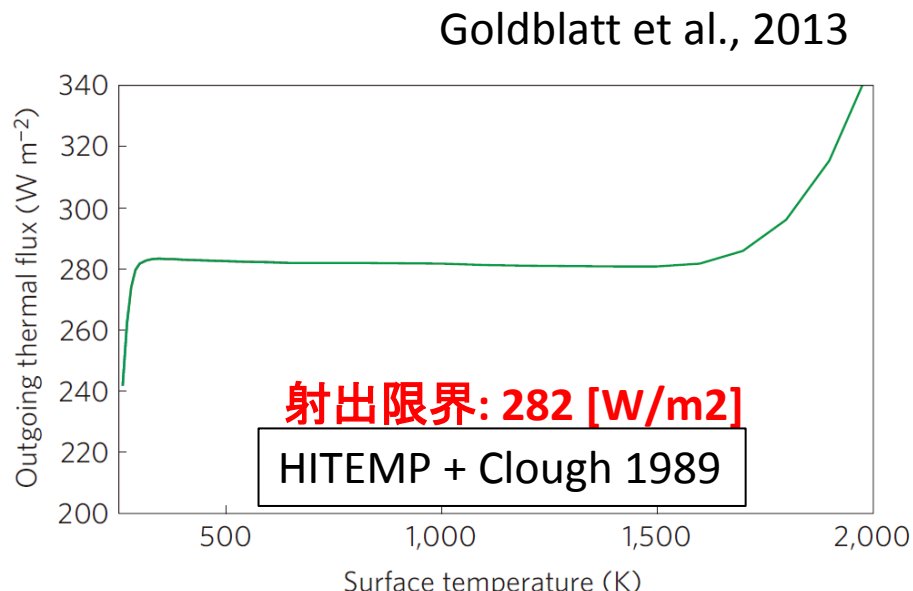
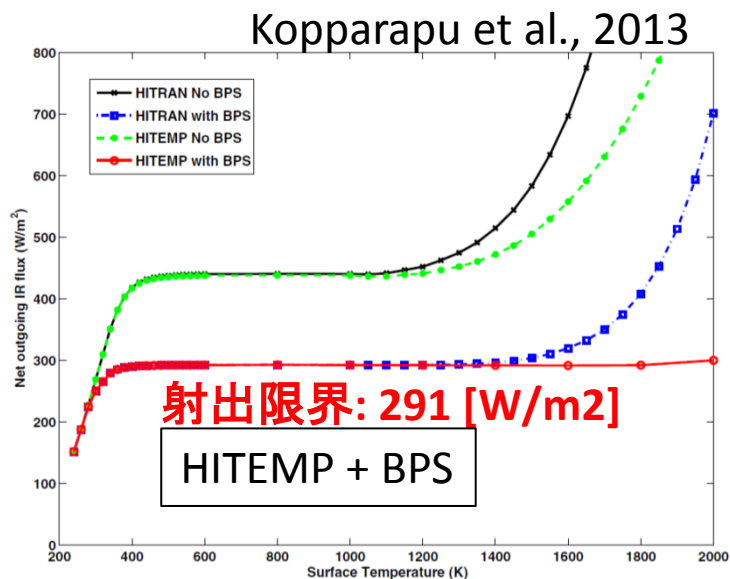
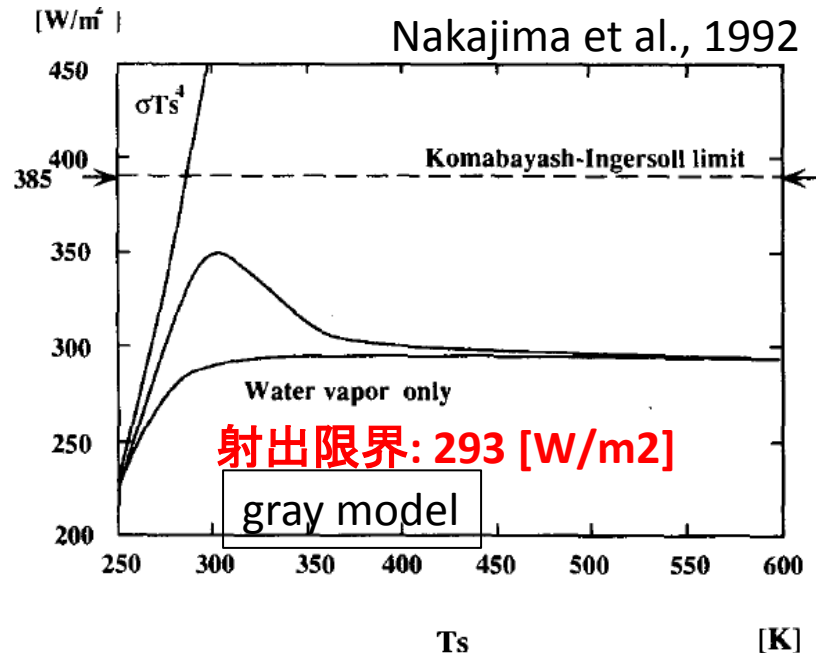
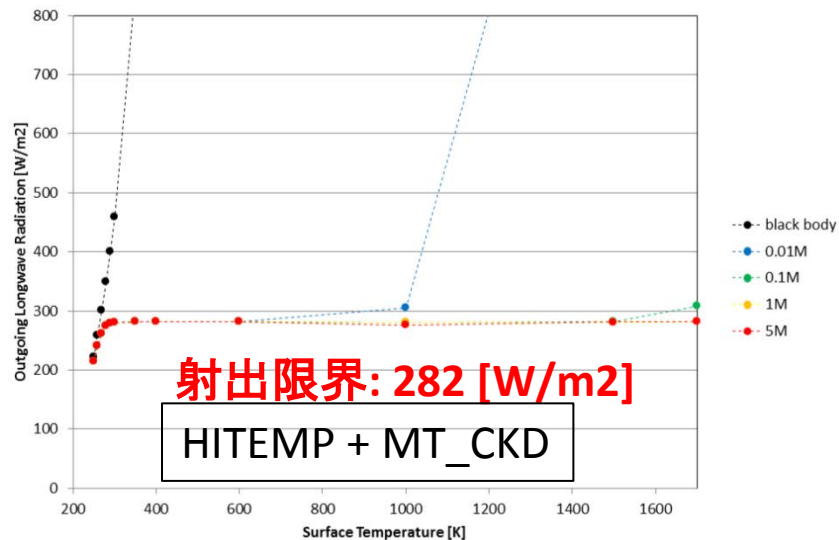
4. 水蒸気大気の計算

大気上端からの上向きフラックス



4. 水蒸気大気の計算

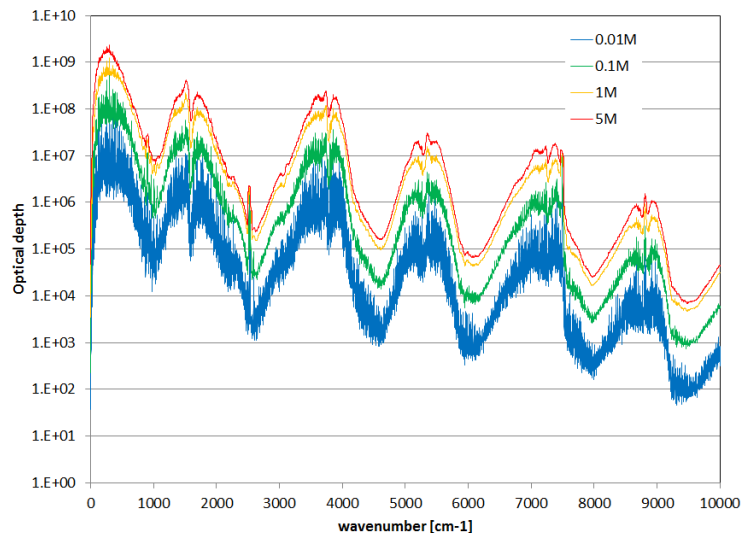
大気上端からの上向きフラックス



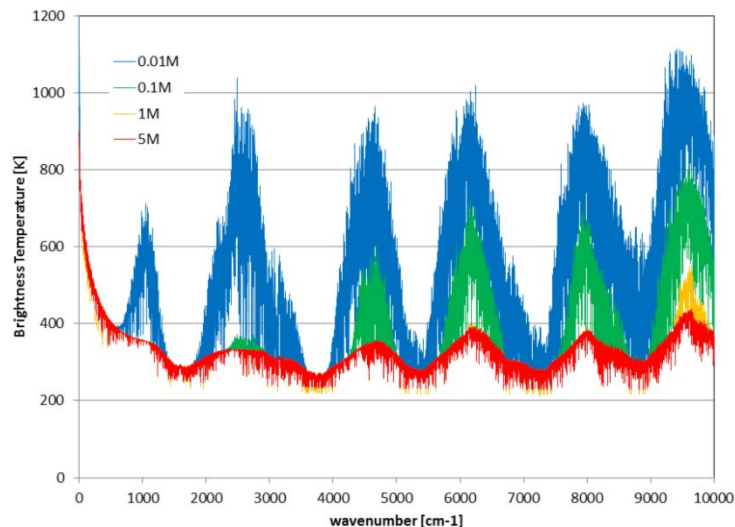
4. 水蒸気大気の計算

マグマオーシャンを持つ惑星は見分けられるのか？

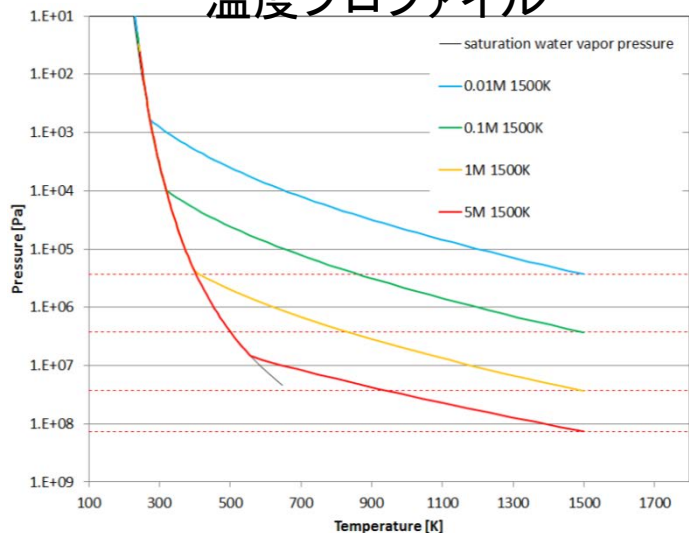
光学的厚さ(地表面温度: 1500K)



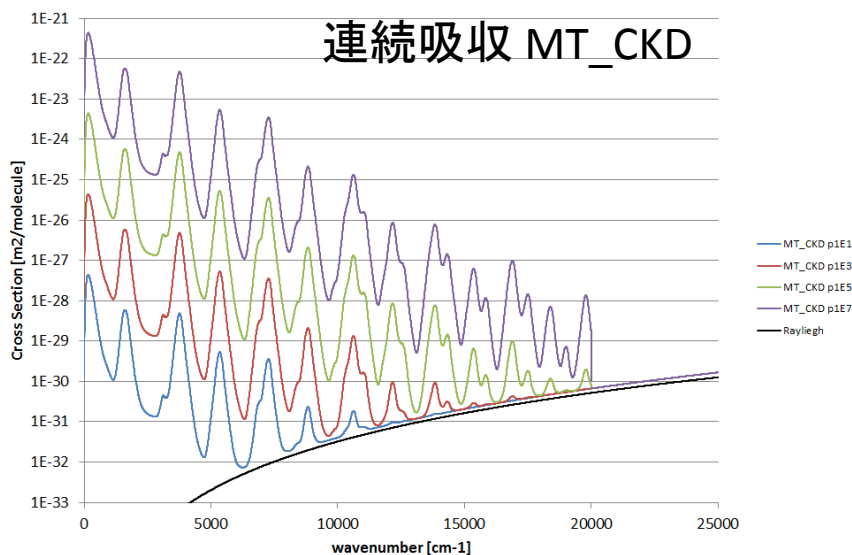
輝度温度(地表面温度: 1500K)



温度プロファイル



連続吸収 MT_CKD



5. 今後の課題

5.1 コード開発

- ・光学過程の追加
 1. 系外惑星に適用できるH₂Oの連続吸収の検討
(適用限界をどう超えるか, 地球からどう飛び出すか)
 2. CO₂についても同様の検討が必要
 3. 雲、エアロゾルの吸収散乱
- ・GCMへの組み込み
 - ・k-分布法によるバンド化

5.2 アプリケーション

- ・バイオマーカーの確認
- ・ハビタビリティの議論
- ・観測への提案、観測された天体の環境推定

6. まとめ

- ・系外惑星の環境推定を目指した放射コードの開発を進めている
- ・データテーブルとSpline 補間により、line by line 法で効率的に吸収断面積の計算を行うコードを実装
- ・HITEMP2010 とMT_CKD を用いて水蒸気大気の放射特性の計算を行った
- ・水蒸気大気の射出限界は $282 \text{ [W/m}^2\text{]}$
- ・マグマオーシャンがあるような条件では、水蒸気大気はとても厚く、近赤外では直接地表面からの放射を見ることはできないことが示唆された
- ・今後は、系外惑星に適用できる連続吸収モデルの検討、GCMへの組み込みを目指したk-分布法によるバンド化の実装を進める