



# 惑星大気の放射伝達計算

高橋芳幸<sup>1,2</sup>, 大西将徳<sup>3</sup>, はしもとじょーじ<sup>4</sup>, 倉本圭<sup>5</sup>, 石渡正樹<sup>5</sup>, 高橋康人<sup>5</sup>, 林祥介<sup>1,2</sup>,  
1: 神戸大学大学院理学研究科, 2: 惑星科学研究センター, 3: 京都大学学術研究支援室,  
4: 岡山大学大学院自然科学研究科, 5: 北海道大学大学院理学研究院宇宙学専攻

## はじめに

多数の系外惑星が発見されている。これら系外惑星に関する興味深い問題の一つはその表層環境である。我々は、様々な惑星の表層環境を調べるために、大気大循環モデルの構築とそれを用いた数値実験に取り組んでいる。しかし、表層環境を数値的に調べる上での大きな問題の一つは放射伝達計算である。放射伝達計算における問題点は大きく分けて二つある。一つは、太陽系内惑星とは異なる温度、圧力、組成条件にある惑星大気の放射特性はよくわかっていないことであり、もう一つは、正確な放射伝達計算に膨大な計算コストが必要となることである。本発表では、我々が進めている、様々な惑星大気に適用できる放射伝達モデルの構築の取り組みを紹介する。

## 放射伝達モデル構築の手順

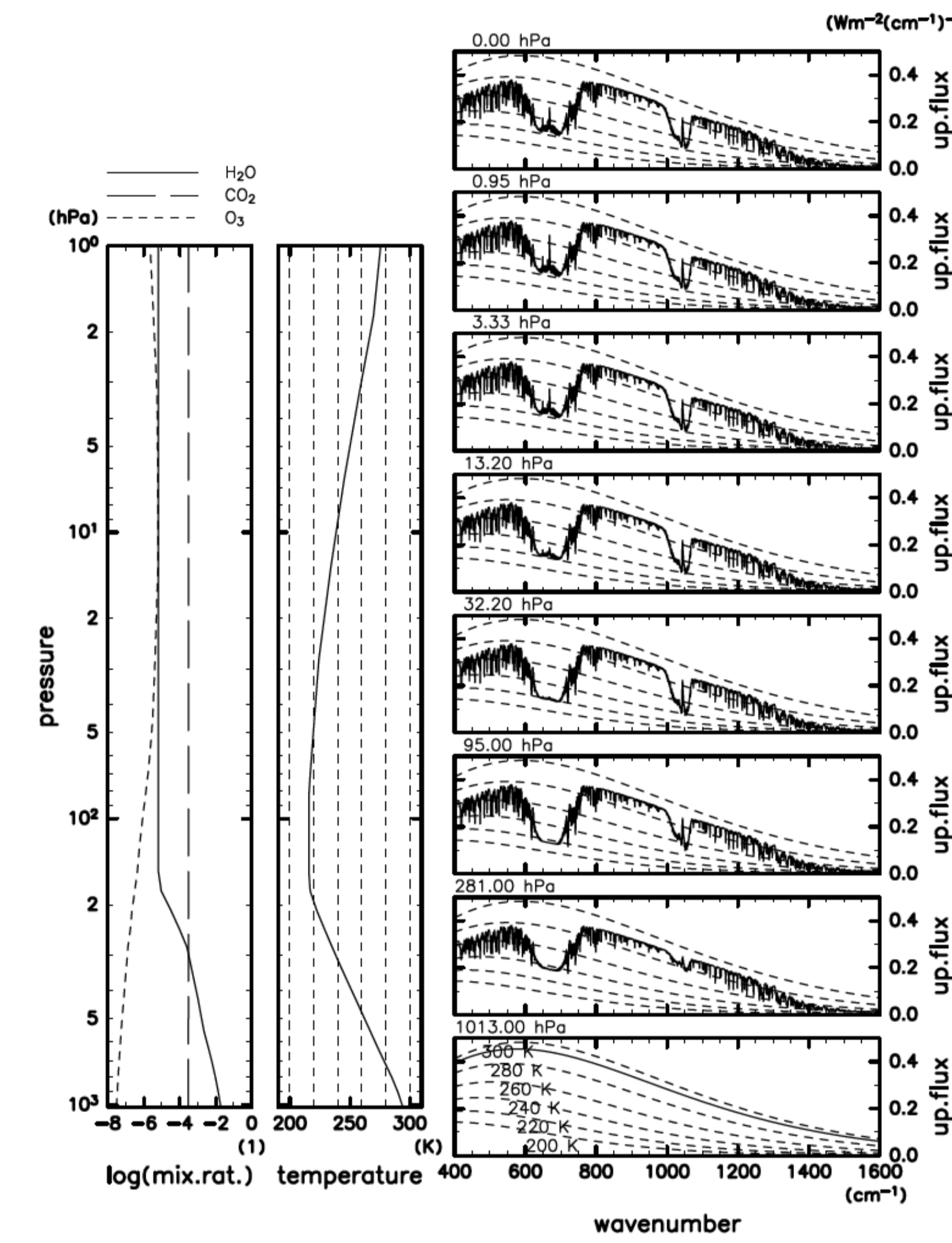
- ラインバイライン (line-by-line) モデルの構築
  - それぞれの吸収線を解像した放射伝達計算
- 相関 k 分布モデルの構築
  - 流体モデルに導入できる程度に計算量を削減
- 鉛直 1 次元放射対流平衡実験
- 大気大循環モデルへの導入

## ラインバイラインモデルの概要

- 吸収線形
  - Voigt 線形
    - Humlicek (1982) の計算法を使用
- 吸収線データベース
  - HITRAN2012 (Rothman et al., 2013), HITEMP (Rothman et al., 2010)
  - 吸収線のカットオフ
    - 25 cm<sup>-1</sup> (e.g., Mlawer et al., 2012)
    - ただし、厚い CO<sub>2</sub> 大気では CO<sub>2</sub> に対して 500 cm<sup>-1</sup> (Wordsworth et al., 2010)
    - 実際には、線形に以下のファクタをかける
      - $f(v) = -((v - v_{m,i,0}) / \Delta v)^2 + 1$ ,  $\Delta v$  はカットオフ波数 (CO<sub>2</sub> 以外)
      - これは経験的なファクタであり、LBLRTM と近くなる。
      - Perrin and Hartmann (1989) のファクタ (CO<sub>2</sub>)
- 連続吸収
  - MTCKD (Mlawer et al., 2012) (Ver. 3.0)
  - 衝突誘起吸収 (Richard et al., 2012) (CO<sub>2</sub>)
  - 線吸収データでないもの (SO<sub>2</sub>)
- Line coupling の効果を無視
  - MTCKD 連続吸収モデルは line coupling を考慮した条件下でのモデルのため、本来は不整合。
- レイリー散乱
  - Hansen and Travis (1974) (空気, CO<sub>2</sub>)
  - Pierrehumbert (2002) (それ以外; Hansen and Travis (1974) の空気の散乱係数の定数倍)
- 放射伝達方程式の近似と解法
  - 下の二つの解の和として計算
    - 入射放射がある場合を  $\delta$ -Eddington 近似で計算
    - 大気の射出がある場合を半球平均近似で計算
  - Toon et al. (1989) の解法を使用

## ラインバイラインモデルを用いた計算例: 地球大気

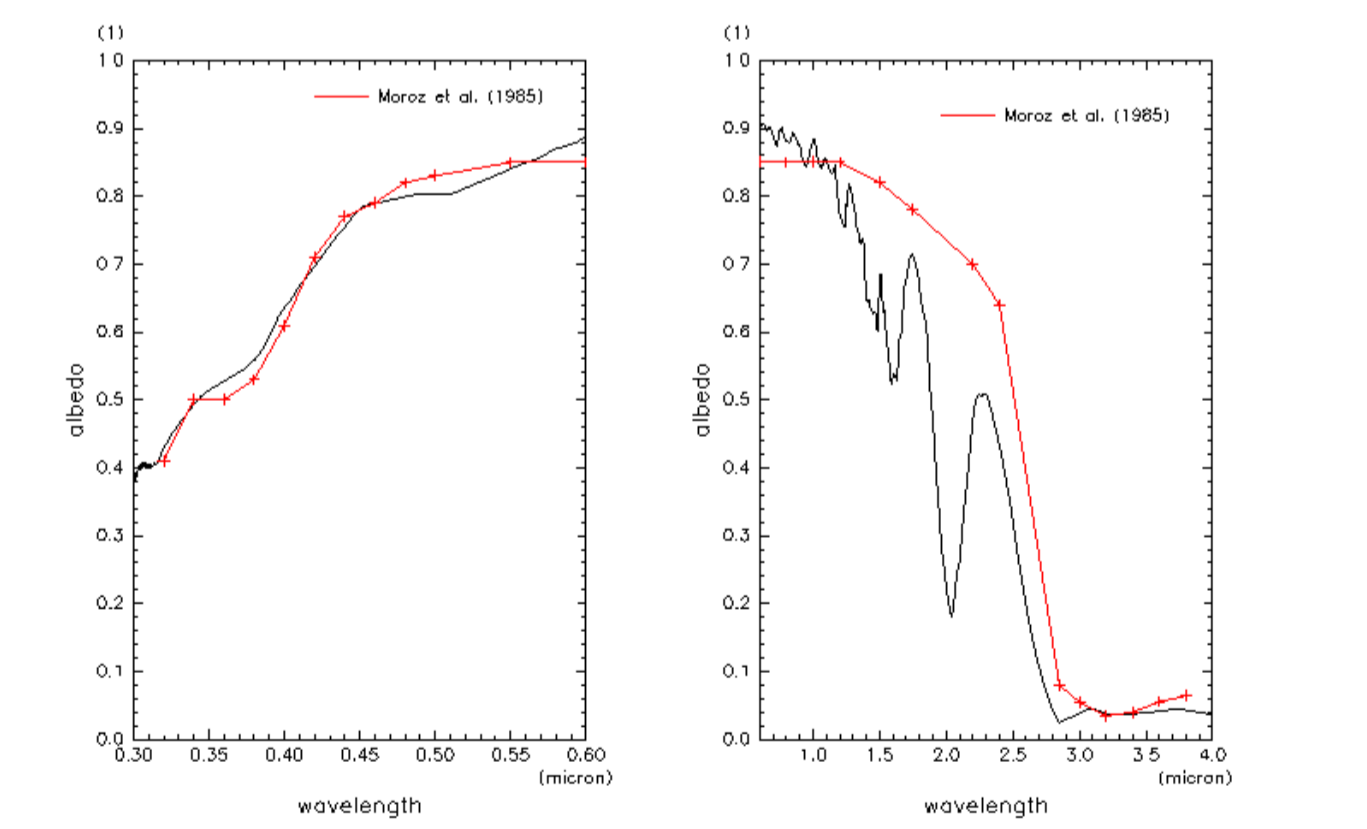
- 大気条件
  - 北半球夏大気 (Mid-Latitude Summer, ICRCCM, Ellingson et al., 1991)
  - 二酸化炭素体積混合比
    - 300 ppmv
  - ICRCCM : Intercomparison of Radiation Codes used in Climate Models
- 惑星表面アルベド
  - $A = \begin{cases} 0, & \text{赤外} \\ 0.2, & \text{紫外・可視} \end{cases}$
  - 波数解像度 : 0.01 cm<sup>-1</sup>



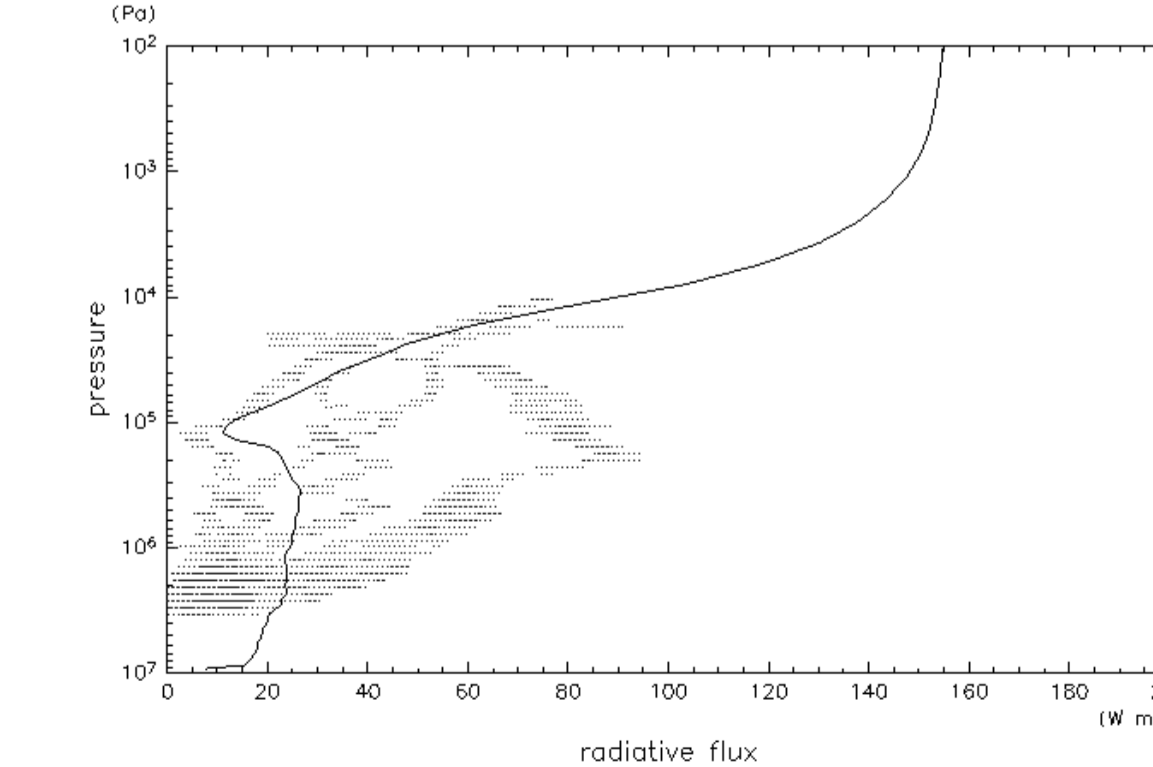
計算に用いた混合比分布(左), 計算に用いた温度分布(中), 各圧力面における上向きフラックススペクトル(右)

## ラインバイラインモデルを用いた計算例: 金星大気

- 大気条件
  - 温度
    - Venus International Reference Atmosphere (Seiff et al., 1985)
  - 組成
    - Crisp (1986) for H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, and SO<sub>2</sub>
    - Pollack et al. (1993) for CO, HF, OCS, N<sub>2</sub>
  - 雲分布
    - Crisp (1986, 1989)
- 惑星表面アルベド
  - $A = \begin{cases} 0, & \text{赤外} \\ 0.05, & \text{紫外・可視} \end{cases}$
  - 波数解像度
    - 0.1 cm<sup>-1</sup>



金星のアルベドスペクトル: ラインバイラインモデル(黒)と観測(赤)

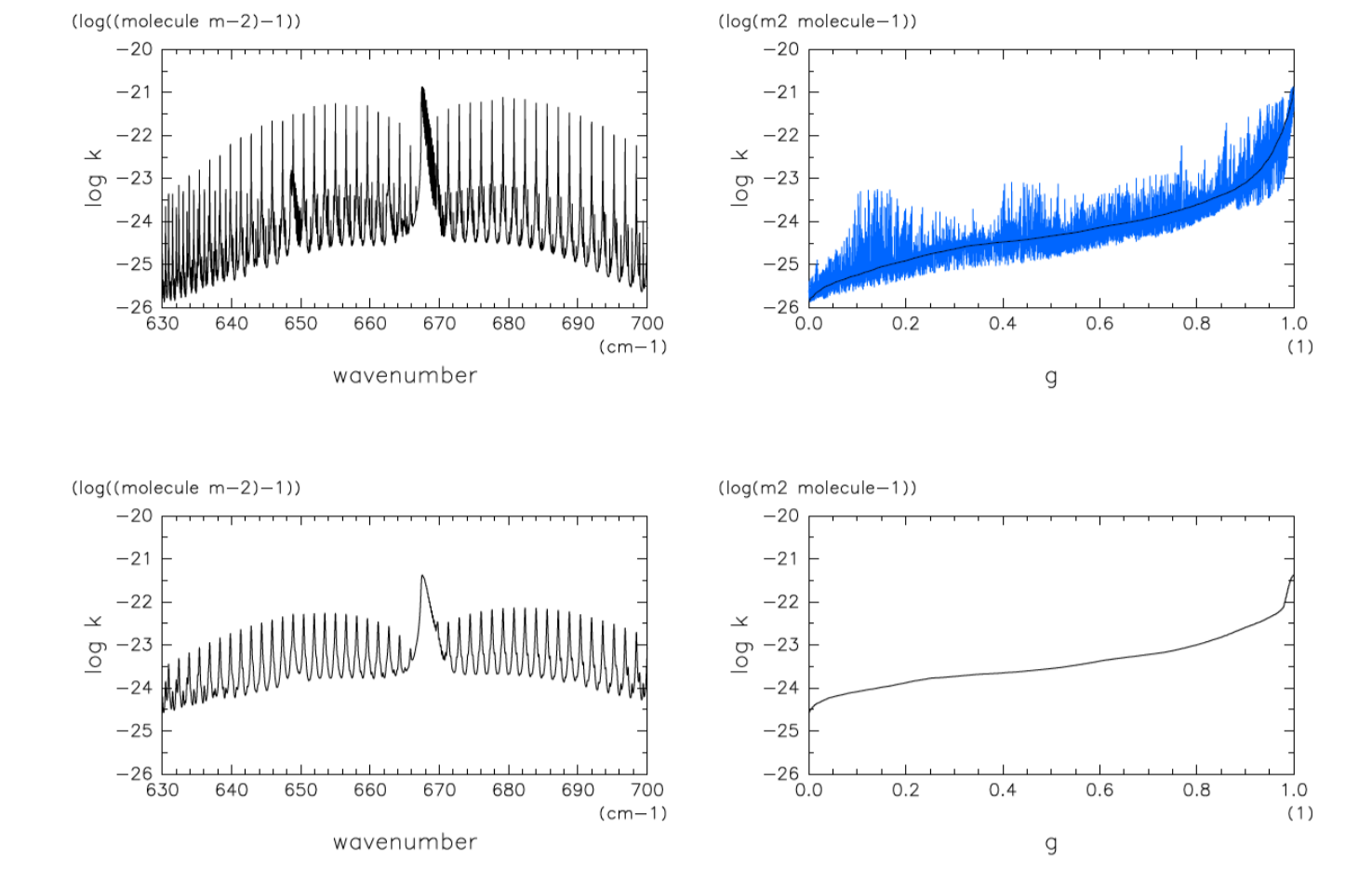


金星大気中の正味赤外放射フラックスの高度分布: ラインバイラインモデル(実線)と Pioneer Venus probe による観測(破線)

## 相関 k 分布法

ラインバイラインの波数積分における計算量を削減するために相関 k 分布法を用いる。

- k 分布法
  - 本来、数値的に波数積分を正確に実施するには、膨大な数の積分点が必要 O(10<sup>6</sup>)。計算量の削減のために、吸収係数が単調増加となるように並び替え。
  - これにより、積分点数はおおよそ O(10<sup>2</sup>) にできる。
- 相関 k 分布法
  - 吸収係数の波数分布は鉛直方向に相関があると仮定。



630-700 cm<sup>-1</sup> における CO<sub>2</sub> の吸収係数: 100 hPa (上), 1000 hPa (下) 吸収係数の波数分布(左), 累積密度関数分布(右)。ただし、右上の青線は、1000 hPa における吸収係数の並びを元に 100 hPa における吸収係数を並べた場合。

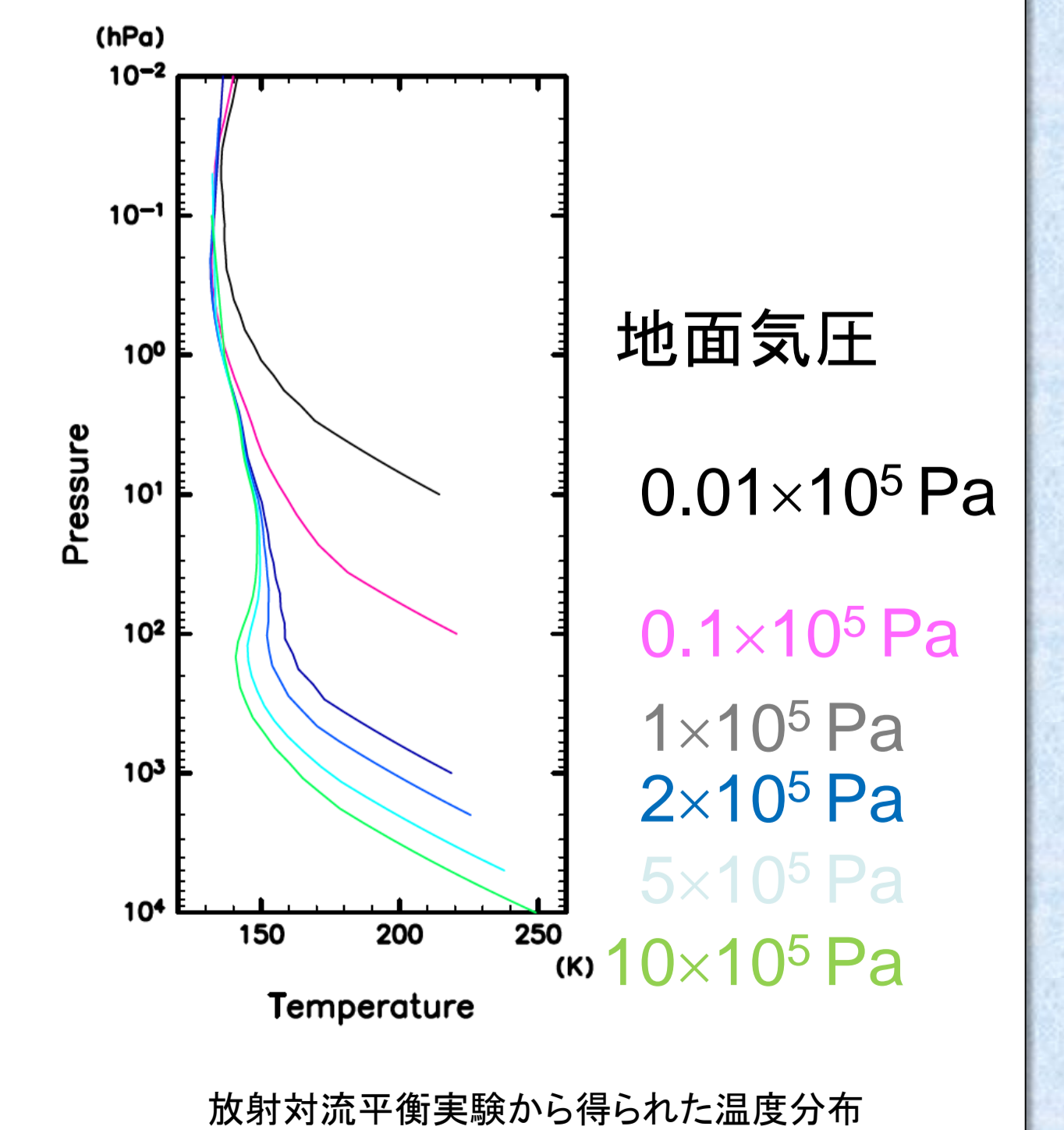
## 相関 k 分布モデルの概要

- 異なる分子種による吸収の重なりへの扱い
  - 気体 3 種まで吸収の重なりを陽に扱うことが可能
  - ただし、陽に扱う気体種が増えるほど事前の計算量が増大
- バンド境界 (RRTMG (Iacono et al., 2008) に従う)
  - 10, 350, 500, 630, 700, 820, 980, 1080, 1180, 1390, 1480, 1800, 2080, 2250, 2380, 2600, 3250, 4000, 4650, 5150, 6150, 7700, 8050, 12850, 16000, 22650, 29000, 38000, 50000 cm<sup>-1</sup>
- ピン配置
  - 2 領域のガウス求積法
    - 0 - 0.98 : 8 点
    - 0.98 - 1 : 8 点

## 相関 k 分布モデルを用いた放射対流平衡実験(古火星を想定)

- 地表面気圧
  - { 0.01, 0.1, 1, 2, 5, 10 } × 10<sup>5</sup> Pa
- 大気組成
  - CO<sub>2</sub> 95%
  - 水蒸気なし
- レイリー散乱を考慮
- 雲なし
- 地表面アルベド
  - $A = \begin{cases} 0, & \text{長波} \\ 0.2, & \text{短波} \end{cases}$
- 入射放射
  - 入射放射天頂角 60°
  - 大気上端でのフラックス 222 Wm<sup>-2</sup>
  - 太陽スペクトル (Gueymard, 2004)

地面気圧 (Pa)	惑星表面温度 (K)	惑星アルベド
0.01×10 <sup>5</sup>	204	0.20
0.1×10 <sup>5</sup>	208	0.20
1×10 <sup>5</sup>	219	0.25
2×10 <sup>5</sup>	226	0.29
5×10 <sup>5</sup>	238	0.36
10×10 <sup>5</sup>	249	0.43



放射対流平衡実験から得られた温度分布