

放射対流平衡解の 放射フラックスの モデル間比較

吉川 颯真

GFD 研究室 D1

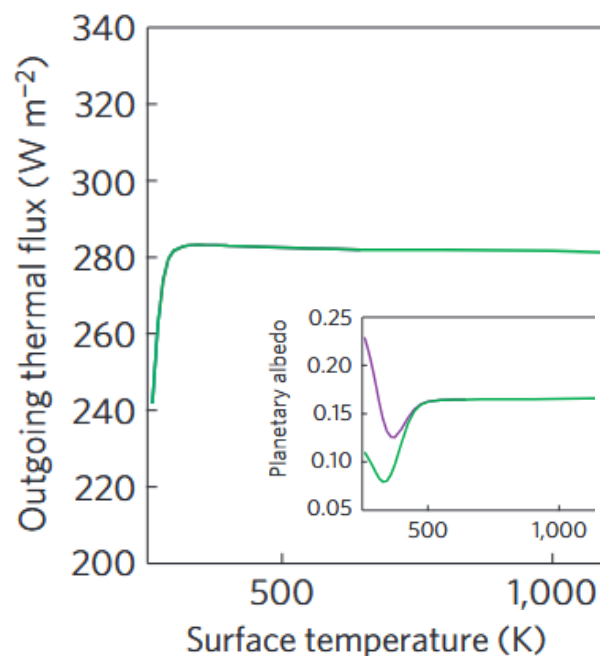
レビューする論文

放射伝達計算の差異について検証している次の2つの論文をレビューする。

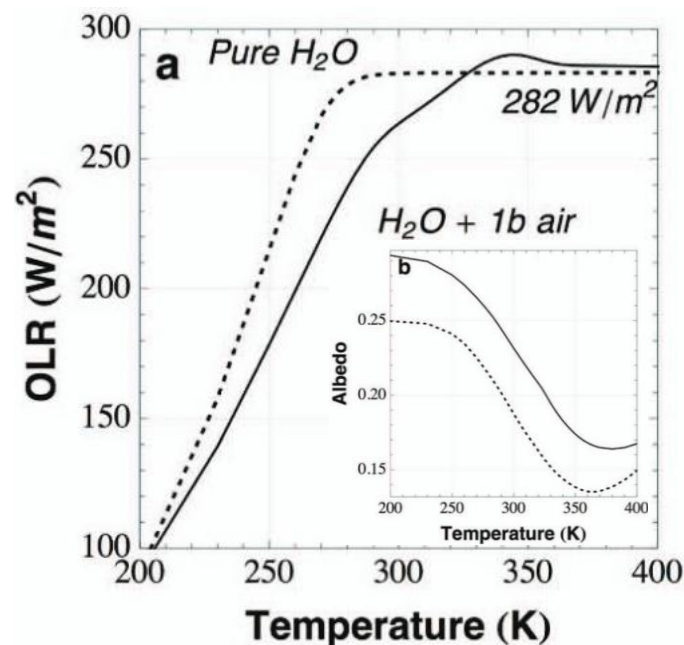
- J. Yang, J. Leconte, E. T. Wolf, C. Goldblatt, N. Feldl, Y. Wang, et al., “Differences in Water Vapor Radiative Transfer among 1D Models can Significantly Affect the Inner Edge of the Habitable Zone”, ApJ, 826:222, 11pp, (2016)
doi:10.3847/0004-637X/826/2/222
- ~~G. Chaverot, et al., “How does the Background Atmosphere Affect the Onset of the Runaway Greenhouse?”, A&A, 658, A40, (2022)
doi:10.1051/0004-6361/202142286~~
間に合いませんでしたすみません

研究背景

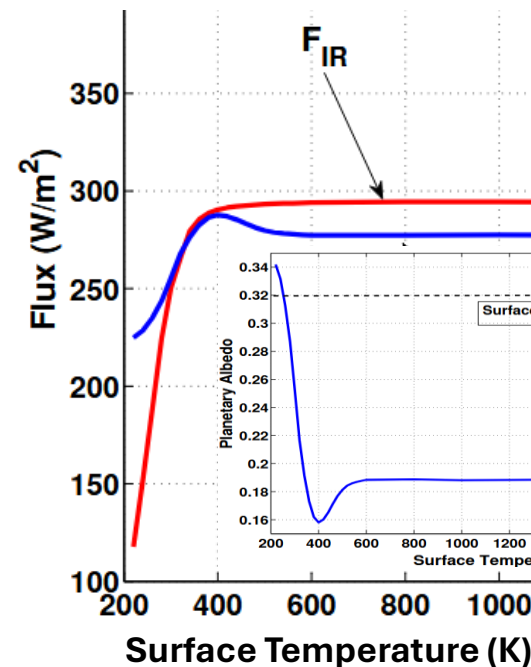
- ハビタブルゾーンの内側境界 (HZIB) の推定値は放射伝達の仕様が原因のモデル差が生じていた.



Goldblatt et al. (2013)
SMART (LBL モデル)
1340 Wm⁻²
 $\alpha_{\text{surf}} = 0.25$ (紫)



Leconte et al. (2013)
LMD generic (相関 k 分布)
1420 Wm⁻²
 $\alpha_{\text{surf}} = 0.25$ (点線)



Kopparapu et al. (2013)
Atmos (相関 k 分布)
1420 Wm⁻²
 $\alpha_{\text{surf}} = 0.32$

研究目的・研究手法

- 7つの鉛直1次元放射伝達モデルを用いて、何がHZIBの推定値に不定性をもたらすのかを突き止める
 - SBDART [Ricchiazzi+, 1988; Yang+, 2000]
 - CAM3 [Collins+, 2002; Ramanathan & Downey, 1986]
 - CAM4 [Wolf & Toon, 2015]
 - AM2 [Edwards & Slingo, 1996; Freidenreich & Ramaswamy, 1999]
 - LMDG [Wordsworth+, 2010a,b]
 - SMART [Meadows & Crisp, 1996; Crisp, 1997]
 - LBLRTM [Clough+, 2005,1992]

放射伝達モデルの仕様の違い

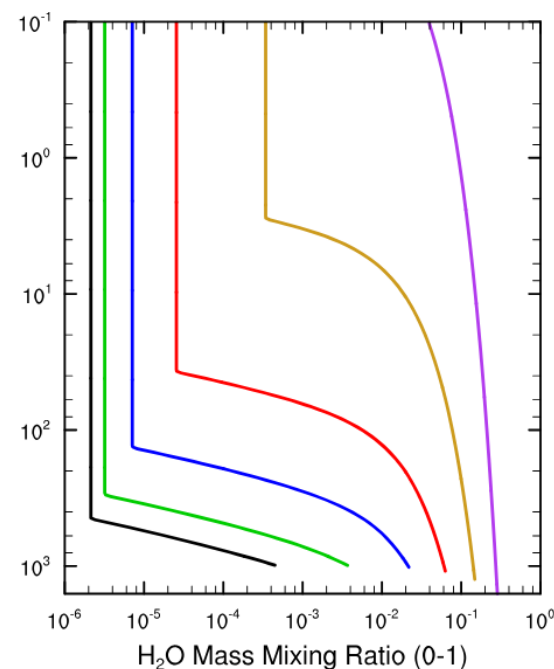
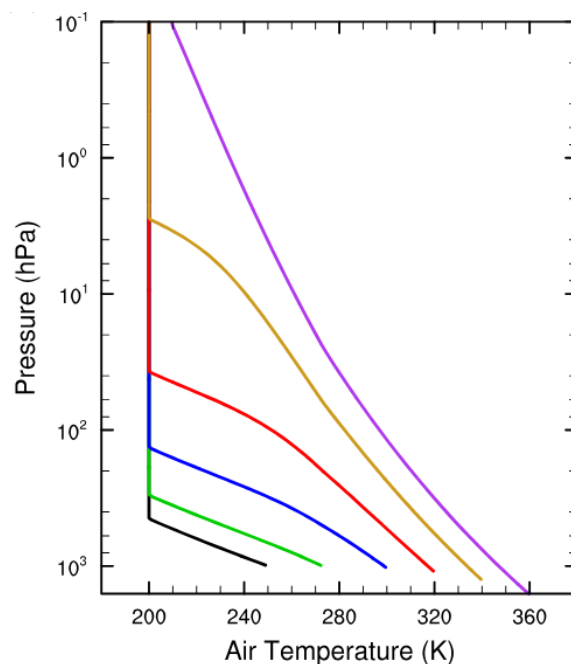
モデル	線吸収 (水蒸気)	連続吸収 (水蒸気)	吸収係数	波数 グリッド	鉛直 層数	多重散乱の扱い
SDDART	HITRAN1996	CKD2.3	相関 k 分布	369	301	Stamnes+88
CAM3	HITRAN2000	CKD2.4	バンド平均	19	301	Briegleb92
CAM4	HITRAN2004	MTCKD2.5	相関 k 分布	23	301	Toon+89
AM2	HITRAN2000	CKD2.1	指数和	18	301	Edwards&Slingo96
LMDG	HITRAN2008	CKD2.4	相関 k 分布	36	301	Toon+89
LBLRTM	HITRAN2008	MTCKD2.5	Line-by-line	$>10^4$	150	Moncet&Clough97
SMART	HITEMP2010	χ -factor	Line-by-line	$>10^4$	75	Stamnes+88

指数和: サブバンドの各点の透過率を指数関数で表し, 線形結合をバンド透過率として計算

$$T(u) = \sum_i w_i e^{-k_i u}$$

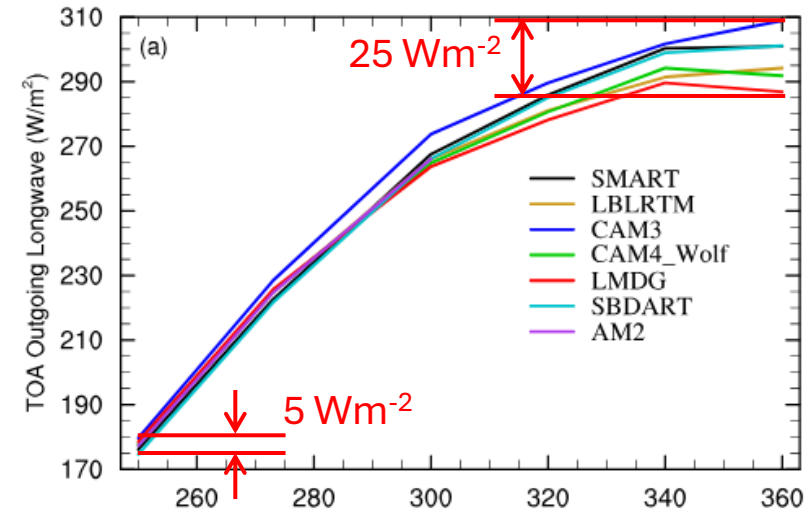
モデル大気

- 放射伝達モデルに与える大気
 - N_2 : 1 bar
 - H_2O : 対流圏で飽和 (相対湿度 100 %), 成層圏で一様
 - CO_2 : 376 ppmv (混合比固定, 全圧変わるので柱密度は可変)
 - 地表面温度: 250, 273, 300, 320, 340, 360 K

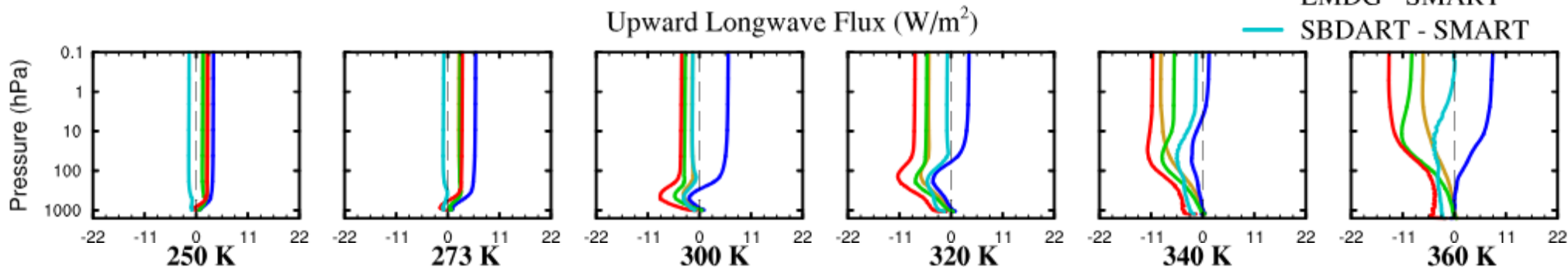


結果: 惑星放射のモデル間差異 (1)

- 高温ほど OLR 差異が大きい
(250 K: $\approx 5 \text{ Wm}^{-2}$, 360 K: $\approx 25 \text{ Wm}^{-2}$)
- 一部モデルは OLR 上昇が止まらない
 - CAM3, SBDART, LBLRTM
(モデル間の共通点なし)
 - 考えられる可能性
 - 340 K では射出限界に達しない
 - これらのモデルは射出限界を再現できない

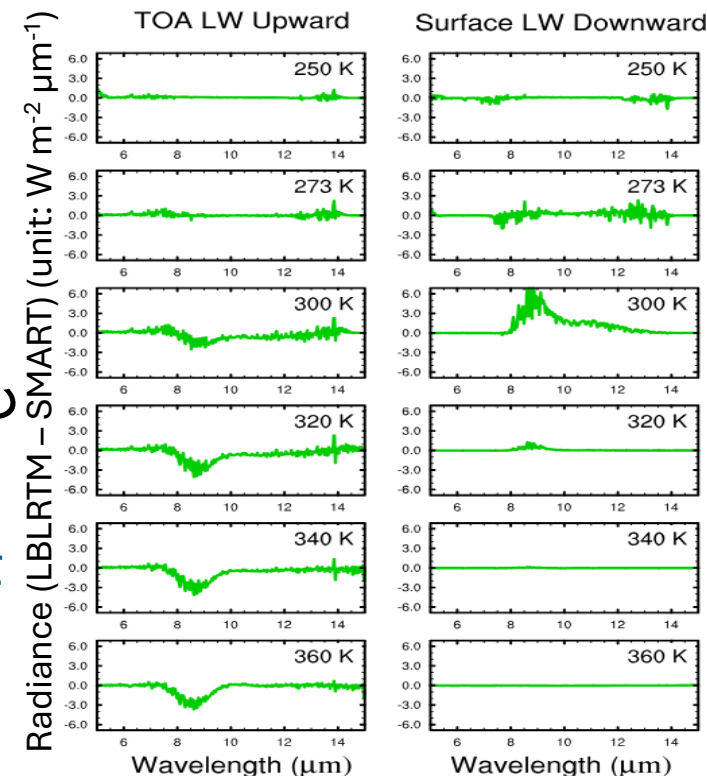


— LBLRTM - SMART
 — CAM3 - SMART
 — CAM4_Wolf - SMART
 — LMDG - SMART
 — SBDART - SMART



結果: 惑星放射のモデル間差異 (2)

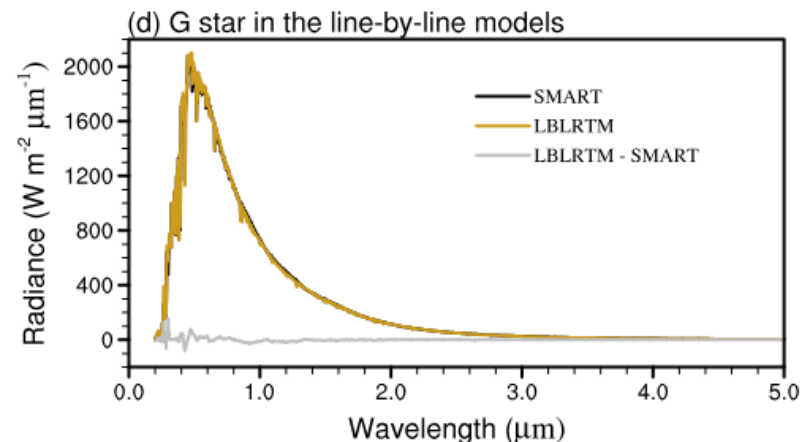
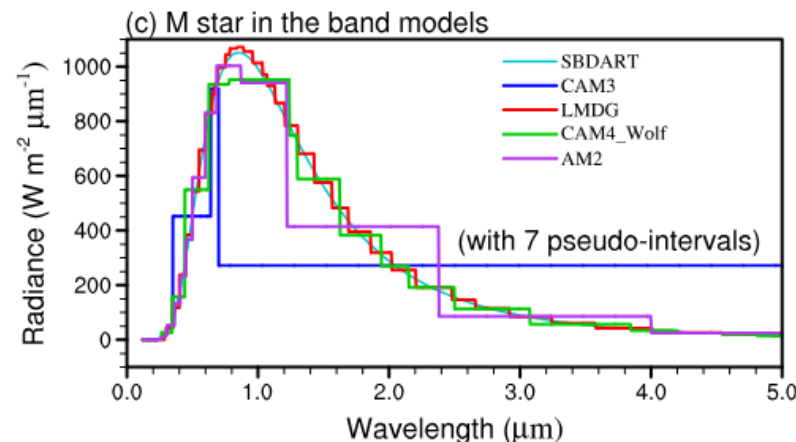
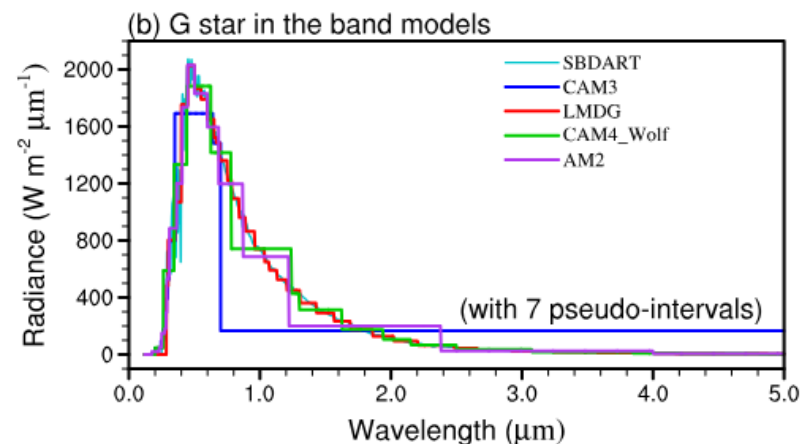
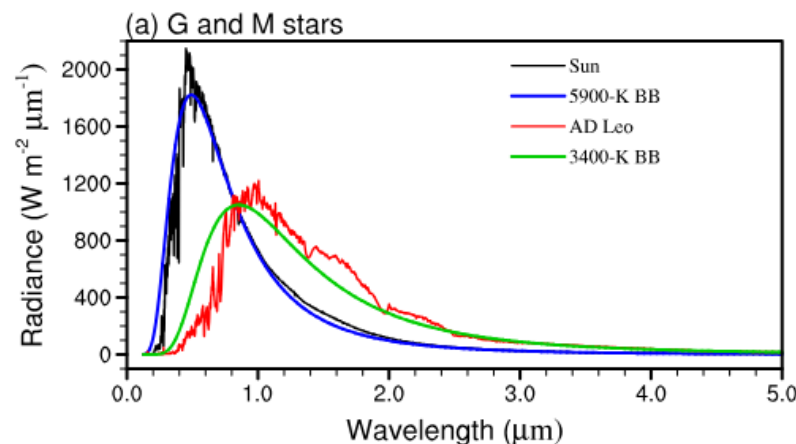
- OLR 差異は連続吸収が支配的な $10\ \mu\text{m}$ 付近の放射強度が原因
 - 2つのLBLモデル間で連続吸収の取り扱いが異なる(下表)
 - 相関k分布を用いている3つのモデルも連続吸収によってOLR差が出ていそう
- $>28\ \mu\text{m}$ の放射強度もバンドモデル間に差
 - 波数グリッドが粗いことが原因



モデル	線吸収 (水蒸気)	連続吸収 (水蒸気)	吸収係数	波数 グリッド	鉛直 層数	多重散乱の扱い
LBLRTM	HITRAN2008	MTCKD2.5	Line-by-line	$>10^4$	150	Moncet&Clough97
SMART	HITEMP2010	χ -factor	Line-by-line	$>10^4$	75	Stamnes+88

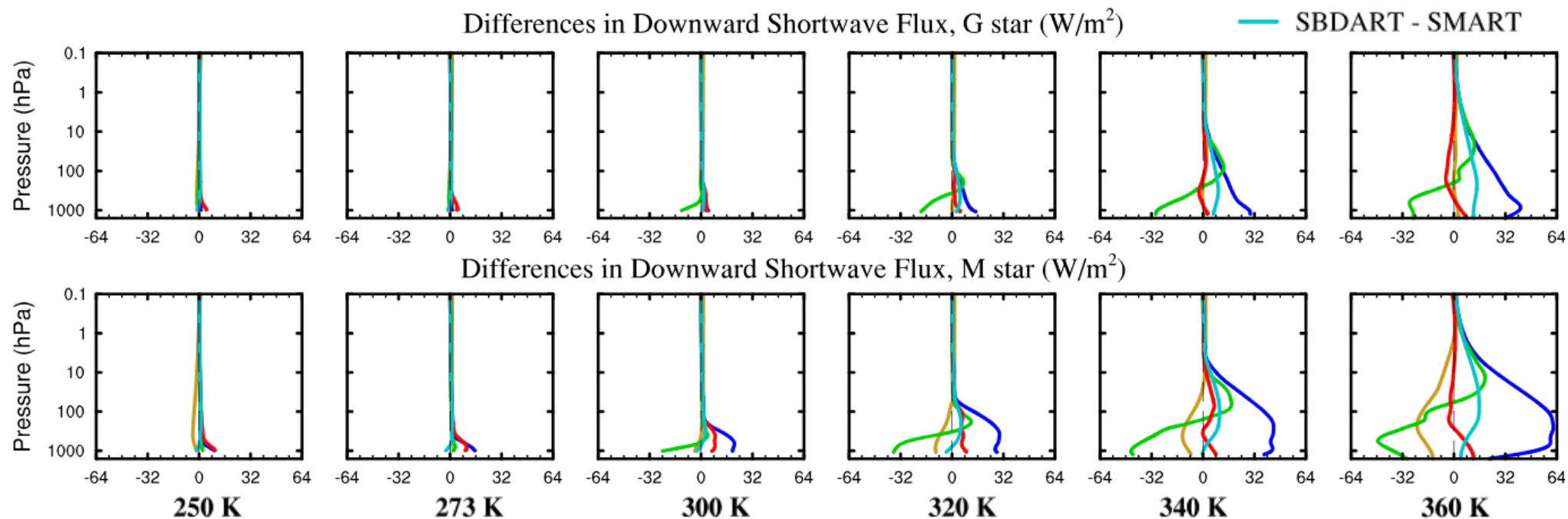
結果: 恒星放射のモデル間差異 (1)

- 大気上端の下向き放射スペクトルは
波数解像度やグリッドの取り方によって大きく異なる



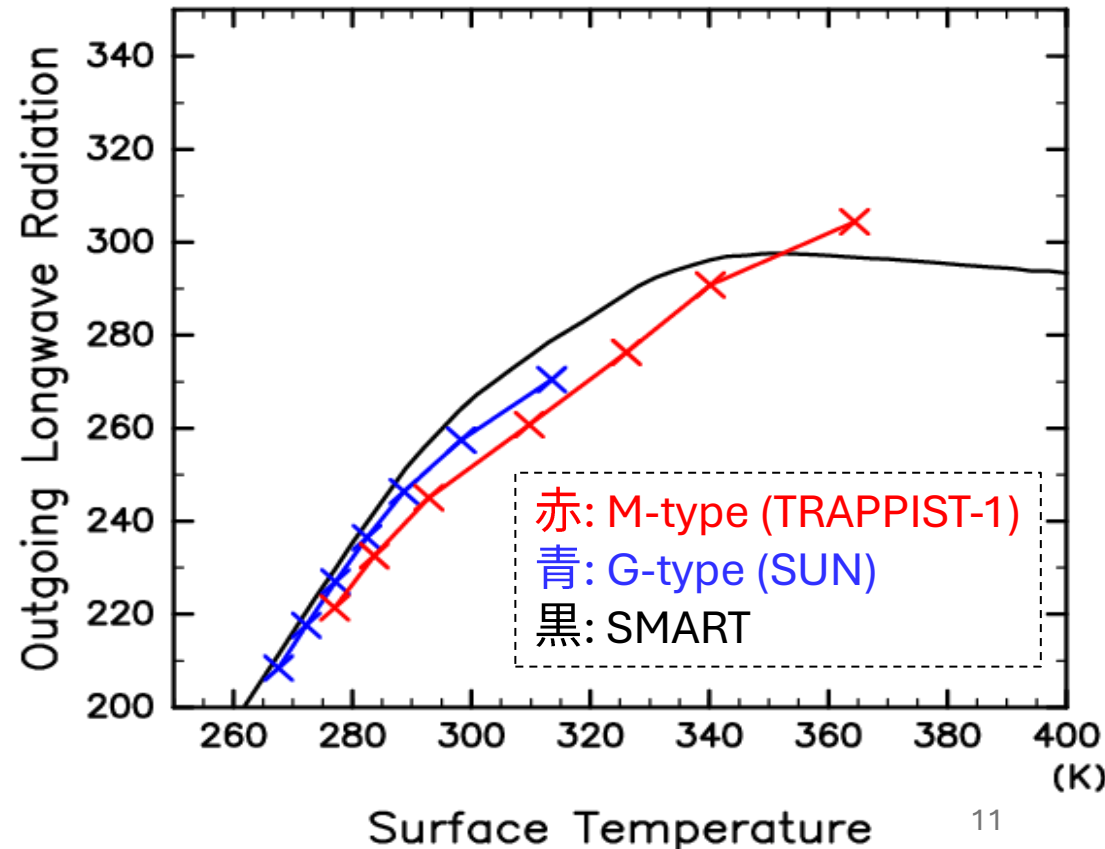
結果: 恒星放射のモデル間差異 (2)

- 下向き恒星放射フラックスは地表面に近づくほど差異大
- 波数解像度が粗いモデルは吸収帯の吸収係数や入射スペクトルの離散化精度が悪く, 放射フラックスの計算精度が悪化する



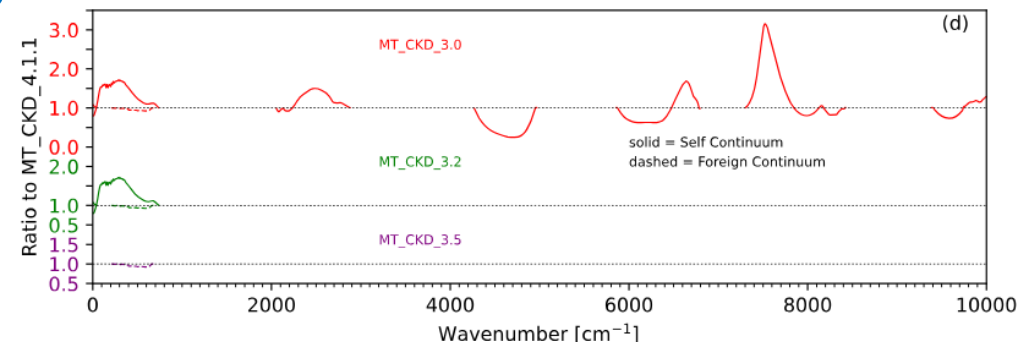
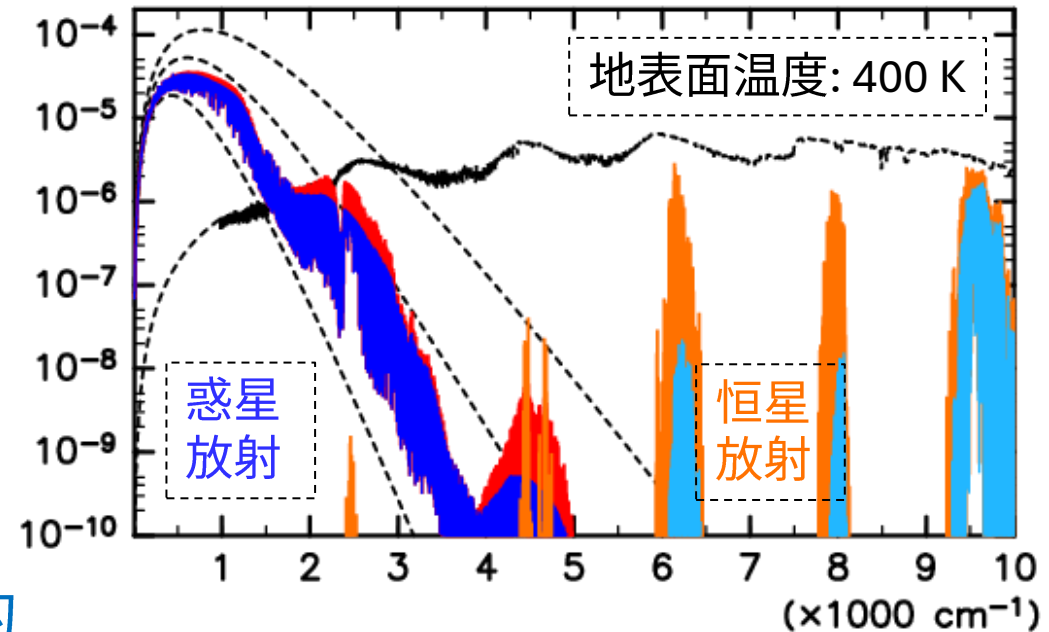
より新しい連続吸収で計算 (1)

- 吉川修論 (2026) の計算でも 360 K まで OLR が上昇し続けたため、連続吸収モデル (MT_CKD3.0) の更新が必要と考えた。
- MT_CKD4.3 と MT_CKD3.0 (W m⁻²)
での放射スペクトルの違いを調査。
- その他の設定
 - 線吸収: HITRAN2024
 - 吸収係数: 相関 k 分布
 - 波数グリッド: 283 点
 - 鉛直層数: 80 層
 - 多重散乱: Toon+89



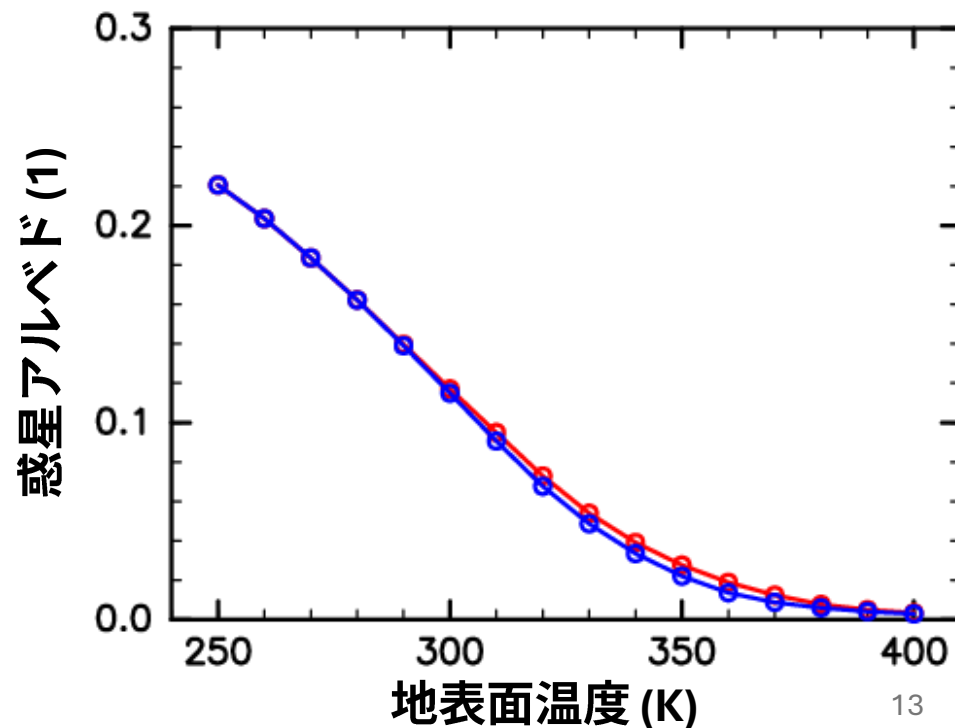
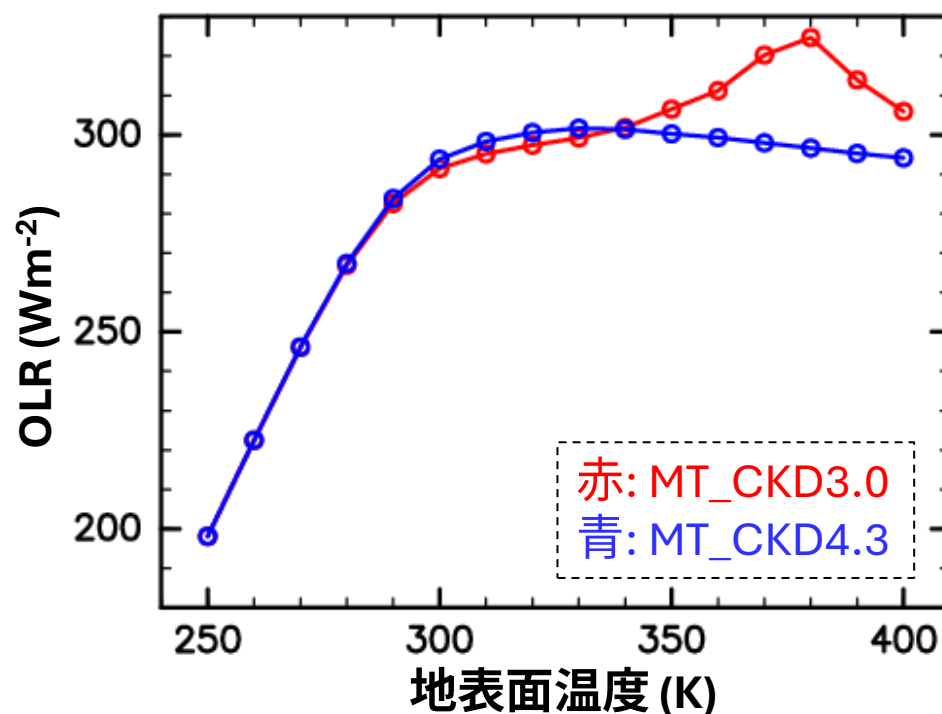
より新しい連続吸収で計算 (2)

- 惑星放射・恒星放射ともに一部波数で放射強度に差
 - 暖色: MT_CKD3.0
 - 寒色: MT_CKD4.3
- MT_CKD4.1.1 のモデルアップデート (Mlawer+, 2023) に示されているものと整合的



より新しい連続吸収で計算 (3)

- 惑星放射の比較
 - MT_CKD3.0 では 380 K で OLR が極大
 - MT_CKD4.3 では 330 K で OLR が極大
- 恒星放射の比較: 高々 1 % 程度の差



本発表のまとめ・今後の展望

- 本発表のまとめ
 - Yang+ (2016) に見られた放射過程のモデル差について、連続吸収モデルに着目して詳細に調査した
 - 高温 (~ 350 K) 状態における OLR に大きな差が生じた
 - 惑星アルベドの差異は高々 1% 程度
- 今後の展望
 - 成層圏大気の等温・等 H_2O 混合比の仮定が HZIB や大気散逸時間スケールに与える影響の調査 (比較惑星学コロキウム 2026/06/03)

参考文献

1. Goldblatt, C., et al. (2013). *Nature Geosci*, 6, 661-667.
<https://doi.org/10.1038/ngeo1892>
2. Leconte, J., et al. (2013). *Nature*, 504, 268-271.
<https://doi.org/10.1038/nature12827>
3. Kopparapu, R. K., et al. (2013). *ApJ*, 765(2), 131.
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/765/2/131>
4. Yang, J., et al. (2016). *ApJ*, 826(222), 11pp.
<https://doi.org/10.3847/0004-637X/826/2/222>
5. Gordon, I. E., et al. (2026). *JQSRT*, 353, 109807.
<https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2026.109807>
6. Mlawer, E. J., et al. (2023). *JQSRT*, 306, 108645.
<https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2023.108645>
7. Toon, O. B., et al. (1989). *JGR Atmospheres*, 94, 16287-16301.
<https://doi.org/10.1029/JD094iD13p16287>