

生命存在可能領域の新しい見積もり： Kopparapu et al (2013)のレビュー

Kopparapu et al (2013) Habitable zones around
main-sequence stars : New estimates,
Astrophysical J., 765, 131

石渡正樹(北大・理)

2013年06月05日 WTKオンラインセミナー

Habitable Zone

- Habitable zone とは：
CO₂-H₂O-N₂大気を持つ惑星が表層に液体の水を保持することのできる恒星の周りの領域
 - Huang (1959), Hart (1978), Kasting et al (1993)...
- 今後の探査計画のことを考えるとM型星の周りのHZの見積もりが重要
 - James Webb Space Telescope (JWST)
2018年打ち上げ
M型星周りの地球的な惑星のスペクトルをとることができるかもしれない(トランジット観測)

HZの幅を決める条件

- これまでのHabitable zone の幅の見積もりはKasting et al (1993)に基づく
- HZの内側境界
 - Water loss limit (moist greenhouse limit):
地球の年令で地球海洋が散逸するほど成層圏 H_2O 量が増える条件(実際には H_2O が光分解されてHが散逸)
 - Runaway greenhouse limit:
暴走温室状態が発生する条件
- HZの外側境界
 - Maximum greenhouse limit:
 CO_2 大気を持つ惑星において表面温度が273Kとなる条件

この論文の目的

- Kasting et al (1993) のアップデート
- Kasting et al (1993)は古い
 - 赤外域における H_2O , CO_2 の吸収計算にバンドモデルを使用
 - CO_2 の衝突吸収(CIA)を過大評価している(Halevy et al, 2009; Wordsworth et al, 2010)
 - 恒星スペクトル型で低温側が物足りない: $T_{\text{eff}}=3700\text{-}7200$

モデル

- 大気構造仮定
 - 内側境界の計算:
H₂O主成分大気を考える
T_s=200-2000K, 等温成層圏(200K)
湿潤断熱線を表面から成層圏まで伸ばす
 - 外側境界の計算:
CO₂主成分大気を考える
T_s=273K固定
CO₂の凝結が起こった高度から潤断熱線を伸ばす。
pCO₂=1-37.8 気圧
- 放射計算: 新しく計算した吸収係数を使用
- 表面温度を与えて外向き赤外放射を計算する
- 雲無し
- 鉛直層数: 101(層数を増やした計算も実施)

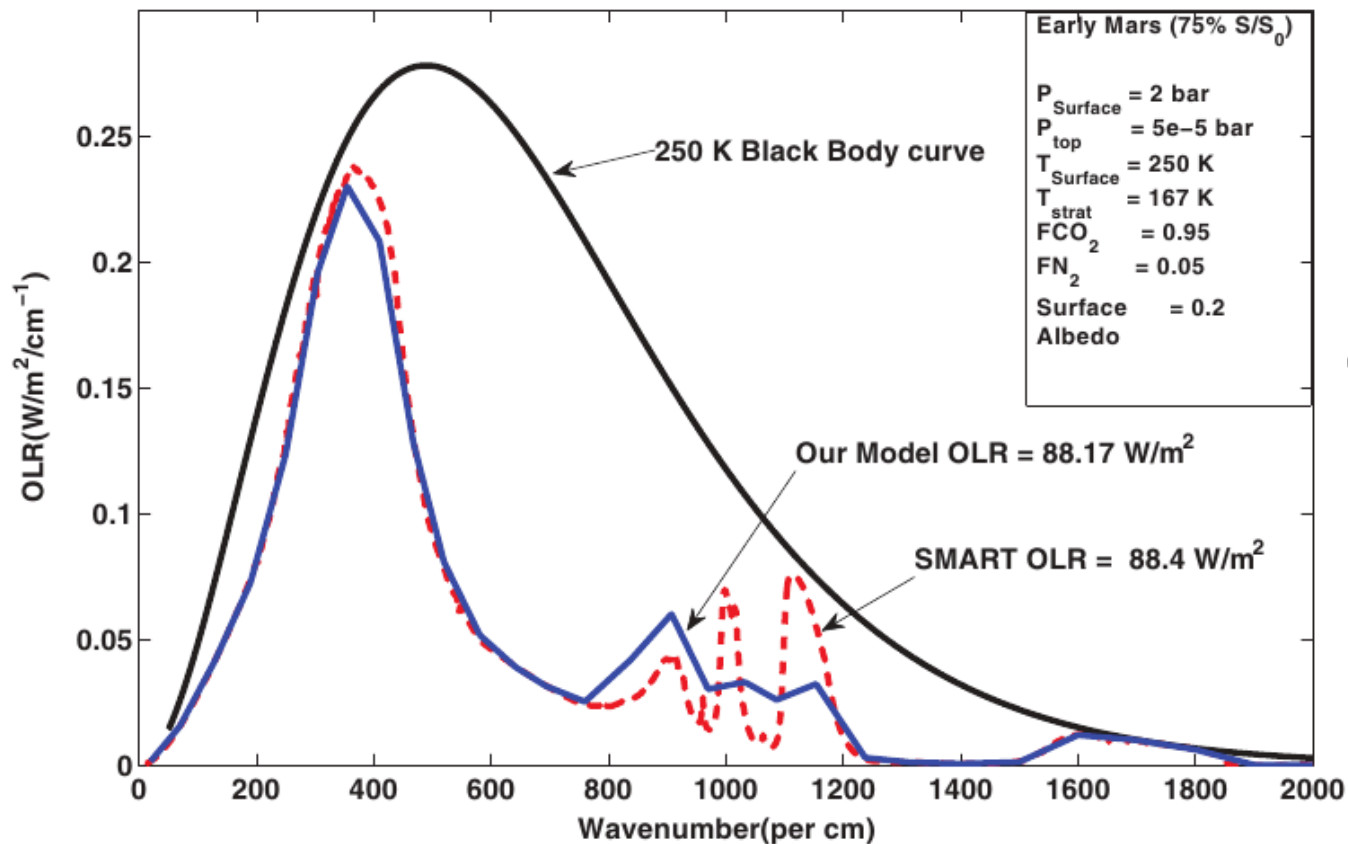
放射計算の改良点

- KSPECTRUMでk分布の吸収係数を計算
 - KSPECTRUM: <http://code.google.com/p/kspectrum/>
 - HITRAN2008とHITEPM2010のデータベースを使用
 - H₂Oの連続吸収に関しては、BPS formalism(Paynter and Ramaswamy, 2011) を使用
- 水蒸気によるレイリー散乱を「ちゃんと」入れた
 - Kasting et al (1993) で使われていたのは空気の式
- CO₂のCIAの計算を改良
 - Cruszka and Borysow (1997), Baranov et al (2004), Halevy et al(2009)のパラメタリゼーションを使用
- 恒星放射
 - T_{eff}=2600-7200K
 - スペクトル分布はBT Settl (Allard et al, 2003, 2007)

モデル検証(2.2節)

- Line-by-line計算との比較をおこなう
 - 2気圧のCO₂大気の場合
Ts=250K, 太陽定数: 38億年前の火星条件
 - 6.5気圧のN₂-H₂O大気の場合
Ts=400K, 太陽定数: 現在の地球条件
- Line-by-line 計算
 - SMART(Spectral Mapping Atmospheric Radiative Transfer; Robinson et al, 2011)を使用
 - D. Crisp により開発
 - H₂Oの連続吸収: CKD continuum (Clough et al, 1989)を使用
- 鉛直総数: 70層

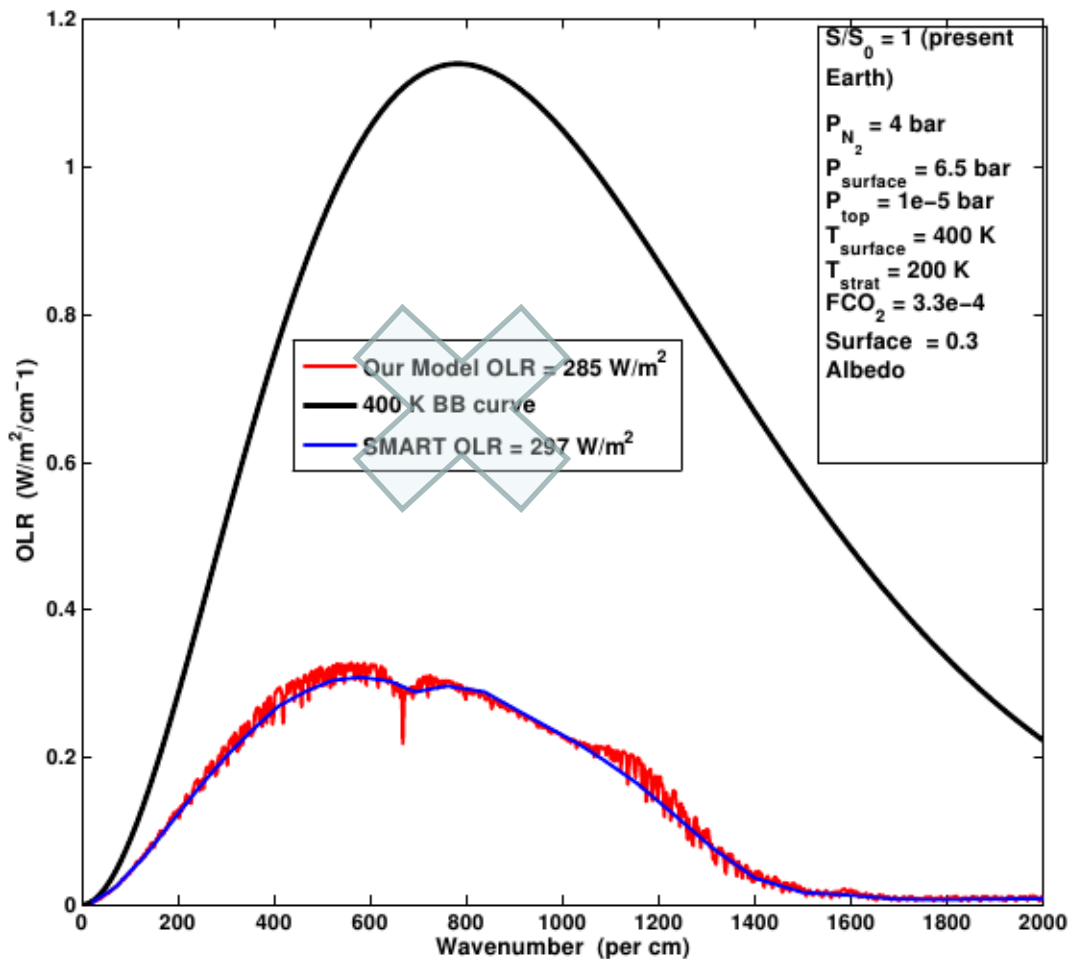
Line-by-lineとの比較: CO₂大気



図の修正前には、
波長積分したOLR
の違いは
667cm⁻¹の振動帯
の吸収が違うため、
と言っている

Line-by-lineとの比較: H₂O大気

- Kopparapu モデル OLR=285W/m²
- 400K 黒体放射
- SMART OLR=297W/m²



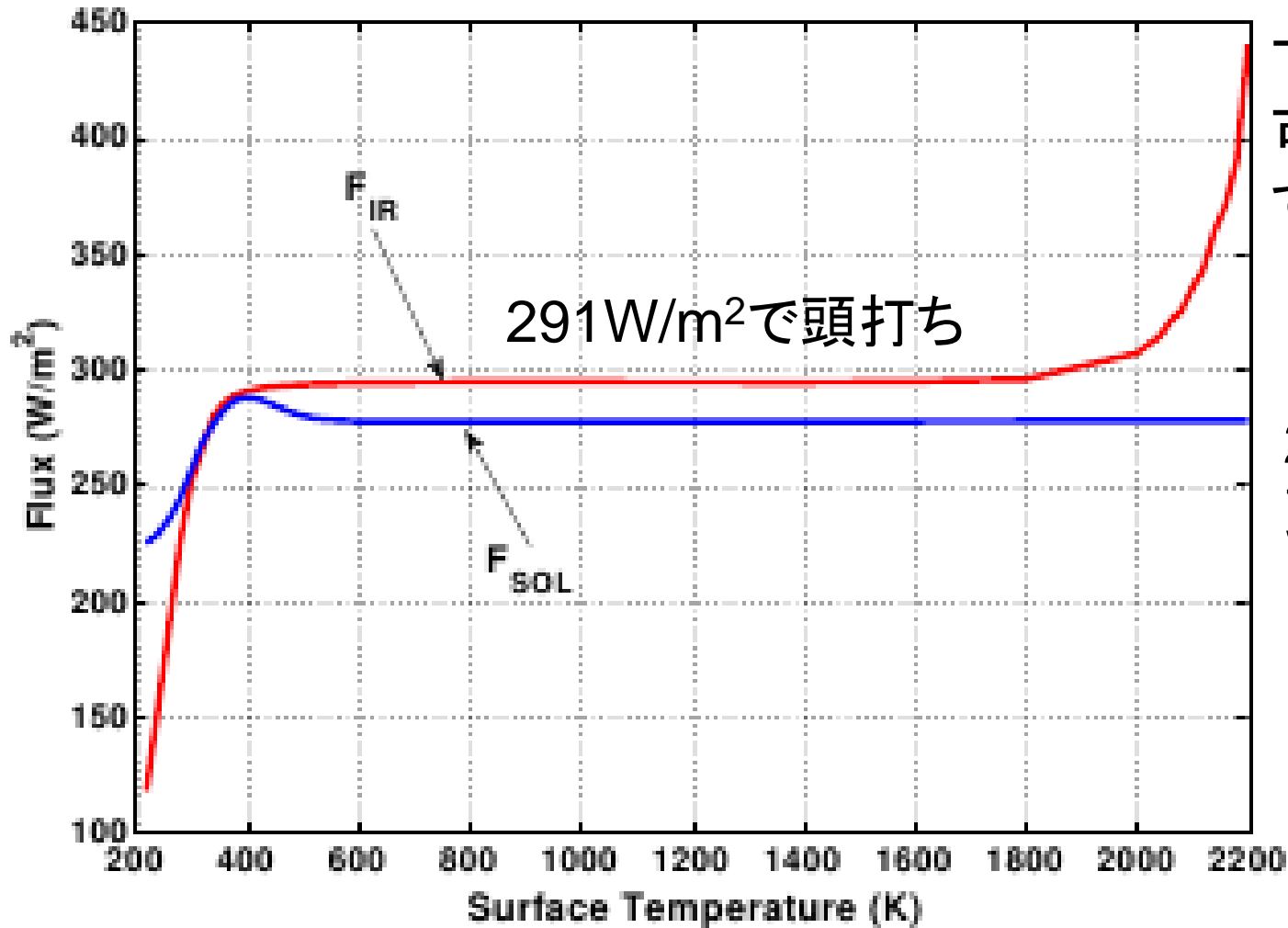
波長積分したOLR
の違いは
800-1200cm⁻¹と
300-600cm⁻¹域で
生じている、
と言っている

Kopparapu et al (2013) Fig.2

HZの内側境界(3.1節)

- H₂O主成分大気に関する計算を実施
 - 多分、現在の地球大気と同量のCO₂, N₂が入っている
- Ts=200-2000K, 等温成層圏(200K)
湿潤断熱線を表面から成層圏まで伸ばす
- 太陽定数: 1360W/m²
- 放射計算にはHITEMP2010を使って計算した吸収係数を用いる
- 表面アルベド: 0.3 (雲が無い分、大きめに設定)

惑星放射と短波放射



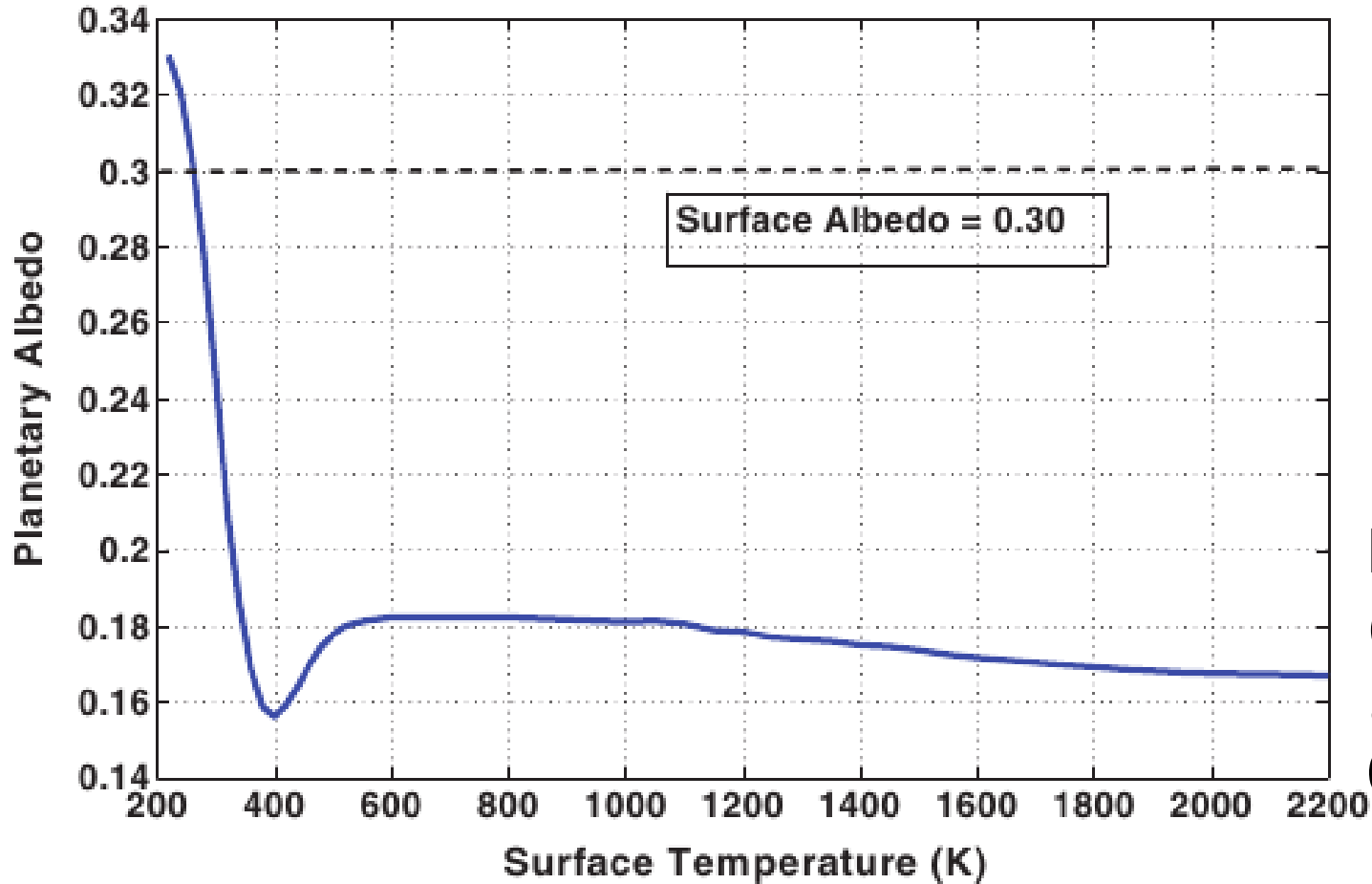
下層大気が
可視域・NIR
で射出

291W/m²で頭打ち

264W/m²で
頭打ち。
レイリー散乱
のため

惑星アルベド

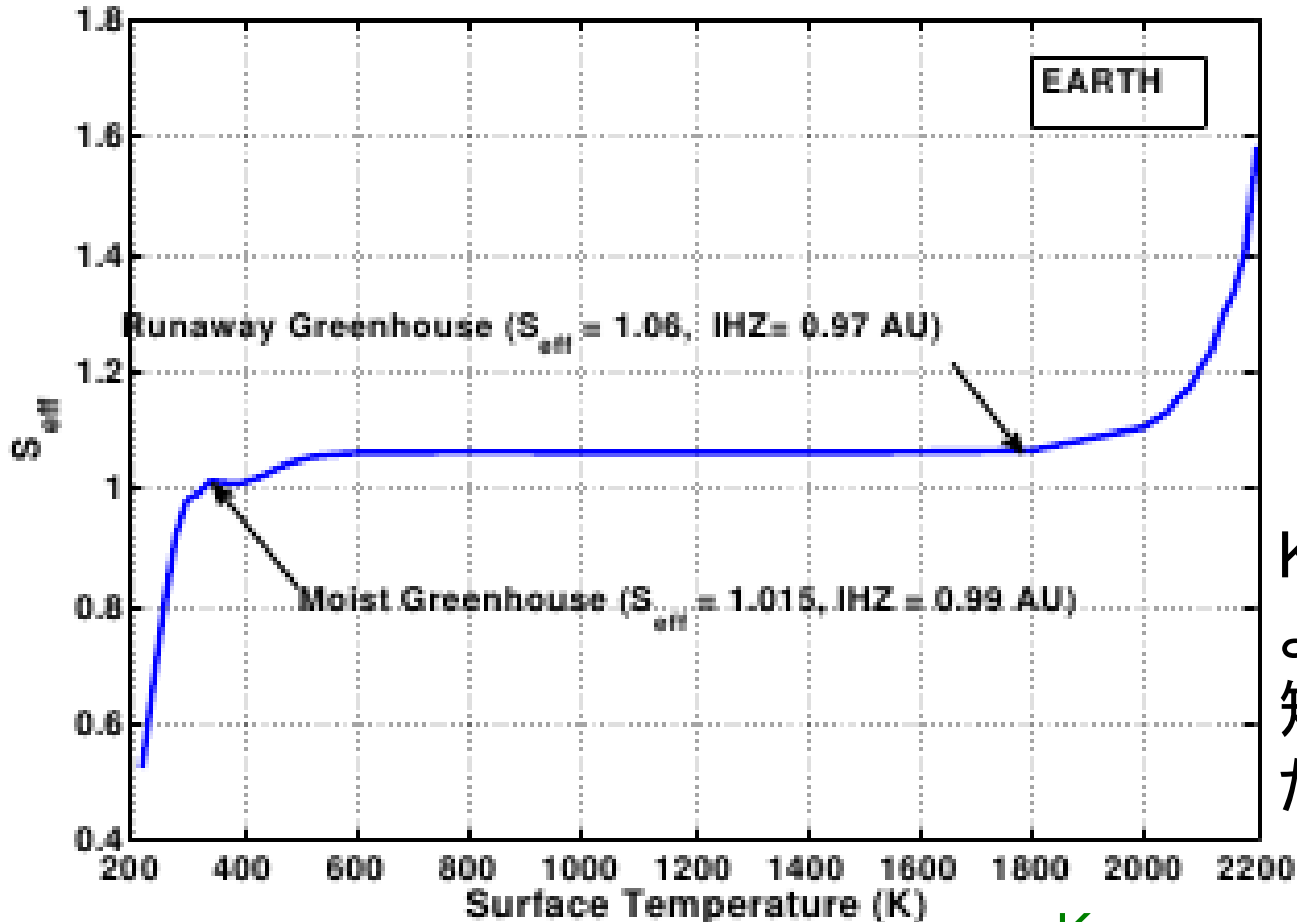
$$A_p = 1 - \frac{4F_{SOL}}{S_0}$$



Kastint et al
(1993)では、
およそ
0.35だった

Effective solar flux

$$S_{eff} = \frac{F_{IR}}{F_{SOL}} = \frac{4F_{IR}}{S_0(1 - A_p)}$$



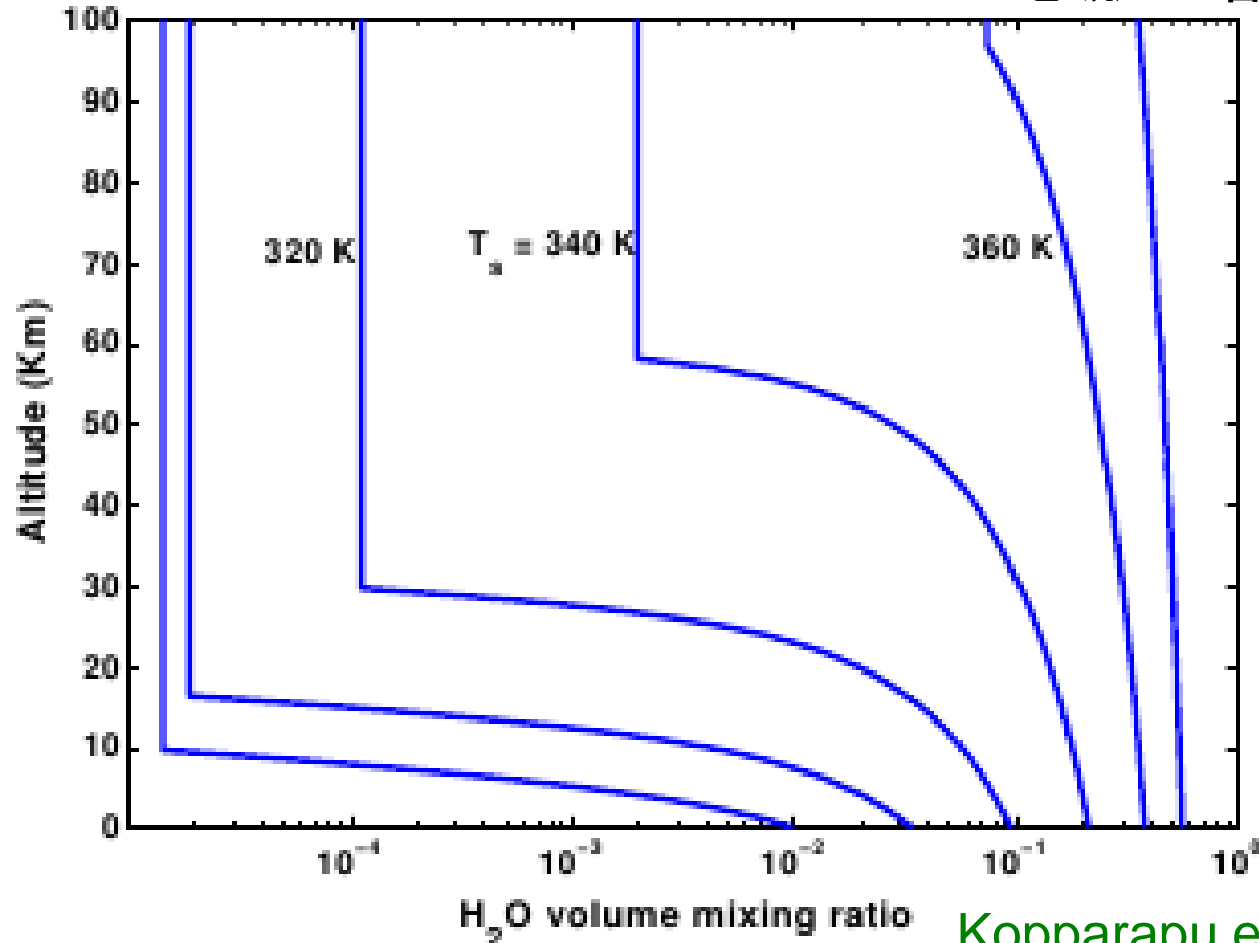
暴走温室限界
と水消失限界
が決まる

Kastint et al (1993)
よりも早く暴走。
短波吸収増えた
ため

Kopparapu et al (2013) Fig.3c

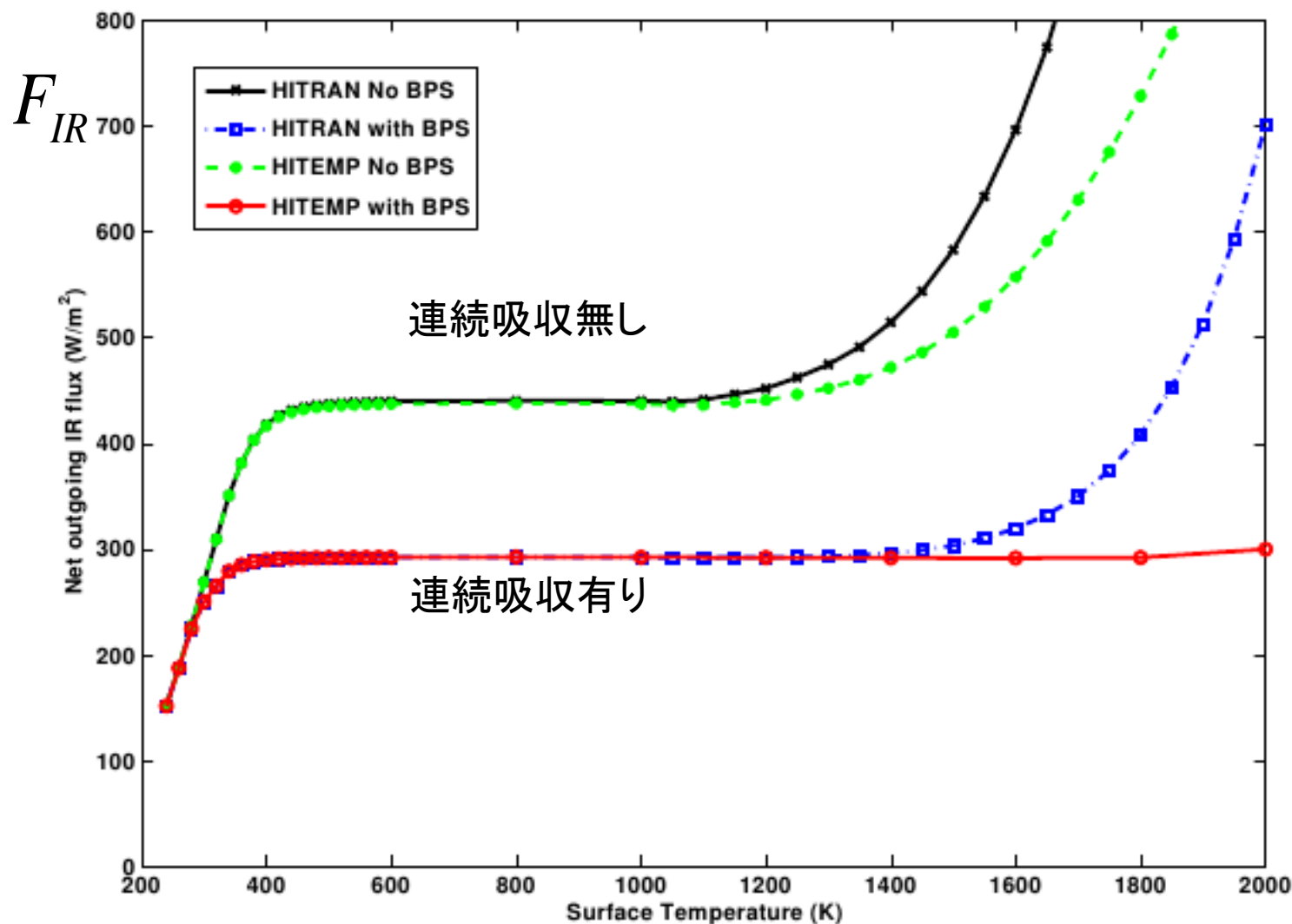
水蒸気の鉛直分布

成層圏のH₂O量が
が急激に増加



Kopparapu et al (2013) Fig.3d

HITRANとHITEMPの比較(3.2節)

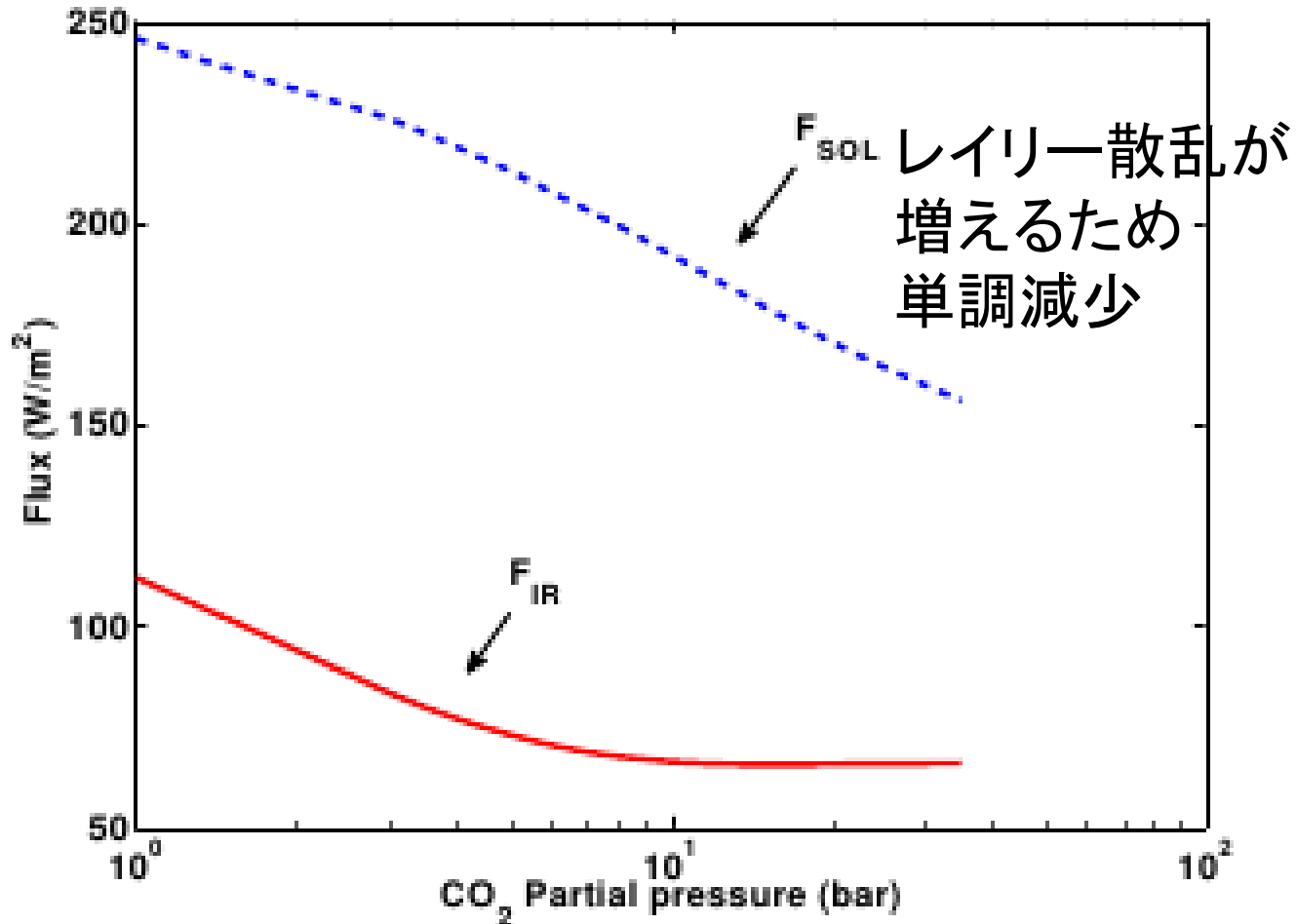


連続吸収を
入れないと
水消失限界
も暴走限界
も太陽に
近づく

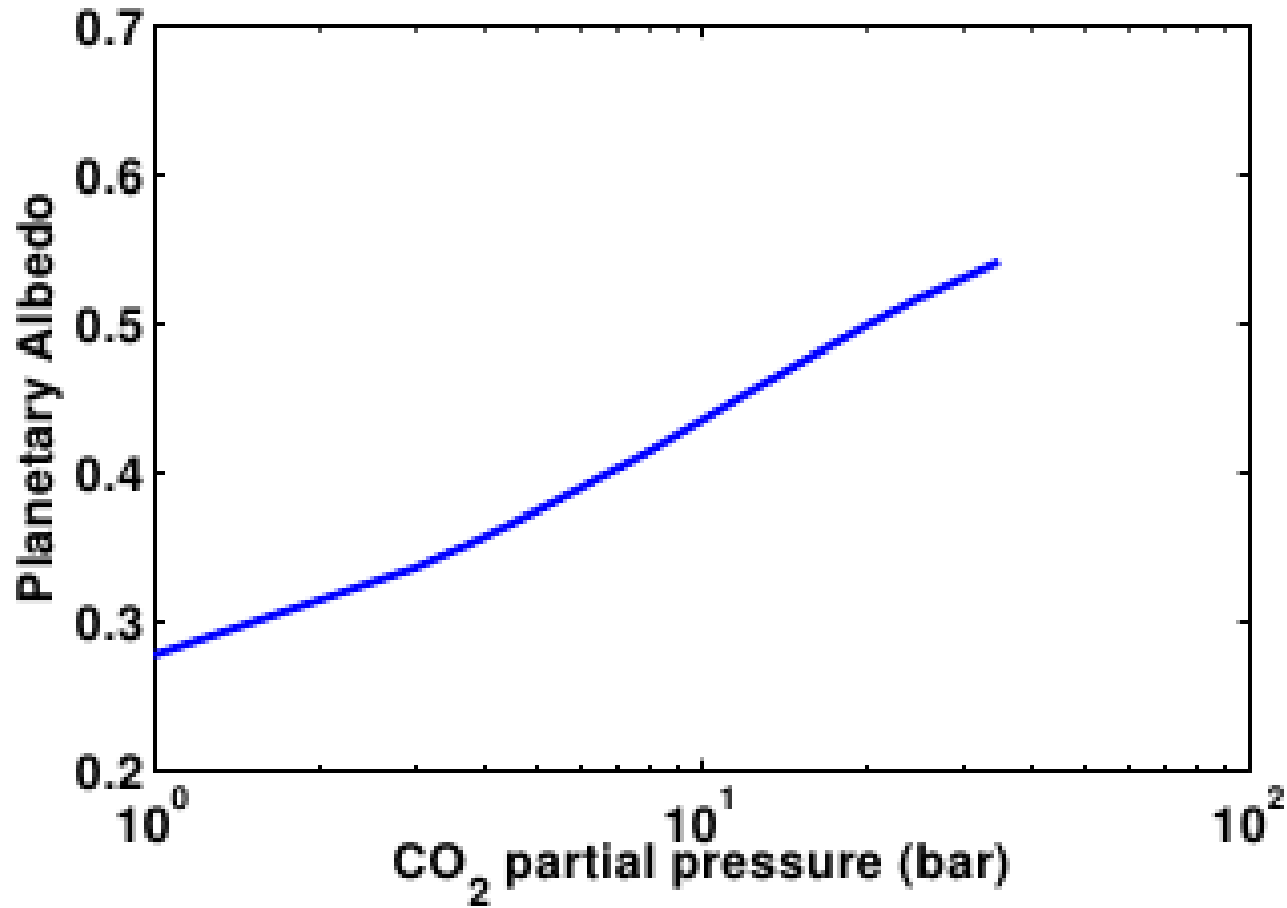
HZの外側境界(3.3節)

- CO₂主成分大気に関する計算を実施
- $T_s=273K$,
CO₂の凝結が起こった高度から潤断熱線を伸ばす。
154Kとなる高度より上層では等温とする
- $p_{CO_2}=1-37.8$ 気圧
- 太陽定数:初期火星条件?
- 表面アルベド:0.2?

惑星放射と短波放射



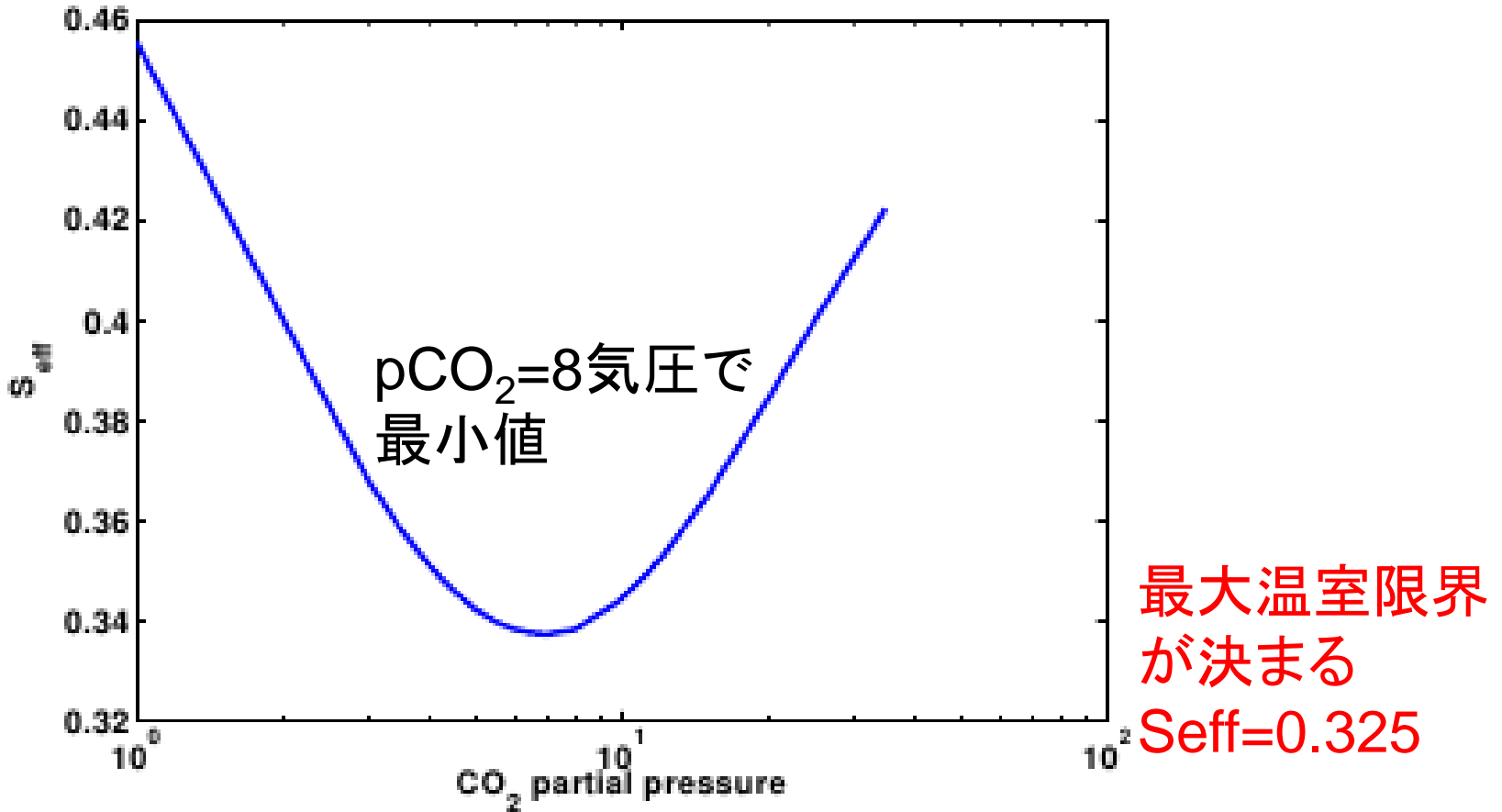
惑星アルベド



Kopparapu et al (2013) Fig.5b

Effective solar flux

$$S_{eff} = \frac{F_{IR}}{F_{SOL}} = \frac{4F_{IR}}{S_0(1 - A_p)}$$



HZの境界位置

	HZ 内側境界			HZ 外側境界	
	Moist greenhouse	Runaway greenhouse	Recent Venus	Maximum greenhouse	Early Mars
Kopparapu et al (2013)	0.99AU	0.97AU	0.75AU	1.67AU	1.77AU
Kasting et al (1993)	0.95AU	0.84AU	0.75AU	1.67AU	1.77AU

Kopparapu et al (2013) Erratum Table 1

- Recent Venus: 10億年前の金星条件
 - 金星表層では10億年前には液体の水は無かった
Solomon and Head (1991)
- Early Mars: 38億年前の火星条件
 - 火星表層では38億年前には液体の水が存在した

地球とは異なる条件下にある惑星のHZ(3.5節)

- 1気圧のN₂を含む大気

	内側境界		外側境界
	Moist greenhouse	Runaway greenhouse	Maximum greenhouse
火星サイズ	1.035AU	1.033AU	1.72AU
地球	0.99AU	0.97AU	1.70AU
スーパーアース	0.94AU	0.92AU	1.67AU
pCO ₂ =5.2 × 10 ⁻³	1.00AU	0.97AU	-
pCO ₂ =5.2 × 10 ⁻²	1.02AU	0.97AU	-
pCO ₂ =5.2 × 10 ⁻¹	1.02AU	0.97AU	-
pCO ₂ =5.2	0.99AU	0.97AU	-

重力小さいと
HZが外側へ

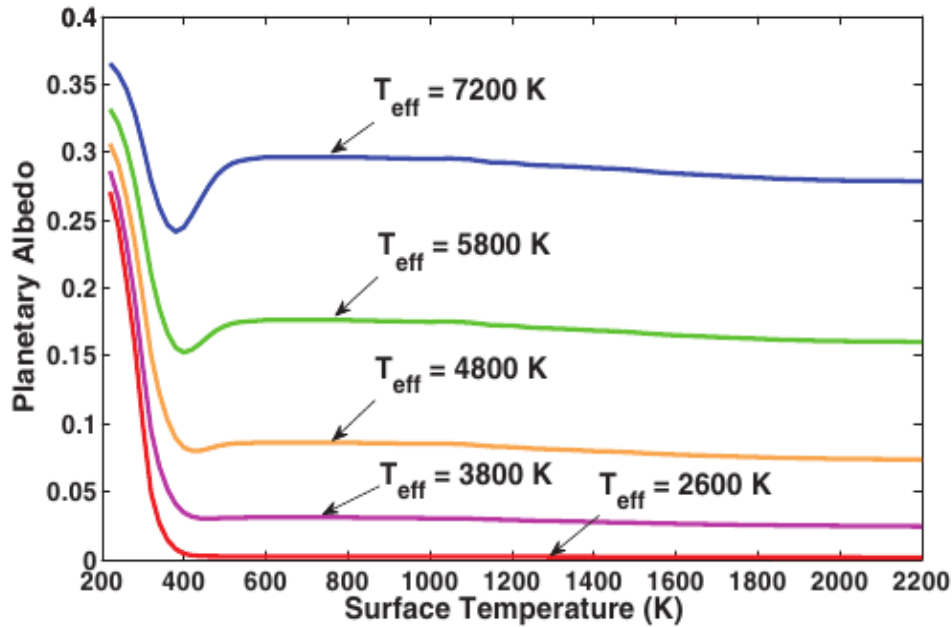
重力大きいと
HZ広がる

太陽以外の恒星周りのHZ(4節)

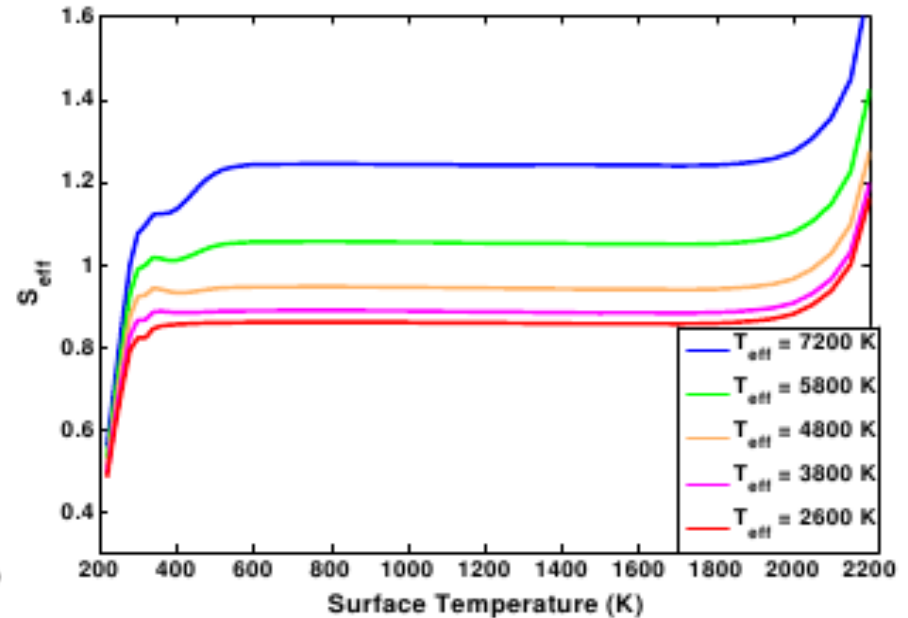
- 恒星スペクトルのデータ: "BT Settl" grid of models (Allard et al., 2003; 2007)を使用
 - 波長域: 0.23-4.54 μm
 - 温度範囲: 2600-70000K
- ここでの計算では、 $T_{\text{eff}}=2600-7200\text{K}$
- 内側境界、外側境界の計算ともこれまでと同様の設定だと思われる

太陽以外の恒星のHZ内側境界

惑星アルベド



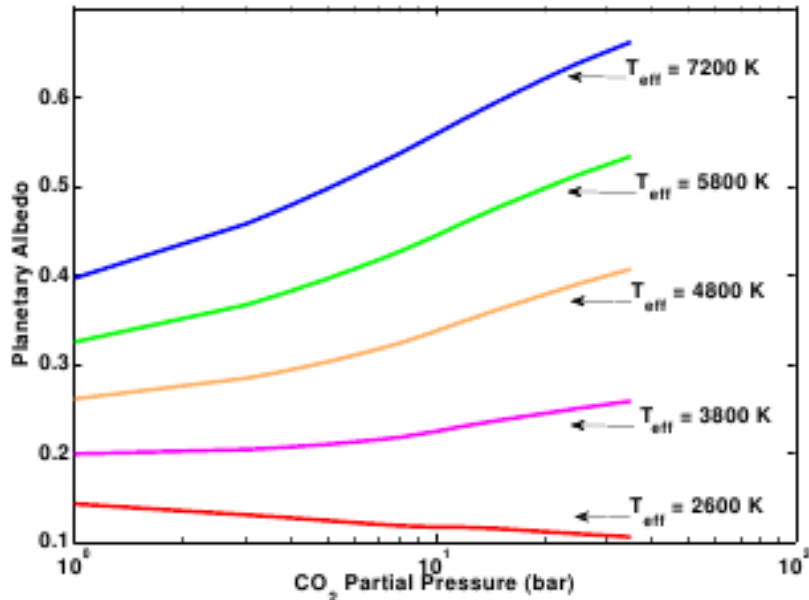
有効恒星放射 S_{eff}



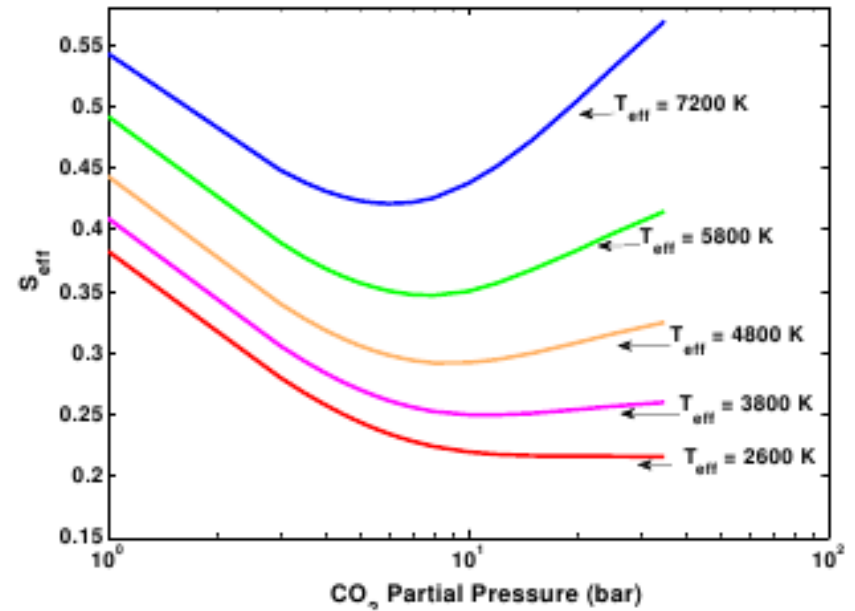
Kopparapu et al (2013) Erratum Fig. 6a
Kopparapu et al (2013) Fig. 6b

太陽以外の恒星のHZ外側境界

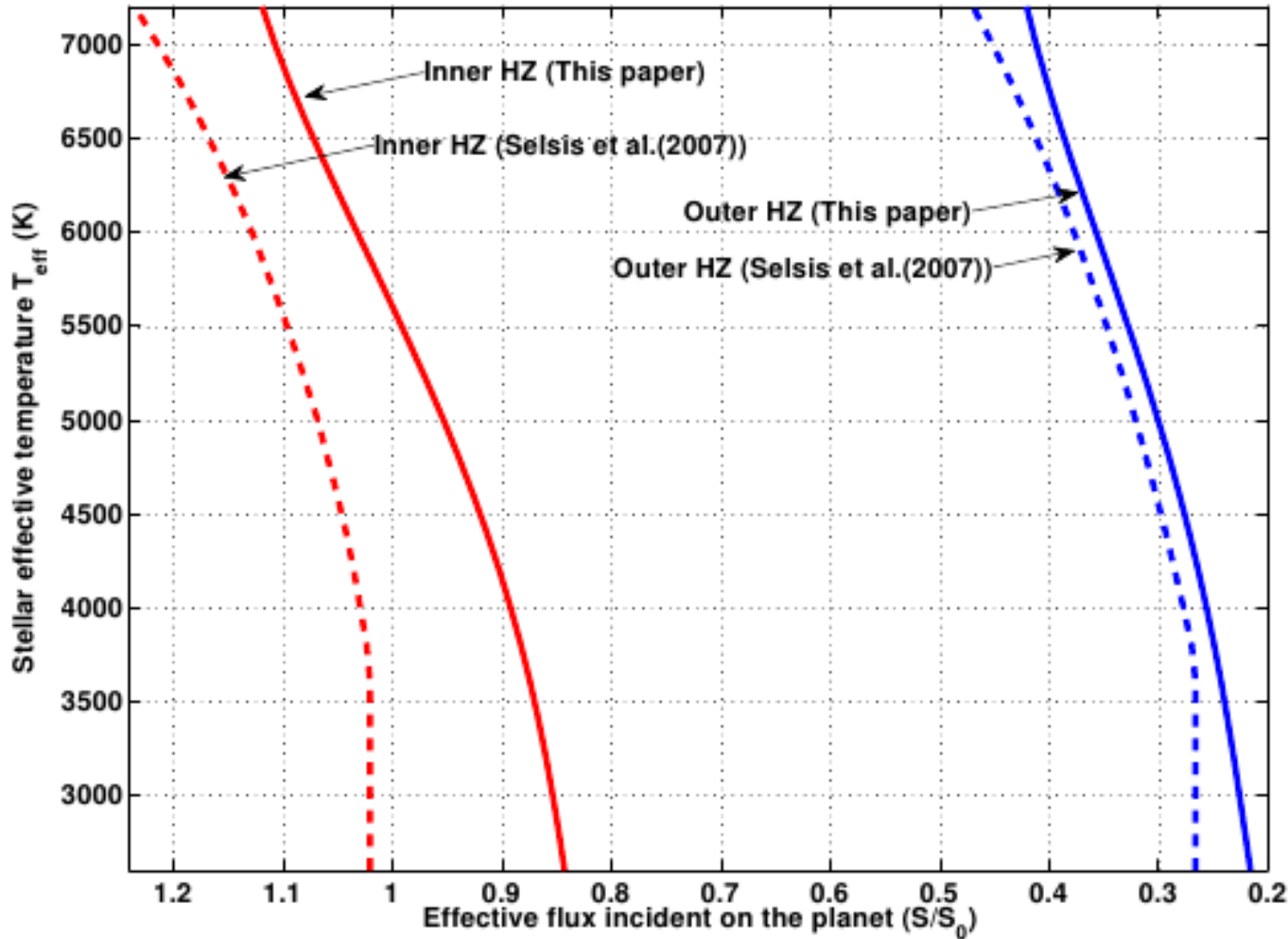
惑星アルbedo



有効恒星放射S_{eff}



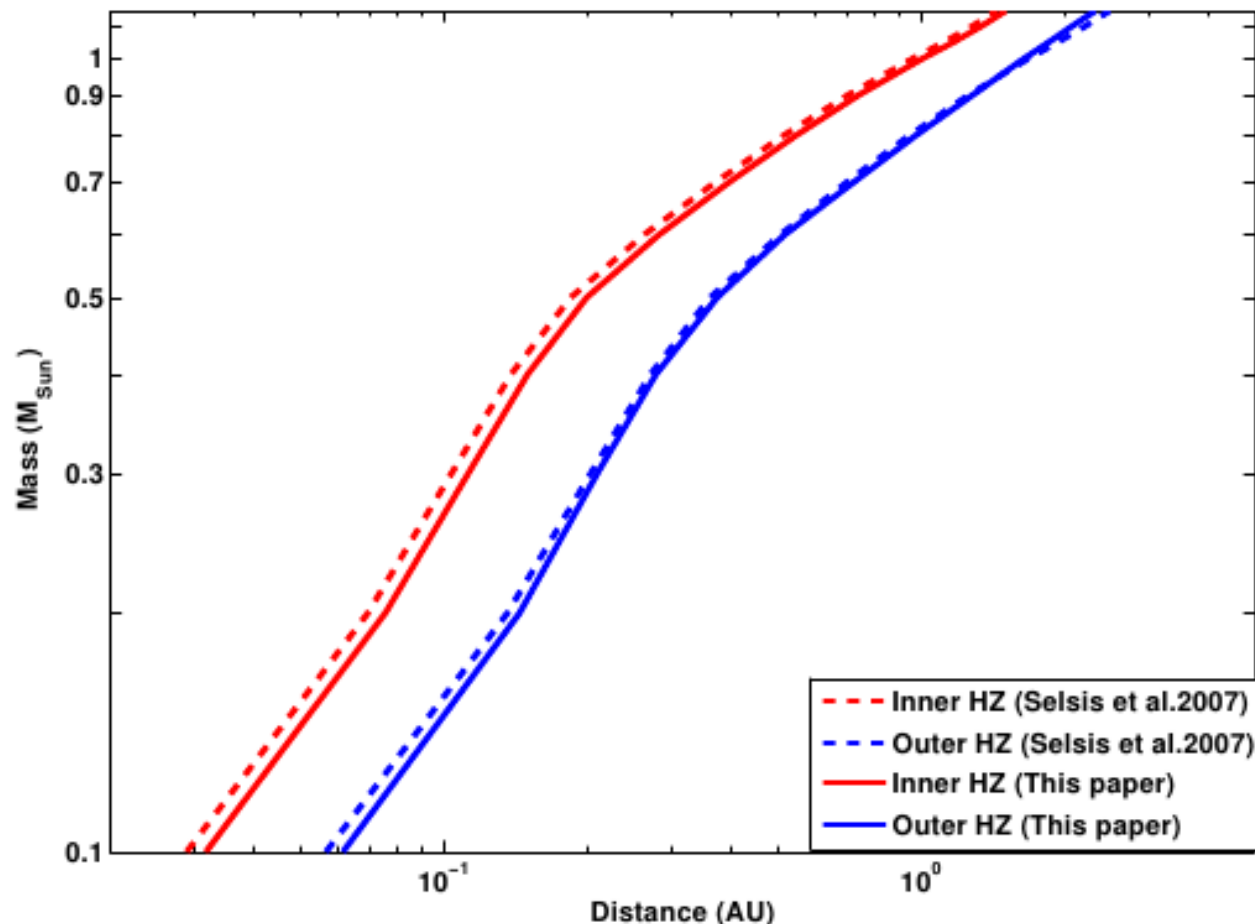
太陽以外の恒星のまわりのHZ



Selsis et al
(2007)との
比較

モデルにより
内側境界
がかなり違う

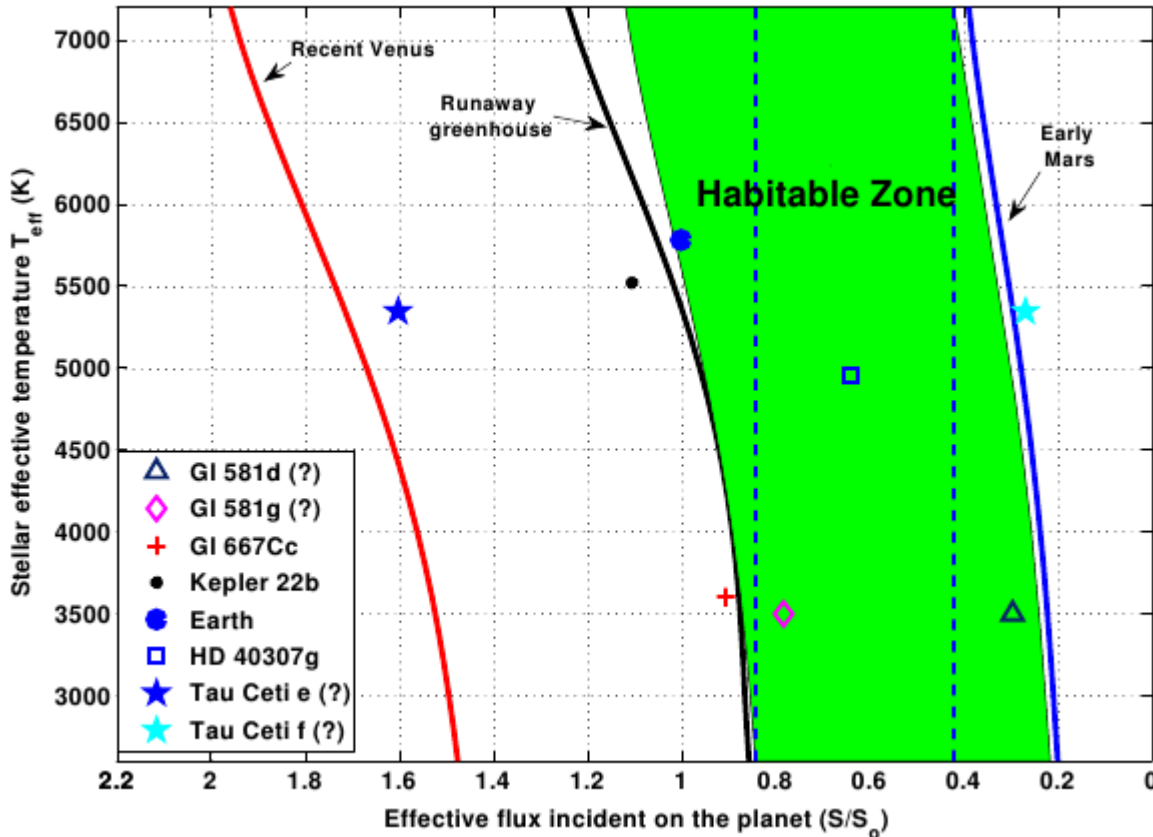
連続生命存在可能領域



CHZ: 50億年
ハビタブル
な領域

恒星進化モデル:
Baraffe et al
(1998)

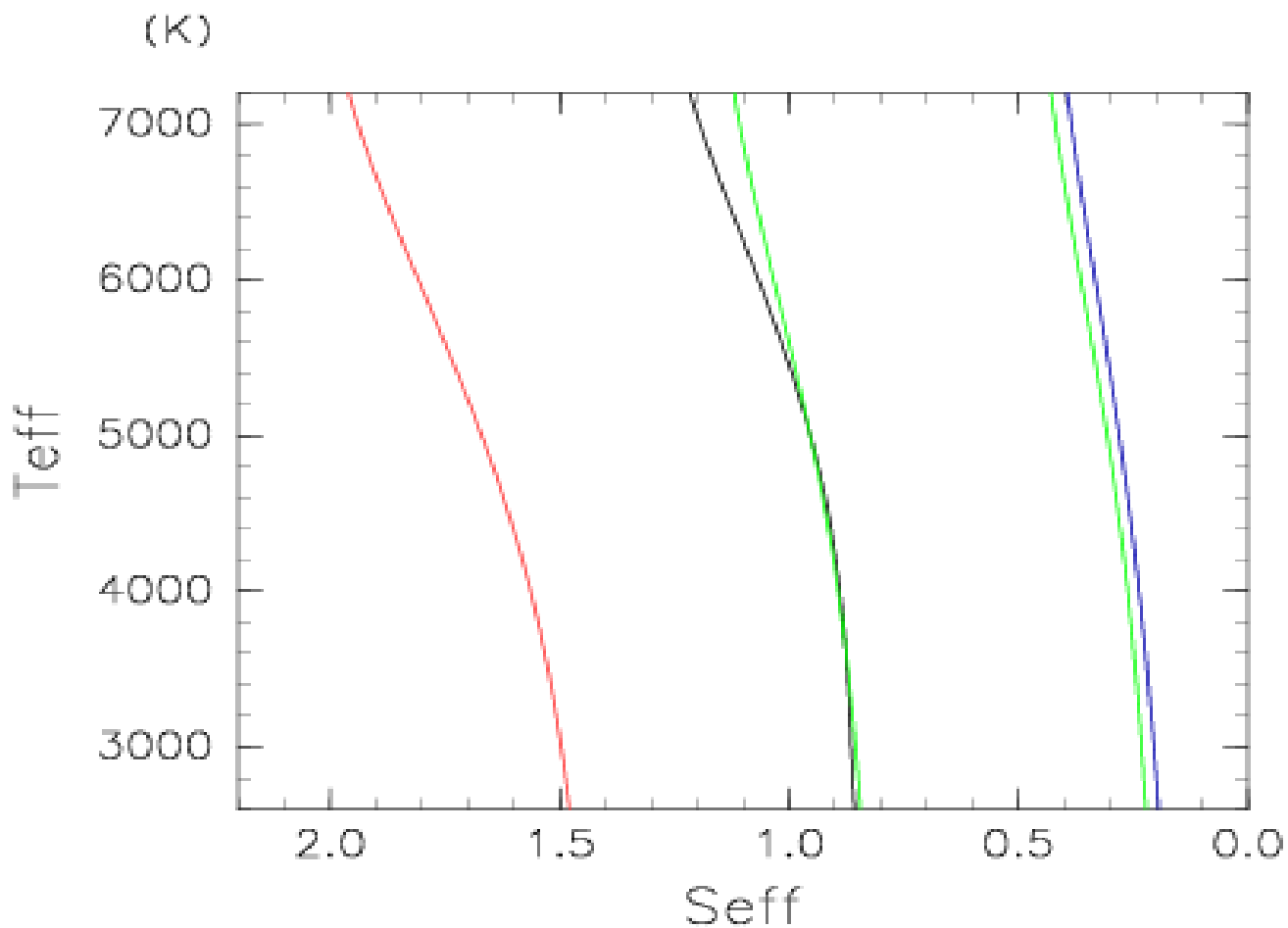
観測された惑星との対応



破線で挟まれた領域は、恒星の型によらずハビタブル

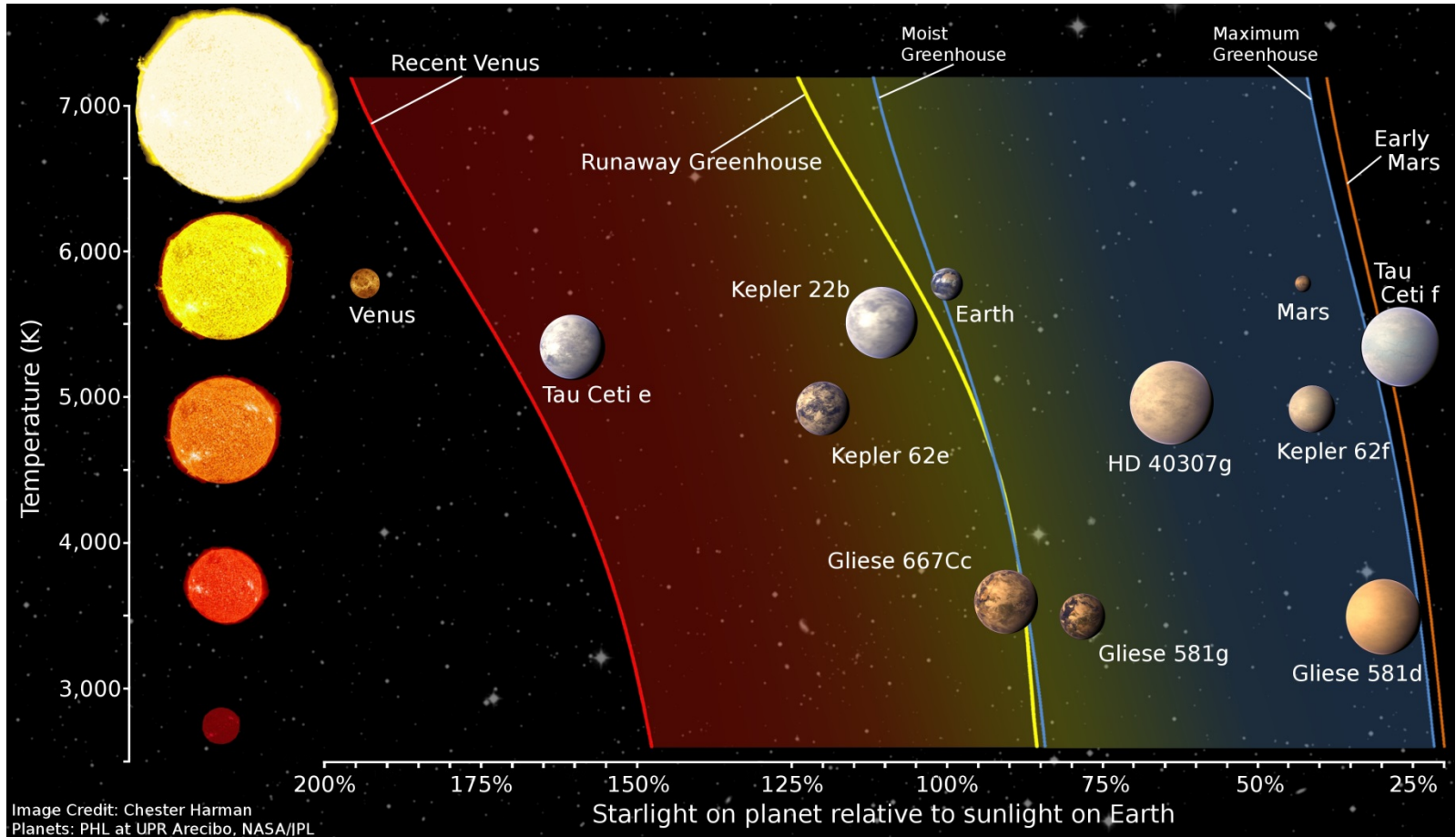
この領域に2つの惑星が入っている

前ページ図の修正版



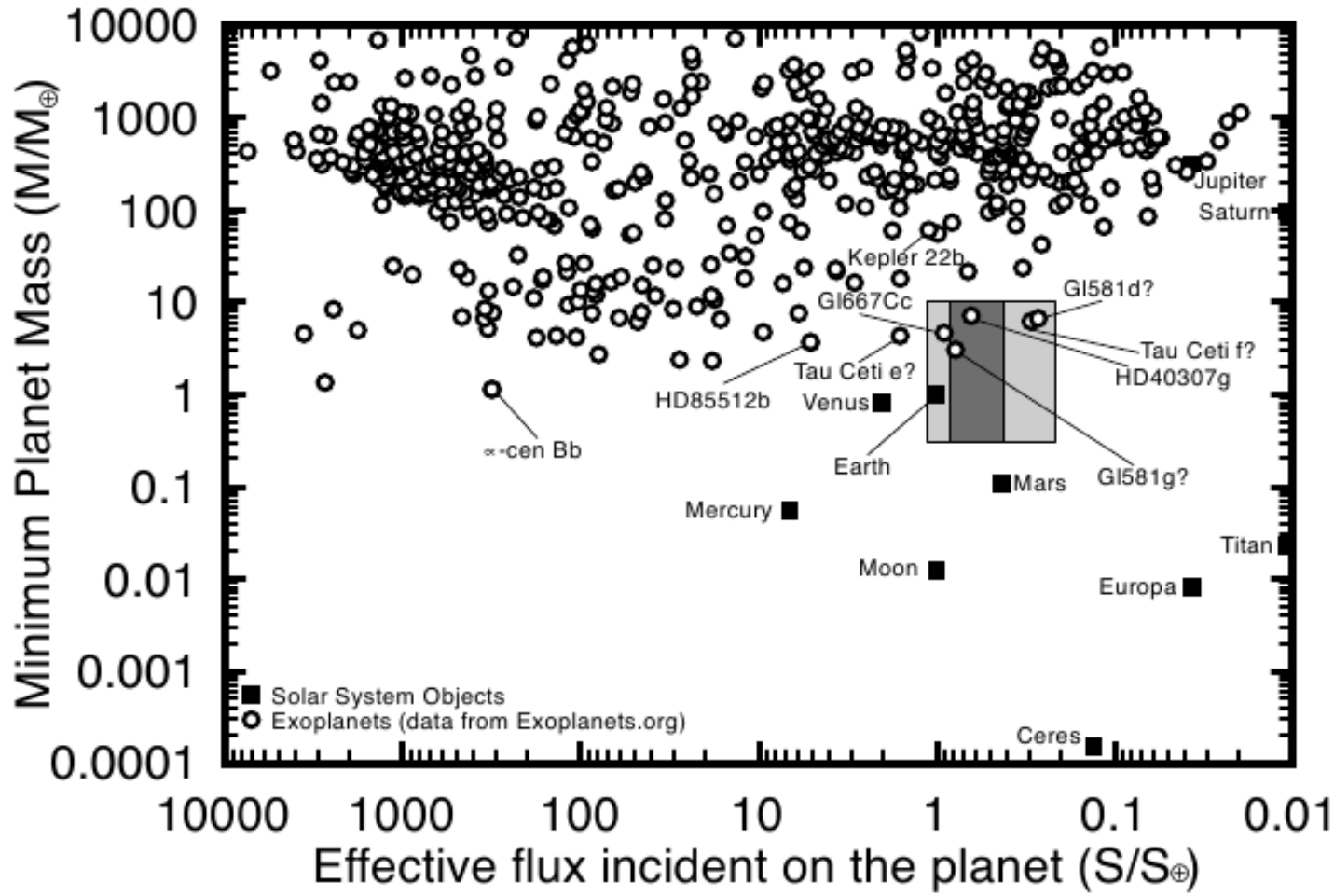
Erratumの係数を使って計算し直したもの

観測された惑星との対応(webの図)



<http://depts.washington.edu/naivpl/content/hz-calculator>

(質量, 入射量)面における分布



Exoplanet.org
のデータを
プロット

地球型惑星
として
 $0.3-10M_E$
を考える

Kopparapu et al の結論

- 太陽まわりのHabitable zone:
0.99AU (water loss limit)
~ 1.67AU(maximum greenhouse limit)
- 生命存在可能条件を考える指標として、有効恒星放射 S_{eff} を使うのが良い(惑星の有効放射温度はよろしくない)
- 議論の部分(5節後半)では以下も言っている
 - 今後の探査計画においてHZ限界を考える場合、water loss limit とmaximum greenhouse limit を使うべき
 - 離心率など軌道要素が変わる場合は結果が変わるかも
 - 雲は問題だ

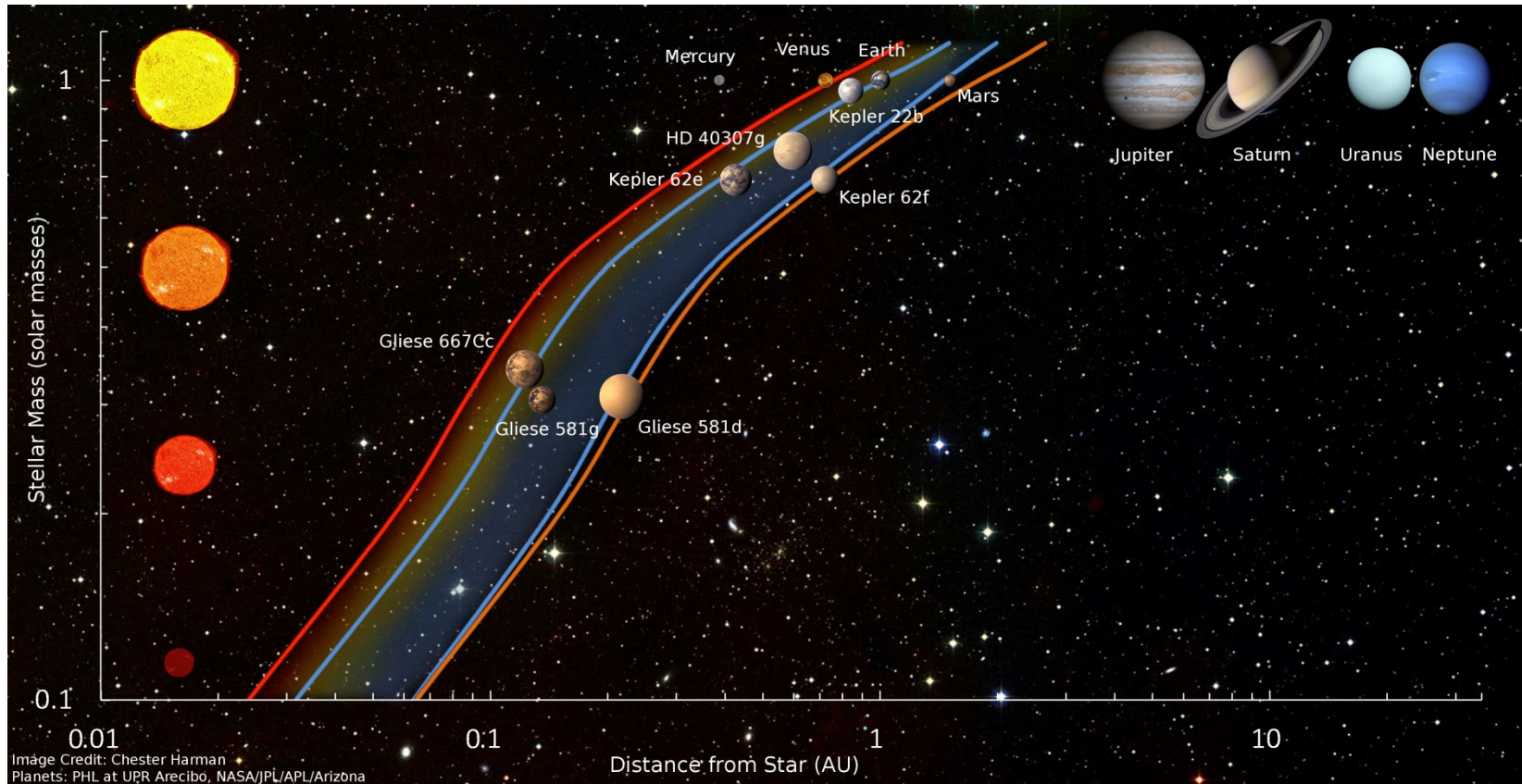
感想

- やはり雲に関する検討が重要？
- 高温星の周りのHZは water loss limit が規定。
成層圏の水の量・分布に関する検討も重要？

参考文献

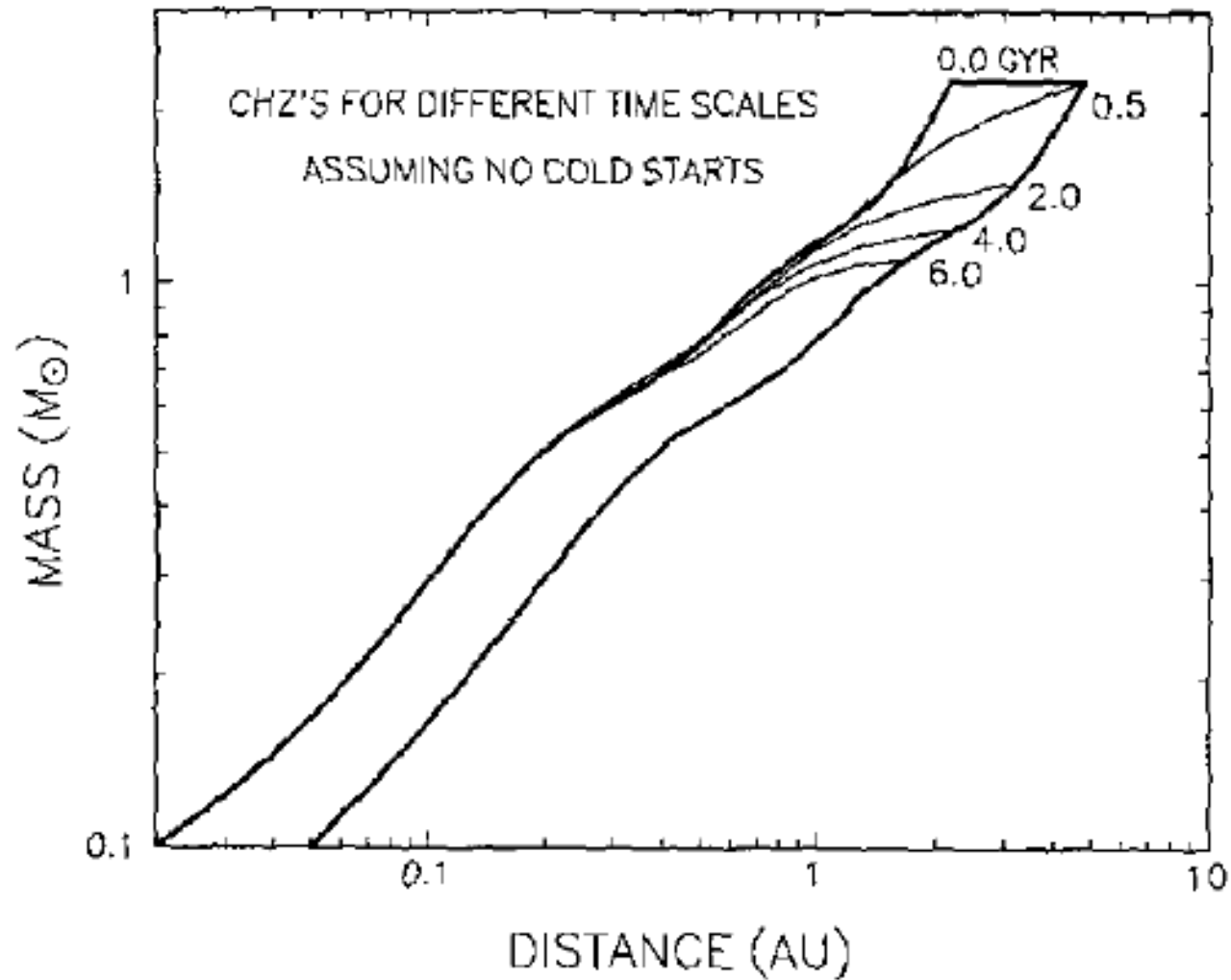
- Kasting et al (1993) Habitable Zones around Main sequence stars. *Icarus*, 101, 108-128.
- Kasting (1988) Runaway and moist greenhouse atmospheres and the evolution of Earth and Venus. *Icarus*, 74, 472-494
- Kopparapu et al. (2003) Habitable zones around main-sequence stars : New estimates, *Astrophysical J.*, 765, 131-146
- Selsis et al. (2007) Habitable planets around the star Gliese 581? *A&A*, 476, 1373-1387

CHZ



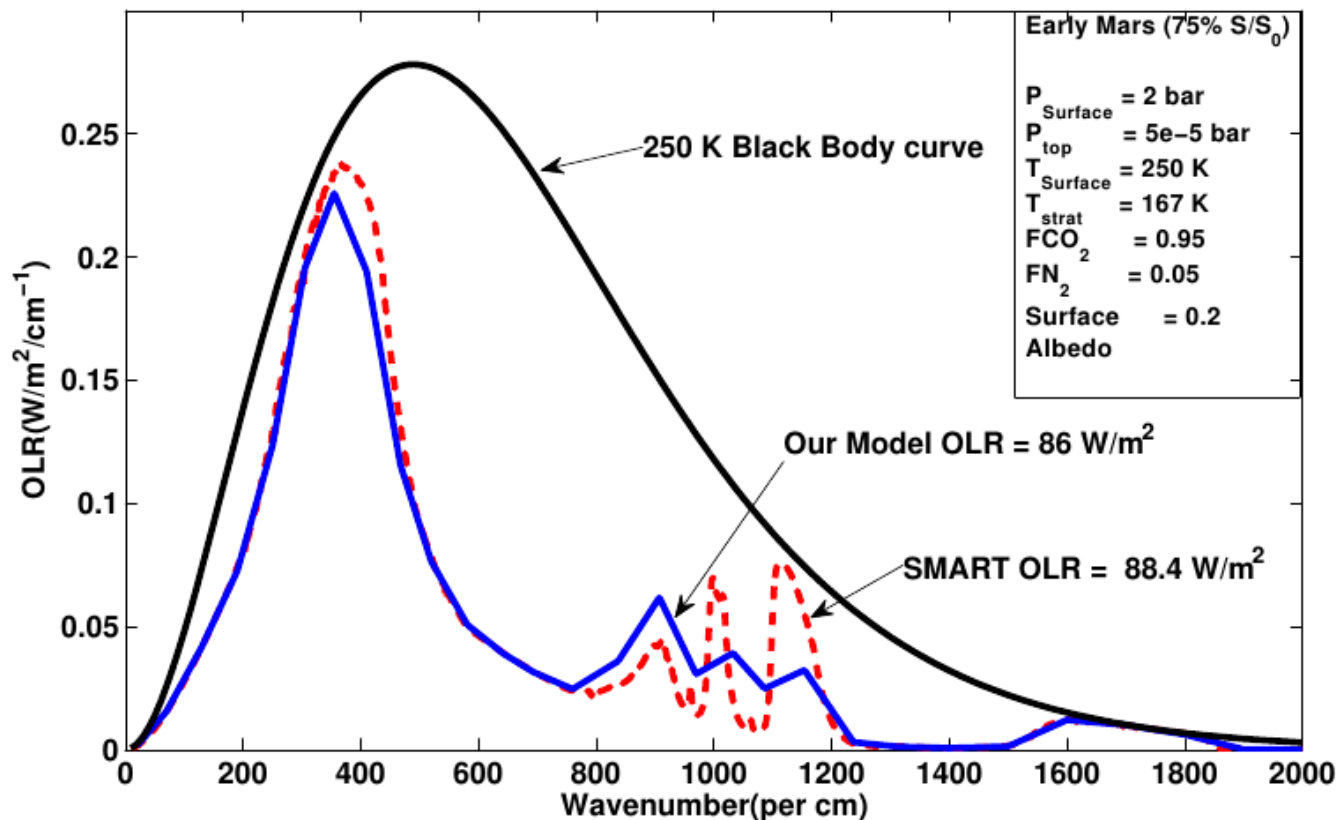
<http://depts.washington.edu/naivpl/content/hz-calculator>

Kasting et al (1993)のCHZ



Kasting et al (1993) Fig.15

Line-by-lineとの比較: CO₂大気



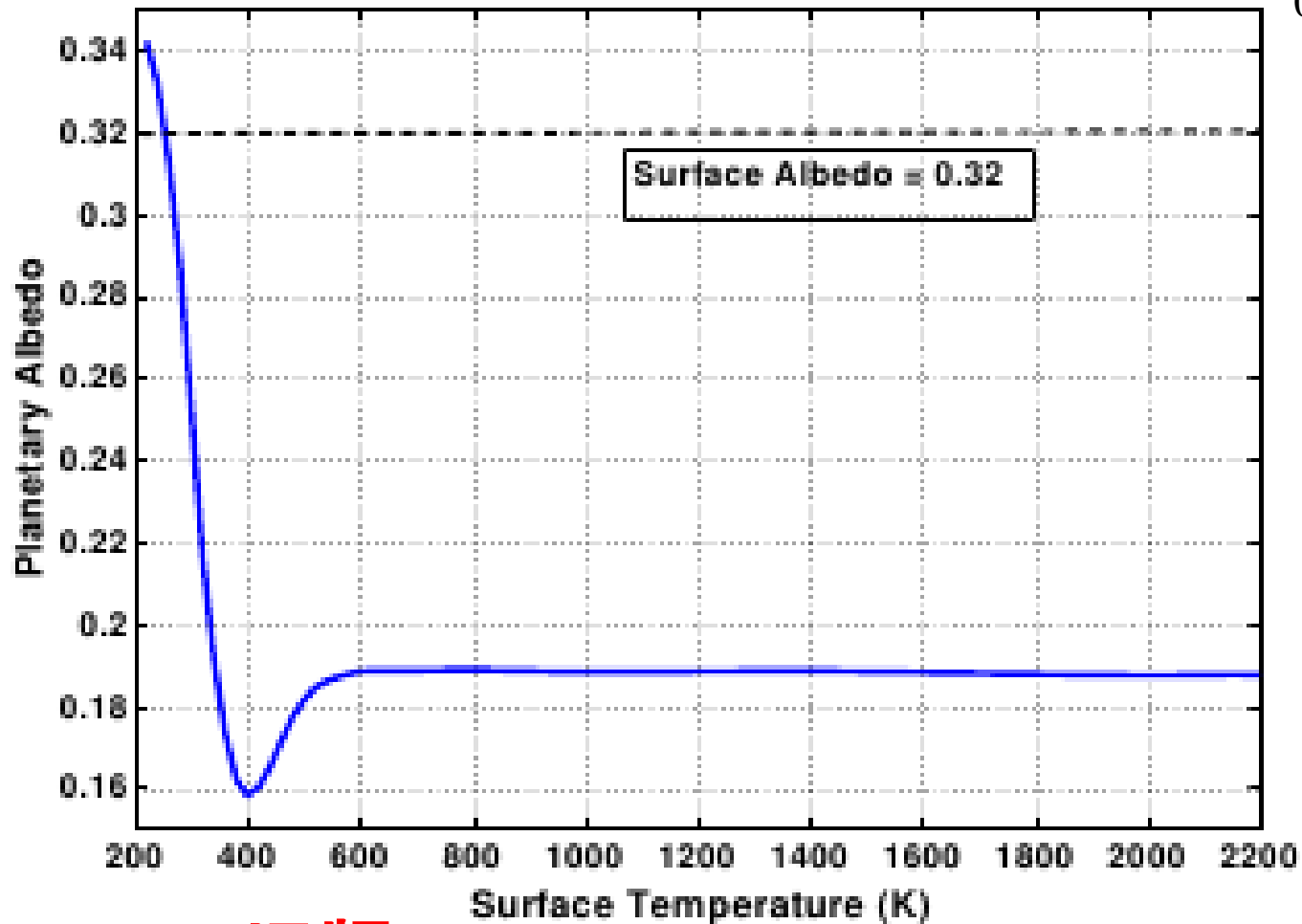
OLRの違いは
667cm⁻¹
の振動帯の吸収が
違うため、と言ってし

旧版

Kopparapu et al (2013) Fig.1

惑星アルベド

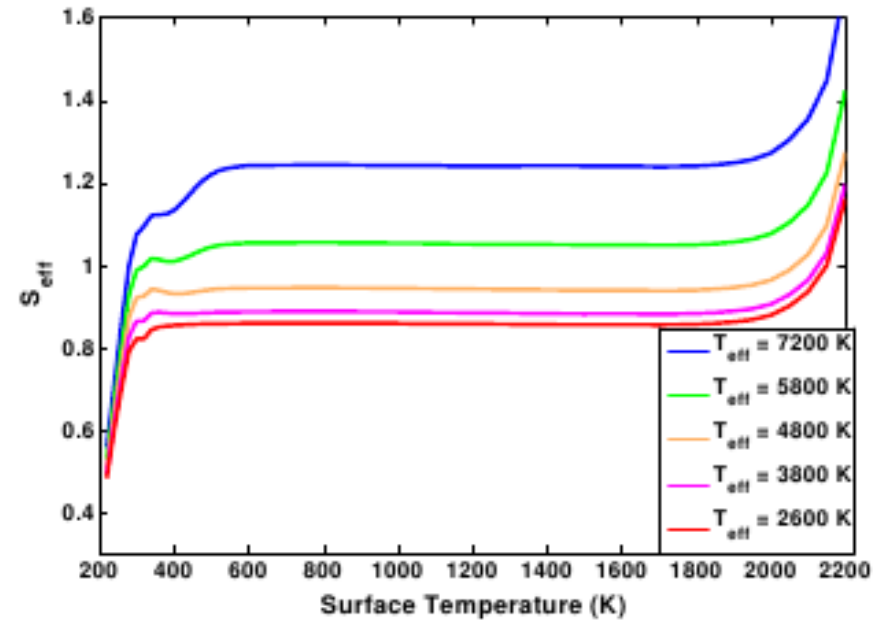
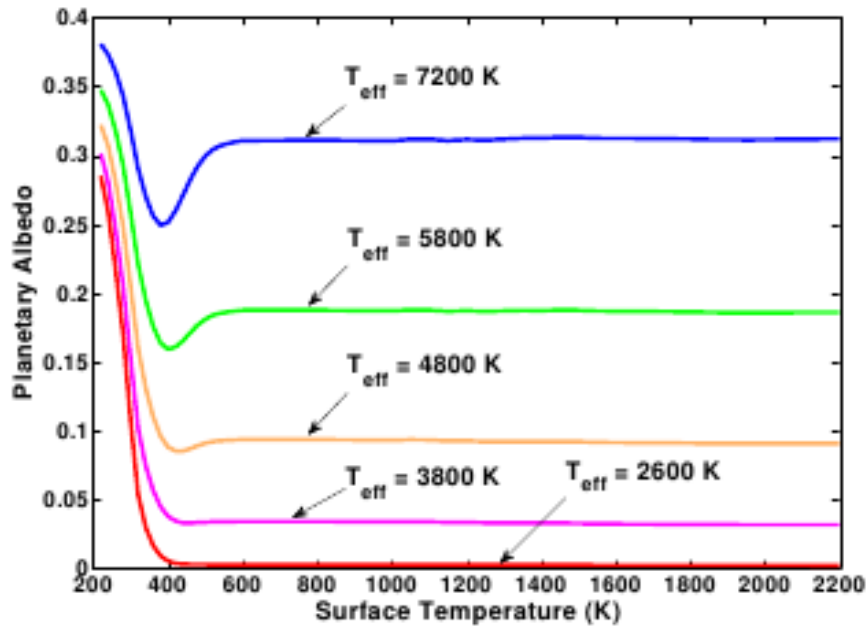
$$A_p = 1 - \frac{4F_{SOL}}{S_0}$$



旧版

Kopparapu et al (2013) Fig.3b

太陽以外の恒星のHZ内側境界



旧版

Kopparapu et al (2013) Fig.6a, b