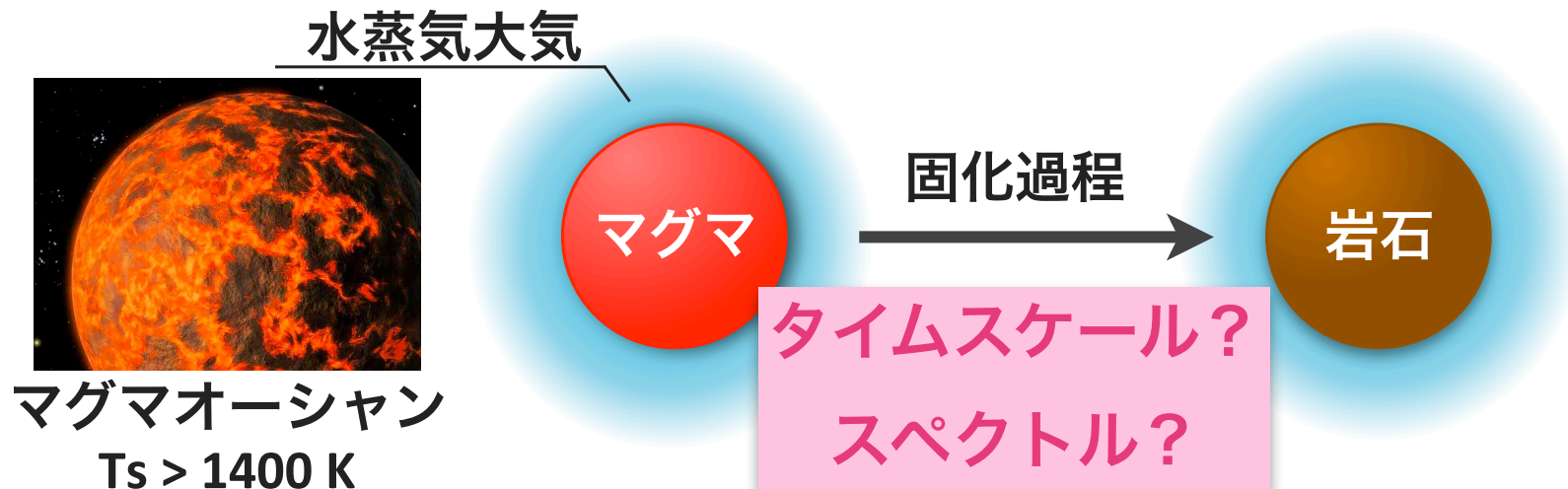


水蒸気大気下でのマグマオーシャンの 継続時間と放射スペクトルの特徴

東大地惑 *濱野景子

共同研究者：阿部豊，河原創 (東大)，玄田英典 (ELSI/Titech)，
大西将徳 (神戸大)，はしもとじょーじ(岡山大)



▶ **大気とマグマオーシャンの‘共進化’：ボックスモデル**

- 軌道に応じた2タイプの進化と特徴 [Hamano, Abe and Genda, 2013, Nature]
- 軌道依存性が生じるメカニズム

▶ **系外惑星観測への示唆**

- マグマオーシャンである惑星の観測頻度が高い軌道
- 放射スペクトル：非灰色大気放射モデル (Preliminary)
[濱野, 阿部, 河原, 大西, & はしもと, 2013, 惑星科学会 秋季講演会]

▶ **議論：最近の非灰色大気モデルでの水蒸気大気放射計算**

- 一次元非灰色放射モデル(HITRAN, HITEMP), 雲なし
Kopparapu et al., 2013, ApJ
Goldblatt et al. 2013, Nature Geoscience
- 非灰色放射モデル(HITRAN) + GCM (LMDZ Earth GCM)
Leconte et al., 2013, Nature

惑星形成と水の供給・損失プロセス

水の供給プロセス

氷微惑星

[e.g. Oka et al. 2011]

H₂ ガスとシリケートの化学
反応

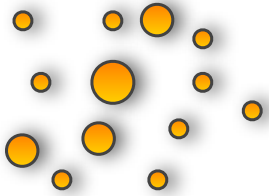
[Ikoma and Genda 2006]

外側の軌道からの氷
を含む天体の混合

[e.g., Raymond et al. 2006, 2007]

微惑星

[e.g. Kokubo and Ida, 1998]



衝突

原始惑星

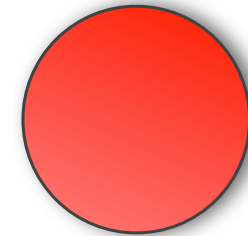
[e.g. Chambers, 1998]



ネビュラガス散逸

巨大衝突

惑星



水の損失プロセス

衝突での損失

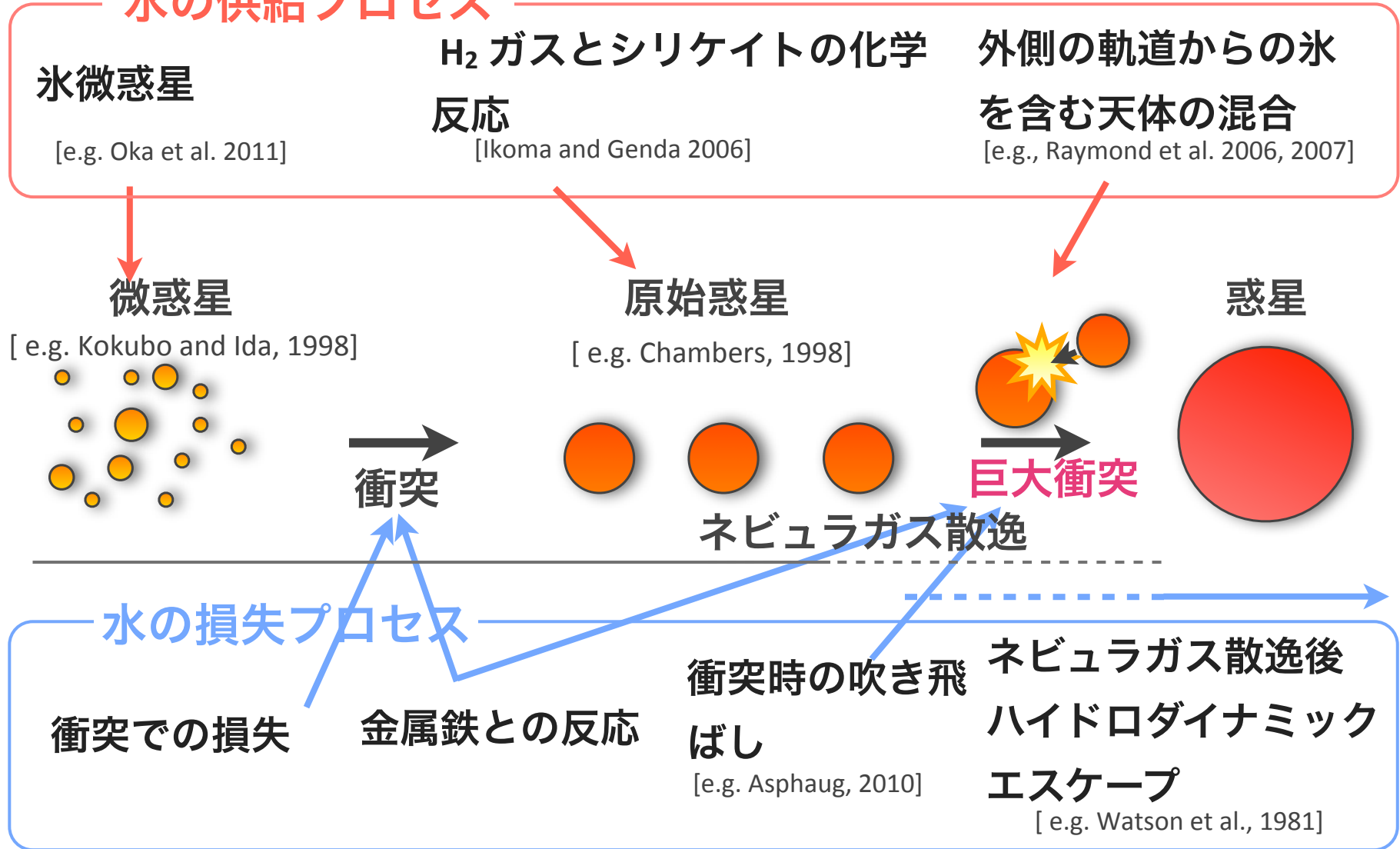
金属鉄との反応

衝突時の吹き飛ばし

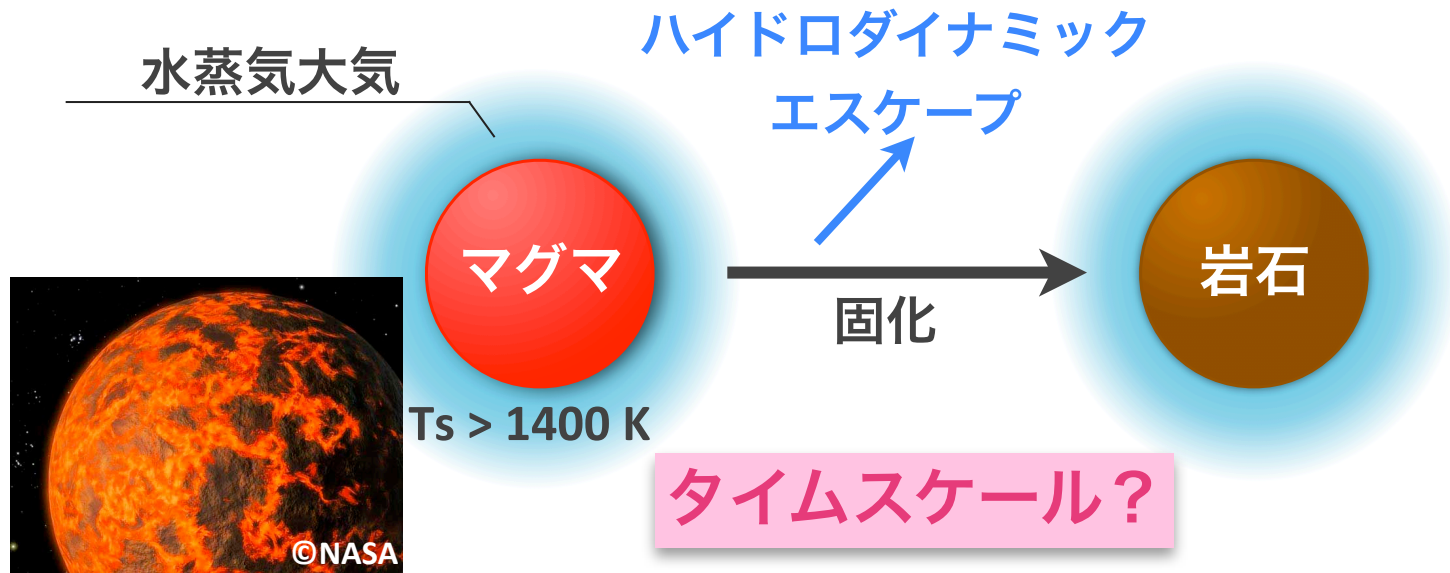
[e.g. Asphaug, 2010]

ネビュラガス散逸後
ハイドロダイナミック
エスケープ

[e.g. Watson et al., 1981]



形成直後の地球型惑星



- ▶ 形成直後は大部分が溶融 [e.g. Canup, 2008]

- ▶ 様々な初期水量をもちうる

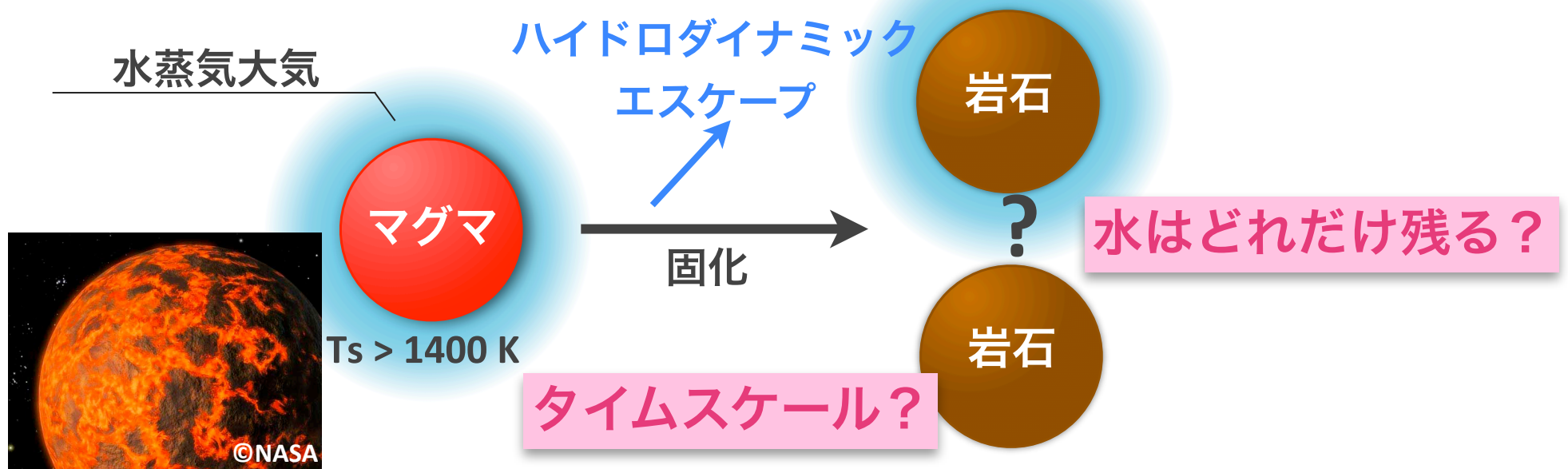
水蒸気大気の形成→惑星の初期熱史に影響

[Matsui and Abe, 1986; Zahnle et al., 1988; Elkins-Tanton, 2008,2010; Lebrun et al., 2013]

- ▶ 固化と並行して大気散逸が生じている

固化の過程でハイドロダイナミックエスケープによって‘脱水’

形成直後の地球型惑星



- ▶ 形成直後は大部分が溶融 [e.g. Canup, 2008]

- ▶ 様々な初期水量をもちうる

水蒸気大気の形成→惑星の初期熱史に影響

[Matsui and Abe, 1986; Zahnle et al., 1988; Elkins-Tanton, 2008,2010; Lebrun et al., 2013]

- ▶ 固化と並行して大気散逸が生じている

固化の過程でハイドロダイナミックエスケープによって‘脱水’

目的

ボックスモデルでのマグマオーシャンと水蒸気大気の共進化

→初期進化を律速する過程

▶ マグマオーシャンの固化タイムスケールは？

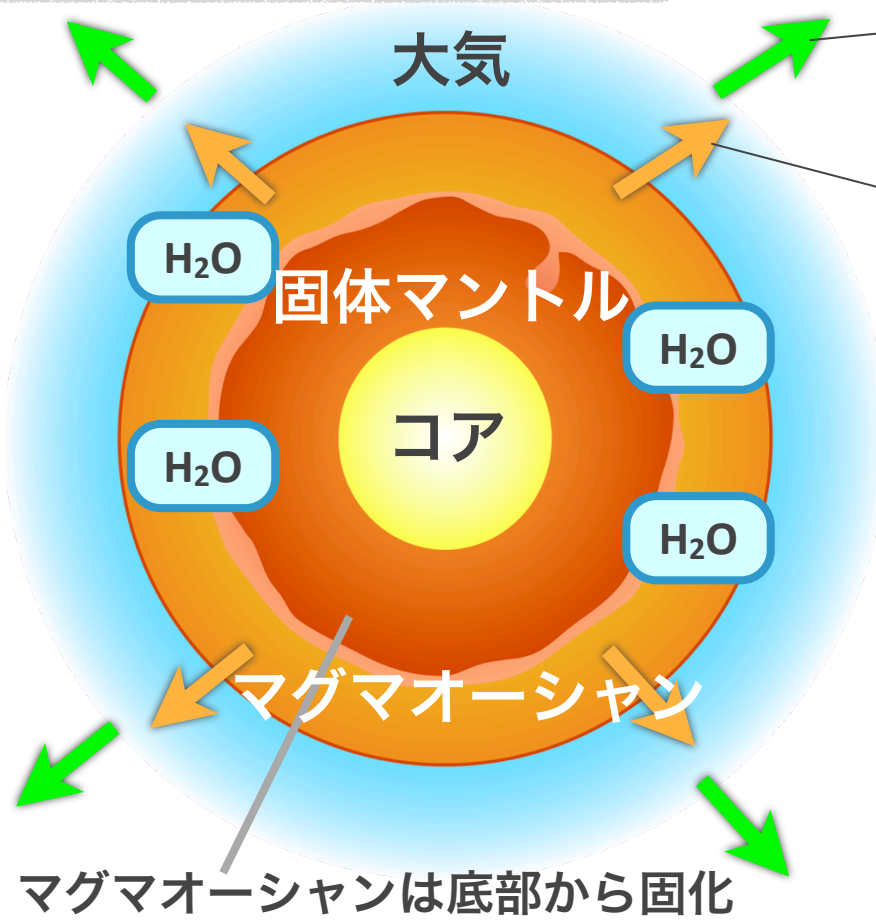
固化時にどれだけ水が残るのか？

▶ 軌道依存性と初期水量依存性は？



マグマオーシャンと水蒸気大気の共進化

水 (水蒸気)
シリケートメルトへの高い溶解度
強い温室効果
HとOで構成される分子



ハイドロダイナミック
エスケープ

脱ガス

大気量

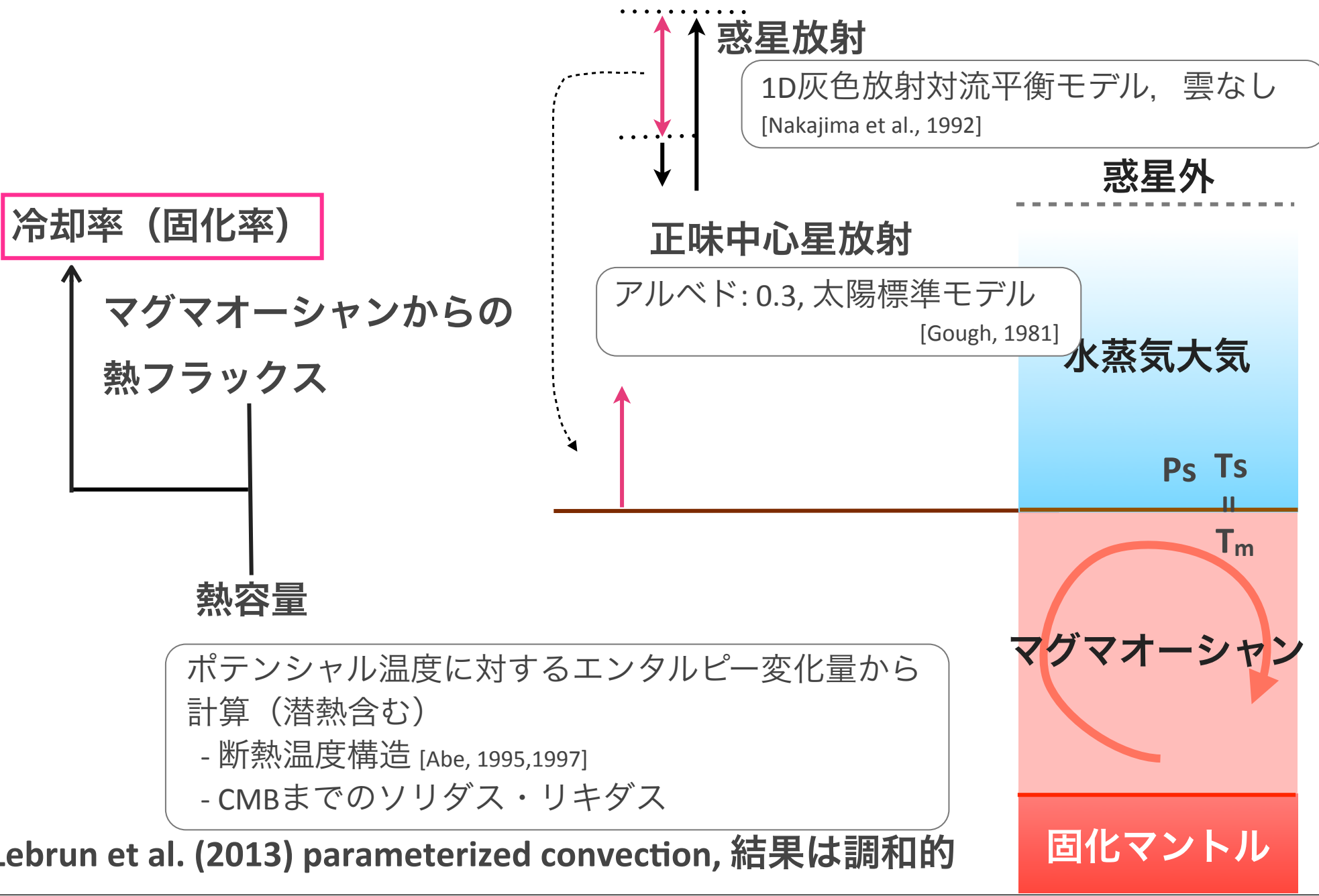
マグマオーシャン
固化速度

温室効果

エネルギーバランスと水収支

[Solomatov and Stevenson, 1993; Abe, 1997]

モデル: エネルギーバランス



モデル: 水収支

大気散逸

エネルギー律速の水素散逸フラックス
[Watson, 1981]

酸素原子はマグマオーシャンの酸化に使われると仮定して水の損失量を計算

惑星外

水蒸気大気

P_s T_s

T_m

脱ガス

地表での溶解平衡
[Papale 1997]

玄武岩質マグマへの水溶解度

マグマオーシャン

固化時の取り込み

固相・液相間での分配

+ 1%のメルトの粒間へのトラップ

[Elkins-Tanton, 2008]

固化マントル

リザーバサイズ

水の総量と

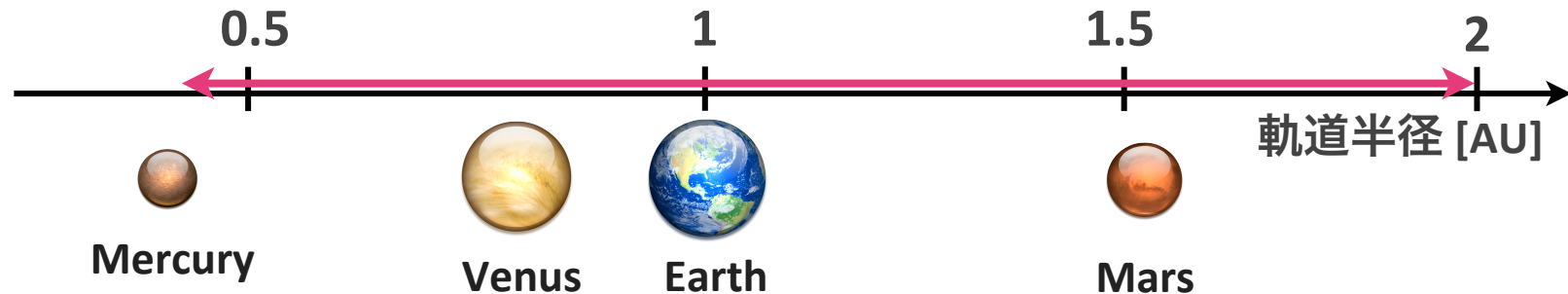
各リザーバ間での分配



パラメータ

太陽のような恒星周りの地球サイズの惑星

▶ 軌道半径 : 0.4 - 2 [AU]

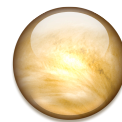


▶ 初期の水量 : 0.01 - 20 M_{EO} ↑ 現在の海洋質量

バルク量に直すと 0.0002 - 0.4 [wt%]

現在の水量

大気 : $<7 \times 10^{-5} M_{EO}$
[Lewis and Grinspoon, 1990]
マントル: たぶんdry
[Nimmo and McKenzie, 1998]



海 : M_{EO}
マントル : 0.25-4 M_{EO} or more?
[e.g. Hirshmann, 2006]

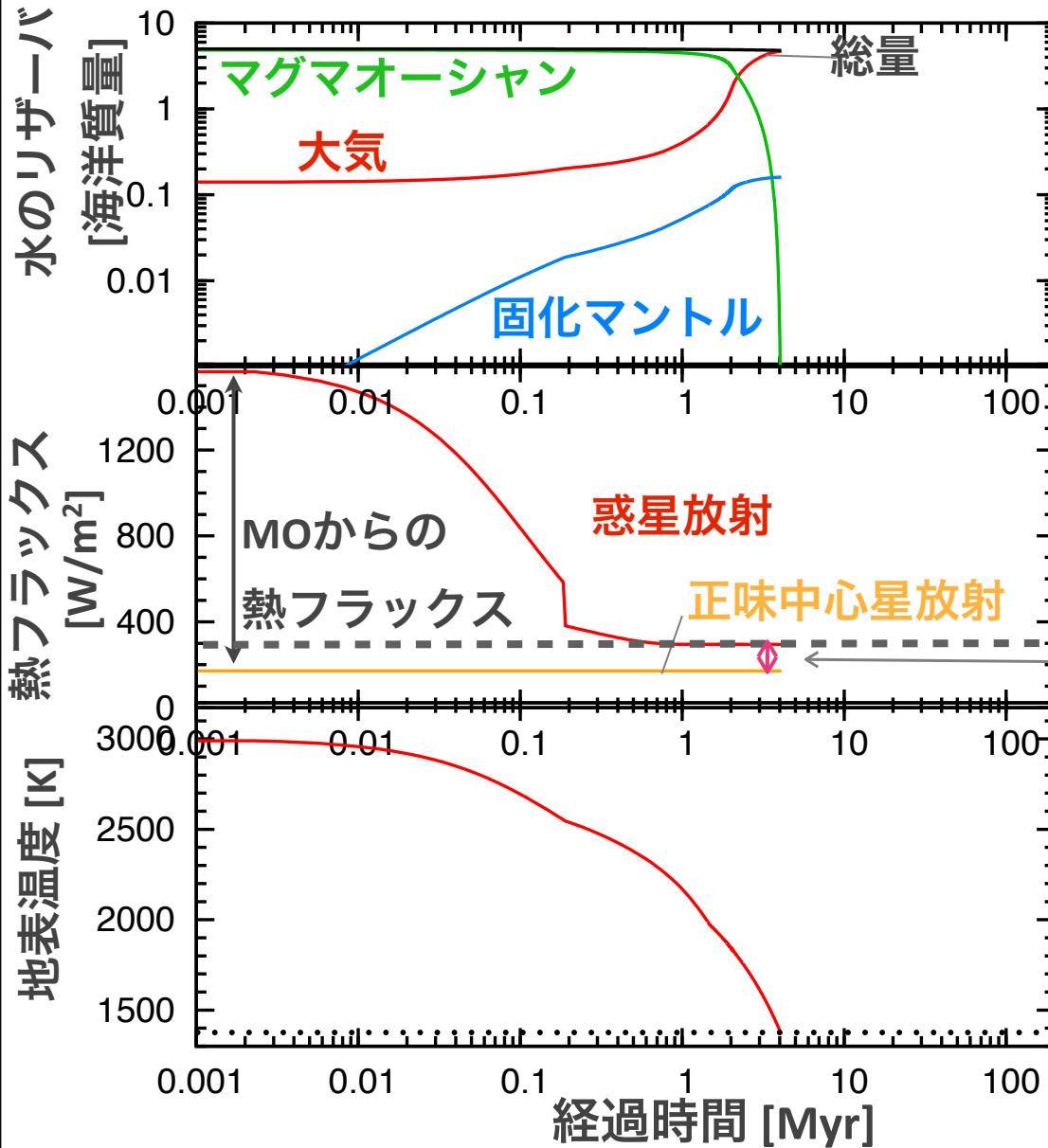
結果

軌道依存性

初期水量は 5 海洋質量に固定

1. 1 AUにある惑星の進化
2. 0.7 AU //
3. 様々な軌道での固化時間と水の残る量
4. 様々な軌道・初期水量での固化時間と水の残る量

結果: 1 AUにある惑星の進化



タイプI

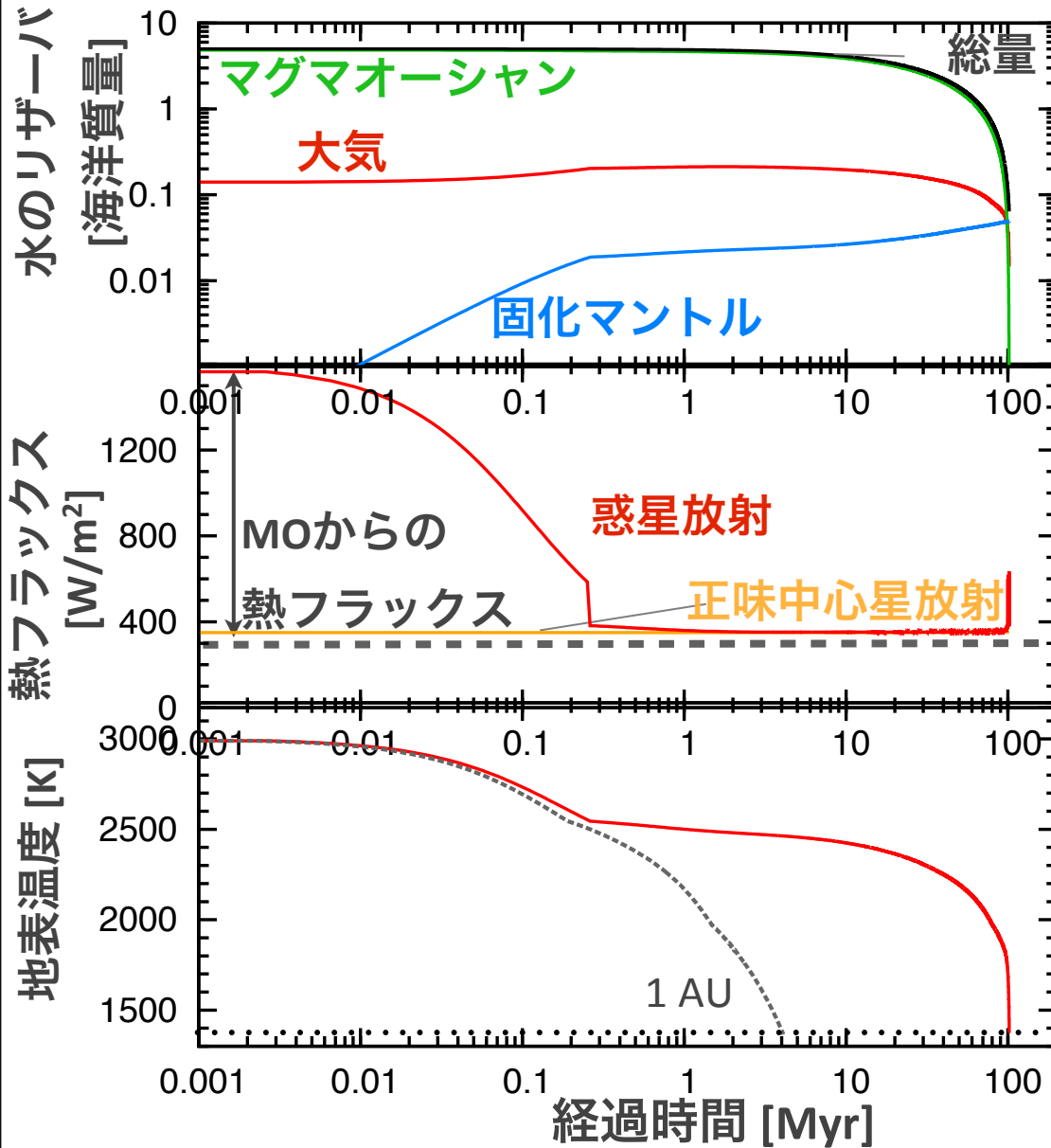
熱フラックスの最小値
固化タイムスケールは
最小熱フラックスで律速

初期の水はほとんど残る

射出限界: $\sim 300 \text{ W/m}^2$

今考えている温度範囲では
下限に相当

結果: 0.7 AUにある惑星の進化



タイプII

固化の過程で惑星放射と正味中心星放射がほぼバランス

水量は固化の過程で大幅に減少

射出限界: ~300 W/m²
今考えている温度範囲では
下限に相当

地表でのソリダス

結果: 軌道依存性

タイプII

タイプI

水の散逸時間

固化時間 [yr]

数百万年

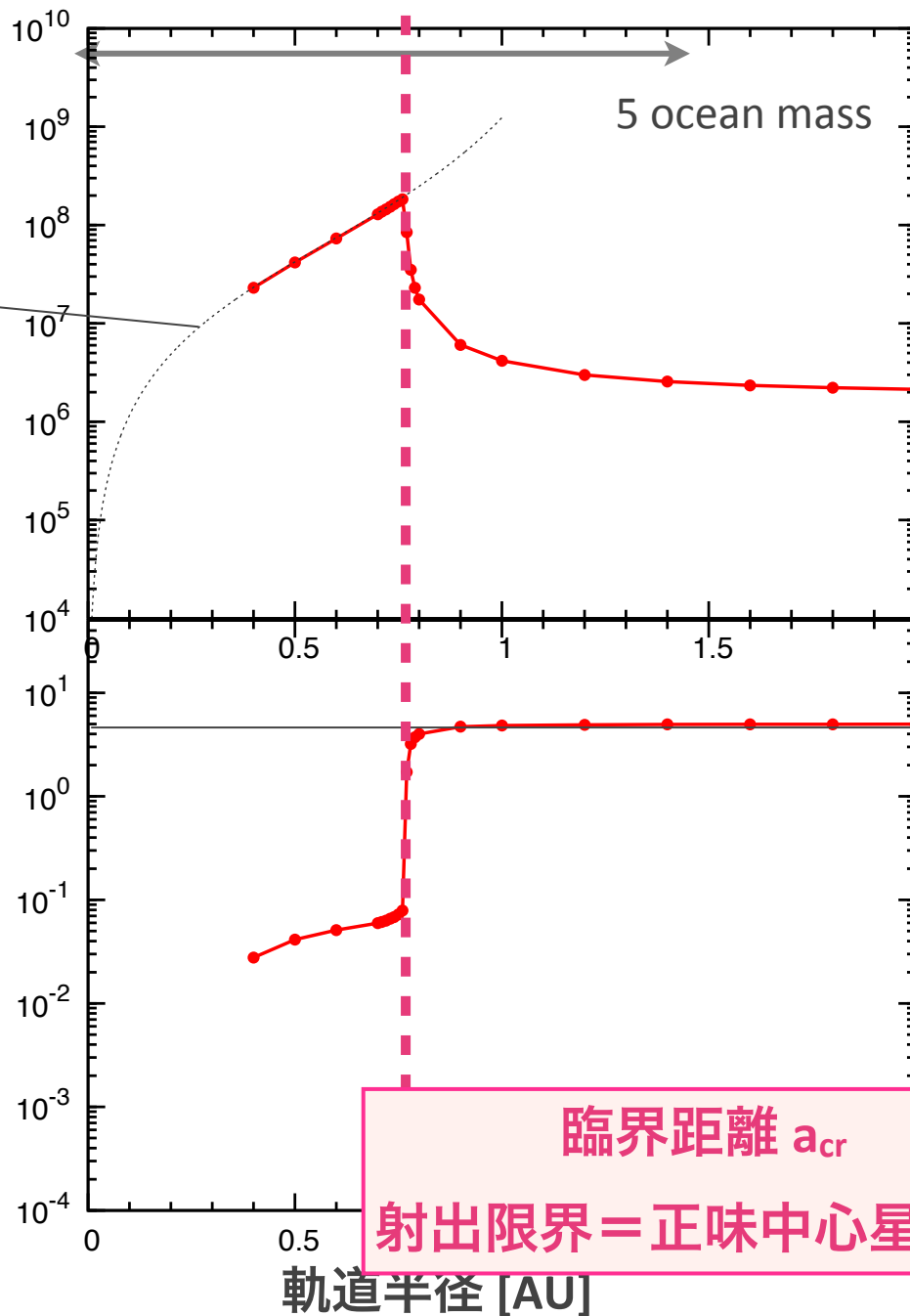
大幅に減少

水の残存量

[海洋質量]

初期量

ほぼ残る

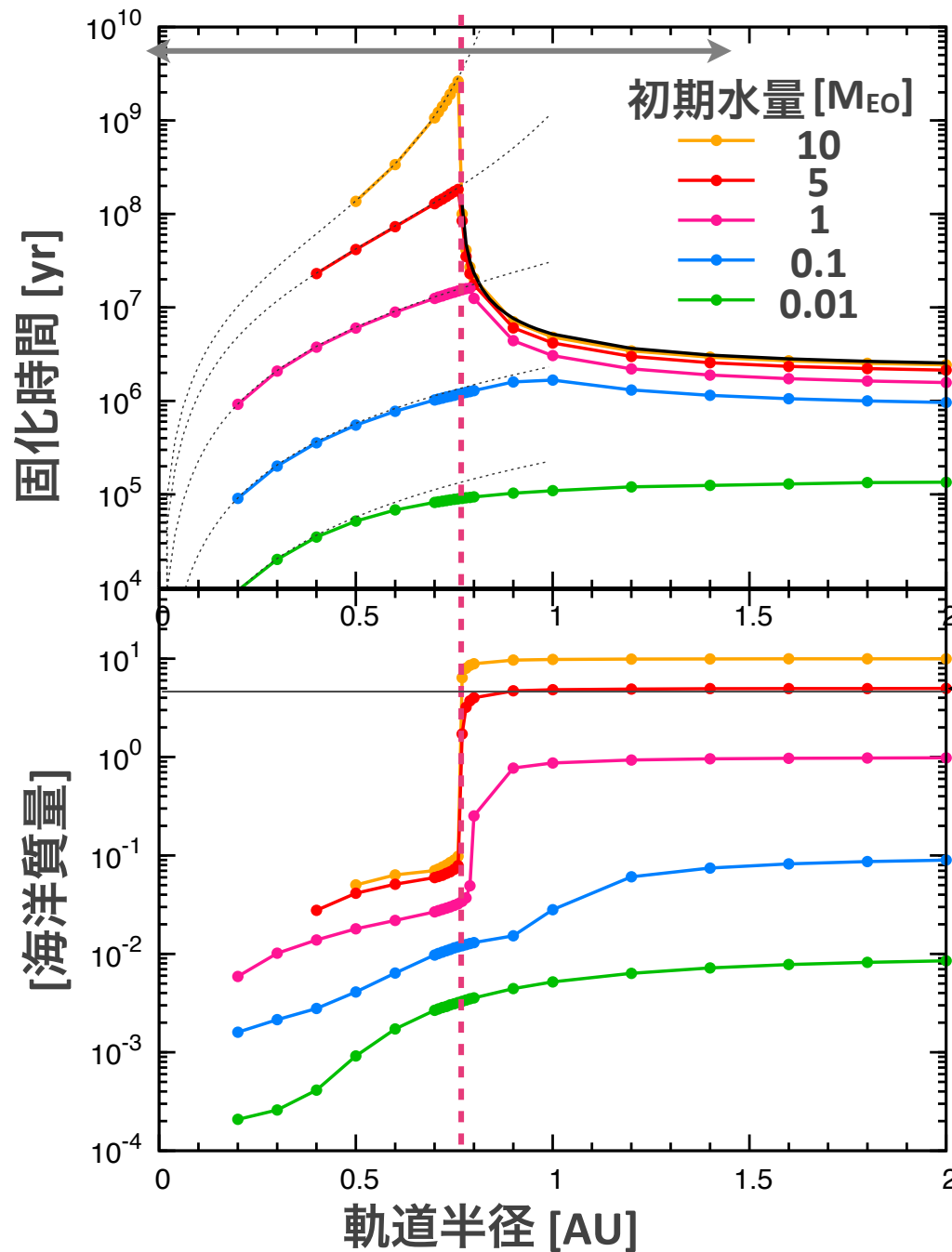


結果: 初期の水量依存性

タイプII

タイプI

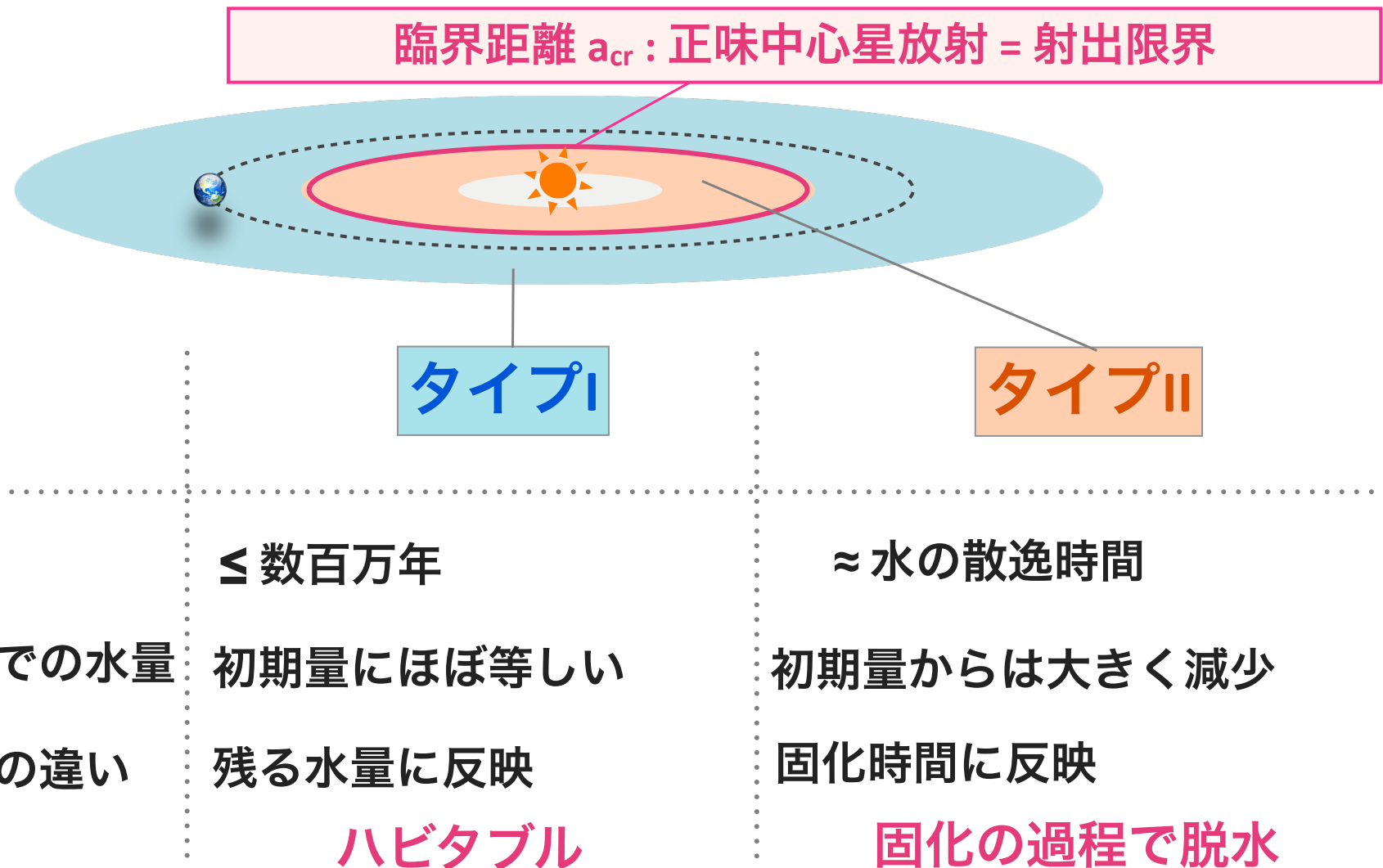
水の散逸時間



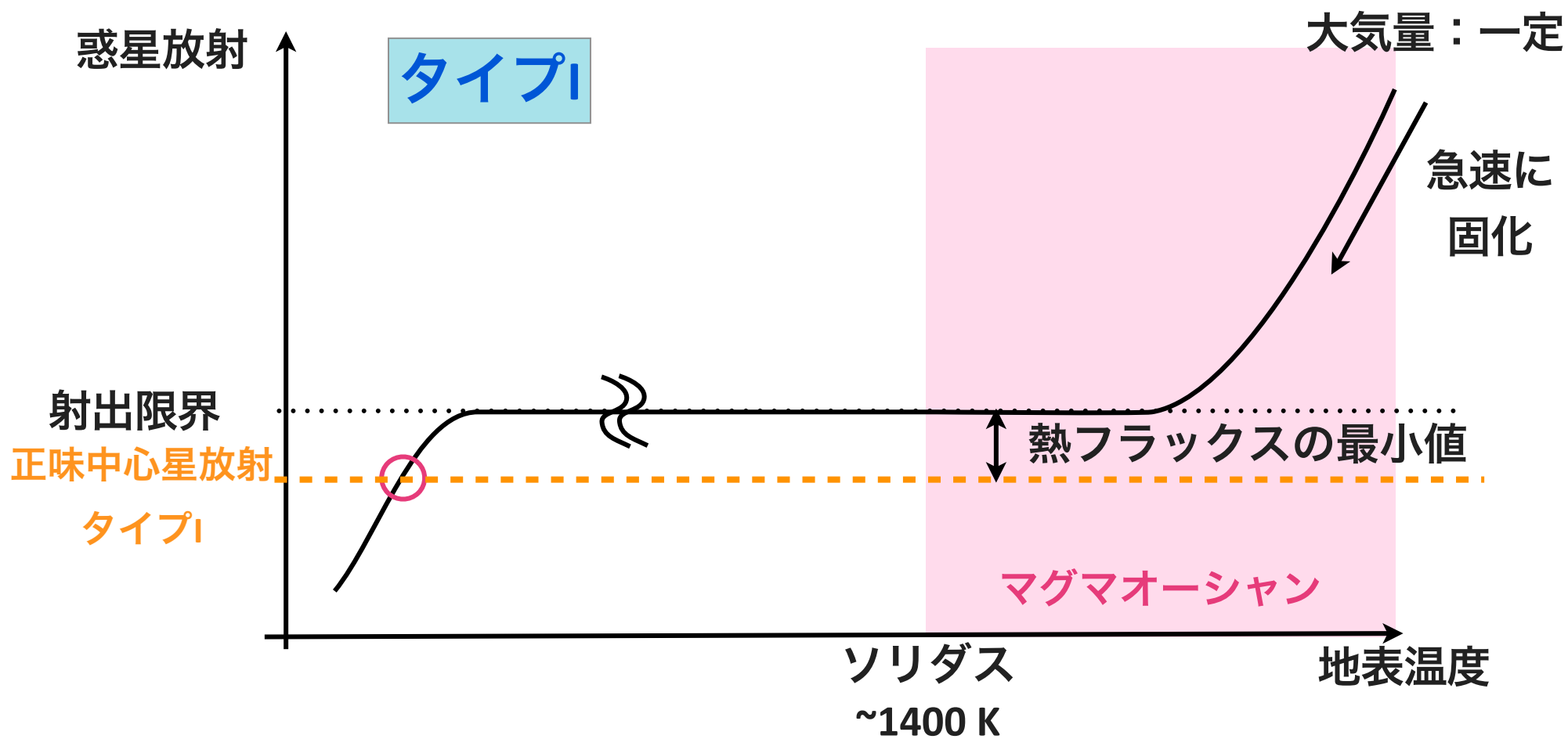
大幅に減少

まとめ

初期進化に応じて地球型惑星は2つのタイプに分類

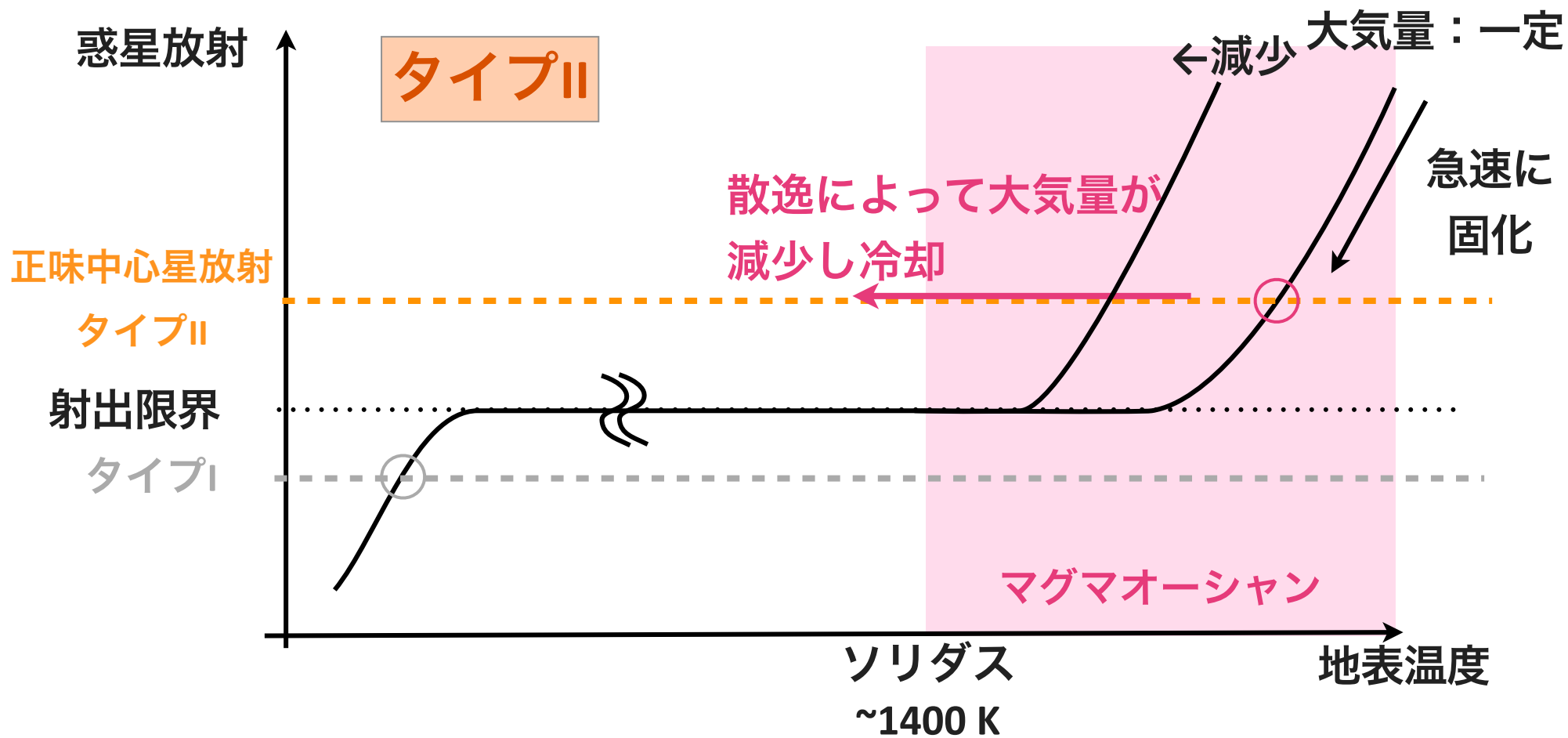


軌道依存性が生じるメカニズム



タイプI ← 熱フラックス最小値で律速

軌道依存性が生じるメカニズム



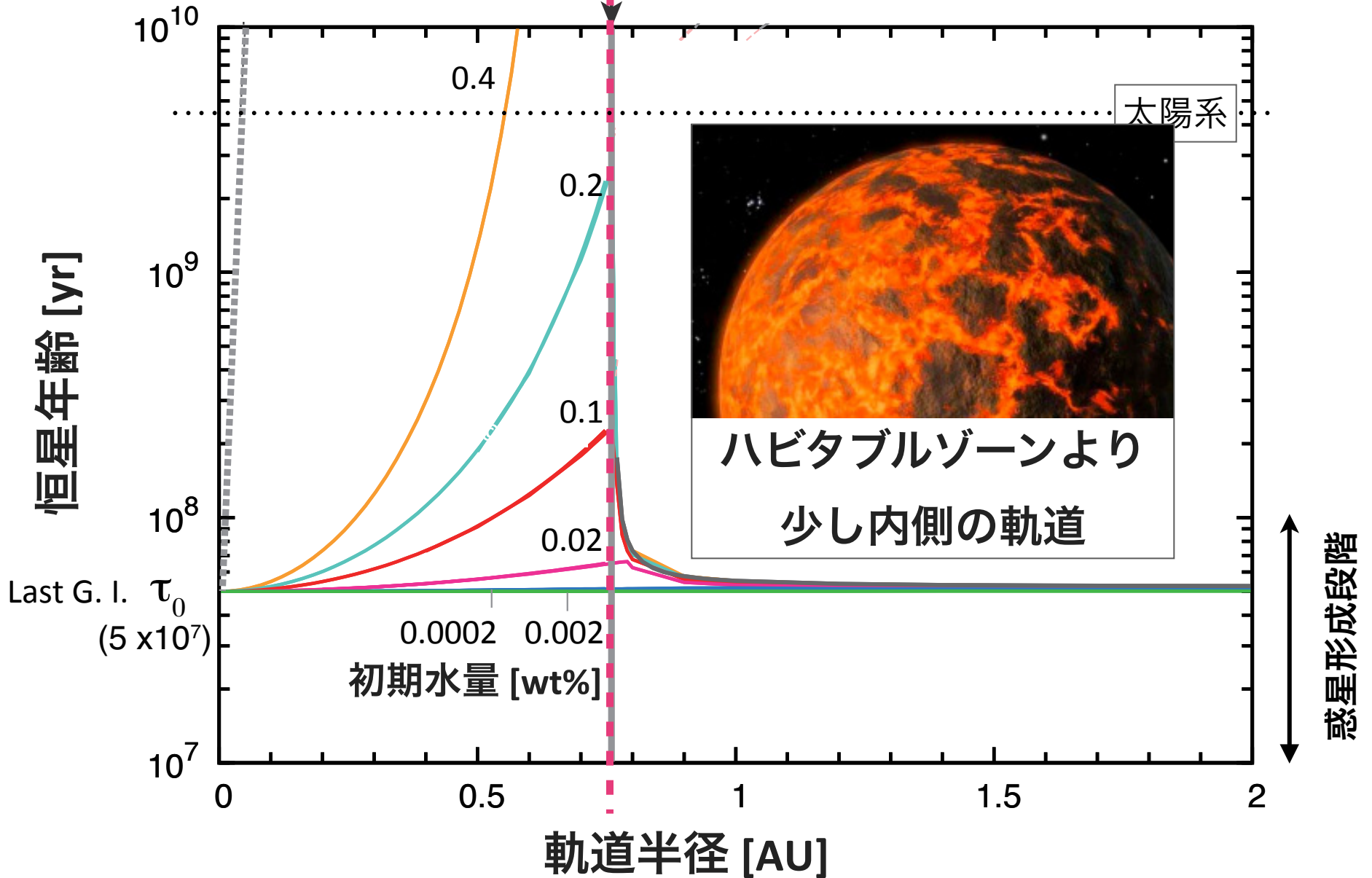
タイプII ← 大気散逸速度が律速

マグマオーシャンの観測頻度が高い軌道は？

タイプII

臨界軌道半径

タイプI



放射モデル概要

地表温度: 1500K, 地表気圧: 80 bar の場合

鉛直一次元放射モデル→惑星放射スペクトルを計算

- ▶ 大気組成: H_2O
- ▶ 大気温度構造: Abe and Matsui (1988)

▶ 吸収・散乱断面積

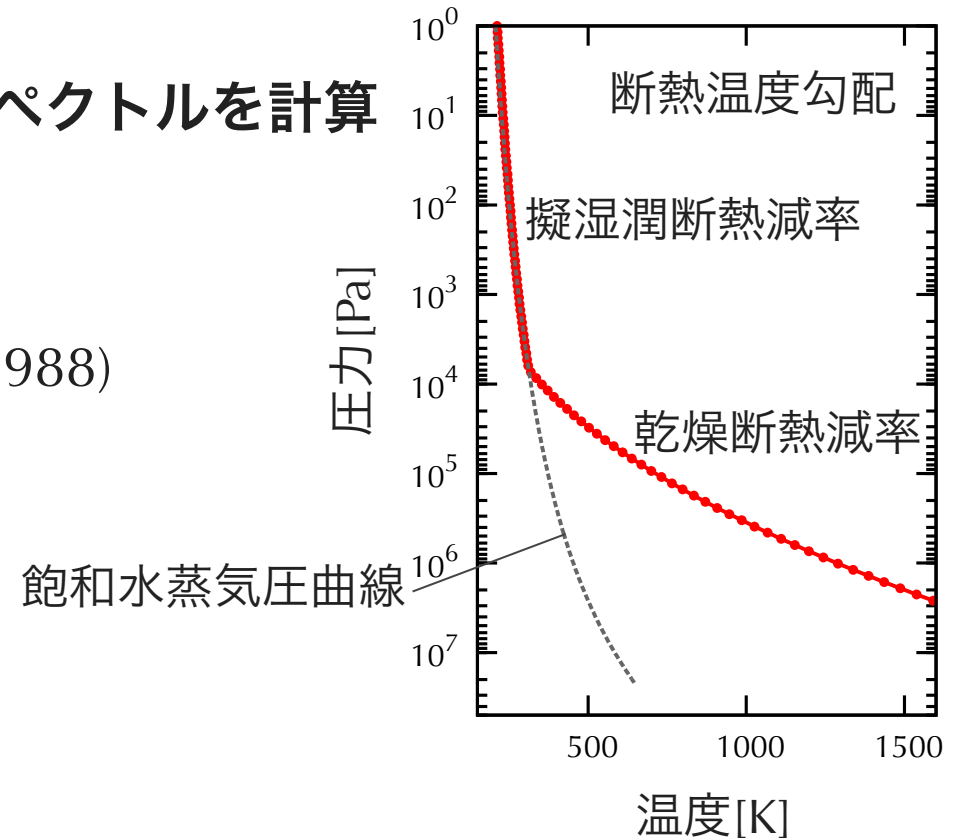
0 - 14,800 cm^{-1} :

Abe and Matsui(1988)のバンドモデル (離散座標法)

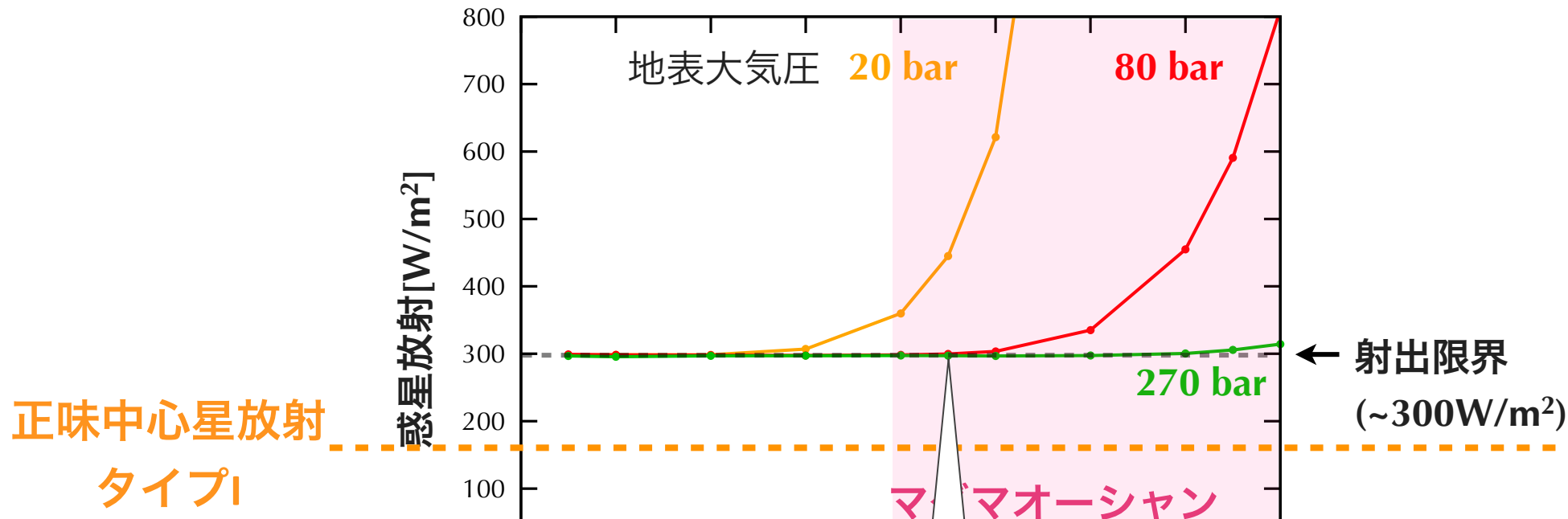
14,800 - 30,000 cm^{-1} :

レイリー散乱+HITEMP2010を利用した相関k分布法

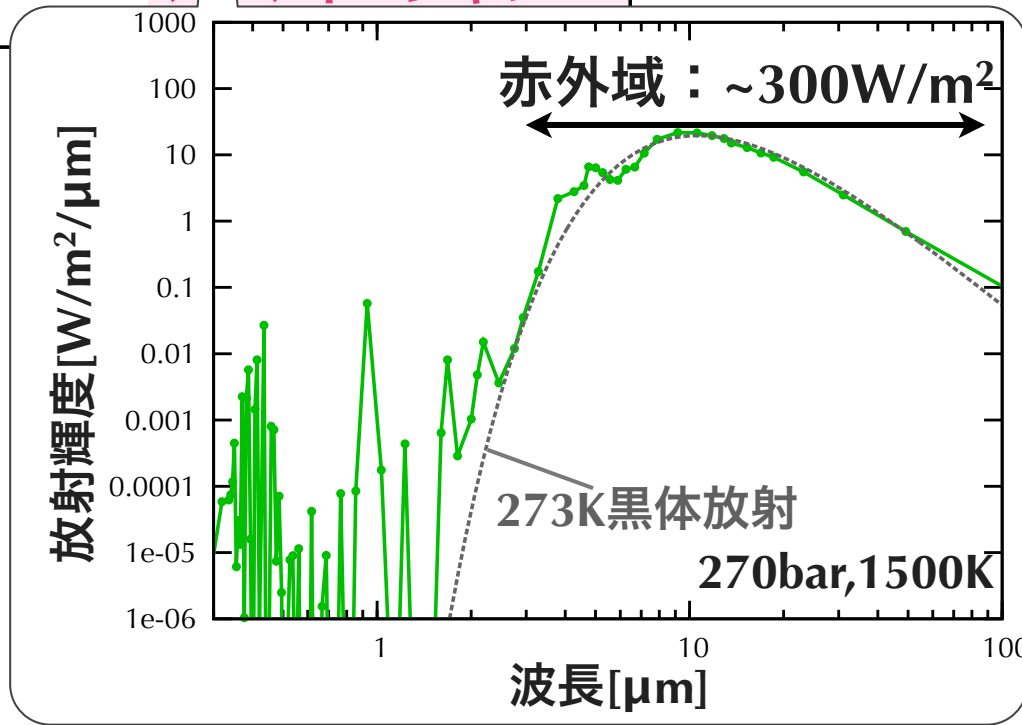
(2方向近似, 等方散乱)



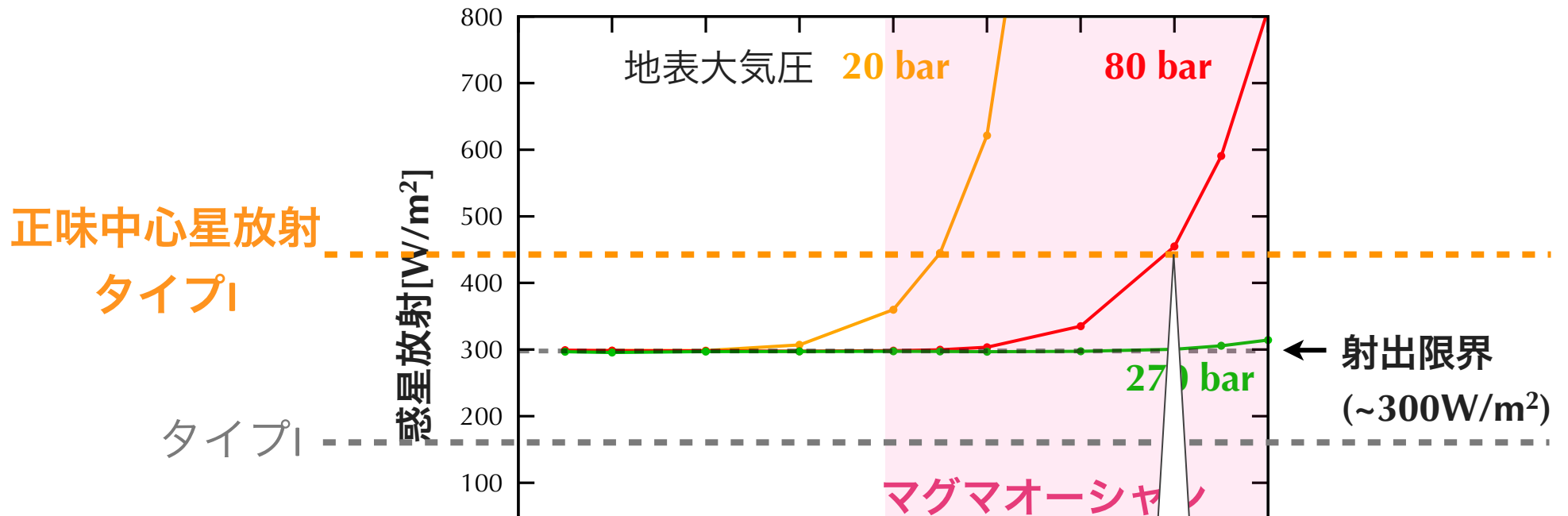
固化途中の放射スペクトル：タイプI



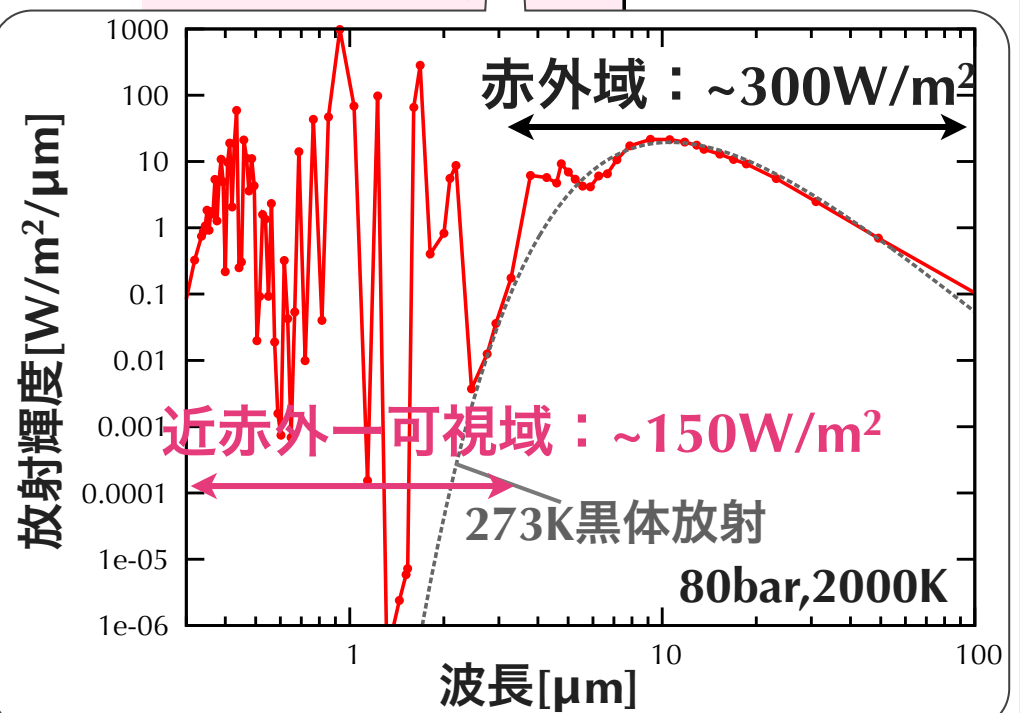
- ▶ 大気量に関係なく固化できる
- ▶ 大気量が 1 海洋質量程度で
射出限界と一致
低温の放射温度として観測



固化途中の放射スペクトル：タイプII



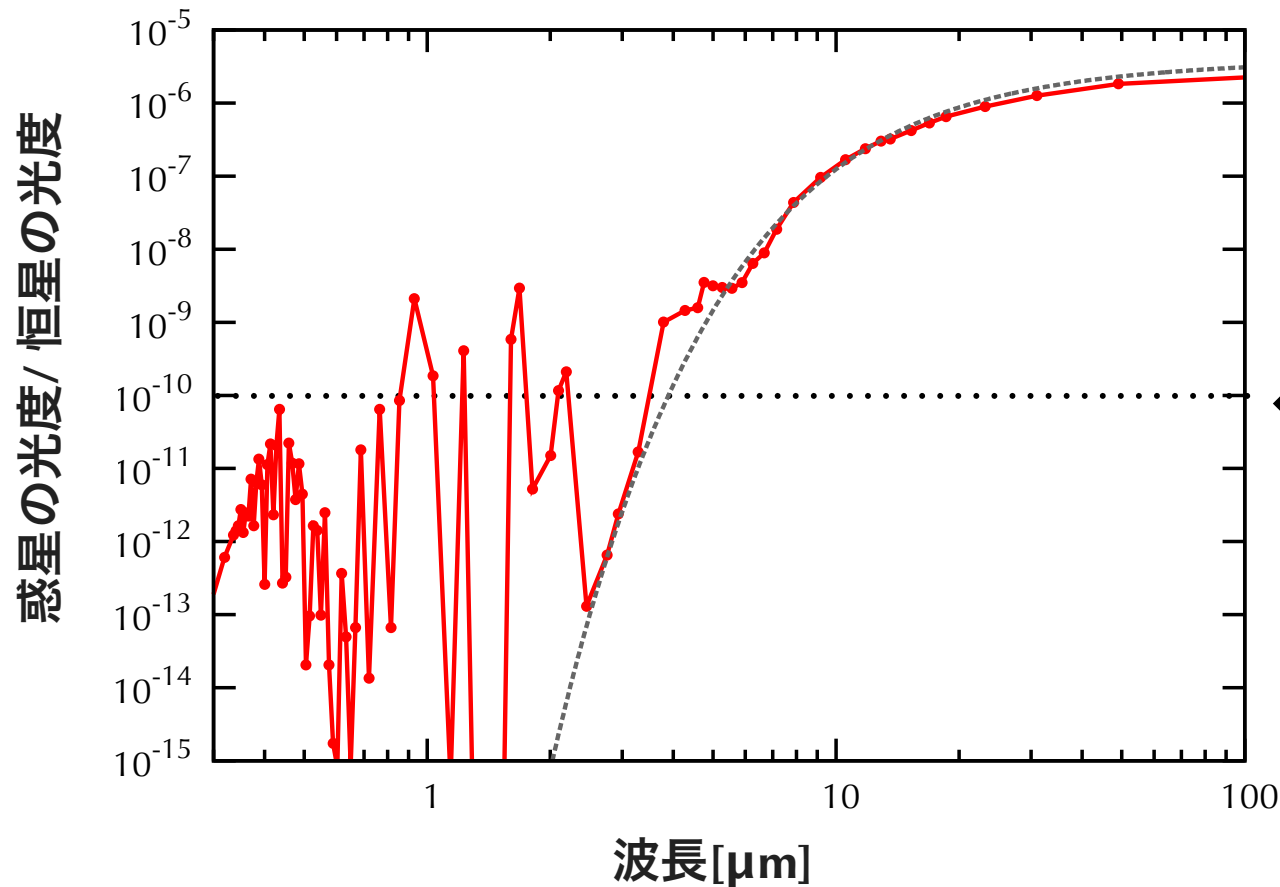
- ▶ 正味中心星放射以上の惑星放射となる地表温度・大気量関係
- ▶ ほぼエネルギーがバランスした状態では可視・近赤からも放射



結果：主星とのコントラスト比

惑星：地球サイズ， 正味中心星放射：450W/m² (~0.65AU) タイプII

主星：現在の太陽（半径・表面温度・光度）



← 将来直接撮像の目標値：

10⁻¹⁰

(ハビタブルゾーン内の地球サイズの惑星からの反射光)

議論：非灰色水蒸気大気モデルでの射出限界の再考

- ▶ 一次元非灰色放射モデル(HITRAN, HITEMP), 雲なし

Kopparapu et al., 2013, ApJ

Goldblatt et al. 2013, Nature Geoscience

- ▶ 非灰色放射モデル(HITRAN) + GCM (LMDZ Earth GCM)

Leconte et al., 2013, Nature

議論：非灰色水蒸気大気モデルでの射出限界の再考

- ▶ 一次元非灰色放射モデル(HITRAN, HITEMP), 雲なし

	射出限界	アルベド
Kopparapu et al., 2013, ApJ	291 [W/m ²]	0.17
Goldblatt et al. 2013, Nature Geoscience	282 [W/m ²]	0.19

- ▶ 非灰色放射モデル(HITRAN) + GCM (LMDZ Earth GCM)

Leconte et al., 2013, Nature :

平均太陽放射が375 [W/m²] 以上で平衡解が存在しない (アルベド0.19)

($375 \times (1 - 0.19) = \sim 304$ [W/m²] のOLR)

進化の二分性

- 射出限界が存在：二分性は生じる
 - タイプの固化時間：2割ほど減少
- 本質的な結論は変わらない

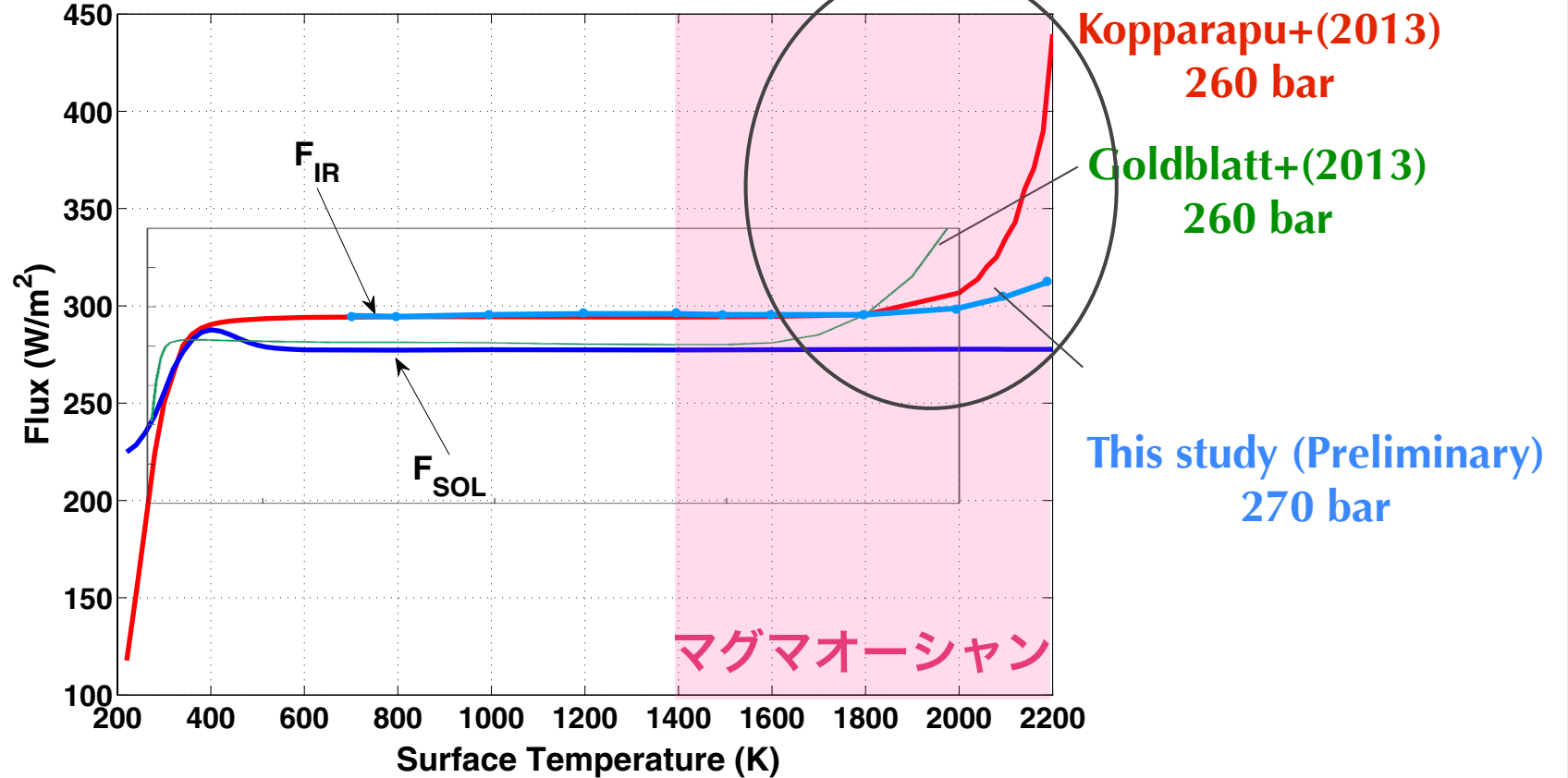
臨界軌道半径 a_{cr} :

1次元放射モデル 0.83 AU

GCM 0.63AU

議論：暴走温室状態での放射スペクトル

▶ 一次元非灰色モデル



Goldblatt+(2013)

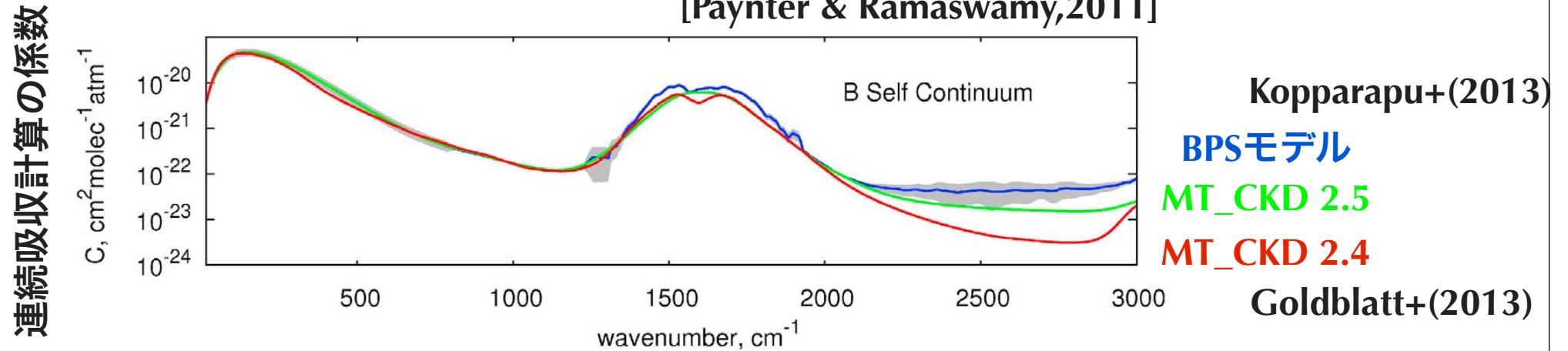
4 μm (連続吸収)での放射が増加

Kopparapu+(2013) This study

可視・近赤外での放射が増加

光学的に薄い波長はどこかに依存

▶ 連続吸収モデル



高温下で適用可能な連続吸収モデルはない

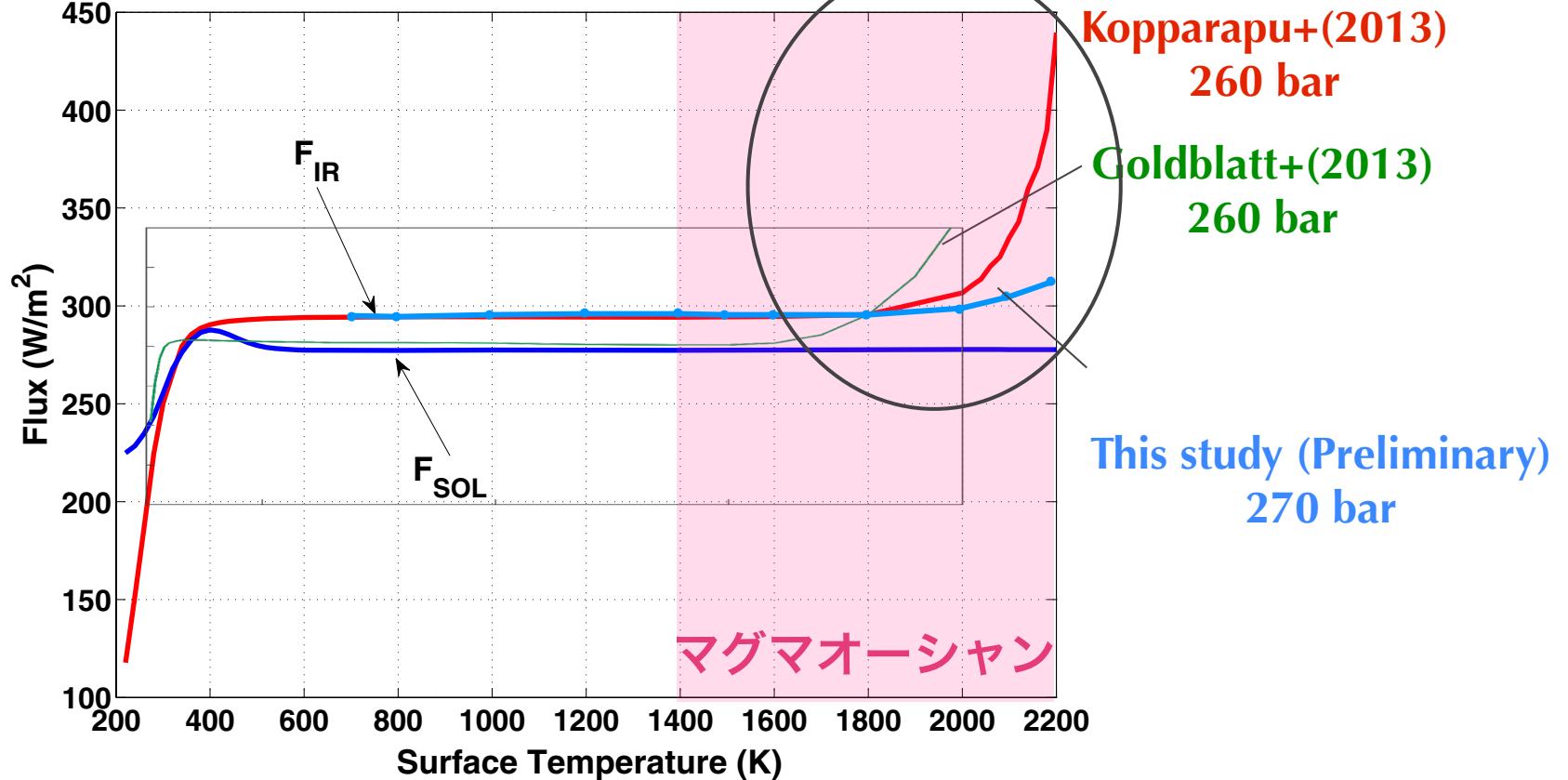
▶ CO₂ : 2385-2500 cm^{-1} に強いバンド

現在の地球大気で光学的厚さ $1-10^4$

→少し含むだけで $4\mu\text{m}$ 付近が光学的に厚くなる

議論：暴走温室状態での放射スペクトル

▶ 一次元非灰色モデル



Goldblatt+(2013)

4 μm (連続吸収)での放射が増加

Kopparapu+(2013) This study

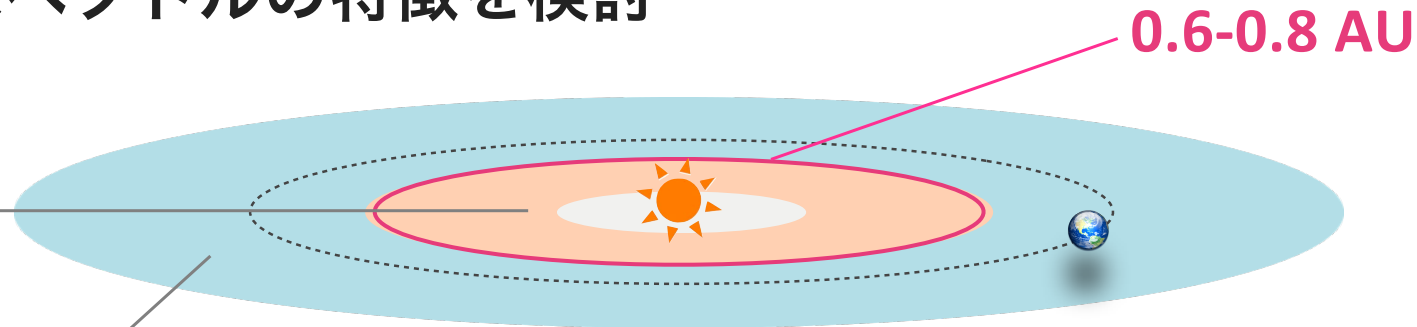
可視・近赤外での放射が増加

▶ 非灰色放射モデル+GCMで暴走温室状態にある場合の計算
はおそらくない

相対湿度・雲分布

結論

水蒸気大気に覆われたマグマオーシャンの固化時間と放射スペクトルの特徴を検討



タイプI: ハビタブルな惑星

- 数百万年以内に固化し海を形成
- 十分な水量がある場合，固化時でも低温のスペクトル

タイプII: 乾燥 or マグマオーシャン状態の惑星

- マグマオーシャン状態の惑星の観測頻度は水量に依存
- 赤外での低温の放射温度 + 可視-近赤外 or $4 \mu\text{m}$ からも放射

今後の課題・予定

▶ 水蒸気大気に覆われたマグマオーシャンの検出可能性

全波長領域：Line-by-line計算

検出しやすい恒星タイプの検討

M型星



コントラスト

個数

恒星からの距離 (IWA)

EUV/光度比・年齢

A型星



▶ 相関 k 分布法を用いた放射モデル作成

→ H₂-H₂O大気とマグマオーシャンの共進化

初期大気の酸化還元度による多様性