



# 炭素循環を持つ系外惑星の表層環境： ハビタブルゾーンでも全球凍結

門屋 辰太郎  
(東大・地惑・田近研・D2)

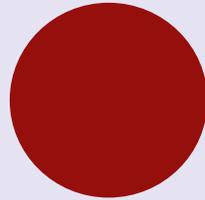
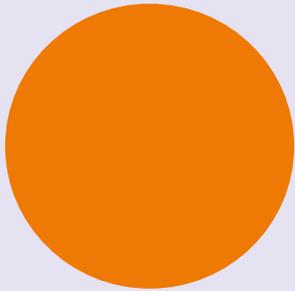
# 1.1 地球型水惑星の表層環境

これまで地球型惑星の表層環境は

- ・ **液体水の存在**に着目し
- ・ 惑星が受ける**中心星放射量**から

制約がなされてきた (e.g., Kasting et al., 1993; Kopparapu et al., 2013)

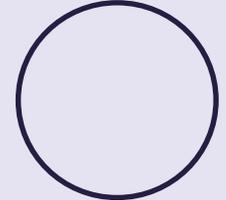
水は全て蒸発



液体が存在



水はすべて凍結

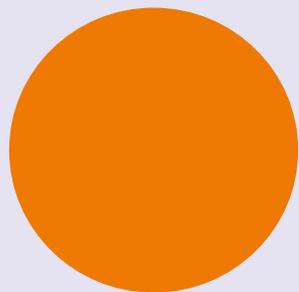


# 1.1 地球型水惑星の表層環境

これまで地球型惑星の表層環境は

- ・ **液体水の存在**に着目し
- ・ 惑星が受ける**中心星放射量**から制約がなされてきた (e.g., Kasting et al., 1993; Kopparapu et al., 2013)

水は全て蒸発

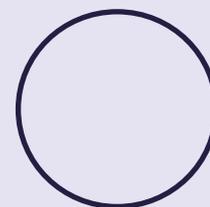


- ・ 暴走温室  
(e.g., Nakajima+, 1992)
- ・ 湿潤温室  
(e.g., Kasting+, 1993)

液体が存在



水はすべて凍結



- ・ 全球凍結  
(e.g., Mischna + 2000)

# 1.1 地球型水惑星の表層環境

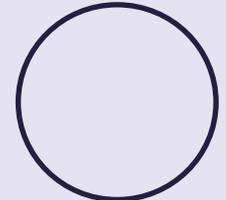
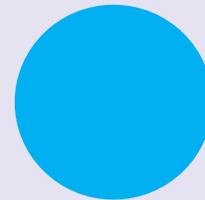
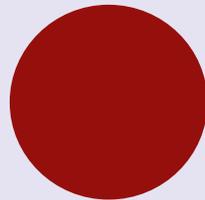
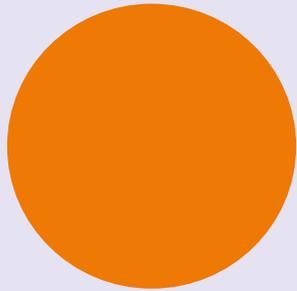
これまで地球型惑星の表層環境は

- ・ **液体水の存在**に着目し
- ・ 惑星が受ける**中心星放射量**から制約がなされてきた (e.g., Kasting et al., 1993; Kopparapu et al., 2013)

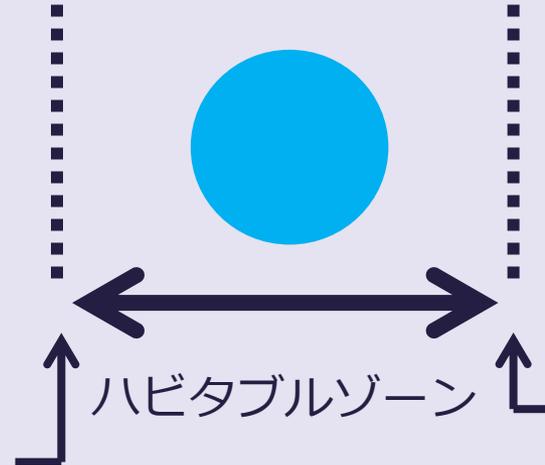
水は全て蒸発

液体が存在

水はすべて凍結



- ・ 暴走温室  
(e.g., Nakajima+, 1992)
- ・ 湿潤温室  
(e.g., Kasting+, 1993)



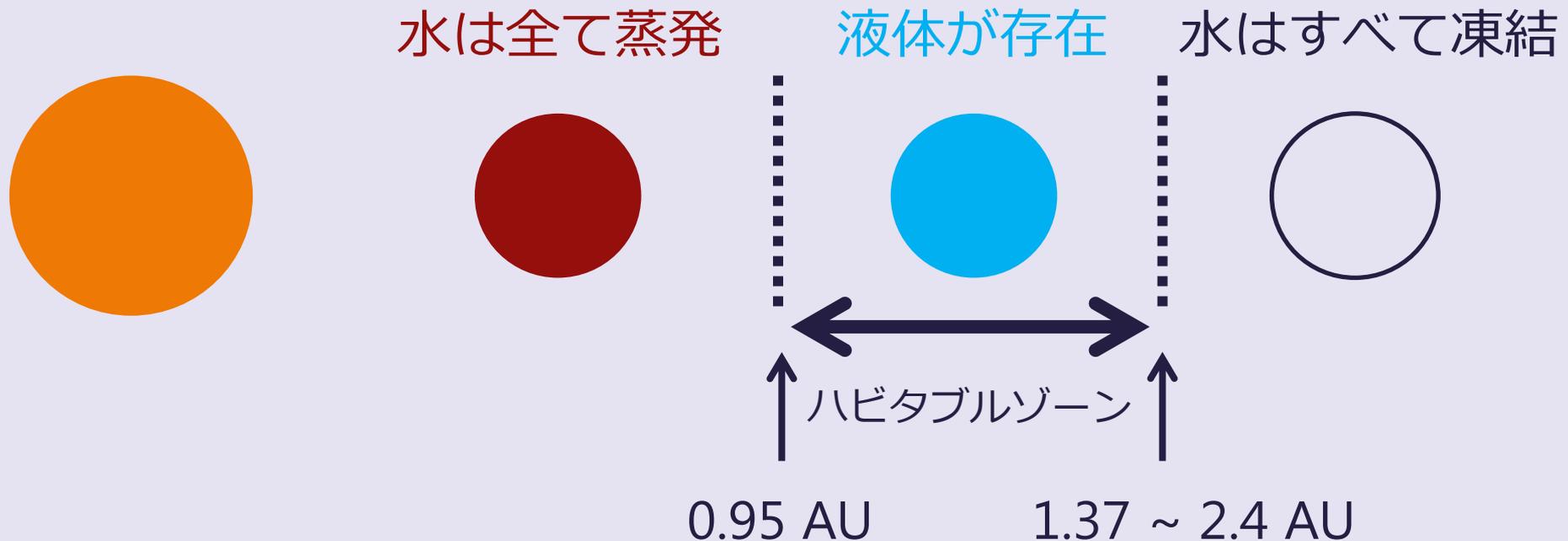
- ・ 全球凍結  
(e.g., Mischna + 2000)

# 1.1 地球型水惑星の表層環境

これまで地球型惑星の表層環境は

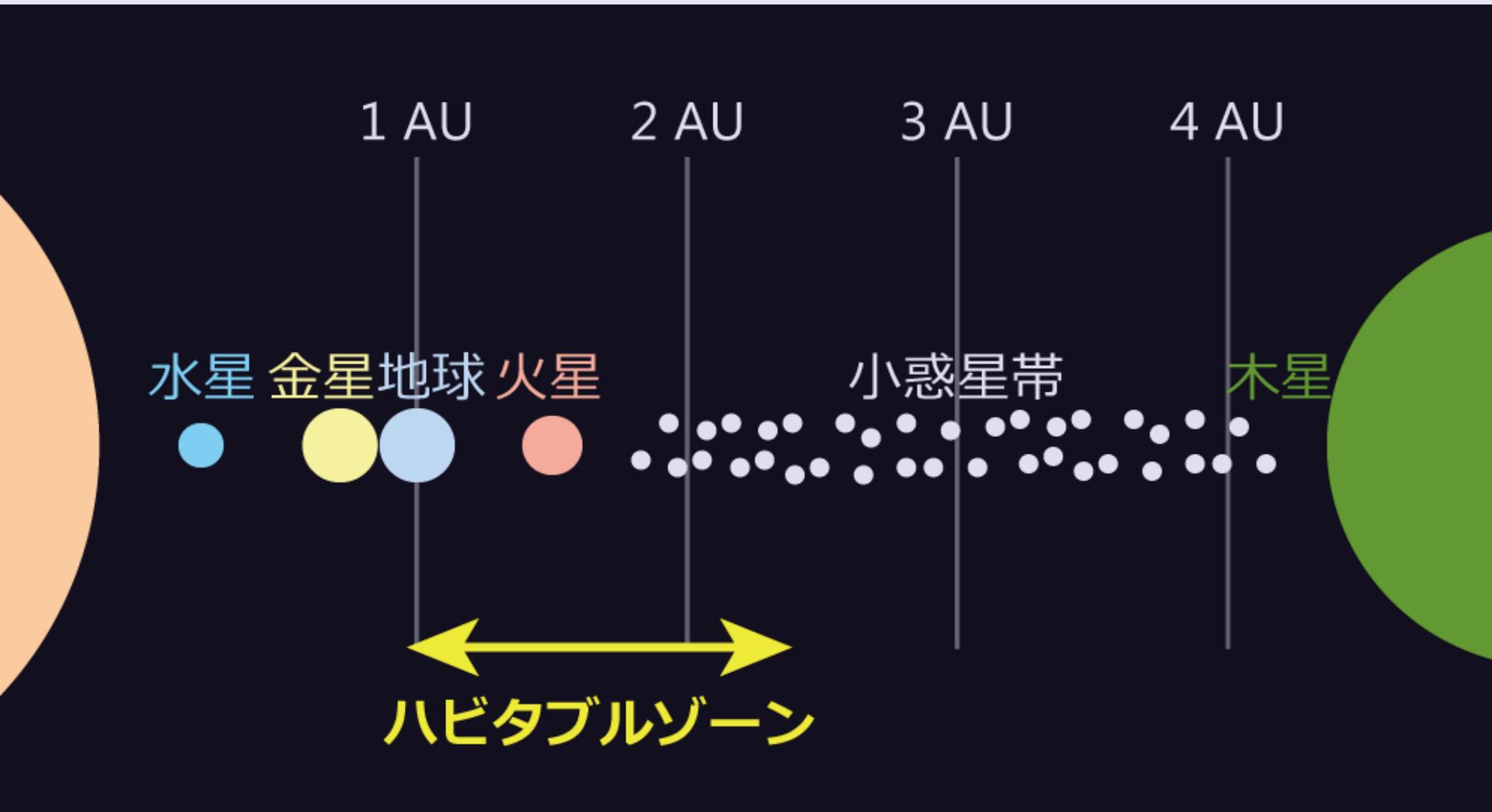
- ・ **液体水の存在**に着目し
- ・ 惑星が受ける**中心星放射量**から

制約がなされてきた (e.g., Kasting et al., 1993; Kopparapu et al., 2013)

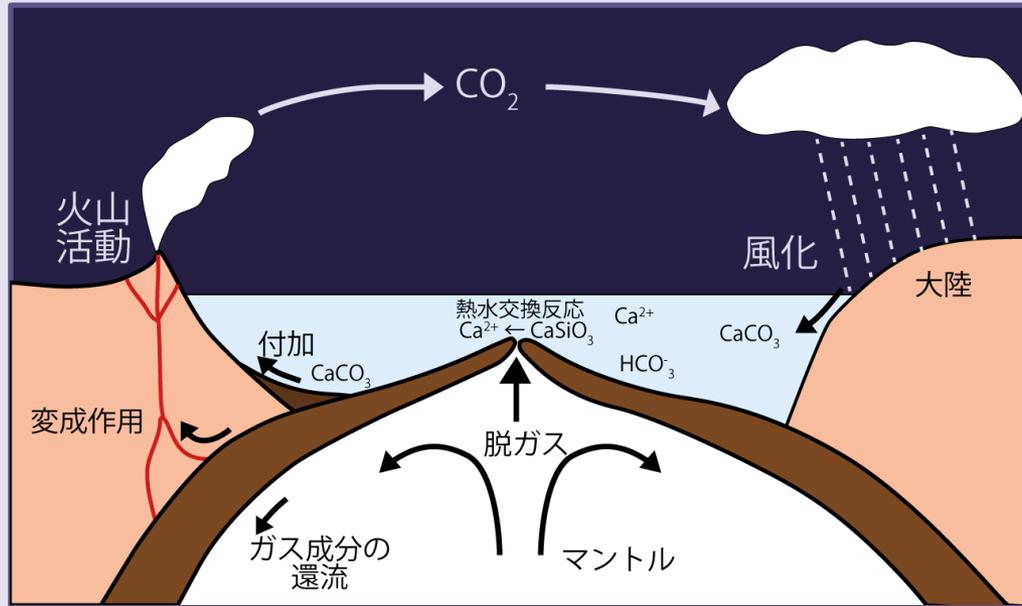


## 1.1.2 太陽系のハビタブルゾーン

Kasting et al., 1993, Kopparapu et al., 2013  
Mischna et al., 2000



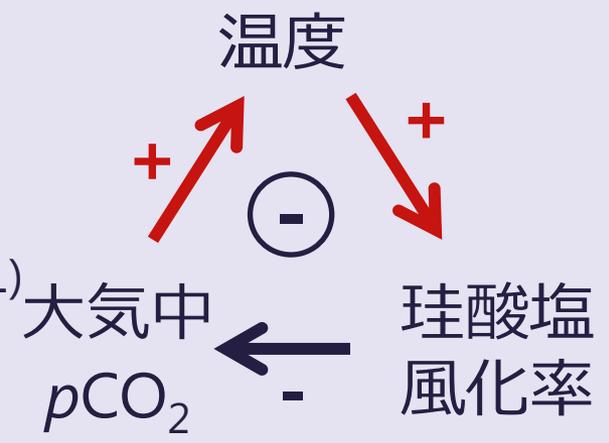
# 1.2 炭素循環とその影響



炭素循環があれば、  
・ 全球凍結から脱出  
・ Walker フィードバック → 気候安定化

(Walker et al, 1981)

・ **HZ内において温暖な環境が維持されるはず (Kasting+, 1993)**



# 1.3 炭素循環でも全球凍結

炭素循環が機能し，また太陽放射が現在と同じ条件でも火成活動に伴う大気海洋へのCO<sub>2</sub>供給率が現在の**1/10以下であれば全球凍結** (Tajika, 2007)

炭素循環があり，HZ内に位置する惑星は

- ・従来の予想に反し，**全球凍結しうる**
- ・全球凍結しても炭素循環のため氷床は融解  
→ 全球凍結と非全球凍結を繰り返す？  
→ **全球凍結状態の存在確率は？**

(c.f., 地球の全球凍結~10<sup>5~7</sup>年:

Crowley et al., 2001; Sohl et al., 1999; Tajika, 2003)

# 1.4 本研究の目的

炭素循環がある地球型惑星に対し、

- ・ 全球凍結に陥る条件を推定する
- ・ 全球凍結状態の存在確率を明らかにする

# 2 モデル

エネルギー平衡：

$$(1 - A(T))S \cos \phi - I(p\text{CO}_2, T) + \frac{\partial}{\partial \phi} \left\{ D(p\text{CO}_2, T) \frac{\partial T}{\partial \phi} \right\} = 0$$

炭素循環：

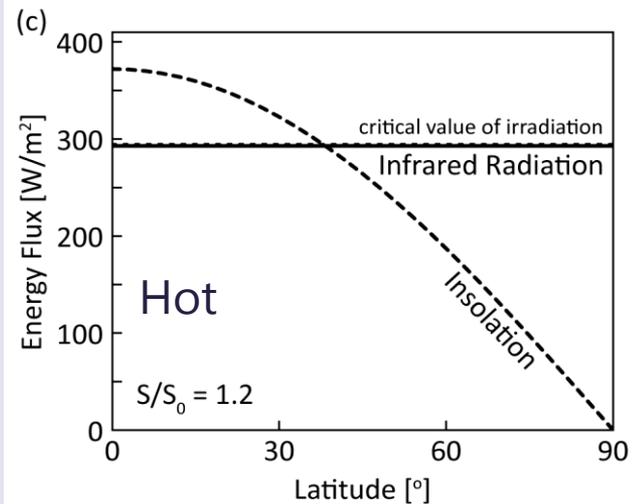
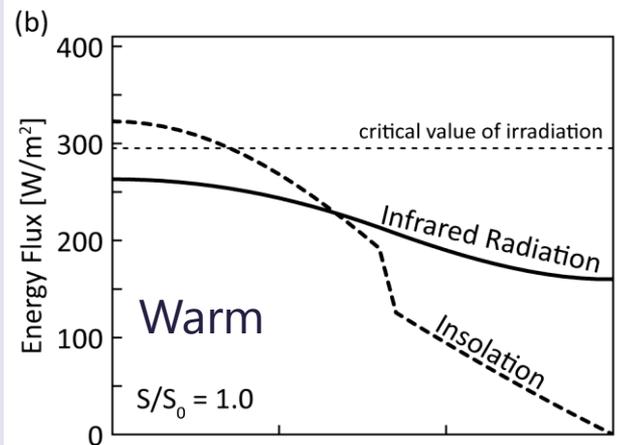
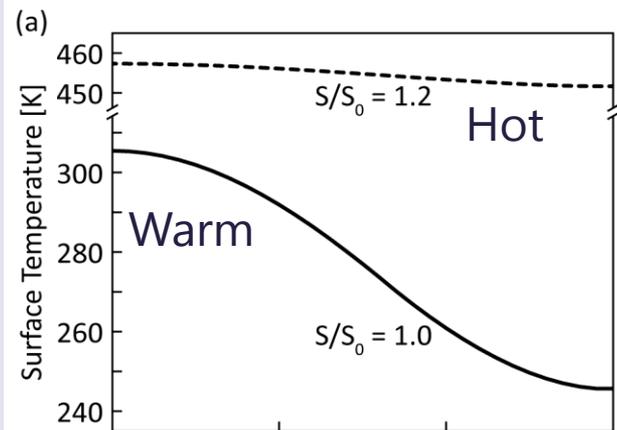
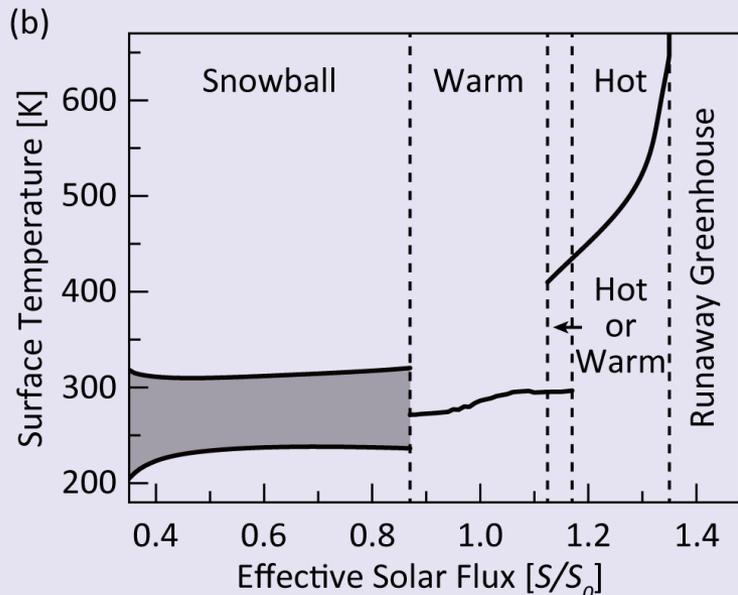
$$F_D - W(p\text{CO}_2, T) = 0$$

$T$ : 地表面温度,  $\phi$ : 緯度,  $A$ : アルベド  
 $S$ : 太陽放射,  $I$ : 惑星放射,  $D$ : 拡散係数  
 $F_D$ :  $\text{CO}_2$ 脱ガス率,  $W$ : 風化による $\text{CO}_2$ 除去率

(North et al., 1981; Walker et al., 1981; Kasting, 1988; Nakajima et al., 1992;  
Williams & Kasting, 1997; Nakamura & Tajika, 2001)

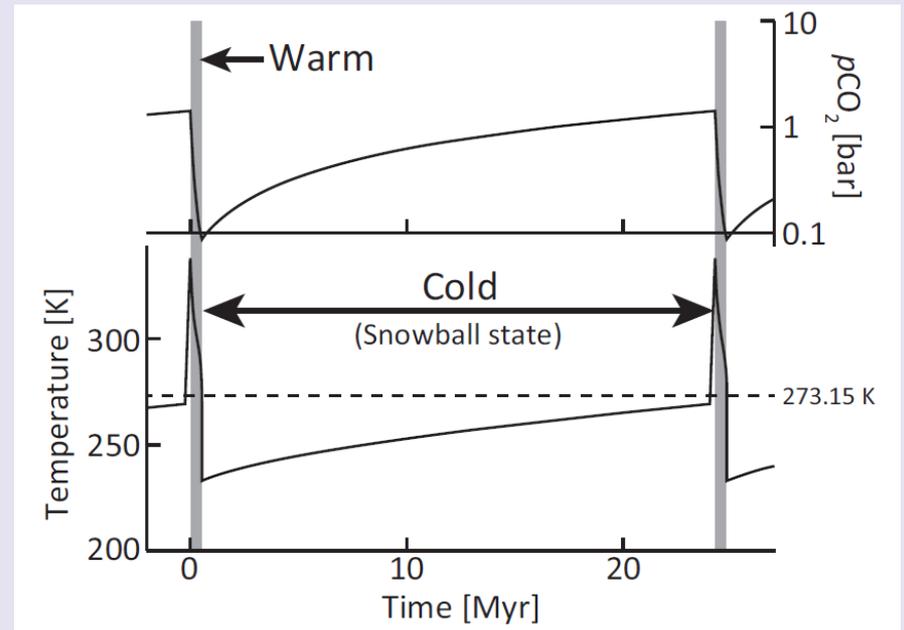
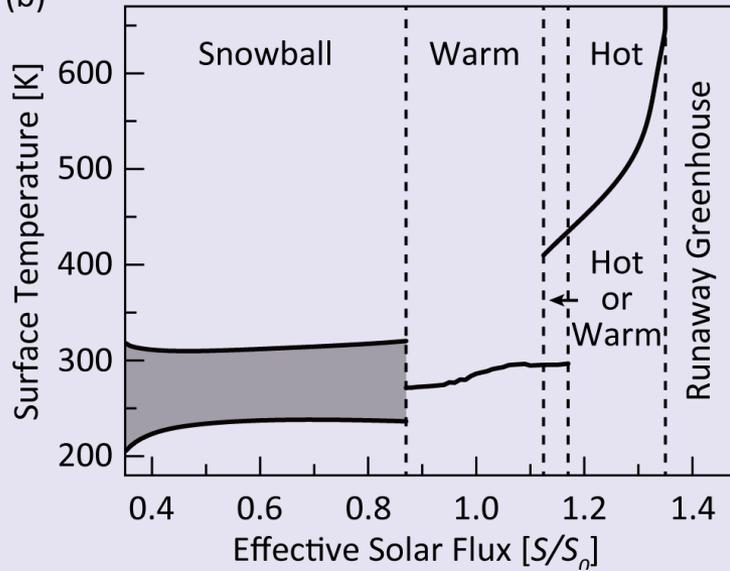
太陽放射と $\text{CO}_2$ 脱ガス率を与え、  
地表面温度分布と $p\text{CO}_2$ を求める

# 3.1 気候の分類

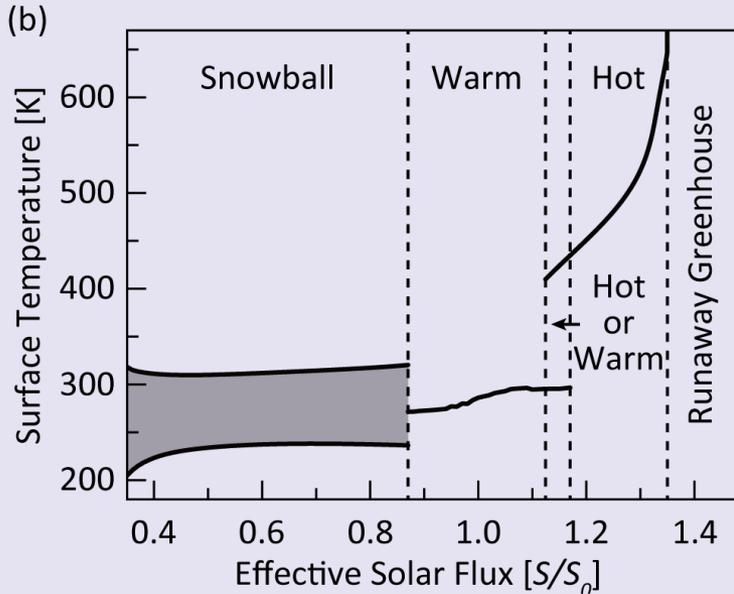


# 3.1 気候の分類

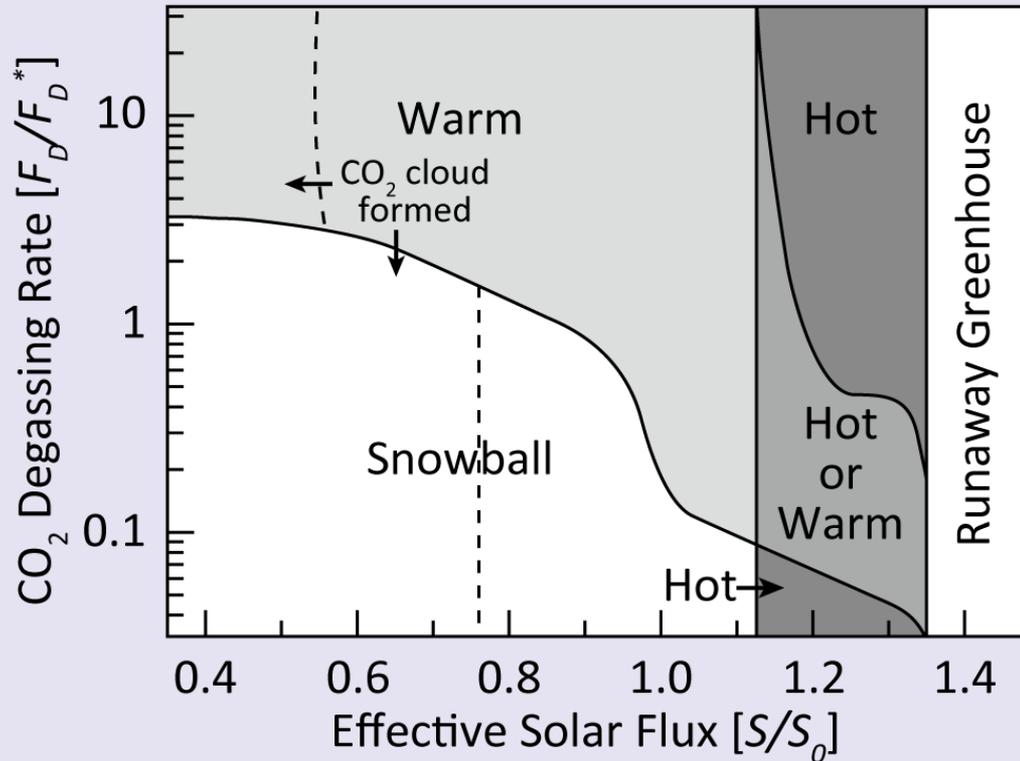
(b)



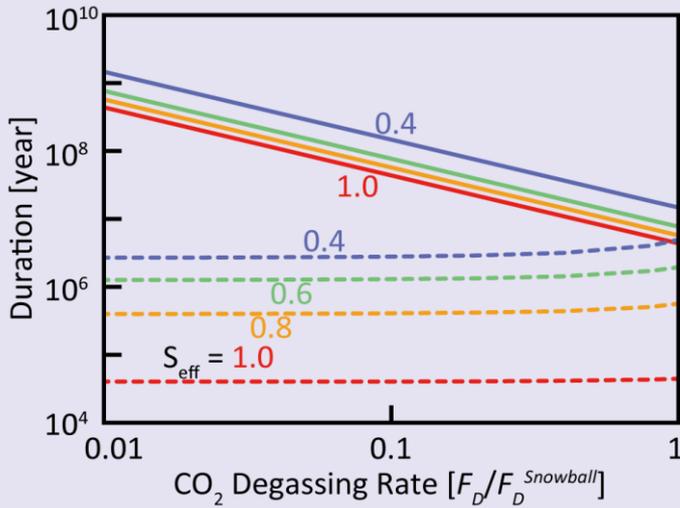
# 3.1 気候の分類



- CO<sub>2</sub>脱ガス率が
- 現在の地球程度でも  
HZ内の**大部分で全球凍結**
  - 現在の地球の**1/10以下**で  
HZでも**全球凍結**
  - 現在の地球の**数倍以上**で  
HZでは**全球凍結しない**

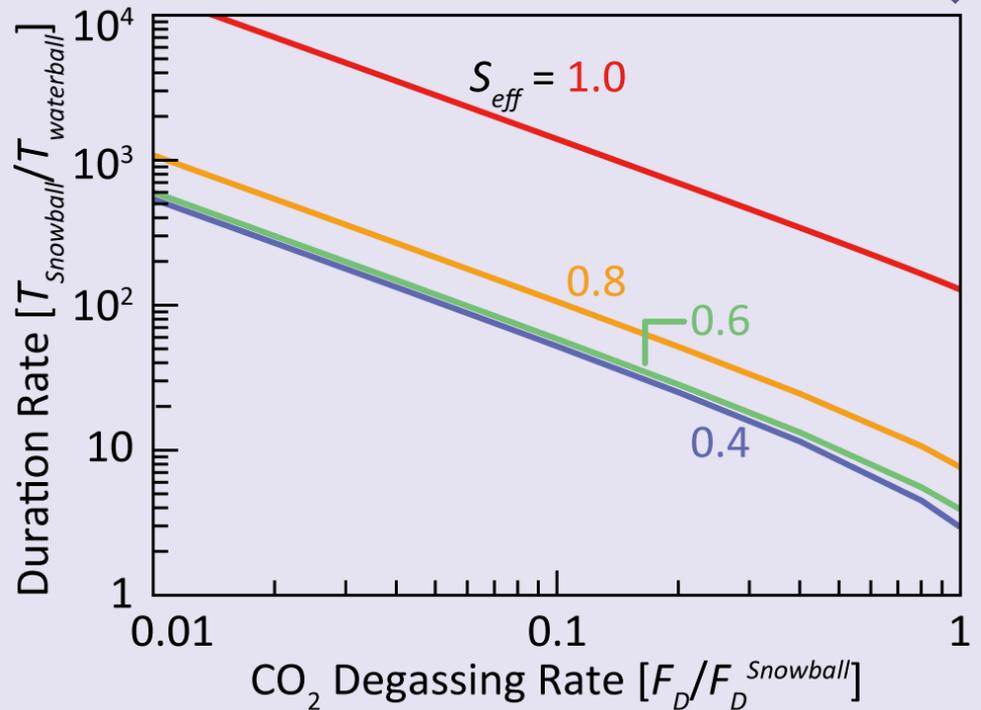
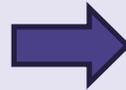


# 3.2 全球凍結状態の存在確率



実線 :  $T_{snowball}$   
破線 :  $T_{waterball}$

各日射量における  
全球凍結臨界CO<sub>2</sub>脱ガス率で  
規格化



全球凍結期間は  
非全球凍結期間に対し  
十分長いため、  
全球凍結状態を観測する  
可能性は十分高い

# 4 結論

- CO<sub>2</sub>脱ガス率が
  - 現在の地球の数倍以上 → 全球凍結を免れる
  - 現在の地球の1/10以下 → 全球凍結に陥る
- 全球凍結モードにおいて  
1サイクル（全球凍結期+非全球凍結期）の75 %以上は、  
全球凍結状態である  
→ 全球凍結状態は十分観測可能であると考えられる。
- 惑星の火成活動は、惑星の内部熱進化に伴い、衰退  
→ 進化の過程で多くの惑星が全球凍結モードに入ると  
予想される