

# 地球惑星科学II

## 第14回

2025年01月16日

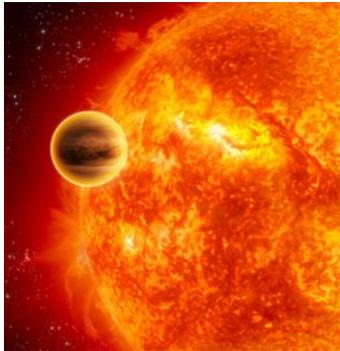
# 連絡：学期末試験について

- 1月23日（木）10:30から実施
- 場所：E301
- 地球惑星科学入門・地学図表・自筆ノートは持ち込み可、電卓も持ち込み可。
  - 他の書籍・紙類などは不可
  - スマートフォン・携帯電話・電子辞書は使用禁止（電卓としての使用も禁止）
- 出題形式
  - 記述問題、計算問題、式変形、式を使って考える問題
  - その場での思考を問う問題も出題

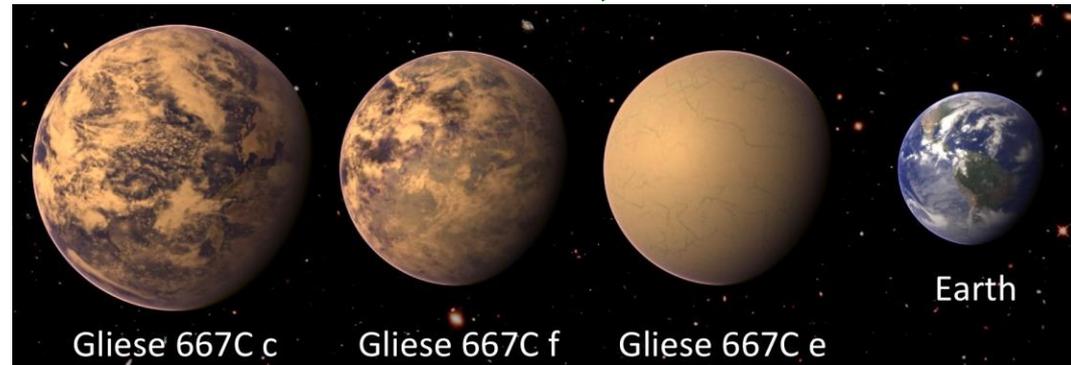
# 今日のテーマ

- 系外惑星

Hot Jupiter



スーパーアース



<http://www.cosmosmagazine.com/news/3404/new-hot-jupiters-rewrite-planetary-theory>

<http://www.drewexmachina.com/2014/09/07/habitable-planet-reality-check-gj-667c>

- 惑星における生命存在可能性

- 参照:

地学図表 p.30—31

地球惑星科学入門31章—34章

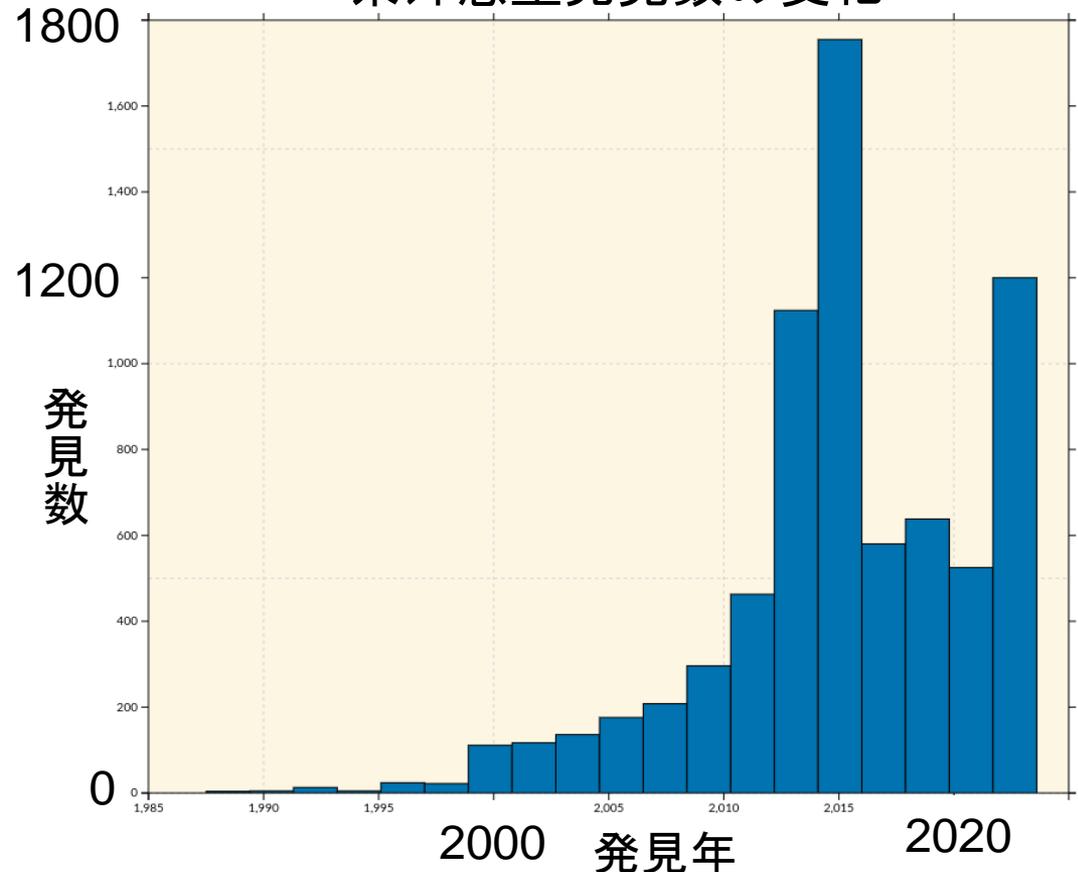
# 系外惑星とは

- 太陽系以外の惑星

- 1995年の初発見（ペガサス座51b）以来、候補天体を含め7000個以上が発見

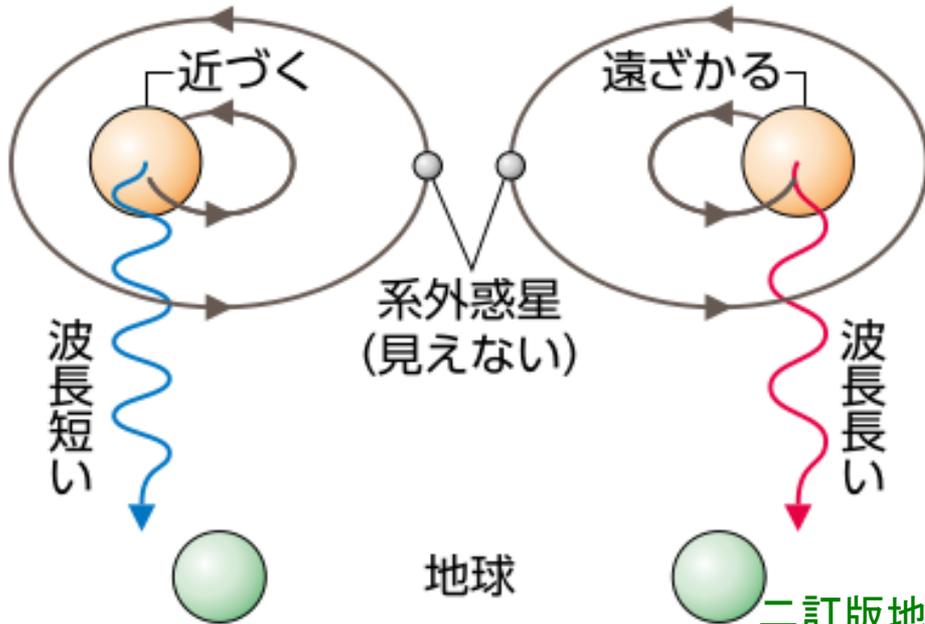
- 最近は太陽に非常に近いところにも地球と似た惑星（プロキシマb）が発見

系外惑星発見数の変化

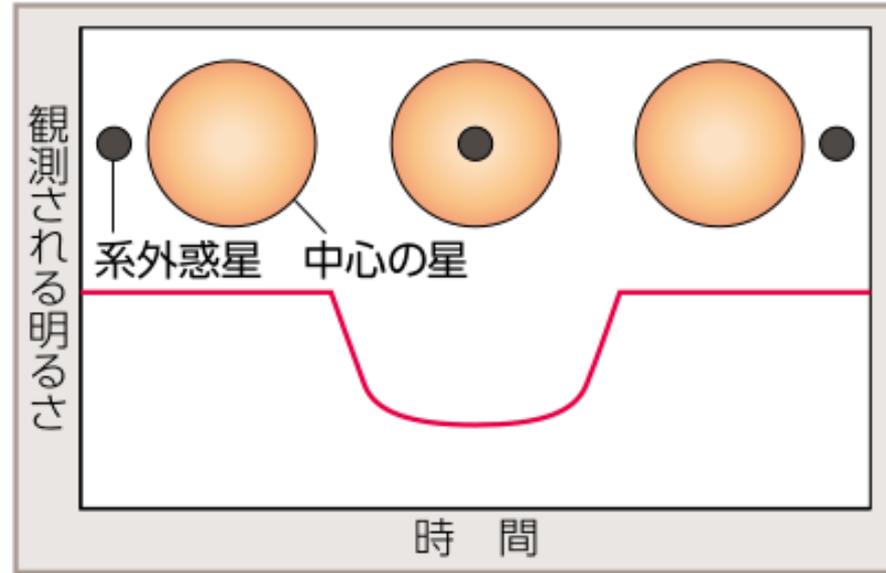


# 系外惑星の観測方法

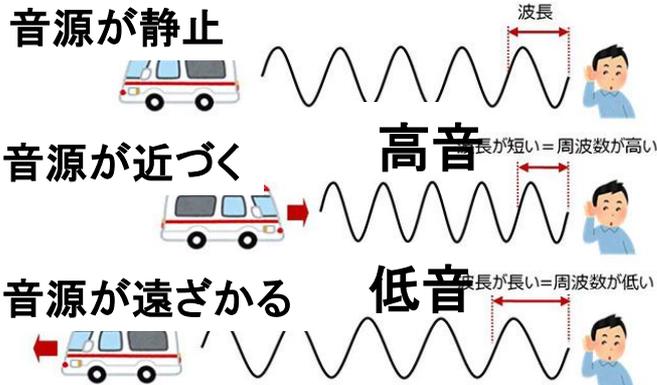
## ドップラー法



## トランジット法

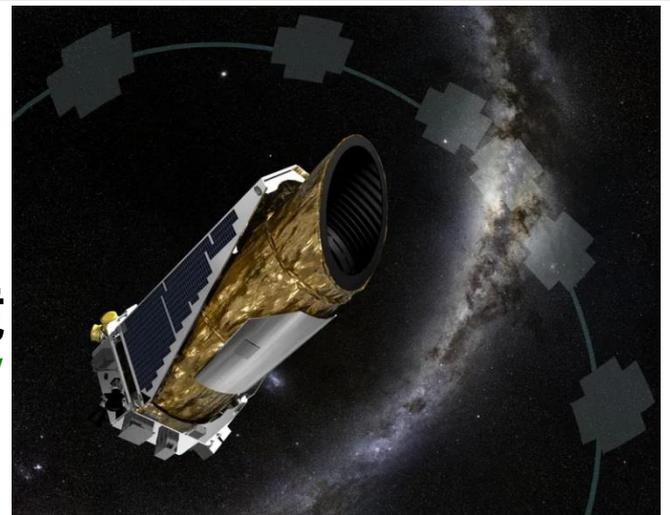


二訂版地学図表P.121



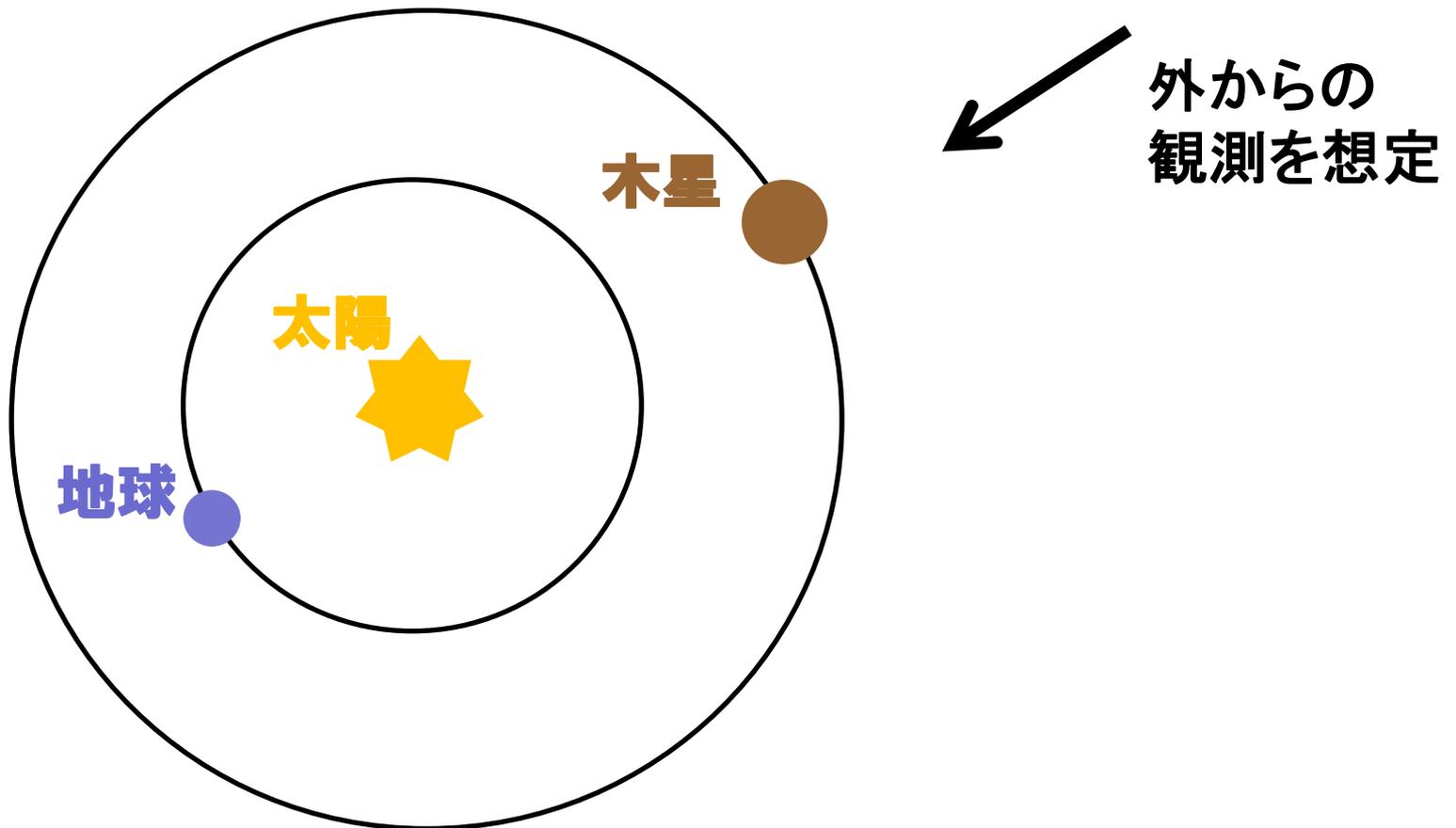
## ケプラー 宇宙望遠鏡

<https://science.nasa.gov/mission/kepler>



# 今日の計算問題

- 木星が太陽の前を通過すると太陽光は何%減少するか？

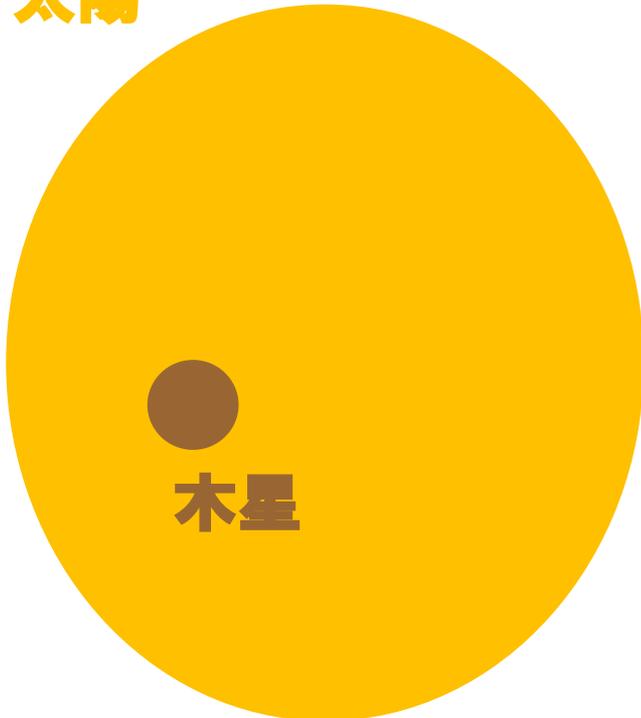


# 計算問題の解答例

- 木星が太陽の前を通過すると太陽光は何%減少するか？

木星は太陽面をどれくらい隠すか？

太陽



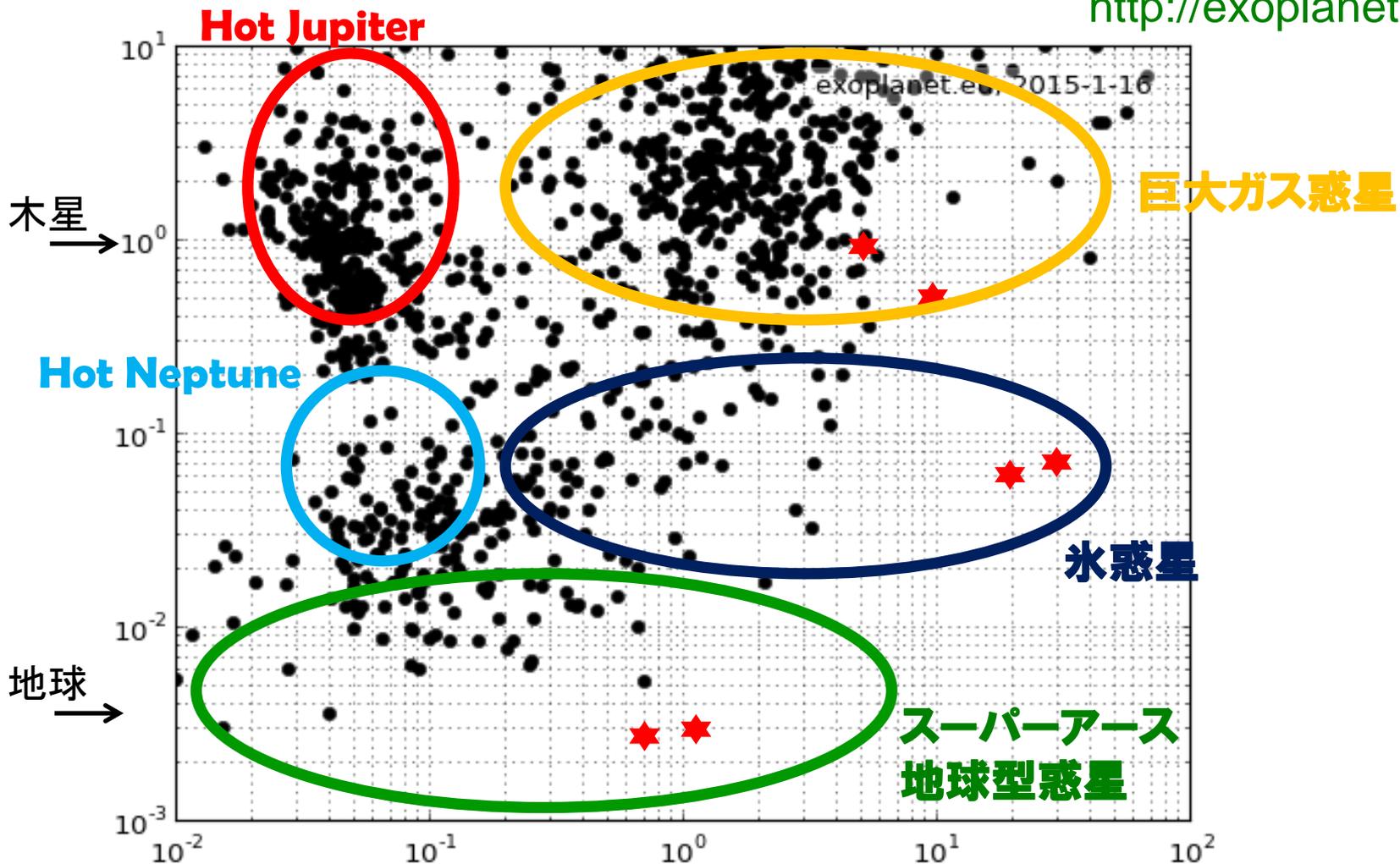
断面積比を求めれば良い

$$\begin{aligned}\left(\frac{\text{木星半径}}{\text{太陽半径}}\right)^2 &= \left(\frac{7.15 \times 10^7 \text{m}}{6.96 \times 10^8 \text{m}}\right)^2 \\ &= (1.03 \times 10^{-1})^2 \\ &= 1.06 \times 10^{-2} \\ &\sim 0.01 \quad (1\%) \end{aligned}$$

# 系外惑星の多様性

<http://exoplanet.eu/>

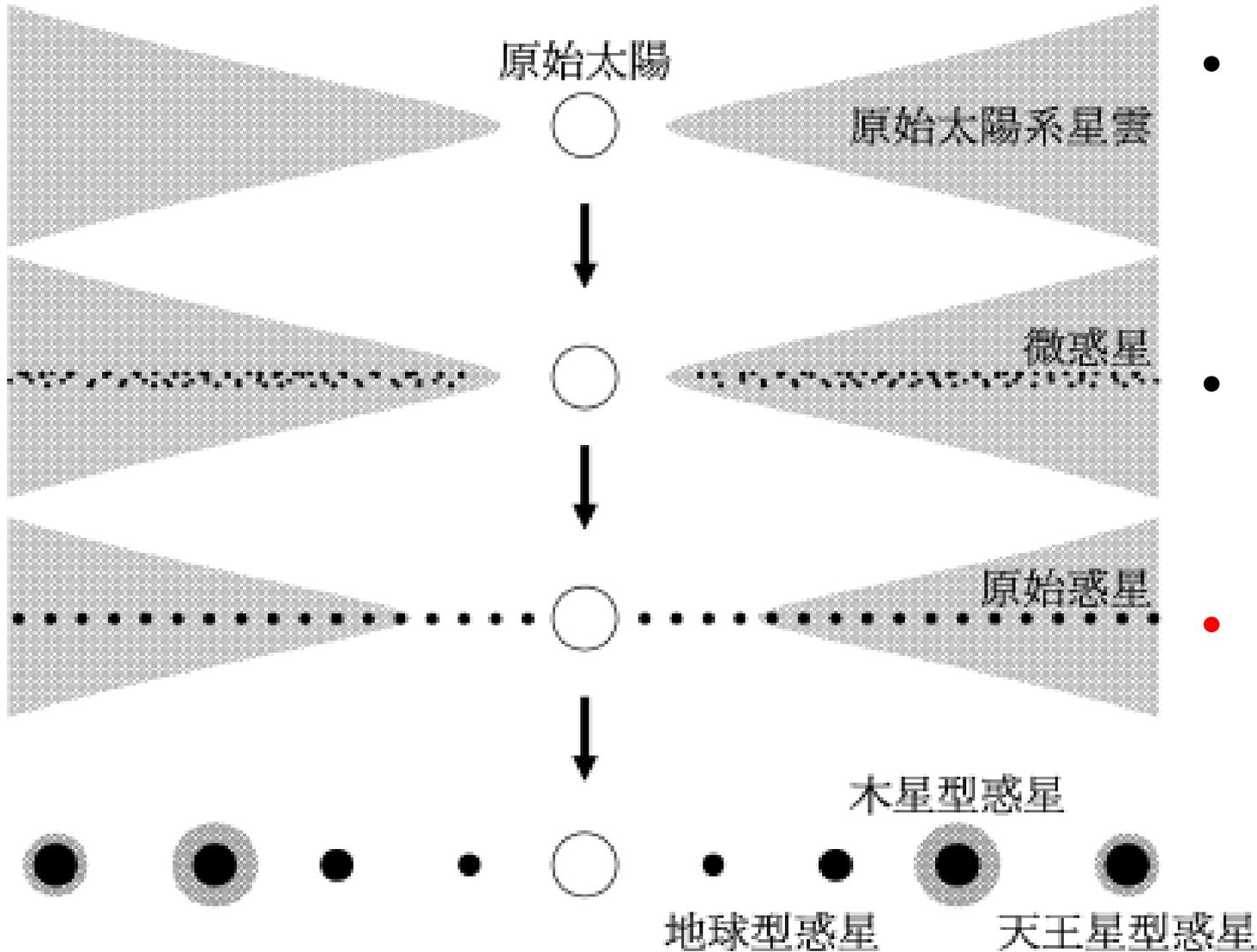
惑星質量(木星で規格化)



<http://www.drewexmachina.com/2014/09/07/habitable-planet-reality-check-gj-667c>

軌道長半径(AU)

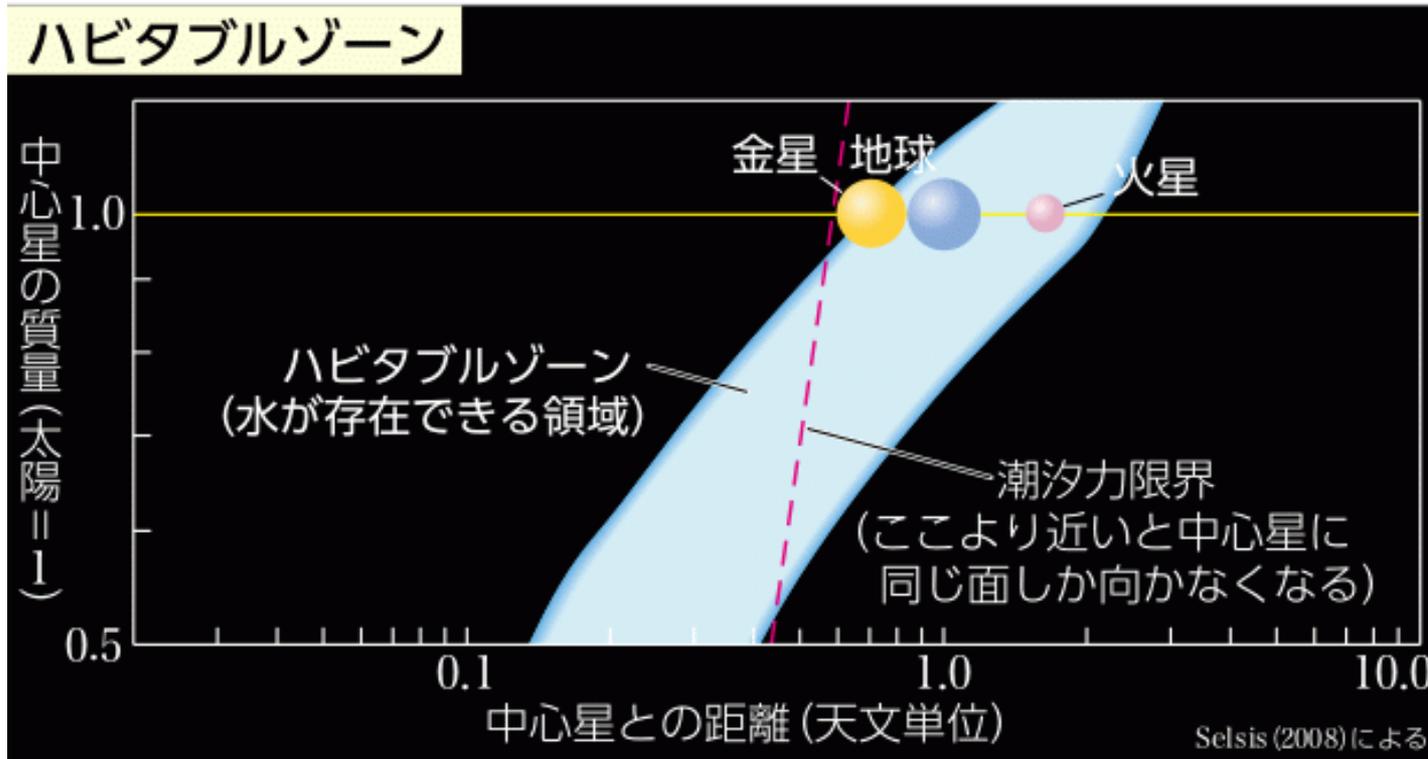
# 惑星形成論の見直し



- 系外惑星の形成過程は太陽系と異なる可能性
- より一般的な惑星形成論が必要
- **惑星移動**

# 系外惑星における生命存在可能性

- 生命発生条件は一般的にはわからない
- 通常は、惑星表面上に液体の水が存在できる条件を考える: ハビタブルゾーン

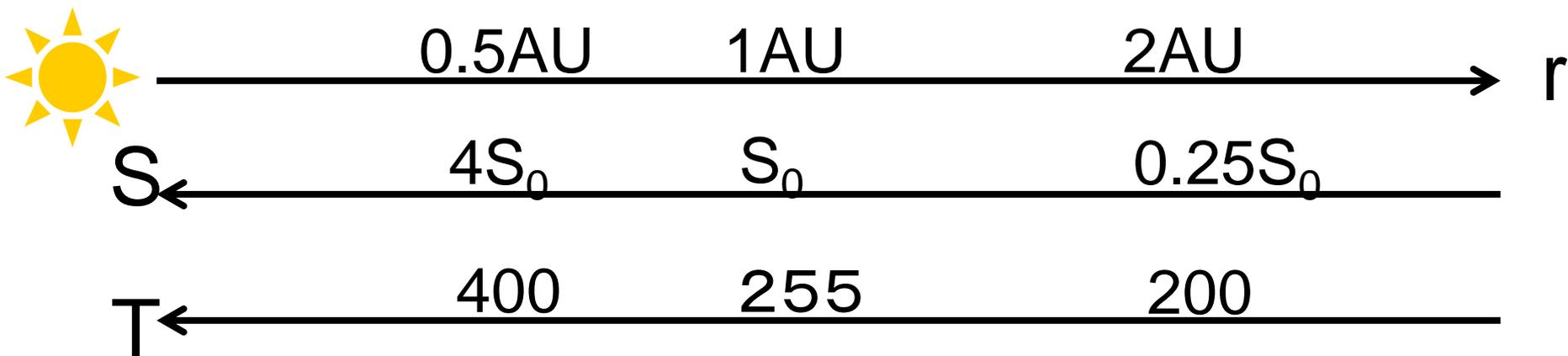


二訂版地学図表P.132

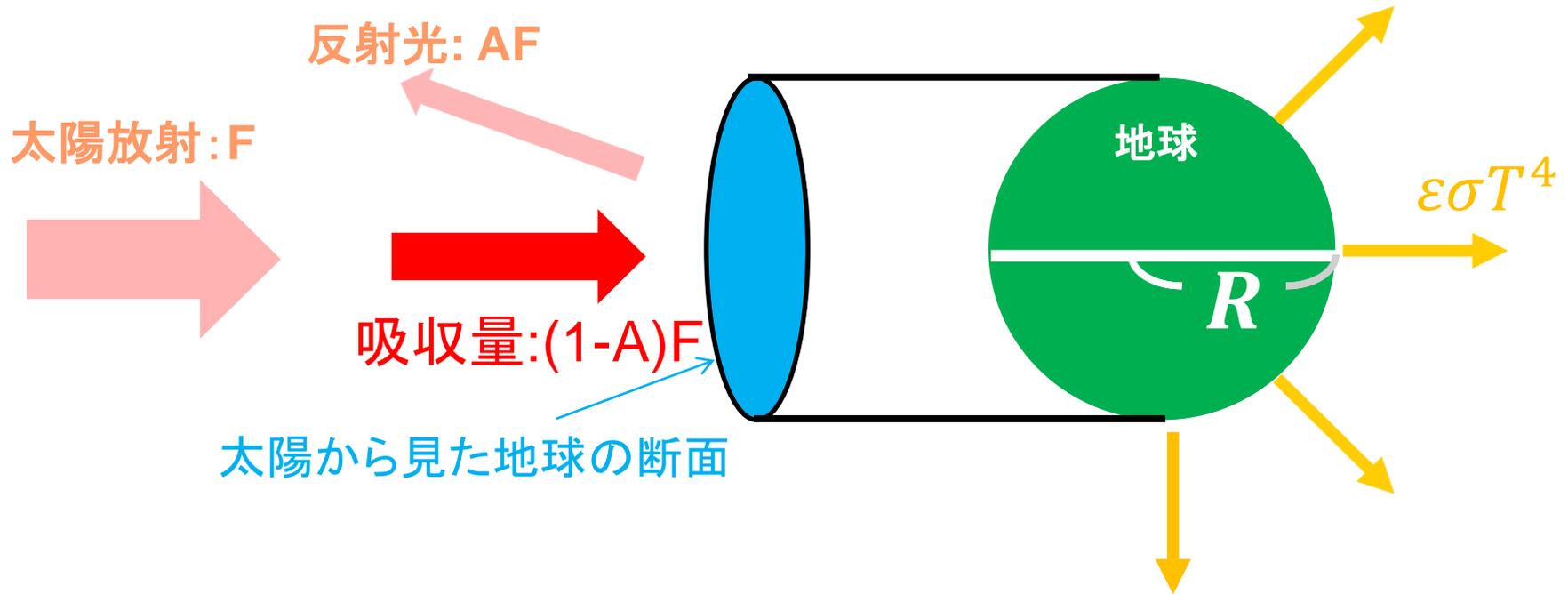
# 軌道半径による惑星温度の違い

- 適度な温度になるためには恒星からの距離が適度なものでなければならない
- 全球平均モデル

$$\text{熱収支: } (1 - A)S = \varepsilon 4\sigma T^4$$



# 平衡温度の計算方法



$$\pi R^2 (1 - A) F = 4\pi R^2 \varepsilon\sigma T^4$$

$$(1 - A) F = 4\varepsilon\sigma T^4$$

$$T = \left( \frac{(1 - A) F}{4\varepsilon\sigma} \right)^{\frac{1}{4}} = \left( \frac{(1 - 0.3) \times 1370}{4 \times 1 \times 5.67 \times 10^{-8}} \right)^{\frac{1}{4}} = 255 \text{ K}$$

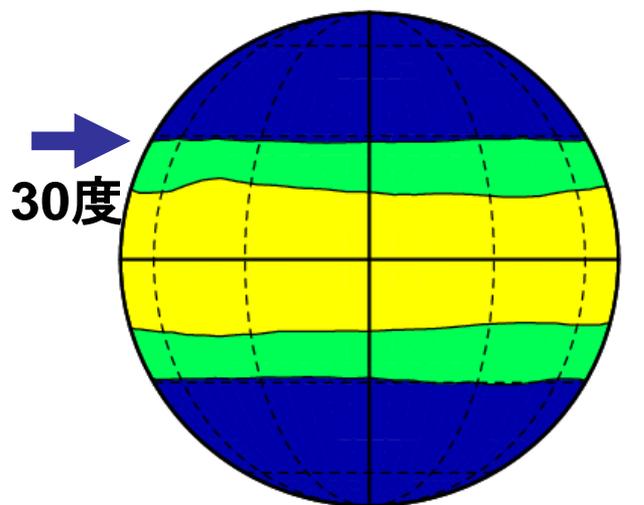
# 大気大循環モデルによる計算結果

地球程度の入射量を与えた場合

- 入射量が大きくなれば氷境界は後退
- 小さくなれば氷境界は低緯度側に進行

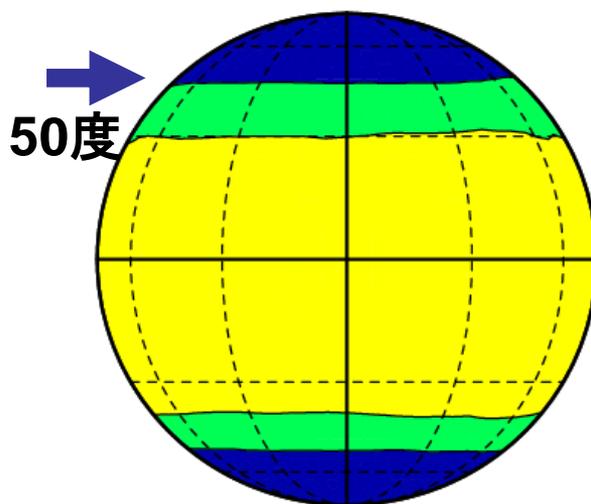
表面温度(365日平均)

入射量:  $325\text{W/m}^2$



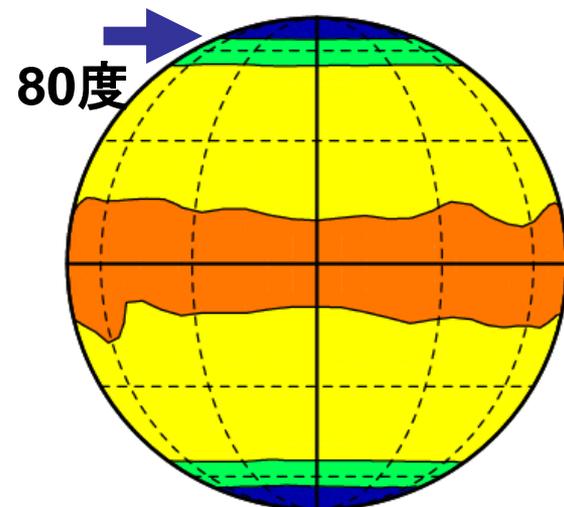
-10 10 30 50 70°C

入射量:  $355\text{W/m}^2$



-10 10 30 50 70°C

入射量:  $375\text{W/m}^2$



-10 10 30 50 70°C

# 大気大循環モデルによる計算結果

入射量を減少させた場合

## • 氷領域が拡大

– 入射量が $325\text{W/m}^2$ : 氷境界は緯度30度

–  $312.5\text{W/m}^2$ : 緯度20度

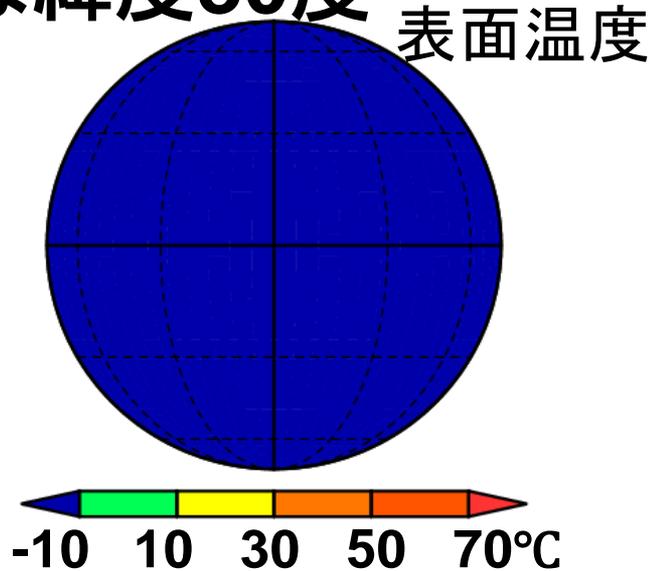
–  $287.5\text{W/m}^2$ : 緯度10度

– では $287\text{W/m}^2$ になると？

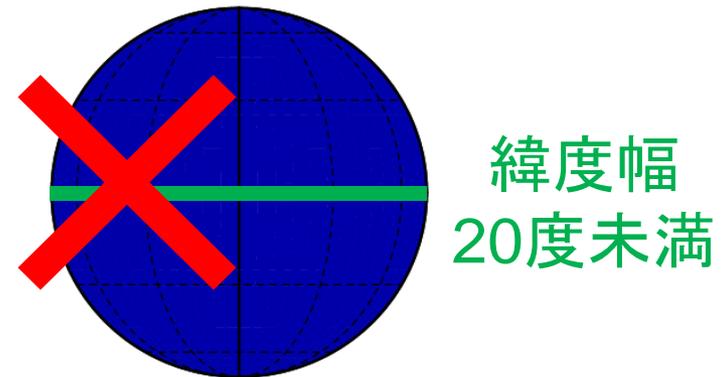
全部凍ってしまう！

全球凍結状態が発生

(気候の状態が一気に変わる)



## • 赤道付近だけ氷が無い状態は維持できない (大極冠不安定)

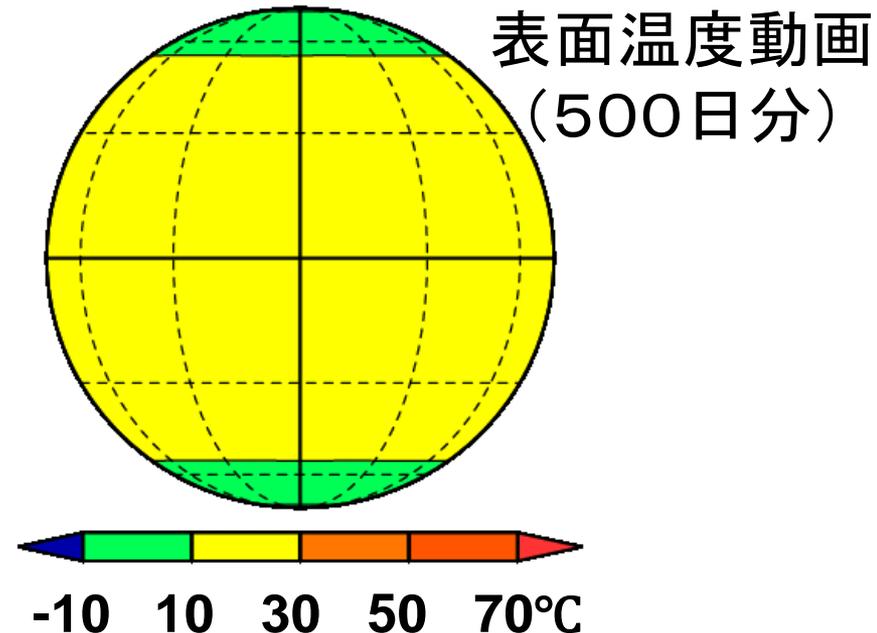


# 大気大循環モデルによる計算結果

入射量を増加させた場合

- 平均表面温度は上昇する
  - 入射量が $350 \text{ W/m}^2$ の時:平均表面温度は  $5^\circ\text{C}$
  - $360 \text{ W/m}^2$ の時:  $15^\circ\text{C}$
  - $370 \text{ W/m}^2$ の時:  $30^\circ\text{C}$
- では、入射量が $380 \text{ W/m}^2$ になると表面温度は  
どうなると思いますか？

表面温度は  
上昇し続ける！  
(暴走温室状態)



# 暴走温室状態とは

## エネルギーのつり合いを考える

入射量が小さい場合



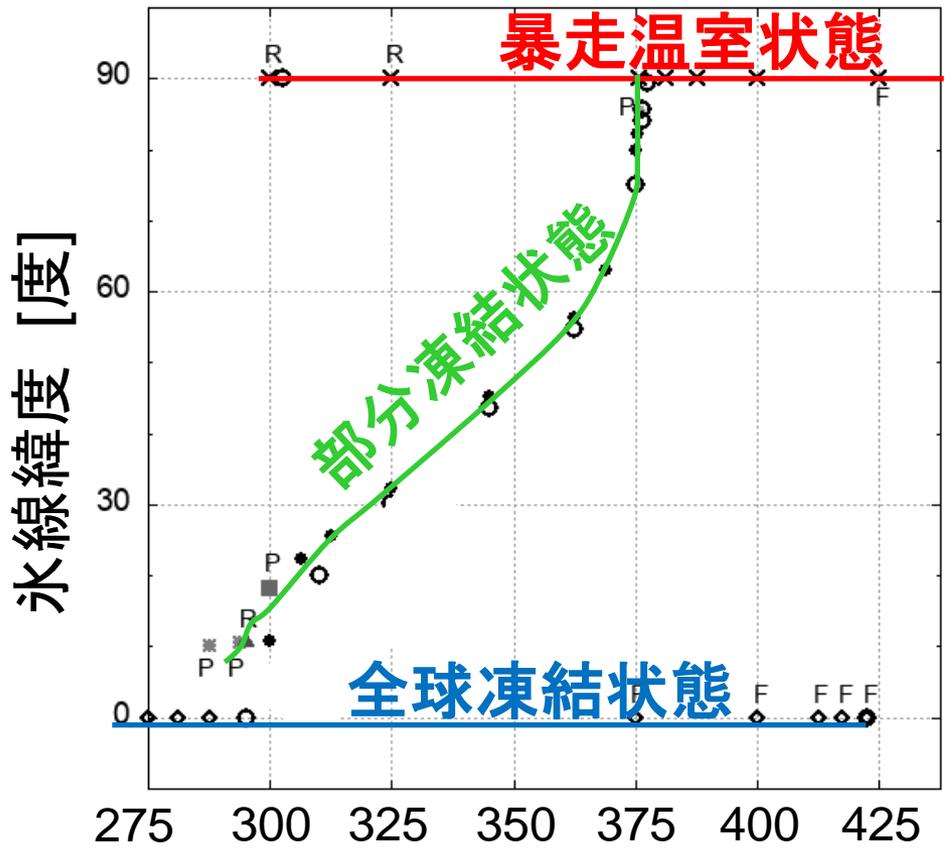
温度が一定に保たれる  
(平衡状態)

入射量が多い場合



温度が上昇を続ける  
(暴走温室状態)

# 大気大循環モデル結果をまとめたもの



## 気候レジーム図

同じ入射量でも異なる状態が発生 (多重解)

shiwatari et al.(2021),



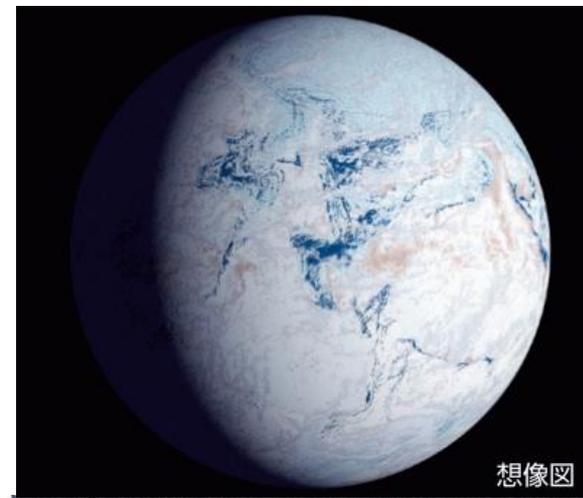
暴走温室状態



全球凍結状態

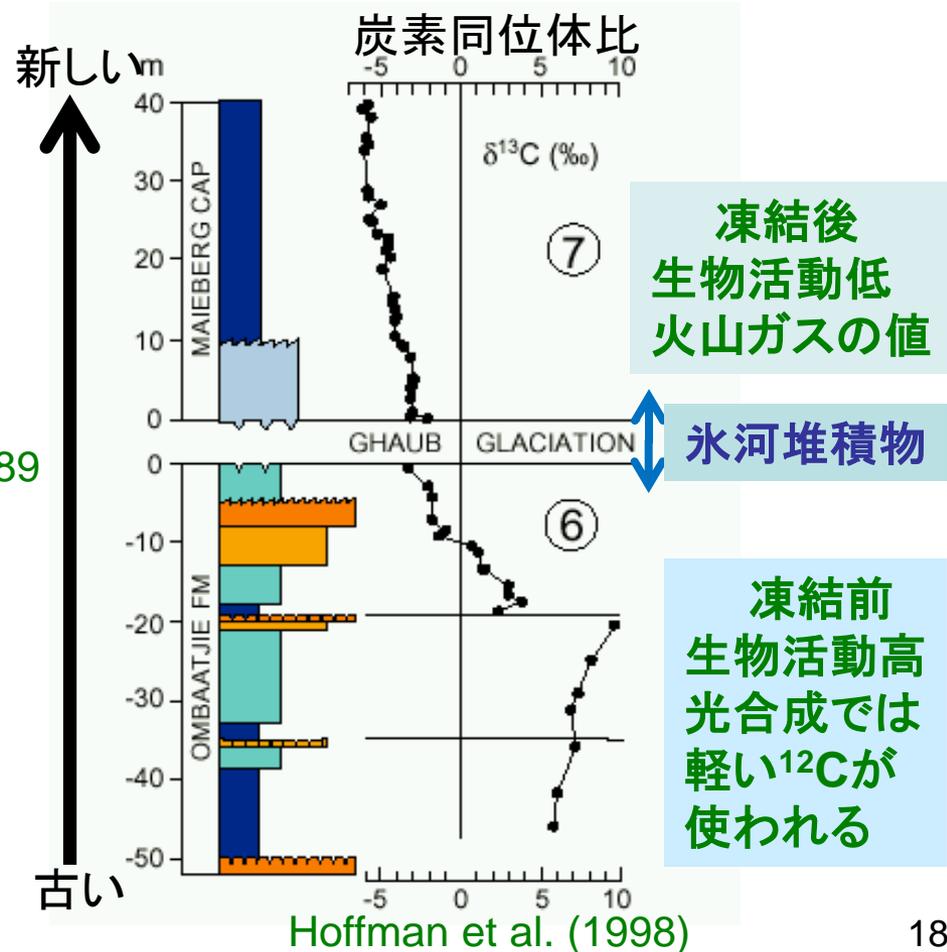
# 全球凍結状態

- 雪玉地球仮説 (Kirschvink, 1992)
  - 7億年前・22億年前に全球凍結
  - 古地磁気学データからすると低緯度にも氷

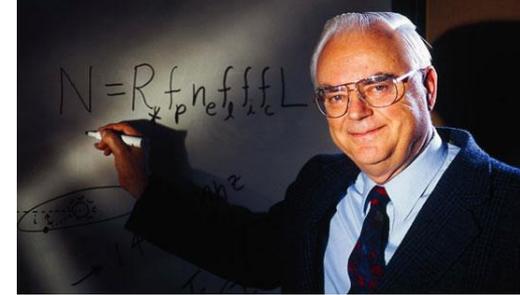


二訂版地学図表P.189

川上 (2000),  
科学 vol.70



# ドレイク方程式



<http://www.seti.org/drakeequation>

- Drake が提案

- 1961年、グリーンバーグ会議

- 銀河系の中で通信可能な知的文明の数

$$N = R \times f_p \times n_e \times f_L \times f_i \times f_c \times L$$

$R$ : 銀河系内で毎年誕生する恒星の数

$f_p$ : 誕生した恒星が惑星系をもつ割合

$n_e$ : 各惑星系における生命の存在に適した惑星の数

$f_L$ : 生命の存在に適した惑星上で生命が誕生する可能性

$f_i$ : 誕生した生命が知的生命体まで進化する割合

$f_c$ : 進化した知的生命体が通信可能な段階まで文明を  
発展させる割合

$L$ : 通信を行う文明が維持される時間