

遠隔授業

遠くの星の気候を「見る」 ～地球型系外惑星の気候～

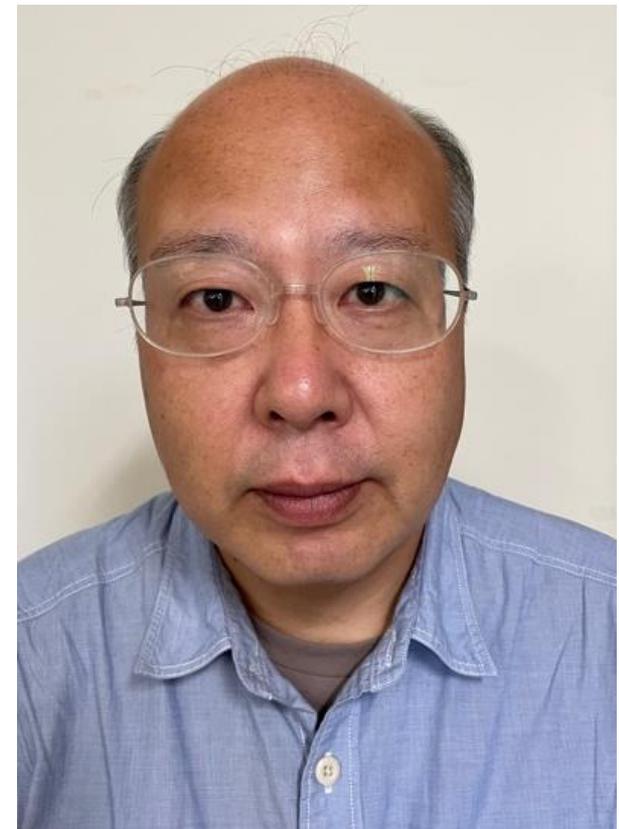
北海道大学 大学院 理学研究院

石渡正樹

2024年12月11日

自己紹介

- 名前
石渡正樹 (いしわたりまさき)
- 所属
北海道大学大学院理学研究院
- 身分
教授
- 研究内容
惑星大気の気象・気候。主として数値計算
– もともとは気象学の研究室に所属
- 雪道でよく転んでます



目次

- 系外惑星の多様性
- 生命存在可能性
- 地球型系外惑星の気候
- まとめ

系外惑星の多様性

系外惑星の多様性

- 太陽系には無い種類の惑星が存在

ホットジュピター
(熱い木星)

ホットネプチューン
(熱い海王星)



https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9b/AB_Pictoris_B.png



https://cosmos-universe.fandom.com/wiki/GQ_Lupi_b



https://www.exoplanetkyoto.org/exohtml/JA_HotNeptune.html

イメージ図

現在の観測ではこのような模様までを見ることはできない

スーパーアース



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

地球型系外惑星とは

- 地球程度の質量（およそ10倍程度まで）を持つ系外惑星
- これまでに 211 個発見
- ただし、それらの全てが地球のような岩石惑星かどうかはわからない
 - 現在観測でわかるのは質量だけ
 - 地球のような岩石惑星かもしれないし
小型のガス惑星かもしれない

生命存在可能性

系外惑星に生命はいるのか？

- これを考えるために、惑星上における生命存在条件は何か？を考察しよう、とよく言われる
- が！生命存在条件は一般的にはわからない
- 宇宙には想像のつかない生命もいるだろう



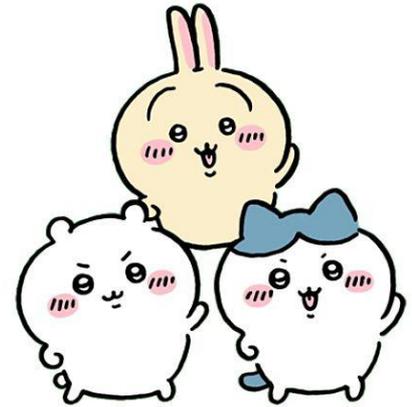
<https://illustrain.com/?p=28733>



いらすとや



<https://irasutoya.jp/goku/doragonb-ru-z-fur-za-irasuto-mury/>



<https://jp.pinterest.com/pin/12384967721933854/>

生命存在可能条件

- 出発点として地球上の生命が存在できる条件を考えることにしている
- では、地球の生命の発生または維持にとって必須なものって何だろう？
 - 皆さん、考えてみてください

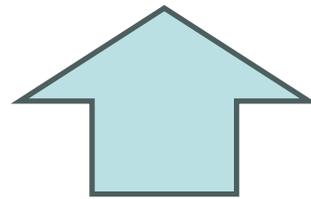
地球の生命にとって必須なもの。。。
ここで考えるのは

水(海): 液体の H_2O

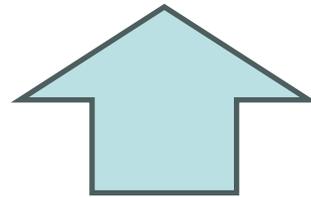


液体の水の存在条件

惑星の表面に液体の水が存在できる条件



惑星の(表面)温度



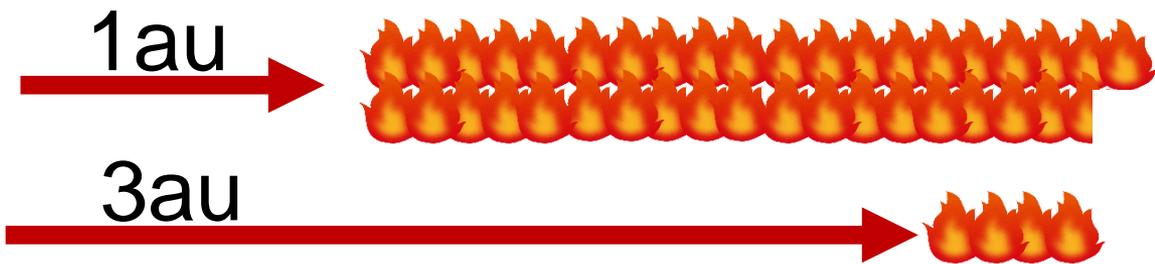
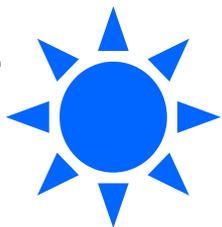
恒星から受け取る光のエネルギーの大きさ

「入射量」と呼ぶことにします

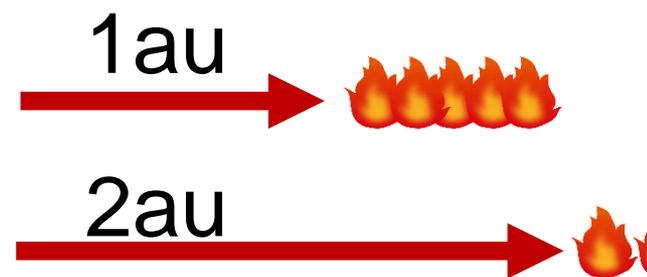
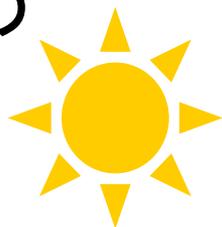
入射量を決めるもの

(入射量) は $\frac{(\text{恒星が出す光の強さ})}{(\text{恒星からの距離})^2}$ に比例

光が強い恒星
温度: 1万度
B型星



太陽と似た光の
強さの恒星
温度: 6千度
G型星



光が弱い恒星
温度: 4千度
M型星



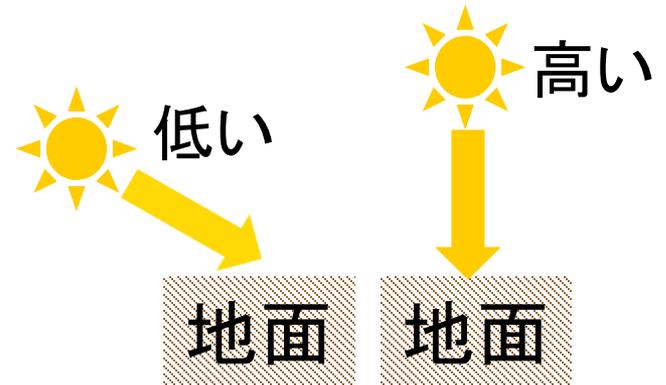
惑星により
入射量は
様々!

地球の入射量

- 太陽から受け取る光のエネルギー量
- 場所によって、時間によって異なる

– 太陽高度が高いと大きい
低いと小さい

– 昼は大きい
夜は小さい



- 地球全体の平均値
(1年平均・緯度経度平均):
およそ 350 W/m²

$W / m^2 = J / sec / m^2$ (ジュール/秒/面積)
1秒で1m²の広さに与えるエネルギー量

350W/m²の発熱量ってどれくらい？

1m²の面積に

- トイレの電球 5-6個 

<https://illustrimage.com/?dl=12510>

- 車のヘッドライト1台分



<https://www.pexels.com/ja-jp/photo/120049/>

- 人 3-4 人



いらすとや

– 人間の体は安静時に 70-100 W の発熱

入射量が変わると

- 入射量が大きければ

- 温度が上がり、飽和水蒸気量が高くなると蒸発が促進
- 海洋がどんどん蒸発するかも

- 入射量が小さければ

- 温度が下がり、水の凝固点を下回ると氷が張る
- 惑星が氷ついてしまうかも

温度と水蒸気量

未来へひろがるサイエンス2, 啓林館(中学理科教科書)

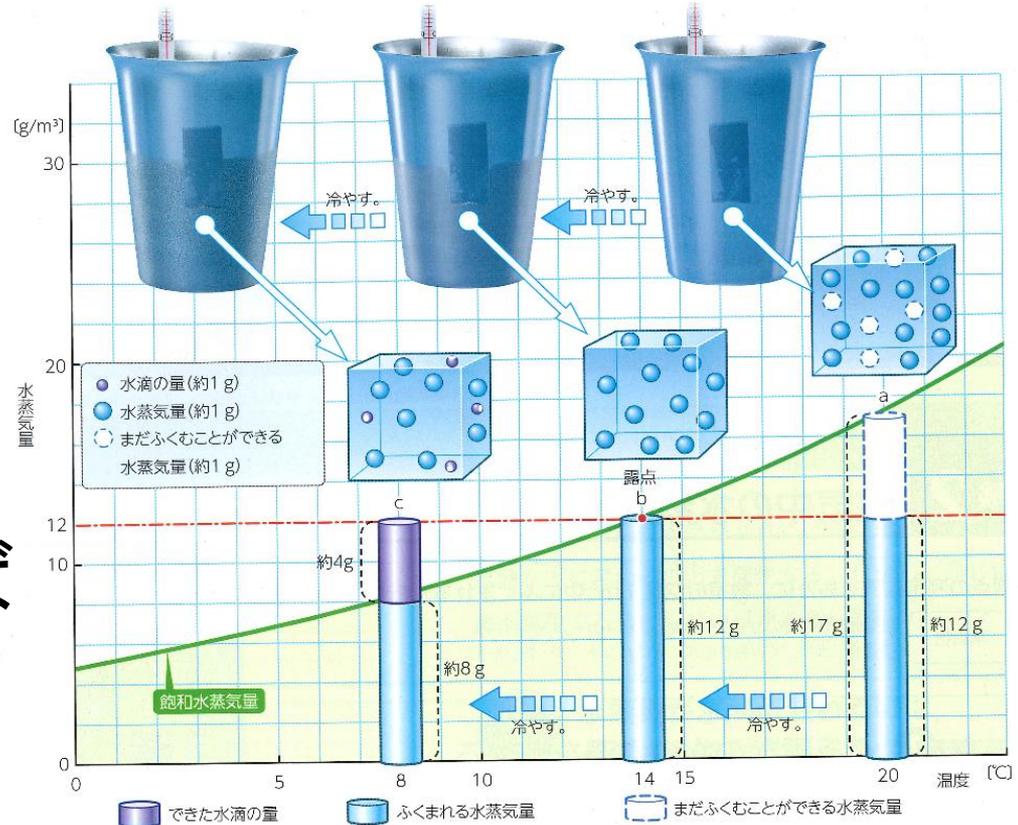
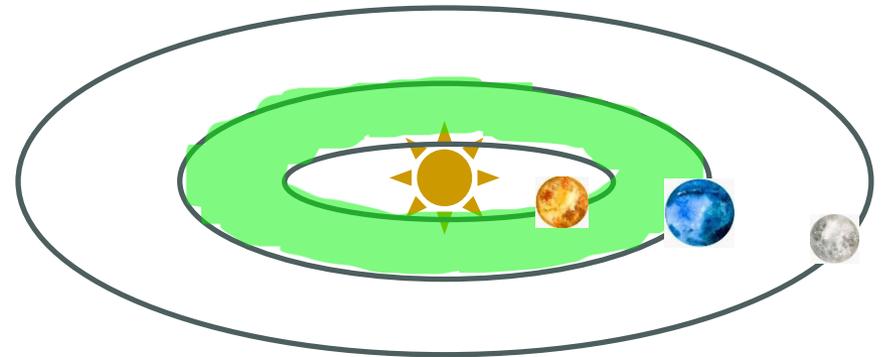
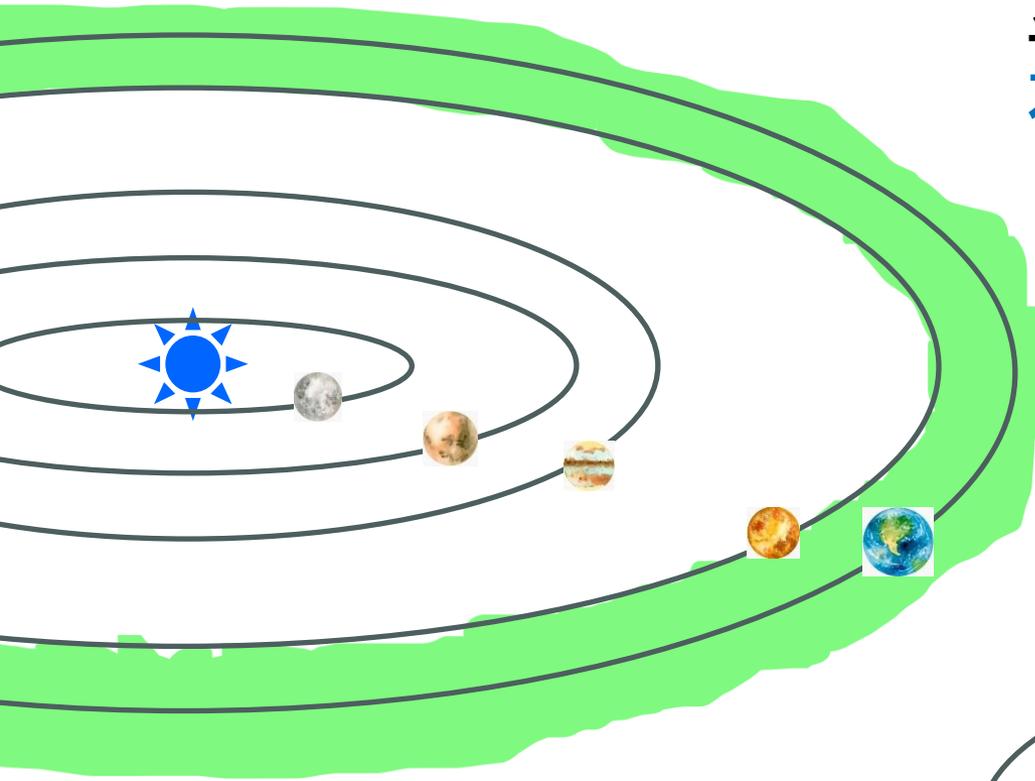


図24 温度と水蒸気量 1 m³中に約12gの水蒸気をふくんだ20℃の空気が冷やされたときの様子。

ハビタブルゾーン

恒星の周囲において惑星表面上に液体の水が存在できる領域

- 光が強い恒星の場合、恒星から遠くに
- 光が弱い恒星の場合、恒星の近くに



地球型系外惑星の気候

地球型系外惑星の気候は実際にはどのようなものだろうか？

- ハビタブルゾーンに関して
 - その幅はどのように決まるのか？
 - 本当に海が無くなる？、本当に全部氷つくのか？
- 現在の観測では系外惑星の気候は見えない
- では予測あるいは予報を試してみよう
- 予報と言えは？ **何を思いつきますか？**

○○○予報

〇〇予報といえは？

天気予報

気象庁の
マスコットキャラクター
ハレルン

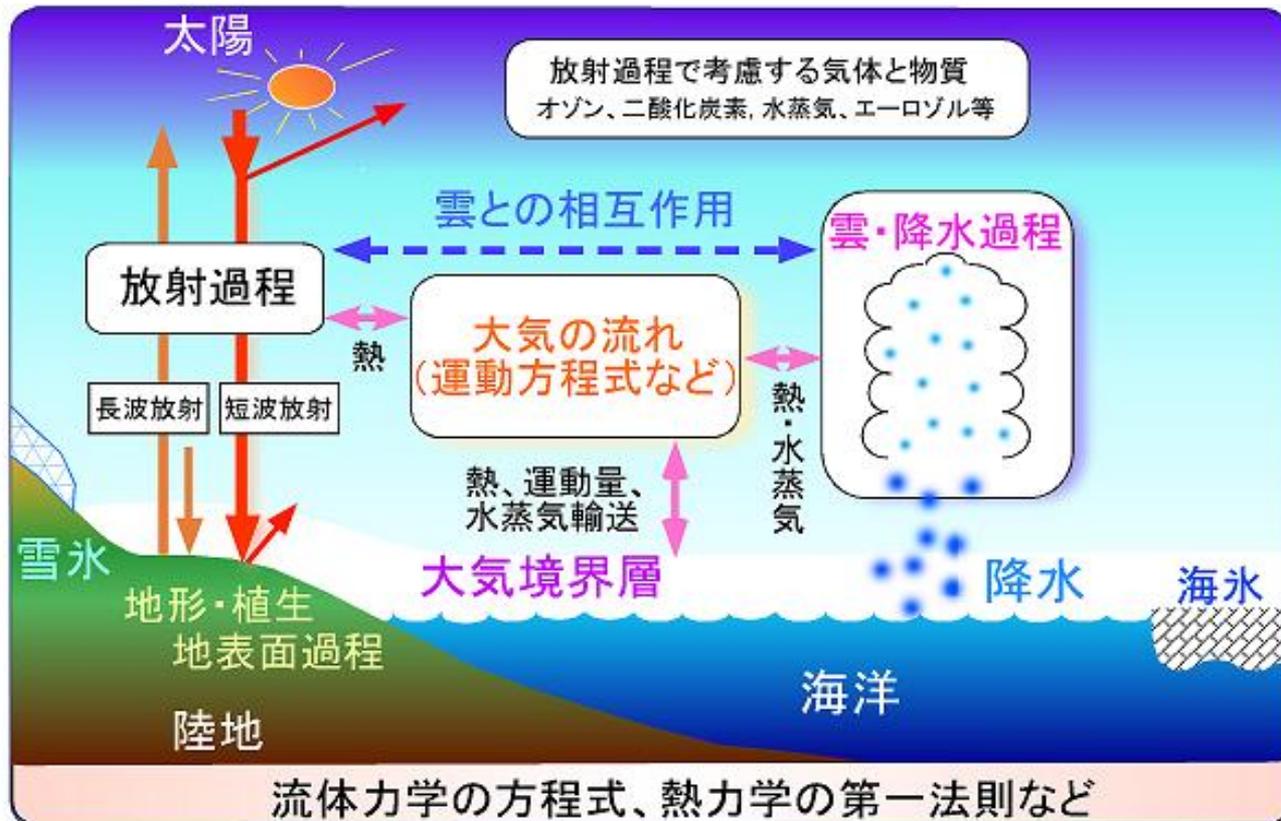


<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/info/harerun.html>

- 地球で行われている天気予報を系外惑星に適用しよう

天気予報とは

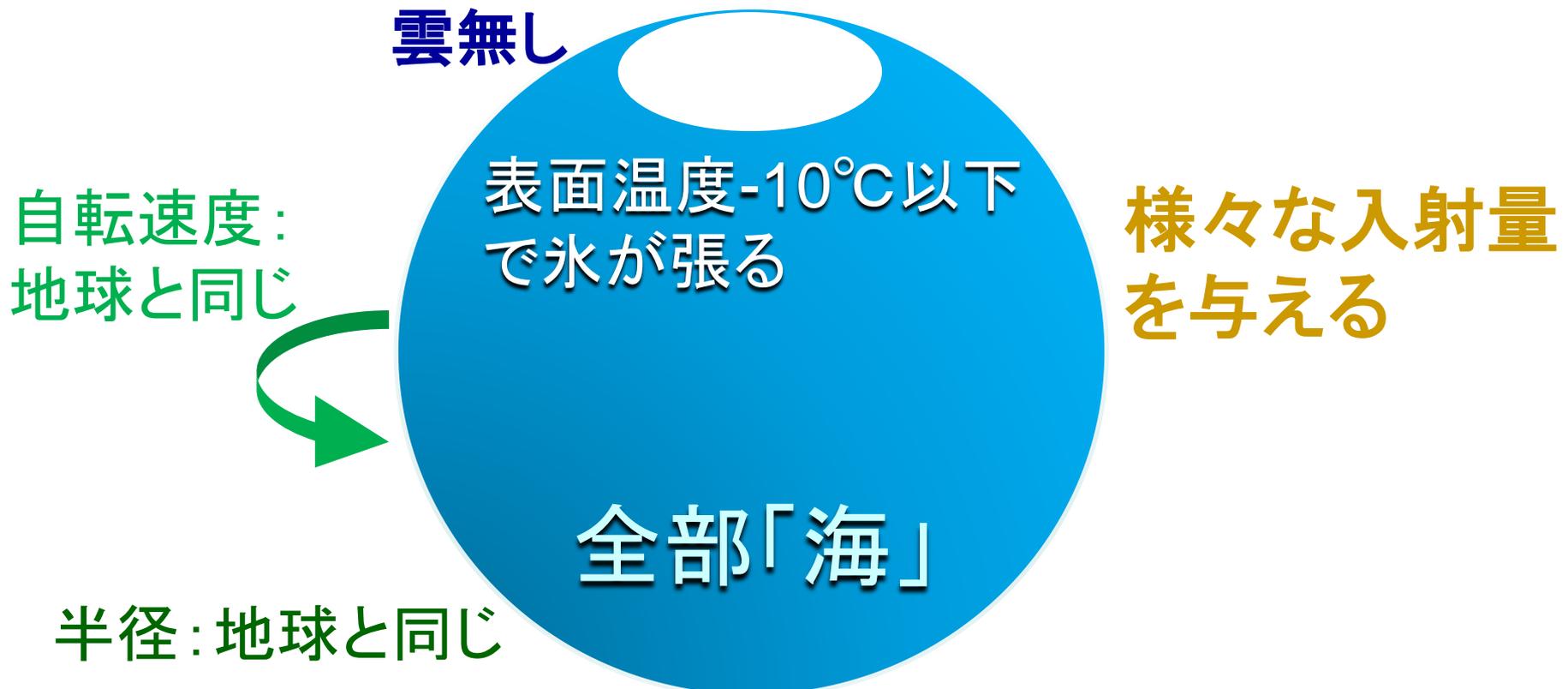
- スーパーコンピュータで将来の気象（風分布、温度分布など）を計算（数値予報）
- その結果をもとに天気予報を作成



数値予報
では多くの
プロセス
を考慮

地球型系外惑星の気候予測

- 地球大気で使われる天気予報用のコンピュータプログラムを活用
- ここでは非常に簡単な設定で考える

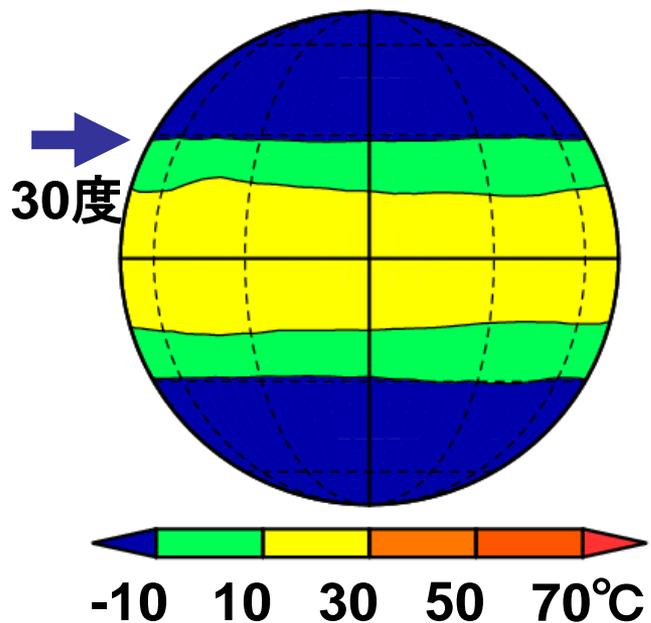


地球程度の入射量を与えた場合

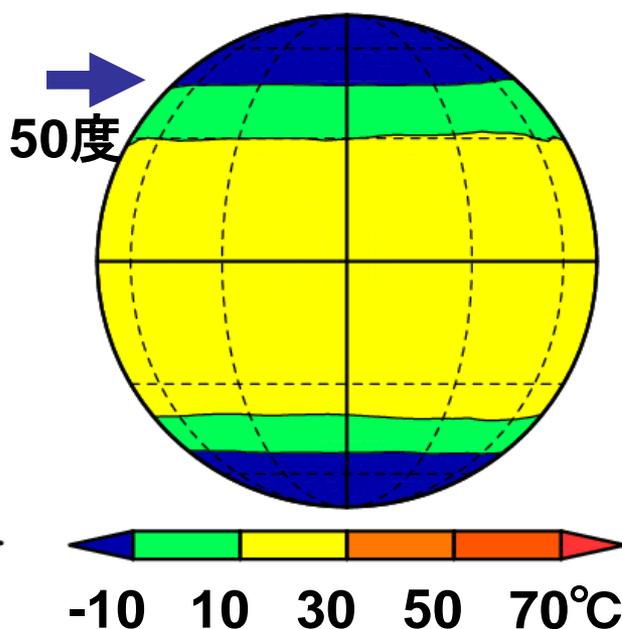
- 入射量が大きくなれば氷境界は後退
- 小さくなれば氷境界は低緯度側に進行

表面温度(365日平均)

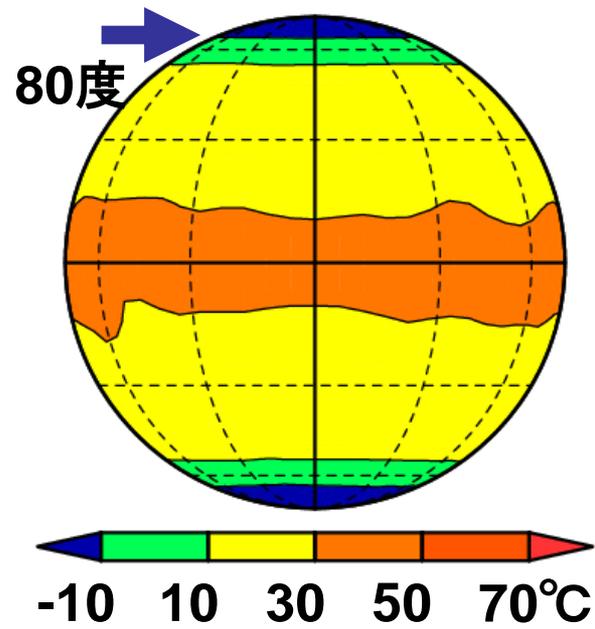
入射量: 325W/m^2



入射量: 355W/m^2



入射量: 375W/m^2



入射量が減少すると

- 氷領域が拡大

- 入射量が 325W/m^2 : 氷境界は緯度30度

- 312.5W/m^2 : 緯度20度

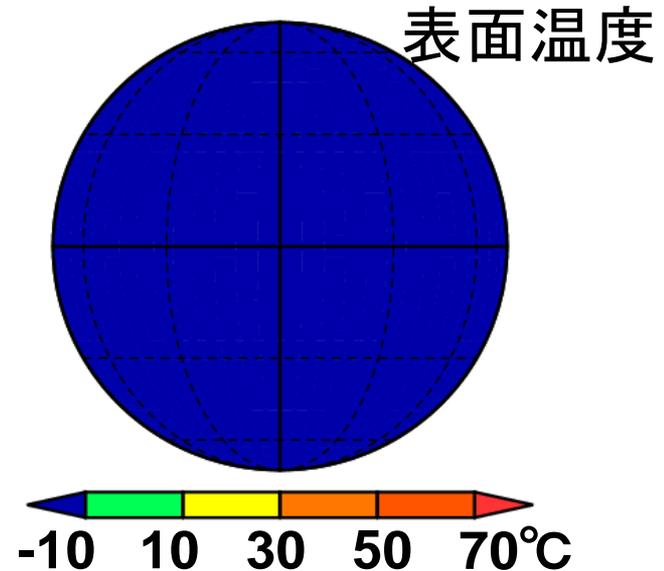
- 287.5W/m^2 : 緯度10度

- では 287W/m^2 になると？

全部凍ってしまう！

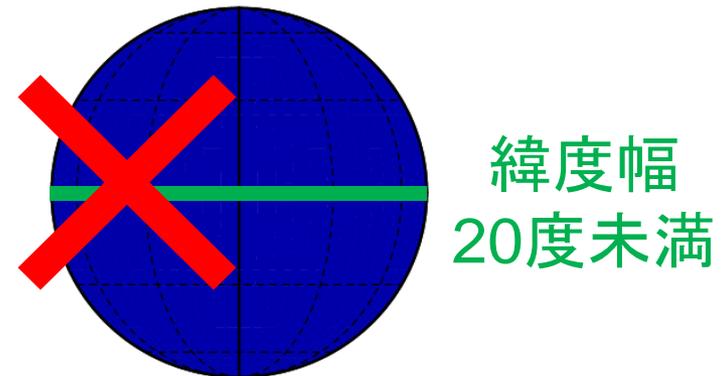
全球凍結状態が発生

(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

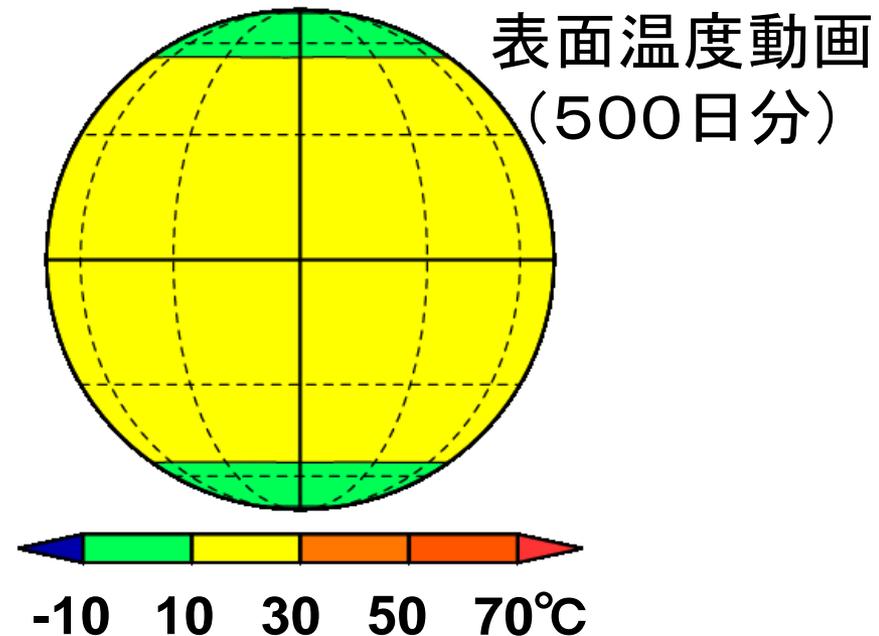
(大極冠不安定)



入射量が増加すると

- 平均表面温度は上昇する
 - 入射量が 350 W/m^2 の時:平均表面温度は 5°C
 - 360 W/m^2 の時: 15°C
 - 370 W/m^2 の時: 30°C
- では、入射量が 380 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



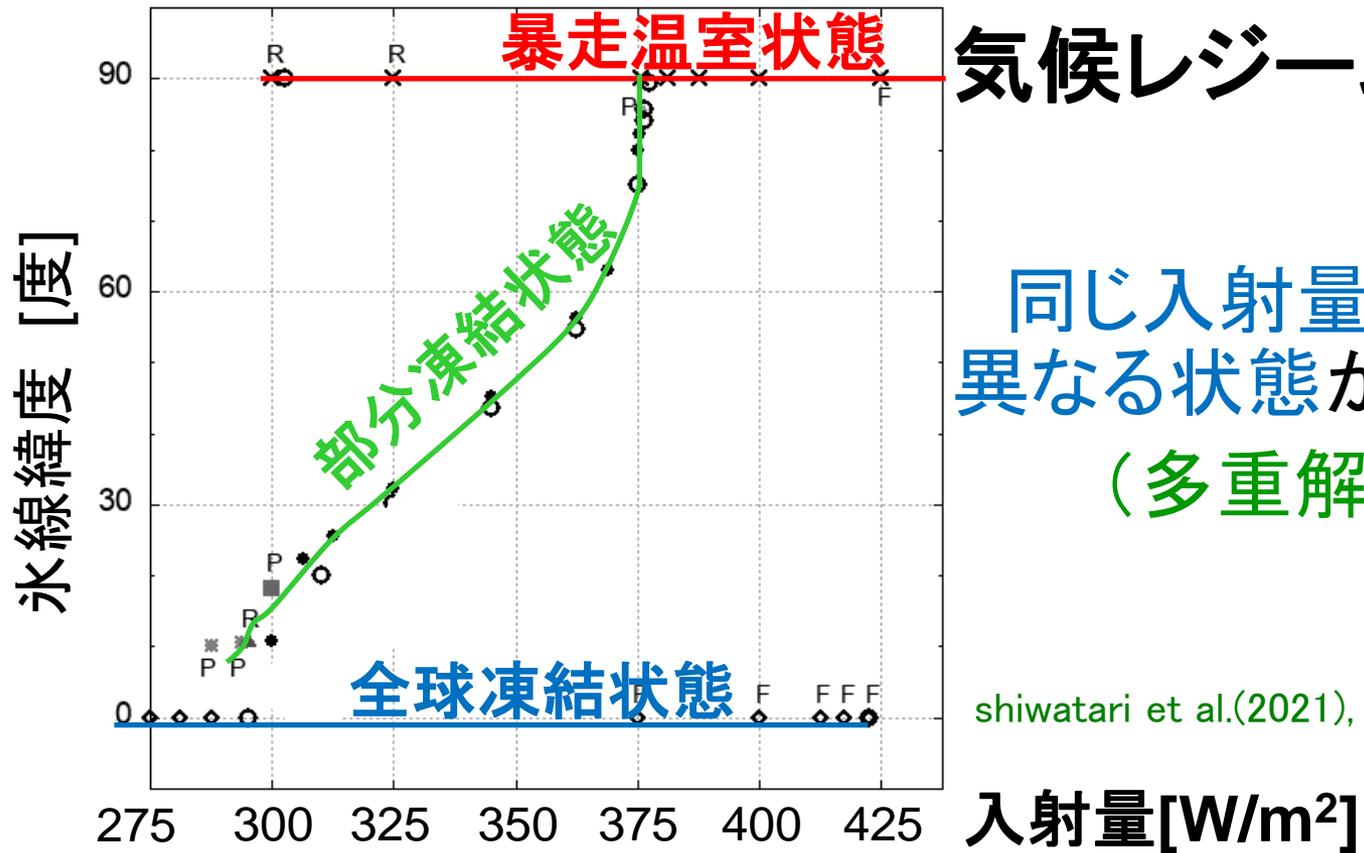
温度が一定に保たれる
(平衡状態)

入射量が多い場合



温度が上昇を続ける
(暴走温室状態)

たーくさんの結果をまとめると



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)

太陽からの距離 [au]

0.9 1.0 1.03

全球凍結状態

ハビタブルゾーン

暴走温室状態

まとめ

- 遠い天体を「見る」方法
 - 地上望遠鏡、宇宙望遠鏡、探査機、数値計算、、、
 - これらにより多くの情報と問題が提供されてきた
- 地球型系外惑星の気候
 - 気候状態は複数種類：全球凍結状態、部分凍結状態、氷無し状態、暴走温室状態
 - 液体の水を保持する系外惑星は存在し得る
- 遠い天体を「見る」意義は何だろうか？
 - 地球を理解するヒントが得られると期待
 - 例えば、気候の安定性など

参考文献

- Ishiwatari et al. (2021), Revision of “Dependence of climate states of gray atmosphere on solar constant: from the runaway greenhouse to the snowball states” by Ishiwatari et al. (2007) J. Geophys. Res., 126, e2019JD031761.