M型星ハビタブルゾーン内における同期回転惑星の氷床形成

Ice sheet formation on a synchronously rotating planet in M-dwarf habitable zone

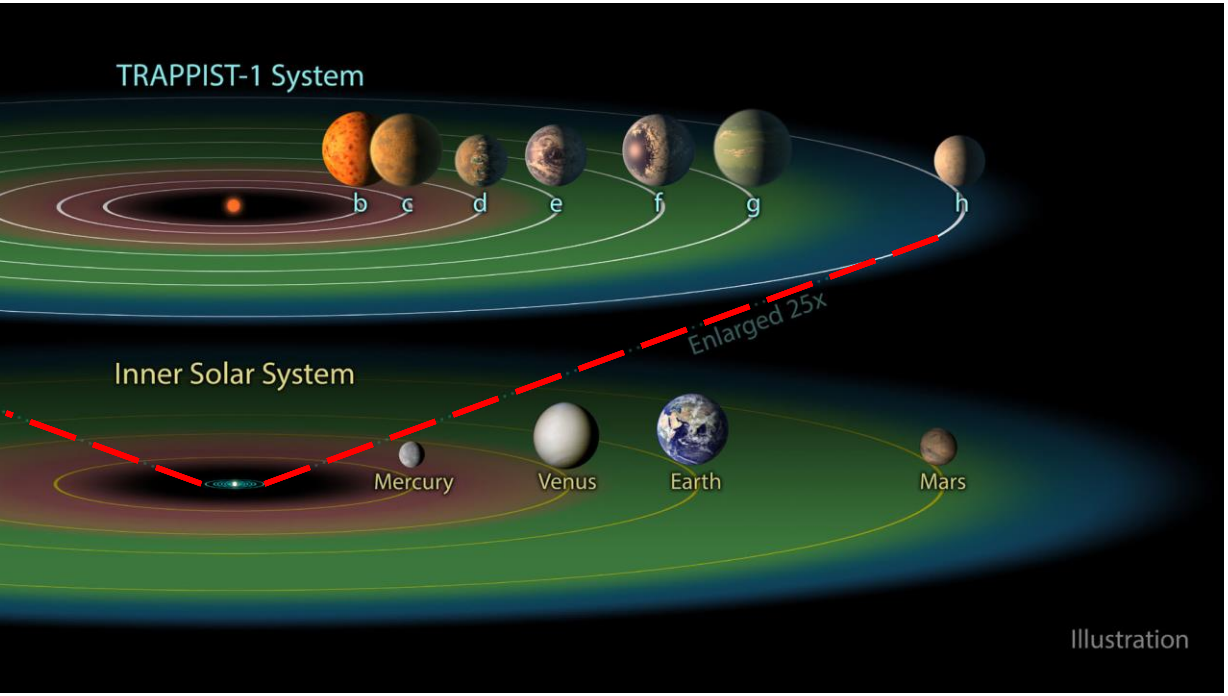
理学院 宇宙理学専攻
惑星宇宙グループ 倉本・鎌田研究室
新井 総馬

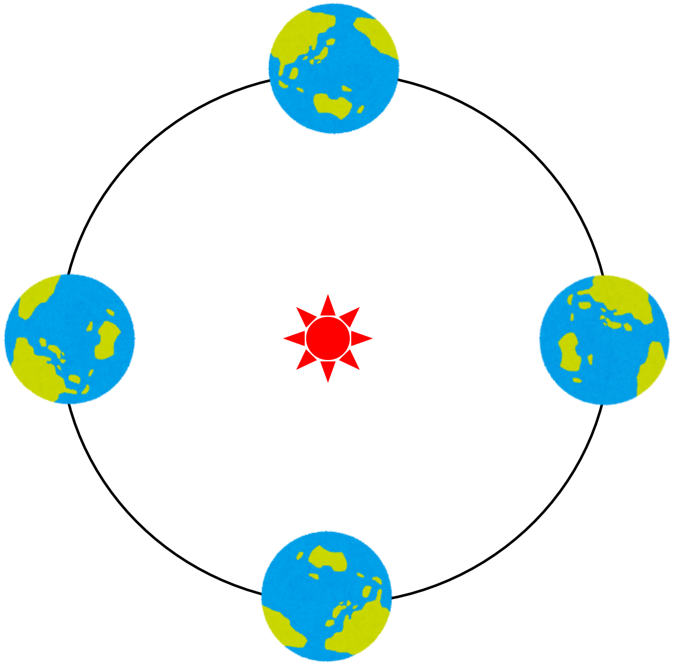
https://www.cnn.co.jp/fringe/35130959.html

M型矮星とそのハビタブルゾーン
M-dwarf star and its habitable zone

M型矮星の周りに多くの地球型惑星

- ハビタブルゾーン内にもつぎつぎに発見
  - 中心星放射強度が表層液体水の存在に適する軌道領域
  - 惑星は同期回転





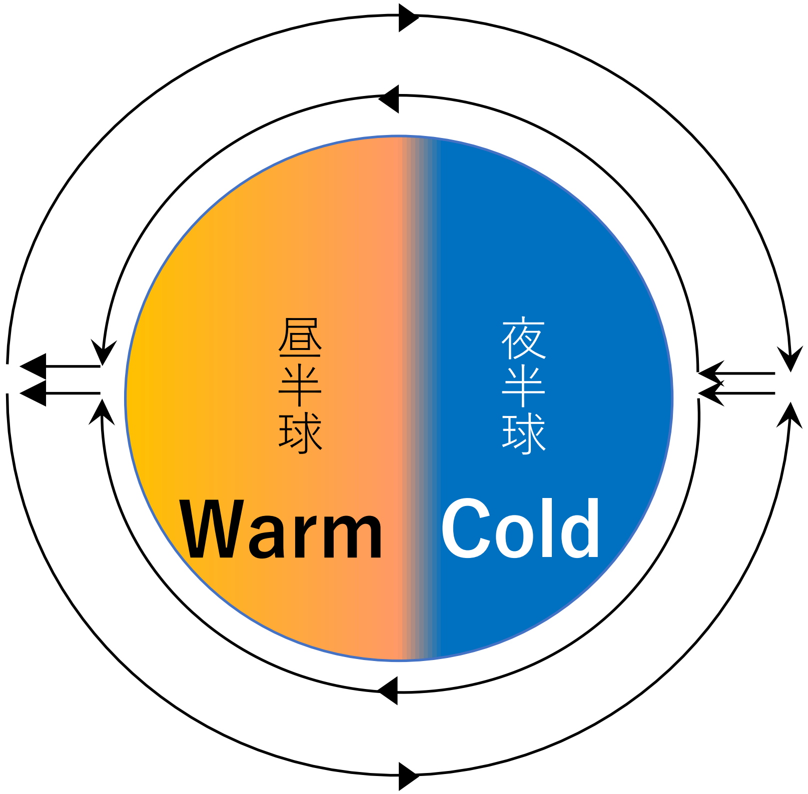
NASA

同期回転惑星の表層で液体水は存在可能か？

Liquid water on a synchronously rotating Earth-like planets ?

夜半球に氷として固定される

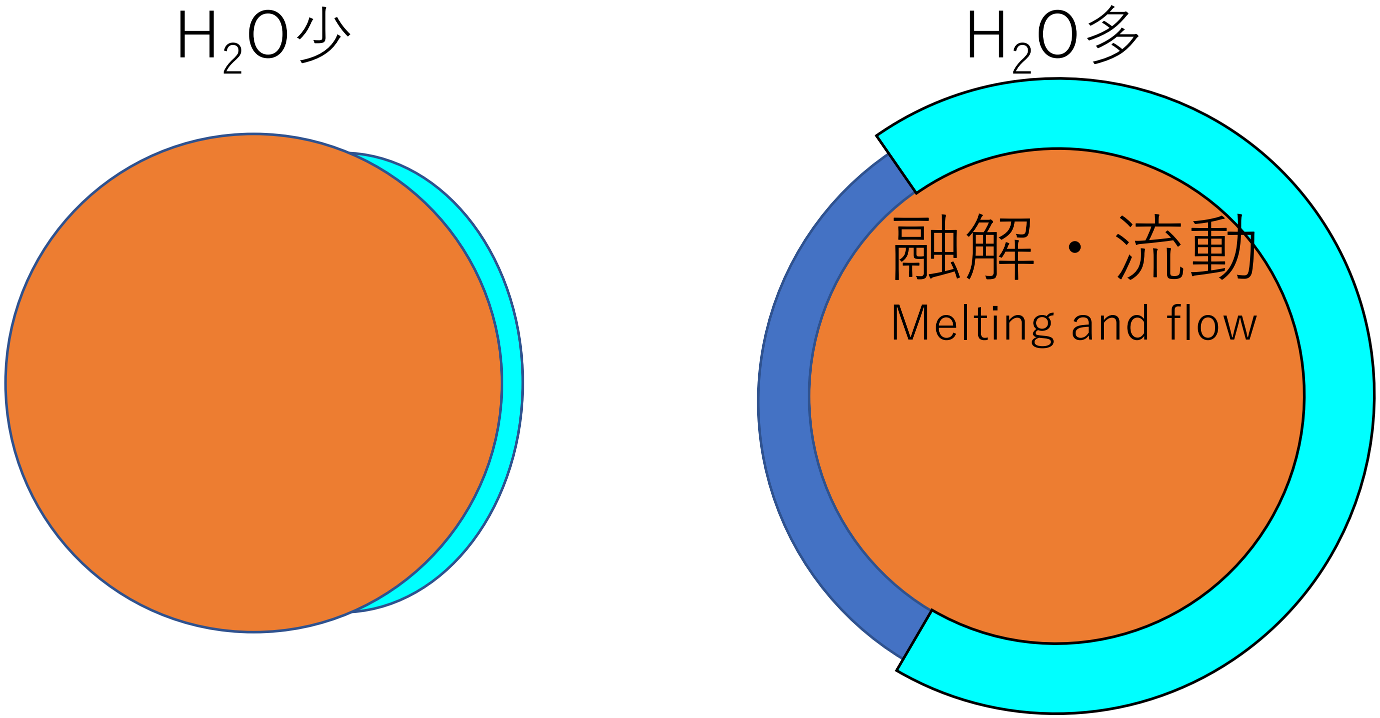
昼半球から液体水が失われる可能性がある



大気循環によりH_2Oが輸送される

氷床の成長には上限があるはず

Growth limit for ice sheet volume



上限の氷床体積より多くH_2Oがあれば、液体水が存在可能

先行研究 previous studies

Menou (2013), Narita (2017)

- 大気大循環モデルを用いて最大氷床体積を推定
  Maximum ice sheet volume is estimated by using General Circulation Model
- 底面融解を想定しT_sと降雪蒸発率から氷床厚を推定.
  Basal melting controls ice sheet thickness depending on surface temperature and precipitation and vaporization rates
- 循環計算では氷床地形を無視
  Ice sheet topography was neglected in the circulation modeling

氷床地形の影響を考慮すれば If topography included･･･

降雪分布や地表面温度分布が変化 circulation changes
氷床分布も変化するはず ice sheet volume changes

目的 objectives

- 氷床地形を考慮した大気大循環モデル計算により最大氷床体積を求める
  GCM simulation including ice sheet topography
- 同期回転惑星上の液体の水と氷床の安定性を考察
  Stability of liquid water and ice sheet on a synchronously rotating planet
  - 同期回転惑星上に液体水が存在するために最低限必要なH_2O量を再推定
  - 氷床分布が収束するか

大気大循環モデル (GCM) dcpam5

3次元球面上のプリミティブ方程式に従う,大気大循環を計算する数値モデル(高橋他, 2013)

・力学過程

運動方程式,連続の式,熱力学方程式を解き

各物理量の時間発展を計算

・物理過程

長波放射:H_2O,CO_2,O_3,雲による吸収

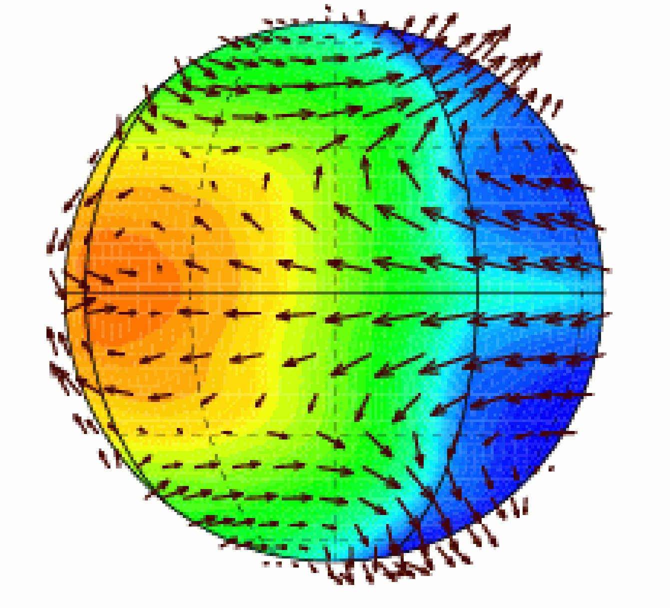
短波放射:H2O,O3,雲による吸収・散乱,レイリー散乱

対流調節(Manabe et al., 1965; Moorthi and Suarez, 1992)

大規模凝結(Manabe et al., 1965)

表層・土壌水量(Manabe et al., 1965)

乱流混合(Mellor and Yamada, 1982)



https://www.gfd-dennou.org/arch/momoko/index.htm.ja

氷床厚を決める地表面温度と降雪率,蒸発率の分布を求める

計算設定1 Simulation setup1

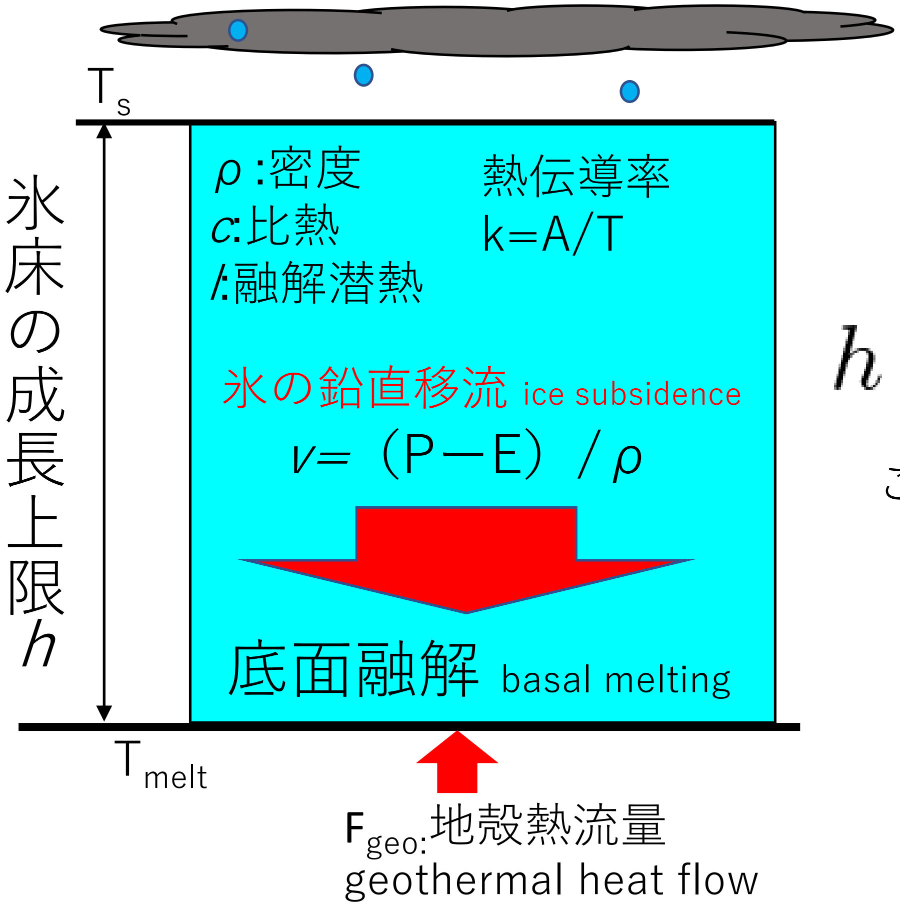
Parameter	Value	
Planet radius	6371 km	Earth value
Surface gravity	9.8 m/s^2	
Insolation	1366 W/m^2	
Atmospheric Comp.	N_2,O_2,CO_2,CH_4,N_2O	
Mean surface pressure	1 bar	
Spin, orbital period	10 day	Typical for M star HZ
Surface albedo	0.15	
Dayside longitude	0-180 deg	
Resolution	T21L22 (32 latitude, 64 longitude, 22 vertical grids)	

計算設定2 Simulation setup2

実験名 Experiment	昼半球地表面 Day side condition	液体水量 Liquid water content	求める最大氷床体積の意味 Maximum ice sheet volume
昼面部分乾燥 Day side surface partially dry	平均20cmの水,各点の土壌水許容量大 20 cm water depth in average, infinite soil water storage	少：大気輸送のみで地表水分布が決定 Small: distribution is controlled by atmospheric transport	昼面に少量でも液体の水が存在するのに最低限必要なH_2O量 Minimum H_2O to form infinitesimal amount of liquid water in day side
昼面水飽和 Day side surface saturated in water	全面沼条件 Uniformly swamp	多：流水による地表水分布の均質化 Large: global redistribution by water flow	昼面に広く海洋が存在するのに最低限必要なH_2O量 Minimum H_2O to form an ocean

氷床厚は涵養率と地表面温度で決定
Ice sheet thickness control factor

- 涵養率＝降雪－蒸発
  accumulation=ice precipitation P－evaporation E
- 上端への氷の供給と底面融解のつり合い



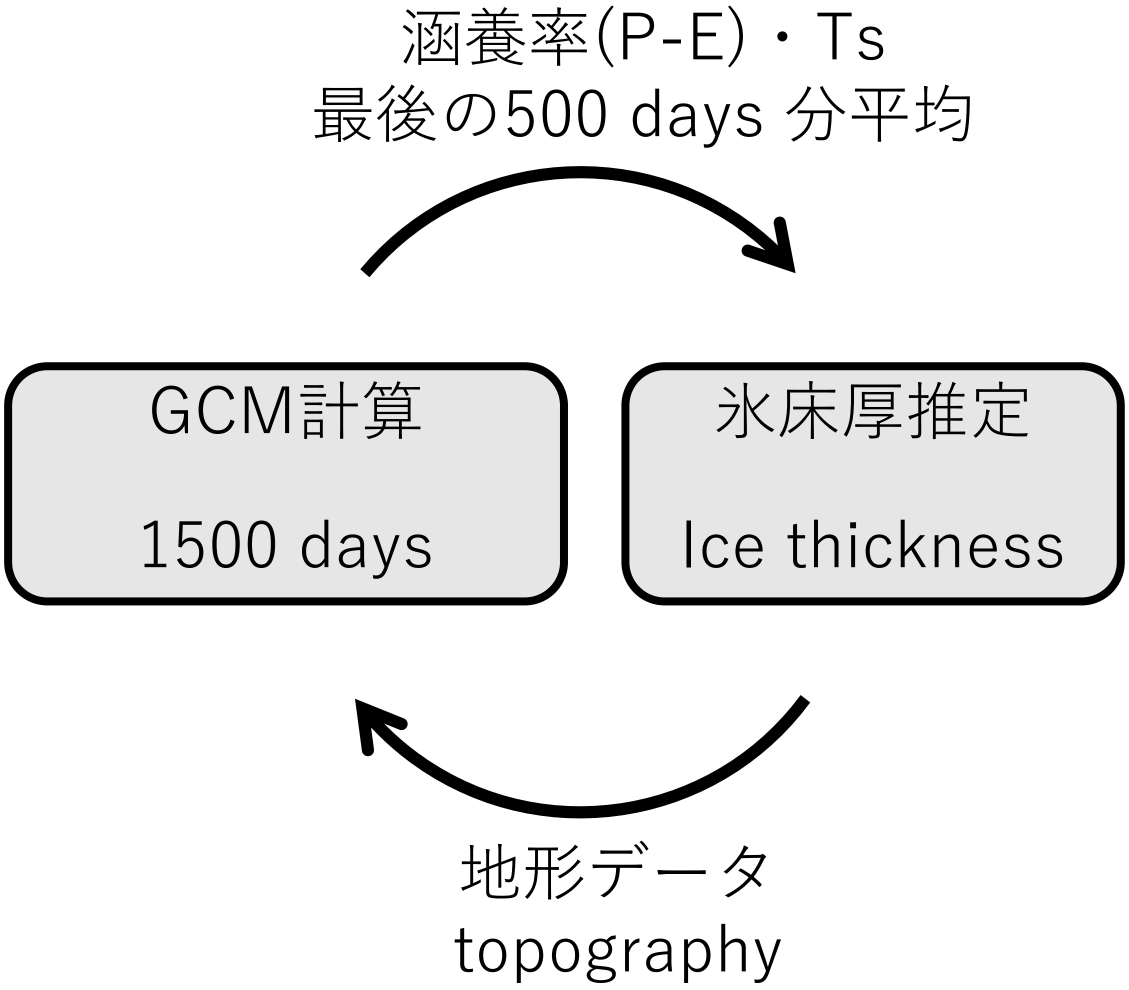
$$h = \frac{1}{C_1}\ln\frac{T_{melt}\left(T_s - \frac{C_1}{\alpha v}\right)}{T_s\left(T_{melt} - \frac{C_1}{\alpha v}\right)}$$

ここで

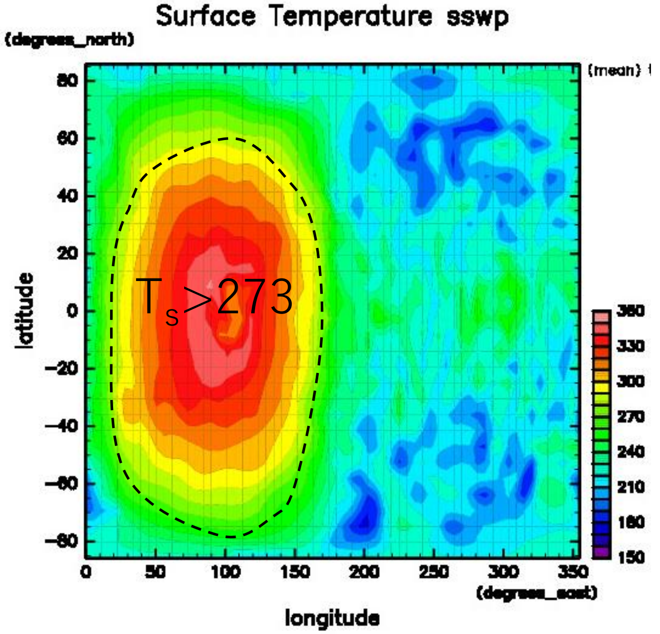
$$C_1(v) = \alpha T_{melt} v + \frac{1}{A}(F_{geo} - \rho l v)$$

$$\alpha = \frac{c\rho}{A}$$

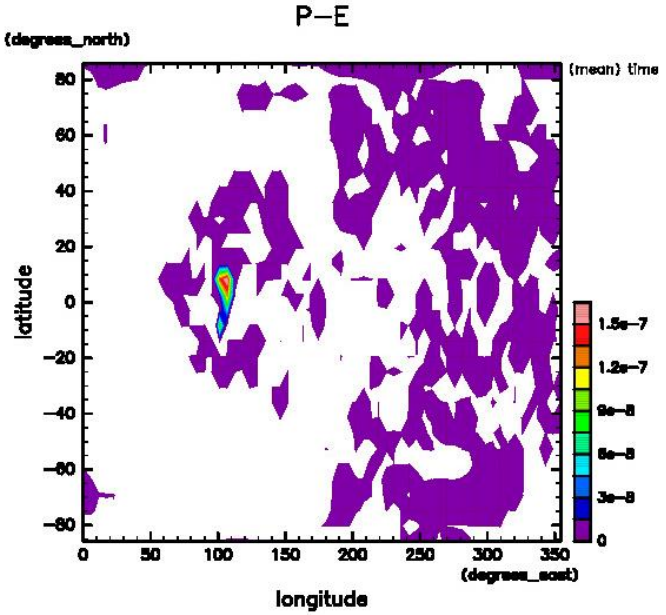
計算手順 calculation procedure



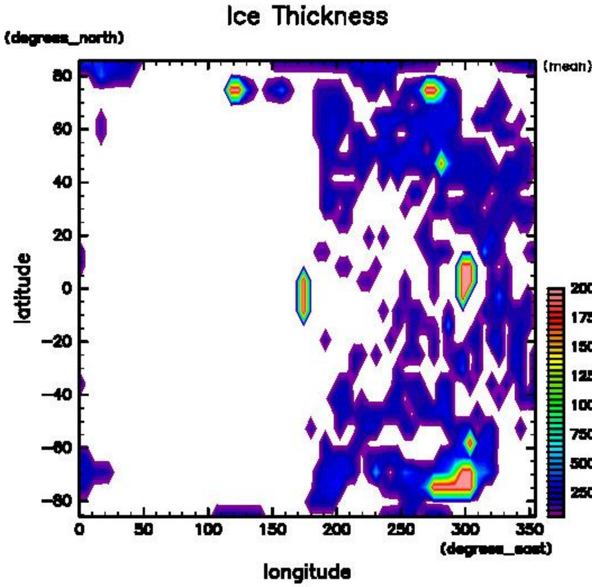
計算結果:昼面部分乾燥実験
results: partially dry experiment



地表面温度



降水(雪)－蒸発



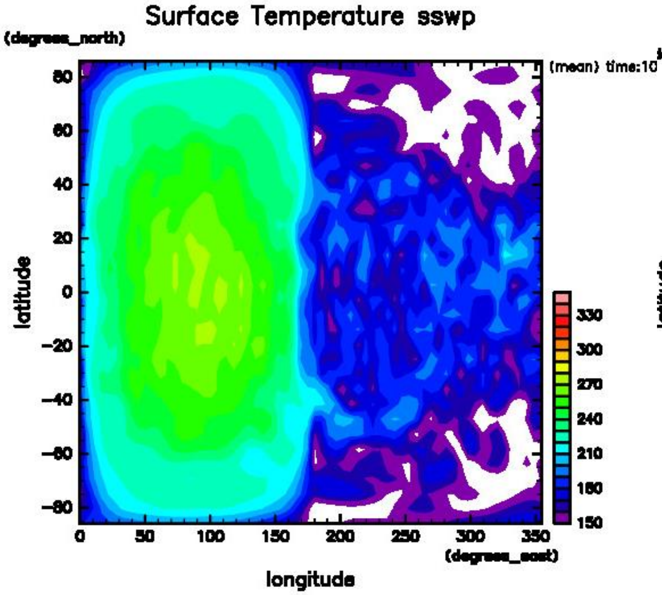
氷床厚

氷床厚分布は5ループ目でほぼ収束 almost converges after 5 loops

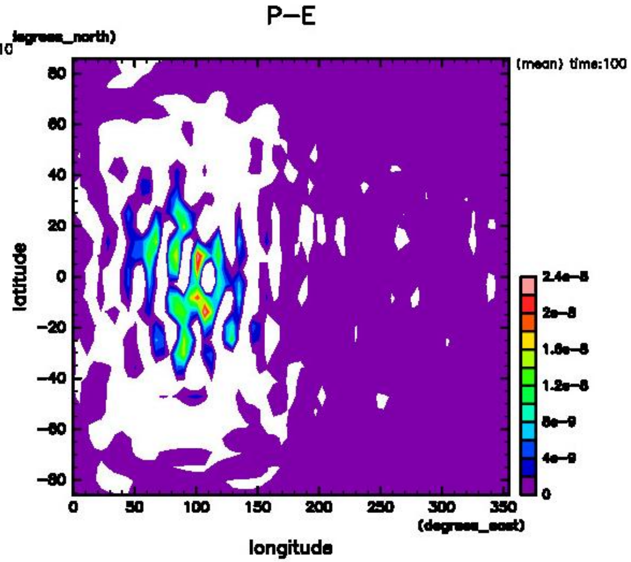
氷床厚大→標高大→地表温低→氷床厚増大
→降雪減　→氷床厚抑制

最大氷床量:全球等価水深 Global Equivalent Water Level 688 m
cf.500 m by Narita 2017 (with no topography)

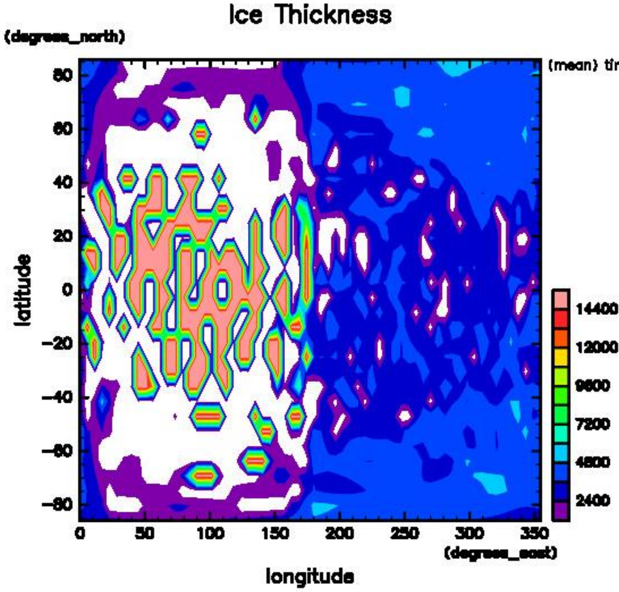
計算結果:昼面水飽和実験
results: saturation experiment



地表面温度



降水(雪)－蒸発



氷床厚

3ループ目で全球が氷点下になった globally frozen！

- 2ループ目で夜半球に高度>1万mの氷床が形成
- 夜半球で冷やされた大気が昼半球に流入

収束解は得られなかった not reach to a convergent solution

- 全球凍結に繋がるかもしれない
- 詳しい実験が必要

液体水の存在可能性

conditions required for liquid water on day side hemisphere

- 地球同様の質量,サイズ,大気質量,日射量,地殻熱流量を持つ同期回転惑星では全球等価水深700 m程度以上のH_2Oが存在すれば昼半球に液体の水が存在可能
  - For earth-like planet, GEL > about 700 m
  - 惑星パラメータ依存性は今後の課題

- H_2Oが多い場合は全球凍結する可能性あり
  - Too much water might cause a snow ball planet
  - 夜半球の標高がおよそ1万m以上になる場合
  - 対流圏より上層が地表面放射により直接冷やされるため

まとめ summary

- M型星HZ内同期回転惑星を模したGCM実験を行い,成長する氷床の影響を反映した大気循環を元に氷の量を推定した
  - GCM simulation is conducted for a synchronously rotating Earth-like planet around M-dwarf star including the ice-sheet topography
- 部分乾燥実験ではほぼ収束した解が得られ,最大氷床体積は全球等価水深で約700 m
  - Partially dry experiment obtained nearly converged solution with a maximum ice sheet volume of 700m GEL
- 今回の惑星の設定ではこれ以上のH_2Oが存在すれば昼半球に液体水が存在可能
  - Liquid water may be stable in day side hemisphere if the planet has larger total H_2O volume
- 水飽和実験では全球が氷点下になり,収束解は得られなかった
  - Saturation experiment does not attain a convergent solution but suggests snowball state induced by ice sheet topography
  - 氷床地形が原因の全球凍結が示唆された