

# 地球型水惑星における 太陽放射増大に対する応答の GCMによる検討

新田 光<sup>1</sup>

阿部 豊<sup>1</sup>

高尾 雄也<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>東大・理・地惑、<sup>2</sup>東工大)

# 地球型水惑星の分類



- ✓水の分布によって3つのタイプに分類
- ✓気候状態がそれぞれ異なる

Abe+2013, Hawaii, Kona

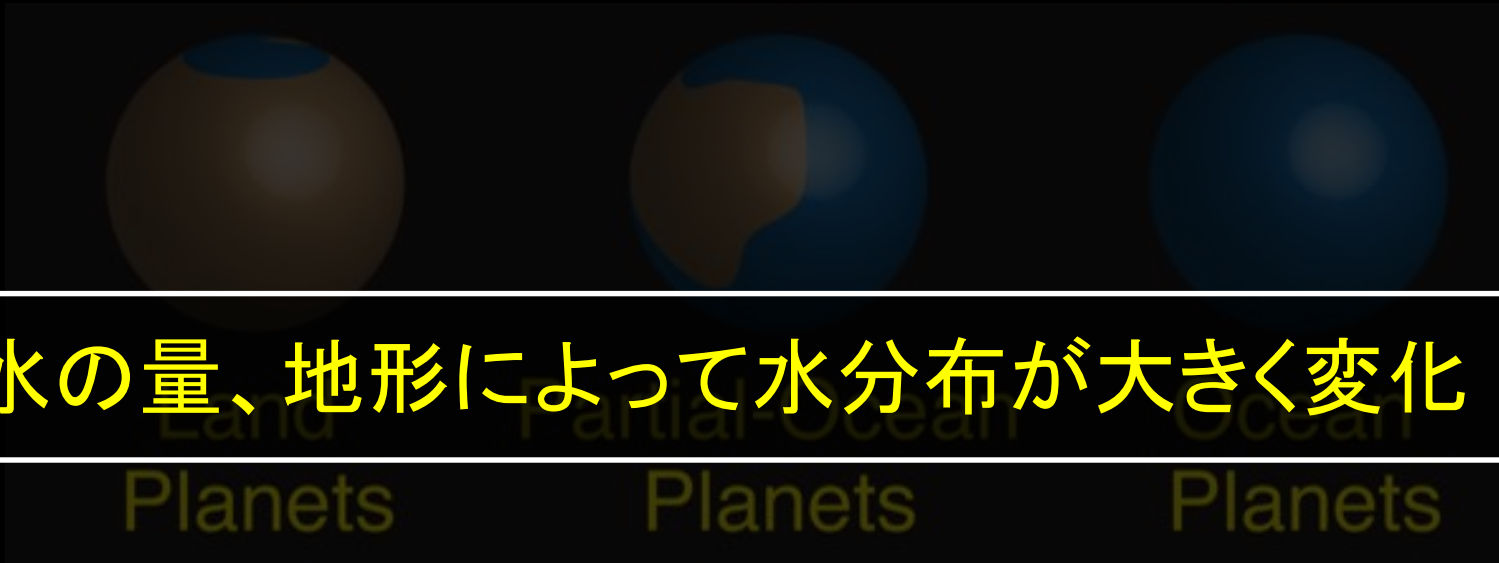
# 地球型水惑星の分類



分類	水量	地形	特徴
陸惑星	~0.1Mo	水を局所化	大気中の水蒸気が地表水分布を支配
部分海惑星	~1Mo	大陸が存在	地表水輸送が水蒸気分布を支配
海惑星	~10Mo	大陸無し	

Abe+2013, Hawaii, Kona

# 地球型水惑星の分類



分類	水量	地形	特徴
陸惑星	~0.1MO	水を局所化	大気中の水蒸気が地表水分布を支配
部分海惑星	~1MO	大陸が存在	地表水輸送が水蒸気分布を支配
海惑星	~10MO	大陸無し	

Abe+2013, Hawaii, Kona

# 暴走温室限界

- ✓ 中心星から受け取るエネルギーが放出できなくなり暴走的に水が蒸発、温度上昇

地表が湿潤なとき、

惑星放射は射出限界を超える放射はできない

- 射出限界:対流圏で水蒸気が飽和した惑星の放射できる最大のエネルギー(Nakajima+1992)

地面が乾燥:大気が飽和せず、

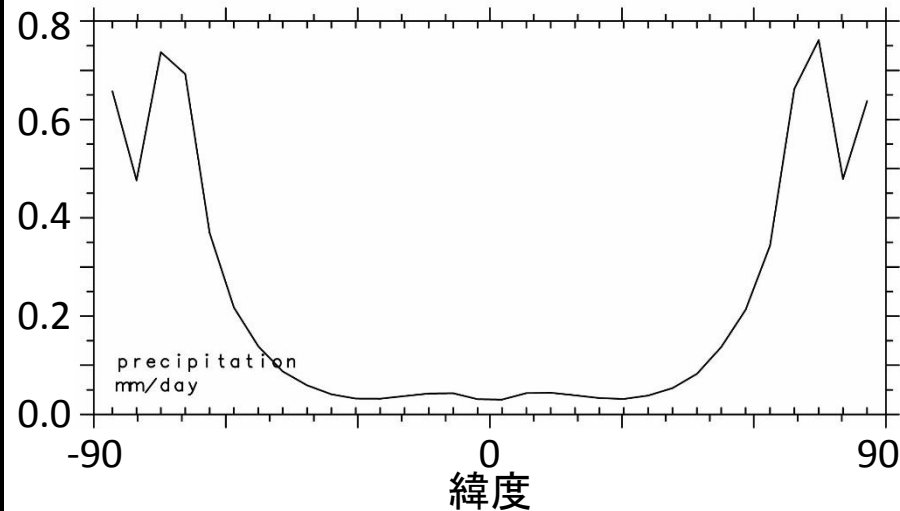
**射出限界以上の放射が可能**(Abe+2011)

→乾燥領域が多い:より大きな惑星放射が射出可能

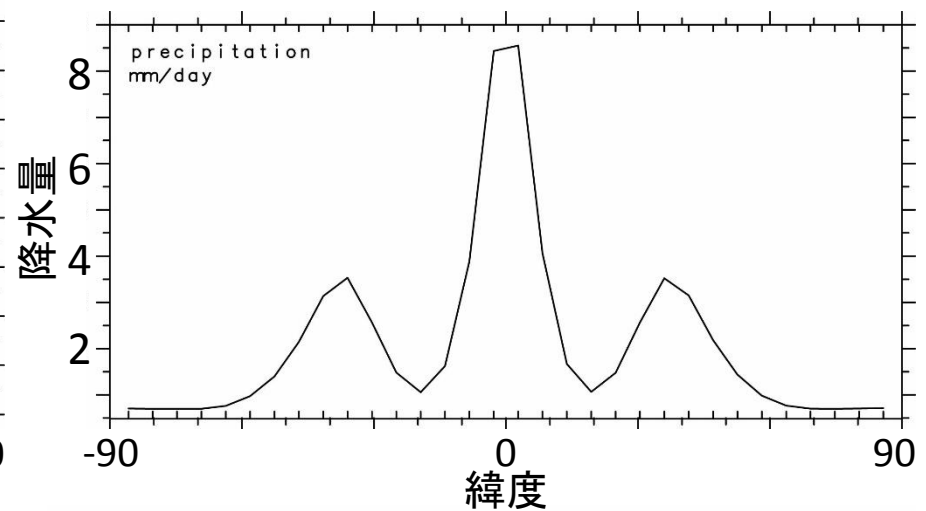
→より強い太陽放射でも液体水が維持可能(暴走しにくい)

# 水分布と暴走限界(完全蒸発限界)

陸惑星降水分布



海惑星降水分布



- ✓ 水が極域に集中
- ✓ 中低緯度は乾燥

- ✓ 全球的に降水
- ✓ 全球的に湿っている

*Abe et al., 2011*

3次元モデルによって陸惑星状態を再現

暴走限界を導出(相対太陽放射170%)↔海惑星:130%程度

→暴走限界の水量、地形による水分布依存性はよく分かっていない

# 本研究の目的

水の量、地形による水分布と暴走限界  
(完全蒸発限界)との関係を3次元モデル  
を用いて考察する

大気循環の寄与で暴走限界が変化  
*Takao(2013), Leconte et al.(2013)*

様々な水分布に対して太陽放射を増大させ暴走限界を計算

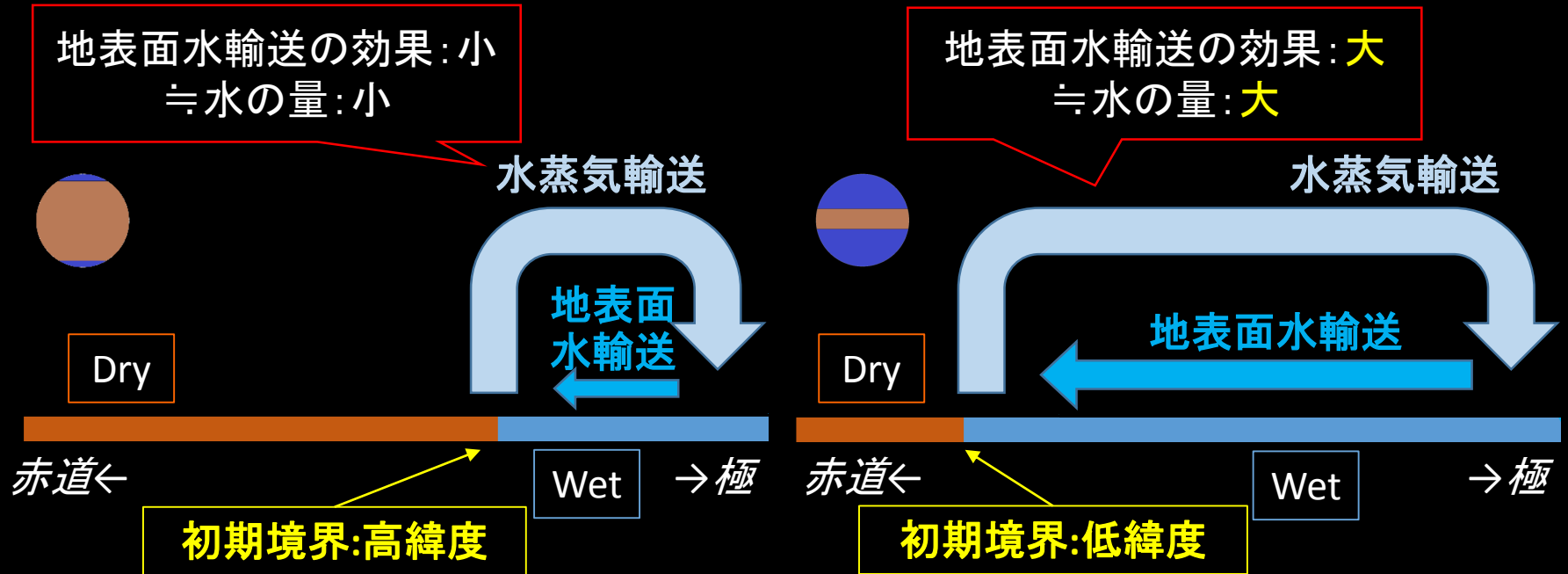
1. 緯度方向のみの水分布の変化、限界 : 水の量 vs. 暴走限界
2. 2次元的な水分布の変化、限界 : 地形 vs. 暴走限界

# 3次元気候モデル

- ✓ 地球大気大循環モデルCCSR/NIES AGCM5.4g
- ✓ 格子点間隔
  - 水平方向:5.6° 間隔、格子点数32×64個
  - 鉛直方向:20層
- ✓ 力学過程: 全球プリミティブ方程式系
- ✓ 物理過程: 放射過程、雲生成/消滅過程、地表過程
- ✓ 円軌道、自転軸傾斜なし、地表アルベド=0.3



# 水の量と初期水陸境界



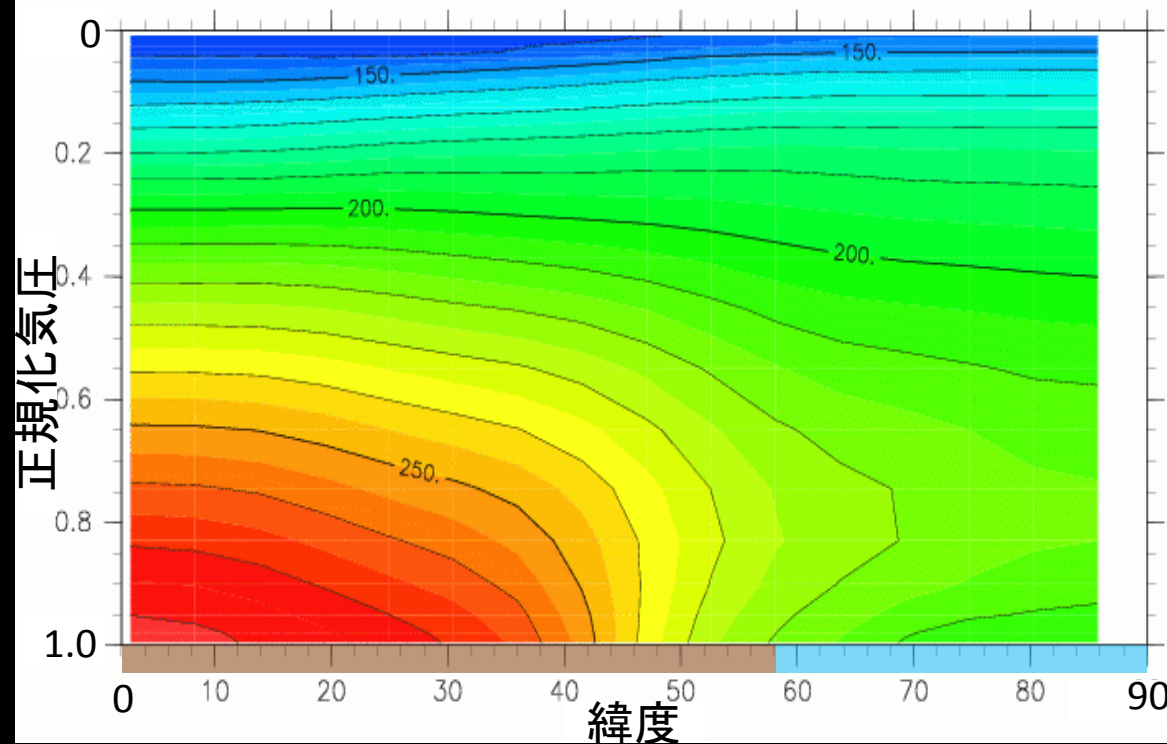
- 初期水陸境界:(水蒸気輸送)=(地表面水輸送)となる緯度
- 水量が多ければ多いほど赤道域まで水がはられていく
- 初期水陸境界が水の量に対応

# 暴走限界と水輸送

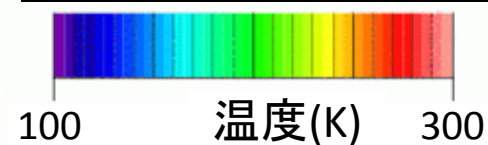
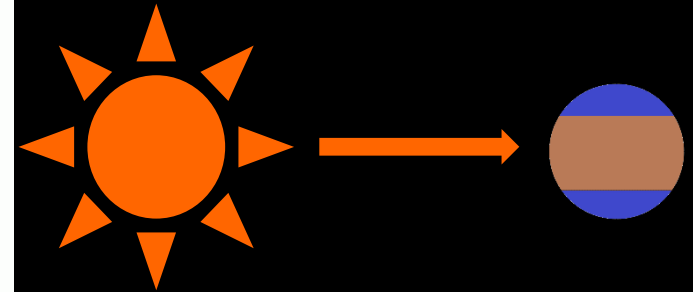
- 水量に対応する各初期境界のときの安定した水分布を計算
- 相対太陽放射を上昇させ限界を導出

温度の緯度-高度分布

0010/01/01.00-0010/01/30.23



初期境界: 58度  
相対太陽放射: 100%  
計算時間: 10年

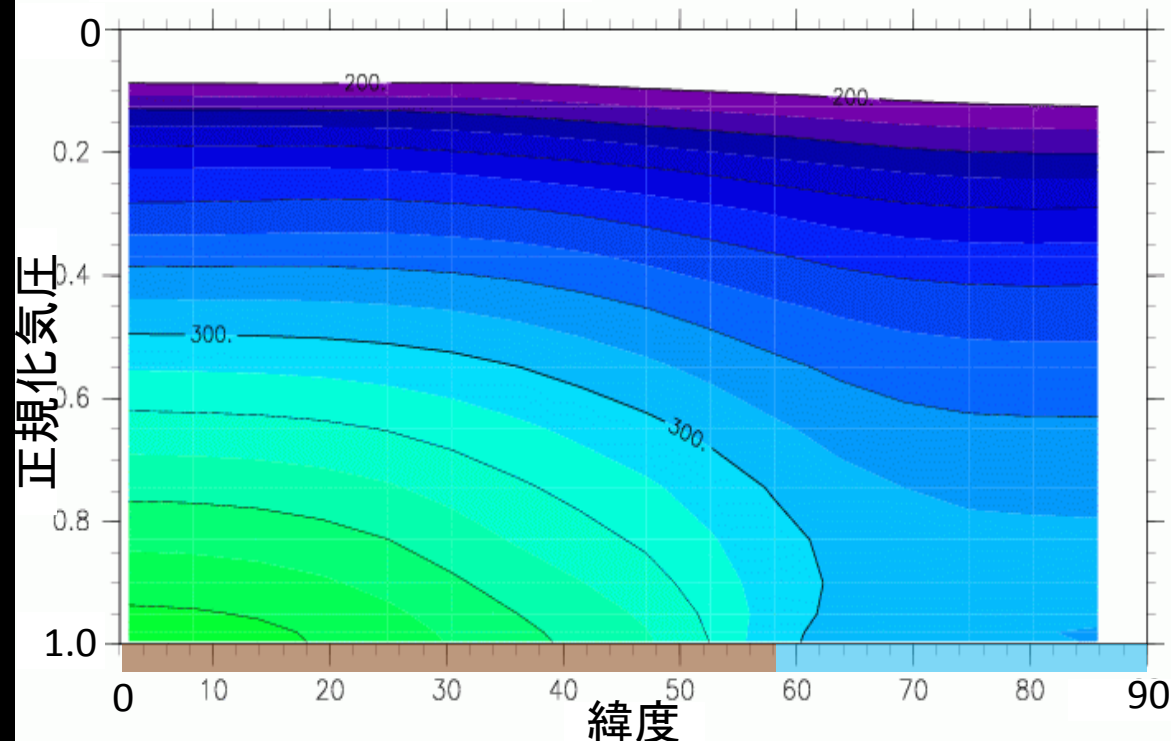


# 暴走限界と水輸送

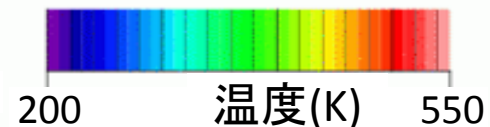
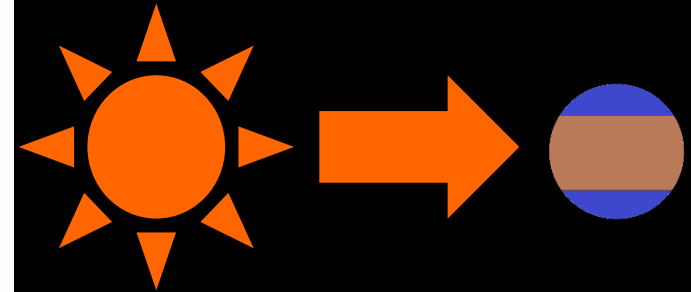
- 水量に対応する各初期境界のときの安定した水分布を計算
- 相対太陽放射を上昇させ限界を導出

温度の緯度-高度分布

0000/01/01.00-0000/01/30.23



初期境界: 58度  
相対太陽放射: 167%  
計算時間: 10年

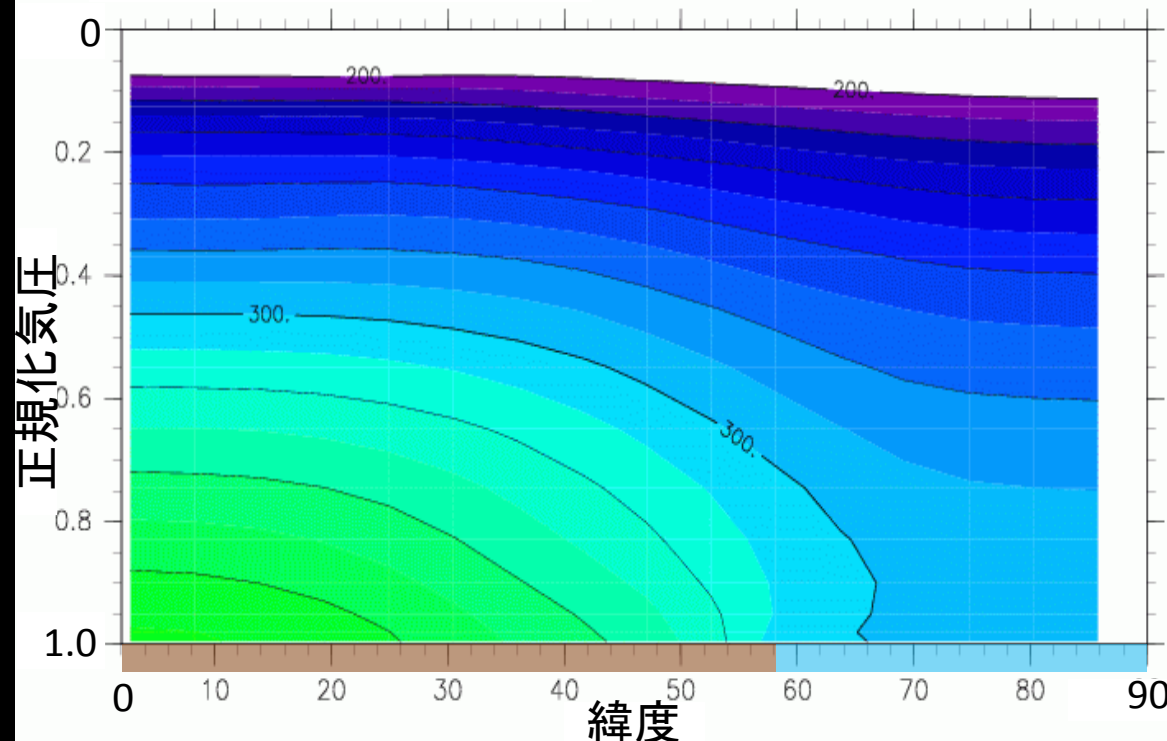


# 暴走限界と水輸送

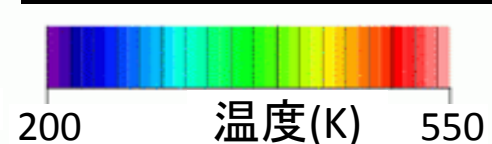
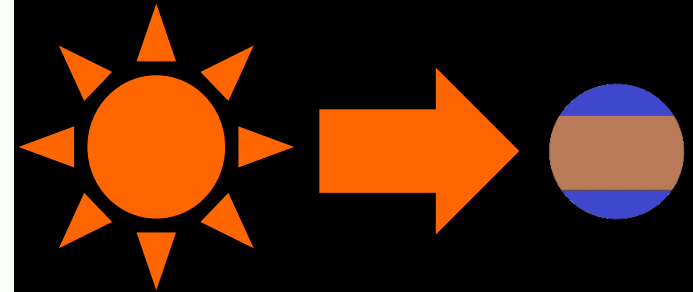
- 水量に対応する各初期境界のときの安定した水分布を計算
- 相対太陽放射を上昇させ限界を導出

温度の緯度-高度分布

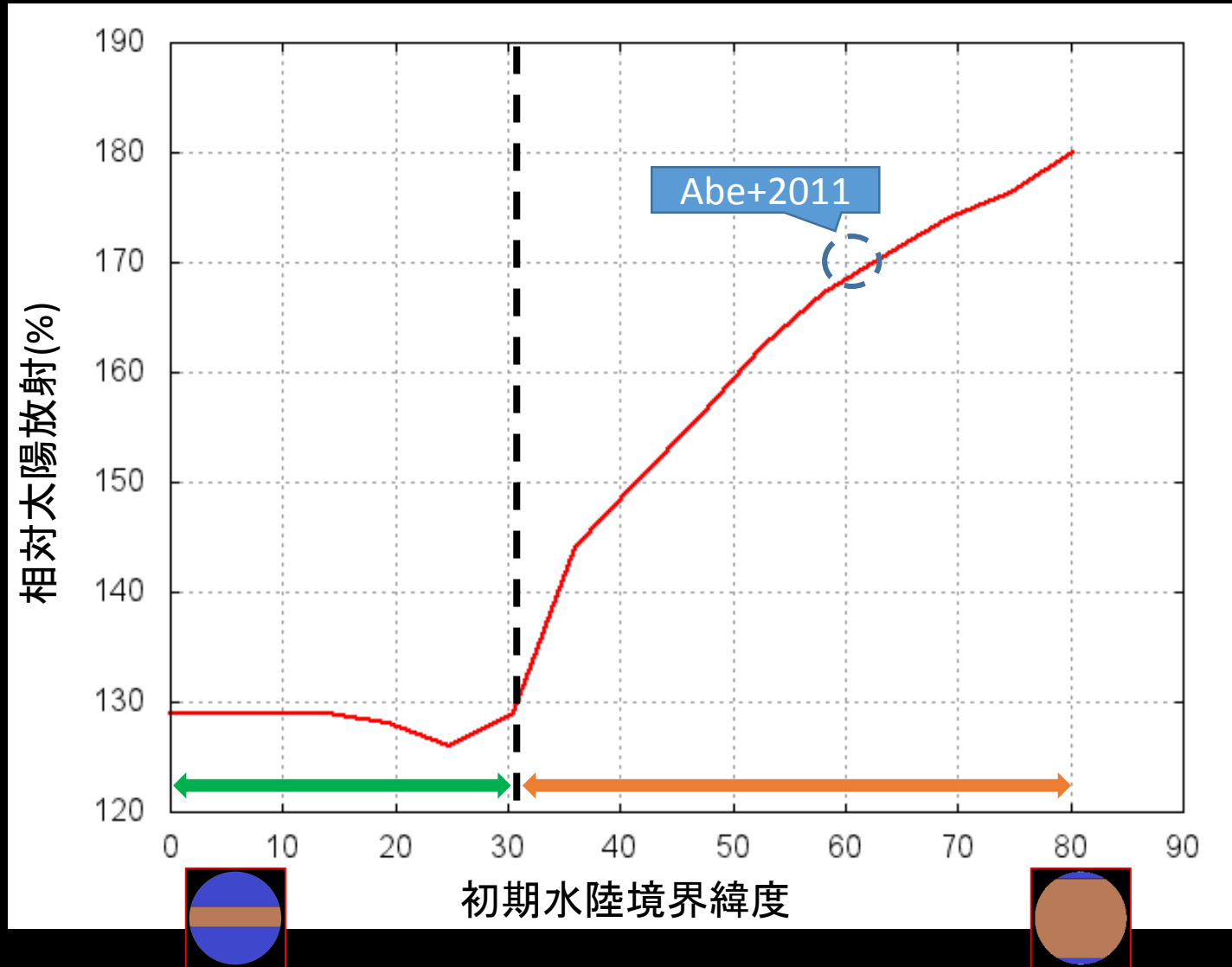
0000/01/01.00-0000/01/30.23



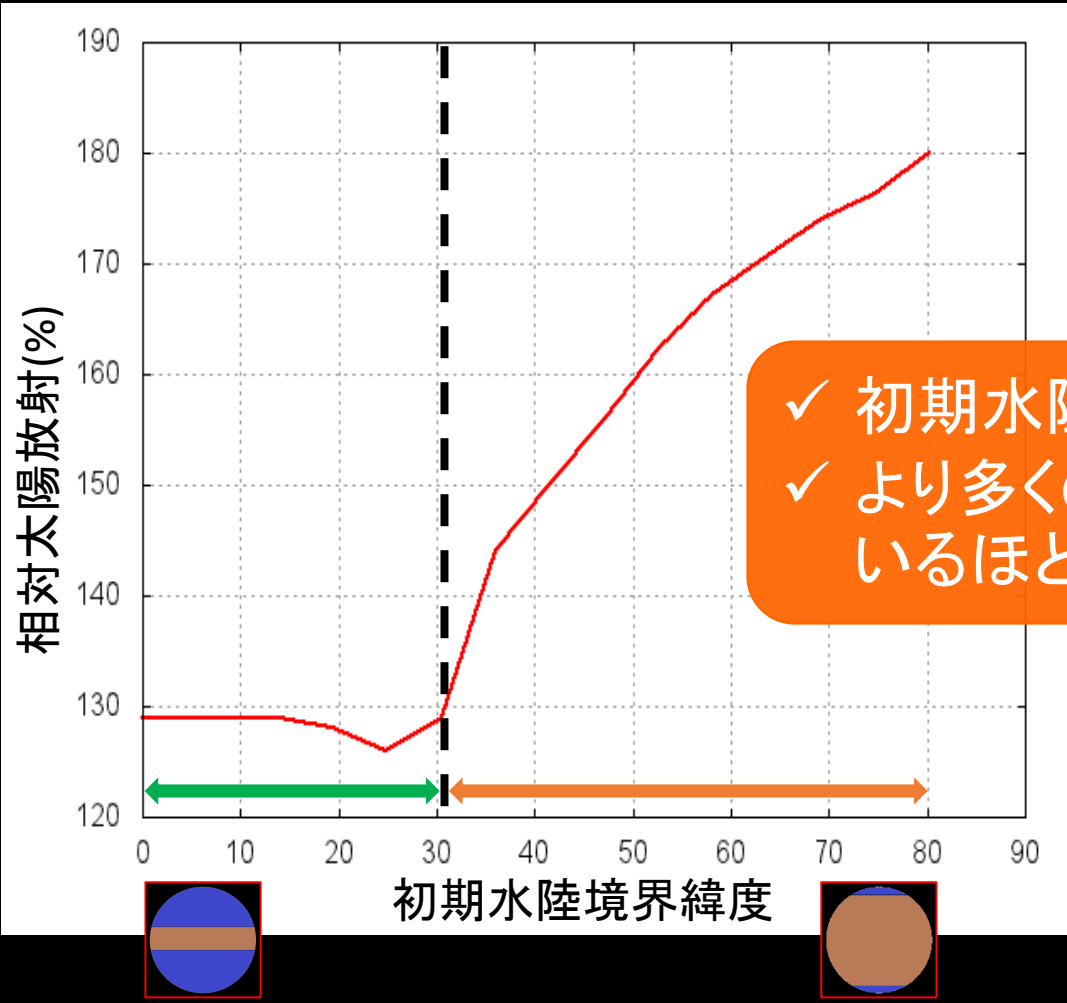
初期境界: 58度  
相対太陽放射: 168%  
計算時間: 7年2ヶ月でストップ



# 初期水陸境界vs暴走限界

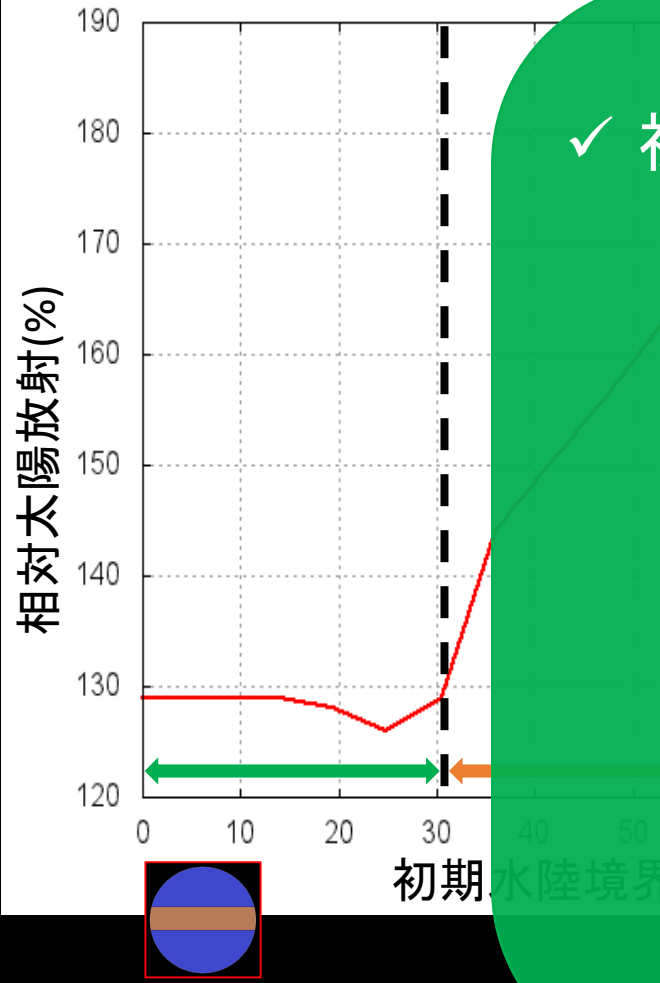


# 中高緯度初期境界と大気循環

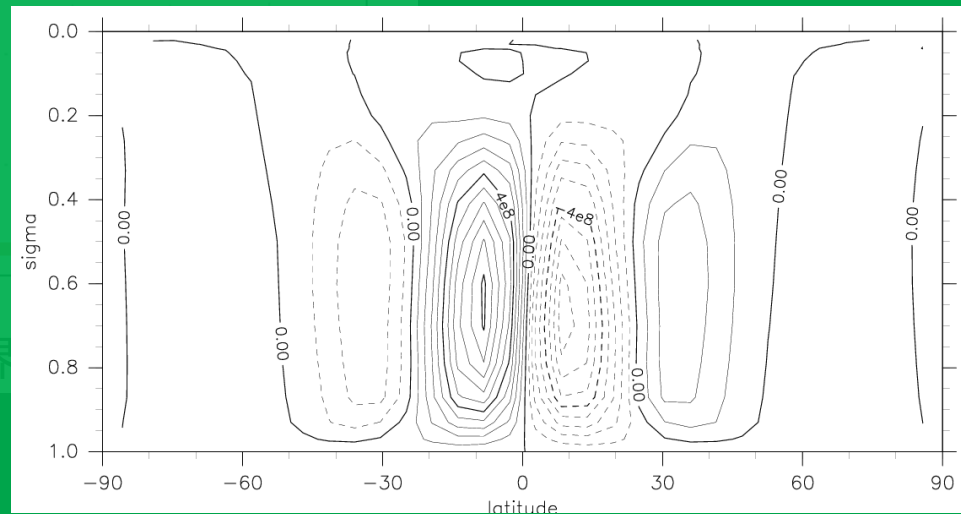


- ✓ 初期水陸境界: 中高緯度領域
- ✓ より多くの領域で地表が乾いているほど大気も乾燥

# 低緯度初期境界と大気循環

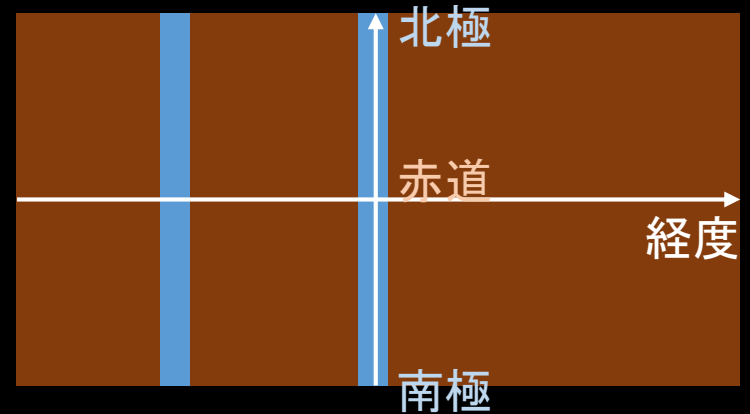
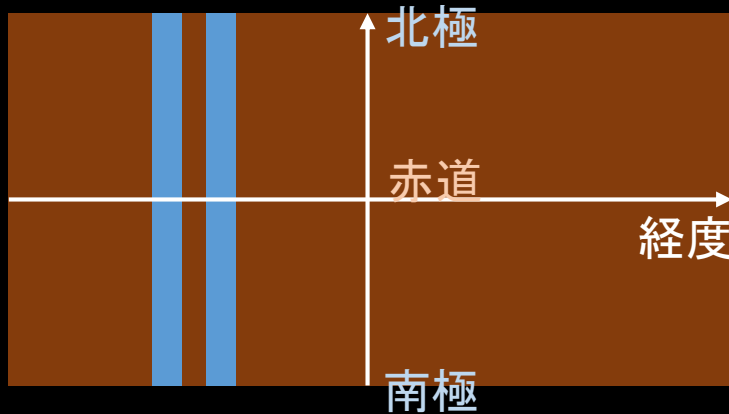


- ✓ 初期水陸境界：低緯度領域
  - ハドレー循環により赤道域に水が運ばれる
  - 初期境界が0~30度の場合、暴走限界はほぼ一定

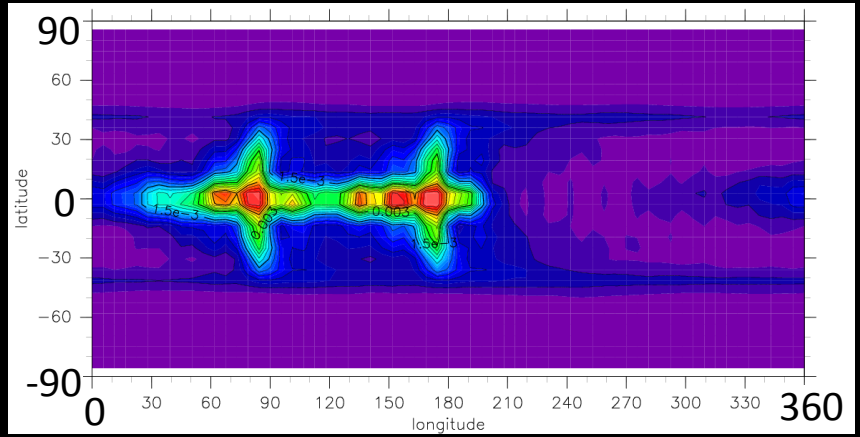
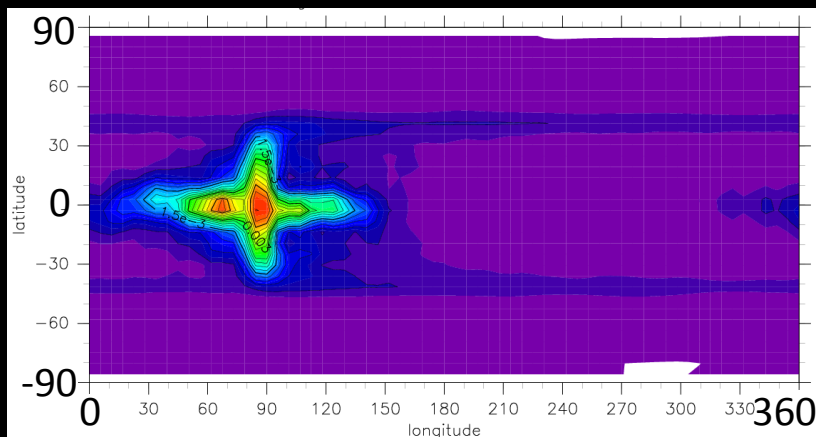


# 経度分布依存性(地形効果の見積もり)

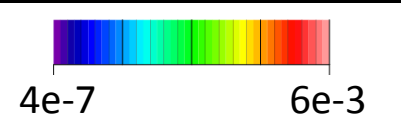
地表水分布



同水量で地形により経度方向の水分布が異なる場合



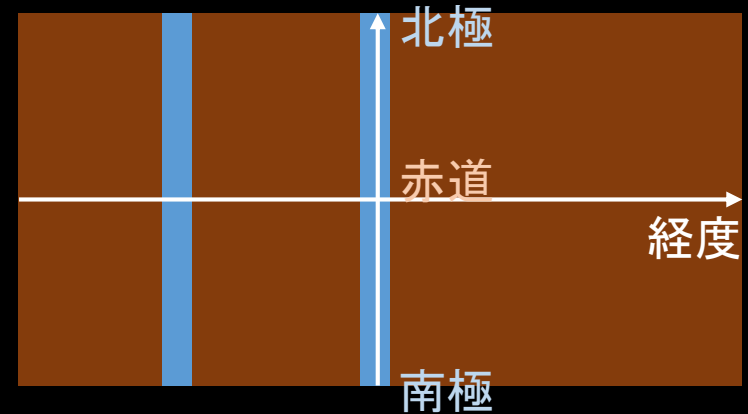
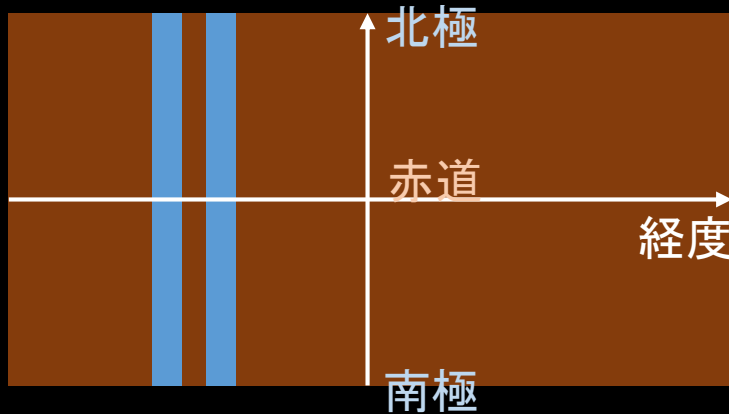
大気下端の絶対湿度分布



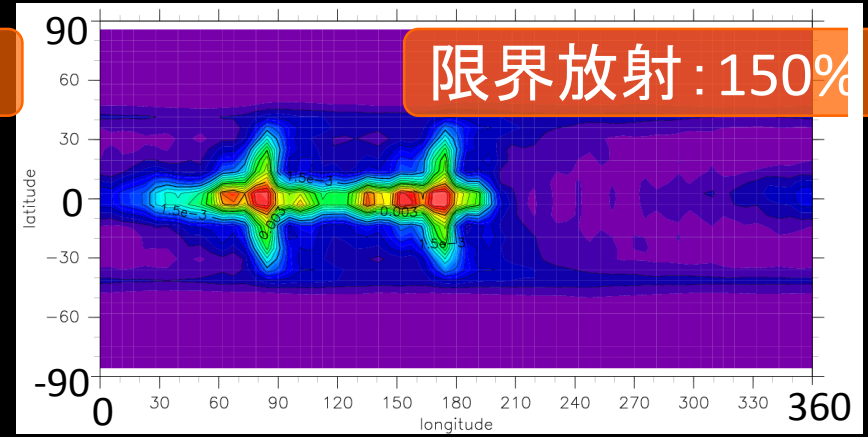
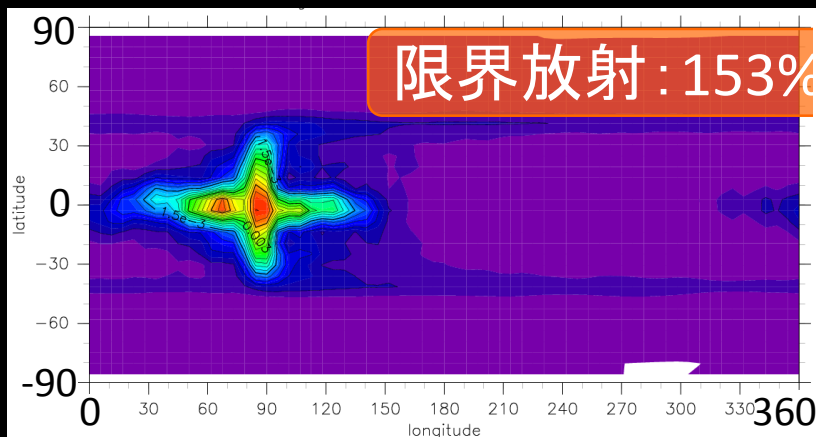


# 経度分布依存性(地形効果の見積もり)

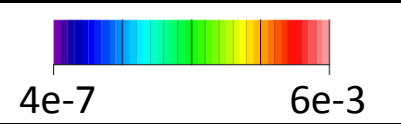
部分海惑星的地表水分布



同水量で地形により経度方向の水分布が異なる場合



大気下端の絶対湿度分布



# まとめ

## 地表水緯度分布と暴走限界

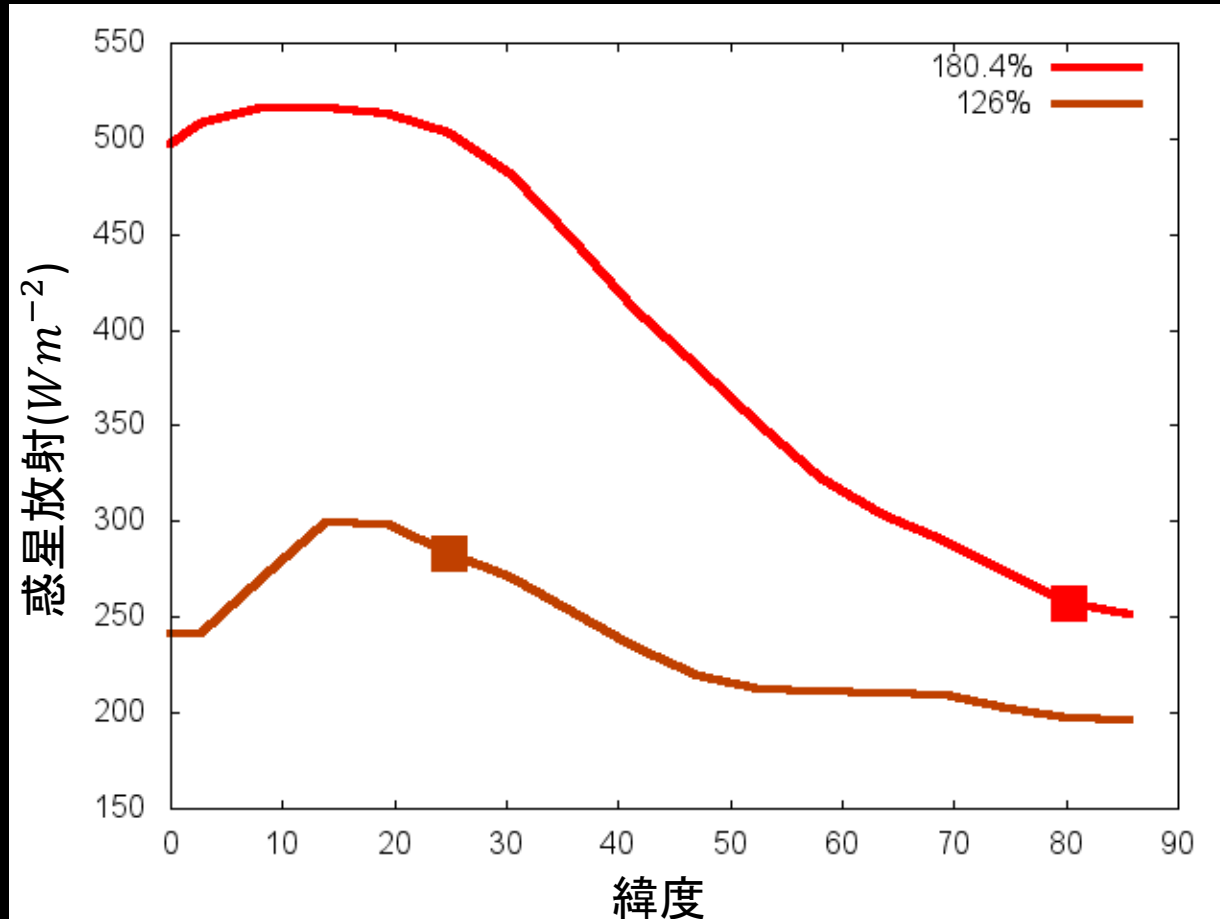
- ✓ 初期境界(水の量)と暴走限界の関係は初期境界緯度で2つに分類
  - 初期境界: 高緯度→乾燥領域が広いほど太陽放射が強くても地表水を維持
  - 初期境界: 低緯度→ハドレー循環の影響大

## 地表水経度分布と暴走限界

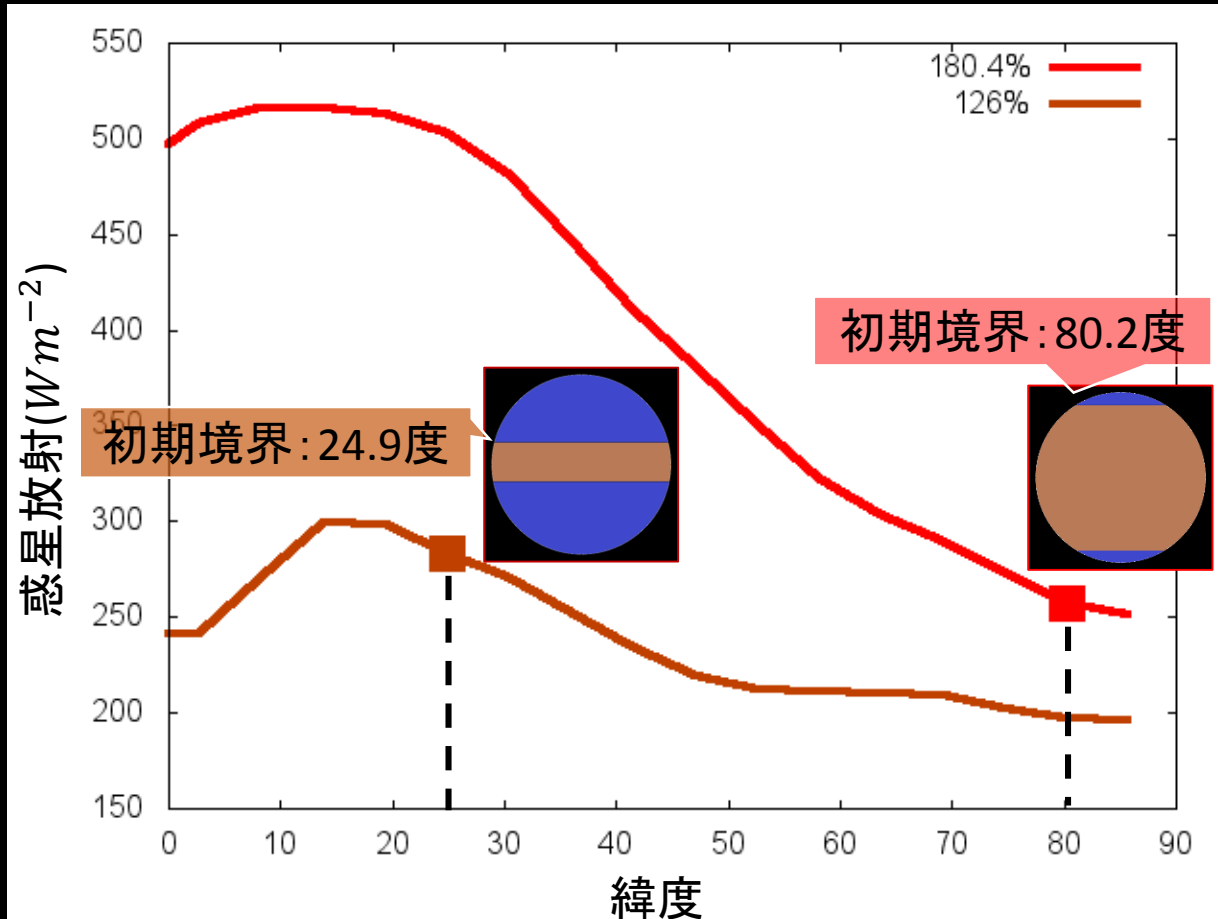
- ✓ 初期経度分布に依存して大気中の水蒸気分布が変化
  - 暴走限界も変化
  - 海惑星と部分海惑星とで暴走限界が異なる
  - 同じ部分海惑星でも大陸配置(地形)により暴走限界は変化

- 暴走状態に入るときの気候状態
- 地形による水分布の系統的理解

# 各水分分布における限界時の惑星放射

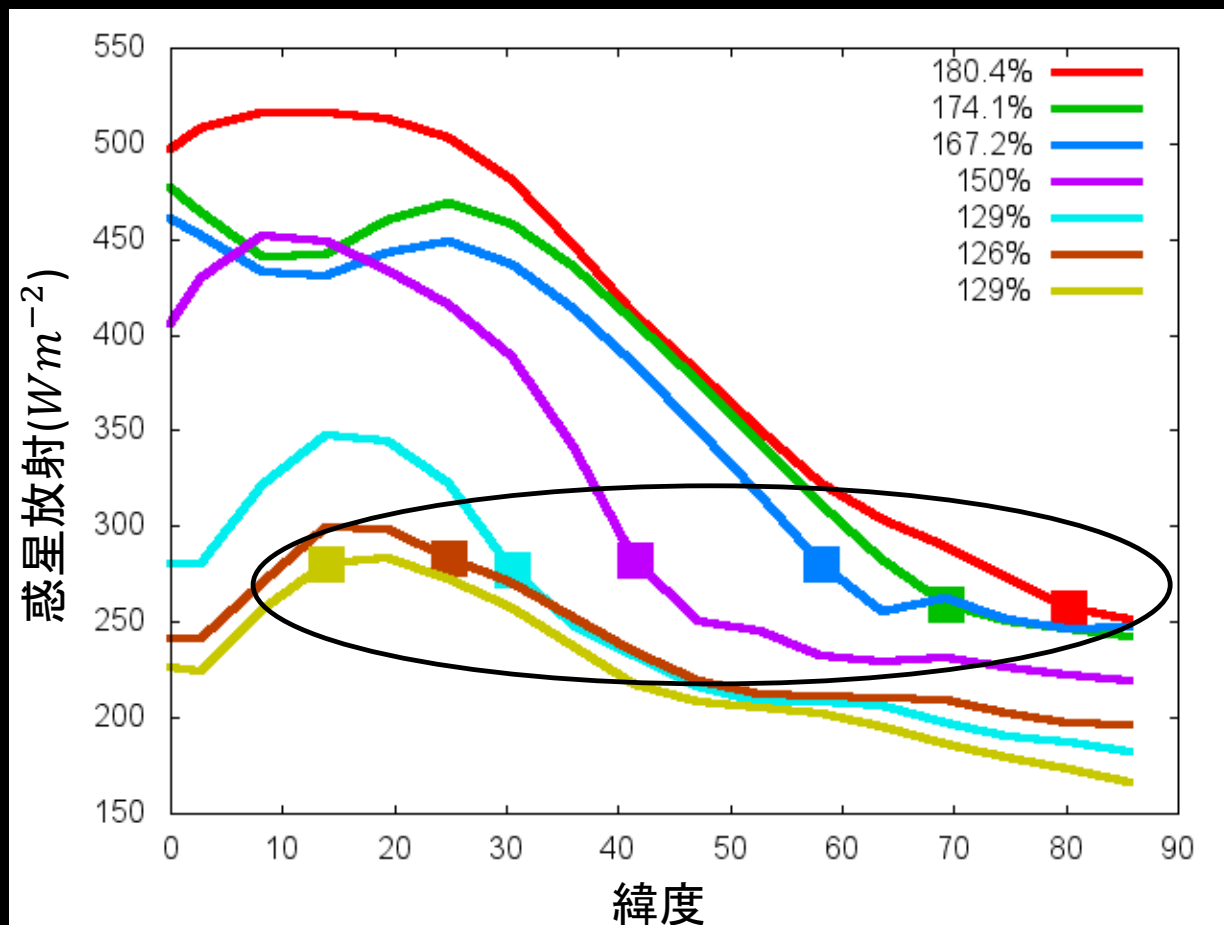


# 各水分分布における限界時の惑星放射



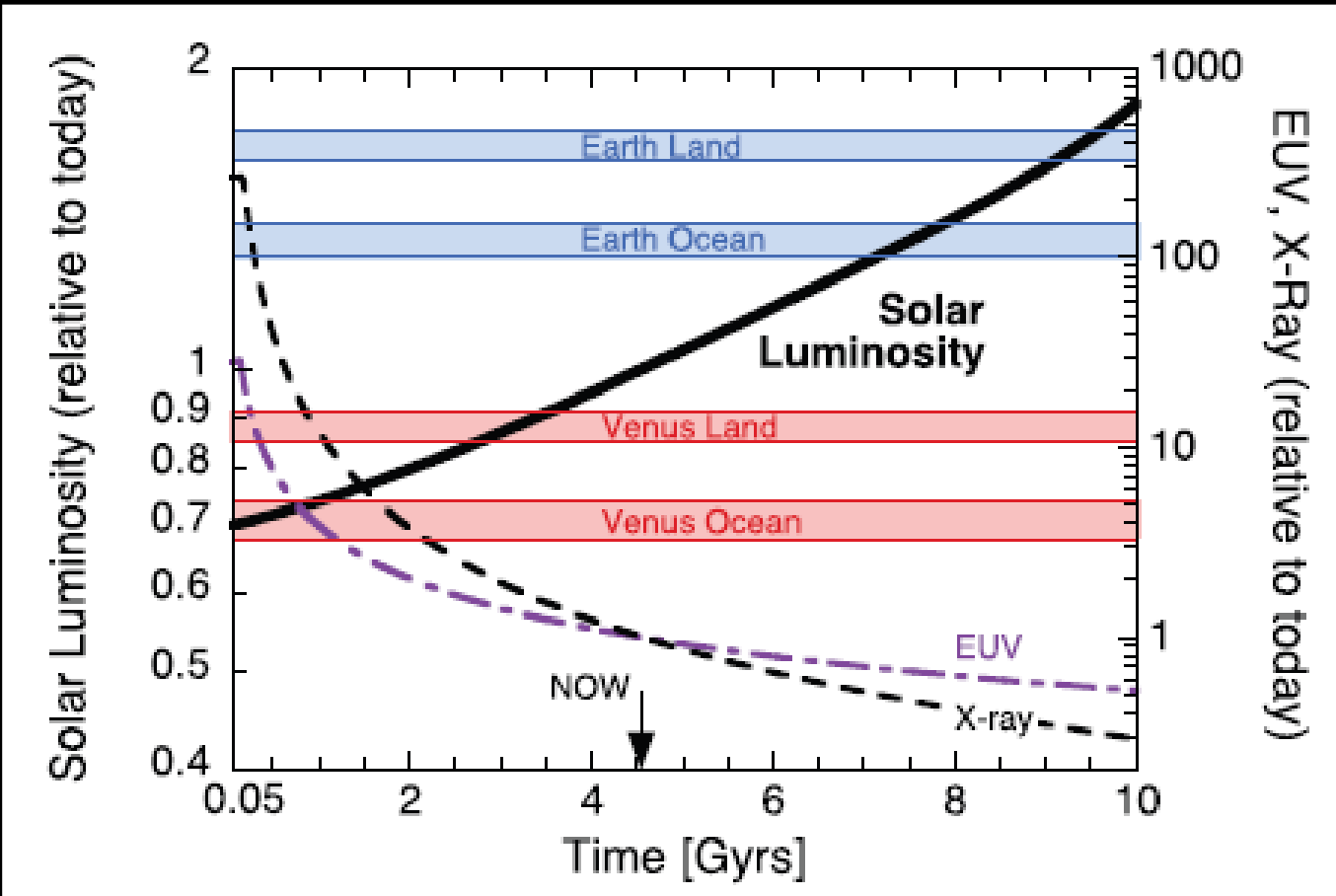


# 各水分分布における限界時の惑星放射

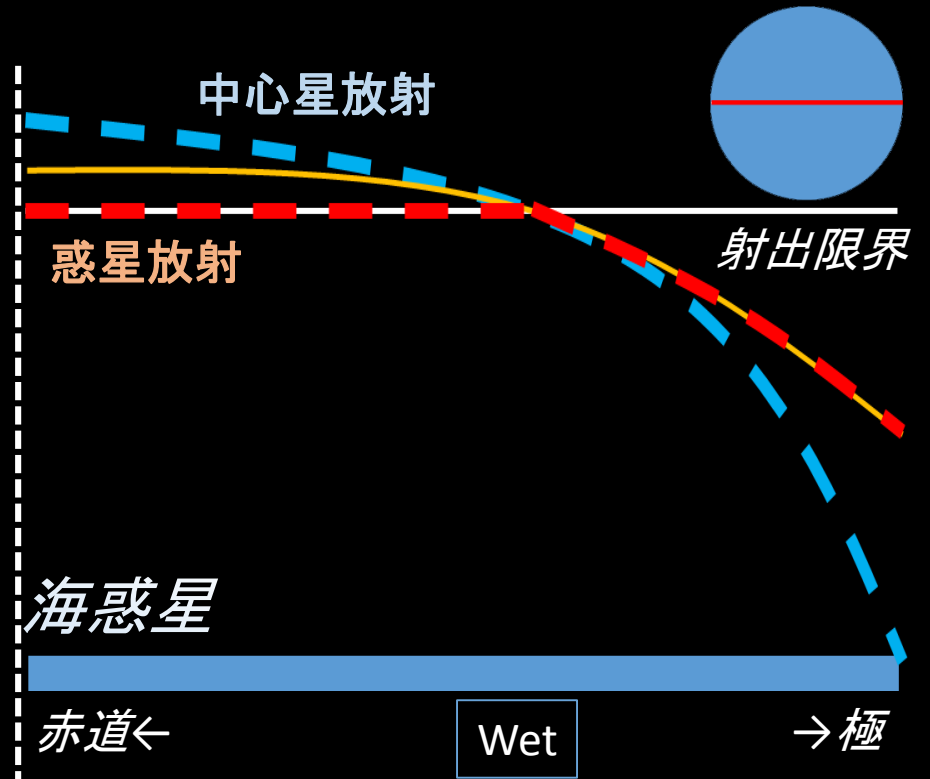
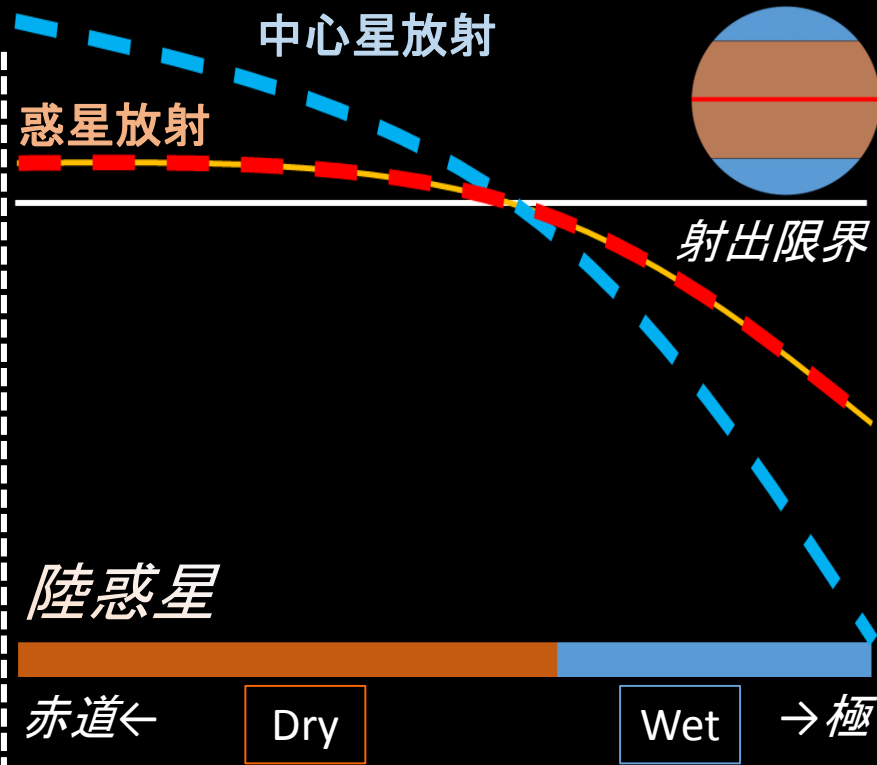


- ✓ 水陸境界で射出限界?(高尾, 2013)
- ✓ 射出限界は $282 W m^{-2}$ 程度(Goldblatt+2013)

# Abe et al, 2011



# 水分分布と放射収支 (Abe+2011)

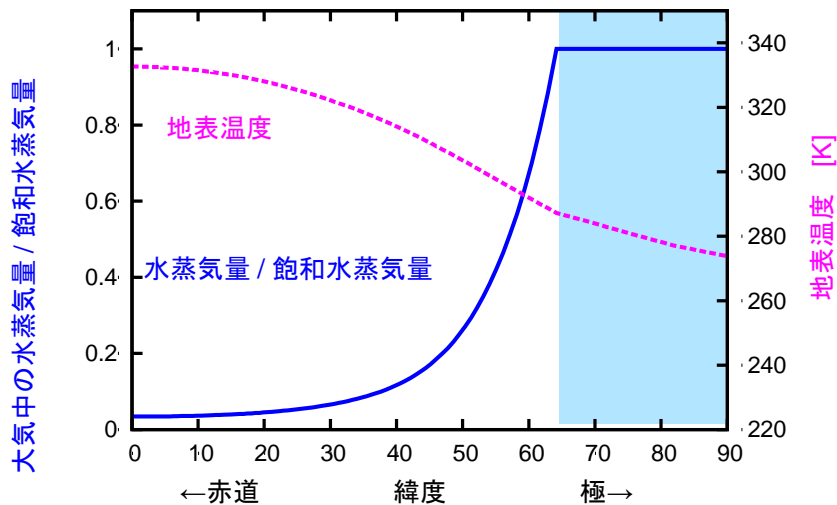
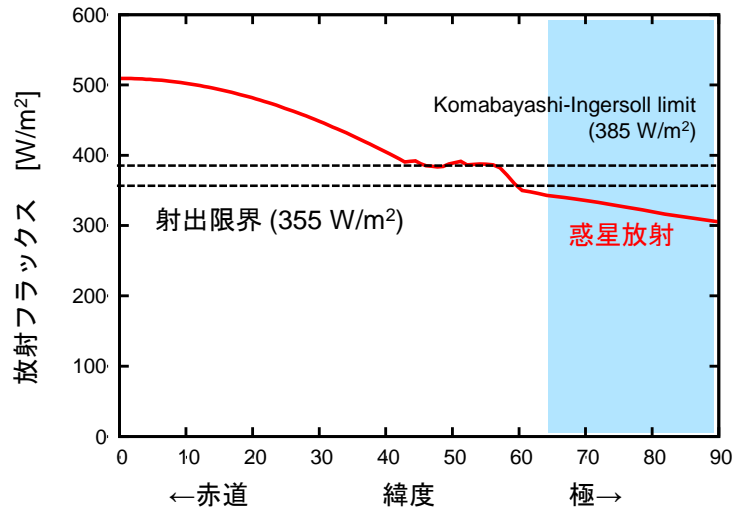


低緯度領域が乾燥  
→射出限界以上の放射が可能

低緯度(高温)領域が飽和  
→射出限界に到達



# Takao, 2013



暴走限界では  
水陸境界が射出限界  
✓ 低緯度側は限界がないため

## Nakajima et al, 1992

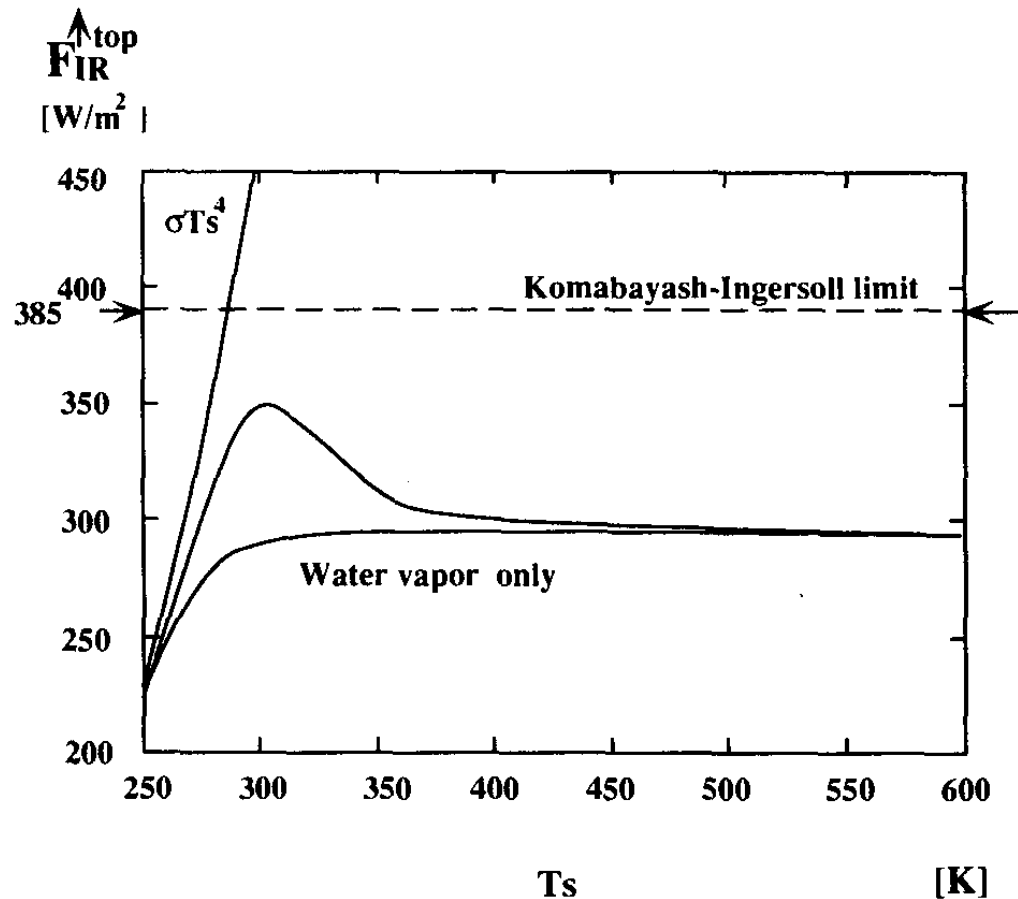
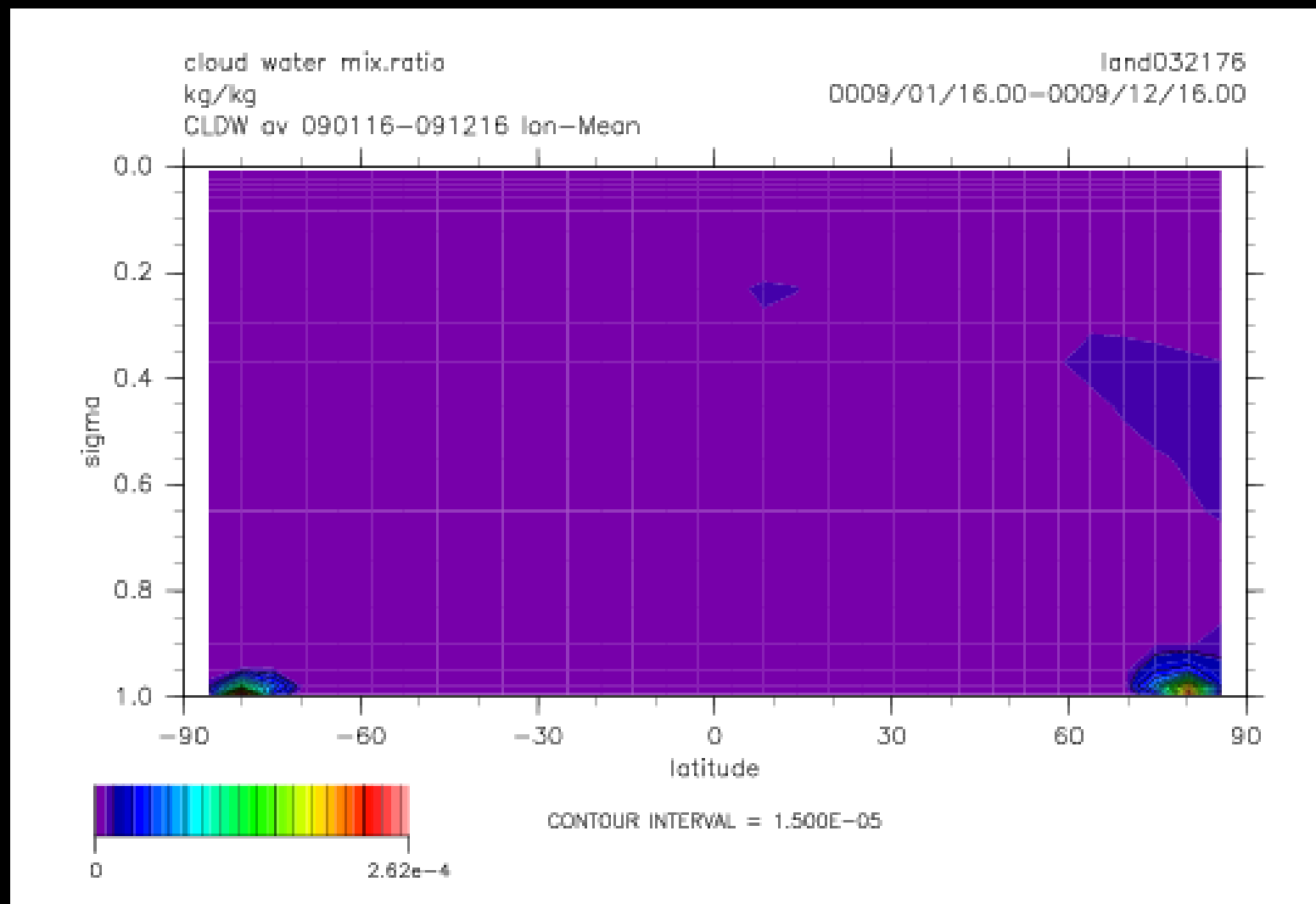
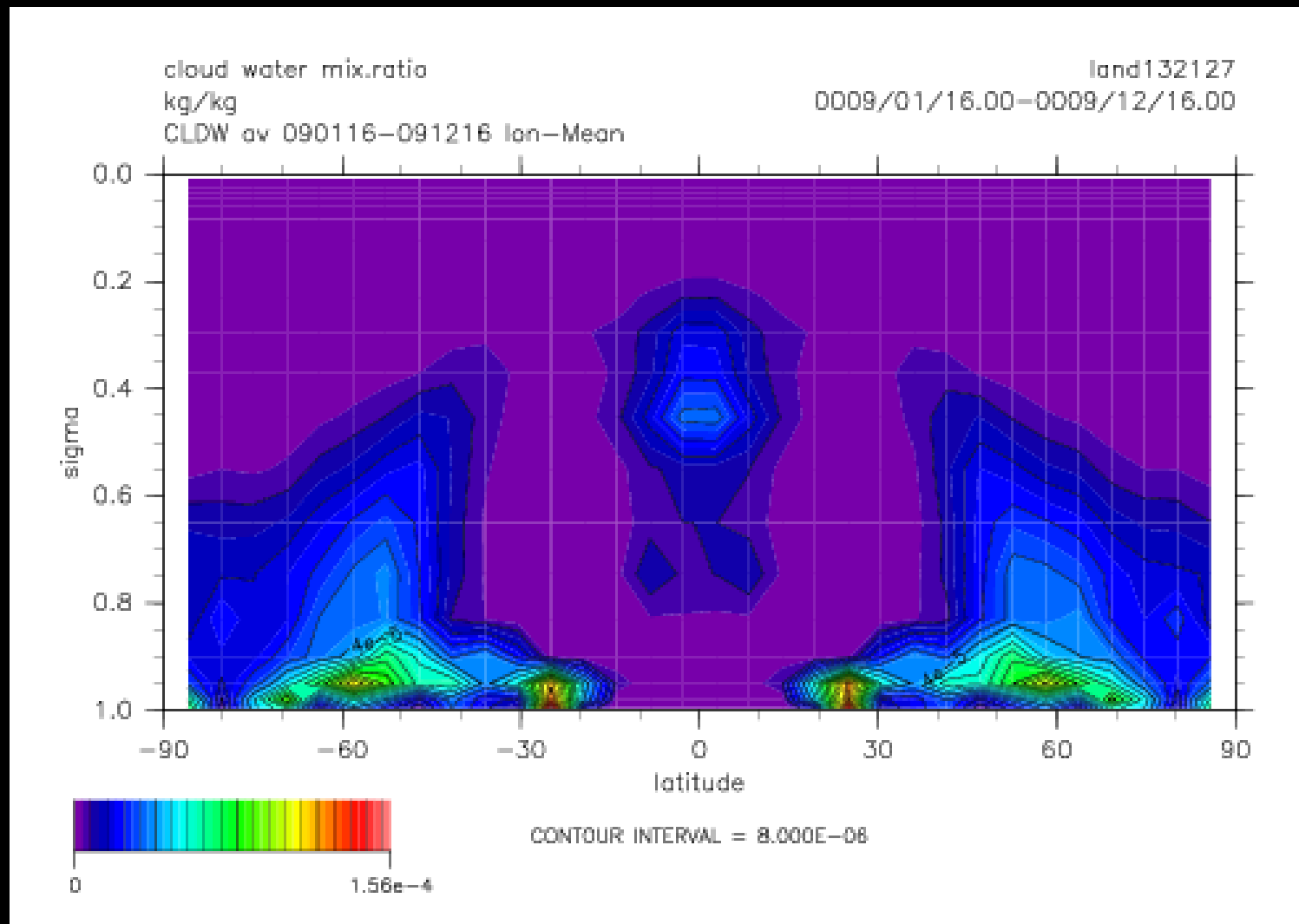


FIG. 3. The relationship between  $T_s$  and  $F_{IR}^{\text{top}}$  for the case when  $P_{n0} = 10^5 \text{ Pa}$ .  $F_{IR}^{\text{top}}$  for the case of the saturation water vapor atmosphere, the blackbody radiation  $\sigma T_s^4$ , and the Komabayashi-Ingersoll limit are also indicated.

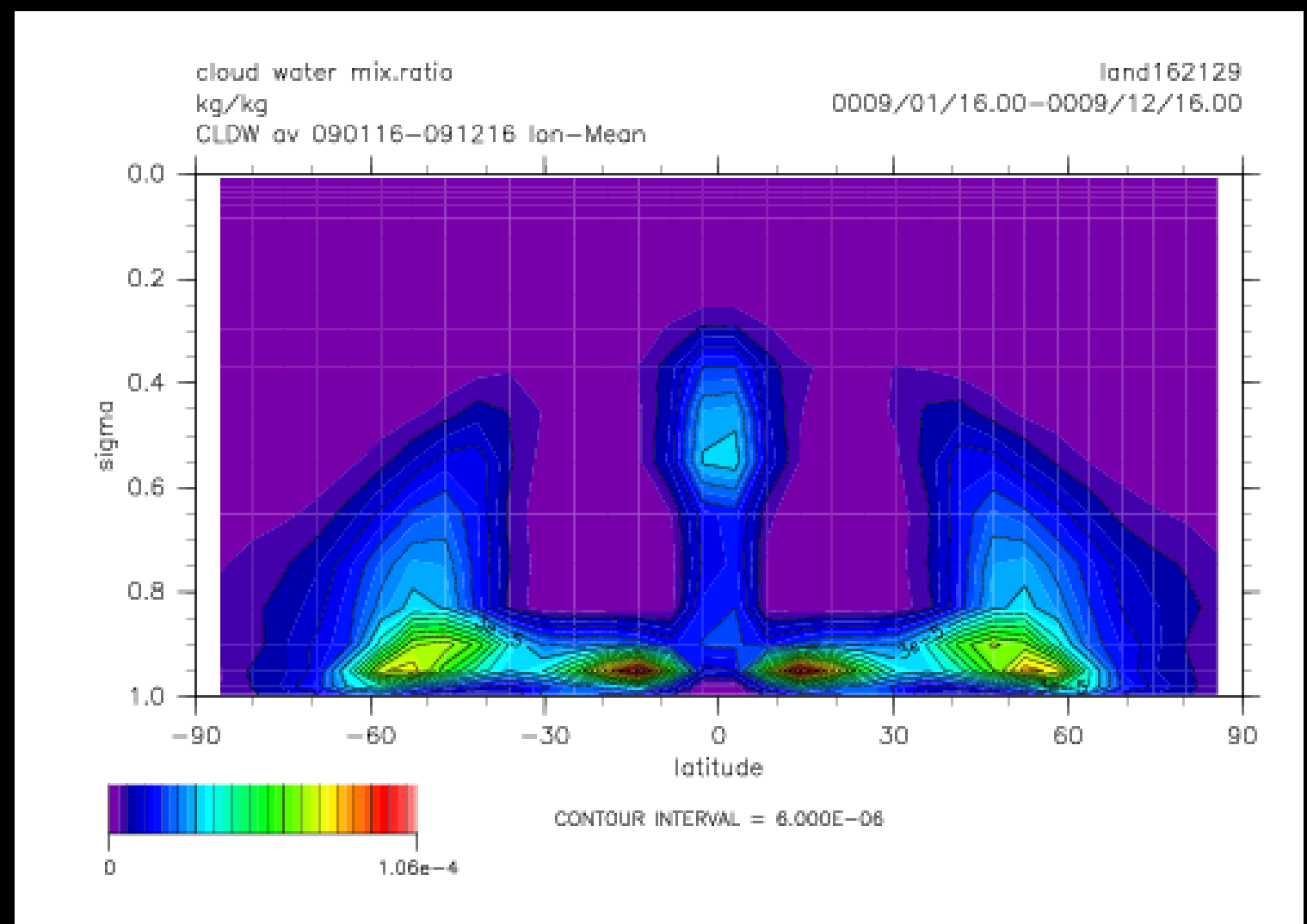
# GCMによる雲分布(初期境界:高緯度)



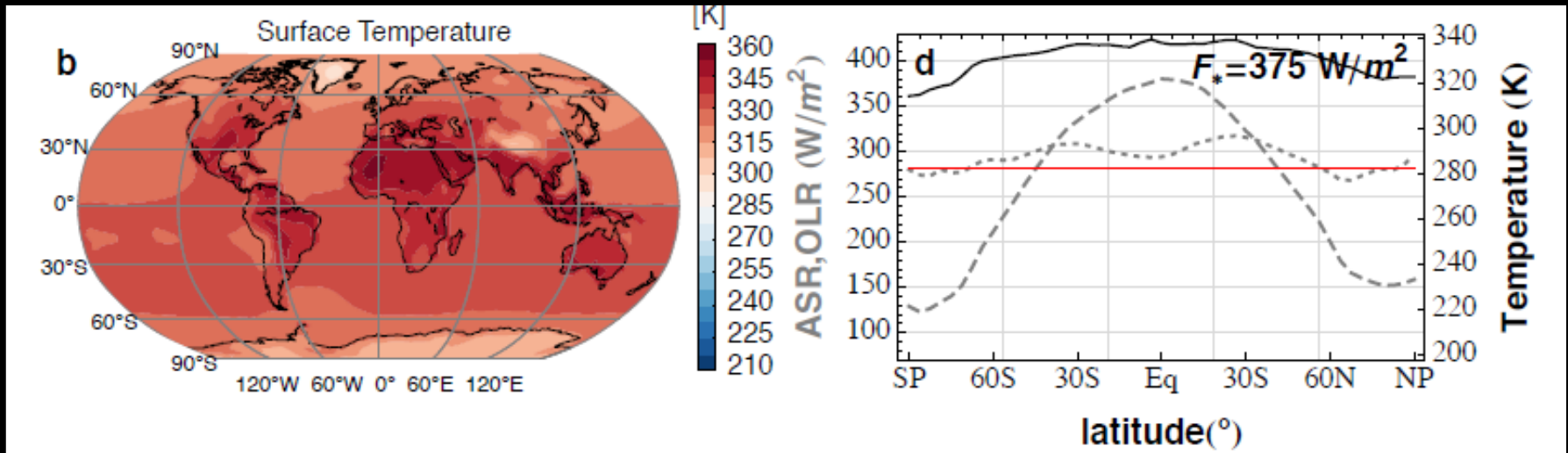
# GCMによる雲分布(初期境界:低緯度)



# GCMによる雲分布(海惑星、初期境界0度)



# Leconte et al., 2013



正味中心星放射110%程度で限界( $375 \text{ W/m}^2$ )

- 雲による正のフィードバック
- 大気循環による暴走の抑制(大気の乾燥化)

# 全球プリミティブ方程式系

1. 連続の式  $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v}) = 0$

2. 静水圧の式  $\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho q$

3. 運動方程式  $\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v} - \frac{1}{\rho} \text{grad}P + \mathbf{g} + \mathbf{F}_r$

4. 熱力学の式  $dU = Q - PdV$

5. 水蒸気の式  $\frac{Dq}{Dt} = S_q$

以上の式に基づき  
球面座標に変換