

惑星大気大循環モデル DCPAM5 によって 表現される地球の地理的気候分布

神戸大学理学部惑星学科

流体地球物理学研究分野

藤原 大葵

発表内容

- 研究背景, 目的
- モデルの概要
- ケッペンの気候区分について
- 実験, 比較
- 考察
- まとめ, 今後の課題

研究背景, 目的

- ・地球流体電脳倶楽部有志は様々な惑星の気候や循環構造の多様性を調べるため, 惑星大気大循環モデル DCPAM5 (高橋 他, 2018) を開発してきた.
- ・このモデルは, 惑星全球の風速, 温度, 密度などを計算することができる.

疑問: 地球の気候をどの程度表現できるのか.

目的: ケッペンの気候区分を用いて, モデルが表現する地球と現実地球を比較, 考察する.

モデルの概要：惑星大気大循環モデル DCPAM5

〈惑星大気大循環モデルの構成〉

- 力学過程
 - モデル格子で表現される運動
 - プリミティブ方程式系を使用
- 物理過程
 - モデル格子より小さいスケールの運動や流体運動以外の効果
 - 乱流混合過程
 - 放射過程
 - 凝結過程 等

モデルの概要：惑星大気大循環モデルDCPAM5

〈力学過程〉

静水圧平衡の式

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} = -\frac{RT}{\sigma}$$

運動方程式

$$\frac{du}{dt} - fv - \frac{uv \tan \varphi}{a} = -\frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda} - \frac{RT}{a \cos \varphi} \frac{\partial \pi}{\partial \lambda} + F_\lambda$$

$$\frac{dv}{dt} + fu + \frac{u^2 \tan \varphi}{a} = -\frac{1}{a} \frac{\partial \Phi}{\partial \varphi} - \frac{RT}{a} \frac{\partial \pi}{\partial \varphi} + F_\varphi$$

連続の式

$$\frac{d\pi}{dt} + \frac{1}{a \cos \varphi} \left(\frac{\partial u}{\partial \lambda} \right)_\sigma + \frac{1}{a \cos \varphi} \left(\frac{\partial}{\partial \varphi} (v \cos \varphi) \right)_\sigma + \frac{\partial \dot{\sigma}}{\partial \sigma} = 0$$

熱力学の式

$$\frac{dT}{dt} = \frac{RT}{c_p} \left\{ \frac{\partial \pi}{\partial t} + \mathbf{v}_H \cdot \nabla_\sigma \pi + \frac{\dot{\sigma}}{\sigma} \right\} + \frac{Q^*}{c_p}$$

ただし

$$\pi \equiv \ln p_s, \quad \mathbf{v}_H \cdot \nabla_\sigma = \frac{u}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial}{\partial \varphi}, \quad \dot{\sigma} \equiv \frac{g\sigma}{RT} \left\{ \left(\frac{\partial z}{\partial t} \right)_\sigma + \frac{u}{a \cos \varphi} \left(\frac{\partial z}{\partial \lambda} \right)_\sigma + \frac{v}{a} \left(\frac{\partial z}{\partial \varphi} \right)_\sigma - w \right\} \text{ である}$$

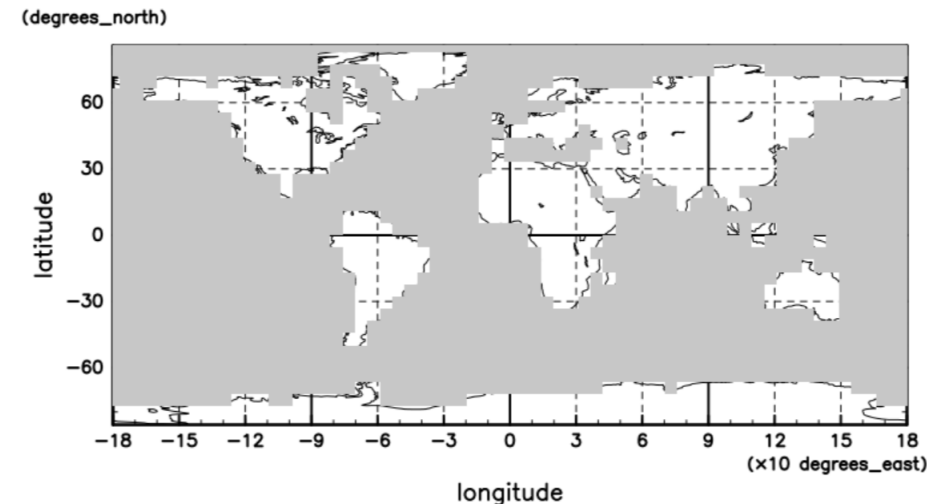
変数	物理量
t	時刻
φ	緯度
λ	経度
p	気圧
p_s	地表面気圧
σ	p/p_s
$\mathbf{u} = (u, v)$	水平風速度
w	z 座標系における鉛直風速度
$\dot{\sigma}$	σ 座標系における鉛直風速度
T	温度
R	気体定数
c_p	定圧比熱
g	重力加速度
a	惑星半径
f	コリオリパラメータ
Φ	ジオポテンシャル
F_λ, F_φ	外力

モデルの概要: 大気大循環モデル DCPAM5

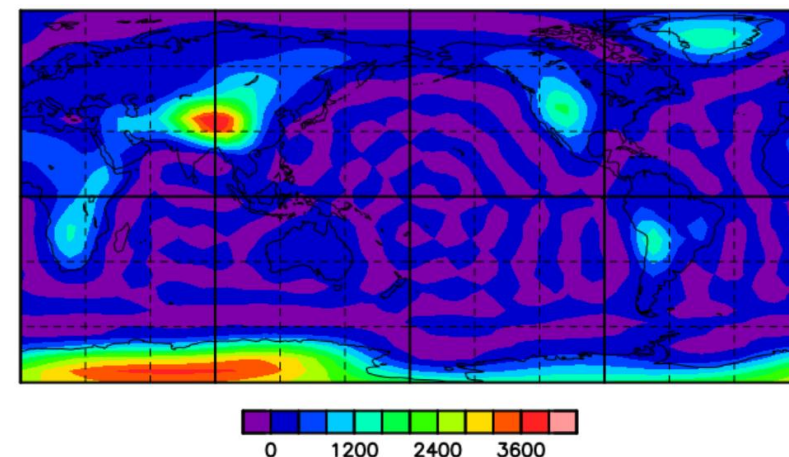
〈実験設定〉

- モデル格子等の設定
 - 経度格子間隔 5.63°
 - 緯度格子間隔 5.63°
 - 鉛直層数 26
- 初期条件
 - 等温静止大気 (280 K)
 - 乾燥大気
- 鉛直方向の境界条件
 - $\dot{\sigma} = 0$ at $\sigma = 0, 1$

▪ 海陸分布



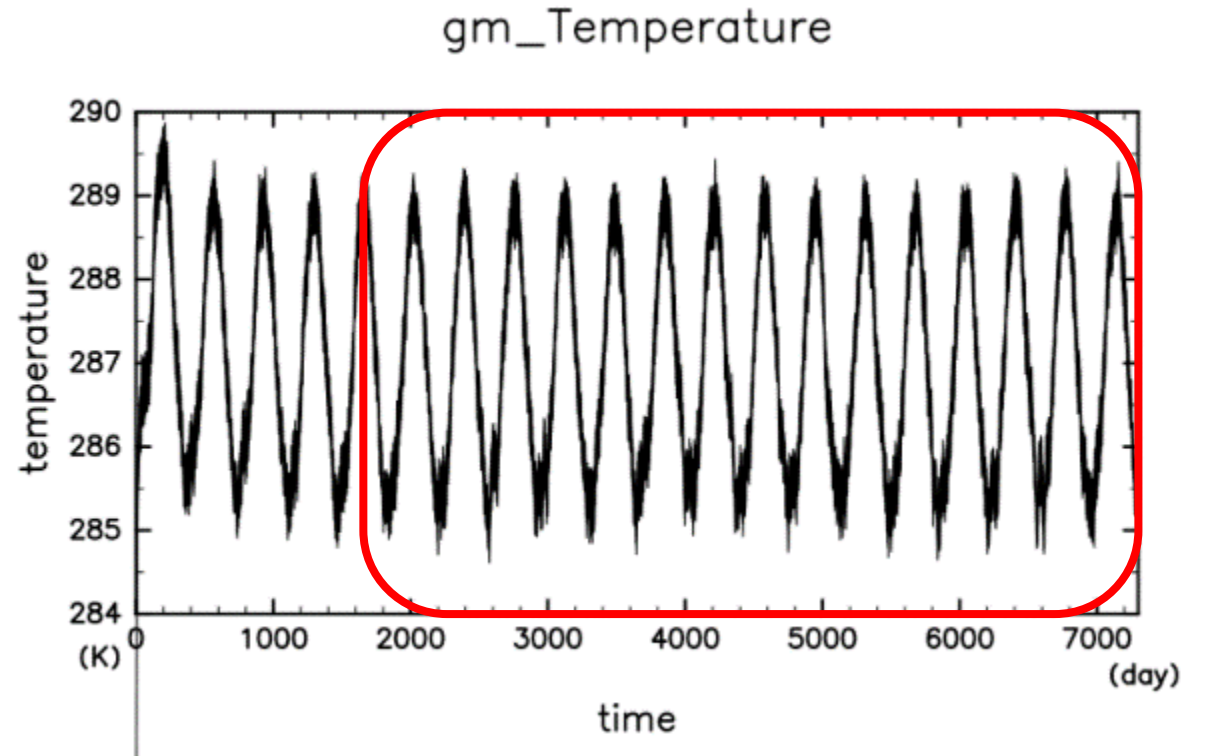
▪ 地形データ



モデルの概要: 大気大循環モデル DCPAM5

〈実験設定〉

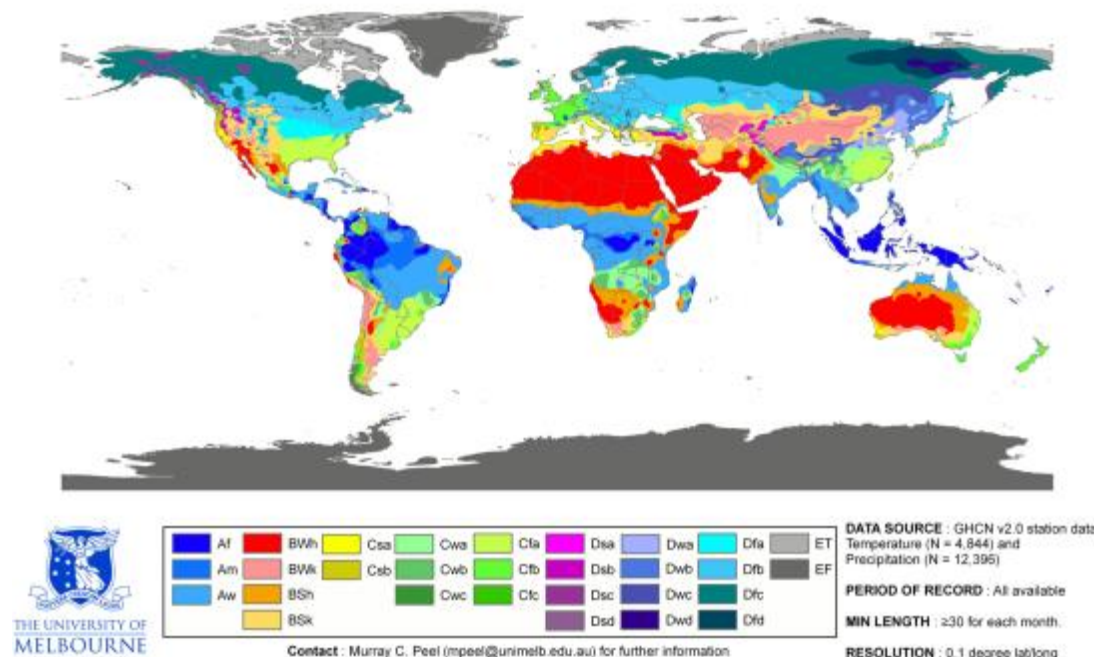
- ・ 各種パラメータ
 - ・ 惑星半径 6371 km
 - ・ 重力加速度 9.8 m/s^2
 - ・ 自転角速度 $7.29 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$
- ・ 各月毎に気候値の海面水温を与えている
- ・ 積分間隔
 - ・ 20 分
- ・ 積分期間
 - ・ 20 年間, 解析で用いるのは 5 年目以降の 16 年分



ケッペンの気候区分

- Köppen, W. (1936) で発表された気候区分
- 植生に基づいて気候区分を定義している
- **気温**と**降水量**の2変数から気候区分を決定できる

現実地球



ケツペンの気候区分

$\overline{T_{max}}$... 最暖月平均気温
 $\overline{T_{min}}$... 最寒月平均気温

$\overline{T_{max}} \geq 10^{\circ}\text{C}$

YES

NO

年間降水量を R (mm), 乾燥限界を r (mm) とすると,
 $R \geq r$
である
年平均気温... t ($^{\circ}\text{C}$)
(1) 降水量最多月が夏, かつ
 $10 \times [\text{最小雨月降水量}] < [\text{最多雨月降水量}]$
 $r = 20t$
(2) 降水量最多月が冬, かつ
 $3 \times [\text{最小雨月降水量}] < [\text{最多雨月降水量}]$
 $r = 20(t + 7)$
(3) (1), (2) 以外
 $r = 20(t + 14)$

YES

NO

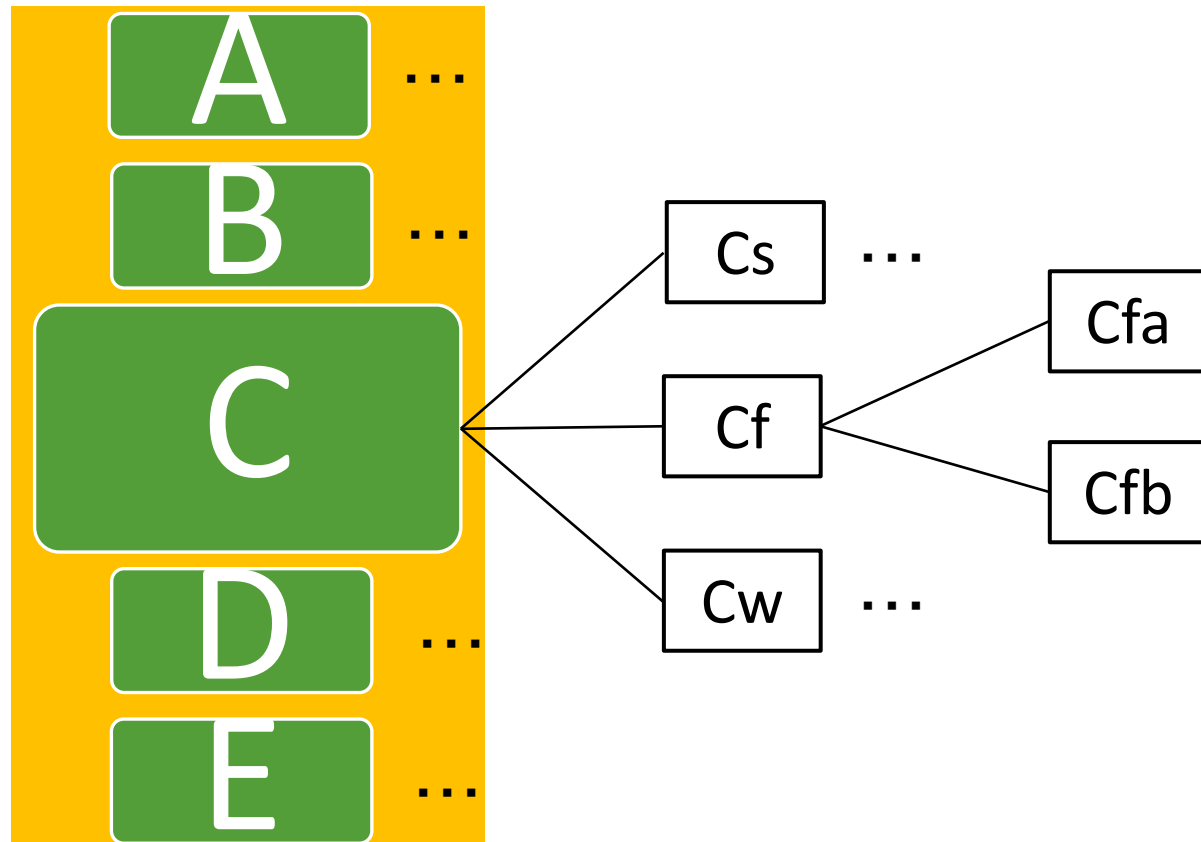
- ・ A : 熱帯
- ・ $\overline{T_{min}} \geq 18^{\circ}\text{C}$
- ・ C : 温帯
- ・ $-3^{\circ}\text{C} \leq \overline{T_{min}} < 18^{\circ}\text{C}$
- ・ D : 冷帯
- ・ $\overline{T_{min}} < -3^{\circ}\text{C}$

- ・ B : 乾燥帯
- ・ $R < r$

- ・ E : 寒帯
- ・ $\overline{T_{max}} < 10^{\circ}\text{C}$

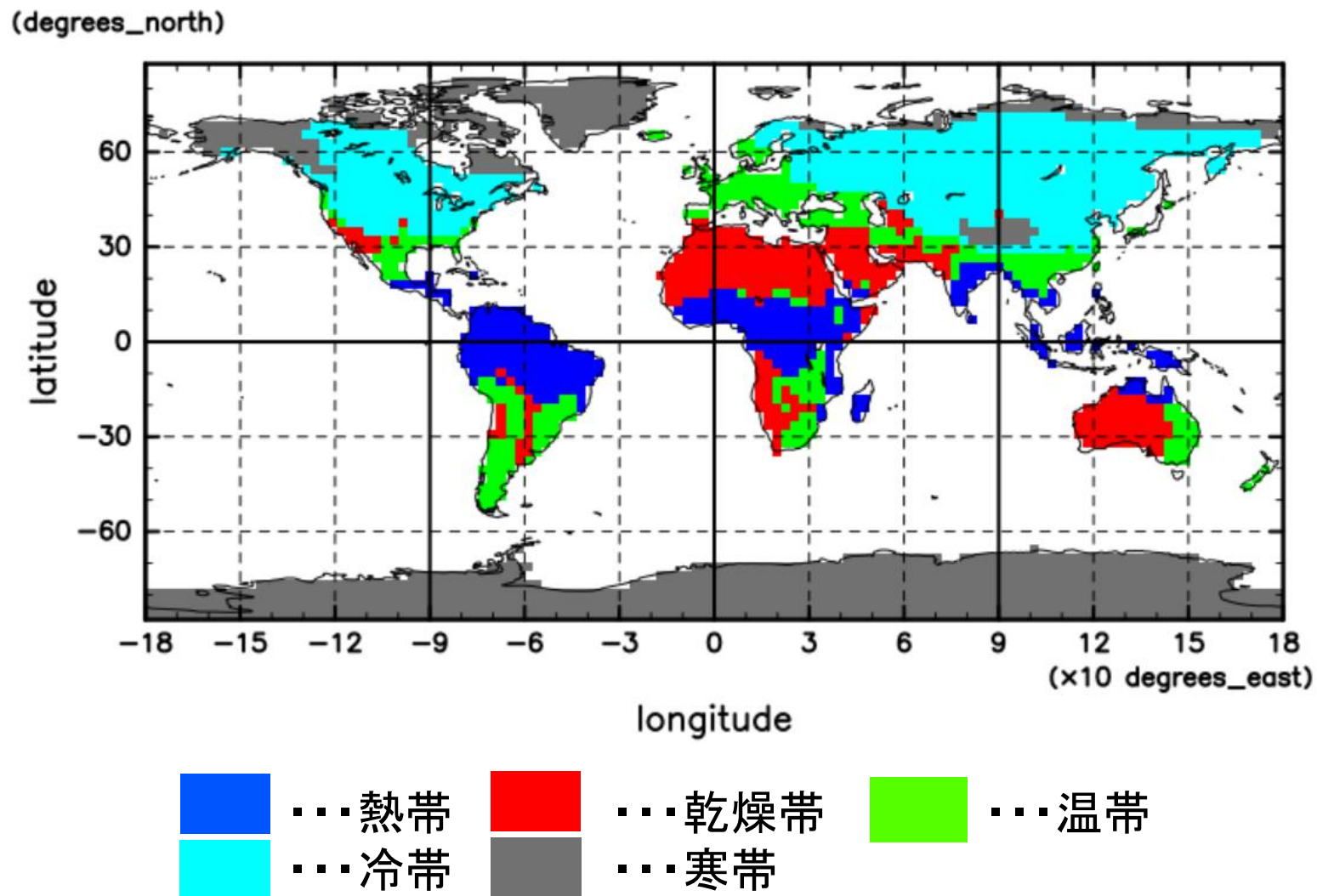
ケッペンの気候区分

例) 温帯 (C) のさらなる分類



↳ 今回は1文字目の分類のみを用いる

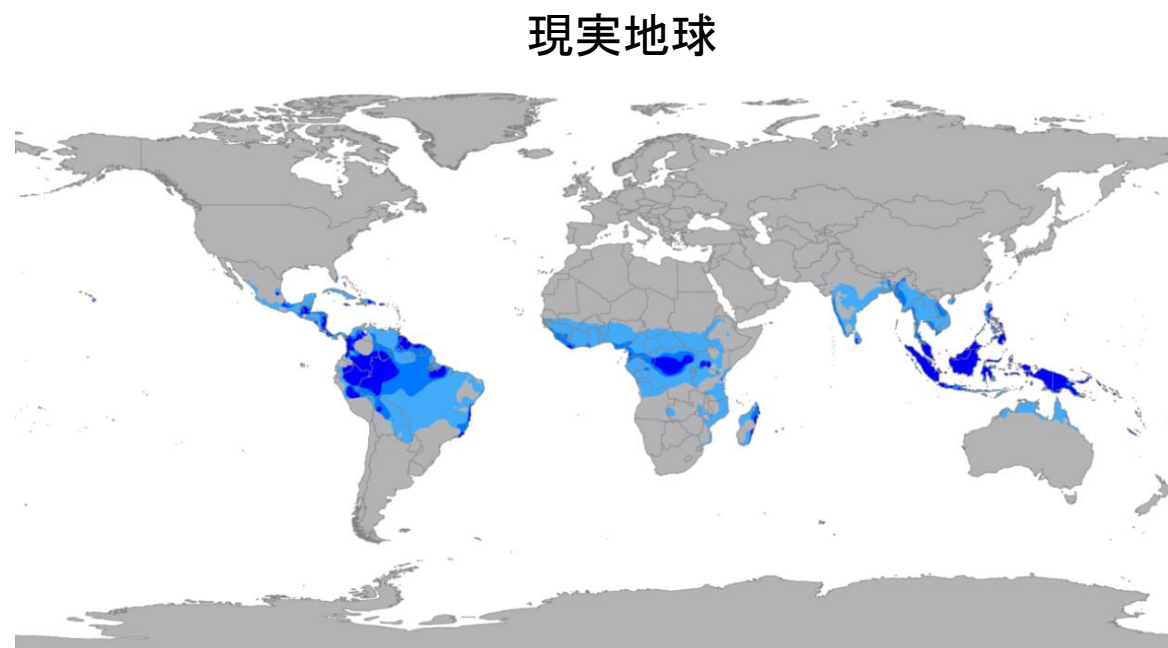
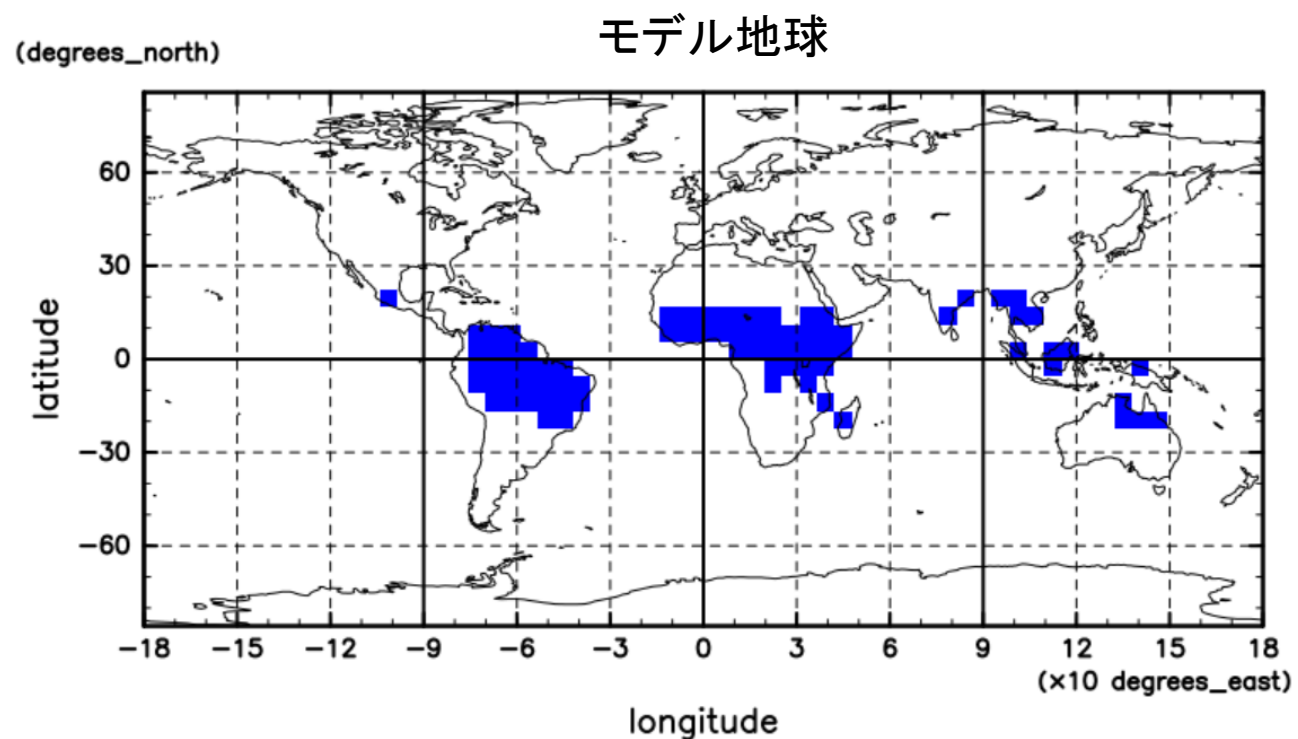
實驗結果



比較





A : 熱帯

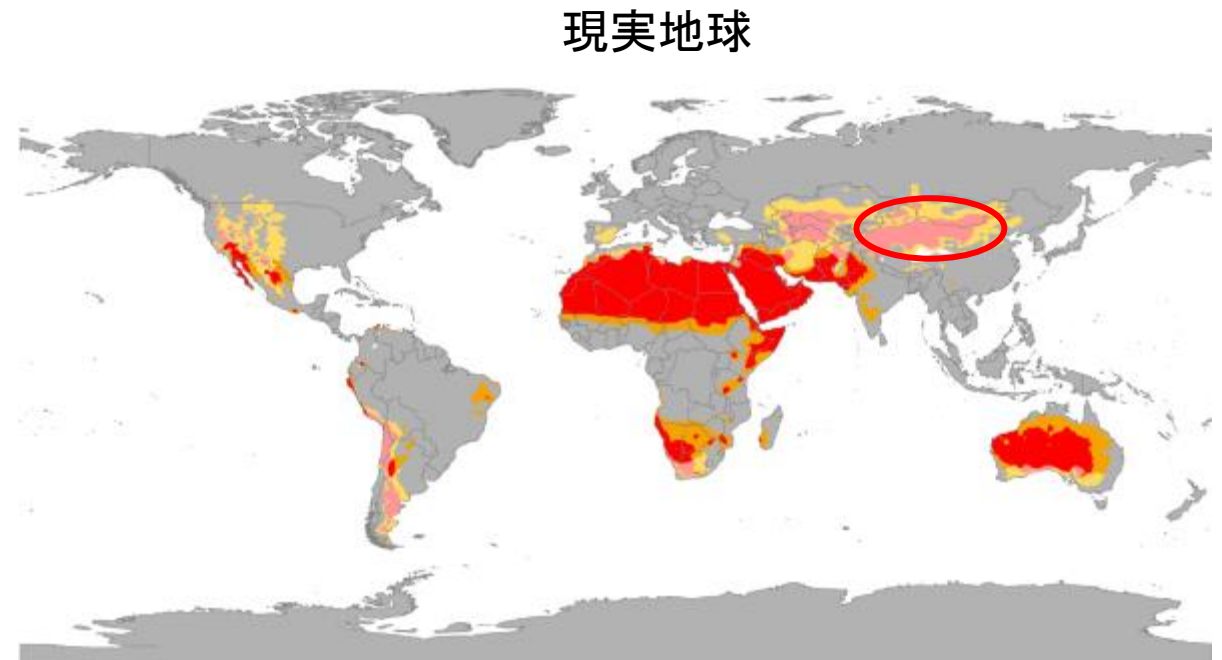
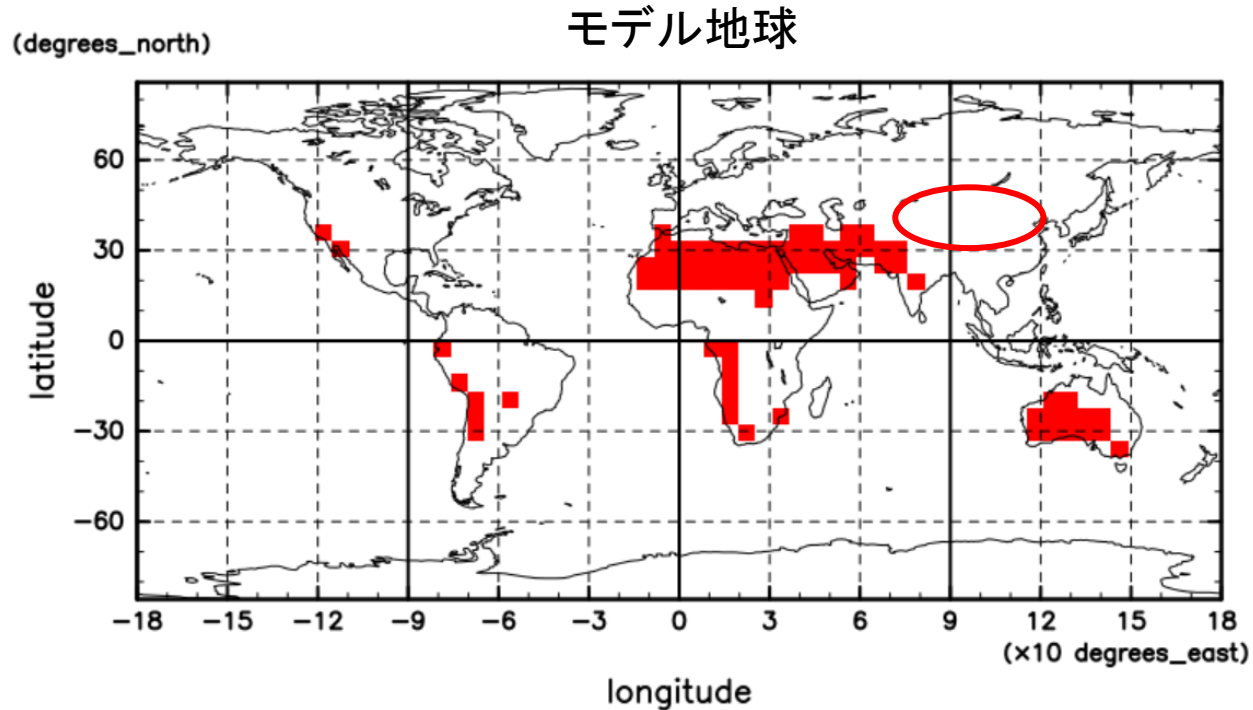
- ・ 概ね同じ領域に表現されている



比較

B: 乾燥帯

- ・ 右図の  色 (= 砂漠気候) は類似した分布をしている
- ・ 右図の  色や  色,  色で示された区分に関しては乾燥帯としてほぼ表現されなかった

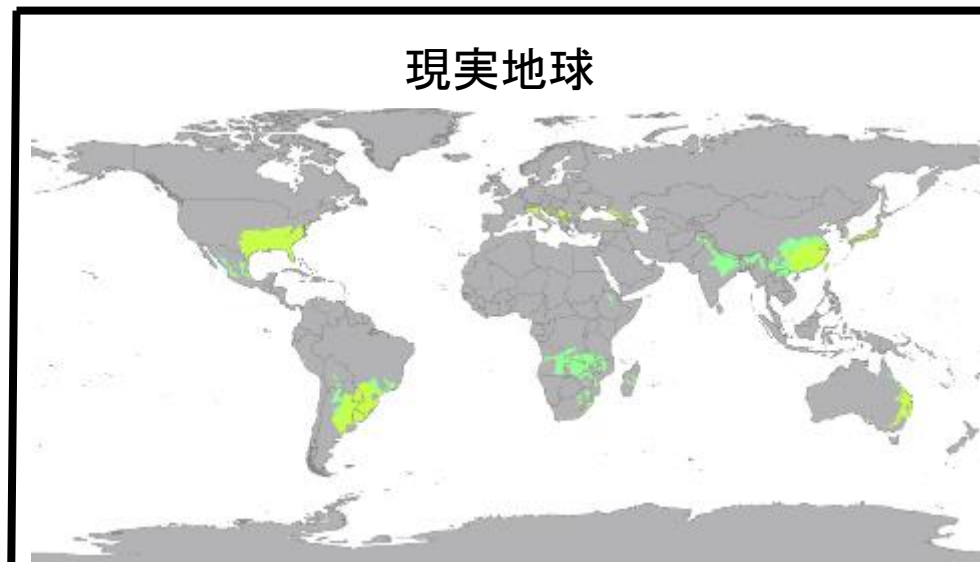
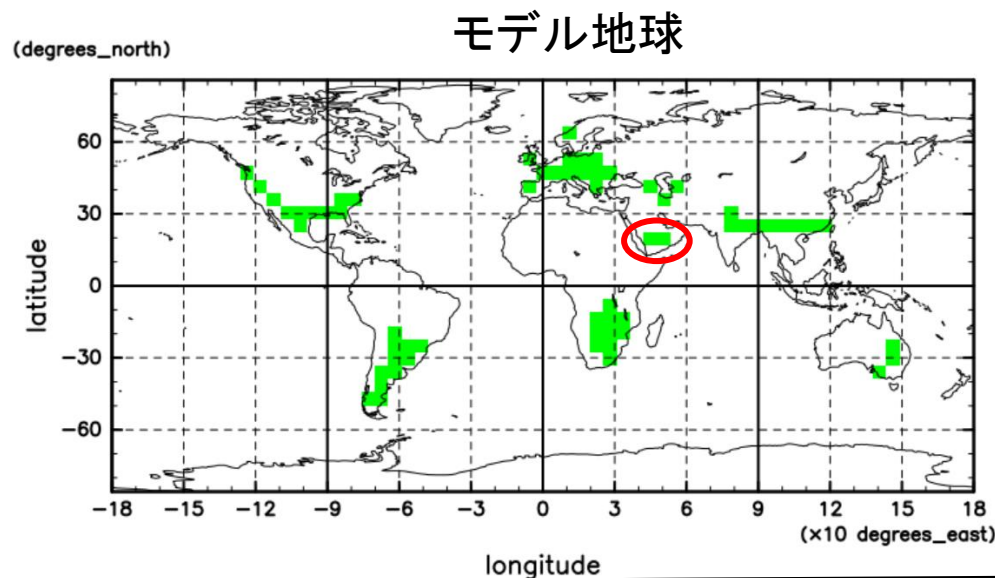


比較

C: 温帯

- ・ 概ね同じ領域に表現されている

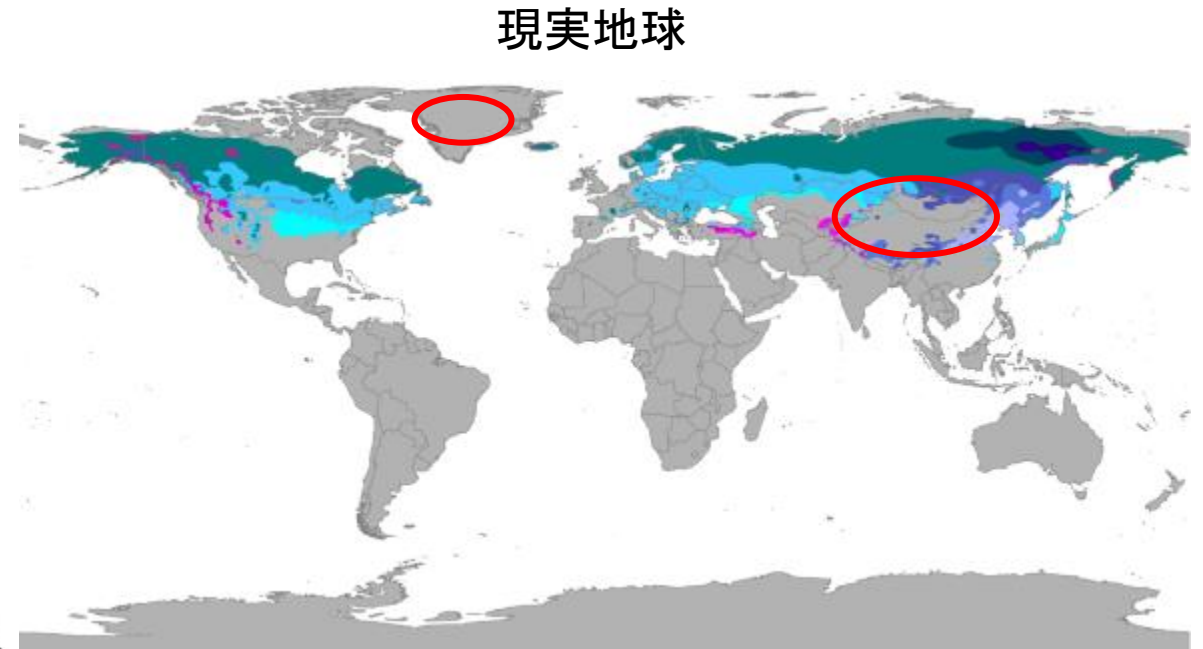
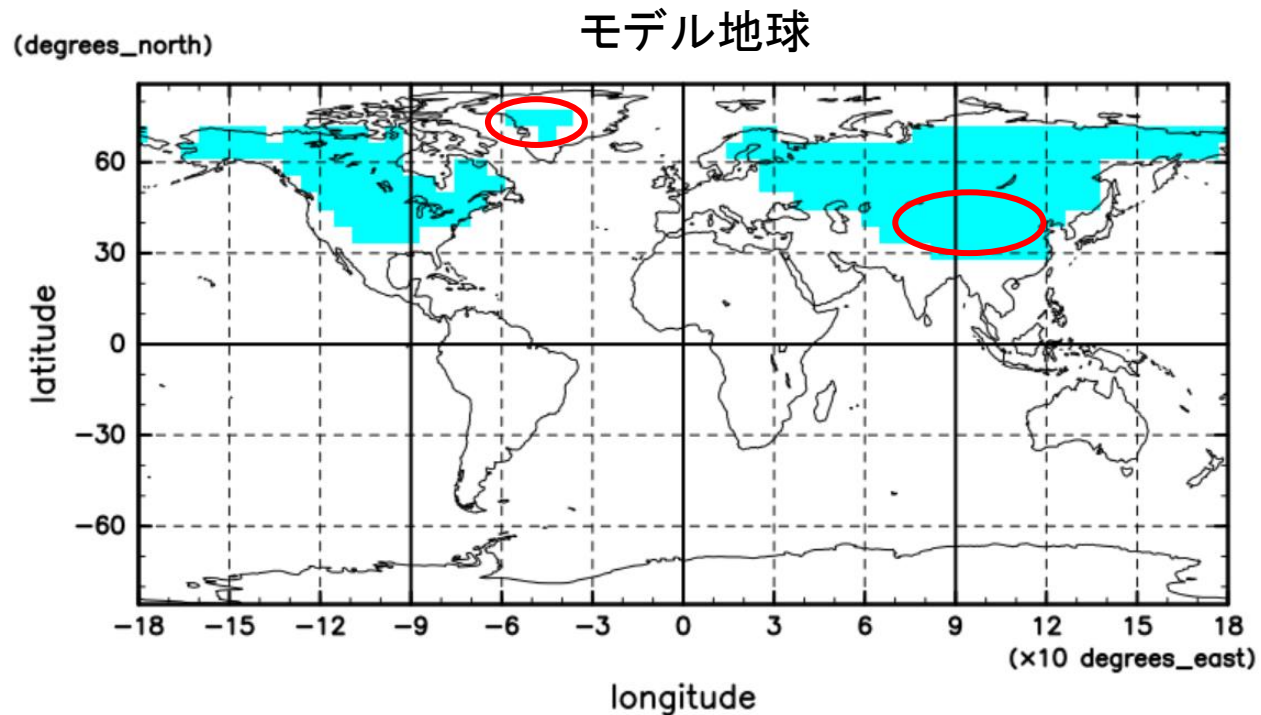
- ・ アラビア半島南部でのモデル地球の気候区分が現実地球とは異なる



比較

D: 冷帯

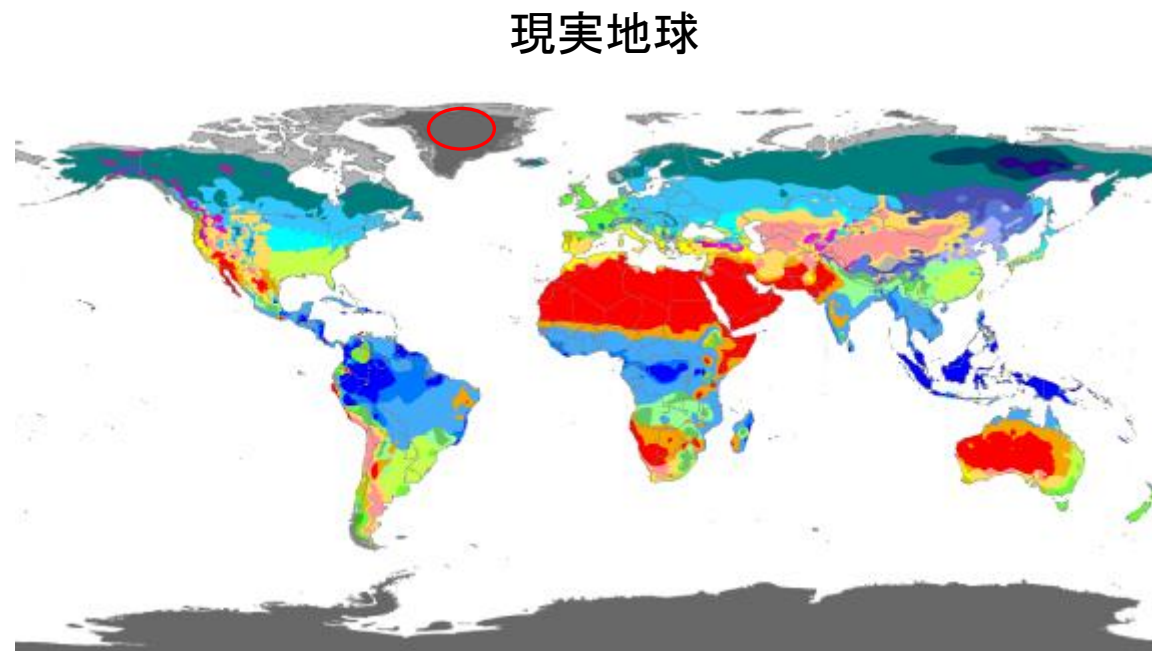
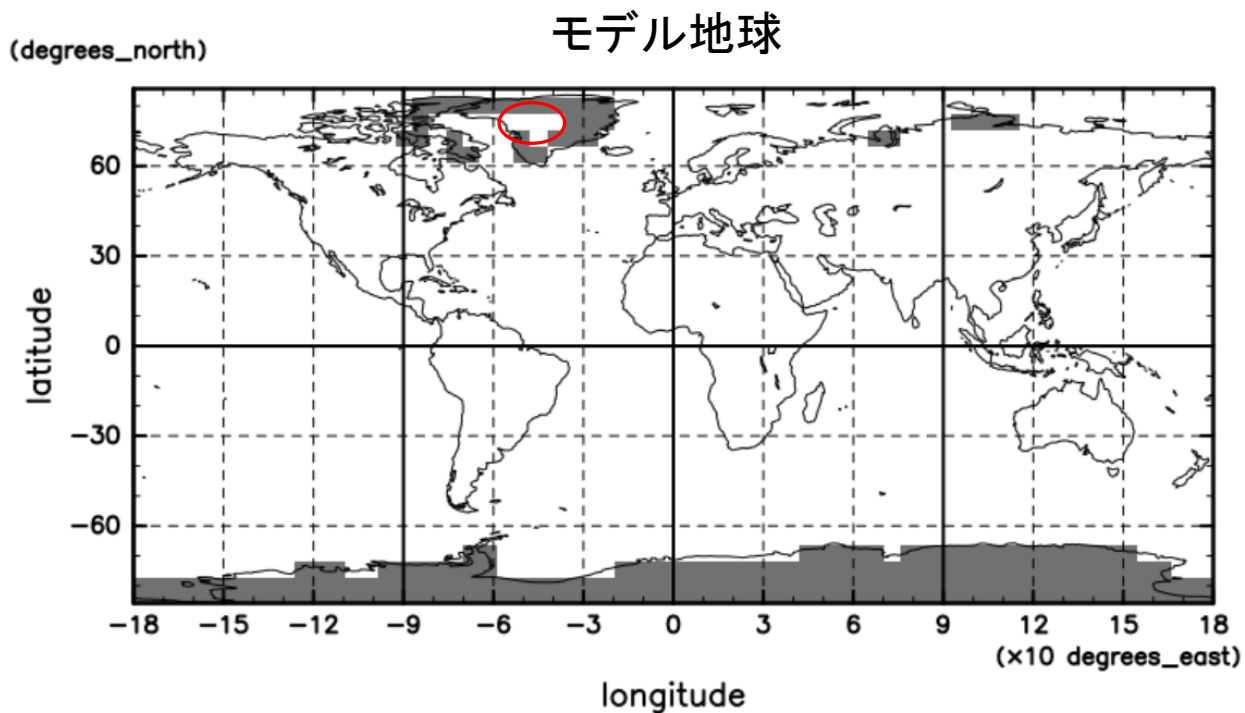
- ・ 北半球のみに表現されている
- ・ 現実地球では冷帯に区分されていない中国北部, グリーンランド中部が, モデル地球では冷帯に区分されている



比較

E: 寒帯 (右図では■色と■色の領域)

- ・ 概ね同じ領域に表現されている
- ・ モデル地球でグリーンランド中部が寒帯に区分されなかった



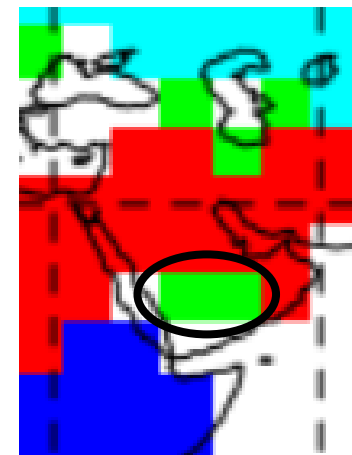
考察

(1) モデル地球においてアラビア半島南部が温帯となっている (現実地球は乾燥帯)

[原因]

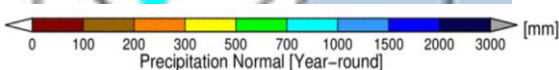
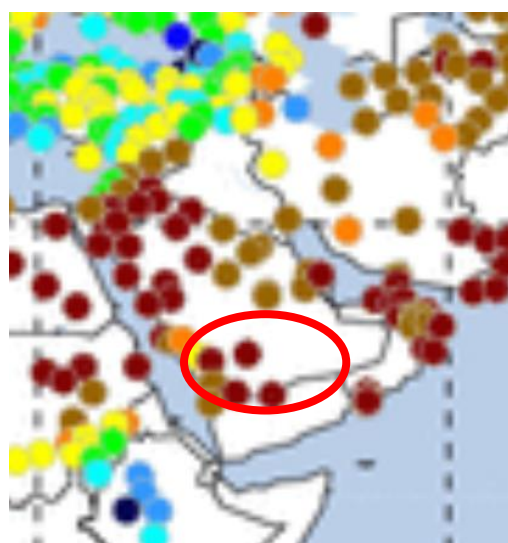
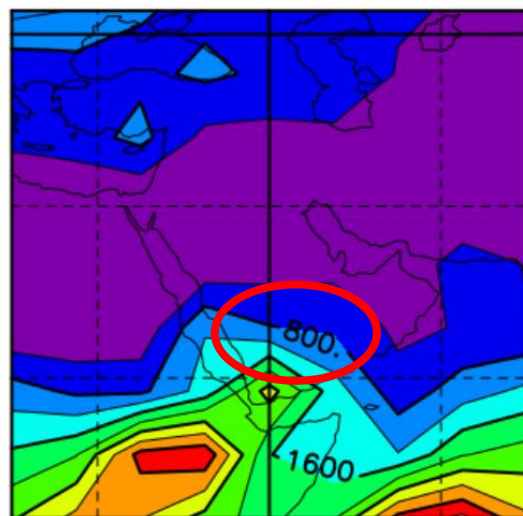
- ・モデル地球の年平均降水量 > 現実地球の年平均降水量 となっている
 - ・特に夏季の降水量がモデル地球で多いことが分かった
 - ・南からのモンスーンがアラビア半島南部まで流入していると考えられる

モデル気候区分



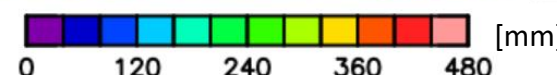
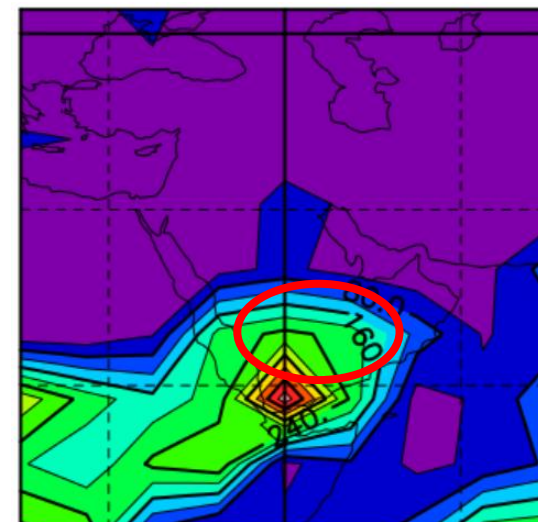
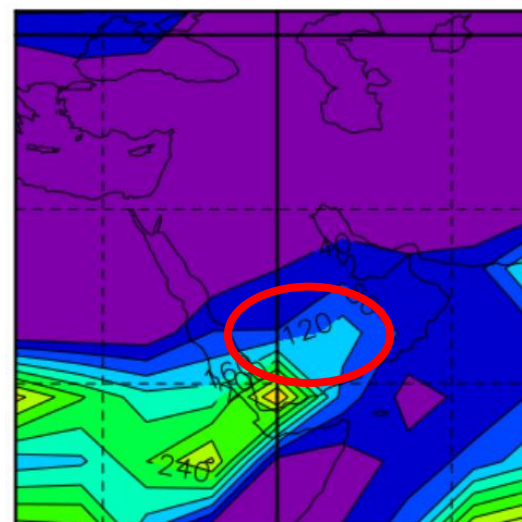
年平均降水量 (モデル)

年平均降水量 (現実地球)



8月の月平均降水量 (モデル)

9月の月平均降水量 (モデル)



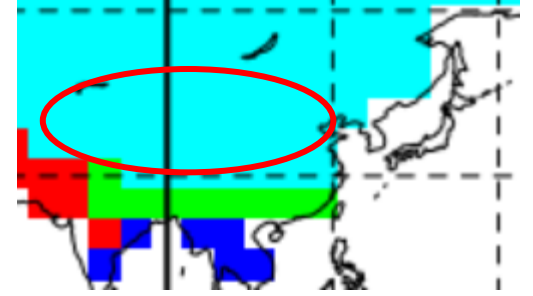
考察

(2) モデル地球において中国北部が冷帯となっている (現実地球は乾燥帯)

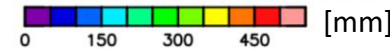
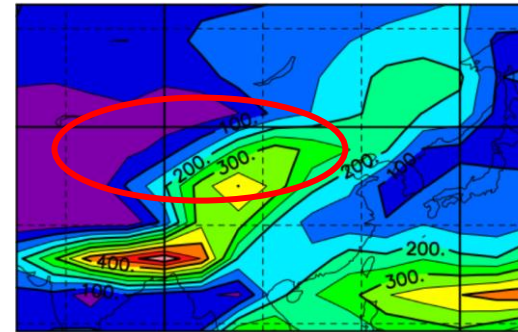
[原因]

- ・ モデル地球の年平均降水量 > 現実地球の年平均降水量 となっている
- ・ 特に夏季の降水量がモデル地球で多いことが分かった
 - ・ モデル地球では平滑化した地形を使用しており、夏季の南東モンスーンが山脈に遮られることなく、内陸まで流入していると考えられる

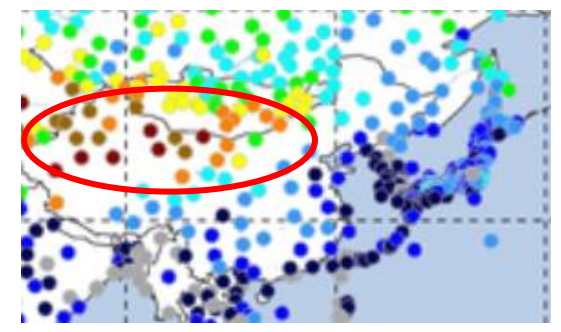
モデル気候区分



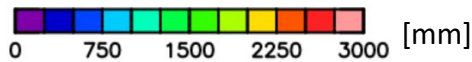
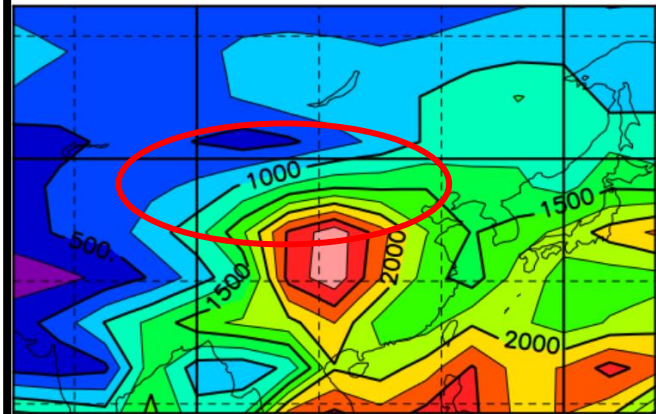
8月の月平均降水量 (モデル)



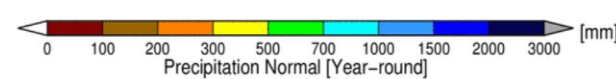
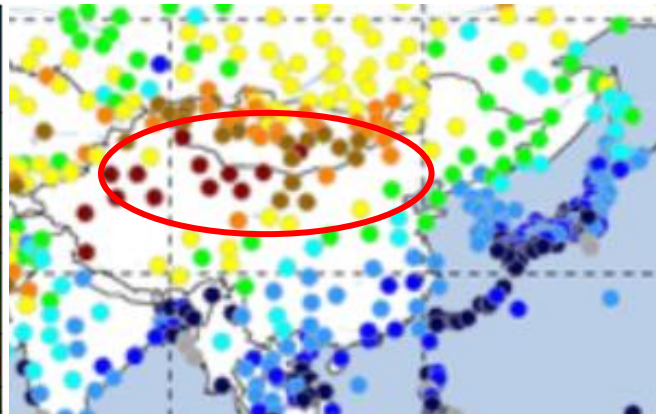
8月の月平均降水量 (現実地球)



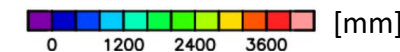
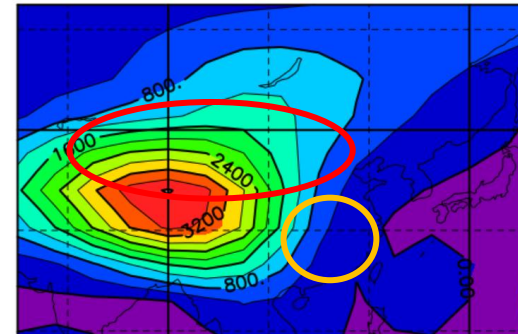
年平均降水量 (モデル)



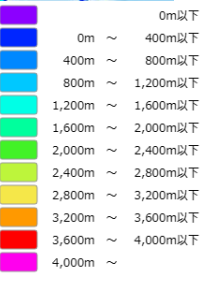
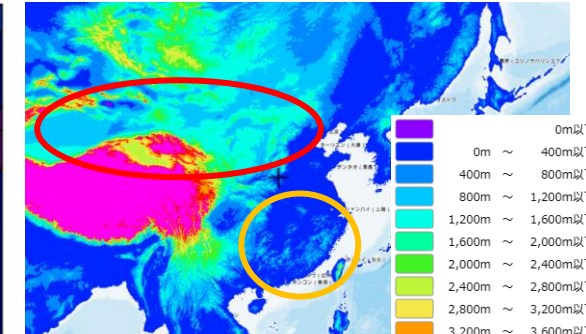
年平均降水量 (現実地球)



地形データ (モデル)



地形データ (現実地球)



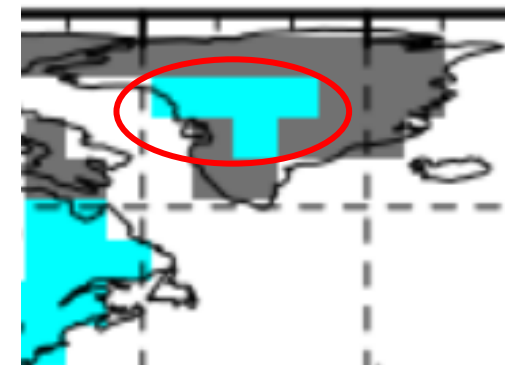
考察

(3) モデル地球においてグリーンランド中部が冷帯となっている (現実地球は寒帯)

[原因]

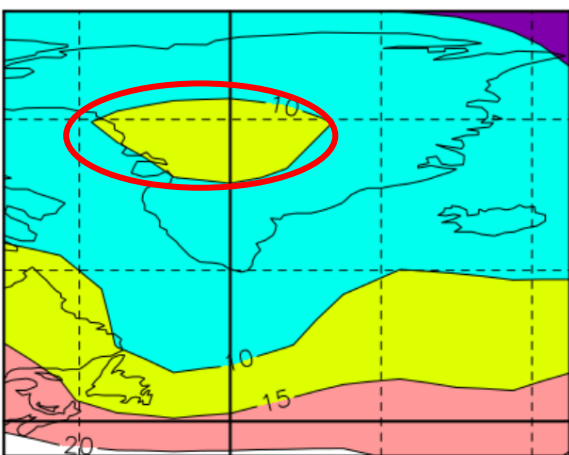
- ・モデル地球で最暖月平均気温が 10°C 以上になっている
- ・モデル地球のほうが現実地球より積雪面積, 氷河面積が小さい (= アルベドが小さい) と考えられる

モデル気候区分

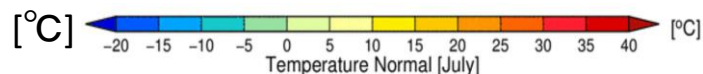
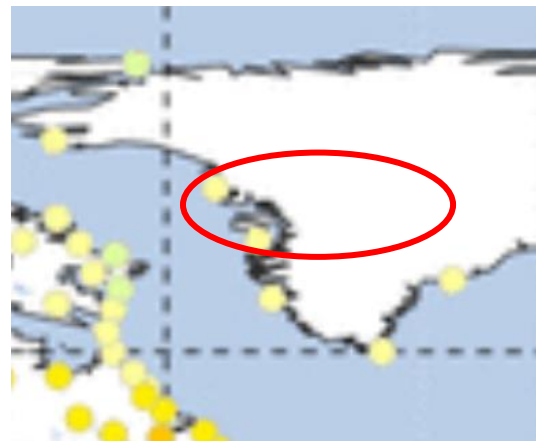


寒帯: $\overline{T_{\max}} < 10^{\circ}\text{C}$

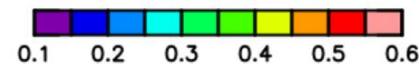
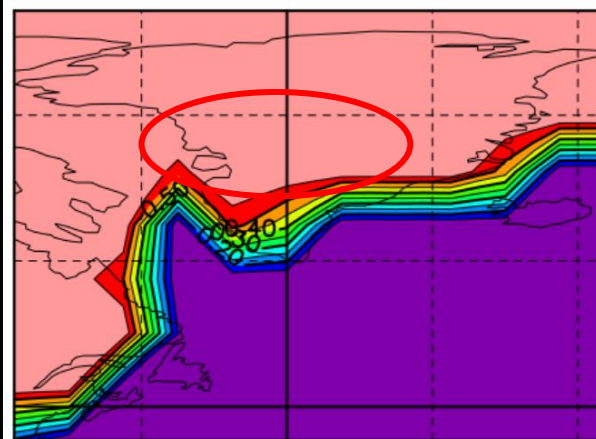
7月の月平均気温 (モデル)



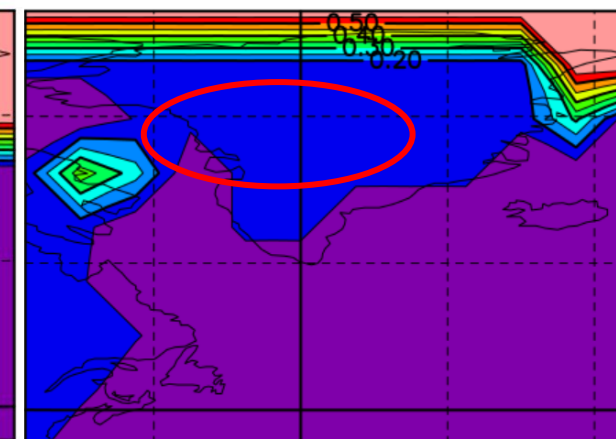
7月の月平均気温 (現実地球)



1月のアルベド (モデル)



7月のアルベド (モデル)



まとめ, 今後の課題

- ・ 地球流体電脳倶楽部有志が開発した惑星大気大循環モデル DCPAM5, ケッペンの気候区分を用いてモデル地球の地理的気候分布を表現した
- ・ 熱帯, 乾燥帯, 温帯, 冷帯, 寒帯の 5 区分に関して現実地球と類似した分布が表現できた
- ・ ただし, 現実地球では乾燥帯に区分されている地域が, モデル地球では冷帯に区分される等, 違いもある (中国北部, アラビア半島南部, グリーンランド中部)
 - ・ モンスーンや地形, アルベドの違いが原因であると考えられる
- ・ 水平解像度を高くして気候分布を調べる

参考文献

- 地球流体電脳倶楽部, 2009: DCPAM5 支配方程式系の導出に関する参考資料.

http://dennou-k.gfd-dennou.org/arch/dcpam/dcpam5/dcpam5_latest/doc/derivation/pub/derivation.pdf

- 気象庁, 世界の天候図表. <https://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/monitor/climfig/?tm=normal&el=tn>
- 国土地理院, 地理院地図/GSI Maps. https://www.gsi.go.jp/CHIRIKYOUIKU/world_landform.html
- Peel, M. C. and Finlayson, B. L. and McMahon, T. A., 2007: Updated world map of the Köppen–Geiger climate classification, *Hydrology Earth and System Sciences* **11**: 1633–1644.
- Thomas W.Wong Hearing et al., 2021: Quantitative comparison of geological data and model simulations constrains early Cambrian geography and climate