

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

藤原 大葵

神戸大学 理学部 惑星学科
流体地球物理学教育研究分野

2023/03/24

要旨

本論文では、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 を用いて計算したモデル地球の気候と現実地球の気候の比較、考察を行った。モデル地球と現実地球の気候の比較を行う際に、ケッペンの気候区分を用いた。この気候区分は気温と降水量の二つの変数から決定できるという特徴がある。二種類の解像度で実験を行い、現実地球と比較を行った結果、異なる気候区分に表現された領域も存在したが、概ね類似した分布が表現できた。

目次

第1章	はじめに	1
第2章	大気大循環モデルの概要	2
2.1	座標系	2
2.2	力学過程	2
2.3	物理過程	4
第3章	ケッペンの気候区分	6
3.1	概要	6
3.2	分類法	6
3.3	現実地球のケッペンの気候区分の分布	7
第4章	実験 I: T21L26 実験	9
4.1	実験設定	9
4.2	実験結果	11
4.3	比較	11
4.3.1	熱帯	11
4.3.2	乾燥帯	12

4.3.3	温帯	12
4.3.4	冷帯	13
4.3.5	寒帯	13
4.4	考察	14
4.4.1	中国北部	14
4.4.2	アラビア半島南部	16
4.4.3	グリーンランド中部	19
第5章	実験 II: T42L26 実験	21
5.1	実験設定	21
5.2	実験結果	23
5.3	比較	23
5.3.1	熱帯	23
5.3.2	乾燥帯	24
5.3.3	温帯	24
5.3.4	冷帯	25
5.3.5	寒帯	25
5.4	考察 I	25
5.4.1	中国北部	26
5.4.2	アラビア半島南部	31
5.4.3	グリーンランド中部	36

5.5 考察 II	38
5.5.1 アラスカ	38
第 6 章 結論	42
謝辞	43
参考文献	44

第1章 はじめに

現実地球はほぼ球形をしており、自転軸は約 23.4 度傾いて太陽の周りを公転している。したがって、低緯度側では一年を通して太陽から受け取るエネルギー量が多く、気温は高い。逆に、高緯度側では太陽から受け取るエネルギー量は少なく、気温は低い。また同じ緯度でも標高が高いほど気温は低い。この気温の違いが原因で赤道側から極側への熱の移動、循環が発生する。この循環は低緯度のハドレー循環、中緯度のフェレル循環、高緯度の極循環の三種類に分けることができ、それぞれ貿易風、偏西風、極偏東風を吹かせ、地球規模の空気の移動が生じる。また、海洋からの風は大陸からの風より湿っているため、海洋からの風の影響が及ぶ領域は大陸からの風の影響が及ぶ領域より降水量が多くなる。つまり、内陸になればなるほど海洋からの湿った風の影響が及ばなくなるため、降水量は少なくなる。また、海洋に近くても、風上側に大陸、風下側に海洋という地域では降水量は少なくなる。上で解説した温度、降水量、風、地形、また海流などが相互作用し、地球気候は決定される。

本研究では、惑星大気大循環モデル DCPAM5 を用いて計算したモデル地球の気候を、気温と降水量の二つの変数から決定できるケッペンの気候区分を用いて地理的に表現し、現実地球の気候と比較、また、考察を行う。

本論文の構成を以下に簡単に示す。第 2 章では、本研究で用いた DCPAM5 の概要を述べる。第 3 章では、ケッペンの気候区分について述べる。第 4 章では、T21L26 の解像度で、ケッペンの気候区分を用いて地理的に表現したモデル地球と現実地球の比較、また、考察を行う。第 5 章では、T42L26 の解像度で、ケッペンの気候区分を用いて地理的に表現したモデル地球と現実地球の比較、また、考察を行う。第 6 章では、本研究の結論を述べる。

第2章 大気大循環モデルの概要

本研究では, 地球流体電脳倶楽部有志によって開発された惑星大気大循環モデル DCPAM5 を用いた. このモデルは, 設定を変更することで, 地球, 火星, 金星などの様々な惑星の気候を計算することができる. 本研究では, 現在の地球と同じ重力加速度, 自転角速度, 惑星半径等のパラメータを設定することでモデル地球の気候を計算した. 本章では, 惑星大気大循環モデル DCPAM5 の具体的な構成を述べる. DCPAM5 の詳細に関しては, DCPAM5 のドキュメント^{*1}を参照されたい.

2.1 座標系

座標系は, 水平方向には緯度 φ , 経度 λ , また, 鉛直方向には $\sigma = p/p_s$ をとる. ここで, $p_s(\lambda, \varphi, z)$ は地表面気圧, $p(\lambda, \varphi, z)$ は圧力, z は高度である.

2.2 力学過程

力学過程とは, モデル格子で表現される運動のことである. 大気の運動を記述する方程式系には, 鉛直静水圧近似, 薄い大気の近似を行ったプリミティブ方程式系を用いる. プリミティブ方程式系は静水圧平衡の式, 連続の式, 運動方程式, 熱力学の式からなる. 各変数とその変数に対応する物理量を表 2.1 のように定義すると, プリミティブ方程式系は以下のように書くことができる.

^{*1}地球流体電脳倶楽部, 「DCPAM5 ドキュメント」, 大気大循環モデル DCPAM5,
URL: https://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/dcpam5/dcpam5_latest/doc/

静水圧平衡の式

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} = -\frac{RT}{\sigma} \quad (2.1)$$

連続の式

$$\frac{d\pi}{dt} + \frac{1}{a \cos \varphi} \left(\frac{\partial u}{\partial \lambda} \right)_{\sigma} + \frac{1}{a \cos \varphi} \left(\frac{\partial}{\partial \varphi} (v \cos \varphi) \right)_{\sigma} + \frac{\partial \dot{\sigma}}{\partial \sigma} = 0 \quad (2.2)$$

運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} - fv - \frac{uv \tan \varphi}{a} &= -\frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda} - \frac{RT}{a \cos \varphi} \frac{\partial \pi}{\partial \lambda} + F_{\lambda} \\ \frac{dv}{dt} + fv + \frac{u^2 \tan \varphi}{a} &= -\frac{1}{a} \frac{\partial \Phi}{\partial \varphi} - \frac{RT}{a} \frac{\partial \pi}{\partial \varphi} + F_{\varphi} \end{aligned} \quad (2.3)$$

熱力学の式

$$\frac{dT}{dt} = \frac{RT}{c_p} \left\{ \frac{\partial \pi}{\partial t} + \mathbf{v}_H \cdot \nabla_{\sigma} \pi + \frac{\dot{\sigma}}{\sigma} \right\} + \frac{Q^*}{c_p} \quad (2.4)$$

ただし,

$$\pi \equiv \ln p_s \quad (2.5)$$

$$\mathbf{v}_H \cdot \nabla_{\sigma} = \frac{u}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial}{\partial \varphi} \quad (2.6)$$

$$\dot{\sigma} \equiv \frac{g\sigma}{RT} \left\{ \left(\frac{\partial z}{\partial t} \right)_{\sigma} + \frac{u}{a \cos \varphi} \left(\frac{\partial z}{\partial \lambda} \right)_{\sigma} + \frac{v}{a} \left(\frac{\partial z}{\partial \varphi} \right)_{\sigma} - w \right\} \quad (2.7)$$

である.

また, 鉛直方向の境界条件として,

$$\dot{\sigma} = 0 \quad \text{at} \quad \sigma = 0, 1 \quad (2.8)$$

を与える.

表 2.1: 各変数と対応する物理量

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 座標系での鉛直風速度
$\dot{\sigma}$	σ 座標系での鉛直風速度
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

2.3 物理過程

物理過程はモデル格子よりも小さいスケール運動や流体運動以外の効果を表すものであり、以下でその概要を述べる。

放射過程は、短波は Toon et al. (1989) の方法を用いて、 δ -Eddington 近似した放射伝達方程式を解いている。H₂O の透過率、レイリー散乱係数、O₃ の吸収係数は Chou and Lee (1996) の値を用いて計算を行っている。雲の消散係数、単一散乱アルベド、非対称因子は Chou et al. (1998) の値を用いている。長波は散乱を無視した放射伝達方程式により計算しており、H₂O、CH₄、N₂O の透過率は Chou et al. (2001) の方法に基づいて計算を行い、O₃ の透過率は、Chou and Kouvaris (1991) の方法に基づいて計算を行っている。また、雲の消散係数、単一散乱アルベド、非対称因子は Chou et al. (2001) の値を使用している。

乱流混合過程は、Mellor and Yamada (1982) Level 2.5 の方法に基づいて、乱流運動エネルギーから計算される鉛直拡散係数を用いる。

凝結過程には, 積雲対流は, 氷晶を含むように拡張した Relaxed Arakawa-Schubert スキーム (Moorthi and Suarez, 1992) を用い, 非対流性凝結 (大規模凝結) は Le Treut and Li (1991) を氷晶を含むように拡張した方法を用いている.

陸面温度は, 熱電導方程式を数値的に解くことにより計算を行っている. 土壌水分はバケツモデル (Manabe, 1969) によって計算されている. また, 雪については, 海氷上に雪は積もらない, 融けた雪は土壌水分に加算する, 雪のアルベドは 0.6 という扱い方をする.

第3章 ケッペンの気候区分

3.1 概要

気候を評価する指標として、本研究ではケッペンの気候区分を用いる。この気候区分は Köppen (1936) で発表されたものである。植生に基づいて気候区分が定義されており、定義された気候区分は気温と降水量の二つの変数から決定できるという特徴がある。また、気温と降水量に関しては、各月毎の平均値、年平均値のデータを用いる。

ケッペンの気候区分は 熱帯、乾燥帯、温帯、冷帯、寒帯 の五種類の気候区分が定義されている。また、それぞれの気候区分は更に細分化することができるが、本研究では細分化した気候区分まで考えないため、その解説は割愛する。五種類の気候区分の分類法については次節で解説する。

3.2 分類法

$\overline{T_{\max}}$ を最暖月平均気温 [$^{\circ}\text{C}$]、 $\overline{T_{\min}}$ を最寒月平均気温 [$^{\circ}\text{C}$]、 R を年平均降水量 [mm]、 r を乾燥限界 [mm] とする。ここで、乾燥限界 r [mm] は年平均気温を t [$^{\circ}\text{C}$]、最多雨月降水量を $\overline{P_{\max}}$ [mm]、最少雨月降水量を $\overline{P_{\min}}$ [mm] とすると、以下のよう

に定義できる。

- (i) 降水量最多月が夏、かつ、 $10 \times \overline{P_{\min}} < \overline{P_{\max}}$ の場合、 $r = 20t$
- (ii) 降水量最多月が冬、かつ、 $3 \times \overline{P_{\min}} < \overline{P_{\max}}$ の場合、 $r = 20(t + 7)$
- (iii) (i), (ii) 以外の場合、 $r = 20(t + 14)$

次に, 以下の条件を考える.

$$(i) \overline{T_{\max}} < 10 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$(ii) R < r$$

(i) にあてはまる場合, 寒帯である. (i) にあてはまらず, (ii) にあてはまる場合, 乾燥帯である. (i), (ii) のどちらにもあてはまらない場合, 以下の方法で分類する.

$$(iii) 18 \text{ [}^\circ\text{C]} \leq \overline{T_{\min}}$$

$$(iv) -3 \text{ [}^\circ\text{C]} \leq \overline{T_{\min}} < 18 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$(v) \overline{T_{\min}} < -3 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

(iii) にあてはまる場合, 熱帯である. (iv) にあてはまる場合, 温帯である. (v) にあてはまる場合, 冷帯である.

3.3 現実地球のケッペンの気候区分の分布

ケッペンの気候区分が現実地球で地理的にどのような分布をしているのかを解説する. 図 3.1 は現実地球のケッペンの気候区分の分布図である. 赤道付近の南アメリカ大陸北部, アフリカ大陸中部, 東南アジア周辺は主に熱帯に区分されている. また, 大陸の内陸にあたる中国北部周辺, ハドレー循環の下降域にあたる緯度 30 度付近のアフリカ大陸北部, アフリカ大陸南部, オーストラリア大陸では広く乾燥帯に区分されている. そして日本を含む東アジア, ヨーロッパ, 南アメリカ大陸中部といった中緯度域は広く温帯に区分されている. 次に, 北緯 60 度付近のロシア, カナダ, アラスカといった高緯度域は広く冷帯に区分されている. 最後に, グリーンランド, 南極大陸といった極域は寒帯に区分されている. これらをまとめると, 基本的には, 赤道から極にかけて熱帯, 乾燥帯, 温帯, 冷帯, 寒帯の順で分布している.

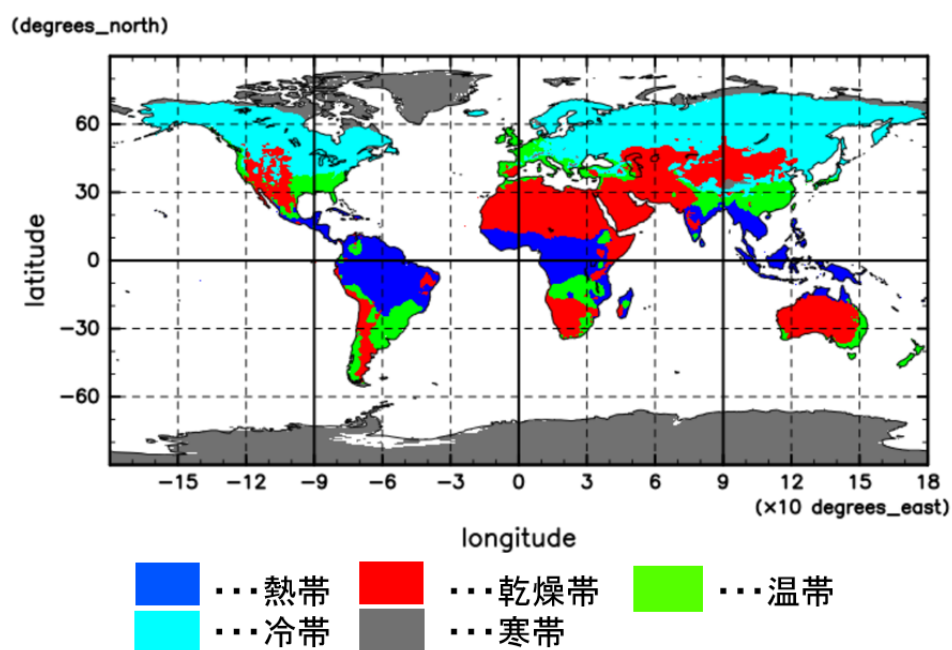


図 3.1: 現実地球のケッペンの気候区分の分布

第4章 実験 I: T21L26 実験

4.1 実験設定

本章では, T21L26 の解像度で実験を行う. ここで, TXX という表記について説明する. TXX の T は ‘Triangular truncation’ の略で, XX は球面調和関数の最大全波数である. 本実験の T21L26 解像度は, 緯度方向, 経度方向の格子点間隔が約 5.63 度, 鉛直方向の層数が 26 層であることに対応する. 地形データは ETOPO1^{*1} を実験の解像度にあわせて平滑化したものを用いる (図 4.1). 図 4.1 を見ると, 現実地球におけるヒマラヤ山脈, ロッキー山脈, アンデス山脈周辺等が概ね表現されていることが分かる. オゾン分布は CMIP5^{*2} 設定の気候値における東西平均を用いる. 海表面温度分布は AMIP II^{*3} 境界値から気候値を生成して与える. 陸面アルベド分布は Matthews (1983, 1984) での分布を使用する. 海表面アルベド分布は AMIP II 境界値の海水密度分布から気候値を生成して与える. 積分間隔は 20 分, 積分時間は 20 年間であるが, 今回は 図 4.2 の赤枠で囲った全球平均温度の年単位の変化が小さく, 準定常状態に入った 5 年目以降の 16 年分のデータを用いる. 雲水の消滅時定数は 1980 秒, 雲氷の消滅時定数は 9000 秒とする. 惑星パラメータは現在の地球の値とほぼ同じになるように設定する (表 4.1). 海陸分布は 図 4.3 を用いる. また, 初期条件として 280 K の等温静止乾燥大気を与える.

表 4.1: 惑星パラメータ

惑星パラメータ	値
惑星半径	6371 km
重力加速度	9.8 m/s ²
自転角速度	7.29×10^{-5} rad/s
自転傾斜角	23.44 度

^{*1} 「ETOP01」は「Earth TOPOgraphy」の略である. ETOPO1 の詳細は Amante and Eakins (2009) を参照されたい.

^{*2} 「CMIP5」は「Climate Model Intercomparison Project Phase 5」の略である. CMIP5 の詳細は Taylor et al. (2012) を参照されたい.

^{*3} 「AMIP II」は「Atmosphere Model Intercomparison Project II」の略である. 海表面温度と海水密度の値は Taylor et al. (2000) より引用している.

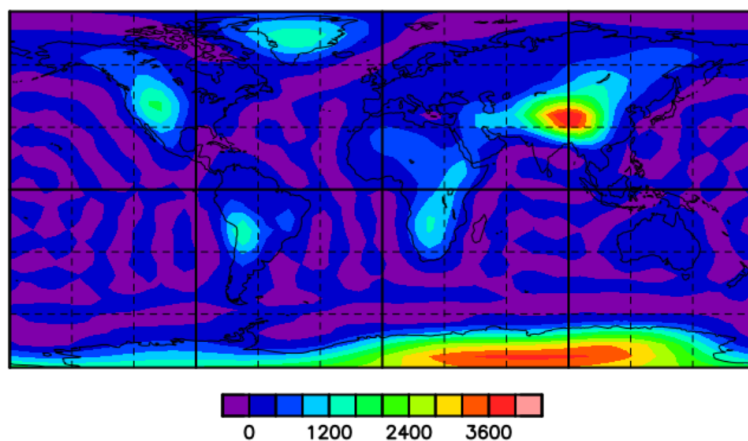


図 4.1: 使用した地形データ

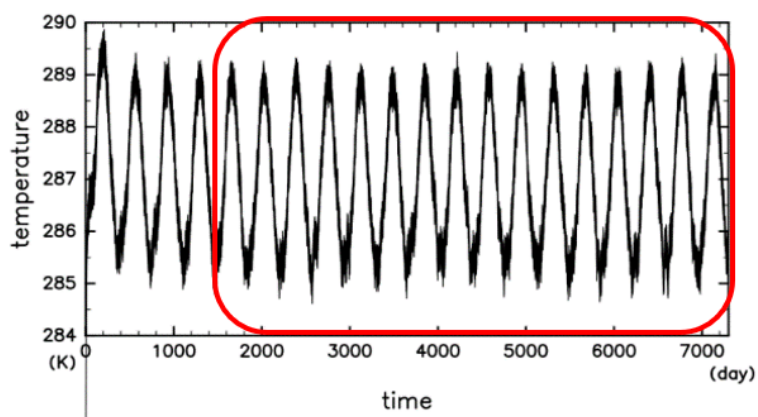


図 4.2: 全球平均温度の時間変化. 赤枠で囲った5年目から20年目のデータを用いて解析を行う.

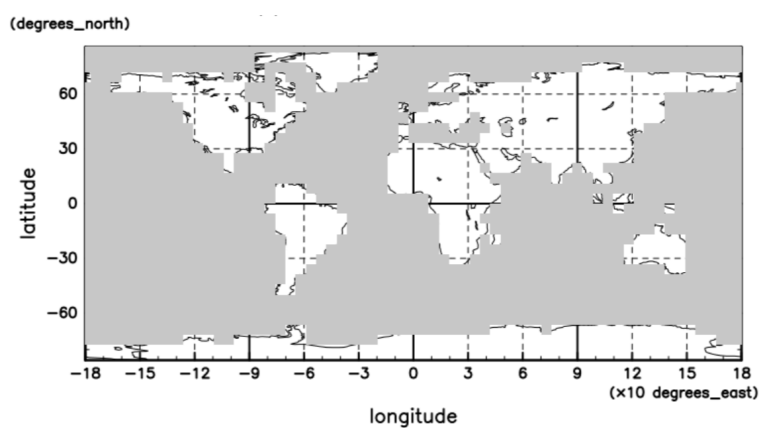


図 4.3: 使用した海陸分布. 白色の領域は陸地, 灰色の領域は海洋として扱う.

4.2 実験結果

ここでは、前節の実験設定のもと、計算を行ったモデル地球と、現実地球の気候を3章で述べたケッペンの気候区分を用いて表現した。図4.4(a)はDCPAM5で計算した気候値をもとに表現したモデル地球のケッペンの気候区分の分布、図4.4(b)はPeel et al. (2007)で発表された現実地球のケッペンの気候区分である。次節で図4.4(a), (b)における各気候区分の分布の比較を行う。

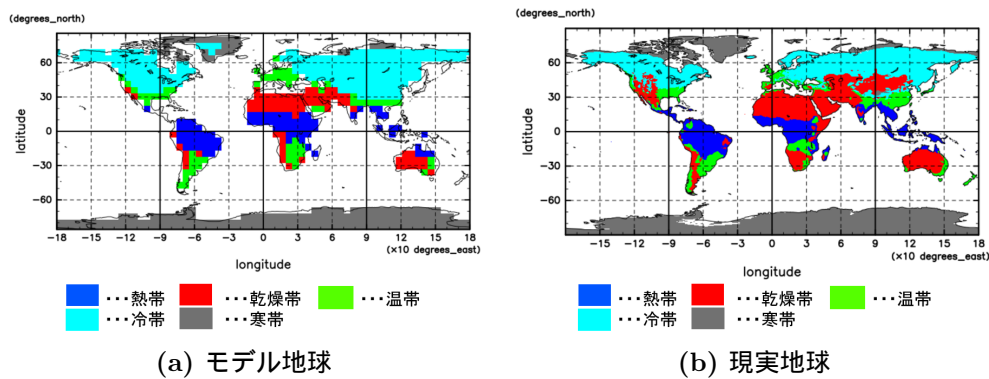


図 4.4: モデル地球と現実地球のケッペンの気候区分の分布

4.3 比較

4.3.1 熱帯

図 4.5 はモデル地球と現実地球の熱帯の分布を表す。二つの図を比較すると概ね同じ領域に表現されていることがわかる。

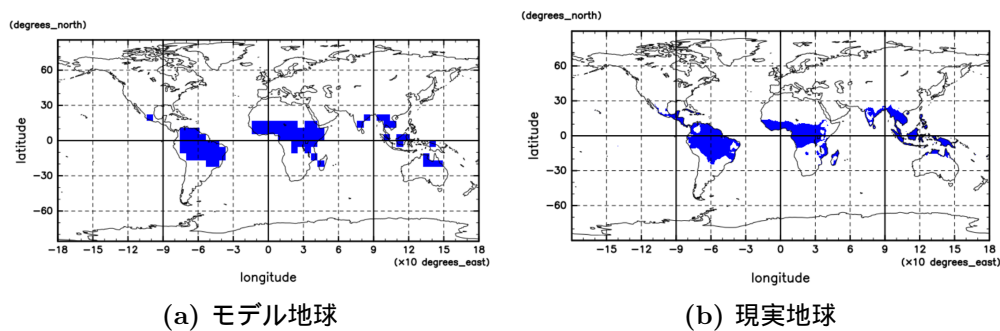


図 4.5: 熱帯分布 (図中の青色の領域)

4.3.2 乾燥帯

図 4.6 はモデル地球と現実地球の乾燥帯の分布を表す。中国北部周辺に注目すると、モデル地球では乾燥帯に区分されていない（冷帯, 図 4.4(a) 参照) のに対し、現実地球では乾燥帯に区分されている。オーストラリア, アフリカ北部, アフリカ南部, 南米西部, 北米西部に関しては現実地球と概ね同じ領域に表現されている。

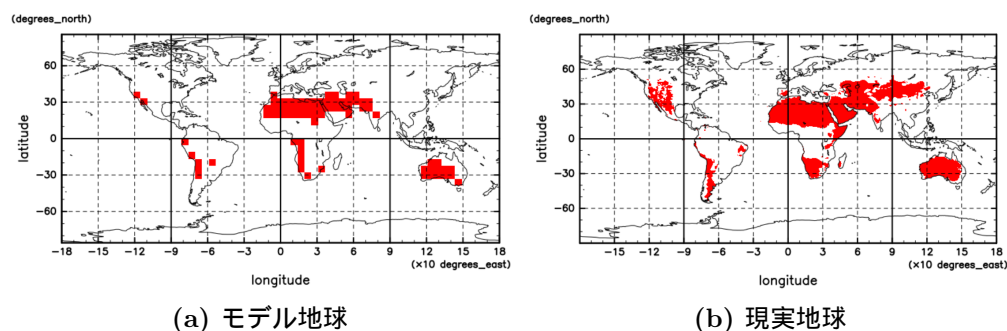


図 4.6: 乾燥帯分布 (図中の赤色の領域)

4.3.3 温帯

図 4.7 はモデル地球と現実地球の温帯の分布を表す。アラビア半島南部に注目すると、モデル地球では温帯に区分されているのに対し、現実地球では温帯に区分されていない（乾燥帯, 図 4.4(b) 参照)。北米南部, 南米南部, ヨーロッパ, 中国南部, オーストラリア東部, アフリカ南部に関しては現実地球と概ね同じ領域に表現されている。

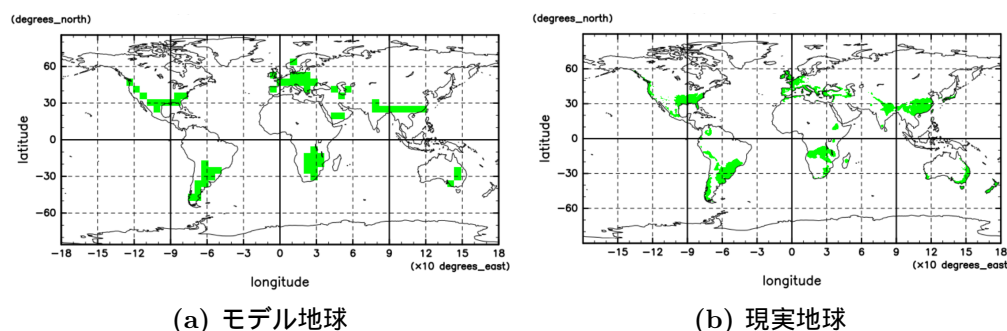


図 4.7: 温帯分布 (図中の緑色の領域)

4.3.4 冷帯

図 4.8 はモデル地球と現実地球の冷帯の分布を表す。前々項で述べたが、中国北部に注目すると、モデル地球では冷帯に区分されているのに対し、現実地球では冷帯に区分されていない(乾燥帯, 図 4.4(b) 参照)。また、グリーンランド中部に注目すると、モデル地球では冷帯に区分されているのに対し、現実地球では冷帯に区分されていない(寒帯, 図 4.4(b) 参照)。北米北部, ロシアに関しては概ね同じ領域に表現されている。

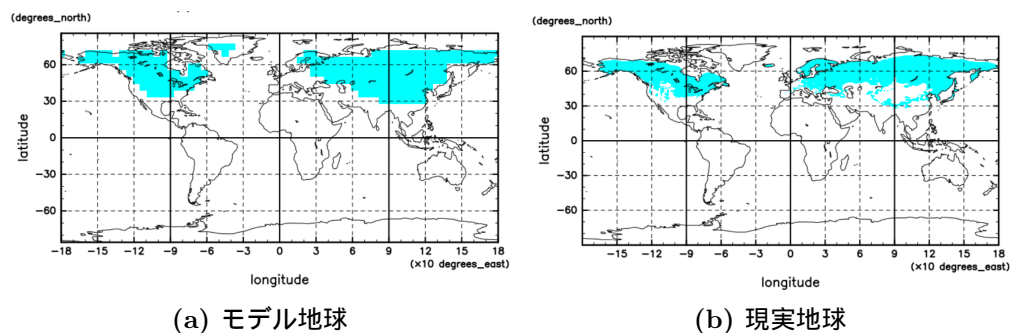


図 4.8: 冷帯分布 (図中の水色の領域)

4.3.5 寒帯

図 4.9 はモデル地球と現実地球の寒帯の分布を表す。前項で述べたが、グリーンランド中部に注目すると、モデル地球では寒帯に区分されていない(冷帯, 図 4.4(a) 参照)のに対し、現実地球では寒帯に区分されている。南極大陸は概ね同じ領域に表現されている。

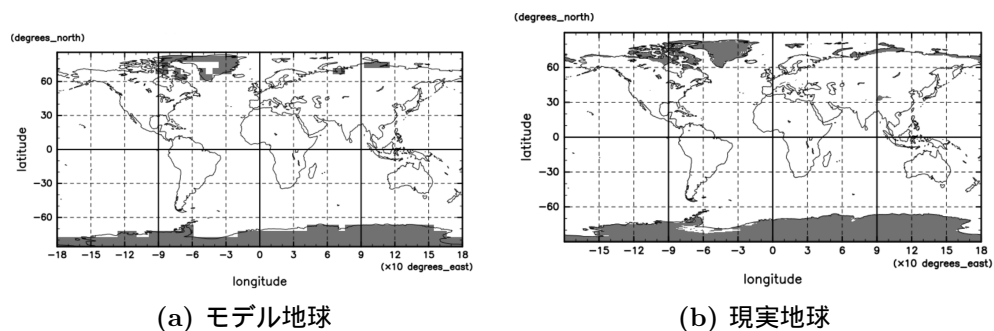


図 4.9: 寒帯分布 (図中の灰色の領域)

4.4 考察

前節において、モデル地球と現実地球で異なる気候区分に表現された領域について、その理由を考察する。

4.4.1 中国北部

中国北部はモデル地球では冷帯に区分されているが、現実地球では乾燥帯に区分されている領域である。3章で述べた気候区分の定義から、冷帯と乾燥帯の区分の違いは降水量の違いに起因しており、実際、図 4.10 からモデル地球の年平均降水量が現実地球の年平均降水量を大きく上回っていることが分かった。また、各月ごとの降水量を調べると、図 4.11 で示すように、特に 8 月の月平均降水量が大きく異なることが分かった。図 4.12 を見ると、モデル地球では平滑化した地形を用いており、橙色で囲った領域の 1000 m 前後の山脈が表現されていない、さらに赤色で囲った領域の南側のヒマラヤ周辺の標高が現実地球より低く表現されている。基本的に、海洋からの風は大陸からの風より湿っているため、海洋からの風の影響が及ぶ領域は大陸からの風の影響が及ぶ領域より降水量が多くなる。このことを踏まえると、図 4.13 が示すように、モデル地球では現実地球と異なり、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くるため、現実地球より降水量が多くなったと考えられる。

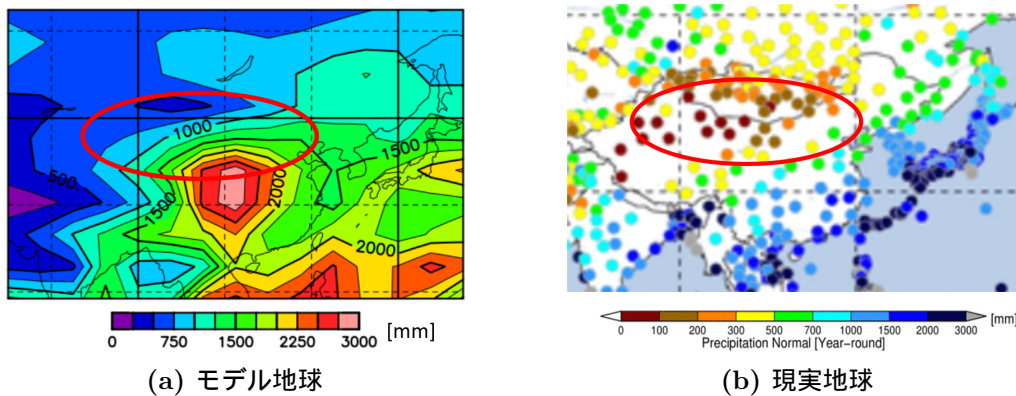


図 4.10: 中国周辺の年平均降水量分布. 赤色で囲った領域がモデル地球と現実地球で気候区分が異なっている. (b) は 気象庁, 世界の天候図表 (<https://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/monitor/climfig/?tm=normal&el=tn>) を用いて作成し、一部加工している.

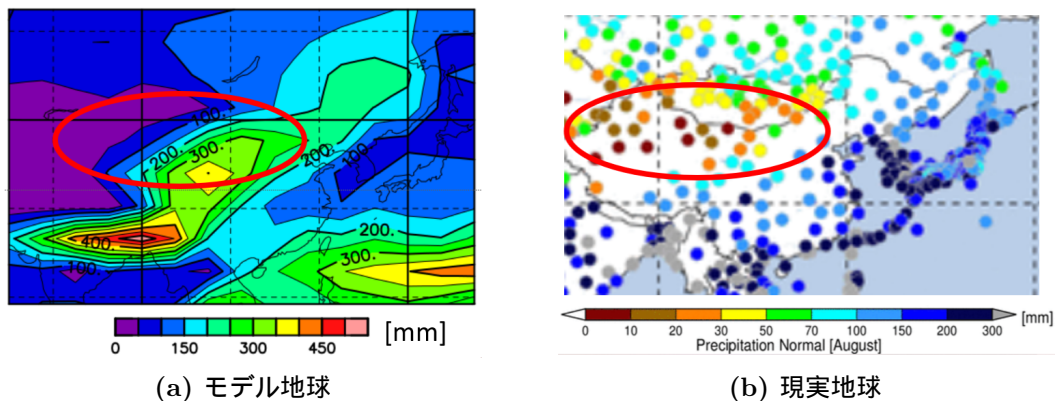


図 4.11: 8月の中国北部周辺の月平均降水量分布. 赤色で囲った領域がモデル地球と現実地球で気候区分が異なっている. (b) は 気象庁, 世界の天候図表 (<https://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/monitor/climfig/?tm=normal&el=tn>) を用いて作成し, 一部加工している.

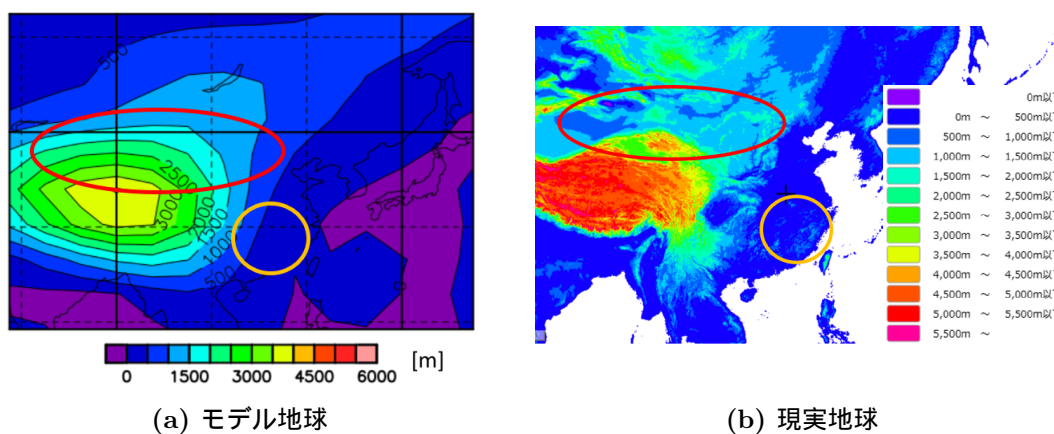


図 4.12: 中国周辺の地形データ. 赤色で囲った領域がモデル地球と現実地球で気候区分が異なっている. (b) は 国土地理院, 地理院地図 (<https://maps.gsi.go.jp>) を用いて作成し, 一部加工している.

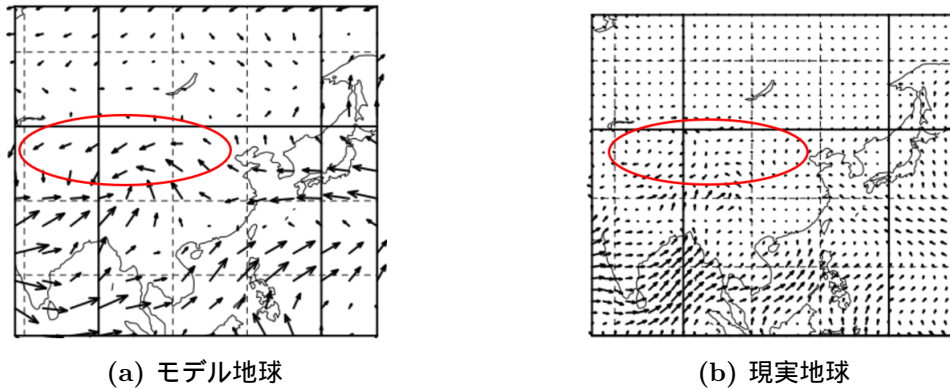


図 4.13: 8月の中国周辺の月平均風分布. 赤色で囲った領域がモデル地球と現実地球で気候区分が異なっている. (a) は $\sigma = 1$ の高度の風, (b) は 1000 hPa 高度の風を表している. (b) は NCEP の再解析データを用いて描画した.

4.4.2 アラビア半島南部

アラビア半島南部はモデル地球では温帯に区分されているが, 現実地球では乾燥帯に区分されている領域である. 3章で述べた気候区分の定義から, 温帯と乾燥帯の区分の違いは降水量の違いに起因しており, 実際, 図 4.14 からモデル地球の年平均降水量が現実地球の年平均降水量を大きく上回っていることが分かった. また, 各月ごとの降水量を調べると, 図 4.15 で示すように特に 9月の月平均降水量が大きく異なることが分かった. 図 4.16 を見ると, モデル地球では平滑化した地形を用いており, 橙色で囲ったエチオピア, ソマリア周辺の山脈の標高が現実地球より低く表現されている. また, アラビア半島南部の南西の山脈もモデル地球は現実地球に比べ, 標高が低く表現されている. 基本的に, 海洋からの風は大陸からの風より湿っているため, 海洋からの風の影響が及ぶ領域は大陸からの風の影響が及ぶ領域より降水量が多くなる. このことを踏まえ, 図 4.17 を見ると, モデル地球では, 夏季の南西モンスーンがアラビア半島南部からみて風上側にあたるエチオピア, ソマリア周辺の山脈, また, アラビア半島南部の南西の山脈に遮られることなく流入してくるため, 現実地球より降水量が多くなったと考えられる.

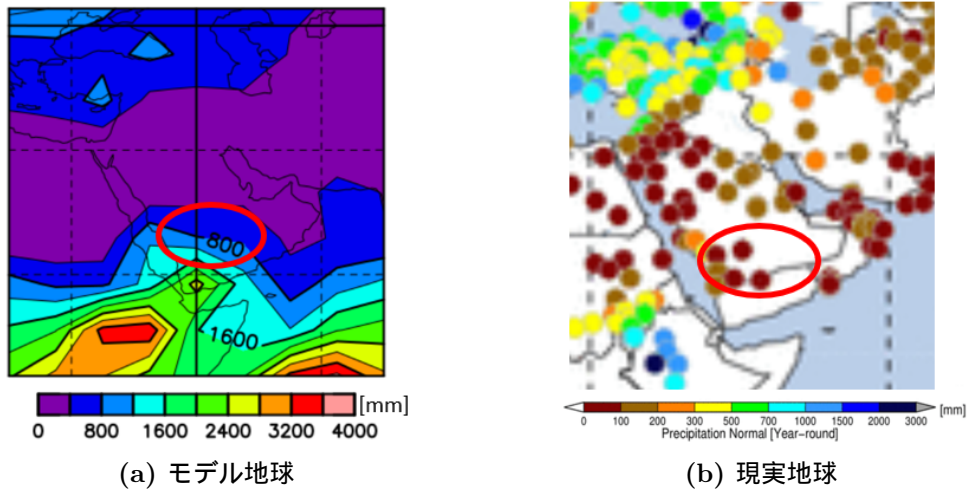


図 4.14: アラビア半島南部周辺の年平均降水量分布. 赤色で囲った領域がモデル地球と現実地球で気候区分が異なっている. (b) は 気象庁, 世界の天候図表 (<https://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/monitor/climfig/?tm=normal&el=tn>) を用いて作成し, 一部加工している.

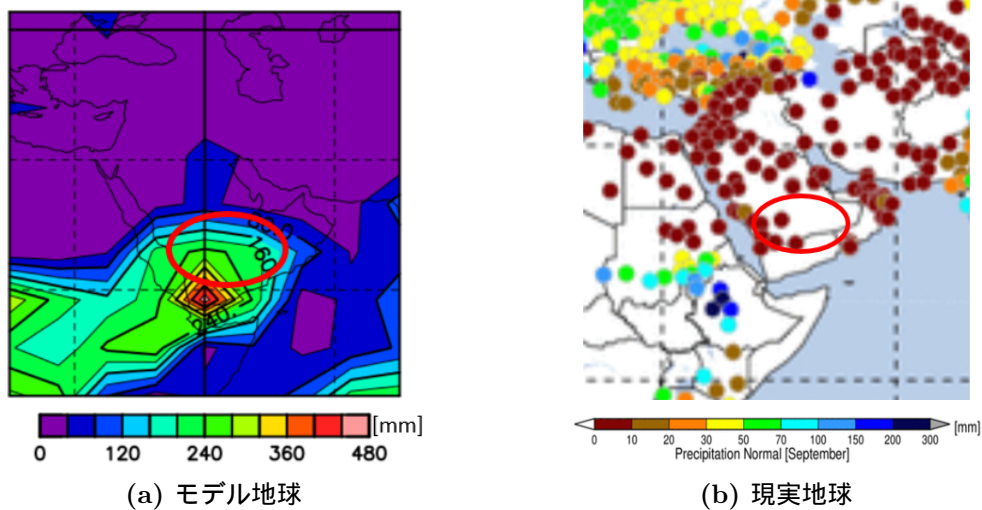


図 4.15: 9月のアラビア半島南部周辺の月平均降水量分布. 赤色で囲った領域がモデル地球と現実地球で気候区分が異なっている. (b) は 気象庁, 世界の天候図表 (<https://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/monitor/climfig/?tm=normal&el=tn>) を用いて作成し, 一部加工している.

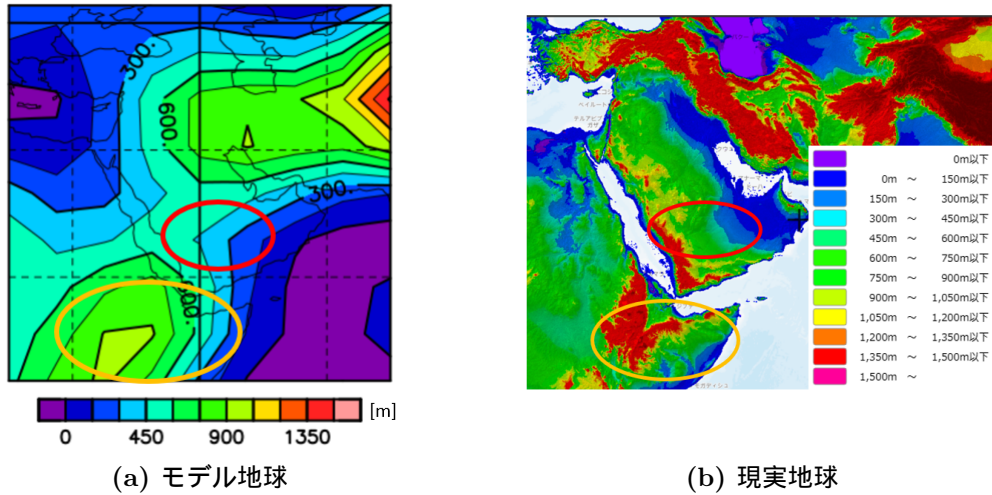


図 4.16: アラビア半島南部周辺の地形データ. 赤色で囲った領域がモデル地球と現実地球で気候区分が異なっている. (b) は 国土地理院, 地理院地図 (<https://maps.gsi.go.jp>) を用いて作成し, 一部加工している.

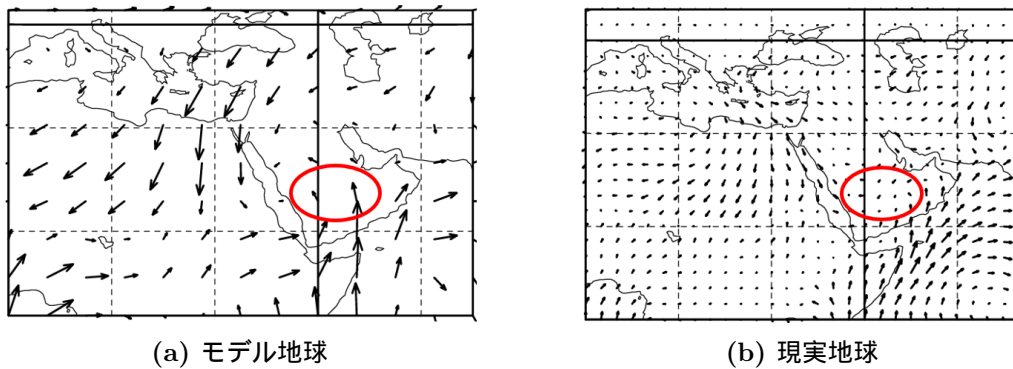


図 4.17: 9月のアラビア半島周辺の月平均風分布. 赤色で囲った領域がモデル地球と現実地球で気候区分が異なっている. (a) は $\sigma = 1$ の高度の風, (b) は 1000 hPa 高度の風を表している. (b) は NCEP の再解析データを用いて描画した.

4.4.3 グリーンランド中部

グリーンランド中部はモデル地球では冷帯に区分されているが、現実地球では寒帯に区分されている領域である。3章で述べた気候区分の定義から、最暖月平均気温が 10°C 未満であれば寒帯、 10°C 以上ならば寒帯以外の区分となる。ここで図 4.18 を見ると、7月の月平均気温がグリーンランド中部において現実地球では 10°C を下回っているのに対し、モデル地球では、 10°C 以上となっていることがわかる。次に、図 4.19(a) を見ると、モデル地球において、グリーンランド中部のアルベドが1月は 0.6 となっており、これは積雪あるいは氷河に覆われていることを示す。一方、(b) を見ると、モデル地球において、7月のアルベドが 0.2 となっており、これは積雪あるいは氷河が溶けていることを示す。グリーンランドは現実地球では1年を通して氷が陸地の約 80% を覆っている。つまり、モデル地球では夏季のアルベドが現実地球よりも小さく計算された結果、気温が上昇し、寒帯ではなく冷帯に区分されたと考えられる。

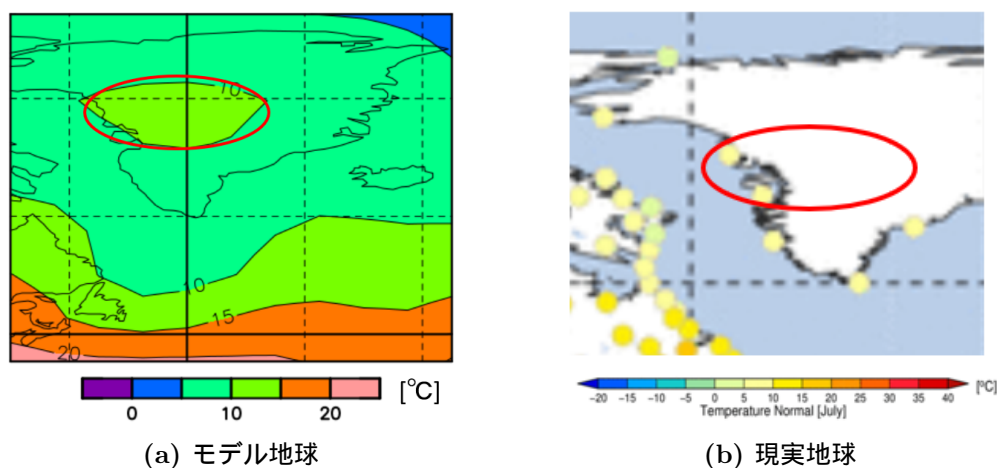


図 4.18: 7月のグリーンランド周辺の月平均気温分布. 赤色で囲った領域がモデル地球と現実地球で気候区分が異なっている. (b) は 気象庁, 世界の天候図表 (<https://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/monitor/climfig/?tm=normal&el=tn>) を用いて作成し、一部加工している.

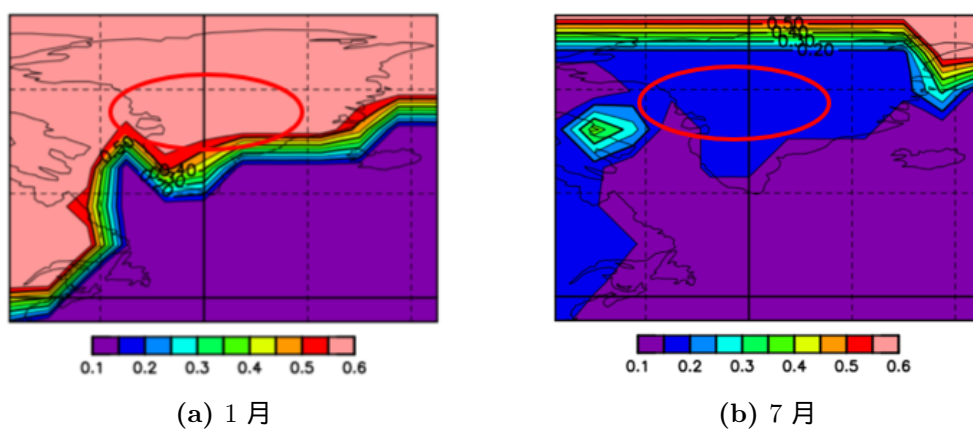


図 4.19: モデル地球の 1 月, 7 月のグリーンランド周辺の月平均アルベド分布. 赤色で囲った領域がモデル地球と現実地球で気候区分が異なっている.

第 5 章 実験 II: T42L26 実験

5.1 実験設定

本章では, T42L26 の解像度で実験を行う. これは緯度方向, 経度方向の格子点間隔が約 2.82 度, 鉛直方向の層数が 26 層であることに対応する. 地形データ, オゾン分布, 海表面温度分布, 陸面アルベド分布, 海表面アルベド, 雲水の消滅時定数, 雲氷の消滅時定数, 惑星パラメータおよび初期条件は 4 章の実験と同じものを用いるため, 4.1 節を参照されたい. 地形データは 図 5.1 を用いる. 図 5.1 を見ると, ヒマラヤ山脈, ロッキー山脈, アンデス山脈等の山脈が表現されていることが分かる. 積分期間は 10 年間であるが, 本実験では 図 5.2 の赤枠で囲った全球平均温度の年単位の变化が小さく, 準定常状態に入った 5 年目以降の 6 年分のデータを用いる. 海陸分布は 図 5.3 を用いる. 白色の領域は陸地, 灰色の領域は海洋として計算を行う.

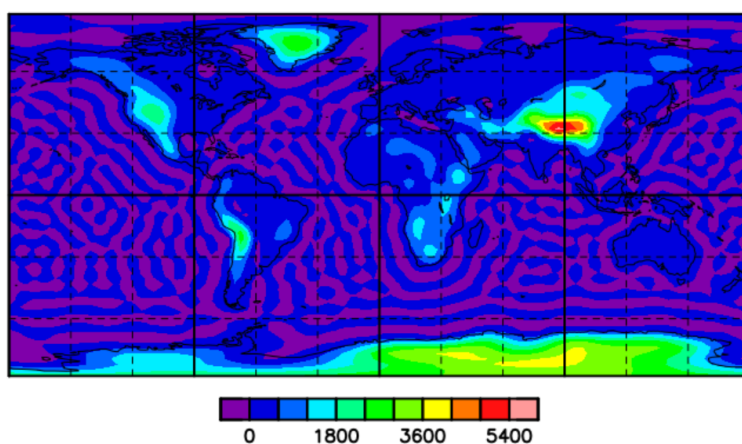


図 5.1: 使用した地形データ

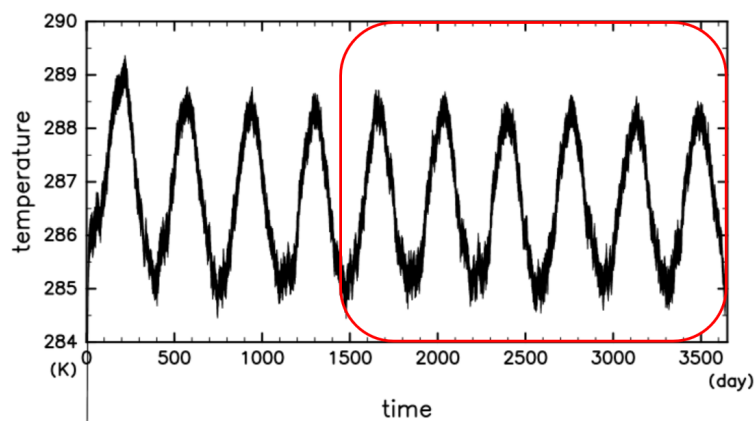


図 5.2: 全球平均温度の時間変化. 赤枠で囲った 5 年目から 10 年目のデータを用いて解析を行う.

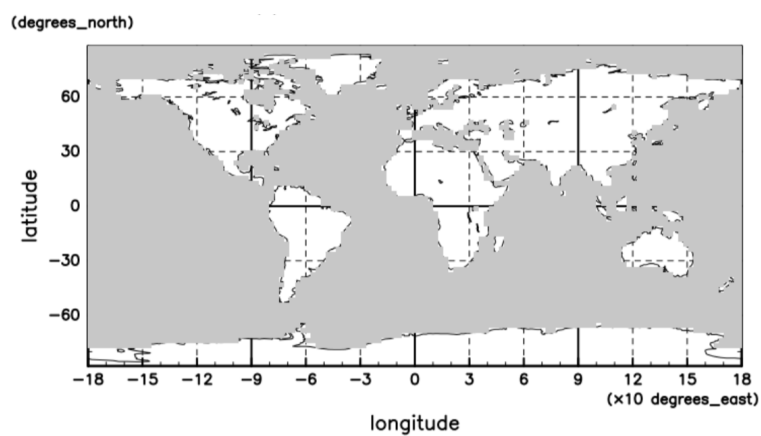


図 5.3: 使用した海陸分布. 白色の領域は陸地, 灰色の領域は海洋として扱う.

5.2 実験結果

ここでは、前節の実験設定のもと、4.2 節と同様に現実地球とモデル地球の気候区分の分布を描いた。次節で図 5.4(a), (b) における各気候区分の分布の比較を行う。

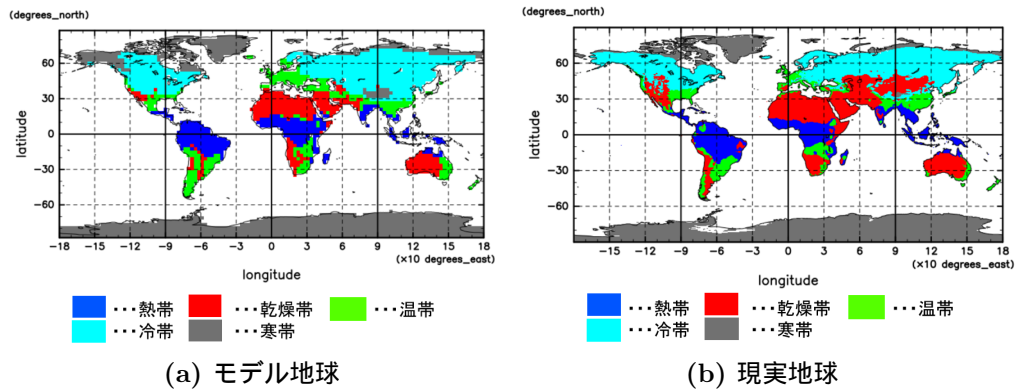


図 5.4: モデル地球と現実地球のケッペンの気候区分の分布

5.3 比較

5.3.1 熱帯

図 5.5 はモデル地球と現実地球の熱帯の分布を表す。解析結果は 4.3.1 項と同じである。

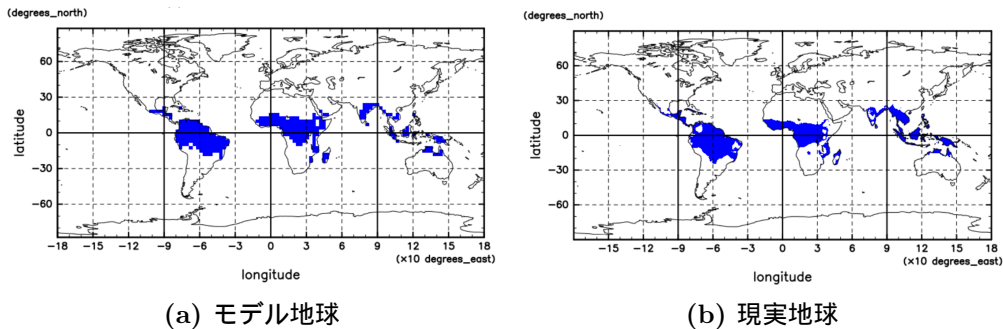


図 5.5: 熱帯分布 (図中の青色の領域)

5.3.2 乾燥帯

図 5.6 はモデル地球と現実地球の乾燥帯の分布を表す。解析結果は 4.3.2 項と同じである。

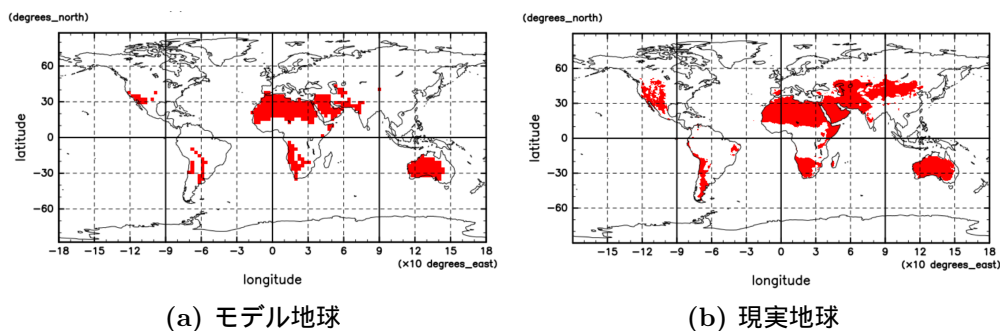


図 5.6: 乾燥帯分布 (図中の赤色の領域)

5.3.3 温帯

図 5.7 はモデル地球と現実地球の温帯の分布を表す。解析結果は 4.3.3 項と同じである。

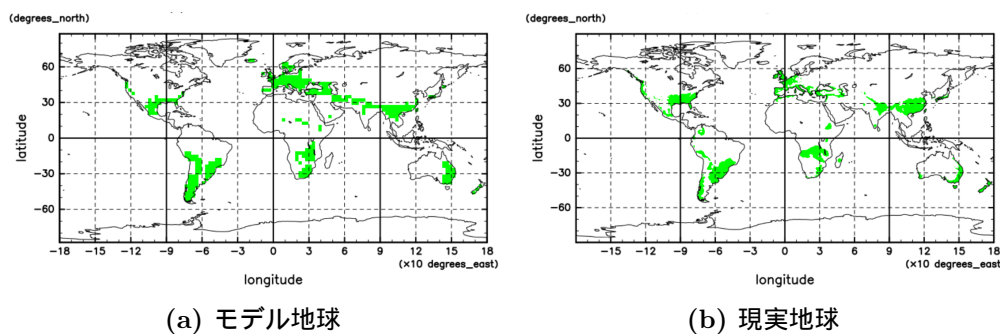


図 5.7: 温帯分布 (図中の緑色の領域)

5.3.4 冷帯

図 5.8 はモデル地球と現実地球の冷帯の分布を表す。4.3.4 項と異なり、グリーンランド中部が冷帯に区分されなかった (寒帯, 図 5.4(b) 参照)。

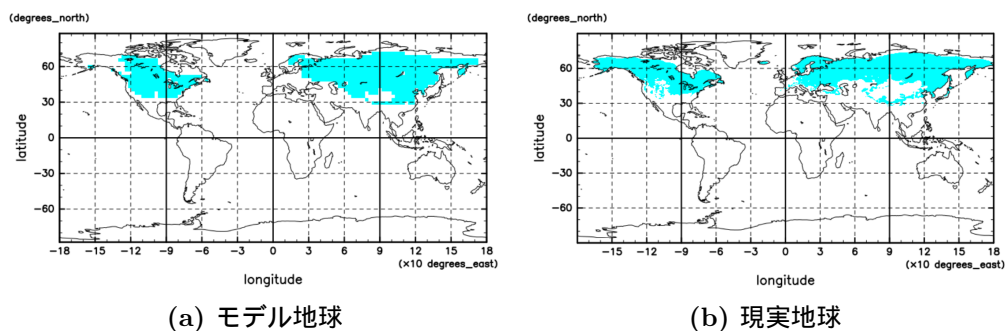


図 5.8: 冷帯分布 (図中の水色の領域)

5.3.5 寒帯

図 5.9 はモデル地球と現実地球の寒帯の分布を表す。4.3.5 項の結果とは異なり、グリーンランド中部が寒帯に区分された。

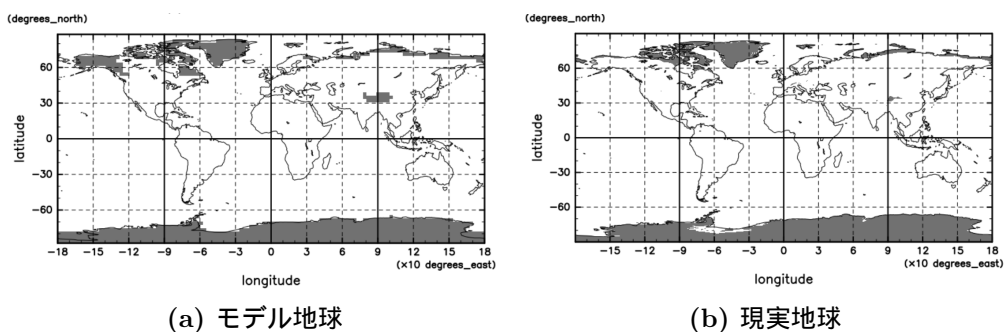


図 5.9: 寒帯分布 (図中の灰色の領域)

5.4 考察 I

本節では、4 章の T21L26 実験で考察を行った領域について、本章の T42L26 実験ではどのように表現されたかを調べる。

5.4.1 中国北部

前章の T21L26 実験では中国北部はモデル地球で冷帯, 現実地球で乾燥帯という違いがあったが, 本章の実験でもモデル地球の気候区分は前章の T21L26 実験とほぼ変わらなかった. この理由を以下で考察する.

図 5.10 は 前章の T21L26 実験と本章の T42L26 実験, また現実地球の中国北部付近の年平均降水量である. この図に注目すると, 赤色で囲った中国北部付近の年平均降水量は 前章の T21L26 実験より, 本章の T42L26 実験のほうが少なく表現されていることが分かる. ただ, 図 5.10(c) の現実地球の降水量よりは多く表現されている. ここで, 前章と同じく, 8 月の月平均降水量の比較を行う. 図 5.11 を見ると, 8 月の月平均降水量は, 前章の T21L26 実験より, 本章の T42L26 実験のほうが少なく表現されていることが分かる. ただ, 図 5.11(c) の現実地球の降水量よりは多く表現されている. 次に図 5.12 で地形データを確認する. (b) で示すように, 前章の T21L26 実験ではヒマラヤの標高が現実地球より低く表現されていたのに対し, (a) を見ると, 本章の T42L26 実験では, (c) の現実地球よりはまだ低いものの, (b) より高い標高で表現されていることが読み取れる. その結果, 図 5.13 に示すように夏季の海洋からの南東モンスーンが山脈に遮られ, 内陸にあたる中国北部まで流入しにくくなり, 降水量が少なくなったと考えられる. ただ, 降水量は少なくなったものの, 再度, 図 5.12(b) を見ると, 現実地球では存在する橙色で囲った中国南東部の 1000 m 前後の山脈は表現されていない, かつヒマラヤの標高が現実地球よりまだ少し低い. この地形データを用いた結果, 本章の T42L26 実験でのモデル地球の降水量は現実地球より多く, 年平均降水量が 3 章で説明した乾燥限界を下回らなかったため, 乾燥帯に区分されなかったと考えられる.

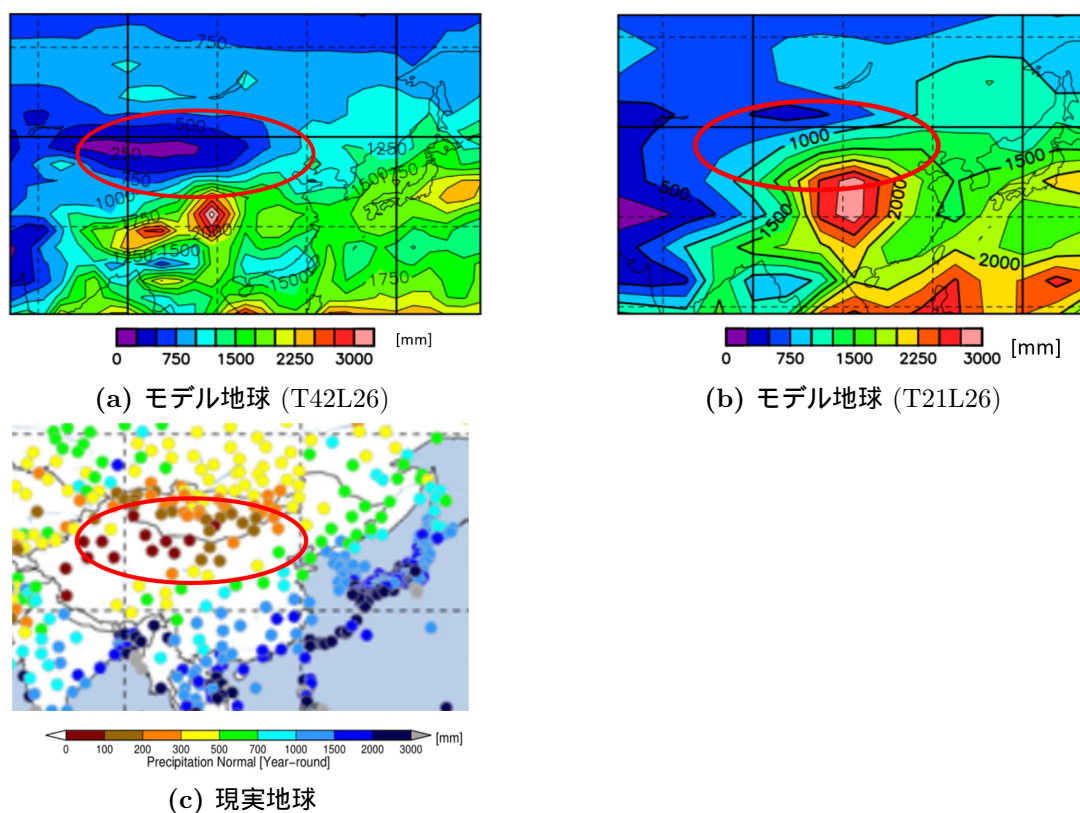


図 5.10: 中国周辺の年平均降水量分布. 赤色で囲った領域がモデル地球と現実地球で気候区分が異なっている. (c) は 気象庁/世界の天候図表 (jma.go.jp) を用いて作成し, 一部加工している.

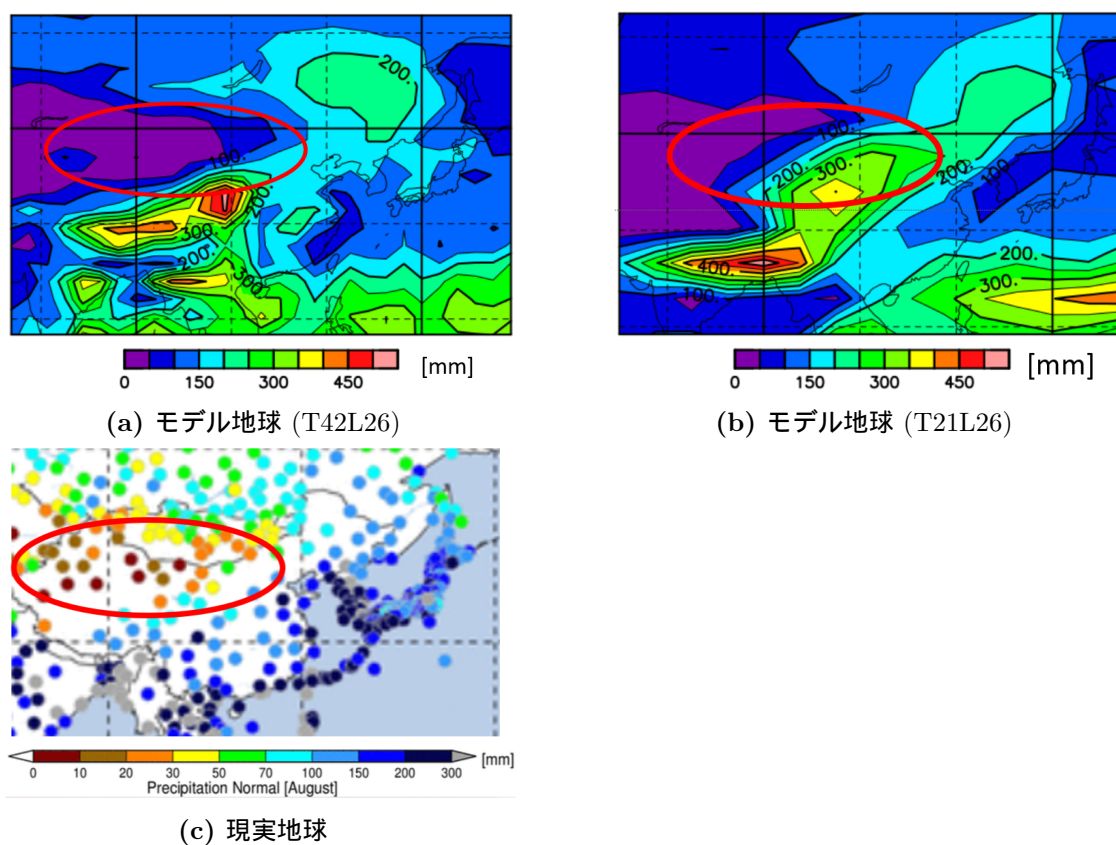


図 5.11: 8 月の中国周辺の月平均降水量分布. 赤色で囲った領域がモデル地球と現実地球で気候区分が異なっている. (c) は 気象庁/世界の天候図表 (jma.go.jp) を用いて作成し, 一部加工している.

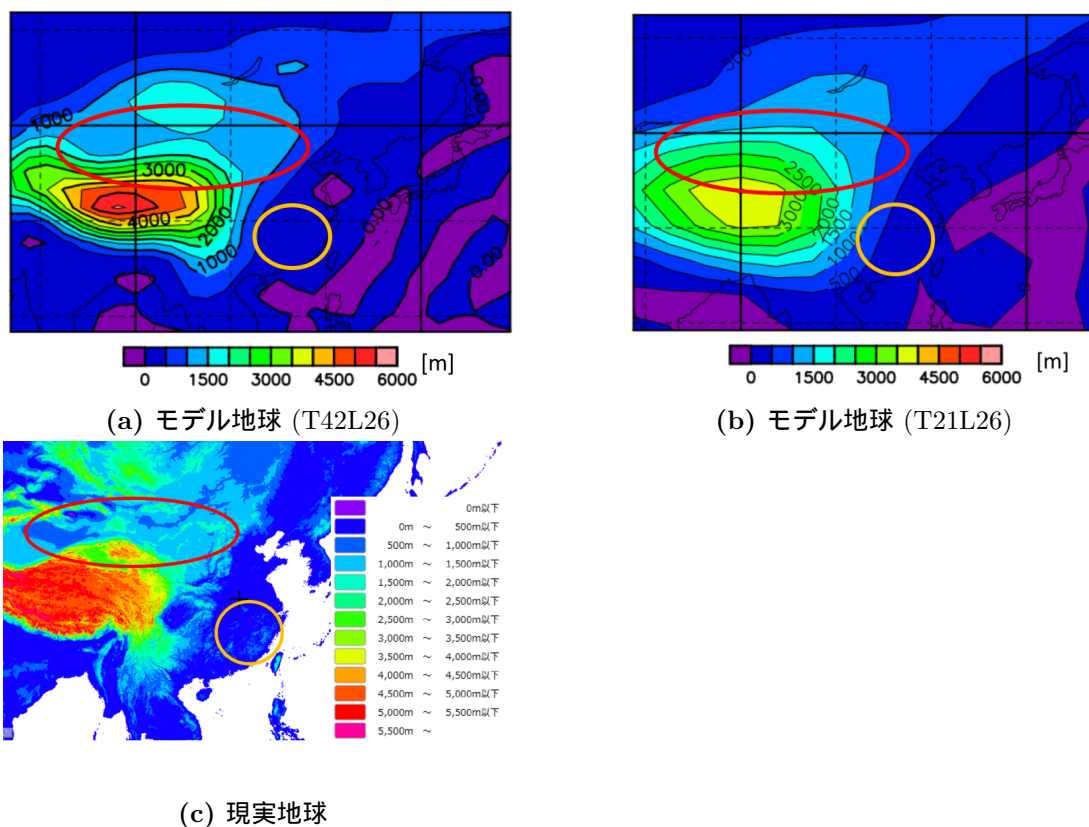


図 5.12: 中国周辺の地形データ. 赤色で囲った領域がモデル地球と現実地球で気候区分が異なっている. (c) は 国土地理院/地理院地図 GSI Maps を用いて作成し, 一部加工している.

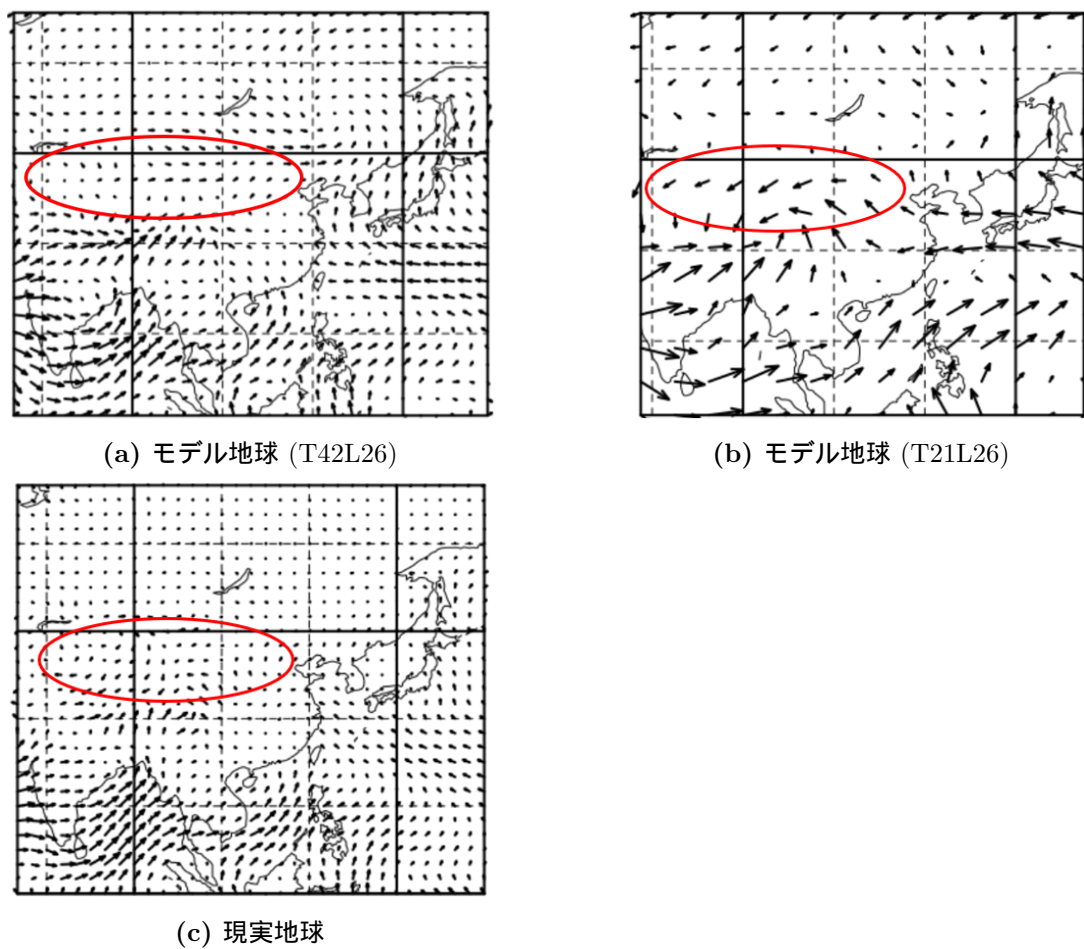


図 5.13: 8月の中国周辺の月平均風分布. 赤色で囲った領域がモデル地球と現実地球で気候区分が異なっている. (a), (b) は $\sigma = 1$ の高度の風, (c) は 1000 hPa 高度の風を表している. (c) は NCEP の再解析データを用いて描画した.

5.4.2 アラビア半島南部

前章の T21L42 実験ではアラビア半島南部はモデル地球で温帯, 現実地球で乾燥帯という違いがあった. 本章の T42L26 実験ではモデル地球で乾燥帯に区分される領域があり, 温帯に区分される領域は減少したが存在し, 熱帯に区分された領域があった. この理由を以下で考察する.

図 5.14 は前章の T21L26 実験と今回行った T42L26 実験, また現実地球のアラビア半島南部付近の年平均降水量である. この図に注目すると, アラビア半島南部の年平均降水量は, 特に赤丸で囲った領域の北側で前章の T21L26 実験より, 本章の T42L26 実験のほうが少なく表現されていることが分かる. ただ, 図 5.14(c) の現実地球の降水量よりは多く表現されている. ここで, 前章と同じく, 9 月の月平均降水量の比較を行う. 図 5.15 を見ると, 特に赤丸で囲った領域の北側で前章の T21L26 実験より, 本章の T42L26 実験のほうが少なく表現されていることが分かる. ただ, 図 5.15(c) の現実地球の降水量よりは多く表現されている. 次に図 5.16 で地形データを確認する. 図 5.16(b) で示すように, 前章の T21L26 実験ではモデル地球のアラビア半島南部の標高が現実地球より低く表現されていたのに対し, 図 5.16(a) を見ると, 本章の T42L26 実験では, 図 5.16(c) の現実地球よりはまだ低いものの, 図 5.16(b) より高い標高で表現されていることが読み取れる. また, 橙色で囲ったエチオピア, ソマリア周辺の山脈に注目すると, 図 5.16(a) は図 5.16(b) より標高が高く, 図 5.16(c) の現実地球とほぼ同じ標高で表現されていることが分かる. この地形データを用いた結果, 本章の T42L26 実験のモデル地球は, 図 5.17 に示すように海洋からの南西モンスーンが山脈に遮られ, 特に内陸側にあたる赤色で囲った領域の北側で降水量が少なくなり, 現実地球と同じ乾燥帯に区分されたと考えられる. また, アラビア半島南端が本章の T42L26 実験で熱帯 (現実地球では乾燥帯) に区分されたことに関しては, 根拠のある考察がまだできていない.

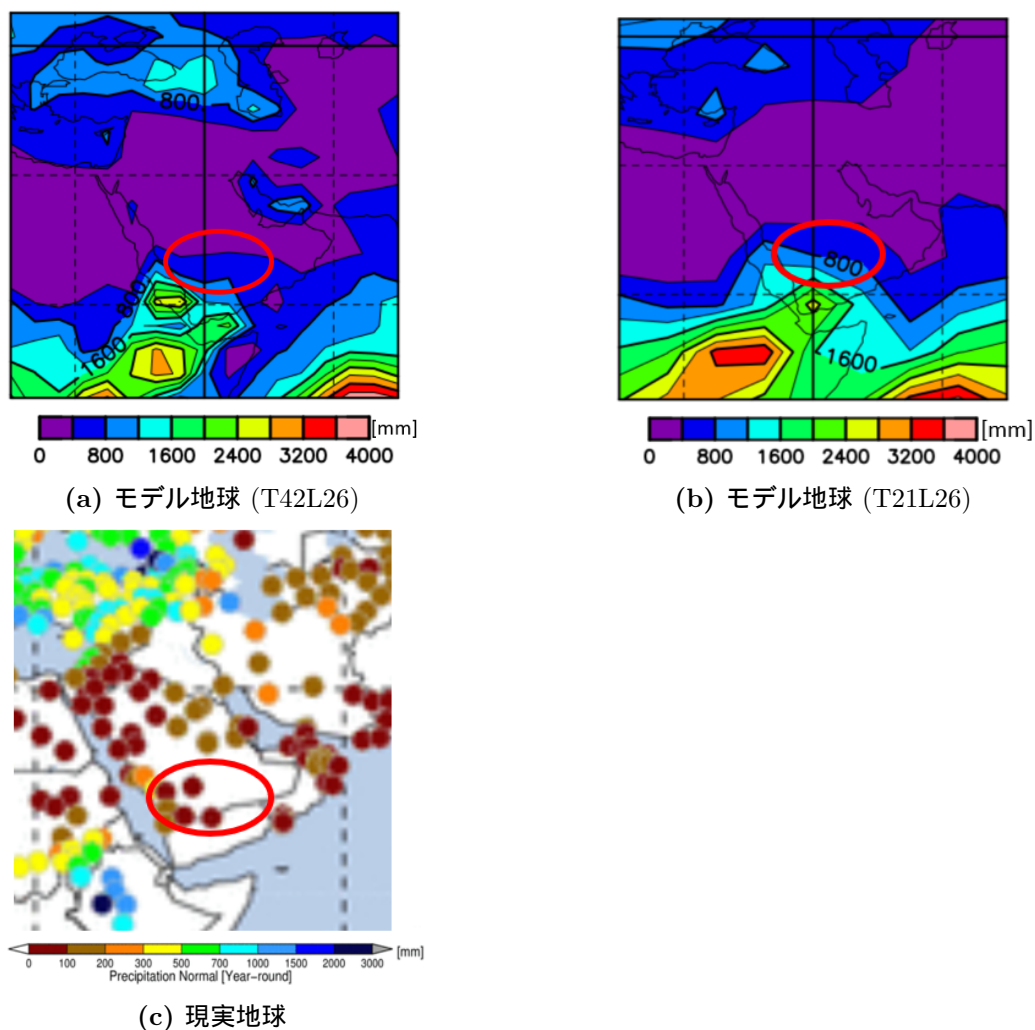


図 5.14: アラビア半島周辺の年平均降水量分布. 赤色で囲った領域が前章の T21L26 実験でモデル地球と現実地球の気候区分が異なっている. (c) は 気象庁/世界の天候図表 (jma.go.jp) を用いて作成し, 一部加工している.

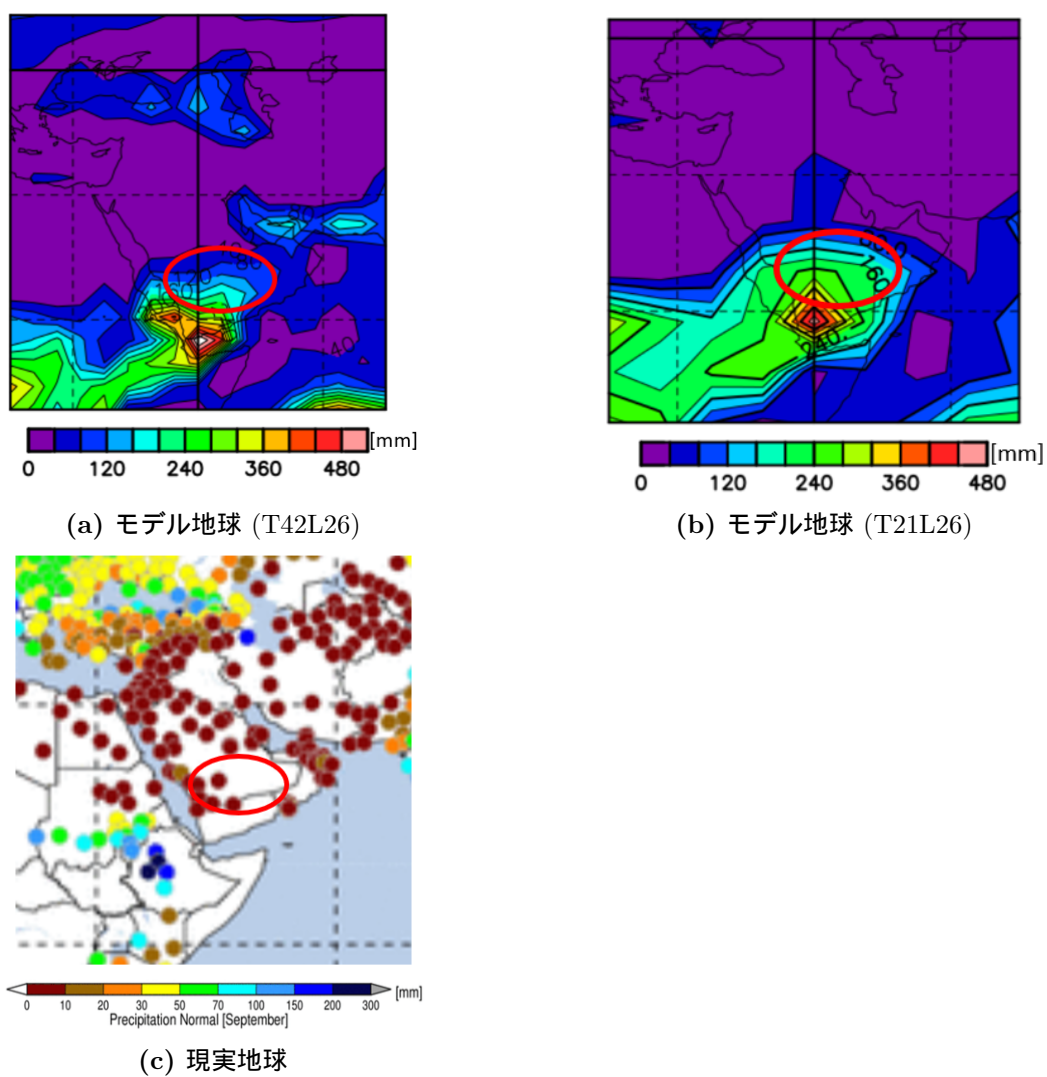


図 5.15: 9月のアラビア半島南部周辺の月平均降水量分布. 赤色で囲った領域が前章の T21L26 実験でモデル地球と現実地球の気候区分が異なっている. (c) は 気象庁/世界の天候図表 (jma.go.jp) を用いて作成し, 一部加工している.

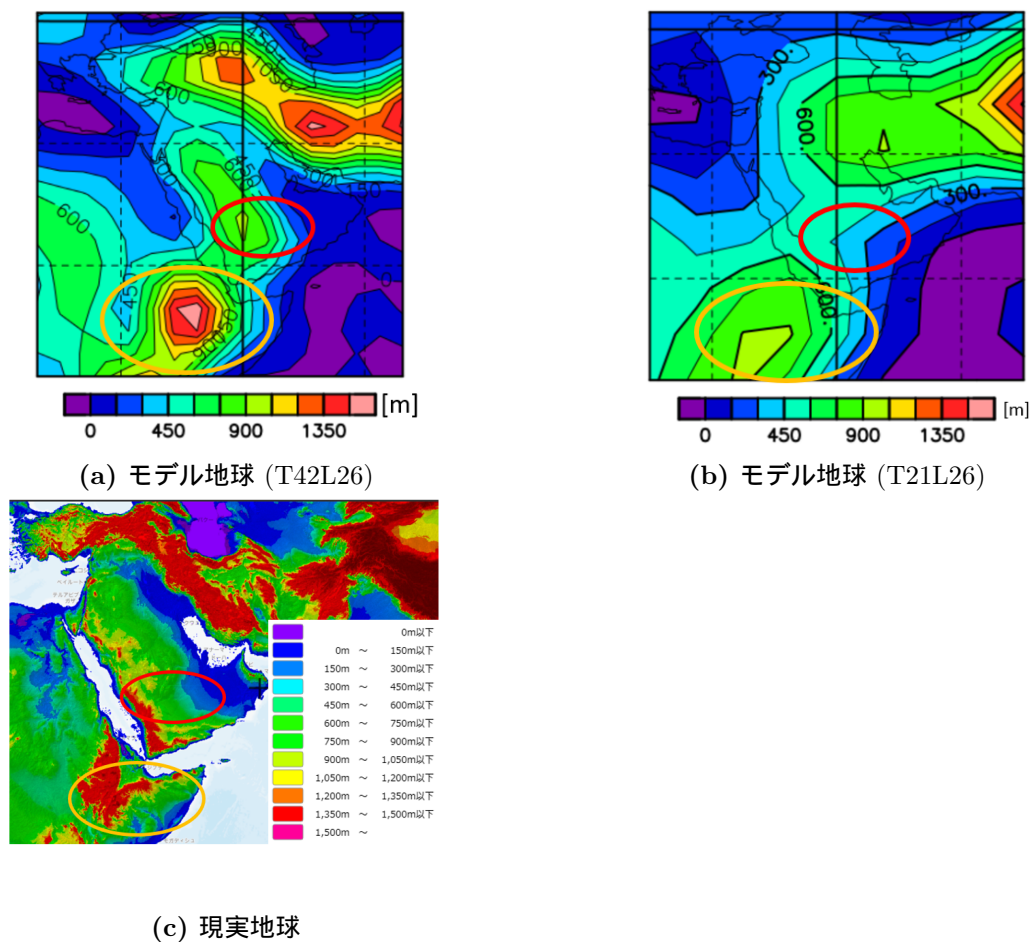


図 5.16: アラビア半島南部周辺の地形データ. 赤色で囲った領域が前章の T21L26 実験でモデル地球と現実地球の気候区分が異なっている. (c) は 国土地理院/地理院地図 GSI Maps を用いて作成し, 一部加工している.

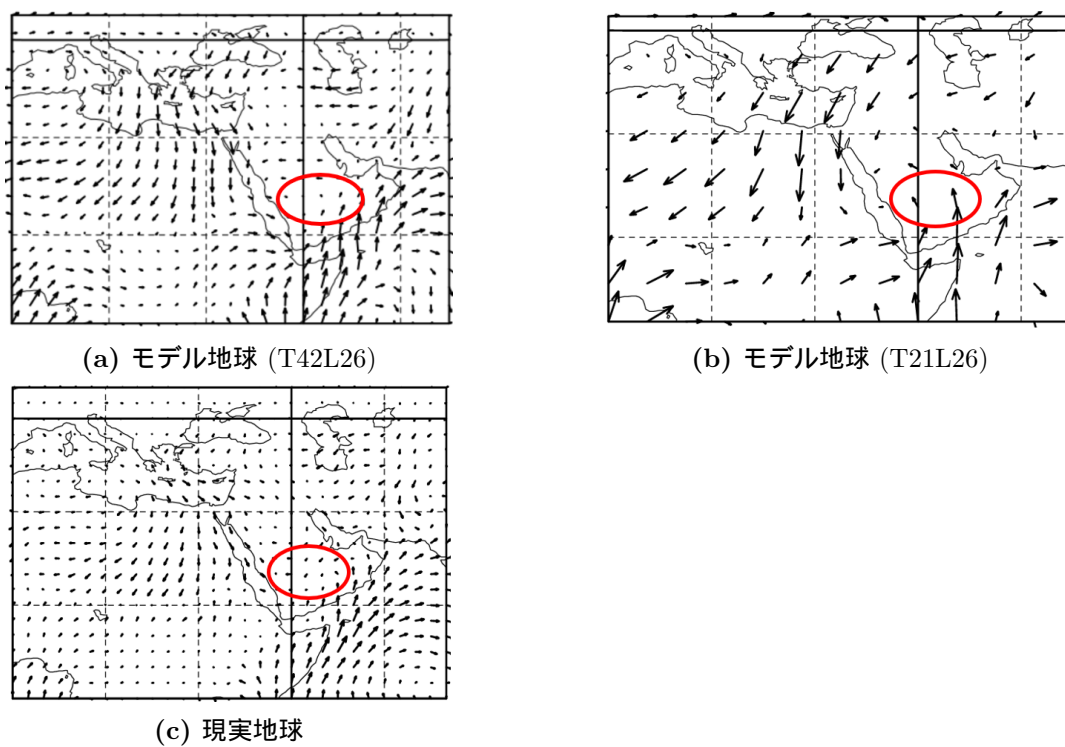


図 5.17: 9月のアラビア半島周辺の月平均風分布. 赤色で囲った領域が前章の T21L26 実験でモデル地球と現実地球の気候区分が異なっている. (a), (b) は $\sigma = 1$ の高度の風, (c) は 1000 hPa 高度の風を表している. (c) は NCEP の再解析データを用いて描画した.

5.4.3 グリーンランド中部

前章の T21L42 実験ではグリーンランド中部はモデル地球で冷帯, 現実地球で寒帯という違いがあったが, 本章の T42L26 実験ではモデル地球が現実地球と同じ気候区分である寒帯に区分された. この理由を以下で考察する.

図 5.18 は 7 月のグリーンランド周辺の月平均アルベド分布である. (b) で示すように, 前章の T21L26 実験ではアルベドの値が小さくなっており, 積雪または氷河が溶けていることを表しているが, (a) を見ると, 本章の T42L26 実験ではアルベドの値が大きく, 積雪また氷河に覆われていることが分かる. その結果, 図 5.19 で示すように, 7 月でも月平均気温が 10°C 以上になっておらず, 現実地球と同じ寒帯に区分されたと考えられる.

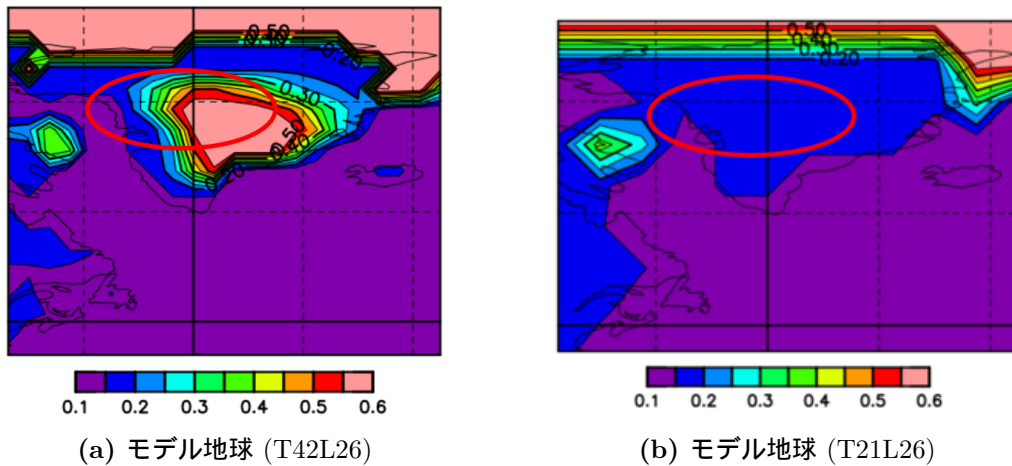


図 5.18: 1 月のグリーンランド周辺の月平均アルベド分布. 赤色で囲った領域が前章の T21L26 実験でモデル地球と現実地球の気候区分が異なっている.

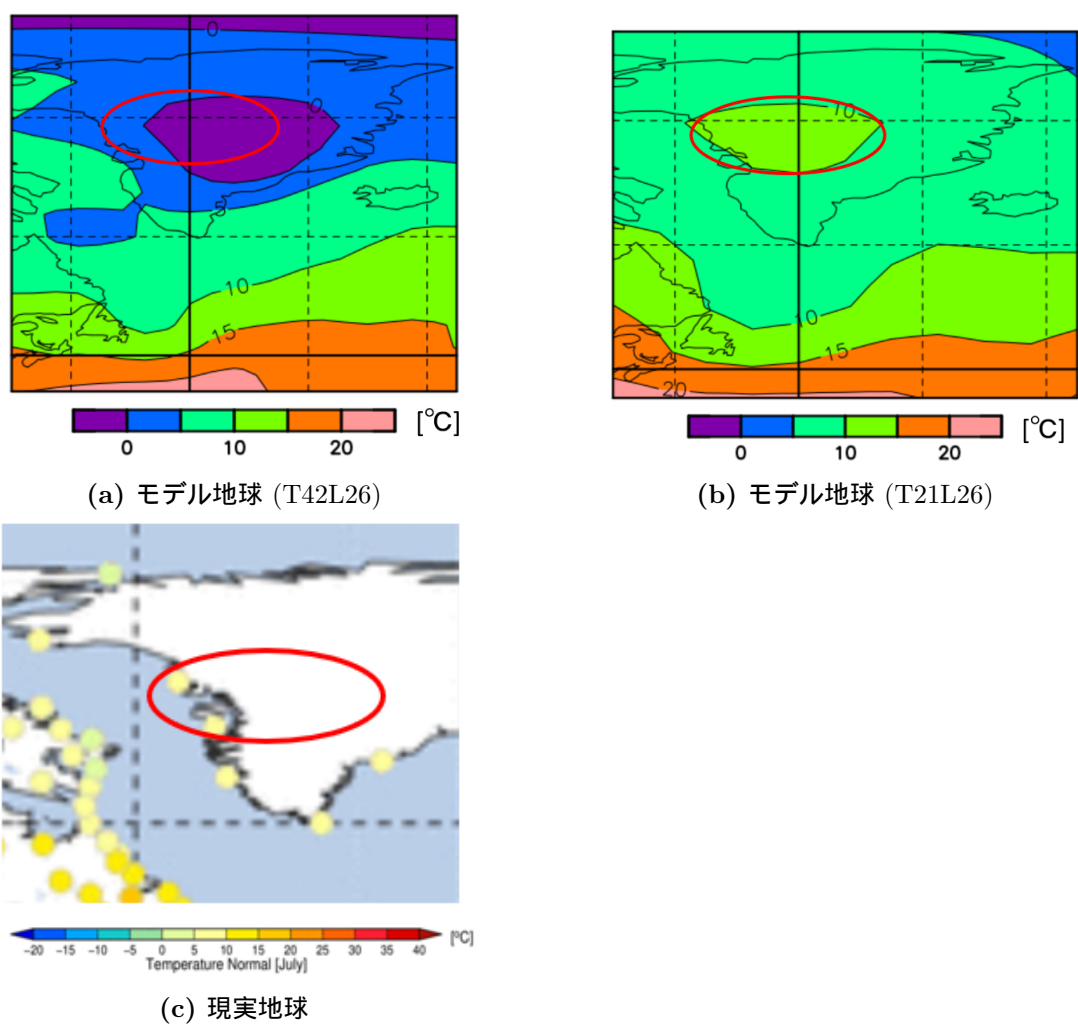


図 5.19: 7月のグリーンランド周辺の月平均気温分布. 赤色で囲った領域が前章の T21L26 実験でモデル地球と現実地球の気候区分が異なっている. (c) は 気象庁/世界の天候図表 (jma.go.jp) を用いて作成し, 一部加工している.

5.5 考察 II

前節で考察した領域以外で, 本章の実験でモデル地球と現実地球で気候区分の違いが生じた領域について, その理由を考察する.

5.5.1 アラスカ

アラスカは現実地球では冷帯に区分されているが, 本章の実験では寒帯に区分された領域である. 図 5.20 を見ると, 前章の T21L26 実験のモデル地球は, アラスカの夏季にあたる 7, 8 月の月平均気温が 10°C 以上となっており, 3 章で解説した寒帯の定義を満たさない. それに対し, 本章の T42L26 実験のモデル地球は, 7, 8 月の月平均気温が 10°C を下回っており, 寒帯の定義を満たしていることが読み取れる. ここで, 図 5.21 を見ると, 7, 8 月の月平均降水量が本章の T42L26 実験のモデル地球の降水量のほうが, 前章の T21L26 実験のモデル地球より多いことが分かる. 次に, 図 5.22 を見ると, アラスカの山脈の標高が T42L26 解像度のモデル地球のほうが T21L26 解像度のモデル地球より高い地形データを用いていることがわかる. また, 図 5.23 より, 地表付近は南西寄りの風が卓越していることが分かる. このことから, T42L26 解像度のモデル地球のほうが T21L26 解像度のモデル地球に比べ, より地表付近の南西風が山脈に沿って上昇し, 雲が発生し, 日射を遮った結果, 月平均気温が下がったと考えられる. また, 前章の実験は 16 年分のデータの平均を用いているのに対し, 本章の実験は 6 年分のデータの平均を用いている. 用いたデータの期間の違いが気候の違いを生み出している可能性も考えられる.

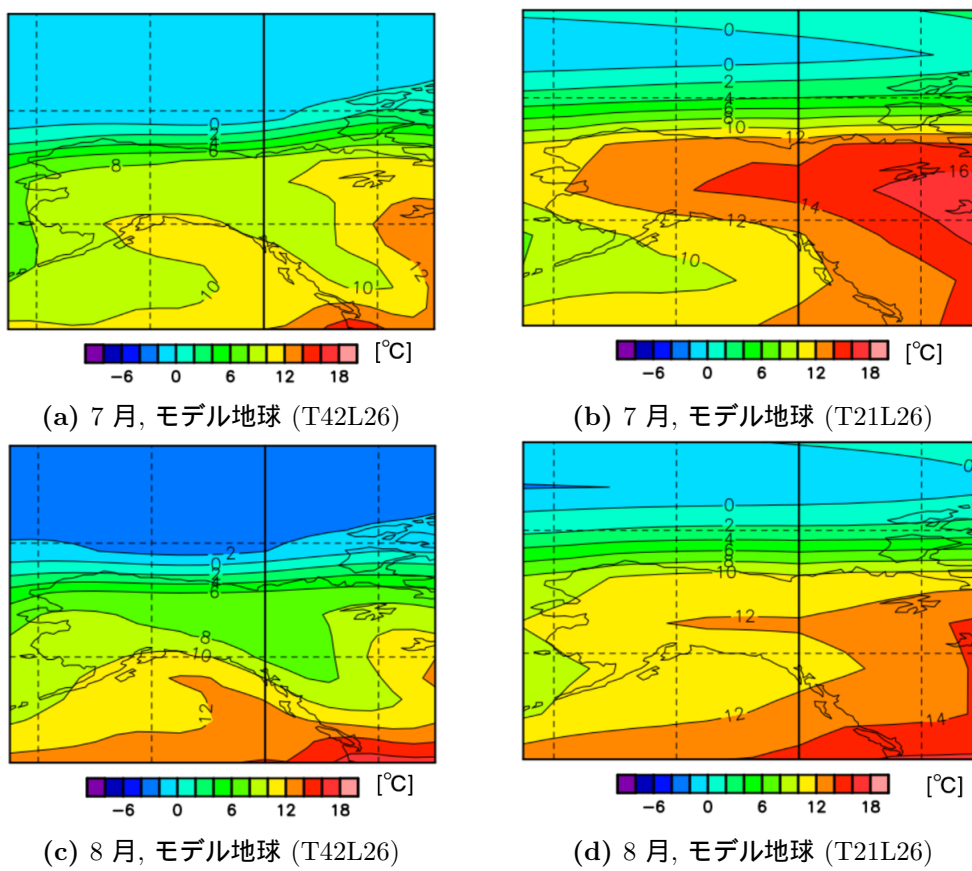


図 5.20: 7, 8 月のアラスカ周辺の月平均気温分布.

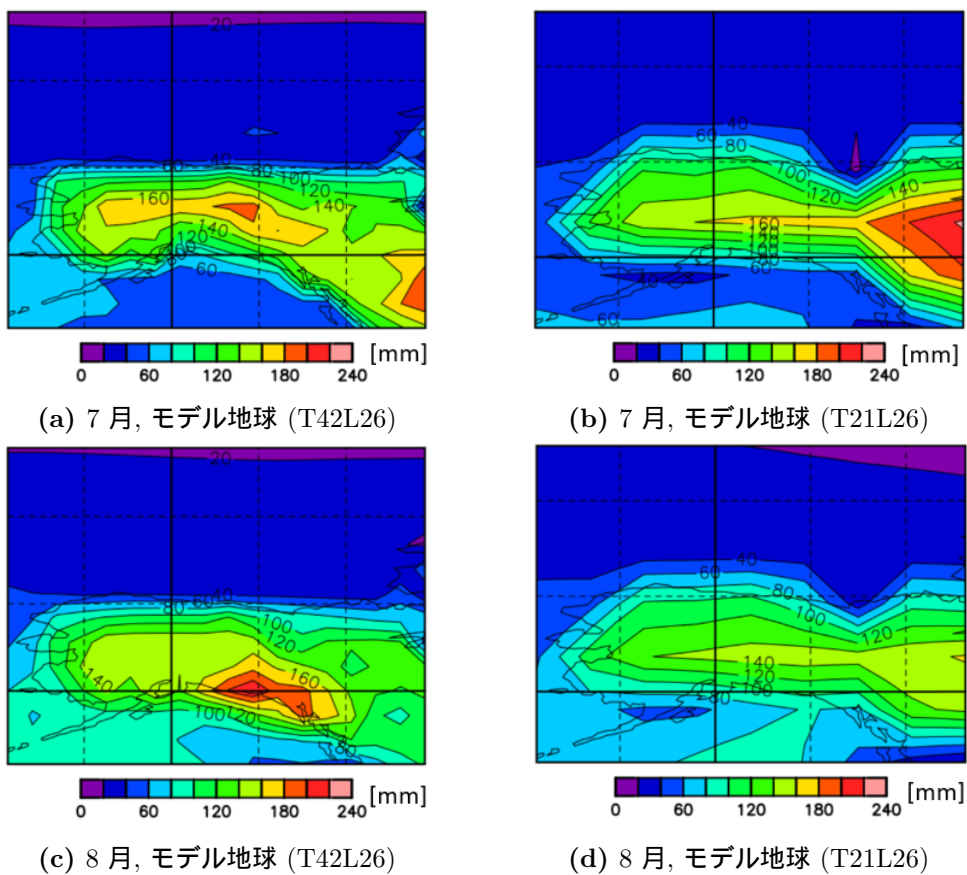


図 5.21: 7, 8 月のアラスカ周辺の月平均降水量分布.

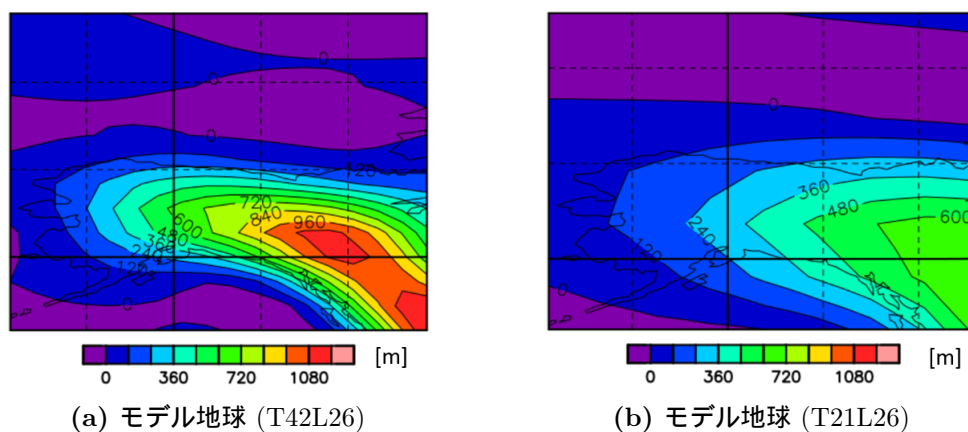


図 5.22: アラスカ周辺の地形データ.

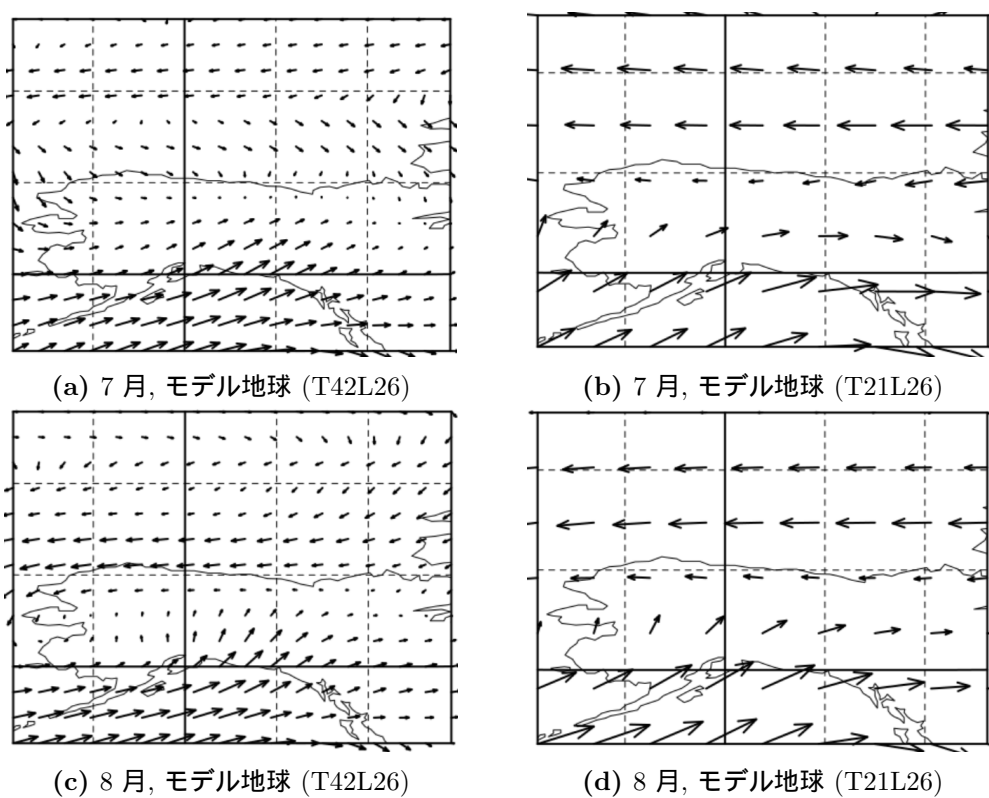


図 5.23: 7, 8 月のアラスカ周辺の月平均風分布.

第6章 結論

本論文では、惑星大気大循環モデル DCPAM5 を用いて計算したモデル地球が、現実地球の気候をどの程度表現することができるかを調べた。モデル地球と現実地球の気候の比較を行う際には、気温と降水量の二つの変数から気候区分を決定できるケッペンの気候区分を用いた。T21L26, T42L26 の二種類の解像度で実験を行った結果、T21L26 解像度では、気候区分は現実地球と概ね同じ領域に表現された。しかし、中国北部やアラビア半島南部、グリーンランド中部の気候区分が現実地球と異なり、これは地形や風、アルベドの値の違いから生じていると考えられる。T42L26 解像度でも、気候区分は現実地球と概ね同じ領域に表現された。上で挙げたグリーンランド中部に関しては、T21L26 解像度とは違い、現実地球と同じ気候区分に表現された。しかし、中国北部、アラビア半島南部に関しては、T21L26 解像度と同様、現実地球と異なる気候区分に表現された。

まとめると、どちらの解像度の実験でも、アルベドや地形の違いから現実地球と異なる気候区分に表現された領域もあったが、気候区分は概ね現実地球と同じ領域に表現された。つまり、現実地球のパラメータ等を設定すると、DCPAM5 は現実地球と類似した気候を計算できることがわかった。

謝辞

本研究を行うにあたって、高橋芳幸准教授には研究内容の方針を示して頂き、また、研究に関する定期的な相談の中で、数多くの助言を頂きました。林祥介教授には、基礎理論講義、基礎理論読書会を通して多くのご指導を頂きました。檜村博基講師には、大気セミナー、卒業研究発表会にて本研究の改善点について助言を頂きました。また、地球および惑星大気科学研究室の皆様にも研究、発表に関する助言を頂きました。深く感謝し、心よりお礼申し上げます。

また、本研究を行うにあたり、地球流体電脳倶楽部有志によって開発されたライブラリである DCL, および GPhys を大いに活用し、大変助けられました。

参考文献

- [1] Toon, O. B., McKay, C. P., and Ackerman, T. P., 1989: Rapid calculation of radiative heating rates and photodissociation rates in inhomogeneous multiple scattering atmospheres, *J. Geophys. Res.*, **94**, 16287-16301.
- [2] Chou, M. D., and Lee, K. T., 1996: Parameterizations for the absorption of solar radiation by water vapor and ozone. *J. Atmos. Sci.*, **53**, 1203-1208
- [3] Chou, M.-D., M. J. Suarez, C.-H. Ho, M. M.-H. Yan, and K.-T. Lee, 1998: Parameterizations for cloud overlapping and shortwave single-scattering properties for use in general circulation and cloud ensemble models. *J. Climate*, **11**, 202-214.
- [4] Chou, M. D., Suarez, M. J., Liang, X. Z., and Yan, M. M. H., 2001: A thermal infrared radiation parameterization for atmospheric studies. NASA Technical Report Series on Global Modeling and Data Assimilation, **19**, NASA/TM-2001-104606.
- [5] Mellor, G. L., and Yamada, T., 1982: Development of a Turbulent Closure Model for Geophysical Fluid Problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **20**, 851-875.
- [6] Moorthi, S., and Suarez, M. J., 1992: Relaxed Arakawa-Schubert: A parameterization of moist convection for general circulation models. *Mon. Wea.Rev.*, **120**, 978-1002.
- [7] Le Treut, H., and Li, Z.-X., 1991: Sensitivity of an atmospheric general circulation model to prescribed SST changes: feedback effects associated with the simulation of cloud optical properties. *Clim. Dyn.*, **5**, 175-187.
- [8] Manabe, S., 1969: Climate and the ocean circulation I. The atmospheric circulation and the hydrology of the Earth's surface, *Mon. Wea. Rev.*, **97**, 739-774.
- [9] Taylor, K. E., Stouffer, R. J., and Meehl, G. A., 2012: An Overview of CMIP5 and the Experiment Design, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **93**, 485-498.

- [10] Taylor, K. E., Williamson, D., and Zwiers, F., 2000: The sea surface temperature and sea ice concentration boundary conditions for AMIP II simulations, PCMDI Report 60, 29 pp
- [11] Matthews, E., 1983: Global vegetation and land cover: New high-resolution data bases for climate studies, *J. Clim. Appl. Meteor.*, **22**, 474-487
- [12] Matthews, E., 1984: Prescription of Land-surface Boundary Conditions in GISS GCM II: A Simple Method Based on High-resolution Vegetation Data Sets. NASA TM-86096. National Aeronautics and Space Administration. Washington, D.C.
- [13] 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.
- [14] 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
- [15] 地球流体電脳倶楽部, DCPAM5 ドキュメント, http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/dcpam5/dcpam5_latest/doc/
- [16] 地球流体電脳倶楽部, GPhys, GGraph チュートリアル, <http://ruby.gfd-dennou.org/products/gphys/tutorial2/>
- [17] 地球流体電脳倶楽部, DCPAM5 支配方程式とその離散化, http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/dcpam5/dcpam5_latest/doc/basic_equations/pub/basic_equations.pdf
- [18] 気象庁, 世界の天候図表, <https://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/monitor/climfig/>
- [19] 国土地理院, 地理院地図, https://www.gsi.go.jp/CHIRIKYOIKU/world_landform.html
- [20] 松田幸樹, 2018: 大気大循環モデルを用いた地球気候の太陽定数依存性に関する数値的研究, 神戸大学理学研究科修士論文