テラフォーミングした火星の 気候区分図:大気大循環モデルを 用いた気候シミュレーション

41427505

清水 康嗣

岡山大学 大学院自然科学研究科 地球科学専攻

2017/02/10

Abstract

Mars is one of the most plausible terraforming target, since there are many similarities between Mars and Earth. To evaluate the environment of terraformed Mars, we simulated a climate of terraformed Mars using an atmospheric general circulation model. Since the land to sea ratio would have a large influence on climate, we simulated a climate with four different sea levels. Our simulation demonstrated that global mean surface temperature increases, as the sea level rises. Since albedo of sea surface is smaller than that of land surface, heating by solar radiation increases with increasing the area of sea. Also global mean precipitation increases, as the sea level rises. At equilibrium, precipitation should be balanced by evaporation, and evaporation over oceans is greater than over the continents. When the area of ocean is less than 50%, large area of southern hemisphere become arid. Since the martian two hemispheres' geography differ in elevation, the southern hemisphere become a large continent. An arid climate in continental interiors is due to the difficulty in the long distance transport of water vapor. To make a comfortable planet to live in, the surface area of oceans should be larger than 50%.

要旨

火星には地球と同様に地面があり,薄いながらも大気が存在することから,火 星に植民する計画や,さらには人間が表層で生活できるようにする惑星改造(テラ フォーミング)も検討されている.本研究では,テラフォーミングした火星につい て大気大循環モデルを用いた気候シミュレーションをおこない,気候区分図を作 成して火星の利用可能性について検討した.

本研究は,海洋面積が全表面積の85%,51%,35%,14%となる4つの海陸分布 について気候シミュレーションをおこなった.全球平均の地表温度は,海洋面積 が増えると高くなった.これは,海洋と陸地のアルベドの違いによって,海洋面 積が大きいほど,惑星アルベドが小さくなり,太陽放射加熱が増えるためと考え られる.また,全球平均の降水量は,海洋面積が増えると増加した.海洋は陸地 よりも蒸発がおこりやすいためと考えられる.

海洋面積が50%以下の場合に、南半球の広い領域が乾燥地域になった.火星の地 形はおおまかに北半球が低地で南半球が高地となっているため、海洋面積が50%以 下になると南半球は巨大な大陸となり、海洋から離れた巨大な大陸の内部には水 蒸気が輸送されず雨が降らなくなった.テラフォーミングした火星で利用可能な 陸地面積を最大化するためには、ほどほどの大きさの海洋が存在している必要が ある.

目 次

第1章	テラフォーミングした火星の気候シミュレーション	1
第2章	モデルと実験設定	3
2.1	モデル	3
2.2	実験設定	4
	2.2.1 解像度	4
	2.2.2 海陸分布	5
	2.2.3 数值積分	6
第3章	気候シミュレーション結果の解析	7
71 - 0 +		1
3.1	全球平均	7
3.1	全球平均	7 7 7
3.1	全球平均	7 7 8
3.1	全球平均	7 7 8 9
3.1	全球平均	7 7 8 9 9
3.1	全球平均	7 7 8 9 9

2017/02/10(清水 康嗣)

	3.2.4	地表の熱収支	••••		16
3.3	季節変	化			18
	3.3.1	地表温度			18
	3.3.2	降水量			20
3.4	年平均				23
	3.4.1	地表温度			23
	3.4.2	降水量			25
3.5	月平均				27
	3.5.1	降水量と風			27
	3.5.2	陸上の積雪			36
	~ 4 ~				10
净 / 吉					
까 4 루	ᄊᅜᅜ				43
₩4∓ 4.1	気候区	カ図 分図の作成			43 43
4.1 4.2	気候区	カ図 分図の作成			43 43 44
4.1 4.2 4.3	気候区 気候区 気候区 火星の	カ図 分図の作成		 	 43 43 44 46
 第4章 4.1 4.2 4.3 第5章 	気候区 気候区 気候区 火星の まとめ	分図の作成		 	 43 43 44 46 47
 4.1 4.2 4.3 第5章 	気候区 気候区 火星の まとめ	分図の作成	· · · · · · ·		 43 43 44 46 47
 第4 ♀ 4.1 4.2 4.3 第5章 	気候区 気候区 火星の まとめ 謝辞	分図の作成		· · · · · · · ·	 43 43 44 46 47 48
第4章 4.1 4.2 4.3 第5章 A	気候区 気候区 気候区 水星の ま お辞 スクリン	方図の作成		· · · · · · · ·	 43 43 44 46 47 48 49
 第4 単 4.1 4.2 4.3 第5章 A 	、 候区 気候区 火星の ま お辞 スクリ A-1	 分図の作成		 	 43 43 44 46 47 48 49 49
 第4章 4.1 4.2 4.3 第5章 A 	、 候区 気候区 気候区 火星の 新辞 スクリ A-1 A-2	分図の作成		 	 43 43 44 46 47 48 49 49 51
 4.1 4.2 4.3 第5章 A 	気候区 気候区 気候区 火星の まとめ 謝辞 スクリご A-1 A-2 A-3	分図の作成		 	 43 43 44 46 47 48 49 49 51 53

2017/02/10(清水 康嗣)

	A-4	年	平均	降小	〈量	•	•		•		•	•		•		•	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	54
	A-5	月	平均	降小	〈量	と	大気	贰튶		層	の	風	•	•		•	•			•		•		•	•	•		56
	A-6	気	候区	分図	(]		•							•			•					•		•	•	•		58
В	積雪量	1 (季	節変	হ化)			•							•	•		•					•		•	•	•		62
С	熱収支	え (年	王平均	匀).			•					•		•	•	•	•	•••		•	•	•		•	•		•	63
D	最下層	冒温周	度 (年	F平t	匀)		•					•		•	•		•					•		•	•		•	67
Е	地表温	腹	(月刊	∑均)			•					•		•	•	•	•	•••		•	•	•		•	•		•	68
F	最下層	了温度	度 (月	∃平♭	匀)		•					•		•	•	•	•	•••		•	•	•		•	•		•	76
	参考文	て献												•			•					•		•	•			84

図目次

2.1	火星の地形 (出典:https://apod.nasa.gov/apod/ap990528.html). 縦 軸は緯度, 横軸は経度	5
2.2	海陸分布.青色は海洋,茶色は陸地 (砂漠).縦軸は緯度,横軸は経 度. (a) 海洋面積 85%, (b) 海洋面積 51%, (c) 海洋面積 35%, (d) 海 洋面積 14%.	6
3.1	地表温度の緯度分布.縦軸は地表温度 (K),横軸は緯度.(a) 海洋面 積 85%,(b) 海洋面積 51%,(c) 海洋面積 35%,(d) 海洋面積 14%.	10
3.2	降水量と蒸発量の緯度分布.縦軸は降水量と蒸発量,横軸は緯度. 青は降水量 (mm/地球日),赤は蒸発量 (mm/地球日). (a) 海洋面積 85%,(b) 海洋面積 51%,(c) 海洋面積 35%,(d) 海洋面積 14%	12
3.3	大気上端の熱収支. 横軸は緯度. 赤は太陽放射加熱 (W/m ²), 青は 惑星放射による冷却 (W/m ²). (a) 海洋面積 85%, (b) 海洋面積 51%, (c) 海洋面積 35%, (d) 海洋面積 14%.	14
3.4	南北熱輸送量の緯度分布.北向きの熱輸送は正,南向きの熱輸送は 負,単位は peta watts. (a) 海洋面積 85%, (b) 海洋面積 51%, (c) 海洋面積 35%, (d) 海洋面積 14%.	15
3.5	地表の熱収支. 横軸は緯度. 赤は太陽放射による地表の加熱 (W/m ²), 青は惑星放射による地表の正味冷却 (W/m ²),黒は顕熱フラックス による地表の正味冷却 (W/m ²),黄は潜熱フラックスによる地表の 正味冷却 (W/m ²). (a) 海洋面積 85%, (b) 海洋面積 51%, (c) 海洋 面積 35%, (d) 海洋面積 14%.	17
3.6	地表温度の季節変化.縦軸は緯度,横軸は時間で図の端から端まで が1年.左端は北半球の春分.色は東西平均の地表温度(K)を表し, 黒い曲線は太陽直下点の緯度を表す.(a)海洋面積85%,(b)海洋面 積51%,(c)海洋面積35%,(d)海洋面積14%.	19
		-0

3.7	降水の季節変化.縦軸は緯度,横軸は時間.図の端から端までが1 年. 左端は北半球の春分. 色は降水量 (mm/地球日)の東西平均を 表し,黒い曲線は太陽直下点の緯度を表す. (a) 海洋面積 85%, (b) 海洋面積 51%, (c) 海洋面積 35%, (d) 海洋面積 14%.	21
3.8	海面気圧の季節変化.縦軸は緯度,横軸は時間.図の端から端まで が1年.左端は北半球の春分.色は海面気圧 (Pa)の東西平均を表 し,黒い曲線は太陽直下点の緯度を表す.色の塗り方が図によって 違うことに注意されたい.(a)海洋面積 85%,(b)海洋面積 51%,(c) 海洋面積 35%,(d)海洋面積 14%.	22
3.9	年平均した地表温度 (K). 縦軸は緯度, 横軸は経度. 黒線は海岸線を 表す. (a) 海洋面積 85%, (b) 海洋面積 51%, (c) 海洋面積 35%, (d) 海洋面積 14%	24
3.10	年平均した降水量 (mm/地球日). 縦軸は緯度,横軸は経度. 黒線は 海岸線を表す. (a) 海洋面積 85%, (b) 海洋面積 51%, (c) 海洋面積 35%, (d) 海洋面積 14%.	26
3.11	海洋面積 85%における月平均の降水量 (mm/地球日) と大気最下層 の風 (m/s) のベクトル図.黒線は海岸線を表す.(a)1 月,(b)2 月, (c)3 月,(d)4 月,(e)5 月,(f)6 月,(g)7 月,(h)8 月,(i)9 月,(j)10 月,(k)11 月,(l)12 月.	29
3.12	海洋面積 51%における月平均の降水量 (mm/地球日) と大気最下層 の風 (m/s) のベクトル図.黒線は海岸線を表す.(a)1 月,(b)2 月, (c)3 月,(d)4 月,(e)5 月,(f)6 月,(g)7 月,(h)8 月,(i)9 月,(j)10 月,(k)11 月,(l)12 月.	31
3.13	海洋面積 35%における月平均の降水量 (mm/地球日) と大気最下層 の風 (m/s) のベクトル図.黒線は海岸線を表す.(a)1 月,(b)2 月, (c)3 月,(d)4 月,(e)5 月,(f)6 月,(g)7 月,(h)8 月,(i)9 月,(j)10 月,(k)11 月,(l)12 月.	33
3.14	海洋面積 14%における月平均の降水量 (mm/地球日) と大気最下層 の風 (m/s) のベクトル図.黒線は海岸線を表す.(a)1 月,(b)2 月, (c)3 月,(d)4 月,(e)5 月,(f)6 月,(g)7 月,(h)8 月,(i)9 月,(j)10 月,(k)11 月,(l)12 月.	35

$(1)^{(1)}$, (1)		38
3.16 海洋面積 35%における月平均の積雪量 (cm). 黒線は海岸線を (a)1月, (b)2月, (c)3月, (d)4月, (e)5月, (f)6月, (g)7月, 月, (i)9月, (j)10月, (k)11月, (l)12月	表す. (h)8 	40
3.17 海洋面積 14%における月平均の積雪量 (cm). 黒線は海岸線を表 (a)1月,(b)2月,(c)3月,(d)4月,(e)5月,(f)6月,(g)7月, 月,(i)9月,(j)10月,(k)11月,(l)12月	表す. (h)8 ・・・・・	42
4.1 気候区分図の判定表	••••	43
 4.2 気候区分図. 縦軸は緯度, 横軸は経度, 黒線は海岸線. (a) 海洋 85%, (b) 海洋面積 51%, (c) 海洋面積 35%, (d) 海洋面積 14%. 熱帯気候, 橙:超乾燥気候, 暗黄:乾燥気候, 緑:温帯気候, 水:冷候, 薄青:ツンドラ気候, 青:氷雪気候 	牟面積 → 赤: →帯気	45
4.3 居住可能領域. 橙:超乾燥気候, 暗黄:乾燥気候, 赤:熱帯気候, 縦帯気候, 水:冷帯気候, 薄青:ツンドラ気候, 青:氷雪気候, 灰:漁	緑:温 海洋. 4	46
 B-1 積雪量の季節変化. 縦軸は緯度, 横軸は時間. 図の端から端ま 1年. 左端は北半球の春分. 色は積雪量 (cm)の東西平均を表し 線は太陽直下点の緯度を表す. (a) 海洋面積 85%, (b) 海洋面積 8 (c) 海洋面積 35%, (d) 海洋面積 14%. 	ミでが ノ,黒 51%,	62
C-2 海洋面積 85%における年平均の熱収支.縦軸は緯度,横軸は線 黒線は海岸線を表す.(a)大気上端の太陽放射加熱(W/m ²),(b 気上端の惑星放射による冷却(W/m ²),(c)太陽放射による地表 熱(W/m ²),(d)惑星放射による地表の正味冷却(W/m ²),(e) フラックスによる地表の正味冷却(W/m ²),(f)潜熱フラックス る地表の正味冷却(W/m ²).	経度. (b) 大 長の加) 顕熱 くによ	63

C-3	海洋面積 51%における年平均の熱収支. 縦軸は緯度, 横軸は経度. 黒線は海岸線を表す. (a) 大気上端の太陽放射加熱 (W/m ²), (b) 大 気上端の惑星放射による冷却 (W/m ²), (c) 太陽放射による地表の加 熱 (W/m ²), (d) 惑星放射による地表の正味冷却 (W/m ²), (e) 顕熱 フラックスによる地表の正味冷却 (W/m ²), (f) 潜熱フラックスによ る地表の正味冷却 (W/m ²).	64
C-4	海洋面積 35%における年平均の熱収支. 縦軸は緯度, 横軸は経度. 黒線は海岸線を表す. (a) 大気上端の太陽放射加熱 (W/m ²), (b) 大 気上端の惑星放射による冷却 (W/m ²), (c) 太陽放射による地表の加 熱 (W/m ²), (d) 惑星放射による地表の正味冷却 (W/m ²), (e) 顕熱 フラックスによる地表の正味冷却 (W/m ²), (f) 潜熱フラックスによ る地表の正味冷却 (W/m ²).	65
C-5	海洋面積 14%における年平均の熱収支. 縦軸は緯度, 横軸は経度. 黒線は海岸線を表す. (a) 大気上端の太陽放射加熱 (W/m ²), (b) 大 気上端の惑星放射による冷却 (W/m ²), (c) 太陽放射による地表の加 熱 (W/m ²), (d) 惑星放射による地表の正味冷却 (W/m ²), (e) 顕熱 フラックスによる地表の正味冷却 (W/m ²), (f) 潜熱フラックスによ る地表の正味冷却 (W/m ²).	66
D-6	年平均の最下層温度 (K). 縦軸は緯度, 横軸は経度. 黒線は海岸線を 表す. 左上:海洋面積 85%, 右上:海洋面積 51%, 左下:海洋面積 35%, 海洋面積 14%	67
E-7	海洋面積 85%における月平均の地表温度 (K). 縦軸は緯度, 横軸は 経度. 黒線は海岸線を表す. (a)1月, (b)2月, (c)3月, (d)4月, (e)5 月, (f)6月, (g)7月, (h)8月, (i)9月, (j)10月, (k)11月, (l)12月.	69
E-8	海洋面積 51%における月平均の地表温度 (K). 縦軸は緯度, 横軸は 経度. 黒線は海岸線を表す. (a)1月, (b)2月, (c)3月, (d)4月, (e)5 月, (f)6月, (g)7月, (h)8月, (i)9月, (j)10月, (k)11月, (l)12月.	71
E-9	海洋面積 35%における月平均の地表温度 (K). 縦軸は緯度,横軸は 経度.黒線は海岸線を表す. (a)1月, (b)2月, (c)3月, (d)4月, (e)5 月, (f)6月, (g)7月, (h)8月, (i)9月, (j)10月, (k)11月, (l)12月.	73

E-10 海洋面積 14%における月平均の地表温度 (K). 縦軸は緯度, 横軸は 経度. 黒線は海岸線を表す. (a)1 月, (b)2 月, (c)3 月, (d)4 月, (e)5 月, (f)6 月, (g)7 月, (h)8 月, (i)9 月, (j)10 月, (k)11 月, (l)12 月.	75
F-11 海洋面積 85%における月平均の最下層温度 (K). 縦軸は緯度, 横軸 は経度. 黒線は海岸線を表す. (a)1 月, (b)2 月, (c)3 月, (d)4 月, (e)5 月, (f)6 月, (g)7 月, (h)8 月, (i)9 月, (j)10 月, (k)11 月, (l)12 月	77
F-12 海洋面積 51%における月平均の最下層温度 (K). 縦軸は緯度, 横軸 は経度. 黒線は海岸線を表す. (a)1 月, (b)2 月, (c)3 月, (d)4 月, (e)5 月, (f)6 月, (g)7 月, (h)8 月, (i)9 月, (j)10 月, (k)11 月, (l)12 月	79
F-13 海洋面積 35%における月平均の最下層温度 (K). 縦軸は緯度, 横軸 は経度. 黒線は海岸線を表す. (a)1 月, (b)2 月, (c)3 月, (d)4 月, (e)5 月, (f)6 月, (g)7 月, (h)8 月, (i)9 月, (j)10 月, (k)11 月, (l)12 月	81
F-14 海洋面積 14%における月平均の最下層温度 (K). 縦軸は緯度, 横軸 は経度. 黒線は海岸線を表す. (a)1 月, (b)2 月, (c)3 月, (d)4 月, (e)5 月, (f)6 月, (g)7 月, (h)8 月, (i)9 月, (j)10 月, (k)11 月, (l)12 月	83

第1章 テラフォーミングした火星の 気候シミュレーション

火星は地球のとなりにある惑星である.火星には地球と同様に地面があり,薄いながらも大気が存在する(例えば,Kieffer et al. 1992).そのため,火星の地表には人間が居住することのできる可能性があると考えられている.しかしながら,現在の火星表層環境は平均気温が210K程度と低温で乾燥しており,平均気圧は6hPaと地球のおよそ1/200の非常に薄い大気しか存在しない(表1.1).そのため,大気などを改変して火星表層で人間が生身で生活できるようにするテラフォーミングが検討されている.

	地球	火星
赤道半径 [km]	6378	3396
公転半径 [AU]	1.00	1.52
地表重力加速度 [m/s ²]	9.80	3.72
自転周期 [時間]	23.93	24.62
自転軸傾斜角 [deg]	23.44	25.19
離心率	0.0167	0.0935
公転周期 [日]	365.26	686.98
太陽定数 [W/m ²]	1361	586
大気組成	$N_2(78.08\%)$, $O_2(20.95\%)$	$CO_2(95.32\%)$, $N_2(2.7\%)$, $Ar(1.6\%)$
地表平均気温 [K]	288	210
地表平均気圧 [hPa]	1014	6

表 1.1: 地球と火星 *1

http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html
http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/marsfact.html

1

^{*&}lt;sup>1</sup>表 1.1 の数値は以下からの引用.

本研究では、テラフォーミングした火星について、大気大循環モデルを用いて 気候シミュレーションをおこなった.海洋面積をパラメタとしていくつかのシミュ レーションをおこなうことで、海洋面積が気候形成におよぼす影響について考察 するとともに、気候区分図を作成してテラフォーミングした火星の利用可能性に ついて検討した.

第2章 モデルと実験設定

2.1 モデル

本研究では、地球流体電脳倶楽部が開発している大気大循環モデルDCPAM5(高橋ほか、2016; http://gfd-dennou.org/library/dcpam/)バージョンdcpam5-20160517を使用して気候のシミュレーションをおこなった。ここではモデルの概略を述べる.モデルの詳細はDCPAM5のドキュメント *²を参照されたい.

テラフォーミングした火星の表層環境は,基本的に現在の地球に類似したものに なっているはずなので,諸々の実験設定は現在の地球と同じであるとした.力学過 程はプリミティブ方程式で記述され,以下の物理過程を使用した.放射過程はToon et al. (1989), Chou and Lee (1996), Chou et al. (2001),降水過程は大規模凝結 の評価に Manabe (1965)を使用し,積雲対流の評価に Relaxed Arakawa-Schubert (Moorthi and Suarez, 1992),乱流混合の係数の評価には Mellor and Yamada level 2 (Mellor and Yamada, 1974, 1982)を用いた.

惑星表面は陸面と海洋で扱い方を変えた.海洋は一定の熱容量を持つ厚さ 60m の板海として扱い,海面温度をモデルの中で計算する.海面温度が氷点下になっ た場合には海氷が生成するとした.陸面は地中熱伝導方程式を数値的に解いて地 表及び地中の温度を計算するとともに,陸面における水分はバケツモデル Manabe (1969)を使用した.

^{*&}lt;sup>2</sup>https://gfd-dennou.org/arch/dcpam/dcpam5/dcpam5_latest/doc/

2.2 実験設定

本研究ではテラ・フォーミングされた火星として表 2.1 に示したものを考えるこ とにした.テラ・フォーミング後の火星は温暖で海洋があり,大気組成や大気圧は 現在の地球と同じであるとした.一方で,赤道半径,重力加速度,自転周期,自 転軸傾斜角,離心率,公転周期は現在と変わらないとした.ちなみに,火星の自 転周期は 24.66 時間,自転軸傾斜角は 25.19°,これらは地球とほぼ同じである.公 転周期は 669 日で地球のおよそ 2 倍である.離心率は 0.09 で地球に比べるとだい ぶ大きく,火星に入射する太陽放射フラックスは遠日点と近日点でおよそ 1.5 倍も 異なる.

パラメタ		
赤道半径 [km]	3396	火星と同じ
重力加速度 [m/s ²]	3.72	火星と同じ
自転周期 [時間]	24.66	火星と同じ
自転軸傾斜角 [deg]	25.19	火星と同じ
離心率	0.0935	火星と同じ
公転周期 [火星日]	669	火星と同じ
太陽定数 [W/m ²]	1370	地球と同じ
大気組成	主成分は N ₂ + O ₂ ,その他の 微量成分 (CO ₂ , CH ₄ など) を含む	地球と同じ
地表面気圧 [気圧]	1	地球と同じ

表 2.1: テラ・フォーミングした火星

2.2.1 解像度

水平解像度は T21(スペクトル法の三角切断で切断波数 21) とした.格子点は緯 度方向に 32,経度方向に 64 ずつ配置されており,格子点の間隔は約 5.6 度である. 鉛直層の数は 26 層とした.各層の中心位置は Arakawa and Suarez (1983) に基づ いて決めた.また,時間発展を計算する際の時間ステップは 925 秒とした.

2.2.2 海陸分布

図 2.1 は 1996 年に打ち上げられた探査機マーズ・グローバル・サーベイヤーに 搭載された MOLA(Mars Orbiter Laser Altimeter) によって測定された火星の標高 である.紫色が標高の一番低いところ,青色,水色,緑色,黄色,赤色,白色と いくにつれて標高が高くなる.図の中央やや東側にタルシス地域と呼ばれる標高 の高い(赤色や白色)場所がある.



図 2.1: 火星の地形 (出典:https://apod.nasa.gov/apod/ap990528.html). 縦軸は緯度, 横軸は経度.

本研究では海洋面積をパラメタとして,図2.2に記した4つの場合について気候 シミュレーションをおこなった.4つはそれぞれ,(a)標高2000m以下が海洋(海 洋面積85%),(b)標高0m以下が海洋(海洋面積51%),(c)標高-2000m以下が海洋 (海洋面積35%),(d)標高-4000m以下が海洋(海洋面積14%),となっている.以 後,海洋が全惑星表面に占める割合でこれらを呼ぶことにする.火星の地形は,北 半球に低地が広がり,南半球に高地が広がっているため(図2.1),大雑把には,北 半球は海洋,南半球は陸地という海陸分布になる.陸面における特性はMatthews (1983)の砂漠で与えた.







図 2.2: 海陸分布. 青色は海洋, 茶色は陸地 (砂漠). 縦軸は緯度, 横軸は経度. (a) 海洋面積 85%, (b) 海洋面積 51%, (c) 海洋面積 35%, (d) 海洋面積 14%.

2.2.3 数值積分

海洋面積 51%, 35%, 14%については 25 火星年, 海洋面積 85%については 35 火 星年積分し, 定常状態になったと思われる最後の 3 火星年を解析に使用した.

第3章 気候シミュレーション結果の解析

3.1 全球平均

3.1.1 地表温度

表 3.1 は各海洋面積における年平均・全球平均の地表温度,太陽放射加熱,可降水量をまとめたものである.太陽放射加熱の値から有効放射温度を計算し,温室効果の大きさは有効放射温度と地表温度との差として求めた.まず,地表温度を見ると海洋面積が大きいほど高くなっていることがわかる.これは海洋のアルベド(0.1)が陸面のアルベド(0.3)より小さいため,海洋面積が増えると惑星アルベドが小さくなり,太陽放射加熱が増えるためと考えられる.実際に,太陽放射加熱は海洋の面積が大きくなるほど大きくなっている(表 3.1).しかしながら,有効放射温度は海洋の面積が少ないとき(海洋面積 14%)と多いとき(海洋面積 85%)で10K程度しか違わない.地表温度には海洋が多いとき(海洋面積 85%)と少ないとき(海洋面積 14%)で40K程度の差があり,太陽放射加熱の違いだけで地表温度の違いを説明することはできない.この地表温度の違いは温室効果の強さが異なるために生じたものと考えなければならない.可降水量を見ると,海洋面積が大きいときに,より強い温室効果が働いていることと整合的である.

海洋面積	85%	51%	35%	14%
地表温度 [K]	304	285	281	267
太陽放射加熱 [W/m ²]	242	225	222	209
有効放射温度 [K]	256	251	250	246
温室効果 [K]	+48	+34	+31	+21
可降水量 [mm]	153	40	29	5

表 3.1: 全球平均の地表温度

3.1.2 降水量と蒸発量

年平均・全球平均の降水量は海洋の面積が大きくなるにつれて増加する(表 3.2). 定常状態においては、大気中に存在する水蒸気量は変化しないので、蒸発量は降 水量に一致する.すなわち、蒸発した分だけの降水がある.蒸発量は温度や風速 に依存するが、なによりも表面に水が存在するか否かによって規定される.海洋 にはいつも水があっていつでも蒸発できるのに対し、陸地にはいつも水があると は限らず、水がなければ蒸発はおきない.そのため、陸面が増えると地表からの 蒸発量が減り、結果として降水量が減ったと考えられる.

表 3.2: 全球平均の地表温度

海洋面積	85%	51%	35%	14%
降水量 [mm/地球日]	4.31	2.08	1.47	0.29

3.2 東西平均

3.2.1 地表温度

図 3.1 は年平均・全球平均した地表温度である. 3.1.1 節で述べたように,全球 平均の地表温度は海洋面積が大きいほど高い.海洋面積 51%や 35%を見ると,海 洋である北半球の方が陸地である南半球よりも地表温度が高い.

地表温度の緯度分布について,南北温度傾度(低緯度と高緯度の間の温度差)に 着目すると,温度差の小さいものと大きいものの2つに分けられる.前者は,海洋 面積85%の北半球と南半球,海洋面積51%の北半球,海洋面積35%の北半球,後 者は,海洋面積51%の南半球,海洋面積35%の南半球,海洋面積14%の北半球と 南半球,である.南北温度傾度は,半球の広い範囲を海洋がおおうときに小さく なり,半球の広い範囲を陸地がおおうときに大きくなる傾向がある.



図 3.1: 地表温度の緯度分布. 縦軸は地表温度 (K),横軸は緯度. (a) 海洋面積 85%, (b) 海洋面積 51%, (c) 海洋面積 35%, (d) 海洋面積 14%.

3.2.2 水収支

図 3.2 は年平均・東西平均した降水量と蒸発量である.海洋面積 85%のときはだいたいどの緯度にも海洋があるので、すべての緯度で蒸発がある.一方で、海洋面積 51%や 35%のときは、南緯 30°以南はほとんどが陸地で海洋はほとんどないため、この緯度帯の蒸発量は少ない.また、海洋面積 14%のときはほぼ全域が陸地なので、ほぼ全域で蒸発量が少ない.降水分布は大気大循環によっても決まるが、おおむね蒸発のある緯度帯で降水が生じていることがわかる.



図 3.2: 降水量と蒸発量の緯度分布. 縦軸は降水量と蒸発量, 横軸は緯度. 青は 降水量 (mm/地球日), 赤は蒸発量 (mm/地球日). (a) 海洋面積 85%, (b) 海洋面積 51%, (c) 海洋面積 35%, (d) 海洋面積 14%.

3.2.3 大気上端の熱収支

図 3.3 は大気上端における年平均・東西平均した正味の太陽放射と外向き惑星 放射を描いたものである.惑星が球形であるため,太陽放射加熱は一般に低緯度 で大きく,高緯度で小さくなる.ほどほどの大きさの海洋が存在する 85%,51%, 35%のときは,赤道付近の太陽放射加熱が弱くなっているが,これは熱帯収束帯で 発生した雲によって太陽光が反射されているためである.

太陽放射加熱と惑星放射による冷却を比較すると,低緯度では太陽放射加熱が, 高緯度では惑星放射による冷却の方が大きい.この熱収支の不均衡は,大気大循 環によって熱が低緯度から高緯度へ運ばれることによって解消される.

図 3.4 は年平均の南北熱輸送量である.海洋面積 14%のときは,南半球から北半球に熱輸送があるが,それ以外では南北半球間の熱輸送は小さい.

220 200

> 180 160

140

120 100

80

-80 -60 -40 -20

0 20

latitude

40 60 80 (degrees_north)



図 3.3: 大気上端の熱収支. 横軸は緯度. 赤は太陽放射加熱 (W/m²), 青は惑星放 射による冷却 (W/m²). (a) 海洋面積 85%, (b) 海洋面積 51%, (c) 海洋面積 35%, (d) 海洋面積 14%.

220

200 180

160

140 120

100

80

-80 -60 -40 -20

0 20

latitude

40 60 80 (degrees_north)



図 3.4: 南北熱輸送量の緯度分布.北向きの熱輸送は正,南向きの熱輸送は負,単位は peta watts. (a) 海洋面積 85%, (b) 海洋面積 51%, (c) 海洋面積 35%, (d) 海洋面積 14%.

3.2.4 地表の熱収支

図3.5は地表における年平均・東西平均した太陽放射加熱,惑星放射による正味 冷却,顕熱フラックスによる正味冷却,潜熱フラックスによる正味冷却,である. 地表(海洋を含む)における水平方向の熱輸送はないものとしているため,各緯度 帯で熱の収支はバランスする.基本的には,太陽放射による加熱と,惑星放射と 蒸発(潜熱フラックス)による冷却がバランスする形になっている.太陽放射によ る加熱は,海洋面積によらずおおよそ赤道に対して対称な分布になっているのに 対し,潜熱フラックスによる冷却は海洋面積によってその緯度分布が大きく変化 する.海洋面積85%のときは,ほぼ全ての緯度で蒸発があるのに対し,海洋面積 51%と35%では南半球で蒸発がほとんどなく,海洋面積14%ではほぼ全球で蒸発 がない.これは,火星の海陸分布(図2.2)によって地表からの蒸発量が規定されて いるためであると考えられる(図3.2).



図 3.5: 地表の熱収支. 横軸は緯度. 赤は太陽放射による地表の加熱 (W/m²), 青 は惑星放射による地表の正味冷却 (W/m²), 黒は顕熱フラックスによる地表の正味 冷却 (W/m²), 黄は潜熱フラックスによる地表の正味冷却 (W/m²). (a) 海洋面積 85%, (b) 海洋面積 51%, (c) 海洋面積 35%, (d) 海洋面積 14%.

3.3 季節変化

3.3.1 地表温度

図 3.6 は、地表温度の季節変化を示したものである.温度の季節変化の振幅は北 半球と南半球で大きく異なっている.例えば、海洋面積 51%のとき、温度の季節 変化の振幅は北緯 80°でおよそ 10K 程度であるのに対し、南緯 80°では 100K 以上 になっている.このように南北で季節変化の振幅が大きく異なるのは、一つには 陸地と海洋の違いによるものと考えられる.海洋である北半球は熱容量が大きく 温度変化が小さくなるのに対し、陸地である南半球は熱容量が小さいため温度変 化が大きくなる.もう一つは離心率の影響が考えられる.火星は地球に比べると 離心率が大きく、近日点と遠日点で惑星が受け取る太陽放射の大きさはおよそ 1.5 倍程度変わる.南半球の夏至付近で近日点を通過し、南半球の冬至付近で遠日点 を通過するため、南半球の季節変化は北半球に比べて大きくなると考えられる.

各季節において地表温度が極大になる緯度は,太陽直下点の緯度が南北に移動 するのにともなって南北に移動しているが,必ずしも太陽直下点緯度に一致して いるわけではない.地表と大気は有限の熱容量を持つため,加熱されて温度が変 化するには時間がかかるためである.地表温度の極大と太陽直下点のずれは,陸 地より海洋の方が大きい.これは陸地より海洋の方が熱容量が大きいためである.

-80

161 162 163 164 165 166 167



図 3.6: 地表温度の季節変化. 縦軸は緯度, 横軸は時間で図の端から端までが1年. 左端は北半球の春分. 色は東西平均の地表温度 (K) を表し, 黒い曲線は太陽直下 点の緯度を表す. (a) 海洋面積 85%, (b) 海洋面積 51%, (c) 海洋面積 35%, (d) 海 洋面積 14%.

192

(×100 day)

time

-80

161 162 163 164 165 166 167 (×100 day)

time

2017/02/10(清水 康嗣)

192

3.3.2 降水量

図3.7 は降水量の季節変化を示したものである.低緯度に見られる降水は熱帯収 束帯によるもので,熱帯収束帯が季節によって南北に移動するのに合わせて,降 水域が南北に移動している.熱帯収束帯の南側と北側に見られる降水量の少ない 地域は亜熱帯高圧帯に対応するものと考えられる.海洋面積85%ははっきりしな いが,海洋面積51%と35%のときは,降水のある地域に比べて熱帯収束帯の北側 と南側の降水量の少ない地域の方が海面気圧が高くなっている(図3.8).中高緯度 は,地表が海洋であれば1年を通じて降水があるが,地表が陸地のときには1年 を通じてほとんど降水がない.



図 3.7: 降水の季節変化. 縦軸は緯度, 横軸は時間. 図の端から端までが1年. 左端は北半球の春分. 色は降水量 (mm/地球日)の東西平均を表し, 黒い曲線は太陽 直下点の緯度を表す. (a) 海洋面積 85%, (b) 海洋面積 51%, (c) 海洋面積 35%, (d) 海洋面積 14%.

1.07e+5

.06e+5

04++5

02e+5

e+5

1000

00981

126000

123000

20000

117000

14000

11088

(×100 day)

-80

161 162 163 164 165 166 167



図 3.8: 海面気圧の季節変化. 縦軸は緯度, 横軸は時間. 図の端から端までが1年. 左端は北半球の春分. 色は海面気圧 (Pa) の東西平均を表し, 黒い曲線は太陽直下 点の緯度を表す. 色の塗り方が図によって違うことに注意されたい. (a) 海洋面積 85%, (b) 海洋面積 51%, (c) 海洋面積 35%, (d) 海洋面積 14%.

101286

(×100 day)

time

-80

161

162

163 164 165 166 167

time

3.4 年平均

3.4.1 地表温度

図 3.9 は年平均した地表温度を示したものである. 3.1.1 節や 3.2.1 節で述べたように海洋面積を大きくするほど温度が高くなっており,どの海洋面積のときも熱帯で一番温度が高くなる. タルシス地域 (北緯 0°~-20°, 東経 230°~270°) は標高が高いため,他の同じ緯度の場所に比べると温度が低くなっている.







図 3.9: 年平均した地表温度 (K). 縦軸は緯度,横軸は経度. 黒線は海岸線を表す. (a) 海洋面積 85%, (b) 海洋面積 51%, (c) 海洋面積 35%, (d) 海洋面積 14%.

3.4.2 降水量

図 3.10 は年平均した降水量を示したものである.海洋上で降水があり,陸上は 一部地域を除いては降水がない (少ない),という傾向が見える.降水量が最大に なる地域は,海洋面積によらずタルシス地域 (北緯 0°~-20°,東経 230°~270°)の 西側である.地形性の降水であることが示唆される.
120

180

longitude

240

300 (degrees_east)



300 (degrees_east)



longitude



図 3.10: 年平均した降水量 (mm/地球日). 縦軸は緯度,横軸は経度. 黒線は海岸線を表す. (a) 海洋面積 85%, (b) 海洋面積 51%, (c) 海洋面積 35%, (d) 海洋面積 14%.

3.5 月平均

3.5.1 降水量と風

図 3.11 から図 3.14 は月平均の降水量と大気最下層の風を示したものである. 北 半球の春分は1月1日なので,1~3月が北半球の春(南半球の秋),4~6月が北半 球の夏(南半球の冬),7~9月が北半球の秋(南半球の春),10~12月が北半球の冬 (南半球の夏)である.

海洋面積 85%のとき (図 3.11) は,年間を通じて中高緯度は西風,低緯度は東風 となっている.風系から,熱帯収束帯が季節進行に合わせて南北に移動している のを見てとることができ,熱帯収束帯と降水域が重なっていることもわかる.

海洋面積 51%(図 3.12) と 35%(図 3.13)の風と降水の季節変化はほぼ同様の傾向 を示す.中高緯度の西風は,海洋が広い地域を占める北半球で強く,陸地が多い 南半球で弱い.低緯度では,北半球の春から夏にかけて南風が吹き,北半球の秋 から冬にかけて北風が吹く.南半球の陸地には,南半球の春から夏にかけて北風 (海洋から陸地へ向かって吹く風)が吹くときに,降水が見られる.降水量が最大 である,タルシス西側地域に降る雨は,主に南半球の夏に降っている.

海洋面積 14%(図 3.14)のときも、大気最下層の風は、中高緯度で西風、低緯度 で東風になっている。海洋面積が大きいときに比べると、熱帯収束帯の位置は季 節によって大きく変わる。陸地は海洋に比べ熱容量が小さく温度が変わりやすい ため、地表温度が極大となる経度が南北に大きく移動するためと考えられる。













図 3.11: 海洋面積 85%における月平均の降水量 (mm/地球日) と大気最下層の風 (m/s) のベクトル図. 黒線は海岸線を表す. (a)1 月, (b)2 月, (c)3 月, (d)4 月, (e)5 月, (f)6 月, (g)7 月, (h)8 月, (i)9 月, (j)10 月, (k)11 月, (l)12 月.









Apr









図 3.12: 海洋面積 51%における月平均の降水量 (mm/地球日) と大気最下層の風 (m/s) のベクトル図. 黒線は海岸線を表す. (a)1 月, (b)2 月, (c)3 月, (d)4 月, (e)5 月, (f)6 月, (g)7 月, (h)8 月, (i)9 月, (j)10 月, (k)11 月, (l)12 月.



(b)















図 3.13: 海洋面積 35%における月平均の降水量 (mm/地球日) と大気最下層の風 (m/s) のベクトル図. 黒線は海岸線を表す. (a)1 月, (b)2 月, (c)3 月, (d)4 月, (e)5 月, (f)6 月, (g)7 月, (h)8 月, (i)9 月, (j)10 月, (k)11 月, (l)12 月.







図 3.14: 海洋面積 14%における月平均の降水量 (mm/地球日) と大気最下層の風 (m/s)のベクトル図. 黒線は海岸線を表す. (a)1月, (b)2月, (c)3月, (d)4月, (e)5月, (f)6月, (g)7月, (h)8月, (i)9月, (j)10月, (k)11月, (l)12月.

longitude 24 36 45

12

3.5.2 陸上の積雪

図 3.15 から図 3.17 は月平均の陸上の積雪量である.海洋面積 85%のときは積雪 がない.

海洋面積 51%と 35%のときは、南半球の秋から春にかけて南緯 50° 以南に積雪 が見られる.また、海洋面積 35%のときは、南半球の冬から春にかけて標高の高 いタルシス地域に積雪する.

海洋面積14%のときは、降水(降雪)が少ないためまとまった積雪は現れない.



(b)











(h)









図 3.15: 海洋面積 51%における月平均の積雪量 (cm). 黒線は海岸線を表す. (a)1 月, (b)2月, (c)3月, (d)4月, (e)5月, (f)6月, (g)7月, (h)8月, (i)9月, (j)10 月, (k)11月, (l)12月.



(b)











(h)



図 3.16: 海洋面積 35%における月平均の積雪量 (cm). 黒線は海岸線を表す. (a)1 月, (b)2月, (c)3月, (d)4月, (e)5月, (f)6月, (g)7月, (h)8月, (i)9月, (j)10 月, (k)11月, (l)12月.



(b)











(h)







Oct



図 3.17: 海洋面積 14%における月平均の積雪量 (cm). 黒線は海岸線を表す. (a)1 月, (b)2月, (c)3月, (d)4月, (e)5月, (f)6月, (g)7月, (h)8月, (i)9月, (j)10 月, (k)11月, (l)12月.

第4章 気候区分図

4.1 気候区分図の作成

図 4.1 に従って気候の区分をおこない,テラフォーミングした火星の気候区分 図を作成した.基本的にはケッペンの気候区分(例えば,http://geo.skygrass. net/note/clim/koppen.pdf)を従うが,乾燥限界は降水の季節分布や年平均気温 に依らず一定の値を用いることとし,年降水量 300mm 以下の地域を乾燥,年降水 量 100mm 以下の地域を超乾燥とした.日本沙漠学会(https://www.jaals.net/沙 漠のギャラリー/)によると,年降水量 300mm 以下になると安定した牧畜や農業を 営むことが難しくなり,年降水量 100mm 以下は人間は限定された活動しかできな い地域とされている.地球における乾燥限界の基準を火星に適用するにあたって は,年降水量を日降水量に変換した数値を用いた.



図 4.1: 気候区分図の判定表

4.2 気候区分図

図 4.2 は、気候シミュレーションの結果に基づいて作成した気候区分図である. 海洋面積 85%のときを除くと、南半球の広い領域が乾燥地域 (橙,暗黄) になって いる.南半球が巨大な大陸となるとき、海洋から離れた大陸の内部には水蒸気が 輸送されず雨が降らないため、このような広大な乾燥地域が現れたと考えられる. 一方で、海洋面積 85%のときには、大きな大陸が存在しないため大きな乾燥地域 はあらわれず、平均気温が高いため熱帯が広く分布する.









図 4.2: 気候区分図. 縦軸は緯度, 横軸は経度, 黒線は海岸線. (a) 海洋面積 85%, (b) 海洋面積 51%, (c) 海洋面積 35%, (d) 海洋面積 14%. 赤:熱帯気候, 橙:超乾燥 気候, 暗黄:乾燥気候, 緑:温帯気候, 水:冷帯気候, 薄青:ツンドラ気候, 青:氷雪気候

4.3 火星の利用可能性

図 4.3 は各気候帯が惑星表面に占める割合をまとめたものである.以下,この図 に基づいてテラフォーミングした火星の利用可能性について考察する.

海洋は人間がボートを浮かべて生活するわけにはいかないので,居住できない と考えることにする.さらに,超乾燥気候や氷雪気候も生活するのはなかなか厳 しいので,人間が居住するには適さない.そうすると,居住に適した範囲は乾燥 気候,熱帯気候,温帯気候,冷帯気候,ツンドラ気候になる.また,快適に過ごせ るかどうかという観点で考えてみると,乾燥気候は乾燥が厳しく,ツンドラ気候 も少し寒すぎる思われるので,住んでもいいと考えられるのは図 4.3 の熱帯気候, 温帯気候,冷帯気候の部分になる.まとめると,火星のテラフォーミングにおい ては海洋面積がどの程度であるかによって惑星の住みやすさが変わってくる.海 洋面積が大きいと利用可能な陸地は狭くなるが,一方で,海洋面積が小さくなる と,惑星の広い範囲は乾燥地域になってしまう.火星の利用可能性を最大化する には,海洋面積を 35%から 50%程度にするのがよいと考えられる.



図 4.3: 居住可能領域. 橙:超乾燥気候, 暗黄:乾燥気候, 赤:熱帯気候, 緑:温帯気候, 水:冷帯気候, 薄青:ツンドラ気候, 青:氷雪気候, 灰:海洋.

第5章 まとめ

大気大循環モデルを用いてテラフォーミングした火星の気候シミュレーション をおこなった.全表面積に占める海洋の割合を変更していくつかの気候シミュレー ションをおこない,海洋面積と気候の関係について考察した.

全球平均の地表温度は、海洋面積が大きいほど地表温度が高くなった.これは 海洋と陸面のアルベドの違いによって、海洋面積が大きいほど太陽放射加熱が増 えたためと考えられる.また、海洋面積を大きくすると大気中の水蒸気量が増え、 より強い温室効果が働くことによって高い地表温度になった.

全球平均の降水量は,海洋面積が大きいときに増加し,小さいときに減少する. これは,海洋にはいつも水があっていつでも蒸発できるのに対し,陸面にはいつ も水があるとは限らず,水がなければ蒸発はおきないためと考えられる.

テラフォーミングした火星の気候区分図を作成した.海洋面積がある程度より 小さくなると、南半球の広い領域は乾燥地域になる.火星の地形はおおまかに北 半球が低く、南半球が高くなっているため、海洋面積が小さくなると南半球は巨 大な大陸となり、海洋から離れた大陸の内部には水蒸気が輸送されず雨が降らな くなるためである.テラフォーミングした火星で利用可能(居住可能)な陸地面積 を最大化するためには、ほどよい大きさの海洋が必要である.

謝辞

本研究を進めるにあたり,多くの方々にお世話になりました.指導教員であるは しもとじょーじ准教授には,研究の方針や進め方,考え方など多くのアドバイス をいただきました.神戸大学の高橋芳幸准教授にはdcpamの使い方やコンパイル 方法について教えていただきました.また,大西将徳研究員や研究室のメンバーに は,研究の相談や日々の話し相手になっていただき,楽しく過ごすことができまし た.なお,本研究の解析には地球流体電脳倶楽部 Ruby プロジェクトの Ruby-DCL および Gphysを使用しました.この場を借りて,皆様に心より感謝申し上げます.

付録

A スクリプト

A-1 全球平均降水量

海洋面積51%における全球平均降水量を求めた際に用いたスクリプトを載せる.

```
require "numru/ggraph"
include NumRu
vname0 = 'PRCP'
ys = 23
ye = 25
yyy = 62+65+67+64+60+55+49+47+46+48+51+55
gphys0 = GPhys::NetCDF_IO.open(vname0+'.nc',vname0)
gphys0 = gphys0/1000.0*60.0*60.0*24.0*1000.0
gphys0.units = Units['mm/day']
gphysw = GPhys::NetCDF_IO.open(vname0+".nc", 'lat_weight')
weight = gphysw.val
weight = weight / weight.sum(0)
gphysy0 = gphys0.cut('time'=>yyy*(ys-1)+1..yyy*(ys-1)+yyy).mean('time')
for i in ys+1..ye
  gphysy0 = gphysy0 + gphys0.cut('time'=>yyy*(i-1)+1..yyy*(i-1)+yyy).mean('time')
end
```

```
gphysy0 = gphysy0/(ye-ys+1)
```

```
gphysy0 = (gphysy0*weight.reshape!(1,gphysw.shape[0])).sum('lat').mean('lon')
```

puts gphysy0

2017/02/10(清水 康嗣)

A-2 水収支

海洋面積 51%における水収支の絵を描く際に用いたスクリプトを載せる.

```
require "numru/ggraph"
include NumRu
vname0 = 'PRCP'
vname1 = 'EvapA'
ys = 23
ye = 25
yyy = 62+65+67+64+60+55+49+47+46+48+51+55
gphys0 = GPhys::NetCDF_IO.open(vname0+'.nc',vname0)
gphys0 = gphys0/1000.0*60.0*60.0*24.0*1000.0
gphys0.units = Units['mm/day']
gphys1 = GPhys::NetCDF_IO.open(vname1+'.nc',vname1)
gphys1 = (gphys1/(2.5*10**6*1000.0))*60.0*60.0*24.0*1000.0
gphys1.units = Units['mm/day']
gphysy0 = gphys0.cut('time'=>yyy*(ys-1)+1..yyy*(ys-1)+yyy).mean('time')
gphysy1 = gphys1.cut('time'=>yyy*(ys-1)+1..yyy*(ys-1)+yyy).mean('time')
for i in ys+1..ye
  gphysy0 = gphysy0 + gphys0.cut('time'=>yyy*(i-1)+1..yyy*(i-1)+yyy).mean('time')
 gphysy1 = gphysy1 + gphys1.cut('time'=>yyy*(i-1)+1..yyy*(i-1)+yyy).mean('time')
end
gphysy0 = gphysy0/(ye-ys+1)
gphysy1 = gphysy1/(ye-ys+1)
gphysy0 = gphysy0.mean('lon')
gphysy1 = gphysy1.mean('lon')
DCL.gropn(4)
DCL.sgpset('isub', 96)
DCL.sgpset('lfull',true)
DCL.uzfact(0.6)
```

GGraph.set_fig('viewport'=>[0.25,0.7,0.15,0.6])
GGraph.set_axes('ytitle'=>'')
GGraph.line(gphysy0,true,'min'=>0,'max'=>10,'index'=>45,'legend'=>true,'title'=>'wa
GGraph.line(gphysy1,false,'index'=>25,'legend'=>'Evap')

DCL.grcls

A-3 降水量の季節変化

ここでは海洋面積 51%における降水量の季節変化の絵を描く際に用いたスクリプトを載せる.

```
require "numru/ggraph"
include NumRu
vname1 = 'PRCP'
vname2 = 'Decl'
ts = 24*669+1
te = 24*669+669
gphysw = GPhys::NetCDF_IO.open(vname1+".nc", 'lat_weight')
weight = gphysw.val
weight = weight / weight.sum(0)
gphys1 = GPhys::NetCDF_IO.open(vname1+".nc", vname1)
gphys1 = gphys1/1000.0*60.0*60.0*24.0*1000.0
gphys1.units = Units['mm/day']
gphys2 = GPhys::NetCDF_IO.open(vname2+"_rank000000.nc", vname2)
DCL.gropn(4)
DCL.sgpset('isub', 96)
DCL.sgpset('lfull',true)
DCL.uzfact(0.6)
GGraph.set_fig('viewport'=>[0.25,0.7,0.15,0.6])
GGraph.tone( gphys1.mean('lon').cut(true,ts..te), true, 'max'=>25, 'min'=>1, 'exchange
GGraph.line( gphys2.cut(ts..te), false,'index'=>9 )
GGraph.color_bar
DCL.grcls
```

A-4 年平均降水量

海洋面積51%における年平均の降水量の絵を描く際に用いたスクリプトを載せる.

```
require "numru/ggraph"
include NumRu
vname0 = 'PRCP'
vname00 = 'sp_for_Mars_T021_MGS_SL0000'
vname1 = '23-25'
ys = 23
ye = 25
yyy = 62+65+67+64+60+55+49+47+46+48+51+55
          = GPhys:::IO.open(vnameO+'.nc',vnameO )
gphys
          = gphys/1000.0*86400.0*1000.0
gphys
gphys.units = Units['mm/day']
gphystopo = GPhys::IO.open(vname00+'.nc','sfcindex')
gphysm = gphys.cut('time'=>yyy*(ys-1)+1..yyy*(ys-1)+yyy).mean('time')
for i in ys+1..ye
  gphysm = gphysm + gphys.cut('time'=>yyy*(i-1)+1..yyy*(i-1)+yyy).mean('time')
end
gphysm = gphysm/(ye-ys+1)
DCL.gropn(4)
DCL.sgpset('isub', 96)
DCL.sgpset('lfull',true)
DCL.uzfact(0.6)
DCL.udpset('LMSG',false)
GGraph.set_fig('viewport'=>[0.15,0.85,0.15,0.6])
GGraph.tone( gphysm,true,'min'=>1,'max'=>20,'annotate'=>false )
GGraph.set_contour_levels('levels'=>[0,0.001],'index'=>[6,6])
GGraph.contour( gphystopo,false )
```

GGraph.color_bar

DCL.grcls

A-5 月平均降水量と大気最下層の風

海洋面積 51%における月平均の降水量と大気最下層風の絵を描く際に用いたスクリプトを載せる.

```
require "numru/ggraph"
include NumRu
vname0 = 'PRCP'
vname1 = 'U'
vname2 = V'
vname00 = 'sp_for_Mars_T021_MGS_SL0000'
ys = 23
ye = 25
yyy = 62+65+67+64+60+55+49+47+46+48+51+55
jan = 62
feb = 62+65
mar = 62+65+67
apr = 62+65+67+64
may = 62+65+67+64+60
jun = 62+65+67+64+60+55
jul = 62+65+67+64+60+55+49
aug = 62+65+67+64+60+55+49+47
sep = 62+65+67+64+60+55+49+47+46
oct = 62+65+67+64+60+55+49+47+46+48
nov = 62+65+67+64+60+55+49+47+46+48+51
dec = 62+65+67+64+60+55+49+47+46+48+51+55
            = GPhys:::IO.open(vname0+'.nc',vname0)
gphys
            = gphys/1000.0*86400.0*1000.0
gphys
gphys.units = Units['mm/day']
            = GPhys:::IO.open(vname1+'.nc',vname1 )
gphysu
           = GPhys::IO.open(vname2+'.nc',vname2 )
gphysv
gphystopo = GPhys::IO.open(vname00+'.nc','sfcindex')
months = [0, jan, feb, mar, apr, may, jun, jul, aug, sep, oct, nov]
```

```
monthe = [jan,feb,mar,apr,may,jun,jul,aug,sep,oct,nov,dec]
       = ["Jan", "Feb", "Mar", "Apr", "May", "Jun", "Jul", "Aug", "Sep", "Oct", "Nov", "Dec"]
tuki
DCL.swpset("iposx",50)
DCL.swpset("iposy",50)
DCL.swpset("lwait0",false)
DCL.swpset("lwait1",false)
DCL.swpset("lwait",false)
DCL.swpset("ldump",true)
DCL.gropn(4)
DCL.sgpset('isub', 96)
DCL.sgpset('lfull',true)
DCL.uzfact(0.6)
DCL.udpset('LMSG',false)
GGraph.set_fig('viewport'=>[0.15,0.85,0.15,0.6])
months.zip(monthe,tuki).each do |ms,me,t|
           = gphys.cut('time'=>yyy*(ys-1)+ms+1..yyy*(ys-1)+me).mean('time')
  gphysm
  gphysmu = gphysu.cut('time'=>yyy*(ys-1)+ms+1..yyy*(ys-1)+me).mean('time')
  gphysmv = gphysv.cut('time'=>yyy*(ys-1)+ms+1..yyy*(ys-1)+me).mean('time')
  for i in ys+1..ye
    gphysm = gphysm + gphys.cut('time'=>yyy*(i-1)+ms+1..yyy*(i-1)+me).mean('time'
    gphysmu = gphysmu + gphysu.cut('time'=>yyy*(i-1)+ms+1..yyy*(i-1)+me).mean('time'
    gphysmv = gphysmv + gphysv.cut('time'=>yyy*(i-1)+ms+1..yyy*(i-1)+me).mean('time'
  end
  gphysm = gphysm/(ye-ys+1)
  gphysmu = gphysmu/(ye-ys+1)
  gphysmv = gphysmv/(ye-ys+1)
  GGraph.tone( gphysm,true,'min'=>1,'max'=>45,'title'=>t,'annotate'=>false )
  GGraph.vector( gphysmu,gphysmv,false,'index'=>755,'flow_vect'=>true,'factor'=>2.0
  GGraph.set_contour_levels('levels'=>[0,0.001],'index'=>[9])
  GGraph.contour( gphystopo,false, )
  GGraph.color_bar('landscape'=>true)
end
```

DCL.grcls

A-6 気候区分図

海洋面積 51%における気候区分図の絵を描く際に用いたスクリプトを載せる.

```
require "numru/ggraph"
include NumRu
vname0 = 'Temp'
vname2 = 'PRCP'
vname00 = 'sp_for_Mars_T021_MGS_SL0000'
ys = 23
ye = 25
yyy = 62+65+67+64+60+55+49+47+46+48+51+55
jan = 62
feb = 62+65
mar = 62+65+67
apr = 62+65+67+64
may = 62+65+67+64+60
jun = 62+65+67+64+60+55
jul = 62+65+67+64+60+55+49
aug = 62+65+67+64+60+55+49+47
sep = 62+65+67+64+60+55+49+47+46
oct = 62+65+67+64+60+55+49+47+46+48
nov = 62+65+67+64+60+55+49+47+46+48+51
dec = 62+65+67+64+60+55+49+47+46+48+51+55
months = [0,jan,feb,mar,apr,may,jun,jul,aug,sep,oct,nov]
monthe = [jan,feb,mar,apr,may,jun,jul,aug,sep,oct,nov,dec]
number = [0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11]
lats = [-85.76059, -80.26878, -74.74454, -69.21297, -63.67863, -58.14296, -52.60653, -47.0
lons = [0, 5.625, 11.25, 16.875, 22.5, 28.125, 33.75, 39.375, 45, 50.625, 56.25, 61.875, 67.5, 7.5, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625, 50.625,
```

```
nlon = 64
nlat = 32
data = VArray.new( NArray.sfloat(nlon,nlat),
                 {"long_name"=>"Climate"},
                 "Climate" )
gphys
             = GPhys:::IO.open(vname0+'.nc',vname0)
             = GPhys:::IO.open(vname2+'.nc',vname2)
gphys2
             = gphys2/1000.0*86400.0*1000.0
gphys2
gphys2.units = Units['mm/day']
            = GPhys::IO.open(vname00+'.nc', 'sfcindex')
gphystopo
gphyslon = gphys.axis('lon')
gphyslat = gphys.axis('lat')
r100 = 100.0/365.0
r300 = 300.0/365.0
gphysm = []
lons.zip(i).each do |lon,i|
  lats.zip(j).each do |lat,j|
    number.zip(months,monthe).each do |k,ms,me|
     gphysm[k] = gphys.cut('lat'=>lat,'lon'=>lon,'sig'=>0.998,'time'=>yyy*(ys-1)+
     for 1 in ys+1..ye
       gphysm[k] = gphysm[k]+gphys.cut('lat'=>lat,'lon'=>lon,'sig'=>0.998,'time'=>
     end
     gphysm[k] = gphysm[k]/(ye-ys+1)
    end
    gphysm2 = gphys2.cut('lat'=>lat,'lon'=>lon,'time'=>yyy*(ys-1)+1..yyy*(ys-1)+yy
    for 1 in ys+1..ye
     gphysm2 = gphysm2+gphys2.cut('lat'=>lat,'lon'=>lon,'time'=>yyy*(l-1)+1..yyy*
    end
    gphysm2 = gphysm2/(ye-ys+1)
```

```
if (gphysm.max < 283.15 && gphysm.max <= 273.15) then
      data[i,j] = 7
    elsif (gphysm.max < 283.15 && gphysm.max > 273.15) then
      data[i,j] = 6
    elsif (gphysm.max >= 283.15 && gphysm2 < r300 && gphysm2 < r100) then
      data[i,j] = 2
    elsif (gphysm.max >= 283.15 && gphysm2 < r300 && gphysm2 > r100) then
      data[i,j] = 3
    elsif (gphysm.max >= 283.15 && gphysm2 >= r300 && gphysm.min >= 291.15) then
      data[i,j] = 1
    elsif (gphysm.max >= 283.15 && gphysm2 >= r300 && 270.15 <= gphysm.min && gphys
      data[i,j] = 4
    elsif (gphysm.max >= 283.15 && gphysm2 >= r300 && 270.15 > gphysm.min) then
      data[i,j] = 5
    else
      data[i,j] = 0
    end
  end
end
gphys00 = GPhys.new( Grid.new(gphyslon,gphyslat), data )
DCL.gropn(4)
DCL.sgpset('isub', 96)
DCL.sgpset('lfull',true)
DCL.uzfact(0.6)
DCL.udpset('LMSG',false)
GGraph.set_fig('viewport'=>[0.15,0.85,0.15,0.6])
GGraph.set_tone_levels('levels'=>[1,2,3,4,5,6,7],'patterns'=>[86999,75999,67999,559
GGraph.tone(gphys00,true)
GGraph.set_contour_levels('levels'=>[0,0.001],'index'=>[6,6])
GGraph.contour(gphystopo,false)
GGraph.color_bar
```

DCL.grcls




B 積雪量(季節変化)



図 B-1: 積雪量の季節変化. 縦軸は緯度, 横軸は時間. 図の端から端までが1年. 左端は北半球の春分. 色は積雪量 (cm)の東西平均を表し, 黒線は太陽直下点の緯 度を表す. (a) 海洋面積 85%, (b) 海洋面積 51%, (c) 海洋面積 35%, (d) 海洋面積 14%.





図 C-2: 海洋面積 85%における年平均の熱収支. 縦軸は緯度, 横軸は経度. 黒線は 海岸線を表す. (a) 大気上端の太陽放射加熱 (W/m²), (b) 大気上端の惑星放射に よる冷却 (W/m²), (c) 太陽放射による地表の加熱 (W/m²), (d) 惑星放射による地 表の正味冷却 (W/m²), (e) 顕熱フラックスによる地表の正味冷却 (W/m²), (f) 潜 熱フラックスによる地表の正味冷却 (W/m²).



図 C-3: 海洋面積 51%における年平均の熱収支. 縦軸は緯度, 横軸は経度. 黒線は 海岸線を表す. (a) 大気上端の太陽放射加熱 (W/m²), (b) 大気上端の惑星放射に よる冷却 (W/m²), (c) 太陽放射による地表の加熱 (W/m²), (d) 惑星放射による地 表の正味冷却 (W/m²), (e) 顕熱フラックスによる地表の正味冷却 (W/m²), (f) 潜 熱フラックスによる地表の正味冷却 (W/m²).



図 C-4: 海洋面積 35%における年平均の熱収支. 縦軸は緯度, 横軸は経度. 黒線は 海岸線を表す. (a) 大気上端の太陽放射加熱 (W/m²), (b) 大気上端の惑星放射に よる冷却 (W/m²), (c) 太陽放射による地表の加熱 (W/m²), (d) 惑星放射による地 表の正味冷却 (W/m²), (e) 顕熱フラックスによる地表の正味冷却 (W/m²), (f) 潜 熱フラックスによる地表の正味冷却 (W/m²).



図 C-5: 海洋面積 14%における年平均の熱収支. 縦軸は緯度, 横軸は経度. 黒線は 海岸線を表す. (a) 大気上端の太陽放射加熱 (W/m²), (b) 大気上端の惑星放射に よる冷却 (W/m²), (c) 太陽放射による地表の加熱 (W/m²), (d) 惑星放射による地 表の正味冷却 (W/m²), (e) 顕熱フラックスによる地表の正味冷却 (W/m²), (f) 潜 熱フラックスによる地表の正味冷却 (W/m²).







図 D-6: 年平均の最下層温度 (K). 縦軸は緯度,横軸は経度. 黒線は海岸線を表す. 左上:海洋面積 85%,右上:海洋面積 51%,左下:海洋面積 35%,海洋面積 14%.

E 地表温度(月平均)











図 E-7: 海洋面積 85%における月平均の地表温度 (K). 縦軸は緯度, 横軸は経度. 黒線は海岸線を表す. (a)1月, (b)2月, (c)3月, (d)4月, (e)5月, (f)6月, (g)7月, (h)8月, (i)9月, (j)10月, (k)11月, (l)12月.











図 E-8: 海洋面積 51%における月平均の地表温度 (K). 縦軸は緯度, 横軸は経度. 黒線は海岸線を表す. (a)1月, (b)2月, (c)3月, (d)4月, (e)5月, (f)6月, (g)7月, (h)8月, (i)9月, (j)10月, (k)11月, (l)12月.











図 E-9: 海洋面積 35%における月平均の地表温度 (K). 縦軸は緯度, 横軸は経度. 黒線は海岸線を表す. (a)1月, (b)2月, (c)3月, (d)4月, (e)5月, (f)6月, (g)7月, (h)8月, (i)9月, (j)10月, (k)11月, (l)12月.









2017/02/10(清水 康嗣)



図 E-10: 海洋面積 14%における月平均の地表温度 (K). 縦軸は緯度, 横軸は経度. 黒線は海岸線を表す. (a)1 月, (b)2 月, (c)3 月, (d)4 月, (e)5 月, (f)6 月, (g)7 月, (h)8 月, (i)9 月, (j)10 月, (k)11 月, (l)12 月.

F 最下層温度(月平均)











図 F-11: 海洋面積 85%における月平均の最下層温度 (K). 縦軸は緯度, 横軸は経 度. 黒線は海岸線を表す. (a)1月, (b)2月, (c)3月, (d)4月, (e)5月, (f)6月, (g)7 月, (h)8月, (i)9月, (j)10月, (k)11月, (l)12月.











図 F-12: 海洋面積 51%における月平均の最下層温度 (K). 縦軸は緯度, 横軸は経 度. 黒線は海岸線を表す. (a)1月, (b)2月, (c)3月, (d)4月, (e)5月, (f)6月, (g)7 月, (h)8月, (i)9月, (j)10月, (k)11月, (l)12月.











図 F-13: 海洋面積 35%における月平均の最下層温度 (K). 縦軸は緯度, 横軸は経 度. 黒線は海岸線を表す. (a)1月, (b)2月, (c)3月, (d)4月, (e)5月, (f)6月, (g)7 月, (h)8月, (i)9月, (j)10月, (k)11月, (l)12月.









2017/02/10(清水 康嗣)



図 F-14: 海洋面積 14%における月平均の最下層温度 (K). 縦軸は緯度, 横軸は経 度. 黒線は海岸線を表す. (a)1月, (b)2月, (c)3月, (d)4月, (e)5月, (f)6月, (g)7 月, (h)8月, (i)9月, (j)10月, (k)11月, (l)12月.

参考文献

- 高橋 芳幸,竹広 真一,石渡 正樹,納多 哲史,小高 正嗣,堀之内 武,森 川 靖大,林 祥介, DCPAM 開発グループ,2016:惑星大気モデル DCPAM, http://www.gfd-dennou.org/arch/dcpam/,地球流体電脳倶楽部.
- Kieffer H, H, B. M. Jakosky, C. W. Snyder, M. S. Mattherws (1992) Mars, University of Arizona Press, Tucson, pp. 1498.
- Toon, O. B., C. P. McKay, and T. P. Ackerman, Rapid calculation of radiative heating rates and photodissociation rates in inhomogeneous multiple scattering atmospheres, J. Geophys. Res., 94, 16287-16301, 1989.
- Chou, M.-D., and K. -T. Lee, Parameterizations for the absorption of solar radiation by water vapor and ozone, J. Atmos. Sci., 53, 1203-1208, 1996.
- Chou, M. -D., M. J. Suarez, X. -Z. Liang, and M. M. -H. Yan, A thermal infrared radiation parameterization for atmospheric studies, NASA Technical Report Series on Global Modeling and Data Assimilation, 19, NASA/TM-2001-104606, 2001.
- Manabe, S., Smagorinsky, J., Strickler, R. F., 1965: Simulated climatology of a general circulation model with a hydrologic cycle. Mon. Weather Rev., 93, 769798.
- Moorthi, S., M. J. Suarez, 1992: Relaxed Arakawa-Schubert: A parameterization of moist convection for general circulation models, Mon. Wea. Rev., 120, 9781002.
- Mellor, G. L., and T. Yamada, 1974: A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers, J. Atmos. Sci., 31, 17911806.
- Mellor, G. L., and T. Yamada, 1982: Development of a turbulent closure model for geophysical uid problems, Rev. Geophys. Space Phys., 20, 851875.
- Manabe, S., 1969: Climate and the ocean circulation I. The atmospheric circulation and the hydrology of the Earth 's surface, Mon. Wea. Rev., 97, 739774.
- Matthews, E., 1983: Global vegetation and land use: New high-resolution data bases for climate studies, J. Clim. Appl. Meteor., 22, 474-487.

- Earth Fact Sheet, http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/ earthfact.html (参照 2017-2-8)
- Mars Fact Sheet, http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/ marsfact.html (参照 2017-2-8)
- Astronomy Picture of the day, https://apod.nasa.gov/apod/ap990528. html (参照 2017-2-8)
- 日本沙漠学会, <https://www.jaals.net/沙漠のギャラリー/> (参照 2017-2-2)
- ケッペンの気候区分 判定表, <http://geo.skygrass.net/note/clim/koppen. pdf> (参照 2017-2-4)