

雲とスノーボールアースの氷解

– Abbot et al. (2012), Abbot (2014) の紹介 –

松田 幸樹

神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻
流体地球物理学研究分野 M1

2016/12/15

目次

- 1 はじめに
 - スノーボールアース仮説
 - 全球凍結解
 - Abbot et al. (2012) と Abbot (2014) の概略
- 2 Abbot et al. (2012)
 - Abbot et al. (2012) の目的
 - モデル
 - 設定
 - SP-CAM
 - スノーボールにおける表面温度と雲放射強制力の関係
 - 雲凝結物の鉛直分布
 - SP-CAM による結果
 - Abbot et al. (2012) まとめ
- 3 Abbot (2014)
 - Abbot (2014) の目的
 - モデル
 - SAM
 - 現在気候の再現実験
 - スノーボール気候の再現実験
 - スノーボール気候の感度実験
 - Abbot (2014) のまとめ
- 4 Abbot et al. (2012) と Abbot (2014) のまとめ
- 5 参考文献

スノーボールアース仮説

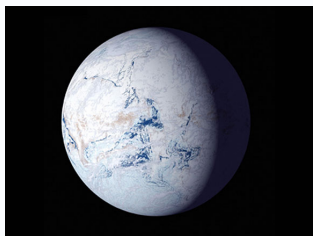


図 1: 氷河が全球を覆った氷河期の様子 (NSF)

- ▶ 6 億年前から 8 億年前の間に赤道かその近くまで氷河が広がっていた期間があったとする説
 - ▶ Kirschvink (1992), Hoffman et al. (1998)
 - ▶ 氷河堆積物, 縞状鉄鉱床, 炭素同位体比
- ▶ エネルギーバランスモデルにおける全球凍結解
 - ▶ Budyko (1969), Sellers (1969) など

全球凍結解

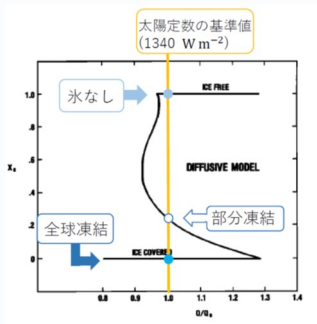


図 2: 太陽定数と氷線緯度の正弦の関係 (North, 1981, Fig 8 より引用)

▶ 南北 1 次元エネルギーバランスモデル (EBM)

▶ 各緯度帯における温度の時間発展の式

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = F_s - F_{OLR} + \nabla \cdot (D \nabla T)$$

- ▶ F_s : 太陽放射
- ▶ F_{OLR} : 惑星放射
- ▶ $\nabla \cdot (D \nabla T)$: 南北熱拡散
- ▶ C : 熱容量, D : 拡散係数

▶ 現在の太陽定数は多重平衡解をもつ

- ▶ そのうちの 1 つが全球凍結解

▶ GCM においても全球凍結解は表現されている (Ishiwatari et al., 2007)

Abbot et al. (2012) と Abbot (2014) の概略

- ▶ Abbot et al. (2012) 以前の研究によると、スノーボール気候に関して以下のことがわかっている：
 - ▶ 地球化学的なデータによると、6～8億年前のCO₂の体積混合比は0.01 - 0.1
 - ▶ FOAMを用いた初期の研究 (Pierrehumbert, 2004, 2005) では、CO₂ = 0.2 で氷解できなかった
 - ▶ モデルによって結果が異なる (Abbot and Pierrehumbert, 2010)
- ▶ そこで、共通の設定のもとで6つの異なるモデルを用いて結果の比較を行った (Abbot et al., 2012)
- ▶ Abbot et al. (2012) ではスノーボール気候において雲の放射効果が重要な役割をもつことがわかった
 - ▶ 雲解像モデルを用いてスノーボール気候における雲の振る舞いを確認する (Abbot, 2014)

Abbot et al. (2012)

Abbot et al. (2012)

Abbot et al. (2012) の目的

これまでの研究によると、スノーボール気候に関して以下のことがわかっている:

- ▶ 地球化学的なデータによると、6 ~ 8 億年前の CO_2 の体積混合比は 0.01 - 0.1
- ▶ FOAM (Pierrehumbert, 2004, 2005) を用いた初期の研究では、 $\text{CO}_2 = 0.2$ で氷解できなかった
- ▶ 放射対流平衡モデルを用いた初期の研究によると、雲はスノーボールの氷解に対する CO_2 の閾値を減少させうる (Pierrehumbert, 2002)
- ▶ モデルによって結果が異なる (Le Hir et al., 2010; Hu et al., 2011; Pierrehumbert, 2010; Le Hir et al., 2010; Hu et al., 2011; Pierrehumbert et al., 2011)

そこで、共通の設定のもとで 6 つの異なるモデルを用いて結果の比較を行った (Abbot et al., 2012)

モデル

- ▶ FOAM (Jacob, 1997)
- ▶ CAM (Collins et al., 2004)
- ▶ ECHAM (Stevens et al., 2012)
- ▶ LMDz (Hourdin et al., 2006)
- ▶ GENESIS (Thompson and Pollard, 1997; Alder et al., 2011)
- ▶ SP-CAM (Khairoutdinov and Randall, 2001; Khairoutdinov et al., 2008)

設定

- ▶ プリミティブ方程式系
- ▶ 解像度 (水平解像度, 鉛直層数)
 - ▶ FOAM: $7.5^\circ \times 4.5^\circ$, 18
 - ▶ CAM: $2.81^\circ \times 2.81^\circ$, 30
 - ▶ ECHAM: $1.88^\circ \times 1.88^\circ$, 47
 - ▶ LMDz: $5^\circ \times 3.83^\circ$, 19
 - ▶ GENESIS: $3.75^\circ \times 3.75^\circ$, 18
 - ▶ SP-CAM: $2.81^\circ \times 2.81^\circ$, 30
- ▶ オゾンなし
- ▶ 表面アルベド: 0.6
- ▶ 温室効果気体: CO₂, H₂O のみ
- ▶ CO₂ の体積混合比: 10^{-4} , 0.1
- ▶ 自転傾斜角: 23.5°
- ▶ 離心率: 0
- ▶ 太陽定数: 1285 W m^{-2}
- ▶ 計算時間: 10 年
 - ▶ SP-CAM に関しては, CAM の最終年の計算結果のデータを用いて 2 年計算

SP-CAM

- ▶ スーパーパラメタリゼーションされた CAM
 - ▶ 雲微物理のパラメタリゼーションを含む 2 次元の雲解像モデルを各格子内に埋め込む
 - ▶ 各格子において陽に雲過程を解像できる

スノーボールにおける表面温度と雲放射強制力の関係

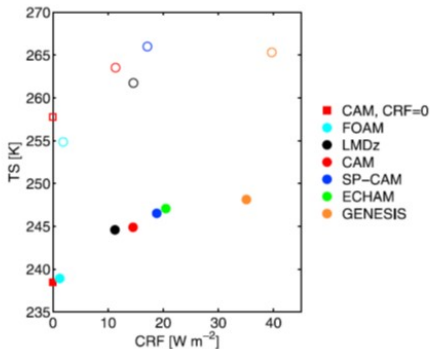


図 3: 熱帯の年平均表面温度 (TS) と大気上端の雲放射強制力 (CRF) の関係. 点は $\text{CO}_2 = 10^{-4}$, 円は $\text{CO}_2 = 10^{-1}$ (原文 FIG. 1)

- ▶ FOAM 以外の GCM は全て FOAM より高い雲放射強制力を生じる
 - ▶ 雲凝結スキームの違い
 - ▶ FOAM: 全カラム中の水蒸気から診断されるスケールハイトを用いた単純な指数関数的減衰として雲水, 雲水の鉛直分布を表現
- ▶ 雲放射強制力はモデル間でばらつきがある
- ▶ 表面温度と雲の放射強制力は正の相関がある

雲凝結物の鉛直分布

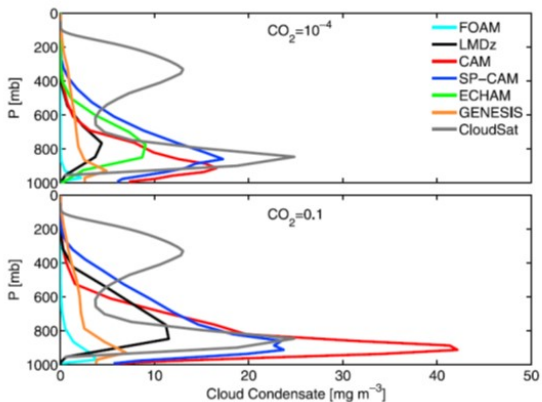


図 4: 熱帯の年平均雲凝縮の鉛直分布 (原文 FIG. 2)

SP-CAM による結果

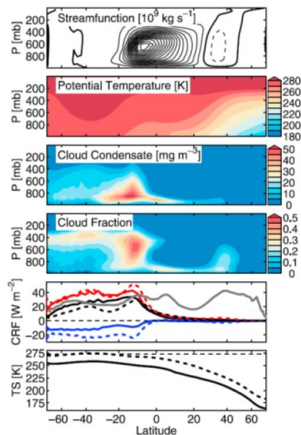


図 5: 1月の SP-CAM の気候 (質量流れ関数, 温位, 雲凝結物, 雲量, 雲放射強制力の子午面分布, 表面温度の子午面分布)(原文 FIG. 3)

Abbot et al. (2012) のまとめ

- ▶ 6 つの GCM を比較するとモデル間で雲放射強制力や表面温度の値にばらつきがある
 - ▶ モデルの雲凝結スキームの違い
- ▶ 雲による温室効果を認めれば、地球化学的なデータの CO_2 の値で氷解が起こり得る
- ▶ スノーボールのような寒い状態における雲の振る舞いの基本的な研究をする必要がある

Abbot (2014)

Abbot (2014)

Abbot (2014) の目的

- ▶ Abbot et al. (2012) で, スノーボール気候における雲の放射効果が重要な役割をもつことがわかったので, 雲解像モデルである SAM を用いてこれを調べる
 - ▶ 雲解像モデルでは
 - ▶ 非静力の雲スケール運動を陽にシミュレーション
従って, 雲の正確な振る舞いを確認できる

モデル

モデル：以下の雲解像モデルを用いる：

- ▶ the System for Atmospheric Modeling (SAM) (Khairoutidinov and Randall, 2003)

SAM

- ▶ 非弾性方程式系
- ▶ 放射スキームは NCAR の CAM, ver 3 (Collins et al., 2004) のものを使用
- ▶ 過飽和は認めない
- ▶ シングルモーメント雲微物理スキームを使用
- ▶ 2 m の厚さの海洋混合層を考慮
 - ▶ 水平熱輸送を考慮
- ▶ 中緯度への大気熱輸送を海洋熱輸送で近似
- ▶ 太陽天頂角: 45°
- ▶ 太陽定数: 566 W m^{-2}
- ▶ 水平方向 128 km, 鉛直方向 17.5 km の二重周期平方領域
- ▶ 水平方向 1 km, 鉛直方向は可変の格子サイズ
- ▶ タイムステップ: 10 s
- ▶ 計算時間: 約 300 ~ 1000 日
- ▶ 平衡条件: 地表面と大気上端でエネルギー収支が 1 W m^{-2} 以下
- ▶ 平衡後 100 日以上を平均

現在気候の再現実験

現在気候の設定

- ▶ 表面アルベド: 0.05
- ▶ CO₂ の体積混合比: 3.55×10^{-4} vmr
- ▶ 熱輸送: 85 W m^{-2}

現在気候の計算結果

- ▶ 表面温度: 299 K
- ▶ 長波雲放射強制力: 29 W m^{-2}
- ▶ 短波雲放射強制力: -30 W m^{-2}
- ▶ 正味雲放射強制力: -1 W m^{-2}

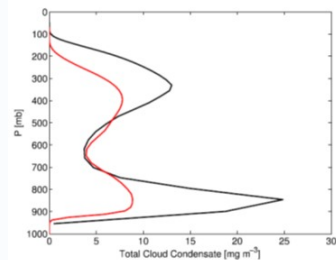


図 6: SAM の現在気候シミュレーション (赤) と熱帯の海洋にわたって平均した CloudSat 観測 (黒) における全 (水と氷の) 雲凝結物密度の鉛直分布 (原文 FIG. 2)

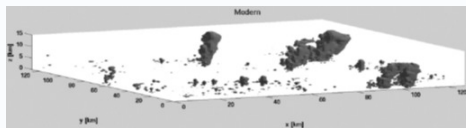


図 7: SAM の現在気候における雲面のスナップショット (原文 FIG. 1, 上)

スノーボール気候の再現実験

スノーボール気候の設定

- ▶ 表面アルベド: 0.6
- ▶ CO₂ 濃度: 10⁻⁴ vmr
- ▶ 熱輸送: 15 W m⁻²

スノーボール気候の計算結果

- ▶ 表面温度: 245 K
- ▶ 長波雲放射強制力: -2 W m⁻²
- ▶ 短波雲放射強制力: 26 W m⁻²
- ▶ 正味雲放射強制力: 14 W m⁻²

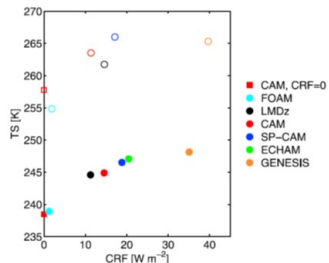


図 8: 熱帯の年平均表面温度 (TS) と大気上端の雲放射強制力 (CRF) の関係. 点は CO₂ = 10⁻⁴, 円は CO₂ = 10⁻¹ (Abbot et al., 2012, FIG. 1)

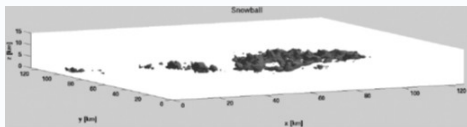


図 9: SAM のスノーボール気候における雲面のスナップショット (原文 FIG. 1, 下)

スノーボール気候の感度実験 1

設定

- ▶ 熱輸送: 15 W m^{-2}
- ▶ 以下の 3 つの気候で実験を行う
 - ▶ 現在の熱帯気候
 - ▶ $\text{CO}_2 = 10^{-2}$ のときのスノーボール気候
 - ▶ $\text{CO}_2 = 10^{-4}$ のときのスノーボール気候

スノーボール気候の感度実験 1

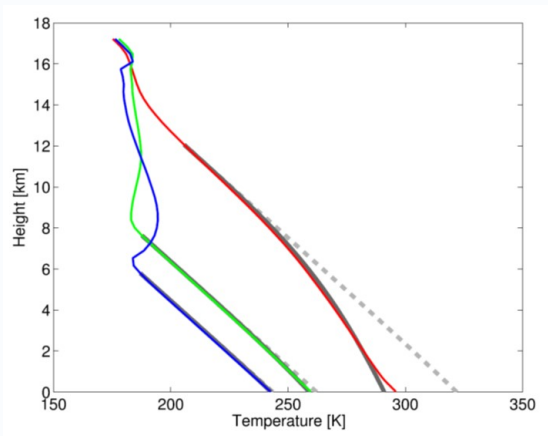


図 10: 鉛直温度分布. 現在の熱帯気候 (赤), $CO_2 = 10^{-4}$ のときのスノーボール気候 (青), $CO_2 = 10^{-2}$ のときのスノーボール気候 (緑), 乾燥断熱減率 (薄い灰色の破線), 湿潤断熱減率 (濃い灰色の実線)(原文 FIG. 3)

スノーボール気候の感度実験 1

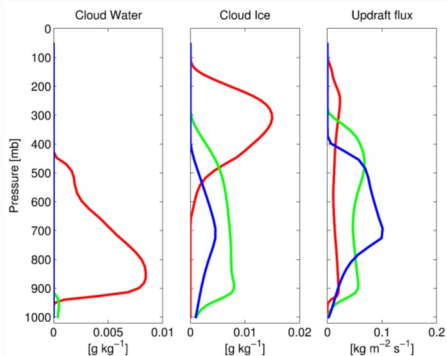


図 11: 雲水, 雲氷, 上昇雲質量フラックスの鉛直分布. 現在の熱帯気候 (赤), スノーボール気候 ($\text{CO}_2 = 10^{-2}$) (緑), スノーボール気候 ($\text{CO}_2 = 10^{-4}$) (青). (原文 FIG. 4)

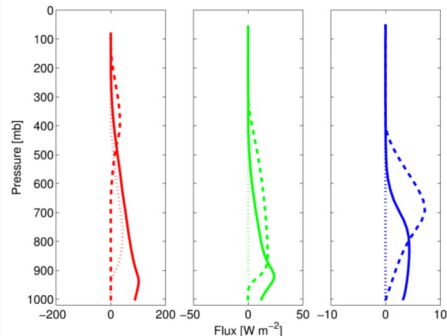


図 12: 水蒸気, 雲水, 雲氷の鉛直フラックス. 左から現在気候, スノーボール気候 ($\text{CO}_2 = 10^{-2}$), スノーボール気候 ($\text{CO}_2 = 10^{-4}$). 水蒸気は実線, 雲氷は破線, 雲水は点線. (原文 FIG. 7)

スノーボール気候の感度実験 1

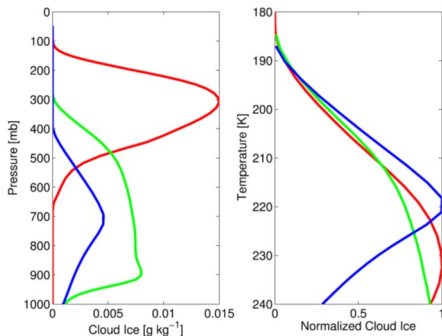


図 13: 圧力と温度に対する雲氷の鉛直分布. 現在の熱帯気候 (赤), スノーボール気候 ($\text{CO}_2 = 10^{-2}$) (緑), スノーボール気候 ($\text{CO}_2 = 10^{-4}$) (青) (原文 FIG. 8)

- ▶ The Fixed Anvil Temperature 仮説 (Hartmann and Larson, 2002):
表面温度が変化しても, 雲頂の温度は変わらないとする説
 - ▶ 図 13 を見ると, 220 K より低温では現在気候, $\text{CO}_2 = 10^{-2}$ のスノーボール気候, $\text{CO}_2 = 10^{-4}$ のスノーボール気候のどれもおよそ一致している
 - ▶ ここでは雲頂は 215 K であるとする

スノーボール気候の感度実験 2

設定

- ▶ 熱輸送: 15 W m^{-2} , 35 W m^{-2} , 50 W m^{-2} , 60 W m^{-2} , 70 W m^{-2}
- ▶ CO_2 の体積混合比: 10^{-2} vmr , 10^{-3} vmr , 10^{-4} vmr

スノーボール気候の感度実験 2

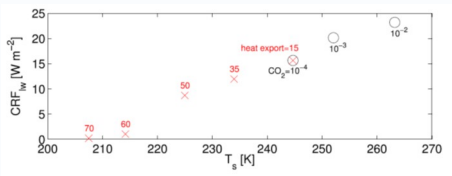


図 14: SAM のスノーボールアース状態の表面温度に対する大気上端の長波放射強制力 (CRF_{lw}) と ice water path. 赤いバツ点は $CO_2 = 10^{-4}$ における熱輸送, 丸印は CO_2 の変化である (原文 FIG 9)

- ▶ 図 14 では, 熱輸送の値を変化させ, 表面温度の値を変化させた
 - ▶ 表面温度が 215 K 以下になると雲放射強制力がほとんどゼロになることがわかる

スノーボール気候の感度実験 3

設定

- ▶ 熱輸送: 15 W m^{-2}
- ▶ CO_2 の体積混合比: 10^{-2} vmr , 10^{-4} vmr
- ▶ 変化させる微物理パラメータ
 - ▶ 雲氷から雪への変化効率 E_{si}
 - ▶ 雲氷からあられへの変化効率 E_{si}
 - ▶ 雲氷から降水への混合比の閾値 q_{ci}
 - ▶ 雲氷の凝結による降水へ反応速度定数 β
 - ▶ 雲水が存在できる最低温度 T_{10}
 - ▶ 氷堆積速度 v_i
 - ▶ 雲氷の有効半径 r_{ei}
 - ▶ 雲水の有効半径 r_{el}

スノーボール気候の感度実験 3

表 1: SAM の微物理パラメータの感度実験結果 (原文 TABLE 3)

Test simulation	T_s (K)	CRF_{sw} ($W m^{-2}$)	CRF_{lw} ($W m^{-2}$)	CRF ($W m^{-2}$)
Reference, $CO_2 = 10^{-4}$ vmr	245	-2	16	14
E_{si} ↓	245	-2	16	14
E_{si} ↑	245	-2	16	14
E_{gi} ↓	245	-2	16	14
E_{gi} ↑	245	-2	16	14
q_{ci} ↓	245	-1	16	15
q_{ci} ↑	245	-2	16	14
β ↓	245	-2	16	14
β ↑	245	-2	16	14
T_{10} ↓	245	-2	18	15
v_j ↓	257	-5	37	31
v_j ↑	242	0	10	9
r_{ci}, r_{cl} ↓	244	-5	19	14
r_{ci}, r_{cl} ↑	245	1	13	14
Reference, $CO_2 = 10^{-2}$ vmr	263	-5	23	18
r_{ci}, r_{cl} ↓	264	-9	29	20
r_{ci}, r_{cl} ↑	263	0	19	18

スノーボール気候の感度実験 4

設定

- ▶ 熱輸送: 15 W m^{-2}
- ▶ CO_2 の体積混合比: 10^{-1} W m^{-2} , 10^{-2} vmr , 10^{-3} vmr , 10^{-4} vmr

スノーボール気候の感度実験 4

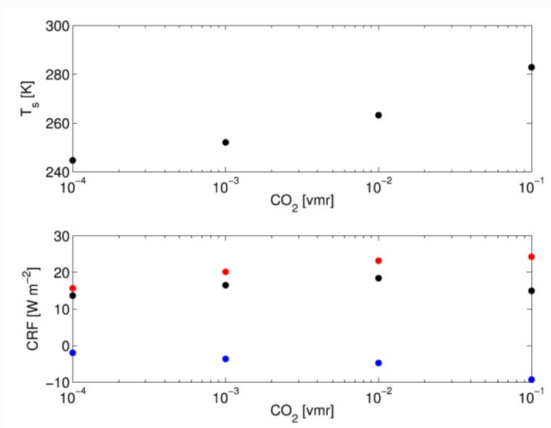


図 15: 表面温度と大気上端における放射強制力と CO₂ との関係. 赤: 長波, 青: 短波, 黒: 正味放射強制力 (原文 FIG. 6)

Abbot (2014) のまとめ

- ▶ SAM によると, スノーボールアース状態で, 雲放射強制力は $10 - 20 \text{ W m}^{-2}$ となる
- ▶ モデルは鉛直方向に 215 K となる高度まで対流を生み, 層積雲のような雲が形成される

Abbot et al., (2012) と Abbot (2014) のまとめ

- ▶ 6 つモデルを用いて計算したところ, 雲放射強制力にバラつきがあることがわかった
 - ▶ モデル間の雲凝結スキームの違いによる
- ▶ 雲解像モデルを用いると, スノーボール気候において以下のことがわかった;
 - ▶ 雲放射強制力は $10 - 20 \text{ W m}^{-2}$ となる
 - ▶ 鉛直方向に 215 K の対流を生み, 層積雲のような雲を形成する
- ▶ 地球化学的なデータによるスノーボール氷解の CO_2 の値においても氷解は起こりうる

参考文献

- ▶ Abbot, D. S., M. Branson, R. T. Pierrehumert, D. Pollard, G. Le Hir, and D. D. Koll, 2012: Clouds and snowball Earth deglaciation. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L20711
- ▶ Abbot, D. S, 2014: Resolved Snowball Earth Clouds. *J. Climate. Sci.*, **27**, 4391-4402
- ▶ Khairoutdinov, M. F., Randall, D. A, 2003: Cloud Resolving Modeling of the ARM Summer 1997 IOP: Model Formulation, Results, Uncertainties, and Sensitivities. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 607-625
- ▶ North, G. R, Cahalan, R. F, Coakley, J. A, 1981: Energy Balance Climate Models. *Rev Geophys Space*, **19**, 91-121
- ▶ <http://www.astrobio.net/news-exclusive/fossils-explain-how-life-coped-during-snowball-earth/>