

気候モデリングから探る全球凍結イベント条件と海洋深層循環

課題責任者

小長谷貴志 東京大学 大気海洋研究所

小長谷 貴志^{*1}, 小玉 貴則^{*2}, シェリフ多田野 サム^{*3}

^{*1} 東京大学大気海洋研究所, ^{*2} 東京工業大学地球生命研究所, ^{*3} 琉球大学理学部

キーワード: 全球凍結, 気候モデル, 海洋深層循環

1. 背景と研究の目的

地球史の中で3回全球凍結(スノーボール)状態があったことが知られている。当時の低緯度において氷河性堆積物が産出されることが証拠となっていて、スノーボールイベント前後で大気組成・生態系の変化があることから、地球惑星科学において重要なイベントである。スノーボールの海洋中酸素は欠乏状態だったが、真核生物が生き残ったことを説明するためには海洋中の物質循環にかかわる海洋深層循環を理解する必要がある。

気候モデルを用いた研究から、太陽放射が減少すると海水によるアルベドフィードバックと海洋循環による熱輸送のために、安定な気候状態が複数(全球凍結解・部分凍結解)存在することが示されてきた。ところが、大気海洋結合モデルではスノーボールの突入条件は調べられているが(Voigt and Marotzke 2010; Yang et al. 2012)、突入までの海洋深層循環までしか求められていない。スノーボールの定常な気候下において達成される熱輸送と海洋深層循環は、大気循環をエネルギーバランスモデルで簡略化した研究に限られる(Oka et al., 2011)。先行研究で海洋深層循環が求められていない理由は記述されていないが、申請者らが行った予察的実験からすると、モデルがそのままではスノーボール環境下で動作しないからと考えられる。これまでに判明した問題点は、(1)スノーボールの低温環境下では全球に海水が広がり、海水の厚さ増加で海面高度が低下するが、モデルでは海面高度の大きな低下が許されない点、(2)現在の地球にない低温気候下で計算が破綻する点にある。

そこで本研究課題では、大気海洋結合気候モデルを用いてスノーボール状態突入条件を定量化すること、スノーボールアースの気候下で達成される海洋深層循環と形成要因を明らかにする。

2. 気候モデルの概要と実験設定

大気海洋結合モデルMIROC4mは大気大循環モデルCCSR-NIES AGCMと海洋大循環モデルCOCOをカップラーでオンライン結合したもので、陸面モデルMATSIROなどのサブモデルを含む(Hasumi and Emori 2004)。MIROC4mの将来予測実験結果は2007年に刊行されたIPCC第4次報告書に使われている。その後もMIROC4mは気候将来予測・氷期を含む古気候研究に数多く使われてきた(例えば古気候Obase et al., 2021; 将来予測Greve et al. 2023)。MIROC4mは2021年度の他公募課題利用を通して、ES4での動作確認とチューニングは終えている。

スノーボール気候では海水が現在よりはるかに厚くなり、標準の設定では海洋モデルの計算ができなかった。これは、海水の生成によって海水が海から抜かれるために海面高度が低下することをモデルが考慮しているのだが、海洋モデルの鉛直座標は表層45mを σ 座標、それより深い場所は z 座標で計算していることから、海面高度が45m以上低下して σ 層が消失することが許されないためである。そのため、海水生成・融解時には海水の体積を変えないようにモデル設定を変更した。塩分フラックスの扱いも同時に変更することで、海水生成・融解による塩分影響は現実通りに表現できている。なおこの結果、全球の塩分の濃度は保存されるが、水量・塩分量は保存されなくなる。

以上の設定で、現在の海陸分布条件のもと、現在気候を初期値とし、現在で1361W/m²となっている太陽定数を瞬時に現在の100%, 96%, 94%, 91%(実験名TSI100, TSI096, TSI094, TSI091)として定常実験を行った。スノーボールに突入後、同じ境界条件のもとで海洋深層循環が定常に達するまで最大2,500年の計算を続けて、スノーボール気候下で達成される海洋深層循環を求めた。通常のMIROC4mでは陸面タイプを外部境界条件として与えており、気候が変化しても変化することがない。このままではスノーボール気候状態の陸面計算で熱収支が求められなくなり計算が停止するため、全球を海水が覆ったら陸面タイプをすべて氷床に差し替えて実験をつづけた。現実には積雪が長い時間をかけて氷床となり、流動によって低緯度に流れる過程があるが、氷床を結合するのは今後の課題である。

3. 結果

4 実験の海水面積・海水厚さ・全休平均気温の時系列を図1に示す。太陽定数が現在の96%では2000年の実験でスノーボールに突入しなかったが、太陽定数が94%の実験では実験から1320年後にスノーボールに突入した。そのため、気候モデルMIROCのスノーボール突入条件は、氷床・陸面植生を考慮しない状態であれば太陽定数にして94~96%の間であると求められた。これは先行研究の気候モデルから示されている範囲と近いが大きめの値で、MIROCの気候フィードバックが強いことを示唆する。太陽定数94%実験でスノーボール突入直前の海水面積は半分以上であるが、この状態から数十年でスノーボールに突入しており、強い気候フィードバックが働いていることがわかる。2500年経過時点で全球の海水厚さは200m程度に達しているが、その後も成長を続けている。

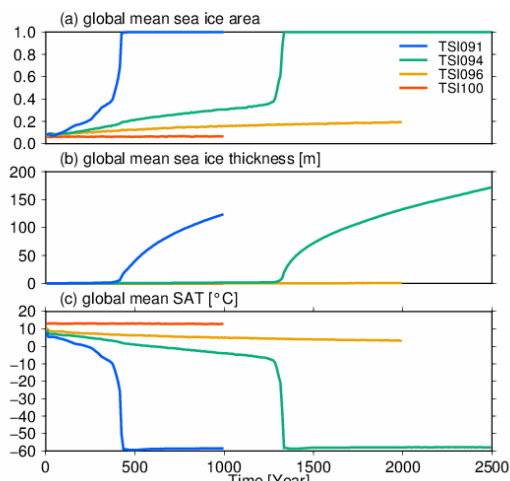


図 1: 気候モデル実験結果の時系列。上から全球海洋のうち海氷に覆われている面積割合、全球平均海氷厚さ、全球平均地表気温。

実験の最終時刻における海洋深層循環と塩分を図 2 に示す。現在気候では 3000m 程度の深さをもつ北大西洋の深層循環と海底まで沈み込む南大洋の深層循環の 2 つのセルの重ね合わせになっていて、塩分も大西洋亜熱帯の水が深層に沈み込んでいる。太陽定数 96% 実験では北大西洋が海氷に覆われるため、北大西洋の深層循環が消失し、南大洋起源の高塩分水が深層に広がっている。太陽定数 94% 実験では、赤道付近で湧昇するような循環が現在実験と同程度の流量で存在している。

スノーボール気候下では全球の海が氷に覆われていることから海面熱フラックスが弱くなるため、強い深層循環が形成されるのは意外な結果である。実験の最終時刻では海氷が厚くなっている途中で、海面に密度が高い水が供給されているためスノーボール実験では海の塩分が高くなる。海面の塩フラックスで生じる密度不安定を解消するためにこのような海洋深層循環が形成されるものと考えられるが、メカニズムの説明は検討中である。

4. 議論と今後の計画

今回のチャレンジ課題を利湯して、現在気候を初期値としてスノーボール突入・継続までの連続実験を行った。全球凍結気候での海洋深層循環の時系列が求めたのは世界初である。チャレンジ実験によって理解が得られた一方で、スノーボールの気候システムを理解するためには複数の課題が残っていることが見えてきた。

1 つは、地球のように海陸分布をもつ惑星でのスノーボールシミュレーションの問題である。先行研究によって、スノーボール気候での大気・水循環が調べられており、スノーボール気候では強い大気の直接循環が生じること、循環によって陸面氷からの昇華・沈着パターンが生じることが複数のモデル比較から知られている。しかし、大気海洋結合モデル MIROC の実験では、強い大気の直接循環は先行研究と同様に生じるものの、先行研究とは大きく異なる水循環が生じている。

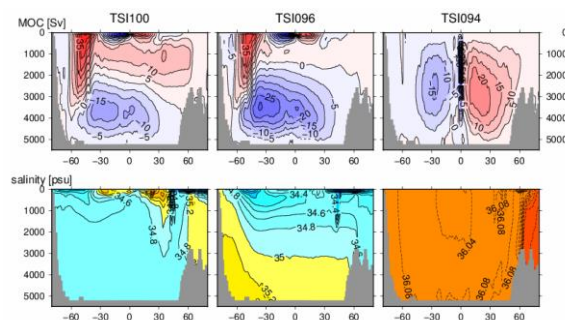


図 2: 気候モデル実験の最終時刻における海洋深層循環と東西平均塩分（緯度—水深断面図）。海洋深層循環は、正値を時計回りとした子午面流線関数（単位 Sv, 10^6 m/s）で示している。

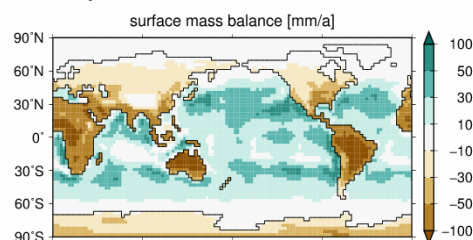


図 3: スノーボール状態の地表面水収支。正値が正味での降水・沈着過剰、負値が蒸発・昇華過剰を示している。

それは、海洋上で水蒸気の昇華沈着が生じ、陸上の氷床から埋め合わせるように昇華が起きている（図 3）。この水循環では陸上に氷床を維持することができず、氷河性堆積物の地質記録を説明しがたい。気候場を解析したところ、海上でのみ極めてつよい逆転層が形成されていて、少ない大気中の水蒸気を現実的でないほど海氷上に沈着させていることが分かった。追加の実験から、不確実なパラメータの 1 つである乱流に関わる陸面の温度拡散係数の最低値を変更すると水蒸気沈着が抑えられることが示唆されているが、よい解決策は検討中である。

今回の実験では海洋地熱を入れていないが、海洋地熱を入れると、地表気温による冷却と海水の熱拡散のバランスから海氷厚さ 1000m 程度で定常に達すると考えられる。モデルを変更して海洋地熱は入れられるようになったが、現在を初期値としてスノーボール定常状態を得るには、1 年以上の計算が必要と考えられる。

今後は、陸面のパラメータを調整して現実的な水循環を得る予定である。その後、スノーボール気候で形成される雲の温室効果・大気中 CO₂ 上昇によるスノーボール気候の維持および脱出条件の定量化に進む。

謝辞

本研究の実施にあたり、文部科学省科研費「最先端の階層的気候モデリングに基づく全球凍結イベントの推移条件解明への挑戦」の助成を受けています。本チャレンジ課題着想前の MIROC を用いた初期実験・チューニングは、地球シミュレータ公募課題「古環境研究および気候将来予測に資する気候数値実験」を用いています。

引用文献

- Voigt and Marotzke (2010) The transition from the present-day climate to a modern Snowball Earth. Climate Dynamics
- Yang et al. (2012) The initiation of modern soft and hard Snowball Earth climates in CCSM4. Climate of the Past
- Oka et al. (2011) Role of the ocean in controlling atmospheric CO₂ concentration in the course of global glaciations. Climate Dynamics
- Hasumi and Emori (2004) K-1 Coupled Model (MIROC) Description. K-1 Technical Report 1, Center for Climate System Research, University of Tokyo
- Obase et al. (2021) Abrupt climate changes in the last two deglaciations simulated with different Northern ice sheet discharge and insolation, Scientific Reports
- Greve et al. (2023) Future projections for the Antarctic ice sheet until the year 2300 with a climate-index method, Journal of Glaciology