

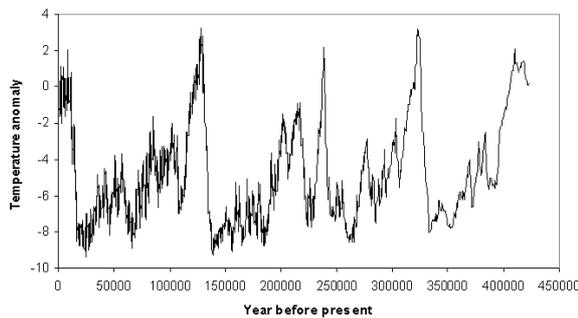
# 積雪の効果を取り入れたエネルギーバランスモデルによる気候の多重平衡解

北海道大学大学院工学院 学生員 ○細井 遵敬  
 北海道大学大学院工学研究院 正会員 山田 朋人

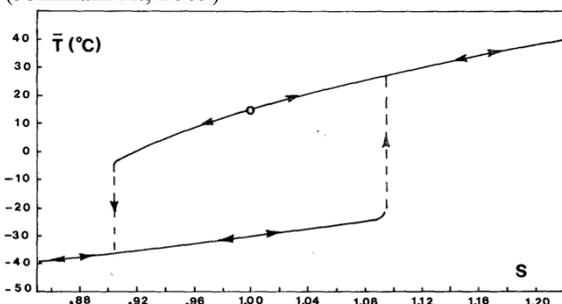
## 1. はじめに

近年、温室効果ガスによる地球温暖化が話題になっている。IPCC 第5次評価報告書では、地球温暖化の進捗別に複数のシナリオが用意され、それらについて将来の気温を数値計算によって推定している。いずれのシナリオも数十年から百年単位の温暖化シナリオのシミュレーションである。

一方、**図-1**は南極のVostokから採取された氷の間隙に含まれる空気中の二酸化炭素濃度から逆算された気温偏差の時間変化を表している。気温偏差の上昇にかかる時間と下降にかかる時間は異なり、上昇時の気温偏差の時間変化は、下降時に比べると高いことがわかる。将来の温暖化した地球の数十年から百年単位の気温変化は、この数万単位での気温偏差の時間変化の傾



**図-1** 気温偏差の移り変わりを示した図。1950年を基準とし、右側へ行くほど過去に遡る。(Jokimäki A., 2009)<sup>1)</sup>



**図-2** 横軸は太陽放射量と太陽定数の比。縦軸は地球の平均気温、多重平衡解を示すモデルの解を表す。(Oerlemans and V. D. Dool, 1977)<sup>4)</sup>

向と、類似することが想定される。

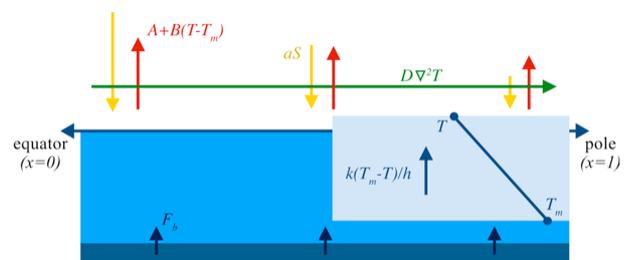
## 2. 研究目的

気温が時間変化と共に遷移する過程として、Budyko<sup>2)</sup>と Sellers<sup>3)</sup>は気候の多重平衡解というものを示した。放射強制力に相当する太陽放射量と、太陽定数の割合と気温との関係を**図-2**に示す。図中の実線部において気温は可逆的に遷移する。点線部において気温は矢印の方向にのみ、不可逆的に遷移する。そのため、一度高温状態へ遷移した場合、低温状態へ遷移することは容易ではないと言える。本研究ではエネルギーバランスモデルを用いて、どのような条件下で多重平衡解が存在するかを調べた。

## 3. エネルギーバランスモデルの概要

本研究におけるエネルギーバランスモデルは、**図-3**に示すような東西方向に平均化された地球を考えている。その理由は、東西方向は偏西風や貿易風によって、南北方向に比べて、大気がよく混合されており、長期的な気候変化を考えるにあたっては、同緯度帯は平均化されていると考えられるからである。エネルギーバランスモデルにおける、エネルギー収支は式(1)で計算される。

$$\frac{\partial E}{\partial t} = aS - L + D\nabla^2 T + G + F \quad (1)$$



**図-3** 地球の表面が全て海だと仮定した場合の海面・海水エネルギーバランスモデルの模式図。右側の薄い青色が海水を、左側の青色が海洋混合層を、下側の濃い青色が混合層より深い海を表す。(Wagner and Eisenman, 2015)<sup>5)</sup>

キーワード エネルギーバランスモデル、気候の多重平衡解、アイス・アルベド・フィードバック

連絡先 〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目北海道大学大学院工学研究科 TEL001-706-6189

式(1)の左辺はエンタルピー $E[\text{J}/\text{m}^2]$ を時間 $t[\text{s}]$ で微分した項である。右辺第1項は正味太陽放射量 $[\text{W}/\text{m}^2]$ を表し、 $a$ は太陽放射の吸収率、 $S$ は太陽放射量 $[\text{W}/\text{m}^2]$ である。第2項は外向き長波放射 $[\text{W}/\text{m}^2]$ を表す。第3項は南北方向へのエネルギー拡散量 $[\text{W}/\text{m}^2]$ を表し、 $D$ は拡散係数 $[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ 、 $T$ は温度 $[\text{K}]$ を表す。第4項は地下から陸面へ流入する熱量 $[\text{W}/\text{m}^2]$ 、第5項は温暖化の指標を表す放射強制力 $[\text{W}/\text{m}^2]$ を表す。

第5項の放射強制力の値を時間の経過とともに大きくすることは、地球温暖化の進行を表し、放射強制力の値を時間の経過とともに小さくすることは、地球気候の寒冷化を意味する。

#### 4. 結果

放射強制力を時間ごとに増加および、減少させた時の気温の応答を調べた。その結果の一部を図-4に示す。

図-4(A)は、海面のアルベドを海水のアルベドよりも0.3大きくした場合の結果、図-4(B)の図は海面のアルベドを海水のアルベドと同じにした場合の結果である。(A)は温暖化シナリオを示す赤線と、寒冷化シナリオを示す青線が、図-1と類似した形をとる。これは複数の安定状態があることを示し、多重平衡解がある。一方、(B)では、温暖化シナリオを示す赤線と寒冷化シナリオを示す青線がほとんど重なっているため、多重平衡解はない。図-4(C)では、snow aging効果を取り入れた。この場合でも、温暖化シナリオと寒冷化シナリオを示す2本の線は図-1と類似した形をとるため、多重平衡解がある。

他にも太陽放射の季節性、南北方向の拡散係数を変化させた時に多重平衡解への影響が見られた。

#### 5. まとめ

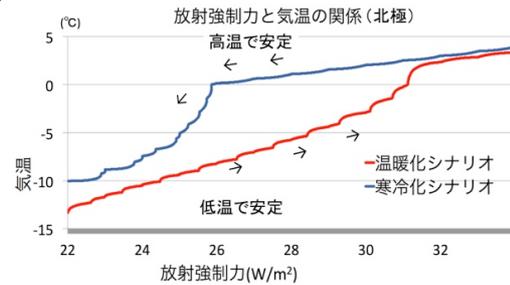
条件によっては、エネルギーバランスモデルにおいて、多重平衡解を示すことがわかった。また、多重平衡解に影響を与える要因は様々である。氷の存在やsnow aging効果は多重平衡解を助長する一方で、南北方向の熱拡散や太陽放射の季節性の増加は多重平衡解を抑制することがわかった。

謝辞：本論文はArCSの成果の一部である。

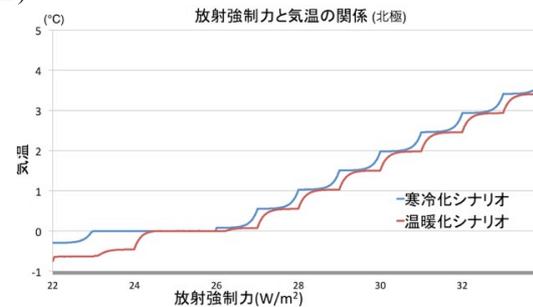
#### 参考文献

- 1) <https://agwobserver.wordpress.com/2009/08/24/rising-carbon-dioxide-concentration-stops-the-glacialinterglacial-cycle/>

(A)



(B)



(C)

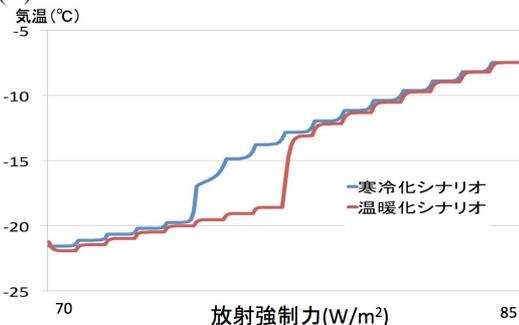


図-4 (A) 海面のアルベド(0.3) < 海水のアルベド(0.6)とした場合

(B) 海面のアルベド(0.6) = 海水のアルベド(0.6)とした場合

(C) snow aging効果を取り入れた場合

海面・海水モデルの結果の一例。縦軸は気温(°C)、横軸は放射強制力(W/m²)。青線は寒冷化シナリオを示し、時間は図の右から左へ進む。赤線は温暖化シナリオを示し、時間は左から右へ進む。

- 2) Budyko M. I.: The effect of solar radiation variations on the climate of the Earth, *Tellus*, pp. 611-619, 1969
- 3) Sellers W. D.: A Global Climate Model Based on the Energy Balance of the Earth-Atmosphere System, *Journal of Applied Meteorology*, pp. 392-400, 1969
- 4) Oerlemans J. and H. M. Van Den DOOL: Energy Balance Climate Models : Stability Experiments with a Refined Albedo and Updated Coefficients for Infrared Emission, *American Meteorological Society*, pp. 371-381, 1978
- 5) Till J. M. WAGNER and Ian EISENMAN: How Climate Model Complexity Influences Sea Ice Stability, *American Meteorological Society*, pp.3998-4014, 2015