

# 第1章

## はじめに

### 1.1 地球大気のエネルギーバランス

大気や海洋のエネルギー源は太陽からの放射エネルギーである。地球は、その太陽からの放射エネルギーを受け、それと釣り合うように長波放射エネルギーを射出している。本節では、大気上端と全球平均でのエネルギー収支や放射収支の緯度分布について述べる。

#### 1.1.1 大気上端での全球平均エネルギー収支

大気上端でのエネルギー収支を考える。図 1.1 は太陽から地球への短波放射と地球が放射する長波放射の概念図である。このように、地球は短波放射を地球の断面積で受けるのに対し、長波放射を全球で射出する。地球は長期間の平均としては平衡状態にあると考えられるので、地球の大気上端において、

$$(1 - \alpha)S\pi R^2 = 4\pi R^2\sigma T_{\text{eff}}^4 \quad (1.1)$$

となる。ここで、 $\alpha$  は地球の全球平均アルベド、 $S$  は太陽定数、 $R$  は地球半径、 $\sigma$  はステファンボルツマン定数 ( $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ )、 $T_{\text{eff}}$  は有効放射温度である。地球において、全球平均アルベドは約 0.3、太陽定数は約  $1370 \text{ W m}^{-2}$  であるとする、有効放射温度は 255 K となる。しかし、実際の全球平均温度は約 288 K であり、有効放射温度よ

り 33 K ほど高い。これは大気の温室効果が原因である。つまり、大気は短波放射に対してはほぼ透明であるのに対して、長波放射に対しては透明ではなく、地表面からの長波放射を大気が吸収し地表面と宇宙へ射出しており、結果として有効放射温度よりも高い地表面温度で平衡になるからである。

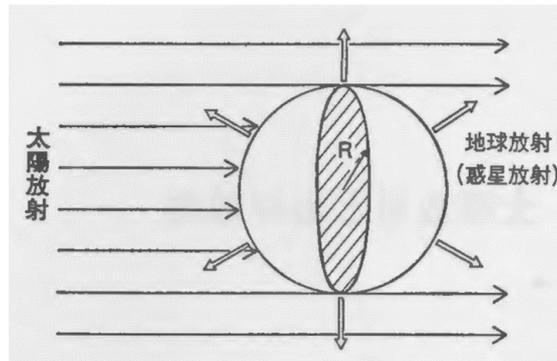


図 1.1 地球へ入射する太陽放射と宇宙へ射出する赤外放射の概念図 (会田, 1982, 図 1.1)

### 1.1.2 全球平均エネルギー収支

実際の地球のエネルギー収支を図 1.2 に示す。図 1.2 は Kiehl and Trenberth (1997) の図 7 を相対値に変更したものである (浅野, 2005a)。つまり、地球大気に入射する太陽放射エネルギーフラックスを 100% としたときの、大気中のエネルギーフラックスを図示している。太陽放射は、大気上端に入射したエネルギーのうち 31% が雲や大気による散乱反射によって宇宙空間に戻る。また、20% は大気によって吸収され直接大気を加熱する。以上を差し引いた 49% が地表面により吸収される。一方、長波放射は、大気により射出される 57% と地表面による射出が大気によって吸収されずに透過した 12% が加わり、合計 69% の長波放射が宇宙空間へ射出されている。このように、空気分子、水蒸気、雲等による散乱吸収や地表面による吸収と空気分子、水蒸気、雲等による射出や地表面による射出の結果、地球全体として釣り合っている。

### 1.1.3 放射収支の緯度分布

前小節では、全球平均したエネルギー収支を見てきた。しかし、地球は球形であり、自転軸が公転面に対して傾斜しているため、各緯度でエネルギー収支が閉じているわけではな

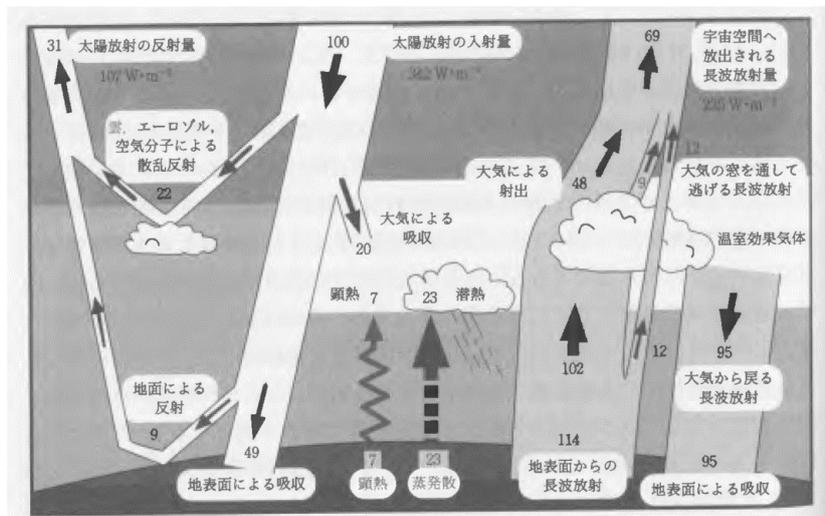


図 1.2 全球平均・年平均した地球の単位面積あたりのエネルギー収支 (浅野, 2010, 図 8.3)

い。図 1.3 は人工衛星観測による 1962 ~ 1966 年の 5 年間の時間平均および帯状平均した太陽放射の吸収量と地球放射の射出量、およびアルベドの緯度分布を表す。放射収支を見ると、両半球ともに赤道から緯度約 35 度までは地球放射より太陽放射の方が多く、それより高緯度側では逆に太陽放射より地球放射の方が多い。つまり、放射過程は常に低緯度側と高緯度側の温度差を拡大する方向に作用する。しかし、実際の地球ではこの過不足は打ち消され、エネルギー収支は釣り合っている。これは、大気や海洋の運動により低緯度から高緯度へ熱が輸送されるからである。図 1.4 は年平均した緯度方向のエネルギー輸送である。

## 1.2 数値モデルを用いた過去の研究

前節では、現在の地球における、大気や海洋の循環や空気分子、水蒸気、雲が関わる放射過程によるエネルギー輸送のが釣り合いについて述べた。放射収支の緯度分布や大気や海洋の運動は、入射する太陽放射量が変化すると、それに応じて変化し、現在の地球とは異なる状態で平衡に達すると考えられる。現在までに、地球の気候と太陽放射の関係について数値モデルを用いて研究されてきた。以下でその一部を示す。

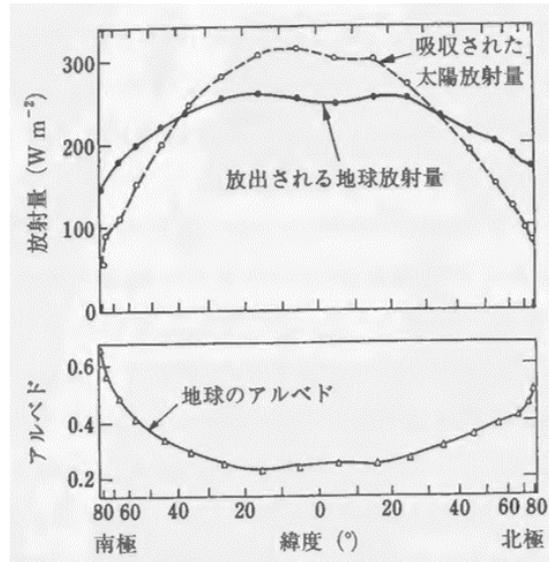


図 1.3 人工衛星観測による 1962 ~ 1966 年の 5 年間の時間平均および帯状平均した太陽放射の吸収量と地球放射の射出量, およびアルベドの緯度分布 (Vonder Haar and Suomi, 1971, Fig 1)

### 1.2.1 EBM を定式化した過去の研究

惑星気候の太陽定数依存性は, 南北 1 次元エネルギーバランスモデル (Energy Balance Model; EBM) を用いて研究された (例えば, Budyko 1969; Sellers 1969). その研究によると, 太陽定数に応じて, 惑星気候は全球凍結状態, 部分凍結状態, 氷なし状態という 3 つの状態を取ること, および, ある太陽定数に対して複数の状態が解となること (多重解の存在) が示された. 図 1.5 は太陽定数と氷線緯度の関係であり, 各緯度帯におけるエネルギー収支の式を用いて得られたものである (North, 1981). 長波放射は温度の一次関数, 水平熱輸送は拡散型で表現されている. 図 1.5 を見ると, 確かに 3 つの状態が存在し, およそ  $1200 \text{ W m}^{-2}$  から  $1740 \text{ W m}^{-2}$  で多重解が存在することが確認できる. また, 傾きが負の部分は不安定であり, 特に氷線緯度が高緯度に見られる不安定を小氷冠不安定, 低緯度に見られる不安定を大氷冠不安定という.

しかし, 長波放射を温度の一次関数で表現すると, 射出限界が表現されない. 射出限界とは惑星放射の上限である. 実際には, 射出限界があるため, 大きな太陽定数の場合にはこの

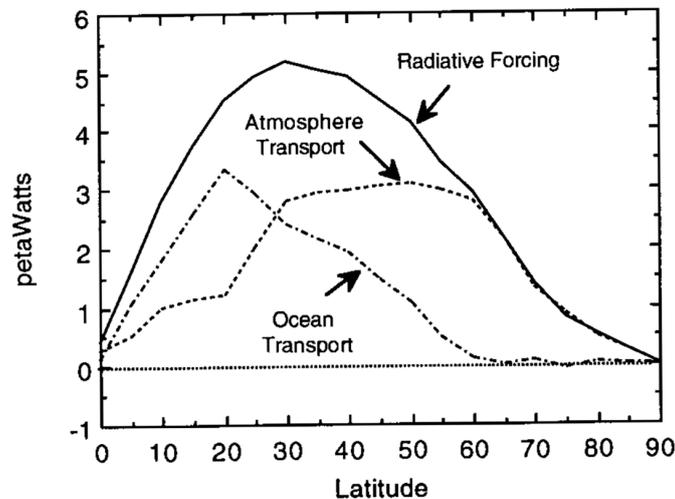


図 1.4 年平均した緯度方向のエネルギー輸送. 正味の放射強制と大気による輸送は観測から評価したものであり, 海洋の輸送はエネルギー収支の残りに応じて算出されている. (Hartmann, 1994, Fig.2.14)

形式は正しくない (Nakajima et al., 1992).

そこで, Ishiwatari et al. (2007) では, Nakajima et al. (1992) の鉛直 1 次元放射対流モデルを用いて大気上端での惑星放射を表現した EBM を利用し, 惑星気候の太陽定数依存性が調べられた (図 1.6). 水平熱輸送は拡散型で表現されている (North, 1975). その結果, 長波放射として温度の一次関数を用いた EBM と同様の 3 つの気候状態だけでなく, 暴走温室状態<sup>\*1</sup>も表現され, 氷なし状態の上限が示された. また, 長波放射として温度の一次関数を用いた EBM と対照的に, 部分凍結解と氷なし解の結合は複雑な特徴を示した.

## 1.2.2 GCM を定式化した過去の研究

また, 惑星気候の太陽定数依存性は, 大気大循環モデル (General Circulation Model; GCM) を用いても研究された (Ishiwatari et al. 2007). その研究によると, GCM を用いても EBM で得られた 3 つの状態や多重解の存在が確認された. さらに, Ishiwatari et al. (2007) では暴走温室状態が存在することも確認された.

<sup>\*1</sup> Nakajima et al. (1992) における暴走温室状態の表現の一部は付録参照.

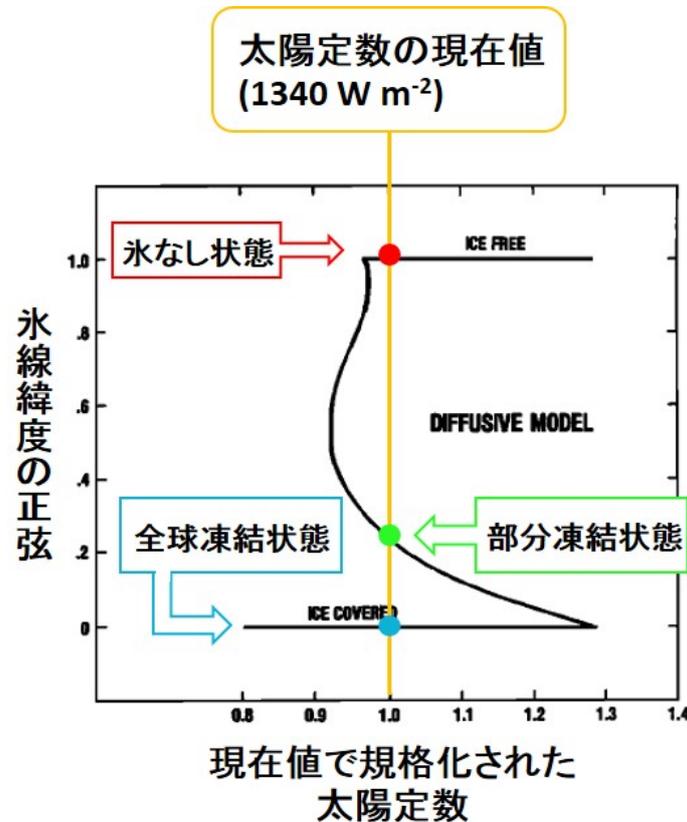


図 1.5 太陽定数と氷線緯度の関係 (North 1981, Fig 8 を改変)

Ishiwatari et al. (2007) で用いられた GCM は AGCM 5.3 (Ishiwatari et al., 1998, 2002) である。力学過程にはプリミティブ方程式系が用いられている。放射過程は, Nakajima et al. (1992) の放射スキームが用いられている。大気は水蒸気と乾燥空気で構成され, 水蒸気のみが長波放射を吸収し射出する。乾燥空気は透明, 水蒸気の吸収係数は一定であり, 波長に依存しない。雲の放射と放射の散乱は考慮されていない。地形は考慮されていない。海表面アルベドは  $263 \text{ K}$  を上回ると  $0$ ,  $263 \text{ K}$  を下回ると  $0.5$  とする。積雪量や海氷の移動は考慮せず, 海は, 熱容量がゼロで海洋による熱輸送を考慮しない swamp ocean として取り扱われている。用いられた解像度は, 緯度経度格子間隔が約  $5.6$  度であり, 鉛直方向の大気層数は太陽定数が  $1450 \text{ W m}^{-2}$  より小さい場合は  $26$ ,  $1450 \text{ W m}^{-2}$  より大きい場合は  $32$  である。

図 1.7 に上記のモデルによる太陽定数と氷線緯度の関係を示す。Ishiwatari et al. (2007) によると, GCM を用いても EBM で得られた 3 つの状態や多重解の存在が確



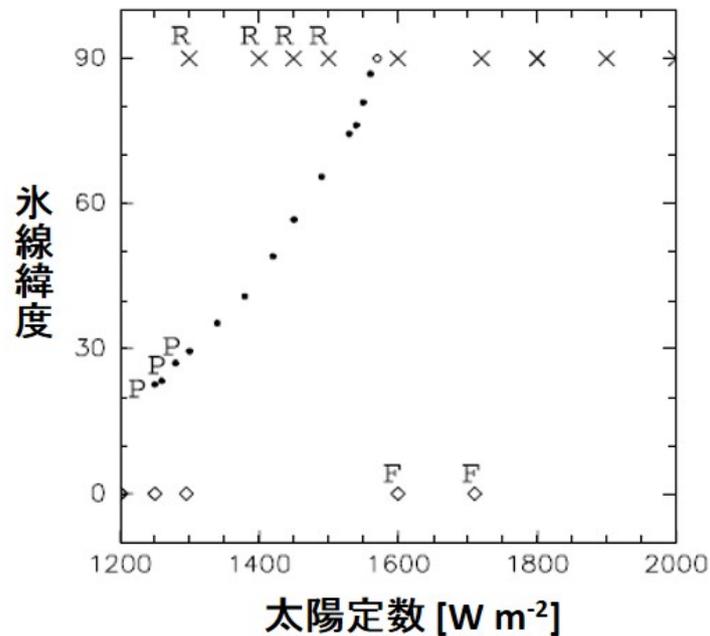


図 1.7 GCM による太陽定数と氷線緯度の関係 (Ishiwatari et al., 2007, Fig 3). 記号は図 1.6 と同様である. F は太陽定数  $1000 W m^{-2}$  で計算される全球凍結解を初期値とした結果, R は太陽定数  $1600 W m^{-2}$  で計算される暴走温室解を初期値とした結果, P は太陽定数  $1300 W m^{-2}$  で計算される部分凍結解を初期値とし太陽定数を徐々に減少させることで得られた結果である. 記号のない点は  $280 K$  の等温状態を初期値とした結果である.

て述べる.

### 1.3.1 全球凍結状態

地質学的なデータから, 8 億年前から 6 億年前の間に全球凍結状態が現れた期間が少なくとも 2 期間あったという仮説が立てられている. この仮説はスノーボールアース仮説と呼ばれており, Kirschvink (1992) や Hoffman et al. (1998) により提された. 地質学的なデータの中で代表的なものとして, 南極以外の世界各地での氷河堆積物の発見, 縞状鉄鉱床の存在, 炭素同位体比のマイナス値が挙げられる.

### 1.3.2 南極以外の世界各地での氷河堆積物の発見

イギリスの地質学者 Brian Harland は氷床が地球表面を全面的に覆った可能性について問題提起した。Harland は 1950 年代にスピッツベルゲンの探検を行ったところ、スピッツベルゲンの先カンブリア時代末の地層に氷河作用の痕跡を発見した。また、広く文献を調べたところ、北欧地域だけでなく、アフリカ、オーストラリア、中央アジア、南北アメリカ大陸にも氷河堆積物があることがわかった。

1980 年代、地層が堆積した場所の緯度を推定する古地磁気学的研究から、南オーストラリアの氷河作用でできた地層が赤道から約 10 度しか離れていない場所に堆積したものであるというデータが提示された。このデータからカリフォルニア工科大学の Kirschvink は全球凍結状態の存在を考え出した。

### 1.3.3 縞状鉄鉱床の存在

世界各地の 7 億年前の氷河堆積物中から縞状鉄鉱床が見つかった。縞状鉄鉱床とは、酸化鉄鉱物、鉄炭酸塩鉱物、硫化鉄鉱物などの鉄分にとんだ鉱物と細かい石英粒子が数センチメートルごとに規則的に繰り返された層状の地層であり、先カンブリア時代に形成された。Kirschvink はこの縞状鉄鉱床の全球凍結状態との関係性について考察した。もし地球が全球凍結状態に陥ったならば、海洋は大気と分離されるため酸素が乏しい状態となり、一時的に大量の鉄イオンが蓄積する。その後、全球凍結状態が終了すると、大気から海洋に酸素が供給され、海洋中の鉄イオンと酸素が反応して大量の酸化鉄が堆積し、縞状鉄鉱床が形成されると考えた。

### 1.3.4 炭素同位体比のマイナス値

先カンブリア時代の地層からは化石がほとんど産出されないので、地層の年代の比較が難しい。そこで、地球科学者 Hoffman は炭素同位体比の変動曲線を用いて、地層の比較を行った。炭素には質量数 12 ( $C^{12}$ ) と 13 ( $C^{13}$ ) の安定な同位体があり、その比率は物質に

より異なる。また、同じ物質でも形成された時代により値のずれが生じ、このずれのパターンを用いて地層の比較を行う。Hoffman はナミビア北部で地質調査を行い、その際に採取した岩石の同位体比を調べると、先カンブリア時代後期の氷河堆積物のところで、石灰岩の炭素同位体比がマイナスの値にずれていることがわかった。C13 と C12 を比較すると、より軽い C12 の方が植物の光合成に使われやすい。従って、炭素同位体比がマイナスの値にずれることは C12 の方が C13 より大きく、植物の光合成が行われていないことを示す<sup>\*2</sup>。Hoffman は全球凍結状態となれば、光合成生物が生息できず光合成が行われないと考え、スノーボールアース仮説を立てるに至った。

## 1.4 本研究の目的

前節までに、地球では現在までに様々な気候状態が存在したと考えられていることを述べた。しかし、数値モデルにより地球気候の太陽定数依存性を調べた先行研究である Budyko (1969) や Ishiwatari et al. (2007) では、大気組成や海陸分布の影響を考慮していなかった。そこで、本研究では、地球流体電脳倶楽部<sup>\*3</sup>が開発している惑星大気大循環モデル DCPAM を用いて、地球の海陸分布や大気組成を考慮し地球気候に対する太陽定数と氷線緯度の関係について調べる。

本論文の以降の構成を簡単に記す。第 2 章では、本研究で用いた惑星大気大循環モデル DCPAM の概要を述べる。第 3 章では、DCPAM を用いて現在の地球のパラメータや境界条件を与えた実験を行い、その結果と NCEP の再解析データを比較する。第 4 章では、現在の地球の海陸分布や大気組成を与えた数値モデルを用いて、太陽定数増減実験を行う。第 5 章では、第 4 章で見られた部分凍結解の初期値依存性について南北 1 次元エネルギーバランスモデルを用いて考察を行う。第 6 章では本論文の結論を述べる。

---

<sup>\*2</sup> 炭素同位体比の計算は

$$\delta^{13}C = \left( \frac{R}{R_0} - 1 \right) \times 10^3 \quad (1.2)$$

で表される。ここで、 $R = {}^{13}C/{}^{12}C$  であり、 $R_0$  は基準値である。

<sup>\*3</sup> URL : <http://www.gfd-dennou.org>