「フロンティアセミナー・テキスト」 ハビタブルプラネットの起源と進化 第3回

阿部 豊¹

2008年11月27日受領, 2010年8月6日受理.

(**要旨**)

生物が生存可能な惑星(habitable planet)の環境の必要条件を液体の水が存在することと考えて,表面に液体の水が存在する地球型惑星「水惑星」の形成と進化を検討した.第1回(第1~3章)[1]と第2回(第4・5章)[2]までの議論をふまえ,最終回の今回は,より原理的な立場から水惑星の形成・維持について検討する.第6章では,再び惑星の表層環境を決める問題をとりあげて,空間的・時間的に中心星から受け取るエネルギーが変化する,ということから導かれてくる問題を中心に検討する.第7章では,水の供給に注目して,生存可能惑星の形成について問題点を議論する.それぞれ,第2・3章,第4章の議論の拡張と問題提起になっている.

6. 惑星気候学

ここから続く6章と7章では、より原理的な立場から 水惑星の形成・維持について考えてみる.しかし、現 時点ではこのような試みはまだ不十分であり、確定し た結果と言えるようなものはあまりない.したがって、 4章までの議論と違って、むしろ問題提起といったも のに近くなってくることを了承いただきたい.

この章では再び惑星の表層環境を決める問題につい て考えよう.2章と3章では全球平均で惑星気候を考え た.全球平均で考えるということ自体,第0次近似と して悪いことではない.しかし,惑星では,中心星か らの光によって表面のエネルギー収支が決まっている から,エネルギーを多く受け取る緯度帯と,あまり受 け取らない緯度帯が生じることは必然的であり,その ことにともなう環境の不均質性は避けて通れない問題 である.

この章では、空間的・時間的に中心星から受け取る エネルギーが変化する、ということから導かれてくる 問題を中心に考えてみたい、具体的には全球年平均的 推定には次の二つの問題がある。

1. 表面が一様均質であると仮定されている

1. 東京大学大学院理学系研究科 ayutaka@eps.s.u-tokyo.ac.jp 全球平均の気候モデルでは,惑星表面に湿った部分 と乾燥した部分が存在する場合を扱うことができなか った.しかし,現実には,砂漠が広く広がっているが, 局地的にはふんだんに水があるという場合もありえる. そういった水が局地的にしか存在しない惑星も,生存 可能惑星となることができるかもしれない.

2. 季節変化を無視している

現在の地球は自転軸の傾斜が23.5度ほどで,この傾 きがあることによって季節変化が生じている.惑星の 気候システムは非線形であるため,年平均日射が同じ であっても日射の季節変化の振幅が年平均気温に影響 することが知られている.

例えば、わずかな軌道要素の変化による季節変化の 振幅の変動が平均的な気候状態に影響する例として、 地球の氷期間氷期サイクルがある。今後発見される 太陽系外の地球型惑星は様々な軌道要素を持つだろう。 たとえその惑星が受ける年平均日射が同じであったと しても、離心率や自転軸傾斜が異なれば、それによる 日射の季節変化の違いは、地球で氷期間氷期サイクル を生み出している違いよりも遙かに大きくなることが 予想され、惑星の表層の平均的環境は大きく異なる可 能性がある。

表面の不均質性や季節変化の問題は、惑星上の水平 方向の熱や物質の輸送に関わっている.2章では、全 球平均を仮定して、大気の鉛直運動のダイナミクスを 無視し、鉛直方向の熱輸送だけを考慮して議論を進め てきた、水平方向の熱輸送を考える場合、大気運動の ダイナミクスをまともに考えないわけにはいかない. この章では、筆者らが最近、大気大循環モデル(6.1.2 節参照)を用いて行った研究を中心に、特に大気運動 のダイナミクスを考慮することによって現れてくる現 象について解説したい.

6.1 表面の不均一

6.1.1 陸惑星と海惑星

惑星上の不均一としては、地形や植生、地面の熱慣 性の違いなど、色々なものが考えられる.しかし、こ こでは大気循環にともなってある意味で必然的に起こ ると考えられる、水循環にともなう不均一性を考えよ う、地球のように大量の水が表面にある惑星では、地 形的に低い場所は常に水で覆われ、海となっている。 海の特徴は、地球の亜熱帯域のように蒸発が降水より も卓越するようなところでも、蒸発した水が海を通し た水輸送によって補給されるため、常に水が存在でき ることである、その結果、大気循環の如何に関わらず、 海がある場所は、その表面がいたるところで湿ってい る、一方、陸上では、河川による流入がない限りは、 蒸発が降水よりも卓越する場所では地面が乾燥する. しかし、降水が多いところでは地面が湿って、場合に よっては大きな湖のようなものさえできる.地面の乾 燥の度合いは大気中の水輸送によって支配される.

このような地面の性質の違いを考え、それを理想 化したものとして、海惑星(Ocean Planet)と陸惑星 (Land Planet)を次のように定義する. 海惑星は, 降 水や蒸発によらず惑星表面が(海洋によって)常に湿っ た状態に保たれている惑星である. この場合には降水 と蒸発は局所的にはバランスしない.一方,陸惑星は 惑星表面の水分布が大気中の循環で支配される惑星で ある。簡単のために大気循環以外の例えば河川などに よる水の輸送は考えないことにする. この場合には降 水と蒸発が局所的にバランスする。陸惑星では水の局 在化が起こることが重要な特徴である.

陸惑星では蒸発が降水よりも卓越する場所は乾燥す る、したがって、地球と同じような自転軸傾斜の場合 には、地球でも砂漠地帯が連なる亜熱帯地帯は全面的 に乾燥地帯になる。地球ではさらに低緯度の地域(熱

191

帯収束帯)では降水が多いが、陸惑星の場合にはこの 地域も乾燥する.これは地球の場合には亜熱帯地帯に も海が存在し、海からの水の供給があるが、陸惑星で は亜熱帯地域は全面的に乾燥してしまい、熱帯収束帯 に水が運ばれないためである。より詳しくは6.2節で 述べるが、こうして自転軸傾斜がハドレーセルの幅よ りも小さい陸惑星の中低緯度は乾燥し、高緯度域に水 が局在する.一般に陸惑星では、太陽放射が大きく平 均温度が高い地域から低温の地域に向けて水は輸送さ れていくため、太陽放射が大きい地域は乾燥している。

6.1.2 大気大循環モデル

ここで用いた大気大循環モデルは東京大学気候シ ステム研究センターと国立環境科学研究所の共同で 開発されたモデル(大気大循環モデル CCSR/NIES AGCM5.4g)の地表面条件だけを単純化したものであ る、したがって、地球サイズの天体上に1気圧の地球 大気がある場合である、温室効果ガスの濃度は変えな い.ただし、大気中の水蒸気量は固定せずにモデル内 で予報させた.惑星の公転周期は360日、自転周期は 24時間とした.地面条件としては,陸惑星,海惑星, 沼惑星を考えた。

陸惑星では土壌水量は飽和水量10cmのバケツモデ ルで計算した。ただしバケツ自体の深さは非常に深く 取り、実験期間中にバケツから水があふれないように した.河川などによる地表での水輸送,地下水の輸送 は考慮していないから、土壌水量は蒸発と降水のバラ ンスによって決まる. 飽和土壌水量より土壌水量が多 い限り、蒸発効率は変化せず、したがって蒸発量は 土壌水量によらない. つまり10cmよりも大量の土壌 水を与えたとしても結果には影響しない. 雪や氷に覆 われていないときの地表面アルベドは、典型的な砂漠 における値0.3とした. 湿った陸面のアルベドは砂漠 のアルベドよりも低いので、この影響を調べるために、 熱帯雨林の典型的な値0.11とした場合も計算し、0.3の 場合と比較した. また計算の初期の擾乱による悪影響 を除去するために、地面を飽和状態に保ったまま10年 間の馴らし実験を行い、大気の循環場が定常になった ことを確かめて、これを初期条件として計算を行った. 海惑星では、全球は50m深さの混合層海洋で覆われ ているとした.海洋のアルベドは0.07として、海洋に よる熱輸送は考慮しない.

沼惑星というのは海惑星と同様に地面は土壌水量に



図6.1 緯度の効果を考慮したときの太陽放射と惑星放射の釣り合いの模式図.(a)地面が全球にわたって湿っている状態で、低緯度側の太陽放射が射出限界を超えている場合(ただし、全球平均の太陽放射が射出限界を超えていない状況).この場合、低緯度側の惑星放射は、地面が湿っているため、射出限界を超えることができない、射出限界を超えた残りの太陽放射(領域①)は、大気の熱輸送などによって、高緯度側へ輸送される、高緯度側では、入射する太陽放射よりも大きな惑星放射を射出することによって(領域②))、惑星全体の釣り合いを保つことが可能となる。(b)地面が全球にわたって湿っている状態で、全球平均の太陽放射が射出限界を超えた場合。全緯度帯で惑星放射が射出限界に一致するが、それでも高緯度側の過剰な太陽放射を惑星放射として補うことができない、このような場合、地面の水がすべて蒸発するまで地表温度が上昇する(暴走温室状態).(c)全球平均の太陽放射が射出限界を超えているが、低緯度側の地面の乾燥している領域は、惑星放射に射出限界がないため、低緯度側で、大きな惑星放射をもつことが可能となる。その分、高緯度側の惑星放射は、射出限界以下に抑えられる。このとき、高緯度側の地面では、水が液体として存在することが可能となる。

よらず,地面は常に水に飽和しているが,熱容量は陸 惑星と同じという仮想惑星である.陸惑星と海惑星で は,地面の湿り具合だけでなく,熱容量が大きく違っ ているため,地面の湿り具合と熱容量の効果を区別す るために導入したものである.実体としては,陸惑星 の初期の馴らし実験をそのまま延長したものである. 沼惑星は常に湿っていることから地表面アルベドは 0.11としている.

雪,氷が存在する場合の地表面アルベドは標準的な 地球モデルのものと同じで、積雪量および温度に依存 して変化する。与えた太陽放射のもとで定常的な循環 が確立するように陸惑星と沼惑星では20年以上、海惑 星では60年以上の数値実験を行った。その後の10年間 の平均値を解析している。

6.1.3 完全蒸発限界

水がすべて蒸発している状態を「完全蒸発状態」,地 表に水や氷が残っている状態を「部分凝結状態」と呼 ぶことにしよう.部分凝結状態から完全蒸発状態へ移 る条件,そのときの正味太陽放射の値を完全蒸発限界 と呼ぶことにしよう.まずは,陸惑星と海惑星で,完 全蒸発限界に違いが生じるかについて検討しよう.2 章で議論したように,完全蒸発限界は暴走温室効果の 発生で与えられていると考えられてきた.暴走温室 状態発生の研究は1次元の放射対流平衡モデルを用い, 全惑星表面上で年平均した日射に対して研究されてき た.この場合の完全蒸発限界は射出限界に一致する.

全球平均1次元ではない場合,これはどう変わるだ ろうか.緯度方向に入射する太陽放射の値が違ってい る場合について考察してみよう.簡単のために自転軸 傾斜がない場合を考えよう.地面が湿っている限り, 1次元モデルが示すように惑星放射には上限が生じる. 低緯度で入射する太陽エネルギーが射出限界を超えて いても,過剰入射分は大気中の熱輸送で高緯度に運ば れ,そこから射出される(図6.1a).現在の地球は低緯 度では射出限界を超える入射があり,この状況にある.

全球で平均した入射太陽エネルギーが射出限界を超 えてしまうと(図6.1b),惑星全域で射出限界まで惑星 放射を射出したとしてもエネルギー収支が合わなくな り,暴走温室状態に入り,地表温度は上昇する.これ は地面が湿っているという状態が解消されるまで続く ことになる.つまり,すべての水が蒸発する.射出限 界の値はH₂Oの物性値でほとんど決まることはすでに 述べた.

また,暴走温室効果が発生するときの気温はほぼ全 球で一様になることが予測される.これは次のような 事情による.地面が湿っている場合,大気中の水蒸気 量は地表温度が高いほど多いから,原理的にはその分 だけ圧力が高い.現在の地球大気中の水蒸気量はあま り多くないから、この効果はほかの圧力変動要因に比 べて小さい.しかし、射出限界付近では数十hPa相当 の水蒸気が大気中にあり、また、温度上昇につれて飽 和水蒸気圧の温度依存性は強まるから¹、地表温度差 は地表圧力差に直接的に反映されるようになる.大き な水平方向の圧力勾配を支えることは力学的に無理だ から、高温=高圧側から低温=低圧側へ大気運動が起



図6.2 地面の水量を変えたときの、相対太陽放射と大気中の水蒸 気量、入射エネルギーは、現在の地球軌道での太陽放射で 規格化してある.完全蒸発限界以下(170%以下)では大気 中の水蒸気量は、初期に地面に与えた水の量にほとんど依 存しない.

こり,同時に熱輸送も起こる.この過程は圧力差が十 分小さくなるまで,すなわち温度差が小さくなるまで 続くはずである.これは温度上昇とともに熱輸送効率 がよくなることを意味する.こうして暴走しつつある とき,温度上昇とともに全球一様な温度に近づくこと が予想される.

したがって、1次元モデルで全球平均放射を用いて 考えた場合と3次元モデルの場合で、結果は大きく変 わらず、暴走温室状態発生条件に大きな不確定性は無 いと考えられてきた。

ここで、どんなに大量の水があっても、ということ が一つの「罠」である. 直感的に、水の量が少なけれ ばより容易に蒸発して、水は失われるであろうと考え られ、水の量が少なければどうなるか、ということが 充分に検討されてこなかった. しかし、水は水蒸気フ ィードバックを介して、暴走温室効果の原因を引き起 こす物質である. 水が少なければ、そもそも、温室効 果が強くならない可能性がある.

もう一つの「罠」は、全球平均1次元モデルを使用し ていたことである.確かに地面の水が蒸発しきった段 階で温室効果の増大は止まり、それ以上の温度上昇は 起こらない.しかし、そのとき全球平均モデルでは、 全球で地面は乾燥してしまっている.この場合、まさ に水の量が少なければより容易に蒸発してしまうはず だ.



だが地面に湿っている場所と乾いている場所という

図6.3 全球平均した惑星放射に対する可降水量(左図)と地面水量(右図). 灰色の領域では、すべての水が蒸発している. 破線は、1次 元放射対流平衡モデルによって得られる射出限界値で、それぞれ仮定した相対湿度を図中に示した.



図6.4 相対太陽放射を変化させたときの,緯度平均・年平均の地 表温度(°C). 完全蒸発限界(170%)以下では,低緯度の温 度は極めて高いが,高緯度では穏やかな気候となっている. 一方,完全蒸発限界以上では,蒸発した水蒸気による極め て強力な温室効果のため,全球が高温となっている.

不均質性を考えれば,状況は変わってくるかもしれな い.乾いている場所からの惑星放射は射出限界の制約 を受けない.62節で述べるように自転軸傾斜がハド レーセルの幅よりも小さい陸惑星では低緯度は乾燥 する.図6.1cで低緯度が乾燥した場合の状況を示した. 全球平均で入射するエネルギーが射出限界を超えたと しても,低緯度の放射が射出限界を超えて大きくなる ため,高緯度は射出限界以下の射出でも全体収支は成 り立つ.すなわち高緯度には水が存在できる.このよ うな状況は惑星表面上の日射分布と水循環を考慮して 初めて現れるもので,全球平均では考えられない.

この状況が現実に発生できるか否かは、大気中の水 平方向の熱輸送で決まっている.つまり、低緯度から 高緯度への熱輸送が速やかであるならば、高緯度も高 温となって水が残らないことが考えられるからである. そこで、大気大循環モデルを利用して上記のようなこ とが起こるのかを確認した[3].

この数値実験では自転軸傾斜が0度の1気圧の空気を 持つ陸惑星で、太陽放射を徐々に増やし、完全蒸発限 界を探した、すでに述べたように自転軸傾斜が小さい 陸惑星では高緯度に水が局在し、低緯度は乾燥してい る.この状態で太陽放射を増大させた、惑星表面には 全球平均で 20cm、40cm、60cm の深さの水を置いた 場合を考えた、この量は非常に少ないように見えるか もしれないが、射出限界の発生には 40cm程度の水で



図6.5 惑星放射に対する大気上端における絶対湿度.破線は、1 次元放射対流平衡モデルによって得られる射出限界値で、 それぞれ仮定した相対湿度を図中に示した.

十分なので、今の実験では充分である.実際、数値実 験の結果によると、完全蒸発限界はいずれの場合も、 相対太陽放射(現在の地球が受け取る太陽放射を100% としたときの相対値)が170%程度であり、結果は完全 蒸発限界以下では与えた水の量にほとんど依存しない (図6.2).完全蒸発限界以下で気候状態が水の量に依 存しない理由は極めて簡単で、地面に飽和土壌水量以 上の水が存在しても、そのことによって大気中の水蒸 気量が影響を受けないことに依っている.飽和土壌水 量以下では地面からの蒸発量は地面の含水量に依存す るが、ここでの設定では土壌水量が 10cm以下の場合 だけなので、実質的な差は小さい.水が完全に蒸発し てしまうと大気中の水蒸気量は与えた水の量で決まる ことになるから、気候状態は与えた水の量に強く依存 する.

図6.3では正味太陽放射に対して可降水量と地面水 量を示した.図から明らかなように少なくとも415W/ m²までは地表に液体の水が安定に存在できる.すな わち完全蒸発限界は415W/m²以上である.完全蒸発 限界近くでは太陽放射は1%刻みで増大させているに もかかわらず,正味太陽放射は完全蒸発限界を挟んで ジャンプしている.これは完全蒸発が起こったときに 大気中の水蒸気が急増し,温室効果が強まるために気 温が急上昇して雲が蒸発し、アルベドが著しく減少す るためである.地面が湿っていれば地面からの水蒸気 の供給で相対湿度が維持されるから、雲が消えること はないが,完全蒸発すると地面からの水蒸気供給がな

 ³⁰⁰K付近では1Kで2hPa, 350K付近では1Kで15hPa, 400K付 近では1Kで150hPaに達する圧力差が生じる.

くなるので、気温上昇によって大気の相対湿度は減少し、雲が消失するのである².

この大循環モデルでは技術的な理由で射出限界の正 味太陽放射が求められていないので、完全蒸発限界と 射出限界を直接比較できない。異なる放射モデルの間 では単純な比較はできないが、射出限界の正味太陽放 射は水蒸気の物性と相対湿度で決まっているので、現 実的物性を考慮したモデルの間では大きな違いはない だろう. そこで図には1次元放射対流平衡モデルで相 対湿度を仮定して求めた射出限界の値が示されている. 射出限界値は相対湿度100%のとき310W/m².75%の とき330W/m². 50%のとき350W/m²である. 相対湿 度は1次元モデルでは決まらないが、中島ら[4]の1次 元のモデルを3次元に拡張した石渡ら[5]の海惑星での 大気大循環モデルによる計算結果では、3次元の大気 での射出限界は1次元放射対流平衡モデルで相対湿度 を約60%としたときの射出限界(約340W/m²)に相当し、 相対太陽放射は110%程度になっている.このことか ら陸惑星の完全蒸発限界は射出限界を大きく超えてい ることが分かる.

図6.4には相対太陽放射を変化させたときの緯度平 均・年平均の地表温度を示した.完全蒸発限界以下で は温度条件はかなり温和である.低緯度の温度は極め て高いが,高緯度の湿潤な領域では穏やかな気候とな っていることがわかる.まさに図6.1cで示したような 状況が起こっている.

図6.5には大気上端における絶対湿度を示した.上 層大気に含まれる水蒸気の量は長期間における惑星上 での水の安定性(長期間の保持)を考える上で極めて重 要である.それは上層大気で水蒸気が紫外線によって 分解され宇宙空間に水素として散逸していくことが地 表から水を失う重要な過程であるからである(3.1.3節). 現在の地球では対流圏界面付近のいわゆるコールドト ラップによって成層圏より上の大気に含まれる水蒸気 量は著しく制限を受けている.このことが地球上にお ける水の安定性に大きな意味を持っている.キャス ティングら[6]によると上層大気の水蒸気の混合比が3 ×10³以上のときには46億年以内に海洋質量程度の水 蒸気が失われる.しかしこの図を見てもわかるように, 完全蒸発状態でない場合,限界付近でも,成層圏上部 の水蒸気量は極端に小さい(~10⁹). このことは,陸 惑星の水は非常にわずかな水の量(平均水深1mm)で も長期間安定に存在できることを意味する.

完全蒸発限界以上の大きな太陽放射の状況を初期値 として,完全蒸発状態から太陽放射を減少させる実 験も行った.いずれの場合も太陽放射160%では地面 に水は存在できず,水量が60cmの場合には太陽放射 120%,水量が40cmの場合には太陽放射130%でも,そ れぞれ完全蒸発状態になっている.

これは大気中の水蒸気量が初期条件によって違って いるからである.太陽放射を増やしていくとき,完全 蒸発限界以下ならば,高緯度の地表に水の大部分が固 定されているために,大気中の水蒸気量は少なく,し たがって温室効果も小さい.一方で,完全蒸発限界以 上から太陽放射を減らしていく場合,水は全て大気中 に水蒸気として存在しているから,大気中の水蒸気量 は多く,温室効果は大きい.このように同じ太陽放射 であっても,初期条件によって温室効果が強く高温の 状態と,温室効果が弱く低温の状態が存在している. つまり地面の水の状態に関して多重平衡状態が現れて いる.

多重平衡状態の上限太陽放射は完全蒸発限界であ るが、下限太陽放射は良く決まっていない.しかし、 水量が60cmの場合に完全蒸発状態は正味太陽放射が 298W/m²までは安定であり、この値が一次元モデル で推定された射出限界の値に近いことは、与えられた 水が多い時には多重平衡状態の下限太陽放射は射出限 界であることを示唆している.そうだとすると、完全 蒸発限界と射出限界の間では一度暴走温室状態になっ た場合、射出限界以下の太陽放射になるまで、地表に 液体の水が現れることはない.このことは、海惑星が 射出限界以上の太陽放射で暴走温室状態に入り、地表 の水が蒸発した場合、大気中の水蒸気が流体力学的散 逸などで失われ、大気が乾燥したとしても、たとえ完 全蒸発限界以下であっても、陸惑星状態になって地表 に液体の水が現れることはないことを示している.

6.1.4 全球凍結限界

まず言葉の整理を行おう.季節的に積雪や海氷があっても,惑星上のどこにも永久的な積雪または海氷が 無い場合を「無凍結状態」と呼ぶことにする.惑星上 のどこかに一年を通して積雪または海氷があるが,積 雪または海氷が消滅する地域・季節がある場合には「部

射出限界以上の惑星放射を射出するためには相対湿度が低下 しなければならないことに注意されたい。



図6.6 相対太陽放射を100%から変化させたときの、陸惑星と海惑星の積雪・雪氷分布. ここでは自転軸傾斜が0度の場合を示した. 図中、白っぽいほど積雪・雪氷は多く、黒い部分は積雪・雪氷がないことを示している.



図6.7 相対太陽放射を100%から変化させたときの、陸惑星と海惑星の地表温度(℃)と太陽放射の関係. 図上部の白抜き三角は、全球 凍結限界を示す.

分凍結状態」と呼ぶ.一年を通して全球が積雪または 海氷で覆われているとき「全球凍結状態」と呼ぶ.こ れらの3つの状態は多重平衡状態になっていることが 知られているが,以下では主に太陽放射を減らしてい ったときのことを考え,無凍結状態から部分凍結状態

表6.1:凍結限界

	陸惑星	海惑星	沼惑星	
部分凍結限界	100%以上	100%以上	100%以上	
完全凍結限界	77%	90%	92%	

へと移る臨界の太陽放射を「部分凍結限界」,部分凍結 状態から全球凍結状態へと移る臨界の太陽放射を「全 球凍結限界」と呼ぶことにする.いずれも現在の太陽 放射を基準として,それに対する相対値で表すことに する.多重平衡状態の問題については6.4節で議論す る.

図6.6に陸惑星と海惑星の積雪・雪氷分布を太陽放 射の関数として示した.太陽放射を減らしていったと きに見られる状態が示されている.自転軸傾斜が0度 の場合,現在の太陽放射を与えた場合でも両極には万 年雪が生じている.この計算では初期には全く雪がな い状態から計算を始めているから,これは初期条件の 影響ではなく,この太陽放射で無凍結状態は不安定で 部分凍結状態が安定であることを示している.すなわ ち部分凍結限界は,陸惑星と海惑星ともに,現在の太 陽放射の100%以上である.太陽放射を減らすと雪の 縁の緯度が徐々に下がってくるが,陸惑星の場合,現 在の77%のところで全球が雪で覆われる.したがって 全球凍結限界は77%である.78%からの変化は劇的で ある.海惑星の場合,全球凍結限界は陸惑星の場合よ りもかなり大きく,90%となっている.すなわち,海 惑星の方が凍りやすい、凍結限界を表61にまとめた.

図6.7は陸惑星と海惑星の地表温度と太陽放射の関 係を示している.太陽放射が現在の値では海惑星の方 が温暖であるが,太陽放射が減少していくと逆転が起 こり,陸惑星の方が温暖になることに注意しよう.陸 惑星では大気が乾燥しているので水蒸気による温室効 果が弱い.このために,同じ正味太陽放射では陸惑星 は海惑星よりも地表温度が低い.この効果は地表温度 が高いほど大きく,すなわち水蒸気フィードバックが 弱い.この効果のために相対太陽放射が大きいときに は海惑星の方が陸惑星よりも温暖である.しかし,凍 結限界近くではそもそも大気中の水蒸気が非常に少な くなっているため,この効果はほとんど影響しない.

太陽放射が小さいときに陸惑星が海惑星よりも温暖 で凍結しにくい理由は一言で言えばアルベドが低く. アイスアルベドフィードバックが弱いためである.陸 惑星は乾燥しているため雲が少ない。惑星アルベドは 海惑星では雲によるアルベドと地面アルベドの和で決 まっているが、陸惑星ではほとんど陸面アルベドで決 まっている.陸面アルベドは低温では積雪の影響を強 く受けるが、陸惑星の積雪は海惑星の積雪に比べて少 ない.理由は、大気が乾燥していることに加えて、熱 容量が小さいために気温の日変化が大きく、昼間に雪 が融けやすいことによる、結局、雲と積雪が少ないた めに、陸惑星のアルベドは同じ温度の海惑星よりも常 に小さい、その傾向は地表温度が低いほど大きく、す なわち陸惑星では海惑星に比べてアイスアルベドフィ ードバックが弱い. 前述のように低温では温室効果に 違いはないから、地表温度は正味太陽放射と直結し ている. つまり、同じ相対太陽放射では陸惑星の方が 海惑星よりも正味太陽放射が大きく、温度が高く、凍

結しにくい.

一方, 沼惑星の場合に凍結限界が高い直接の原因は, 海惑星よりもさらに雲量が多く, 惑星アルベドが高い ためである. 湿った陸面のアルベドの値が小さい効果 は雲の効果で完全に打ち消されている. 沼惑星の雲量 が多くなる理由は,海惑星よりも熱容量が小さく,日 射による加熱がより直接的に蒸発に結びつくためであ ろう. 凍結限界は仮定する陸面アルベドの値にある程 度は依存するが,むしろ雲やアイスアルベドの効果の 方が大きい.

6.1.5 陸惑星が意味すること

以上の実験が示すように、大気が1気圧で自転軸傾 斜が0度の場合、海惑星では海が長期間存在できる太 陽放射の範囲は現在の地球における太陽放射の90~ 110%であるのに対し、陸惑星では77~170%であった. ここでは大気組成や大気量の影響は全く考えていない. 特に炭素循環などによって大気組成や大気量が自動調 節される影響は考慮していない.その影響まで考える と生存可能領域(Habitable Zone)の幅はここで考えた ものとは違ってくるであろう.しかし、同じ大気条件 であれば、水が安定に存在出来る条件は、陸惑星の方 が海惑星より広い.上で述べた太陽放射の範囲の違い は大した違いではないように見えるが、これが生存可 能領域の違いであると考えると幅は3倍以上違ってい る.

海惑星・陸惑星とは具体的にはどのような惑星であ ろうか.現実の惑星では、地球は海惑星としての特 徴を持っているように思われる.一方,現実の惑星 で,これが陸惑星である、というような惑星は分から ない.しかし、非常に昔(Noachian)の火星は陸惑星 的だった可能性が考えられる.また、最近の観測によ ると土星の衛星タイタンが、循環しているのは水では ないが、陸惑星としての特徴を示しているように思わ れる.なお、SFの世界では陸惑星は昔から知られて いる("Dune" 砂の惑星[7]).

陸惑星は一種の理想化された極限である.実際の惑 星では地表での流水によっても水分布は影響を受ける. 地表での流水は水を等ポテンシャル面に沿って分布さ せようとする.等ポテンシャル面に沿って再分布する 時間と大気中の水輸送で局在化する時間のかねあいで, 陸惑星的に振る舞うか否かが決まる.地形的起伏が大 きく,水が少ない惑星では,地表の流水による水の再 分配は効率が悪く、大気循環にともなう水輸送が卓越 して陸惑星的に振る舞うことが期待される.一方で、 地形的起伏が小さく、水が多い惑星では、地形的凹地 を水が満たし、速やかに等ポテンシャル面に沿って再 分布するために、海惑星的に振る舞うことが期待され る.地球の状態はこの状態であると考えられる.現時 点では水がどれ位少量であれば陸惑星として振る舞う かはよくわからないが、陸惑星は比較的少量の水があ る惑星で期待される.すなわち地球のように大量の水 を持つ惑星が、必ずしも液体の水を表面に持ちやすい わけではないことになる.

このことの意味することは極めて重要である. 表面 に液体の水がある惑星というと、暗黙のうちに地球の ように大量の水がある惑星を想定しているが、必ずし もそれが「水惑星」の標準的な姿ではないかもしれな いのである。現在の地球では海と陸の熱容量の違いに より、海洋上の温度変化の方が大陸上の温度変化より も小さい、このことからH2Oはしばしば地球環境を安 定化していると言われる. しかし必ずしもそうとは言 えない、その理由はH2Oが非常に強い正のフィードバ ック効果を持つからである.つまり、H2Oは強い温室 効果気体であって、温暖であるほど蒸発し、蒸発する ほど温室効果を強める.という水蒸気フィードバック を持つ. また, H2Oは寒くなると凝結し, 凝結すると アルベドを上げ、寒冷化させる、というアイスアルベ ドフィードバックを持つ. どちらも強い正のフィード バックである.2章で議論した液体の水の安定条件は、 高温側では水蒸気フィードバック、低温側ではアイス アルベドフィードバックで決まっている. すなわち. H₂O自身が持つ不安定性によって境界が決められてい るのである. ここまで述べてきた海惑星と陸惑星にお ける完全蒸発限界、全球凍結限界の違いは、正にこの 二つの強い正のフィードバックの効き方の違いによっ ている.

地球的ではない「水惑星」も検討対象としなければ いけない.また、大気のダイナミックスが場合によっ ては平均的な気候状態も大きく変える可能性を考えに 入れなければならない.

6.2 自転軸傾斜

惑星が自転軸傾斜, すなわち自転軸の公転面の法線 に対する傾き, をもつ場合には季節変化が生じる. 全 球年平均の太陽放射は自転軸傾斜によって影響を受け ないが、季節変化の振幅が自転軸傾斜に依存すること によって、気候システムの非線形性を通し、全球年平 均の気候状態も影響を受ける。

例えば、わずかな季節変化の振幅の変動が平均的な 気候状態に影響する例として、地球の氷期間氷期サイ クルがある.地球の自転軸傾斜は約4万年間で約1度変 化する.軌道離心率も約10万年で変化する.自転軸傾 斜と軌道離心率がある場合には、自転軸と軌道の歳差 運動によって、近日点・遠日点を通過する季節が変わ る.地球ではこれにより、夏と冬の日射変化の振幅が 約2万年で変化する.自転軸傾斜の変動や歳差運動で は季節変化の振幅が変化するだけで、地球全体でみれ ば太陽から受ける日射の総量は変わらないが、これら の軌道要素の周期的な変化により、平均気温も変化し、 地球は数万年~10万年周期で氷期と間氷期を繰り返 している.

非線形性を生み出すメカニズムはいろいろあるが, アイスアルベドフィードバックは代表的なものの一つ である.例えば日射が小さい季節に雪が降るとアルベ ドが上がるので,雪が降らない場合より高い日射まで 低い温度と高いアルベドが保たれる.その結果,年平 均の正味日射は小さく,年平均気温は低くなる.この メカニズムは上述の地球の氷期間氷期サイクルの要因 の一つと考えられている(ミランコビッチ理論).

また、一般に惑星の自転軸傾斜は、その惑星の公転 面の傾き, つまり軌道傾斜が他の惑星からの永年摂動 によって周期的に変化することによって変化する.し かし、近年の天体力学的な研究によって、自転軸傾斜 がカオス的に変化する場合があることが知られている. これは軌道傾斜が変化する周期と、自転軸の方向が歳 差運動によって変化する周期が近いものになってしま った場合に、両者の共鳴が起こるためである[8]、自 転軸傾斜の変化の周期は、通常数万年以上かかるから、 観測的な実例はないものの、太陽系内では火星が大き な自転軸傾斜の変化を経験したと考えられている.現 在の火星の自転軸傾斜は25度であるが。10⁵~10⁶年の 周期で平均25度の周りを20度近い振幅をもって変動す ることが知られている[9]. 一方、地球は、月の潮汐力 によって、月がない場合に比べて自転軸の歳差の速さ が約3倍になっている.このため軌道傾斜が変化する 周期と自転軸の歳差周期が大きく異なったものになり、



図6.8 自転軸傾斜を変化させたときの、(a)夏至における(冬半球では冬至)日平均の日射分布と(b)年平均の日射分布



図6.9 自転軸傾斜を変化させたときの,全球凍結が起こっていない陸惑星における年間降水量. 自転軸傾斜が小さい場合,低緯度は乾燥し,高緯度で主に降水が起こるのに対して,自転軸傾斜が大きい場合は,すべての緯度で降水が起こる.

共鳴は起こらない.したがって,地球の自転軸傾斜の 変動はおよそ1度と小さい.しかし月の潮汐力がなけ れば共鳴してしまうと考えられ,自転軸傾斜は10度以 上の変動が起こる.

この節では、自転軸傾斜が大気循環のダイナミクス

を介して惑星が凍結するか否かにまで大きく影響して いることを示そう.

6.2.1 直立レジームと傾斜レジーム

図6.8に夏至における(冬半球では冬至)日平均の日 射分布と年平均の日射分布を自転軸傾斜の関数として



図6.10 地表温度の季節変化. 図中の数字は絶対温度単位の地表 温度,等高線の幅は10Kにとってある.(a)直立レジーム: 自転軸傾斜が23.5度の陸惑星の場合と,(b)傾斜レジーム: 自転軸傾斜が60度の陸惑星の場合.



図6.11 自転周期を変化させたときの気候レジーム変化の例. 自 転軸傾斜が45度の陸惑星で相対太陽放射が100%の場合. 自転周期が24時間の場合(実線)は傾斜レジームに属し, 240時間の場合(波線)は直立レジームに属する年平均降水 量の緯度分布となっていることがわかる.

示した.当然のことながら自転軸傾斜が大きいほど夏 至における高緯度の日射は大きくなる.偶然であるが, 現在の地球の自転軸傾斜(23.5度)では夏至の日の夏半 球の日平均日射はほとんど緯度によらない.だから, 地球よりも自転軸傾斜が小さい惑星では,1年を通し ていつも高緯度側の日平均日射は低緯度側の日平均日 射よりも小さく,逆に地球よりも自転軸傾斜が大きい 惑星では、夏至には高緯度側の日平均日射が低緯度側 の日平均日射よりも大きくなる.また、年平均日射で は、自転軸傾斜が55度程度を超えたときには高緯度側 の方が低緯度側よりも多くの日射を受けることになる. また、春分や秋分における日平均の日射分布は自転軸 傾斜によらず自転軸傾斜が0度の日平均の日射分布と 等しい.

自転軸が大きく傾いている場合と、あまり傾いてい ない場合では大気循環は全く異なる振る舞いをし、異 なる気候レジームを構成している.前者を「直立レジ ーム」、後者を「傾斜レジーム」と呼ぼう[10].2つのレ ジームの選択はハドレーセルの占める緯度帯の幅と自 転軸傾斜の大小関係で決まっている.自転軸傾斜は回 帰線緯度に等しいから、回帰線緯度とハドレーセルの 幅の大小関係で決まっていると言ってもよい.

「直立レジーム」は自転軸傾斜がハドレー循環の幅 よりも小さいときのレジームである.この場合,常に 低緯度帯は中・高緯度帯よりも温度が高い.このため, 中緯度帯では,自転方向に吹く風(以下では地球の場 合にあわせて「西風」と呼ぶ)が卓越する.全球凍結が 起こっていない陸惑星では,緯度方向の温度勾配にと もなって水蒸気は低緯度から高緯度に輸送されてしま い,低緯度は著しく乾燥化し,高緯度で主に降水が起 こり,低緯度ではほとんど降水がない(図6.9).

「傾斜レジーム」は自転軸傾斜がハドレー循環の幅 よりも大きいときのレジームである.この場合には, 夏半球中高緯度は低緯度よりも温度が高くなるため, 夏半球中高緯度からハドレー領域に向かっての熱と水 の輸送が起こる.このため、中緯度帯では,自転方向 と逆に吹く風(「東風」と呼ぶ)が卓越する.全球凍結 が起こっていない陸惑星では,この熱輸送にともなっ て夏半球の低緯度での降水が起こる.その結果,全て の緯度で降水が起こり,どちらかというと高緯度側が 乾燥する(図6.9).また,夏半球の温度に関しては同 じ太陽放射・大気組成・大気量であっても「直立レジ ーム」に比べて非常に高くなる(図6.10).

ハドレー循環の幅自体が気候状態に依存している. しかし、ここで重要なことは、自転によるコリオリ力 のために、ハドレー循環の幅には上限があるというこ とである.

佐藤[11]によると、温度ピークの位置が高緯度にな

ると、温度ピークの位置とハドレー循環の上昇位置が 一致しなくなることがわかっている.これは緯度方向 の温度勾配に依存しているが、現在の地球の自転周期 では勾配が大きい極限で25.5度となる.数値実験で得 られた幅の上限はこれよりも少し大きいようであるが、 自転軸傾斜が30度と45度の間で循環のレジームは入れ 替わる.

ところで、上述の議論に従えば、ハドレー循環の幅 の上限は自転周期に依存しているはずであるから、同 じ自転軸傾斜であっても自転周期が異なれば、異なる 循環レジームが得られるはずである.実際、自転軸傾 斜が45度の場合、自転周期が24時間の場合、傾斜レジ ームの循環が得られているが、自転周期を10倍に伸ば すとハドレー循環の上限の幅が大きくなり、直立レジ ームの循環が得られる(図6.11).

図6.11の数値実験では、力学的な自転周期、すなわ ちコリオリカに関するパラメータだけを変化させ、日 射の変化する周期はどちらも同じである.したがって、 ここでいう「自転周期を長くした場合」は、通常の自 転周期の実験と日射の与え方に関しては厳密に一致し ている.したがって、この2つのレジームの交替はダ イナミクスで支配されていることが分かる.

数値実験の結果では、地球や火星の自転周期では、 ハドレーセルの幅はだいたい30度前後である.現在の 地球や火星の自転軸の傾きは約23~24度なので、こ れは「直立レジーム」に属する.しかし過去の火星で は自転軸が60度程度まで傾いた時期があったとされて おり、この場合は「傾斜レジーム」になる.このこと から、古火星においては気候状態が「直立レジーム」 と「傾斜レジーム」の間を遷移した可能性が示唆され る.

6.2.2 全球凍結限界

図6.12に陸惑星の場合の積雪分布を太陽放射の関数 として示した.太陽放射を減らしていったときに見ら れる状態が示されている.表6.2に部分凍結限界,全 球凍結限界の値をまとめた.傾斜レジーム(60度)の全 球凍結限界は直立レジーム(0度や23.5度)の場合より も著しく小さい.すなわち,傾斜レジームの場合の方 が凍結に陥りにくいことがわかる.さらに,傾斜レジ ームの場合の興味深い特徴に,季節積雪の分布の変化 がある.無凍結状態では冬半球で積雪が起こっている. 部分凍結状態では低緯度に永久積雪が生じるが,この とき冬半球における季節積雪が起こらなくなっている. これは水蒸気が永久積雪として低緯度に固定されてし まった結果,冬半球高緯度が乾燥し,積雪が起こらな くなったものと考えられる.この場合,高緯度では寒 冷化にともなってむしろ積雪が減少することになる.

図6.13には図6.7と同じように,陸惑星の場合の地表 気温の緯度分布を太陽放射の関数として示した.当然 のことながら自転軸傾斜が大きい場合には夏半球と冬 半球の温度差が大きい.全球凍結が起こると劇的に地 表温度が下がるが,これはアイスアルベドフィードバ ックの効果である.また,自転軸傾斜が大きいときに は,冬半球の温度も高くなっていることに注意しよう. これは夏に暖かくなる影響が冬にまでおよんでいるこ とを示している.

図6.14と図6.15は、それぞれ、海惑星の場合の積雪 分布と太陽放射の関係、地表温度分布と太陽放射の関 係を示している.傾向的には陸惑星の場合と同様であ って、全球凍結限界は自転軸傾斜が大きいほど小さく なのる.海の大きな熱容量を反映して、自転軸傾斜が 大きい場合でも夏半球と冬半球の温度差は陸惑星の場 合に比べて小さい.

このように自転軸傾斜が小さい場合には凍結しやす く、自転軸傾斜が大きい場合には凍結しにくい結果が 得られた[12]. しかし、この結果だけではレジームが 異なることが凍結条件に影響しているのか、単に自転 軸傾斜の違いによる日射分布の違いが凍結条件に影響 しているのか、明らかではない.一方、すでに述べた ように、自転周期に依存して直立レジームと傾斜レジ ームの両方が現れる場合があることが分かっている. 季節的日射分布が同じで、レジームが違うケースにつ いて凍結条件を検討した.ここでは力学的な自転周期、 すなわちコリオリカに関するパラメータだけを変化さ せ、日射の変化する周期は同じなので、日射の与え方 に関しては差がない.

表6.2: 凍結限界と自転軸傾斜の関係(陸惑星の場合)

自転軸傾斜	部分凍結限界	完全凍結限界
0度	100%以上	77%
23.5度	90%	77%
45度	90%	70%
60度	90%	58%

それぞれ値は相対太陽放射



図6.12 相対太陽放射を減少させたときの、異なる自転軸傾斜を 持つ陸惑星における積雪分布.北半球の夏至前後3ヶ月 間の平均的積雪分布を経度方向に平均化して示している. すなわち南半球部分は冬季3ヶ月間の積雪分布を表して いる.図中、白っぽいほど積雪・雪氷は多く、黒い部分 は積雪・雪氷がないことを示している.図上部の白抜き 三角は全球凍結限界を、黒三角は部分凍結限界を示す.

自転軸傾斜が45度の陸惑星の場合,自転周期24時間 では傾斜レジームであり,凍結条件は約70%であるか ら,太陽放射75%では全球凍結しない結果が得られた. 一方,自転周期240時間で直立レジームに入っている 場合には全球凍結する結果が得られた(図6.16).この



図6.13 相対太陽放射を減少させたときの自転軸傾斜の異なる陸 惑星の地表温度分布(℃). 図上部の三角の意味は図6.12と 同じ.

ことから、凍結条件は単に日射の季節変化の違いによっているのではなく、気候レジームに依存しているこ とが明らかである.一般的に傾斜レジームにある方が 直立レジームにあるよりも凍結しにくいと言うことが できる.理由は、ハドレー循環は熱輸送効率がよいた めである.全球凍結限界は、夏に最も多く日射を受け る地域で凍結が起こるか否かが決めていると考えてよ い.直立レジームでは最も多く日射を受ける地域はハ ドレー循環地帯の中にあり、熱は効率的にその地域か

75

60

45

30

15

0

-15

-30

-45

-60

-75

110

95

Δ

75

60

45

30

15

0

-15

-30

-45

-60

-75

0度

緯

度

[度]

100 105





図6.15 相対太陽放射を減少させたときの自転軸傾斜の異なる海 惑星の地表温度分布(℃). 図の見方は図6.13と同じ.

ら外に運び出されてしまう. それに対して傾斜レジー ムでは最も多く日射を受ける地域はハドレー循環の外 になる.そこでは熱輸送効率があまりよくないので, 熱が外の地域へ運び出されにくく,それゆえ高い温度

図6.14 相対太陽放射を減少させたときの自転軸傾斜の異なる海 惑星の積雪分布. 図の見方は図6.12と同じ.



図6.16 自転周期を変化させたときの地表温度(℃)の季節変化の 例. 自転軸傾斜が45度の陸惑星で相対太陽放射が75%の 場合. 自転周期が24時間の場合(a)は傾斜レジームに属 し, 240時間の場合(b)は直立レジームに属する温度分布 となっていることがわかる.(b)は全球凍結状態である.

を維持しやすい.このような影響は程度の差はあって も、陸惑星でも海惑星でも起こる.陸惑星・海惑星を 問わず、直立レジームの場合よりも傾斜レジームの場 合の方が全球凍結しにくいと結論できる.

ところで,自転軸傾斜が大きい惑星と小さい惑星の どちらが生存に適しているかは難しい問いである.自 転軸傾斜が大きい場合には凍結は起こりにくいものの, 大きな季節変化を経験する.季節変化が地球程度に穏 やかで,かつ,地球より凍結しにくい惑星は,実験した範囲では自転軸傾斜が45度の海惑星の場合であった.

6.3 軌道離心率

太陽系の惑星はどれもあまり軌道離心率が大きくな く,ほとんど円軌道である.しかし,現在までに発見 された系外惑星では軌道離心率が非常に大きい惑星が 多数知られている(Eccentric Planet)[例えば13].離心 率が大きい惑星ではどのような気候が実現されるので あろうか.

離心率(e)が日射に与える影響は二つある(図6.17)。 一つは離心率が大きくなると同じ軌道長半径でも年平 均の日射が大きくなることである。ただし、この効果 は離心率が小さいときは小さく, e = 0.3ぐらいまでは あまり変化しないで、離心率が大きくなると急激に大 きくなる、もう一つの効果は、近点と遠点で日射が大 きく変わることである.このために、年間の温度変化 が大きくなることが予想される、それだけでなく、年 平均日射は射出限界を超えないが、近点付近では全球 平均の日射が射出限界を超える場合や、年平均日射は 全球凍結限界を下回らないが、遠点付近では全球平均 の日射が全球凍結限界を下回る場合が生じる。前者の 場合には水蒸気フィードバック、後者の場合にはアイ スアルベドフィードバックという非線形の効果が働く ために、年平均の気候状態にも大きな影響が出る可能 性がある[14][15][16].

年間を通して日平均日射が変化することによって, すでに述べた無凍結状態,部分凍結状態,全球凍結状態,



図6.17 軌道離心率の日射量への効果.(左)年平均日射量と(右)日射振幅.

また,年平均日射が射出限界を超えている,年平均暴 走温室状態のほかに,年間のある一時期,遠点近傍の 時期だけ全球凍結に陥る,一時全球凍結状態が現れる. 離心率が大きい場合には全球凍結状態は現れにくい.

360日という公転周期のもとでは1気圧の大気が持つ 熱容量でも,熱慣性の効果がかなり大きく,一時的凍 結や一時的暴走温室状態の発生が全球平均気温に与え る影響はあまり大きく無いようである.しかし,近点 付近で射出限界を越える日射がある場合,射出限界の 効果で熱をためこみ,その結果,遠点付近でも温度低 下があまり大きくならないという場合がある.

惑星大気の質量が大きい場合や、海がある場合に は、惑星表層の熱容量が大きくなるために、年間を通 じての日射量変化の影響はあまり現れなくなる.し たがって、年間の温度変化が小さいという意味で、離 心率が大きいときは海惑星の方がより生存可能な惑 星のようである.この場合には、離心率を持つことに よって年平均日射が大きくなるために、生存可能領域 (Habitable Zone)はやや外側に広がる.

離心率と自転軸傾斜が両方ともある場合には、近点 を通過する季節がいつであるかによって、いろいろな 場合が生ずる.とりわけ、近点を冬至に通過し、遠点 を夏至に通過する場合、中心星からの距離の変化と季 節変化が打ち消し合うために、年間を通した温度変化 は小さくなる.このとき反対側の半球では、近点を夏 至に、遠点を冬至に通過するから、年間の温度変化は 非常に大きくなる。前述の半球では年間を通した温度 変化は小さく、生存可能になるであろう、もし、自転 軸と軌道の歳差運動がないならば、近点を通過する季 節は変わらないから、気候状態も変わらない、しかし、 自転軸傾斜があり、惑星が扁平率を持つ場合、中心星 からの潮汐力によって自転軸の歳差運動が起こること は避けられないから、この状態は長続きしない、歳差 運動の効果まで考慮すると、離心率が大きくかつ自転 軸傾斜も大きい惑星では、いつかは年間の温度変化が 大きくなると考えられる.

6.4 多重性

6.1.4節で無凍結状態,部分凍結状態,全球凍結状態 の三つの状態を定義した.これは凍結状態に対する多 重平衡解となっている.また 6.1.3節では完全蒸発状 態と部分凝結状態の間で多重平衡解が存在することを 示した.図6.18に多重平衡状態の概念図を示した.本 稿で定義した部分凍結限界は、図6.18の無凍結状態の 下限NIminに相当し、全球凍結限界は、部分凍結状態 の下限PIminに相当する.一方、全球凍結状態から他 の状態に移るためには、全球凍結限界ではなく、さ らに強い太陽放射が必要で、図の全球凍結状態の上 限CImax以上になって初めて他の状態に遷移(気候ジャ ンプ)することができる.多重性があることによって、 気候状態にはヒステリシスが生じる.ヒステリシスが 存在するということは、惑星表層環境の進化上の道筋 に関して一種の制約が生ずるということであって、ど のような環境が実現し得るかに大きな影響を与える.

このうち凍結側のヒステリシスは惑星内部の活動な どによって打ち消される可能性がある.たとえば、全 球凍結状態からの脱出が、二酸化炭素循環によって引 き起こされる、というような状況である(3章と5章参 照).このことは、惑星内部の活動によって複数あり うる表層環境のうちの一つの状態だけが選択される、 ということを意味していて、惑星内部の活動が表層環 境を決める上で重要であるということを示唆している. また、離心率や自転軸傾斜が大きい場合、どちらも年 間の気温変動を大きくするため、凍結側の気候の多重 性が消える傾向がある.

一方で、水が蒸発する側の多重性とヒステリシスは 残る可能性が高いだろう.これは、一つには太陽放射 が太陽の進化にともなって増大傾向にあるために、一 度蒸発してしまった水が元に戻るという変化が起こり にくいためである.もう一つは、一度蒸発してしまうと、 大気上層に上がった水蒸気が分解されて散逸し、失わ れてしまうことが考えられるからである.このことは、 金星のような天体と地球のような天体の進化上の分岐 点として重要であるかもしれない.

6.5 汎水惑星気候学に向けて

この章では、比較的水が少なく、大きな海はないが 液体の水は存在するという「水惑星」の理想化された 姿としての陸惑星の気候について触れた.そのふるま いは、海を持つ地球的な「水惑星」とはかなり異なるが、 陸惑星も「水惑星」である.また、軌道要素の影響に ついても議論し、自転軸傾斜によって、異なる大気循 環が生ずることを示した.特に重要なことは、大気循 環場が違うということが、惑星が全球凍結してしまう か否か,といった平均的長期的な環境にまで影響を及 ぼすことである.また,62.1節で触れたように,自転 周期も気候に大きな影響を与える.

地球と同程度に水があり,地球と似たような環境を つくる条件は,自転軸傾斜や離心率の効果まで考える と,かなり厳しいかもしれない.その反面で,液体の 水を表面に長期間にわたって維持する環境は,必ずし も地球的な環境であるとは限らない.地球的な水惑星 と地球的ではない水惑星の両方を合わせて考えた場合, 必ずしも水惑星となる条件の範囲は狭くなさそうであ る.

しかし,地球的ではない水惑星の検討は始まったば かりで,多くの課題が残されている.そもそも現段階 では,海惑星と陸惑星の境界がどのように決まるのか よくわからない.極限としての海惑星と陸惑星の中間 的な状況も考えられる.大気組成や大気量の影響,ど の程度まで地形の存在が平均的な環境に影響を及ぼす か,など,様々な検討課題が考えられる.

さらに,惑星の長時間の,あるいは平均的な表層環 境を決める要因としては,大気や海洋が決める気候そ のもののふるまいに加えて,その上側と下側の境界条 件として,大気散逸や,固体惑星の挙動が考えられる.

大気散逸の問題は3章で議論した.定量的には多く の問題が存在している.特に水の散逸に関しては,3 章でも取り上げた酸素の処理の問題がある.固体惑星 表面との反応,非熱的散逸,還元的大気組成など,い ろいろな検討課題が残されている.還元的大気組成に 関しては,揮発性物質の供給問題と関連して7章で少 し触れよう.

固体惑星の挙動が表層環境に与える影響として,固 体惑星部分と大気の間での揮発性物質交換がある.こ のうち3章では炭素循環を取り上げた.地球のように プレートテクトニクスが働いている惑星では炭素循環 の議論はだいたい良いかもしれないが(問題点につい ては5章で述べた),プレートテクトニクスが働いてい る惑星自体が水惑星と同程度,あるいはそれ以上に珍 しい可能性がある.

水の存在が岩石のレオロジーや破壊条件を介してプ レートテクトニクスに影響する可能性がある.プレー トテクトニクスの存在は海の維持に寄与していると考 えられるから,表層環境と惑星内部の活動は互いに影 響を与えつつ,進化してきた可能性がある.表層環 境と惑星内部の「共進化」が実際に起こっているのか, どのような条件が満たされると起こるのか,といった 問題は「水惑星」環境の形成条件を考える上で極めて 重要であるが,難しい問題でもある.

プレートテクトニクスが働かない場合には、炭素循 環は定量的な検討が難しい.また、陸惑星ではCO₂は あるが海がないために、炭酸塩形成による炭素固定は おそらく非常に遅いと考えられる.したがって、同じ 脱ガス率では温暖化しやすいと推測できる.このよう に、炭素循環は惑星内部の活動のみならず、気候状態 にも強く依存し、互いに影響しあうと考えられる.固 体惑星部分と大気の間での揮発性物質交換は、大気散 逸問題とも関連し、金星や火星の環境進化を検討する 上でも重要であるが、未だ理解は不十分である.

7. 生存可能惑星の形成

この章では生存可能惑星(Habitable Planet)の形成 条件について,惑星形成論の立場から検討してみたい. 現在までの理論で,いくつかの未解決の問題があるも のの,大量の円盤ガスを捕獲した木星型,巨大氷惑星 である海王星型,岩石質惑星である地球型の三つのタ イプの惑星の作りわけについて,大局的には理解がで きている[17].現時点ではこの中で大きいもの,すな わち木星型と海王星型の一部だけが観測で見えている と考えて理論と観測の間で大きな矛盾はない.この議 論にしたがうと,惑星系の10%位はいわゆる生存可能 領域(Habitable Zone)に火星質量から地球質量の数倍 までの質量をもつ惑星があって不思議がない.

しかし、いわゆる生存可能領域にある、ある程度の 質量の惑星であれば、必ず水惑星になるか、というと 必ずしもそう言えるかどうか疑問の余地がある。6章 でみたように、惑星表面の条件を少し変えれば生存可 能領域の大きさは変わってくるし、離心率や自転軸傾 斜によっても惑星表層環境は大きく変化する。さらに、 表層環境は惑星内部のテクトニクスにも強く依存する。 また、適当な量の水が必ず供給されるものであるか否 かわからない、惑星が小さければ、おそらく大気が散 逸するために水惑星であり続けることは難しいであろ うが、惑星がどこまで大きくても良いのか、上限はよ くわからない、たとえば大きな惑星では水素が散逸し ないために、地球型惑星であっても大気組成は太陽系



図6.18 多重平衡状態の概念図.

の地球型惑星とは異なる可能性がある.また,重力が 大きいことは大型の生物の生存には不向きであるかも しれない.すなわち,いわゆる生存可能領域にある大 型の地球型惑星が「地球」になるのか,金星や火星の ような環境になってしまうことはないのか.逆に,地 球的ではないが生存可能な惑星が形成される条件が, 実現されるのか.つまるところ,太陽系で見られてい るような地球型惑星の多様性,さらには理論的にあり 得る地球型惑星の多様性を作りわけるところまで,現 在の議論は進んでいない.

この章では,水の供給に注目して,生存可能惑星の 形成について問題点を考えてみたい.

7.1 適量の水

地球はしばしば水惑星であるといわれる.実際,地 球は金星・火星・水星に比べて圧倒的に大量の水を表 面に持っている.金星では明らかに表面にH₂Oがない し,火星では地下にある程度固定されている可能性は あるが,少なくとも表面にはH₂Oがほとんど無い.地 球では単に絶対量としてH₂Oが多いというだけではな く,他の揮発性物質に対して相対的にH₂Oが多いこと にも注意すべきであろう.

しかし、地球の海洋の質量は地球質量の0.023%に過ぎず、全体として見ればわずかな量である。これと比べれば、海王星や天王星は、その質量と半径から、60~70%がH₂Oであると考えられているから、惑星の大部分がH₂Oでできているという意味では、「真の水惑 星」は海王星型惑星であると言える。 生存可能惑星の条件として、液体の水が表面にある ことを課してきたが、ここまで「水の量」に関しての 条件は考えてこなかった、水は多ければ多いほどよい のだろうか.

惑星の環境の規定要因という視点でいえば、必ずし も水が多いほどよい、とは言えなかった。6章でみた ように、水が局在している陸惑星の方が、全面が水で 覆われている海惑星よりも、中心星からの距離が広い 範囲で液体の水が存在できた。また、3章でみたように、 液体の水が存在できないと言うわけではないが、大陸 が存在しなければ地表温度は非常に高く保たれた。も し、地球上で液体の水が現在の海の量の10倍もあった ならば(2倍程度でも充分かもしれないが)大陸は水没 してしまう、地球よりも水が多い惑星は地球より遙か に高温になるかもしれない。

また, 生物の側から検討した場合, 生物にとっても 水は多いほどよい, と言えるのだろうか. 生物が水だ けでできているわけではない, ということに注目すれ ば, 水とそれ以外の物質(つまるところ岩石)の間の適 正な量比はあるのではないだろうか. 化学反応でエネ ルギーを得ている生物にとって, ある程度高濃度で物 質のやりとりができる, ということは重要なはずであ り, そのために液体の水が重要であった. 充分に高い 濃度で溶質が溶けていないのであれば, 溶媒としての 水の意義はあまりない.

今の段階ではどの程度の量が最も適切であるか、と いうことは明らかではないが、「水の適量」は存在す ると考えられる.おそらく、「真の水惑星」である海 王星型惑星は水が多すぎるのではないだろうか.

7.2 水の供給と大気形成

1章でも述べたように、宇宙における元素の存在度 から考えて、H₂Oは非常に大量に存在しうる分子であ る. 原始太陽系円盤の環境では、酸素はMgやSiとい った金属元素と結合し、次に炭素と結合し、残りの酸 素は水素と結合してH₂Oとなる、と考えてよい. この なかで最も大量に存在するのは炭素である. したがっ て、炭素にすべての酸素がとられてしまわない限り、 大量のH₂Oが生成される³. 太陽系の元素存在度では、

^{3.} ここでは炭素は主に一酸化炭素COの形になっている、と考えた.炭素が主にメタンCH4の形になっていると考えると、もっと大量のH2Oが生成する.

地球型惑星の主成分である岩石や鉄(酸化したあるい は酸化していない金属元素)の2倍から3倍の量のH₂O が生成される.その意味で,惑星環境でH₂Oが得にく い,ということはあまり無いと考えられる.真の水惑 星と呼んだ海王星型惑星は,低温環境で凝縮している 成分(岩石や鉄とH₂Oの氷)を集めてできていると考え れば極めて自然な組成である.

このように見てみると、地球は中途半端に大量の H2Oを持っている惑星であり、その中途半端であるこ と、が生存可能惑星としての地球環境を生む上で重 要であったと考えられる。では、どのようにして、そ の中途半端な量を獲得したのであろうか、4章で地球 大気の形成を議論したとき、この点については実はき ちんと考えていない、4章では、主に地球のマントル 組成をよく説明できる簡単なモデルとして2成分モデ ルを導入し、それに基づいて揮発性物質の供給量を推 定した. だから. 現在の地球組成にうまく合うように. いわば地球組成をカンニングして、材料を決めたので あって、そのような組成にどうして到達したのか、と いうことには全く答えていない. また,2成分モデル でも、全体として1%くらいのH2Oを含んでいたと推 定され、地球の海の質量の40倍近くの量に達する膨大 な量であった.

現在の惑星形成論では、直接原始太陽系円盤内の組 成・同位体分布を推定することは未だできていない. そのため、円盤のどこにあった微惑星を集めて地球型 惑星が形成されるか、ある程度の推測はできるにせよ、 個々の惑星がどのような組成になるべきか、とりわけ、 どの程度の量の揮発性物質が個々の惑星に供給される べきか、ということには答えが出せていない.

原始太陽系円盤内の組成・同位体を推定するために 使われるのは隕石である.隕石の揮発性物質の含有量 はグループごとにかなり大きな違いがある.隕石を異 なる組成・同位体比をもつグループに分類することが できることは、原始太陽系内に組成・同位体の不均質 があったことを意味する.しかし、組成的不均質が空 間的にどのようなものであったのかはっきりしたこと はわからない.一つの情報は小惑星帯における異なる 反射スペクトルを持つ小惑星の軌道分布である.反射 スペクトルの一致から隕石と小惑星の対応がつけられ、 組成の空間分布がある程度推測できる[18].だが、小 惑星は大型の惑星になれなかった物質であり、地球型 惑星が現在存在する領域では組成の空間分布の推定は 難しい.

原始太陽系内で隕石などの固体物質の組成を変えた 事件がどのようなものであったか,可能性はいろいろ あり得る.岩石や同位体の組成に影響を与える現象は 高温でエネルギーが高い現象だった可能性が高い.し かし,揮発性物質の含有量,特に親気性物質の含有量 は,比較的低温で影響を受けるから,違う現象が両者 を決めた可能性がある.

さらに,現在推定される地球の平均組成は,同位体 比まで考えれば,隕石グループの混合だけでは説明で きない.このことは,我々が現在隕石として手に入れ ることができない固体惑星材料物質の存在を示唆する [例えば19].地球型惑星の領域では惑星そのものが質 量の大部分を占めていて,小惑星が占める割合は小さ いことを考えるならば,未知の物質の方が主である可 能性もあるだろう.理論上は全く親気性物質の含有量 が異なる未知の地球材料物質があっても良い.

7.2.1 氷微惑星からの地球型惑星形成

古典的な原始太陽系円盤モデル[20]では,地球軌道 付近は太陽光によって固体の塵が直接加熱されると考 えていたため,原始太陽系円盤の圧力で太陽組成の気 体から氷が凝結する温度,約150Kよりもかなり高く, 地球軌道付近の固体物質は基本的には乾燥していたと 考えられてきた.しかし,円盤内に惑星材料となる塵 が大量にある段階では,円盤の中心面付近に直接太陽 光が射すとは考えられない.円盤表面は太陽放射によ って加熱されるが,円盤内部には直接太陽光は差し込 まない.このようなモデル[21]で推定される円盤から の赤外放射は,観測される原始惑星系円盤からの放射 を良く説明するとされる.

一方,円盤内部は円盤表面からの放射によって加熱 される.しかし、太陽光は円盤に斜めにかするように 入射するために、円盤単位面積あたりに受ける太陽放 射フラックスは非常に小さくなること、さらに円盤表 面からの放射の1/2は円盤外へ失われること、から円 盤内部はかなり低温になる可能性がある.円盤表面か らの入射フラックスと赤外放射フラックスの釣り合い で、円盤内部の温度を求めると、微惑星が形成される 前の段階では、金星軌道0.7AUのすぐ外側まで氷が凝 結するほど低温であったと推定できる.

円盤内部に大きな熱源があれば中心面の温度は低く

ならないが,そのためには円盤が中心星へ降着してい るなどの状況が必要である. 微惑星形成が起こる段階 で円盤が中心星へ降着していない限り,地球軌道付近 の微惑星も形成直後には氷が凝結するほど低温であっ たと推定できる.

このモデルを地球型惑星の集積に適用すると,地球 型惑星の領域でも金星軌道の外側では,氷微惑星から の惑星形成が起こることになる.一方,微惑星形成に ともなって円盤から固体ダストが失われ,円盤の透明 度が上がるにつれて,微惑星に直接太陽光があたるよ うになり,地球軌道付近の微惑星は温度が上昇し,い ずれ氷は失われる.微惑星内部の短寿命放射性核種の 崩壊や,微惑星の衝突合体にともなう重力エネルギー の解放によっても温度上昇し,氷は失われるだろう.

しかしこの場合,固体惑星材料物質の中に氷,間隙水, 含水鉱物などの形で固定されて取り込まれる可能性は 否定できない. 微惑星は昇華しながら集積し,惑星に 供給される水の量は集積と昇華の競合で決まることに なる.簡単なモデルでこの過程を検討してみると,最 終的に惑星に供給される水の量は様々なパラメータに 依存し,乾燥した惑星から,数%以上の水が残る惑星 まで,幅ができるようだ[22].しかし,地球軌道付近 の氷微惑星は,現時点では理論的に推定されるのみで, 直接サンプルされないため,物質化学的にはこれを裏 付けることができていない.

また,惑星形成過程で水が取り込まれても,その 後の進化過程で,大気散逸,金属鉄コアにHを取り込 む,などの過程によって,合計で地球の質量の2%く らいの水は地表から取り去られる可能性があるだろう [23].

以上で述べてきたような変化の幅が地球型惑星の多 様性の起源,さらには系外地球型惑星の多様性の起源 につながっていると面白い.

7.2.2 炭素の挙動

3章で水蒸気の宇宙空間への散逸を検討したとき, 酸素の処理が問題であると指摘した.大量の還元的 気体が存在すれば,それは酸素の受け取り手となる. CH4やCOが多く,H2が散逸する場合,惑星表面から H2Oが失われる可能性がある.それは,次のような反 応が右に進むことによってH2Oが分解されてしまうか らである. $H_2O + CO \longleftrightarrow H_2 + CO_2$ $2H_2O + CH_4 \longleftrightarrow 4H_2 + CO_2$

言い換えれば、CH4やCOに富む大気の場合,それが 原因で水が不安定になるかもしれない.炭素の挙動と 量は生存可能惑星を考える上で極めて重要である.う まく炭素を処理してあげないと惑星は水を保持できな い.上で述べたようにCとHの比の違いが,まったく 異なる環境を生むかもしれない.

7.2.3 捕獲大気と脱ガス大気

惑星への水の供給,揮発性物質の供給,という視点 でみたとき,一つの不思議な点がある.4章でも述べ たように,太陽系の木星型惑星,海王星型惑星の大気 は原始太陽系円盤ガスを捕獲して生じた「捕獲大気」 である.それに対して太陽系の地球型惑星の大気は, 何らかの固体材料物質からの脱ガスで生じた「脱ガス 大気」である.しかし,惑星形成の一般的な姿として, 地球型惑星の大気が「脱ガス大気」にならなければな らない必然性はないはずである.こう考えると,系外 地球型惑星には,太陽系のように「脱ガス大気」を持 つ惑星もあれば,原始太陽系円盤ガス起源の「捕獲大 気」を持つものもあるだろう.これらは地球型惑星と いっても,異なる表層環境となる可能性がある.

原始太陽系円盤ガスの分子組成を推定すると、H₂O とCOがほぼ等量存在するから、COが適当に酸化され なかった場合、H₂Oが残らない可能性がある。円盤ガ スを捕獲したからといって、その大気が全く酸化され ず、H₂Oが保持できなくなる、とは言えないが、捕獲 大気と脱ガス大気では組成が異なる可能性があり、生 存可能性も違ってくるかもしれない。

7.2.4 混合大気

原始惑星は円盤起源と微惑星起源の揮発性物質が混 合した大気を持つと考えられる.この大気を以下では 「混合大気」と呼ぶことにしよう.混合大気の性質は まだ十分に理解されていないことが多い.混合原始大 気では、H₂Oや炭素,窒素などの大気主成分は脱ガス 成分から供給されるため、太陽組成ガスだけから大 気を作る場合のような希ガス存在量の制限(4.3.1節参 照)は受けない.しかし、このような混合原始大気の 性質はいまだ良く研究されていない.

7.3 課題はたくさんある

今のところ,惑星大気の材料物質から,捕獲,脱ガ ス,散逸,固体惑星との相互作用を経て,どのような 大気組成・大気量になるか,という惑星大気形成進化 の一般理論は完成していない.大気形成の包括的理解 へ向けての検討課題としては

- ・原始太陽系円盤の中での揮発性物質の分布
- ・混合原始大気の構造とその性質
- ・集積過程での固体惑星内部への揮発性物質分配とそ の影響
- ・巨大衝突直後の高温原始大気=シリケイト大気とその影響
- ・集積直後の原始大気の組成とその変遷
- 大気散逸機構の定量的理解

などが挙げられる. 系外水惑星を理解するにはこれら の問題解決が必要であろう.

ところで現在の地球大気は生物の光合成を起源とす る酸素分子を除いたとしても、大気中の炭素は最も酸 化的な形態である二酸化炭素になっているため、かな り酸化的な大気であるといえる.このような物質から は容易に有機物は形成されない[24].もし原始大気が 有機物を合成し易い還元的なものであり、後に有機物 を合成しにくい現在のような組成になったのならば、 生命の自然発生は地球進化の初期の限られた時期だけ に許された現象だったのかもしれない.一方で、多 細胞生物に高い酸素濃度が必要という議論がある[25]. もしこれが正しいならば、多細胞生物は大気環境がし かるべく進化する惑星にだけ存在できることになるの かもしれない.

謝 辞

この原稿は2006年夏のフロンティアセミナーの講演 をまとめ直したものです.はじめに著者に講演の機会 を与えてくれた関係各位に感謝いたします.玄田英典 博士,佐々木貴教博士には講演記録の作成からはじま り,図表の準備,引用文献の選択整理,投稿および改 訂原稿の整形修正,さらに印刷原稿の校正に至るまで, 全ての段階でお手伝いいただきました.両博士の強力 なサポート無くてはこの原稿は完成しませんでした. 両博士に深く感謝いたします.最後になりますが,査 読者はしもとじょーじ博士には多くの建設的なコメン トをいただきました. 説明を明確なものにする上で大 変有益でした. 感謝いたします.

参考文献

- [1] 阿部豊, 2009, 遊星人 18, 194.
- [2] 阿部豊, 2010, 遊星人 19, 112.
- [3] Abe, Y. et al., 2005, Proc. 38th ISAS LPS, 56.
- [4] Nakajima, S. et al., 1992, J. Atmos. Sci. 49, 2256.
- [5] Ishiwatari, M. et al., 2002, J. Atmos. Sci. 59, 3223.
- [6] Kasting, J. F. et al., 1993, Icarus 101, 108.
- [7] Herbert, F., 1963, Dune, Clinton, New York.
- [8] Atobe, K. et al., 2004, Icarus 168, 223.
- [9] Laskar, J. et al., 2002, Nature 419, 375.
- [10] Abe, Y. et al., 2005, Icarus 178, 27.
- [11] Satoh, M., 1994, J. Atmos. Sci. 51, 1947.
- [12] Abe, Y. and Abe-Ouchi, A., 2002, Proc. 35th ISAS LPS, 21.
- [13] 井田茂, 2003, 異形の惑星 系外惑星形成理論か ら, NHKブックス.
- [14] Konishi, T. and Abe, Y., 2005, Proc. 38th ISAS LPS, 60.
- [15] Tsuihiji, D. et al., 2006, Proc. 39th ISAS LPS, 170.
- [16] Tsuihiji, D. and Abe, Y., 2007, Proc. 40th ISAS LPS, 158.
- [17] Ida, S. and Lin, D. N. C., 2004, Astrophys. J. 604, 388.
- [18] Binzel, R. P. et al., 2003, in Asteroid III, 255.
- [19] Sasaki, S., 1991, Icarus 91, 29.
- [20] Hayashi, C., 1981, Prog. Theor. Phys. Suppl. 70, 35.
- [21] Sasselov, D. D. and Lecar, M., 2000, Astrophys. J. 528, 995.
- [22] Machida, R. and Abe, Y., 2010, Astrophys. J. 716, 1252.
- [23] Abe et al., 2000, in Origin of the Earth and Moon, 413.
- [24] Miller, S. L. and Schlesinger, G., 1983, Advances in Space Research 3, 47.
- [25] Catling, D. C. et al., 2005, Astrobiology 5, 415.