

# 原始惑星による原始惑星系円盤ガスの獲得

生駒 大洋<sup>1</sup>

2008年10月21日受領, 2008年11月8日受理.

(要旨) 惑星は、水素・ヘリウムを主成分とする円盤状のガス雲の中で生まれる。本稿では、原始惑星によるガスの取り込み機構について、筆者の研究によって得られた知見を中心に解説する。そして、それらに応用し、木星のような巨大ガス惑星および地球型惑星の大気の起源について述べる。

## 1. はじめに

筆者は、惑星および惑星系の起源—その中でも、木星型惑星の形成過程および地球型惑星の大気・海洋の起源を柱として研究してきた。これら2つのテーマは決して新しいテーマではない。1980年から1990年代半ばまで盛んに議論されたテーマである。しかし、1995年に太陽系外で木星型惑星と思われる惑星が発見されて以降、再び、より広い視野で、議論する必要性が出てきた。太陽系外惑星の発見以降に研究者の道を歩き出した筆者は、太陽系の起源の問題はもちろんのこと、それらを一般化し、太陽系外惑星系へ応用することを目的に進んできた。本稿ではまず、惑星系の母体である原始惑星系円盤を構成するガス(円盤ガス)の惑星への集積過程について、主に筆者の研究によって明らかになった知見をまとめ、そして、いくつかの応用について紙幅の許す限り述べる。

## 2. 円盤ガス獲得の物理

恒星は、宇宙空間に漂うガス雲の中の密度揺らぎが成長し重力的に崩壊することで、誕生する。そうしたガスの塊は角運動量を持っているため全てが1点に集まることはできず、生まれたばかりの恒星は必然的にガス円盤を伴う。この円盤こそが惑星の誕生現場であり、「原始惑星系円盤」と呼ばれる(図1)。原始惑星

系円盤は中心の恒星と似た組成を持つだろう。太陽の場合は、質量にして98%が水素とヘリウムで、残りの2%が酸素などの「重元素」である。このわずかな重元素が円盤内で固体となり、地球のような岩石惑星、さらにはガス惑星の氷/岩石コアを作ったと考えられる。具体的には、小惑星や彗星の存在が示唆するように、この重元素が「微惑星」と呼ばれる半径数kmの固体塊となり、それが衝突・合体を繰り返し、原始惑星となったと考えられている。ここでは、微惑星の集積による固体惑星の形成過程の詳細については触れず、円盤ガスの獲得による原始大気さらに巨大惑星のエンベロープの形成過程について述べる。

### 2.1 大気の質量

天体が大気をまとうには、ある程度大きな質量が

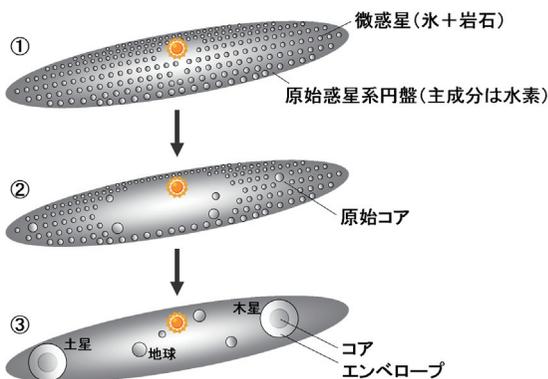


図1: 太陽系形成の標準モデル.

1. 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻 助教

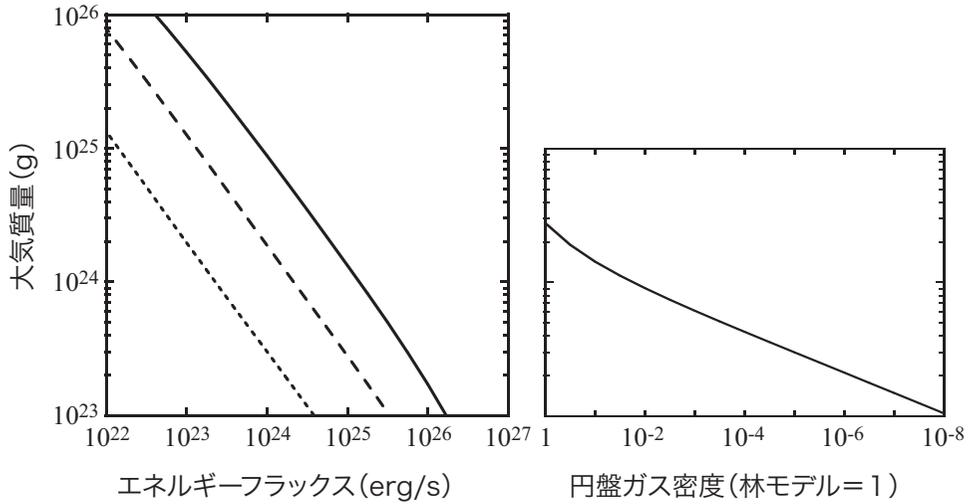


図2：原始惑星系円盤ガス中に埋まった惑星が持つ大気質量[1]。惑星の質量を地球質量とし、林モデルで与えられる円盤の1AUに存在するとした。左図はエネルギーフラックスとの関係を示す。線種の違いはガスの吸収係数違いを表わす。具体的には、点線が標準的に用いられるガスト吸収係数で、波線・実線の順に10%ずつ小さくなる。右図は、大気質量と円盤ガス密度との関係を示す。

必要である。なぜなら、ガスの乱雑な熱運動を重力によって抑え込まなければいけないからだ。別の言い方をすれば、惑星からの脱出速度がガスの音速をだいたい上回ると、そのガスを大気として捕えることができる。その時の質量は、ガスの温度と組成に依存するが、100K程度の水素の場合、地球質量の約1%である。

惑星の質量が大きくなると、大気質量も増加する。これは、円盤ガスに埋もれている天体特有の性質だ。惑星の質量が大きくなると、惑星表面ではなくもっと上空で脱出速度と円盤ガスの音速が等しくなる。この球面の半径を $Ra$ とすると、およそ $Ra = GMm/kT$ と書ける(ここで、 $G$ は重力定数、 $M$ は惑星質量、 $m$ は円盤ガス分子の質量、 $k$ はボルツマン定数、 $T$ は温度)。つまり、惑星の質量 $M$ が大きいほど、ガスを閉じ込められる容積が大きくなるので、大気量は増えることになる。

しかし、惑星質量が同じであっても、半径 $Ra$ の球内のガスの密度分布が違えば、大気量も異なる。容積はほぼ決まっているので、大気がコンパクトに圧縮されていれば、より多量のガスを獲得することができる。その密度分布を支配する物理量は主に、大気に単位時間に与えられるエネルギー(エネルギーフラックス)と保温効果を決める量(吸収係数)である。図2に、円

盤ガスに埋もれている地球質量の惑星が保持する大気質量の数値計算結果を示す[1]。図からわかるように、エネルギーフラックスと吸収係数が大きいほど、(ほぼ反比例して)大気量は減る。この依存性は数学的に示すことも難しくないが[2]、定性的に言えば、エネルギーフラックスが大きいほど、あるいは大気の保温効果が大きいほど、大気の熱エネルギーが大きくなり、重力に対抗して膨張した構造をとるからである。

大気質量は円盤ガス密度に敏感でないことも重要である。図2を見れば分かるように、円盤ガスの密度が8桁変わっても、大気質量は1桁程度しか減少しない。このことは、地球の重力が強く、大気質量のほとんどが地表面付近にあることを示している。つまり、上空で少々環境が変わっても、地表面付近にはその情報が伝わらないのである。これは、火星程度の惑星では成り立たない。火星サイズの惑星の場合は、円盤ガス密度に比例して大気量は減少する[1]。

## 2.2 臨界コア質量と暴走的ガス捕獲

前小節では、ガス集積初期段階で、大気質量が惑星質量に比べて小さい場合について述べた。ここでは、惑星質量と同程度の質量の大気をもつ場合について述べる。混乱をさけるために、大気を除いた部分を「コア」

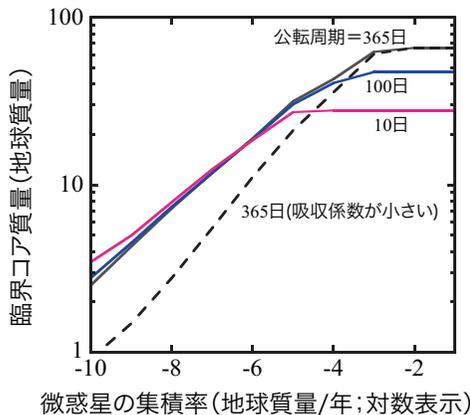


図3：臨界コア質量と微惑星集積率の関係[3, 4, 9]。軌道周期が10日, 100日, 365日の場合について描いた。また, 軌道周期が365日の場合には, ダストの吸収係数が実線で用いた値の1%の場合の結果も示した(破線)。

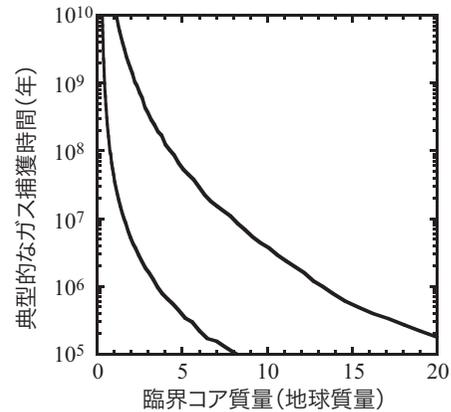


図4：惑星質量と暴走ガス捕獲後の典型的なガス捕獲時間の関係 [3, 9]。実線が標準的なダスト吸収係数を用いた場合で, 破線はその1%の吸収係数を用いた場合の結果である。

と呼ぶことにする<sup>1)</sup>。

大気質量はコア質量の増加とともに増えると述べたが, その成長は一様ではない。ある臨界値を超えると, 暴走的なガス集積が起きる。それは, 大気質量がコア質量と同程度になる頃である。それは次のように理解できる。原始大気の中では, コアからの重力をガスの圧力で支えている(この状態は静水圧平衡状態と呼ばれる)。その圧力を維持するには熱エネルギーが必要である。小さいコアに束縛されている希薄な原始大気は, 外因的に与えられる有限のエネルギーで十分に静水圧平衡状態を維持することができる。しかし, コアの質量が大きくなり, 大気質量がそれと同程度になると, 大気の深部も重力源となり上層部をひきつける。これを原始大気の「自己重力」という。原始大気の自己重力が卓越すると, 与えられたエネルギーだけでは不十分となり, 原始大気は自分自身で収縮し, それ自体の重力エネルギーの解放によって静水圧平衡状態を保とうとする。しかし, 収縮の結果, 原始大気深部の密度はさらに上昇する。その結果, さらに自己重力の増大によって原始大気が収縮し, さらに円盤ガスを獲得する。このような正のフィードバックによって, 暴走的な円盤ガス捕獲が起こるのである。

図3に臨界コア質量の値を示した[3]。横軸は微惑星の集積率である。形成期には, 原始コアに向けて落

下してくる微惑星の運動エネルギーが外因的なエネルギー供給源として最も重要である(エネルギーフラックスは微惑星集積率にだいたい比例する)。前小節で, ある質量のコアに対して, エネルギーフラックスが大きいほど大気量が少ないことを述べた。これは, 大気質量とコア質量が同程度になるときのコア質量が大きいを示す。吸収係数についても論理は同様である。それが, 図3で示されていることである。

一方, 微惑星の集積率がある程度高くなると, 臨界コア質量の値は一定になる。これは, 大量のエネルギーを大気内で輸送するために全域で対流が発生し, 温度構造が輻射に關係する量に依存しないためである。その代りに言うと変だが, 円盤の熱力学特性に敏感になる。たとえば, よく用いられる円盤モデル(林モデル)では, 臨界コア質量は中心星に近づくほど(公転周期が短くなるほど), 小さくなる(詳細については[4]を参照)。

臨界コア質量は大気組成にも当然依存する。たとえば, 水素とヘリウムからなる大気に炭素や酸素を混入することを考えると, 平均分子量の増加と比熱の増大のために臨界コア質量は小さくなる。一方, 吸収係数の増加によって臨界コア質量は大きくなる。詳細な数値計算[5]によれば, わずかな(数%程度の)混入では吸収係数の効果が勝り臨界コア質量が大きくなるが, それ以上重元素の割合が高くなると臨界コア質量は一ケタ程度小さくなる。

最後に, 臨界コア質量到達後のガス捕獲のタイムス

1) 地球型惑星の場合は中心にある金属コアを指すが, ここでは木星型惑星を想定しているため, 金属部分だけでなく水・岩石由来の部分も含めてコアとよぶ。

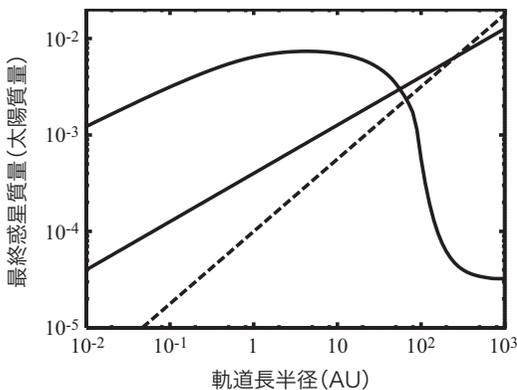


図5：円盤ガスを獲得する惑星の最終的な質量の典型的な分布 (太い曲線；[6])。細い直線はギャップ形成条件を表わし、実線は円盤の粘性拡散で決まる条件を、破線は圧力勾配で決まる条件を表わす(本文参照)。

ケールをみる。「暴走的」とは言っても、ガス集積が必ずしも短時間で起きるわけではない。図4に、臨界質量後のガス捕獲の典型的な時間をプロットした[1]。直感的に分かると思うが、コア質量が大きいほど、ガス捕獲のタイムスケールは短い。重要なことはその依存性が非常に強いことである。コアの質量が2倍異なれば、成長時間は10倍異なる。原始星の観測から円盤ガスは数百万年で消失するといわれている。図4が示すように、1地球質量で臨界状態に到達したとしても、その後のガス捕獲には一億年以上かかる。これが、地球が木星のようなガス惑星にならなかった原因なのかもしれない。

## 2.3 暴走的ガス捕獲の終焉とガス惑星の質量

上で見た暴走的なガス捕獲はいつまで続くのだろうか。円盤ガス起源と考えられる分厚い大気をまとう巨大惑星の質量は様々である。太陽系だけでも、木星(約318地球質量)から海王星(約17地球質量)まで4つの巨大惑星が存在する。系外惑星系をみれば、木星のさらに10倍の質量までより広範囲にわたる。こうした質量の多様性はどのように生まれるのだろうか。

上で述べたように、コアの質量が臨界値を超えると、暴走的なガス捕獲が起きる。しかし、そのガス捕獲を駆動するエンベロープの収縮はどんどん激しくなり、ついには円盤ガスの供給が追い付かなくなる。そして、最終的には、ディスクによるガス供給が律速する段階を迎える。

惑星系形成の統計学によく用いられる考え方は、惑星がガス円盤に溝(ギャップ)を開けることで円盤ガスの供給が止まるという考え方だ。惑星は、近傍の円盤ガスを重力的に散乱することによって、円盤にギャップを作ろうとする。一方、円盤ガスは乱流粘性による拡散あるいは圧力勾配による押し戻しによって、それを埋める。しかし、ある程度以上大きくなると、重力散乱が非常に強力になり、定常的なギャップが開く。通常の円盤では、圧力勾配による押し戻しで決まる条件の方が厳しく、重力散乱と圧力勾配による埋めの効果が釣り合うときの質量がギャップ形成の目安である。その条件によると、ガス惑星の最終的な質量は円盤ガスの温度で決まり、惑星系の外へ行くほど大きくなる。しかし、これは太陽系の現在の構造とは合致しない。なぜなら、太陽系では外へ行くほどガス惑星(木星～海王星)の質量は減少するからである。

図5に、原始惑星系円盤の長期的な粘性進化と蒸発、そして惑星へのガス流入を同時に考慮したモデルが与えるガス惑星の最終質量を中心星からの距離ごとに示した[6]。特徴的な領域がおよそ3つあることが分かる。まず、中心星に近い領域で、上で述べたようなギャップ形成によってガス惑星の成長が終わる領域だ。しかし、粘性や圧力勾配によって決まる条件に比べて、10倍程度大きい。これは、ギャップが開き始めても、その後ギャップを介して円盤ガスが流入できることを示している。次に、中間領域では、ギャップの形成が遅く、円盤ガス全体が惑星へと流入できる。つまり、惑星の質量はほぼ円盤ガスの質量で決まる。最後に、遠方領域では、ガス集積自体が遅く、先に円盤ガスが消失してしまい、わずかな量の円盤ガスしか獲得できない。外へ行くほど惑星質量は小さくなる。おそらく土星と天王星、海王星はこの領域で形成されたと考えられる。

## 3. 巨大ガス惑星の起源

### 3.1 HD 149026b

2005年、日本のすばる望遠鏡によって初めて、太陽系外惑星HD 149026bが検出された[7]。しかも、ドップラーシフト法とトランジット法という2つの異なる観測法[8]によって検出されたため、軌道長半径(=

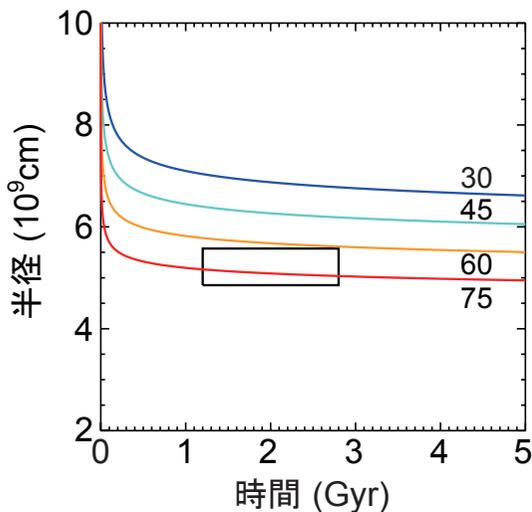


図6：HD 149026bの理論進化モデルと観測値の比較[9]。曲線に付した数値はコア質量を表わす(単位は地球質量)。枠で囲んだ部分は観測値に相当する。この計算では、氷のコアと太陽組成エンベロープからなる惑星を仮定した。惑星質量をHD 149026bの質量とし、軌道長半径を0.04AUとした。

0.04AU)と質量(=1.2土星質量)、そして半径(=0.86土星半径)が確定した。注目すべき特徴は平均密度の高さだ。質量は土星の1.2倍であるが、密度が土星の約2倍(=1.3g/cm<sup>3</sup>)と高い。これは木星とほぼ同じである。このわずかな情報ではあるが、前節で得た知識を使うと、この惑星の起源に制約を与えることができる。

まず、図6にHD149026bを想定した巨大ガス惑星の進化曲線を示した[9]。つまり、この仮想的な惑星は氷コアと太陽組成大気(エンベロープ)からなり、その質量および中心星との距離はHD149026bの観測値と同じである。巨大ガス惑星は、そのコアの質量が大きいほど、早く収縮する。図からわかるように、観測値と整合的な結果を与えるコア質量は、60地球質量(M<sub>E</sub>)から75M<sub>E</sub>であり、この惑星が巨大なコアを持つことが分かる(実際にはコア中の氷/岩石比の不定性があり、それを考慮すると、この惑星は50-80M<sub>E</sub>のコアを持つと推定される[9])。

それでは、すべての重元素がコアに取り込まれているのだろうか。実は、重元素をコアではなくエンベロープに分配して同様の進化計算をしても、残念ながら結果はそれほど変わらない[9]。つまり、現状の理論進化計算だけからだとは重元素の分配を制約することは

できない。しかし、形成過程を考えると、それに制約を与えることができる。

まず重要なことは、この惑星が暴走的ガス捕獲を経験したかどうかである。いったん暴走的ガス捕獲が始まると、ガス集積は一気に進むので、その暴走過程の間に微惑星をとらえることは難しい。一方、暴走捕獲後(つまり、現在のエンベロープができた後)は、微惑星を獲得したとしても、それらはコアまでは届かずエンベロープ中で蒸発してしまう。つまり、暴走的ガス捕獲が始まる時点での原始コアの質量(臨界コア質量)が、第一次近似的には、現在のコア質量と考えることができる。そして、それ以外の重元素は、エンベロープ形成後に獲得したと考えられる。

上の進化計算によれば、エンベロープとコアの質量比は約0.4-1.3である。この値は、HD149026bが暴走的ガス捕獲を経験した可能性が高いと判断できる十分に大きな値である[9]。前節でコアとエンベロープの質量が同程度の時に暴走的ガス捕獲が始まると述べたが、その比は約0.4以下であり、パラメータに敏感でない。一方、図3に示したように、暴走的ガス捕獲を起こさずに50M<sub>E</sub>以上のコアを作るためには、非現実的に速くコアを成長させる必要がある。もう少し慎重に見積もっても、暴走的ガス捕獲以前に形成できるコアの質量は高々30地球質量であることがわかる[9]。つまり、少なくとも数十地球質量という大量の微惑星をエンベロープ形成後に投入しなければならないのである。

このことは、HD149026bの起源に一つの制約を与える。中心星から遠い領域では、惑星の重力圏の大きさが惑星の物理的な大きさに比べて非常に大きい。その場合、微惑星は、惑星に衝突する前に、惑星による重力散乱によって殆ど系外に飛ばされてしまう。一方、中心星近傍—例えば、現在の位置付近—ではその比が小さいため、衝突する可能性が高くなる。したがって、重元素の注入は少なくとも中心星近傍に移動してから起きたということが出来る[9]。

最後に、少ない水素・ヘリウムガスの起源について考える。HD149026bの水素・ヘリウムガスの質量は、重元素と同程度かそれ以下である。この特徴だけ見れば、巨大ガス惑星というよりはむしろ海王星型の惑星に分類すべきであろう。しかし一方、上で述べたように、この惑星は暴走的ガス捕獲を経験している。これらをどう理解すればよいのだろうか。一つの可能性は、

1.3節でみたように、散逸あるいは蒸発しつつある円盤ガスの中で、惑星形成が起きたことである。この場合、暴走的なガス捕獲を開始しても、限られた量の円盤ガスしか獲得しない。もう一つは、大量のガスを獲得した後に、そのガスを消失したという可能性である。それには、中心星からのUVの照射による散逸と巨大衝突による剥ぎ取りが考えられる。しかし、UVによる散逸は、惑星質量が小さくなるにしたがって加速するので、HD149026bのエンベロープのような中途半端な質量の段階を検出する可能は非常に低いと考えられる。

以上の考察から、少なくとも2つの形成シナリオを考えることができる。一つは巨大衝突をとまなうシナリオである。重元素の超過は、衝突する巨大惑星のコアが注入されることで説明できる。また、少ない水素・ヘリウムガスは、衝突時の散逸によって説明することができる。こうしたプロセスが起こるには、少なくとももう一つ巨大惑星がこの系に存在すべきである。

もう一つのシナリオとして、散逸しつつある円盤ガスの中で(比較的ゆっくり)形成したというシナリオである。この場合、少ない水素・ヘリウムガスは、円盤ガスの供給が限られているということで説明できる。しかし、重元素の超過については、惑星の移動によって、内側にできた固体惑星を食べることで説明できるかも知れないが、そもそも密度が低くなった円盤ガスが惑星を内側に移動させられるかどうかは未解決の問題である。

以上のように、平均密度というわずかな情報から、理論を用いてここまで形成過程を絞り込むことができる。この風変わりな惑星の起源を完全に解明することは諸々の不確実性が解消されるまでは不可能であるが、こうした考察によって、現状の惑星形成論の欠陥を洗い出し、今後の方針を与えることができる。

### 3.2 木星

太陽系外で木星級の惑星が多数発見されるまでは、木星型惑星の起源に関する問題と言えば、「形成時間」の問題が最もさかんに議論されていた。若い恒星に対する観測から、エンベロープの材料物質である円盤ガスは数百万年で消失することが知られている。一方、コア成長の時間スケールについての理論的見積もりでは、木星のコアが臨界質量に到達するには1千万年以

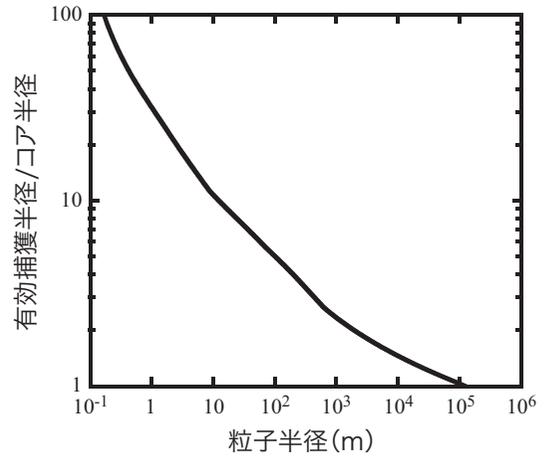


図7：原始大気による微惑星の有効捕獲半径[10]。横軸は、微惑星あるいは破片のサイズである。コア質量を1地球質量とした。

上かかる。

原始コアの成長は、微惑星との衝突・合体によって起きる。初期は非常に早く成長する。しかし、原始コアがある程度大きく(しかし、地球質量以下)になると、その強力な重力によって周囲の微惑星を散乱し、微惑星の原始コアに対する相対運動を激しくする。その結果、微惑星は原始コアに捕らわれにくくなる。この段階がコア形成の律速段階である。

この段階を短くするために我々が行ったことは、微惑星を「壊す」ことである。これは、コアを早く作ることは矛盾しているように聞こえるが、アイデアは次の通りである。微惑星が破壊されることによって、集積する固体粒子のサイズは小さくなる。そして、小さい粒子ほどガス抵抗を強く受ける。それには2つのメリットがある。一つは、上述の原始コアとの相対速度をガス抵抗によって小さく保つ効果である。もう一つの効果は、大気との摩擦によって微惑星を捕らえやすくすることである。つまり、実効的な断面積が大きくなるのだ。(実は、前者の効果だけだと、ほとんどの固体粒子は原始コアではなく太陽方向へ落ちて行ってしまふ。)

図7に、地球質量の原始コアがまとう大気による実効的な衝突半径を描いた[10]。多くの研究で仮定されているkmサイズの微惑星では大気の影響はほとんど効かないが、それ以下だとその影響は顕著に見られ、コアに衝突しない軌道にある微惑星でも惑星に捕えら

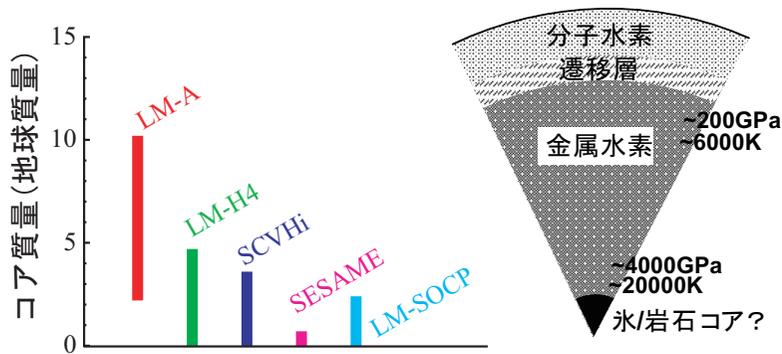


図8：木星の内部構造とコア質量の推定値(データは[17])。LM-A, LM-H4, SCVHi, SESAME, LM-SOCPは異なる状態方程式を表わしている。

れることができる。実際に、微惑星の衝突破壊および破片のコアへの集積、エンベロープの成長を同時に追った我々のシミュレーションによれば、コア成長を起こす粒子のサイズはmサイズであり、かなりの割合の固体粒子が大气によってとらえられる。最終的に、(円盤の固体面密度が林モデルの数倍であれば)木星を数百万年でつくることのできる[11]。

しかし、この「形成時間の問題」に対する認識は変わりつつある。前述のHD 149026bもそうだが、多数のいわゆる「ホット・ジュピタ」—中心星のごく近傍に存在する木星級の系外惑星—の発見とその後の理論研究によって、今では惑星が移動することの方がむしろ自然であるという認識に変わった。その役を果たすのは原始惑星系円盤である。つまり、木星や土星が太陽から離れた所にあるのは、円盤ガスの密度が十分に低くなってから誕生したためである、と多くの人が考えるようになった。言い換えると、木星や土星の形成が円盤ガス消失時期と同程度かそれ以上なのはむしろリーズナブルである。このことは、1.3節の結論とも調和的である。

一方で、最近では、我々は別の問題を抱えている。それは、木星のコア質量の問題だ。図8に示すように、標準的な内部構造モデルでは、表面から約200GPa、約6,000度までは水素が分子の形で存在する。しかし、それより高圧下では、水素が非常に高密度状態にあり、金属のようになっていると推定されている。この水素を「金属水素」と呼ぶ。この金属水素の層は4000GPa・約20,000度まで続く。さらに、中心に水・シリケート・鉄などからなるコアが存在する。それでは、推定されるコア質量はどの程度なのだろうか。

当然であるが、コア質量の推定値は状態方程式に依存する。異なる理論や実験に基づいた様々な状態方程式が存在する。そこで、それぞれの状態方程式について、木星について推定されるコア質量を図8に並べた。図から分かるように、木星に関するほとんどの推定値が10地球質量以下という小さいコアの存在を支持している。特に最近の状態方程式であるSCVHiやSESAMEは0から数地球質量と非常に小さいコアであることを示唆する。もちろん、現状の理論の枠組みでも、こうした状態と矛盾のないシナリオを作ることができるが、たとえば図4をみても分かるようにかなり限られた状況である。したがって、これらの結果が現実なのかどうか確認する必要がある。

そこで、大阪大学レーザーエネルギー学研究中心(阪大レーザー研)にある核融合用に開発された強力レーザー(激光XII号)を用いて、我々は水素の状態方程式を決定するための高圧実験を進めている。すなわち、水素を詰めた平板のサンプルにレーザーを照射することで衝撃波を発生させ、高圧を得る実験である。超高圧への到達に加えて、我々のグループの一つの特筆すべき特徴は、重水素ではなく水素を使うことである。実は、木星の主成分が水素であるにもかかわらず、既存のデータのほとんどが重水素に関するものである。そして、最終的には、最も不確定性の大きい「遷移層」の状態である約200GPa、6,000度を実験室で再現し、遷移層での状態方程式を明らかにしていきたいと考えている。まだ最終的な目標には到達していないが、ここ2年間で技術が蓄積され[12]、本年度は本格的に水素の状態方程式データが取れ始めている。今後の成功に期待していただきたい。

## 4. 地球型惑星の大気と海の起源

地球の大気の起源が原始太陽系円盤ガスであるとは考えにくい[13]。広く受け入れられている考えは、コンドライト隕石に似た組成をもつ微惑星の揮発性成分か、あるいは、彗星の揮発性成分がその起源であるという考えである。しかし、その考えをそのまま太陽系外に応用するのは危険である。なぜなら、それは太陽系固有のプロセスである可能性があるからだ。一般的には、惑星は原始惑星系円盤ガスの中で形成され、太陽系のような構造を取るのにはある限られた状況であるだろう[14]。

明確な定義はないが、地球型惑星の大気の質量は固体部分の質量に比べて小さい。その場合、地表面との相互作用によって大気の組成は大幅に変化される。たとえば、水は水素と酸素からなる化合物であるので、この水素に富む大気に酸素が供給されれば、惑星上で水が生成する。その酸素の供給源は、地表に含まれる酸化物である[15]。例えばFeOによって酸素分圧が決まる系では、 $H_2O/H_2 \sim 1$  (質量比) が達成される。したがって、惑星上で十分な量の水が生成するために必要な条件は、(1)十分な量の円盤ガスが獲得されることと(2)地表に流動性の高いマグマオーシャンが形成される(地表面温度が岩石の融点である約1500Kを超える)ことである。前者は十分な水素を、後者は十分な酸素を供給するために必要な条件である。

我々の最近の研究 [1] によれば、その大気の強力な保温効果によって、地球質量程度より大きな惑星では、地表面温度は常に岩石の融点を超える。つまり、マグマオーシャンが常に存在することになる。大気を持つ惑星の地表面温度は、供給されるエネルギー量と光学的厚み(赤外線の吸収係数×柱密度)の掛け算で決まる。原始地球型惑星におけるエネルギー源は、原始惑星に衝突する微惑星の運動エネルギーや巨大衝突時に内部に埋め込まれた衝突エネルギーである。一方、赤外線吸収は主にダストによって担われる。現状では、これらの値に対する不確定性は大きい。しかし、それらに対する依存性は小さく、地表面温度が常に1500K以上となることがわかる。

円盤ガスに接続していない大気では、大気質量(つまり柱密度)が一定なので、エネルギー量が減少する

と大気は冷える。しかし、円盤ガスに接続した大気の場合、エネルギー量の減少による大気の収縮に伴って、円盤ガスが流入し大気量が増加する(図2)。このことは、光学的な厚みが増加することにつながる。同様に、ダスト量の減少も大気の収縮につながり、大気質量、つまり光学的厚みを増加させる。このような自己調節機能によって、円盤ガス中の原始惑星の地表面温度は、エネルギー量とダスト量にあまり関係なくほぼ一定の値に維持されるのである。

次に、大気質量は、地表面で単位時間に解放されるエネルギー量と大気中のダスト量にほぼ反比例して、増加する(図2)。原始惑星の大気に供給されるエネルギー量は状況によって変わるが、リーズナブルな値の範囲内で、たとえば地球質量の惑星は地球の海水量と同程度かそれ以上の質量を獲得しうる。質量が大きいいわゆる「スーパー地球」ならば、さらに大量の水を獲得しうるだろう。

我々の地球について、冒頭で、大気は円盤ガス起源ではないと述べたが、海の起源と大気の起源が必ずしも同じである必要はない。実際、地球の海水のD/H比の長期進化に関する我々のモデルは、コンドライトや彗星を起源とする水のD/H比が現在の海水と合致せず、たとえば円盤ガス起源の水のように低いD/Hの寄与が必要であることを示している[16]。しかし、円盤ガス起源説と整合しない他の元素あるいは同位体比も多くあり、まだまだ結論づけるのは早計であるというべきだろう(詳細は[16]参照)。重要なことは、円盤ガスの取り込みというのは、かなり普遍的に起こりうるプロセスであるということだ。現在、水を有する「生命居住可能惑星」が流行っているが、水の獲得という観点では、そうした惑星はかなりの割合で存在しうると予想される。

## 5. おわりに

我々は宇宙で唯一の存在なのか。この謎を科学として議論できる時代が来た。しかも、宇宙望遠鏡や惑星探査機、大型実験装置の発展によって、我々の理論をどんどん立証できる時代が来た。この10数年間のドップラーシフト観測によって、300個以上の太陽系外惑星が発見され、惑星系形成を統計的に議論できるようになった。さらに最近では、2006年末に打ち上げられ

た宇宙望遠鏡CoRoTや今年打ち上げ予定のKeplerが詳細なトランジット観測を行い、より小さな惑星の内部構造を知ることができる時代に入りつつある。また、Spitzer望遠鏡に続いて2013年に打ち上げられるJWSTでは、トランジットする地球型惑星の大気スペクトル観測によって、大気の組成が分かるようになり、地球型惑星の海の存在や大気の起源に関する理解が飛躍的に進むと期待できる。一方、NASAの木星探査ミッションJuno(2011年打ち上げ予定)では、史上初めて木星に周回機を投入し、内部構造の推定に必須の高次かつ高精度の重力モーメントが取得される。また、日本も参加するLaplaceミッションで、木星(あるいは土星)の内部構造を制約する新しい情報が得られるだろう。こうした時代に惑星科学者として生きることを幸せに思う。

## 謝 辞

日本惑星科学会2007年度最優秀研究者賞受賞論文として、本記事を執筆させていただきました。まず、学会賞に推薦して下さった元指導教官の中澤清先生にこの場をお借りしてお礼を申し上げます。本記事で紹介させていただいた研究結果は、たくさんの方々との共同研究の成果であり、その皆様に心から感謝しております。また、お忙しいところ投稿原稿を査読して下さった阿部豊先生、本記事の執筆機会を与えて下さった田中秀和遊星人編集長に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] Ikoma, M. & Genda, H. 2006. ApJ. 648, 696.
- [2] 生駒大洋 2008. シリーズ現代の天文学9 (渡部潤一ら編, 日本評論社), 210
- [3] Ikoma, M., Nakazawa, K., & Emori, H. 2000. ApJ 537, 1013.
- [4] Ikoma, M., Emori, H., & Nakazawa, K. 2001. ApJ 553, 999.
- [5] Ikoma, M. 2003. BAAS 35, 980.
- [6] Tanigawa, T. & Ikoma, M. 2007. ApJ 667, 557.
- [7] Sato, B. et al. 2005. ApJ 633, 465.
- [8] 井田茂2008 系外惑星(東京大学出版会)
- [9] Ikoma, M. et al. 2006. ApJ 650, 1150.
- [10] Inaba, S. & Ikoma, M. 2003. A&A 410, 711.
- [11] Inaba, S., Wetherill, G., & Ikoma, M. 2003. Icarus 166, 46.
- [12] Ozaki et al. submitted.
- [13] 玄田英典 2008 シリーズ現代の天文学9 (渡部潤一ら編, 日本評論社), 217
- [14] Thommes et al. 2008. Science 321, 814.
- [15] Sasaki 1990. Origin of the Earth (Newson, H. E. & Jones, J. H. eds.) 195.
- [16] 玄田英典・生駒大洋 2008. 遊星人(本稿)
- [17] Saumon, D. & Guillot, T. 2004. ApJ 609, 1170.