

地球型惑星の大気形成と生命の存在する惑星

はしもとじょーじ

〈神戸大学大学院自然科学研究科大気水圏科学研究室 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1〉

e-mail: george@kobe-u.ac.jp

地球型惑星の大気は大きく分けて円盤ガス捕獲と衝突脱ガスの二つの過程によって形成されると考えられている。大気の組成は材料物質の組成を反映しつつ固体惑星との反応や宇宙空間への大気の流出などの過程が作用して決定されるが、いずれにしても大量の水と還元的な成分を含む原始大気が形成される可能性が高い。このような惑星表層の化学環境は生命にとって都合のよいものであることを考えると、生命の存在する惑星というものは宇宙において普遍的な存在であるのかもしれない。

1. 原始大気と生命の起源

標準的な太陽系形成論によると、地球型惑星は原始惑星系円盤の中で微惑星が集積して45億年くらい前に形成されたと考えられている¹⁾。地球形成から最初の数億年については地質学的な証拠が残されていないが、月に残された微惑星衝突の記録を見るに40億年くらい前までの地球にはしばしば微惑星が衝突していて、地球表層は海洋が全蒸発するような高温状態になることが何度かあったと推測されている。一方、グリーンランドで発見された38億年前の岩石に含まれる炭素の同位体比は、その当時の地球に生物活動があったことを示唆している。したがって、微惑星衝突という消滅要因がなくなった直後か少しの時間の後には、生命が地球上に存在していたことになる。

地球上で自己完結的に生命の材料物質となる有機物の合成から生命の誕生までの一連の過程が行われたかどうかは明らかでないが、約40億年前の地球表層環境が生命にとってどのような環境であったのかを明らかにすることは、生命の起源という大きな謎を解き明かすための重要な手がかりとなるものである。特に大気組成は有機物の合成

効率と密接に関連するだけでなく、温室効果などを通じて惑星表層の温度を規定するという意味でも、生命にとって大きな境界条件を与えるものとなっている。

以下では、地球型惑星の大気形成過程についてレビューするとともに、筆者らが行った原始地球大気の化学組成に関する推定の結果を示し、最後に現在の知見を統合して系外惑星系も含めて生命の存在する惑星の存在確率を考察する。

2. 大気の形成

地球型惑星が大気を形成する過程は大きく分けて、円盤ガスの捕獲と、微惑星に含まれる親気性元素の脱ガスの二つが考えられている²⁾。俗に、前者で形成される大気を1次大気と呼び、後者を2次大気と呼ぶ。しかし、1次や2次と呼ぶことには問題もあるので、以下では起源に基づいて前者を円盤ガス捕獲大気、後者を衝突脱ガス大気と呼ぶことにする。

2.1 円盤ガス捕獲大気

原始惑星系円盤ガスの中で原始惑星がある程度以上の大きさまで成長すると、円盤ガスが原始惑星の重力によって捕獲されて大気が形成される。

原始惑星の重力によって円盤ガスが捕獲されるとは、ガスのもつ熱運動のエネルギーが惑星の重力圏を脱出するのに必要なエネルギーより小さいことであるとすれば、円盤ガス捕獲大気を形成することのできる原始惑星の最小サイズを決めることができる。京都モデルの原始惑星系円盤を仮定した場合、円盤ガス捕獲大気を形成する原始惑星の最小サイズはおよそ月サイズ（地球質量の 1/100）となる²⁾。

原始惑星が捕獲する円盤ガスの質量は、大気上端で円盤ガスと大気が連続的に接続するという条件で決定される。すなわち、大気の上端で円盤ガスが原始惑星に流入するのを押し止めるにたる圧力を作るのに必要な量の円盤ガスが原始惑星に捕獲される。原始惑星の質量が大きくなると円盤ガスを引きつける原始惑星の重力が強くなるので、捕獲される円盤ガスの質量は大きくなる。一方、大気の温度が上昇する場合には、圧力が高くなることによって円盤ガスの流入が押し止められるようになる。したがって、原始惑星が捕獲する円盤ガスの質量は、原始惑星の質量だけでなく大気の温度などにもよって決定される。

円盤ガス中で成長する原始惑星の大気温度は、大気の保温効果によってかなりの高温になる可能性が指摘されている³⁾。原始惑星が成長することは微惑星が集積していて重力エネルギーが惑星表面で解放されていることを意味するが、大気があって大気が赤外線を吸収すると惑星表面で解放されたエネルギーが失われにくくなるため惑星表層の温度が上昇する（保温効果）。大気による保温効果を詳細に調べたモデル計算によれば、原始太陽系円盤ガスの中で原始惑星が地球サイズまで成長すると数気圧程度の円盤ガス捕獲大気が形成される。ただし、これは円盤ガス中で原始惑星が成長する場合の結果であるから、途中で円盤ガスが失われてしまえばこれだけの質量の円盤ガス捕獲大気は形成されない。また逆に、原始惑星に集積する微惑星が少なく集積で解放される重力エ

ネルギーが小さい場合には、より多くの円盤ガスが流入してこれよりも質量の大きな円盤ガス捕獲大気が形成される。

大気の保温効果は、円盤ガス捕獲大気の質量を決めるだけでなく、その化学組成にも影響を与える。円盤ガスを捕獲して形成される大気の組成は円盤ガスの組成を反映して水素やヘリウムが主成分となるが、原始惑星の表面が高温になれば大気と固体惑星が反応することによってその組成は変化する。原始太陽系円盤ガスの中で原始惑星が火星サイズ（地球質量の 1/10）まで成長すると地表温度は保温効果によって千数百 K を超えるくらいにまで上昇するが、このときには大気と固体惑星の化学反応によって大気中の水素の一部が酸化されて大気の H_2/H_2O 比は 10 程度になると見積もられている。原始惑星が小さいうちは保温効果による温度上昇も小さいので大気と固体惑星が化学反応することの影響は小さいが、火星サイズ以上の原始惑星では固体惑星との化学反応によって大量の H_2O が生成すると考えられる。

2.2 衝突脱ガス大気

原始惑星に集積する微惑星に親気性物質が含まれている場合には、微惑星集積時の衝突脱ガスによっても大気が形成される。衝突脱ガスとは、原始惑星の重力に引かれた微惑星が高速で衝突したときに発生する衝撃波によって物質が強く加熱され固体中に閉じ込められていた親気性元素が放出される現象である。実験室における衝突実験の結果などから推測するに、原始惑星が月サイズまで成長すると衝突脱ガスが起こるようになる⁴⁾。原始惑星がさらに大きくなって火星サイズになれば衝突時の加熱で微惑星はほぼ完全に融解するようになるので、微惑星に含まれる親気性元素の脱ガスは確実に起こるはずである。

衝突脱ガス大気の質量や組成は、基本的に微惑星に含まれる親気性元素の量と組成によって決定される。しかし微惑星の組成はよくわからない。このことは衝突脱ガス大気を考えるうえでの非常

に大きな問題である。もし微惑星に親気性元素が含まれていなければ衝突脱ガス大気は生成しないことになるが、いちおう太陽系の場合には炭素質隕石のような親気性元素を含んだ始源的な固体物質が存在しているので親気性元素を含む物質が原始惑星に全く集積しなかったとは考えにくい。少なくとも太陽系においては衝突脱ガスによる大気の生成があったと考えるのが自然である。ちなみに地球の海洋質量は地球全質量の約 0.02% にすぎないから、仮に微惑星の 10% が脱ガスするならば微惑星にわずか 0.2 wt% の水が含まれているだけで海洋を形成するのに十分な量の水が脱ガスする。

地球については現在の地球の平均組成から地球材料物質を推定することができるので、それに基づいて衝突脱ガス大気を考えることができる。微惑星の組成は時間変化していた可能性もあるが、地球の平均組成であるような物質が集積していたとしたら還元的な組成の大気が形成されるはずである。なぜなら、後にコアを形成することになる金属鉄が微惑星に混ざっていたはずで、衝突時の加熱によって高温になった金属鉄は大気と反応するからである。先に述べたように火星サイズ以上の大きさの原始惑星に集積する微惑星は融解したと考えられるが、このときには炭素や窒素といった元素が熔融金属鉄に溶け込むことも重要となる⁵⁾。微惑星に含まれる親気性元素の組成や量を推定することは困難であるが、熔融金属鉄との反応によって大気組成がコントロールされていれば酸化還元状態が金属鉄によってバッファーされ炭素・窒素が取り去られるので、 H_2 や H_2O を主成分とする大気が形成されることになる。

一方、微惑星の組成が時間変化していた場合には、形成される衝突脱ガス大気の組成も変わってくる。実際、地球の場合にはその形成の最末期に酸化的な物質が集中的に集積したとする集積モデルが提唱されている⁶⁾。これは一般にレイト・ベニアなどと呼ばれているが、その根拠は地球マン

トルに含まれる高親鉄性元素の量が金属鉄と平衡になった場合に比べて多いことにある。この高親鉄性元素の量はコア形成が終了した後に炭素質隕石的な組成をもった物質が集積したと考えることで説明することができるとされている。レイト・ベニアによってもたらされる親気性元素は金属鉄と平衡にならないので、一般にレイト・ベニアは H_2O や CO_2 からなる酸化的な組成の衝突脱ガス大気を生成すると考えられてきた。しかし筆者らの研究では還元的な成分をかなりの割合で含む大気がレイト・ベニアによって形成される可能性が示されている。このことについては後でもう少し詳しく述べる。

2.3 地球大気の起源

地球大気の大部分は固体物質に含まれる形で地球に供給された脱ガス起源の大気であると考えられている²⁾。地球大気の組成を太陽組成と比べてみると、水素・炭素・窒素といった反応性のある成分が希ガスに比べて多くなっている。このことは、反応性のある水素・炭素・窒素の方が反応性のない希ガスより固体物質に取り込まれやすいことで説明することができる。また、地球大気と始源的な隕石に含まれる希ガスは全体的な存在度のパターン（相対存在度）が似ていることから、地球大気は脱ガス起源であることが示唆される。

一方、地球大気を円盤ガス起源と考えることは難しい。円盤ガス（太陽組成）から出発して現在の地球大気を作るには、大気から希ガスを取り除いて大気主成分元素に対する希ガスの割合を減らしてやる必要がある。大気から希ガスを減らすには、中（惑星内部）に入れるか外（宇宙空間）に捨てるかしかないが、揮発性が高く反応もしない希ガスを惑星内部に入れることは難しい。また宇宙空間への散逸は気体の質量数に依存するため、やはり希ガスだけを選択的に減らすことは難しい。

以上より地球大気の主成分は円盤ガス起源でないと考えられているわけであるが、円盤ガス捕獲

大気の形成された可能性が否定されているわけではないことには注意する必要がある。すなわち、地球大気主成分の大部分は円盤ガス捕獲ではない過程によって供給されたものであるが、そこに円盤ガスを捕獲した成分が少し混ざっていてもよい。実際、地球内部に捕らわれているネオンの同位体組成は大気と異なっていて、太陽組成に似ているとも言われている。このことは、原始地球で円盤ガス捕獲によって大気が形成されたことを意味しているのかもしれない。

3. 大気の散逸

3.1 ハイドロダイナミック・エスケープ

地球の場合には、円盤ガスを捕獲して大気が形成された可能性もあることを述べた。また衝突脱ガスによって形成される大気も、金属鉄の集積を考えると水素が主成分であった可能性が高いことを述べた。実際には円盤ガス捕獲と衝突脱ガスの二つの過程が同時に働いて大気が形成されることになるが、いずれにしても初期には水素を主成分とした大気が形成されることになる。

この惑星形成の初期に形成される水素を主成分とする大気は、その後の過程で失われるものと考えられていた。水素が主成分の大気を失わせる過程として最も有力と考えられているのがハイドロダイナミック・エスケープである。これは、極端紫外線などの加熱によって惑星の重力を振り切るに十分な熱エネルギーをもつようになった惑星の上層大気が宇宙空間へと流出する過程である。大気の実平均分子量が小さいほど大気の流出は起こりやすいため、水素を多く含むような大気はハイドロダイナミック・エスケープが起こって比較的短期間のうちに失われると考えられてきた。

しかし、原始惑星から水素大気を失わせるのはそれほど簡単ではない。大気の実平均分子量の上限は、加熱源である極端紫外線や遠紫外線の強さで規定される。

$$\Phi \leq \frac{3F}{4G\rho}$$

ここで Φ は大気の質量流出率 [kg/s]、 F は加熱源のエネルギーフラックス [W/m^2]、 ρ は惑星の平均密度 [kg/m^3]、 G は万有引力定数である。現在の地球軌道における極端・遠紫外線のエネルギーフラックスで地球海洋に含まれる水素をすべて散逸させるのに必要な時間を見積もってみると約 1.2 億年になる⁷⁾。ここに見積もったのは最短時間であり、詳細なモデル計算ではその 10 倍近い時間が必要との結果になっている⁸⁾。中心星が出している極端・遠紫外線のフラックスがこの見積もりよりもずっと強い可能性もあるが、原始惑星が形成された後の中心星が強い極端・遠紫外線を出すメカニズムは不明であり、極端・遠紫外線が強かったかどうかは明らかでない。したがって水素を多く含む大気が数億年にわたって惑星上に存在した可能性は捨てきれない。

3.2 衝突過程による大気散逸

微惑星が高速で衝突するようになると微惑星そのものが蒸発するようになるが、衝突で発生した蒸気雲がその膨張の過程で周囲の大気を加速して宇宙空間へ流出させることがある。これがインパクト・エロージョンと呼ばれる大気散逸の過程である。大気が散逸するためには惑星の脱出速度を超える速度まで加速される必要があるため、大気を散逸させる衝突にはいくつかの条件が科せられる。

衝突蒸気雲による大気散逸を運動量保存という観点から見ると、大気を散逸させるためには蒸気雲の質量が散逸させる大気の質量よりも大きく、かつ蒸気雲のもつ速度が惑星の脱出速度よりも大きいということになる。すなわち、厚い大気をまとった惑星から大気を散逸させるには質量の大きな衝突蒸気雲を、重力の強い惑星から大気を散逸させるには高温で分子運動の速度が大きな衝突蒸気雲を形成する必要がある。

衝突で生成する蒸気雲の質量は微惑星の質量・

衝突速度だけでなく微惑星や惑星表層の物性によっても変わってくるし、散逸する大気の種類も大気量や大気構造によって変わってくる。そのため衝突散逸の効果を簡単にまとめることは難しいが、一般には以下のように考えられている。まず惑星の集積が進んでいる段階では微惑星の衝突速度は原始惑星の脱出速度程度と見積もられるので、微惑星衝突による大気の散逸量は大きくない。しかし惑星集積の最末期には高速で衝突する微惑星が現れるようになるので、大気が散逸する場合もある。この場合に重要となってくるのは大気量と考えられ、大気の薄い惑星からはかなりの量の大气が失われる可能性が指摘されている⁹⁾。

衝突が大気に及ぼす影響については巨大天体衝突も考えておく必要がある。惑星の集積過程では小さな微惑星が集積するだけでなく、火星程度の質量をもった巨大な微惑星の衝突も数回程度あったと考えられている¹⁾。以前は巨大衝突があるとそれ以前に存在した大気はすべて失われると考えられてきたが、数値モデルを使った最近の研究では相当量の大气が保持されるとの結果になっている¹⁰⁾。まだ巨大天体衝突が大気に及ぼす影響のすべてが解明されたとは言えないが、安直に大気がすべて失われると考えるべきでないことは確かである。

4. レイト・ベニア大気の組成

これまで地球集積の最末期にあったとされるレイト・ベニアで形成される大気は、集積物質が酸化的であるように酸化的なもの（ H_2O や CO_2 が主成分）になると考えられてきた。しかし、レイト・ベニアという集積モデルが主張しているのは金属鉄の存在しない状況で集積した物質が存在するというのであって、酸化的な組成の大気が形成されるかどうかは明らかでない。そこで筆者らはレイト・ベニアが想定するような炭素質隕石的な組成をもった物質の集積で形成される大気の組成について検討を行った⁷⁾。

惑星集積の最末期には原始惑星の質量も大きくなっているため、衝突によって高温・高圧の蒸気雲が作られ親気性元素はほぼ完全に脱ガスすると考えられる。高温・高圧の蒸気雲の中では化学反応が効率よく進むので、脱ガスした成分はその温度・圧力条件下における化学平衡に近い組成になる。しかし蒸気雲が膨張し温度・圧力が低下すると化学反応は進みにくくなるので、ある程度まで温度が下がったところで組成は固定（クエンチ）される。クエンチの温度・圧力条件は蒸気雲の膨張過程などによって決まるため簡単に見積もることはできないが、脱ガスする気体の組成は惑星表層の平均的な温度よりずっと高温での化学平衡の組成になっている可能性が高いことは重要である。

図1はクエンチの温度・圧力をパラメータとして、レイト・ベニアで形成される大気の組成を計算した結果⁷⁾の一例である。レイト・ベニアで集積する物質の組成としてCIコンドライトという種類の炭素質隕石の組成を用いたが、この隕石

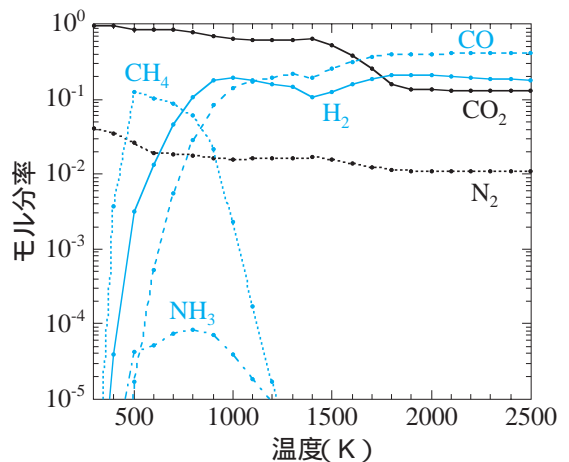


図1 レイト・ベニアで形成される大気の組成。CIコンドライトがそれぞれの温度で化学平衡（圧力は10 bar）になったときの気相の組成を、 H_2O を除いて規格化した。計算ではこれ以外の成分も計算しているが、ここでは代表的なものだけを示す。

はわれわれが手にしている始源的な物質の中で最も酸化のとされているものである。図では水蒸気を除いた乾燥大気の組成を示しているため水の量は示されていないが、かなりの量の H_2O も生成しているため惑星表層には海洋（温度によっては氷床）も形成されることになる。

レイト・ベニアで形成される大気の最も重要な特徴は、ごく低温（ $\sim 300\text{ K}$ ）で化学平衡にならない限り H_2 , CO , CH_4 といった還元的な成分が大気にかかなりの割合で含まれることである。衝突蒸気雲中の化学反応のクエンチ温度は通常 $1,000\text{ K}$ 以上と推定されていることを考えると、大気には H_2 や CO といった還元的な成分が 30% 以上含まれることになる。クエンチの温度が $1,000\text{--}500\text{ K}$ まで下がった場合には、 H_2 や CO に代わってメタン (CH_4) が生成されるようになる。単純な反応経路だけだとメタンは生成されないかもしれないが、鉄などによる触媒反応によって化学反応が進めばメタンが生成する可能性は十分にある¹¹⁾。さらに低温になるとメタンよりグラファイト (C) が安定となり、平衡組成からメタンが消えてグラファイトが出るようになる。低温で進む反応経路が見つかっていないためグラファイトが出るかどうかはわからないが、ともかく低温で化学平衡になって大気組成が CO_2 や N_2 を主成分とする酸化のものになったとしても、惑星表面にグラファイトという還元的な成分が大量に現れることには注意する必要があるだろう。

ここに示した化学平衡計算の結果は、たとえば酸化のとされる CI コンドライトから大気を作ったとしても、大気には還元的な成分が多く含まれることを示している。このように還元的な成分を含む大気が形成されるのは、CI コンドライトに大量の有機物が含まれているからである。有機物中の炭素は還元型であるため、有機物を加熱・分解して生成するガスは必然的に還元的な組成になる。もともと CI コンドライトが酸化であるとされたのは他の隕石中に存在する金属鉄が存在せ

ずすべての鉄が酸化鉄として存在しているからであるが、酸化鉄に含まれる酸素の量は有機物から生成する還元的なガスをすべて酸化するには十分でないのである。

酸化鉄に含まれる酸素の量が酸化的な大気を作るのに十分でないことは簡単な計算によって示すことができる。3 価の鉄が 2 価に変わることで炭素を酸化する反応は



すなわち、 1 mol の炭素を CO に変えるには 2 mol の 3 価の鉄が必要とされる。このことから、CI コンドライトに含まれる約 $20\text{ wt}\%$ の鉄がすべて 3 価であったとした場合に酸化できる炭素の量はおよそ $2\text{ wt}\%$ と計算される。しかし CI コンドライトには炭素が約 $3.5\text{ wt}\%$ 含まれておりそのほとんどは還元型であるから、たとえ鉄がすべて 3 価であったとしても酸素不足となる。したがって、CI コンドライトから生成するガスは還元的な組成にならざるをえないのである。

5. 生命の存在する惑星

ここまで地球大気の形成を軸に地球型惑星の大気形成過程をレビューしてきたが、この節では太陽系外の地球型惑星も含めた地球型惑星一般の大気について考えてみることにする。

地球大気の形成で重要な点は、どのように大気を形成したとしても、初期には還元的な成分を含んだ大気が形成され、かつ惑星表層には大量の水が出現するという点である。この結論は、円盤ガス捕獲と衝突脱ガスのいずれの過程で大気が形成されても変わらないし、酸化的な物質（レイト・ベニア）だけから大気を形成しても変わらない。系外惑星系と太陽系では化学組成をはじめとしてさまざまな違いがあることは確かであるが、太陽系外の多くの地球型惑星でも大量の水と還元的な成分を含む大気が形成される可能性は高いように思われる。

大量の水と還元的な成分を含む大気の形成は、生命にとって都合のよい環境が多く惑星で出現することを意味している。生命が生存可能な環境を定義することは難しいが、地球上の生物が生存・繁殖していくためには液体の水が必須であることから、液体の水は生命が存在するための必要条件と考えられることが多い。水が惑星表層で液体として安定に存在できるかどうかはまた別の問題として検討する必要があるが、まず水という物質が存在するという必要条件が満足されていることは重要である。

また、大気に還元的な成分が含まれるということは、生命の材料物質となる有機物の合成に適した環境であることを意味している。原始惑星表層環境を模擬した有機物の合成実験の結果は、大気に還元的な成分が含まれている場合に有機物が効率よく合成されうること示している。惑星の外で合成された有機物が惑星に供給されて生命の前駆物質となってもよいのだが、たとえそれがなかったとしても生命前駆物質は惑星上で合成されるわけである。

原始大気の化学組成という観点から見た場合、地球型惑星の多くは生命の存在する惑星となるための必要条件を満足して形成されるように見える。原始大気は水素の宇宙空間への散逸などの過程によって変化していくが、その時間スケールは数億年程度であるため¹²⁾、生命にとって化学的に都合のよい環境は最低でもそれくらいの期間は維持される。地球では微惑星衝突による消滅要因がなくなったすぐ後に生命が出現していることを考えると、これらの惑星でも生命が出現した可能性は十分にあるだろう。生命が存在する惑星となるためには液体の水が安定に存在できる環境も維持されなくてはならないから、原始大気の化学組成だけを見て生命の存在する惑星を語り尽くすことはできないが、案外多くの地球型惑星が生命を宿す惑星となっているのではないかと考えられるのである。

参考文献

- 1) 井田 茂, 渡邊誠一郎, 1997, 岩波講座地球惑星科学 12 比較惑星学, 第3章
- 2) 阿部 豊, 1998, 岩波講座地球惑星科学 13 地球進化論, 第1章
- 3) Sasaki S., 1990, in *Origin of the Earth*, p. 195
- 4) Lange M. A., Ahrens T. J., 1982, *Icarus* 51, 96
- 5) Kuramoto K., Matsui T., 1996, *J. Geophys. Res.* 101, 14909
- 6) Kimura K., et al., 1974, *Geochim. Cosmochim. Acta* 38, 683
- 7) Hashimoto G. L., Abe Y., Sugita S., 2004, in preparation
- 8) Sekiya M., et al., 1981, *Prog. Theor. Phys.* 66, 1301
- 9) Melosh H. J., Vickery A. M., 1989, *Nature* 338, 487
- 10) Genda H., Abe Y., 2003, *Icarus* 164, 149
- 11) Sekine Y., et al., 2003, *J. Geophys. Res.* 108(E7), 5070
- 12) はしもとじょーじ, 2004, 日本惑星科学会誌・遊星人, 13, 4

Formation of Atmospheres on Terrestrial Planets

George L. HASHIMOTO

*Laboratory for Atmosphere-Hydrosphere Sciences,
Department of Earth and Planetary System
Sciences, Kobe University, 1-1 Rokkodai, Nada,
Kobe 657-8501, Japan*

Abstract: Atmospheres of terrestrial planets are generated by a gravitational capture of proto-planetary disk gas and impact degassing of accreting materials. The composition of atmosphere is closely related to the composition of accreting material, but it is also affected by chemical reaction between atmosphere and solid planet and atmospheric loss processes. Our calculation demonstrates that the early atmosphere of terrestrial planets would contain a significant amount of reduced species and H₂O. Since such an environment satisfies the conditions for harboring a life in view of the chemistry, there would be lots of planets that harbors a life.