

特集「金星研究の新展開(2)」

金星大気の形成と進化

はしもとじょーじ¹

1. 金星と地球

金星は地球からもっとも近い距離にある惑星でその質量も地球とほぼ同じであるが、現在の金星表層環境は地球と大きく違っている(表1)。金星の大気量と地表温度はそれぞれ地球の約100倍と約2.5倍。惑星表層にある水の存在量には両者で10万倍以上もの開きがある。しかし、水の存在量を除けば金星と地球で惑星表層の親水性元素の量は似ているようにも見える。

ここでは、金星で地球と異なる大気・表層環境がつくられた過程についての標準的な(やや古典的な)シナリオをレビューし、いくつかの問題点を指摘する。

	金星	地球	地球*
軌道半径(地球=1)	0.72	1.00	
質量(地球=1)	0.815	1.00	
入射太陽放射(W/m ²)	2620	1370	
惑星アルベド	0.77	0.3	
全球平均温度(K)	735	288	
大気量(bar)	92	1	~80
大気組成(vol%)			
N ₂	1.8	78.1	1.0
O ₂		20.9	
Ar	0.02	0.9	0.01
CO ₂	98.1	0.035	99.0
惑星表層の水の存在量	極微量	270 気圧相当	270 気圧相当
水の存在形態	水蒸気	海洋	海洋, 水蒸気

* 現在の地球大気から生物起源のO₂を除き、堆積岩に含まれる炭素をCO₂として加えたもの。

表1: 金星と地球の比較 ([1]の表5.3を一部改変し加筆した)。

2. 惑星集積

標準的な太陽系形成論によれば、地球型惑星は原始惑星系円盤の中で微惑星が集積して形成される[2]。原始惑星系円盤の中に化学的な不均質がどの程度あ

たのかについてはわかっていないが、金星と地球はほぼ等しい組成の物質が集積して形成されたと考えられている。その第一の理由は地球と金星の平均密度で、天体内部の高圧の影響を差し引いて比べると両者はほとんど同じ値となっている。このことは両者が似たような物質から構成されていることを示唆し、それから材料物質も似たようなものであったと推察される。また、微惑星の集積がおこなわれているときには原始惑星の重力散乱によって動径方向に物がかき混ぜられるので、このことによっても金星と地球の材料物質は均質化させられたものと推測される。ただし、金星と地球で材料物質が違ったことを示唆するような事実もあり(6章を参照)、材料物質が同じでなかった可能性は排除されないことを指摘しておく。

惑星の集積過程及び初期進化において重要な役割を果たしたと考えられる衝突現象についても、金星と地球で大きな違いはなかったと考えられる。原始惑星に集積する微惑星は原始惑星の重力に引かれて高速衝突するが、この衝突によって発生する衝撃波は原始惑星の加熱や衝突脱ガスなどを通じて惑星の形成に大きな影響を及ぼしたと考えられている。微惑星衝突の影響を考える上で重要なパラメタのひとつとなるのは衝突速度であるが、集積過程における微惑星の衝突速度は原始惑星の脱出速度に同じくらいとされている。したがって、質量が同程度で脱出速度も同じくらいの金星と地球では、似たような衝突速度で微惑星が集積し同じような惑星形成過程が進行したものと推測される。

似たような物質が似たような過程を経て集積し形成される金星と地球は、集積過程が終了したときに似た

1. 神戸大学 大学院自然科学研究科 大気水圏科学研究室

ような原始大気を形成すると考えてよいだろうか？
個々の衝突現象がもたらす影響はそれぞれ違ったものであるはずだが、多数の小さな微惑星の衝突によって惑星が形成されたのならそうした差違は均されてしまう。したがって、金星と地球が多数の小さな微惑星の集積によって形成されたのなら、ほぼ同じ原始大気が金星と地球で形成されることになるだろう。

しかし近年は、そうではない可能性が考えられるようになってきている。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、火星程度の質量を持った巨大な微惑星の衝突 (giant impact) が数回程度あったと考えられている [2]。巨大衝突が大気に及ぼす影響はまだ十分に解明されていないが、巨大衝突は規模が大きいために大気に大きな影響を与えた可能性があり、また回数が少ないため個々の巨大衝突が大気に異なる影響を与えるときその結果は統計的に均されない。したがって、巨大衝突が現在あるような金星と地球の表層環境の差違をつくりだした可能性は否定されない。

ここでは惑星の集積過程において金星と地球の差違がつけられた可能性もあることを指摘するにとどめ、以下では集積過程が終了したときに金星と地球で似たような原始大気が形成されたとしてその後の進化を議論することとする。

3. 原始大気の形成

地球型惑星の大気は微惑星に含まれる親気性元素が脱ガスして形成されたと考えられている (大気の二次起源論) [3]。原始太陽系星雲ガスを原始惑星が重力的に捕獲することで大気が形成される可能性もあるが、この大気 (俗に一次大気と呼ばれる) は大気主成分元素 (炭素や窒素) に比べて希ガスを多く含んでいるため、それを進化させて現在あるような地球型惑星の大気をつくるのは難しいと考えられている。

脱ガスのメカニズムとしては衝突脱ガスを考えるのが一般的である。地球大気を形成した脱ガスについては放射性元素を用いた研究から地球史の初期に集中的

に起こったことが示されている。このことは衝突脱ガスによる大気の形成と整合的である。衝突脱ガスによって大気が形成されたとするならば、集積過程が完了したときに現在ある大気の元となった原始大気が形成されていたことになる。しかし、原始大気の組成を知る手がかりとなるような地質学的証拠は見つかっておらず、原始大気の組成は理論的に推測するしかない。

ここでは、マグマの海 (magma ocean) が形成された場合の原始大気組成を惑星集積完了時の大気組成として話を進めることにする。惑星表層が全球的に融解している状態をマグマの海と呼ぶが、このとき大気組成は大気とマグマの間の元素分配によってコントロールされる。マグマの海の形成を直接的に示す証拠は見つかっていないが、微惑星が集積する時の高速衝突を考えると原始惑星がある程度の融解を経験したことは間違いない。特に巨大衝突があったときには、瞬間的に強い加熱が起こるので惑星は大規模に融解してマグマの海が形成されるだろう。また、巨大衝突がない場合でも大気の保温効果 (blanketing effect) が働いて惑星表面が冷却しにくくなれば、小さな微惑星の集積による加熱によっても惑星表面の温度は全球的に岩石が融解する温度まで上昇しマグマの海が形成される [3]。

大気とマグマの海との間の元素分配を考える上でもっとも重要となるのは金属鉄の存在の有無である。金属鉄が惑星表層に存在し大気と反応する場合には、親気性のある炭素や窒素といった元素が熔融金属鉄に溶け込むことで大気から取り去られ、酸化還元状態は金属鉄と珪酸塩の酸化還元反応によってコントロールされる。そのため、金属鉄が存在する場合には炭素・窒素・酸素などに枯渇した大気が形成される。

惑星集積と並行して形成される大気は、金属鉄と反応していたと考えるのが自然である。大気が金属鉄と反応するかどうかは、集積する微惑星に金属鉄が含まれていたかどうかで決まる。微惑星の組成は不明であるが、惑星をつくった微惑星の平均組成は惑星の平均組成と同じようなものであったはずなので、大局的には惑星の平均組成であるような物質が集積していたと

考えてよい。惑星の平均組成は地球型惑星の中心に金属鉄のコアがあることを反映して金属鉄を含むものとなっているので、惑星の平均組成をもった物質が集積(均質集積)していれば金属鉄と反応した大気が形成される。

以上の考察より、惑星集積と並行して形成される原始大気は200-300気圧程度の $H_2 \cdot H_2O$ と数10気圧程度の $CO \cdot CO_2$ を主成分とするようなものになると推定されている[4]。次章以降はこの原始大気を出発点として議論を進めていくことにするが、これとは違った原始大気というものもありえるので、そのことについて簡単に述べておく。

ここまで、形成された大気が失われる過程については考えてこなかったが、大気がなんらかの過程で失われた可能性がないわけではない。例えば、巨大衝突によって大気が大規模に散逸する可能性が指摘されたりする。もし、惑星集積の末期に大気の大部分を失うようなことが起これば、現在の大気は大気散逸後の惑星集積最末期に集積した物質から形成されることになる。惑星集積の最末期は微惑星の衝突頻度が減少しているため、マグマの海が存在しない状況で大気が形成された可能性が高い。また、惑星集積の最末期には集積する物質の組成が変化する可能性も考えられている(不均質集積)。あるモデルでは、金属鉄を含まない酸化的な物質(炭素質隕石や彗星のような組成を持ったものを想定することが多い)が選択的に集積することを考えたりする(レイト・ベニア(late veneer))。この場合に形成される大気は金属鉄と反応しないため、上に述べたような惑星集積過程に形成される大気とは全く異なる性質のものになる。大気が失われない場合でもレイト・ベニアによる大気汚染というのはいりえるのだが、実際にどれくらいの影響があったのかは明らかではない。

4. 海洋の形成

惑星集積の末期に微惑星の衝突頻度が減少して惑星

表面で解放される重力エネルギーが小さくなると、マグマの海は冷却して固化する。さらに冷却がすすみ惑星表層の温度が低下すると、原始大気中の水蒸気が凝結して雨が降り海洋が形成される。このようなことが地球では起こったと考えられているが、金星でも海洋は形成されたのだろうか？ 一次元放射対流平衡モデルによって調べられた海洋形成条件[5]を見ると、金星でも地球と同様に形成末期には海洋が形成された可能性のあることがわかる。

海洋が形成されるための条件はいくつかあるが、十分な量の H_2O がある場合に金星で問題となるのは暴走温室状態に陥らないための条件である。ここで暴走温室状態とは、海洋が存在する条件の下で加熱と冷却の釣り合いが取れなく(加熱が過剰に)なって海洋が完全に蒸発する状態と定義される。この暴走温室状態の発生においては、海洋が存在する条件下で惑星放射(惑星が宇宙空間に射出する熱放射)に上限のあることが本質的に重要である。熱放射は温度が上がれば大きくなるが、海洋が存在する場合には熱放射を吸収する大気水蒸気量も温度とともに増加するため、温度が上昇しても惑星放射はある値以上には大きくなることできない。そのため、この惑星放射の上限(射出限界)を上回る加熱があったとき海洋は安定に存在することができなくなって蒸発する。射出限界の値は一次元放射対流平衡モデルを使った研究によって300-325 [W/m^2]程度と推定されている[5]。

暴走温室状態になるかどうかは、他の熱源がない場合には太陽放射で惑星がどれほど加熱されるかによって決まり、それは太陽光度と惑星アルベドによって決まる。地球に比べ太陽に近い金星は、より強い太陽放射(地球の約2倍)による加熱を受けるため暴走温室状態に陥りやすいと言える。太陽光度の時間変化は恒星の物理モデルによって推定されており、惑星形成が完了したところは現在の70-75%程度であったとされている。一方、惑星アルベドを推定することは非常に難しい。惑星アルベドの値は雲によって大きく変わるが、現在の我々の知見ではどのような雲がどこにどれほど

できるのか予測することができない。このことは惑星表面環境を考える上での大きな問題である。

いちおう雲がない場合の惑星アルベドは計算可能なので、それに基づいて海洋形成条件が満足されるかどうかを調べることはできる。一般に雲の反射率は大きいので雲ができると惑星アルベドは大きくなる。そのため雲がないときの惑星アルベドは惑星アルベドの最小値と考えることができ、最小アルベドなどと呼ばれる。最小アルベドの値は大気量によって変わるが、現在の金星大気くらいの CO_2 があるときには0.4程度になる[5]。惑星アルベドがこの大きさであれば、太陽光度が現在の70-75%であった45億年前の金星は暴走温室状態にならない(図1)。

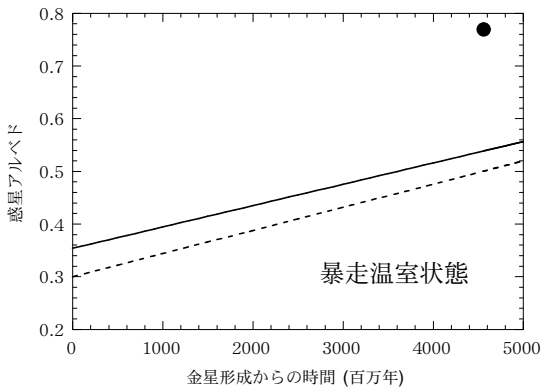


図1：暴走温室状態を発生させない惑星アルベド最小値の時間変化。太陽光度の時間変化が $L/L^* = [1+0.4(1-t/t^*)^{-1}]$ で与えられる場合に、太陽放射による加熱が射出限界と等しくなる惑星アルベドの時間変化を示した。実線と破線はそれぞれ射出限界が $300[\text{W}/\text{m}^2]$ と $325[\text{W}/\text{m}^2]$ の場合を表す。それぞれ破線より右下にあるとき暴走温室状態が発生する。黒丸は現在の金星を示しており、現在の金星が太陽から受ける加熱の大きさは射出限界よりも小さい。

雲が生成する場合は雲がない場合より暴走温室状態に陥りにくくなると一般に考えられている。雲には、惑星アルベドを大きくすることで太陽放射の加熱を弱める働きと、惑星が射出する熱放射を吸収・散乱することで惑星放射を弱める働き(射出限界を下げる働き)があるが、前者が卓越すると考えられているわけである。実際に現在の地球で雲は地球を冷やす方向に働い

ているし、水蒸気を多く含む光学的に厚い大気中で雲が生成しても惑星放射は大きくは変わらないので、雲は暴走温室状態の発生を妨げる方向に働くと考えてよいように思われる。ただし、雲の影響は生成する雲の分布や性質によって変わるため、暴走温室状態と雲の関係を定量的に評価するには暴走温室状態が発生するような状況でどのような雲が生成するのかを調べる必要がある。

海洋が形成された場合には、海洋中で炭酸塩が生成して大気から CO_2 が取り除かれると考えられる。実際に地球ではこの過程によって大気中の CO_2 が取り除かれ、現在あるような大気がつくられたと考えられている[6]。炭酸塩の生成によって大気量が減少すると最小アルベドは小さくなるので、もし雲によって惑星アルベドが維持されなければ暴走温室状態に陥ってしまう。雲による不確定が大きいため確かなことは言えないが、海洋はそれ自身が炭酸塩を生成して大気量を減らすことによって暴走温室状態を作りだし自らを蒸発させてしまうのかもしれない。

雲によって高い惑星アルベドが維持される場合には、金星でも海洋は長い期間にわたって存在し続けることができる。時間の経過とともに太陽光度は増大していくが、惑星アルベドが0.45であれば20億年程度の期間にわたって金星は暴走温室状態にならない(図1)。惑星アルベドの0.45という値をどう考えるべきであるかは難しいところであるが、あり得ないと簡単に切り捨てることはできないとは言えるだろう。長期にわたって金星に海洋が存在した可能性を無視することはできない。金星に海洋が存在したことを示す証拠は見つっていないが、真剣に探してみる価値はあるものと思う[7]。

最後に、現在の金星は暴走温室状態でないことを指摘しておく。現在の金星は惑星アルベドが0.77と大きいので、太陽放射による加熱は射出限界を下回っている(図1)。現在の金星に海洋が存在しないのは、惑星表面に存在する H_2O の量が少ないためである[5]。また過去においても、惑星集積の間を除いたら金星が

暴走温室状態になったことは一度もなかったかもしれない。仮に初期の金星で海洋が形成された場合には海洋が消失しなければならないが、暴走温室状態にならずとも惑星表層の H_2O 存在量が減少すれば海洋は消失する。すなわち、金星に海洋が存在しないことは必ずしも暴走温室状態の発生を示すものではない。

5. 水の消失

金星で海洋が形成されたかどうかは不明であるが、原始大気に大量の水蒸気が含まれていたのなら、その H_2O は取り除かれなければならない。金星大気から物を移動させるとしたら、その行き先は内（惑星内部）か外（宇宙空間）のどちらかということになる。

まず惑星の内部に入った H_2O の量だが、これはそれほど多くない。金星マントルに含まれる H_2O の量の上限は、ここ40億年の間に脱ガスした H_2O の総量と脱ガスしたマントルの体積の下限から制約することができる[8]。前者を水素の散逸フラックスから、後者を大気中の ^{40}Ar の量から推定すると、現在の金星マントルの H_2O の存在度は15ppm 以下となる[8]。これから見積もられる金星マントル中の H_2O の量は原始大気中の水蒸気量（200-300bar）に比べてとても少ない。

H_2O が内へ入らなかったのなら外（宇宙空間）へ逃がさなければならない。惑星の重力圏の外へ物を運ぶためには、惑星の重力を振り切るに十分な運動エネルギーを与える必要がある。質量の大きなものほど必要なエネルギーが大きくなるので散逸しにくくなる。金星くらいの大きさの天体になると重力がかなり大きいため、水素とヘリウム以外の成分は容易に散逸しない。すなわち H_2O はそのままの形では散逸しないと考えられる。

しかし、水素は散逸できるので H_2O を分解して水素を宇宙空間へ逃がせば金星表層から H_2O を減らすことができる。 H_2O は波長の短い紫外線によって分解されるので、そういった光が入ってくる大気の上層

まで H_2O が持ち上げればよい。水素を金星から散逸させる過程はいくつかあるが、短時間で大量の水素を散逸できる過程はハイドロダイナミック・エスケープ (hydrodynamic escape) と考えられている[9]。ハイドロダイナミック・エスケープは、極端紫外線などで加熱された上層大気が惑星の重力で束縛されなくなって宇宙空間へと流出する過程で、流出のフラックスは主に上層大気の水蒸気混合比と加熱源である極端紫外線の強度で決まる。若い恒星は強い紫外線を発していると考えられていたので、大量の水素を短時間のうちに散逸させることができると考えられていた。

しかし近年、強い紫外線が発せられるのは惑星形成以前との見方がされるようになってきた[10]。仮に極端紫外線の強度が現在と変わらないとするならば、ハイドロダイナミック・エスケープで金星から地球海洋に相当する量の水を散逸させるのに少なくとも6億年の時間がかかる。この6億年という時間は極端紫外線のエネルギーが100%の効率で散逸に使われると仮定して導いたものなので、実際に必要な時間はこれより長い。

また、ハイドロダイナミック・エスケープで惑星表層の H_2O を全て散逸させるわけにはいかないという問題もある。水素の流出フラックスは上層大気の水蒸気混合比が小さくなると急激に小さくなるため、コールド・トラップ (cold trap) の水蒸気混合比が0.1を下回るとハイドロダイナミック・エスケープで水素は流出しなくなる。したがって、 H_2O が大量にあるときはハイドロダイナミック・エスケープで水素を散逸させることができるが、 H_2O が減ってハイドロダイナミック・エスケープがなくなった後に残された H_2O は他のなんらかの過程で散逸させなければならない。

ハイドロダイナミック・エスケープ終了時の大気に含まれる H_2O の量は、 CO_2 や N_2 といった H_2O 以外の大気成分の量によって決まる。大気に CO_2 や N_2 などが多く含まれていると大気の水蒸気混合比は小さくなるので、かなりの量の H_2O が残される。現在の金

星大気にある量の CO_2 が大気にあった場合には、10bar 程度の H_2O が大気に残される。一方、海洋が形成され CO_2 の大部分が炭酸塩として固定されていけば大気の水蒸気混合比が大きいままに保たれるので、ハイドロダイナミック・エスケープ終了時に残る H_2O の量はずっと少なくなる。

ハイドロダイナミック・エスケープの後に金星から水を散逸させる過程は主に非熱的散逸となる。非熱的散逸とは、熱平衡状態から逸脱して大きな運動エネルギーを持った粒子（分子、原子、イオンなど）を生成して、それらが宇宙空間へ散逸する過程である。電荷交換、衝突解離、スパッタリング (sputtering)、太陽風によるピックアップなどが、非熱的散逸の代表的な過程として挙げられる。

非熱的散逸で流出する水素の量もまた上層大気中の水蒸気混合比に強く依存しているが、上層大気に水素が十分にあったとしても非熱的散逸で減らすことのできる H_2O の量は20億年で1bar 程度と見積もられている [11]。実際には上層大気に含まれる水素の量が少なくなっているため、0.1bar の H_2O であってもそれを消失させるにはかなりの時間が必要とされる。そう考えると、金星でもいったんは海洋が形成し大気中の CO_2 が炭酸塩として固定され、ハイドロダイナミック・エスケープで大部分の水素が散逸したと考えるべきなのかもしれない [12]。ただし、非熱的散逸の多くにはイオンや電子が介在していて磁場も絡んでくることから、まだ十分に解明されていないことも多い。非熱的散逸で散逸する水素の量を定量的に評価することは非常に重要である。

さて、 H_2O のうち水素は散逸するとしたが、酸素はどこへ行くのであろうか？ 実は H_2O が分解して生成する酸素の行方はよくわからない。水素が散逸するときに酸素も引きずられて散逸するとの考えもあるが、酸素は重いので散逸させるのは難しいように思われる。大気中の CO などと反応して失われたとする考えもあるが、 H_2O が分解して発生する大量の酸素を全て消費するには量的に不足しているように思われる。

となると、後は地面と反応して失われたと考えるしかない。地殻やマントルは大量にあるので量が問題になることはないが、どのように反応したかということは問題かもしれない。現在の金星表面が非常に酸化されているというわけではないので、表面だけでなく地殻全体（あるいはマントルも）が酸化されなければならない。また、 H_2O が紫外線によって分解されて酸素が発生するのは大気の上層であり地面からは離れている。分解によって発生した酸素がそのまま残っていると、再び水素と結合してしまい水素の散逸効率が低下するという問題も生じるかもしれない。

最後に水素の散逸と同位体組成の関連について述べておく。初期の金星に大量の水が存在したと仮定して議論をすすめてきたが、大量の水があったことは金星大気の水素の同位体組成からも示唆されると考えられている [13]。金星大気の水素の同位体組成は $\text{D}/\text{H} = (2.5 \pm 0.5) \times 10^{-2}$ で、地球の海水 ($\text{D}/\text{H} = 1.6 \times 10^{-4}$) に比べると重水素が水素に対し100倍くらい多くなっている。散逸の過程では軽いものほど失われやすいので質量数に応じた同位体分別がおこる。したがって、金星大気に重水素が多いことは、初期に大量の水が存在し水素が散逸したとするシナリオと整合的である。しかしながら、初期に大量の水がなかったとしても、脱ガスや彗星の衝突による大気への水の供給と水素の散逸によって金星大気の水素の同位体組成を説明することが可能と言われている [14]。必ずしも金星大気の水素同位体組成の解釈は一意的でないことに留意する必要がある。

6. 希ガス

希ガスは基本的に化学反応することがない親気性元素であり、かつ同位体も含め様々な質量数のものが存在することから、大気の起源や形成過程を制約する有用なツールになる。そのため希ガスに関連した様々な研究がなされているが、それらの全てをここでレビューすることは無理なので以下では重要度が特に高いと思

われる事柄に絞って簡単に説明することにする。惑星大気の希ガスに関するレビューは文献[15]を参考にされたい。

金星大気と地球大気の希ガスを比較したときの最も顕著な特徴は、金星に希ガスが多いことである[15]。金星大気の炭素と窒素の存在量は地球表層のそれと同程度であるが、非放射性元素起源の Ne と Ar はそれぞれ地球の約30倍と約70倍もの量が金星にある。He 以外の希ガスは容易には散逸しえないので金星と地球における希ガスの存在量の違いは惑星の集積過程でつくられたと考えられるが、その具体的な過程は明らかでない。現時点でもっとも無理がないと考えられている説明は、金星と地球で材料物質に含まれる希ガスの量が違っていたとするものである。ただし、惑星集積の章で述べたように原始惑星が成長するとき原始惑星系円盤は動径方向にかき混ぜられてしまうことが問題である。ちなみに巨大衝突によって地球にある希ガスの量を減らすという考えもあるが、この場合には炭素・窒素・クリプトン・キセノンなどの量が金星と地球で同程度であることを説明することが難しくなる。

金星大気にある ^{36}Ar の存在量は、地球との比較というに関係なくそれ自体が大きな謎となっている。金星にある ^{36}Ar の量を惑星の質量で規格化した値は、もっとも Ar を多く含む隕石と同程度になる。Ar を多く含む物質だけを集めて金星が形成されるのなら金星の ^{36}Ar 存在量を説明することもできるが、そのように考えるのは非常に不自然であるように思われる。金星の ^{36}Ar 存在量を説明するための仮説はいくつか提案されているが、いずれの仮説にも無理があるように見えるのが現状である。

反応性のある大気主成分と希ガスが同じ振る舞いをするととは限らないので、希ガスから導かれる制約の全てが大気主成分にも当てはまるとは言えないが、大気の起源や形成を考える上で希ガスを無視することはできない。金星大気の形成および進化を考えるときには、主成分元素だけでなく希ガスとの整合性も考慮することが重要と言えよう。

7. まとめ

現在の金星と地球の表層環境は全く違うものであるが、その違いがいつ生じたのかは明らかでない。金星と地球ではそもそも材料物質からして違っていたのかもしれないし、惑星集積過程において例えば巨大衝突のような現象で差違がつくられたのかもしれない。

惑星集積過程において金星と地球が同じように形成された場合でも、その後の進化によって金星と地球の差違はつくられうる。惑星集積が終了したときの原始大気が金星と地球で同じようなものであったとしたら、大昔の金星にも海洋が形成されていた可能性がある。太陽に少し近い金星は大気温度が高く大気中の水蒸気量が多くなるため水素が散逸して水が失われる。太陽から少し遠い地球ではコールド・トラップの働きによって水素の散逸が抑えられ、現在まで海洋が保持される。

謝辞

査読者の倉本圭氏のコメントは、本論文の読みやすさを大きく向上させた。また、ゲストエディターの今村剛氏が原稿作成の遅れに辛抱強く対応してくれたおかげで、本論文を書き上げることができた。両名に対し心から感謝したい。

参考文献

- [1] 田近英一, 1998, 岩波講座地球惑星科学13地球進化論, 第5章.
- [2] 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.
- [3] 阿部豊, 1998, 岩波講座地球惑星科学13地球進化論, 第1章.
- [4] Abe, Y. and T. Matsui, 1986, J. Geophys. Res. 91, E291.

- [5] Abe, Y., 1993, *Lithos* 30, 223.
- [6] Tajika, E. and T. Matsui, 1993, *Lithos* 30, 267.
- [7] Hashimoto, G.L. and S. Sugita, 2003, *J. Geophys. Res.* 108, 5109, doi:10.1029/2003JE002082.
- [8] Namiki, N., 1995, Ph. D. thesis, M.I.T.
- [9] Kasting, J.F. and J.B. Pollack, 1983, *Icarus* 53, 479.
- [10] Basri, G. and C. Bertout, 1993, in *Protostars and Planets III*, Univ. Arizona Press, 543.
- [11] Kumar, S. et al., 1983, *Icarus* 55, 369-389.
- [12] Kasting, J.F. et al., 1984, *Icarus* 57, 335-355.
- [13] Donahue, T.M. et al., 1982, *Science* 216, 630.
- [14] Grinspoon, D.H., 1993, *Nature* 363, 428.
- [15] Zahnle, K., 1993, in *Protostars and Planets III*, Univ. Arizona Press, 1305.