

# 地球と火星

## ——HとCと初期分化について——

倉本 圭<sup>1</sup>

地球は海、つまり液体の水に地表面を広く覆われている。海が生命の故郷であることは広く受け入れられている考えである。火星はそこで独自に生命が発生し、今もなお生き延びている可能性が期待されている惑星である。この期待の背景には、過去の火星は地球と同様の表層環境を持っていたのではなかろうかという希望的推測がある。

現在の火星の表面は冷たく、水はほとんど氷になってしまっている。これは、火星が単位表面積あたりに受け取る太陽放射エネルギーが地球よりも小さいことを反映している。しかし火星表面には過去の流水の活動を示唆する地形が多く残されており、過去の火星は温暖で液体の水が存在できたのではないかと考えられている。だが過去の火星が温暖であったとして、その表層における物質循環の様態などは本当に地球と良く似ていると考えていいのであろうか。

地球や火星の表層の進化において、最も主要な役割を果たしている元素はHとCである（注1）。本稿では、まず地球と火星の表層の持つ特徴について、特にHとCの役割に着目して比較を行なう。ここでの結論は、地球と火星の間には表層進化におけるHとCの役割に大きな差異があるようにみえるということである。次に、その理由を考えるために惑星形成時における揮発性元素の挙動について考察する。そして材料物質組成の違いを反映したH・Cの原始大気・マントル・コア間での分配のされ方の違いが、地球と火星の表層進化の本

質的な違いを引き起こした可能性について議論する。

注1 もちろんOも重要な元素であるが、その惑星表層における挙動はほとんどHとCに付随している。

### 地球と火星の表層の比較

#### 水惑星：地球

地球はしばしば水惑星と呼ばれる。それは海、すなわち  $1.4 \times 10^{21}$  kgの水が地球の表面を広く覆っているためである。地球型惑星の中で、液体の水に広く表面を覆われているのは地球だけである。

水惑星としての地球表層の特徴は、海の存在のみにあるのではない。地球表面の海以外の部分は主に大陸が占めている。比較惑星学的見地からは、大陸地殻は特異な組成の岩石からなる。それは  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  に富むが、このような組成の地殻を大量に有するのは太陽系において地球だけである。このような特殊な組成の地殻は、 $\text{H}_2\text{O}$  の影響により形成されたと考えられている[1]。

地殻とは、マントルのシリケートが部分融解してできた液、つまりマグマが地表付近で冷え固まったものである。 $\text{H}_2\text{O}$  の存在下でマグマが発生すると、それは  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  に富む組成、つまり大陸地殻の持つような組成になることが実験岩石学的に知られている[2]。ちなみに  $\text{CO}_2$  の存在下では、反対に  $\text{SiO}_2$  に乏しいマグマが生ずることが分かっ

<sup>1</sup> 東京大学気候システム研究センター研究員

ている[2].  $\text{SiO}_2$ に富む大陸地殻の存在は、地球表層付近における $\text{H}_2\text{O}$ の存在度の $\text{CO}_2$ に対する優位性を暗示する。

地球の大気は火星や金星のものと異なり、 $\text{CO}_2$ に乏しく $\text{N}_2$ を主成分とする。これは地球表層の $\text{CO}_2$ は、降雨による大陸の岩石の化学風化作用と、海における炭酸塩の沈澱作用により、その大部分が大気から奪い去られ地殻へ固定されているためである[3]。現在ではこの過程には生物が重要な役割を分担している。しかし、生物が仮にいなくてもこの過程は進むことには注意しておく。地球の地殻に固定されている $\text{CO}_2$ 量は、約 $3 \times 10^{20}$  kgと推定されている[4]。この量は海の $\text{H}_2\text{O}$ の量に比べると、質量的にも分子数の上でも少ないことが分かる。

このように $\text{H}_2\text{O}$ 存在量が $\text{CO}_2$ に勝っている性質は、地球からコアを取り除いた部分、つまりマントルと表層を合わせた“シリケート地球”全体に及んでいるらしい。図1はシリケート地球に対して推定されているH, C存在度[5,6]を、揮発性物質を多く含む炭素質隕石[7]と比較して示したものである。この図の中で、シリケート地球がもっとも高いレベルのH/C比を有していることが分かる。こ

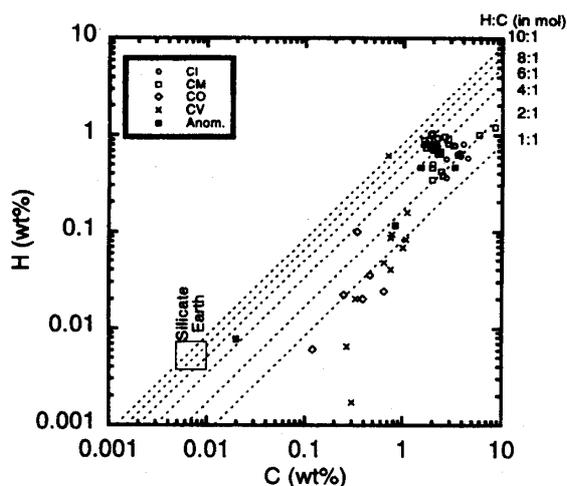


図1. シリケート地球と炭素質隕石中のH・C存在度。斜線は一定のH:C比を示す。[5,6,7]に基づく。

の図には彗星のデータは記入していないが、唯一組成が推定されているハレー彗星についてはCIコンドライトなどよりも低いH/C比を持つと推定されている[8]。もし地球のHやCが炭素質隕石や彗星に似た材料物質からもたらされたならば、以上のデータは何らかの理由でシリケート地球からはCが奪われ、Hが残されたことを示唆する。

### (二酸化)炭素惑星(?)：火星

地球とは対照的に、火星表層は $\text{H}_2\text{O}$ よりも $\text{CO}_2$ に富む様に見える。まず大気について見てみよう。火星大気は $\text{CO}_2$ を主成分とし、 $\text{N}_2$ は2番目の成分になっている。これは火星においては、液体の水の働きによる $\text{CO}_2$ の地殻への固定作用が弱かったことを示唆する。

大気中の $\text{CO}_2$ と $\text{H}_2\text{O}$ 分子に関する酸素同位体比の分光学的観測結果は、火星大気と交換できる揮発性物質の地表リザーバーにおいては、 $\text{CO}_2$ が $\text{H}_2\text{O}$ よりも数的にも多いらしいと解釈されている[9]。観測される酸素同位体比は、 $\text{CO}_2$ の方が $\text{H}_2\text{O}$ よりも若干重い。これは $\text{H}_2\text{O}$ と $\text{CO}_2$ 間の同位体交換平衡の効果によると考えられる。一方、火星表層の揮発性物質がかつて高温下で岩石圏と平衡にあったとすると、表層揮発性物質全体が持つ酸素同位体比の平均値は岩石の値にほとんど等しくなるはずである。火星の岩石の持つ酸素同位体比は、SNC隕石から推定されている。これらの隕石は様々な証拠から、火星の地殻の破片に違いないと考えられている[10]。 $\text{CO}_2$ と $\text{H}_2\text{O}$ を比較してみると岩石に近い酸素同位体比を持っているのは $\text{CO}_2$ である。このことは、火星表層の揮発性物質に含まれるOは主に $\text{CO}_2$ として存在していると考えerことで説明できる。

また、分光学的観測によって得られた火星大気のD/H比は地球の海水の持つ値よりも5倍程度大きく、火星からHが大量に散逸したことを暗示す

る。この観測結果が示された当初、高いD/H比はおそらく大気のみの特徴であり、氷などの形で地中に存在するH<sub>2</sub>Oは地球のそれに近い値を持っているのではないかと考えられた。この場合、火星大気中のH<sub>2</sub>O量はわずかであるため、高いD/H比は必ずしも火星表層のH<sub>2</sub>Oの大規模散逸を意味するとは限らなくなる。ところが最近、SNC隕石の含水鉱物にも高いD/H比が発見され、散逸はやはり地表に存在するH<sub>2</sub>O全体に及ぶ、大規模なものであったと推定されている[11]。

SNC隕石や探査船のデータから推定されている火星の地殻は、SiO<sub>2</sub>やAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>に乏しい組成を持つ。このことは、火星ではH<sub>2</sub>Oの強く関与したマグマ活動は盛んではなく、もし何か揮発性物質が関与しているとすれば、それはCO<sub>2</sub>である可能性を示唆する。実際、SNC隕石の一種であるNakhliteはCaOに富むマグマから結晶分化してできた岩石と推定されており、CO<sub>2</sub>の関与がこのような組成のマグマ生成の理由として考えられている[12]。

以上のように、地球と火星ではHとCの働きにおいてその表層の特徴は大きく異なっているように見える。地球の表層環境はH<sub>2</sub>Oの働きに強く影響されており、一方火星ではH<sub>2</sub>Oの働きが弱く、むしろCO<sub>2</sub>の強い影響を見て取ることができる。そしてこれは惑星表層・マントルにおけるHとCの存在度の大小関係の違いを反映していると考えられることができそうである。それでは、HとCの相対的な存在度が地球と火星で異なる理由はどのように考えれば良いだろうか。そこで以下ではこれらの揮発性物質の起源に焦点を当て、まず始めに材料物質について考える。

## 材料物質

希ガスを始めとする惑星大気元素組成から、地球型惑星の大気は原始太陽系星雲を直接捕獲した物の名残りではなく、固体材料物質に含まれて

いた物が惑星の形成・進化と共に脱ガス・蓄積したものだと考えられている。

火星は地球に比べて太陽から遠いので、その材料物質には揮発性物質がより多く含まれていたと考えるのは自然である。このことは火星に対して推定されている揮発性親石元素の存在度からも支持される。そのような推定はSNC隕石の分析に基づいてなされている。NaやKなど、火星における揮発性親石元素存在度の推定値は地球のそれに比べいずれも高い値を示す[13]。

地球よりも火星の材料物質のほうが揮発性物質の含有量が多いことは、HやCのようなより揮発性の高い元素についてももっともらしい。とはいえ、これらの元素が実際にどのくらいの量で含まれていたのかは、今のところほとんど制約条件がない。現在の惑星に観測されるH・C量は、材料物質中のこれらの元素の存在量の下限を与えるに過ぎない。地球や火星から、HやCの一部が宇宙空間へ散逸したことはほぼ間違いない。しかし、その量については極めて推定が難しい。また惑星の金属鉄コアにもHやCが分配されている可能性があるが、その量もほとんど不明である。

ここでは、当座のモデルとしてDreibusとWänke [13]による2成分モデルを適用して、材料物質中のHやCの量を見積もることにしよう。このモデルでは、惑星の材料物質を原始太陽系星雲の高温領域における高温還元型凝縮成分と、低温領域における低温酸化型凝縮成分の混合物として表す。低温酸化型成分の組成としては、CIコンドライトのものをとる。そして、CIコンドライトの組成からNa以上に揮発性の高い元素を引き去り、Feが全て還元されるまでO量を減らしたものを高温還元型成分の組成にとる。

両成分の混合比は、惑星に推定されている揮発性親石元素存在度を説明するように与える。Si量で両成分の組成を規格化した場合、低温酸化型成

表1. 地球と火星のモデル材料物質組成(単位は mol, Si ≡ 1)

元素	高温還元型成分	低温酸化型成分	地球	火星
Si	≡ 1	≡ 1	1	1
Mg	1.08	1.08	1.08	1.08
Al	0.08	0.08	0.08	0.08
Ca	0.06	0.06	0.06	0.06
Na	—	0.06	0.006	0.021
Ni	0.05	0.05	0.05	0.05
Fe	0.90	0.90	0.90	0.90
S	—	0.52	0.052	0.182
O <sup>(1)</sup>	3.26	3.847	3.319	3.465
C	—	0.70	0.07	0.245
H	—	3.5	0.35	1.225
O <sup>(2)</sup>	—	1.75	0.175	0.6125

(1) 低温酸化型成分中のH<sub>2</sub>Oに含まれる分は除く

(2) H<sub>2</sub>Oに含まれるO

分の占める割合は地球の材料物質に対してはほぼ10%, 火星のものに対しては35%と与えられる[13]. このようにして推定される材料物質組成を表1に示す.

さて, このモデルでは火星の方が地球よりも材料物質中のH・C量は多い. しかしその比は変わらない. したがって単純にこれらの物質が蓄積したのでは, 地球と火星間の表層に示唆されるHとCの量比の違いは生じない. 始めからそのようにH・Cの量比が異なる材料物質が集積したと考えることも, 全く不可能と言うわけではないだろう. しかし炭素質隕石では揮発性元素量が減少するとH/C比は小さくなる傾向がある(図1参照). この傾向が地球と火星の材料物質にも成り立つならば, 地球の方が相対的にCに富む材料物質を持つはずである. だが, この傾向は地球と火星の表層に示唆されるHとCの量比の関係とはむしろ逆センスである. したがって現在地球と火星の表層に存在するHとCは, それぞれの惑星の形成・進化の過

程に何らかの影響を受けてその分布が決まったと考えられる.

## 集積と分化

現在の惑星形成論の理解では地球型惑星の大規模な成層構造, 即ち大気・マントル・コアの分化は惑星集積と同時に進行する. 惑星集積は始め数キロサイズだった微惑星が, お互いの重力により衝突合体を繰り返して大きな天体へ成長する過程である. 集積過程は必然的に重力エネルギーの解放を伴う. 仮に重力エネルギーが全て熱に転化されたとすると, 地球では数万K, 火星でも数千K以上の温度上昇をもたらすことになる. したがって地球型惑星はその集積時に大規模な加熱・融解を経験する可能性があり, 成層構造の分化が進行すると考えることができる.

年代学的データからは, 地球のマントル・コアの分化は約40億年以上前にさかのぼるものと推定されている. 火星に関してはSNC隕石の年代学デ

ータが得られており、マントル・コアの分化は約45億年前にまでさかのぼると推定されている[14]. これは火星の分化が惑星集積とほとんど同時進行であったことを示唆する. この火星に関する年代学データは、地球型惑星の「熱い起源」を裏付ける証拠として重要である. マントル・コアの分化とはシリケートと金属鉄の重力分離過程に他ならない. この過程は物質が高度に融解しないと(少なくとも火星内部の圧力条件下では)進行が困難であることが実験的に示されており、理論的にもそのように考えられている[15]. つまり火星はその形成時に大規模な加熱融解を経験したはずである.

集積過程における重力エネルギーの解放量は、惑星を大規模に融解させるのに十分な大きさをもつ. しかし、そのためには解放された重力エネルギーはある程度以上の効率でいったん熱に転化される必要がある. 効率の良い熱への転化の方法には、大きく2通りの考え方がある. 一つは原始大気の保温効果で熱をため込むというものである. もう一つは巨大な微惑星の衝突により、一挙に大規模な熔融を引き起こすというものである.

原始大気による保温効果のメカニズムは地球サイズの惑星には有効である. 比較的小さな微惑星が連続的に集積する場合には、原始大気が原始太陽系星雲ガスを引きつけたものであれ、微惑星から脱ガスして形成されるものであれ、原始惑星の質量が現在の地球質量の数十パーセントを越えると表面に熔融した層、つまりマグマ・オーシャンが形成される. ところが地球の約10%の質量しかない火星サイズの惑星については、原始大気の保温効果でマグマ・オーシャンの形成を引き起こすことはかなり困難である[16].

一方、巨大な微惑星の衝突は火星サイズの惑星に対しても有効な加熱融解の機構となる. 高速度衝突による衝撃圧縮プロセスで物質の融解に必要なエントロピー上昇をもたらすには、7-8 km/s以

上の衝突速度が必要である[16]. このような衝突速度は、地球の集積後期には自己の重力加速により必然的に達成される. 質量が小さく脱出速度の小さい火星に対しても、微惑星の持つランダム相対速度が原始惑星の脱出程度になることを考慮するとそのような速度は現実的と考えられる.

このような速度で、 $10^{18}$ - $10^{19}$  kg以上の微惑星の衝突が起こると、惑星上には数100キロを越えるサイズの熔融体が形成される. そこでは熔融金属鉄は表面張力の作用で径が1 cm程度の無数の小さな液滴をなして、比較的短時間の内に熔融体の底へ沈降する. それは熔融体の冷却固化よりも十分短い時間スケールで進行する. また熔融金属鉄の各々の液滴は小さく、単位体積あたりの表面積が大きいため周囲との化学平衡は比較的良く成り立つと考えられる. 底にたまった熔融金属鉄は大きな塊をなし、比較的冷たくて固い惑星深部領域を通して中心へ沈降することができる[16].

最近の惑星集積論では、惑星集積の中-後期はこうした比較的巨大な微惑星の衝突が原始惑星の質量成長の主要なメカニズムと考えられている. したがって、巨大な微惑星衝突は火星だけでなく地球においても、主要なマントル・コアの分化プロセスであったと考えることができる. このような場合、微惑星から持ち込まれたHやCはどのように振る舞うだろうか.

従来は、一定の速度をこえた衝突がおこると微惑星に含まれていた揮発性物質は完全に脱ガスし、一度原始大気へ放出されるという、いわゆる衝突脱ガスモデルにそった議論が展開されていた(例えば[18]). このモデルでは暗黙の仮定として微惑星のサイズはそれほど大きくなく、衝撃波の通過によって揮発性物質を抱えているホスト鉱物(例えば含水鉱物)が不安定になると、ほとんど完全な脱ガスが起こるとされる.

AbeとMatsui [18]は、地球の集積期における衝

突脱ガスによる水蒸気を主成分とする原始大気、およびその保温効果によるマグマ・オーシャンの形成・進化について論じた。彼らの研究で評価されるべき点は、集積期における表層の揮発性物質の振る舞いに、固体地球との相互作用が極めて重要な役割を果たす可能性を明確に示したことである。すなわち、原始大気中の $H_2O$ 量は、マグマ・オーシャンとの溶解平衡によってコントロールされ、それによって地球の現在の海水量が説明される可能性が示された。

しかし彼らの議論には、いくつかの問題点も存在する。その一つは、微惑星のサイズが小さく、原始惑星へのエネルギー解放は集積期を通じて時間的になめらかに進むとみなされていることである。しかし微惑星サイズがかなり大きい場合には、エネルギー解放の間欠性が重要となる。衝突と衝突の間に原始大気は冷えてしまい、集積中常に表面にマグマオーシャンが維持されるとは限らない。また彼らの議論では、揮発性物質の挙動については

衝突脱ガスと原始大気からマグマへの溶解が主として考慮されている。だが、重要な相として存在したはずの金属鉄の役割は明らかにされていない。

微惑星が巨大でしかもその衝突時に熔融を伴う場合には、含まれていた揮発性物質の多くが一度熔融体内部に埋め込まれ、比較的高い圧力下においてマグマや熔融金属鉄に溶けこんでしまうことが考えられる。もちろん、衝突過程において瞬時に脱ガスしてしまう成分もあることには違いない。しかし、衝突脱ガスは従来考えられてきたほどには効率のよい過程ではない可能性がある。ここでHやCは親鉄性の高い、つまり若干圧力を加えると大量に金属鉄へ溶解できる性質の元素であることには注意しておく。熔融金属鉄に取り込まれたものはコアへ輸送され、マグマへ取り込まれたものはまずマントルへ分布することになるであろう。現在惑星の表面付近に存在する揮発性物質は、このような分配過程(図2)の影響を受けてその分布の状態が決まっている可能性がある。

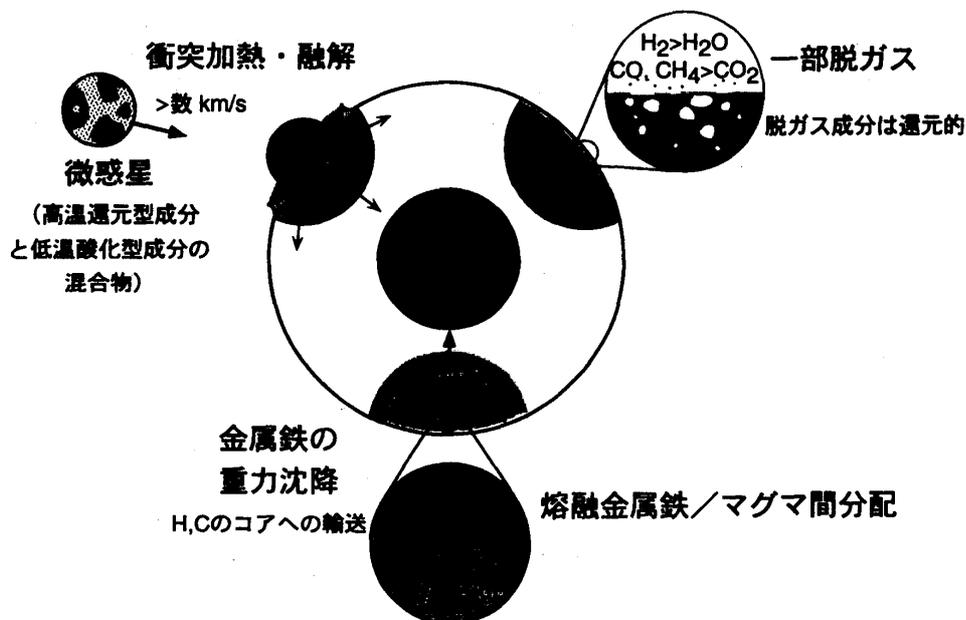


図2. 集積期の地球型惑星の分化と、それにとまうH, Cの挙動の模式図。

## HとCの分配

最近KuramotoとMatsui [19]は、高温高压下におけるガス・マグマ・熔融金属鉄間のH・Cの平衡分配を推定する数値モデルを構築し、分配の性質について調べている。このモデルは、種々のガスの熔融金属鉄及びマグマに対する溶解度に関する知識を基に構築されている。モデルには、熔融金属鉄中でH・C・Sの溶質元素間に働く反発力的相互作用が考慮されている。これらの溶質元素は、お互いの溶解度を低下させる働きを持つ。また、分配において重要な熱力学量である酸素分圧は、Fe

やOの各相間の分配の結果として内部的に解かれる様になっている。モデルの詳細については文献[19]を参照されたい。

2成分モデルから推定された地球のモデル材料物質について、分配の計算を行った例が図3である。この計算例では温度は2000 Kとし、圧力は5 GPaまで計算を行った。この圧力は地球の深さ約150 kmでの圧力に相当する。これ以上の圧力ではガスの溶解度についての知識は不十分であり、計算は行っていない。また結果の温度に対する依存性はそれほど強くない。

この場合、Cは熔融金属鉄へ選択的に分配され

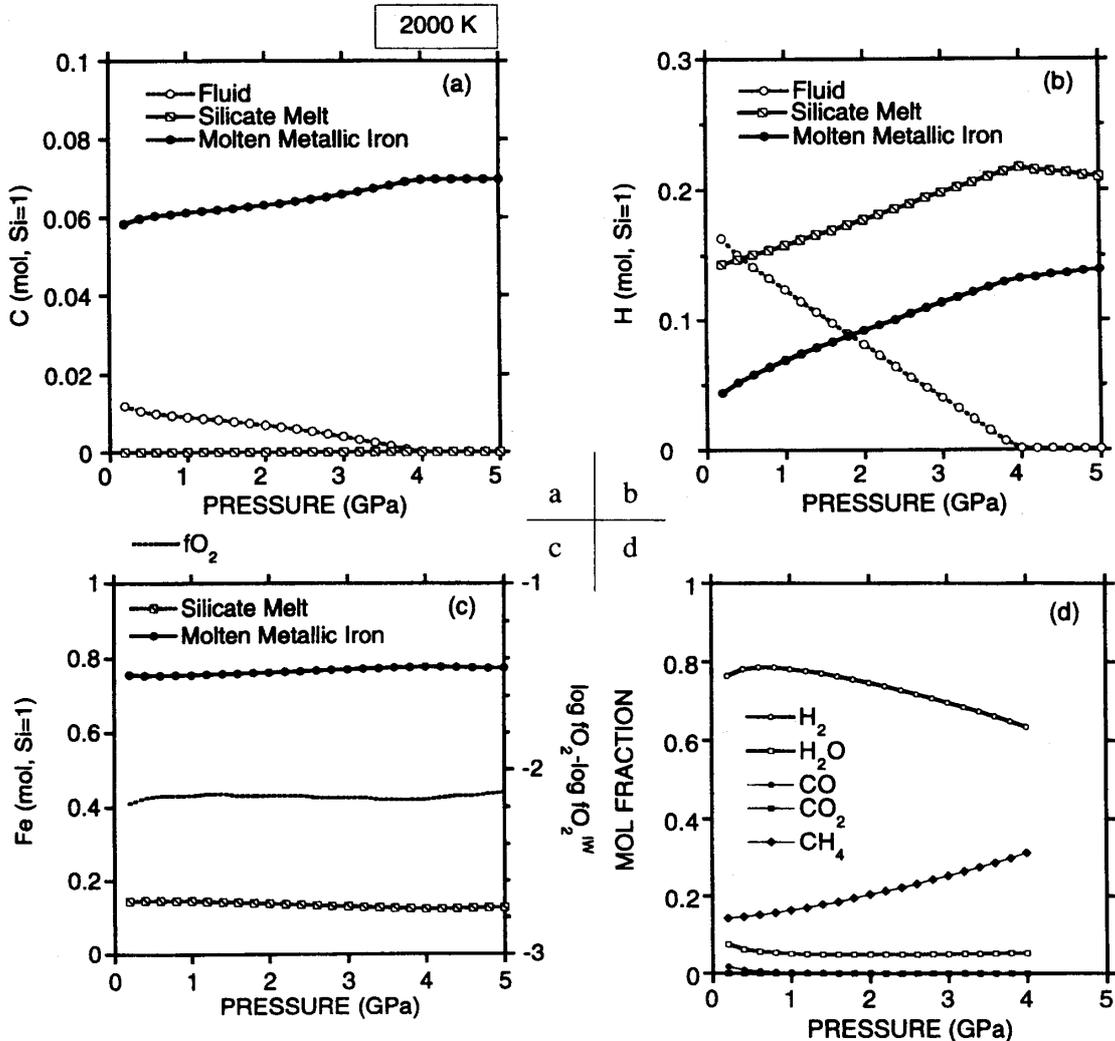


図3. 地球に対するモデル材料物質組成の場合のC(a)・H(b)の分配。ガス(Fluid)・マグマ(silicate melt)・熔融金属鉄(molten metallic iron)の各相に分配されたC・H量は、全系に含まれるSiに対するモル数で表す。対応するFeの分配と酸素分圧(c), ガスの組成(d)も同時に示す。[19]より。

ていることが分かる(図3a). マグマへは実質的に全く分配されていない(C/Siモル比 $\sim 10^{-6}$ のオーダー). これは金属鉄が存在する低酸素分圧下で $\text{CO}_2$ 分圧が低く抑えられ, マグマへの $\text{CO}_2$ の溶解が妨げられているためである(注2). 低圧側にはガスの相が現れており, 系全体のCのうち若干の割合が分配されている. しかし約4 GPaを越える高压側では完全な溶解が起こり, ガスは現れない. また計算ではグラファイトの飽和も考慮に入れているが, この例では熔融金属鉄中のCをはじめとする溶質元素濃度は小さく, グラファイトの飽和は起こっていない.

注2 実験的に $\text{CO}$ と $\text{CH}_4$ のマグマへの溶解度は

$\text{CO}_2$ に比べて極めて小さいことが知られている. そこでモデルでは $\text{CO}$ と $\text{CH}_4$ の溶解は無視している. 詳しくは[19]およびそこの引用文献を参照されたい.

一方, Hは熔融金属鉄にもかなりの割合が分配されているが, マグマも重要な分配先となっている(図3b). マグマには $\text{H}_2\text{O}$ として分配されている. 低圧側ではガスにもHが分配されている. ガスの組成は金属鉄存在下の低い酸素分圧(鉄-ウスタイトバッファ下での値のほぼ1/100)を反映して,  $\text{H}_2$ に富む組成になっている(図3c,d).

これらの分配の基本的な特徴は, 材料物質中のH, C量が比較的少ない場合(2成分モデルでは, 低

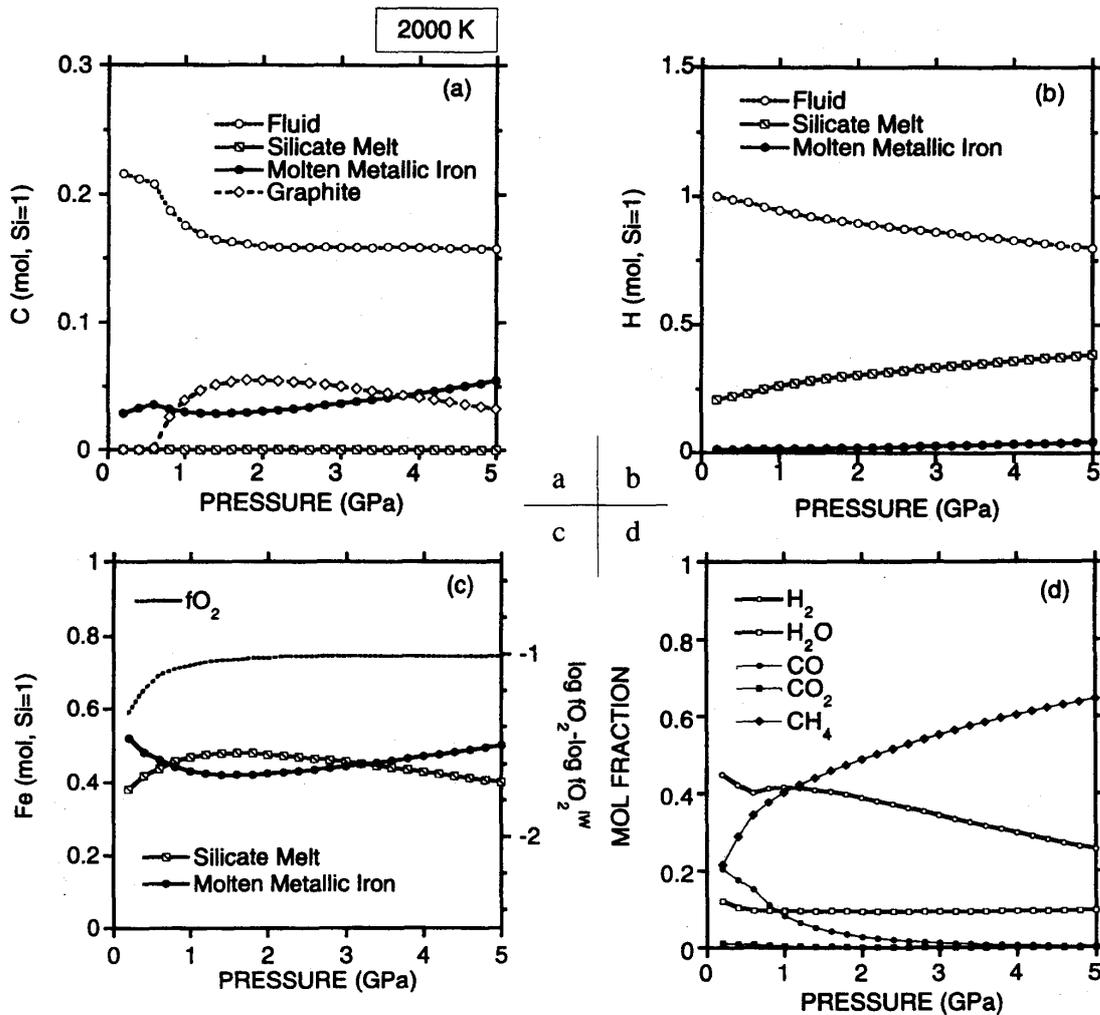


図4. 火星に対するモデル材料物質組成の場合の分配.

温酸化型成分の占める割合が小さい時)には共通している。即ち、(1)Cは選択的に熔融金属鉄へ分配され、(2)Hは $H_2O$ としてマグマへも分配される、そして(3)ガス組成は $H_2$ に富む。

しかし材料物質中のH, C量が増えると分配の特徴は変化する。図4は2成分モデルによる火星のモデル材料物質に対する計算例である。この計算例でも温度は2000 Kに固定されている。しかし、結果の温度依存性はこの場合も小さい。

Cについては、熔融金属鉄が主要な分配先ではなくなっていることが分かる(図4a)。Cの多くはガスに分配されている。また高压側ではグラファイトの飽和も起こっている。熔融金属鉄が主要な分配先でなくなったのは、材料物質中の熔融金属鉄への溶質元素量が増し、しかも酸化鉄成分が増えて系全体に金属鉄の占める割合が減ったことがその理由である。特に熔融金属鉄中のS量の増加は、Cの飽和溶解度を著しく低下させている。マグマへはこの場合もほとんどCは分配されていない。この場合でも、 $CO_2$ 分圧はマグマへの多量の $CO_2$ の溶解を許すほどには高くなっていない。

Hについてもガスが主要な分配先となっていることが分かる(図4b)。しかし、マグマ及び熔融金属鉄にもかなりの割合が分配されている。

系の酸素分圧は材料物質組成における酸化的成分の増加を反映して、地球の材料物質モデルに対する結果に比べほぼ1桁大きくなっている(注3)(図4c)。ガスの組成はそのことを反映して若干 $H_2/H_2O$ 比が小さくなるなどの傾向を示すが、やはり $H_2$ が主要な化学種であることには変わりがない(図4d)。Cの熔融金属鉄への分配の効率が低下したことを反映して、ガス中のC/H比は大きくなっている。またガス中のCは大部分、 $CH_4$ や $CO$ の還元型の分子種の形を取っている。

注3 読者によっては、酸素分圧の増大はグラフ

ァイトの飽和と一見矛盾するように見えるかも知れない。確かに酸素分圧があるしきい値(温度・圧力の関数)よりも高くなると、グラファイトは安定には存在できない。逆にグラファイトが飽和するには酸素分圧がしきい値よりも低いことだけでなく、グラファイトが他の相に希釈されないことも必要である。地球材料物質モデルの結果は前者の条件は満たしても、熔融金属鉄への溶解によって後者の条件が満たされないためにグラファイトは飽和しない。一方、火星材料物質モデルでは酸素分圧は上昇したとはいえ、しきい値を越えるには至っていない圧力範囲が存在している。その一方で他の相への希釈の効果は小さくなり、グラファイトが飽和する。

材料物質中のH, C量が増した場合の、分配の基本的な特徴をまとめると次のようになる。(1)Cの熔融金属鉄への分配は効率が悪くなり、多くはガス中の $CO$ ,  $CH_4$ やグラファイト、即ち還元型の炭素種へ分配され、(2)Hについてもガスが主要な分配先となるが、マグマ・熔融金属鉄にもある程度入り、(3)ガス成分は $H_2 \cdot CO \cdot CH_4$ に富むようになる。

このように材料物質の組成に依存したH, Cの分配のされ方の違いは、先に述べた地球と火星の表層進化の差異を説明するかもしれない。以下では分配の後の段階で必然的に進行すると考えられるいくつかの過程も考慮することで、両惑星にまたがる表層進化の差異が実際に説明しうることを示す。

## 地球と火星の初期進化

### 水惑星・地球: 低H, C量の場合

HとCの分配されたガス・マグマ・熔融金属鉄は、それぞれ原始大気・マントル・コアへと分かれて

行く。地球に対して想定されるような、比較的H、C含有量の低い材料物質の場合には、Cは選択的にコアへ取り除かれ、マントルには初めCO<sub>2</sub>をほとんど含みずH<sub>2</sub>Oを溶かし込んだマグマがつけ加わる。原始大気に初め放出されるのは、H<sub>2</sub>を主成分とするガスである。

このようなHとCの初期分布を持つ惑星は、その後の進化を経て地球のような表層環境を持つに至ると考えられる。そこで重要な役割を果たすのは、大気散逸とマントルからの脱ガスである。原始大気は初めH<sub>2</sub>に富むが、H<sub>2</sub>は遅かれ速かれ宇宙空間へ散逸してしまう。地球大気の希ガスの同位対比から示唆されるように、太陽からの極端紫外線が強く、H<sub>2</sub>の散逸流量が大きい場合にはより重い大気成分も同時に散逸するかも知れない[20]。一方でマントルからの脱ガスは徐々に進行すると考えられる。そこから脱ガスしてくる成分はH<sub>2</sub>Oを主とし、Cはほとんど含まれない。こうしてH<sub>2</sub>に富む原始大気は失われ、H<sub>2</sub>Oに富み相対的にCO<sub>2</sub>に乏しい表層の環境が出現する。

脱ガスとH<sub>2</sub>の散逸は、現在の地球マントルの酸化状態も説明することには注意しておく。現在の地球マントルは酸化的であり、Feに富む金属相は不安定である。だが今回のモデルではマントルの初期物質はコアへ分離した金属鉄と一度化学平衡を経験するので、マントルは還元的な状態から出発する事になる。還元的な雰囲気下でH<sub>2</sub>Oの脱ガスが起こると、そのH<sub>2</sub>Oの一部はマントルのFeO成分と反応し、H<sub>2</sub>が大気に放出されFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>がマントルに残される。このように脱ガス過程における化学反応を考慮すると、マントルはコア形成時の酸化還元状態を必ずしも保持しない。脱ガスとH<sub>2</sub>の散逸と共にマントルにはFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>が蓄積し、徐々に酸化的な状態へと進化すると考えられる[19]。

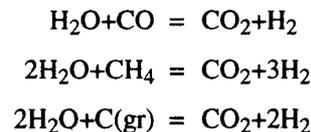
今回の分配計算の結果に対しては、地球マントルの親鉄性元素の起源やコアの密度などに対する

議論もあるが、それらは[19]にゆずる。ここでは異なるH、Cの初期分布から出発すると、異なる表層の環境が導かれる可能性を中心に議論する。

#### 炭素惑星・火星: 高H、C量の場合

火星の材料物質組成がおよそ2成分モデルの推定で与えられるとすると、コアへはC、Hはあまり取り去られず、マントルには初めH<sub>2</sub>Oを含んだマグマとグラファイトが分配されると考えられる。そして原始大気にはまずH<sub>2</sub>・CH<sub>4</sub>・COに富むガスが放出される。このような初期分布から出発すると、H<sub>2</sub>Oに乏しくCO<sub>2</sub>に富む、火星に対して推測されるものに似た表層環境が導かれると考えることができる。

この場合に、その後の表層の進化に重要となる過程は大気散逸とマントルからの脱ガスだけでなく、多量の還元型炭素種とH<sub>2</sub>Oとの化学反応である。原始大気中・あるいはマントルからの脱ガス過程において、以下の反応が進むことが考えられる[22]。



H<sub>2</sub>が選択的に宇宙空間に失われてしまうことを考慮すると、これらの反応は大局的にはH<sub>2</sub>Oを消費し、CO<sub>2</sub>を作り出す方へ進む。

分配モデルの結果は、還元型炭素種の総量はH<sub>2</sub>Oを全て上記の反応で失わせるのに十分である。この事をはっきり表すために、“H<sub>2</sub>Oの保持率” $\xi$ を導入しよう[23]。これは以下のように定義する

$$\xi = 1 - \frac{[\text{CO}]_0 + 2[\text{CH}_4]_0 + 2[\text{C}]_0}{[\text{H}_2\text{O}]_0}$$

ここで[i]<sub>0</sub>は、ガス・マグマ・熔融金属鉄間の分

配時において、ガス及びマグマに分配された化学種  $i$  のモル数である。

定義から分かるように、 $\xi = 1$  ならば、 $H_2O$  は還元型炭素種との反応では全く失われず、 $0 < \xi < 1$  ならば、一部が還元型炭素種との反応で失われ、 $\xi < 0$  であれば完全に失われてしまう可能性があることを表す。この量を、2成分モデルにおける材料物質中の低温酸化型成分の混合比を変化させて求めたものが図5である。

火星に対する混合比35%に対しては、 $H_2O$  の保持率  $\xi$  は負である(図5)。これは、もし反応が完全に進み  $H_2$  のみが宇宙空間へ散逸する場合には、表層の  $H_2O$  は還元型炭素種との反応で全て失われてしまうことを意味する。大気中の重い化学種の散逸も起こるとすると、それは  $H_2O$  の消費を抑える方向に働く。なぜなら還元型炭素種の多くは初めガス、つまりもともとから原始大気に分配されており、一方初めマントルへ分配された  $H_2O$  は、それが脱ガスするまでは散逸を免れることが可能だからである。しかしながらマントルにはグラファイトが同時に分配され得る。したがって極端な場合を考え、仮に初期の原始大気が完全に失われるとしても、Cをかなり含むガスが脱ガスし蓄積すると考えられる。

ちなみに地球に対するモデル材料物質組成(低温酸化型成分10%)に対しては、 $\xi \sim 1$  である(図4)。したがって還元型炭素種との反応で  $H_2O$  が失われてしまう恐れはない。

## まとめと今後の火星探査への期待

今回の議論をまとめると、以下のようになる。

(1) 表層における H, C の分布や役割に関して、地球と火星の間には著しい違いがあるように見える。大気組成・地殻組成の点で火星は  $CO_2$  に強く支配された表層進化を経ている傾向があるのに対し、地

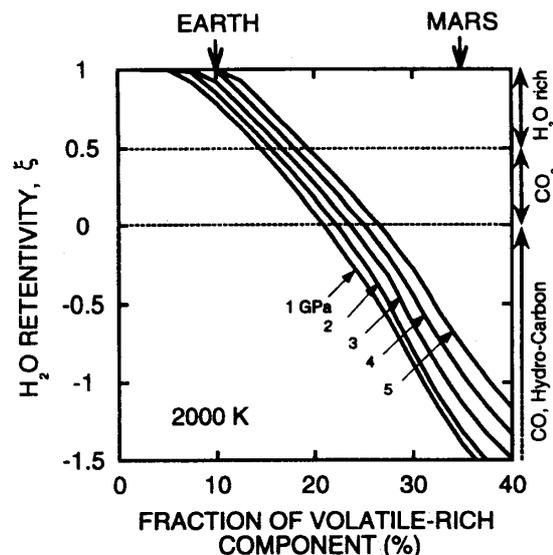


図5.  $H_2O$  の保持率. 各曲線は、各圧力下における結果を表す。[23]より。

球では  $H_2O$  の働きがより支配的であるように見える。そしてそれは表層における  $H_2O$  と  $CO_2$  の量的な大小関係の違いを反映していると考えられる。

(2) 惑星表層における H と C の分布は、惑星形成時の分化過程に強く影響を受けていると思われる。特に、最近の惑星集積論が示唆するサイズの比較的大きな微惑星の集積を考えた場合には、ガス・マグマ・熔融金属鉄間の高圧下での分配が原始大気・マントル・コア間の H と C の分配にとって重要と考えられる。

(3) 分配は材料物質中で金属鉄に対して H と C がどの程度含まれるかにより、質的に大きく異なる。特に C が効率よくコアに分配されるかどうか重要である。C のコアへの分配の効率は、材料物質の H・C の金属鉄に対する存在度が小さいほど良く、大きくなると悪くなる。地球と火星に推定されている親石性元素存在度からは、地球よりも火星の材料物質の方が H・C に富むと考えられ、地球と火星ではそれぞれ質の異なる分配が起こった可能性がある。

(4)分配後の原始大気の散逸・マントルからの脱ガス・及び還元型炭素種と  $H_2O$  の化学反応を考慮することで、材料物質中の H, C 含有量が小さい場合には、地球のような相対的に  $H_2O$  に富み  $CO_2$  に乏しい表層が導かれ、一方で H, C 含有量が多い場合には、火星のような相対的に  $H_2O$  に乏しく  $CO_2$  に富む表層が導かれると考えられる。

地球と火星の比較起源論は、数年先の複数の火星探査計画の実現と共に、これからますます盛んになって行くと思われる。そこで、特に将来の火星探査に関連していくつかのコメントを挙げて本稿の締めくくりとしたい。

今回展開した議論の柱の一つは、地球と火星では表層の H と C の相対存在度が逆転している可能性があるということであった。しかし、これはかなり限られた観測的制約条件を基にしたものであることは否定できない。特に火星表層の H と C の相対存在度に関する最も直接的な制約条件は、火星大気中の  $H_2O$  と  $CO_2$  に関する O 同位対比の地上からの分光学的データによっている[9]。しかしこのデータは少なからぬ誤差を含み、大気圏外からの詳しい観測が待たれている。

また様々な大気成分の同位対比異常を作り出すプロセスを理解していくことも重要である。このようなプロセスの一つとして、太陽風と火星上層大気の相互作用による大気散逸が注目されている。最近火星大気の希ガス元素などに見られる同位対比異常は、これでほとんど説明できるかもしれないという議論もある[21]。しかしその散逸プロセス・フラックス等については観測的に不十分な理解しか得られていない。現在から過去の状態を知るためにも、この過程の理解をすすめる必要がある。火星の上層大気を中心に観測を行う Planet-B は、有用な観測データをもたらすに違いない。

また地殻やコアに関して、より詳しい情報を知ることが重要である。地殻の組成はその形成に関与する揮発性元素が何かという情報を引き出せる可能性がある。またコアのサイズや密度から、材料物質に関する新たな知見が得られるはずである。火星は月に続く、次の地震波探査の目標天体であり、そう遠くない将来の前進を期待したい。

また火星の地殻にトラップされている揮発性物質に関する情報は極めて限られている。同位対比組成については、SNC 隕石に含まれている急冷メルトへの溶解成分や含水鉱物・炭酸塩鉱物の同位対比組成が得られているのみである。これも直接火星の試料の直接分析が望まれる。火星物質のサンプルリターンには、惑星大気の起源を解くという意義もあるのである。

## 謝辞

本研究をすすめるにあたり、東京大学地球惑星物理学教室の松井孝典・阿部豊助教授には多くの有益な助言を頂いた。春山純一氏を中心とした「火星・水セミナー」では、火星表層・大気・超高層に関する認識を深めることができた。査読者のコメントは本論文の改訂に有益であった。

## 参考文献

- [1] Campbell, I. H., and Taylor, S. R., 1983: No water, no granites -no oceans, no continents. *Geophys. Res. Lett.* **10**, 1061 - 1063.
- [2] Wyllie, P. J., 1979: Magmas and volatile components. *Am. Mineral.* **64**, 469 - 500.
- [3] Walker, J. C. G., Hays, B. P., and Kasting, J. F., 1981: A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of Earth's surface temperature. *J. Geophys. Res.* **86**, 9776 - 9782.
- [4] Donahue, T. M., and Pollack, J. B., 1983: Origin and evolution of the atmosphere of Venus. in

- Venus*, eds. Hunten, D. M. et al., Univ. of Arizona Press, Tucson, pp. 1003 - 1036.
- [5] Carr, M. H., and Wänke, H., 1992: Earth and Mars: Water inventories as clues to accretional histories. *Icarus* **98**, 61 - 71.
- [6] Zhang, Y., and Zindler, A., 1993: Distribution and evolution of carbon and nitrogen in Earth. *Earth Planet. Sci. Lett.* **117**, 331-345.
- [7] Kerridge, J. F., 1985: Carbon, hydrogen and nitrogen in carbonaceous chondrites: Abundances and isotopic compositions in bulk samples. *Geochim. Cosmochim. Acta* **49**, 1707 - 1714.
- [8] Jessberger, E. K., Kissel, J., and Rathe, J., 1989: The composition of comets. in *Origin and Evolution of Planetary and Satellite Atmospheres*, eds. Atreya, S. K., et al., Univ. of Arizona Press, Tucson, pp. 167 - 191.
- [9] Jakosky, B. M., 1991: Mars volatile evolution: Evidence from stable isotopes. *Icarus* **94**, 14 - 31.
- [10] McSween, H. Y. Jr., 1985: SNC meteorites: Clues to martian petrologic evolution? *Rev. Geophys.* **23**, 391 - 416.
- [11] Donahue T. M., 1995: Evolution of water reservoirs on Mars from D/H ratios in the atmosphere and crust. *Nature* **374**, 432 - 434.
- [12] Longhi, J., 1991: Complex Magmatic Processes on Mars: Inferences from the SNC meteorites. in *Proc. Lunar and Planet. Sci.* **20**, Lunar and Planetary Institute, Houston, pp. 695 - 709.
- [13] Dreibus, G., and Wänke, H., 1989: Supply and loss of volatile constituents during the accretion of terrestrial planets. in *Origin and Evolution of Planetary and Satellite Atmospheres*, eds. Atreya S. K., Univ. of Arizona Press, Tucson, pp. 268 - 288.
- [14] Schubert, G., Solomon, S. C., Turcotte, D. L., Drake, M. J., and Sleep, N. H., 1992: Origin and thermal evolution of Mars. in *Mars*, eds. Kiefer, H. H., et al., Univ. of Arizona Press, Tucson, pp. 147 - 183.
- [15] Stevenson, D. J., 1990: Fluid dynamics of core formation. in *Origin of the Earth*, eds. Newsom H. E. and Jones J. H., Oxford University Press, New York, pp. 231 - 249.
- [16] Kuramoto, K., 1994: Partition of atmophile elements during accretion of the terrestrial planets. PhD thesis, Univ. of Tokyo.
- [17] Tonks, W. B. and Melosh, H. J., 1992: Core formation by giant impacts. *Icarus* **100**, 326 - 346.
- [18] Abe, Y., and Matsui, T., 1986: Early evolution of the Earth: accretion, atmosphere formation, and thermal history. in *Proc. 17th Lunar and Planet. Sci. Conf.*, *J. Geophys. Res.* **91**, suppl., E291 - E302.
- [19] Kuramoto, K. and Matsui, T., 1995: Partitioning of H and C between the mantle and core during the core formation in the Earth: its implications for the atmospheric evolution and redox state of early mantle. *J. Geophys. Res.* に投稿中.
- [20] Hunten, D. M., Donahue, T. M., Walker, J. C. G., and Kasting, J. F., 1989: Escape of atmospheres and loss of water. in *Origin and Evolution of Planetary and Satellite Atmospheres*, eds. Atreya, S. K., et al., University of Arizona Press, Tucson, pp. 386 - 422.
- [21] Jakosky, B. M., Pepin, R. O., Johnson, R. E., and Fox, J. L., 1994: Mars atmospheric loss and isotopic fractionation by solar-wind-induced sputtering and photochemical escape. *Icarus*

111, 271 - 288.

- [22] Kuramoto, K., and Matsui, T., 1994:Mars, a carbon-rich planet ? *Lunar and Planet. Sci. Conf. XXV*, 759-760 (abstract).
- [23] Kuramoto, K., 1995:Volatile accretion, core formation, and surface environment evolution of the Earth and Mars. *Phys. Earth Planet. Inter.* に投稿中.