

特集「火星圏のサイエンス」

原始惑星内部のD/H比

齊藤 大晶¹，倉本 圭²

2018年6月30日受領，査読を経て2018年7月16日受理。

(要旨) 形成期の惑星内部に取り込まれた初生水のD/H比は地球と火星で異なるらしい。始原マントルにソースを持つと考えられる噴出岩中のメルト包有物中のH₂Oは、地球試料においては、星雲ガスを取り込んだことを示唆する低いD/H比を示す一方で、火星試料においては、炭素質コンドライトに近いD/H比を示す。両者のD/H比の差異は、星雲内で集積する原始惑星上における原始大気の構造が惑星質量に依存しているためであるかもしれない。新たな次元大気構造数値モデリングの結果によれば、火星質量程度の原始惑星の場合、上層に星雲ガス成分、下層に衝突脱ガス成分からなる成層した混成型原始大気が形成し、接している原始マントルは材料物質に含まれるH₂OのD/H比を獲得することができる。これに対して、火星質量以上の原始惑星の場合、対流により起源の異なる両成分が混合し、下層大気のD/H比は星雲ガスの値に接近する。これによって大質量の惑星の始原マントルは、星雲ガスに近い値のD/H比を獲得できた可能性がある。

1. はじめに

水素同位体比(D/H)は、水の供給源によって値が異なる。例えば、原始太陽系星雲ガス(以下、星雲ガス)のD/H比は $\sim 2.1 \times 10^{-5}$ 、炭素質コンドライト隕石は $\sim 1.6 \times 10^{-4}$ であり[1, 2]、両者の間のD/H比には約10倍ほど値に開きがある。

地球の海洋のD/H比は炭素質コンドライトのそれと同様であることから、しばしば地球の水の起源は炭素質コンドライトであると考えられてきたが、そう断定するのは早計である。例えば、水素分子と水蒸気間での同位体交換反応や原始大気の大規模な散逸によってD/H比は3~9倍に上昇しうることが示されている[3]。これは形成初期の海洋のD/H比は現在よりも低いことを示唆する。

実際に、カナダのパフィン島から噴出する溶岩中のメルト包有物からは現在の海洋よりも低いD/H比が

得られている[4]。これら地方で得られる溶岩はマントル深部由来のものであり、Pb-Pb法による年代推定から、この溶岩のソース領域の形成は44.5-45.5億年前であることが示唆されている[5]。この年代はちょうど地球形成期に該当する。そのため、このソース領域は後のプレートテクトニクスによる地球表層物質と水素同位体交換をほとんど経験していないと推定される。そのため、測定されたD/H比は地球形成期に取り込まれた初生水の値を反映しているとともに、その値の低さから、水の供給成分として原始太陽系星雲ガスが重要であったことを示唆する。

その一方で、火星マントル起源と考えられている火星隕石メルト包有物中のH₂Oの同位体分析によると、火星マントルのD/H比は炭素質コンドライト的である[6, 7]。火星の場合、形成初期から現在にかけてプレートテクトニクス等の作用による表層物質と深部物質の混合は極めて限定的であったと推定される[8]。したがって上記の水素同位体測定結果は、火星形成期に取り込まれた初生水のD/H比を示すと考えられる。これが炭素質コンドライトの値に近いということは、

1. 高知工科大学 システム工学群

2. 北海道大学 理学研究院

saito,hiroaki@kochi-tech.ac.jp

火星が初期に取り込んだ H_2O は主に微惑星起源であることを示唆する。

火星隕石中のHf-W系を用いた放射年代測定によると、火星は、現在の約1/2の質量に達するのに180(±100)万年程度と、急速に成長を遂げたことが示唆されている[9]。このことは惑星集積の寡占成長の理論とも調和的である[10]。地球型惑星形成の現代的描像によると、微惑星の集積によって火星サイズの原始惑星が地球型惑星領域に数十個形成すると考えられている。このことから地球の‘元’となった他の原始惑星も同様に、少なくとも火星質量前後に達するまでは急速に集積成長した可能性がある。星雲ガスの散逸タイムスケール(<1000万年)[11]に比べて推定された集積時間が短いことから、原始惑星は基本的に星雲ガス中で集積成長したと考えられる。

原始惑星が月質量($\sim 10^{23}$ kg)以上になると、微惑星から H_2O をはじめとする揮発性成分が衝突脱ガスを開始し、それが重力的に束縛され始める。それと並行して、原始惑星は星雲ガスを重力的に捕獲し始める[例えば、12, 13]。このことから、上層に星雲ガス成分、下層に脱ガス成分からなる、いわゆる混成型原始大気が火星を含む原始惑星上に形成された可能性がある[14]。

原始大気の保温効果により地表面温度が岩石の融点を超えるとマグマオーシャンが形成される。マグマには水蒸気を吸収する性質がある[例えば15]ため、マグマオーシャンへの溶解により原始大気中の水蒸気が内部へ取り込まれる[16]ものと期待される。

もし星雲ガス成分と脱ガス成分が互いに混合しなければ、惑星内部のD/H比は微惑星のそれにほぼ一致するであろう。一方、混合が起こる場合には、低いD/H比をもった水が惑星内部に取り込まれる可能性がある。この低いD/H比の水は、星雲ガス成分の混合によるD/H比の低い水素が脱ガス成分由来の水蒸気との間で進行する同位体交換反応



によって生成すると予想される。高温高压下における平衡定数は ~ 1 であり、なおかつ平衡に至るタイムスケールは集積のそれに比べて十分に短い[3]。そのため、混合が起きる場合の水のD/H比は対流混合によって平均化された水素のD/H比と同程度になると考えら

れる。その他、惑星の材料物質に FeO 等の酸化物がマグマオーシャンに含まれる場合でも、水素との酸化還元反応により星雲ガス成分のD/H比を反映する水が生成すると考えられる[13, 17]。このように、原始大気の混合が起きるか起きないかの違いが、地球と火星の初生水のD/H比の差をもたらしたのかもしれない。以下では実際にその可能性があることを、原始大気構造の対流安定性の解析から示してゆく。

2. 混成型原始大気モデル

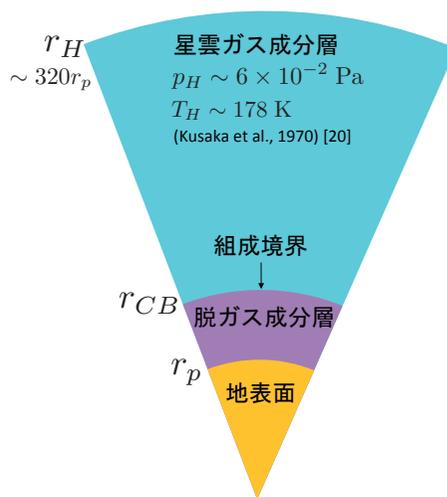


図1: 混成型原始大気構造を示す概略図。上層が星雲ガス成分、下層が脱ガス成分からなる。 r_H はヒル半径、 r_{CB} は組成境界高度、 r_p は惑星半径である。火星を想定した典型的な数値として、 $r_H/r_p \sim 320$ 、 $r_{CB}/r_p \lesssim 2$ である。

原始大気はSaito and Kuramoto(2018)[14]と同様のモデルを採用する。詳しくは[14]およびそこの引用文献を参照されたい。混成型原始大気は上層に星雲ガス成分、下層に衝突脱ガス成分の2層からなる(図1)。また大気構造は、成層圏および対流圏からなる一次元放射対流平衡構造を仮定する。大気上端をヒル半径にとり、星雲ガス大気層と脱ガス大気層の境界は圧力的になめらかに接続する。両層は ~ 5 倍の密度差があることから、互いに混合しないものとまずは仮定する。組成境界の位置を決定するためには、集積物質中の揮発性成分濃度と惑星集積率を与え大気構造を計算する必要がある。

星雲ガス成分は H_2 とHeからなり、その割合は太陽

組成と等しい。また，星雲ガス中の水素分子のD/H比は 2.1×10^{-5} とした[1]。

原始惑星の材料物質として，二成分モデル[18]を採用し，ここでは火星を想定し，揮発性物質に富み酸化炭素質コンドライト様物質35%と，揮発性物質に枯渇し還元的なエンスタタイトコンドライト様物質65%からなると仮定した。そしてこれらの物質が形成期をとおして一様に集積する，いわゆる均質集積を仮定した。この場合，還元剤として振る舞う金属鉄が常に供給されるため，集積中の脱ガス成分は還元になる。原始惑星材料物質中のH/C比(=5)を与え，微惑星衝突時に実現される典型的な温度(2000 K)，圧力(100 bar)下での化学平衡計算をしたとき，脱ガス成分の組成は $\text{H}_2\text{O} : \text{H}_2 : \text{CO} : \text{CH}_4 = 0.15 : 0.45 : 0.20 : 0.20$ となる[19]。このとき脱ガスする H_2O および H_2 のD/Hは炭素質コンドライトの代表的な値である 1.6×10^{-4} とする。二成分モデルにそのまま従うと，単位質量あたりの脱ガス成分濃度 f_{deg} は ~ 4 wt%を得る。ただし，材料物質中の揮発性成分は集積前に一部失われる可能性があることも考慮し，本研究では f_{deg} をパラメータとして扱う。

3. 混成型原始大気が混合する条件

混成型原始大気の組成成層状態が崩れ，星雲ガス成分と脱ガス成分が対流混合する条件について考える。拡散や微惑星衝突，その他の過程による混合は，少なくとも火星質量の原始惑星ではそれほど効率的ではないと推定される[14]。対流混合は，組成成層の仮定の下で組成境界高度よりも上方に対流圏界面が存在する場合に起きると仮定する。ここでは，化学組成勾配の存在による対流混合の抑制の可能性については無視した。このような混合を経た状態の大気を混合型原始大気と呼ぶことにする。

混合型原始大気が形成される条件を調べるために，まずは全大気が星雲ガス成分のみで構成される場合を考え，どの位置に対流圏界面が生じるかを考える。図2は，大気全層が星雲ガス成分で構成される場合の対流圏界面半径 r_p と惑星質量 M_p の関係を示している。集積率が $1/3 M_M \text{Myr}^{-1}$ (M_M : 火星質量)の場合，惑星質量が $\sim 0.8 M_p/M_M$ 以下のとき星雲ガスのみの大気では対流は生じない。それ以上の惑星質量に達すると，

重力的に束縛される星雲ガス成分が多くなり，光学的に厚くなって星雲ガス成分のみの大気でも対流が発生する(図2)。

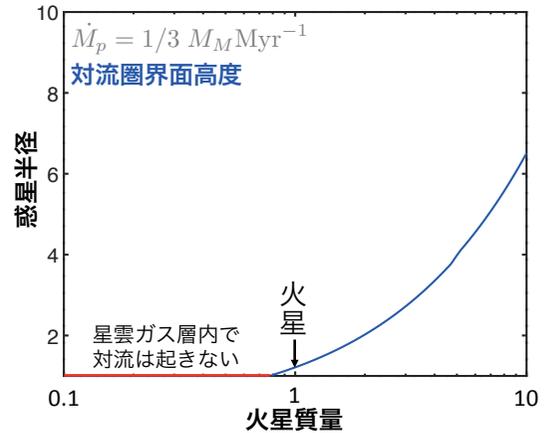


図2: 対流圏界面高度と惑星質量の関係。実線は対流圏界面高度を表す。

次に，脱ガス成分大気を下層に加えた場合を考える。純粋な星雲ガス層の構造は，放射フラックスとヒル半径での境界条件で決まるため，完全な組成成層の仮定の下では，下層を脱ガス層に置き換えても，星雲ガス大気部の構造は維持される。上記で求めた純星雲ガス大気の対流圏界面以下に組成境界が位置すれば，組成境界をまたぐ対流混合が生じて混合型原始大気が形成し，その逆の場合は混成型原始大気が維持される。つまり，組成境界高度が対流圏界面高度に一致する場合の脱ガス成分の大気質量が原始大気のタイプを分ける閾値となる。図3は，脱ガス成分の大気質量を材料物質の揮発性成分濃度に焼き直したときの閾値と惑星質量の関係を示している。1火星質量の場合， $f_{\text{deg}} \leq 0.1$ wt%なら対流混合が起き，混合型原始大気が生じる。それよりも惑星質量が大きい場合には，比較的容易に混合型原始大気が形成する。地球軌道は火星軌道よりも太陽に近いことから，材料物質中の揮発性成分は少ないと考えられるが，火星の二成分モデルを想定した揮発性成分濃度(4 wt%)を与えた場合でも，惑星質量 $\leq 1.5 M_M$ までしか混成型原始大気を維持できない。それ以上の惑星質量の場合は混合型原始大気が形成し，D/H比が低下することが示唆される。

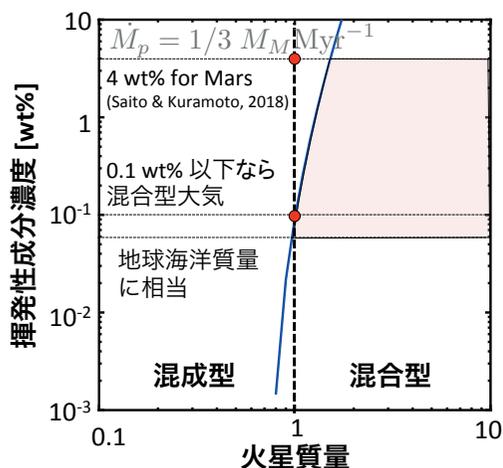


図3: 揮発性成分濃度 f_{deg} と惑星質量の関係。実線は対流圏界面に相当する。火星の材料物質として二成分モデル[18]を採用したときの f_{deg} は4 wt%である。地球の材料物質に対しても二成分モデルを適用すると、 f_{deg} は1 wt%程度となる。ただし、この値にもかなりの不確実性があることには注意が必要である。少なくとも現在の海洋質量以上は存在したはずである。また地球内部には海洋質量の数倍ちかい水分が含有している可能性も指摘されていることから[21]、地球の材料物質中の揮発性成分濃度の値は $0.06 < f_{deg} [\text{wt}\%] < 1$ とした。

4. 原始大気のD/H比の惑星質量依存性

前節の結果から概ね火星質量より大きな原始惑星の場合、混合型原始大気が形成する可能性があることがわかった。混合した下層大気のD/H比を見積もるためには、星雲ガス成分がどの程度の割合で混合するかを調べる必要がある。そこで、まず完全に組成成層した原始大気構造を求め、そして対流圏界面から組成境界までに存在する星雲ガス大気層中の水素分子が、脱ガス大気層中の水素分子および水分子と対流により十分に混合すると仮定して、混合大気層の平均D/H比と評価する。

集積率を固定した場合の、原始大気下層(条件により純脱ガス大気ないしは混合大気)のD/H比の惑星質量依存性を図4に示す。惑星質量が~1火星質量以下の場合、 f_{deg} によらず原始大気下層は炭素質コンドライト的なD/H比をもつ。惑星質量が大きくなるに従って、星雲ガス成分はより顕著に混合するようになり、下層大気のD/H比は星雲ガスの値に近づく。 $f_{deg} = 4$ wt%の場合でも、原始惑星質量が十分大きければ下層大気のD/H比は $\sim 4 \times 10^{-5}$ となる。 $f_{deg} < 0.1$ wt%に

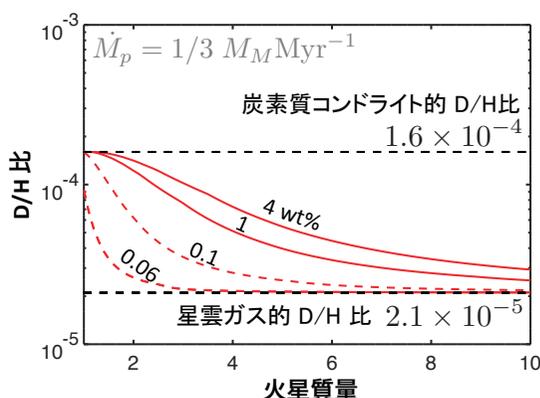


図4: 下層大気のD/H比の原始惑星質量依存性。(集積率: $1/3 M_M/\text{Myr}$). 曲線はそれぞれ揮発性成分濃度4, 1, 0.1, 0.05 wt%を与えた場合を表す。

おいては、数火星質量に達した時点でほぼ星雲ガスと等しいD/H比を取るようになる。

次に集積率を0.01から $1 M_M/\text{Myr}$ まで変化させた場合の原始大気下層のD/H比と原始惑星質量の関係について示す(図5)。1.5火星質量以上に達する頃にはどの f_{deg} の値の場合でもD/H比は $< 1.6 \times 10^{-4}$ となり、混合型原始大気が形成することがわかる。図中の 1.6×10^{-4} と記した破線より左側領域ではD/H比は 1.6×10^{-4} に等しいこれは混成型原始大気を維持していることを意味する。惑星質量が大きくなるほどD/Hは低下する一方、集積率が高いほど、D/H比の低下が鈍くなる傾向が見取れる。これは集積率が高くなることで、脱ガス成分大気層が熱的に膨張し組成境界が上方に位置するようになるためである。結果として混合層に取り込まれる星雲ガス大気量が減少することで、D/H比の低下が抑制される。

今回与えた f_{deg} の範囲の場合、寡占成長を終え火星質量程度に達した原始惑星上に形成する原始大気のD/H比はほぼ炭素質コンドライト的な値をとることがわかった。このことは、先に述べた火星隕石が示す岩石学的証拠と矛盾しない。集積中に星雲ガスが完全に晴れてしまった場合でも、内部のD/H比は炭素質コンドライト的なD/H比を示すことになる。

惑星形成論によれば、地球は複数個の原始惑星が互いに巨大衝突を繰り返して現在の質量へ至った。地球

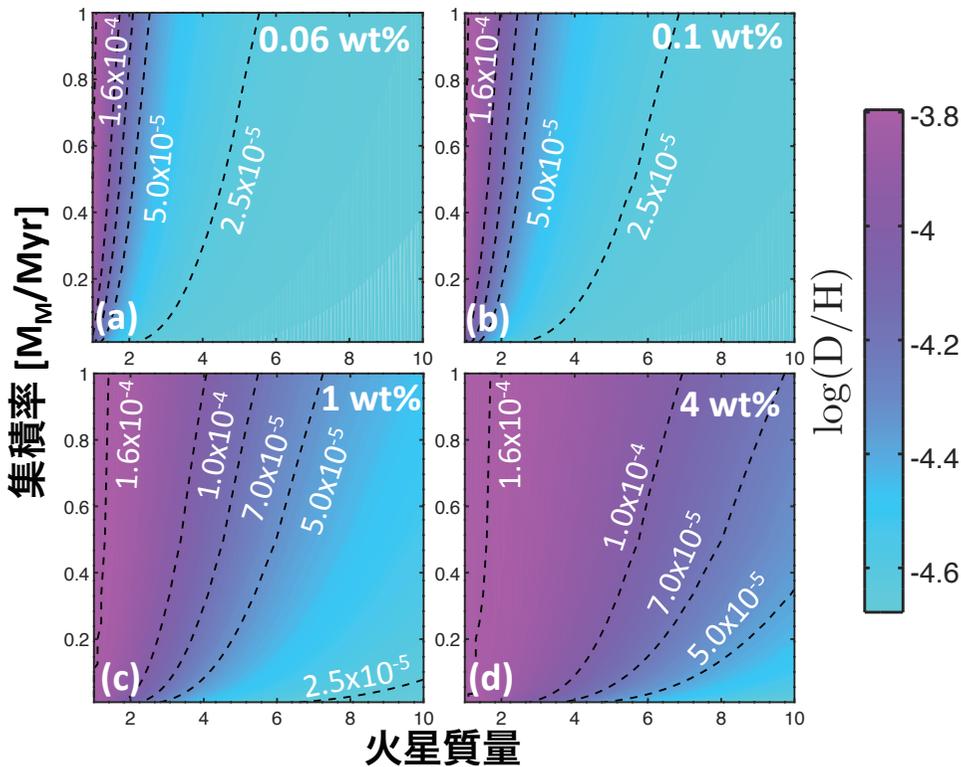


図5：集積率を変化させた場合の原始大気下層のD/H比と原始惑星質量の関係。集積率は0.01から1 M_M /Myr，惑星質量は $1 \leq M_p/M_M < 10$ までをとった。また，揮発性成分濃度は0.06, 0.1, 1, 4 wt%を与えた。

のもとになった原始惑星の場合も1火星質量のときの原始大気下層のD/H比はコンドライト的な値を示すが，2火星質量あたりから急激にD/H比は星雲ガス成分の値に漸近する。集積率にもよるが， $f_{deg} < 0.1$ wt%の場合だと，2火星質量程度でD/H比は星雲ガスの値とほぼかわからない値を持つようになる。 $f_{deg} = 1$ wt%のとき，2火星質量でマントル深部由来の火山岩のD/H比($\sim 1.2 \times 10^{-4}$ [2])と同程度の値を持つ。 $f_{deg} = 4$ wt%の場合，脱ガス大気質量が多いため，D/H比の減少は他に比べて顕著には認められない。ここまでの議論では，背景大気として星雲ガスが存在していることを前提としていたが，星雲ガスが晴れてしまっている状況では，大気成分は脱ガス成分のみになるのでD/H比は炭素質コンドライト的な値をとると予想される。なおこの計算例では，星雲ガスの圧力と温度は固定した地球軌道では，火星軌道における値よりも高い星雲ガス圧力が期待されるが，これは星雲ガス層の不透明度を増加させ，より対流攪拌を促進する効果を

持つと考えられる。その程度についてはより詳しい研究が必要である。

5. 原始惑星内部のD/H比

惑星内部のD/H比が集積期に形成する原始大気によって決定されるとして，その場合どのような過程で決まったのか。今回想定した揮発性成分濃度の範囲($0.06 < f_{deg} [\text{wt}\%] < 4$)では，火星サイズの原始惑星上には，脱ガス成分と星雲ガス成分の組成成層が維持され得る。

揮発性成分濃度が0.1 wt%以上のとき，混合型原始大気の保温効果によって地表面温度が岩石融点を超える[14]。従って，火星の場合は，集積中に脱ガス成分と星雲ガス成分の混合が抑制され，組成成層が維持され続けた結果，下層大気の水や水素の一部が内部に分配され，炭素質コンドライト的な値を獲得した可能性がある。

一方、微惑星の揮発性成分濃度には高い不定性があり、今回想定した範囲よりもさらに低い可能性もある。例えば、惑星質量が1火星質量の場合でも、揮発性成分濃度が ≤ 0.1 wt%であれば、対流混合が生じD/H比は星雲ガスの値を取るようになる。しかしながら揮発性成分濃度が低すぎると、マグマオーシャンを形成するほど大気は高温にならず[14]、原始大気の保温効果のみでは火星隕石が示唆するような形成段階初期でコア・マンツルの分化は起きない。ただし集積時間が十分短ければ、短寿命放射性核種による内部融解と分化は起こりうる[14]。この場合、地表面は融解していないため原始大気から惑星内部への水の取り込みは抑制されるであろう。そして火星内部の水は、主に微惑星に由来するものとなると考えられる。この場合も火星内部はコンドライト的なD/H比を獲得する。

地球のもととなった原始惑星の典型的な質量は概ね月質量～火星質量と見積もられているが、微惑星の面密度によってはこれよりもやや大きな質量も取り得る。例えば、1.5火星質量程度の原始惑星が地球軌道付近存在する場合を考えてみよう。海洋質量と同程度の水が含まれる揮発性成分濃度(0.06 wt%)の場合、集積率にもよるが、D/H比は $\sim 7 \times 10^{-5}$ 、二成分モデルから推定される揮発性成分濃度(1 wt%)の場合でも、 1.2×10^{-4} とD/H比の低下が期待される(図5)。またこれらのケースでは、地表面温度は岩石の融点を超え、惑星内部に効率的に原始大気成分を取り込むことができる。このように地球の場合は、火星よりも多少大きな原始惑星が形成し、その頃に星雲ガスを内部に取り入れたのかもしれない。

6. まとめ

星雲ガス成分と脱ガス成分の組成境界と対流圏界面の位置を比較することで、脱ガス成分と星雲ガス成分からなる原始大気の組成成層の対流安定性について議論した。火星質量程度の原始惑星の場合、揮発性成分濃度が0.1 wt%以上であると組成成層が維持される。この場合、原始惑星内部は、主に微惑星由来の水を取り込み、コンドライト的なD/H比を獲得すると予想される。一方、火星質量を ~ 50 %以上上回る原始惑星の場合、星雲ガス大気を重力的に束縛する量が急激に増えることから、星雲ガス大気層で対流が発生し、

結果として混合型原始大気が形成する。この場合、下層大気のD/H比は星雲ガス由来の値に近づく。2火星質量に達する前には、地球始原マンツルのD/H比の報告値($\leq 1.2 \times 10^{-4}$)[4]程度まで原始大気のD/H比は低下する。地球は火星質量よりもやや大きな原始惑星段階を経ることによって、低いD/H比を持った水を原始大気から内部に取り込んだ可能性がある。

謝辞

本稿執筆にあたり、有意義な査読意見を頂きました玄田英典博士ならびに黒川宏之博士に感謝致します。

参考文献

- [1] Geiss, J. and Gloecker, G., 1998, Sp. Sci. Rev. 84, 239.
- [2] Robert, F. et al., 2000, Sp. Sci. Rev. 92, 201
- [3] Genda, H. and Ikoma, M., 2008, Icarus 194, 42.
- [4] Hallis, L. J. et al., 2015, Science 350, 795.
- [5] Jackson, M. et al., 2010, Nature 466, 853.
- [6] Usui, T. et al., 2012, Earth Planet. Sci. Lett. 357, 119.
- [7] Hallis, L. J. et al., 2012, Earth Planet. Sci. Lett. 359, 84.
- [8] Watters, T. R. et al., 2006, Nature 444, 905.
- [9] Dauphas, N. and Pourmand, A., 2011, Nature 473, 489.
- [10] Kobayashi, H. and Dauphas, N., 2013, Icarus 225, 122.
- [11] Kita, N. T. et al., 2005, ASP Conference Series 341, 558.
- [12] Hayashi, C. et al., 1979, Earth Planet. Sci. Lett. 43, 22.
- [13] Ikoma, M. and Genda, H., 2006, Astrophys. J. 648, 696.
- [14] Saito, H. and Kuramoto, K., 2018, Mon. Not. R. Astron. Soc. 475, 1274.
- [15] Fricker, E. and Reynolds, T., 1968, Icarus 9, 221.
- [16] Matsui, T. and Abe, Y., 1986, Nature 319, 303.
- [17] Sasaki, S., 1990, in Origin of the Earth.
- [18] Dreibus, G. and Wanke, H., 1987, Icarus 71, 225.
- [19] Kuramoto, K., 1997, Phys. earth Planet. Inter. 100, 3.
- [20] Kusaka, T. et al., 1970, Prog. Theor. Phys. 44, 1580.
- [21] Murakami, M. et al., 2002, Nature 295, 1885.