

地球の海水の起源

生駒大洋^{*,*}・玄田英典^{*}

Origins of Sea Water on the Earth

Masahiro IKOMA^{*,*} and Hidenori GENDA^{*}

Abstract

Although the mass of oceans on the Earth is a tiny fraction (0.023 wt%) of the bulk Earth mass, the existence of oceans is sufficient to distinguish the Earth from the other planets in the solar system. Water is essential for the origin and evolution of life, the stability of the surface environment, and the evolution of the planetary interior. At present, we have no definite answers to fundamental questions about the origins of water on the Earth. The process by which water was supplied to the Earth is thought to be closely related to the dynamics of the solar system. Because of several uncertainties about the planet formation process (the position of the snow line in the solar nebula, the lifetime of the nebula gas, the timing of the formation of Jupiter, etc.), the origins of the Earth's oceans are still much in question. In this paper, we describe several possible sources of the Earth's water in the solar system and possible processes by which water was supplied to the Earth. Within the context of the modern theory of planetary formation, we discuss several scenarios for the origins of the Earth's oceans.

Key words : origins of oceans, planet formation, solar nebula, water

キーワード : 海の起源, 惑星形成, 原始太陽系円盤, 水

I. はじめに

地球は「水の惑星」とよく言われるが、海の質量 (1.4×10^{21} kg) は地球全体 (6.0×10^{24} kg) のわずか 0.023 wt% でしかない。そんな小さな存在である海の起源を、なぜ惑星形成論者がわざわざ考えなければならないのか。確かに、液体の水は生命現象をつかさどる化学反応の場を提供することからわれわれ生命にとって必須の物質である。また、水は、地球の表層環境を支配し、プレート運動・マントル対流といった地球内部の活動や熱的な進化にも重要な役割を果たしている

考えられている。こうした意味で、水は重要な存在であると言える。しかし、惑星形成論者は、太陽系の 8 個の惑星¹⁾の一つとそこに住む生命にとって重要だから、海の起源を解明したいと思うのだろうか。恐らくそれだけではないだろう。なぜならば、以下で解説するように、地球の海の起源は、太陽系全体の形成過程と密接に関係している極めて重要な問題であるからである。

地球の海の起源、およびそれと密接に関係する大気の起源の研究は、現在転換期にあると言える。この問題は、1980年代に主に日本のグループによって精力的に研究された。もっともよく知

* 東京工業大学地球史研究センター

* 現所属：東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻

* Research Center for the Evolving Earth and Planets, Tokyo Institute of Technology

* Present address: Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

られている理論モデルは、阿部と松井 (Abe and Matsui, 1986; Matsui and Abe, 1986) によって提唱された、いわゆる「衝突脱ガスモデル」であろう (IV 章参照)。このモデルは地球の海の質量が必然であると結論付けた点で美しく、海の起源は解明されたかのように思えた。しかし、1990 年代以降のコンピューター技術の発展とそれに伴う惑星形成論の大幅な修正によって、現状では、その結論をそのまま受け入れることはできない状況となってきた。

本論文では、地球の海の起源に関する理論的研究の現状を解説する。まず、II 章では、地球の水の起源物質の候補を列挙し、それらの化学的・同位体的特徴をまとめる。III 章では、惑星形成の初期条件および惑星形成過程の最新の理解について解説する。IV 章では、水の起源物質を宇宙空間から地球に持ち込む力学的プロセスを解説する。V 章では、II 章から IV 章の内容を総合して、地球の海水の起源を議論する。また、VI 章では、地球以外の天体、特に金星と火星の水について簡単に紹介する。最後に、VII 章では、残された課題と今後の展望について述べる。

II . 地球の水の起源物質

地球の水 (海) はどこからやってきたのだろうか。地球の水を詳細に調べるだけではこの問いに答えることはできないだろう。地球の水と地球外の水を比較検討することによって初めて、その答えに近づくことが可能である。地球に水を供給した源が現在も存在しているとは限らないが、そのような場合でも理論的な推察は可能である。この章では、地球に水を供給した可能性のある三つの供給源について解説する。

1) コンドライト隕石

地球外物質の中で、我々が直接手にできる代表的なものは地球に降ってきた隕石である。これまでにさまざまなタイプの隕石が確認されているが、ここでは水を含む隕石であるコンドライト隕石について述べる。

コンドライト隕石は、コンドルールと呼ばれるケイ酸塩の小球を特徴的に含む始原的な隕石であ

り、46 億年前に形成した姿をそのまま残していると考えられている。コンドライト隕石は、金属鉄・アルミニウム・カルシウムの含有量や酸素同位体比などから「炭素質コンドライト」、「普通コンドライト」、「エンスタタイトコンドライト」の三つに分類される。炭素質コンドライトは非常に酸化的な隕石で、鉄のほとんどが酸化されており、金属鉄は含んでいない。また、水・有機物・硫黄などの揮発性の高い物質を多く含んでいるという特徴を持つ。一方、エンスタタイトコンドライトは非常に還元的であり、鉄のほとんどは金属鉄と少量の FeS として存在している。普通コンドライトはその中間的な状態にある。普通コンドライトおよびエンスタタイトコンドライトは、炭素質コンドライトに比べて含水量は少ないが、平均的には微量に水を含む。

図 1 で、地球の含水量とコンドライト隕石の含水量の推定値を比較した。この図から、地球を形成した材料がすべて含水量の低いエンスタタイトコンドライトであったとしても、地球の海水量が説明できることがわかる。また、地球全体がコンドライト隕石でなくても、ほんの数%の炭素質コンドライトが地球に供給されただけで、現在の地球の海水量は説明可能であることもわかる。一方で、地球を形成した材料がすべて普通コンドライトや炭素質コンドライトであった場合、地球の含水量よりもずっと多量の水が供給されてしまうということもわかる。

地球の海水の起源の指標として、水素と重水素の比 (D/H) がよく用いられる。現在の地球の海の D/H は 1.56×10^{-4} (De Wit *et al.*, 1980) である。それに対して、炭素質コンドライトの D/H は $1.5 \pm 0.5 \times 10^{-4}$ (Robert, 2003) であり、両者はよく一致している。このことから、地球の海水の起源が炭素質コンドライト中の水であると考えられる研究者は多い。しかし、上部マントルの Os 同位体比が炭素質コンドライトのものとは異なっている (Drake and Righter, 2002) など問題点も指摘されている。

2) 彗星

彗星の大部分は揮発性の高い物質で構成されて

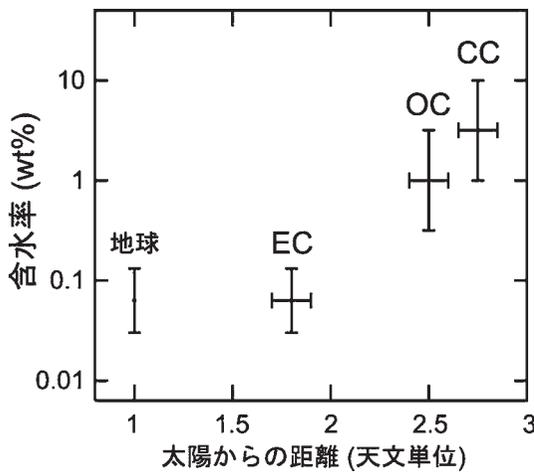


図 1 炭素質コンドライト (CC)、普通コンドライト (OC)、エンスタタイトコンドライト (EC)、および地球の含水率と太陽からの距離 (参照 Raymond *et al.*, 2004)。ただし、地球の含水率には地球内部の含水量の推定値を含めた。

Fig. 1 Water contents of carbonaceous chondrites (CC), ordinary chondrites (OC), enstatite chondrites (EC), and the Earth, including water in the interior, as functions of heliocentric distance (data from Raymond *et al.* 2004)

いる。主要成分は H_2O (約 80 wt%) であり、さらに $CO \cdot CO_2 \cdot CH_4 \cdot NH_3$ ・岩石物質などを含むことが観測的に推定されている (例えば, Delsemme, 1988)。そして、彗星の D/H は、三つの彗星(ハレー彗星, ヘールボップ彗星, 百武彗星)で観測されており、地球の海水の D/H よりどれも約 2 倍高いことがわかっている (例えば, Drake and Righter, 2002)。したがって、地球の海水がすべて彗星から供給されたと仮定すると、地球の海水の D/H が現在の値よりも 2 倍ほど大きくなってしまおうという問題が生じる。この問題を解決するためには、海水の D/H を下げる何らかのメカニズムが必要であるが、有力なメカニズムは今のところ提唱されていない。しかし、観測された三つの彗星の D/H が彗星全体を代表しているのかどうかは明らかではない。

3) 原始太陽系円盤ガス

現在は存在しないが、形成時の太陽系に充満していたと考えられる原始太陽系円盤ガスも水の供給源の一つである。次章で述べるように、原始太陽系円盤ガスの化学組成は太陽の組成と近かったと考えられる。太陽の化学組成は太陽光球面のスペクトル観測から得られている。太陽の大部分 (98 wt%) は水素とヘリウムからなり、続いて存在度の高い順に $O \cdot C \cdot Ne \cdot Si \cdot Mg$ である。原始太陽系円盤は太陽に比べて非常に低温であるため、酸素は Si や Mg と結びつき鉱物として存在し、残りの酸素は水素と結びつき H_2O として存在したと考えられる。太陽光球面の組成から H_2O は円盤ガス全体の 1-2 wt% 程度を占めていたと見積もられる。したがって、現在の海水質量の 50-100 倍の原始太陽系円盤ガス ($0.7 - 1.4 \times 10^{23}$ kg) が地球に供給されれば、海水量を説明することができる。詳細は次章で扱うが、原始太陽系円盤ガス中で惑星が形成された場合、惑星は重力によってこの円盤ガスを捕獲する。さらに、円盤ガスをまとうと地表面が高温となり、マントル中の酸化物 (例えば, FeO) によって H_2 が酸化され、さらに大量の水が形成される可能性がある。

原始太陽系円盤ガス中に存在していた水分子の D/H は、原始太陽系円盤の物理化学条件 (温度や圧力など) に依存するため推定は容易ではない。しかし、重水素が水素分子よりも水分子に濃集しやすいという実験事実 (Robert *et al.*, 2000) から、水分子の D/H は水素分子より数倍高かったことが推察される。これに対して原始太陽系円盤ガスの水素分子の D/H は観測から、現在の地球の海の D/H よりも 5-7 倍小さいことがわかっている (Geiss and Gloeckler, 1998)。したがって、上で述べたように円盤ガスの水素から水が生成した場合、現在の海水との D/H の大きな違いが問題となる。これに関しては、後で詳しく述べる。

III . 惑星形成の現代的描像

前章では、考え得る水の供給源について述べた。次に問題となるのは、それらの地球への供給プロセスである。それは、惑星形成のダイナミク

スと密接に関連している。そこで、本章では、惑星形成の現代的描像について解説する。

惑星形成の詳細な描像が明らかになったのは、いくつかの要因が挙げられる。その一つがコンピューター性能の向上である。以前は、主に解析的もしくは統計的な手法によって形成過程が議論されてきた。しかし、惑星の軌道進化・合体成長が直接的に計算可能(いわゆる N 体シミュレーション)となったことによって、惑星の形成過程、特に統計的な手法では再現できない形成後期過程が詳細にわかるようになった。また、天体観測が非常に発展し太陽系外の惑星が数多く発見されたことも、惑星形成論の発展に大きな影響を与えた。系外惑星をテストケースとして、これまで太陽系で議論されてきた惑星形成の素過程を吟味し、惑星形成論をより堅実なものにしていくことが可能となった。さらに、隕石などの精密かつ局所的な分析が行われるようになり、太陽系誕生時の環境がより詳細にわかるようになったことも惑星形成論の発展に大きな役割を果たしてきたと言える。

1) 原始太陽系円盤と微惑星

星は、星間ガスの高密度部分(「分子雲コア」と呼ばれる)が収縮してできたガスの塊である。分子雲コアは回転しながら収縮する。その結果、原始の星の周りにはガス円盤が形成される。この円盤は、その形成過程からわかるように、星とほぼ同じ元素組成を持つ。太陽の場合、水素とヘリウムが 98 wt% を占め、残りの 2 wt% が炭素・酸素・ケイ素・鉄などのいわゆる「重元素」²⁾ である。このわずかな量の重元素が集まって地球型惑星(水星・金星・地球・火星)ができる。

この原始太陽に付随したであろう円盤状のガスは「原始太陽系円盤(ソーラーネビュラ)」と呼ばれる。こうした円盤の存在は、かつては理論的な仮説(Hayashi, 1981)であったが、最近では、例えばハッブル宇宙望遠鏡が撮影した原始星の写真から、原始星を取り巻くガス円盤の存在を直接確認することができる。

原始太陽系円盤の初期段階では、円盤ガスは原始星へ激しく降着する。その際に解放される重力

エネルギーによって円盤は高温状態にあり、少なくとも水などの揮発性の高い分子はガスとして存在する。降着率の減少に伴って円盤は徐々に冷え、円盤内でさまざまな分子の凝縮が起き、ダストが生成する。地上望遠鏡による円盤の赤外観測によって、こうしたダストの存在が確認されており、その典型的なサイズは μm である(例えば、Beckwith and Sargent, 1996)。

生成されるダストの組成は、主に原始太陽系円盤内の温度分布によって決まる。原始太陽に近い領域では温度が高いため、シリケートや鉄などのみが凝縮しダストを構成する。それらに比べて凝縮温度が低い水などの揮発性の高い物質はガスとして存在しダストには取り込まれない。一方、原始太陽から遠い低温領域(典型的には 170 K 以下の領域)では、水などの揮発性の高い物質も凝縮しダストに取り込まれる。この二つの領域の境界は「雪限界線(スノーライン)」と呼ばれる(例えば、Sasselov and Lecar, 2000)。

そのスノーラインの位置に関しては、まだ議論が分かれている(図 2)。よく知られている林モデル(Hayashi, 1981)では、スノーラインは 2.7 天文単位(AU)³⁾に位置する。林モデルの温度分布は、原始太陽からの直接の輻射によって決まる。これを「光学的に薄い円盤」という。一方、原始太陽系円盤には多量のダストが存在し、そのダストによって太陽輻射は遮られるという考え方もある。これを「光学的に厚い円盤」という。後者の考え方に基けば、原始太陽系円盤の温度は低く、スノーラインは 1 AU 付近であった可能性もある(Chiang and Goldreich, 1997; Sasselov and Lecar, 2000 ほか)。ダストの光学特性はサイズに敏感である。 μm サイズの頃は、太陽輻射をよく遮る。したがって、円盤形成初期は光学的に厚い円盤であったと考えられる。その後、ダストが互いの付着によって成長し、サイズが大きくなると、太陽輻射を遮る効率が低下し、光学的に薄い円盤へと移行する。したがって、惑星形成(以下で述べる微惑星形成)が開始する段階のスノーラインの位置が重要であるが、それに関する詳細な研究はまだなされていない。

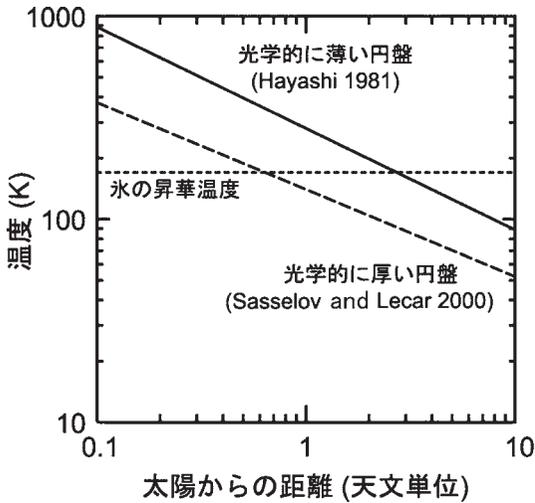


図 2 光学的に薄い円盤 (Hayashi, 1981) と厚い円盤 (Sasselov and Lecar, 2000) の温度分布の例。

Fig. 2 Examples of temperature distributions in an optically thin disk (Hayashi, 1981) and an optically thick disk (Sasselov and Lecar, 2000).

これらのダストが集まって「微惑星」と呼ばれる数 km サイズの始原天体が形成される。スノーラインよりも内側に形成される微惑星は岩石を主成分とし、スノーラインよりも外側で形成される微惑星の主成分は氷である。微惑星のほとんどは惑星になったと考えられるが、小惑星帯に存在する隕石母天体、太陽系外縁部に存在する海王星以遠天体（短周期彗星の源）、さらにその外周で球殻状に分布していると考えられているオールト雲（長周期彗星の源）などが微惑星の残りであると考えられている。微惑星の形成過程に関しては、ダスト同士の衝突によって付着成長したという説とダスト層が重力不安定によって分裂したという説がある。どちらの説が正しいかはいまだ激しい論争が続いている（例えば、Sekiya and Takeda, 2005）。ここでは紙幅の都合上、その論争については触れないことにする。

2) 惑星成長過程

ひと言で言えば、微惑星の衝突と合体の繰り返しが惑星成長過程である。初期の成長過程とし

て、以下で説明する「秩序的成長」と「暴走的成長」の二つのモードが考えられる。簡単のために、すべての微惑星が初期に同じ質量であったとしよう。二つの微惑星が衝突・合体し、質量が2倍になる。さらに、質量が2倍になった微惑星同士が衝突・合体し、その質量が2倍になる。これがあらゆる領域で起こり、微惑星集団全体として横並びで成長の進むモードが「秩序的成長」である。一方、衝突合体して質量を増した微惑星が、残っている小さな微惑星を集めて、選択的に成長するモードが「暴走的成長」である。実際の惑星成長は後者のモードで進行することが知られている (Wetherill and Stewart, 1989)。それは、重力的な引きつけの効果のために、質量の大きな天体ほど実効的な衝突断面積が大きいからである。結果的に、惑星成長初期では、(局所的には) 暴走的成長を始めた一つの大きな天体と多数の小さな微惑星が存在する状態が達成される。以下、暴走的に大きくなった天体を「原始惑星」と呼ぶことにする。

暴走的成長モードでは、その名が与える印象どおり、原始惑星は非常に速く成長することができる。その成長率は微惑星の初期存在量と太陽からの距離に依存するが、標準的な円盤モデル（最小質量太陽系円盤モデル: Hayashi, 1981）の1 AU付近では、約10万年で火星質量程度に、約20万年で地球質量程度にまで成長する。

しかし実際は、暴走的成長は長続きしない。原始惑星がある程度大きくなると、その強力な重力によって、今度は周囲の微惑星を散乱し、微惑星の原始惑星に対する相対運動を激しくする。その結果、微惑星は原始惑星に捕らわれにくくなる。つまり、原始惑星が大きくなるほど成長率が下がるという新しい段階に入る (Ida and Makino, 1993)。最初に大きくなった原始惑星がこの段階に入ると、別の場所で遅れて成長を開始した原始惑星がその原始惑星にどんどん追いついてくる。結果的に、地球型惑星領域にいくつもの原始惑星が形成され始める。この段階は原始惑星の「寡占的成長段階」と呼ばれる (Kokubo and Ida, 1998, 2000)。

原始惑星システムへの外的な影響（例えば、木星や土星などの重力的摂動）がなければ、それぞれの原始惑星がそれぞれの勢力範囲の微惑星を集積しつつ、その成長を終える。このときの質量は「孤立質量」と呼ばれる。最小質量太陽系円盤モデルでは、典型的な孤立質量は地球質量の約10%、つまり火星質量程度である。このように、原始惑星が微惑星を集めて成長するというモードでは、現在の地球や金星のような惑星サイズには到達しない。したがって、地球型惑星集積の最終段階では、原始惑星同士の衝突によって惑星成長が進む。この段階を「巨大衝突段階」と呼ぶ。よく知られているように、こうした巨大衝突の結果、月が形成されたと考えられている (Ida *et al.*, 1997)。

このように、ここ10数年の間に、地球型惑星形成（特に、形成後期段階）の理解が大幅に進んだ。しかし、巨大天体衝突段階で原始太陽系円盤ガスが残っていたのかどうかという問題や、そのときすでに木星が形成していたかどうかという問題など、まだ解決されていない問題もある。そしてそれらのことは、地球の水の起源を考える上で極めて重要なことであることがV章でわかる。

IV. 水供給のプロセス

1) 集積中の微惑星の衝突脱ガス

まず、地球軌道付近に存在した微惑星に水が含まれていた場合を考える。その場合、地球に衝突する微惑星から水が脱ガスし、水蒸気を主体とする大気が形成される (Abe and Matsui, 1986; Matsui and Abe, 1986)。その水蒸気大気は、原始太陽系円盤ガスが完全に散逸してしまった状況では、微惑星の集積が止むとすぐに冷却し、海を形成する。

水を含んだ岩石が高速で衝突すると、その衝撃による加熱によって岩石から水が脱ガスする。その衝突速度の閾値は実験的に得られている (Lange and Ahrens, 1982)。一方、質量の大きい原始惑星ほど強い重力で微惑星を引きつけるので、微惑星の衝突速度は大きくなる。その衝突速度と原始惑星の質量の関係は簡単な関係式で記述

することができる。この二つの事実から、原始惑星が月程度 ($\sim 10^{23}$ kg) の大きさにまで成長すると、衝突した微惑星から水が脱ガスし始めることがわかる。したがって、微惑星の衝突合体で月程度の大きさになると、惑星は水蒸気の大気を持ち始める。

水蒸気は強力な温室効果ガスであるため、微惑星の衝突脱ガスで地表に水蒸気が蓄積していくと、微惑星の衝突で解放されたエネルギーが宇宙空間へ逃げにくくなり、地表面温度が上昇していく。火星程度の大きさになると、地表面温度は岩石の融点 (~ 1500 K) にまで上昇する。ところが、溶融した岩石への水蒸気の溶解度は高く (数 wt%) 大気中の水蒸気は溶融岩石へ溶解してしまう。このようにして大気中の水蒸気量が減少すると、今度は大気の保温効果が減少し、地表温度が下がり、地表面の岩石が固化する。すると、また衝突脱ガスによって大気中の水蒸気量が増加し、地表が溶ける。このようなフィードバックが働くことによって、大気中の水蒸気量が一定に保たれ、地表温度が岩石の融点程度に保たれる (図3A)。阿部と松井 (Abe and Matsui, 1986) の数値計算によると、惑星が微惑星の衝突合体で最終的に地球サイズにまで成長した場合、現在の海質量 ($\sim 10^{21}$ kg) 程度の水蒸気大気が形成される (図3B)。微惑星中の含水率や衝突脱ガスの効率などを多少変化させても、最終的に地球が保持する水蒸気大気量がほとんど変化しないという点からも、現在の地球の海の起源として有力視されてきた理論モデルである。

しかし、図3Bを見れば、水蒸気大気の質量は惑星の成長速度 (微惑星の集積率) に依存することがわかる (Abe and Matsui, 1986)。一方、上で述べたように、惑星形成の現代的描像では、彼らが仮定したような定常的な微惑星の集積は起こらず、最終ステージでは原始惑星同士の衝突 (巨大天体衝突) が起きることがわかった。したがって、現在の惑星形成理論の枠組みでは、微惑星の衝突脱ガスによる水蒸気大気の形成という概念自体は否定されてはいないが、そのプロセスのみで海水量が決まった可能性は低い。

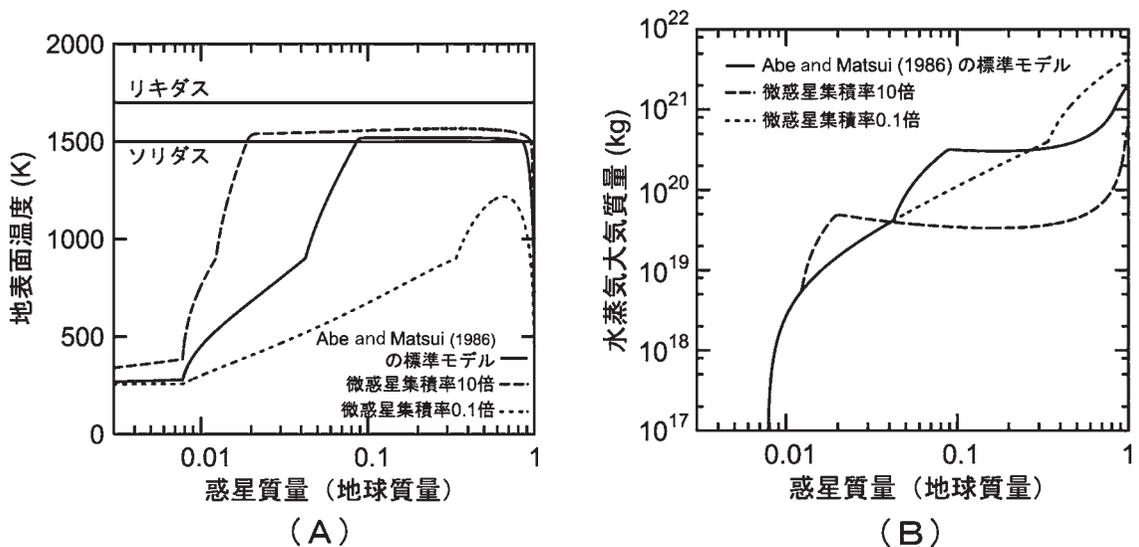


図 3 衝突脱ガスモデルによる水蒸気大気形成. Abe and Matsui (1986) と同様の計算を行った. 地表温度 (A) および水蒸気質量 (B) を原始惑星質量の関数として表している. 実線は Abe and Matsui (1986) の標準的なモデル (地球が約 5 千万年で形成される微惑星集積率) で, 破線と点線はそれぞれ標準的なモデルに比べて微惑星集積率が 10 倍と 0.1 倍の結果を表している

Fig. 3 Surface temperature (A) and atmospheric mass (B) of an accreting protoplanet with a water-vapor atmosphere formed by impact-induced degassing. The abscissa is the mass of the accreting protoplanet in the unit of Earth mass. The solid line represents what Abe and Matsui (1986) referred to as the standard model, which assumes the accretion rate is such that an Earth-mass planet forms in approximately 50 million years. In the cases represented by dashed and dotted lines, accretion rates that are higher and lower, respectively, by a factor of 10 than that in the standard model are assumed. The lower and upper horizontal lines are the solidus and liquidus of silicate, respectively.

2) レイトベニア

次に地球軌道付近で形成される微惑星に水などの揮発性の高い物質がまったく含まれていなかった場合を考える。前章で述べたように、原始太陽系円盤が光学的に薄い場合、地球軌道付近の温度が高いため、形成される微惑星は水などを含まない。このことを前提とした場合、地球軌道付近の微惑星だけで地球を作ったならば、当然、大気と海を持たない地球が形成される。そこで、そのような地球に、地球軌道よりも外側で形成した揮発性の高い物質を含む天体が微量だけ地球に供給されたとするのがレイトベニア仮説である。

地球の海水は地球全体と比較すると微々たるものである。そのため、揮発性の高い物質を多く含むような炭素質コンドライト隕石や彗星などが地

球に少量でも降ってくれば、高速衝突による脱ガス (前述参照) によって揮発性の高い物質が地表上へ放出され、現在の地球の海水量を容易に説明できるかもしれない。実際、現在でも小惑星帯から隕石が地球に降ってきており、彗星が地球軌道付近まで接近することもある。46 億年間に地球に降った小天体の総量が月のクレータの頻度分布 (Chyba, 1990) やマントル中の強親鉄性元素の存在度 (O'Neill and Palme, 1998) から見積もられており、(不確定性は非常に大きいものの) その総量は 10^{20} - 10^{23} kg 程度で海水量を説明できる範囲にある。地球軌道よりも外側の天体が地球へ飛来してくるメカニズムとしては、木星による小惑星帯への重力的な攪乱 (Morbidelli *et al.*, 2000) や、天王星・海王星の移動による氷微惑

星（彗星）の散乱（Gomes *et al.*, 2005）などが考えられている。

元々、レイトベニア仮説は地球マントル中の過剰な強親鉄性元素（Ru, Rh, Pd, Re, Os, Ir, Pt, Au）を説明する仮説として唱えられた。それは、コアに分配されるべき強親鉄性にもかかわらず、マントル中に過剰に存在しているからである。このパラドクスは、地球のコア形成後に炭素質コンドライトなどによって強親鉄性元素が地球マントルに供給されたと考えれば解決される。しかし、最近の地球型惑星の現代的な描像に基づいた原始惑星のコア形成の研究（Senshu *et al.*, 2002）によれば、原始惑星が火星質量の段階で、すでにコアが形成される。つまり、地球がほぼ現在の大きさに成長した後に強親鉄性元素を供給する必要性は必ずしもなく、惑星集積途中に供給された場合でも、現在のマントル中の強親鉄性元素の過剰を説明できるかもしれない。

また、レイトベニア仮説による地球の水・大気の供給プロセスは1990年代に欧米で特に注目をされたのだが、その理由の一つとして巨大天体衝突という現象が挙げられる。地球軌道付近で形成された微惑星に揮発性の高い物質が含まれていて、例えば、前節1)のような集積中の微惑星衝突脱ガス大気が形成されたとしても、月を形成したと考えられるような巨大天体衝突ですべて吹き飛んでしまうと考えられていたからである。その代表的な研究としてAhrens（1990）の論文がある。彼は、解析的な手法を用いて、巨大天体衝突ですべての大気が吹き飛ばされる条件を見積もり、その条件が満たされていることを示した。しかし、その後の詳細な数値計算によって、彼の導いた条件が、実は、大気的全散逸の条件ではなく、大気が散逸し始める条件でしかないことがわかった（Genda and Abe, 2003, 2005）。その結果、巨大天体衝突ですべての大気・海を吹き飛ばすことはできないことがわかり、必ずしもレイトベニアでしか水や大気が形成されないというわけではなくなった。

3) 原始太陽系円盤ガスの捕獲に伴う水の生成 地球が原始太陽系円盤ガス中で形成した場合の

水生成プロセスについて述べる。前述の二つのプロセスは、基本的に、原始太陽系円盤ガスが完全に散逸し、真空中で地球形成および水供給が起こることを前提としている。その意味で、ここで紹介するプロセスは前述の二つとは性格が異なっている。

微惑星の衝突・合体によって原始惑星が大きくなってくると、水素とヘリウムを主体とする原始太陽系円盤ガスを重力的に捕獲し始める。原始惑星が月サイズ程度（ $\sim 10^{23}$ kg）になると、惑星の重力エネルギーが円盤ガスの熱エネルギーよりも大きくなり、円盤ガスは大気として束縛されるようになる。

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（Sasaki, 1990）。例えばFeOによって酸素分圧（正確にはフガシティー）が決まる系では、 $H_2O/H_2 \sim 1$ （質量比）が達成される（Robie *et al.*, 1978）。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1500 K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。

まず、条件(2)について先に述べる。円盤ガス中に存在する地球質量の惑星がまとう大気の構造を調べた我々の最近の研究（Ikoma and Genda, 2006）によれば、その大気の強力な保温効果によって、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（赤外線吸収係数×柱密度）の掛け算で決まる。原始地球におけるエネルギー源は、原始地球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、Ikoma

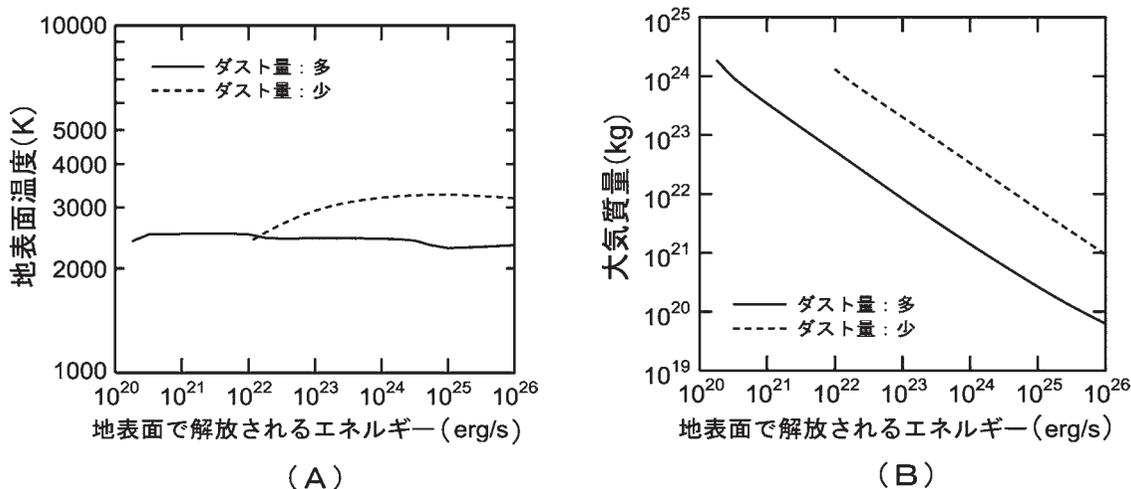


図 4 原始太陽系円盤中の原始惑星の大気の地表面温度 (A) と大気質量 (B). 実線は円盤中のダスト量が分子雲コアとほぼ同じ場合で、破線はダスト量が分子雲コアの 1% の場合の結果である。

Fig. 4 Surface temperature (A) and atmospheric mass (B) of an Earth-mass protoplanet embedded in the protoplanetary disk (or solar nebula). The abscissa is the energy flux from the surface of the protoplanet. The solid and dashed lines represent cases with abundances of dust grains equivalent to and 1% of that in molecular clouds cores.

and Genda (2006) のシミュレーション結果によれば、それらに対する依存性は小さく、地表面温度が常に 1500 K 以上となることがわかる (図 4A)。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質量が増加する。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、円盤ガス中の原始地球の地表面温度は、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、条件 (1) について述べる。図 4B に示したように、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、大気質量は増加する。原始地球の大気に供給されるエネルギー量 (つまり、横軸の値) については、

まだ詳細な研究がなされていない。しかし、例えば、微惑星の集積によってエネルギーが供給される場合は、そのエネルギー供給率 (L) は、

$$L \approx \frac{GM_E}{R_E} \dot{M}_E = 1.1 \times 10^{24} \left(\frac{\dot{M}_E}{10^{-8} M_{E\text{yr}^{-1}}} \right) \text{erg/s}$$

と見積もることができる (G : 重力定数, M_E : 地球質量, R_E : 地球半径, \dot{M}_E : 微惑星集積率)。微惑星集積率は時間的に減少する。地球は 1 億年以内にできたと考えられているので、地球形成の最終段階での微惑星集積率は $1 \times 10^{-8} M_E/\text{yr}$ 程度以下であろう。その場合、図 4B から、大気質量は 10^{21} kg 程度以上となる。その大気から H_2O が生成されれば、現在の地球の海質量 (1.4×10^{21} kg) と同程度かそれ以上の H_2O が大気中に形成され得ることがわかる。

この H_2O は、原始太陽系円盤ガスが完全に散逸して、大気温度が低下する際に凝縮して海を形成する。一方、地球質量の 0.3 倍以下の小さい惑

星では、重力が小さいため、ほとんどのパラメータ範囲において、地表温度を 1500 K 以上に保つだけの大気を捕獲することができない (Ikoma and Genda 2006)。このような場合、効率よくマントル中の酸化物と円盤ガス大気中の水素が反応できなく、 H_2O の生成はほとんど起こらない。

この章では、三つの水供給プロセスを紹介してきたが、注意すべき点として、これら三つのプロセスのうち一つだけで地球に水が供給されたということを必ずしも意味しない。例えば、地球型惑星形成領域の微惑星に揮発性の高い元素が含まれており、かつ惑星が円盤ガス中で形成したならば、衝突脱ガスと円盤ガスの捕獲が両方とも起こるだろう。さらに、その後にレイトベニアとして水などが加わる可能性もある。

V. 海を持つ惑星の形成シナリオ

海水の起源の問題は惑星の集積過程と密接に関係している。したがって、1990 年代以降の惑星集積理論の進展に伴って、地球の水の起源に関する考え方も修正を余儀なくされている。ここでは、惑星集積の現代的なシナリオの枠組みで、地球の海水の起源を議論する。

III 章で地球型惑星の形成過程について述べた。しかし、一つの問題が残る。寡占的成長段階で形成された原始惑星は、原始太陽系円盤のガス抵抗や微惑星集団による力学的な摩擦によって、太陽の周りを円軌道で回っている。当然のことだが、円軌道の原始惑星同士は衝突しない。したがって、何らかの原因によって、円軌道から楕円軌道に軌道が変化されなければならない。一方、現在の惑星の軌道はどれもほぼ円軌道であるが、原始惑星同士の衝突によってできた惑星の軌道は必然的に楕円である。つまり、現在のような惑星系を作るためには、原始惑星の軌道を一度楕円化して衝突させ、さらにその後に円軌道に戻さなければならないのである。

原始惑星の軌道を楕円化する機構としては主に二つが考えられる。一つは、原始惑星同士の重力的相互作用である。原始惑星は円軌道で回っているが、常に重力的に相互作用を続けている。短い

期間では軌道に変化を及ぼさないが、その相互作用が長年蓄積されると、原始惑星の軌道に不安定化を及ぼし、円軌道状態がついには崩壊し、互いに軌道交差を始める。原始惑星の運動に与える抵抗が何も存在しない場合、この軌道不安定は 10 万年から 100 万年で起こることが知られている (Chambers *et al.*, 1996)。軌道を楕円化するもう一つの機構は、木星や土星による重力的な摂動である (例えば, Raymond *et al.*, 2006)。つまり、外的な作用によってシステムを壊すという考え方である。

一方、上でも述べたように、惑星を円軌道化するのには原始太陽系円盤のガス抵抗が微惑星集団による重力相互作用 (力学的摩擦) である。原始惑星同士の巨大衝突が終わった後に、少なくともどちらか一方が残っていなければならない。しかし、当然のことだが、どちらも原始惑星の楕円化を阻害する働きをする。例えば、原始太陽系円盤ガスが存在しない場合は 10 万年から 100 万年で起きる軌道不安定が、最小質量太陽系円盤モデルが与える量のガスが存在する場合にはその程度の時間では軌道不安定が起きないことが知られている (Iwasaki *et al.*, 2002)。以下で述べるように、原始惑星の軌道交差を誘発するものと巨大衝突後の離心率を下げる機構の違いによって、水の起源に対する考え方は大きく異なる。

上で述べた現代的な惑星集積理論の枠組みで、地球の水の起源を議論する。現状ではいくつかのシナリオが考えられ、それらの優劣をつけることは難しい。その原因として、地球型惑星領域のダイナミクスに大きな影響を与える原始太陽系円盤ガスの散逸時期および木星の形成時期がいまだに不確定であることが大きい。以下では、それらのシナリオを列挙する。

1) ガス抵抗による円軌道化と水の生成

まず、地球型惑星の形成が木星の形成に比べて早く、地球型惑星の集積中には木星が存在しない場合を考える。その場合、原始惑星はその場の微惑星を集積しつつ、孤立質量に到達する。地球軌道付近の原始惑星はこの段階では水を含んでいないと考えられる。その後、原始惑星同士の重

力相互作用によって、軌道が不安定化し、巨大衝突が起きる。いま微惑星はすべて原始惑星に集積してしまっているので、最終的な惑星の円軌道化は原始太陽系円盤のガス抵抗に頼らざるを得ない。Kominami and Ida (2002) の N 体シミュレーションによれば、原始太陽系円盤のガス密度が最低でも最小質量太陽系円盤モデルの 10000 分の 1 は残っていないと、惑星の軌道を円軌道化することはできない。一方、Ikoma and Genda (2006) によれば、この程度の原始太陽系円盤ガスが残っていれば、地球上に十分な水をもたらすことができる。

2) 微惑星集団による円軌道化と小惑星帯からの水の供給

次に、地球型惑星の形成が遅く、原始惑星の寡占的成長段階の途中で木星が形成されたとする。その場合、木星の強力な重力によって、地球型惑星領域の原始惑星や微惑星が掻き乱される。その一つの結果として巨大衝突も起きる。木星形成が完了しているので、原始太陽系円盤ガスが残っていないかもしれない。しかしこの場合は、巨大衝突が起きた後も微惑星が残っているので、微惑星の重力的な摩擦によって惑星の軌道が円軌道に修正されることは可能である。Raymond *et al.* (2004, 2005, 2006) の詳細な N 体シミュレーションによれば、現在の小惑星帯付近にあった微惑星（炭素質コンドライトと考えられる）が地球領域に供給され、地球や金星は十分な量の水を獲得することができる。

3) レイトベニアによる水の供給

最後に、氷微惑星（彗星）による水供給のシナリオを紹介する。現在の外惑星（木星・土星・天王星・海王星）の配置は力学的に安定である。しかし、形成初期から必ずしも安定な配置であったとは限らない。そこで、外惑星のシステムがもう少しコンパクトであったと考える。そのとき、四つの惑星は互いの重力的な反発によって距離を広げようとする。初期は、その軌道反発は徐々に進むが、木星と土星の軌道周期がきれいな整数関係

例えば、木星が太陽の周りを 2 周する間に土星はぴったり 1 周するような状況（平均運動軌

共鳴という）になると、その相互作用が強くなり、一気に軌道が膨らむ。その結果、海王星領域に残っていた氷微惑星が散乱され、地球軌道に氷微惑星が短期間に大量に供給される（Gomes *et al.*, 2005）。これは、月のクレタ年代学と整合的であるという考えもあるが、実際にそうした集中的な彗星の重爆撃があったかどうかは議論の余地がある。

以上のように、力学的な観点では、さまざまなシナリオを考えることができる。次に化学的な側面、特に D/H 比の観点から議論を展開しよう。現在の海水の D/H 比は 1.5×10^{-4} であり、炭素質コンドライトの D/H 比の平均値に極めて近い。一方、原始太陽系円盤ガスの水素の D/H 比は海水よりも 5 倍から 7 倍低く、彗星の水の D/H 比は約 2 倍高い。この事実から、海水の起源は炭素質コンドライトの水であるという考えが広く受け入れられてきた。しかし、この議論には論理の飛躍がある。それは、初期物質と 46 億年経った物質（海水）を比較しているという点である。

最近、我々は地球が初期に水素と水蒸気の混合大気を持った場合の D/H 比の変化を調べた（Genda and Ikoma, 2006）。原始太陽系円盤ガスをまとった場合は当然こうした環境が達成されるが、炭素質コンドライトからの脱ガス大気であっても鉱物や有機物と水の反応によって、水素が大量に生成される可能性が高い（Hashimoto *et al.*, 2007）。こうした状況から進化すると、水蒸気の凝結による海の生成とその後の水素の散逸の過程において、水に重水素が濃縮する。Genda and Ikoma (2006) の数値実験によれば、46 億年間で海水の D/H 比は 3 倍から 9 倍高くなる。こうしたことが実際に起きたならば、炭素質コンドライトと海水の D/H 比の一致はむしろ炭素質コンドライト起源説を否定しているのかも知れない。また反対に、D/H 比という観点から言えば、太陽系円盤ガス起源の海水の方が都合よいのかもしれない。しかし、大気散逸の規模やマントルに溶け込んだ水との混合など不確定な部分が多く、現時点では結論を出すことは難しい。

VI. 他の惑星の水

前章までは地球に焦点をしばって議論を行ってきたが、この章では地球のすぐそばを公転する金星と火星の水についても述べよう。同じ岩石惑星と呼ばれるこれらの惑星を地球と比較検討することによって、なぜ地球に海が存在するのか、ひいてはなぜ地球が生命の発生・存続可能な惑星（ハビタブル・プラネット）となったのかについてより理解を深めることができる。

金星は、地球のすぐ内側を公転している惑星（公転半径 0.72 AU）であり、大きさは地球とほぼ同じである（地球質量の 0.82 倍）。現在の金星には海は存在していない。また、金星大気の高気圧は約 90 bar でその 96% は CO_2 からなり、水蒸気はわずか 120 ppm 程度でしかない。しかし、このことは、金星が昔から海、もしくは水蒸気として大量の水を持たなかったということを必ずしも意味するわけではない。むしろ多くの研究者は、金星が形成された 46 億年前には、地球と同程度もしくは現在の金星よりは大量の水（もしくは水蒸気）が存在していたと考えている。その理由は、地球にだけ水が供給されて、金星にはほとんど供給されなかったと考える積極的な理由がないということ、そして現在の金星大気中の水蒸気の D/H が極めて大きい（地球の海水の D/H よりも約 100 倍大きい）ということなどが挙げられる（Donahue *et al.*, 1982）。金星の高い D/H は、大気の上層で水蒸気が太陽紫外線によって分解され、水素が宇宙空間へ散逸する際、水素原子よりも重い重水素原子が大気中に濃縮することによって達成されることが指摘されている。しかし、このプロセスで問題となってくるのは、太陽紫外線による水の分解で生成された酸素の行方である。現在の金星大気には O_2 はほとんど存在しない。この問題に対して現在三つの仮説がある（例えば、Kasting and Pollack, 1983; Chassefière, 1996）。一つは、地表を酸化するのに酸素が使われたとするものである。この場合、地表面の数 km の岩石を酸化させる必要がある。もう一つは、大昔の金星大気の主成分が CO_2 ではなく、 CO であった

とする考え方である。その場合、酸素は CO を酸化して現在の金星大気の主成分である CO_2 を作ったと考える説である。これら二つの酸素量減少プロセスは地球でも同様に起こりえたことだが、地球の場合は生命からの酸素供給によって現在の酸素量を維持することができる。最後の一つは、水素が宇宙空間へ散逸する際に、重たい酸素もいっしょに引きずって散逸したとする説である。いずれの説が正しいかは現在でも議論されている段階である。

過去の金星には大量の水が存在していた可能性があることがわかったが、次に問題となってくるのは、地球が金星と同じ運命をたどらなかった点である。同じ運命をたどったならば、現在の地球には海が存在しなかったであろう。この点を決定付けたのは、太陽からの距離であると考えられている。太陽から近い金星は、表面温度が高く、もし大量の水が存在していたならば、大気上層部の水蒸気量が多くなる。そして太陽紫外線による水蒸気の分解が効率よく起こり、水素が効率よく失われる。一方、地球は、太陽からはほどよく遠いため、大気上層部の水蒸気量が低い。そのため、分解・散逸は効率よく起こらず、46 億年間水を保持できたと考えられている。

次に火星について述べる。火星は地球のすぐ外側を公転している惑星（公転半径約 1.5 AU）であり、地球よりも小さい（質量は約 0.1 倍）。現在の火星表面温度は低く、液体の水は存在できないが、極に H_2O 氷の存在が示唆されている（例えば、Titus *et al.*, 2003）。火星は月につづいてもっとも多くの惑星探査機が送り込まれた惑星である。探査機からさまざまな観測データが得られており、少なくとも過去のある一時期には、温暖で地球のような水循環があったのかもしれないと思われるような証拠が発見されている。例えば、チャンネルと呼ばれる液体の水が流れたような河川地形が多く残されていたり、水の存在下で作られる岩石などが発見されたり、過去の海の存在を示唆する海岸線のような特徴的な地形などが挙げられる（Head *et al.*, 1999）。温暖に保つメカニズムとしては、強い温室効果を持つ CO_2 や CH_4 が

過去には数 bar 程度存在していた可能性が指摘されている（例えば、Kasting, 1991）。このような地形的な証拠を残すような大量の水がどのようにして火星に供給されたかは、現在の地球の水の起源以上にわかっていない。また過去に存在していた水が現在どこに失われたのかもわかっていない。地表下に永久凍土として存在しているのか、何らかのメカニズムで宇宙空間へ失われたかはまだわかっていない。

太陽からの距離（軌道長半径）を観点として、惑星表面上に液体の水が存在できるような範囲のことを一般にハビタブル・ゾーンと呼ぶ。実際には「液体の水の存在」=「居住可能（ハビタブル）」ではないが、液体の水の存在という条件が居住可能であることの少なくとも必要条件であることから、便宜的に使われている。大雑把に、そのような範囲は、金星よりも外側で火星よりも内側の範囲である。さらに詳細な研究（Kasting *et al.*, 1993）によると、現在の太陽光度では、0.95–1.37 AU であり、太陽光度の時間変化などを考慮して、46 億年間永続的なハビタブル・ゾーンは 0.95–1.15 AU であるとされている。

VII. 終わりに

本論文で述べたように、地球の海水の起源に関する議論は現在混沌とした状態である。我々の眺めている海は、分子雲コアの水素と酸素が約 46 億年の歴史を経て現在の状態になったものである。しかも、地球近傍の局所的なプロセスの結果ではなく、太陽系全体のダイナミクスの結果として海が形成されたことは上で述べた通りである。多くの理論的・観測的不確実性がある中で、さまざまな仮説が出るのも当然である。

これまでの議論でわかるように、鍵となるのは原始太陽系円盤のグローバルな進化の解明であろう。現在計画中の ALMA（Atacama Large Millimeter Array: アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計）計画に期待したい。この計画では、原始星周りの原始惑星系円盤の密度・温度構造を 1 AU の分解能で観測することができる。それによって、スノーラインの位置や進化、惑星形成のタイ

ミング、円盤散逸の時期と機構などに制約を与えることができるだろう。

また、近年進歩が著しい系外惑星検出も地球の大気・海の起源にとって重要な情報を与えてくれるだろう。すでに、太陽以外の星で 200 個以上の惑星が発見されており、最小のもので地球質量の 5.5 倍の惑星が発見されている（Beaulieu *et al.*, 2006）。近い将来、地球と同程度の惑星が検出され、大気スペクトルなどから水を有する惑星が発見されるかもしれない。さらに観測が進み、こうした惑星の検出頻度や木星のような巨大ガス惑星との位置関係などが議論できるようになれば、太陽系で起こったプロセスに強い制約を与えることができるだろう。

謝 辞

本論文に含めた我々の研究成果は、井田 茂教授と藤本正樹教授との議論の結果生まれたものである。お二人に感謝いたします。また、査読者には大変有益なコメントをいただきました。

注

- 1) 2006 年 8 月、チェコのプラハで行なわれた国際天文連合 (IAU) の決議により、冥王星は「惑星」から外れ、太陽系の惑星は 8 個となった。
- 2) 天文分野では習慣的に、ヘリウムより重い元素をまとめて「重元素」と呼ぶ。
- 3) 「天文単位」とは太陽-地球間距離 (1.5×10^8 km) を 1 とした距離の単位である。

文 献

- Abe, Y. and Matsui, T. (1986) Early evolution of the Earth: Accretion, atmosphere formation, and thermal history. *J. Geophys. Res.*, **91**, E291–E302.
- Ahrens, T.J. (1990) Earth Accretion. in *Origin of the Earth* edited by Newsom, H.E. and Jones, J.H., Oxford Univ. Press, New York, 211–227.
- Beaulieu, J.-P. *et al.* (2006) Discovery of a cool planet of 5.5 Earth masses through gravitational microlensing. *Nature*, **439**, 437–440.
- Beckwith, S.V.W. and Sargent, A.I. (1996) Circumstellar disks and the search for neighbouring planetary systems. *Nature*, **383**, 139–144.
- Chambers, J.E., Wetherill, G.W. and Boss, A.P. (1996) The stability of multi-planet systems. *Icarus*, **119**, 261–268.
- Chassefière, E. (1996) Hydrodynamic escape of oxygen from primitive atmospheres: Applications to

- the cases of Venus and Mars. *Icarus*, **124**, 537–552.
- Chiang, E.I. and Goldreich, P. (1997) Spectral energy distributions of T Tauri stars with passive circumstellar disks. *Astrophys. J.*, **490**, 368–376.
- Chyba, C.F. (1990) Impact delivery and erosion of planetary oceans in the early inner Solar System. *Nature*, **343**, 129–133.
- Delsemme, A.H. (1988) The chemistry of comets. *Philos. Trans. R. Soc. Lond., Ser. A*, **325**, 509–523.
- De Wit, J.C., Van der Straaten, C.M. and Mook, W.G. (1980) Determination of the absolute D/H ratio of V-SMOW and SLAP. *Geostand. Newsl.*, **4**, 33–36.
- Donahue, T.M., Hoffman, J.H., Hodges, R.R. and Watson, A.J. (1982) Venus was wet: A measurement of the ratio of deuterium to hydrogen. *Science*, **216**, 630–633.
- Drake, M.J. and Righter, K. (2002) Determining the composition of the Earth. *Nature*, **416**, 39–44.
- Geiss, J. and Gloeckler, G. (1998) Abundances of deuterium and helium in the protosolar cloud. *Space Sci. Rev.*, **84**, 239–250.
- Genda, H. and Abe, Y. (2003) Survival of a proto-atmosphere through the stage of giant impacts: The mechanical aspects. *Icarus*, **164**, 149–162.
- Genda, H. and Abe, Y. (2005) Enhanced atmospheric loss on protoplanets at the giant impact phase in the presence of oceans. *Nature*, **433**, 842–844.
- Genda, H. and Ikoma, M. (2006) Origin of the ocean on the Earth: Early evolution of water D/H in a hydrogen rich atmosphere. *Icarus*, (submitted).
- Gomes, R., Levison, H.F., Tsiganis, K. and Morbidelli, A. (2005) Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets. *Nature*, **435**, 466–469.
- Hashimoto, G.L., Abe, Y. and Sugita, S. (2007) The chemical composition of the early terrestrial atmosphere: Formation of a reducing atmosphere from CI-like material. *J. Geophys. Res.* (in press).
- Hayashi, C. (1981) Structure of the solar nebula, growth and decay of magnetic fields and effects of magnetic and turbulent viscosities on the nebula. *Prog. Theor. Phys. Suppl.*, **70**, 35–53.
- Hayashi, C., Nakazawa, K. and Mizuno, H. (1979) Earth's melting due to the blanketing effect of the primordial dense atmosphere. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **43**, 22–28.
- Head, J.W., Hiesinger, H., Ivanov, M.A., Kreslavsky, M.A., Pratt, S. and Thomson, B.J. (1999) Possible ancient oceans on Mars: Evidence from Mars orbiter laser altimeter data. *Science*, **286**, 2134–2137.
- Ida, S. and Makino, J. (1993) Scattering of planetesimals by a protoplanet-slows down of runaway growth. *Icarus*, **106**, 210–227.
- Ida, S., Canup, R.M. and Stewart, G.R. (1997) Lunar accretion from an impact-generated disk. *Nature*, **389**, 353–357.
- Ikoma, M. and Genda, H. (2006) Constraints on the mass of a habitable planet with water of nebular origin. *Astrophys. J.*, **648**, 696–706.
- Iwasaki, K., Emori, H., Nakazawa, K. and Tanaka, H. (2002) Orbital stability of a protoplanet system under a drag force proportional to the random velocity. *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, **54**, 471–479.
- Kasting, J.F. (1991) CO₂ condensation and the climate of early Mars. *Icarus*, **94**, 1–13.
- Kasting, J.F. and Pollack, J.B. (1983) Loss of Water from Venus. I. Hydrodynamic escape of hydrogen. *Icarus*, **53**, 479–508.
- Kasting, J.F., Whitmire, D.P. and Reynolds, R.T. (1993) Habitable zones around main sequence stars. *Icarus*, **101**, 108–128.
- Kokubo, E. and Ida, S. (1998) Oligarchic growth of protoplanets. *Icarus*, **131**, 171–178.
- Kokubo, E. and Ida, S. (2000) Formation of protoplanets from planetesimals in the solar nebula. *Icarus*, **143**, 15–27.
- Kominami, J. and Ida, S. (2002) The effect of tidal interaction with a gas disk on formation of terrestrial planets. *Icarus*, **157**, 43–56.
- Lange, M.A. and Ahrens, T.J. (1982) Impact induced dehydration of serpentine and the evolution of planetary atmospheres. *J. Geophys. Res.*, **87**, A451–A456.
- Matsui, T. and Abe, Y. (1986) Evolution of an impact induced atmosphere and magma ocean on the accreting Earth. *Nature*, **319**, 303–305.
- Morbidelli, A., Chambers, J., Lunine, J.I., Petit, J.M., Robert, F., Valsecchi, G.B. and Cyr, K.E. (2000) Source regions and timescales for the delivery of water to the Earth. *Meteorit. Planet. Sci.*, **35**, 1309–1320.
- O'Neill, H. St. C. and Palme, H. (1998) Composition of the silicate Earth: Implications for accretion and core formation. in *The Earth's Mantle: Composition, Structure, and Evolution* edited by Jackson I., Cambridge Univ. Press, Cambridge, 3–126.
- Raymond, S.N., Quinn, T. and Lunine, J.I. (2004) Making other earths: Dynamical simulations of terrestrial planet formation and water delivery. *Icarus*, **168**, 1–17.
- Raymond, S.N., Quinn, T. and Lunine, J.I. (2005) Terrestrial planet formation in disks with varying surface density profiles. *Astrophys. J.*, **632**, 670–676.
- Raymond, S.N., Quinn, T. and Lunine, J.I. (2006) High-resolution simulations of the final assembly of Earth-like planets I. Terrestrial accretion and dynamics. *Icarus*, **183**, 265–282.
- Robert, F. (2003) The D/H ratio in chondrites. *Space Sci. Rev.*, **106**, 87–101.
- Robert, F., Gautier, D. and Dubrulle, B. (2000) The solar system D/H: Observations and theories. *Space Sci. Rev.*, **92**, 201–224.
- Robie, E.A., Hemmingway, B.S. and Fisher, R.F.

- (1978) Thermodynamic properties of minerals and related substances at 298.15 K and 1 bar (10^5 Pascals) and at higher temperatures, *US Geol. Surv. Bull.*, **1452**, 456p.
- Sasaki, S. (1990) The primary solar-type atmosphere surrounding the accreting Earth: H₂O-induced high surface temperature. in *Origin of the Earth* edited by Newsom, H.E. and Jones, J.H., Oxford Univ. Press, New York, 195-209.
- Sasselov, D.D. and Lecar, M. (2000) On the snow line in dusty protoplanetary disks. *Astrophys. J.*, **528**, 995-998.
- Sekiya, M. and Takeda, H. (2005) Does the gas flow through a porous dust aggregate help its growth in a protoplanetary disk? *Icarus*, **176**, 220-223.
- Senshu, H., Kuramoto, K. and Matsui, T. (2002) Thermal evolution of a growing Mars. *J. Geophys. Res.*, **107**, E12, 5118, doi:10.1029/2001JE001819.
- Titus, T.N., Kieffer, H.H. and Christensen, P.R. (2003) Exposed water ice discovered near the south pole of Mars. *Science*, **299**, 1048-1051.
- Wetherill, G.W. and Stewart, G.R. (1989) Accumulation of a swarm of small planetesimals. *Icarus*, **77**, 330-357.

(2006 年 9 月 25 日 受付, 2007 年 1 月 30 日 受理)