

地球の海の起源 ～現状整理とD/Hの初期進化～

玄田 英典¹, 生駒 大洋¹

2008年10月10日受領, 2008年10月28日受理.

(要旨) 古くから地球の海の起源について, 多くの研究がなされてきたが, その水がどこからどうやって地球に供給されたかについては, 不確実なことが多い. 本稿では, まず, 地球に水を供給した材料物質の候補とその供給プロセスについて簡単にまとめ, 重水素と水素の比(D/H)を指標とした従来の議論を行う. そして, 実は, 海のD/H自体が, 海形成および原始大気の散逸によって大きく変化し, 材料物質と水供給プロセスを考える上で大きな影響を与えうることを示す.

1. はじめに

「太陽系外のハビタブルゾーン¹⁾に地球型惑星発見! 海が存在し, 生命の可能性も!」というニュースが2007年4月に流れた[1]. この時, とても興奮したのと同時に, ひねくれ者である筆者は, 「ハビタブルゾーンに惑星が存在するからといって, 必ずしも海が存在するわけではない」などと思ってしまった. その理由は, 後で述べるように, 地球の海でさえ, その起源, 特に水がどこからどうやって供給されたのか不確かなことが沢山あるからである.

地球の海の起源について, 現状では, どの程度のことかわかっているのだろうか. 次のような2つの根源的な問いがある. いつから海が存在したのか? という問いと, その水がどこからどのようにして地球上にもたらされたのか? である. 前者の問いに関しては, 地質学的な証拠(例えば, 堆積岩や枕状溶岩など, 大量の水が存在しないと形成されないもの)から, 少なくとも38億年前には海が存在していたことがわかっている[2]. さらに地球化学的な証拠(ジルコンと呼ばれる鉱物中の酸素同位体比)からは, 43億年前に海が存在

していた可能性が指摘されている[3]. このように, 海が存在自体は, 地球の歴史のきわめて初期, おそらく地球形成最終段階には存在していたと考えられている. 一方, 後者の, その水が地球にどこからどのように供給されたのか, という問いに関しては, いくつかの水を含む材料物質の候補およびその供給プロセスが提案されているが, どれが本当に地球に水をもたらしたものののかについて決定的なことは言えないのが現状である.

そこで本稿では, まず, 地球に水を供給した材料物質の候補とその供給プロセスについてまとめる(セクション2). そして, 現在の海と, 材料物質の水を比較検討する有効な手段として, D/H(重水素と水素の比)に注目をする(セクション3). そのあと, 最近筆者らが研究を進めた原始大気と海のD/Hの初期進化に関する研究[4]について解説を行い, 実は, 海のD/Hが, 原始大気との同位体交換反応, および原始大気の大規模散逸によって容易に変わりうるという結果を示す(セクション4).

2. 水の供給プロセス

水を含む地球外の天体をもとにして, 地球に水を供給したであろう材料物質の候補およびその供給プロセスについて, おおまかに3つの可能性が現在までに考えられている. それぞれ, 要点について述べる.

1. 東京工業大学大学院理工学研究科

1) ハビタブルゾーンとは, 惑星表面上に H₂O が液体として存在することのできる宇宙空間の領域のことで, 通常は, 中心星からの距離で論じられることが多い. 太陽系の場合, 大雑把に言って, ハビタブルゾーンは, 金星よりも外側で火星よりも内側の領域とされている. 日本語では, しばしば「生存可能領域」, 「居住可能領域」など訳される.

2.1 微惑星による水の供給

惑星は、原始太陽系円盤の中で作られる。原始太陽系円盤は、ガスと塵からなり、塵が集まって、微惑星を形成し、それら微惑星が衝突合体して、最終的に地球型惑星が作られる。地球を作った材料物質(微惑星)に水が含まれていれば、当然、地球に水は供給される。さらに、地球が月サイズ程度($\sim 10^{23}$ kg)の大きさになると、微惑星から水が脱ガスしはじめ、惑星表面上に水蒸気が蓄積し、後に海が形成される[5]。重要な点は、1AU付近の微惑星に水が含まれていたかどうかである。古典的な原始太陽系円盤モデル(光学的に薄いモデル)に従えば、1AU付近での温度は270K程度[6]であり、 H_2O はすべて水蒸気として存在し、微惑星中に H_2O は取り込まれない。ただし、最近のDrakeらの分子動力学法の計算によって[7]、高温の状態でも、ごく少量の H_2O がケイ酸塩に物理吸着もしくは化学吸着することがわかった。吸着できるケイ酸塩ダストの表面積にもよるが、もしかしたら地球の海質量程度の水は、このプロセスで供給できるかもしれない。古典的な円盤モデルでは、 H_2O の凝縮と蒸発の境界(氷境界)は小惑星帯付近にあり、小惑星帯で水を多く含むものとそうでないものが分布していることと調和的である。

一方、光学的に厚い円盤モデル[8]では、太陽光が1AU付近に直接入ってこないため、低温となり、 H_2O がすべて凝縮し、氷微惑星が形成される[9]。しかし、そのような氷微惑星で地球を作ると、地球にあまりにも大量の H_2O が供給されてしまうという問題や、現在の小惑星帯の含水分布をうまく説明できない問題などが残っている。微惑星形成中の円盤の光学的な特徴が、本当はどのようなものであったかについては、まだ良くわかっていない。

2.2 レイトベニア仮説による水の供給

現在の地球の海の質量(1.4×10^{21} kg)は地球全体の質量(6.0×10^{24} kg)とくらべてわずか0.023wt%である。したがって、地球の大部分(99%以上)を形成した微惑星に、まったく水が含まれていなくても、水を適度に含む天体が、少量だけでも地球に降ってくれば、少なくとも、現在の地球の海の量は説明できるはずである。例えば、炭素質コンドライト隕石(含水率 ~ 5 wt%)や彗星(含水率 ~ 80 wt%)などが考えられる。特に、地

球がほぼ現在の大きさになったあとに、このような天体がごく少量降ってくることをレイトベニア仮説と呼ぶ[例えば、10]。元々、この仮説は、地球のコアに分配されるべき強親鉄性元素(Ru, Rh, Pd, Re, Os, Ir, Pt, Au)が、実際の地球マントル中に過剰に存在することを説明する仮説として唱えられたものである。地球のコアが完全に分離した後(つまり地球がほぼ現在の大きさになった後)に、炭素質コンドライト隕石のような金属鉄を含まない天体が少量だけ地球に降ってくれば、現在のマントル中の強親鉄性元素の過剰が説明可能である。少量だけ後に付け加えるということを、ベニア板の表面の薄い化粧板になぞらえて、レイトベニア(late veneer)と呼ぶ。地球軌道よりも外側に存在するこれら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かく乱[11]や、天王星・海王星の移動による氷微惑星(彗星)の散乱[12]などが考えられている。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。

2.3 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の中で形成した場合の水生成プロセスを考える。微惑星の衝突合体で原始惑星が月サイズ程度($\sim 10^{23}$ kg)の大きさになってくると、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[13]。水は水素と酸素からなる化合物なので、重力的に捕獲した水素に富む原始大気に酸素が供給されれば、惑星上で水が生成する可能性がある。その酸素の供給源として、地表に含まれる酸化物が考えられる[14]。例えば、現在の地球マントル中にも豊富に存在しているFeOによって酸素分圧(正確にはフガシティ)が決まるような系を考えた場合、質量比で $H_2/H_2O \sim 1$ (@ ~ 1500 K) が達成される[15]。したがって、惑星が十分な量の円盤ガスを獲得し、地表が流動的であれば(つまりマントルが大規模に溶融してマグマオーシャンが形成すれば)、十分な量の水が惑星上で生成可能である。そのような条件が成り立つには、惑星の質量がもっとも重要であり、惑星が現在の地球の半分以上の大きになれば、十分満たされる[16]。したがって、地球が、ある程度の大きさまで、原始太陽系円盤ガスの中で形成した場合には、円盤ガス中の水素と岩石中の酸素から、現在の海質量の水は

容易に生成される。

重要な点は、原始太陽系円盤ガス中で地球がどこまで大きくなったかである。少なくとも惑星形成の初期段階は、円盤ガス中で起こったはずである。一方、地球ほどの大きさになる最後の段階まで、円盤ガスが微量でも残っていたかどうかについては、まだ断定はできていない。しかし、現在の地球型惑星の軌道(特に小さな離心率)を説明するためには、円盤ガスが地球形成の最終段階まで少量残っていた方が都合がよいということも指摘されている[17]。少量の円盤ガスがありさえすれば、上記の述べた水生成のプロセスは十分に働くことがわかっている[16]。

3. D/Hによる海の起源への制約

地球の水が、どの材料物質から供給されたのかを議論する際に、重水素と水素の比(D/H)が指標としてよく用いられる。そこで、図1に現在の海のD/Hおよび、前セクションで挙げた水を含む材料物質の候補(炭素質コンドライト隕石、彗星、原始太陽系円盤ガス)のD/Hを示した。残念ながら、セクション2.1で取り上げた1AU付近で形成した微惑星に含まれた可能性のある水のD/Hに関しては、良くわからない。

図1を見ると、炭素質コンドライト隕石のD/Hの平均値は、海のD/Hにとっても近いことがわかる。一方、彗星は、重水素に富み、海よりも2倍ほど高いD/Hを持っている。ただし、3つの彗星でしかD/Hは測ら

れておらず、この3つの彗星が彗星全体のD/Hを代表しているかどうかについては、まだ疑問が残っている。また、太陽と同じ組成を持つと考えられる原始太陽系円盤ガスの水素分子のD/Hは、重水素が少なく、海の1/5～1/7程度である。したがって、D/Hの観点だけから考えると、地球の水は、炭素質コンドライト隕石による供給、もしくは、彗星と原始太陽系円盤ガスのほどよい混合で説明できてしまう。しかし、実際は、それほど単純ではなく、D/H以外の地球化学的な制約によって、材料物質を特定することは困難となっている。例えば、レイトベニア仮説によって炭素質コンドライト隕石で水を供給した場合、マントル中のOs同位体比は、炭素質コンドライト隕石のものと一致しなければならないが、実際の地球マントル中のOs同位体比はそうになっていない[18]。また、原始太陽系円盤ガスを大量に捕獲した場合、希ガス(特にNe)が大量に地球に供給されてしまう。水素を主体とする大気が、その後、大規模に散逸し、同時に希ガスも散逸したとしても、マントル中に溶け込んだNeが過剰に残ってしまうなどの問題が挙げられている[19]。

4. 原始大気と海のD/Hの進化

前セクションのD/Hの議論は、地球の海のD/Hが46億年間変化しなかったことを前提として行われている。しかし、そもそも、そのような前提は本当に正しいのだろうか？我々は、水素ガスを大量(水と同程度)に含

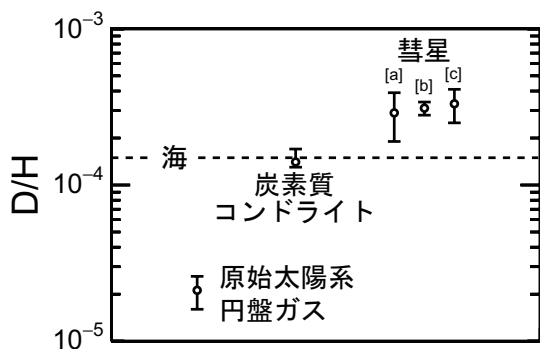


図1: 現在の地球の海のD/Hと、地球に水を供給した可能性のある材料物質のD/H。3つの彗星([a]百武, [b]ハレー, [c]ヘルボップ)についてD/Hが測られている。原始太陽系円盤ガスのD/Hは太陽風の観測をもとに推定。図はGenda and Ikoma (2008)[4]から。

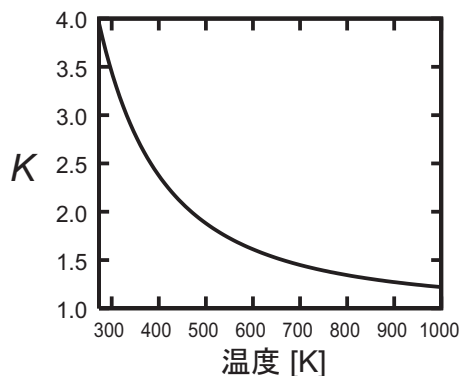


図2: 平衡定数の温度依存性。平衡定数は常に1よりも大きい。つまり、常に重水素は水蒸気側に濃集している。そして、温度が低いほど、濃集の程度が大きいことがわかる。

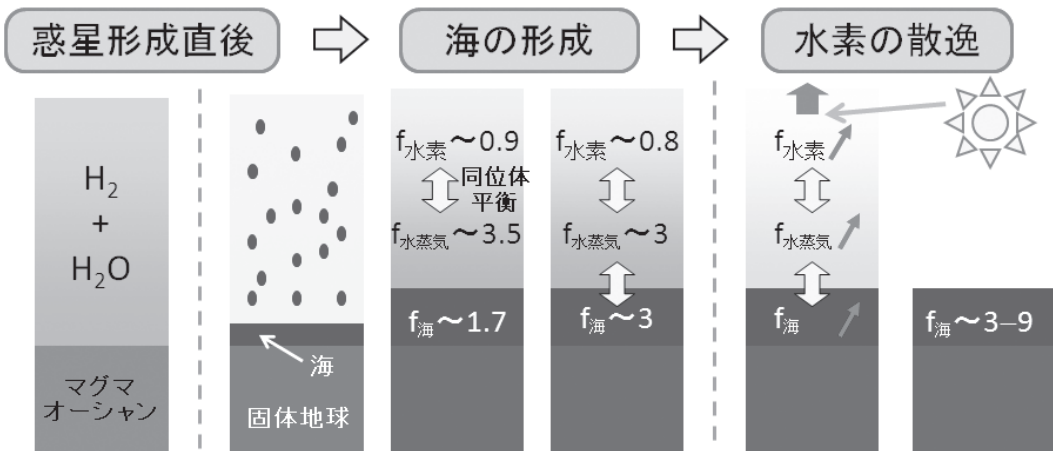
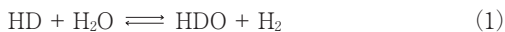


図3：原始大気と海のD/Hの進化のまとめ。地球形成直後に、水素分子と水蒸気分子を含む原始大気が形成した場合を考えている。原始大気の冷却にともなって、水蒸気が凝縮しはじめ(～600K)、海が形成される。そのとき、原始大気中の水素分子と水蒸気分子は同位体平衡にあり、重水素に富む海が形成される。海形成直後のD/Hはおよそ1.7倍上昇している。その後、惑星表面が十分に冷却すると(～300K)、原始大気と海の間での重水素の交換が進み、海のD/Hがさらに約3倍まで上昇する。その後、水素ガスの散逸にともなって、原始大気と海のD/Hがさらに上昇し、最終的に海のD/Hは3～9倍まで上昇する。

む原始大気が原始地球で形成した場合に、海のD/Hが数倍上昇する可能性を指摘した[4]。水素ガスに富む原始大気の形成可能性については、後述するとして、まずは、D/H上昇のメカニズムについて解説する。

上昇のメカニズムは実に簡単である。それは、以下のような水素分子と水蒸気分子の同位体交換反応である。



実験により、重水素は、水蒸気分子を好むことがわかっている[20]。図2に、式(1)の平衡定数 $K (= [D/H]_{\text{水蒸気}} / [D/H]_{\text{水素}})$ の温度依存性を示した。図からわかるように水蒸気のD/Hは常に水素ガスのD/Hよりも高く、重水素に富む。例えば、600Kの場合、1.5倍ほど、水蒸気のD/Hが高くなる。この反応によって、原始地球が冷却して、原始大気中の水蒸気が凝縮して海が形成されると、地表にできた海のD/Hは原始大気よりも高くなる。詳細な計算[4]によると、海形成直後(～600K)のD/Hは、系全体のD/Hよりも約1.7倍上昇する。その後、海と原始大気は、比較的低温の状態(～300K)で重水素のさらなる交換が起こり、海のD/Hは初期の2～3倍程度にまで上昇する。図3に、モデル計算によって得られた原始大気と海のD/Hの進化についてまとめた。

海のD/Hを上昇させるもうひとつ重要なメカニズムは、原始大気の散逸である。水素分子を多く含む原始大気は、太陽からのX線および極紫外線をよく吸収し、大規模に散逸することが知られている[21]。質量の重い重水素(D)は水素原子(H)よりも散逸しづらいため、原始大気に重水素が濃縮する。原始大気の散逸のタイムスケールは、1～10億年程度であり、原始大気と海が同位体平衡になるタイムスケールよりも十分長い[4]。そのため、散逸によって原始大気のD/Hが上昇すると、海のD/Hもそれにつられて上昇する。最終的に海のD/Hは3～9倍まで上昇することがわかっている(図3)。上昇値に大きな幅があるのは、散逸のタイムスケールに不確実性があるのが原因であり、ゆっくりとした散逸ほど、D/Hが大きく上昇する。

このように、海のD/Hの上昇は、水素ガスを大量に含む原始大気が地球に存在した場合に起こる。では、そのような原始大気が地球形成過程で作られたのだろうか？最近の研究によると、最も酸化的な隕石である炭素質コンドライト隕石で原始大気を形成したとしても、 H_2 、 CO 、 CH_4 などを多く含む還元的な原始大気が形成されることがわかってきた[22]。原始大気を形成する段階でまったく金属鉄を含んでいないものだけが地球に衝突したと考えるのはむしろ不自然なので、原始大気を形成する段階で、地球に金属鉄を含むよう

な天体が衝突した場合を考えると、金属鉄は酸化されて、さらに還元的な原始大気が形成される。そのような状況下で形成される原始大気の H_2/H_2O （質量比）は約1程度となり、大量の水素ガスを含む原始大気が形成される。さらに、地球が原始太陽系円盤ガス中で形成されると太陽の円盤ガスを重力的に捕獲する。この場合も、大量の水素分子を含む還元的な原始大気が形成される。したがって、程度の問題はあるが、従来考えられていた[例えば23]よりも水素ガスを多く含む還元的な原始大気が地球には形成されたようである。

これまで見てきたようにD/H自体が容易に上昇することを考えると、現在の海のD/Hが炭素質コンドライト隕石のそれと近い値であるからといって、海の起源は、炭素質コンドライト隕石中の水であると強く言うことはできなくなる。むしろ、海のD/Hが、水の供給時から上昇することを考えると、現在の海のD/Hよりも低いソースが必要となってくる。例えば、低いD/Hを持つ原始太陽系円盤ガスが重要な役割を果たすかもしれない。

5. おわりに

地球は「水の惑星」とよく言われるが、海の質量は地球全体のわずか0.023wt%でしかない。しかし、このような海が存在は、地球と他の惑星とを質的に大きく区別するものであり、特に、生命の起源・進化にとって極めて大きな役割を果たしてきたと考えられ、その起源を議論することは極めて重要である。しかしながら、現状では、これまでに述べてきたように、地球に水を供給した材料物質とその供給プロセスについて不確定な部分がいくつかあり、混沌とした状態にある。したがって、これらのことを解決するためには、今後何かしらのブレイクスルーが必要であろう。

例えば、太陽系外の観測がその任を担うかもしれない。我々は、現在、地球の海しか知らない。つまり、海の起源を検証する材料が地球の海という1つのターゲットしかないのだ。もし、系外惑星の大気の分光観測によって、大気中に大量の水蒸気が確認され、惑星表面に液体の水の存在が示唆されるようになれば、検証の材料が増える。例えば、その系外惑星系のガス惑星の配置から、レイトベニア仮説による水供給プロセスの妥当性が検証されるだろう。また、円盤観測によ

って微惑星形成時の氷境界の位置が正確にわかれば、地球型惑星を形成する微惑星に水が含まれるべきかどうかの検証も行える。

以上のようなことは、遠い未来のことにように思えるが、実は、そう遠くない未来に実現可能と考えられる。実際に、太陽系外のガス惑星ではあるが、大気中の H_2O がすでに検出されている[24]。また、氷境界についても、円盤表面ではあるが、その位置が見え始めてきている[25]。

謝 辞

本稿執筆にあたり、有意義な査読意見をいただきました佐々木貴教博士に感謝します。また、執筆の機会を与えてくれた田中秀和博士にも感謝します。

参考文献

- [1] Udry, S. et al., 2007, A&A 469, L43.
- [2] Appel, P. W. U. et al., 1998, Terra Nova 10, 57.
- [3] Mojzsis, S. T. et al., 2001, Nature 409, 178.
- [4] Genda, H. and Ikoma, M., 2008, Icarus 194, 42.
- [5] Matsui, T. and Abe, Y., 1986, Nature 319, 303.
- [6] Hayashi, C., 1981, Prog. Theor. Phys. Suppl. 70, 35.
- [7] Drake, M. J., 2005, Meteorit. Planet. Sci. 40, 519.
- [8] Sasselov, D. D. and Lecar, M., 2000, Astrophys. J. 528, 995.
- [9] Machida, R. and Abe, Y., 2006, Lunar and Planetary Science XXXVII, Abstract #1615.
- [10] O'Neill, H. S. C. and Palme, H., 1998, in The Earth's Mantle: Composition, Structure, and Evolution, pp. 3.
- [11] Morbidelli, A. et al., 2000, Meteorit. Planet. Sci. 35, 1309.
- [12] Gomes, R. et al., 2005, Nature 435, 466.
- [13] Hayashi, C. et al., 1979, Earth Planet. Sci. Lett. 43, 22.
- [14] Sasaki, S., 1990, in Origin of the Earth.
- [15] Robie, E. A. et al., 1978, US Geol. Surv. Bull. 1452, 456.
- [16] Ikoma, M. and Genda, H., 2006, Astrophys. J. 648,

696.

- [17] Kominami, J. and Ida, S., 2002, *Icarus* 157, 43.
- [18] Drake, M. J. and Richter, K., 2002, *Nature* 416, 39.
- [19] Mizuno, H. et al., 1980, *Earth Planet. Sci. Lett.* 50, 202.
- [20] Robert, F. et al., 2000, *Space Sci. Rev.* 92, 201.
- [21] Zahnle, K., 1993, in *Protostars and Planets III*.
- [22] Hashimoto, G. L. et al., 2007, *J. Geophys. Res.* 112, doi:10.1029/2006JE002844.E05010.
- [23] Rubey, W. W., 1995, in *Crust of the Earth*, pp. 631.
- [24] Barman, T., 2007, *Astrophys. J.* 661, L191.
- [25] Inoue, A. K. et al., 2008, *PASJ* 60, 557.