

特集「月科学の最先端と今後の展望：月はどこまでわかったのか？」

徹底比較！月の起源

玄田 英典¹

2010年4月23日受領, 2010年4月30日受理.

(要旨) 月の起源といえば, 巨大衝突説(ジャイアントインパクト説)であると, 最近では当然のように考えられているが, はたして本当にそうなのであろうか. 月の起源を制約する観測データを再考し, それにもとづいて, 4つの月の起源に関する仮説(分裂説・捕獲説・双子説・巨大衝突説)を再検討した(表1). 総合的には, 巨大衝突説が有力ではあるが, 最近の巨大衝突説に関する精力的な研究によって, いくつか弱点も見え始めてきた.

1. はじめに

古来から数々の月の起源に関する仮説が提唱されてきた. 本稿では, 月の起源として, 代表的かつ, 科学的検討に耐えうる説として, 分裂説・捕獲説・双子説・巨大衝突説(図1)を取り上げ, 観測的な制約条件からそれぞれの仮説の長所・短所について検討を行う. このような比較は1980年代に多くレビューされてきたが[例えば, 1, 2], 近年, 惑星形成に関する知見に進展があったこと, また, 巨大衝突説に関して, 主にシミュレーションの分野で精力的に研究が進んだことによって, 逆に巨大衝突説の弱点も見え始めてきた. そこで, 本稿では, 改めて上記の4つの仮説について観測的制約条件をもとに再検討をしてみたいと思う.

2. 観測的制約条件

はじめに, 月の起源を考察する上で重要となってくる月と地球に関する観測的制約条件を簡単にまとめる.

2.1 角運動量

月の質量は, 地球の約 $1/80$ であり, 他の惑星-衛星系とくらべると1桁以上大きい¹. 月が大きいということは, 地球-月系の角運動量も当然大きくなる. したがって, 月の起源を考える場合, 衛星の質量だけでなく, 角運動量も説明しなければならない. また, 地球-月系の角運動量ベクトルは, 地球の公転面の法線とほぼ平行である. 現在の地球の自転角運動量は, 地球-月系の角運動量と比べて無視できるので, 月の公転面と地球の公転面がほぼ平行であると言いかえることができる.

2.2 大規模溶融

アポロ計画により地球に持ち帰られた月の岩石試料の分析から, 月の高地の組成が斜長石を多く含む斜長岩でできていることがわかった. またそのような試料の年代測定により, 月の高地の年代が極めて古いことがわかった. このことから, 月は形成直後に, 大規模に溶融していた, つまりマグマオーシャンの状態を経験したことが明らかとなった[例えば, 4]. マグマオ

1. 東京大学大学院理学系研究科
genda@eps.s.u-tokyo.ac.jp

1. ちなみに冥王星-カロン系は $1/10$ と大きい. そのため, 月の起源と同様に, カロンも巨大天体衝突で形成されたとする研究もある[3].

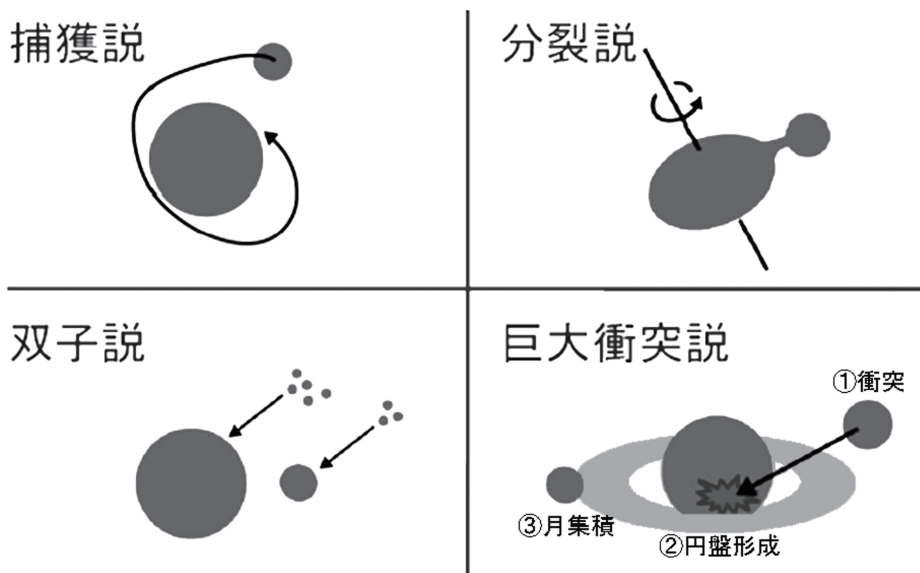


図1：分裂説・捕獲説・双子説・巨大衝突説のイメージ図

ーションがどれくらいの深さであったのかについては、まだ議論はわかれている[5]が、大規模溶融は、月の形成メカニズムに強い制約を与える。

2.3 組成

月の平均密度(3.34 g/cm^3)は、地球の非圧縮時の平均密度(4.45 g/cm^3)よりも小さい。このことは、月は地球よりも軽い物質でできていることを意味し、月に金属鉄が少ないと考えるのが最も簡単である。月震および月重力の解析でも、月には金属鉄のコアがないか、もしくはあったとしても非常に小さいことが示唆されている[例えば6]。

月のバルク組成に関しては、揮発性元素(蒸発温度が 1300K 以下)が強く枯渇している点を除けば、地球マントルと基本的には類似していると通常は考えられている[例えば7]。しかし、実際のところは、我々は月に関しては表面組成しか分かっておらず、また、地球マントルに関しても、下部マントルの組成は厳密にはわかっていない。したがって、バルク組成が類似しているかどうかを月の形成メカニズムの制約にどれくらい用いてよいのかはよくわからない。

一方、同位体に関しては、組成よりも確かなことが言える。地球と月の酸素同位体比は、区別できないほど同じ分別線にのる[例えば8]。一方、火星やほとんどの隕石の酸素同位体比は、地球と月のそれとは異なる

[8]。このことは、地球と月が酸素同位体的に同じ材料でつくられた、もしくは、月形成過程で酸素同位体がよく混ざり同位体平衡に達したことを意味する。

3. 月の起源の再評価

表1に観測的制約条件に対して、それぞれ、4つの月の起源に関する仮説(分裂説・捕獲説・双子説・巨大衝突説)について検討したものをまとめた。各評価は、以降の各論で詳しく述べる。

3.1 分裂説

1880年にダーウィン²が提唱した分裂説から検討をはじめよう。分裂説は、高速回転する地球の外側部分、つまりマントルから月が分裂してできたとする説である。この説は、前節で挙げた多くの組成的制約条件を説明することができる。まず、ちょうど月質量の物質が地球から分裂した場合、月のバルク組成は、地球マントルとおおざっぱには同じ組成になる³。また、分裂説でできる月は金属鉄を必然的に含まない。酸素同

2. 「種の起源」を提唱したチャールズ・ダーウィンの息子。

3. “おおざっぱには” といったのは、もし仮に高速回転する地球マントルがすでに分化していた場合、分裂によって選択的に地球の地殻物質が月に多くとりこまれることとなる。この場合、地殻成分には多くのAlやCaを含むことを考えると、もしかしたら、月にAlやCaが多く存在するかもしれないことと、調和的かもしれない。

位体が地球と月で区別できないことも容易に説明する。月が大規模溶融を経験したことも、分裂という激しい現象を考えれば、定性的には許せる。

一方、分裂説の欠点は2つある。1つは、高速回転している地球という初期条件である。どのようにして分裂するほどの高速回転を実現するのが問題である。1980年代までは、地球は終始微惑星の集積で形成されたと考えられていたため、そのような多数の微惑星のランダムな衝突で、一方向だけ回転が卓越するとは考えにくかった[例えば、9]。2つ目の欠点は、仮に分裂が起きるほどの高速回転が実現したとしても、そのような高速回転に必要な角運動量は、現在の地球一月系の角運動量の2倍という試算がされている[10]。つまり、分裂説で月を作った場合、地球一月系から角運動量を約半分ぬかなければならない。太陽との潮汐で角運動量を抜くなどのアイデアがあるが、あまり有効には働かなかったと考えられる[10]。しかし、なんらかのメカニズム、例えば、分裂時に一部分の物質が地球重力圏から飛び出し、その際に角運動量が持ち去られれば、問題は解決するかもしれない[1]。

ここで、ひとつ注意しておくことがある。それは、1990年代に入り、地球の集積が、前半は微惑星の集積による原始惑星の形成で、後半がそれら原始惑星同士の衝突で特徴づけられることがわかった点である。このことから、高速回転問題は、再考する必要がある。小久保ら[11]の地球型惑星形成の最終ステージの数値計算によると、最終的にできあがる地球型惑星の回転速度は、分裂する程度にまでスピニングアップすることがわかった。これは、一見、分裂説を支持するようにみえるが、実は、小久保らの計算は、原始惑星の合体において「完全合体」を仮定しており、原始惑星の衝突による角運動量の増加分をすべて惑星の回転速度に焼きおしている。したがって、最終的な回転速度を過大評価している。実際は、衝突しても合体しない効果などにより、惑星が高速回転しない[12]。より衝突を現実化した数値計算によると、確かに、回転分裂するほどにまでは達していない[13]。

3.2 捕獲説

地球と月がそれぞれ太陽系の別の場所で形成し、そのあと月が地球のすぐそばを通過した際に、なんらかのメカニズムで月が捕獲され、現在の地球一月系が形

成されたとするのが捕獲説である。この説で、月を作成することは物理的にも化学的にも難しい。まず、天体を捕獲するためには、地球に接近してきた月の軌道エネルギーを抜く必要がある。軌道エネルギーを抜くメカニズムとしては、地球との潮汐散逸[14]やガス円盤による散逸が考えられる[15]。しかし、地球の約1/80もある大きな月を潮汐で捕獲しようとするためには、地球のごく近傍を通過する必要がある。そのような場合には、月は潮汐破壊してしまい、単純に月を捕獲することはできない。また、円盤ガスによる散逸については、十分なガス円盤がなければならぬのと、月が地球に落下する前に円盤ガスを散逸させなければならないという絶妙なタイミングが必要である。

また、化学的にも多くの問題を持っている。まず、この仮説では、地球と月が太陽系の別々のところで形成されたとするので、酸素同位体が異なる材料物質で形成された可能性が高い。したがって、現在の地球一月系の酸素同位体の一致を容易には説明できない。大規模溶融したかどうかとも自明ではない。また、捕獲されて月となる天体がもとと金属鉄を多く含まなかった天体だと考える積極的な理由がない。以上の多くの点から、捕獲説は、月の起源としてあまり有力ではないことを確認することができる。

3.3 双子説

地球と月がほぼ同じ場所で連星形成のように同時に形成したとするのが双子説である。捕獲説とは異なり、同じ材料物質で地球と月が作られるため、組成的にも同位体的にも地球と月は類似する。しかし、地球と同程度の金属鉄コアを月が持ってしまうことは避けられない。また、月が大規模に溶融することは難しく、月だけから揮発性元素を強く枯渇させる積極的なメカニズムはない。

一方で、このようなプロセスで月を形成すること自体は、不可能ではない。しかしながら、集積中、成長する地球の重力が強くなることによって、月が地球に落下しないように、微調整される必要があり、決して容易とはいえない。また、3.1節で述べた現代的な地球型惑星形成シナリオでは、共成長している地球一月系が、原始惑星の衝突によって壊されてしまう、という問題点もある。

3.4 巨大衝突説

地球に火星質量(地球質量の1/10程度)の天体がななめに衝突することによって、衝突天体のマントル物質が地球周辺にばらまかれ、円盤が形成される。この円盤から月が集積してできたとする説が、巨大衝突説である。

この説は、2節で述べた多くの制約条件を満たす。まず、上記のような衝突が起これば、確かに地球のまわりに多くの物質がばらまかれることが衝突のシミュレーションによってわかっており、どのような衝突でどのような円盤が形成されるかもある程度はわかっている[例えば、16]。この円盤から月が集積する過程も詳細に調べられており、1カ月～1年という非常に短い時間で月が形成される[17]。1980年代までは、このような巨大天体の衝突が恣意的であることから、この説が疑問視されることもあったが、最近の地球型惑星形成の詳細な数値計算の結果[18,19]によると、3.1節で述べたように、地球型惑星形成の後期には火星サイズの原始惑星同士の衝突が複数回起きることがわかってきた。正面衝突よりもななめ衝突の方が確率的には高いことを考えれば、複数回起こる現象で、1回ぐらい月が形成されても確率的には許されるだろう。しかしながら、このプロセスで形成される地球-一月系の角運動量ベクトルの方向については、確率が低いことには注意が必要である。原始惑星の衝突角度は、三次元的にランダムであり、形成される月の公転面は、地球の公転面と垂直になる可能性の方が高い。したがって、形成直後の地球-一月系が現在のように月の公転面が水平となるような衝突は、実はまれなのである[11]。その後の、太陽潮汐などで地球-一月系の角運動量ベクトルが現在のような状態にまで進化するかどうかを検討する必要がある。

組成にはついてはどうだろうか。まず、観測的事実と調和的な部分について述べる。巨大衝突のシミュレーション結果からは、ばらまかれる円盤物質は、主に衝突天体のマントル物質であることがわかっている[16]。このことから、現在の月に大きな金属鉄コアがないこととは矛盾しない。また、衝突によって解放されるエネルギーは非常に大きく、円盤物質は全溶融し、一部蒸発するほど高温になる。また、円盤から月が集積する際に解放される重力エネルギーによって、月が全

球的に溶融するのは疑いない。このことから月が大規模溶融を経験したことと調和的である。円盤形成および短時間の月集積から、形成された月に揮発性元素が枯渇する。この過程を追った計算[20]によると確かに揮発性元素(Na, Kなど)は強く枯渇し、難揮発性元素(Ca, Alなど)は濃集する結果が得られている。

酸素同位体はどうであろうか。実は、ごく最近まで、この制約は巨大衝突説を否定する強い根拠となっていた。それは、捕獲説で考察したことと同じように、地球とは離れた場所で衝突天体が形成されたと考えられるので、衝突天体と原始地球が同位体的に異なっていたと考えるのが普通であり、円盤物質の75-90%が衝突天体由来であることを考えると[16]、酸素同位体の点では観測と矛盾する。したがって、衝突天体がもともと原始地球と同じ酸素同位体を持っていたと考えない限り、この制約を満たすことはできなかった。しかしながら、最近、この問題の解決策がパーレバンとステイブソン[21]によって示された。彼らは、巨大天体の衝突によって形成された部分蒸発した円盤と、地表面の溶融した地球を考え、円盤が冷却する際に、円盤内で激しい対流(混合)が起こり、円盤物質と地球マントルが最終的に同位体平衡に達することを示した。

彼らの研究によって、酸素同位体という制約について一段落ついたように思われたが、その後、いくつかの点において、このモデルが不完全であることが指摘されるようになってきた[22]。その問題点は2つある。1つは、彼らの混合モデルには、物質の混合は考慮しているが、円盤内での角運動量の輸送は考慮していない。差動回転する円盤中で半径方向に物質が混合する際に、角運動量が輸送されるかどうかは自明ではないが、ほんの少しでも角運動量が輸送されると、円盤全体が拡散するか、もしくは、円盤中のどこかで密度が薄くなってしまい、その部分がボトルネックとなり地球マントルと円盤との物質のやりとりが遮断されてしまう。今後、角運動量が輸送されるのかも含めて検討が必要である。2つ目の問題は、混合に要する時間である。彼らは円盤が100年かけて冷却し、そのあと、月の集積が始まるというモデル[23]に乗ったが、実際には、部分蒸発している円盤でも、蒸発していない円盤物質が円盤中心面に沈殿し、1年足らずで月形成が始まってしまうことがわかっている[24]。このような場合、地球マントルと円盤が同位体平衡になるまで十

分に混合する時間はない。

また、そもそも、原始惑星の衝突で円盤そのものが形成しないのではないかという研究が和田らによって報告された[25]。この研究以前の衝突シミュレーションのほとんどすべては、SPH法といわれる粒子法を用いたもので、形成された円盤の構造をしっかりと追うには解像度が悪かった。和田らは、この問題を克服するため、円盤を高解像度で計算することのできるメッシュ法を用いた。彼らの計算では、仮想的な状態方程式を使ったもので、完全とは言えないが、少なくとも、衝突によって大規模に蒸発がおこり、円盤が気体的にふるまえば、円盤中で衝撃波が発生し、円盤の角運動量が失われ、円盤物質の大半が数日という短いタイムスケールで地球に落下してしまうことが示された。今後はより現実的な状態方程式をつかった同様の数値計算をする必要がある。

4. 議論とまとめ

観測的制約条件をもとに、4つの月の起源に関する仮説を検討してきた(表1)。慣例にしたがい、総合的に判断すると、いくつか克服すべき点はあるものの、巨大衝突説が、有力であると言える。しかしながら、そもそも総合的な評価で優劣を決めて良いものなのかどうかは自明ではない。もし仮に、月の形成自体の制約が、他の組成的な制約よりもあまり重要でない場合、例えば、月形成がなんらかの微妙な調整により可能であり、形成確率が極めて低くても許されるならば、組成的な面でほぼすべての制約条件を満たす分裂説が有力となるであろう。また、巨大衝突説は、月が大規模溶融したという制約条件を、一見満たすように思われるが、実はこの制約条件は巨大衝突説の欠点になりうる可能性がある。それは、前節で述べたように、巨大衝突説で作られる月は、完全に溶融せざるを得ない。

一方で月マグマオーシャンの深さには不確定性があり、今後の月探査で、月が完全溶融ではなく、部分溶融であったことが確実となれば、このことは巨大衝突説の欠点となるであろう。そのためには、アポロ計画で設置できなかった月の裏側に地震計を置き、月内部の状態を詳しく調べる必要がある。

最後に、酸素同位体の制約についても注意が必要であることを述べる。地球-一月系、火星、隕石の酸素同位体が異なることから、少なくとも太陽系の内側領域の酸素同位体が不均質でなんらかの傾向(例えば太陽からの距離)があると考えられている。しかし、地球をつくった個々の材料物質の酸素同位体がどのようなバリエーションをもっていたかについてはわかっていない。さらに太陽系の内側領域の質量のほとんどは地球と金星が占めており、金星については酸素同位体比すらわかっていない。したがって、巨大衝突説で、円盤を介して同位体平衡になるのが難しいことから、地球に衝突してくる原始惑星の酸素同位体が地球と一致しなければならないという制約が、はたして本当に必要な制約なのかどうかは今のところ自明ではない。少なくとも、金星の酸素同位体比が計測されれば、なんらかの糸口は見いだせるのではないだろうか。

謝 辞

本稿は、月科学研究会(2009)とRISE研究会(2010)において発表した月の起源に関するレビュー講演のもとに作成しました。これらの研究会において、コメントをいただいた方々に感謝いたします。また、本稿を投稿する機会を与えてくれた荒井朋子氏、査読により有益なコメントをしてくださった小久保英一郎氏、原稿のチェックをしてくださった後藤孝介氏に深く感謝いたします。

表1: 仮説の評価⁴

	容易さ	大衛星	大溶融	揮発欠乏	コア小	O同位体
捕獲説	△	△	△	×	×	×
分裂説	×	△	△	△	○	○
双子説	△	△	×	×	×	○
衝突説	△	△	○	○	○	△

4. ○と×の項目については、本文中で述べた客観的な事実により容易に区別することができるが、△の項目については、できるかぎり客観的に判断を下したが、読者によっては、○もしくは×になるかもしれない。

文 献

- [1] Boss, A. P., 1986, *Science* 231, 341.
- [2] Wood, J. A., 1986, in *Origin of the Moon.*, 7.
- [3] Canup, R. M., 2005, *Science* 307, 546.
- [4] Warren, P. H., 1985, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 13, 201.
- [5] 倉本圭 et al., 2007, *遊星人* 16, 197.
- [6] Hood, L. L. and Zuber, M. T., 2000, in *Origin of the Earth and Moon*, 397.
- [7] Jones, J. H. and Palme, H., 2000, in *Origin of the Earth and Moon*, 197.
- [8] Weichert, U. et al., 2001, *Science* 294, 345.
- [9] Ohtsuki, K. and Ida, S., 1990, *Icarus* 85, 499.
- [10] Stevenson, D. J., 1987, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 15, 271.
- [11] Kokubo, E. et al., 2006, *ApJ* 642, 1131.
- [12] Agnor, C. and Asphaug, E., 2004, *ApJ* 613, L157.
- [13] Kokubo, E. and Genda, H., 2010 *ApJ* 714, L21.
- [14] Mizuno, H. and Boss, A., 1985, *Icarus* 63, 109.
- [15] Nakazawa, K. et al., 1983, *The Moon and the Planets* 28, 311.
- [16] Canup, R. M., 2004, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 42, 441.
- [17] Ida, S. et al., 1997, *Nature* 389, 353
- [18] Kokubo, E. and Ida, S., 1998, *Icarus* 131, 171.
- [19] Chambers, J. E., 2001, *Icarus* 152, 205.
- [20] Abe, Y. et al., 1998, *Origin Earth Moon Conf.*
- [21] Pahlevan, K. and Stevenson, D. J., 2007, *EPSL* 262, 438.
- [22] Melosh, H. J., 2009, 72nd Annual Meteoritical Society Meeting.
- [23] Thompson, C. and Stevenson, D. J., 1988, *ApJ* 333, 452.
- [24] Machida, R. and Abe, Y., 2004, *ApJ* 617, 633.
- [25] Wada, K. et al., 2006, *ApJ* 638, 1180.