

巨大衝突後の地球と月形成円盤

中 島 美 紀

〈Geological and Planetary Science, California Institute of Technology,
1200 E California Blvd MC 150-21, Pasadena, CA 91125〉
e-mail: mnakajima@caltech.edu



巨大衝突説によると、地球とインパクトの衝突によって形成された周地球円盤（月形成円盤）が集積して月が形成されたと考えられているが、具体的にどのような衝突が起こったかについては議論が分かれている。例えば (a) 標準モデル：地球に火星サイズの天体が衝突 (b) 高速回転地球モデル：高速で回転していた地球に小さな天体が高速で衝突 (c) 等質量モデル：地球の半分程度の質量をもつ二天体が衝突、などのモデルがある。これまでの研究から、モデル (b) と (c) は地球と月の石が非常に似た組成をもっていることを説明できることがわかっている。しかし、これらのモデルが他の地球化学的制約を満たすかどうかは分かっていない。例えば、地球内部（マントル）がこれまで混ざったことがないという観測結果や、月の揮発性元素量が少ないことなどである。これらの観測結果とモデルの整合性を確かめることを目的とし、本研究では天体衝突計算を行い地球と月形成円盤の衝突直後の構造を明らかにした。その結果、(a) のモデルは天体衝突によって地球内部が混ざらなかったことを説明できるが、(b)、(c) では説明できない可能性があることが分かった。また、月形成円盤は (a) の場合に比べて (b)、(c) では高温になることが分かった。更に、本研究結果に基づき円盤の時間進化を追うことにより、これらのモデルと月の揮発性元素量との整合性を確かめることもできるはずである。

1. 巨大衝突仮説

標準的な「巨大衝突説」によると、原始地球と火星サイズの天体（インパクト）の巨大衝突によって地球の周囲に岩石主体の円盤が形成され、その一部が集積して月になったと考えられている^{1), 2)}。本モデル（標準モデル、図1(a)）は、月の質量、地球と月の自転、公転速度、また月の鉄含有量などを説明することができるため支持されてきたが、このモデルは地球と月の類似性をうまく説明できないことがわかっている。これまでの研究から、アポロ計画により持ち帰られた月の石と、地球の石の組成、具体的には両者の同位体比（酸素など）が非常に似ていることがわかってい

る。同位体比とは同一の元素のうち中性子数が異なるものの存在比であり、一般的に同位体比は天体によって異なると考えられている（例えば、火星と地球の酸素同位体比は大きく異なっている）。数値計算によると円盤の大部分はインパクト由来の物質からできており、もしインパクトの同位体比が地球と異なっていたら、その円盤から形成される月の同位体比もそれに従うはずであり、地球と月の類似性をうまく説明できない。この問題を解決するために、Pahlevan-Stevenson³⁾ は地球の大気と月形成円盤は繋がっており、対流を通じて両者の組成が均質化されたと提案したが、このモデルには幾つかの問題があることが分かっている。また、より高速で二天体が衝突するモデルも

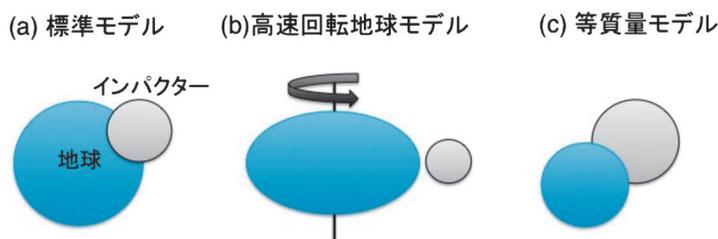


図1 これまで提案された三つの異なる巨大衝突モデル。近年提案されたモデル (b), (c) は地球と月の組成の類似性を説明できるが、その他の地球化学的制約を説明できるかについては分かっていない。

提案されているが⁴⁾、地球と月の精度の高い類似性を説明するのは難しい。インパクトが地球とたまたま同じ、もしくは非常に近い組成をもっていた可能性はゼロではないが、かなりの偶然が重ならねばならない⁵⁾。

1.1 新たなインパクトモデル

地球と月の類似性を説明するため、近年新しい力学的モデルが提案された。Cuk-Stewart⁶⁾によると、地球は初期、高速で自転し（1日が3時間程度）楕円型に変形しており、そこへ小さなインパクトが高速で衝突し、地球の一部がはぎ取られそれが円盤になったというものである（高速回転地球モデル、図1(b)）。Canup⁷⁾は、地球の半分程度の質量をもつ二天体が衝突したモデルを提案した（等質量モデル、図1(c)）。これらの新しいモデルでは、地球と円盤の組成がほぼ同一になるので、地球と月の類似性を説明できる可能性がある。しかしながら、これらのモデルでは現在の地球の自転、月の自転、公転速度等が現在の値よりもはるかに大きくなってしまおうという問題がある。Cuk-Stewart⁶⁾は、これらの速度は月の軌道進化の中で小さくなり、現在の値と一致するようになると考えているが、実際に効率良く速度低下が起こるかは議論が分かれている。

1.2 地球マントル：新たな地球化学的制約

これまで地球と月の同位体比について議論が盛んに行われてきたが、ここでは地球に由来する新たな制約について考えてみる。地球内部は、岩石主体の外側成分（マントル）と鉄主体の内側成分

（コア）に分かれている。これまでの研究から、地球のマントルは過去には不均質であったことが分かっている。これはHf（ハフニウム）-W（タングステン）という元素の地球マントル中の存在比に基づいている。¹⁸²Hfは不安定であり、約900万年程度で¹⁸²Wへと変化する（ここで182は元素の質量数を表す）。また、Hfはマントル（岩石）中に安定する一方、Wはコア（鉄）の中に存在することを好む。従って、マントル中に過剰な¹⁸²Wが発見されれば、それは元来¹⁸²Hfであったはずであり、またその過剰分は¹⁸²Hfがまだ存在していた地球形成初期に作られたはずである。実際、Touboulら⁸⁾やWillboldら⁹⁾は、マントル深部に由来すると考えられる、数十億年前に固化した岩石中に過剰な¹⁸²Wを発見した。これは、地球形成初期にはマントル内に¹⁸²Hfが不均質に分布しており、その不均質性がその後数十億年保存されたことを意味する。もし、この不均質性が巨大衝突（45億年前）以前に形成されたとすると、地球のマントルは巨大衝突によって混ざらなかつたということになる。これまで提案されてきた月形成モデルがこの観測結果を説明できるかについては、まだ詳しい研究は行われていない。

1.3 月形成円盤一水の分量など

次に、月の組成からも巨大衝突モデルに制約をかけられるかもしれない。例えば、月は地球に比べて揮発性元素に乏しいことが知られている。これは、おそらく初期の月形成円盤は非常に高温で、一部の揮発性元素が蒸発しており、それらが

何らかの形で失われ（地球へと落ち込んだか、宇宙空間へと失われたか）、月形成に関与しなかったためであると考えられているが、具体的に何が起こったかについては明らかになっていない。また、近年は岩石中の含水量を高精度で測定できるようになった結果、月の含水量は地球と同程度だった可能性が指摘されている（e.g., Hauriら¹⁰⁾）。水は他の揮発性元素同様、円盤中で一部蒸発し失われたと考えられていたので、これは驚くべき結果である。ただし、月のごく一部である岩石から月全体の含水量を測定するのは非常に難しく、これらの観測には大きな不定性が残されていることに留意したい。このような新たな月の地学的証拠からも、衝突モデルを制約できるはずであるが、これまで月形成円盤の初期の様子は詳細にはわかっておらず、両者を結びつけるのは難しい状況である。

1.4 地球マントルと月形成円盤の初期条件

近年得られてきた地球化学的証拠と、巨大衝突仮説の整合性を検討するため、本研究では巨大衝突後の地球と月形成円盤の初期条件を数値計算によって明らかにする。まず、地球マントルが巨大衝突によって混ざられ、均質化されるかどうかを調べる。さらに、月形成円盤の初期条件を明らかにする。本研究で得られた円盤構造を用いて、将来的に月の揮発性元素量を見積もることを目指す。

2. 巨大衝突計算

2.1 地球マントルのモデル

本研究では、最初に Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法という方法を用いて天体衝突計算を行った。SPH法では、流体が粒子でできているとみなし計算する手法で、天体衝突計算等に幅広く使われている。粒子同士の重力的な相互作用を計算しなければいけないが、これには非常に長い計算時間がかかる（粒子数を N とすると、計算時間は N^2 に比例する）。そこで、本研究では国立天文台の GRAPE という特別なコン

ピュータを使うことによって、計算時間を大幅に減らすことに成功した（e.g., Fukushimaら¹¹⁾ や Steinmetz¹²⁾）。

また、より現実に近い計算を行うために、本研究では新しい状態方程式を構築した。地球のマントルは上部、下部に分けられ、それぞれ異なる物質からできていることが知られているが、これまでの計算ではマントル全体が上部マントルの物質でできていると仮定した計算が頻繁に行われてきた。これは、上部マントルの条件が実験的に再現しやすく、より理解が進んでいるためである。しかし、このままでは下部マントルの物理をうまく追うことができないため、本研究では、以下の二つのモデルを計算した：マントル全体が上部マントル（フォレストライト）の物質からできている場合と、下部マントル物質（ペロブスカイト）でできている場合である。この異なる状態方程式がどのような違いを生むのかを調べた。

2.2 月形成円盤のモデル

円盤の構造については、SPH計算と解析的手法を組み合わせて計算した。これまでのSPH計算では円盤の解像度が低く、具体的な物理を追うのが難しかった。なぜならば、標準的なSPH手法では、粒子が多い部分ほどその箇所の解像度が高くなるが、円盤のような質量の小さい場所では粒子数が少なく、解像度が低くなってしまふのである（各粒子は同じ質量を持っている）。そこで、本研究ではまずSPH法を用いて天体同士の衝突現象を追い、形成される円盤の質量、エントロピー（次の章で解説）、速度の分布などを計算した。次に、これらの分布と、円盤の圧力勾配が重力と釣り合っているという仮定に基づき、円盤の二次元的構造（ r , z 方向）を計算した。ここで、 r 方向は地球の自転軸からの距離、 z 方向は円盤の鉛直方向を表す。

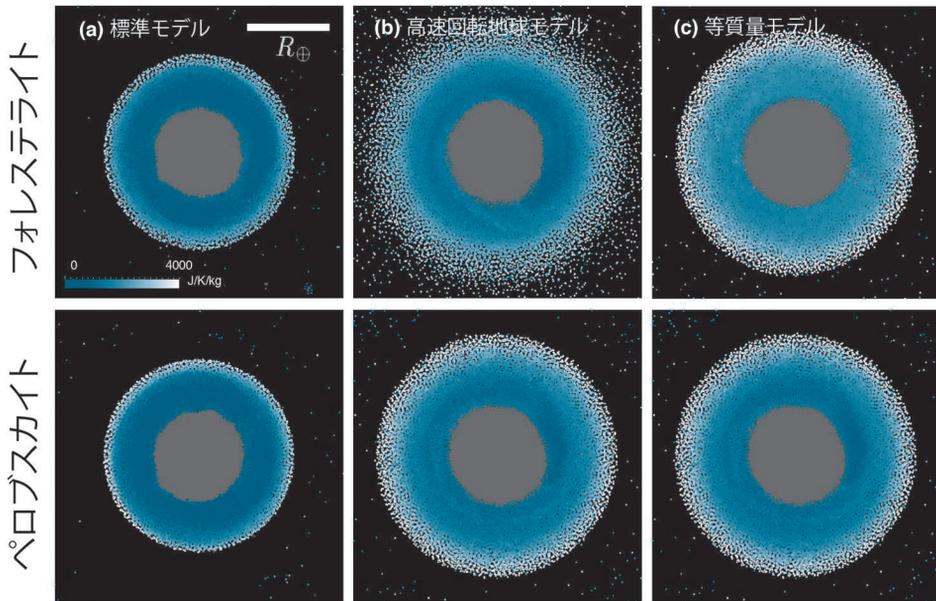


図2 天体衝突後の地球マンツルの断面図を表す。現在の地球の半径 R_{\oplus} が白線で示されている。青-白色はマンツルのエントロピー、灰色はコア（鉄）を表す。

3. 巨大衝突計算

3.1 マンツルの安定性

本研究では、これまで提案された三つの巨大衝突モデルを再現した。図2は、天体衝突直後の地球の断面図を表している。上下のパネルはそれぞれ、マンツル全体がフォステライト又はペロブスカイトで出来ていると仮定している。青-白色はマンツルのエントロピー、灰色が鉄コアを表している。エントロピーはインパクトによってどれだけ物質が温められたかを示し、直感的には（厳密には正しくないが）エントロピーの高い部分（白い部分）が基本的に高温である。数値計算の結果から、衝突後のマンツルの温度構造は物質の種類（フォステライト、ペロブスカイト）にあまり依存しないことがわかった。さらに、近年提案されたモデル (b), (c) は、標準的なモデル (a) に比べて、よりマンツルのエントロピーが高くなる（～高温）ことも分かった。これは、モデル (b), (c) の衝突によって生じるエネルギー

（力学的エネルギー）が、標準的なモデルに比べて大きいためである（衝突速度が大きいため、またはインパクトの質量が大きいため）。特に (c) のモデルでは、二つの天体が何度も衝突を繰り返す、その過程でマンツルは非常に高温になる。さらに、巨大衝突後、(a) ではマンツルの一部（鉄コアとの境界付近）は溶けずに固体のまま存在するが、(b), (c) ではマンツルのほぼすべての部分が溶融することがわかった。

さらに、マンツルの安定性のモデル依存性も明らかにした。数値計算の結果マンツルは表層程高温になることがわかったが、これはマンツルが熱力学的に安定で、対流が起こらないことを意味する。高温の物質は密度が小さくなるので、低温で高密度の物質の上に安定して存在できる。（これは、日常的にも体験することである。例えば、お風呂を暖めたとき、温かいお湯が表面に浮かび冷たい水が下に沈み、両者がよく混ざらないことなどである）。つまり、マンツルは対流によってかき混ぜられることはない。しかしながら、これは

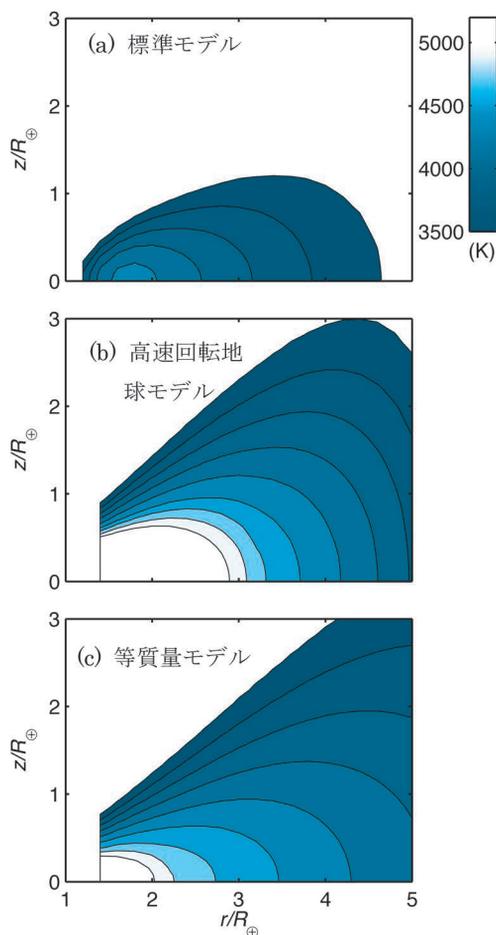


図3 巨大衝突後の円盤の等温線を表している。低温部分（3500 K以下）の温度構造は示されていない為、実際は図で表されているよりも円盤は広がりを持っている。新しいモデル (b), (c) によってできる円盤は (a) の円盤よりも高温である。

すぐマンツルの不均質性が保たれることを意味しない。なぜならば地球マンツルは対流のみならず、力学的な力によって攪拌される可能性があるからである。衝突直後、地球マンツルはインパクトから大きな力を受け、その内部が大きく攪拌され、均質化される可能性がある。SPH計算結果に基づきこの可能性を調べた結果、地球のマンツルは (a) の場合攪拌されず、(b) の場合はおそらく一部攪拌、(c) の場合は完全に攪拌されるこ

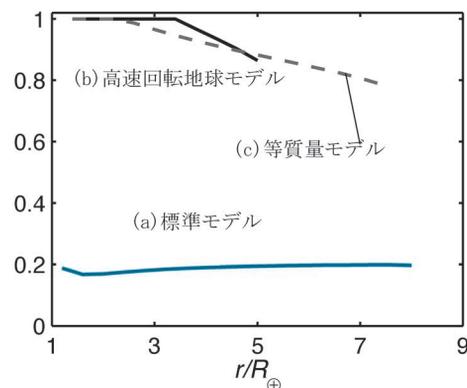


図4 巨大衝突後の円盤の蒸発率の r 方向成分の依存性を表している。モデル (b), (c) の円盤はより高温である為、その結果円盤蒸発率も (a) と比べて高くなっていることが分かる。

とがわかった。これより、マンツルの不均質性を一番うまく説明できるのは (a) の標準的なモデルということになる ((b) でも、マンツルの一部は混ざらないままかもしれない)。近年提案されたモデルでは同位体比を説明できる一方、地球マンツルの不均質性という地球化学的な結果と整合的にならない可能性があることとなる。ただし、一部の科学者は天体衝突後にマンツルの不均質化が起こったことを提案しているなど、まだまださまざまな課題があることを指摘したい。

3.2 月形成円盤

月形成円盤の等温線が図3に示されている。モデル同士を比較してみると、標準的なモデルに比べて、近年提案されたモデル (b), (c) は数千K高い温度をもっていることがわかる。これは、マンツルの議論と同様で、モデル (b), (c) の衝突エネルギーが (a) に比べて高く、円盤を作る物質もより衝撃加熱を受けている為である。この結果、円盤の蒸発率にも違いが生まれる。図4は、円盤の蒸発率の r 方向依存性を表したものである。(a) の場合、蒸発率は r にほとんど依存せず、ほぼ一定値であり液体主体の円盤であるが (気体20%, 液体80%), 近年のモデルではその蒸発率はほとんど100%に近く、円盤の質量の大部分は

気体で占められている。本研究のみからでは、このような高い蒸発率をもつ円盤が現在の月形成につながるか否かについては直接議論できない。しかし、蒸発率の高い円盤は不安定で、月を形成できないという研究結果¹³⁾や、そのような円盤は現在の月の化学的組成をうまく説明できない¹⁴⁾などの可能性が指摘されている。月の揮発性元素量の衝突モデル依存性を確かめる為にも、今後、円盤の温度進化を追う必要がある。

4. 最後 に

本研究は、地球マントルがこれまで混ざったことがないという観測結果や、月の揮発性元素の存在量などと整合的な巨大衝突モデルを明らかにすることを目的として、巨大衝突直後の地球内部や周地球円盤の状態を調べた。地球のマントル、円盤の進化についてはまだわからない点が非常に多く、本研究がその初期条件を決める手助けとなれば幸いである。本研究はDavid Stevenson氏との共同研究であり、詳細は文献15, 16に譲るとする。

参考文献

- 1) Hartmann W. K., Davis D. R., 1975, *Icarus* 24, 504
- 2) Cameron A. G. W., Ward W. R., 1976, *Lunar Planet. Sci.* 7, 120
- 3) Pahlevan K., Stevenson D. J., 2007, *Earth Planet. Sci. Lett.* 262, 438
- 4) Reufer A., Meier M. M. M., Benz W., Wieler R., 2012, *Icarus* 221, 296
- 5) Dauphaus, N. et al., 2014, *Phil. Trans. R. Soc. A*, 372, 20130244
- 6) Cuk M., Stewart S. T., 2012, *Science* 228, 1047
- 7) Canup R. M., 2012, *Science* 228, 1052
- 8) Touboul M., Puchtel I. S., Walker R. J., 2012, *Science* 335, 1065
- 9) Willbold M., Elliot T., Moorbath, 2011, *Nature* 477 195
- 10) Hauri E. H., Weinreich T., Saal A. E., Rutherford M. C., Van Orman J. A., 2011, *Science* 333, 213
- 11) Fukushima T., Ito T., Makino J., Ebisuzaki T., Sugimoto D., 1991, *Publ. Astron. Soc. Japan* 43, 841
- 12) Steinmetz M., 1996, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 278, 1005
- 13) Wada K., Kokubo E., Makino J., 2006, *The Astrophys. J.* 638, 1180
- 14) Pahlevan K., 2013, *Lunar Planet. Sci.* 44, 3073
- 15) Nakajima M., Stevenson D. J., 2014, *Icarus*, 233, 259
- 16) Nakajima M., Stevenson D. J., 2015, *Earth Planet. Sci. Lett.*, in review

The Initial States of the Earth's Mantle and Moon-Forming Disk

Miki NAKAJIMA

California Institute of Technology, Pasadena, CA 91125

Abstract: According to the giant impact hypothesis, the Moon formed from a partially vaporized disk generated by an impact between the Earth and an impactor about 4.5 billion years ago. The details of this process, however, are still debated. Suggested models include; (a) the standard model: a Mars-sized impactor hit Earth; (b) the fast-spinning Earth model: an impact between a fast-spinning Earth and a small impactor; (c) the sub-Earth model: a collision between two half Earth-sized celestial bodies. It has been shown that models (b) and (c) could explain observed similarities of the isotopic ratios between Earth and the Moon, but it is not clear yet if these models are consistent with other geochemical observations. For example, Earth's ancient rocks seem to indicate that Earth's mantle was not mixed at least in the first billion years. This implies that the Moon-forming impact did not have enough energy to mix the mantle. Another observation is that the Moon is depleted in volatiles with respect to Earth. To investigate whether the impact models are consistent with these observations, we have performed giant impact simulations and identified the initial states of the Earth's mantle and the Moon-forming disk. We find that the Earth's mantle remains unmixed in (a), but it may be, at least partially, mixed in (b) and (c). This may indicate that (a) may be more favorable to explain the unmixed mantle. We also find that the Moon-forming disks of the recent models are much hotter than that of the standard model. Our disk model can be used to estimate the Moon's volatile contents in our future work.