

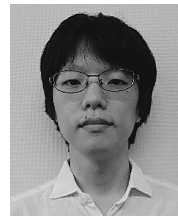
# 月は地球のマグマオーシャンから出来た

細野 七月

〈神戸大学理学研究科惑星科学研究センター

〒650-0047 神戸市中央区港島南町7丁目1番48 神戸大学統合研究拠点3階〉

e-mail: natsuki.hosono@crystal.kobe-u.ac.jp



巨大衝突とは2つの天体同士の衝突現象の事であり、地球の月の起源を説明するために提唱された仮説である。この説によると、原始の地球に火星サイズ程度の原始惑星が衝突し、その衝撃により地球の周りに蒸気化した岩石で出来た円盤が出来上がる。この円盤がやがて冷えて固体になり、重力で集積して現在の月になった。この仮説は地球と月のいくつかの特徴をよく説明出来る一方、月の岩石の同位体比測定の結果と数値計算で得られた結果の間に矛盾が生じる事が指摘されたため、見直しをせまられるようになってきた。本研究では、この見直しの候補として、これまで数値計算に取り入れられてこなかったマグマオーシャンの効果を提唱する。

## 1. はじめに

月は地球の周りを回転する衛星であり、地球に最も近い天体である。「月がなぜそこに存在しているのか？」は、人間が長い間考え続けてきた重要な問題である。この問いは月や惑星がまだ神様のような存在であった時代から始まり、月への着陸に一度は成功した今でもなおそうである。

「月の起源」は惑星科学において極めて重要である。これは月の存在が「惑星の多様性」に密接に関係しているからである。科学の発展とともに人類は宇宙開拓を進め、太陽系の惑星に探査機が飛ぶようになった。これにより、地球以外の天体に関する多様な情報が集まってくるようになったわけだが、それにつれ太陽系の惑星たちには極めて様々な特徴がある事がわかってきた。そして、それに伴い我々が暮らすこの地球とその衛星である月にも他の太陽系内の惑星たちと比べて極めて特殊な特徴がいくつか存在している事がわかってきた。まず、最も特徴的なのが「月の大きさ」である。太陽系内には衛星を持った惑星が地球以外

にも存在しているが、どの衛星もその半径は大きくとも惑星の半径の1/10以下である。ところが、月の半径は地球の半径のおおよそ1/4程度であり、極めて巨大な衛星であると言える。次に、地球・月系の角運動量は他の衛星系の角運動量に比べ非常に大きい。これは、月は地球に対して1/4程度という大きさである事に加え、38万kmという遠いところをおおよそ一月で一周という高速で公転しているためである。更に、月は地球などの他の岩石惑星に比べ、その平均密度が小さい。これは、地球などの岩石惑星に存在している金属のコアが月では極めて小さく、岩石が主成分の天体である事を示唆している。

このように、月は他の惑星と衛星のペアには無い特徴を持ち合わせており、地球・月系は他の衛星系とは違う出来方をした可能性が高い。では、月は具体的にどのように形成されたのだろうか。いろいろ候補はあるのだが、その中でもまず最初に提唱されたのが「分裂説」である。これは高速で自転する原始地球の表面から岩石がちぎれ、それがやがて月になったという説である。しかしな

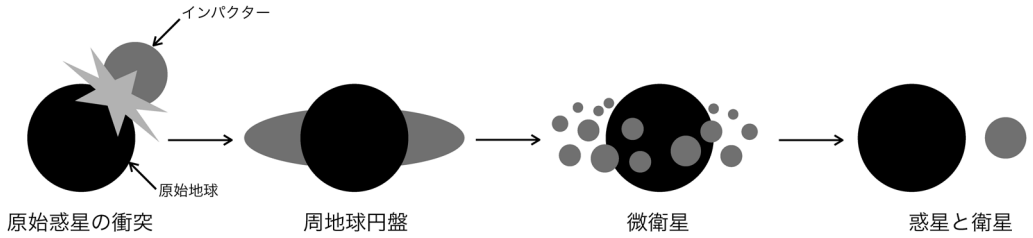


図1 巨大衝突の模式図. 原始の地球に、火星サイズ程度のインパクターが衝突する. これにより、地球の周りに岩石蒸気の円盤が構成される. この円盤がやがて冷え固まり、現在の地球の月になった.

がら、地球が出来る過程において、地球表面から岩石がちぎれるにまで高速の自転が出来るかどうかは不明である. そこで次に「同時形成説」というものが提唱された. これはその名のとおりに、そもそも地球が出来た際にその近くに月もオマケで出来たという仮説である. しかしながら、この仮説だと月の密度が地球と違う事がうまく説明出来ない. もし月が地球と同じような出来方をしたのなら、同じような密度の物が出来上がるはずである. 更に「捕獲説」というものも出てきた. これは、元々惑星として誕生した月がたまたま地球の近くを通り過ぎ、その際に地球に捕獲されたという説である. しかしながら、これも同時形成説と同じく月の密度にやや問題が残る. もし月が元はどこか別のところで地球などと同様に惑星として形成された天体ならば、その密度は他の岩石惑星と同程度でなくてはならない.

さて、このように「月の起源」はいくつか提案されたが、どれも完全にはその特徴を再現出来ないという状態であった. そこで新しく提唱されたのが「巨大衝突仮説」[1, 2]である. この仮説によると、今から46億年ほど前の地球に火星程度の大きさの惑星（インパクター）が斜めに衝突する. この衝突のエネルギーにより、地球やインパクターを作っていた岩石の一部が蒸発して膨張し、飛び出していく. この岩石蒸気はそのまま地球を周回するようになり、結果として地球の周りに岩石の蒸気で構成された「円盤」が構成される. 岩石蒸気円盤はそのうち冷えて固まり、小

い岩石の塊を作る. この岩石の塊が重力で集まる事により、現在の月が出来たとされる (図1).

この巨大衝突仮説は、前述した地球と月の特徴をほぼ全て説明可能である. 例えば、地球と月の大きな角運動量であるが、これはインパクターが衝突した際のその軌道角運動量が現在の地球と月の角運動量とほぼ同じ程度であるとすれば、それが現在の地球と月に保存されているはずである. また、もし衝突時に軽い岩石が多く円盤に行き、一方で重たい鉄に関してはあまり円盤に行かなかったとすれば、月の小さい密度に関しても説明がつく. この仮説を検討するために、これまでいくつかの数値計算が行われてきた [3]. これらの数値計算により、インパクターが地球の脱出速度程度の速度で斜めにぶつかった場合、インパクターから岩石蒸気が吹き出し、現在の月と同程度の質量を持つ岩石蒸気の円盤を形成するという結果が得られた. 言い換えれば、現在我々が見ている月は、46億年前に地球に衝突したインパクターの残り物だという事になる. これは後に「標準的な」巨大衝突と呼ばれるようになる. そして、月の起源は巨大衝突であった、という事で2000年代前半頃に一旦は決着がついたのだった.

ところが2000年代以降になってから、それまでの標準的な巨大衝突の数値計算の結果からは説明出来ない事実が発見された. それが、地球と月の化学的組成の一致である. 1970年前後、人類はアポロ計画により、月から400 kg弱の岩石を持ち帰る事に成功した. そして2000年代が近く

なると、分析機器が発展した事により、この月の岩石の極めて精密な成分分析が行われるようになった[4]。これらの研究によると、地球と月の化学的な成分、例えば酸素やタングステンなどの物質において、その同位体比が極めて高い精度で一致したのである。

さて、これは一体何を意味するだろうか。実は、太陽系内の天体は太陽からどの程度の距離で形成されたかによって固有の同位体比を持つ。すなわち、巨大衝突が起きた際にも、地球には地球の、インパクトにはインパクトの固有の同位体比の値があったはずだ。したがって、地球と月の同位体比が同じになるためには、巨大衝突の際に形成された円盤は地球側から飛び出した物質を主成分として構成されている必要がある事を意味している。

さて、このように地球化学によると月は地球から出来ているはずだが、数値計算は月はインパクトから出来ていると結論付けていた。この2つの結果は完全に矛盾しており、一度は決着がついたと思われた月の起源は再び謎に包まれた。この問題は「同位体比問題」と呼ばれ、月形成や地球科学では深刻な問題として扱われた。

そこでこの同位体比問題を解決するための案として、いくつか標準的ではない巨大衝突が提唱されてきた。その中の一個が「高速回転説[5]」であり、衝突時の原始地球が高速で回転していたとする説である。この説によると、元々高速で自転している原始地球にやや小さめの原始天体が衝突したとすると、原始地球から大量の物質が一気に飛び出し、結果として原始地球由来の成分が多い円盤が出来上がるという仮説である。しかしながら、分裂説と同様、地球がその形成の過程で高速の回転を得る事はやや難しい。また、同じ大きさの天体2つが衝突したとする「双子衝突説[6]」も出てきた。この説では、ほぼ同じ大きさの2つの天体が衝突し、円盤と原始惑星は均一に混ざるため、衝突後に出来上がる原始地球及び円盤は自

然とほぼ同じになる。更に、極めて高エネルギーの衝突によって岩石部分が全て蒸発し、全てが混ざり合ってから地球と月が形成された、という仮説も出てきた[7]。一方、地球の内部の観測からは、原始地球はあまり高温すぎる状態になってはいけないという研究もあり[8]、衝突により何もかも混ぜて地球と月を作るのはこの観測結果と矛盾する。この他にも、インパクトは原始地球に衝突した後にとどこか遠くへと飛び去ってしまったとする「当て逃げ説[9]」、小規模な衝突を何回も繰り返したとする「複数衝突説[10]」などなど、実に様々な亜種が提唱された。しかしながら、これらの説では説明が出来ない組成もあるため、どの説も残念ながら完全な解決には至っていないと言えよう。

ではもっと単純に考えて、原始地球とインパクトが全く同じ化学的成分を持っていたと考えればどうだろうか。もし、インパクトが地球とほぼ同じ軌道上で形成されたとすれば、原始地球と衝突天体が同じ同位体比を持っていた事になる。しかしながら、同じ軌道上に同程度の質量の惑星を複数作る事は難しいうえ、仮にそのような事があったとしても、タングステンの同位体比を説明するのが難しい[11]。タングステンの同位体比は、惑星が形成されてからの時間で決まるので、もし原始地球とインパクトが同じタングステン同位体比を持つならば、形成場所のみならず形成時期まで一致している必要が出てきてしまう。

また、これらの標準的ではない巨大衝突には月の形成確率という観点からも疑念が残る。これらの巨大衝突では月形成が可能なパラメータ領域が狭く、月は極めて低確率でしか出来ない「ラッキー・サテライト」になってしまう。月の出来る確率がどのくらいであるべきか、というのは少々難しい問題であるが、やや乱暴な考え方をすれば今我々の太陽系の中の岩石惑星4つのうち月のような巨大な衛星を持っているのは地球のみなので、月の形成確率は概ね1/4程度である事が望ま

しいと言える。

このように、月の起源に関してはあちらが立てばこちらが立たず、といった状況になってしまった。その中で、あらたな仮説として「マグマオーシャン仮説」というものが提唱された [12]。この仮説は、インパクトが衝突した際に、原始地球は「マグマオーシャン」と呼ばれるどろどろに融けた岩石の海に覆われていた、とする仮説である。実は岩石は、固体の状態と液体の状態だと加熱に対する挙動が大きく異なる事が示唆されている [13]。具体的には、固体の岩石に比べ液体の岩石は、加熱された際により急激に膨張する。そこで、もしインパクトにはマグマオーシャンが無く固体の岩石のみで構成されていたとすると、衝突時の固体と液体の非対称な加熱が起これ、地球のマグマオーシャンに存在する物質の方が大きく膨張して軌道に飛び出す。これにより、原始地球側から物質が円盤に行くという理屈である。

この仮説では、地球を覆うマグマオーシャン以外に標準的な巨大衝突仮説との違いは存在しない。ただし、この仮説は未だに流体数値計算による検証などが行われてきておらず、実際にマグマオーシャンを持った原始地球上にインパクトが衝突した際に、本当に選択的にマグマオーシャン側から物質が飛び出すかは必ずしも自明ではない。

そこで本研究では、このマグマオーシャン仮説を流体数値計算により確かめる事を目的とした。そのためには、液体の岩石の特徴を流体数値計算に組み込む必要がある。しかしながら、これまでマグマオーシャンのような高温・高圧下での液体の岩石を用いて巨大衝突の数値計算をした例は存在しなかった。これはなぜかという、そのような高温・高圧下での液体の岩石の特徴をよく再現できて、かつ流体の数値計算に適応可能な状態方程式が存在していなかったからである。そこで、本研究ではまず高温・高圧下での液体の岩石の特徴をよく再現できると確かめられた状態方程式 [13] を、流体の数値計算手法に組み込むように

式変形した。その後、マグマオーシャンを持った原始地球への巨大衝突の数値計算を行う事で、実際に原始地球由来の物質が多い円盤を作る事が出来るかを検証する事を試みた。

本稿では、まず我々がこのマグマオーシャン仮説の検証を行うために実際に使用した計算手法を簡単に説明した後、その結果を紹介する事にしよう。そして最後に、本研究から月形成に対して何と言えるかを考察していく事とする。

## 2. 計算手法

本章では、本研究において巨大衝突の数値計算を行うために用いた手法に関して説明する。ただし、標準的な計算手法に関しては先行研究 [3] などに詳しく載っているため、本稿ではそれら先行研究から改良を加えた三点、具体的には数値計算手法、大規模並列計算法、及び液体の岩石の状態方程式の三点に関して記述する。

### 2.1 数値計算手法

まずは、巨大衝突の数値計算がこれまでどのような数値計算手法によって行われてきたか紹介しよう。これまで様々な巨大衝突の数値計算が行われてきたが、そのほぼ全てに Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法 [14, 15] と呼ばれる粒子的流体数値計算手法が使われてきた。この SPH 法には、流体間に働く重力の計算が楽であったり、流体が大きな変形をする、あるいはいろいろな物質が混在する系が得意などの長所があるため、巨大衝突の数値計算に適している手法である。一方で、標準的な SPH 法には接触不連続面の取扱いが苦手であるという問題点も報告されてきた [16]。具体的には、標準 SPH 法では接触不連続面に非物理的な表面張力のような力が働くのである。なぜこのような非物理的な力が働くのかと言うと、“smoothed” の名が示すとおり、SPH 法では何かしらの物理量を連続的になす必要があるわけだが、標準 SPH 法では密度をなますからである。しかしながら本来接触不連続面では、



密度は不連続である。標準SPH法はこれをなまして連続的にしようとするため、接触不連続面の周りに大きな密度の誤差を生む。これが圧力に対しても誤差を与え、結果として物理的に存在しない圧力勾配が発生する。巨大衝突においては、惑星のコアとマントル境界の部分は接触不連続面になっているため、この問題点を克服する事は重要である。

そこで、我々はDensity Independent SPH (DI-SPH) 法 [17-19] と呼ばれる新しいSPHの定式化を開発した。この新しいSPH法では、密度ではなく圧力をなます。接触不連続面前後では、密度は不連続であるが、圧力は連続である。したがって、この圧力をなますという取扱いは接触不連続面周りでの誤差を大きく軽減する事が出来る。実際、この手法はすでに巨大衝突に適用され、標準SPH法とDISPH法の結果の間には大きな違いが見られる事が指摘されている [20]。我々はこのDISPH法を用いて巨大衝突の数値計算を行う事にした。これにより惑星のコアとマントルの境界をより正しく行う事が出来る他、固体マントルとマグマオーシャンの境界も正しく扱う事が出来る。

## 2.2 大規模並列計算法 (FDPS)

SPH法を用いる際に問題になるのが、その計算時間である。SPH法は粒子法であるため、粒子一つ一つの座標はその粒子に働く加速度とともに時間変化していく。そして、この一つの粒子に働く圧力勾配はその粒子から見て周囲にある粒子との相互作用の足し合わせによって表現される。そのため、「全粒子の中から相互作用する粒子を探す」という処理を全粒子に対して毎ステップ行わなくてはならず、計算コストがかかる。にもかかわらず、巨大衝突の数値計算では、衝突角度、衝突速度、衝突天体の質量など、いろいろな場合での衝突の計算を行う必要があるが、一般的に粒子法において効率のよい大規模並列計算コードを書くのは簡単ではない。

そこで、著者も開発に参加しているFramework for Developing Particle Simulators (FDPS) [21, 22] と呼ばれるプログラムを用いて大規模な並列計算が可能なSPHコードを開発した。FDPSは任意の粒子法を自動的に大規模並列計算可能なコードにするプログラムである。具体的には、FDPSは粒子法プログラムを並列計算に必要な部分と相互作用計算に必要な部分に分割する。ユーザーは相互作用計算のみを書く必要があり、並列計算部分は全てFDPSが担当する。この新しいコードと、「京」を用いて我々は巨大なパラメータのサーベイを行った。FDPSはオープンソースソフトウェアとして開発されており、誰でもダウンロードして使う事が出来る (<https://github.com/FDPS/FDPS>) ため、興味が出たらぜひ使ってみていただきたい。

## 2.3 マグマオーシャンの状態方程式

マグマオーシャンを持った原始地球への巨大衝突の数値計算を行うためには、液体の岩石の特性を流体数値計算手法に組み込む必要がある。これには、液体の岩石の挙動を正しく再現するための「状態方程式」と呼ばれるものが必要である。状態方程式とは、流体の持つ圧力を体積と温度（ないしは内部エネルギー）の関数として書いたものの事である。

さて、この状態方程式には、固体の岩石には固体の岩石用の、液体の岩石には液体の岩石用のものが存在しており、固体と液体の振る舞いの違いはこの状態方程式の違いに反映される。固体の岩石には古くから用いられている状態方程式が存在するが、液体の岩石の状態方程式は、その実験の難しさなどからあまり確立したものが存在していなかった。

今回の研究では、Jingら [13] によって開発された状態方程式を用いる事にした。この状態方程式は、惑星のマグマオーシャンのように高温かつ高圧下での液体の岩石の特徴をよく再現出来ること示されたからである。

### 3. 結 果

図2は、本研究で実施した計算から得られた結果である。グレーの粒子は原始地球由来の物質、黒の粒子はインパクター由来の物質である。上の段はマグマオーシャンが存在する場合の結果であり、下の段は存在しない場合の結果となっている。

まず、マグマオーシャンが存在する場合の結果から見ていこう。最初にインパクターが原始地球に対し接近する（パネル (A)）。そして、インパクターは原始地球に対して斜めに衝突する（パネル (B)）。この衝突により、原始地球とインパクターから蒸発した岩石が飛び出す（パネル (C)）。これにより、原始地球の周りに大量の岩石蒸気がばら撒かれる（パネル (D)）。

次にマグマオーシャンが存在しない場合の結果（下段）を見てみよう。パネル (b) 及び (c) から、マグマオーシャンが無い場合は存在する場合に比べ、インパクターから物質が飛び出そうとし

ている事が見て取れる。最終的に原始地球の周りに出来上がる円盤の構成物質も、マグマオーシャンの有無で違う事がわかる。マグマオーシャンが存在する場合（パネル (D)）は原始地球由来の成分が円盤中に多く含まれるが、そうでない場合（パネル (d)）はインパクター由来の成分が円盤に多く混ざる。これから、マグマオーシャンの存在が円盤の物質の比率を大きく変えるという事がわかる。

次にこのような計算を、インパクターの軌道のパラメータ、すなわち衝突角度や衝突速度を変えて行ってみよう。各々の計算で得られた円盤の質量と、円盤中の原始地球由来の成分の割合を定量的に評価してプロットしたものが図3である。横軸は衝突後に出来上がった円盤の質量を現在の月の質量で規格化したものであり、縦軸はその円盤中の原始地球由来の成分の比である。丸い点がマグマオーシャンが存在する場合での計算結果であり、四角の点はマグマオーシャンが無かった場合の計算結果である。現在の月を説明するには、円

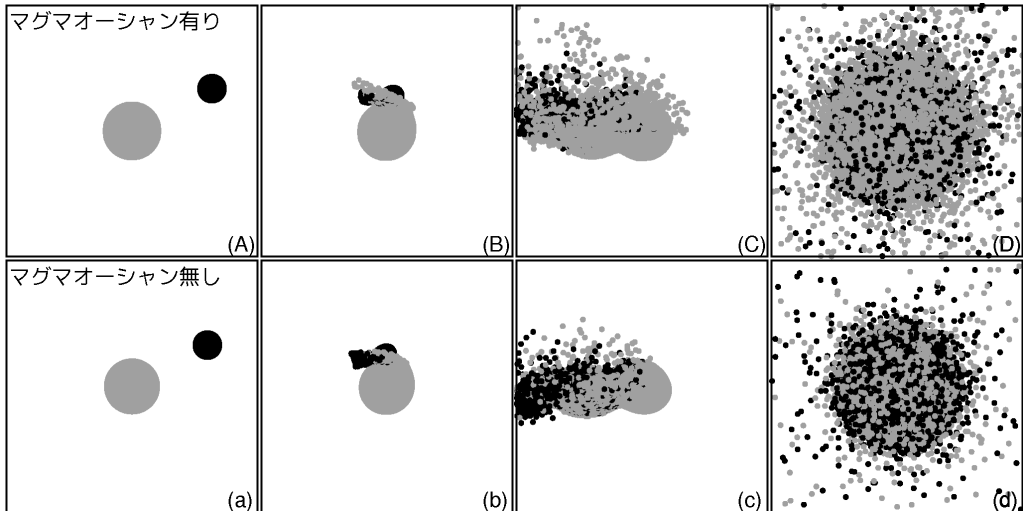


図2 巨大衝突の数値計算の結果を示したもの。グレーの粒子は原始地球由来の物質、黒の粒子はインパクター由来の物質である。上の段はマグマオーシャンが存在する場合の結果、下の段は存在しない場合の結果である。パネル (A) 及び (a) は衝突前のインパクターの位置である。パネル (B) 及び (b) は衝突直後で、パネル (C) 及び (c) は衝突中の様子である。また、パネル (D) 及び (d) は衝突から3日程度経ち、円盤が出来た後の様子である。

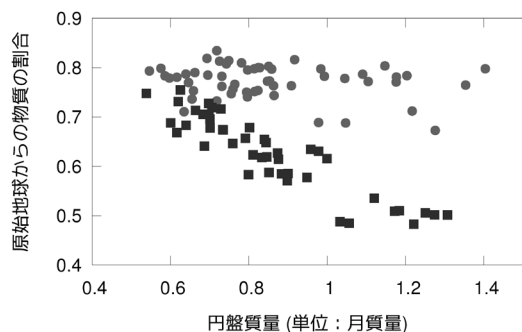


図3 個々の巨大衝突の数値計算から得られた円盤の質量と、その中の原始地球由来の成分の比を示したもの。丸はマグマオーシャンが原始地球上に存在する場合の計算結果で、四角は存在しない場合の計算結果。

盤質量が少なくとも1よりも大きくなければならない。また、月と地球の化学組成の一致を説明するには、原始地球由来の物質の比が高い必要がある。以上から、この図の右上の領域が「月形成可能な領域」であるという事になる。実際、図3の右上には、数個の丸の点が存在しており、これらが月形成が可能な衝突領域の候補という事になる。一方で、四角い点はこの領域に存在しないため、原始地球にマグマオーシャンが存在しない場合、現在の月と地球の組成を説明可能な衝突は存在しない事がわかる。

#### 4. 結論及び将来の展望

本研究では、巨大衝突説によって現在の月と地球の組成の一致を説明するための鍵となる要素として、マグマオーシャンが妥当かどうかを数値計算を用いて評価した。その結果、マグマオーシャンが存在する場合としない場合では、形成されるであろう月の岩石中の原始地球由来の成分の割合が大きく異なる事がわかった。マグマオーシャンが存在する場合、月は原始地球から飛び出した物質から主に作られる事となる。これにより、これまでの巨大衝突説では説明がつかなかった、地球と月の組成の一致を自然に説明できる可能性があ

ると言えよう。

一方で、マグマオーシャン仮説にはまだ課題が残っている。例えば、マグマオーシャンの年齢である。惑星形成論では、巨大衝突を起こす期間は概ね $10^8$ 年程度で[23]、巨大衝突の頻度は概ね $10^7$ 年に一回程度と見積もられている。ところが、マグマオーシャンが原始地球全体を覆っていられる時間はこの時間よりもかなり短いと考えられている。したがって、マグマオーシャンが原始地球の全体を覆っている状態で巨大衝突が起こる可能性は実は高くない。ただし、もしマグマオーシャンが原始地球全体を覆った状態ではなく、部分的に存在している状態であれば、 $10^{7-9}$ 年程度と長い時間存在していられる[24]。そのため、部分的に溶融した状態の原始地球に衝突が起こった場合にも今回の研究で行ったような計算結果が再現出来るかどうかを確かめる計算が求められるだろう。

また他にも、今回は月形成可能な条件として円盤質量が現在の月質量以上である事を設定したが、実際には円盤全てが月になれるわけではない。円盤のうち一部は地球に落下したり、あるいは系から脱出してしまうものが存在するため、円盤質量は月質量より1.5-2.0倍程度はある事が好ましい。したがって、より重い円盤を作るための条件を探す必要がある。例えば、今回の研究では原始地球と衝突天体の質量比などは固定したが、今後はこれらも含めたより広いパラメータレンジをサーベイする必要があるだろう。

月形成は、惑星の多様性を説明するという観点と、現在の地球の初期条件になるという観点から、極めて重要な現象である。しかしながら、現在のところ現在の地球と月の組成の一致を説明可能な、決定的と呼ばれるシナリオは存在していない。本研究のマグマオーシャンシナリオが、その決定的となるシナリオを見つけるための大きな手がかりになると幸いである。

## 5. 謝 辞

本稿の内容はすでに出版済みの査読付き論文 [25] に基づくものであるため、詳しくはそちらを参照していただきたい。本稿を書くために行われた数値計算は、理化学研究所計算科学研究センターの「京」コンピュータ (Project ID: ra000008) を用いた。また、本稿を執筆する機会を与えてくださった押野翔一氏、原論文の共著者である唐戸俊一郎氏、牧野淳一郎氏、斎藤貴之氏に感謝を申し上げる。

## 参考文献

[1] Hartmann, W. K., & Davis, D. R., 1975, *Icarus*, 24, 504  
 [2] Cameron, A. G. W., & Ward, W. R., 1976, 7, 120  
 [3] Canup, R. M., 2004, *Icarus*, 168, 433  
 [4] Wiechert, U., et al., 2001, *Science*, 294, 345  
 [5] Ćuk, M., & Stewart, S. T., 2012, *Science*, 338, 1047  
 [6] Canup, R. M., 2012, *Science*, 338, 1052  
 [7] Lock, Simon J., et al., 2018, *J. Geophys. Res.: Planets*, 123, 910  
 [8] Mukhopadhyay, S., 2012, *Nature*, 486, 101  
 [9] Reufer, A., et al., 2012, *Icarus*, 221, 296  
 [10] Rufu, R., et al., 2017, *Nat. Geosci.*, 10, 89  
 [11] Kruijer, T. S., & Kleine, T., 2017, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 475, 15  
 [12] Karato, S.-i., 2014, *Proc. of the Japan Academy, Series B*, 90, 97  
 [13] Jing, Z., & Karato, S.-i., 2011, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 75, 6780  
 [14] Lucy, L. B., 1977, *ApJ*, 82, 1013  
 [15] Gingold, R. A., & Monaghan, J. J., 1977, *MNRAS*, 181, 375  
 [16] Agertz, O., et al., 2007, *MNRAS*, 380, 963  
 [17] Saitoh, T. R., & Makino, J., 2013, *ApJ*, 768, 44

[18] Hopkins, P. F., 2013, *MNRAS*, 428, 2840  
 [19] Hosono, N., et al., 2013, *Pub. Astron. Soc. Jpn.*, 65, 108  
 [20] Hosono, N., et al., 2016, *Icarus*, 271, 131  
 [21] Iwasawa, M., et al., 2015, *WOLFHPC '15*, 1:1  
 [22] Iwasawa, M., et al., 2016, *Pub. Astron. Soc. Jpn.*, 68, 54  
 [23] Kokubo, E., et al., 2006, *ApJ*, 642, 1131  
 [24] Solomatov, V., 2007, in *Treatise on Geophysics*, ed. Schubert, G., (Elsevier, Amsterdam), 91  
 [25] Hosono, N., et al., 2019, *Nat. Geosci.*, 12, 418

## The Moon May Come from the Terrestrial Magma Ocean

Natsuki HOSONO

*Center for Planetary Science, Integrated Research Center of Kobe University, 7-1-48 Minatojima-Minamimachi, Chuo-ku, Kobe 650-0047, Japan*

Abstract: The Giant Impact hypothesis is a collision between two planetary embryos, which is suggested as the origin of the Moon. According to this scenario, a Mars-sized impactor hit the proto-Earth and generated a circumterrestrial debris disc which later formed the Moon. Although this scenario can satisfy several constraints in the Earth-Moon system, recently, we found a mismatch between the high-precision measurement of chemical compositions of lunar rocks and the results of numerical simulations. We suggest that the magma ocean, which may cover the proto-Earth, is one of the modifications to the classic giant impact theory.