

令和 5 年 5 月 30 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14826

研究課題名（和文）原始地球のマグマオーシャンが、巨大衝突と地球-月系の形成に与える影響の評価

研究課題名（英文）Terrestrial magma ocean origin of the Moon

研究代表者

細野 七月（Hosono, Natsuki）

神戸大学・理学研究科・特命助教

研究者番号：70736298

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：巨大衝突とは、地球の月の起源になったとされている現象であり、これまでに幾つかの数値計算によりその妥当性が検証されてきた。これにより、月は衝突してきた側の天体から形成された事が示唆された。一方で、高精度同位体比計測を地球及び月の石に行くと、月は原始地球の側から形成される事がわかり、数値計算結果と矛盾した。

本研究では、この巨大衝突時に、原始地球の上にマグマオーシャンと呼ばれる液体岩石の層が存在する場合を考えた。液体岩石の状態方程式として、我々が開発したものを含め幾つか提案されているものを用いて計算した。その結果、我々の状態方程式を用いた場合、原始地球から多くの物質が円盤に行く事がわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球と月の石の同位体比が一致するという事実を説明するために、近年では幾つか標準的では無い衝突シナリオを提唱する研究も多い。しかしながら、それらの研究ではどれも基本的に確率的には低い現象であるという問題もある。我々のマグマオーシャン仮説では、原始地球の上にマグマオーシャンが存在する以外は標準的な巨大衝突シナリオと変わらないため、惑星形成後期では珍しくないイベントであると言える。また、本研究から、原始地球にマグマオーシャンが存在した時期、深さなどにもある程度成約がかけられると考えられる。本研究は、惑星科学及び地球科学から見ても重要な研究であると言える。

研究成果の概要（英文）：The Giant Impact (GI) is a collision between two planetary embryos. According to the numerical simulations, the Moon forms from the impactor-rich debris disc. However, contemporary isotopic composition measurements indicate that lunar and terrestrial rocks show near identity, meaning that the Moon should form from the proto-Earth. To resolve this issue, we conducted numerical simulations with a proto-Earth covered by a magma ocean and solid impactor. For an equation of state (EoS) for a magma ocean, we assessed different EoSs, including that we suggested. As a result, if we use an EoS, we suggested for a magma ocean, the debris disc forms mainly from proto-Earth.

研究分野：惑星科学

キーワード：月 地球

1. 研究開始当初の背景

巨大衝突は、二つの原始天体どうしの衝突の事であり、地球の月の起源として現在広く信じられている。この仮説によると、今から 46 億年前、原始の地球に火星サイズ程度の天体が衝突する。この衝突により、衝突してきた側の天体は蒸発し、地球の周囲に蒸発した岩石円盤を作る。この岩石円盤が冷えて固体になり、最終的に集積して地球の月となる。この仮説が実際に地球の月を説明できるか確かめるために、これまでに幾つかの数値計算が行われた(Canup et al., 2001 など)。それにより、この現象は地球と月を説明できると結論づけられた。

一方、地球の石と月の石の高精度同位体比測定が行われた結果、地球と月の石の同位体比は極めて高い精度で一致する事が報告された(Melosh, 2014 など)。これは、月は衝突してきた側の天体ではなく、原始地球の側から形成された事を意味する。これは数値計算結果と矛盾し、大きな問題として取り扱われてきた。

この問題を解決するために、幾つか非標準的な巨大衝突が提唱されてきた。これらの仮説の中には同位体比問題を解決したのもあったが、一方で、月形成が極めて稀なイベントになるという問題点も抱えていた。

また、これらの非標準的なシナリオの問題点として、地球と月の石の FeO と MgO の比が説明できないという物もある。ほぼ完全に一致している同位体比と違い、月の石は FeO が地球の石より多いという特徴がある(Melosh, 2014)。したがって、巨大衝突説はこの同位体比の一致と FeO/MgO 値の違いを同時に説明する必要がある。

そこで、Karato (2014)では、衝突時に原始地球の上にマグマオーシャンと呼ばれる液体の岩石が乗っている場合を考えた。液体岩石を持った原始地球と固体インパクターの間で衝突が発生すると、非対称な加熱が発生し、液体岩石の方が選択的に加熱される可能性を熱力学的に示唆した。これにより、地球のマグマオーシャンの方が急激な加熱膨張し、円盤に行く。地球形成の後期の段階では、その集積熱により、表層の岩石が融解している可能性は高い。したがって、この仮説は月の形成確率にも大きな影響を与えないと期待される。また、液体岩石は固体岩石と同位体比は変わらないが、FeO/MgO に関してはその融点の違いから違う値を持つ事になる。

2. 研究の目的

本研究では、このマグマオーシャン仮説が実際に地球と月の同位体比問題を解決できるかを確かめるために、マグマオーシャン仮説の数値計算を行う事を目的とした。数値計算結果から得られた円盤の質量に加え、円盤の原始地球比率や FeO 成分の偏りなどを導出し、それらからマグマオーシャン仮説が月の力学的及び化学的側面を同時に満たせるかを確かめる。

3. 研究の方法

本研究では、マグマオーシャンを持った天体への巨大衝突への数値計算を行う。ここで重要なのが、マグマオーシャンの状態方程式である。高温高压下での液体岩石の状態方程式は、精確な物を導出するのが難しく、幾つか候補がある。そこで、本研究ではこれまで使われてきた M-ANEOS と呼ばれる状態方程式に加え、Jing and Karato (2011)にて開発された、剛体球理論による状態方程式を流体計算に適用可能なようにした物を使う事にした。

また、数値計算手法に関しては、これまで広く用いられてきた Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)法を用いる。しかしながら、標準的な SPH 法は密度不連続面を取り扱うのが苦手であるという問題もあるので、今回は Density Independent SPH(Hosono et al., 2013)と呼ばれる密度不連続面の取り扱いに長けた SPH を用いる事にした。

4. 研究成果

図 1 は、実際に得られた粒子分布である。これから、マグマオーシャンの状態方程式に剛体球モデルを用いた物と、M-ANEOS を用いた物では、最終的に得られる粒子分布が違う事がわかる。剛体球モデルを用いた場合、地球のマグマオーシャン由来の粒子が地球の周辺に分布する。

図 2 は、数値計算から得られた円盤の質量と同位体比の偏り及び FeO/(FeO+MgO)の偏りの時間進化を示した物である。月形成を説明するには、まず円盤質量は月質量以上であること、同位体比の偏りは概ね 0.15 程度以下であること、FeO/(FeO+MgO)の偏りは 0.5 前後程度である事が要請される。図 2 から、M-ANEOS を用いると、同位体比の偏りが大きく出るが、剛体球モデルだと 0.15 に極めて近い値になる事がわかった。

これらの事から、マグマオーシャン仮説は、月形成の化学的問題を解決する可能性があるが、そのためにはマグマオーシャンの状態方程式として剛体球を用いる事が必要である事がわかった。本研究から、地球と月の力学的制限と化学的制限を同時に満たすには、必ずしも非標準的な衝突を考える必要は無い事がわかった。更に、本研究の結果から、マグマオーシャンの深さや存在期間、衝突のタイミングなどに関しても制約がつかると期待される。

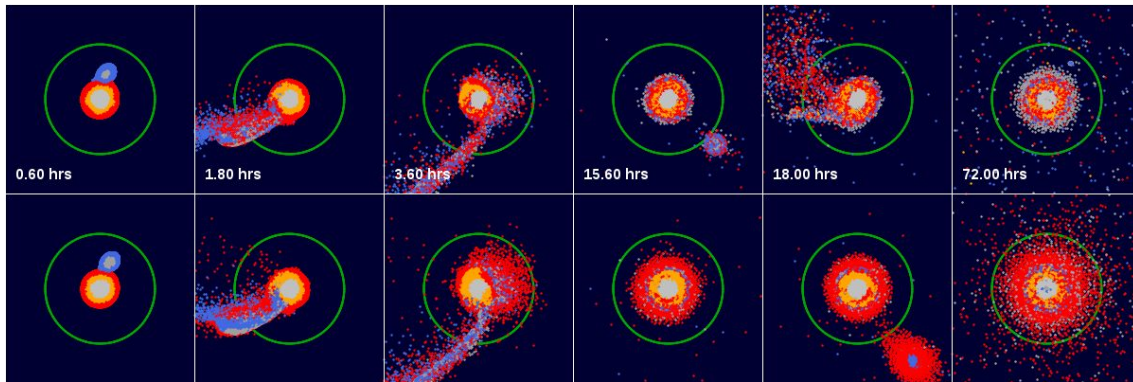


図1: 数値計算から得られた粒子の分布。上段はマグマオーシャンの状態方程式として M-ANEOS を用いた物、下段は剛体球モデルによるものを用いた結果である。赤い粒子は原始地球のマグマオーシャン、オレンジの粒子は深部の固体マントルであり、グレーの粒子は鉄コアである。また、青い粒子はインパクターのマントルである。左下の数字は衝突からの時間である。

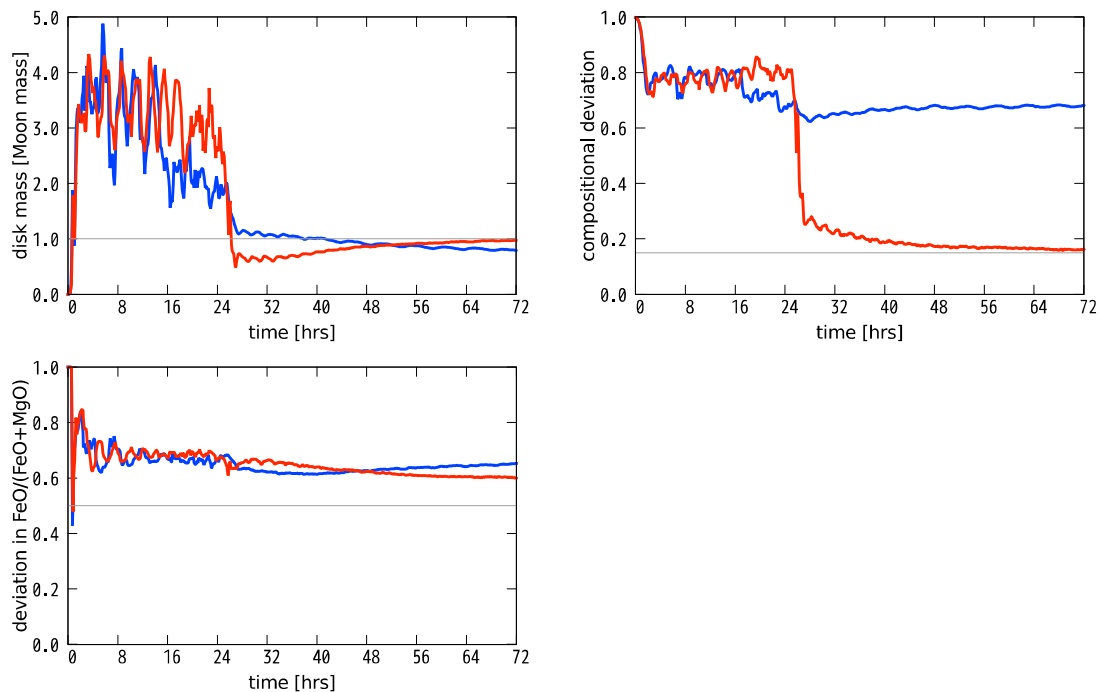


図2: 円盤質量、同位体比の偏り、FeO/(FeO+MgO)の偏りの時間進化を示した物。赤はマグマオーシャンに剛体球モデルを用いた物、青はM-ANEOSを用いた物。

引用文献

- Canup, R. M., Ward, W. R., & Cameron, A. G. W., 2001, *Icarus*, 150(2), 288-296.
- Hosono, N., Saitoh, T. R., & Makino, J., 2013, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 65, 108.
- Jing, Z., & Karato, S.-i., 2011, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(22), 6780-6802.
- Karato, S.-i., 2014, January, *Proceeding of the Japan Academy, Series B*, 90(3), 97-103.
- Melosh, H. J., 2014, *Phil. Trans. Royal Soc. A*, 372, 20130168.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hosono Natsuki, Karato Shun ichiro	4. 巻 127
2. 論文標題 The Influence of Equation of State on the Giant Impact Simulations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Planets	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2021JE006971	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------