

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13562

研究課題名(和文)月形成確率に関する理論的研究

研究課題名(英文)On the probability of moons formation

研究代表者

玄田 英典(GENDA, Hidenori)

東京工業大学・地球生命研究所・特任准教授

研究者番号：90456260

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：天体衝突コードを天体の軌道進化と天体間の衝突の両方を考慮した計算コードを作成し、地球型惑星形成の最終段階である巨大天体衝突ステージの計算を10通り行い、衝突条件を抽出した。火星で起こる可能性のある巨大天体衝突に注目し、現在の小さな2つの衛星が、巨大天体衝突によって形成可能であることを示した。また、計算コードを外惑星領域で起こる巨大天体衝突に適用し、冥王星の衛星であるカロロンが同様に巨大天体衝突で形成可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：We developed the new numerical code that includes the orbital evolution of protoplanets and collisional process of them. We carried out 10 simulations of terrestrial planet formation, and extracted the impact conditions for giant impacts. First we focused on the Martian moons, and discussed the possibility of their formation via a giant impact onto Mars. Next we showed that Pluto's satellite Charon can also be formed by a giant impact that happened in the outer solar system.

研究分野：惑星物理学

キーワード：巨大天体衝突 地球型惑星形成 円盤進化

1. 研究開始当初の背景

月の起源としてジャイアントインパクト仮説がある。原始地球に火星サイズの原始惑星が低速で斜め衝突をし、原始月円盤が形成され、その円盤から月が作られたとする説である[1]。この説が他の仮説(分裂説・共成長説・捕獲説)よりも、地球-月系の物理的・化学的な特徴を説明するため、現在もっとも有力な説とされている。

さらに最近では、月と地球の酸素同位体組成の一致をも説明する衝突条件がいくつか発見されはじめている。高速回転する原始地球に火星サイズよりも小さい天体が高速で衝突した場合[2]や、同質量の天体同士が衝突した場合[3]、衝突天体が原始地球に合体しない場合である[4]。あらゆるすべての衝突条件が探索されたわけではないが、確かに上記のような衝突が地球形成時に実際に起これば、現在の月の物理的・化学的・同位体的特徴と調和的な衛星が形成されうるといことはわかってきている。しかし、実際にそのような衝突がどのような確率で起こるのか? また上記であげた衝突条件以外に月を形成するような衝突があるのかどうかについてはよくわかっていないのが現状である。さらに、地球には大きな衛星が1つ、火星には小さな衛星が2つ存在するが、金星や水星には衛星が存在していない。つまり、地球に月が存在しているのが偶然なのか必然なのかということについては定量的には解明されていないという現状がある。

2. 研究の目的

巨大天体衝突による衛星形成とその後の軌道進化において重要な以下の4つのプロセスに注目し、惑星が形成したときに衛星が形成される可能性・確率を定量的に明らかにすることを本研究の目的とする。考慮するプロセスとしては、(1)原始惑星の軌道進化、(2)原始惑星同士の衝突、(3)原始衛星円盤からの衛星の形成過程、(4)惑星-衛星系の潮汐進化、である。

3. 研究の方法

(1)原始惑星の軌道進化、については4次精度のエルミート法[5]を用いることによって天体間の衝突イベントを見逃すことなくすべての衝突イベントを検知する計算コードを作成する。(2)原始惑星同士の衝突、に関しては、これまでに代表者が作成してきたSPH法を用いた天体衝突計算コードの改良を行う。具体的な改良点としては、より現実的な物質の状態を扱えるM-ANEOS[6]状態方程式の導入を行う。また、物質境界面や自由境界面を正しく扱うことのできるDISPH法[7]を衝突計算コードに組み込み、巨大天体衝突シミュレーションを行う。上記(1)と(2)の2つのプロセスを統一的に扱う計算コードを作成して、地球型惑星形成の後期段階である巨大天体衝突ステージにおける惑星形成

シミュレーションを行い、巨大天体同士の衝突条件について系統的に調べる。

(3)原始衛星円盤からの衛星の形成過程については、地球の月形成のような質量の大きな円盤の進化だけでなく、小さな衛星の形成が期待される質量の小さな円盤の進化も追えるような計算コードであるHYDRORINGコード[8]を用いて、実際に形成された円盤に適用し、形成される衛星の性質(個数・質量・軌道要素)を調べる。

(4)惑星-衛星系の潮汐進化、については、地球-月系だけでなく系外惑星の衛星潮汐進化までを広く扱った潮汐進化コード[9]を使用する。

4. 研究成果

まず、天体の軌道進化と天体間の衝突の両方を考慮した計算コードを作成し、地球型惑星形成の最終段階である巨大天体衝突ステージの計算を10通り行った[Genda et al. 2017 EPSL]。その結果、形成される地球型惑星の数や質量、その軌道分布などについては、過去に行われた衝突プロセスを考慮しない研究[10]で得られた結果と調和的な結果が得られた。一方で、個々の衝突で放出される破片量は、無視できる量ではなく、すべての巨大天体衝突で放出される破片量は、系全体の質量の20%ほどになり、従来考えられていたよりも巨大天体衝突ステージがダストまみれになることがわかった。このようなダスト円盤は、若い星の周りで観測されており、我々は太陽系外で地球型惑星の形成と衛星の形成が行なわれている現場をすでに観測しているという可能性があることを明らかにした[Genda et al. 2015 ApJ]。

我々は、天体衝突計算コードの改良自体についても実行した。天体衝突でどのような質量の円盤が作られるかは、形成される衛星の数や質量に大きな影響を与えるため重要である。従来のコード[11]では、標準SPH法が使われていたが、この手法では、粒子の密度を周囲の粒子の質量の足し合わせで算出していたため、惑星のように自由表面やコア-マントル境界のような密度不連続面がある領域を正しく扱うことができなかった。そこで、密度の代わりに圧力の足し合わせによって密度不連続面を正しく扱うことのできるDISPH法[7]を巨大天体衝突計算に適用した。その結果、多くの衝突条件においては、標準SPH法よりも軽めの円盤が形成されることがわかった[Hosono, ..., Genda et al. 2016 Icarus]。このことは従来思われていた以上に、小さい衛星が数多く作られるという可能性を示唆している。

次に、巨大天体衝突による火星衛星の形成過程を解明した。地球の月を作った巨大天体衝突との違いは、衝突天体が比較的小さく、衝突速度が脱出速度よりもやや早い場合に、現在の火星でみられる小さな2つの衛星の形成が可能であることがわかった

[Rosenblatt, ..., Genda et al. 2016 Nature Geoscience]。軽い円盤からの衛星形成に関しては、HYDRORING コード[8]を用い、形成された複数の衛星の軌道進化については、火星本体の潮汐を考慮したN体計算を行った。天体衝突条件(衝突天体サイズ・衝突速度・衝突角度)は、確率的な部分を含んでいるため、その範疇で、衛星の有無・大きさ・数が変わることを意味していることがわかった。

さらに、巨大天体衝突による衛星形成の問題を地球型惑星だけでなく、冥王星にも適用した。2015年にNASAの探査機ニューホライズンズが冥王星を初めてフライバイし、冥王星の鮮明な画像が送られてきた。その画像から、冥王星の赤道付近の広い領域が茶褐色を呈していることがわかり、我々は、この茶褐色の領域が、冥王星の衛星であるカロンを作った巨大天体衝突で冥王星の赤道付近が加熱され、単純な有機分子が重合することによって茶褐色を呈した可能性が極めて高いことを示した[Sekine, Genda et al. 2017 Nature Astronomy]。この研究結果は、衛星を作るような巨大天体衝突が、地球型惑星形成領域だけでなく、外惑星領域においても我々が考えていたよりも高い頻度で起こっていることを示している。

<引用文献>

- [1] Canup, R. M., 2004, Annu. Rev. Astron. Astrophys. 42, 441–475.
 - [2] Cuk, M. and Stewart, S. T., 2012, Science 338, 1047–1052.
 - [3] Canup, R. M., 2004, Science 338, 1052–1055.
 - [4] Reufer, A., Meier, M. M. M., Benz, W. and Wieler, R., 2012, Icarus 221, 296–299.
 - [5] Kokubo, E., Makino, J., 2004, PASJ 56, 861–868.
 - [6] Melosh, H. J., 2000, LPSC.
 - [7] Saitoh, T.R. and Makino, J., 2013, ApJ 768, 44 (24pp).
 - [8] Charnoz, S., Salmon, J. and Crida, A. 2010, Nature 465, 752–754.
 - [9] Atobe, K. and Ida, S., 2007, Icarus 188, 1–7.
 - [10] Kokubo, E., and Genda, H., 2010, ApJ 714, L21–L25.
 - [11] Genda, H., Kokubo, E., and Ida, S. 2012. ApJ 744, 137 (008pp).
5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)
- 〔雑誌論文〕(計11件)
- (1) Genda, H., Fujita, T., Kobayashi, H., Tanaka, H., Suetsugu, R., Abe, Y., 2017 Impact erosion model for gravity-dominated planetesimals. *Icarus*, in press. [査読有]
 - (2) Genda, H., Iizuka, T., Sasaki, T., Ueno, Y., Ikoma, M., 2017. Ejection of iron-bearing giant-impact fragments and the dynamical and geochemical influence of the fragment re-accretion. *Earth and Planetary Science Letters* **470**, 87–95. DOI: 10.1016/j.epsl.2017.04.035 [査読有]
 - (3) Sekine, Y., Genda, H., Kamata, S., Funatsu, T., 2017. The Charon-forming giant impact as a source of Pluto’s dark equatorial regions. *Nature Astronomy* **1**, 0031. DOI: 10.1038/s41550-016-0031 [査読有]
 - (4) Hyodo, R., Charnoz, S., Ohtsuki, K., Genda, H., 2017. Ring formation around giant planets by tidal disruption of a single passing large Kuiper belt object. *Icarus* **282**, 195–213. DOI: 10.1016/j.icarus.2016.09.012 [査読有]
 - (5) Rosenblatt, P., Charnoz, S., Dunseath, K.M., Terao-Dunseath, M., Trinh, A., Hyodo, R., Genda, H., Toupin, S., 2016. Accretion of Phobos and Deimos in an extended debris disc stirred by transient moons. *Nature Geoscience* **9**, 581–583. DOI: 10.1038/NGEO2742 [査読有]
 - (6) Hyodo, R., Charnoz, S., Genda, H., Ohtsuki, K., 2016. Formation of Centaurs’ rings through their partial tidal disruption during planetary encounters. *The Astrophysical Journal Letters* **828**, L8 (6pp). DOI: 10.3847/2041-8205/828/1/L8 [査読有]
 - (7) Hosono, N., Saitoh, T. R., Makino, J., Genda, H., Ida, S., 2016. The giant impact simulations with density independent smoothed particle hydrodynamics. *Icarus* **271**, 131–157. DOI: 10.1016/j.icarus.2016.01.036 [査読有]
 - (8) Genda, H., 2016. Origin of Earth’s oceans: An assessment of the total amount, history and supply of water. *Geochemical Journal* **50**, 27–42. DOI: 10.2343/geochemj.2.0398 [査読有]
 - (9) Kodama, T., Genda, H., Abe, Y., Zahnle, K.J., 2015. Rapid water loss can extend the lifetime of planetary habitability. *The Astrophysical Journal* **812**, 165 (11pp). DOI: 10.1088/0004-637X/812/2/165 [査読有]
 - (10) Genda, H., Kobayashi, H., Kokubo, E., 2015. Warm debris disks produced by giant impacts during terrestrial planet formation. *The Astrophysical Journal* **810**, 136 (8pp). DOI: 10.1088/0004-637X/810/2/136 [査読有]
 - (11) Genda, H., Fujita, T., Kobayashi, H., Tanaka, H., Abe, Y., 2015. Resolution dependence of disruptive collisions between planetesimals in the gravity regime. *Icarus* **262**, 58–66. DOI: 10.1016/j.icarus.2015.08.029 [査読有]

〔学会発表〕(計54件)

- (1) Genda, H. (2016/11/08) Planet Formation, *UK-Japan Frontiers of Science Symposium*, Buckinghamshire, U.K. [Invited]
- (2) Genda, H. (2016/10/31) Origin of Phobos and Deimos, *ELSI Planetary Workshop on Mars*, ELSI Lounge, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan. [Oral]
- (3) Genda, H. (2016/09/30) Giant Impacts and Satellite Formation, *Japan-Germany Planet & Disk Workshop*, Beach Hotel Sunshine Ishigakijima, Ishigaki Island, Okinawa, Japan. [Invited]
- (4) Genda, H. [2016/07/06] Giant Impacts and Terrestrial Planet Formation, *Magma Oceanology Workshop*, Hotel New Sagami, Shizuoka, Japan. [Oral]
- (5) Genda, H., Sekine, Y. and Funatsu, T. (2016/06/29) The Formation of Elongated Dark Areas on Pluto by a Charon-Forming Giant Impact, *Goldschmidt Conference 2016*, Pacifico Yokohama, Kanagawa, Japan. [Oral]
- (6) Genda, H., Hyodo, R., Charnoz, S. and Rosenblatt, P. (2016/05/23) On the origin of Martian moons, *Japan Geoscience Union Meeting 2016*, Makuhari Messe International Conference Hall, Chiba, Japan. [Oral]
- (7) Genda, H. (2016/02/15) Scientific Aspects of MMX Mission, *Phobos, Deimos, and Mars Workshop*, ELSI Hall, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan. [Oral]
- (8) Genda, H. (2016/01/13) Giant impacts and early evolution of terrestrial planets, *The 4th ELSI International Symposium*, Kuramae Hall, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan. [Oral]
- (9) Genda, H. (2015/11/04) Giant Impacts and Terrestrial Planet Formation, *Workshop for The Earth's Mantle and Core*, Dogo Prince Hotel, Ehime, Japan. [Oral]
- (10) Genda, H., Ueno, Y., Foriel, J., Usui, T., Ueta, S., Bao, H. and Sun, T. (2015/08/20) Splashed Hadean Seawater Hypothesis, *Goldschmidt Conference 2015*, Prague Congress Center, Prague, Czech Republic. [Poster]

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：

出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

玄田 英典 (GENDA, Hidenori)
東京工業大学・地球生命研究所・特任准教授
研究者番号：90456260

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

セバスチャン・シャノーズ
(CHARNOZ, Sebastian)
パスカル・ローゼンブラット
(ROSENBLATT, Pascal)
兵頭 龍樹 (HYODO, Ryuki)