

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14536

研究課題名（和文）数値実験による高速自転小惑星の変形過程の解明と内部物性への応用

研究課題名（英文）Numerical simulations of asteroid deformation due to rapid rotation and implication for internal properties of asteroids

研究代表者

杉浦 圭祐 (Sugiura, Keisuke)

東京工業大学・地球生命研究所・JSPS特別研究員

研究者番号：70846344

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：JAXAの探査機はやぶさ2が訪れた小惑星リュウグウはそろばんの珠のような形状をしている。多くのそろばん珠形状をした小惑星は高速自転をしていることから、高速自転による変形でそろばん珠形状になったと考えられている。我々はそろばん珠形状形成の条件を調べるため、高速自転変形過程の数値シミュレーションを実施した。その結果、そろばん珠に変形するためには70度程度以上の高い実効的摩擦角と数日程度以下の速い自転加速度が必要であることが分かった。また変形の際に放出された破片はその後衛星として集積するため、そろばん珠形状をした小惑星は衛星を持つ可能性が高いことが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では小惑星リュウグウのようなそろばん珠形状の形成には70度程度以上の高い実効的摩擦角が必要なことを明らかにした。1 kmサイズの小惑星がこのような高い実効的摩擦角を獲得するためには、数100Pa程度の付着力が必要である。そろばん珠形状をした小惑星は多く見つかることから、数100Pa程度の付着力は小惑星の内部物性として普遍的に存在していることが示唆される。特に1 km程度以下の小天体の衝突進化にはこの付着力が大きな影響を及ぼすため、本研究は惑星形成論の文脈において付着力の重要性を示したと言える。

研究成果の概要（英文）：The asteroid Ryugu visited by JAXA's spacecraft Hayabusa 2 has a diamond-like top shape. Many top-shaped asteroids have rapid rotation, so that top shapes are considered to be formed through deformation due to rapid rotation. We performed numerical simulations to investigate conditions required for top shape formation. As a result, we found that top shape formation needs high effective friction angles > 70 degrees and fast spinup timescales $<$ several days. We also found that fragments ejected at top shape formation eventually accumulate into satellites, which suggests that top-shaped asteroids are likely to have satellites.

研究分野：太陽系形成論

キーワード：小惑星リュウグウ そろばん珠型 高速自転変形 数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

JAXA の探査機はやぶさ 2 が訪れた小惑星リュウグウは、はやぶさ 2 のその場観測によって通称「コマ型」と呼ばれているそろばんの珠のような形状をしていることが分かった [1]. コマ型形状をしている小惑星はリュウグウだけではなく、NASA の探査機 OSIRIS-REx が訪れた小惑星ベヌーの他、レーダー観測によって形状が測定された 1999 KW4, 2001 SN263, ディディモスといった小惑星もコマ型形状をしていることが分かっている [e. g., 2, 3].

これらコマ型をしている小惑星の自転軸は全て短軸と並行である。つまり、ちょうどそろばんの珠がそれらを貫いている軸の周りを回転しているのと同じように自転している。またコマ型小惑星の形状はほとんど自転軸の周りに軸対称である [e. g., 1]. さらに、リュウグウは自転周期が 7.6 時間と比較的遅く自転しているものの、他のコマ型小惑星の自転周期は 2 - 4 時間ほどであり高速自転をしている [e. g., 2, 3]. 小惑星の密度を 1 g/cm^3 と仮定するとその自己重力と遠心力が釣り合うような臨界自転周期は 3.3 時間程になるため、2 - 4 時間の自転周期はその形状が遠心力によって変化してしまうのに十分なほど高速であると言える。そのため、一般的には小惑星の自転加速によって自転速度が高速になり、その高速自転によってそれらの形状がコマ型に変形したと考えられている [e. g., 1].

小惑星の自転速度を変化させる機構として考えられているもののうち代表的なものは Yarkovsky-O'Keefe-Radzievskii-Paddock (YORP) 効果と呼ばれているものである [e. g., 4, 5]. YORP 効果は小惑星が太陽光を吸収する時と再放射する時の非対称性が原因で生じるトルクにより、大きさや形状によりタイムスケールは大きく変わりうるが数百万年程度の比較的長いタイムスケールで自転周期が変化する効果である。他にも小惑星同士の衝突や、衝突破壊後の破片の集積など、物理的な衝突で直接的に角運動量が供給されることにより数日程度以下のタイムスケールで自転周期は変化しうる [e. g., 6, 7].

もう一つ興味深い事実として、コマ型形状をした小惑星の半数程度が衛星を持っていることが挙げられる。小惑星リュウグウとベヌーは衛星を持たないが [1, 2], 2001 SN263, 1999 KW4, 1994 CC, ディディモスなどのコマ型小惑星は衛星を持っている [e. g., 3]. このことはコマ型形状形成と衛星形成が密接に関係していることを示唆している。

2. 研究の目的

小惑星が自転加速及び高速自転をすれば必ずコマ型に変形するかどうかは自明ではない。例えば摩擦のない流体の自己重力球を高速自転させても楕円体に変形するだけであることは良く知られている [e. g., 8]. 一方で同じ連続体であっても摩擦の存在する粉体の自己重力球を高速自転させたときにどのように変形するのかはよく分かっていない。リュウグウのような小惑星は破片が重力で緩く寄せ集まったラブルパイル構造をしており、破片間の摩擦がその形状形成に重要な役割を果たしている可能性が高い。小惑星が持つ摩擦力の強さを定量的に明らかにすることで、小惑星の内部の物性に対して有力な示唆が得られると期待できる。

さらに、小惑星の自転速度を変化させる機構は、YORP 効果のようなタイムスケールが長い現象と、小惑星衝突のようなタイムスケールが短い現象があると考えられる。しかしながら、粉体の自己重力球の自転加速タイムスケールを変化させたときにその変形過程がどのように変化するかも明らかでない。

従って、小惑星が自転加速したときにコマ型へ変形するために必要な摩擦力の強さと自転加速速度の速さが分かれば、その内部物性と変形過程について重要な示唆が得られると考えられる。本研究の目的は、小惑星の自転加速による変形過程の数値シミュレーションを通して、この 2 点に制約を与えることである。さらに変形過程と衛星形成過程がどのように関係しているのかもシミュレーションを通して調べる。

3. 研究の方法

本研究では数値シミュレーションによって小惑星の自転加速を直接的に再現することで変形過程を調べる。数値シミュレーションには弾性体・粉体力学に拡張した Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法 [9] の計算コードを使用する。SPH 法とは広がりを持った粒子の集合体で粉体や流体などの連続体を表現し、連続体の保存の式を離散化する手法である。

粉体を模擬する SPH 粒子を約 25,000 個使用し、直径 1 km の球形の小惑星を作成した。この球を自転加速させ、変形する様子を観察した。主なパラメータは粉体の摩擦角と自転加速度とし、この 2 つを様々に変化させて数値シミュレーションを実施した。粉体の摩擦角は一般的に 30 - 50 度の範囲内に収まるとされている [10]. しかしながらリュウグウ表面へのクレータ形成実験より、リュウグウ内部には数 100 Pa 程度の付着力が存在することが示唆されており [11], その付着力を考慮すると「実効的な」摩擦角は 80 度以上まで大きくなる可能性がある。そのためシミュレーションで使用する摩擦角の値は 30 度から 80 度の範囲で変化させる。自転加速タイムスケールについてはシミュレーションの時間的制約により、数日から数ヶ月の範囲で変化させる。

4. 研究成果

(1) 自転加速による変形過程の摩擦角・自転加速度依存性

図1は自転加速タイムスケールを1日程度に固定し、摩擦角を様々に変えてシミュレーションを実施した結果を表している。これらの図において自転軸は視線方向に垂直かつ真上の方向である。図1(a)-(e)より、摩擦角が40度のときは 1.5×10^5 秒ほどの時間をかけてゆっくりと変形し、変形後の形状は扁平になっていることがわかる。一方で図1(f)-(j)より、摩擦角が60度になると変形が 1×10^4 秒ほどの短い時間で進行することが分かる。しかし最終的な形状はやはり扁平である。図1(k)-(o)は摩擦角が80度まで高い場合の結果を示している。変形にかかる時間は摩擦角が60度の場合と同じく 1×10^4 秒程度だが、最終的に形成されている形状は楕円形ではないことが分かる。この形状は斜面が直線的で、そろばんの珠のような軸対称な形状になっており、コマ型の特徴をよく再現している。変形過程における内部物質の流線を詳しく調べたところ、摩擦角40度もしくは60度で扁平な形状になっているときは自転軸方向に潰れるように全体が動いているが、摩擦角が80度でコマ型に変形したときは表面の物質のみが赤道面方向に動く地滑りのような現象が起きていることが分かった。

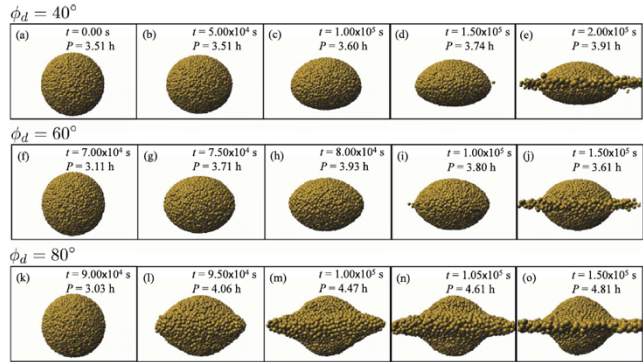


図1: 自転加速タイムスケール1日程度で、摩擦角を40度、60度、80度と変化させた場合のシミュレーションのスナップショット。[12]のfig.1より転載。

次に自転加速タイムスケールを変化させた場合に変形過程がどのようになるか調べた。図2は図1(f)-(j)と同様に摩擦角が80度だが自転加速タイムスケールが1ヶ月程度の場合のシミュレーション結果を表している。図2(a)-(c)は自転軸に垂直な方向から見た場合のスナップショットで、(d)-(f)は自転軸の方向から見た場合のスナップショットである。この場合でも地滑りのような変形過程になっていることが分かったが、地滑りは軸対称ではなく部分的にしか起きていないことが分かった。最終的に形成された形状を調べても軸対称なコマ型にはなっておらず、部分的に直線的な斜面ができていただけであった。

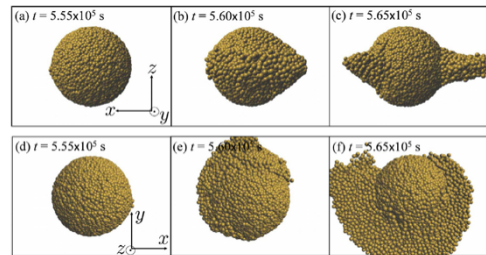


図2: 摩擦角80度で自転加速タイムスケールが1ヶ月程度の場合のシミュレーションのスナップショット。[12]のfig.7より転載。

以上の結果より軸対称のコマ型形成には、摩擦角が80度程度まで大きく、自転加速タイムスケールが1日程度よりも短いという条件が必要なることが示唆される。80度程度の実効的摩擦角を実現するには、1 kmサイズの小惑星では数100 Pa程度の付着力が必要だが、この値はリュウグウ表面へのクレータ形成実験から示唆されている値と整合的である。このことは数100 Pa程度の付着力は表面だけでなく内部の物質にも存在していることを示唆しており、小惑星全体において付着力が重要な効果である可能性を示している。数100 Pa程度の小さな付着力でも惑星形成過程における小天体の低速度衝突には重要な効果を及ぼす可能性があり、惑星形成の文脈でも付着力を考慮することが大事であるという示唆が得られた。また1日程度の自転加速タイムスケールは小惑星や破片の衝突過程で実現できるため、コマ型形成においてそのような突発的な現象が大事である可能性が示唆された。

(2) コマ型形成時に放出された破片の長期的進化と衛星形成

コマ型小惑星の周りを回る衛星を今回のコマ型形成シナリオで整合的に説明できるか調べるために、図1(k)-(o)のシミュレーションを延長し、放出された破片の長期的進化を追うシミュレーションを実施した。図3はそのシミュレーションの結果を示したものである。図3より放出された破片で形成された円盤は、10日程度の進化を経て重力的に集積し衛星になっていることが分かる。このシミュレーションの場合は2つの衛星が形成され、それぞれの質量は中心にある小惑星の1.5%と3.0%程度であった。実際のコマ型小惑星の衛星の質量も中心にある小惑星

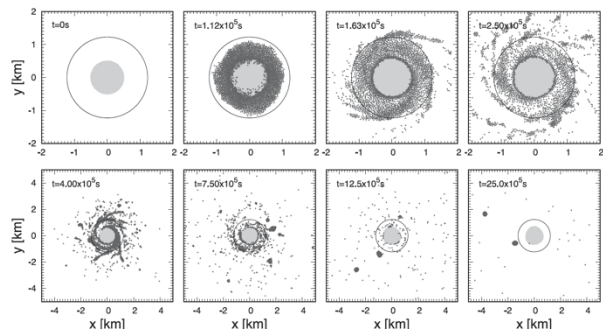


図3: コマ型形成時に放出された破片のその後の進化を計算したシミュレーションのスナップショット。[13]のfig.2より転載。

の数%程度であり[e. g., 3], この計算結果と整合的である。

本研究の計算結果から, 自転加速によるコマ型形成が起きたとき, 地滑りによって放出された破片が円盤状にばら撒かれ, 不可避的に衛星形成につながるということが分かった。この結果は衛星を持つコマ型小惑星の環境をよく再現する。一方でリュウグウとベヌーはコマ型をしているにも関わらず衛星を持っていない。これは, リュウグウ・ベヌー及びそれらの衛星が形成されたのち, 現在に至るまでのさらに長期的な進化の過程で失われたと考えれば説明可能である。そのような衛星の長期的な軌道進化を起こす機構として binary YORP 効果などが提唱されており [e. g., 14], 衛星が失われることも十分にあり得る。従って, 太古のリュウグウやベヌーには衛星が存在していたが, 長期的な軌道進化の結果それらが失われた可能性が高い。

<引用文献>

- [1] Watanabe, S., et al., 2019. Hayabusa2 arrives at the carbonaceous asteroid 162173 Ryugu-A spinning top-shaped rubble pile. *Science* 364, 268-272.
- [2] Lauretta, D.S., et al., 2019. The unexpected surface of asteroid (101955) Bennu. *Nature* 568, 55-60.
- [3] Ostro, S.J., et al., 2006. Radar imaging of binary near-earth asteroid (66391) 1999 KW4. *Science* 314, 1276-1280.
- [4] Rubincam, D.P., 2000. Radiative spin-up and spin-down of small asteroids. *Icarus* 148, 2-11.
- [5] Walsh, K.J., 2018. Rubble pile asteroids. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 56, 593-624.
- [6] Sugiura, K., Kobayashi, H., Inutsuka, S., 2020. High-resolution simulations of catastrophic disruptions: Resultant shape distributions. *Planet. Space Sci.* 181, 104807.
- [7] Michel, P., et al., 2020. Collisional formation of top-shaped asteroids and implications for the origins of Ryugu and Bennu. *Nature comm.* 11, 2655.
- [8] Chandrasekhar, S., 1969. *Ellipsoidal Figures of Equilibrium*. The Silliman Foundation Lectures, New Haven: Yale University Press.
- [9] Sugiura, K., Kobayashi, H., Inutsuka, S., 2018. Toward understanding the origin of asteroid geometries. Variety in shapes produced by equal-mass impacts. *Astron. Astrophys.* 620, A167.
- [10] Heiken, G. H., Vaniman, D. T., & French, B. M. 1991, *Lunar Sourcebook - A User's Guide to the Moon*
- [11] Arakawa, M., et al., 2020. An artificial impact on the asteroid 162173 Ryugu formed a crater in the gravity-dominated regime. *Science* 368, 67-71.
- [12] Sugiura, K., et al., 2021. SPH simulations for shape deformation of rubble-pile asteroids through spinup: The challenge for making top-shaped asteroids Ryugu and Bennu. *Icarus*, 365, 114505
- [13] Hyodo, R. & Sugiura, K. 2022. Formation of Moons and Equatorial Ridge around Top-shaped Asteroids after Surface Landslide, *Astrophys. J. Letters*, 937, L36
- [14] Ćuk, M., & Burns, J. A. 2005, *Icarus*, 176, 418

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Sugiura Keisuke, Kobayashi Hiroshi, Watanabe Sei-ichiro, Genda Hidenori, Hyodo Ryuki, Inutsuka Shu-ichiro	4. 巻 365
2. 論文標題 SPH simulations for shape deformation of rubble-pile asteroids through spinup: The challenge for making top-shaped asteroids Ryugu and Bennu	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 114505 ~ 114505
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2021.114505	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hyodo Ryuki, Sugiura Keisuke	4. 巻 937
2. 論文標題 Formation of Moons and Equatorial Ridge around Top-shaped Asteroids after Surface Landslide	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L36 ~ L36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ac922d	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 杉浦圭祐
2. 発表標題 ラブルパイル小惑星の自転加速による変形過程の数値計算とリュウグウやベヌーなどのコマ型形状形成条件
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉浦圭祐
2. 発表標題 Numerical Simulations of Spinup of Asteroids and the Formation of Top-Shaped Asteroids
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉浦圭祐
2. 発表標題 小惑星の自転加速による変形とリュウグウなどのコマ型小惑星の形成条件
3. 学会等名 日本天文学会2020年秋季年会
4. 発表年 2020年

〔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
---------	---------