

固体天体衝突現象を扱う数値計算法の開発と 衝突による小惑星形状形成過程の解析



杉浦 圭祐

〈東京工業大学地球生命研究所 〒145-0061 東京都大田区石川町 1-31〉

e-mail: sugiuraks@elsi.jp

探査機はやぶさが訪れた小惑星イトカワの細長い形状からわかるように、小惑星は多様な形状をしている。大きな小惑星の形状は主に小惑星同士の衝突で形成されるため、衝突により形成される形状を調べることで、形状からその小惑星が経験した衝突を制限できる。我々は固体天体の衝突現象を調べるため、Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法に基づいた計算コードを開発した。数値計算の結果、質量が近い小惑星同士の低速な衝突では平たい形状を含む様々な形状が形成されるが、高速で破壊的な衝突では主に丸い形状と頭が2つあるような形状しか形成されないことがわかった。つまり、大きく平たい小惑星は惑星形成期での低速な衝突で形成され、その形状を現在まで保持している可能性が高い。

1. はじめに

JAXAの探査機はやぶさが撮影した小惑星イトカワは細長いラッコのような形をしており、NASAの探査機ニューホライズンズ (New Horizons) が撮影した小惑星 2014 MU₆₉ (愛称ウルティマ・トゥーレ: Ultima Thule) は雪だるまのような形をしている。このように小惑星は多様な形状をしている。読者の中にも小惑星の写真を見て、どのような経緯でそのような形になったのか不思議に思った方もおられると思う。

我々は小惑星形状の形成過程として小惑星同士の衝突に着目し、数値シミュレーションを実行し衝突で形成される形状を調べてきた。その結果、部分的にはあるものの小惑星を形成した衝突の条件及び衝突が起きた時代について、小惑星の形状から制限できることがわかってきた。本稿ではこの研究の成果について主に紹介する。我々が開発したシミュレーションコードは最新のモデルに基づいているため、どのようなモデルを使用して

おりどのような計算が可能なのかについても併せて紹介する。

2. 小惑星と太陽系の進化

2.1 小惑星

太陽系には惑星以外にも小惑星と呼ばれる小さな天体が多数存在している。小惑星のサイズは1,000 km未満であり、その多くは火星と木星の軌道の間にある小惑星帯に存在している。すでに80万個ほど¹⁾の小惑星が発見されており、小惑星を用いることで太陽系に関する統計的な研究を行うことが可能である。

地球のような大きな惑星は強い重力によって基本的に丸い形状となる。一方で小惑星は小さく重力よりも岩石の弾性力や岩石粒子間の摩擦力が重要なため、小惑星イトカワのようにいびつな形状を保つことができる。小惑星の形状は主にその明るさの変化から推定されている。小惑星の明るさは見かけの面積に比例するため、いびつな小惑星が自転していると見かけの面積が時間とともに変

化し、結果明るさも時間変化する。その明るさの変化を詳細に観測することで、形状を推定することができる^{2),3)}。この手法を用いて、すでに1,600個ほどの小惑星の形状が推定されている⁴⁾。

小惑星の形状は惑星の潮汐力、小惑星自身の高速自転、小惑星同士の衝突などによって変形させることができる。しかし潮汐力による変形は惑星のごく近傍でしか起きないため、小惑星帯のように近傍に惑星がない領域では潮汐変形はほぼ起きない。また小惑星の自転速度は小惑星が太陽光を吸収・放射する際に生じるトルクによって加速させることができ（Yarkovsky-O'Keefe-Radzievskii-Paddack (YORP) 効果⁵⁾）、結果として高速自転によって変形させることはできるが、YORP効果は10 km以上の小惑星には非効率であるため⁵⁾、やはりこの機構でそのように大きな小惑星の形状を変化させることは難しい。そのため大きな小惑星の形状は主に小惑星同士の衝突によって形成される。

太陽系には似た軌道を持つ小惑星の集団がいくつか存在しており、それぞれの集団は単一の母天体の最近の衝突破壊で形成されたと考えられているため、小惑星同士の衝突破壊は確かに起きている。とはいえその頻度は決して高くはなく、100 km程度の小惑星の形状を変えられるほど破壊的な衝突は、その小惑星1つあたりだと太陽系年齢の10倍の時間で1回程度しか起きないと見積もられている⁶⁾。このことは言い換えると、太古の太陽系で形成された小惑星形状が現在まで保たれている可能性がある、ということである。本稿ではそのような大きく始原的な可能性がある小惑星に着目して議論を行う。

2.2 太陽系の進化と小惑星の衝突速度

惑星は原始惑星系円盤と呼ばれる、若い太陽の周りを回る気体成分と固体微粒子からなる円盤状の構造の中で形成する^{7),*1)} (図1a)。この円盤の

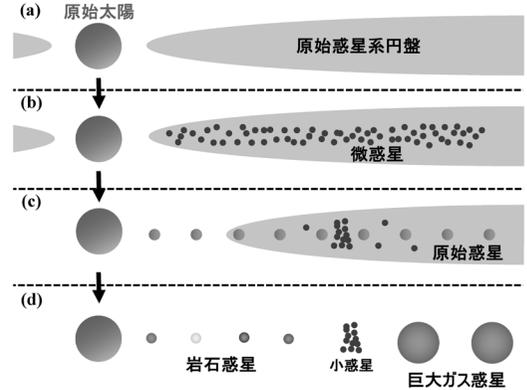


図1 太陽系の進化の概説図。原始惑星系円盤の断面を横から見た図になっている。

中で始めに固体微粒子同士がお互いに付着合体することで成長し、やがて微惑星と呼ばれる km から 100 km 程度のサイズの天体になる (図1b)。その後は微惑星同士が重力によって合体して成長していくが、この時の成長速度は大きな微惑星ほど速いため、やがていくつかの 1,000 km サイズの原始惑星と成長から取り残された微惑星の集団という2極化した状態になる (図1c)。最終的に原始惑星同士がさらに合体し、現在の太陽系の基本的な構造が形成される (図1d)。現在の太陽系の小惑星は微惑星の生き残りであると考えられており、本質的に同じ天体である。そのため本稿では微惑星のことも小惑星と呼ぶことにする。

小惑星同士の衝突速度は太陽系の時代によって大きく変化する。円盤ガスが存在し原始惑星が成長している最中の環境 (図1c) での小惑星同士の相対速度を、円盤ガスからの抵抗によって相対速度が下げられるタイムスケール⁸⁾と原始惑星からの重力散乱によって相対速度が上げられるタイムスケール⁹⁾の釣り合いから見積もると、原始惑星が火星サイズに成長するまでは大雑把に数 100 m/s以下の相対速度に保たれる。一方で現在

*1 若い星がその周りに円盤状の構造を伴うということは観測によってすでに確かめられており、また原始惑星系円盤での惑星形成を考えると太陽系の特徴をよく説明できることから、原始惑星系円盤中での惑星形成シナリオは広く受け入れられている。

の太陽系の小惑星帯での小惑星間の平均の相対速度は5 km/s程度となっており、惑星形成期のそれよりも桁で大きくなっている。

衝突により小惑星をバラバラに破壊できるか否かは、大雑把には衝突速度と小惑星からの脱出速度の兼ね合いで決まる。脱出速度とは物体が小惑星の重力を振り切って脱出できるような速度である。そのため脱出速度程度の速度で衝突しても、生じた破片を小惑星から脱出させることができないため破壊は難しい。逆に脱出速度よりも十分に大きな衝突速度の衝突では小惑星をバラバラに壊すことができる。直径100 kmの小惑星からの脱出速度は100 m/s程度であるため、惑星形成期では主に脱出速度程度の衝突が、現在の太陽系では脱出速度よりも十分大きい速度の衝突が起きる。もちろん衝突によって小惑星を破壊できるかどうかは衝突体の質量にも依存するため、衝突速度だけでは議論できない。しかしながら衝突体が被衝突体よりも十分小さい場合、部分的な破壊になるため被衝突体の形状はほとんど変わらない。そのため被衝突体の形状が十分に変わるような等質量に近い小惑星同士の衝突に限って言えば、惑星形成期の衝突は主に非破壊的に、現在の太陽系の衝突は破壊的になる。すなわち、その2つの異なる衝突様式によって形成される小惑星形状を明らかにすることで、小惑星形状の形成時代を制限することにつながる。

3. 固体天体衝突現象を扱う 数値計算法

3.1 固体天体の動力学を扱うために必要な物理

小惑星は主に岩石のような固体で成り立っている。ひびが入っていない一枚岩の岩石の場合、多少力を加えたとしても少し変形するだけでひびは入らず、力を除けば元の形に戻る。このように外的な要因で変形しても、変形に比例する内部応力によって変形が元に戻る物体を弾性体と呼び、その弾性体を扱う手法を弾性体力学と呼ぶ¹⁰⁾。小

惑星の変形を扱う計算法も、主にこの弾性体力学が基礎となる。

ただし岩石の場合、変形が大きくなるとひび割れが入って壊れてしまう。そうなるとひびの大きさよりも十分に大きい巨視的なスケールでは、引っ張り応力などの弾性体としての内部応力は失われてしまう。そのため岩石を扱うためには弾性体力学に加えひび割れのモデル、つまりひび割れが入り始める変形の大きさを決める理論¹¹⁾及びその後の挙動を扱う理論¹²⁾が必要となる。

ひび割れが十分に入って粉々に砕けた岩石は瓦礫や砂の塊と見なすことができる。実は小惑星イトカワやリュウグウも瓦礫が重力で集まってできた天体（ラブルパイル天体）であり、そのような天体の形状は構成粒子間の摩擦によって保たれている。従って破壊され粉々になった岩石間の摩擦を扱うモデル¹³⁾は、衝突破壊によって形成される小惑星の形状を議論する上で最も重要である。

3.2 弾性体力学を扱う SPH 法と張力不安定性

弾性体力学の場合にも流体力学と同様に、連続の式、運動方程式、エネルギー方程式といった連続体の方程式を立てることができる。弾性体力学に特有の横ずれ応力を記述する構成方程式もさらに必要であるが、それらを解くことで弾性体の挙動を追うことができる。それらを数値的に解くための手法の1つに Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法^{14), 15)} という手法がある。SPH 法に関する詳しい説明は省くが、物体を粒子の集合で置き換え、粒子間の相互作用を運動方程式などに従って計算することで各粒子の運動を計算し、それら粒子の運動の集合として物体全体の運動や変形を記述する手法である。SPH 法はもともと天文の分野で流体力学を解くために開発された手法であるが、その性質上大変形を伴う問題や粗密が激しい問題が得意であるため、小惑星の衝突破壊問題にも適した手法である。

しかしながら一般に広く使われている標準的な SPH 法¹⁶⁾ をそのまま弾性体力学に拡張すると、

流体には存在しない張力優勢領域で数値的な不安定性が起きることが知られている^{17), *2}。これは張力不安定性と呼ばれており、破壊の無いはずの純粋な弾性体力学でも数値的な、つまり偽のひび割れを引き起こしてしまう。そのため岩石の物理的なひび割れを正確に扱いたい問題でこの張力不安定性を放置しておく間違っただけの解を与えてしまう可能性がある。

そこで我々は、私の学生時代の指導教員である犬塚修一郎氏が開発したゴドノフSPH法¹⁹⁾の知見を活かし、張力不安定性を解決する手法を開発した。ゴドノフSPH法には2つの特徴があり、1つは強い衝撃波も精度良く解くことができる点である。もう1つは粒子間の密度分布を粒子の位置の密度から推測(補間)し、密度分布を考慮した上で運動方程式などを定式化している点である。張力不安定性は2粒子間隔で1波長という極めて短い波長の摂動が成長する不安定性であり、粒子間の情報の扱い方が重要になる問題であるため、我々はこの2つ目の特徴に着目した。粒子間の密度分布を補間する方法はいくつか存在するが、各補間方法を用いた運動方程式などの線形安定性解析を行った結果、特定の補間方法を用いれば張力優勢領域でも安定に計算できることがわかった²⁰⁾。そのため補間方法を適切に選んだゴドノフSPH法を用いれば、弾性体力学の計算であっても数値的なひび割れを起こすことなく解くことができる²¹⁾。

図2に弾性体リングの衝突・跳ね返りの様子を標準SPH法とゴドノフSPH法で計算した結果を示す。図2aより、標準SPH法を用いると弾性体力学の計算を行っているにも関わらず、数値的なひび割れで弾性体リングの挙動を正しく表現できていないことがわかる。一方図2bに示すように、ゴドノフSPH法を用いれば弾性体リングの跳ね返りを安定に記述することができる。

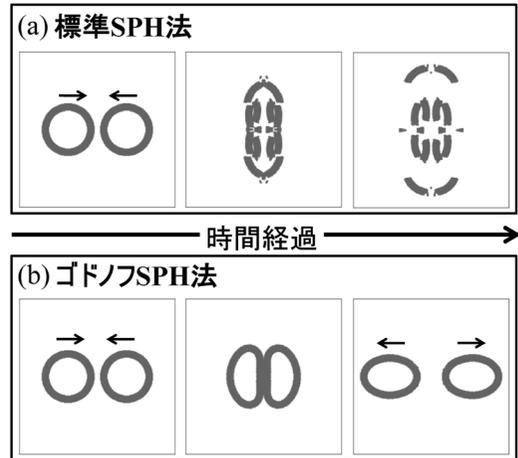


図2 弾性体リングの衝突を標準SPH法(a)とゴドノフSPH法(b)で計算した結果を比較したものである。図中の矢印はリングの運動方向を表す。

3.3 破壊・摩擦モデルのSPH法への導入とテスト計算

3.1節でも述べたように、小惑星の衝突破壊及びその後の形状形成を扱うためには、弾性体力学に加え岩石の破壊及び粉々になった岩石間の摩擦のモデルが必要である。そのため我々はSPH法用に開発された破壊モデル²²⁾及び摩擦モデル²³⁾を計算コードに導入した。

小惑星がバラバラに破壊されるような大規模破壊の場合、初期の被衝突体に比べずっと小さな天体が多数形成される。そのような衝突で形成される小さな天体の形状を表現するためには高解像度の計算が必要で、これを実現するためには計算コードを並列化しスーパーコンピュータを用いる必要がある。我々は理化学研究所の粒子系シミュレータ研究チームが開発したFramework for Developing Particle Simulator^{24), 25)}を利用して計算コードを並列化し、大規模破壊の高解像度計算を可能とした。

km程度以上のサイズの小惑星同士の衝突では基本的に小惑星は粉々となり、形成される小惑星

*2 標準SPH法であっても、人工的な反発項を導入するなどして張力不安定性を解決するような手法¹⁸⁾も存在する。

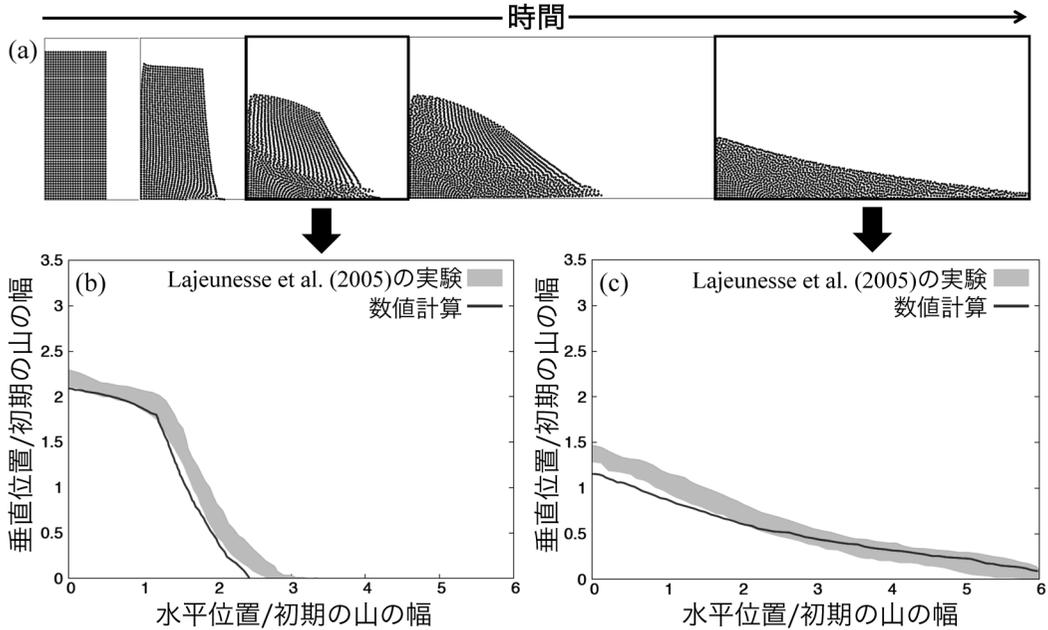


図3 粉体の山の崖崩れを我々が開発したSPH法の計算コードを用いて計算した結果 (a) と、特定の時刻において室内実験²⁶⁾ から得られた山のプロファイルと比較した結果 (b, c). 室内実験結果より得たプロファイルに幅があるのは、同じ結果になるが多少ばらつきのある複数の実験からプロファイルを得たためである。

の形状は粉々になった岩石間の摩擦によって保たれることになる。そのため粉体としての摩擦を正しく扱っているか確認することは非常に重要である。そこで我々は、粉体の山の崖崩れの室内実験²⁶⁾ を開発したSPH法の計算コードを用いて再現し、結果を比較した。数値計算に用いる摩擦角のパラメータは実験で使用した粉体のそれと合わせてある。図3aの左端のように直方体の粉体の山に鉛直方向に重力を与えることで、図3aのように崖崩れの様子を再現できる。また崖崩れの途中(図3b)と崖崩れ完了後(図3c)の時刻を選び室内実験から得られた山のプロファイルと比較した結果、実験結果と数値計算結果は良い一致を示すことを確かめた。

4. 小惑星衝突と形成される小惑星形状

ゴドノフSPH法は3節で説明したようにいくつかの良い特徴を持っているが、一方で計算コストは標準SPH法に比べ高い。また本節で紹介する

直径100 kmの大きな小惑星の衝突では、衝突時に即座に小惑星が粉々となるため弾性体的挙動は重要ではない。そのため本節の計算では標準SPH法を用いる。本稿で紹介する小惑星衝突の数値計算の条件を以下に簡単にまとめる。初期に球形状の小惑星を考えそれらの衝突を扱う。剛性率や状態方程式などに用いるパラメータは玄武岩のもの²⁷⁾ を使用する。粉々になった岩石の摩擦角は、月の砂から得られた値²⁸⁾ である40°に設定する。始原的な可能性の高い直径100 km以上の小惑星の形状と比較することを目的とし、被衝突天体の直径は100 kmとする。計算は破片の集積のタイムスケールである1,500秒よりもずっと長い、衝突後10万秒まで実行する。この条件のもとで衝突速度・衝突角度・衝突体/被衝突体質量比を変化させた様々な衝突計算を実行する。なお衝突角度は0°が正面衝突となるように表す。

4.1 惑星形成期における低速・非破壊的衝突

まず直径100 kmの小惑星からの脱出速度程度

の、数100 m/sの衝突速度を用いた非破壊的な衝突の結果²⁹⁾を紹介する。非破壊的な衝突の場合、等質量衝突が最も形状変形に効率的なため、ここでは特に衝突体の直径も100 kmの衝突計算の結果を紹介する（衝突体質量が被衝突体質量の半分以上被衝突体に近ければ、同様な衝突になることは確認済みである）。衝突速度は主に非破壊的になる50から400 m/sまで変化させる。また衝突角度はかすり衝突にならないように5から45°まで変化させる。

図4aはそれぞれの衝突計算で形成された最大

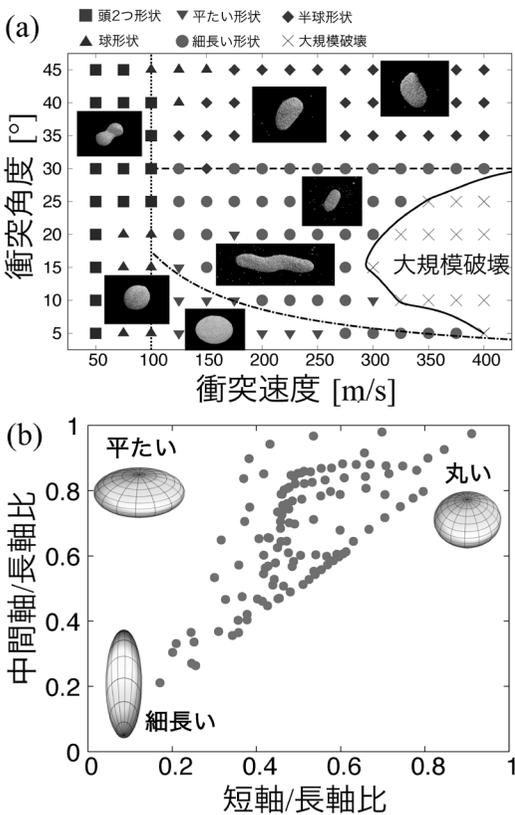


図4 等質量で低速な衝突計算の結果。(a)は各衝突計算の結果できた最大集積天体の形状を分類した結果と、それぞれの分類の典型的な形状のスナップショットを表す。Sugiura et al. (2018)²⁹⁾の図を改変。(b)は(a)の衝突計算のうち大規模破壊ではない計算でできた最大集積天体の軸比を表す。

集積天体の形状を頭が2つある形状，球形形状，平たい形状，細長い形状，半球形状に分類した結果である。また大規模破壊と書いてある領域は、衝突の結果できた最大集積天体の質量が初期の被衝突天体の質量の0.4倍以下になるような破壊的衝突が起きた領域である。図4aより等質量で非破壊的な衝突では、比較的狭いパラメータ空間の中でも多様な形状が形成されることがわかる。また基本的には図4aに示している3本の線でそれぞれの形状が形成されるパラメータ空間が分けられていることもわかる。図4bに大規模破壊を除く衝突で形成された最大集積天体の軸比を示す。ただし、短軸/長軸比及び中間軸/長軸比の両方とも1に近い形状は丸い形状（図の右上）、短軸/長軸比のみ小さく中間軸/長軸比は1に近い形状は平たい形状（図の左上）、両方とも小さい形状は細長い形状（図の左下）となる。図4bからわかるように、中間軸/長軸比が0.2程度の極めて細長い形状や、短軸/長軸比が0.4程度の平たい形状も形成可能であることがわかる。そのため等質量に近く低速度の衝突で形成される天体形状によって、2017年10月に発見された太陽系外から来たと思われる小天体オウムアムア (1I/ 'Oumuamua)³⁰⁾の極端細長形状を説明することが可能である³¹⁾。

4.2 現在の太陽系における高速・破壊的衝突

次により高速で破壊的な衝突の結果を紹介する。ここでの衝突はほぼ正面衝突とする。その上で衝突体/被衝突体質量比 M_i/M_t と衝突速度 v_{imp} を、 $(M_i/M_t=1/16, v_{imp}=1.7 \text{ km/s})$, $(M_i/M_t=1/8, v_{imp}=1.0 \text{ km/s})$, $(M_i/M_t=1/4, v_{imp}=0.7 \text{ km/s})$ とした3通りの衝突計算の結果について紹介する。なお、これらの衝突では最大集積天体の質量が初期の被衝突天体の質量の1/10以下になっており、まさに小惑星をバラバラにするような衝突である。

図5aは $(M_i/M_t=1/8, v_{imp}=1.0 \text{ km/s})$ の場合の衝突計算のスナップショットを表しているが、高速衝突によって破片からなる大きなカーテン状

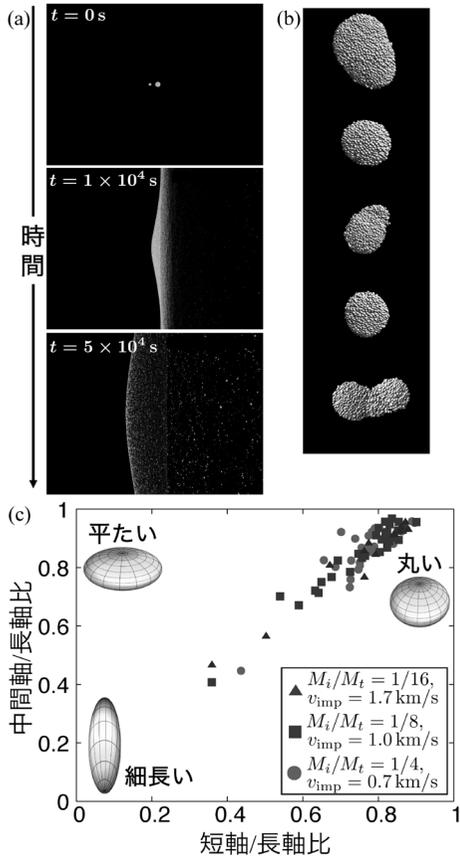


図5 破壊的な衝突の計算結果. (a) は $(M_i/M_t=1/8, v_{imp}=1.0$ km/s) の衝突計算のスナップショット, (b) はこの計算で形成された5つの集積天体のスナップショットを表す. (c) は3つの破壊的な衝突計算の結果形成された, SPH粒子5,000個以上で十分に形状が分解されているような集積天体の軸比を表す.

の構造ができていることがわかる. またカーテン構造の中で破片が自己重力によって寄り集まることで, 基本的には図5bに示すように丸い形状ができあがる. さらに形成された丸い2つの天体がお互いに重力で合体することで, 図5bの一番下に示すような頭が2つあるような形状もできあがる.

図5cに3つの破壊的な衝突の計算で形成された集積天体の軸比を示しているが, ここからも2つの軸比が両方とも1に近い丸い形状か, 両方

とも小さい頭が2つあるような(細長い)形状ができていることがわかる. そのため破壊的な衝突では丸い形状か中間軸/長軸比が0.4以上の細長い形状なら形成が可能である. しかしながら, 図5cより短軸/長軸比が0.6程度以下で中間軸/長軸比が1に近いような平たい形状は形成されないこともわかる. この平たい形状が形成できない点が, 低速で非破壊的な衝突(図4b)と最も違う点である.

5. 直径100 km以上の小惑星形状とそれらの形成時代

5.1 実際的小惑星形状

4節にて短軸/長軸比が0.6程度以下の平たい形状は, 現在の太陽系で起こるような破壊的な衝突では形成されず, 惑星形成期に起きるような質量が同じ程度の小惑星同士の低速度衝突でしか形成されないことを示した. しかしそのように平たい形状の小惑星は本当に存在するのだろうか. 2節で説明したように, 小惑星の形状は主に小惑星の光度変化の観測から推定されているが, この手法で推定された小惑星の形状モデルは Database of Asteroid Models from Inversion Techniques (DAMIT)⁴⁾ というデータベースに保管されている. 直径100 km以上の小惑星に関しても100個強の形状モデルが保管されている.

図6にDAMITに保管されている形状モデルを解析して得た, 実際の直径100 km以上の小惑星の軸比を示す. 図6より, 実際的小惑星の中にも短軸/長軸比が0.5程度の平たい小惑星が4個ほどあることがわかる. 従って4節の衝突計算の結果より, これら平たい小惑星形状は惑星形成期に形成され, 現在までその形を保ってきたことが示唆される.

5.2 現在の太陽系での低速度衝突は本当に実現不可能か?

2節で現在の太陽系の小惑星帯での平均の衝突速度は5 km/sと書いたが, この速度は平均値であってこれより遅い速度の衝突が無いわけではな

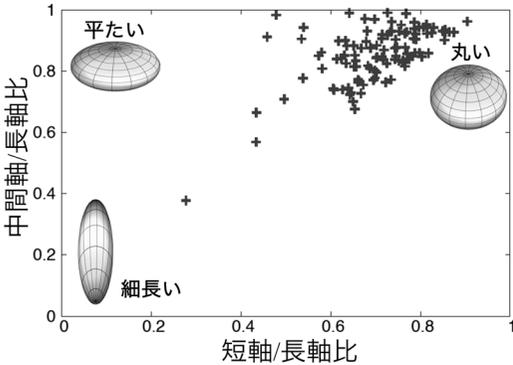


図6 DAMITに保管されている直径100 km以上の小惑星の形状モデルを解析して得た小惑星の軸比。

い。そこで我々は軌道が精度良くわかっている小惑星の軌道の情報¹⁾と小惑星同士が近接遭遇した場合の相対速度の計算方法³²⁾を用いて、小惑星帯の小惑星同士が衝突するとしたらどのような衝突速度の分布になるのか調べた。その結果、図4で調べたような速度が400 m/s以下になる衝突は全衝突のうちわずか0.2%しか起きないことがわかった。このように現在の太陽系では小惑星の脱出速度程度の低速度衝突は極めてまれである。平たい形状を形成するためにはさらに同じ程度の質量の小惑星同士が衝突するという条件も必要のため、現在の太陽系で低速度衝突によって平たい小惑星を形成することは絶望的に思われる。

同じ小惑星族に属する小惑星同士ならそのような低速度衝突は可能かもしれない。2節でも少し触れたが、小惑星の族とは似た軌道を持つ小惑星の集団で、単一の母天体が衝突により破壊されてできた天体の集団である。特に族が形成された直後はその族に所属する小惑星同士の相対速度は数100 m/s程度になることが予想されているので³³⁾、族形成後に同じ族の小惑星間で低速度衝突を起こすことは可能ではある。ただ、直径100 km程度の小惑星は小惑星帯でも最大サイズであり、そのような小惑星による1回の衝突破壊で100 kmサイズの集積天体を2つ以上形成する

ことは難しいため、やはり同じ族の小惑星間であっても100 kmサイズの小惑星同士の低速度衝突を起こすことは難しい。

一方で、2節で述べたように火星サイズの原始惑星が形成される前の惑星形成期では平均の衝突速度も数100 m/s以下になる。また現在でこそ100 kmサイズの小惑星は数が少ないが、木星などの巨大ガス惑星の形成とその後の惑星移動などの要因によって原始小惑星のほとんどは太陽系外に放出されたと考えられているため³⁴⁾、惑星形成期では100 kmサイズの小惑星も豊富に存在していたと考えられる。そのため惑星形成期では100 kmサイズで等質量程度の小惑星同士の低速度衝突はより頻繁に起こっていたと考えられる。従って、我々は現在の太陽系に存在する直径100 km以上の平たい小惑星形状は、惑星形成期に形成され現在まで形を保ってきたものであると結論づけた。

6. おわりに

本研究では主に小惑星の軸比を用いて形状を評価し、各小惑星の形状からその衝突史を明らかにすることを試みた。一方、近年の探査機による小惑星のその場観測によって、軸比だけでなくより詳細な形状や地形がいくつかの小惑星でわかってきている。そのような地形の研究によって、より詳細な小惑星の歴史や性質に迫ることができるだろう。

JAXAの探査機はやぶさ2のその場観測によって、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ことが明らかとなった。この形はコマの一種と同様の形であることから、英語でコマ型を意味するトップシェイプと呼ばれている。小惑星リュウグウは周期7.6時間という比較的遅い自転をしているものの、他の多くのトップシェイプ形状をした小惑星は周期2から4時間の高速自転をしているため、高速自転による変形でトップシェイプに進化したと考えられている。しかしながら高速自転をすれば常にトップシェイプに進化

する訳ではなく³⁵⁾。トップシェイプに進化するために必要な詳しい条件もわかっていない。粉体の動きづらさを変えたり内部に岩塊の層を用意するなど様々な条件で高速自転変形の数値計算が行われているため³⁵⁾、トップシェイプ形成の条件を明らかにすることで観測で明らかにすることの難しい内部構造に制限を与えられるかもしれない。我々の計算コードは小惑星の高速自転変形に直接応用できるため、トップシェイプ形成の詳細な条件を明らかにすべく現在進行形で研究を行っている。

NASAの探査機ニューホライズンズは冥王星よりも外側の軌道を回る小惑星ウルティマ・トゥーレの近傍を通過し、その詳細な形状を撮影した。その結果、この小惑星は雪だるまのような頭が2つあるような形状、もしくは「パンケーキ」と「くるみ」が合体したような形状をしていることがわかった³⁶⁾。個人的に興味深いのが、ウルティマ・トゥーレの2つの頭の接触点に非常に明瞭なくびれがあることである。砕けていないような2つの一枚岩天体が合体すればそのような明瞭なくびれは残せるかもしれないが、ウルティマ・トゥーレほどの30 kmサイズの2天体が脱出速度程度で衝突したとしても少なくとも接触点付近は粉々に壊れてしまうだろう。その場合図5bで示したようにくびれは埋まってしまうことが予想される。そうならないということは、お互いがお互いの周りを回る2重小惑星を経てゆっくりと合体したか、粉々になってもくびれを残せるだけの粘着力があるということを示唆しているのかもしれない。そのため小惑星ウルティマ・トゥーレの形状の研究を通して、その形成史もしくは物性に制限を与えられるかもしれない。

我々が開発した計算コードは、本稿で紹介したような小惑星の衝突現象のみならず、様々な固体天体に関する現象に応用することができる。特に、連続体力学に基づきかつ固体天体を扱うことのできる計算コードを所持しているのは世界でも

数グループしかないため、独自性の高い研究が可能であると自負している。本稿では計算コストの低い従来のSPH法を用いた計算結果を紹介したが、今後より小さく弾性体的な効果が大事になる計算でゴドノフSPH法を使用する予定である。今回開発した計算コードを用いて様々な現象を明らかにすべく、今後も精力的に研究を推し進めていきたいと考えている。

謝 辞

本稿の内容は筆者の博士論文の一部に基づいております。関連論文の共著者であり学生時代から筆者の指導にあたってくださった犬塚修一郎氏、小林浩氏には深く感謝申し上げます。本研究の数値計算は国立天文台天文シミュレーションプロジェクトの計算機であるXC30及びXC50システムを使用しております。この計算機の利用によって研究を完遂することができたため、計算機関連の方々には大変感謝しております。最後に、本稿の執筆の機会を与えてくださった滝脇知也氏に感謝申し上げます。また本研究は文部科学省科学研究費補助金(17J01703)より補助を受けております。

参 考 文 献

- 1) https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb_query.cgi (2019.6.10)
- 2) Kaasalainen, M., & Torppa, J., 2001, *Icarus*, 153, 24
- 3) Kaasalainen, M., et al., 2001, *Icarus*, 153, 37
- 4) <https://astro.troja.mff.cuni.cz/projects/asteroids3D> (2019.6.10)
- 5) Rubincam, D. P., 2000, *Icarus*, 148, 2
- 6) O'Brien, D. P., & Greenberg, R., 2005, *Icarus*, 178, 179
- 7) Hayashi, C., et al., 1985, in *Protostars and Planets II*, eds. Black, D. C., & Matthews, M. S., (University of Arizona Press)
- 8) Weidenschilling, S. J., 1977, *MNRAS*, 180, 57
- 9) Ida, S., & Makino, J., 1993, *Icarus*, 106, 210
- 10) Lifshitz, E. M., et al., 1986, *Theory of elasticity*, 3rd ed. (Elsevier, Amsterdam)
- 11) Jaeger, J. C., & Cook, N. G. W., 1969, *Fundamentals of rock mechanics* (Methuen, London)
- 12) Grady, D., & Kipp, M., 1980, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 17, 147
- 13) Collins, G. S., et al., 2004, *Meteoritics & Planetary*

Science, 39, 217

- 14) Lucy, L. B., 1977, AJ, 82, 1013
- 15) Gingold, R. A., & Monaghan, J. J., 1977, MNRAS, 181, 375
- 16) Monaghan, J. J., 1992, ARA&A, 30, 543
- 17) Swegle, J. W., et al., 1995, J. Comput. Phys., 116, 123
- 18) Gray, J. P., et al., 2001, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 190, 6641
- 19) Inutsuka, S., 2002, J. Comput. Phys., 179, 238
- 20) Sugiura, K., & Inutsuka, S., 2016, J. Comput. Phys., 308, 171
- 21) Sugiura, K., & Inutsuka, S., 2017, J. Comput. Phys., 333, 78
- 22) Benz, W., & Asphaug, E., 1995, Comput. Phys. Commun., 87, 253
- 23) Jutzi, M., 2015, Planet. Space Sci., 107, 3
- 24) Iwasawa, M., et al., 2015, in Proceedings of the 5th International Workshop on Domain-Specific Languages and High-Level Frameworks for High Performance Computing, WOLFHPC '15, 1:1
- 25) Iwasawa, M., 2016, PASJ, 68, 54
- 26) Lajeunesse, E., et al., 2005, Physics of Fluids, 17, 103302
- 27) Benz, W., & Asphaug, E., 1999, Icarus, 142, 5
- 28) Heiken, G. H., et al., 1991, Lunar Sourcebook—A User's Guide to the Moon (Cambridge University Press, Cambridge)
- 29) Sugiura, K., et al., 2018, A&A, 620, A167
- 30) Meech, K. J., et al., 2017, Nature, 552, 378
- 31) Sugiura, K., et al., 2019, Icarus, 328, 14
- 32) Kobayashi, H., & Ida, S., 2001, Icarus, 153, 416
- 33) Michel, P., et al., 2001, Science, 294, 1696
- 34) Walsh, K. J., et al., 2011, Nature, 475, 206
- 35) Walsh, K. J., et al., 2008, Nature, 454, 188
- 36) Stern, S. A., et al., 2019, Science, 364, aaw9771

Development of the Numerical Simulation Method for Rocky Body Impacts and Analysis of Collisional Deformation Processes of Asteroids

Keisuke SUGIURA

Earth Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, 1-31 Ishikawa-cho, Ota-ku, Tokyo 145-0061, Japan

Abstract: Asteroids have various shapes. Shapes of large asteroids are mainly formed through collisions between asteroids, and thus shapes of asteroids give us the information about past asteroid impacts. To investigate rocky body impact phenomena, we developed the numerical code based on a Smoothed Particle Hydrodynamics method. Our numerical simulations show that similar-mass and low-velocity impacts form various shapes including flat shapes, while high-velocity and destructive impacts mainly form spherical and bilobed shapes. This suggests that large flat asteroids were formed through low-velocity impacts in the planet formation era and they remain the same until today.