

微惑星衝突による1I/ʻOumuamuaの極端細長形状の形成可能性

杉浦 圭祐^{1,2}, 小林 浩², 犬塚 修一郎²

2019年9月4日受領, 査読を経て2019年9月26日受理.

(要旨) 太陽系外から来たと思われる小天体1I/ʻOumuamuaは光度曲線の観測から中間軸/長軸比が0.3以下の極端に細長い形状をしていると考えられている. 本研究ではそのような形状の起源として微惑星同士の衝突を考え, Smoothed Particle Hydrodynamics法を用いた衝突シミュレーションによって極端細長形状を形成する衝突条件を調べた. その結果, 半径50 mの微惑星に同じ程度の大きさの微惑星が40 cm/s以下の低速で衝突することで極端細長形状が形成可能であることがわかった. この低速な衝突速度は乱流強度 α が 10^{-4} 以下で大きな微惑星の半径が7 km以下であるような原始惑星系円盤の環境で実現可能である. そのため, 1I/ʻOumuamuaはそのような乱流が弱く極めて若い原始惑星系円盤から飛来してきた可能性がある.

1. はじめに

1I/2017 U1(ʻOumuamua)(以下オウムアムア)という小天体をご存知だろうか. これは太陽系外から来たと考えられている小天体として初めて発見された小天体である. 初の太陽系外起源小天体ということで多くの注目を集めたが, 何よりも人々を驚かせたのはその極めて細長い形状だろう. 読者の中にも「葉巻」のような形として描かれたこの小天体の想像図を見られた方もおられると思う.

小天体の起源は惑星形成期に存在していた成長途中の天体である「微惑星」である. 我々は数値シミュレーションによって微惑星同士の衝突を再現し, そのような極端に細長い形状を形成する衝突の条件を調べた[1]. 本論文ではこの研究の結果について紹介していく. より様々な様態の衝突で形成される小天体形状と太陽系の小惑星の衝突史の関係を議論した研究については, 別途日本天文学会が発行する天文月報にて解説を行っているので, 興味のある方はそちらも参照してほしい.

2. 太陽系外起源小天体オウムアムアとその形状

オウムアムアは2017年10月にハワイに設置されているPan-STARRS1望遠鏡によって発見された小天体である[2]. ちなみに「オウムアムア」という単語はハワイ語で「遠方からの初めての使者」というような意味を持っている. この小天体の軌道は離心率が1.2程度の双曲線軌道である. つまり, 遠方から太陽の近くに飛んで来た後, 再び遠方に飛び去る軌道である. またこの小天体の遠方での太陽との相対速度は26 km/s程度であるが, この相対速度は太陽近傍の恒星のランダム速度に近い値である. つまり, そのような近傍の星の惑星系から飛来してきた可能性が高いと考えられている. この小天体の名前の一部である「1I」の「I」はinterstellarの頭文字であり, 1番目に見つかった恒星間小天体という意味を持つ.

小天体は太陽光を反射して光っているため, その大きさが大きいほど明るく見える. オウムアムアはその明るさから, 100 m程度の大きさの小天体であると見積もられている. さらにいびつな形状を持つ小天体は自転していると見た目の面積が時々刻々と変化するため, その小天体の明るさも時間変化する. したがって

1. 東京工業大学 地球生命研究所
2. 名古屋大学大学院 理学研究科
sugiuraks@elsi.jp

明るさの時間変化（光度曲線）から逆に形状を推定することができる。オウムアムアの光度曲線は基本的に細長い楕円体のものと整合的で、その明るさは数時間の間に最大で10倍も変化する。オウムアムアが短軸周りに回転する偏長楕円体であった場合、この明るさ変化の倍率は中間軸/長軸比 b/a を意味する。つまり、全長が胴の幅の10倍も長い「葉巻」型の小天体である可能性がある。ただし、オウムアムアの小ささと観測期間の短さのため、その軸比は確かに定まっているものではない。 $b/a=1/6$ 程度が最も確からしい軸比である[3]と言われているものの、様々な論文で以下のように見積もられている： $b/a < 0.19$ [4], $0.1 < b/a < 0.29$ [5], $b/a < 0.22$ [6], $b/a < 0.20$ [7], $b/a < 0.33$ [8], $b/a=0.1$ 程度 [2]。そのため、少なくとも $b/a < 0.30$ 程度の極端に細長い形状をしていると考えられている。

よく細長いと形容される小惑星イトカワも中間軸/長軸比は $b/a=0.55$ 程度であるため[9]、オウムアムアの形状がいかに特殊であるかがよくわかる。そのような特殊な形状を形成するためには何か特殊な環境が必要だと予想される。そのためオウムアムアの極端細長形状を形成する機構を明らかにすることで、オウムアムアがどのような惑星系で形成されどのような経緯で太陽系にやって来たのか、といった歴史に制限を与えられる可能性がある。そのような機構の候補として、星や惑星からの潮汐力による引き伸ばし[10]、星間ダストによる削り取り[11]、微惑星同士の衝突変形[12, 13]、などを挙げることができる。本研究では微惑星同士の衝突に着目し、中間軸/長軸比 b/a が0.3以下の形状を持つ小天体を形成するような衝突の条件を調べる。

3. 数値計算手法と微惑星衝突計算の初期条件

3.1 数値計算手法

先行研究より、同じ程度の質量を持つ微惑星同士の低速で合体的な衝突がいびつな形状を作りやすいことがわかっている[13]。一方で高速で微惑星を粉々に壊してしまうような衝突では軸比が0.5以下のいびつな形状を作りにくいことも示されている[14]。そのため本研究では、オウムアムアと同じ程度の大きさである

100 m程度の微惑星同士の合体的衝突に着目する。この大きさの微惑星が自己重力で合体するためには数10 cm/s程度の低速度で衝突することが必要であるが、そのような低速衝突は惑星形成期の力学的に冷たい環境で起きる。惑星形成期において微惑星は固体微粒子の集積で形成されるため、100 m程度の小ささの微惑星はまだ微粒子の集合、つまり粉体の塊のままであると考えられる。したがって粉体としての微惑星同士の衝突を考える。

本研究では微惑星同士の衝突を再現するため、連続体の方程式を解くことで数値シミュレーションを行う。つまり、連続の式、運動方程式、エネルギー方程式を解く。微惑星の衝突・合体には自己重力が重要なため、自己重力ももちろん計算する。また粉体を扱うため、引っ張り強度は無視し、横ずれ強度は圧縮圧力に比例するように計算する[15]。この横ずれ強度と圧縮圧力の比例係数が摩擦係数 μ_d であり、摩擦角 ϕ_d と $\mu_d = \tan(\phi_d)$ の関係がある。一般的に摩擦角は安息角と同じ値をとる。安息角は粉体の山の限界の傾斜角であり、つまりは砂時計の砂の山の斜面の角度である。安息角、または摩擦角が大きいほど急な斜面に粉体が耐えることができ、いびつな形状を保ちやすくなる。

連続体の方程式を数値的に解くために、Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法という手法を使用する[e.g., 16]。この手法では物体を広がりを持った粒子の集合で置き換える。さらにこの描像に従って連続体の運動方程式などを離散化し、各粒子の加速度などを得る。そのようにして得られた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。もともと天文分野で流体力学を解くために開発された手法であるが、最近になって弾性体力学[17]や粉体の動力学[15]にも応用されるようになってきた。本研究ではこの粉体の動力学を扱うSPH法を使用する。

3.2 微惑星衝突計算の初期条件

簡単のために粉体の球を微惑星とし、2つの粉体球を衝突させる。粉体の性質を表すパラメータとして摩擦角 ϕ_d を考え、 ϕ_d を変化させたシミュレーションを行う。月の砂を計って得られた摩擦角の範囲は30°から50°の間であるため[18]、この範囲で ϕ_d を変化させる。

オウムアムア程度のサイズの天体形成を再現するため、被衝突天体の半径は50 mで固定する。一方で衝

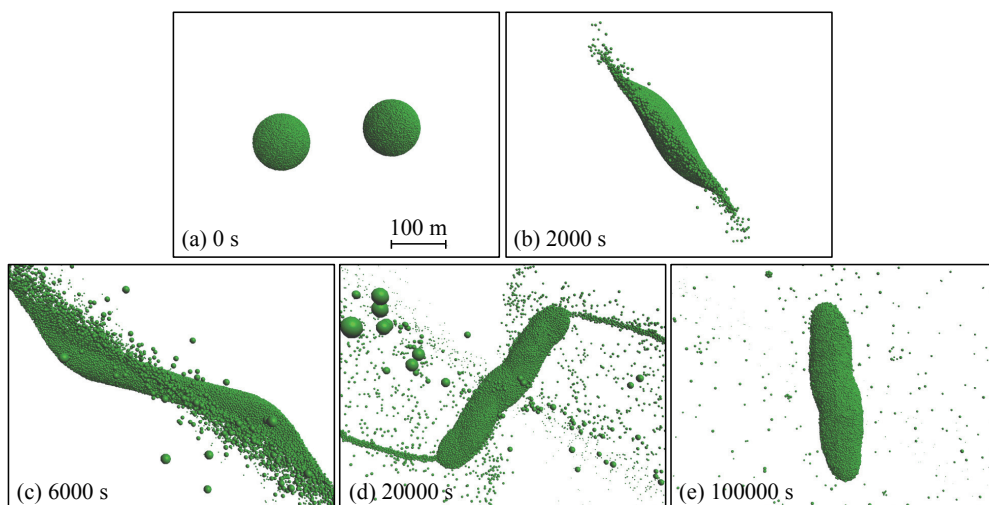


図1: $\phi_d = 40^\circ$, $M_i/M_t = 1.0$, $v_{imp} = 20$ cm/s, $\theta_{imp} = 15^\circ$ の衝突計算で形成される最大天体のスナップショット。(a)-(e)はそれぞれ異なる時刻のスナップショットを表す。Sugiura et al. (2019)[1]の図を改変。

突天体のサイズは、被衝突天体のサイズ程度で多少変化させる。つまり、衝突天体質量 M_i と被衝突天体質量 M_t の比を1程度で変化させる。また被衝突天体に5万SPH粒子程度使用する解像度で計算を行う。

衝突速度 v_{imp} は100 m程度のサイズの微惑星同士の衝突が合体的になる数10 cm/s程度で変化させる。また衝突角度 θ_{imp} は正面衝突付近で変化させる。ここで、 $\theta_{imp} = 0^\circ$ が正面衝突を表す。

まとめると、 ϕ_d , M_i/M_t , v_{imp} , θ_{imp} をパラメータとして変化させ、様々な衝突計算を行う。それら衝突の結果形成される天体の中間軸/長軸比 b/a を測定し、 $b/a < 0.3$ となるような極端細長形状を形成するような衝突条件を調べる。

4. 微惑星衝突による極端細長形状の形成条件

4.1 摩擦角 $\phi_d = 40^\circ$ の等質量衝突

まず摩擦角 $\phi_d = 40^\circ$ で衝突天体の半径も50 m、つまり同じ質量の微惑星同士の衝突の結果($M_i/M_t = 1.0$)を紹介する。図1はこのような衝突計算のうちに極端細長形状を形成した衝突のスナップショットを表す。この衝突によって微惑星は衝突速度のうち横ずれ成分の方向に引き伸ばされ(図1b, c)、引き伸ばされた方

向から破片が集積することで極めて細長い最大天体が形成される(図1d, e)。この最大天体の軸比は $b/a =$

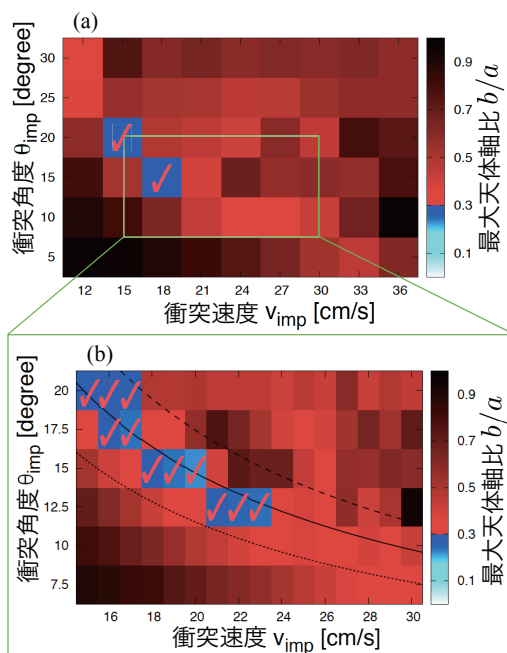


図2: $\phi_d = 40^\circ$, $M_i/M_t = 1.0$ の各衝突計算で形成された最大天体の中間軸/長軸比 b/a のカラーマップ。(b)は(a)のパラメータ空間の一部をさらに詳しく調べた結果を表す。 $b/a < 0.3$ となる最大天体ができただけのパラメータにはチェックマークを記してある。また(b)において黒い破線、実線、点線はそれぞれ $v_{imp} \sin \theta_{imp} = 6.0, 5.1, 4.0$ cm/sを表す。Sugiura et al. (2019)[1]の図を改変。

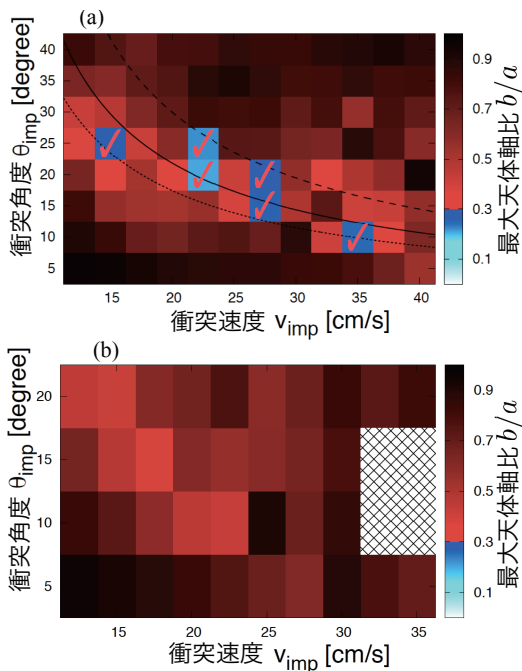


図3: 等質量衝突だが摩擦角 ϕ_d が異なる場合の衝突で形成された最大天体の中間軸/長軸比 b/a のカラーマップ。(a)は $\phi_d = 50^\circ$, (b)は $\phi_d = 30^\circ$ の結果を表す。(a)で黒い破線, 実線, 点線はそれぞれ $v_{\text{imp}} \sin \theta_{\text{imp}} = 10, 7.4, 6.0$ cm/sを表す。また(b)で網掛けの領域は大規模破壊が起きたため最大天体の軸比を測らなかった領域である。Sugiura et al. (2019) [1]の図を改変。

0.24であり、4:1程度の極端細長形状が形成されている。衝突条件によってはまれに最大集積天体以外の天体が $b/a < 0.3$ の極端細長形状になることもあるが、図1に示すように主に最大天体が極端細長形状になる。そのため、以下では各衝突計算で形成された最大天体の軸比を調べる。

図2は $\phi_d = 40^\circ$, $M_i/M_t = 1.0$ で様々な衝突速度・衝突角度で衝突計算を行い、最大天体の中間軸/長軸比 b/a を調べた結果である。図2aより $b/a < 0.3$ となる極端細長形状の形成には $\theta_{\text{imp}} = 15^\circ$ 付近で $v_{\text{imp}} = 15 - 20$ cm/sという条件が必要ながわかる。また極端細長形状を形成した衝突パラメータの付近をさらに詳細に調べた結果である図2bより、 $v_{\text{imp}} \sin \theta_{\text{imp}} = 5.1$ cm/s付近、大雑把に 4.0 cm/s $< v_{\text{imp}} \sin \theta_{\text{imp}} < 6.0$ cm/sで極端細長形状が形成されていることがわかる。 $v_{\text{imp}} \sin \theta_{\text{imp}}$ とは衝突速度成分のうち横ずれ速度の成分を表す。図1よりこの横ずれ速度の方向に引き伸ばされることで極端細長形状が形成されていることがわかるため、ある

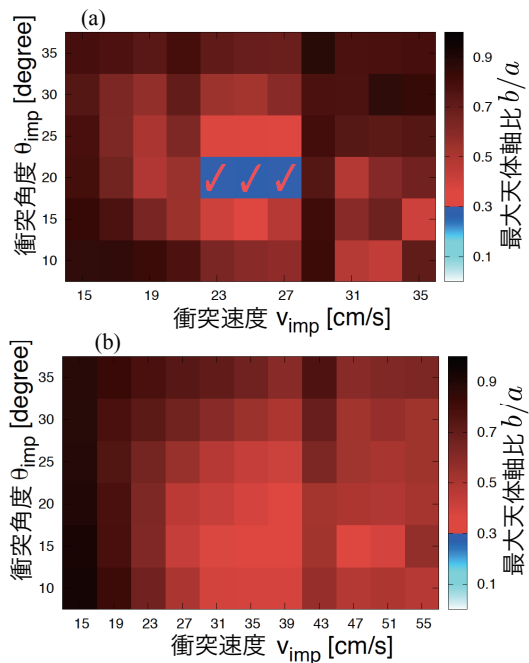


図4: 摩擦角は $\phi_d = 50^\circ$ だが等質量衝突ではない場合の衝突計算で形成された最大天体の中間軸/長軸比 b/a のカラーマップ。(a)は $M_i/M_t = 0.5$, (b)は $M_i/M_t = 0.25$ の結果を表す。Sugiura et al. (2019) [1]の図を改変。

程度大きな横ずれ速度が必要である。しかし横ずれ速度が大きすぎると最大天体が分裂してしまいそれほど細長い形状はできないため、分裂するかしないか程度の横ずれ速度が要求される。衝突2天体が分裂してしまうような衝突速度は衝突エネルギーと摩擦により散逸するエネルギーの釣り合いで見積もることができ、そのような衝突速度はだいたい2体脱出速度程度になる[13]。この衝突における2体脱出速度は約6 cm/sであり、極端細長形状の形成に必要なずれ速度の $v_{\text{imp}} \sin \theta_{\text{imp}} = 5.1$ cm/sを説明できる。

4.2 極端細長形状形成への摩擦角の依存性

次に同様に等質量衝突(つまり $M_i/M_t = 1.0$)だが摩擦角が異なる場合の衝突計算の結果を紹介する。図3aより、摩擦角が $\phi_d = 50^\circ$ とより大きい場合についても、 $v_{\text{imp}} < 40$ cm/s程度で極端細長形状が形成されていることがわかる。また衝突速度・角度の刻み幅が大きいため軸比の値が連続的に変化していないように見え

るものの、同様に $v_{\text{imp}} \sin \theta_{\text{imp}} = 7.4 \text{ cm/s}$ 程度、大雑把に $6.0 \text{ cm/s} < v_{\text{imp}} \sin \theta_{\text{imp}} < 10 \text{ cm/s}$ の横ずれ速度を持つ衝突で極端細長形状が形成していることもわかる。

一方、図3bより $\phi_d = 30^\circ$ と摩擦角をより小さくした場合については、低速で合体的な衝突から高速で破壊的な衝突まで様々な衝突計算を行ったにも関わらず、極端細長形状の形成はしていないことがわかる。これは摩擦角が小さい、つまり横ずれ強度が小さい場合はより極端にいびつな形状を保つことが難しくなるためである。従って極端細長形状の形成には摩擦角が 40° 以上という条件が必要になることがわかる。

4.3 極端細長形状形成への質量比の依存性

最後に摩擦角は $\phi_d = 50^\circ$ だが、衝突天体質量/被衝突天体質量比 M_1/M_2 が1.0ではない、つまり等質量衝突ではない場合の衝突計算の結果を紹介する。図4aは質量比が $M_1/M_2 = 0.5$ 、つまり衝突天体の質量が被衝突天体の質量の半分である衝突の結果を表すが、少ないもののいくつかのパラメータの衝突において極端細長形状が形成されていることがわかる。

一方、図4bは $M_1/M_2 = 0.25$ とより衝突天体が小さい場合の結果を表すが、図4aと比べより広い衝突速度の範囲でパラメータサーベイを行ったにも関わらず、極端細長形状の形成は確認できなかった。これは衝突天体の大きさが被衝突天体に比べ小さくなればなるほど、局所的な破壊になってしまい被衝突天体全体の引き伸ばしにならなくなるからである。従って極端細長形状の形成には衝突天体/被衝突天体質量比 M_1/M_2 が0.5以上という条件が必要になることがわかる。

以上の衝突計算結果をまとめると、極端細長形状の形成には大雑把に摩擦角 ϕ_d が 40° 以上、衝突天体/被衝突天体質量比 M_1/M_2 が0.5以上、衝突速度 v_{imp} が 40 cm/s 以下、衝突角度 θ_{imp} が 30° 以下という条件が必要である。

5. 議論

5.1 低速度衝突を実現する環境

極端細長形状を微惑星衝突によって形成するための4つの条件のうち、衝突速度以外の3つの条件は月の砂の摩擦角の取り得る範囲及び衝突条件の多様性を考

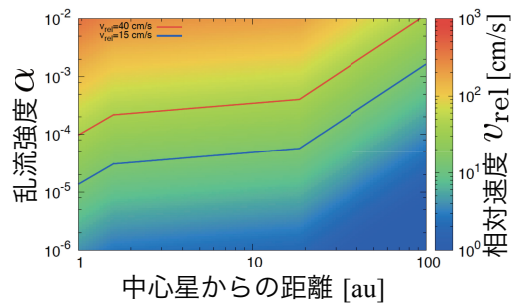


図5: 原始惑星系円盤内にて乱流によって誘起される半径100 mの微惑星間の相対速度。横軸は中心星からの距離、縦軸はShakura-Sunyaevの無次元乱流強度、色は半径100 mの微惑星間の相対速度である。赤い線と青い線はそれぞれ相対速度が 40 cm/s と 15 cm/s の等高線を表す。Sugiura et al. (2019)[1]の図を改変。

えると実現可能である。一方で 40 cm/s 以下の衝突速度という条件は実現することが難しい。例えば太陽系の小惑星帯での平均の衝突速度は 5 km/s であり、惑星系での衝突速度は一般に km/s 程度である。原始惑星系円盤内のような力学的に冷たく静かな環境なら数 10 cm/s の衝突速度も実現可能かもしれないが、それでも乱流やより大きな天体からの重力的な攪乱によって相対速度が上げられてしまうかもしれない。

ここでは原始惑星系円盤の中での微惑星衝突による極端細長形状の形成を考え、数 10 cm/s 程度の衝突速度になる条件について議論する。具体的には乱流とより大きな天体の重力攪乱に着目し、半径100 mの微惑星同士の衝突速度が 40 cm/s 以下になるような乱流強度と大きな天体の半径を制限する。簡単のために中心星が太陽と同じ性質を持ち、最小質量円盤モデル[19]で与えられるような原始惑星系円盤を考える。

(1) 乱流

原始惑星系円盤内にガスの乱流渦が存在すると、100 mサイズの天体であっても乱流によって多少は軌道が揺らされ、天体同士の相対速度が生じる[e.g., 20]。乱流の強度は一般に α という無次元量で表されるが、これは最大乱流渦の回転速度と音速との比を表すような量である。ある強度 α の乱流によって微惑星間の相対速度が平均的にどのような値になるのかは理論的に見積もることができる[21]。

図5は原始惑星系円盤内にて乱流によって誘起される半径100 mの微惑星間の相対速度を表す。図5より、中心星からの距離が20 au以下なら 10^{-4} 以下の α 、

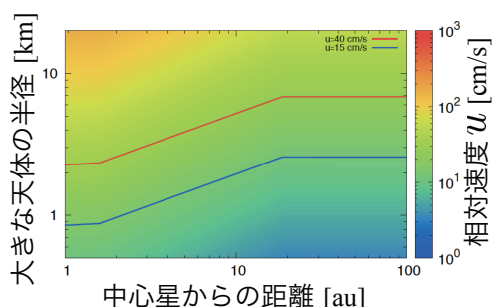


図6: より大きな天体の重力によって誘起される半径100 mの微惑星間の相対速度。縦軸はより大きな天体の半径を表す。それ以外は図5と同じ。Sugiura et al. (2019) [1]の図を改変。

100 au程度の距離なら 10^{-2} 以下の α なら微惑星間の相対速度が40 cm/s以下になることがわかる。

原始惑星系円盤では磁気回転不安定性が乱流の主要な源と考えられており、 $\alpha = 10^{-2}$ 程度の強度の乱流が発達する[22]。そのため100 auの遠方ならば磁気回転不安定性による乱流が発達しても40 cm/s以下の衝突速度は実現される。また0.1 – 10 auの円盤赤道面では低い電離度と高いガス密度のため磁気回転不安定性が発達せず、 $10^{-6} < \alpha < 10^{-3}$ の低い乱流強度が実現される。そのため中心星の近傍であっても磁気回転不安定性が発達しないような領域なら低い衝突速度が実現される。

さらに、観測的にも原始惑星系円盤での乱流が弱いことが示唆されている。HL Tauという原始惑星系円盤ははっきりとしたダストのギャップ構造を伴っているが、はっきりとしたギャップが観測されるためには円盤が十分に薄い必要があり、そのためには $\alpha = 10^{-4}$ 程度の弱い乱流強度でないといけないことが示されている[23]。従って原始惑星系円盤における乱流では半径100 mの微惑星間の相対速度を高くするには不十分で、40 cm/s以下の低速度衝突を妨げる要因にはなりそうもないということがわかる。

(2) より大きな天体からの重力攪乱

大きな天体が存在すると重力によって軌道が乱され、天体間の相対速度が上がる。ここでは半径Rの大きな天体の集団と半径100 mの微惑星の集団を考え、大きな天体からの重力散乱により相対速度が上がる効果[24]とガス抵抗によって相対速度が下がる効果[25]が釣り合う平衡状態における、半径100 mの微惑星間の

相対速度を見積もる。

図6は半径Rの大きな天体の重力散乱によって誘起される半径100 mの微惑星間の相対速度を表す。図6より、中心星から遠く相対速度が小さくなりやすい領域であっても、半径7 km以上の天体が存在するだけで半径100 mの微惑星間の相対速度が40 cm/s以上に上げられてしまうことがわかる。天体の成長のタイムスケールは円盤の場所などに依存するため天体半径が7 km以下となるような系の年齢を定量的に議論することは難しいが、40 cm/s以下の低速度衝突を実現するためには惑星はおろか微惑星も7 kmに成長していないような極めて若い原始惑星系円盤の環境が必要であることがわかる。

一方、オウムアムアが太陽系に飛来するためには、何らかの方法でオウムアムアが形成された原始惑星系円盤から放出され脱出する必要がある。巨大ガス惑星による放出[26]を考えた場合、円盤の外側のような微惑星の成長が遅い領域でオウムアムアの極端細長形状を形成し、その後惑星の成長が速い円盤の内側に移動して巨大ガス惑星によって放出されたのかもしれない。中心星が1つではなく連星であった場合[27]、非常に若い連星周りの原始惑星系円盤でオウムアムアを形成し、その後連星の近傍に移動して連星によって放出されたのかもしれない。または他の恒星がオウムアムアが形成された原始惑星系円盤に近接遭遇し、オウムアムアが形成された場所から直接放出されたのかもしれない[28]。

いずれにせよ、オウムアムアの極端細長形状を形成した後、その形が他の微惑星との衝突で壊される前に系を脱出しなければいけない。特に細長い形をしていると衝突断面積が大きくなるので、より衝突が起きやすくなってしまう。そのため、本研究で提唱したオウムアムア形状の微惑星衝突による形成がどのくらい実現可能か(あるいは困難か)は、微惑星衝突・成長・移動のタイムスケールなどを加味した上でさらに議論していく必要がある。

放出前に微惑星との衝突で小天体オウムアムアの極端細長形状が破壊されてしまう可能性は考慮する必要があるが、一方で放出時に散乱する天体と近接遭遇した際の潮汐力による破壊は無視できそうである。潮汐

力により小天体を破壊できるような半径(ロッシュ半径)を見積もると、軸比が10:1の細長い小天体であってもロッシュ半径は散乱天体の半径の3倍程度にしかない。一方で巨大ガス惑星による放出では、ガス惑星の重力が中心星よりも優勢になる半径(ヒル半径)程度まで近づけば放出は可能であり[29]、木星の場合のヒル半径は木星半径の700倍程度とロッシュ半径よりも十分に大きい。また中心連星による放出及び恒星遭遇による放出でも天文単位程度の距離の近接遭遇で放出されるため[30, 31]、放出される小天体の形状の変形は無視できると考えられる。

5.2 オウムアムアは宇宙人が作った宇宙船なのか?

話は少し変わるが、読者の中にも「葉巻」型をしているオウムアムアの想像図を見て、よくSFに出てくる宇宙船みたいだと思われた方もいるのではないだろうか。実際、「オウムアムア宇宙船」説はNHKスペシャルで取り上げられ紹介されたりもした¹。非常に夢のある話だし、筆者も研究者ではない身であつたら信じたいところだが、一方で専門家が何の根拠もなくそのような説を主張するだろうか、とも思うだろう。もちろんこの説を主張している論文[32]も正しい根拠のもとにこの説を議論しており、その結果宇宙船、というより人工物の可能性があるだろうと言っているに過ぎない。ここでは人々の注目を集めた話題として「オウムアムア宇宙船」説を取り上げ、この説の経緯と根拠について筆者の理解の範囲で簡単に説明したいと思う。

オウムアムアは太陽から0.25 auという非常に太陽に近いところを通っておきながら、彗星に見られるような「尾」などはどのような観測でも確認することはできなかった[e.g., 2]。そのため当初は、オウムアムアは揮発性成分をすでに失っており、小惑星のような岩石質の天体で表面からガスやダストの放出はないものと考えられていた。一方でオウムアムアの軌道を詳しく調べると、太陽からの重力だけでは説明できないような軌道をしており、どうやら近日点付近で太陽とは逆方向に加速をしているということがわかった[33]。その加速の可能性を検討した結果、ガスかダストの放出が最も可能性の高い加速の原因であり、毎秒10 kg程度の質量放出があれば加速が説明できることがわかった。これだけの質量放出があれば「尾」などとして観測されるはずだが[34]、前述したようにそのような

観測はない。従って、観測で受かりにくい大きなダストを放出しているなどといった可能性はあるものの、質量放出が観測されないということとその軌道に矛盾が生じているわけである。

そこで「宇宙船」説の論文[32]の著者たちは、別の加速のメカニズムとして太陽光による放射圧を考えた。「宇宙船」説の著者たちの見積もりによると、観測された加速を太陽光放射圧によって説明するためにはオウムアムアは厚みが1 mm程度の薄いシート形状になっている必要がある。当然そのような薄い小天体は(少なくとも太陽系には)存在しない。そのためオウムアムアは人工物の可能性があり、そのような人工物としてソーラーセイル(太陽帆)、つまり宇宙船の一部が考えられる。「宇宙船」説の著者たちはこのように主張している。

従って「オウムアムア宇宙船」説は、著者らの主観という背景はあるものの、基本的には根拠に基づいた可能性を議論した結果、薄い人工物である可能性を示唆しただけ、と行うことができる。オウムアムアは観測時間が短かったこともあり確たる情報が少なく、先ほど述べた質量放出があつたかも含め、様々な議論が続いている状況である。そのため人工物説を完全に否定することは難しい。しかしながら、惑星形成の過程でかなりの量の固体天体が系外に放出されることが示されているため、太陽系外起源小天体が存在することは自然である。そのため、オウムアムアがいかにも不自然なほど細長い形状をしていようとも、オウムアムアを太陽系外起源小天体と考えその形状の起源を惑星形成の何らかのメカニズムに求める方が科学的合理性がある、と筆者は思う。

6. おわりに

太陽系外から飛来してきたと考えられている小天体オウムアムアは、光度曲線の観測によって中間軸/長軸比が少なくとも0.3よりも小さいような極端細長形状をしていると考えられている。本研究ではそのような形状の起源として微惑星同士の衝突を考え、SPH法を用いた衝突シミュレーションによって極端細長形状を形成する衝突条件を調べた。その結果、半径50

2. <https://www.iau.org/news/pressreleases/detail/iau1910/>

mの微惑星に同じくらいの大きさの微惑星が40 cm/s以下の低速度で衝突した場合、衝突角度や速度にもよるが極端細長形状を形成する衝突があることがわかった。

そのような低速衝突を起こすには、原始惑星系円盤の中のような力学的に静かな環境が要求される。我々は乱流とより大きな天体からの重力散乱という2点に着目し、40 cm/s以下の衝突速度が実現される条件を見積もった。その結果、乱流強度 α が 10^{-4} 以下で大きな天体の半径が7 km以下なら実現可能であることがわかった。従って、オウムアムアはそのような静かで若い原始惑星系円盤で形成され、その系から放出された後に太陽系にやってきた小天体である可能性が考えられる。

2019年8月に2番目の太陽系外起源小天体が発見され、本論文を執筆中の2019年9月24日に国際天文学連合により2I/Borisovと命名された。この小天体の離心率は約3.4にもなり、また彗星に見られるような尾やコマが観測されるなど、オウムアムアとはまた違った特徴を持つ²。さらに、次世代大型望遠鏡の稼働によって、1年で最大1個の太陽系外起源小天体が見つかるとの見積もりもある[35]。今後そのような小天体が多数見つかり、太陽系内的小天体だけでなく系外的小天体の情報を利用することによって、より多角的に惑星形成を議論できるようになるだろう。

謝 辞

本研究の数値シミュレーションは国立天文台天文シミュレーションプロジェクトのXC30システムを使用して行いました。天文台計算機システムに関わる全ての方に感謝申し上げます。また本研究は日本学術振興会(17J01703, 18H05436, 18H05437, 18H05438, 17K05632, 17H01105, 17H01103, 23244027, 16H02160)及び研究拠点形成事業「惑星科学国際研究ネットワークの構築」より支援を受けております。

参考文献

- [1] Sugiura, K. et al., 2019, *Icarus* 328, 14.
- [2] Meech, K. J. et al., 2017, *Nature* 552, 378.
- [3] McNeill, A. et al., 2018, *Astrophys. J.* 857, L1.
- [4] Bannister, M. T. et al., 2017, *Astrophys. J.* 851, L38.
- [5] Bolin, B. T. et al., 2017, *Astrophys. J.* 852, L2.
- [6] Drahus, M. et al., 2018, *Nature Astron.* 2, 407.
- [7] Fraser, W. C. et al., 2018, *Nature Astron.* 2, 383.
- [8] Knight, M. M. et al., 2017, *Astrophys. J.* 851, L31.
- [9] Fujiwara, A. et al., 2006, *Science* 312, 1330.
- [10] Walsh, K. J. and Richardson, D. C., 2006, *Icarus* 180, 201.
- [11] Domokos, G. et al., 2017, *Research Notes of the AAS* 1, 50.
- [12] Leinhardt, Z. M. et al., 2010, *Astrophys. J.* 714, 1789.
- [13] Sugiura, K. et al., 2018, *Astron. Astrophys.* 620, A167.
- [14] Michel, P. et al., 2019, *Proceedings of 50th Lunar and Planetary Science Conference 2019*, 1659.
- [15] Jutzi, M., 2015, *Planet. Space Sci.* 107, 3.
- [16] Monaghan, J. J., 1992, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 30, 543.
- [17] Libersky, L.D., Petschek, A.G., 1991, Smooth particle hydrodynamics with strength of materials. Pages 248–257 In: Trease, H.E., Fritts, M.F., Crowley, W.P. (Eds.), *Advances in the Free-Lagrange Method Including Contributions on Adaptive Gridding and the Smooth Particle Hydrodynamics Method*. Lecture Notes in Physics, vol. 395 Berlin Springer Verlag.
- [18] Heiken, G.H., Vaniman, D.T., French, B.M., 1991, *Lunar Sourcebook - a user's Guide to the Moon*.
- [19] Hayashi, C., 1981, *Prog. Theor. Phys. Suppl.* 70, 35.
- [20] Cuzzi, J. N. et al., 2001, *Astrophys. J.* 546, 496.
- [21] Ormel, C. W. and Cuzzi, J. N., 2007, *Astron. Astrophys.* 466, 413.
- [22] Flock, M. et al., 2017, *Astrophys. J.* 835, 230.
- [23] Pinte, C. et al., 2016, *Astrophys. J.* 816, 25.
- [24] Ida, S. and Makino, J., 1993, *Icarus* 106, 210.
- [25] Adachi, I. et al., 1976, *Prog. Theor. Phys.* 56, 1756.
- [26] Raymond, S. N. et al., 2018, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 476, 3031.
- [27] Jackson, A. P. et al., 2018, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 478, L49.
- [28] Kobayashi, H. et al., 2005, *Icarus* 177, 246.
- [29] Fernandez, J. A., 1978, *Icarus* 34, 173.
- [30] Holman, M. J. and Wiegert, P. A., 1999, *Astron. J.* 117, 621.

- [31] Kobayashi, H. and Ida, S., 2001, *Icarus* 153, 416.
- [32] Bialy, S. and Loeb, A., 2018, *Astrophys. J.* 868, L1.
- [33] Micheli, M. et al., 2018, *Nature* 559, 223.
- [34] Meech, K. J. and Svoren, J., 2004, in *Comets II*, 317.
- [35] Cook, N. V. et al., 2016, *Astrophys. J.* 825, 51.