

「天体の衝突物理の解明 (XV) ～小惑星の表層進化～」開催報告

末次 竜¹, 岡本 尚也², 鎌田 俊一³,
鳶生 有理², 杉浦 圭祐⁴, 保井 みなみ⁵

1. はじめに

2019年11月27日(水)～29日(金)の三日間、千葉工業大学スカイツリータウンキャンパスにおいて「天体の衝突物理の解明 (XV) ～小惑星の表層進化～」を開催した(図1)。研究会の目的は天体の衝突現象に関係する物理の理解であり、2005年に初開催されて以降、会場の変更等はあったが毎年継続的に開催され、今回で第15回を迎える。

この研究会では毎年、議論の軸となるテーマを設定しており、今年度のテーマは「小惑星の表層進化」である。毎年4、5月頃に世話人らでテーマについて相談し決めているが、今年度は相談時期に探査機「はやぶさ2」による小惑星リュウグウ表面への宇宙衝突実験の成功もあり、比較的早い段階で今回のテーマとなった。当然、探査機「はやぶさ2」の結果も含めた議論が望まれるため、探査に大きく関わっておられる荒川政彦氏(神戸大学)、杉田精司氏(東京大学)、坂谷尚哉氏(宇宙航空研究開発機構)の三名にご講演をお引き受けいただいた。こうした内容で一般講演を募集した結果、首都圏開催ということもあり講演数が例年よりも増加し、最終的には口頭講演が28件(招待講演含む)、ポスター講演が15件、参加者総数は55名となった。

以下では研究会の内容をごく簡単に紹介する(文

中敬称略)。各講演のスライドや要旨は研究会のウェブページにアップロードしているので、詳細はそちらを参考にしていただけたら幸いである(<http://www.impact-res.org/impact19/index.html>)。なお毎年、研究会の内容は初回[1]を除いて参加者に報告をお願いしてきたが、私(末次)自身はこれまで報告記事を執筆していなかったため、今回は15年ぶりに開催報告という形をとらせていただくことにした。

2. プログラム

<<口頭講演>>

■11月27日(水)

鈴木大輝(アストロバイオロジーセンター)

「彗星衝突による有機分子運搬の可否」

岩佐海詩(神戸大学)

「衝突掘削による氷小天体カラーへの影響」

豊田優佳里(神戸大学)

「土星リングを模擬した多孔質氷球の反発に関する実験的研究」

杉村瞭(神戸大学)

「物質強度を変化させた模擬小惑星標的を用いた高速度クレーター形成実験～クレータースケール則の導出、エジェクタ放出過程の解析～」

樋口誠(北海道大学)

「冥王星の衝突クレーターの深さ・直径比とその理論的解釈」

中村昭子(神戸大学)

1.産業医科大学

2.宇宙航空研究開発機構

3.北海道大学

4.東京工業大学

5.神戸大学

ryos@med.uoeh-u.ac.jp

「衝突弾丸物質の残存」

保井みなみ(神戸大学)

「石膏及びガラス球の衝突破壊強度に対する斜め衝突の影響」

中村誠人(神戸大学)

「氷微惑星を模擬した氷球の斜め衝突実験」

■11月28日(木)

山本裕也(神戸大学)

「リュウグウ表層を模擬した低強度粗粒標的に対するクレーター形成実験」

杉浦圭祐(東京工業大学)

「小惑星の高速自転変形の数値計算とリュウグウなどのコマ型の形成条件について」

金丸仁明(大阪大学)

「小惑星 Ryugu に働く YORP 効果の数値計算：自転状態の進化史の解明に向けて」

道上達広(近畿大学)

「小惑星リュウグウにおけるメートルサイズのボルダー3軸比」

荒川政彦(神戸大学)【招待講演】

「はやぶさ2-SCIとDCAM3による宇宙衝突実験」

杉田精司(東京大学)【招待講演】

「はやぶさ2観測データから見えてきた小惑星リュウグウの進化史」

坂谷尚哉(宇宙科学研究所)【招待講演】

「はやぶさ2中間赤外カメラの観測結果」

和田浩二(千葉工業大学)

「SCIクレーターから放出されたイジェクタ粒子のサイズ推定」

門野敏彦(産業医科大学)

「小惑星 Ryugu での宇宙衝突実験: 放出物のパターンとボルダー」

翼瑛理(Instituto de Astrofisica de Canarias)

「極域観測から示唆されるリュウグウのスペクトル進化」

■11月29日(金)

黒澤耕介(千葉工業大学)

「炭素質隕石シミュラントからの衝撃脱ガス」

柳澤正久(電気通信大学)

「月面衝突閃光の発光メカニズム」

阿部新助(日本大学)

「月面衝突閃光と微光流星の多波長同時観測によるメテオロイドのサイズ分布決定」

布施綾太(日本大学)

「衝突閃光の実験・観測・数値シミュレーションによる研究」

鈴木宏二郎(東京大学)

「塑性ガスモデル数値流体力学によるペネトレータ貫入シミュレーション」

池田晋太郎(神戸大学)

「衝突によるラブルパイル天体の自転速度変化」

黒崎健二(名古屋大学)

「水素大気を持つ惑星の天体衝突」

城野信一(名古屋大学)

「木星の形成に伴うコンドリユールの形成」

大村知美(名古屋大学)

「小規模衝突による傾斜地形緩和に関する実験的研究」

長足友哉(神戸大学)

「自由落下ダスト流に形成するクラスター間衝突実験」

<<ポスター講演>>

塩本純平*(神戸大学)

「D型小惑星模擬標的の衝突破壊実験」

堀川和洋*(神戸大学)

「始原的隕石母天体を模擬した衝突破壊に関する実験的研究」

長野巧*(神戸大学)

「フラッシュX線による衝突破片の速度-質量分布の観測：乾燥粘土を用いた強度と空隙率に対する依存性の研究」

笹井遥*(神戸大学)

「多孔質天体を模擬した雪のクレーター形成実験及び衝突残留熱の計測」

横田優作*(神戸大学)

「バルジ地形に形成される衝突クレーターに関する実験的研究」

大川初音*(神戸大学)

「クレーター形成時のエジェクタ放出過程における3次元粒子追跡」

中澤風音*(東京工業大学)

「放出物カーテンにおけるパターン形成のメカニズム
解明に向けた多粒子衝突シミュレーション」

末次竜 (産業医科大学)

「LIGGGHTSによる衝突計算」

寫生有理 (宇宙科学研究所)

「Ryugu クレーターの熱物性」

黒澤耕介 (千葉工業大学)

「大気中斜め衝突現象の高速シュリーレン撮像」

黒澤耕介 (千葉工業大学)

「iSALE users group in Japan 活動報告」

岡本尚也 (宇宙科学研究所)

「DESTINY+ミッション搭載カメラによる小惑星
Phaethon表層の観測：機上校正方法に関する検討」

佐藤峰南 (千葉工業大学)

「米国西部に分布する白亜紀-古第三紀境界セクションの強親鉄性元素およびオスミウム同位体組成バリエーション」

平田直之 (神戸大学)

「リュウグウクレーターの東西非対称性の起源に関する理論的考察」

門野敏彦 (産業医科大学)

「爆発によるクレーター形成：衝突との対応」

(*はポスター2分講演者)

3. 講演概要

各講演内容を簡単に紹介するが、関係性が強い講演については、まとめて紹介していることについてご了承ください。

3.1 11/27(水)

鈴木(大): 天体衝突で地球に持ち込まれる有機分子の生存率を数値計算で調べた。計算で得た分子が生存可能な温度領域の割合と衝突角度ごとの衝突確率から、生存率が従来よりも低くなることを示した。

岩佐: トロヤ群小惑星のカラーの二分性に対する天体衝突の表面掘削の寄与を調べ、臨界衝突エネルギーより小さいエネルギーで小天体の半球全体が更新されうること示した。

豊田: 土星リングの薄さを維持するには構成粒子同

士の非弾性衝突が重要である。衝突実験で氷球の反発係数を調べ、ある衝突速度以上で非弾性衝突に推移することを明らかにした。

杉村: 天体には物質強度があるが従来の掘削流のモデルは物質強度を無視している。衝突実験の結果をもとにモデルを改良しリュウグウ表面の物質強度に制約を与えた。

樋口: 探査機New Horizonsによる観測結果から冥王星のクレーターの深さと直径の関係を求めた。その関係からクレーターの形状変化が起こるサイズを調べ、リソスフィアの厚さなどを見積もった。

中村(昭): 小惑星表層にある反射率が異なる物質はインパクターの残骸である可能性が指摘されている。実際に衝突実験を行い、放出物にインパクターの破片が多数含まれうることを示した。

保井, 中村(誠): 天体は多くの場合、角度を持って衝突することから、衝突実験で大規模破壊に必要とされるエネルギーの衝突角度依存性を調べた。斜め衝突の場合、衝突速度の(標的表面に対する)法線成分を用いることで、エネルギーと破片質量が冪の関係になることを示した。ただし冪指数は、標的の構成物質(石膏や氷など)によって異なる。

ポスター講演: 口頭講演の増加から、これまで二日目に行っていたポスター講演を今年は初日に行った。毎年、ポスター講演者のなかには、学外で初めて発表する学生がいる。そうした学生と他機関の研究者との研究交流を促すために、二年前から学生にのみポスターの内容を紹介する2分発表の時間をポスター講演の前に設けている。今年度は2分発表の定着もあり、発表スライドに実験結果や数値計算結果の動画を入れるなどの積極的な研究紹介が目立った。その結果、ポスター講演は大変盛り上がり、予定していた時間では足りず、講演の時間を超えても議論が行われていた。

3.2 11/28(木)

山本: リュウグウ表層を模擬した大きさの異なる粒子で構成された標的への衝突実験を行い、粒子破壊で消費されるエネルギーの効果をスケーリング則に考慮する必要があることを示した。

杉浦: リュウグウのコマ型形状の形成に自転速度が及ぼす影響を数値計算で調べ、高速で自転し構成



図1: 集合写真(杉村瞭氏(神戸大)提供).

粒子間の摩擦が大きい場合には、コマ型形状になり得ることを示した。

金丸: リュウグウの観測結果(軌道・形状モデル等)と熱モデルから、YORP効果による自転速度変化を見積もり、10万～100万年の時間スケールで自転が減少していることを示した。

道上: リュウグウ表面にあるメートルサイズの岩塊の三軸比を測定した結果、それらの平均値は衝突破壊で形成される破片の比の値とおおむね一致しており、岩塊は衝突破壊で形成された可能性が高い。

荒川: SCI(Small Carry-on Impactor) の弾丸はリュウグウ表面から約60°の角度で斜め衝突し直径14.3mで中心にピットがあるクレーターを形成した。クレーターの形状は半円形であり、これは衝突点近くの岩塊が影響した可能性が高く、実際、分離カメラDCAM3(Deployable CAMera in 3rd generation)で撮影されたエジェクタも岩塊に阻害され岩塊方向へはほとんど放出されていない。また長時間エジェクタカーテンがリュウグウ表面と接していることやクレーターの大きさが重力支配域のスケーリング則とよく一致することから、リュウグウ表

面の強度は極めて小さく重力に支配されていることを明らかにした。

杉田: ONC (Optical Navigation Camera)のリュウグウ表層のスペクトル観測により、リュウグウはC型小惑星のうち含水吸収の無いグループに分類された。これはリュウグウの母天体と推測されているボラナ、オイラリアの特徴とも一致している。また表層の多くの岩塊も同じスペクトルである。そのため、これら岩塊が母天体への天体衝突で生まれた破片とすると、母天体の内部は加熱され均一だった可能性がある。一方、小さいクレーターが表層に少ないことから、リュウグウ表層の更新速度は100万年以下という非常に短い時間スケールであることが示唆される。

坂谷: リュウグウ表面の熱慣性をTIR (Thermal InfraRed Imager)で全球的及び局所的に調べたが、基本的に均一であり、その値は $200\text{Jm}^{-2}\text{s}^{-0.5}\text{K}^{-1}$ 程度であることを明らかにした。これは岩塊の性質が低熱慣性(=高空隙)であり、値が地球上の隕石と異なるのは地球の大気通過時の破壊により、採取できる隕石にバイアスがかっている可能性があることを示唆している。一方、より詳細な解析では、ホット

スポットと呼ばれる周囲よりも熱慣性がさらに低い領域や高い熱慣性をもつ岩塊など不均質性も存在することが示された。

和田, 門野: DCAM3で観測されたSCIによるエジェクタカーテンと掘削流のモデルとの比較から、エジェクタの主要な構成粒子サイズは1~10cmであることを見積もった。一方、エジェクタカーテンがフィラメント構造になったのはエジェクタ内にある大粒子が影響した可能性が高い。またこれらの結果から、リュウグウの地表面下の粒子サイズ分布にも制約を与えた。

巽: リュウグウ表面のスペクトル傾斜の観測から極域は他と比べると青く、さらに0.7 μ mバンドの吸収が見られることから含水鉱物が存在し新鮮な表層である可能性が高い。

3.3 11/29(金)

黒澤: 小惑星内の揮発成分の衝突への反応の解明はリュウグウのサンプル解析等で重要となる。C型小惑星を模擬した標的への衝突実験を行い、 H_2 や CO_2 などのガスが検出されたことを報告した。

柳澤, 布施, 阿部: 衝突閃光は主に月面への天体衝突で生じる発光現象であり詳細なメカニズムは不明である。最近のふたご座流星群により生じた閃光のスペクトルの解析では、3000Kの黒体放射のスペクトルとおおよそ一致した。また衝突する天体自体にも制約を与えるためにレーダーや大型望遠鏡を用いた観測成果についても報告した。さらに、衝突実験と数値計算を用いた相補的な研究にも着手しており、衝突による閃光の発光効率の詳細が見積もられつつあることが示された。

鈴木(宏): 流体計算で粉流体の挙動を示す「圧縮するが膨張しないモデル」を用いた衝突計算を行った。クレーター底の硬化といった従来と異なる結果が示され、より現実的な計算にむけた改良が進行中である。

池田: 小惑星の自転速度進化に対する天体衝突の寄与を見積もるために数値計算を行い、天体衝突は質量比の有無に関わらず基本的に自転速度を減少させることを明らかにした。

黒崎: 大気を持つ天体同士の衝突は天王星の自転軸の傾斜からも、しばしば起こった可能性がある。

数値計算によって衝突合体にはコア同士の衝突が重要であることを示した。

城野: 天体衝突によるコンドリュール形成モデルでは、岩石の溶融に原始惑星系円盤内で数km/sの衝突速度が要求されるが、木星重力によって到達できうことを数値計算で明らかにした。

大村: 斜面上のクレーターの緩和を調べるために衝突実験を行い、クレーター径の重心位置と傾斜角の経験式を求めた。傾斜角が小さい時、緩和を無視した先行研究の式に近づくことも示した。

長足: 自由落下させた砂からできるクラスター同士を衝突させた結果、衝突速度が数値計算から予測される値より速い場合でもクラスター同士が付着成長する可能性があることを示した。

4. まとめ

今年度は「小惑星の表層進化」というテーマで研究会を開催し、多くの方にご参加していただき、小惑星だけでなくダスト、コンドリュール、衛星、惑星などを対象とした衝突現象についてご講演いただいた。例年に比べ小惑星に関係する講演が多かったのは、今年度テーマもさることながら、やはり「はやぶさ2」が得た小惑星リュウグウの探査結果の影響が大きいだろう。昨年度のテーマが「探査機はやぶさの成果と挑戦：初号機から2号機へ」であり、講演中に「岩塊だらけの表面に予定通りタッチダウンできるのか?」、「衝突実験を行って、クレーターやエジェクタを観測できるのか?」という議論が行われていたことを考えると、今年一年間の探査結果が、惑星科学にとっていかに重要で、また様々な方のご尽力で得られたものかと思わずにはいられない。2020年はリュウグウの探査結果の更なる解析や、「はやぶさ2」が二回のタッチダウンで採取したサンプルの回収計画に加え、NASAの小惑星探査機オサイリス・レックスのベンヌへのタッチダウンなどもあり、小惑星についての知見がさらに深まるのが今から楽しみである。

5. おわりに

昨年度の懇親会や参加報告記事[2]で私や世話人にかけられた期待(プレッシャーとも言う)に応えられ

たのかは不明ですが、今回の経験をもとに来年度にむけて動き始めておりますので、ご期待下さい。特に5年後、10年後といった将来的な衝突研究を考えると若手研究者の参加は非常に重要となってきますので、少しでも衝突現象にご興味があればお気軽にご参加ください(いきなり世話人への勧誘や参加報告書の依頼などはしませんので…)。まるで世話人代表を終えたような雰囲気をだしていますが、来年度も引き続き私が努めますので、どうぞよろしくお願いいたします。

最後になりましたが、今年の研究会は国立天文台の研究交流委員会から開催助成金をいただきました。その申請過程や旅費見積もりでは国立天文台シミュレーションプロジェクトの伊藤孝士氏、増子京子氏にご尽力いただきました。心より感謝申し上げます。また会場は千葉工業大学より提供いただきました。千葉工業大学の黒澤耕介氏と下山亜希子氏には会場設営でお手数おかけいたしました。誠にありがとうございました。

参考文献

- [1] 和田浩二ほか, 2005, 遊星人 14, 202.
- [2] 脇田茂, 2019, 遊星人 28, 94.