

「天体の衝突物理の解明 (XVI)/第12回スペースガード研究会 ～プラネタリーディフェンスの現況～」参加報告

荒川 創太¹



図1. 研究会の集合写真(末次氏提供). 今回はオンライン開催であったことがわかる.

1. はじめに

2021年3月10日(水)から12日(金)の3日間の日程で、「天体の衝突物理の解明 (XVI)/第12回スペースガード研究会」がオンライン開催された(口頭発表にはZoom, ポスター発表および懇親会にはRemoが用いられた). 新型コロナウイルス感染症の流行の影響で, 例年11月頃に開催されていた「天体の衝突物理の解明」研究会が3月開催に変更になり, また, スペースガード研究会との共催となった. 本年度のテーマは「プラネタリーディフェンスの現況」ということで, 吉川真氏(宇宙科学研究所), 浦川聖太郎氏(日本スペースガード協会), 大澤亮氏(東京大学)を迎え, ご講演いただいた. 3件の招待講演を含め21件の口頭発表, および6件のポスター発表があった.

1. 国立天文台 科学研究部
sota.arakawa@nao.ac.jp

講演時間が比較的長め(30分)に設定されており, 講演中に随時質問を受け付けるスタイルを採用していることが本研究会の特徴である. 例年と異なりオンライン開催であったが, 50名を超える参加者による活発な議論が行われた(図1). 本稿では, 筆者の参加報告として, 研究会の様子を記述する. 本稿で紹介する内容は筆者の理解にとどまっており, 不正確な部分が含まれている可能性が大いにある. 各講演の要旨, 発表スライドは衝突研究会のホームページ(<http://www.impact-res.org/impact20/>)に掲載されているので, 興味をもたれた方はそちらを参照していただくか, 講演者に直接ご連絡いただきたい.

2. 講演概要

研究会のプログラムは以下の通りである.

《口頭発表》

3月10日(水)

荒川 創太(国立天文台)

「氷」粒子の付着特性について

笹井 遥(神戸大学)多孔質氷天体のクレーター形成における衝突残留
温度計測**豊田 優佳里**(神戸大学)土星リング粒子を模擬した多孔質氷球の低速度衝突
実験：反発係数及び付着特性に対する空隙率依存性**野村 啓太**(神戸大学)

二次標的を用いた高速度岩石エジェクタの計測

山本 裕也(神戸大学)低強度レゴリスにおける衝突エジェクタ速度スケール
則に対する実験的研究**池谷 蓮**(神戸大学)クレーターエジェクタが高速自転小惑星の赤道リッジ
を形成している？**多田 賢弘**(東京大学)オーストラリア・アジアテクタイトイベント：インドシナ
半島東部におけるイジェクタ層の認定とその分布**木内 真人**(JAXA/ISAS)

低重力下での高速度衝突クレーター形成実験

門野 敏彦(産業医科大学)有限サイズターゲット上のクレーター形成：爆発と衝突
の対応

3月11日(木)

杉浦 圭祐(東京工業大学ELSI)石鉄隕石メソシデライトの形成シナリオ解明に向けた
ベスタ様小惑星への巨大衝突の数値計算**黒崎 健二**(名古屋大学)

巨大衝突に伴う大気散逸の数値計算と理論的考察

鈴木 宏二郎(東京大学)ガラスビーズを用いた粉体の準静的圧縮試験と衝突
シミュレーションへの応用**吉川 真**(JAXA/ISAS)プラネタリーディフェンスに関する国際的な取り組み
【招待講演】**浦川 聖太郎**(日本スペースガード協会)

ライトカーブ観測から迫る小惑星における衝突イベ

ント時期の推定【招待講演】

大澤 亮(東京大学)東京大学木曽観測所トモエゴゼンによる微小地球
接近小惑星の動画観測【招待講演】**中村 昭子**(神戸大学)

コンドライト模擬物の衝突圧密

塩本 純平(神戸大学)多孔質隕石模擬物質の衝突実験：キャビティー成長
の観察

3月12日(金)

黒澤 耕介(千葉工業大学)減衰衝撃波を利用した衝撃回収実験1：炭酸塩の波
状消光の発生条件**大野 遼**(千葉工業大学)減衰衝撃波を利用した衝撃回収実験2：玄武岩の衝
撃溶融脈の発生条件**鳶生 有理**(JAXA/ISAS)

熱赤外カメラを用いた衝突残留熱計測

柳澤 正久(電気通信大学)

ふたご座月面衝突閃光の低分散スペクトル

《ポスター講演》

保井 みなみ(神戸大学)ガラスビーズを用いた低速度クレーター形成実験：学
生実験のデータ統計解析**鳶生 有理**(JAXA/ISAS)

次世代サンプルリターン候補天体の検討

石田 紗那(神戸大学)層構造試料を用いた衝突破壊実験：デジタル画像相
関法による衝突破片速度分布の計測法の開発**江口 裕樹**(神戸大学)低空隙多孔質氷標的を用いた高速度衝突実験：運
動量輸送およびクレーター形成過程に関する実験的
研究**黒澤 耕介**(千葉工業大学)粉体標的の衝突爆心地周辺の物質回収方法につい
て**岡本 尚也**(JAXA/ISAS)

DESTINY+搭載カメラ光学校正計画の検討状況

2.1 招待講演

プラネタリーディフェンスに関する国際的な取り組みと、地球接近小天体の観測について3件の招待講演があった。ご多忙のところご講演を引き受けていただいたことに感謝したい。

吉川氏(JAXA/ISAS)にはプラネタリーディフェンス(スペースガード)の歴史と最近の国際的な取り組みについてご講演いただいた。International Asteroid Warning Network(IAWN, 地球近傍天体の発見し軌道を確定する、各国の天文台などを中心としたネットワーク)とSpace Mission Planning Advisory Group(SMPAG, 地球に衝突する危険な小天体が発見されたとき、どのように対応するのかを検討する、各国の宇宙機関によって構成される組織)が2013年に設立された経緯などを語っていただき、とても勉強になった。また、「(なにも対策しなければ)ある国に衝突するはずだった天体が、回避策を実施しそれに失敗した結果として他の国に衝突してしまった場合、誰がどのような責任を負うのか?」という質問が講演後にあり、国際的な協力体制の構築やルールの制定を平時から進めておくことが重要であるなあ、と感じた。

浦川氏(日本スペースガード協会)には小惑星のライトカーブ観測についてご講演いただいた。彗星・小惑星遷移天体である107P/Wilson-Harringtonの可視測光観測から、形状、タンプリング運動、衛星の有無などを議論されていた。この天体は次世代サンプルリターン計画(詳細は寫生氏のポスター講演を参照されたい)における有力な候補天体のひとつでもある。小天体の回転状態によっては公開されている形状モデルでは計算できないことがある、という困難について語っていただいたことが筆者の印象に残っている。また、高速自転する10 mサイズの地球接近天体2012 TC₄についてもライトカーブ観測から形状や回転状態を推定されていた。三軸不等楕円体の回転状態が遷移する時間スケールに関する議論が大変興味深かった。すばる望遠鏡HSCアーカイブデータを用いた小惑星発見アプリCOIASについても紹介されていた。

大澤氏(東京大学)には東京大学木曽観測所の可視光広視野動画観測システムTomo-e Gozenを用

いた微小地球接近小惑星のサーベイについてご講演いただいた。直径100 m程度以下の微小小惑星は暗いため地球に接近したもののしか観測できない。また、地球接近小惑星は見かけの速度が大きいため高時間分解能の観測を行う必要がある。これらの困難について、Tomo-e Gozenは広視野動画観測を行うことで効率的な微小地球接近天体の検出を可能にしていることを紹介されていた。また、ライトカーブ観測による微小小惑星の自転周期の決定と、破壊強度の推定に関する話が非常に興味深かった。YORP効果による自転加速のタイムスケール、衝突破壊破片として初期に持つであろう自転速度などが評価され、観測結果と比較されていた。

2.2 一般口頭講演

今回のテーマである「プラネタリーディフェンス」に限らず、天体衝突に関する幅広い興味、関心に基づく講演が多数なされた。以下では筆者の判断でいくつかのテーマに分類し、それぞれの講演について簡単に紹介させていただく。

2.2.1 高速衝突実験

天体の衝突物理の解明は惑星系の形成と進化における最重要課題のひとつであろう。衝突によるクレーター形成、エジェクタ放出過程などが室内実験や数値計算によって調べられており、今回の研究会でも多数の発表を聞くことができた。

笹井: 彗星のような多孔質氷天体の進化において、圧縮支配域のクレーター形成と衝突残留熱を理解することが重要である。高速衝突実験によって、多孔質氷標的におけるクレーターサイズのスケールング則や、ピット中心からの距離によって最大上昇温度やその到達時刻がどう変化するのか調べた結果が報告された。加えて、熱伝導の数値計算による実験結果の再現から、衝突エネルギーの衝突残留熱へのエネルギー分配率を推定していた。

野村: 火星エジェクタのフォボスへの輸送量を推定するために、二次標的を用いた高速度岩石エジェクタのサイズ・速度・放出角度の同時測定を行った。垂直衝突と斜め衝突のそれぞれについてエジェクタのサイズと速度、放出角度と速度の関係が調べられてい

た。エジェクタ速度別の破片サイズ分布を求め、従来の破片サイズモデルから得られる平均破片サイズと比較してより大きい破片が高速で放出されていることが示されていた。

山本: 衝突によって破壊される低強度レゴリスを標的に用い、衝突エジェクタの速度分布・放出角度の標的粒子の強度や弾丸と標的のサイズ比に対する依存性を調べた。標的粒子としてcmサイズの大玉の風化凝灰岩を用いた実験では、石英砂を用いた場合と比較してクレーター壁における規格化エジェクタ速度が大きいことが示されていた。

木内: 落下塔を用いて低重力下で高速衝突実験を行い、クレーターサイズの重力依存性を調査した。宇宙研の縦型二段式銃の真空チャンバー内に組立・解体可能な落下装置を構築することで低重力下での高速度衝突実験を可能にした。引張強度の小さい珪砂標的ではクレーター直径に明確な重力依存性が見られ、重力支配域の π スケールリングが成り立つ。一方で、引張強度の大きいFine Glass Beadsやアルミナを標的にした場合はクレーター直径に重力依存性が見られず、これらのクレーターは強度支配域または遷移域にあることが示された。実験結果をもとに、強度の影響を受けるクレーター直径が小惑星のサイズやレゴリスの粒径にどう依存するのか議論されていた。

門野: 強度支配域におけるクレーター形成とカストロフィック破壊の中間段階であるside spallationに着目し、爆薬を用いた爆発実験と弾丸を用いた衝突実験を行い、両者の対応関係を調べた。爆発実験では室内衝突実験よりも大きなクレーターを形成することが可能であり、爆発実験と衝突実験の結果を対応させることができれば衝突破壊の標的サイズ依存性の研究に有用である。発表においては、実験結果から爆発条件(爆薬量と埋め込み深さ)と衝突条件(弾丸サイズと衝突速度)の対応条件を導出していた。

中村: マトリックス模擬試料とコンドルール模擬試料を混合してコンドライト模擬試料を作成し、衝突圧密実験を行った。マトリックスとコンドールの混合物は、自己重力による静的圧縮だけではコンドライトよりも大きな空隙率を持つことが期待されるため、母天体上での衝突圧密や熱変成、水質変成が重要だと考えられている。フラッシュX線透過画像の解

析から圧密領域の密度構造の推定が行われていた。

塩本: タギシュ・レイク隕石およびCMコンドライトを模擬した多孔質の標的を作成し、それらの衝突破壊強度およびエジェクタの速度を調べた。エジェクタの速度は標的側面の前方、中央、後方の3点で計測し(側面速度)、衝突点からの距離を標的の等価球直径で規格化した値で整理した。2種類のタギシュ・レイク模擬物について、強度の大きいUTPS-TBの方が強度の小さいWCSよりも側面速度が大きいことが示されていた。

黒澤: 炭素質隕石の典型的な水質変成鉱物であるカルサイトについて、波状消光を示す粒子の存在が中間衝撃圧力領域での衝撃変成指標として有用であることを紹介した。金属コンテナを用いて大理石試料の衝撃回収実験を行い、さらにiSALE shock physics codeを用いた数値衝突計算によって試料中を伝播する衝撃波を評価した。回収した試料を薄片に加工し偏光顕微鏡で観察した結果、3 GPa以上の衝撃圧力を経験した領域で半分以上の粒子が波状消光を示すことが明らかになった。個々の粒子が塑性変形を始めると波状消光を示すようである。

大野: 玄武岩試料について衝撃回収実験を行い、回収した試料を薄片に加工し岩石・鉱物学的観察、化学組成マッピング、結晶学的分析を実施した。また、衝突実験と同じ条件でiSALEによる数値計算を実施し、衝撃経験圧力・温度を推定した。ユークライト隕石の衝撃変成度について、波状消光角、マスキリナイト(衝撃ガラス)の存在量、ショックペインの有無で分類するKanemaru Tableが存在するが、この細分化されたshock stageに対して実験と数値計算から定量的な圧力値を与えた。

鳶生: 熱赤外カメラを用いた高速度衝突のその場観測による熱物性変化検出手法の確立を目指し、珪砂・ガラスビーズへの高速度衝突の熱赤外撮像を実施した。衝突残留熱を計測した。珪砂ではクレーター内に高温放出物が残らない一方、粒径1 mm程度のガラスビーズでは高温の衝突生成物がクレーター崩壊により埋没し、粒径100 μ m程度のガラスビーズでは高温衝突生成物がクレーター内に残留した。また、クレーター内部の冷却・昇温過程が撮像できており、今後、撮像された表面温度変化を熱モデル計算と比較する予定である。

鈴木: 油圧プレスを用い、粉体の準静的圧縮実験を行った。圧縮実験においては一部のガラスビーズが破碎され、非可逆的に粉体が圧縮される様子が確認された。圧縮後は大きな粒子がガラス粉末中に距離をおいて配列される構造になる。実験から、粉体の密度・圧力の関係が、非可逆的圧縮曲線と弾性的除荷・再圧縮線で構成される「塑性ガス」モデルで表現できることが確認された。発表では、圧縮実験の結果から構築した状態方程式をペネトレータの数値シミュレーションに適用した結果も紹介されていた。

2.2.2 低速衝突

原始惑星系円盤でのダスト粒子の合体成長や、惑星のリングを構成する粒子の運動を理解するためには、低速度衝突実験によって衝突速度と反発係数の関係を理解することが不可欠である。

荒川: 原始惑星系円盤中でのダスト粒子の成長を理解する上で、様々な分子の「氷」の付着特性を理解する必要がある。そこで、水氷およびドライアイス粒子の限界付着速度について、過去の実験結果の再解釈を行った。ミクロンサイズの水氷粒子の限界付着速度がドライアイス粒子よりも1桁程度大きいことが実験的に知られているが、これが表面エネルギーの違いではなく粘性的なエネルギー散逸の強さの違いに起因することを、粘弾性を考慮した球の接触理論を用いて示した。

豊田: 土星リングはcmからmサイズの水氷粒子で形成されており、熱慣性などから多孔質な氷凝集体であると推測されている。そこで、多孔質氷球の低速度衝突実験を行い、反発係数及び付着特性に対する空隙率依存性を調査した。実験によって反発係数と衝突速度の関係式が得られ、これを外挿することで土星リング粒子の空隙率を議論した。また、多孔質球の反発係数の低下は、塑性変形によるエネルギー散逸によって説明できることが示されていた。

2.2.3 地質調査、観測

実験や数値計算だけでなく、観測や地質調査も衝突研究を推進する重要な手法のひとつである。今回の研究会でもこれらの手法に基づく研究成果が発表された。

多田: オーストラリア・アジアテクトイトイベントは地球上での大規模な衝突イベントの中で最も年代が新しい(約80万年前)にもかかわらず、衝突クレーターが未発見で、衝突地点周囲に分布するはずのイジェクタ層も見つかっていなかった。そこで、インドシナ半島広域における野外調査を行い、イジェクタ層を認定し、分布を調査した。テクトイトを含む角礫層の層厚分布から、衝突地点はラオス南西部Bolaven Plateauであると推定した。

柳澤: 月面衝突閃光の明るさから衝突エネルギーを推定するためには、発光効率(運動エネルギーから可視広域での発光エネルギーへの変換効率)を知る必要がある。先行研究においては4つの流星群について地球で観測された流星数と月面閃光の数を比較することで発光効率が求められており、衝突速度によらず0.2%程度であった。発表では、ふたご座月面衝突の低分散スペクトル観測の結果が紹介され、高温(約6000 K)・低温(ケイ酸塩の蒸発温度以下)の2成分の黒体放射の寄与があることが示されていた。

2.2.4 数値計算

数値シミュレーションは天体衝突の研究において非常に強力なツールである。今回の研究会ではSmoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法を用いた巨大衝突の数値計算や、高速自転する小惑星上でのエジェクタ堆積物の分布に関する発表があった。衝突実験に関する発表においてもiSALEなどを用いた数値計算との比較を行っていたものが多数あったことを付け加えておきたい。

池谷: コマ型小惑星の赤道リッジ形成メカニズムとして、エジェクタ堆積物の赤道域への集中的な堆積というモデルを提唱した。小天体の自転速度をパラメータとして、球面一様乱数を用いて複数のクレーターの位置及び直径を与え、エジェクタ粒子の軌道を計算することで堆積地点を求めた。Ryuguサイズの天体について、自転周期が3時間の場合、メインベルト小惑星ならば衝突破壊寿命よりも短い時間で十分な高さの赤道リッジを形成できる可能性が示された。

杉浦: メソシデライトはベスタ(もしくは類似した直径

500 km程度の天体)を母天体とする石鉄隕石である。メソシデライトはコア由来の鉄・ニッケル合金と地殻由来の火星岩質なケイ酸塩の混合物であり、マントルの主成分であるカンラン石はほとんど含まれていない。発表では、SPH法を用いた数値計算でベスタ様小惑星への巨大衝突を再現し、衝突後の天体質量が元の質量の半分程度になるような条件においてコアが掘削され、表面地殻と混合可能であることが示された。また、衝突前の母天体の内部構造として地殻とコアが厚いモデルを考えるとより観測事実を説明しやすくなるという結果も紹介されていた。

黒崎: 惑星の大気量の違いはその形成過程や形成後の進化過程を反映する。大気散逸の代表的なメカニズムとして天体衝突があり、これまでの研究でも議論されてきたが、衝突規模が大きい領域については十分に理解されていなかった。発表では、SPH法を用いた巨大衝突に伴う水素ヘリウム大気散逸の計算結果が示され、衝突エネルギーから大気の流出エネルギーへの変換効率が議論されていた。流出大気量と流出エネルギーの相関関係は2種類の領域に分けられ、エネルギーに比例する領域と運動量に比例する領域からなることが明らかになった。

2.3 ポスター講演

ポスター講演は6件あり、研究会2日目にRemoを用いて実施された。今回も学生のポスター講演については2分間のフラッシュトークが行われた。オンライン開催であったにもかかわらずポスター講演も盛り上がり、懇親会開始直前まで各講演者のスペースで議論が続いていた。

3. まとめ

今回は「プラネタリーディフェンスの現況」というテーマで、第16回「天体の衝突物理の解明」研究会が第12回スペースガード研究会との共催で実施された。新型コロナウイルス感染症の流行で例年と同じ時期に同じ形式で実施することはできなかったが、それでも非常に実りある研究会であったと感じた。世話人の皆様および参加者の皆様にお礼申し上げたい。いずれの講演も時間配分ぎりぎりまで活発な議論が行われており、また、筆者のような衝突実験

を専門としない人間でも気軽に質問ができる雰囲気形成されていた。これはこの研究会の素晴らしい伝統である(らしい)。毎回の参加報告で書かれていることの繰り返しになるが、少しでも衝突現象にご興味があれば(現在は衝突研究を専門としていない方でも)是非気軽に参加されることを勧めたい。筆者にとって今回の参加はまだ2回目であるが、とても楽しい研究会であると再確認した。

前回の「天体の衝突物理の解明」研究会のテーマは「小惑星の表層進化」、前々回は「探査機はやぶさの成果と挑戦: 初号機から2号機へ」であった。はやぶさ2のSCIとDCAM3による宇宙衝突実験が大成功したのが2年前(2019年4月5日)であり、これから大量に採取されたサンプルが分析されることで小惑星の形成・進化史がより深く議論されると期待される。また、今後も世界各国で様々な天体への探査が計画されており、多様な天体における多様な衝突現象が研究の対象になるのだろう。今回の研究会でも、想定する天体として彗星、コンドライト母天体、ラブルパイル小惑星、火星などがあり、研究目的・手法も非常に多岐にわたった。次の機会にはどのような天体の衝突物理と出会えるのか、今から楽しみである。

謝辞

研究会の開催にご尽力いただいた世話人の皆様(末次竜氏、岡本尚也氏、鎌田俊一氏、黒崎健二氏、寫生有理氏、杉浦圭祐氏、保井みなみ氏)に感謝いたします。また、本稿執筆の機会は大島商船高等専門学校の末次竜氏より頂きました(原稿の確認など大変お手数をおかけしました)。感謝申し上げます。