

# 「天体の衝突物理の解明 (XXI) ～パターン形成～」参加報告

豊田 優佳里<sup>1</sup>



図1: 研究会の集合写真.

## 1. はじめに

2025年11月5日(水)から11月7日(金)にかけて、第21回「天体の衝突物理の解明」が開催された。本研究会は、神戸大学 統合研究拠点 惑星科学研究センター(CPS)において現地開催され、今年度のテーマは「パターン形成」であった。

本研究会では、廣部紗也子氏(海洋研究開発機構)、桂木洋光氏(大阪大学)、道越秀吾氏(京都女子大学)を招待講演者として迎え、ご講演いただいた。

<sup>1</sup>アストロバイオロジーセンター / 国立天文台  
yukari.toyoda@nao.ac.jp

研究会には、現地では56名、オンラインでは7名の研究者および学生が参加し(図1)、招待講演3件を含む計32件の発表が行われた。

本研究会は、講演時間が質疑応答込みで招待講演60分、一般講演30分と比較的長く設定されており、講演中にも随時質疑応答が可能な形式であったため、発表内容についてじっくりと議論することができた。

本稿では、研究会の講演概要と全体の様子を簡単に紹介する。各講演内容については、あくまで筆者の理解の範囲内でまとめたものであるため、より詳細な内容については研究会webページ(<http://>

impact-res.sakura.ne.jp/impact25/) の要旨集等をご参照いただきたい。

## 2. 講演概要

以下に、本研究会の講演概要を示す(敬称略)。

<口頭講演>

11月5日(水)

セッション 1: アグリゲイト/コンドリユール

荒川 創太(海洋研究開発機構)

「ダストアグリゲイトは衝突によって混合するか?」

友膳 涼平(神戸大学)

「低速度衝突過程に関わるダスト集合体の機械特性の測定」

城野 信一(名古屋大学)

「複合コンドリユールの形成条件」

セッション 2: クレーター

山下 光葉(東京大学)

「クレーターサイズ頻度分布を用いた月の衝突盆地放出物厚さ分布の推定」

柿木 玲亜(神戸大学)

「クレーター形態から推測する固体天体の力学強度: 層構造標的のクレータースケーリング則の構築」

黒澤 耕介(神戸大学)

「炭素質小惑星上の微小クレータ形成過程の熱力学」

セッション 3: リング/円盤

兵頭 龍樹(ELSI/立教大学/SpaceData)

「巨大惑星リングの微隕石衝突過程: 蒸発・凝縮・電磁ダスト力学」

吉村 洋一(神戸大学)

「月形成円盤のスパイラル構造について」

11月6日(木)

セッション4: 衝突破壊

西尾 峻人(神戸大学)

「小規模破壊衝突におけるエジェクタの解析」

櫻井 哲志(神戸大学)

「小惑星上でのボルダーの衝突破壊」

道上 達広(近畿大学)

「内部クラックを持つ炭素質隕石の衝突破壊強度」

セッション5: 【招待講演】

廣部 紗也子(海洋研究開発機構)【招待講演】

「衝突および残留応力による破壊パターン形成と数値解析手法の開発」

セッション6: 【招待講演】

桂木 洋光(大阪大学)【招待講演】

「低速衝突によるパターン形成現象」

セッション7: 【招待講演】

道越 秀吾(京都女子大学)【招待講演】

「円盤におけるパターン形成」

11月7日(金)

セッション8: 氷

菊川 涼介(神戸大学)

「高速度衝突実験による内海を覆う氷衛星上の貫通クレーター形成メカニズムの解明」

豊田 優佳里(アストロバイオロジーセンター)

「氷球の低速度斜め衝突実験: 反発係数と回転に対する衝突角度依存性」

セッション9: 含水

神取 知広(神戸大学)

「含水小惑星模擬表層に対するクレーター形成実験: 加熱の影響」

豊嶋 遥名(神戸大学)

「湿った砂におけるクレーター形態: 衝突実験と数値シミュレーションの相互比較」

<ポスター講演>

黒崎 健二(防衛大学校)

「砂標的への衝突シミュレーション」

坂田 大典(東京農工大学)

「粉体層への衝突による粒子巻き上げと採集過程のシミュレーション」

北 和真(東京農工大学)

「破砕性粉体ターゲットにおける非破砕性粉体衝突時の応力伝播と内部挙動のシミュレーション」

荒川 創太(海洋研究開発機構)

「2次元凝集体の圧密数値シミュレーション: ジャミング転移における初期構造の影響」

大村 知美(大阪産業大学)

「階層構造粒子塊の圧密挙動に関する実験的研究: モデルとの比較」

長足 友哉(工学院大学)

「天体表面の固体粒子の付着力: 塑性変形や重力の影響」

山本 大晟(神戸大学)

「玄武岩標的への斜め衝突による高速度エジェクタ: 金属二次標的上のクレーター形状」

笹井 遥(名古屋工業大学)

「小惑星を模擬した氷・砂混合試料における衝突残留温度計測」

門野 敏彦(産業医科大学)

「Dimorphos下層のサイズ分布~Heraの観測結果, 予測してみた~」

愛敬 雄太(東京大学)

「高解像度画像を用いた小惑星リュウグウ岩塊表面の小クレーター解析」

池田 あやめ(産業技術総合研究所 地質調査総合センター)

「斜長石・マフィック鉱物支配の月中央丘における岩塊の大きさと形状のちがひ」

巽 瑛理(Instituto de Astrofísica de Canarias)

「Clarissa族はCI隕石の母天体か?」

荒川 真和(神戸大学)

「天体衝突時の火球からの熱線放射の影響」

黒澤 耕介(神戸大学)

「天体衝突による炭素質小惑星内部の大規模損傷」

## 2.1 招待講演

本研究会では、今年度のテーマである「パターン形成」に関連した3件の招待講演が行われた。

廣部氏は、衝突および残留応力によって生じる破壊パターン形成に着目し、粒子離散化有限要素法(PDS-FEM)を用いた数値解析手法について講演された。従来手法では取り扱いが困難であった動的破壊や残留応力場における破壊進展を、一貫した定式化のもとで解析可能であることが示され、衝突破壊や乾燥亀裂、熱応力による亀裂遷移など、多様な

破壊現象に対する有効性が紹介された。

桂木氏は、粉体層への低速衝突によって生じる多様なパターン形成現象について講演された。固体弾や液滴、エアージェットなどの衝突により形成されるクレーター形状や非自明な構造を例に、低速衝突におけるパターン形成の特徴が整理された。また、実験結果を異なるスケールの現象として捉えることで、新たな物理的理解が得られる可能性についても議論された。

道越氏は、銀河円盤や原始惑星系円盤、惑星環などに普遍的に見られるパターン形成について講演された。特に土星の環を対象とし、自己重力や粒子衝突、外部摂動によって生じる自己重力ウェイクや密度波、ギャップ構造などを整理し、観測・理論・数値シミュレーションの比較を通じた円盤ダイナミクス理解の重要性が示された。

これらの招待講演を通じて、衝突破壊から粉体衝突、円盤構造形成に至るまで、異なる物理過程に共通するパターン形成の理解が深められた。

## 2.2 一般口頭講演

一般口頭講演では、招待講演のテーマに限らず、天体の衝突現象に関する幅広い分野の発表が行われた。衝突実験、数値シミュレーション、観測・解析手法など多様なアプローチが紹介され、衝突に伴う構造形成や物性進化に関する活発な議論が行われた。

「アグリゲイト/コンドリユール」セッションでは、原始惑星系円盤におけるダスト集合体やコンドリユールの衝突過程に関する研究が報告された。荒川氏は、個別要素法を用いた数値シミュレーションにより、組成の異なるダストアグリゲイト同士の衝突に伴う破片のサイズ分布および内部混合度を評価し、衝突による効率的な機械的混合が生じにくい可能性を示した。友膳氏は、シリカダスト集合体を用いた弾性波速度測定により、縦波・横波速度から弾性定数を導出し、ヤング率が充填率、粒径、粒子形状、吸着水量および歪み速度に強く依存することを明らかにした。城野氏は、粘性液滴と固体球の衝突実験に基づき、衝突速度および粘性係数に依存した合体確率を定量化し、複合コンドリユール形成には高い数密度環境が必要であることを示した。

「クレーター」セッションでは、固体天体表層におけるクレーター形成過程と、その形態から読み取れる物性や形成メカニズムに関する研究が報告された。山下氏は、月のクレーターサイズ頻度分布を用いて、衝突クレーター形成に伴うエジェクタ堆積物の分布及び厚さを推定し、月面表層レゴリスの混合に関して議論した。柿木氏は、レゴリス層に覆われた基盤層を模擬した二層構造標的への衝突実験により、クレーター形態やピットサイズが表面層厚さおよび基盤層強度に依存することを示し、同心円型クレーターの形態から基盤層の力学強度を推定可能であることを明らかにした。黒澤氏は、炭素質小惑星リュウグウ表面に観察される微小衝突孔群に着目し、高速度衝突時の熱力学過程を検討することで、溶融物の分裂により形成された二次衝突孔群である可能性を示した。

「リング／円盤」セッションでは、巨大惑星リングや月形成円盤における衝突・重力相互作用に起因する構造形成過程に関する研究が報告された。兵頭氏は、土星リングにおける微隕石の高速度衝突過程を理論および数値計算により解析し、微隕石物質が蒸発・凝縮・帯電・電磁相互作用を経てリングから除去されることを示した。吉村氏は、高解像度重力N体シミュレーションを用いて月形成円盤に生じるスパイラル構造の時間発展と安定性を解析し、リーディングスパイラルの形成とその重力不安定性が角運動量輸送および月形成時間に与える影響について議論した。

「衝突破壊」セッションでは、小惑星衝突に伴う破壊・エジェクタ放出・標的内部構造の影響に関する研究が報告された。西尾氏は、強度・破壊および摩擦を組み込んだSPH法による球面標的衝突シミュレーションに基づき、エジェクタの速度—累積質量分布を室内実験スケーリングと比較して標的曲率がエジェクタ質量や高速成分に影響することを示し、新たなスケーリングの必要性を指摘した。櫻井氏は、高空隙率ガラス焼結体およびガラス球を用いた衝突実験により、ボルダー模擬標的の衝突破壊が周囲レゴリスの粒径や物性(インピーダンス比)に依存して変化し、特に小粒径・低インピーダンス条件で破壊が促進されることを示した。道上氏は、内部クラックを有する炭素質隕石を対象とした高速衝突実験とX線CT撮像により、破断面が衝突前のクラックに沿って

形成される傾向を示すとともに、最大破片質量比から衝突破壊強度 $Q^*$ を見積もり、標的形状や衝突点位置、クラックの有無が $Q^*$ 評価に重要であることを指摘した。

「氷」セッションでは、氷天体における衝突クレーター形成と、氷粒子衝突の反発・回転特性に関する研究が報告された。菊川氏は、二段式軽ガス銃を用いた氷—液体層構造標的および氷板単体標的への高速度衝突実験により、表裏スポール形成や貫通—非貫通境界が氷板厚み・衝突速度・内海模擬物質の条件に依存することを示し、氷地殻貫通の最低条件として背面まで剪断破壊が到達することが重要であると示唆した。豊田氏は、氷球と鏡面研磨した花崗岩板を用いた低速度斜め衝突実験と二次元レーザー変位計による計測に基づき、衝突速度および衝突角度の増加に伴って反発係数が低下することを示すとともに、特に低角度側ではクラックによる散逸だけでなく回転へのエネルギー変換を考慮する必要があることを指摘した。

「含水」セッションでは、含水・湿潤な天体表層における衝突クレーター形成と、温度・含水率に伴う材料特性変化がクレーター形態やスケーリング則に与える影響に関する研究が報告された。神取氏は、含水小惑星表層模擬物質(砂混合石膏、石膏、パイロフィライト)に対する加熱実験と二段式軽ガス銃による散弾衝突実験を行い、加熱により縦波速度や引張強度が変化すること、ならびに砂混合石膏では加熱温度の上昇に伴いクレーター直径が増加する一方でパイロフィライトでは減少するなど、加熱起因の強化／強化がクレーター形態に反映される可能性を示した。豊嶋氏は、湿った砂標的で得られた衝突実験結果をBern SPHコードにより再現・拡張し、乾燥砂および含水率12 wt.%の湿潤砂でクレータープロファイルやエジェクタ堆積構造が実験と整合することを確認するとともに、重力支配域までスケールを拡張した数値計算から、湿潤表層ではクレーターが浅くなり消去されやすい可能性を示した。

### 2.3 ポスター講演

研究会2日目の夕方に、現地でのポスターセッションが開催された。本研究会では、ポスターセッションに先立ち、学生によるポスター講演として3分間のフ

ラッシュトークが行われ、その後、現地参加者を中心としたポスターセッションが実施された。発表形態は現地参加のみであったが、オンライン参加者も議論に参加できるよう、Slack上にポスター資料がアップロードされた。

ポスターセッションは懇親会と連続したスケジュールで開催され、コアタイムは1時間40分と比較的限られた時間ではあったものの、各ポスターの前には多くの参加者が集まり、活発な議論が行われていた。学生によるラッシュトークは、各ポスターの内容を事前に把握する良い機会となり、その後の議論を円滑に進めるうえで有効であったように思われる。

### 3. おわりに

本研究会では、ダスト集合体の衝突過程から小惑星・氷衛星・惑星リング・月形成円盤に至るまで、さまざまなスケールにおける衝突現象に関する研究が報告され、衝突現象が惑星科学において果たす役割の広がりと重要性が改めて確認された。室内実験、数値シミュレーション、理論的研究、探査観測に基づく解析など、多様なアプローチによる発表を通して、分野ごとの立場や視点の違いを意識しながら議論することで、衝突現象に対する理解がより深まったように感じられた。

また、本研究会は、「衝突」という共通のキーワードを研究テーマとする研究者たちが一堂に会し、対面で集中的に議論できる場であることが大きな特徴である。講演時間内にとどまらない踏み込んだ議論が

随所で行われており、特に若手研究者や学生による発表に対しても活発な質疑応答が交わされ、研究の背景や今後の課題について深く議論できる貴重な機会となっていた。

一方で、本研究会ではSlackなどのオンラインツールも併用され、講演時間内で議論しきれなかった点について、講演後も質問や意見交換を継続できる環境が整えられていた。議論の中で挙げられた参考文献や資料を気軽に共有できる点や、各自の端末で発表資料を参照しながら議論を進める様子も見られ、対面中心の研究会においてオンラインツールが議論を補完する手段として有効に機能していたように思われる。

このように、本研究会は対面での濃密な議論を核としつつ、オンラインツールを柔軟に取り入れることで、より実りある研究交流の場を提供していた。今後も本研究会が、分野横断的な衝突現象研究に関する理解を深める場として、継続的に重要な役割を果たしていくことが期待される。

### 謝辞

本研究会の開催にあたり、企画・運営にご尽力いただいた世話人の皆様に心より感謝いたします。また、会場の確保ならびに研究会当日の運営に多大なご協力をいただいた、神戸大学 惑星科学研究センター（CPS）所属の吉田雄城氏に深く感謝いたします。あわせて、本稿に掲載した集合写真をご提供いただいた大阪産業大学の太田知美氏に感謝いたします。

---

## 著者紹介

---

### 豊田 優佳里



アストロバイオロジーセンター アストロバイオロジー 装置開発室 特任研究員。国立天文台併任。神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻博士課程修了。博士(理学)。神戸大学大学院理学研究科

惑星学専攻 学術研究員などを経て、2025年4月より現職。