

# 「天体の衝突物理の解明(XVII)～小天体進化における圧密過程の役割～」参加報告

木内 真人<sup>1</sup>

## 1. はじめに

2021年11月24日から26日にかけて、第17回「天体の衝突物理の解明」が開催された。新型コロナウイルス感染症の流行により、昨年度に引き続きオンラインでの開催となり、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。今年度のテーマは「小天体進化における圧密過程の役割」で、高田智史氏(東京農工大学)、中村昭子氏(神戸大学)、荒川創太氏(国立天文台)、松本恵氏(東北大学)を迎え、ご講演頂いた。研究会には延べ60名以上の研究者と学生が参加し(図1)、招待講演を含めて17件の口頭発表と6件のポスター発表が行われた。講演時間は招待講演が60分、一般講演が30分と一般的な学会よりも長い時間に設定されており、じっくりと研究内容を聴けることが本研究会の特徴である。また、講演中に随時質疑応答が行える点も特徴となっている。

本稿では講演の概要と研究会の様子をごく簡単に紹介する。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ているが、より詳細な講演内容を知りたいという方は、研究会のwebページ (<http://www.impact-res.org/impact21/index.html>)にて公開されている要旨やスライドを参照して頂きたい。

1. 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所  
kiuchi.masato@jaxa.jp

## 2. 講演概要

以下に研究会のプログラムを示す(敬称略)。

### <口頭講演>

#### ■11月24日(水)

吉田雄城(東京大)

「分子動力学で探るダストモノマー間相互作用」長

谷川幸彦(東京大)

「低質量比のダストアグリゲイト間衝突による成長と破壊」

辰馬未沙子(東京大/国立天文台)

「ダスト集合体の圧縮強度で探る彗星・小惑星形成過程」

高田智史(東京農工大)

「粉体粒子の変形とレオロジー」【招待講演】

中村昭子(神戸大)

「塵・レゴリス模擬物の圧密実験」【招待講演】

#### ■11月25日(木)

荒川創太(国立天文台)

「ダストアグリゲイトの熱物性と密度進化」【招待講演】

松本恵(東北大)

「隕石中の氷の痕跡とその母天体進化」【招待講演】

塩本純平(神戸大)

「タギシュ・レイク隕石微小片及び模擬物(UTPS-TB)の衝突破壊実験」

大野遼(千葉工大)

「事前加熱玄武岩を用いた衝撃回収実験」

豊田優佳里(神戸大)

「土星リング粒子を模擬した多孔質水球の低速度衝突

実験：反発係数に対する空隙率及び複数回衝突の影響」

鈴木宏二郎(東京大)

「準静的圧縮試験による砂の塑性ガス状態方程式モデルと衝突現象への応用」

黒崎健二(名古屋大)

「衝突シミュレーションから探る天体の自転軸変動と大気流出量」

黒澤耕介(千葉工大)

「天体衝突時に発生する高速放出物の特徴」

## ■11月26日(金)

前田夏穂(神戸大)

「すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Camで得たC型/S型like小惑星のサイズ分布の比較」

野村啓太(神戸大)

「10km/s越高速度衝突による微小クレーター形成実験」

木内真人(ISAS/JAXA)

「模擬低重力下での高速度衝突クレーター形成実験II」

中澤風音(東工大)

「放出物カーテン内でのパターン形成 - クラスタ分析による粒子クラスタの追跡と解析モデルの作成 -」

## <ポスター講演>

江口裕樹(神戸大)

「熱進化した氷微惑星を模擬した圧密標的上のクレーター形成実験」

山口祐香理(神戸大)

「蛇紋岩・氷標的からの高速度エジェクタの観察」

黒澤耕介(千葉工大)

「天体衝突時に隕石のK-Ar同位体時計が初期化される条件」

黒澤耕介(千葉工大)

「iSALE users group in Japanの現状報告2021」

岡本尚也(千葉工大)

「DESTINY+搭載カメラTCAPとMCAPの地上光学校正計画」

金丸仁明(ISAS/JAXA)

「Yarkovsky効果を考慮した小惑星Ryuguの軌道進化」

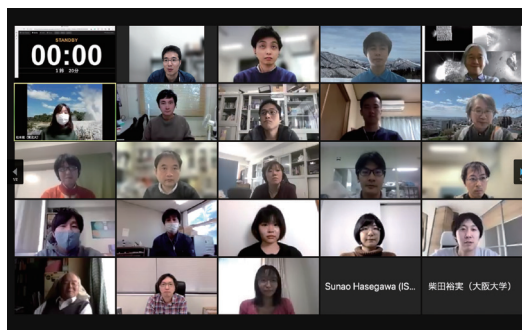


図1: 研究会の集合写真(Zoom画面のスクリーンショット).

## 2.1 招待講演

研究会初日の後半から2日目の前半にかけて、今年度のテーマである「小天体進化における圧密進化の役割」に関連した4件の招待講演が行われた。

高田智史氏は、粉体粒子の変形や破砕が粉体系のレオロジーに与える影響について講演された。破砕する粉体粒子のモデルを構成し、衝突や剪断力を加えるシミュレーションを行った結果、剪断率により破砕の様式が異なることが示された。また、粒径分布が冪分布を持つときのレオロジーについて調べた結果、応力や粘性率も冪分布を持つことがわかった。ただし、粘性率については現実の系との対応がつかず、今後の研究が必要であるということだった。また、溶媒中の粉体のレオロジーに関するシミュレーション結果についても紹介された。変形や破砕を伴う言わば現実的な粉体の物理に関して大変勉強になる内容であった。

中村昭子氏は、塵やレゴリスの圧密に関する実験的研究について講演された。小天体構成粒子を模擬した実験試料の紹介や粉体層の静的な圧縮試験の手法について解説が行われた。球シリカ粒子の圧縮試験より、単分散と多分散で結果が似ていることが示された。また、実験結果を応用してCVコンドライト母天体の内部充填率構造の推定が行われた。講演後半では粒子層の引張り強度の測定結果について紹介され、球状粒子では引張り強度が数値シミュレーション結果と調和的であることが示された。また、これまでの実験で用いられている不規則形状粒子は、サイズや強度・表面状態などが隕石構成粒子を模擬できていないという問題点が今後の課題とし

て挙げられた。実験的手法による粉体の扱いの難しさを改めて感じた一方、まだまだ手付かずの領域であるという可能性も感じられた。

荒川創太氏は、ダストアグリゲイトの熱物性と密度進化について講演された。まず原始惑星系円盤中のダストアグリゲイトの初期密度進化についてのレビューが行われ、構成粒子が同一粒径である場合とサイズ分布がある場合でアグリゲイトの成長様式が異なることが示された。次に、ダストアグリゲイトと微惑星の熱伝導率についてのレビューが行われ、粉体の熱伝導率の数値シミュレーション結果と実験結果についてそれぞれ解説された。最後に、焼結による微惑星の密度進化についてのレビューが行われ、「加圧焼結」による圧密の役割について詳しく解説された。個人的に、微惑星の進化の過程について非常にわかりやすいレビューを聴くことができて大変ありがたかった。

松本恵氏は、隕石の分析から得られた氷の痕跡と隕石母天体の進化の過程について講演された。最も始原的な炭素質コンドライトであるAcfer094隕石の内部を放射光X線CTによって観察した結果、非常に多孔質な岩相(UPL)を発見した。また、さらなる観察により、UPL中の空隙にはもともと氷が存在していたことを示した。この結果から、Acfer094隕石の母天体が雪線の外側から内側へ移動することによって形成されたというモデルが提案された。分析より得られる直接的な証拠から導かれる形成モデルには、やはり説得力を感じた。また、分析手法を細かく解説して頂けたのは、分野外の者にとっても非常に興味深く聴くことができた。

## 2.2 一般口頭講演

例年通り一般講演では、招待講演のテーマに限らず、天体の衝突現象に関する様々な分野の発表が行われた。以下では大まかな分野ごとにそれぞれ簡単に紹介する。

### (1) 数値計算・理論研究

今回の研究会のテーマと密接に関わる内容として、ダストに関する数値計算の結果を示した講演が以下のように行われた。吉田氏は、モノマー衝突の分子動力学計算を行い、サイズや衝突速度、温度の

影響を観察した。衝突速度を大きくするとモノマーが変形しやすくなり、この変形がJKR理論と室内実験の結果のズレの要因の一つであると考察している。長谷川氏は、質量比を持つダストアグリゲイトの斜め衝突に関してN体コードを用いた計算を行った。高質量比の場合、等質量比の場合と比べて臨界衝突破壊速度は小さくなるという結果を示した。辰馬氏は、ダスト付着N体計算により、ダスト集合体の高密度領域の圧縮強度を求めた。得られた圧縮強度より、彗星の形成はダストの直接付着成長で説明できる一方、小惑星の形成は直接付着成長では説明できないことを示した。

天体衝突に関する数値計算や衝突放出物に関する計算についても講演が行われた。黒崎氏は、原始惑星の巨大衝突による自転軸の傾斜角度の変動量に関して、標準SPH法を用いた衝突計算を行った。計算結果から、天王星の自転軸傾斜角が巨大衝突によってどのように形成されるかの検討を行った。黒澤氏は、非常に高い空間解像度を持つ3次元数値衝突計算の解析から、斜め衝突時の高速度放出物の方向分布を求められるかについて検討を行った。高速度放出物分布は球面調和関数展開を利用することで表現できる可能性を示した。

### (2) 室内実験

今回の研究会では実験に関する講演が最も多かったが、実験に加えて数値計算も行い比較検討している発表もいくつか見られた。

「衝突実験による物性理解」という枠組みでは以下の講演が行われた。塩本氏は、タギシュ・レイク隕石の微小片とその模擬物の衝突破壊実験を行い、普通コンドライトや炭素質コンドライトよりも壊れにくい可能性があることを示した。これは、D型小惑星の衝突進化の理解につながるデータであると考えられる。大野氏は、隕石の衝突変成履歴の理解を目的として、事前加熱した玄武岩に対する衝撃回収実験を行った。結果、常温での実験よりも溶融している組織が見られ、また数値計算によって到達温度と圧力の推定を行った。豊田氏は、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を行った。多孔質氷球の反発係数は氷球の場合と異なり、衝突速度の増加とともに反発係数は下がり続けること、1回

目の衝突においては空隙率が大きいほど反発係数は低くなるのに対し、複数回衝突において空隙率依存性が見られないことを示した。また、実験結果より、土星リング粒子の空隙率を推定した。

「クレーター形成・放出物」という枠組みでは以下の講演が行われた。野村氏は、10 km/sを越える高速度衝突による微小クレーター形成実験を行った。斜め衝突時に放出される高速度破片を弾丸として扱うことで上記のような高速度衝突を可能としている。実験結果より、微小クレーター形状からインパクトの情報が得られるか検討を行った。木内は、強い固着力を持つ粉体層に対して模擬低重力下で高速度衝突実験を行い、重力支配域から強度支配域への遷移条件を制約した。また、実験で得られたクレーター直径の内部摩擦角依存性と空隙率依存性が数値計算の結果と異なることを示した。中澤氏は、衝突放出物のカーテンのパターン形成メカニズムを調べるため、衝突実験と数値計算をそれぞれ行った。実験結果から、パターンの形成がカーテン膨張のタイムスケールで起こっていることを示した。また、数値計算から解析モデルを構築し、形成するクラスターの最終サイズ等が予測可能であることを示した。

粉体の圧縮実験に関する講演も行われた。鈴木氏は、衝突によって生じる砂の挙動をマクロな流体力学的モデル(CNE)で記述できるか確かめるため、粉体の準静的圧縮実験を行った。結果、CNE流体モデルは粉体の圧縮モデルとしてある程度汎用性を持つことを示した。

### (3) 観測

観測分野では今回は1件のみの講演だった。前田氏は、すばる望遠鏡搭載の広視野撮像装置(Hyper Suprime-Cam)による観測で得た、3472個の小惑星データを用いて、直径0.4 - 5 kmの範囲でS型likeのカラーを持つ小惑星とC型likeのカラーを持つ小惑星のサイズ分布の比較を行った。S型小惑星とC型小惑星のサイズ分布の形状は、上記の直径の範囲においてよく一致し、組成の違いが衝突破壊程度にほとんど影響しないことを示した。

## 2.3 ポスター講演

研究会2日目の夕方にRemoを用いたポスター講演

が開催された。前年度に引き続き、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。ポスター講演数は全6件と例年に比べ少なく、全体的にやや寂しい雰囲気ではあったが、各講演者の周りには人が集まり(画面上だが)、熱心に議論が繰り広げられていた。オンライン開催のポスター発表では発表資料をボード内に収める必要がないので、口頭発表と大差ない情報量が提供されているように感じた。

## 3. おわりに

今回は「小天体進化における圧密過程の役割」というテーマで、4人の招待講師を招いて開催された。筆者は本研究会の世話人としてテーマ選びにも参加したが、招待講師の皆様には理論・実験・分析の見地から興味深くわかりやすい講演をして頂き、一聴講演者として非常に満足しました。お忙しい中、招待講演を引き受けてくださったことを感謝いたします。一般講演でも様々な分野の方々に参加して頂き、初めて参加される方も少なくなかった。本研究会は必ずしも「衝突」を専門とされていない方でも気軽に参加可能であるので、興味を抱いた方はぜひ次の機会に参加してみたいと思う。

昨年度に引き続きオンライン開催となったが、オンライン環境に皆さん随分慣れたのか、非常にスムーズに進行された。質疑応答も全講演を通じて活発に行われたが、一方で対面での開催ではもっと熱量が多かったようにも感じる。また、懇親会では世話人がRemoの扱いに不慣れであったこともありシステムが落ちてしまい、ご迷惑をおかけした。上記の問題点については今後の課題とするが、やはり次回は実際に顔を合わせて議論できることを願って本報告記事を締めさせていただきます。

## 謝辞

Remoをご用意頂いた北海道大学の鎌田俊一氏、Zoomをご用意頂いた名古屋大学の黒崎健二氏にこの場を借りて感謝申し上げます。また、本稿執筆の機会と集合写真は宇宙航空研究開発機構の寫生有理氏から頂きました。重ねて感謝申し上げます。