

「天体の衝突物理の解明(XII)～水質変成から探る太陽系物質進化～」参加報告

杉浦 圭祐¹

1. はじめに

2016年11月10日から12日の3日間、六甲山の麓にある神戸大学六甲台キャンパスにて、研究会「天体の衝突物理の解明」が開催された(図1)。同研究会は通称「衝突研究会」の名で呼ばれ、理論や実験など幅広い手法を用いて天体衝突の物理を研究している者の発表、交流の場となっている。特に筆者のように惑星形成を理論の面から研究している者にとっては、室内衝突実験を行っている方々の研究成果を集中的に聞くことのできる貴重な機会である。今年で12回目を数えるこの研究会は、北海道大学の低温科学研究所での開催が通例であったが、去年まで会場を手配していただいていた方の異動の都合で今年は神戸大学での開催であった。毎年衝突物理に関連するテーマを掲げ、招待講師の方々にテーマに沿った招待講演をしていただくのがこの研究会の特徴であるが、今年は「水質変成から探る太陽系物質進化」というテーマが掲げられた。このテーマの下、招待講師の方々には隕石に含まれる水質変成を受けた成分を手がかりにして、過去の太陽系で何が起きたかを解明する研究について講演をしていただいた。このテーマに限らず幅広い分野の研究に関する一般講演も同様に行われ、21件の口頭講演と10件のポスター講演が行われた。また、実際に室内衝突実験を行っている研究室がある神戸大学での開催という利点を活かし、最終日の研究会終了後に神戸大学ラボツアーが行われ、2段式軽ガス銃などの実験設備を見学できるという貴重な機会も設けられた。



図1：研究会の集合写真。

本稿では衝突研究会の参加報告という形で、講演の概要と研究会の様子をごく簡単に紹介させて頂く。研究会の雰囲気を多少なりともお伝えし、研究会に興味をいただければ幸いである。ページ数の都合上、個々の講演の詳細についてお伝えすることはできないが、筆者の理解の範囲内で講演内容についてまとめ、お伝えしようと思う。各講演の要旨に関しては研究会のHP (<http://www.impact-res.org/impact16/>)にて公開されているので、より詳しく講演内容を知りたいという方はぜひそちらを参照していただきたい。

2. 講演概要

以下に研究会のプログラムを示す。

■11月10日(木)

中村昭子(神戸大)

「隕石母天体上の強度支配域のクレーターサイズ」
鈴木絢子(ISAS/JAXA)

1. 名古屋大学理学研究科
sugiura.keisuke@a.mbox.nagoya-u.ac.jp

「強度支配域の室内実験衝突クレーターに見られる形状効果」

荒川政彦(神戸大)

「凍結砂を用いた強度支配域の衝突クレーター形成過程に関する実験的研究」

田中秀和(東北大)

「ダストアグリゲイトのクレーター衝突破壊」

脇田 茂(天文台)

「iSALEを用いた微惑星衝突計算」

末次 竜(産業医大)

「iSALEを用いた重力支配域での衝突計算」

小川 諒(神戸大)

「鉄合金への衝突実験：鉄質天体のクレーター形状による軌道進化制約の可能性」

向井敏司(神戸大)

「超高速衝突試験によるマグネシウムの衝撃変形応答解析」

黒澤耕介(千葉工大)

「Spallationによる火星隕石放出過程の再評価」

岡本尚也(千葉工大)

「室内衝突実験と数値衝突実験による高速放出物の挙動」

■11月11日(金)

道上達広(近畿大)

「モルタル標的に対する斜め衝突実験～月の楕円クレーターと縦穴への応用」

金城秀征(東京大)

「層構造氷物質への斜め衝突実験 - エンセラダス・プリューム噴出維持機構への応用」

杉浦圭祐(名古屋大)

「微惑星の形状進化:弾性体SPH法を用いた微惑星の衝突破壊・重力再集積の数値計算」

中条俊大(東京大)

「DEMに基づいたラブルパイル小惑星の振動モード解析と衝突破壊への応用」

留岡和重(神戸大)

「始原天体の中で何が起こったか:水質変成を手がかりにして」【招待講演】

藤谷 渉(茨城大)

「水質変成の年代学と物質進化」【招待講演】

古川善博(東北大)

「衝突による水質変成と有機物」【招待講演】

松榮一真(神戸大)

「含水砂標的へのクレーター形成実験:SCI実験解析に向けて」

平田 成(会津大)

「形状・自転・衝突履歴から考える小惑星Ryuguの表面地質」

大村知美(神戸大)

「振動によるレゴリス層の密度進化に関する実験的研究」

■11月12日(土)

長谷川 直(ISAS/JAXA)

「あかり3ミクロン分光観測小惑星の近赤外YJHK分光観測」

石黒正晃(ソウル大)

「衝突現象の観測について」

小林 浩(名古屋大)

「衝突進化と惑星形成」

門野敏彦(産業医大)

「固体が破壊されるときに発生するX線の計測」

■ポスター講演

平田直之(神戸大)

「ディオオーネの構造地形の年代決定」

横山康喜(神戸大)

「重複クレーター形状の実験的研究」

鈴木絢子(ISAS/JAXA)

「小型ガス銃開発の現状報告」

木下敏輝(神戸大)

「月画像解析によるクレーター光条線長さの計測:Zモデルとの比較」

岡本千里(神戸大)

「水分化天体の衝突破壊実験」

黒澤耕介(千葉工大)

「衝突破碎岩石の内部摩擦による粘性加熱:衝撃熔融条件の再評価」

石橋 高(千葉工大)

「[低速]高速度衝突による炭素化合物の生成」

多田賢 弘(東京大)

「タイ東北部における0.79Ma衝突事変(オーストラリア・アジアテクトタイトの起源)のイジェクタ層の

探索」

金丸仁明(大阪大)

「小惑星イトカワにおける表面重力場への自転周期と内部密度分布の影響」

白井直樹(首都大)

「オーストラリアンテクタイト中での隕石成分の探索」

2.1 招待講演

研究会の2日目には、研究会のテーマである「水質変成から探る太陽系物質進化」に関連し、3件の招待講演が行われた。

1件目の招待講演である留岡和重氏の講演では、隕石に見られる水質変成の起源の研究とその理解について、歴史的な経緯を時系列に沿って紹介していただいた。講演では隕石の顕微鏡写真が多数紹介され、その観察から推察される過去に隕石が経験したと考えられる環境について分かりやすく解説していただいた。特に、1980年代には隕石中の含水鉱物の変成で作られたかどうかもわかっておらず、その後層状珪酸塩の脈の発見から母天体での水質変成でできたことと理解された、という話を聞き、太陽系の歴史への理解が時間とともにいかに深まっていったかが実感できた。

2件目の藤谷渉氏の講演では、短寿命放射性核種による年代測定を用いて測定される、隕石やそれに含まれる鉱物の形成年代について、具体的に紹介していただいた。特に親石性のハフニウムから親鉄製のタングステンへの放射壊変を用いることで、コア分化の時期を推定できるという話は印象的であった。また年代測定的手法だけでなく、水質変成の度を調べる方法とその指標(Rubin scale, Alexander scale, Howard scale)についても紹介していただき、大変勉強になった。

最後の招待講演は古川善博氏による講演で、天体衝突と水質変成の関連性に主軸を置いた講演をしていただいた。隕石にはコンドリュールと呼ばれる粒状の構成物が存在するが、コンドリュールの中にはリムと呼ばれる構造をその縁に持つものがある。このリムの形成起源の仮説の一つに、衝突加熱で蒸発した水による水質変成で作られたとするものがあると紹介されたが、大変興味深かった。講演によると、短寿命核種による加熱が期待できない時代や場所では、衝撃波によ

る水質変成が重要になる可能性があるとのことだったので、衝突物理の解明が岩石組成の理解にも影響を及ぼすと改めて実感できた。

2.2 一般口頭講演

今年も研究会のテーマである「水質変成から探る太陽系物質進化」に限らず、幅広い分野の一般口頭講演がなされた。以下では室内衝突実験やその他の室内実験に関するもの、数値シミュレーションや理論的手法を用いた研究に関するもの、小惑星とその観測に関するもの、の3つに分類し、特に面白いと感じた講演を中心に筆者の理解した範囲内で内容を紹介していく。

(1) 衝突実験、室内実験

衝突研究会と呼ばれる研究会だけあって、非常に多岐に渡る衝突実験に関する研究が紹介された。そのどれもが独創的であり、衝突実験の多様性やユニークさを楽しませていただいた。

鈴木氏の講演では、曲率のある面への衝突実験の結果が紹介された。平らな面への衝突実験が一般的であるが、一方で直径1 km以下の小さい天体上のクレーター形成には曲率の効果が重要となってくる。実験の結果、曲率が大きくなるとクレーター体積も増加することが分かった。iSALEと呼ばれる衝撃波物理を記述できる衝突計算コードを用いた数値計算とも比較を行い、クレーター体積の増加は曲率により衝突点から遠くでも衝撃圧が高くなるためであることが推定された。

荒川氏の講演では、強度支配域のクレーター形成過程を詳しく調べるため、凍結砂を用いた衝突実験の結果が紹介された。凍結砂の水分量を変えることにより、物質強度を系統的に変えることが可能であり、強度支配域での衝突現象をより詳しく調べることができる。実験結果を用いて、強度支配域における音速の依存性も含んだカップリングパラメータの導出と、放出物の軌道を表現できるモデルの構築を行い、その結果が紹介された。

向井氏の講演は天体の衝突現象という観点から少し離れ、工学的に強いマグネシウム合金を作るために衝突実験を利用する、というユニークなものであった。軽くて強い金属は工学的に有用である。マグネシウムは密度が小さく扱いやすいが、反面引張強度が小さく脆いという欠点もある。そこで他の金属元素を少量添

加することで強度を増やすということが行われており、向井氏は金属を添加したマグネシウムの強度の評価に衝突実験を用いていた。その結果、少量のイットリウムの添加により脆性的な破壊を抑えられることが示された。

金城氏の講演では、土星の衛星であるエンセラダスからの水の噴出を維持する機構を明らかにするための衝突実験の結果が紹介された。水の噴出を維持するためには、噴出口の壁面へ氷が凝結する機構よりも、氷ダストが壁面に凝結した氷を破壊する機構の方が卓越する必要がある。金城氏は破壊の機構の効率を調べるため、霜をまとった氷への衝突実験という非常に独創的な実験を行った。講演では破壊効率の速度依存性が紹介された。

大村氏からは衝突実験ではなく、砂の充填率の変化を調べた室内実験の結果が紹介された。天体表面のレゴリス層を構成する岩石粒子の充填率が振動によりどのように変化するか調べるため、砂の充填率が振動、及びタッピングでどのように変化するか調べた。その結果、重力と振動による加速度が同程度の時に最も充填率が増加しやすいことが示された。

門野氏からは、衝突破壊によって発生するX線を実験的に測定するという、一風変わった実験の結果が紹介された。破壊時の歪みにより電荷の偏りが生じ、破壊後にそれがもとに戻ることで電磁波を発生し、発光現象が起こる。実は破壊に伴う発光現象は一般的であり、氷砂糖の破壊でも可視光を観測することができるのである。講演では様々な物質を衝突破壊した際のスペクトルが紹介され、物質ごとの特性X線を検出可能であることが示された。

(2) 数値計算, 理論研究

衝突現象を理解するためには室内実験だけではなく、実験室スケールから天体スケールまで幅広い衝突現象を扱うことができ、詳細な解析が可能な数値計算の使用が極めて重要である。衝突研究会でもiSALE (impact Simplified Arbitrary Lagrangian Eulerian) コード、SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法、DEM (Discrete Element Method) といった手法を用いて衝突現象などを再現した研究が多数紹介された。

脇田氏の講演では、iSALEを用いて微惑星の衝突を再現し、微惑星の衝突でコンドリュールを作る溶融液滴が形成可能かどうか調べた結果が紹介された。半

径10 km程度の微惑星同士、衝突速度1 km/s程度の衝突計算を行った結果、表面付近から放出される物質は溶融しており、コンドリュールが形成可能であることが示された。

末次氏からは同じくiSALEを用いて、大規模破壊になるために必要な衝突エネルギーの閾値が、数値計算の解像度によってどのように変化するか調べた結果が紹介された。先行研究によりSPH法を用いた場合には解像度を増やすと閾値のエネルギーが減ることが示されていたが、他の手法でも同様の依存性があるか調べた形になる。その結果、iSALEを用いた場合にもSPH法と同様の傾向が見られることが示された。

黒澤氏からは、火星起源の隕石を火星から放出するための機構を、同じくiSALEを用いて調べた結果が報告された。火星はある程度大きくその脱出速度も5 km/sと高速であるので、火星隕石を説明するためには物質を高速で放出する機構が必要である。計算の結果、自由表面を超えた後に起きる後期加速によって高速な放出物を作ることが可能であることが示された。

岡本氏の講演では、衝突実験によって観測される放出物の挙動をSPH法で再現するために必要な数値計算解像度を調べた結果が報告された。解像度を様々に変えて、実験で観測された放出物の形状と比較することで、実験を再現するためには弾丸に 10^6 ものSPH粒子数が必要となることが分かった。

中条氏からは、ラブルパイル天体の振動モードを解析的に調べ、さらにDEMによる数値計算と比較した結果が紹介された。ラブルパイル天体の振動特性を調べることは、将来的な探査ミッションで天体の内部構造を調べる際に重要となる。このような解析的な議論は数値計算とは異なり包括的な理解が可能であるので、極めて有用であると感じた。

小林氏からは、多数の微惑星を統計的に扱うことで惑星と多数の微惑星の軌道計算を行い、惑星の離心率を下げる機構について調べた結果が紹介された。惑星は巨大衝突を経て形成されたと考えられており、巨大衝突は惑星の離心率を上げてしまうが、そのままだと現在の太陽系の小さい離心率を説明することができない。そのため、微惑星による力学的摩擦で離心率を下げる機構が提案されている。小林氏の講演では、惑星の離心率を下げるために必要な微惑星のサイズと量についての定量的な議論が紹介された。

(3)小惑星、観測

衝突研究会では実験、数値計算以外に、観測的な手法で小惑星の性質を調べた研究に関する講演も行われた。以下ではそのような観測に関連する3講演について紹介していく。

平田氏の講演では、はやぶさ2ミッションのターゲットである小惑星リュウグウの表面地質を、形状モデルの観点から調べた結果が紹介された。小惑星イトカワの観測から、表面に傾斜が適度に存在し細粒な物質が存在する場合、重力と遠心力ポテンシャルの和が小さい低地に細粒な物質が集まることが予想される。リュウグウの場合にもそのような場所があるか形状モデルを用いて議論した結果、あまりなさそうであるということが示された。

長谷川氏からは、あかり衛星の赤外分光観測のデータと追観測したデータを用いて、小惑星をスペクトルの特徴ごとに分類分けを行った結果が紹介された。含水鉱物は3ミクロン付近に強い吸収線を作るため、この波長域の分光観測から含水鉱物の有無を調べることができると考えられている。長谷川氏の講演では小惑星をBus-DeMeoの分類法を用いて分類した結果が紹介された。

石黒氏の講演では、P/2010 A2という小惑星からのダスト放出の起源についての議論がなされた。ダスト雲の形状を再現するためのモデル計算の結果が紹介され、このダスト雲の起源は破壊の衝突である可能性が高いとの結論が出された。

2.3 ポスター講演

研究会の2日目の夕方には、懇親会を兼ねたポスターセッションの機会が設けられた。お酒の力もあってか、終始和やかな雰囲気での議論ができたように思う。また、世話人の方々と神戸大学の学生の方々の尽力により、快適に議論ができた。筆者も木下氏とポスターセッションの時間に議論を行い、月表面の画像解析を行いクレーター光条線の長さを定量的に評価した研究について聞かせていただいたが、普段聞けないような話を掘り下げて聞く事のできる貴重な機会であったと感じた。

3. おわりに

今回の衝突研究会のテーマが「水質変成から探る太陽系物質進化」であったこともあり、筆者にはあまり馴染みのない隕石の組成、変成やそこから分かる太陽系の歴史について聞くことができ、非常に有用な研究会であったと感じた。また、このような隕石の詳細な観察や解析から太陽系の過去の詳細な姿が次々に明らかとなっている、ということが実感できた。一方でそのような過去の姿を説明できるような惑星形成のモデルの構築もこれから必要であり、より一層、観測、実験、理論の専門家が協力して研究を行うことの重要性も感じられた。

研究会の雰囲気としては終始和やかであり、活発かつオープンな議論がなされていた。改めて、衝突研究会が異なる分野で研究を行う研究者同士の重要な交流の場であることを実感した。この参加報告記事を読んでこの研究会に興味を抱いた方は、ぜひ次の機会に参加してみたいと思う。

謝辞

この研究会の開催にあたり尽力いただいた世話人の方々、及び神戸大学の方々には会場の準備や整備などを通して大変お世話になりました。この場をお借りして感謝申し上げます。