

天体の衝突物理の解明(IV)

～「かぐや」が迫る月の衝突クレーター～ 参加報告

大野 宗祐¹, 黒澤 耕介²

本年9月27日から29日にかけて、北海道大学低温研究所にて天体の衝突物理の研究会が行われた。天体の衝突物理の研究会の開催は今年で第4回となる。今回は、「天体の衝突物理の解明(IV)―「かぐや」が迫る月の衝突クレーター―」と題し、特に月探査衛星「かぐや」が送ってきた最新の月データを実際に探査計画に中心となって関わった方々にご紹介いただき、それをもとに月の衝突クレーターについて活発な議論が行われた(特別セッション『「かぐや」が迫る月の衝突クレーター』, 研究会二日目)。また、レーザー銃を用いた実験など新しい実験的手法を用いた研究や、理論的研究も含め幅広い視点と幅広い手法が数多く紹介され、活発な議論が展開された。

講演タイトルと講演者(所属)は以下の通りである(以下全て敬称略)。

<9月27日>

高出力レーザーによる地球脱出速度を超える飛翔体の実現
門野敏彦(阪大レーザー研)

レーザー加速弾丸を用いた高速度衝突クレーター形成実験
荒川政彦(名大)

宇宙速度による衝突閃光の分光観測
黒澤耕介(東大)

レーザー銃を用いた衝突脱ガス実験
大野宗祐(岡山大地球物質科学研究センター)

発光輝線形状解析によるレーザー加熱蒸気雲の圧力測定
横山聖典(東大)

クレーター形成過程のその場観測2
山本 聡(東大)

粉体衝突クレーター形成における粉体抵抗力
桂木洋光(九大)

粉体物質の衝突挙動のその場観察 - レーザー干渉速度計の利用
関根利守(物質・材料研究機構)

海洋底に形成される衝突クレーターに関する実験的研究
土肥弘嗣(名大)

衝突過程への遠心力の効果に関する実験的研究
山下靖幸(神戸大)

<9月28日>

特別セッション『「かぐや」が迫る月の衝突クレーター』
地形カメラによる月面衝突クレーターの詳細観測
春山純一(JAXA)

月の20kmクレーター Giordano Bruno:かぐや搭載地形カメラによる1178年形成仮説の検証
諸田智克(JAXA)

月クレーター放出物の解析
平田 成(会津大)

マルチバンドイメージャーによる月面衝突クレーターの観測
大竹真紀子(JAXA)

クレーター多重リングは、どのくらいの深さから出てきたのか? :かぐやスペクトルプロファイラーによる最新の観測からの議論
中村良介(産総研)

可視-近赤外連続スペクトルによる月面衝突クレーターの表面鉱物組成と深部物質への制約
小川佳子(国立環境研究所)

レーザー高度計計測が明かす新たな月衝突盆地の発見
荒木博志(国立天文台)

月重力場が明らかにする月裏側の衝突盆地の地下構造
並木則行(九大)

LCROSS の月永久影への衝突の観測で何が分かるか?
杉田精司(東大)

ビットクレーターチェーンと溶岩チューブ構造を模擬した実験的研究
道上達広(福島高専)

1. 岡山大・地球研

2. 東大・新領域

<9月29日>

多孔質模擬天体の衝突圧力減衰率測定実験～焼結体と非焼結体の比較 瀬藤真人(神戸大)

焼結した雪球の衝突実験 寫生有理(名大)

コア・マントル構造を持つ小天体の衝突破壊に関する実験的研究:コア・マントルへのエネルギー分配率 岡本千里(名大)

高速衝突破片の自動追跡 三浦直人(会津大)

衝突破片のサイズ分布の天体サイズ分布へ影響 小林浩(北大低温研)

彗星塵衝突トラックの三次元構造 飯田洋祐(阪大)

合体成長過程におけるダスト構造進化の数値計算:斜め衝突の効果 陶山徹(北大低温研)

ダストアグリゲイトの衝突シミュレーションによる破壊過程と成長効率 和田浩二(北大低温研)

リム付きコンドリュールの衝突付着と跳ね返りに関する実験的研究 内山陽一朗(名大)

ダスト合体衝突成長による微惑星形成 田中秀和(北大低温研)

<ポスターセッション>

ダストアグリゲイト模擬体の焼結による強度変化 町井 渚(神戸大)

普通コンドライト隕石母天体模擬物質の衝突破壊実験:衝突成長条件と衝突破壊強度の関係 保井みなみ(名大)

天体衝突時のAngular Momentum Splash によるスピンダウンのシミュレーション 武田隆顕(国立天文台)

レーザー加速弾丸衝突による放出物の検出 中村昭子(神戸大)

月オリエンターレ衝突盆地のかぐやLISM データ 出村裕英(会津大)

高軌道傾斜角の微小メインベルト小惑星を対象とした広域サーベイ 寺居剛(神戸大)

衝突クレータリングのSPH シミュレーション:岩石強度の効果 高田淑子(宮城教育大)

初日午後のセッションの前半では、レーザー銃或いはレーザー生成蒸気雲を利用した衝突現象に関する実験的研究が紹介された。特に最初の4講演においては、

現在大阪大学レーザー研究所で進行中のレーザーを用いた飛翔体加速技術の開発と応用について、現状の紹介と今後の展開についての議論が行われた。門野らは、大阪大学レーザー研究所の激光XII号レーザーとそれを用いた飛翔体加速実験について報告した。加速手法の概要と、実際の飛翔体の観測例が紹介され、宇宙速度を遙かに超える秒速数十キロメートルの速度が達成されていることが示された。秒速10キロメートルを超える速度の衝突実験は惑星科学上非常に重要であるが、技術的に難しい。これを手始めに、今後幅広く応用されていくことが期待される。荒川らは、そのレーザー銃を用いた秒速10キロメートル以上の条件でのクレータ形成実験を行い、衝撃圧減衰率を見積もった。観測されたクレータは非常に浅く、高速度の衝突条件では減衰率が大きいことが示唆された。黒澤らは、宇宙速度でのケイ酸塩への衝突蒸発実験に関して報告した。宇宙速度で衝撃圧縮されたケイ酸塩の熱力学状態は未解明である。この問題に取り組むため、衝突閃光の発光分光観測を行う予定であるが、今回は第一歩として、衝突によるケイ酸塩の蒸発が起こったことが示された。大野らは、レーザー銃を用いた衝突脱ガス実験について報告した。東京大学のレーザー銃を用いた実験結果は、先行研究で考えられていたよりも低い衝撃圧でも方解石の衝突脱ガスが起こるとを示す。これは反射衝撃波や封圧の影響であろうと考えられる。講演ではさらに、大阪大学レーザー研で行われた硫酸塩岩の衝突脱ガス実験の第一報も報告された。横山らは、蒸気雲内の圧力測定法についての講演を行った。レーザー照射により生成させた蒸気雲のカルシウムイオン、水素原子の発光輝線のシュタルク広がり的大小を観測し、それから蒸気雲内の圧力を推定した。これまでと異なる波長の輝線を用いることにより、圧力測定の信頼度が向上したことが示唆された。これらこのセッションで紹介された圧力減衰率測定、分光測定、ガス分析等は超高速度の衝突現象に特有の現象を理解する上で非常に重要な実験手法であり、飛翔体加速技術とともに今後の発展が望まれる分野であるといえよう。

初日午後のセッションの後半には、粉体への衝突現象など様々な衝突実験の手法と結果が報告された。山本らは斜め衝突における楕円クレータの形成過程を、レーザー法を用いて時間分解して観測した。実験結果

から、衝突直後のクレーター形成途中の段階では、クレーター形成が終了した後よりも円から遠い楕円になっていることが示された。桂木らは、粉体層に固体弾を低速度で衝突させ、その動力学を計測する実験を行った。実験データから求まる運動方程式も用いて、定式化された実験データを最も良く説明する粉体衝突抵抗力のモデルが示された。関根らは、粉体の衝撃圧縮挙動とその後の圧力解放過程のその場観察を行うため、レーザー干渉速度計の波形計測から、粉体の圧縮及び脱ガスを実験的に調べた。ユゴニオから予想される波形との比較から、この手法で衝突脱ガスが観測できることが示唆された。土肥らは、海洋衝突などの際に層構造がクレーター形成に与える影響を調べるために、二層構造を持つ標的に対する衝突実験を行った。その結果、層構造の厚みと物性により、クレーター形状はお椀型、平底型、同心円型と変化することが示された。山下らは、小天体の自転による遠心力がその天体の衝突破壊に及ぼす影響を調べるため、回転する標的への衝突実験と、実際の回転小天体で重要なパラメータである過剰な応力がかかった状態の標的への衝突実験を行った。得られた結果は、標的の強度の1割から2割程度の応力でも破壊強度に影響することが示す。衝突現象の理解、特にスケーリング則の確立には物理的な理解が不可欠である。手法も視点も非常に多岐にわたっているこのセッションに参加して、詳細な物理機構から新しい切り口の現象論まで包括的に理解していくことが衝突現象の理解に必要であることを改めて痛感させられた。

二日目は、特別セッション『「かぐや」が迫る月の衝突クレーター』が行われ、かぐやのデータと直接は関係のない二講演を含め、惑星探査で得られた(得られる)結果と衝突現象との関連性の議論が活発に行われた。午前中のセッション最初の講演で春山らは、かぐやに積まれた地形カメラ(Terrain Camera: TC)による最新の月地形データを発表した。特にクレーター内部及びその周辺の動画が報告されたが、その素晴らしい映像に一同感心していた。ティコクレーターの中央丘の異質構造や、溶岩溜まりの存在は、クレーター形成過程に大きな制約を与えることが期待される。諸田らはTC画像から、直径10 km以上のクレーターの中で最も新しく、1178年に形成されたとする仮説があるGiordano Brunoクレーターの年代推定について報告

した。新しいクレーターの形成年代は、現代の地球への隕石衝突確率を推定する上で重要である。TCによりGiordano Brunoクレーター周辺に10 - 100mのクレーターが50個ほど発見され～500万年前に形成された可能性が高いことが示された。平田らは、年代が新しくサイズの大きいTychoクレーターのejecta blanketや impact melt について、月撮像/分光機器(LISM)で新しく得られたデータを用いて解析と議論を行った。Tycho のejecta blanket が三種のユニットからなっていること、impact meltが多く存在しV字型に分布していることなどが報告された。これらの観測は大規模な衝突現象を理解する上で非常に重要な情報となるはずである。大竹らの講演では、かぐやのマルチバンドイメージャーによる月のクレーターの観測例が紹介された。特にJacksonクレーターの観測例において、中央丘とその周辺の化学組成についての議論が興味深いものであった。衝突クレーターの中央丘の形成メカニズムは、衝突とクレーター形成の物理において長年の大きな問題で完全な結論を得るには至っておらず、かぐやの詳細なデータによりこの問題の理解が進むことが期待される。

午後のセッションも引き続き主にかぐやの観測結果が紹介され、それに基づく議論がなされた。中村らは、かぐや搭載のスペクトルプロファイラーによる衝突クレーターの観測例を紹介し、特にクレーター多重リングと中央丘に着目した議論を行った。お椀型や中央丘を持つもの、多重リング型などのクレーターの形状はクレーターサイズと衝突地点の内部構造により変わる。かぐやで得られた新しいデータは、月の地殻の内部構造と大規模衝突クレーター形成の物理との包括的な理解への大きな手がかりになっていくことが期待される。小川らは、これまで観測データが少なかった月面裏側のrayを持つクレーターのスペクトルプロファイラーによる観測例を紹介した。その結果、rayが化学組成ではなく風化度の違いで明るく見えているものと、化学組成も周囲と異なっている可能性のあるものと二つのグループに分けられることが示された。荒木らの講演では、かぐやに搭載されたレーザー高度計(LALT)のデータの紹介とそれと重力データを組み合わせた月の大規模な衝突盆地についての再検討が行われた。既知の衝突盆地のデータベースを元に、かぐやで得られたデータとの比較が紹介された。明らかに衝突盆地



写真：講演中の会場内(写真提供、田中秀和氏)

のように見える地形・構造もあるものの、データベースに載っているものでも簡単には判別できない衝突盆地があることが紹介された。簡単ではないものの、衝突盆地の判定基準を確立することが重要であるというコメントが出された。並木らはかぐやによる月重力場探査の結果について報告した。かぐやでは2機の小衛星を用いることで、世界で初めて月の裏側の重力を直接調べた。月の裏側に存在する衝突盆地の重力異常を詳細に調べたことにより、月の衝突盆地は3グループに分類されることが明らかとなった。特に裏側の衝突盆地の多くは力学的に緩和しきっておらず、盆地形成当時の地殻が比較的低温であった可能性が示唆された。かぐやのデータは、観測される領域や分解能、化学組成や内部構造の情報など月の新たな情報を数多く与えてくれるものである。月の表面は無数の衝突によって形成された地形に覆われていること、衝突の科学において月が最良の大規模な天然の衝突地形の観測対象であり続けていること、クレーター形成から衝突天体のフラックスに至るまで月のクレーターの観測結果を基に議論が組み立てられている点が非常に多いこと、等を考えても、新たな月の科学の進歩は必然的に衝突の科学についても大きな進歩をもたらすはずである。それは当然逆にも言えることであり、普段衝突現象を研究している科学者と惑星探査の現場にいる科学者が互いに最新の研究成果を紹介し議論する場というものが非常に重要であり貴重で有用であることを参加して強

く感じた。

二日目午後の最後には、かぐやの観測結果以外の新しい惑星探査とその観測結果に密接に関連する話題が紹介された。杉田らはLCROSSの月面衝突探査の地上望遠鏡を用いた観測の提案を行った。衝突放出物の赤外分光観測を行い、月表層のH₂Oの存在量を推定する手法が説明された。さらに衝突物理を適用すれば、月表層の成層構造までも推定することが可能であることが報告された。道上らの講演では、火星において最近発見された深いピットクレーターの成因について、衝突との関連性の可能性について議論がされた。溶岩チューブを想定した中空の標的への衝突実験を行いピットクレーターの形状の再現を試みたが、この条件では、観測されるような形状の深いピットクレーターを作ることは困難であろう事が示された。二日目にはポスターセッションも行われ、多くの議論を行う機会を得た。

三日目午前中は、衝突破壊と天体の衝突進化に関連した講演が行われた。瀬藤らは衝突実験で粉体内の粒子速度減衰率を調べた結果について発表を行った。近年続々と発見されている高空隙率小天体の衝突進化を推定するためには重要な課題である。実験の結果、粒子速度減衰率は粉体の空隙率、焼結度にはほとんど依存しなかったことが報告された。薦生らは氷微惑星を模擬した焼結雪球の衝突破壊強度を調べた実験に関して報告した。実験結果を無次元衝突応力を用いてスケールリングし、焼結進行による雪球の衝突破壊強度変化

を定式化した。岡本らはコア・マントル構造を持つ層構造試料を用いた衝突実験の結果を報告した。コア、マントル双方の最大衝突破片を調べることで、コアへのエネルギー分配率の実験式を得た。三浦らは最新の画像解析技術を衝突実験へ適用する試みに関して報告した。従来、高速度衝突破砕実験では高速カメラ画像を人間の手で解析し、衝突破片を追跡していた。自動的な破片の追跡が可能になれば、実験効率が大幅に向上することが期待される。講演では、自動解析を行いやすいような衝突実験の試料作成法や照明の配置などの議論も行われた。小林らは微惑星の衝突進化に関する数値計算結果を紹介した。衝突破砕を考慮した凝集方程式に、微細なダストが太陽輻射圧やポインティングローバートソン効果で太陽系から失われる効果を取り入れ、天体総質量の減少を調べた。その結果、微惑星同士の衝突のタイムスケールで総質量減少が起こること、総質量減少は最大天体の衝突破壊強度が重要であることが示された。

三日目の午後は、小さな粒子の衝突に関連した講演が行われた。飯田らはNASAスターダスト計画で採取された彗星塵の分析に関して報告した。シリカエアロジェルに一定速度で衝突・貫入させることで、彗星塵を減速させ捕集しているので衝突物理が重要となる。捕集用シリカエアロジェルに残された衝突痕の3-D形状及び蛍光X線分析を行い、衝突痕の形成モデルを提案した。元の彗星塵の密度を彗星塵のサイズ及び衝突痕の長さの関数として定式化した。陶山らはダスト凝集体の衝突のN体計算結果について報告した。従来は正面衝突のみを扱ってきたが、今回は一般的な斜め衝突の計算結果が示された。斜め衝突の場合、ダスト凝集体の断面積がその質量にはほぼ比例した。この結果は斜め衝突では、ダスト凝集体が引き延ばされるために圧縮されにくいことで解釈できる。和田らは圧縮が進んだダスト凝集体同士のN体衝突計算結果を報告した。斜め衝突も考慮した系統的な計算の結果、氷ダスト凝集体の付着限界速度が ~ 60 m/sとなることを示した。この結果は圧縮が進んだダスト凝集体では粒子が自由に飛散することができず、その内部にとどまることで説明された。内山らはシリカ層で覆った玄武岩へガラス球を衝突させ付着限界速度と反発係数を求める実験の結果を報告した。これはリム付きコンドリュール同士の衝突を模擬している。付着限界速度はシリカ層の

厚みに依存していること、反発係数が層厚に依存した上限値を持つことが示された。田中らはダストの衝突合体成長による微惑星形成に関する数値計算結果を報告した。北大低温研の最新のダスト衝突計算結果を用いて、ガス抵抗によるダストの落下を考慮した凝集方程式を数値的に解いた。その結果、10AU以内で氷微惑星が直接成長可能であること、固体面密度の大幅な上昇により惑星落下問題も解決することが示された。

研究会の講演は以上である。著者から見た、著者の理解であるので、各講演について興味を持たれた方々、正確な情報が欲しい方々は是非講演者に直接お問い合わせをお願いしたい。

本年の衝突研究会も、例年通り非常に多岐にわたる手法と視点が披露され議論が行われたため、非常に有意義に楽しく参加することができた。かぐやの観測データはもちろんであるが、実験手法やモデル計算でも近年新たな進歩が着実に見られていることも確認でき、それらがうまくかみ合えば衝突の科学という分野の飛躍的な進歩に繋がる可能性もあるのではないかと考えている。最後になるが、本研究会を開催するに当たって尽力をされた、世話人の和田浩二、山本哲生、荒川政彦、中村昭子、門野敏彦、杉田精司の各氏や北海道大学低温科学研究所の皆様、そしてすばらしい話題提供をして下さった講演者各氏に篤く御礼を申し上げます。