

# 「天体の衝突物理の解明Ⅱ－惑星科学における粉体の役割」参加報告

城野信一<sup>1</sup>, 門野敏彦<sup>2</sup>

夏の終わりの札幌にて、「天体の衝突物理の解明Ⅱ－惑星科学における粉体の役割」が9月15-16日に開催された。本研究会の内容を紹介し、最後に衝突研究についての私見を述べさせて頂きたい。(文中敬称略)

本研究会は昨年に第一回が行なわれ、今回が二回目となった。今回はテーマとして粉体をとりあげ、惑星科学以外の分野で活躍されている講師お二方に招待講演をお願いした。講演リストは以下の通りである。

## 惑星科学における粉体の役割

城野信一 (名大環境)

## 微粒子の帯電機構や振る舞い (招待講演)

松坂修二 (京大工)

## 非弾性衝突のメカニズム (招待講演)

國仲寛人 (中央大理工)

## アグリゲイト衝突の数値シミュレーション

和田浩二 (北大低温研)

## 衝突による小惑星の自転進化

武田隆顕 (国立天文台)

## 格子法によるジャイアントインパクトシミュレーション

森蘭宏太 (東大地球惑星)

## 石膏球の低速度衝突破壊実験

藤井雄一 (神戸大自然)

## 層構造天体の衝突破壊における破片・速度分布の特徴

岡本千里 (名大)

## 微小衝突破片と周辺大気の化学反応

黒澤耕介 (東大新領域)

## ガラスビーズ岩石混合焼結体へのクレーター形成実験

平岡賢介 (神戸大自然)

## 粉体層における衝突クレーター形成過程の物理

山本聡 (東大新領域)

## 微小重力実験, 今週の実験結果

高木靖彦 (東邦学園大)

## 小惑星イトカワのクレーター形状

平田成 (会津大)

## ディープインパクト探査結果の解析最前線

杉田精司 (東大新領域)

## Deep Impactにより放出されたエジェクタの空間分布から彗星内部構造を探る

門野敏彦 (JAMSTEC)

## ポスターセッション

### CDPによる衝突破片の自動追跡の試み

三浦直人 (会津大)

### 含水多孔物質への衝突実験: ダスト形成メカニズムの解明への試み

小倉尚也 (神戸大自然)

### ガラスビーズ焼結体の衝突破壊強度

瀬藤真人 (神戸大自然)

冒頭に筆者(城野)によって全体を通してのイントロダクションが行なわれた。衝突現象は大きく次の二つの場合に分類することができるであろう。1) 標的の質量が増加する場合、そして2) 標的の質量が減少する場合の二通りである。惑星科学において1)の理解は惑星形成過程、特に微惑星形成過程のシナリオを

1. 名古屋大学大学院環境学研究科

2. 海洋研究開発機構地球深部探査センター

構築する上において決定的に重要である。一方、2)は、天体表面におけるクレーターの形成過程や太陽系小天体の破壊に対応することになる。

1)においてはダスト微粒子、もしくはそのアグリゲイトが重要な役割を果たす。微粒子が相互衝突してダストアグリゲイトを形成し、空間的に濃集することで重力不安定もしくは合体成長することにより微惑星が形成されるものと考えられている。問題となるのは、微粒子は相互衝突して付着するのか？アグリゲイトの相互衝突がアグリゲイトの成長につながるか？ということである。

2)のカテゴリーは、微惑星や惑星が形成され、円盤ガスが散逸して衝突速度が増加したステージに対応する。現在太陽系で起こっている衝突の多くはこのカテゴリーに入る。現在衝突が起きている天体である小惑星や彗星核といった太陽系小天体は始原的であると考えられており、前述したダストアグリゲイト(粉体)が長い時間をかけて変性したものが構成物質であると思われる。

1), 2)それぞれの場合において粉体、もしくはその変性物は衝突現象において非常に重要な役割を果たす。粉体の力学的物性は非常に幅広く、衝突の結果を大きく変化させることが予想される。重要な物理量として以下の4つが議論された；1)構成粒子のサイズ、2)間隙流体の量、3)空隙率、4)焼結の度合いである。構成粒子のサイズが小さくなるほど粒子間の結合力が重要となる。間隙流体は脆性破壊⇔塑性変形の遷移を引き起こす。また空隙率、焼結の度合いによって力学的強度が大幅に変化する。

引き続き招待講演が行なわれた。松坂の講演においては、ミクロンサイズの微粒子をガス流に乗せてパイプ中を流す実験において観察される様々な興味深い現象が解説された。微粒子はパイプ内壁に衝突すると

付着し層を形成する。しかしこの層は厚くなり続けるわけではなく、別の微粒子が衝突することによって破壊され、内壁から引き剥がされる。この二つのプロセスの競合によって様々な沈着パターンが生まれることになる。この状況はダストアグリゲイトの成長過程に近い。

二番目のトピックとして衝突による帯電の実験が報告された。微粒子は衝突によっていとも簡単に帯電してしまう。パイプ内壁の帯電状態をコントロールすることで微粒子を空間中に浮遊させる、また内壁に付着させずに落下させる技術の紹介がなされた。微粒子の帯電はダストアグリゲイトの成長にも非常に重要であると思われる。しかし惑星科学においては室内実験による研究はいまだ数少ない[1]。

二つのダスト粒子が衝突後合体するためには、はじめに持っていた運動エネルギーを散逸させる必要がある。これを記述する一つの量として、衝突前の速度と衝突後の速度の比で表される「跳ね返し係数」がある。続いて招待講演を行なった國仲は、固体の衝突において有名なこの係数に着目した。二つの弾性体をバネの集合体として表現し、衝突の数値シミュレーションを行なった。ところどころバネを切断しておき格子欠陥を導入してやると、欠陥の密度に応じて跳ね返し係数が変化することが示された。衝突時に発生した弾性波が系外に流れることで運動エネルギーは失われる。格子欠陥の存在により弾性波の伝わり方が変化するため結果として跳ね返し係数が変化する。

興味深いことに、跳ね返し係数は1を越える場合があることが実験[2]により報告されている。先ほどのコードを用いて数値シミュレーションしたところ、標的となる板が変形することで板の面の向きが変化し、見かけ上跳ね返し係数が1を越えることになることが示された。

一般講演の内容について簡単に報告する。ダストア

グリゲイトの数値シミュレーションの結果が和田から報告された。ダスト微粒子間の相互作用エネルギーによって衝突結果がうまく整理できることが示された。

森蘭がジャイアントインパクトの数値シミュレーションコードの開発状況を発表し、武田が衝突による小惑星のスピンアップの数値計算の結果を示した。それぞれ状態方程式をどう与えるかがポイントとなると思われる。小倉、藤井、岡本、山本、高木、平岡は室内実験の報告を行なった。それぞれの実験において用いられている物質、実験手法に幅広さがある。山本、高木はガラスビーズを用いて天体表面のレゴリスを模擬している。小倉、藤井は石膏、平岡はガラスビーズ+岩石片混合物の焼結体、岡本は中心にガラス球を埋めこんだ石膏球を用いていた。

ここから、実験に幅広い力学物性をもった物質を用いていることが見て取れる。力学的物性が異なれば当然衝突の結果も異なってくる。従来の衝突破壊実験では観察されなかった現象が見られるようになってきた。高い空隙率を持つ石膏では低速度での衝突においては割れることなく「へこむ」だけになる(藤井)。コアマントル構造をもった標的を用いると破片のサイズ分布が無構造の場合から変化する(岡本)。

ガラスビーズを用いた山本の実験ではレーザーを用いる新たな手法を用いることによりクレーターの形状変化をリアルタイムで捉えることに成功した。さらに高木の実験においては落下塔を用いることにより無重力環境を再現している。これらの実験結果から、かねてから議論されている、クレーターのスケーリング則の見直しが迫られることが期待される。

観測とリンクした議論が平田、杉田および筆者(門野)によって行なわれた。平田ははやぶさが撮影した小惑星イトカワのクレーターの形状とその特徴を議論した。門野はDeep Impactミッションの地上観測デー

タを基に彗星の内部構造を推定し、杉田はすばる望遠鏡における観測データから放出物の粒子サイズと組成を議論した。

全体を通じて言えることは、昨年と同様に、学会とは違い講演・質問時間に余裕があり質問しやすい雰囲気であったことである。各発表で質問・コメントが活発に飛び交いながらも各座長のコントロールがうまく、昨年のような事態(昼食時間がなくなり皆弁当を食べながら講演を聴いた)は避けることができた。ただ、気になることは、コメントを発する人はほとんどがPD以上であり、大学院生の方が質問・コメントしたことは皆無であったように思う。現在業界の軸を担っている方々は大学院生の時から質問・コメント、その他色々な意味で目立っていた。「院生の魂、定年まで」という北大山本教授の格言通りだとすると、20年後の衝突業界は寂しい。しかしこの格言には例外も多い。大学院生の方々は、まずは自分の研究室のセミナーでの発言、小勉強会などの企画などから始めてみてはいかがであろうか。それが理解を深めるのに必ず役立つはずである。

本報告のまとめを兼ねて、衝突研究に対する私見(城野)を述べさせて頂きたい。衝突現象は様々な素過程からなる複合的な現象である。衝突研究の黎明期においては、衝突破壊の最終結果として生成された破片のサイズ分布のみからでも惑星科学において興味深い議論を行なうことができた。これは、材料として用いる物質が脆性的に破壊する素材に限られていたためともいえる。しかし惑星科学の進化に伴い、衝突現象に関与する物質は脆性破壊する物質とは限らないことが明らかとなってきた。したがって、まずは用いる物質の力学的物性、特に粉体の力学的物性を実験的にしっかり押さえる必要があるのではないだろうか。それではどのような物性を明らかにする必要があるのだろうか? 次の量が挙げられる。1) 粒子間の付着力、ころがり+すべり摩擦力: 惑星形成過程初期において重

要となるミクロンサイズの微小粒子にはAFMが有力であろう。ダストアグリゲイトの成長過程においては氷に対する実験が決定的に重要となる。2) 粉体のマクロな物性:これはさらに三つに分けられる。2-1) 塑性変形の構成方程式, 2-2) 脆性破壊強度, および2-3) これらの二つの変形モードの遷移, の三つである。これらの量をまず計測することで, 衝突現象の結果も見通しよく整理されるようになるのではないだろうか。

最後に, 御多忙にもかかわらず御講演を快諾いただいた松坂修二先生および國中寛人先生にお礼申し上げます。なお本研究会は科学研究費特定領域研究「太陽系外惑星科学の新展開」ダスト班の援助を受けて, 北海道大学低温科学研究所共同利用研究集会の一環として開催されました。本研究会開催に御尽力いただいた北大低温研の皆様に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] Poppe, T., Blum, J. and Henning, T., 2000  
Astrophys. J. 533, 472-480.
- [2] Louge, M. Y. and Adams, M. E., 2002 Phys.  
Rev. E. 65, 021303.