

「天体の衝突物理の解明(X) ～日本の衝突研究の未来～」参加報告

桑原 秀治¹

1. はじめに

2014年10月22日から25日にかけて北海道大学低温科学研究所にて第10回「天体の衝突物理の解明」研究会(以下、衝突研究会とする)が開かれた。節目となる今年度研究会では“日本の衝突研究の未来”をテーマにこれまで日本の衝突研究を黎明期から牽引してこられた水谷仁氏と藤原顕氏を迎え、ご講演頂いた。招待講演以外では25件の口頭発表と17件のポスター発表があった。講演時間は途中の質疑を含めて招待講演と一般講演についてそれぞれ1時間、30分間の時間配分となっている。本稿では今年度衝突研究会の様子を各講演内容を交えて簡単に紹介していく。詳細については研究会webページにある発表要旨を参考されたい(<http://www.impact-res.org/impact14/index.html>)。

2. 講演概要

表1に今年度衝突研究会の日程プログラムを示す。以下では招待講演、一般講演の概要についてそれぞれ紹介する。

2.1 招待講演

水谷仁氏は衝突クレーターのサイズを任意の衝突条件と関係付けるスケールリング則の構築に関する仕事を中心にご講演された(講演の様子を図1に示す)。現在、クレータースケールリング則として最もよく引用されているものは π スケールリング則であり[e.g., 1]、これは



図1：水谷氏の招待講演の様子。

クレーターのサイズと衝突条件(例えば、衝突速度、弾丸と標的の密度など)の関数関係を次元解析により表現し、実験値に合うようにパラメータを決定した経験則である。 π スケールリング則によるとクレータ体積は弾丸のサイズ、密度、衝突速度に個々に依存するのではなく、それらを結合させた量(以下、結合変数とする)に依存するとあるが、その物理的意味は明示されていない。また、室内実験スケールで構築された π スケールリング則が果たしてどういった衝突条件、例えば衝突速度範囲で適用可能なのかも不明であった。

こうした問題は π スケールリング則が衝突物理過程に基づいて定式化を行っているわけではないことに由来しており、この点について水谷氏は理論的なスケールリング則(以下、水谷スケールリングとする)を構築された[e.g., 2]。水谷スケールリングによると、結合変数は最大衝撃圧力と衝突点から動径方向の圧力減衰の解析的表現の掛け合わせで表すことができ、結合変数の物理的解釈が明確になった。また、水谷スケールリングは物質強度と衝撃圧力との競合で決まる物質の衝突破壊現象に関するパラメータ表現についても重要な示唆を

1. 東京大学大学院新領域創成科学研究科
kuwahara@astrobio.k.u-tokyo.ac.jp

表1: 天体の衝突物理の解明(X)のプログラム.

10月22日(水)		
14:00~18:00 iSALE 勉強会		
10月23日(木)		
13:30	加藤伸祐 (名大)	クレーターを用いた月の最後の火成活動の噴出量の推定
14:00	諸田智克 (名大)	月の衝突盆地放出物の厚さ分布
15:00	杉浦圭祐 (名大)	Tillotson 状態方程式を導入したゴドノフ SPH 法での衝突シミュレーション
15:30	桑原秀治 (東大)	地球型惑星の核-マントル間の塩素分配から探る原始海洋形成の描像
16:00	栗田敬 (東大)	火星における斜め衝突クレーターの形態学
17:00	松榮一真 (神戸大)	粉粒体を伝播する衝突励起地震に関する実験的研究 II
17:30	山田智哉 (名大)	レゴリス対流による小惑星表面更新のタイムスケールの推定
18:00	紫垣沙央 (神戸大)	コンドリュールの強度測定とコンドライト模擬試料の圧縮実験
18:30-20:00 ポスターセッション		
10月24日(金)		
9:30	長谷川直 (宇宙研)	2014 年度の宇宙研超高速衝突実験設備の現状
10:00	柳澤正久 (電通大)	超高速衝突現象の超高速撮影と測光観測
10:30	道上達広 (近畿大)	室内衝突実験における玄武岩の破片形状と小天体への応用
11:30	高木靖彦 (愛知東邦大)	玄武岩に形成されたクレーターの三次元形状測定とそれから求められる π スケーリング則
12:00	木内真人 (神戸大)	模擬低重力下における砂標的へのクレーター形成実験 II
12:30	辻堂さやか (神戸大)	石英砂ターゲットにおけるクレーターエジェクタの速度分布に関する実験的研究
14:15	水谷仁 (ニュートンプレス)	日本における衝突実験, 四方山話と水谷スケールリング則
15:15	藤原顕 (関西大)	衝突実験始まりのころ
16:45	高野翔太 (神戸大)	氷地殻を模擬した氷・砂混合物への超高速クレーター形成実験
17:15	黒澤耕介 (千葉工大)	球弾丸斜め衝突時に発生する Jetting の超高速撮像計測
17:45	大野宗佑 (千葉工大)	超高速衝突で生成する液滴に関する実験的研究
18:15-20:45 懇親会		
10月25日(土)		
9:30	門野敏彦 (産業医科大)	衝撃波圧力の減衰: 数百 GPa から HEL まで
10:00	鈴木絢子 (宇宙研)	曲率のある面への衝突: 弾丸密度の影響
10:30	保井みなみ (神戸大)	石膏球の衝突破壊実験: 複数回衝突が衝突破壊条件に与える影響
11:30	中村昭子 (神戸大)	強度支配域での衝突破壊のサイズ依存性
12:00	岡本尚也 (神戸大)	高空隙ターゲットで得られたキャピティサイズスケールリング則の彗星表面への応用
12:30	原田竣也 (神戸大)	多孔質標的への低密度脆性弾丸の衝突
14:30	兵頭拓真 (横浜国立大)	小惑星探査機はやぶさ 2 搭載サンプラーホーン内の粒子挙動に関する研究
15:00	巽瑛理 (東大)	天体表面ブロック層破壊による弾丸減速効果とクレーター則
15:30-16:30 総合討論		
【ポスター発表】		
鈴木絢子 (宇宙研)	新しい小型ガス銃の開発と現状	
金久保隆太 (電通大)	蒸気雲の固体壁への衝突による発光	
田口雅子 (名大)	月のアポロ盆地の火成活動: クレータを用いたマグマ噴出量の推定	
安藤混祐 (名大)	1999JU3 の衝突確率とクレーター年代学関数の構築	
加藤麻美 (名大)	月面クレータからみた過去 32 億年間の衝突頻度の長期変化	
大村知美 (神戸大)	衝突破片層の空隙率	
和田浩二 (千葉工大)	粒子系衝突におけるエネルギー散逸	
平井隆之 (宇宙研)	非分離型サボを用いた二段式軽ガス銃におけるサブミリプロジェクトイルシングルショット法の開発	
岡本千里 (神戸大)	炭素質コンドライトを模擬したガラスビーズ焼結体へのクレータ形成実験	
常ユイ (東大)	チクシュレーブ・クレーター内部掘削試料から抽出した衝撃変成石英のカソードルミネッセンス: 衝撃変成と発光スペクトル	
黒澤耕介 (千葉工大)	不規則形状弾丸による高空隙率小惑星表面掘削の数値衝突計算	
三宅範宗 (千葉工大)	納豆菌ウィルスの衝撃耐性実験	
澤田なつ季 (名大)	衝突クレータによって露出した月初期の貫入岩の探索	
末次竜 (神戸大)	捕獲された微惑星の周惑星円盤内での分布	
芝池論人 (東工大)	冥王代の天体衝突が大地球殻に与える影響とジルコン年代分布	
細野七月 (理研)	Terrestrial magma ocean origin of the Moon I: Equation of state for liquid	
上田翔士 (東工大)	岩石惑星における小天体衝突シミュレーション	



図2：藤原氏の招待講演の様子。

与える内容となっている。

藤原顕氏は70年代当時の衝突実験をはじめられたいささつを中心にご講演され、当初は惑星間塵をピエゾ素子を用いて検出する機器開発のためのダスト加速装置製作を行っていたが、京都大学に二段式軽ガス銃が設置されたことをきっかけとして衝突破壊現象に関する実験的研究をはじめられたことをお話し頂いた(講演の様子を図2に示す)。藤原氏の仕事は衝突研究に惑星科学的な視点を持ち込み、小惑星の衝突破壊現象についてはじめて実験的制約を与えた[e.g., 3]。こうした小天体の衝突破壊現象に関する実験的研究は世界中の惑星科学者に広く引用され、現在の日本の衝突研究の大きな柱となっているように思う。

2.2 一般講演

本稿では口頭発表内容についてのみ簡単に紹介する。講演初日は岩石天体の表層進化に関する発表が集中した。月に関する発表ではまず、クレーター年代学により見積もった海の噴出年代とチタン含有量の関連から火成活動を推定し、地形的痕跡との整合性について検証した研究(加藤)が発表された。続いて月の全球的な衝突盆地放出物の厚さ分布推定から最も原始的な初期地殻を露出している箇所を推定した研究(諸田)があり、月北半球裏側でMgに富んだ始原始的と見られる地表面組成が観測された理由として衝突盆地放出物の堆積量が薄かった可能性が指摘された。

地球型惑星の衝突に関連した研究発表では、従来法と比較して衝撃波を適切に取り扱える流体数値計算法の開発に関する研究(杉浦)、地球の核-マントル間の塩素分配から核組成や原始海洋形成の描像を推定する



図3：衝突研究会参加者の写真。

研究(桑原)、火星の特徴的な衝突クレーター形状の成因に関する研究(栗田)が発表された。数値計算は惑星スケールでの衝突現象を理解するうえで強力な手法となるが、今後も室内実験との比較による検証が必要であろう。地球表層に存在する塩素は原始天体と比較して同程度の揮発性をもつ元素よりもさらに枯渇している。こうした地球の塩素欠乏は原始海洋の散逸や核への取り込みを反映しているのかもしれない。火星には他の岩石天体と比較して特徴的な形態をもった衝突クレーターが多く見られ、クレーター形成時の火星表層環境を強く反映していると考えられている。火星の複雑クレーターの形態学的特徴の成因についてははまだ論争中であり、収束する気配は見えていない。本研究会においても講演時間ぎりぎりまで白熱した議論が交わされた。

小惑星上の衝突現象に関する講演では小天体全体を揺らす衝突励起地震の伝播に関する実験的研究(松榮)、またそれによって駆動されるレゴリスの流動化現象と地表面更新に関する実験的研究(山田)、小天体が過去に経験した衝突履歴を探るためのコンドリュールの強度測定に関する研究が発表された(紫垣)。衝突励起地震による固体物質の流動化現象は複雑クレーターの崩壊を駆動するメカニズムとしても考えられており[e.g., 4]、今後もさらなる実験的制約と理論モデルの構築が望まれるであろう。

講演二日目は衝突現象素過程に関する室内実験研究が発表された。まず、日本の衝突実験研究拠点の一つである宇宙研の衝突実験設備の現状に関する発表があり、衝突銃を用いた実験に関連する論文の最近の投稿数などが紹介された(長谷川)。続いて秒速数kmでの

高速度衝突に伴う物質の発光現象に関する発表(柳澤)があった。弾丸の物性と発光特性の関係がより明らかになれば測光観測から衝突体の性質を推定できるようになるかもしれない。衝突破壊現象に関する研究では破壊された玄武岩破片の形状に関する発表(道上)があった。破片形状と衝突破壊の程度の間を定量的に求めることで小惑星表層のボルダーなどから母天体の衝突破壊の程度を推定する手助けとなるかもしれない。

衝突クレーター形成過程に関する講演では玄武岩標的のスケーリング則構築(高木)、砂標的へのクレーター形成効率の重力依存性(木内)、衝突放出物の速度分布に関するスケーリング則構築(辻堂)、氷と砂混合標的への高速度クレーター形成(高野)に関する実験の研究発表があった。既存のスケーリング則では表現できていない効果を考慮した統一的なスケーリング則を確立するにはさらなる実験的制約が必要そうである。

衝突圧縮過程に関する研究では高速度衝突圧縮時に発生する物質の高速噴射現象に関する実験と理論モデルの構築(黒澤)、また、 $>10\text{km/s}$ の超高速度衝突により生成する液滴のサイズ分布(大野)について発表があった。高速度カメラなどの計測機器の時間分解能の上昇に伴い、物体が衝突した瞬間から物質が飛散し始めるまでの様子が詳細に撮影され、これまで理論研究が特に先行していた衝突圧縮の描像にはじめて実験的制約が与えられ、衝突現象の物理過程に関する理解がさらに進んだ印象を受けた。

講演最終日は標的の形状や物性の効果に関する衝突実験を中心に講演が続いた。はじめに岩石メルト、蒸気が発生する衝撃圧力条件での衝撃波減衰に関する研究(門野)、曲率をもった標的への衝突実験(鈴木)、事前衝突を受けた標的の衝突破壊実験(保井)についての発表があった。こうした実験は実際の天体衝突問題を考えるうえで重要であるが、複雑な過程を含んでいるために実験結果の解釈に難しさを感じた。続いて強度支配域における衝突破壊強度の天体サイズ依存性に関する実験(中村)、彗星がもつ高い空隙率を考慮した衝突実験(岡本, 原田)、はやぶさ2に搭載されているサンプラーホーンの衝突回収模擬実験(兵頭)、弾丸と標的を構成するブロックサイズが近い場合のクレーター掘削効率に関する実験(巽)に関する発表があった。近年の探査によって始原天体表層環境についての知見が

増えつつあり、こうした実験の結果を合わせることで始原天体の衝突進化に関する新たな描像が今後明らかになっていくであろう。

3. 最後に

今年度は衝突研究会開催10回目となる節目を迎え、これまで日本の衝突研究界を牽引してこられた水谷仁氏と藤原顕氏から貴重なお話を講演いただいた。招待講演以外の一般講演も時間配分ぎりぎりまで議論が交わされ、盛況のうちに全日程が終了した。また、ポスター発表においても終始活発な議論を交わす様子が見られ、参加者全員が有意義な時間を過ごせたようである。例年の参加報告でも述べられているように衝突研究会の魅力は議論しやすい雰囲気と研究者間の活発な交流にあると思う。次年度も開催予定であるため、衝突に関連した研究を行っている方や衝突現象に少しでも興味を持たれている方はぜひ参加されることを薦めたい。

謝辞

研究会を開催するにあたってご尽力くださいました世話人の皆様、北海道大学低温科学研究所の方々に感謝致します。また、本稿執筆の機会は千葉工業大学惑星探査研究センターの黒澤耕介さんより頂きました。感謝致します。

参考文献

- [1] Holsapple, K. A. and Schmidt, R. M., 1987, *J. Geophys. Res.* 92, 6350.
- [2] Mizutani et al., 1990, *Icarus* 87, 307.
- [3] Fujiwara, A. and Tsukamoto, A., 1980, *Icarus* 44, 142.
- [4] Melosh, H. J. and Ivanov, A., 1999, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 27, 385.