

# 「衝突クレーター形成ワークショップ: 数値モデルと観測的研究の間の橋渡しを目指して」参加報告

小野瀬直美<sup>1</sup>

## 1. ワークショップの概要

2003年2月7日から9日までの3日間、アメリカのヒューストンにあるLPIで「衝突クレーター形成ワークショップ」が開かれた。衝突クレーター形成という、限られた分野に関する学会であったにもかかわらず、発表者だけで50人を越える活気のあるものであった。討論の時間はもちろんのこと、各発表のあとの質問の時間も、座長の「時間ですよ」を遮らばかりの非常に熱心な議論が交わされ、活発な意見交換がなされていた。ワークショップの開かれた3日間を通じて、Melosh氏、Ahrens氏をはじめとする大御所から学生まで、70人ほどの人が講堂に集まった。朝8時半から夕方7時過ぎまで休憩、お昼休みを削りつつの強行軍であったにもかかわらず、会議の期間中を通して出席率は高く、この分野に対する関心の深さが窺われた。この学会は、衝突クレーター形成を研究する者にとって、様々な角度から衝突クレーター形成を見直す良い機会であった。

本ワークショップの目的は、表題にもあるように、ここ10年の間に大きな発展を遂げた、衝突クレーター形成に関する数値モデルによる研究と地球上のクレーターの観測的研究の成果を明らかにすること、これら2つの研究グループの間にある考え方の違いを認識し摺り合わせを行うこと、そして、お互いの研究手法から得られるであろう「欲しいデータ」を洗い出すことである。数値モデルを用いるグループと観測のグループの間にはお互いの背景の違いから言葉の定義やクレーター形成過程の仮説にも考え方の差異が

あり、クレーターの直径の定義のような基本的なことまで熱い議論が交わされた。特にMelosh氏を主とするモデリンググループが提唱するように、「過渡的なクレーター (transient crater)」の内側の物質を一度すべて掻き出してから、これが崩れて最終的なクレーターになるのか、それとも地質学的研究が示すように「過渡的なクレーター」を作るには、内部の地層を全部掻き出すのではなく、クレーターの底にある地層が弾性的に凹むという効果も考える必要があるのではないか。あるいは、「過渡的なクレーター」という物は存在しないのではないか。という議論が盛り上がっていた。

このような衝突クレーター形成の研究者が一堂に会するのは初の試みであったので、完全な意見の摺り合わせ、橋渡しには至らなかったが、互いに研究成果を発表し議論に火花を散らせることが今後の研究における大きな一歩となった。今回、主に話題に上ったようなkmオーダー以上のクレーターには、実験的手法による直接的なアプローチができないだけに、より慎重なスケール則の導入が必要である。そしてそのスケール則を求めるためには、岩石や砂の層など、地球科学的に重要な物質の状態方程式を求めることとともに、もっと様々な衝突条件での実験的手法を用いた綿密な研究が必要なのではないだろうか。

## 2. 衝突クレーター形成の簡単な説明

### 2.1 衝突条件とクレーターの形

衝突クレーターになじみのない読者のために、衝突クレーター形成の概略をここで簡単に説明する。

<sup>1</sup> 宇宙科学研究所 藤原研究室

長い太陽系の歴史を通じて、天体の衝突現象は普遍的なものであった。天体表面への衝突によるクレーター形成は、表面地形の進化に重要な役割を果たしたのみならず、K-T境界層における大量絶滅にみられるように地球上の生命の進化にも大きな影響を与えるものである。また、クレーター形成の際に放出されたイジェクタは天体表面へのレゴリス層形成に寄与する。

一口に衝突クレーター形成といっても、その衝突条件には様々なものが考えられ、従って形成されるクレーターも様々である。主な衝突条件に限ってみても、飛翔体の物質としては小惑星、彗星、隕鉄などがあるし、その大きさも数ミクロンから数十キロに及ぶものである。衝突速度もまたカイパーベルトでの数百 m/s から、小惑星帯での平均約 5 km/sec, 小惑星や彗星の地球への衝突では数十 km/sec を越えるものもある。これに加えて、衝突角度や、衝突される天体の物質特性、層構造、重力などが複雑に絡んでくるのである。

また形成されるクレーターの形も衝突の規模やターゲットの物性により様々に変化する。

ターゲットの物質強度より、重力の影響の方が大きくなる「重力支配域 (gravity regime)」（砂などの物質強度のないターゲットを用いたとき、および km を越える大規模なクレーターするとき）でのクレーターの形の変化を図1に示す。クレーターの直径が小さい物から順に、盛り上がったリムを持つおわん型の simple クレーター、直径 10 km を越えると現れるクレーターの中央部が盛り上がって丘を形成している central peak クレーター、そして中央部に環状の盛り上がりが見られる peak ring クレーターが形成される。直径が数百 km になると何重ものリングを持つ mulch ring クレーターが形成されるが、このタイプのクレーターが実際のところどのような過程で形成されたのかは議論の分かれるところである。一方、強度を持つ石などのターゲットに形成された小規模なクレーターは、「強度支配域 (strength regime)」であり、中央に形成される、おわん型のくぼみとそれを取り囲む引っ張り破壊で壊された spall 破片の痕跡のくぼみが特徴的である。

(図2)

## 2.2 衝突クレーター形成過程

衝突クレーター形成の手順として、今回話題の中心となった地球上の直径数 km のクレーターが作られるときの様子を主に Melosh 氏の Impact Cratering [1]

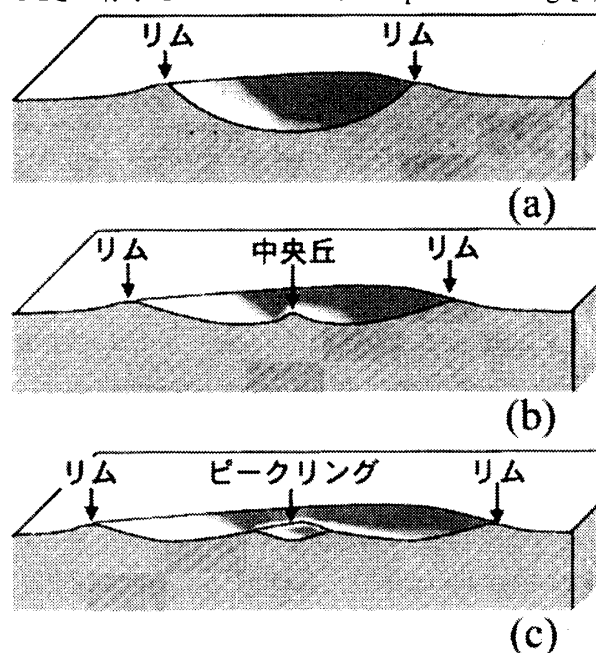


図1 クレーターの形の模式図。深さ方向にわざと拡大して書いてある。(a) Simple クレーター (b) Central-peak クレーター

$\theta_i = 45 \text{ degree}$

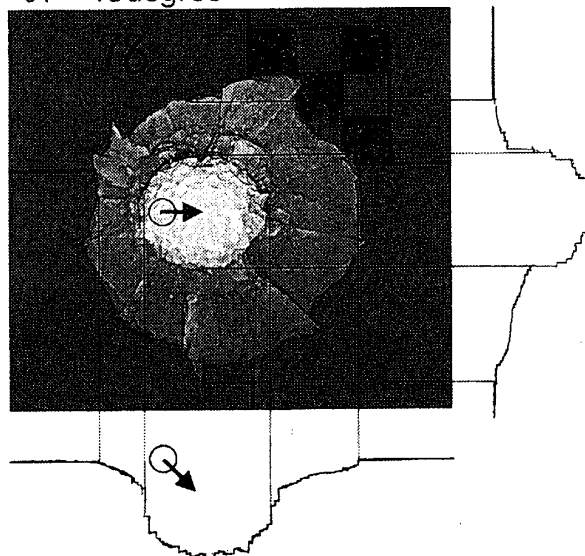


図2 石膏に形成されたクレーターの例：衝突速度 4 km/sec, 衝突角度 45 度, 7 mm ナイロン球。縦断面図と横断面図をつけた。

を参考にして述べる。この大きさのクレーターを形成するための衝突条件は、例えば Gault et al.[2]より、衝突速度約 20km/sec, 直径数百 m の小惑星があげられる。

[地球大気への突入]: 地球の大気圏に突入した小惑星は衝撃波を伴い空気抵抗を受けつつ大気中を進み、やがて地表に衝突する。

[接触と圧縮の段階]: 飛翔体とターゲットの表面が接触すると、その境目から発生した衝撃波により jetting と呼ばれる高速度の破片の放出がある。そして、衝突により発生した衝撃波の進行とともに飛翔体、ターゲット双方の物質は高温、高圧となり、熔融したり、破碎されたりする。うち一部は蒸発し、拡散する(衝突蒸発雲)。

[掘削放出の段階]: 実際にクレーターを掘る段階である。衝撃波により碎かれたターゲットの破碎物と熔融物は、強度を失い、流体として仮定できるとされている。図3のように、これらの物質は、最初は衝撃波により中心点から外側への速度を与えられるが、続いて訪れる飛翔体背面で反射した希薄波により引き戻される。この衝撃波により与えられる速度と希薄波により与えられる速度が微妙に異なるので、これらの破碎物および熔融物はクレーターの中から投げ出される具合になる。この流れを表すのに「Maxwellのz-モデル」と呼ばれる幾何学的な経験則が一般的に用いられている。この掘削放出流によりクレーターが形成されてゆき、やがて最大半径に達する。この時点でのクレーターのことを「過渡的なクレーター (transient crater)」とよぶ。

[修正の段階]: 「過渡的なクレーター」の壁が崩れて重力的に安定な状態になる段階である。ちなみに、central peak クレーターの中央丘や、peak ring クレーターの peak ring が重力によって隆起するのもこの段階である。この後、さらに長期にわたる変形もあるのだが、ここでは省略する。

衝突クレーター形成に関してのより詳しい日本語での説明は、[3]をご覧ください。

### 3.今回主な話題となっている2つの研究手法

数値シミュレーションによる衝突クレーター形成の研究は、計算機の能力や、計算コードの向上とともにめざましく発展した。十数年前の軸対称を仮定した1次元での計算では垂直衝突しか扱うことができなかったが、今では3次元の計算を用いて、斜め衝突を扱うことができるようになった。また、解像度も以前と比べると格段に向上し、比較的細かな破片の動きを数値的に追うことができるようになった。最近の研究では K-T 境界層における大量絶滅の原因となったチクスルーブクレーターを形成したであろう衝突を数値モデルで扱った Pierazzo and Melosh[4]等があげられる。

地球上に形成されたクレーターの地質学的調査が発展したのは、人工衛星や航空写真等により地球上のクレーターを効率よく探し出すことができるようになったのも一つの理由だ。地球上に形成されたクレーターは天候や植生、プレートテクトニクスや火山活動により著しい風化を受けるので、発見されたクレータ

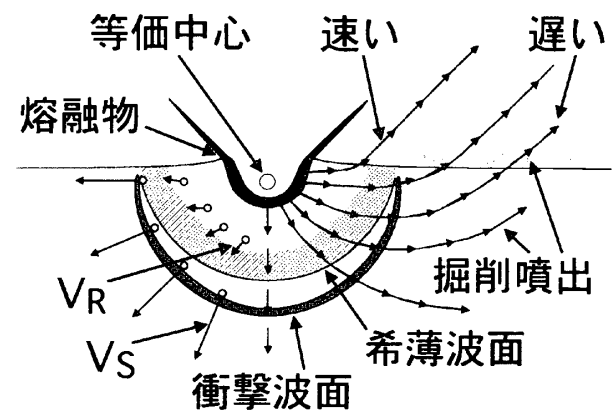


図3 掘削放出過程の模式図: 右半分に駆動された粒子の流線を、左に各々の位置での破片の速度を表した。濃い斜線が衝突で発生した衝撃波を、薄い斜線は飛翔体の背面で衝撃波が反射した希薄波である。等価中心は衝突によるクレーターと爆破によるクレーターの形が同じになるような爆発の中心地である。衝撃波に比べ、希薄波は厚く、形も少し浅型である。中心に近い位置からの放出は速く、離れるほど遅くなる。

のサイズや年代、発見場所には観測バイアスがかかっている。さらに、その後の地質活動によりクレーターが変形されることもある。しかしながら、実験室では再現できない大規模の衝突クレーターの内部構造を実際にボーリング調査や地質学、地震学的調査を行うなどして詳細に調べることができるのはそれらのデメリットを補って余りある大きな魅力である。例えば、Dressler and Reimold[5]などがあげられる。これ以外にも実験的手法による研究があり、モデル計算に必要なパラメーターや数式の決定に大きな役割を果たしている。しかし、今回の学会においては実験的手法を用いた研究の発表は、私のものを含め数えるほどしかなかった。現在まで行われてきた実験的研究の多くは状態方程式を求めるためのものか、砂のターゲットを用いた鉛直方向での衝突であり、それと火薬爆破によるクレーターとの対比である。弾性強度を持つ岩盤への衝突を考えると、岩石への衝突実験が必要であるし、斜め衝突は火薬爆破によるクレーター形成では近似できないものである。実際、石膏に対する衝突クレーター形成は垂直方向のものであっても、砂に対する爆発によって作られたクレーターとはかなり異なった様相を示している。よって、今一度、実験的研究を行う必要が高いのではないか。

## 4.講演内容

まず、世話役のHerrick氏がこの学会の趣旨とプログラム構成について述べた。1日目はまず議題を提案するオープニングセッションがあり、続いてモデル計算による研究を行うのにどのような物質特性が必要であるかを述べるセッションと全体討論が行われた。午後にはターゲットの物質特性とクレーター形成過程についての口頭発表があり、夜にはビールを片手に和やかな雰囲気ですポスターセッションが開かれた。2日目は衝突クレーター形成における熱の動きと、飛翔体の特徴についてのセッションで始まった。午後からは、

斜め衝突と形成された破片の分布についてのセッションと総合討論がもたれた。そして3日目には複雑な形状のクレーターの形成過程に関して熱く語られた後、午後には小惑星などの微小重力下でのクレーター形成についてのセッションがあり、最後の数時間は総合討論であった。

### 4.1 基調講演

オープニングセッションでは、衝突クレーター形成の教科書を著したMelosh氏が、理論に基づくモデル計算を用いた研究手法の紹介を行った。モデル計算の有利な点はやはり重力が支配的になるような大規模な衝突に関しても計算を行うことができること、そして、計算に含まれる任意の点での温度、圧力といった物質の状態を時間を追って知ることができることである。一方で、不利な点は、分割を細かくするとメモリーが足りなくなること、土台となる理論に間違いがあると尤もらしく見える嘘を出力してしまうことである。現在のコンピューターの技術は十数年前に比べると隔世の感であるが、それでもまだ、3次元で時間を追っての計算を行うとき、メッシュを細かくするとメモリーが不足するので、現在に至ってもメッシュの分割の仕方にも工夫が凝らされているようだ。衝撃波による物性の変化を計算するのに不可欠な状態方程式も時代とともに進化をしているのであるが、残念なことに地球科学的に興味のある実際の地層や多孔質物質に関するものは少ない。また、衝突初期の「接触と圧縮の段階」で発生するほどの高温高压での状態方程式は十分でない。さらに、同じ升目の中に鉄と氷が入るようなことになったら、それ以降、その升目をどのような状態方程式で扱えばよいかなども残された問題である。観測的手法、実験的手法、計算的手法のいずれも単独では限界がある。各々の手法で研究を行っているもの同士の議論と協力によってこそ、「衝突クレーター形成」という分野全体の発展が望めるのだ。と、Melosh氏は締めくくった。

続いて、Herrick氏が地球上のクレーターの地質学的観測から衝突クレーター形成を研究する手法につ

いて、「天然のちょうど良い実験室である」と述べた。地球上のクレーターの観測では、クレーターの外側では地層が擾乱を受けていないこと、クレーターの中央部ではより深部の地層が持ち上がってきていること、そして飛翔体とターゲットの物質がよく混じり合っているということなどわかった。また、地質学的研究によって、形成された衝突熔融体や、破砕物の量や分布を観測することにより、「衝突と圧縮の段階」の条件に制約を与えることができるのではないかと語った。

Simpleクレーター以外の「複雑なクレーター」に関してはまだ多くの疑問点がある。地球以外にできた複雑なクレーターに関しては、その形が標的となる天体の強度や重力に著しく依存しているとみられるが、納得できる説明はまだ今のところ得られていない。また、理論的研究を行う研究者の間で必ず仮定されている、「過渡的なクレーター」についても、その作り方、形状、そして崩れ方に関して疑問が呈された。

続いて、Holsapple氏がモデル計算的研究の立場から、衝突クレーター形成を計算する上でいかに状態方程式と構成方程式が重要であるかを述べた。衝突の極初期の接触と圧縮の段階においては、非常に高温高压が全体のクレーターと比べると小さい領域で、短時間発生する。一方で「掘削放出の段階」の終わりから「修正の段階」にかけては、低温、低圧の物質を扱わねばならない。そのためには、コンピューターのメモリーを上手に分配するコードが必要であるとともに、幅広い温度圧力状態における地質学的物質の状態方程式が必要となってくる。また、現実の天体表面は多孔質であることが多いが、この微少な空隙の扱いが状態方程式の上からも、コンピューターコードの作り方からも非常に難しい問題となっている。

Holsapple氏は、砂に対する衝突実験を行い砂の動きの断面図を見せてくれた。実験方法は、側面の一方がアクリル窓となった箱を目印となる粒子を入れた砂で満たし、このアクリル窓の極近くを真上から火薬銃で撃つ。というものである。衝突速度が遅いこと、アクリル板からの反射で衝撃波の形が多少変わって

いるであろうことなどつつこみどころはあるが、なかなか興味深い動画であった。なぜ砂を用いた実験かというと、Holsapple氏もそうであるが、モデル計算的手法を行う人の多くは、衝撃波によって砕かれた物質を砂と同じであると仮定しているからである。この実験において、衝突による砂の挙動は、砂の中に浅く埋めた爆薬を爆発させてクレーターを作ったときのものとほぼ等しい。ということである。

続いてSpray氏が、地球上のmulch ringクレーターの観測結果を述べた。様々な規模の破砕物や熔融物の貫入があり、大きなものでは人の大きさくらいの岩石が礫として熔融物に取り込まれた衝突角礫岩から、小さいものではmmスケールの割れ目に熔融物が貫入したものもあった。衝撃波により形成された断層は、岩石の破壊強度近くまで減衰した衝撃波の裾野が球面状ではなく、かなりでこぼこしたものであることを物語っていた。

クレーター中央丘の形成についても疑問が提示された。Central peakのあるクレーターの形成過程における「過渡的なクレーター」は「掘削放出」+「岩石と破砕物が弾性的に押し縮められる」で形成されたのではないだろうか。そして、クレーターの中央丘は岩石と破砕物の弾性的な跳ね返りと重力の効果の双方によって持ち上げられたのではないかと。

## 4.2 その他の講演

この日の午後以降のセッションにも、興味深い講演が多数あった。その中から目に付いたものをいくつか紹介させていただこう。

### (1) モデル計算による研究

より精度の高い「修正の段階」での挙動をモデル計算するために、「掘削放出の段階」とは別のコードを利用して「過渡的なクレーター」形成以降の崩壊のみを計算する発表もいくつかあった。「修正の段階」のみを扱うだけあって、今まで難しかった時間、空間のスケールの取り方に関する問題が解決されていた。熔融物の動向や、クレーター中央丘、peak ringの形成

される様子がコンピューター画像で手に取るように表された。しかし、これらの手法はいずれも「過渡的クレーター」の状態を最初から仮定したものである。

## (2) 観測的研究

地球の表面の2/3は海洋であるということから、海洋に対する衝突を扱ったモデル計算をOrmö氏ら3グループが発表した。Ormö氏はスウェーデンの海洋底クレーター、Lopckene craterでの地質学的調査も行った。

地質学的研究の中では地層の並び方や擾乱の程度、熔融物の量や分布、衝突破砕物の元の地層での位置、破壊の程度などが述べられた。クレーターの周囲には同心円状の逆断層があり、一度の引っ張り応力で生じたとみられている。大きなクレーターではこれらの断層がモホ面まで達しているものもある。

アルゼンチンの黄土地帯にある衝突角度が約9度という斜め衝突クレーターを発掘した発表もあった[6]。このクレーターは、空中で分解した岩石部分を含む隕鉄の集団によって形成されたもので、クレーターの形としては、エアロジェルに岩石を衝突させたものと同じように紡錘形の膨らみの奥に細いトンネル(トラック)があり、その先端に隕鉄が捕獲されているというものである。なぜこのような形になるのかはまだよくわかっていない。

風化してしまったクレーターを調べる場合、クレーターの直径に関する情報は、地層が擾乱を受け、岩石がダメージを受けた範囲に基づくものである。一方でモデル計算の研究者の間では直径といえば過渡的なクレーターの直径を指す。これらの間の相関に関しては意見の分かれるところである。現在掘削放出の段階を記述するのに用いられているz-モデルで記述されるクレーターの深さと実際に擾乱を受けた深さが一致しないようだという報告もあった。

## (3) 実験的研究

衝突クレーター形成と大量絶滅の関係を考えると重要となるものの一つに、衝突の冬といわれるものがある。これは、衝突クレーター形成の際に大気中に

まき散らされたダストやエアロゾルによって太陽光が遮蔽され光合成の停止や寒冷化がおこるというものである。この衝突起源のエアロゾルの発生量や組成分布を調べるためには「接触と圧縮の段階」で発生する高温高压のガスの組成や量を測定し、また計算する必要がある。この衝突発生ガスのその場観測を行った研究を杉田氏が行った。また、実際のチクスループクレーターレベルの大きさではどうなるであろうかという計算を大野氏が発表した。これらは[7]に詳しい。

同じく接触と圧縮の段階で放出される固体微粒子からなるjettingに関しては、一件の発表で衝突方向の下流に置いた金属板への衝突があることが示されたにとどまった。やはり、高速度の微粒子の直接観測は難しい。Melosh氏を始め何人かの研究者が飛翔体の衝突後の運命について興味を持っていた。すべて熔けるのか。どれくらいの大きさの破片がどれくらいの速度で飛び出すのか。また、その破片の受ける衝撃の程度などである。実験室で取り扱える飛翔体の大きさは高々数cmなので、このようなテーマを直接確認することは困難である。

Anderson氏の研究では、レーザーカーテンを使い、砂のターゲットから飛び出す粒子の速度を自動的に測る。という便利な実験装置が登場し、「掘削と放出の段階」の円錐状のイジェクタの速度が示された。初期と後期の放出の比較から、斜め衝突では、z-モデルで使用している等価中心の位置が時間とともに移動しているらしい。ということがわかった。

今回私が発表したものは、石膏に対する衝突クレーター形成における「掘削と放出の段階」での破片速度の測定結果である。「掘削と圧縮の段階」の初期には、1mm以下の破片が円錐状に放出される。垂直衝突の場合、この円錐面がターゲット表面となす角は37.5度から45度が最も多く、破片の速度は測定できたもので60m/sから180m/sを中心とする。この円錐状の放出の後に、ひとつひとつ追跡することが可能な速度、大きさのSpall破片が飛び出す。これらの破片は衝突から5msec以内にターゲット表面を離れてお

り, また, 中村 and 藤原 (1991) [8] に述べられたのとよく似た速度-質量分布を示す. 一方で, 破片速度 0.6m/s から 10m/s と遅く, 直径が 2mm 以下の小さい破片がかなりの数, ほぼ垂直方向に放出されることが求められた. これらの破片がターゲットから離れるのは 5msec 以降であり, 円錐状の放出や, Spall 破片と較べて, 有意に遅い時刻での放出である. このことは, 少なくとも石膏に対する衝突の場合,  $z$ -モデルでは表しきれない放出があるということである. そしてこの遅くて小さな破片は小さな天体への衝突レゴリス形成を考える上で非常に重要なのである.

## 5.まとめ

この学会を象徴する一つの文章は, "Models are fine as long as you don't believe in them" であろう. これは, 学会中の討論でのある地質学者の発言である. これはとても重要なことである. モデル計算技術の進化は目を見張るものであり, それにより出力される画像はモデル計算を行う研究者自ら述べるように, 美しく, いかにも尤もらしい. しかし, これらの計算の中には, 数多くのまだ数値化されないパラメーターが隠れている. そして, 衝突クレーター形成に関するスケールリング則も未だ完全とはいえない. それゆえ, これらの大きなスケールの衝突においては, 地球上のクレーターの地質学的データとよく照らし合わせることで, 用心深くモデル計算の結果を評価することが重要であろう.

本学会に寄せられたアブストラクトおよび暫定的なプログラムは <http://cass.jsc.nasa.gov/meetings/impact2003/> に掲載されている.

## 6.謝辞

学会で皆が使用した OHP を一つの収録としよう. という企画がありました. 本レビューを書くにあたっていろいろな参考にさせていただきました. このよう

なことを企画したこの学会の主催者 Herrick 氏と Pierazzo 氏, そして各々のスライドの著者方にこの場を借りて感謝します. 私, 小野瀬の発表分に関しては宇宙科学研究所, 藤原顕教授との共同研究であり, ご指導に感謝します. 本稿の査読をし, 有意義なご指摘を下さった杉田精司博士に感謝します. 筆者の不勉強故, 他分野の紹介において不十分な点も多いですが, ご容赦くださるようお願いいたします.

## 参考文献

- [1] Melosh, H.J., 1989, Impact Cratering
- [2] Gault, D.E. et al., A primer in lunar geology 137
- [3] 藤原顕, 1997: 地球惑星科学 12 卷「比較惑星学」, 87
- [4] Pierazzo and Melosh, H.J., 2000, Icarus 145, 252
- [5] Dressler, B.O., and W.U.Reimold, 2001, Earth-Science Reviews 156, 1-4, 205
- [6] Cassidy, W.A., and M.L.Renard, 1996, Meteor. Planet. Sci. 31, 433
- [7] 杉田精司, 大野宗祐, 2002, 日本惑星科学会誌, 11, 1, 42
- [8] 中村昭子, 藤原顕, 1991, Icarus 92, 132