

衝突放出物の速度分布

山本 聡¹

1. 重力支配域における衝突現象

1.1 太陽系における衝突現象と放出物の速度分布

太陽系内の固体天体の表面では、天体の運命を左右するような大規模な衝突から、メテオロイドやダストによる絶え間ない衝突までいろいろなものが衝突を繰り返している。これらの衝突で生成されるクレーターからの放出物のうち、放出速度が小さいものは母天体に戻り、再び表面を覆う。一方、放出速度が天体の脱出速度を越えるものは、惑星間塵や惑星周りでダストリングの供給源となりうる。それゆえ、天体上での衝突堆積物の分布・表層衝突進化の研究や、惑星間塵・ダストリングの生成率等の研究において、放出速度分布が重要なデータとなる。ここでは、この衝突放出物の速度分布について話をする。

1.2 物質強度支配域と重力支配域

本題に入る前に、予備知識として物質強度支配域と重力支配域という言葉について説明しておく。これまでの天体衝突の研究において、物質強度支配域と重力支配域という二つのケースにわけて研究が進められてきた([1]参照)。簡単にいうと、前者はクレーター生成過程において重力が重要な役割を果たさず、物質強度によって支配される場合であり、後者はその逆に重力が重要となる場合である。具体的に述べると、岩石質ターゲットを用いた実験室スケールの衝突実験は物質強度支配域に相当し、

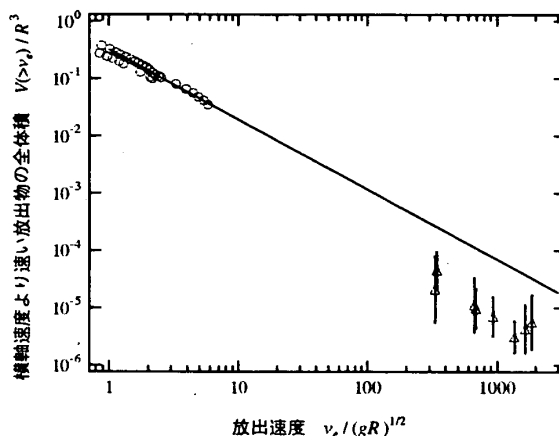


図1：重力支配域における衝突放出物の速度分布。横軸は放出速度で、縦軸はその速度よりも速い粒子の全体積になっている（横軸、縦軸ともに規格化されており、無次元量となっている。詳しくは本文2.3節を参照）。○はHousen et al. [6]のデータで、△はYamamoto and Nakamura [7]のデータ。実線は低速度放出物データを基にして得られたスケーリング則[6]。

大きさが数100m～kmを越える大きいクレーター[2]やレゴリス層のような構成粒子間の力が微弱で、強度が極めて低い粒子層における衝突は重力支配域に相当する。

1.3 これまでの研究と問題点

さて、衝突放出物の速度分布の研究においても、この二つのケースについてそれぞれ研究が行われてきた。物質強度支配域の場合は、スケーリング則（特徴的なスケールの存在しない系で一般的にみられる法則をいう。惑星科学では、実験室スケールで得られた結果を天体スケールに応用する為に用いられる。詳細説明は[1], [2]等を参照)に基づいて幾つかデータがまとめられている[3, 4, 5]。一方で、粉

¹ 東京大学大学院新領域創成科学研究科

体層を用いた衝突実験(重力支配域)の場合, 個々の粒子について速度を測定することが難しいため, 速度分布のデータは乏しいのが現状である. これまでの結果をまとめると図1のようになる[6, 7]. Housen et al.は低速度(放出速度が数m/s以下)放出物のデータに基づいて, 速度分布の冪分布指数を-1.22と見積もった[6]. 高速放出物(>300m/s)についてはYamamoto & Nakamura[7]が測定を行った. 彼らの結果とHousen et al. [6]のデータから補外した値(図1の実線)とを比較すると, その差は一桁内であった. これは, 低速度データから得られた-1.22の冪指数が300m/s以上の速度領域でも成り立つように見える結果であった.

しかし, 放出物速度には最大速度が存在するはずである. その最大速度はプロジェタイル衝突速度の関数となっており, 低速度衝突では衝突速度の約20%, 1km/s以上の高速衝突では衝突速度の1~8%であると報告されている[8](その最大速度をHartmann Cutoff速度(HC速度)と呼ぶことにする). さて, このHC速度を考慮に入れて, 図1を見直すと, 一つ矛盾が生じる. というのも, Yamamoto & Nakamura [7]の実験では, 衝突速度が約4km/sであり, この場合HC速度は0.04-0.3km/sと見積もられる. Hartmann [8]の結果が正しいとすると, 0.3km/sより速い粒子は測定されないはずである. しかし, 彼らが測定した粒子の速度は0.3km/s以上であった. しかも, 多数の粒子が測定され, 上記のように, その量は-1.22の冪指数のデータから補外した値と比べても一桁以内であった[7]. いったいこれは, どういうことなのだろうか?

1. 4 斜め衝突効果の重要性

この矛盾点を解決するには, 両データの中間点, つまり放出速度が数10~数100m/sについて調べるのが一つの方法であろう. しかし, 実は上記の実験では, それぞれプロジェタイルの衝突角度が違う

のである. 低速度側のデータ[6, 8]は垂直衝突の実験結果を基にしているのに対し, 高速度のデータ[7]は, 斜め衝突(表面からの衝突角度30度)の実験データを基にしていた. 結論から先に述べると, 上記の矛盾の原因はこの「衝突角度の違い」にあったのだ. そこで, 重力支配域における放出速度分布(放出速度が数10~数100m/s)について調べる為に, いろいろな衝突角度で衝突実験を行うことにする.

2. 斜め衝突実験の紹介

2. 1 実験方法

図2に本研究で用いた実験装置の写真を示す. 図3に概略図を示した. 真空チャンバーの5方向(表面からの角度で, 15, 30, 45, 60, 90度)にポートが設置されており, それぞれにレールガンをはめ込むことで, 垂直衝突および斜め衝突実験が可能となっている. ターゲット粉体としてガラスビーズ(粒径 $220 \pm 30 \mu\text{m}$)を用いた. これをたらい(直径20cm, 深さ5cm)に入れ, 図2にある真空チャンバーの中に置く. 実験時にはチャンバーの中は90Pa以下にセットされるため, 空気抵抗による放出物の減速は無視できる. レールガンを用いて, プロジェ

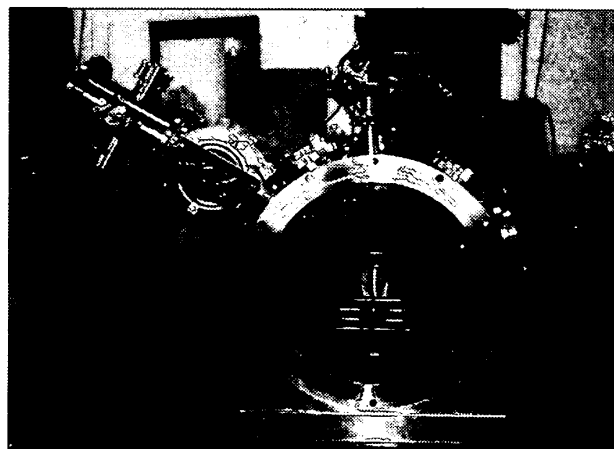


図2: 衝突実験装置を真横から見た写真. 中央チャンバーから左斜め上に飛びだしている部分が衝突銃(レールガン)である. この図ではレールガンは水平から斜め30度の方向に設置されている.

クタイトル(重さ0.2gの銅ワイヤー)を加速する(レールガンについては[9]参照). 衝突速度は216~272m/sであった(表1).

放出粒子の速度を推定する為に, 薄いアルミフォイルを用いて速度選別を行った. この方法で如何にして粒子の速度分布を得るのだろうか? その原理は次の通りである. このアルミフォイルをあらかじめターゲットの周りに張り巡らしておく. プロジェクタイトルがターゲットに衝突するとクレーター形成に伴い, 多数の粒子が放出され, 周りのアルミフォイルに衝突する. この時, ある程度高速の粒子はアルミフォイルを貫通する(ここで, アルミ上に孔が空けば, 貫通と定義する. 必ずしも粒子自体がアルミを通過する必用はない). 粒子のサイズを一定にしておけば, アルミを貫通するのに必要な速度(アルミ貫通速度)より速い粒子の総数を知ることが出来る. アルミ貫通速度については, 別の実験から見積った(詳しくは[10]). 今回は厚さ15 μm のアルミフォイルを用いた. この場合, 粒径220 μm 粒子の貫通速度は, 約72 \pm 5m/sと見積もられている[10]. 実験後,

衝突角度 [度]	衝突速度 [m/s]	クレーター直径 [cm]
90	272	15.0
90	243	14.4
90	248	14.5
90	250	14.5
60	260	15.4
60	229	14.8
60	223	14.8
60	216	14.7
45	248	14.1
45	236	13.9
45	248	14.9
45	240	14.7
30	258	12.0
30	245	11.9
30	258	13.4
30	243	13.2
15	258	11.9
15	219	11.2
15	238	11.2
15	245	11.3

表1: 実験条件

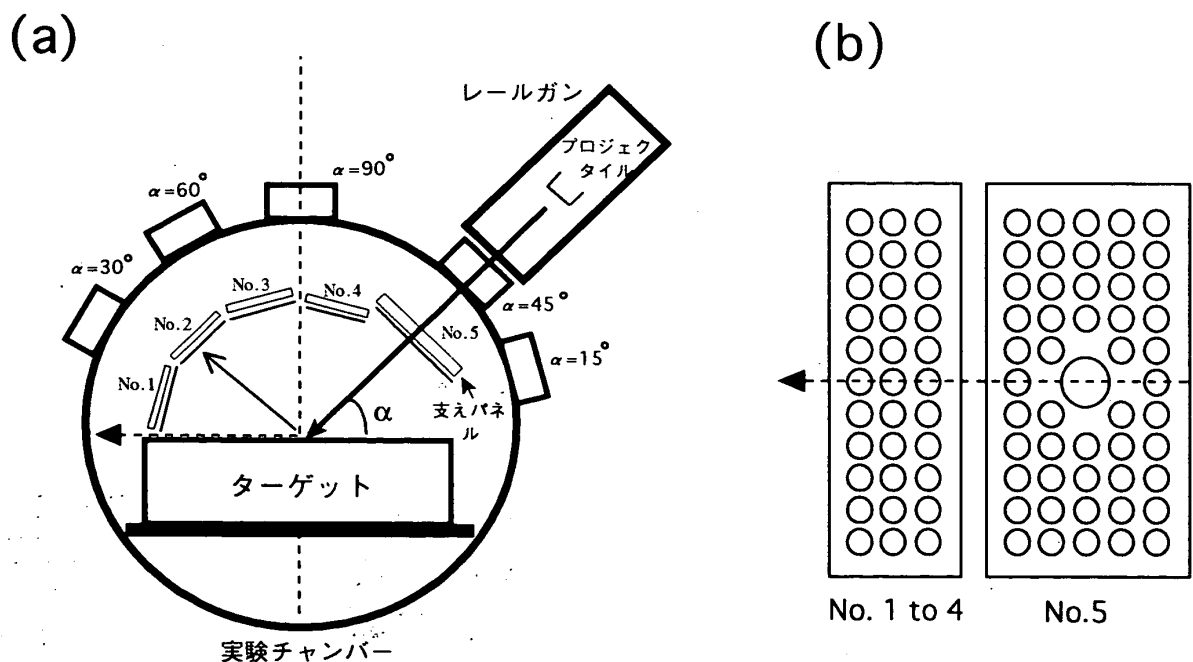


図3: 実験装置の概略図. (a)は実験装置の断面図. この図でレールガンは衝突角度45度方向に設置されている. ターゲットの周りには, 5枚の支えパネル(厚さ6.5mmのアルミ板)が設置されている. パネルのターゲット側には, 厚さ15 μm のアルミフォイルが張られている. (b)は支えパネルを上から見た図. 各支えパネル上には開口部(直径1cm)が33個(No.5パネルについては50個)存在する. 衝突放出物はこの開口部の上に張られたアルミフォイルによって測定される.

回収したアルミフォイル上の貫通孔の個数を数えることで、72m/sより速い粒子の総数が分かるというわけである。

2. 2 実験結果 ～貫通粒子の個数～

実験後に回収したアルミフォイルの例を図4に載せる。これは回収フォイルの後方から光をあてて実体顕微鏡で撮像したものである。4つの貫通孔が写っている。これらの画像を解析することで、アルミ上の貫通孔の個数分布を導き出す。ところで、アルミはターゲットの周り全方向に完全に張り巡らされている訳ではない。またプロジェクトイルの衝突角度毎にアルミフォイルの配置が異なるため、それぞれの場合で

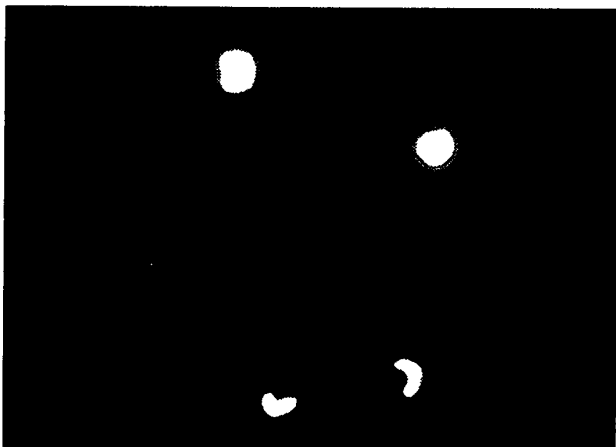


図4：アルミフォイル上の貫通孔の画像。この図では4つの貫通孔が見られる。アルミフォイルの下方に光源をセットし、実体顕微鏡にて撮像。スケールは画像の横幅が約4mm。

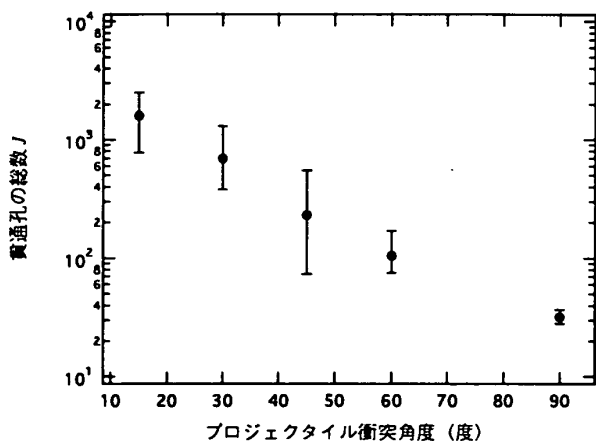


図5：アルミ上での貫通孔の総数J。横軸はプロジェクトイルの水平方向からの衝突角度。

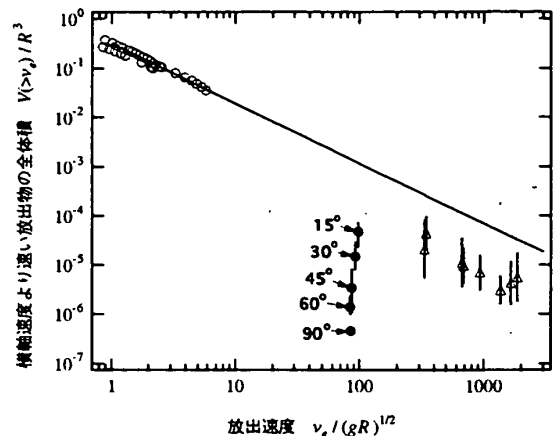


図6：図1の速度分布データに今回得られたデータ(●印)を足したグラフ。図中の数字はプロジェクトイルの衝突角度(ターゲット表面から測定)を示している。○はHousen et al. [6]のデータで、△はYamamoto and Nakamura [7]のデータ。実線は低速度放出物データを基にして得られたスケーリング則[6]。

支えパネル上の開口部の立体角補正も必要である。これらを考慮して、アルミ上における貫通孔の空間分布を導出した(これ以上の詳細説明と空間分布についての議論は、ここでは割愛する。詳しくは[10]参照)。最終的に得られた空間分布関数を全立体角方向に積分することで、全方向に対する貫通孔の総数Jを見積った。図5にその結果を示す。横軸はプロジェクトイルの衝突角度である。各衝突角度について4回ずつ実験を行った(表1)。その統計誤差をエラーバーとして表示した。全体的な傾向としてプロジェクトイルの衝突角度が浅くなるにつれて、アルミ貫通孔の総数が増加するという傾向が得られている。垂直衝突では、貫通孔は全体で30個前後であるのに対して、15、30度の斜め衝突の場合は、数100～数1000個の貫通孔が見つっている。つまり、72m/s以上の高速粒子の総数は、プロジェクトイルの衝突角度に大きく依存するということが明らかとなった。

2. 3 これまでの研究データとの比較

次に過去に得られた速度分布との比較を行おう。Housen et al. [6]によれば、重力支配域における衝突

放出物の速度分布は、次のようなスケーリング則で表される。

$$\frac{V(>v_e)}{R^3} = K \left(\frac{v_e}{\sqrt{gR}} \right)^{-\varepsilon} \quad (1)$$

ここで、 g は重力加速度、 R はクレーター半径である。専門外の読者のために、式(1)の無次元量について端的に述べると、左辺は速度 v_e より速い速度で飛び出す放出物の総体積 $V(>v_e)$ と、全放出物の体積(総掘削量) R^3 の比になっており、また右辺の括弧の中は v_e と重力ポテンシャル gR の平方根(クレーターの底から地上に達するのに必要な最低速度程度)の比となっている。係数 K 、 ε は実験データより決まる値である。低速度(数m/s以下)の放出物の実験データから、 $K=0.32$ 、 $\varepsilon=1.22$ と見積もられている[6]。ここでは粒子を直径 $s=220\mu\text{m}$ の球形とし、 $V(>v_e)=J \times \pi s^3/6$ とした。 $v_e=72\text{m/s}$ での全個数 J については、図5の結果を用いる。式(1)において、クレーター半径 R について知る必要がある。しかし、図3の測定方法では、実験後に直接 R を測定するのは難しい。というのも、大半の放出物はアルミを貫通せずターゲット粒子層に戻り、クレーターの上に覆いかぶさってしまう。そのため、クレーターが埋もれてしまい、見掛け上 R が小さく測定されるからである。そこで、プロジェクトイルの衝突速度から生成クレーターの大きさを見積もることにした。衝突速度とクレーターサイズの関係は別実験から明らかにした[10]。その結果を用いて、各条件でのクレーター直径($=2 \times R$)を見積もった(表1)。

式(1)のスケーリング則と上記データを用いて、 $V(>v_e)/R^3$ の値を $v_e=72\text{m/s}$ の場合について見積もった。結果を図6に示す。衝突角度が浅くなるにつれ、 $V(>v_e)/R^3$ が単調増加している。衝突角度15度と90度の場合では二桁も値が異なる。これより速度分布が衝突角度に大きく依存することがわかる。しかし、他のデータセット[6, 7]と比較した時、一瞥しただ

けではこの図を総合的に理解するのは容易でない。この一見整合性の無いように見えるデータの集まりをどのように理解したら良いのだろうか？

まず、垂直衝突の場合について見てみる。Housen et al. [6]の速度分布($K=0.32$ 、 $\varepsilon=1.22$) (図6での実線)で、横軸=80付近での値と比べて、今回の90度のデータは約4桁低いことがわかる。今回の実験では、衝突速度が約200-300m/sであったため、HC速度(1km/s以下の衝突では約20%)は約40-60m/s程度と見積もられる。一方、今回の条件でのアルミ貫通速度は72m/sであった。つまり、ほとんどの粒子は貫通速度より遅い為、アルミフォイルを貫通できなかった。ところで、HC速度は最大速度と定義されているにもかかわらず、図6ではHC速度より高速粒子が測定されている。HC速度は放出速度分布の高速付近を記述する一種の統計量であり、統計的揺らぎが存在する。例えば、プロジェクトイルのエッジ部分からjet的に飛び出す粒子などによって、HC速度よりも速い粒子が存在する可能性がある。しかし、その個数も全体からみれば無視できる量であった。これが、衝突角度90度のデータが非常に小さな値になった理由であると考えられる。

次に衝突角度30度の場合について、Yamamoto & Nakamura[7]のデータとの比較を行ってみる。両データの $V(>v_e)/R^3$ の値は、非常に近い値をとっており、両者は一つの速度分布でつながっているように見える。Yamamoto & Nakamura [7]のデータおよび今回の測定速度領域は、HC速度より速い領域であった。それにもかかわらず多数の放出粒子が観測されている。斜め衝突の場合、HC速度より高速で放出される粒子集団が存在するようだ。これを別の方法からも確認できないだろうか？

2.4 高速カメラによる撮像

そこで今度は、斜め衝突における高速放出集団の存在について、高速度カメラを使って検討してみ

る。図7, 8は、高速度カメラを用いて、クレーターリングの様子を真横から撮像したものである(この測定実験ではアルミフォイルはセットしない)。各画像の下に数字は、プロジェクトイルが衝突した瞬間(図7, 8の左最上段の図)からの相対時間(40 μ s間隔)である。それぞれの図は、合計15枚の連続画像からなっている。放出物がクレーターの端の部分から斜め上方に広がり、放出物カーテンを形成している様子がとらえられている。放出物カーテンの先端部分の動きを追うことで、放出物の最大速度(すなわちHC速度)を測定することができる。

垂直衝突の場合(図7)、その速度は約50 m/sであり、プロジェクトイル衝突速度(205 m/s)の約24%であった。この値はHartmann[8]の報告した20%とほ

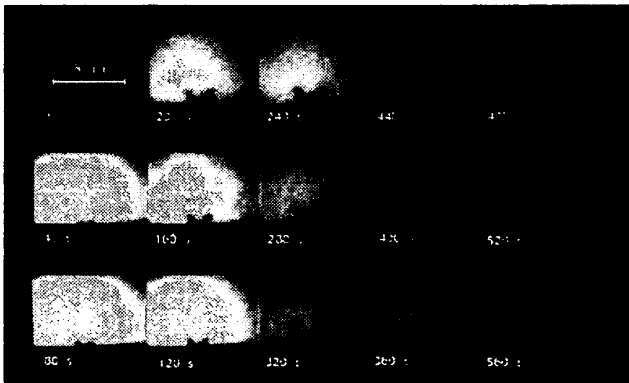


図7:クレーターからの放出物の15枚連続イメージ(高速度カメラにより撮像[10])。この図は、プロジェクトイルの垂直衝突の場合で、衝突速度は205m/s。プロジェクトイルが衝突した瞬間(左最上段のイメージ)からの相対時間(40 μ s間隔)を各イメージの下に記している。最初のイメージにあるスケールは50mmに相当する。

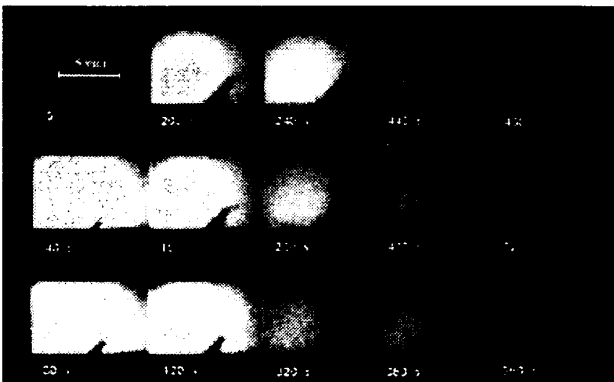


図8:斜め衝突(水平方向から15度)の場合の連続イメージ。プロジェクトイルは斜め左側から衝突。衝突速度は197m/s。

ぼ同じ値である。この50 m/sという値はアルミ貫通速度(72m/s)を下回ることに注意されたい。つまり、ほとんどの粒子がアルミを貫通するのに十分な速度を持っていなかったわけである。実際、アルミフォイル上の貫通孔は30個以下であった(図5)。今回の結果により、HC速度の存在をアルミ貫通およびカメラの両面から確認できた。

一方、斜め15度衝突の場合(図8)、先端速度は126m/sであった。これはプロジェクトイルの衝突速度(197m/s)の約64%であった。つまり、多くの粒子が72m/sより高速であった為、アルミを貫通できたわけである。実際に、アルミフォイル上に1000個程度の貫通孔が確認されている(図5)。このように斜め衝突の場合、従来のHC速度よりも速い速度で放出される粒子集団(高速放出物集団)の存在を確認できた。

2.5 まとめ ～通常放出物と高速放出物～

今回の結果から、次のようにまとめることができる。垂直衝突の場合、放出物の速度分布は、Housen et al. [6]の速度分布(-1.22の冪分布)で表わされる(これを通常放出物と呼ぶ)。その分布はHC速度まで続き、HC速度より高速領域では基本的に放出粒子は存在しない(プロジェクトイルのエッジ部分からjet的に飛ぶ出す粒子などによって、幾分速い粒子が存在する可能性がある。しかし、今回の測定によると、その個数も30個程度であったので全体からみれば無視できうる量である)。一方斜め衝突の場合、HC速度よりも速い粒子集団(高速放出物集団)が、プロジェクトイルの進行方向側(下方側)に放出される。プロジェクトイルの衝突によってターゲット表層付近の粒子が効率良く加速され、高速度で放出されるのであろう。その高速放出物の総量は衝突角度に依存し、表面からの角度が浅くなるにつれて総量が増加する。斜め15, 30度の結果では、Yamamoto & Nakamura [7]のデータ(30度衝突)と同程度のフラックスが得られており、これらのデータセ

ットはHC速度より高速領域に Housen et al. [6]の速度分布とは異なる速度分布を形成すると予想される。このように、粉体層からの速度分布には二つの放出物(通常放出物と高速放出物)の集団が存在することが今回の測定より明らかにされた。

3. 応用 ～月起源ダスト～

今回のデータは、固体惑星・衛星上で起こる重力支配域の衝突現象(大規模スケールやレゴリス層)における衝突放出物の研究(衝突堆積物分布, 二次クレーター, レゴリス進化等)に応用できる。また, 小天体からの惑星間空間へのダスト供給や惑星周辺のダストリング粒子の供給量などの定量的見積もりにも応用される。しかし, これらの研究を行う上では図6のデータはまだ不十分である。というのも, 速度に対して一点しかデータが得られていないため, あと数点データを得ないことには速度「分布」を定量的に明らかにしたとは言えないからだ。また, 図6のように衝突角度毎に分布が異なるようでは, もはやスケール則としての適用限界がきている。プロジェクトイルの衝突角度やHC速度を考慮した, シンプルな分布で表される新しいスケール則が必要である。今後これらのデータ取得を行い, 新しいスケール則の定式化を行いたい。

しかし, 現時点のデータからでも得られる新しい知見もある。最後に, その一例として, 月からの衝突放出物(月ダスト)について述べたいと思う。メテオロイドやダストの絶え間ない衝突により, 月面上では絶えず小さいながらもクレーターが形成され, 同時に大量のダストが放出されている。これらの放出物(月ダスト)が月の脱出速度を越えていれば, 月の重力圏を出て地球に降り注ぐ可能性がある。月ダストは地球大気突入にさいして, 彗星などの月以外の起源からのダストと比べて, 生き残る可能性が高いと考えられている[11]。地球上層大気への月ダストの寄与を定量的に検討する上では, クレーターから

の放出物のうち, 月脱出速度を越える割合を知る必要がある。それには, 今回のテーマである放出速度分布が重要となる。従来の月ダストの研究では, 月表面を堅い物質と仮定し(物質強度支配域に相当), 衝突現象や放出物の生成について考察されてきた。その結果によれば, $1\mu\text{m}$ より大きな粒子は月を脱出できないとされてきた[e.g. 11]。しかし, 実際の月面はレゴリス層で覆われている。この場合, 今回の重力支配域での速度分布のデータから何が言えるのだろうか?

垂直衝突の実験データに基づいた場合, 月ダストは月を脱出しないということになる。月に定常的にぶつかるメテオロイドの平均衝突速度は約 20km/s と報告されている[12]。この場合, HC速度(1km/s 以上の高速衝突の場合, 衝突速度の1-8%)は, $0.2\text{-}1.6\text{ km/s}$ であり, 衝突放出物のほとんどは月重力圏を脱出できない(月脱出速度は約 2.4km/s)。しかし, 実際の衝突は様々な角度でおこる。上の結果で見たように, 斜め衝突の場合HC速度よりも高速の放出物集団が放出される。それゆえ, 月を脱出するレゴリス粒子が多数存在することが予想される。例えば, 図8の結果から最大速度を衝突速度の64%と仮定すると, 放出最大速度は約 13km/s となる。この場合, ミクロンサイズ以上の粒子でも月重力圏を脱出する可能性がある[13]。また, 図6で斜め30度衝突のデータ[7]を高速度放出物の速度分布として見積もった場合, 月からの放出量は約 $3 \times 10^4\text{kg/年}$ と見積もられる(詳しくは[13])。この量は月表面を堅い物質と仮定した場合の約20倍の量である。このような見積もりから, 比較的サイズの大きな月ダストが地球周囲に多量に放出されていると予想される。それ故, 地球成層圏で回収されるIDPs (Interplanetary Dust Particles)の中に, 月起源ダストが多く含まれる可能性が出てきた。従来考えられてきたよりも, 月からのダストを「重んじる」必用がありそうだ。

謝辞

本研究の要となる衝突銃の開発と実験実施にあたり、北海道大学・低温科学研究所の香内晃さん、渡部直樹さん、荒川政彦さんには、多大な協力を頂きました。また、装置本体の製作において、同研究所技術部の新堀邦夫さん、中坪俊一さん、石井弘道さんにも多大な技術的サポートをしていただきました。また、東京工業大学の榎森啓元さんには、原稿を査読していただき有益なコメントを頂きました。これらの方々に対して、ここに感謝を述べたいと思います。

参考文献

- [1] 藤原顕, 1997: 地球惑星科学 12 卷「比較惑星学」, 87.
- [2] Melosh, H. J., 1989: *Impact Cratering: A Geologic Process*. Oxford Univ. Press, New York.
- [3] Gault, D. E., Heitowit, E.D., 1963: *Proc. 6th Hypervelocity Impact Symp.* 2, 419.
- [4] Housen, K. R., 1992: *LPSC XXIII abst.* 555.
- [5] 道上達広, 他, 2000: *遊星人* 9, 186.
- [6] Housen, K. R., et al., 1983: *J. Geophys. Res.* 88, 2485.
- [7] Yamamoto, S., Nakamura, A. M., 1997: *Icarus* 128, 160.
- [8] Hartmann, W. K., 1985: *Icarus* 63, 69.
- [9] Sugi, N., et al. 1998: *Geophys. Res. Lett.* 25, 837.
- [10] Yamamoto, S., 2002, *Icarus* 158, 87.
- [11] Yamamoto, S., Mukai, T., 1996: *Physics, Chemistry, and Dynamics of Interplanetary Dust.*, ASP Conf. Series 104, 47.
- [12] Grün, E., et al., 1985: *Icarus* 62, 244.
- [13] Yamamoto, S., Nakamura, A. M., 2000: *Astron. Astrophys.* 356, 1112.