

論文内容の要旨

石膏に対する斜め衝突クレーター形成において発生する破片の 速度質量分布：2つの破片群の定義とその放出機構

(Mass-velocity distribution of fragments in oblique impact
cratering on gypsum:

Two groups of fragments and their ejection mechanisms)

氏名 小野瀬直美

固体表面を持つ天体の表面に無数に存在するクレーターは、これらの天体の表面が衝突により変化し続けてきたことを物語っている。衝突により砕かれ放出された岩石が、再び天体表面に降り積もることができれば、その表面に衝突クレーター形成由来のレゴリスが形成されることになる。小型の小惑星のように自己重力の小さな天体での衝突レゴリス形成をはじめとする天体表面の進化を考えるにあたっては、衝突クレーター形成によって放出される破片の速度と質量の分布を、遅い破片にも着目して求めることが必要である。しかし、多孔質固体に対する衝突クレーター形成実験における破片速度の計測例はまだ少なく、破片の放出に関するモデルも、クレーター周縁部から放出される Spall 破片に対するものしかない。

本研究では石膏 target に対して 4 km/sec で直径 7 mm の Nylon 球を 0~60 度で衝突させて crater 形成実験を行い、発生した破片の速度、target 表面からの放出時刻、そして破片の初期位置を高速度カメラの画像を用いて測定した。これらの破片は、放出時刻、速度、ならびに初期位置より、衝突の初期に放出される Spall 破片を中心とする「早期放出破片群」と、やや遅れて target 表面と垂直方向に数多く放出される「後期放出破片群」とに分けることができる。(図. 1) これらのうち、早期放出破片群は、Melosh (1984) に述べられている Spall 破片に対応すると考えられる。一方で、後期放出破片群は本研究で初めて識別された。後期放出破片群の特徴は、衝突から 5 msec 以降に、crater 中心にある楕円形の pit (深さ 24 mm、半径 13 mm) から、放出速度 12 m/s 以下で、target 表面から垂直に、多数の細かい破片が放出されるというものであり、これらを、Z-model (eg. Maxwell 1973, 1977) などの既存の理論で説明することは困難である。

後期放出破片群あるいはこれに相当する比較的低速度でターゲット表面と垂直な方向に放出される破片が見られるのは、石膏に対するクレーター形成のほか、玄武岩に対する衝突クレーター形成においてであり、砂に対する衝突クレーター形成や、ターゲット底面が破壊されるような衝突においては、これに相当する破片の放出は認められなかった。従って、後期放出破片群の放出においては、衝突により発生した衝撃波に対するタ

ターゲットの弾性的応答が重要であることが示唆される。

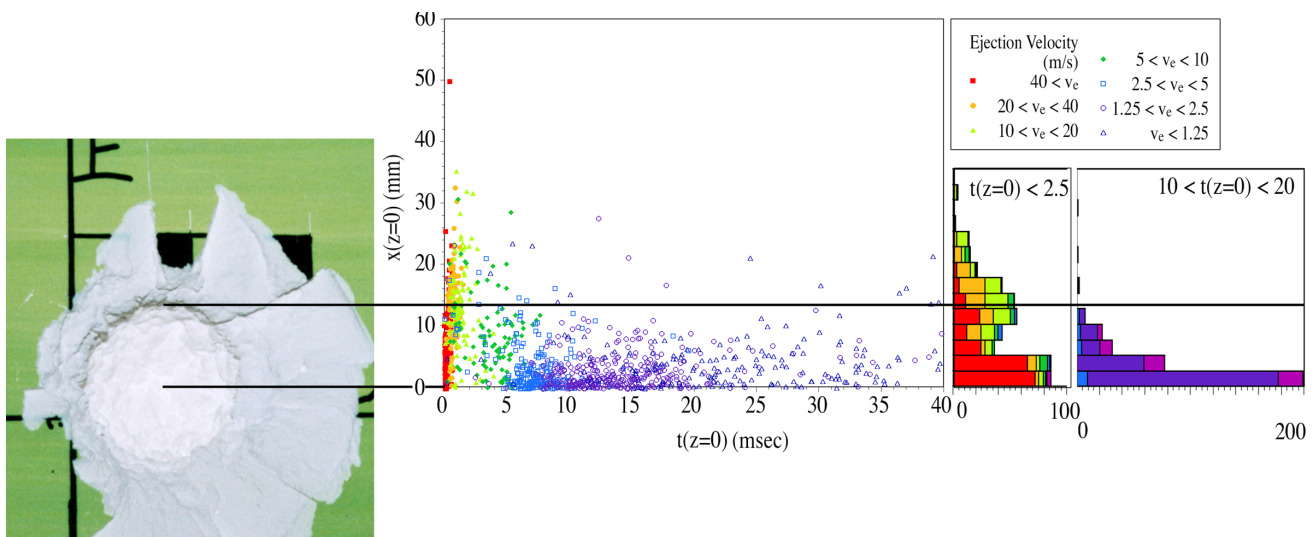
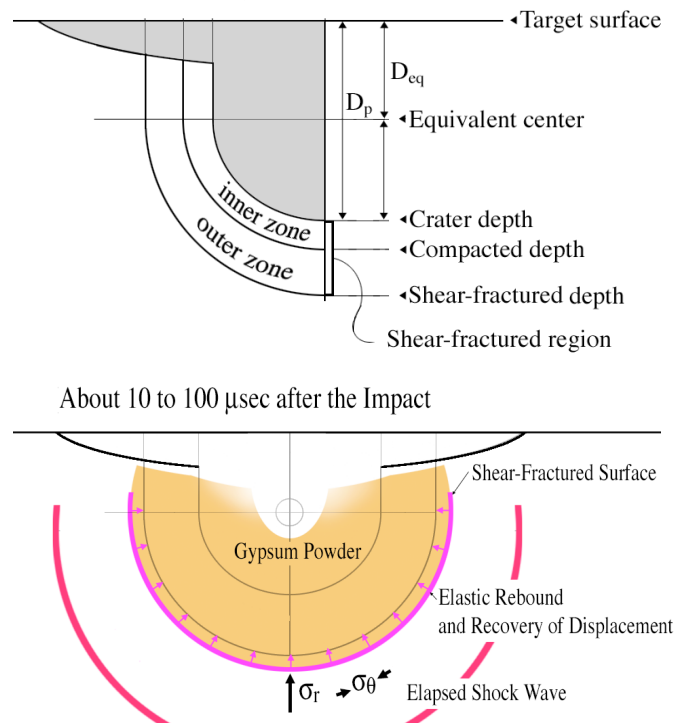


図.1 左から、石膏に対する 4.2 km/sec の垂直衝突により形成されたクレーター、破片の軌跡から推測される破片がターゲット表面を離れた時間と初期位置、放出時刻ビンごとのヒストグラム

衝突後の target を飛行体の弾道を含む平面で切断すると、衝突により形成された crater と、それを取り囲む剪断破壊かつ圧密された石膏の層、さらにその外側に剪断破壊のみされた石膏の層が見られる。これらの剪断破壊された領域の外側には、数本の radial crack はあるが比較的ダメージが少なく hoop stress を支えることができる領域が存在する。これらの領域の境界は、12mm の深さの点を中心とするほぼ同心円状に分布している。したがって衝突により形成された等圧核の中心は target 表面から 12mm の深さにあり、衝撃波はここから放射状に伝播し、中心から半径約 20mm にある破壊強度を持つ領域と持たない領域の境界（以後 SF 面と呼ぶ）において、石膏の圧縮破壊強度（12MPa）まで減衰したと考えることができる。

本研究においては、crater を取り囲む比較的ダメージの少ない target 物質の衝突に対する弾性的な振る舞いによって後期放出破片群が放出された可能性を考える。衝突により発生した弾性波が SF 面に垂直外向きに作用することにより、SF 面よりも外側にある石膏は周方向に引っ張り応力を受け、弾性歪みが生じる。弾性波の通過後 SF 面に外力が加わらなくなると、target に加えられた周方向の弾性歪みの回復に伴い SF 面は中心に向かう速度を持ち、その内側に存在する剪断破壊された石膏を加速する。石膏粉に加えられる加速度のうち中心軸に向かうものは互いに打ち消し合い、残った target 表面に垂直な速度成分により石膏粉が放出され、後期放出破片群として測定されたとする。（図. 2）衝突時における Crater 底の弾性的回復は、カナダの Charlevoix crater の観測においても示唆されている(Dence 2004)。また、Kadono et al. (2005)においても、低速度の衝突破壊によって放出される破片が、弾性エネルギーを保持していることが 図.2 上：target 断面、下：弾性的応答の模式図示唆されている。



本モデルでは、第一次近似として SF 面を代表する半径 20mm の球形の空洞を持つ無限弾性体を考え、

この球空洞の表面に内側から外側に向かって圧力 10MPa、継続時間 3 μ sec の弾性矩形波が作用すると仮定し、SF 面の変位と速度を Green 関数を用いてもとめた。実際の crater 形成では SF 面の内側には剪断破壊された石膏の層が存在するが、本モデルでは単純化のため矩形波の通過後の SF 面を自由端と仮定した。石膏のヤング率を 2×10^9 Pa、ポアソン比を 0.25、密度を 0.92g/cc とすると、弾性波の通過直後の SF 面の半径方向の速度は内向きに 1.2m/s である。

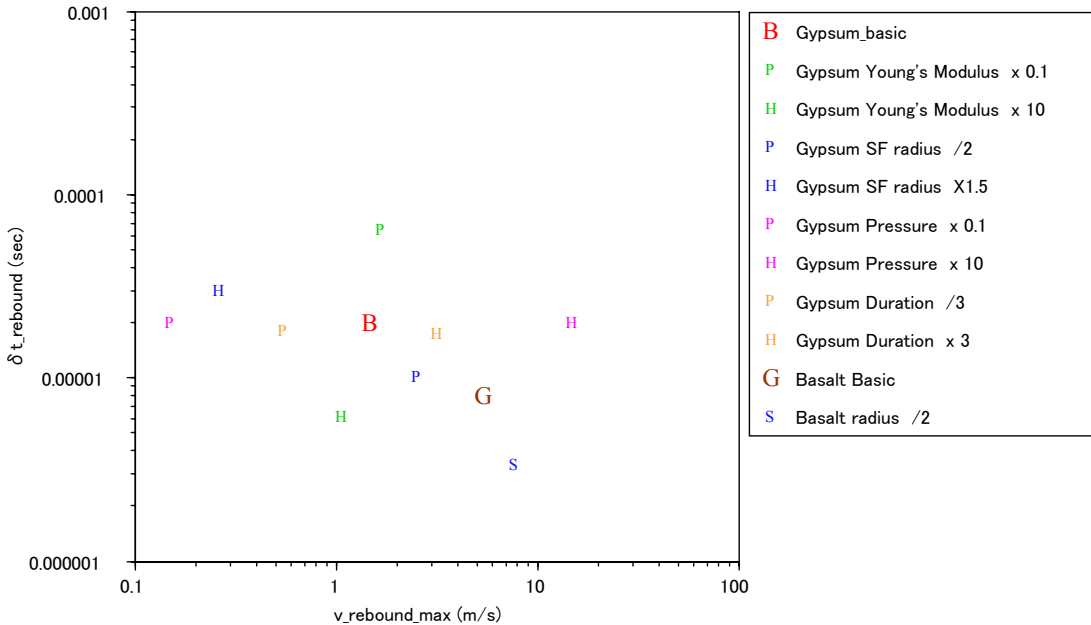


図 3. 初期条件を変化させたときの SF-面の跳ね返りの速度とその継続時間

SF 面で生じた内向きの速度は、剪断破壊された石膏の中を音速で伝わり、これが出口に通じる表面に達した時点で、石膏粉のうち表面に位置するものから順に放出されると考えられる。Teramoto et al. (2004) によると、粉体の音速は固体のそれと較べて粒径が小さくなるほど遅くなる傾向がある。彼らのデータを粒径、物質に関して外挿すると、5 μ m サイズの石膏粉の音速は約 25m/s となる。よって、深さ 32mm の SF 面で発生した上向き速度が、飛翔体の潜り込み深さ 9mm まで伝わったと仮定すると、後期放出破片のうち最も表面に近い位置にあったものの移動開始時刻は 1msec である。これにより、後期群のうちもっとも上部に存在したと考えられる 10-12m/s の破片の放出時刻の平均 2.5msec のうち、初期深さから target 表面まで移動するのに必要な時間 0.8msec とを合わせて、この群の放出時刻の遅れのうちの 70%を説明することができる。また、この後期放出破片群の放出速度は、実験結果のヒストグラムより斜め衝突においてはやや減少するようにも見える。後期放出破片群の放出角度は、斜め衝突においてはわずかに下流方向に傾くが、その変化は衝突角度の変化に比べると微々たるものである。

本研究で定義づけられた後期群の存在を考えあわせることによって、自己重力の小さな天体上にも粒径の小さなレゴリスが衝突により形成される可能性が示唆される。