

論文の内容の要旨

論文題目 Numerical Simulation of Impact into Granular Material
by Distinct Element Method
(離散要素法 (DEM) による粉体層への衝突の
数値シミュレーション)

氏名 和田 浩二

1. 目的

衝突クレーターの形成過程は天体の衝突・衝撃波の伝播(圧縮段階)から始まり、孔の掘削(掘削段階)を経てトランジェントクレーターの崩壊(緩和段階)に至る。本研究では特に掘削段階における掘削流や衝突放出物(イジェクタ)の放出過程などの素過程を明らかにするための手法として、Distinct Element Method(DEM, 離散要素法)による衝突の数値シミュレーションコードを開発し、粉体層への垂直衝突のシミュレーションを行なった。この手法は今後様々な問題に適用できると考えられるが、本研究ではその妥当性を示すことを中心に議論する。具体的には、イジェクタの速度分布や角度分布などについてこれまでの実験結果と本研究のシミュレーション結果とを比較・検討した。また、シミュレーションに基づく議論として、掘削流のモデルであるZ-モデルの妥当性の検証を行なった。

2. 背景

これまで、イジェクタの放出過程を理解するために、粉体層(砂粒やガラス粒)への衝突実験が行われてきた。また、その実験結果を基にイジェクタ速度分布に関する幾つかのスケールリング則が得られている。しかしながら、室内実験においては、高速度で飛散する微小なイジェクタ粒子を精度良く観測することが難しく、不十分な点が多い。一方で、衝突の数値シミュレーションも近年盛んに行われるようになってきた。数値計算を行なう利点としては、例えば、実験では測定不可能な時空間分解能でデータが得られる、などがある。

しかしながら、従来の計算手法は、いずれも媒体を流体(連続体)近似するものである。個々のイジェクタ粒子の放出過程の解析のためには、連続体ではなく個々の離散的粒子の運動を扱い得ることが必要となる。

そこで、本研究では粉体計算手法である DEM を適用し、粉体層への衝突の数値シミュレーションコードの開発・応用を行った。DEM は主に粉体工学や土木工学の分野で開発・応用されてきた手法であるが、個々の粉体粒子の運動を離散的に取り扱うため、粉体層への衝突及びイジェクタの運動を的確にシミュレートし得ると期待される。DEM による衝突クレータリングのシミュレーションを行なうのは、本研究が初の試みである。この数値シミュレーションによって得られるイジェクタ速度分布などの結果は、従来の砂への衝突実験の結果と直接的に比較でき、DEM による数値計算の妥当性の検証が可能である。

DEM においては、各時間ステップごとに接触粒子による粒子間相互作用(弾性力・摩擦力)を着目粒子について求め運動方程式を解くことで個々の粒子の運動を計算していく。本研究では粒子間相互作用のモデルとしては、バネとダッシュポットが平行に繋がったフックモデルを用い、接線方向には摩擦スライダも導入する(図1)。バネは弾性力を、ダッシュポットはエネルギー散逸を実現し、反発係数に応じた力を与える。また、摩擦スライダは摩擦係数に応じた適切な摩擦力を実現する。

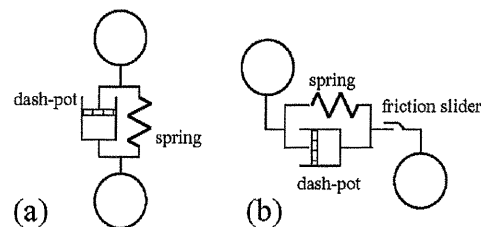


図1：接触粒子間の相互作用力モデル。(a)法線方向。(b)接線方向。

3. 垂直衝突のシミュレーション設定

半径 1mm の同径球(石英の物性値を使用)約 38 万個をターゲットとして直方体の箱(20cm×20cm×7cm)の中に堆積させる(図 2a)。これにターゲット粒子の 2~4 倍の大きさの粒子(アルミの物性値を使用)を様々な衝突速度(100~900m/s)で衝突させる。粒子間には固着力・転がり抵抗は考えない。また、壁での反射波の発生を極力抑えるために、壁の反

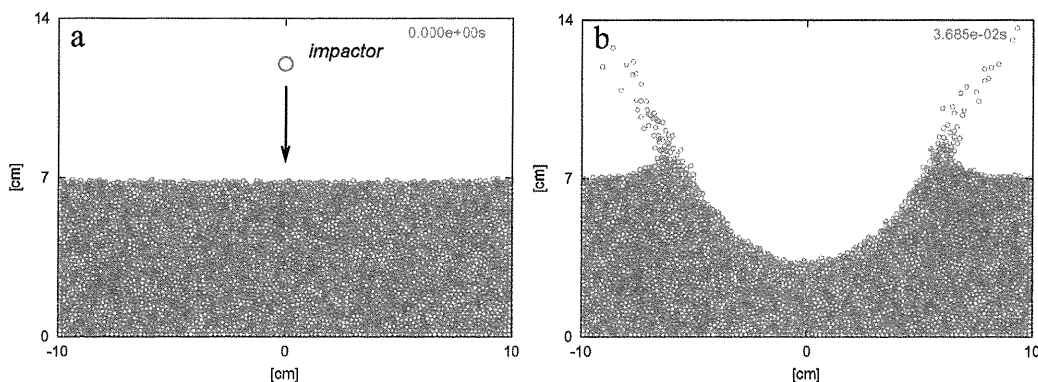


図2：300m/s で衝突した際のクレータ形成過程のスナップショットを断面図で表示したもの。(a)初期状態。(b)トランジェントクレータ形成時(衝突後約 40ms)。

発係数は 0 に設定する。衝突粒子の大きさや衝突速度の他に、粒子間の反発係数や摩擦係数をパラメーターとして振って計算した。DEM の不利な点として、多くの粒子を扱うためには高性能の計算機が要求されるが、本研究では並列化して計算を行なった。それでも計算には時間がかかるため、トランジェントクレーターがほぼ形成された段階で計算を終了させる。衝突粒子半径を 3mm、衝突速度を 300m/s、粒子間の反発係数及び摩擦係数を各々 0.4、0.5 とした場合のシミュレーションで得たトランジェントクレーターの断面図を図 2 b に示す。

4. シミュレーション結果と実験結果の比較

シミュレーションで得られた、1)イジェクタ放出位置と放出速度の関係、2)イジェクタ放出位置と放出角度の関係、3)イジェクタ放出速度と放出量の関係、について各々実験結果と比較を行なった。ここでは 3)イジェクタ放出速度と放出量の関係、について示す。

イジェクタの放出速度と放出量の関係を示すものとして、ある速度以上で放出されたイジェクタの累積体積の分布をプロットしたものが、図 3 である。放出速度・体積は各々クレーター半径を用いて規格化している。

連続分布として得られたシミュレーション結果は、低速領域・高速領域ともに、実験結果と調和的である。高速領域における大きな傾きから、放出速度にカットオフがあることが示唆される。

このように、本研究のシミュレーションによるイジェクタの速度分布等は実験結果と概ね調和的であり、このシミュレーションが掘削流やイジェクタ放出過程を明らかにする上で有効な手段となり得ることが示された。また、クレーター半径を用いて規格化したイジェクタ速度分布においては、粒子間の反発係数や摩擦係数の依存性はみられなかった。これは、掘削流が隣接粒子間の相対速度が小さい「粒子群」として振舞うことを示唆している。

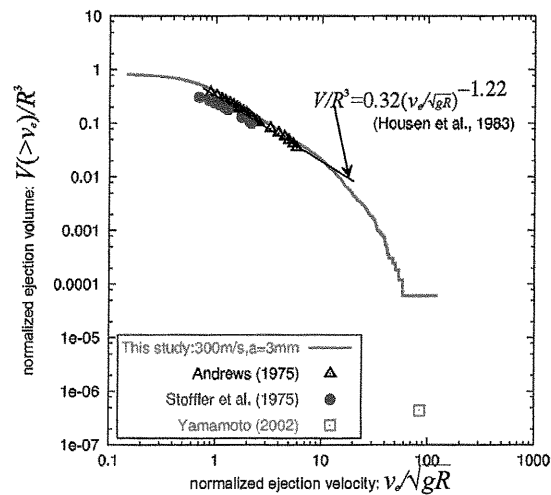


図 3 : v_e 以上の速度で放出されたイジェクタの体積 $V(>v_e)$ の分布。クレーター半径 R 、重力加速度 g を用いて規格化した値でプロットした。赤線で表示されているのが本研究のシミュレーション結果(パラメーター: 衝突速度 300m/s, 衝突粒子半径 3mm, 反発係数 0.4, 摩擦係数 0.5)。高速領域で途切れているところは、粒子 1 個の体積に相当する。一方実験結果は点で表示。黒線は低速領域の実験結果に対するフィッティングライン。

5. Z-モデルの妥当性の検証

Maxwell らによって提唱された Z-モデルは、衝突クレーター形成時の掘削流を解析的に表現するモデルである。定常非圧縮流であることや粒子速度の動径成分が距離の Z 乗で減

衰するという簡単な仮定から、ある点(流源)からの流線が与えられ、掘削領域の推定など様々なクレーターの解析に用いられてきた。しかしながら、現実のクレータリングは非定常であるなど、Z-モデルが掘削流を適切に表現できるか疑問である。これまで実験や数値計算においてこの Z-モデルの妥当性が検証されてきたが、実験においてはターゲット内の運動を直接観察することは困難であり、数値計算においても有限差分による連続体近似計算のためにターゲット内粒子の運動追跡が困難である。したがって、これまでのところ、実際にターゲット内の粒子が Z-モデルで予想される流線に沿って運動する、ということは不明確であったが、本研究の DEM による衝突シミュレーションによってこれを示すことを試みた。

ここでは、最も特徴的な結果を示す。図 4 は、表面を越えた粒子、即ちイジェクタ粒子が初期にどの位置にあったかを示したもので、ターゲット表面で放出された位置別に色分けして表示した。同じ色の粒子はすべて表面の同じ位置から放出されたことを意味する。これに Z-モデルの流線を重ねて見ると、粒子の色別分布と Z-モデルの流線が良く一致していることが分かる。このことは、ターゲット粒子が Z-モデルで予想された流線に沿って運動していることを示唆している。このように、ある程度空隙のある粉体層においても、Z-モデルは掘削流の簡便かつ良い近似であることが確認された。これは、粒子に変形がなく、「粒子群」として運動するため、おおよそ非圧縮媒体として振舞う結果であると考えられる。

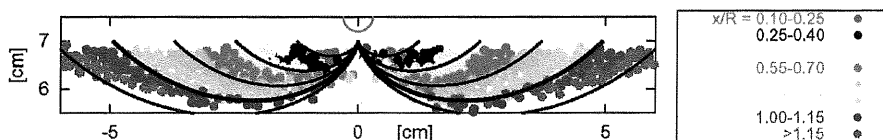


図 4: ターゲット表面を越えた粒子の初期位置を放出位置別に色分けして表示したもの(パラメーター:衝突速度 300m/s, 衝突粒子半径 3mm, 反発係数 0.4, 摩擦係数 0.5)。凡例にあるように、トランジェントクレータ半径 R (この場合、4.95cm) で規格化した衝突点からの距離 x の値に応じて色分けしている。重ねて表示されている曲線は、 $Z=3$ で流源がターゲット表面にある場合の Z-モデルの流線。上端の半円は比較のために衝突粒子を表示したもの。

6. 結論

本研究においては衝突クレータリング、特にイジェクタ放出過程解明のために DEM による数値シミュレーションコードを開発し、粉体層への垂直衝突のシミュレーションを行ない、イジェクタ速度分布などに関して実験結果と比較した。その結果、DEM による衝突シミュレーションは、実験結果と調和的であり、掘削流やイジェクタ放出過程の解析に有用であることが示された。また、掘削流は、概ね Z-モデル的流線に沿うことが確かめられた。今後、この手法は斜め衝突など様々な問題への適用が期待される。