

学位論文要旨

Numerical study for granular splash and force propagation caused by single granular impact onto granular bed

(粉体衝突により引き起こされるスプラッシュと応力伝播に関する数値的研究)

田邊 章洋

風紋や砂丘など、地球上の堆積物がなす微視的・巨視的な地形は近年火星や土星の衛星であるタイタンの地表面でも観測されている。このような地形パターンは各々の地域の環境を反映しているため、地形形成のメカニズムの理解は地球・惑星環境科学において非常に重要な問題である。地形形成ダイナミクスにおける堆積物輸送の重要な素過程の1つとして、風に吹かれた粒子が地表面に衝突することで起こる粉体のスプラッシュ過程がある。本論文では、離散要素法を用いることで粒子-粉体層間の衝突現象を再現する計算機実験を行った。論文の前半では、粉体層表面での衝突によって飛び出した粒子について、そのダイナミクスに関する統計的な性質を調べ、先行研究やモデル間での比較を行い、また、放出粒子を衝突後の時系列に応じてグループ分けをすることで見えてくる運動性の違いなどをまとめた。論文の後半では衝突現象と放出現象を結びつけることを目的として、初期の衝撃が伝播する経路を簡単なルールをもとに構築し、この経路の形状と飛び出す速度の関係について考察した。

1. 序論

粉体の衝突現象は自然界の様々な場面で観測される素過程の1つである。砂漠で見られる風紋や砂丘のような特徴的な地形は地表付近の定常的な粒子輸送により形成されるが、このような粒子輸送は、風に加速された粒子が地表面に衝突し地表面の粒子を弾き飛ばすスプラッシュ過程及びその連鎖によって発達・維持される。また、同様の地形は近年火星や土星の衛星であるタイタンなど地球外の天体表面でも観測されており、これらの観測写真からその地域の風性環境の推定も行われている。このように、粒子-粒子層間で起こるスプラッシュ過程を理解することは堆積粒子輸送の理解及び、様々な地形形成の解明につながる。そこで、スプラッシュ過程に注目し、単純化した衝突過程に関する実験的・理論的な研究が行われてきた。

本論文ではスプラッシュ過程について離散要素法(Discrete Element Method、以下 DEM)を用いて粒子-粉体層間の衝突過程を再現する計算機実験を行った(図 1)。その結果、放出粒子のダイナミクスについて、先行研究の実験と定性的な一致が見られ、また、粒子の放出過程の詳細に注目した解析を行い、放出粒子の統計的な特徴付けを試みた。さらに、より現実に近い系を考えるために、粉体層の構成粒子に粒径分布を与え、スプラッシュ過程への影響を調べた。

一方で、衝突のように粉体層に外力が加わった際の粉体内部での応力の応答に関しては多くの課題が残されている。特に3次元粉体層の内部応力を実験的に可視化することは困難であるため、理論モデルや数値計算を用いた研究が行われてきた。本研究では、粉体スプラッシュの観点から粉体内部での応力ダイナミクスを考え、初期の衝突エネルギーが放出粒子まで粉体層内部を伝播する経路を簡単なルールに基づき特定した。そして、この応力伝播経路の構造や放出粒子の運動の関係について考察を行った。

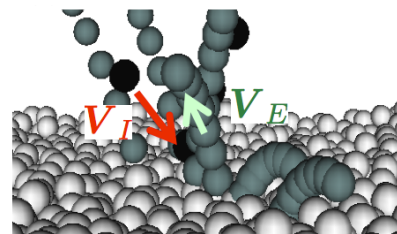


図 1 粉体スプラッシュの連続写真。黒、灰色の粒子はそれぞれ入射粒子と放出粒子を表す。

2. モデル

本研究では DEM を用いて粒子-粉体層間の衝突過程の計算機実験を行った。DEM は、個々の粒子に対して Newton の運動方程式をたて、粒子に働く力を仮定することで、粒子の挙動を再現する計算手法である。本研究では粒子の並進運動のみを扱い、回転運動を無視して考える。そして、粒子を球形で変形しないと仮定し、斥力として働く接触力と重力のみを考慮する。ここで、接触力は2体間接触力の足し合わせで求められ、2体間接触力は非弾性衝突とし、Hertz の弾性理論に基づく反発力と2粒子の相対速度に比例するエネルギーの散逸の重ね合わせで記述される。

3. 粉体スプラッシュ

本数値計算では直径 $d=1$ [cm]、質量 $m=1$ [g] の単分散の粒子からなる粉体層と、平均を d とする異なる粒径分布を与えた 4 種類の粉体層を考える。粒径分布は最大・最小サイズをそれぞれ $1.5d$ 、 $0.5d$ とするガウス分布 $N(d, 0.1d)$ 、 $N(d, 0.3d)$ と一様分布 $U(0.5d, 1.5d)$ 、 $U(0.9d, 1.1d)$ として与える。これらの粒径分布に従う 32,768 個の均質な材質からなる粒子を用いて、3 次元の計算領域内部で自由落下により粉体層を構築する。ここで、水平方向の境界条件として単分散系は半径 $20d$ の円筒領域、多分散系は $35d \times 35d$ の周期境界を考える。このようにして形成した粉体層に対して、粉体層表面上高さ d 離れたランダムな水平位置を初期条件として 1 粒子を衝突させる。衝突後衝突点から高さ d 以上跳ねた粒子を放出粒子として定義し、その時の速度と角度をそれぞれ放出速度・放出角度とする。入射速さ、角度の各組に対して 100 箇所の異なる位置での衝突を発生させてアンサンブルをとり、放出速度・角度の変化やその粉体層依存性について調べた。

4. 粉体中の内部応力伝播

3 次元粉体中での応力伝播を議論するために、初期の衝撃が粉体スプラッシュで飛び出す各粒子に伝わる経路を単純なルールから構築し、その形状や放出粒子のダイナミクスと関連付けて議論した。以下では前節の単分散粒子系を用いた。2 体間の非弾性衝突の繰り返しで衝撃が伝播していくと仮定し、以下の手順で応力の伝播経路を構築した。まず 1 粒子衝突に飛び出した放出粒子を数え上げ、そのうちの 1 つに注目する(図 3 青粒子)。そしてこの放出粒子に対して最大接触力を与える粒子を探す(図 3 青粒子左隣の橙粒子)。次にその粒子を対象として、同様の探索を行う。粒子間の相互作用は非弾性衝突を仮定しているため、入射粒子との相互作用が最大となり、衝突を繰り返すことで減衰する。そのため対象粒子をずらしながらこの手順を繰り返すことで入射粒子に到達する。この粒子列の形状と放出速度との関係について議論した。

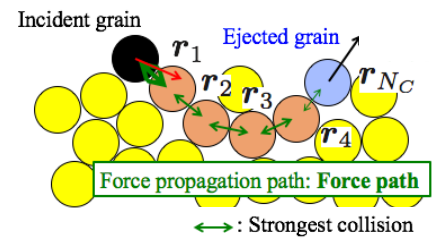


図 3 Force path の定義

5. 結論

本論文では粉体層に 1 粒子を衝突させることで粉体スプラッシュを発生させ、飛び出す粒子のダイナミクスを考察し、衝突エネルギーが粉体層内部を伝播する過程に着目した計算機実験を行った。

論文の前半では、粉体スプラッシュについて、先行研究を模して行った数値計算によって放出粒子のダイナミクスを定性的に再現した。さらにスプラッシュの詳細を調べるために、放出粒子をスプラッシュの初期とそれ以降で分けることで、2 つの異なる運動モードを見出した。初期に飛び出した 10% 程度の粒子は残りの粒子に比べて平均的に 10 倍以上の運動エネルギーを持って跳躍した。この結果は粉体層に一定の粒径分布を与えた場合においても共通しており、放出粒子の速さ・角度分布は粉体層の粒径分布の有無やその与え方に依存しなかった。一方で粉体層の粒径分布は放出粒子のサイズ分布に反映され、小さい粒子が飛び出しやすく、大きい粒子はほとんど飛び出さない。また、1 回のスプラッシュで飛び出す粒子の総体積は入射速さ・角度だけに依存し、粉体層には依存しなかった。そのため、小さい粒子を多く含む粉体層からは多くの粒子が飛び出す結果が得られた。

論文の後半では、粒子衝突後の粉体層内部でのエネルギーの伝播経路を特定し、その構造を調べた。衝突エネルギーの伝播にかかる個数に対して平均放出速度が指数的に減少することから、今回構築した経路は粉体内部でのエネルギーの伝播過程をよく捉えていると考えられる。この減衰率は粒子間の反発係数よりも小さいため、粉体層中を曲がりながらエネルギーが伝播することがわかった。また、粒子の放出速度分布を考えると、3 回程度の衝突を経由すると入射粒子の記憶がなくなることが明らかとなった。この結果は論文前半の結果で見られた、粉体層表面でのスプラッシュを通じて粒子輸送に寄与する放出粒子はごく少ない衝突回数を経て飛び出すということに対応している。

公表論文

T. Tanabe, T. Shimada, N. Ito, and H. Nishimori, “Splash detail due to a single grain incident on a granular bed” *Physical Review E*, **95**, 022906, (2017).