

粉体流中の衝突・拡散 — やっぱ 3D っしょ！ —

Collision and diffusion in powder layer

須田 恵理子[1], 酒井 敏[2]

Eriko Suda[1], Satoshi Sakai[2]

[1] 京大・人環・地球動態, [2] 京大・総人・地球科学

[1] Earth Sci., HES, Kyoto Univ., [2] Earth Sci. IHS, Kyoto Univ

【粉体上での摩擦】

金属円盤などの剛体がベニヤ板の上を滑走する場合、摩擦係数は 0.35 程度である。ところがベニヤ板の上に小麦粉などを薄くふんわりと敷き詰めると摩擦係数は 0.1~0.3 であり、「粉」がないときよりも摩擦係数が小さくなることが実験(粉体実験)で確かめられた。粉体の上で摩擦が小さくなるのは、粉体層に発生する圧力が金属円盤を「浮かせる」からと考えられる(飯澤・他、1999)。

一方、岩屑なだれと呼ばれる山体の崩壊現象では、崩壊前後の最大垂直距離と最大水平距離の比(見かけ上の動摩擦係数)が 0.1 程度と小さいことが知られている。岩屑なだれは乱流ではなく、崩壊後も崩壊前の地層を保持していたり岩石同士が相対関係を保っていたりするにもかかわらず、何故摩擦係数が小さいのか。その理由は未だ明らかではない。山体崩壊には土壌や火山灰、破碎された岩片など「粉」と見なせる部分に関わっており、粉の上での摩擦のメカニズムが明らかになれば、岩屑なだれの摩擦係数がなぜ小さいか、説明できる可能性がある。

しかし、粉体層上では剛体の摩擦係数が通常より小さいことは明らかになったが、そのメカニズムは明らかではない。そこで数値計算によって粉体層上での剛体の滑走の再現し、小さな摩擦係数のメカニズムを明らかにすることを試みた。

【二次元 DEM による実験】

粒子要素法(DEM)を用い、粉体層の上を、金属円盤にあたるプレートがサイクリックに運動する二次元 DEM 周期境界モデルで実験を行った。粒子要素法は一つ一つの粒子の運動方程式を解くシミュレーション法で、接触する粒子の間には距離に比例する力、相対速度に比例する力が働く。これらの比例定数と、接線方向に働く力によって粒子表面が滑り始める最大摩擦力を決める摩擦係数の、3 種類の値を変化させることで粒子の特性を変化させることができる。そこでこれらの値をそれぞれ 3 つ定め、その組み合わせからなる 27 種類のパラメータを用いた。8 種類のプレート形状に対してそれぞれのパラメータで、合計 216 通りの計算を行った。その結果、摩擦係数はどの場合でもほぼ 0.3 で一定であった。パラメータの組み合わせによって決まる粒子の跳ね返り係数や、それぞれのパラメータについても比較しても、摩擦係数が 0.3 から大きく或いは小さくなるような傾向は見られなかった。

同じ二次元の粒子要素法を用いた非周期境界モデルでも実験を行った。モデル自体が完璧なものとは言えないが、数種類のパラメータで実験を行った限りでは周期境界モデルよりも摩擦係数は大きく、境界条件を変えることでは、粉体実験の小さな摩擦係数を再現するのは難しいと考えられる。

【ビリヤードモデル】

今回用いた粒子要素法は二次元モデルであり、そもそも三次元の実験の再現を試みるのは無理があるかもしれない。例えば粒子同士の衝突に着目すると、二次元では衝突と逆方向に跳ね返る確率が高いが、三次元では等方的に跳ね返る、といった違いがある。しかしフル三次元の粒子シミュレーションは計算機への負荷が非常に高い。そこで二次元と三次元の衝突則の違いに着目し、粒子の衝突後の速度分布がそれぞれの次元の衝突則と一致するような、擬似的に次元の違いを表現するモデルを作成した。衝突則の違いが計算結果に及ぼす影響が明らかではないので、小さな摩擦係数の再現を試みる前に、長方形の壁に囲まれた領域に等間隔に配置した粒子のうち一つにだけ初速を与え(ビリヤードモデル)、その運動エネルギーの伝播や減衰を比較した。

その結果、粒子同士の跳ね返り係数が 1.0 の場合、初速方向へのエネルギーの伝播が二次元のほうが多少早い以外に大きな違いは見られなかった。粒子同士の跳ね返り係数が 0.5 の場合、二次元のほうが系全体のエネルギー減衰が早かった。

【三次元モデルの可能性】

粉体実験では、金属円盤の重さを支えるのも金属円盤に摩擦抵抗力を与えるのも粉体層である。つまり、粉体が金属円盤に与える上向きの力と、金属円盤の進行方向と逆向きに与える力の比が円盤の摩擦係数として観測される。粉体が円盤に対して持っている運動量が失われることで円盤速度と逆向きの力が発生するので、ある一定の運動量に対しては発生する摩擦抵抗力の力積の最大値は決まる。したがって、運動量が失われるまでに発生する上向きの力が大きいほど、摩擦係数が小さくなると考えられる。このことから、系全体の運動エネルギー減衰

が小さく、長い時間粉体層が運動量を保持していれば金属円盤との衝突回数が増え、摩擦係数が小さくなる可能性がある。

二次元モデルと三次元モデルを比較した結果、エネルギー減衰率は三次元モデルのほうが小さかった。二次元モデルでは再現できなかった粉体実験が、三次元モデルでは再現できる可能性がある。