

個別要素法を用いた底面の凹凸に着目した土砂流動時の大粒子挙動

Large Particle Movement in Granular Flow Focused on Bed Roughness by
Distinct Element Method

鯨吉 樹 Itsuki TOKIYOSHI (山口大学大学院創成科学研究科)
中田幸男 Yukio NAKATA (山口大学大学院創成科学研究科)

近年、降雨による土石流が多発しており、対策としてフェンス状捕捉構造物の設置が進んでいる。これによる適切な減災効果を得るためには、渓床面の凹凸が礫のような大粒子の挙動に与える影響の把握が必要である。そこで、本研究では個別要素法解析を用いて、大粒子の挙動に与える渓床面の凹凸の影響の検討を行った。土砂流動中の流動性の高い空間での粒子構成割合を評価することで分級現象に与える底面の凹凸と流下距離の影響を把握し、また、底面の凹凸との反射条件から前方集積に対しても影響を及ぼすことが判明した。

キーワード：土砂流動，個別要素法，渓床条件，分級現象，流動速度
(IGC : E-06, E-13)

1. はじめに

土石流のような粒状体の土砂流動中の大粒子の挙動として、分級挙動と前方集積挙動があげられ、これらは、様々な分野で研究が進められている(例えば、¹⁾)。分級現象は、大粒子が流動層内のより上層に移動することで、偏析現象、逆グレーディング現象と記されることもある。この現象は、河床との間で発生する大粒子に発生する分散圧力によって生じるとする考え方²⁾や、大粒子、小粒子に作用する粒子間力を評価し、大粒子の上昇機構と小粒子の下降機構で理論的に説明する考え方^{3),4)}がある。前方集積挙動は、より上層にある大粒子が前方に移動し、かつ、土塊先頭で集積することを指す⁵⁾。この現象では、流動層内の速度差や、濃度の違いによる説明³⁾がある。

近年の土石流災害の頻発に伴い、土石流の礫のような大粒子の検討に注目したものが増えてきている。これは、大粒子の集積機能などを考慮した透過型の対策構造物が適用⁶⁾されていることや、高エネルギー吸収型防護柵の適用⁷⁾が進んでいることに関連している。加えて、分級の程度によって衝撃力が異なることが指摘されていること⁸⁾から、ますます、研究の深化が望まれる。

最近10年間の実験的な研究では、大型の土槽による実験⁹⁾や混合粒径に着目し小型模型装置を用いた検討¹⁰⁾、回転円筒装置を用いた検討¹¹⁾がある。和田ら¹²⁾は、土石流が発生する条件として、溪流の勾配、幅、長さや渓床の粗度条件に加え、土石流の規模や砂礫の粒度構成が、大粒子挙動に影響することを指摘している。その上で、流下距離および土石流の流下(流速)に直接的に影響を及ぼすと考えられる3種類の渓床粗度と勾配に着目した

実験¹²⁾や溪流の長さに着目した実験¹³⁾を行っている。さらに、水と礫の分級現象に対する粗度条件の影響¹⁴⁾や、流動実験方法の影響¹⁵⁾を検討している。ここでは、流動層中の大粒子の軌跡が実験的に明らかにされ、大粒子が前方へ移動後、後退する軌跡を描くことが示されている。

解析的な検討として、連続体理論に基づく検討¹⁶⁾が数多く行われていることが指摘されている¹⁷⁾。これらでは、特に定常流れ場における大粒子の分級挙動を理論的に説明している。個別要素法のような不連続体理論に基づく検討^{11),18)-23)}が、進んできている。前田ら¹⁹⁾は、分級現象を地盤力学的な観点で分析し応力鎖の形成が大粒子の上昇に寄与していることを指摘している。また、渓床の摩擦係数や凹凸の影響¹⁷⁾⁻²³⁾が議論されている。

このように、土砂流動時の大粒子挙動に与える渓床粗度の影響が指摘され、実験的や解析的な検討が進みつつある。しかし、多種多様な渓床面の凹凸を対象にすることで、分級現象と前方集積現象の程度との関連性や、発生の有無に関して議論された検討はない。分級現象が衝撃力に与える影響が指摘されていることから、新しい対策構造物の設計法の確立にむけて、今後より一層進めることが重要と考えた。この検討を進めるにあたり、この凹凸条件の細かな設定の変更を考えると、実験的な検討よりも、個別要素法の利用による検討が、実質的でより優位といえた。

以上のことから、本研究では、個別要素法を用いて、土砂流動時の大粒子挙動の、分級挙動と前方集積挙動を系統だてて検討することとした。ここでは、まず、用いた個別要素法のシミュレーションについて記述するとともに、典型的なシミュレーション結果について説明する。

ここでは、底面の凹凸の高さが同じで間隔を変化させた際に前方集積の発生に違いのあったシミュレーションの中で、前方集積が発生し、底面の凹凸が最も多いシミュレーションを典型的なシミュレーションとした。シミュレーションの特徴は、溪床の凹凸の程度と間隔を種々変化させていることで、これにより凹凸の影響を検討することである。この凹凸の与え方の違いにより、分級するまでに要する流動距離や流動速度、また、前方集積挙動の程度を詳細に分析する。

2. 個別要素法

本解析では図-1のような解析モデルを用いた。このモデルは、下流端から4mの位置にゲートを設けた。このゲートより上流に、流動させる粒子を空中落下により用意した。流動させる粒子は、直径が5.0mmの赤い粒子(以降「大粒子」という)が2000個、直径が2.5mmの青い粒子(以降「小粒子」という)が16000個を混合し、流下時には水の影響を考えず、斜面を重力のみで流下させた。この粒子の粒径や混合の比率は岡山県新見市で発生した土石流から採取した土と参考文献²³⁾を参考に設定した。また、この解析は3次元で解析を行った。

この斜面には、事前の予備解析の結果から、スムーズな土砂流動が発生するように35°の傾斜を持たせ、分級現象を捉えられるように斜面の長さを4mとした。斜面の底面は、凹凸を変化させ、土砂流動に与える影響を検討できるようにした。

モデル底面の凹凸状態とそのパラメータの定義を図-2に示す。図-2の黒塗りの部分は底面の凹凸として底面から突き出ている部分である。ここで d_b は底面に張り付けた粒子の直径、 d_b/n_b は底面から突き出ている粒子の高さで、直径 d_b の n_b 分の1が底面から突き出ていると表現している。間隔 i_b は底面に張り付けた粒子の間にある粒子の個数である。

つまり、破線で示したように隙間なく凹凸を与えたとき、実線で示した底面の凹凸としての粒子の間にある凹凸の個数ということになる。なお、破線粒子は間隔を定義するための描画したもので、解析では存在しない粒子であることに注意する必要がある。そして、中心間距離は底面に張り付けた粒子が流下方向に隣合う粒子との中心間の距離である。この中心間距離は d_b/n_b と間隔 i_b から求められる。

また、斜面下端からゲート方向を見た際の図を図-3とする。この解析では周期境界を用いたが、周期境界は図-3の両端の粒子の中心を通り、斜面に直角である面的な境界のことである。解析時、図-3のように幅25mm(両端の粒子の中心を通るように境界があるため)の斜面に見えるが、実際には左右を周期境界とした。これは左境界と右境界が解析上つながっていると考えるものである。これにより、図-1でゲートと斜面に直角な方向に境界が

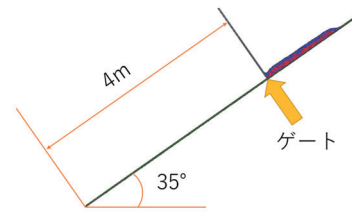


図-1 解析模型

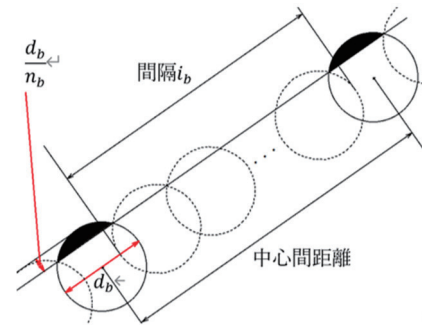


図-2 モデル底面の凹凸状態とそのパラメータの定義

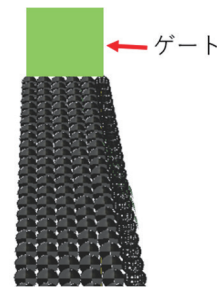


図-3 周期境界

表-1 解析に用いたパラメータ

密度 (土粒子)	2650	kg/m ³
ヤング係数 (斜面)	2.2×10 ⁶	kN/m ²
ヤング係数 (土粒子)	1.0×10 ⁶	kN/m ²
ポアソン比	0.3	
摩擦角(斜面)	14	°
摩擦角(土粒子)	26.6	°
ダンピング係数	0.7	
時間増分	0.4×限界時間増分	s

ない斜面(横方向に無限斜面)を再現しているように考えることが出来る。解析に用いた個別要素法に必要な入力パラメータについては表-1に示す。

表-1中の限界時間増分は限界時間増分 $= 2 \times \sqrt{m/k}$ (ここで、 m は質量、 k はヤング係数)から算出され、計算の安定性を保証するための値である。本解析では、底面の凹凸のみを変化させ、土砂流動の挙動への影響を検討しているが、これはその他のパラメータの影響は小さく、底面の凹凸の及ぼす影響が大きいことが分かっているためである。そのため、解析のパラメータの内、ヤング係

数およびダンピング係数，時間増分は解析の時間が膨大にならないようにし，ヤング係数には現実的な値に近い値を設定し，ダンピング係数は粒子が大きく跳ねないような値を設定した．また，土粒子密度は岡山県新見市で発生した土石流の現場で採取した土の密度を測定した値を用いており，摩擦角は参考文献^{24),25)}を参考に設定し，ポアソン比は一般的な砂の値を用いて設定した．また，本解析は流動層が十分な厚みを有していない場合，分級現象の評価が難しくなることが考えられたため，流動層の厚さの最大値が大粒子3個分よりも小さくなると解析を終了した．

3. 典型的な土砂流動の挙動

ここでは，典型的な土砂流動の挙動として底面の凹凸が $d_b/n_b=5.0/2$ ，つまり，大粒子と同径の粒子を半球だけ見える状況で，間隔0の場合のゲートが開いた直後の土砂流動の様子を図-4に示す．底面の凹凸が $d_b/n_b=5.0/2$ の場合，間隔を大きくしたとき，前方集積が発生していなかったため，最も底面の凹凸が多い間隔0の場合を典型的な土砂流動とした．解析では，ゲート背後に大粒子を下層に堆積させるため，大粒子および小粒子の順に空中落下させた後，ゲートを開けて土砂流動を誘発させる．ここでは，赤色粒子は大粒子，青色粒子は小粒子となるように描画している．

次に，底面の凹凸が $d_b/n_b=5.0/2$ ，間隔0の場合のある程度流下した際の土砂流動の様子を図-5に，大粒子が上層かつ前方に移動した際の土砂流動の様子を図-6に示す．

図-4～図-6に示すように，ゲートを開けた直後は赤色粒子(大粒子)が流動層下層にあるものの，しばらく土砂流動することで，流動層上層へ入れ替わりが進んでいることが認められる．

本解析に対する分析で用いた変数や座標軸を図-7に示す．ここで， X' は斜面方向， Y' は斜面直角方向とし，斜面下端を原点とした．また Y'_{max} を全粒子の中で最も大きい Y' の座標と定義した．この Y'_{max} を含む面は最も厚さを有する面となるため， Y'_{max} に着目した検査空間を設定した．図-7の検査空間はオレンジ色の枠で囲った領域である．

検査空間は， Y'_{max} を中心に， ± 5 個分の大粒子の範囲とした．

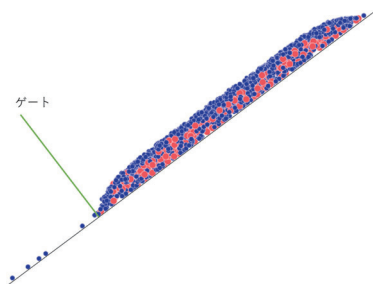


図-4 ゲートを開けた直後の土砂流動の様子(t=2.82s)

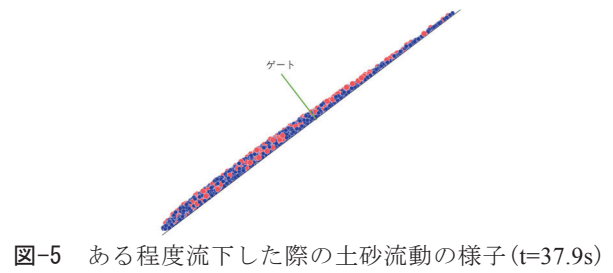
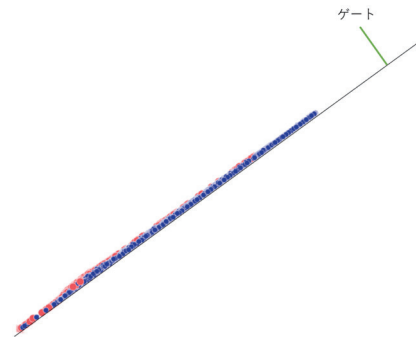
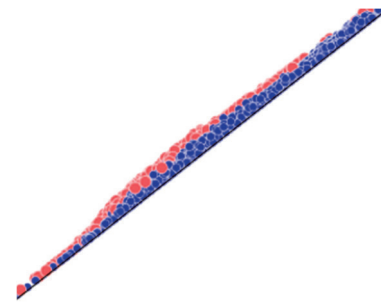


図-5 ある程度流下した際の土砂流動の様子(t=37.9s)

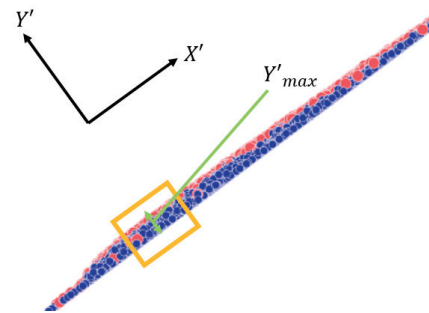


(a) ゲート位置あり

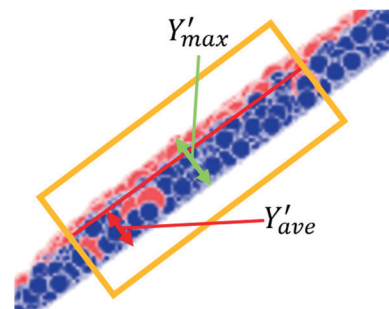


(b) 拡大図(ゲート位置なし)

図-6 大粒子が上層かつ前方に移動した際の土砂流動の様子(t=128.0s)



(a) 座標軸について



(b) 変数の詳細について

図-7 分析に用いた変数と座標軸

そして、この検査空間に含まれる大粒子のみの Y' の座標の平均値を Y'_{ave} とした。この Y'_{ave} を Y'_{max} で除し、百分率で表したものを、土砂流動層の厚さに対する大粒子の相対的高さとする。

$$\text{相対的高さ(\%)} = \frac{Y'_{ave}}{Y'_{max}} \times 100 \quad (1)$$

この相対的高さは、大粒子を下層に充填するため、流動直後は30%である。この相対的高さは、流動が進むと50%を超える。これは、下側に充填した大粒子と上側に充填した小粒子の上下が逆転し、大粒子が小粒子よりも流動層上層に移動したと捉えることができる。また、今回は流動層の厚さが大粒子3個分以上ある場合で考察を行っている。十分に厚さがある状態であるため、分級現象の評価の指標になると考え、この相対的高さを指標として用いることにした。

4. 底面の凹凸に着目した大粒子の浮き上がり挙動

底面の凹凸が $d_b/n_b=5.0/2$ の場合に間隔 i_b を変化させた際と底面の凹凸がない際のゲートからの位置と Y'_{max} の関係を図-8、ゲートからの位置と Y'_{ave} の関係を図-9、ゲートからの位置と相対的高さの関係を図-10に示す。ここで、間隔 i_b は同じ高さの底面の凹凸が粒子間に入る個数であるため、間隔の単位は個となる。

図-8 から、底面の凹凸が凹凸なしの場合、2m程度流下するまで Y'_{max} がほとんど低下していないことが分かる。底面の凹凸がある場合は、間隔が小さくなるにつれ、 Y'_{max} が低下する流下距離も短くなっている。

図-9 から、底面の凹凸がある場合、 Y'_{ave} は流下しても大きく変化していないが、図-8 で流下により Y'_{max} が低下していることを考えると、大粒子は検査空間内で相対的高さが上がっていると捉えることができる。

図-10 から、流下すると、相対的高さが増加する。この増加の割合は、間隔が小さいものが高いことがわかる。間隔が小さいものの方が相対的高さの増加も高いため、相対的高さが50%を超えた際の流下距離が短くなっている。間隔19の場合の相対的高さが50%を超えた際の流下距離はおおよそ1m程度であることに対して、間隔0の場合の相対的高さが50%を超えた際の流下距離はおおよそ0.2m程度であり、相対的高さが50%を超えた際の流下距離が短くなっていることが分かる。

次に、底面に張り付けた粒子の中心間距離と相対的高さが50%を超えた際の流下距離の関係を図-11に示す。この図には、図-10に示した結果にくわえ、凹凸の程度の異なる結果も示している。

図-11から、まず底面の凹凸がd2以上の場合を見ると、中心間距離が長くなると、相対的高さが50%を超えるまでの流下距離も長くなっている。今回の検討の範囲(底面の凹凸がd2以上の場合)であれば、1m以内の流下距離で相対的高さが50%に到達している。

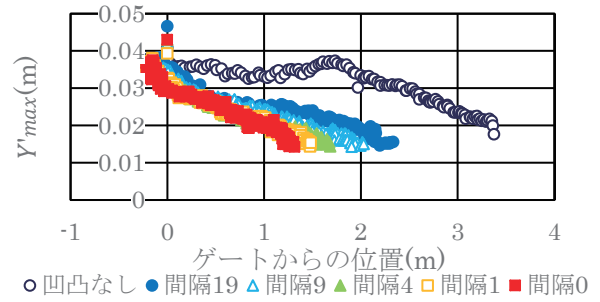


図-8 ゲートからの位置と Y'_{max} の関係

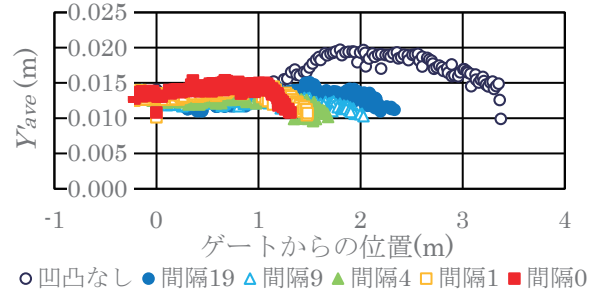


図-9 ゲートからの位置と Y'_{ave} の関係

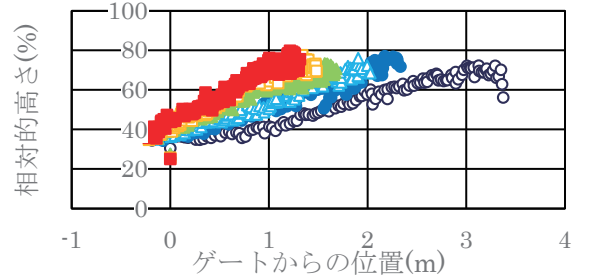


図-10 ゲートからの位置と相対的高さの関係

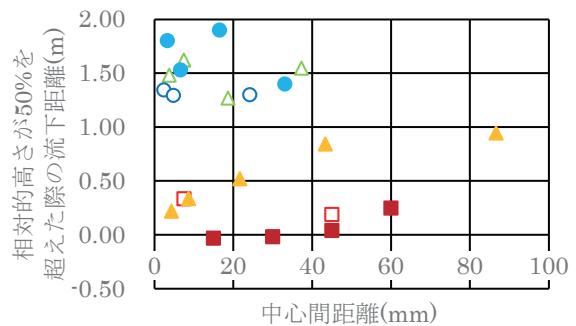


図-11 中心間距離と相対的高さが50%を超えた際の流下距離の関係

次に底面の凹凸がd2よりも小さいd3, d4, d8の場合を見ると、中心間距離に関わらず、流下距離が1.5m付近で相対的高さが50%を超えている。最後に底面の凹凸について見ると、底面の凹凸が大きくなると、相対的高さ

が50%を超えるまでの流下距離が短くなっている。大粒子の上層への移動、つまり分級挙動は、凹凸の程度や間隔に依存するが、凹凸がない場合でも生じることがわかる。

5. 底面の凹凸に着目した大粒子の前方集積挙動

まず、底面の凹凸が $d_b/n_b=5.0/1$ で間隔2の場合の時間 t とその時刻に $Y=Y'_{max}$ となる粒子の X とその X の近似値 X'_a の関係を図-12に示す。

図中の $t=28.62(s)$ のオレンジ色の線は底面の凹凸が $d_b/n_b=5.0/1$ で間隔2の場合に相対的高さが50%を超えた際の時刻である。

この近似値は、以降の分析に利用するために、以下のように、時間に関する2次の多項式で近似した。

$$X'_a(t) = a_1 \times t^2 - a_2 \times t + a_3 \quad (2)$$

この2次の多項式での近似はその他の次数の多項式での近似よりも相関係数が高かったため用いた。

なお、底面の凹凸が $d_b/n_b=5.0/1$ で間隔2の場合は、 $a_1 = 2.11 \times 10^{-5}$ 、 $a_2 = 0.00931$ 、 $a_3 = 4.307$ となった。

この X'_a を用いて、検査空間速度を式(3)で、検査空間流下距離を式(4)で求める。

この検査空間速度は図-7で設定した検査空間が時間 t_i から t_{i+1} の間どの程度で動いたかを示す。検査空間内での粒子の速度分布を検討するための基準値として算出した。

$$\text{検査空間速度}(t_{i+1}) = \frac{X'_a(t_{i+1}) - X'_a(t_i)}{t_{i+1} - t_i} \quad (3)$$

ここで、 t_i ：時間、 $X'_a(t_i)$ ：時間 t_i の X の近似値 X'_a
また、検査空間速度は微分ではなく差分から求めたが、これは解析で個別要素法を用いており、時間ステップごとに座標が記録されるため、差分を用いる方が結果との親和性が高いと考えたため、差分から検査空間速度を求めた。

$$\text{検査空間流下距離}(t_i) = X'_a(t_0) - X'_a(t_i) \quad (4)$$

$X'_a(t_0)$ ：ゲートを開けた直後に $Y=Y'_{max}$ となる粒子の X の近似値

底面の凹凸が $d_b/n_b=5.0/1$ で間隔2の場合、 $t_0=2.87s$ の時、 $X'_a(t_0)=4.280(m)$ である。時刻 t は計算開始から時間を示している。この t_0 はゲートの上昇を始めた時刻で、本解析で各粒子の座標の記録を開始した時刻である。 $t=0s$ から $t_0=2.87s$ では、ゲートより上流側に粒子を堆積するために費やした時刻である。

式(2)より、底面の凹凸が $d_b/n_b=5.0/1$ で間隔2の場合に相対的高さが50%を超えた際、 $X'_a(28.62) = 4.058(m)$ となるため、検査空間流下距離 $(t_i) = X'_a(t_0) - X'_a(t_i) = 4.280 - 4.058 = 0.222(m)$ となる。このときの検査空間速度を求めると、

$$\text{検査空間速度}(28.6) = \frac{X'_a(28.62) - X'_a(27.98)}{28.62 - 27.98}$$

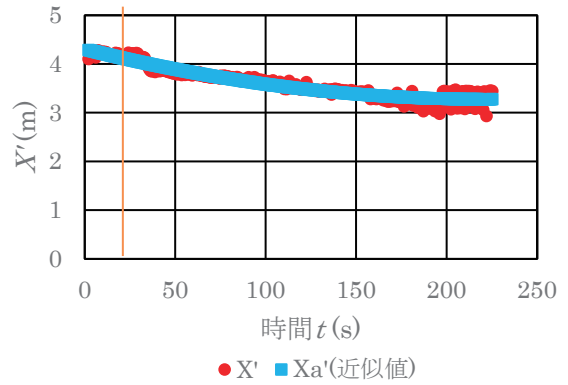


図-12 時間 t と X' と X' の近似値 X'_a の関係 ($d_b/n_b=5.0/1$ で間隔2の場合)

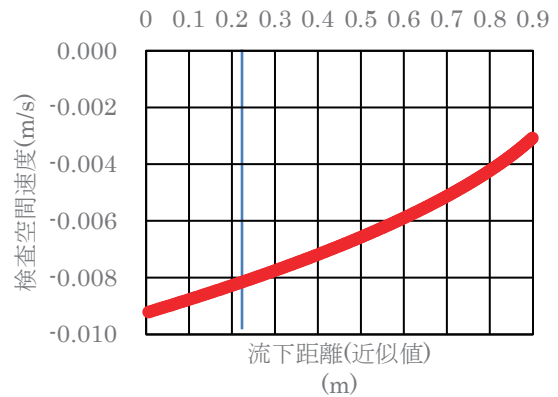


図-13 流下距離(近似値)と検査空間速度の関係 ($d_b/n_b=5.0/1$ で間隔2の場合)

$$= \frac{4.058 - 4.063}{28.62 - 27.98} = -0.008(m/s)$$

となる。検査空間流下距離と検査空間速度を X' の近似値を用いて計算した理由は、 X' の対象となる粒子は、 Y'_{max} となる粒子で、Step毎に異なる。このため、時間が t_i から t_{i+1} になった際に X' の値が増加していることがあり、流下距離が負の値になることがあった。この場合、検査空間に対する流動特性の評価が難しいため、近似値を用いて計算することにした。

底面の凹凸が $d_b/n_b=5.0/1$ で間隔2の場合の検査空間流下距離と検査空間速度の関係を図-13に示す。

図-13から、流下すると検査空間速度が低下していることがわかる。これは流下することで底面の凹凸による抵抗力を受けることにより、検査空間速度が低下したと考えられる。また、図-13に示した青線は底面の凹凸が $d_b/n_b=5.0/1$ で間隔2の場合の相対的高さが50%を超えた際の検査空間流下距離($t=28.62s$)を示しており、この底面の凹凸が $d_b/n_b=5.0/1$ で間隔2の場合の検査空間流下距離($t=28.62s$)は、先述した通り0.222mであり、このときの検査空間速度は-0.008(m/s)である。この値は一般的土流の速度に比べかなり遅いが、今回の解析では自重のみで流下しており、水の影響を考えていないことに加え、

ここでは検査空間という粒子の集合体に注目しており、その集合体の速度を求めていることや後述する底面の凹凸に衝突時の反射方向から土塊の進行方向が常に斜面平行でないことから、このように小さな値になったと考えられる。

次に底面の凹凸が $d_b/n_b=5.0/1$ で間隔 2 の場合の相対的高さが 50%を超えた際の大粒子の X' 方向の速度と Y' の関係を図-14 に示す。これは検査空間内での大粒子の X' 方向速度の深さ分布である。大粒子の速度はばらつきがあるものの、深さ方向に直線的に変化している。図-14 の X' 方向の速度が $-0.008(\text{m/s})$ に引かれた青線は検査空間速度を示しており、土砂流動の上部の粒子は検査空間速度よりも速い速度で流下している。これは土砂流動の下部の粒子は底面の凹凸による抵抗を受けるため、粒子の X' 方向の速度が小さくなると考えられる。

底面の凹凸の変化による中心間距離と検査空間速度の関係を図-15 に示す。この検査空間速度は相対的高さが 50%を超えたときの値である。また、底面の凹凸が凹凸なしの場合は中心間距離が無限であり、図-15 にプロットが出来ないため、中心間距離が 0mm のところにプロットした。

図-15 から、底面の凹凸があるもので、その凹凸が d2 よりも小さい d3, d4, d8 の場合は中心間距離に関わらず、検査空間速度がかなり速くなっており、底面の凹凸が凹凸なしの場合とほとんど同じ検査空間速度になっている。また、底面の凹凸が d2, ball_s, ball_L の場合は中心間距離が大きくなるにつれて、検査空間速度が増加する傾向が見られる。ただし、底面の凹凸が ball_L の場合は検査空間速度がかなり低下しており、中心間距離が 45mm 以下の場合は検査空間速度に大きな変化がなく、中心間距離が 60mm の場合に少しだけ検査空間速度が増加している。

検査空間内で相対的高さが 50%を超えた際の Y' が大きい方から 30 個の粒子の速度と検査空間速度の差を求め、これを速度差とする。底面の凹凸の変化による中心間距離と速度差の平均値の関係を図-16 に示す。速度差が正の際は検査空間速度の方が速く、負の場合は粒子速度の方が速いことを示している。図-14 から、底面の凹凸が d3 以下の場合は中心間距離によって速度差の絶対値が大きくなっている。底面の凹凸が d2, ball_s の場合は中心間距離に関わらず、速度差の絶対値が小さくなっている。底面の凹凸が ball_L の場合は速度差の絶対値はかなり小さいが、中心間距離が大きくなるにつれて、速度差の絶対値が少しずつではあるが大きくなっている。これにより、上層に上昇した大粒子は土塊前方に移動する傾向があることになる。そして、この傾向は、凹凸の程度や間隔に大きく依存せずに生じることがわかる。

ここで、土塊の前方に移動した際に土塊よりも先に流下する挙動を見せる大粒子を I 型とする。粒子が土塊の前方に行った後、土塊よりも先に流下しており、横向きで見たときの軌跡から I 型と命名した。 $Y'=Y'_{max}$ となる粒

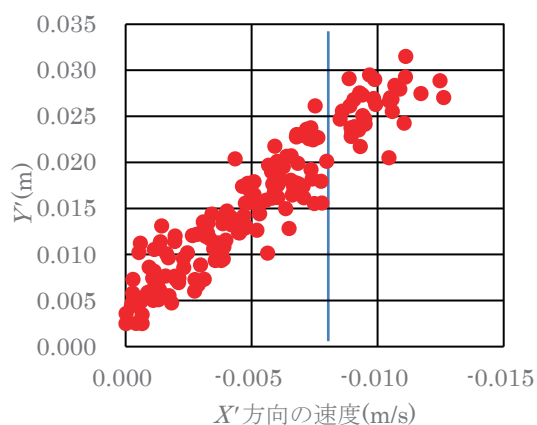


図-14 大粒子の X' 方向の速度と Y' の関係 ($d_b/n_b=5.0/1$ で間隔 0 の場合)

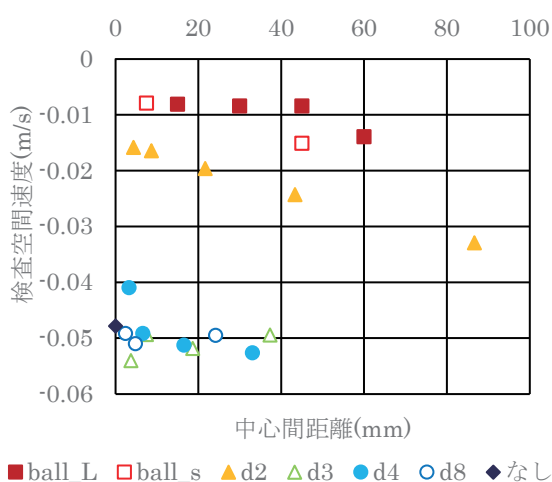


図-15 底面の凹凸の変化による中心間距離と検査空間速度の関係 (相対的高さが 50%を超えたとき)

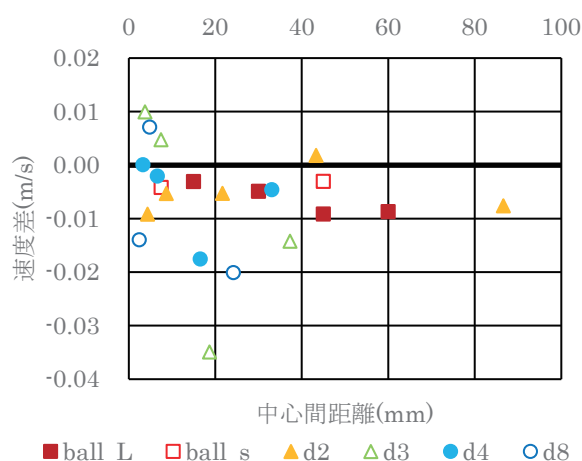


図-16 中心間距離と速度差の平均値の関係

子を基準としたときの代表的な I 型挙動を見せる単一粒子の軌跡を図-17 に示す。図-17 において粒子の初期位置のプロットに矢印を付した。

この図は時刻ごとに変化する $Y'=Y'_{max}$ となる粒子を基

準にして、抽出した粒子がどのような軌跡となるかを示しており、この粒子は $Y'=Y'_{max}$ となる粒子から離れるように右から左に移動している。つまり、流下中の土塊内部での粒子の相対的な動きを表している。図-17の Y'_{max} の粒子からの位置の0mは $Y'=Y'_{max}$ の粒子の位置を常に示しており、このI型の軌跡を示す粒子は流下により $Y'=Y'_{max}$ となる粒子付近(0m)から徐々に離れていく。つまり、このI型の粒子は、粒子速度が検査空間速度よりも大きく、土塊から離れて前方に移動しているため、 Y' が小さいことが特徴である。

I型以外の軌跡を示す大粒子をC型とした。これに該当する粒子を横向きで見た時の軌跡からC型と命名した。時刻ごとに変化する $Y'=Y'_{max}$ となる粒子を基準としたときの代表的なC型挙動を見せる単一粒子の軌跡を図-18に示す。図-18において粒子の初期位置のプロットに矢印を付した。図-18に示したC型の大粒子の挙動は一度 $Y'=Y'_{max}$ となる粒子よりも前方に移動した後に、底面の凹凸に触れることで抵抗力を受け、後退するような軌跡を見せることが特徴である。

図-18に示した粒子は一度 $Y'=Y'_{max}$ となる粒子より後方に移動した後、流動層上層に移動し、その後で $Y'=Y'_{max}$ となる粒子よりも前方に移動して底面の凹凸に接触し、 $Y'=Y'_{max}$ となる粒子に戻ってくるような軌跡になる。

上述したI型の粒子の大粒子2000個に対する比率と中心間距離の関係を図-19に示す。図-19から、底面の凹凸がball_Lで中心間距離が15mm, 30mm, 45mmの場合とball_sで中心間距離が7.5mmの場合のみがI型挙動をする粒子が無いことが分かる。

また、大粒子が斜面を流下し、底面の凹凸に接触した際の挙動の模式図を図-20に示す。これは大粒子と底面の凹凸が接触した点の接面を反射面と想定し、この面に大粒子が衝突した際にどの方向に反射するかを考えたものである。

図-20において、大粒子は斜面に対して入射方向 θ で反射面に衝突し、反射方向 θ で反射するため、大粒子は反射面に衝突すると斜面に対して反射方向 2θ に進む。また、水平面からの反射方向は $2\theta+35^\circ$ となる。この θ を式(5)から算出した。

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{\frac{5.0+d_b}{2} \frac{d_b}{2} - \frac{nb}{2}}{\frac{5.0+d_b}{2} \frac{d_b}{2}} \right) \quad (5)$$

この θ は粒子が斜面に平行に移動して底面の凹凸に衝突することを前提として計算しており、中心間距離が短くなると底面の凹凸の間に粒子が入ることが出来なくなり、この前提が成立しなくなるが、今回は議論を簡便化し、今回の解析結果とも一致するため、この θ を用いることにした。

$2\theta+35^\circ$ が 90° よりも小さいということは大粒子が底面の凹凸に衝突後、斜面上向きに進むことを意味し、後退するような挙動を見せることになる。

大粒子が底面の凹凸に衝突した際の挙動を図-21に示す。ここでは底面の凹凸がball_L, d3の場合を示す。

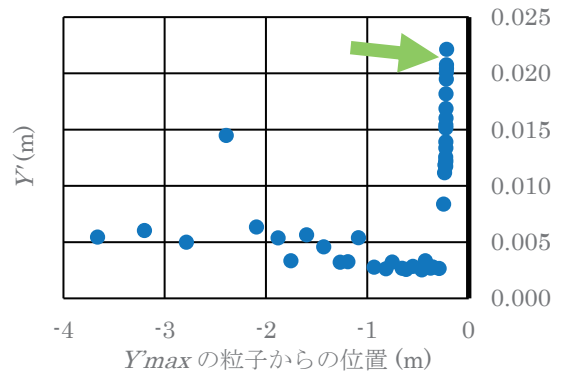


図-17 I型の粒子の軌跡

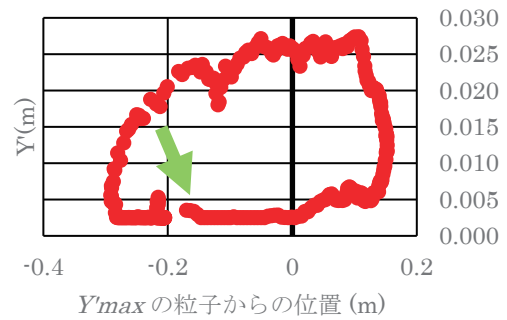


図-18 C型の粒子の軌跡

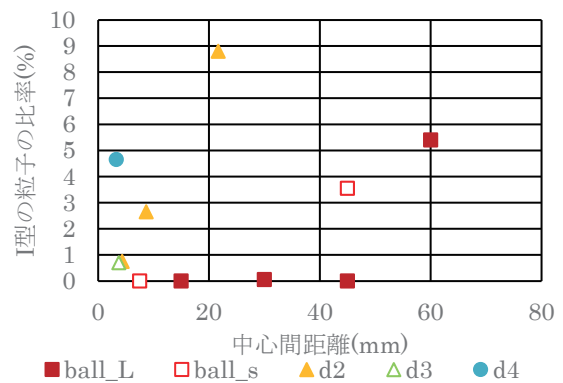


図-19 中心間距離とI型の粒子の大粒子2000個に対する比率の関係

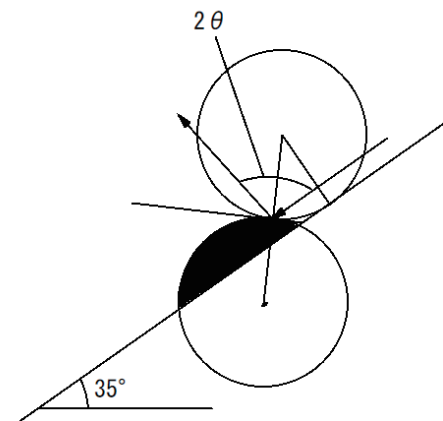


図-20 大粒子が底面の凹凸に衝突した際の挙動

底面の凹凸ごとの $2\theta+35^\circ$ の値を求めたものを表-2 に示す。表-2 から、底面の凹凸が ball_L, ball_s の場合のみが、 $2\theta+35^\circ$ が 90° よりも小さくなっており、底面の凹凸に衝突した際に戻る挙動を見せるため、図-13 に示す検査空間速度が ball_L, ball_s の場合は特に小さくなったのではないかと考えられる。また、底面の凹凸が d2 の場合は $2\theta+35^\circ$ が 90° よりも大きいが、その差が 5° と小さく、衝突時に前方に移動する成分が小さいため、ball_L や ball_s の場合よりも速くなるが、d3, d4, d8 の場合に比べると、検査空間速度がある程度小さくなったと考えられる。また、大粒子が I 型挙動を見せず、C 型挙動のみになるのは、底面の凹凸が ball_L で中心間距離が 15mm, 30mm, 45mm の場合と ball_s で中心間距離が 7.5mm の場合のみであった。

また、大粒子が I 型挙動を見せず、C 型挙動のみになるのは、底面の凹凸が ball_L で中心間距離が 15mm, 30mm, 45mm の場合と ball_s で中心間距離が 7.5mm の場合のみであった。このことから、大粒子が C 型挙動のみを示し、土塊の前方に集積するためには、速度差の絶対値が $0.01(\text{m/s})$ よりも小さいこと、検査空間速度が $0.01(\text{m/s})$ よりも遅いことが必要であると考えられる。これは底面の凹凸が大きく、中心間距離が短いときが条件を満たしている。底面の凹凸が大きくなると、図-20 の反射面に衝突した際に反射角が小さくなり、衝突後に斜面上向きに進む成分が大きくなる。中心間距離が短いときはこの衝突の回数が増える。それによって、検査空間速度や粒子速度が遅くなり、両方の値が十分に小さくなることによって、速度差も小さくなると考えられる。このように、大粒子が分級挙動を示し、その後前方に移動し、さらに集積する挙動を示す条件は、凹凸の条件が、図-20 で示すような反射条件によって判断できることがわかった。

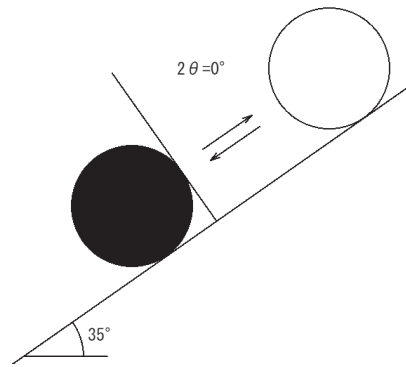
6. おわりに

本解析では土砂流動に対するシミュレーションを行い、流動性の高い空間での粒子構成割合を評価することで大粒子の浮き上がりに与える底面の凹凸と流下距離の影響を把握した。その結果、以下のことがわかった。

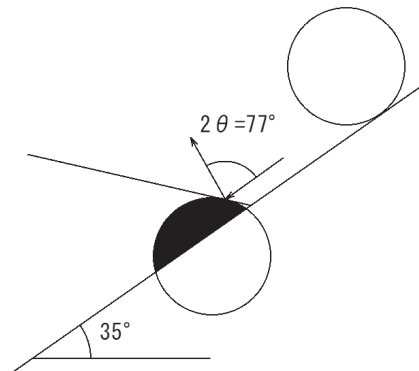
- (1) 大粒子の上層へ移動する分級挙動は、凹凸の程度や間隔に依存するが、凹凸がない場合でも生じた。
- (2) 上層に上昇した大粒子は土塊前方に移動する傾向があることを示した。この傾向は、凹凸の程度や間隔に大きく依存せずに生じた。
- (3) 大粒子が分級挙動を示し、その後前方に移動し、さらに集積する挙動を示す条件は、大粒子と底面の凹凸の幾何学条件で導ける反射条件によって判断できた。

謝辞

日常の議論を通じて多くの知識や示唆を頂戴しました中田研究室の皆様に深く感謝致します。



(a) 大粒子が底面の凹凸に衝突した際の挙動
(底面の凹凸が ball_L の場合)



(b) 大粒子が底面の凹凸に衝突した際の挙動
(底面の凹凸が d3 の場合)

図-21 大粒子が底面の凹凸に衝突した際の挙動

表-2 底面の凹凸ごとの反射方向

	ball L	ball s	d2	d3	d4	d8
$2\theta+35^\circ$	35	74	95	119	132	157

参考文献

- 1) 高橋保: 土石流の機構と対策, 近未来社, 432p., 2004.
- 2) Bagnold, R, A.: Experiments on a gravity free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear, Proc.Roy.A, Vol.225, No.1160, pp.49-63, 1954.
- 3) 橋本晴行, 椿東一郎: 土石流における逆グレイディング機構, 土木学会論文報告集, Vol.1983, No.336, pp.75-84, 1983.
- 4) 山野邦明, 大同淳之: 二粒径からなる混合粒径粒子流の流動機構, 土木学会論文集, Vol.1985, No.357, pp.25-34, 1985.
- 5) Bagnold, R, A.: Deposition in the process of hydraulic transport, Sedimentology, Vol.10, No.1, pp.45-56, 1968.
- 6) 守山浩史, 下条和史: 多枝原谷土石流捕捉結果によるワイヤネット工の改良, 砂防学会誌, Vol.59, No.1, pp. 35-38, 2006.
- 7) 西井洋史: 激甚化する土砂災害からの防災・減災を目指して, 砂防学会誌, Vol.71, No.6, pp. 1-2, 2019.

- 8) Jiang, Y. J., Fan, X. Y., Li, T. H., and Xiao, S. Y. : Influence of particle-size segregation on the impact of dry granular flow, *Powder Technology*, Vol.340, pp.39-51, 2018.
- 9) Iverson, R. M., Logan, M., LaHusen, R. G., and Berti, M. : The perfect debris flow? Aggregated results from 28 large-scale experiments, *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH Earth Surface*, Vol.115, F03005, pp.1-29, 2010.
- 10) 岩田知之, 堀田紀文, 鈴木拓郎 : 混合粒径土石流における分級現象が流動特性に及ぼす影響, *砂防学会誌*, Vol.66, No.3, pp. 13-23, 2013.
- 11) 堀口俊行, 香月智, 小川あずさ : 回転円筒による2粒径混合粗粒材の偏析実験と個別要素法解析, *土木学会論文集 A2 (応用力学)*, Vol.72, No.1, pp. 1-20, 2016.
- 12) 和田孝志, 古谷智彦, 中谷加奈, 水山 高久, 里深好文 : 土石流先頭部における大粒子集積に影響を及ぼす要素に関する実験的研究, *砂防学会誌*, Vol.67, No.6, pp. 56-63, 2015.
- 13) 原田紹臣, 和田孝志, 古谷智彦, 中谷加奈, 水山高久, 里深好文 : 土石流先頭部における大粒子の集積過程に関する基礎的な実験, *砂防学会誌*, Vol.68, No.1, pp. 39-43, 2015.
- 14) 松村健太郎, 齋藤和樹, 堀口俊行, 香月智 : 回転円筒実験における水と礫の分級現象に及ぼす底面粗度の影響, *構造工学論文集 A*, Vol.65A, pp. 835-848, 2019.
- 15) 松村健太郎, 堀口俊行, 香月智 : 直線水路実験と回転円筒実験における礫分級現象の比較, *構造工学論文集 A*, Vol.66A, pp. 928-940, 2020.
- 16) Gray, J., Ancy, C. : Segregation, recirculation and deposition of coarse particles near two-dimensional avalanche fronts, *Journal of Fluid Mechanics*, Volume 629, pp. 387-423, 2009.
- 17) Gray, J.M.N.T., Gajjar, P., Kokelaar, P. : Particle-size segregation in dense granular avalanches, *Comptes Rendus Physique*, Volume16, No.1, pp.73-85, 2015.
- 18) Zhou, G. G. D., Ng, C. W. W. : Numerical investigation of reverse segregation in debris flows by DEM, *Granular Matter*, Vol.12, pp. 507-516, 2010.
- 19) 前田健一, 舘井恵, 福間雅俊 : 個別要素法を用いた粒子流れの構造と大粒径の浮き上がりのマイクロメカニクス, *砂防学会誌*, Vol.64, No.4, pp.3-14, 2011.
- 20) Kumaran, V., Bharathraj, S. : The effect of base roughness on the development of a dense granular flow down an inclined plane, *Physics of Fluids*, Vol.25, No.7, p.070604, 2013.
- 21) Zhou, W., Lai, Z., Ma, G., Yang, L., Chen, Y. : Effect of base roughness on size segregation in dry granular flows, *Granular Matter* 18, Vol.83 p.8, 2016.
- 22) Jing, L., Kwok, C. Y., Leung, Y. F., Sobral, Y. D. : Characterization of base roughness for granular chute flows, *Physical Review*, Vol.94, No.5, p.052901, 2016.
- 23) Jing, L., Kwok, C. Y., Leung, Y. F., Sobral, Y. D. : Effect of geometric base roughness on size segregation, *EPJ Web of Conferences, Powders & Grains 2017*, Vol.140, No.03056, 4p. 2017.
- 24) 木成ゴム株式会社 : プラスチックの物性, http://www.kinari.jp/material/plastic_material.html, (参照 2020.12.22).
- 25) 中村史香 : 傾斜法による静止摩擦係数・動摩擦係数の測定. 物質・表面粗さ・粗さ方向と摩擦力の関係, <http://www.jpho.jp/2015/2015-1st-chall-exp-report/1531027.pdf>, (参照 2020.12.22).

(2021年6月16日 受付)