回転円筒による混合球形粒子の偏析実験 と個別要素法解析

堀口 俊行1・香月 智2・長池 広樹3

¹学生会員 防衛大学校理工学研究科後期課程(〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20) E-mail: ed12007@nda.ac.jp

²正会員 防衛大学校教授 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20) E-mail: katsuki@nda.ac.jp

³非会員 防衛大学校システム工学群建設環境工学科(〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20) E-mail: ed12007@nda.ac.jp

本研究は、粒径の異なる粒状体に生ずる偏析現象を基礎的に解明するため、回転円筒実験装置を考案し、 2粒径混合球形粒子群の運動特性や偏析現象の生起区分について考察したものである.すなわち、粒径の異 なる3種類のガラス球、比重の異なるナイロン球および表面に凹凸が有る粒径の異なる3種類の固化石炭灰 を用いた混合材料とし、回転円筒内での偏析現象について調べた.そのうえで、粒径の組み合せや回転円 筒の速度の違いによる偏析現象の生起区分を行った.また、その偏析現象における大粒径粒子が先頭部に 集中する機構について考察した.さらに個別要素法で偏析現象を再現し、2粒径混合実験の偏析現象の再現 能力と、そのメカニズムについて分析した.

Key Words : segregation, grain, debris flood check dam, DEM

1. 緒 言

毎年発生する土砂災害は、国民の生活や財産を脅か しているが、近年の降雨傾向の変化によりその頻度や 激しさが増大傾向にある¹⁾.中でも、土石流は施設に 対する破壊力が大きく、有効な対策が求められている. 土石流対策の要は、**写真-1**に示すような透過型砂防堰 堤²⁾に依拠しているが、この構造は広い開口部を設け ることで、平時は流砂の流下や生物の上下流間の移動 を妨げることのない環境性能を保証するものである. 一方で、土石流に対しては先頭部に集中する巨礫を利 用し、開口部を閉塞させて土石流の後続流を受け止め る構造である.

ところで、この構造設計の前提となる「先頭部に巨 礫が集中する、もしくは巨礫が高く浮き上がる現象」 は、多くの研究者の知見に基づいている^{3,5}.例えば、 大同⁶は、Bagnold⁷⁾の分散圧力は粒子の径が大きいほど 大きくなることから、大粒子は上方に、小粒子は下方 に移動することを定性的に示した.また、橋本・椿⁸⁰ は大粒径が集中する機構の前段階として、各層におけ る粒子の集中機構を考察した.その結果、土石流の流 動層では小粒子が多い場合には大粒子の上昇により、



写真-1 透過型砂防堰堤による巨礫捕捉

逆に大粒子の多い場合には小粒子の下降により逆グレ イディング現象が生じて速い表面流速によって巨礫が 先頭部へ送り出される現象を実験的に検討している. また,巨礫が先頭部に集中することに関連して,山野・ 大同⁹は,平均的な粒子の挙動をBagnold⁷⁰の流動モデル で表現し,大粒子に対して小粒子は下方に移動するこ とを定量的に示した.

また,高橋¹⁰は現地調査,基礎実験,解析における 検討を続け,土石流の流下メカニズムについて研究を 行った.そこでは,土石流はいろいろな形態に分類さ れ, 土石流の内部応力の支配因子の観点から, 砂礫型, 乱流型およびスリラー型に分類できるとしている.し かし,いずれの研究においても土石流を巨視的に連続 体の流体モデルとしているものである.

一方,離散モデルに基づく研究では,異粒径の粒子 がそれらの配置を分離する現象を分級現象,または分 離現象などと呼んでいる¹¹⁾.

基礎的には、物理的視点の研究も行われており、そこでは、原語のSegregationを偏析と訳し研究されている¹²⁾.この物理分野の基礎研究では、粒状体は固体的性質、流体的性質および気体的性質を表わすことができ、集密度と運動状態でこの3相を遷移するとし、流体的性質において偏析現象が現われるとしている^{11),12)}.以後、各々の研究の説明では、その研究で用いた用語に従うものとし、本研究に関するものは用語を偏析とする.

離散化モデルの研究例として,福間ら¹³⁾は2次元個別 要素法を用いて,粒状体の流れである石礫型土石流の 流れの特性と内部の構造との関連について検討し,流 下過程中の分級現象のメカニズムを考察した.また, 前田ら¹⁴⁾は,個別要素法を用いた粒子の流れの構造と 大粒径の浮き上がりを応力鎖の形成メカニズムによっ て,分級現象を考察している.つまり,文献10)の視点 からは,従来の「土石流において分級現象が生じ,先 頭部に巨礫が集中する」という前提は,限られた生起 条件が満足された場合にのみ現れるものとしている. その条件を図-1のメカニズムの模式図を用いて,次の

ように総括している. 1) 大粒径粒子は、同じ領域に小粒径粒子を置いた場合 に比して、接触している粒子の数が多いことで、その 領域の剛性が高くなり応力集中する特性を有している.

このため、底面にある凹凸と底面を流れる粒子から卓 越して大きな接触力の鎖(応力鎖)が大粒径粒子が浮 き上がる運動の源となる.

2) 大粒径粒子の浮き上がりが生じるには、応力鎖の元 となる適切な底面粗度(凹凸)が必要である.

3) 大粒径粒子の浮き上がりを生じる流速になるのは、 河床の傾斜角が安息角付近である.

4) 大粒径粒子の浮き上がりを妨げないように, 表層部 は間隙比が相対的に大きく緩い状態であることが必要 である.

5) シミュレーション結果においては、大粒径粒子が浮き上がるためには、最大粒径と最小粒径の比が5倍以上であることが必要である.

著者らも、透過型砂防堰堤の性能評価のため直線水路を使った実験を行っている¹⁵⁾⁻¹⁸⁾.これらは、構造物の性能評価に研究の焦点を置いているので、巨礫や流木が先頭部に分離集中する条件を生起させるため、底



図-1 大粒径の浮き上がり機構¹⁴⁾

面粗度を人工的に作り,偏析させている^{19,20}.しかし, 底面粗度や水流上面が異なると,偏析現象は生起しない.このように,直線水路における実験では,概して 土石流は静止から始まる運動の遷移過程にあるので, 未偏析状態の土石流が永遠に続くのか,あるいは偏析 状態の土石塊はそのまま偏析状態を続けられるのかに ついて判定できないという問題がある.

一方,回転円筒形装置の実験として,Hsuら²¹⁾は粒状体の集合体として礫,土および粘土を用いて,回転円筒内で材料の挙動を検討した.その結果,前方に盛り上がる傾向のあるケースや材料間の移動(混合)がほとんど行われないケースがあることを示している. Kaitna & Rickenmann²²⁾は,混合状態の礫材の安定する角度の計測や回転速度を変化させて運動状態を考察している.

また、堀田ら²³⁾は回転円筒水路を用いた高濃度固液 混相流における間隙水圧の評価を長水路における間隙 水圧との比較で、円筒内特有の粒子相と流体相の相違 や内部流による間隙水圧の変化について整理した.そ の後、層流状態の固液混相流における間隙水圧が静水 圧より大きな値となることを明らかにすることで水路 としての適用性を論じた.なお、これらの研究におい て、円筒内における運動状態の考察を行っているが、 大粒径が先頭に集中する偏析現象の生起条件について は、明らかにされていない.

粉体力学¹²⁾の分野では、容器の中に小粒子と大粒子 が混じり合っているとき、振動を加えると大粒子や重 い粒子が浮き上がるブラジルナッツ現象の研究が有名 である.そのメカニズムの説明には大きく二つがある.

その第一の説は、容器を振動させると、全ての粒子 が振動する.その際に、大粒子が浮かび上がると、今 まで大粒子があったところに隙間ができる.その隙間 に小粒子が入り込むことによって、大粒子が上昇する とするものである.

第二の説は、容器が縦振動すると、小粒子と内壁の 間に生ずる摩擦によって外側にある小粒子が相対的に



容器の下の方へ移動し、その動きが伝播して底面中央 にある粒子が押し上げられて登っていく対流のような 動きが生じることで、大粒子が上面に浮き上がるとす るものである.

しかし、このブラジルナッツ現象が土石流の分級メ カニズムのどの部分に関連付けられるのかについては 不明確である.このように、偏析現象については未解 明な点が多く、土石流の分級現象の生起条件も不明な 状態が続いている²⁴.

本研究は、従来の実験要領では捉えることが困難で あった偏析現象を安定的に生起させて分析するために、 回転円筒内に異なる粒状体の混合物を入れる.その状 態で、定速で回転させると円筒内で粒子塊が定位置に とどまりながら、内部では粒状体が複雑に配置変換す る定常状態を作り出す実験法を創案し、その平衡状態 における偏析現象の生起条件について検討するもので ある.そのうえで、個別要素法解析の混合粒状体を用 いて、偏析状態における要素間接触力や運動のメカニ ズムについて考察するものである.

2. 実験要領

(1) 実験装置

本研究で用いた実験装置は,図-2および写真-2に示 す外径92cm,深さ15cm,幅20cmの回転円筒型アクリ ル板流路を自転車のリムに連接したものである.この 円筒形流路にガラス球などの混合粒子を入れ、手動で 回転させる. その際, 自転車用の速度計を利用して底 面速度を計り,所定の速度で回転させる.この装置は, 従来使用されている直線流下水路において、仮に偏析 が生ずる条件下であっても偏析に必要な流下長を確保 できないという制約を克服できる利点がある.また, 条件が整うと偏析した粒子塊をほぼ同位置にとどめる ことができるので、固定されたビデオカメラで粒子塊 内部での粒子の運動が撮影できるという利点もある. 一方で、円筒形による底面の曲率があるため勾配変化 が伴うという不利点がある.この不利点を克服するた めには、半径を大きくする必要がある.しかし、本装 置は人力であるので大きな半径の装置にできないため、 このサイズにしている. なお,底面粗度については本 研究の検討事項から除外しアクリル板のままとする.

(2) 物理係数との関係

本節から(5)節にわたって、回転円筒実験装置におい て現われる特徴的な現象とその物理係数等との関係に ついて述べる.

図-3に、単粒子の運動によって生じる平衡点につい て示している.単粒子の場合に、仮に粒子の回転を止 めてゆっくりと円筒を回転すると、あるところで粒子 が滑り出す.この角度は、明らかにアクリル板と粒子 との静止摩擦角(θ_{IS})である.すなわち、静止摩擦係



数 (µ_{IS}) が次式で与えられる.

$$\mu_{\rm IS} = \tan(\theta_{\rm IS}) \tag{1}$$

また、回転円筒が等速で回転している状態で、この 回転の粒子がある位置に平衡して止まるならば、その 角度(θ_{Id})によってアクリル板と粒子との動摩擦係数 (μ_{Id})が求まる.

$$\mu_{\rm Id} = \tan(\theta_{\rm Id}) \tag{2}$$

粒子の回転を許した場合には、円筒の等速回転状態 で定点にとどまると、その角度(θ_{tr})は、転がり摩擦 係数(μ_{tr})を与える.

$$\mu_{\rm Ir} = \tan(\theta_{\rm Ir}) \tag{3}$$

(3) スティックスリップ現象²⁵⁾

図-4は、極めて遅く回転する円筒内の粒子塊の模式 図である.図-5(a)に示すように、この状態では隣接す る粒子間の接触摩擦により粒子の回転運動は拘束され るため、粒子配列およびその骨格構造が固定したまま で、塊全体が底面の回転とともに移動する.図-4に示 すように、この準静止状態では底面との摩擦が静止摩 擦係数より小さくて、滑動安定状態にある領域(*R*_s) と、滑動不安定な領域(*R*_u)とが一体となっている. 参考までに、その先頭の粒子塊の端部が平面とのなす 角は、粒子塊の有する安息角*φ*,より小さくなっている.

徐々に円筒を回転させ、粒子塊が高い位置に来ると、 滑動不安定な領域(*R_u*)が安定領域(*R_s*)に与える荷 重に対し、安定領域(*R_s*)の底面摩擦の抵抗力が耐え られなくなり、粒子塊全体が底面に対して滑動し始め る.すると、底面との摩擦力は動摩擦に移行し摩擦力 が弱くなるので、一気に前方へ移動する.その後、あ る程度進むと、動摩擦による抵抗力が、不安定力に勝 るためそこで停止し、底面との摩擦力が静止摩擦力に 支配される状態に戻る.回転円筒をゆっくりと回転さ せると、このように粒子塊全体が前後に移動する現象 を繰り返す.これは、粒子塊が一つの固体のように振 舞うものであり¹²⁾、スティックスリップ現象²⁵⁾と呼ば れている.

(4) 流動平衡状態

前述のスティックスリップ現象²⁵)における粒子の配 列が崩れない原因は、図-5(a)に示すように底面にある 粒子が転がるために必要な回転を粒子間の接触が邪魔 するからである.一方、図-5(b)に示すように最下面の 粒子は互いに離れて、その上部にある粒子を通じて、 接触状態を形成すると、全粒子が同調する回転運動が 可能になる.そのうえで、底面から受ける力と重力が バランスすると、その場に同じ塊の形状と粒子配列を 保ちつつ、塊が底面に対して流れているかのように振 る舞う流動平衡状態を作り出すことができる.

図-5(b)の機構は、粒状体が円柱のような2次元場では、比較的容易に生起し得るが、粒子が球形の3次元場では、状況が異なる。例えば、図-5(c)のように仮に規則的に並んで積まれても、2段目の1つの粒子が1段目の粒子4個に跨って乗ることになる。その場合に、接触点の幾何的対称性が崩れると、2段目の粒子が1段目の4個粒子から受ける回転速度に違いが生ずる。この速度の違いは、上段の粒子の回転軸と底面との平行性を失わせるために進行方向に対して直角方向の動きを生じさせる。ある点でこの動きが生ずると、隣接する架構



造に影響するため、次々と架構造の対称性が失われる. つまり、3次元場では仮に真球であっても、架構造の均一性を保つことは難しく、粒子群が完全な流動平衡状態になることは難しい.ただし、互いの粒子が細かく 接触と離反を繰り返していると、粒子の配列変換が緩 やかに行われる.このため、巨視的に回転円筒内に形 成された粒子塊は、同位置で同じ形の塊となる流動平 衡状態となることが可能である.図-5(d)は、流動平衡 状態における粒子塊の位置と拡がりを表す代表角度を 示す.まず、中心点が鉛直線を原点とし、先頭部の角 度を先端角(θ_U)、その塊の中心を平衡角(θ_C)後尾を 後端角(θ_U)とする.計測は、実験装置に直交したカ メラ撮影による写真から測定する.

(5) 気化状態¹²⁾

流動平衡状態よりも、さらに回転速度を大きくする と、粒子間の接触と離反が厳しくなり、お互いに接触 している時間の方が離反している時間よりも短い気化 状態¹²⁾となる.気化状態では、最上層の粒子は飛び跳 ねており、中層でも激しく衝突しあっている.図-6に 示すように、この塊の外形は巨視的に同一位置にとど まることもあるが、全体の位置が前後に一定の周期で 前後移動を繰返すこともある.

(6) 供試体粒子

使用した供試体粒子は,表-1と写真-3に示すガラス 球,ナイロン球,および固化石炭灰の3種類であり,ガ ラス球と固化石炭灰には,それぞれ3種類の粒径があり, 合計7種類となる.なお,ガラス球とナイロン球は,ほ ぼ真球であり,ガラス球の比重は2.6に対して,ナイロ ン球は1.1と軽くなっている.固化石炭灰は,石炭灰を 球状に丸めて固化させたものであり,表面には若干の 凹凸がある.固化石炭灰の比重は1.8である.なお,本 供試体の粒径については,比重の影響を検討するため, 8mmを最小として定めた.また,前田研究¹⁴にある5 倍粒径では,混在させる大粒径粒子の個数を極端に少 なくせざるを得ないことから最大を25mmとした.

(7) 実験ケース

実験は、単粒径粒子の物理係数を求める基礎実験を 行った後に、各々の粒子モデルの単粒子群の流動平衡 状態を生起させ、その状態の先端角、平衡角および後 端角を求めた.そのうえで、表-2に示す7ケースの2粒 径混合状態の実験を行った.実験ケースI~IIIではガラ ス球における異粒径の組合せを、実験ケースIV~VIで は石炭灰の異粒径の組合せによって偏析現象を検討し ている.実験ケースVIIは、ガラス球とナイロン球の同

CASE	供試体の組合せ	体積(体積比)	備考	
Ι	ガラス球 25mm & 15mm	2.680 (1:1)	25mm:160 個	
Π	ガラス球 25mm & 8mm	2.680 (1:1)	15mm:750 個	
III	ガラス球 15mm & 8mm	2.680 (1:1)	8mm:4000 個	
IV	固化石炭灰 30mm & 15mm	2.010 (1:2)		
V	固化石炭灰 30mm & 8mm	2.010 (1:2)	総量で組み合わせて管理	
VI	固化石炭灰 15mm & 8mm	2.680 (1:1)		
VII	ナイロン球 8mm & ガラス球 8mm	2.680 (1:1)	各粒子 4000 個	

表-2 2 粒径混合実験ケース

表-3 単粒子の性質

	平均粒径	静止摩擦係数(θ_{IS})	転がり摩擦係数 (θ_{lr})
	25mm	0.364 (20°)	$0.000~(0^{\circ})$
ガラス球	15mm	0.364 (20°)	0.000 (0°)
	8mm	0.364 (20°)	$0.000~(0^{\circ})$
ナイロン球	8mm	0.364 (20°)	$0.000~(0^{\circ})$
	30mm	0.364 (20°)	0.087 (5°)
固化石炭灰	15mm	0.364 (20°)	0.087 (5°)
	8mm	0.364 (20°)	0.087 (5°)



図-7 固化石炭灰の単粒子平衡

表-4 単	自粒子群の平衡角
--------------	----------

供試体粒子	平均粒径	粒子数(個)	代表角		粒子運動
			θ_L	70°	
	25mm	160	θ_C	28°	配置変換なし
			$ heta_U$	-15°	
	15mm	700	θ_L	60°	回転
ガラス球			θ_C	27°	
			θ_U	-5°	
		4,000	θ_L	50°	回転
	8mm		θ_{C}	24°	
			θ_U	-2°	
	8mm	4,000	θ_L	50°	回転
ナイロン球			θ_{C}	24°	
			θ_U	-2°	
	35~25mm	60	θ_L	51°	配置変換なし
			θ_{C}	20°	
			θ_U	-10°	
	20~10mm	約 700	θ_L	61°	回転
固化石炭灰			θ_{C}	29°	
			θ_U	-4°	
	10-5mm	約 4,000	θ_L	50°	
			θ_{C}	25°	回転
			θ_U	-1°	

一粒径であるが,異比重の組合せによる実験である.

各ケースごとに,底面速度v=0.2m/sから,0.1m/sずつ 増加させて1.4m/sまで実験を行い,その後2.0m/sと 3.0m/sの実験を行った.

3. 実験結果と考察

(1) 単粒子および単粒子群の実験

ガラス球1個を底面速度v=1.0 m/s~3.0 m/sの回転円 筒内に置くと粒子は、最下面($\theta=0^\circ$)において、その 場にとどまるように回転する.回転速度によっては、



図-8 平衡角~底面速度関係(単粒径粒子群)

底面のわずかな凹凸の影響によって上下に跳躍するこ ともあるが、最下面において平衡状態となる.

固化石炭灰は、粒子表面に凹凸があるので、ガラス 球のように完全に平衡状態にはならず,図-7に示すよ うに最下面において, 左右 2cm 程度の範囲で跳躍しな がら最下面付近にとどまる.この場合の摩擦係数は, 平均位置で求めるものとすると、得られた各粒子の転 がり摩擦係数は,表-3のようになる.なお,表-3には, 文献 25)の傾斜法による静止摩擦係数の測定により求 めた底面と各粒子の静止摩擦係数も示している.なお, この傾斜法は物体を傾斜に乗せ、徐々に傾斜を傾けて いきその最大の傾斜角によって決定する.この方法は,

形状や物体の大きさに制約を受けることや、外部の振 動によって値が変化すると言われているが、実験ごと のばらつきは大きくなかった.

(2) 単粒径粒子群の実験

2 粒径混合実験に先立って単粒径粒子群の平衡塊を 形成させ、平衡角に及ぼす粒子数の影響について調べ た.表-4には、収束した平衡塊の平衡角、先端角およ び後端角を示す.まず,図-8にガラス球3種類の平衡 角~個数関係を示す. 図中の線の中央にある丸は θ_C に、上下に伸びる線の上下端はそれぞれ先端角 θ_L 後 端角 θ_Uに対応している. 図-8(a)に示す 25 mm ガラス



球においては、100 個では θ_c =10°であるが、160 個で は、 θ_c =25°となり平衡角が大きくなる. しかし、200 個以上では θ_c =28°と一定値に収束し、300 個以上にな ると、先端および後端角もそれぞれ θ_L =-13°、 θ_U =73° と一定値に収束している. 同様にガラス球 15mm では、 700 個以上で θ_L =-5°、 θ_c =27°、 θ_U =60°に、8mm ガラ ス球は 3000 個以上において、 θ_c =24°、 θ_U =50°、 θ_L = -2°の収束値が得られる.

ところで、平衡状態の粒子の配列変換について観察 してみると、粒径 25mm ガラス球は、図-10(a)のよう な塊を形成し配列変換は生じない.すなわち、図-5(b) に示したように個々の粒子がわずかに離れて、相互の 回転を許す状態となり、その場で回転できるため平衡 塊の中での粒子の配置変換せずにとどまっている.一 方、図-10(b)に示すように15mm および8mm ガラス球 の粒子群は、先頭部にある粒子が、下層を通り後方に 下がり、後端付近に到達すると平衡塊の上層に浮き上 り、上層を先頭部に移動することを繰り返している. すなわち、平衡塊全体が、回転円筒と同じ方向に循環 している.なお、固化石炭灰の単粒径粒子群も同様の 配列変換を示す.

(3) 2 粒径混合実験

図-9は、実験ケース I, II, III のガラス球を用いた 2 粒径混合実験の平衡角~底面速度関係を示す.参考ま でに、図中に破線で囲んだ領域は、同一速度の 2 つの 状態が現れることを示している.また、図-11~13 に は、典型的な現象の模式図を示している.

図-9(a)の25mm ガラス球と15mm ガラス球の混合実 験では、0.1m/s より遅い速度においてスティックスリ ップ現象を示し、0.4m/s の底面速度に達すると平衡塊 を形成し偏析する.スティックスリップ現象は、図 -11(a)に示した粒子塊が前方にある場合、大粒径であ る25mm 粒子は、 θ_c =21°を中心に θ_L =-11°、 θ_U =53°の範 囲に分布するのに対して、小粒径の15mm 粒子は、 θ_c =25°を中心に θ_L =-10°、 θ_U =59°の範囲に分布している. つまり、偏析していない.これが、円筒の回転に伴っ て、図-11(b)の後方に移動した状態となり、突然滑り 出して図-11(a)に戻る.以後、この2つ状態を相互に 移行することを繰り返す.



次に,底面速度 v=0.4m/s 以上になると,図-12(a)の ような未偏析の初期状態から、図-12(b)に示すように、 大粒径の 25mm の粒子群は、 $\theta_c=12^\circ$ を中心に $\theta_{U}=34^\circ$ 、 θ₁=-10°の範囲に分布し、小粒径の15mm 粒子は、θ_c=27° を中心に $\theta_{I}=55^{\circ}, \theta_{I}=-3^{\circ}$ の範囲, つまり後方に分布す る偏析状態となる.表-4 によると 25mm 粒子のみの単 粒子群による平衡塊の中心角は、 $\theta_c=25^{\circ}$ であるので、 混合状態での25mm 粒子塊は、単粒径塊に比して、相 対的に 13°程前方に押し出されている.一方, 15mm 粒 子のみの粒子塊による平衡塊の中心角は、 $\theta_c=27^\circ$ 、先 頭角,後端角はそれぞれ θ_L =-5°, θ_U =60°であるので, 混合時も平衡角は変わらない.しかし、先端角 (θ_r), 後端角(θ_U)の差が大きくなり、より広域に分布して いる. 同様の偏析状態は、1.4 m/s までほぼ同じように 保たれるが、小粒径粒子と大粒径粒子の平衡角が徐々 に近づいている.

その後、底面速度 v=2.0m/s になると、2 つの粒子群 は、大粒径と小粒径との平衡角がそれぞれ θ_c =14°と 20°となる.よって、大粒径である 25mm 粒子の分布範 囲が拡がって2 つの分布域がほぼ同じになり、明瞭な 偏析を視認できなくなる.さらに、3.0m/s になると図 -13 に示すような気化状態となり、その塊は周期的に 大きく前後移動する.その際、後方に至るときの粒状 体分布域において 25mm 粒子は、 θ_L =9°、 θ_c =31°、 θ_U =52°の範囲に、15mm 粒子は、 θ_L =11°、 θ_c =41°、 θ_U =71°の範囲である.また、前方に至るときの粒状体分 布域では、25mm 粒子は、 θ_L =-27°、 θ_c =-7°、 θ_U =13° の範囲に、15mm 粒子は、 θ_L =-25°、 θ_c =3°、 θ_U =30° とやや後方に分布する.このように、粒子は乱れるように飛んでいるが、その中で大粒径 25mm が前方に集まる傾向があり、気化状態においても偏析しているとも見受けられる.

図-10(b)には、25mm 粒子と8mm 粒子の混合実験の 結果を示しているが、概ね図-10(a)と同傾向である.

しかし、図-10(c)における 15mm 粒子と 8mm 粒子の 2 粒径混合実験では、やや異なる現象を示す.写真-4 に,15mm ガラス球と8mm ガラス球の混合実験に現れ る3つの典型的な状態を示した.写真-4(a)に示す底面 速度 v=0.4~0.6m/s においては, 通常の偏析状態になり 緑色の 15mm 粒子が白色の 8mm 粒子の上層に乗り前 方に集まっている.しかし、回転速度を増して底面速 度 v=0.7m/s 以上になると、最初は図-14(a)に示すよう に偏析するが、少し時間を経過すると写真-4(b)および 図-14(b)に示すように未偏析状態になる. その後, 時 間の経過とともに再び偏析状態になり、その後未偏析 となることを繰り返す. これを循環偏析と呼ぶものと する. つまり、粒径の差異が小さいと、偏析の発生条 件に周期性が生ずることになる.また,写真-4(c)は底 面速度 v=3.0m/s で現れた気化状態を示している. 15mm 粒子も 8mm 粒子も均質に混ざり, 8mm 粒子は 写真でも明瞭に判るほど飛び跳ねて、円筒底面から高 く跳躍し拡散し,偏析していない.このように粒子全 体が互いに離れた状態となるため、塊の外形線は、他 の2つ写真に比して膨張したようにも見える.

CASE	供試体番号	$\theta_U(^\circ)$	$\theta_C(^\circ)$	$\theta_L(^\circ)$	偏析の有無
Ι	ガラス球 25mm	34	12	-10	厚托
	ガラス球 15mm	55	27	-3	1曲朳 有(0.4~2.0m/s)
II	ガラス球 25mm	34	12.5	-9	原托
	ガラス球 8mm	53	23	-7	1冊初 有 (0.4,~2.0m/s)
	ガラス球 15mm	36	16	-4	偏析 有(0.4~0.6m/s)
111	ガラス球 8mm	52	23	-6	循環偏析(0.7~2.0m/s)
	固化石炭灰 35~25mm	34	15	-4	厚托
IV	固化石炭灰 20~10mm	51	25	-1	1偏析 有(0.4~1.2m/s)
V	固化石炭灰 35~25mm	40	16	-8	厚拆 友 (0.4 g + 2 m/s)
V	固化石炭灰 10~5mm	59	27	-5	1冊初 有 (0.4,~1.2m/s)
VI	固化石炭灰 20~10mm	58	25	-8	信垢わり
	固化石炭灰 10~5mm	58	25	-8	
VII	ガラス球 8mm	57	23.5	-10	何 折わ1
	ナイロン球 8mm	57	23.5	-10	

表-5 偏析発生区分



(a) $t=t_0$



(b) $t=t_0+2.0s$



(c) $t=t_0+2.7s$



(d) $t=t_0+4.1s$

(e) $t=t_0+4.7s$ 写真-5 偏析時の大粒径粒子の運動(25mm ガラス球+8mm ガラス球)

図-15 に、固化石炭灰混合実験において偏析したケ ースの平衡状態の変化について平衡角~底面速度関係 を用いて示す. 図-15(a), (b)ともに, 図-10(a)のガラ ス球の25mm 粒子と15mm 粒子の混合実験と同様な傾 向を示している. つまり, 図-15(a)に着目すると粒径 35 mm~25mmと粒径 20mm~10mmの混合実験である が、0.2m/s 以下で、スティックスリップ現象を示し、 その後、底面速度 0.4m/s~2.0m/s では、平衡塊となり 偏析している. すなわち, 粒径 35~25mm 粒子は, $\theta_{C} = 15^{\circ}$ を中心に $\theta_{L} = -4^{\circ}, \theta_{U} = 34^{\circ}$ の範囲で分布するが, 粒径 20~10mm 粒子は, $\theta_c \rightleftharpoons 25^\circ$ を中心に $\theta_U \rightleftharpoons 51^\circ$, θ₁≒-1°の範囲に分布している. このとき, 大粒径の 35 ~25mm 粒子は、単粒子群の実験における中心点も上 下端角も小さくなり、分布幅 ($\theta_{II} \sim \theta_{I}$) が小さくなっ ている.

一方,小粒径 20~10mm 粒子は,平衡角は単粒径実 験とほぼ同じであるが、後端角 θ_U は単粒径実験時より も大きく, 先端角 θ, は小さくなって広域に分布してい る.つまり,ガラス球の偏析現象と同様の傾向にある. しかし,ガラス球より低速の2.0m/sで気化状態となる. その際、ガラス球のように一定の領域にとどまること はない. すなわち, 表面に凹凸がある粒子群では, 平 衡塊を形成できる底面速度の領域が狭まっている.

(4) 偏析現象の生起区分

表-5に,各実験の偏析現象の発生区分の総括を示す. 実験ケースI~Vでは、明瞭に偏析が現れている.同じ 固化石炭灰においても、 20~10mmと10~5mmの2粒 径混合状態の実験では偏析していない. これは, 平均 粒径の差異が、1.5倍程度であり、一部の粒径が重複し



ているためと思われる.また,実験ケースVIの粒径が 同じ8mmであるが,比重の異なるガラス球とナイロン 球の混合実験も偏析現象は生起じない.これは, Williams²⁶⁾の指摘したブラジルナッツ効果では,比重が 軽い方が浮き上がりやすいとすることとは,異なるも のとなった.

(5) 大粒径の先頭部集中機構

写真-5には、25mmガラス球と8mmガラス球の混合 実験の底面速度v=0.8 m/sの粒子状態をビデオ映像のコ マ送りによって示す.図中の白丸は、25mm粒子の一 つをトレースしている.まず写真-5(a)では、この粒子 は先端の下層にある.その後t =t₀~2.7sで下層を伝わっ て平衡塊中間まで逆上っている(写真-5(b)、(c)).こ こで、後方の小粒径粒子群に押されるように逆上る速 度が小さくなり(写真-5(d))上層に浮上する.一旦浮 上すると上層部を前方にかけ下るように移動し(写真 -5(e)~(f))、先端で最上層に落ちて、写真-5(a)の状態 となる.

このように、大粒径粒子は平衡塊の前半分の領域を 円筒の回転方向と同じ(写真では時計回り)回転方向 で長楕円のような移動軌跡を形成する運動を行ってい る.

4. 個別要素法による解析

粒状体の挙動について個別要素法を用いて解析する ことが多い^{13,14,27-30}.よって、本実験で観察された偏 析および粒子の運動特性について個別要素法の再現能 力を確認することは、今後の研究にとって有用と考え られる.そこで、円柱要素を用いた個別要素法解析^{23,24)} を応用して、ガラス球の実験結果を解析した.

衣-0 胜灯基平旭					
項目				値	
	25mm ガラス球モデル			160 個	
磁西志	15mm ガラス球モデル			750 個	
條安希	8mm ガラス球モデル			5000 個	
	比重			2.6	
枠要素	円柱形要素				362 個
	げわ学物	法線方	向 K _n	(N/m)	1.0×10^{6}
	はなんに対	接線方	向 K _s	(N/m)	3.5×10^{5}
要素間	減衰定数 h			0.2	
ばね	粘着力 c(N)			0	
	要素間	礫間			0.268(15°)
	摩擦係数	$tan \; \phi_e$	礫-枠	間	0.364(20°)
計算条件	時間刻み ∆	<i>t</i> (s)			1.0×10^{-6}

表-6 解析基本值

(1) 回転円筒の解析モデル

解析は、実験の中で典型的な挙動を示す単粒径のガ ラス球 25mm, 15mm, 8mm と, 2 粒径混合については、 25mm と 8mm および 15mm と 8mm の混合実験につい て、底面速度 v=1.0m/s のケースについて行った。

本解析では、実験装置の底面について、図-16(a)に 示すように360個の円柱要素を半径の0.3%分ずつずら して重ね合わせることによって、ほぼ滑らかな曲面と なるように配列した.なお、図-16(b)のように球形要 素が漏出しないよう側面(両面に配置)にも同様に円 柱要素を配置している.

そのうえで、底面速度が 1.0m/s となるようにこれら の要素を実験と同様に回転させた.また、ガラス球は 球形要素を用いて、実験と同条件である粒径 25mm、 15mm、8mm、比重は 2.6 としてモデル化した.なお、 要素間粘着力および摩擦角は、要素間は粘着力をない ものとし、 $\tan \varphi_e=0.268(\varphi_e=15^\circ)$ 、礫と底面との摩擦は、 $\tan \varphi_e=0.364(\varphi_e=20^\circ)$ とした.それぞれの摩擦係数は、 **表**-3 に示す静止摩擦係数を用いた.なお、ばね定数は、 実験で用いた粒子の物理的性質を表現することが望ま しいが、解析時間が過大になるため $\Delta t=1 \times 10^6$ s に対 して発散せず安定して解析可能であるものとした.ま た、減衰定数はパラメトリック($h=1.0\sim0.1$ の間)に 検討し、要素間の過剰な振動を制止できる最小値であ るh=0.2とした.以上の解析基本値を**表**-6 に示す.

粒子モデルの初期配置は,静止した円筒内に要素を 自重による盛土形状を形成させる落下法²⁹⁾により配置 した.その際,2粒径混合状態のときは,実験の初期 条件を真似て,最初に大粒径要素を落下配置した後, 小粒径要素を落下させ,大粒径要素の上に小粒径要素 が覆い被さるように配置した.

(2) 単粒径粒子群の解析

単粒径粒子群の解析は,実験と同様に安定した平衡



塊を形成した. 図-17 に, 粒径 25mm, 15mm および 8mm の解析で形成された平衡塊を示す.また, 表-7 に,解析で得られた分布域を実験値と比較して示す. 図-17(a)の粒径 25mm のケースでは,先頭部に2段重 ねの層ができ,その後には一段の層が続いている.こ れらの粒子には配列変換は生じない.その分布域は, 実験が θ_L =50°, θ_C =23°, θ_U =-5°であるのに対して,解 析は θ_L =52°, θ_C =23°, θ_U =-6°となっており,良く一致し ている.

粒径 15mm のケースでは、各粒子が位置を変えなが ら図-17(b)の全体形状を保つが、その分布域は、実験 が θ_L =61°、 θ_c =28°、 θ_U =-5°であるのに対して、解析は θ_L =62°、 θ_c =28°、 θ_U =-5°となっており、これも良く一致 している.

さらに、粒径 8mm のケースでは粒径 15mm と同様 に配置変換しながら、全体形状は同じ形を保っている. その分布域は、実験が θ_L =54°, θ_C =24°, θ_U =-7°に対して、 解析は、 θ_l =58°、 θ_c =24°、 θ_l =-10°であり、実験に比し てやや広域に広がるものの概ね一致している.

なお、各解析における粒子の運動状態を分析するため、平衡塊中におけるある1つの要素の移動軌跡を示 すと、図-18のようになる.図-18(a)の粒径25mmのケ ースでは、最後端と最先端の要素の運動を示している が、これらは60mm程度前後に往復しながら、ほぼ同 じ位置にとどまっている.すなわち、図-5(a)で説明し た機構で後端部分が、図-5(c)で説明した機構で先端部 分がバランスするように、各々の要素が一定の回転と 移動を繰り返している.一方、図-18(b)、(c)の粒径 15mm、8mmのケースでは、要素が底面沿いに後方へ 向かって登った後に、後端付近で上層部に浮き上がり、 平衡塊の上層を伝わって一気に先頭部へ下り、その先 端で底面に落ち、平衡塊の下層を逆に登ることを繰り 返す.巨視的には、移動軌跡が回転円筒内と同じ回転 方向の長楕円となり循環していることになる.



(3) 2 粒径混合解析

図-19(a)に、25mm 粒子(160 個)と8mm 粒子(5000 個)との2粒径混合解析で得られた平衡塊の様子を示 すが、実験と同様な平衡塊を形成している.その分布 域は、粒径25mmの要素群は、 θ_U =-8°、 θ_c =11°、 θ_L =30° であり、粒径8mmの要素群の θ_U =0°、 θ_c =25°、 θ_L =59° に対して、前方に位置していることがわかる.参考ま でに、粒径25mmの要素群の平衡角 θ_c は、その単粒径 群解析における平衡角(解析)が θ_c =23°であったのに 対して小さくなっており、解析においても前方に押し 出されていることがわかる.この定性的な傾向は、表 -7 に示すように分布域の数値においても実験値と概 ね一致している.図-19(b)には、粒子の軌跡図を示し ているが、図-10(b)の実験と同様に、小粒径粒子と大 粒径粒子は、ともに時計回りの移動軌跡を描き移動し ている点や、大粒径粒子が全平衡塊の平衡角 θ_c 付近で、 大粒径粒子が浮き上がっている点も実験と同傾向である.

図-20には、15mm(650個)と8mm(5000個)の2 粒径混合の解析結果を示す.この解析においては、時 間を追って状態が変化した.すなわち、初期の混合状 態から大粒径粒子が後方に下がり(図-20(a))、浅層部 一面に広がり速い流れに乗り、大粒径が前方に集中す る(図-20(b)).この状態がしばらく続くものの、時間 とともに下層の大粒径粒子が後方に逆上るようになり、 やがて図-20(c)に示すような全体的な混合状態になる. すなわち、写真-4(b)もしくは図-14(b)で示した混合状 態となる.実験においては、この後に再度偏析した後、 非偏析となることを繰り返した.しかし、解析では一 旦均質な混合状態になると、再度偏析することはなく、 実験の循環偏析現象を再現できなかった.これは、実 験では手回しでビデオ撮影後に回転速度が一定である



図-24 流下中の速度分布

ことを慎重に確認したが、完全に一定でないことなどの解析とは異なる点が寄与している可能性がある.

(4) 粒子間接触力

図-21 に, 偏析現象を示した図-19 に対応する解析に おける接触力分布の推移を示す.なお,図-21 におけ る各粒子サイズは実物の 1/5 にしており,粒子の色分 けは,図-19 と同じである.紫色で示した接触力は 2 つの粒子の中心点を結ぶ線で方向を示し,接触力の大 きさに応じて太くしている.まず,先頭部において図 -21(a)に示しているような大粒径要素を底面が斜め後 方へ突き上げる力が頻繁に生じ,粒子の前方への移動 を制動する.

その後,この先端に生じた制動力によって大粒径要素が逆上るにつれて後方へ移動し、また上層の大粒子にも、伝達する機構を形成する.そして図-21(c)に示すように 0.6s では、大粒径の存在する先端から中間部の広い範囲に多くの強い制動力の分布が生じている.

これは、図-1で示した前田ら¹⁴⁾の指摘と類似している. 一方の小粒径要素は、大粒径要素に囲まれた領域においては、大きな接触力を発揮することもあるが、後方の領域では、ほとんど大きな接触力は発生せず、お互いに離反している状態も多い.この結果、大粒径要素は、平衡角(θ_c)付近において、後方から不安定状態 のため、相対的に大きな速度で迫ってくる小粒径要素 に押し込まれて強く拘束される小粒径粒子群に囲まれ て、周囲を拘束されつつ押し上げられ、浮き上がって いるようである.このことは、図-4で示した安定領域 *R*_sと不安定領域*R*_uとの境界部領域において、ブラジル ナッツ効果を頻発しているとも考えられる.

(5) 粒子速度

図-22には、**図-19**に対応する各粒子の速度ベクトル を示す. ここでは、25mm 要素が前方に移動している ものを赤線で、後方に移動しているものを、紫線で示 している. また, 8mm 要素は前方に移動しているもの を緑線で、後方移動を青線で示している. 図-22 より 最下層には、黄色線もしくは青線が多く現れる. すな わち、最下層では底面の回転と同方向に粒子が移動し ている.一方、上層部では緑や赤線が多く、また長い 線が多いことから、前方へ向かって速く移動している ことがわかる.なお、大粒径と小粒径が混合している 領域では、上層部または中層部の速度はあまり大きく はない. さらに、平衡角の領域では大粒径要素の速度 ベクトルが上向きのものがあり、小粒径要素は下向き もしくは後方のものが混在する. すなわち, 平衡角周 辺領域で小粒径がせめぎ合って、その中で大粒径要素 が浮き上がることがわかる.

これを図-4 で示した安定・不安定領域区分が動的な 領域にも適用できるとして考察すると、傾斜が急で礫 塊に対する底面摩擦が不足する領域と、逆に底面から の摩擦力が利いて制動している領域の境界領域におい ては、粒子速度ベクトル分布に乱れが生じ、その乱れ の作用によって、ブラジルナッツ効果が現われて、大 粒径粒子が上層に浮き上がると解釈できる.

図-23 には、図-19 で示した解析の粒子群を深さ方向 に4層に区分し、底面層、中間層1と2、および上層 とし、それぞれの領域内における粒子の速度の頻度分 布を示した.回転円筒内の底面層の最頻値は, -0.005m/s であり、半分以上は、-0.4m/s を中心とする 負の速度を有している. つまり,後方に上っているこ とがわかる.中間層1と2の最頻値は、それぞれ0.08m/s, 0.17m/s であり、大半が前方に流れていることがわかる. さらに上層では、最頻値が 0.25m/s となり、ほぼ全要 素が前方に向かっており、中間層よりも早く流れてい ることがわかる.よって、大粒径要素が上層に浮き上 がると一気に前方まで流されることがわかる. 図-23 の上側に示した横軸は、底面との相対速度を示してい るが、実速度 0.7m/s で後方に移動している粒子は、底 面との相対速度では、0.3m/s で前方に移動しているこ とを示している.

図-24 に、実速度分布と相対速度分布の意味を模式 図として示す.回転円筒内の運動は、図-24(a)に示す ような実速度分布を示している.すなわち、底面層は 円筒の回転方向に沿って後方に移動するが、ある中間 層より上層では、前方に進む逆方向への運動となる. しかし、図-24(b)に示すように底面を固定した場合の 粒子の運動として見るならば、底面でも前方に小さい 速度で進んでおり、上層になるに従って速度が大きく なる.つまり、高橋¹⁰が示しているように、速度差に よるせん断応力が内部に生じる直線水路における土石 流の速度分布と同じ意味を有している.つまり、回転 円筒実験は、直線水路内で生起する土石流の一形態を 定常化しているものと考えられている.

5. 結 言

本研究は、2 種類の異なる粒状体を混合して回転円 筒内で礫塊を流動状態にし、その偏析現象を観察でき る実験法を創案し、混合条件や回転速度による偏析現 象の生起条件や、その際の粒状体個々の運動について 考察したものである.また、個別要素法による解析も 行い、その適用性や偏析現象における解析的な補足の 考察をした.

本装置の特徴は、流動塊を定点に停められることで

あり、このため、偏析現象の生起・非生起区分をでき ることであるが、条件によっては、未偏析と偏析状態 を交互に繰り返すことも新しい知見として得られた. 以下に本研究で得られた知見を要約する.

- (1) 回転円筒内実験装置を用いて,2粒径混合状態のガ ラス球に生起する偏析現象を生起できることを示 した.
- (2) 偏析時の小粒径群の平衡角は単粒径粒子群のもの と等しく、大粒径群の平衡角は単粒径粒子群のも のより小さくなる.すなわち、混合状態の配列変 換中で生じるメカニズムによって、前方に押し出 されて集中している.
- (3) 粒径差の小さいガラス球15mmと8mmでは, 偏析 と未偏析を繰り返す循環偏析現象を示した.
- (4) 球形差の小さい異粒径の固化石炭灰でも,30mm 程度の大粒径粒子を用いた場合に偏析現象を確認 できた.
- (5) 同一粒径で比重の異なるガラス球とナイロン球の 組み合わせにおいては,偏析しなかった.
- (6) 個別要素法は、ガラス球における2粒径混合実験の 偏析現象を比較的容易に再現できることを示した.
- (7) 個別要素法解析によると、前田ら¹⁴⁾の指摘と同様に偏析現象では、先頭部に集中している大粒径要素に対する底面からの制動力が重要な働きをしていることを示した。そのうえで、平衡塊の中心あたりにおいて、後方の不安定塊と前方の安定塊とのせめぎ合いが生じると、その領域では、速度ベクトル分布に乱れが生じ、そのためブラジルナッツ効果と同様な大粒径の浮き上がり、偏析現象を生起させる。
- (8) 個別要素法解析において,偏析状態における平衡 塊内部の流速分布を分析した結果,固定床におい て底面から上部にかけて流速が増し,せん断応力 を生じされる従来の固定床実験と同様な機構とな っていることを示した.
- (9)本研究では、理想的な球形供試体を用いており、 実礫材の凹凸形状の影響については未解明である。 また、水や細砂が混在することも未検討であり、 土石流との関連性については多数の検討事項が残 されている.さらに、本研究で用いた実験装置は、 人力であるので、速度制御の正確性に制約がある。 このため、電動化や円筒半径の大型化などの改良 が求められる。

参考文献

 荻原幸男監修:日本の自然災害 1995~2009 年-世界 の大自然災害も収録-, p.320,日本専門図書出版, 2009.7.

- 田畑茂清,守山浩史:鋼製透過型えん堤工法・設計法の変遷と課題,砂防学会誌, Vol.64, No.6, pp.47-51, 2010.3.
- 財団法人 砂防・地すべり技術センター 鋼製砂防構造 物委員会編集:平成21年版鋼製砂防構造物設計便覧, エッセイエブロ,2010.
- 4) 地盤工学会:ジオテクノート12 土石流, 2003.5.
- 5) 諏訪浩:土石流先端への大岩塊の集中機構,京大防災 研究所年報, Vol.31, B-1, pp.1-31, 1988.4.
- 大同淳之:急勾配上の多量の砂れきを含む流れの流動 特性,第18回水理講演会論文集, Vol.18, pp.199-203, 1974.8.
- Bagnold, R. A. : Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear, *Proc. Roy. A*, Vol. 225, pp. 49-63, 1954.
- 8) 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,No.336, pp.75-84, 1983.8.
- 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,第 357/II-3, pp.25-34, 1985.5.
- 10) 高橋保: 土石流の機構と対策, 近未来社, 2004.9.
- 田口善弘:砂時計の七不思議-粉粒体の動力学,中公 新書,1995.5.
- J. Duran 著,中西 秀,奥村剛訳:粉粒体の物理学, 2002.6.
- 13) 福間雅俊,前田健一,湯浅知英:石礫流れ中の分級と 跳返りのメカニズムに関する考察,実務利用を目指す マイクロジオメカニックスに関するシンポジウム, pp.1-6, 2008.11.
- 14)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.3-14,2011.6.
- 15) 渋谷一,原木大輔,香月智:透過型砂防えん堤の流木 混じり土石流の捕捉性能に関する実験的研究,砂防学 会誌, Vol.62, No.1, pp.66-73, 2009.5.
- 16) 渋谷一,香月智,大隅久,石川信隆,水山高久:流木 捕捉工の捕捉性能に関する実験的研究,砂防学会誌, Vol.63, No.3, pp.34-41, 2010.9.
- 17) 渋谷一,香月智,大隅久,石川信隆:根付き流木モデ

ルによる流木捕捉工の捕捉効果に関する実験的検討, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.1087-1094, 2011.3.

- 18) 渋谷一,香月智,國領ひろし,大隅久,石川信隆:透 過型砂防えん堤に作用する流木混じり土石流荷重に 関する実験,砂防学会誌, Vol.65, No.1, 2012.5.
- 19) 足立昭平:開水路における桟型人工粗度の実験的研究, 京都大学防災研究所年報, Vol.3, pp.17-33, 1959.12.
- 20) 足立昭平:人工粗度の実験的研究--桟型粗度と溝型粗度-,京都大学防災研究所年報,Vol.4, pp.185-193, 1961.3.
- Hsu, L., Kaitna, R., Edietirich, W. and Sklar, R. S. : Boundary shear stress of granular flows, IJEGE, B-038, 2011.3.
- 22) Kaitna, R. and Rickenmann, D. : Flow of different material mixtures in a rotating drum, DFHM07, 2010.11.
- 23) 堀田紀文, 宮本邦明, 鈴木雅一, 太田猛彦:回転円筒 水路を用いた高濃度固液混相流における間隙水圧分 布の測定, 砂防学会誌, Vol.50, No.6, pp.11-16, 1998.3.
- 24) 岩田知之, 堀田紀文, 鈴木拓郎: 混合粒径土石流の分 級現象が流動に及ぼす影響に関する研究, 平成 24 年 度砂防学会研究発表会概要集, pp.392-393, 2012.5.
- 25) 田中久一郎:摩擦のおはなし, pp.133-134, 日本規格 協会, 1985.3.
- 26) Williams, J. C. : The segregation of particulate materials : A review, *Powder Technology*, Vol. 15, pp. 245-251, 1976.
- 27) 澁谷一, 堀口俊行, 香月智, 大隅久, 石川信隆: 円柱 形集合体要素を用いた個別要素法による根付き流木 の捕捉シミュレーション, 土木学会論文集 A2 (応用力 学), Vol.67, No.2, pp.I_323-I_334, 2011.8.
- 28) 堀口俊行, 澁谷一, 香月智:集合体要素を用いた礫中 詰材の単純せん断抵抗力解析,構造工学論文集, Vol.58A, pp.104-117, 2012.3.
- 29) 伯野元彦:破壊のシミュレーション-拡張個別要素法 で破壊を追う-, pp.40-53, 森北出版, 1997.
- 30) 渋谷一,原木大輔,香月智:3元個別要素法による透 過型砂防えん堤の流木混じり土石流の捕捉シミュレ ーション,応用力学論文集,Vol.12, pp.449-460, 2009.8.

(2013.4.19 受付)

SEGREGATION EXPERIMENT OF SPHERICAL GRAINS IN ROLLING CYILINDER AND ITS DEM ANALYSIS

Toshiyuki HORIGUCHI, Satoshi KATSUKI and Hiroki NAGAIKE

This paper presents segregation phenomena of spherical grains observed in a rolling cylinder and its analysis by using the DEM. The rolling cylinder experimental device in which grains flow down relatively along the rolling bottom plane and grains stay constantly in a position of rolling cylinder is proposed. Therefore grains movement in those groups can be observed. In experiment 3 size glass beads, one size nylon bead, and 3size harden coal ash beads are used, and two of them are combined as a sample. Segregation occurrence combination is categorized. Moving characteristics of large size grain and small size grain is discussed by analysis results of DEM as well as experimental observations.