土石流の挙動に関する解析と磁界を用いた計測システム

Simulation and sensing system for behavior of mudflow

川村洋平1•杉山文乃2•倉岡千郎3•松島亘志4•大川浩一5

Youhei KAWAMURA, Ayano SUGIYAMA, Senro KURAOKA, Takashi MATSUSHIMA and Hirokazu Okawa

1 正会員 工博 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 講師 (〒305-0001 茨城県つくば市天王台 1-1-1)
2 工修 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 (〒305-0001 茨城県つくば市天王台 1-1-1)
3 正会員 工博 日本工営株式会社 (〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原 2304)
4 正会員 工博 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 准教授 (〒305-0001 茨城県つくば市天王台 1-1-1)
5 工博 秋田大学 工学資源学部 助教 (〒010-8502 秋田県秋田市手形学園町 1-1)

In Japan, there are many precipitous mountains. Because of it, mudflow often occurs in rainy and typhoon season. Countermeasure for mudflow is required as soon as possible, but prediction system of mudflow has not been established yet. The purpose of this study is to establish the simulation of mudflow that is useful for countermeasure for mudflow. In flowing mudflow, boulder comes floating and it moves ahead of a flow. This phenomenon has been confirmed and published. But it has not been figured out. In this paper, this phenomenon is reproduced by the DEM simulation. And, the new measurement method for verifying the validity of a simulation is proposed. Electromotance is used for this system to be able to sense position of invisible boulder.

Key Words mudflow, sensing, DEM, simulation, electromotance

1. はじめに

日本の国土はその3分の4が山地であり急峻な地形で あるため,毎年降雨が集中すると各地で土石流が頻発し, 多くの尊い人命や財産が失われている.2006年7月, 長野や北陸,山陰,九州地方で,の~9000戸が浸水す る集中豪雨が発生した.長野県岡谷市においては,19日 未明に豪雨による土石流が発生し,死者7名,行方不明 者1名という尊い人命が失われた.また,住宅や農業施 設,道路など貴重な財産が,土石流による甚大な被害を 受けた.土石流に対しての早急な対策が求められており, その一つとして砂防堰堤が挙げられる.砂防堰堤の設計 手法は未だ確立されておらず,経験則に基づき試行錯誤 しているのが現状である.

土石流が流下する間に、巨礫が泥や小さい礫の上に乗 り上げ土石流の上層部に浮き上がる現象が確認、報告さ れている¹⁾. 土石流の流下する速度は底面部と比較し上 層部の方が速いため、上層部に浮き上がった巨礫は流れ に乗り土石流の先頭部に押し出されるものと予想されて いる. この、巨礫が浮き上がる挙動についてのメカニズ ムはまだ解明されていない.メカニズムが解明されると、 計算により土石流の挙動の再現が可能になる. そして、 シミュレーションを用いて様々な試行を行い、砂防堰堤 の設計に役立てられることとなる.

本研究ではシミュレーションと計測手法の検討を行

っている.まず、シミュレーションでは巨礫が何故浮き 上がるのかに重点を置き、個別要素法を解析手法として 挙動の解析を行った.その結果、巨礫が上層部へ浮き上 がり、先頭部へ押し流される現象の再現ができ、巨礫が 浮き上がる原因は、礫の摩擦抵抗から生じる回転が原因 ではないかという仮説の検討を行った.しかし、シミュ レーションが実現象と整合性があるかという点について はまだ検討されていない.というのは、礫の挙動を実験で 計測するシステムが未だ確立していないためである.そ のために、次に計測で用いる新たなシステムを提案する. これは、磁界を用い、従来では計測が不可能だった不可 視の状態にある礫の位置を測定できるものである.本論 文では、計測システムの原理と、それを大型施設を用い た実験へと応用し、土石流中の礫の位置、速度が測定で きたことを示す.

2. 個別要素法によるシミュレーション

本章では、シミュレーションを用いて巨礫の浮き上が り現象のメカニズムの解明を試みた.メカニズムの解明 により、浮き上がり現象のモデルを計算上で表現するこ とが可能となるため、より実現象と整合性のあるシミュ レーションが作成できる.このシミュレーションを用い、 様々な条件の土石流、もしくは様々な形状の砂防堰堤を 再現し、土砂の体積形状や捕捉状況を比較することで、 最適な砂防堰堤の形状を検討することが可能となる.

土石流のシミュレーションは、個別要素法(DEM)、 SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics), 土石流を小 下2層に分離する2層モデル等,いくつかの手法を用い 行われており2,3, 巨礫の浮き上がり現象に関しては、 底面より伝わる応力鎖によって巨礫が浮き上がるという 説等が唱えられている 4. 本研究においては, 礫のひと つひとつの動きに着目をするために、個別要素法(DEM) を用いることとし、巨礫が浮き上がる原因は、巨礫が回 転し小さな礫の上に乗り上げるからではないかと仮説を 立て、シミュレーションを行った、シミュレーションに は個別要素法を用いた解析ソフト、PFC^{2D}(Itasca 社)を 用いる. 個別要素法とは、粒子間に、図-1 に示すよう なバネ、ダンパー、スライダー(せん断機構)で表され る接触メカニズムを導入し、運動方程式を解く手法であ り、砂礫などの粒子の集合体の運動をモデル化すること ができる. バネにより、接触面に対して垂直方向、およ びせん断方向の衝突力が計算され、ダンパーにより衝突 によるエネルギー損失を表現する. スライダーはモー ル・クローンの破壊規準に従い、せん断力が抵抗力より 大きければすべりが発生する機構を表す、一方、底面は 剛体の平板でモデル化され、平板と粒子の接触は、粒子 同士の接触モデルと同様である.

シミュレーションでは、大粒子を巨礫と見立て、小粒 子と共に斜面を流下させる.小粒子の径と摩擦係数は一 定としたまま、大粒子の径と摩擦係数を変化させること によって、大粒子の挙動に現れる特徴を観測し、巨礫浮 き上がりの要因を検討した.その結果、回転した大粒子 が小粒子の上に乗り上げるのは、大粒子と小粒子との間 に生じる摩擦力のためであり、一度乗り上げた大粒子は、 粒径の大きさのために間隙に落ちにくい傾向があり、土 石流の上層部まで浮き上がるという知見が得られた^{5,6}.

2.1. 土石流モデルの作成

PFC^{2D}で扱える要素は厚みを持った粒子と壁のみで



図-1 個別要素法における物体の接点概念図

あるため、壁を斜面、粒子を砂礫と見立てモデルを作成 する. 勾配4°流下方向長さ600mの斜面の上流部に、 土石流流下のシミュレーションを行う前に粒子を配置す る部分を設け、これをパッキングスペースとする. パッ キングスペースは、25mの間隔で向かい合う1対の壁で 構成されている. なお、斜面はデータ整理の便宜上 x 軸 に重ね、 x 軸方向に- 0.7m/s²、 y 軸方向に- 9.8 m/s²の の重力を付加し、勾配が 4°であるときと同等の重力を 受けるようにした. その斜面モデルを図- 2 に示す. 壁面、粒子のパラメータを表- 1、表- 2 に示す. このモ デルにおける、斜面の傾斜、礫の径、パラメータ等は、 ある流域における礫のデータから算出された、牧野らに よるものである 4.

表-1 壁面・粒子のパラメータ

摩擦係数	1.0
バネ定数(N/m)	1.0×10 ⁶
ダンパー定数	0.45

表-2 粒子のパラメータ

	大粒子	小粒子
個数(個)	20	600
半径(mm)	500	256



実際の土石流において、礫は三次元空間上に存在するため、本来ならば三次元の球体で表現すべきである.しかし、このシミュレーションで扱えるのは、奥行きの一定な円盤のみである.したがって、円盤の形状で表現される粒子の厚さは、大粒子、小粒子共に300mmに統一した.この300mmという厚さは、粒子が同半径の球であった場合の質量と同等になるような厚みを計算し、大粒子と小粒子の中間の値としたことによる.

これを基本モデルとし、以下の試行で、大粒子の径と 摩擦係数を変化させる際のベースとする.

2.2. 粒子パッキングと基本モデルの流下

土石流のシミュレーションにおいて,対象領域に何ら かの方法で粒子をパッキングしなければならない.その 方法は,大別すると,規則的に設定する方法とランダム に設定する方法の2種類となる.自然に存在する斜面, 岩盤が,規則的に配置された岩石・土により構成されて いる例は少ない.よって,本解析においては,粒子をラ ンダムに配置する方法が適切だと考えられる.粉粒体の ランダムパッキングについては,棄却法,局所移動法, 成長法等いくつかの手法が提案されているが,その中に 落下法という手法がある [¬].これは,粒子に重力を作用 することによりモデルのパッキングを行う方法である. 従来,地盤解析などにおいては,この落下法が多く用い られてきた.その理由は以下のとおりである.

1) 土の生成や土構造物の建設環境に近い

2) パッキング終了時に実際に近い応力状態が得られる

3) 粒状体シミュレーション解析のプログラムがそのま ま利用できる.

よって、本シミュレーションでは、この落下法をパッ キング時に採用する.

この中に,20個の大粒子を縦4段,横5列と均等に配

置・生成した. 600 個の小粒子をランダムに発生させた 後,重力を付加し自然落下させパッキングを行った. パ ッキングに用いた壁を消去すると重力により流下が始ま る. 流下方向は図-2 における x 軸の負の方向である. 流れ場のモデル化は、流下方向に一定の流速分布を与え るものとした。粒子には,流下方向に,式(1)に示す外力 を与えた⁸.

$$M\frac{dw}{dt} = (M-m)g_x - \frac{1}{2}m\frac{dw}{dt} - \frac{1}{8}\pi d^2\rho C_D w^2$$
(1)

ここで、 M:粒子の質量、m:粒子体積相当の水 の質量、 g_x :x軸方向の重力、d:粒子の直径、 C_p : 抵抗係数、 ρ :水の密度、w:水の流速と粒子との相対 速度である、右辺第2項は水との相対速度に起因する抗 力、第3項は推力を表す、計算に用いた値を表-3に示 す、本シミュレーションは、水と砂礫の混同体である土 石流実験を再現したものであるため、水の密度は 1000 kg/m³、水の流速は 10m/s と設定した.

表-3 粒子に与える外力のパラメータ

抵抗係数C _D	1.0
水の密度 p (kg/m ³)	1000

図-3は、基本モデルの粒子を流下させた際の変化の 様子である.これより、均一にパッキングされていた大 粒子が、時間の経過とともに先頭部へ流れてくる様子が わかる.開始直後、大粒子は均等に配置されていたが、 開始 10 秒後には全ての大粒子が小粒子に乗り上げ、底 面から浮き上がった.粒子群の上層部に浮き上がった大 粒子は進行方向へ押し流され、40 秒後には約半数の粒子 が全粒子数のうち先頭部 20%へ集まった.

また,全粒子 620 個の粒子のうち,底面部 50%の 310 個と,上層部 50%の 310 個の x 軸方向への平均速度を



表-4に表す. 粒子は x 軸の負の方向に流下するため, 平均速度も負の値になっている. これより本シミュレー ションにおいて,上層部は底面部に比べ流速が大きいと いう現象の再現ができた.

	10 秒	20秒	30秒	40秒	50秒
上層部粒子の速					-
度(m/s)	-1.87×10^{3}	-8.58	-8.48	-8.54	-8.56
底面部粒子の速					
度(m/s)	-9.08×10^{3}	-7.10	-7.09	-6.92	-7.04

表-4 上層部と底面部の粒子速度比較

この基本モデルにおいて,確認できた現象は以下の2 点である.

- (1) 大粒子は流下する過程で、回転し小粒子の上に乗り 上げる.
- (2) 上層部に乗り上げた大粒子は流れに乗り先頭部に集まる.

2.3. 大粒子の粒径を変更した場合

実際の土石流中の岩石はその大小に関わらず同じ密 度であるが、巨礫が小礫の上に浮き上がる現象が見られ る. 粒子の大きさの差異が巨礫の浮き上がる原因だと考 え、基本モデルの大粒子の半径を 250mm, 300mm, 400mm, 500mm (基本モデル), 600mm, 700mm の5種類に置き換えそれぞれのケースにおける大粒子の 挙動を比較した.各ケースの設定で異なる点は、大粒子 の径だけである.大粒子のパッキング時の配置位置はす べて同じ位置となっており、また、小粒子の配置は、ラ ンダムに発生させ、重力によるパッキングという方法を どのケースにおいても用いている.以下に示す結果は、 上記シミュレーションを各ケース1度ずつ行い得たもの である.

比較方法は、図-4に示すように、620個の全粒子数 のうち、先頭部 20%である 124 個に含まれる大粒子の 個数で行った.ただし、斜面上で粒子の個数の偏りが発 生し、それが時間の経過とともに変化すると、それぞれ の時刻における先頭部の個数 20%に含まれる大粒子の 個数の比較が行えなくなる.そこで、斜面を流下中の粒 子を斜面方向に沿ってヒストグラムを求めたところ、こ の分布は正規分布に従うことが確認できた.よって、全 体の粒子数のうち、先頭部 20%に含まれる大粒子の個数 により、大粒子の偏りを比較する方法は適切であるとし た.

土石流モデルを流下させた直後の,全粒子の x 軸方向 への分布は一様分布であるが,流下開始後 5 秒ほどで正 規分布となる.このことを,以下の手順で検証した.図 -5に,流下開始後 5 秒の粒子数の, x 軸方向への分布 のヒストグラムを示す.横軸の『斜面上の位置』は,図 4 に示す x 軸を参照とする.この分布は正規分布に従う という帰無仮説 Hを立て、カイ二乗分布を用いた適合度 検定法により検定した⁹. 流下開始後 5 秒のヒストグラ ムのカイ二乗値を求めると 19.87 となる. 有意水準 0.01, 自由度 8 のカイ二乗値は 20.09 となるため、 19.87 > 20.09 となり仮説 Hは棄却できない. 同様に、流下開始 後 10 秒、15 秒のヒストグラムのカイ二乗値を求めたと ころ、 19.58、11.22 となる. いずれも、有意水準 0.01, 自由度 8 のカイ二乗値より小さい値であるため、仮説 H は棄却できない. 従って、流下中の粒子の分布は、正規 分布に従うとする.



図-5 流下中の粒子個数のヒストグラム

この比較方法を用い,各ケースの,先頭部 20%に含ま れる粒子の個数の推移を図-6 に示す.大粒子の半径が 600mm,700mmのケースは,流下開始から20秒後に 大粒子の約1/3が先頭部に押し出され,40秒後には大粒 子の半数以上が先頭部を流れている.これは基本モデル とほぼ同じ特徴と言える.対し,基本モデルより大粒子 の粒径の小さい400mm,300mmは、大粒子が前に押 し出される特徴がやや小さい.

2.4. 大粒子の摩擦係数を変更した場合

粒子は流下の過程で回転する.回転した大粒子が小粒 子の上に乗り上げるのは、大粒子と小粒子との間に生じ る摩擦力のためである、という仮説を実証するために、 大粒子の摩擦係数を変更するという試行を行った.これ は、大粒子と他の要素との間の摩擦係数を,0.0,0.3, 0.5,0.7,1.0(基本モデル)の5種類に置き換え、それ ぞれ挙動を調べたものである.大粒子の摩擦係数に着目 し各ケースを比較するために、小粒子同士、小粒子と底 面の摩擦係数は、基本モデルと同様いずれのケースも **1.0** のままとした.以下に示す結果は、この試行を各ケース1度ずつ行い得たものである.

図-7に、先頭部に含まれる大粒子の個数の推移を示 す.大粒子の摩擦係数が0.0であるとき、流下中に大粒 子が先頭部まで出る現象は見られず、時間が経過しても 大粒子はおおよそ一様な分布であった.対して、大粒子 の摩擦係数が0.7,1.0と大きくなるにつれ、先頭部を流 れる大粒子の数は増加した.図-8に、大粒子が他の小 粒子を乗り上げる図を(a),(b),(c)の順に時系列で示す.移 動を伴い底面を回転してきた大粒子は前を流れる小粒子 に接触する.そして、小粒子と反対の時計回りに回転し 始め、小粒子を乗り越える.一度小粒子の上に乗り上げ た大粒子は、粒径が間隙より大きいと間隙に落下しない ため、上昇を続ける.

以上のシミュレーション結果より,巨礫が浮き上がる 現象は,大粒子が回転することにより,下部の粒子から の摩擦力に影響を受けていると考えられる.



図-6 粒径を変化させた場合の先頭部に含まれる大粒子個数の変化



図-7 摩擦を変化させた場合の先頭部に含まれる大粒子個数の変化

3. 磁界を用いた位置計測システムの提案

2章において、土石流中の巨礫が土石流の上層部に浮



図-8 小粒子を乗り越える大粒子

き上がり、先頭部を流れるという現象の、シミュレーション上での再現を行った.しかしながら、シミュレーションで用いた数種のパラメータや流体モデルの妥当性は検討されていない.そこで、土石流実験において、礫の動きを計測するためのシステムの提案を行う.

現時点での土石流実験における計測手法は、主に高速 度カメラによる撮影が用いられてきた.これは、土石流 を固体と流体の集合体と捉えた場合、視覚的に挙動を計 測するのに非常に有効的な手法である.その反面、対象 とした礫が、他の礫の下へ入り込んだ場合や、カメラの 画角の外やピントの合わない場所へ移動した場合などに、 土石流中の礫のひとつひとつの動きを捉えるには不十分 であるという弱点がある.この弱点を補うために、不可 視、非接触で礫の動きを測定するシステムを提案する必 要がある.このシステムには、透過性のある磁界を用い ることとした 10.

3.1. 計測システムの原理

周囲の磁束が変化すると、コイルに起電力が生じる電 磁誘導という現象がある.このシステムは、電磁誘導を 用い、センサであるコイルと、磁石を取り付けた測定対 象である礫との距離を、計測するものである.図-9に 概念図を示す.

磁束と起電力の関係式は式(2)で表される.

$$\varepsilon = -\frac{d\phi_B}{dt} \tag{2}$$

 ε : 起電力, ϕ_{B} : 磁束とする.

電磁誘導によりコイルに生じる起電力は、コイルと磁 石の距離と、磁石の動く速度に関係する.コイルと磁石 との距離が近いほど、また、磁石の移動速度が速いほど、 起電力のピーク値は大きくなる.つまり、起電力のピー ク値だけではコイルと磁石との距離を算出することがで きない.しかし、磁石の速度は、入力波形の立ち上がり からノイズレベルに収束するまでの時間に関係する.即 ち、磁石の速度が速ければ、その時間間隔は小さくなり、 速度が遅ければ大きくなる.そこで、磁石の移動速度に 影響されずコイルと磁石の距離を計測するために、コイ ルに生じた電圧を積分した値を計算に用いることとした.



図-9 磁界を用いた礫の位置計測システム概念図



図-10 磁界を用いた礫の位置計測システム概念図

コイルに生じた起電力と,移動平均を取りノイズを除去 したもの,起電力を積分したものの波形を図-10に示す. ある1つのコイルより得られる積分値は,そのコイルの 方向の磁束変化によるものである.礫は三次元空間上を, 動くため,3つのコイルをそれぞれ直交に3軸方向に配 置する.よって,3方向の磁束変化に応じた起電力が, それぞれのコイルに生じる.式(3)に示す,3つの電圧を 積分した値を足し合わせたものを磁束変化率強度と定義 する.これは,理想的な状態において,コイルと磁石の 距離に相関のある値である.

磁束変化率強度 $\propto k_x \int |v_x(t)| dt + k_y \int |v_y(t)| dt + k_z \int |v_z(t)| dt$ (3)

 v_x , v_y , v_z は, x軸, y軸, z軸それぞれの方向のコ イルに生じる起電力を示す. k_x , k_y , k_z は, 起電力に 乗算する係数である. この実験において, 3 個のコイル は, 磁石からの距離が等しくなるよう, また, 中心軸が いずれも同じ位置になるよう配置するのが理想的である. しかしながら, それは物理的に不可能なため, この係数 は、それぞれ起電力に適当な係数を与えるためのもので ある.

3.2. 磁束変化率強度とコイルー磁石間の距離の関係

実際に、磁束変化率強度がコイルと磁石の距離に相関 があるかを検証するために、コイルの近傍で磁石を移動 させ, 電界強度係数を算出した. これに用いた基礎実験 装置を図-11に示す. この装置は,厚さ3mmのアクリ ル板で作られており、底面板の上を磁石が通過すること でコイルに起電力が生じる.3 つのコイルを直交する角 度で配置し、三次元の磁束の変化に反応するようにした. また、磁石は装置の底面を転がるが、底面のとコイルと の距離 dは、底面の高さの調節により、任意に変えるこ とが可能である.この装置を用い、磁石とコイルとの距 離を変え、起電力を何ケースか測定し、磁束変化率強度 を算出した. 図-12に,距離を横軸に,磁束変化率強度 を縦軸にプロットしたグラフを示す.なお、 k_x 、 k_y 、 k_z 、 はいずれも 1.0 とした. これより, 磁石とコイルとの距 離が遠ざかるにつれ、磁束変化率強度が減少するという 傾向が見て取れる. データにばらつきがあるのが欠点で



図─11 基礎実験装置

あるが、これは磁石とコイルとの間に、底面であるアク リル板があることによる影響や、磁束変化率強度を算出 するための積分範囲の設定によるものであると考えられ る.

3.3. 計測システムの大型水路への適用

3.1 で述べた原理を、大型水路での実験に適用した. コイルを3方向に配置したセンサを用い礫と各センサと の距離を計測し、センサ数を増やすことで3点測量の原 理を用いて礫の位置を特定することがシステムの最終的 な目標である.しかし現段階では、磁束変化率強度と、 センサと磁石との距離の相関に大きなばらつきがある. また、大型水路での実験では他の礫や水を用いるために、 更に誤差が生じると予測される.従って、現時点ではま ず、着目した礫の、水路の斜面方向での位置を計測する ことを目的とする.礫の位置が測定できればその結果よ り、礫の流下速度も測定できることとなる.

コイルからの出力電圧を用いた位置計測システムの 概要を図-13に示す. 土石流モデルの流下する斜面にコ イルを取り付け、これをセンサとする. 土石流モデルの 中の着目する礫の一つに磁石を取り付け、この礫がセン サの近くを通過すると、電磁誘導によりコイルに起電力 が生じる仕組みである. コイルに生じた起電力は、アン プを介し増幅され、ロガーにデータとして蓄積される. 図-14にセンサとして用いたコイルの写真を示す. コイ ルは、鉄棒のコアにエナメル線を500回巻きつけたもの を 4 つ直列に接続したものを1 セットとして使用した. コイルに生じる起電力は、コイルの巻き数に比例する. 4つのコイルを直列に接続したのは、2000回巻きのコイ ルと同等の、より大きな起電力を出力させるためである. これを水路内に、約1m間隔で設置した.高さは、水路 底面から約25cm上方の、土石流を流下させた際に水が かからない程度の位置とした. また, 直径 3~4cm と1 ~2cm の礫に, 直径 7mm, 高さ 5mm の円柱型ネオジ ム磁石を接着剤で取り付けたものを図-15に示す.この 二つを測定の対象とし、大きい礫、小さい礫と呼ぶ.

実験は、図-16に示す、全長7m,幅0.3m,深さ0.5m, 勾配5°の大型実験水路で、これらの装置を用いて行った.5セットのコイルを、上流からコイル1、コイル2、 …,コイル5とする.

コイル1より 1.5m 上流に直径 2~3cm の礫 0.03m³ の貯め,その中に2種類の磁石の付いた礫を混ぜる.小 さい礫を前,大きい礫を後ろという配置で,1m 間隔を あけて礫群の中ほどの深さに埋める.この後,0.4m³の 水を流下させ土石流を発生させた.

土石流の挙動の計測は、このシステムと同時に、高速 度カメラも用いて行う.このカメラは、斜面に沿って敷 かれたレールの上を、礫の流れと共に動き、礫の速度、 回転等が画像により測定できるもので、撮影速度は200 フレーム/s となっている.カメラより得られた画像を図











図-14 センサとなるコイル



図-15 ネオジム磁石を取り付けた対象とする礫

コイル1 礫の初期配置位置 1m7m

図-16 大型実験水路

- 17(a),(b)に示す. これは、撮影開始後、0.935 秒後、 1.380 秒後の写真である。白丸で目印を付けられた礫は 同じもので、0.935秒の時点での位置を0.0mとすると、 0.445 秒後には 0.5m の位置まで流下した. 他の礫につ いても同様に速度を算出したところ、土石流の流下速度 は約 1m/s という結果が得られた。このときのセンサか らの出力を、アンプを用いて 1000 倍に増幅したものを 図-17に示す. それぞれのコイルからの波形には、2つ ずつピークが立っており、小礫、大礫が通過したことに よる起電力だと言える. これより、小、大それぞれの礫 の平均速度は、1.05m/s,1.09m/s となり、ビデオカメラ 撮影より得られた速度と同等の値が得られ、僅かながら 大きい礫の方が速いことが計測できた.数回行った他の ケースや、大小の礫の初期配置を入れ替えたケース、礫 群の構成を変更したケースでも,同様の傾向が見られた. また,シミュレーションによる土石流モデルにおいても, 大きい礫の方が流下速度が速いという結果が得られてい るため、今回の計測においてはシミュレーションとの整 合性も確認できた.

4. まとめ

本研究ではまず,砂防堰堤の設計に役立てるために, 個別要素法を用いた土石流のシミュレーションを行った. 次に,シミュレーションの実現象との整合性を検討する 目的で,磁界を用いた新たな計測システムの提案を行っ た.これによって得られた知見は以下のとおりである. (1)シミュレーションにおいて,巨礫が浮き上がり先頭部 まで押し流される現象が再現できた.



図-17 土石流の流下の様子



図-18 センサからの出力

- (2) シミュレーションにおいて、大粒子の径、摩擦係数 を変更した試行より、大粒子の浮き上がり現象の要因 は、大粒子が回転し摩擦力の影響で浮き上がるという ことである.
- (3)大型水路を用いた室内実験において、磁界を用いた計 測システムで、礫の斜面方向での位置、速度の計測が 行えた.これより、本システムの有用性が示せた.

今後は、センサ数を増やし、信号処理方法を改善する ことによって、より精度の高い計測システムを作成し、 礫の挙動についての実験結果を得る.得られた実験結果 はシミュレーションに反映させ、実験の結果により近い 礫の動きを再現する.そして、シミュレーション上で実 規模レベルの土石流を再現させ、砂防堰堤の設計に役立 てることを最終的な目標とする.

参考文献

- 1)砂防学会:土砂災害対策一扇状地対策,土石流対策等 一(1),山海堂,1992
- 2) ナイリ・ムニルら:二次元 SPH 法を用いた液状化による速報流動現象の解析,応用力学論文集 vol.8, pp.591-600, 2005
- 3) 里深好文,水山高久,飯尾達朗:石礫型土石流に含ま れる巨礫の分級現象に関する研究,平成19砂防学会 研究会発表会概要集,2007
- 4)平林大貴,福間雅俊,前田健一,杉井大輔:マルチス ケールでみた石礫集合体の流れとその内部の限界状 態,平成 20 防学会研究会発表会概要集, pp.30-31, 2008
- 5) 川村洋平・杉山文乃・倉岡千郎 : 土石流の巨礫の挙 動に関する個別要素法シミュレーション, 平成 19 年 度資源・素材学会春季大会講演集, pp.35-36, 2007
- 6) 倉岡千郎・杉山文乃・川村洋平:土石流の巨礫の移 動機構の個別要素法による検討,平成19年度砂防学 会研究発表会概要集,pp.432-433,2007
- 7) 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—, 森北出版株式会社,2004
- 8) 牧野孝久・倉岡千郎・杉山実:土石流の巨礫集積機構 に関する個別要素法シミュレーション,社団法人砂 防学会,平成 18 年度砂防学会研究会発表会概要集, pp.416-417,2006
- 9) 橋本智雄:入門統計学,共立出版株式会社,1996
- 10) 杉山文乃・川村洋平・倉岡千郎・大川浩一: 土石流 における巨礫浮き上がり現象のメカニズムの解明に 関する研究, p.50, 2007

(2008年4月14日 受付)