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、のべ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る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/s^2 、y軸方向に -9.8m/s^2 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

図-2 シミュレーションで用いた斜面モデル

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、奥行きのある円盤のみである。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⁷⁾。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⁾。

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

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_D : 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 ρ (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

流下開始直後

10秒後

20秒後

40秒後

図-3 基本モデル流下の様子

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。

表-4 上層部と底面部の粒子速度比較

	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

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樣分布であるが、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-4 先頭部20%の粒子

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るのには、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。

$$\varepsilon = -\frac{d\phi_B}{dt} \quad (2)$$

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 磁界を用いた磁の位置計測システム概念図

図-10 磁界を用いた磁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. 磁は三次元空間上を, 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.

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

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-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の亚克力板で作られており, 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-12 センサと磁石との距離と 磁束変化率強度の相関

図-13 センサと磁石との距離と 磁束変化率強度の相関

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

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—(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，福岡雅俊，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 年度砂防学会研究会発表会概要集，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)