

# 不連続変形法 (DDA) を用いた巨礫を含む 土石流の解析的検討

岩田 直樹<sup>1\*</sup>・荒木義則<sup>1</sup>・佐々木猛<sup>2</sup>・萩原育夫<sup>2</sup>・大西有三<sup>3</sup>・小山倫史<sup>4</sup>

<sup>1</sup>中電技術コンサルタント(株) (〒734-8510 広島市南区出汐2-3-30)

<sup>2</sup>サンコーコンサルタント(株) (〒136-8522 東京都江東区亀戸1-8-9)

<sup>3</sup>関西大学環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

<sup>4</sup>関西大学社会安全学部 (〒569-1098 大阪府高槻市白梅町7-14)

\*E-mail: niwata@cecnet.co.jp

近年多発している豪雨により2014年7月には長野県で巨礫を含む土石流で砂防堰堤が破壊した事例が発生し、2014年8月の広島土石流災害でも3mを超える巨礫の流出が観測された。これまで巨礫を含む土石流に対しては、混相流と仮定した連続体として扱われることが多かったが、礫径が土石流水深に比べて十分に大きい場合には個々の巨礫の運動を捉える必要がある。そこで本研究では、2014年8月の広島土石流災害を事例として、2次元および3次元不連続変形法 (DDA) を用いて巨礫に土石流の流体力を作用させた解析を行い、地盤条件や巨礫寸法の違いによる巨礫の到達距離や速度について比較を行った。この結果、2次元解析では評価できない巨礫の挙動を3次元の地形を考慮することで概ね再現できることが分かった。

**Key Words :** DDA, sediment disaster, debris flow, fluid force, boulder, 2014 Hiroshima landslide

## 1. はじめに

2014年7月9日に長野県南木曾町の梨子沢で発生した土石流災害では、数 m を超える巨礫が流下して鋼製透過型砂防堰堤の一部に損傷が生じた。これを契機として土石流における巨礫対策を検討するように通達<sup>1)</sup>が出されるとともに、巨礫の挙動を評価することが望まれるようになった。また、2014年8月20日に広島市で発生した土石流災害では、時間100mmを超える短時間豪雨により、これまで巨礫の流出が少ない風化花崗岩の渓流で数 m を超える巨礫が土石流とともに流出した<sup>2,3)</sup>。

土石流は、土砂と水の混合物が一種の連続体のように流動する現象であることから、一般的に土石流現象のシミュレーション解析は、混相流として扱う連続体モデルが適用されてきた。しかし、粒度分布が広く、石礫を多く含む石礫型土石流の場合には十分な再現が出来なかった。このため、土石流を粒子の集合体と考え、個々の粒状体の不連続体の運動を解く個別要素法 (DEM) が、土石流の流下挙動の評価<sup>4)</sup>や礫が運搬されるメカニズムの解明<sup>5)</sup>などに適用されるようになってきた。しかしながら、数 m を越す巨礫の運動についての検討事例は少なく、DEM では巨礫を球体でモデル化することから、礫の形状の違いによる影響や到達距離の比較検討等は行

われていない。

本検討では、巨礫の形状を任意に設定でき、落石解析に用いられている不連続変形法 (DDA) を用いて、巨礫ブロックに流体力を作用させることにより土石流中での巨礫の運動について検討を行う。検討対象は、2014年8月20日に広島市安佐南区八木三丁目で発生した土石流災害とし、2次元および3次元 DDA を用いてシミュレーションを行い、地形、地盤物性値および巨礫寸法等の影響について比較することにより DDA の土石流解析への適用性について検討を行った。

## 2. 検討手法

DDAは、任意形状の弾性体多角形ブロックの集合体における変位・変形を動的、準静的に解析する手法であり、個々のブロック間のすべり・分離および接触を考慮できる大変形問題の解析が可能である。ブロック間の貫入を防ぐためにペナルティ法が導入され、ブロック間の摩擦はモール・クーロンの破壊規準によりモデル化されている。また、モデル化が難しい斜面の凹凸等による接触エネルギー消費を速度エネルギー比 (接触前後の速度比の2乗) として考慮できるようになっている。

DDAの土石流解析への適用に当たっては、土石流の流体力を考慮する必要がある。そこで、斜面上を流れる土石流を図-1に示すように領域として定義し、この領域内を通過した巨礫ブロックに流体力を作用させる。ここで、領域内は流速一定とし、領域の高さが土石流の水深となる。ブロックには式(1)に示すように流体力と浮力を考慮し、領域内にあるブロックの面積に応じて流体力と浮力を作用させる<sup>6)</sup>。

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_w A V^2 + \rho_w V_{dip} \quad (1)$$

ここで、 $F_D$ ：土石流流体からブロックに作用する外力、 $C_D$ ：抗力係数、 $\rho_w$ ：土石流の密度、 $A$ ：土石流に水没している（領域内の）ブロックの表面積、 $V$ ：土石流流体とブロックの相対的な速度、 $V_{dip}$ ：土石流に水没している（領域内の）ブロックの体積。

### 3. 八木三丁目の土石流で流出した巨礫の状況<sup>1),2)</sup>

多数の巨礫が流出した広島市安佐南区八木三丁目で発生した土石流災害では、41名の方が亡くなった。この溪流は、写真-1に示すように、阿武山（標高 586.4m）の南側に位置する流域面積約 23haの羽根型の流域を持つ。

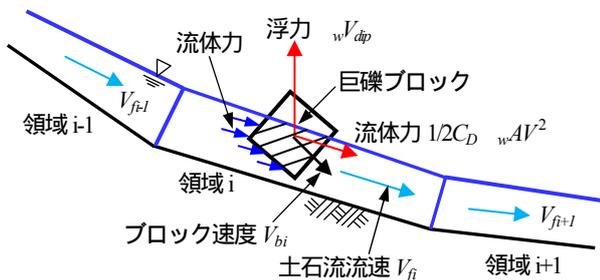


図-1 DDAブロックに作用する土石流流体力



写真-1 対象溪流の全景とモデル化領域

つ。流域の大部分は花崗岩からなり、表層 1~2m は風化したまさら土であるが、深部にはブロック化した巨礫が分布しており、豪雨によりこのブロックも流出した。土石流は、本川の標高 415m 付近に源頭部を持ち、標高 215m 付近で左岸側からの支川と合流して流下した。標高標高 60m 程度の溪流出口までの流路長は 980m 程度で、平均勾配は約 20°である。

溪流出口より下流（以降、流出部と呼ぶ）の流出状況を写真-2に示す。写真中央から左側に 2~4m 程度の巨礫が散乱しており、溪流出口から 100m 程度の箇所まで停止している。流出部の平均勾配は 10°程度であるが、階段状に敷地造成されている。溪流出口付近の土石流の痕跡調査の結果、3回の流出が確認されており、第1波は溪流出口付近の左岸側に堆積し、第2波、第3波が溪流出口の右岸側を侵食して巨礫とともに流下したものと考えられている。

### 4. 解析条件

#### (1) 解析モデル

写真-3は本川と支川の合流部付近を下流側から撮影したものであるが、写真右側斜面の法尻に見られるように、立方体ブロックが残っており、渓床部は新鮮な岩盤が露



写真-2 溪流出口下流部の巨礫の流出状況<sup>2)</sup>



写真-3 本川と支川の合流点付近の状況<sup>2)</sup>

頭している．このような立方体ブロックは，合流部より上流側では少なくなることから，合流部を巨礫発生源（ブロック流下開始点）として，写真-1に示す領域をモデル化した．3次元DDAモデルの作成に当たっては，10mグリッドの地形データをもとに図-2に示す3次元DDAモデルを作成した．巨礫ブロックは，立方体の角を面取りした形状とし，巨礫発生源から1つのブロックを流下させた解析を行った．一方，2次元DDAでは，渓床沿いの縦断面図を用いてモデル作成を行った．

### (2) 土石流の流速と水深

土石流の水深と流速は，「砂防基本計画策定指針」<sup>7)</sup>に基づき，想定した土石流ピーク流量 $220\text{m}^3/\text{s}$ と現地調査<sup>8)</sup>をもとに設定した土石流の流下幅等を用いて Manning 式により算定した．図-3に溪流縦断方向の土石流の流速と水深の分布を示す．溪流幅が部分的に狭隘な箇所では流速が早く，水深も深くなるが，溪流部の流速は $7\sim 8\text{m/s}$ 程度であり，過去に観測された石礫型土石流の流速と同程度となっている．また，水深は $1.5\sim 2.0\text{m}$ 程度であり，現地調査の結果とも概ね整合した値である．

### (3) 検討ケースと解析用物性値

本検討では，以下の項目に着目して，2次元および3次

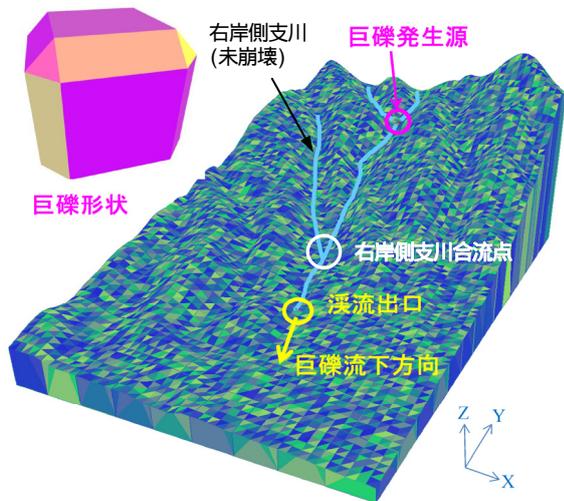


図-2 溪流縦断方向の土石流の流速と水深の分布

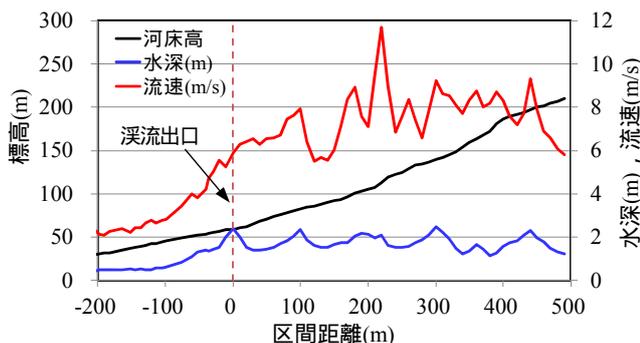


図-3 溪流縦断方向の土石流の流速と水深の分布

元解析により算定される巨礫ブロックの到達距離と実測値を比較して，土石流シミュレーションへのDDAの適用性を検討した．

土石流流体力の有無

溪流部および流出部の速度比

巨礫寸法

表-1に解析用物性値を示す．巨礫の物性値は，花崗岩の $C_M\sim C_L$ 級に相当する岩盤の一般値を設定し，溪流部の接触部の摩擦角等は「砂防基本計画策定指針」に基づき設定した．速度比は巨礫ブロックが地盤に接触した際の接触前後の速度の比であり，落石解析で実施されている事例<sup>9)</sup>を参考に溪流部では $0.8\sim 0.4$ の範囲，流出部では $0.6\sim 0.2$ の範囲でそれぞれ組合せを変えたケースについて比較を行った．なお，速度比 $0.8$ は岩石ブロックが岩盤に接触した場合， $0.6$ は締まった土砂， $0.4$ は軟らかい土， $0.2$ は泥に接触した場合に相当する．巨礫寸法は， $1.0\sim 4.0\text{m}$ の範囲で $50\text{cm}$ 刻みに変えて比較を行った．

## 5. 2次元DDAによる解析結果

### (1) 土石流流体力の影響

図-4は，土石流流体力を考慮したケースと考慮しないケースについて，巨礫寸法 $3\text{m}$ とした場合の速度分布と巨礫の軌跡を示す．ここで，溪流部の速度比は $0.8$ ，流出部の速度比は $0.6$ としている．流出部の勾配が $10^\circ$ 程度あることから，いずれのケースも完全に巨礫が停止することはなく，ゆっくりと転がり続ける．このため，巨礫の速度が $1.0\text{m/s}$ 以下で3秒以上継続した場合に停止したものと判断して到達距離を算定した．

溪流部の巨礫速度は，流体力を考慮したケースでは，流体力の作用により土石流の流速と同程度となるが，流体力を考慮しないケースでは，流速よりも遅く，飛び跳ねる軌跡が見られる．このため，流体力を考慮しないケースでは，溪流出口の巨礫の速度が $1\text{m/s}$ 程度となり，溪流出口付近で一旦停滞りそうになるが，その後再び転が

表-1 解析用物性値

巨礫	弾性係数 (GPa)	0.5 ( $C_M\sim C_L$ 級相当)
	ポアソン比	0.2
	単位体積重量 ( $\text{kN/m}^3$ )	26.0
	ペナルティ (GPa/m)	0.5
	ブロック寸法 (m)	$1.0\sim 4.0$ ( $0.5\text{m}$ 刻み)
溪流部	接触部の摩擦角 ( $^\circ$ )	30
	速度比	$0.8\sim 0.4$
流出部	接触部の摩擦角 ( $^\circ$ )	10
	速度比	$0.6\sim 0.2$
土石流	単位体積重量 ( $\text{kN/m}^3$ )	19.2
	抗力係数	1.5
時間刻み (秒)		0.0001

り、渓流出口から45mの位置で停止した。一方、流体力を考慮したケースでは、渓流出口の巨礫の速度が4m/s程度であり、渓流出口から下流にも50cm程度の水深があり流体力が作用することから、渓流出口から190mの位置まで巨礫が到達した。

### (2) 渓流部および流出部の速度比の影響

図-5は、渓流部の速度比を0.8とし、流出部の速度比を0.6~0.2で変化させるとともに、流体力の有無の影響について到達距離の比較を行ったものである。ここで、巨礫寸法は3mとする。この結果、流体力があると流出部の速度比が小さくなるほど到達距離が短くなるが、流出部に泥を想定した速度比0.2でも100m程度まで流下している。一方、全域で流体力を考慮しないケースと流出部のみ流体力を考慮しないケースでは、全域で流体力を考慮せず、流出部の速度比を0.6としたケースを除くと、いずれも到達距離は10m以下となっており、渓流出口付近で停止する結果となる。ただし、全域で流体力を考慮せず、流出部の速度比を0.6としたケースは、図-4(a)に見られるように、渓流出口付近で一旦停滞していることを考えると、流出部の流体力を考慮しない場合には、概ね渓流出口付近で停止するもの考えられる。このことから、流出部の巨礫の流下には、流出部の流体力の影響が大きいことが分かる。

図-6は渓流部の速度比を0.8~0.4、流出部の速度比を0.6~0.2でそれぞれ組合せを変化させた場合の到達距離を比較したものである。なお、巨礫寸法は3mで、流体力は考慮している。この結果、流出部の速度比が小さくなるほど到達距離が短くなり、流出部に泥を想定した速度比0.2でも100m程度まで流下する。また、渓流部の速

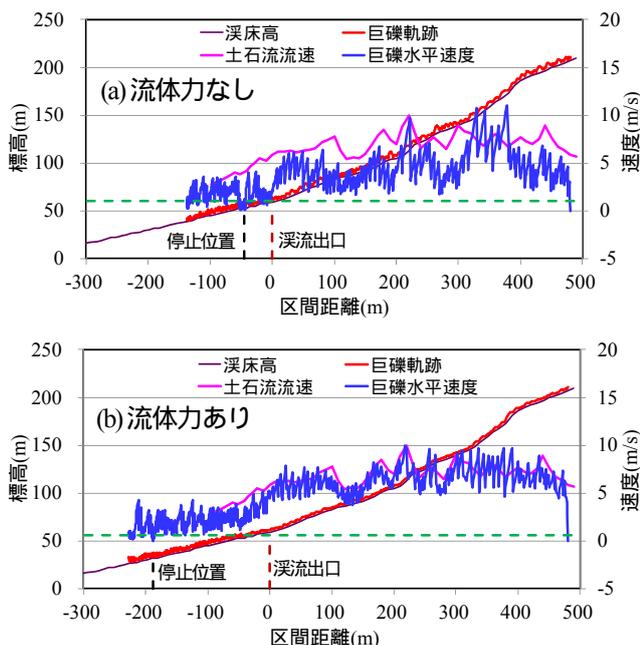


図-4 流体力有無の違いによる巨礫の速度と軌跡の比較

度比の違いによる影響は、流下部の速度比が0.4以下ではほとんどないが、0.6では渓流部の速度比が大きいほうが到達距離が大きくなる傾向が見られる。通常、DDAによる落石解析では、落下開始時のブロックの姿勢により結果がばらつくことから、姿勢を変えて(ブロックを回転させて)複数回計算を行う。しかしながら本検討では、姿勢を変えた検討が出来ていないため解析結果にバラツキが生じていることも考えられる。このため、渓流部の速度比の違いによる影響については、ブロックの姿勢を変えた検討を行って評価する必要がある。また、流出部に泥を想定した速度比0.2のケースで到達距離が100m程度になるといった結果も、巨礫が転がり過ぎていると考えられる。

### (3) 巨礫寸法の影響

図-7は、渓流部の速度比を0.8、流出部の速度比を0.4として、巨礫寸法を1.0~4.0mまで0.5m刻みで変化させるとともに、流体力の有無の影響について到達距離の比較

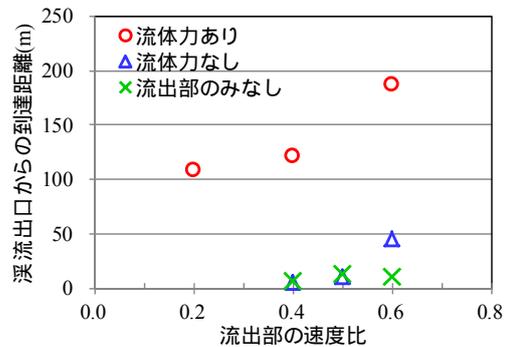


図-5 流体力有無と速度比の違いによる到達距離の比較

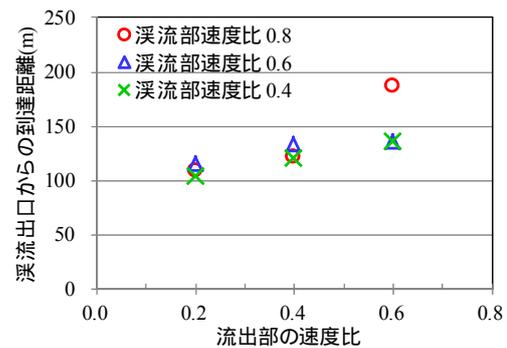


図-6 地盤の速度比の違いによる到達距離の比較

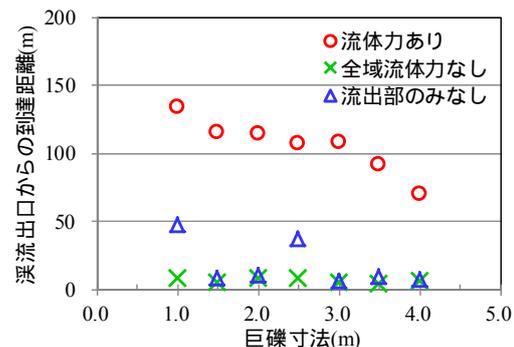


図-7 巨礫寸法の違いによる到達距離の比較

を行ったものである。この結果、流体力を考慮した場合、巨礫寸法が大きくなると到達距離が短くなる傾向は見られるが、流体力を考慮しない場合、巨礫の寸法によらず溪流出口付近で停止する結果となる。

## 6. 3次元DDAによる解析結果

### (1) 土石流流体力の影響

図-8は、流体力を考慮したケースの巨礫の軌跡を示す。ここで、巨礫寸法は3m、速度比は溪流部0.8、流出部0.4である。巨礫は、地形に応じて渓床部を流下するが、溪流出口付近で右岸側の斜面に衝突して完全に停止する。この傾向は、流体力を考慮しない場合も同様である。

図-9は、流体力を考慮したケースと考慮しないケースのX方向（概ね溪流横断方向）とY方向（概ね溪流縦断方向）の巨礫の流下速度をY方向の軌跡を示す。2次元DDAと同様に、流体力を考慮しないケースでは、巨礫の落下速度は土石流流速よりもかなり遅く、溪流部での飛び跳ねも多い。一方、流体力を考慮しないケースでは、流体力の影響により巨礫の流下速度は速くなり、飛び跳ねもほとんどないが、2次元DDAと比較すると流下速度は遅く、巨礫が土石流とともに流下しているとは言い難い。これは、巨礫の3次元形状を考慮したことで、巨礫に作用する流体力が小さくなったためである。

### (2) 地盤の速度比や巨礫寸法等の影響

2次元DDAと同様に、巨礫寸法を3mとして流体力を考慮したケースについて、溪流部の速度比を0.8~0.6、流出部の速度比を0.6~0.2でそれぞれ組合せを変えて検討を行った。この結果については図示していないが、いずれのケースも巨礫は溪流出口部付近で右岸側の斜面に衝突して完全に停止する結果となった。

次に、速度比を溪流部0.8、流下部0.4として流体力を考慮したケースについて、巨礫寸法の違いによる影響に

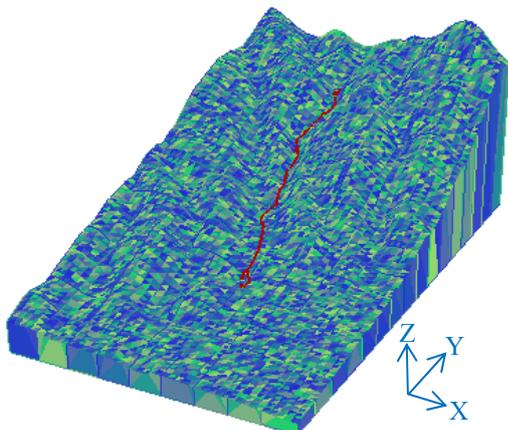


図-8 巨礫の軌跡（巨礫寸法3m、流体力あり）

ついて比較を行った。図-10は巨礫寸法を4mと2mとしたケースの巨礫の流下速度と軌跡を示したものである。寸法が大きくなると、土石流に浸かっている割合が小さくなることから流体力の影響が小さくなり、4mの流下速度は3mよりも小さくなる。一方、2mでは浸かっている割合が大きくなることから、流下速度が大きくなり、土石流の流速に近づく。このため4mとしたケースでは、溪流出口より150m程度上流の右岸側支川合流点付近の勾配が緩くなっている箇所、完全に停止しないものの

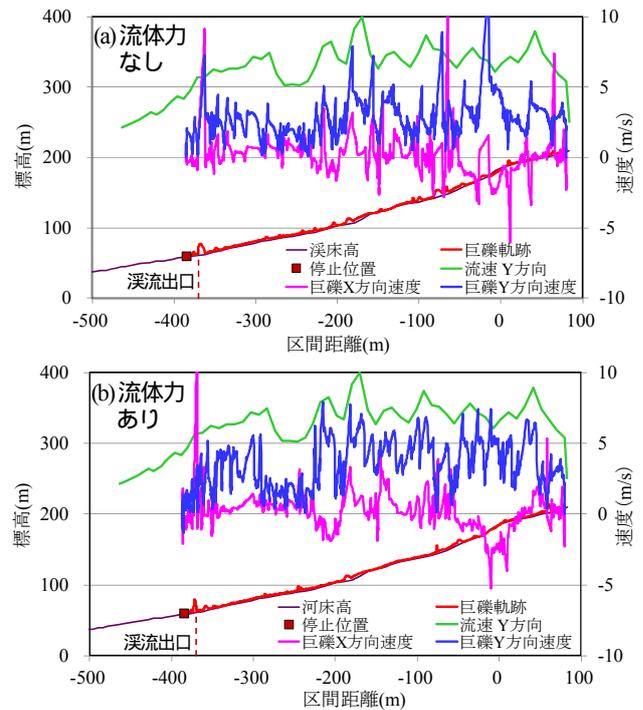


図-9 流体力有無の違いによる巨礫速度と軌跡

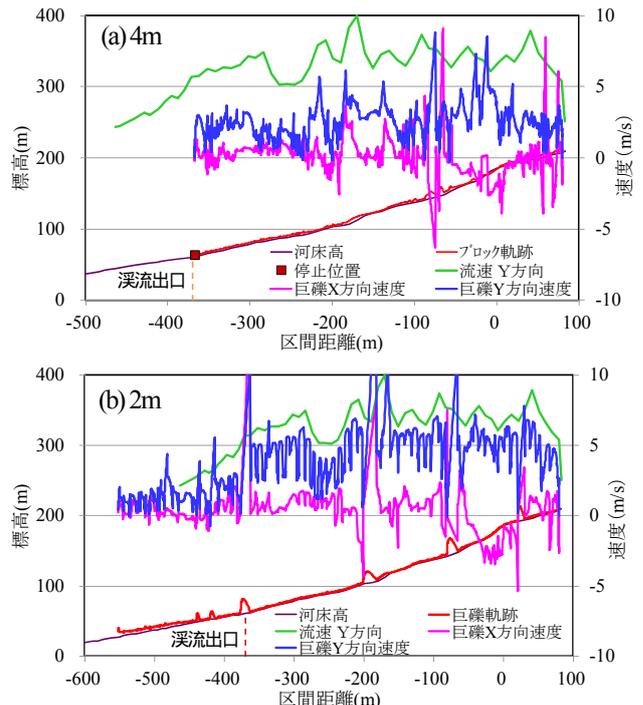


図-10 巨礫寸法4m,2mのケースの巨礫速度と軌跡

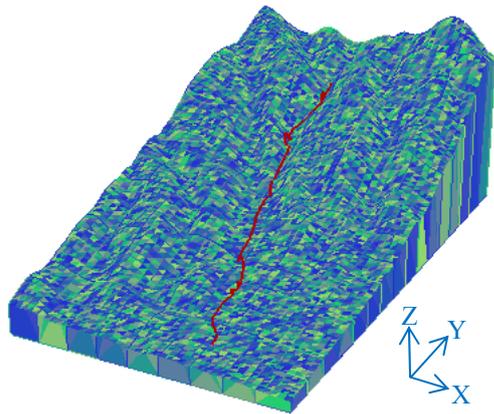


図-11 巨礫の軌跡（巨礫寸法2m，流体力あり）

速度1m/s以下になり、その後に渓流出口付近で完全に停止する。一方、2mとしたケースでは、渓流出口より下流へ流下し続け、完全に停止しない。なお、2次元DDAと同様に、巨礫の速度が1.0m/s以下で3秒以上継続した場合に停止したものと判断すると、到達距離は渓流出口から50m程度となる。

図-11は巨礫寸法2mのケースの軌跡であるが、巨礫は、渓流出口で右岸側斜面に衝突して左岸側にやや方向を変えた後に、再び渓流出口から真っ直ぐに伸びる方向に流下している。この流下方向は、現実の巨礫の方向とも概ね整合した結果となっている。

## 7. おわりに

ブロックに流体力を考慮した2次元および3次元DDAを用いて、2014年広島土砂災害の巨礫の挙動についてシミュレーションを行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 2次元DDAでは、流体力を考慮すると到達距離は100mを超え、実際よりもかなり遠くまで流下するが、流体力を考慮しないと渓流出口付近で停止する。
- (2) 2次元DDAにおける到達距離は、流下部の速度比が大きいほど、また巨礫寸法が小さいほど長い。が、

流部の速度比の影響は少ない。

- (3) 3次元DDAでは、地形の効果により巨礫寸法3m以上では渓流出口付近に停止するが、2mでは下流に流下する。

3次元DDAで巨礫が渓流出口付近に停止したことについては、実際に土石流の第1波が渓流出口付近に堆積したことと整合しており、第2波、第3波が斜面を洗掘して巨礫が流出したことを考慮すると、2次元よりも3次元の結果のほうが現地状況をより再現できているものと考えられる。このことから、3次元の地形を適切にモデル化することが必要であることがわかったが、解析結果の流下時間が実際よりも長く、巨礫が運搬されるメカニズムまで再現できているとは言い難い。今後は、複数のブロックを流下させるなどの検討を行い、巨礫の流下メカニズムも含めた検討も行っていく予定である。

## 参考文献

- 1)国土交通省水管理・国土保全局砂防部 保全課：鋼製透過型砂防堰堤の留意事項について、事務連絡、2014。
- 2)土木学会・土木学会中国支部、地盤工学会：平成 26 年広島豪雨災害合同緊急調査団 調査報告書、2014。
- 3)土木学会：2014 年広島豪雨災害報告書（最終版）、2015。
- 4)中谷洋明、前田健一、菅井径世、筒井胤雄、杉浦大輔：急勾配区間での土石流に関する運動力学的特性の再現手法について、砂防学会誌、Vol.58, No.4, pp. 35-40, 2005。
- 5)前田健一、館井恵、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)Sasaki, T., Hagiwara, I., Iwata, N., Miki, S., Ohnishi, Y. and Koyama, T. : Parameter study of practical rockfall problems with fluid flow by 3D-DDA, 12<sup>th</sup> Inter. Conf. on Analysis of Discontinuous Deformation, pp.48-56, 2015.
- 7)国土交通省 国土技術政策総合研究所 危機管理技術研究センター砂防研究室：砂防基本計画策定指針（土石流・流木対策編）解析、国総研資料第 364 号、2007。
- 8)日本応用地質学会、平成 26 年広島土砂災害に学ぶ 土地の成り立ちを知り、土砂災害から身を守る、平成 26 年広島大規模土砂災害調査団報告会、配布資料、2015。
- 9) 日本道路協会：落石対策便覧に関する参考資料 落石シミュレーション手法の調査研究資料、pp.154, 2002。

## ANALYTICAL STUDY OF DEBRIS FLOWS WITH BOULDER USING DDA

Naoki IWATA, Yoshinori ARAKI, Takshi SASAKI, Ikuo HAGIWARA,  
Yuzo OHNISHI and Tomofumi KOYAMA

Recently many sediment disasters induced by a heavy rainfall occurs and debris flow with boulders damage sabo dams. In this study, to evaluate the boulder flowing motion, we conduct two dimensional(2D) and three dimensional(3D) DDA considering fluid flow force and compared the calculated stopping position of boulder with the actual result on the sediment disaster in Hiroshima on 20th August, 2014. The block of 2D DDA flowed down far than actual results, but one of 3D DDA stoped at the same position of actual result. From these results, it was important to model the three-dimensional topography appropriately.