

APM法を用いた数値実験で得られた三次元データに基づく石礫流のエネルギー的考察

中央大学大学院 学生会員 ○加藤 宏季
中央大学研究開発機構 フェロー 福岡 捷二

1. 序論

土石流は土砂礫と水との混合体が大きなエネルギーを持ち、そのエネルギー勾配により流動していると考えられる。そして、土石流による堰堤や家屋等の構造物の破壊は土石流のもつ巨大なエネルギーによるものと考えられる。そのため、土石流全体の流動をエネルギー的に正しく理解する必要がある。土石流は土砂礫と水とが相互に影響を及ぼしながら運動する現象であり、流速分布や圧力分布が複雑となる。このため平均流速とエネルギー補正係数による速度水頭の評価や静水圧分布と仮定する考え方では不十分であると考えられ、これらの仮定を設けずに土石流内部の複雑な流速分布や圧力分布を計算することが求められる。近年では、計算機やモデルの向上により土石流のような多粒子場の三次元的な流れ場と粒子群の運動を解析でき、運動方程式と連続式から得られた水理量の三次元データを用いることにより三次元的なエネルギー分布が得られる段階にある。

図-1に、土石流の既往研究(例えば¹⁾)と本研究のフローを示す。既往研究の多くは、模型実験や現地観測により得られた知見を基に土石流の内部構造や粒子の運動形態や力関係を、粒子群を連続体として捉えてモデル化している。導出される構成則や侵食速度式には、経験的に得られたものや粒子が規則的に整列しているなどの大胆な仮定が導入されており、今日の学術技術の進展によって検討が必要なものも多いが、導出された土石流の流動モデルは、土石流の堆積範囲予測や土石流対策構造物の効果検証などに利用されている。

一方、本研究では、流体力を直接評価可能な resolved CFD-DEM 型モデルの Arbitrary Particle Multiphase(APM)法²⁾を用いた数値実験を行うことにより、粒子-流体の相互作用を考慮した流れ場と個々の粒子の運動の三次元データが得られる。APM法では、流れ場は連続式とLES、粒子群は個別要素法により解析される。また、粒子に働く流体力は粒子周りの流れ場を詳細に解くことで粒子周りの圧力分布、流速分布より算出する。粒子が流体に及ぼす影響は一流体固液混相流解析により流れ場を解くことにより考慮されている。流れ場の計算において、石礫は密度の異なる流体として取り扱っており、石礫部分においても流速分布だけではなく、圧力分布も得られる。このような枠組みの中で、水の粘性や乱れによるエネルギー散逸や、粒子衝突によるエネルギー

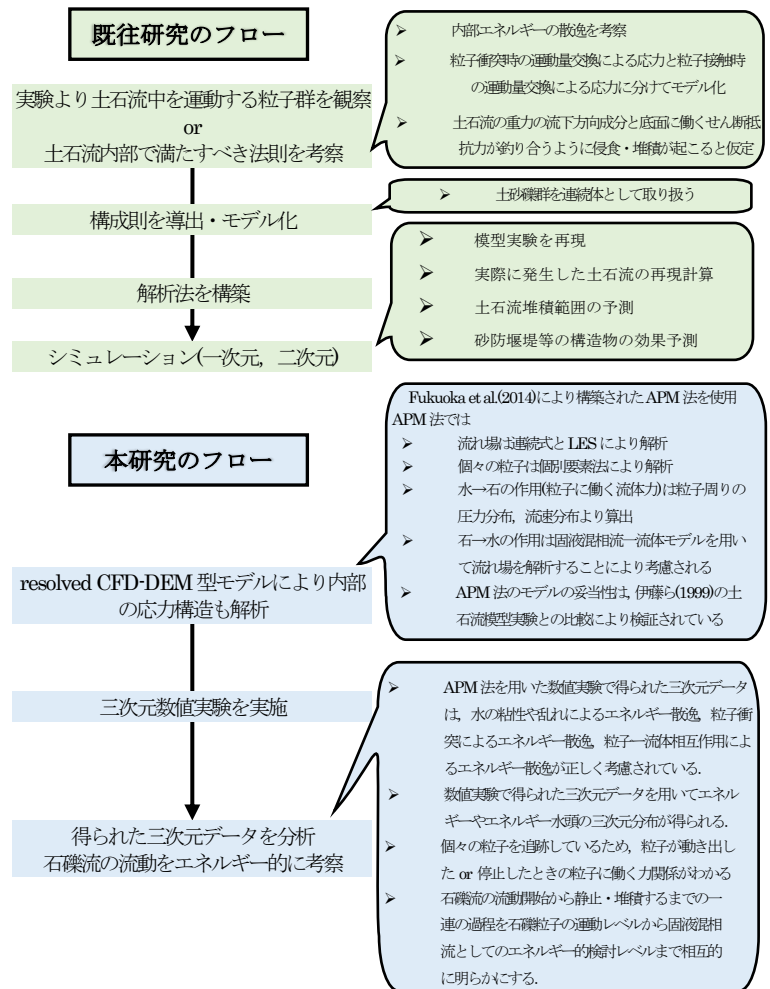


図-1 土石流の既往研究(例えば¹⁾)と本研究のフロー

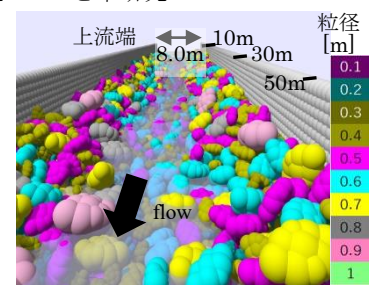


図-2 数値実験水路の初期状態

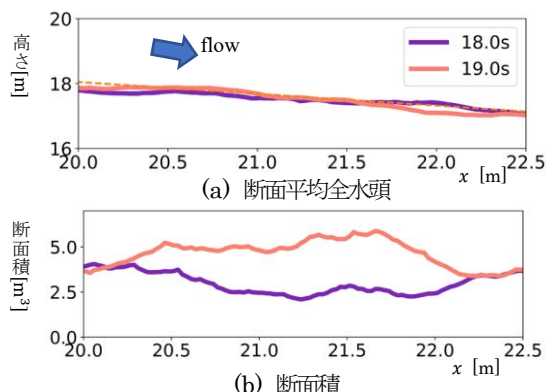


図-3 18秒, 19秒における断面平均全水頭と断面積の縦断面図

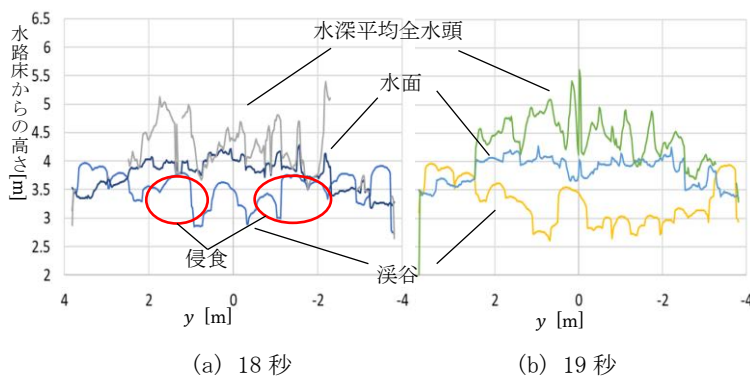


図-4 21m地点の横断面図

ギー散逸, 粒子と水の相互作用によるエネルギー散逸は解かれている. すなわち, APM法により得られる時空間的な三次元データを用いることにより, エネルギーロスを適切に考慮されたエネルギー水頭の三次元分布が得られる. 本研究では, APM法を用いた数値実験で得られた三次元データを用いて石礫流(2章で述べるように, 本研究で扱う粒子群は非常に粗い粒子群からなるため「石礫流」と呼ぶこととする)を固液混相流として捉え, 石礫流の流動機構をエネルギー的に検討する.

2. 数値実験条件

数値実験水路は, 水路長60m, 幅8m, 勾配20°の直線水路である. 渓谷の粒度分布は最大粒径が1.0m, 最小粒径が0.1mの粗い非球形粒子群を用いた. すべての粒子の形状と密度は等しく, その密度は2650 kg/m³である. 図-2に, 数値実験水路の初期状態(通水開始前)を示す. 通水を開始すると, 上流端付近の粒子が水流の作用を受け運動を開始し, 石礫流として流下し渓床・渓岸を侵食・堆積しながら流下した.

3. 侵食・堆積とエネルギーの変化

図-3には, 18秒と19秒時点における, 断面平均全水頭と断面積の縦断面図を示す. 断面平均全水頭 \bar{H}_A は次式(1)

$$\bar{H}_A = \frac{1}{Q} \cdot \int_A \left\{ \frac{u^2 + v^2 + w^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z \right\} u dA \quad (1)$$

により評価した. ここに, u は x 方向流速, v は y 方向流速, w は z 方向流速, p は圧力, g は重力加速度, ρ は密度, A は断面積, Q は流量である. 図-3より, 18~19秒の間に, 20~22m付近において断面積が大きくなり, エネルギー勾配が大きくなっている. 図-4には, 18秒時点と19秒時点における21m地点の横断面図を示す. 水深平均の全水頭 \bar{H}_h は次式(2)

$$\bar{H}_h = \frac{1}{\bar{u}h} \cdot \int_{z_b}^{z_s} \left\{ \frac{u^2 + v^2 + w^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z \right\} u dz \quad (2)$$

により評価した. ここに, z_b は渓谷高さ, z_s は水位, \bar{u} は水深平均流速, h は水深である. 図-4より, 18~19秒において, $y = 1 \sim 2m$ と $y = -2 \sim -1m$ 付近において侵食されおり, このことにより断面積が大きくなっている. 21m付近では, 大粒径粒子群が動き出したことにより粒子群の持つエネルギー水頭が加わり, 石礫流のエネルギー水頭が時間的に増加しているものと考えられる. また, 侵食された多くの大粒径粒子群を輸送するために比較的大きなエネルギーが消費されるため, 21mの少し下流側ではエネルギー勾配が急となっている.

5. まとめ

本研究では, resolved CFD-DEM型モデルであるAPM法を用いた数値実験を行い, 得られた三次元データを基にエネルギー水頭の時空間分布を得ることができ, 石礫流の流動機構をエネルギー的に検討した. 本検討では, 18~19秒間における石礫流の流動過程のみに着目した. 今後は, 石礫流の流動開始から静止し堆積するまでの一連の過程を個々の石礫粒子の運動レベルから固液混相流としてのエネルギー的検討レベルまで総合的に明らかにする.

参考文献

- 1). 江頭ら: 土石流の数値シミュレーション, 日本流体力学会数値流体力学部門Web誌, 2004.
- 2). Fukuoka, S., Fukuda, T., Uchida, T.: Effects of size and shapes of gravel particles on sediment transports and bed variations in a numerical movable-bed channel, *Advances in Water Resources*, 2014.