

粒子法における土石流構成則モデルの開発

京都大学大学院農学研究科 ○阿部孝章, 水山高久
立命館大学理工学部 里深好文

1. 緒言

近年我が国において、局地的な集中豪雨が頻発し、それによって発生した土砂災害が尊い人命や財産に甚大な被害を及ぼしている。土石流を始めとしたこれら土砂災害の被害防止・軽減のためには災害の物理的機構を考慮したシミュレーションモデルを作成し、現象の規模・到達範囲を予測・検討することが重要である。従来手法である格子・メッシュに基づいた解析手法は、モデルの簡潔さ、計算の高速性が長所であり、現象の大まかな把握や予測検討に対して多くの功績があり、防災の実務面での有用性は確固とした物がある。

しかし、これらの手法は現象の内部機構の記述精度に限界があり、河川構造物周辺の局所急変流や、弯曲した河道における土石流の流動等、不連続部を有する流れに適用すると計算が不安定になったり、計算自体が不可能である等その難点が指摘されている。

一方数値流体力学分野で近年活発に実施されている粒子法による解析は、例えば後藤ら¹⁾による固液二相流計算のように非常に高解像度な単一土砂粒子スケールの数値解析にも適用可能である。しかしその解像度を維持しつつ、山地災害のような大規模シミュレーションに粒子法を用いると計算時間がかかり過ぎる等の問題がある。

これに対し別府ら²⁾による粒子法の解析においては、土石流を非圧縮の粘性流体として取り扱っており、砂防構造物に加わる流体力の評価という点で良好な結果を得ている。しかし現段階において土石流の挙動を充分に考慮した数値モデルの確立には至っていない。

以上を踏まえ、本研究ではミクロスケールより大概的で、かつマクロスケールよりも土石流のミクロ挙動を考慮可能なメゾスケール解析法の開発を展望し、粒子法における土石流構成則モデルを開発した。そして簡単な数値実験水路に開発したモデルを適用し、モデルの妥当性・適用性について検討を行った。

2. 構成則モデルの概要

基本的には Koshizuka ら³⁾によって提案された粒子法の一つ、MPS 法の非圧縮流れの支配方程式：

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu\nabla^2\mathbf{u} + \mathbf{g}$$

に準拠しているが、本研究では式中の ν を ν_{cons} に置き換え、解析を実施している。但し $\mathbf{u}$ は速度、 ν は動粘性係数、 $\mathbf{g}$ は重力項である。以下では ν_{cons} の算定方法について述べる。土石流の構成則に関する研究は高橋ら⁴⁾による物が代表的であるが、多くは速度勾配 (du/dy) の 2 乗に比例す

る形になっている。本研究でもそれに準拠する形とするため (du/dy) を粒子法の枠組内で算定し、 ν_{cons} を (du/dy) の関数とする形で構成則を表現した。

具体的にはある時刻における粒子 i の鉛直方向上下に、間隔 $1.5\Delta r_0$ で仮想粒子 A,B を図 1. のように配置し、その点から距離 r_e の範囲内に内挿領域を設けた。但し、 Δr_0 は初期粒子間隔、 r_e は影響半径で $r_e = 2.0\Delta r_0$ とした。この領域において流速を補間し、仮想粒子 (Fictitious Particle) A,B の点における流速を用いて、粒子 i の位置における速度勾配を、

$$\left(\frac{du}{dy}\right)_i = \frac{u_{\text{FictA}} - u_{\text{FictB}}}{2\Delta r}$$

のように算定した。さらにこの速度勾配を用いて粒子 i の持つ動粘性係数 ($\nu_{\text{cons}})_i$ を

$$(\nu_{\text{cons}})_i = \beta\nu\left(\frac{du}{dy}\right)_i^2$$

とした。すなわち、速度勾配が大きな粒子ほど粘性効果が大きくなるモデルとした。また係数は便宜的ではあるが $\beta = 1.0 \times 10^3$ と与えた。

3. 数値実験水路への構成則モデルの適用

本項では図 2. に示すように簡単な数値実験水路を作成し、前項のモデルを適用して妥当性の検討を行う。初期水深は 0.1m、水路勾配 $I = 1/10$ 、粒子径は 0.001m とした。上流端には流入境界、下流端には自由流出境界を設置し、上流から単位幅流量 $0.3\text{m}^2/\text{sec}$ を与えた。尚、計算開始直後流体粒子には流下方向に $3.0\text{m}/\text{sec}$ の流速を与えた。

計算開始後、 $t = 6.0\text{sec}$ の流れの様子を図 3. に示す。構成則モデルによる水路の水面形状は標準型 MPS 法のそれと比較し、流入境界直下におい

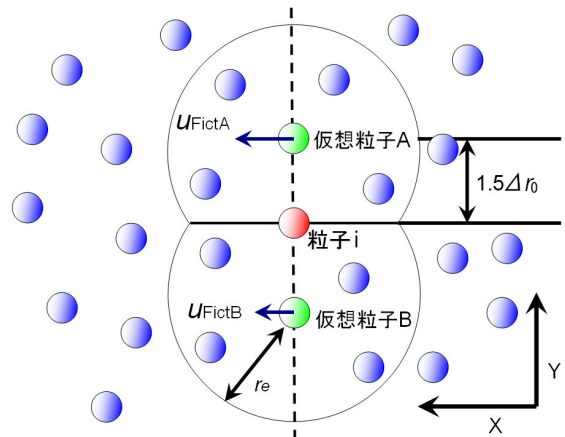


図1: 構成則モデルの概念図

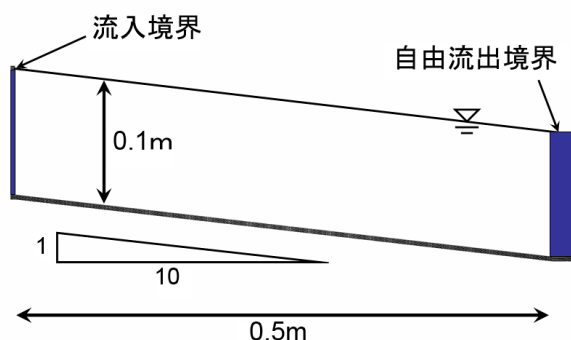


図2: 数値実験水路の模式図

て水深が極小となる結果となり、これは粘性効果が通常の MPS 法よりも大きくなった為と考えられる。加えて、構成則モデルにおいては河床に比較的平行な水面形状を維持することが可能となった。また図 3. の下部は画像の矩形枠内に示した部分の速度分布である。流入境界から流出境界までの距離を 1 とし、上から 1/3 の点を A、2/3 の点を B と置いた。A,B いずれの点においても標準型 MPS 法の速度分布は河床付近から水面に向かうにつれて速度がやや小さくなる傾向が見られるのに対し、構成則モデルの速度分布は河床付近で最小となり、ある高さより上では標準型 MPS 法とほぼ同様の傾向を示した。つまり、構成則モデルによって速度勾配が大きい河床部では速度勾配に対する抵抗力が大きくなり、それが速度分布に反映される形となった。よって本モデルによって速度勾配に大きく依存する抵抗、及び河床での摩擦効果を考慮した土石流解析が可能となったと言える。

5. 結言

本稿では粒子法の一つである MPS 法の計算スキームに変更を加え土石流構成則モデルを開発し、これを比較的勾配の大きな数値実験水路に適用した。標準型の MPS 法と比較しても速度勾配の 2 乗に比例する抵抗力が考慮されたことで、特に河床境界付近での顕著な速度分布の差となって表れた。しかし本モデルは動粘性係数を速度勾配の 2 乗に比例する形で置換したのみであり、パラメータの決定方法や他の様々なケースへの適用性、そして水理実験との定量的な比較等、より詳細な検討が必要である。

また、石礫など土石流構成材料の粒子的な挙動を再現する段階になって初めて粒子法の利点は活かされると言える。今後は本モデルのような構成則モデルに侵食・堆積モデルを結合し、冒頭に示したような粒子法によるメゾスケール解析手法の開発に取り組みたい。

謝辞

本研究の遂行にあたり、(独) 農業・食品産業技術総合研究機構の田中良和氏には粒子法による流体解析の統合環境コードを御提供頂き活用させて頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

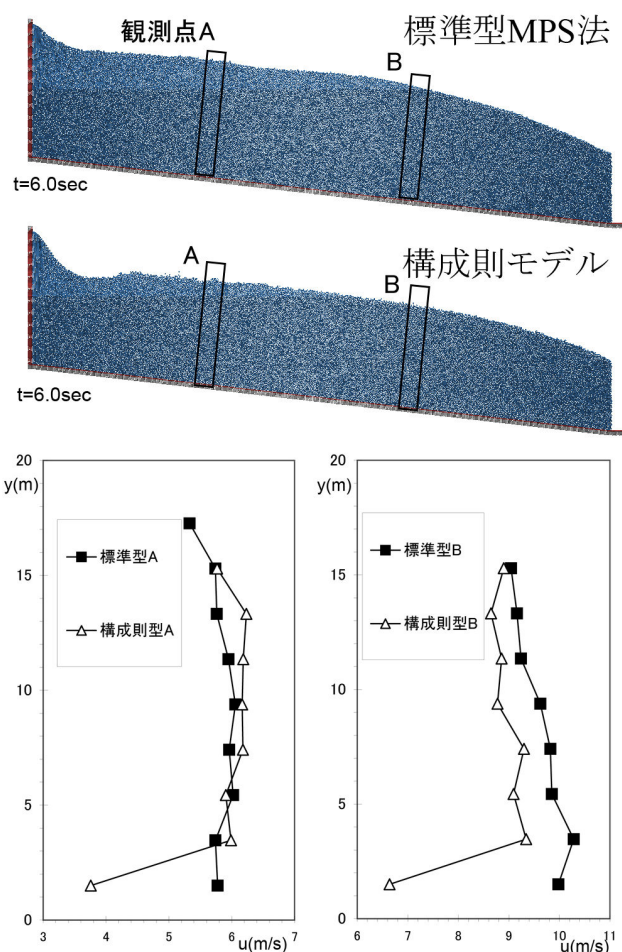


図3: 数値実験水路への適用結果

参考文献

- 1) 後藤仁志, 林稔, 酒井哲郎, 固液混相流型 MPS 法による波・底泥相互干渉の数値解析, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp.1-5, 2001.
- 2) 別府万寿博, 石川信隆, 園田佳臣, 長谷川祐治, 水山高久, 個別要素法・粒子法による土石流モデルのシミュレーション解析, 平成 20 年度砂防学会研究発表会概要集, pp.38-39, 2008.
- 3) S. Koshizuka, A. Nobe and Y. Oka, Numerical Analysis of Breaking Waves Using the Moving Particle Semi-implicit Method, International Journal for Numerical Methods in Fluids, **26**, pp.751-769, 1998.
- 4) 高橋保, 土石流の発生と流動に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第 20 号, B-2 pp.405-435, 1977.