

# 粒子法を用いたビジュアルな土石流シミュレーション

国土防災技術(株) 大野亮一, 龍見栄臣, 中澤洋

## 1. 粒子法とは

粒子法は、移動する多数の粒子点により、流体や固体をシミュレートする手法である。メッシュフリー法の1種であることから、落水・碎波といった変形分離を伴う流体解析に強みを発揮し、多くの適用例が報告されている。解析精度は粒子数に強く依存し、計算機パワーを多く必要とするが、二次元解析については、近年マシンパワーが足りてきた感があり、三次元解析への適用も十分視野に入ってきたといえるだろう。

粒子法は、気体・流体・固体が混在する固気混相や固液混相といったマルチフィジクスを得意とする。この特徴が、土石流シミュレーションに適するのではないかと考え、土石流への適用を試みた。本発表ではその結果について簡単に報告したい。

## 2. 粒子法による土石流表現

粒子法による土石流表現には、いろいろなアプローチが存在する。表に簡単に整理した。

各手法とも流体表現には粒子法を用いる。土砂表現の手法がそれぞれ異なる。表中、 から に行くほど考慮される力の種類・質が増えており、より精緻なモデル化がなされている。

表 粒子法による土石流表現手法の分類

	流体	土砂	備考
	粒子(流体)		混合体(単相流)として扱う
	粒子 (流体)	剛体	粒子と剛体の連成解析。
		粒子(剛体)	粒子連結による剛体表現。後藤(2001)など。
		粒子(流体)	土砂を流体アナロジーで表現。後藤(1999)など。
		DEM	土砂を個別要素法(DEM)で表現。後藤(2003), 酒井(2008)

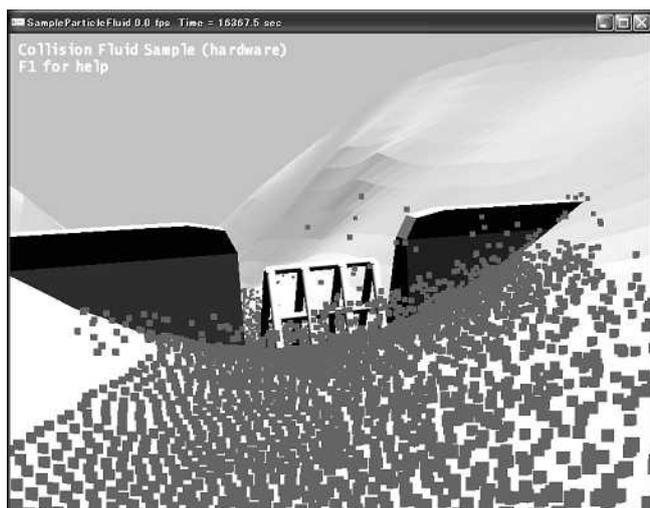
後藤(1999)は、粒子法の1種であるMPS法を用いて、粒子法固液二相流モデル(MPS-MPS法と呼ぶ。表の )を提案した。MPS-MPS法は微細土砂の拡散過程はよく表現できるが、以下の理由から土砂の堆積過程の表現には不向きとされている。固相にもナビア・ストークス式を用いること、礫同士の衝突力が評価できないこと、の2点である。土砂の堆積過程を表現するため、後藤(2003)は、土砂を個別要素法(DEM)で表現するモデル(表の )を構築した。この方法はDEMと粒子法(MPS)が連成(カップリング)された手法であり、DEM-MPS法と呼ばれる。DEM-MPS法では、流体~土砂間の相互作用力(圧力と粘性抗力)と、土砂~土砂間の相互作用力(圧力と粘性抗力と衝突力)が評価され、土石流現象で考慮すべき力の多くを含み、土砂の堆積過程も表現できるモデルとなっている。

土石流を精緻に表現する場合、DEM-MPS法がもっとも有力となろう。しかし、これまでの報告は小規模領域の微視的現象を対象としており、数百メートル規模の実溪流のシミュレートに適用された事例はない。

### 3. 粒子法による試計算

今回は実渓流を対象とすることから、簡略ではあるが表の、による計算を行った。すなわち、土石流は単相流扱いとし、地形、立木、流木、砂防えん堤を剛体オブジェクトで表現する。また、粒子と剛体間の力の受け渡しは、圧力を含めた流体力を評価するのが正しいが、圧力は無視し、粒子流速から求まる力のみを剛体との衝突箇所を外力として付与した。このため、流体圧力は存在するが剛体に浮力が作用しない。なお、剛体に衝突した流体粒子には反発係数に応じた反力を与えた。このように大胆な簡略化を施したが、それなりに土石流らしいふるまいが得られている。定量的な妥当性検証はまだ行っていない。

粒子法の解析コードについて若干述べる。今回は NVIDIA 社の PhysX を使用した。PhysX は SPH 法ベースの粒子法で、バイナリコード(SDK)は無償でダウンロードできる。また、国産コードとして有名な MPS 法は、ユーザー会経由でソースコードの配布が行われている。どちらも容易に入手が可能である。



スリットえん堤のスナップショット



流木のスナップショット

### 4. ビジュアル表現と今後の用途

粒子法は、粒子の位置情報が刻々と計算されるため、土石流が流動する様子をそのまま可視化できる。必然的にダイナミックな土石流が表現され、ビジュアル表現との親和性が高い。ビジュアルな可視化は、計算結果の直感的理解につながる。逆に、指定箇所の水位を調べたい場合、そのための専用ルーチンを組み込む必要があり、従来の土石流シミュレーションに比べ手間がかかるという側面もある。また、砂防えん堤との組合せでは、土石流が流下中にえん堤位置をマウスで動かしながら最適位置を検討するなど、設計者との対話型ツールとすることも簡単であり、使い方次第でおもしろい道具になる可能性を秘めている。

#### 参考文献：

- 後藤仁志・Jørgen Fredsøe (1999): Lagrange 型固液二相流モデルによる海洋投棄微細土砂の拡散過程の数値解析, 海岸工学論文集, 第 46 巻, 986-990.
- 後藤仁志・酒井哲郎・林稔 (2001): 粒子法による流木群の堰止め過程の Lagrange 解析, 水工学論文集, 第 45 巻, 919-924.
- 後藤仁志・林稔・安藤怜・酒井哲郎 (2003): 固液混相流解析のための DEM-MPS 法の構築, 水工学論文集, 第 47 巻, 547-552.
- 酒井幹夫・越塚誠一・豊寫至 (2008): DEM-MPS 法による自由界面を伴う固液混相流の数値解析, 粉体工学会誌, Vol.45, No.7, 466-477.