

浅水方程式ベース粒子法による地形変動解析

Geophysical evolution analysis using particle method based on shallow-water equation

松島 亘志^{1*}, 貝阿彌 淳¹, 山田 恭央¹

Takashi Matsushima^{1*}, Jun Kaiami¹, Yasuo Yamada¹

¹ 筑波大学システム情報工学研究科

¹ University of Tsukuba

河川地形の形成・発達過程の解明は、地形学・地質学などの理学分野のみならず、河川やダム維持管理、洪水対策、周辺地盤の物性予測などの多くの工学分野にとっても重要な課題である。特に、近年のコンピュータの進歩とともに、このような長期問題への数値解析的アプローチの可能性が広がってきており、さまざまな手法が提案されてきている [1,2]。そこでは、如何に複雑現象のエッセンスのみを抽出して、簡便な長時間解析の可能なモデルを構築するか、というコンセプトが重要となる。

本研究では、河川工学の分野で広く用いられている浅水方程式をベースとし、それを差分法で解く代わりに粒子法を用いる解析手法を構築した [3]。粒子法は流体解析や固体の大変形解析などで近年用いられている Lagrange 的な解析手法であり、連続体中の物質点の変位を計算粒子の運動として表現する手法の総称である。その流儀・名称は数多くあるが、ここでは、分子動力学法や個別要素法などの離散体解析手法に極めて近い方法を採用している。すなわち、計算粒子の運動は、個々の運動方程式を解くことで陽的に計算し、更に流体間の相互作用力を、近傍の粒子の smoothing で求めずに、単純な 2 体間ポテンシャルによって与えている。その理由は、前者の方法では近傍粒子数が少ない場合に異常な応答値が計算されて計算が不安定になるため、妥当な計算を行うのに相当数の粒子が必要であるのに対し、後者の方法では精度を犠牲にする代わりに安定性を確保でき、少ない粒子数で計算が可能であるからである。

浅水方程式によれば、計算粒子に作用する力は、(a) 慣性力、(b) 底面せん断応力、(c) 地形勾配による圧力、(d) 流体高さの水頭による圧力、(e) 隣の流体との粘性応力 + 乱流拡散応力、となる。(b) 底面せん断応力は、Manning の平均流速公式を適用し、更に固相率が高い場合にも適用できるように、流動限界勾配を導入する。(c) 地形勾配によって生じる重力水頭の圧力ベクトルは、通常差分法による解法と同様に求める。地形はメッシュデータとしてあらかじめ与え、後述のように流砂過程によって変動するものとする。(d) の流体高さの水頭による圧力および (e) 隣の流体との粘性応力 + 乱流拡散応力が、前述の計算粒子間の相互作用力となるが、本研究では (e) の効果は無視し、(d) については近傍の計算粒子間の 2 体相互作用として簡便に与えるものとした。具体的には、粒子間距離に応じて、基準距離から近づくとも反発力、遠ざかると引力が作用するというバネを考えることになるが、このバネの値は 1 次元の水頭換算によって一義的に (すなわちパラメータなしに) に求める。注意すべきは、この相互作用力は、流体の圧縮性とは関係なく、水頭換算で求めるため、計算の時間刻みを大きくとれることである。また、粒子間距離がある程度離れると相互作用力が働かないとすることで、計算粒子単体でも自然な運動が再現できる。最後に、このようにして求めた力を足し合わせた力により、個々の粒子の運動方程式を差分法で解くことで、次の時間ステップでの計算粒子の位置を求める。

流体の固相率 (土砂の割合) が小さい領域では、Meyer-Peter-Muller の掃流砂量式による土砂移動を計算する。無次元限界掃流力は、岩垣の実験式を用いるが、本研究では、実験に合わせて、単粒度に近い砂を対象としている。ただし、非平衡な流れでの砂の侵食・体積を表現するため、掃流砂量式によって計算される限界掃流砂量に至るまでの遅延時間を考慮している。これにより、比較的实验に近い侵食・堆積状況を再現できることがわかった。

また、本解析手法は、地震や豪雨による斜面崩壊と、その後の土石流の流動計算なども対象にしている。その場合には、流動限界勾配以上の位置に固相率の高い流体粒子を配置して計算することにより、斜面崩壊とその影響範囲を簡便に表現できる [3]。

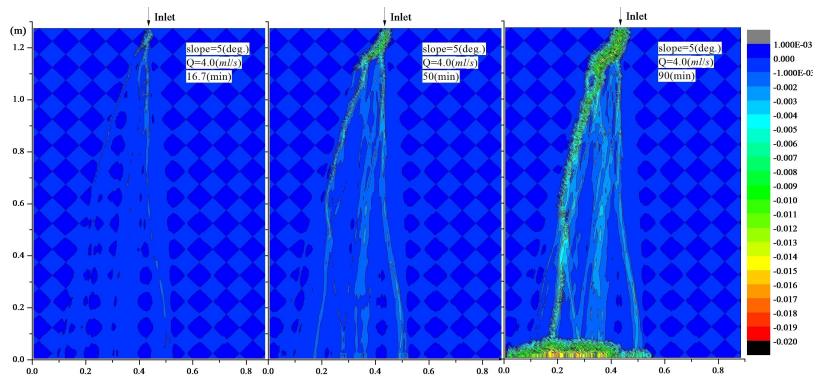
図は、長さ 1.28m、幅 0.88m の板に、粒径約 0.2mm の砂を敷き詰めたものを、傾斜 5° に傾けて、上流から 2ml/s で水を流した場合の数値解析結果である。ここでは、初期の地表面高さの擾乱を正弦関数で与えている。初め左右に振れていた流路が、あるところで固定され、そのまま定常の流れになっている様子が見られる。実際の実験では、傾斜が大きくなった側岸が崩壊し、それによって流路が間欠的に変動する様子が観察された。発表では、そのような斜面崩壊モデルを組み込んだ計算結果も紹介する予定である。

参考文献

[1] 関根正人：移動床流れの水理学、共立出版。

[2] 後藤仁志：数値流砂水理学、森北出版。

[3] ホアン・ジャクエンほか：衛星画像から得られる 2.5m メッシュ標高データを用いた土砂流動解析、地盤工学会関



キーワード: 土砂流動, 粒子法, 地形進化

Keywords: Sediment dynamics, Particle method, Geographical evolution