

# 大規模な土石流の流下・堆積に関する数値計算プログラム作成の留意点

内田太郎・丹羽 諭・西口幸希・村上正人・蒲原潤一・岡本 敦

## 1. はじめに

土石流の流下、堆積、氾濫については、これまでも、様々な数値計算手法が提案され、数値計算のためのプログラムが提案されてきた。特に、近年、ユーザーインターフェースを備えた数値計算プログラムも公開されてきた<sup>1)</sup>。その結果、研究のみならず、徐々にではあるが実際の土石流対策に広く活用されつつある。

土石流の数値計算プログラムの多くは、土石流全体の連続式、運動方程式、砂礫の連続式から構成される流れの支配方程式を離散化し、連続的に解く手法が用いられている<sup>例えば、2)</sup>。これまでの土石流の数値計算に関する文献の多くで、支配方程式については詳細に述べられている。しかし、支配方程式のみでは、土石流数値計算プログラムを作成することは困難である。例えば、離散化手法の詳細、非定常性が強い場合の制御方法、支配方程式の適用範囲外の取扱いなど（以下、これらを総称して、「プログラミング手法の詳細」と呼ぶ。）によって、支配方程式、入力条件が同じであっても、結果が異なる可能性がある<sup>3)</sup>。一方、土石流数値計算技術の更なる発展や幅広い普及のため多様な計算プログラムの開発が進められるべきであるが、計算プログラムによる差はある程度以下になっていることは重要であると考えられる。

そこで、国土技術政策総合研究所砂防研究室では、国土交通省砂防部砂防計画課の作成した大規模土石流の数値計算プログラムに関して、プログラミング手法の詳細に関する検討を行った。特に重要と考えられるプログラミング手法の詳細については、取扱いが計算結果に及ぼす影響についても検証したのでここに報告する。

## 2. 用いた基礎方程式

石礫型土石流の内部応力を表現するにあたって、比較的整然と層流状態で移動し、流れの骨格を形成している「土石」と土石の間隙を埋める「間隙

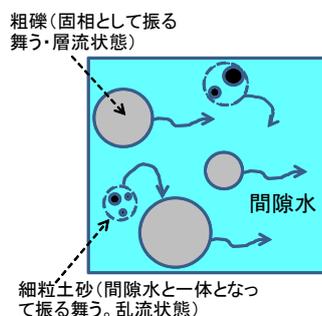


図-1 大規模土石流の流下時のイメージ図

水」とに分けて取り扱われ、内部応力がモデル化されてきた。さらに、土石のうちの細粒分は、間隙水と一体となって流下する、いわゆるフェーズシフトという現象が生じることが指摘されてきている<sup>4)</sup> (図-1)。この細粒土砂のフェーズシフトを考慮した数値計算プログラムが開発<sup>5)</sup>、適用性の検証が行われ<sup>6)</sup>、「深層崩壊に起因する土石流の流下・氾濫計算マニュアル(案)」<sup>7)</sup> (以下、マニュアルと呼ぶ) が提案されてきた。そこで、本研究においては、マニュアルに示されている基礎方程式に準じて、数値計算手法の細かい仕様に関する検討を行った。

## 3. 検討内容

### 3.1 検討の概要

本検討では、

- (1) 支配方程式の適用範囲
- (2) 離散化手法の影響
- (3) フェーズシフトを考慮した場合の基礎方程式の取扱い

について検討した。

### 3.2 支配方程式の適用範囲

支配方程式の適用範囲に関しては、数多くの仕様を決める必要があるかと思われるが、以下の4項目をここでは検討した。

- 1) 相対水深が非常に小さくなった場合の河床せん断力の算出方法

相対水深(水深を代表粒径で除した値)が非常に小さくなった場合、底面に働くせん断力が大きく算出され、計算が不安定になる可能性が考えら

れる。そこで、ここでは、計算の不安定化を防ぐ目的で相対水深が3以下となった場合でも、相対水深を3として河床せん断力を算出した。

2) 相対水深が大きくなった場合の河床せん断力の算出方法

相対水深が大きくなった場合は、一般に石礫型土石流の状態から乱流型土石流の状態に移行することが明らかにされている<sup>8)</sup>。これまでも土石流数値計算プログラムでは、相対水深が大きくなったときには、河床せん断力を石礫型土石流の抵抗則の代わりにマンニングの式により算出されることが多い<sup>9)</sup>。そこで、ここでも相対水深が30を上回る場合は、土砂濃度によらず、マンニングの式を用いて河床せん断力を算出した。

3) 平衡濃度の上限値の取扱い

土石流の平衡濃度を算出する式は、急勾配な領域に適用すると土砂濃度が1を上回るような非現実的な値が算出される。土石流の平衡濃度の上限値が河床堆積物の土砂濃度の0.9倍などに設定されることが多い<sup>9)</sup>。ここでは、本検討でも、同様な取扱いを行った。

4) 平衡濃度算出における勾配の取扱い

土石流の平衡濃度は、等流・定常状態を仮定し、勾配の関数の形で表わされることが多い<sup>2)</sup>。非定常・不等流条件の数値計算を行う際の勾配の算出方法としては、エネルギー勾配、水面勾配<sup>1)</sup>、河床勾配<sup>4)</sup>の算出が考えられる。ここで、現在広く用いられている土石流シミュレータであるKanako<sup>1)</sup>と同様に、水面勾配を用いた。

3.3 離散化手法等の影響

支配方程式の離散化にあたっては、数多くの仕様を決める必要があると思われるが、ここでは影響が大きいと考えられる以下の2項目を検討した。

1) 平衡濃度算出に用いる勾配の算出手法

2) 運動方程式中のスカラー量の取扱い

土石流の流下・堆積過程の数値計算においては、水深等のスカラー量と流速等のベクトル量の算出地点を空間刻みの長さの半分の距離上下流にずらしたスタッガード・スキームが広く用いられている<sup>(例えば1),5)</sup>。一方、平衡濃度算出に用いる勾配の取り方、運動方程式中のスカラー量の取り方は計算結果に影響を及ぼす可能性は極めて高いがこれまでの研究論文等において、手法の詳細について記載されていない場合が多い。そこで、ここでは、平衡濃度算出に用いる勾配については、風下側の勾配を用いることとし、勾配の取り方の影響を検討するために、風下・風上の平均勾配を用いた

ケースについても計算を行った。また、運動方程式中のスカラー量については、風上側の値を用いることとし、スカラー量の取り方の影響を検討するために、風下・風上の平均値を用いたケースについても計算した。

3.4 フェーズシフトを考慮した場合の基礎方程式の取扱い

フェーズシフトを考慮した場合の基礎方程式の取扱いについては、以下の項目について検討した。

1) 土石流と土砂流（掃流状集合運搬）の平衡濃度の連続性

土砂流（掃流状集合運搬）については、いくつかの平衡濃度式が提案されてきているが<sup>(例えば、9)</sup>、ここでは、広く用いられている式の1つである高橋らによる実験式を用いた<sup>10)</sup>。なお、同式を用いた場合、平均土砂濃度と輸送土砂濃度の違いに関する整理が不十分になるおそれがあるとの議論もあり<sup>11)</sup>、今後の検討が必要な部分を残している。一方、高橋らによる実験式を用いる場合、一般的に勾配によって用いる平衡濃度式は選択され、勾配 $\theta$ が $\tan \theta > 0.138$ の条件のときに土石流の平衡濃度式を用い、 $\tan \theta < 0.138$ のとき、土砂流の平衡濃度式が用いられる<sup>(例えば1)</sup>。しかし、この方法を用いた場合、条件によっては、土石流から土砂流に必ずしも平衡濃度が連続しない場合がある<sup>12)</sup>。特に、細粒土砂のフェーズシフトを考慮した場合、土石流から土砂流に移行すると平衡濃度が急に大きくなる。そこで、本検討では、鈴木らの手法<sup>12)</sup>を用いて、平衡濃度の連続性を確保した。

2) 間隙流体密度の上限値の取扱い

河床に細粒土砂が大量にある場合、河床が侵食されると土石流中に大量な細粒土砂がもたらされることになる。その全てがフェーズシフトとした場合、間隙流体中の細粒土砂の割合が、非現実的なほど非常に高くなる可能性がある。そこで、本検討では、間隙流体の細粒土砂濃度に上限値を

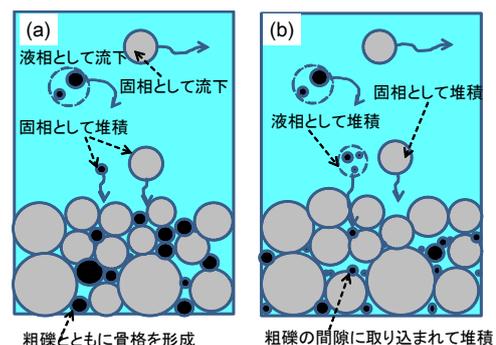


図-2 堆積過程の模式図

設け、仮に上限値を上回るような細粒土砂が侵食によりもたらされたとしても、上限値を上回る細粒土砂はフェーズシフトせず、粗礫同様、固相として振る舞うとした(図-1参照)。

### 3) 細粒土砂の堆積過程の取扱い

フェーズシフトした細粒土砂の堆積過程については、いくつかのプロセスが考えられる(例えば5)。例えば、堆積する直前には細粒土砂であっても、固体的な振る舞いをし、粗礫とともに河床を構成するという仮定(図-2(a))と堆積する直前まで細粒土砂は間隙流体と一体となっており、粗礫によって構成される河床の間隙に残るという仮定(図-2(b))の2つが考えられる。さらには、これらの中間的な振る舞いも考えられる。現時点で十分な情報がないが、本検討では、河床の質量保存の取扱いが簡便になるよう図-2(a)に示した仮定に従い、河床の粒度分布は侵食堆積により変化しないと仮定した。

## 4. 検討結果

### 4.1 検討手法の概要

本検討では、2005年の台風により宮崎県鰐塚山山系で発生した七瀬谷の土石流を対象に検討を行った。本検討では、崩壊地直下から土石流流下区間及びその下流域の地形条件を空中写真及び地形データから設定した。地形条件や入力条件の設定方法は、基本的にはマニュアルに従った。また、前章で示した方針に従い作成したプログラムを用い、土石流の流下・堆積に関する数値計算を実施した。その上で、細かい仕様の違いが計算結果に及ぼす影響を検討するために、表-1に示す数値計算を行った。

### 4.2 検討結果の概要

まず、作成したプログラム及び前節で設定した

条件を用いて、七瀬谷の土石流の堆積範囲を概ね再現できることを確認した。また、既存の汎用シミュレーター(Kanako-LS)<sup>2)</sup>の計算結果と比較を行い、流速、水深、河床変動量の時空間変動が概ね一致することを確認した。

支配方程式の適用範囲、離散化手法、フェーズシフトの考慮に関する細かい仕様の影響に関する検討結果の概要を表-1にまとめた。その結果、細かい仕様のうちいくつかは、河床変動計算結果や計算の安定性に大きく影響することが確認された。なお、ここでの結果は、あくまでも七瀬谷の地形において、深層崩壊に起因する土石流を想定しマニュアルに従い計算した際の評価結果であり、地形条件や想定する現象により、影響の有無や程度は異なることが予想され、更なる検討が必要であると考えられる。

次に、検討結果の例として、離散化手法の細かい仕様のうち、スカラー量の取り方に関する検討結果を図-3に示す。図に示したように、スカラー量を風上側で取ると流量の計算結果は比較的スムーズで計算が安定していると考えられるが、スカラー量を上下流の平均値を用いた場合、所々に流量が急激に跳ね上がるような箇所が見られ、計算が安定していない可能性が高いことが分かる。

## 5. おわりに

本検討により、既往の研究論文等であまり示されることがなかった、支配方程式の適用範囲、離散化手法、フェーズシフトの取扱いに関する検討を行い、これらのプログラミング手法の詳細が土石流の流下・堆積に関する数値計算結果に大きく影響する場合があることを示した。このことは、同じ基礎方程式を用いた計算プログラムであっても、プログラミング手法の詳細によっては、異な

表-1 検討結果の概要

	提案手法	比較検討手法	影響
支配方程式の適用範囲			
相対水深が小さくなった場合	相対水深の下限值設定	下限値無し	影響小
相対水深が大きくなった場合の河床せん断力の算出方法	マニング式へ移行	マニング式へ移行無し	影響小
土石流の平衡濃度の上限値	上限値設定	上限値無し	急勾配区間における河床変動に影響
平衡濃度算出における勾配	水面勾配	河床勾配	影響小
離散化手法の影響			
平衡濃度算出に用いる勾配	風下勾配	上下流の平均勾配	計算の安定性に影響大
運動方程式中のスカラー量	風上の値	上下流の平均値	計算の安定性に影響大
フェーズシフトを考慮			
平衡濃度の連続性	鈴木らの手法で連続	不連続	河床変動・到達範囲に影響
間隙流体密度の上限値	上限値設定	上限値無し	河床変動・到達範囲に影響
細粒土砂の堆積過程	図-2a	図-2b	河床変動・到達範囲に影響

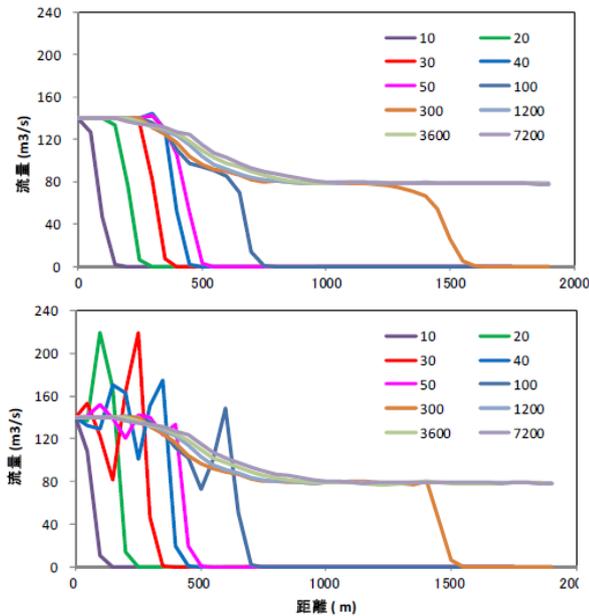


図-3 スカラー量の取扱いに関する検討結果の例（上：風上側、下：上下流平均値）凡例の数字の単位は砂

る結果を算出するおそれがあることを示している。必ずしも、1つのプログラムに収敛させていく必要はないと考えるが（実際、本検討で作成したプログラムは、既存のKanako-LS等と計算結果がほぼ等しくなることを確認している。）ある程度、土石流計算プログラムの作成・活用にあたっては、細かい仕様を明確にしていくことが必要であると考えられる。

ここでは、検討結果の概要を示したのみであり、詳細については、国土技術政策総合研究所資料等としてとりまとめていく予定である。本検討では、土石流計算プログラムを作成するにあたって必要な全ての仕様を検討できていないと考えられる。これについては引き続き検討を進めていくとともに、関係各位からのご意見も賜りたいと考えている。なお、国土交通省砂防部砂防計画課で作成されたプログラムの活用にあたっては、適宜、国土交通省砂防部砂防計画課地震・火山砂防室に相談されたい。

参考文献

- 1) 中谷加奈、和田孝志、里深好文、水山高久：GUIを実装した汎用土石流シミュレータ開発、第4回土砂災害に関するシンポジウム論文集、pp.149～154、2008
- 2) 地盤工学会 土石流編集委員会：ジオテクノート12、土石流、2003
- 3) 鈴木拓郎：土石流数値シミュレーションにおける侵食速度式の制御法、砂防学会誌、第65巻、第5号、pp.21～28、2013
- 4) 江頭進治、本田尚正、宮本邦明：姫川支川蒲原沢土石流のシミュレーション、水工学論文集、42巻、pp.919～924、1998
- 5) Uchida T., Nishiguchi Y., Nakatani K., Satofuka Y., Yamakoshi T., Mizuyama T.: New numerical simulation procedure for large-scale debris flows (Kanako-LS), Int. J. Erosion Cont. Eng., Vol.6, pp. 58-67, 2013
- 6) 西口幸希、内田太郎、石塚忠範、里深好文、中谷加奈：細粒土砂の挙動に着目した大規模土石流の流下過程に関する数値シミュレーション、砂防学会誌、第64巻、第3号、pp.11～20、2011.
- 7) (独)土木研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム：深層崩壊に起因する土石流の流下・氾濫計算マニュアル(案)、土木研究所資料、第4240号、2012
- 8) Hotta N. Miyamoto K.: Phase classification of laboratory debris flows over a rigid bed based on relative flow depth and friction coefficients Int. J. Erosion Cont. Eng., Vol.1, pp.54-61, 2008
- 9) 江頭進治、宮本邦明、伊藤隆郭：掃流砂量に関する力学的解釈、水工学論文集、第41巻、pp.789～794、1997
- 10) Takahashi, T.: Debris Flow, Monograph series of IAHR, 1981
- 11) 江頭進治、鈴木拓郎、内田太郎：『土砂移動シミュレーション手法における輸送形態の遷移に伴う不連続性の解消に関する研究』に関する質疑応答、砂防学会誌、第66巻、第5号、pp.73～75、2014
- 12) 鈴木拓郎、内田太郎、岡本敦：土砂移動シミュレーション手法における輸送形態の遷移に伴う不連続性の解消に関する研究、砂防学会誌、第66巻、第2号、pp.21～30、2013

内田太郎



国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部砂防研究室 主任研究官  
Taro UCHIDA

丹羽 諭



国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部砂防研究室 部外研究員  
Satoshi NIWA

西口幸希



(株)建設技術研究所 砂防部  
Yuki NISHIGUCHI

村上正人



(株)建設技術研究所 砂防部  
Masato MURAKAMI

蒲原潤一



国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部砂防研究室長  
Jun'ichi KANBARA

岡本 敦



国土交通省水管理・国土保全局 砂防部砂防計画課 地震・火山砂防室長  
Atsushi OKAMOTO