

日本における土石流・泥流理論研究の原点の再確認

(国研) 土木研究所 清水武志

1. はじめに

実務では各種基準書に示される土石流の公式を用いて計画や設計等が進められ、また数値計算では既往研究に基づく土石流の基礎方程式が利用される。土石流力学は研究者・技術者の日々の業務で利用されており、適切な利用のために理論の仮定や適用限界の理解が求められる。しかし、国内での土石流力学の理論的研究発表が少ない現在、理論が持つ概念や仮定、発展史を聞ける機会は少ない。また入門的な専門書も見当たらない。そのため、式が内包する概念等を正確に理解するのは容易とはいえない。

そこで、本稿では、筆者の理解した範囲において、その後大きく発展した土石流流動の力学理論を初めて提案した論文の内容を解説することで、理論が持つ仮定や概念、物理的描像を研究史的に再確認することを目的とする。本稿の主たる対象は高橋(1977)および宮本(1985)である。これらの研究に強く影響を与えた Bagnold(1954) や金谷(1979a, b) の内容を含めて土石流力学研究前史も簡潔に描いてみる。このような試みは、理論のもつ仮定や概念の理解を促せる可能性があると考えている。なお、本稿の内容自体は『講座「土石流」』(宮本, 1993a,b,c) と類似するが、原著論文に即して内容を示した点が異なると考えている。

2. 土石流力学研究前史と日本の土石流流動理論

沙漠や流砂の研究者の Bagnold(1954) は、実験および完全弾性球を含むクエット流れの理論的な考察により、中立粒子(溶液と同じ密度の粒子との混合液)の衝突による動的応力はひずみ速度の2乗に比例することを示した。水の粘性応力はひずみ速度の1乗に比例するため、この相違は粒子流に特徴的である。高橋(1977) は、この研究結果を斜面流に適用して土石流の流動理論を提案し、多くの特性が説明できることを示した。

一方、1960年代頃までに流体力学や固体力学に共通する基礎が研究され、一般連続体力学や有理連続体力学という名で連続体力学が整備された。また、連続体の局所平衡に加え非平衡を扱う熱力学である非平衡熱力学や有理熱力学も同時期に発展した。このような背景の中、佐竹正雄および Jenkins を座長とする日米粒状体力学セミナー(1978年, 仙台)が開催され、粒状体の固体や流体に対する実験的研究に加え、連続体力学や統計力学を適用する新しい研究が示され、著名な粒子温度の提案(Ogawa)や Mctigue による粒子運動論などが会議録に掲載された。Mctigue の研究と同様の方法により椿ほか(1982)は土石流流動理論を構築した。同会議録の Savage の研究に議論を残した金谷は、その翌年に2篇の論文を発表した(金谷, 1979a,b)。この研究は、間隙が真空である剛体球による粒状体の「遅い流れ」と「速い流れ」を対象とし、他の研究者のように一般連続体理論をあてはめるのではなく、具体的な物理現象に即してモデルを作り、一般連続体のひとつ極性流体(Cosserat 流体)の物理的内容を示したことに特徴がある。すなわち、物理的に一貫した方法により、粒状体の粒子間摩擦の力学モデルを統計処理し、非平衡熱力学の枠組みにより散逸関数から巨視的な構成方程式(材料の特性を表現する応力と変形の関係式)を得た。この手続きは微細構造(ここでは個々の粒子)を考慮した連続体モデルの一つの構築方法を示した。宮本(1985)は、金谷の理論的な枠組みを参考に、実験結果を満足し力学的に一貫性を持つ土石流の構成方程式を研究した。

3. 宮本(1985)によるニュートン流体に満たされた粒子流(土石流)で卓越する応力の研究

2. に示した高橋(1977)は、中立粒子による Bagnold(1954)の動的応力を適用して、土石流の実験結果を説明した。これにより、衝突応力で粒子が均一に分散する流れという物理的描像が得られる。一方、宮本(1985)は、エネルギー保存則を考えることで、Bagnold(1954)に不合理な点があることや椿ほか(1982)では非現実的なパラメータでないと実験を説明できないこと等の問題を見出した。そのため、エネルギー保存則や実験結果を満たす土石流の応力の構成を検討した。以下、宮本(1985)第1編の内容を示す。

3.1 準備：用語の定義・エネルギー損失機構・その調査方法

概念理解に必要な準備をする。「動的応力」は、Bagnold(1954)や金谷(1979b)の「速い流れ」の理論で示されるひずみ速度の2乗に比例する応力(圧力とせん断力)をいう。粒子集団を考えた巨視的な動的応力のせん断力 τ と圧力 p の比は「動的内部摩擦係数」 $\tan \phi_d = \tau/p$ という。静的な応力比である通常の「内部摩擦係数」とは異なる。一方、「摩擦係数」 μ は微視的に一つひとつの粒子に着目したときのせん断力と圧力の比である。

流動中のエネルギー損失の微視的な原因はいくつかある。粒子が剛体球もしくは完全弾性体の場合、粒子間のせん断応力による摩擦でエネルギーが損失する(せん断散逸)。椿ほか(1982)の観測で示された非弾性体として扱う場合、せん断力に加え、圧力でもエネルギー損失がある(体積散逸)。粒子・流体間で流速差があれ

ば摩擦で損失する。間隙流体には粘性による損失もある。

実験的に応力の影響を調査する方法は主に 2 種類である。動的応力のみの影響は中立粒子を満たした回転二重円筒で測定するせん断力と圧力（およびその比 $\tan \phi_d$ ）を調べる。一方、エネルギー損失を上回るエネルギーが重力により供給されて粒状体は流動するため、動的応力と重力の影響は斜面流（粒子と流体の密度差が生じるため）で調べる。

3.2 回転二重円筒による動的応力の影響

宮本は、Bagnold (1954) や金谷 (1979b) の「速い流れ」の理論による粒子間の動的応力により、回転二重円筒の実験結果を説明できるか検討した。両モデルはひずみ速度の 2 乗に比例する動的応力であるが、完全弾性体を仮定するため、エネルギー損失はせん断力のみである。この損失の条件 $\mu < 1$ および $\tan \phi_d < 1$ を両モデルは満足できなかった。前者ではエネルギーが保存され、後者では $\mu > 1$ となり不合理なためである。

3.3 斜面流（土石流）における応力の構成

宮本は、斜面流の実験結果を説明できるか検討した。動的応力のみで説明すると、動的応力に関する係数値が実験より 1 オーダ小さく、また粒子間衝突角 α が大きく層状流れ（椿ほか, 1982）を説明できない。そこで他の応力を導入するため、a) 土石流発生時のせん断力と b) 定常流における流動中のせん断力、を再考した。

まず a) について示す。土石流発生時に、高橋 (1977) の理論では、静止状態から極限つり合いの状態を経て動き始めると一気に土砂が表面まで分散する。しかし宮本は、実験水路で給水すると底面付近の土が降伏し、ひずみ速度に依存しないクーロン降伏応力 τ_y （圧力と静的内部摩擦係数の積）が作用して剛・塑性運動する、と考えた。この考えは、金谷 (1979a) による研究結果（堆積層とほぼ同様の高土砂濃度の「遅い流れ」のせん断力はひずみ速度に依存しない）や椿ほか (1982) による全層で粒子が接触しながら相対運動する観察が支持した。発生して河床侵食した後、流動深や土砂濃度分布が変化しない定常流で土石流が流動するには、水中重量の τ_y に加え、全せん断力と降伏応力 τ_y の差が流動に寄与する応力（流動応力）として作用する必要がある。

そこで次に、b) の流動応力をエネルギー的視点で検討した。粒子流が持つエネルギー散逸機構を整理すると、1) 流体相のせん断力、2) 粒子・流体間の相互作用、3) 粒子間の動的なせん断力による摩擦（せん断散逸）、4) 粒子間の動的な圧力による非弾性的性質（体積散逸）、が考えられた。1) は、泥流と同様に、水より大きな粘性係数となる有効粘性係数を用いたニュートン流体で評価できるが、粗な粒子流の特徴として相対的に粘性の寄与は小さい、と考えられる（詳細は略）。また、3) は上述の通り寄与が小さいため、2) と 4) のいずれかが流動応力と考えられる。ここで、粒子流の特徴として 2) を流体による粒子変動のエネルギー損失と考えれば、4) の粒子変動による粒子間相互作用に 2) を包含できる、と考えた。以上の考えの下、4) 非弾性衝突の効果を実験で説明できるかを検討した。一般に理論分析を行う定常流では、平均土砂濃度 C は時空間的に変化せず $DC/Dt = 0$ と表現されるが、このままでは非弾性衝突による体積変化がない。そのため、土砂濃度の変動成分（時間平均は零）により体積損失が生じ、その分のエネルギーが次の瞬間に重力で供給されて元の状態に戻る、と考えた。以上の仮定を設定し、椿ほか (1982) の観測が示す非弾性衝突を導入するため、非弾性球に拡張した Bagnold モデルを使い実験で得られた動的内部摩擦係数を評価すると、実験を説明できた。

以上より、宮本 (1985) は、粒子接触によるクーロン降伏応力および非弾性衝突の動的応力による体積損失と等価なせん断力の和として、巨視的な土石流のせん断力を構成した。このとき、粒子・流体間の相互作用を無視し応力（や散逸関数）が独立な空間で表わされるため、合力を各応力の和で表現した。

4. おわりに

本稿に示した土石流解釈の違いは主として、Bagnold (1954) の実験的な応力と変形の経験式（流動式）の立場に立つか、連続体力学を基に保存則と整合する構成方程式を導くか、の点にある。前者を基礎とする高橋 (1977) では完全弾性粒子の衝突応力で粒子が均一に分散する土石流の描像が得られた。一方、後者の宮本 (1985) では、エネルギー的考察と実験により、動的応力のうち瞬間的な土砂濃度変動による体積損失（粒子・流体相互作用を含む）と等価なせん断力および粒子接触に伴うクーロン降伏応力（静的応力）の寄与を評価することで、静的応力と流動応力が作用して流動する土石流の描像が得られた。これらの研究は日本の土石流に対する力学研究の出発点である。その後の約 40 年間の発展や現在の課題を理解するには、理論のもつ仮定や概念を批判的に理解することが重要と考えられる。本稿の詳細は土木研究所資料として公開予定である。

謝辞 土石流の論文を共に読み議論して頂いた故・泉山寛明氏（元国土技術政策総合研究所）に感謝の意を表す。

参考文献 Bagnold, Proc. R. Soc. Lond. A225, 1954; 高橋保, 京大防災研年報 B, 20-B2, 1977; 金谷健一, 機械学会論文集, 45-392, 1979a,b; 椿東一郎ほか, 土木学会論文報告集, 317, 1982; 宮本邦明, 博士論文, 1985; 宮本邦明, 砂防学会誌, 1993a,b,c