

## 5 土石流の壁体への衝突に関する数値実験

京都大学農学部

○ 三好岩生

小橋澄治

水山高久

### 1. はじめに

土石流が砂防ダムなどの障害物に衝突・越流するような場合の流動機構を解明することを目的として、土石流の壁体への衝突現象について数値実験による検討を行った。土石流の流動機構に関する研究は近年多大なる進歩を遂げているがそれらの多くは定常等流としての基本的な流れを対象としたものであり、実際の山地河川での土石流による土砂移動現象を解明するためにはダムへの衝突のような空間的、時間的に変化のある現象に関する基礎研究を進めることが重要である。また逆にこのような土石流の非定常流動に関する研究を進めることによって土石流の流動特性がより明確にされると考えられる。ここではMAC法による数値実験を行うことによって土石流の流下方向に対する縦断二次元での土石流段波の流速、流動深、見かけの粘性係数、流路勾配等の変化に対する、水面形、流体内部の流速、圧力等諸水理量の空間的・時間的分布の応答が調べられる。

### 2. 数値計算方法

本数値実験に用いられる数値計算方法はMAC法 (Marker-And-Cell Method) という一種のFDMであり、流路方向の縦断二次元での解析が行われる。この方法の主な特徴として複雑な水面形状を持つ流体の急変非定常現象の解析が可能なこと、解析領域への流体の流入・流出や障害物が自由に設定できること等があり、本テーマには最も適した方法の一つであるといえる。基礎式は次に示すような連続式とNavier-Stokes方程式であり、言い換えれば流体は非圧縮性のニュートン流体として扱われることになる。これまで土石流の流体特性としてダイラタントモデルをはじめとするいくつかの非ニュートン流体としての構成方程式が提案されているが、本実験では各実験条件をできるだけ単純化して現象の全体の傾向を見ることを目的とするため、従来提案された構成方程式の大体の傾向を見かけの粘性係数 (等価動粘性係数と呼ぶことにする) の概念を導入することによって表現することとした。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = - \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + g_x$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = - \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g_y$$

ここに、 $u, v$ : X, Y方向の流速、 $p$ : 圧力、 $\nu$ : 等価動粘性係数、 $g_x, g_y$ : X, Y方向の重力加速度である。

計算結果としては各時点での水面形と各時点、各格子点での流速、圧力などの諸水理量が得られる。

### 3. 数値実験

#### 3. 1. 実験条件

数値実験は図-1に示すように、勾配 $\theta$ の流路に対して垂直に立つ高さ $H_w$ の壁体に向かって段波高 $H$ で先端角 $60^\circ$ のくさび型のフロント部形状を持った土石流段波が全層均一の流速 $V_0$ で進行するものとし、先端が壁体に接する状態を初期条件として与えた。等価動粘性係数は全流体に対して均一の値で与えられ、流路底面及び壁体の表面には抵抗が働かないものとする。このような数値実験では図-1のようにある程度単純化されたモデルを設定しても操作することが可能なパラメータが多数有り、それら全ての効、またそれらの複合的な効果をも検討するためには膨大な種類の実験が必要となるが、ここでは土石流流という現象の特徴的な性格に大きく関与すると考えられる等価動粘性係数と段波の流速をそれぞれ独立に変えたときの現象に与える影響について検討する。実験条件を表-1に示す。

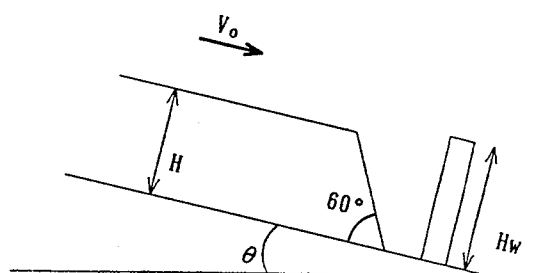


図-1 数値実験の初期設定

表-1 実験条件

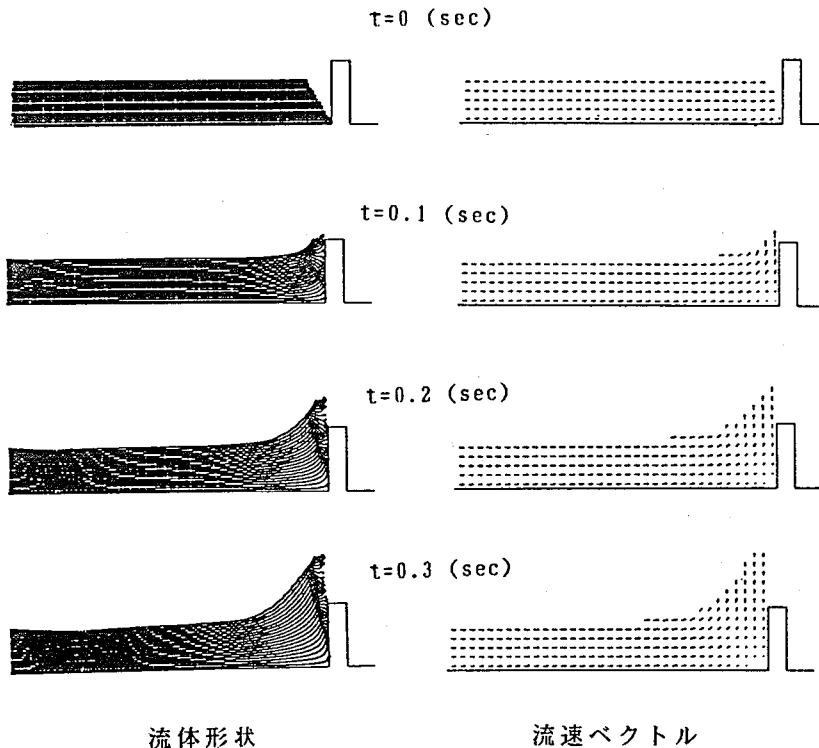
| No. | $\theta(^{\circ})$ | $H(m)$ | $H_w(m)$ | $V_0(m/s)$ | $\nu(cm^2/s)$ |
|-----|--------------------|--------|----------|------------|---------------|
| 1   | 20                 | 1.0    | 1.4      | 5.0        | 10000         |
| 2   | 20                 | 1.0    | 1.4      | 5.0        | 0.01          |
| 3   | 20                 | 1.0    | 1.4      | 10.0       | 10000         |
| 4   | 20                 | 1.0    | 1.4      | 1.0        | 10000         |

#### 3. 2. 結果及び考察

図-2～図-5に計算結果として得られた流体形状を示す。(実験No.1に付いては各時点、各位置での流速ベクトルを合わせて示す。) 動粘性係数の値は $20^{\circ}C$ の水で $0.01cm^2/s$ であり、高橋<sup>11</sup>によると土石流の見かけの粘性係数は実際の土石流の流下速度と流動厚さからニュートン流体として考えると水の $10^4$ 倍～ $10^6$ 倍になるとされている。図-2と図-3(実験No.1とNo.2)を比較すると、水の場合は段波が壁体に衝突した後、壁面から比較的近くにある流体部分が順次後続の流れに押し出されて噴流状に上方にジャンプし、逆に大きい等価粘性係数を持った流体は壁面との衝突の影響が上流側に伝わって流体の最高到達高度は低くなる傾向がみられる。この傾向は筆者らが行った物理実験<sup>12</sup>の結果とも対応するものである。図-6はこれらの現象が起きているときに壁体を受ける力の経時変化を示したものである。この力は各時点での単位時間当りの流体の流速ベクトル変化と釣り合うものであり、より短い時間内により多くの流体部分がより多くの流下方向の流速成分を失ったときに大きくなる。

図-2と図-4、図-5(実験No.1とNo.3、No.4)は同じ等価粘性係数で初期流速が違う場合であるが、これを見ると流速が小さいときは段波が壁体に衝突した後壁体上流側に貯留されてその後オーバ

ーフローしていくような挙動を示すが、流速が大きくなるにしたがって噴流上に壁面に沿ってジャンプするようになる。このとき計算範囲内での壁面が流体から受ける単位幅当りの最大荷重は、流体の単位体積重量を $1.4\text{g/cm}^3$ とすれば $V_0=10\text{m/s}$ のとき $18.6\text{t/m}$ 、 $V_0=5\text{m/s}$ のとき $6.2\text{t/m}$ 、 $V_0=1\text{m/s}$ のとき $3.1\text{t/m}$ であった。この荷重は当然段波の初速度が大きいほど大きい。最大荷重は単純に流速の2乗に比例するわけではない。このことは壁体上流側に貯留される流体による静水圧による荷重の変化と、流線の変化に伴う荷重の時間変化が時間に対して異なった関数関係にあり、その合計の値が荷重として作用するためと考えられる。



流体形状 流速ベクトル  
図 - 2 計算結果 (No.1)

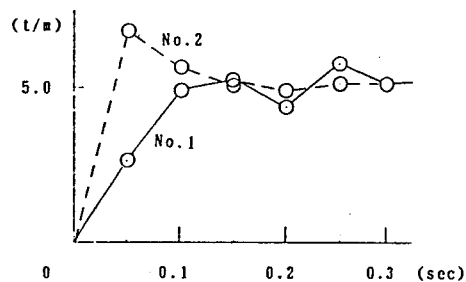


図 - 6 壁体にかかる単位幅当りの荷重  
(流体の単位体積質量は $1.4\text{g/cm}^3$ として計算)

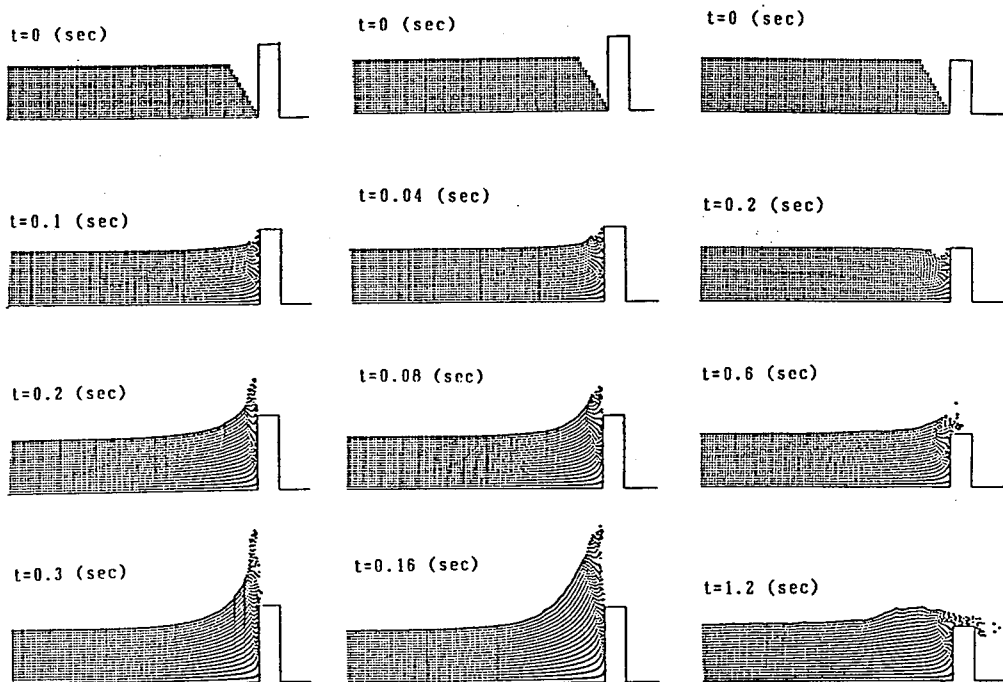


図-3 計算結果 (No.2)

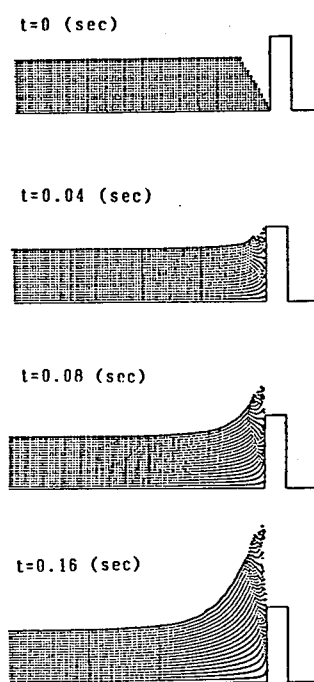


図-4 計算結果 (No.3)

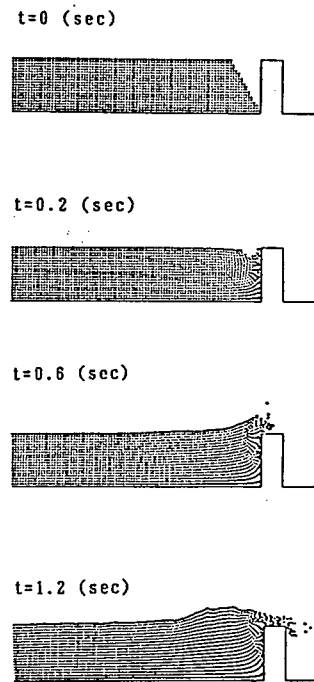


図-5 計算結果 (No.4)

#### 4. まとめ

土石流が壁体に衝突したときの挙動に対する見かけの粘性係数と流速の影響について数値実験的に検討を行った。今回の数値実験には流路底面や壁面の抵抗や流体内の流速分布など必ずしも実際の土石流に忠実ではない条件が含まれているが、これは土石流段波の壁体への衝突現象をできるだけ純粹に取り出すための基礎的な知見を得ることを目的としたためであり、実際の土石流シミュレーションを行うためには本研究の結果を基礎としてより実際の状況に即するような条件の設定が必要であろう。土石流が壁体に衝突したときの挙動のような非正常現象の解明に対しては数値実験が有効な手段の一つとなるが、現段階ではこのような解析の検討の基準となる物理量に対する定まった考え方が存在せず、その手法と共に解析目的となる物理量を十分考えていく必要がある。今後はさらに多くの実験条件を有機的に関連させながらそれらの効果を整理してまず基本的な段波の衝突現象を明らかにしたのち、物理実験などとも対応させながらより土石流らしい現象についても研究を進めていく予定である。

#### 参考文献

- (1) 高橋保：土石流の流動機構，混相流シンポジウム論文集，1983, pp.187-203
- (2) 三好岩生、鈴木雅一：土石流の衝撃力に関する実験的研究，新砂防，Vol.43, No.2, 1990