

## 粘性の異なる液体を用いたダムブレイクの2次元数値計算による再現

九州大学大学院 ○和田眞典 江藤稚佳子、九州大学大学院農学研究院 水野秀明、久保田哲也

## 1. はじめに

平成 22(2010)年 7 月 5 日に鹿児島県南大住町船石川で発生した土石流(水野・小山内、2011)、平成 27(2015)年 7 月 28 日に鹿児島県垂水市深港川で発生した土石流、平成 28(2016)年 4 月 16 日に熊本県南阿蘇村山王谷川で発生した泥流等にみられるように、九州地方ではシルトや粘土などの細かい土砂を多く含む泥流が豪雨や地震に伴って発生した。特に、本研究で対象としている流れは、前述の事例にみられるように、和田ら(2019)にある沈殿しない、一様な流れである。このような泥流による土砂災害を効率的に防止・軽減するためにハード対策やソフト対策を講じるためには、泥流の動きを精度良く予め想定しておく必要がある。

泥流や土石流の動きを予測する手法の代表的なものに、浅水流方程式の数値解析手法があげられる。例えば、新井・高橋(1992)は、粒子を含む流体塊の乱れ応力と粒子の衝突による応力の総和をせん断応力として導いた底面摩擦応力を、2次元浅水流方程式に組み込んだ数値モデルを提案した。宮沢ら(2007)は新井・高橋(1992)らの提案した数値モデルに侵食堆積速度を新たに組み込んだ数値モデルを提案した。水野ら(2002)は流れの底面での重力の斜面方向成分が粘性と釣り合うとして求めた底面摩擦応力を浅水流方程式に組み込んだ数値モデルを提案した。また、宮田ら(2014)は底面摩擦応力をマニング型のものを2次元浅水流方程式に組み込んだ数値モデルを提案した。このように、従来の研究では、泥流の運動を予測するための数値モデルは2次元浅水流方程式を基本としており、その違いは底面に作用する応力の考え方にあることが分かる。これらの数値モデルは水路実験や実際に発生した泥流に適用してその精度を評価しているものの、浅水流方程式が持つ衝撃波や希薄波の再現性に着目して精度を評価した研究は多くない。また、跳水や段波といった、2次元浅水流方程式の中で現れる衝撃波は泥流の氾濫に大きく影響を及ぼすため、その衝撃波を精度良く予測することが求められる。

そこで、本研究は、泥流をビンガム流体として浅水流方程式を誘導し、その数値モデルによる衝撃波及び希薄波の再現性を明らかにすることを目的とする。

## 2. 数値モデルの概要

本研究では質量保存則と運動量保存則を鉛直方向に積分した2次元浅水流方程式を用いる。せん断応力はビンガム流体を想定する。すると、2次元浅水流方程式は

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V h)}{\partial y} = 0 \quad \dots (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho U h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U^2 h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho U V h)}{\partial y} \\ &= -\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{2} \rho g h^2 \right) - \rho g h \frac{\partial b}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 (U h)}{\partial y^2} \\ & \quad - \left( \tau_Y + \mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) \Big|_{z=b} \end{aligned} \quad \dots (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho V h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U V h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V^2 h)}{\partial y} \\ &= -\frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{2} \rho g h^2 \right) - \rho g h \frac{\partial b}{\partial y} + \mu \frac{\partial^2 (V h)}{\partial x^2} \\ & \quad - \left( \tau_Y + \mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) \Big|_{z=b} \end{aligned} \quad \dots (3)$$

となる。ここで、 $\rho$ は泥の密度[kg/m<sup>3</sup>]、 $U$ は流れの速度の x 方向成分[m/s]、 $V$ は流れの速度の y 方向成分[m/s]、 $h$ は流れの深さ[m]、 $g$ は重力加速度[m/s<sup>2</sup>]、 $b$ は河床位[m]、 $\tau_Y$ は降伏応力[N/m<sup>2</sup>]、 $\mu$ は粘性係数[Pa・s]で、 $(\partial u / \partial z)|_{z=b}$ は流れの底面における鉛直(z)方向の x 方向の速度の勾配、 $(\partial v / \partial z)|_{z=b}$ は流れの底面における鉛直(z)方向の y 方向の速度の勾配である。なお、xy 平面は水平面で、x 方向と y 方向は互いに直交する。ここで、流れの底面近傍において、境界層の形成を想定し、圧力が一様として流れの運動に影響を及ぼさないと仮定して、せん断応力を考慮した運動方程式を立ててとくと、速度勾配が流れの底面から高さ $z$ 、ある時刻 $T$ において

$$\frac{\partial u}{\partial z} = C_1 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\mu T}} \cdot \text{EXP} \left( -\frac{\rho \cdot z^2}{4\mu T} \right) \quad \dots (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial z} = C_2 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\mu T}} \cdot \text{EXP} \left( -\frac{\rho \cdot z^2}{4\mu T} \right) \quad \dots (5)$$

と求まる。ここで、 $C_1, C_2$ は積分定数である。式(4)と(5)を $z$ 方向で積分すれば、速度が求まる。このとき底面から高さ $\alpha$ [m]において、

$$\int_0^\alpha \frac{\partial u}{\partial z} dz = U \quad \dots (6)$$

$$\int_0^\alpha \frac{\partial v}{\partial z} dz = V \quad \dots (7)$$

となるように、積分定数 $C_1, C_2$ を定める。時刻 $T$ は、底面から高さ $\alpha$ [m]で速度勾配が $\beta$ になると仮定して、

$$C_1 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\mu T}} \cdot \text{EXP} \left( -\frac{\rho \cdot \alpha^2}{4\mu T} \right) = \beta \quad \dots (8)$$

$$C_2 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\mu T}} \cdot \text{EXP} \left( -\frac{\rho \cdot \alpha^2}{4\mu T} \right) = \beta \quad \dots (9)$$

を満たすように定める。

数値計算に際しては、Toro(2001)にあるように、式(1)から(3)の連立偏微分方程式を  $xy$  平面上の固定した領域  $S$  で面積分する有限体積法を用いた。領域  $S$  を閉じる曲線  $C$  上を通過する質量フラックスと運動量フラックスは、曲線  $C$  上の微小線分  $dc$  に対して垂直な方向で 1 次元のリーマン問題を解いて求める。詳細は Toro(2001)を参照していただきたい。

### 3. 水路実験への適用と考察

図-1 は実験を行った水路である。水路はアクリル製で、幅 30mm 高さ 27mm、長さ 500mm で、水平な机の上に設置した。中央にはゴム製のスルースゲートを設置した。スルースゲートの左側で深さ 27mm になるまで液体を注ぎ、右側で深さ 10mm になるまで液体を注いだ。水路の側面には 2 台のビデオカメラを設置し、スルースゲートの左側と右側の水深の変化を記録した。実験に際しては、所定の液体を注いだ後、ビデオカメラの撮影を開始し、液体の温度を測定してから、手動でスルースゲートを引き上げ、衝撃波と希薄波を発生させた。実験に用いた液体は水と動粘性 1000cStc のセンチストークス液の 2 種類とした。水深の時間変化は、ビデオカメラで撮影した動画より静止画を 1 秒間に 60 枚程度抽出し、50mm 毎に 11 点において水面の位置を読み取った。なお、スルースゲートを引き上げた時刻を 0 秒とした。

図-2 は水の場合における実験結果の水深と計算結果の水深を比較したものである。水の粘性係数は  $0.001\text{Pa}\cdot\text{s}$  とし、水の密度は  $1000\text{kg}/\text{m}^3$  とした。実験結果と計算結果を比較すると、その波形は段波の先端部を除いて概ね一致した。平均絶対値誤差(MAE)は 0.2 秒で 0.24022mm、0.4 秒で 0.29115mm であった。平均平方二乗誤差(RMSE)は 0.2 秒で 1.4041mm、0.4 秒で 1.6644mm であった。スルースゲートを手動で引き上げたため、段波の先頭部の形が崩れた可能性がある。

図-3 はセンチストークス液の場合における実験結果と計算結果の水深を比較したものである。粘性係数は  $0.904\text{Pa}\cdot\text{s}$  とし、密度は  $904\text{kg}/\text{m}^3$  とした。実験結果と計算結果を比較すると、計算結果は実験結果よりも高めになった。平均絶対値誤差(MAE)は 3.3 秒で 0.21724mm、6.6 秒で 0.20116mm であった。平均平方二乗誤差(RMSE)は 3.3 秒で 1.4050mm、6.6 秒で 1.8127mm であった。

### 4. おわりに

本研究では、泥流をビンガム流体として考えて浅水方程式を開発し、衝撃波と希薄波の再現性を明らかにすることを目的とした。その結果、水の場合であれば、段波の先頭部では再現性が落ちたものの、計算結果は実験結果の波形を概ね再現できたことが分かった。一方、センチストークス液の場合、計算結果は実験結果の波形よりも 2mm 弱程高めになったものの、概ね再現できたことが分かった。今後は鹿児島県垂水市深港川をはじめとして泥流の発生した災害に適用し、現象の再現性を明らかにしていきたい。本研

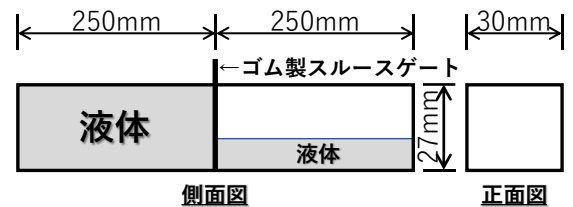


図-1 実験装置の概要

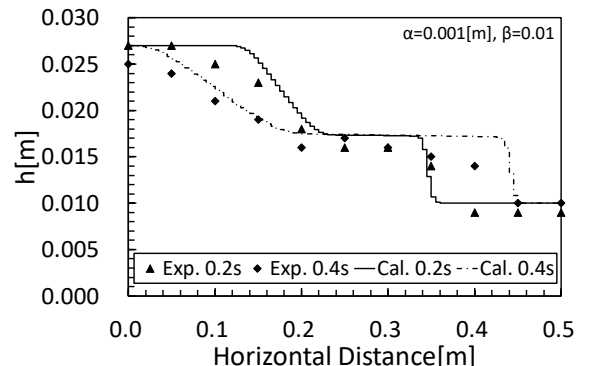


図-2 実験結果と計算結果の比較(水)

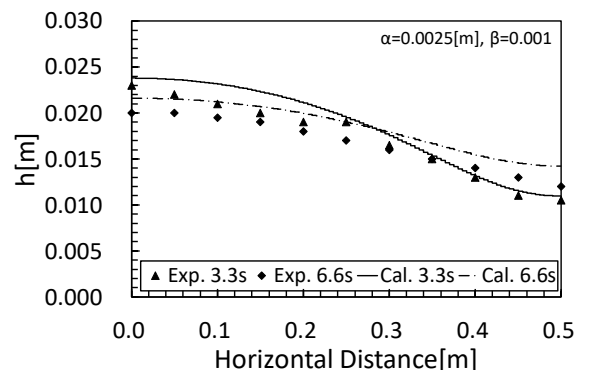


図-3 実験結果と計算結果の比較(センチストークス液)

究は国土交通省河川砂防技術開発公募地域課題の一部として実施した。ここに記して感謝の意を表する。

### 引用文献

- 新井宗之、高橋保 (1992) : 泥流型土石流の氾濫堆積シミュレーション、水工学論文集、Vol. 36、p. 227-234  
 宮田秀介、堤大三、村重慧輝、宮本邦明、藤田正治 (2014) : 泥流発生過程を考慮した融雪型火山泥流の予測、土木学会論文集 B1 (水工学)、Vol. 70、No. 4、p. I-949-I\_954  
 宮沢直季、砂田憲吾、大石哲 (2007) : 火山地域における土砂堆積の評価のための 2 次元泥流モデルの開発、砂防学会誌、Vol. 59、No. 5、p. 23-34  
 水野秀明、小山内信智 (2011) : 2010 年 7 月鹿児島県船石川土石流災害の流下実態、土木技術資料、Vol. 53、No. 7、p. 24-27  
 水野秀明、ビットリオ・ボボリン、仲野公章 (2002) : 透過型砂防堰堤を通過する泥流のハイドログラフ推定に関する研究、砂防学会誌、Vol. 54、No. 5、p. 3-11  
 E. F. Toro(2001): Shock-capturing Methods for Free-Surface Flow, JOHN WILEY & SONS, p.64-66  
 和田眞典、久保田哲也、水野秀明 (2019) : 土石流に含まれる土砂の沈殿条件の解明、2019 年度砂防学会研究発表会概要集、p. 499-500