

土石流の合流を考慮したモデルの開発

京都大学大学院農学研究科 ○和田孝志 (現・株式会社建設技術研究所)・中谷加奈・小杉賢一朗
立命館大学理工学部 里深好文
政策研究大学院大学 水山高久

1. はじめに

山地流域では大規模な降雨イベントが発生した際、複数の溪流から洪水流や土石流が発生し、それらが合流する場合がある。このとき、これらの流れが合流部に到達するタイミング、流れの性状（土砂濃度、粒径、ハイドログラフ等）、合流部の地形条件（溪流幅、合流角度、溪床勾配等）によって一時的な河道閉塞が発生するなどの合流部特有の複雑な水位変化や河床変動が生じる。このような合流部の挙動によって、下流の氾濫場に到達する土石流のハイドログラフが変化する可能性がある。したがって、大規模降雨イベント時の土石流被害をより正確に把握するためには、複数の溪流から様々なタイミングで発生する洪水流または土石流の流下および合流過程をより合理的に計算可能とする計算モデルが必要である。

以上より、本研究では、複数の溪流を持つ山地流域を計算対象とし、これらの溪流上の洪水流または土石流の流下過程と合流部における合流過程を合理的に計算可能とする計算モデル（以下、「土石流合流モデル」とする）を新たに開発した。また、土石流合流モデルを用いて既往土石流合流実験の再現計算を行い、実験結果と計算結果を比較することによりモデルの妥当性を確認した。

2. 土石流合流モデル

土石流合流モデルの概略を図-1に示す。土石流合流モデルは、和田らが開発した結合モデル¹⁾の2次元計算領域の任意地点で、複数の1次元溪流からの流入を考慮可能としたモデルである。これらの1次元溪流は計算上1本の溪流として取り扱い、1次元計算領域の計算点にそれぞれの溪流の始点 $i_{s,n}$ および終点 $i_{e,n}$ (n は溪流番号) を設定することにより区別している。

図-2に、本モデル2次元計算領域での n 番目溪流からの流入メッシュ配置を示す。本モデルでは、 n 番目溪流からの流入に関して、流入フラックス $Q_{a,n}$ 、流入点座標 $A_N(x_{a,n}, y_{a,n})$ 、 n 番目溪流下流端の流下方向と2次元計算領域 x 軸のなす角 $\theta_{a,n}$ 、 n 番目溪流下流端の河道幅 $B_{a,n}$ を入力条件とする。まず、 $A_N(x_{a,n}, y_{a,n})$ 、 $\theta_{a,n}$ および $B_{a,n}$ から流入横断軸 $B_N C_N$ を2次元領域上で設定する。次に、2次元領域の計算メッシュ (i, j) において、設定した $B_N C_N$ がコントロールボリューム内に含まれる長さ $L_{n(i,j)}$ を算定する。この作業を n 個の1次元溪流について行うことで、2次元領域で任意地点、任意流入角度に設定された n 個の1次元溪流からの接続が考慮される。

計算点 (i, j) における n 番目溪流からの流入量 $Q_{n(i,j)}$

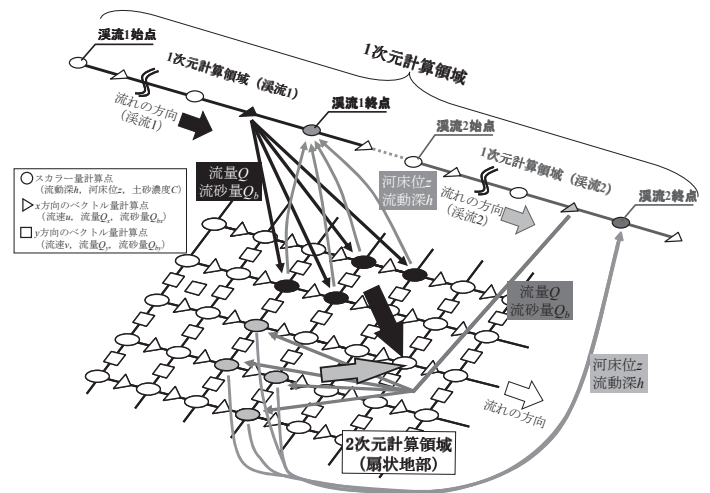


図-1 土石流合流モデルの概略

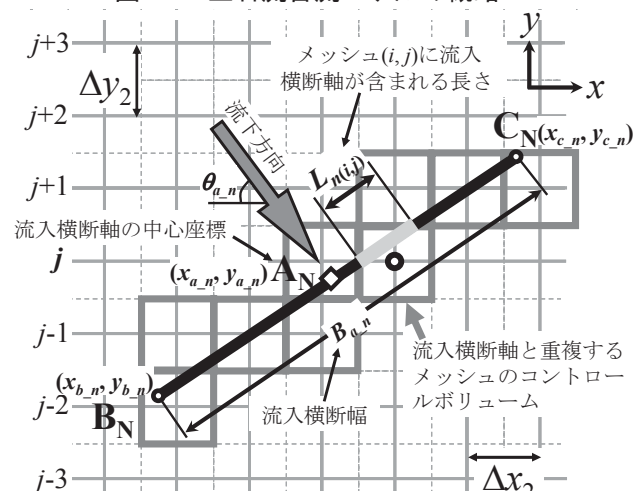


図-2 2次元計算領域での n 番目溪流からの流入メッシュ配置

は、流入幅 $B_{a,n}$ に対する各メッシュの寄与 $L_{n(i,j)}/B_{a,n}$ を考慮し、以下のように設定する。

$$Q_{n(i,j)} = \frac{L_{n(i,j)}}{B_{a,n}} Q_{a,n} \quad (1)$$

加えて、これらの流入対象点に対して n 番目溪流下流端からの運動量の受け渡しも考慮する。2次元領域に流入する x 方向の単位時間当たりの運動量は、 $\rho_m \times Q_{n(i,j)} \times u_{a,n} \cos \theta_{a,n}$ となる。ここで、 ρ_m は土石流の見かけの密度、 $u_{a,n}$ は n 番目溪流下流端の流速である。この運動量をもつ流体塊が流速 $u_{n(i,j)}$ にまで変化するものとする。簡単のため密度変化は考えないものとし、圧力と水深の変化や重力の影響を無視すれば、流体塊に単位時間当たりに作用する力 $F_{x,n}$ は以下の

ように表される。

$$F_{x_n} = \rho_m Q_{n(i,j)} \{u_{n(i,j)} - u_{a_n} \cos \theta_{a_n}\} \\ = \frac{\rho_m L_{n(i,j)} Q_{a_n}}{B_{a_n}} \{u_{n(i,j)} - u_{a_n} \cos \theta_{a_n}\} \quad (2)$$

一方、2次元領域の計算点 (i,j) のコントロールボリューム内の流体は F_{x_n} の反作用として $-F_{x_n}$ の力を受けることになる。したがって、 n 番目溪流下流端からの運動量の受け渡しは、 n 番目溪流流入対象点の流速算定時に、外力として $-F_{x_n}$ を付加することで考慮可能となる。

n 番目溪流下流端の境界条件(河床位 z_{ie_n} および流動深 h_{ie_n})は、 n 番目溪流下流端直上流計算点の河床位 z_{ie-1_n} および流動深 h_{ie-1_n} と、2次元領域の n 番目溪流流入対象点の平均河床位 z' および平均流動深 h' を用いて求める。ここで、 z' および h' は、 n 番目溪流流入対象点の河床位および流動深に各メッシュの寄与 $L_{n(i,j)}/B_{a_n}$ を重み付けし、それらを合計したものである。

3. 土石流合流モデルの妥当性検証

3.1 方法

土石流合流モデルの妥当性を検証するため、本モデルを用いて中谷らが実施した土石流合流実験²⁾の再現計算を行い、得られた計算結果と実験結果を比較した。中谷らの土石流合流実験および再現計算の概要を図-3に示す。実験水路は本川水路および支川水路から成り、本川水路の中流部に支川水路が所定の合流角度(45度, 60度, 90度)で接続されている。

実験の手順は次のようである。支川水路上に実験砂を5cm厚で敷き詰め、予め本川水路上流端から一定流量の給水(0.3, 0.5, 0.7, 1.0 L/s)を行っておく。この状態を初期状態として、支川水路上流端より0.3 L/sの給水を行うことにより土石流を発生させ、接続部を通じて本川に土石流を流入させた。支川水路給水開始25秒後に給水を停止し、合流部付近の土石堆積厚を計測した。実験砂はほぼ一様な粒径(2.9 mm)の砂礫である。

3.2 結果と考察

図-4に、合流角度60度設定時の合流部の堆積厚

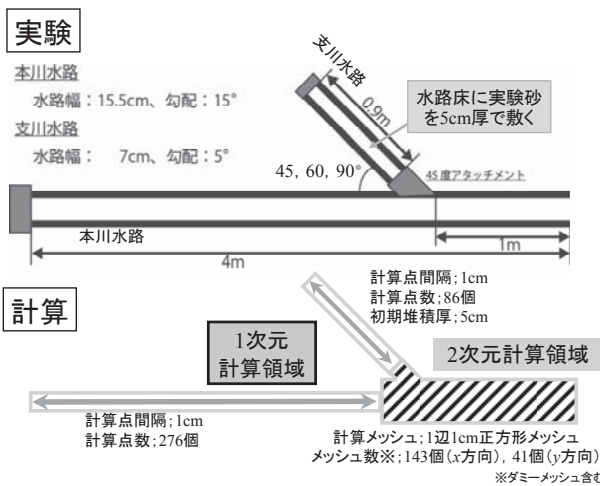


図-3 中谷らの土石流合流実験²⁾および再現計算の概要

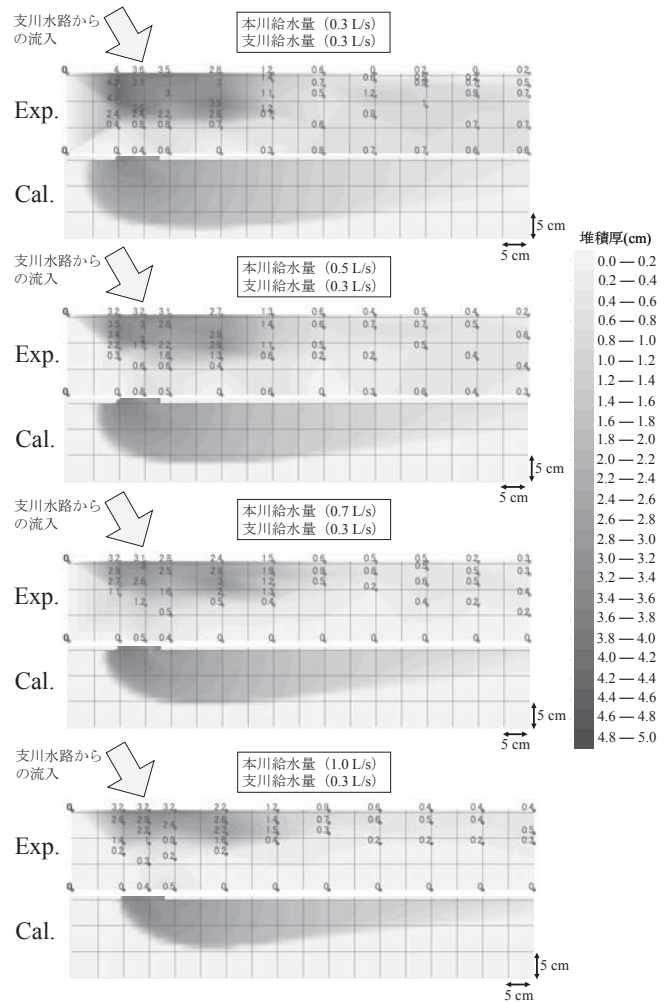


図-4 合流部の堆積厚分布に関する実験結果と計算結果(合流角度60度)

分布について実験結果と計算結果を示す。この図に示されるように、両者は概ね一致しており、開発した土石流合流モデルは十分実現象を再現し得ることがわかる。ただし、実験結果よりも計算結果の方が支川流入の対岸方向に堆積範囲がやや大きくなる傾向が見られた。これは、本モデルでは本川流水による堆積土砂の再侵食が過小評価されていることが原因と考えられる。本川流水による堆積土砂の再侵食をより厳密に表現するためには、流水による側岸侵食機構をモデルに組み入れる等の更なる改良が必要である。

4. おわりに

本研究で開発した土石流合流モデルは十分に土石流合流過程を再現し得ることが確認された。しかし、様々な条件下でより厳密に土石流合流過程を計算可能とするためには、流水による側岸侵食機構を組み込む等の改良に加えて、合流する流れの性状や合流部の地形条件を様々に変えた条件下で本モデルの妥当性を検証していく必要がある。

参考文献

- 1)和田ら, 砂防学会誌, Vol.61, No.2, p.36-40, 2008 2)中谷ら, 土木学会論文集 B1, Vol.69, No.4, pp.I-931-I-936, 2013