

地形条件が一次元河床変動計算の結果に及ぼす影響に関する考察
 土木研究所火山土石流チーム（前国土交通省国土技術政策総合研究所砂防研究室）○水野秀明
 国土交通省国土技術政策総合研究所砂防研究室小山内信智

1. はじめに

近年、砂防設備による土砂災害リスクの低減効果や土砂災害を引き起こした土砂移動現象の分析を行うことを目的として、河床変動計算といった数値計算を用いることが多くなってきた。土石流による土砂災害といったように計算で対象とする領域が狭い場合には、2次元で計算する事例が多くなってきたが、例えば流砂系内での土砂移動（国土技術政策総合研究所、2007）といったように流域単位で土砂移動を追跡する場合には1次元で計算する事例が多い。このように、土砂移動現象をより精度よく、かつ、より効率的に予測できる数値計算が求められている。

山地流域では、溪流は湾曲したり、他の溪流と合流したりする。流水が湾曲部に流れ込むと、水深が深くなり、流速が遅くなる。また、本川と支川の合流点付近では、本川の流れによって、支川の水深が深くなるため、跳水が生じたりすると想定される。このような現象もあり、山地流域での土砂移動を1次元の数値計算で再現すると、その結果は実際の土砂移動を再現できない可能性がある。例えば、安倍川流砂系における1982年から20年間の土砂移動を再現した事例では、実際の河床変動と計算上の河床変動の差が河口から21km上流までの河川区間で1m以下であったが、それより上流域で3～4m程度ずれたことが報告された（国土技術政策総合研究所、2007）。

このような影響を考慮するため、山地流域での地形の影響を数値計算に取り込むことで、数値計算による土砂移動の予測精度を高める試みがなされてきている（例えば水野・小山内、2009）。しかしながら、現時点で溪流の湾曲や合流が数値計算の結果に及ぼす影響を系統的に整理されていない。そこで、本研究は地形条件が一次元河床変動計算の結果に及ぼす影響を把握することを目的として数値実験を行った。ここでは、まず、水の流れに及ぼす影響を整理したので報告する。

2. 数値実験の概要

2. 1 基礎方程式とプログラムの精度

本研究で用いた基礎式は次のとおりである。

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{F}(\bar{U})}{\partial x} + \frac{\partial \bar{G}(\bar{U})}{\partial y} = \bar{S}$$

$$\bar{U} = \begin{bmatrix} h \\ Uh \\ Vh \end{bmatrix}, \bar{F}(\bar{U}) = \begin{bmatrix} Uh \\ U^2h + 0.5gh^2 \\ UVh \end{bmatrix}, \bar{G}(\bar{U}) = \begin{bmatrix} Uh \\ UVh \\ U^2h + 0.5gh^2 \end{bmatrix}, \bar{S} = \begin{bmatrix} 0 \\ gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - gh \frac{n^2 U \sqrt{U^2 + V^2}}{h^{4/3}} \\ gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - gh \frac{n^2 V \sqrt{U^2 + V^2}}{h^{4/3}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 h :水深[m]、 U : x 方向流速[m/s]、 V : y 方向流速[m/s]、 g :重力加速度[m/s²]、 z_b :河床位[m]である。本研究では湾曲や合流を考慮できるように、幾つかの線分（以後、境界と呼ぶ）でできている多角形のコントロールボリューム（以後、要素と呼ぶ）を用いる。その際、要素内の変数は平均値（ $\bar{U}$ ）を用いる（式（2））。また、計算する際には、式（1）を連立偏微分方程式（式（3））と連立常微分方程式（式（4））に分離して計算した。

$$\bar{U} = \frac{1}{|V|} \iiint_V \bar{U} dV \quad (2) \quad \frac{d}{dt} \iiint_V \bar{U} dV = - \iint_{\Omega} (H \cdot \bar{n}) d\Omega \quad (3) \quad \frac{d}{dt} \bar{U} = \bar{S}(\bar{U}) \quad (4)$$

ここで、 $|V|$:コントロールボリュームの体積、 H :フラックステンソル、 $\bar{n}$:境界に対する法線ベクトル、 Ω :境界である。境界を通過するフラックスは特性曲線法（Toro, 2001）により算出した。

図-1、2はダムブレイク問題を本研究で作成したプログラムで解いた結果と、特性曲線法により解いた厳密解を比較したものである。計算は水平面上で底面摩擦がないと想定して行った。初期条件は $-10\text{m} \leq X \leq 0\text{m}$ で $h=1.0\text{m}$, $U=2.5\text{m/s}$, $0\text{m} \leq X \leq 40\text{m}$ で $h=0.1\text{m}$, $U=0.0\text{m/s}$ とした。共に変数がジャンプする周辺では、計算結果は厳密解から少しずれているものの、厳密解をほぼ再現できたと考えられる。

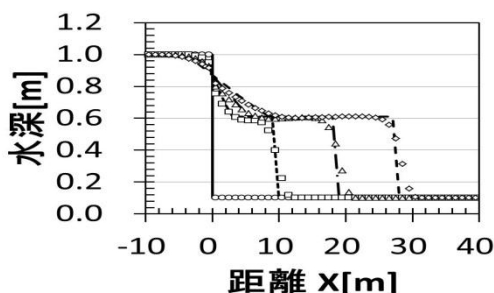


図-1 水深の変化

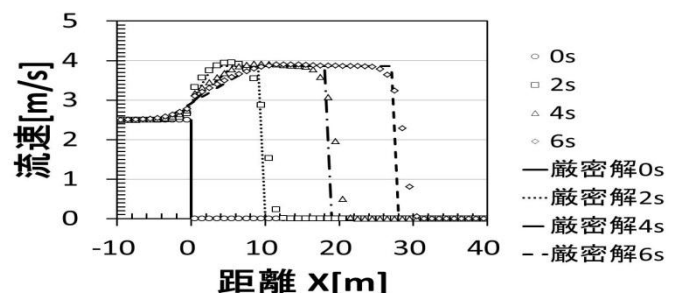


図-2 流速の変化

2. 2 計算ケースと計算結果

図-3は計算に用いた流路の線形である。湾曲による影響を検討するために、直線の場合に加えて、曲率半径(50m、

100m、200m)と中心角(57度、115度、172度)を組み合わせた9種類の線形を設定した。合流による影響を見るために、支川が本川に合流する角度を45度、90度、135度の3種類設定した。要素の形状は概ね一遍10mの四角形とした。上下流端以外の境界から質量と運動量が計算領域外に流出しないようにした。上流端から $1.0\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ の一定の割合で水を提供した。なお、速度による影響を見るために、湾曲の場合、合流の場合ともに、粗度係数を0.030、0.010、0.003の3種類変化させた。

図-4は湾曲による影響に関する計算事例で、中心角が172度の場合のものを示す。直線部では、線形にかかわらず定常な状態であった。曲率半径が小さくなるほど、湾曲部での水深は深くなり、流速は遅くなった。

図-5は合流による影響に関する計算結果の事例である。本川においては、合流点付近で水深が深くなり、流速が遅くなったことがわかる。支川の合流角度が大きくなるほど、水深は深くなり、流速は遅くなった。

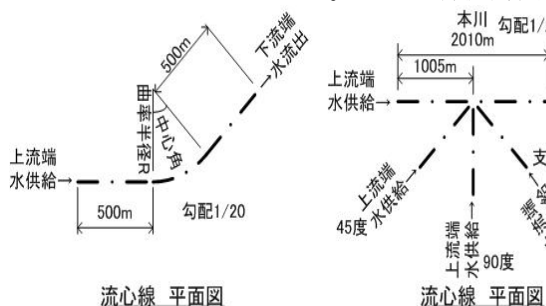


図-3 計算を行った流路の線形

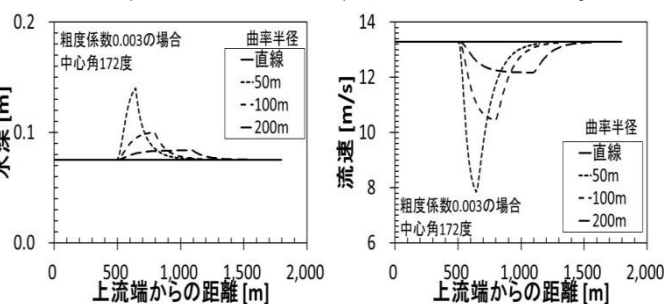


図-4 計算結果の例(左:水深、右:流速)

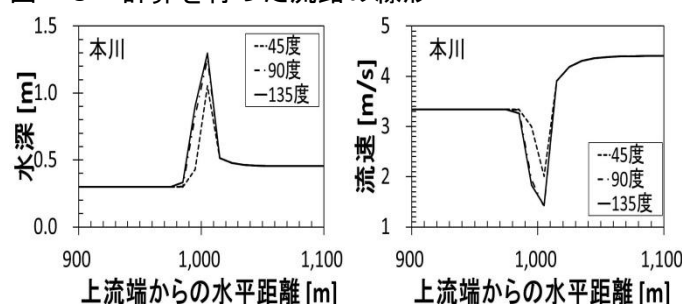


図-5 計算結果例(本川、左:水深、右:流速)

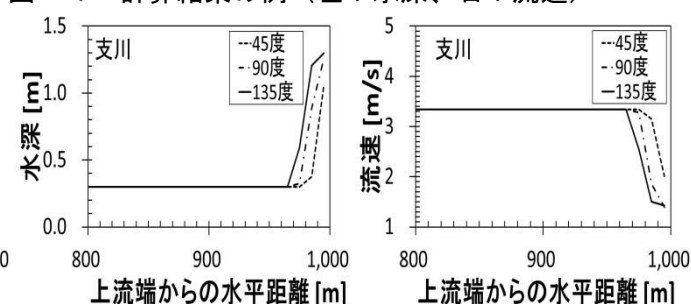


図-6 計算結果例(支川、左:水深、右:流速)

3. 湾曲と合流による影響についての考察

図-7は直線の線形の場合での水深又は流速に対して湾曲の線形の場合での湾曲部における数値の比を示したものである。曲率半径が小さいほど、水深比が大きくなり、流速比が小さくなった。流れが湾曲部に差し掛かると、その進行方向に境界が存在するため、流速が遅くなり、水深が深くなったと考えられる。

図-8は合流点より上流での水深又は流速に対して合流点での数値の比を示したものである。支川と本川の合流角が大きくなるほど、水深比は大きくなり、流速比は小さくなった。これは、本川の流速ベクトルが合流点において流心方向よりずれ、進行方向に対する速度成分が遅くなったためと考えられる。

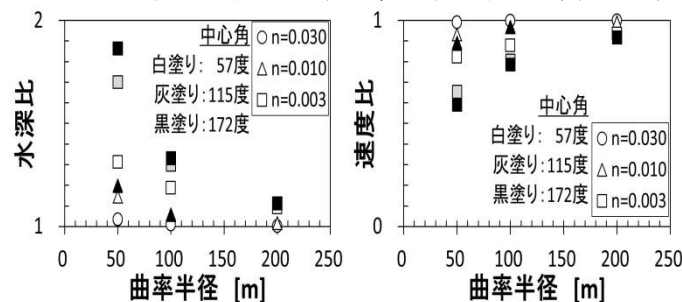


図-7 湾曲による影響(左:水深、右:流速)

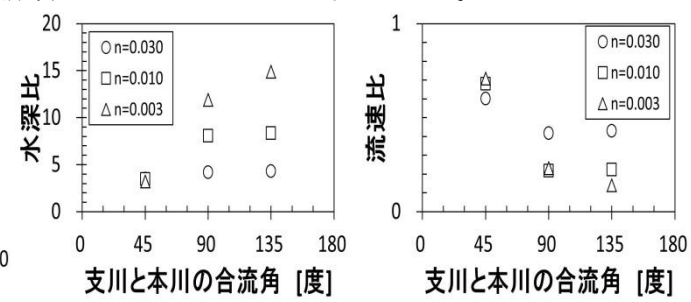


図-8 合流による影響(左:水深、右:流速)

4. おわりに

湾曲や合流といった地形条件が計算結果に影響を及ぼすことが分かった。特に、合流による影響は湾曲と比べて顕著であったことが分かった。数値計算によって山地流域における土砂移動の余地・予測手法の精度を向上させるためには、これらの影響を考慮していくべきと考えられる。今後はさらに系統的に整理していきたい。

引用文献

国土交通省国土技術政策総合研究所(2007):健全な水循環系・流砂系の構築に関する研究、国土技術政策総合研究所プロジェクト研究報告 No.16、p.44-51

水野秀明、小山内信智(2009):迫川で形成した河道閉塞(天然ダム)の危険度評価に関する考察、国土技術政策総合研究所資料第552号、p.37-51

Eleuterio F. Toro(2001): Shock-Capturing Methods for Free-Surface Shallow Flows, WILEY, 309pp