

1. 背景および目的

扇状地における土石流の氾濫は大きな人的・物的被害を生む。このような被害を防止・軽減するためには土石流の発生・流動・堆積が予測可能な数値シミュレーションモデルを作成し、土石流の氾濫範囲を知ることが有効である。既存のシミュレーションモデル（以下「非結合モデル」と呼ぶ）では、谷部分では1次元計算、扇状地部分では2次元計算というように別個に計算されていた。しかし、このような方法では顕著な土砂堆積が谷出口で生じるような場合、正確に計算できないと考えられる。本研究では、1次元と2次元の計算を結合させることにより、この問題を検討し、解決する。

2. 方法

上述の問題の原因としては、1次元計算と2次元計算とが別個に計算され、両計算の双方向の連携がとれないことが挙げられる。非結合モデルでは、1次元計算で求められた下流端の流量・流砂量を2次元計算の流入条件として用いることで、谷部分での流動から扇状地部分での堆積までの土石流の過程を表していた。しかし、上流の1次元計算領域から下流の2次元計算領域への影響は伝えられても、下流の2次元計算領域から上流の1次元計算領域への影響は伝えることができず、1次元計算と2次元計算が一方向の関係となっていた。

そこで、非結合モデルに用いられている1次元、2次元計算を結合させたシミュレーションモデル（以下「結合モデル」と呼ぶ）を新たに作成した。結合モデルでは、1回の時間ステップ(Δt)毎に、谷部分の1次元計算と扇状地部分の2次元計算の両方を行う。1次元計算により得られた下端部の流量、流砂量を2次元計算の流入条件として用い、2次元計算の上流部の河床、水深などを1次元の下端部の条件として用いる。このように双方向に連携した計算を行うことにより、谷出口におけるより合理的な計算が可能になる。

作成した結合モデルと非結合モデルで、流量・流砂量・河床変化・堆積過程を比較し、2次元計算の結果が上流の1次元計算に及ぼす影響を調べた。比較を行いやすくするために、単純な仮想的流域上でシミュレーションを行っている。

3. 結合モデルの概要

結合モデルで用いた1次元、2次元計算の基礎方程式を以下に示す。なお、比較対象とした非結合モデルにおいても、同様の基礎方

程式を用いている。

- ① 水・土砂を含めた全質量の保存則

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = i$$

- ② 土砂の質量の保存則

$$\frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{\partial Chu}{\partial x} + \frac{\partial Chv}{\partial y} = iC_s$$

- ③ x方向（流下方向）の流水の運動方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho h}$$

- ④ y方向（横断方向）の流水の運動方程式（2次元計算）

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho h}$$

- ⑤ 河床変動の式

$$\frac{\partial z}{\partial t} + i = 0$$

ここに、*h* : 流動深、*u* : x方向の流速、*v* : y方向の流速、*C* : 土砂濃度、*z* : 河床位、*t* : 時間、*p* : 水の圧力、*i* : 侵食堆積速度（堆積速度に関して慣性的運動は無視している）、 ρ : 間隙流体の密度、*C_s* : 河床堆積の最密充填濃度、 τ_x 、 τ_y : 河床せん断力である。

結合モデルでは、図1のような条件を設定して1次元計算と2次元計算を結合した。なお、本モデルでは、1次元河道幅(*B₀*)が2次元平面のメッシュ幅(Δ*y*)と異なること、1次元河道の流下方向と2次元平面のx軸の方向が若干異なる場合があることを考慮して結合を行っている。

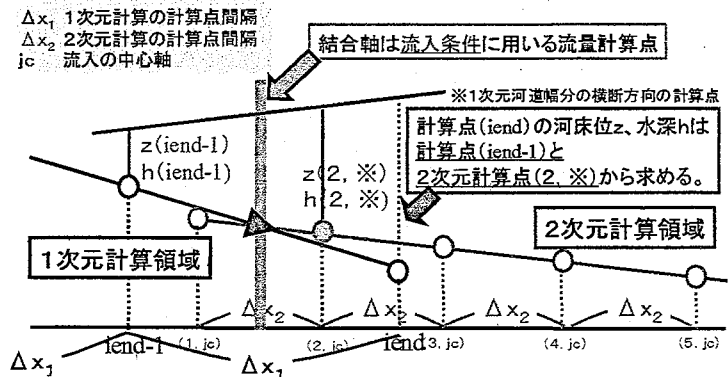


図1 1次元計算と2次元計算の結合部分

4. 結果と考察

図2は結合モデルと非結合モデルの比較に用いた単純な仮想的流域を示している。1次元計算領域は角度 θ_1 の一様勾配とし、下流の2次元計算領域はx軸方向に角度 θ_2 の一様勾配とした。また、両計算領域ともに初期河床堆積厚は無いものとした。流入は1次元領域の上流端から図2に示すような流入条件で与えた。

$\theta_1=20^\circ$ 、 $\theta_2=4^\circ$ の条件で行ったシミュレーション結果について比較をする。図3は、シミュレーション開始から1800秒後の結合部付近の河床縦断面図を示している。勾配変化点より上流側が1次元計算部分、下流側が2次元計算部分である。非結合モデルの河床は連続していないが、結合モデルの河床は連続していることがわかる。また、勾配変化点には土砂が堆積し、1次元下端部から上流に堆積が遡上している。

図4は、2次元計算の流入条件として用いる、1次元下流端の流量・流砂量の時間変化を表している。結合モデルの方が流量・流砂量が小さくなっているのは、河床縦断面図で見られた1次元領域での堆積による欠損が加味された結果であると考えられる。しかし、ピーク流量は、結合モデルの方が大きくなっている。これは、結合モデルの1次元下流端の境界条件が2次元平面の広がりやを反映しているために、土石流先端部の流速が大きくなるからであると考えられる。

図5は、開始から1800秒後の2次元平面上での堆積厚を示している。結合モデルのほうが非結合モデルよりも堆積量が少ないのは、流量・流砂量の比較から、1次元領域での堆積による欠損が加味された流入条件の差によるものと考えられる。

5. まとめと今後の課題

単純な仮想的流域による結合モデルと非結合モデルによる土石流の堆積過程の比較を行った結果、流量・流砂量・河床変化・堆積量において違いがみられた。これは、結合モデルによって、1次元・2次元計算の結合部付近における土砂の堆積が表されるようになったことが原因と考えられる。

以上から、従来の非結合モデルの問題を結合モデルによって、解決できたと考えられる。

しかし、モデルの比較には様々な条件下の計算結果が必要であり、本研究の結果だけでは不十分である。今後さまざまな条件下でのシミュレーションを行う必要がある。

また、本研究では仮想的流域を対象としてシミュレーションを行ったが、結合モデルの精度を調べるためには、実際に過去に起こった災害の復元計算を行い、検討する必要があると考えられる。

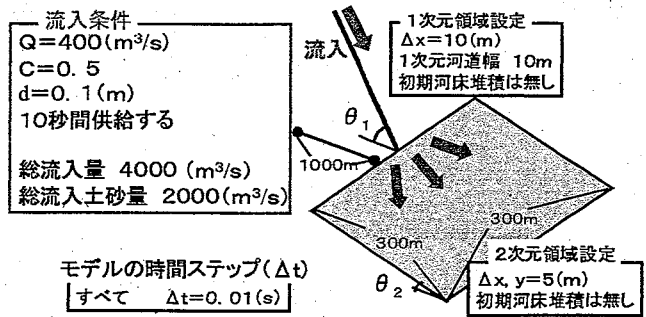


図2 モデル比較に用いた仮想的流域

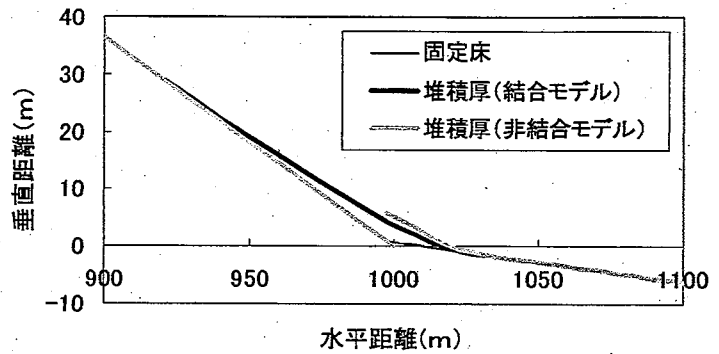


図3 1800秒後の河床縦断面図

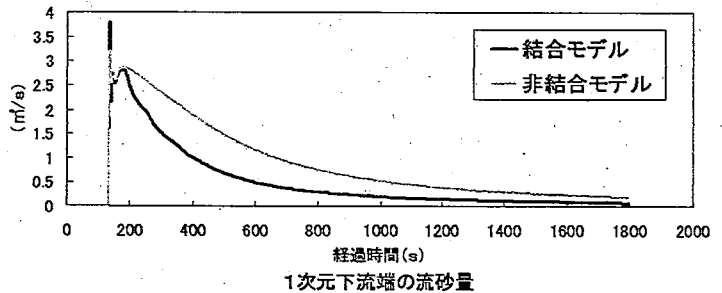
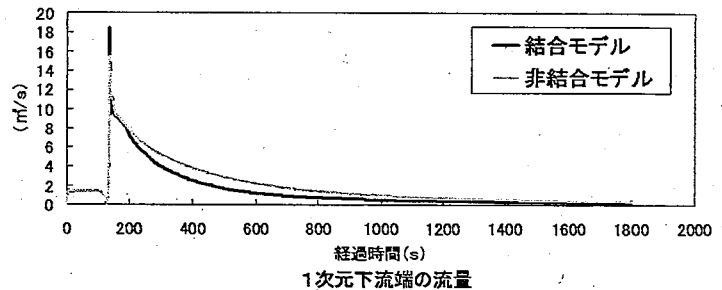


図4 1800秒後の1次元下流端の流量・流砂量

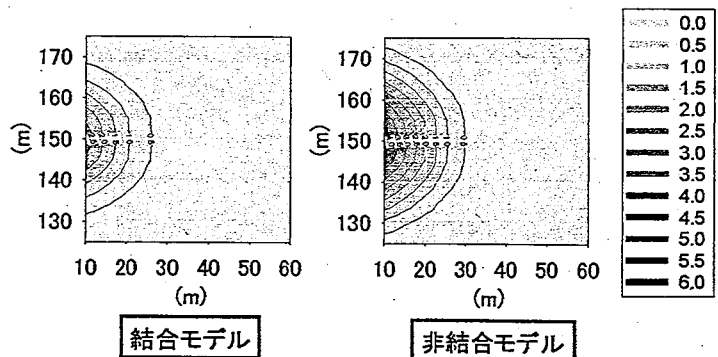


図5 1800秒後の2次元平面上の堆積厚