

## II-85

## 土石流突入により発生・伝播する津波数値モデルの改良

東北大学大学院工学研究科 学生員 ○後藤大地

東北大学大学院工学研究科 正員 今村文彦

### 1. はじめに

地滑り及びそれに伴う土石流により発生する津波は、断層運動による津波に比べて頻度は低いものの、歴史的にみてもその規模・被害ともに大きな事例がある。しかし、土石流により発生する津波の研究は、断層運動に比べて詳細な検討が少なく、未だ、津波発生・伝播モデルには不明な点が多い。

本研究では、一次元水路において実際に土石流突入による水理実験を実施し、発生・伝播過程を整理した結果、津波の波数分散性を考慮する必要があることが分かった。そこで、従来用いていた長波近似による二層流数値モデル上層の運動方程式に分散項を組み込み、二段階混合差分法（原ら，1997）を用いて計算することにより、後藤・今村（2002）のモデルをより適切に改良することを目的とする。

### 2. 一次元水理実験

可変傾斜式の土砂発生用一次元伝播水路（後藤ら，2002）を設置し、水路上流に設置された給砂装置から比重 2.6、重量 30kg、乾燥状態の 4 号硅砂を流下させ、土石流を水中に突入させて津波を発生させた。また傾斜路は 30° 滑面で行った。

上流のゲート位置から、0.1m、2.0m、土石流突入位置の 3 カ所の水路中央にレーザー変位計を設置し、層厚の測定を行った。また、デジタルビデオカメラで水路全体流況を撮影して時間毎の津波の空間波形を測定し、水切り位置から 0.5m、1.0m、2.0m、3.0m の 4 ケ所に波高計を設置して波高の時系列を測定し、発生・伝播過程を詳細に把握した。図 1 に実験装置図を示す。

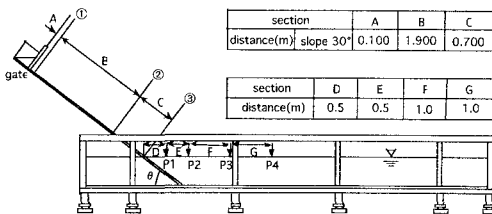


図1 一次元水路実験装置

### 3. 分散項導入による二層流数値モデルの改良

#### 3.1. 分散項導入の必要性

一次元水理実験で発生した第 1 波の水深波長比をデジタルビデオカメラで撮影した空間波形で読みとって検討する。片対数グラフ横軸に水深波長比、縦軸に微小振幅波の波速と長波の波速の比をとって無次元化した微小振幅波と長波近似と深海波近似とを比較したグラフを図 2 に示す。一般的に水深波長比が 1/25 より小さい場合は長波で、1/2 より大きな場合は深海波で近似することができる。水理実験で発生した第一波の水深波長比はおよそ 0.35 であり、図中の○で囲まれた部分に当たる。実験で発生する津波は波数分散性を考慮しなければならないことがわかる。

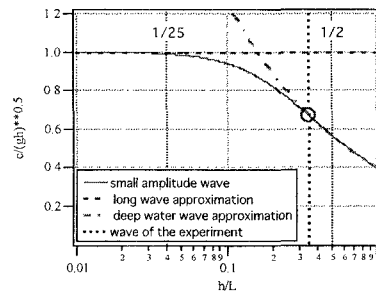


図2 水理実験で発生した第1波の水深波長比

#### 3.2. 二段階混合差分法を用いた二層流数値モデル

支配方程式中の運動方程式には、(1)式に示す、分散項を考慮した二次元ブシネスク方程式を津波（上層）に用いる。ブシネスク方程式は相対水深  $\sigma = H/L \sim 1$ 、水深波高比  $\varepsilon = \eta/H \ll 1$  の波を近似できる。土石流（下層）には分散項は含まれていない長波近似を仮定した運動方程式を用いる。

$$\frac{\partial M_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M_1^2}{D_1} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{M_1 N_1}{D_1} \right) + g D_1 \frac{\partial \eta_1}{\partial x} - \text{INTF}_x = \frac{h^2}{3} \frac{\partial^2 M_1}{\partial x^2} + \frac{h^2}{3} \frac{\partial^2 N_1}{\partial x \partial y} \quad (1)$$

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M_1 N_1}{D_1} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N_1^2}{D_1} \right) + g D_1 \frac{\partial \eta_1}{\partial y} - \text{INTF}_y = \frac{h^2}{3} \frac{\partial^2 N_1}{\partial y^2} + \frac{h^2}{3} \frac{\partial^2 M_1}{\partial x \partial y}$$

ここで  $\eta$  は水位、 $M$ 、 $N$  は線流量、 $D$  は全水深、 $h$  は静水深、 $g$  は重力加速度、 $\text{INTF}$  は界面抵抗項、添え字の 1、2 はそれぞれ上層、下層を示す。

次に、二段階混合差分法の流れについて説明する。この方法では、(1)式の計算を二段階に分ける。

一段階目では、(3)式によって移流項と圧力項と界面抵抗項を解き、計算上の中間値  $M^*$  を求める。いま、

$$\frac{1}{\Delta t} [M_{i+1/2,j}^* - M_{i+1/2,j}^{n-1/2}] + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - INTF_i = 0 \quad (2)$$

とおくと、

$$M_{i+1/2,j}^* = M_{i+1/2,j}^{n-1/2} - \Delta t \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - INTF_i \right] \quad (3)$$

となる。次に、二段階目で、一段目で求めた中間値を用いて分散項を含めた三行対角行列の差分式(4)式を Double sweep algorithm (原ら, 1997) で解くことになる。ここで解くべき未知数は  $M$  のみとし、簡単のために二次元成分である  $N$  の時間勾配には前ステップと前々ステップの値を用いることにする。

$$\frac{1}{\Delta t} [M_{i+1/2,j}^{k+1/2} - M_{i+1/2,j}^*] = \frac{h^2}{3} \left( \frac{\partial^3 M}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 N}{\partial x \partial y^2} \right) \quad (4)$$

### 3.3. 計算条件と結果の考察

数値計算は浅水理論に基づくもの(case1)、二段階混合差分法を用いて改良した2層流数値モデルに基づくもの(case2)、波高計 P1 で計測された波形を強制入力し、二段階混合差分法を用いて土石流無しの単層モデルに基づくもの(case3)の3ケースの計算を行った。図3～図6に波高計 P1～P2 での比較結果を示す。case1 は浅水理論に基づくために短周期成分の遅れが再現できていない。それに対して case2 では、津波が上下に滑らかに振動しており、case1 で再現できなかった分散性を再現できている。しかし、振幅と周期は一致していない。case3 を見ると、波高に多少の差は見られるが、波数分散性を考慮することにより水理実験で発生した波を良く再現している。case2 と case3 の比較より、case2 は土石流突入時の相互作用により形成される津波が再現できておらず、2層界面での相互作用力のモデル化に課題があると考えられる。また、case3 より、土石流突入時の波形が再現できれば土石流突入によって発生する津波の伝播計算は2層流数値モデルによって精度良く再現できることが分かった。

### 4. おわりに

二段階混合差分法を用いることによって2層流数値モデルを波数分散性を考慮するモデルに改良したが、土石流突入時に発生する津波波形を再現できなかった。2層界面での相互作用力のモデル化にはさらなる検討が必要である。

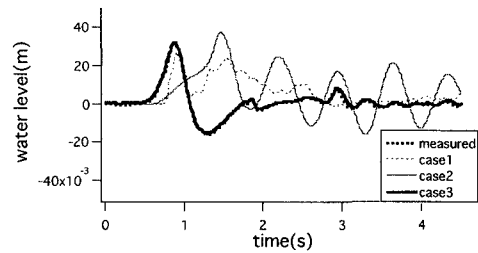


図3 波高計 P1 での水位比較結果

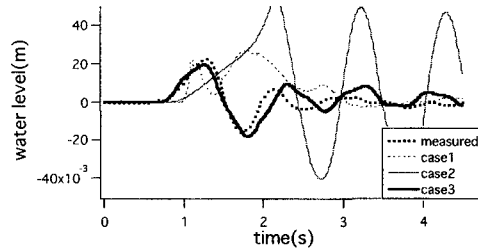


図4 波高計 P2 での水位比較結果

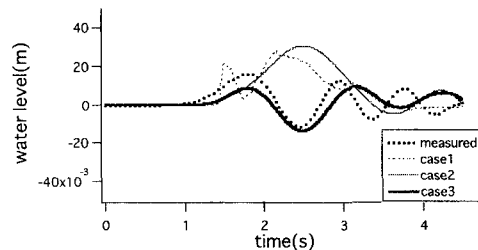


図5 波高計 P3 での水位比較結果

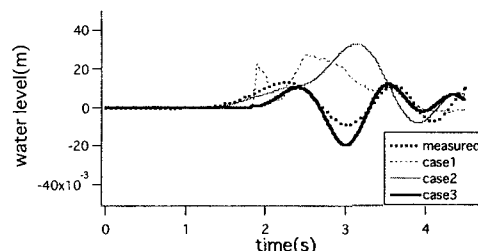


図6 波高計 P4 での水位比較結果

謝辞：今回水理実験データをご提供頂いた電源開発のみなさまに心から感謝いたします。

### 参考文献

- 後藤大地・今村文彦(2002)：土石流突入による津波発生・伝播モデルの改良，第57回年次学術講演概要集，PP.21-22
- 原信彦・後藤智明 (1997)：二段階混合差分法による非線形分散波の数値計算，東海大学紀要工学部，Vol.37，No.2，pp.101-107