

土砂突入による津波発生機構に関する基礎検討

今村文彦* ・後藤大地** ・嶋原良典*** ・喜多村雄一****
松原隆之***** ・高岡一章***** ・伴 一彦*****

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、通常のような断層運動により引き起こされ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。1791 年眉山崩壊によって発生した津波は有明海を伝播し、対岸の肥後・天草を襲い、15,000 名以上の死者を出した。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、津波発生モデルには不明な点が多い。

土砂流による津波については、富樫ら (1992) や Herman et al. (2001) による水理実験の研究や相田 (1975, 1984), 松本ら (1998), 今村・李 (1998) による二層流数値解析などが行われているが、土砂突入過程による津波の発生機構やそれ以降の伝播過程に関しては未だ詳細に検討されていない。土石流の流下状況と表面波(津波)との相互作用に関する基礎研究が十分行われておらず、突入時の物理過程に不明な点が多いことが理由として挙げられる。そこで本研究では、1 次元水路において実際に土砂流突入による水理実験を実施し発生過程を整理し、さらに二層流モデルの適用性を調べることで、発生機構を解明することを目的とする。

2. 水理実験方法及び条件

可変傾斜式の土砂発生用 1 次元伝播水路 (図-1 参照, 長さ 8 m, 幅 0.4 m, 水深 0.6 m) を設置し, 水路上流に設置された給砂装置から突入物質を流下させ, 土砂流を水中に突入させて津波を発生させた。突入物質は 4 号珪砂で比重 2.6, 重量 30 kg, 乾燥状態であり, また傾斜路は滑面で角度を変えて行った。水位変化は高速容量式波高計 ((株) KENEK 社製) を傾斜路水切り位置から 0.5 m, 1.0 m, 2.0 m に設置して時間波形を測定した。さらに, デジタルビデオカメラ (SONY (株) 社製 30 コマ/s)

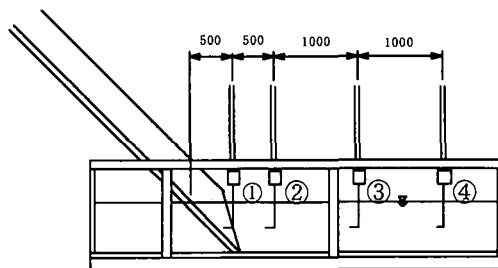


図-1 1 次元水路実験装置

で水路全体流況を撮影することにより時間毎の空間波形を測定し, 発生・伝播過程を詳細に把握した。土石流突入時では, 津波発生状況を詳細に確認するため, ハイスピードビデオ (ナック社製 250 コマ/s) による撮影を行った。また, 上流のゲート位置から, 0.1 m, 2.0 m, 土砂突入位置 (傾斜路と水面の交差部) の 3 カ所の水路中央に CCD レーザー変位センサ ((株) キーエンス社製, 測定範囲: ± 500 mm, 直線性: $\pm 0.1\%$ of FS) を設置し測定を行った。土砂のない状態では変位が 0 cm となり, 土砂が通過すると変位が変化し測定できる。

3. 二層モデルによる発生・伝播

地滑りによる津波の場合には, 単層モデルで扱うことが出来なくなる。特に, 岩屑流は先端で海水と混合し乱泥流に移行する。乱泥流のみを対象とする場合には, 地滑り物質が海底斜面を滑り降りる過程とそのために海面に起こる波を同時に計算する相互作用モデルが用いられている (例えば, Jiang & LeBlond, 1992; 松本ら, 1998)。ここでは, 二層に分かれた流体の基礎方程式が必要となる。本研究でもまず, このモデルを採用して比較検討を行う。

まず長波近似を仮定し, 二層界面での力学的及び運動学的条件を用いて, 各層間で積分すると [詳細は Imamura & Imteaz (1995) を参照], 1 次元伝播問題での連続の式, 運動方程式はそれぞれ以下のように導かれる。(変数の定義, 座標などについては図-2 を参照)

* 正 会 員 工 博 東北大学教授 大学院工学研究科
附属災害制御研究センター
** 学生会員 東北大学大学院工学研究科博士前期
*** 学生会員 修(工) 東北大学大学院工学研究科博士後期
**** 正 会 員 工 博 電源開発(株)茅ヶ崎研究センター
***** 正 会 員 工 修 電源開発(株)茅ヶ崎研究センター
***** 正 会 員 工 修 電源開発(株)原子力部

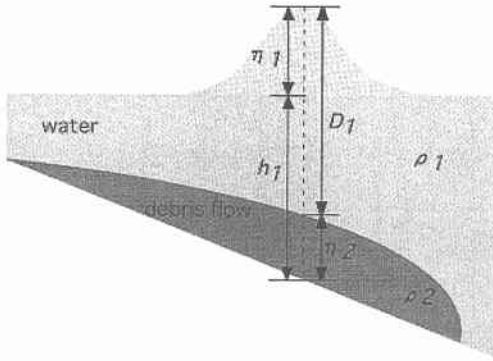


図-2 二層モデル中の変数の定義

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\eta_1 - \eta_2) + \frac{\partial M_1}{\partial x} + \frac{\partial N_1}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial M_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M_1^2}{D_1} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{M_1 N_1}{D_1} \right) + g D_1 \frac{\partial \eta_1}{\partial x} - INTF_x &= 0 \quad \dots (1) \\ \frac{\partial N_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M_1 N_1}{D_1} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N_1^2}{D_1} \right) + g D_1 \frac{\partial \eta_1}{\partial y} - INTF_y &= 0 \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \eta_2}{\partial t} + \frac{\partial M_2}{\partial x} + \frac{\partial N_2}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial M_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M_2^2}{D_2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{M_2 N_2}{D_2} \right) + g D_2 \left(\alpha \frac{\partial D_1}{\partial x} + \frac{\partial \eta_2}{\partial x} - \frac{\partial h_1}{\partial x} \right) + \frac{\tau_x}{\rho_2} + \alpha INTF_x &= DIFF_x \quad \dots (2) \\ \frac{\partial N_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M_2 N_2}{D_{21}} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{M_2^2}{D_2} \right) + g D_2 \left(\alpha \frac{\partial D_1}{\partial y} + \frac{\partial \eta_2}{\partial y} - \frac{\partial h_1}{\partial y} \right) + \frac{\tau_y}{\rho_2} + \alpha INTF_y &= DIFF_y \end{aligned} \right\}$$

ここで、添え字の1, 2はそれぞれ上層, 下層での値であることを示し, η : 水位変動, N, N : x, y 方向の線流量, D : 全水深であり $h + \eta$, で定義される. h : 水深, η_1 : 静水面からの水位変化量, η_2 : 土砂流の厚さ, M, N : 流量フラックス, g : 重力加速度, ρ : 密度, $\alpha = (\rho_1/\rho_2)$: 密度比, τ_x/ρ : 底面摩擦力, $INTF$: 界面抵抗力, $DIFF$: 水平拡散項を示す. 下層の影響は界面の変化として上層の連続式に取り入れられ, 上層の影響は圧力として下層の運動の式にあらわれている.

4. 運動量式中の項のモデル化

二層流モデルにおいて, 重要な項と考えられるのが, 底面摩擦項, 水平拡散係数, 界面抵抗, 波数分散項である. 底面摩擦項, 水平拡散係数は主に土石流モデルに,

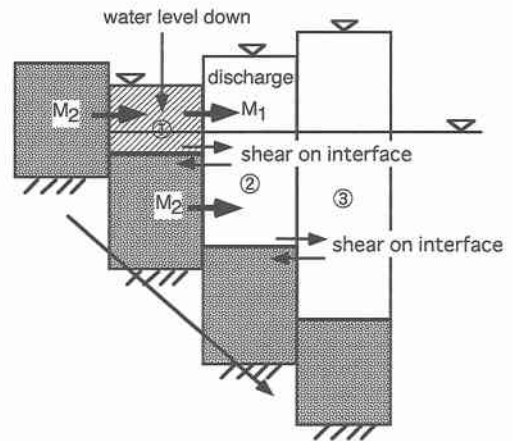


図-3 界面抵抗による水面低下作用

波数分散項は主に津波モデルに, 界面抵抗は相互に関連している. 現在まで, 土石流や密度流を対象に様々な研究がなされ, 底面摩擦項, 水平拡散係数, 界面抵抗のモデル化がなされ, その係数の定式化が試みられている. しかし, 一般的に適用できるモデルは存在していない.

まず, 3つの項の導入過程について整理した. 長波理論においては, 分子動粘性項と渦動粘性項の双方をまとめて粘性項とし, 各層で積分して扱うことになる. 下層の土石流に対しては底面から界面まで, 上層の津波に対しては, 界面から水表面までの積分範囲となる. 鉛直方向微分の粘性項も積分されて, 底面, 界面, 水表面でのせん断力になる. 土砂流では, 底面と界面でのせん断力を考慮するが, 津波の場合には, 水表面でのせん断力を考えなくともよいので, 界面のせん断力のみが残る. ここで, これらのせん断力のモデル化が重要となる. 土砂流の場合には, 水平方向微分の粘性項も重要であり, 無視できない. 分子動粘性係数と渦動粘性係数を1つにまとめ, 空間的に変化がないものにとると, 水平拡散項としての取り扱いが可能となる. 従って, 以上の3種類のモデル化を考える必要がある.

本研究で基本としたモデルを以下に説明する. まず, 底面摩擦力の式は Manning 粗度の式を用いた. 層間の相対速度をとることにより導かれる界面抵抗力の式は本間・林 (1980) の密度流の式を用いた. 以下 (3)~(5) 式にそれぞれの式を示す. 土石流の突入の場合, 界面抵抗は図-3に示されたように, 土石流の流入に伴い水面を引き込む効果があると期待できる. 図-3中に示されたコントロールボリューム①においては, 界面抵抗により流量 M_1 が増加し, 一方, 流入する量がない (M_2 は土石流の流量であり, 海水へは直接流入しないとの仮定を設けている) ので, 結果としてコントロールボリューム①での水位は低下する.

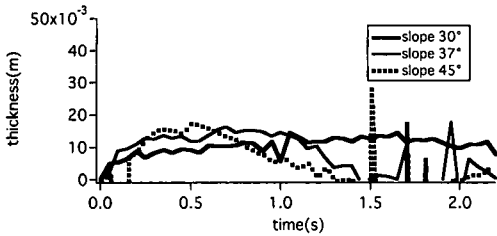


図-4 水面突入直前での土砂流

底面摩擦項と係数： n

$$\frac{\tau_x}{\rho} = \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2}$$

$$\frac{\tau_y}{\rho} = \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

水平拡散項と係数： ν

$$DIFF_x = \nu \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right)$$

$$DIFF_y = \nu \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

界面抵抗項と係数： f_{inter}

$$INTF_x = f_{inter} \bar{u} \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}$$

$$INTF_y = f_{inter} \bar{v} \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ は x 方向と y 方向の相対速度を意味する。なお、松本ら (1998) は、土砂流先端部に形状抵抗を入れているが、本実験では、図-4 に示されたように土砂流の先端は大きな抵抗力を生じさせる形状になっていないと判断し、ここでは省略している。

5. 解析方法と検討結果

5.1 計算条件とパラメータスタディ条件

支配方程式 (1)-(5) 式を 2 次元伝播問題に拡張し、さらにそれを Staggered leap-frog 法を用いて差分化し、津波の発生伝播計算を行うことにする。ただし、摩擦項のみ計算安定のために、陰的な差分スキームを用いている。また、その際の格子間隔は 0.02 m にとり、十分津波の波長を分割できるサイズとした。また、時間間隔は数値計算の安定条件を満足するように斜路の角度が 30 度と 37° の時は 0.0001 秒、45° の時は 0.00005 秒とし、再現時間は 3.5 秒間とする。

水理実験結果を二層流数値モデルで再現計算する上で重要となるのは土砂流の挙動とそれによる津波の発生メカニズムの導入である。これらは、二層流数値モデル中の各項の係数値に影響されると考えられるが、これらの係数の一般現象へ適用できる定式化はいまだ成功していない。しかしながら、どの項がどのような段階にどの程度に影響するかを評価することは、大変重要である。そ

表-1 パラメータスタディの係数比較ケース

ケース名	底面粗度 $n(\text{s/m}^{1/3})$	水面拡散 $\nu(\text{m}^2/\text{s})$	界面抵抗 f_{inter}	突入時間 $t(\text{s})$		
				斜面 30°	斜面 37°	斜面 45°
A-1	0.08	0.01	0.0	1.59	1.21	1.03
A-2	0.10	0.01	0.0	1.86	1.41	1.18
A-3	0.12	0.01	0.0	2.14	1.61	1.35
B-1	0.12	0.02	0.0	2.28	1.74	1.45
B-2	0.12	0.03	0.0	2.34	1.81	1.53
B-3	0.12	0.005	0.0	2.01	1.54	1.28
C-1	0.12	0.01	0.05	2.14	1.61	1.35
C-2	0.12	0.01	0.20	2.14	1.61	1.35
C-3	0.12	0.01	1.00	2.14	—	—
実験	—	—	—	1.85	1.45	1.25

ここで本研究では各係数に対してパラメータスタディを行った。表-1 に示すように、3 種類の係数に対して値を変化させて、結果の違いを議論した。ここで突入時間はゲート開放から水面突入までの時間であり、土砂流先端の速度を比較する目安となる。

5.2 比較方法

水理実験における土砂突入時点を比較開始時刻とし、その時刻から 0.5 秒後の空間波形を出力する。また、水理実験結果については、デジタル写真の水面形と土砂流形 (空間波形) をデジタイザーでプロットし、縮尺を合わせて結果を比較する。なお、土砂流と水との境界が混合のために明確ではないので、ここでは土砂流が最も広がっている位置を土砂流の形としてプロットしているため、水中への流下後、連行により先端で大きく膨らんでいる。比較結果については、斜面勾配が 30° の場合のみの結果を示していく。

5.3 比較結果

a) 底面粗度

図-5 においては、底面粗度係数の変化による空間波形の違いを示している。この結果より、底面粗度係数の値が小さいほど土砂の流下速度が速くなり、それに伴い発生する津波の波高が増大することがわかる。今回は滑面水路を用いているので、本来の底面粗度は極めて小さな値をとると思われたが、今回の比較結果により妥当な計数値として 0.12 と大きくなった。これは、土粒子間の底面での混合によるせん断力を含んでいたことを示している。斜面角度を変化させてもほぼ同様な結果であった。またこれは建設省河川局砂防部砂防課 (1989) で、土砂流の計算に用いられている値の 0.1 とほぼ等しいので、土砂流の係数としては、妥当であったと思われる。

b) 水平拡散係数

次に、図-6 に、水平拡散係数の変化による空間波形の違いを示している。この結果より、水平拡散係数が大き

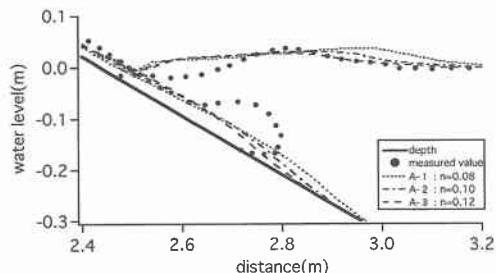


図-5 底面粗度係数の変化 (30°-0.5(s))

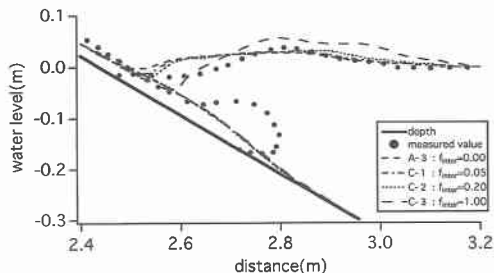


図-7 界面抵抗係数の変化 (30°-0.5(s))

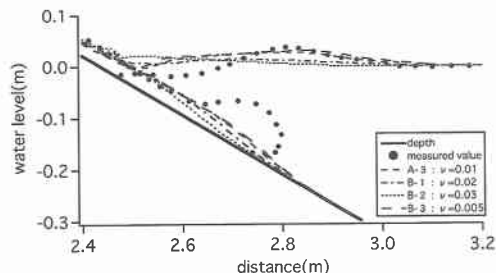


図-6 水平拡散係数の変化 (30°-0.5(s))

いほど土砂流の流下速度が遅くなり、さらに土砂流の形状を薄い層状にすることがわかった。このようにして土砂流が薄い層状になると、発生する津波の前面勾配が小さくなり、津波の波高を小さくさせる。今回妥当な値は0.01であった。

c) 界面抵抗係数

また、図-7の界面抵抗係数の変化による空間波形の違いを示している。この結果より、界面抵抗の影響が第1波峰後部に水位の低下として現れているのがわかる。界面抵抗は速い流れの土砂流が水面を引き込む作用があり、これが第1波峰の後方に見られた。水理実験ではこの引き波が顕著に見られ、かつ伝播していく様子が見られるが、二層流数値モデルでは引き波が伝播していく様子を再現できていない。計算結果では界面抵抗により水面の引き込みを再現してはいる。しかし、水理実験では引き込んだ後に抵抗力がすぐに減少して後に引き波が伝播していると考えられる。このような状況は今回のモデルでは十分再現しているとは言えない。今回用いた界面抵抗のモデルには、密度流での適用式を用いたが、土砂流による津波発生を再現する際には、混合による抵抗値の増加が考えられるために単に相対速度の2乗に比例するだけでは再現できない可能性があることを示している。

以上の結果をまとめると、底面粗度係数と水平拡散係数は、土砂流の流下速度を支配し、かつ引き起こされる津波波高の大きさを左右するものであることがわかった。

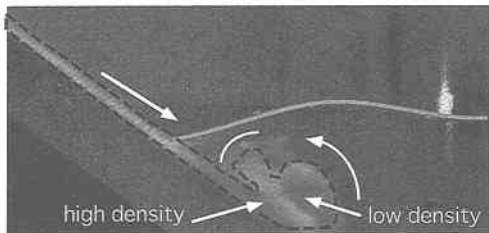
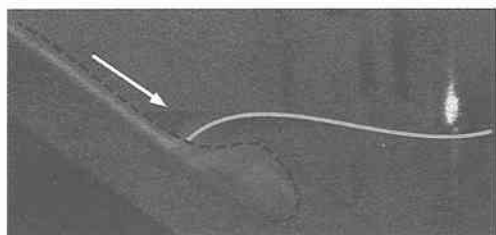
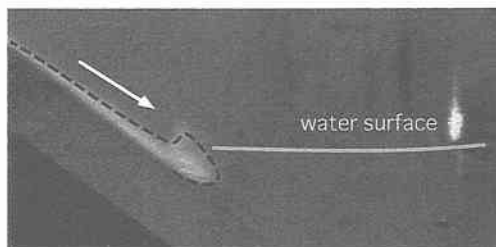


図-8 土石流の水面突入の瞬間

た。特に水平拡散係数は土砂流の形状を薄くし、津波の前面勾配を変化させるという重要な性質がわかった。

また、今回用いた界面抵抗のモデルは、水面と土砂流と大気との境界付近での水位低下は再現するが伝播については再現出来ていないことがわかり、改良の必要があるといえる。また、本研究で用いた二層流数値モデルでは長波近似を仮定しているが、図-8に示した状況のように、土石流の水面の突入後に、先端付近での3次元的な流れが形成され、この近似が必ずしも精度がよいとはいえない。

6. 主な結論

本研究では、既往の二層流数値モデルでは行われていなかった、詳細な再現性の確認を、各せん断応力の係数値に対してパラメータスタディを実施して水理実験結果と比較することにより行い、妥当な係数値を推定した。二層流数値モデルでは、上下層流の挙動が相互に影響しあうモデルであるので、津波を引き起こす土砂流の動きや層間での抵抗を支配する各せん断応力が、発生する津波に大きく影響する。

まず、底面摩擦係数が大きくなると、土砂流の流下速度が遅くなり、それにより発生する津波波高が小さくなることがわかった。次に、水平拡散係数を大きくすると、土砂流の流下速度が遅くなり、そして土砂流が薄い層状になって流下することにより発生する津波第1波の前面勾配が小さくなることがわかった。本研究のケースでは、底面摩擦係数は0.12、水平拡散係数が0.01が最適であることがわかった。また、界面抵抗は、津波第1波後部の引き波を支配することがわかった。しかし、相対速度の2乗に比例するモデルは見直す必要がある。

謝辞：本研究の一部は、科研費基盤(B)(2)(12574016)

の補助を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 相田 勇 (1975): 1792年島原眉山崩壊に伴った津波の数値実験, 地震 II, Vol. 28, pp. 449-460.
- 相田 勇 (1984): 火山により発生する津波の見積もり—1741年渡島大島の場合—, 東大地震研彙報, Vol. 59, pp. 519-531.
- 今村文彦・李 昊俊 (1998): 津波発生・伝播の数値モデルの現状と課題, 沿岸海洋研究, 第36巻, pp. 91-101.
- 建設省河川局砂防部砂防課 (1989): 土砂流対策技術指針(案)
- 富樫宏由・平山康志・谷口祐治・松本慎市 (1992): 1792年有明海津波の再現性水理実験, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 221-225.
- 本間 仁・林 泰造 (1980): 続水理学, 丸善出版④, 97 p.
- 松本智裕・橋 和正・今村文彦・首藤伸夫 (1998): 土砂流による津波発生モデルの開発, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 346-350.
- Hermann, M. F., W. H. Hager and H. E. Minor (2001): Lituya Bay case: Rockslide impact and wave run-up, J. Sci. Tsunami hazards, Vol. 19, No. 1, pp. 3-22.
- Imamura, F. and M. M. A. Imteaz (1995): Long waves in two-layers: Governing equations and numerical model, J. Sci. Tsunami Hazards, Vol. 13, No. 1, pp. 3-24.
- Jiang, L., and P. H. LeBlond (1994): Three-dimensional modeling of tsunami generation due to submarine mudslide, J. Phys. Oceanogr., 24(3), pp. 559-572.