

斜面崩壊によって誘起される波動とその伝播に関する数値実験

細山田得三¹・Pujiraharjo Alawfi²・張 瑞瑾³

斜面の崩落が原因で土塊と水塊が衝突し大規模な災害が生じることがある。本論文では非線形長波理論に基づき地盤と水面波動の 2 つの運動の連成を評価するアルゴリズムを考案した。このアルゴリズムでは底面地盤の変動を水面の波動運動における底面の運動学的条件式に組み込み、質量保存則である長波方程式の連続条件式の右辺に造波項を与えて波を発生させた。このような現象は強い非線形性を有しているため保存性の高い CIP 系のアルゴリズムを採用した。計算領域は 1 次元および平面 2 次元であり、土砂が水面に衝突した際に生じる水面波の発生と伝播を評価することができた。

1. はじめに

地震等の外力により不安定斜面の土塊がすべり面を形成して崩落し、海、湖沼、貯水池等に衝突して水面に大規模な擾乱が発生する災害がある。このような土砂災害は古くから世界の各地で発生しており、いずれも多数の犠牲者が出る大惨事となっている。日本は地形が急峻である上に火山や地震の密集地帯に位置しており、歴史的な大災害の記録が残されている。大規模なものでは例えば眉山大崩壊 (1792) によって島原湾に発生した波動が対岸の肥後 (熊本) に大災害をもたらした (梅谷ら, 2001)。近年、頻発している中山間地での地震とそれに伴う土砂崩壊による河道の閉塞もそのような災害の例である。

海岸工学の分野でもこのような地盤の変動に応じた波動の発生には大きな関心が寄せられている (平石ら 2000, 2001)。従来、地震による津波や波動の発生に関する数値モデルは水底の地盤の変位をそのまま静的に初期の水表面の変位として与えるものが多い。あるいは地盤の変形速度の想定値から運動量の流入や水位変動をモデル化して与えているものもある。これらの方法は水中に流入する土塊とそれに伴って発生する水面変動が力学モデルとして連成していない。いくつかの研究においては、地盤の動的変動を与えることによって静的な断層変位だけでは説明できない津波遡上高の合理的な解釈を与えている (橋ら, 2000)。波動の発生に対する地盤変位の動的な影響を計算するためには土砂運動と水の波動運動との両者を連成させ、相互作用を取り扱うことが可能なアルゴリズムの提案が求められる。

斜面の崩壊 (移動する固体の運動) と水面の擾乱 (流体運動) とを連成させて計算する手法は、DEM 法、

MPS 法、流体モデルや二層流モデルなどが提案されている (後藤ら, 2000, 2002, 2003, 重松ら 2001)。代表的な粒子法である DEM 法は土砂を有限個の離散体と考え、重力などの外力や粒子同士の衝突などの影響を運動方程式 (並進と回転) に反映させながら計算する。この方法は、粒子の物理的な意味づけにあいまいさが残り、また、現地スケールの現象に適用する場合、計算容量で制約される粒子の個数や粒子の大きさが現象を再現するのに十分なものの検討する必要がある。

一般的に流体運動を数値計算する場合、圧力の計算法に関して非静水圧近似 (SIMPLE 法, MAC 法, SOLA 法等) と静水圧近似 (浅水波近似) の 2 つの方法がある。両者においては明らかに前者の方がより現象に忠実である。しかしながら、空間のスケールについて水平に比して鉛直が十分小さい場合、浅水波近似が十分成り立つ。

本研究では上記のような現況を受けて土砂と水面の波動との相互作用に関する浅水方程式に基づいた計算法の開発を行った。図-1 にはその基本的な考え方を模式的に示す。移流項には非線形計算性を考慮するため、近年広く使用されている CIP 系の計算スキームを用いた (陸田ら, 2004)。著者らと同じ立場に属する研究として、今村ら (2001) は、土砂と波の連成・相互作用について浅水方程式を用いたモデルの提案とそれに応じた実験に

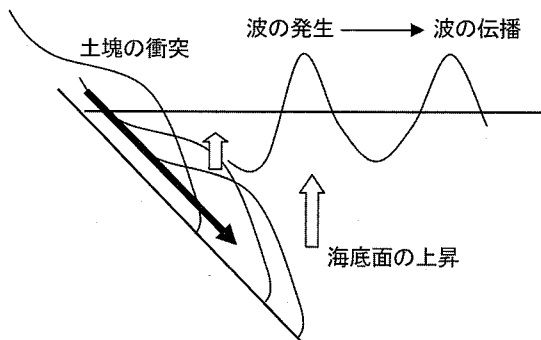


図-1 土塊の流入によって発生する波動の模式図

1 正会員 工博 長岡技術科学大学助教
2 M.E 長岡技術科学大学大学院工学研究科
博士課程エネルギー・環境工学専攻
3 博(工) 大連水産学院

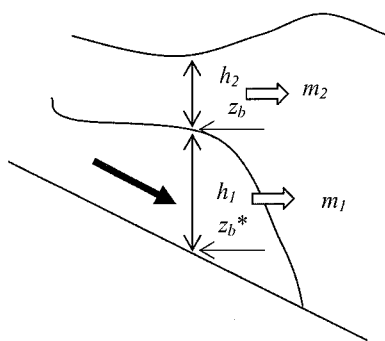


図-2 変数の配置

による研究を行っている。この研究では、底面せん断力や水平粘性項による影響に焦点を当て、計算と実験との比較を中心にして研究を行っている。用いられている移流項のスキームは従前のものである。この立場に立った研究はこれ以降、大きな進展が見られていない。著者らは、今村らの研究に近い立場、すなわち、土砂と波動の運動を浅水方程式によって表現し、両者を連成させることによって土砂の突入によって発生する波動の数値モデルを開発した。

2. 計算方法

(1) 土塊の流入によって発生する波動の計算法

数値計算手法としては通常の浅水流方程式を用いて衝突する崩壊土塊の運動を表現する。一方、土塊から衝突される方の水塊側の運動も浅水方程式を適用し、2つの浅水方程式を連成させて計算を行った。2つの流体（土塊と水塊）が相互作用するためには、衝突することによって土塊が水塊を押しつけるということが含まれる必要がある。このことは計算格子内部の土砂の地盤高を上昇させて表現した（張ら 2005, 2006）。従来、浅水方程式の連続式は、発散をゼロとする非圧縮性流体の連続条件式を鉛直積分し、自由表面の運動学的条件式を適用することによって誘導される。この際、ライプニッツ積分則によって積分と微分の演算の順序の交換を行う。この運動学的条件式を崩壊土砂の流入で変動を受けた海底面にも適用し、海底が変動することによって生じる造波項を取り入れることによって土砂と水の衝突による造波を表現した。図-1にはこれらの計算方法の考え方を模式的に示している。底面の変動によって運動学的条件式に従って水面が上昇している。流体内部に進入した土塊は流体の造波抵抗によって速度が減衰する。このことは、土塊の進行とは逆方向の圧力勾配を作用させることによって表現した。この圧力勾配は、土塊上部の水部の水深による静水圧近似によって算定される。以上のような方法

で土塊と水位の変動を同一時間ステップにおいて計算することにより、お互いの更新値が影響を与えながら計算を進めていくことが可能となり、連成計算が成立する。また、このアルゴリズムは地震による海底面の隆起によって発生する津波の発生にもプログラムを変更することなく応用できる。

(2) 基礎方程式

崩壊土砂部と水部の運動を記述する平面2次元での支配方程式を以下に示す。

崩壊土砂部（添字 1）：

$$\frac{\partial h_1}{\partial t} + \frac{\partial m_{1j}}{\partial x_j} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial m_{1j}}{\partial t} + \frac{\partial u_{1j} m_{1j}}{\partial x_j} = \\ -gh_1 \frac{\partial z_b^* + \rho_s h_1 + h_2}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(D_1 \frac{\partial m_{1j}}{\partial x_k} \right) + \tau_{1z} \quad \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

水部（添字 2）：

$$\frac{\partial h_2}{\partial t} + \frac{\partial m_{2j}}{\partial x_j} = \begin{cases} 0 & h_2=0 \text{ の場合} \\ \frac{\partial h_1}{\partial t} & h_2>0 \text{ の場合} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial m_{2j}}{\partial t} + \frac{\partial u_{2j} m_{2j}}{\partial x_j} = \\ -gh_2 \frac{\partial z_b + h_2}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(D_2 \frac{\partial m_{2j}}{\partial x_k} \right) + \tau_{2z} \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

$$z_b = z_b^* + h_1 \quad \dots\dots\dots (5)$$

式（1）、（3）はそれぞれ、崩壊土砂部と水部の連続条件式である。式（2）、（4）はそれぞれの部分の2次元の運動方程式である。記号 x, t, h, m, u, D, τ_z はそれぞれ、水平座標、時間、水深、線流量、流速、水平粘性係数、底面せん断力であり、添字 1, 2 はそれぞれ崩壊土砂部と水部を意味する。式（5）により土砂上面の標高 z_b が底面標高 z_b^* と土砂の高さ h_1 の和として計算される。この2系統の方程式は土砂部と水部が衝突することによって2つの流体が相互作用するように連成している。図-2に変数の定義を模式的に示す。

式（3）の右辺は土砂の流入によって水部の底面が上昇しその結果生じる水部の造波項に相当する。変動している底面の運動学的条件によって誘導される項である。なお、左辺の第2項が無視できる程小さい場合、底面の変位と水面の変位が一致するため、従来の断層モデルによる造波、すなわち底面の変位と初期水面を一致させて

波動を発生させることになる。例えば1m程度の地盤変位が数百kmにわたって1分程度で生じるような海底地震の場合、その項を無視するという近似が十分成り立つが、土砂の流入のような水平スケールがあまり大きくない現象では無視することができない。また、この式の右辺には、計算点が水面上の場合（すなわち陸部）、ゼロとなるため、そのことをチェックするための場合分けが含まれている。なお、流体の速度が十分大きく、短時間の現象であるため、圧力項が支配的であり、界面のせん断力による造波効果は含まれていない。

(3) 移流項の取り扱い

土塊が崩壊して斜面を流下する現象は大変高速であり、非線形性が卓越している現象である。このため、移流項の計算スキームには安定であり、保存性と非線形性を十分考慮することができるスキームを導入する必要がある。本研究ではオリジナルな CIP (Cubic-interpolated pseudo particle) 法、CIP-CSL2 (Conservative Semi-Lagrangian) 法の発展形である CIP-CSLR1 (Conservative Semi-Lagrangian with Rational function) (Yabe et al., 2001, Xiao et al., 2001, 2002) および1次の風上差分と中央差分の混合によって移流項を表現する手法を適宜使用した。

(4) 計算条件と数値実験ケース

計算対象空間は1次元と2次元である。1次元の計算は実験室スケールで45°の急斜面を対象としている。2次元の計算は実スケールで、標高の高い地滑り発生地帯を想定して、図-3に示すようなモデル領域を設定した。計算格子サイズ (dx, dy) は50 m, 計算時間ステップ (dt) は0.01 sである。格子数は、100×100であり、計算領域の広さは5 km 四方と土砂の流動を考える上では非常に広領域となっている。図中、左上の急斜面から土砂が崩落し、静水面に衝突する。

3. 計算結果

図-4には、1次元の計算結果の例を示す。上段は、斜面部を流下する土石流であり、下段が計算領域全体における水面変動の伝播を示している。土砂は水平な底部に達している。下段の水面変動を見ると、土石流の開放後、0.7 s程度で水部に到達し、その後、1.3 s程度までの間に大きな水位変動となっている。その後の水位変動の伝播は波形の前傾化を示しながら対岸に接近している。土砂の動きは長時間の結果を示していないが、造波抵抗等の逆方向の圧力により減速した。計算結果には示していないが、伝播した波は対岸の斜面を遡上し、反射することも確認した。

図-3に示した平面2次元の計算領域に対する計算結果を図-5に示す。これら4つの図は、水に衝突する直

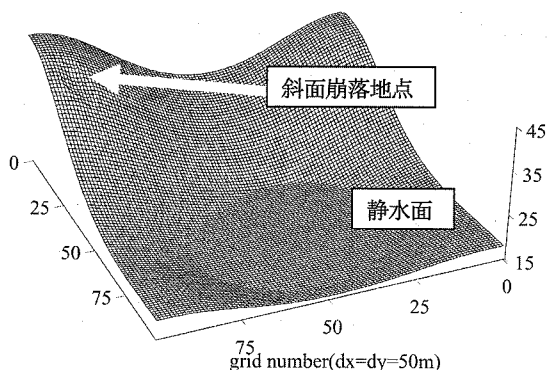


図-3 2次元計算のモデル地盤標高と初期の静水位

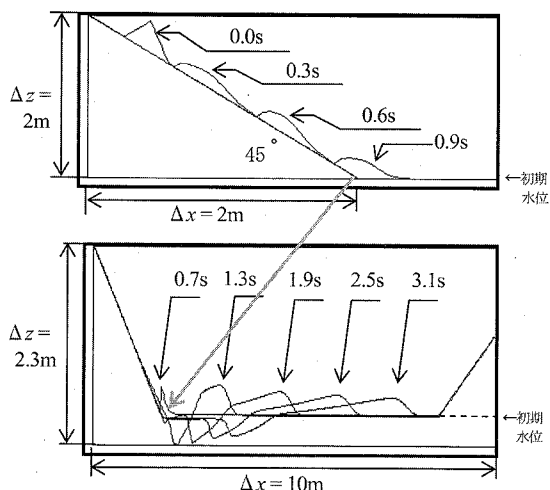


図-4 土塊の流入によって発生する波動の計算結果 (1次元)

前の土砂と衝突後に発生する水面波の鉛直変位について衝突部分付近を拡大して示している。なお、土砂と水面波の鉛直方向の変位は、地盤斜面の鉛直方向の変化に比して小さいため、10倍に拡大されている。ここに例示したケースの土砂と水面波の移流項の取り扱いは、それぞれ CIP 法、CIP-CSLR1 法である。斜面上部で発生した崩壊土砂は、地盤標高の変動を反映しながら水面に接近してくる。崩壊が発生した後、土砂は地形標高の最急勾配の方向に重力を受けながら崩落するため、流下方向に向かって一旦、左向きに方向を転じている。土砂の先端は重力流先端部に見られるグラビティヘッドを形成し、その後、水面に衝突して高い水位変動が生じている。水に流入した土砂は、さらに水深の深い方向に広がり、水面波は衝突部から円形の波として伝播する。これらの結果は、概ね予見していたものと合致している。

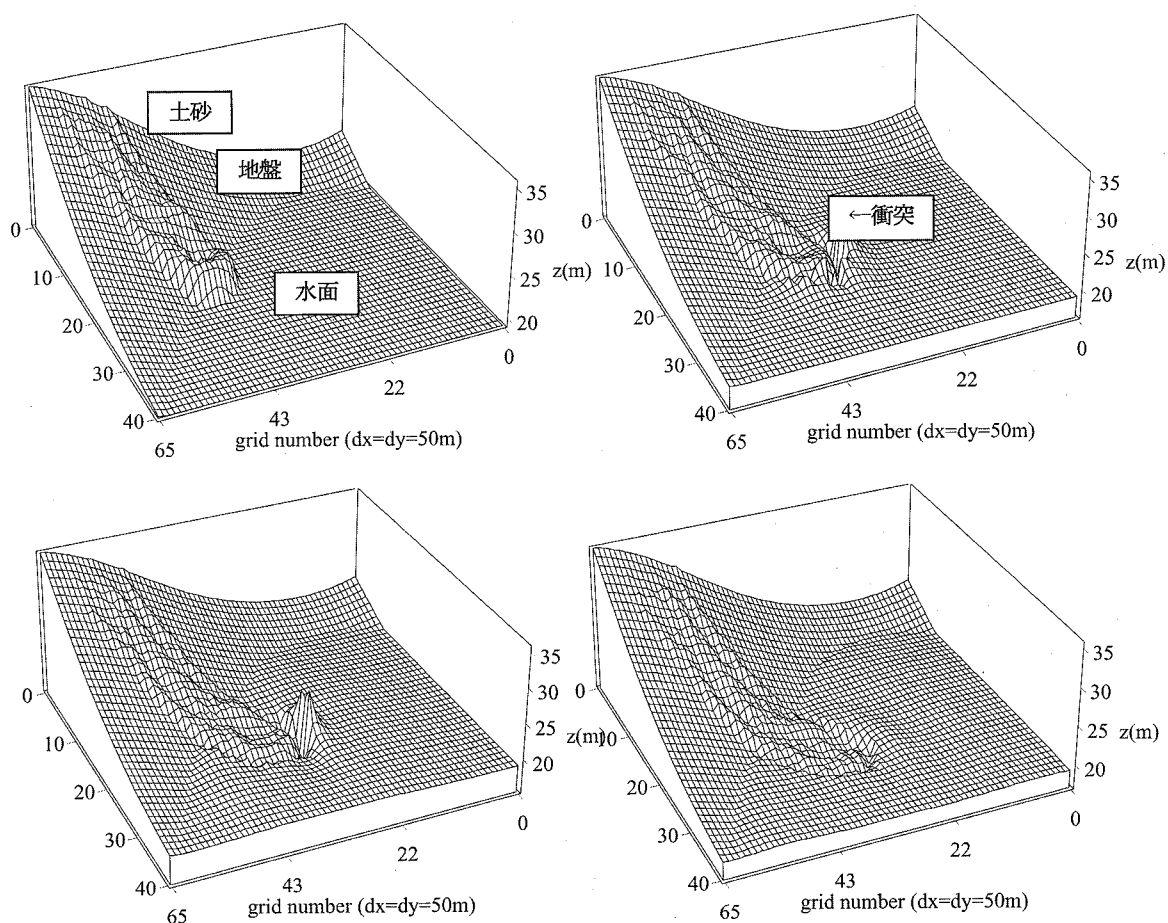


図-5 斜面を流下する土砂とその水面への衝突 (平面 2 次元)
 土砂の発生からの経過時間 左上: 450s, 右上: 550s, 左下: 650s, 右下: 750s 地盤標高と水深の和の分布であり, 水面 (各図右下) と陸上部の地盤が同時に表示されている。

図-6 には衝突した時点での線流量ベクトルの分布を示す。土砂が水と衝突して、押しのけられ、同心円に近い波動が発生している。ただし、衝突する向きと海底の勾配にも関係し、海底が深い方に向けてより強い線流量ベクトルが発生しているようである。なお、この図に示されているベクトルのスケールは、水部では土砂部の 5 倍となっている点に注意を要する。今回の計算では、土砂の密度は 2.6 で一定となっており、土砂の運動エネルギーが水部に伝達されると速度が大きくなることは理論的に推測できるが、現時点ではそれがどの程度になるか定量的な検討は行っていない。

計算に用いたコンピュータの CPU は Intel 社製 ItaniumII であり、Intel Fortran Compiler ver.8 を用いて計算を行った。CPU 時間はすべてのケースにおいて 5 分未満であり、さらに詳細な現地スケールの計算領域への適用も可能である。

4. ま と め

本研究では斜面を崩落していく土塊の運動とその衝突に伴う波動の発生について両者を連成させるアルゴリズムを新たに提案した。本論文では、2つの流体の相互作用を計算するアルゴリズムの提案を主要な内容としたため、計算の妥当性の検証が十分ではない。このような現象を室内実験によって調べるには大規模な実験装置と高速カメラによる詳細な解析が必要であり今後の課題としたい。また、乱流モデルの導入や土砂と水塊の界面のせん断抵抗も考慮すべきであるが、流体塊の衝突によって発生する乱れについて十分な知見やモデル提案がなされていない。今後、ゼロ方程式モデルの導入も視野に入れて乱流モデルの導入を図る予定である。このような流れに関する乱流の取り扱いについて今後の研究の発展を望みたい。

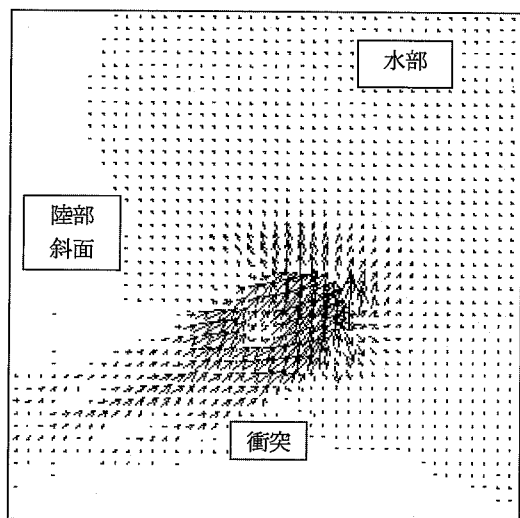


図-6 衝突直後の土砂と水面波の線流量ベクトル
土砂部: CIP, 水部: CIP-CSLR1

謝辞: 本研究を遂行するにあたり、東京工業大学大学院造エネルギー専攻の肖鋒助教授には CIP 法の既往研究に関する広範な文献の紹介や数値計算手法について具体的に役立つ有益な情報を提供して頂いた。また、東京大学大学院の黄光偉助教授、長岡技術科学大学の陸旻皎・熊倉俊郎両助教授、早川典生・長岡技術科学大学名誉教授には有益な示唆を頂いた。ここに謝意を表する。

参 考 文 献

- 今村文彦・後藤大地・鴨原良典・喜多村雄一・松原隆之・高岡一章・伴一彦(2001): 土砂突入による津波発生機構に関する基礎的検討, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 321-325.
- 梅谷英孝, 富樫宏由(2001): 寛永 4 年(1792)有明津波の再現性と災害特性に関する研究, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 356-360.
- 後藤仁志・酒井哲郎・林稔(2000): 大規模斜面崩壊による水面波の発生過程のグリッドレス解析, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 56-60.
- 後藤仁志・林稔・酒井哲郎(2002): 固液二相流型粒子法による大規模土砂崩壊に伴う水面波の発生過程の数値解析, 土木学会論文集, 第 719 号 / II -61, pp. 31-45.
- 後藤仁志・林稔・安藤怜・鷺見崇・酒井哲郎(2003): 砂礫混合層を伴う混相流解析のための DEM-MPS 法マルチスケールリンクの開発, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 26-30, 2003.
- 重松孝昌・廣瀬真由・錦織陽一・小田一紀(2001): DEM 法と VOF 法を併用した三次元固液混相流モデルの開発とその適用例, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 6-10.
- 張 瑞瑾・細山田 得三(2005): 斜面の崩壊によって誘起される水面波とその遡上・伝播に関する基礎的な数値実験, 応用力学論文集, Vol.8, pp. 865-874.
- 張 瑞瑾(2006): Development of non-linear shallow water wave models and the application to highly non-linear fluid flows, 長岡技術科学大学博士論文, 2006.
- 橋和正, 今村文彦: 複合型津波発生メカニズムの解明 - 1998 年パプアニューギニア津波を例として -, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 346-350.
- 平石哲也, 柴木秀之, 原崎恵太郎, 原信彦, 三嶋宣明(2000): 地震断層と海底地滑りを考慮した 1998 年パプアニューギニア地震津波の日本沿岸への適用, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 341-345.
- 平石哲也, 柴木秀之, 原信彦(2001): 円弧滑り法を利用した地滑り津波波源による明和八重山地震津波の再現, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 351-355.
- 陸田秀実・清水研一・土井康明・福田和宏(2004): CIP-EDEM 法による自由液面と弾性体運動連成解析, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 41-45.
- Xiao F. and Tabe T. (2001): Completely conservative and oscillationless semi-Lagrangian schemes for advection transportation, Journal of Computational Physics, Vol.170, pp. 498-522.
- Xiao F., Yabe T., Peng X. and Kobayashi H. (2002): Conservative and oscillation-less atmospheric transport schemes based on rational functions, Journal of Geophysical Research, Vol.107, D22, 4609, doi: 10.1029/2001JD001532:ACL 2-1-2-11.
- Yabe T., Tanaka R., Nakamura T. and Xiao F. (2001): An exactly conservative semi-Lagrangian scheme (CIP-CSL) in one dimension, Monthly Weather Review, Vol.129, pp. 332-344.