

iRIC を用いた土石流解析

エンジニアリング本部 防災・環境解析部 水圏解析グループ

田中 春樹

1. はじめに

降雨による斜面崩壊には、大きく分けて深層崩壊と表層崩壊の二種類ある。深層崩壊とは長期間の降雨により土壌中に雨水が蓄積し、基盤上までの土層が崩壊する現象である。一方、表層崩壊とは降雨強度が大きい場合に表層土が崩壊する現象であり、崩壊と同時に表層に蓄積した水と土砂、泥が混ざった土石流・泥流が発生する。

近年の土石流・泥流による災害は、平成 25 年 10 月に東京都大島町、平成 26 年 8 月に広島県広島市で発生した。

東京都大島町の例では、平成 25 年 10 月 16 日に台風 26 号がもたらした湿った空気の影響で、最大 100mm/h を超える猛烈な雨が降り続き、24 時間の降水量が 800mm を超える豪雨となり、斜面崩壊による泥流が発生し、死者 35 名、行方不明者 4 名、家屋被害(全壊、半壊)86 戸となる大規模な土砂災害となった¹⁾。

広島県広島市の例では、平成 26 年 8 月 20 日に時間 100mm を超える局地的な豪雨となり、安佐南区と安佐北区では土石流(107 件)とがけ崩れ(59 件)が同時多発的に発生し、死者 74 名、家屋被害(全壊、半壊)255 戸と甚大な人的被害をもたらした²⁾。

今後想定される温暖化の影響により上述したような短時間の猛烈な豪雨の発生頻度が増加すると考えられ、表層崩壊による土石流・泥流が発生する危

険性が高まってくると予想される。

本稿では、土石流・泥流を解析するソフトウェアのひとつとして、一般に無料で公開されている iRIC を用いた解析事例について紹介する。

2. 土石流解析モデルの概要

2.1 iRIC とは

iRIC (International River Interface Cooperative) ソフトウェアは、これまで USGS (アメリカ地質調査所) で開発してきた MD_SWMS と(財)北海道河川防災研究センターで開発してきた RIC-Nays の機能を統合した河川流況・河床変動解析ソフトウェアであり、<http://i-ric.org/ja/> より一般に無料でダウンロードできる。

iRIC は、ポストプロセッサ、プリプロセッサ、ソルバの3つの機能から構成されており、ソルバとして、二次元または、三次元の流況解析や河床変動解析など様々なソルバを搭載しており、GUI でプリプロセッサ処理(メッシュ作成や地形、粗度、構造物データ作成など)からポストプロセッサ処理(平面分布図、コンター図、アニメーション)を一貫して実行することができる。

このうち土石流・泥流解析については後述する Morpho2DH ソルバを用いた。

2. 2 解析モデル概要

Morpho2DH は一般曲線座標で境界適合座標を用いた非定常平面二次元の土石流・泥流モデルを主体とした解析ソルバであり、京都大学の竹林洋史氏によって開発された。

主な機能・特徴は以下の通りである。

- ① 斜面崩壊を初期条件とした土石流・泥流の流動・堆積過程を表現可能なモデルである。
- ② 砂防ダムや貯砂ダム、家屋などの構造物を考慮できる。
- ③ 植生や植生高さを考慮できる。
- ④ 複数の崩壊地点を考慮できる。

2. 3 基礎式

水及び土砂の混合物の質量保存則³⁾は以下の式で表される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = \frac{E}{c_*} \quad (1)$$

t : 時間、h : 土石流・泥流の流動深
 u, v : x, y 方向における速度成分
 c_* : 静止堆積層の砂礫の堆積濃度
 E : 河床の浸食速度

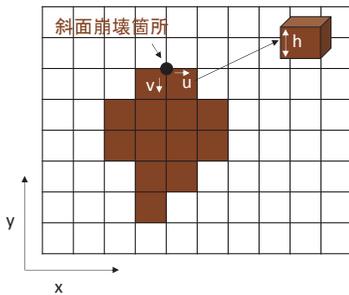


図 1 平面二次元モデルの概念図

ここで、以下の江頭らの式(2)を用い、 θ は流動方向の河床勾配式であることから式(3)の関係が求められる。

$$\frac{E}{\sqrt{u^2 + v^2}} = c_* \tan(\theta - \theta_e) \quad (2)$$

$$\sin \theta = \frac{u \sin \theta_x + v \sin \theta_y}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (3)$$

θ : 流動方向の河床勾配
 θ_x : x 方向の河床勾配、 θ_y : y 方向の河床勾配
 θ_e : 水及び土砂の混合物中の鉛直平均土砂濃度 \bar{c} に関する流動方向の平衡河床勾配

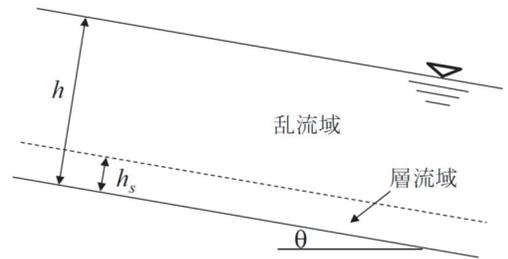


図 2 二相流モデルの概念図⁵⁾

図 2 のように、水と土砂の混合物に対して河床近傍に層流域、その上に乱流域を有する二層流を考え、 \bar{c} を一定とすると、以下の関係が得られる。

$$\tan \theta_e = \frac{(\sigma/\rho - 1)\bar{c}}{(\sigma/\rho - 1)\bar{c} + 1} \frac{h_s}{h} \tan \phi_s \quad (4)$$

ϕ_s : 土砂の内部摩擦角、 h_s/h : 層流層厚さの比

液体中の土砂の質量保存則³⁾は下式で表される。

$$\frac{\partial ch}{\partial t} + \frac{\partial chU}{\partial x} + \frac{\partial chV}{\partial y} = E \quad (5)$$

運動量保存則³⁾から以下の関係が得られる。

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial huU}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_m} \quad (6)$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial hvU}{\partial x} + \frac{\partial hvV}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial P}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho_m} \quad (7)$$

ここに、 g は重力、 z_b は河床位である。 P は圧力であり、静水圧近似を用いる。 ρ_m は下式で表される。

$$\rho_m = (\sigma - \rho)\bar{c} + \rho \quad (8)$$

ρ_m : 土砂等の密度、 ρ : 水の密度、 σ : 土砂の密度

表 1 計算条件

対象地域	広島県広島市可部東六丁目
計算メッシュ	メッシュサイズ:5m メッシュ数(X方向:81、Y方向:111)
地形	国土地理院 5mメッシュ(標高)
斜面崩壊規模	崩壊可能土砂量は7.5m ³ (X方向 5m、Y方向 5m、渓床深さ 0.3m)
浸食深さ	0.1m
計算時間	200秒
DT	0.001

$$\tau_{bx} = \{\tau_x + \rho f_b(u^2 + v^2)\} \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (9)$$

$$\tau_{by} = \{\tau_y + \rho f_b(u^2 + v^2)\} \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (10)$$

τ_{bx}, τ_{by} : x、y 方向における掃流力成分
 f_b は抵抗係数であり、以下の関係を用いる。

(乱流域)

$$f_b = \frac{C_{mu}}{8} \alpha^2 \quad (11)$$

(層流域)

$f_b =$

$$\frac{4}{25} \left\{ k_f \frac{(1-c)^{\frac{5}{3}}}{c^{\frac{2}{3}}} + k_d \frac{\sigma}{\rho} (1-e^2) c^{\frac{1}{3}} \right\} \left(\frac{h_s}{d} \right)^{-2} \quad (12)$$

ここに、 C_{mu} は泥流の抵抗に関する係数であり、ユーザーが泥流の流れ方を見ながら設定する値である。 $k_f=0.16$ 、 $k_d=0.0828$ 、 e は粒子の反発係数、 d は土砂の平均粒径である。

河床位方程式³⁾は以下の式で表される。

$$\frac{\partial Z_b}{\partial t} = -\frac{E}{C_*} \quad (13)$$

これらの基礎式を用いて土石流・泥流の流動深、流速、堆積・浸食量を求める。

2. 4 計算条件および検討ケース

(1) 計算条件

計算条件表を表 1 に示す。

計算対象地域は平成 26 年 8 月豪雨により土石流が発生した可部東六丁目とした。計算対象範囲には標高約 250m の山があり、その麓に家屋が存在しており、台川の左岸側の比較的地盤が高いところに家屋が密集している。

斜面崩壊規模については、表 1 に示すように崩壊可能土砂量は崩壊範囲を計算メッシュ 1 つ分(25m²)とし、崩壊する渓床深さ 0.3m と仮定の条件とした。斜面崩壊箇所は、地図・空中写真閲覧サービス(国土地理院)より平成 26 年 8 月豪雨(広島市北部)の航空写真を参考に設定した。

浸食深さとは浸食が予想される渓床堆積土砂の平均深さのことであり、本来、露岩調査を行い縦断的な基岩の連続性を考慮し設定する必要があるが、今回はモデルの特徴を把握するため、仮定条件として計算領域全域の平均浸食深さを 0.1m と低く設定した。また、静止堆積濃度、土砂内部摩擦角、層流層厚の比などの土石流性質に関するパラメータはモデルデフォルト値とした。

(2) 検討ケース

2.2 のモデルの特徴に挙げた項目を把握するために表 2 に記す CASE1～CASE4 を検討ケースとした。

表 2 検討ケース

CASE1	家屋なし
CASE2	家屋あり
CASE3	対策施設あり、家屋あり
CASE4	斜面崩壊箇所複数あり

CASE1 は家屋、砂防ダムなどの障害物がない条件である。

CASE2は家屋を考慮した条件である。家屋については iRIC の GUI にてポリゴンを作成して加えることができるが、今回は国土基盤地図情報の建築物をシェープファイル形式に変換したものを iRIC のインポート機能より読み込み設定した。

CASE3 は、対策施設として砂防ダムを考慮した条件である。砂防ダムは、設置設定箇所を「8.20 土砂災害 砂防・治山施設整備計画図」⁵⁾を参考に配置し、堤体部標高を一律 E.L.108m(天端高 10m)に嵩上げした。

CASE4 は、斜面崩壊箇所を複数箇所設定した条件である。複数箇所それぞれの斜面崩壊規模は同一とした。また、家屋、砂防ダムなどの障害物はないものとした。

図 3 に計算対象域と計算地形、家屋位置を示す。

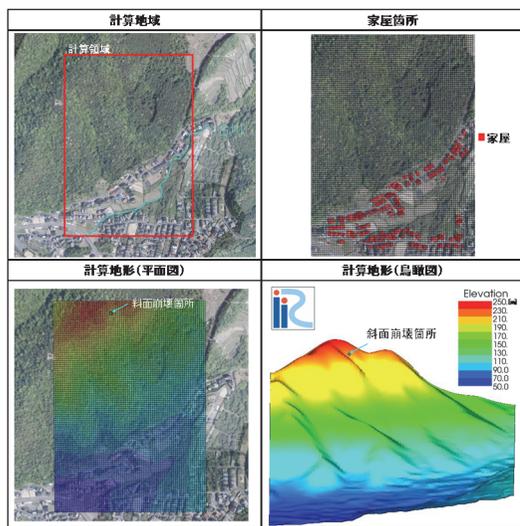


図 3 計算対象地域および地形条件

2.5 結果及び考察

検討ケース毎の流動深(土石流の深さ)の時間変化および最終地盤変動量を図 4～8 に示す。

CASE1(家屋なし)においては、土石流発生直後は土石流の規模は非常に小さいが、流下とともに大きくなり、家屋に流入する時点で大きくなっていることがわかる。

また、土石流発生から 60 秒後には家屋に到達し、初期斜面崩壊深さ 0.3m のものが溪流の土石を巻き込んで約 1m の流動深となったことがわかる。その後は、家屋を考慮していないため土石流は扇形に広く薄く流れており、地盤の低い河川に流れ込んでいる。

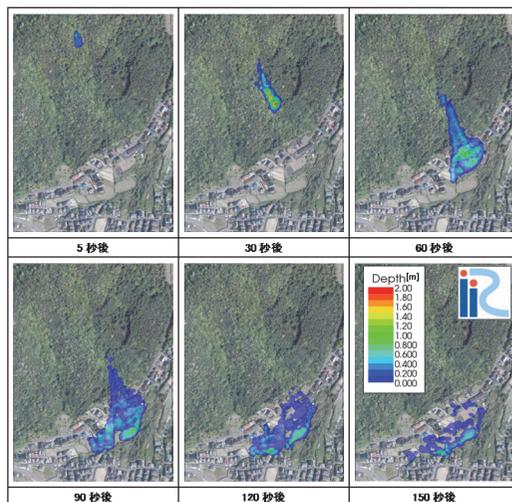


図 4 流動深の時間変化(CASE1)

CASE2(家屋あり)においては、土石流発生から 60 秒後には家屋に到達し、土石流は家屋の上流側で堆積し流動深が 2m 近くせり上がっていることがわかる。また、家屋が障害物となり、土石流が道路や家屋の間を流下していることがわかる。最終地盤変動量についても家屋なしと比較すると、最終的に家屋前面で堆積した土砂が多いことがわかる。

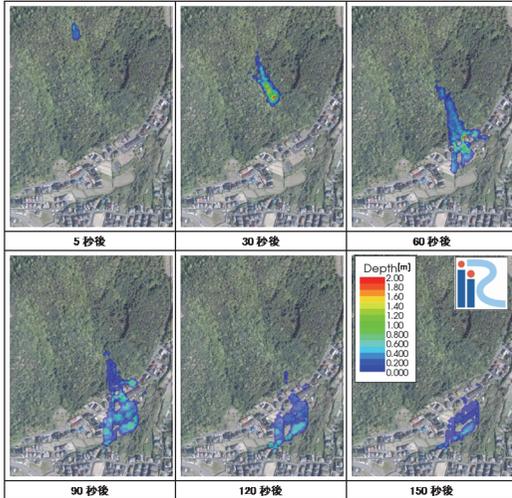


図5 流動深の時間変化 (CASE2)

CASE3 (対策施設あり)においては、前述同様の土石流が発生すると仮定して、家屋上流側に砂防ダムを設定した。その結果、土石流発生から60秒後は砂防ダムを設定したことにより、家屋への土石流の流入はなく計算終了時までダムから越流することがなかった。

CASE4 (複数斜面崩壊)においては、今回新たに追加した斜面崩壊箇所からの土石流を支川とし、CASE4以前の崩壊箇所からの土石流を本川とする。土石流発生直後は2地点とも土石流の規模は非常に小さいが、流下とともに大きくなり、支川が10~15秒後に本川と合流することで土石流が発達し、60秒後の到達範囲もCASE1と比較し広がっており、土石流の流速が大きくなったことがわかる。その後も、本川と支川それぞれの溪谷からの土石流が家屋に流れ込み到達範囲も広がることになる。

以上のように検討ケース毎に土石流の発生・流動・堆積過程の違いを視覚的に捉えることができた。

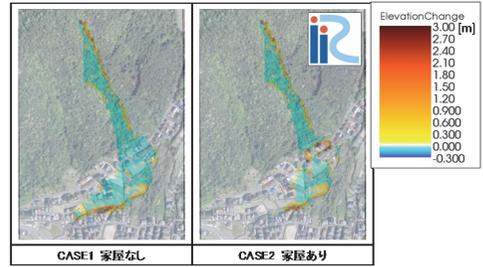


図6 最終地盤変動量

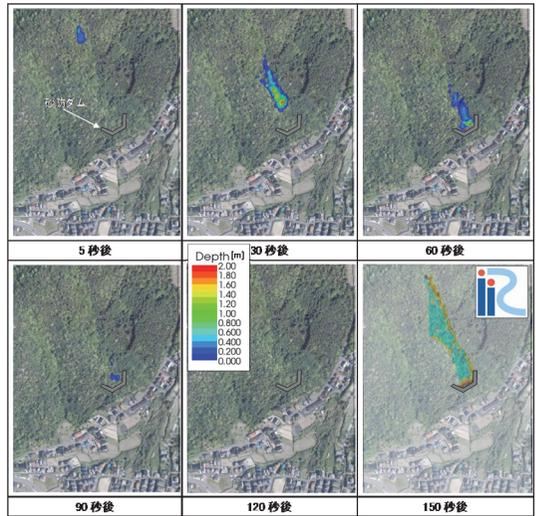


図7 流動深の時間変化および地盤変動量 (CASE3)

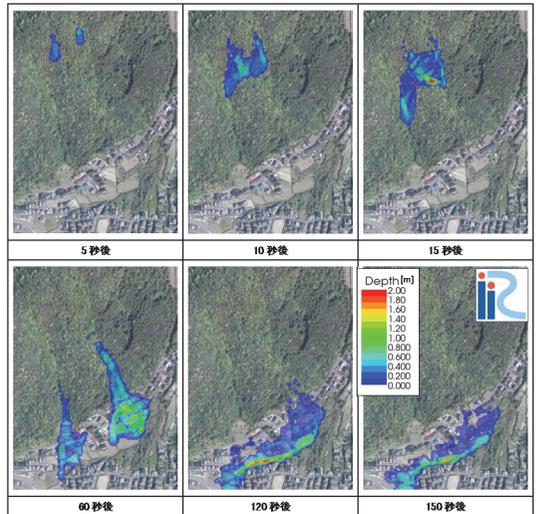


図8 流動深の時間変化 (CASE4)

3. おわりに

土石流・泥流モデル(Morpho2DH)および iRIC の GUI が適用可能である事項、適用できない事項および課題点を表 3 に整理した。

表 3 Morpho2D の適用可否項目の整理

適用可	<ul style="list-style-type: none"> ・家屋などの障害物の設定 ・本川・支川の崩壊箇所の設定 ・植生密度、植生高さの設定 ・計算結果項目は流動深、地盤変動量、流速など ・連続画像出力、アニメーション動画出力 ・シェープファイルをインポート可能 ・その他ソフト形式出力可 (Google Earth用(kml)、ESRIシェープファイル、CSVなど)
適用外 /課題点	<ul style="list-style-type: none"> ・降雨による粒径の細かい土砂の浸食は非対象 ・流水や家屋流失計算は非対象 ・本川・支川の崩壊開始時間の設定は不可 ・最大流動深、到達時間の平面分布図は出力対象外 ・ソルバのソースは非公開

iRIC の土石流・泥流モデルにおける適用外の項目を以下に示す。

- ① 土石流による土砂が堆積したあとに降り続いた豪雨による粒径の小さい土砂の浸食は対象としていない。
- ② 本川、支川の複数箇所での斜面崩壊は設定できるが、各々の発生時間設定をできず同時刻に発生させることしかできない。
計算結果は時刻毎の流動深、変動量、速度などがあるが、包絡値については出力対象外であるため、別途 CSV 形式より値を抽出し包絡値を取得し、別途 GIS ソフトを用いて取り扱えるように処理する手間がある。
土石流とは異なるが火山災害予想区域図作成にあたって 6)は最大流動深分布図、最大堆積深分布図、分布の時間変化を求められることから上記の課題は解決が望まれる。
- ③ iRIC の GUI 上の課題としては、結果出力時の凡例の小数点以下桁数設定ができないため、実務上の報告書に掲載する際は③と同様に別途 GIS を用いて再描画する必要があると考えられる。
- ④ 公開されているソルバのソースは非公開であるため、ソルバ変更は不可能である。

上記のように適用外となる項目や課題点はいくつ

かあるが、出力としてアニメーションや Google Earth 上への表示も容易に可能であることから、土石流の発生・流動・堆積過程を視覚的に捉えるツールとしては非常に優れたモデルであると考えられる。今後は実務上仕様を満たす計算条件、出力結果項目とモデルの計算対象可否条件を照らし合わせて iRIC の土石流・泥流モデル(Morpho2DH)を使用することを検討していきたいと考える。

<参考文献>

- 1) 「平成 25 年台風第 26 号伊豆大島の土砂災害の概要」(国土交通省, 平成 25 年 11 月 12 日, 本省発表資料)
- 2) 「広島県で発生した土砂災害への対応状況」(国土交通省,平成 26 年 10 月 31 日)
- 3) 「土石流の数値シミュレーション」(日本流体力学会数値流体力学部門 Web 会誌(第 12 巻, 第 2 号,pp. 33-43),2004 年,江頭進治, 伊藤隆郭)
- 4) 「伊豆大島で発生した泥流の平面二次元解析」(河川技術論文集(第 20 巻), 2014 年, 竹林洋史, 江頭進治, 藤田正治)
- 5) 「8.20 土砂災害 砂防・治山施設整備計画図」(平成 26 年 12 月 2 日,広島県)
- 6) 「火山噴火に起因した土砂災害予想区域図作成の手引き(案)」(平成 25 年 3 月,国土交通省)