

土石流発生・流下・氾濫過程を一体的に推定可能な 数値シミュレーションモデルの開発とプログラムの公表

今森直紀・清水武志・山崎祐介・石田孝司

1. はじめに

火山噴火により火砕物が堆積した場合、降雨に伴う土石流が発生しやすくなることがある^{例え1)}。このような土石流による被害を軽減するため、被害域の想定として土石流発生に伴う土砂と水の氾濫範囲（以下「氾濫範囲」という。）を推定し、住民等の避難に役立てることが必要である。

このため、国土交通省では、土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律（平成22年11月25日法律第52号〔第一次改正〕、以下「法律」という。）に基づき、緊急調査の実施とその結果を市町村長等に通知することとなっている。緊急調査では氾濫範囲を数値シミュレーションにより推定する²⁾。これには土木研究所等が開発したQUAD（Quick Analysis System for Debris Flow）³⁾が用いられるが、開発から10年以上が経過し、後述するように運用面での課題も顕在化している。

そこで、土木研究所では数値シミュレーションによる氾濫範囲の推定精度の向上を図ることを目的とし、QUADとは別に土石流の流出・氾濫モデルを新たに開発した。本報告では新たに開発した数値シミュレーションモデルについて概説するとともに、その活用に向けた取組みも紹介する。

2. QUADの概要と課題

緊急調査は迅速性が求められるため、QUADは一定程度の精度を確保した上で、速やかに氾濫範囲が推定できることを優先している⁴⁾。例えば、土石流流量を推定し、これを用いて氾濫範囲を推定する過程では、噴火直後は現地情報が限られることや迅速性を重視するため、作業を極力単純化している⁵⁾。また、計算に用いる地形データのメッシュサイズも約50mないし約20mである。そ

の結果、過去の緊急調査では1週間程度で緊急調査の結果が通知できている^{例え6)}。

一方、火山噴火後の初動期に提供する情報としては、このように一定程度の精度で氾濫範囲が推定できれば取り急ぎの避難行動をとる上では十分かもしれないが、火山活動が継続する場合は火砕物の堆積範囲等の状況変化に応じて氾濫範囲の推定精度の向上を図ることが望ましい。加えて、噴火後の調査で入手できた情報を元に、QUADによる数値シミュレーションとは別の数値シミュレーションモデルでも評価し、氾濫範囲の推定精度を向上させることで避難の範囲を更新していくことも必要と考えられる。また、QUADによる計算結果は氾濫範囲のみを表示する仕様であり、氾濫時の深さや流速などの情報はない。

この他、近年は数値シミュレーションの入力条件として使用することのできる地形や解析雨量のデータは分解能が大きくなりつつある。また、火山噴火時に関係機関が取得した火砕物の堆積厚等の情報を共有するシステムも構築されつつあり⁷⁾、これらのデータの活用も望まれる。

3. 新たに開発した数値シミュレーションモデルの概要と特徴

3.1 数値シミュレーションモデルの構成と概要

土木研究所が新たに開発した数値シミュレーションモデルは、図・1に示す降雨流出モデル、土石流流出モデル、土石流氾濫モデルの各サブモデルと地形モデルから構成されている。これらを実装した解析プログラム、入出力データ処理および可視化プログラム群はDFSS(Debris Flow Simulator for Sabo)という⁸⁾。

各サブモデルで扱う現象は以下の通りである。降雨流出モデルでは、降雨により流域斜面に飽和側方浸透流および表面流が発生し、河道に流出す

る過程を扱う。土石流流出モデルでは、河道の流量が増加し、河床堆積物が不安定化して土石流が発生・流下する過程を扱う。そして、土石流氾濫モデルでは土石流が氾濫する過程を扱う。DFSSは、これらの現象の数値シミュレーションを一体的に実施することができる。以下、各サブモデルの概要と特徴について説明する。

3.2 地形モデル

地形モデルは、図・2のとおり流域地形モデルと氾濫原地形モデルから構成され、いずれも国土地理院の数値標高モデルのデータにより構築される。流域地形モデルは、降雨流出モデルの計算領域である斜面系と土石流流出モデルの計算領域である河道系で構成される。氾濫原地形モデルは、等分割されたグリッドセル（格子状のマスキ）で表現される。

3.3 降雨流出モデル

降雨流出モデルの斜面は平面2次元で表現され、斜面の土層は表層とその下層で構成されている。それぞれの層で浸透能を設定することが可能である（図・3）。例えば表層は火砕物の堆積層、その下の層は元の斜面のように火砕物が堆積した斜面を表現することもできる。また、蒸発散量を入力することで、土層の乾燥過程も考慮できる。

3.4 土石流流出モデル

土石流流出モデルは、1次元で表現された河道において、降雨流出モデルの計算結果を入力して、土石流の発生および侵食・堆積を伴う流下過程を計算する。土石流の発生は、河床堆積物に無限長斜面の安定解析により評価し、不安定となった場合に堆積物の全層が流動化することで表現している。なお、本モデルでは山腹崩壊に起因する土石流の発生は考慮していない。

土石流流出モデルにおける河道系と氾濫原地形モデルの接続については、図・4に示すとおり、土石流が河道を流下していく過程で土石流の表面標高が流路側岸の地盤標高を上回った地点（以下「氾濫開始点」という。）で氾濫が開始し、氾濫開始点における土石流流量が計算過程で定められていく。このため、QUADにおいて入力条件として与えていた氾濫開始点の位置とハイドログラフの設定は不要である。なお、河道系の任意地点における土石流流量も抽出でき、氾濫範囲を別のモデルを用いて推定することも可能である。

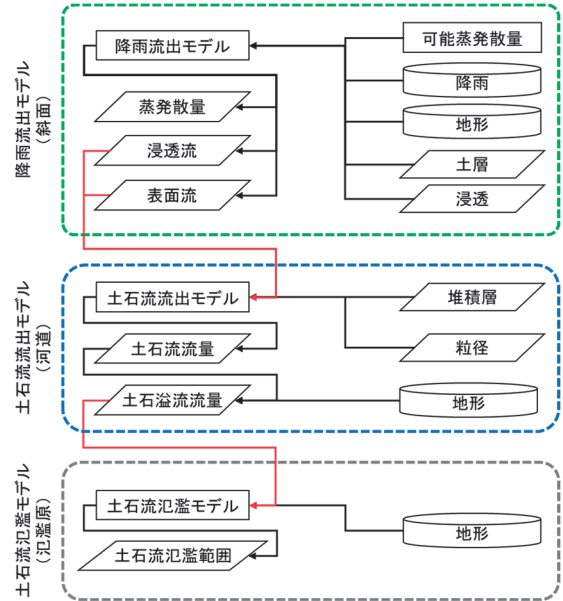


図-1 本モデルにおけるサブモデルの構成⁸⁾

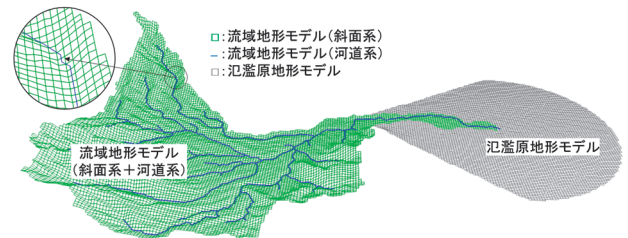


図-2 地形モデルの模式図⁸⁾

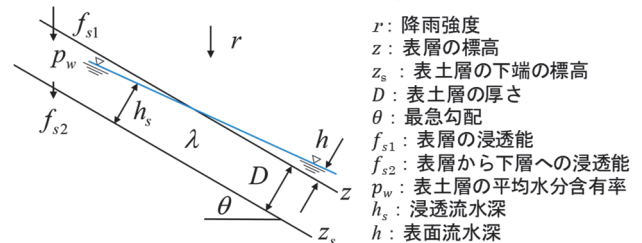


図-3 斜面と水面の模式図（山崎ら⁸⁾に凡例を加筆）

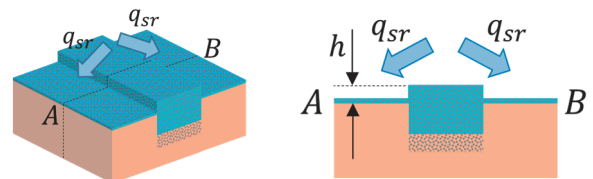


図-4 土石流の溢流⁸⁾

3.5 土石流氾濫モデル

土石流氾濫モデルは平面2次元で表現され、河道からあふれ出た土石流の氾濫過程を時系列で計算する。DFSSでは計算結果は流動深等を時系列的に確認できるほか、最大流動深も出力することができる。

3.6 本モデルによる氾濫範囲の再現性の確認

1990年九州北部豪雨時における阿蘇古恵川の土石流で氾濫範囲の再現性を確認した。1990年7

月の豪雨により、阿蘇市一の宮町では古恵川から土石流が氾濫し、土砂災害が発生した。図-5はこの災害における調査結果との比較により、氾濫範囲の再現性を検討したものである。計算による最大流動深（res_hmax）は領域の北側に氾濫水が滞留しているが、これは、地形モデルに水路や道路盛土などを表現することで改善されるものと推定される。

3.7 本モデルの今後の課題

本解析モデルにおいては、土石流の氾濫範囲推定に重要な過程を既往研究に基づき、できる限りモデル化しているが、QUADと同様に山腹崩壊による土砂の生産・移動過程、河床における微細土砂の含有率の保存則、土石流対策施設の効果評価等は考慮していない。土石流対策施設の効果を評価するためには、対策施設を地形により表現したり支配方程式に施設効果を考慮したりするなどの改良が必要である。また、火山噴火後の土石流を対象とする場合、火砕物の堆積厚や粒径等から浸透能の変化を推定する手法も必要である。これらは今後の課題として挙げられる。

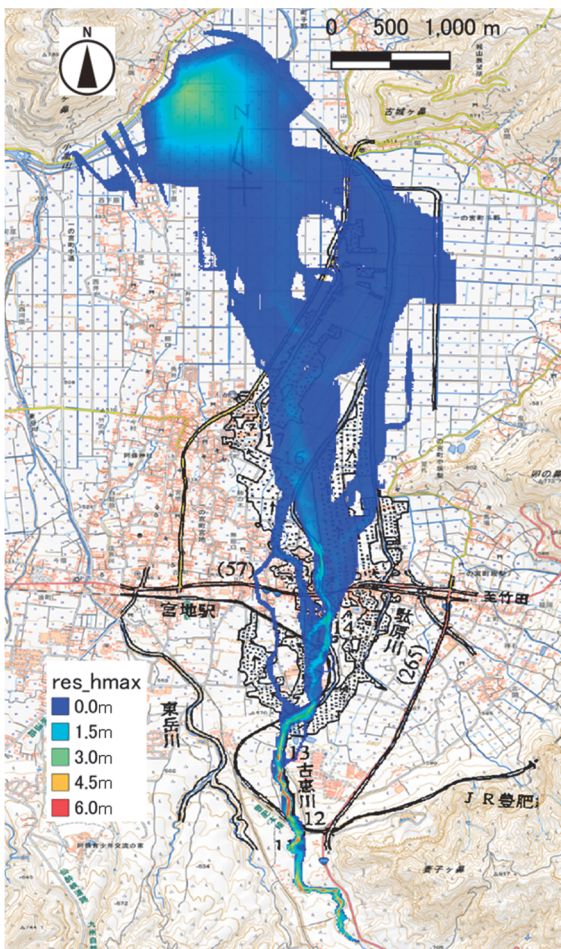


図-5 最大流動深と調査結果の比較⁸⁾

4. 本プログラムの活用に関する取組

4.1 オープンソースプログラムとしての公表

DFSSはオープンソースプログラムとして公表した。まず、ソースコードも含めプログラムおよびその解説を公表することで、実務的、研究的な仕様により本モデルやプログラムの検証や妥当性の確認が可能となる。また、ソースコードが公表されている土石流の数値シミュレーションプログラムはほとんどないため、土石流の数値シミュレーションについて学習する場合に教材の一つとしての活用も期待できる。

DFSSのライセンスはクリエイティブ・コモンズ表示-継承4.0 国際パブリック・ライセンスであり、著作権表示とライセンス継承が必要であるが、ソースコードは自由な改変が可能であり、また、商用利用も含め利用制限はない。

4.2 更なる実用化に向けた技術開発の状況

今回開発したモデルを実装したプログラムはCUI(Character User Interface)で操作するため、ある程度のプログラミングの知識が必要である。本プログラムについて将来的に法律に基づく緊急

```

DF_ver.1.0.f90
1  ! Program: DF_ver.1.0.f90
2  ! Copyright (2021) by Public Works Research Institute (P.W.R.I.)
3  ! License: CC-BY-SA
4
5  ! 1 2 3 end end+1
6  ! FX q q q q q
7  ! -> -> -> -> ->
8  ! CV | z | z | z |...| z |
9  ! | 1 | 2 | 3 |...| end|
10
11 implicit none
12 real(8), parameter :: PI=acos(-1.d0), deg2rad=PI/180.d0, rad2deg=180.d0/PI, &
13 g=9.8d0, u2=0.35d0, dtlim=0.0001d0, cfl=0.01d0
14 real(8), allocatable :: z(:,:), zini(:,:), zs(:,:), h(:,:), ho(:,:), d(:,:), &
15 hs(:,:), hso(:,:), coh(:,:), sf(:,:), hmax(:,:), hsmx(:,:), &
16 cc(:,:), cco(:,:), cf(:,:), cfo(:,:), e(:,:), tant.e(:,:), &
17 grad.z(:,:), grad.w(:,:), rho(:,:), rhom(:,:), fdir(:,:)
18 real(8), allocatable :: u(:,:), uo(:,:), v(:,:), vo(:,:), ua(:,:), va(:,:), uv(:,:), &
19 uh(:,:), vh(:,:), qc(:,:), qv(:,:), qcx(:,:), qcy(:,:), &
20 qccx(:,:), qccy(:,:), qccf(:,:), qccf(:,:), &
21 q.a(:,:), qcc.a(:,:), qcc.f(:,:)
22 real(8), allocatable :: qin0(:,:), cin0(:)
23 integer, allocatable :: iacc(:,:), ibasin(:,:), idir(:,:), ifld(:,:)
24 real(8) :: dx, dy, dt, qdt, dout.time, fout.time, xllcorner, yllcorner, cellsize, &
25 dm, csta, cstad, pf, pc, rhov, sig, tanp, coh.tmp, ks, rn, hlum
26 real(8) :: time, time0, time1, end.time, dt0, dtmin, &
27 x, y, flxd, umax, vmax, h, umax, h, vmax, tmp, usmax, vsmax, &
28 qin, cin, q.out, qcc.out, qcf.out
29 integer :: iend, jend, itsp_max, itsp_dout, itsp_fout, qnum, itsp_q
30 integer :: i, j, k, itsp, itr, l, umax, j, umax, l, vmax, j, vmax
31 integer :: ijofs.uv(8,0:4,2)= & ! see subroutine cal_u
32 reshape((/0, 0,-1,-1, 0, 1, 1, 0, 0 & @ case0 i=1.4,j=5:8
33 -0,1, 0, 0, 0, 0, 0,-1 & @ case1 i=1.4,j=5:8
34 -0,1, 0, 0, 0, 0, 1, 0 & @ case2 i=1.4,j=5:8
35 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0,-1 & @ case3 i=1.4,j=5:8
36 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0 & @ case4 i=1.4,j=5:8
37 0, 1, 1, 0, 0, 0,-1 & @ case0 i=1.4,j=5:8
38 0, 0,-1, 0,-1, 0, 0 & @ case1 i=1.4,j=5:8
39 0, 0, 1, 0,-1, 0, 0 & @ case2 i=1.4,j=5:8
40 0, 0,-1, 1, 0, 0, 0 & @ case3 i=1.4,j=5:8
41 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0 & @ case4 i=1.4,j=5:8
42 /), (/8,5,2/)) ! 0:4 -> 5
43 integer, allocatable :: ij.cv(:,:), ij.u(:,:), ij.v(:,:), ij.u.we(:,:), ij.v.sn(:,:), &
44 ij.w(:,:), ij.e(:,:), ij.s(:,:), ij.n(:,:)
45 integer :: n.ij.cv, n.ij.u, n.ij.v, n.ij.u.we, n.ij.v.sn, &
46 n.ij.w, n.ij.e, n.ij.s, n.ij.n
47 ! -> Id
48 integer, allocatable :: ij.1d2d(:,:), i.vin(:,:), i.1d(:,:)
49 real(8), allocatable :: xy.1d2d(:,:), va.in0(:,:), vcc.in0(:,:), vcf.in0(:,:), &
50 va.in(:,:), vcc.in(:,:), vcf.in(:)

```

図-6 土木研究所資料で公表したソースコードの例⁸⁾

調査における使用も視野に入れた場合、グラフィカルな環境での操作を可能とすることが望ましい。そこで、DFSSを国土交通省が運用している火山噴火リアルタイムハザードマップシステム⁹⁾へ機能付加することを想定し、GUI(Graphical User Interface)での操作が可能なシステムの開発を進めている。

また、これまでに本モデルを適用した地域以外の土石流災害のデータも用いて更なるモデルの検証を行い、改良に取り組んでいく。併せて、本モデルはQUADと比べて現象を精緻に表現可能であることから、DFSSはQUADよりも計算に時間を要するため、更なる計算の高速化を図る等の改良も加えていく予定である。

5. まとめ

本報告では土木研究所が開発した新たな土石流の流出・氾濫解析モデルと解析プログラムについて、下記概要のとおり紹介した。

- 本解析モデルでは降雨流出過程および土石流発生・流下・氾濫過程を一体化した数値シミュレーションが可能である。
- 降雨流出過程において、表層と下層にそれぞれ浸透能を設定することが可能である。
- QUADで必要だった氾濫開始点の位置とハイドログラフの設定が不要である。
- 本解析モデルによる数値シミュレーションプログラムはオープンプログラムとし、ソースコードを公表した。これにより著作権表示や改変時のライセンス継承が必要であるが、ソースコードの自由な改変が可能であり、利用の制限もない。

土木研究所では、今後も本モデルおよびプログ

ラムの発展的な改良にも取り組みながら土石流による被害の防止軽減のための研究を進めていく。

謝 辞

本報告の一部は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「国家レジリエンス（防災・減災）の強化」（管理法人：国立研究開発法人防災科学技術研究所）によって実施された。

参考文献

- 1) 池谷浩、石川芳治：1992年8月雲仙普賢岳に発生した土石流（速報）、砂防学会誌、第45巻、第3号、pp. 52～56、1992
- 2) 国土交通省：土砂災害防止対策基本指針、<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sabo/content/001357554.pdf>、2022.05.09参照
- 3) 清水武志・高橋佑弥・藤村直樹・石井靖雄：土石流・掃流状集合流動・掃流砂流の氾濫に関する並列計算オープンソースプログラムの開発、土木研究所資料、第4415号、2022
- 4) 内田太郎・山越隆雄・清水武志・吉野弘祐・木佐洋志・石塚忠範：河道閉塞（天然ダム）及び火山の噴火を原因とする土石流による被害範囲を速やかに推定する手法、土木技術資料、第53巻、第7号、pp.18～23、2011
- 5) 清水武志・内田太郎・山越隆雄・石塚忠範：天然ダムによる土石流想定範囲計算システム（QUAD-L）の開発と2011年台風12号災害における適用、土木技術資料、第54巻、第10号、pp.14～17、2011
- 6) 佐々木美紀：平成23年霧島山（新燃岳）噴火とその後の対応について、砂防学会誌、第66巻、第5号、pp.88～91、2014
- 7) 上田英樹・廣瀬郁・松澤孝紀・三輪学央・長井雅史・河野裕希：JVDN システムの開発の経過、日本火山学会講演予稿集、2020
- 8) 山崎祐介・清水武志・石井靖雄・石田孝司：降雨流出解析と連動した土石流の流出・氾濫解析法、土木研究所資料、第4419号、2022
- 9) 国土交通省：報道発表資料、<https://www.mlit.go.jp/common/001254562.pdf>、2022.05.24参照

今森直紀



土木研究所 土砂管理研究グループ火山・土石流チーム 主任研究員
IMAMORI Naoki

清水武志



土木研究所 土砂管理研究グループ火山・土石流チーム 研究員
SHIMIZU Takeshi

山崎祐介



研究当時 土木研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム研究員、博士（農学）、現日本工営㈱
Dr. YAMAZAKI Yusuke

石田孝司



土木研究所 土砂管理研究グループ火山・土石流チーム 上席研究員
ISHIDA Kouji