

◆ 報 文 ◆

統合型の水文・斜面安定モデルによる土砂災害発生予測

内田太郎* 秋山一弥** 小山内信智***

1. はじめに

最近では地球規模の気象観測や数値モデルの高度化等によって、降雨予測の精度向上が図られてきている。今後、これらの高時空間分解能の降雨予測情報を土砂災害に対する防災計画、土砂管理計画に有効に活用するためには、土砂生産予測モデルの時空間分解能も向上させる必要がある。一方、これまで表層崩壊の発生箇所や時刻など、土砂生産に関する予測手法として提案された方法は、過去の災害実績に基づく経験的な手法が多い。これらの手法は、植生、地質、地形など場の条件や、先行降雨量、降雨波形など誘因となる条件が多様な土砂災害に適用するには限界がある。

土砂生産の予測モデルの分野では、1980年代以降、土砂移動現象をコントロールする表面流、鉛直浸透、飽和側方流などの雨水から流出に至る過程に関するモデルや、雨滴侵食、斜面安定計算などの土砂の生産と移動現象に関する各モデルを統合した物理モデルの構築・提案がなされてきた¹⁾。また、雨水から流出までの過程、土砂の生産と移動現象に関する数多くの実験や観測が行われ、様々なモデルの改良・提案もなされてきている。

しかし、これらのモデルは個々の現象を対象としており、実際の現象との検証も十分ではなく、土砂災害に対する防災計画に活用されているとは言いがたいのが現状である。そこで本報文では、土砂生産の予測モデルが実務上利用可能となるように、物理モデルの現状と課題を分析し、土砂生産に関する各モデルを統合した予測モデルを構築し、実際の現地に適用した事例について紹介する。

2. 物理モデルの現状と課題

土砂生産予測には、様々な現象に関する数多くのモデルを組み合わせる必要があるため、その構築に多大な労力を要し、構造の全体を詳細に把握することが難しい。そのうえ、各現象に対して数多くのモデルが提案されており、目的や対象スケール、事象にあった最適なモデルを抽出するのが困難な状態である。

近年、KINEROS (<http://www.tucson.ars.ag.gov/kineros/>) などの表面侵食予測モデルや、

CHASM (<http://www.chasm.info/>) などの表層崩壊予測モデルといった各現象の推定手法を組み合わせた「パッケージ化されたモデル」が公開されている。しかし、多岐にわたる現象や様々な場の条件、降雨の時空間分解能に応じた各現象を最適に説明できるモデルや、各モデルの組み合わせを選択できるシステムは構築されていないのが現状である。

3. 統合した土砂生産予測モデルの作成

多くのモデルを組み込んでシステム化を図るために、統一の規格・コンピュータ言語を用いて、従来から提案されている土砂移動現象を表す過程について、数値計算手法のプログラム化を行った。

また、近年明らかになった斜面水文の理論を取り入れ、1つの現象を対象とした複数のモデルから目的に応じて自由に選択し、各現象のモデルを組み合わせることが可能で、新たに提案されたモデルも随時追加できる型式とした。

さらに、全国の地形や降雨に関して詳細な情報として提供されているメッシュデータが活用可能なシステムとして開発を行った。

図-1に本システムの構造を示す。システムは①メッシュ作成モデル、②雨水-流出モデル、③表面侵食モデル、④表層崩壊モデル、の4モデルからなり、②~④のモデルは2~4つのサブルーチンからなる。各サブルーチンは複数の計算手法から選択可能なように構成した。プログラミングした各モデルは表-1のとおりである。

4. 作成したモデルの実測事例への適用性

はじめに滋賀県田上山地の不動寺流域に設定した試験斜面において、水理パラメータを現地試験や室内試験で決定し、水文観測結果を対象として、雨水-流出モデルの再現性を検討した。その水理パラメータを用いて、実際の土砂災害事例に関して雨水-流出モデルと表層崩壊モデルの性能を検証した。土砂災害の再現対象は平成11年広島災害で、崩壊が発生し、土壌水分観測を行っている広島市佐伯区荒谷川流域の崩壊斜面とした。

4.1 試験斜面における水文観測結果への適用

滋賀県田上山地の不動寺流域に設定した試験斜面(0.1ha)において、雨水-流出モデルを適用した事例を以下に述べる。不動寺流域では図-2

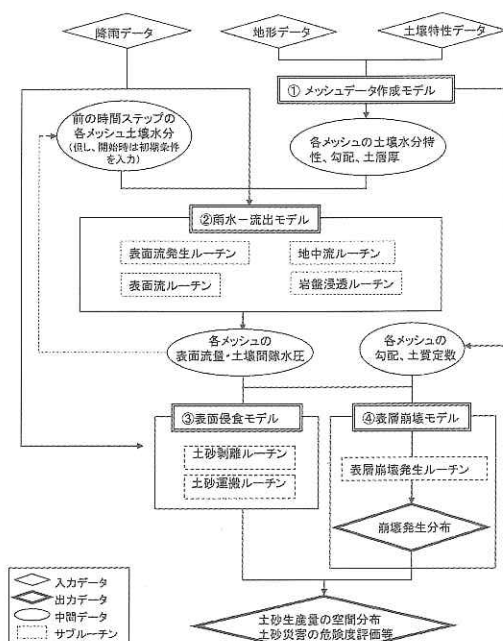


図-1 統合型土砂生産予測モデルの概要

表-1 プログラミングで利用した手法

モデル	サブルーチン	計算手法
①メッシュデータ作成モデル		正方形メッシュ作成
②雨水-流出モデル	(1) 表面流発生ルーチン (2) 表面流ルーチン (3) 地中流ルーチン (4) 岩盤浸透ルーチン	Smith-Parlangeの式 ³⁾ 2次元浅水流モデル 2次元キネマティックウェーブモデル 1次元不飽和浸透流 (Richards) 式 + 飽和側方流 小杉らの式 ⁴⁾ + 飽和側方流 拡散方程式 ⁵⁾ 定常流モデル ⁶⁾ 一定量浸透モデル ⁷⁾
③表面侵食モデル	(1) 土砂剥離ルーチン (2) 土砂運搬ルーチン	欧らの粘性土の侵食速度式 KINEROS中の侵食速度式 ⁸⁾ 水山式
④表層崩壊モデル	表層崩壊発生ルーチン	無限長斜面の安定解析

に示すように、流域内に約7m間隔でテンシオメータを計18箇所設置し、土壌の圧力水頭を計測している。各々の観測地点では2深度（表層20cm、土壌と岩盤の境界面）の測定を実施している。

地形、土層厚分布、土壌の飽和透水係数は実測値、水分特性曲線は van Genuchten の水分特性曲線式²⁾を用いて、短時間の雨量強度が大きかった2002年7月17日の降雨時における圧力水頭の計算を実施し、実測値との比較を行った。

計算条件の基本項目は以下のとおりである。

(1) モデルで再現する現象

不動寺流域にある山地源頭部における土壌間隙

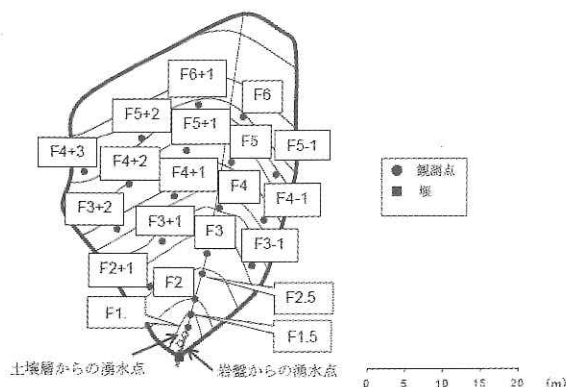


図-2 不動寺流域の地形と観測点の位置

水圧の空間分布の観測結果^{9), 10)}を対象

(2) 実測データ

降雨データ、地形（地表面標高）データ、圧力水頭データ

(3) 検証データ

圧力水頭の経時変化

(4) 計算で利用するモデルとサブルーチン

雨水-流出モデルのうち、表面流と地中流のルーチンを組み合わせたモデルの再現性

2002年7月17日の7時から10時の降雨について、10分間隔の降雨データ記録を図-3に示す。降雨は不飽和浸透して地下水面に達して地下水が上昇し、飽和側方流となって流下する。さらに、地表面付近が飽和して浸透能以上になった場合の降雨は表面流となって地表面を流下する。これらの現象を表面流と地中流（不飽和浸透、飽和側方流）の各ルーチンを連動させて再現した。

表層部は図-4のとおり谷地形であり、表層は1層構造、差分メッシュ総数は1,426セル（46行×31列×1層）である。セルのサイズ（dx及びdy）は100cmとする。表層厚は実測値から内挿したが、最低20cmを確保した。

最下流端（図-4中の丸で示した2セル）を除いた表層部セルを囲む3辺は不透水境界とした。帯水層中の水の流出入は、不圧帯水層への垂直方向のかん養（降雨）のみである。最下流端の2セル

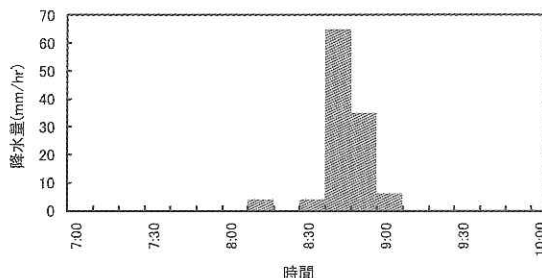


図-3 不動寺流域のハイトグラフ（2002/7/17）

(47,16)、(47,17)については、上流側からの流入量と下流側の流出量が同じとして、流出量 Q_x を $Q_x(47,16) = Q_x(46,16)$ 、 $Q_x(47,17) = Q_x(46,17)$ として算出した。

飽和側方流計算は二次元であり、その入力データを表-2に示す。また、不飽和浸透流計算は一次元であり、入力データは表-3のとおりで、これらは飽和透水係数、不飽和浸透の水分特性曲線、表層の差分構造(図-5)に関連する。

不飽和浸透の水分特性曲線で用いる飽和体積含水率(θ_s)、残留土壌水分(θ_r)等は、土質サンプルの室内実験から決定した。実験値と計算値による土壌の水分特性曲線を図-6に示す。

不飽和浸透流の計算における各層の初期飽和度については、まずすべての層で飽和度0.7を与え、無降雨条件の下での定常計算を行い、その分布を求めた。一方、飽和側方流の計算における地下水深は飽和度1.0に相当する水深とした。その後10時間程度無降雨の状態、雨水-流出モデル(表面流と不飽和浸透流・飽和側方流計算を合わせた地中流ルーチン)によって非定常計算を行い初期

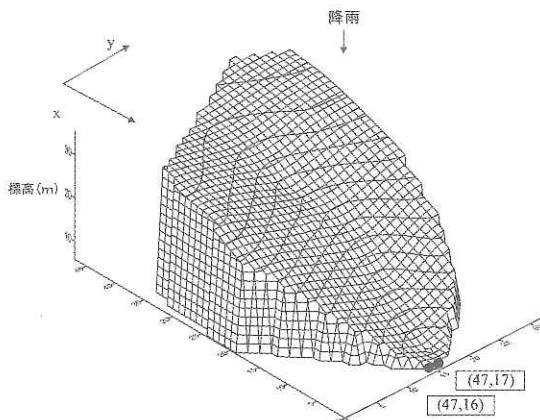


図-4 不動寺流域の標高

表-2 飽和側方流計算(二次元)の入力データ

差分パラメータ				
入力パラメータ	内 容	値	単 位	データ形式
imx	x方向のセルの数	46		
jmy	y方向のセル数	31		
dlx	x方向のセルの大きさ	100	cm	代表値
dly	y方向のセルの大きさ	100	cm	代表値
水理パラメータ				
入力値	内 容	値	単 位	データ形式
λ	空隙率	0.417	cm ³ /cm ³	代表値
kx	x方向の飽和透水係数	0.027	cm/s	代表値
ky	y方向の飽和透水係数	0.027	cm/s	代表値
hi	初期地下水深	0~30	cm	セル×セル
地形パラメータ				
入力値	内 容	値	単 位	データ形式
zi	標高データ	468~3,589	cm	セル×セル
D	表層土層厚	20~140	cm	セル×セル

条件とした。

土壌と岩盤の境界面において、観測で得られた圧力水頭の実測値の経時変化を図-7に示す。また、本モデルの計算による降雨ピーク出現前、降

表-3 不飽和浸透流計算(一次元)の入力データ

水理パラメータ				
入力パラメータ	内 容	値	単 位	データ形式
ks	飽和透水係数(垂直方向)	0.027	cm/sec	代表値
van Genuchten の水分特性曲線式 (Thoms, 2003)				
入力パラメータ	内 容	値	単 位	データ形式
θ_s	飽和体積含水率	0.417	cm ³ /cm ³	代表値
θ_r	残留土壌水分	0.210	cm ³ /cm ³	代表値
λ	空隙率	0.417	cm ³ /cm ³	代表値
α	土の空隙形状:長さの逆数を示す係数	0.044	1/cm	代表値
β	土の空隙形状:均等性を示す係数	1.9	-	代表値
表層の垂直差分構造				
入力パラメータ	内 容	値	単 位	データ形式
Δz	垂直方向(z方向)の単位深さ	2~14	cm	セル×セル
D	表層土層厚	20~140	cm	セル×セル

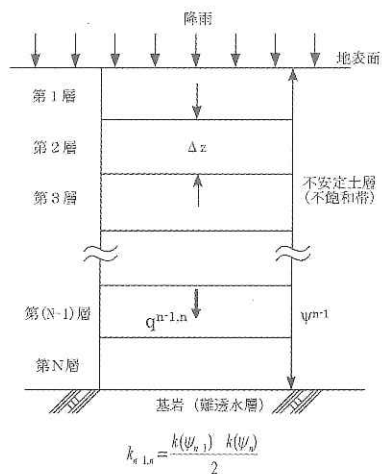


図-5 不飽和土層中の差分計算

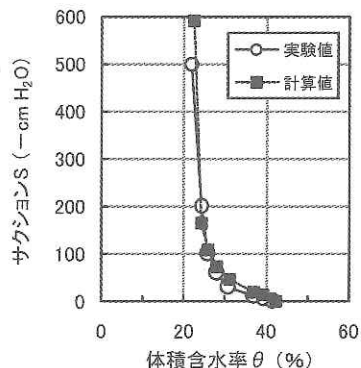


図-6 不飽和土の水分特性曲線

雨ピーク出現時間付近および降雨終了時点、計算終了時点の土壌-岩盤境界面における圧力水頭の変動を図-8に示す。

初期の圧力水頭（ここでは8:00の圧力水頭）はほぼ観測値に近い分布となった。しかし、降雨のピーク時において圧力水頭を比較すると、8:00の時点とほとんど顕著な変化がなく、降雨への反応は30分程度遅れて現れていることがわかる。これは雨量強度が大きい事例のため、観測値は降雨により圧力水頭が負圧から正圧へ急激に変化するが、本モデルでは反応は遅いものの、全体的には負圧から正圧への変化を再現しているといえる。

4.2 表層崩壊発生事例への適用

1999年6月29日に、総雨量255mm、最大時間雨量63mmの豪雨により広島市佐伯区荒谷川流域（流域面積0.0276km²）で表層崩壊が発生した。本検討ではこの土砂崩れを再現対象とする。

(1) モデルで再現する現象

モデル計算による安全率によって崩壊現象を再現

(2) 実測データ

降雨データ、地形（地表面標高）データ、基盤標高データ、表層崩壊箇所データ

(3) 検証データ

崩壊箇所と安全率分布との比較

(4) 計算で利用するモデルとサブルーチン

雨水-流出モデル（表面流・地中流のサブルーチン）と表層崩壊モデル（斜面安定解析を行う斜面崩壊発生ルーチン）を組み合わせたモデルの再現性

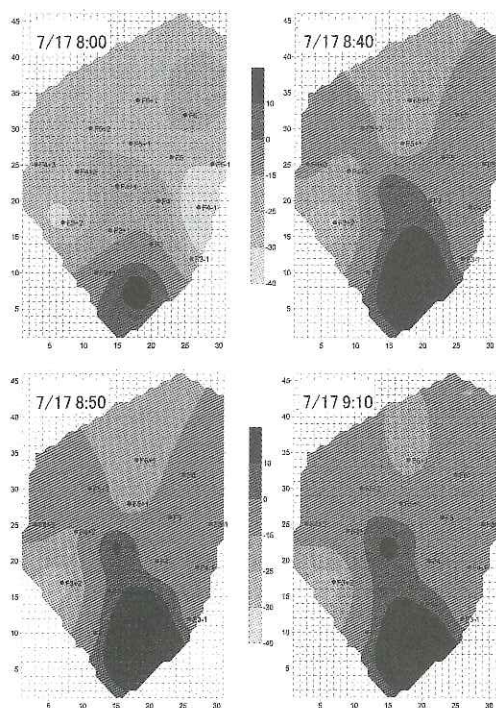
(5) 入力パラメータ

側方流計算における初期地下水深を除く各水理パラメータと、浸透流計算で用いる van Genuchten の水分特性曲線式については、滋賀県田上山地の不動寺流域の試験斜面で用いた値を使用した。

1999年6月29日の0時から18時の降雨について、1時間間隔の降雨データ記録を図-9に示す。降雨が浸透して地下水面に達して地下水が上昇、飽和側方流となって流下し、さらに地表面付近が飽和して浸透能以上の降雨は表面流となって地表面を流下する現象を、不飽和浸透流・飽和側方流計算による地中流ルーチンと、表面流ルーチンを連動させた雨水-流出モデルで再現した。

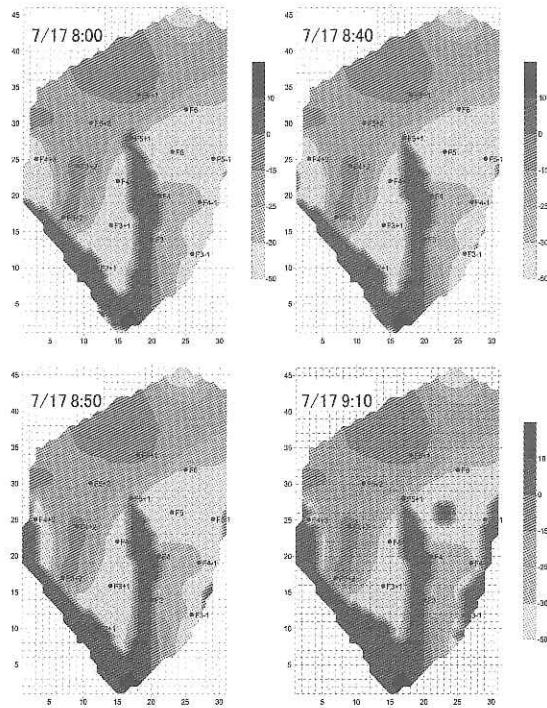
表層部は図-10のとおり谷地形であり、差分メッシュの総数は1,225セル（49行×25列）で、セルのサイズ（dx及びdy）は500cmとする。表層土厚は地表面と基盤の標高データの差であるが、最低20cmとし、その範囲は20cm～384cmである。

最下流端を除いた表層部セルを囲む3辺は不透水境界とした。帯水層中の水の流入出は、不圧帯



降雨のピーク: 8:40-50

図-7 2002年7月17日の降雨による土壌と岩盤境界面の圧力水頭（観測値）の経時変化



降雨のピーク: 8:40-50

図-8 2002年7月17日の降雨による土壌と岩盤境界面の圧力水頭（計算値）の経時変化

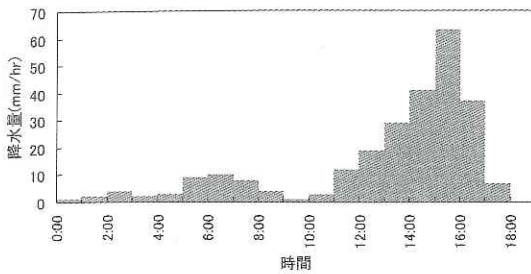


図-9 荒谷川流域のハイドログラフ (1999年6月29日)

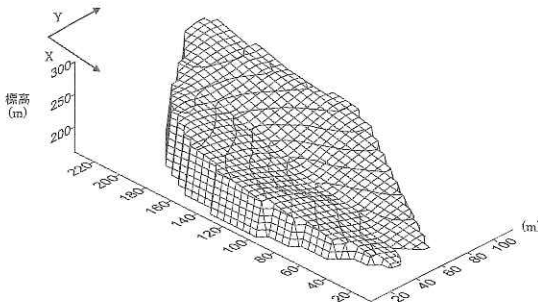


図-10 荒谷流域の標高

水層への垂直方向のかん養(降雨)のみである。最下流端の3セルについては、上流側からの流入量と下流側の流出量が同じとして、流出量 Q_x を計算した。

飽和側方流計算の入力データを表-4に示す。また、不飽和浸透流計算における入力データは表-5のとおりで、田上山不動寺流域の試験斜面と同様に、飽和透水係数、不飽和浸透の水分特性曲線、表層の差分構造に関連する。不飽和浸透流の計算における各層の初期飽和度は、まずすべての層で飽和度0.5を与え、無降雨条件の下での定常計算を行いその分布を求めた。一方、飽和側方流計算の地下水深は飽和度1.0に相当する水深とした。

次に3時間程度無降雨の状態、雨水-流出モデル(不飽和浸透流・飽和側方流計算を合わせた地中流ルーチンと表面流ルーチン)によって非定常計算を行い初期条件とした。

斜面の安定解析については、以下の無限延長斜面式を用いた。

$$F_s = \frac{C + (w - u) \tan \phi}{W \sin S}$$

ここで、 S ：斜面勾配、 F_s ：安全率、 w ：土塊の自重、 C ：土の粘着力、 ϕ ：土の内部摩擦角、 u は間隙水圧、である。計算で使った各定数は、既往の強風化岩で得られている数値から、表-6に示す値を仮定した。

崩壊が発生した正確な時刻は不明のため、降雨強度が最大となった直後の17:00における安全率

表-4 飽和側方流計算(二次元)の入力データ

差分パラメータ				
入力パラメータ	内 容	値	単 位	データ形式
imx	x方向のセルの数	49		
jmy	y方向のセル数	25		
dlx	x方向のセルの大きさ	500	cm	代表値
dly	y方向のセルの大きさ	500	cm	代表値
水理パラメータ				
入 力	内 容	値	単 位	データ形式
λ	空隙率	0.417	cm ³ /cm ³	代表値
kx	x方向の飽和透水係数	0.027	cm/s	代表値
ky	y方向の飽和透水係数	0.027	cm/s	代表値
hi	初期地下水深	0~97	cm	セル×セル
地形パラメータ				
入力値	内 容	値	単 位	データ形式
zi	標高データ	16,181~27,717	cm	セル×セル
D	表層土層厚	20~384	cm	セル×セル

表-5 不飽和浸透計算(一次元)の入力データ

水理パラメータ				
入力パラメータ	内 容	値	単 位	データ形式
ks	飽和透水係数(垂直方向)	0.027	cm/sec	代表値
van Genuchtenの水分特性曲線式(Thoms, 2003)				
入力パラメータ	内 容	値	単 位	データ形式
θ_s	飽和体積含水率	0.417	cm ³ /cm ³	代表値
θ_r	残留土壌水分	0.210	cm ³ /cm ³	代表値
λ	空隙率	0.417	cm ³ /cm ³	代表値
a	土の空隙形状:長さの逆数を示す係数	0.044	1/cm	代表値
β	土の空隙形状:均等性を示す係数	1.9	-	代表値
表層の垂直差分構造				
入力パラメータ	内 容	値	単 位	データ形式
Δz	垂直方向(z方向)の単位深さ	2~38	cm	セル×セル
D	表層土層厚	20~384	cm	セル×セル

表-6 安定解析の定数値

入力値	内 容	単 位	入力値の範囲
slope	最大傾斜角	°	6.0~50.5
zmax	表層土層厚	m	0.20~3.84
γ_w	水の単位体積重量	kg/m ³	1,000
γ_s	土の単位体積重量	kg/m ³	2,200
C	土の粘着力	N/m ²	10,000
ϕ	土の内部摩擦角	°	35

の平面分布(計算値)と、実際に崩壊が発生した箇所について図-11に示す。安全率を計算して平面分布を表した結果、実際に崩壊が発生した位置において安全率が1.0を下回る結果を得た。

5. まとめ

現地の現象や実測データを精度よく再現できるパラメータの設定が課題であるが、本システムによって各現象を説明する様々な手法を組み合わせた計算結果と、実測の水文観測結果や災害事例を

参考文献

- 1) 小杉賢一郎：斜面における雨水の浸透・流出過程のモデル化、新砂防、第57巻、第3号、pp.71-79, 2004
- 2) Thoms, R.B. : Simulating fully coupled overland and variably saturated subsurface flow using MODFLOW, A thesis for Master of Science in Environmental Science and Engineering, pp.1-130, Oregon Health and Science University, 2003
- 3) Smith, R.E. and Parlange, J.Y. : A Parameter-Efficient Hydrologic Infiltration Model, Water Resources Research, Vol.14, No.3, pp.533-538, 1978
- 4) 小杉賢一郎、水山高久、藤田正治：表層崩壊発生予測モデルによる地下水の再現制度の検討、新砂防、第55巻、第3号、pp.21-32, 2002
- 5) Iverson, R.M. : Landslide triggering by rain infiltration, Water Resources Research, Vol.36, No.7, pp.1897-1910, 2000
- 6) Montgomery, D.R. and Dietrich, W.E. : A physically based model for the topographic control on the shallow landsliding, Water Resources Research, Vol.30, pp.1153-1171, 1994
- 7) 平松晋也、水山高久、石川芳治：雨水の浸透・流下過程を考慮した表層崩壊発生予測手法に関する研究、第43巻、第1号、pp.5-15, 1990
- 8) Smith, R.E., Goodrich, D.C. and Quinton, J.N. : Dynamic, distributed simulation of watershed erosion -The KINEROS2 and EUROSEM models, Journal of Soil and Water Conservation, Vol.50, NO.5, pp. 517-520, 1995
- 9) Uchida, T., Asano, Y., Ohte, N. and Mizuyama, T. : Analysis of flowpath dynamics in a steep unchannelled hollow in the Tanakami Mountains of Japan, Hydrological Process, Vol.17, No.2, pp.417-430, 2003
- 10) 西口幸希、内田太郎、水山高久、小杉賢一郎：山地源頭部における土壌間隙水圧の空間分布の観測、新砂防、第57巻、第5号、pp. 53-58, 2005

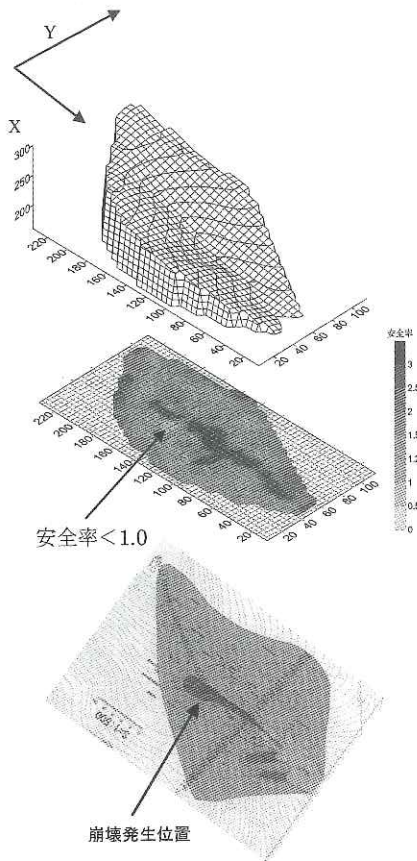


図-11 モデル計算による安全率の分布と実際の崩壊との関係

比較することができる。多数の検証を行うことで、土砂生産予測に関する物理モデルの課題や、目的、対象とする期間、地域ごとに最適な計算手法組み合わせや適用性が明らかになると考えられる。

今後はシステムを一般的に利用可能な形として改良し、土砂災害の発生箇所や時刻を予測可能なシステムを作成し、土砂災害のソフト・ハード対策に活用する予定である。

内田太郎*



独立行政法人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(前 国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター砂防研究室研究官)、博士(農学)
Dr. Taro UCHIDA

秋山一弥**



国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター砂防研究室主任研究官
Kazuya AKIYAMA

小山内信智***



国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター砂防研究室長、農博
Dr. Nobutomo OSANAI