

土石流数値シミュレーションの一次元計算領域と二次元計算領域の設定方法の検討

ー GIS と連携した Hyper KANAKO システムを活用してー

中谷 加奈*・美土路 哲也**・堀内 成郎**・里深 好文***・水山 高久*

Setting method of 1-dimensional area and 2-dimensional area boundaries in debris flow numerical simulation: using the Hyper KANAKO system equipped with a GIS platform

Kana NAKATANI*, Tetsuya MIDORO**, Shigeo HORIUCHI**,
Yoshifumi SATOFUKA*** and Takahisa MIZUYAMA*

Abstract

Debris flow numerical simulation is effective for hazard mapping and disaster prevention. One-dimensional (1D) simulations are usually applied in steep upstream areas, whereas two-dimensional (2D) simulations are often applied in low-slope downstream areas. We applied debris flow simulation on two torrents, one in the Ibi area of Gifu Prefecture, where a large-scale sediment disaster had occurred in 1895, and one in Izu Oshima, where a large debris flow occurred in 2013. We used the usual method, setting a 1D area for the steep torrent, and a new method, setting a 2D area from the upstream steep area. We used the Hyper KANAKO, a GIS-equipped debris flow simulation system. The new method described the torrents well, especially for the Izu Oshima disaster, where an undulating surface exists from the steep area and large scale debris flow occurs.

キーワード：土石流，数値シミュレーション，Hyper KANAKO，計算領域，伊豆大島，揖斐

Key words：debris flow, numerical simulation, Hyper KANAKO, simulation domain, Izu Oshima, Ibi area

* 京都大学大学院農学研究科
Graduate School of Agriculture, Kyoto University

** 株式会社パスコ
Pasco Corporation

*** 立命館大学工学部都市システム工学科
Department of Civil Engineering, College of Science
and Engineering, Ritsumeikan University

1. はじめに

土石流数値シミュレーションは、土石流の機構に関する研究により得られた知見に基づき、設定された地形や供給ハイドログラフなどの条件下で、土石流の発生・流動・堆積・氾濫過程や砂防構造物の機能評価などを表現するものである。多様な条件下で実施でき、観測や現地調査および室内実験の結果からは知りえない情報を提供する利点を持ち¹⁾⁻³⁾、国内外で多数のモデルやプログラムが提案^{例えば4)-10)}されている。

最近では流木の挙動や透過型堰堤の閉塞の検討において粒子法^{例えば11), 12)}や個別要素法^{例えば13), 14)}の適用も進んでいるが、時間・空間的な制約があるため、現状では限定された領域での適用が殆どである。実務や研究では、土石流を混合流体として、その運動を固定した計算点上に配置した物理量の変化で表現する格子法と呼ばれる数値解析法が利用されることが多く⁴⁾⁻⁹⁾、土石流の発生・流動から下流への氾濫・堆積の一連の挙動を容易に表現することができる。

土石流数値シミュレーションで格子法を適用する際に、急峻な谷部では一次元計算領域として、谷出口などの緩勾配の扇状地では流下方向だけでなく横断方向への広がりを考慮した二次元計算領域として設定するのが一般的である^{15), 16)}。これまでは谷部の急勾配領域と、氾濫・堆積の起こる緩勾配領域が比較的明瞭に区別できる溪流についての検討が実施されており、土石流発生事例においても谷部では土石流が溪流内を流れることが殆どであった。しかし、平成25年10月に発生した伊豆大島の土石流災害では¹⁷⁾、比較的上流から横断方向に広がったり複数方向の流下が確認されて、従来のような谷出口を一次元領域と二次元領域の境界とする手法では表現できないような現象（溪流から溢れ出す、流域を越える）が発生している。

本検討では、既往の土石流数値シミュレーションをレビューして境界の設定方法について整理した。次に伊豆大島土石流災害と、過去に大規模な土砂移動が発生した揖斐川の溪流について、GISと連携したHyper KANAKOシステム¹⁸⁾を適用した。一次元計算領域と二次元計算領域の境界につ

いて、従来の谷出口を境界とする手法、並びに急勾配の上流部から二次元領域を設定する手法で数値シミュレーションを実施して、その違いを検証した。

2. 既往の土石流数値シミュレーション

格子法での土石流数値シミュレーションについて、土石流の発生・流動領域としての急勾配の山地河川の一次元領域と、横断方向にまで流動・堆積が広がる緩勾配の扇状地の二次元領域の計算手法ならびに境界の設定方法について示す。なお、一次元領域だけを対象として土石流の溪流からの流出量や砂防施設の効果を検証する手法や¹⁹⁾、二次元領域だけを対象として氾濫・堆積過程を解析するシステム^{10), 20)}も存在するが、本検討では土石流の発生・流動域の上流を一次元領域として、下流の氾濫・堆積が生じる緩勾配を二次元領域として上流から下流までを一連の計算で行う手法を対象とする。これは、筆者らは汎用シミュレータの開発を目指しており、多様な条件（地形、土石流の規模、砂防施設、範囲、時間）や目的（例えば、施設の配置や効果の検討、複数シナリオの災害予測、時間・空間的な制約下での計算など）に応じて、ユーザーが計算方法を選択できるように、一次元と二次元を組み合わせたシステムが合理的だと考えるためである。

2.1 一次元領域と二次元領域を別個に計算する手法

高橋・中川は¹⁵⁾ 溪床に沿って洪水流量の変化あるいは崩壊土砂の供給条件を与えることで、溪床堆積物が侵食・堆積して発生する土石流ハイドログラフ並びに土砂濃度の時間的変化を予測する一次元的解析と、一次元解析で得られた結果を谷出口の境界条件として扇状地上における氾濫・堆積過程を二次元的に解析する総合的なシミュレーション法を提案した。この手法は岐阜県洞谷で発生した土石流災害事例に適用されて、その妥当性も確認されており、従来はこのように急勾配の山地溪流を一次元解析で、緩勾配の扇状地を二次元解析で別個に分けて解析する手法が用いられてい

た。

2.2 一次元領域と二次元領域を接続して計算する手法

従来、下流の氾濫領域までを検討する土石流シミュレーションには、2.1 で示した手法が採用されてきた。しかし、この手法では上流の一次元領域から下流の二次元領域への影響は伝わるが、下流の二次元領域から上流の一次元領域への影響は伝わらない一方の関係となっている。一次元領域と二次元領域の境界部で顕著な土砂堆積が生じるような場合には合理的な計算が実施できない。

和田ら¹⁶⁾は前述した問題を解決するために、一次元領域と二次元領域の計算を連動させ、二次元上流域での流動深や堆積厚を一次元下流端へとフィードバックすることによって、境界部において双方向に連携のとれた「結合モデル」を開発した。結合モデルを用いて、汎用土石流シミュレータ Kanako2D が開発され、土石流災害事例への適用や効果的な砂防施設の検討、土石流が発生した場合の氾濫・堆積状況の検証などがこれまでに実施されている²¹⁾。

2.3 一次元領域と二次元領域の境界の設定方法

2.1 や 2.2 で挙げたいずれも、山間部で流れ方向のみに拘束される一次元領域と、流れ方向だけでなく横断方向に流れが広がることのできる二次元領域を、いわゆる谷出口を境界として区分して計算する手法である。

(1) 従来の設定方法と課題

この境界は、土石流対策計画において計画基準点あるいは氾濫開始点として保全対象の上流等に設けるとされており²²⁾、技術者が対象溪流について地形状況や人家等の立地状況あるいは既往災害実績などを総合的に踏まえて判断するものである。土石流発生事例について検討する際、広島県宮島白糸川²³⁾、山口県防府市石原²⁴⁾で発生した土石流は、谷部と氾濫・堆積域の境界が比較的明瞭であったことから、土石流数値シミュレーション

を実施する際に一次元領域と二次元領域を設定しやすい²¹⁾。一方で、氾濫開始点を変えることで下流の家屋の被災範囲を判定する精度が異なることも明らかとなってきた²⁵⁾。

しかし、伊豆大島で発生した土石流では、谷部と氾濫・堆積領域を明確に区分するのが難しい。崩壊直下の流動が開始したと考えられる上流部においても、大規模な土砂流出であったことや谷が浅かった地形的要因のためか、流下方向だけでなく横断的に流れや土砂移動が広がっており、一部ではオーバーフローまでが見られるなど、この領域を流動域であることを理由に一次元で解析することは現象に即しているとは言い難い。また、伊豆大島災害を受けて、氾濫開始点を設定する際に統一的な考え方で設定できるよう、谷の縦断勾配や保全対象の位置、過去の実績や地形形状などを提示する等の見直しも進んでいる^{26), 27)}。

(2) 技術的な制約と発展

土石流数値シミュレーションを実施する際に、従来は一次元領域と比べて二次元領域は計算に要する時間が長く、計算領域や計算時間が大きいほど、一つの計算にかかる時間が数日を要する場合がある等非常に長かったことも、二次元計算領域をあまり大きく設定しなかった理由の一つに挙げられる。しかし、計算機の性能向上に伴い、最近では二次元領域の土石流計算も数～数十分程度で実施できるまでに短縮されている。計測技術の限界もあり、急勾配の山間部ではこれまで植生の影響等から、下流の開けたエリアと比較して精度のよい地形データを得られなかったことも、上流部において二次元解析を実施できなかった理由の一つに挙げられる。近年では、計測技術が著しく発達したことから、山間部でも航空レーダや斜め写真等から詳細な地形データを入手することが可能になっている¹⁷⁾。

2.4 本研究の目的と手法

このように、一次元領域と二次元領域の境界の設定方法における課題が明らかとなったことから、従来と境界の設定を変えた場合の検証が必要

となった。また、これまでの二次元計算領域を上流側にまで拡大できなかった技術的な制約が解消されてきたことから、計算を実施するための手法や地形データ等が整備されつつある。

本検討では、結合モデルを採用した、航空レーザー測量データ (LP データ) や国土地理院の数値標高データを地形条件として入力できる GIS と連携した Hyper KANAKO システムを適用して、3 章以後で検討を実施した。

地形条件として、土石流が渓流を越える事例として伊豆大島を、渓流内を流れる事例として揖斐川を検討対象とした。また、上記のように砂防施設の機能評価には流量・流砂量を指標とするため一次元計算で扱うことが殆どであったが、計算領域の設定方法の違いが施設効果の検証に及ぼす影響についても揖斐川の事例で検討した。境界の設定方法を変えた場合と従来の方について比較して、計算結果の再現性及び妥当性について検討することを目的とした。

3. 伊豆大島を対象とした土石流数値シミュレーション～平成 25 年 10 月に発生した土石流災害～

平成 25 年台風 26 号によって伊豆大島では 24 時間雨量が 800mm を越える豪雨が記録され、10 月 16 日未明に大金沢で大規模な土石流が発生し、死者・行方不明者 39 名、全壊家屋 73 戸等の甚大な被害をもたらした¹⁷⁾。土石流は、崩壊土砂が多量の水を含んで流動化して発生し、規模も極めて大きく、崩壊地以外の支渓からも豪雨によって多量の水が流下して本川の土石流に合わさったため下流での被害が更に大きくなった。また、伊豆大島の火山山麓特有の緩い尾根や凹凸の多い地形条件や、細粒分を多く含む高い流動性から、流れが複数の方向に流下し、低い尾根を乗り越え、渓流からオーバーフローし、分流・合流を繰り返して流下した。崩壊に伴い流木化した立木とともに、土石流の流下で巻き込まれた立木も流木となって多量に流下して、家屋等への被害が甚大となるとともに、流木が暗渠や橋梁を閉塞して、流下方向を変えて氾濫範囲を拡大させ被害を大きくした。

本章では、一次元領域と二次元領域の境界の設定方法を変えて、またハイドログラフを 2 ケース想定して、Hyper KANAKO で土石流数値シミュレーションを実施した。

3.1 計算条件

伊豆大島では火山地域に特有の細粒分が多い一方で、中間径が少なく大粒径が存在した。本計算では、災害後の調査から大金沢本川堆積工上流の鋼製スリット堰堤で堆積した巨礫も含めた粒径として、代表粒径を 0.2m に設定した。また、細粒分が多く含まれることから、流体相の密度は $1,200\text{kg/m}^3$ を採用した。

計算に用いたパラメータは Table 1 に示す。地形データは災害前に国土地理院が取得していた数値データを利用した。

(1) 一次元領域と二次元領域の設定方法

境界の設定位置を変えた 2 ケースで地形を設定した。

伊豆大島で発生した土石流は、流動が開始したと考えられる崩壊直下の上流部でも、流下方向だけでなく横断方向にも流れが広がっていることから、最上流の一部 (約 250m) のみを一次元領域として設定し、流動が始まった領域から河口までを全て二次元領域として Fig.1 のように設定し

Table 1 Simulation parameters

Parameters/Variables	Value	Unit
Simulation time	1200	s
Time step	0.01	s
Diameter of material	0.2	m
Mass density of bed material	2650	kg/m^3
Mass density of fluid (water and mud, silt) phase	1200	kg/m^3
Concentration of movable bed	0.6	
Internal friction angle	35	deg
Acceleration of gravity	9.8	m/s^2
Coefficient of erosion rate	0.0007	
Coefficient of deposition rate	0.05	
Manning's roughness coefficient	0.03	$\text{s/m}^{1/3}$

た。

背景は災害後に撮影されたオルソ画像で、大金沢堆積工や被害の大きかった神達地区、元町地区の場所を示し、土木研究所の報告で示された流下範囲を白線で併せて示す。二次元領域は計算メッシュ 10m × 10m、流下方向に 202 点、横断方向に 104 点である。一次元領域は、計算点数 51 点、計算点間隔 5m、河道幅 10m とした。土石流の発生・流下域で侵食深が浅かったことから¹⁷⁾、一次元領域、二次元領域とも初期状態において移動可能土砂（不安定土砂）は設定していない。この地形を landform1 とする。

また、従来用いられる氾濫開始点（ここでは大金沢川堆積工の下流付近）を一次元領域と二次元領域の境界とした条件も Fig.2 の様に設定した。二次元領域は計算メッシュ 10m × 10m、流下方向に 102 点、横断方向に 104 点である。一次元領域は、計算点数 230 点、計算点間隔 5m、河道幅 10m とした。一次元領域、二次元領域とも初期状態において移動可能土砂は設定していない。この地形条件を landform2 とする。地形条件の変更

に伴って、一次元領域、二次元領域の計算点数が変わっただけで、他の計算に使用するパラメータは Table 1 と同じである。

landform2 で設定した一次元領域について、Fig.3 に縦断図を（landform1 の一次元領域も表示）、Fig.4 に地形図を示す。縦断勾配は 8° 程度と比較的大きいが谷が明瞭でなく起伏が小さい。

(2) 供給ハイドログラフ

供給ハイドログラフは、調査報告等^{17), 28)}を参考に、Fig.5 のようにピーク流量 500m³/s、ピーク継続時間 600 秒、土砂濃度 30% で設定した。これを hydro1 とする。通常、想定されるような規模の小さな土石流であれば、ピーク流量は数十～百 m³/s で継続時間も数分であることが多いが²⁹⁾⁻³¹⁾、hydro1 はそれより継続時間も長くピーク流量も大きい。そこで、Fig.6 のようにピーク流量を 100m³/s、ピーク継続時間を 300 秒として、総流量及び総土砂量は hydro1 の 1/10 となる hydro2 について検討を実施した。土砂濃度は hydro1 と同じ 30% である。



Fig. 1 Setting landform data (landform1, set 2D area from upstream)



Fig. 2 Setting landform data (landform2, usual method)

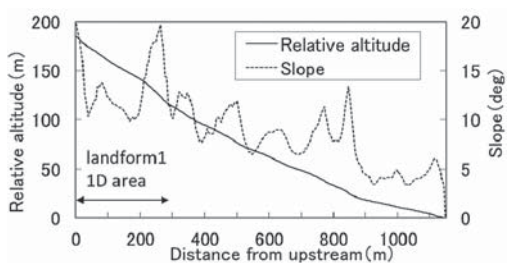


Fig. 3 Longitudinal profile of landform2 1D area (landform1 1D area show as arrow)



Fig. 4 Contour map of landform2 1D area (This background map data is distributed from Digital Japan Web System)

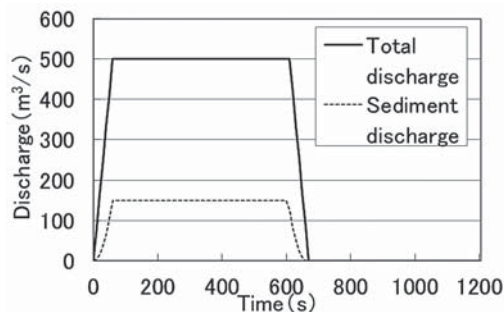


Fig. 5 Supplied hydrograph (hydro1)

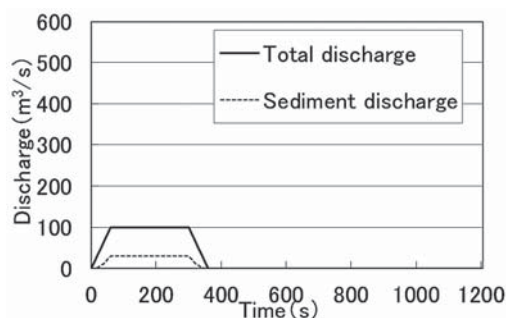


Fig. 6 Supplied hydrograph (hydro2)

(3) 計算ケース

2つの地形条件、並びに2つの供給ハイドログラフの設定方法で、Table 2に示す4ケースを計算した。

3.2 計算結果

Fig.7-Fig.10は計算期間に現れた最大痕跡（流動深+堆積厚の最大値）を示している。最大痕跡を前述のように定義したのは、堆積が生じると地形が変化して河床高が初期状態から変わるため、流動深を示すだけでは氾濫等の痕跡がうまく表現できないためである。堆積が発生しない箇所では痕跡は最大流動深となる。なお、仕様上10cm未満の痕跡は示されないため、一部で不連続に痕跡が見られるが、実際には数cmの痕跡が確認されている。

結果から、Case1が最も災害後の状況と対応がいい。上流では大金沢堆積工で3m程度の痕跡も見られ、これは堆積工上流に土砂が堆積したこと

Table 2 Simulation cases

Case	Landform	Supplied hydrograph
Case1	landform1 (setting 2D area from upstream)	hydro1 (large)
Case2	landform2 (usual method)	hydro1
Case3	landform1	hydro2 (small)
Case4	landform2	hydro2

や、堆積工の上流で5m程度の侵食跡が災害後に見られたこととも対応する。

更に、堆積工の上流で流れが二方向に分かれて、一部は神達地区に流れたこともわかる。神達で大きな被害が生じたのは、主には今回の検討で対象としなかった左支川からの流入によるものだが、一部は本川からの土石流が合わさったことも災害拡大の要因と考えられており、この点でもよく表現している。下流では、地盤高の低い流路沿いで大きな痕跡が見られる点や、元町地区の河口近くで道路沿いに流れが右岸方向へ広がった点まで再現されている。

境界を氾濫開始点に設定したCase2では、堆積工の上流で5m以上の大きな痕跡は見られるが神達地区への流入は地形の設定条件上表現できない。また、境界から下流では二次元領域となって横断方向へ広がることのできる影響で二次元領域の上流で広く3m程度の痕跡が見られるが、その下流では概ね流路沿いに1-3mの痕跡が見られるだけで右岸側まで広がった災害状況やCase1の結果とは大きく異なる。境界の設定方法による違いが大きく見られた。

境界は上流に設定するが、小さいハイドログラフを供給したCase3では、堆積工の上流で二方向に流れは分かれるが、神達地区までは到達しない。また、堆積工より下流では概ね流路沿いに沿って50cm~1mの痕跡が見られるが、元町の下流で少し右岸側に広がって10cm程度の痕跡が存在する。この規模の土石流であれば、流路沿いの一部の家屋に水・土砂が付く程度であったと推測される。

境界を氾濫開始点にとり、供給ハイドログラフを小さくしたCase4ではCase2と同様に、二次元

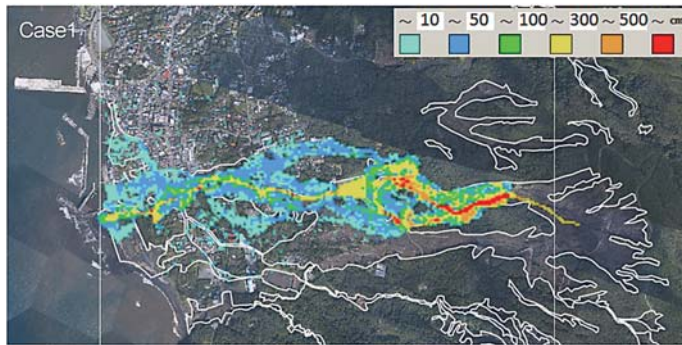


Fig.7 Result of maximum trace (flow depth plus deposition) during simulation in Case1 (landform1, hydro1)

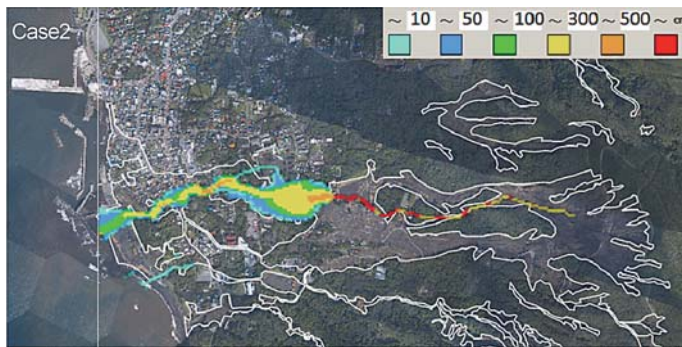


Fig. 8 Result of maximum trace (flow depth plus deposition) during simulation in Case2 (landform2, hydro1)

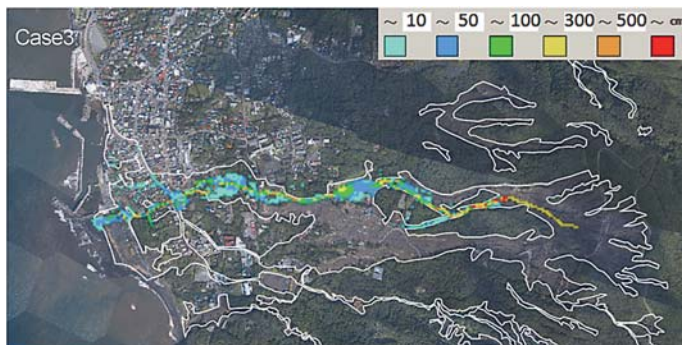


Fig.9 Result of maximum trace (flow depth plus deposition) during simulation in Case3 (landform1, hydro2)

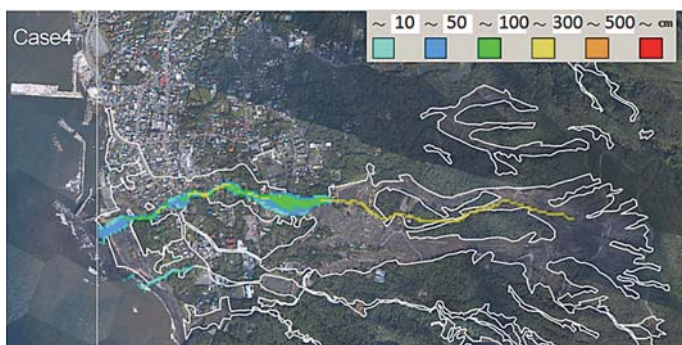


Fig.10 Result of maximum trace (flow depth plus deposition) during simulation in Case4 (landform2, hydro2)

領域の上流で横断方向に痕跡が広がる様子が見られた。その下流では流路沿いに50cm～1mの痕跡が見られ、元町の河口付近での右岸側への広がりにはCase3と比べて小さい。

一方でCase1とCase2の結果の違いは、Case3と比較して痕跡が発生した範囲は大きく異なる。この規模であれば、大規模な土石流として設定したhydro1の場合よりは、境界位置が及ばず影響は小さい。

元町橋付近 (Fig.1でMotomachiの下に示す矢印) から左岸側の河口付近で痕跡が見られる点はCase1, 3とCase2, 4では異なる。Case1, 3と範囲が異なるのは、この地点まで到達する流量が異なる (landform2の方がlandform1よりも大きい) ことや、landform1では流路内だけでなく横断方向にも広がっており、landform2では殆どが流路内を流れていた影響と推測される。

伊豆大島の計算結果からは、起伏が小さい地形では境界の設定方法が結果に影響すること、今回のような流域を超えるような災害規模では上流から二次元領域とする方が実災害と対応すること、一方で小さい規模の土石流を供給した場合であれば境界の設定方法はそれほど大きく影響しないことが明らかとなった。

4. 揖斐川を対象とした土石流数値シミュレーション～砂防堰堤を設置～

大規模土砂災害が発生した場合のシナリオを仮定して、揖斐川の一溪流を対象とした土石流数値シミュレーションを実施した。このエリアには、ナンノ谷大崩壊と呼ばれる大規模崩壊跡がある。この崩壊は明治28年8月5日に発生し、崩壊土量は153万 m^3 と記録されている。崩壊発生の1週間前から続いた長雨や、7月29-30日の豪雨によって下流河川でも洪水被害が発生した。溪流はV次谷となっており、谷出口に既設堰堤が設置されており、堆砂敷よりも上流は硬岩が露頭している。河床材料は中小礫が多く1m以上の巨礫は少ない。

本章でも、一次元領域と二次元領域の境界の設定方法を変えて、また既設堰堤が存在するため堰

Table 3 Simulation parameters

Parameters/Variables	Value	Unit
Simulation time	1800	s
Time step	0.01	s
Diameter of material	0.015	m
Mass density of bed material	2600	kg/m ³
Mass density of fluid (water and mud, silt) phase	1000	kg/m ³
Concentration of movable bed	0.6	
Internal friction angle	35	deg
Acceleration of gravity	9.8	m/s ²
Coefficient of erosion rate	0.0007	
Coefficient of deposition rate	0.05	
Manning's roughness coefficient	0.03	s/m ^{1/3}

堤を考慮してHyper KANAKOで検討を実施した。

4.1 計算条件

現地状況から、対象流域は中小礫などが多く見られる一方で平均粒径は小さい。河床材料を元に1.5cmを代表粒径として採用した。また、細粒分は少ないことから流体相密度を1,000 kg/m³、現地試料から土砂密度を2,600kg/m³、河床の容積濃度を0.6として設定した。地形データはLPデータを利用した。計算に用いたパラメータはTable 3に示す。

(1) 一次元領域と二次元領域の設定方法

境界の設定位置を変えた2ケースで地形を設定した。

上流の45mのみを一次元領域と設定してその下流から広く二次元領域として設定するlandform3 (Fig.11)と、谷出口を境界として設定するlandform4 (Fig.12)を設定した。

landform3では二次元領域は計算メッシュ10m×10m、流下方向に231点、横断方向に132点である。一次元領域は、計算点数9点、計算点間隔5m、河道幅15mとした。併せて、二基の砂防堰堤を考慮する際の設置点、並びに本川との合流点の位置を示している。なお、landform3では既設の砂防堰堤はいずれも二次元領域に入るため、堰

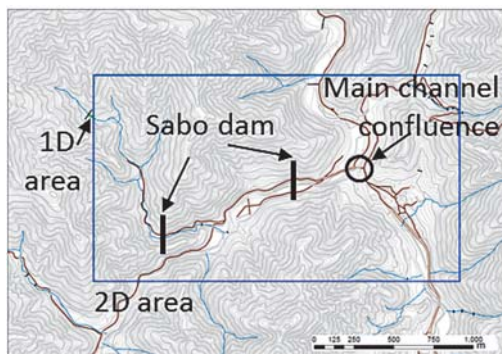


Fig.11 Setting landform data, showing sabo dams and main channel confluence position (landform3, set 2D area from upstream)

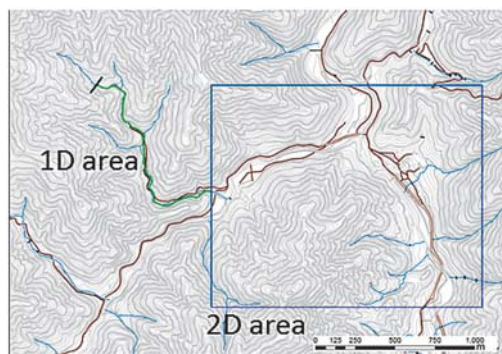


Fig.12 Setting landform data (landform4, usual method)

堤を考慮するときは、高さや水通しの形状までを考慮して、計算メッシュに合うよう調整して地盤高を設定している。

landform4 では二次元領域は計算メッシュ 10m × 10m、流下方向に 151 点、横断方向に 132 点である。一次元領域は、計算点数 276 点、計算点間隔 5m、河道幅は LP データから計測された 10m から 50m 程度で、一次元領域の下流には上流側の堰堤が位置する。いずれの地形条件についても、不安定土砂は一次元領域、二次元領域とも設定していない。

landform4 で設定した一次元領域について、Fig.13 に縦断図を (landform3 の一次元領域も表示)、Fig.14 に地形図を示す。縦断勾配は約 8° と伊豆大島と似ているが、揖斐川の方が谷が明瞭で起伏が大きい。

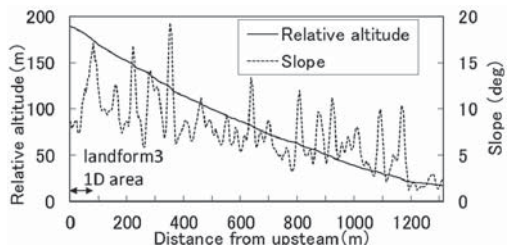


Fig. 13 Longitudinal profile of landform4 1D area (landform3 1D area show as arrow)

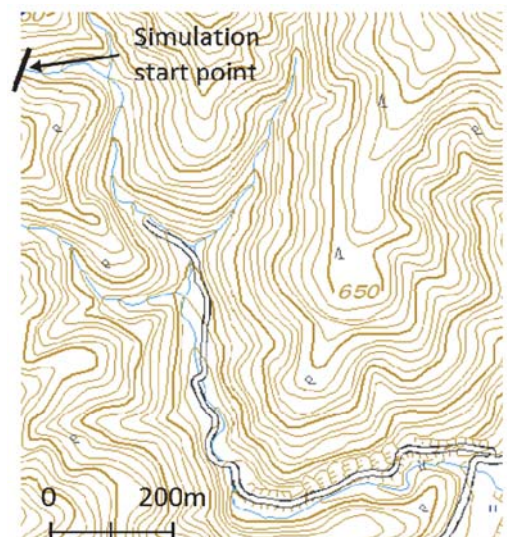


Fig. 14 Contour map of landform4 1D area (This background map data is distributed from Digital Japan Web System)

(2) 供給ハイドログラフ

計算で設定した供給ハイドログラフを Fig.15 に示す。土砂量は約 12 万 m³、水を含んだ状態では総量約 40 万 m³ の大規模な土石流が発生することを想定している。ピーク流量は 2,000 m³/s とし、土砂濃度は砂防計画策定指針に示される最小の土石流濃度として 30% とした。

(3) 計算ケース

2つの地形条件の設定方法で、砂防堰堤を考慮する場合としない場合の 4 ケースを Table 4 の様に計算した。

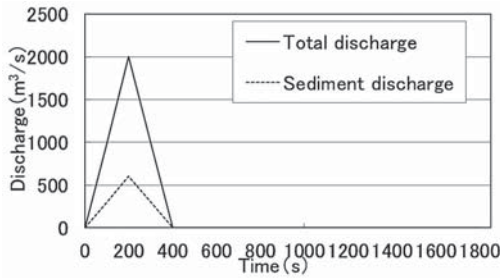


Fig. 15 Supplied hydrograph (hydro3)

Table 4 Simulation cases

Case	Landform	Sabo dam	Supplied hydrograph
Case5	landform3 (setting 2D area from upstream)	None	hydro3
Case6	landform4 (usual method)	None	hydro3
Case7	landform3	Set	hydro3
Case8	landform4	Set	hydro3

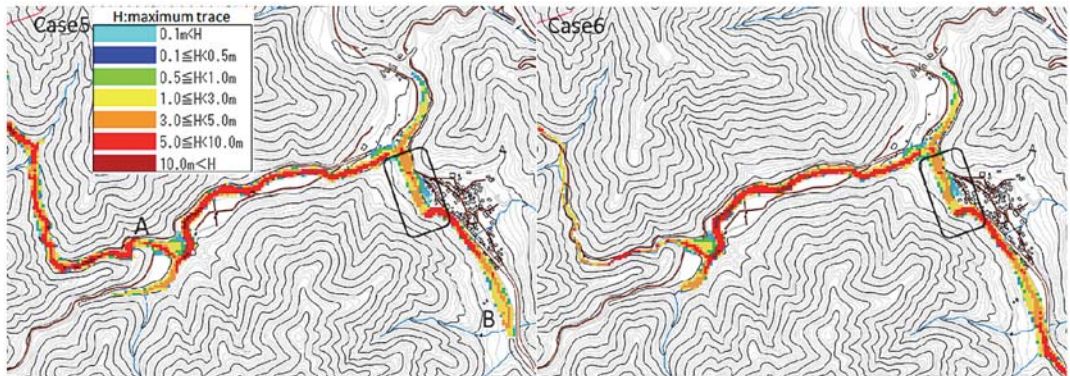


Fig.16 Result of Case5 (left) and Case6 (right) maximum trace (flow depth plus deposition) during simulation (no sabo dam)

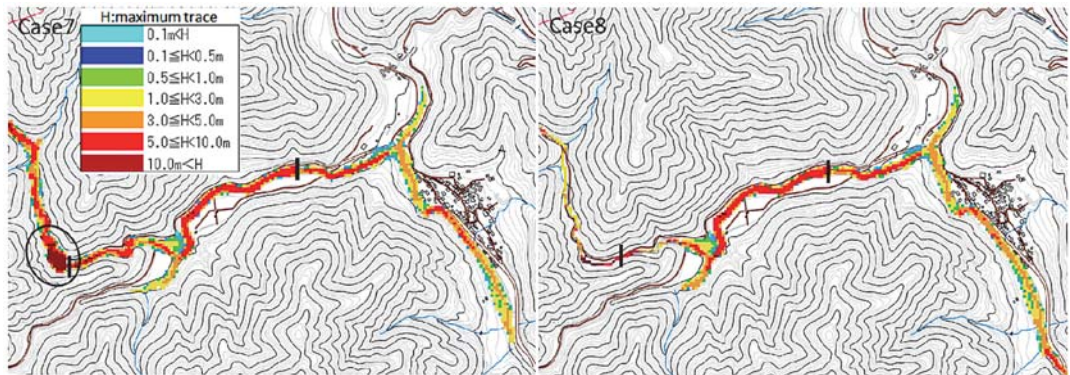


Fig.17 Result of Case7 (left) and Case8 (right) maximum trace (flow depth plus deposition) during simulation (with sabo dams)

4.2 計算結果

Table 4 に示した条件で計算を実施した。Fig.16-Fig.17 は計算期間に現れた最大痕跡(流動深+堆積厚の最大値)を示している。また、結果を示す範囲はFig.11のlandform3の二次元領域として設定したエリアである。Fig.16左のCase5中

に示すA点、B点について各ケースでの結果を比較考察する。なお、A点より上流は急勾配の土石流区間で、A点を境にCase6とCase8では下流側が二次元領域となる。また、Case5,7よりもCase6,8で上流側の河道幅が狭く見えるが、これは一次元領域は各断面について二次元領域の一メッシュ

として表示されるためであり、実際には設定した河道幅で土砂が堆積している。

砂防堰堤を設置しない Case5 と Case6 では、合流点より下流の集落の一部 (Fig.16 内の黒枠) で河道から流れが溢れて最大 1m 程度の浸水が発生することが確認された。また、土石流の流動区間においては、上流から 2D 領域を設定した Case5 で大きな痕跡が見られたが、痕跡は溪流に留まっておりオーバーフロー等は見られない。A 点より上流では、Case5 では溪流の中心部で 10m 以上の痕跡を示す一方、両岸の値が小さい。これは上流の谷部 (V 次谷) を二次元領域で設定したことによる。Case6 では 1-3m 程度を示す箇所が多いが A 点直上流では部分的に 10m 以上を示しており、一次元領域では横断方向に均一な値を示す。この領域で見られた痕跡は、堆積によるものが大きく、更に A 点まで移動した土砂は Case5 の方が Case6 よりも若干少ない。A 点より下流のエリアからは、両ケースで大きな違いは見られないが、浸水した集落よりも下流の本川では、Case5 で地点 B から下流は 1-3m の痕跡が一部で見られるだけなのに対して、Case6 ではその下流まで 5m 以上の痕跡が見られており、到達範囲が異なっている。これは、Case5 では A 点まで到達する流量が若干少なくなることによる影響と考えられる。

砂防堰堤を設置した Case7 と Case8 では、Case5 や Case6 で確認された合流点下流の集落で痕跡は確認されず、河道内に流れは収まっており、河道内の痕跡も堰堤無しのケースと比べて小さくなっていることから、堰堤の効果が確認された。更に下流の B 点では、痕跡が付いた到達範囲は堰堤無しの場合と比べてあまり変わらず、痕跡の値はいずれのケースでも堰堤が有る場合の方が小さくなっている。

上流側の堰堤については、上流から二次元領域として設定した Case7 では 10m 以上の大きな痕跡が発生したエリアが広く見られ (Fig.17 左図中の黒丸)、堰堤上流で水・土砂が貯留されたことが推測される。一次元領域として設定された Case8 でも堰堤上流で 10m 以上の痕跡が見られ、堰堤無しの場合よりもその範囲が広く、いずれのケースでも

堰堤の効果が確認される。この堰堤の上流では、Fig.17 中では横断的な堆積範囲は右図 (Case8) の方が少なく見えるが、先述のように堰堤上流 (Fig.17 左図黒丸に相当するエリア) では 20-50m の河道幅が設定されており、この幅に均等厚さで土砂が堆積している。一方、Case7 の方が 10m 以上の範囲が広く、また一部では Case8 の河道幅よりも広がって堆積していることから、この堰堤による堆積は Case7 の方がやや多かった。一方、下流側の堰堤については、堰堤の上流で同様の痕跡の範囲・値が確認され、設定方法による違いは殆どみられない。このように、堰堤を設置した Case7, 8 でも下流の到達範囲が異なったのは、堰堤無しの Case5, 6 と同様に A 点まで到達する流量や土砂量が、二次元領域を上流から設定した Case7 の方が若干少なくなることによる影響と考えられる。

次に、A 地点ならびに合流点への到達時刻を Table 5 に示す。結果の出力間隔は 10 秒である。到達時刻は、避難等のソフト対策を検討する際の指標の一つになると考えられる。

両点とも堰堤が有る場合も無い場合も、いずれも二次元領域を大きく取った Case5 や Case7 の方が到達時刻が遅かった。これは、谷部まで二次元領域とした場合、溪流内についても流れ方向だけでなく横断方向への土石流の流動・堆積を計算することの影響と考えられる。まず、溪流において流動方向が直進せず迂曲する場合に、一次元で計算する際は流れ方向に沿って領域を設定するため最短ルートで流れが移動するのに対して、二次元領域で設定された場合には区分されたメッシュ沿いに流れ方向と横断方向で階段状のルートを経由して移動するので移動距離が長くなる (メッシュサイズによって変化する) ことの影響が挙げられる。また、谷地形を一次元のように単純化した矩

Table 5 Debris flow arrival time

Case	A	Confluence point
Case5	240s	590s
Case6	180s	490s
Case7	340s	720s
Case8	220s	600s

形断面ではなく、谷の横断形状を考慮することによる影響も挙げられる。

堰堤が設置されていると、施設が無い場合に比べてA点でも合流点でも流れの到達時刻は遅くなり、施設が機能したことが示された。

A点での堰堤の有無による到達時刻の差は、上流から二次元領域を設定したCase7（堰堤有り）とCase5（堰堤無し）では、Case7の方が100秒遅い。一方、一次元領域として計算されるCase8（堰堤有り）とCase6で（堰堤無し）は、Case8の方が40秒遅くなる。堰堤の効果によって下流に到達する時間が、一次元領域として計算するか二次元領域として計算するかという手法の違いで約一分も異なる。

下流の合流点を見ると、堰堤の有無による到達時刻の差は、上流から二次元領域で計算するCase5とCase7では堰堤有のCase7の方が130秒遅くなる。上流を一次元領域として計算するCase6とCase8では堰堤有のCase8の方が110秒遅くなるが、A点ほど大きな違いはない。これは、A点より下流ではCase6とCase8も二次元領域となり横断方向への水・土砂の移動が考慮されることや、下流側の堰堤の機能等によって差が小さくなったのではないかと考えられる。

揖斐川の検討では、領域の設定方法による顕著な違いは見られなかったが、到達範囲や堰堤上流の堆積状況、到達時刻については若干異なる結果が示された。今後は、地形や土石流規模などの条件を鑑みて、情報を収集し、領域の設定方法を検証する必要がある。

5. おわりに

本研究では、土石流数値シミュレーションにおいて、一次元領域と二次元領域の設定方法を変えた検討を実施した。伊豆大島の災害事例については、発生した様な大規模な災害を想定した場合には、二次元領域を上流側から設定するほうが、上流での複数方向への流れや下流での氾濫・堆積について災害状況を再現できた。一方で規模の小さな土石流の場合には、大規模な災害ほど大きな違いは確認できなかった。

揖斐川の検討では、非常に大きな土石流を想定して計算したが、伊豆大島の検討と比べると、領域の設定方法による違いはあまり見られなかった。しかし、下流までの到達範囲や痕跡高は、上流から二次元領域を設定した場合の方が小さかった。堰堤の効果は、どちらの領域設定方法でも確認されたが、堰堤上流での貯留効果や、下流への到達時刻の遅れは、上流から二次元領域を設定するケースで確認された。谷部を二次元領域で計算することは、谷の横断形状を考慮できることや堰堤上流の堆積が表現される利点がある一方、流れ方向の追跡やそれに伴う到達時間については課題が残り、検証が必要である。

伊豆大島でも揖斐川でも、通常的手法で一次元領域を設定したエリアは平均勾配が約8°でありそれほど大きな違いはない。しかし、上流域で揖斐川では谷が比較的明瞭で起伏も大きい一方で、伊豆大島では谷がそれほど明瞭でなく、起伏があまり大きくないことなどが影響したと考えられる。

このように、上流部の地形について谷が明瞭であり起伏が大きいのか、そして規模の大きな土石流が発生するかどうか、この二つの要因が領域の設定方法を変えた場合に影響することが本検討から示唆された。また、領域の境界を設定する際に、計測データ等が揃っていれば、これまでのように一次元領域を谷出口に設定するよりも、谷の上流から二次元領域を設定して計算する方が、伊豆大島災害のような現象を表現することができる。一方で、揖斐川のように谷が明瞭な地域についても両方で大きな違いは見られなかったことから、二次元領域を上流から設定しても到達範囲や流動深・堆積の大きな箇所がある程度推定することは可能である。

今後は、谷地形が明瞭な場合について設定領域を変えた場合の到達範囲や到達時刻、砂防堰堤の効果について、現地の情報を収集して、更なる検討を進めていきたい。

謝辞

本研究は、（一財）砂防・地すべり技術センター

受託研究「大規模土砂移動の影響範囲の予測とその対応手法の整理」の助成を受けたものです。また、本研究の一部はJSPS 科研費 24710206 の助成を受けて実施した。伊豆大島災害の土石流の流下範囲や流下痕跡について独立行政法人土木研究所火山・土石流チームから貴重なデータを提供頂いた。中部地方整備局越美山系砂防事務所から揖斐川について貴重なデータを提供頂いた。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 1) 水山高久・藤田正治 (1997) : 河床変動計算のススメ, 砂防学会誌, Vol.50, No.1, pp.67-71.
- 2) 岡部健士 (1997) : 急流河川の1次元河床変動(その1), 砂防学会誌, Vol.50, No.3, pp.58-65.
- 3) 藤田正治 (1998) : 砂防ダムの堆砂計算法(その1), 砂防学会誌, Vol.51, No.1, pp.72-77.
- 4) 高橋保, 匡尚富 : 変勾配流路における土石流の形成 (1986), 京都大学防災研究所年報, Vol.29, B-2, pp.345-359.
- 5) 江頭進治・芦田和男・佐々木浩 (1988) : 土石流の流動機構, 第32回水理講演会論文集, pp.485-490.
- 6) 椿東一郎・橋本晴行・末次忠司 (1982) : 土石流における粒子間応力と流動特性, 土木学会論文集, No.317, pp.79-91, 1982
- 7) 高濱淳一郎・藤田裕一郎・近藤康弘 (2000) : 土石流から掃流状集合流動へ遷移する流れの解析法に関する研究水工学論文集, 第44巻, p.683-686.
- 8) 里深好文・吉野弘裕・小川紀一郎・森俊男・水山高久・高濱淳一郎 (2007) : 高磯山天然ダム決壊時に発生した洪水の再現, 砂防学会誌, Vol.59, No.6, pp.32-37.
- 9) 鈴木拓郎・堀田紀文・宮本邦明 (2009) : 非連行型侵食速度式を用いた勾配・流路幅の変化点や砂防ダムにおける土石流の数値シミュレーション, 砂防学会誌, Vol.62, No.3, pp.14-22.
- 10) O'Brien J. S., Julien P.Y., Fullerton W. T. (1993) : Two dimensional water flood and mudflow simulation. J. Hydrol. Eng., 119 (2), pp.244-261.
- 11) 後藤仁志・五十里洋行・酒井哲郎・奥謙介 (2007) : 山地橋梁の流木閉塞過程の3次元シミュレーション, 水工学論文集, Vol.51, pp.835-840.
- 12) 阿部孝章・里深好文・水山高久 (2011) : 高濃度石礫流れの粒子間応力を考慮した粒子法の開発, 砂防学会誌, Vol.63, No.6, pp.23-31, 2011.
- 13) 渋谷一・香月智・大隅久・石川信隆・水山高久 (2011) : 円柱モデル個別要素法による捕捉工の流木捕捉解析, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.67, No.1, pp.113-132.
- 14) 清水義彦・長田健吾 (2007) : 流木形状を考慮した個別要素法による橋脚周辺の流木集積過程に関する数値実験, 水工学論文集, Vol.51, pp.829-834.
- 15) 高橋保・中川一 (1991) : 豪雨時に発生する石礫型土石流の予測, 砂防学会誌, Vol.44, No.3, p.12-19.
- 16) 和田孝志・里深好文・水山高久 (2008) : 土石流の1次元・2次元シミュレーションモデルの結合, 砂防学会誌, Vol.61, No.2, pp.36-40.
- 17) 石川芳治・池田暁彦・柏原佳明・牛山素行・林真一郎・森田耕司・飛岡啓之・小野寺智久・宮田直樹・西尾陽介・小川洋・鈴木崇・岩佐直人・青木規・池田武徳 (2014) : 2013年10月16日台風26号による伊豆大島土砂災害, 砂防学会誌, Vol.66, No.5, pp.61-72.
- 18) 堀内成郎・岩浪英二・中谷加奈・里深好文・水山高久 (2012) : LP データを活用した土石流シミュレーションシステム「Hyper KANAKO」の開発, 砂防学会誌, Vol.64, No.6, pp.25-31.
- 19) 里深好文・水山高久 (2005) : 砂防ダムが設置された領域における土石流の流動・堆積に関する数値計算, 砂防学会誌, Vol.58, No.1, pp.14-19.
- 20) 砂防技術総覧 (2009) : 財団法人砂防・地すべり技術センター二次元氾濫数値シミュレーションモデル New-SASS, JSECE Publication No.56, I-3-2
- 21) 中谷加奈・前田大介・里深好文・水山高久 (2010) : 平成21年7月に山口県防府市石原地区及び八幡谷溪流で発生した土石流の検討, 第5回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp.81-86.
- 22) 国土交通省 (2012) : 河川砂防技術基準 調査編 第17章砂防調査.
- 23) 海堀正博・浦真・吉村正徳・藤本英治 (2006) : 2005年9月6日に広島県宮島で発生した土石流災害, 砂防学会誌, Vol.58, No.5, pp.18-21.
- 24) 古川浩平・海堀正博・久保田哲也・地頭菌隆・権田豊・杉原成満・林真一郎・池田暁彦・荒木義則・柏原佳明 (2009) : 2009年7月21日山口県防府市での土砂災害緊急調査報告, 砂防学会誌, Vol.62, No.3, pp.62-73.
- 25) 寺田秀樹・水野秀明 (2003) : 土石流による家屋

- 被災範囲の設定方法に関する研究, 国土技術政策総合研究所資料, No.70.
- 26) 国土交通省水管理国土保全局砂防部 (2014) : 土砂災害対策の強化に向けた検討会 ハード対策分科会討議資料 .
 - 27) 国土交通省水管理国土保全局砂防部 (2014) : 土砂災害対策の強化に向けた検討会 ハード対策分科会 (第2回) 討議資料 .
 - 28) 日本地震学会ニュースレター (2014), Vol.25, No.5, p.2.
 - 29) Suwa, H. (1989) Field Observation of Debris Flow, Proc. Japan-China (Taipei) Joint Seminar on Natural Hazard Mitigation, Kyoto, pp.343-352.
 - 30) Suwa, H., Okunishi, K. and Sakai, M. (1993) Motion, debris size and scale of debris flows in a valley on Mount Yakedake, Japan, IAHS Publ. no.217, pp.239-248.
 - 31) 池田暁彦・門馬直一・堀内成郎・山田利治 (1998) : 滑川北股沢で発生する土石流について, 砂防学会誌, Vol.51, No.2, pp.31-38.

(投稿受理 : 平成 26 年 4 月 18 日)