

## 表層崩壊リアルタイムハザードシステムの構築に際して生じた課題と対策(11)

### Some Problems and Measures appeared during the Construction of the Real-time Hazard System for Slope Disasters at a Heavy Rainfall (11)

沖 村 孝 Takashi Okimura	鳥 居 宣 之 Nobuyuki Torii	中 川 渉 Wataru Nakagawa
原 口 勝 則 Katsunori Haraguchi	鏡 原 聖 史 Satoshi Kagamihara	笠 原 拓 造 Takuzo Kasahara

#### 1. はじめに

令和元年は、東日本台風（台風 19 号）や房総半島台風などにより 1,996 件の土砂災害が発生し、昭和 57 年の統計開始以降 4 番目に多い件数を記録した。これは統計開始以降の平均発生件数（1,081 件）の約 1.8 倍にあたり、その被害は死者・行方不明者 23 名、負傷者 12 名、人家被害 535 戸に上っている<sup>1)</sup>。

中でも、10 月 12 日～13 日にかけての台風 19 号の影響により、10 月 10 日～13 日までの総降水量が、神奈川県箱根で 1,000mm に達し、東日本を中心に 17 地点で 500 mm を超過した。また、東日本や東北地方の多くの地点で 3、6、12、24 時間降水量の観測史上第 1 位を更新した<sup>2)</sup>。この台風 19 号に伴う土砂災害は 20 都県で 952 件発生し、これまで過去最多であった平成 16 年の台風 23 号の 800 件を上回り、過去最多の土砂災害をもたらした台風となった<sup>3)</sup>。気象庁は、このような顕著な災害をもたらした台風 19 号について、災害の経験や教訓を後世に伝承するために「令和元年東日本台風」と名付けた<sup>2)</sup>。

このように、近年では、観測史上最大の降雨量や降雨強度が報告されることが毎年のように生じている。従来、土砂災害の発生時刻に関する危険度指標は、過去の被災経験から総降雨量あるいは土壌雨量指数や降雨強度のパラメータが用いられ、これら過去に観測された値とその時の崩壊発生の有無から、崩壊発生の危険度が経験的に求められ、土砂災害警戒区域に対する土砂災害警戒情報として使われている。しかし、近年のような過去に経験したことのない大きな降雨量に対しては、経験的に求められた指標や基準だけでは、十分な対応に結び付かない可能性がある。すなわち、過去に崩壊記録のない斜面で崩壊が発生したり、総降雨量によらず大きな降雨強度の出現時刻に崩壊が発生したりする可能性がある。これを解消するためには経験的なデータから危険度を判断するのではなく、降雨を入力した力学的な斜面安定解析から安全率を求め、この安全率から危険度を判定することが必要になる。また、空間や時系列に関して、よりきめ細かな予測情報を提供することが、警戒や避難情報の適切な発令に資するものであると考えられる。

筆者の一人は、かつて表土層崩壊を対象として地形を 10m 格子間隔で数値モデル化し、格子点（もしくはセルの中心点）に表土層厚を設定し、降雨を入力し、飽和横流れ浸透解析によりセルの地下水位を計算し、無限長斜面安定解析式を用いて、各セルで、時間ごとに安全率を計算する手法を提案した<sup>3)</sup>。近年、技術の開発により高精度の地形データや降雨データを入手できる状況になってきたこともあり、このモデルを用いてリアルタイムでハザード情報を計算できるようになってきた。このような環境条件下で、兵庫県のご協力を得て平成 19 年度より 3 ヶ年で「六甲山系土砂災害危険度予測システム」プロジェクトでかつて提案したモデルを実用化する機会に恵まれた<sup>4)</sup>。このモデルの構築、実用化に際して新たに出現した問題点などは、すでにこれまでの報告<sup>6)7)8)9)10)</sup>で詳しく紹介した。また、問題点への対策を組み込んだ「土砂災害のためのリアルタイムハザードシステムの作成手順」<sup>11)</sup>や留意事項<sup>12)</sup>をとりまとめた。その後、バージョンアップとも言える新たな取り組みとして、安全率の変化量を加えた判定方法<sup>13)</sup>や、市街地内の小規模斜面にも対

応する 5m メッシュ併用型の解析方法<sup>14)</sup>、土石流の発生機構を考慮した新たな判定方法<sup>15)</sup>、長雨時に多発する小規模崩壊への対応方法など<sup>16)</sup>を考案しその適用性について報告を重ねてきた。

本報告では、前々報<sup>15)</sup>にて丹波市を対象に検討した土石流の発生機構を考慮した新たな判定手法について、地質の異なる香美町域を対象にその適用性を検証した結果について報告する。

## 2. これまでの報告の概要

### 2. 1 2010 年報告

2010 年報告<sup>6)</sup>では、モデルの概要説明を行った後、システム化に際して生じた課題について説明し、その対策手法の紹介を行った。その内容の主なものは、次のとおりである。

- 1) 地形のスムージング化
- 2) 地形分類と表土層厚
- 3) 人工改変地の扱い
- 4) 地盤条件の設定
- 5) 推定表土層厚の再検討
- 6) 植生条件の考察
- 7) 異なる地質条件への対応
- 8) 微地形条件（水面、沖積地等）への対応
- 9) 用いる雨量データの検討
- 10) 演算処理高速化の検討
- 11) アウトプットデータの表示方法の検討
- 12) 土砂災害警戒区域（急傾斜）への反映方法の検討
- 13) 土砂災害警戒区域（土石流）への反映方法の検討

### 2. 2 2011 年報告

2011 年報告<sup>7)</sup>においては、2010 年度の試験運用中に出現した様々な課題を、個別に検討した。その内容は以下のとおりである。

- 1) 昭和 42 年崩壊地の表土層の推定
- 2) 谷壁斜面に存在する浅い谷（0 次谷）の表土層厚の推定
- 3) 谷壁斜面と谷底斜面境界部での表土層厚の不連続対策
- 4) 小起伏斜面における表土層厚の推定
- 5) シミュレーション降雨による異常セル推定表土層厚の補正
- 6) 土砂災害警戒情報解除のためのタイミング情報対策

### 2. 3 2012 年報告

2012 年報告<sup>8)</sup>においては、その後の運用中に出現した課題について対策を検討した。その内容は以下のとおりである。

- 1) 0 次谷および急傾斜地における層厚の調整
- 2) 表土層満水時の判定における不具合対策
- 3) シミュレーション降雨による局所的な不具合対策

### 2. 4 2013 年報告

2013 年報告<sup>9)</sup>においては、豊岡市を対象としてこれまで適用していない地質条件である北但層群や矢田川層群、照来層群、超塩基性岩などに適用した際に判明した課題と対策について述べた。その内容は以下のとおりである。

- 1) 難透水層の影響による崩壊への対応
- 2) 人家裏切土斜面の崩壊特性の把握と対応

## 2. 5 2014年報告

2014年報告<sup>10)</sup>においては、上郡町を対象としてこれまでに適用していない地質条件である相生層群や超丹波帯などに適用した際に判明した課題と対策について述べた。その内容は以下のとおりである。

- 1) 頂部小起伏面の周縁部に多発する崩壊への対応
- 2) 頂部小起伏面の自動抽出手法

## 2. 6 2015年報告

2015年報告<sup>12)</sup>においては、表六甲山系や豊岡市、上郡町と類似の地形・地質を有する三田市への適用において、表土層の設定などについて新たな留意点が得られたのでこれを報告した。その内容は以下のとおりである。

- 1) 有馬層群（丹波層群を含む）固有の層厚式の設定
- 2) 裸地、草地、とくしゃ地における粘着力の調整
- 3) 礫密度を考慮した土質パラメータ間の整合性の確認

## 2. 7 2016年報告

2016年報告<sup>13)</sup>においては、2014年8月豪雨による丹波市の土砂災害を対象にシステムの検証を行う中で、崩壊の判定タイミングが実際の崩壊等が集中的に発生した時刻よりも数時間遅れる傾向にあることや、降雨が終了しても判定が長時間継続するという課題が確認されたため、安全率の絶対量に加えてその変化量を判定の指標とすることで、判定タイミングが改善されたのでこれについて報告した。

## 2. 8 2017年報告

2017年報告<sup>14)</sup>においては、神戸市の市街地内に小規模斜面が土砂災害警戒区域として数多く分布しており、このような小規模斜面はその平面幅が狭いため10mDEMによって傾斜が的確に表現できない場合があるほか、人工改変の影響もあるためこれまで対象外としていた。しかしながら、神戸市からの要望によりその対応を検討する必要が生じた。このため、土砂災害警戒区域内を5mメッシュにて安全率を計算する方法について比較検討し、リアルタイム演算のスピードやシステム改修費用などを勘案して、地下水位については10mメッシュで演算した結果を適用し、安全率については5mメッシュ毎に表土層厚や地盤物性値は市街内の小規模斜面固有の条件を検討する方法を採用することとした。

## 2. 9 2018年報告

2018年報告<sup>15)</sup>においては、近年の豪雨の激化に伴い短時間に地中に浸透しきれない雨水が地表面流となって一気に溪流に流出することで溪床堆積土砂流動型の土石流が発生しやすいことが確認された。しかしながら、現行の土石流予測モデルではこのような土石流の発生機構を十分に考慮できていないことが空振りの一因と想定された。このため、平成26年に丹波市で発生した土石流事例をもとに現行の手法による危険度判定の課題を整理し、崩壊起因型、溪床堆積土砂流動型、複合型の土石流に対し、それぞれの発生機構を反映した判定手法を検討した。検討の結果、新たな土石流判定手法の適用によって空振率が半減し、さらに捕捉率についても向上することが確認できた。しかしながら、改善された空振率は未だ高い数値であること（約35%）や、他地域への適用に際しては検証事例が丹波市の事例に限られているなどの課題が残っているため、引き続き他の地域を含めて検証を続けることとした。

## 2. 10 2019年報告

2019年報告<sup>16)</sup>においては、平成30年7月豪雨において長雨特有の崩壊発生形態として、小規模な崩壊や人工斜面の崩壊などが多数確認された。これらは、本システムでは対象外としている崩壊形態であり、システム稼働中にこれらの発生を予測することはできなかった。しかしながら、情報を利用するユーザーからは小規模な崩壊等であっても本システムにおいて予測できるよう改良の要望があり、どのような対応が可能か検討を行った。検討の結果、解析セルの細分化による小規模崩壊の予測や、道路を流れる流水を考慮した人工斜面の崩壊予測などの対応方法について検討し適用できる可能性を示した。しかしながら、今回検討した方法を広域に展開するにはモデル構築における膨大な作業が発生するほか、サーバ等のハードウェアの増設などの課題もあり、実用化のためにはさらに効率的な方法の検討が必要と考えられた。

### 3. 香美町を対象とした新たな土石流判定手法の適用検証

#### 3. 1 検証対象溪流

検証対象溪流は香美町に分布する土石流危険溪流 227 溪流である（図 3.1、3.2 参照）。

町北部の海岸付近から北但層群豊岡累層や矢田川層群の分布域に小規模な土石流危険溪流が多い。また、南部の高標高地域では北但層群村岡累層や照来層群などの堆積岩が分布し規模の大きな土石流危険溪流が集中している。

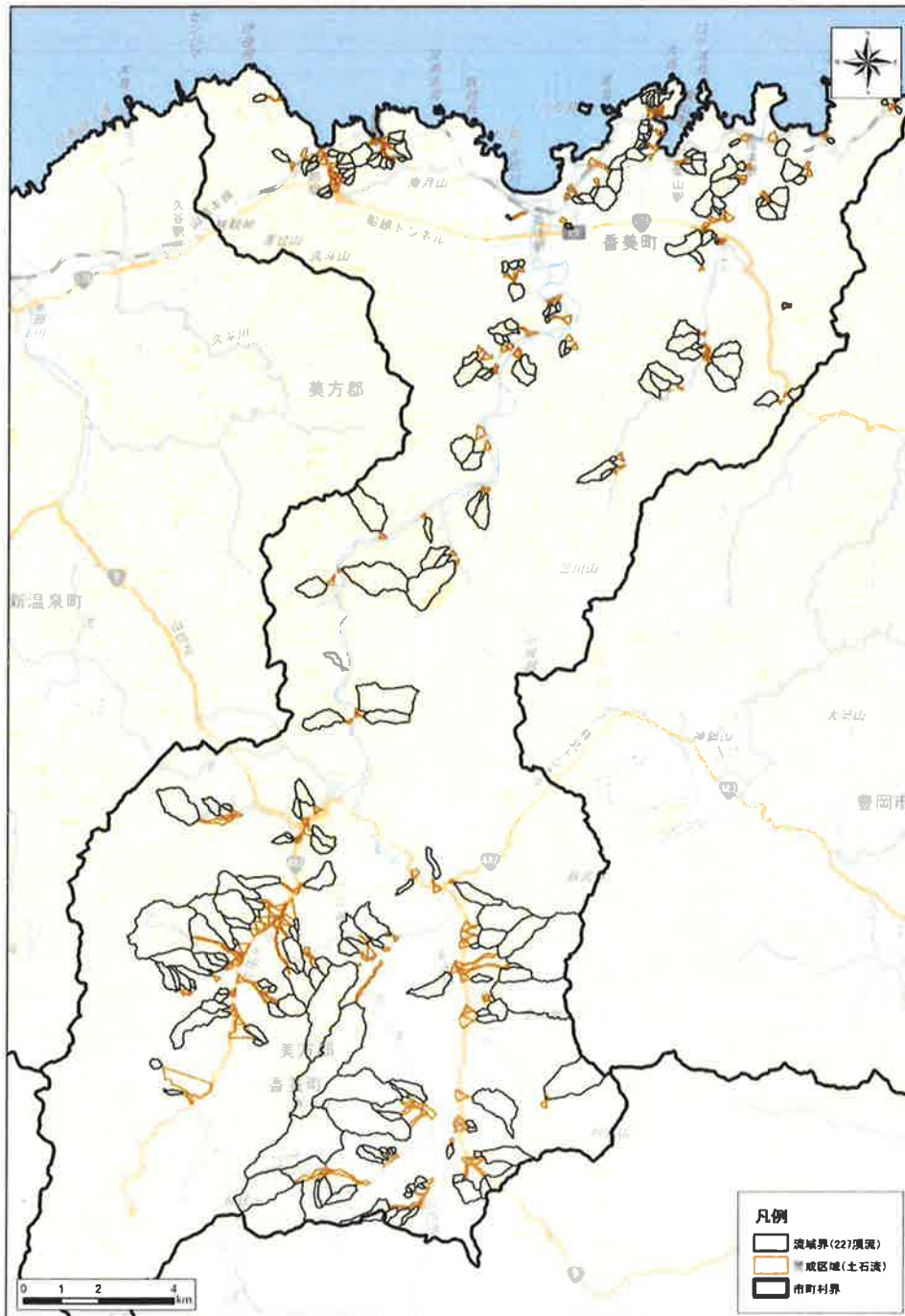


図 3.1 検証対象溪流の位置図（香美町）

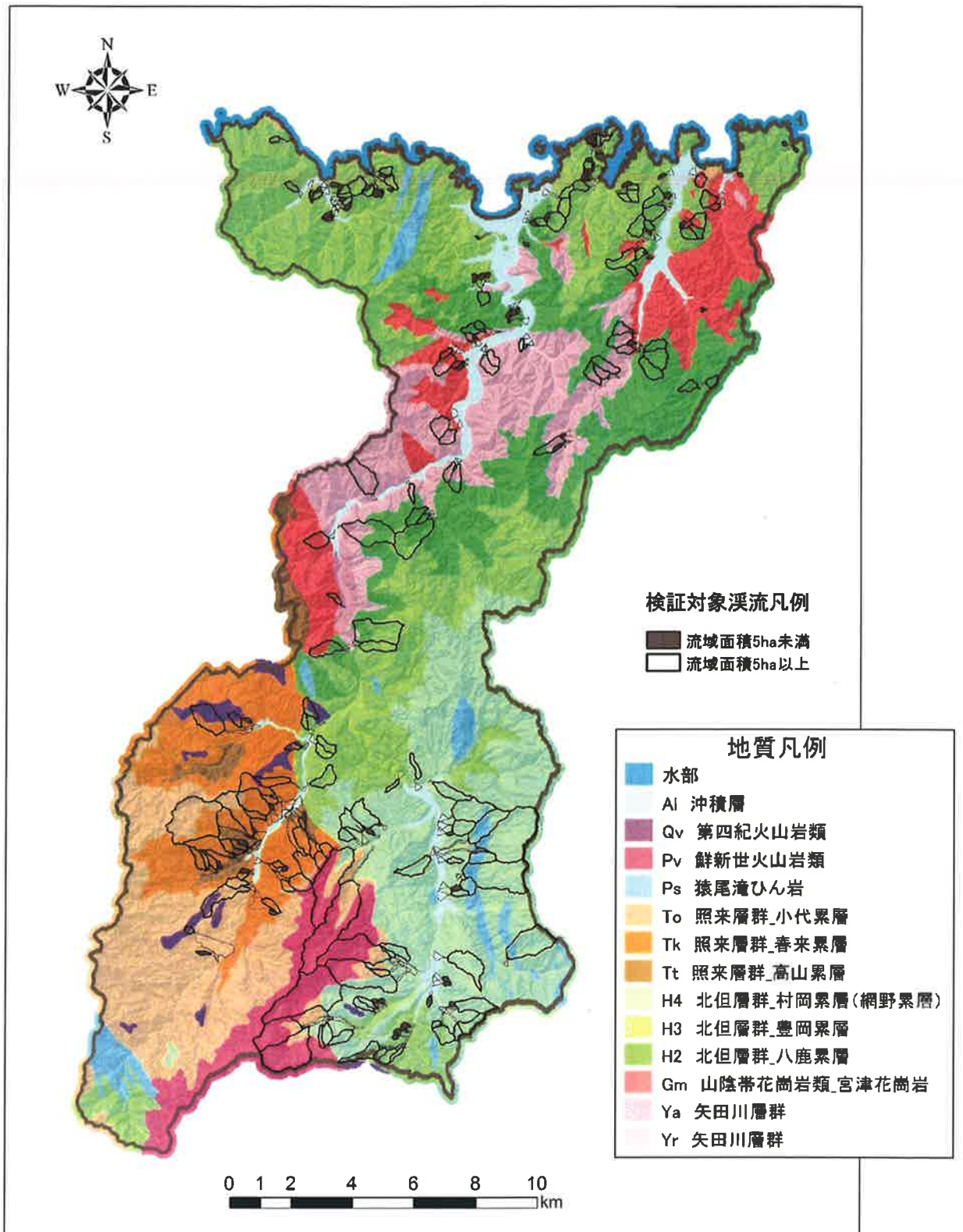


図 3.2 検討対象溪流と香美町の地質

### 3. 2 検証対象降雨

検証対象降雨は、比較的降水量が多いこと、崩壊等の土砂移動の発生が確認されていること、降雨前後の航空写真が入手できることを条件として、「平成 16 年（2004）10 月台風 23 号」を選定した。

#### （1）気象概要

平成 16 年 10 月 13 日 9 時にマリアナ諸島近海で発生した台風 23 号は、18 日に超大型で強い勢力となって沖縄の南海上を北上した。この台風は、19 日に沖縄本島から奄美諸島沿いに進み、20 日 13 時頃、大型の強い勢力で高知県土佐清水市付近に上陸した後、18 時前大阪府泉佐野市付近に再上陸した。兵庫県では、台風と前線の影響によって 19 日～20 日の総降水量が洲本で 372mm を記録したほか、各地で記録的な大雨となった。この台風による兵庫県内の被害状況は、死者・行方不明者 26 人、負傷者 130 人、被災者 22 人、住家全壊 650 棟、住家半壊・一部損壊 8,130 棟、道路損壊 246 か所、山崖崩れ 16 か所、堤防決壊 103 か所などであった<sup>17)</sup>。

#### （2）降雨量

検証に用いる降雨の時系列を図 3.4～3.5 に示した。また、10 月 19 日～21 日の総雨量および最大時間雨量の分布を図 3.3 に示した。総雨量はほぼ町全域にわたり 200mm を超える状況であり、中でも豊岡市との境にあたる三川山付近で総雨量および時間雨量ともに最大値を記録している。

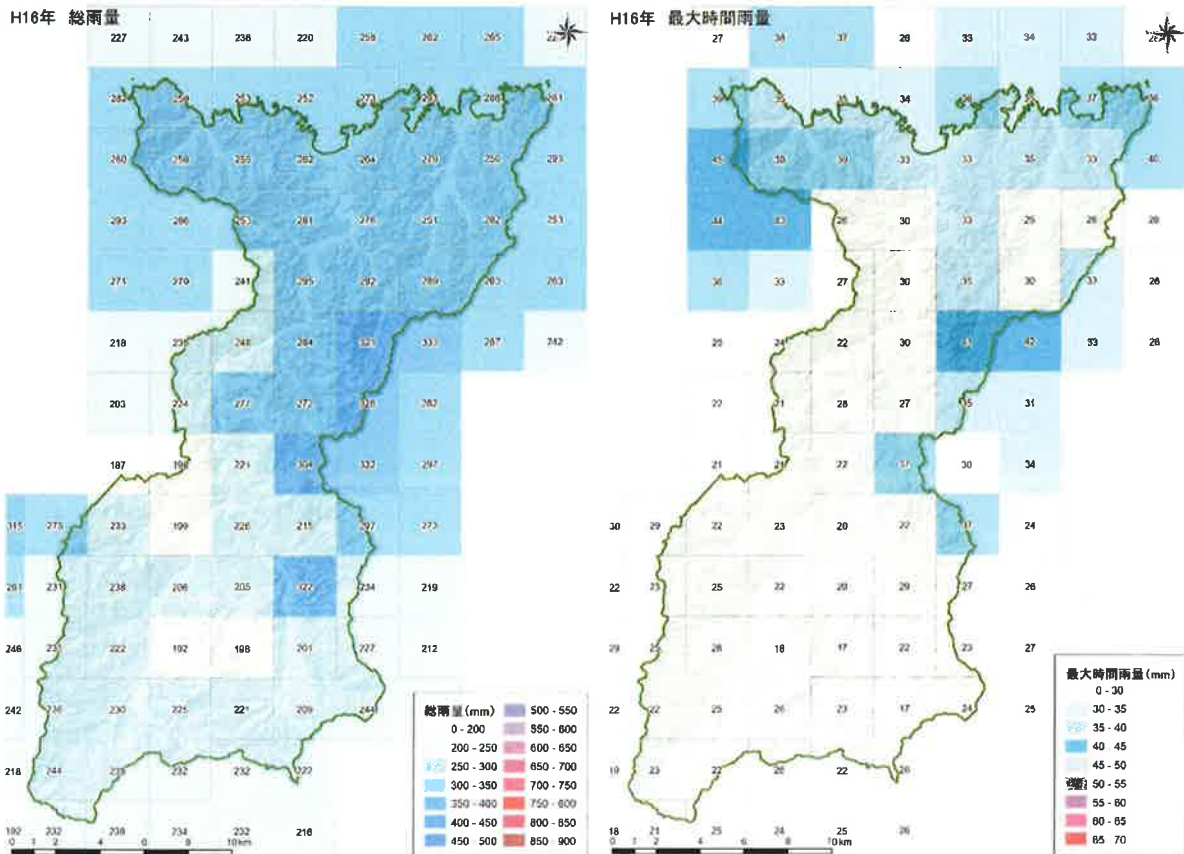


図 3.3 検証対象降雨の総雨量および最大時間雨量分布(レーダ解析雨量 2.5km メッシュ)

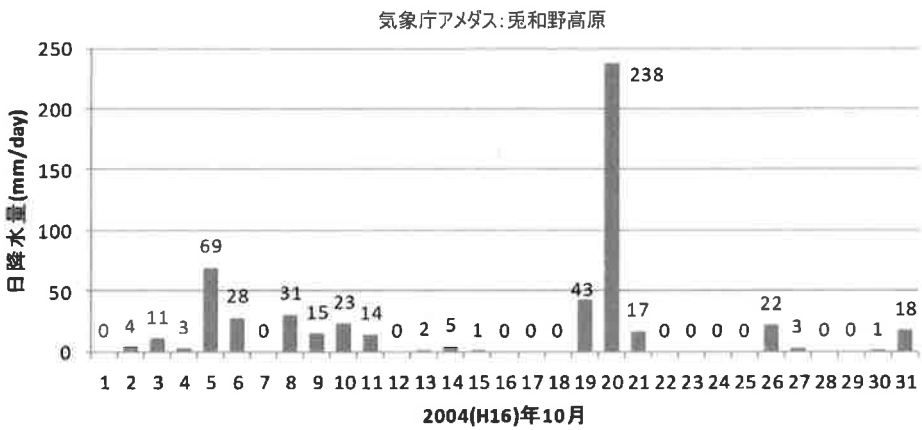
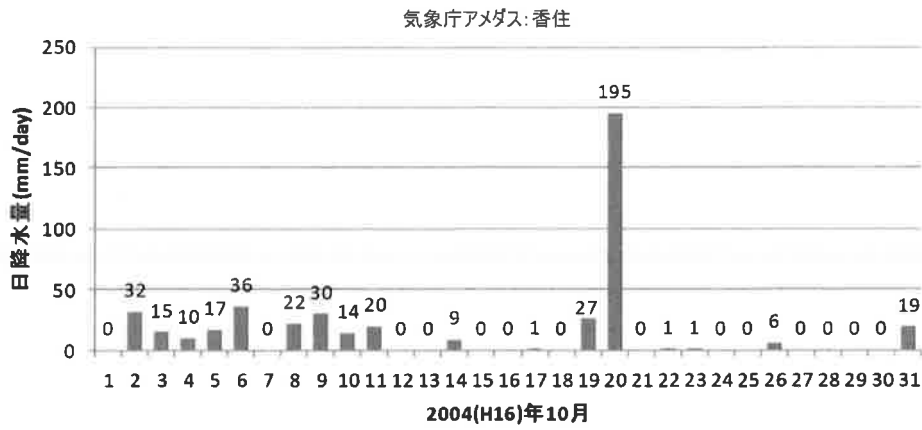


図 3.4 検証対象降雨の日降水量

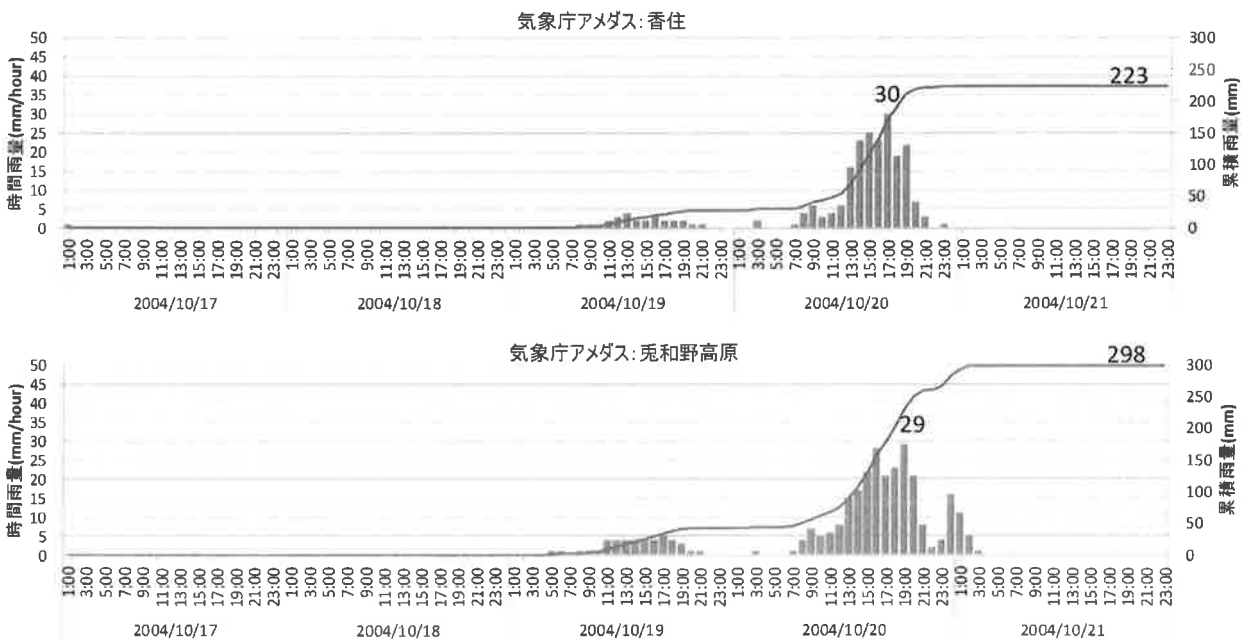


図 3.5 検証対象降雨の時間雨量および累積雨量

### (3) 土砂移動状況

平成 16 年台風 23 号の翌年に撮影された空中写真をもとに、崩壊や荒廃溪流の判読結果を図 3.6 に示した。図中の崩壊箇所は面積が  $100\text{m}^2$  よりも大きい崩壊地を抽出した結果であり、降雨量の多かった矢田川層群や花崗岩類の地域に多く分布している。また、図中の荒廃溪流は流域内に土砂流出の痕跡が見られる溪流を抽出したものであり、谷出口下流に及ぶ土砂流出は確認されていない。なお、現地調査においても谷出口下流での土石流堆積物が確認されていないことから、この台風では土石流の発生は無かったと考えられる。

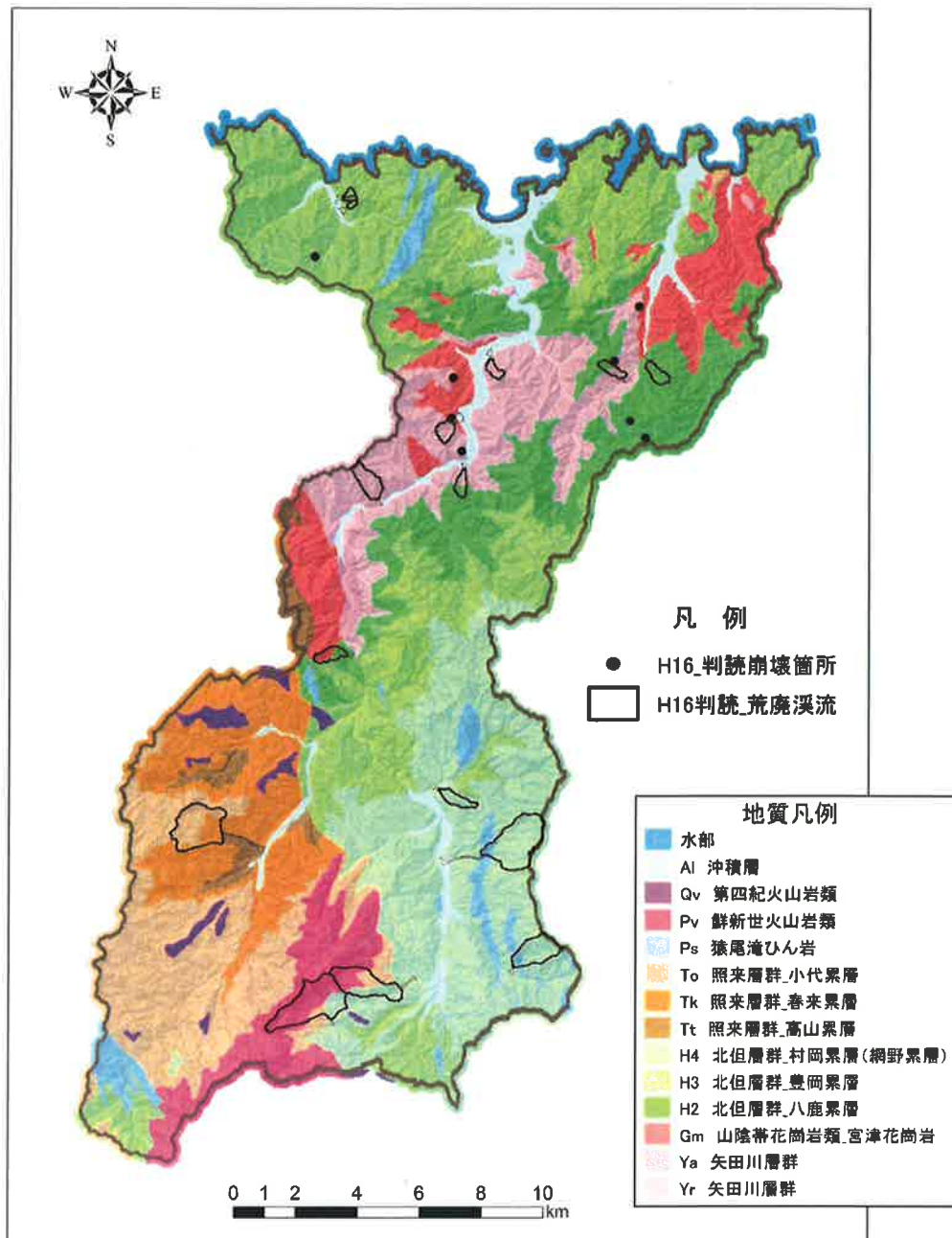


図 3.6 空中写真判読による崩壊および荒廃溪流の分布



### 3. 3 検証対象降雨による新たな土石流判定手法の適用検証

#### (1) 稼働中のシステムによる判定

現在稼働中のシステムは、六甲山系における土石流発生事例をもとにした閾値（崩壊面積率と流域面積の関係式）によって土石流の発生・非発生を判定している。この閾値を用いて平成16年台風23号の降雨に適用した場合の判定状況を図3.7にとりまとめた。

図3.7において閾値を超過した溪流はゼロである。前述のとおりこの台風による土石流の発生は確認されていないことから適切な判定結果と言えよう。

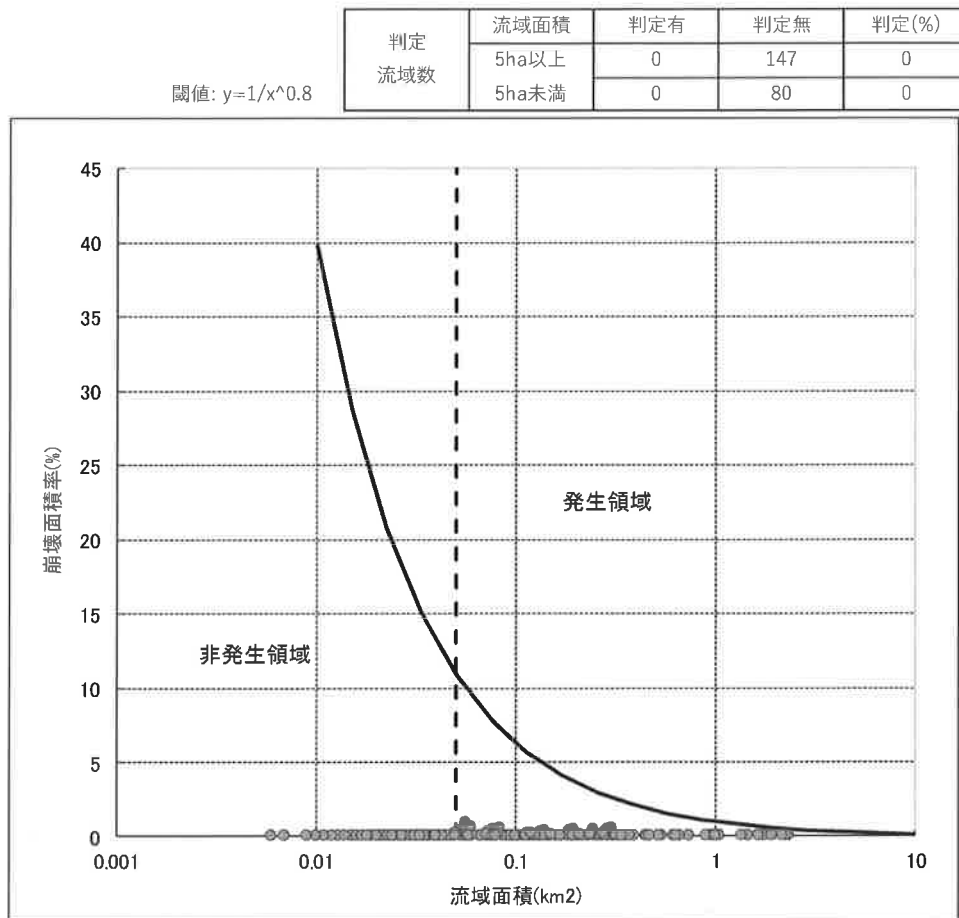


図 3.7 稼働中のシステムによる判定（平成16年台風23号）

#### (2) 丹波モデルの準用による判定

##### ① 丹波モデルの概要

前々報<sup>15)</sup>で報告した丹波市での土石流の判定手法（以下、丹波モデルと呼ぶ）の判定フローを図3.8に示した。判定フローに記載した代表粒径  $d = 30\text{cm}$  や溪床土砂流出区間の閾値 ( $q_* \geq 2$  かつ溪床勾配  $15^\circ$  以上) は地域ごとに調整の検討を要するパラメータである。溪流の規模や土石流の発生形態に応じた判定のための閾値については図3.9に示したとおりである。

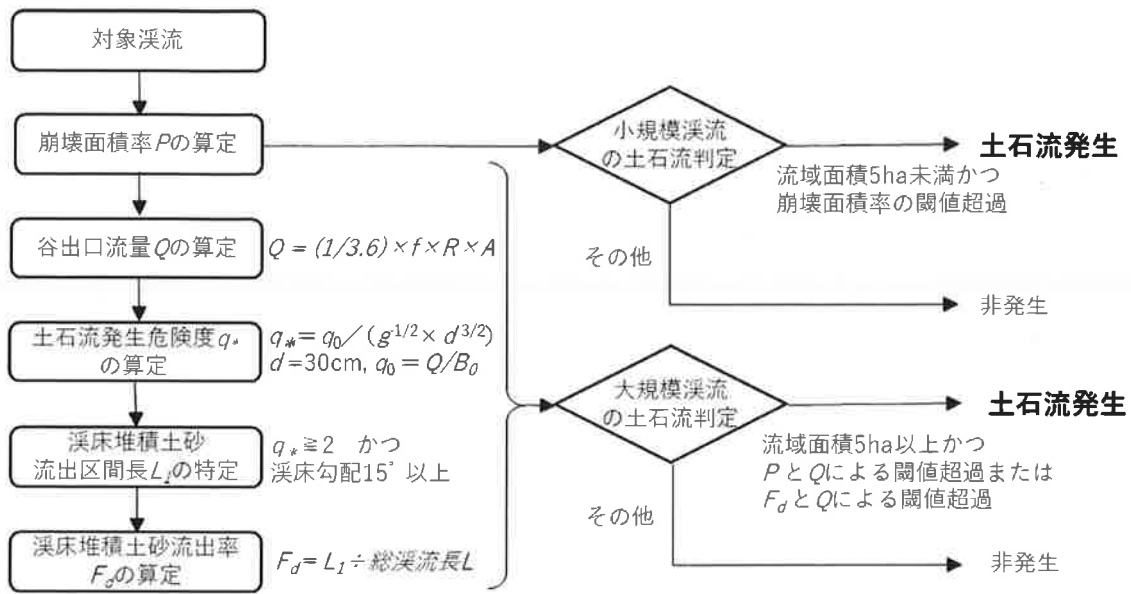


図 3.8 新たな土石流判定手法（丹波モデル）の判定フロー

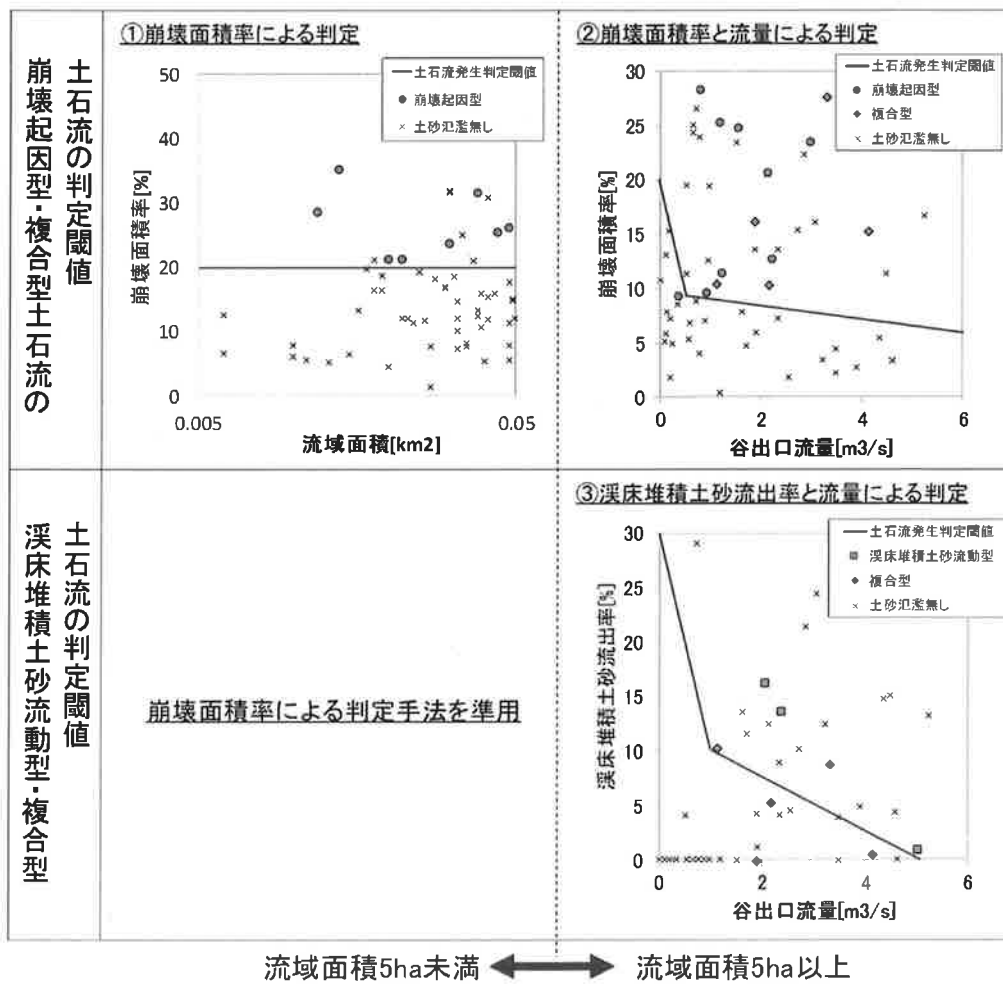


図 3.9 丹波モデルにおける判定のための閾値<sup>15)</sup>

② 香美町における丹波モデルの適用結果

丹波モデルで設定された代表粒径や判定のための閾値を準用し、香美町の土石流危険渓流に対して平成16年台風23号の降雨を適用した場合の判定状況を図3.10にとりまとめた。なお、崩壊面積率による判定の閾値は、図3.9で20%としているが、ここではその後の検討で見直された27%を適用している。

図3.10をみると、崩壊起因型土石流の判定では空振りはなく適切な判定となっている。一方、溪床堆積土砂流動型の判定では流量が多い領域で空振りが確認される。その空振率は4% (=10/227) であり、丹波市での空振率34.7%<sup>15)</sup>に対してワンオーダー低い値となっている。ただし、丹波市での検討<sup>15)</sup>では稼働中のシステムによる判定よりも空振りが改善されているが、香美町では逆に空振りが増加する結果となっている。

以上の検討結果を踏まえ、サンプル的な現地調査によって判定結果と現地状況の対応を確認した上で、香美町のデータに基づく閾値等の検討を進めることとした。

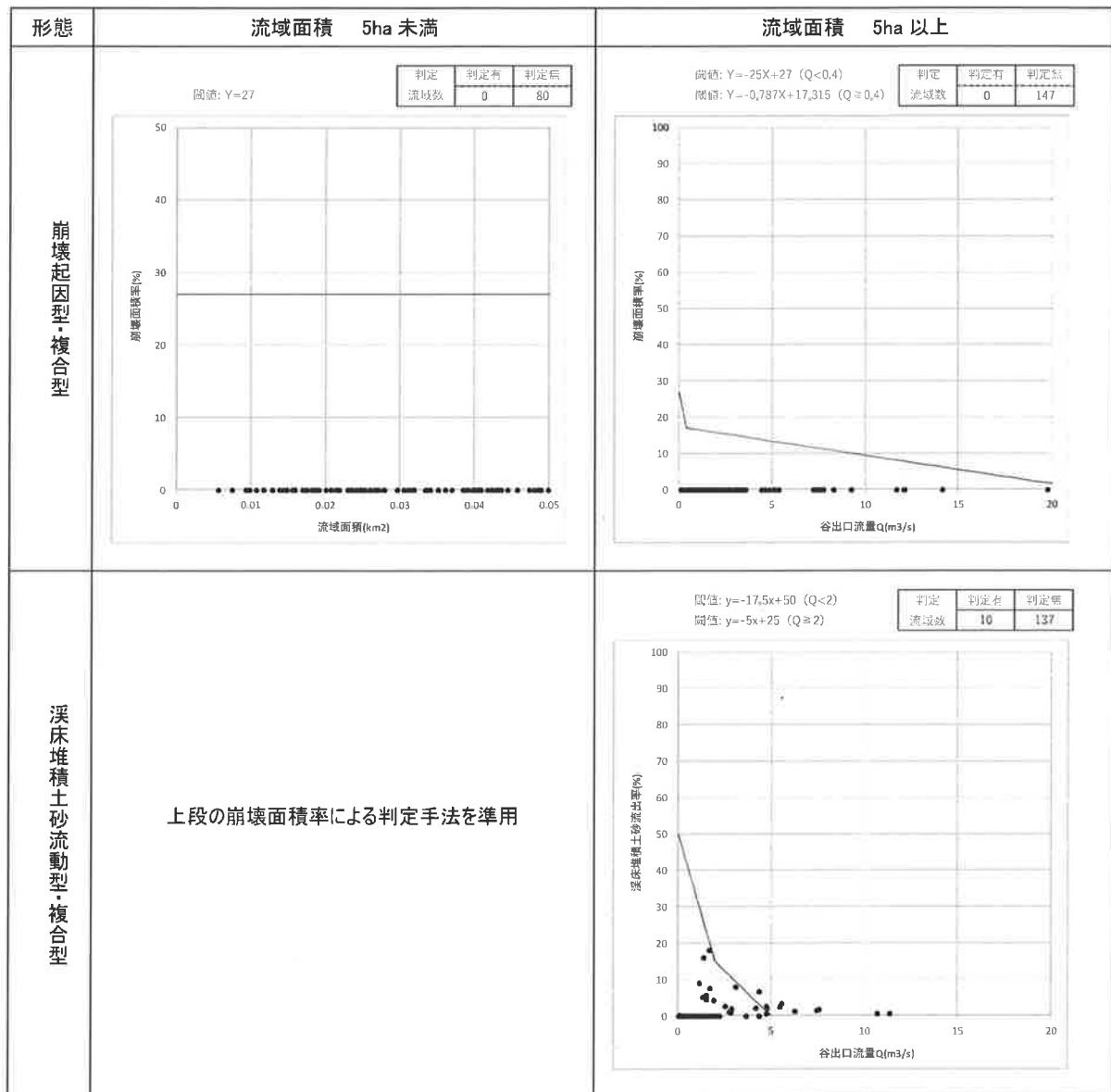


図3.10 丹波モデルの準用による判定 (平成16年台風23号、閾値は丹波モデル)

### (3) 香美町における土石流判定手法の構築

#### ① 現地調査

丹波モデルの準用による判定結果を踏まえ、サンプル的な現地調査を行って、実際の土砂流出状況と判定結果の適合性やパラメータとなる代表粒径等について検討した。

土石流発生危険度  $q_* \geq 2$  かつ 溪床勾配  $15^\circ$  以上となる区間(溪床堆積土砂流出区間  $LI$ )の現地状況を確認した結果、土砂流出が進行している区間がいずれも  $LI$  に対応していることが確認できた(一例: 図 3.17)。

代表粒径  $d$  については、溪床勾配  $15^\circ$  以上の発生区間や下流の土石流堆積物の状態を確認した結果、概ね丹波モデルと同じ  $30\text{cm}$  で妥当であることが確認できた。

#### ② パラメータの設定

現地調査の結果、溪床土砂流出区間の閾値や代表粒径について丹波市での検討結果と大きな違いが確認されなかったため、以下を香美町でのパラメータとして適用することとした。

- ・ 溪床土砂流出区間の閾値 :  $q_* \geq 2$  かつ 溪床勾配  $15^\circ$  以上
- ・ 代表粒径 :  $d = 30\text{cm}$

#### ③ 土石流判定のための閾値の設定

丹波モデルを準用した判定において、崩壊起因型の判定では問題が確認されなかったため、空振りが確認された溪床堆積土砂流動型の閾値について検討することとした。

溪床堆積土砂流動型の閾値は、検証対象降雨とした平成 16 年台風 23 号で土石流の発生が確認されていないことから、丹波市における溪床堆積土砂流動型の発生レベルを考慮しつつ、プロットの上限付近に閾値を設定した(図 3.11)。

なお、設定した閾値の妥当性については、代表的な非発生降雨や土砂災害警戒情報に用いられている土砂災害発生基準線(CL)を超過する降雨を用いて次項にて検証する。

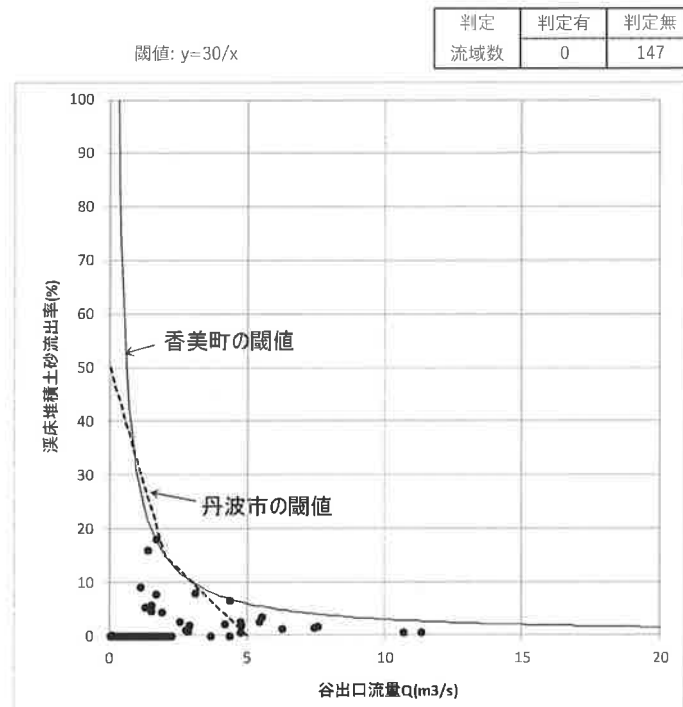


図 3.11 香美町における溪床堆積土砂流動型の閾値設定(平成 16 年台風 23 号)

④ その他降雨による妥当性の検証

前項で設定した香美町の閾値について、以下の降雨を用い妥当性の検証を行った。検証に用いた降雨のハイトグラフについては図 3.12 および図 3.13 に代表的なものを示した。

- ・平成 2 年の非発生降雨
- ・平成 29 年の非発生降雨
- ・平成 30 年の非発生降雨
- ・CL 超過レベルの仮想降雨（前方集中型）
- ・CL 超過レベルの仮想降雨（後方集中型）

なお、香美町域では過去に土石流発生の記録が無いことから、土石流が生じる可能性のある降雨として土砂災害警戒情報に用いられている CL（土砂災害発生基準線）を超過するレベルの仮想降雨 2 ケース加えている。この仮想降雨と土砂災害警戒情報の CL との対応関係を図示すると図 3.14、図 3.15 のとおりである。sim1 の仮想降雨は香美町を 5km メッシュに分割した単位ごとに設定された複数の CL 群の下限付近を、sim2 の仮想降雨は CL 群の上限付近を超過するレベルの降雨となっている。

上記の降雨と香美町の閾値との対応状況をとりまとめ図 3.16 に示した。

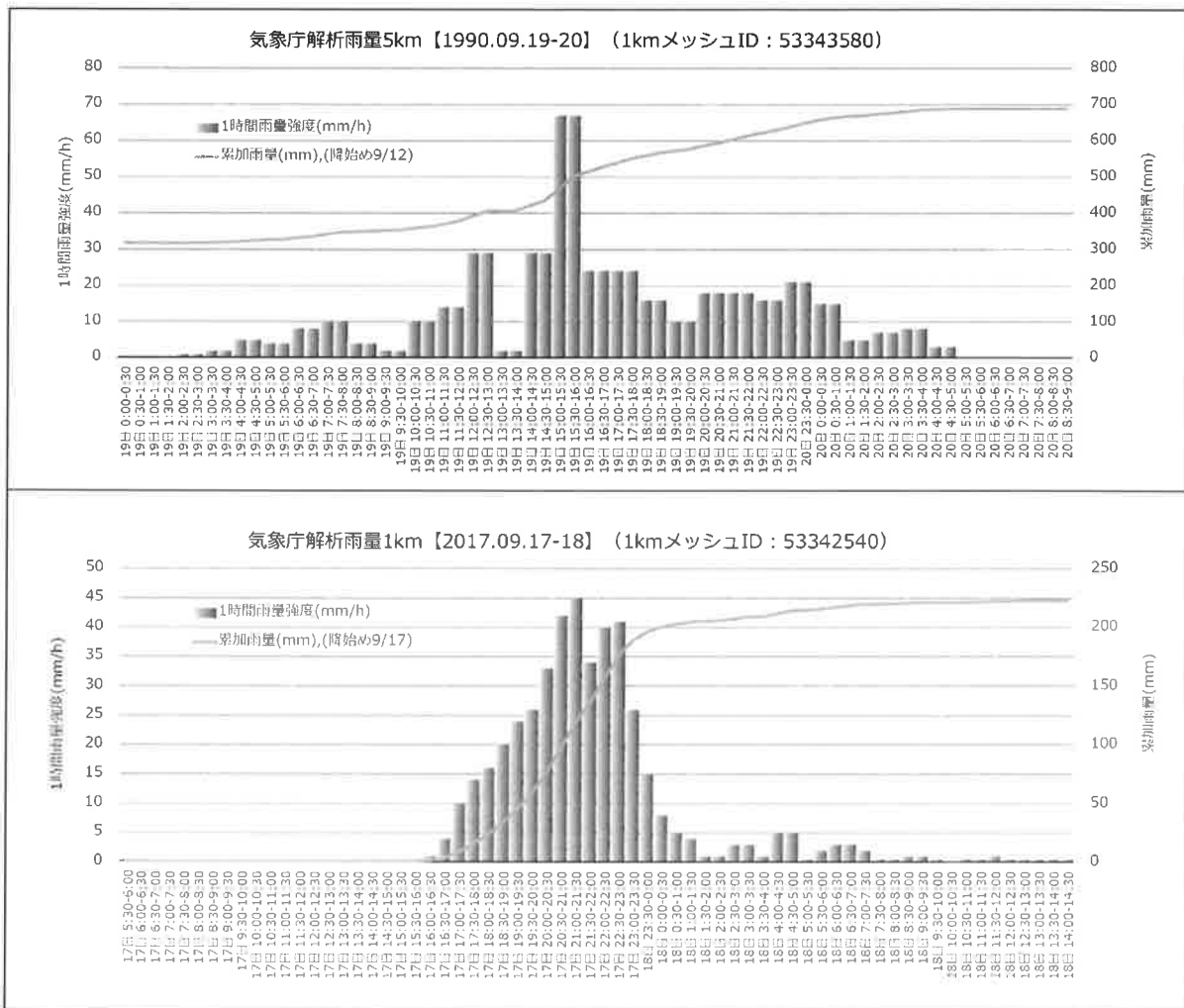


図 3.12 ハイトグラフ (1)

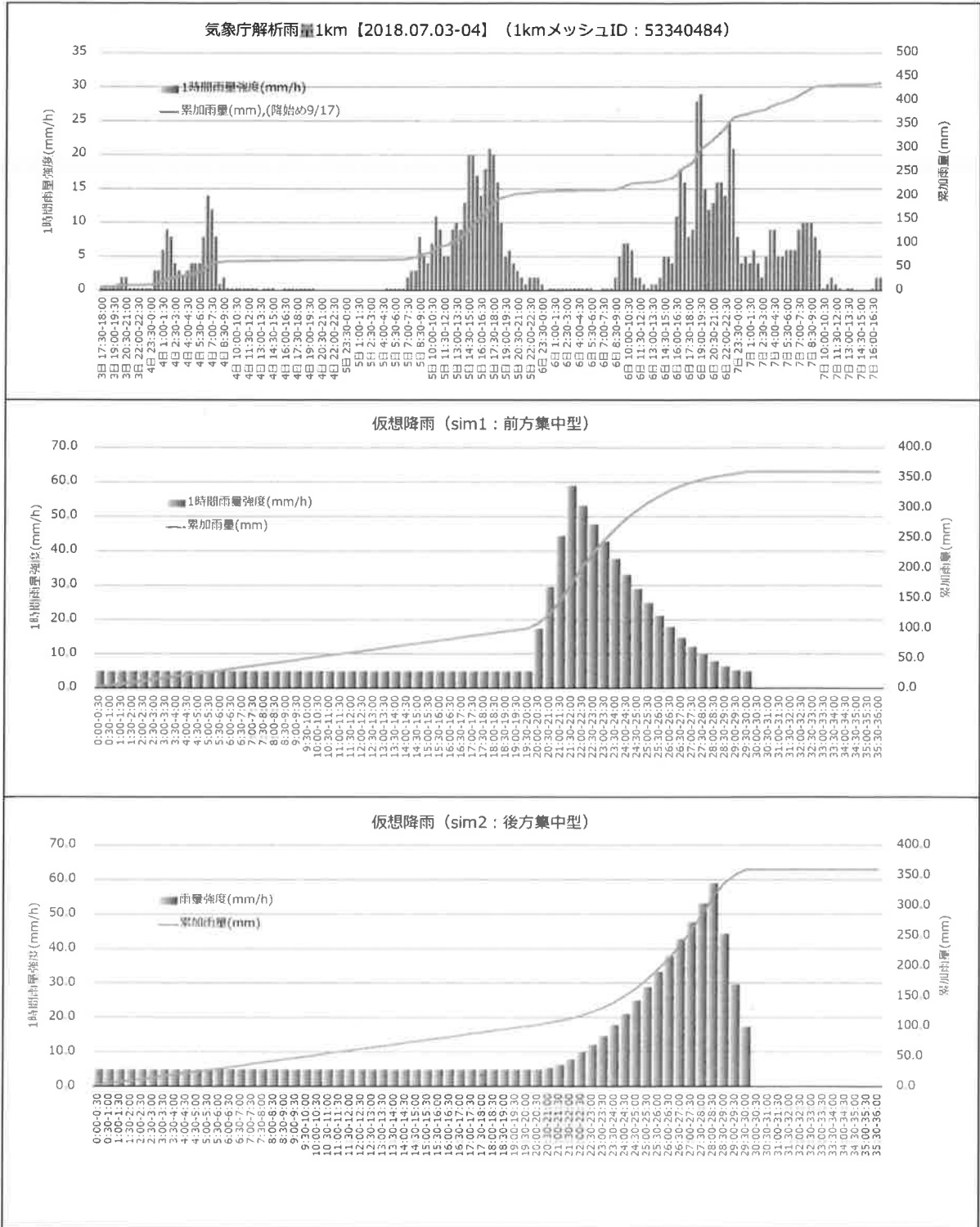


図 3.13 ハイエトグラフ (2)

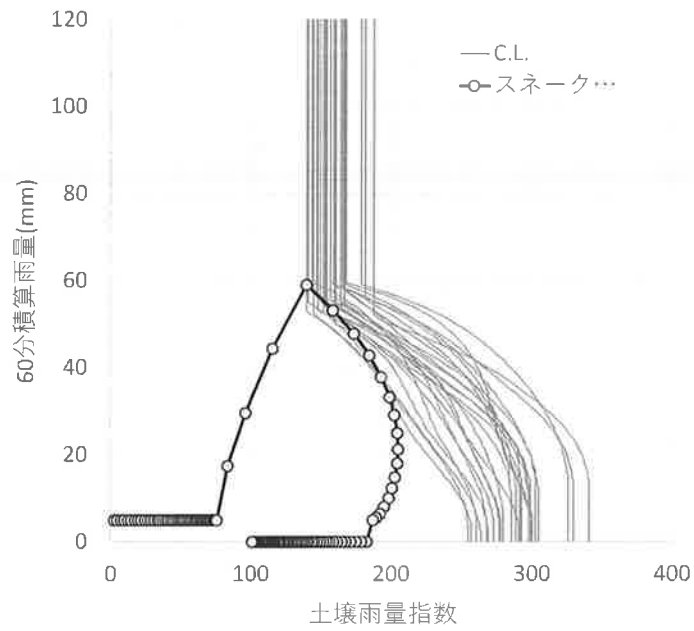


図 3.14 仮想降雨 (sim1) と土砂災害警戒情報の CL との関係

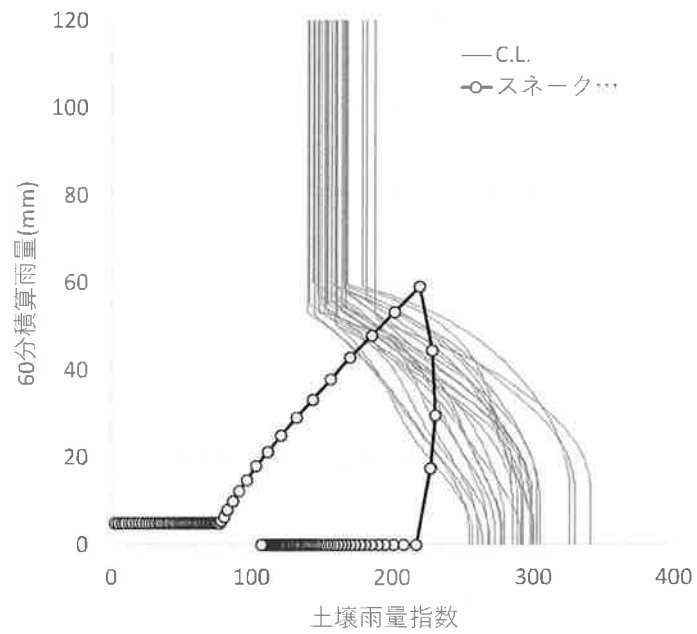
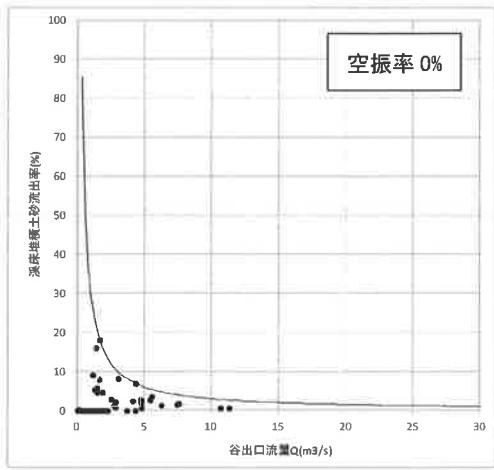


図 3.15 仮想降雨 (sim2) と土砂災害警戒情報の CL との関係

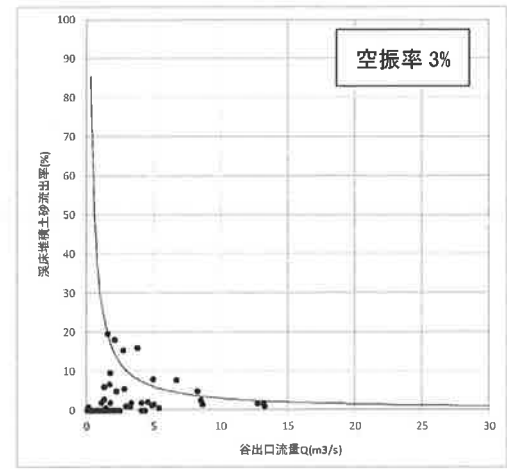
【参考】平成16年（非発生降雨上流に閾値を設定）  
閾値:  $y=30/x$

判定	判定有	判定無
流域数	0	147



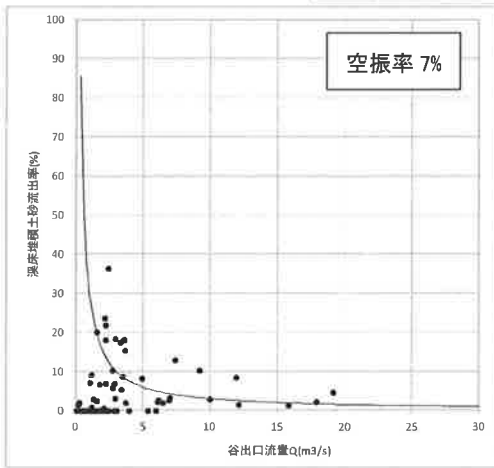
平成30年（非発生降雨）  
閾値:  $y=30/x$

判定	判定有	判定無
流域数	6	141



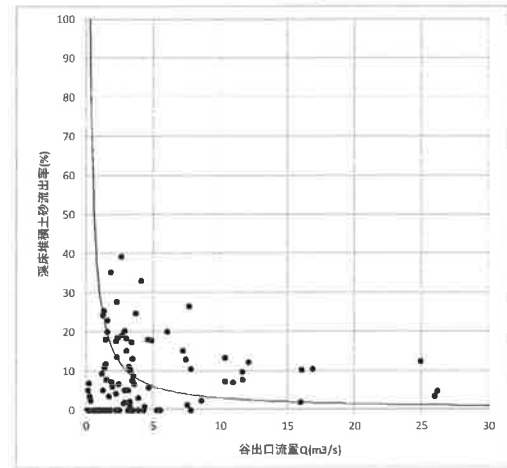
平成29年（非発生降雨）  
閾値:  $y=30/x$

判定	判定有	判定無
流域数	16	131



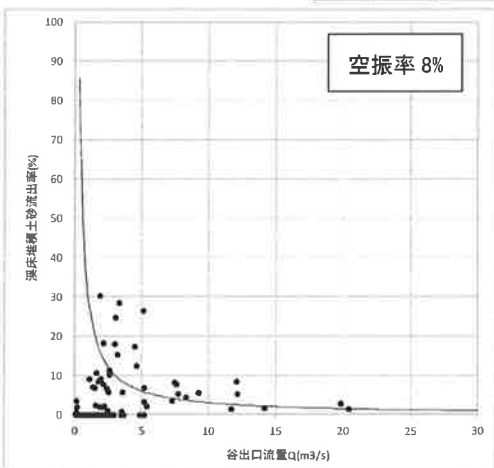
仮想降雨 (sim1)  
閾値:  $y=30/x$

判定	判定有	判定無
流域数	39	108



平成29年（非発生降雨）  
閾値:  $y=30/x$

判定	判定有	判定無
流域数	19	128



仮想降雨 (sim2)  
閾値:  $y=30/x$

判定	判定有	判定無
流域数	39	108

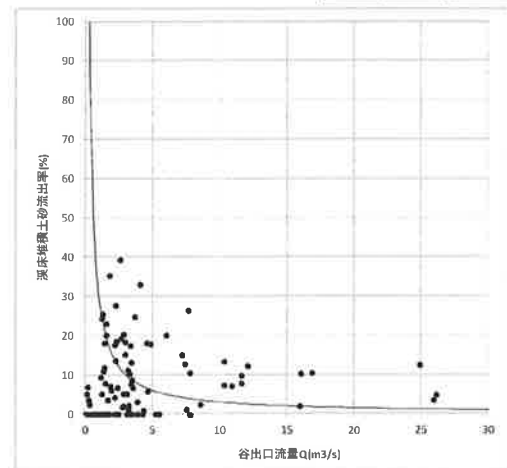


図 3.16 香美町の閾値の妥当性の検討



今回検討した降雨における空振率は0~8%であった(図 3.16)。丹波市での検討事例では空振率が 34.7%<sup>15)</sup>であったのに対してワンオーダー低い値となっている。一方、崩壊予測モデルの空振率 3%前後<sup>8)</sup>よりもやや多いレベルである。

CL 超過レベルの仮想降雨を適用したケースでは、降雨量の増加に反応して閾値を超過する溪流が急増している。仮想降雨によって土石流発生危険度  $q^* \geq 2$  かつ溪床勾配  $15^\circ$  以上となる地点について、現地状況を確認した結果の一例を図 3.17 に示す。図示した溪流は矢田川層群の分布域に位置する流域面積  $0.25\text{km}^2$  の土石流危険溪流である。この溪流の谷出口には砂防堰堤が施工され満砂状態となっている。中流域では溪岸・溪床の侵食や石礫の堆積などが見られ、過去に土石流が発生していたことが確認できる。堰堤に堆積した石礫や倒木は苔に覆われており堆積後 10 年以上の時間経過が推測される。また、その上部には比較的新しく少量の石礫の堆積が見られたことから土砂流出を繰り返しているものと考えられる。この溪流の下流域では過去に災害記録が確認されていないことから人家への影響は無かったようである。図中の溪流沿いには、10m 間隔に配置した流出率計算点を図示しており、CL 超過レベルの降雨である仮想降雨によって土石流発生危険度  $q^* \geq 2$  かつ溪床勾配  $15^\circ$  以上となる地点に「●」を表示している。「●」の連なる区間は、現地調査によって把握した土石流の流下痕跡と一致しており、 $q^* \geq 2$  と溪床勾配  $15^\circ$  以上による溪床堆積土砂流出区間の判定の妥当性が確認できた。この溪流で見られた複数の土石流の発生時期は不明であるが、図 3.18 のとおり平成 2 年および平成 29 年の降雨で香美町の閾値を超えていることから、これらの降雨時に土石流が発生したのと考えれば設定した閾値の妥当性がさらに裏付けられよう。



図 3.17 土石流発生危険度の現地検証

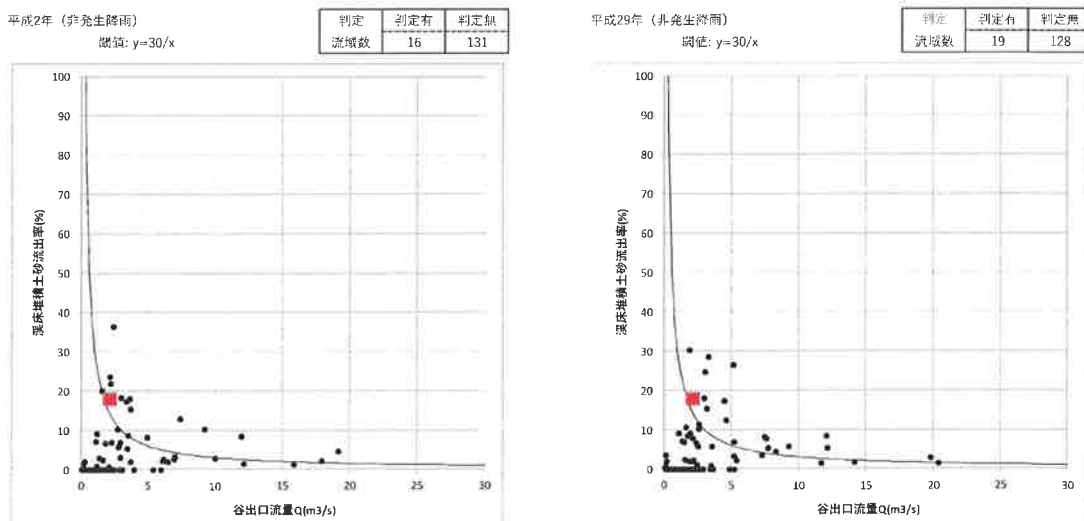


図 3.18 香美町の閾値と堰堤に捕捉された土石流(図中の■が堰堤に捕捉された土石流発生溪流)

### ⑤ 改良案の検討

前項での検討により新たに設定した溪床堆積土砂流動型の閾値について概ね妥当性が確認できた。しかしながら、空振率がやや高めな状況も確認された。

このため、空振りを低減するための改良案を検討するものとした。改良案の検討は、土石流発生危険度  $q^*$  の演算過程においてパラメータを少なくするために固定的な扱いとしていた溪床勾配  $15^\circ$  以上区間の河道幅を仮想的に変化させる方法の適用性について検討した。

河道幅  $B_0$  の推定方法については、式(1)で示されるレジーム則がよく知られており、 $\alpha$  は 3.5~7.0 程度の値をとるとされている<sup>18)</sup>。

$$B_0 \approx \alpha Q^{1/2} \quad (1)$$

ここに、 $B_0$  は河道幅、 $Q$  は流量、 $\alpha$  は係数である。

原田らは現地にて計測した河道幅とレジーム則との相関について検討した結果、流域面積に加えて河床勾配を加えた式(2)に  $\eta = 2.4$  を適用することで実測値との相関性が向上したことを報告している (図 3.19)<sup>19)</sup>。

$$B_0 \approx \sqrt{\frac{fkr_e}{8gd}} \sqrt{\frac{A}{I}} = \eta \sqrt{\frac{A}{I}} \quad (2)$$

ここに、 $B_0$  は河道幅、 $A$  は対象地点より上流域の流域面積、 $I$  は溪床勾配、 $f$  は摩擦損失係数、 $r_e$  は有効降雨強度、 $g$  は重力加速度、 $d$  は代表粒径、および  $k$ 、 $\eta$  は係数である。

本検討では、式(2)と  $\eta = 2.4$  を用いて河道幅  $B_0$  を計算点ごとに变化させる方法の適用性を検討するものとした。

検討に用いる降雨は、前述と同じ以下の降雨である。検討の方法は、まず現地調査において砂防堰堤に堆積した土石流が見られた溪流 (図 3.17) が平成 2 年の降雨で発生したものと仮定してこれを捕捉できる閾値を設定する。その後、設定した閾値に対して、それ以外の非発生降雨をもとに空振率を求めて、図 3.16 の結果と比較するものとした。なお、比較のため CL 超過レベルの降雨について試算するものとした。

- ・平成 2 年の発生降雨 (砂防堰堤に土石流の堆積あり)
- ・平成 16 年の非発生降雨
- ・平成 29 年の非発生降雨
- ・平成 30 年の非発生降雨
- ・CL 超過レベルの仮想降雨 (前方集中型)
- ・CL 超過レベルの仮想降雨 (後方集中型)

以上による検討結果を図 3.20 に示す。図 3.20 では平成 2 年に発生したと考えられる土石流を捕捉する閾値によって空振率を 0~1% に低減できていることが確認された。なお、CL 超過レベルの仮想降雨を適用したケースでは、閾値を超過する溪流数が図 3.16 に対して半数ほどに減少し改良前よりも閾値を超過しにくくなっていることも確認された。

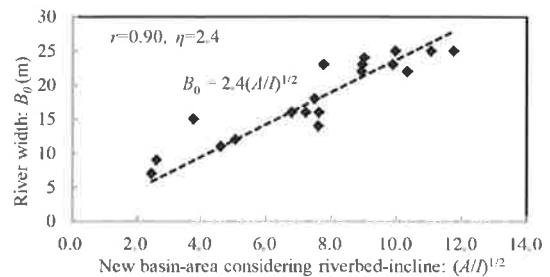
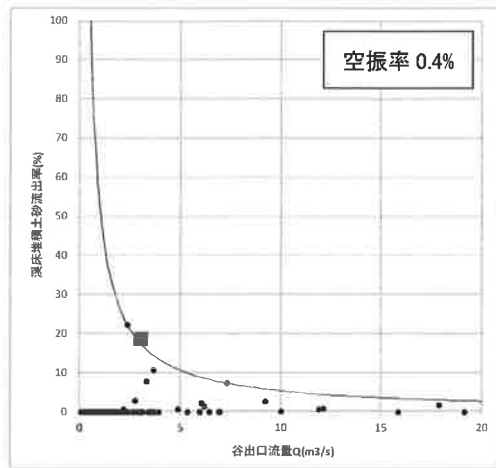


図 3.19 勾配を考慮した流域面積と河道幅との関係<sup>19)</sup>  
(溪床勾配 1/50 以上)

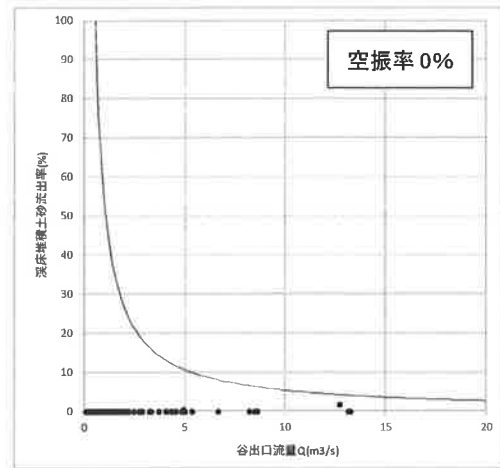
平成2年 (土石流発生溪流あり)  
閾値:  $y=5.3/x$

判定	判定有	判定無
流域数	2	145



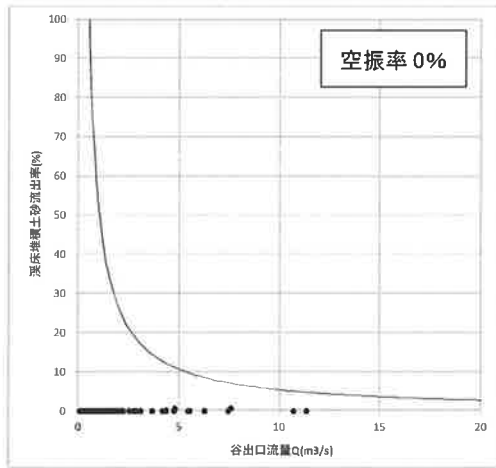
平成30年 (非発生降雨)  
閾値:  $y=5.3/x$

判定	判定有	判定無
流域数	0	147



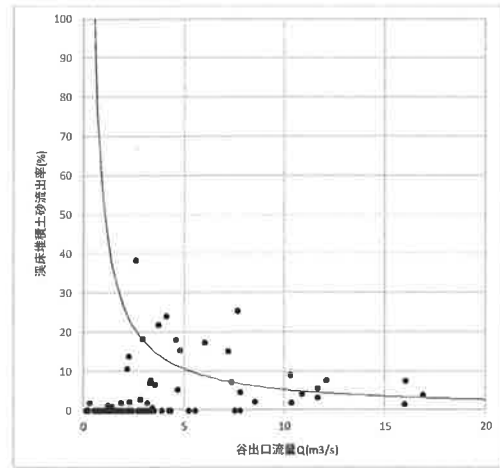
平成16年 (非発生降雨)  
閾値:  $y=5.3/x$

判定	判定有	判定無
流域数	0	147



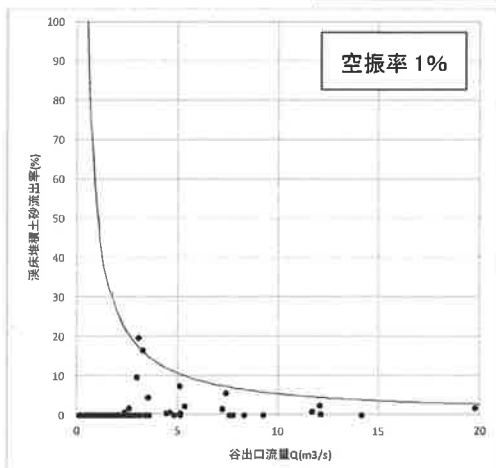
仮想降雨 (sim1)  
閾値:  $y=5.3/x$

判定	判定有	判定無
流域数	16	131



平成25年 (非発生降雨)  
閾値:  $y=5.3/x$

判定	判定有	判定無
流域数	2	145



仮想降雨 (sim2)  
閾値:  $y=5.3/x$

判定	判定有	判定無
流域数	16	131

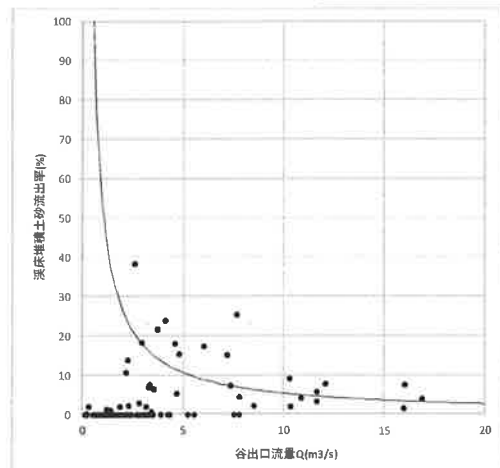


図 3.20 河道幅を仮想的に与える改良案 (図中の■が堰堤に捕捉された土石流発生溪流)

### 3. 4 まとめと今後の課題

香美町を対象に新たな土石流判定手法の適用検証を行う中で確認された事項を列記すると以下のとおりである。

- ① 新たな土石流判定手法は、崩壊起因型や溪床堆積土砂流動型に対応した手法であり、丹波モデルを準用した検証の結果、崩壊起因型の判定には問題が確認されず、香美町においても適用できることがわかった。
- ② 一方、溪床堆積土砂流動型の閾値（丹波モデル）は、10 渓流で空振りが確認されたため、香美町のデータに基づき閾値を見直し空振率を 0～8%に低減できたものの、崩壊予測モデルの空振率よりもやや高いレベルとなった。
- ③ CL 超過レベルの降雨である仮想降雨で土石流発生危険度  $q^* \geq 2$  かつ溪床勾配  $15^\circ$  以上となる地点を現地確認した結果、土石流の流下痕跡と合致し溪床堆積土砂流出区間の閾値の妥当性が確認できた。
- ④ 現地調査の結果、平成 2 年および平成 29 年に土石流が発生した可能性がみられた渓流について、見直した溪床堆積土砂流動型の閾値によって土石流の発生を予測できることが確認された。
- ⑤ 空振率のさらなる低減のために河道幅を仮想的に変化させる方法を適用した結果、平成 2 年に発生した可能性のある土石流を捕捉しつつ大きく空振りを低減できることがわかった。

本検討の検討で確認された事項を踏まえ、今後以下の事項に基づき他の市町への展開に向けたい。

#### ① 谷出口下流への土砂流出量に着目した閾値の設定

香美町の溪床堆積土砂流動型の閾値は、丹波市で確認された同種の土石流についても概ねカバーできるレベルに設定しているが 1 事例を捕捉できていない。捕捉できていない 1 事例は、谷出口下流への土砂流出量が非常に少なく被害の発生に至らない規模の事例である。丹波市での検討では、流域外に土砂流出のあった渓流を流出土砂量の大小に関わらず土石流発生渓流としており、余裕をもって土石流の発生を予測できるように配慮している。このような取り扱いが、空振りの増加とトレードオフの関係にあるため、閾値の設定対象とする土石流の規模を家屋に被害を及ぼすレベルとするなど一定の基準を設ける必要がある。

#### ② 広域展開のための閾値設定の効率化

土石流判定のパラメータとなる溪床堆積土砂流出区間の閾値や代表粒径は地質の異なる丹波市と香美町で大きな違いが確認されなかった。今後、この手法を広域に展開していくためには、現地調査を要するパラメータはできるだけ最小限にすることが望まれるため、過去の研究成果に基づく溪床堆積土砂流出区間の閾値 ( $q^* \geq 2$  かつ溪床勾配  $15^\circ$  以上) は固定的に扱い、代表粒径  $d=30\text{cm}$  を標準値として、良好な結果とならない場合に限って現地調査に基づき代表粒径  $d$  の調整を検討することとしたい。すなわち、パラメータはできるだけ固定化して、谷出口流量や溪床堆積土砂流出率からなる閾値の設定によって渓流ごとの細かな発生場の条件の違いを吸収させることとしたい。

#### ③ 河道幅の仮想計算による高度化

今回、新たに河道幅を仮想的に与える方法を提案した。この方法の適用により係数  $\eta$  のパラメータが増えるため、過去の研究成果に基づく  $\eta = 2.4$  に固定化し、実際の現地状況との違いは閾値の設定の中で吸収していくこととしたい。

#### ④ 土石流の発生事例が無い地域での閾値設定

今回の検討では、代表的な複数の非発生降雨の上限に設定した閾値により過去の土石流発生事例を捕捉できた。広域に展開する場合、土石流の発生事例が記録として残っていない地域においては複数の非発生降雨の上限に閾値を設定することで対応していきたい。

#### 4. おわりに

本報告では、前々報<sup>15)</sup>にて丹波市を対象に検討した土石流の発生機構を考慮した新たな判定手法について、地質の異なる香美町域を対象にその適用性を検証し、その結果について報告した。

検討の結果、地質の異なる香美町においても新たな土石流判定手法を適用できることが確認できた。また、さらに空振率を改善する方法として河道幅を仮想的に与える方法を提案し、崩壊予測モデルによる空振率と遜色のないレベルで運用できる見通しとなった。

しかしながら、検証事例が丹波市と香美町に限られているため、引き続き事例検証を重ねつつ、「3.4 まとめと今後の課題」に記した事項を踏まえて全域域への適用に向けた。

本プロジェクトの推進に関しては、兵庫県県土整備部砂防課や新温泉町土木、香美町の全面的なご支援を受けた。このような機会を与えていただいた関係各位に深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省砂防部：令和元年の土砂災害、令和2年3月
- 2) 気象庁：災害時気象報告（平令和元年東日本台風等による10月10日から10月26日にかけての大雨・暴風等）、災害時自然現象報告書2020年第3号、令和2年3月31日
- 3) 沖村孝・市川龍平：数値地形モデルを用いた表層崩壊危険度の予測法、土木学会論文集、1985.
- 4) 沖村孝・鳥居宣之・尾崎幸忠・南部光広・原口勝則：豪雨による土砂災害を対象としたリアルタイムハザードシステムの構築、新砂防、63(6)、4-12、2011.
- 5) Takashi OKIMURA、 Nobuyuki TORII、 Masatoshi MATSUMOTO、 Mitsuhiro NANBU and Katsunori HARAGUCHI: Construction of the real-time hazard forecasting system in order to support evacuation from surface slope failure disasters caused by heavy rainfalls、 International Symposium on Earthquake Induced Landslides and Disaster Mitigation at the 3rd Anniversary of the Wenchuan Earthquake、 Chengdu、 China、 2011.
- 6) 沖村孝・鳥居宣之・南部光広・原口勝則：表層崩壊リアルタイムハザードシステムの構築に際して生じた課題と対策、建設工学研究所論文報告集、52、119-137、2010.
- 7) 沖村孝・鳥居宣之・南部光広・原口勝則：表層崩壊リアルタイムハザードシステムの構築に際して生じた課題と対策(2)、建設工学研究所論文報告集、53、153-173、2011.
- 8) 沖村孝・鳥居宣之・中川渉・原口勝則：表層崩壊リアルタイムハザードシステムの構築に際して生じた課題と対策(3)、建設工学研究所論文報告集、54、159-183、2012.
- 9) 沖村孝・鳥居宣之・中川渉・原口勝則：表層崩壊リアルタイムハザードシステムの構築に際して生じた課題と対策(4)、建設工学研究所論文報告集、55、91-116、2013.
- 10) 沖村孝・鳥居宣之・中川渉・原口勝則 ほか：表層崩壊リアルタイムハザードシステムの構築に際して生じた課題と対策(5)、建設工学研究所論文報告集、56、45-66、2014.
- 11) 沖村孝・鳥居宣之・中川渉・原口勝則：土砂災害のためのリアルタイムハザードシステムの作成手順、建設工学研究所論文報告集、56、67-83、2014.
- 12) 沖村孝・鳥居宣之・中川渉・原口勝則：表層崩壊リアルタイムハザードシステムの構築に際して生じた課題と対策(6)、建設工学研究所論文報告集、57、17-36、2015.
- 13) 沖村孝・鳥居宣之・中川渉・原口勝則・鏡原聖史：表層崩壊リアルタイムハザードシステムの構築に際して生じた課題と対策(7)、建設工学研究所論文報告集、58、43-58、2016.
- 14) 沖村孝・鳥居宣之・中川渉・原口勝則・鏡原聖史：表層崩壊リアルタイムハザードシステムの構築に際して生じた課題と対策(8)、建設工学研究所論文報告集、59、29-39、2017.

- 15) 沖村孝・鳥居宣之・中川渉・原口勝則・鏡原聖史・笠原拓造・江川真史・孝子繪図：表層崩壊リアルタイムハザードシステムの構築に際して生じた課題と対策 (9)、建設工学研究所論文報告集、60、29-43、2018.
- 16) 沖村孝・鳥居宣之・中川渉・原口勝則・鏡原聖史・笠原拓造・江川真史・孝子繪図：表層崩壊リアルタイムハザードシステムの構築に際して生じた課題と対策 (10) ～平成 30 年 7 月豪雨の検証と課題～、建設工学研究所論文報告集、61、23-66、2019.
- 17) 神戸地方気象台：兵庫県災害年表 ([https://www.jma-net.go.jp/kobe-c/shiryou/saigai\\_nenpyou/pdf/saigai2004\\_kobe.pdf](https://www.jma-net.go.jp/kobe-c/shiryou/saigai_nenpyou/pdf/saigai2004_kobe.pdf))
- 18) 水山高久：山地河川の掃流砂に関する研究，京都大学学位論文、10p、1977.
- 19) 原田・中谷・里深：山地河川における河道幅の推定方法に関する提案、砂防学会研究発表会概要集、396-397、2014.

### 著 者

沖村 孝	所員、理学博士、地盤工学
鳥居 宣之	所員(非常勤) 神戸市立工業高等専門学校教授、博士(工学)、山地防災工学
中川 渉	客員研究員 応用地質株式会社、博士(工学)、地盤工学
原口 勝則	客員研究員 国際航業株式会社、技術士(建設部門)、砂防工学
鏡原 聖史	客員研究員 株式会社ダイヤコンサルタント、博士(工学)、地盤工学
笠原 拓造	国際航業株式会社、砂防工学