

平成30年7月豪雨における土石流による 住宅及び社会基盤施設の被害と今後の研究課題



広島大学防災・減災研究センター長
土田 孝

広島県における土砂災害の概要

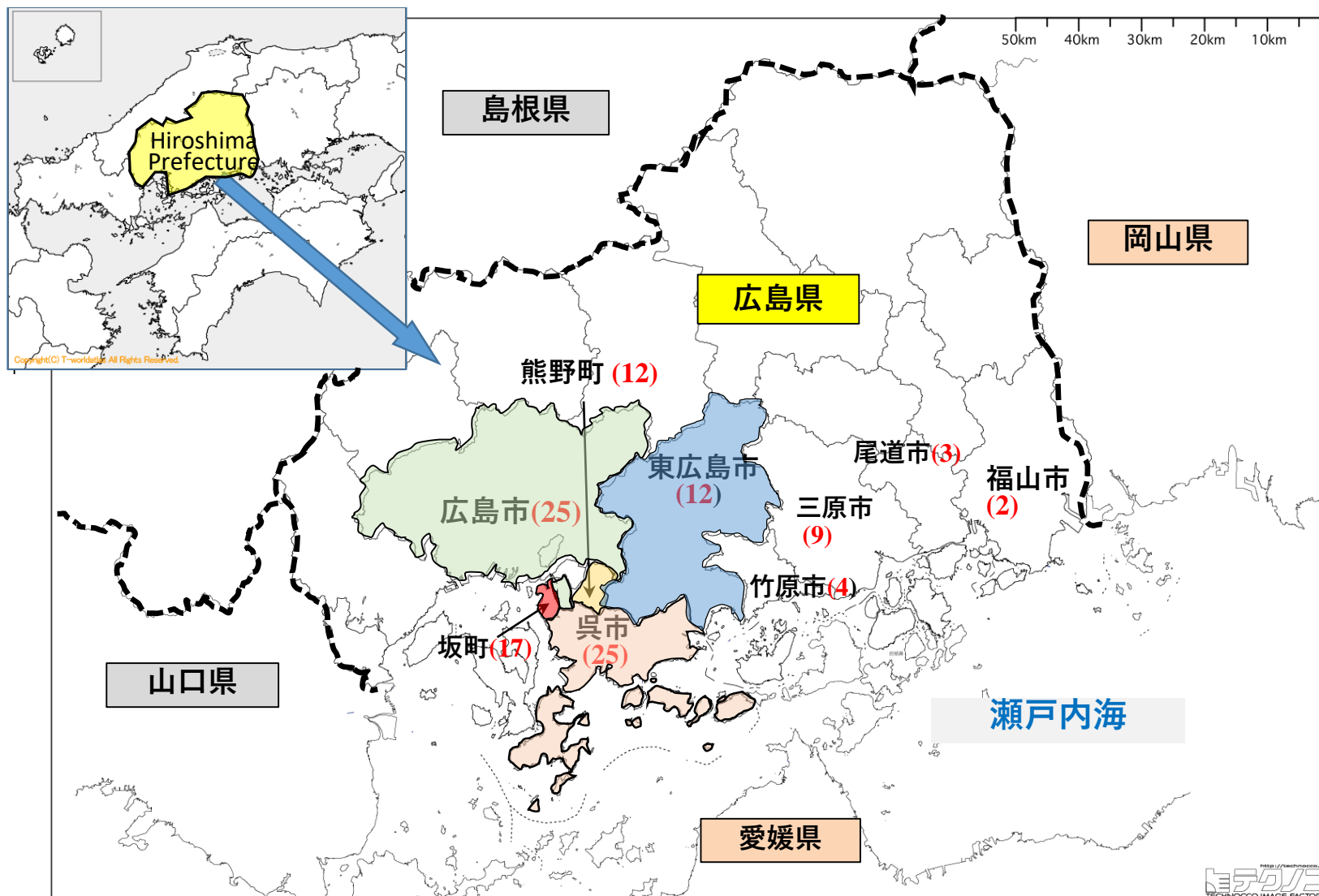
市町の名前	土砂災害の発生箇所数	土砂災害による死者	本災害による死者・行方不明者	負傷者数	全死者・行方不明者に対する土砂災害による死者の割合r (%)
広島市	211	20	25	30	80
呉市	182	20	25	22	80
竹原市	134	4	4	5	100
三原市	145	5	9	9	56
尾道市	53	2	3	6	67
福山市	90	0	2	4	0
府中町	24	1	2	0	50
東広島市	91	8	13	20	62
安芸高田市	6	0	3	0	0
海田町	6	0	1	4	0
熊野町	10	12	12	4	100
坂町	69	15	17	12	88
その他	48	0	0	9	-
計	1242	87	116	125	75

近年の広島県における土砂災害による死者

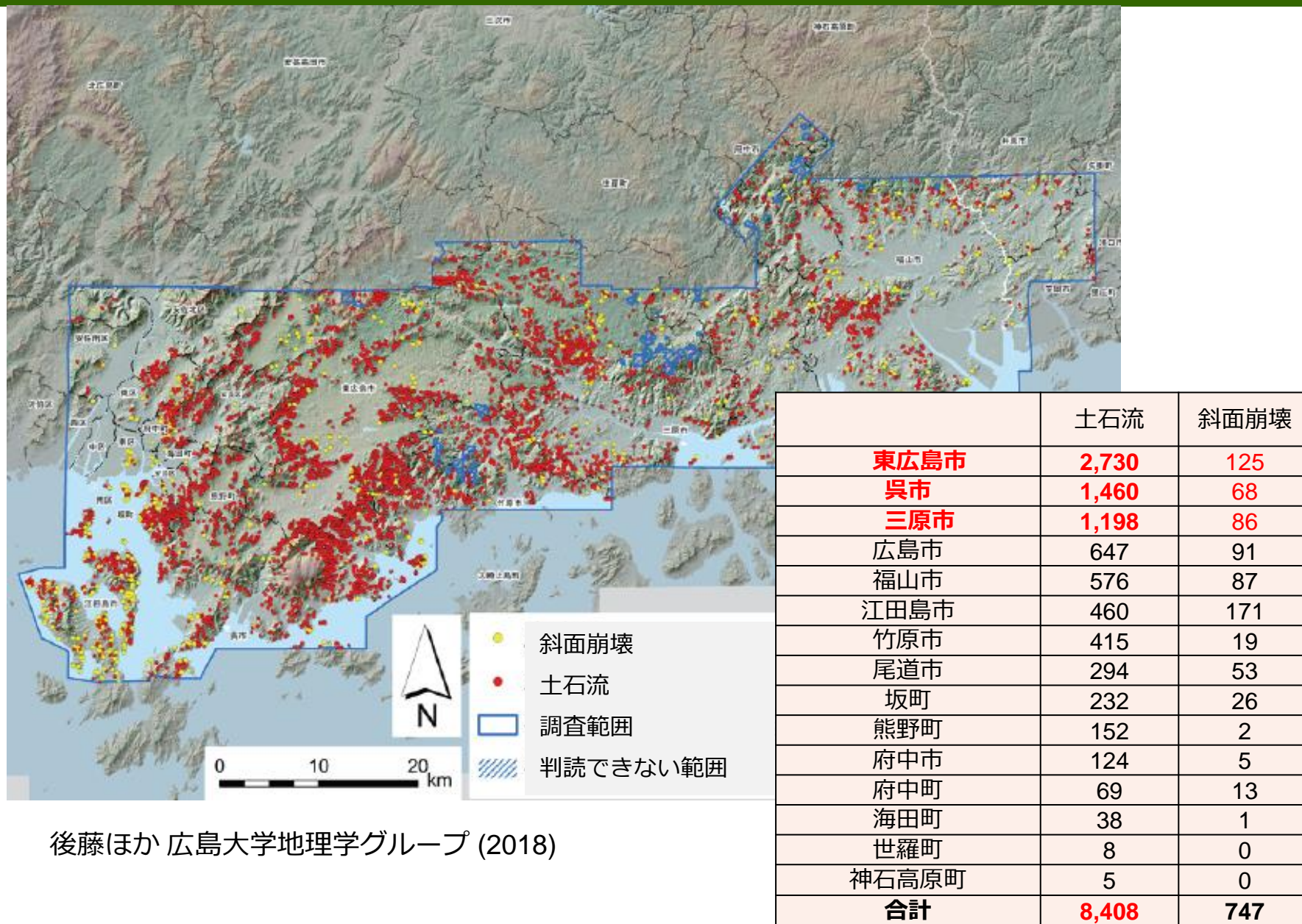
1999年6月29日の災害: 死者・行方不明者32名

2014年8月20日の災害: 死者75名

広島県の地図と災害による犠牲者数

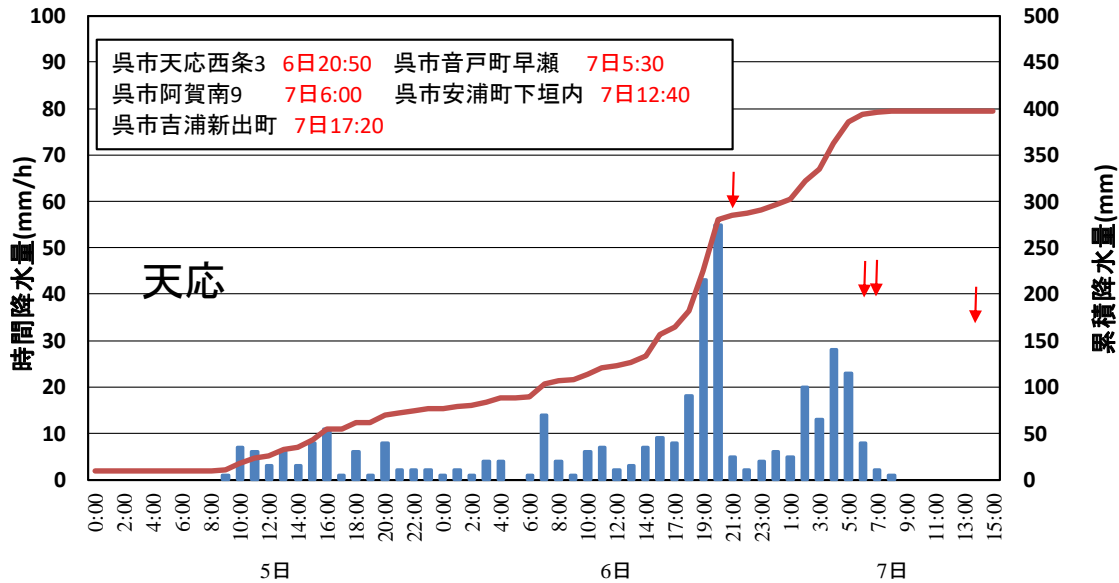
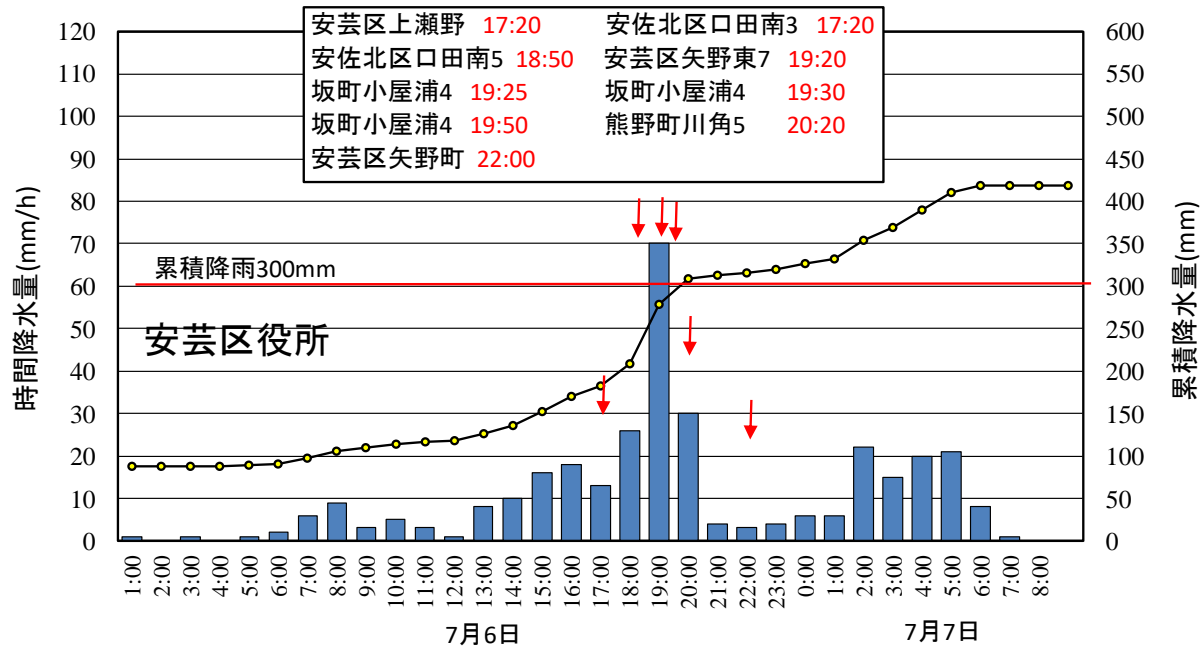


広島県内の土石流発生地点と斜面崩壊地点（土砂の動きから計測）

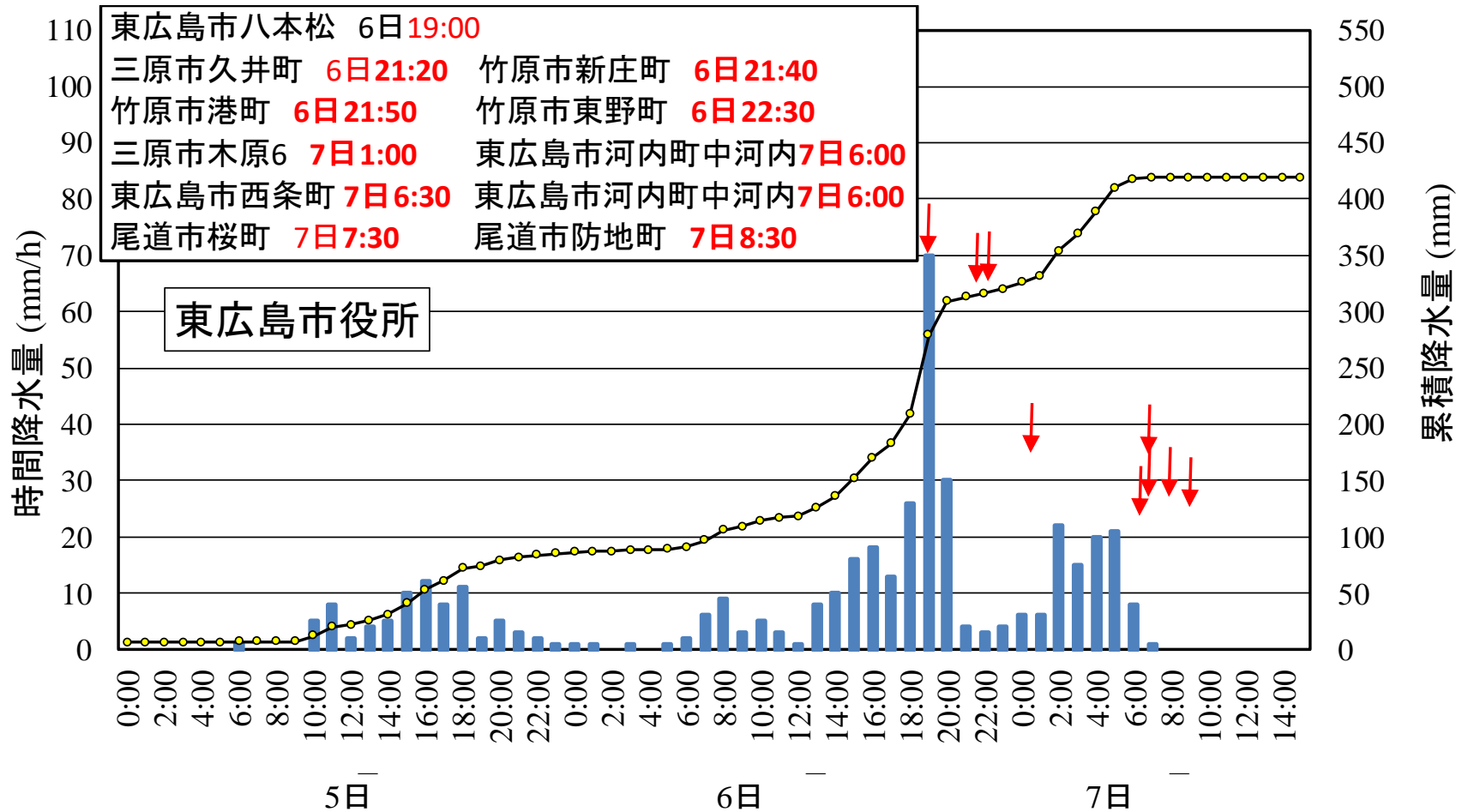


後藤ほか 広島大学地理学グループ (2018)

広島県における降雨の状況と発災時刻（広島市安芸区、坂町、熊野町、呉市）



広島県における降雨の状況と発災時刻（東広島市、竹原市、三原市、尾道市）



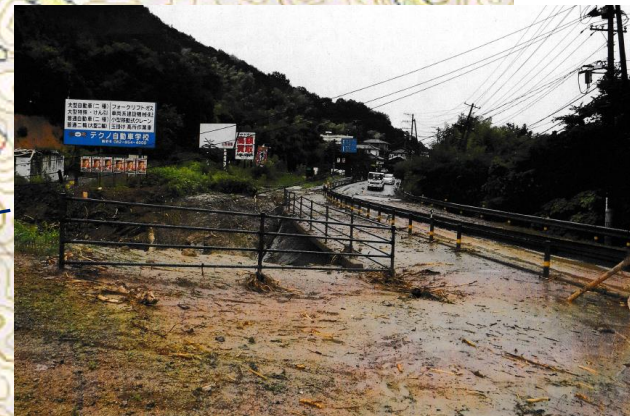
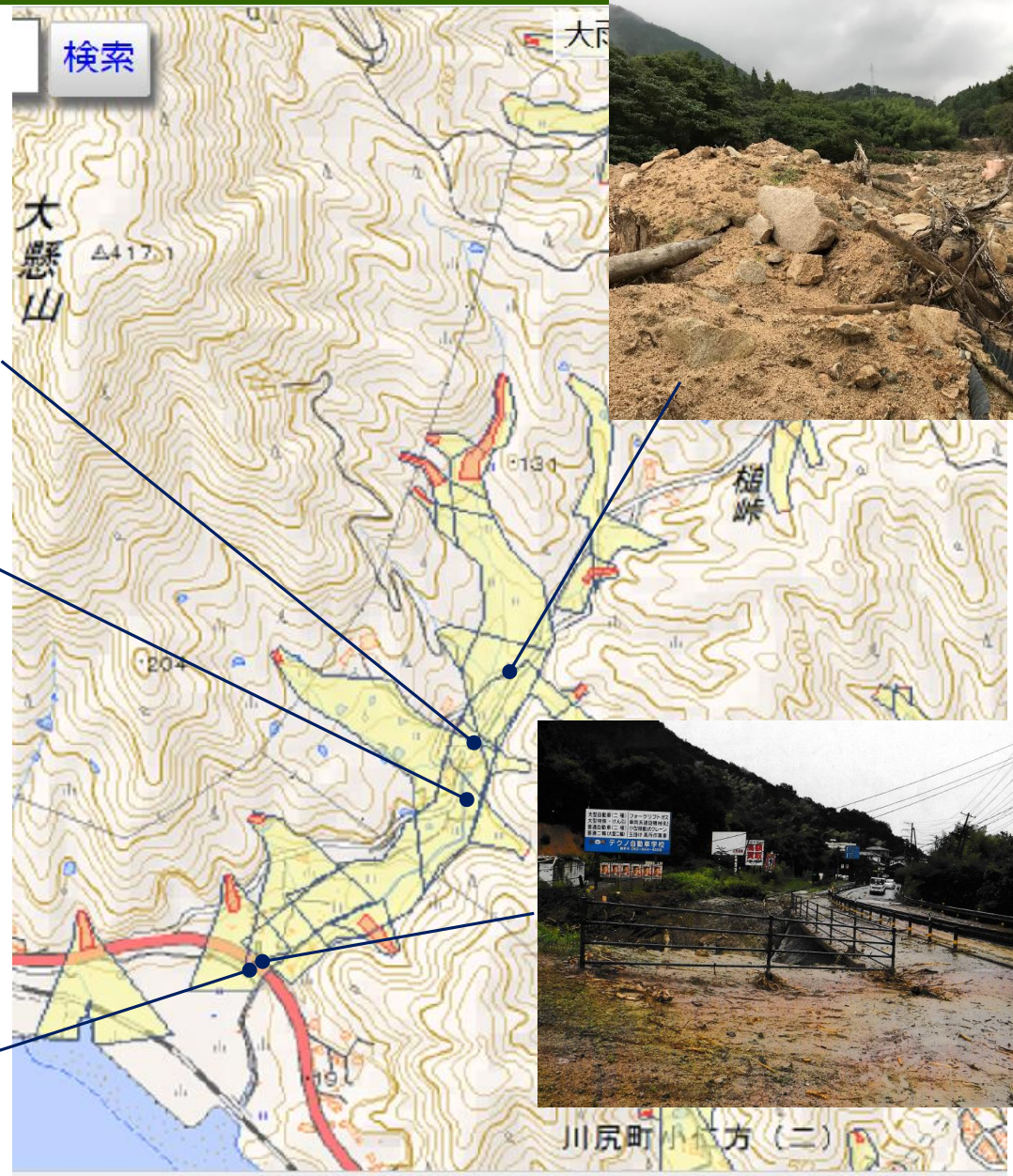
呉市川尻町・仁方町の土石流災害

土石流が、道路や河川に流入し、住宅、水道施設、道路、鉄道に被害を与えて海に流出した例である。

土石流は住宅を破壊した後、約1500m移動している。



この地域の土砂災害警戒区域・特別警戒区域



地盤災害の観点からの広島県の土砂災害の特徴

1. 土石流による道路・水道・ため池など**様々なインフラにおける被害**
2. 土石流が河道を閉塞し洪水氾濫を助長するといった**土砂災害と洪水の相乗効果による被害の拡大**
3. 溪流の基礎調査の予測（特別警戒区域）を上回る流出土砂量、コアストーンによる被害拡大など**外力としての土石流の巨大化**
4. 河川周辺における大規模な**地盤陥没**による交通途絶の多発

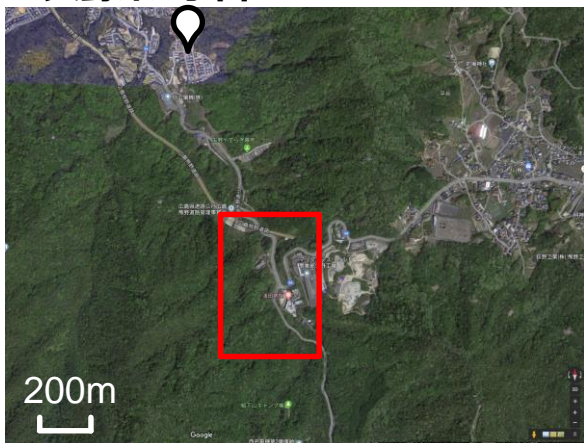
1と2に当てはまる典型的な事例として、広島市安芸区矢野町県道34号線沿いにある昭和入口交差点周辺の調査結果を紹介する。

**広島市安芸区矢野町 昭和入口交差点付近に
おける土砂洪水災害による道路利用者の被災**

調査箇所 | 広島市安芸区・昭和入口交差点



矢野東7丁目



調査箇所 | 広島市安芸区・昭和入口交差点

実施日：7月14日，8月3日

参加者：土田，橋本，他学生4名（広大）

- 矢野，熊野町，焼山の結節点.
- 県道34号が矢部川と**昭和入口交差点**にて交差した後，広島熊野道路の高架をくぐり，並行して北へと下る複雑な場所.
- ✓ 7月6日夜に交差点で**信号待ちをしていた複数台の車**に大量の土砂（濁流？）が流れ込んだ.
- ✓ 被災箇所は交差点から広島熊野道路の高架下カーブまでの約300mの下り坂区間.



道路上の車両の被災状況①

坂の上方（左奥）からの土砂，流木に押し流された車両



道路上の車両の被災状況②

押し流された後、倒れた電信柱に引っかかっている車両



道路上の車両の被災状況③

カーブのガードレールを突き破り広島熊野道路の高架に挟まっている車両



土砂の流出状況

被災前



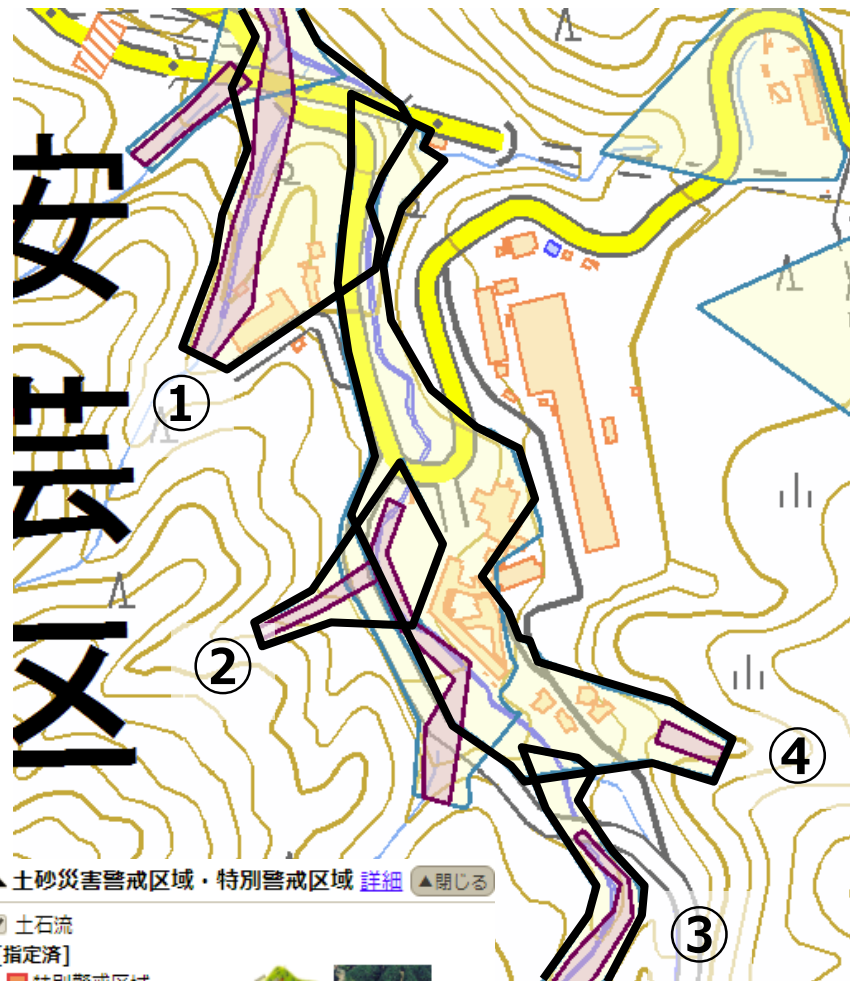
Googleマップより

7月11日時点の航空写真（国土地理院）



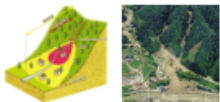
土砂災害警戒区域・特別警戒区域との関係

7月11日時点の航空写真（国土地理院）



▲土砂災害警戒区域・特別警戒区域 [詳細](#) ▲開じる

- 土石流
- [指定済]
 - 特別警戒区域
 - 警戒区域
- [指定前]
 - 特別警戒区域
 - 警戒区域



広島県防災Webより



昭和入口交差点周辺の土砂の流れ

交差点には大きく分けて**二つの流れ**があったと推察される。

A. 溪流②の土砂が焼山方面の道を流下



B. 溪流③④の土砂が矢部川沿いに流下



A. 焼山方面の道路上の土砂の流れ



土石流が防音壁を破壊しているの
と同時に土砂が道路沿いを下った
跡が見られた。

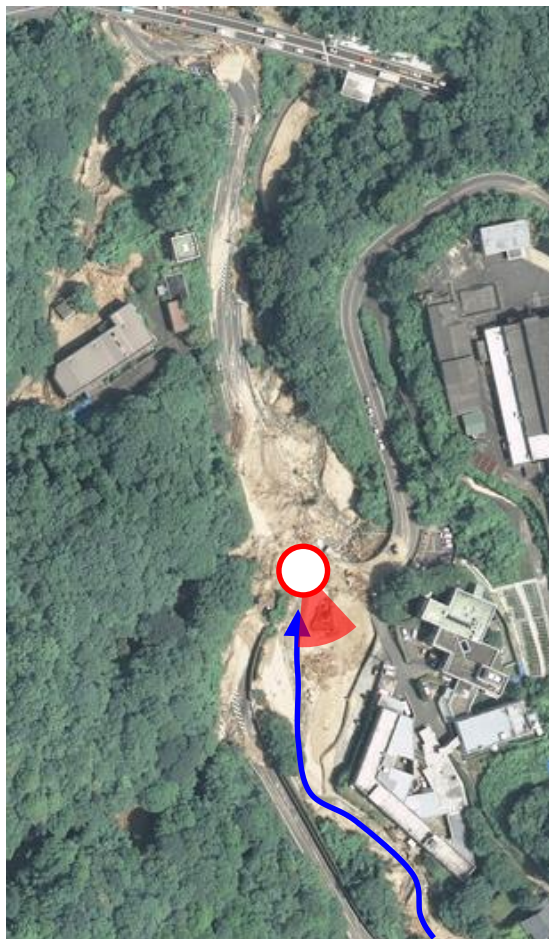
A. 焼山方面の道路上の土砂の流れ



- 流下した先には土砂で埋まった車両も見られた.
- そのまま交差点を通過し北へ下ったと考えられる.

B. 矢野川沿いの土砂の流れ

交差点から上流を見ると付近の病院の駐車場一面に上流から土砂が堆積していた。



B. 矢野川沿いの土砂の流れ

- 実際には、元々存在していた深さ5m程度の河道が完全に土砂で閉塞していた。
- 結果的に数千 m^3 程度補足されていたと推察される。



B. 矢野川沿いの土砂の流れ

- 川は交差点で道路の下のカルバートを通して流れていた。
- 災害当時は閉塞して、流入する水や後続の土砂は道路上へ溢れ出たと推測される。



推定される被災メカニズム



車を押し流しながら
県道に沿って流下



浅田病院付近の土砂収支 → 矢野川に約25,000m³の流出

流出 (流入) : 25,540m³



崩壊・侵食 : 2,000m³
堆積 : 2,600 m³
流出 (流入) : 600m³

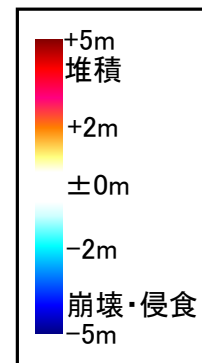
崩壊・侵食 : 2,100m³
堆積 : 4,300 m³
流出 (流入) : 2,200m³

崩壊・侵食 : 6,940m³
堆積 : 300m³
流出 (流入) : 6,640m³

崩壊・侵食 : 1,600m³
堆積 : 900m³
流出 (流入) : 700m³

崩壊・侵食 : 4,000m³
堆積 : 10m³
流出 (流入) : 3,990m³

崩壊・侵食 : 25,000m³
堆積 : 8,030m³
流出 (流入) : 17,070m³



参考 | 下流（矢野東方面）の水路



既に土砂は一部撤去されていたが、
ここでも水路が埋まっていた跡が
見られた。

参考 | 下流（矢野東方面）の水路



ここでも道路の下を通る
管路の入口で土砂の閉塞
が生じたと推察される。

カルバートなど地下に設置した水路は、土石流の発生により閉塞しやすい

河道が閉塞すると、土砂を含む水は道路上を流下する。

国道2号線西条バイパスにおける土石流の道路への流出

八本松周辺 土石流位置図



提供：中国地方整備局広島国道事務所

国道2号線西条バイパスにおける土石流の道路への流出



提供：中国地方整備局広島国道事務所

国道2号線西条バイパスにおける土石流の道路への流出

土石流が発生した溪流のひとつ



溪流の出口から流出した流木と土砂と水。流出量は土砂約8,000m³、流木約3,000m³であった。(9日,森脇武夫広島工業大学教授提供)



大量の土砂が堆積した2号線溝迫交差点付近
(9日,森脇武夫広島工業大学教授提供)



土石流の出口の前の橋梁工事現場。掘削箇所に3000m³程度の土砂が堆積したと推定される。



山陽自動車道志和トンネルへの土石流の流入

山陽自動車道志和トンネルの東広島側入口付近。大規模な表層崩壊により、土砂がトンネルの上下線に大量に流入した。

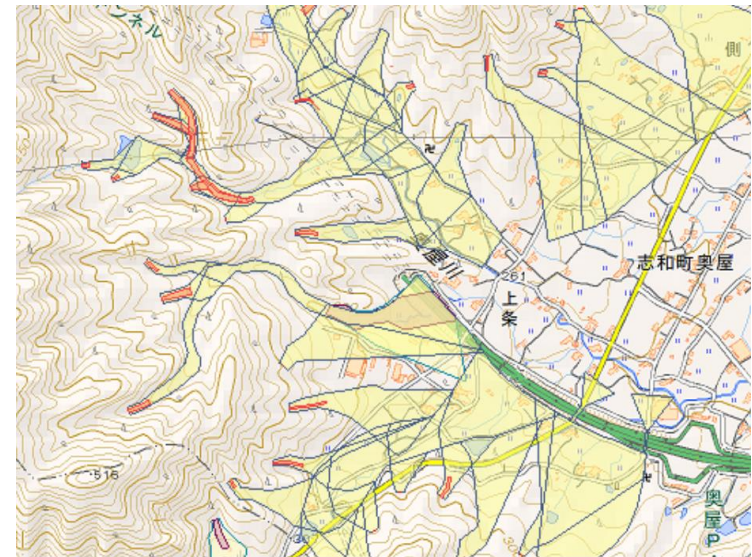
トンネル内監視カメラの映像。流木と土砂で形成された「流木・土砂ダム」が、トンネル内をゆっくりと出口に向かって移動している。



提供：NEXCO西日本



提供：NEXCO西日本



呉広島道路の盛土崩壊

土石流が発生した
溪流の出口

崩壊箇所の山側の溪流
では土石流が発生し、
2,000m³程度の土砂が
流出した。発生時期は
6日夜7時頃から7日午
前の間と考えられる。

土石流により山側の排
水工は完全に閉塞し機
能を失った。

山側から流れた雨水が
盛土内に浸透し、盛土
内の水位が上昇して崩
壊した。

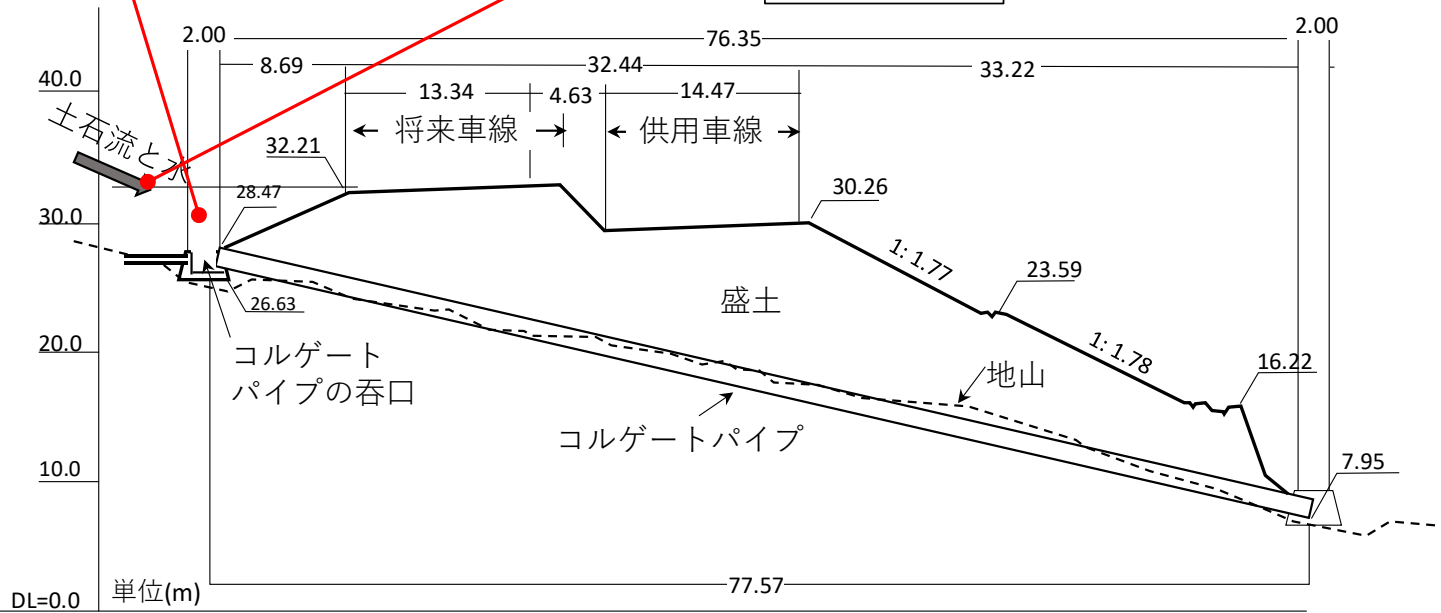
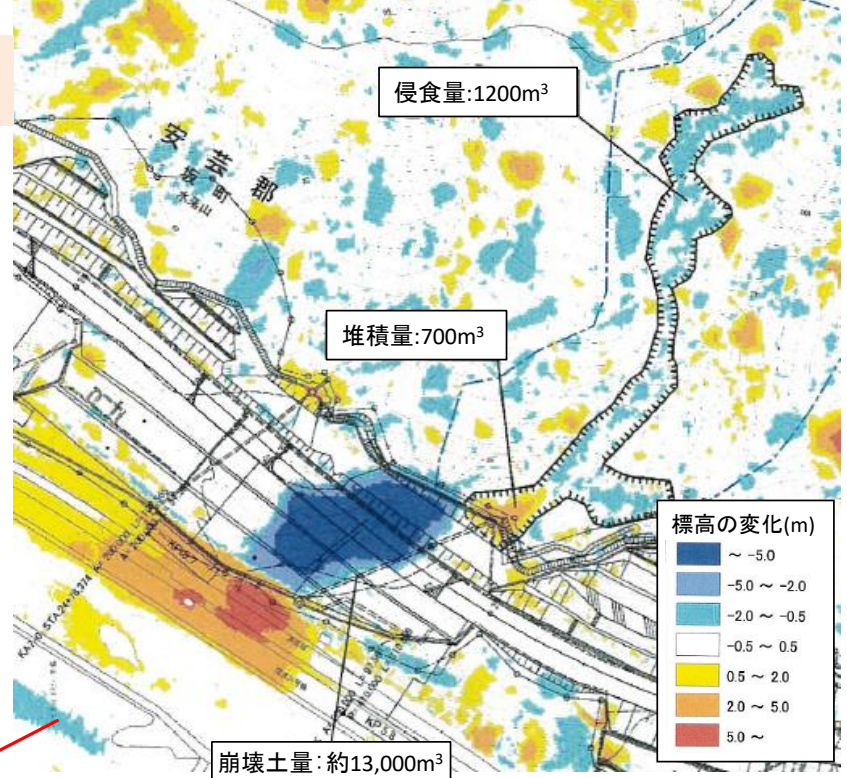


盛土の崩壊は主要な降雨が終わって約1日経過した
7月8日午前8時頃に発生した。

土石流により山側の排水工の閉塞



道路と溪流間の
ポケット部で観
察されたプール
状の水たまり
(7月9日)



土石流によるインフラ施設の被害

- 土石流・土砂洪水氾濫により道路上の車両が被災した災害はこれまでに例がなく、今後、同様のリスクを抱える地点の抽出、道路利用者への危険の周知、早期の通行規制を検討する必要がある（たとえば落石のように）。
- 道路上を土砂・濁流が流れた要因として土石流の道路への流出に加え、河道が道路と交差するカルバート部で完全に閉塞したことによる土砂の溢流および洪水氾濫があったと推察される。中小河川と並行し土石流の流出の可能性がある道路は同様のリスクを抱えている。
- 山陽自動車道でも土石流による道路の被害が多発したが、降雨が基準に達しており、交通を規制していたため、人的被害は発生しなかった。しかし、土石流対策は重要な課題である。
- JR山陽線も土石流による路盤の流出など大きな被害を受けた。水道設備も土石流により被災し、断水が発生した。
- さまざまな社会基盤施設で土石流対策を検討する必要がある。

土砂洪水氾濫の多発

土砂洪水氾濫：土石流等が発生した後にさらに大量の水が溪流内から流下し、流出した直後の不安定な土砂を巻き込んで河道を埋没・閉塞させながら無秩序に流下していく現象

土砂洪水氾濫による鉄道施設の被害



広島県内では大量の土砂を含む水による土砂洪水氾濫が各地で発生した。山陽本線瀬野駅は、瀬野川の支川榎ノ山と瀬野川との合流点から100mの距離に位置している。榎ノ山川は瀬野川との合流点の300m上流で河道が閉塞し、6日21時頃から氾濫が始まり、浸水深さは1.0～1.3mであった。

瀬野駅では線路上に堆積した土砂の厚さは最大で約1.0mであった。

土砂洪水氾濫による駅施設の広範囲における埋没は、呉線水尻駅でも発生し、鉄道施設内に約4,200m³の土砂が堆積した。

呉市天応西条（大屋大川天応中学入口より下流）



河川に土砂が堆積し道路を流下している（7/8撮影）



天応中学校入口の橋が土砂で埋まっている（7/8撮影）



広島呉道路高架付近では1階がほぼ水没している（7/8撮影）



広島呉道路高架付近から上流を撮影（7/8撮影）

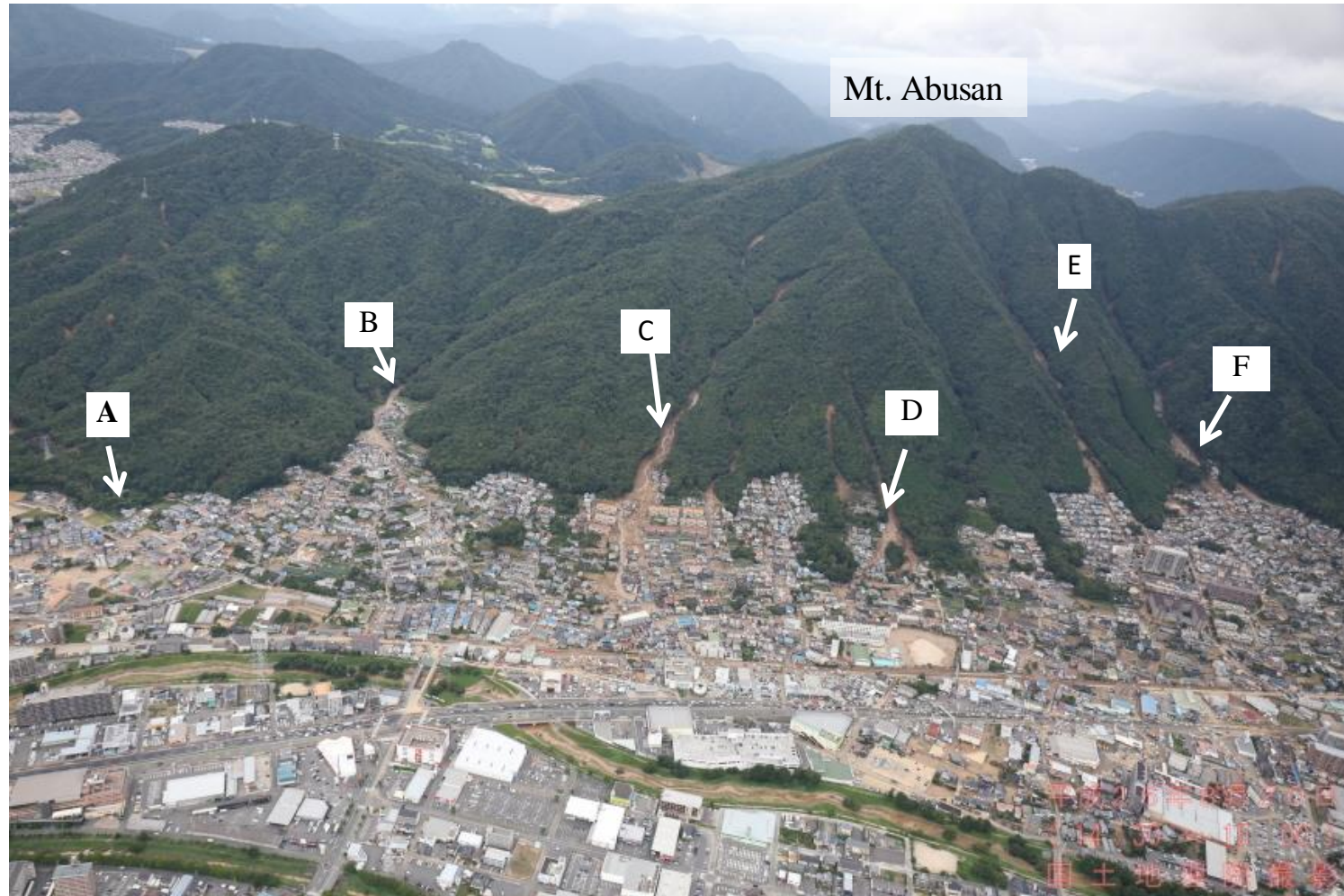
呉市天応西条



広島における土石流による住宅被害の 特徴

基礎調査で想定した流出土砂量・被害の規模と
実際に発生した土砂量の関係について

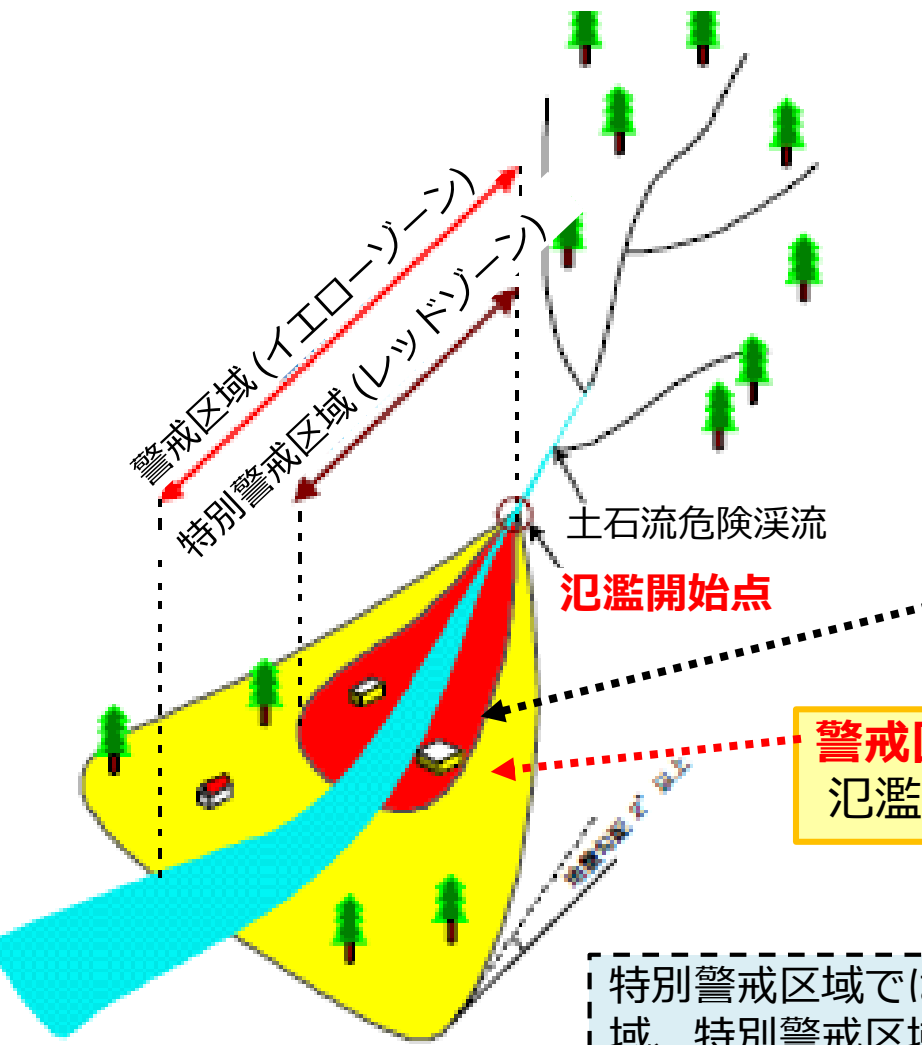
2014年広島市の土砂災害における住宅被害（安佐南区緑井・八木地区）



- A: Stream over Midori-i 7-Chome
- B: Stream over Midori-i 8-Chome
- C: Stream over Midorigaoka prefectural apartments (Yagi 3-Chome)
- D: Stream over Mitsuhiro Shrine (Yagi 3-Chome)
- E: Stream over Abu-no-Sato Housing Complex (Yagi 3-Chome)
- F: Stream over Yagigaoka Housing Complex (Yagi 4-Chome)

土石流に対する警戒区域・特別警戒区域の指定

土砂災害防止法 (2000)



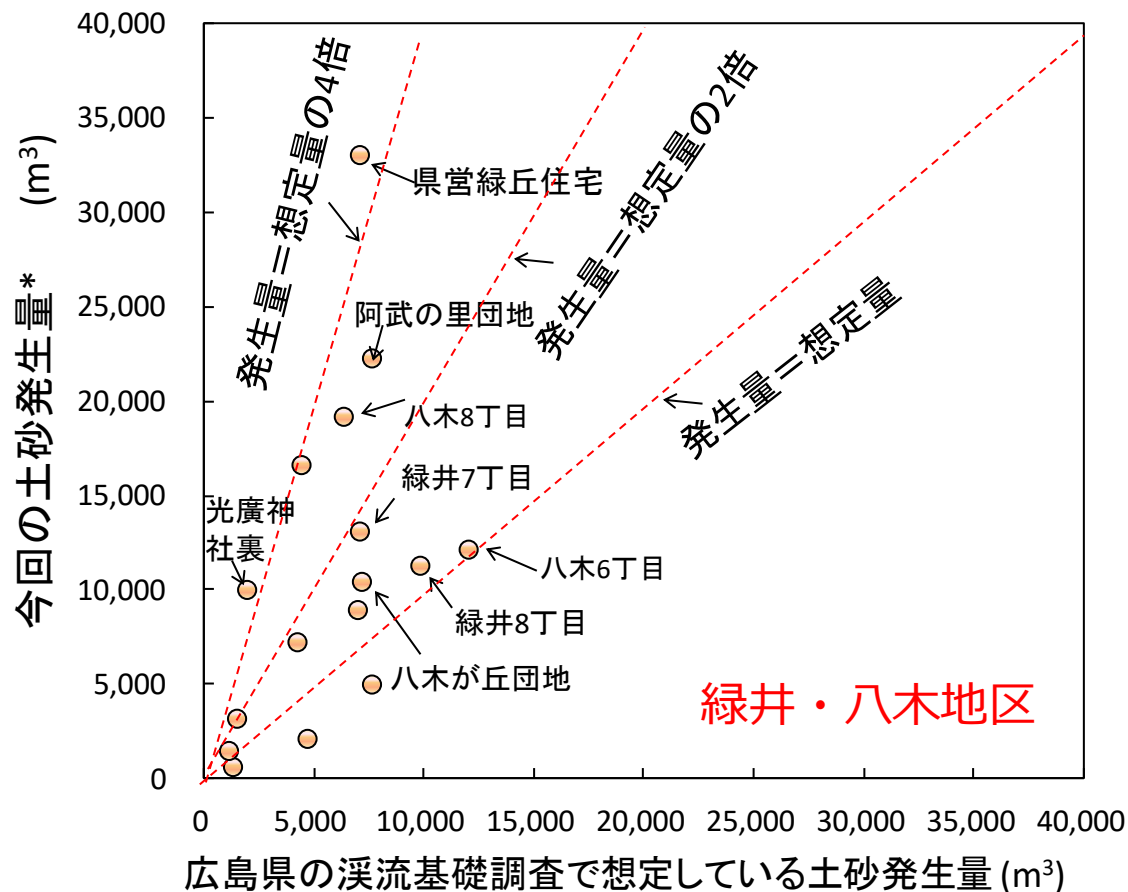
特別警戒区域 (red):
土砂災害危険渓流の下流で住宅が土石流により構造的な損傷を受ける危険がある範囲。

特別警戒区域の決定方法
基礎調査によって発生土砂量の推定
↓
氾濫開始点の決定
↓
土石流の動きの解析と建築物への影響評価
↓
特別警戒区域の決定

警戒区域 (yellow):
氾濫開始点から地盤傾斜2度以上の範囲。

特別警戒区域では家屋の新築は制限される。自治体には、警戒区域、特別警戒区域において、土砂災害に対する警戒と早期避難システムを構築することが求められている。

2014年の土石流で発生した土量と危険渓流の基礎調査で想定されていた土量の関係（安佐南区 緑井・八木地区）



*注意：中国地方整備局の調査による概算値であり、今後修正される可能性もある。

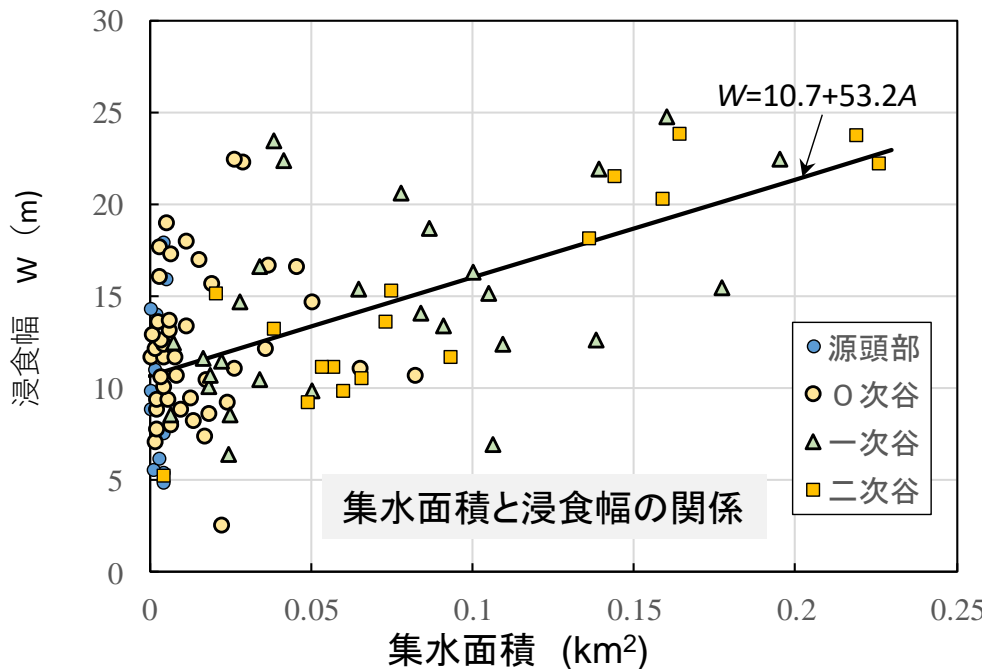
- ・ 緑井・八木地区の16の渓流のうち12の渓流で調査時の予測を上まわる量の土砂が流下した。
- ・ 特に被害が大きかった八木3丁目の渓流は、予測量の3～5倍発生した。

浸食幅と浸食深さの検証（被災前後のGISデータ）と見直し 広島県土砂災害警戒区域等法指定検討委員(2014)

災害前の調査結果と、
標高データから求めた
浸食断面の比較



*広島県土砂災害警戒区域等法指定検討委員会資料より



2014年以前の方法では、浸食幅を平均4.5m程度に設定していた。
しかし、災害前後の標高データから浸食幅を求めると、概ね10m以上の渓流が多かった。(浸食深さは大きな差はなかった)。

新たな推奨算定式



浸食幅(m) = 10.7 + 53.2 × (集水面積, km²)

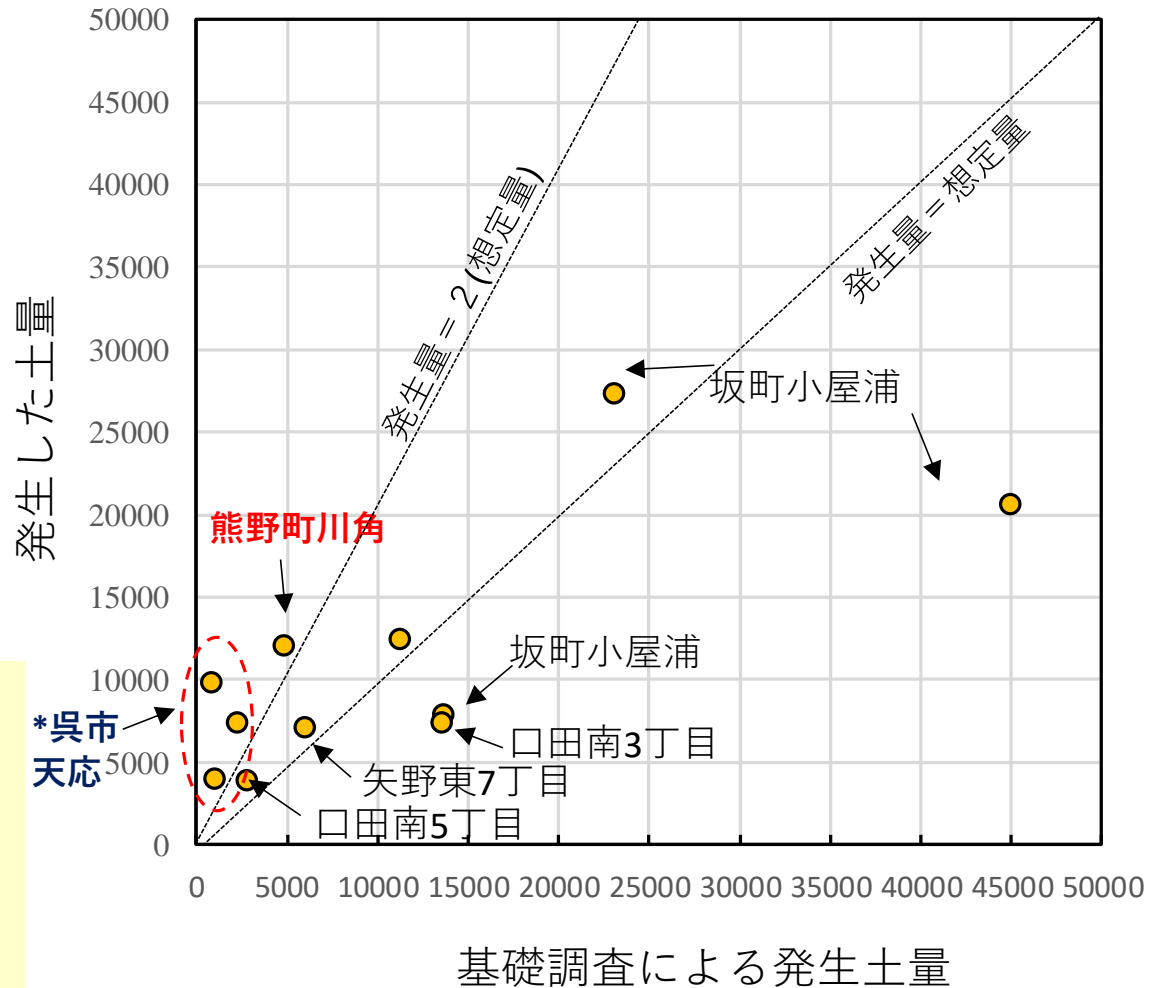
2014年以降の基礎調査に適用。

今回の土石流で発生した土量と危険溪流の基礎調査で想定されていた土量の関係（広島市・呉市・東広島市・三原市区）

- ・ 呉市天応だけは、計算方法改定前の2012年の基礎調査による数字である。発生量は4~10倍となっている。
- ・ 呉市天応を除くと、発生量と想定量の相違は小さい。ただし、熊野町川角だけは発生量は想定量の2倍以上となっている。

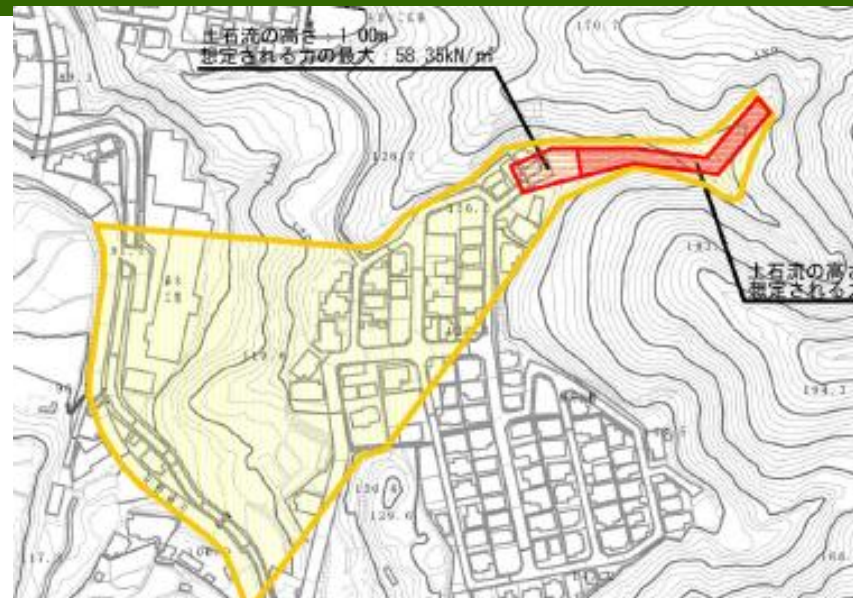
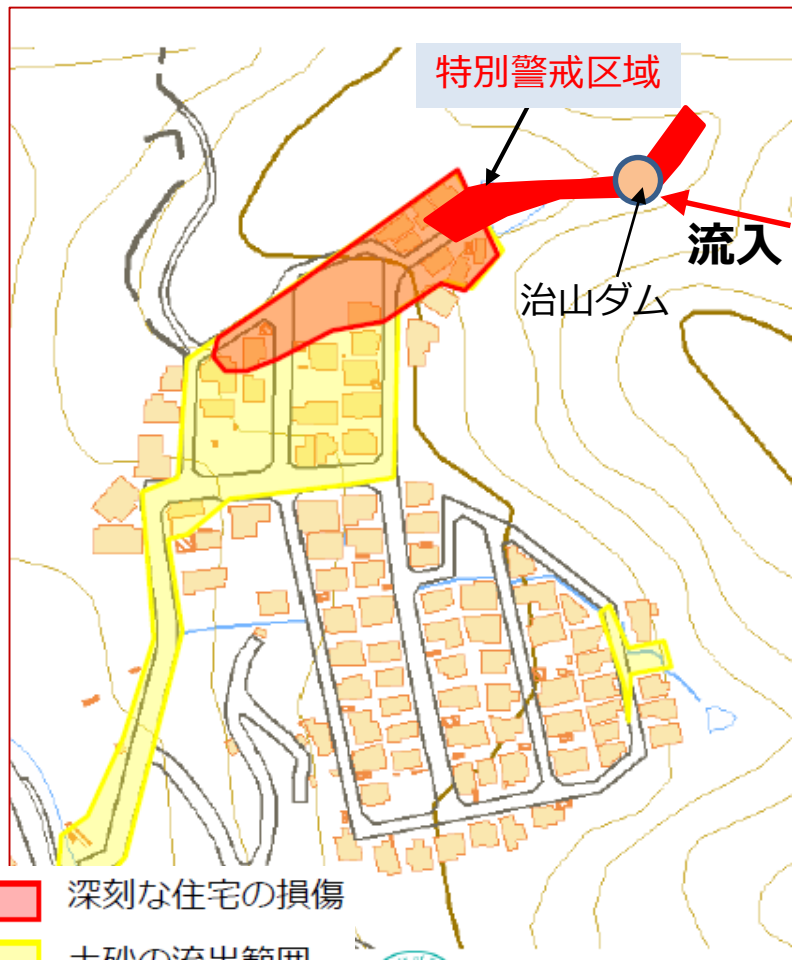


- ・ 2015年以前の基礎調査による想定量は過小の可能性が高い。
- ・ 2015年以降は土砂量の差は縮小している。（熊野町川角を除く）



ただし、土量がほぼ一致しても被害状況は一致しない！

矢野東7丁目梅河ハイツにおける土石流と区域図（予定）の関係



土砂災害警戒区域および特別警戒区域の区域予定図
2018年5月17日指定前の公開（広島県）
予測発生土砂は**6,030m³**（治山ダム建設前）
（算定時の浸食幅は**10.8~12.6m**）

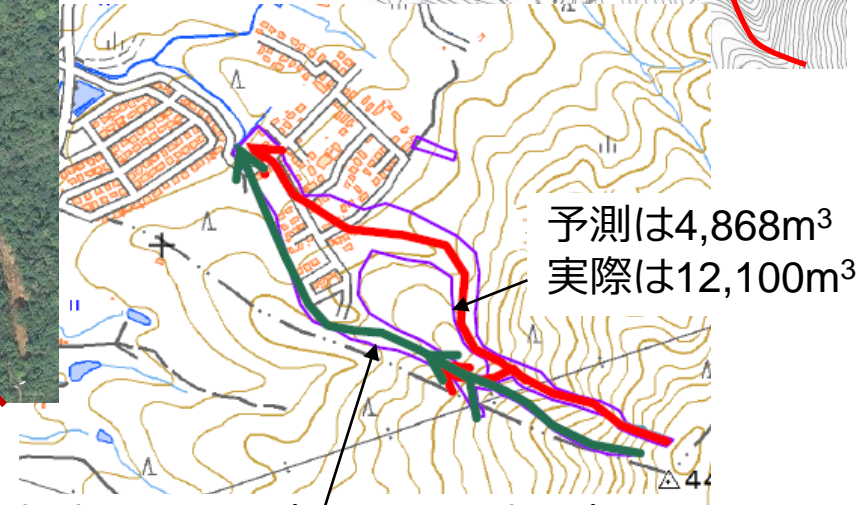
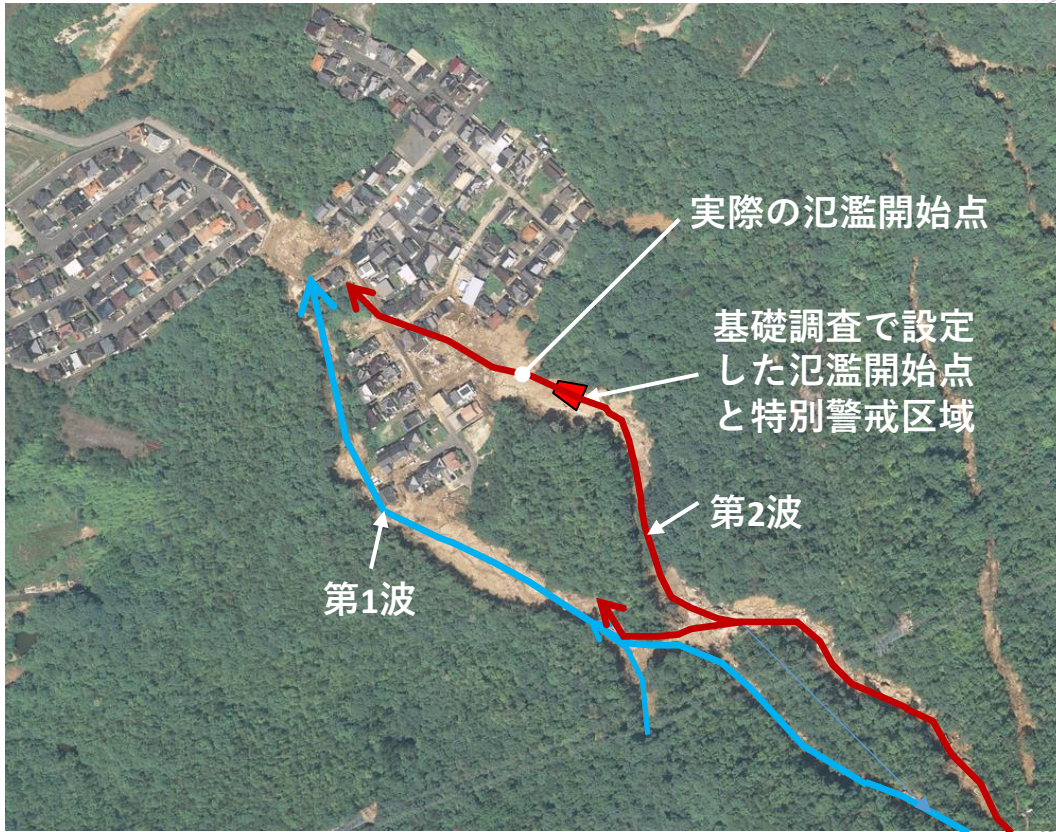
↓ 対象溪流の発生土砂は**7100m³**だが

**（別の溪流からの流入） + （氾濫開始
点が砂防ダムの下の可能性）**

「土石流危険溪流カルテ作成要領（案）1999年6月 建設省河川局砂防部砂防課」
氾濫開始点は、土石流危険区域の地形が谷底平野の場合、「支溪の合流点、狭窄部の出口、溪床勾配8°以下」を目安とし、扇状地形の場合は、「谷の出口、扇状地頂部、地形勾配10°以下（土砂流の場合は8°）」を目安に設定する。

熊野町川角5丁目大原ハイツにおける土石流と区域図の関係

土砂災害警戒区域および特別警戒区域の区域図
2017年3月9日 広島県告示



国土地理院 <http://www.gsi.go.jp/common/000000044.gif>

想定しない溪流からの土砂の流入
があったことが差の原因

危険渓流の基礎調査の問題と限界

1. 2014年の広島災害後に危険渓流から流出する土砂の計算法を改定した。この改定により、基礎調査で予測した土砂流出量と発生量の差は縮小したと考えられる。
2. 改定前の予測土砂流出量が過小であることが確認できた。2014年以前の基礎調査の数字については、緊急の見直しが必要。
3. 矢野東7丁目の梅河団地の渓流では、土量の差は小さいが、甚大な被害を与える範囲は拡大した。この原因は、**想定していなかった渓流からの土砂流入、氾濫開始点の予測と実際の差**が考えられる。先行する土石流が治山ダムを埋め、後続の土石流がダムを通過して落下後に氾濫を開始した可能性がある。
4. 熊野町川角地区大原ハイツの土石流においても**氾濫開始点のずれ、想定しない渓流**を含め複数の渓流の土砂の合流で、予測を大きく超える土砂が発生した。基礎調査の問題と限界にどう対処するか、が問題といえる。

河川周辺における大規模な地盤陥没による交通途絶

- ・ 瀬野川沿いの国道2号線の崩壊
- ・ 県道34号線における道路の大規模な陥没
- ・ 都市内河川と平行する道路における陥没の多発

都市内河川の河岸・道路の大規模な陥没の多発



国道2号線 瀬野川河岸の陥没により15日間の通行止め (写真：中国地方整備局)



県道34号線の陥没



沼田川沿いの県道33号線、山陽本線の崩壊

河岸の大規模な崩壊により主要な
道路・鉄道の途絶



孤立する地域の発生
被害の長期化

地盤工学の観点からの課題（再掲）

1. 土石流による道路・水道・ため池など**様々なインフラにおける被害**
2. 土石流が河道を閉塞し洪水氾濫を助長するといった**土砂災害と洪水の相乗効果による被害の拡大**
3. 溪流の基礎調査の予測（特別警戒区域）を上回る流出土砂量，コアストーンによる被害拡大など**外力としての土石流の巨大化**
4. 河川周辺における大規模な**地盤陥没**による交通途絶の多発

広島大学における土砂災害の研究



広島大学における土砂災害に関する研究(2003年以降)

1) 携帯型貫入試験機による自然まさ土斜面の強度定数評価に関する研究

Tsuchida, T., Athapaththu A.M.R.G., ほか2名: Estimation of in-situ shear strength parameters of weathered granitic slopes using lightweight dynamic cone penetrometer, Soils and Foundations, Vol. 51 (2011), No. 3, 497-512.

2) 安定解析による豪雨時自然まさ土斜面の危険度評価に関する研究

Tsuchida, T., Athapaththu, A.M.R.G., ほか4名: Individual Landslide Hazard Assessment of Natural Valleys and Slopes Based on Geotechnical Investigation and Analysis, Soils and Foundations Vol.54, No.4

3) 土石流の前兆現象としてのニオイの発生に関する研究

土田孝, 由利厚樹, ほか4名: 地盤内において強度と斜面崩壊時において発生に関する一考察, 地盤工学ジャーナル, Vol. 8, No. 2, pp. 339-348, 2013.

4) 重大な土砂災害に関する事例研究

・2009年7月 東広島市の残土処分場の崩壊

Takashi Tsuchida, Seiji Kano, ほか4名: Landslide and mudflow disaster in disposal site of surplus soil at Higashi-Hiroshima due to heavy rainfall in 2009, Soils and Foundations, Vol.54, No.4.

・2010年7月 庄原市で発生した土石流災害

Tsuchida, T., A.M.R.G. Athapaththu, ほか2名.: Investigation of Landslide Calamity due to Torrential Rainfall at City of Shobara, Japan, Soils and Foundations, Vol.55, No.5. 2015, 1305-1317

・2014年8月 広島市で発生した土砂災害

土田孝, 森脇武夫, ほか2名: 2014年広島豪雨災害において土石流が発生した溪流の状況と被害に関する調査, 地盤工学ジャーナル, Vol.11(1), 33-52, 2016,

Takashi Tsuchida, Takeo Moriwaki, Shinji Nakai and AMRG, Athapaththu1, Investigation of Multiple Slope Failures and Debris flows of 2014 Disaster in Hiroshima, Soils and Foundations, Japan. (accepted,)

・2018年7月 西日本豪雨災害 地盤工学会誌7月号に3編, Soils & Foundations執筆中

1. 携帯型貫入試験機による自然まさ土斜面の強度定数評価に関する研究

自然斜面における地盤調査の難しさと少ない地盤工学データ

- ・ 急斜面で深い植生があり、現場で電源や車両を使うことができない
→通常的地盤調査方法が全く適用できない
- ・ 対象となる渓流は私有地であり、所有者の特定は難しい。
→やれることに限界がある。



地盤情報が無いと地盤工学的な方法を自然斜面に適用することは困難!

携帯型貫入試験機LWDCPT, lightweight dynamic cone penetration test, による自然まさ土斜面の調査手法を開発した。

豪雨時における個別溪流・斜面のリアルタイム危険度評価システムの開発

現在の危険度評価(雨量指標による方法)

県内を5kmのメッシュに分割し、それぞれで雨量と過去の災害・無災害との関係を求める

⇒ 雨量により5kmメッシュごとに警戒避難基準

⇒ 東広島市内だけで2782箇所ある危険溪流・斜面の個別の危険度評価はできない。

气象台による
詳細な雨量
予測の提供

自然斜面の調査方法の開発
ボランティアによる斜面調査

降雨時の斜面崩壊メカニズム

雨が地盤内に浸透



- ・斜面勾配
- ・地質構造
- ・地盤の強度の低下
- ・地下水位の上昇
- ・地下水の流入

雨量情報と地盤・地形情報＋安定解析(土質力学的アプローチ)による個別斜面のリアルタイム危険度評価

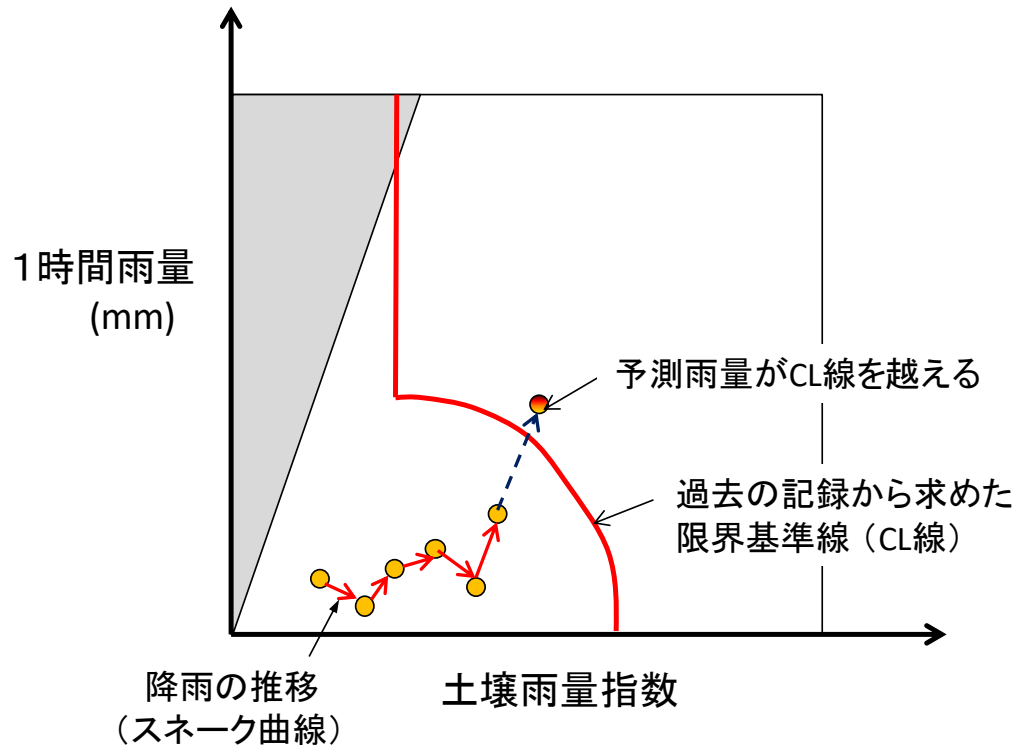
予測精度の向上＋警戒避難指示における空振り率の低下

→ 本当に避難が必要な地域の絞込みと警戒避難指示の徹底

広島県土砂災害警戒情報 監視画面



土砂災害警戒情報による危険度の判定



横軸: 長期的な雨量指標(累積雨量に近い)である**土壌雨量指数**

縦軸: **時間雨量**(現況の雨量あるいは1時間後の予測雨量)

土砂災害発生限界基準線 (Critical line, 以下CL): 県内を5km × 5kmのメッシュに分割し, それぞれのメッシュごとに過去の土砂災害時の雨量の記録をもとにCLを決定.

携帯型コーン貫入試験機 LWDCPT

Hammer: weighs 1.73 kg

Stainless steel rods: D=14 mm L= 0.5m

Cone: Area 2 cm²

Dynamic cone resistance (q_d)

$$q_d = \frac{1}{A} \cdot \frac{\frac{1}{2} M \cdot V^2}{1 + \frac{P}{M}} \cdot \frac{1}{x_{90^\circ}}$$

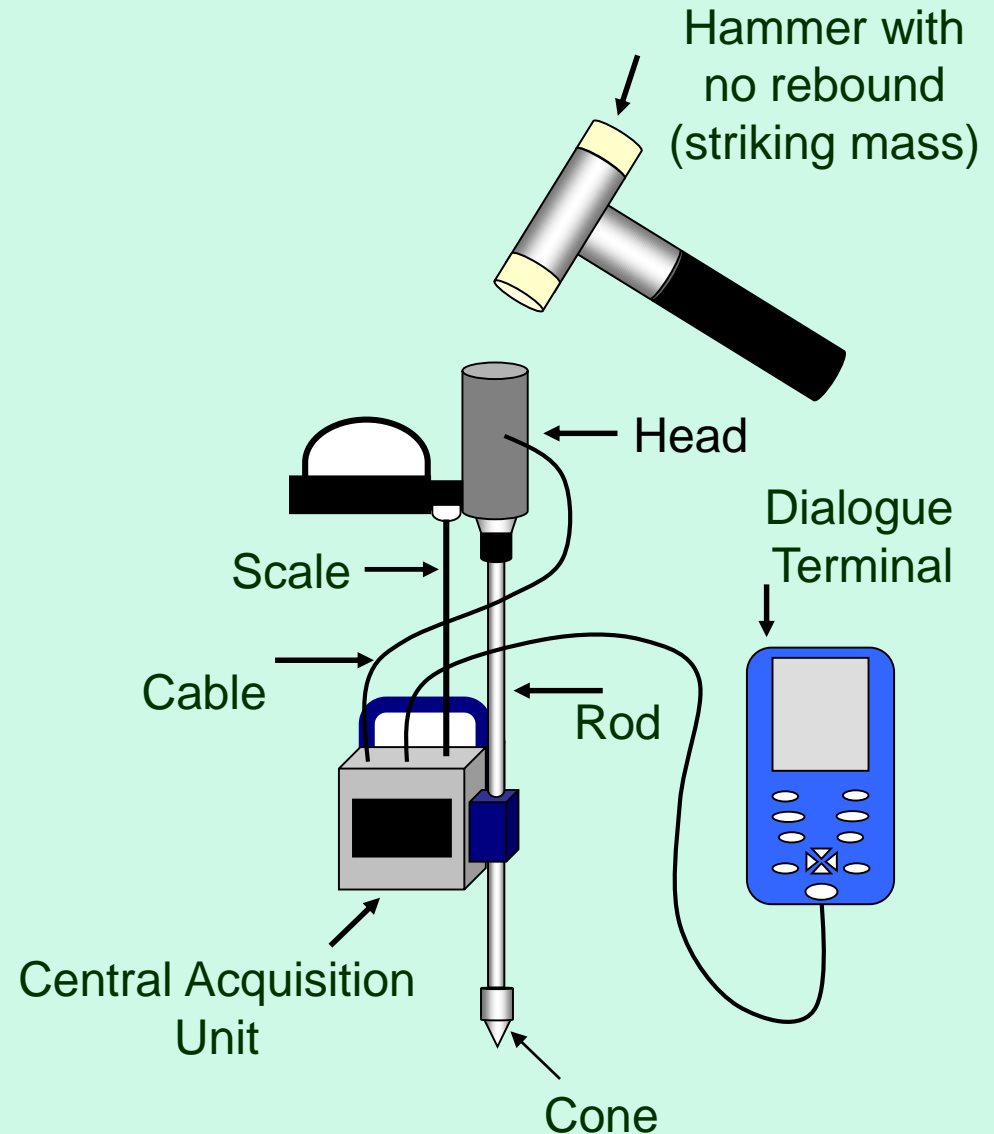
x_{90° = Penetration due to one blow of the hammer by 90° cone

A = Area of the cone

M = Weight of the striking mass

P = Weight of the struck mass

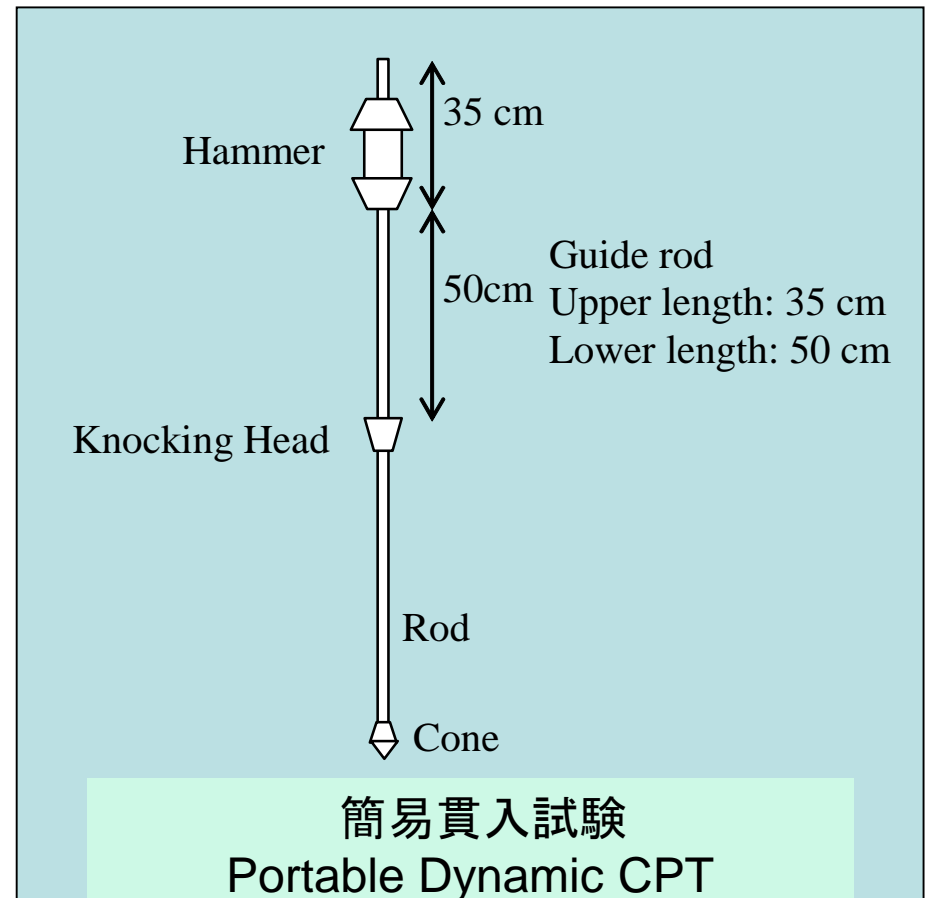
V = Speed of the impact of the hammer.



簡易貫入試験 (PD-CPT)

自然斜面の調査では簡易貫入試験 PD-CPT が標準貫入試験の代わりに用いられてきた。

10cm貫入したときの打撃回数を N_d とする。



LWDCPTの長所 (PD-CPTと比べて)

1. 試験に必要な人数が少ない。
LWDCPTは一人でも試験できる。
2. 試験後のロッドの引き抜きが容易である。
3. 0.01 MPa までの貫入抵抗値が表示されるので、柔らかい地盤でも精度がよい。
4. LWDCPTの方が個人誤差が少ない。
5. 試験者がけがをするリスクが小さい。

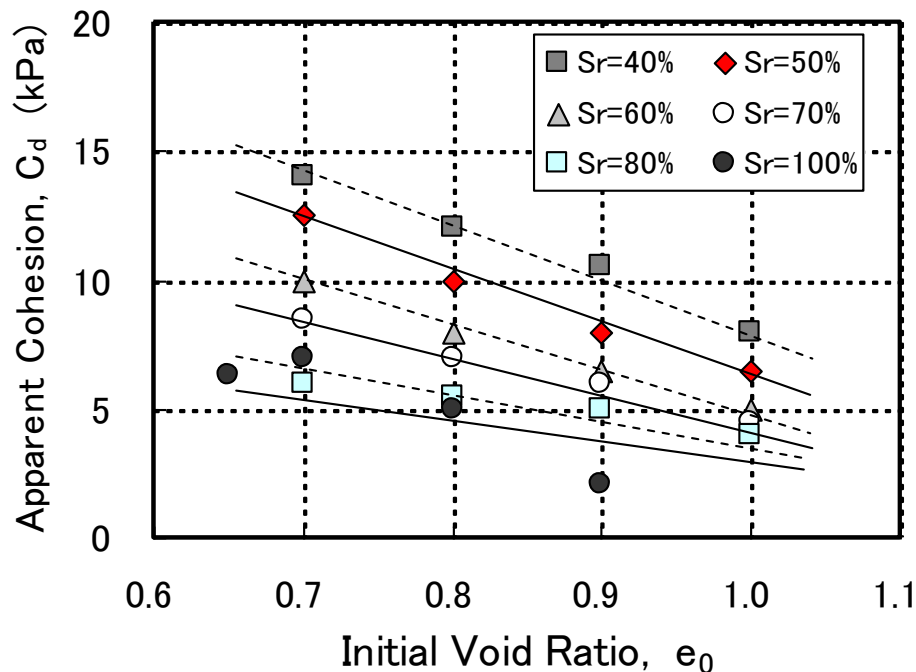
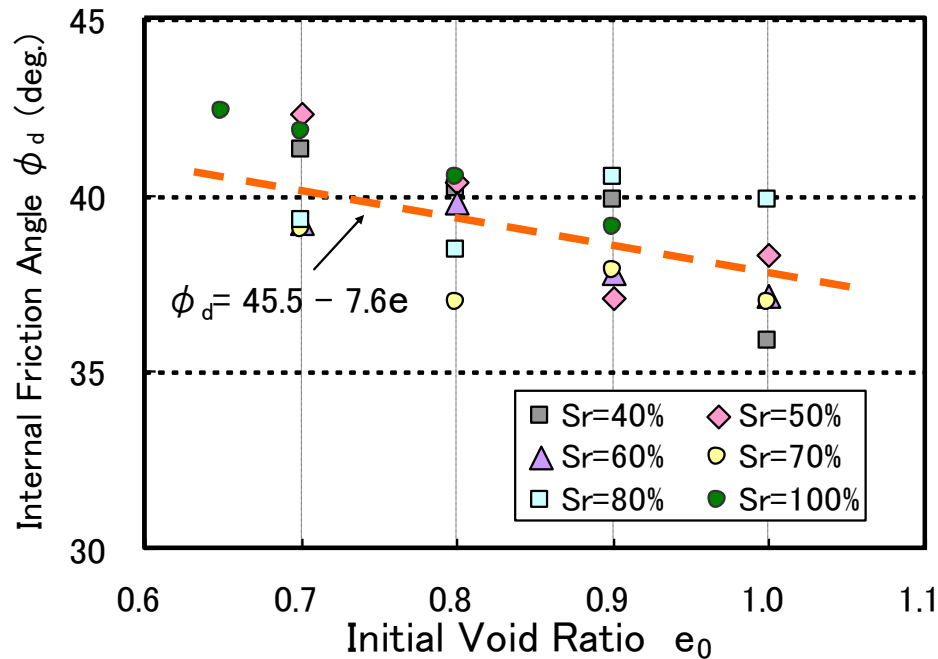
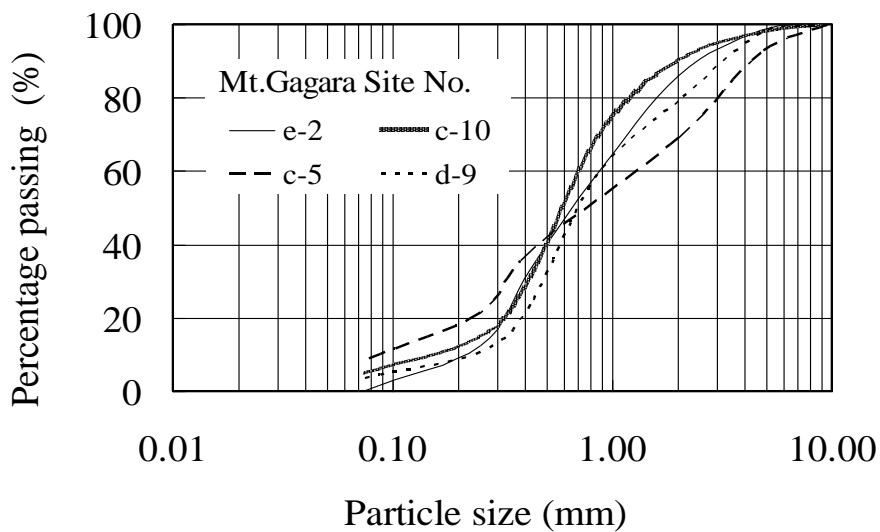


まさ土の室内試験に基づく 強度定数 c と ϕ の決定法

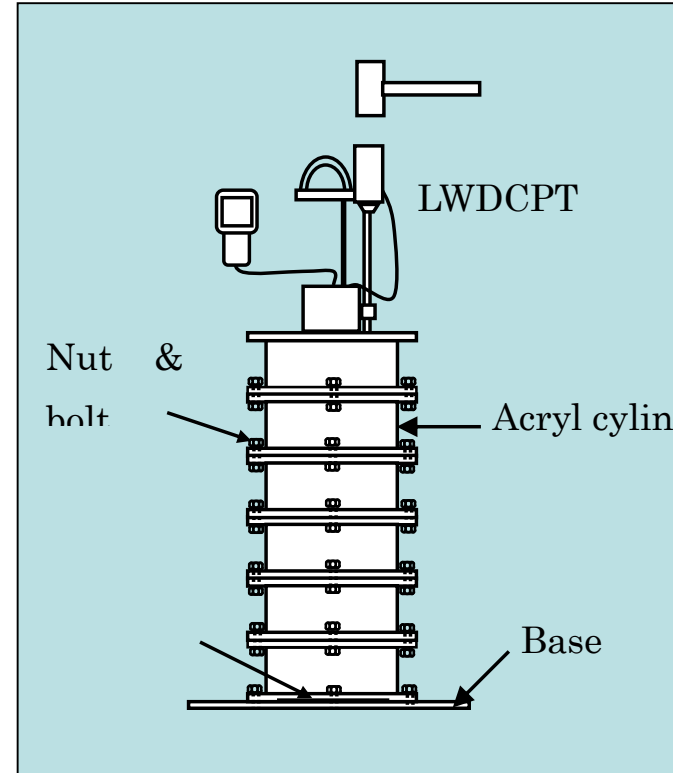
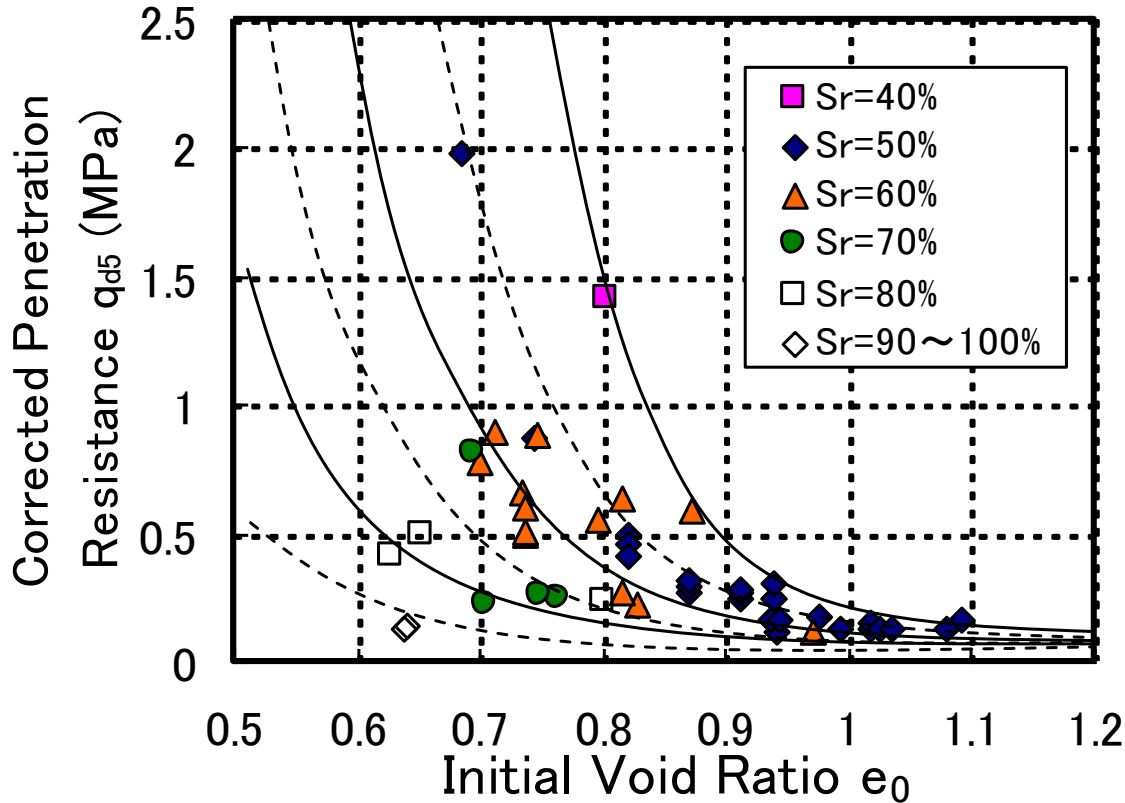
携帯型貫入試験機の q_d (LWDCPT) と
現地の飽和度から、間隙比 e を推定



室内試験から求めた間隙比 e と
 c と ϕ の関係を用い、飽和度と e から
対象地盤の c 、 ϕ を推定する。



q_d (LWDCPT) と飽和度から間隙比 e を求める式



コーン貫入抵抗値 q_d と飽和度、間隙比の関係

$$e = \left\{ (S_r / 10 - 2) q_{d5} \right\}^{\left(\frac{7}{S_r - 100} \right)}$$

$$q_{d5} = q_d - 0.01 \times (\gamma z - 5)$$

γ : bulk density of soil kN/m^3
 z : depth in m.

Tsuchida, T., Athapaththu A.M.R.G., Seiji Kano, Kazuaki Suga: Estimation of in-situ shear strength parameters of weathered granitic (Masado) slopes using lightweight dynamic cone penetrometer, Soils and Foundations, Vol. 51 (2011), No. 3, 497-512.

(2) 安定解析による豪雨時自然まさ土斜面の危険度評価に関する研究

源頭部を特定し源頭部に2~5m間隔で試験地点を選定

源頭部より溪流側面に斜面勾配が 20° 以下となるまで20m間隔で試験地点を選定.

軽量動的コーン貫入試験の実施

安定解析に用いる断面と強度定数の決定

降雨浸透解析の実施(次元)

降雨浸透・地下水上昇過程での安定解析

個別の土砂災害危険溪流の危険度評価

Athapaththu, A.M.R.G., Tsuchida, T., Kano, S.: New Geotechnical Method for Natural Slope Exploration and Analysis, Natural Hazards (Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards) , Vol 75, pp1327-1348,2014.

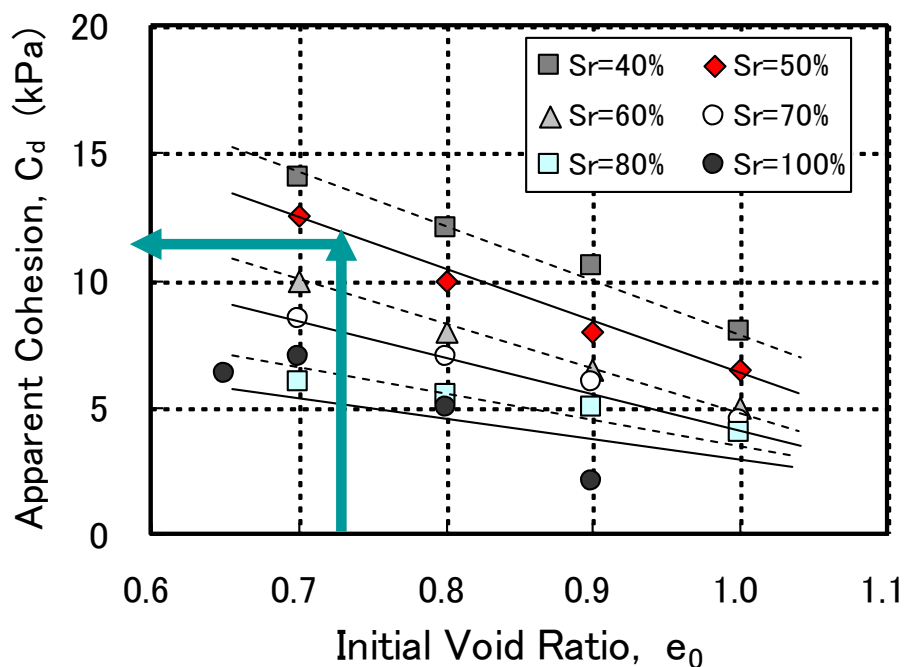
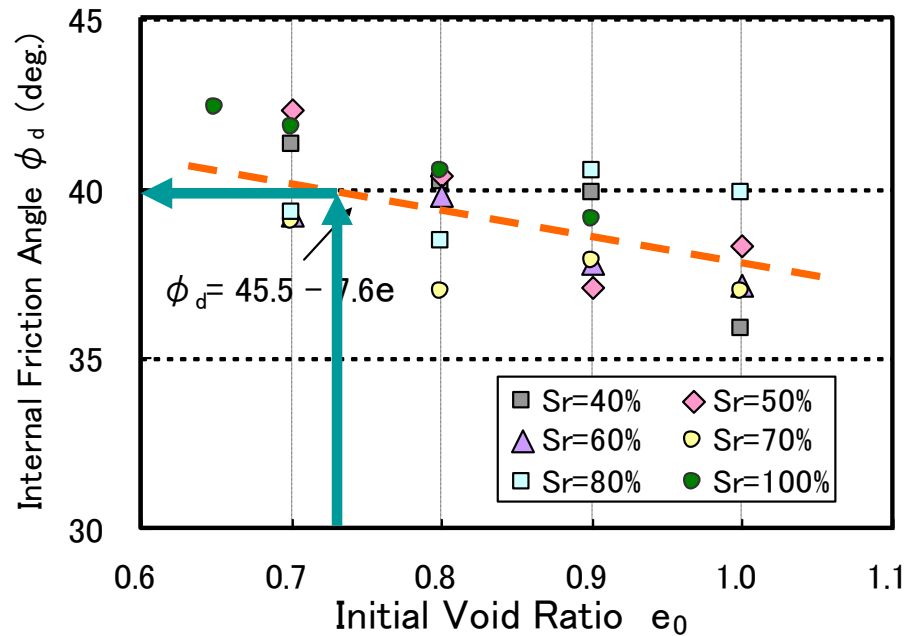
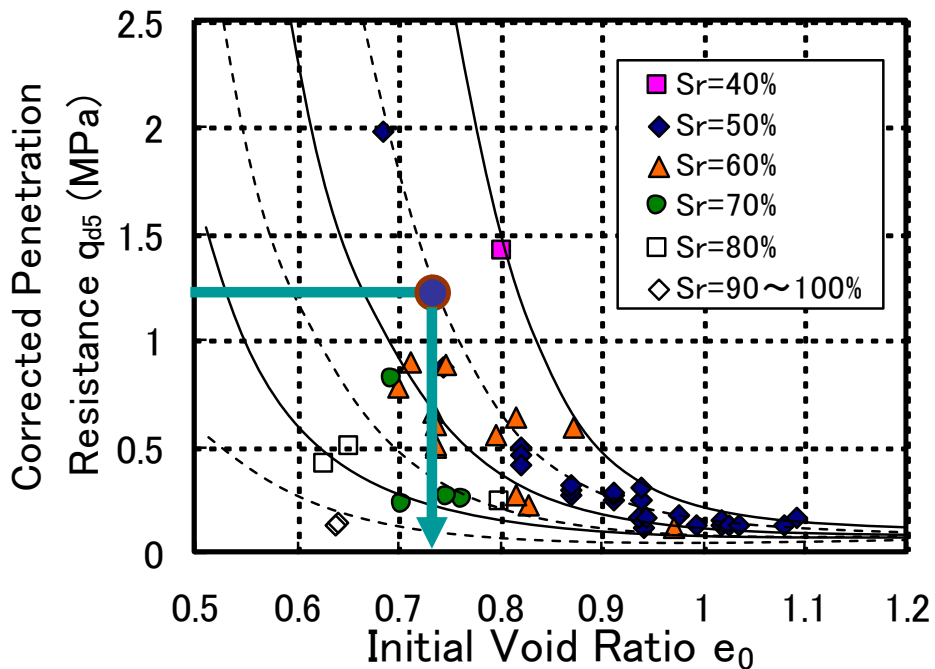
溪流調査の実施

- ・広島大学構内ががら山の2斜面
- ・東広島市内1箇所
- ・広島市内2箇所
- ・呉市内1箇所

サイト5(広島市内)における貫入試験実施地点設定例

-
- =C line
 - =R line
 - =L line

0 50(m)



貫入抵抗値と飽和度によるまさ土の強度定数の決定

携帯型貫入試験機の q_d (LWDCPT) と現地の飽和度から、間隙比 e を推定



室内試験から求めた間隙比 e と c と ϕ の関係を用い、飽和度と e から対象地盤の c 、 ϕ を推定する。

降雨浸透過程の安定解析

高含水比帯 飽和度75~85%

風化まさ土層

降雨

岩盤

雨水の浸透による
高含水比帯の形成
と降下

高含水比帯 飽和度75~85%

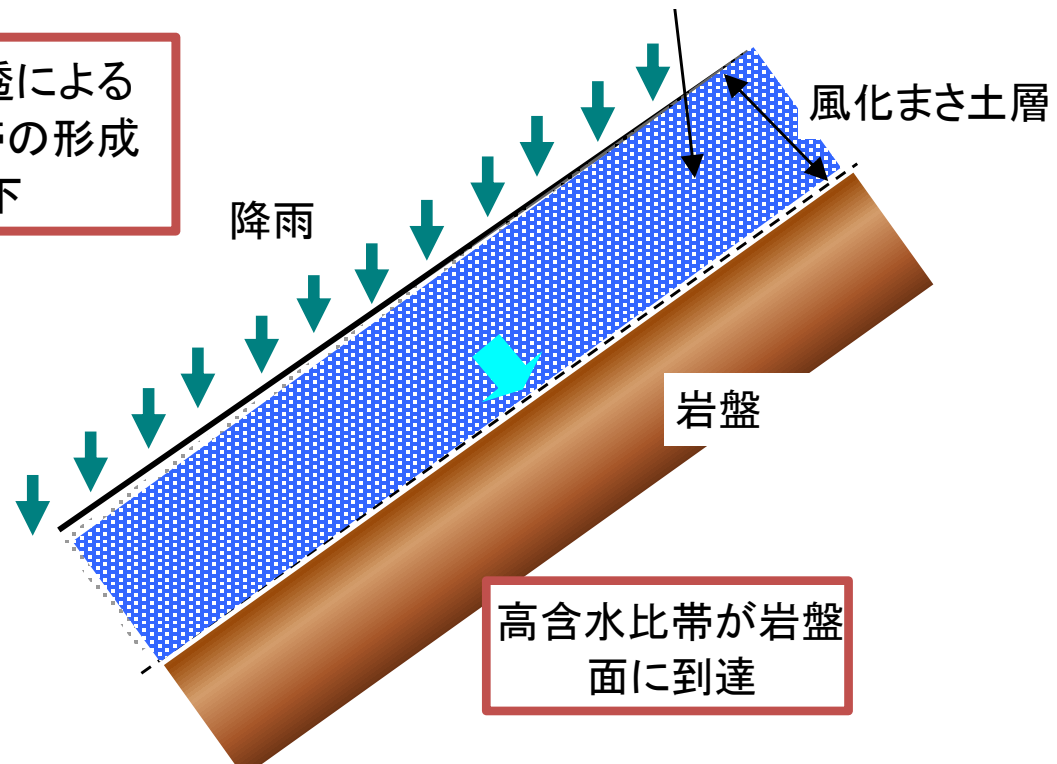
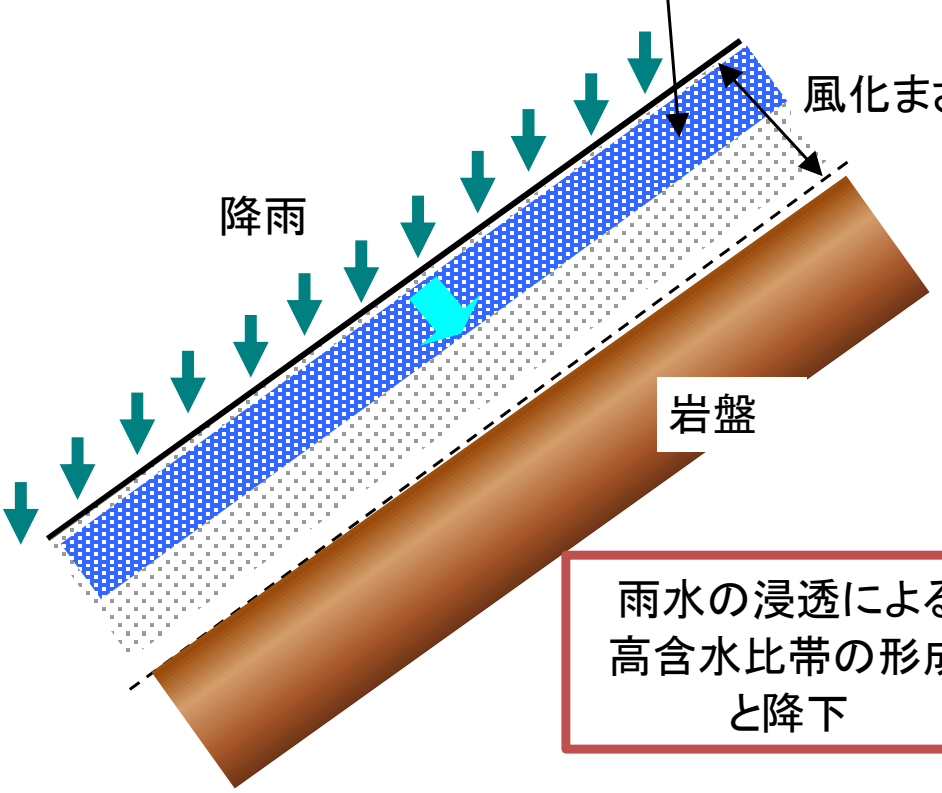
風化まさ土層

降雨

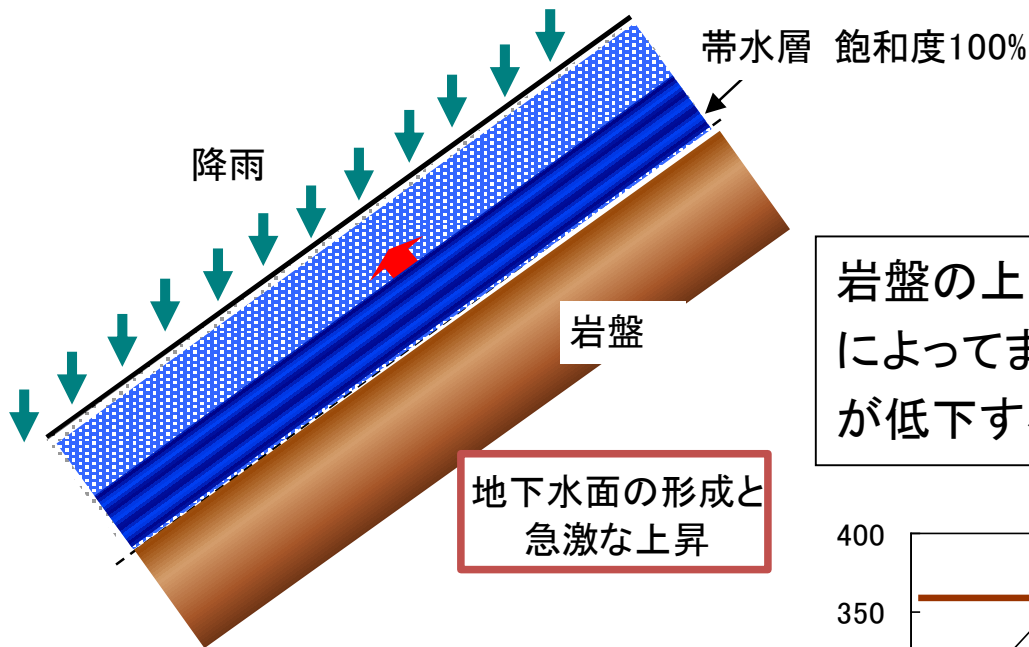
岩盤

高含水比帯が岩盤
面に到達

風化まさ土層の場合、層厚は斜面によって異なるが、通常は1~5m.



地下水上昇過程の解析



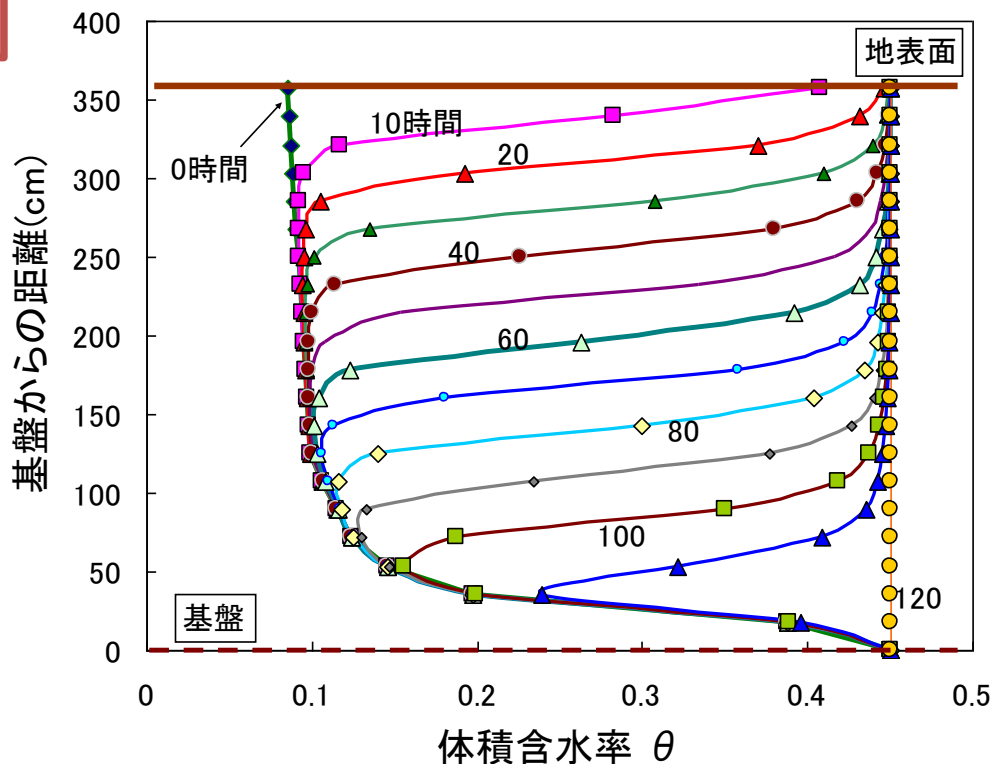
岩盤の上に地下水位が形成される。浮力によってまさ土の重さが軽くなり、摩擦力が低下する。

サイト1

時間雨量10mm/h

Richardsの式による解析

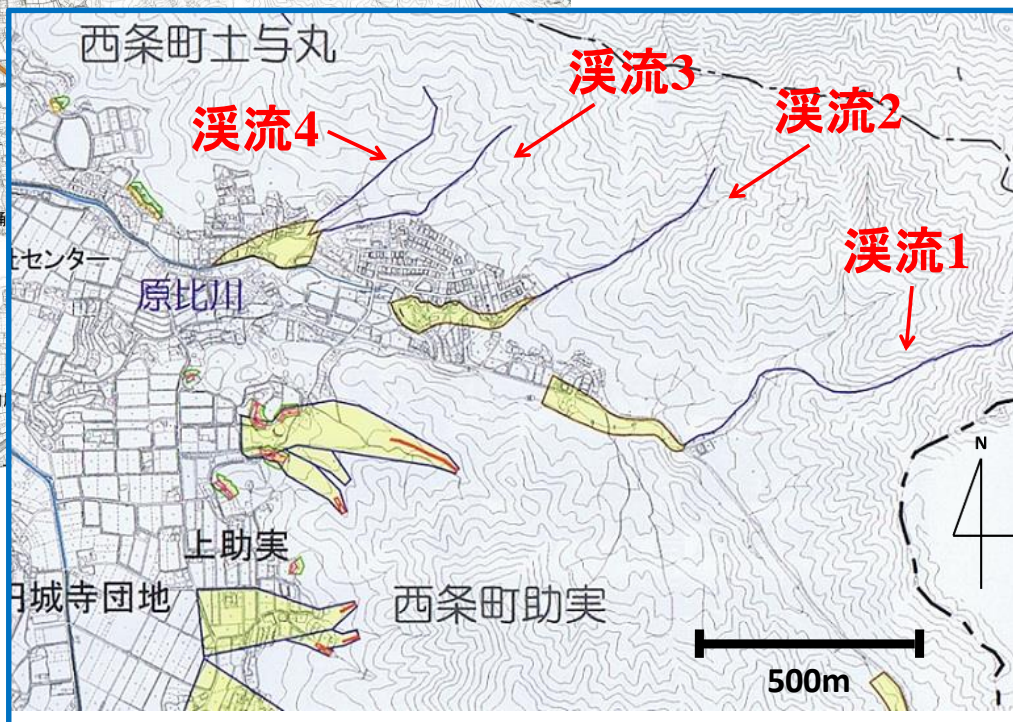
$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\psi) \cdot \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right) = 0$$



4か所の溪流の危険度評価



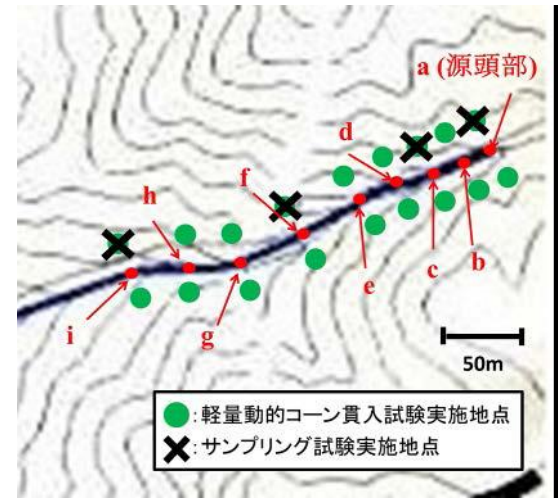
調査地点



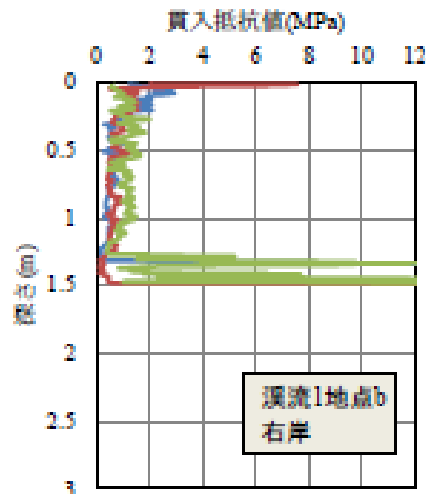
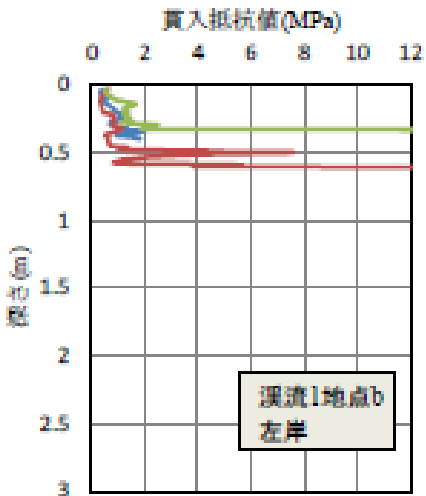
1) 溪流の調査



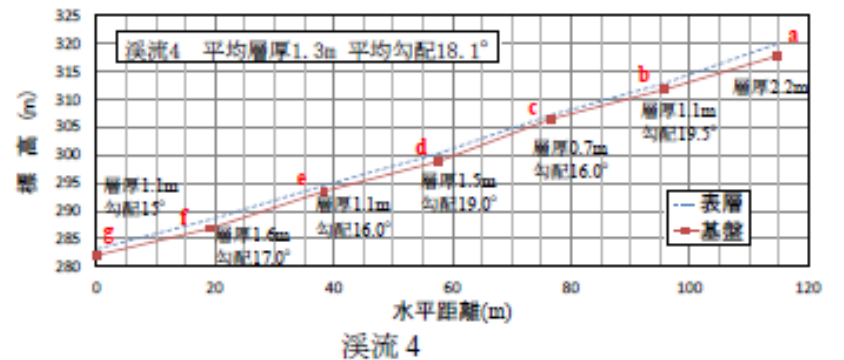
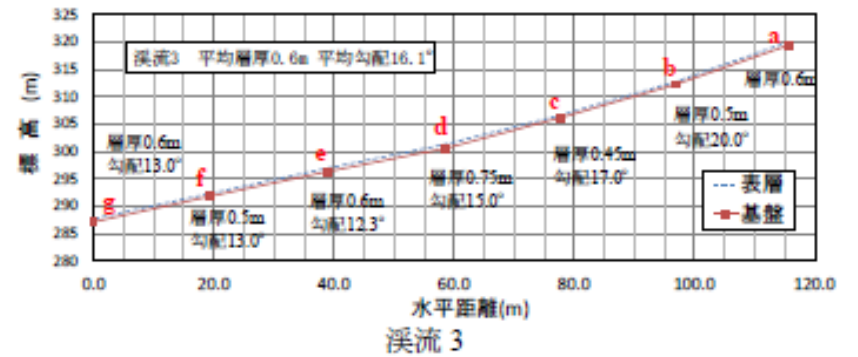
2) 貫入試験と試料採取の位置



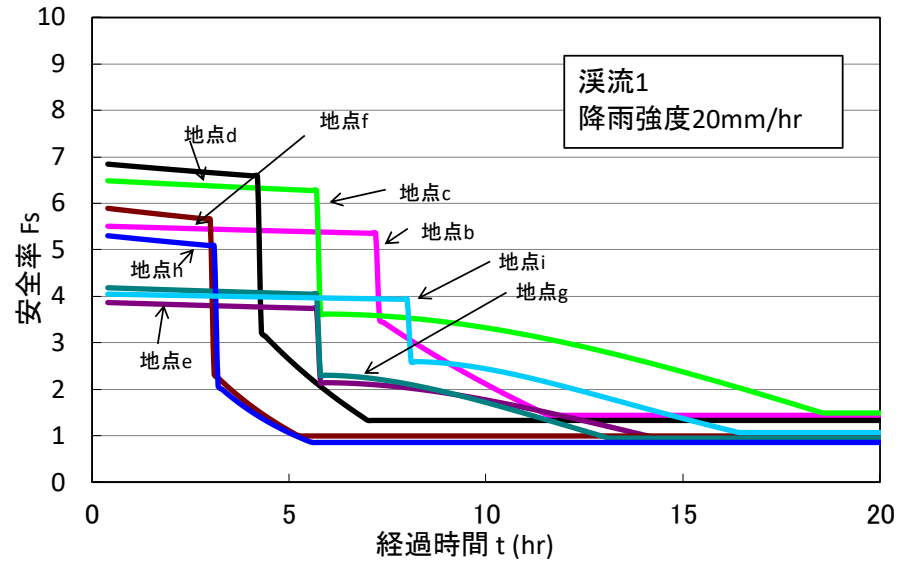
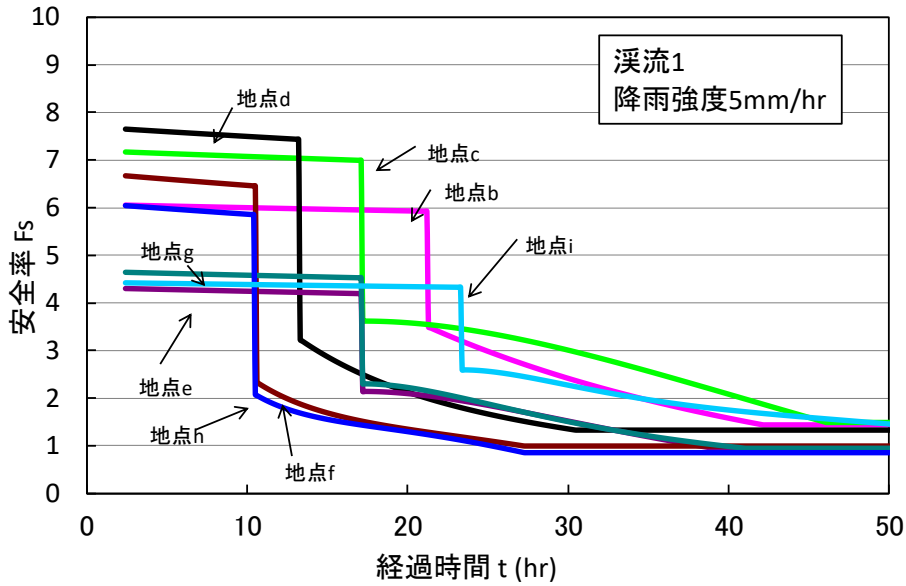
3) 貫入試験結果



4) 溪流の断面の決定



一定降雨条件における溪流の各点での安全率の変化



降雨の浸透による高含水比帯の下降



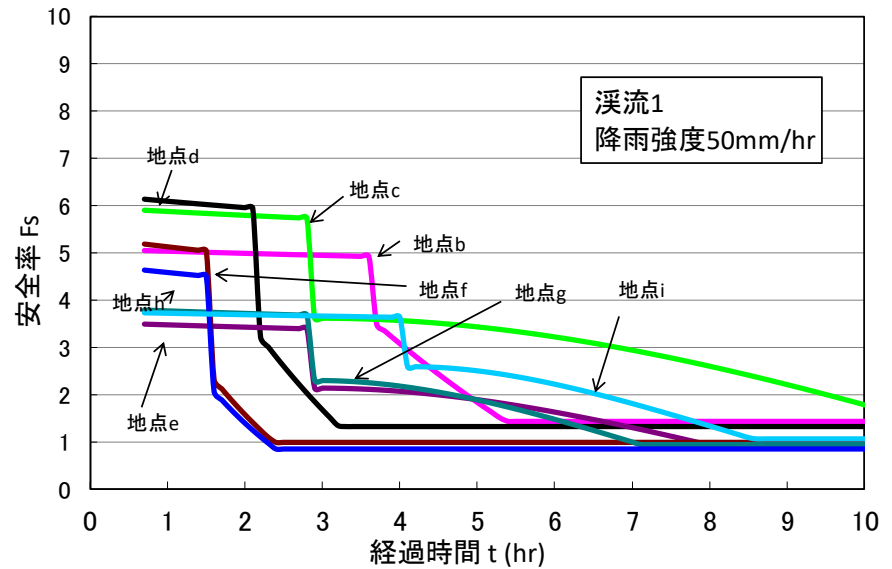
地下水位の形成と上昇



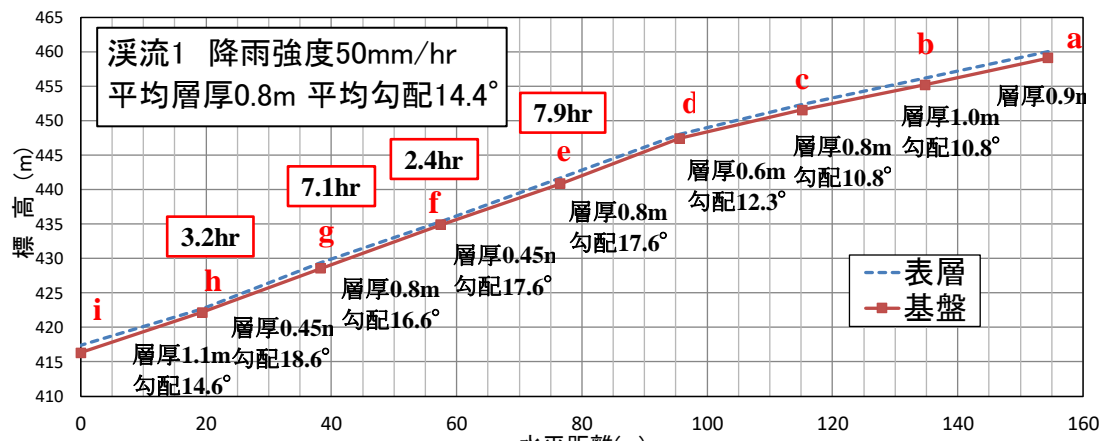
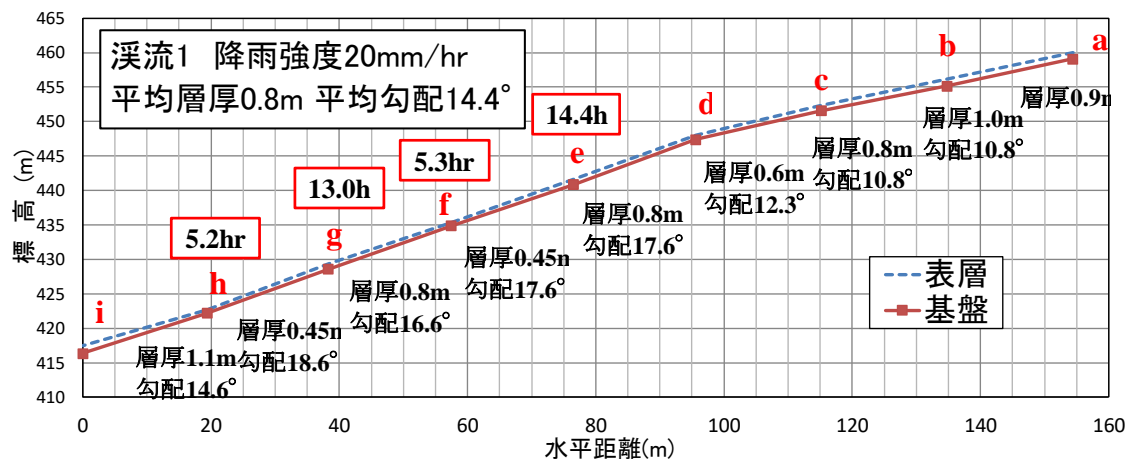
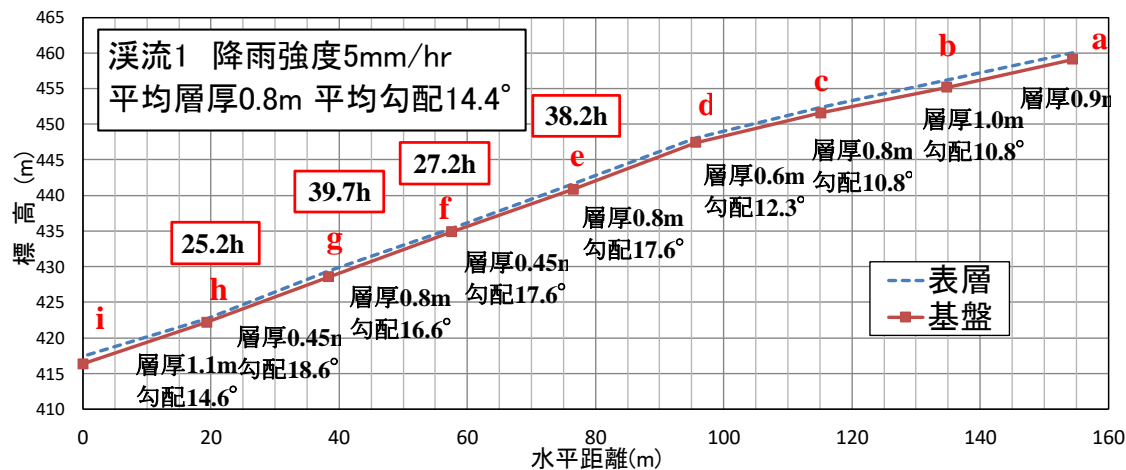
安全率の低下



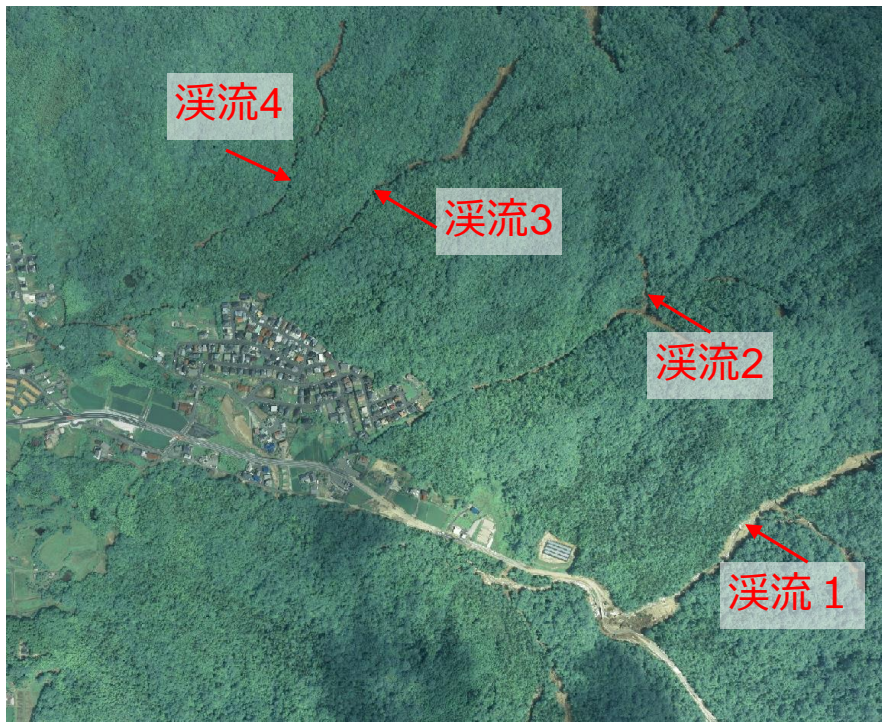
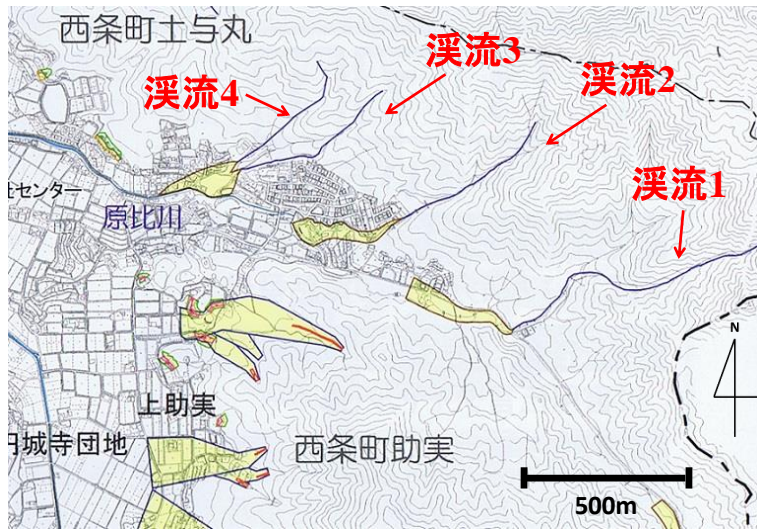
斜面のすべりが発生



一定降雨条件における溪流の各点での安全率が1を切るときの時間



計算結果のまとめと総合評価(2011)



2018年西日本豪雨における土砂の流出

		溪流 1	溪流 2	溪流 3	溪流 4
勾配 (°)		18.6	25.7	20.0	19.5
層厚 (m)		0.5	0.9	0.5	1.1
安全率が1未満となるまでの時間(時間)	R=5mm/hr	25.2	25.1	19.0	47.2
	R=20mm/hr	5.2	7.7	5.2	12.2
	R=50mm/hr	2.3	3.7	2.4	5.7
安全率 1 を切る時間からみた危険度(1~5 点)		4.1	3.8	5	1
安全率が1未満となる斜面の範囲(m)	R=5mm/hr の雨が48hr 降った時	81	10	66	29
	R=20mm/hr の雨が10hr 降った時	6	4	57	0
	R=50mm/hr の雨が5hr 降った時	5	4	33	0
安全率が 1.0 未満となる斜面の範囲による危険度(1~5 点)		3.5	1	5	1.7
総合的にみた危険度(10 点満点)		7.6	4.8	10	2.7
下流に影響する範囲(戸数)		1~2	18~20	13~15	13~15

土石流危険渓流の危険度評価

- 1) 軽量動的コーン貫入試験を中心とした土砂災害危険渓流の地盤調査方法を提案し、東広島市内の4つの渓流に適用した。調査結果により、渓流の勾配、風化層厚、貫入抵抗値から推定した強度定数により、モデル化できることを示した。また、本調査方法では一箇所 of 渓流をほぼ一日で調査できた。
- 2) 一定の降雨強度の条件では、高含水比帯の体積含水率および飽和度は降雨強度によって決まること、さらに高含水比帯の深さ方向降下速度も降雨強度によって決まることがわかった。
- 3) 降雨により形成された高含水比帯が基盤に達し、地下水が形成され始めた以降において二次元斜面モデルにおいて地下水位の高さを計算する式を導出した。
- 4) 4つの土砂災害危険渓流において地盤情報を基に作成した二次元斜面モデルにおいて降雨強度5, 20, 50mm/hrの雨が継続した場合を想定した地下水位の形成・上昇と斜面安定解析を行い、降雨の斜面の安全率の経時変化を示した。計算から得られた安全率が1.0以下となるまでの降雨後経過時間と安全率が1.0以下になる斜面の範囲をもとに、4つの土砂災害危険渓流の危険度の相対評価を行い、危険度を比較することができた。

川端昇一，土田孝，加納誠二，由利厚樹，花岡尚，中川翔太：地盤調査と斜面安定解析に基づく土砂災害危険渓流の豪雨時危険度評価，地盤工学ジャーナル，Vol. 8, No. 1, 119-131, 2013.

Tsuchida, T., Athapaththu, A.M.R.G.ほか4名：Individual Landslide Hazard Assessment of Natural Valleys and Slopes Based on Geotechnical Investigation and Analysis, Soils and Foundations Vol.54, No.4.

広島大学における現在および今後の取り組み



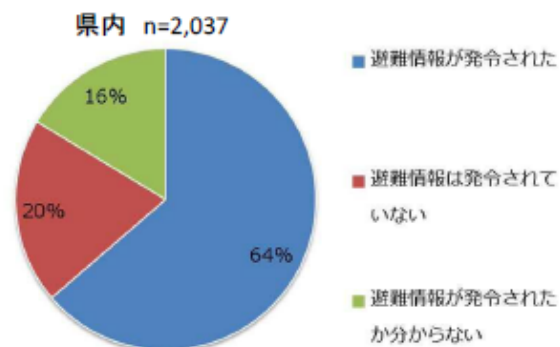
災害後に実施された広島県による住民アンケートの結果 1

避難情報発令の認知度は土砂災害警戒区域内の住民は**95%**であった。

検証② 土砂災害に関する住民アンケート(12/14)



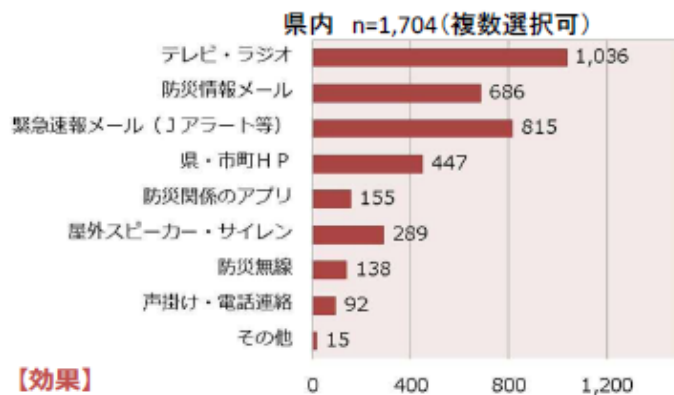
18) 平成30年7月豪雨(7/5~8)の避難情報発令の認知度



■ 避難情報発令の認知度は84%
土砂災害警戒区域等内の住民では95%

避難情報の認知度	県内全域 (n=2,037)		土砂災害警戒区域等内	
	回答数	割合	回答数	割合
避難情報が発令された	1297	64%	229	83%
避難情報は発令されていない	407	20%	32	12%
発令されたか分からない	333	16%	14	5%
合計	2037	100%	275	100%

19) 避難情報(7/5~8)の情報入手先



■ 情報入手先として、「テレビ・ラジオ」が61%と最も多い次いで、「緊急速報メール」が48%とインターネット環境からの情報入手が多い

避難情報の情報入手先 (複数選択)	県内 (n=1,704)	
	回答数	割合
テレビ・ラジオ	1,036	61%
防災情報メール	686	40%
緊急速報メール(Jアラート等)	815	48%
県・市町HP	447	26%
防災関係のアプリ	155	9%
屋外スピーカー・サイレン	289	17%
防災無線	138	8%
声掛け・電話連絡	92	5%
その他	15	1%
合計	3,673	1,704

【効果】

県内と比べ土砂災害警戒区域等内の住民の認知度が高い(84%→95%)ことを確認

施策3 避難につながる取組の推進

災害後に実施された広島県による住民アンケートの結果 2

- ・土砂災害警戒区域内の住民で、何らかの避難行動をとった人は**30%**。
- ・避難所・親戚友人宅への避難は**13%**で自宅内避難が**17%**。
土砂災害警戒区域の住民の70%は避難しなかった。
- ・避難した人のうち発災前に避難したのは21%、65%は発災後に避難。

検証② 土砂災害に関する住民アンケート(13/14)



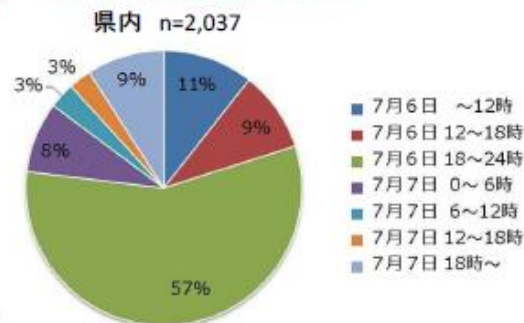
20) 平成30年7月豪雨 (7/5~8) の避難状況



■ 何らかの避難行動を行った住民は13%
土砂災害警戒区域等内の住民では30%が避難

H30.7月豪雨の避難状況	県内 (n=2,037)		土砂災害警戒区域等内		比較
	回答数	割合	回答数	割合	
避難所へ避難	38	2%	20	7%	30%
親戚・友人の家に避難	61	3%	16	6%	
2階や崖から遠い場所に避難	165	8%	46	17%	
避難しなかった	1,773	87%	193	70%	
合計	2,037	100%	275	100%	

21) 時間帯別避難状況



■ 発災前に事前避難した割合は20%
土砂災害警戒区域等内の住民では事前避難の割合は21%

時間帯別避難状況	県内 (n=2,037)		土砂災害警戒区域等内		比較
	回答数	割合	回答数	割合	
7月6日 ~12時	28	11%	9	11%	21%
7月6日 12~18時	25	9%	8	10%	
7月6日 18~24時	150	57%	53	65%	↓ 発災
7月7日 0~6時	22	8%	5	6%	
7月7日 6~12時	8	3%	1	1%	
7月7日 12~18時	7	3%	2	2%	
7月7日 18時~	24	9%	4	5%	
合計	264	100%	82	100%	

【効果】

県内と比べ土砂災害警戒区域等内は2.3倍の住民が避難

【課題】

事前避難の割合は土砂災害警戒区域内も違いはないことを確認

施策3 避難につながる取組の推進

- ・避難勧告、避難指示などの防災情報を受け取っても、実際に避難行動に結びつかない。
- ・避難した人の中で、発生前に避難したのは21%に過ぎない。



- ・避難しない。
- ・早期避難が少ない。避難行動が遅すぎる。

避難行動に移らない原因は：

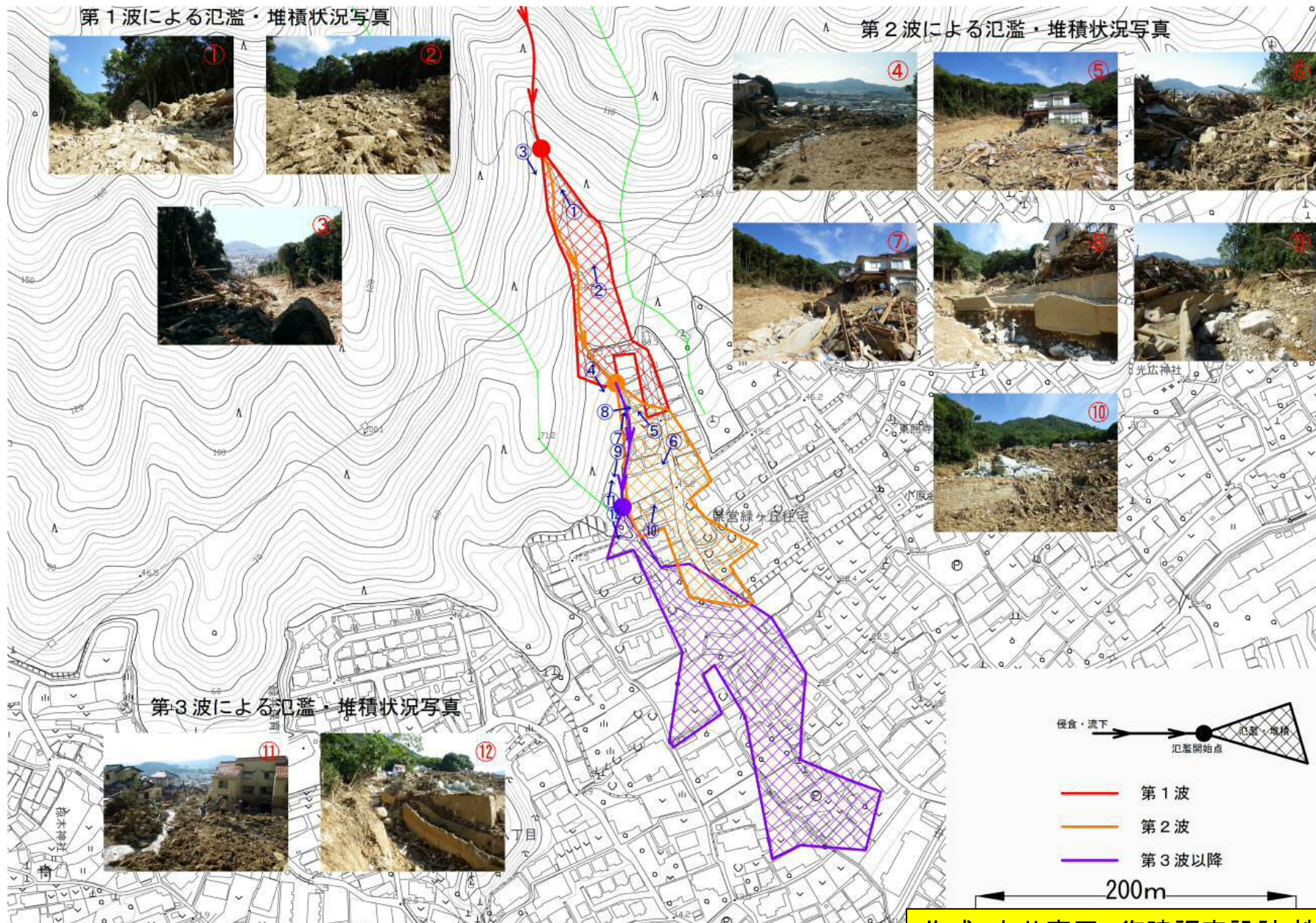
正常性バイアス：自分にとって何らかの被害が予想される状況下にあっても、それを正常な日常生活の延長上の出来事として捉えてしまい、「自分は大丈夫」「今回は大丈夫」「まだ大丈夫」などと過小評価すること。→ **心理学の専門家による取り組み**

過去の経験：過去に避難したが「何事も起こらなかった」。避難しなくとも「何事も起こらなかった。」という体験により、「今回もたぶん避難しなくても大丈夫」と考えてしまう。
→ 渓流で起こっていることの情報がないため、「何事も起こらなかった」→ 渓流内では実際には土砂の移動が起こっている。渓流内の土砂の移動の情報を伝えることが避難に直結する。
→ **渓流内の情報不足が避難しない大きな原因ではないか**

八木3丁目県営緑ヶ丘住宅上の土石流(2014年8月広島土砂災害)

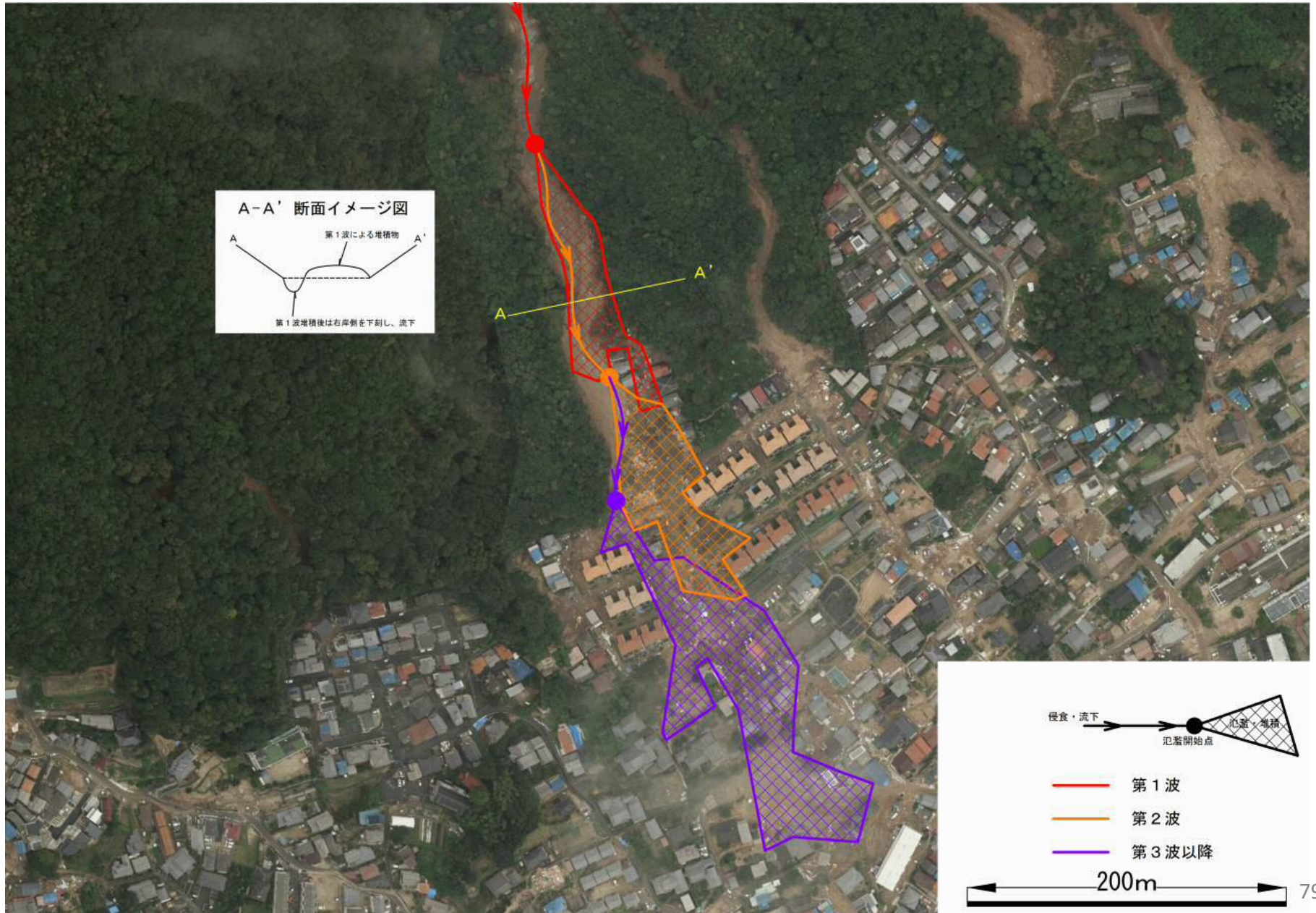


県営緑が丘住宅の上の溪流下の被害: 土石流は少なくとも3回来襲している。



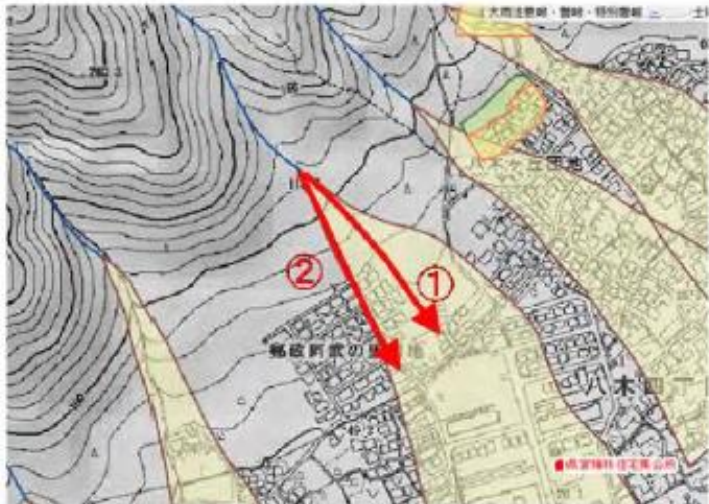
作成: 中井真司、復建調査設計(株)

氾濫・堆積の模式図を国土地理院の空中写真に重ねたもの



阿武の里団地：土石流

- 二つに分かれて流下.
- この地域の土石流の流下予想は①が中心(下図)
- 先に①に土石流が流れ、その堆積物が後に続く②の土石流の流下を妨げて流路を変えたと推定.

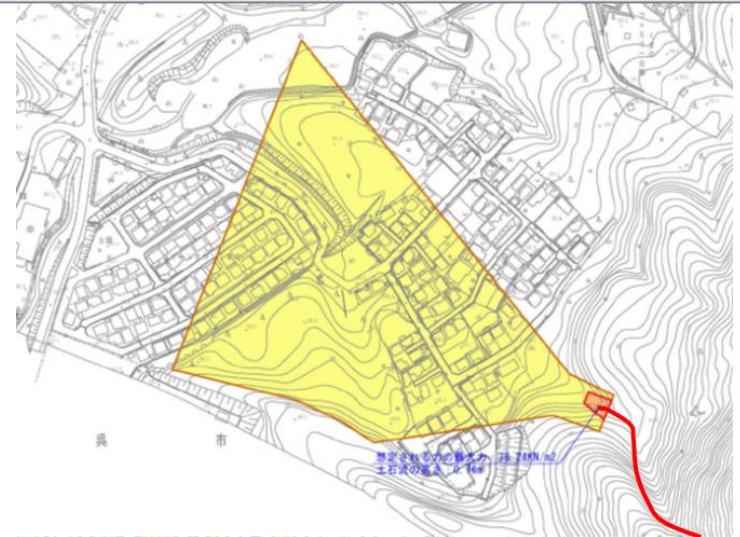


熊野町川角地区で発生した土石流

土砂災害警戒区域および特別警戒区域の区域図
2017年3月9日 広島県告示



国土地理院 <http://www.gsi.go.jp/common/000000044.gif>



想定しない溪流からの土砂の流入
があったことが差の原因

土石流対応ワイヤレスセンサーを用いた住民参加型警戒・避難システムによる土石流発生の早期検知システムに関する研究

複数回の土石流発生による被害の拡大



- H26の見直し以降、溪流毎の流出土砂量の予測値は実績値と整合性向上
(予測：6,030m³、実績：7,100m³)
→ 被災した住宅団地や道路では複数の土石流の発生が確認される場合が多い。
- **1つ目の土石流の堆積により、2つ目はより遠くへ到達し、被害を拡大**

「1つ目」の土石流を確実に捉え 避難情報を発信する警戒システム

断線センサー、変位計、
カメラによる土砂移動検知



住民への直接配信

- ✓ 個別溪流ごとの警戒情報
- ✓ 住民参加と直接配信
- ✓ 「空振り」の軽減

住民、道路管理者・道路通行者へ直接危険度の通知

土石流対応ワイヤレスセンサーを用いた住民参加型警戒・避難システムが早期避難に及ぼす効果

現在の「避難勧告」、「避難指示」の判断は、広域の雨量と地盤災害発生確率をもとに、雨量によって判断。
住民は、地域の溪流の情報がない。



避難しても目にみえる被害が発生しないと「空振り」と称され、早期避難の効果が理解しにくい。



豪雨時には被害が無くも溪流では土砂の動きがある。
溪流の動きに関する情報がわかることで、「土砂が流出したが、溪流内に留まったり砂防堰堤に捕捉されて被害が無かった」などの結果がわかる。



目に見える被害の有無だけでなく、**溪流での土砂の動きを把握することで、早期避難の必要性を納得**できる。

土石流の前兆現象としてのニオイの発生に関する研究 1

日本工営(株)技術研究所(筑波)との共同研究

地下水位上昇仮説

- ・地盤の間隙中には強いニオイが存在する。
- ・土砂災害が発生する直前には地盤内の地下水位が急上昇する。
- ・地下水位の上昇により、地盤の間隙中の空気がニオイとともに地表面から放出される。

土田孝, 由利厚樹, 加納誠二, 中藪恭介, 矢葺健太郎, 花岡尚, 川端昇一: 地盤内において強度と斜面崩壊時のにおい発生に関する一考察, 地盤工学ジャーナル, Vol.8, No.2, pp.339-348, 2013.

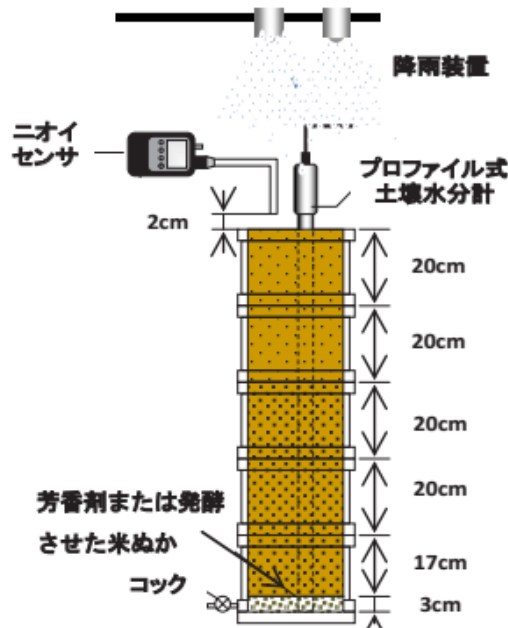
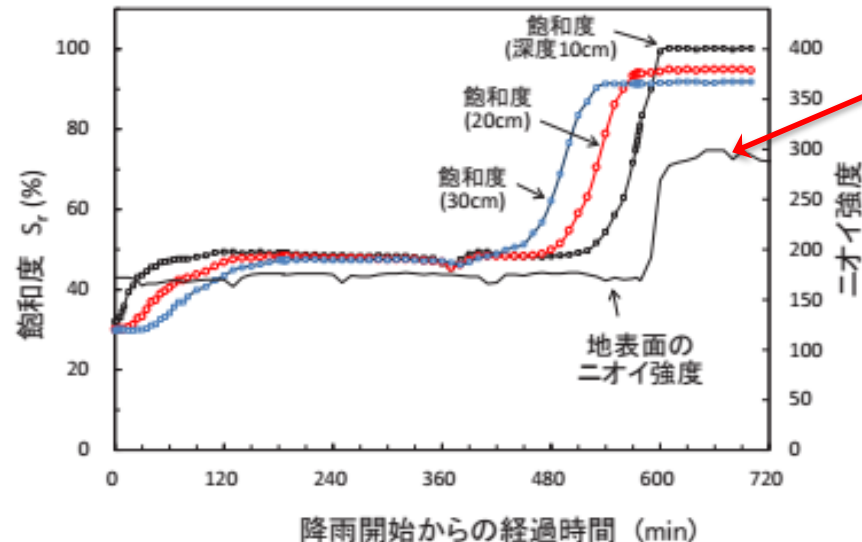


図 18 一次元降雨浸透実験に用いた模型土層



降雨により
地下水位と
ともににおい
強度が上昇

図 20 降雨開始からの時間と地盤内の飽和度および地表面で測定したにおい強度 (発酵した米ぬか) の関係

土石流の前兆現象としてのニオイの発生に関する解析 2

日本工営(株)技術研究所(筑波)との共同研究

先行土石流仮説

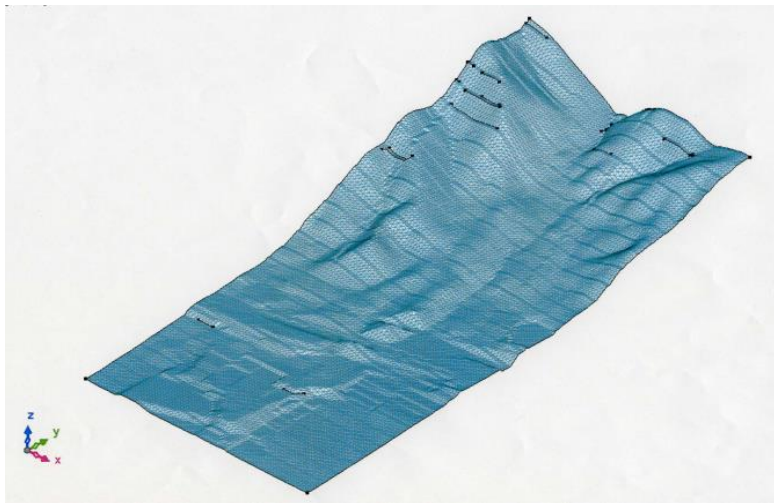
- ・大きな被害を生じる土石流は複数回発生している。
- ・先行する土石流が住宅地の近距離に到達しそのニオイが風により住宅地に達する。

西日本豪雨災害において災害前にニオイが発生した事例(東広島市八本松)について本仮説の可能性を検討した。

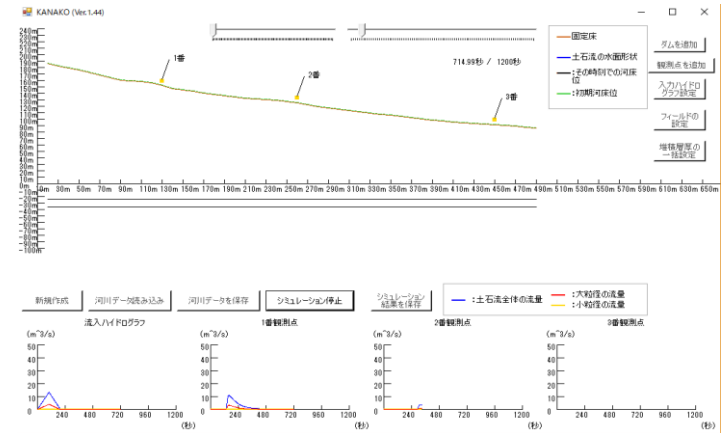


国道2号線バイパス建設現場の掘削箇所に土石流が流入。掘削が幸いし、近くの通行中の道路への被害はなかった。

建設中の技術者がニオイを感じて直ちに避難を呼びかけ
→ 避難が完了した直後に土石流が襲う



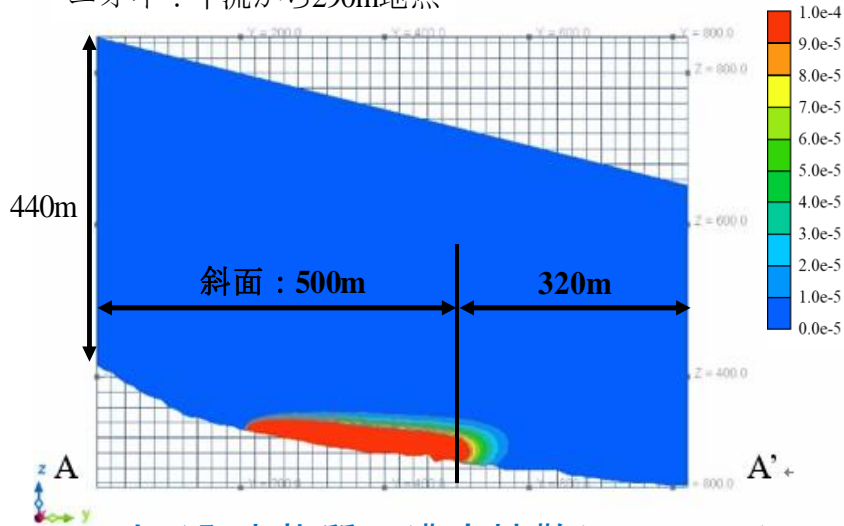
土石流発生箇所の地形モデル



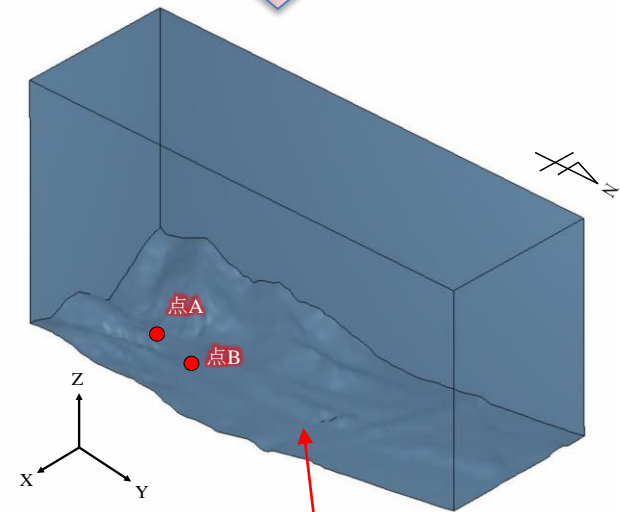
土石流シミュレーションで堆積しやすい箇所を特定

斜面：八本松
ニオイ：下流から290m地点

Time:210sec



ニオイ発生物質の濃度拡散シミュレーション



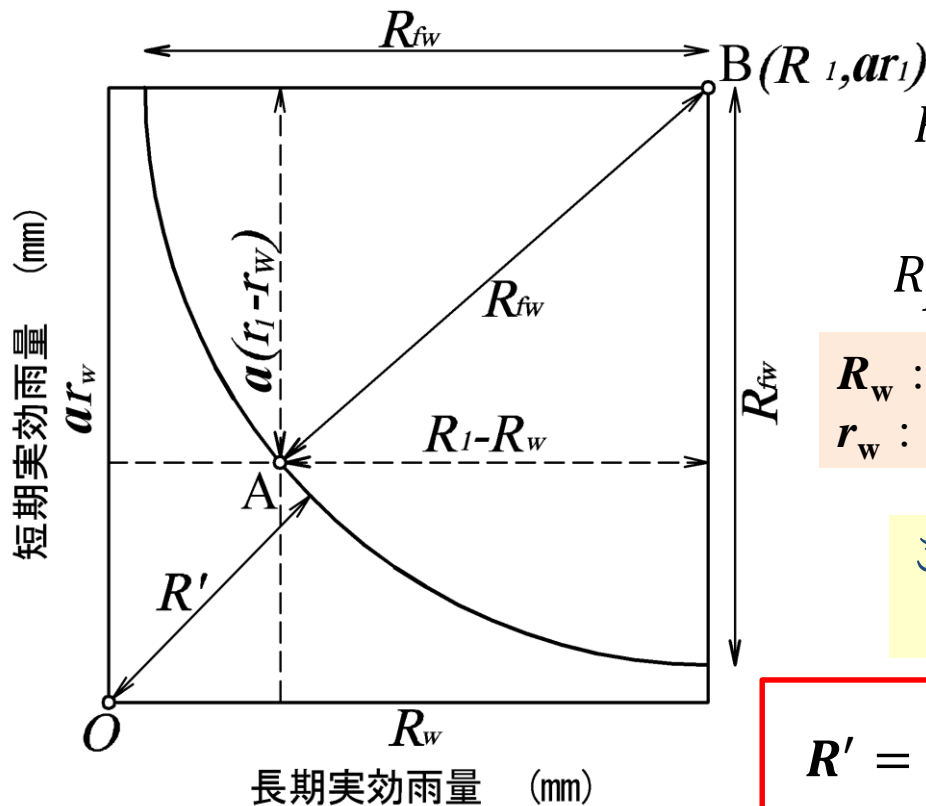
溪流の出口
ニオイの証言者の位置

→ この条件では約3.5分後にニオイが290m下流に到達

→ 先行した土石流がニオイの発生源という仮定は可能性が高い

単一雨量指標 R' の適用に関する研究

土砂災害のリスク評価には、先行雨量と災害発生時の雨量強度の2つの関係が用いられている。広島大学では、先行雨量を長期実効雨量で、雨量強度を短期実効雨量で表し、土砂災害の危険度を一つの数値で総合的に評価できる単一雨量指標 R' を提案している。



$$R' = R_{fw0} - R_{fw} \quad (1)$$

$$R_{fw} = \sqrt{(R_1 - R_w)^2 + a^2(r_1 - r_w)^2} \quad (2)$$

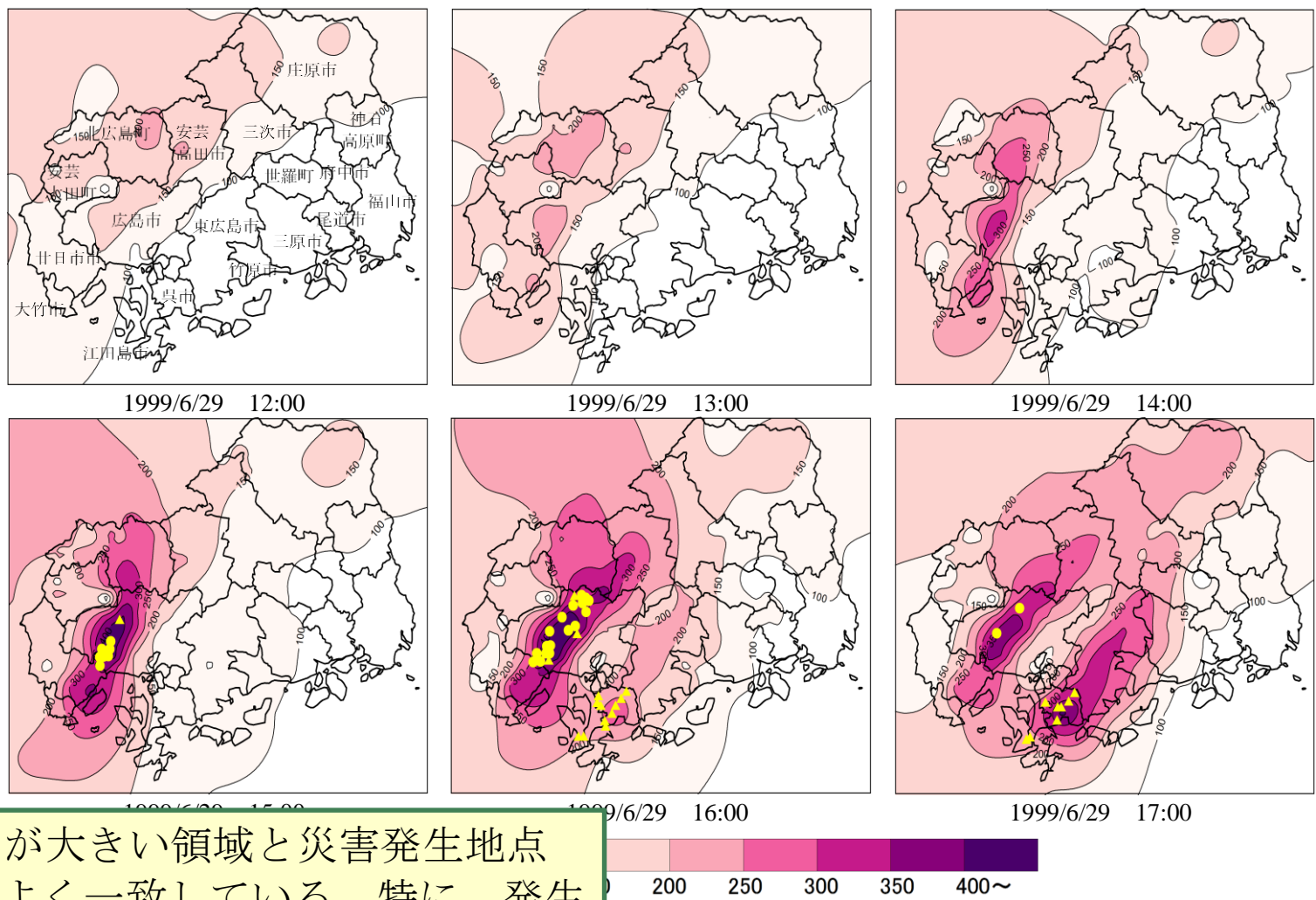
R_w : 半減期を72時間とする長期実効雨量(mm)
 r_w : 半減期を1.5時間とする短期実効雨量(mm)

これまでの災害の分析から

$$R_1 = 600\text{mm}, \quad r_1 = 200\text{mm}, \quad a = 3$$

$$R' = 848 - \sqrt{(600 - R_w)^2 + 3^2(200 - r_w)^2}$$

単一雨量指標 R' の適用に関する研究 1999年6.29災害における R' 分布

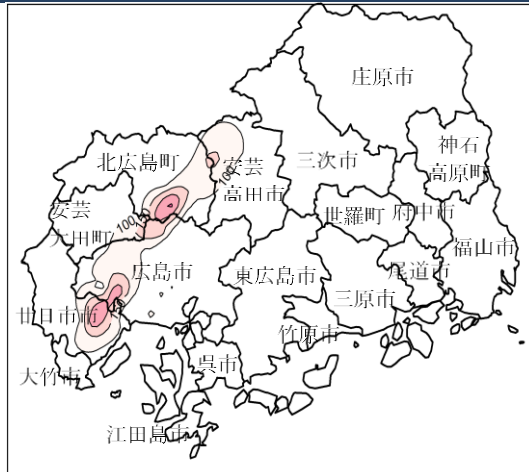


R' が大きい領域と災害発生地点がよく一致している。特に、発生時間が特定できた土石流災害は全て $R' = 250\text{mm}$ 以上のところで発生している。

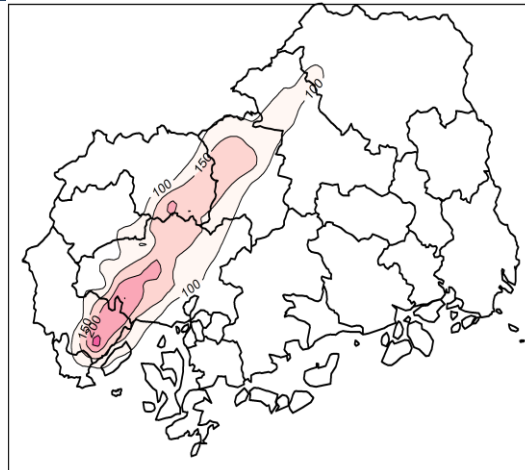
流, ▲ : その時間帯に発生したかけ崩れ)

1999年6.29災害における R' 分布図

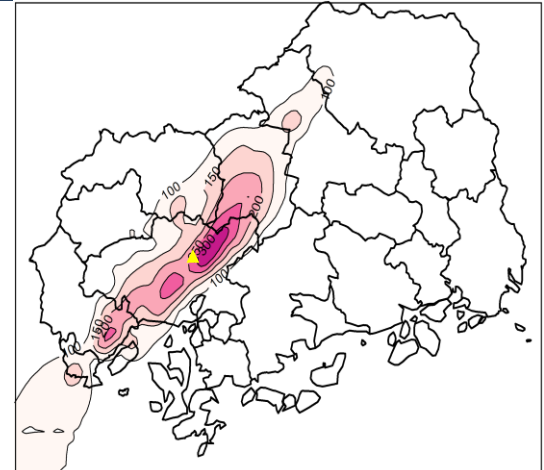
単一雨量指標 R' の適用に関する研究 2014年8.20災害における R' 分布図



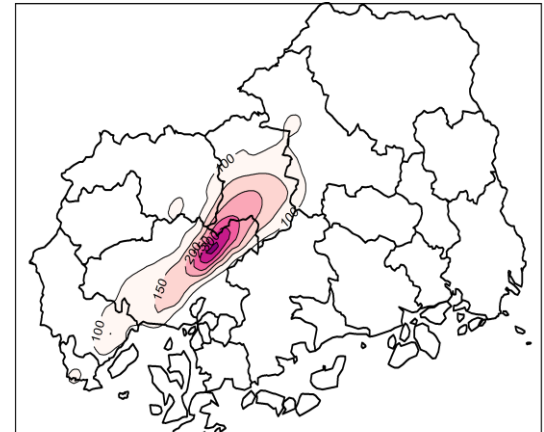
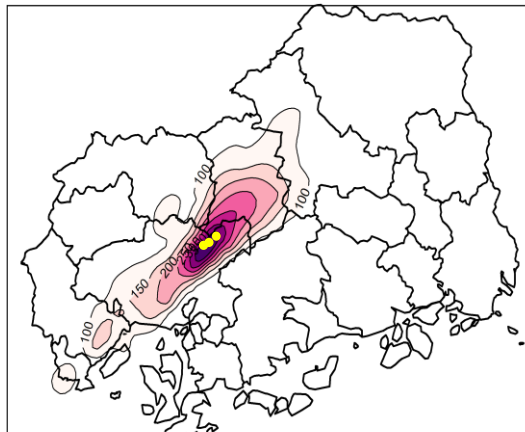
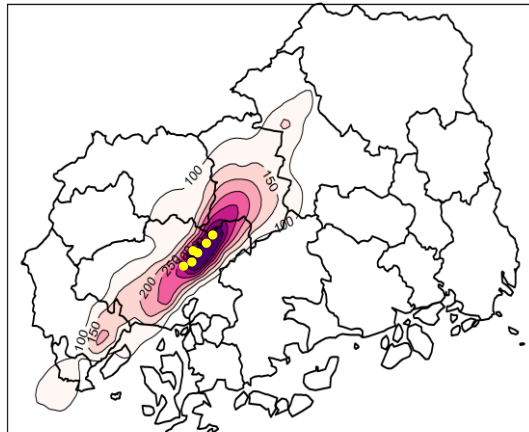
2014/8/20 1:00



2014/8/20 2:00

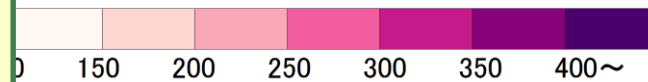


2014/8/20 3:00



2014/8/20 5:00

2014/8/20 6:00



2時30分頃に安佐南区山本八丁目で死者2名を出すがけ崩れが起こり、3時から5時にかけて安佐北区可部地区から安佐南区緑井・八木地区で土石流が同時多発しており、 R' 等値線図の推移状況とよく一致。

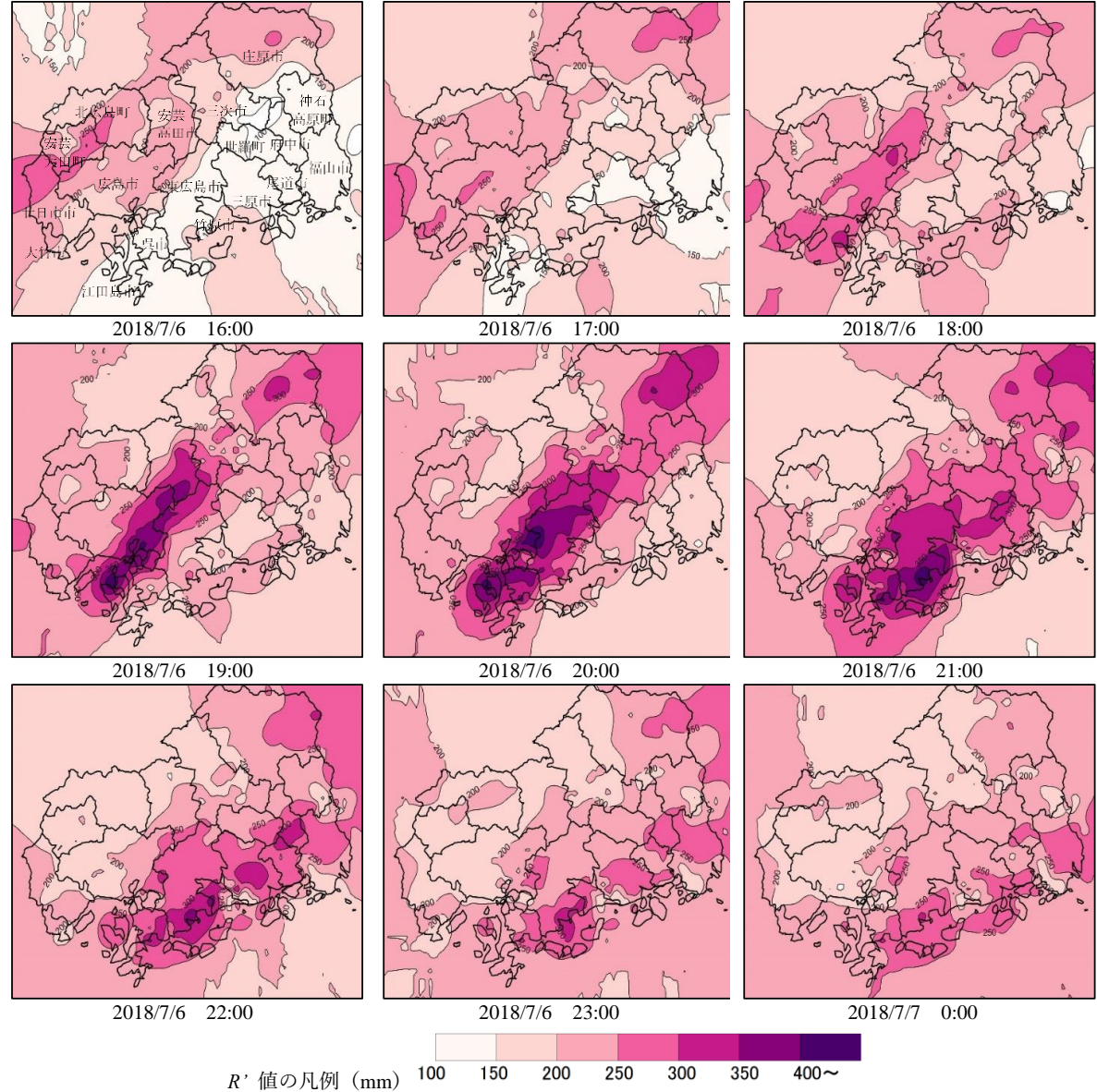
た土石流, ▲ : その時間帯に発生したがけ崩れ)

2014年8.20災害における R' 分布図

単一雨量指標 R' の適用に関する研究 2018年西日本豪雨災害における R' 分布図

7月6日16時に広島県西部と広島県北部で $R' = 250\text{mm}$ 以上となる領域が現れ始め、18時には東へ移動し、広島市と安芸高田市に拡大。

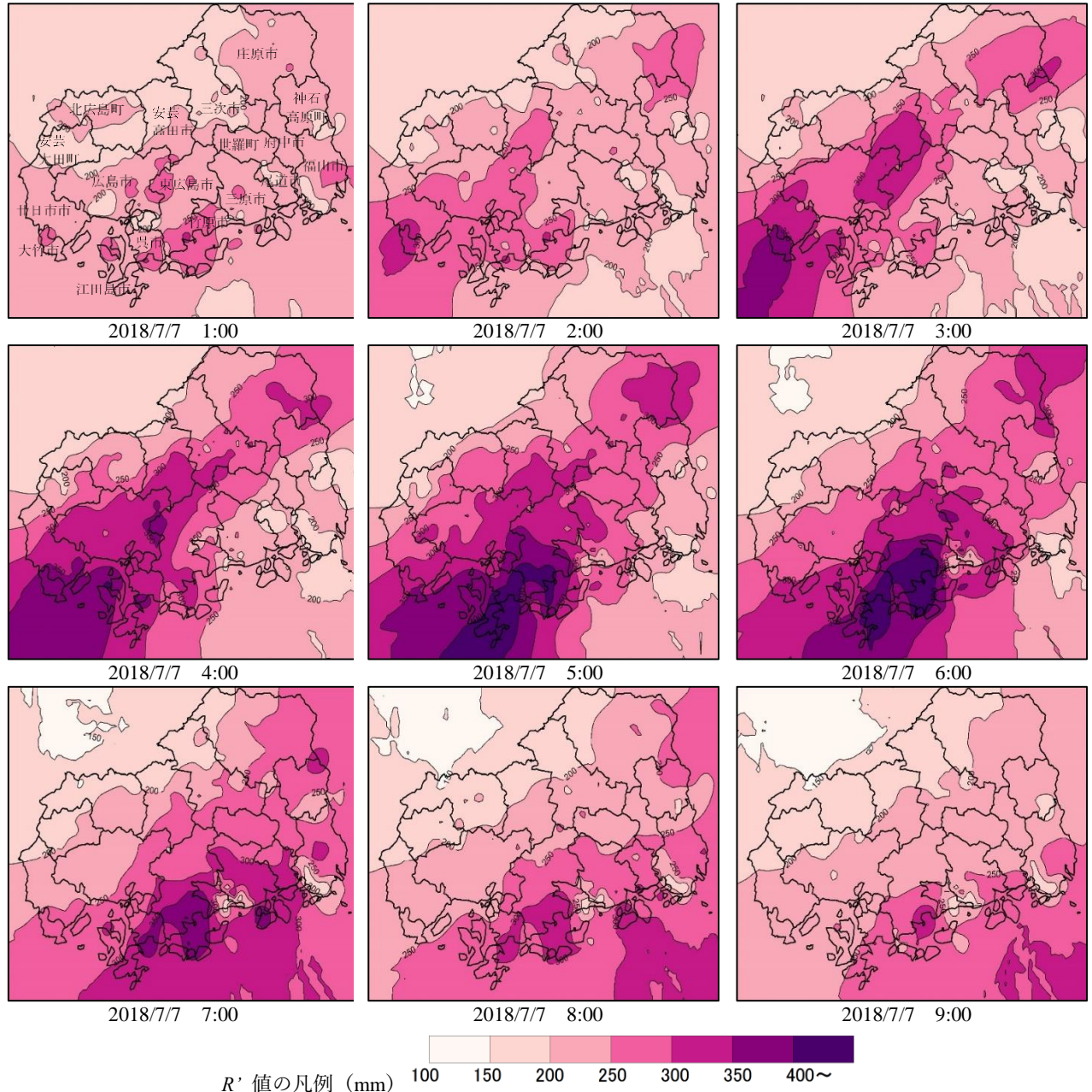
7月6日19時から広島市南部の一部に $R' = 400\text{mm}$ 以上となる領域が出現し、20時には大きな被害の出た広島市安佐北区口田地区周辺が $R' = 400\text{mm}$ 以上となった。



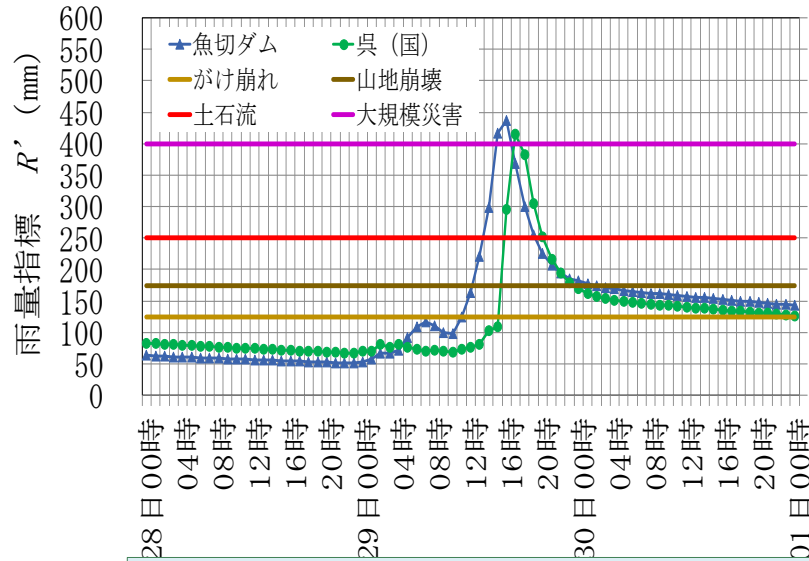
(a) 7月6日16:00~7月7日0:00

図-12 2018年7月豪雨災害における R' 分布図(その1)

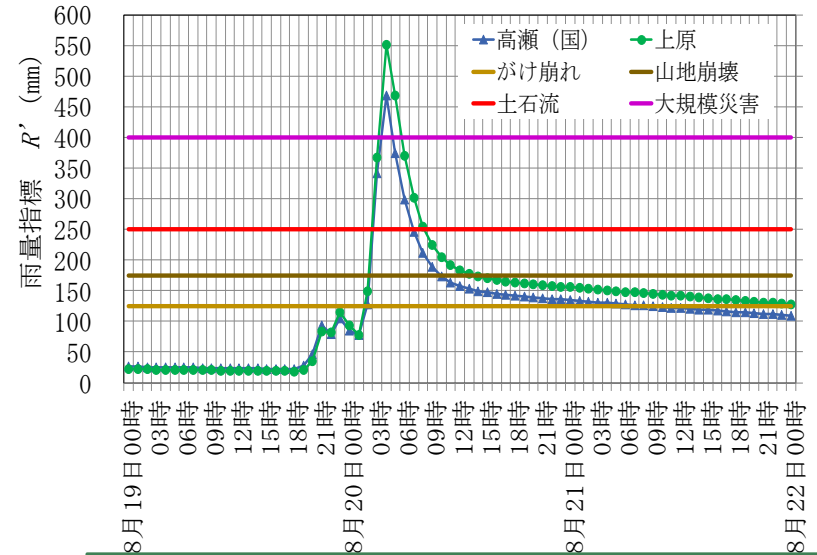
単一雨量指標 R' の適用に関する研究 2018年西日本豪雨災害における R' 分布図



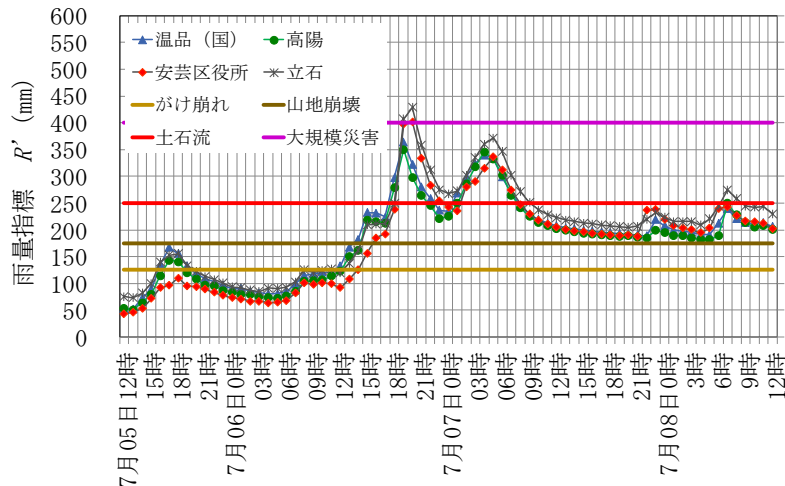
7月7日5時から再び $R' = 400\text{mm}$ 以上となる領域が呉市南東部と東広島市南部で現れ、7時まで続いた。



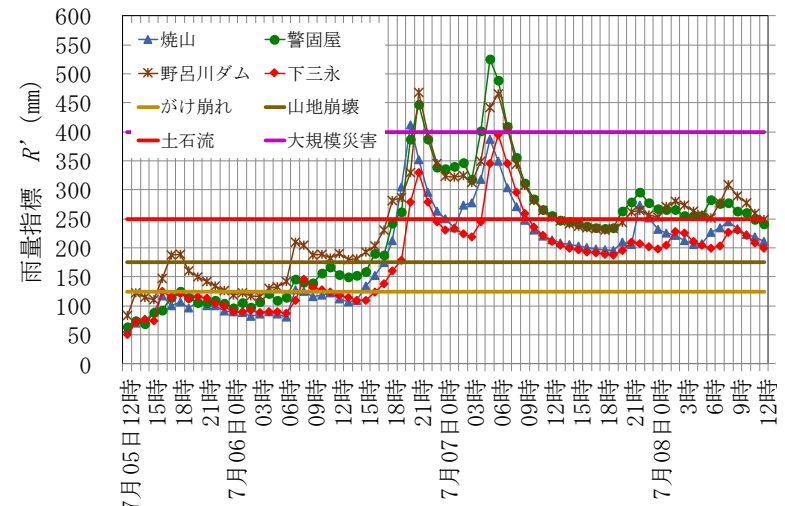
1999年6.29災害における R' 分布



2014年8.20災害における R' 分布図



(a) 2018年西日本豪雨災害における R' 分布図



東広島市エリア

単一雨量指標 R' の適用に関する研究

$R' = 250\text{mm}$ 以上となる地域および時間帯で**土石流が発生する**。

$R' = 400\text{mm}$ 以上で**大規模災害**となる。

R' が 400mm を超えた雨量観測地点は、2014年の8.20災害で4か所であったが、今回の災害では29か所であり、広島県の広いエリアで大規模災害が起こる危険度の降雨があった。

大規模な土砂洪水氾濫が起こった地域 = R' がピークを迎えてから $R' = 250\text{mm}$ 以上で停滞する状態が12時間以上継続していた。



R' と土砂洪水氾濫の発生が関連付けられる可能性

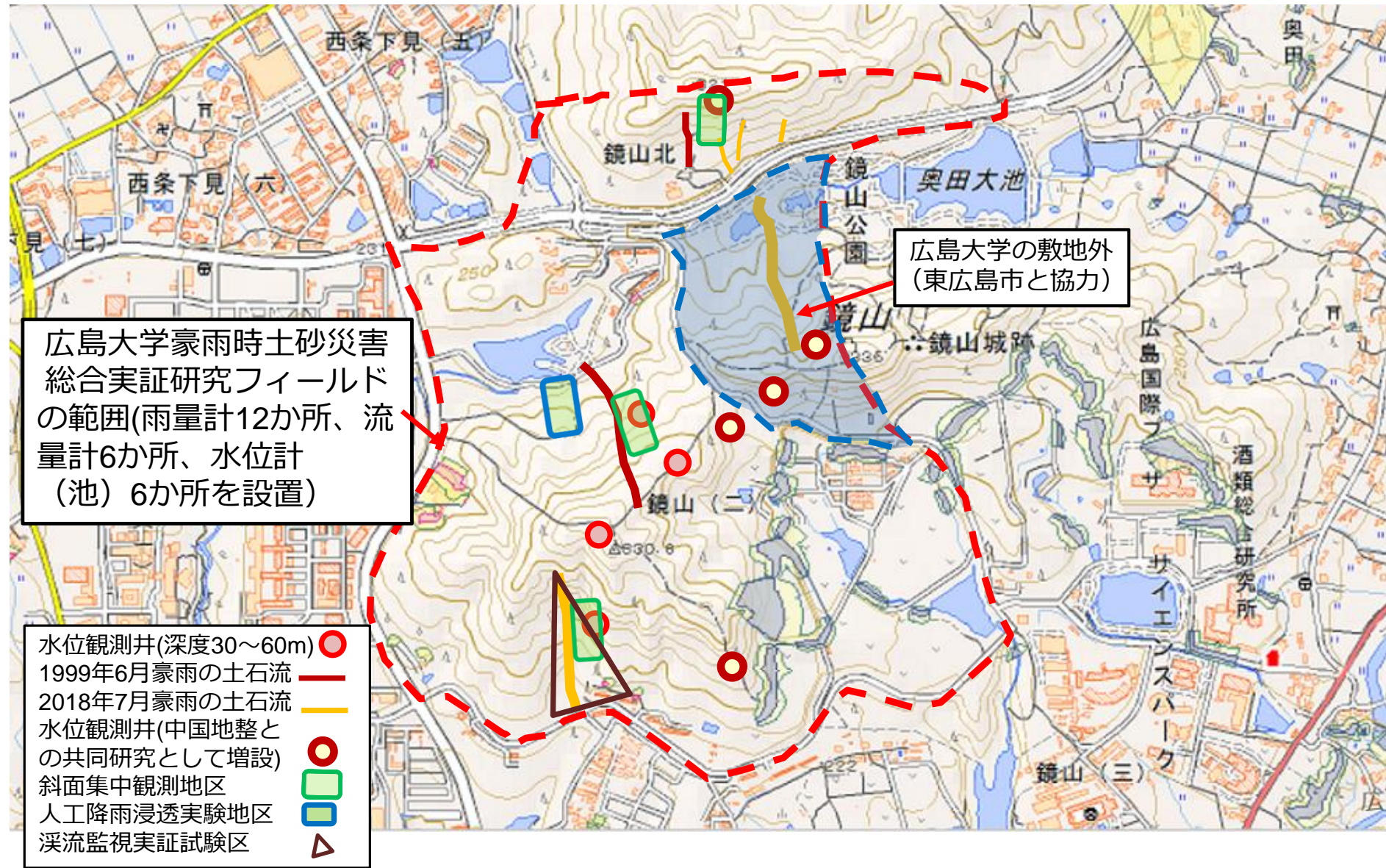
単一雨量指標のメリット

- ・単一の数字であり、地域の分布図を描いたり、時間に対する推移を容易にグラフ化できる。
- ・危険度が最悪の段階まで達した後にさらに悪化しているか、改善しているかの推移を場所ごとに把握できる。
- ・近年、民間会社が任意の場所に雨量観測所を設置しクラウドを活用してユーザーに低価格で雨量観測データを提供するサービスが普及しつつある。 R' と本サービスを組み合わせることで、任意の箇所の土砂災害危険度を簡単に評価できる。

広島大学豪雨時土砂災害総合実証研究フィールド構想



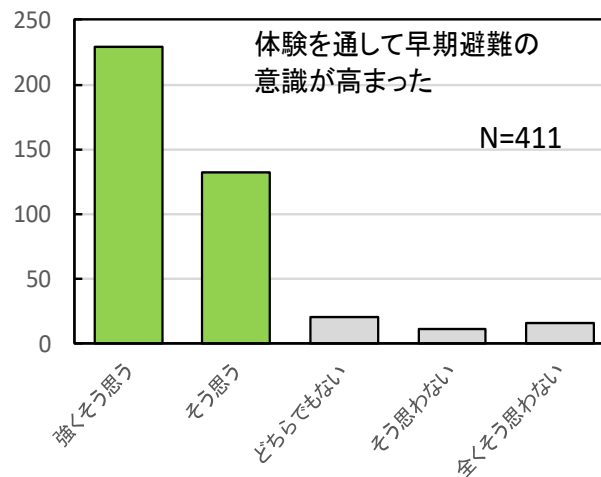
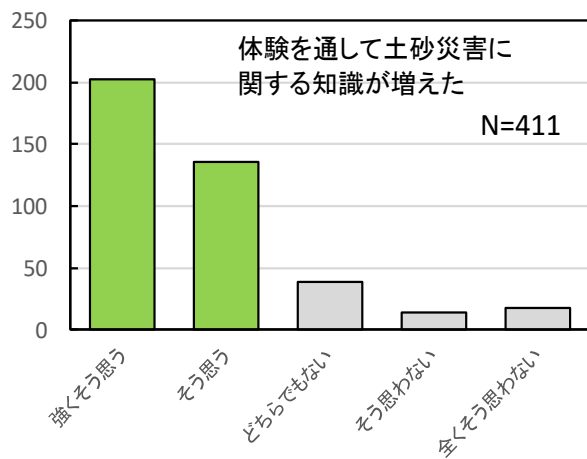
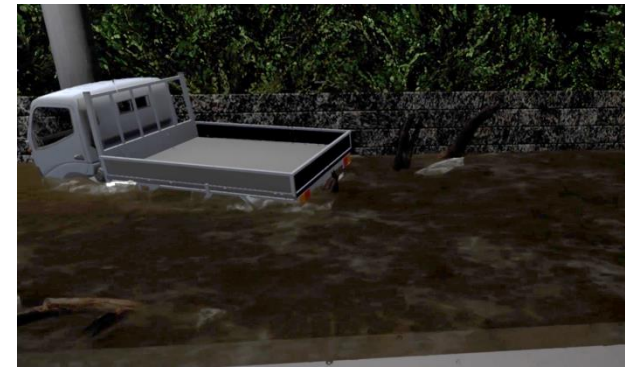
広島大学豪雨時土砂災害総合実証研究フィールド構想



土砂災害の避難体験VRの作成

避難体験VR「土砂災害」～平成30年7月西日本豪雨災害から学ぶ～

西日本豪雨の土砂災害発生前から災害発生に至るまでの気象状況および住宅付近の状況を再現し、災害の疑似体験をすることで、避難のタイミング等について体験・学習することができる。



市内中学校でのVR体験