

2019年に国内で発生した土石流災害について

Debris Flow Disaster Occurred in Japan, in 2019

竹林洋史・藤田正治

Hiroshi TAKEBAYASHI and Masaharu FUJITA

Synopsis

Field observation and numerical analysis were performed for the debris flows which were occurred in Koyasu, Marumori, Miyagi in Oct, 2019 and in Kinryu, Saga in Aug, 2019. Three debris flows were happened in Koyasu area and those debris flows destroyed a house completely. The results of the numerical analysis show that the debris flow approached at the residential area in 40 sec. and it is very difficult to evacuate after the occurrence of debris flow. On the other hand, the debris flow approached at the residential area in 600 sec. in Kinryu, because development of debris flow was slow. People, therefore have enough time to evacuate after the occurrence of debris flow.

キーワード: 土石流, 子安, 金立, 数値解析, 土砂災害

Keywords: Debris flow, Koyasu, Kinryu, Numerical analysis, Sediment disaster

1. はじめに

2019 (令和 1) 年は Fig. 1 に示すように, 国内で 422 件の土石流災害が発生した. 2006 年~2013 年の平均年間土石流発生件数は 221 件であり (国土交通省砂防部), 2019 年は土石流災害が多い年であったことがわかる. その多くが 2019 年 10 月の台風 19 号による豪雨によるものである.

本報告では, 2019 年 10 月の台風 19 号による豪雨によって家屋が全壊する被害が発生した宮城県丸森町子安で発生した土石流と 2019 年 8 月の豪雨によって広い土砂堆積域が途中に存在する佐賀市金立の溪流で発生した土石流について現地調査と平面二次元の土石流数値シミュレーションによって土石流の流動特性を明らかにし, 今後の土砂災害対策に資する情報を提供する.

2. 宮城県丸森町子安で発生した土石流

2.1 対象地域の概要

2019 年 10 月 12 日から 13 日にかけて, 台風 19 号による豪雨によって宮城県南部に位置する伊具郡丸

2019年6月下旬~7月上旬 梅雨前線による豪雨

土石流: 9

2019年7月20日 梅雨前線及び台風5号による豪雨

土石流: 1

2019年8月28日 前線に伴う豪雨 (佐賀県など)

土石流: 2

2019年9月3日 新見豪雨

土石流: 2

2019年9月8日 台風15号による強風

土石流: 1

2019年10月12日 台風19号による豪雨

土石流: 407, 死者: 5人, 行方不明者: 1人, 負傷者: 1人

2006年~2013年の平均年間土石流発生回数: 221 (国土交通省砂防より)

Fig. 1 Debris flow disaster in 2019

森町子安で複数の土石流が発生し, 家屋が破壊されて 4 名の死者・行方不明者が発生した. 台風 19 号による土砂災害の数は 2019 年 12 月 24 日時点で 952 となっており, 一つの台風による土砂災害の数としては過去最多であった. Fig. 1 に示すように, 土石流の数は 407, がけ崩れは 501, 地滑りの数は 44 であり, 死者数は 16 人, 行方不明者数は 1 人, 負傷者数は 10 人であった (いずれも 2019 年 12 月 24 日時点). なお, 宮城県の土砂災害の数は 254 であった.

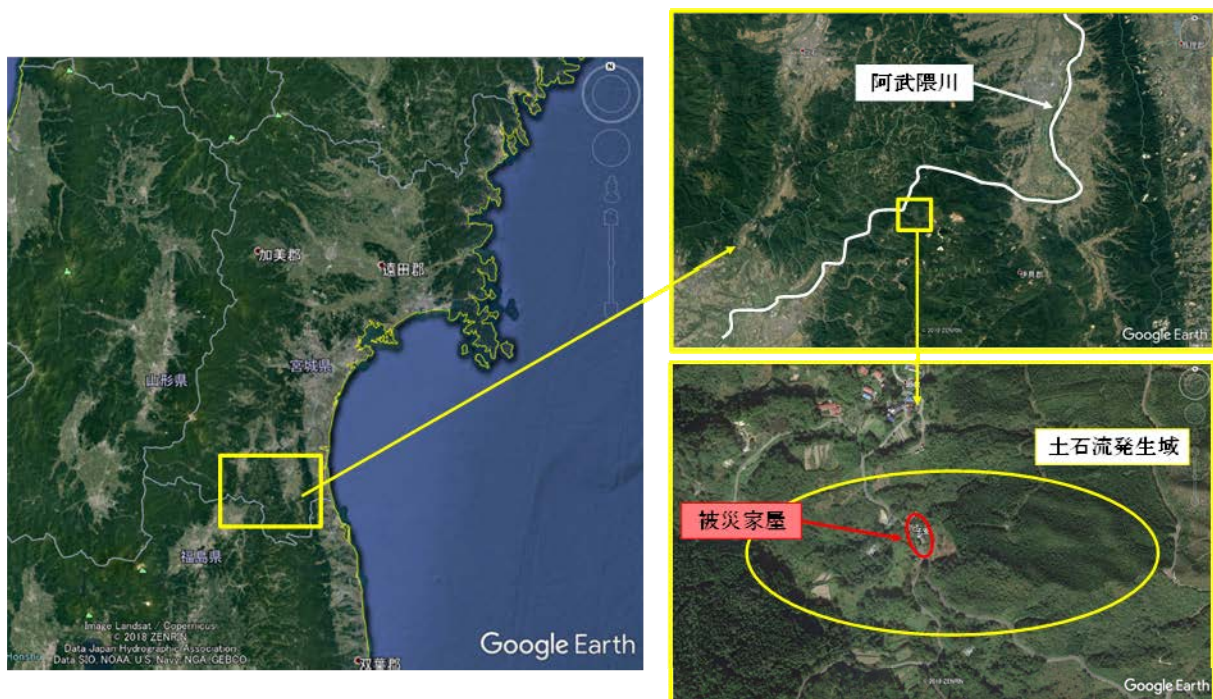


Fig. 2 Location of Koyasu, Marumori, Miyagi

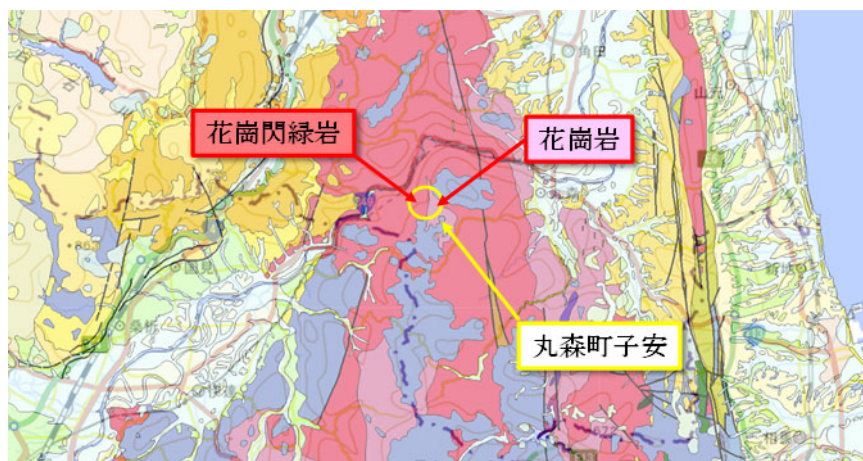


Fig. 3 Geological condition around Koyasu area (GSJ)

Fig. 2 に調査対象地点の位置を示す。子安地区は阿武隈川右岸側の阿武隈高地北端付近に位置している。子安地区には南北方向に道路があり、道路沿いに一世帯所有の二軒の家屋が存在していた。斜面は西向きであり、被災家屋よりも上流域の斜面勾配は約 18 度、被災家屋よりも下流域の斜面勾配は約 9 度である。

2.2 地形・地質

Fig. 3 に研究対象地点周辺の地質図を示す(産業技術総合研究所)。対象地点の斜面上部は花崗岩地帯、被災家屋周辺は花崗閃緑岩となっている。2017 年の九州北部豪雨被災地の赤谷川流域の地質は広い範囲で花崗閃緑岩となっており、2018 年の西日本豪雨被災地の広島市は広い範囲で花崗岩地帯となっており、

研究対象地点と同様の地質である。また、風化の度合いも似ており、粒径 1mm 前後の細粒土砂が多い一方で直径数 m から数十 cm の球状風化したコアストンも見られた。

2.3 降雨

Fig. 4 に C-X 合成レーダーによって得られた土石流発生地点における降雨強度の時間的な変化を示す。降雨は、2019 年 10 月 12 日午前 9 時ぐらいから 10 月 13 日午前 2 時ぐらいまで降り続いており、12 日午後 9 時 6 分に最大降雨強度を記録している。近くに住んでいる住民によると、午後 9 時 7 分に土石流が発生したとのことであり、ちょうど最大降雨強度の発生時間と一致している。

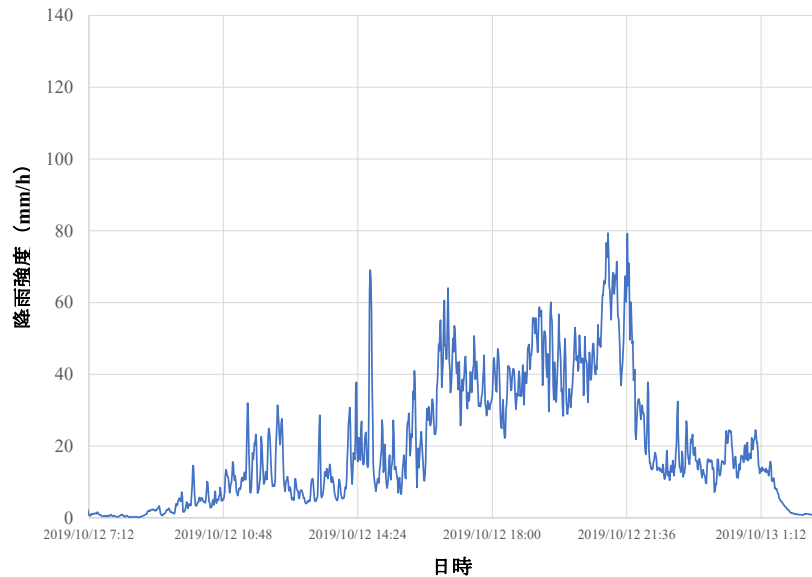


Fig. 4 Temporal change of rain intensity obtained by CX-band radar at Koyasu area



Fig. 5 Erosion by debris flow at the upstream of the damaged house

2.4 現地調査

Fig. 5 に家屋上流の土石流流動域の様子を示す。比較的明確な土石流の流動痕が三筋確認できるため、土石流は少なくとも三カ所から発生し、家屋の方に流れてきたと考えられる。また、土石流による地盤浸食深が非常に浅いことがわかる。Fig. 6 に対象地点周辺の斜面の様子を示す。周辺の斜面でも、非常に多くの土石流が発生していることがわかる。なお、これらの土石流は下流の宅地まで到達していない。これは、対象地域は斜面勾配が 20 度以上の場所がほとんど無く、土石流発生斜面としては比較的緩やかであるとともに、斜面の途中に土石流の堆積域となる緩勾配域が存在しているためと考えられる。また、斜面上の不安定土砂の厚さが薄く、土石流の規模がそれほど大きくならないことも原因と考えられる。

3 宮城県丸森町子安で発生した土石流を対象とした数値シミュレーション

3.1 基礎方程式

数値シミュレーションに用いた基礎方程式は、水と土砂の混合物を一つの流体として扱った一流体連続体モデルである平面二次元土石流モデルによるものを用いる (Takebayashi & Fujita, 2020)。構成則は江頭ら (江頭・伊藤, 2004) によるものを用いる。本解析モデルでは、細粒土砂が水と混合することによって液体として振る舞う相変化を考慮している。

3.2 解析条件

平均格子幅は 2m である。地盤データには国土地理院による 5mDEM データを用いた。本解析では、Fig. 5 で示した斜面崩壊起源の三つの土石流を考慮している。土砂の平均粒径は 1cm としている。



Fig. 6 Slope of the upstream of the damaged house

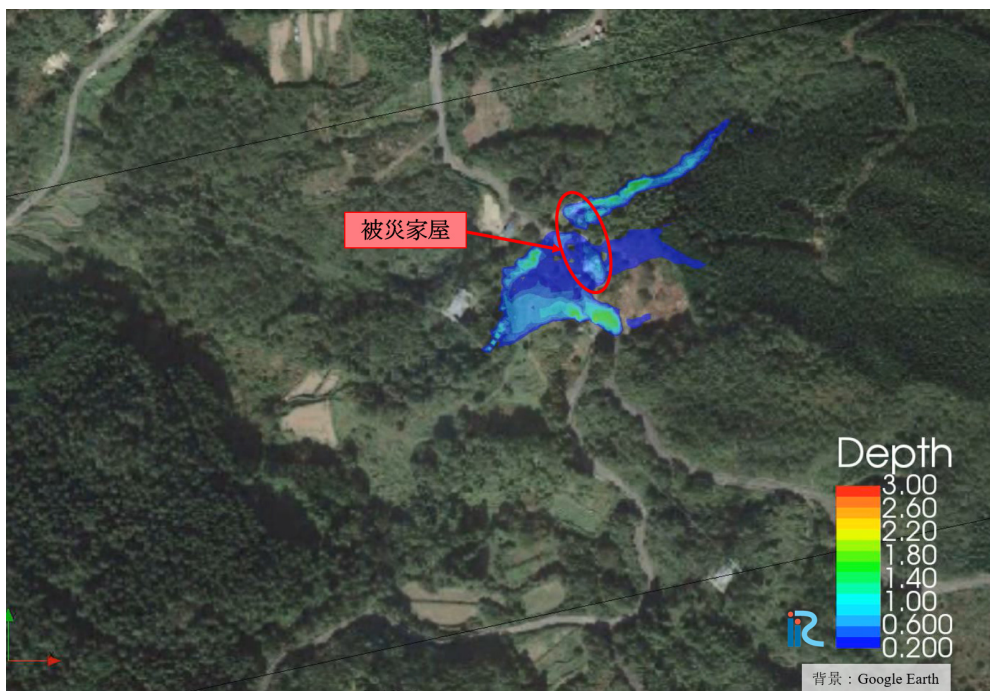


Fig. 7 Spatial distribution of flow depth (70s after the landslides)

3.3 解析結果

Fig. 7 に土石流の流動深の空間分布を示す. 土石流発生から宅地までの到達時間は約 40 秒と短く, 降雨強度が時間雨量約 80mm と強かったことを考えると, 土石流発生後に別の場所に避難をすることは非常に難しかったと考えられる. また, 斜面での平均流速が 10m/s と速く, 家屋全体が流出しているため, 二階への垂直避難では助からないことがわかる. ただし, 宅地前の道路に沿って北, もしくは南に 60m 程度移動した場所は土石流流動域から外れるとともに谷地形ではないため, 土石流による被災確率は非常に低い. そのため, そのような場所に一時避難場所を確保することができれば, 容易に避難でき, 生存確率を高めることが可能である.

4 佐賀市金立で発生した土石流

4.1 対象現象の概要

2019 年 8 月 28 日の早朝, 佐賀市北部に位置する金立川で土石流が発生し, 下流域の宅地に大量の土砂が流れ込んだ. その結果, 複数の家屋が破壊されるとともに, 氾濫した土砂によって農地が埋没した.

4.2 地形・地質

Fig. 8 に調査対象地点の位置を示す. 金立川は佐賀市の北部を南下して流れており, 土石流が氾濫した領域の南限付近に高速道路(長崎道)が東西に建設されている. 氾濫した土石流の一部は, 高速道路に



Fig. 8 Location of Kinryu, Saga

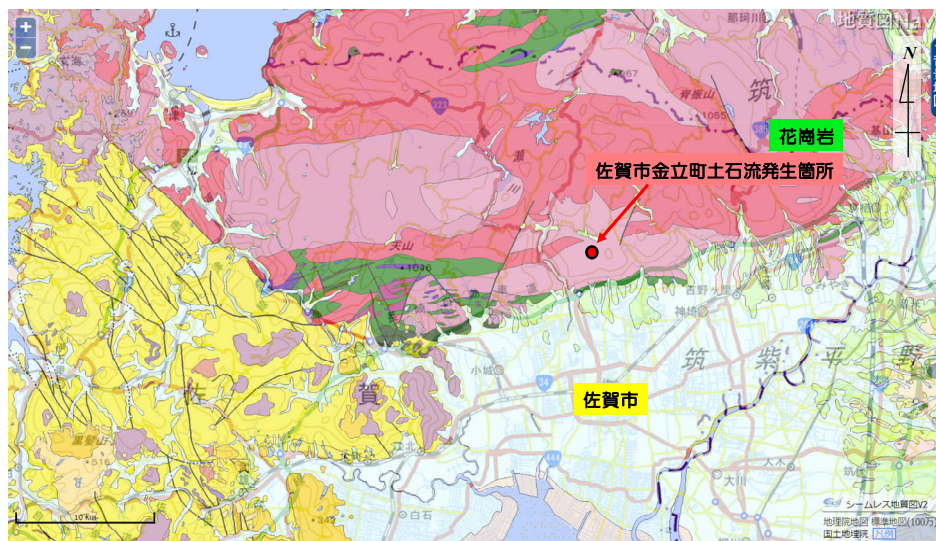


Fig. 9 Geological condition around Kinryu area (GSJ)

衝突・堆積し、一部はボックスカルバートを通して南下した（国土交通省，2019）．なお，ボックスカルバートに流入した土砂量はわずかである．土石流の流動距離は約 2.3km である．発生後の 500m 程度は真っ直ぐ南下し，その後，南西に方角を変えて 300m 程度進んだ後に南東に方向を変えて宅地まで真っ直ぐ流下している．崩壊の発生した斜面は約 35° の勾配を有している．しかし，その下流の約 600m の区間は河床勾配が約 6° と緩やかである．さらに下流は再び河床勾配が急になり，約 10° となっている．

Fig. 9 に調査対象地点周辺の地質図を示す（産業技術総合研究所）．対象地点は花崗岩地帯となっており，前述の宮城県丸森町，2018 年 7 月の広島市などと同様の地質である．また，風化の度合いも似ており，粒径 1mm 前後の真砂土が多い一方で，直径数 m から数十 cm の球状風化したコラストンも見られた．

4.3 降雨

Fig. 10 に CX レーダーによって得られた土石流発生地点における降雨強度の時間的な変化を示す．降雨は，2019 年 8 月 25 日正午ぐらいから 8 月 28 日正午ぐらいまで断続的に降っている．途中，8 月 26 日午後，8 月 27 日 21 時～24 時など，雨がほとんど降っていない時間帯もある．土石流が宅地に流れ込んだ時刻は 8 月 28 日午前 6 時 20 分ごろであり，後述の数値シミュレーションの結果によると，斜面崩壊発生（土石流発生）から宅地に土石流が到達するまでの時間が約 10 分であるため，斜面崩壊の発生時刻は 8 月 28 日午前 6 時 10 分ごろと考えられる．CX レーダー雨量によると，6 時 7 分～9 分の間に時間雨量換算で 100mm 以上の高強度の雨が降り，6 時 11 分には時間雨量換算で 50mm 以下となっている．つまり，6 時 7 分～9 分の高強度の雨が斜面崩壊の引き金となった可能性が高いと同時に，あと数分早く雨が

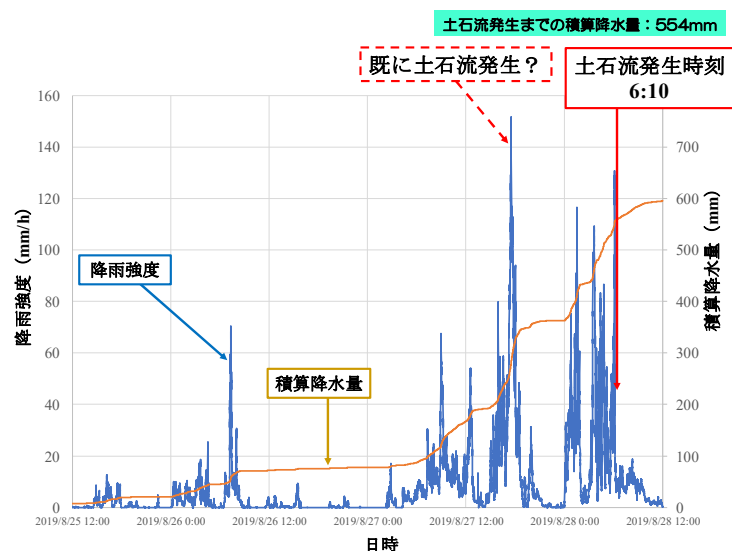


Fig. 10 Temporal change of rain intensity obtained by CX-band radar at Kinryu area

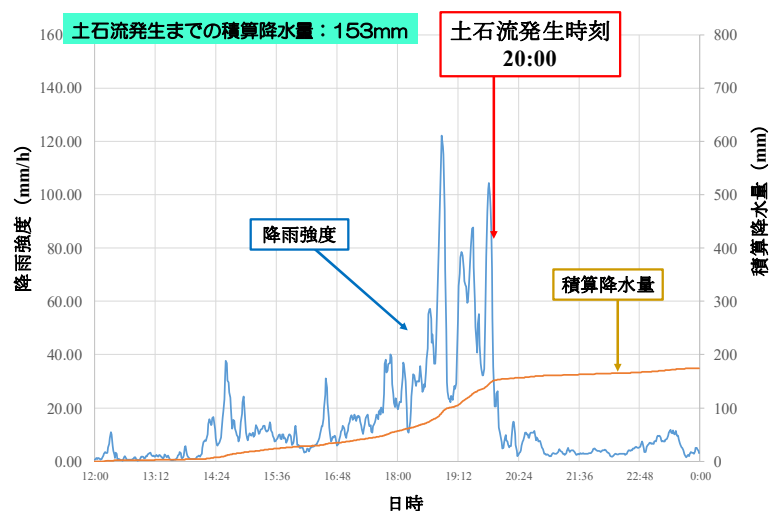


Fig. 11 Temporal change of rain intensity obtained by CX-band radar at Kawasumi, Kumano, Hiroshima in July 2018

降り終わっていたら本土石流は発生していなかった可能性がある。

8月25日正午からの総降雨量は554mmとなっており、非常に大きい値となっている。Fig. 11に2018年7月の西日本豪雨時に広島県安芸郡熊野町川角で土石流が発生した地点のCXレーダーによって得られた降雨強度の時間変化を示す。広島市のケースでは、総降雨量153mmで土石流が発生しており、金立川とは斜面崩壊発生時の総降雨量に大きな違いがある。これは、金立川では、無降雨・弱雨の時間帯が度々あり、土中の水分が流出して斜面表層の含水率が高くなりにくかったことが一つの原因と考えられる。もう一つの原因は、二つの崩壊の内の一つ、もしくは両方が、8月27日の17時30分ごろの高強度降雨時に既に崩壊して土石流が発生していた可能性である。もし、17時30分ごろの高強度降雨時に発生していたのであれば、8月26日午後の無降雨期間後の総降水量は約200mmであり、広島県安芸郡熊野

町川角の土石流発生時の総降水量に近い値となる。8月27日の17時30分ごろの高強度降雨時に既に斜面が崩壊して土石流が発生していた可能性については、後述の土石流の数値シミュレーション結果にもとづいて再度検討する。

4.4 現地調査

Fig. 12に土石流発生地点から約400m下流の広幅河道領域を示す。土石流は二カ所から流れてきて合流していることがわかる。この領域は河道幅が広く、一度堆積した土砂が浸食された状況が見られ、小規模な土石流による流出土砂が過去に堆積していた可能性がある。

Fig. 13に土石流発生地点から約750m下流の様子である。対象地点は河床勾配が緩やかであるとともに川幅が狭くなっており、大量の流木と直径2m程度のコアストーンが堆積しており、河道が閉塞している。また、河道左岸側の道路にも多くの土砂が氾濫した



Fig. 12 Confluence of valleys and wide channel width area



Fig. 13 Choked channel



Fig. 14 Erosion area



Fig. 15 Sediment inundation on farm land

痕跡があり、道路上の最大堆積深は 2m 程度となっている。Fig. 14 は、Fig. 13 に示した地点から約 50m 下流の様子である。河床と河岸は大きく浸食されており、河岸には過去の土石流堆積物である真砂土と花崗岩が見える。Fig. 15 は、下流に位置する農地である。農地にも細粒土砂と流木が氾濫している。

5 佐賀市金立発生した土石流を対象とした数値シミュレーション

5.1 基礎方程式

数値シミュレーションに用いた基礎方程式は、子

安地区の解析と同様に、水と土砂の混合物を一つの流体として扱った一流体連続体モデルである平面二次元土石流モデルによるものを用いる。ただし、解析精度及び解析効率を高めるため、基礎方程式は一般座標系に変換したものを用いる。

5.2 解析条件

Fig. 16 (a) に解析に用いた計算格子を示す。平均格子幅は 2m であり、格子総数は 167767 である（流下方向 1321, 横断方向 127）。なお、デカルト座標系の基礎方程式を用い、Fig. 16 (b) に示すような平均格子幅 2m の正方形格子を用いた場合、395997 の格

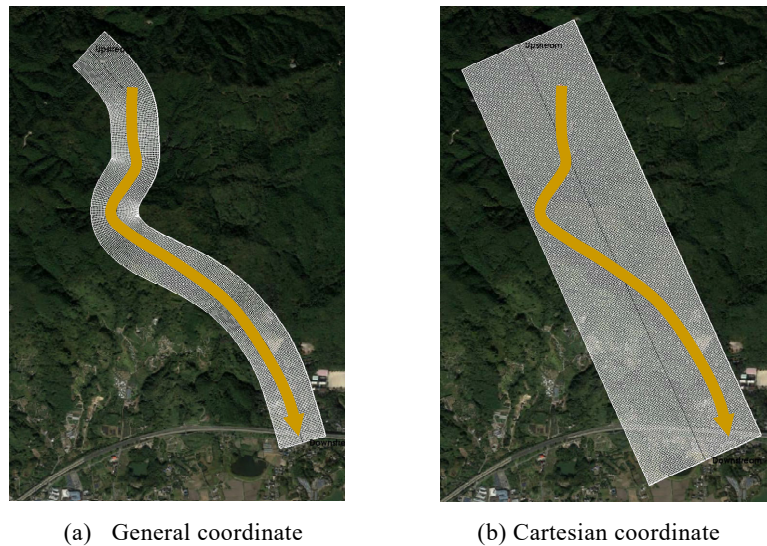


Fig. 16 Numerical grid used in analysis

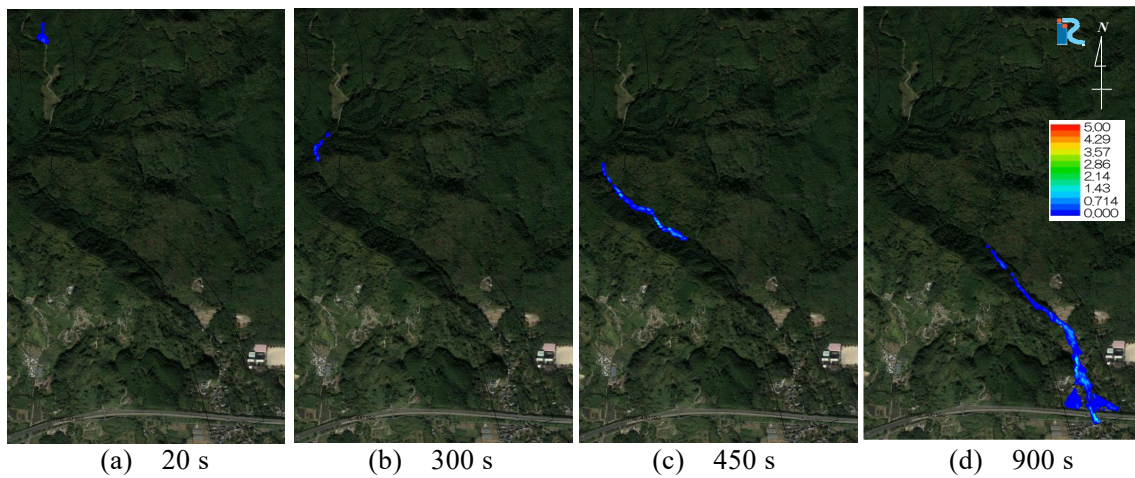


Fig. 17 Temporal change of flow depth of debris flow

子が必要である（流下方向 1211，横断方向 327）。また，Fig. 16 (b) に示す格子を用いると，土石流が格子を斜めに横断することが多く，一般座標系による基礎式を用いた解析と同様の解析精度を確保しようとするとして 1m 以下の格子サイズが必要となる。その結果，一般座標系による基礎式を用いることにより，デカルト座標系の基礎方程式を用いた場合に比べ数倍の解析速度となる。

本解析では，二つの斜面崩壊の内，西側の崩壊のみを考慮している。河床材料の平均粒径は 1cm，不安定土砂の厚さは 0.5m としている。

5.3 解析結果

Fig. 17 に土石流の流動深の空間分布の時間変化を示す。土石流発生から宅地までの到達時間は約 600 秒である。そのため，宅地で 8 月 28 日午前 6 時 20 分ごろに土石流の流下が確認されたことを考えると，土石流の発生は 6 時 10 分ごろと考えられる。土石流発生から宅地までの到達時間は約 600 秒であること

を考えると，二つの土石流合流点付近に土石流センサーを設置しておけば，土石流発生後であっても避難が可能である。

土石流は流下しながら河床・河岸を浸食し，浸食した土砂と水を自身に取り込みながら規模を拡大させる。しかし，本土石流は，流向が南東に変化するまでの約 800m はほとんど規模が変化していない。流向を南東に変化させてからは土石流の規模は流下とともに大きくなっている。上流域で土石流がそれほど発達しないのは，上流域の河床勾配が緩やかであるとともに川幅が広い領域も存在し，土砂が堆積しやすいためと考えられる。つまり，金立川は上流域に自然の遊砂地を有していることになる。これは，2016 年の土石流が下流まで到達していないこととも一致する。また，流向が南東に変化するまで土石流が発達しないことを考えると，流向が南東に変化する地点付近に砂防ダムを建設すれば，比較的小規模の砂防ダムでも土石流を止めることができ，砂防ダム建設費を低く抑えられると考えられる。

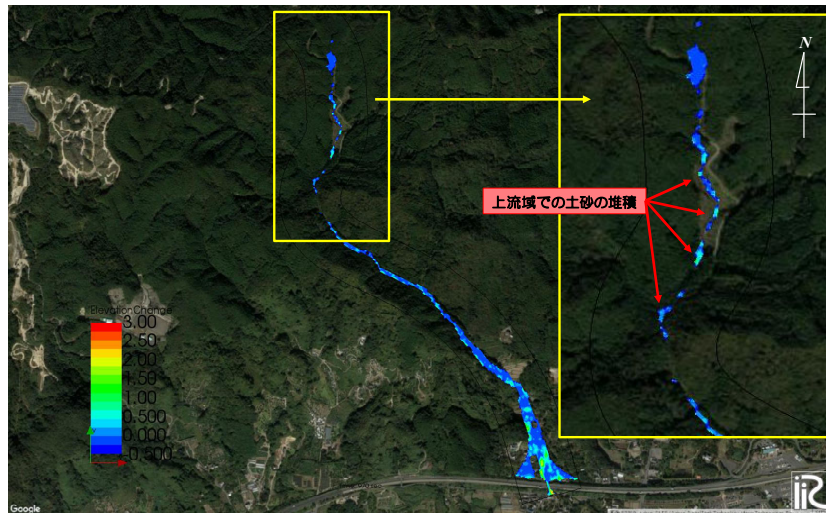


Fig. 18 Spatial change of bed deformation

土石流の平均速度は約 3.2m/s である。前述の広島県安芸郡熊野町川角の土石流の平均速度が約 10m/s であることを考えると、非常に低速の土石流であることがわかる。これは、上流域で土石流があまり発達しなかったことが影響している。

Fig. 18 に土石流流下後の河床変動量の空間分布を示す。図に示すように、上流域では土砂の堆積域が多く見られ、青で示される広い浸食域は斜面崩壊発生地点周辺の急河床勾配の領域のみである。一方、下流域は河床の浸食域が広く、宅地周辺になると土砂の堆積域が増えている。

これらの結果と降雨データ及び現地調査の結果を総合すると、金立川は上流域の河床勾配が緩やかであるとともに川幅が比較的広がっているため、河道上流域が自然の遊砂地としての役割を有している。また、広幅河道域のすぐ下流に川幅の狭い領域があり、河道閉塞が発生しやすい。そのため、土石流が発生しても上流域で停止して下流の宅地まで流れない場合がある。これらのことを総合すると、8 月 27 日の 17 時 30 分ごろの高強度降雨時に既に斜面が崩壊して土石流が発生し、上流域で停止していた可能性は十分あると考えられる。また、金立川のように溪流の途中に広い土砂堆積域を有する流域はよく見られ、2017 年の九州北部豪雨が発生した福岡県朝倉市の赤谷川の支川や 2018 年に岐阜県飛騨市の宮川の支川で発生した土石流溪流などがある。これら 3 つの溪流は、上流の土砂堆積域に民家はない。そのため、上流域におい土石流が発生していても下流まで流れてこないため、気づかない内に上流域で大量の土砂が貯留される可能性がある。また、下流域まで土石流が流れてくるかどうかは、上流域の土砂堆積域よりも下流に土石流が流れるかどうか、つまり、上流域の土砂堆積域に十分土砂が貯まっているかどうかパラメータとして加わるため、降雨量と土石

流の発生との関係が得られにくく、宅地まで流動してきた過去の土石流の情報のみを用いた CL 曲線などでは宅地まで流れる土石流の発生・非発生の判断が困難であるため、注意が必要である。

6 おわりに

2019 年の台風 19 号による豪雨によって宮城県丸森町子安で発生した土石流と 2019 年 8 月の豪雨によって佐賀市金立の溪流で発生した土石流について現地調査と平面二次元の土石流数値シミュレーションによって土石流の流動特性を検討した。得られた成果をまとめると、以下のようである。

- (1) 子安地点の斜面上部は花崗岩地帯、被災家屋周辺は花崗閃緑岩となっており、粒径 1mm 前後の細粒土砂が多い一方で、直径数 m から数十 cm の球状風化したコアストンも見られた。
- (2) CX バンドレダー雨量によれば、子安地点では 2019 年 10 月 12 日午後 9 時 6 分に最大降雨強度を記録しており、土石流発生時刻と一致している。
- (3) 子安地点の土石流は少なくとも三カ所から発生し、家屋の方に流れてきたと考えられる。また、土石流による地盤浸食深が非常に浅い。
- (4) 子安地点の土石流は発生から宅地までの到達時間は約 40 秒と短く、土石流発生後に別の場所に避難をすることは非常に難しかったと考えられる。また、斜面での平均流速が 10m/s と速く、家屋全体が流出しているため、二階への垂直避難では助からないことがわかる。
- (5) 子安地点の被災家屋から道路に沿って 60m 程度移動した場所は土石流流動域から外れるとともに谷地形でないため、土石流による被災確率は非常に低い。よって、そのような場所に一時避難場所を確保することによって、容易に避難ができ、生存確率を高めることが可能である。

- (6) 金立では降り始めからの総降雨量が 554mm の時点で宅地まで流れる土石流が発生した。一方、2018 年に広島県安芸郡熊野町川角で発生した土石流の発生時点での総降雨量は 153mm であり、1/3 程度の値である。これは、金立川では無降雨・弱雨の時間帯が度々あり、土中の水分が流出して斜面表層の含水率が高くなりにくかったことが一つの原因と考えられる。また、二つの崩壊の内の一つ、もしくは両方が、半日前の総降雨量が少ない 8 月 27 日の 17 時 30 分ごろの高強度降雨時に既に崩壊して土石流が発生し、上流域に生産された土砂が堆積していたことが推測される。
- (7) 金立における土石流の発生から宅地までの到達時間は約 600 秒である。そのため、宅地で 8 月 28 日午前 6 時 20 分ごろに土石流の流下が確認されたことを考えると、土石流の発生は 6 時 10 分ごろと考えられる。
- (8) 金立で発生した土石流は、流向が南東に変化するまで発達しないことを考えると、流向が南東に変化する地点付近に砂防ダムを建設すれば、比較的小規模の砂防ダムでも土石流を止めることができ、砂防ダムの建設費を低く抑えられると考えられる。
- (9) 上流の民家の無い場所に土砂堆積域を有する溪流は、上流域において土石流が発生していても下流まで流れてこないため、気づかない内に大量の土砂が上流域で貯留される可能性がある。また、下流域まで土石流が流れてくるかどうかは、上流

域の土砂堆積域に十分土砂が貯まっているかどうかパラメータとして加わるため、降雨量と土石流が宅地に流れてくるかどうかの関係が得られにくいため、注意が必要である。

謝辞

丸森町、金立町の住民の皆様から発災時に多くの情報を提供頂いた。また、佐賀大学・大串浩一郎教授から金立町での被災の状況について詳しい情報を提供頂いた。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 江頭進治・伊藤隆郭 (2004) : 土石流の数値シミュレーション, 日本流体力学会数値流体力学部門 Web 会誌, Vol.12, No. 2, pp. 33-43.
- 国土交通省 (2019) : http://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/rldosha/190930_saikan_sabo_kinryuu.pdf.
- 国土交通省砂防部 : <https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sabo/>.
- 産業技術総合研究所 : 地質ナビ.
- Takebayashi H., Fujita, M. (2020) : Numerical Simulation of a Debris Flow on the Basis of a Two-Dimensional Continuum Body Model. *Geosciences*, 10, 45.

(論文受理日 : 2020 年 9 月 14 日)