

逢初川上流部での地形改変と 土石流発生との関連性

RELATIONSHIP BETWEEN TOPOGRAPHICAL CHANGES AND DEBRIS FLOW OCCURRENCE IN THE UPPER REACHES OF THE AIZOME RIVER

中野 晋¹・蔣 景彩²・上月 康則²
Susumu NAKANO, Jin-Cai JIANG and Yasunori KOZUKI

¹正会員 博(工) 徳島大学特命教授 環境防災研究センター (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

²正会員 博(工) 徳島大学教授 環境防災研究センター (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

令和3年7月に熱海市の逢初川源頭部で大規模盛土が崩壊し、深刻な土石流災害が発生した。逢初川源頭部付近で複数行われた地形改変に注目し、これらの地形改変が流出過程に及ぼした影響について数値解析により検討した。地形改変前と後の地形データを用いて令和3年7月豪雨時の雨水流出過程を計算し、逢初川源頭部付近の断面通過水量の比較を行った。その結果、尾根部を削って谷を埋めるなどの宅地造成に伴う地形改変の結果、北側を流れる鳴沢川流域から多量の雨水が逢初川側に流入し、盛土末端部では地形改変前の4倍に達する表流水が通過した可能性があることが明らかとなった。

Key Words: debris flow disaster, the Aizome River, land modification, rainwater runoff process

1. はじめに

2021年6月下旬に日本列島の南に停滞していた梅雨前線が北上し、7月1日から3日には東海地方から関東南部にかけて記録的な大雨となった。7月1日には伊豆諸島で線状降水帯が形成され、東京島新島村では1時間79.5mmの雨を記録している。気象庁¹⁾によると6月30日の降り始めから7月3日までの間に神奈川県箱根で830.5mm、静岡県伊豆市天城山で570mmなど、神奈川県や静岡県で500mmを超える雨量が観測された。この大雨により、熱海市伊豆山地区で逢初川源頭部の大規模盛土が崩壊し、逢初川中下流部で死者26名、行方不明者1名の人的被害、全壊、半壊、一部損壊、合計98棟の家屋被害が生じる土石流災害が発生した²⁾。

静岡県³⁾は被災前後の3次元点群データから作成した地形差分図(図-1)から、源頭部の崩壊土砂量は約55,000 m³で、その内、約7,500m³は上流部に設置された砂防ダムで補足されたと推定している。一方、国土地理院⁴⁾は2009年、2019年の航空レーザー測量と発災直後の7月6日に行ったUAVレーザー測量による標高調査から、2009年から災害前の2019年までの間の地形変化量は+56,000 m³で、災害前(2019年)と災害後(2021年)の地形変化量は-58,000 m³であると発表している。

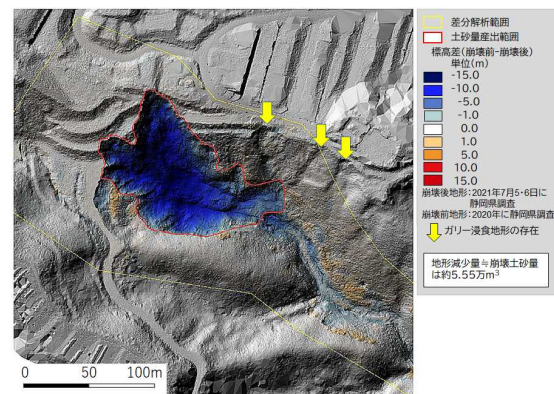


図-1 地形差分解析図(静岡県発表資料³⁾)に加筆

両者の発表した災害前後の土砂変化量はほぼ一致しており、2009年から2019年に行われた人為的土砂変化量とほぼ同量の土砂が土石流として流下し、中下流の谷筋に形成された市街地を襲ったことがわかる。

また、静岡県⁵⁾の発表では源頭部に行われた盛土量は70,000 m³または75,000 m³で、施工業者が届出していた盛土量36,640 m³(2009年12月9日付)の約2倍の盛土がされていたほか、設置予定とされた排水工も設置されていなかったことも判明している。こうしたずさんで大規模な盛土造成が急流河川の源頭部で実施され、災害発生まで放置されていたことが今災害の主因と言える。

土石流が発生したのは7月3日10時30分頃とされるが、6月30日0時から7月3日10時までの総降水量は綱代（気象庁）で395mm、熱海（静岡県）で458mmを記録している。盛土崩壊のあった逢初川上流に対する集水面積は約4.7haで、集水域全体に450mmの雨が降ったと仮定すると2.1万m³の水分量がこのエリアに降ったこととなる。高橋⁹⁾によると崩壊土砂が流動化するには崩壊土砂量と同程度の水分量が必要とされており、5万m³以上の土砂が流動化するために必要な水分量の半分にも届かない。したがって、静岡県「逢初川土石流の発生原因調査検証委員会⁹⁾」が指摘するように集水域の外、つまり別の集水域からの流入が影響した可能性がある。

図-1は静岡県³⁾が航空レーザー測量から得たDEMデータを図化したものであるが、この図を注意深くみると図中に加筆した3カ所の矢印部分には北側の造成地から逢初川に向かう流路が形成されていることがわかる。流路の末端は崩壊した盛土の末端部に向かっており、2019年当時から北側造成地から表流水の流入があった可能性が示唆される。また、静岡県公表資料⁸⁾によると、2007年5月時点で盛土末端部には転石土留と土留柵が設置されている。これらの盛土崩壊の抑止効果は限定的であるが、盛土末端部に表流水が多量に流入すればこれらの損壊を生じさせる可能性もある。

源頭部周辺では7カ所で図-2に示す土地改変が行われている。静岡県の公表資料⁸⁾によると、土地改変の内容は、①土砂の盛土（2007～2011年）、②太陽光発電施設（2016～2017年）、③緊急伐採（2016年）、④北西部宅地造成（2002～2010年）、⑤北東部宅地造成（2003～2006年）、⑥産業廃棄物投棄（2009年以降）、⑦土砂投棄（2021年）である。本研究ではこれらの土地改変が源頭部付近の表流水の流下過程に変化をもたらせた可能性があるのではないかと考え、2019年に静岡県が取得している詳細なDEMデータを用いて、逢初川源頭部付近での地形改変による雨水流出過程の変化について数値解析により分析する。なお、土石流発生メカニズムを検証するためには盛土内部の水分量が重要であり、表流水から地下への浸透、盛土周辺での水分移動等の解析が必要となるが、表流水動態のみから盛土の不安定に繋がる要因について考察することを目的とし、土石流発生メカニズムの検証のためには別途検討が必要である。

2. 解析方法と計算ケース

(1) 解析対象範囲と地形データ

解析対象範囲は図-3に示す逢初川の集水域全体と北側に隣接する鳴沢川の集水域の一部を含む範囲（1134m×784m）である。地形データとしては静岡県提供の50cmDEM（2019年12月11日取得のLPデータから作成）と国土地理院の10mDEM（1/25,000地形図の等高線

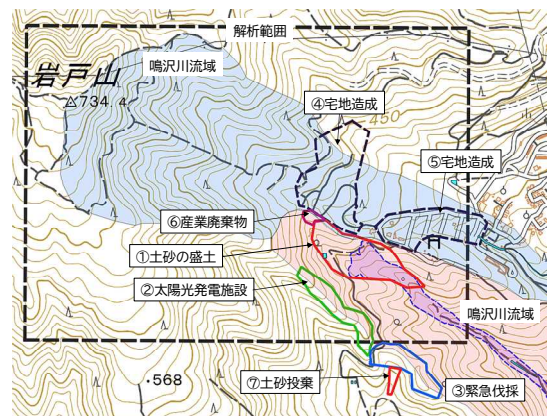


図-2 源頭部周辺の土地改変（静岡県資料⁸⁾を元に作成）

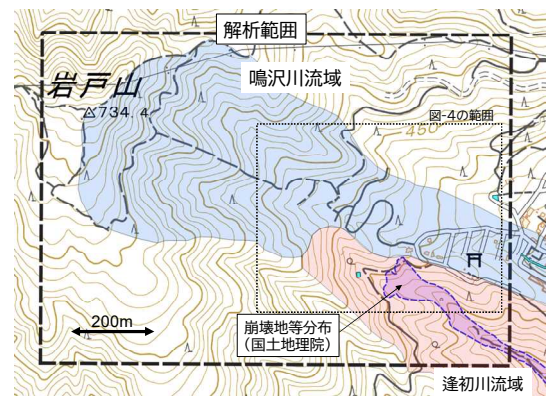


図-3 解析対象範囲（崩壊地等分布図⁹⁾等を加筆）

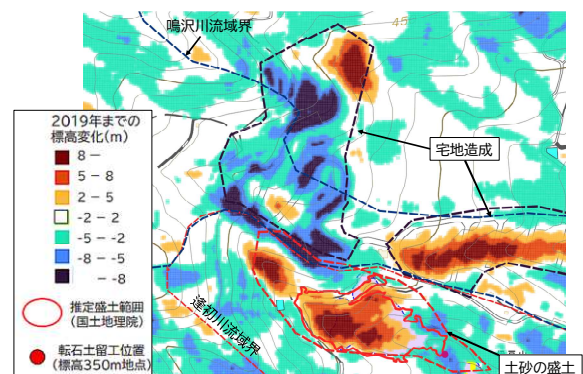


図-4 地形改変に伴う標高変化

（2019年LP標高値と国土地理院10mDEMとの差）

より作成）から平均及び空間内挿により、2mメッシュデータを作成した。前者を「土砂崩壊前地形」、後者を盛土や宅地造成前に相当する「造成前地形」と呼称する。なお、10mDEMデータの高さの精度は5m以内であり、地形の違いによる雨水流出過程を分析する上では十分ではないが、北東部宅地造成が始まる2003年以前の地形データは他にないため、これを利用する。

上記のように作成した2019年と造成前の2mメッシュでの標高変化を図-4に示す。造成前地形データの精度が低いため、正確な評価はできないものの図-2に示した①土砂の盛土と⑤宅地造成で8m以上の標高増加が見られ、④の宅地造成では北側で盛土と切土が行われて平坦な土地が造成されていること、南側の尾根部分で8m以上の

標高低下があることがわかる。また、図中に国土地理院が整理した推定盛土範囲⁷⁾と静岡県⁵⁾の報告資料から推定した標高350m地点の転石土留工の位置を示す。

(2) 降雨条件

逢初川と鳴沢川の集水域付近での降雨観測は網代（気象庁，熱海市網代）と熱海（静岡県，熱海市水口町）で行われている。7月1日0時から3日にかけての今次災害時の降水状況を図-5に示す。3日間にわたり数mm～20mmの雨が続き、集水域により近い熱海の雨量は3日間で497mm、網代は417mmの雨を記録している。集水域の北側に位置する箱根観測所の期間内雨量が830.5mmと最高値を記録し、箱根に近づくにつれて雨が強く降っていることを考慮し、解析には熱海観測所の雨量データを用いる。また、2年前の2019年10月には伊豆、関東、東北に大きな被害をもたらした台風19号（令和元年東日本台風）が伊豆地方に大雨をもたらしており、この豪雨時の状況と比較するため、令和元年東日本台風時の降水状況（図-6）についても対象降雨として解析する。令和元年東日本台風では凡そ24時間で約270mmの雨を記録している。対象域の大半を占める森林域の流出係数は0.3とした。

(3) 計算手法

数値解析には雨水流出と洪水氾濫解析に適するAFREL-SR(ニタコンサルタント(株))を用いた。本手法は内外水洪水氾濫解析に適した手法であり、雨水流出過程に最適な方法とは言えないが、地形改変に伴う流出量を相対的に比較するという目的には適すると判断して使用した。計算格子は2m×2mの正方形メッシュで2021年7月1日0時から3日11時までの59時間をタイムステップ0.05sで計算した。このソフトウェアは平面2次元浅水方程式を時間方向には風上差分、空間方向にはスタックカードメッシュを用いた中央差分形式で離散化して作成したXOKABEモデルを、ニタコンサルタント(株)が改良を加えたものである。本計算では北側隣接地内の雨水下水路の考慮が必要であるが、このソフトウェアでは図-7に示すように雨水下水路を考慮した計算が容易にできるのが特徴である。北側の造成宅地には上蓋式U字側溝が設置されており、現地での簡易計測をもとに幅0.5m、深さ0.4m、上蓋からの流入率は10%と仮定して計算に用いた。なお、森林域のマニングの粗度係数は0.06とした。

(4) 計算ケース

計算ケースは令和3年7月豪雨の降雨に対して、造成前地形と土砂崩壊前地形の2ケースに加えて、令和元年東日本台風時の降雨に対して、土砂崩壊前地形でのケースを加えた計3ケースを実施し、流出特性の比較検討を行う。なお、令和元年東日本台風を対象とした計算では降雨の始まる2019年10月11日9時から12日21時までの36時

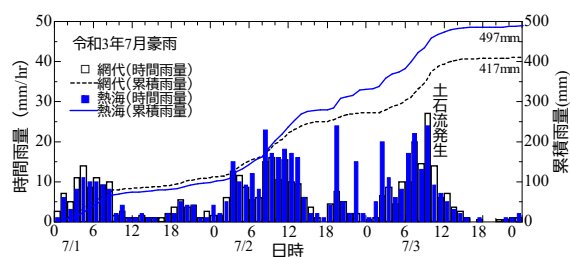


図-5 令和3年7月豪雨時の降水状況

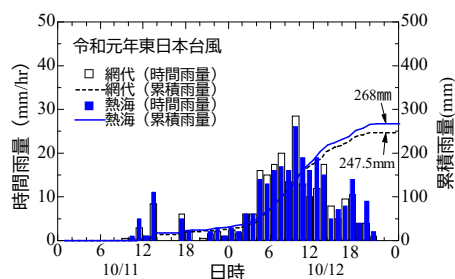


図-6 令和元年東日本台風時の降水状況

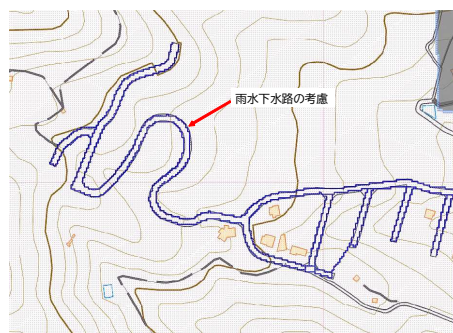


図-7 北側隣接造成宅地内の雨水下水路（側溝）の考慮間を計算対象期間とする。

3. 解析結果

(1) 最大浸水深分布

令和3年7月豪雨に対して、土砂崩壊前地形と造成前地形とで計算した最大浸水深分布を図-8、図-9に比較して示す。両者の地形再現精度や本来の空間分解能が異なるため、随所で違いがみられるが、特に図-8中に丸で囲んだA付近（図-2の④北西部宅地造成エリア）、B付近（図-2の⑤北東部宅地造成エリアの西端部）、C付近（図-2の⑤北東部宅地造成エリアの南端部）では造成前地形では見られない水の流れがあることが示唆される。A付近の水の流れは元々谷の下流側で鳴沢川に合流していたものが図-4に示した④の造成で谷部の盛土と尾根部の切土により、北側の沢からの東南東方向の流れが南向きに変わり、⑤の宅地造成エリアを通して鳴沢川に流れるように変更されたことを示している。また、B、Cについては鳴沢川と逢初川を区分する分水嶺付近での地形改変により、鳴沢川流域から一部の雨水が逢初川に流下している状況を示すものと思われる。Bからは盛土の上流

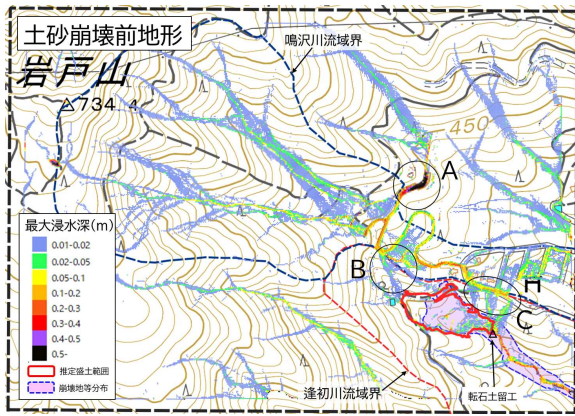


図-8 最大浸水深分布（土砂崩壊前地形）

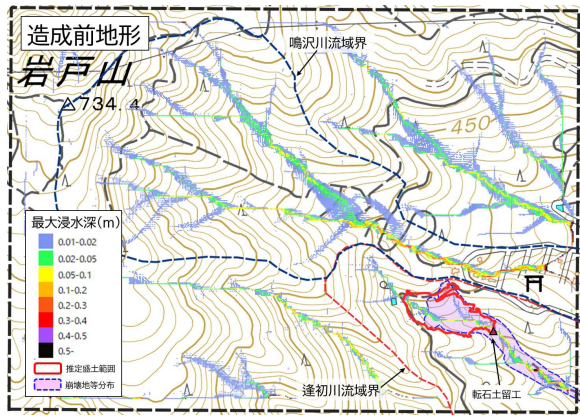


図-9 最大浸水深分布（造成前地形）

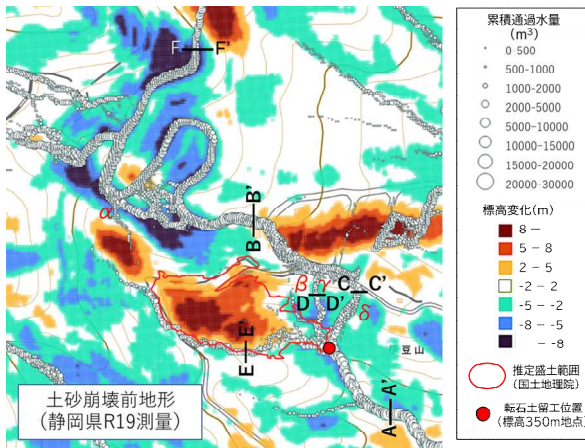


図-10 累積通過水量の計算結果（土砂崩壊前地形）

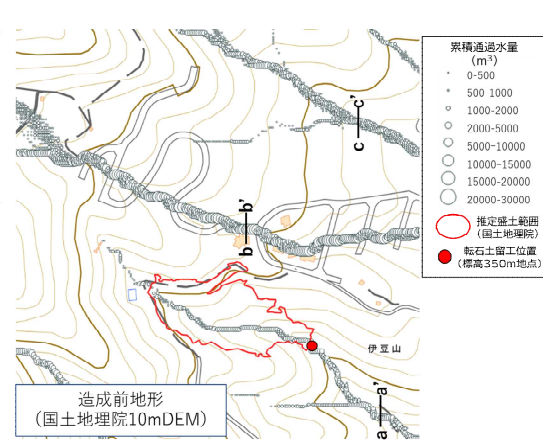


図-11 累積通過水量の計算結果（造成前地形）

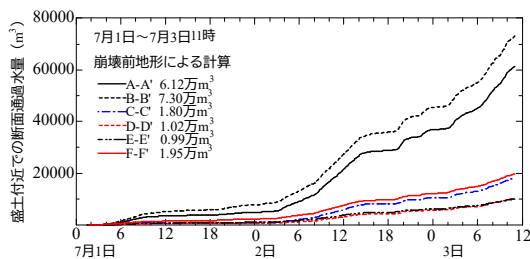


図-12 各断面通過水量（土砂崩壊前地形）

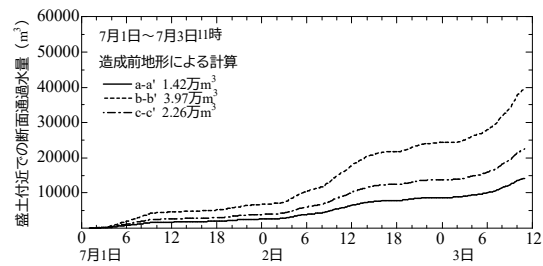


図-13 各断面通過水量（造成前地形）

部付近へ、Cからは盛土の末端部に流下している様子が確認される。

(2) 累積通過水量

最大浸水深ではベクトル情報がないために通過する水量の大小がわからない。そこで、10分ごとに出力させた浸水深と流速を乗じることで単位幅流量を求め、7月1日0時から3日11時までに通過する単位幅あたりの累積水量を求めることにした。

図-10は土砂崩壊前地形について格子点ごとの累積通過水量を示す。図には図-4で示した標高変化量も重ねて表示している。宅地と盛土の造成による地形改変の結果、北側に隣接する宅地造成エリアから図中に示す α 、 β 、 γ 、 δ の4か所から逢初川流域に流下する状況が見取

れる。特に盛土末端付近への雨水流入が顕著である。また、盛土の上流部からは主に盛土と南斜面の境界を流下するが、北東部宅地造成エリアからは α の付近から流入があることがわかる。

図-11は造成前地形に対して同じ計算を行ったもので、逢初川、鳴沢川それぞれの谷地形に沿って雨水が流出し、鳴沢川側から逢初川側への流入は認められない。

(3) 断面通過水量

地形改変に伴い、流下する水量がどの程度変化したかを確認するため、図-10及び図-11中に示す各断面（A-A'～F-F'断面、a-a'～c-c'断面）を通過する水量を求めた結果を図-12、図-13に示す。

A-A'～F-F'断面は地形改変後の土砂崩壊が発生する直

前の地形での断面通過水量で、A-A'断面が盛土末端部を通過する水量、B-B'断面は鳴沢川上流部の盛土北側造成地付近を通過する水量、C-C'とD-D'断面は盛土北側造成地から流入する水量、E-E'断面は盛土の南側を通過して上流部から流下する水量、F-F'断面は北西部宅地造成の結果、鳴沢川北側の谷から尾根部を超えて鳴沢川上流部に流入する水量である。土砂崩壊が起こった直後の7月3日11時までの断面通過水量はそれぞれ6.12万 m^3 、7.30万 m^3 、1.80万 m^3 、1.02万 m^3 、0.99万 m^3 、1.95万 m^3 となっている。

一方、a-a'～c-c'断面は造成前地形に対するもので、a-a'断面はA-A'断面と同じ盛土末端部での通過水量、b-b'断面はB-B'断面と同じ、鳴沢川上流部での通過水量、c-c'断面は鳴沢川下流で合流する北側の谷を流下する通過水量に当たる。断面通過水量はそれぞれ1.67万 m^3 、3.97万 m^3 、2.26万 m^3 で本来の集水面積に応じた値となっている。

断面通過水量で最も多くなるのはB-B'断面で鳴沢川支流の北側の谷からの流入などの影響もあり、造成前地形のb-b'断面に比べて3.33万 m^3 （184%）も多くなっている。盛土末端部A-A'断面で流下する水量は6.12万 m^3 で造成前地形に比べると4.70万 m^3 （431%）増加している。C-C'断面とD-D'断面を通過する水量は合わせて2.82万 m^3 と水量増加分に相当しており、鳴沢川流域から地形改変の結果、流入するようになったと考えられる。

図-14は土砂崩壊前地形と令和元年東日本台風の降水量を与えて各断面の通過水量を計算したものである。盛土末端部を通過する水量は2.39万 m^3 で、令和3年7月豪雨時の39%である。造成前地形を仮定した場合の1.42万 m^3 の168%となっているが、土砂崩壊が起こる危険度には達していなかったと考えられる。

4. 考察

(1) 地形改変による集水域の変化

図-15は崩壊した盛土周辺での切り盛り分布を静岡県⁹⁾が整理したものである。図の青で着色された部分が切土、茶で着色された部分が盛土となっている。崩壊盛土に隣接した北側の鳴沢川に沿って尾根部を削り、谷の部分を盛土することにより、宅地造成が行われた。図中で青に着色された最も北側の部分の切土は鳴沢川の直上流の谷と鳴沢川支流の谷の間の尾根を削ることにより、鳴沢川の支流筋から本流筋への流入を誘引した。一方、中央部の青く着色された切土は鳴沢川と逢初川を分ける分水嶺を除くこととなった。この結果、図-8に示したように流域を超えた雨水移動を生じさせた可能性が高い。

北側の宅地造成の際には、雨水排水のための道路の両端におよそ幅0.5m、深さ0.4mの上ぶた式U型側溝が整備されており、中程度の降水では正常に排水処理されていたと思われる。一方、大雨の際には道路に沿って流れ下る雨水の全量を側溝に収めることができなかったことで、

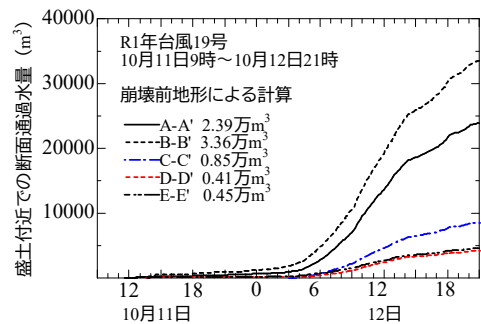


図-14 各断面通過水量（令和元年東日本台風時）

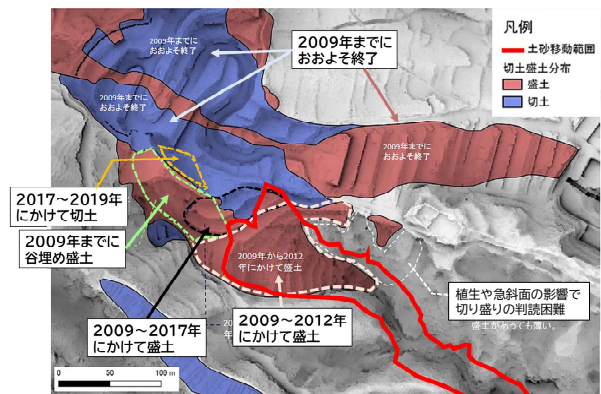


図-15 崩壊地周辺の切り盛り分布（静岡県⁹⁾資料に加筆）

道路上を雨水が走るような状況が発生し、特に逢初川源頭部の盛土部に隣接する造成宅地の南端の道路から一部の雨水が逢初川側へ流入したものと推察する。災害発生から1週間後の7月10日に実施した現地踏査でも図-10のC-C'断面直前の路面に小石が流された痕跡があったが、これは推察結果と調和的である。なお、本研究では流出計算結果を検証するための河川水位情報が得られていないことから、精度検証が行われていない。したがって、主な計算結果である地表面を流れる断面通過水量についても定量的な議論はできない点に留意する必要がある。

(2) 集水域変化の土石流発生との関連性

静岡県⁹⁾の調査によると逢初川源頭部の盛土量は70,000 m^3 または75,000 m^3 であり、この内約55,000 m^3 が崩壊し、盛土内部にほぼ飽和状態で湛水していた水と一緒に土石流となって下流部に流れ下ったと評価されている。第2回逢初川土石流の発生原因調査検証委員会の報告⁹⁾では住民が撮影した映像や消防通報記録から土石流は10時28分頃の第1波から13時47分の第7波まで複数回にわたって繰り返し発生したことが確認されている。第1波の土砂は粘性度が高く、枯れた木などが多く含まれていたと報告されている。10時55分に撮影された第2波は水煙を上げながら流下する大規模な泥流が撮影されており、この時の土石流の流下速度は7.8～9.3m/s、流量は1800～2300 m^3/s と報告されている。この時点までに大規模な崩壊が発生し、谷出口付近に設置されている砂防ダムを満

たした後に一気に流下したと考えられる。

同委員会では第1波の発生過程を盛土内の地下水が増加し、地下水位が上昇、盛土末端部が地下水で満たされて崩壊。末端部分が崩れることによってその上部が不安定化して、順次、崩壊域が遡上した可能性があると指摘している。さらに、盛土下端部を失ったことで、盛土上部も不安定化して崩壊、最大規模の土石流に繋がったと評価している。

本研究の解析結果では源頭部周辺で尾根部の切土と谷部の盛土を含む地形改変が行われた結果、想定を超える集水域の拡大が発生し、盛土末端部には造成前地形に比べて4倍を超える雨水の流入があった可能性が示された。盛土末端部への多量の流水の集中は盛土末端部からの排水不良の要因になり、末端部の地下水位上昇を促進したこと、崩壊抑止効果は限定的であると思われるが、盛土末端部に設置されていた転石土留工及び土留柵を流水により、損傷させた可能性があることなどが考えられる。

本研究では盛土崩壊に直結する盛土表面からの浸透、地下水の流入、盛土内部での水分移動などの事象については検討していないため、逢初川源頭部での地形改変が土石流の発生機構にどの程度影響したかは評価できない。

2022年3月に静岡県から公表された検証委員会の中間報告書¹⁰⁾では溪床高の違いから鳴沢川から逢初川に向かう地下水流が元々存在すること、源頭部付近の開発により地下水の流れが変わり、流入量が増加した可能性があると指摘している。この報告では地下水の挙動について述べており、本論文で示したような宅地造成に伴う表流水の流出特性変化の検討は行われていないが、地下水流でも隣接する流域からの流入が確認されたことは重要な結果である。

5. おわりに

逢初川源頭部で発生した土石流災害の調査を行う中で、源頭部の異常な盛土はもとより、周辺部の度重なる地形改変が少なからず影響を与えていないかと考えて、分析を始めることとなった。特に崩壊盛土に隣接する北側の宅地造成では分水嶺付近が削られ、谷が埋められた結果、雨水の流出過程が大きく変化することになった。今回、得られた結果は盛土の安定性に関する知見を含むものではないため、盛土崩壊のメカニズムを解明するものではない。しかし、分水嶺付近での地形改変にはこうした問題が生じる可能性があることに留意して調査、計画作成することが重要であることが理解された。

近年、市街地が形成されている斜面地の上部等において太陽光発電施設の設置が頻繁に行われている。また、熱海市の事例のように都市近郊部の斜面地の上部で宅地開発が行われることがある。特に下流に市街地が立地する上流部での用地造成では流域の擾乱を招かないように

十分注意する必要がある。

数値解析において必要となる流出係数等のパラメータについて、同定作業なども行っていないため、精度を吟味できる段階ではないため、今後、精度検証などが必要であることを付記する。

謝辞：解析に必要となる地形や降雨に関するデータは静岡県交通基盤部より、提供いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 気象庁：災害をもたらした気象事例「7月1日から3日の東海地方・関東地方南部を中心とした大雨」，令和3年7月8日，https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2021/20210708/jyun_sokuji20210701-0703.pdf
- 2) 静岡県：熱海市伊豆山地区土砂災害の被害と対応について（総括情報），令和3年12月15日，<https://www.pref.shizuoka.jp/kinkyu/documents/atamidoshasoukatsul1215.pdf>
- 3) 静岡県：3次元点群データを活用した崩壊土砂量及び補足土砂量の推定，令和3年7月8日，<https://www.pref.shizuoka.jp/kensetsu/ke-960/documents/dosharyo.pdf>
- 4) 国土院：令和3年(2021年)7月1日からの大雨に関する情報，航空レーザー測量による二時期および三時期の標高値変化量抽出（7月9日更新），https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/R3_0701_heavyrain.html#5
- 5) 静岡県：逢初川源頭部の総盛土量の推定，静岡県第1回逢初川土石流の発生原因調査検証委員会，資料7，令和3年9月7日，<http://www.pref.shizuoka.jp/kensetsu/ke-350/sabouka/documents/shiryu2.pdf>
- 6) 高橋 保：土石流の発生と流動に関する研究，京都大学防災研究所年報，第20号B-2，pp.405-435，1977。
- 7) 静岡県：熱海市伊豆山地区内の土石流発生箇所付近の土地の改変行為，逢初川土石流災害に係る「行政手続き確認作業チーム」による確認結果（県の行政手続き）等について，令和3年10月18日，<https://www.pref.shizuoka.jp/kensetsu/ke-520a/izusandosekiryou.html>
- 8) 静岡県：空中写真判読による盛土履歴，第2回逢初川土石流の発生原因調査検証委員会，資料10，令和3年11月26日，<http://www.pref.shizuoka.jp/kensetsu/ke-350/sabouka/documents/2kennsyouiinnshiryu10.pdf>
- 9) 静岡県：住民撮影動画及び消防通報記録による土石流流下実態の把握，第2回逢初川土石流の発生原因調査検証委員会，資料12，令和3年11月26日，<http://www.pref.shizuoka.jp/kensetsu/ke-350/sabouka/documents/2kennsyouiinnshiryu10.pdf>
- 10) 静岡県：逢初川土石流の発生原因調査中間報告書，第5章，地質・水文調査，pp.1-41，令和4年3月29日。

(2022. 3. 25受付)