

熱海市の逢初川土石流災害の地形・地質的背景

木村克己
深田地質研究所

The topographical and geological background of the debris flow disaster
on July 3, 2021 in the Aizome River, Atami city, Shizuoka Prefecture

KIMURA Katsumi

Fukada Geological Institute

要旨：熱海市の逢初川源頭部で 2021 年 7 月 3 日に発生した土石流とその流下特性に関わる地形・地質的特性について、以下のとおり整理・考察した。①岩戸山周辺の水文地質構造として、湯河原火山噴出物の堆積面が南から南南東方向に 16～25° 傾斜していること示し、岩戸山周辺の広い流域の深層地下水流入の可能性を指摘した。②土石流は逢初川下流域の開析谷地形に規制されて流下したため、開析谷内部で人的・物的被害が集中したことを示し、それを考慮した災害対策の必要性を指摘した。③逢初川源頭部の土地改変の履歴を整理し、2009 年 10 月を境に盛土が急速に増加し、色が褐色から黒色へ変化したことを示した。④逢初川源頭部の地質層序について、下位から上位へ、火山岩類、礫層（谷底に限定）、褐色盛土層、黒色盛土層からなることを示し、2009 年 6 月、2019 年 12 月、2021 年 7 月（崩壊後）の 3 期と火山岩類上面を基準面とする逢初川の縦断地形を復元し、その変遷を考察した。

キーワード：逢初川、土石流、開析谷、滑落崖、谷埋め盛土、黒色盛土、立体地図、縦断形

Abstract: This issue summarizes and examines the topographic and geological features about the debris flow occurrence on July 3, 2021, in the head of the Aizome River, Atami City as follows: 1. Bedding surfaces of the Yukawara volcanic eruptive rocks dip 16 to 25 degrees to the S to SSE, which are expected to be hydrogeological characterization in the area surrounding Mt. Iwato. 2. The debris flow went down with the height of 2 to 4 meter inside the incised valley so that the residents around the valley bottom were severely damaged. 3. The records of land modification have been summarized to find that from October 2009 the valley fill embankment has grown rapidly and the color of the soil changed from brown to black. 4. The geological strata and structure in the head of the Aizome River have been displayed.

Keywords: Aizome River, debris flow, mudslide, incised valley, scarp, valley fill embankment, black soil, 3D map, longitudinal stream profile

1. はじめに

2021年7月3日10時30分頃に、静岡県熱海市の逢初（あいぞめ）川の標高400mほどの最上流部で発生した土石流で、26人の死者と1人の行方不明者、流出家屋44戸を含む122棟の建物被害をもたらした。土石流発生の誘因は7月2日から3日にかけての大量の降雨（熱海観測所で2011年1月からの観測史上最大の期間雨量449mm）であったが、崩壊した土砂は、逢初川の源頭部に違法にかつ大量に累積されていた産業廃棄物を含む盛土であったことが明らかにされている（静岡県, 2021a）。盛土には法的に必要とされる排水設備が欠如ないし不足していたため、流入した水を排水できず盛土が飽和状態になって崩壊に至ったのではないかと当初から指摘されていた（奥山, 2021など）。この点は、逢初川の土石流発生の素因が、盛土の造成法の問題と谷の源頭部という水の集積しやすい場所にあることを示すものであった。このような谷埋め盛土の分布状況は首都圏においてもその実態が十分には把握されていない。今後同じような盛土の崩壊による土石流災害を防ぐためにも、その発生のメカニズムの解明とともに、盛土箇所の水文環境に関わる地形・地質的特徴を理解することが大事である。

土石流発生のメカニズムの解析を目的に、静岡県発生原因調査チームによる現地調査、地下水・湧水調査、盛土履歴調査、ボーリング調査が実施され、その調査・検討結果が第1回（9月7日）および第2回（11月26日）の「逢初川土石流の発生原因調査検証委員会」（以下、検証委員会）の配布資料として公表された（静岡県, 2021a, 2021b）。静岡県は、同資料1の「(検証委員会) 設置内容と意図」の概要において、地形、地質、土質等の関連データを一般公開すること、研究者

等が静岡県の公開データ等をもとに独自に解析し発生メカニズム等について検討進めていくことを期待すること、検証委員会の検証結果を踏まえ、最終調査報告書を作成すること、と述べている。著者は、この静岡県の意図を受けとめて本論文を執筆するものである。

検証委員会の資料において、崩壊した盛土層が異なる時期のものからなり、いずれも廃棄物が含まれていること、盛土層を飽和させた水流は、逢初川の源頭部での降水に加えて、隣接する流域からの地下水が流入した可能性があることなどが調査データに基づき指摘されている。また、盛土の崩壊過程については、盛土層直下の高透水性の砂礫層（溪流堆積物と呼称されている）に地下水が流下し、次第に地下水位が上昇することで上位の盛土層が不安定化し、下端から上方へと盛土層が崩壊にいたったとする見解が説明されている。

現状の段階では、検証委員会の調査結果とその見解について、以下のとおり、検討が不十分と考えられる課題がある。①崩壊過程を規制する逢初川源頭部の地質層序と構造、②隣接する地域からの深層地下水の流入に関わる水文地質構造、③市街地における土石流の流路となった開析谷の地形的特性、がある。

本論文では、上記の課題について、逢初川とその周辺の地形・地質的特性を考慮して、静岡県の検証委員会で公表された調査・分析資料、および既往の文献と地形画像の解析、今年8月2日・3日の現地調査で得た知見を基礎に検討する。

2. 利用した地形・地質データと分析手法

利用した主な地形・地質データは、以下のとおりである。これらのデータをQGIS (ver.3.16) に読み込み、必要なデータ加工・表示・解析を行った。

- ・数値標高データ：国土地理院の基盤地図情報（数値標高モデル）：5m メッシュ（以下，5mDEM） <https://www.gsi.go.jp/kiban/>（航空レーザー（以下，LP と略す）計測日：2009 年 6 月 27 日）
- ・立体地図：朝日航洋株式会社の「静岡県熱海市伊豆山付近の陰陽図（被災前）」（静岡県熱海市災害 3 次元点群データの利用，LP 計測日：2019 年 12 月 11 日）（朝日航洋㈱，2021a）
：朝日航洋株式会社の「発災前後の陰陽図比較」（朝日航洋㈱，2021b）
<https://www.aeroasahi.co.jp/news/detail.php?id=394>
：国土地理院の「赤色立体地図」（XYZtile）
<https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>
- ・オルソ空中写真：朝日航洋株式会社の「オルソ写真画像データ」（geotiff 形式，2021 年 7 月 10 日撮影）（朝日航洋㈱，2021c）
<https://www.aeroasahi.co.jp/news/detail.php?id=394>
- ・地形・地質図：5 万分の 1 地質図幅「熱海地域の地質」，地質調査総合センター。（及川ほか，2011）
：1:25000 都市圏活断層図「熱海」，国土地理院技術資料。（八木ほか，1996）

3. 地形・地質

3.1 概要

図 1 に伊豆半島北部から箱根山付近の赤色立体地図を示す。伊豆半島北東部は，箱根火山から南北に複成火山が縦列し，鞍掛山，熱海峠，十国峠，玄岳，山伏峠，巢雲山を連ねる南北にのびる稜線をなす。南北稜線のすぐ西側に，西伊豆断層帯沿いに南北方向の深い断層谷が刻まれているが，それより西側は狩野川が流れる谷底低地まで傾斜 3

～7°のなだらかな緩斜面をなす。この緩斜面は箱根火山の外輪山の火山原面に続くものであり，複成火山群の火山原面にあたると考えられている（及川ほか，2011）。一方，東側の斜面は，著しく開析されて谷密度が大きく，河谷は V 字形の谷壁斜面をなす（図 1）。火山原面は岩戸山から南へ続く尾根などにわずかに残すだけとなっている（図 2）。断面図から求められる接面の勾配は西側斜面より急で，7～11°である。熱海市の七尾，伊豆山，春日町，水口町付近には，地すべりの滑落崖や移動体が認められる（図 2；八木ほか，1996）。すなわち，東斜面は，西斜面に比べて，河川の顕著な下刻や斜面崩壊が発達した地形場にあるといえる。

東斜面域は，地形的に熱海峠付近から岩戸山を経て東方向に続く尾根を境に，北側の湯河原市街地を中心とする千歳川・新崎川流域と南側の熱海市北部付近の糸川・初川・和田川流域とに分かれる（図 1）。両流域は海側に開いた馬蹄形の輪郭をもち，その海岸線に接するところで河川が合流し狭い沖積低地が形成されている。

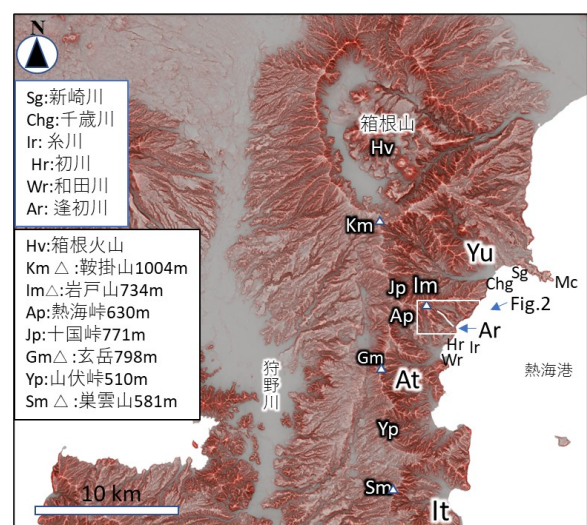


図 1 伊豆半島北部付近の赤色立体地図（国土地理院）
Yu：湯河原市，At：熱海市，It：伊藤市，白線：逢初川の河道

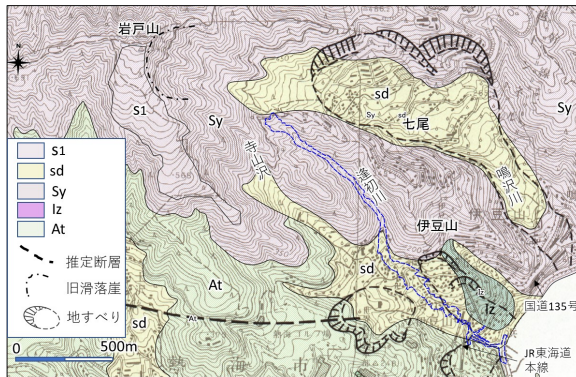


図 2 熱海市付近の地質図 及川ほか (2011) と八木ほか(1996)に基づく。旧滑落崖を追記。s1: 火山原面, sd: 山地緩斜面堆積物, Sy: 湯河原火山噴出物, Id: 伊豆山デイサイト, At: 熱海火山噴出物, 青破線で逢初川の土石流流下範囲を追記。

以下、熱海市付近の地質について、及川ほか (2011) に基づいて概説する。熱海市周辺では、山地の基盤は第四紀の火山噴出物で構成され、逢初川上流部を含む岩戸山南斜面および北側の千歳川・新崎川流域は、箱根火山群に属する湯河原火山噴出物 (Sy; 噴出年代 0.4~0.25Ma) が分布する (図 2)。その南側には宇佐美-多賀火山群に属する熱海火山噴出物 (At; 噴出年代 0.7~0.45Ma) が主に分布している (図 2)。湯河原火山噴出物は、熱海火山噴出物の上に重なる。両火山噴出物は、安山岩から玄武岩、一部デイサイや流紋岩の溶岩と火砕岩で構成され、それぞれ異なる噴出中心を有する成層火山体をなす。熱海市七尾、伊豆山などに認められる傾斜 20°以下の緩斜面には、山地緩斜面堆積物 (sd) が基盤の火山噴出物を覆って分布している (図 2)。同堆積物は、厚さは 50m 以下で、長径数~十数cmの円~亜角礫で構成される不淘汰な礫層であり、ほとんど風化火山灰土壌に覆われない。七尾では、基盤岩を直接覆う風化火山灰土壌中に東京軽石層が産出したことから、同堆積物は東京軽石層が示す年代 (約 5 万年前) より新しいと推定された。

3.2 逢初川周辺の地形・地質

逢初川周辺の立体地図を図 3 に、3 次元イメージを図 4 に、逢初川の縦谷断面図を図 5 にそれぞれ示す。

岩戸山の東縁は特徴的な径 400m の半円形状の輪郭線を描き、その斜面は上部で傾斜 45°の急斜面をなし下方に凹んだ形状の谷型斜面を形成している (図 3, 4)。谷型斜面には直線上にのびる 1 次谷が発達し、その下方の標高 450~350m にかけて傾斜 12~15°の緩斜面が広がる。以上の地形的形状は、岩戸山東縁の急斜面が古い滑落崖で下方の緩斜面の堆積物はその崩落堆積物であること



図 3 静岡県熱海市伊豆山付近の立体地図 (朝日航洋(株), 2021a) 2019 年 6 月 LP 計測データによって作成。図中に青破線は逢初川の土石流流下範囲を示す。

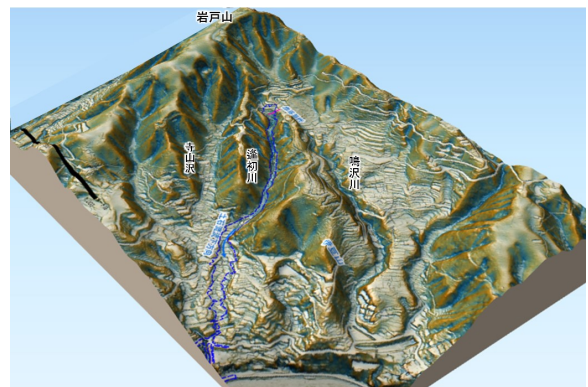


図 4 静岡県熱海市伊豆山付近の 3 次元地形イメージ 国土地理院の 5mDEM から GIS の 3 次元モデル機能で作成し、図 3 の立体地図を重ねて表示。

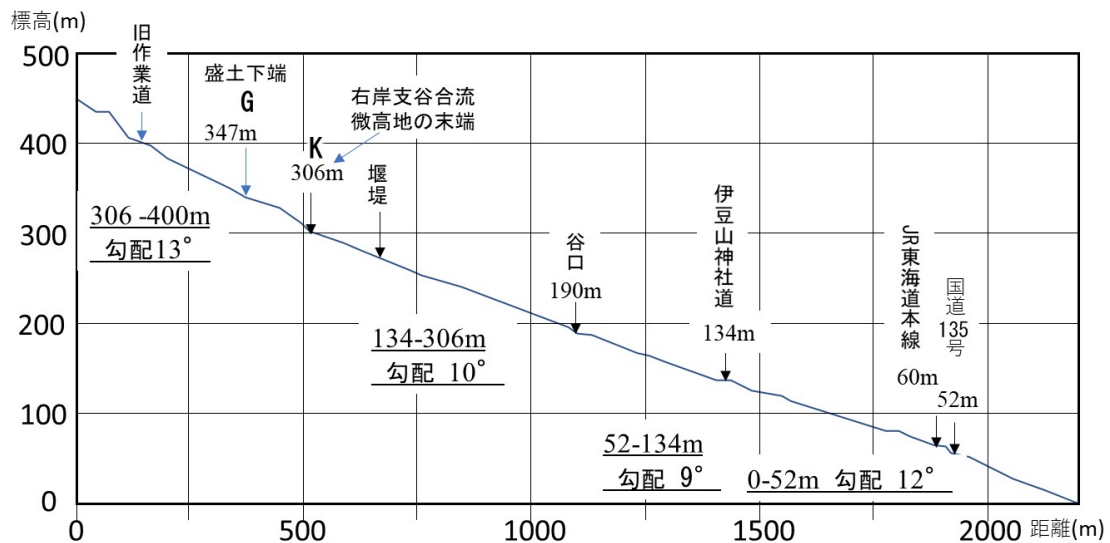


図5 逢初川の縦断面図（縦横比2対1） 国土地理院の5mDEMの利用。標高340m
 以上は静岡県（2021a）の資料8-5のLine1に沿う。G・Kの位置は図11参照。

を示唆する。しかし、宅地造成が進み、緩斜面の微地形的変状は観察できない状況にある。この緩斜面は南東方向へ延長1.4kmにわたって続くが、その延長部は北方の滑落崖から南南東方向に広がる崩落堆の形状を示し、地すべり移動体にあたると解釈されている（図2；八木ほか，1996）。緩斜面には熱海市七尾の団地などの集落がある。

鳴沢川はこれらの緩斜面を下刻しているが、地理院の標準地図によれば、標高350m付近の遷急点から上流は埋立前の谷底は浅く、南に隣接する逢初川との分水界との比高も低い。上流部は2009年6月までに宅地造成で埋め立てられ（静岡県，2021a：資料8-3）、作業道が通る標高400m付近では分水界と造成地との比高差がない状態に変化している（図3）。そのため、鳴沢川上流部の表流水が逢初川に流出する可能性が指摘されたが、静岡県（2021a）は、地表調査でその量は限定的であると評価している。

逢初川は、岩戸山の南東斜面の標高520mの尾根に端を発して、南東方向にV字谷底を流れ、

谷口からは、東南東方向に海岸線まで平均10°の急な勾配で（図5）、開析谷底を流下している（図4）。谷口から下流部は市街地化し、伊豆山神社道－JR 東海道本線間は暗渠となっている。土石流発生箇所は、逢初川の標高347～400mの源頭部を埋めた盛土分布域であり、その流域は4.6万m²と狭い（図3；静岡県，2021b：資料9-5）。寺山沢は、岩戸山南方の尾根に源頭部をもち、その上流部は急峻なV字谷をなし、標高200mから海岸線にかけて、幅200～300m、平均勾配10°の土石流扇状地を形成している（図3、図4）。扇状地の両縁は左支流の逢初川と右支流の河谷に沿って開析谷が刻まれている。

4. 水文地質構造

静岡県の検証委員会資料（静岡県，2021a，b）から、これまでに明らかにされている水文特性に関わる基本的な点は以下の3点である。

- ・降水量：7月1日から3日にかけての降水量は、

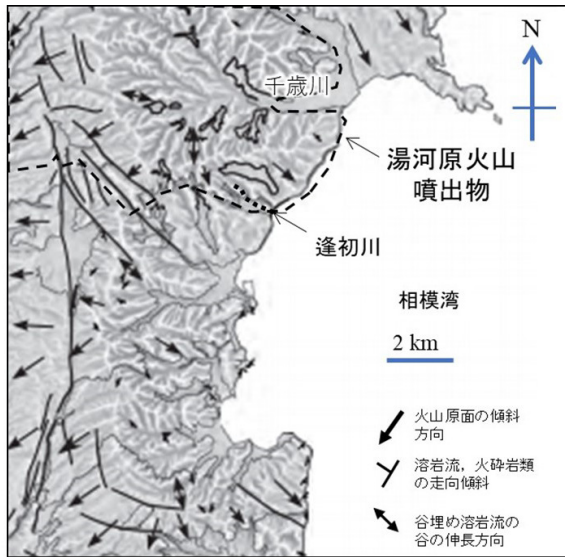


図 6 熱海市付近の火山噴出物と火山原面の構造（及川ほか，2011 の図 4.1） 基図は横山ほか（1999）の地上開度図。逢初川の流路と湯河原火山噴出物の分布範囲を追記。

逢初川に近い静岡県熱海観測所では 449 mm が記録されている。この値は、2011 年からの観測記録史上で最大であり、日本気象協会によれば、逢初川付近の降水量は同値より 20% 以上大きく、552 mm に達していることが指摘されている。

・盛土への流入量：逢初川の土石流発生地点の流域は 4 万 m^2 と狭いが、その V 字谷の源頭部を埋めた盛土であるため、降水のおおくが盛土付近に集水することになる。また、隣接する鳴沢川の流域などの流域外からも、地下水が流入していた可能性が、深度 40m までのボーリング調査による地下地質構造とボーリング孔や湧水地の水文データから指摘されている。逢初川源頭部の流域面積に比べると、同地点から上流の鳴沢川流域は、約 6 倍にあたる 25 万 m^2 である。

以下、流域外からの地下水の流入評価に関連する水文地質構造として、岩戸山周辺の火山噴出物の構造について検討する。

逢初川源頭部は、岩戸山南東斜面にあり、地質的には、湯河原火山の南東斜面に位置する。その

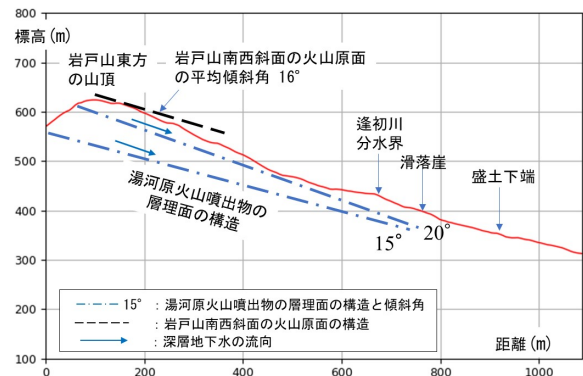


図 7 岩戸山東方尾根から逢初川源頭部間の地形断面図 断面の位置は図 3 の A-B 線。

南側で、熱海火山（噴出物宇佐美-多賀火山群の一画）に隣接している（及川ほか，2011）。火山体内部の地質構造の推定には、火山原面の傾斜方向、および現地調査で測定した溶岩の傾斜方向と溶岩流の伸長方向とがある（図 6：及川ほか，2011）。図 6 において、湯河原火山噴出物について、岩戸山北側の千歳川流域を中心に、周囲に傾斜する火山原面の構造とそれに符合する 1 地点の溶岩流の方向が表示されている。逢初川付近では南から南南東方向に傾斜する構造が読み取れる。傾斜角としては次の 2 種のデータが有用である。一つは、火山噴出物の層理面の測定値（及川ほか，2011 の地質図）であり、3 点と少ないが、20～25°を示す。あと一つは、岩戸山の南西斜面に残る火山原面の最大傾斜角度であり、等高線から読み取ると、平均 16 度の傾斜を示す。

以上のデータから推定された湯河原火山噴出物の最大傾斜方向に沿うように、岩戸山の稜線から逢初川源頭部にかけて南南東方向の縦断面図を作成した（図 7）。同図には、地質構造の指標として傾斜角 15°と 20°の直線、逢初川の分水界、滑落崖の頂部、谷埋め盛土の下端の位置を表示した。

図 7 の断面図は、逢初川源頭部の流域面積に比べて 6 倍もの広さをもつ鳴沢川流域に加えて、

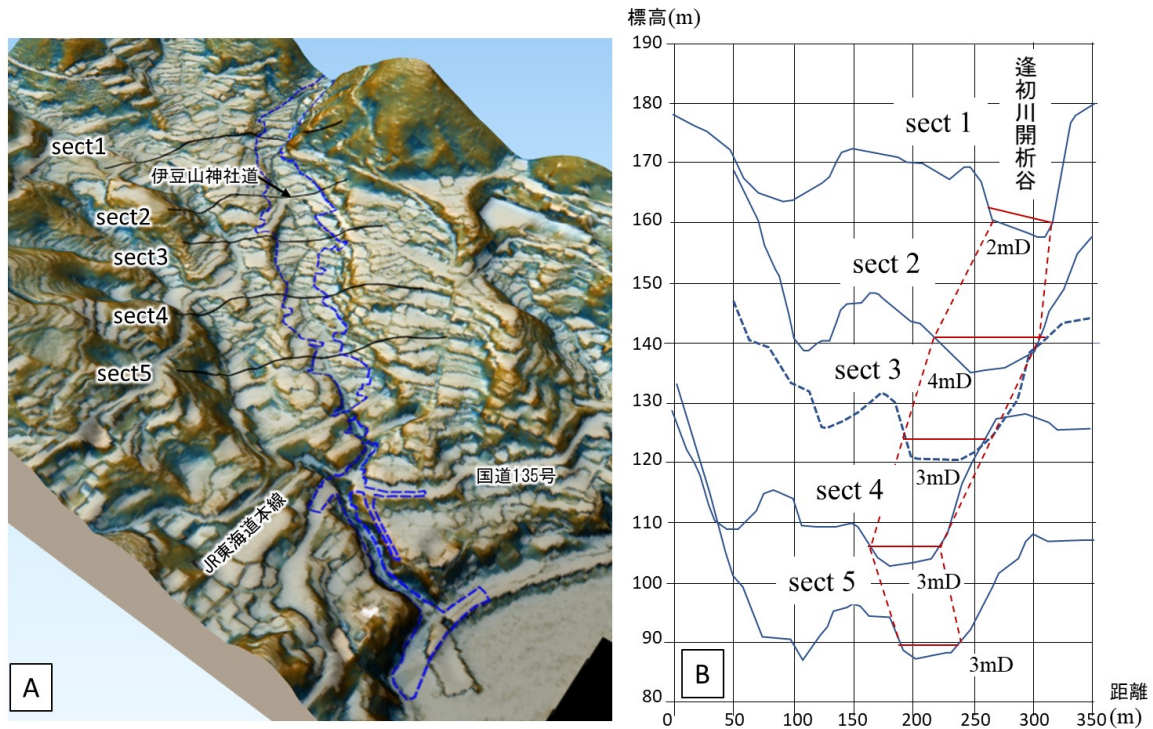


図 8 逢初川下流部の立体地図（朝日航洋㈱，2021a）の 3 次元画像（A）と断面図（B） 3 次元化と断面図は 国土地理院の 5mDEM を利用 青破線：土石流流下範囲，（B）の赤線は土石流の上面。

岩戸山北側の約標高 580m 以上の流域からも、地山の火山噴出物に浸透する地下水が逢初川源頭部付近に流入する可能性を示している。

5. 土石流の流路

逢初川下流の開析谷について、その 3 次元地形画像と断面図を図 8 に示す。逢初川の土石流の流下範囲について、土砂堆積物の分布や地山の剥ぎ取りの痕跡を被災後の 7 月 10 日撮影の空中写真（オルソ画像：朝日航洋㈱，2021b）から判断して QGIS 上でトレースした。その全体分布図を図 2，図 3，図 4 に、下流部を図 8A に示す。

逢初川下流の開析谷は、JR 東海道本線より海側では、南西側の支流と合流し、海食崖の急斜面を下刻する谷底幅 5m 程、深さ 10～

20m の峡谷をなしているが、谷口から JR 東海道本線までの区間は、谷底幅 65～135m、深さ 5.5～12m で、舟底状のゆるやかな形状をなす（図 8A, B）。狭小な 2 段の段丘面が一部に認められる。谷底の勾配は、谷口から国道 135 号間は 9°ではば一定しており、そこから海岸線までは、12°と急になる（図 5）。土石流上面が平らであると仮定して、土石流の流下範囲に基づき、図 8B の開析谷の横断断面図に土石流の上面を表示した。同図から土石流の厚さは 2～4m であったと推定できる。

開析谷と土石流の流下範囲の分布との比較から、土石流は谷の出口から下流側では、扇状地を下刻した開析谷内を流れ下ったと判断できる（図 8）。そのため、土石流の高さも 2～4m の高さが維持され、流路沿いの家屋に被害が集中する結果をまねいたと考えられる。

熱海市の土砂災害ハザードマップには、土石流警戒区域として、寺山沢中・下流域の土石流の扇状地地域全体が指定されているが、土石流の流路については考慮されていない。標高 70m から 180m までの扇状地上には、開析谷内も含めて熱海市伊豆山の市街地域が広がっている。特に逢初川下流の開析谷は、寺山沢の扇状地を下刻したものであることを考慮すると、逢初川流域だけでなく寺山沢流域で発生した土石流についても、その流路になる危険性が高い。開析谷の中であるのか、その外かで、危険度が大幅に異なることに留意した災害対策と土地利用のあり方を考える必要がある。

6. 土地改変履歴と輪郭構造

始めに、逢初川土石流発生箇所で開催された土地改変の履歴を静岡県（2021a, 2021b）の資料に基づいて整理し、次に、崩壊地の輪郭構造、およびその背景となった地形改変と地質層序・構造の特徴について検討する。

6.1 土地改変の履歴と実態

逢初川土石流発生箇所の土地改変は、A 社（静岡県が用いている呼称）が当該地域の土採取計画届を 2007 年 3 月 9 日に熱海市に提出し、同年 4 月 9 日に受理書が熱海市から交付された時点が出発点になる。

2006 年

2006 年 9 月 20 日の空中写真（静岡県，2021a：資料 6-3）では、鳴沢川上流部は宅地造成を目的にした谷埋め盛土でならされているが、逢初川土石流発生箇所は、広葉樹林に覆われて土地改変が行われていないことがわ

かる。

2007 年～2009 年 9 月

2007 年 5 月 22 日の現地写真（静岡県，2021a：資料 6-4）では、逢初川土石流発生箇所の森林伐採と土地改変で、谷底から左岸側の谷壁は土砂と一部伐採された樹木で整地もされないまま埋積された様子がうかがえる。同資料によれば、盛土下端部付近の谷底（標高 350m 付近）には転石積の土留、その 20m 上流に土留柵が設置されているが、土砂ですでに埋積されている。この時点ですでに土地改変の面積は届け出の 0.9446ha を越えて、林地開発許可が必要な 1ha 超になっていた。

2009 年 6 月 24 日の現地写真（静岡県，2021b：資料 10-13）では、逢初川土石流発生箇所に旧作業道が通され、その山側斜面は、写真奥の中型トラック高の 3 倍（高さ 6m）以上にもわたって切土されている。左岸の谷壁斜面から谷底にかけては、幅広く土砂が盛られ数段の小段が認められる。2009 年 3 月 19 日に熱海市は A 社より土砂の搬入を開始したことの連絡を受けていることから、それ以後、土砂搬入による谷埋め盛土が急速に進行したことが推定できる。

2009 年 6 月 27 日の空中写真（静岡県，2021b：資料 10-14）では、3m まで拡張された旧作業道とその下方に小段が切られた谷埋め盛土の分布、および旧作業道より上流の谷源頭部がその高さまで埋め立てられている様子が読み取れる。

国土地理院の 5mDEM の LP 計測は、この 6 月 27 日に実施されている。すなわち、同データが示す逢初川土石流発生箇所の地形は、自然状態ではなく、当時までの土地改変の結果を反映していることになる。

崩壊箇所の谷埋め盛土は、盛土開始頃の 2007 年 5 月 22 日から 2009 年 6 月 24 日までの現地撮影写真（静岡県，2021b：資料 10）では褐色がかかった色を呈する。

2009 年 10 月～2019 年

作業道から下方の谷に土砂の搬入が認定された 2009 年 10 月 9 日（静岡県，2021a：資料 6）以降、急速に盛土量が増加している。

2009 年 10 月 16 日，2010 年 6 月 30 日，2010 年 10 月 18 日の現地写真（静岡県，2021a：資料 6）では，盛土量の増加に加えて，その土砂の色が黒色ないし暗灰色を呈している。すなわち，2009 年 10 月を境に盛土の色が褐色から黒色に変化したことになる。

2011 年 2 月に当該地域の土地所有者は A 社から C 氏に変更されたことで，約 3 年にわたる土地改変はほぼ終了した。その後，盛土施工の状態が悪く，侵食・崩壊が発生しており（静岡県，2021a：資料 6），2019 年まで小さな改変や修復が行われていた（静岡県，2021b：資料 10）。

6.2 地形改変と崩壊の輪郭構造

逢初川土石流発生箇所の 2019 年 12 月当時の地形を示す立体地図（朝日航洋㈱，2021a）を図 9 に示す。同図には，2009 年 6 月時の地形等高線（国土地理院の 5mDEM から作成），崩壊部の輪郭（静岡県，2021b：資料 8-6），断面線 X-Y（静岡県，2021a：資料 8-5 の Line1）を重ねて表示している。以下，2009 年 6 月，2019 年 12 月，2021 年 7 月に実施された LP 計測データで表現された立体地図および逢初川の縦断形に基づき，地形改変の変遷と崩壊箇所の輪郭構造を検討する。

2009 年 6 月期の逢初川源頭部の状況

崩壊した盛土が施工される前の逢初川源頭部の状況は，国土地理院の 5mDEM で可視化することができるが，前述したとおり，すでに旧作業道より上流の谷源頭部が埋め立てられるなど，土地改変が行われていた。実際，この 5mDEM で描いた逢初川の縦断形（図 10，11）には，つぎのとおり，盛土による地形改変の状況が表現されている。

図 9 の A1-A2，および A2-A3-G 間は土地改変記録ですでに盛土が実施されている。逢初川源頭部の 2009 年 6 月期の縦断形（図 10）は，それに符合して，平坦な上端とその谷側の前置斜面からなる谷埋め盛土の形状を呈している。A2-A3-G 間の盛土の下端の位置は明確ではないが，静岡県（2021b）の資料 10-11 の記録からは，標高 370m 付近の土留柵ないし 350m の転石土留まで延長していたと推定できる。一方，H-K 区間（図 11）は，地点 K 以下の勾配 10°の平均勾配からはずれて，上に膨らんだ形状を呈している。この区間については盛土の記録がなく，2019 年 12 月期の立体地図（図 9）にみられる小段丘の分布に対応することから，その微地形を反映していると考えられる。

2019 年 12 月期の盛土の状況

逢初川源頭部の標高 400m 付近に現作業道が通り，その上流側の谷底は盛土で平坦化されており，下流側の盛土の下端は地点 G（標高 346m）まで続く（図 9，図 10）。下流側の谷埋め盛土には 10 段の小段が認められるが，下部の 3 段は平坦面やエッジに小規模な凹凸が目立つ。盛土の位置は，地形等高線（2009 年 6 月期）が示す V 字状の谷軸に沿っている（図 9）。2019 年 12 月期の縦断形（図 10）において，盛土体前面斜面の平均傾斜は 19°，

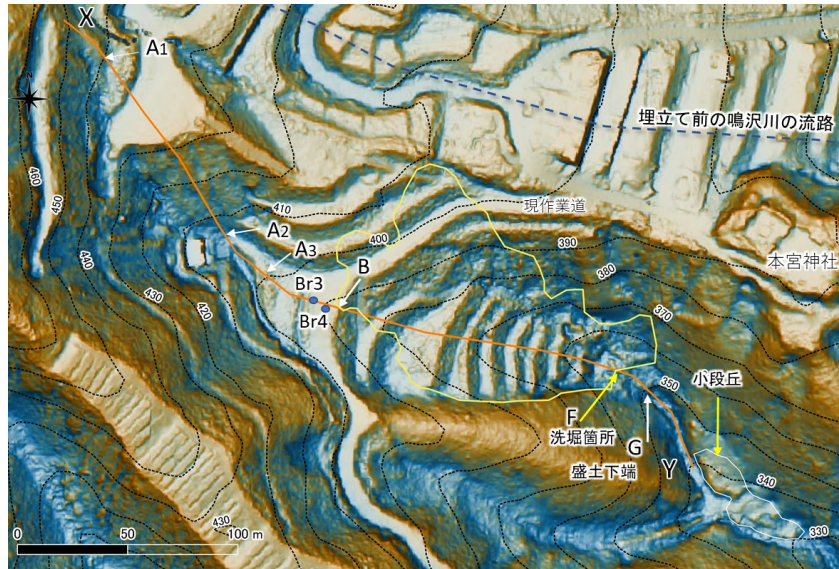


図9 逢初川源頭部付近の立体地図（朝日航洋株，2021a） 等高線（2009年12月時点）：
 国土地理院の5mDEMから作成，崩壊箇所の輪郭（黄色実線）：静岡県，（2021b）の資料8-6，
 X-Y断面線：静岡県（2021b）の資料8-5のLine1に沿う．Br3・Br4：静岡県（2021b）の資料
 4のボーリング地点No.3・No.4．

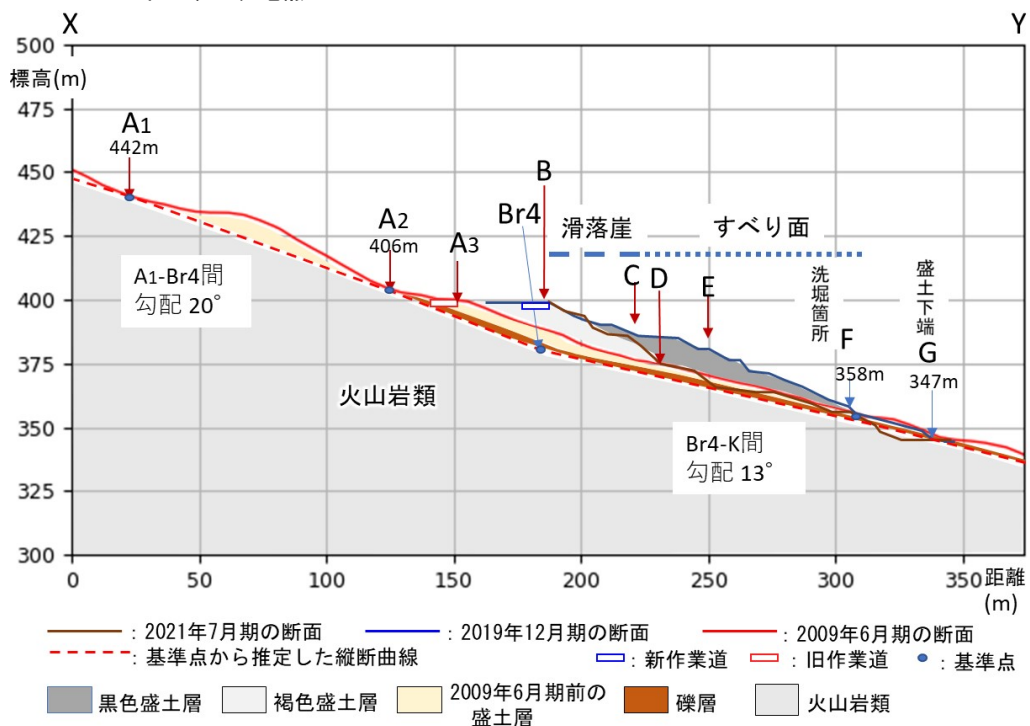


図10 逢初川崩壊箇所付近の縦断面図（縦横比1：1） 断面図位置は図9のX-Y線． 2009年6月期の断面
 は国土地理院の5mDEMから作成．2019年12月期・2021年7月期の両断面は静岡県（2021a）の資料8-5に基づく．

下半部の傾斜は22°と急である．

図9の盛土下端に，下流側を開いた馬蹄形
 の凹地が認められ，そこを始点とするガリー

状の幅3～5mの流路が，谷の右岸縁に沿って
 右支谷の合流地点まで下流に55m延長してい
 る．この谷の滑走斜面側の左岸には60m長に

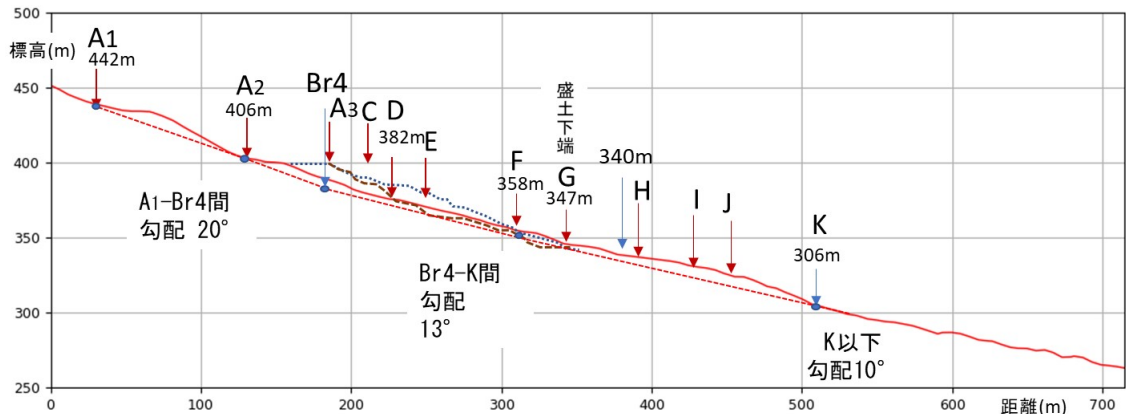


図 11 逢初川の縦断面図（縦横比 1 : 1） 断面図の範囲は標高 263m から 400m 間。標高 340m 以上の縦断面の位置は図 9 の X-Y 線。凡例およびキャプションは図 10 参照。

わたって小段丘状の微高地が形成されている。
2021 年 7 月期、崩壊箇所の状況

図 9 の崩壊箇所の輪郭線（静岡県，2021b：資料 8-6）が示すとおり，崩落は作業道付近の盛土で被覆された円弧状の急傾斜面に沿って発生した。崩壊箇所について，図 12 に立体地図（静岡県，2021b：資料 8-6）に，図 13 にドローン撮影の斜め写真（静岡県，2021b：資料 11-3），図 14 に現地写真をそれぞれ示す。

崩落は，以下の観察事実から，滑落崖，側方崖，すべり面という輪郭構造を形成して発生した可能性が高い。地形の形状を考慮して輪郭構造の区画を図 12 と図 13 に示す。

崩落面は，作業道に沿った円弧状を呈し，2021 年 7 月期の縦断面（図 10）の B-D 間で平均傾斜は 30°を示す。崩落面は図 13 の写真に捉えられているように，表層の大半が崩土で覆われたり崩れたりしているが，所々に盛土や火山岩類が露出している（小山，2021a,b；静岡県，2021a,b）。右岸の「2 段の落ち残り土塊」と記された範囲は，2 条の谷傾斜約 60°の正断層で土塊が下方にずれた状態を明確にとどめ，断層面は作業道に平行して湾曲してい

る（図 13）。このような正断層の形状は，滑落崖全体の姿勢に符合している（図 12）。

谷壁に沿う側方崖の平均傾斜は，国土地理院（2021）の 2021 年 7 月 6 日 LP 計測による断面図（A-B）では，左岸で 40°，右岸で 38°を示す。側方崖は崩土で覆われたり小規模な崩壊跡をとどめるが，谷向きの断層条線が特に右岸側に多く認められている（静岡県，2021a：資料 14-8）。

崩落の基底をなすすべり面は，現地写真（図 14B）や崩壊後の立体地図（図 12）を見る限り，崩土や流水による侵食で初生状態がほとんど残されていないが，図 12 の立体地図において，基底の 2 箇所に段差が認められる。そのうち上流部の段差は，図 10 の 2021 年 7 月期断面の地点 E にその段差が表現されている。下流部の段差は断面図ではその西端がかかるだけのためか確認できない。

盛土下端付近の洗堀箇所（図 9；標高 355m 付近）は，崩壊後の河床に，下流側に開いた馬蹄形の深さ約 2m の凹地が形成された地点である（静岡県，2021a：資料 14-13；地質については後述）。そこを始点とするガリー状の

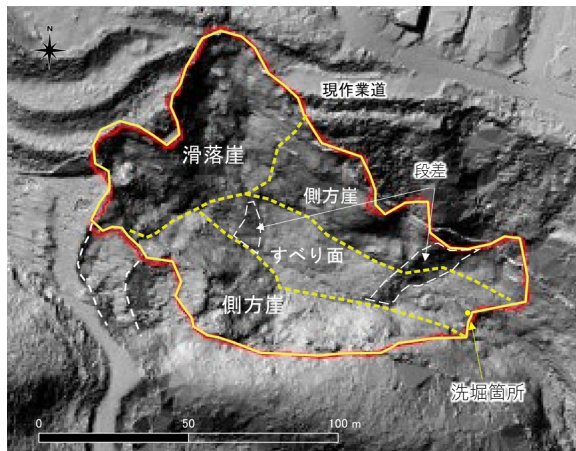


図 12 逢初川の崩壊箇所付近の立体地図（2021 年 7 月 6 日 LP 計測，静岡県，2021a：資料 8-7）斜面崩壊の輪郭構造を追記。

流路が谷の右岸縁に沿って延長している（図 12）。朝日航洋㈱（2021b）の崩壊後の立体地図では、より明瞭に可視化されており、流路の幅は約 8m で下流へ 100m 追跡できる。この凹地とそれを始点とするガリー状流路は、2019 年 6 月時点のものと形状が極めて類似しているが、地点が 20m 上流側に変位している。

6.3 地質層序と構造

ここでは、静岡県（2021a, b），小山（2021b）で示された地質層序に関する知見に基づき、逢初川源頭部の地質層序と構造について整理し、盛土崩壊の背景となる地形・地質学的特性を検討する。

地質層序と岩相

静岡県（2021a）は盛土層を一括しているが、小山（2021b）は逢初川の崩壊地の地質調査と現地でのドローン撮影による 3 次元地形モデルから、盛土を上位の黒色盛土と下位の褐色盛土とに二分し、盛土の下位に地山の火山岩類が崩壊地内に点々と露出していることを明らかにした。崩壊箇所では、崩壊面に幅広く



図 13 逢初川崩壊箇所上部の斜め写真（静岡県，2021a：2021 年 8 月 2 日撮影）斜面崩壊の輪郭構造を追記。それ以外の文字・記号は原図中のもの。

黒色盛土層が露出し（図 13A；静岡県，2021b：資料 11-4, 11-11, 11-13），中央崩壊地の滑落崖（図 13）では、その下盤（山側）に褐色の盛土層が露出していることが観察できる（静岡県，2021b：資料 11-3）。

火山岩類の上位に盛土が不整合に重なる層序関係は、小山（2021b）によって崩壊地の滑落崖と側方崖で確認されているが、谷底では露頭がなく不確かであった。上述した洗堀箇所（図 9）の小崖に認められる露頭（詳細は後述）において、下位から、火山岩類、礫層、崩土が順次重なる層序が記載されている（静岡県（2021a）：資料 6-13）。静岡県（2021a）によると、礫層は溪流堆積物と呼称され、同一層に対比された礫層が、標高 400m 付近の作業道上で実施された、No.3 と No.4 のボーリング調査（位置は図 9 参照）によって、暗褐色の盛土の直下で、風化溶岩の直上に認められている。礫層は、No.3 では厚さ 2.5m のシルト質礫、No.4 では厚さ 3.5m のシルト混じり砂礫層と記載されている。

本論文では、崩壊地の地質層序について、

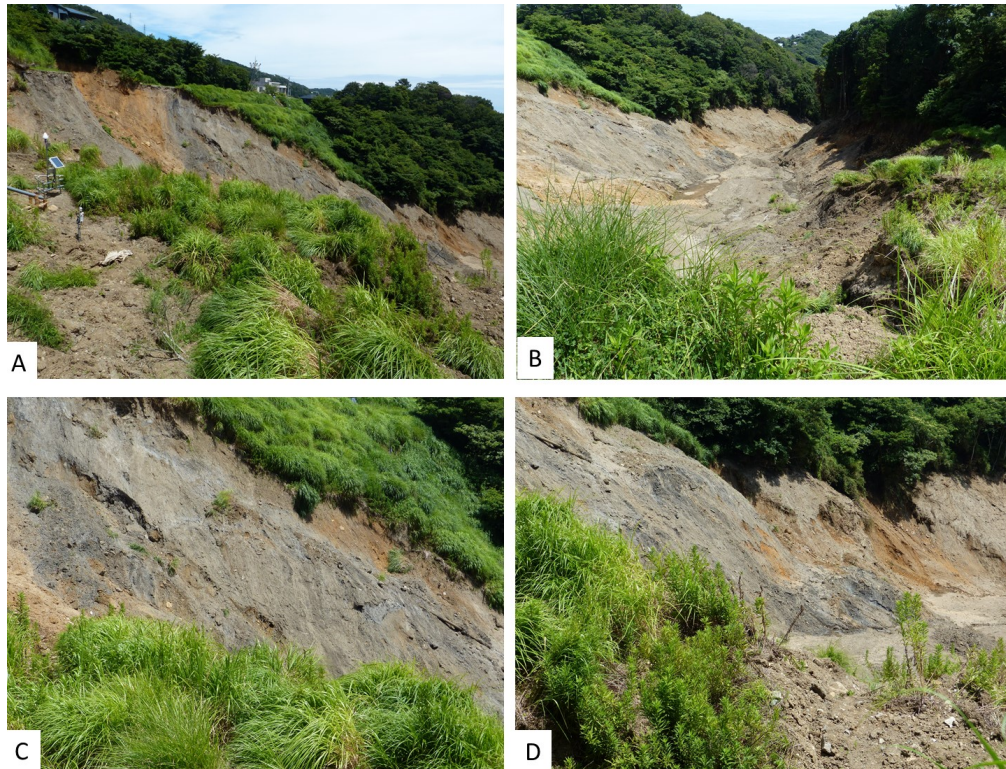


図 14 逢初川源頭部の崩壊後の現地写真（8 月 2 日撮影） A：滑落崖の中央崩壊地．B：崩壊地の平坦化された谷底面（下流方向）．C・D：左・側方崖に露出する黒色盛土層の断面 C：黒色盛土層面構造 D：礫の配列からなる平行葉理の堆積構造 スケール：A・B・D 中の谷壁の裸地化している斜面の高さは約 15m，C の横幅は約 20m．

小山(2021b)の層序に上記の礫層を加えて，下位から上位へ，火山岩類，礫層（谷底に限って分布），褐色盛土，黒色盛土の 4 層区分とする．なお，以下では，地層としての盛土であることを示す意味で，便宜的に両盛土を褐色盛土層，黒色盛土層と呼称する．

火山岩類 図 2 の地質図で逢初川源頭部の位置から判断すると，及川ほか（1995）の湯河原火山噴出物に対比できる．小山（2021b）によると，火山岩類は，安山岩質の緻密な溶岩と火砕岩の互層からなるが，火砕岩はその判別は難しいほどに風化を受けて粘土化が進んでいる．

礫層 静岡県（2021b）が逢初川の谷底にあたる地点 F と Br3・Br4 のボーリング地点において（位置は図 9 参照），その産出を認めて地

質断面図中（静岡県，2021b：資料 4-16）で同一層に対比した．

地点 F では，排水パイプの有孔管（径 20 cm）を含む崩土（厚さ 20～30 cm）の下位に，厚さ 1.5m 程の溪流堆積物（礫層）とそれに覆われる地山の熱水変質を受けた溶岩または火砕岩が産出する（図 15；静岡県，2021a：資料 6-13）．

図 15 の写真を観察し，礫層の礫径とその含有量を写真上で簡易計測した．その結果によると，礫層は，70%以上を占める礫と細粒分基質からなる．礫の配列はランダムで淘汰が悪く，基質は締まりのない様相を呈する．礫径は 6～20 cm の大礫が卓越し，礫のほとんどが平坦な面とシャープな稜で特徴づけられる角礫の形状を示し，ほとんど円摩されていない

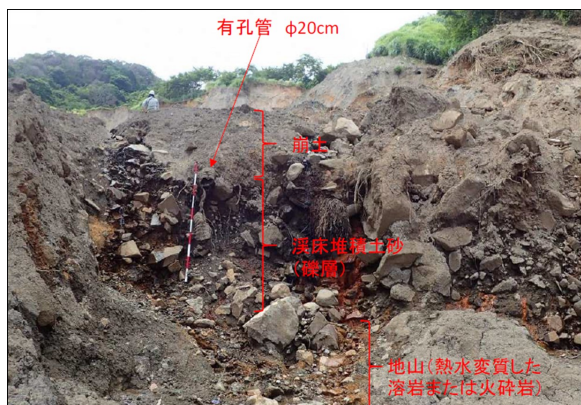


図 15 逢初川源頭部の崩壊後の現地写真（静岡県，2021a：資料 14-13） 洗堀で形成された小崖の露頭写真 スケール：1m.

いように見える．このような堆積相の特徴から，礫層は円摩され淘汰作用が働く掃流による（溪流）堆積物ではなく，溶岩が露出する急斜面の崖錐堆積物か土石流起源の堆積物であると考えられる．

褐色盛土層と黒色盛土層 両者ともに礫混じり砂ないしシルトであるが，土質の色で明瞭に区分できる．前者は褐色～暗褐色，後者は黒色～暗灰色を呈する．崩壊地で採取された両盛土の土質試験結果（静岡県，2021a：資料 12-7）によれば，両盛土層の粒度組成は比較的類似し，礫質な砂ないし粘性土であるが，細粒分の割合が黒色盛土で 37～42%，褐色盛土で 30～36%となっており，黒色盛土の方が少し多い．黒色盛土層には，産業廃棄物と一般廃棄物の混在が崩落地の露頭で確認されている（静岡県，2021b；小山，2021a）．褐色盛土層についても，ボーリング調査によって，No.3 では表層から 12m 長，No.4 では 14m 長のコアが得られており，それらの混入が確認されている（静岡県，2021b：資料 4-8，4-10）．

また，崩壊箇所の側方崖において，黒色盛土層の面に沿った空隙で認定できる物性的な

面構造（図 14A，C），および礫の配列からなる平行葉理（図 14D）が認められる．これらは下流側に 30～35°傾斜している．

褐色盛土層と黒色盛土層の区分とその新旧は，時系列の現地写真（静岡県，2021a：資料 6）が示す盛土の色調の変化とも符合する．すなわち，崩壊箇所の谷埋め盛土は，盛土開始頃の 2007 年 5 月 22 日から 2009 年 6 月 24 日までは褐色を呈するのに対して，作業道から下方の谷に土砂の搬入が認定された 2009 年 10 月 9 日以降，2009 年 10 月 16 日，2010 年 6 月 30 日，2010 年 10 月 18 日の現地写真では，盛土が黒色ないし暗灰色を呈している．

なお，2009 年 10 月 9 日と 10 月 16 日の現地写真では，背景の建物と本宮神社を囲む森（図 9 参照）との位置関係から，すでに当時の作業道が現在の作業道の位置（図 9）にほぼ接近していることが確認できる．したがって，No.3 と No.4 のボーリング調査地点は，褐色盛土層の分布域内にあたると判断でき，ボーリング調査結果と整合している．

以上のことを考慮すると，図 10 の断面図で，地点 B-D の 2021 年 7 月期に発生した滑落崖の斜面は，ほぼ褐色盛土層と黒色盛土層との境界付近にあたると推定できる．

地質構造

以上の地質層序と 2009 年 6 月期，2019 年 12 月期，2012 年 7 月期の各縦断曲線の特徴に基づいて，図 10 の縦断面図に，火山岩類，礫層，褐色盛土層，黒色盛土層の層序区分を表示した．なお，図 10 において，2009 年 6 月期の縦断曲線より下位の盛土層は，形成時期が本格的な土砂搬入の前であり，土質も違いがある可能性があるため，それ以降の褐色盛土層とは分けて表示した．

地質構造を考慮する上で、火山岩類上面の境界面の推定が必要である。そこで、次の考え方で推定した。

河川の浸食と土砂の運搬・堆積作用がつりあった状態の平衡河川の縦断形は、一般に上流に向かって指数曲線的に次第に急傾斜になり、任意の区間はある勾配の直線で近似されている（池田ほか，1986 など）。2009 年 6 月期の縦断曲線は、盛土と微高地をなす堆積物の影響がある区間では、ある勾配の直線ではなく、その影響を受けて上に盛り上がった形状に変化している。そこで、盛土やその他の被覆堆積物を除き、火山岩類が露出している地点の標高を基準点にそれを通る縦断曲線は、平衡河川のそれを近似するものと仮定して、選択した基準点から逢初川の縦断曲線を求めた（図 10、図 11）。

採用した基準点とその理由は、つぎのとおりである。地点 K（図 11）は河床の微高地の末端部であり、それより下流では勾配 10° の直線で縦断形が近似できる。地点 F は、そのすぐ下流側の河床が洗堀され基盤岩が露出している（図 15）。地点 Br4 はボーリング調査地点でその地下 18m に火山岩類が出現する（静岡県，2021b：資料 4-10）。地点 A1 と A2 は盛土平坦面の山麓縁で、盛土が薄くなって地山の火山岩類に接する付近にあたる。

これらの基準点から推定した縦断曲線は、K 以下で 10° 、Br4-F-K 間で 13° 、A1-A2-Br4 間で 20° という勾配変化を示すものとなった（図 10、図 11）。基準点 Br4 は作図上、F-K の直線と A1-A2 の直線との交点付近にあたる。

褐色盛土層と上位の黒色盛土層との境界は、地点 B より山側は褐色盛土層で、谷側の崩壊面（B-D 線）より上位は黒色盛土層であるこ

とを考慮すると、ほぼ、平均勾配 30° の B-D 線に沿ったものか、それよりも B を基点に谷側により急傾斜していたことになる。この平均勾配 30° は、前述の黒色盛土層内に認められた内部構造の傾斜に匹敵するので、境界面の勾配を 30° とするのは妥当であろう。

以上の考えに基づいて、火山岩類、礫層、褐色盛土層、黒色盛土層の分布を図 10 の断面図に表現した。火山岩類上面の縦断曲線と 2009 年 6 月期断面とを比較すると、旧作業道が通る盛土平坦面の谷側縁の A3 から洗堀箇所 F までの区間で、2009 年 6 月期断面と火山岩類上面との間に、最大 8m の盛土と礫層からなる堆積物の存在が推定できる（図 10）。

馬蹄形凹地形成の地質条件

土石流発生時に形成された洗堀箇所 F と 2019 年 12 月期の盛土下端 G（図 9）は、共に下流側に開いた馬蹄形の深さ約 2m の凹地が形成された地点であり、両地点から発生するガリー状の流路の存在から、凹地が流路の始点で地下水の湧出点であったと考えることができる。地下水の流下・流出は、静岡県（2021b）が指摘しているとおり、その層準（図 10）だけでなく、実際に現地にて観察された洗堀箇所の露頭観察（図 15）から、礫層の層準であると判断できる。

盛土層直下の礫層はその堆積相から高い透水性をもち、谷底沿いに、標高 400m の源頭部の盛土層直下に確認された礫層まで連続している可能性が指摘され、源頭部における地下水の流路として重要視されている（静岡県，2021a, b）。現地での湧水・流水調査でも隣接する鳴沢川・寺山沢に比較して高い比流量が観測されている（静岡県，2021b：資料 6-16）。

静岡県（2021b）は、盛土層直下の高透水性

の礫層（溪流堆積物と呼称）に地下水が流下し、次第に地下水位が上昇することで上位の盛土層が不安定化し、下端から上方へと盛土層が崩壊にいたったとする見解を示しているが、上記に整理した礫層の分布と盛土下端付近で生成された湧出点の形成は、この見解を支持している。

しかし、土石流発生時に地下水の流出箇所が地点 F であり、その前の平常時では盛土下端の地点 G であった理由は説明されていない。そこでこの点について図 10 に示す地質構造を基礎に以下検討する。

図 10 の縦断面図で、洗堀箇所 F 地点は、盛土体前面の勾配の遷緩点にあたり、勾配はその上流側の E-F 間で勾配 22° 、下流側の F-G 間で勾配 13° と大幅に緩くなることが理解できる。また、図 9 の立体図からは、F 地点は盛土に設けられた小段間の境にあたること、図 10 の縦断面図からは、盛土の層厚も、したがって礫層にかかる盛土の上載圧も半減することがわかる。これらの F 地点を境にした盛土の変化が意味することは、土石流発生頃に想定される礫層中の地下水圧の増大で、礫層を覆う盛土が破壊されて地下水が流出しやすい箇所にあたりそうだということである。

盛土下端 G が地下水の流出地点になり得た条件としては、礫層の分布とその成因が鍵であるように思える。もし、礫層が溪流の掃流による堆積物（静岡県, 2021a, b）であれば、地点 G より下流側にもその分布が広がっているはずであり、盛土下の礫層を流下する地下水は地点 G で噴出して凹地をつくる必然性はない。一方、礫層の堆積相から想定される土石流堆積物や崖錐堆積物の場合も、地点 G でその層厚が急激に変化する原因が他になけれ

ばならない。この点に関連した情報として、6.1 項で記述した、2007 年 5 月 22 日の現地写真（静岡県, 2021b：資料 10-11）で捉えられた盛土下端部付近（標高 350m 付近）に設置された転石積の土留の施設がある。この土留の位置は、その標高からちょうど地点 G にあたる。施設の実態が不明であるが、施設設置後に土石流や崖錐が生成された場合は、この土留の高さまで礫層が堰き止められることになり、地下水も堰き止められ地下水位の上昇を招きやすい。降雨量の多いときはその地点から地下水が噴出しやすい状況であった可能性が考えられる。

7. まとめ

本論文では、静岡県（2021a, b）の公開資料、国土地理院と朝日航洋㈱の航空レーザ計測の数値地形データとその立体地図、地質図情報、および若干の現地調査で得た知見を踏まえて、逢初川源頭部における土石流発生とその流下特性に関わる地形・地質的特性について、以下のとおり整理・考察した。

(1) 岩戸山周辺の水文地質構造として、及川ほか（1995）に基づき、湯河原火山噴出物の堆積面が南から南南東方向に、 $16\sim 25^\circ$ の角度で傾斜していることを示した。この地質構造は、逢初川源頭部の流域面積に比べて 6 倍もの広さをもつ鳴沢川流域に加えて、岩戸山北側のおよそ標高 580m 以上の流域から深層地下水が逢初川源頭部付近に流入する可能性を指摘した。

(2) 逢初川は V 字谷の谷口から下流では、寺山沢の土石流扇状地を開析した舟底状の開析谷を流下している。この開析谷と土石流の流

下範囲との比較から、土石流は開析谷に規制され、2~4m の高さで流れ下ったことを示した（図 8）。そのため、開析谷底沿いの家屋に被害が集中する結果をまねいたと考えられる。開析谷内の危険性を考慮した土砂災害ハザードマップの作成など、災害対策と土地利用を考える必要性を指摘した。

（3）逢初川土石流発生箇所で開催された土地改変の履歴を静岡県（2021a,2021b）の資料に基づいて整理し、①2009 年 6 月 27 日の LP 計測による国土地理院の 5mDEM は、逢初川源頭部で 2007 年から当時までに進められた土地改変の影響を反映した内容であること、②2009 年 10 月を境に盛土の急速な増加に加えて、盛土の色がそれまでの褐色から黒色ないし暗灰色に変化したこと、などを指摘した。

（4）2009 年 6 月、2019 年 12 月、2021 年 7 月の 3 期に実施された LP 計測データで表現された立体地図および逢初川の縦断形に基づき、縦断地形の変遷と崩壊地の輪郭構造を示した。

（5）静岡県（2021a,b）、小山（2021b）で明らかにされた地質層序に関する知見に基づき、逢初川源頭部の地質層序を、下位から上位へ、火山岩類、礫層（谷底に限って分布）、褐色盛土層、黒色盛土層の 4 層に設定した。地質構造に関して、逢初川の縦断面において、2009 年 6 月、2019 年 12 月、2021 年 7 月の 3 期の縦断形に加えて、火山岩類上面を基準面とする縦断形を新規に設定し、層序分布を示した。主要な知見は、滑落崖の斜面は、ほぼ褐色盛土層と黒色盛土層との境界付近にあたること、2009 年 6 月期の縦断面と火山岩類上面との間に最大 8m の盛土を含む堆積物が存在すること、2019 年 12 月期に存在した凹地状の湧出地は、礫層を覆う堆積物がそれより上流に比

較し急速に薄くなった箇所で発生したこと、そして、土石流発生時に出現した同湧出地は、2007 年 5 月までの盛土整備で設置された転石積み土留の存在が影響している可能性を指摘したこと、である。

以上、本論文で検討した内容が今後の土石流発生の原因解明や災害対策に参考になることができれば幸いです。最後になりましたが、逢初川の土石流災害で亡くなられた方々に心から哀悼の意を表します。

謝辞

現地調査を実施するにあたり、本研究所の松澤 真博士に協力をいただき、原稿についても貴重なご意見をいただいた。ここに深くお礼申し上げます。

文献

- 朝日航洋株式会社（2021a）：静岡県熱海市伊豆山付近の陰陽図（被災前）（CC-BY）
<https://www.aeroasahi.co.jp/news/detail.php?id=391>
- 朝日航洋株式会社（2021b）：発災前後の陰陽図比較（CC-BY）
<https://www.aeroasahi.co.jp/news/detail.php?id=394>
- 朝日航洋株式会社（2021c）：2021 年 7 月 10 日静岡県熱海市土石流災害航空レーザ計測データ他：オルソ写真画像データ（CC BY 4.0）、G 空間情報センター
<https://www.geospatial.jp/ckan/dataset/aac-2021710-atami-lp>
- 池田 宏・伊勢屋ふじこ・飯島英夫（1986）：

- 実験水路に形成される河川の縦断形. 筑波大学水理実験センター報告, No.10, 115-123.
- 国土地理院 (2021): 航空レーザ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/common/000234173.pdf>
- 小山真人 (2021a): 伊豆山逢初川土石流源頭部の崩壊状況とその地質学的解釈 (予察的調査報告 2) (2021.7.9). 静岡大学防災総合センター小山真人研究室 WEB サイト
https://sakuya.vulcania.jp/koyama/public_html/Izu/izusan210709report.pdf
- 小山真人 (2021b): 伊豆山逢初川土石流源頭部の崩壊状況とその地質学的解釈 (予察的調査報告 4) (2021.8.2), 10p. 静岡大学防災総合センター小山真人研究室 WEB サイト
https://sakuya.vulcania.jp/koyama/public_html/Izu/izusan210802report.pdf
- 及川輝樹・石塚 治 (1995): 5 万分の 1 地質図幅「熱海」, 地質調査総合センター.
- 奥山晃平 (2021): 熱海土石流, 盛土の工法「不適切」. 日経コンストラクション, 2021 年 7 月 26 日号.
- 静岡県 (2021a): 第 1 回逢初川土石流の発生原因調査検証委員会配布資料 (1~17). 2021 年 9 月 7 日開催.
http://www.pref.shizuoka.jp/kensetsu/ke-350/sabouka/r3hasseigenninncyousakennsyouii_nnkai.html
- 静岡県 (2021b): 第 2 回逢初川土石流の発生原因調査検証委員会配布資料 (1~15). 11 月 26 日開催.
http://www.pref.shizuoka.jp/kensetsu/ke-350/sabouka/r3hasseigenninncyousakennsyouii_nnkai_2.html
- 八木浩司・今泉俊文・澤 祥・東郷正美・池田安隆 (1996): 1:25,000 都市圏活断層図「熱海」, 国土地理院技術資料, D.1-No.333.
- 横山隆三・白沢道生・菊池 祐 (1999): 開度による地形特徴の表示. 写真測量とリモートセンシング, vol.38, 26-34.
- 国土地理院: 基盤地図情報 (数値標高モデル): 5m メッシュ (標高) (以下, 5mDEM)
<https://www.gsi.go.jp/kiban/>: 赤色立体地形: XYZtile
<https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>