鹿児島県出水市針原川地域における 扇状地災害の発生プロセス

Process of fan disaster caused at the Harihara river district, Sendai City, Kagoshima

岩 尾 雄四郎* 玉 田 文 吾**

Yushiro IWAO Bungo TAMADA

山 崎 孝 成**

Takanari YAMASAKI

Abstract

After heavy rainfall, debris flow induced by flash water took 21 lives at the Harihara river district, Southern Kyushu of Japan, in the midnight of the 10th July 1997. Field investigation, in-situ survey, electrical prospecting, hydro-geological analysis were conducted to find out the essential reason and developed process. Fundamental source behind this disaster was deduced to the hidden fault weakening by confined water consequently. Moving soil mass on down-slope into the agricultural pond had caused flash water and the combined flash flood with soil mass flow acted like debris hydraulic jumps. Conclusions on the sequential processes were drawn as partial failure at the fault, failed material dam or small lake formation, increase in pressure behind, burst of the dammed lake, induced flow of debris and progressive slope failure. Flash water mixed debris hydraulic jumps on the area had devastated the invaluable human lives, orange fields and farmer housings.

キーワード：斜面崩壊、扇状地、堰き止め湖、土石流、フラッシュウォーター、発生プロセス

1. はじめに

平成9年7月10日午前0時50分頃、鹿児島県出水市の針原地区をフラッシュウォーターと土石流が襲った。ミカン農地や人家が呑み込まれ、死者21名を出す惨事となった。約1km上流の斜面で発生した山腹崩壊が直接の原因で、ため池や下流の完成間近な砂防ダムを乗り越えている(図-1)。土や石を含まない泥流は八代海付近まで及んでいた。九州南部では活発な梅雨前線のため、数日前より大量の降雨があった。出水市では特に7月9日の降雨量が275mm¹⁾に達し、その後の降雨が一段落した後で大災害が発生している。

針原川は土石流危険渓流に指定されていたが、想定外の山腹崩壊が財産だけでなく多くの人命を犠牲にした。このような大災害の発生プロセスを明らかにすることの意義は防災計画・対策上極めて大きいと考え、客観的事実や報道の内容から総合的に検証した。

2. 地形・地質概要

鹿児島県西北部に位置する出水市は、熊本県との県境にある標高687.3mの矢筈岳から南西に延びる山岳・丘陵地域と八代海に面した沖積平野から成っている。災害は標高300m付近から起伏の緩やかな丘陵地が広が

図-1 被災の概念図

* 佐賀大学 理工学部
** 西日本工業大学 工学部
*** 国土防災技術(株) 技術本部

り、その開析された谷で発生した。針原川の上流の河川縦断勾配は標高 50 m 付近まで急であるが、それより先は段丘性の丘陵地の先に扇状地を形成し、その先端では八代海に小規模な三角州的な平地を形成している。矢筈岳は更新世の輝石安山岩質の火山砕屑岩類が底部に分布し、それを同質の溶岩が覆う²⁾とされている。崩壊凹地の延伸方向はほぼ東西であり、針原川下流の西方には同じ方向の顕著な谷が存在する。それ以外では NE-SW 性のリニアメントらしきものがこの一帯に数本考えられるが、顕著なものではない。水俣南断層群の方向はこのリニアメントに近似的であるが、崩壊凹地の延伸方向、西方の谷の方向、小断層群の方向は何れも一致しない³⁾。

3. 現地調査

3.1 山腹崩壊と災害

針原川の標高 100 m 付近においてその右岸側斜面が標高 190 m 付近まで、幅約 70-80 m にわたって圈谷状に崩壊していた (写真-1, 2)。針原川右岸の崩壊した凹地 (図-1) の縦断面はノの字状であり (図-2)、標高約 100-190 m の範囲である。崩壊凹地の底面の形状は、上部は浅い V 字形、標高 150 m 付近の中部は広い U 字形、更に下部では U-V 字形となり標高 100 m 付

近では僅かに崩壊しているだけである (図-3)。崩壊凹地の縦断面方向は針原川本流と約 30° の角度をなしていた。崩壊凹地の右側は人頭大から径 1 m 前後の礫を含む風化土であり、地表から深度 20 m 程度の風化度は深部よりも大きく進み、境界部からは盛んな湧水が認めら

写真-2 崩壊凹地と複数の断層が存在する場所 (手前の人の脇)

写真-1 飛行機から見た崩壊凹地と土石流の拡散域

図-2 崩壊凹地の縦断面

図-3 崩壊凹地の横断面

れた。さらに深部は比較的新鮮な自破砕岩であった。左岸側は風化した火山碎屑岩（自破砕岩）と半風化の溶岩が分布しているが、比較的堅固で風化度において対象的な差が見られた。崩壊凹地の左岸側の崩壊面には堅固と思われる溶岩が板状に露出しており、その面の傾斜角は約 $50-60^{\circ}$ である。この面には複数の断層面が認められた（写真-3）。崩壊地の右岸側や頭部では比較的風化の弱い自破砕岩を強引に引きちぎったと思える破壊面もあった。崩壊地から針原川に合流した土石流は左岸側で高い位置まで堆積していた。含水比の高い粘土に大小の礫や樹木が混乱し、巨礫には新鮮な破断面の生じているものもあった。農業用ため池が針原川の途中に存在し、その直下には左岸側から地形的に張り出していたそうであるが、その張り出しを乗り越えた土石流の先端部は終息し、人頭大の礫が濃集して舌状に堆積していた。

土石流の駆け抜けた針原川河床には破壊した巨礫、生の樹木片が赤茶けた粘土や砂礫とともに散乱していたが、損傷を受けていない樹木（ねむ、カシ、杉）も鎮座していた（写真-4）。完成間近であった砂防ダムは土砂で満杯になり、両端から土石流が越流している事を伺わせたが、それより5-8m程高い位置では草本や樹木がフラッシュウォーターで激しく洗われた痕跡が認められた（写真-5）。砂防ダムの右岸側上部は破損されていた。砂防ダムの直下には副ダムが構築されていたそうだが、その一部は集落の中程まで運搬されていた。砂防ダムより下流側では、土石流によって激しく破壊された家屋や果樹と堆積物が認められると同時にその外側にはフラッシュウォーターによる自動車の転倒等⁹⁾や泥水の飛散跡が認められた（写真-5）。針原川の崩壊部分の上流側約100mの範囲では、樹木の約5mの高さの位置に流下物の付着が見られた。その後、この一帯の樹木は急速に枯死していった。これは崩壊によって2次的に形成された極く小規模な堰止め湖の存在を示すと考えられる。

3.2 崩壊面

崩壊凹地の左岸側には凸状の明瞭な不連続面が存在し（写真-2）、不連続面は玉葱状風化のある自破砕岩部分であり、その部分には多くの断層面が確認された。明瞭な鏡肌が認められ（写真-3）、粘土にはほぼ水平な条線が何れにも確認された。走向 $N 60-70^{\circ} E$ 、傾斜 $55-70^{\circ} NW$ であった。規模的には小さいがこの場所に集中しており、他の場所とは異なっていた。これらの小断層を誘起させる主断層の存在を調査したが確認出来なかった。崩壊凹地の底部には傾斜角が $30-40^{\circ}$ と低角度のものが2ヶで認められた。ため池の脇には地形的張り出しがあるが、そこの安山岩質自破砕岩に見られた断層は $N 60^{\circ} W$ 、 $70^{\circ} NE$ であり、崩壊凹地の断層とは走向・傾斜が異なっていた。

写真-3 横ずれの条線を記録する断層面

写真-4 鎮座する樹木はほとんど無損傷

写真-5 フラッシュウォーターで激しく洗われた砂防ダム脇の斜面

4. 解析

4.1 土質

崩壊地や針原川の河床で採取した土のコンシステンシーは、液性限界が約70%、塑性限界が約40%であるが、断層粘土は液性限界が高い⁹⁾。

4.2 地形的諸元⁹⁾

崩壊から土石流、フラッシュウォーター発生に至るプロセスを総合的に検討する材料として、被災前後の地形図の比較計測から次のように積算された。

崩壊土量：標高 100 m から 190 m までの範囲で概算すると、約 15 m^3 である。

崩壊土の厚さ：標高 14.0 m 付近において最大で、厚さ約 40 m。

ため池と崩壊地の距離：約 160 m。

従前の溪床堆積砂礫：ボーリングの岩盤深度からの概算で約 3 万 m^3 である。ため池の貯留容量：深度 3 m として $1 \text{ 万 } 6000 \text{ m}^3$ 、深度 4 m として 2 万 m^3 、である。

堰止め湖の貯留容量：水深 3 m で 500 m^3 、4 m で 1200 m^3 、5 m で 2300 m^3 、6 m で 3000 m^3 、7 m で 4100 m^3 である。

堰止め湖の流水痕跡：河床より約 6 m。砂防ダム左岸側の流水痕跡：ダム天端より約 7 m。

砂防ダム地点での集水面積： 0.69 km^2 。集落内の地形傾斜：約 3 度。

不確定な諸元として、10 日午前 0 時 45 分の直前に砂防ダムに土砂で満たされていたか否か、あるいは湛水で満たされていたか否か、災害発生時点で砂防ダムの下流に越流した土砂量、その後の降雨で夜が明けた時点までに越流した土砂量については判明しなかった。

4.3 流出解析

出水消防署で観測された降雨量をもとにして、堰止め湖が形成された地点、砂防ダムの地点での流出量予測を中安の方法⁵⁾で行った。これは流域を等流達時間線で分割し、降雨の地理的分布や流域形状の影響を考慮しながら時間的な流出量を求める手法である。9 日午後 5 時頃、針原川水系の農業用水路からは溢れる程の水が撮影されているが、当時の予測水量は約 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ である。基底流量は 1 km^2 当たり概算 $0.002\text{--}0.03 \text{ m}^3/\text{s}$ として $0.0014\text{--}0.02 \text{ m}^3/\text{s}$ と算定される (図-4)。しかし下記の証言によると、災害発生前には $0.2 \text{ m}^3/\text{s}\text{--}1.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度の流量があったとも推定される。

4.4 証言的記録

新聞やテレビで多くの人が被災前後の状況について説明している。また、現地の工事関係者の発言もある。そ

の主なものを示す。

9 日午後 11 時から午前 0 時にかけて多くの人が、「ゴロゴロ」という大きな音を聞いている。「大きな音」、「地滑りのような音」、「岩が崩れるような音」、「岩がぶつかりあう音」と表現しており、しかも 1 回ではなく何度も聞いたと話している。この音が何を示すかは判明しないが、集落の上流域では岩を含む土砂の移動が被災の 1-2 時間前には既に何度も起きている事を示している。また、「川を流れる石の音がこれまで聞いたことのないガタガタというテンポが早い大きな音だった」との発言もある。増水時の掃流による巨礫の衝突音であろう。被災した生存者は次のように述べている。「ドーンという音とともに目の前が真っ暗になった。何も分からない状態で土砂に流された」、「ゴーという音がした。間髪を入れずに泥水が、ドーンと壁を突き破って寝室を駆け抜けていった」、「ゴーという音がして何秒もたたないうちに土砂が飛び込んできた。胸までつかりながら避難した」、「息が詰まり、もうおしまいだと思った」などである。また、自宅ごと 300 m 流され九死に一生を得た人もいる。これは転倒した無傷の自動車とともにフラッシュウォータの発生を示唆していると考えられる。9 日午後 4 時頃「針原川沿いの岸を洗い始めた」、「浸水を防ぐため土のうを積んだ」、9 時すぎ「夕方と比べると針原川の水位は下がっていた」、11 時頃は「水が減っているね」、11 時半頃「さほど増えていなかった」と述べている。過去に現地で工事に関わった業者は、「崩壊凹地の頭部辺りに、等高線沿いの亀裂が数本存在し、植生には段差が望遠されていた」と話している。確認は出来ないが、1997 年の北薩地方の地震で発生した可能性もある。

5. 予測計算

5.1 土石流の規模予測

今回の災害を土石流として発生規模についての予測を試みた。100 年確率日雨量は概算推定値として $500 \text{ mm}/\text{日}$ 、流域面積は当該斜面と地下水の浸透可能域まで含めて 0.14 km^2 、空隙率 = 0.4、容積土砂濃度 = 0.54、流出補正係数 = 0.5 等として、運搬可能土砂量 (Vec) を予測した^{5,6,7,8)} 結果は約 $180,000 \text{ m}^3$ である。ちなみに実際の日雨量 (275 mm) では、Vec = 約 $100,000 \text{ m}^3$ となる。

一方、土石流の流下延長については約 600 m と予測された。ちなみに $Q_1 = 100,000 \text{ m}^3$ の場合、 $L = 466 \text{ m}$ となる。求められた崩壊土砂量は約 15 万 m^3 であり、大略的には予測値に近い値に収まっている。

5.2 土石流の容積土砂濃度

土石流とは水と土砂の混合物の流体であるが、この流体内の土砂の量 (容積濃度) が大きいほど、破壊力が大きいとされている。一般的には 30% 程度の土砂容積濃

図-4 堰き止め湖での流出量予測

度を含んで、土石が集合運搬されているものが土石流といわれている。これに対し、土砂の流出が流水による各個運搬の状態である場合は掃流である。崩壊土砂量は約15万 m^3 であり、従前の溪床堆積砂礫はボーリングによる岩盤深度から推定すると約3万 m^3 である。これに対して溜め池の貯留容量は約2万 m^3 、堰止め湖も最大4100 m^3 であり、土石流化するには水の量が少なすぎる。

6. 考察

山腹崩壊が災害の直接的原因である事は疑いの余地が無い。しかし、崩壊の素因と誘因、崩壊の様式、崩壊から災害に至る過程、物的・人的被害の発生様式については謎が多い。特に多くの人が最初に確認した7月10日朝の災害現場は、実際の災害発生後に大量の降雨があり、大量の泥水が流下した後の姿である。

崩壊に関しては、当該地点の地質に大きな不均質性・不連続性が存在した事が大きいと考える。安山岩質の自破碎岩が分布し、上下に岩相が異なっている。上部は玉葱状風化が進行しているが、下部では余り顕著ではない。また、崩壊凹地の左岸側に集中する小断層群の存在が極めて大きいと考える。この断層の存在を見逃した報告もあるが、崩壊地の断層の持つ意義は大きい。小断層群は水俣南断層群としてその存在が推定されていた断層群⁵⁾の一部と関連していると思われる。多くの小断層面が針原川と斜交する方向で雁行状に分布しており、一部は緩傾斜であるが殆どは60-70°の傾斜を示している。鏡肌が確認され、条線は横ずれを示している。崩壊前に既に横ずれ運動が発生しており、それが小断層群の条線に残っていると考えられる。この断層を挟んで、自破碎岩の分布高度は数10mの落差があり、横ずれ運動だけでなく鉛直的運動も存在したと思われる。

崩壊地では小断層部分や、崩壊面における小断層の延長部分から湧水が確認され、9月1日段階でもある程度の湧水が認められる。断層という不連続面に被圧性の間隙水圧が働き、揚圧力が生じていた事は疑いないであろう。

不連続面における豊富な地下水の存在、被災の1-2時間前からの異音発生の証言から、崩壊様式は、地滑り性崩壊と考える。凸状の不連続面をすべり台として崩壊したものであり、崩壊地の右岸側や頭部では比較的風化の弱い自破碎岩を強引に引きちぎって崩壊したと考える。山腹斜面の崩壊が直接的な原因であるが、集落が被災するまでのプロセスは上記の観察事項や積算値から図-5 a) - f) の過程を経たと総合的に推定された。

9日午後11時以降、多くの人がゴロゴロという大きな音を何度も聞いている。この時間帯の針原川での流出量は基底流量に近いと解析されており、流水で礫の衝突

する音とは考えられない。音が大きく、断続的であるので崩壊が断続的に発生していたと考える。この時既に堰止め湖が形成された可能性が高く、針原川の流量が極めて水量であったとの証言と調和的である。この時の流量

a) 断層付近の斜面に弱面が出現

b) 斜面の一部が崩壊し堰き止め湖を形成

c) 溜め池、砂防ダムの湛水の可能性

d) 堰き止め湖が決壊し、砂防ダムと溜め池に土石流突入

e) 砂防ダムを土石流が満たしてフラッシュウオータを発生させ、ダムの一部を壊して下流へ

f) 被災後の降雨で斜面は完全に崩壊し、一部の樹木は各所に鎮座

図-5 被災に至るまでの推定経過

は基底流量に近く、推定湛水量から満水には1-2時間を要したと思われる。何時、越流し、あるいは決壊したかは明瞭ではないが、一部崩壊した土砂の裾部を侵食し、ため池に土砂を流入させ始めたであろう。そして0時50分少し前に、崩壊地全域の大規模崩壊、あるいは崩壊土砂の大半が滑動を開始したと考える。

この大規模土砂移動はため池に飛び込み、あるいは乗り越えて突入し、水を得て土石流に化したと考える。土石流の一部は針原川左岸の地形的張り出しを乗り越えてミカン農地内で終息している。15万m³の崩壊土砂に対してため池の最大2万m³の貯留水は土石流化するには少なく、全体が土石流化したとは考えにくい。砂防ダムに湛水していたか否かについての確証はない。しかしフラッシュウオータが発生した事はダム脇の流水痕跡で明らかである。この段階で砂防ダムを乗り越えて土石流が集落を襲ったか否かについては確認出来ない。砂防ダムが土砂で満たされていたか否か、水が湛水していたか否かも判明しない。湛水していたならば、土石流の一部が突入することによって、フラッシュウオータが砂防ダム脇を容易に乗り越えたであろう。

10日午前0時50分の災害発生後、救援隊が泥水の中で救難搜索活動を行っている。午前3時台から9時までに計85mmの降雨が記録されているが、この降雨による泥水であろう。そして午後0時台から11日午前5時までに計191mmの降雨が記録されているが、救援隊の活動が行われていたこの時間帯に土石流やフラッシュウオータが再度発生した可能性は無い。砂防ダムより下流に流出した土砂量の推定が出来ないが、10日午前0時50分段階では比較的になかったと想像する。堆積土砂が顕著なのは砂防ダム下約100mであり、家屋の損傷は同じく約300mの範囲である。砂防ダムで大半の土砂を阻止したと考える。

10日午前0時50分に先立ち、崩壊が発生して一挙に土石流下したとの作業仮説で検証した場合、9日午後11時以降に聞こえたという断続的な大きな異音、約70%の液性限界に対する当時の自然含水比、崩壊の到達長、ため池の貯留水と土石流の容積土砂濃度、散在する根付き樹木などの点において説明に困難が伴う。

哀悼の言葉と謝辞

本論文をまとめるに当たり、出水市針原地区の被災者の皆様に深く哀悼の念を表明させていただきます。現地調査の便宜や資料提供をして頂いた出水市役所、建設省の江頭毅氏、議論して頂いた九州大学の平野宗夫教授に感謝致します。

引用・参考文献

- 1) 出水市消防署：降雨量資料、1997
- 2) 鹿児島県：鹿児島県地質図、鹿児島県、1991
- 3) 岩尾雄四郎・花村修・藤井照久・安藤進一：鹿児島県出水市針原川地域における土石流災害の地質的素因（投稿中）、地すべり
- 4) 玉田文吾・岩尾雄四郎・吉永憲弘：鹿児島県出水市の土石流について（速報）、地すべり、Vol. 34, No. 2, 1997
- 5) 岩尾雄四郎・泉山亮・山崎孝成：出水市針原地区の土石流災害、「自然災害における地盤の防災および構造物の復旧と補強」シンポジウム論文集、pp. 325-334, 1997
- 6) Yushiro Iwao, Takanari Yamasaki, Osamu Hanamura and Shinnichi Ando Process of slope failure due to flash water and debris flow at Southern Japan in 1997 Proceedings of 8th International Congress of IAEG Vol. 3, pp. 2059-2064, 1989
- 7) 武居有恒監修：地すべり・崩壊・土石流、鹿島出版会、1988
- 8) 池谷浩：土石流災害調査法、山海堂、1980
- 9) 森脇寛・佐藤照子・千葉長：1997年7月鹿児島県出水市針原川土石流災害調査報告、主要災害調査第35号、pp. 1-69、科学技術庁防災科学技術研究所、1998
- 10) 中澤努：出水市土石流災害の概要と周辺の地質、地質ニュース、No. 517, pp. 42-47, 1997
- 11) 田中雄作：出水市土石流災害発生要因への水文学的アプローチ、地質ニュース、No. 517, pp. 48-55, 1997
- 12) 1988年7月10日以降の佐賀新聞、毎日新聞、日本経済新聞、南日本新聞の各記事、NHK、MBCの放送
(原稿受理日 平成10年12月21日)

融雪に起因した表層崩壊発生予測モデルの構築と再現計算

「地すべり」Vol. 36, No. 3 (通巻第 139 号) pp. 76~84, 1999 年 (平成 11 年) 12 月

植村昌一, 平松晋也, 井良沢道也

融雪に起因して発生する表層崩壊現象に着目し, 崩壊に至るまでの全過程 (融雪, 浸透, 斜面の不安定化) を忠実に再現した「融雪崩壊モデル」を構築した。本モデルを 1997 年の融雪期に新潟県湯ノ谷村で発生した表層崩壊に適用した結果, 当時の積雪分布や斜面の不安定化の状況を良好に再現していることが確認された。

鹿児島県出水市針原川地域における扇状地災害の発生プロセス

「地すべり」Vol. 36, No. 3 (通巻第 139 号) pp. 85~90, 1999 年 (平成 11 年) 12 月

岩尾雄四郎, 玉田文吾, 山崎孝成

鹿児島県出水市で発生した土石流災害の発生プロセスを検証した。素因としての断層の存在, 被災後に行われた測量, ボーリング結果やマスコミで報じられた時間的経過を基にして, 流出解析や土石流の予測式での検討を行った。崩壊が一挙に土石流化したとは考えにくい状況の証拠の存在する中, 被災までのプロセスを最も合理的に解釈する研究である。斜面崩壊は断層の存在が素因であり, 斜面崩壊が堰き止め湖を形成した可能性, 段階的な土石流への発展, フラッシュウォーターの発生, 深夜の被災から夜明けまでの降雨による樹木や土砂流出が発生プロセスであるとの結論に到達した。

大阪層群砂質土の液状化挙動

「地すべり」Vol. 36, No. 3 (通巻第 139 号) pp. 91~98, 1999 年 (平成 11 年) 12 月

岡田康彦, 佐々恭二, 福岡 浩

大阪層群砂質土に対して, 100~630 kPa の応力範囲で非排水条件において, 歪み制御三軸圧縮試験および, 速度制御リングせん断試験を行った。正規圧密試料に対するリングせん断試験の有効応力経路は構造破壊挙動を示し, 構造破壊時の応力点は応力平面上で原点を通る直線 (構造破壊線) に乗った。また, リングせん断試験から得られた Steady state line は, 三軸圧縮試験よりも低応力側に位置したが, これを粒子破砕が完全に終了した状態で現れる Ultimate steady state line であるとした。

崩壊型土石流の流下に伴う地盤の振動特性—小谷村蒲原沢土石流—

「地すべり」Vol. 36, No. 3 (通巻第 139 号) pp. 99~107, 1999 年 (平成 11 年) 12 月

森脇 寛

1996 年 12 月 6 日, 長野県小谷村の蒲原沢上流で発生した山腹崩壊の土砂が土石流化して流下した。そのため, 下流域で前年度の災害復旧工事に従事していた人々が被災し, 多数の死者をだした。同じ時刻ころに約 5.7 km 南南東に設置していた地震計に震動波形が記録されていた。本論文ではその波形を種々の面から検討した結果, 崩壊土砂が渓流を流下する際に生じた地盤の震動と推定した。今回の地盤震動は地震エネルギーに換算するとマグニチュード M 0.05 に匹敵する値である。さらに FFT 解析により震動記録の立ち上がり前から減少するまでのパワースペクトルの変化を時系列的に検討した。その卓越周波数は 1~2 Hz 付近に見られ, 過去に観測された土石流による震動に比べて低周波数であることがわかった。また, 既往の崩壊事例調査から崩壊土量とその流下が引き起こす振動エネルギー (マグニチュード M) の間には一定の比例関係が存在し, 今回の土石流もその関係式上にはほぼ位置する事を示した。

中央ネパールにおける地形及び地質, 地質構造と斜面変動

「地すべり」Vol. 36, No. 3 (通巻第 139 号) pp. 108~116, 1999 年 (平成 11 年) 12 月

阿部真郎, 檜垣大助, Vishnu DANGOL

ネパールでは, 崩壊, 地すべりなどの斜面災害が多発している。中央ネパールの低ヒマラヤ帯におけるロシ川, スンコシ川, タマコシ川沿岸の斜面変動を調査した結果, これらの斜面災害が, ヒマラヤ山脈形成に伴う主中央衝上断層 (MCT) や岩盤特性など地質, 地質構造と, 更には第四紀以降の激しい地盤の隆起と河川の下刻作用などの地形要因, また風化作用などと密接に関連して発生していることが明らかになった。