

# 高精度 DEM を用いた崩壊地からの土砂移動特性の把握

岸本 昌之

近畿地方整備局 六甲砂防事務所 調査課 (〒658-0052 神戸市東灘区住吉東町3丁目13-15)

本報告は、2014年8月の豪雨による崩壊発生前後と発生から2年後の3時期の航空レーザ計測データを用いて、六甲山系における近年の土砂移動特性を把握したものである。規模の大きい崩壊地を、崩壊区間、流下区間、堆積区間に分け、標高差分値からそれぞれの変動状況を見ると、崩壊深の方が侵食深よりも大きい、崩壊直下流の砂防堰堤では崩壊土砂の多くが捕捉されている、といった特徴が確認できた。崩壊発生直後と2年後の差分解析結果からは、流域内で生産された土砂が、その後下流へと移動している傾向がみられた。また、六甲山系の特徴的な土砂移動現象として、平成7年兵庫県南部地震による崩壊で発生した土砂が、2014年の豪雨で大きく侵食され、下流へ再移動している事例が確認された。

キーワード 航空レーザ計測, 表層崩壊, 差分解析, 土砂移動特性, 地震による崩壊

## 1. はじめに

六甲山系では、2013年以降の台風等による降雨などにより、急峻な山腹斜面で崩壊が随所で発生した。なかでも、平成26年台風11号による豪雨(以下、「2014豪雨」とする)は時間雨量と総雨量がともに多く、比較的規模の大きい崩壊が多発するとともに、土石流が発生するなど崩壊地からの土砂移動が多数確認されている。

ここでは、六甲山系において2014豪雨で発生した崩壊地を対象に、崩壊発生前後、及び数年経過した後の航空レーザ計測による高精度数値地形モデル(DEM: Digital Elevation Model)を用いた解析を実施し、崩壊による土砂移動特性、崩壊の分布状況、崩壊発生後の土砂移動状況、六甲山系に特徴的な土砂移動についてとりまとめた結果を報告する。

## 2. 航空レーザ計測の実施

六甲山系で、2011年、2014豪雨直後、2016年の3時期に航空レーザ計測および空中写真撮影を実施した(表-1)。2016年の計測では、10点の調整用基準点と7箇所のキャリブレーションサイトを設置し、標高誤差および水平位置誤差を最小化した。計測データから地盤標高データを作成するためのフィルタリング処理では、処理データから地形表現図を作成し、砂防ダム等の構造物の欠損や植生の残存による精度の低下を防止した(図-1)。また、計測時期による水平位置ずれを確認するために、DEMからレタレーション画像(詳細な標高差で繰り返し色を

変化させた、等高線のような画像)を作成し、2時期の画像を重ね合わせることにより、その影響の有無を確認した(図-2)。その結果、水平位置ずれにより発生する干渉縞は見られず、水平誤差は極めて小さいことが分かった。

表-1 使用した空中写真および航空レーザ計測データ

使用データ		撮影時期	仕様
空中写真データ	崩壊前	2011.11.26, 12.14	地上解像度: 50cm以下
	崩壊直後	2014.9.6~9.10	地上解像度: 50cm以下
	崩壊後	2016.8.11	地上解像度: 25cm以下
航空レーザ計測データ	崩壊前	2011.11.27~2012.1.6	1mDEM
	崩壊直後	2014.9.6~9.10	1mDEM
	崩壊後	2016.10.24~11.2	1mDEM

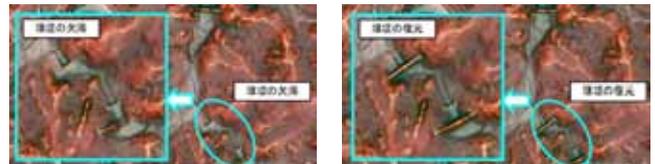
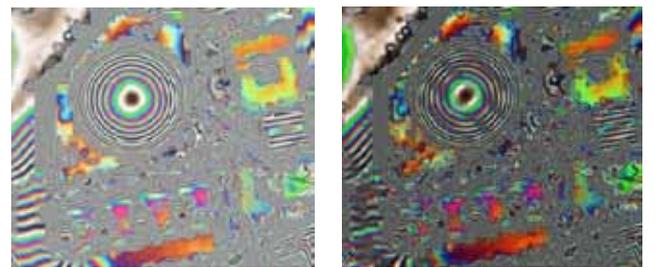


図-1 地形表現図を用いたフィルタリング処理の確認と修正



2 時期のレタレーション画像の重ね合せ  
2 時期の水平誤差による干渉縞は見られない  
X-Y 方向にそれぞれ 1.0m シフトした画像  
干渉縞が発生している

図-2 2 時期の水平誤差の確認

### 3. 航空レーザ計測データを活用した崩壊地判読

2014 豪雨前後に実施した航空レーザ計測データを用いて、地形表現図作成と差分解析を実施した。その結果を過去に実施された空中写真判読結果と比較対照することにより、崩壊地を、斜面が崩れた区間（崩壊区間）、崩れた土砂が流下した区間（流下区間）、流下した土砂が堆積した区間（堆積区間）の3つに分類し、その範囲を特定した（図-3）。

崩壊地およびその周辺の標高差分図を詳細に見ると、崩壊地内では、明瞭な地盤標高の低下がみられる一方で、その周辺部に地盤が上下する範囲が不規則に表れていた。これらの箇所は、オルソ画像で見ると樹林に覆われていることから、地盤形状は大きく変化しておらず、樹木の繁茂によってレーザが遮蔽された影響で生じる誤差の影響を受けている可能性がある。このとき、図-3の範囲内の崩壊地以外の標高差分値の平均値を算出すると約-7cmであった。

この結果から、崩壊地以外の範囲では、正負の誤差は概ね相殺されているが、場所ごとに見ると誤差を有することを考慮し、崩壊地として抽出した範囲内を対象に土砂移動の検討を行うこととした。また、崩壊地と同様に、堰堤の堆砂地も土砂の堆積等が活発で植生の影響を受けにくいため、その範囲を特定して土砂移動の検討対象とした。

### 4. 崩壊による土砂移動特性

崩壊土砂量を崩壊面積規模別に集計すると、崩壊面積が1,000m<sup>2</sup>以上の崩壊地（全259箇所中9箇所（図-4））から生産される土砂量が、全体の30%以上を占めることがわかった。そこで、全体の土砂移動特性に大きく影響すると考えられる1,000m<sup>2</sup>以上の崩壊地に着目し、崩壊前後の高精度DEMを用いて、詳細な土砂移動状況の把握を行った。



図-3 地形表現図と標高差分図を用いた判読結果の修正と分類

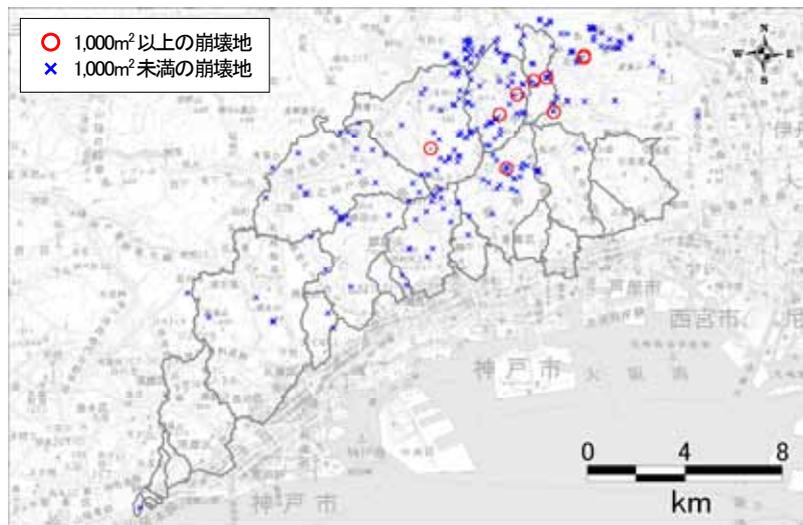


図-4 2014年の豪雨による崩壊地の分布

その結果から、崩壊区間の標高差分値（崩壊深）の方が、流下区間の標高差分値（侵食深）より大きく、崩壊土砂量が侵食土砂量より多い傾向が確認された（図-5）。また、縦断的な土砂収支傾向では、崩壊及び流下区間で生産された土砂が崩壊直下で堆積しているものと、その多くが下流へ流出しているものが確認された。前者は、崩壊直下に砂防堰堤が存在している場合に多く見られ、崩壊土砂を捕捉している様子が確認された（図-6、図-7）。

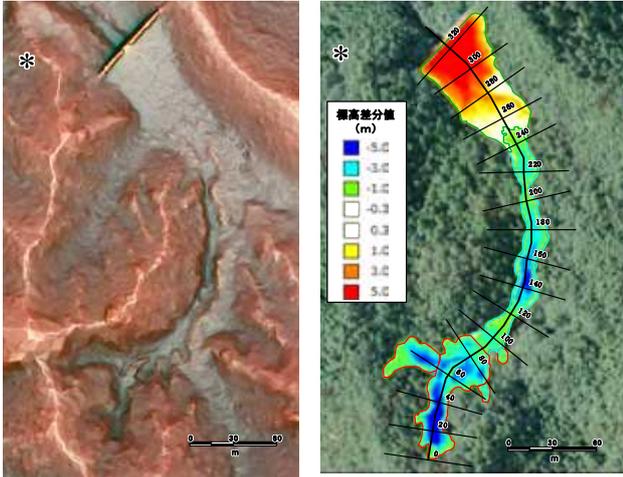


図-5 崩壊地周辺の地形表現図（左）と標高差分図（右）

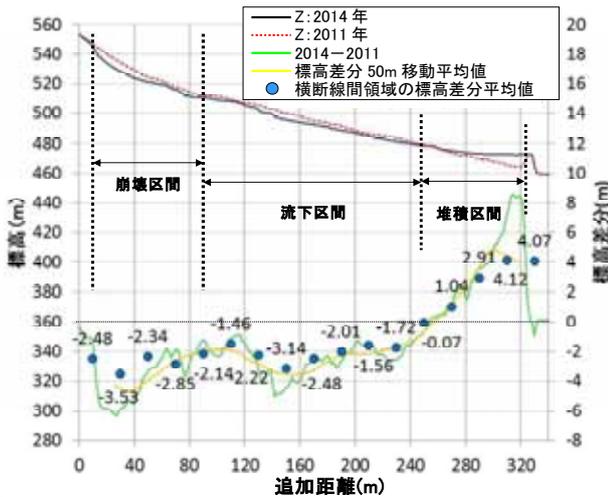


図-6 崩壊地周辺の標高および差分値の縦断面図

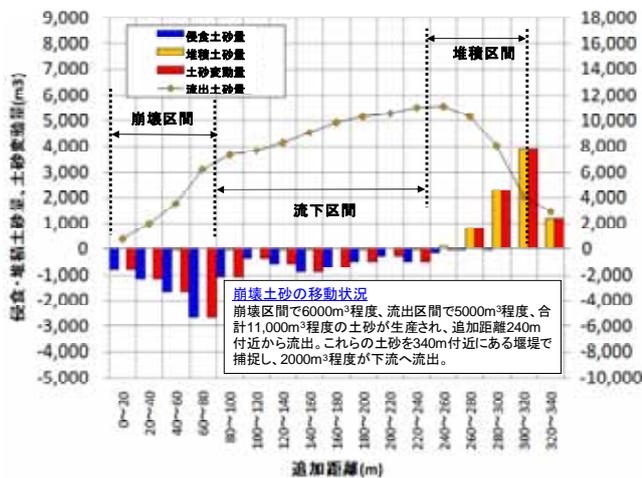


図-7 崩壊地周辺の縦断的な土砂収支傾向

### 5. 流木堆積状況の把握

2014 豪雨では、土砂とともに流木が発生し、堆砂地上に堆積している状況が確認された（図-8）。そこで、航空レーザ計測による3次元点群データを用いて、堆積箇所の縦横断面図を作成すると、堆積した流木の縦横断形状が概ね確認できた（図-9）。縦横断面図から堆積物の輪郭を推定すると、概略の体積を知ることができる。



図-8 堆砂地上に堆積した流木

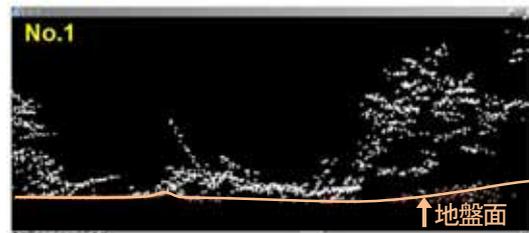
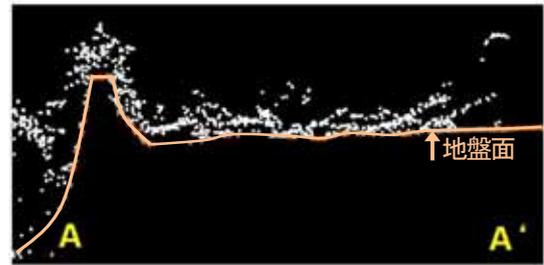


図-9 3次元点群データでみた堆砂地上に堆積した流木

6. 2014 年崩壊発生後の土砂移動状況

2016 年度に実施した空中写真撮影および航空レーザ計測結果を用いて、崩壊地判読と差分解析を行った。その結果、2014 豪雨以降に発生した崩壊は、数が少なく規模も小さいことが分かった。崩壊地と堆砂地は、植生が消失したことにより僅かな土砂の移動変化も把握しやすいことから、標高差分値を流域ごとに集計して土砂移動傾向を確認した。その結果、2011 年から 2014 年崩壊直後は堆積土砂量が多かったのに対し、2014 年崩壊直後から 2016 年にかけては侵食土砂量が多く、多くの流域で土砂が流出する傾向にあることが分かった (図-10)。

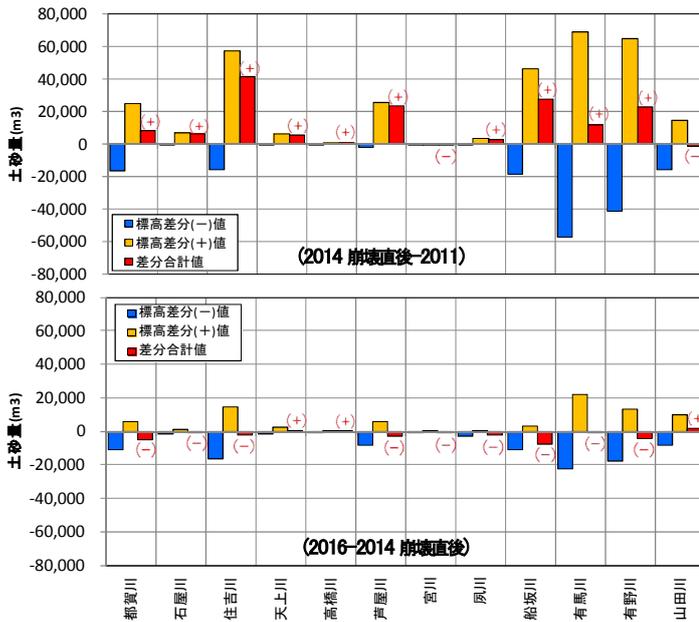


図-10 崩壊前後 (上) と崩壊以降 (下) の標高差分合計値

堆砂地の形状に変化が見られた有馬川流域の白石第二堰堤と白石第三堰堤の堆砂地の標高差分図を図-11 に、それぞれの堰堤堆砂地の縦断形状を図-12 に示す。

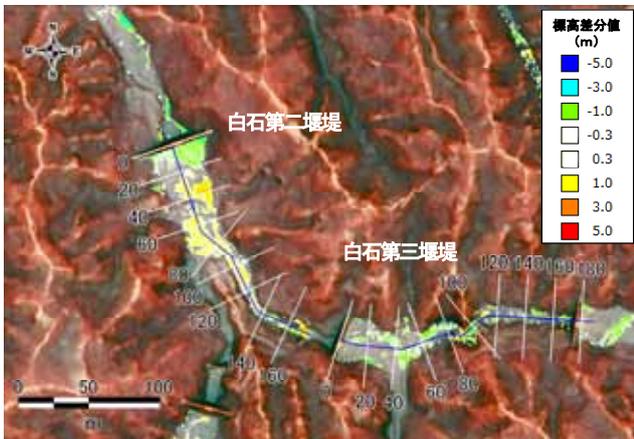


図-11 2014 豪雨以降の堰堤堆砂地の標高差分図 (2016-2014) (有馬川流域 白石第二堰堤と白石第三堰堤)

上流に位置する白石第三堰堤では、2014 豪雨で堆積した土砂の一部が 0.5m 程度侵食されている。一方、下流の白石第二堰堤では、0.5m~1.0m 程度の堆積が見られる。差分図および縦横断面図から、2014 豪雨時に捕捉された土砂が侵食され、下流に流出している状況が分かる。

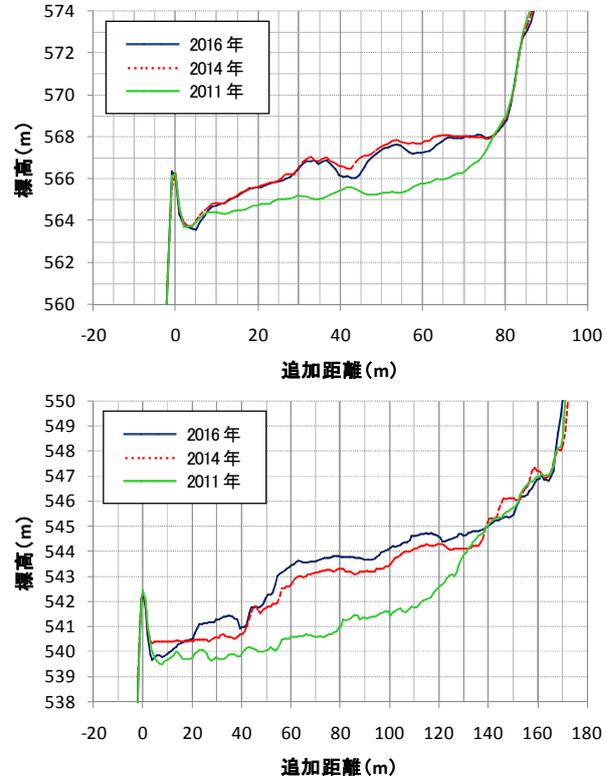


図-12 2014 豪雨以降の堰堤堆砂地の縦断変化 (有馬川流域 白石第三堰堤 (上) と白石第二堰堤 (下))

7. 地震による崩壊残土の再移動

武庫川水系仁川流域の崩壊事例を確認すると、流下区間の上部が平成 7 年兵庫県南部地震により崩壊した箇所であった。地震後に実施された崩壊地調査のスケッチによると、崩壊下部約 25m にわたり、崩壊残土が 0.5m~1.0m 程度堆積していたことが記録されていた。

これに対し、2014 年と 2011 年の縦断図と標高差分図を確認すると、地震による崩壊残土が堆積していたと考えられる範囲付近は 2~3m 程度の侵食が確認された (図-14, 図-16)。また、その下流には過去の豪雨などによる流出土砂が溪床に堆積したと推察される範囲が存在し、2014 豪雨時に両岸が侵食され土砂が流出していた。

流出した崩壊土砂の一部は、下流に設置された不透過型砂防堰堤で捕捉された。堆砂地の縦断図を見ると、有効高約 5.0m の不透過型堰堤は 2014 豪雨による崩壊前から堆砂しており、崩壊に伴う土砂流出で最大 3.5m 程度、平均 1.0~2.0m 程度まで堆砂が進行したことが分かる (図-15)。

2014 豪雨による土砂の平面的な変動量を示す図-16 と縦断的に示す図-17 から、崩壊時の土砂の移動特性を推定すると、①崩壊上部 (No. 0~No. 80) で生産された崩壊土砂のうち約 1,740m<sup>3</sup> が流出、②地震による崩壊残土が堆積する区間付近 (No. 80~No. 160) でさらに 4,550 m<sup>3</sup> の土砂が侵食、③残存土砂を除く 6,230 m<sup>3</sup> が下流に流出、④過去の地震による崩壊土砂が溪床に堆積している区間 (No. 160~No. 260) で侵食された土砂約 2,100 m<sup>3</sup> が加わり約 8,210 m<sup>3</sup> の土砂が谷出口 (No. 260) から流出、⑤谷

出口より下流では、不透過型堰堤による捕捉量 2,410 m<sup>3</sup> を含む 3,810 m<sup>3</sup> の土砂が堆積、⑥河道で侵食された 1,130 m<sup>3</sup> を加えた約 5,530 m<sup>3</sup> が下流に流出、といった区間毎の土砂移動変化が生じたと考えられる。

この結果から、谷出口から流出した土砂の約 50%が地震による残土を含む溪床堆積物から生産されたこと、堆砂の進行した不透過型砂防堰堤で土砂の捕捉がみられたことが、当該崩壊の土砂移動特性としてあげられる。

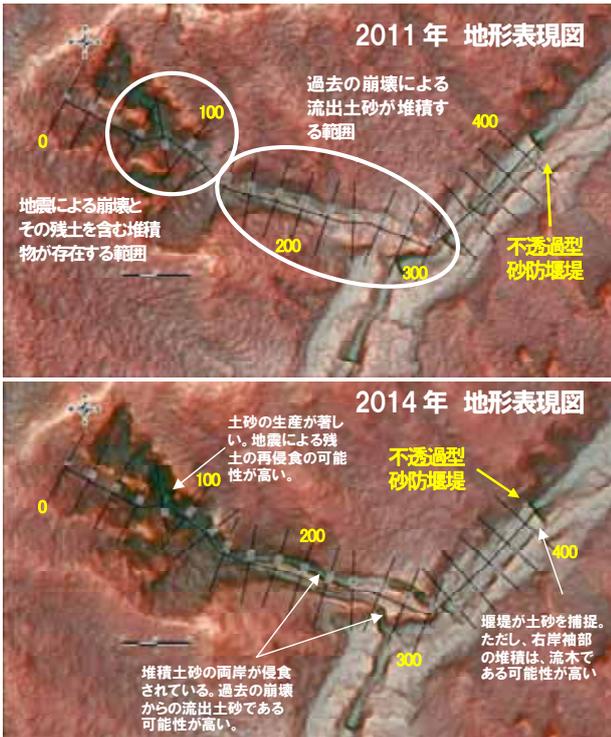


図-13 崩壊発生前後の地形表現図  
(上：崩壊発生前、下：崩壊発生後)

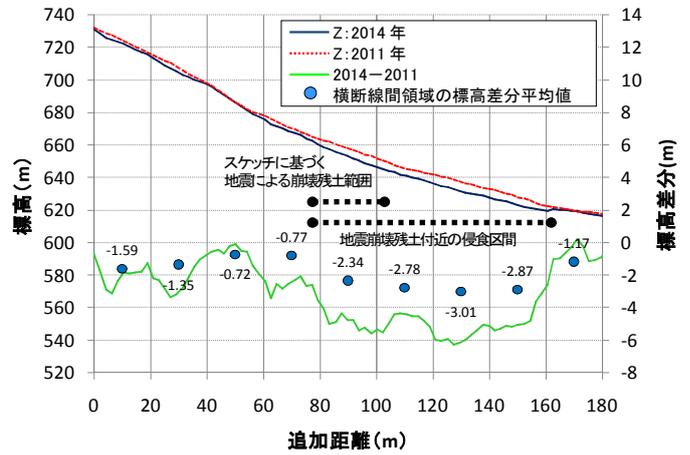


図-14 崩壊上部の縦断形状

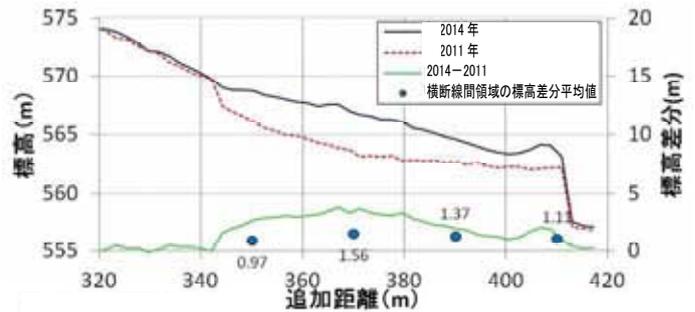


図-15 下流河川に設置された堰堤堆砂地の縦断図

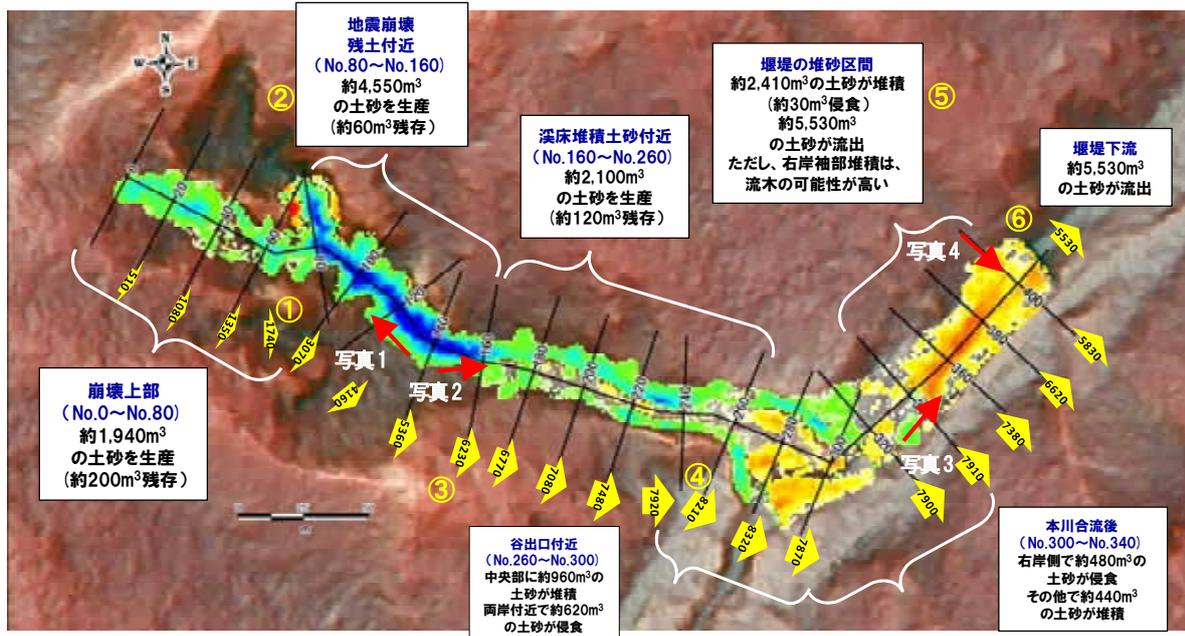


図-16 崩壊による平面的な土砂移動特性

(図中○数字は文中の記述に対応)

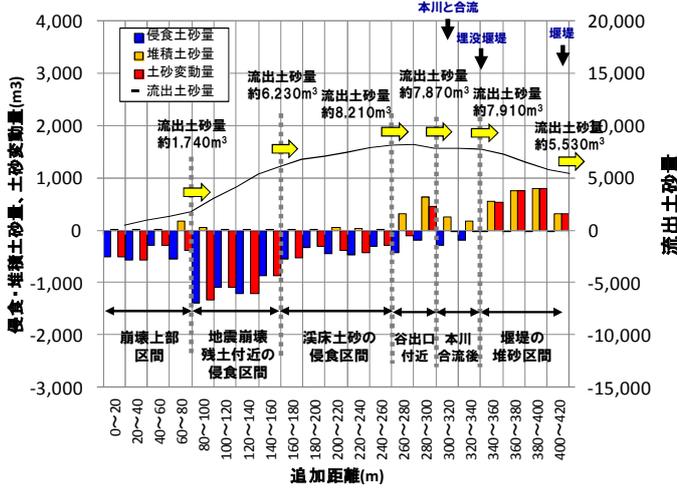


図-17 崩壊による縦断的な土砂移動特性

この結果は、現地調査でも確認されており、数m以上の溪床侵食(写真-1)や、沿岸堆積物の流出(特に左岸側が数m程度侵食)による土砂流出痕跡を見ることができた(写真-2)。さらに、砂防堰堤の堆砂地では、概ね標高差分図が示す堆積域、比較的新しい流出土砂の堆積が確認された(写真-3)。ただし、堆砂地の右岸側袖付近は、流木を多量に含むことも確認された(写真-4)。



写真-1 地震による崩壊残土を含む溪床堆積物の侵食状況



写真-2 溪床堆積土砂の侵食状況



写真-3 下流河川に設置された不透型砂防堰堤堆砂地の状況



写真-4 堰堤右袖の直上流に異常堆積した流木と土砂

## 8. おわりに

本報告で示したように、空中写真判読および航空レーザ計測データの差分解析結果から、崩壊地からの連続的な土砂移動特性を把握することが可能であることが確認された。また、複数時期に航空レーザ計測を行うことで、流域内の土砂の流出・堆積変化の傾向も把握できることが分かった。これらの解析結果は、崩壊による土砂生産の規模や土砂量、土砂移動形態やメカニズムに関する重要な資料になると考えられ、砂防計画における土砂量や崩壊危険度評価、数値シミュレーションの検証材料に活用していくことが期待される。

一方で、解析を進めるにあたって、湛水した堆砂地の堆積形状の把握や、植生に覆われた溪床部からの生産土砂量の算出、堆砂地上に堆積した土砂と流木の区別などの技術的課題も確認されている。このため、航空レーザ計測データの解析技術のさらなる改良と開発、検証を進めていくとともに、今後、現地調査やその他の解析技術を併用して活用性を高めていくことが重要であると考える。