

公益財団法人国土地理協会 第16回学術研究助成

微地形図 (CS 立体図) を用いた
土砂災害潜在危険度評価に関する研究

研究代表者

藤本 将光 立命館大学理工学部

共同研究者

戸田 堅一郎 長野県林業総合センター

宮田 秀介 京都大学防災研究所

山川 陽祐 筑波大学生命環境系

1. はじめに

近年の短時間降雨強度の増加傾向によって、豪雨による土砂災害の被害も甚大となる傾向にある。毎年のように大規模な土砂災害が発生しており、2014年の広島、2017年の九州で発生した災害は記憶に新しい。土砂災害の発生頻度は増加傾向にあるが、山地で発生する斜面崩壊の面積は数%程度であり、斜面崩壊自体は非常に稀な現象である。このため、崩壊が“どこで”発生するのかを予見することが重要であり、また非常に難しい課題でもある。既存の表層崩壊発生予測に関する研究では、過去の斜面崩壊のデータに基づいて、斜面特性や地質などの要因を統計的に解析する手法（鈴木・小橋，1981；大林ら，1999；水田・瀬尾，2001など）が用いられ検討出されてきたが、“どこで”発生するのかという難題の解決には至っていない。

斜面崩壊発生の危険性の評価には、主として地形や地質等に支配される発生場の特徴と崩壊発生の誘因となる地下水流動等の水文的要因を把握する必要がある。近年の観測技術の向上によって航空機からのレーザスキャナを用いた計測技術によって、解像度が1m程度の空間分解能の高い数値標高モデル（DEM：Digital Elevation Model）が広域で取得され、整備されつつある。既存の研究（Derron et al., 2005; 三浦ら，2005；藤本ら，2011）は、解像度1mのDEMを用いた崩壊発生危険個所の評価を行い、DEMの解像度の違いが危険度評価において重要であることが指摘されている。Derron et al. (2005) や三浦ら（2005）は、斜面の勾配や比高などを基にした地形解析によってDEMの解像度が崩壊発生予測に及ぼす影響を検討した。藤本ら（2011）は、水文過程を考慮した斜面安定解析を用いた崩壊発生予測に対するDEMの単位メッシュサイズの妥当性を検証した。これらの研究は高解像度のDEMを用いることによって、地形の再現精度が向上することで、表層崩壊発生箇所の予測精度が向上する可能性があることを示すものである。

土砂災害直後の調査結果から崩壊斜面から大量の湧水が噴出している事例が数多く報告され、崩壊発生に地下水が影響していることが示されてきた（文献）。しかし、地下水流動は表面地形だけでなく基盤構造に支配されるため、地下水の流動形態を把握することが困難であり、様々な手法が検討されてきた。地頭蘭ら（2006）は崩壊の発生に関与する地下水の流動は湧水および湧水の電気伝導度の空間分布特性を用いて把握する方法を提示し、簡便な調査による実態把握の可能性が報告されている。また、仲矢ら（2010, 2011）は1m深地温、藤本ら（2013）は地中音探査手法を用いて、比較的広い範囲において地下水流動が推定できることを示している。

以上のことから、高精度地形データの地形解析と水文調査を組み合わせることで斜面崩壊発生危険度評価における新たな指標を提示できる可能性がある。そこで、本研究では高精度・高密度の地形データを用いた地形解析と湧水の空間分布特性調査に基づく水文情報を得ることで斜面崩壊の潜在的危険度を評価することを目的とする。

2. 調査方法

2.1 調査地

本報告では2つの調査地で行われた結果を示す。1つ目の調査地は京都市に位置する清水寺周辺である。本研究では清水山の山頂（242.2m）を有する尾根筋より西側の清水寺境内および国有林を対象とした。地質は中・古生層の丹波層群の砂岩、泥岩、チャート、大阪層群の砂礫層と粘土の互層からなる。清水寺境内では1972年、1999年に斜面崩壊が発生しており、最近では2013年の台風18号で大小合わせて5か所の斜面崩壊が発生した。また、2015年には小規模崩壊、近隣する大谷本廟の墓地で斜面崩壊が発生した（檀上ら，2014）。

2つ目の調査地は滋賀県南部に位置する不動寺水文試験地である。不動寺水文試験地は、標高599.7mの太神山山頂付近から田代川に流下する支線流域である。地質は田上花崗岩に分類され、大部分は中～粗粒黒雲母花崗岩によって占められる（周琵琶湖花崗岩団体研究グループ，2000）。この花崗岩は、中世代の中期から第三紀の初期にかけて秩父古生層の間に侵入した花崗岩類である。2005-2006年の平均で、年平均気温は11.3℃，月平均気温は8月に最高で22.1℃，1月に最低で0.1℃であった。2004年から2006年の年平均降水量は1587mmであった。不動寺水文試験地においても、2013年の台風18号によって斜面崩壊，土石流の発生が確認されている。なお，不動寺水文試験地では近年の斜面崩壊の報告事例が少ないため，斜面崩壊に関わる湧水の特徴を捉えることでの土砂災害の危険性評価にとどめた。

2.2 調査方法

地形解析は航空レーザ測量によって得られた数値地形モデル（DEM）を用いて微地形図を作成した。微地形図には戸田（2014）が開発した，視覚的に立体的な地形判読が可能である立体図法を用いてCS（Curvature and Slope）立体図を作成した。CS立体図と地質図を用いて地形判読を行った後，湧水調査を行った。湧水の電気伝導度の計測は電気伝導度計（HORIBA社，ES-51）を用いて現地において行った。湧水量が極めて少なく，電気伝導の計測に必要な水量が確保できなかった地点は湧水点の位置のみの把握にとどめた。不動寺水文試験地においては既存の湧水点観測結果（Fujimoto et al., 2008 ; Fujimoto et al., 2011 ; Asano and Uchia, 2010 ; Uchida and Asano, 2010）も対象とした。

3. 結果と考察

3.1 堆積岩地域における湧水，土砂災害地の特徴

図-1に清水寺周辺における湧水，土砂災害地の調査結果を地形図およびCS立体図上に示した。土砂災害地は，1972年，1999年，2013年に豪雨によって発生した斜面崩壊であり，全6箇所である。現地踏査により湧水発生位置（写真-1）を確認し，踏査時に湧水があった場所に○印，谷頭部で湧水がない場合は×印を付けた。湧水箇所は41箇所，湧水のない谷頭部は24箇所であった。踏査図にCS立体図を使用することで，従来の等高線による地形図では判読が難しい微細な谷地形や谷頭部を判読できた。

湧水に関わる地形的特徴である地形の傾斜角を検討した（図-2，表-1）。ここでは，(c) ESRI Japan発行の10mメッシュDEMを使用し，ArcGIS10を用いて傾斜角を計算。斜面崩壊箇所の最上部，湧水確認位置の傾斜角の値を集計した。斜面崩壊は20°以上で発生しているが，20-25°の占める割合が大きく，傾斜角との明瞭な関係は認められなかった。また，湧水の発生する傾斜角は大きなばらつきを示した。湧水のない谷頭部の傾斜角も同様にばらつきを示し，湧水の発生と傾斜角にも関連性は認められなかった。

図-3では，産業技術総合研究所地質調査総合センター発行の地質図「京都東南部」上に斜面崩壊箇所の最上部，湧水確認位置をトレースし，斜面崩壊および湧水と地質の関係を集計した（表-2）。斜面崩壊の発生箇所は少ないが，半数の3か所がチャートの地質であった。湧水は半数以上が，Ouの砂，礫，および泥海底粘土層を含む地質で確認されており，地質と湧水の発生に関係性があることが認められた。

地形指標である傾斜角や地質と湧水，土砂災害の関連性を検討してきたが，傾斜だけでなく，湧水の発生には，集水性を支配する斜面の地形形状を考慮する必要がある。斜面の地形形状は，

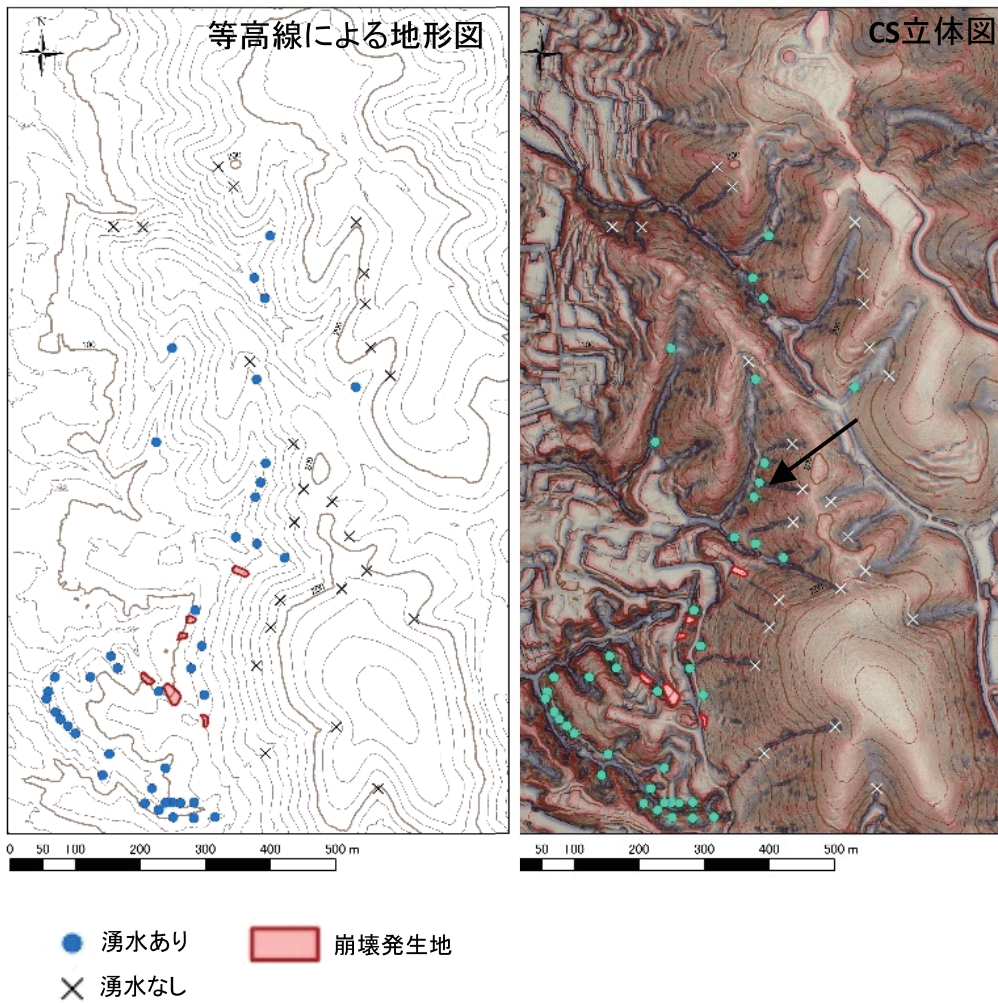


図-1 堆積岩調査地における湧水、土砂災害地の調査結果



写真-1 図1中矢印位置の湧水地点の状況

谷型，直線型，尾根型，波型に基本的に大別される。本研究では，この斜面の地形形状を定量的に把握するために，地形の平面曲率の標準偏差を指標として用いた。平面曲率とは，等高線方向に計算した地表面の曲率をいい，尾根は正，谷は負の値を示す。一定半径の検索円内の標準偏差を計算することで，地形の複雑さを表すものである。本対象地では，0.5mメッシュを1mメッシュにリサンプリングし，標準偏差 = 3.0のガウシアンフィルタを用いた加重平均により平滑化し

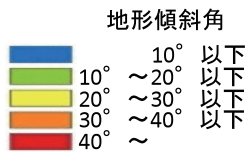
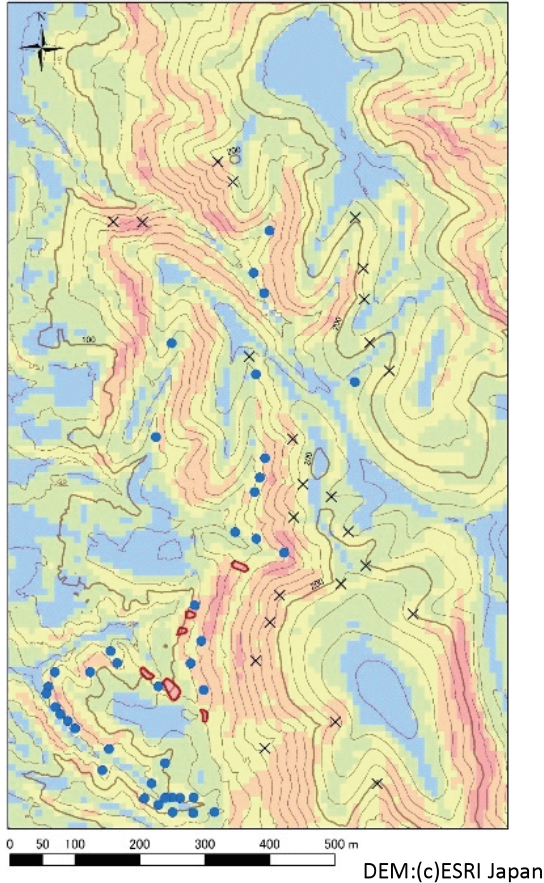


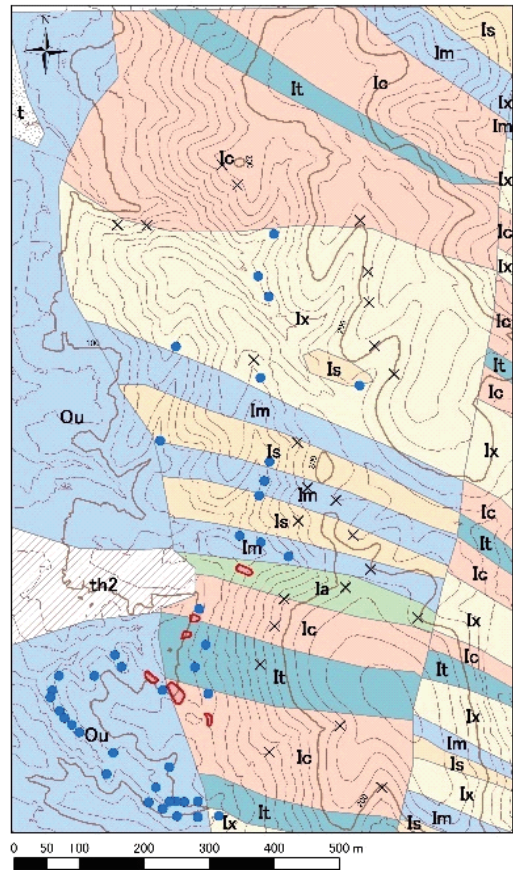
図-2 堆積岩調査地における傾斜角と湧水点、土砂災害地の関係

表-2 堆積岩調査地内の湧水点、土砂災害地と地質の関係

	崩壊	湧水あり	湧水なし
Ou 砂、礫及び泥、海底粘土層を含む	1	23	
Im 泥岩、及び泥岩優勢砂岩泥岩互層		4	3
It 礫石型珪質粘土岩	1	2	1
Ix 泥質混在層		7	7
Is 塊状-厚層理砂岩		3	3
Ic 層状チャート	3	2	8
Ia 砂岩優勢砂岩泥岩互層	1		2
計	6	41	24

表-1 傾斜角と崩壊の有無、湧水の有無の関係

傾斜角	崩壊	湧水あり	湧水なし
10° 以下		1	
10° ~ 15°		3	1
15° ~ 20°		9	4
20° ~ 25°	4	7	6
25° ~ 30°		7	5
30° ~ 35°	1	10	5
35° ~ 40°	1	3	2
40° ~ 45°		1	1
計	6	41	24



地質図:産業技術総合研究所地質調査総合センター「京都東南部」

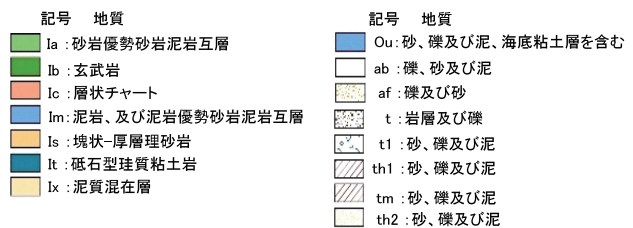


図-3 堆積岩調査地における湧水点、土砂災害地と地質の関係

表-3 堆積岩調査地内の平面曲率の標準偏差と湧水点、土砂災害地の関係

平面曲率の標準偏差	崩壊	湧水あり	湧水なし
0.5以下			8
0.5 ~ 0.6		1	8
0.6 ~ 0.7		3	3
0.7 ~ 0.8	1	7	3
0.8 ~ 0.9	2	9	
0.9 ~ 1	2	10	1
1.0 ~ 1.1	1	5	1
1.1 ~ 1.2		6	
計	6	41	24

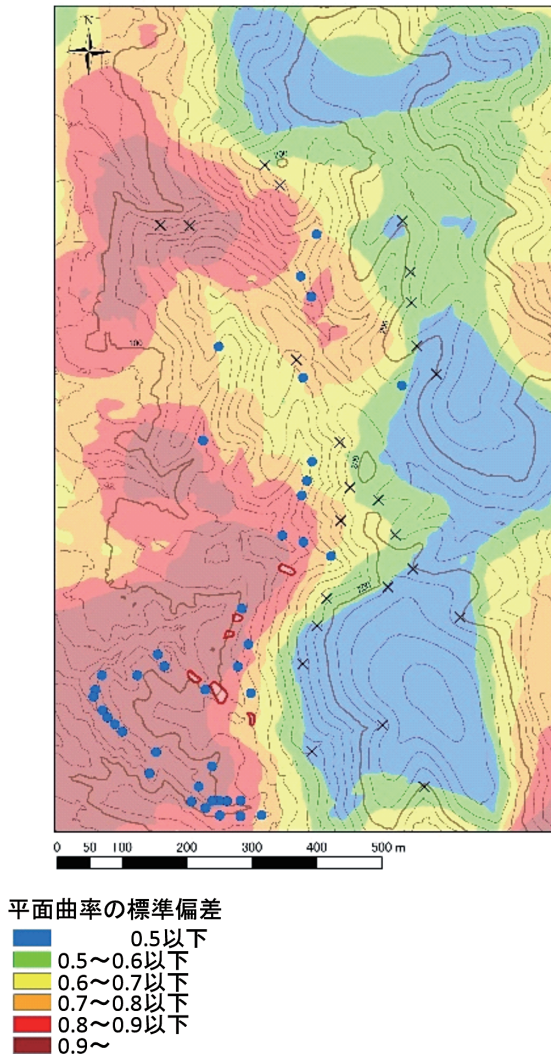


図-4 堆積岩調査地における平面曲率の標準偏差と湧水点、土砂災害地の関係

た。ArcGIS10の曲率計算により平面曲率を計算し、半径100m円内のセル値の標準偏差を中心セルの値とした。東側の尾根部の平面曲率の標準偏差の値が小さく、西側ほど高くなる傾向を示し、地質構造に起因した地形的特徴が認められることが示された(図-4)。湧水、斜面崩壊地は平面曲率の標準偏差が大きくなるほど多くなり、0.8~1.0の間の占める割合が大きかった(表-3)。

図-5にCS立体図を基にした調査対象地の地形判読結果と過去の災害発生箇所の位置を示す。図-5中の黄色破線の位置にはリニアメントが存在すると判読された。このリニアメントは桃山断層系の一部である東山西緑断層(吉岡, 1987)に相当すると考えられる。吉岡(1987)は断層を横切る谷筋に横ずれが認められないことから、この断層を逆断層と推定しているが、CS立体図による判読結果、平面曲率の標準偏差から得られる結果も同様であった。CS立体図では青黒く見える場所は崩壊地や谷の発達が認められる個所として判断される。調査対象地では断層の東側に比べて西側で数多くの明瞭な浸食地形が確認された。湧水調査の結果によって断層東側の斜面では確認された湧水が数少なく、西側では多数の湧水が認められた(図-6)。これらの結果から、



図-5 CS 立体図と過去の土砂災害の位置
(藤本ら (2016) からの引用)

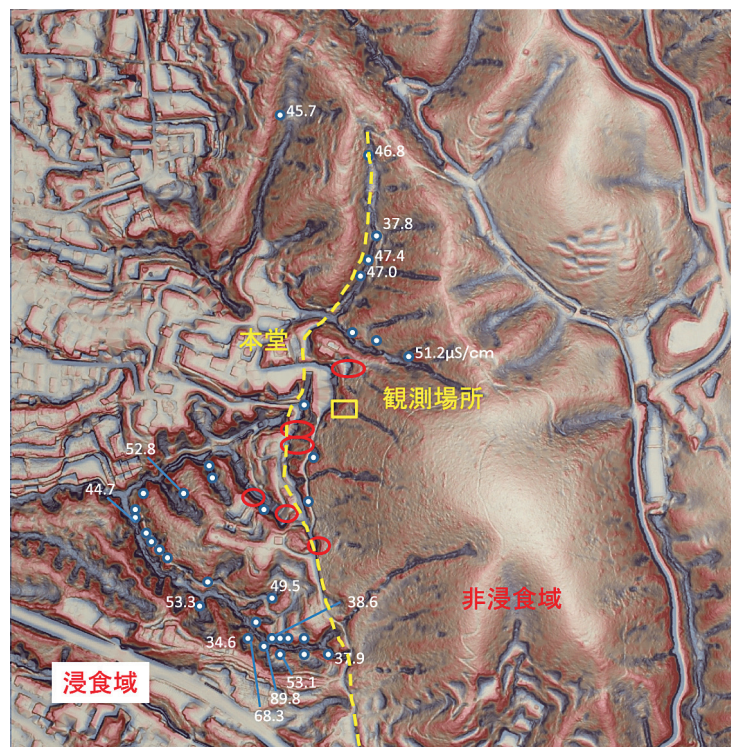


図-6 湧水の空間分布特性 (図中の数値は電気伝導度を示す)
(藤本ら (2016) からの引用)

対象地は水の浸食作用の影響の有無による非浸食域と浸食域に分けられると判断された。非浸食域では透水性がよく，雨水が土層以深の深部にまで浸透し，浸食地形が形成されないのに対して，浸食域では湧水や降雨時の洪水流によって浸食作用が卓越していると考えられた。また，湧水の電気伝導度には大きな差が見られなかった。この結果は清水山は山頂が242mの丘陵地であり，山体内の地下水帯の規模はそれ程大きくなく，湧水に寄与する地下水帯は同程度のスケールであると考えられる。浸食域では北側の領域においては谷筋に沿って湧水が認められた。現地踏査から露頭部の岩相が南側の領域とやや異なることが確認され，同じ地質帯でも基岩構造が異なることが示唆された。また，谷筋が尾根付近にまで達しており，谷頭部に集水域を持たない谷地形であることから断層活動に起因する谷の形成であると推測された。このため，山体の地質は同様であるが地形発達過程に起因する基岩構造の違いから地下水の流動過程に差が生じていると考えられる。

これまで非浸食域での間隙水圧等の現地モニタリング（図-5，6の黄色四角枠の範囲，檀上ら，2014; Fujimoto et al., 2015)の結果から，土層内での非常に素早い水移動が観測されている。また，土層内の地下水位の上昇には限界があり，累積降雨の増加に伴って地下水が深部浸透している可能性が示唆された。現地モニタリングで得られた結果と本研究の結果と調和的であり，非浸食域において雨水の浸透が卓越することが示された。本研究の地形解析から，近年の斜面崩壊は断層に沿った位置で発生している傾向が認められた（図-5）。断層活動に伴う破碎帯の形成によって断層周辺が弱部となっていると推定される。地形解析と湧水の分布から推定される地下水流動の結果から，豪雨時には断層の上流域にあたる非浸食域に多量の雨水がもたらされ，深部浸透できなかった地下水が断層近辺の弱部に湧出することが斜面崩壊の発生要因となる可能性が示された。

3.2 花崗岩調査地における特徴

不動寺水文試験地のCS立体図および湧水点の位置を図-7に示す。既存の研究による湧水点も含めて全35地点を確認した。CS立体図では，谷底部はやや明るい色を示すものの，全体的に褐色を

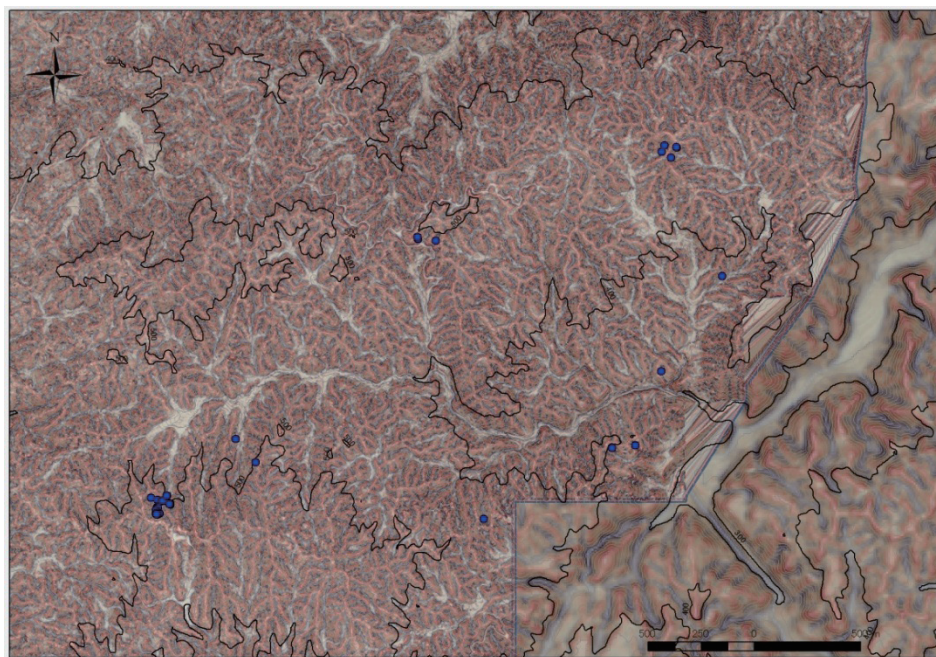


図-7 花崗岩調査地におけるCS立体図と湧水点の位置

示した。この結果は、全体的に斜面が急であり、かつ、流域全体が一様であることを示している。現地調査で得られた湧水点の数は限られているが、踏査時において非常に小さな溪流においても溪流水が存在することを確認した。このことは非常に微細な谷頭部においても湧水が存在していることを示唆している。実際に、量水堰が設置されている山頂付近の約2haの流域（Fujimoto et al., 2011）内のすべての溪流調査の結果では、すべての谷頭斜面から湧水が確認されており、同様の現象が同地質でも認められると考えられる。

図-8に不動寺水文試験地の傾斜角と湧水点の位置を示す。傾斜角の分布は流域全体で暖色を示し、急傾斜斜面が広く分布することを示している。この傾向はCS立体図から得られた結果と調和的であるといえる。湧水点は傾斜角が大きくなるほど多くなる傾向を示した（表-4）。特に、傾斜角が35°以上の地点の湧水の発生数が多く、湧水の発生条件が斜面の傾斜に起因していると考えられる。一方、傾斜の緩い地点からも湧水が認められ、斜面形状とは別の要因（例えば亀裂

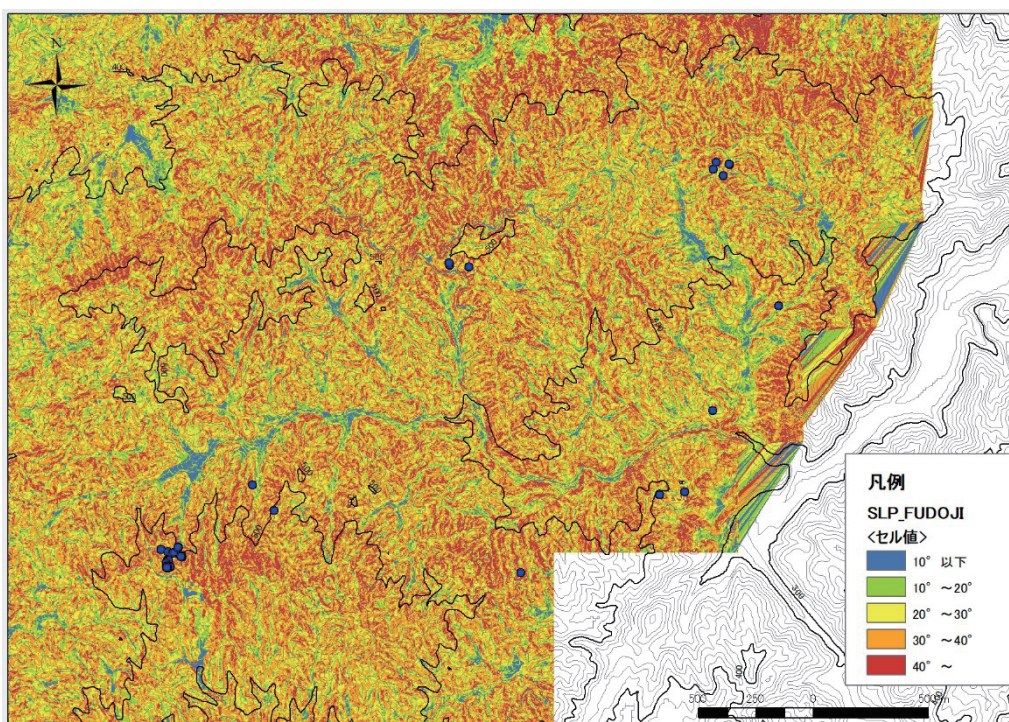


図-8 花崗岩調査地における湧水点と傾斜の関係

表-4 花崗岩調査地における湧水点と傾斜の関係

傾斜	湧水
10° 以下	1
10° ~15°	1
15° ~20°	4
20° ~25°	3
25° ~30°	4
30° ~35°	5
35° ~40°	9
40° ~	8

表-5 花崗岩調査地内の湧水点と曲率の標準偏差の関係

標準偏差	湧水
0.6以下	2
0.6~0.7	5
0.7~0.8	28
0.8~0.9	0
0.9~1.0	0
1.0~1.1	0
1.1~1.2	0
1.2~1.3	0
1.2~	0

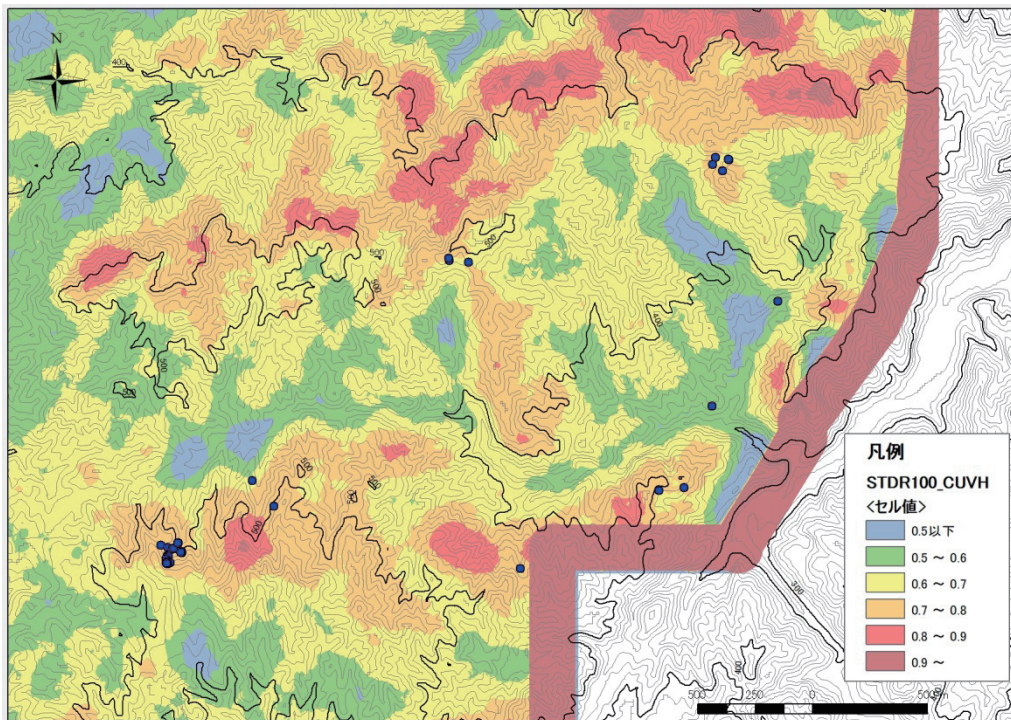


図-9 花崗岩調査地における湧水点と曲率の標準偏差の関係

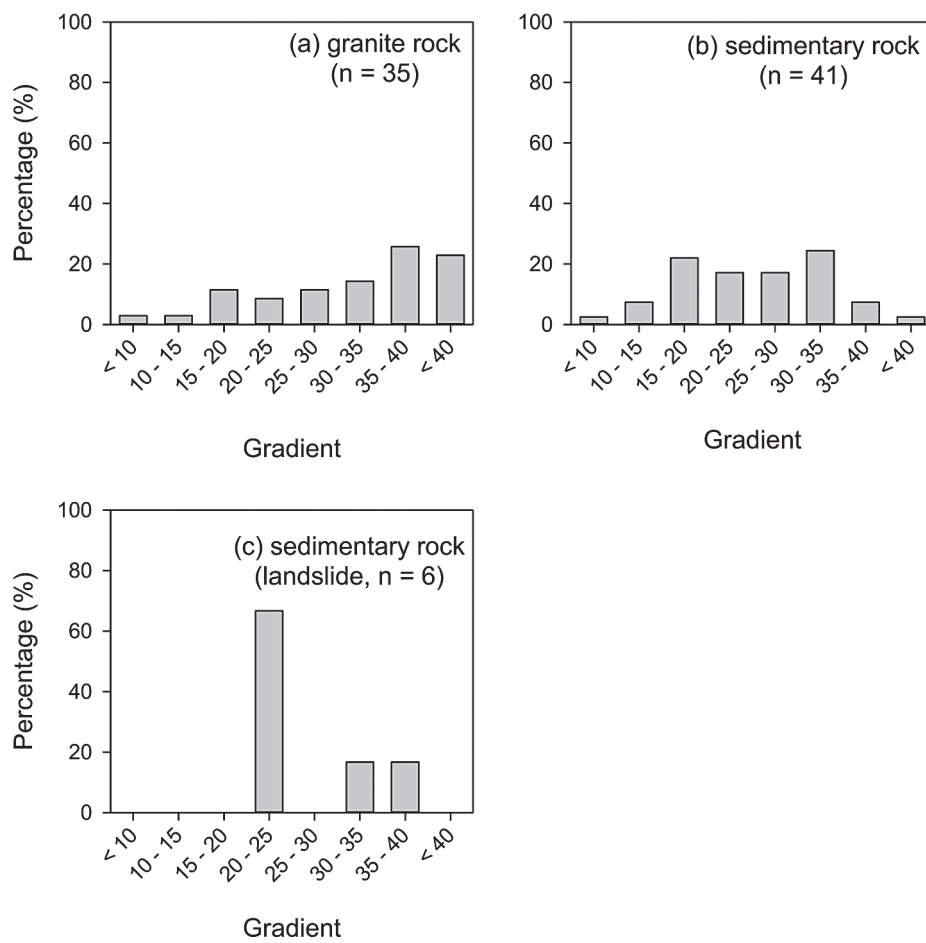


図-10 湧水点、土砂災害地（堆積岩）の傾斜の分布

等の地質構造)に影響を受けた湧水も存在することが示唆された。

堆積岩地質調査地と同様に、斜面の地形形状を把握するために平面曲率の標準偏差を算出した(図-9)。標準偏差が0.6以上を示す範囲が広く、標準偏差の結果からも対象流域全体が一様に急傾斜であり、谷型の斜面が広く分布していることを示していると考えられる。湧水地点における曲率の標準偏差は0.8以下であり、0.7~0.8に集中していた(表-5)。湧水地点の平面曲率の標準偏差にまとまりがある結果は、花崗岩地質では湧水が発生する条件が斜面の地形形状であることを示唆するものである。本報告での湧水地点の事例は限られているため、今後地点数を増やすことで更なる検討を加える必要がある。

3.3 地質による湧水、土砂災害の発生危険度の違い

花崗岩調査地、堆積岩調査地の湧水点、堆積岩調査地の土砂災害地の傾斜角の分布を図-10に、地形曲率の標準偏差の分布を図-11に示す。堆積岩地質の湧水点の傾斜角は比較的ばらつき、15-35°の範囲に分布するのに対し、花崗岩地質の湧水点の傾斜角は35°以上の傾斜の割合が高かった。この結果から、堆積岩地質に比べて、花崗岩地質の湧水点の方が地形の傾斜が大きい傾向を示すと考えられる。堆積岩地質の土砂災害地の地点数は少ないが、20-25°に占める割合が大きかった。

地形の平面曲率の標準偏差は、花崗岩地質では0.8以下に分布しているのに対して、堆積岩地質

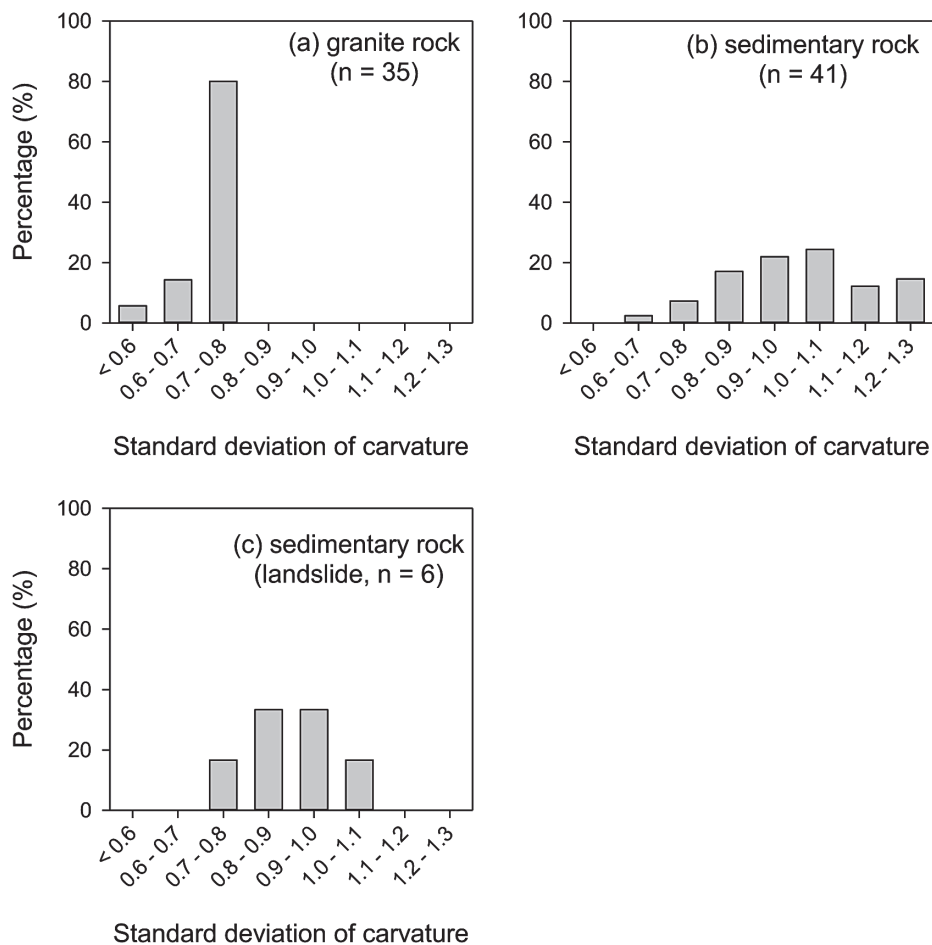


図-11 湧水点、土砂災害地(堆積岩)の地形曲率の標準偏差の分布

表-6 花崗岩，堆積岩調査地の
傾斜の特徴

	花崗岩	堆積岩
最小値	0.01	0.00
最大値	78.13	83.09
平均値	30.09	26.80
標準偏差	10.76	14.00

表-7 花崗岩，堆積岩調査地の
曲率の標準偏差の特徴

	花崗岩	堆積岩
最小値	0.38	0.13
最大値	0.92	1.19
平均値	0.65	0.74
標準偏差	0.08	0.21

では幅広くばらつき、明瞭な違いが認められた。この結果は花崗岩地質が堆積岩地質に比べて急傾斜で、谷密度が小さい傾向を持つことを示している。しかし、本解析結果は湧水点のみを対象としているため、堆積岩地質では湧水が卓越する砂岩や粘土層からなる大阪層群を対象としていることになる。このため、本調査における堆積岩地質では、特に湧水が卓越する大阪層群の地質の特徴をとらえていると考えられる。一方、土砂災害地における地形曲率の標準偏差は比較的まとまった分布を示しており、土砂災害の潜在的危険性の指標となることが示唆された。また、花崗岩地質において湧水地点の平面曲率の標準偏差は0.7～0.8に占められる割合が高かった。この結果は、不動寺流域は単一の花崗岩であり、調査流域内での地形的特徴にばらつきがみられないことを示していると考えられる。表-6、表-7に花崗岩、堆積岩調査地の傾斜、地形曲率の標準偏差の特徴を示す。花崗岩地質の標準偏差が小さく、この結果からも花崗岩地質の方が地形的特徴に遍在性が小さいことが示された。

上記の結果より、花崗岩、堆積岩において湧水点の地形的特徴が異なることが示された。特に、地形の平面曲率の標準偏差には明瞭な差が認められ、平面曲率の標準偏差が湧水点の位置や斜面崩壊の潜在的危険性の評価指標となることが示唆された。

4. おわりに

本研究ではCS立体図に基づく地形判読と湧水の現地調査から土砂災害の潜在的危険度を評価する手法に関して検討を行った。堆積岩地質と花崗岩地質の流域において調査を行い、地質毎に評価基準が異なることが示された。堆積岩地質の流域では地質構造と分布によって土砂災害発生と湧水が影響を受けることが明らかとなった。調査対象地内では、断層を境に浸食域と非浸食域に分かれ、地下水の流動－流出過程が明瞭に異なることが示された。浸食域では多数の湧水が認められ、今後地下水の湧出によって土砂流出を引き起こす災害が懸念された。また、断層付近で近年の斜面崩壊が発生しており、非浸食域で土層より深くの深部まで浸透した地下水が断層付近で湧出することで斜面崩壊が引き起こされる可能性が示された。堆積岩地質の結果は、対象地の局所的な特徴をとらえている可能性もあり、今後他の堆積岩地質においても同様の調査を行い、検討を行う余地があると考えられる。花崗岩地質では湧水点の傾斜角が大きくなる傾向を示した。また、湧水地点の平面曲率の標準偏差の分布には偏りがあり、湧水の発生地が谷型の地形形状に起因することが認められた。このことから、花崗岩地質では、湧水点および湧水に関わる斜面崩壊の発生地の予測に有効な指標であることが示された。

以上の結果から、CS立体図による地形判読、地質図、平面曲率の標準偏差を組み合わせることで、崩壊危険地、湧水発生地を効率的に抽出することが可能になると考えられる。特に、平面曲率の標準偏差は地形形状の定量的な特徴を把握する指標として有効であることが明らかになった。

謝辞

本研究を遂行するに当たり、中日本航空株式会社岩浪英二様、国土交通省近畿地整整備局様には地形データの取得と活用にご協力いただいた。ここに記して深く感謝を表します。

参考文献

- 1) Asano Y, Uchida T.: Is representative elementary area defined by a simple mixing of variable small streams in headwater catchments?, *Hydrological Processes* 24: 666-671, 2010
- 2) 檀上徹・藤本将光・木村亘・平岡伸隆・深川良一：台風18号に伴う清水寺境内の被害と重要文化財後背斜面の地盤水分変動及び挙動に関する一考察，歴史都市防災論文集，Vol.8，pp.115-122，2014.
- 3) Derron M.H., Blikra L.H., and Jaboyedoff M.: High resolution digital elevation model analysis for landslide hazard assessment (Åkerneset, Norway). In Senneset K, Flaate K, Larsen JO (eds), *Proceedings of the 11th international conference and field trip on landslides, Norway*, Taylor and Francis Group. p.101-113. 2005
- 4) Fujimoto M, Ohte N, Tani M.: Effects of hillslope topography on hydrological responses in a weathered granite mountain: comparison of the runoff response between the valley-head and the side slope, Japan. *Hydrological Processes* 22: 2581-2594, 2008
- 5) Fujimoto M, Ohte N, Tani M.: Effects of hillslope topography on runoff response in a small catchment in the Fudoji Experimental Watershed, central Japan. *Hydrological Processes* 25: 1874-1886, 2011
- 6) Fujimoto M., Arimitsu Y., Hiraoka N., Danjo T., Kimura T., Ishida Y., and R. Fukagawa: Characteristics of groundwater movement at a hillslope above Kiyomizu-dera Temple, an important cultural asset, *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, Vol.2, No.77, pp.2643-2647, 2015.
- 7) 藤本将光・檀上徹・土山拓也・木村亘・深川良一：清水寺後背斜面における地中音測定を用いた地下水流動の把握，歴史都市防災論文集，Vol.8，145-150，2014.
- 8) 藤本将光・戸田堅一郎・有光悠紀・里深好文・深川良一：京都市東山地域における斜面崩壊の潜在的危険度評価，歴史都市防災論文集，Vol.10，145-150，2016.
- 9) 地頭蘭隆・下川悦郎・寺本行芳：深層崩壊発生場予測法の提案－鹿児島県出水市矢筈岳山体を例にして－，*砂防学会誌*，Vol.59，No.2，pp.5-12，2006.
- 10) 三浦弘之・翠川三郎・井上聡史：高解像度数値標高モデルを用いた都市域での急傾斜地崩壊危険個所の抽出方法，*地域安全学会論文集*，No7，p.1-8，2005
- 11) 仲矢順子・酒匂一成・光谷俊祐・深川良一：急勾配斜面表層における水文環境－清水寺後背斜面における地下水流路調査－，歴史都市防災論文集，Vol.4，pp. 83-90，2010.
- 12) 仲矢順子・深川良一・酒匂一成：清水寺後背急勾配斜面における地盤表層地下水流路の調査と分析，歴史都市防災論文集，Vol.5，pp. 271-278，2011.
- 13) 大林成行・小島尚人・Chung, C.: 斜面安定性評価モデルの精度比較とその実用化への提案，*土木学会論文集*，No.630/VI-44，p.77-89，1999.
- 14) 酒匂一成・深川良一・岩崎賢一・里見知昭・安川都夫：降雨時の斜面災害防止のための重要文化財周辺斜面における現地モニタリング，*地盤工学ジャーナル*，Vol. 1, No.3, pp. 57-69, 2006.
- 15) 鈴木雅一・小橋澄治：がけ崩れ発生と降雨の関係について，*砂防学会誌（新砂防）*，Vol.34.No.2，p.16-26，1981
- 16) 周琵琶湖花崗岩団体研究グループ：琵琶湖周辺の花こう岩質岩体－その5，田上地域の花こう岩類，*地球科学*，54，380-392，2000.
- 17) 戸田堅一郎：曲率と傾斜による立体図法（CS立体図）を用いた地形判読，*森林立地*，Vol. 56, No.2, pp. 75-79, 2014.

- 18) Uchida T, Asano Y.: Spatial variability in the flowpath of hillslope runoff and streamflow in a meso-scale catchment. *Hydrological Processes* 24: 2277-2286, 2010
- 19) 吉岡敏和：京都盆地周縁部における第四紀の断層活動および盆地形成過程，*第四紀研究*，Vol.26, No.2, pp. 97-109, 1987.