

実効雨量および土壌雨量指数から見た平成23年 台風12号による土砂災害現場の水文地質特性

HYDROGEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF LANDSLIDE DISASTER SITES OCCURRED IN TYPHOON NO.12 IN 2011 ON THE POINT OF VIEW FROM EFFECTIVE RAINFALL AND SOIL WATER INDEX

田内 裕人¹・江種 伸之²・平田 健正³

Hiroto TANOUCHI, Nobuyuki EGUSA and Tatemasa HIRATA

¹和歌山大学システム工学部 (〒640-8510 和歌山県和歌山市栄谷930番地)

E-mail: tanouchi@center.wakayama-u.ac.jp

²和歌山大学システム工学部 (〒640-8510 和歌山県和歌山市栄谷930番地)

³放送大学和歌山学習センター (〒641-0051 和歌山県和歌山市西高松1丁目7-20)

Key Words: deep-seated landslide, surface slope failure, debris flow, effective rainfall, soil water index

1. はじめに

平成23年8月25日に発生した台風12号は、紀伊半島に豪雨と甚大な洪水や土砂災害をもたらした(紀伊半島大水害)。この台風は大型で移動速度が遅く、西日本から北日本にかけて山沿いを中心に豪雨となった。豪雨による被害は紀伊半島に集中し、和歌山県内では日高・西牟婁地域で深層崩壊を含む大規模斜面崩壊、東牟婁地域で表層崩壊・土石流が多発した。

一般に、豪雨による土砂災害は素因と誘因によりその形態や規模が決まる。そこで、本研究では、実効雨量、土壌雨量指数などの降雨指標を用いて、平成23年台風12号により和歌山県で発生した土砂災害現場(以下、崩壊地)の水文地質特性を分析した。

2. 紀伊半島の地質と土砂災害の概要

(1) 地質^{1),2)}

図-1に紀伊半島南部の地質と崩壊地を示す。紀伊半島は、四万十帯、熊野酸性火成岩類、熊野層群・田辺層群の3種類の地質から成る。四万十帯は海洋プレートが大陸プレートの下に沈み込む際に海洋プレート上の堆積体が大陸側に付加されることでできた付加体で、紀伊半島の大部分を占める。海洋プレ-

トが沈み込む際にプレート上の堆積体は著しい変形を受け、種々の岩石が混在する混在岩ができ、また断層の上盤がずり上がった大規模逆断層が形成されるなど、複雑な地質構造を成す。

熊野酸性火成岩類は火成岩体で、花崗斑岩として紀伊半島南部に広く分布する。花崗斑岩ではマグマ冷却時の体積収縮でできた柱状節理が発達し、この節理の割れ目に沿って風化が進む。風化はタマネギ状に進み、角の取れた風化コアストーンが形成される。また、一部の地域には流紋岩質火砕岩の噴出岩体および流紋岩・流紋岩質火砕岩の岩脈が存在する。流紋岩や流紋岩質火砕岩は主に塊状岩質であるが、所々に熊野層群を取り込んだ部分もみられる。また、平滑な岩盤を形成しやすい特性をもつ。

熊野層群・田辺層群は、大陸棚から陸棚斜面に堆積した礫岩、砂岩、泥岩からできた堆積体が陸化したものである(前弧海盆堆積体)。泥ダイアピルによってできた泥質角礫岩などがみられるが、全体として付加体のような著しい堆積体の乱れはない。

(2) 土砂災害³⁾⁻⁵⁾

日高・西牟婁地域では、清川、三ツ又、伏菟野、真砂、深谷、熊野、皆地(上平治)、三越(奥番)で大規模な斜面崩壊が発生した。この地域の地質は付加体

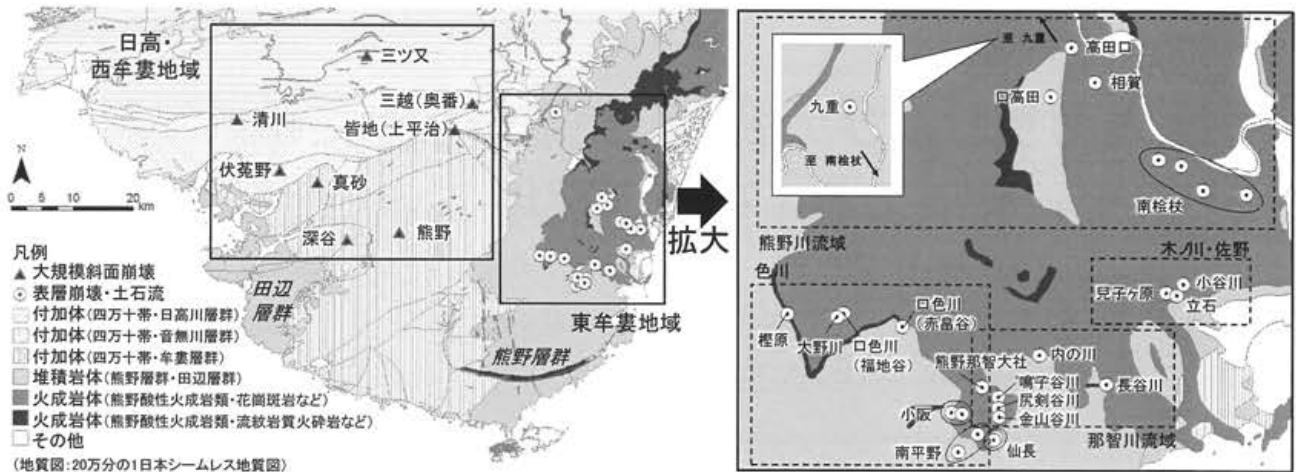


図-1 和歌山県南部(紀南地方)の地質と崩壊地(調査地点のみ)

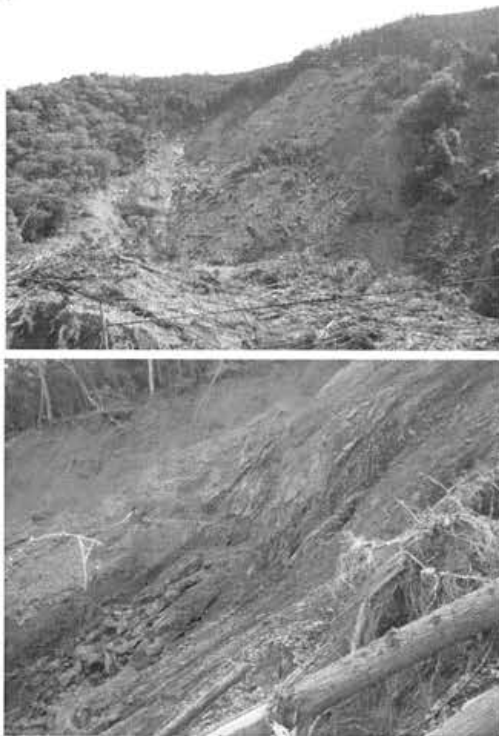


図-2 三越(奥番)の崩壊地
(上：崩壊斜面，下：崩壊斜面のスラストと破碎帯)



図-3 東牟婁地域の崩壊地(那智川流域・金山谷川)



図-4 花崗斑岩の露頭(熊野川流域 三重県側)

の四万十帯に属している。付加体には多くのスラスト(衝上断層)があり、またスラストに伴う多くの破碎帯が存在する。スラストは海洋プレートに押された方向、すなわち紀伊半島では北側に向かって傾いているのが一般的である。このため、山の北側斜面では、山腹斜面の傾きとスラストの傾きが同じ方向の流れ盤になっている。このような地質構造から、付加体では大規模斜面崩壊が起りやすい。

例えば、伏菟野や三越(奥番)ではスラストとこれに伴う破碎帯の存在が確認されていて、これら破碎帯や破碎帯付近の泥質岩が水分を含んで軟弱化し、破碎帯がすべり面となって大規模な斜面崩壊が発生

したと推察される(図-2)。これに対し、真砂、深谷、熊野では、地層の傾きと山腹斜面の傾きが同じ方向の流れ盤となっており、平成23年台風12号の豪雨により風化帯や古い崩積土が水分を多量に含み、流れ盤に沿ってすべり崩壊が発生したと推察される。

一方、東牟婁地域では、熊野川流域、木ノ川・佐野、那智川流域、および色川で表層崩壊と土石流が多発した(図-3)。この地域の地質は、火成岩体の熊野酸性火成岩類(花崗斑岩、流紋岩、流紋岩質火砕岩)と前弧海盆堆積体の熊野層群で構成される。熊野酸性火成岩類の母岩となる花崗斑岩は柱状節理が発達し、この節理の割れ目に沿って風化が進みやすい(図-4)。

また、花崗斑岩は基盤岩の熊野層群に比して急峻な地形であるのに対し、熊野層群はやや緩斜面をなしている。このような地形と地質により、表層崩壊の多くは熊野酸性火成岩類の花崗斑岩で発生した。また、これらの崩壊地の多くでは谷筋の緩傾斜部分に崩積土(旧土石流堆積物)が堆積しており、これが崩壊土砂とともに土石流化していた。その他、谷筋に残る崩積土が再び流動化して土石流になった例(溪床不安定土砂の流動化)もみられる。

ただし、一部ではこれとは異なる崩壊形態が確認されている。那智川流域の長谷川では流紋岩・流紋岩質火砕岩で比較的大きな表層崩壊が発生していた。また、色川では流紋岩質火砕岩と熊野層群の地質境界の直上で発生した崩壊が確認されている。そのほか熊野川流域の九重では熊野層群で大きな土石流が発生していた。ただし、熊野層群における表層崩壊・土石流の発生数は熊野酸性火成岩類と比べると非常に少なく、かつ小規模である。

3. 降雨特性

(1) 地質体ごとの降雨特性

図-5に土砂災害発生時(以下、崩壊時)における積算雨量と時間雨量の関係を示す。台風12号で土砂災害が発生した地域は広範囲に渡る。そのため、ここでは1km四方ごとの局地的な雨量が得られるレーダーアメダス解析雨量を使用した。なお、本稿では、積算雨量は台風12号による雨が降り始めた8月30日もしくは31日から崩壊時刻までの総雨量、時間雨量は崩壊時刻を含む1時間雨量と定義する。

図より日高・西牟婁地域における崩壊時の時間雨量は2~40mm/h、積算雨量は760~1450mm、東牟婁地域における崩壊時の時間雨量は40~120mm/h、積算雨量は720~1330mmであることがわかる。東牟婁地域の時間雨量は日高・西牟婁地域より多いが、積算雨量については両者の間に大きな違いはない。ただし、東牟婁地域の4地点(図中の九重、口色川・福地谷、大野川、檜原)の降雨特性は他の東牟婁地域における崩壊地とは明らかに異なる。そこで、この4地点を除いて考えると、東牟婁地域の時間雨量は70~120mm/h、積算雨量は720~1130mmとなる。すなわち、東牟婁地域の多くの現場では、崩壊に至るまでの積算雨量は日高・西牟婁地域よりも少ないが、崩壊時には非常に強い雨が降っていたことになる。

一般に、1)深層崩壊を含む大規模斜面崩壊は降雨継続時間が長く合計降水量が多い場合(雨水が地下深部まで浸透する)、2)表層崩壊は短時間の雨量が多

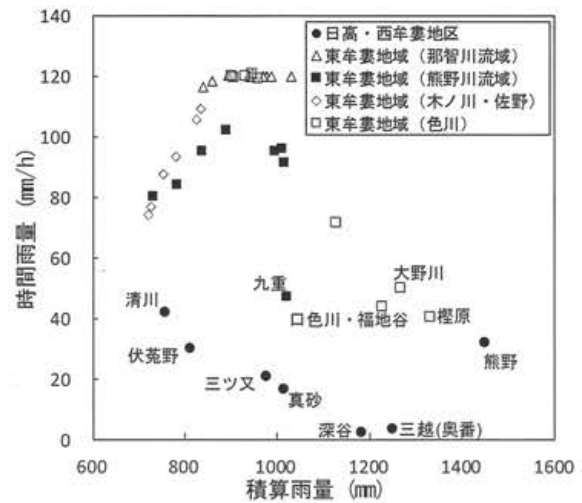


図-5 土砂災害発生時(崩壊時)の積算雨量と時間雨量^{3),4)}

い場合(表層土の水分量が增大する)、3)土石流は合計降水量が多くなった後に短時間の雨量も多くなった場合(多量の水分を含んで表層土が緩んだ状態で降雨強度が増す)に発生する。すなわち、東牟婁地域の九重などの4地点を除けば、土砂災害形態と雨量の関係は、両地域ともに一般的な傾向とよく一致する。換言すると、深層崩壊を含む大規模斜面崩壊を起こしやすい地質特性(四万十帯)を有する地域に深層崩壊を起こしやすいパターンの降雨(積算雨量の多い長雨)があったこと、表層崩壊・土石流を引き起こしやすい地質特性(熊野酸性火成岩類)を有する地域に土石流を起こしやすいパターンの降雨(積算雨量が増えた後の強雨)があったことが、甚大な被害を引き起こした要因と推察される。

以上、図-5についてまとめると、四万十帯が分布する日高・西牟婁地域では、先行雨量として約750mmの降雨があると、その後の1時間雨量が40mm/h以下であっても大規模斜面崩壊の発生する可能性が高くなる。一方、熊野酸性火成岩類で表層崩壊と土石流が多発した東牟婁地域では、先行雨量として650mm程度の降雨があった後に70mm/h以上の激しい雨が降ることによって土石流の発生する可能性が高くなるといえる。

(2) 東牟婁地域における崩壊時の降雨特性

東牟婁地域で崩壊時の時間雨量が70mm/h以下の4地点のうち、九重のみが熊野層群で発生した土石流である。この崩壊斜面は、火成岩体の貫入および流れ盤の影響で節理や層理が非常に発達しており(図-6)、表層が不安定化し崩れやすい状況にあった。このため、時間雨量が多くなっても積算雨量の増大により土石流が引き起こされた可能性が推察される。ただし、熊野層群の他の崩壊地では崩壊時刻が不明



図-6 節理の発達した熊野層群の流れ盤（九重）

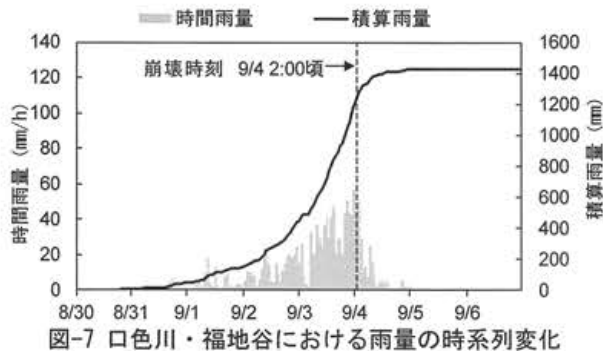


図-7 口色川・福地谷における雨量の時系列変化

なため、詳細な分析ができず、熊野層群の土砂災害と雨量の関係については今後の課題である。

また、九重以外の口色川・福地谷などの3地点は時間雨量が60mm/hを上回ることはなく、崩壊時の時間雨量も大きくない。しかし、20~40mm/h以上の雨が長時間続き、崩壊時の積算雨量は1200 mmを超えており(図-7)、熊野酸性火成岩類の他の崩壊地と比べると積算雨量が多い。すなわち、これら3地点では、土石流を発生させる一般的な降雨特性ではなく、積算雨量が多くなったことによって表層崩壊・土石流が発生したと推察される。

以上より、和歌山県南部では、その地域の地質体で発生しうる土砂災害(四万十帯なら大規模斜面崩壊、熊野酸性火成岩類や熊野層群なら表層崩壊・土石流)と降雨特性(その土砂災害を起こしやすい雨の降り方かどうか)に注意しながら対応することが重要である。ただし、東牟婁地域では一般的な土石流現場とは異なる降雨特性を示した地点も存在するため、時間雨量が多くなっても積算雨量の増大にも注意しなければならない。

4. 降雨指標から見た水文地質特性

自然斜面の崩壊には、降雨特性(雨量や降り方)に加えて、雨水の浸透・流出や地中の水分量も関係する。そこで、次に実効雨量と土壌雨量指数を降雨指標に用いて、崩壊地の水文地質特性を考察する。な

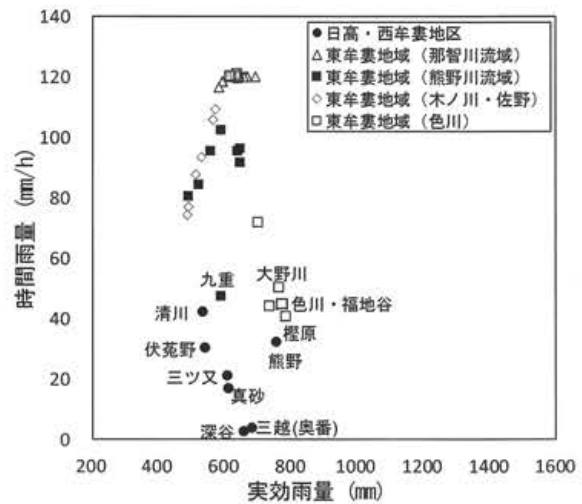


図-8 崩壊時の時間雨量と実効雨量(半減期24時間)

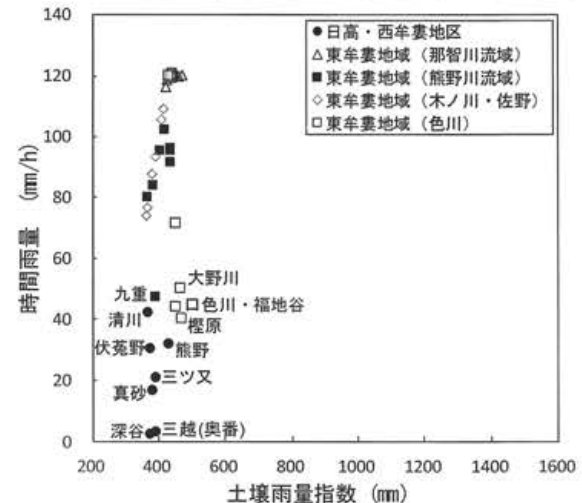


図-9 崩壊時の時間雨量と土壌雨量指数

お、前述のように熊野層群の崩壊地については調査地が九重しかなく、四万十帯や熊野酸性火成岩類の崩壊地と同等の評価が困難である。そこで、ここからの議論では、九重の結果も参考として図示するが、東牟婁地域については主に熊野酸性火成岩類の崩壊地について述べていると理解していただきたい。

図-8に崩壊時の時間雨量と実効雨量(半減期24時間)の関係、図-9に崩壊時の時間雨量と土壌雨量指数の関係を示す。なお、入力データとして使用した雨量は前と同じレーダーアメダス解析雨量である。崩壊時の実効雨量は、日高・西牟婁地域が530~750mm、東牟婁地域が490~780mm、土壌雨量指数は、日高・西牟婁地域が370~430mm、東牟婁地域が370~480mmであった。積算雨量と時間雨量の関係を示す図-5と比較すると、実効雨量と土壌雨量指数は共に同一地域内だけでなく地域間の差も小さくなっている。さらに、この傾向は実効雨量より土壌雨量指数でより顕著に現れている。

両地域の差が小さくなった理由としては、両地域の降雨特性と地質由来の崩壊メカニズムの違いを挙

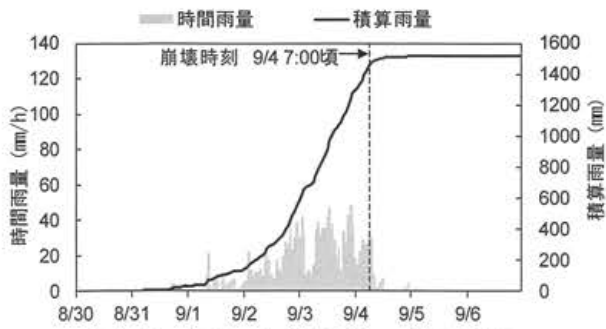


図-10 熊野における雨量の時系列変化

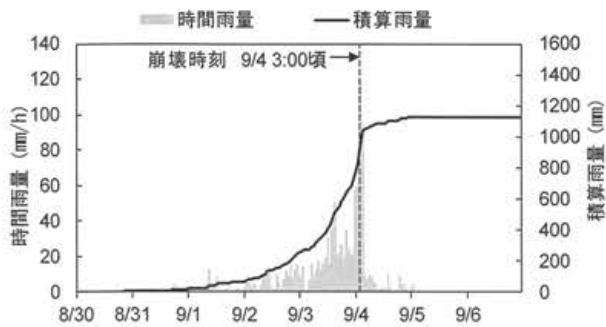


図-11 金山谷川における雨量の時系列変化

げることができる。深層崩壊を含む大規模斜面崩壊が発生した四万十帯が分布する日高・西牟婁地域では降雨強度20~40mm/hの雨が長時間継続したのに対し(図-10)、表層崩壊・土石流が多発した熊野酸性火成岩類が分布する東牟婁地域の多くの現場では降雨初期にはそれほど強い雨が降らず、崩壊直前の数時間に60~120mm/hの強雨が集中した(図-11)。台風12号では数日間に渡り雨が降り続いたので、初期の雨水は地中で貯留や浸透するだけでなく、初期雨水の一部は崩壊時には斜面から流出しており崩壊に直接関与していない可能性が高い。そして、その傾向は比較的強い雨が長時間に渡り降り続いた日高・西牟婁地域の方が高いと思われる。そこで、本考察を検証するために、各崩壊地における崩壊時の積算雨量に占める各降雨指標と流出量の割合を比較した。

まず、図-12に両地域の崩壊地における積算雨量に占める実効雨量と流出量の割合を示す。ここでは、日高・西牟婁地域で崩壊時刻が不明の皆地(上平治)を除いた7地点および東牟婁地域の4地区を代表する7地点を示している。これを見ると、地点によって差はあるが、流出率は日高・西牟婁地域で29~48%(平均40%)、東牟婁地域で32~52%(平均38%)となっており、平均的には日高・西牟婁地域の流出率が東牟婁地域を上回っている。

続いて、図-13に両地域における崩壊時の積算雨量に占める土壌雨量指数と流出量の割合を示す。流出率は、日高・西牟婁地域が56~72%(平均66%)、東牟婁地域が52~65%(平均56%)であり、土壌雨量指数を

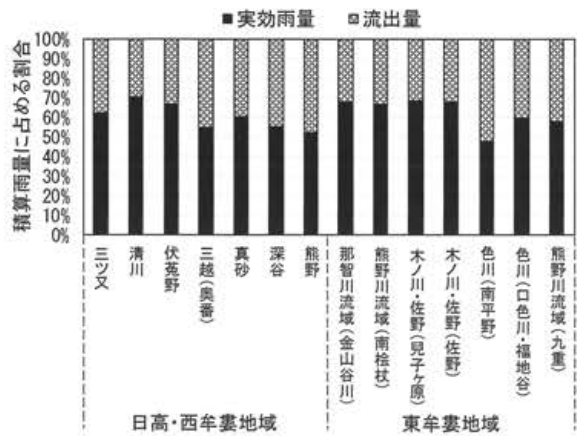


図-12 崩壊時の積算雨量に占める実効雨量と流出量の割合

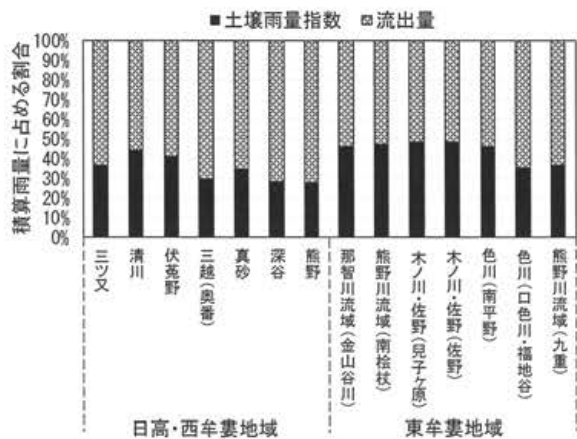


図-13 崩壊時の積算雨量に占める土壌雨量指数と流出量の割合

使用した場合でも、日高・西牟婁地域では東牟婁地域と比較し崩壊に影響を及ぼさない先行降雨の割合が大きいことがわかる。

以上より、日高・西牟婁地域では、降雨開始直後から強い雨が長く降り続くことで崩壊時の積算雨量が760~1450mmと多くなり、雨水がスラストや破碎帯などを通り地下深部まで浸透することで大規模な斜面崩壊が多発したと考えられる。しかし、強い雨が継続的に降ったため崩壊時の流出量も多くなり、積算雨量に占める実効雨量や土壌雨量指数の割合が相対的に小さくなったと推察できる。一方、東牟婁地域では、崩壊数時間前までの積算雨量が日高・西牟婁地域と比較し少なく、これに伴い流出量も少なかったが、崩壊直前の数時間は猛烈な雨となったため、大量の雨水が地下深部へ浸透や河川へ流出する間もなく表層土に溜り、表層崩壊・土石流に至ったと考えられる。このため東牟婁地域では日高・西牟婁地域と比較し、積算雨量は少ないもののこれに占める流出量の割合も小さくなり、結果として実効雨量と土壌雨量指数の地域差が小さくなった。本結果は、崩壊に寄与した地中の水分量が地形・地質特性(素因)、降雨特性(誘因)、およびこれらの組み合わせ

で決まる土砂災害の形態に関係なく、同程度であったことを示しており、土砂災害予測において、長期降雨指標として実効雨量や土壌雨量指数を用いることで素因、誘因、および土砂災害の形態の影響を相対的に小さくできる可能性を示唆している。

5. おわりに

本稿では、時間雨量、積算雨量、実効雨量(半減期24時間)、土壌雨量指数といった降雨指標を用いて、平成23年台風12号により和歌山県で発生した土砂災害の特徴を分析した。以下に得られた知見を示す。

1) 土砂災害の形態と雨量の一般的な関係は、深層崩壊を含む大規模斜面崩壊は降雨継続時間が長く合計降水量が多い場合、表層崩壊は短時間の雨量が多い場合、土石流は合計降水量が多くなった後に短時間の雨量も多くなった場合であるが、和歌山県内の崩壊地では、一部を除いて土砂災害の形態と降雨の関係が一般的な傾向と一致した。

2) すなわち、深層崩壊を含む大規模斜面崩壊を起こしやすい地質特性(四万十帯)を有する地域に深層崩壊を起こしやすいパターンの降雨(積算雨量の多い長雨)があったこと、表層崩壊・土石流を引き起こしやすい地質特性(熊野酸性火成岩類)を有する地域に土石流を起こしやすいパターンの降雨(積算雨量が増えた後の強雨)があったことが、甚大な被害を引き起こした要因と推察される。

3) 四万十帯が分布する日高・西牟婁地域は先行雨量として約750mmの降雨があると、その後の時間雨量が40mm/h以下でも大規模斜面崩壊が発生する可能性が高くなる。一方、熊野酸性火成岩類が分布する東牟婁地域では、先行雨量として650mmの降雨があった後に70mm/h以上の激しい雨が降ることによって表層崩壊・土石流の発生する可能性が高くなる。

4) ただし、東牟婁地域には一般的な表層崩壊・土石流現場とは異なる降雨特性を示した地点が存在するため、時間雨量が多くなっても積算雨量の増大にも注意しなければならない。

5) 長期降雨指標として実効雨量(半減期24時間)と土壌雨量指数を用いた場合、崩壊に寄与しなかった雨水の影響(流出した雨水の影響)が排除されるため、地質体による違いが小さくなり、崩壊時の実効雨量で490~780mm、土壌雨量指数で370~480mmとなった。特に土壌雨量指数では地質体による差がほぼ見られなくなった。このことは、崩壊に寄与した地中の水分量は、地質特性と降雨特性に大きく由来する

土砂災害の形態に関係なく、同程度であったことを意味する。

6) この結果は、長期雨量指標として土壌雨量指数を用いる場合には、地質や崩壊の形態の影響は相対的に小さくなり、土壌雨量指数のみで土砂災害の有無を予測できる可能性を示唆している。

今後は、本研究で得られた成果をより詳細に分析し、土砂災害警戒情報に役立つ知見を見い出したい。

謝辞：本稿の執筆にあたっては、「想定外」豪雨による地盤災害への対応を考える調査研究委員会(地盤工学会関西支部・日本応用地質学会関西支部・関西地質調査業協会・中部地質調査業協会合同委員会)メンバーの石田優子氏、泉並良二氏、岩瀬信行氏、後誠介氏、加藤智久氏、佐々木精一氏、谷垣勝久氏、辻野裕之氏、鍋島康之氏、野並賢氏、矢野晴彦氏から有益なアドバイスをいただいた。また、鈴木梨加氏(博士前期課程2年生)および原田真吾氏(学部4年生)には実効雨量と土壌雨量指数の計算、平井千津子氏(研究支援員)にはGISを使った分析や図化を手伝っていただいた。

なお、本研究の一部は、JSPS科研費25242037、和歌山大学独創的研究支援プロジェクト、一般財団法人レントオール奨学財団、JR西日本の支援を受けて行われたものである。

ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 吉松敏隆, 中屋志津男, 児玉敏孝, 寺井一夫, 原田哲朗: 紀伊半島の地質と温泉, URBAN KUBOTA, 第38号, 56pp., 1999.
- 2) 紀州四万十帯団体研究グループ編著: 紀伊半島における四万十付加体研究の新展開, 地団研専報, 第59号, 310pp. 2012.
- 3) 後誠介・江種伸之: 紀伊半島の地形・地質と平成23年斜面災害, 和歌山大学防災研究教育センター紀要, 第1号, pp.5-12, 2015.
- 4) 江種伸之: 平成23年台風12号による和歌山県の土砂災害, 土と岩, 第63号, pp.26-34, 2015.
- 5) 江種伸之・石田優子・辻野裕之・中西典明・矢野晴彦・鍋島康之: 平成23年度紀伊半島大水害の実態と教訓 - 「想定外」豪雨による地盤災害の軽減に向けた提言 - 4. 和歌山地域の実態, 地盤工学会誌, 第64巻, 第6号, pp.41-48, 2016.

(2016. 5. 31受付)