

紀伊半島の地形・地質と平成23年斜面災害

GEOLOGICAL AND GEOMORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS OF SLOPE FAILURE DISASTER IN KII PENINSULA IN 2011

後 誠介¹, 江種 伸之²
Seisuke Ushiro and Nobuyuki Egusa

¹防災研究教育センター客員教授, ²システム工学部教授

2011年台風12号により, 紀伊半島では斜面災害が多発した. 被害が集中した那智川流域では, 巨礫主体の土石流が本流に流入したことにより長時間にわたる氾濫が発生し, 斜面と河川の複合災害に到った. 紀伊半島は, 付加体・前弧海盆堆積体・火成岩体という3タイプの地質体からできており, それぞれに形成過程が異なる. そのために地質体の特性が異なり, それが地質体の崩壊メカニズムの相違となって現れた. 付加体では大規模斜面崩壊が多発したのに対して, 火成岩体では崩壊・土石流が多発した. また前弧海盆堆積体では, 節理の発達した泥質岩で崩壊がみられたが, その規模は小さく発生頻度も低かった. 付加体の大規模斜面崩壊と火成岩体の崩壊・土石流とは, 発生時の降雨状況が異なることが明らかになった.

キーワード: 大規模斜面崩壊, 土石流, 付加体, 前弧海盆堆積体, 火成岩体, 降雨特性

1. はじめに

2011(平成23)年台風12号(Talas)は, 紀伊半島に甚大な被害をもたらした. 大型でゆっくりと北上したため, 紀伊半島では広範囲にわたって河川の氾濫, 山地の斜面崩壊が多発し, 斜面災害が引き金となって河川の氾濫が起こり, 複合災害となった地域もみられた.

この大水害をうけて, 地盤工学会・日本地質学会・日本応用地質学会・関西地質調査業協会・中部地質調査業協会は, 「平成23年台風12号による地盤災害合同調査団」(団長: 深川良一立命館大学教授, 団員は78名)を編成し, 共催事業による現地調査を行った. その後, 設計の想定を超える豪雨に対する地盤災害の減災に向けた提言を行うことをめざして, 「「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」(委員長: 深川良一立命館大学教授)が, 公募された委員(設立時: 63名)により設立された. あわせて平成24-26年度和歌山大学独創的研究支援プロジェクトの支援による調査研究が行われた.

ここでは, これらの調査研究をもとにして, 崩壊の素因となった紀伊半島の地形・地質の特性に焦点をあてて, 平成23年斜面災害について報告する.

2. 斜面・河川の複合災害

(1) 那智地域の複合災害

和歌山県内の死者・行方不明者57名の4割弱の犠牲者が集中した那智地域では, 土石流による犠牲者とともに河川の氾濫による犠牲者も生じている. 那智川の水位上昇に伴って堤防の一部決壊が起こったが, 那智川支流の溪流で発生した土石流が本流に流入したことにより, 本流沿いの広い範囲で一気に氾濫・浸水が発生し¹⁾, 甚大な被害が生じることになった.

那智川右岸の4溪流と左岸の5溪流から大規模な土石流が流下するとともに, 那智川本流沿いでは河岸の旧土石流堆積物が洗掘されて流下しており, これらが合流して八反田付近まで到達している. この途中にある魚の首付近では, 直線状の那智川を流下した土石流が, 右側に緩く曲がる河川に沿って流下せず直進し, 大きな被害を発生させた要因となった²⁾.

那智川本流で氾濫を起こした地点は, 大門坂の北東側地点, 蛇ノ谷川合流部, 魚の首付近の3地点とみられるが³⁾, いずれの地点も那智川の水位上昇に加えて, 土石流で流下した巨礫主体の崩壊土砂により河道が狭まるとともに浅くなったほか, 土石流により護岸が破壊されたり本流が堰き止められたりしたからであり, 氾濫は長時間にわたって続いた.

(2) 那智地域の地形・地質の特性

那智川は、那智山系を源流域として那智湾に注ぐ延長7km、流域面積24.8km²の二級河川である。源流域は烏帽子山(標高909.2m)をはじめとする標高800m~900mの急峻な山々からなり、那智大滝を経てわずか7kmの距離で那智湾に到る急流である。

このため河川の水位は、降雨の変動を鋭敏に反映する。川関水位観測所の水位は、市野々雨量観測所の時間雨量の変動と極めてよく連動しており、9月3日午後3時から降雨が急に増大したのを反映して、午後4時10分には水位が氾濫注意水位を超える3.14mに達し、その後4日午前1時から時間雨量60mmの集中豪雨になると、午前1~2時頃に大門坂北東部で浸水が発生している⁷⁾。したがって那智地域は、降水量の変動が短時間のうちに河川の水位変動となって現れる地域であり、その背景には上記のような地形的要因がある。

那智地域で発生した土石流は極めて特徴的であり、角のとれた花崗斑岩の巨礫を主体とする。巨礫主体の土石流の発生要因については後述するが、このような特徴的な土石流を発生させる花崗斑岩の岩体の存在が、多量の巨礫からなる土石流が多発した地質的要因である⁸⁾。

すなわち、源流部から河口までの距離が短く急峻であるという地形的要因に加えて、巨礫主体の土石流を発生させやすい花崗斑岩の岩体が存在するという地質的要因があり、斜面と河川の複合災害に到ったものである。

3. 紀伊半島をつくる地質体

紀伊半島はおおまかには、付加体・前弧海盆堆積体・火成岩体という3タイプの地質体からできている。これ

らの地質体は、それぞれに形成された過程が異なっており、そのために地質体の特性もまた異なっている。紀伊半島中南部の地質と斜面災害発生地点を、図-1に示す。

(1) 海洋プレートの沈み込みでできた付加体

海洋プレートの移動と沈み込みに伴って、海溝やトラフ付近の深海で形成された地質体が付加体である。これが隆起をして紀伊半島大部分の大地となっている。古い順に奈良県川上村・奈良県から三重県に到る大台ヶ原付近の秩父帯、奈良県黒滝村・天川村付近の高野山帯、奈良県五條市大塔町・十津川村付近の日高川帯、和歌山県田辺市本宮~田辺付近の音無川帯、和歌山県大塔山付近から南側の牟婁帯と分布し、南側ほど新しい^{4),5),6)}。

付加体の岩石は、遠洋の海底火山でできた緑色岩類(玄武岩・玄武岩質凝灰岩)、遠洋の海底でできた石灰岩・チャート、半遠洋性の赤色頁岩、そして陸から流れ出た砂・泥などのタービダイト(砂岩と泥岩のリズミカルな互層)などからなる堆積岩類であり、遠洋・半遠洋の海底でできた岩石は、海洋プレートに乗って移動してきたものである。

海洋プレートは重いので、海溝・トラフで大陸プレートの下に沈み込む。これに伴って海洋プレートに乗っていた海底火山でできた岩体や海底の堆積物は、沈み込む海洋プレートに引っ張られて大陸プレート側の岩体の下に潜り込んでいく。この結果、整然と重なっていた地層は著しい変形を受ける。それで地層は複雑に褶曲したり小断層で切られたりするほか、地層の初生層序が乱れるとともに、緑色岩類や石灰岩・チャートなどのブロックを含む泥質岩ができたり、断層の上盤がずり上がったスラスト(衝上断層)が多数形成されたりしている⁷⁾。スラストは破碎帯を伴っている。

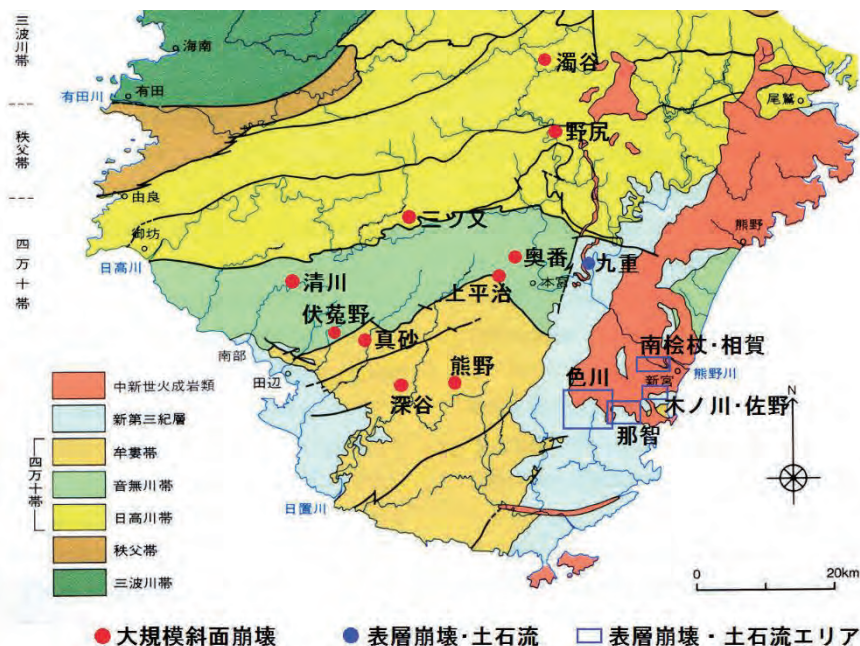


図-1 紀伊半島中南部の地質と斜面災害発生地点(地質図: 紀伊半島の地帯区分³⁾を一部加工して使用)

(2) 陸棚斜面の海盆にできた前弧海盆堆積体

海底は、大陸棚から陸棚斜面をへて海溝にいたる。この陸棚斜面に形成された前弧海盆に堆積した礫・砂・泥などの地層からなる堆積岩体があり、これが陸化して大地となっている地域がある。紀伊半島南東部の熊野層群、南西部の田辺層群という新第三紀層である。熊野層群の中・下部層は比較的深い海盆にできた地層であるが、上部層は浅海に堆積した地層である⁸⁾⁹⁾。

前弧海盆堆積体には、泥ダイアピルによってできた泥質角礫岩がみられるが¹⁰⁾、付加体とは異なり全体として地層の乱れはさほどみられない。

(3) マグマからできた火成岩体

紀伊半島には、マグマからできた大規模な火成岩体(中新世火成岩類)がある。地表に最も広く分布するのは、南東部にある熊野酸性火成岩類である。これは噴出した熔岩である流紋岩、噴出または貫入した火砕岩である流紋岩質火砕岩、そして貫入して地下にラコリスを形成した花崗斑岩からなり¹¹⁾¹²⁾、大規模な陥没カルデラを形成したとされる¹³⁾。

大峯山脈には大峯花崗岩質岩が分布する。花崗岩・花崗閃緑岩を主とし、南側に花崗斑岩・石英斑岩の岩体が伸びる¹⁴⁾。このほか潮岬・大島には、潮岬火成複合岩類が分布する¹⁵⁾。

火成岩体の主体は花崗斑岩であり、岩体の冷却とともに体積収縮でできた柱状節理が発達する。また流紋岩質火砕岩は、平滑堅硬な岩盤や風化洞窟(タフォニ)を形成しやすい特性をもつ。

4. 地質体の特性と斜面災害

平成23年紀伊半島大水害では、広範囲にわたって斜面災害が多発した。この結果、地域の地質体の特性によって地盤崩壊のしくみが異なること¹⁶⁾¹⁷⁾、あるいは異なる地質体が接する地質境界付近で崩壊が多発する傾向があることが明らかになった。

(1) 付加体で頻発する大規模斜面崩壊

付加体は、海洋プレートの沈み込みに伴って、著しい変形を受けている地質体である。付加体の分布域は、これまでも大規模斜面崩壊の履歴の多い地域として知られていたが、これは付加体の地質特性を反映しており、2011年災害でも大規模斜面崩壊が多発した。

a) 古い付加体の泥質混在岩や破碎帯

古い付加体である秩父帯にある川上村、高野山帯にある黒滝村・天川村、日高川帯にある五條市大塔町・十津川村、音無川帯にある田辺市山間部では、幅100m～500m、高さ100m～700mを超えるような大規模斜面崩壊が各所で発生し、崩落した多量の土砂が対岸の民家を飲

み込んだり、河川を堰き止めて土砂ダムを形成したりして、甚大な被害をもたらした²⁾(図-1)。

古い付加体で発生する崩壊が大規模となるのは、著しい変形を受けた泥質混在岩が存在すること、あるいは大規模スラストと派生する断層に伴う破碎帯が存在することなどが崩壊の素因となるからであり、崩壊の素因となる地盤の脆弱部が地盤をつくる岩体の地下内部にまで届いているために、地盤の深層からの崩壊となる。このような地下内部にまで届く岩体の脆弱部に向かって、記録的豪雨によりもたらされた雨水が地下水となって浸透・集中することになり、それが崩壊の誘因となっている。さらに加えて、岩体内部にみられる面構造(地層の層理面、岩体の節理面、節理面と層理面が連続する複合面、断層の破碎帯など)の傾きが、山腹斜面の傾きと同じ方向である流れ盤となる地点があり、このような地点では大規模斜面崩壊が起こりやすい。

十津川村宇宮原地区の濁谷では、幅250m、高さ250mに渡って大規模斜面崩壊が起こり、崩壊土砂が土石流となって十津川まで流下した。崩壊部は著しい破断を受けた砂岩泥岩互層である。砂岩層は変形してレンズ化しており、泥岩層には剪断面や劈開面が発達する。そしてその下位に珪質砂岩層のやや硬質な岩体が分布する。さらに崩壊源頭部付近には高角の断層が多数存在し、破碎帯から湧水が認められる。したがって変形・擾乱の著しい砂岩泥岩互層が不安定化し、多量の降雨に伴って破碎帯から地下水が供給されて崩壊が生じたとみられる¹⁸⁾。

十津川村野尻地区では、幅300m、高さ230mに渡って大規模斜面崩壊が起こり、崩壊土砂の一部が土石流となって十津川まで流下した。ここでは層理面・節理面ともに流れ盤であり、崩壊地の主要部は主に泥質混在岩からなり、その下位に硬質な緑色岩類が分布する。この緑色岩類は、周辺の岩体に比べて透水性が低いとみられ、この緑色岩類が地下水を遮水する役割を果たし、その結果として地下水圧の上昇を引き起こし、これが誘因となって崩壊が生じたものとみられる¹⁸⁾。さらに加えて、崩壊地の最上位には砂岩優勢の砂岩泥岩互層が分布しているが、これはスラストの下盤であるとみられ、泥質混在岩のうちでこの互層に近いゾーンは、断層破碎帯である可能性がある。このように泥質混在岩や断層破碎帯の存在が、この崩壊地の崩壊素因になったとみられる。

熊野川支流の三越川流域にある田辺市本宮町奥番では、北向きの斜面が大規模斜面崩壊を起こした(写真-1)。ここは、1953(昭和28)年および明治年間に崩壊があったと記録されている¹⁹⁾ほか、「三越川破碎帯」と西方延長の「熊野破碎帯」の記載がある²⁰⁾。紀伊半島では、スラストは一般的に北側に向かって傾いている。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となる地点があり、このような地点では北向きの大規模斜面崩壊が起こりやすい。奥番の崩壊地は、まさにこのような地点である。



写真-1 スラストの破碎帯 (田辺市本宮町奥番.
2013年2月3日撮影)

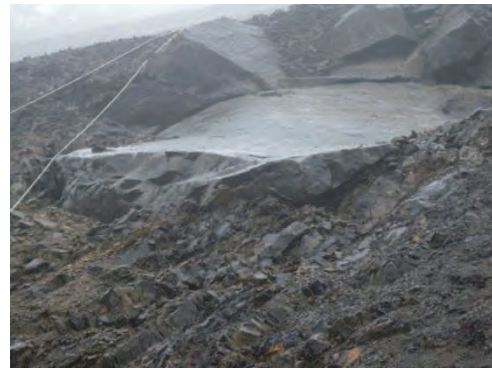


写真-2 砂岩泥岩互層に混在する砂岩ブロック (田辺市伏
菟野. 2013年7月3日撮影)

田辺市伏菟野の崩壊地は、泥岩優勢の砂岩泥岩互層が複雑な小褶曲をくり返すだけでなく小褶曲をなす部分がブロック化するとともに、そのなかに泥岩および砂岩のブロックが多数混在するという極めて複雑な地質構造をしている(写真-2)。このような構造は付加体の初生的な変形に加えて、近傍にあるスラストの運動に伴って形成されたとみられるが、さらにこのスラストはそれ自身が大きく屈曲しており、スラストの運動とその後の屈曲により、局所的な強度低下と地下水の高浸透域が形成され、これが崩壊の素因となったとみられる^{21),22),23)}。

このほか田辺市龍神村三ツ又はスラスト近傍の剪断の発達したゾーン、田辺市本宮町上平治はスラストに伴う破碎帯に加えて、低角に貫入した石英斑岩岩脈の下底面に熱水変質帯があり、これらが崩壊の素因となっている。

b) 新しい付加体の流れ盤

新しい付加体である牟婁帯では、田辺市中辺路町真砂、田辺市深谷、田辺市熊野などにおいて、大規模斜面崩壊が発生している²⁾(図-1)。

牟婁帯は、大規模な褶曲構造を特徴とする北部域、ブロック構造が主体となる南部域からなり、いずれもスラストの発達は良くない。また地層の初生層序がよく保存されており、泥質混在岩は認められない²⁴⁾。このような新しい付加体である牟婁帯は、古い付加体ほどの変形には到っておらず、牟婁帯の崩壊は大規模な褶曲構造のある北部域に集中している。

大規模な褶曲構造が形成されるのに伴って、地質体に節理や剪断構造が発達し、これが地質体の風化を進行させることにつながり、地質体の脆弱部を形成することにつながるとみられる。また大規模な褶曲構造のために、山腹斜面の傾きと地層の傾きが同じ方向の流れ盤となる地点ができることにもつながった。これらが大規模な褶曲構造のある北部域に、牟婁帯の崩壊が集中した要因である。

田辺市熊野では、幅500m、高さ280mの大規模斜面崩壊が起り、土砂ダムが形成されるとともに、土石流が下流の集落まで到達した。この崩壊地は、牟婁帯北部域の大規模な第1級の褶曲構造の向斜の北翼にあたり、地



写真-3 節理の発達する層理面の流れ盤 (田辺市熊野.
2013年10月5日撮影)

層の傾きと山腹斜面の傾きが同じ方向の流れ盤になっている(写真-3)。また層序の下位である厚い砂岩層を含む砂岩優勢の砂岩泥岩互層が崩壊地の上位に位置し、層序的上位である泥岩優勢の砂岩泥岩互層が崩壊地の下位に分布する。これら両者は、崩壊地付近では高角な断層で接していたとみられ、崩壊地東側にある林道で断層破碎帯が認められ、さらに岩盤内部を通る地下水の供給が疑われる湧水がみられた²⁵⁾。断層に平行に延びる節理面が発達しており、これらの節理面と層理面が連続する複合面が形成され、地下水の浸透・集中が誘因となって大規模な崩壊に到ったとみられる。崩壊地の北側には厚い崩積土が分布し、崩壊履歴のある地点である。

古座川町松根では、風化帯と崩積土が流れ盤方向に崩壊している。厚い砂岩層を含む砂岩泥岩互層の分布域であり、崩壊土砂には砂岩の巨礫もみられる。崩壊地はこの南側を走る松根一平井スラストの上盤であり、このスラストに伴って節理や剪断構造が発達し、これが地質体の風化を進行させることにつながった可能性がある。

田辺市中辺路町真砂および田辺市深谷では、斜面崩壊とともに崩壊土砂が土石流となって流下した。これらの地点は、層理面あるいは剪断面が流れ盤となっており、風化帯や崩積土が崩壊している。

(2) 乱れの少ない堆積体での斜面崩壊

前弧海盆堆積体である熊野層群では、新宮市山間部



写真-4 遮水帯となった粘土質変質帯 (那智勝浦町口色川, 2012年10月27日撮影)



写真-5 節理面・層理面で緩んだ泥質互層 (新宮市九重, 2013年12月7日撮影)

(新宮市熊野川町, 新宮市高田), 新宮市佐野, 那智勝浦町色川, 古座川町小川上流域および三重県御浜町などで崩壊や土石流が発生したが, 付加体の大規模斜面崩壊や火成岩体の崩壊・土石流のような大規模な斜面災害はみられない。また熊野層群の崩壊頻度は低く, 熊野酸性火成岩体の崩壊頻度の10分の1程度と推定される。

熊野層群は地層の初生層序がよく保存されており, 乱れがさほどみられない地質体である。また熊野層群の分布域は, 斜面の傾斜が火成岩体ほど急峻ではない。このような地形・地質の要因が, 崩壊規模が小さかったことあるいは発生頻度が低かったことにつながったものとみられる。しかしながら節理の発達した泥質岩では, 崩壊が起りやすい傾向がある。

熊野層群の崩壊地を概観すると, 2グループに区分できる。ひとつは新宮市熊野川町小口～古座川町小川上流域にある崩壊地であり, 節理の発達した塊状泥岩・泥質互層の分布域である。節理に沿って風化帯が形成されているほか, 風化の進んだ節理面が剥離面になることがあり, このような特性が崩壊の素因になったとみられる。このエリアには北東-南西方向のリニアメントが見出されており²⁶⁾, 崩壊地はこの方向にならんでいる。

次には, 火成岩体(熊野酸性火成岩体・大峯花崗岩質岩体)の近傍に位置する泥質岩の崩壊地である。火成岩体の近傍では, 火成岩体の貫入に伴って熊野層群の節理の発達が進んだと考えられるほか, 熱水作用により形成

された粘土質変質帯が存在する地点がある(写真-4)。粘土質変質帯は地下水を遮水するので, 崩壊の素因となる。熊野層群の崩壊地が火成岩体の近傍に集中した背景には, このような要因が考えられる。

那智勝浦町色川小阪では, 火成岩体に近接する熊野層群の泥岩層に粘土質変質帯があり湧水が認められた。この粘土質変質帯が地下水を遮水する役割を果たし, その結果として地下水圧の上昇を引き起こし, これが誘因となって崩壊し土石流化したとみられる¹⁾²⁷⁾。

新宮市九重(図-1)では, 熊野層群の節理の発達した泥岩・泥質互層の流れ盤において, 主として崩積土が崩壊するとともに土石流となって流下した。周辺には広範囲にわたって崩積土が分布するほか, 泥岩・泥質互層は節理面と層理面に沿って緩んでおり(写真-5), 今後も崩壊・土石流の発生しやすい状態である。崩壊地の背後には大峯花崗岩質岩の貫入があり, 崩壊地の正面は熊野川の攻撃斜面である^{28),29)}。

(3) 火成岩体で頻発する巨礫主体の土石流

熊野酸性火成岩体が存在する那智勝浦町那智・色川, 新宮市木ノ川・佐野, 新宮市南松杖・相賀そして三重県熊野市, 三重県紀宝町などでは, 巨礫を主体とする土石流が多数発生した²⁾(図-1)。

主岩体である花崗斑岩には, 岩体の冷却とともに体積収縮でできた柱状節理が発達する。そのために節理に沿って地下深部まで風化が進みやすく, ある程度まで風化が進むと外側から皮をむくように剥離するタマネギ状風化に移行して, 角の取れた風化コアストーンを形成しやすいという特性がある。したがって花崗斑岩には, 風化コアストーンを多量に含む風化帯が形成されやすい(写真-6)。これに加えて, 節理に沿って崩落した巨礫あるいは過去の土石流堆積物である巨礫が, 山腹に厚い崩積土を形成している。このような花崗斑岩の特性と急峻な地形が, 巨礫を主体とする土石流が発生した素因となっている。また流紋岩質火砕岩は平滑堅硬な岩盤を形成しやすい特性をもち, 崩積土が平滑な岩盤上を滑落するように流下しやすい。

土石流による甚大な被害が発生した那智勝浦町那智・色川では, 花崗斑岩からなる急傾斜地において, 風化帯表層部あるいは山腹にあった崩積土が崩壊して, 土石流となって流下した^{27),29),30)}(写真-7)。土石流は花崗斑岩の風化コアストーンに由来する巨礫を主体とし, 流出した崩壊土砂の量は, 風化帯の新たな崩壊で発生した崩壊土砂よりも, 山腹にあった崩積土が流下した量の方が圧倒的に多い。山腹下部は熊野層群からなるやや緩斜面であり, ここに厚い崩積土が残っていたからである^{1),17),29)}。

このほか那智地域の長谷川流域では, 流紋岩質火砕岩の分布域で, 崩積土が平滑な岩盤上を滑落するように流下した例がみられた³¹⁾。

これに対して熊野川下流域の新宮市南松杖・相賀では,



写真-6 花崗斑岩の風化帯（三重県紀宝町、2013年3月29日撮影）



写真-7 流下した土石流堆積物（那智勝浦町金山、2011年10月2日撮影）

崩壊源頭部～土石流末端まで花崗斑岩のみが分布しており、土石流の流路には新鮮な花崗斑岩が露出したところが多く、土石流は急峻な斜面を短時間に流下したものとみられる³²⁾。また三重県紀宝町では、83箇所の崩壊が確認されており、崩壊の発生箇所は南～南東向き斜面に8割が集中している³³⁾。三重県の熊野酸性火成岩体では、花崗斑岩の北岩体で118箇所(0.41箇所/km²)、花崗斑岩の南岩体で117箇所(1.06箇所/km²)、流紋岩体で27箇所(0.44箇所/km²)の崩壊が確認されている³⁴⁾。

火成岩体の崩壊のうちでも、岩体内部の地質的要因に崩壊の素因があるとみられる崩壊地がある。熊野那智大社裏の土石流の源頭部は、崩壊深10mを超える深い崩壊である³⁵⁾。花崗斑岩には発達する節理とともに剪断に伴う開口部があり、その下位に風化の進行したゾーンが認められた。このような岩体内部の構造により、間隙水圧の上昇が誘因となって節理沿いに崩壊に到ったとみられる³⁶⁾。崩壊土砂の巨礫は、外縁に一定幅の風化ゾーンが認められる角礫が多く、崩壊の直前まで節理に沿って組み合わさって露頭を構成していたとみられる。またここには断層に伴う粘土質変質帯があり、主な節理はこの変質帯に向かって傾斜している。この粘土質変質帯が、地下水を遮水する役割を果たす崩壊の素因のひとつになったとみられる。

火成岩体と熊野層群の地質境界付近で、火成岩体が崩壊した崩壊地がある。那智勝浦町色川の赤畠谷では、流

紋岩質火砕岩が幅50mで崩壊し、崩壊土砂は土石流となって集落に被害をもたらした。ここでは下位にある熊野層群の泥岩に幅15mを超える粘土質変質帯があり、この変質帯が地下水を遮水したことによって山側の地下水圧が上昇したことにより崩壊したとみられる^{27),29)}。

このほか火成岩体と熊野層群の地質境界付近では、上位の花崗斑岩は柱状節理に沿って地下水を鉛直方向に浸透させやすい性質をもつものに対して、下位の熊野層群の地層は山側に向かって緩く傾斜して地下水を受け止める構造になっている。ここに地下水が集中すれば地質境界付近で地下水が滞留して、火成岩体の風化帯の地下水圧を急激に上昇させ、崩壊につながるというしくみが考えられるが、このような崩壊地は未だ確認されていない。

5. 降雨の状況と斜面災害

(1) 降雨特性の分析

那智勝浦町那智・色川では、激しい降雨の継続していた時間帯に崩壊・土石流が集中して発生した。色川では4日午前1時～2時頃³⁷⁾、那智では4日午前2時～3時頃³⁸⁾である。これに対して田辺市本宮町奥番では、降雨がほぼ上がった4日午前8時半～9時に崩壊が発生した²⁾。このような事例をみていると、どのような降雨状況のもとで崩壊に到ったのかは、判然としないように思われる。

ここで大規模斜面崩壊の発生しやすい付加体、節理の発達した泥岩層で崩壊の発生しやすい熊野層群(前弧海盆堆積体)、巨礫を主体とする崩壊・土石流の発生しやすい火成岩体、それぞれの降雨特性に着眼する。地質体の構造・特性の相違を反映して、地質体の崩壊の仕方が異なっているからである。このような視点に立って整理された崩壊発生時の降雨状況を、図-2に示す。なお、鈴木ほか(2013)³⁸⁾はレーダーアメダス解析雨量(約1kmメッシュ)をそのまま用いていたが、ここでは解析雨量については、クリギング法を使って崩壊地の雨量に補間したものを使用している。

この図をみると、火成岩体で巨礫主体の崩壊・土石流が発生した箇所(那智地域の8箇所、色川地域の5箇所、木ノ川・佐野地域の6箇所、熊野川下流域の南桜杖・相賀の7箇所の計26箇所)は、この図の上位やや左寄りエリアに集中している。これに対して、付加体で大規模斜面崩壊が発生した日高・西牟婁地方の7箇所は、この図の下位エリアに横長に分布している。付加体の大規模斜面崩壊地と火成岩体の崩壊・土石流発生地とは、やや隔たって分布しており、重複してプロットされていない。そして第3のグループとして、熊野層群で崩壊・土石流が発生した新宮市九重および火成岩体で崩壊・土石流が発生した色川の3箇所の計4箇所があり、これらは上記2つのグループの中間エリアの右寄りに分布している。

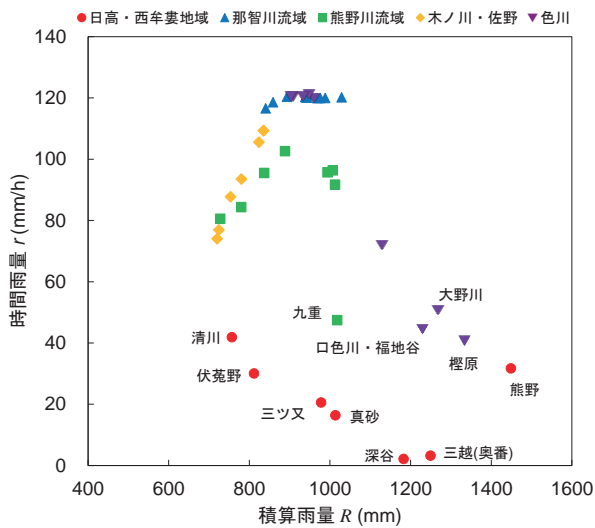


図-2 崩壊時の積算雨量と1時間雨量³⁸⁾

(2) 斜面災害発生時の降雨の状況

日高・西牟婁地域の大規模斜面崩壊は、積算雨量として670mmを超えると、その後の1時間当たりの降雨が40mm以下であっても、その発生につながっている。その一方で積算雨量がその2倍余りの1,400mm近くで発生している崩壊地もあるが、その場合でも崩壊時の雨量は40mm以下である。このようなバラつきが生じるのは、付加体地質構造の脆弱部の規模や構造の相違などを反映するものと考えられる。これは、「深層崩壊を含む大規模斜面崩壊は、降雨継続時間が長く積算雨量が多くなった場合に発生する」とされる一般性とよく一致する。

一方、新宮・東牟婁地域の崩壊・土石流は、積算雨量として650mmの降雨があった後に1時間当たり70mm以上の集中豪雨があると、その発生につながっている。「土石流は、積算雨量が多くなった後に、短時間の集中豪雨があった場合に発生する」とされる一般性とよく一致する。三重県東紀州地域では、積算雨量として800mmの降雨に加えて1時間当たり70mm以上の集中豪雨(花崗斑岩南岩体の場合)または1時間当たり90mm以上の集中豪雨(花崗斑岩北岩体の場合)で、崩壊・土石流が多発したとされている³⁹⁾。これは集中豪雨の発生した時間帯が、東紀州地域の方が2時間前後遅れたことを反映している可能性がある。

次に、第3のグループの4箇所については、以下のような特徴的な地質的要因が認められる。新宮市九重は熊野層群の節理の発達した泥質岩の緩んだ流れ盤である。色川の櫻原は流紋岩質火砕岩の新鮮岩盤と脆弱化した変質帯との境界で崩壊が発生している。また口色川・福地谷では源頭崩壊地や溪流沿いに複数の断層破砕帯があり、これらが脆弱なゾーンを形成している。西側に隣接する大野川でも同様である可能性が高い。このような要因が崩壊に関連すると推察されるが、詳細は今後の課題となっている^{38),40)}。第3のグループは、このような地質的

要因のために、他の崩壊地に比べて崩壊時の1時間雨量が少なく、積算雨量が多い傾向を示したとみられる。

9. おわりに

2011(平成23)年台風12号による紀伊半島大水害では、紀伊半島の広範囲にわたって斜面災害が多発した結果、地質体の形成過程の相違が、地質体の崩壊メカニズムの相違となって現れることが明瞭になった。しかしながら、詳細な崩壊メカニズムについては未解明な課題も多い。

謝辞: 本稿は「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による調査や議論に依るところが大きい。なお、この研究の一部は、和歌山大学平成24-26年度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、西日本旅客鉄道株式会社、およびJSPS科研費25242037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る。

参考文献

- 1) 那智勝浦町務課編：紀伊半島大水害 平成23年9月町を襲った台風12号の記録, p.16, pp.20-66, pp.71-74, pp.263-265, pp.270-277, 那智勝浦町, 2013.
- 2) 平成23年台風12号による地盤災害調査団編：平成23年台風12号による紀伊半島における地盤災害調査報告書, pp. II-14- II-69, pp. III-24- III-48, pp. III-56- III-90, pp. IV-3- IV-14, 地盤工学会関西支部, 2011.
- 3) 吉松敏隆：地帯区分と境界断層, 特集=紀伊半島の地質と温泉, アーバンクボタ, No.38, pp.8-9, 1999.
- 4) 大和大峯研究グループ：紀伊山地中央部の中・古生界(その9) - 辻堂・大峯・台高・国見山地域の再検討 -, 地球科学, 第59巻, pp.287-300, 2005.
- 5) 大和大峯研究グループ：紀伊山地中央部の中・古生界(その10) - 大杉地域 -, 地球科学, 第61巻, pp.33-47, 2007.
- 6) 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59号, pp.1-86, 2012.
- 7) 鈴木博之：紀伊半島四万十付加体の地質構造, 地団研専報59号, pp.101-110, 2012.
- 8) 久富邦彦：紀伊半島東南部の熊野層群の地質と堆積, 地質学雑誌, 第87巻, pp.157-174, 1981.
- 9) Chijiwa, K., Tomita, S.: Stratigraphic Notes on Kumano Group, *Mem. Fac. Sci., Kyushu Univ., Ser. D, Geol.*, Vol.24, pp.155-178, 1981.
- 10) 紀州四万十帯団体研究グループ：紀伊半島, 中新統熊野層群の泥ダイアピル, 特に前弧海盆南縁の巨大分岐断層群との関係について - 紀伊半島四万十帯の研究(その15) -, 地球科学, 第65巻, pp.1-16, 2011.
- 11) 荒巻重雄, 羽田忍：熊野酸性火成岩類の中部および南部の地質, 地質学雑誌, 第73巻, pp.494-512, 1965.

- 12) 川上裕, 星博幸: 火山—深成複合岩体にみられる環状岩脈とシート状貫入岩: 紀伊半島, 尾鷲—熊野地域の熊野酸性火成岩類の地質, 地質学雑誌, 第113巻, pp.296-309, 2007.
- 13) Miura, D.: Arcuate pyroclastic conduits, ring faults, and coherent floor at Kumano caldera, southwest Honshu, Japan., *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol.92, pp.271-294, 1999.
- 14) 村田守: 紀伊半島中部, 大峯地域の中新世IタイプおよびSタイプ花崗岩質岩の岩石学, 岩鉱, 第79巻, pp.351-369, 1984.
- 15) 三宅康幸: 和歌山県潮岬火成複合岩体の地質と岩石, 地質学雑誌, 第87巻, pp.383-403, 1981.
- 16) 鈴木博之, 中屋志津男, 山本俊哉, 鈴木稔和: 平成23年台風12号災害における紀伊半島の斜面災害と地形・地質 (概要), 地団研専報59号, pp.263-271, 2012.
- 17) 後誠介: 熊野川流域の地質と斜面崩壊, 熊野林業, 第12号, pp.4-9, 2013.
- 18) 三田村宗樹, 宇都忠和, 栃本泰浩, 東田淳, 宇都秀幸, 村橋吉晴, 岡島信也, 山下大輔, 加藤智久, 松村法行: 大規模斜面崩壊の地質学的背景 —平成23年台風12号による奈良県十津川村濁谷・野尻地区の斜面災害—, 第49回地盤工学研究発表会, pp.1813-1814, 2014.
- 19) 塚脇祐次, 宗森一郎: 和歌山県地下資源調査第一班調査報告書, 地質調査所月報, 第47巻, 7号, pp.6-7, 1953.
- 20) 津田秀郎: 和歌山県における地すべり, 和歌山大学学芸学部紀要自然科学, 第13集, pp.25-40, 1963.
- 21) 野並賢, 鍋島康之, 後誠介, 岩佐直人, 矢野晴彦, 石田優子・佐々木清一: 平成23年台風12号による和歌山県伏菟野地区の崩壊状況について, 第48回地盤工学研究発表会, pp.2079-2080, 2013.
- 22) 鍋島康之, 野並賢, 後誠介, 谷垣勝久, 矢野晴彦, 石田優子: 和歌山県伏菟野地区における大規模崩壊地の地質と崩壊に関する考察, 第49回地盤工学研究発表会, pp.1819-1920, 2014.
- 23) 野並賢, 鍋島康之, 後誠介, 谷垣勝久, 矢野晴彦, 石田優子: 和歌山県伏菟野地区の地質構造と崩壊機構の検討事例, *Kansai Geo-Symposium 2014* 論文集, pp.189-194, 2014.
- 24) 鈴木博之, 中屋志津男, 福田修武: 牟婁付加シークエンス (牟婁層群) の層序と構造 —中部始新統~下部中新統の付加体—, 地団研専報59号, pp.71-86, 2012.
- 25) 鍋島康之, 野並賢, 後誠介, 矢野晴彦, 石田優子, 岩佐直人, 佐々木清一: 平成23年台風12号により斜面崩壊が発生した和歌山県熊野地区の地質的背景について, 第48回地盤工学研究発表会, pp.2071-2072, 2013.
- 26) 通商産業省資源エネルギー庁: 昭和63年度広域地質構造調査報告書 那智地域, pp.95-105, 1989.
- 27) 矢野晴彦, 泉並良二, 後誠介, 江種伸之: 平成23年台風12号による那智勝浦町色川地域における土石流災害, 第48回地盤工学研究発表会, pp.2091-2092, 2013.
- 28) 辻野裕之, 谷垣勝久, 泉並良二, 加藤智久, 岩瀬信行, 石田優子, 後誠介, 江種伸之: 平成23年台風12号による新宮市熊野川町九重における土石流災害, 第49回地盤工学研究発表会, pp.1791-1792, 2014.
- 29) 江種伸之, 辻野裕之, 谷垣勝久, 泉並良二, 矢野晴彦, 加藤智久, 岩瀬信行, 石田優子, 藤本将光, 岩佐直人, 後誠介: 平成23年台風12号による和歌山県牟婁地域における土石流災害, *Kansai Geo-Symposium 2014* 論文集, pp.179-184, 2014.
- 30) 江種伸之, 鍋島康之, 矢野晴彦, 辻野裕之, 後誠介, 深川良一: 平成23年台風12号による和歌山県那智勝浦町における土石流災害, 第47回地盤工学研究発表会, pp.1705-1706, 2012.
- 31) 江種伸之, 辻野裕之, 岩瀬信行, 谷垣勝久, 岩佐直人, 藤本将光, 後誠介: 平成23年台風12号による那智川水系長谷川における土石流災害, 第48回地盤工学研究発表会, pp.2089-2090, 2013.
- 32) 加藤智久, 岩瀬信行, 矢野晴彦, 石田優子, 江種伸之: 平成23年台風12号による新宮市南松杖と相賀における土石流災害, 第49回地盤工学研究発表会, pp.1789-1790, 2014.
- 33) 酒井俊典, 古根川竜夫, 岡島賢治: 平成23年台風12号により発生した紀宝町における土砂災害の状況, 第48回地盤工学研究発表会, pp.2073-2074, 2013.
- 34) 酒井俊典, 岡島賢治, 池田静香, 大久保啓太, 古根川竜夫, 石川昌幹, 片岡泰, 坂口和之, 中谷仁, 長谷川謙二, 林健二, 由井恒彦: 平成23年台風12号により発生した三重県東紀州地域の斜面崩壊の特徴, 第49回地盤工学研究発表会, pp.1785-1786, 2014.
- 35) 石田優子, 藤本将光, 梅本啓介, 里深好文, 深川良一: 平成23年台風12号による熊野那智大社土砂災害の実態調査, 第48回地盤工学研究発表会, pp.2085-2086, 2013.
- 36) 石田優子, 後誠介, 藤本将光, 江種伸之, 深川良一: 熊野那智大社土石流の源頭崩壊地における地質構造と崩壊に関する考察, 第49回地盤工学研究発表会, pp.1793-1794, 2014.
- 37) 色川地域振興委員会編: 色川だより, 第28号, p.4, 2012.
- 38) 鈴木梨加, 江種伸之, 矢野晴彦, 辻野裕之, 鍋島康之, 後誠介: 平成23年台風12号による和歌山県内の土砂災害と雨量の関係, *Kansai Geo-Symposium 2013* 論文集, pp.87-90, 2013.
- 39) 古根川竜夫, 酒井俊典, 岡島賢治, 池田静香, 大久保啓太, 石川昌幹, 片岡泰, 坂口和之, 中谷仁, 長谷川謙二, 林健二, 由井恒彦: 平成23年台風12号により発生した三重県東紀州地域の斜面崩壊と降雨との関係, 第49回地盤工学研究発表会, pp.1787-1788, 2014.
- 40) 江種伸之, 辻野裕之, 谷垣勝久, 泉並良二, 矢野晴彦, 加藤智久, 岩瀬信行, 石田優子, 藤本将光, 岩佐直人, 後誠介: 平成23年台風12号による和歌山県牟婁地域における土石流災害, *Kansai Geo-Symposium 2014* 論文集, pp.179-184, 2014.

(2015. 1. 9受付)