

九州南部の森林流域における2005年台風14号 豪雨による出水と土砂流出

宮縁育夫^{*1}・玉井幸治¹・小川泰浩²・清水貴範¹

Runoff and Sediment Discharge Triggered by the Typhoon 200514 (Nabi) in Forested Watersheds, Southern Kyushu, Japan

Yasuo MIYABUCHI^{*1}, Koji TAMAI¹,
Yasuhiro OGAWA² and Takanori SHIMIZU¹

Abstract

Storm runoff and sediment discharge during the typhoon 200514 (Nabi) were monitored in three forested basins (WS1: 6.6 ha, WS2: 9.2 ha, WS3: 8.2 ha) at the Sarukawa Experimental Watershed located in Miyazaki Prefecture, southwestern Japan. Dormant geology in the area is chaotic beds of mudstone and sandstone within the Shimanto Belt (an accretionary prism). The total amount of precipitation associated with the typhoon storm event was 1,156 mm. Although the maximum 1-hr precipitation was 40.5 mm/hr and not exceptionally higher than average annual record, high and intense rainfall (precipitation >23 mm/hr) continued 19 hours. During the storm event, the greatest peak and total catchment runoff was observed in WS1 and WS3 and direct storm runoff coefficient became 83 and 98 % respectively. Sediment discharge volumes measured by deposits behind weir ponds of WS1, WS2 and WS3 were 2.5, 7.3 and 1.9 m³/ha, respectively. Several slope failures occurred on hillslopes and zero-order hollows in WS2. Hence, the greatest sediment discharge observed at the weir of WS2 potentially associated with remobilization of deposited material within the channels and riparian zones, because most of sediment due to slope failures deposited on the foot of hillslopes. Continuous monitoring of runoff and sediment discharge will help to understand the spatial and temporal variations of sediment supplied, deposits and transport in forested watersheds.

Key words: *the typhoon 200514 (Nabi), heavy rainfall, forested watersheds, runoff, sediment discharge.*

2006年6月28日受付, 2006年11月27日改稿, 2007年1月5日受理

¹ 森林総合研究所九州支所

¹ Kyushu Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute, Kurokami 4-11-16, Kumamoto 860-0862, Japan.

² 森林総合研究所水土保全研究領域

² Department of Soil and Water Conservation, Forestry and Forest Products Research Institute, Matsunosato 1, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan.

* Corresponding author: yasuo@affrc.go.jp

1. はじめに

わが国は台風や前線の常襲地帯に位置しており、総雨量が1,000 mm以上に達するような豪雨が出現することがある。こうした豪雨は山地斜面における侵食や崩壊、河川での洪水・土石流の発生といった活発な土砂生産・流出現象の誘因であり、山地流域の地形変化に大きな影響を及ぼす。このような豪雨に伴う流出現象の実態解明は水文学的にも地形学的にも重要な意義をもつと考えられ、わが国では大学や研究機関等によって設置された多数の試験流域で水文観測が実施されてきた。その中でも、神通川水系足洗谷流域では、精力的な現地観測により降雨流出だけでなく、土砂流出機構についても多数の研究結果が得られている（沢田, 1985 など）。しかしながら、総雨量が1,000 mm以上に達するような降雨イベントに関する観測データは少なく、そのようなイベントによる水土流出の実態を報告した例はほとんどない。

わが国の中でも、台風や前線の来襲頻度がとくに高い九州地方では1993年6月～9月（地頭菌ほか, 1996）などに著しい豪雨が出現したが、2005年9月には台風14号が来襲し、宮崎県や鹿児島県などでは記録的な豪雨に見舞われ、大規模な斜面崩壊や河川氾濫が発生するなど、激甚災害となった（谷口ほか, 2005）。こうした土砂災害が発生した地域には、森林総合研究所九州支所が1959年以来水文観測を実施している去川森林理水試験地^{さるか}があり、観測史上最大規模の降雨流出イベントが記録されていた。台風14号による降雨は気象庁や宮崎県等により多数の地点で観測されていたが、流域からの流出量を正確に測定し、その結果を報告した例は見当たらない。

本論は、記録的な豪雨をもたらした2005年台風14号による去川森林理水試験地の降雨流出や土砂流出の実態を報告するとともに、森林小流域における土砂生産・流出プロセスについて考察するものである。

2. 試験流域の概要

去川森林理水試験地（Sarukawa Experimental Watershed）は、大淀川流域の宮崎県^{ひがし}東諸^{もろ}郡高岡町（現 宮崎市高岡町）字和石^{よれし}の宮崎森林管理署去川国有林内に位置している（Fig. 1）。この地域は標高400 m以下の小起伏山地からなり、地質は四万十累層群の頁岩の分布域にあたる（木野・太田, 1976）。詳細な調査によると、地質は頁岩が優勢であるものの、礫岩や石灰岩、さらに厚い砂岩も認められている（丸山ほか, 1960）。試験流域付近の地質の走向はほぼ南北方向で60°程度の角度で西方に傾斜している（木野・太田, 1976）。ただし、この地域は四万十帯が北東走向から南北走向へ屈曲する地点にあたる（寺岡ほか, 1981）など、地質構造が複雑であり、岩石は破碎が著しく進行していて板状や^{やじり}鏟状に剥離するなど、断片化していることが特徴となっている。こうした特徴から、試験地に分布する岩石は、破断された砂岩泥岩互層等からなる混在岩（斎藤ほか, 1997）やメランジュ相などの乱雑

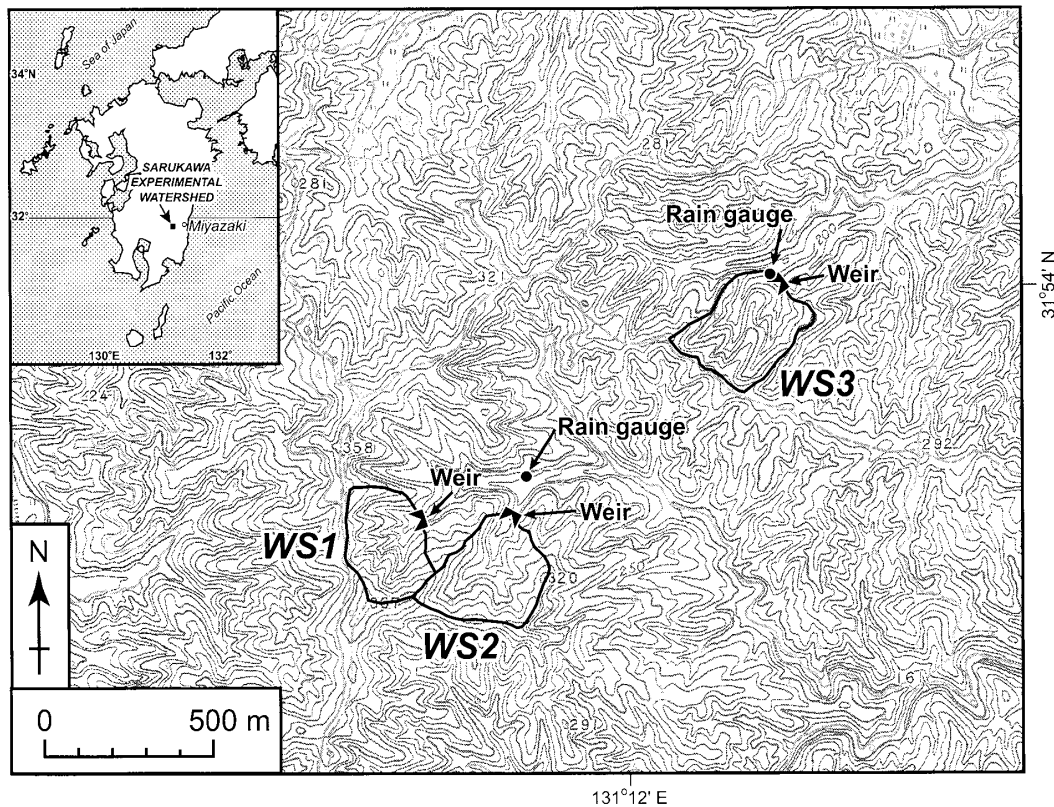


Fig. 1. Topographic map of the Sarukawa Experimental Watershed located in Miyazaki Prefecture, southern Kyushu. The base map is a part of 1:25,000 topographic map of the Arimizu district published by the Geographical Survey Institute. Contour interval is 10 m. Longitude and latitude are shown as WGS 84.

層 (村田, 1998) とよぶべきものであろう。また, 試験地周辺の緩傾斜の谷や尾根部分には約 29,000 年前 (奥野, 2002) に始良カルデラから噴出した入戸火砕流堆積物 (荒牧, 1969; 横山, 1972) が分布している。この堆積物は俗に“シラス”とよばれるもので, 試験地内においてはその露出が確認できていないが, 尾根などの緩斜面には存在するものと考えられる。

去川森林理水試験地は, 台風常襲地帯の常緑広葉樹林および針葉樹林における水文特性の解明を目的として 1956 年に設置されたもので, 1959 年より本格的な水文・気象観測が行われている (林業試験場宮崎分場防災研究室, 1960)。この試験地は, 1 号沢・2 号沢・3 号沢という 3 つの流域で構成されている (Fig. 1)。流域面積は 1 号沢が約 6.6 ha, 2 号沢が約 9.2 ha, 3 号沢が約 8.2 ha であり, 流域の平均傾斜は 32 ~ 34° 程度となっている (Table 1)。1 号沢と 2 号沢は隣接しているが, 3 号沢はそれらより北東へ 1 km 程度尾根を隔てた場所に位置している。1・2 号沢は杉の本谷へ, 3 号沢は和石谷へ注いでいるが, これらは最終的に合流し, 境川を経由して大淀川へ流出している。流域の形状は 2 号沢と 3 号沢が類似しているが, 1 号沢は沢の長さに比較して横幅が大きく, 平均傾斜もやや大きいという特徴がある (丸山ほか, 1960)。試験地内の土壌は急斜面を除くと 1 m 以上の厚さとなってい

Table 1. Geomorphic and vegetation characteristics of the Sarukawa Experimental Watershed.

Watershed	Area (ha)	Elevation (m)	Length of main stream (m)	Average slope of main stream (degree)	Average slope gradient (degree)	Vegetation
Watershed 1 (WS1)	6.556	262.9-370.2	261.3	22.3	34.4	Clear cutting of broad-leaved forest in 1965 and <i>Hinoki</i> plantation in 1967
Watershed 2 (WS2)	9.174	232.3-358.1	393.3	17.7	32.3	Partial cutting of broad-leaved forest in 1982
Watershed 3 (WS3)	8.181	202.4-288.1	380.6	12.7	32.3	Clear cutting of conifer and broad-leaved forests in 1965 and <i>Hinoki</i> and <i>Sugi</i> plantation in 1982

Data in the table are from Forest Influences Unit, Kyushu Branch Station (1982) and Takeshita et al. (1996).

る。3流域とも B_A 型, B_C 型, B_D 型の土壌が認められ, B_D 型は各流域ともに谷筋に 10 % 前後分布しており, 2号沢は B_A 型が多く, 3号沢は B_C 型が 50 % 以上を占めている (白井ほか, 1965)。観測開始当初における植生は, 1号沢と 2号沢がシイ・カシ類を上層木とし, イスやタブなどを下層木とする本地域で代表的な常緑広葉樹林であった。また, 3号沢の谷筋は約 50 年生 (1960 年当時) のスギ造林木を主体とし, 尾根部分には常緑広葉樹が存在する針広混交林であった (林業試験場宮崎分場防災研究室, 1960; 白井ほか, 1962)。その後, 1号沢の照葉樹林と 3号沢の針広混交林は 1965 ~ 1966 年に皆伐が行われ, 1967 年に 1号沢にヒノキを, 3号沢にはヒノキ (流域上部) とスギ (下部) が植栽された (九州支場防災研究室, 1982)。2号沢の森林は対照区として保存されたが, 1982 年に沢筋を中心に流域面積の約 43 % に相当する 3.79 ha が部分伐採され, その後は未植栽の状態でも萌芽・天然更新によって植生が回復している (竹下ほか, 1996)。観測流域内には林道や作業道は設置されておらず, 過去の伐採によって生じた斜面崩壊は認められない。

この試験地における年平均降水量 (1967 ~ 1986 年) は 2,847 mm であり (九州支場防災研究室, 1982; 竹下ほか, 1996), これは宮崎市での観測値 (気象庁 1971 ~ 2000 年データによる平年値) よりも 400 mm 程度多い値となっている。

3. 観測方法

2005 年の台風 14 号来襲時を含む期間における, 去川森林理水試験地での観測の概要を以下に記す。

各試験流域の出口には量水堰堤が設置されており, 60° の三角ノッチを使用して水位を測定した (Fig. 2)。水位はフロート式水位計 (池田計器製; 3ヶ月巻きの記録紙使用) で記録した。自記水位記録の読みとりは人手により実施し, そのデータをコンピュータに入

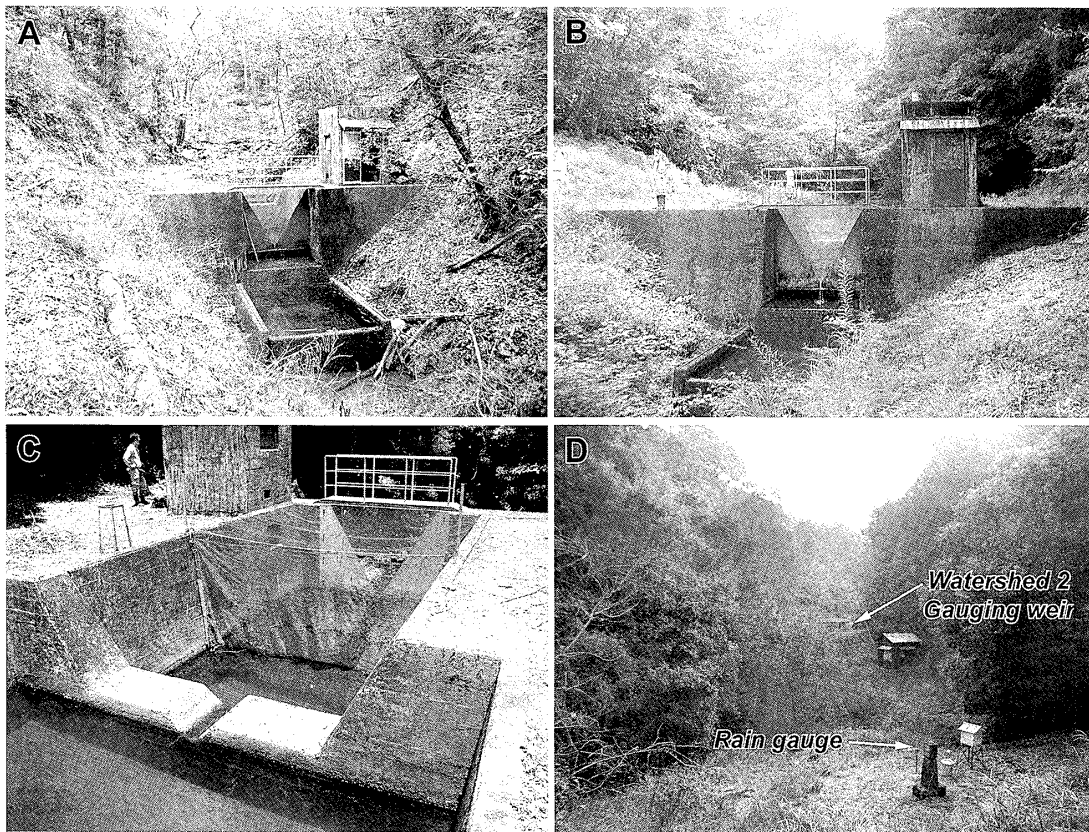


Fig. 2. Photographs of the Sarukawa Experimental Watershed. (A) Gauging weir at the watershed 1. (B) Gauging weir at the watershed 2. (C) Gauging weir and reservoir at watershed 3. (D) Rain gauge near the watershed 2.

力して、水位流量換算式（白井・竹下，1968）と台形近似により流量の計算を行った。

量水堰堤上流側には水位計測のための湛水池（長さ 6.5 m，幅 3.6 m，深さ 3.3 m）のほか，さらに上流に土砂の流入を防ぐ沈砂池（長さ 3.6 m，幅 5.2 m，深さ 2.5 m）が設置されている（Fig. 2 C）。この沈砂池と湛水池に堆積した土砂について，1 m ごとに設けた測線のレベル測量を行って土砂量を計測して，流域からの流出土砂量として取り扱った。

降雨量の観測は，2号沢に近接する露場（標高約 230 m；Fig. 2 D）と 3号沢水位計室（標高約 200 m）屋根に設置した転倒マス型雨量計（0.5 mm 一転倒）を使用して実施し（Fig. 1），その転倒時間をデータロガー（Onset Computer Corporation 製 HOB0 Event）に記録した。

4. 台風 14 号に伴う豪雨の出現状況

2005 年 8 月 29 日にマリアナ諸島付近の海上で発生した台風 14 号（アジア名 Nabi）は，西に進みながら大型で非常に強い勢力に発達した。9 月 4 日に大東島地方に接近してから，6 日に熊本県天草下島および長崎県諫早市付近に上陸した後，同日夜半に日本海へ抜

けて北東に進んだ。この台風は広い暴風域を維持したまま、比較的ゆっくりした速度で進んだことが特徴であり、西日本を中心に長時間にわたって暴風・高波・大雨が続いた（気象庁，2005）。台風の暖かく湿った暴風が九州・四国地方等の南東側斜面で強い上昇気流となり、発達した雨雲が長時間持続したことにより、宮崎県を中心とする九州地方では、9月3日～8日の総雨量が1,300 mm以上に達し（東臼杵郡南郷村神門^{みかど}，えびの市），各地で日雨量の記録を更新する（例えば，えびの市で9月6日に639 mm）など、記録的な豪雨となった。この豪雨によって、去川森林理水試験地を含む大淀川流域では宮崎市や高岡町を中心に氾濫が起こり、4,706戸の家屋が浸水した（杉尾，2006）。

去川森林理水試験地における9月3日から6日までの総雨量は2号沢付近の露場で1,156 mm，3号沢で991 mmであり（Table 2），1959年の観測開始以来，最大規模のものであった。総雨量の多かった2号沢露場での観測データによると，9月1日～2日は無降雨の状態であり，台風14号に伴う降雨は9月3日の16時台に始まったが，その日は日雨量5.5 mm，最大時間雨量2.5 mm/hrと比較的弱い降雨であった。9月4日に入って，時間雨量はいくつかのピーク（最大時間雨量35.5 mm/hr；16：00-17：00）を示して増減を繰り返すようになった（Fig. 3）。さらに9月5日からは強雨が連続する状態となった。とくに同日15時から9月6日10時までの時間帯は，連続して時間雨量23 mm/hr以上の降雨が記録された。この時間帯の50%以上は30 mm/hrの状態であり，最大時間雨量は40.5 mm/hrであった。6日10時以降は降雨量が漸減するようになり，同日21時には降り止んだ。

台風14号に伴う降雨は強度の面からみると，最大時間雨量が2号沢で40.5 mm/hr，3号沢で36 mm/hrと極度に多いものではなく，こうした時間雨量は本試験地において毎年数回出現する程度のものであった。しかし，時間雨量20 mm/hr以上の状態が19時間以上続くなど，強い雨が長時間継続する降雨であった。そのことを反映して，累積雨量もほぼ一定の割合で増加し続けていた（Fig. 3）。その結果，台風14号による降雨は総雨量として3号沢で991 mm，2号沢で1,156 mmに達する記録的なものであったといえる。また，これらの降雨量は2005年降水量の32%（3号沢）および37%（2号沢）に相当する量であった。

Table 2. Summary of the September 3-6, 2005 heavy rainfall observed at the Sarukawa Experimental Watershed.

Watershed	Total rainfall (mm)	September 3		September 4		September 5		September 6	
		total (mm/day)	maximum (mm/hr)	total (mm/day)	maximum (mm/hr)	total (mm/day)	maximum (mm/hr)	total (mm/day)	maximum (mm/hr)
Watershed 2 (WS2)	1156.0	5.5	2.5	168.5	35.5	592.5	39.0	389.5	40.5
Watershed 3 (WS3)	991.0	6.5	2.5	154.5	36.0	521.5	31.0	308.5	33.0

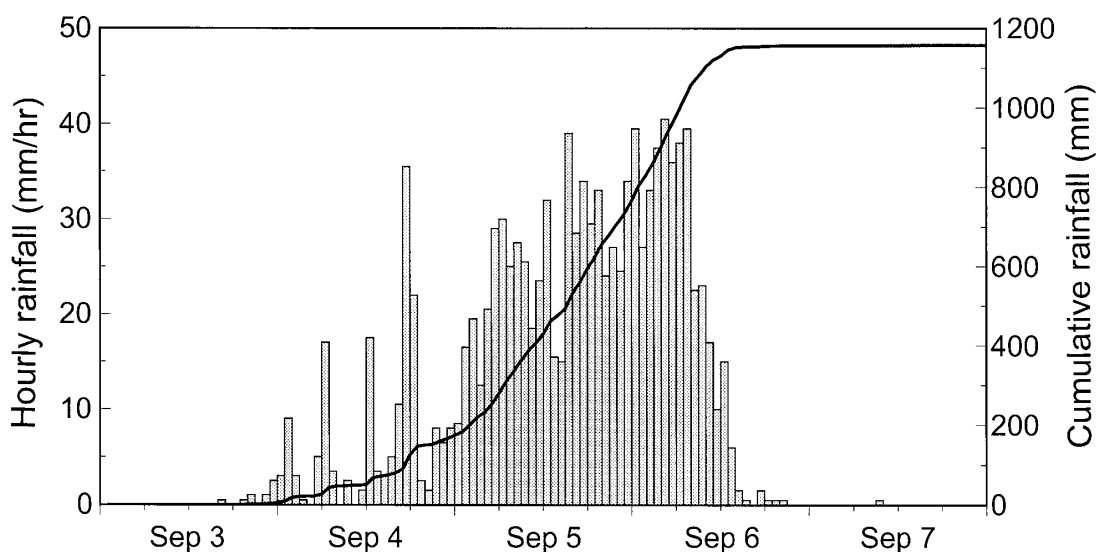


Fig. 3. Temporal change in hourly rainfall on September 3-7, 2005 observed at the watershed 2.

5. 降雨流出の発生状況

記録的な総雨量となった豪雨により、3つの試験流域では観測史上、最大規模の流出が発生した (Table 3). 各流域のハイドログラフを Fig. 4 に示す. なお、2号沢においては湛水池への多量の土砂流入により9月5日21時30分頃より正確な水位観測を実施できなくなったため、それ以降の流出量 (測定された水位の値をそのまま用いて計算したもの) は点線で記している (Fig. 4 B).

3つの流域の流出波形は類似しており (2号沢の正確な水位データが得られなくなった部分を除く)、とくに1号沢と3号沢のものはほとんど一致していた (Figs. 4 A, 4 C). 各流域ともに、降雨開始の9月3日16時20分~30分頃から、水位が上昇し始めている.

Table 3. Runoff characteristics of the Sarukawa Experimental Watershed during the September 3-6, 2005 rainstorm event.

Watershed	Total rainfall (mm)	Maximum rainfall (mm/hr)	Maximum rainfall (mm/10 min)	Peak discharge (m ³ /sec)	Peak runoff (mm/10 min)	Direct runoff (mm)	Direct runoff coefficient
Watershed 1 (WS1)	—	40.5	14.0	0.57	5.2	960.2	0.831
		Sep 6 04:00-05:00	Sep 5 15:40-50	Sep 6 06:48:08:00	Sep 6 07:50-08:00		
Watershed 2 (WS2)	1156.0	40.5	14.0	—	—	—	—
		Sep 6 04:00-05:00	Sep 5 15:40-50				
Watershed 3 (WS3)	991.0	36.0	11.0	0.75	5.5	969.7	0.979
		Sep 4 17:00-18:00	Sep 5 15:40-50	Sep 6 08:12	Sep 6 08:00-10		

Note: Direct runoff coefficient at the watershed 1 was calculated by using total rainfall at the watershed 2.

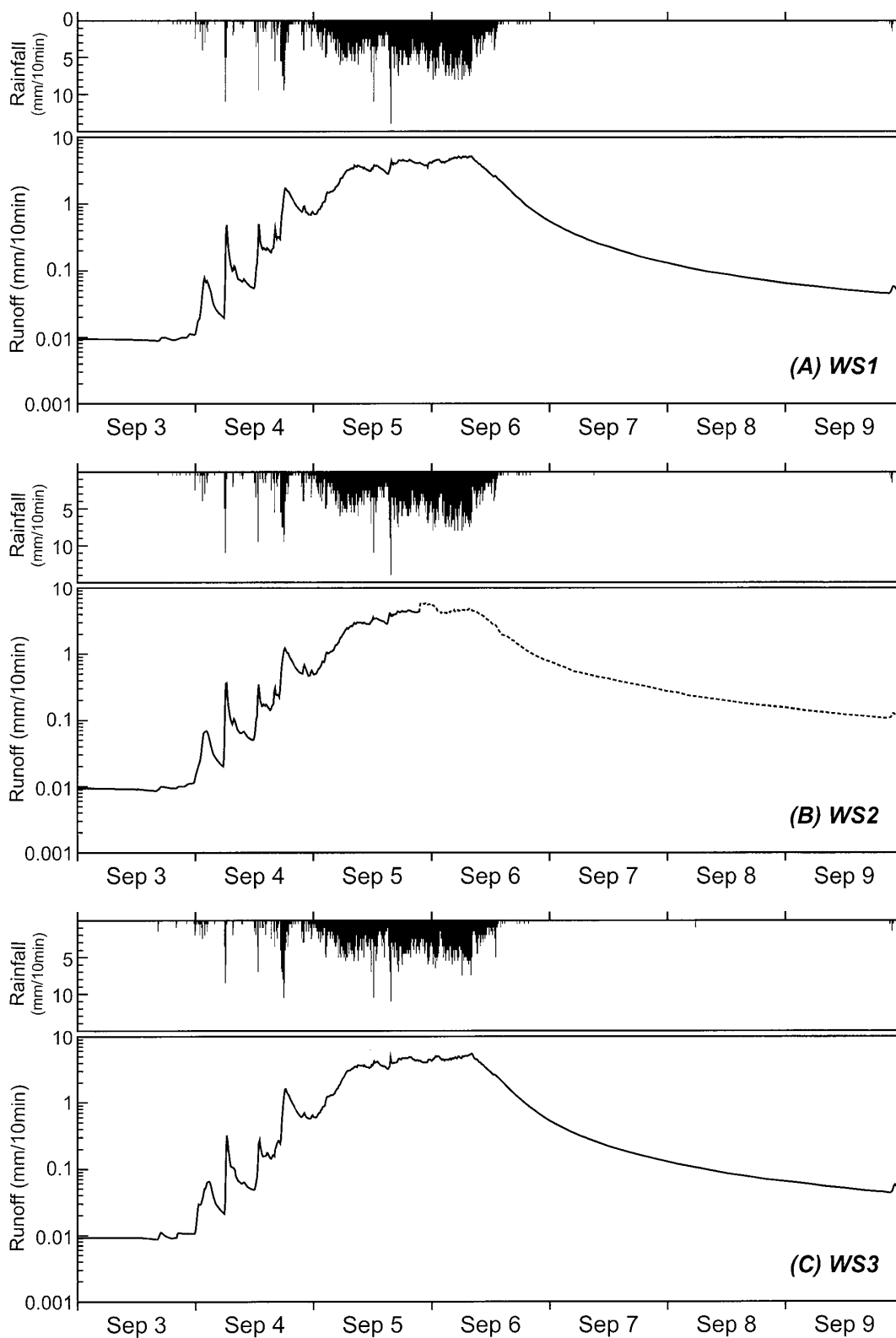


Fig. 4. Hydrographs of the typhoon 200514 event at the Sarukawa Experimental Watershed.

その後、降雨ピークに対応する鋭敏な流出ピークを示しながら、流出量が増加していき、降雨量がとくに集中した9月5日～6日に多量の流出が観測された。流出量のピークは、降雨の最後のピークに近い9月6日の8時頃に出現しており、1号沢で5.2mm/10min、3号沢で5.5mm/10minとほぼ同じ値であった（Table 3）。その後、降雨量の減少に伴って流出量も減衰していき、その減衰は次の降雨が始まった9月9日21時頃まで続いた。

台風14号豪雨について欠測なくデータが得られた1号沢と3号沢のハイドログラフ（Figs. 4 A, 4 C）から直接流出量の分離を試みた。この直接流出の分離には、減衰曲線を片対数軸上にプロットして得られた直線をつぎの出水上昇開始点から時間的にさかのぼり、その折れ点を求めて、対象とする出水開始点と直線で結んだ下部領域を基底流出とする方法（中野, 1976, p.145）を使用した。この方法は簡便であることから、一般によく用いられている（例えば、藤枝, 1995 など）。降雨終了後の逡減部分を片対数プロットした結果、両流域ともに次の降雨開始点（9月9日21時10分）までの間に明瞭な直線の折れ点を見出すことができなかった。台風14号豪雨に伴う直接流出は次の降雨開始点以降も続いていたものと考えられるが、ここでは便宜的に、次の降雨開始点までを直接流出の継続期間とした。つまり、ハイドログラフ上の9月3日16時20分の出水開始点と9月9日21時10分の次の出水開始点とを直線で結び、その下部領域を基底流出、上部領域を直接流出として分離した。その結果、1号沢の直接流出量は960.2mmであり、これは総雨量1,156mmの約83%に相当する。また、3号沢の直接流出量は969.7mmで、総雨量991mmの約98%を占める高い値となっていた。

6. 流域からの土砂流出の実態

6.1. 流域内の侵食・崩壊状況

観測史上記録的な豪雨に見舞われた去川森林理水試験地周辺域においては、多数の斜面崩壊等が認められた。したがって、試験流域内の斜面でも侵食や崩壊が発生しているものと予想されたため、現地調査を実施した。その調査は2005年9月21日と12月8日、2006年1月12日に行い、3つの流域内の沢筋を全て踏査して行った。

1号沢においては、南端の流路沿いに段丘面の侵食（幅5.5m、高さ1.8m、厚さ2m程度）とやや大きな溪岸崩壊（幅8m、高さ10m、深さ2m程度）が認められた（Fig. 5 A）が、崩壊土砂はその直下に残存しており、流出していなかった。また、流路に堆積する礫などが大きく侵食された形跡は認められなかった。

2号沢では、根返りや折損といった風倒木のほか、いくつかの谷頭崩壊や溪岸崩壊が発生していた。谷頭崩壊の中で最も大きなものは幅4.5m、高さ3m、奥行6.5m程度であった（Fig. 5 B）。その崩壊面には多数のパイプ（径3～4cm）が認められたこと（Fig. 5 C）から、パイプ流が一気に吹き出すことによって崩壊した（Tsukamoto et al., 1982 など）と考えられる。また、主流路源頭部付近の右岸には幅10～20m、高さ約40mの崩壊が起

こっていたが、崩壊深は最大で0.5m程度であり (Fig. 5 D), それほど多くの土砂生産は発生していなかった. これらの谷頭崩壊や溪岸崩壊で生産された土砂は、いずれも崩壊直下の流路に堆積しており、下流まで流出していない状況であり、流路では著しい侵食は起こっていなかった (Figs. 5 E, 5 F). しかし、2号沢には量水施設から約5 m上流の右岸側に幅2 m, 長さ8 m, 深さ1.5m程度の崩壊が発生しており、その崩壊土砂だけが沈砂池



Fig. 5. Photographs of slope erosion and failures, and channels in the Sarukawa Experimental Watershed. (A) A channel sideslope failure (about 8 m wide) in the watershed 1. (B) A valley head collapse in the watershed 2. (C) Pipes formed on a collapse wall. (D) A slope failure at the headwater of the watershed 2. (E) A small channel having woody debris and sediment in the watershed 2. (F) The main stream of the watershed 2.

へ達していた。

3号沢については、ごく小さな谷頭崩壊（幅 1.8m、高さ 1.2m、奥行 0.6m 程度：崩壊面にはパイプあり）が 1 箇所と根返りした風倒木が見られたのみであり、ほとんど土砂が流出していない状況であった。

6.2. 流域からの流出土砂量

台風 14 号豪雨による流域から流出土砂量を把握するために、2005 年 9 月 21 日に沈砂池および湛水池の測量を行った。なお、同年 8 月 18 日に現地調査を行った段階では、目視による各流域の沈砂池・湛水池の堆積土砂は 1 m³に満たない量であった。また、9 月 21 日以降、2006 年 1 月までの期間にも顕著な土砂堆積が認められなかったため、9 月 21 日に計測した土砂量はほぼ全量が台風 14 号豪雨によって流出した土砂であり、また 2005 年における年流出土砂量にほぼ相当すると考えられる。

計測された流出土砂量は、1号沢で 16.5 m³、3号沢で 15.9 m³とほぼ同じ量であった (Table 4)。これらを単位面積あたりに換算すると、それぞれ 2.5 m³/ha と 1.9 m³/ha になる。2号沢の堆積土砂量は 67.3 m³ (量水槽の土砂を含む) であった (7.3 m³/ha) が、湛水池はほぼ満砂しており (Fig. 6)、ノッチ下流側の量水槽にも土砂の堆積が認められたため、流出土砂量はさらに多いと見積もられる。

また、2号沢では 9 月 5 日 21 時 30 分頃より他の流域とは異なる流出波形が認められた (Fig. 4 B) ため、同時刻頃に湛水池へ多量の土砂が流入したものと考えられる。その時刻は、同日の降雨ピークを記録した約 6 時間後にあたる。それは、あくまでも土砂流入によって正確な観測が行えなくなった時刻であり、流域内の斜面崩壊の発生時刻や沈砂池・湛水池への土砂流入開始時刻は不明である。

流出土砂の粒度組成を明らかにするため、2005 年 9 月 21 日に各流域の沈砂池より、350～400 g 程度 (乾燥重量) の土砂をサンプリングした。堆積土砂の表面は細粒物質が洗い流さ

Table 4. Sediment discharge volumes from the Sarukawa Experimental Watershed in 2001-2005.

Year	Annual rainfall	Watershed 1	Watershed 2	Watershed 3
2001	3184.0 (mm)	6.0 (m ³)	5.5 (m ³)	5.2 (m ³)
		0.9 (m ³ /ha)	0.6 (m ³ /ha)	0.6 (m ³ /ha)
2002	2858.5 (mm)	5.1 (m ³)	4.0 (m ³)	3.9 (m ³)
		0.8 (m ³ /ha)	0.4 (m ³ /ha)	0.5 (m ³ /ha)
2003	2861.0 (mm)	7.8 (m ³)	7.3 (m ³)	7.6 (m ³)
		1.2 (m ³ /ha)	0.8 (m ³ /ha)	0.9 (m ³ /ha)
2004	4000.5 (mm)	37.1 (m ³)	23.9 (m ³)	26.9 (m ³)
		5.7 (m ³ /ha)	2.6 (m ³ /ha)	3.3 (m ³ /ha)
2005	3146.0 (mm)	16.5 (m ³)	67.3 (m ³)	15.9 (m ³)
		2.5 (m ³ /ha)	7.3 (m ³ /ha)	1.9 (m ³ /ha)

れている可能性があるため、表面から 30 ~ 50 cm 程度の深さから各流域 2 試料ずつ採取し、それを今回の降雨イベント全体で堆積した土砂の平均的な部分であると考えた。採取した試料は乾燥 (105℃で約 24 時間) 後、 $-5\phi \sim 5\phi$ (1 ϕ 間隔) のふるいによって分離した。堆積土砂の粒度分析結果を Fig. 7 に示す。各流域で採取された土砂は、中央粒径 Md_{ϕ} が $-2 \sim -1\phi$ (2 ~ 4 mm), 分級度 σ_{ϕ} (Inman, 1952) が 1.7 ~ 2.5 とおおむね同様の粒度分布を有している。ただ、1号沢と 2号沢の土砂は礫成分の割合が 55 ~ 70 % であったが、3号沢の土砂は礫成分が約 45 % とやや細粒であった。いずれの流域の堆積土砂もシルト成分以下の割合は 1 ~ 2.5 % であり、細粒物質が少ないことが特徴である。これは、

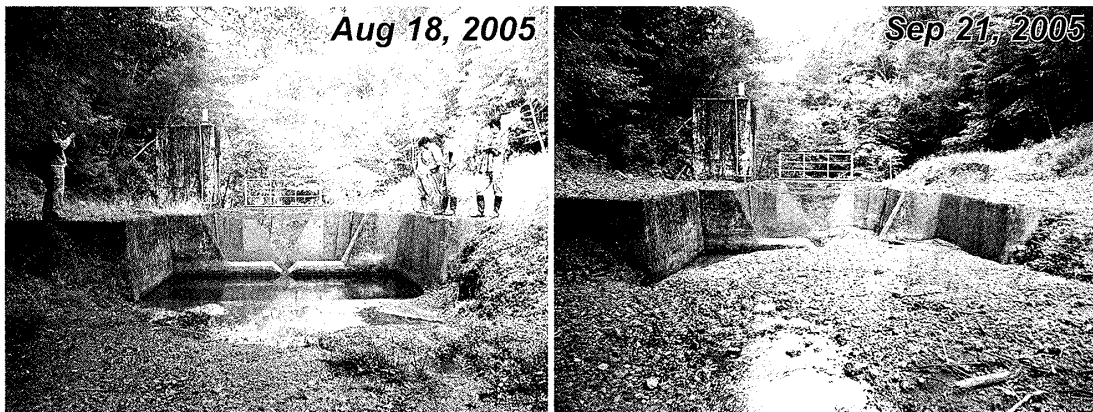


Fig. 6. Downstream views of the reservoir at the watershed 2 before and after the typhoon 200514.

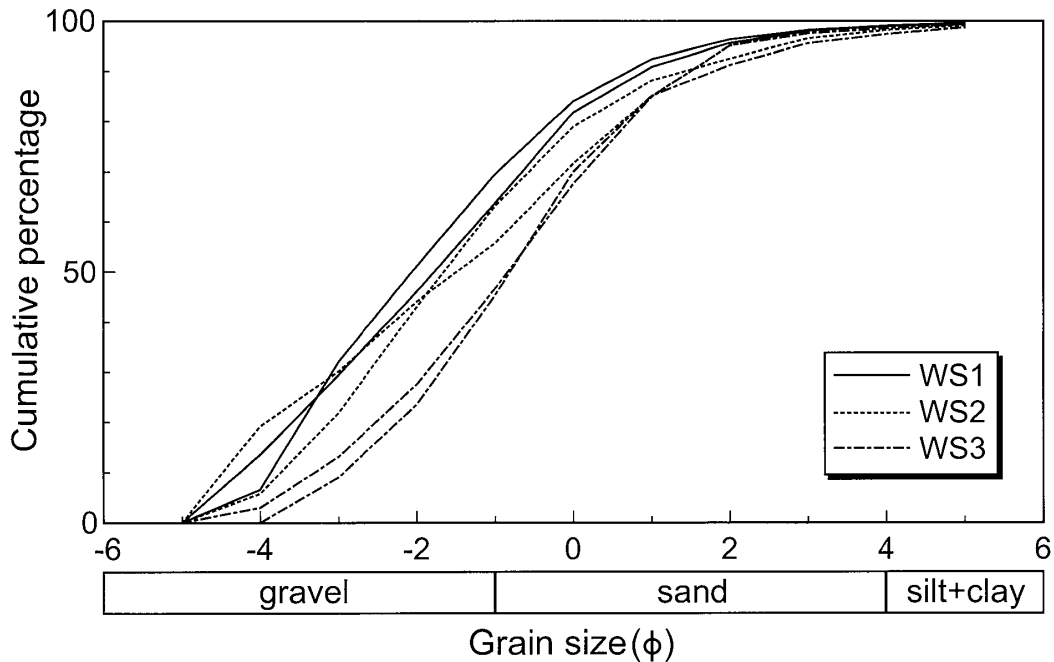


Fig. 7. Cumulative curves of grain-size distribution for sediments deposited in reservoirs by the typhoon 200514.

シルト以下の細粒物質が出水時に浮遊砂として下流へ流出したためと考えられる。また、各沈砂池での堆積土砂の最大粒径（最大の岩片 5 個の長径平均値）は、2 号沢と 3 号沢でそれぞれ 10.6 cm と 9.4 cm であったが、勾配がやや急な 1 号沢では 22.2 cm であった。したがって、台風 14 号豪雨によって流出した土砂は粒径 10 ～ 20 cm 以下のものであった。

7. 考 察

九州南部に位置する去川森林理水試験地では、2005 年台風 14 号によって総雨量 1,156 mm（9 月 3 日～6 日）に達する豪雨に見舞われた。この豪雨により総雨量の 83～98 % を占める直接流出が観測され、これは当試験地において観測史上最大規模の降雨流出イベントであったといえる。白井・竹下（1968）は本格的な観測開始直後である 1959 年 8 月 4 日～10 日豪雨時の流出解析を行っている。その豪雨によっては 1 号沢で 306 mm、2 号沢で 240 mm、3 号沢で 288 mm の直接流出量（地表流下量と中間流量とされているものを合計した流出量）が観測されており、これらは総雨量（525 mm）のそれぞれ 58 %、46 %、55 % に相当する値である。白井・竹下（1968）による直接流出量は本研究と若干異なる方法で算出されたものであるが、2005 年台風 14 号豪雨における直接流出率はかなり大きなものであることがわかる。一般的に、直接流出率は総雨量とともに増大する傾向があるとされている（中野，1976，p.146～147）。2005 年 9 月 3 日～6 日の総雨量は 1959 年 8 月 4 日～10 日の 2 倍程度と多量なものであり、83～98 % を占める直接流出も十分に発生するものと考ええる。

今回の流出は降雨の最後のピーク以降、次第に減衰していったが、ハイドログラフから直接流出とみなされる流出は降雨終了後 3 日間以上も継続していた。9 月 9 日～12 日にかけて次の降雨があり（総雨量 41.5 mm）、その影響を完全に分離できなかったが、実際には台風 14 号豪雨に伴う直接流出はさらに数日間続いていたものと推察される。こうしたことから去川森林理水試験地では、台風 14 号に伴う豪雨は流域内にとどまることなく、大半は直接流出として流出したと考えられた。しかし、この豪雨による直接流出が流域末端から全て流出するまでには、降雨終了後 3 日間以上という期間を要したことが明らかとなった。1959 年 8 月 4 日～10 日豪雨に伴う流出においても、降雨停止後の減衰曲線は 3 日目くらいから減衰が穏やかになり、3 日目以降の流出は地下水流出が主体になるとされている（白井・竹下，1968）。2005 年台風 14 号による豪雨は、1959 年 8 月豪雨の 2 倍程度の量であるため、降雨終了から 3 日間以上直接流出が継続する可能性は十分にあると考えられる。

去川試験地の流出土砂量および降水量について、2005 年を含む 5 年間の値を Table 4 に示す。各年の土砂量の測定は 2005 年と同様に、土砂流出が卓越するような大きな降雨イベントが終了した後（11 月～1 月頃）に行われている。台風 14 号豪雨後の測定では、2 号沢から 7.3 m³/ha の土砂が流出し、これは過去 5 年間では最大の流出土砂量であった。一

方、1号沢と3号沢で2005年に計測された流出土砂量は、それぞれ $2.5\text{ m}^3/\text{ha}$ と $1.9\text{ m}^3/\text{ha}$ で、例年よりはやや大きな値ではあるが、2号沢に比べて極端に少ない値となっていた。しかし、これらの流域では最近5年間で年降水量が最も多かった2004年の方が多量の土砂を流出しており、とくに1号沢では $5.7\text{ m}^3/\text{ha}$ の土砂が流出していた。そこで、年降水量および日最大雨量と流出土砂量との関係を見ると、それぞれには概ね正の相関関係が認められる (Fig. 8)。ただし、2004年の1号沢の大きな値は年降水量とほぼ対応しており、2005年台風14号による2号沢の流出土砂量は年最大日雨量を反映した結果となっている。今後、去川試験流域における流出土砂量を高精度に予測するためには、降雨量だけでなく、ピーク流出量などの水理量との関係解析 (芦田ほか, 1972, 1983; Rickenmann, 1997) を行う必要がある。

台風14号に伴う土砂流出量は、流域内の侵食・崩壊状況とも対応していた。ほとんど崩壊が起こっていなかった1号沢と3号沢では流域からの流出土砂量は少なかったが、根返りや折損といった風倒木のほか、いくつかの谷頭崩壊や溪岸崩壊が発生した2号沢においては、過去5年間で最大の流出土砂を観測した。しかし、量水施設直上流右岸側の崩壊を除くと、他の崩壊は面積が 400 m^2 以下で、深さも 0.5 m 以下であり、それほど多くの土砂を生産していなかった。また、これらの谷頭崩壊や溪岸崩壊で生産された土砂は、いずれも崩壊直下の流路に堆積しており、下流まで流出していない状況であった。つまり、2号沢において流域末端まで達した土砂は粒径が 20 cm 以下のものであり、さらに粗粒な大礫や巨礫は運搬されていなかった。流域末端まで流送された土砂は新たな崩壊で生産されたものではなく、それまでに流路に堆積していた土砂であると考えられる。現地踏査を行うと、2号沢はいくつかの沢に別れており、それらの源頭部付近には植生に乏しく、裸地に近い斜面が認められた。そうした斜面は近年に発生した崩壊跡地 (崩壊深は 0.5 m 以内) であると推定される。今回の豪雨イベント以前には詳しい現地踏査を行っておらず、崩壊がいつ発生したのか明らかではないが、降雨量が多かった2004年などに起こった可能性もある。去川森林理水試験地2号沢では、他の2流域と比べて、斜面崩壊によって生産さ

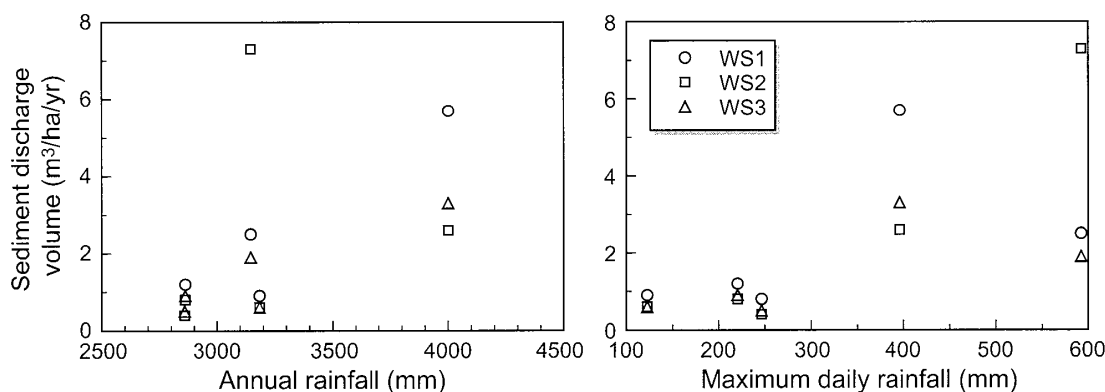


Fig. 8. Relations between amounts of rainfall and sediment discharge volumes at the Sarukawa Experimental Watershed from 2001 to 2005.

れた土砂が流域末端に流出するまでには 1 年以上の時間を要する可能性がある。これらの土砂は崩壊発生後、河道に一度貯留されてから、その後の豪雨で流出するのであろう。このように、本試験地における土砂生産・流出プロセスは流域ごとに異なっている可能性があるが、詳細を明らかにするためには、今後も継続してデータを集積しなければならない。

8. ま と め

2005 年 9 月の台風 14 号は、九州南部を中心に甚大な豪雨災害をもたらした。本論では、その災害発生地域に位置する去川森林理水試験地（宮崎県高岡町）の降雨流出と土砂流出の実態を報告するとともに、山地小流域における土砂生産・流出過程について考察した。その結果は、以下のようにまとめられる。

去川試験地では、2005 年 9 月 3 日～6 日にかけて総雨量 1,156 mm に達する豪雨に見舞われた。この降雨は、最大時間雨量が 40.5 mm/hr と極端に強いものではなかったが、時間雨量 20 mm/hr 以上の状況が 19 時間程度継続するなど、総雨量として記録的なものであった。2つの試験流域（1号沢および3号沢）では、総雨量の 83～98%に相当する直接流出が観測され、これは当試験地において観測史上最大規模の降雨流出イベントであったと考えられる。

この降雨流出イベントでは、ほとんど崩壊が発生していない2つの流域（1号沢および3号沢）でそれぞれ 2.5 m³/ha, 1.9 m³/ha の土砂が流出した。一方、いくつかの谷頭崩壊や溪岸崩壊が認められた流域（2号沢）における流出土砂量は 7.3 m³/ha であったが、それらの崩壊で生産された土砂は、いずれも崩壊直下の河道に堆積していて、下流まで流出していない状況であった。1号沢と3号沢については詳細が不明であるが、台風 14 号豪雨によって2号沢から流出した土砂の大部分は過去の崩壊によって生産された土砂や河道に堆積していた土砂であった。これらのことから、去川森林理水試験地においては、斜面崩壊による生産土砂が一度河道に貯留されてから、その後の豪雨で流出するというプロセスが存在し、その時系列変化は近接する各流域で異なることが推定された。しかし、このような現象が普遍的なものであることを明らかにするためには、今後も観測データを蓄積して検討しなければならない。

謝 辞

本研究は、九州森林管理局との共同研究の一環として行われ、観測施設の維持管理については同局に多大なご協力とご支援をいただいた。宮崎市高岡町在住の古市利明氏には日頃から試験地の維持管理にご尽力いただいている。データ整理では牧 蓉子氏と河野真由美氏のご協力を得た。2名の匿名査読者による意見は、本論の内容を改善する上で有益であった。以上の方々に心よりお礼申し上げます。

引用文献

- 荒牧重雄 (1969) 鹿児島県国分地域の地質と火砕流堆積物：地質学雑誌, **75**, 425-442.
- 芦田和男・高橋 保・奥村武信・道上正規・沢田豊明 (1972) 山地流域における出水と土砂流出－穂高砂防観測所の観測結果－：京都大学防災研究所年報, **15 B**, 349-361.
- 芦田和男・高橋 保・沢田豊明 (1983) 山地流域における出水と土砂流出：京都大学防災研究所年報, **26 B-2**, 303-314.
- 藤枝基久 (1995) ブラジル・サンパウロ州海岸山脈における流出特性：森林総合研究所研究報告, **369**, 63-152.
- Inman, D. L. (1952) Measures of describing the size distribution of sediments: *J. Sediment. Petrol.*, **22**, 125-145.
- 地頭菌 隆・下川悦郎・三浦郁人・松本舞恵・加藤昭一 (1996) 1993年鹿児島豪雨による土砂災害発生と降雨：鹿児島大学農学部演習林報告, **24**, 69-87.
- 気象庁 (2005) 災害時気象速報－平成17年台風第14号による9月3日から8日にかけての大雨と暴風－：災害時自然現象報告書2005年第1号, 55 p.
- 木野義人・太田良平 (1976) 野尻地域の地質：地域地質研究報告 (5万分の1図幅), 地質調査所, 45 p.
- 九州支場防災研究室 (1982) 去川森林理水試験地観測報告 (1967年1月～1976年12月)：林業試験場研究報告, **317**, 147-190.
- 丸山岩三・遠藤 尚・吉筋正二・浅田正朗 (1960) 去川試験地の地形と地質 (去川森林理水試験地第1回報告)：林業試験場研究報告, **123**, 45-68.
- 村田明広 (1998) 宮崎県の四万十帯の地質 (宮崎県地質図第5版説明書)：宮崎県, 44 p.
- 中野秀章 (1976) 森林水文学：水文学講座13, 共立出版, 228 p.
- 奥野 充 (2002) 南九州に分布する最近約3万年間のテフラの年代学的研究：第四紀研究, **41**, 225-236.
- Rickenmann, D. (1997) Sediment transport in Swiss torrents: *Earth Surface Processes and Landforms*, **22**, 937-951.
- 林業試験場宮崎分場防災研究室 (1960) 去川森林理水試験地概要：暖帯林, 昭和35年5月号, 1-5.
- 斎藤 眞・阪口圭一・駒澤正夫 (1997) 20万分の1地質図幅「宮崎」：地質調査所.
- 沢田豊明 (1985) 山地流域の土砂流出に関する研究：京都大学工学部博士論文, 149 p.
- 白井純郎・竹下 幸 (1968) 去川試験地の流量, 消失水量, 保留量について (去川森林理水試験地第4回報告)：林業試験場研究報告, **216**, 127-166.
- 白井純郎・岡 国夫・浅田正朗・竹下 幸 (1962) 試験地の植生の概要について (去川森林理水試験地第2回報告)：林業試験場研究報告, **140**, 89-101.
- 白井純郎・浅田正朗・竹下 幸 (1965) 試験地の土壌の概要について (去川森林理水試験地第3回報告)：林業試験場研究報告, **176**, 89-99.
- 杉尾 哲 (2006) 台風14号による氾濫・洪水災害：西部地区自然災害資料センターニュース, **34**, 15-18.
- 竹下 幸・清水 晃・宮縁育夫 (1996) 去川森林理水試験地観測報告 (1977年1月～1986年12月)：森林総合研究所研究報告, **370**, 31-75.
- 谷口義信・内田太郎・大村 寛・落合博貴・海堀正博・久保田哲也・笹原克夫・地頭菌 隆・清水 收・下川悦郎・寺田秀樹・寺本行芳・日浦啓全・吉田真也 (2005) 2005年台風14号による土砂災害：砂防学会誌, **58(4)**, 46-53.
- 寺岡易司・今井 功・奥村公男 (1981) 九州外帯の屈曲構造：構造総研連絡誌「中生代造構作用の研究」, **3**, 87-98.
- Tsukamoto, Y., Ohta, T. and Noguchi, H. (1982) Hydrological and geomorphological studies of debris slide on forested hillslopes in Japan: *IAHS publ.*, **137**, 89-98.
- 横山勝三 (1972) 始良カルデラ入戸火砕流の流動・堆積機構：東京教育大学理学部地理学教室地理学研究報告, **XVI**, 127-167.