

山火事跡地の水流出特性（Ⅰ） — 備前試験地における流出状況 —

西 山 嘉 寛

Runoff Characteristics in Burnt Forest
— A Survey of Runoff at BIZEN Experimental Watershed —
NISHIYAMA Yoshihiro

要旨：山火事の被災後、全く手の入っていない流域（全焼区）と階段工を施工した流域（階段工区）、さらに火災に遭っていない健全な林分（健全区）について、その水流出特性を比較検討した。時間流量は、減水部で全焼区>階段工区>=健全区となった。直接流出量は全焼区、階段工区とも降水量の40～50%であったが、健全区は前者の半分以下の20%前後であった。降水量と直接流出量の関係から流出率は3者ともに分数式で近似できた。直接流出は、3試験区とも20mm前後の降水量で発生し、流出率は降水量50～60mmにかけて急激に増加し、降水量がさらに大きくなると流出率の増加率は減少する結果が得られた。

ピーク流量は、最大時間雨量×降水量（ピーク流量に到達するまでの総降水量）とピーク流量の関係式から、階段工区>=全焼区>健全区の順となった。

被災区と健全区について地表流出を比較検討した。地表流出率は裸地化している場合、降水量の60%台に達する例がみられたのに対し、健全区では5%未満であった。また植生回復が進行するにしたがって地表流出量はあきらかに低下していった。さらに表層部の草本類の有無、地上空間における低木、亜高木類などの木本類の有無でも地表流出量は異なった。

キーワード

土壌理化学性 直接流出 地表流出

I. はじめに

岡山県南部は瀬戸内気候に属し、特に冬期間には降水量が少なく異常乾燥する。また植生もアカマツ被害木や林床をコシダ、ウラジロの枯死体が堆積していることから、冬期間は常に山火事の危険にさらされている。実際、岡山県では冬～春先に山火事が毎年発生し、時には山火事による消失面積が数ha以上にものぼる例もみられる。このことから、山火事により裸地化した箇所からの水土の流出は大きな問題となっており、水土流出の低減は重要な課題である。

山火事跡地においては、主に植生回復に関する研究が広島県の江田島や宮島で中越⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾や中根¹⁰ら、江崎¹¹、佐々木¹²によってなされた。また森林環境の変化が流出に及ぼす影響については、欧米の調査で森林植生が皆伐で失われた場合、各種流出量の増加がみられたとの報告がある¹³。しかし、瀬戸内地方の山火事が水流出特性に及ぼす影響に関する報告⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾は多くない。

一方、地表流出における研究はヒノキ人工林において、服部²⁾ら、竹内³⁾にみられるが、瀬戸内地方における調査例はみられない。このことから、1986年8月に被災した岡山県備前市久々井の山火事跡地の小流域において、流量および地表流出の調査を開始した。現在、試験期間途中ではあるが、山火事による水流出特性の変化について報告する。なお、本研究報告の一部は第44回日本林学会関西支部大会で口頭発表した⁴⁾。

本研究の執筆にあたり数々の御助言を賜った森林総合研究所関西支所防災研究室長の服部重昭博士に心より感謝の意を表する。

II. 調査方法

1. 土壌理化学性

1990年に岡山県備前市久々井に試験地を設定するに当たり、予備調査として、被災した林地（燃焼激、燃焼軽）および健全な林地について、土壌理化学性を調べた。被災林地と健全な林地は互いに接しており、被災前の土壌条件はほぼ同一であることを前提に採取箇所を選定した。調査にあたっては採土円筒（400cc）を用いて各採土箇所から2個づつサンプルを採取した。

2. 河川流出

1990年4月に岡山県の東南部に位置する備前市久々井に試験地を設定した。この試験地は海岸から200mの小起伏山地に位置する。標高は約100~260m、気候は瀬戸内気候で、年平均気温は約14℃、年降水量は約1,300mmである。試験地と試験流域の概要を図-1に示す。そして1990年7月に被災した2流域の末端に水位計（池田計器 パーシャルフリューム1週間巻き）を設置した。1流域は山火事の被災後全く手の入っていない全焼区であり、もう一つは被災後階段工区と植栽を行った流域（階段工区）である。さらに1991年6月中旬に全く被災にあっていない流域（健全区）に水位計を設置した。降水量は試験地内2箇所に自記雨量計（池田計器 1カ月巻き）を1990年7月に設置し、以後測定を行っている。

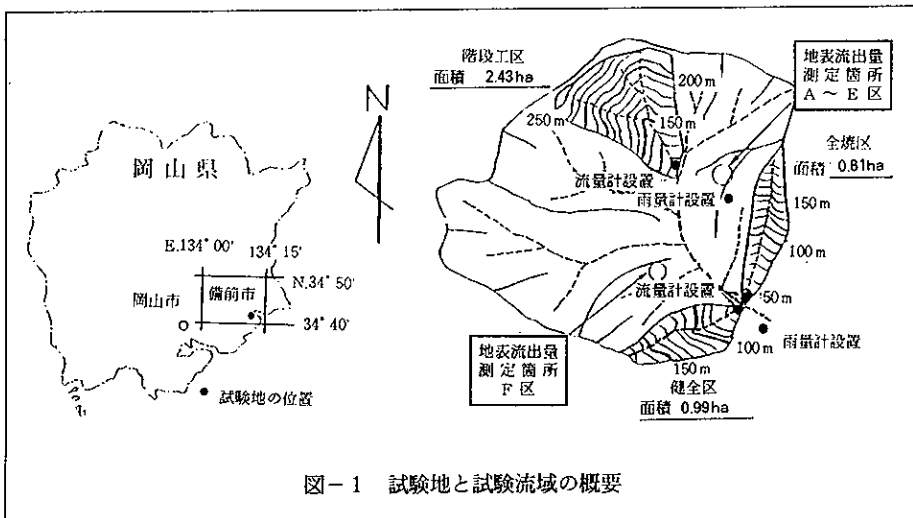


図-1 試験地と試験流域の概要

全焼区では、被災後アカマツを中心とした実生による再生とコナラ、リョウブ、ヒサカキ、コバノミツバツツジ等の萌芽再生がみられる。また部分的にススキやセイタカアワダチソウ、ダンドボロギク等の外国種の草本類も侵入している。

階段工区では被災後、階段工を施工し、水平部（犬走り部分）にアカマツ、ヤマモモ、ヤシャブシのポット苗を植栽している。また斜面部位は全焼区にみられる木本、草本類による植生回復が徐々にみられる。

健全区ではアカマツ、ソヨゴ等が上層木を形成しており、下層部にガンピ、ツツジ、地表部にコシダ、ウラジロがみられる。

水位を流量に変換するための水位－流量曲線の関係は3流域とも現地での流量測定から以下の式が当てはまった。

$$Q = 0.264 H^{1.58} \quad (\text{相関係数 } r = 0.90 \text{ 以上})$$

ここで、Qは流量、Hは水位である。この水位－流量式を用いて、流量（リットル）を求めるとともに最終的に流量を流域面積で割ってmm換算した。読み取りは、流量、降水量ともに1時間単位として、これにより直接流出量、ピーク流量、季節変動等についての解析を行った。直接流出量は降雨開始時の初期流量をもとに水平分離により算定した。

3. 地表流出

1990年7月に設定した試験地内に試験区を計6箇所設定した。試験区の概況について表-1に示す。

表-1 試験区の概況

試験区	大きさ(m)	傾斜(°)	斜面方位	植 生	植被率(%)
A	5×2	30	SW	無	0 (0)
B	5×2	25	SW	ネジキ, ヒサカキ, ススキ, ダンドボロギク	25 (8)
C	5×2	25	SW	コナラ, コバノミツバツツジ, ススキ	42 (18)
D	5×2	25	W	ネジキ, コバノミツバツツジ, ヒサカキ	20 (11)
E	5×2	25	W	ワラビ, セイタカアワダチソウ	100 (42)
F	10×2	30	NE	ソヨゴ, リョウブ, ヒサカキ, ガンピ, コシダ	100 (100)

注. 植被率の数値は1991年9月に行った調査で得られたものである
() 内の数値は1990年8月のものである

調査区は一部を除き（縦10m）、縦5m、横2mの長方形である（図-15）。この調査区から雨水が枠外に移動しないように外壁として高さ10cm程度地上部に壁を築いている。調査区の下端部には土砂および水を受けるトイを設置した。また降雨が直接このトイ内に入らないように蓋を設けた。トイに流れ出た水はビニールパイプで下方の大型タンクに溜まる仕組みとなっている。大型タンクの容量はA区では550リットル、その他の試験区では350リットルである。調査は1990年4月から1992年2月までの期間である。

Ⅲ. 結果及び考察

1. 土壌特性

採取時の土壌の理学的性について表-2に示す。

表-2 試験地内の土壌の理学的性

採土箇所	層位	層厚 (cm)	三相組織 (%)			細孔隙 (%)	粗孔隙 (%)	透水量 (cc/min)
			固相	液相	気相			
燃焼(激)	BC	1~5	固相 49	液相 39	気相 12	30	21	11
燃焼(軽)	BC	2~6	固相 46	液相 32	気相 22	27	27	70
健全区	B	3~7	固相 39	液相 37	気相 24	28	33	103
同	BC	8~12	固相 51	液相 30	気相 19	21	28	35

各試験区とも地質は流紋岩で、健全区内(土壌型 I m- α)でB層が確認されたが、被災したそのほかの場所ではB層は確認されず、いずれも土壌断面はBC層および基層から形成されていた(土壌型 I m- β)。

三相組成については、地表面から数cm範囲ではB層の存在する健全区の方がB層の存在しない被災区に比べ、固相の割合が小さく、逆に気相の割合が大きい傾向がみられた。細孔隙率は健全区の方が被災区に比べ小さく、粗孔隙率が高い傾向がみられた。透水量は健全区の方が被災区より明らかに大きかった。以上の点から、降水の浸透は健全区の方が良いと考えられる。ただし、健全区でもBC層は透水量がB層に比べ極端に小さい数値となっていることから、降水が下層土に浸透する割合の低いことが推定される。

2. 河川流出

(1) 流量の季節変化

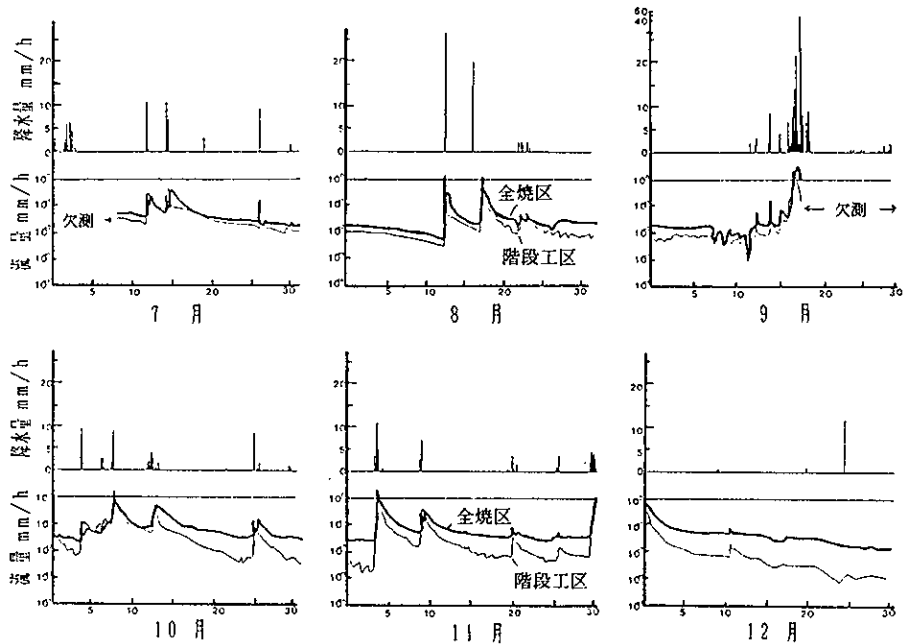


図-2 全焼区と階段工区とのハイドログラフの比較
(1990年7月~12月)

時間ごとの流量の季節変化について検討する。

1990年の流量の季節変化を図-2に示す。同年の全焼区と階段工区とを比較すると、ピーク流量には大きな差はみられなかったが、ピーク流量の発生時間については階段工区の方がやや早く、減水もそれにともない早い傾向がみられた。最も大きな差として、ピーク以後の減水曲線に違いがみられた。階段工区と比べ、全焼区はピーク流量に達して以後の減水が遅く、階段工区の方が早い傾向がみられた。一般に階段工を施工すれば、斜面に水平部ができるため雨水の浸透が良くなり、降雨後ゆっくりした流出がみられるため減水勾配は緩くなると考えられる。しかし本結果では階段工区の方が減水勾配が大きくなっていったことから、階段工施工以上に影響の大きい因子があると考えられるが、これまでの調査結果からはその原因は明かではない。

この年の9月中旬には総降水量(連続降雨)500mm以上の集中降雨が発生した。この影響で12月の流量からもわかるように、例年渇水となる冬期間でも基底流出がみられた。

1991年の流量の季節変化を図-3に示す。

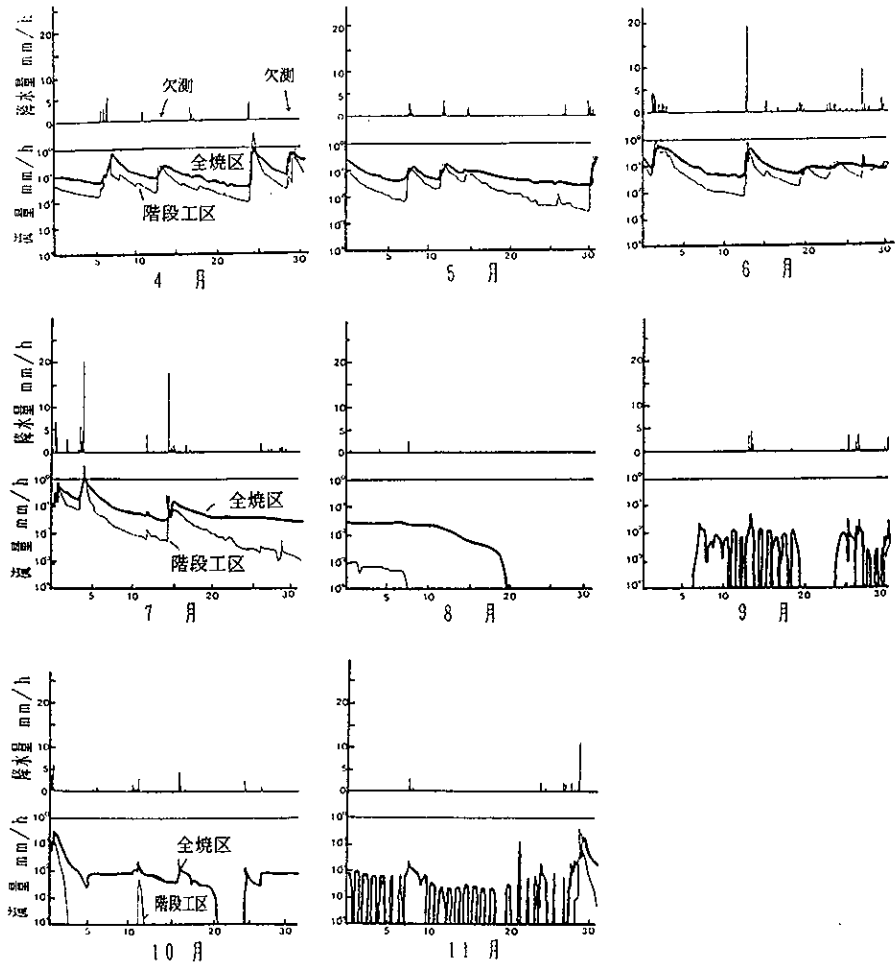


図-3 全焼区と階段工区とのハイドログラフの比較
(1991年4月~11月)

全焼区、階段工区ではピーク流量、ピーク流量の発生時間、減水勾配も1990年と同様な傾向を示した。この年の降水パターンがほぼ平年と類似していると考えられる。年間で最も流量が多いのは梅雨の時期となっており、梅雨以後の8月中旬以降では渇水期となる。ただし、全焼区の場合、9、11月の渇水期で降水がない日に、夕方から朝方にかけて基底流出がみられた。これは土壌水分が日中には蒸発散に消費されるが、夜間には蒸発散が停止するため基底流出が生起すると考えられる。ただし、階段工区でこの現象が発生しない点については説明がつかない。

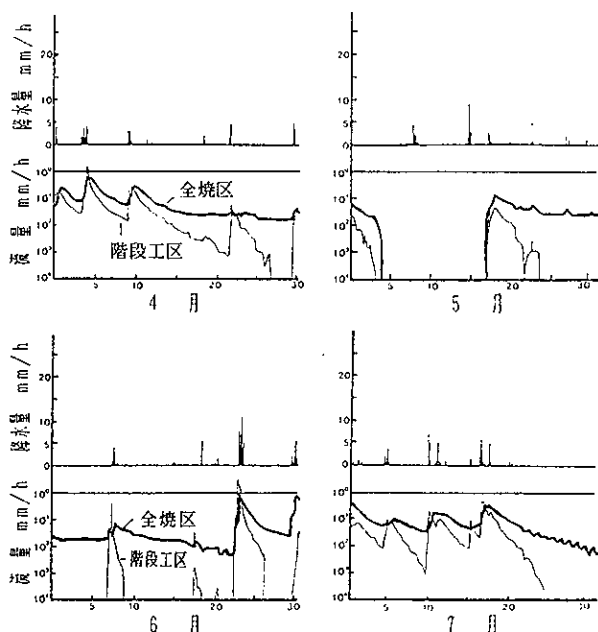


図-4 全焼区と階段工区とのハイドログラフの比較
(1992年4月～7月)

1992年の流量の季節変化を図-4に示す。調査期間は4ヶ月であるが、5月上中旬、7月下旬以降の梅雨以降の無降雨期間では全焼区、階段工区ともに基底流出は激減、または停止している。特に階段工区の場合の渇水期間は極めて長いことが特徴として挙げられる。また全焼区では、7月下旬にみられるように、流量がピークに達して以後の減水期間でも流量は上下している。このことは、1991年の例と同様に土壌表面や植生からの蒸発散とともに河道からの蒸発も影響していると考えられる。

1993年の全焼区と健全区の流量の季節変化を図-5に示す。降水量が少ない場合、全焼区の方がピーク流量は多い傾向がみられるが、降水量が梅雨の時期のように増大した場合、逆に健全区の方がピーク流量が多い現象もみられた。流出の停止期間は健全区の方が階段工区同様に長い傾向がみられた。渇水期間も5、6、9、10月の一部で記録された。三寺ら⁶⁾の研究でも降雨以後の基底流出は健全区では必ずしも多くないと報告している。健全区では、B層が一部ではあるが存在することや、植生等による降雨遮断や樹木等からの蒸発散により土壌水分が消費されているためと考えられる。この結果は、全焼区の流出量が健全区に比べ減水速度が遅く、また無降日の基底流量も多いことと一致する。

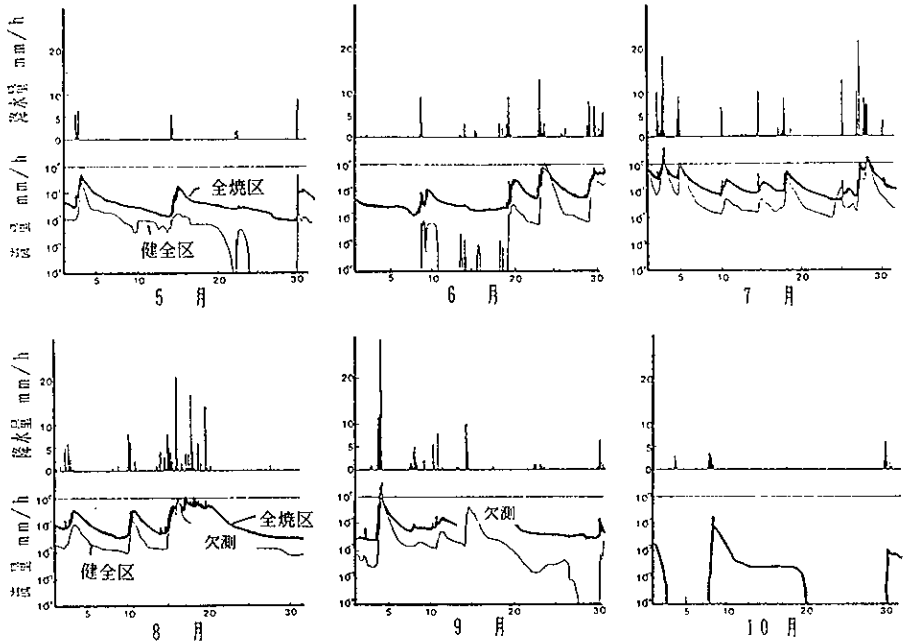


図-5 全焼区と階段工区とのハイドログラフの比較
(1993年5月～10月)

(2) 直接流出量の比較

直接流出量は降水量、初期流量等の複数の要因が関係していることが考えられる。直接流出量とそれに係わると思われる要因との相関係数を表-3に示す。

表-3 直接流出量とそれを支配する要因との相関

試験区	直接流出量(基本統計)				相 関 行 列			
	MEAN	SD	MIN	MAX	X(2)	X(3)	X(4)	
全焼区 (N=25)	X(1)	26.431	29.900	5.000	124.3	0.9534	0.1226	-0.0200
	X(2)	68.960	54.135	30.0	216.0		0.2809	-0.0690
	X(3)	11.440	7.398	4.0	29.0			-0.3032
	X(4)	0.048	0.051	0.003	0.258			
階 段 工 区 (N=20)	X(1)	20.820	25250	2.711	103.1	0.9766	0.1148	-0.0066
	X(2)	62.475	47.900	30.00	210.5		0.2042	-0.0889
	X(3)	11.025	6.988	4.00	26.5			-0.2679
	X(4)	0.025	0.056	0.00	0.254			
健全区 (N=17)	X(1)	12.770	15.271	0.500	58.3	0.9139	0.3712	0.1559
	X(2)	70.471	59.034	30.5	216.0		0.4085	0.1225
	X(3)	9.206	5.788	3.5	29.0			0.0456
	X(4)	0.005	0.006	0.00	0.016			

要因 X(1): 直接流出量 X(2): 降水量 X(3): 最大時間雨量 X(4): 初期流量

直接流出量は降水量といずれの試験区ともに相関が極めて高い（相関係数 $r = 0.90$ 以上）のに対し、その他の最大時間雨量、初期流量との相関は認められない。そこで降水量と直接流出量の関係を全焼区と階段工区（1990年7月～1993年7月）、健全区（1992年6月～1993年7月）について解析した結果、それぞれ図-6～図-8のとおりとなった。

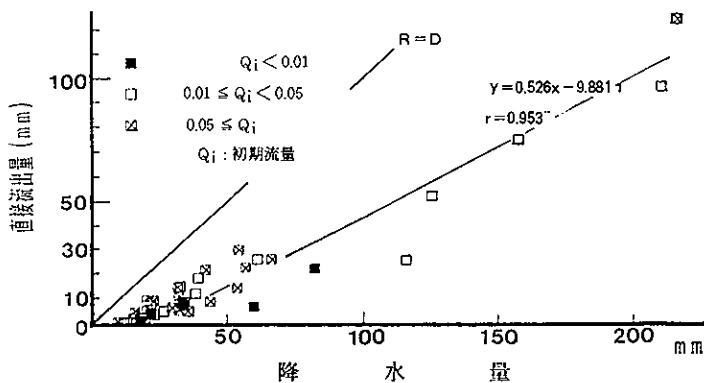


図-6 一降雨における降水量と直接流出量との関係（全焼区）

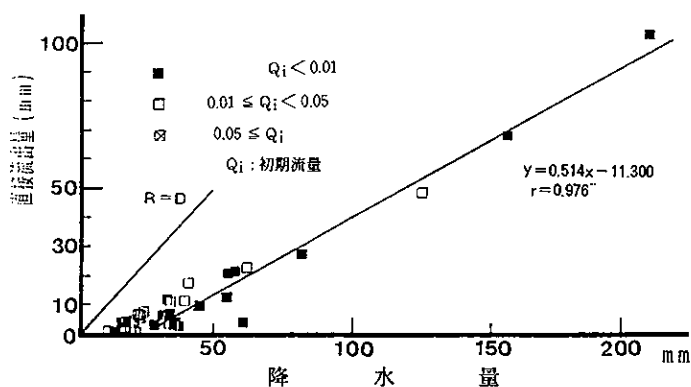


図-7 一降雨における降水量と直接流出量との関係（階段工区）

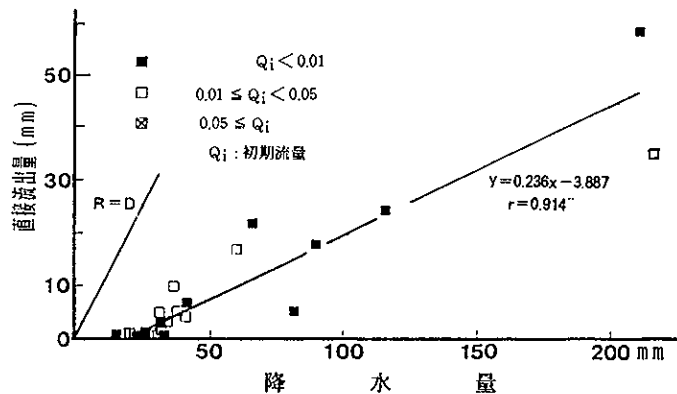


図-8 一降雨における降水量と直接流出量との関係（健全区）

中野²⁾は直接流出量は流域内の乾湿状態に大きく左右され、湿っている状態では直接流出量は増加し、乾燥状態では逆に減少すると述べている。ただし、今回の結果からでは3区とも降雨時の初期流量の大小による直接流出量の違いは明確ではなかった。

降水量と直接流出量の関係は一次直線で近似され、その相関はいずれも0.90以上と高かった。以上の点から、降水量が多い6、7月の梅雨の時期では直接流出量は増加し、逆に初期流量、降水量とも少ない傾向にある8月以降では直接流出量は減少すると考えられる。

健全区では降水量が200mmの場合でも、全焼区、階段工区と比べ、直接流出量は両区の約50%に留まっている。このことから考えると、健全区は被災区に比べ洪水流出を抑える効果が大きいたことが考えられる。

次に全焼区、健全区、階段工区の直接流出率の比較を図-9に示す。直接流出率は全焼区と階段工区では、全焼区の方が少し高い傾向にあったが、明確な差とはいえない。全焼区と健全区とでは全焼区が流出率30%を超えた場合でも、健全区では10%台の流出率であった。この結果から、3者間の直接流出率は、全焼区>=階段工区>健全区の順となる。

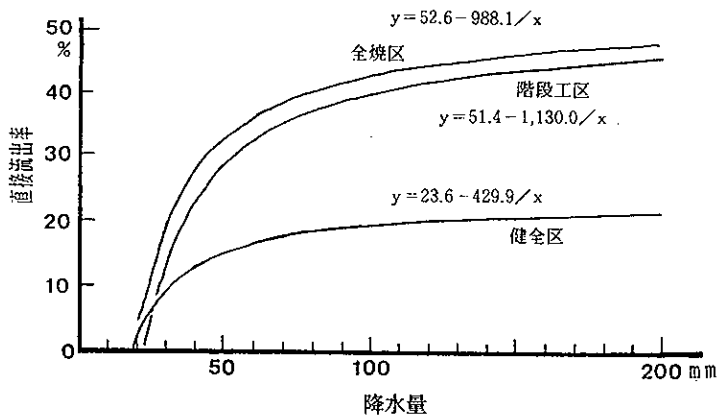


図-9 降水量と直接流出率との関係

全焼区、階段工区とも被災していることを考えれば、山火事の影響は直接流出量(率)にも明かな差となって現れることを示している。

各試験区の直接流出率は、以下の式より求められる。

$$\text{全焼区 } D.F0 = 52.6 - 988.1/x$$

$$\text{階段工区 } D.F1 = 51.4 - 1,130.0/x$$

$$\text{健全区 } D.F2 = 23.6 - 429.9/x$$

ただし、D.F0~2: 直接流出率

x: 降水量

以上の関係式からすれば、いずれの区も直接流出が開始される降水量は20mm前後であると考えられる。また降水量が20～50、60mmの範囲で急激に流出率が高まることが予想される。そして、これより降水量が多い場合、流出率の増加率は減少傾向を示す。

いま降水量を $20\text{mm} < x < 200\text{mm}$ にすれば、直接流出率は全焼区約47%、階段工区約45%、健全区では約21%に収束することが予測される。このことから、被災区（全焼、階段工区）と健全区の流出率の関係は

$$\text{被災区} : \text{健全区} \approx 2 \sim 2.5 : 1 \quad (1)$$

であると考えられる。

同様に全焼区、階段工区、健全区について同一降雨の場合の直接流出率の比較を図-10に示す。少降雨での直接流出率は、各試験区で違いがみられる。全焼区、階段工区では約10%の流出率がみられる場合でも、健全区ではほとんど流出はみられない。直接流出率が大きくなると、全焼区と階段工区ではその差は少し開く傾向にあり、全焼区が直接流出率が50%の場合、階段工区は約45%である。健全区は全焼区が直接流出率が50%の時でも約15%である。以上の関係から、被災区と健全区の関係は

$$\text{被災区} : \text{健全区} \approx 3 : 1 \quad (2)$$

であった。

(1)と(2)の結果から、被災区と健全区の直接流出量(率)の関係を考えると、最終的に各試験区の直接流出量(直接流出率)の関係は全焼区>=階段工区>健全区であり、山火事被災後では直接流出量は2～3倍程度以上に増加することが予測される。

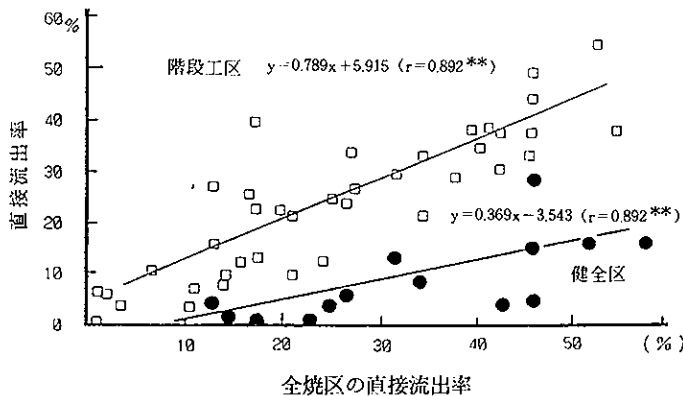


図-10 全焼区と健全区・階段工区の直接流出率の比較

(3) ピーク流量の比較

出水ごとのピーク流量の観測結果を図-11に示す。

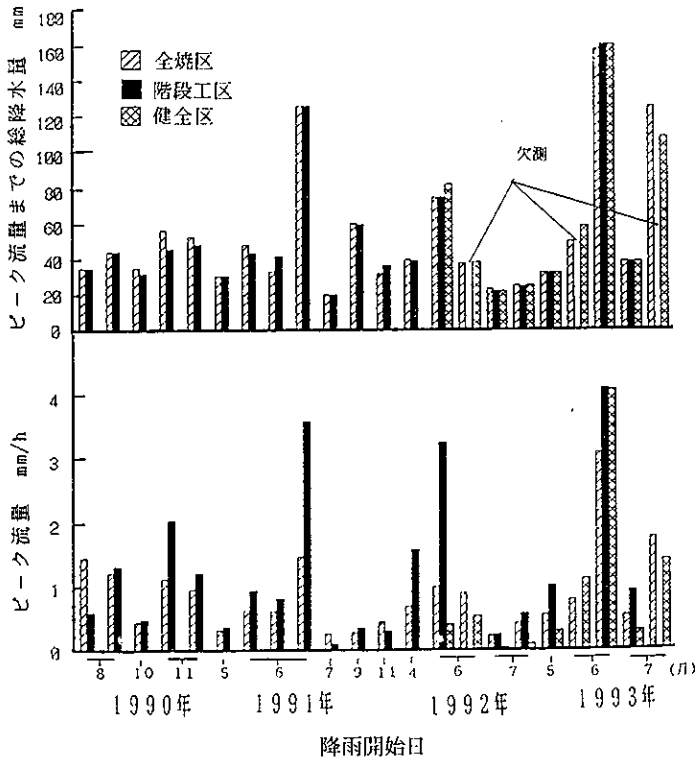


図-11 降雨時期別のピーク流量

ピーク流量に達するまでの総降水量が50mm以下では、単位時間当たりのピーク流量は、階段工区>全焼区>健全区順であった。これは、斜面の勾配や流域面積等にも左右された結果と考えられる。またピーク流量に達するまでの総降水量が100mm以上の場合には、各試験区の差ははっきりしない。なお、ピーク流量に達するまでの総降水量が100mmを超える場合は、6～7月の梅雨時期に限定された。

次にピーク流量に大きく関与すると考えられるピーク到達までの総降水量×最大時間雨量とピーク流量の関係を図-12～図-14に示した。いずれの回帰式とも、1%水準で有意であった(F検定)³⁰⁾。3試験区の比較から、被災した場合、ピーク流量は増加することがわかる。全焼区と健全区各回帰式を比較すると、ピーク流量は時間当たり約0.4mm健全区の場合の方が小さくなっている。中根が広島県の江田島で調査した例³⁾では、ピーク流量は被災すると2～3倍高くなると述べている。また中野²⁾は岡山県下竜ノ口試験地での洪水流出量を解析して、森林伐採により、ピーク流量は1.7倍になったと報告している。今回の結果では、たとえばX=2.3のとき、全焼区では0.592mm/h、健全区では0.198mm/hとなり、約3倍となった。

次に全焼区と階段工区各回帰式から、ピーク流量を比較すると、階段工区の方がやや大きい傾向となったが、この原因は流域面積や勾配等の要因が大きいと考えられるので、今後さらに検討する必要がある。

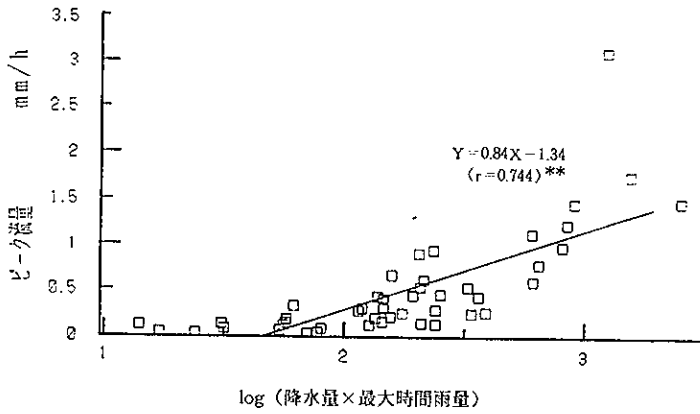


図-12 降水量・最大時間雨量とピーク流量の関係
(全焼区)

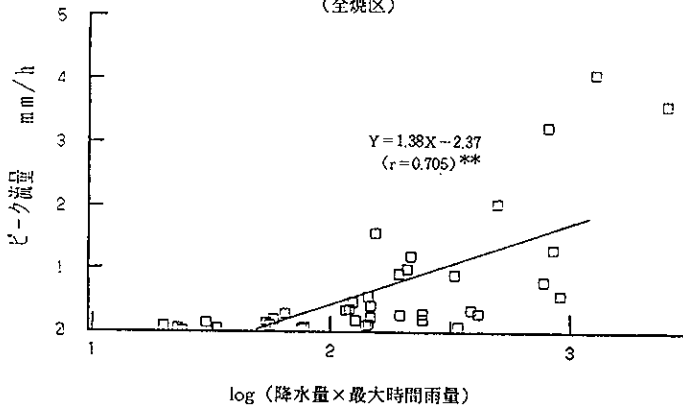


図-13 降水量・最大時間雨量とピーク流量の関係
(階段工区)

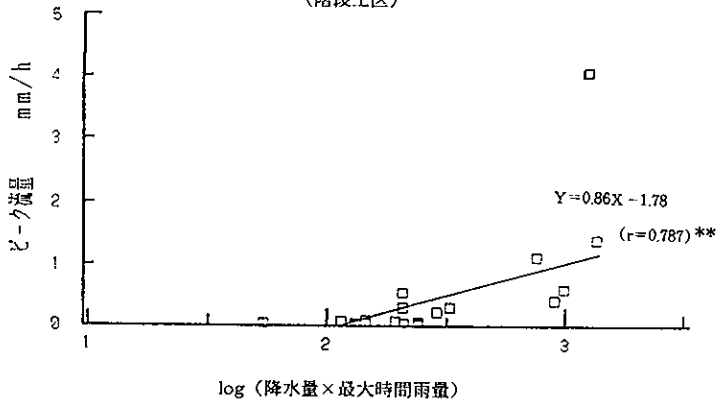


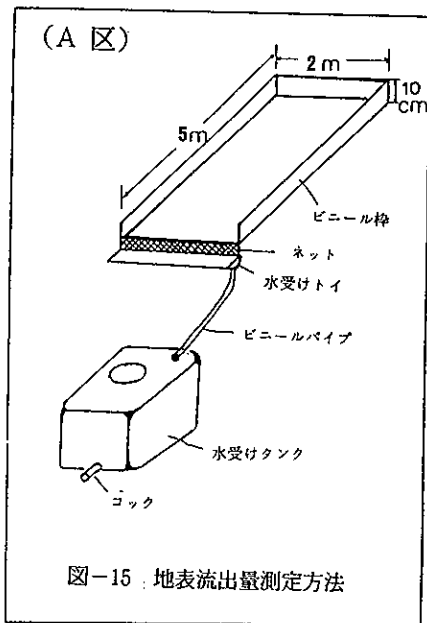
図-14 降水量・最大時間雨量とピーク流量の関係
(健全区)

3. 地表流出

A区からE区は山火事に被災しており、F区は健全な林地内である。A区は尾根部中腹にあたり、浸食が激しく裸地化している。B区は試験区内に斜面部、犬走り部をそれぞれ2箇所配置した階段工を施工している。斜面長は約3m、犬走りは約50cmである。C区は人為的処理は行っておらず、位置的にはB区のすぐ下方部に設けていることもあり、土壌、植生条件はB区と同様である。D区は、降水がたまるように穴（縦40cm、横50cm、深さ30cm）をプロット内に2箇所作り、周囲から水が入るように地面を削っている。E区は人為的処理は行っていない。土壌条件はD区のすぐ下方に設けていることもあり、D区と同様である。しかし、植生は、E区はワラビが全面に繁茂しており、D区の木本類の植生とは異なる。F区は斜面方位がA～E区とは異なる。下層植生は草丈1m程度のコシダが優占しており、草丈も1m程度となっている。また地面には枯死したウラジロが堆積しており、落葉によってL、F層、および少しではあるがH層が形成されている。地上部では亜高木、低木の木本類が試験区内で80本程度確認された。なお、高木層（樹高8m以上）の個体は健全な林分でもほとんどみられない。

土壌、植生状態を含めた環境条件から総合的に判断すると、A区→B、C区→D区→E区→F区と良くなっていると考えられる。

ここで用いた地表流出測定装置をA区を例に図-15に示す。なお、ここで用いた降水量とは一連続降雨量ではなく、調査期間内での総降水量である。



完全に裸地化したA区について、降水量と地表流出量の関係を図-16に示す。ただし、降水量が150mm範囲までの傾向と考えられるが、地表流出量は直線的に増加していると考えられる。なお、1990年と1991年での流出量の比較では、明確な差はみられなかった。

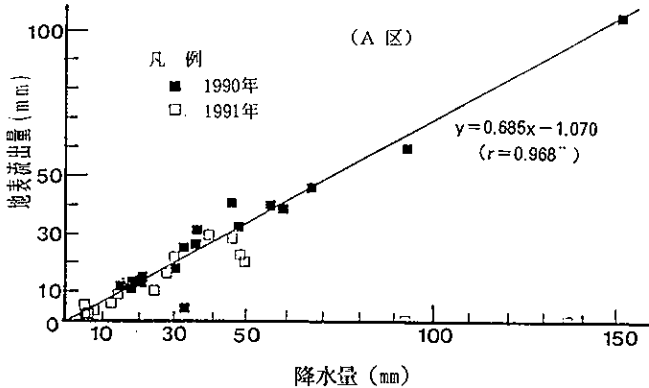


図-16 降水量と地表流出量との関係

降水量と地表流出率の関係については、以下のとおりとなった。

$$y = 0.686x - 1.070$$

$$R (y/x) = 68.6 - 107/x$$

y : 地表流出量, x : 降水量

R : 地表流出率

降水量が数mm範囲で地表流出は発生し、降水量が20mmの場合でも地表流出率は60%以上となる。降水量が20mmを超えると、地表流出率の増加率は次第に減少し、降水量が100~200mmの範囲でも、流出率は約67~68%となった。

次にA区以外の試験区について、地表流出量との相関が高いと思われる降雨因子との相関を表-4に示す。A区では降水量との相関が極めて高いのに対し、D~F区の植生回復が進んでいる試験区では、降水量との相関は低くなり、逆に最大時間雨量との相関の方が高い傾向がみられた。つまり、裸地化、浸食が進んでいるところでは、たとえ最大時間雨量が小さくても、地表流出が発生しやすいことから、降水量の影響を強く受けるのに対して、地表部が植生等でマルチされているところでは、地表流出が発生しにくいことから最大時間降雨量の方が流出に強い影響をもたらしていると考えられる。またC区では地表流出量は降水量、最大時間降雨量に影響を受けており、それぞれの相関より、両者を乗じたものを対数値に換算した値との相関の方が高かった。

表-4 地表流出量と降雨因子との相関

試験区	地表流出量データ			要因			
	N	MEAN	MIN	MAX	Rf	Rmax	log (Rf・Rmax)
A	33	22.25	1.59	104.82	0.968	0.531	0.792
B	35	8.10	0.34	28.68	0.805	0.561	0.796
C	35	5.91	0.10	20.96	0.714	0.654	0.774
D	35	3.21	0.07	16.55	0.576	0.755	0.685
E	35	3.54	0.00	24.27	0.495	0.742	0.639
F	35	1.60	0.00	11.56	0.531	0.765	0.650

N : データ数 MEAN : 平均値 MIN : 最小値 MAX : 最大値
 Rf : 降水量 Rmax : 最大時間雨量

次に降水量（累積）と地表流出量（累積）との関係を図-17に示す。裸地化しているA区では植生が進行しているB～F区に比べ、地表流出量は極めて多かった。たとえば、降水量（累積）が1,000mmの場合、A区では地表流出量（累積）は約650mmであるのに対し、B区では約200mm、E区では約40mmとなり、各試験区で顕著な差がみられた。

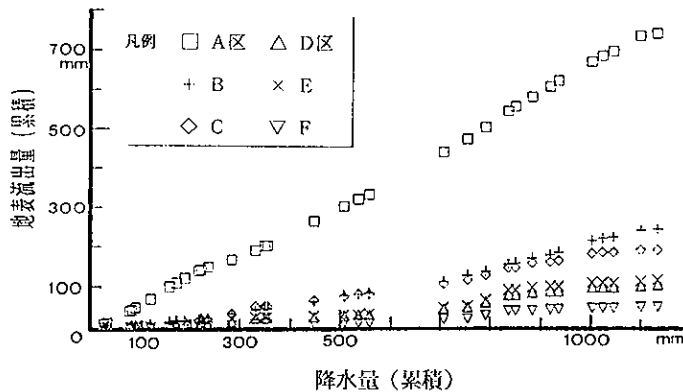


図-17 降水量と地表流出量との関係

表-5 降水量（累積）と地表流出量（累積）との関係式

試験区	回帰式 (y=ax+b)	相関係数	F検定 (有為差)
A	y=0.664x-15.675	0.998	1%有意
B	y=0.219x-22.083	0.989	1%有意
C	y=0.187x-15.533	0.995	1%有意
D	y=0.101x-11.196	0.979	1%有意
E	y=0.114x-13.063	0.979	1%有意
F	y=0.050x-6.998	0.969	1%有意

注) y : 流出量 (累積) x : 降水量 (累積)

表-5に示した回帰式の係数値を参考に各試験区の地表流出量を比較検討した。降水量（累積）が増加すれば、各試験区の地表流出率（累積）は、A区66.4%、B区21.9%、C区18.7%、D区10.1%、E区11.4%、F区5.0%に収束する。いま、A区、C区、E区それにF区を比較すると、次のとおりとなった。

$$A : C : E : F = 11 : 3 : 2 : 0.8 \sim 1$$

A区は完全に裸地であり、C区は植被率42%である。C区の植被率からすれば、地表流出率ももっと高い数値（A区の1/2）になることが予測されるが、ここで得られたC区の地表流出率はA区の3~4分の1であった。この差は、落葉層の堆積と土壌化の影響であろうと思われる。

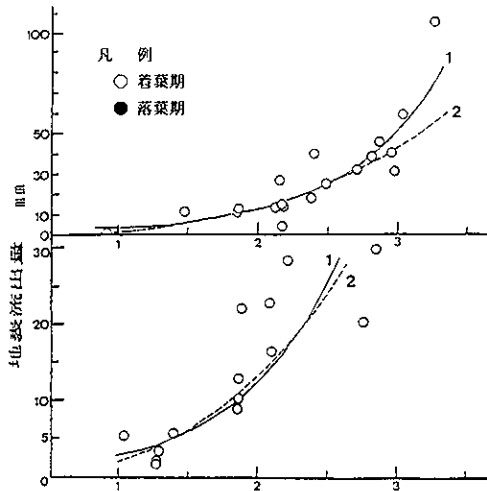
E区はワラビの影響で植被率は100%となっている。植被率からすれば、地表流出率はC区の42%であると考えられるが、実際にはC、E区では地表流出率に倍も差はみられない。ワラビの場合、夏季の短期間に伸長成長はみられるが、この成長時期に達するまでの植被率はさらに低く、このことが影響していると考えられる。A区とE区から地表部植生の有無の影響を考えると、地表部に植生があれば地表流出量は約1/5に抑えられる傾向があるといえる。

F区のように地上部に高木、垂高木、低木が形成され、また林床にはコシダ等に繁茂された林分では、裸地化しているA区と比較しても流出量は10分の1以下に低減している。またE区のように地表部が草本類だけで覆われている場合に比べても、F区の地表流出量は2分の1以下である。

以上の点からすれば、林床、および地上部の木本類の有無は地表流出量を大きく左右するといえる。山火事に被災した林地において、地表流出による表層土壌の移動を防ぐには、草本、木本による早期の地表面の緑化は重要である。

次に治山工法について検討する。B区は階段工を施した場合である。B区の地表流出量はA区の約1/3となっていた。D区のように斜面に穴を設け、降水を集水させた場合では地表流出量はA区の約6~7分の1であった。植被率（B区25%、E区20%）を考慮しても、地表流出率は減少していると考えられる。このことから、今後階段工と集水を目的とした工法を併用することも検討する必要があると思われる。

ところで竹内ほか¹⁴⁾は、一連続降雨量（ x ）と地表流出量（ y ）との関係は $y = a x^b$ （ a 、 b は係数）で示されるとしている。ただし、ここでの適用では相関はあまり高くなかった（相関係数 $r = 0.50$ 未満）。そこでA区~F区までについて降水量・降雨強度をひとつの指標とし、地表流出量との関係を求めた。これを図-18~図-23に示す。

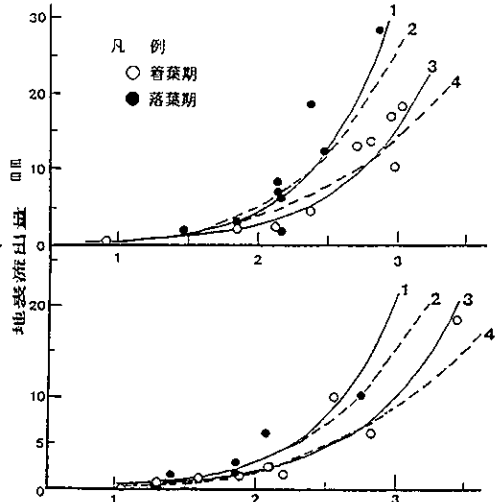


log (降水量 × 最大時間降水量)

図-18 降水量・最大時間雨量と地表流出量の関係 (A区)

注1. 図上段は1990年, 下段は1991年の調査データを示す。

注2. 図中の番号1, 2はそれぞれ指数式, べき乗式を示す(表-6参照)。

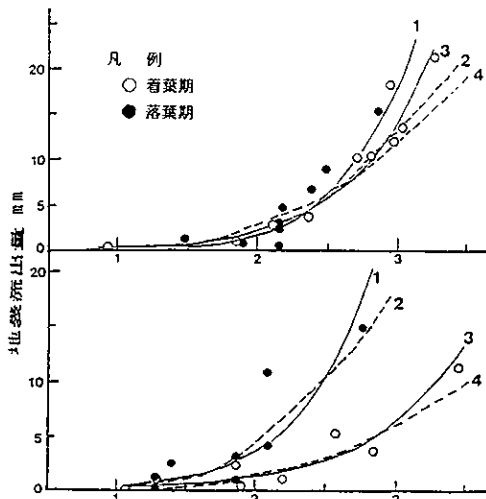


log (降水量 × 最大時間降水量)

図-19 降水量・最大時間雨量と地表流出量の関係 (B区)

注1. 図上段は1990年, 下段は1991年の調査データを示す。

注2. 図中の番号(式)1, 3は指数式, 2, 4はべき乗式を示す(表-6参照)。

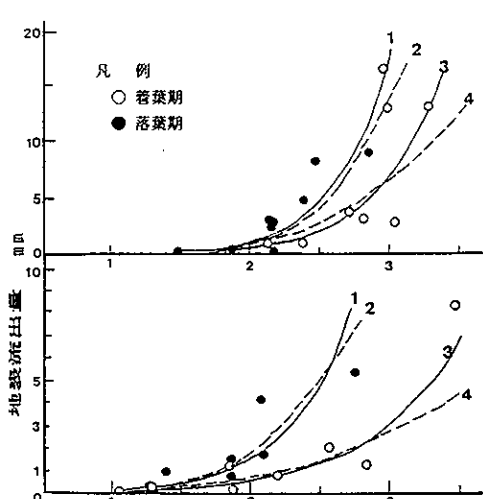


log (降水量 × 最大時間降水量)

図-20 降水量・最大時間雨量と地表流出量の関係 (C区)

注1. 図上段は1990年, 下段は1991年の調査データを示す。

注2. 図中の番号(式)1, 3は指数式, 2, 4はべき乗式を示す(表-6参照)。

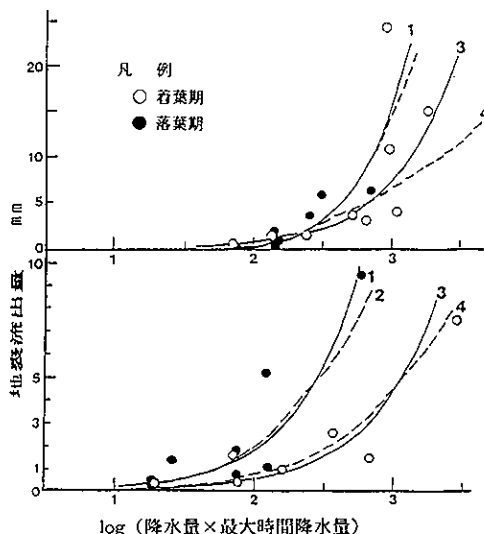


log (降水量 × 最大時間降水量)

図-21 降水量・最大時間雨量と地表流出量の関係 (D区)

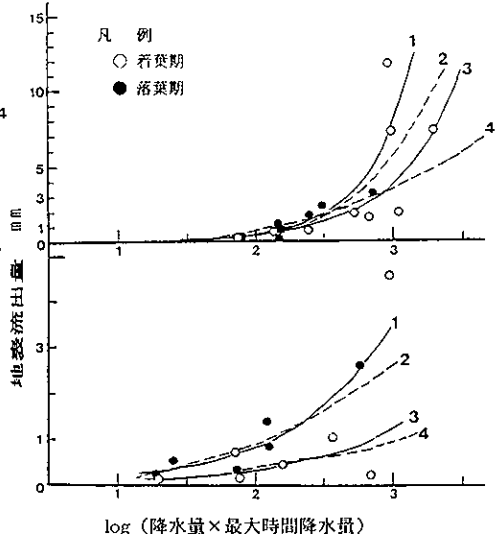
注1. 図上段は1990年, 下段は1991年の調査データを示す。

注2. 図中の番号(式)1, 3は指数式, 2, 4はべき乗式を示す(表-6参照)。



log (降水量 × 最大時間降水量)
 図-22 降水量・最大時間雨量と地表流出量の関係 (E区)

注1. 図上段は1990年, 下段は1991年の調査データを示す。
 注2. 図中の番号(式) 1, 3は指数式, 2, 4はべき乗式を示す(表-6参照)。



log (降水量 × 最大時間降水量)
 図-23 降水量・最大時間雨量と地表流出量の関係 (F区)

注1. 図上段は1990年, 下段は1991年の調査データを示す。
 注2. 図中の番号(式) 1, 3は指数式, 2, 4はべき乗式を示す(表-6参照)。

両者の関係は表-6に示すとおり, ほぼ指数, べき乗式で近似できた。特に裸地部がみられるA区(一部), B区, C区, D区では植被率の高いE, F区に比べよく適合した。それだけ, 裸地部では降水量とともに最大時間雨量が流出量に大きな影響を与えることが予想される。

表-6 降水量・時間雨量と地表流出量との関係

試験区	調査年	着・落葉期	指数式	べき乗式	回帰式番号
A	1990年	-	$Y=0.664 * 4.26^x$ 0.902 **	$Y=1.688 * X^{2.95}$ 0.855 **	指1 べき乗2
	1991年	-	$Y=0.667 * 4.31$ 0.580 **	$Y=2.113 * X^{2.70}$ 0.771 **	1 2
B	1990年	着	$Y=0.100 * 5.14$ 0.957 **	$Y=0.485 * X^{3.06}$ 0.890 **	3 4
	1991年	着	$Y=0.090 * 4.69$ 0.938 **	$Y=3.196 * X^{3.07}$ 0.922 **	3 4
	1990年	落	$Y=0.650 * 8.22$ 0.914 **	$Y=0.248 * X^{4.27}$ 0.872 **	1 2
	1991年	落	$Y=0.070 * 6.39$ 0.900 **	$Y=0.314 * X^{3.47}$ 0.939 **	1 2

試験区	調査年	着・落葉期	指数式	べき乗式	回帰式番号	
C	1990年	着	$Y=0.050 * 6.25^x$ 0.954 **	$Y=0.307 * X^{3.33}$ 0.908 **	3	4
	1991年	着	$Y=0.050 * 4.77^x$ 0.952 **	$Y=0.181 * X^{3.16}$ 0.926 **	3	4
	1990年	落	$Y=0.030 * 7.84^x$ 0.922 **	$Y=0.141 * X^{1.09}$ 0.854 **	1	2
	1991年	落	$Y=0.060 * 7.55^x$ 0.843 **	$Y=0.323 * X^{3.74}$ 0.876	1	2
D	1990年	着	$Y=0.008 * 9.53^x$ 0.715 *	$Y=0.067 * X^{1.08}$ 0.632 **	3	4
	1991年	着	$Y=0.020 * 5.02^x$ 0.948 **	$Y=0.086 * X^{3.18}$ 0.820 **	3	4
	1990年	落	$Y=0.003 * 16.95^x$ 0.773 *	$Y=0.015 * X^{5.84}$ 0.858 **	1	2
	1991年	落	$Y=0.010 * 9.76^x$ 0.560	$Y=0.091 * X^{1.33}$ 0.813 **	1	2
E	1990年	着	$Y=0.009 * 9.32^x$ 0.626	$Y=0.076 * X^{1.02}$ 0.531 *	3	4
	1991年	着	$Y=0.008 * 8.08^x$ 0.734 *	$Y=0.033 * X^{1.43}$ 0.932 **	3	4
	1990年	落	$Y=0.002 * 20.33^x$ 0.698 *	$Y=0.005 * X^{7.11}$ 0.790 **	1	2
	1991年	落	$Y=0.020 * 9.41^x$ 0.914 **	$Y=0.119 * X^{1.14}$ 0.899 **	1	2
F	1990年	着	$Y=0.004 * 9.63^x$ 0.622	$Y=0.035 * X^{1.08}$ 0.528 *	3	4
	1991年	着	$Y=0.020 * 3.77^x$ 0.774 *	$Y=0.055 * X^{2.85}$ 0.657 *	3	4
	1990年	落	$Y=0.008 * 20.91^x$ 0.691 *	$Y=0.002 * X^{7.18}$ 0.787 **	1	2
	1991年	落	$Y=0.050 * 4.15^x$ 0.946 **	$Y=0.150 * X^{2.85}$ 0.891 **	1	2

注) **, *はそれぞれ5, 1%で有意であることを示す

着葉(展開)時期と落葉時期についてみると、9月下旬以降の落葉期に梅雨時期のようなまとまった降水がなかったが、降水量に最大時間雨量を乗じたものの対数値が2.5までの範囲では、落葉期の方が流出量大きい傾向が各試験区で共通してみられた。このことは服部ほか¹⁾がふれているようにリターフローの影響が関係しているとも考えられる。

また落葉期では降水量に最大時間降水量を乗じたものの対数値が2.5前後から地表流出量は急激に増加した。着葉期では対数値が2.5~3の範囲で急激に増加している。落葉期では実際に2.5を越える降雨が発生することはないが、梅雨時期(着葉期)であれば、年に一回以上は発生が考えられる。

次に1990年と1991年ではどの試験区でも、1990年の方が地表流出量が大きかった。このことは植生の回復が影響していることが考えられる。特にB～E区では1年生草本類の出現や木本類の萌芽再生が顕著になってきたことが関係していると思われる。

ここで求められた降水量・最大時間雨量と地表流出量の関係は

$$y1 = a \cdot b^x \quad (\text{指数式})$$

$$y2 = a \cdot x^b \quad (\text{べき乗式})$$

ただし $x = Rf \cdot Rmax$ y : 地表流出量

Rf : 降水量 $Rmax$: 最大時間雨量

$$s.f1 = a \cdot b^x / Rf \cdot 100$$

$$s.f2 = a \cdot x^b / Rf \cdot 100$$

$s.f1, 2$: 地表流出率 (%)

これにより、流出率も降水量、最大時間雨量から予測できる。ただし、D～E区にかけての植生回復が進行している試験区、それに健全な林分内のF区では、回帰式の相関が低い。

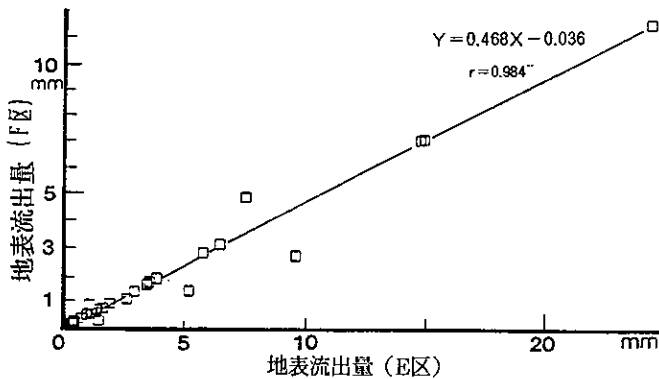


図-24 地表流出量の比較

同一降雨における地表流出量についてE区とF区を比較したものが図-24である。両者は直線回帰され、その相関は極めて高くなった。この回帰式のY切片は無視できることから、F区の地表流出量(率)はE区の46.8%、つまり半分以下となる。E区はワラビで試験区の全面が覆われていて植被率が100%であるのに対し、F区は地表がコシダで覆われ、さらには上部には低木、亜高木層がある。この状況を考えて時、地上部の低木、亜高木も地表流出量の軽減に影響していると考えられる。したがって、緑化を行う上では、地表部を草本類で被覆するとともに木本類による早期成立(回復)も必要であると考えられる。

結 論

小流域での直接流出量，斜面での地表流出量などの水流出特性が山火事の前後でどのように変化するかについて研究を行ってきた。現在試験途中ではあるが，これまでに明かになった点を以下にまとめる。

- (1) ピーク流量が発生する時間の早さは階段工区＝健全区＞全焼区であった。
- (2) ピーク流量後の減水勾配の大きさは健全区＞階段工区＞全焼区となった。
- (3) 健全区，階段工区に比べ，全焼区は流出停止期間が短い傾向にあった。
- (4) 降水量と直接流出量の関係はどの試験区についても相関が高かったが，初期流量，最大時間雨量との相関は極めて低かった。
- (5) 直接流出量は全焼区＞＝階段工区＞健全区の順となり，被災区：健全区＝2～3：1の割合であった。
- (6) 直接流出は降水量20～30mmの範囲で発生し始め，50～60mmの範囲までに急激に上昇し，100mmを越える降水量では増加率は減少していく傾向がみられた。
- (7) 地表流出量と降水量の相関は裸地区で高く，植生が回復するにしたがって低くなる傾向がみられた。
- (8) 地表流出量（累積）と降水量（累積）との関係は1次式で近似された。健全な林分では被災後，浸食により裸地化した区や地表が草本で被覆された区に比べ，地表流出量はそれぞれ1/10，1/2となった。
- (9) 降水量・最大時間雨量と地表流出量との関係は指数，べき乗式で近似できた。ただし，植生の回復が進行している箇所では相関が低かった。

引用文献

- 1) 江崎次夫・小川滋・井上章二・山本正夫・藤枝正文・岸原信義（1987）林野火災大規模化の要因解明と火災跡地の環境保全に関する研究（Ⅲ）. 98回日林論：581～584.
- 2) 藤枝基久・阿部敏夫（1982）竜の口試験地における森林の成立が流出に及ぼす影響. 林業試験場研究報告317：113～138.
- 3) 服部重昭・阿部敏夫・小林忠一・玉井幸治（1992）林床被覆がヒノキ人工林の浸食防止に及ぼす影響. 森林総合研究所報告362：1～34.
- 4) Hibbert, A.R (1973) Forest treatment effect on water Yield. International Symposium on Forest Hydrology (PENNSYLVANIA)：527～543.
- 5) 三寺光雄・中根周歩（1982）山火事跡地の流出解析. 日本生態学会第29回大会講要：83.
- 6) 中越信和・中根周歩・今出秀樹・根平邦人（1981）アカマツ林の山火事跡地における植生回復，I. 初期段階の種組成，構造及び現存量. 広島大学総合科学部紀要IV，6：69～113.
- 7) 中越信和・中根周歩・今出秀樹・根平邦人（1982）アカマツ林の山火事跡地における植生回復，II. 落下種子の動態. 広島大学総合科学部紀要IV，7：95～126.
- 8) 中越信和・根平邦人（1982）アカマツ林の山火事跡地における植生回復，III. 対象アカマツ林. 広島大学生物学会誌48：7～16.
- 9) 中越信和・根平邦人・中根周歩（1983）アカマツ林の山火事跡地における植生回復，IV. 初期段階の埋土種子. 広島大学総合科学部紀要IV，8：41～65.

- 10) 中根周歩 (1986) 林野火災が生態系物質循環に及ぼす影響. 遺伝40vol.11 : 10~15.
- 11) 中根周歩・根平邦人・中越信和・高松修治 (1983) アカマツ林の山火事跡地における植生回復. V. 播種の影響について. 広島大学総合科学部紀要IV, 8 : 111~126.
- 12) 中野秀章 (1971) 森林伐採および伐採跡地の植被変化が流出に及ぼす影響. 林業試験場報告240 : 1~251.
- 13) 中野秀章 (1976) 森林水文学. 228pp, 共立出版, 東京.
- 14) 西山嘉寛 (1993) 山火事跡地の水流出特性 (I). 小流域における流量の変化. 日本林学会関西支部第44回大会講演要旨集 : 32.
- 15) 佐々木正臣・東敏生・吉田文則・池田作太郎・岡田剛 (1982) 山火事跡地復旧試験. 広島県林試県報17 : 25~65.
- 16) 菅民朗 (1989) パソコン統計処理. 285pp, 技術出版, 東京.
- 17) 高橋史樹編 (1984) 山林大火跡地の環境変遷. 文部省「環境科学」研究Ⅷ : 33~38
- 18) 竹内信治・近嵐弘栄・坪山良夫 (1986) ヒノキ林地における地表流量の測定. 97回日林論 : 531~532.
- 19) 田中豊編 (1984) パソコン統計解析Ⅱ多変量解析, 403pp, 共立出版, 東京.