

## 竜の口山試験地における森林の成立が流出に及ぼす影響

藤 枝 基 久<sup>(1)</sup>・阿 部 敏 夫<sup>(2)</sup>Motohisa FUJIEDA and Toshio ABE: Effects of Regrowth and  
Afforestation on Streamflow on Tatsunokuchiyama  
Experimental Watershed

**要 旨**：林業試験場竜の口山森林理水試験地の南谷・北谷流域について、森林の成立に伴う林況変化が年間水収支と流出特性におよぼす影響を検討した。年間水収支については、森林の成立により年流出量が南谷で15%、北谷で18%減少した。年基底流出量の減少も見られ、その多くは出水直後の遅い中間流を含む期間のものとして推定されるが、低水期間の地下水流量も減少した。流出特性の面より一降雨とそれに伴う出水の関係を検討すると、直接流出量は大雨時において10~15mm減少した。ピーク流量の遅滞時間は、いくぶん長くなる傾向が見られ、ピーク流出係数はその最大値の比較において南谷で森林成立以前の約15%の減少が見られたが、北谷では明確な差は検出されなかった。表面流出の減水係数は森林成立以前の平均値との比較において、南谷で34%、北谷で12%減少したが、中間流出、基底流出については変化がなかった。これらの結果より、森林の成立は一降雨による直接流出量を減少し、ハイドログラフの平滑化を招くことが分かった。

## I は じ め に

林業試験場竜の口山森林理水試験地の南谷・北谷流域は、瀬戸内沿岸の小雨地方におけるアカマツ林の水源涵養機能を解明するため設置され、1937年1月以来、流量と気象観測が継続されている。

この間、多くの試験研究が行われたが、その中で、1944~1947年に南北両谷のアカマツ林が皆伐され、伐採が流出に及ぼす影響が検討された。すなわち、少雨地方の小流域においては、伐採により年・季節・月・豊水各流出量及び直接流出量、ピーク流量が増加するが盛夏期の月流出量が減少すること、さらに低水・渇水両流出量といった基底流量が増加することなどが明らかになった<sup>(1)</sup>。

皆伐後、北谷は自然状態におかれ、南谷は1959年の山火事によりほぼ全域の植生を焼失したので、翌年クロマツの人工造林が行われた。現在、北谷ではアカマツや各種広葉樹から成る天然混交林が、南谷ではクロマツ壮齢林が保持されており、これらの成育に伴う水収支の変化について試験中であり、その一部については報告してきた<sup>(2)~(4)</sup>。

このたび、北谷は1947~1952年を皆伐影響期、1971~1975年を林相健全期とし、南谷は1960~1964年を山火事影響期、1971~1975年を林相健全期として、森林の成立が年間水収支や一降雨による直接流出量、ピーク流量、減水曲線といった流出特性におよぼす影響を検討した。この報告は、理論的な流出解析ではなく、多数のしかも精度の高い実測資料によって実証的に、森林の影響を評価することを目的としたものである。

なお、原稿の校閲と有効な批判とを賜った防災部理水第一研究室長 河野良技技官に謝意を表する。

II 流域の概要

竜の口山森林理水試験地は大坂営林局岡山営林署管内竜の口山国有林 11 林班に属し、南谷 (22.611ha) と北谷 (17.274 ha) の 2 流域より成る。Fig. 1 は試験流域の地形図であり、その諸元を数値で示せば Table 1 のようである。地形・地質等は既報の文献<sup>14)</sup> にゆずり、ここでは今回の報告に必要な項目について述べる。

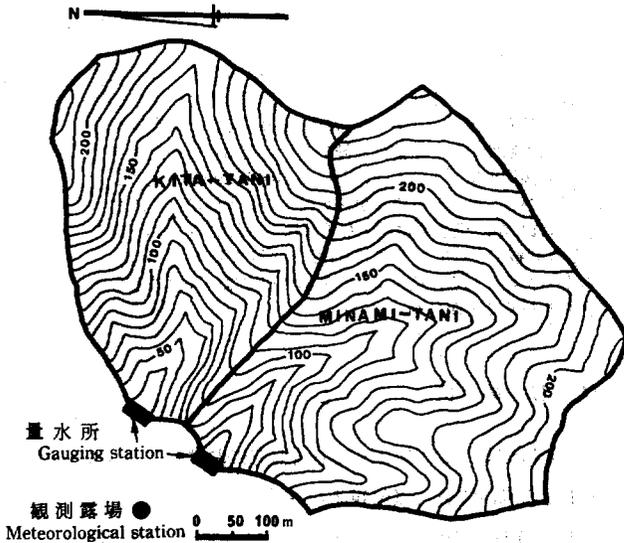


Fig. 1 竜の口山試験地の地形図  
Topographic map of Tatsunokuchiyama experimental watershed.

Table 1. 試験流域の地形特性  
Physical characteristics of the experimental watershed

因子 Factor	流域 Watershed	南谷 Minami-tani	北谷 Kitatani
流域面積 (ha) Watershed area		22.611	17.274
標高 (m) Altitude		50~257	36~246
平均傾斜 (度) Mean slope of watershed		23.9	27.5
主流長 (m) Length of main stream		770	580
主流長の平均傾斜 (度) Gradient of main stream		15.1	19.9
形状係数 Form factor		0.557	0.664

Table 2. 気候表 (観測露場)  
Table of climate (Meteorological station)

要素 Elements	月 Month	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Year
降水量 (mm) Precipitation		38.1	49.9	77.1	110.6	125.1	186.0	171.1	103.7	174.0	101.0	57.7	34.4	1,228.7
平均気温 (°C) Mean temperature		2.3	3.2	7.0	13.3	18.2	21.8	26.0	27.1	22.3	16.0	9.8	4.4	14.3
平均最高気温 (°C) Mean of maximum temperature		8.1	8.9	12.7	18.4	22.8	25.8	29.7	31.2	27.3	21.8	16.3	10.8	19.4
平均最低気温 (°C) Mean of minimum temperature		-2.1	-1.6	1.4	6.5	11.6	16.3	21.2	21.9	17.7	10.9	5.0	0.2	9.2
平均湿度 (%) Mean relative humidity		79.0	76.0	71.1	69.2	71.8	77.9	80.6	77.7	80.5	81.6	83.2	81.1	77.4
平均蒸発量 (mm/day) Mean pan evaporation		1.1	1.5	2.4	3.5	4.0	4.0	4.6	5.1	3.5	2.3	1.5	1.0	2.8

Observation periods 1937 to 1977.

## 1. 気 象

本試験地の観測露場における1937～1956年の観測結果は「森林気象観測報告」<sup>1)</sup>に報告されているが、それ以降の公表はないため、一括して1937～1977年の観測統計値を求めた。月別の平均値を掲げるとTable 2 のようである。

ここでは流出現象に最も関係の深い降雨特性について、その概要を述べる。

本試験地は瀬戸内気候区に属するため降雨量が少なく、年降雨量は最少621.8mmから最大1,650.1mmの範囲にあり、平均1,228.7mm、標準偏差207.6mmである。月降雨量の極大値は梅雨期の6～7月と台風期の9月にあらわれ、年降雨量の43.2%に達する。梅雨の平年値は、梅雨入り6月8日、梅雨明け7月16日で、期間日数38日、期間降雨量318.0mmである。台風は9月前後に通過する年もあるが、その影響は少なく日降雨量100mm以上の豪雨は5回を記録するだけであった。

年間降雨日数（日降雨量0.1mm以上）は、121.7日であるが、30mm以上は9.5日でその多くは、6、7、9月に集中するようである。無降雨継続期間については、連続7日以上回数は暖候期（5～10月）で4.5回、寒候期（前年11月～4月）で5.7回あり、最大無降雨日数は前者で31日、後者で33日であった。

最大10分間雨量は1976年6月14日の29.6mm、最大60分間雨量は1959年9月12日の56.6mmであり、いずれも雷雨性のしゅう雨によるものであった。また最大24時間、48時間雨量は1976年9月11～12日の台風17号により発生し、最大24時間雨量142.1mm、最大48時間雨量206.7mmであった。

Fig. 2, 3は、特性係数法<sup>2)</sup>により求めた短時間降雨と長時間降雨の確率降雨強度曲線である。

## 2. 林況の変遷

本試験期間中の植生・地表状態の変遷について要点を述べると次のようである。

### 南谷流域

1959年9月に隣接流域から山火事が延焼し、約0.3haのヒノキ植林地（約30年生）を除き全域の植生を全焼した。火勢が強く、落葉層・腐葉層まで完全に焼失したが、10月下旬ごろよりネザサ・ヒメムカシヨモギなどの再生が見られ、裸地状態は約2か月間であった。

1960年3月にクロマツの植栽（3,000本/ha）が行われたが、ササ、シダ、雑木類の再生・生育が著しく、植栽後3年間は保育のため下刈りが行われた。1962年には樹高1.0～1.5mのクロマツ幼齢林となり、以後自然放置された。

1976年現在の林況は、ヒノキ壮齢林と山頂分水嶺付近にコナラが見られる以外はクロマツが順調な生育を示し、樹高8.1～9.5m、胸高直径9～11cmに達し、林冠はほぼうっ閉している。下木としてはネジキ、ヒサカキ、ソヨゴ、ヤマハゼ、ツツジ類等が見られ、林床にはクロマツの落葉が堆積し、一部にはササ、シダが生育する。なお局所的にクズの繁茂地があり、その部分のクロマツはほとんど枯死している。

### 北谷流域

マツクイムシの被害が流域全体におよんだため、1945年春よりアカマツ老齢林の皆伐・搬出作業がはじまり、1947年7月までに流域内の主要林木の除去がほぼ完了した。以後自然のまま放置された。

その後、当時の既存植生であったコナラ・リュウブ・ヒサカキ・ツツジなどの再生や、アカマツの自然侵入があり、アカマツを主林木として、これに広葉樹を混じえ、下層はネザサ・ススキ・コシダなどで構

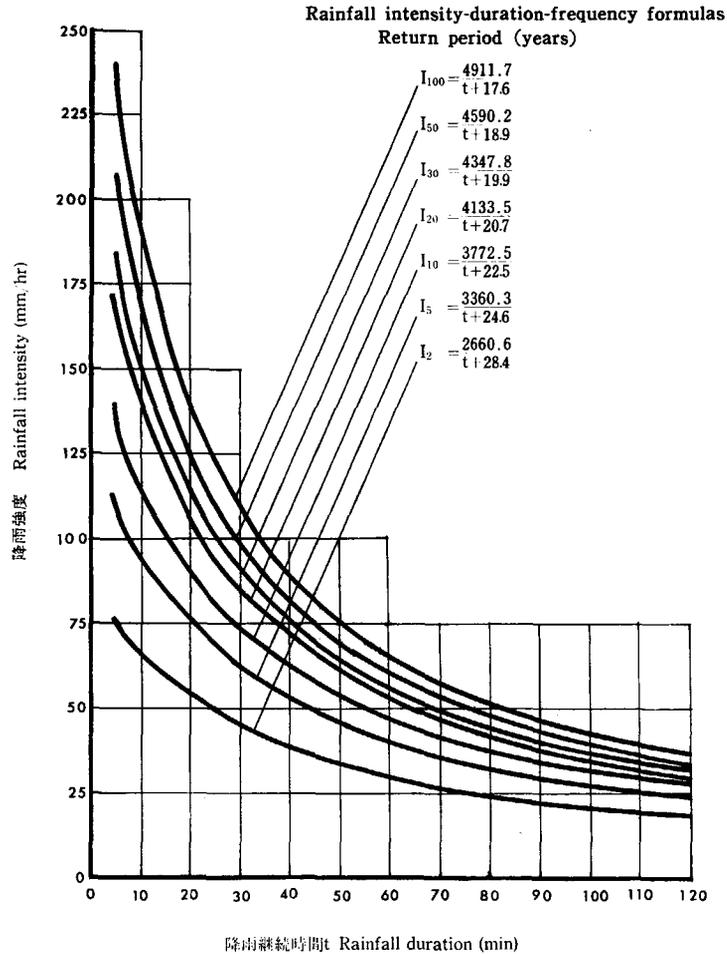


Fig. 2 確率降雨強度曲線 (短時間)  
Rainfall intensity-duration-frequency curves  
(short duration).

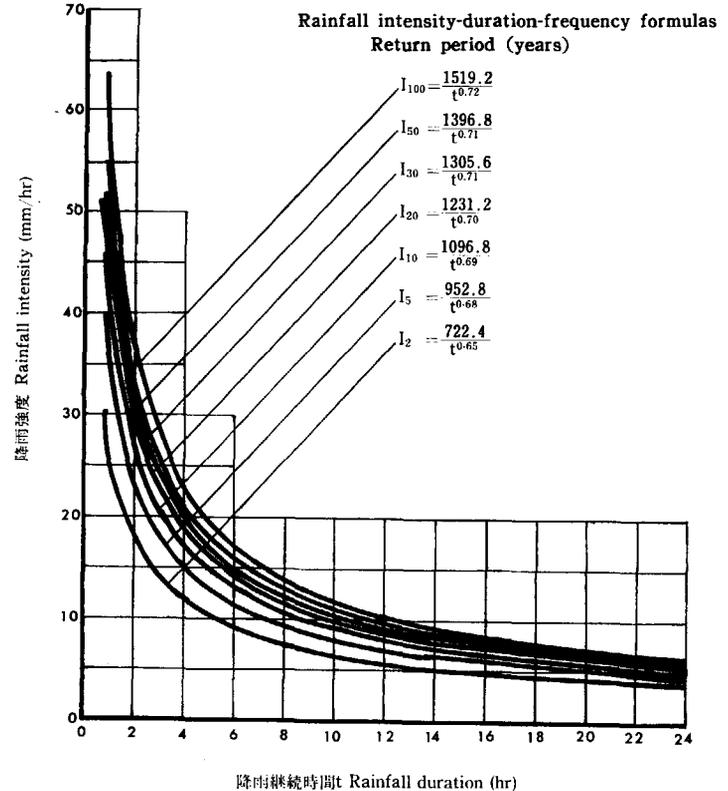


Fig. 3 確率降雨強度曲線 (長時間)  
Rainfall intensity-duration-frequency curves  
(long duration).

Table 3. 試験流域の蓄積  
Volume of stand in the experimental watershed

流域 Watershed	南 Minamitani		北 Kitatani	
	蓄積 Volume of stand	単位面積の蓄積 Volume per hectare	蓄積 Volume of stand	単位面積の蓄積 Volume per hectare
調査年 Year	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> /ha)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> /ha)
1958	20	0.9	—	—
1963	29	1.3	202	11.7
1968	48	2.1	1,262	73.1
1973	499	22.1	1,775	102.8
1978	981	43.4	2,339	135.4

成される林分に移行していった。1962～1964年に溪流兩岸の再生林木の伐採が2度行われた(合計 0.8 ha)が、それ以外は自然状態におかれた。

1976年現在の林況は、アカマツ・コナラを主林木としてこれに各種広葉樹を混じえた天然混交林を形成している。下木としてはヒサカキ、ソヨゴ、ネジキ、ヤマハゼ、ツツジ類等の灌木・雑木類が繁茂しており、林床には落葉が堆積し、部分的にササ・シダが生育する。

Table 3 は、森林調査簿より求めた試験流域の蓄積の変化である。なお 1953 年以前については調査不能であった。

### III 年間水収支

皆伐地や山火事跡地等の無立木地に森林が成立することによって、降雨量の直接流出量、基底流出量、消失量への配分に応じたような影響をおよぼすかを量的に把握することは、森林の水保全機能を定量的に評価する上で重要である。本節では、水年を単位とする水収支を検討する。

一般に、ある流域での水収支は次式で示される。

$$P = D + L + \Delta S \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$D = D.R + B.R \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで、P: 降雨量, D: 流出量, L: 消失量, ΔS: 貯蓄量の変化, D.R: 直接流出量, B.R: 基底流出量

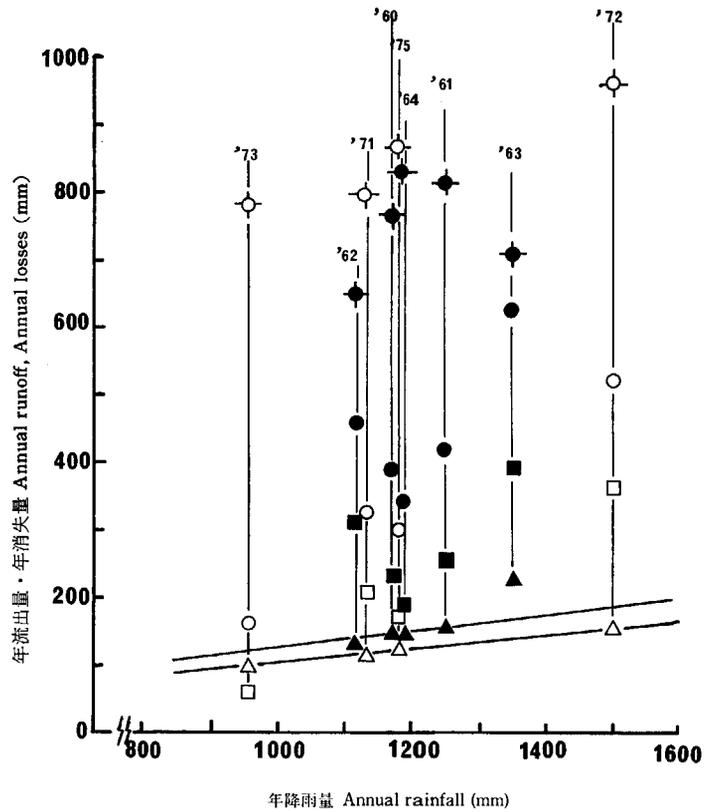
いま、水文期間を1水年に取れば ΔS ≈ 0 となり次式を得る。

$$P = D.R + B.R + L \quad \dots\dots\dots(3)$$

当試験地においては、降雨量と流出量は実測されており、消失量はその残余として求まる。

流出量の直接流出量と基底流出量への分離は、一降雨によって水位曲線に変化が認められるものすべてについてハイドログラフを作製し、そのハイドログラフの立ち上がり点と中間流出(早い中間流出)の終了点を直線で結ぶ方法によった<sup>2)</sup>。また、複数のピークを持つ複雑なハイドログラフについても、これを一つの出水とみなして同様な方法によった。こうして求めた直接流出量を年間集計して年直接流出量とした。

Fig. 4, 5 は、各水年の年降雨量に対する総流出量、直接流出量、基底流出量、消失量の関係を、南谷

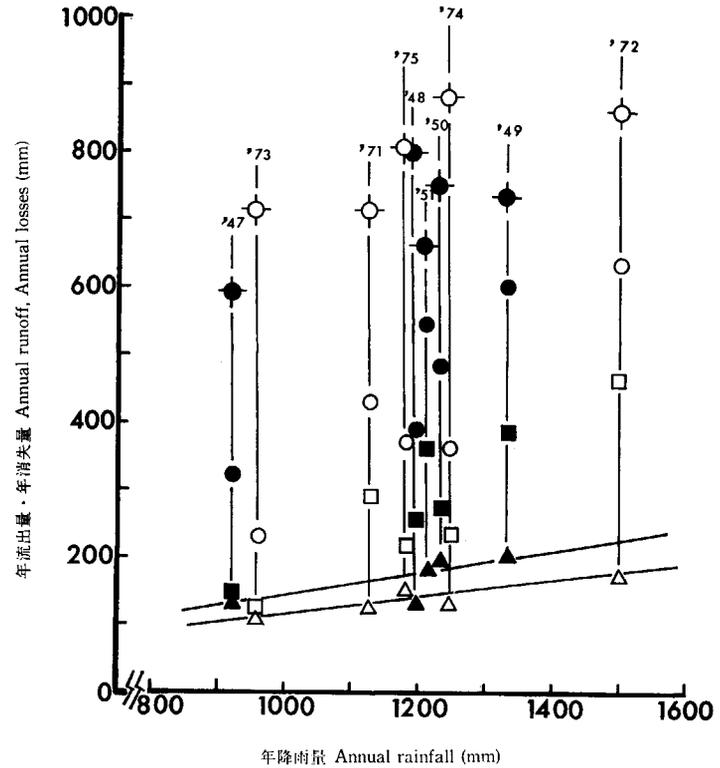


山火事影響期 Stage under the influence of forest fire  
 林相健全期 Stage of normal forest

■ 直接流出量 Direct runoff  
 ▲ 基底流出量 Base runoff  
 ● 総流出量 Total runoff  
 ◆ 消失量 Losses

□ 直接流出量 Direct runoff  
 △ 基底流出量 Base runoff  
 ○ 総流出量 Total runoff  
 ◇ 消失量 Losses

Fig. 4 年降雨量と年流出量・年消失量の関係(南谷)  
 Relation between annual rainfall and annual runoff and losses (Minamitani).



皆伐影響期 Stage under the influence of clear cutting  
 林相健全期 Stage of normal forest

■ 直接流出量 Direct runoff  
 ▲ 基底流出量 Base runoff  
 ● 総流出量 Total runoff  
 ◆ 消失量 Losses

□ 直接流出量 Direct runoff  
 △ 基底流出量 Base runoff  
 ○ 総流出量 Total runoff  
 ◇ 消失量 Losses

Fig. 5 年降雨量と年流出量・年消失量の関係(北谷)  
 Relation between annual rainfall and annual runoff and losses (Kitatani).

Table 4. 4～6月の期間における降雨量と流出量の水年別比較  
Comparison between rainfall and runoff for April~June

期 間 Stage	年 Year	期間降雨量 Rainfall (mm)	期間降雨量	期間降雨 日 数 Number of rainfall days	期間直接流出量		期間基底流出量		期間総流出量		期間流出率	
			年降雨量		Direct runoff (mm)		Base runoff (mm)		Total runoff (mm)		Runoff of percentage (%)	
			Annual rainfall (%)		南 谷 Minami- tani	北 谷 Kitatani	南 谷 Minami- tani	北 谷 Kitatani	南 谷 Minami- tani	北 谷 Kitatani	南 谷 Minami- tani	北 谷 Kitatani
皆 伐 影 響 期 Under the influence of clear cutting	1947	367.7	40.1	31	—	99.2	—	57.3	—	156.5	—	42.6
	1948	244.1	20.4	30	—	31.8	—	28.4	—	60.2	—	24.7
	1949	418.2	31.3	40	—	136.2	—	62.3	—	198.5	—	47.5
	1950	341.0	27.6	33	—	101.0	—	63.8	—	164.8	—	48.3
	1951 (平均) Mean	351.7 (344.5)	29.0 (29.7)	33 (33.4)	—	87.1 (91.1)	—	65.4 (55.4)	—	152.5 (146.5)	—	43.4 (41.3)
山 火 事 影 響 期 Under the influence of forest fire	1960	340.4	29.2	44	68.0	—	46.2	—	114.2	—	33.5	—
	1961	412.3	33.1	34	84.8	—	61.4	—	146.2	—	35.5	—
	1962	584.7	52.4	40	224.9	—	73.6	—	298.5	—	51.1	—
	1963	650.1	48.3	58	260.7	—	115.6	—	376.6	—	57.9	—
	1964 (平均) Mean	372.4 (472.0)	31.5 (38.9)	36 (42.4)	98.0 (147.3)	—	41.2 (67.6)	—	139.2 (214.9)	—	37.4 (43.1)	—
林 相 健 全 期 Normal forest	1971	360.1	31.8	37	46.9	72.3	32.2	49.7	79.1	122.0	22.0	33.9
	1972	461.7	30.8	42	103.9	148.9	45.7	56.7	149.6	205.6	32.4	44.5
	1973	386.6	40.5	35	39.9	78.9	41.4	44.3	81.3	123.2	21.0	31.9
	1974	328.9	26.4	35	(欠測)*	53.8	(欠測)*	30.3	(欠測)*	84.1	—	25.6
	1975 (平均) Mean	429.3 (393.3)	36.4 (33.2)	46 (39.0)	85.5 (69.1)	105.6 (91.9)	42.1 (40.4)	56.8 (47.6)	127.6 (109.4)	162.4 (139.5)	29.7 (26.3)	37.8 (34.7)
平 年 値 Normal value**	421.7	34.3	36.7									

\* Missing observation

\*\* The normal value shows the average from 1937 to 1977 at the meteorological station.

は、山火事影響期、林相健全期に、北谷は皆伐影響期、林相健全期のそれぞれ両期間に分類して示したものである。ただし南谷の 1974 年については、流量に関して一部欠測があったので除外した。

この図より次のことが言えよう。

全体的傾向として、総流出量、直接流出量、消失量は、年降雨量の増加に伴い直線的に増加している。しかし、南谷の山火事影響期では年降雨量に対する関係が 1962 年と 1963 年においてかなり複雑に変動しており、北谷の皆伐影響期の 1948 年についても同様である。これらの著しい変動は、一部植生変化にも起因するであろうが、後述する降雨条件の影響を強く受けた結果と考えられる。

基底流出量は、北谷の皆伐影響期の 1948 年と南谷の山火事影響期の 1963 年を除いて、きわめて安定しており、それぞれの期間で年降雨量の増加に伴い直線的に微増するだけである。したがって総流出量の変動の多くは降雨特性が敏感に反映する直接流出量の変動に起因するものと推定される。

次に、年間水収支の面から見ると、皆伐影響期、山火事影響期においては林相健全期と比較して同一年降雨量に対する総流出量、直接流出量、基底流出量は多く、したがってその分消失量は減少している。

ここで、皆伐影響期の 1948 年と山火事影響期の 1963 年において、年降雨量の総流出量、直接流出量、基底流出量、消失量への配分量が、その他の水年と比較してかなり異なった値を示した理由を降雨条件の面より検討する。

Table 4 に示すように、1963 年は 4～6 月にかけて降雨が断続的にあり、期間中の各種流出量が異常に高い値を示した。一般に出水直後の基底流量は、地下水流出の他に遅い中間流出を含むため比較的流量が多い。その減水中に次の降雨による出水があると、高い初期流量のもとで増水をくり返すため基底流量の増大を生じる。また期間中流域が湿潤状態にあったことが、直接流出量の増大をもまねいたものと考えられる。一方 1948 年は、逆にこの期間が少雨であったため、梅雨期の 6 月に渇水流量 (355 日流量) が出現するほど流域が乾燥状態にあった。そのため直接流出量のみならず、基底流出量も皆伐影響期間内の

Table 5. 年降雨量 1,200mm に対する流出量、消失量の推定値  
Estimated annual runoff and losses in 1,200 mm annual rainfall

<南 谷 Minamitani>

期 間 Stage	降 雨 量 Rainfall (mm)	流 出 量 Runoff (mm)			消 失 量 Losses (mm)
		直接流出量 Direct runoff	基底流出量 Base runoff	総流出量 Total runoff	
山火事影響期 Under the influence of forest fire	1,200	240	160	400	800
林相健全期 Normal forest	1,200	210	130	340	860

<北 谷 Kitatani>

期 間 Stage	降 雨 量 Rainfall (mm)	流 出 量 Runoff (mm)			消 失 量 Losses (mm)
		直接流出量 Direct runoff	基底流出量 Base runoff	総流出量 Total runoff	
皆伐影響期 Under the influence of clear cutting	1,200	310	180	490	710
林相健全期 Normal forest	1,200	260	140	400	800

平均基底流出量の51%と低い値となった。

なお1962年の直接流出量の変動は、梅雨期の異常多雨によるものである。

このように年間降雨量の時期的な配分の相違によって、各種流出量がかなり変化し、ひいては年間水収支に大きな影響を与えるようである。

前述のごとく本流域の年平均降雨量は1,228.7mmであるから、それにきわめて近い1,200mmの年降雨量が通常の気象条件下であったと想定して、これに対する総流出量、直接流出量、基底流出量、消失量を南北両谷のそれぞれの期間について推定してみよう。

いま、Fig. 4, 5において通常の気象条件下で年降雨量のあった水年について、各種流出量、消失量の直線式を求め、年降雨量1,200mmを代入して各種流出量、消失量のおおよその値を求めるとTable 5のようになる。

南谷はクロマツ林の成育により植栽後10年の経過で総流出量にして約60mmが減少し、北谷はアカマツとコナラを主体とする天然林の成立により皆伐後25年の経過で総流出量にして約90mm減少することがわかった。このように竜の口山森林理水試験地においては、森林の成立に伴い直接流出量のみならず、基底流出量の減少も見られた。これらについて若干の検討を加える。

河川流域の一年間の流況は、豊水流量（95日流量）、平水流量（185日流量）、低水流量（275日流量）、渇水流量（355日流量）等のある特定の日流量により簡便的に表される。そこで各水年ごとに日流出量<sup>9)14)</sup>（水高）をもって流況曲線を作り、豊水流量、平水流量、低水流量、渇水流量を求めた。また、平均日基底流量（年基底流出量を年間日数で除したものが、流況曲線上でどこに位置するかを知るために、あわせてFig. 6, 7に示した。

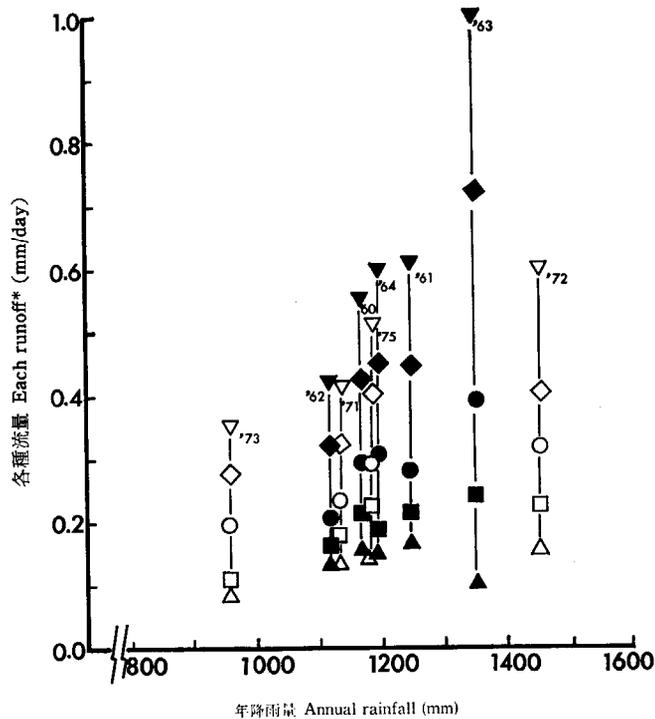
この図から次のように要約される。

(1) 各流量とも年降雨量の増加によりほぼ直線的な増加傾向を示すが、大きな流量ほど年変動が激しい。(2) 北谷の皆伐影響期、南谷の山火事影響期の豊水流量と平水流量は南北両谷の林相健全期のそれらより大きな値を示すが、低水流量、渇水流量については前者ほど明瞭な関係は見られない。(3) 平均日基底流量は豊水流量と平水流量のほぼ中間に位置する、などである。

また各種流量の出現時期について整理すると、低水流量、渇水流量は無降雨期間の連続した時や盛夏の渇水期に現われ、豊水流量、平水流量は主に出水直後の比較的流量の多い時期に出現した。

一般に平水流量以下は地下水流出成分が卓越する時期と考えられており、かつ流況曲線上の日平均基底流量の位置より判断して、低水流量、渇水流量は地下水流出のみの基底流出量であり、豊水流量、平水流量は地下水流出の外に遅い中間流出をも含む基底流出量と推定される。

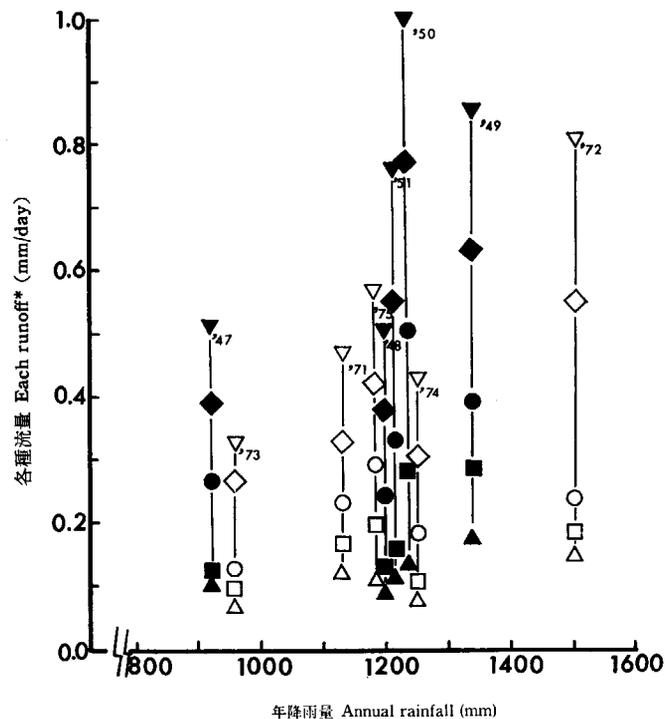
したがって、林相健全期においては森林成立以前の約30~40mmの基底流出量の減少が認められたが、森林成立前後の両期間における低水流量、渇水流量については必ずしも明瞭な相違が見られなかったことは、年基底流出量の減少の多くは出水直後の比較的流量の多い期間の基底流出量の減少に起因するものと考えられる。すなわち森林の成立による樹冠遮断量や林床遮断量の増加は、同一年降雨量の下では相対的に林地正味雨量の減少を招き、その結果として直接流出量のみならず基底流出量（主として遅い中間流出量）の減少をも生じたものと推定される。また林木の成長は蒸散量の増大をもたらし、低水流出期の基底流量を減少せしめると考えられるが、今回の結果では5~10mm程度であり、降雨量や降雨パターンといった気象的条件に影響を受けるようである。



山火事影響期 Stage under the influence of forest fire	林相健全期 Stage of normal forest	▽ 豊水流量 Plentiful runoff	○ 平水流量 Ordinary runoff
●	□ 低水流量 Low runoff	▲ 渇水流量 Scanty runoff	◇ 平均日基底流量 Mean daily base runoff
■			
▲			
◆			

Fig. 6 年降雨量と各種流量の関係 (南谷)

Relation between annual rainfall and each runoff (Minamitani).



皆伐影響期 Stage under the influence of clear cutting	林相健全期 Stage of normal forest	▽ 豊水流量 Plentiful runoff	○ 平水流量 Ordinary runoff
●	□ 低水流量 Low runoff	▲ 渇水流量 Scanty runoff	◇ 平均日基底流量 Mean daily base runoff
■			
▲			
◆			

Fig. 7 年降雨量と各種流量の関係 (北谷)

Relation between annual rainfall and each runoff (Kitatani).

\* Plentiful runoff shows the flow available within 95 days a year. Ordinary runoff shows the flow available within 185 days a year. Low runoff shows the flow available within 275 days a year. Scanty runoff shows the flow available within 355 days a year. Mean daily base runoff is calculated from dividing annual base runoff by the number of the yearly days.

#### IV 流出特性

##### 1. 直接流出量

降雨によって生じる流出の大部分は直接流出量である。したがって一降雨量と直接流出量の関係はきわ

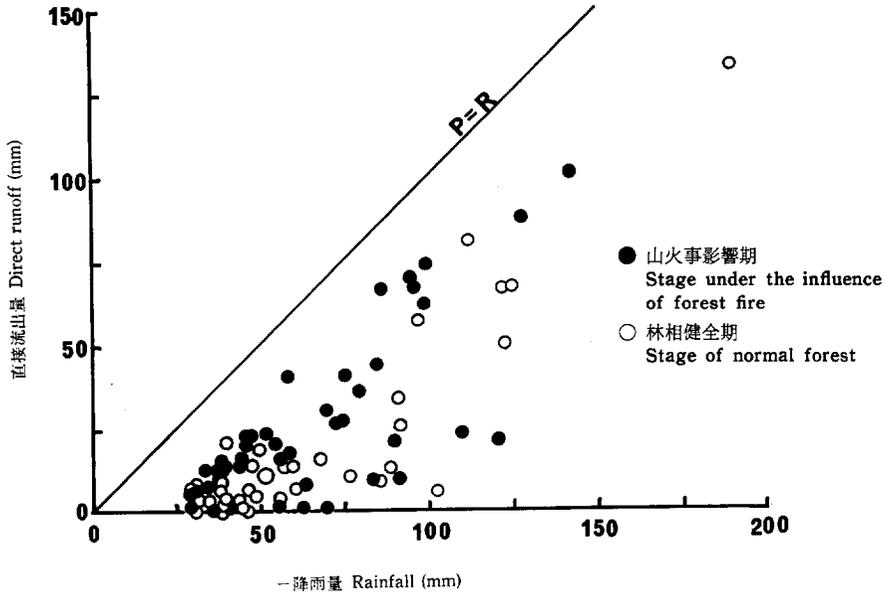


Fig. 8 一降雨量と直接流出量の関係 (南谷)

Relation between rainfall ( $P$ ) and direct runoff ( $R$ ) (Minamitani).

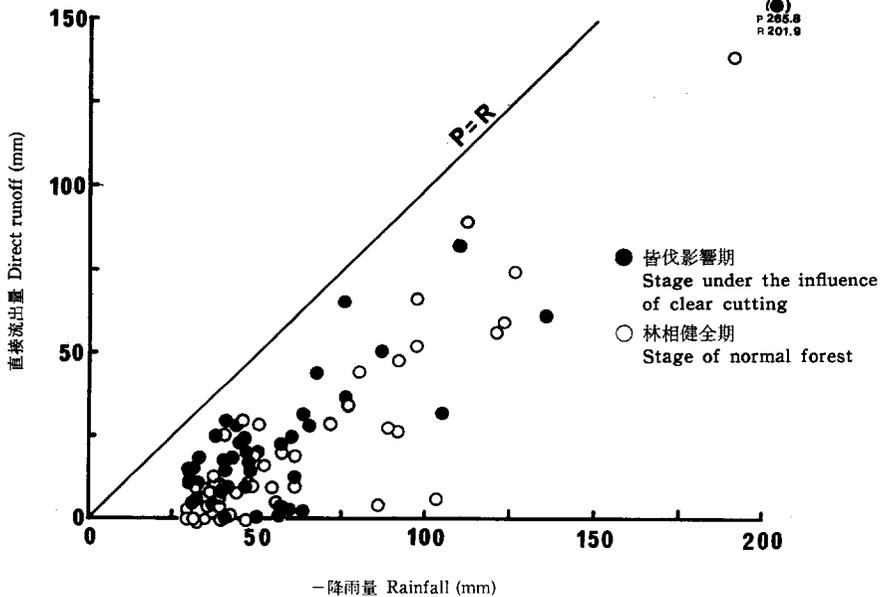


Fig. 9 一降雨量と直接流出量の関係 (北谷)

Relation between rainfall ( $P$ ) and direct runoff ( $R$ ) (Kitatani).

めて密接である。本節では、前節で求めた個々の直接流出量について検討する。

資料数は南谷 399 個（山火事影響期 194, 林相健全期 205）、北谷 450 個（皆伐影響期 203, 林相健全期 247）であったが、そのうち約 75% は一降雨量 30 mm 以下であった。

Fig. 8, 9 は南北両谷のそれぞれの期間に分類して、一降雨量（30 mm 以上）と直接流出量の関係を示したものであるが、点がかかなりばらつく。これは、流域面積が 20 ha 前後と小さいため、流域の湿潤状態や降雨特性が流出に敏感に反映するためと考えられる。しかしながら大局的に見た場合降雨量の増加に伴い直接流出量もほぼ直線的な増加が見られる。特に大出水では、ある一定の損失量のあった後は、損失がなく、降雨の大部分が流出するようである。

経験的に一降雨量（ $P$ ）と直接流出量（ $R$ ）の関係は、ある範囲で上に凹の曲線であるが、一降雨量がある限度以上になると（4）式のような傾き 1 の直線で表わされる。ただし  $L$  は損失量である。

$$R = P - L \quad \dots\dots\dots(4)$$

今回の結果や武田の報告<sup>14)</sup> から判断して、平均的状态下では、損失雨量 50~60 mm でほぼ飽和状態となり、降雨階級約 80 mm 以上より（4）式で表わされるようである。これは、全体的に流域の土壤深が浅く地表面より 30~40 cm で硬い粘土質の C 層に達するため A, B 層の土湿を補給した雨水は、C 層にはばまれて浸透よりむしろ、層にそって斜面下部に流下するため、損失雨量が少ないものと考えられる。

治水上の目的から、本論では小雨時を省略し、図上で便宜的に流出状況を最大と標準に区分して直線式を求めた（Table 6）。

ここで最大とは点群のほぼ上限を連ねた直線で最も流出しやすい条件下での流出であり、標準とはほぼ中間に分布する点群を結んだもので平均的な条件下での流出を表わすものとする。

なお流域の湿潤状態を示すパラメーターとして初期流量を用いると、点のばらつきが解消される<sup>15)</sup> と言われるが、本流域に適用しても十分な結果が得られなかった。また初期流量（基底流量）自体森林の有無によって影響を受けるものと考えられるため、ここでは除外した。

最大、標準いずれも林相健全期の損失量が多く、南北両谷とも森林の成立により約 10~15 mm の直接流出量が減少したことになる。これらの量は、増水時に森林によって調節されたものであると推定されるが、これらについて若干の考察を加える。

一般に森林流域に降った雨は、まず枝葉・樹皮をぬらし樹冠層に貯留される（樹冠遮断量）。次に樹冠層を通過した雨水は林床に達して、その一部は A<sub>0</sub> 層や凹地に貯留され（林床遮断・凹地貯留）、さらに

Table 6. 降雨量（ $P$ ）と直接流出量（ $R$ ）との関係  
Relation between rainfall ( $P$ ) and direct runoff ( $R$ )

(単位 Unit : mm)

流域 Watershed	南 Minamitani		北 Kitatani	
	山火事影響期 Under the influence of forest fire	林相健全期 Normal forest	皆伐影響期 Under the influence of clear cutting	林相健全期 Normal forest
最大 Maximum	$R = P - 20.0$	$R = P - 30.0$	$R = P - 15.0$	$R = P - 20.0$
標準 Standard	$R = P - 40.0$	$R = P - 55.0$	$R = P - 35.0$	$R = P - 45.0$

降雨余剰として地表を流下するものを除き森林土壤中に浸透する。

本流域での実測記録はないが、一般に 100 mm 以上の大雨時の樹冠遮断率は 5～10% であり、林床物遮断は 2～4 mm 程度と見積もられている<sup>14)</sup>。山火事影響期や皆伐影響期にこれらの遮断量がまったくないわけではなからうが、森林成立前後の両期間の直接流出量の差は、ほぼ樹冠遮断量と林床遮断量の合計に一致する。

一方白井は、積算雨量と積算流出量よりアカマツ林伐採前後の流域の平均浸透量を求めているが、いずれも 3 mm/hr 前後と植生変化による差はほとんど認められなかったとしている<sup>16)</sup>。したがって森林火災や伐採によって植被状態に変化が生じて、地表面の裸地化や著しいかく乱がないかぎり、浸透量にはあまり変化がないものと推定される。

以上の事項より判断すると、両期間における直接流出量の差 10～15 mm は、主に樹冠遮断や林床遮断といった植被変化に起因するものと推察される。

## 2. ピーク流量の遅滞時間

ピーク降雨量とピーク流量の遅れ（遅滞時間）の現象は、流域の諸特性が総合化された結果であるから、ハイドログラフ上昇期の重要な指標である。

遅滞時間の表現方法はいくつかあるが、ここでは、ピーク降雨量の中心からピーク流量までの時間として求めた。降雨が長時間続く場合は、必ずしもハイドログラフの最大雨量によりピーク流量が発生せず、降雨後半の強雨によってもたらされることが多い。その場合はピーク流量に対応する雨量をピーク降雨量として遅滞時間を計測した。

降雨量は降雨の開始期から降雨のピークまでの間の量とし、雷雨を除いて、この間の雨量が 20 mm 以上のものを資料とした。またピーク降雨量は、10分単位で求めた任意の 60 分間雨量である。

山地小流域での遅滞時間は、先行雨量の影響を強く受ける<sup>18)</sup>と指摘されるため、先行雨量の有無に分けて検討した方がよいであろうが、資料数が少なかつたため両者をあわせて検討した。

Table 7 は遅滞時間の平均値を、Fig. 10～13 はピーク降雨時までの累加降雨量と遅滞時間との関係をピーク降雨量の強度階級別に示したものである。

これらより次のことがいえよう。

平均値は、変動係数からも判るように個々の出水によりばらつきが大きい、おおむね 60 分前後と言

Table 7. ピーク流量の遅滞時間  
Lag-time of peak discharge

流域 Watershed	南 谷 Minamitani		北 谷 Kitatani	
	山火事影響期 Under the influence of forest fire	林相健全期 Normal forest	皆伐影響期 Under the influence of clear cutting	林相健全期 Normal forest
資料数 Number of data	33	29	36	31
平均 (分) Mean (Minute)	52.9	66.0	55.7	71.3
変動係数 (%) Coefficient of variation	48.9	47.0	70.3	52.3

＜山火事影響期＞

Stage under the influence of forest fire

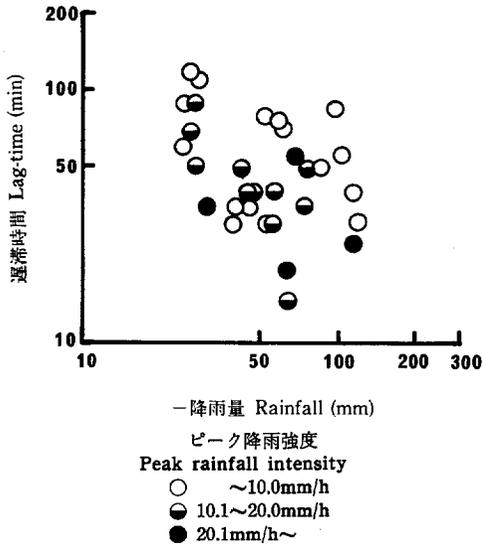


Fig. 10 一降雨量と遅滞時間の関係 (南谷)  
Relation between rainfall and lag-time (Minamitani).

＜林相健全期＞

Stage of normal forest

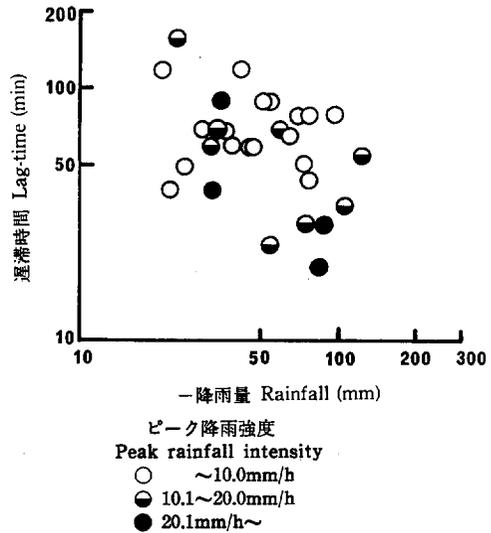


Fig. 11 一降雨量と遅滞時間の関係 (南谷)  
Relation between rainfall and lag-time (Minamitani).

＜皆伐影響期＞

Stage under the influence of clear cutting

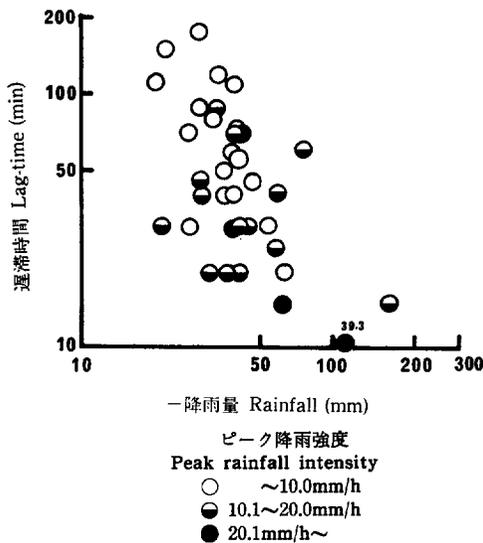


Fig. 12 一降雨量と遅滞時間の関係 (北谷)  
Relation between rainfall and lag-time (Kitatani).

＜林相健全期＞

Stage of normal forest

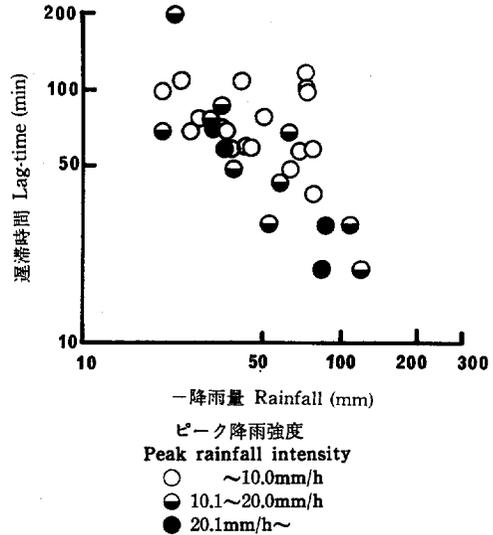


Fig. 13 一降雨量と遅滞時間の関係 (北谷)  
Relation between rainfall and lag-time (Kitatani).

えそうである。また南北両谷とも森林の成立に伴い、平均で15分程度遅滞時間が長くなっている。個々の遅滞時間は、降雨量の増加に伴い早くなる傾向が見られ、ピーク降雨量が10mm/hr以下の時は、変動が大きいのにに対して、20mm/hr以上になると両者の関係がほぼ直線上にならぶようである。これは、出水時における森林の貯留効果の相違の他に、強雨の場合は、ピーク雨量とピーク流量の対応が明確であるが、弱雨の場合は必ずしもそうではないという結果にもよるものと考えられる。

ピーク流量が大きいほど遅滞時間が小さくなるように思われるが、実測結果では必ずしもそうではなかった。これは短時間で比較的強雨のあった場合は、大部分が表面流出からなり、ピーク流量が早く現われるのに対して、降雨が長時間続く場合は中間流出の影響が強くて、比較的弱いピーク降雨量でもピーク流量を構成することがあり、その場合は遅くなるようである。

このように遅滞時間は、諸々の条件により多様に变化するようである。ここでは、遅滞時間の大きな相違を検討する意味で降雨量 ( $R$ ) とピーク降雨量 ( $r_p$ ) を独立変数とする重回帰式を求めた (Table 8)。

これらの回帰式は、 $F$  検定の結果1%ないし5%で有意であるが、重相関係数からも判るように推定精度はよくない。

いまピーク流量までの降雨量が50mmとした場合の遅滞時間を試算してみると次のような結果となる。

ピーク降雨強度を10mm/hrから30mm/hrに変化させた場合、南谷においては、山火事影響期で50分から33分になり、林相健全期では60分から41分となった。一方北谷においては、皆伐影響期で39分から21分になり、林相健全期では62分から42分となった。この計算結果上から見れば、森林の成立に伴って南谷で10分程度、北谷で20分程度遅滞時間が長くなる。

したがってごく大まかに言えば、20ha程度の森林流域では、遅滞時間がピーク降雨量10mm/hr程度では60分前後であり、30mm/hr程度では30分前後である。これが森林の伐採や山火事によって無林地になった場合、遅滞時間が10~20分早くなることが予想されるが、地形等の流域諸特性の影響により一様な変化ではないものと推察される。

### 3. ピーク流出率

ピーク流出率 (ピーク流出係数:  $f_p$ ) は、合理式の使用にあたって不可欠であり、次式によって求めることができる<sup>6)</sup>。

Table 8. 期間別ピーク流量の遅滞時間の推定式  
Estimated formula on lag-time of peak discharge

流域 Watershed	推定式 Estimated formula	重回帰式 Multiple regression equation	重相関係数 Multiple correlation coefficient
南谷 Minamitani	山火事影響期 Under the influence of forest fire	$\log LT = 2.726 - 0.390 \log r_p - 0.375 \log R$	0.564**
	林相健全期 Normal forest	$\log LT = 2.616 - 0.338 \log r_p - 0.296 \log R$	0.523*
北谷 Kitatani	皆伐影響期 Under the influence of clear cutting	$\log LT = 3.211 - 0.573 \log r_p - 0.617 \log R$	0.722**
	林相健全期 Normal forest	$\log LT = 3.035 - 0.356 \log r_p - 0.522 \log R$	0.669**

LT: Lag-time (minute),  $r_p$ : Peak 1-hour rainfall,  $R$ : Rainfall amount.

\*\* 1%水準有意 Significant at 1% level, \* 5%水準有意 Significant at 5% level.

$$f_p = \frac{3.6Q}{rA} \dots\dots\dots(5)$$

ここで

Q : ピーク流出量 (m<sup>3</sup>/sec), A : 流域面積 (km<sup>2</sup>), r : 洪水到達時間内の平均降雨強度 (mm/hr)

ピーク流出率を求めるにあたって r の取り扱い方が問題となるが, Snow は小面積で, かつ単純な形をした流域における到達時間はピーク降水量とピーク流量間の遅滞時間にきわめて近いものである<sup>17)</sup>としている。したがって本報告では, 洪水到達時間をピーク流量の遅滞時間におきかえた。実測のピーク流量の遅滞時間が, 30~60 分の場合が多いことから判断して, ピーク流出率をピーク 60 分間降雨量 (mm/hr) に対するピーク流出量 (ピーク流量を流出高 mm/hr に換算したもの) の比として求めた。最近, 洪水到達時間の実用的推定法が提案されている<sup>18)</sup>が, 既報の文献<sup>9)</sup>より判断してもこの竜の口山試験地の場合, 洪水到達時間を 60 分として計算しても大きな相違はなかろうと考えられる。

Fig. 14, 15 は期間別のピーク降雨量とピーク流出量の関係を示したものである。

南谷流域は林相健全期の  $f_p$  が 0.5 を超えたものが 1 例あるが, これはピーク流量までの雨量が 98.1 mm と多く, 比較的弱いピーク降雨量 (9.1 mm/hr) により発生したものである。したがってピーク流量に中間流出成分の影響が強く表われ, その結果ピーク流出率が高くなったものと推定される。ピーク降雨量が 10 mm/hr 以下の場合に  $f_p$  の値が高いものが見られるが, これは前述の理由によるものが多いようである。

また  $f_p=0.488$  という例があるが, これは一降雨量 126.1 mm と竜の口山試験地の一連続降雨量としては最大級のものであり, 最も流出しやすい条件下でのピーク流出率と見てもよさそうである。

ところが山火事影響期では,  $f_p=0.60$  以上のものが 2 例あった。これらは一降雨量 50 mm 以上の出水によって発生しており, 一応流域が湿潤状態のもとでの流出といえるであろう。

降雨量が少なかったり, ピーク降雨量が小さな場合は, 個々の出水により変動が大きく, 森林成立前後の両期間でピーク流出率に相違があるかどうかは判断できない。しかし, 中規模以上の降雨量に伴う出水において, ピーク流出率の上限を比較するかぎりには, 森林の成立によってピーク流出率が森林成立以前の 10~15% 減少したと言ってよいだろう。

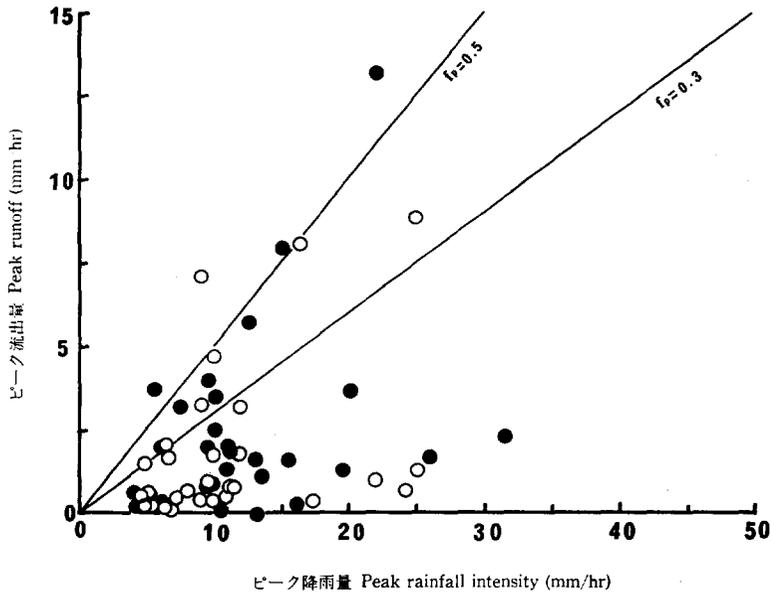
一方北谷流域は南谷のような傾向は見られなく, 林相健全期でも  $f_p=0.5$  以上のものが 4 例記録された。これらはいずれも一連続降雨量 50 mm 以上での出水であるが, 南谷では同一降雨でこれほど高いピーク流出率はなかった。またピーク降雨量が大きいと, 一時的な表面貯留にむけられる量が多くなり, ピーク流出率は小さくなる傾向が見られるが, 北谷では森林成立前後の両期間を通じて必ずしもそうではなく, 30~50% のピーク流出率を保っている場合が多い。これは流域の地形, 傾斜, 土壌深度といった流域特性に起因するものと考えられる。

したがって地形の急峻な北谷では, 両期間の降雨特性の差も多分に作用しているであろうが, 少なくともこの資料に関しては, 皆伐影響期と林相健全期で著しい相違は見あたらなかったと言ってよさそう。

#### 4. 減水曲線

出水期のハイドログラフの減水部分 (減水曲線) は主要な降雨が終った後に起って河谷や流域に貯留された水の減水状況を示し, 流域の特性を表わすものと考えられている。

減水曲線は表面流出, 中間流出, 地下水流出の 3 成分より成り, それぞれ異った流出過程を示すため, その合成である減水曲線の形は各成分に比例して決まる<sup>19)</sup>。各成分ごとに片対数紙上で流量と時間の関係

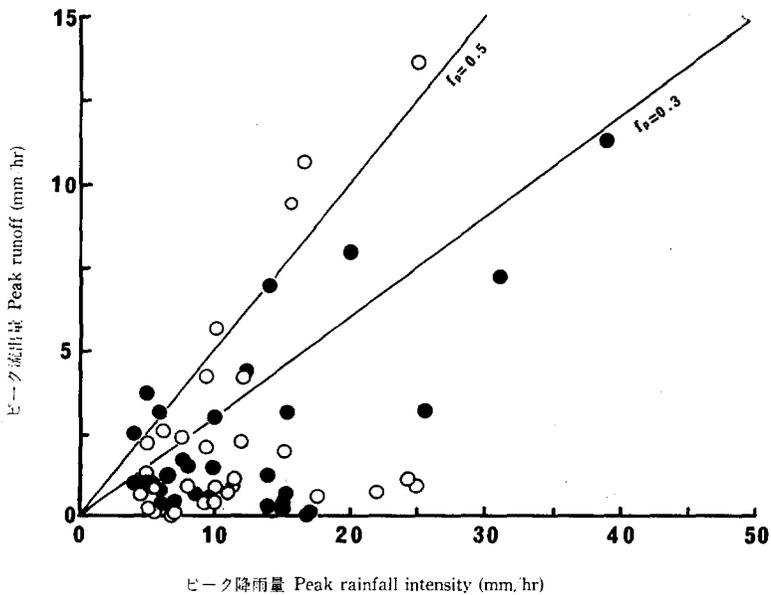


- 山火事影響期 Stage under the influence of forest fire
- 林相健全期 Stage of normal forest

$f_p$  (Runoff coefficient) shows the rate of peak 1-hour rainfall and peak flow.

Fig. 14 ピーク降雨量とピーク流出量の関係 (南谷)

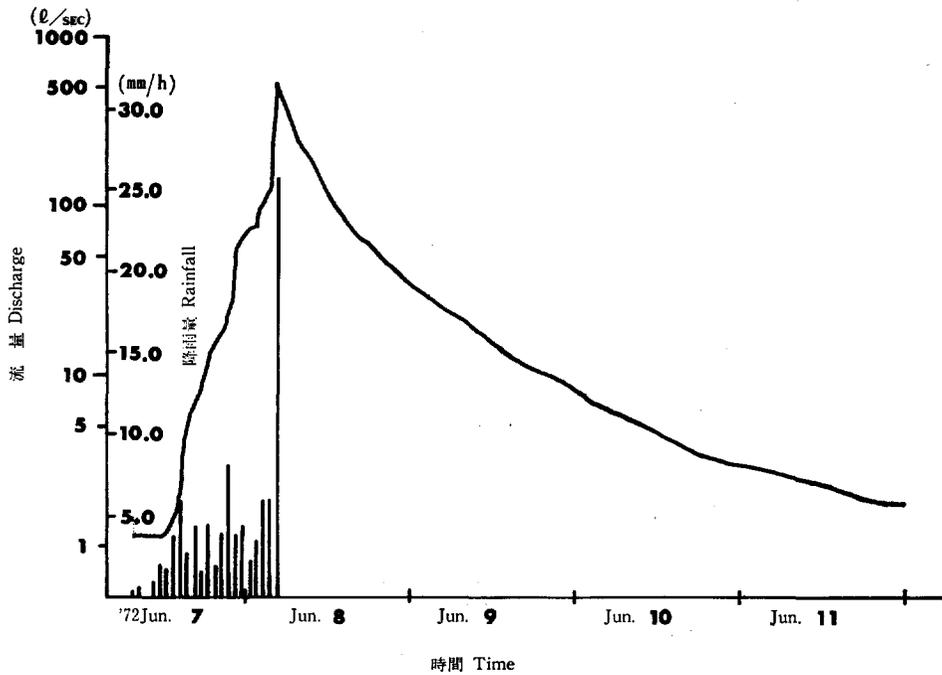
Relation between peak rainfall intensity and peak runoff (Minamitani).



- 皆伐影響期 Stage under the influence of clear cutting
- 林相健全期 Stage of normal forest

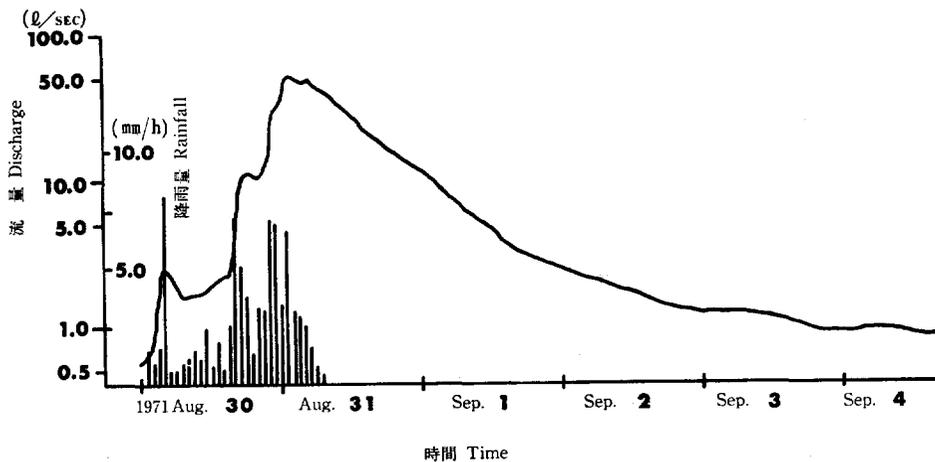
Fig. 15 ピーク降雨量とピーク流出量の関係 (北谷)

Relation between peak rainfall intensity and peak runoff (Kitatani).



南谷 Minamitani 1972. Jun. 7~11

Fig. 16 ハイドログラフの一例 (Type I)  
A sample of storm hydrograph (Type I).



南谷 Minamitani 1971. Aug. 30~Sep. 4

Fig. 17 ハイドログラフの一例 (Type II)  
A sample of storm hydrograph (Type II).

が直線となり、次式のような指数曲線で表わされることが一般に認められている。

$$Q = Q_0 e^{-kt} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $Q$  : 時刻  $t$  における流量、 $Q_0$  : 時刻  $t=0$  における流量、 $k$  : てい減係数

一連続降雨量約 50 mm 以上の降雨による出水のなかから単一のピークを示す出水を抽出して、流量を片対数紙にプロットした結果ピーク流量以降の減水部が 3 本の直線に近似できるもの (Fig. 16) と、2 本の直線に近似できるもの (Fig. 17) とに分けられる。

ここで便宜上、減水曲線が 3 本の直線に近似できるものを Type I、2 本の直線に近似できるものを Type II とする。Type I において、減水部の第 1 の折点までの部分を一次てい減部、第 1 の折点から第 2 の折点までの部分を二次てい減部、それ以降を三次てい減部とすれば、一次てい減部は表面流出、二次てい減部は中間流出、三次てい減部は基底流出 (この場合地下水流出の他に遅い中間流出を含む) の減水曲線にそれぞれ相当すると考えることができる。また Type II は、その折点の時刻を直接流出終了時として、折点までの一次てい減部を大部分が早い中間流から成る直接流出、それ以降の二次てい減部を基底流出の減水曲線に相等すると考えることができる。

このような考えにもとづいて、それぞれの出水について減水曲線のてい減係数  $K$  を単位時間は 1 時間とし、最小自乗法により求めるとともに、ピーク流量発生時刻から直接流出終了時までの継続時間を直接流出減水時間として算出した。

Table 9, 10 は解析結果である。南谷は 32 例中 Type I は 24 例、Type II は 8 例であり、北谷は 31 例中 Type I は 23 例、Type II は 8 例であった。減水曲線を片対数紙にプロットしたときの折線の数やてい減係数の値は、降雨特性のみならず、流域の地形、土壌、植被状態といった流域特性の影響を受けて変化するものと想定される。

南谷流域はピーク流量  $100 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{sec}$  (1.6 mm/hr) 程度を、北谷流域は  $60 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{sec}$  (1.3 mm/hr) 程度を境界としてそれ以上のピーク流量をもつ出水では 3 本 (Type I)、それ以下の出水では 2 本 (Type II) の折線によって減水曲線が近似されると言えそうである。

てい減係数は変動が大きい、標準的な値は、一次てい減係数 0.12~0.20、二次てい減係数 0.04~0.07 が多いようである。三次てい減部は直接流出終了後、72 時間の経過時間を原則としたが、減水中に次の降雨があり経過時間が短いため過大な値を示したものもある。したがって、三次てい減係数は 0.01~0.02 程度と推定される。

また直接流出減水時間は 48~72 時間であり、流量がほぼ一定状態になるには 7~10 日を要するようである。全体的に南谷が北谷に比較して、てい減係数は小さく、直接流出減水時間も長いようである。

単独流域法は、降雨条件が異なるため森林成立前後の両期間の差はそのまま植被状態によるものとは言いがたいが、ここでは平均値の差で検討する。

Type I の場合について一次てい減係数、二次てい減係数、三次てい減係数に森林成立前後の両期間で差があるかどうかをみるために、平均値の差の検定を行った。

その結果、南谷は一次てい減係数に 1%水準で有意差が認められたが、二次と三次のてい減係数には有意差が認められなかった。北谷は一次、二次、三次のてい減係数いずれも、有意な差はなかった。また直接流出減水時間についても同様な検定を行ったが、南北両谷とも有意な差は認められなかった。

しかし全体的には、両谷とも一次てい減係数は森林の成立により減少傾向にあり、森林成立以前の値に

Table 9. 南谷; 減水曲線のてい減係数 (Type I)  
Recession coefficient of Minamitani watershed (Type I)

期 間 Stage	流出年月日 Date	総降雨量 Rainfall amount (mm)	平均降雨強度 Mean of rainfall intensity (mm/hr)	最大1時間雨量 Maximum 1-hour rainfall (mm/hr)	ピーク流量 Peak discharge ( $\times 10^{-8}$ m <sup>3</sup> /sec)	流出てい減係数 Recession coefficient			直接流出 減水時間 Recession <sup>(9)</sup> time (hr)	
						一次 (hr <sup>-1</sup> ) Surface runoff	二次 (hr <sup>-1</sup> ) Subsurface runoff	三次 (hr <sup>-1</sup> ) Base flow		
山火事影響期 Under the influence of forest fire	1960. Jul. 5	99.4	5.23	23.2	832.14	0.238	0.057	0.016	65.5	
	Aug. 29	89.6	5.60	28.2	105.20	0.129	0.071	0.019	46.0	
	Oct. 6	72.1	2.33	8.4	122.30	0.111	0.062	0.017	48.0	
	1961. Jun. 28	99.6	3.56	11.8	331.75	0.167	0.060	0.019	53.0	
	Jun. 27	59.2	1.60	14.2	102.31	0.157	0.074	0.017	36.0	
	Oct. 6	64.3	6.43	23.4	79.35	0.233	0.081	0.019	40.5	
	Oct. 26	79.4	2.27	17.9	217.51	0.215	0.045	0.023	66.0	
	1962. Jun. 13	94.4	3.05	15.7	496.78	0.222	0.038	0.018	68.0	
	Jun. 24	70.8	3.73	11.7	114.19	0.122	0.054	0.015	64.0	
	Jul. 3	128.3	2.00	10.3	251.43	0.169	0.056	0.013	62.0	
	1963. Jun. 13	59.0	2.68	8.4	244.60	0.157	0.052	0.015	56.5	
	Aug. 11	109.3	2.48	13.9	162.03	0.145	0.069	0.015	47.5	
	Aug. 30	76.6	2.32	41.1	412.41	0.260	0.061	0.019	58.0	
	1964. Sep. 24	84.2	4.21	14.8	100.04	0.301	0.093	0.019	37.5	
	平均 Mean						0.188	0.062	0.017	53.5
	標準偏差 <sup>(1)</sup>						0.057	0.014	0.002	11.0
	林相健全期	1971. Jul. 1	112.4	5.35	15.5	465.90	0.171	0.057	0.019	63.0
Jul. 22		123.4	1.71	24.8	115.43	0.119	0.041	0.021	71.5	
1972. Jun. 7		96.7	4.20	26.0	525.89	0.194	0.065	0.026	55.0	
Sep. 9		61.6	5.55	7.9	40.16	0.120	0.070	0.015	39.5	
Sep. 16		135.7	2.51	7.8	292.61	0.136	0.067	0.022	53.0	
1974. Apr. 8		91.5	2.03	6.2	101.74	0.073	0.053	0.015	64.0	
Sep. 9		85.9	4.52	10.3	53.41	0.148	0.067	0.014	50.0	

Normal forest	Oct. 2	92.4	4.02	16.0	130.13	0.102	0.063	0.017	55.5
	1975. Jun. 24	121.8	3.38	8.0	197.37	0.116	0.054	0.014	65.5
	Nov. 14	71.0	2.09	6.7	92.03	0.073	0.060	0.015	54.0
	平均 Mean					0.125	0.060	0.018	57.1
	標準偏差 <sup>(1)</sup> 平均値の差の検定 ( <i>t</i> <sub>0</sub> 値) <i>T</i> -test					0.039	0.009	0.004	9.2
					2.981**	0.462	0.301	0.854	

(1) Standard deviation

(2) The recession time shows the interver time from peak flow to the end of direct runoff.

\*\* 1%水準有意 Significant at 1% level.

\* 5%水準有意 Significant at 5% level.

南谷; 減水曲線のてい減係数 (Type II)

Recession coefficient of Minamitani watershed (Type II)

期間 Stage	流出年月日 Date	総降雨量 Rainfall amount (mm)	平均降雨強度 Mean of rainfall intensity (mm/hr)	最大1時間雨量 Maximum 1-hour rainfall (mm/hr)	ピーク流量 Peak discharge ( $\times 10^{-3}$ m <sup>3</sup> /sec)	流出てい減係数 Recession coefficient		直接流出減水時間 Recession time (hr)
						一次 (hr <sup>-1</sup> ) Subsurface runoff	二次 (hr <sup>-1</sup> ) Base flow	
山火事影響期 Under the influence of forest fire	1963. Jul. 10	54.3	2.36	7.4	62.81	0.052	0.017	49.0
	Sep. 11	52.5	2.39	10.6	98.91	0.057	0.018	50.5
	1964. Jul. 9	55.0	11.00	17.3	94.48	0.060	0.019	49.5
	平均 Mean					0.056	0.018	49.7
林相健全期 Normal forest	1971. Jun. 27	51.8	2.35	19.5	44.50	0.048	0.018	54.0
	Aug. 8	88.8	2.86	7.2	51.10	0.071	0.013	47.0
	Sep. 16	60.7	1.60	8.0	28.29	0.043	0.015	60.0
	1972. May 8	50.0	2.08	8.8	59.86	0.058	0.020	52.0
	1975. Oct. 11	57.0	2.28	6.7	42.50	0.065	0.020	61.5
平均 Mean					0.057	0.017	54.9	

Table 10. 北谷; 減水曲線のてい減係数 (Type I)  
Recession coefficient of Kitatani watershed (Type I)

期間 Stage	流出年月日 Date	総降雨量 Rainfall amount (mm)	平均降雨強度 Mean of rainfall intensity (mm/hr)	最大1時間雨量 Maximum 1-hour rainfall (mm/hr)	ピーク流量 Peak discharge ( $\times 10^{-8}$ m <sup>3</sup> /sec)	流出てい減係数 Recession coefficient			直接流出 減水時間 <sup>(2)</sup> Recession time (hr)
						一次 (hr <sup>-1</sup> ) Surface runoff	二次 (hr <sup>-1</sup> ) Subsurface runoff	三次 (hr <sup>-1</sup> ) Base flow	
皆伐影響期 Under the influence of clear cutting	1947. May 9	45.8	2.29	7.5	87.00	0.111	0.057	0.024	43
	Jul. 9	86.5	7.20	24.3	341.12	0.191	0.072	0.016	52.5
	1948. Jul. 14	57.1	11.42	46.0	138.24	0.129	0.109	0.029	34
	Sep. 12	47.0	5.88	24.9	159.03	0.223	0.073	0.022	42.5
	Sep. 26	60.1	6.67	14.8	151.66	0.152	0.070	0.028	38.5
	Oct. 5	75.6	6.30	22.5	509.75	0.192	0.051	0.026	58
	1949. Jun. 9	50.0	2.78	6.2	78.41	0.112	0.072	0.023	43
	Jun. 19	110.1	4.10	5.9	383.93	0.305	0.049	0.019	54.5
	Jul. 5	62.9	3.31	13.3	132.12	0.130	0.063	0.021	46
	Jul. 31	104.8	11.64	38.9	546.53	0.327	0.092	0.020	40.5
	1950. Mar. 30	67.9	2.12	5.3	171.26	0.181	0.054	0.016	47
	1951. Jul. 2	65.1	4.34	9.5	165.07	0.177	0.075	0.020	42
	Jul. 8	182.1	2.46	13.8	345.86	0.191	0.044	0.015	64
		平均 Mean 標準偏差 <sup>(1)</sup>					0.186 0.067	0.068 0.018	0.022 0.005
林相健全期	1971. Jul. 1	112.4	5.35	15.5	454.61	0.215	0.064	0.025	53
	Jul. 22	123.4	1.71	24.8	116.05	0.123	0.035	0.024	75
	Aug. 30	88.8	2.86	7.2	111.75	0.125	0.089	0.015	47.5
	1972. May 8	50.0	2.08	8.8	98.35	0.105	0.049	0.021	56.5
	Jun. 7	96.7	4.20	26.0	628.15	0.308	0.078	0.036	44
	Sep. 16	135.7	2.51	7.8	273.61	0.196	0.047	0.020	55
	1974. Apr. 8	91.5	2.03	6.2	126.19	0.106	0.059	0.025	51.5

Normal forest	Sep. 9	85.9	4.52	10.3	47.40	0.167	0.099	0.023	36.5
	Oct. 2	92.4	4.02	16.0	114.81	0.148	0.078	0.030	46.0
	1975, Nov. 14	71.0	2.09	6.7	107.55	0.126	0.061	0.021	50.5
	平均 Mean					0.162	0.066	0.024	51.6
	標準偏差 <sup>(1)</sup>					0.063	0.020	0.006	10.1
	平均値の差の検定 ( $t_0$ 値) T-test					0.877	0.216	1.246	1.286

(1) Standard deviation

(2) The recession time shows the interver time from peak flow to the end of direct runoff.

北谷; 減水曲線のてい減係数 (Type II)

Recession coefficient of Kitatani watershed (Type II)

期間 Stage	流出年月日 Date	総降雨量 Rainfall amount (mm)	平均降雨強度 Mean of rainfall intensity (mm/hr)	最大1時間雨量 Maximum 1-hour rainfall (mm/hr)	ピーク流量 Peak discharge ( $\times 10^{-8}$ m <sup>3</sup> /sec)	流出てい減係数 Recession coefficient		直接流出減水時間 Recession time (hr)
						一次 (hr <sup>-1</sup> ) Subsurface runoff	二次 (hr <sup>-1</sup> ) Base flow	
皆伐影響期 Under the influence of clear cutting	1949, Sep. 13	60.7	2.25	9.5	39.51	0.084	0.018	37
	Oct. 4	75.5	1.57	5.0	59.03	0.051	0.021	52
	1951, May 27	47.5	1.90	9.3	51.48	0.064	0.014	44
	平均 Mean					0.066	0.018	44.3
林相健全期 Normal forest	1971, Jun. 27	51.8	2.35	19.5	58.62	0.066	0.024	49
	Sep. 16	60.7	1.60	8.0	41.49	0.049	0.014	56
	1972, Jul. 6	47.1	2.24	9.4	59.03	0.063	0.025	47
	Sep. 9	61.6	5.55	7.9	47.03	0.094	0.015	39.5
	1975, Oct. 11	57.0	2.28	6.7	65.41	0.050	0.030	57.5
	平均 Mean					0.064	0.022	49.8

対して、南谷で 34%、北谷で 13% の減少を示した。二次てい減係数は、ほとんど影響はないものと考えられる。また直接流出減水時間は、4~5 時間長くなっている。

Type II の場合については資料数が少なく、統計的検定は行えなかったが、Type I の場合の検定結果から判断して、一次てい減係数と二次てい減係数については森林成立の前後の両期間では有意な差はないと言えよう。また直接流出減水時間についても同様と考えられるが、5 時間ほど長くなっている。

出水現象には、降雨特性や流域の初期水分状態なども複雑に影響するので、以上の結果よりただちに一般的結果を引き出すことはかなり危険であるが、皆伐、山火事後の植生の再生・発達は Type I で減水部の一次てい減係数を減少させるが、二次、三次のてい減係数に影響を与えず、また Type II ではてい減係数に影響が見られなかった。

したがって直接流出ハイドログラフは森林の成立によって平滑化を招くものと推定されるが、その主要な原因は一次てい減係数の減少、すなわち表面流出成分の軽減によるものである。しかし直接流出減水時間の増大、すなわち直接流出ハイドログラフの基底長はわずかに長くなる程度と推察される。

## V おわりに

林業試験場竜の口山森林理水試験地の南谷・北谷流域について、森林の成立に伴う林況変化が年間水収支と流出特性におよぼす影響を検討した。得られた結果は次のようである。

(1) 年降雨量 1,200 mm とした場合、森林の成立により南谷では森林成立前より約 60 mm、北谷では約 90 mm の年流出量が減少した。年基底流出量の減少も見られ、その多くは出水直後の遅い中間流を含む期間のものとして推定されるが、低水期間の地下水流量も減少した。

(2) 平均的な流出状況で、一降雨量 80 mm 以上では、約 10~15 mm の直接流出量の減少が見られ、これは主に樹冠遮断や林床遮断という植被変化に起因するものと推定される。

(3) ピーク流量の遅滞時間は個々の出水による変動が大きいが、森林成立前後の両期間とも 60 分前後が多かった。またピーク降雨までの降雨量が 50 mm とする場合、森林の成立により 10~20 分程度遅くなるようである。

(4) ピーク流出率は個々の出水による変動が大きいが、上限を比較した場合南谷において森林成立後はそれ以前の 10~15% 減少したが、北谷では明確な相違は見られなかった。

(5) 典型的なハイドログラフの減水曲線は、表面流出、中間流出、基底流出の減水部分よりなる。森林成立以前における、表面流出のてい減係数の平均値は、南谷で 0.188、北谷で 0.186 であったが、森林の成立に伴いそれぞれ 34%、12% 減少した。これに対して中間流出 (0.04~0.07)、基底流出 (0.01~0.02) のてい減係数は、森林成立前後の両期間で変化が見られなかった。またピーク流量後の直接流出ハイドログラフの基底長がわずかに長くなる傾向が見られた。

一般に森林の水保全機能は、洪水緩和と渇水緩和の両面を含む流量の調節にあるが、本流域において、森林の成立が両者にもたらした結果と今後の課題を総括すると次のようである。

年間水収支においては、直接流出量のみならず、基底流出量の減少も見られ、必ずしも渇水緩和の上から好ましいものとは言えない。しかし、この結果は瀬戸内少雨地方の 20 ha 前後の小流域で得られた試験結果であることを考慮する必要がある。

また一降雨の出水においては、直接流出量を軽減し、ハイドログラフの平滑化を招き洪水緩和の上から

好ましい結果といえる。これは主に表面流出成分の減少に起因するものと考えられるが、今後、流出モデルにより詳細な検討をしてゆく必要がある。

### 引用文献

- 1) 土木学会編：土木工学ハンドブック上巻，技報堂，p. 45，(1974)
- 2) 藤枝基久・阿部敏夫：瀬戸内山地小流域における水収支の一例，日林関西支講，29，188～190，(1978)
- 3) ———・岸岡 孝・阿部敏夫：竜の口山南谷流域における山火事が流出におよぼす影響，日林誌，61，184～186，(1979)
- 4) ———・—————：竜の口山南谷流域における山火事が減水曲線におよぼす影響，日林関西支講，30，195～197，(1979)
- 5) 巖 柄 紘・小林慎太郎・丸山利輔：降雨前の低水流量を指標とした有効雨量の分離，農土論集，91，26～33，(1981)
- 6) 岩井重久・石黒政儀：応用水文統計学，森北出版，162～177，p. 278，(1970)
- 7) 角屋 睦：流出解析手法，洪水到達時間と合理式，農土誌，48，587～592，(1980)
- 8) 金子 良：水文学講座12，農業水文学，共立出版，78～93，(1973)
- 9) 関西支場防災研究室・岡山試験地：竜の口山森林理水試験地観測報告，林試研報，308，133～195，(1979)
- 10) 中野秀章：森林伐採および伐跡地の植被変化が流出に及ぼす影響，林試研報，240，251，(1971)
- 11) ———：水文学講座13，森林水文学，共立出版，55～72，(1976)
- 12) 西畑勇夫：河川工学，技報堂，p. 70，(1975)
- 13) 農林省林業試験場：森林気象観測累年報告(第2号)，(1960)
- 14) ———：森林理水試験地観測報告，174～181，(1961)
- 15) 武田繁後：竜の口山水源かん養試験第1回報告，山林局施業参考資料第7輯，121～123，(1942)
- 16) 白井純郎・近藤松一・大原忠一：竜の口山水源かん養試験第4回報告，伐採による流量変化の総合的考察，林試研報，68，109～111，(1954)
- 17) VEN TE CHOW：Handbook of Applied Hydrology，McGraw-Hill，p. 14—7，(1964)
- 18) 吉野昭一：山地小流域の雨水到達時間について，日林誌，62，59～61，(1980)

### Effects of Regrowth and Afforestation on Streamflow on Tatsunokuchiyama Experimental Watershed

Motohisa FUJIEDA<sup>(1)</sup> and Toshio ABE<sup>(2)</sup>

#### Summary

Tatsunokuchiyama experimental watershed consisting of Minamitani watershed (22.6 ha) and Kitatani watershed (17.3 ha) was established in 1937 for the study of the headwater conservation of pine forest in the Setouchi region (1,200 mm. rainfall belt).

Received October 6, 1981

(1) Forest Influences Division

(2) Kansai Branch Station

All pine trees on the two watersheds were cut down in 1944 to 1946, and then the watersheds were left without any treatment. By 25th year after clearcutting Kitatani was covered with a mixed second-growth forest. The dominant species are *Pinus densiflora* and *Quercus serrata*. On the otherhand, all the vegetation except 0.3 ha on Minamitani was destroyed by the forest fire in September 1959. On the burn, *Pinus thumbergii* was planted in 1960. At the end of the 15th year, trees were 8.1 to 9.5 meters tall and averaged 10 centimeters in diameter. The present objective of research on the watershed is to determine the changes in water balance after clearcutting and planting.

In this paper, we presumed that on Minamitani, differences in runoff between the periods when the seedling were 1 to 5 year old (1960 to 1964) and those when trees 11 to 15 years old (1971 to 1975) were ascribed to treatment, and they were compared. Similarly, on Kitatani, differences between the period 1947 to 1952 and the period 1971 to 1975 were compared. The objects of this paper is to evaluate some effects of tree regrowth and afforestation on annual water balance and flow characteristics.

The results obtained are summarized as follows.

(1) Annual runoff decreases of Minamitani and Kitatani following development of forest cover are 60 mm and 90 mm, respectively (1,200 mm. rainfall). The development of forest cover decreases not only annual direct runoff but annual base flow, especially the baseflow decreases is large during the recession periods immediately after a storm runoff occurred.

(2) In the case of more than 80 mm storm rainfall, the direct runoff decreases about 10 to 15 mm on the watershed, which mainly depends on the increases of crown interception and litter interception loss.

(3) The lag time defined as the interval from center of peak 1-hour rainfall to peak flow is about 60 minutes on the watershed. The development of forest cover makes the average lag time prolong 10 to 20 minutes.

(4) The runoff coefficient defined as the rate of peak 1-hour rainfall and peak flow widely varies with both rainfall intensity and antecedent soil moisture condition. Under the comparisons of the upper limit of plotted points, the runoff coefficient decreases 10 to 15% on Minamitani, but there is no significant difference on Kitatani.

(5) The recession segment of a typical simple hydrograph is consisted of surface runoff, subsurface runoff and baseflow components, and it may be described by an equation of the form  $Q = Q_0 \exp(-kt)$ , where  $k$  is the recession coefficient. The average recession coefficient of surface runoff on Minamitani and Kitatani decrease 34% and 12%, respectively, but there is not very much change of those of subsurface runoff and baseflow after regrowth and afforestation. The interval time from peak flow to the end of direct runoff has a tendency to delay a little.

From above results, we presumed that the development of forest cover decreases a storm runoff, especially surface runoff components, and makes a sharp storm hydrograph slow down, but the transpiration increase following development of forest cover decreases baseflow during long periods of drought.