

林地の地表流下雨量について

白 井 純 郎⁽¹⁾
近 藤 松 一⁽²⁾

緒 言

本試験は竜之口山水源涵養試験の一環として林地の地表流下量と植生との関係を明らかにするため、昭和 13 年に開始されたものであるが、その後人員の都合で昭和 19 年以降は一時中断のやむなきに至つたが、昭和 26 年に 1 号区 3 号区のみ既往設備に一部改修を加えて観測を再開した。旧 2 号区は方位、傾斜が他区と異なり、土壌においても若干の相違が認められるのでこれを廃止し、また 4 号区は傾斜のみ若干異なるが、参考に供するため昭和 29 年 1 月修理のうへ 2 月より観測を開始した。各区の前期（昭和 17～18 年）ならびに 後期（昭和 27～28 年）の概況は下記のとおりである。なお、再開後の 1 号区は縦に 2 等分して A、B 両区とし、A 区はコントロール区とする予定であつたが、その承水溝にしばしば滲透水が流入する形跡があり、資料として不適當であるので主に B 区を比較の対照とした。

	集水面積	傾斜	主なる植生
第 1 号区(B) 前期	465.1m ²	36°	アカマツ老令林
後期	240.8m ²	36°	ヤマウルシ、ソヨゴ、ツツジが散生、下草としてコシダが密生
第 3 号区 前期	236.3m ²	37°	アカマツ稚樹
後期	236.3m ²	37°	アカマツ幼令林

（植生は末尾の写真参照）

今回の報告は主として 1、3 号区の前後期それぞれ 2 カ年の資料に基いて両区の同時比較を行うとともに、時期別に植生の変移にともなう流下量の差を検討し、さらに地表流下の機構について滲透能の面から若干の考察を加えた。

I 測定結果の取りまとめ

1. 年の地表流下量

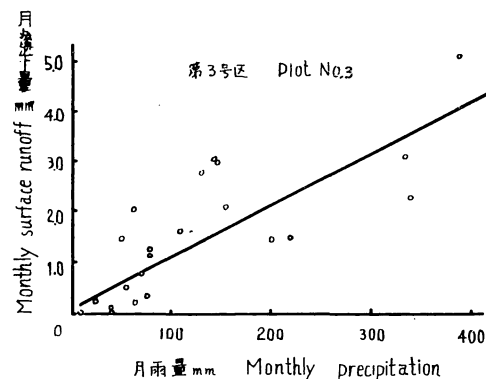
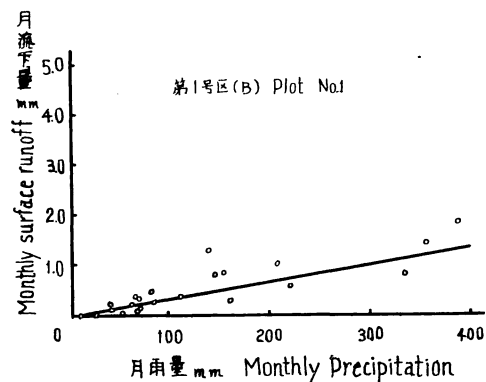
前後期 2 年間の地表流下量は第 1 表のとおりである。

第 1 表でみると、年流下率は 1 号区ではアカマツ伐採後いじりしく減少するに対し、3 号区では稚樹が幼令林に移行してより激増しており、樹令の増加につれて流下量も増加の傾向がうかがわれる。しかし、流下量の絶対量は年雨量に比べていずれもきわめて小さい。一般に林地の地表流下量は非常に少なく雨量の 10% に達することはまれであることは各地^{1) 2) 3)}の試験において実証されている。また、これを同流域の北谷流出率前期⁴⁾ 32%、後期 45% に比較すると年流量中に占める地表流下の割合が 1 割にも満たないことが認められ、これら林相別の差は水源涵養上問題とするにたりない。しかし、一般に強雨時にはかなりの地表流下量を生じ、出水に際してこのわずかの地表流下が効果的に働くことを考えれば、以上

(1) 高島分場長心得 (2) 高島分場防災研究室員

第1表 年流下量
Table 1. Annual surface run-off

	年 Year	第1号区 Plot No. 1			第3号区 Plot No. 3		
		雨量 Precipitation	流下量 Surface runoff	比 % Runoff-ratio	雨量 Precipitation	流下量 Surface runoff	比 % Runoff-ratio
前期 Former period	16	1427.9	50.13	3.5	1439.2	1.73	0.1
	17	1186.0	39.54	3.3	1166.8	2.33	0.2
	計 Total	2613.9	89.67	3.43	2606.0	4.06	0.16
後期 Later period	27	1430.5	6.42	0.4	1393.5	23.68	1.7
	28	1460.8	4.91	0.3	1428.8	10.39	0.7
	計 Total	2891.3	11.33	0.39	2822.3	34.07	1.21



第1図 月雨量と月流下量

Fig. 1 Monthly precipitation and monthly surface run-off.

の差は治水上は無視できないであろう。

2. 月流下量

月流下量を図示したのが第1図である。月流下量(y)も月雨量(x)との関係は、前期では $y = ax^b$ の形で表わされるが、後期ではほぼ比例的関係にあることが認められる。2カ年の22の資料についてその関係式を求めると、

$$1号区 \quad y = 0.0033x + 0.081 \quad r = +0.59$$

$$3号区 \quad y = 0.0096x + 0.314 \quad r = +0.79$$

となつて、降雨のない時にも地表流下を生ずるといふ理論的矛盾もあるが、その相関はかなり高い。しかし、一降雨量とその流下量との相関に比べて低いのは、月流下量は季節によつてかなり変動するためではなかろうか。

本式によれば3号区は常に1号区より多く約3倍に近い値を示しているが、月流下量の月雨量に対する比は小さく、大略月雨量の3%を超えることはきわめてまれである。また、前後期の比較では1号区の前期は月降雨量100mm以上は流下量は急増し後期といちじるしい差が生ずる。3号区は逆に後期の方がいちじるしく大きく、アカマツ林は稚樹から幼令林と成育するにしたがつて地表流下の増加することを示している。

3. 一降雨の地表流下量

前期後期別に一降雨の地表流下量を雨量階級別に示したのが第2表である。

第 2 表 雨量と流下量
Table 2. Precipitation and surface run-off

	雨量階級 Class of precipitation	第 1 号 区 Plot No. 1				第 3 号 区 Plot No. 3			
		雨量平均 Mean of precipitation	流下量平均 Mean of surface run-off	比(%) Run-off ratio	観測回数 Time of observation	雨量平均 Mean of precipitation	流下量平均 Mean of surface run-off	比(%) Run-off ratio	観測回数 Time of observation
前期 Former period	0~2	0.4	—	—	84	0.3	—	—	84
	2~5	3.2	—	—	12	3.1	0.002	0.06	16
	5~10	7.5	0.005	0.07	14	7.0	0.003	0.04	12
	10~20	14.1	0.024	0.17	16	13.5	0.010	0.07	22
	20~40	27.7	0.229	0.86	19	29.8	0.027	0.09	24
	40~70	53.2	1.522	2.86	13	53.0	0.088	0.17	12
	70~	98.8	12.215	12.36	4	83.7	0.080	0.10	1
後期 Later period	0~2	0.4	—	—	101	0.4	—	—	103
	2~5	3.6	0.003	0.08	39	3.5	0.002	0.06	37
	5~10	7.6	0.018	0.24	33	7.3	0.060	0.82	33
	10~20	14.4	0.054	0.38	28	13.9	0.205	1.47	28
	20~40	29.2	0.160	0.55	22	29.3	0.437	1.49	24
	40~70	52.4	0.190	0.36	14	52.7	0.610	1.16	11
	70~	98.2	0.422	0.43	7	91.9	1.219	1.33	8

雨量階級 Class of precipitation	雨量平均 Mean of precipitation	裸 地 (1m×4m) Bare land			裸 地 (1.4m×2.8m) Bare land		
		流下量平均 Mean of surface run-off	比 (%) Run-off ratio	観測回数 Time of observation	流下量平均 Mean of surface run-off	比 (%) Run-off ratio	観測回数 Time of observation
0~2	0.4	—	—	41	—	—	41
2~5	3.3	0.230	7.0	9	0.306	9.3	9
5~10	6.2	0.552	8.9	3	1.196	19.3	3
10~20	14.5	4.224	29.1	16	4.896	33.8	16
20~40	28.0	10.026	35.8	13	11.320	40.4	13
40~70	50.4	26.363	52.3	7	27.703	55.0	7
70~	154.4	98.753	64.0	1	108.132	70.0	1

地表流下量 (y) と雨量 (x) との関係は、前期¹⁾では川口氏によつて $y = ax^b$ の形で示されており、その形が一般的なものと考えられるが、後期では $y = ax + b$ の直線式で表わすことが適当であり、各区について関係式を求めると

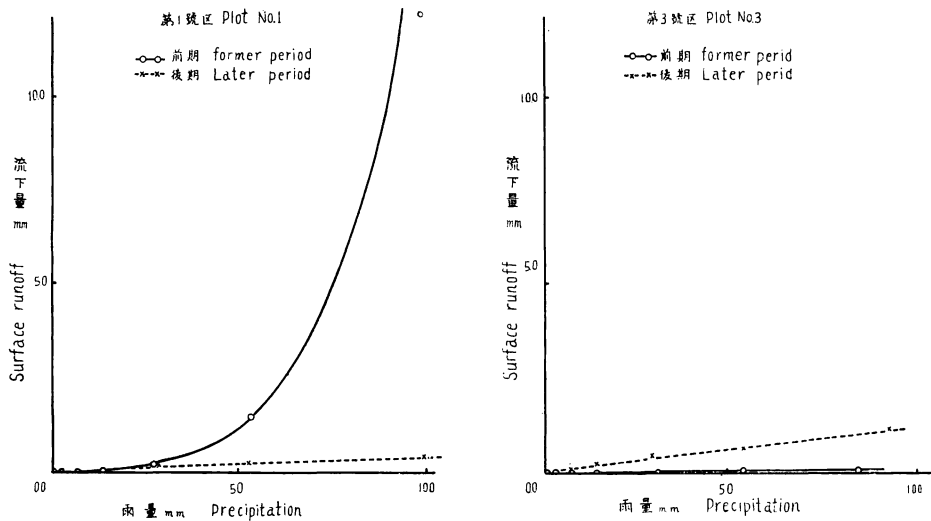
$$1 \text{ 号区 } y = 0.0044x - 0.0085 \quad x \text{ と } y \text{ との相関係数 } r_1 = +0.98$$

$$3 \text{ 号区 } y = 0.0135x - 0.0294 \quad r_3 = +0.99$$

となり、その相関は非常に有意である。

上式は一連続降雨量と流下量との平均の相互関係を求めたものであるから、これを個々の降雨についてあてはめてみると、その実測値にかなり相違する場合もあるが、これは降雨前の土地の乾湿、降雨強度などに起因した結果と思われる。

両区の地表流下量を比較すると、3号区は降雨のいかににかかわらず常に1号区より流下量が多い。こ



第 2 図 雨量階級別流下量
Fig. 2 Surface run-off of each rainfall class.

れは両区の植生の種類、密度が主因をなすものと考えられる。すなわち、林木の成長するにつれウツベイ度が高くなるが、反面下木、下草の密度が疎になる。したがって、降雨余剰が地表流下する際の障害物が減少するため流下量の増加するものと想像される。しかし両区の上木の種類、ウツベイには大きな相違はあるが、下木、下草の密度は1号区がいくらか密であり、落葉層、腐植層についても見かけ上大差があるとは認められない。したがって、両区の流下量の差は上木の種類、密度が主なる原因ではないかと推定される。

さらにこれを前期、後期について比較してみると第2図のように、1号区については前期のアカツ老令林は伐採後7~8年経過した後期の雑木稚樹混生林に比し、その流下量はいじむるく大きい。この流下量の低下は伐採が直接の原因となり急激に減少したものか、あるいは伐採によつて一時流下量の増加を見たが、その後植生の回復につれて漸減したものか、流下量減退の過程は伐採後の記録が中断されているため明らかでない。また、3号区は前期に比し後期の流下量は倍加しており、森林が成長した場合同一樹種でも樹令が異なると流下量にも変化の生ずることを立証している。流下量の増加状況はこれも記録中断で判明しないが、おそらく各年ごとに流下量は多少の増減はあつたにしても、長期的に漸増したものと考えてよからう。

1号区の後期と3号区の前期流下量は、ほぼ相似た値を示している点から、一般に稚樹区は樹種のいかんにかかわらず地表流下量は少ないとみられる。

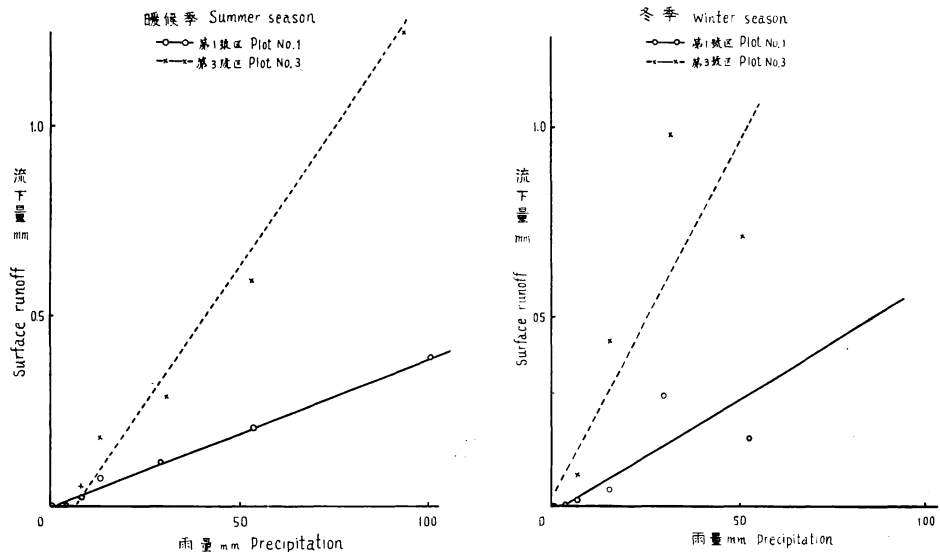
宮崎氏によれば⁵⁾、アカマツはか二、三の樹種ではその根に寄生する外生菌根は水を反ばつて滲透を悪くする性質があり、樹木の成長につれ菌が増殖する傾向があるから、自然地表流下の増加が予想される。上述の両区の地表流下の増減はこの傾向と一致するから、あるいは菌根によるものと考えられるが、前期の土壤調査の記録がないのでそのような断定は不可能である。なお、3号区の現在の土壤について調査の結果では、透水性の比較的良好なことが認められたが、菌根の存在は明瞭でなかつた。また、アメリカにおいても Pine litter⁶⁾のない林地では地表流下を生じない降雨でも、litterをもつ林地では流下を起す

ことが記録されており、それは林地が降雨で飽和する前に針葉の表面に沿って水が流下するものと解釈されるが、本試験のアカマツ老令林においてもこの種の地表流下もいくらか予想されるものの、その量は大きいたことはないであろう。

前期、後期の結果を総合考察してみると、アカマツ老令林が流下量最も多く、幼令林、稚樹区の順に順次減少傾向が認められる。川口氏¹⁾によれば2号区の幼令林が最も多いが、これは前記のように、土壌、方位が他区と異なるためであるかとも思われる。なお、このように老令林の地表流下が多いとするならば、降雨時の増水量、最大比流量も当然多いことも予想されるのに対し、著者らの検討した谷の試験結果は、北谷では伐採前の増水量、最大比流量の小さいことを示している(ただし南谷ではその伐採前後の差は明瞭でない)。この相違については、林地の地表流下が全流量に比し普通きわめて少ないものであるから、地表流下がすくなくとも、上記の二者が大きいことも場合によつてはありうるかもしれないと推定され、後述の7節の谷の最大流量と地表流下のピークとの関係についての検討で、すくなくとも北谷においてこの傾向が認められるようである。これは老令林の地表の植生の少ないこと、litter による影響、或いは外生菌根などの影響によるものかもしれないが、今のところその断定は不可能である。また、アカマツ林の林令の増加にともなう地表流下の増加傾向を一般的なものとするに危険がある。なお、植生の有無が地表流下に与える影響を示す一例として、本試験地の3号区の下方に設けられた植生剥離の地表流下試験区(方位、傾斜3号区に同じ、斜面積 $4m^2$)の流下量がいずれも著しく多いことであり、そのうち巾 $1m \times$ 長 $4m$ 、巾 $1.4m \times$ 長 $2.8m$ の2矩形区の雨量階級別流下量を示すと、第2表のように各雨量階級とも植生区に比しきわめて多く、特に $50mm$ 以上の降雨ではその流下率は 50% に近い。これは面積や斜面長の差によることも一応考えられるが、一般にそれらの影響は比較的小さいものであり、この場合主として植生の影響の大きいことによるものと考えられる。

4. 季節の影響

上記の資料を季節別に暖候期(6, 7, 8, 9月)と冬期(11, 12, 1, 2月)に分け、雨量階級別にまと



第3図 季節別流下量
Fig. 3 Seasonal surface run-off.

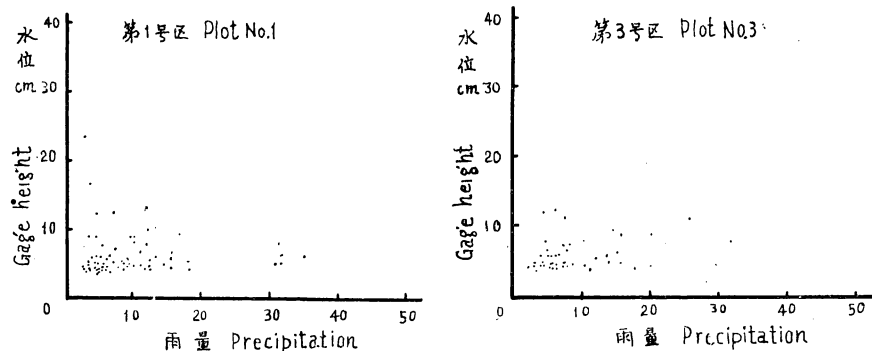
め図示してみると第3図となる。

暖候期は雨量と流下量は大体直線的関係にあることが認められるが、冬季においては点の散布状態が非常に不揃いで明らかな傾向は見だし難い。これは冬季は暖候季に比し資料の少ないことと、気象変化による影響が大きな原因であろう。両区とも冬季の流下率が暖候期のそれより高い傾向を示している。一般に冬季においては雨量強度および総雨量も小さいので地表流下の少ないことは予想されるが、その反面、厳寒期には土壤凍結の影響が考えられる。林地の場合、ある程度凍結してもその滲透能はほとんど変化しないとの報告もあるが⁹⁾、土壤微生物、樹根の作用も不活発化することなどからして、地表流下は増加の傾向があるとみてよいのではなかろうか。しかし、これについては土壤の性質が大きく影響し、土壤によつて冬季、夏季の流下が逆になる例⁹⁾もあつて、普遍的な結論は不可能と信ずる。

5. 地表流下開始の限界雨量

量水箱の箱外流出に至らない程度の軽度の地表流下を生ずるための最小雨量は、後期においては1号区 2.7mm、3号区 2.1mm であり、最大は1号区 31.4mm、3号区 20.4mm で、なお箱外流出をしない場合もあつてその巾はかなり大きい。これは雨の強度、林地の凍結の有無などによつて支配されるためである。上記の最小値もともに厳寒期のものであつて、普通は両区とも 7mm 前後で地表流下をはじめるが、箱内上昇にとどまり箱外の流出開始は 10mm 前後とみてよい。この値は前期のそれとほとんど変わらない。したがつて、水みちとなる低滲透の部分の面積は前後の各区とも大差はないとみられる。

林地の乾湿状況も当然この限界雨量に影響するものと予想されるので、その両者の関係を図示してみたのが第4図である。



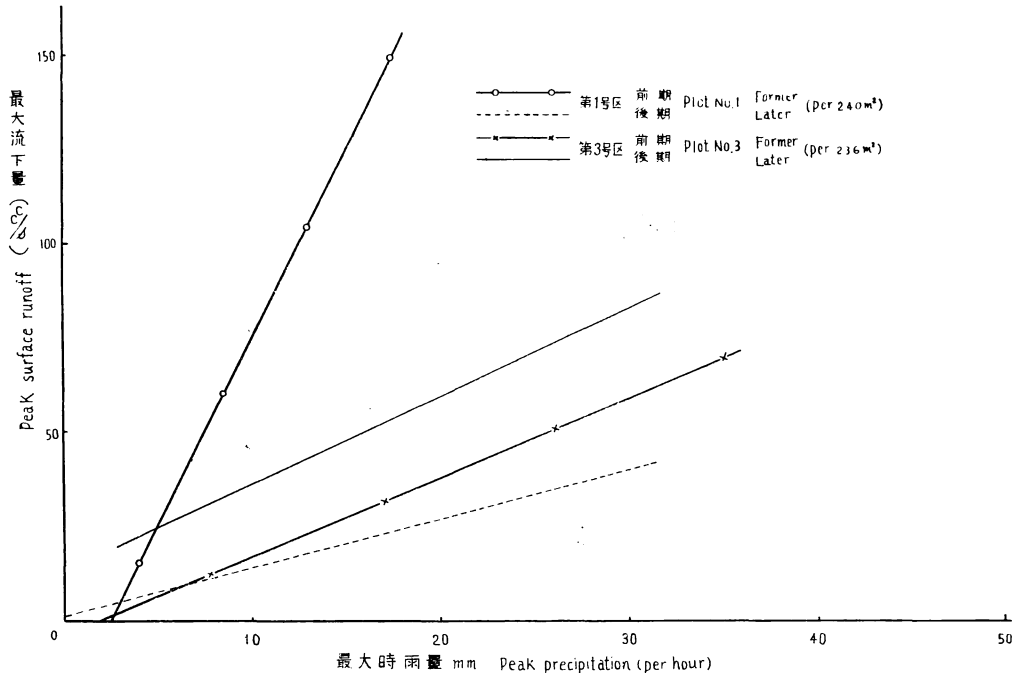
第4図 限界雨量と北谷の水位
Fig. 4 Minimum precipitation required to run-off and level of ground water.

ここで林地の乾湿を表す指標として北谷の水位を用いた。これによると水位の高い場合の限界雨量はおおむね小さいという傾向はうかがわれるも、逆に水位の低い場合の雨量はかなり広い巾をもつて一定の傾向がなく、林地の乾燥は特にその限界雨量に関係ないともいえる。もつとも林地の乾燥が特にひどいときは落葉層が水を反ばつて、かえつて地表流下を促進することもしばしばみられることからして当然かもしれない。

6. 最大流下量

治水上前問題となるのは総流下量よりも最大流下量である。最大流下量も前述のように林地の乾湿、気温、雨の強度によつて影響されるが、このうち雨の強度との関係が最も大きいと予想される。ピーク前の

積算雨量も多少の関係ありと考えられたが、1号区の単純な降雨型の15例について検討したところ積算雨量と、ピーク流量との間には前後期とも全然相関がみられなかつた(前期 $r = +0.18$, 後期 $r = -0.28$)。また、林地の乾湿を表わす指標として谷の水位をとつて最大流下量と水位との相関を同じ資料によつて求めたが(前期 $+0.62$, 後期 -0.14)、前期ではやや有意であるが、後期では有意性がなかつた。したがつて、ここでは最大流下量を雨の強度の函数として両者の関係に検討を加える。



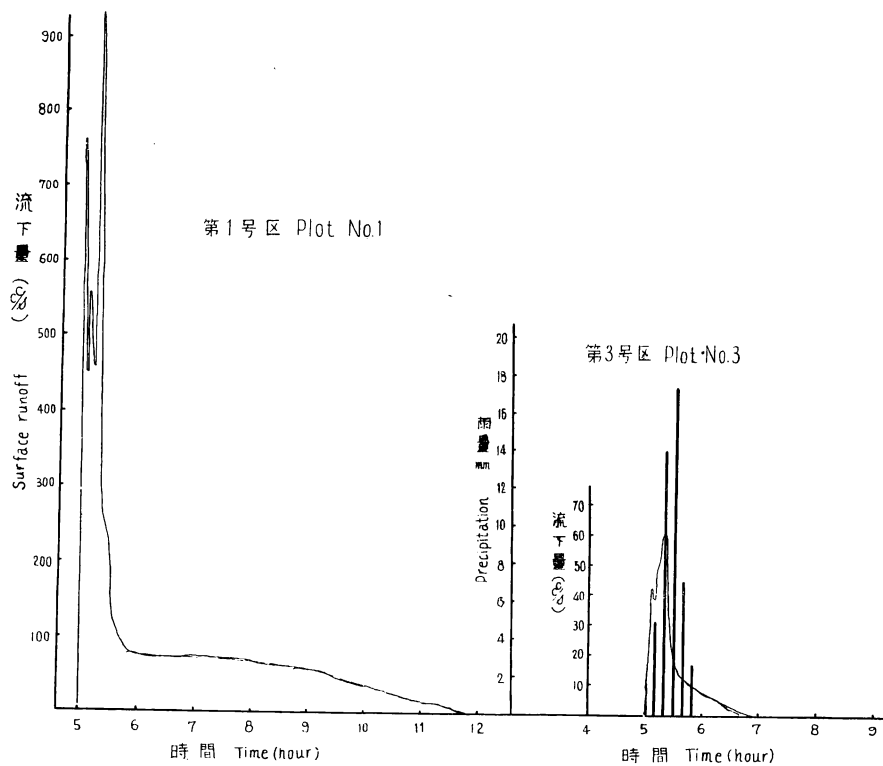
第 5 図 最大流下量と最大時雨量
Fig. 5 Maximum surface run-off and peak of the precipitation.

前後期それぞれ2カ年の資料のうち、ピークの比較的明瞭なもの26例を抽出して最大時雨量(x mm)と地表流下量(y cc/s)を図上にplotすると、各区の各時期とも点の散らばりが大きい、一次の関係が最妥当であると考えられるので、最小自乗法で求めると、

前期	1号区	$y = 10.1x - 26.4$ (後期1号B区面積に換算)	$r_{xy1} = +0.87$
	3号区	$y = 2.1x - 3.9$	$r_{xy3} = +0.67$
後期	1号区	$y = 1.3x + 1.1$	$r_{xy1} = +0.64$
	3号区	$y = 2.3x + 12.6$	$r_{xy3} = +0.51$

この場合雨の強度として1時間雨量を採用した。10分間雨量をとつた場合でもその相関係数に大差なかつた。これら4区を比較するに前期1号が圧倒的に多く、後期1号が最も少ない。また、3号区は後期の方が前期より常に最大流下量が大きく、その傾向は一降雨量と流下量とのそれに等しいが、いずれにしても最大流下量も雨量に比するときわめて小さく、これを1時間雨量に換算した場合最も多い1号区においても、100mmの強雨の時で雨量の16%にも達しないことが本式から推定される。

つぎに、特に雨量強度の大きい場合について、二、三の例を挙げてその流下状況を調べてみると前期の雨量強度中、最大は昭和16年8月20日の50.5mm/hrであるが、これはしゅう雨性豪雨で、その前後に



第 6 図 強雨時の流下量曲線
Fig. 6 Hydrograph of surface run-off on a heavy rain.

第 3 表 強雨時の全流量および最大比流量

Table 3. Total and specific peak of surface run-off on heaviest rainfalls.

	前 期 Former period		後 期 Later period			
	1 号区 Plot No. 1	3 号区 Plot No. 2	1 号区 Plot No. 1	3 号区 Plot No. 3	1 号区 Plot No. 1	3 号区 Plot No. 3
	I	II	I	II	I	II
全 流 量 Total run-off mm	4.51	0.33	0.21	0.18	0.47	0.51
流 下 率 Runoff-ratio %	8.9	0.66	0.5	0.5	1.1	1.4
最 大 比 流 量 Peak run-off per square meaters cc/s	1.99	0.26	0.12	0.11	0.26	0.24
地表流下終了までの平均滲透能 Mean infiltration rate during surface run-off mm/hr	8.4	66.8	45.0	40.8	20.0	9.5

ほとんど雨をみなかつた。この流量曲線は第 6 図のとおり、3 号区では流出は降雨終熄とともに割合に早期に止むに対して、1 号区は急激に流出は衰えるが、5 時間の後でもなお流出をみる。その全流量ならびに最大比流量は第 3 表のとおりである。

この時の雨の 10 分間最大強度は 114 mm/hr に達しているが、1 号区の最大流下量の強度を 1 時間雨量に換算すると 7.2 mm 、3 号区では 0.9 mm となり、その流下量は依然小さい。これはその滲透能が大きいためであろうが、降雨開始後間がなく、林地がいまだ充分湿潤せず地表貯留能力が大きいことが影響するのであろう。

1 号区が 3 号区に比し降雨後の流下時間の長いことは、1 号区の滲透能が低い上にその地表貯留能力の大きいことに帰せらるべきものであろう。いつたん滲透した水が承水溝付近で漏出する可能性も考えられるが、これを肯定する充分の根拠がない。

後期の最大強度の雨は昭和 27 年 7 月 19 日 (I) の 35.5 mm/hr と、同年 8 月 6 日 (II) の 34.7 mm/hr で、その 10 分間最大雨量は前者は 72 mm/hr に達する。その最大比流量は全流量と同様に 3 号区は 1 号区の 2 倍以上となつている。しかし、その雨量に対する割合からみればいずれもきわめて小さく、1、3 号区間の差も問題とするにあたらない。ただ 3 号区が降雨後の流下時間の長いことは地表残留量が大きく、それが徐々に放出するものと解される。これを伐採前後について比較すると、1 号区では伐採とともに最大流下量はいちじるしく減少し、滲透能が増加するに対し、3 号区では逆にアカマツの成長にともない、滲透能は低下し流下量の減少をみる。要するに、最大流下量もアカマツ林の成長につれて同様に増加の傾向があるが、各区とも滲透能および貯留力が大きいため雨量に対する流下率はきわめて小さく、いずれも治水機能は大きい。

7. 地表流下のピークと北谷の最大流量の関係について

強雨時の谷の流量は一般に主として地表流下によつて形成されると予想されるのであるが、流下曲線の比較的単純な形の場合の伐採前、伐採後 14 例について流下量と流量との関係を検討した。北谷の伐採前の植生は 1 号区のそれと相似するので前期では 1 号区を、後期の植生はアカマツ 30% を含む笹下木林であつて、1 号区よりむしろ 3 号区の植生がこれに近づくと考えられるので、主として 3 号区を比較の対照とした。ただし、北谷の内部でも局部的に地質、土壤にかなりの違いがあるので、1、3 号区の流下量をもつて北谷のそれを推測することに危険もあるが、地表流下の開始、その最盛期などの流下状況について両区を参考とするうえには大した不都合のないものと考ええる。

まず地表流下のピーク流量と北谷のそれとの相関を求めるに、前期では $+0.6$ でやや有意であるが、後期では -0.11 で相関がない。これは一般に降雨中および後の谷の流量は主として中間流出によつて構成され、地表流下の占める比重は割合に小さいから、後期のように純地表流下の少ないと推定される場合に相関のないのが当然であるかもしれない。しかし、北谷流域の地表流下量が伐採後に減少したと断定する根拠は充分でない。

つぎに、ピーク流量の量的比較であるが、普通谷の流量はその集水面積が大きくなるほどその流量曲線の変化が緩慢となり、したがつてそのピークも一局部のそれより大となることは少ないのであるが、地下水量および中間流量の多い場合ではそれらを含めた総流量のピークは、地表流下のピークより大きくなることも予想される。

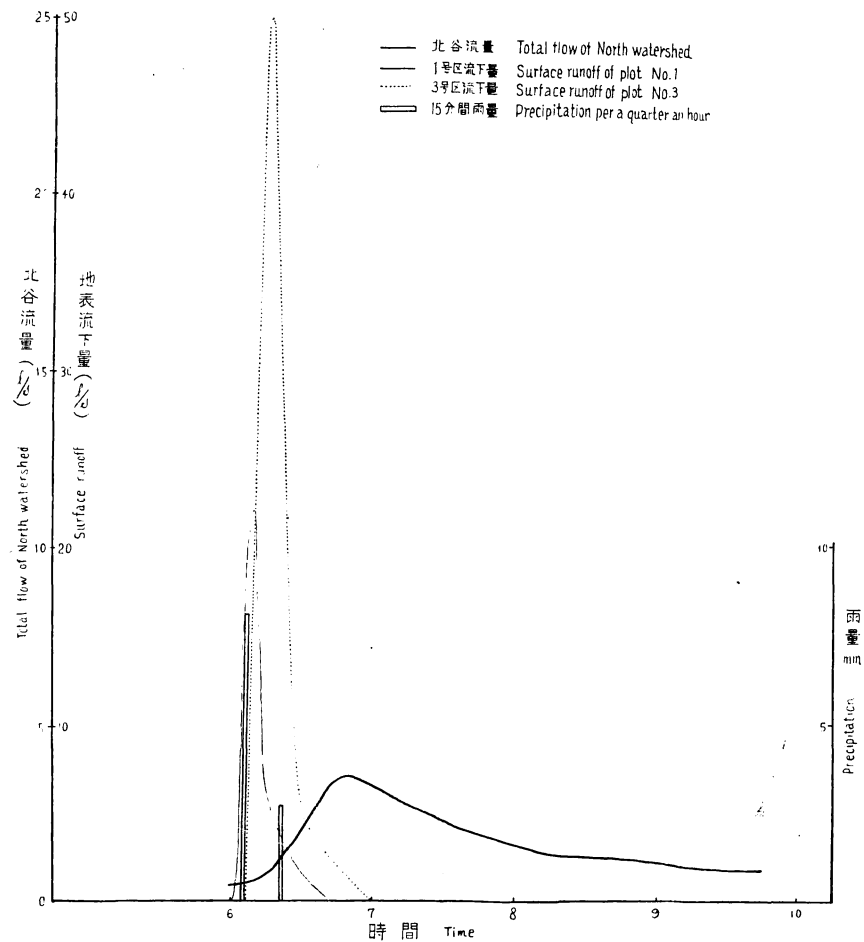
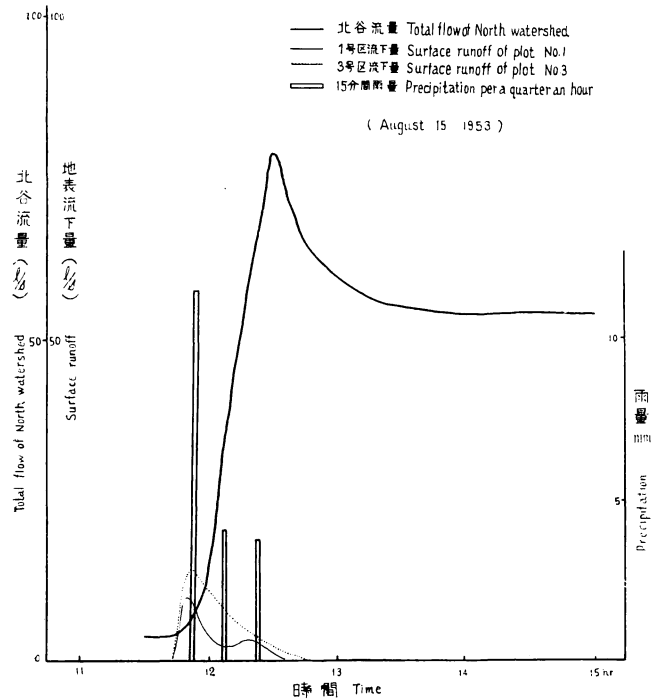
第 4 表の各例について概略の考察を加えるに（第 6 図参照）、前期では No. IV, XII, XIII を除いて 12 例は地表流下量の方が大きい。これは短期間の地表流下では河道流入にいたるまえに山腹斜面に滲透する量が多く、河道流量に加わる分が少ないによるので、この傾向が一般的であろう。No. IV は降雨総量 110 mm 、平均 1 時間強度 12 mm/hr に達する豪雨であり、ピークに達するころは前 5 時間の降雨（積算

第4表 地表流下と流量のピーク

Table 4. Peak run-off of plot and North watershed

	No.	月 日 Date	雨量のピーク時間 Time of peak of precipitation (hr)	降雨前流量 Run-off before precipitation (l/s/ha)	最大10分雨量 Maximum precipitation per 10 minutes (mm)	ピークまでの積算雨量 Integral precipitation till peak (mm)	流量ピーク時間 Time of peak run-off (hr)	ピーク流量 Peak run-off (l/s/ha)	1号区地表流下最大流量 Peak surface run-off (l/s/ha)		雨のピークから流量ピークまでの時間 Time from maximum precipitation to peak run-off (minute)
									Plot No. 1	Plot No. 2	
前期 Former period	I	16. 3.12	22.50	0.01	3.5	3.0	23.25	0.31	1.05	—	35
	II	16. 5.25	6.00	0.01	4.1	11.8	6.30	0.63	1.98	—	30
	III	16. 7.26	3.07	0.02	3.6	18.6	3.40	0.45	1.72	—	33
	IV	16. 8.15	8.30	0.02	14.5	26.9	9.25	31.55	14.51	—	55
	V	16. 8.20	5.20	0.02	17.0	0	5.50	6.47	19.78	—	30
	VI	17. 8. 6	7.00	0.01	5.8	1.8	7.45	0.14	5.68	—	45
	VII	17. 8. 7	0.30	0.01	5.0	7.5	24.50	0.23	4.52	—	20
	VIII	17. 8.17	4.00	0.01	5.9	1.4	4.30	0.63	6.99	—	30
	IX	17. 8.27	14.00	0.01	5.2	6.5	14.20	0.48	4.45	—	20
	X	17. 8.31	14.30	0.01	4.8	12.4	14.55	1.13	3.44	—	25
	XI	17. 9.15	4.50	0.01	5.0	0.8	5.50	0.13	2.47	—	60
	XII	17. 9.18	22.30	0.04	7.8	16.4	22.50	13.88	10.32	—	20
	XIII	17. 9.21	15.20	0.11	10.6	113.4	15.35	32.92	8.94	—	15
	XIV	17. 9.30	17.20	0.02	7.5	0	17.45	1.38	2.00	—	25
	XV	17.11.14	12.30	0.01	3.8	28.5	13.10	0.32	1.94	—	20
後期 Later period	I	27. 7.20	13.25	0.02	16.4	0	14.05	5.66	1.16	2.75	40
	II	27. 8. 6	13.10	0.02	12.0	0	13.50	7.96	1.08	2.37	40
	III	27. 9.15	17.55	0.11	6.0	30.0	19.00	3.94	0.66	1.69	65
	IV	27. 9. 2	17.55	0.01	8.2	2.0	18.40	0.18	1.78	5.54	40
	V	27. 9. 7	18.35	0.01	6.0	0	19.30	0.18	0.62	2.12	55
	VI	27. 9.11	4.25	0.01	8.2	0.1	5.20	0.26	0.66	1.95	55
	VII	28. 6. 6	18.20	0.36	11.8	4.2	18.35	5.96	1.43	0.85	15
	VIII	28. 7. 5	12.00	0.07	11.0	3.9	12.40	4.57	0.54	0.85	40
	IX	28. 8. 1	7.40	0.01	9.4	2.2	18.20	0.21	0.66	1.10	20
	X	28. 8.15	6.00	0.01	9.2	0	6.50	0.21	1.29	2.92	50
	XI	28. 9. 1	14.55	0.01	11.3	0	15.12	10.75	1.87	5.21	17
	XII	28. 9. 5	1.40	1.97	6.0	24.1	2.25	22.74	0.66	1.06	45
	XIII	28. 9.17	10.30	0.01	6.2	11.3	11.32	5.10	0.96	2.58	72
	XIV	28. 8.27	15.30	0.02	4.5	7.6	16.10	0.54	0.96	2.24	40

26.9 mm) によつて地下水位の上昇、中間流量の増加等で地表流下量に比し、それらの値がなお多量になるためである。これに対し No. V は降雨強度は No. IV より大きい、降雨時間が短いため、地表流下以外の流量がきわめて小さく、ピーク時の流量はほとんど地表流下で構成されるのであるが、河道流入にいたるまでにその多くは滲透するので、谷の流量ピークは小さくその減水も速やかである。No. XII はピーク時の降雨は短時間であるが、前日の降雨の影響が考えられる。ただし、この場合でも当日の降雨前の流量はきわめて小さく、この流量が直接ピークに影響するところはきわめて少ないが、このように保留量の大きいときは地表流下に近い中間流出の出方が速やかであり、また多量に及ぶためそのピークは大きへ



第 7 図 地表流下曲線と北谷の流量曲線
Fig. 7 Hydrograph of surface run-off of plot and total flow North watershed.

なるのではないかと推測される。したがって、そのピークも地表流下そのものによつて構成される場合に比べていくらか遅れる傾向がある。これに対し後期では 1 号, 3 号区とも流下量が少ないため流量との相関がなく、谷の流量の大部分は中間流出や地下水によつて供給されると想像され、ピークが前期に比べておくれるのはこのためではなかろうか。

降雨前の水位が低く、降雨時間の短い場合の IV, V, VI, IX, X, XVI は地表流下のピークの方が大きい。これは前述のように河道流入に加わる流下量が少ないからであろう。

要するに、谷の流量は降雨前の基底流量、ピーク前の雨量により定まる中間流量、ピーク時の雨の強度によつて定まる地表流下量に 3 分することができるが、その関係式を数式化すると、

$$R_m = Q + I + S \quad \text{で表わされる。}$$

R_m : 流域のピーク流量 ($l/s/ha$) Q : 降雨前の流量 (%)

I : ピーク時の中間流量 (%) S : ピーク時の地表流下量 (%)

ここで I はピークまでの積算雨量 P や、その時の基底流量 Q と正の関係にあることが予想されるので、最も簡単にその両者の相乗積に比例すると考え、また地表流下量は地表流下試験区の流下量 S' に比例するものと仮定した。したがって上式は、

$$R_m = Q + aPQ + bS'$$

となり、 $R_m - Q = R'$ として PQ, S' ならびに P_{10} (10 分間最大雨量) との相関を求めると左表に示す

	$r_{R' \cdot PQ}$	$r_{R' \cdot S'}$	$r_{R' \cdot P_{10}}$	$r_{R' \cdot PQS'}$
前 期 Former period	+0.69*	+0.60*	+0.63*	+0.85**
後 期 Later period	+0.81**	-0.11	+0.10	

とおりで、後期では流量のピークと、 S' および P_{10} とは全然相関がみられない。

このことは純地表流下が少なく、Subsurface flow の大きいことを示すのではな

* はやや有意の意味 ** は非常に有意

かろうか。しかし、最大流量の絶対量は前期に比してけつして小さくないことは過去の検討²⁾によつて確かめられており、結局水の地表、地下の在り方が関係するのであろう。

第 4 表の資料を用いて前期の常数 a, b を求めると

$$a = 2.16 \quad b = 1.03$$

となり、上式から判断しても一般に流量中に占める地表流下の割合は、中間流量より大きいことを推定しうる。つぎに、雨のピークから流量のピークまでの時間 (lag) を前後期について比較するに、その降雨状況が相等しいものとして平均値の差の検定をしたが、 $t = 2.127 > 2.062 = t_{0.05}$ となつて 5% の危険率で差があると認められた。この時間は雨量条件、特に雨の強度によつて大きく変化する。すなわち、雨の強い時は地表流下の深さは大となり、したがつてその流下速度は大きくなつて lag が短くなると考えられるが、第 4 表の資料については lag と最大流下量との相関はみられない。これは流出量と流下量との関係と同じく降雨の強さと、その時間によつて流量のピークがいちじるしく変化するからである。一般に河川流域のように大きい場合は、

$$\text{lag} = f(L, Lg, I)^{3)}$$

L : 最大流路延長 Lg : 基点から最大流域中までの距離 I : 平均勾配

によつてかなりの適合値を得³⁾るが、北谷のように小流域では河道の延長が 400m にも足りないので、出

水時の河道の通過時間はきわめて短かく、上の lag において無視して差しつかえないから、結局 lag は山腹斜面から河道までの到達時間によつて左右されるのではないかと推察される。しかし、山腹斜面の流下機構についてはその影響する因子はきわめて多く、まだ充分明らかにされていない。第4表の各例について、その地表流下量および雨量自記紙から地表流下の lag について検討するに、おおむね 2~3 分程度のズレがあるものと考えられる。この場合 plot 内に全面流下があつたものと仮定し、最遠隔地点からの流下量の到達した時にピークが形成されたとすると、その平均流下速度 (V_m) は

$$V_m = \frac{2000cm}{25 \times 60} = 13 cm/sec \quad \text{となる。}$$

林地のような透透能の大きな場合は斜面長が長いほど流下が減少する⁷⁾ので、上の値はさらに小さくなるであろう。

北谷流域で河道への最遠隔地点は約 250m の距離にあるので、それから河道への到達には上の V_m を用いると約 30 分余を要することとなる。したがつて、30 分以上の降雨集中時の lag は約 30~40 分で、これは植生の変移によつて多少変化することは前記の検定で実証された。

第7図のような雨量状況の単純な場合がこれに該当し、lag の長い（たとえば前期の IV、後期の XI 等）のは雨量に 1 次のピークにつづいて小さいながら 2 次のピークの存在するため、lag が延びたものと推察される。なお、この問題については中間流量につき充分検討の要があり後日の課題とする。

8. 植生刈取りによる影響

1号B区において昭和27年9月、上木（ソヨゴ、ウルシその他の小雑木類でその密度は $3m^2$ 当り1本程度）を残し、下部植生のコシダ、ケネザサの刈払いを行った。この際面積 $1m^2$ の標準地6カ所をとり、その刈取り植生の生重量ならびにこれに充分飽水せしめた場合の重量を求めて、その保持しうる水量

第5表 下草生重量と水分保持量
Table 5. Surface glass and thats moisture holding capacity.

	1	2	3	4	5	6	平均 Mean
生 重 量 Weight of green glasses <i>gr</i>	1050	915	1015	990	1395	1555	1153
飽 水 量 Weight of green glasses saturated with water <i>gr</i>	950	645	985	710	805	1305	900
含 水 率 Moisture content %	95	70	97	71	57	83	78

第6表 刈取り前後の雨量と流下量
Table 6. Precipitation and surface run-off before and after cutting surface vegetation.

		1	2	3	4	5	6	7	8	平均 Mean
刈 取 前 Before cutting	雨 量 <i>mm</i> Precipitation	35.7	48.8	17.2	16.9	8.0	3.8	5.0	3.4	17.4
	流下量 <i>mm</i> Surface run-off	0.18	0.25	0.09	0.15	0.02	0.01	0.01	0.01	0.09
刈 取 後 After cutting	雨 量 <i>mm</i> Precipitation	33.2	54.6	18.2	12.1	6.5	6.6	4.4	3.5	17.4
	流下量 <i>mm</i> Surface run-off	0.12	0.24	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06

を推定した（第 5 表）。

これを雨量に換算するとわずか 0.9mm で、上木もきわめて粗であるから、その全保持水量は 1mm 程度であろう。したがって、降雨の際地表に達する雨量はの場合植生の有無によつてほとんど変化がないとみてよい。刈取りによつて地表流下量に差があるかどうか、刈取り前後それぞれ 2 カ月の資料（第 6 表）8 例によつて検討する。

まず雨量については、その強度の影響もあるが、いまそれを無視して総雨量の平均についてみると等しい。またその流下量についてみると、平均して前後それぞれ 0.09 と 0.06mm というように、後の方が小さくなっている。対応する流下量についてみても後の方で大きいものが一例もないので、刈取り後の流下量が少なくなる傾向があるとしてよいのではあるまいか。下草の刈払いによつて流下の増加が予想されるが、下草の水分保持量がきわめて少なく、一方刈株および落葉腐植層にならば変化がないのみならず逆に林地被覆の減少するため、地表上層が乾燥し水分保留量が増加するためと思われる。このことは川口氏によつて発表¹⁾された 4 号区（草生区）の下刈りの影響と逆の傾向にあるが、両区の間には下草の密度、落葉腐植層の厚さにも相違があつて、これらを見無視してその影響を論ずることは危険であり、一般の林地においてその落葉層に変化を及ぼさないかぎり、下刈りの影響はきわめて小さいと考えてよい。

Ⅱ 地表流下の機構についての考察

以上測定結果についての検討によつて、林相の変移による流下量増減の傾向の概略が判明した。しかし、地表流下が降雨強度によつてなにゆゑ変化するか、また地表状態によつて流下量の増減のあるのはいかなる機構によるか等についてはまだほとんど明らかでない。近年これらの問題の解析のための一つの指標として HORTON⁶⁾ 等によつて、滲透能が提唱されている。その基本的な考え方は林地には一定の最小滲透能があり、その f_e を超過する雨量、すなわち降雨余剰が地表流下をなすとするものである。現在なおこの滲透説をもつてしても、雨量と流量との関係を十分に説明し得ない点もあるが、最も合理的な考え方と思されるので、滲透能、保留能の面から上記の傾向について検討を加えてみよう。

1) 滲透度

ここにいう滲透度¹⁰⁾とはその土地の滲透能以下の降雨強度の際の滲透強度を表わすものとする。一般に林地の平均滲透能はかなり大きく、自然降雨の強度以上の場合が普通で、したがって滲透能をもつてしては雨量と地表流下との関係を説明し得ないので、この場合滲透度を用いることとした。1 号、3 号について地表流下を起した期間中の 1 時間の雨量と、同時間内の滲透量との関係を調べるに、いずれの区も滲透

第 7 表 雨量滲透量の関係

Table 7. Relation between precipitation and infiltration.

		相 関 係 数 Correlation coefficient	回 帰 直 線 Regression line
1 号 Plot No. 1	前 期 Former period	+0.94	$y = 0.943x - 0.10$
	後 期 Later period	+0.99	$y = 0.990x + 0.13$
3 号 Plot No. 3	前 期 Former period	+0.99	$y = 0.993x - 0.08$
	後 期 Later period	+0.99	$y = 0.988x$

量は雨量の増度に比例して漸増する。よつてその一次式を最小二乗法で求めると第7表のとおりで、同じ雨量に対する滲透量の面からいえば、その時期別、植生別の差がほとんど認められない。いずれにしても自然降雨の強度(最大は前期 42.4 mm/hr, 後期 35.5 mm/hr)ではそのほとんどが滲透するところからして、これらの林地の平均滲透能はすくなくとも 30~40 mm 以上であることは間違いない。したがつて、この程度の雨では滲透度の植生による差は少ないが、1号区では前期より後期、3号区では後期より前期がいくらか滲透能が大きい。一方 2~3 mm/hr の雨でも地表流下を開始するのは、林地は種々の滲透能の土壌の総合によるものであるため、林地全体としての平均滲透能が大きいにかかわらず、一部の滲透能の低い水みちによる流下が起ると解すべきである。もちろん、このような低滲透能の部分においても地表貯留能力が大きければ、雨が滲透能を超過しても直ちに地表流下するものでなく、その流下機構はさらに複雑であるが、後述のように地表貯留能力は比較的小さいと推定され、また流下時の貯留量はほぼ一定と見なされるからここではその影響を無視した。いま上の HORTON 氏の部分滲透能の考え方に一応従つて、本試験の雨量と流下記録からその部分滲透能について検討してみよう。ただし、林内各部分にはそれぞれほぼ一定の滲透能があり、その滲透能を超過する雨量(超過雨量)が地表流下するということを前提とする。

1 時間雨量, 部分滲透能, その面積割合を次のような記号で表わす。

$f_1, f_2, f_3 \cdots f_n$: 部分滲透能

$L_1, L_2, L_3 \cdots L_n$: 部分滲透能の面積割合

$i_1, i_2, i_3 \cdots i_n$: 一降雨中の各 1 時間雨量

f_m に等しい強度の i_l の雨が降つた場合を考えると、 f_m より大なる滲透能の部分では雨が全部滲透し地表流下に関係がない。 f_m より小なる滲透能の部分では、それぞれの滲透能に値する雨量は全部滲透するから、その滲透量は $\sum_1^m f_m L_m$ となる。また、この部分の雨の供給量は $i_l \sum_1^m L_m$ であるから、結局ある 1 時間降雨 i_m 中の地表流下量は $R_l = i_l \sum_1^m L_m - \sum_1^m f_m L_m$ で、これを一降雨 r 時間の各時雨量について積算したものがその降雨中の地表流下量となる。

$$\text{すなわち, } \sum_{l=1}^r R_l = \sum_{l=1}^r \{i_l \sum_1^m L_m - \sum_1^m f_m L_m\} = \sum_{l=1}^r \sum_1^m \{L_m(i_l - f_m)\}$$

自然降雨では一般にその強度は弱く、普通 15 mm/hr までであり、したがつて 15 mm/hr 以上の滲透能の部分は流下に関係がない。そこで、いま普通の降雨で流下に影響する部分滲透能をかりに 0, 3, 5, 10 mm と括約すると(この括約の仕方にも議論の余地はあるが)。

$$\begin{aligned} \text{流下量 } R &= L_0 \sum_{r=1}^r (i_r - f_0) + L_3 \sum_{r=1}^r (i_r - f_3) + L_5 \sum_{r=1}^r (i_r - f_5) + L_{10} \sum_{r=1}^r (i_r - f_{10}) \\ R &= L_0 x_0 + L_3 x_3 + L_5 x_5 + L_{10} x_{10} \end{aligned}$$

ただし、 x_m は傍書の滲透能の超過雨量を表わす。

となる。ここで前記 13, 後期 15 の普通降雨記録について、一降雨ごとの各滲透能の超過雨量 $\sum_{r=1}^r (i_r - f_m)$ とその流下量との単相関、偏相関、重相関係数および L_m を求めた(第8表)。

第8表の単相関はどの区もおおむね総雨量との相関が最も大きく、超過雨量 $\sum_{r=1}^r (i_r - f_m)$ の f_m が大となるにつれ相関が低くなり、5 mm 以上の超過雨量とは有意の相関がない。一方、偏相関係数は交互に負の値をとり、したがつてこれより導かれた L_m の値も負となる。またこれら超過雨量の流下量に対する重相関係数はかなり高く、いずれも有意であり、この回帰式から推定される流下量は実際値と比較的よく

第8表 超過雨量と流下量との相関

Table 8. Correlation coefficient for rainfall excess and surface run-off

		総雨量 (X_0) Total rainfall	3 mm/hr 以上 の超過雨量 (X_3) Rainfall excess over 3 mm/hr	5 mm/hr 以上 の超過雨量 (X_5) Rainfall excess over 5 mm/hr	10 mm/hr 以 上の超過雨量 (X_{10}) Rainfall excess over 10 mm/hr	流下量 R と X_0, X_3, X_5, X_{10} と の重相関係数 Multiple correlation coefficient between R and X_0, X_3, X_5, X_{10}
前期 Former period	γ	+0.79	+0.58	+0.39	+0.25	+0.92
	Plot No. 1 ρ	-0.04	-0.74	-0.70	+0.51	
	α	-0.07	+2.02	-2.62	+0.93	
	γ	+0.48	+0.23	+0.14	-0.01	+0.86
	Plot No. 3 ρ	+0.80	-0.77	+0.80	-0.81	
	α	+0.01	-0.10	+0.15	-0.07	
後期 Lates period	γ	+0.62	+0.65	+0.47	-0.07	+0.85
	Plot No. 1 ρ	+0.04	-0.13	+0.35	-0.44	
	α	+0.00	-0.01	+0.04	-0.03	
	γ	+0.62	+0.42	+0.24	-0.02	+0.69
	Plot No. 3 ρ	+0.36	-0.19	+0.11	+0.08	
	α	+0.03	-0.06	+0.04	+0.01	

γ : Correlation coefficient ρ : Partial correlation α : Partial regression coefficient

適合している。しかし、これは計算の一例にすぎないのであつて、これが必ずしも最も適合度の高い式ではないことはいふまでもない。また L が上のように負となることから、これを部分滲透能の面積割合と考えることは明らかに不合理となろう。要するに以上の結果を生じた原因としては、部分滲透能の括約の仕方にも問題があるが、根本的には各部分の滲透能を降雨期間中一定としたことに難点があると考えられる。すなわち、このような低滲透能な部分でもその滲透能は常にある巾をもつて変動するものであり、したがつて、降雨期間中の滲透能別面積が一定であるとする考え方に無理があるのであろう。しかし、普通の降雨では地表流下は 3mm とか 5mm 程度の比較的低滲透の部分から生ずることは予想されることであり、これは主に落葉落枝の水みちによるもので本格的な地表流下は起らないから、これより林地の平均滲透能を推測することはできない。

2. 斜面滲透計による測定

上述のように林地の平均滲透能はおおむね自然降雨強度以上であるので、それから平均滲透能の推定は不可能である。林業試験場平田氏は傾斜面上の任意の地点で、滲透能を測定する斜面滲透計を考案¹¹⁾された。給水法として 30 cm×30 cm の区画の上端から水を流す方法をとつている点で自然降雨と違うが、給水量が充分に大きく最大滲透能を超過する場合は自然降雨の状況と大差がなく、滲透能と雨の強度との関係の概況が推定されると考えられる。

なお、地表流下量と降雨強度より滲透能を決定するには HORTON の下記の式が用いられる。

$$f_a = \frac{(P - Q)}{t_n + \frac{t_r}{3}}$$

f_a : 平均滲透能 P : t_n 時間の給水量 t_n : 流下の時間から降雨の止むまでの時間 t_r : 残留流下時間 Q : t_n 時間の流下量と t_r 時間の残留量

こうして得られた滲透能は測定した降雨強度の範囲内においては雨の強度とともに増し、一定不変と考えられる最小滲透能と紛らわしいので、これを前と同様に滲透度と呼ぶこととする。

本滲透計を1号, 3号の試験区付近の, それぞれの植生の相似た状況の箇所に埋設し, 雨量強度を任意に種々変化させて滲透度を測定した。

滲透度 (y) と雨量強度 (x) とを図上に plot すると, ほぼ直線関係が推定されるので (1号A区付近ではその点の散らばりがよくないが, $r = +0.46$ で有意水準 10% で相関ありと認められた) その最小二乗式を求めると,

1号A区付近

$$y = 0.15x + 14.0$$

1号B区付近

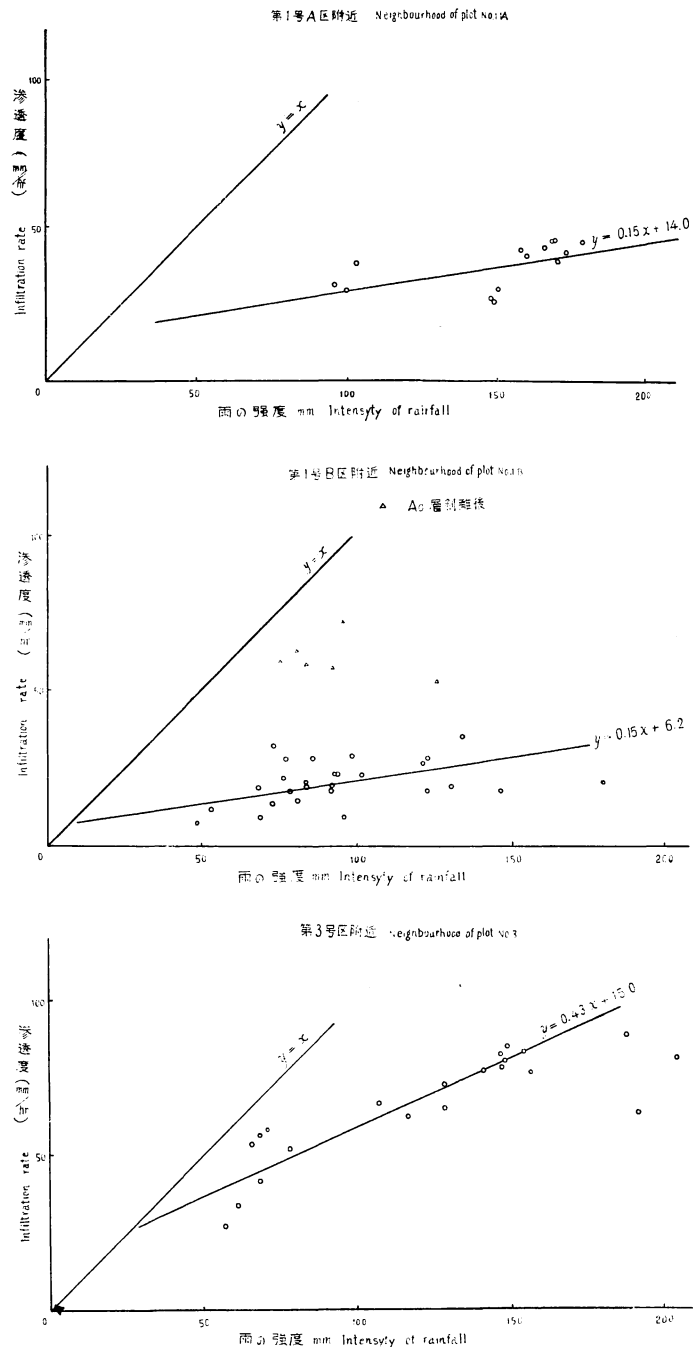
$$y = 0.10x + 6.2$$

3号区付近

$$y = 0.43x + 15.0$$

と, その滲透度は雨の強度に応じて増加の傾向がみられる。本関係式においては理論上 $x > y$ であるから, 図上で $y = x$ 直線の交点より

左側の部分は意味がない。またその両直線の交点の x 座標は地表流下を生ずる限界時雨量に該当するものであるが, この値は1号A区で 11.5 mm, B区 8.7 mm, 3号区 26.3 mm となり, 自然降雨の値よりかなり大きくなるのはその流水方法からすれば当然であろう。また, この滲透度と雨の強度との関係は



第8図 降雨強度と滲透度

Fig. 8 Intensity of rainfall and infiltration capacity.

自然降雨の範囲内では前節で述べたように $y=x$ に近い直線で表わされ、また x の特に大きい場合に滲透能の考えに従うならば $y=a$ と x 軸に平行な直線となるべきであり、これを一つの直線で表わそうとするならば誤差が生ずると考えられる。さらにこのような考えにより第 8 図をみると、全面流下を生ずる場合の滲透度（滲透能）は、本図から 3 号区付近のもので 70 mm に近い値が想定されるが、他の 2 例では滲透度は 40 mm 程度に止まっているようでもあるが、はつきりしたことはいえない。この傾向は自然降雨の際の流下が 3 号区にやや多いとする既述の傾向と背馳するようであるが、その場合の流下は林地表層の落葉層における部分流下であつて、林地全体の滲透能には著しい影響はないのではないかと解される。しかし、1 号区のように伐根の多いところではその腐朽による局部的滲透能の増加も充分予想されるところで、その判定は非常に困難である。

なお、3 号区付近の上記測定箇所付近に近く埋設したマスグレーブ滲透管にヴューレットで給水して測定した 1 時間滲透量は、 $30\sim 50\text{ mm}$ で、この値に比較して傾斜面滲透計による値はやや過大ではないかと思考される。

要するに上図の傾向からして、雨量強度の強い場合の滲透度は 3 号区の方が 1 号区より大きいと見てよいのではなからうか。また図に見られるように、腐植層剝離後はかえつてその滲透度を増加させる傾向がみられたが、その原因については地表面の攪乱によると考えられるが、一方 KITTREAGE²⁾ のいうようにその上部の落葉層が水みち的作用をして水の流下を容易とすることもあり得よう。しかし一般には植生剝離が流下を増加する傾向のあることは 3 節でも明らかであり、したがつて上記の現象は一時的なものかと判断される。

3. 林地地表保留量

林地が地表流下を起すには降雨によつてまず地表の落葉腐植層が水で飽和され、土の滲透能を超過する降雨余剰が地表のクボミを満たしてはじめて本格的な流下を見る。もちろん地表の飽和にいたるまでに若干の流下を見るが、量的には問題とならない。したがつて落葉腐植層の地表流下に及ぼす役割は大きい。

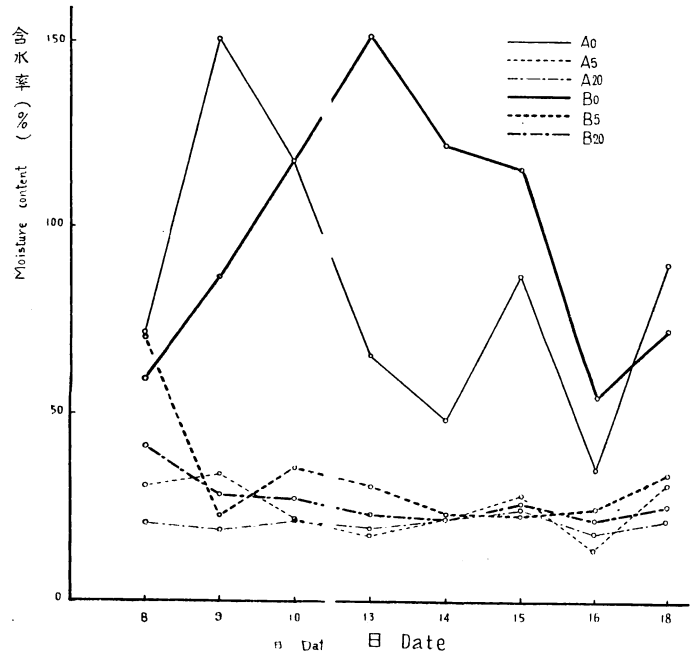
一般にこの層はかなりの孔隙量を有し水分保留力が高い。ことに下部土壌が不滲透性の場合には一時貯留として多量の水が保留される。この腐植表土層の水分保留量を調査するため、1、3 号区内で落葉を除いた腐植表土層を土壤採集筒（径 11.5 cm 、深 4.0 cm ）で採取し、深さ 1.0 cm の水中に浸し飽和せしめ、後絶乾してその含水量を求めた（第 9 表）。

1 号区は 3 号区に比べて腐植層がいくらか厚く、含水量が大で B 層においてもかなりの差がみられる（第 9 図）。

第 9 表 表土の含水量
Table 9. Maximum water capacity of surface soil.

	1 号 区 Plot No. 1		3 号 区 Plot No. 3	
	A ₀ 層 A ₀ -horizon	B 層 B-horizon	A ₀ 層 A ₀ -horizon	B 層 B-horizon
絶 乾 量 <i>gr</i> Absolutely dry soil weight	99	235	280	470
容 水 量 <i>gr</i> Maximum water capacity	318	261	242	180
雨 量 換 算 <i>mm</i> Maximum water capacity	30.9	25.1	23.3	17.3

両層を通じてその水分保持能力に約3割の差があり、このうち A₀ 層は右図のように降雨前後の時期によつてその含水率の変化ははなはだしく(50~150%)、地下 5 cm 以下の B 層ではその変化が少なく、常に 20~40% の値を示しており降雨時の保留能力が小さい。またその水分の滲透速度を測定したところ、3 号区は 1 号区よりやや疎水性の傾向がみられた。以上は腐植層以下の保留量であるが、地表のクボミや落葉の上に一時保留される量は、一般に山腹斜面のように傾斜の急な所では少なく、傾斜と反比例して



第9図 降雨後の土壌水分の変化
Fig. 9 Change of soilmoisture.

減ずるといわれている。この貯留量は一部は滲透し残りは地表流下に関係あるもので、地表流下量と一時貯留量とは理論的には $q^{(1)} = K\theta M^{(12)}$ (M は流水の Turbulance に関する常数である) の関係がある。総降雨量 i 、全滲透量 f 、地表流下量 q が求められれば一時貯留量 θ は $\theta = i - (q + f)$ として求められるはずである¹⁾ が、 f は時間的にも変化するものであるから、その推定は困難である。

前節で述べた人工降雨の記録を用いて式から θ の近似的な値を推算する(第10表)。

この場合雨の強さ i は一定であるが、滲透能 f も降雨中一定であると仮定する。実際には降雨前斜面

第10表 一時貯留量と流下量
Table 10. Surface detention and surface run-off.

	1 号 付 近 Neighbourhood of Plot No. 1						3 号 付 近 Neighbourhood of Plot No. 3					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
総 雨 量 cc Total precipitation	860 (76)	640 (72)	1530 (180)	1130 (134)	1240 (146)	800 (93)	1610 (64)	1240 (127)	1390 (148)	1730 (80)	1290 (98)	1260 (57)
滲 透 量 cc Infiltration	84	121	178	297	142	186	1294	660	744	1235	786	1035
流 下 量 cc Surface runoff	550 (48)	375 (42)	1062 (125)	640 (75)	841 (99)	448 (52)	207 (8)	291 (29)	341 (36)	312 (14)	303 (23)	153 (7)
一時貯留量 cc Surface detention	226 (2.5)	144 (1.6)	292 (3.2)	193 (2.1)	227 (2.7)	166 (1.8)	109 (1.2)	289 (3.2)	305 (3.4)	183 (2.0)	201 (2.2)	72 (0.8)

表中の () は mm を表わす。

にかなりの量を散水するため、その期間中は滲透能の時間的变化は割合に小さい。滲透量は 1 時間滲透能に降雨時間を乗じて求めた。なお、降雨時間は流下が充分 Equilibrium に達してから止めたもので、5 ～15 分の間にあり一定しない。

表の 6 例について見るに、林地の一時貯留量はきわめて小さく、かなりの地表流下量を示す場合、たとえば 1 号区付近の No. 5 $150 \text{ cc/min} = 100 \text{ mm/hr}$ の流下の際でもその貯留量は 2.7 mm にすぎない。一方両区の貯留量にもほとんど差がみられない。また $\log q$ と $\log \phi$ とは相関が高いのでその関係式を求めるに、

$$1 \text{ 号付近} \quad q = 22.4 \phi^{1.37}$$

$$3 \text{ 号付近} \quad q = 5.5 \phi^{1.71}$$

となつて渦流の流速公式に近いものが得られるが、この場合の流速はほぼ 1 cm/sec くらいできわめて遅く、半ば伏流に近い形で流れるものとみられる。等しい貯留量でも下部構造の種類によつて流下量にかなりの差が生ずるもようであるが、上記の資料程度ではその差を論ずることに無理がある。いずれにしろ一時貯留量は腐植層の保水効果に比べるときわめて小さい。

結 論

1) 年流下量、月流下量、一降雨による流下量とも、稚樹、幼壮令林、老令林の順に増加しており、稚樹、草生区が治水的にみて最も好ましい。その原因は一般に樹令の小となるほど下部植生が密であることや、老令林では根に寄生する菌根による滲透度の低下、また Pine litter による流下の促進が推定される。これは当試験地の谷の流量の傾向とは異なるが、治水的に見たこのような傾向を一般的なものとして断定することができない。しかし、老令林でも裸地に比べて流下量は断然少なく治水機能は十分である。

2) 季節別にみて暖候期より冬期の流下量が高い。これは冬期に地表凍結することや、土壤微生物、樹根の作用が不活発化して滲透能が低下するためと考えられる。

3) 地表流下開始の限界は 10 mm 前後で、林相別の差はほとんどない。林地の湿潤なときは、それはやや小さくなる傾向がみられるが、一方その乾燥は限界雨量を多くするとはいえない。

4) 最大流下量は雨量強度によつて最も大きく影響される。同じ雨量強度に対するその値は林相別に 1) と同じ傾向にあるが、いずれも量的には雨量に比較してきわめて少ない。

5) 試験区の最大流下量を同流域の北谷流量のピークと比較すると、老令林当時は有意な相関があるが伐採後では相関はない。これは前期ではピーク流量における Surface flow の Weight が大きいに対し、後期では Subsurface flow の影響が大きいためである。したがって北谷の Lag は後期より前期の方がいくらか短い。

6) 1 号 B 区の下部植生の刈取りによつて流下量は一時やや減退の傾向がみられるが、その原因は下刈りによる地表植生の乾燥でその水分保留能力の増加に帰すべきものと思われる。しかし、その影響も腐植層の厚さ、下草の密度によつて変るもので一般的な結論はできない。

7) 地表流下記録を滲透の面からみれば林相別の差はごく小さく、いずれも雨の大部分が滲透しその関係は y (滲透量) $= x$ (雨量) に近い直線式で表わされる。また、林地では 5 mm 程度までの超過雨量による流下が最も多いようであり、 10 mm 以上の超過雨量とは関係がないようである。

8) 傾斜面滲透計によつて 1, 3 号地付近で滲透度を実測の結果は、滲透度は雨量強度とともに増加する傾向があるが、3 号区では 70 mm 付近で一定値に近づいているようでもあるが、1 号区でははつきり

したことはいえない。

9) 林地の水分保持力はきわめて大きく、特に A₀ 層において顕著であり、また 3 号区は 1 号区に比べてやや疎水性であり、その水分保持力も劣る。地表の水分の一時貯留量はその流下量に比べて非常に小さい。

要するに林地の水分保留力ならびにその滲透能が大きいため、一般に地表流下は比較的になくその治水作用は大であるが、これを林相別にみて稚樹から幼壮老と樹令の高くなるにつれて、流下量も増加の傾向がみられ、特に老令林においていちじるしい。しかし、この傾向も下草の密度、落葉腐植層、土質により大きく影響されるので、普遍的なものと断ずるわけにはゆかない。

文 献

- 1) 川口武雄：地表流下雨量について，森林治水試験集報 20，(1944，昭．19) p. 7
- 2) 上野巳熊：有林地と無林地の地表流下量の比較，森林治水気象集報 10，(1920，大．9) p. 47
- 3) BENNETT, Haugh Hammond: Soil conservation, McGraw-Hill Book Co. (1939)
- 4) 白井純郎・近藤松一・大原忠一：伐採による流量変化の総合的考察，林業試験場研究報告 68，(1954，昭．29) p. 96
- 5) 宮崎 榑：四国森林植生と土壤形態との関係について，興林会 (1942，昭．17)
- 6) KITTRIDGE, Joseph: Forest influences. McGraw-Hill Book Co. (1948)
- 7) BAVER, L. D.: Soil physics John Wiley & Sons, Inc. (1948)
- 8) 物部長穂：水理学，岩波書店 (1934，昭．9)
- 9) 中安米蔵：雨量より洪水量の推定について (1950，昭．27)
- 10) 平田徳太郎訳：林業試験場集報 62，(1946，昭．26) p. 122
SHERMAN, L. K.: Determination of infiltration from surface-runoff (Trans. Ameri Geophs. Union) (1938)
- 11) 平田徳太郎・黒鳥 忠・木立正嗣：浸透，土壤，地下水に関する研究，森林保全研究会，(1953 昭．28)
- 12) LINSLEY, R. K. and others: Applied hydrology McGraw-Hill Book Co. (1949)

Experiment in the Surface Run-off of Different Forests.

Junro SHIRAI and Matsuichi KONDO

(Résumé)

This experiment was begun in 1933, as a link of the experiment in the water conservation function of the pine forest at Tatsunokuchi, which has been carried on since 1937. But it was interrupted in 1945 and resumed in 1951, and since that time has been continued till the present.

The outline in the former and the later period of two plots, No. 1 and No. 2, which are covered in this report, is described in the table of the preface.

In this report we intend to analyse the difference of surface run-off between each class of vegetation in the upper table, and compare flood control and water conservation functions of those vegetations in reference to the total flow of the Kitadani (same watersheds as those plots).

Results obtained are:

As shown in tables 1, 2, and Fig. 1, the annual monthly and individual surface run-off decreased in the latter moreso than in the former period in No. 1 plot, but No. 3 plot showed a contrary tendency. Judging from this result, surface run-off in pine forest was probably increasing with the growing of pines. We presume it was due to the following causes: the first is that density of lower vegetation in pine forest becomes thinner with the growing of pines, and the second is due to the function of ectrophie mycorrhiza which lives on the root of *Pinus densiflora* S. et Z. The third is easy running of surface water upon the pine litters. Besides these, the increasing of infiltration capacity by decay of the pine stumps will also be a cause, but we cannot confirm which of those causes are most possible.

On the other hand, each surface run-off and its peak in any of the plots, are both very little as compared with the total run-off of the Kitadani. By examining heights and lags of these peaks from automatic records, we presume the peak run-off of the Kitadani in the former period was more effected by surface run-off than by sub-surface run-off, but in the latter period the contrary applies.

Cutting of undergrass within plot 1B had very little effect on the surface run-off.

On calculating infiltration capacity from surface run-off and rainfall, those of each plot are all large, and there is little difference among the plots.

From the correlation coefficient between rainfall excess and surface run-off, we found that surface run-off was in close connection with rainfall excess over 3, or 5 mm/hr, but had little connection with that over 10 mm/hr. Accordingly, surface run-off should probably rise from parts having infiltration capacity lower than 5 mm/hr.

In short, from the results of the above observation, we conclude that all the forests have a large conservation function and the higher infiltration capacity and so, those flood control functions are excellent. Differences among the above function of each vegetation are very little as compared with bare land. Particularly speaking, its function decreases with the growing of pines.

前 期
Former period



写真 1. 第 1 号 区
Phot. 1 Plot No. 1



写真 2. 第 3 号 区
Phot. 2 Plot No. 3

植 生 の 変 移
Change of vegetation

後 期
Later period



写真 3. 第 1 号区
Phot 3 Plot No. 1



写真 4. 第 1 号区
Phot. 4 Plot No. 1



写真 5. 第 3 号区
Phot. 5 Plot No. 3

植生の変移
Change of vegetation