

森林の水土保持機能の定量化に関する研究 : 第2報 1983年水文資料による流出解析

著者	地頭菌 隆, 春山 元寿
雑誌名	鹿児島大学農学部演習林報告
巻	13
ページ	159-177
URL	http://hdl.handle.net/10232/966

森林の水土保持機能の定量化に関する研究

第2報 1983年水文資料による流出解析

地頭菌 隆・春 山 元 寿*

(砂防工学研究室)

Quantification of the Soil and Water Conservation Function of Forest

II. Analyses of Hydrological Data Observed in 1983

Takashi JITOSONO and Motohisa HARUYAMA*

(Laboratory of Erosion Control)

まえがき

水源かん養，洪水調節，土地保全等に代表される森林の水土保持機能の解明と定量的評価を行うための基礎資料を得ることを目的として，鹿児島市の水源地帯である甲突川上流域に鹿児島県林務部の施設として森林理水試験区が設定されている。第1報⁴⁾において試験流域の地形，地質，土壌および植生調査結果が報告された。試験流域における雨量および水位観測は1982年7月から行われている。まだ観測期間が短く，十分な観測記録が得られたわけではないが，試験流域の流出特性を明らかにするため，1983年の1年間に得られた水文資料を用いて流出解析を行ったので，その結果について報告する。

試験流域の概況

試験流域は，Fig.1に示されるように，鹿児島市を貫流する甲突川支川の川田川上流域に設定されている。試験流域の地形，地質，土壌および植生調査結果については第1報⁴⁾で述べられたのでここではその概略を説明する。

試験流域は，Fig.2に示されるように，ひずんだ扇形をした平面形状をなし，長軸方向約1000 m，最大幅約540 m，面積27.41haである。また高度は標高250～485 mに位置している。

地質は新第三紀ないし第四紀更新世と考えられる玄武岩質安山岩，凝灰質堆積岩類および安山岩によって構成されている。

斜面形・堆積区分調査によると，面積的には匍行土面が最も多く，次いで緩斜面，急峻匍行土面の順であり，溪間堆積面および崩壊土面は少ない。

植生については，流域面積の95.5%を森林が占め，その人工林率は非常に高く86.1%である。天然林は壮齢広葉樹林のみである。人工針葉樹林はスギ，ヒノキであり，人工混交林はスギと広葉樹からなる。

*鹿児島大学工学部

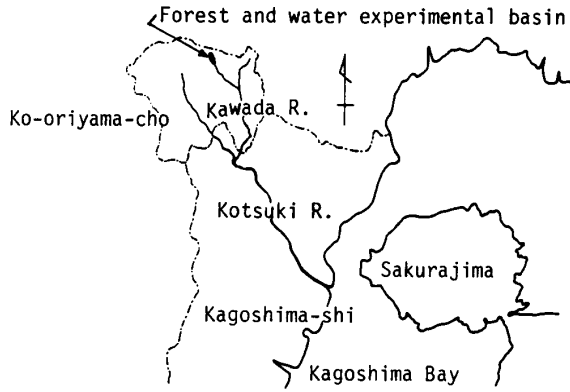


Fig. 1. Location of experimental basin.

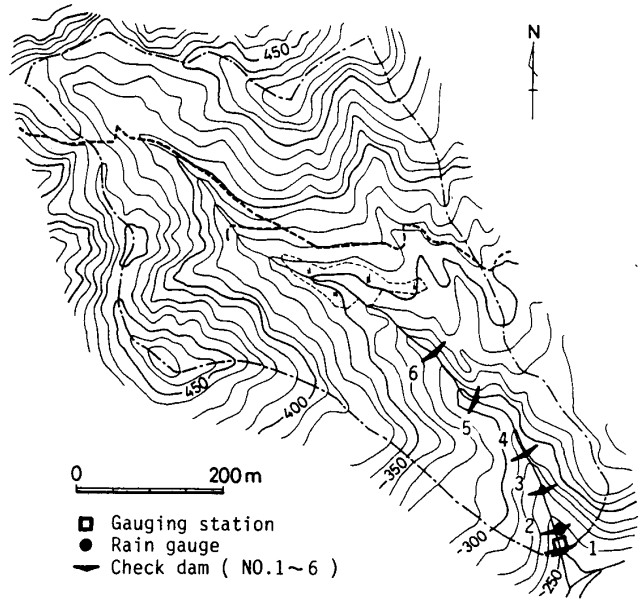


Fig. 2. Topography of experimental basin.

観測方法

量水施設は、Fig.2 に示されるように、試験流域の下流端に設置され、湛水池、量水ぜき、水位計、雨量計および計器室からなる。また、量水施設上流部には、湛水池への土砂流入を防止するため治山

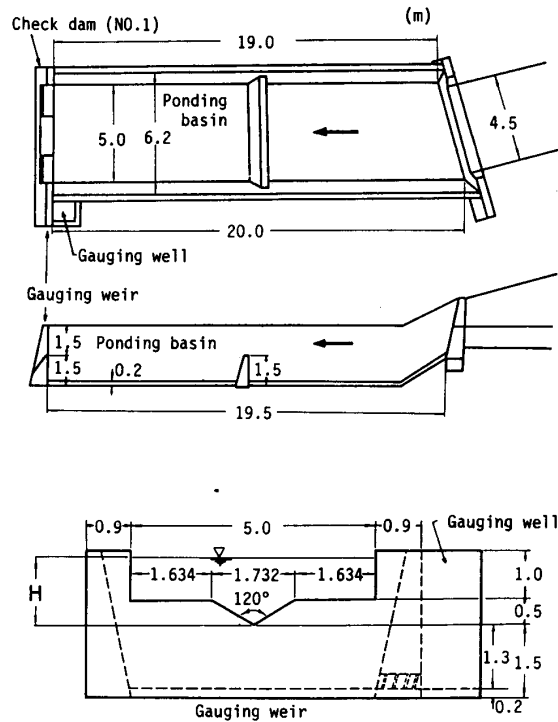


Fig. 3. Structure of gauging station.

ダムが5基（No.2,3,4は1982年以前に完成，No.5,6は1983年2月に完成）設置されている。

量水施設の構造図をFig.3に示す。

湛水池は，幅6.2 m，長さ19.5 m，ノッチ最下点部の水深1.3 mの大きさを持ち，整流の役割をしている。

量水せきは，頂角120度の刃形三角せきと広頂長方形せきからなる複合せきである。低水位（越流水位50 cm以下）に対しては刃形三角せきによって対応し，豪雨時の高水位（越流水位50 cm以上）に対しては広頂長方形せきを加えた断面によって対応する。

水位は，波浪の影響をなくするために貯水を観測井に導き，フロートを介して測定され，また，雨量は1回転倒0.5 mmの転倒ます型雨量計により測定され，計器室内の記録計に1ヶ月間連続記録されている。

水位・流量の関係

水位・流量の関係を表す水位・流量曲線は25回の実測により決定した。水位が低い場合の流量は三角せき越流水量の直接測定により，水位が高い場合の流量は湛水池において棒浮子および小型プライス流速計を用いて測定した接近流速と流水断面積により求めた。

水位・流量曲線はFig.4に示され，水位を H (cm)，流量を Q (m^3/s)とすると次式で表される。

$0 < H \leq 50$ cmの場合

$$Q = 2.979 \times 10^{-5} H^{2.514} \tag{1}$$

$50 \text{ cm} < H$ の場合

$$Q = 5.806 \times 10^{-6} H^{2.932} \tag{2}$$

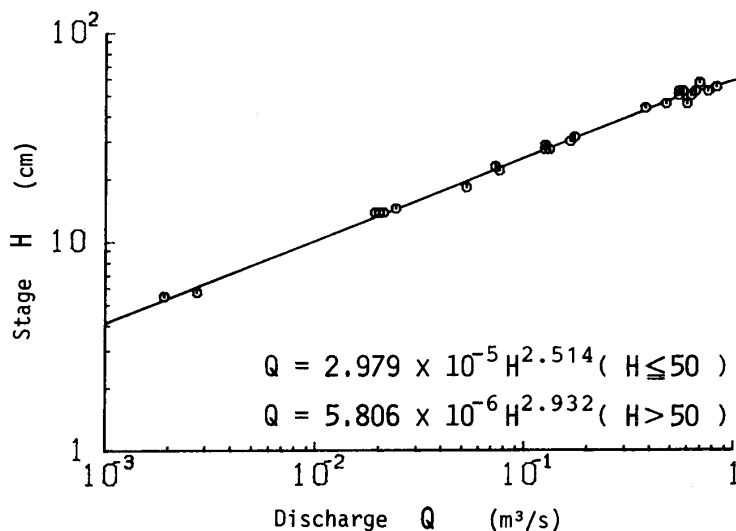


Fig. 4. Relationship between stage and discharge.

ただし、(2)式は水位 50～56 cm の範囲で得られた 6 回の実測値から算出したものであり、水位 56 cm 以上の場合は不明である。水位 56 cm 以上を記録したのは、1983 年においては 6 月 21 日 10 時 40 分から 13 時 30 分まで（最高水位は 64.0 cm，11 時 30 分）、および 7 月 15 日 4 時 40 分から 5 時 20 分まで（最高水位は 58.6 cm，5 時）の 2 回であった。ここでは水位 56 cm 以上の場合も(2)式が成り立つものと仮定して解析を行っている。

観測結果と考察

1. 降雨状況

鹿児島市における 1983 年の降水量と年平均降水量を Table 1 に示す。1983 年は 11，12 月の降水量が少なく、特に 11 月の降水量は鹿児島地方気象台における観測史上最低を記録した。他の月は年平均並みかあるいはそれ以上で、3～6 月および 9 月の雨量が特に多くなっている。1983 年は年降水量が平年値より約 670 mm も多く、多雨年であったといえる。

試験流域においては 1982 年 7 月から雨量観測が行われている。試験流域における 1983 年の降雨状況は Table 2 に示され、鹿児島市における観測記録と同傾向がみられる。1983 年において、最大時雨量は 44.5 mm（9 月 4 日，15：00～16：00），60 分間当りの最大雨量（最大 60 分間雨量）

Table 1. Precipitation in 1983 and normal annual precipitation (at Kagoshima Local Meteorological Observatory)

Month	1983	Normal year*
1	88.5mm	95.2mm
2	97.5	106.4
3	324.5	146.9
4	453.0	256.0
5	413.5	274.7
6	633.0	474.7
7	296.0	322.6
8	178.5	208.6
9	435.5	210.6
10	81.0	108.0
11	26.5	91.5
12	20.0	79.5
Year	3,047.5	2,374.7

* Statistical duration is thirty years from 1951 to 1980.

Table 2. Conditions of rainfall and runoff (in 1983)

Month	Rainfall (mm)	Runoff (mm)	Runoff ratio (%)
1	79.0	14.1	17.8
2	135.0	37.3	27.6
3	347.0	229.6	66.2
4	397.5	374.9	94.3
5	343.5	230.9	67.2
6	664.0	644.3	97.0
7	310.0	333.2	107.5
8	222.5	45.5	20.4
9	466.5	353.7	75.8
10	92.5	41.4	44.8
11	30.0	8.4	28.0
12	41.0	4.1	10.0
Year	3,128.5	2,317.4	74.1

は 57.0 mm（9 月 4 日，15：20～16：20），最大日雨量は 157.5 mm（6 月 21 日）であった。

2. 流出状況

1983 年の年間ハイドログラフを Fig.5 に示す。最大流量は 6 月に、最小流量は 12 月に発生している。したがって、この流域での水年は 1 月～12 月と定めてよい。また、月ごとの流出高および流出率を Table 2 に示す。4 月，6 月および 7 月の流出率は非常に高い。これは、Fig.5 にみられるように、前月の終りからその月までの降雨が原因であると思われる。年降雨量は 3128.5 mm，年流出高は

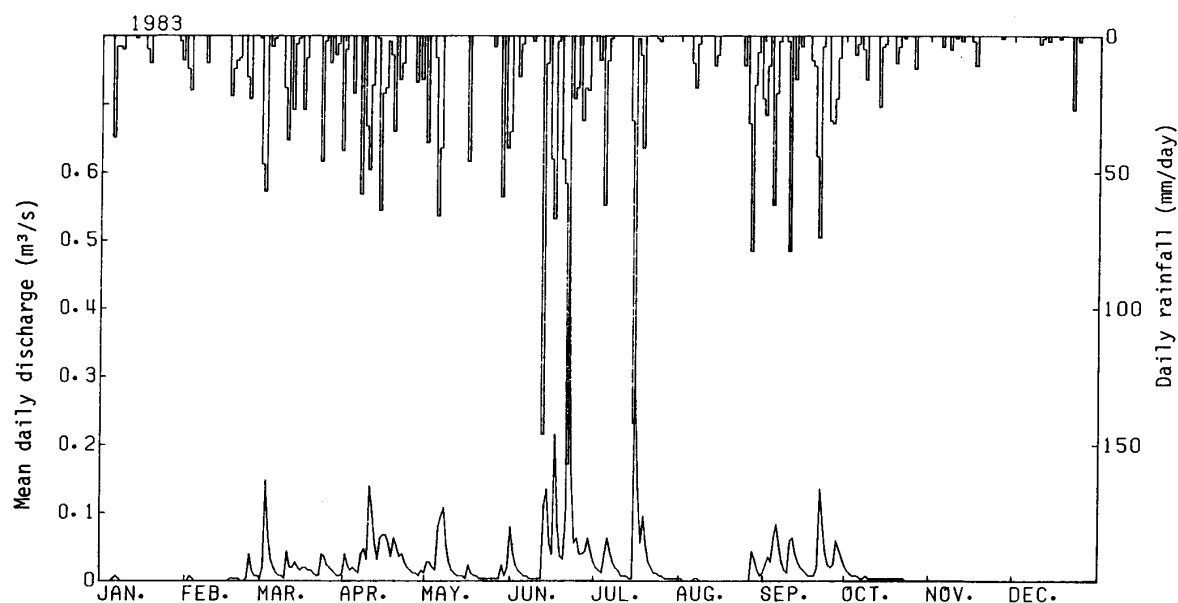


Fig. 5. Annual hydrograph in 1983.

2317.4 mm, および年流出率は 74.1 %であった。水収支期間を 1 年とすると流域内貯留量の変化量が無視されるから、年降雨量と年流出高の差 811.1 mm (約 2,223,000 m³) がこの流域の 1 年間の消失量 (損失量) となる。消失量には、樹木などの植生による遮断損失量, 蒸散量, 地面からの蒸発量, 地下水流として他の流域に流出する深層透過量等が含まれる。

1983 年においては、豊水比流量^{注 1)}0.076 (m³/s/km²), 平水比流量^{注 2)}0.019 (m³/s/km²), 低水比流量^{注 3)}0.004 (m³/s/km²), および渇水比流量^{注 4)}0.001 (m³/s/km²) という結果が得られた。また、最大流量は 1.147 (m³/s), 最小流量は 0.0002 (m³/s) であり、最大流量と最小流量の比で定義される河況係数は 5735 であった。

3. 短期流出特性

試験流域の流出特性を明らかにするために、1983 年の 1 年間の観測資料を用いて短期流出解析を行った。

(1) 直接流出量の算定

山地小流域における短期流出のハイドログラフは、表面流出, 中間流出 (早い中間流によるもの), および地下水流出 (遅い中間流によるものを含む) の 3 つの成分から構成され、表面流出量と中間流出量は直接流出量, 地下水流出量は基底流出量と呼ばれている。

直接流出量の算定には種々の方法が提案されているが、ここでは、Fig.6 に示されるように、流量の立ち上がり点 A 点と G 点を直線で結び、その直線とハイドログラフで囲まれる斜線部分を直接流出量とした。G 点の決定は以下の方法による。流量を対数目盛、時間を算術目盛とした片対数紙上にハイドログラフを描くと、その減水部はいくつかの直線からなる折線に近似される。その第 2 折曲点を G 点とした。つまり、第 1 折曲点の時刻で表面流出が、第 2 折曲点の時刻で中間流出が終了した

注 1) 1 年間のうち 95 日間はこれを下ることがない比流量。

注 2) 1 年間のうち 185 日間はこれを下ることがない比流量。

注 3) 1 年間のうち 275 日間はこれを下ることがない比流量。

注 4) 1 年間のうち 355 日間はこれを下ることがない比流量。

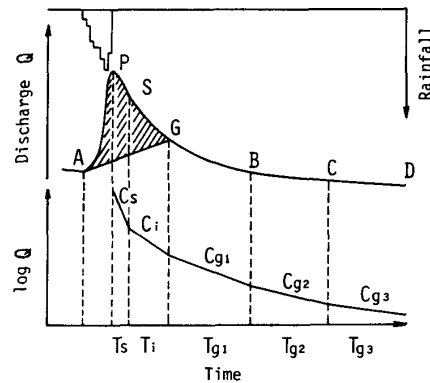


Fig. 6. Determination of direct runoff and recession constants.

と考えた。ひと雨の降雨状況によってはハイドログラフに表面流出成分あるいは中間流出成分が現れない場合がある。この場合第1折曲点をG点とした。G点の決定には後述する減水定数を参考にしている。

直接流出は、降雨後数時間から50時間程度で終了している。

(2) 流出と降雨の関係

1983年の1年間に得られた短期流出データをTable 3に示す。以下このデータの解析結果について述べる。

(a) 最大時雨量と総雨量の関係

直接流出高をパラメーターとして最大時雨量と総雨量の関係をFig.7に示す。両者の間には両対数紙上において直線的な関係が認められる。直接流出高は総雨量の増加に対して明確な増加を示すが、最大時雨量の増加に対しては必ずしも明確な増加を示していない。これは、直接流出量が降雨強度よりも総雨量により深く関係しているためと考えられる。

最大60分間雨量と総雨量の関係においても上記のことは認められた。

(b) 直接流出高と総雨量の関係

直接流出高 Q_d と総雨量 P の関係をFig.8に示す。両者の関係は実線で示され、

$$Q_d = 1.04 \times 10^{-3} P^{2.26} \quad (\text{相関係数 } r = 0.96) \quad (3)$$

となり、危険率1%で有意である。総雨量が増加すると直接流出量は指数関数的に増加することがわかる。

流域に降雨があった場合、その流域からの流出量は、流域の被覆状態、地形、地質、土壌構造、土壌含水状態、降雨特性等の多くの因子によって左右される。ひとつの流域についても降雨開始時の土壌の含水状態および降雨特性によって流出量は影響される。降雨開始後、直接流出が始まるまでの降雨分は初期損失量と呼ばれており、その指標として初期流量あるいは先行降雨が取り上げられることが多い。初期流量は、一般に基底流量が季節によって変化するので必ずしも流域内の乾湿度を反映するとは限らない。しかし、南九州のような多湿、亜多湿帯では1年を通じて季節の変動が少ないため、初期流量は初期損失量の指標になりうるといわれていることから¹⁾、ここでは初期流量をその指標に用いることとした。Fig.8は初期比流量（増水開始時の比流量）をパラメーターとしている。破線ⒶおよびⒷは、初期比流量が0.02 (m³/s/km²) 以下の場合および0.05 (m³/s/km²) 以上の場合の Q_d と P の回帰曲線をそれぞれ示したものである。同程度の総雨量であっても初期流量が大きい場合、

Table 3. Hydrological data used in analyses (in 1983)

No.	Date	Rainfall				Direct runoff			Initial specific discharge ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$)	Peak specific discharge ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$)
		Total Rainfall (mm)	Duration (hr)	Maximum hourly rainfall (mm/hr)	Maximum rainfall per sixty minutes (mm/60min)	Runoff (mm)	Duration (hr)	Runoff ratio (%)		
1	2.24*	39.0	11	12.0	13.5	10.563	42	27.1	.00864	.38083
2	3.2	104.5	23	17.0	18.5	62.674	72	60.0	.01396	1.10073
3	3.10	56.0	12	10.5	11.5	8.855	33	15.8	.01780	.30737
4	3.13	26.5	11	5.0	5.5	1.368	20	5.2	.05732	.14286
5	3.16*	24.5	6	9.5	10.0	2.037	17	8.3	.04307	.15995
6	3.23*	46.5	9	12.0	15.0	10.429	28	22.4	.02290	.44737
7	4.1*	39.5	9	9.5	13.0	4.873	20	12.3	.02574	.28496
8	4.4*	19.5	3	12.0	18.5	1.143	9	5.9	.05613	.15557
9	4.7*	57.5	12	10.5	15.0	9.062	25	15.8	.03549	.39973
10	4.10	98.5	39	16.0	17.5	25.831	41	26.2	.10003	.72494
11	4.14*	55.5	8	11.5	13.5	6.457	14	11.6	.07689	.53405
12	4.22*	21.0	4	9.0	9.5	2.163	13	10.3	.11389	.24034
13	4.27*	17.5	3	14.5	16.0	.511	8	2.9	.03374	.08270
14	4.29*	17.0	2	8.5	13.5	1.578	12	9.3	.02648	.15126
15	5.1*	37.0	10	10.5	13.5	3.045	16	8.2	.04013	.25764
16	5.7	113.0	49	12.0	12.0	53.121	77	47.0	.05496	.56188
17	5.16*	46.0	11	11.0	13.0	3.966	20	8.6	.01346	.27875
18	5.28*	59.0	4	24.5	25.0	5.933	21	10.1	.00686	.42315
19	5.31	77.0	26	9.5	9.5	23.338	55	30.3	.02429	.45562
20	6.3*	13.5	7	4.5	5.0	.201	9	1.5	.05732	.07133
21	6.12*	156.0	25	40.5	50.5	66.028	49	42.3	.00826	1.40529
22	6.16*	111.5	21	18.5	22.0	65.416	52	58.7	.10170	1.39713
23	6.21	257.0	51	26.5	30.0	233.564	102	90.9	.08123	3.81294
24	7.4*	62.0	10	23.5	33.5	9.638	16	15.5	.03038	.66086
25	7.15	173.5	27	35.0	38.5	133.897	64	77.2	.01396	3.23179
26	7.18*	41.5	6	29.0	33.5	13.382	21	32.2	.13876	.70318
27	8.5*	10.0	2	7.5	10.0	.043	10	.4	.00532	.00826
28	8.6*	19.5	2	16.0	17.5	.745	24	3.8	.00591	.03639
29	8.24*	11.0	4	6.0	6.0	.098	13	.9	.00333	.00754
30	8.27	125.0	42	22.5	23.0	17.835	62	14.3	.00377	.61016
31	8.31*	14.0	5	5.5	6.0	.659	12	4.7	.02648	.06733
32	9.1	34.5	19	9.5	17.0	4.676	24	13.6	.03823	.21573
33	9.4	83.5	21	44.5	57.0	23.059	29	27.6	.05155	.91995
34	9.10	81.0	23	25.5	26.0	20.005	46	24.7	.03917	.52497
35	9.20	10.0	4	5.0	5.0	.244	11	2.4	.02090	.03461
36	9.21	116.5	43	20.0	25.5	40.588	52	34.8	.02574	1.08667

*Single peaked hydrograph.

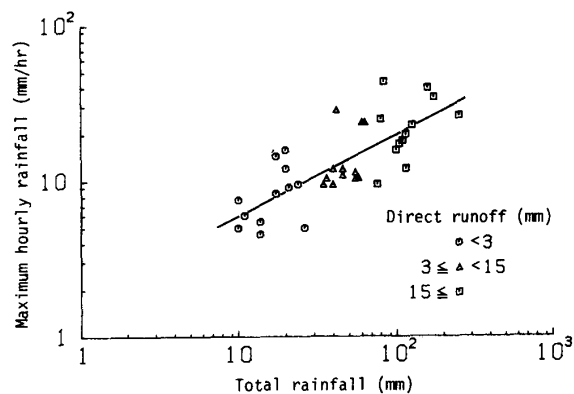


Fig. 7. Relationship between maximum hourly rainfalls and total rainfalls.

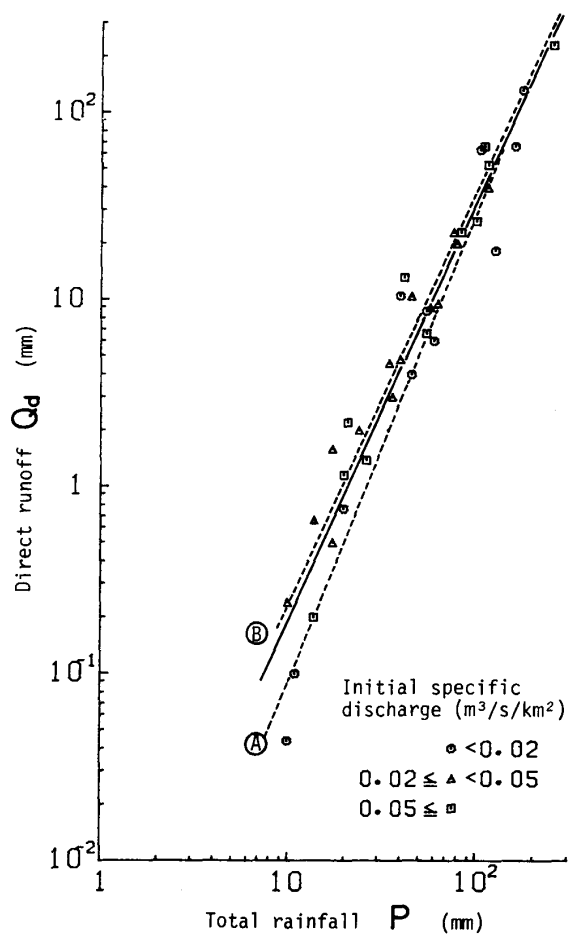


Fig. 8. Relationship between direct runoffs and total rainfalls.

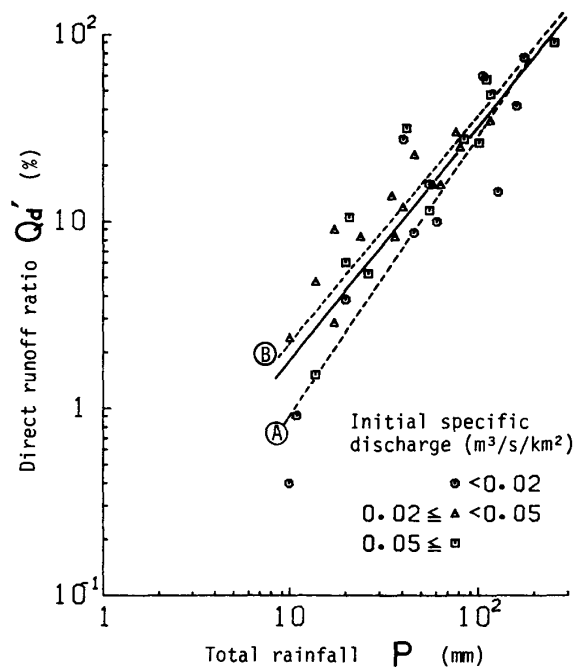


Fig. 9. Relationship between direct runoff ratios and total rainfalls.

すなわち流域の土壌が湿潤な状態にある場合の方が直接流出量は多くなることが認められる。しかし、総雨量が増加すると初期流量の直接流出量に及ぼす影響は明確でなくなる。

(c) 直接流出率と総雨量の関係

初期比流量をパラメーターとして直接流出率 Q_d' と総雨量 P の関係を Fig.9 に示す。両者の関係は実線で示され、

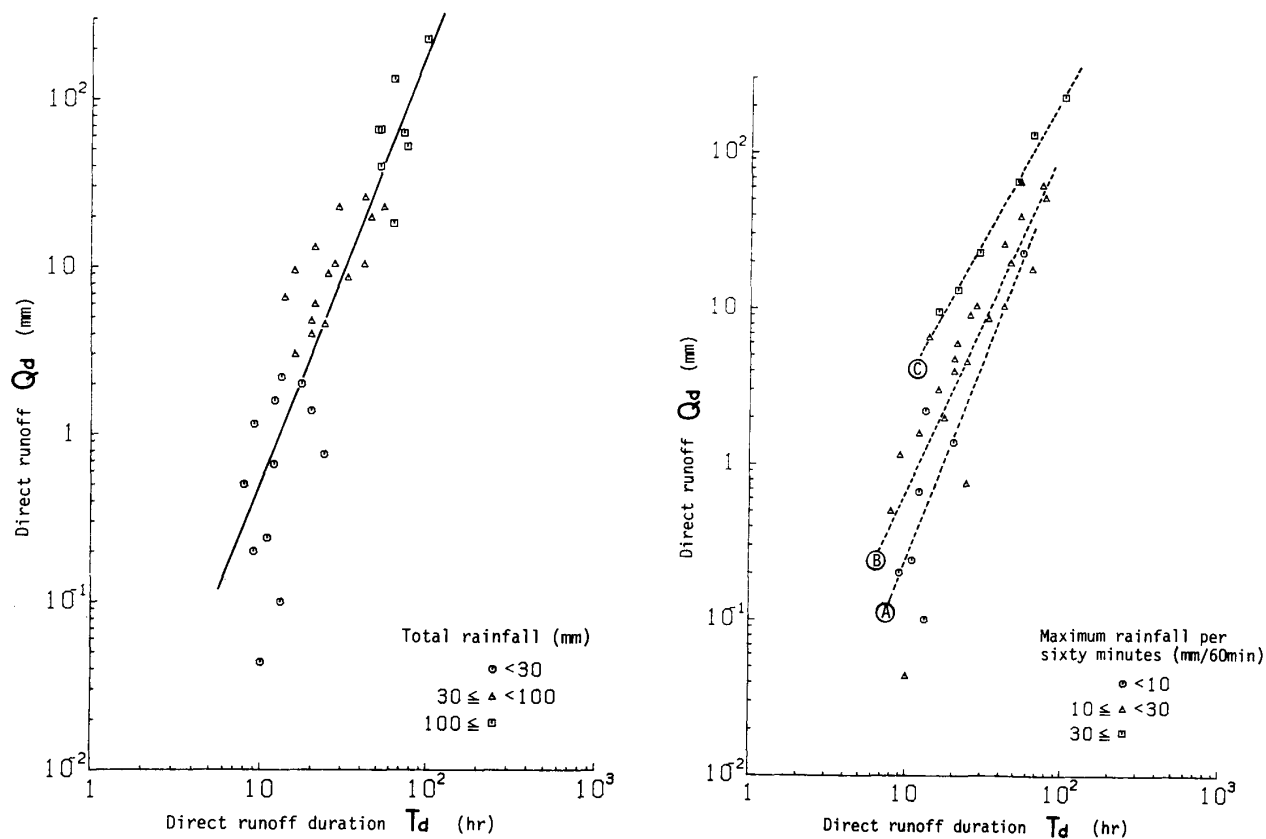
$$Q_d' = 0.102P^{1.26} \quad (r = 0.89) \quad (4)$$

となり、危険率 1% で有意である。破線①および②は、初期比流量が $0.02 \text{ (m}^3/\text{s/km}^2)$ 以下および $0.05 \text{ (m}^3/\text{s/km}^2)$ 以上の場合に対応した回帰曲線である。同程度の総雨量であっても流域の土壌が湿潤な状態の方が直接流出率は大きい。しかし、総雨量が多くなると初期流量の直接流出率に及ぼす影響は小さくなる。

(d) 直接流出高と直接流出継続時間の関係

直接流出高 Q_d と直接流出継続時間 T_d の関係を総雨量をパラメーターとして Fig.10(A) に示す。両者の関係は、

$$Q_d = 1.47 \times 10^{-3} T_d^{2.56} \quad (r = 0.88) \quad (5)$$



(A) Parameter : Total rainfall

(B) Parameter : Maximum rainfall per sixty minutes

Fig. 10. Relationship between direct runoffs and direct runoff durations.

であり、危険率 1% で有意である。回帰曲線上において総雨量の大小の分布をみると、上部ほど総雨量の大きいデータが分布している。すなわち、総雨量が増加するほど直接流出量は増加し、また流出時間も長くなる。

最大 60 分間雨量をパラメーターとした Q_d と T_d の関係を Fig.10(B) に示す。破線 ㉠、㉡および ㉢ はそれぞれ最大 60 分間雨量が 10 mm 未満、10 mm 以上の 30 mm 未満、および 30 mm 以上の場合の Q_d と T_d の回帰曲線であり、すべて高度に有意である。直接流出量と流出時間の関係は降雨強度に依存しているのがわかる。したがって、流出時間が同程度である場合、降雨強度の大きい降雨ほど流出量は多くなる。

直接流出量と流出時間の関係によりハイドログラフの形が想定される。たとえば、流出量が同程度である場合、流出時間が短いほどハイドログラフは鋭い波形を示し、逆に流出時間が長いほどハイドログラフは偏平な波形を示す。

(e) 直接流出率と初期流量

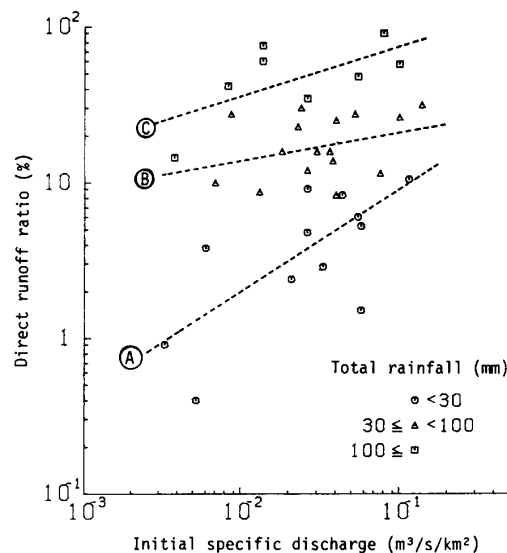


Fig. 11. Relationship between direct runoff ratios and initial specific discharges.

総雨量をパラメータとして直接流出率と初期比流量の関係を Fig.11 に示す。かなりばらついているが、初期比流量が多いほど直接流出率は高くなる傾向にある。破線 ㉠、㉡および ㉢ は総雨量をそれぞれ 30 mm 未満、30 ~ 100 mm、および 100 mm 以上に分類した場合の回帰曲線である。㉠線以外は有意な相関は認められなかったが、直接流出率と初期流量の関係は総雨量で分類され、同程度の初期流量でも総雨量が大きいほど流出率は高くなる傾向にある。

パラメーターを最大 60 分間雨量とした場合の直接流出率と初期比流量の関係は、総雨量の場合ほど明確に分類されなかった。

(3) 増水部の特性

1983 年に得られた観測資料を用いて、流量の増加状況と流量増加に影響した降雨特性の関係について調べた。降雨特性を把握するための因子として、ハイドログラフの上昇開始時刻 1 時間前から

ピーク時までの降雨量 P_r , その間に発生した最大時雨量 P_{hp} , および最大 60 分間雨量 P_{60p} を用い, また, 増水状況を把握するための因子として, 初期比流量 (増水開始時点の比流量) q_i , ピーク比流量 q_p , 増水開始時からピーク時までの所要時間 T_r , ピーク比流量と初期比流量の差 (増加比流量 q_r), および単位時間当りの平均増加比流量 q_r' ($= q_r/T_r$) を用いた。それぞれの因子間の関係を相関係数表として Table 4 に示す。

Table 4. Coefficients of correlation between hydrological factors at rising limb of hydrographs

	P_{hp}	P_{60p}	T_r	q_i	q_p	q_r	$q_r'^{*4}$
Rainfall P_r (mm)	0.76 ^{*1}	0.74 ^{*1}	0.56 ^{*1}	0.16	0.76 ^{*1}	0.88 ^{*1}	0.72 ^{*1}
	0.75 ^{*1}	0.75 ^{*1}	0.56 ^{*1}	0.05	0.80 ^{*1}	0.89 ^{*1}	0.76 ^{*1}
Maximum hourly rainfall P_{hp} (mm/hr)		0.98 ^{*1}	0.10	0.19	0.64 ^{*1}	0.72 ^{*1}	0.79 ^{*1}
		0.97 ^{*1}	0.06	0.04	0.65 ^{*1}	0.75 ^{*1}	0.77 ^{*1}
Maximum rainfall per sixty minutes P_{60p} (mm/60min)			0.11	0.16	0.60 ^{*1}	0.67 ^{*1}	0.75 ^{*1}
			0.07	0.02	0.65 ^{*1}	0.75 ^{*1}	0.77 ^{*1}
Duration of rising limb T_r (hr)				-0.14	0.21	0.34 ^{*1}	0.02
				-0.25	0.22	0.31 ^{*2}	0.00
Initial specific discharge q_i (m ³ /s/km ²)					0.67 ^{*1}	0.32 ^{*2}	0.54 ^{*1}
					0.55 ^{*1}	0.35 ^{*1}	0.45 ^{*1}
Peak specific discharge q_p (m ³ /s/km ²)						0.92 ^{*1}	0.92 ^{*1}
						0.96 ^{*1}	0.93 ^{*1}
Rising of specific discharge ^{*3} q_r (m ³ /s/km ²)							0.88 ^{*1}
							0.95 ^{*1}

- 1) Number of data=58.
- 2) ^{*3}Increase in specific discharge during rising limb of hydrograph, $q_r=q_p-q_i$.
- 3) ^{*4}Mean value of the rising of specific discharge per an hour, $q_r'=q_r/T_r$.
- 4) Upper value : application to regression line.
Lower value : application to regression curve.
- 5) ^{*1} 1 % level of significance.
^{*2} 5 % level of significance.

(a) 増加流量と降雨特性

増加比流量 q_r あるいは単位時間当りの平均増加比流量 q_r' と降雨量 P_r , 最大時雨量 P_{hp} および最大 60 分間雨量 P_{60p} の間には高度の相関が認められる。Fig.12 および Fig.13 は中記の関係の 2 例である。Fig.12 は q_r と P_r の関係 (データ数 $n = 58$) を P_{60p} をパラメーターとして示してある。両者の関係は,

$$q_r = 1.81 \times 10^{-4} P_r^{2.03} \quad (r = 0.89) \tag{6}$$

である。また, Fig.13 は q_r と P_{60p} の関係を P_r をパラメーターとして示してある。両者の関係は,

$$q_r = 1.41 \times 10^{-3} P_{60p}^{1.85} \quad (r = 0.75) \tag{7}$$

である。降雨量あるいは降雨強度が増加するほど初期流量とピーク流量の差は拡大することがわかる。

Table 4 に示される相関係数によって検討すると, q_r' と P_r の関係より q_r と P_r の関係がより強く, また, q_r と P_{60p} あるいは q_r と P_{hp} の関係より q_r' と P_{60p} あるいは q_r' と P_{hp} の関係がより強いこと

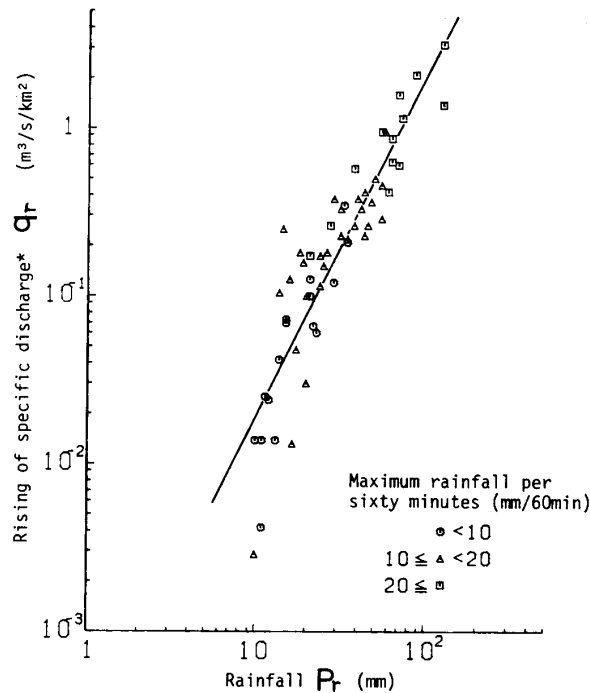


Fig. 12. Relationship between risings of specific discharge and rainfalls.
* Increase in specific discharge during rising limb of hydrograph.

から、降雨量は増加流量の規模に、降雨強度は流量の増加速度に深く関係していることがわかる。

(b) 増加流量と初期流量

増加比流量 q_r と初期比流量 q_i の関係を降雨量 P_r をパラメーターとして Fig.14 (A) に示す。両者の関係は実線で示され、

$$q_r = 0.548q_i^{0.399} \quad (r = 0.35) \quad (8)$$

であり、高度に有意である。破線①および②は降雨量が 20 mm 未満および 50 mm 以上の場合の回帰曲線である。また、 q_r と q_i の関係において最大 60 分間雨量 P_{60p} をパラメーターとした場合を Fig.14 (B) に示す。破線①および②は最大 60 分間雨量が 10 mm 未満および 20 mm 以上の場合の回帰曲線である。Fig.14 によれば、相似した性質の降雨でも初期流量が大きいほど増加流量も多くなることから、初期流量を流域の土湿状態を表す指標として用いることは適当であろう。しかし、破線②付近にプロットされる降雨量あるいは降雨強度の大きい降雨に対しては、初期流量は必ずしもその指標となりえない場合がある。

(4) 減水部の特性

(a) 減水定数の算出

Table 3 に示される短期流出データのピーク後の減水状況を Fig.15 に示す。先に述べたように短期流出のハイドログラフを片対数紙上に描くと、その減水部はいくつかの直線からなる折線に近似された。Fig.6 において、PS 間は表面流出が卓越し、SG 間は中間流出が卓越していると考えられる。G 点以降は地下水流出のみが行われ、GBCD は地下水減水曲線と呼ばれている。各直線は次の指数関数式で表される。

$$Q_t = Q_0 e^{-ct} \quad (9)$$

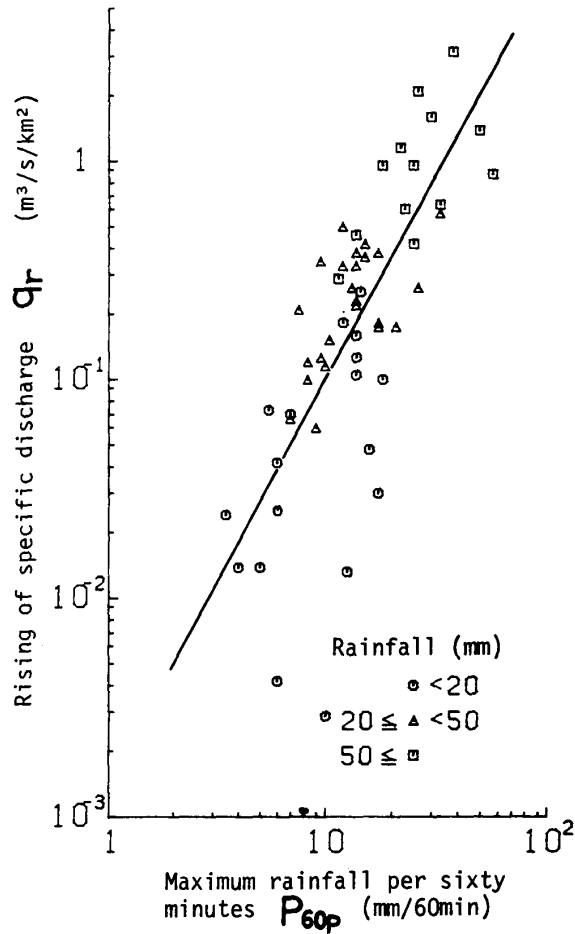


Fig. 13. Relationship between risings of specific discharge and maximum rainfalls per sixty minutes.

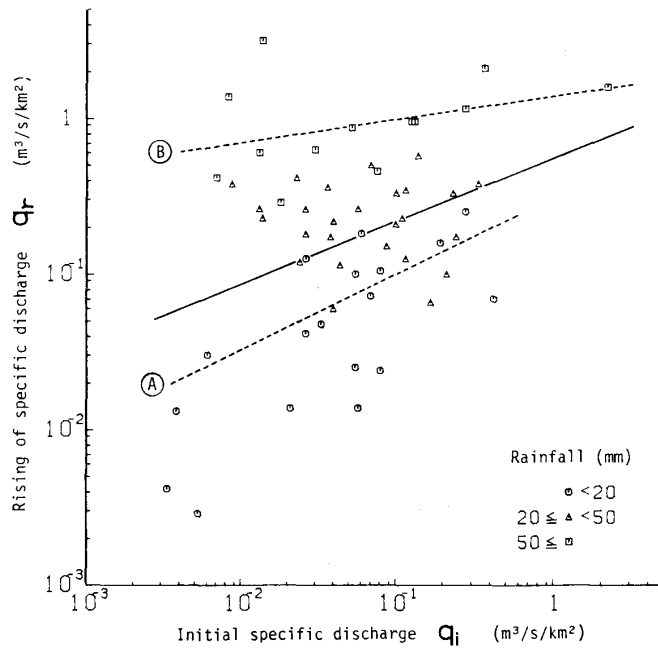
ここで、 Q_0 : 減水曲線のある時点における既知流量、 e : 自然対数の底、 c : 減水定数、 t : 時間、 Q_t : Q_0 から t 時間後の流量である。

Table 3 に示された短期流出ハイドログラフの減水部に(9)式を適用し、減水定数 c を算出した (Table 5)。減水曲線への(9)式の当てはめは最小自乗法により行われ、すべて高度の相関をもって適合されている。

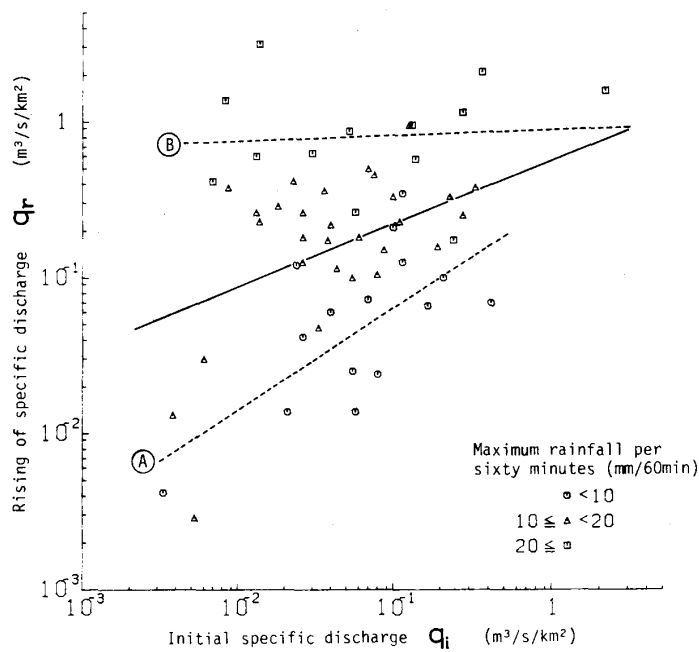
Table 5 における c_s および c_i は、Fig.6 に示されるように、それぞれピーク時から表面流出終了時までの期間 (PS)、および表面流出終了時から中間流出終了時までの期間 (SG) の減水定数であり、 c_{g1} 、 c_{g2} および c_{g3} は直接流出終了時以降の減水定数である。 T_s 、 T_i 、 T_{g1} 、 T_{g2} および T_{g3} はそれぞれの期間の所要時間を示す。

(b) 各減水定数について

表面流出が卓越している PS 間は減水の割合が大きく、減水定数 c_s は 0.063 ~ 0.271 (平均 0.127) (1/hr) と散らばっている。これは、表面流出の卓越している減水部が降雨の時間的分布の影響を強く受けることによると考えられる。表面流出は、ピーク時より 3 ~ 15 時間で、ひと山のハイドログラフ (Table 5 において *1 印の記録) に限ると 3 ~ 9 時間 (平均 5.9 時間) で終了している。



(A) Parameter : Rainfall



(B) Parameter : Maximum rainfall per sixty minutes

Fig. 14. Relationship between risings of specific discharge and initial specific discharges.

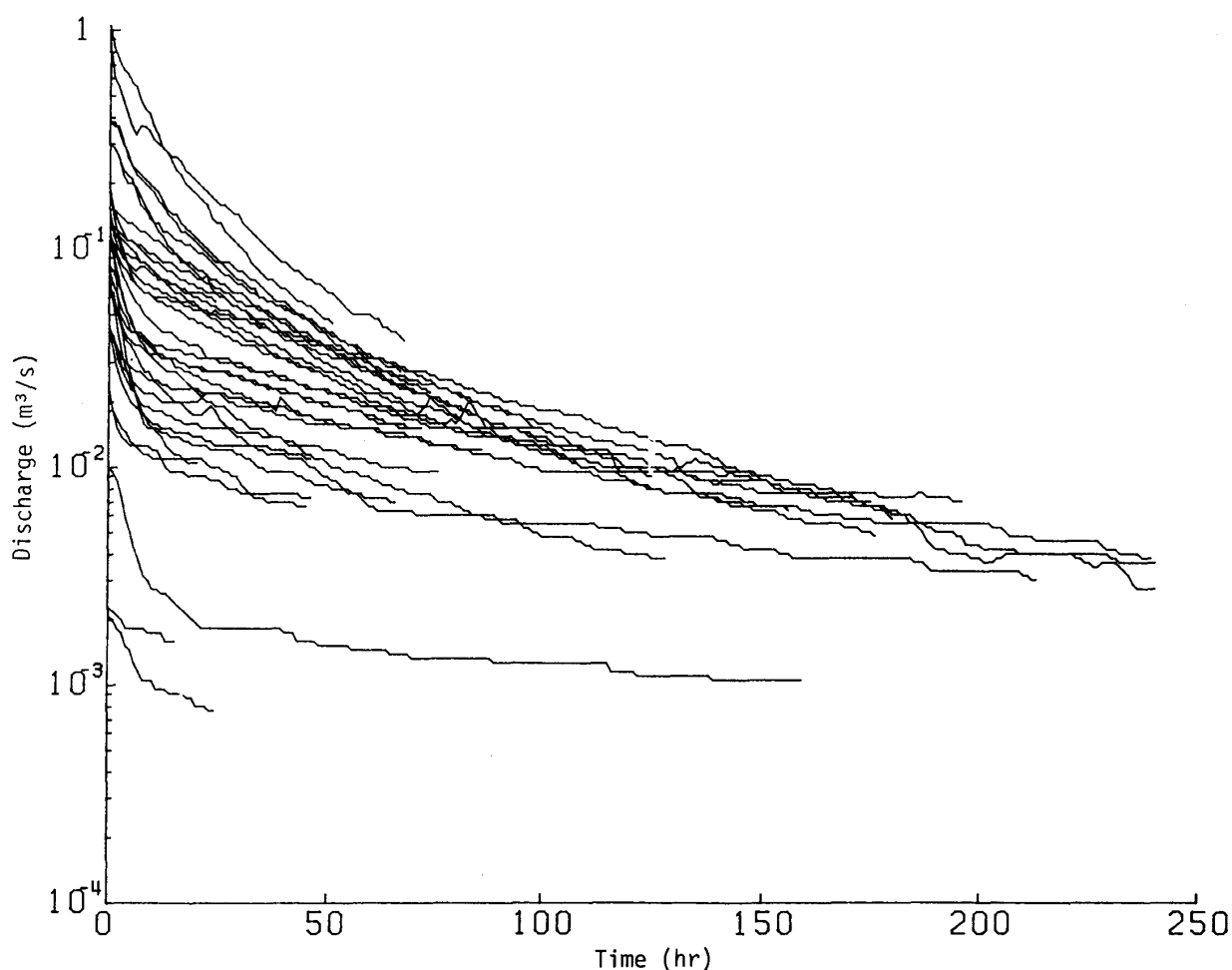


Fig. 15. Recession curves after peak points.

Table 6 は、ひと山のハイドログラフの短期流出データを用いて減水定数 c_s 、 c_i および c_{g1} と水文因子の関係を相関係数表としてまとめたものである。水文因子としては、ひと雨の総雨量、降雨継続時間、最大時雨量、最大 60 分間雨量、平均降雨強度、初期流量（増水開始時の流量）およびピーク流量を用いている。 c_s は平均降雨強度と高度の相関があり、他の因子とは有意な関係は認められない。したがって、表面流出が卓越している PS 間ではひと雨の平均降雨強度が増加すると減水の割合が大きくなることがわかる。また、 c_s は中間流出が卓越している SG 間の減水定数 c_i と高度の相関がある。

中間流出が卓越している SG 間の減水定数 c_i は、 $0.027 \sim 0.067$ (1/hr) の範囲にあり、平均 0.041 (1/hr) である。表面流出終了時から中間流出終了時までの時間 T_i は 2 ~ 50 時間、ひと山のハイドログラフに限定しても 2 ~ 33 時間（平均 11.4 時間）と散らばっている。ピーク時から直接流出終了までの時間（ T_s と T_i の合計時間）は 4 ~ 56 時間、ひと山のハイドログラフに限ると 4 ~ 38 時間（平均 14.5 時間）の範囲にある。 c_i と水文因子の間には有意な関係は認められなかった。

G 点以降の減水定数 c_{g1} は地下水減水定数と呼ばれ、 c_s および c_i に比較し散らばりが小さく、

Table 5. Recession constants

No.	Date	PS		SG		GB		BC		CD	
		c_s (1/hr)	T_s (hr)	c_i (1/hr)	T_i (hr)	c_{g1} (1/hr)	T_{g1} (hr)	c_{g2} (1/hr)	T_{g2} (hr)	c_{g3} (1/hr)	T_{g3} (hr)
1	2.24* ¹	.128	9	.033	23	.016	68				
2	3. 2	.080	16	.032	33	.017	79	.010	48		
3	3.10* ¹	.121	6	.033	17	.015	29				
4	3.13	—	—	.050	9	.010	68				
5	3.16* ¹	.116	5	.029	7	.009	144				
6	3.23* ¹	.107	8	.028	14	.014	47				
7	4. 1* ¹	.124	5	.036	8	.013	59				
8	4. 4* ¹	.114	7	—	—	.010	69				
9	4. 7* ¹	.085	5	.030	13	.019	30				
10	4.10	—	—	.042	24	.025	57				
11	4.14* ¹	.156	3	.047	3	.021	18				
12	4.22* ¹	.098	4	.028	6	.013	115				
13	4.27* ¹	.167	3	.045	2	.014	41				
14	4.29* ¹	.149	5	.039	4	.010	37				
15	5. 1* ¹	.144	4	.032	5	.013	61				
16	5. 7	—	—	.031	28	.026	38	.018	22	.011	129
17	5.16* ¹	.189	8	—	—	.016	58	.005	215		
18	5.28* ¹	.271	7	.055	10	.022	28				
19	5.31	—	—	.038	30	.021	46				
20	6. 3* ¹	—	—	.062	4	.012	62	.009	140		
21	6.12* ¹	.101	5	.042	33	.026	29				
22	6.16* ¹	.098	6	.045	28	.027	40				
23	6.21	.094	15	.045	36	—	—				
24	7. 4* ¹	.140	7	—	—	.015	123	.009	109		
25	7.15	.153	6	.040	50	—	—				
26	7.18* ¹	.136	4	.034	14	.021	71	.011	141	.005	214
27	8. 5* ¹	—	—	.056	4	.011	11				
28	8. 6* ¹	.154	8	.042	13	.004	138				
29	8.24* ¹	.087	8	—	—	.021	16				
30	8.27	.147	4	.049	16	—	—				
31	8.31* ¹	—	—	.067	8	.006	12				
32	9. 1	—	—	.047	5	—	—				
33	9. 4	.063	8	—	—	.022	70	.012	30		
34	9.10	.126	3	.027	26	.014	146				
35	9.20	—	—	.062	5	—	—				
36	9.21	.081	10	.033	19	.021	69				
	Mean	.127	5.9* ²	.041	11.4* ²	.016					

1) c_s and T_s are recession constant and time elapsed from point P to point S as shown in Fig.5. The other symbols are defined by the same rule.

2) *¹ Single peaked hydrograph.

3) *² Mean of single peaked hydrograph.

Table 6. Coefficients of correlation between recession constants and hydrological factors

Hydrological factor	Recession constant		
	c_s	c_i	c_{g1}
Total storm rainfall	-0.11	-0.12	0.74* ¹
	-0.01	-0.30	0.63* ¹
Duration of storm rainfall	-0.33	-0.18	0.66* ¹
	-0.32	-0.27	0.60* ¹
Maximum hourly rainfall	0.18	-0.08	0.57* ¹
	0.27	-0.18	0.43
Maximum rainfall per sixty minutes	0.08	-0.11	0.53* ¹
	0.21	-0.21	0.40
Mean rainfall intensity	0.72* ¹	0.08	0.14
	0.59* ¹	-0.05	0.06
Initial discharge	-0.24	-0.18	0.24
	-0.18	-0.24	0.12
Peak discharge	-0.18	-0.13	0.77* ¹
	0.05	-0.41	0.52* ²
c_s		0.71* ¹	-0.03
		0.66* ¹	-0.13
c_i			-0.09
			-0.14

- 1) Number of data=23.
- 2) Upper value : application to regression line.
Lower value : application to regression curve.
- 3) *11 % level of significance.
*25 % level of significance.

0.004 ~ 0.027 (1/hr) の範囲にあり, 平均 0.016 (1/hr) である。この平均値は, 大藪川流域 (38.22ha) における値 0.010²⁾ より大きく, 竜の口山南谷流域 (22.611ha) における値 0.015³⁾ とほぼ同じである。

地下水減水定数 c_{g1} と水文因子の関係においては, ひと雨降雨量, 降雨継続時間, 最大時雨量, 最大 60 分雨量およびピーク流量との間に高度の相関が認められ, 平均降雨強度および初期流量との間には有意な関係は認められない。降雨量あるいは降雨強度が大きい降雨の場合, 地下水流出は大きな割合で減水しはじめることがわかる。G 点以降無降雨が長期間続くと, 地下水減水曲線はさらに小さい減水定数の曲線に変化する。(Table 5 において, No.2, 16, 17, 20, 24, 26 および 33 のデータにみられるように c_{g1} から c_{g2} , c_{g3} への変化)。すなわち, 地下水減水曲線は片対数紙上においていくつかの直線部分に近似される。これは, 安山岩と凝灰質の堆積岩が互層し, しかも断層が存在するというこの流域地質の複雑さに由来するものと考えられる。

地下水減水定数には季節的な変化がみられ, 2 ~ 4 月間は, 平均 0.015 (1/hr), 5 ~ 9 月間は

平均 0.018 (1/hr) となり、冬期より夏期の方が減水割合が大きい。これは、従来いわれる季節的な蒸発散量の変化と、減水定数がひと雨降雨量、降雨強度、ピーク流量等と高度の相関があることからみて、季節による降雨特性の違いによるものと考えられる。

地下水減水定数を用いて地下水減水曲線を SG 期間に逆延長し、減水曲線から地下水流出分を差し引くと中間流出の減水曲線が求められる。中間流出の減水定数を算出した結果、その値は、0.082 ~ 0.541 (1/hr) の範囲にあり、平均値 0.253 (1/hr) が得られた。この平均値は、竜の口山南谷流域における 0.080³⁾、および大藪川流域における値 0.156²⁾ よりはるかに大きい値である。

要 約

鹿児島市を流れる甲突川上流水源地に設定されている森林理水試験流域において、1983年に得られた水文資料を用いその流出特性を明らかにした。以下得られた結果をまとめると次のようである。

1) 試験流域における1983年の観測結果によると、年降雨量 3128.5 (mm)、年流出量 2317.4 (mm)、年流出率 74.1 (%)、年消失量 811.1 (mm) であった。

2) 試験流域における降雨—流出の関係について解析した。その結果、総雨量とその降雨により生じた直接流出量および直接流出率の間には高度の相関が認められた。(Fig.8 および Fig.9)。これらの関係は、流域の土湿状態の指標となる初期流量(増水開始時の流量)に依存している。したがって、降雨量が同程度である場合、初期流量が大きいほど直接流出量および直接流出率は増加する。しかしながら、大きい初期流量のもとでは、初期流量が直接流出量および直接流出率に及ぼす影響は小さくなる。

3) 直接流出量と直接流出継続時間の間には高度の相関が認められる(Fig.10)。この関係において直接流出をもたらした降雨の総雨量をパラメーターにとると、総雨量が増加するに従って直接流出量および直接流出継続時間は増加する。また、この関係は最大60分間雨量にも依存している。

4) ハイドログラフの増水部の形とその増水をもたらした降雨特性の関係が解析された(Fig.12 ~ 14)。その結果、増水の規模は主に降雨量に影響され、増水の速さは主に降雨強度に影響される。降雨量、降雨強度、降雨継続時間等の降雨特性が同程度であれば、増水の規模や速さは降雨開始時の流域の土湿状態に依存する。

5) ハイドログラフの減水曲線を流量を対数目盛とした片対数紙上に描くと、その減水曲線は次第に傾斜を緩くしていく数本の直線に近似される。各直線の減水定数と水文因子の関係を相関係数表にまとめると Table 6 が得られる。

6) 地下水減水定数は 0.004 (1/hr) ~ 0.027 (1/hr) の範囲にあり、平均 0.016 (1/hr) である。地下水減水定数には季節的な変化がみられ、夏期 0.018 (1/hr) および冬期 0.015 (1/hr) であった。この季節的な変化は、蒸発散の季節的な変化と降雨特性の季節的な変化に原因していると考えられる。直接流出終了後、長期間無降雨が続くと、地下水減水定数はさらに小さい値へ変化していくことが認められた。

参 考 文 献

- 1) 岩井重久・石黒政儀：応用水文統計学。1 - 370, 森北出版, 東京 (1970)
- 2) 戎信宏：大藪川理水試験地の流出解析。日林九支研論, No.36, 311 - 312 (1983)
- 3) 小川滋：山地小流域における出水解析の基礎的研究。九大農演報, No.50, 1 - 68 (1977)
- 4) 地頭菌隆・春山元寿：森林の水土保持機能の定量化に関する研究(第1報)試験流域の環境調査。鹿大農

演報, No.12, 25 - 42 (1984)

Summary

Runoff characteristics of the forest and water experimental basin established in the headwater of the Kostuki River running through Kagoshima-shi, were clarified from the results obtained by the analyses of the hydrological data observed in 1983. The considerations made above are summarized as follows:

1) According to the data obtained in 1983 in this experimental basin, the annual rainfall was 3128.5 (mm), the annual runoff was 2317.4 (mm), the annual runoff ratio was 74.1 (%), and the annual loss was 811.1 (mm), respectively.

2) The rainfall-runoff relationships in this basin were analyzed. Some correlations of high significant level were noted between the total rainfall during a spell of rain, the direct runoff and the direct runoff ratio (Fig.8 and Fig.9). These relationships depended on the initial discharge (the discharge at the time of the rising) representing the index of the basin moisture conditions. Therefore, in the case in which storms had similar amounts of rainfall, the direct runoff and the direct runoff ratio increased with the initial discharge. However, the effect of the initial discharge on the direct runoff and the direct runoff ratio decreased with the increase of the initial discharge.

3) There was a correlation of high significant level between the amount and the duration of direct runoff (Fig.10). Taking the total rainfall of a spell of rain causing the direct runoff, as parameter, the amount and the duration of direct runoff were noted to be increasing with the total rainfall. Moreover, the above relationship depended on the maximum rainfall per sixty minutes.

4) Relations between the shape of the rising limb of the hydrograph and the characteristics of the storm causing the rising were analyzed (Fig.12 to 14). The scale of the rising was influenced mainly by the rainfall amount, and the rate of the rising was influenced mainly by the rainfall intensity. When the storm characteristics were similar, the scale and the rate of the rising depended on the moisture conditions of the basin at the onset of the storm.

5) When the recession curve of the hydrograph was described on semilogarithmic paper, plotting the discharge as a logarithmic scale, the recession curve was approximated by several straight lines with gradually decreasing slope. The correlation coefficients between the recession constants and the hydrological factors were showed in Table 6.

6) The groundwater recession constants were within the values from 0.004 (1/hr) to 0.027 (1/hr), the mean value being 0.016 (1/hr). The groundwater recession constants changed with the season, i. e., 0.018 (1/hr) during the summer months and 0.015 (1/hr) during the winter months. It was assumed that these changes were caused by the seasonal changes of the evapotranspirations and the storm characters. It was observed that when drought continued for a long time after the cessation of the direct runoff, the values of the groundwater recession constants were made to be changed into still smaller ones.