

山地流域における流出と流域条件との関係

米丸伸一*

Relations between runoff and watershed characteristics in mountain watersheds

Shin'ichi YONEMARU

米丸伸一：山地流域における流出と流域条件との関係 鹿野林試研報5:1-18, 2000 県内の7つの農業利水ダム流域の流出解析により、流出に森林がどの程度影響しているのか、また森林以外の地形などの因子が流出にどの程度影響しているのか検討した。①年降雨量が同程度の水年における各流域の年水収支をみると、流域の森林率と消失量との間には明らかな正の相関関係が認められ、流域の森林率が高いほど流出率が低かった。また森林率が同程度の流域では、森林の針葉樹林率が高い流域は年消失量が多いことが認められた。これらのことから流域の森林率が高いほど流域からの蒸発散量が多く、また針葉樹林は広葉樹林に比べ蒸発散量が多いことが示唆された。②森林率が高い流域ほど年流出量における直接流出率が低く、基底流出率が高かった。③一降雨量と直接流出量との間では各流域とも遷移雨量は50～65mmにあり、流域による差違は特に認められなかった。森林率が高い流域ほど基本流出率は低かったが、森林率が80%を超えるといずれも8%前後の値となり、流域による差違は認められなかった。一次付加流出率も森林率が高い流域ほど低くなる傾向があったが、森林率が80%を超えた流域では、一定の傾向は認められなかった。④不被災地下水の通減係数は森林率が高い流域ほど小さかったが、森林率が80%を超えた流域間では差違が認められなかった。⑤流量を目的変数とし、地形、森林率などの因子を説明変数とする重回帰分析を行い、流域条件と流出との関係を検討した。年流出量では森林率の標準回帰係数は負の大きな値を示していた。年直接流出量では流域面積や代表傾斜などの地形因子の標準回帰係数が森林率や表層地質の因子のものよりも大きく、直接流出には地形因子が大きく影響を及ぼしていた。年基底流出量では地形因子の標準回帰係数の値は年直接流出量の場合に比べ相対的に小さくなっており、一方で表層地質や森林率の標準回帰係数の値が大きくなっていった。

キーワード：流出解析，ダム流域，水源かん養機能，蒸発散

I はじめに

本県は県土の約64%が森林に占められている。その森林は大半が都市・集落等の上流域にあり、水源かん養や土砂崩壊防止、土砂流出防止などの水土保持機能を考えるうえで重要な位置を占めている。また、本県はシラスなどの特殊土壌地帯にあり、台風の襲来が多いことなどから、山地災害が多く、森林の有する国土保全機能に対する県民の関心は高い。特に近年の渇水や洪水を契機として、森林の水保全機能は益々重要視されてきている。

森林の水源かん養機能は一般的には洪水を緩和し、渇水時の流出量を増やす、いわゆる「流出の平準化」により理解されている。一方、森林には様々な成育段階や樹種があり、その管理方法も多様である。また、これら森

林の成立する流域の森林率や地質、土壌等も多様であり、流域からの流出の過程には多くの因子が複雑に関与している。

そこで今回、県内の農業用利水ダム流域の流出解析を通して流域からの流出に森林がどの程度関係しているのか、また森林以外のほかの流域条件が流出にどの程度影響しているのか検討したので報告する。

II 調査対象流域の概況

調査対象とした、県内の7つの農業利水ダムを図-1に示した。本土に位置する3ダム、離島に位置する4ダム(長島1, 種子島1, 奄美群島2)である。鹿児島県における農業用水源施設等の概要(1994)によると、各ダムの概況は表-1のとおりである。

* 現 加治木農林事務所



図-1 調査ダム位置図

表-1 各ダムの概況

ダム名	所在地	水系名	ダム規模		
			堤高(m)	堤長(m)	有効貯水量(万m ³)
高川ダム	出水市	米ノ津川	42.0	163.5	7,727
竹山ダム	溝辺町	網掛川	54.5	163.0	1,937
高隈ダム	鹿屋市	肝属川	47.0	136.0	11,630
鷹巣ダム	東町	小幡川	28.9	117.4	255
西京ダム	西之表市	西京川	29.7	133.8	2,238
大川ダム	名瀬市	大川	33.7	117.0	382
神嶺ダム	徳之島町	亀徳川	33.8	170.0	678

Ⅲ 調査方法

本研究では流域の水収支及び直接流出特性、基底流出特性、流況特性と森林率との関係から、ダム流域の流出量に及ぼす森林の影響を検討した。解析に使用した資料及び因子については下記のとおりである。

1. 降雨量及び流出量

各ダムで観測された項目の中から、日雨量及びダム湖への日流入量を利用した。今回はこの日流入量を流域からの日流出量とした。資料は欠測の少ない年を採用した

ため、解析に用いた各ダムの水年は、高川ダム、竹山ダム、高隈ダムが7水年(1990～1996)、鷹巣ダムが3水年(1995～1997)、西京ダムが5水年(1991～1994,1997)、大川ダムが5水年(1986～1988,1994,1996)、神嶺ダムが3水年(1990～1992)である。

解析に用いた流量の因子は、下記により求めた。

- 1) 直接流出量：ハイドログラフにおいて日流出量の増加日の点と、この点からピーク流出量発生後2日後の点を直線で結び、その線より上部を直接流出量とする簡易法を採用した。また、その期間の降雨量を一降雨量とし、直接流出量との関係を検討した。

2) 基底流出部：ハイドログラフにおいて降雨終了日から3日目以降で無降雨期間が7日以上（流域の中で、7日以上の無降雨期間が非常に少ない場合は4日以上）の流量の遞減部を対象とし、基底流出の特性を検討した。

3) 流況区分値

(1) 最大流量：1年間のなかでの最大の日流量。

(2) 豊水流量：流況曲線を作成し、95日はこれを下らない流量。

(3) 平水流量：流況曲線を作成し、185日はこれを下らない流量。

(4) 低水流量：流況曲線を作成し、275日はこれを下らない流量。

(5) 渴水流量：流況曲線を作成し、355日はこれを下らない流量。

(6) 最小流量：1年間のなかでの最小の日流量。

4) 調節量：流況曲線と雨量曲線と年平均日流量直線で囲まれる部分（図-2）。

5) 非調節量：流況曲線と年平均日流量直線で囲まれる部分（図-2）。

2. 流域面積：A (km²)

流域面積は、各ダムの計画概要書からの数値を採用した。

3. 主溪流勾配：H/L (%)

1/50,000の地形図により概略に主溪流の高低差(H)を判読し、それを主溪流長(L)で除して算出した。

4. 流域代表傾斜：θ (°)

当該地域の土地分類基本調査（鹿児島県）の傾斜区分図により判読した。今回は、流域面積の60%以上を占

める傾斜の区分を流域の代表傾斜とした。なお、60%以上を占める傾斜区分がなかった場合は、傾斜区分の中央値に面積比率を乗じた値の合計値を代表傾斜とした。また、鷹巣ダム及び神嶺ダムは土地分類図がなかったため、1/50,000地形図に1cm×1cmのメッシュをかけ、メッシュ内の等高線本数から各メッシュの傾斜を算出し、平均傾斜を算出した。

5. 形状係数

$$A/L^2 = B/L$$

B：流域平均幅 (B = A/L)

6. 地質

当該地域の土地分類基本調査及び鹿児島県の地質(1990)により表層地質を判読し、流域面積の60%以上を占める地質を代表地質とした。今回は重回帰分析するにあたり、九州地区林業試験研究機関協議会(1985)による地位指数の推定式に用いられた各地質の回帰係数を流域地質の評点として採用した。

7. 土壌

当該地域の土地分類基本調査及び土地分類図(1971)により土壌を判読し、流域面積の60%以上を占める土壌を代表土壌とした。

8. 森林

1/5,000の森林計画図により流域内の林分を抽出し、森林簿から流域の森林面積を林相別に集計した。なお、森林の蓄積、林齢については、森林簿における広葉樹林のデータが現況と異なっていることが多く、また現況に応じた数量的把握が困難であったため、今回は検討資料として採用しなかった。

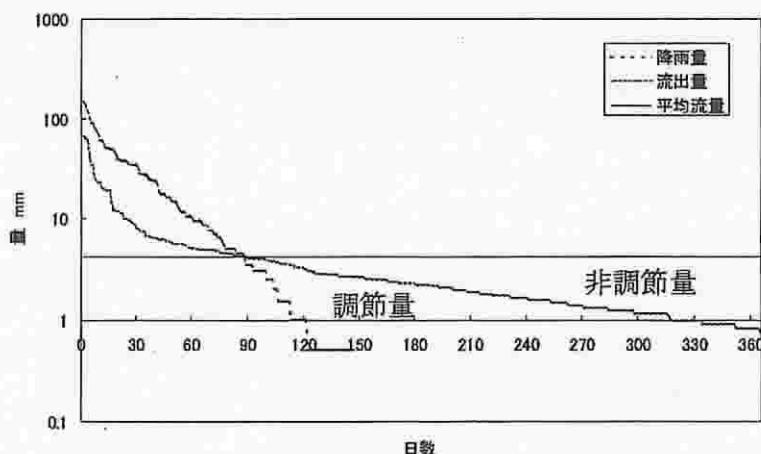


図-2 流況曲線(竹山ダム:1996)

各ダム流域の概要を表-2に示した。

IV 結果及び考察

1. 各流域の概況

調査対象としたダム流域は、代表傾斜、形状係数、及び森林率から二つのグループに大別された。一つは、流域の代表傾斜が緩やかで、形状係数が大きく、森林率が

低い、鷹巣ダムと西京ダム流域である。もう一つは、森林率が高く、形状係数の小さい、高川ダム、竹山ダム他3流域である。

流域の規模が大きくなるほど、地形、地質、土地利用形態などの複数の流域条件が絡み合い、流出は複雑に影響される。今回調査対象とした流域は流域の規模が大きく、流出に及ぼす森林の影響を検討するにあたっては、

森林率と他の流域条件との関係を十分に把握しておく必要がある。

そこで森林率を目的変数とし、地形や地質の条件を説明変数とする重回帰分析を行い、その結果を表-3に示した。形状係数の標準回帰係数は負の大きな値を示しており、森林率と形状係数は負の高い相関関係にあることが伺える。

表-2 流域の概況

流域名	流域面積 (km ²)	森林率 (%)	針葉樹林率 (%)	主流勾配 (%)	代表傾斜 (°)	形状係数	(地質指数) 地質	土壌
高川	23.50	93.1	51.3	6.0	30 ~ 40	0.59	(0.9991) 砂岩・頁岩互層	褐色森林土 (1.0187)
竹山	10.53	83.8	78.5	7.7	20 ~ 30	0.39	安山岩	褐色森林土 (0.9991)
高隈	38.40	81.2	54.9	5.1	20 ~ 30	0.43	砂岩・頁岩互層	黒色土・褐色森林土 (1.0187)
鷹巣	1.75	35.4	48.9	7.2	3 ~ 8	2.16	安山岩	褐色森林土 (0.9765)
西京	4.15	55.4	52.2	3.7	3 ~ 8	1.36	砂岩, ローム層	未熟土 (0.9991)
大川	11.06	97.6	21.4	8.5	14	0.61	砂岩・頁岩互層	黄色土 (0.9991)
神嶺	3.39	88.5	28.5	16.0	15	0.54	砂岩・頁岩互層	赤色土

注：(地質指数)は、九州地区林業試験研究機関協議会(1985)による

表-3 森林率の他の流域条件による重回帰分析結果

	流域面積	主流勾配	代表傾斜	形状係数	地質指数	R ² 乗値
標準回帰係数	-0.2648	0.1000	0.3703	-0.7921	-0.1270	0.867
p値	0.023	0.234	0.002	0.000	0.077	

2. 水収支

図-3に竹山流域における年降雨量と年流出量・年消費量との関係を示した。年消費量は年降雨量から年流出量を差し引いたものである。

年降雨量の増加にともない年流出量は増加しており、年降雨量がある一定量を超えると流出量は45度の傾きで直線的に増加する傾向が認められた。また、年消費量は年降雨量の増加にともない増加の傾向が認められたが、その増加の割合は年流出量に比べ非常に小さく、降雨量が一定量を超えると極限值に収束する傾向がみられた。

これらのことから同一流域でも降雨量により流出量や消費量が異なることが知られ、流域間の水収支は降雨量

の条件をほぼ一定として比較することの必要性が示唆された。

今回は各流域の比較できる資料に制限があり降雨量の条件を一定にすることはできなかったが、年降雨量が2,200mm～2,900mmの年の資料を抽出し比較することにした。抽出した年の各流域のハイエト・ハイドログラフを図-4～10に示した。

流域による降雨状況の違いもあるが、降雨に対する流出の状況は流域によってかなり異った。大川流域と神嶺流域では、流出量が一定の値を示している期間が頻繁にみられた。これはダムへの流入量をほかのダムではダム湖面の水位の変動とダムからの放流量から算出しているのに対し、この二つの流域ではダム湖上流側に設置して

ある量水堰により算出していることが要因と思われる。
 鷹巣流域と西京流域では降雨に対する流出の反応が極め

て早く、また流出の変動幅がほかの流域に比べて大きか
 った。

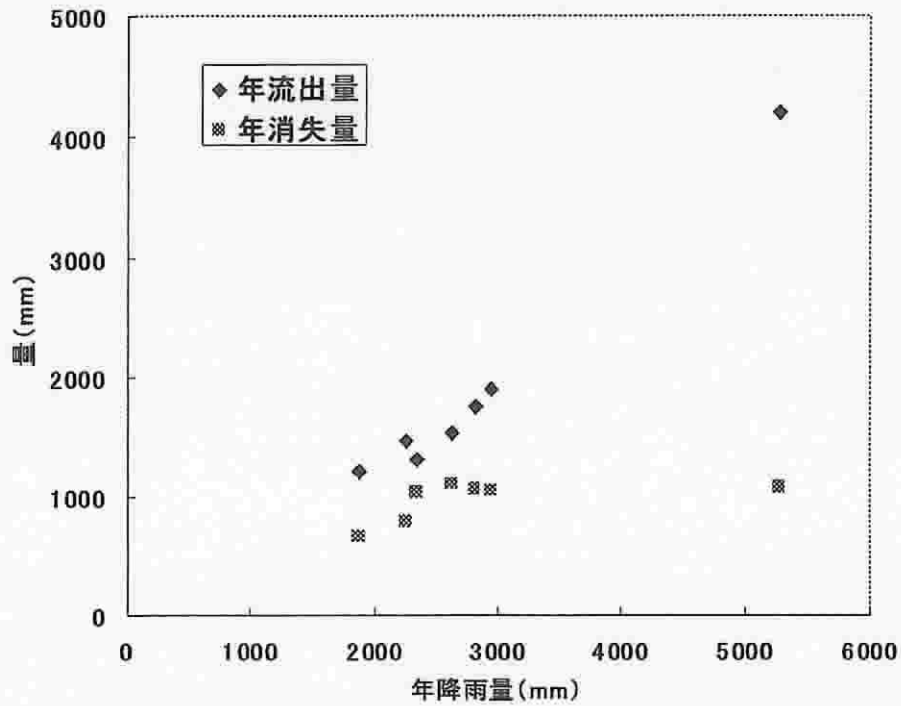


図-3 年降雨量と年流出量・消失量(竹山)

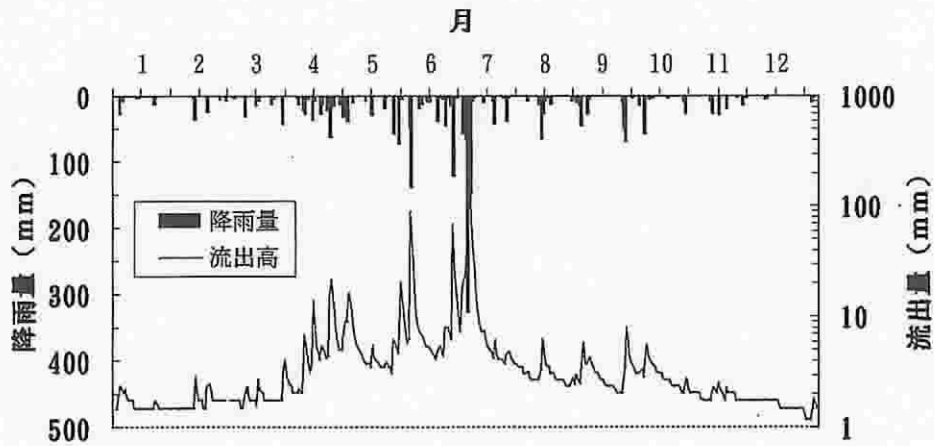


図-4 高川流域におけるハイエト・ハイドログラフ(1995)

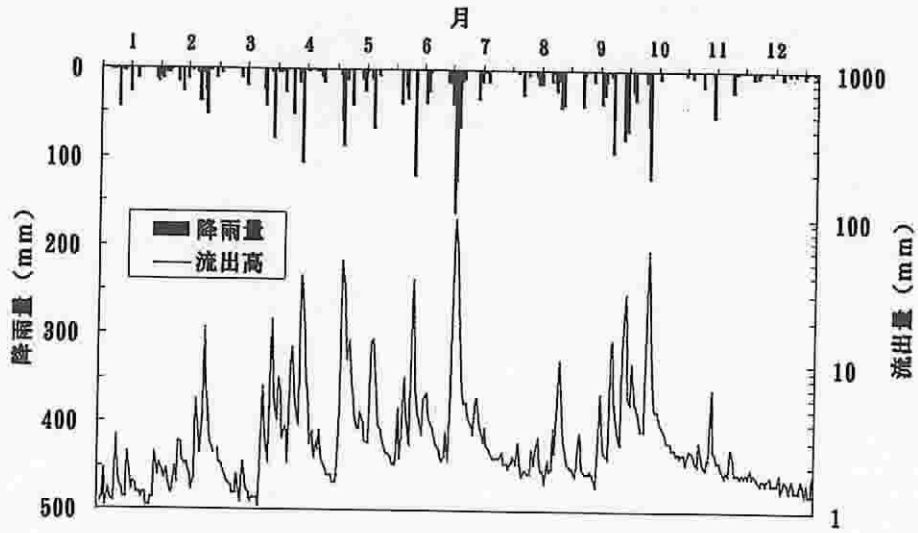


図-5 竹山ダムにおけるハイエト・ハイドログラフ(1990)

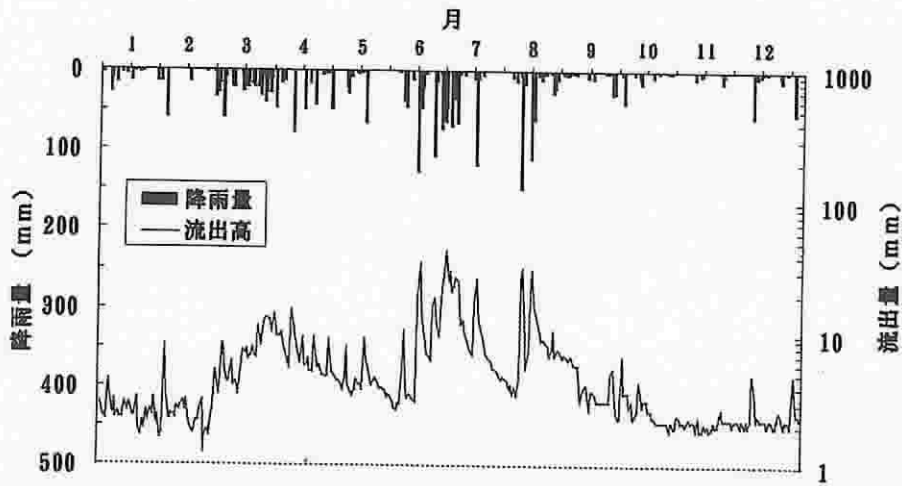


図-6 高隈ダムにおけるハイエト・ハイドログラフ(1992)

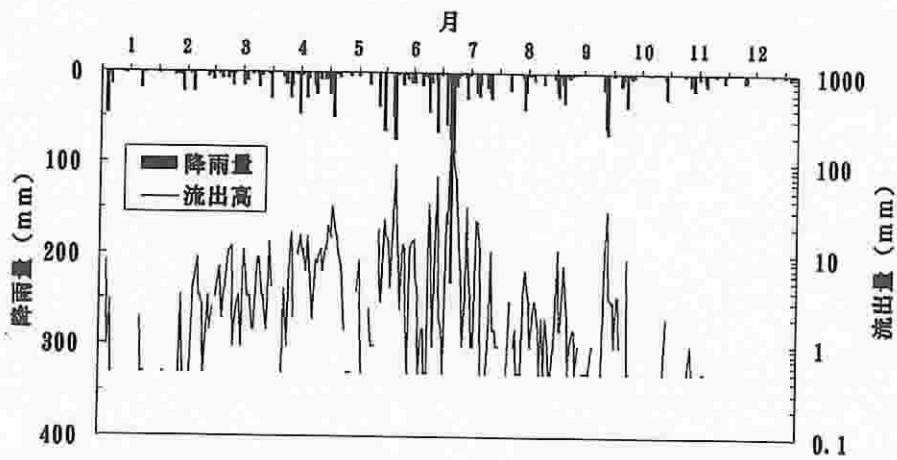


図-7 鷹巣ダムにおけるハイエト・ハイドログラフ(1995)

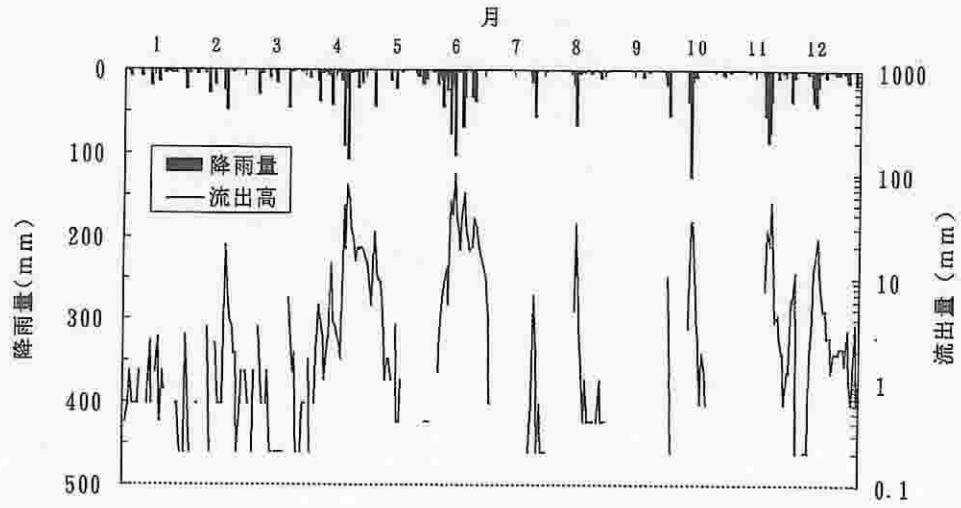


図-8 西京ダムにおけるハイエト・ハイドログラフ (1995)

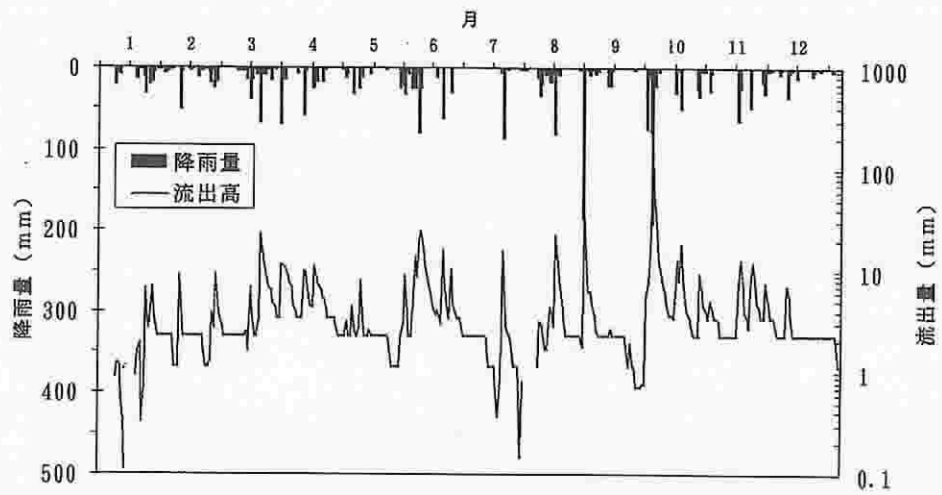


図-9 大川ダムにおけるハイエト・ハイドログラフ (1996)

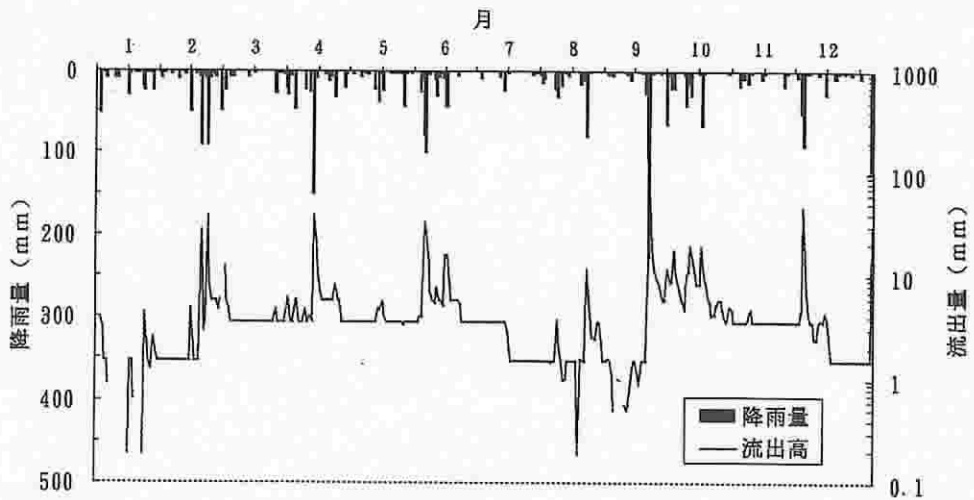


図-10 神嶺ダムにおけるハイエト・ハイドログラフ(1990)

表-4 各流域の年水収支

流域名	水年	年降雨量	年降雨日数	年流出量	年流出日数	年流出率	年消失量	年平均気温
		P (mm)	(日)	R (mm)	(日)	R/P (%)	P-R (mm)	
高川	1995	2,772.0	126	1,901.9	365	68.6	870.1	14.4
竹山	1990	2,819.5	117	1,761.4	365	62.5	1,058.1	16.0
高隈	1992	2,921.0	135	2,135.3	365	73.1	785.7	15.3
鷹巣	1995	2,155.0	137	1,901.5	235	88.2	253.5	16.6
西京	1994	2,212.0	117	1,731.7	234	78.3	480.3	20.3
大川	1996	2,595.0	149	1,612.8	349	62.2	982.2	21.3
神嶺	1990	2,821.0	149	1,683.1	351	59.7	1,137.9	21.6

図-4～10における年水収支を表-4に示した。なお表の平均気温は鹿児島県農業気象月報(1990～1996)に記載された、流域に最寄りの観測地点で観測された当該年の気温を引用している。

森林率が低く代表傾斜の緩やかな鷹巣と西京流域は、年降雨量に対する年流出率が78～88%で他の流域に比べて高い値を示している。しかし一方で、年降雨日数が他の流域と比べ大差がないにもかかわらず、年流出日数は非常に少なく、降雨量に対する流出の総量は多いものの、流出は降雨直後に多く集中しているといえる。

流域の水収支は、次式で表せる。

$$P = R + E \pm \Delta S$$

(P：降雨量，R：流出量，E：蒸発散量， ΔS ：流域貯留の変化量)

各流域の調査対象期間は1月から12月までであり、期間終わりの12月の降雨量は例年比較的少ないことから、流域貯留の変化量(ΔS)は0で無視できる値といえ、表-4の年消失量は年蒸発散量に相当する。

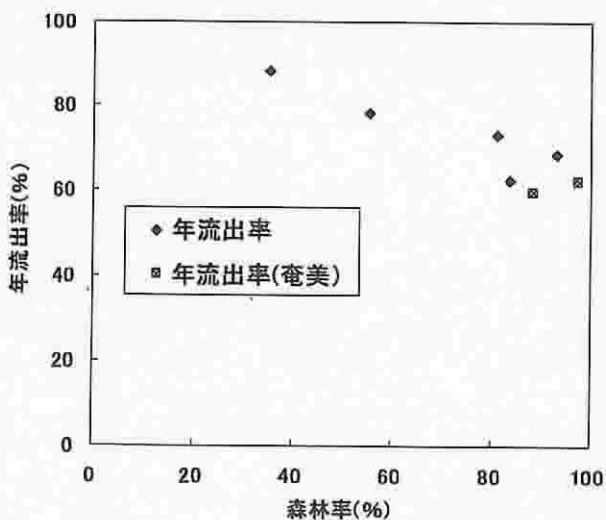


図-11 流域の森林率と年流出率

図-11に各流域の森林率と年流出率との関係を示し

た。森林率と年流出率とは明らかな負の相関関係にあり、流域の森林率が高くなるほど流域からの蒸発散量は多くなり、年流出率は低くなることを示唆している。また、奄美群島流域の年流出率は森林率が同程度の他の流域に比べて低いようであった。

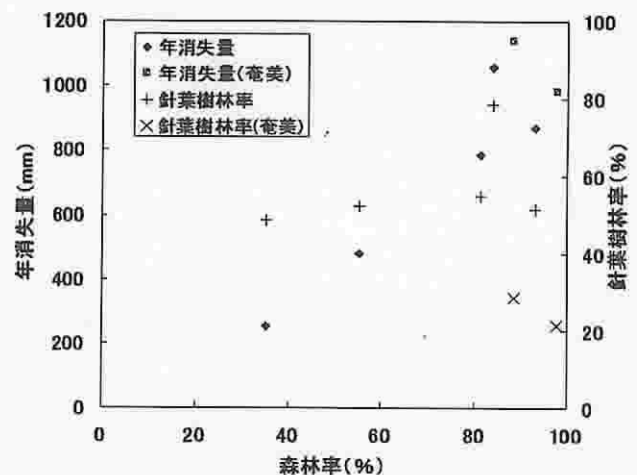


図-12 森林率と年消失量

図-12に森林率と年消失量との関係を示した。森林率と年消失量との間には明らかな正の相関関係が認められた。すなわち流域の森林率が高くなるほど、流域からの蒸発散量は多くなることが示唆された。針葉樹林率が50%前後の4流域では森林率が高くなるにしたがって年消失量は直線的に増加していた。また、奄美群島流域の年消失量は森林率が同程度の他の流域に比べて多かった。亜熱帯に位置する神嶺流域の年平均気温は暖帯に位置する高川流域のそれに比べて7.2度高い、21.6度である。流域位置の緯度が低いほど気温が高くなるため、流域からの蒸発散量は多くなるようである。

次に森林の針葉樹林率と年消失量との関係を見ると、針葉樹林率が80%弱の流域の年消失量は森林率が同程度で針葉樹林率が50%前後の流域に比べて非常に多く、

奄美群島流域と同程度の値を示している。また、竹山流域と高隈流域の森林率は 80 % 余りで大差ないが、針葉樹林率が約 24 % 高い前者の年消失量が 272mm 多く、この差違は水を利用する立場からは無視できない量と考えられる。年消失量は森林率という量的なものに基本的には影響されるが、針葉樹林や広葉樹林という林相の違いにも影響されていることが推察される。塚本ら(1984)は

コウイータ森林水文試験地で、流域の樹種を広葉樹から針葉樹(マツ)に変更したところ、流出量が減少し、それはマツが広葉樹に比較し遮断量と蒸散量の大きいことが要因であるとしている。針葉樹林は広葉樹林に比べ水消費量が多く流出量をより減少させる方に作用しており、今回の結果においても同様な結果が得られた。

表-5 各流域の流出特性値

流域名	年降雨量 (mm)	年流出量 a (mm)	直接流出に係る		年直接流出量 b (mm)	直接流出率 b/a (%)	基底流出量 a-b (mm)
			降雨量 (mm)	日数 (日)			
高川	2,772.0	1,901.9	2,618.0	173	673.0	35.4	1,945.0
竹山	2,819.5	1,761.4	2,781.0	233	760.5	43.2	1,000.9
高隈	2,921.0	2,135.3	2,820.0	215	385.8	18.1	1,749.5
鷹巣	2,155.0	1,901.5	2,066.0	209	1,238.2	65.1	663.3
西京	2,212.0	1,731.7	2,105.0	170	901.5	52.1	830.2
大川	2,595.0	1,612.8	2,424.0	172	494.0	30.6	1,118.8
神嶺	2,821.0	1,683.1	2,397.0	142	455.5	27.1	1,227.6

3. 直接流出特性

表-4の年流出量を直接流出量と基底流出量について分けたのが表-5である。年流出率の高かった鷹巣、西京流域では他の流域に比べ直接流出率は 50 % 以上の高い値を示している。

しかし森林率が 80 % を越えると、流域によるばらつきがみられ一定の傾向は認められなかった。

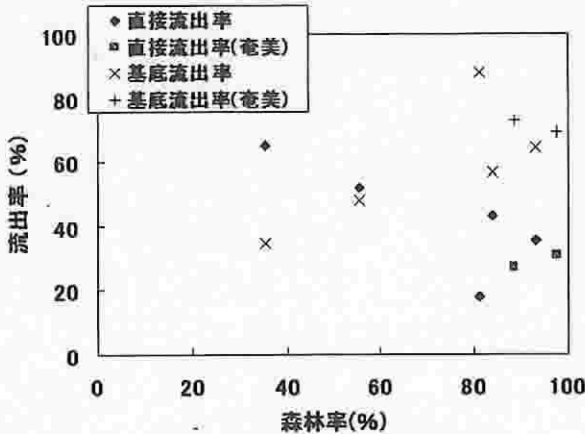


図-13 森林率と直接・基底流出率

図-13に流域の森林率と直接流出率、基底流出率との関係を示した。流域の地形や地質などの条件の違いもあるが、森林率が高くなるほど直接流出率は低く、基底流出率は高くなっている。これはこれまで言われてきた森林の水源かん養機能の本質である「流出の平準化作用」と理解できる。森林は蒸発散により年流出量を低くしているが、一方では直接流出量を抑え、基底流出量を増加させていることが伺える。

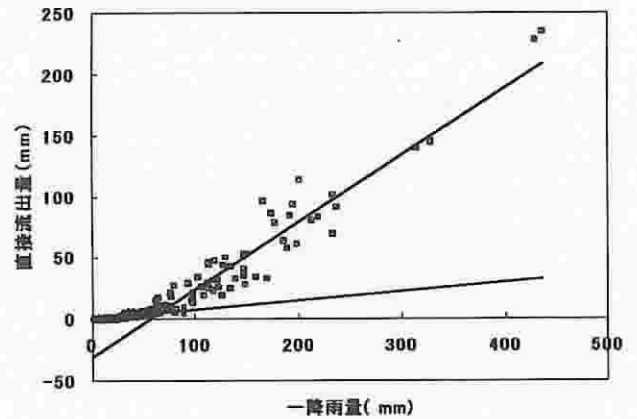


図-14 一降雨量と直接流出量(竹山ダム)

次に竹山流域における一降雨量と直接流出量との関係を図-14に示した。一降雨量が増えると直接流出量は増えていくが、その増加の割合は一定の降雨量以下では小さく、一定の降雨量を超えると大きくなっている。竹山流域では一降雨量が 65mm を境に一降雨量と直接流出の対応が異なり、65mm を越えると流出率が大きくなっている。

安藤ら(1982)はこれら相関図をもとに、一降雨量と直接流出との関係を

$$D = f_0 \times P \quad \dots 0 \leq P < P_1$$

$$D = f_0 \times P + f_1 \times (P - P_1) \quad \dots P_1 \leq P$$

(D：直接流出量， f_0 ：基本流出率， f_1 ：1次付加流出率， P_1 ：1次遷移雨量)

の近似直線で表示できるとした。また基本流出率 f_0 は飽和流出域（全流域面積の中で河道及び河道周辺の湿地河原など常時ほぼ飽和状態である領域）の占有面積率とほぼ一致するとした。この近似式にもとづき各流域における一降雨量と直接流出量との関係を解析した結果が表-6である。

表-6 一降雨における直接流出の特性値

流域名	f_0	f_1	P_1
高川	8.3	58.7	58
竹山	7.5	54.9	65
高隈	8.0	33.1	63
鷹巣	30.3	92.8	56
西京	21.7	83.1	48
大川	12.9	39.1	63
神嶺	8.9	37.2	58

森林率と1次遷移雨量との関係を図-15に示した。1次遷移雨量は各流域とも約60mm程度の値であり、流域による差はなく、森林率と遷移雨量との間には一定の傾向は認められなかった。遷移雨量は表層土壌の透水性や保水性などの理学的性質や土壌の飽和状況などの土壌条件や地形条件により大きく影響されると考えられるが、規模の大きい流域を単位とした流出には複数の要因が影響しているため、流域間では明らかな違いはでてこないのではと推察される。

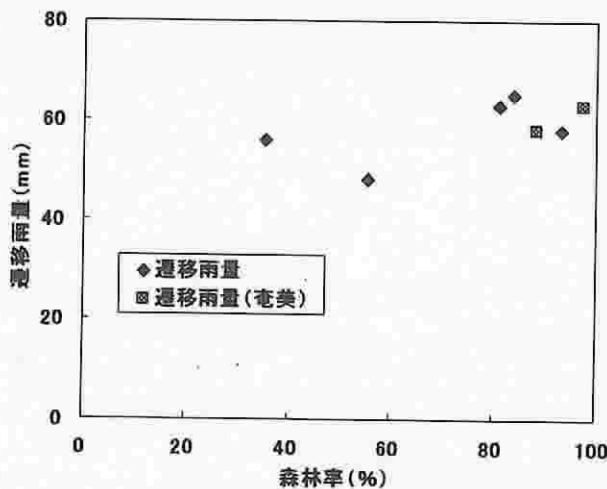


図-15 森林率と遷移雨量

森林率と基本流出率・1次付加流出率との関係を図-16に示した。基本流出率は森林率が高くなるに従って低くなる傾向がみられた。しかし森林率が80%を越え

た流域ではいずれも8前後の値を示し流域による違いは認められなかった。これは高橋ら(1982)による全国の多目的ダム流域の解析結果と同様であった。森林率と付加流出率との関係についても基本流出率の場合と同様な傾向が認められたが、流域による差がより顕著となった。森林率が60%未満の2流域では付加流出率は80%を超えており、遷移雨量を超えた降雨があると、そのほとんどが短期間で流出することが伺える。針葉樹林率の高い流域や奄美群島流域では森林率が同程度の流域に比べ、付加流出率は低い値を示している。降雨後初期の流出には流域土壌の乾湿が大きく影響するが、針葉樹林率の高い流域で付加流出率の低いのは、針葉樹の樹幹遮断量が広葉樹に比べて多く、蒸散により土壌水分が常に多く消費され、一方、奄美群島流域では県本土に比べ平均気温が高く、森林からの蒸発散量が多いことによるものと考ええる。

しかしいずれにしても、森林率の格差が大きい場合は森林率が高くなるに従い、流出率が低くなる傾向が認められるが、森林率が80%を越えると流出率は森林率に関係なくほぼ一定となる傾向がみられた。これらのことから森林の直接流出に及ぼす影響には、一定の限界があると推察される。

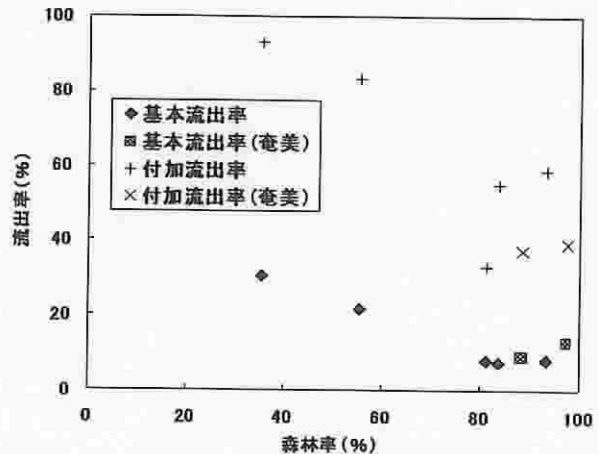


図-16 森林率と基本・付加流出率

4. 基底流出特性

地下水は地下水帯に自由水面を持つ不被圧成分と地下水帯が不透水層に囲まれた被圧成分に分かれる。無降雨期間がある程度以上になると、地下水は不被圧成分からなると考えられる。高木(1966)は、不被圧成分の地下水の低減量を次式による表せるとしている。

$$Q = Q_0 / (1 + b \times Q_0^{1/2} t)^2$$

(Q ：流量， Q_0 ：初期流量， t ：経過時間， b ：透減係数)

この式では逓減係数が大きいほど、無降雨期間が長くなると地下水量の減少度合いが大きくなることを表している。この式により算出した各流域の逓減係数 b を表-7 に示した。なお、神嶺流域については基底流出部のデータ数が少なかったため算出しなかった。

同様な流域条件にある鷹巣、西京流域は他流域に比べ

逓減係数が高く、無降雨期間の地下水の低減量が大きいたことが伺える。高橋ら(1983)は、第4紀火山類、花崗岩類、第3紀火山類、古生層、第3紀層流域、中生層流域の順に逓減係数は小さく、逓減係数に地質が影響しているとしている。今回は調査流域数が少なかったためか、地質による差は認められなかった。

表-7 各流域の地下水逓減係数

	高川	竹山	高隈	鷹巣	西京	大川
逓減係数 b	0.0132	0.0134	0.011	0.17	0.1527	0.0505

森林率と地下水逓減係数との関係を図-17 に示した。森林率が高くなると地下水逓減係数は小さくなる傾向がみられる。しかし森林率が80%を越える県本土の流域ではいずれも0.01程度の値を示し、流域による差は認められなかった。IV-3の直接流出特性での結果と同様、森林率の格差が大きい場合は森林率が高くなるに従い逓減係数が小さくなる傾向が認められるが、森林率が高くなると逓減係数は森林率に関係なく一定となる傾向がみられ、森林が地下水に及ぼす影響には一定の限界があると推察された。一方、奄美の大川ダム流域の森林率は90%を越えていたにもかかわらず、森林率が80%以上の県本土の流域に比べて逓減係数が高く、奄美流域は渇水期の流量の減少割合が大きく、県本土の流域に比べ渇水緩和機能が低いことが示唆された。

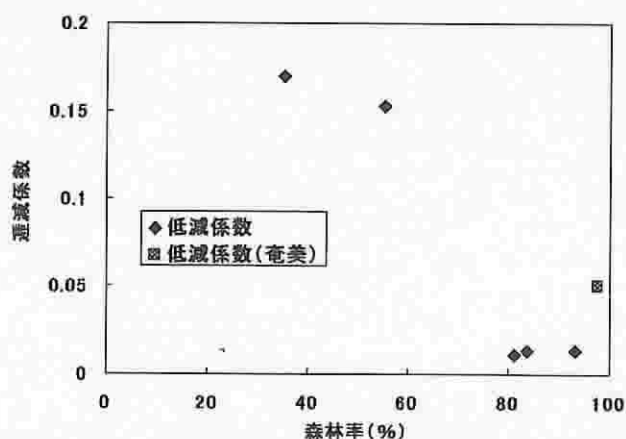


図-17 森林率と逓減係数

5. 各ダム流域の流況特性

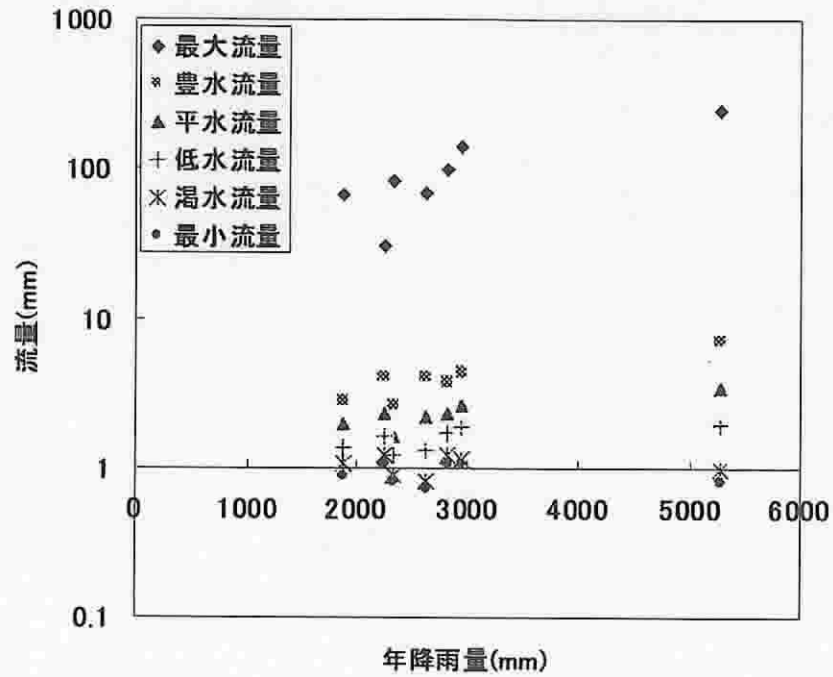
水源かん養機能の主体である「流出の平準化」をみるため、流況曲線はその指標として用いられる。流況曲線

により求められた流況区分値が年降雨量とどのような関係にあるのか、竹山流域における例を図-18 に示した。直接流出成分で大部分が占められる最大流量や豊水流量は年降雨量が増えるほど増えていき、降雨量に大きく影響されていることが分かる。一方、無降雨期の流量にあたる渇水流量や最小流量は基底流出に占められるため変動が少なく、年降雨量には影響されにくいことが分かる。このことから、量の少ない流況区分値ほど流域の特性を安定して表すことが伺える。

表-4 に示した各流域の水年の流況区分値を表-8 に示した。直接流出量の割合が多かった鷹巣、西京流域は豊水流量から平水流量への減少割合が多く、低水流量、渇水流量は0になっている。奄美群島流域は渇水流量が0になっており、年間を通して流出していないことが分かる。志水(1980)は渇水量と流域の表層地質との関係について解析し、第三・第四紀火山岩類、花崗岩類からなる流域は、中・古生層、第三紀層からなる流域に比較し渇水量は多いとしている。しかしながら、IV-4の地下水逓減係数と同じく、地質による明確な差は認められなかった。

森林率と各流域の流況区分値との関係を図-19 に示した。森林率と流況区分値の間には一定の傾向は認められなかった。また、森林率が同程度の奄美群島流域と本土に位置する流域の最小流量は前者ははるかに少なく、前者の渇水流量はいずれも0である。

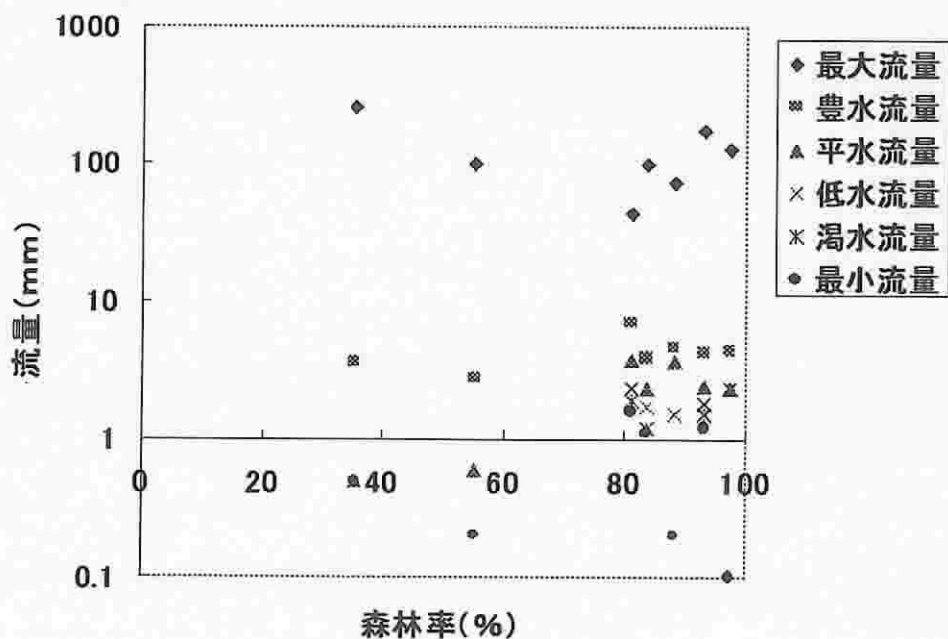
年降雨量と調節量・非調節量との関係について竹山ダムにおける例を図-20 に示した。非調節量は年降雨量の増加にともない増えていくのに対して、調節量は若干の増加がみられるもののほぼ安定した値を示している。低水流量や渇水流量など他の流況区分値と同様に調節量は流域の特性を安定して表すことが伺える。



図一18 年降雨量と流況区分値(竹山ダム)

表一8 各流域の流況区分値

	最大流量	豊水流量	平水流量	低水流量	渇水流量	最小流量	非調節量	調節量
高川	171.9	4.2	2.4	1.8	1.5	1.2	809.9	586.7
竹山	98.1	3.8	2.3	1.7	1.2	1.1	743.7	506.9
高隈	43.2	6.8	3.7	2.3	1.9	1.6	688.8	804.7
鷹巣	257.2	3.5	0.5	0	0	0.5	1,223.0	141.2
西京	99.1	2.7	0.6	0	0	0.2	1,178.6	115.4
大川	126.3	4.3	2.3	2.3	0	0.1	606.8	479.6
神嶺	71.7	4.6	3.6	1.5	0	0.2	560.7	411.3



図一19 森林率と流況区分値

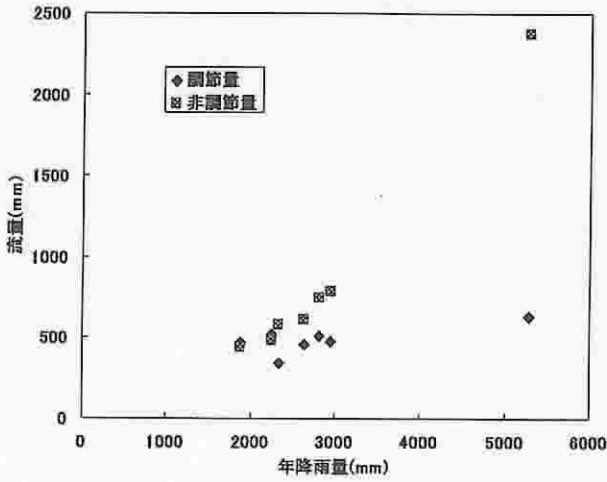


図-20 年降雨量と調節量・非調節量(竹山)

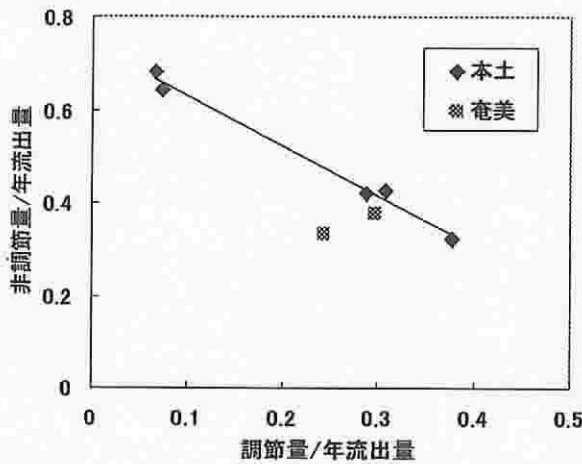


図-21 調節量/年流出量と非調節量/年流出量

各流域における調節量/年流出量と非調節量/年流出量との関係を図-21に示した。年流出量に対する調節量の割合が多く非調節量の割合が少ないほど、水源かん養機能の本質である「流出の平準化作用」は高いといえる。奄美群島流域では本土流域に比べ非調節量/年流出量は低いが、これは年間の日平均流量が少ないことによるものと考えられる。

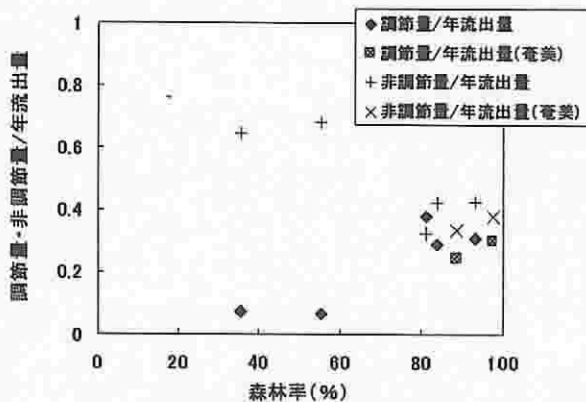


図-22 森林率と調節量・非調節量/年流出量

森林率と調節量/年流出量、非調節量/年流出量との関係を図-22に示した。森林率が高いと年流出量に占める調節流量の割合は高く、一方で非調節流量の割合は低い、すなわち「流出の平準化作用」が高いようである。しかし森林率が80%を越える流域では明らかな差が認められない。

6. 流出に及ぼす流域条件の評価

これまで森林の流出に及ぼす影響を検討するために、流出特性を表す指標値と森林率との関係をみてきた。しかし今回の結果からは、流域からの流出量は、森林率に大きな格差がある場合には一定の傾向をもって増減するものの、ある一定の森林率を超えると森林に関係はなくなり一定値に収束する傾向が認められた。これは調査対象流域をダム流域としたため流域の規模が大きく、流域内の地形や地質などの複数の要因が流出に影響を及ぼしており、森林率という単一の因子のみの影響は見いだしにくいと考えられる。

そこで流域の地形や地質、森林が流量にどの程度影響しているのか統計解析による評価を行った。解析法は田中豊ら(1995)の重回帰分析により行い、年流出量や流況区分値を目的変数とし、年降雨量や地形、地質、森林率を説明変数とした。説明変数は地形、地質、森林を表す表-2の因子を採用した。地形因子としては流域の規模を表す流域面積、流域の形状を表す形状係数、流域の性質を表す主溪流勾配、代表傾斜である。地質因子としては九州地区林業試験研究機関協議会(1985)によるヒノキの林地生産力を地質について評価した指数を用いた。このため地質指数が大きい地質ほど林地の生産力が高いことを表している。森林は流域面積における森林面積の比率を表す森林率を用いた。土壌の流出には土壌の孔隙組成が大きく影響しているが、有光(1987)は表層地質による母材の違いが土壌の孔隙組成の違いをもたらすとしている。そのため表層地質を説明変数に採用したことにより、今回は土壌型は説明変数には採用しなかった。

表-9に重回帰分析における各因子の標準回帰係数を示した。流出量、直接流出量、基底流出量の年総量では、形状係数は有意な因子ではなかった。流況区分値のうち、年降雨量は基底流出成分の多い低水流量、湧水流量、最小流量において有意な因子となっていない。森林率は直接流出成分の多い最大流量、豊水流量では有意な因子とはなっていないが、基底流出成分が多くなっていく平水流量以下の流量では有意な因子となっている。

表-9 重回帰分析による各因子の標準回帰係数

流 量	年降雨量	地		形		表層地質	森林率	R ² 乗値
		流域面積	形状係数	溪流勾配	代表傾斜			
年流出量	(0.908)	(-0.051)	(-0.229)	(0.199)	(0.597)	(-0.527)	(-0.471)	0.884
	0.817	-0.033	-0.215	0.089	0.500	-0.236	-0.501	
直接流出量	(0.882)	(-0.726)	(0.071)	(0.423)	(0.604)	(-0.329)	(-0.345)	0.817
	0.884	-0.846	0.081	0.258	0.639	-0.167	-0.432	
基底流出量	(0.771)	(0.737)	(-0.267)	(0.637)	(0.276)	(-0.484)	(-0.374)	0.899
	0.427	0.651	-0.237	0.339	0.180	-0.296	-0.352	
最大流量	(0.682)	(-0.361)	(0.166)	(0.423)	(0.439)	(-0.011)	(-0.126)	0.538
	0.700	-0.493	0.306	0.595	0.654	-0.008	-0.236	
豊水流量	(0.729)	(0.506)	(-0.278)	(0.654)	(0.159)	(-0.599)	(-0.259)	0.811
	0.512	0.477	-0.232	0.484	0.078	-0.362	-0.321	
平水流量	(0.585)	(0.716)	(-0.479)	(0.879)	(0.249)	(-0.502)	(-0.497)	0.899
	0.254	0.612	-0.465	0.756	0.161	-0.206	-0.501	
低水流量	(0.271)	(0.637)	(-0.492)	(0.886)	(0.259)	(-0.369)	(-0.548)	0.870
	0.112	0.558	-0.545	0.889	0.219	-0.160	-0.648	
渇水流量	(0.191)	(0.682)	(-0.751)	(0.922)	(0.601)	(-0.458)	(-0.814)	0.917
	0.062	0.503	-0.878	0.883	0.427	-0.165	-1.110	
最小流量	(0.193)	(0.662)	(-0.751)	(0.894)	(0.531)	(-0.355)	(-0.767)	0.875
	0.077	0.584	-0.878	0.906	0.436	-0.149	-1.159	

()上段書きは偏相関係数, 部は重回帰分析において有意確率 p 値 > 0.05 の因子

表-9の流出量における各因子の標準回帰係数を図化したのが図-23である。年流出量では年降雨量の標準回帰係数が最も大きく、年降雨量が年流出量に非常に大きく影響しているという当然の結果を得た。地形因子の中で代表傾斜の標準回帰係数が0.5と大きいものの、地形因子は全体的に標準回帰係数は小さく解析に有意でない因子が多かった。森林率は年降雨量の次に標準回帰係数が大きい負の値であり、森林率が大きいほど年流出量を減少させることを示唆している。表層地質の標準回帰係数は負の小さな値であり、地質指数が大きいほど年流出量を減少させる方に作用している。これは林地の生産力が高いほど、林地の表層土が透水性や保水性が高く、また植生の成長量が大きく蒸散量が多いことが年流出量を減少させているものと推察される。

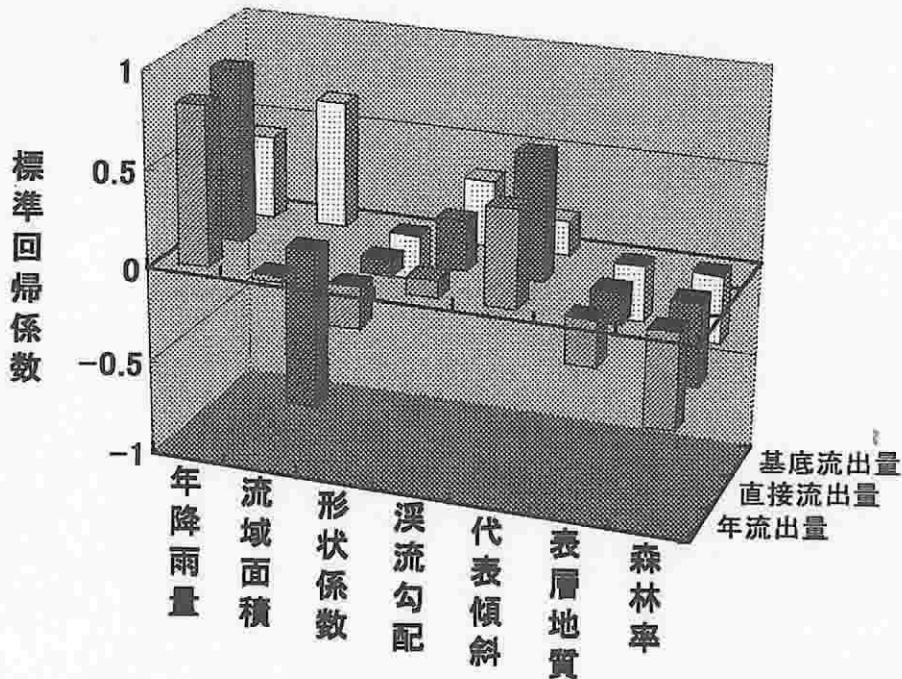
直接流出量では年流出量と同様に年降雨量の標準回帰係数が最も大きかった。次に標準回帰係数が大きかったのは地形因子の流域面積で、負の値を示しており流域面積が大きいほど直接流出量を減少させる方に作用することを示唆している。地形因子の代表傾斜や主溪流勾配は正の値を示し、傾斜が急なほど、また溪流勾配が急なほ

ど直接流出量を増加させる方に作用することが伺える。形状係数は負の小さな値を示した。表層地質と森林率は負の値を示している。森林率は年流出量と同様、森林率が高いほど直接流出量を減少させることがわかる。採用した因子では年降雨量を除けば、地形因子の標準回帰係数が他の因子に比べ相対的に高く、直接流出には地形が大きく影響していることが示唆された。

基底流出量では年降雨量の標準回帰係数は高いものの、年流出量や直接流出量での場合と比べ、標準回帰係数は小さくなっている。流域面積は直接流出量と同じく標準回帰係数は高いものの正の値を示しており、流域面積が大きいほど基底流出量は大きくなることが伺える。形状係数と代表傾斜は偏相関係数は低い、形状係数は負の値を示しており、形状係数が大きいほど基底流出量は少ないことが分かる。森林率の標準回帰係数は年流出量や直接流出量の場合と同様に負の値を示しており、基底流出量を減少させる方に作用している。表層地質の標準回帰係数は直接流出量の場合と比べて大きく、基底流出成分が多く占める基底流出量は地下水の経路にあたる山体内部の地質構造に影響されることが示唆された。

年流出量、直接流出量、基底流出量において各因子の標準回帰係数の変動をみると、年降雨量はどの流出量においても標準回帰係数は大きかった。地形因子の中の規模を表す流域面積は大きいほど、直接流出量を減少させる方に働き、基底流出量を増加させる方に作用していた。流域の形状を表す形状係数は全体的に標準回帰係数は小さく、年流出量とは有意ではない因子であった。流域地

形の性質を表す溪流勾配や代表傾斜は急であるほど、流出量を増加させる方に作用していた。表層地質や森林率は負の値を示しており、流出量を減少させる方に作用していた。これは林地の生産力が高いほど、また森林率が高いほど、植物の成育活動が活発で蒸発散量が多く、そのことが流出量を減少させる方に作用しているものと推察される。



図一23 流出量における各因子の標準回帰係数

次に表一9の流況区分値における各因子の標準回帰係数を図一24に示した。

先ず最大流量についてみると、年降雨量の標準回帰係数が最も大きく、年間のピーク日流量にあたる最大流量は降雨量に大きく影響されるという、当然の結果が得られた。降雨量を除く因子では地形因子の標準回帰係数が相対的に大きい。このことから直接流出成分が大部分を占める流量は、地質や森林率の因子よりも地形因子により大きく影響されることが伺える。流域の規模を表す流域面積の標準回帰係数は、直接流出量の場合と同様に負の値を示しており、流域面積が大きくなるほど最大流量を減少させる方に作用することを示唆している。流域の形状を表す形状係数、流域地形の性質を表す主溪流勾配、及び代表傾斜は正の値を示している。形状係数は値が大きくなると流域の形状は円形に近づき、小さくなると流域は細長くなることを表す。流域の形状が円形に近くなるほど、また主溪流勾配や代表傾斜が急になるほど最大

流量は大きくなることを示唆している。一方地質や森林率は負の値を示しているが、有意な因子ではなかった。

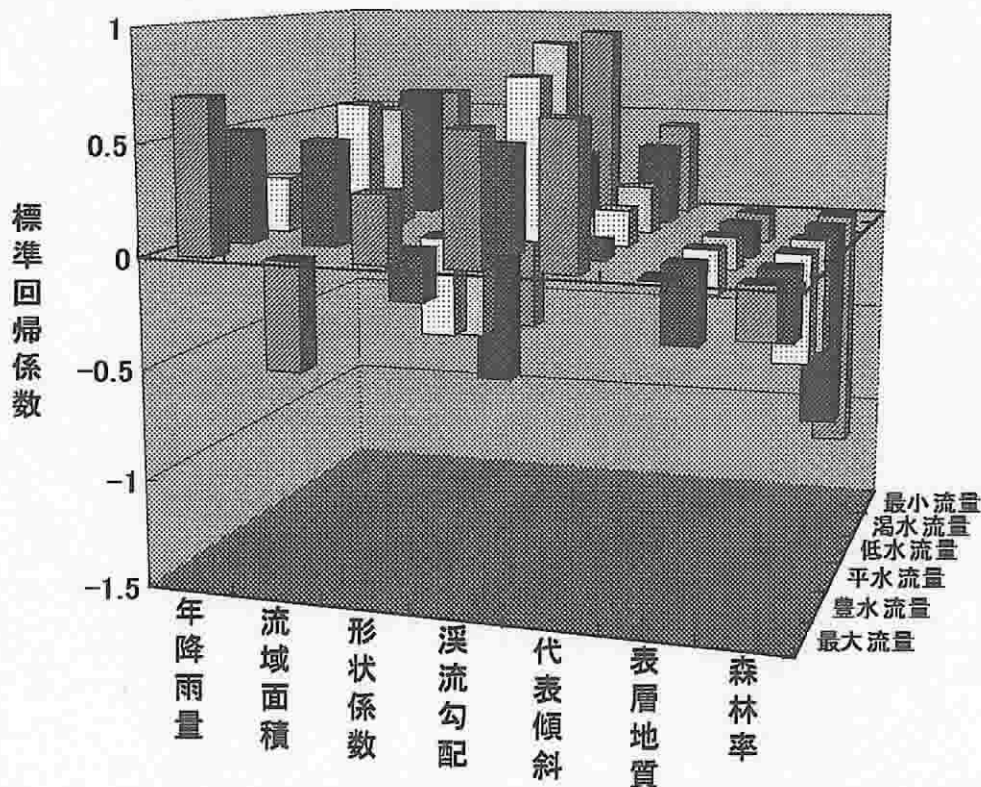
次に豊水流量についてみると、最大流量と同様に年降雨量の標準回帰係数が最も大きい、最大流量での標準回帰係数に比べ小さくなっている。地形因子の回帰係数は最大流量と比べて異なった傾向になっている。流域面積は最大流量の場合と異なり正の値を、形状係数は負の値を示し、直接流出量、基底流出量での解析と同様な結果がここでも得られた。流域面積が大きくなるほど、直接流出成分が大部分を占める最大流量を減少させ、基底流出成分が多くなってくる豊水流量を増加させることが分かる。形状係数の標準回帰係数も最大流量と異なり負の値を示しているが、これは円形に近い流域ほど地下水流量が少なくなることを示唆している。最大流量と比べて標準回帰係数は降水量や地形因子の値が相対的に小さくなり、地質や森林率の値が大きくなっている。

湧水流量についてみると、年降雨量は標準回帰係数が

小さく、有意でない因子となっている。全因子の中では森林率の標準回帰係数が最も大きく、渇水期の流出に大きく影響を及ぼすことが伺える。森林率の回帰係数は負の値を示し、森林からの蒸発散により流量を減少させていることが示唆された。地形因子の回帰係数は他の流況区分値の場合と同様に他の因子と比べ相対的に高い値を示している。

最大流量から最小流量へと各因子の標準回帰係数の変動をみると、年降雨量は流量の多い方では標準回帰係数は大きく、流量に大きく影響を及ぼしている。しかし流量の少ない方にあたる低水流量からは標準回帰係数は小さくなり、流量とは有意でない因子となる。流域の規模を表す流域面積はどの流量においても有意な因子であり、流域の水保全機能を評価する場合には重要な因子となる。最大流量では流量を減少させる方に作用するが、豊水流量からは流量を増加させる方に作用していた。形

状係数では流域の形状が円形に近くなるほど、直接流出成分がほとんどを占める最大流量では流量を増加させるが、豊水流量からは流量を減少させる方に作用している。主溪流勾配や代表傾斜では標準回帰係数はどの流量においても正の値を示し、傾斜が急になるほど流量を増加させる方に作用している。主溪流勾配はどの流量においても有意な因子であり、流域面積と同様に流域の水保全機能を評価する場合の重要な因子となる。表層地質の標準回帰係数はどの流況値でも負の値を示し、林地生産力の高い地質は流量を減少させる方に作用していた。森林率の標準回帰係数も表層地質と同様にどの流況値でも負の値を示しているが、相対的に表層地質より標準回帰係数は大きかった。最大流量から最小流量へと森林率の標準回帰係数は徐々に値が大きくなり、森林率が高くなると低水期の流量を減少させる方に作用することが伺えた。



図一24 各流況区分値における各因子の標準回帰係数

V 摘 要

今回の結果をまとめると次のとおりである。

1. 流域の年水収支においては、流域の森林率が高いほど流出率は低かった。また森林率が同程度の流域にあ

っては、針葉樹林率が高い流域の流出率がより低かった。森林は蒸発散により流出量を減少させており、針葉樹林は広葉樹林に比べて蒸発散量が多く流出量をより減少させていることが示唆された。

2. 森林率が高い流域ほど、直接流出率が低くて基底流出率が高く、水源かん養機能の本質である「流出の平

準化」作用は高いことが推察された。

3. 一降雨量と直接流出量との関係における、遷移雨量の値はいずれの流域も 50 ~ 65mm であり、流域による差違は認められなかった。基本流出率は森林率が高くなるにしたがって低くなる傾向があったが、森林率が 80 % を越えた流域では、いずれも 0.08 前後の値を示し、流域による差違は特に認められなかった。1 次付加流出率も森林率が高くなるにしたがって低くなる傾向があったが、森林率が 80 % を越えた流域においては、一定の傾向が認められなかった。
4. 不被圧地下水の低減量を表す式における逓減係数は、森林率が高くなるにしたがって小さくなる傾向があったが、森林率が 80 % を越えると本土の流域ではいずれも 0.01 程度の値を示し、流域による差違は認められなかった。一方、奄美の一流域の逓減係数は森林率が 90 % を越えていたにもかかわらず 0.05 と大きかった。
5. 2,3,4 においては、森林率に格差がある場合には森林の影響が認められた。しかし流域の森林率が 80 % を超えると、いずれも森林率に関係なくほぼ一定の値に収束する傾向が認められた。これらから、「流出の平準化作用」に及ぼす森林の影響には一定の限界があるものと推察された。
6. 流域における地形や地質、森林の条件が流出に及ぼす影響をみるために流量を目的変数とし、地形などを説明変数とする重回帰分析を行った。
7. 年流出量では年降雨量の標準回帰係数が最も大きかった。次に森林率が負の大きな値を示し、森林率が高いほど流出量を減少させる方に作用していた。
直接流出量では年降雨量の標準回帰係数が最も大きかった。次に流域面積や代表傾斜などの地形因子の標準回帰係数は表層地質や森林率の場合よりも相対的に大きく、直接流出には、地形が大きく影響していることが示唆された。
8. 基底流出量では年降雨量や地形因子の標準回帰係数は、年流出量や直接流出量での場合に比べ相対的に小さくなっており、一方で表層地質の標準回帰係数が、年流出量や直接流出量の場合に比べて高くなっていた。地下水成分が多く占める基底流出には、山体内部の地質構造が影響を及ぼす度合いが大きくなることが示唆された。
9. 流況区分値における直接流出成分の多い最大流量は年降雨量に大きく影響され、その次には主溪流勾配や代表傾斜などの地形因子に大きく影響されていた。豊水流量から最小流量へと地下水成分が多くなる流量に

つれ、森林率の標準回帰係数は大きくなり、蒸発散により流量を減少させる方に作用していた。

今回は流出に森林が及ぼす影響について流出の特性を表す指標値を用いて検討した。結果からは森林率が高い流域ほど直接流出量は少なく基底流出量は多い、すなわち「流出の平準化作用」が高いことが認められた。しかし調査対象流域が少なかったこともあり、流出における森林の明らかな影響が認められたのは流域の年消失量のみであった。他の特性値との関係においても森林率に格差がある場合は森林の影響が認められたが、流域の森林率が 80 % を超えると森林の影響は認められなかった。重回帰分析の結果では、直接流出や基底流出についても、森林率より地形などの立地条件が流出に大きく影響を及ぼしていた。

竹下(1985)は流出には森林土壌の孔隙構造が重要な役割を果たしているとしている。一方で塚本(1998)は森林が成立し年数が経過すると森林土壌は定常状態になり、森林整備による「流出の平準化作用」の増進については限界があるとしている。また太田(1991)は森林が有する機能のほとんどが高度に発揮される前提条件として、森林の土保全機能の発揮が求められるとしている。森林の水源かん養機能に関しては、森林率が高い流域において流量のみから森林を評価していくには限界があり、森林からの蒸発散量や「流出の平準化」の主体である土壌構造を定量的に評価していく必要があると考えられる。さらには流出に重要な役割を果たしている森林土壌の保全機能、いわゆる土保全機能を評価していくことも益々重要になると思われる。

しかし何れにしても、今回の結果から流域の流出において森林の影響が明らかに認められたのは、流域の年消失量、すなわち蒸発散量であり、今後森林を管理・整備していくうえでは念頭に置いておかねばならない重要な視点となる。特に針葉樹林は広葉樹林に比べ蒸発散量が多く流出量を減少させていることから、水保全機能の面から判断すると、現在のスギ、ヒノキに偏った森林資源から、広葉樹資源をより増やしていく森林整備のあり方が今後必要と考えられる。

現在間伐の手遅れにより公益的機能の低下が懸念されるスギ、ヒノキ林においては、公益的機能の維持・向上を図るうえから、間伐、枝打ちの早急な実施が求められ整備が進められている。ここでいう公益的機能は主に土保全機能のことである。しかしながら見方を変えると、間伐、枝打ちは森林の葉量を減少させることである。このことは森林からの蒸発散量を減少させ、流量を増加させることになり、もう一つの目的である水保全機能の面

からも好ましい状況に導くことになる。

国や地方公共団体における財政事情が極めて厳しい状況下、国民の理解を得ながら森林を適正に整備していくためには、これまで以上に森林整備の目的を具体的に提示し、効果的に事業を実施していくことが求められてくる。そのためにも明確な森林整備のゾーニングが今後益々重要になってくると考えられる。

謝 辞

この研究を進めるにあたり、高川ダム管理事務所の堤下管理係長、竹山ダム管理事務所の大庭ダム管理主任、高隈ダム管理事務所の原崎管理係長、東町役場耕地課の本田事業推進係長、西之表市役所農水土木課の牧農業土木係長、名瀬市役所農地林政課の橋口技師、徳之島町役場耕地課の中島課長には、ダムで観測された降雨量、流入量などの資料を御多忙にもかかわらず快く提供頂いた。ここに関係各位に深く感謝の意を表する。

引用文献

- 有光一登(1987) 森林土壌の保水の仕組み, 創文: 93-100
 安藤義久ら(1982) 山地河川の長期流出解析に関する一考察, 土木学会論文集 318: 93-105
 鹿児島県農地整備課(1994) 鹿児島県における農業用水源施設等の概要, 鹿児島県: 3-5
 鹿児島県企画部(1978) 土地分類基本調査(出水)
 鹿児島県企画部(1973) 土地分類基本調査(加治木)
 鹿児島県企画部(1977) 土地分類基本調査(栗野)
 鹿児島県企画部(1971) 土地分類基本調査(鹿屋・志布志)
 鹿児島県企画部(1980) 土地分類基本調査(種子島)
 鹿児島県企画部(1981) 土地分類基本調査(奄美大島北部・喜界島)
 鹿児島県企画部企画調整課(1990) 鹿児島県の地質
 鹿児島県・鹿児島地方気象台(1990～1996) 鹿児島県農業気象月報
 九州地区林業試験研究機関協議会(1985) 九州各県のヒノキ林地生産力(Ⅱ): 13-19
 経済企画庁総合開発局(1971) 土地分類図
 太田猛彦(1991) 土保全のための森林管理モデル, 森林科学 3: 36-40
 志水俊夫(1980) 山地流域における湧水量と表層地質・傾斜・植生との関係, 林業試験場研究報告.310: 109

-128

- 高木不折(1966) 低水流出の低減特性に関する研究, 土木学会論文集 128: 1-11
 竹下敬司(1985) 森林土壌と水源かん養機能, 森林立地 XXVII(2): 19-26
 田中豊ら(1995) 統計解析ハンドブック, 共立出版: 19-54
 高橋裕ら(1982) 山地河川流域の直接流出特性とそれに対する土地条件の効果, 第26回水理講演会論文集: 197-203
 塚本良則ら(1984) 水管理のための森林施業序論, 水利科学 158: 28-61
 塚本良則(1998) 森林の現状にふさわしい水源かん養林の考え方, 林業技術.680: 7-10