

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
Direct Runoff Characteristics of Mountainous Basins

東京大学工学部土木工学科 正員 高橋 裕
東京大学工学部土木工学科 正員 安藤義久
電 源 開 発 株式会社 正員 ○有賀 茂

1. 緒 論

山地河川流域を対象とした洪水流出解析と低水流出解析のいずれにおいても、一雨雨量と直接流出量の対応関係を明らかにすることは重要であると考えられる。本稿では、山地河川流域を対象にして、一雨雨量と直接流出量との関係を定式化し、そのパラメーターと流域の土地利用、地質、土壌などの土地条件との対応関係を検討し、直接流出特性に対する流域の土地条件の効果を明らかにする。

2 一雨雨量と直接流出量の関係の定式化

2-1 既往の研究

一雨ごとの雨量と直接流出量の関係については、従来から様々な提案がなされている。以下に、主な既往の研究について簡単に述べる。武田¹⁾は、一雨雨量と直接流出量との関係が雨量の階級により数個の直線関係で表わされるとしている。高橋²⁾は、一雨雨量と直接流出量との関係は、一雨雨量のある範囲内で、指数曲線的に表わされると報告している。木村³⁾は、河川流域内を流出地域と浸透地域に大別し、流出面積の比で与えられる一次流出率を設定し、さらに降雨の浸透量に限界値を与え、飽和雨量を提案している。

2-2 瀬戸試験地における一雨雨量と直接流出量の関係の定式化

(1) 対象流域の概要

対象流域は、東京大学愛知演習林内の瀬戸試験地の中の、山地の自然流域である白坂流域と東山流域である。これらの流域は、東京大学農学部付属し、森林理水および砂防工学の研究に資するために、昭和初年から精度の高い水文観測が行なわれており、現在も継続されている。この結果をもとに、Yamaguchi et al⁴⁾により、森林の理水効果を中心とした水文学的研究が行なわれている。表1には、白坂流域と東山流域の概要を示すが、両流域とも流域面積が1 km²前後の花崗岩類の流域であり、林相は良好である。

表1 瀬戸試験地の白坂流域と東山流域の概要

流域名	流域面積 (ha)	起伏量 (m)	森林面積率 (%)	地 質	林 相 (ha)
白 坂	88.5	335.0	90.6	深層風化の花崗岩	人口造林地 11.4
					マツおよび雑木地 68.8
					禿しゃ、崩壊跡地 7.4
					除地 0.9
東 山	106.7	270.5	91.2	深層風化の花崗岩	マツ中心の天然生林 59.3
					禿しゃ、崩壊跡地 9.4
					マツおよび雑木地 38.0

(出典：参考文献4)および5)

(2) 一雨雨量と直接流出量の関係の定式化

ここで用いたデータは、参考文献5)に収められている昭和5年から昭和20年までの日雨量、日流量データである。直接流出量と基底流出量の分離法としては、流出量の増加日を起点として、この点とピーク流量発生後2日目の点を直線で結ぶという簡易法を用いた。

図1には、白坂流域と東山流域について、横軸に一雨雨量（P），縦軸に直接流出量（D）をとり、流域ごとに両者の関係を図示した。これらの相関図により、（P，D）の点が、次の①式の折線と②式の直線に囲まれた領域内にあることがわかる。

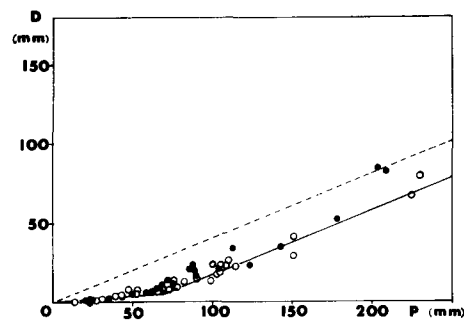
$$\text{折れ線：} \quad D = \left\{ \begin{array}{ll} f_0 P & 0 \leq P < P_1 \\ f_0 P + f_1 (P - P_1) & P_1 \leq P \end{array} \right\} \quad \dots\dots ①$$

$$\text{直線：} \quad D = f P \quad (f = f_0 + f_1) \quad \dots\dots ②$$

ここで、 f_0, f_1, P_1 は、安藤・高橋⁶⁾により、それぞれ基本流出率、1次付加流出率、1次遷移雨量と命名されている。表2には、白坂流域と東山流域の直接流出のパラメーターの値が示されている。 f_0 の物理的意味は、小雨（ $0 \leq P < P_1$ ）における流出域の面積率であり、全流域面積の中で河道および河道周辺の湿地河原など常時はば飽和状態である領域（飽和流出域と命名）の占める面積率に対応すると考えられている。このことを確認するために、白坂流域と東山流域の飽和流出域を地図と現地踏査により、図2のように図化し、飽和流出域の面積率を算定したところ、両流域とも0.08程度であり、基本流出率（ f_0 ）の値とほぼ一致した。従って、基本流出率（ f_0 ）は、飽和域面積率に等しい結果になった。1次付加流出率（ f_1 ）は、飽和流出域の拡大と中間流出成分の発生という2つの要因が複合したと考えられる直接流出量の増加率を表わす。また、1次遷移雨量（ P_1 ）は、この雨量を境界として流出形態が遷移するという意味で、1次遷移雨量と名付けられている。

次に、直接流出特性に対する流域の乾湿の影響について検討する。Linsley et al⁷⁾は、湿潤地域では、地下水流出量が流域の乾湿の状態を表わす指標として使用可能であると報告しているので、ここでは降雨日の前日の流出量を地下水流出量と仮定し、流域の乾湿状態の指標として扱う。地下水流出量が1.5mm/日以上の時を湿潤状態とし、それ未満の時は乾燥状態と考える。図1の中で、黒丸が湿潤状態を表わし、白丸が乾燥状態を表わす。図1に示す2流域とも黒丸が白丸より上方に分布しており、湿潤状態の場合には点が②式に示す直線に近づいていることがわかる。このことから、 $f = f_0 + f_1$ は、流域が湿潤状態に達している時の直接流出率であり、（P，D）の点の上限を与えるといえる。

(a) 白坂流域



(b) 東山流域

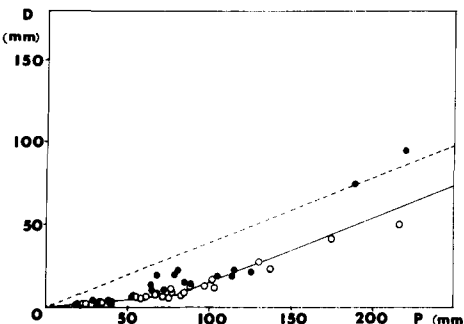


図1 瀬戸試験地の白坂流域と東山流域における一雨雨量（P）と直接流出量（D）の相関図

表2 瀬戸試験地の白坂流域と東山流域の直接流出のパラメーターの値

流域名	f_0	f_1	$f = f_0 + f_1$	P_1
白坂	0.07	0.33	0.40	70
東山	0.09	0.30	0.39	80

3-2 多目的ダム流域における一雨雨量と直接流出量の関係

対象とする多目的ダム流域における直接流出量と基底流出量の分離法としては、流量の増加日を起点として、この点とピーク流量発生後2日目の点を直線で結び、その線より上を直接流出量とする簡易法を用いた。ここで、2日目というのは、Linsley et al⁹⁾が示した次式による。

$$N = 0.8 A^{0.2}$$

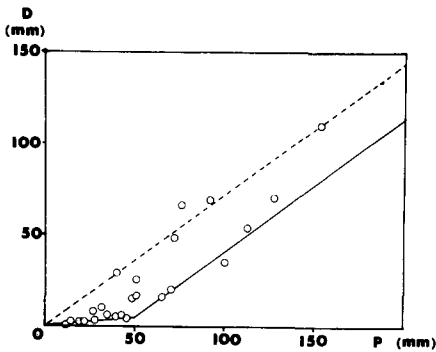
.....③

但し、N：ハイドログラフのピーク発生以後、直接流出が続く日数(日)、A：流域面積(km²)である。

③式より、流域面積が20 km²から300 km²の範囲では、ほぼN=2(日)としてさしつかえなく、しかも本研究で対象とする多目的ダムの流域面積の多くは、上記の範囲に含まれる。

上述の方法に従って、対象流域ごとに、一雨雨量と直接流出量の関係を求め、横軸に一雨雨量(P)、縦軸に直接流出量(D)をとり、プロットした。その二例を図4に示す。図4に示すように、多目的ダム流域においても、瀬戸試験地で定式化された一雨雨量と直接流出量の関係式(①および②式)が有効であることがわかる。

(a) 蔵王ダム流域



(b) 品木ダム流域

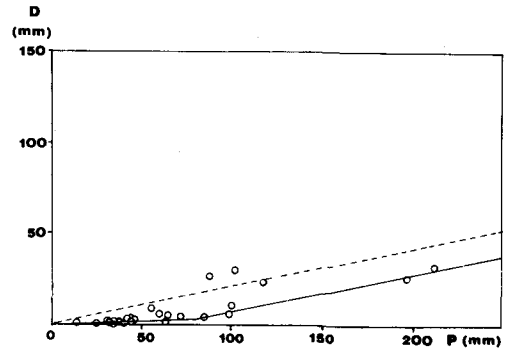


図4 多目的ダム流域における一雨雨量(P)と直接流出量(D)の相関図

3-3 直接流出のパラメーターfと流域面積との対応関係

直接流出のパラメーターfと流域面積との対応関係を検討する。図5は、本研究で対象とする多目的ダム流域の流域面積(A)を横軸にとり、各流域のfの値を縦軸にとり、プロットした図である。この図をみる限りでは、直接流出のパラメーターfと流域面積Aとの間には、有意な関係がみられないことがわかる。

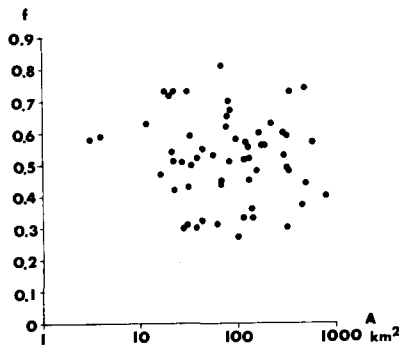


図5 多目的ダム流域における直接流出のパラメーターfと流域面積Aとの相関図

3-4 直接流出のパラメーターと流域の地質との対応関係

流出特性に対する流域の地質の効果に関しては、虫明・高橋・安藤¹⁰⁾および高橋・安藤・井上¹¹⁾が流域の地質は流況全般に大きな効果を及ぼすことを明らかにしており、前者は地質区分として、第四紀火山岩類、第三紀火山岩類、第三紀層、花崗岩類、中生層、古生層という区分を提案している。本稿でも同じ地質区分を採用する。また、青木・石崎・岸井・長谷川¹²⁾は、全国の流出試験地のデータに基づき、浸透性流域の流出率は非浸透性の流域の流出率と比べてかなり小さいことを明らかにしている。

表3には、対象とする58の多目的ダム流域を流域の地質により区分し、直接流出のパラメーター f_0 、 f_1 、 f 、 P_1 の地質別の平均値と標準偏差を示す。表3に関する考察を以下に列記する。

- (1) 基本流出率 f_0 についてみると、地質間に大差はなく、全国的に0.08前後の値をとることがわかる。このことは、前述したように、 f_0 の値は流域の飽和流出域の面積率とほぼ一致するので、湖水面・河道・水田・湿地などの飽和流出域の面積率が山地河川流域の場合には全国的に0.08程度であることと対応していると考えられる。
- (2) 一次付加流出率 f_1 および直接流出率 f に関しては、花崗岩類流域の値が他の地質に比べて小さいことがわかる。また、残りの4つの地質区分の中では、第四紀火山岩類流域が平均値では他の地質の流域より若干小さい値を示すものの、バラツキが大きいので、この結果だけで地質間の大小を断定することはできない。花崗岩類流域の f_1 と f が他の地質より低い値を示すことについては、従来いわれているように、日本の花崗岩類地帯はほとんどがマサ化されており、浸透性が良好であるということと照らしあわせると、妥当な結果といえる。
- (3) 一次遷移雨量 P_1 に関しては、地質による差異はみられず、ほぼ50mmから70mmの間にあるといえる。

表3 直接流出のパラメーターの地質別の平均値と標準偏差

流域の地質 \ パラメーター	f_0		f_1		$f = f_0 + f_1$		P_1	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
第四紀火山岩類	0.07	0.02	0.43	0.16	0.50	0.16	55.7	12.9
第三紀火山岩類	0.10	0.03	0.45	0.03	0.55	0.03	57.5	8.7
花 崗 岩 類	0.09	0.02	0.37	0.12	0.47	0.12	60.8	8.8
中 生 層	0.08	0.02	0.47	0.14	0.54	0.14	60.0	14.5
古 生 層	0.08	0.02	0.46	0.14	0.55	0.14	54.6	10.8
全 流 域	0.08		0.44		0.52		58.0	

3-5 直接流出のパラメーター f と流域の土壌の関係

流域の土壌が流出特性を左右する要因であることは容易に推察される。中野¹³⁾は、地下流出量涵養に対する貢献度により土壌型の類別を行なっているので、本稿ではこの土壌分類に従い、土壌の浸透性により、表4に示すように土壌を3つに分類した。すなわち、クロボク土と褐色森林土壌を浸透性大とし、褐色森林土壌のうち黄褐系と赤褐系は浸透性が中程度とし、上記以外の土壌は浸透性が小とする。さらに、次式のように土壌指標 S を定義した。

$$S = 1.0 \times x + 0.5 \times y + 0 \times z \qquad \dots\dots ④$$

ここで、 x ：浸透性大の土壌の占有面積率（％）、 y ：浸透性中の土壌の占有面積率（％）、 z ：浸透性小の土壌の占有面積率である。④式の右辺の係数は、各土壌分類の重みを表わし、ここでは簡単のために、表4中に示すように、1.0、0.5、0の重みと仮定した。58の多目的ダム流域について、経済企画庁発行の土地分類図¹⁴⁾中の20万分の1の都道府県別の土壌分類図を用いて、各土壌分類の占有面積率 x 、 y 、 z を求め、④式により各流域の土壌指標 S の値を算定した。

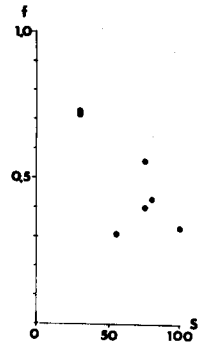
図6には、地質別に、直接流出率 f と土壌指標 S との相関図を示す。図中、縦軸は直接流出率 f であり、横軸は土壌指標 S であり、 S が大きいほど浸透性の良好な土壌が広く分布することを意味する。図6をみる

と、第三紀火山岩類と花崗岩類の流域では、Sとfの間に明瞭な関係がみられないが、第四紀火山岩類と中生層と古生層の流域ではSが大きいほどfが小さい傾向が明らかにみられる。すなわち、浸透性が大きい土壌が広く分布している流域ほど直接流出率が小さいことがわかる。以上のことから、直接流出特性に対する流域の土壌の効果があることが示されたといえる。

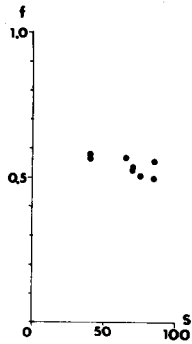
表 4 浸透性による土壌の分類

土 壌 の 種 類	浸 透 性	重 み	面 積 率(%)
ク ロ ボ ク 土 褐色森林土壌（一般）	大	1.0	x
褐色森林土壌（黄褐色） 褐色森林土壌（赤褐色）	中	0.5	y
岩 石 地 岩 屑 土 残 積 性 未 熟 土 乾 性 褐 色 森 林 土 壌 乾 性 ポ ド ゾ ル 湿 性 ポ ド ゾ ル 赤 色 土 黄 色 土 暗 赤 色 土 灰 色 低 地 土 グ ラ イ 土	小	0	z

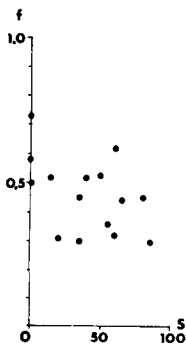
(a) 第四紀火山岩類流域



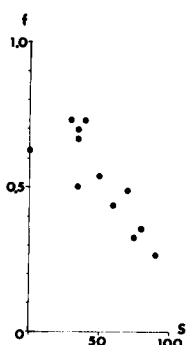
(b) 第三紀火山岩類流域



(c) 花崗岩類流域



(d) 中生層流域



(e) 古生層流域

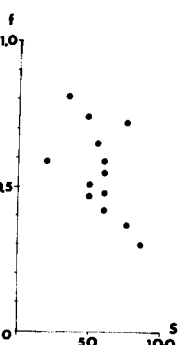


図 6 多目的ダム流域における直接流出率 f と土壌指標 S との地質別の相関図

4. 結論と今後の課題

本研究で得られた主要な成果を以下に列記する。

- (1) 山地河川流域の一雨雨量(P)と直接流出量(D)との対応関係を定式化することができた。すなわち、点(P , D)は、折線①と直線②に囲まれた領域にあることが示せた。また、流域が湿潤状態の時には、点(P , D)は直線②に接近することが明らかとなった。

$$D = \begin{cases} f_0 P & 0 \leq P < P_1 \\ f_0 P + f_1 (P - P_1) & P_1 \leq P \end{cases} \cdots \textcircled{1} \quad D = f P \quad (f = f_0 + f_1) \cdots \textcircled{2}$$

- (2) ①式中の基本流出率 f_0 は、飽和流出域の占有面積率とほぼ一致することが明らかにされた。
(3) 直接流出率 f と流域面積との間に有意な関係はみられなかった。
(4) 一次遷移雨量 P_1 は、流域の地質によらず、ほぼ50 mmから70 mmの間にあるといえる。
(5) 直接流出率 f に対しては、流域の地質だけでなく、流域の土壌の効果も大きいことが、浸透性による土壌分類に基づく土壌指標 S と f との対応関係から示せた。

今後の課題としては、対象流域の数を増やして、一雨雨量と直接流出量との関係式の妥当性をさらに検討するとともに、土壌の分類法と土壌指標について、より詳細な検討を加えていく必要があると考えている。

謝 辞

貴重な水文データを提供していただいた東京大学農学部山口伊佐夫教授と東京大学愛知演習林の諸戸清一講師に深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 武田繁後：年流出量と主なる降雨の増水量に就て（宝川森林治水試験第2回報告），林業試験所研究報告，№50，PP. 1～87，1956.
- 2) 高橋敏男：山岳水源地からの出水，赤川洪水調節に関する水理気象学的研究，昭和33年度報告，PP. 7～22，1959.
- 3) 木村俊晃：貯留関数法，土木技術資料3-12，4-1，4-4，4-5，4-6，4-7，1961.
- 4) Yamaguchi, I. and Nishio, K. : Studies on forest hydrology in the Tokyo University Forest in Aichi, Journal of the Japanese Forestry Society, Vol. 61, №4, PP. 135～141, 1979.
- 5) 愛知演習林・演習林研究部：愛知演習林水量観測結果報告(I)および(II)，東京大学農学部演習林，№20および№21，1976および1977.
- 6) 安藤義久・高橋 裕：山地河川の長期流出解析に関する一考察，土木学会論文報告集投稿中。
- 7) Linsley, R. K., Kohler, M. A., and Paulhus, J. L. H. : Hydrology for Engineers, McGraw-Hill, P. 265, 1958.
- 8) 建設省河川局：多目的ダム管理年報，1965～1975.
- 9) Linsley, R. K., Kohler, M. A., and Paulhus, J. L. H. : Hydrology for Engineers, McGraw-Hill, p. 230, 1958.
- 10) 虫明功臣・高橋 裕・安藤義久：日本の山地河川の流況に及ぼす流域の地質の効果，土木学会論文報告集，第309号，PP. 51～62，1981.
- 11) 高橋 裕・安藤義久・井上誠一：表日本の山地河川の流況特性に関する統計的研究，第25回水理講演会論文集，PP. 209～214，1981.
- 12) 青木佑久・石崎勝義・岸井徳雄・長谷川正：全国流出試験地調査中間報告，土木技術資料21-8，1979.
- 13) 中野秀章：森林水文学，共立出版，PP. 39～48，1976.
- 14) 経済企画庁総合開発局：土地分類図，（都道府県別），1970～1975.