

火山活動が流出現象に及ぼす影響に関する実証的研究

地頭菌 隆
(森林資源環境学研究室)

Studies on the Effects of Volcanic Activity on Runoff

Takashi JITOUSONO
(Laboratory of Watershed Management and Forest Products Technology)

目 次

緒 言

第1章 活火山流域における火山灰が雨水の流出に及ぼす影響

第1節 桜島北岳山体の概況

第2節 火山活動の概要

第3節 表面流出試験地の概況

第4節 方 法

1. 表面流出試験

2. 降下火山灰量の測定

3. 表層部の土質試験

4. 浸透能試験

第5節 土質試験および浸透能試験結果

第6節 火山灰被覆斜面の表面流出特性

1. クロマツ林地と広葉樹林地の表面流出特性の比較

2. 火山活動の盛衰に伴う表面流出特性の変化

3. クロマツ林地と広葉樹林地の表面流出発生時の降雨条件

第7節 要 約

第2章 活火山流域における土石流・泥流

第1節 土石流・泥流調査地の概況

第2節 土石流・泥流の観測・解析方法

第3節 土石流・泥流発生時の降雨条件

1. 土石流・泥流発生時の記録

2. 土石流・泥流発生時の降雨

第4節 土石流・泥流の流出特性

1. 土石流・泥流の流速
 2. 土石流・泥流の流出と降雨
 - 第5節 火山活動の盛衰が土石流・泥流の発生・流出特性に及ぼす影響
 1. 降灰回数の把握
 2. 火山活動が土石流・泥流の発生に及ぼす影響
 3. 火山活動が土石流・泥流の流出に及ぼす影響
 - 第6節 要約
- 第3章 第四紀火山碎屑物に覆われた森林流域の流出特性
- 第1節 試験流域の位置および概況
 1. 高隈第1号試験流域および高隈第2号試験流域
 2. 郡山試験流域
 - 第2節 試験流域の流域条件
 1. 調査方法
 2. 調査結果
 - 第3節 雨量・流量観測方法
 1. 高隈第1号試験流域
 2. 高隈第2号試験流域
 3. 郡山試験流域
 - 第4節 降雨および流出状況
 - 第5節 短期流出特性
 1. 水文因子の算出
 2. 直接流出特性の比較
 3. 減水特性の比較
 - 第6節 長期流出特性
 - 第7節 火山碎屑物層の地下水位観測
 1. 観測位置および方法
 2. 観測結果と考察
 - 第8節 要約
- 第4章 第四紀火山活動が流況に及ぼす影響の比較評価
- 第1節 対象流域および解析資料
 1. 対象流域とその分布
 2. 地質分類と流域の地質判読
 3. 流量および降水量
 - 第2節 流域地質と流況特性
 1. 年降水量と日流出量
 2. 地質分類別の流況曲線
 - 第3節 地質分類別の流況因子

1. 豊水・渴水量差および豊水・渴水量比
2. 非調節流出量および調節流出量
3. 非調節流出量および調節流出量の応用

第4節 積雪地帯の流域の検討

第5節 流域の斜面傾斜と流況

第6節 要約

第5章 総括

謝辞

参考文献

緒言

日本は、環太平洋火山帯に位置し、多数の火山が分布しており、現在活動的なものだけでも約65、第四紀の火山は約200にも達し（勝井・中村，1979）、世界でも有数の火山国である。国土全般にわたって激しい火山活動が行われたのは第三紀以後である（久野，1976）。この火山活動は第四紀にも引き継がれ、厚い火山噴出物層が形成された。現在の日本の火山地形の明瞭なものほとんどは第三紀鮮新世末から第四紀にかけて形成されたものであり、人間生活に深くかかわっているのもこの鮮新世末から第四紀の活動によりできた新しい火山である（小出，1973）。

火山活動は、水蒸気爆発、火砕流、溶岩の流出、火山灰・軽石の放出などさまざまな形態をとる。このような火山活動は、火山そのものの地形を形成するだけでなく、火山周辺の非火山性の山地の地形変化をもたらす要因として大きな役割を果たしている（竹下，1987）。大規模火山噴火に伴い発生する火砕流や岩屑流、溶岩流は火山体のみならず周辺山地を埋め、地形を大きく変化させる。火山灰・火山ガスの放出は火山体やその周辺の森林植生を広範囲に破壊し、地表面を火山灰で覆い、土壌浸透能を極端に低下させ、表面流の増大を招く。火山性荒廃地での表面・リル・ガリー侵食、斜面崩壊、土石流・泥流などの頻発と多量の土砂生産は、この火山灰被覆による土壌浸透能の低下に伴う表面流出に強く起因している。このように、火山活動は、直接間接に影響して火山体とその周辺域の地形変化を促す。国内国外を問わず過去の火山災害の大部分は、こうした火山噴火に伴う地形変化によって引き起こされたものである（Blong, 1984）。このほか火山活動に伴って引き起こされる災害として、火山ガスによる災害、火山性地震による災害、津波による災害などがある（守屋，1981）。

一方、わが国の火山の大部分を占める成層火山の場合、その山体は火山灰・軽石などの火山碎屑物と溶岩流堆積物が幾重にも積み重なって空隙に富んだ地質構造を呈していることから、有力な水源涵養体であることが従来から経験的に指摘されている。この経験則を実証しようと一部では火山体の水文学的解明の研究が模索されている（山本，1970；Winograd, 1971）。また、第四紀の火山活動に伴い噴出した火山岩類や火山碎屑物から構成される火山周辺の流域の流況は他の流域に比較して非常に安定しているとの指摘もある（金子，1973；岸井，1977；高橋，1978；虫明ほか，1981）。これは、第四紀火山岩類からなる流域が透水性・保水性に富んだ火山灰・軽石などの火山碎屑物に

覆われていることに由来していると推測される。近年、このような火山性地質流域の高い透水性・保水性に着目し、洪水を透水性・保水性の高い地下部へ浸透させ洪水調節を行うと同時に地下水の涵養を図ろうという計画も検討され、実施に移されている（名波，1988）。このほか、火山活動は、我々人間に温泉、地熱などの恵みを与え、観光の場を提供している。また火山噴出物は新素材資源として有効に活用されている。

以上のように、火山は、災害を通して我々人間に厳しく振る舞う一方、人間の生活に豊かな資源を提供するという全く相反する二つの側面を有する。こうした火山活動の影響の二面性は竹下（1987）によっても指摘されているところである。

本論文では、火山が人間の活動に及ぼす影響のうち、火山活動の流域水文環境への影響を桜島・始良火山を対象にして水文学的な立場で検討し、実証的に解明することを目的としている。

以下、研究の進め方を論文の構成に従って述べる。

第1章および第2章では、火山活動に伴う火山噴出物が流域水文環境を変化させ、土砂災害を引き起こすという、いわば火山活動が人間に対してマイナス的に作用する側面について実証的に検討する。

1955年以来火山灰噴火を続けている桜島山腹斜面では、火山活動に伴う降下火山灰の被覆によって浸透能は著しく低下し、多量の表面流出が発生しているものと予想される。桜島における浸透能は健全な森林地の5～6%以下であったという測定結果も報告されている（竹下，1982）。火山灰の降下被覆が表面流出に与える影響について検討するために、桜島山腹斜面に小試験流域を設定し、降雨時の表面流の発生特性と流出量の観測を行った。第1章ではこれらの観測結果をもとに火山灰被覆斜面の表面流出特性を定量的に明らかにする。さらに、火山活動の短期的な盛衰が雨水流出現象に及ぼす影響についても検討する。火山灰被覆による表面流の発生については1977～1978年に噴火した有珠火山（山本，1984）や1980年に噴火した合衆国の St. Helens 火山（Swanson et al., 1983; Janda et al., 1984; Collins and Dunne, 1986）などでも確認されているが、ここで取り上げるように観測データに基づいて詳細に検討された研究例はない。

桜島の上腹部は、火山活動に伴う火山灰や火山ガスにより森林植生が破壊され、荒廃が著しい。土壌浸透能の極端な低下により増大した表面流は新旧の火山噴出物からなる山体を激しく侵食している（下川・地頭菌，1987a, 1987b, 1987c）。深く刻まれた荒廃渓流では表面流の増大に起因して土石流・泥流が頻繁に発生し、下流の扇状地では土砂災害も引き起こされている。第2章では活火山流域における土石流・泥流のビデオ観測結果をもとに、火山活動が土石流・泥流の発生や流出に及ぼす影響を解明する。土石流・泥流は人間の生活環境に多大な被害を及ぼす危険性があり、その発生や流出のメカニズムを解明することは活火山地域における防災対策に対しても重要な意味をもつものと思われる。

第3章では、火山噴火後長い期間が経過し、火山噴出物の露出していた山地に森林植生が回復した流域での雨水の流出現象を取り扱う。ここでは、火山活動が流域の水源涵養機能に及ぼす影響について実証的に検討する。

九州南部には第四紀に生成した始良、阿多、鬼界などの巨大カルデラが位置している。これらは第四紀にたびたび大爆発を起こし、多量の火山砕屑物を放出した。中でも始良カルデラは約2.2万年前に大隅降下軽石と呼ばれる多量の軽石の放出と火砕流を伴う大規模な噴火を起こした（町田，1977）。この軽石の分布主軸は始良カルデラから東南東方向である。第3章で扱うデータはこの大

隅降下軽石層に覆われた2つの試験流域で得られたものである。なお、約2.2万年前の火砕流は入戸火砕流と呼ばれるもので、九州南部を広く覆っている（横山，1972）。“しらす”と呼ばれる白色砂質の堆積物（太田，1964）の大部分はこの入戸火砕流堆積物の非溶結部である。

このような火山活動の歴史からみて、九州南部に位置する流域は第四紀の火山活動に影響を受けた代表的な流域といえる。南九州しらす地帯の流出現象を扱った研究は阿部（1926）、菊池（1932）にはじまったといわれる。その後、金子（1973）は現地観測による詳細な流出資料からしらす台地の流出現象の解明を試みている。このほか、現地観測に基づいてしらす地帯の流出現象を実証的に研究したものには最近では塚田（1978，1979）、塚田・上野（1981）、河原田・長（1985a）、難波ほか（1987）などがある。しかし、火山砕屑物が流出特性に及ぼす影響を定量的に検討し、流域の水源涵養機能に果たす役割を評価するには不十分な状態にある。

第3章では、始良カルデラ・桜島火山の周辺に設定した小森林流域の試験地での水文観測に基づいて、降下火砕物に覆われた2試験流域の流出特性を降下火砕物に覆われていない試験流域の流出特性と比較することにより、火山砕屑物が流出特性に及ぼす影響を解明し、火山砕屑物が流域の水源涵養機能に果たす役割について検討する。

第4章では、火山砕屑物が流域の水源涵養機能に及ぼす影響を他の地質の流域と比較しながらさらに検討する。さまざまな流域地質の全国規模の解析を目的としたため雨量・流量データには全国に分布する多目的ダム流域（118個）のデータを用いた。流域の流出状況を把握するための流況因子としては流況曲線から得られる情報を採用し、従来よく使用されてきた流況因子と最近提案された流況因子の両方について算出し、流況因子としての有効性についても検討する。

第5章は全体的な総括である。

第1章 活火山流域における火山灰が雨水の流出に及ぼす影響

本章の課題は、火山活動に伴う降下火山灰の影響を受けた流域における雨水の流出状況について、現地観測に基づき実証的に検討することである。

一般に良好な森林地では土壌表層の浸透能が非常に高く、表面流はほとんど発生しない（塚本，1966）。しかし、林地が細粒の火山灰に覆われるとその浸透能は極端に低下する。活発な火山活動を続けている桜島における浸透能は健全な森林地の5～6%以下であったという測定結果も報告されており（竹下，1982）、桜島山腹の林地斜面では、火山活動に伴う降下火山灰の被覆によって浸透能は著しく低下し、多量の表面流出が発生しているものと予想される。このような火山活動に伴う火山灰被覆により浸透能が極端に低下し、表面流の増大を起こしたという観測例は、1977～1978年に噴火した有珠火山（山本，1984）でも報告されている。また、1980年に噴火した合衆国の St. Helens 火山（Swanson et al., 1983; Janda et al., 1984）においても、噴出物の主体が軽石であったため有珠火山や桜島火山ほどではないが、噴火に伴い浸透能が低下したことが報告されている。

本章では、火山灰噴火を続けている桜島山腹斜面に設定した小試験流域における水文観測データ（地頭菌・下川，1987，1989）から火山活動の影響を受けた流域における雨水の流出状況を明らかにする。さらに、火山活動の短期的な盛衰が雨水流出に及ぼす影響についても検討する。

第1節 桜島北岳山体の概況

桜島は、鹿児島湾の北部に位置し、始良カルデラの南縁に発達した東西方向約12km、南北方向

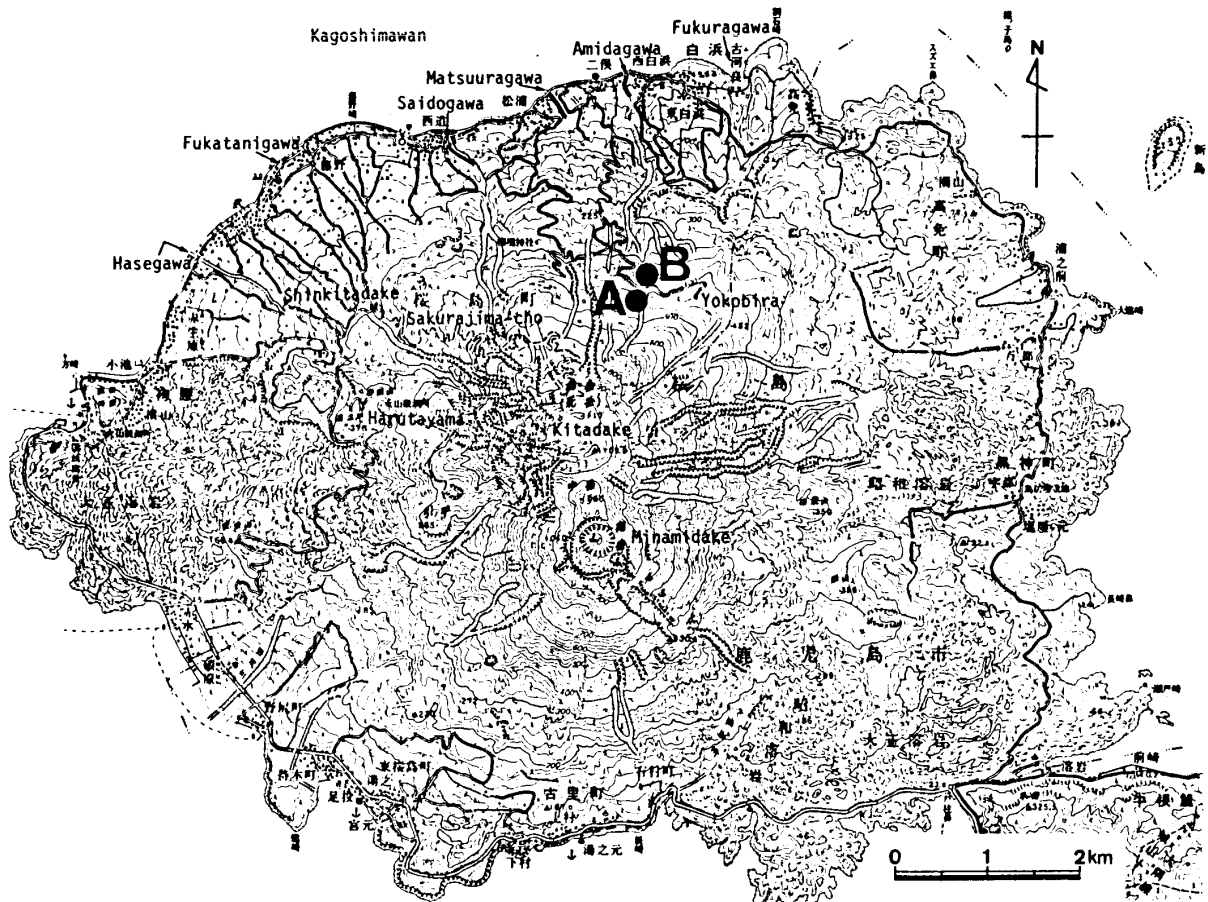


Fig. 1.1 Location of experimental catchments.

A: Japanese black pine forest B: Broad leaved forest

図-1.1 表面流出試験流域の位置.

A: クロマツ林 B: 広葉樹林

約 9 km, 周囲約 52 km, 面積約 80 km² の活火山であり, 最高峰の北岳 (1117 m) をはじめとして中岳 (1059 m), 南岳 (1011 m) の 3 つの山頂をもつ複式成層火山である。調査地域はこの桜島火山の北岳山体である (Fig. 1.1)。

桜島の北岳山体の地形は, 一般に標高 300 m 以下はなだらかな丘陵斜面や台地状となり, 300 ~ 500 m は丘陵地と急傾斜地が混在, 500 m 以上は急傾斜の山岳部となっている (Fig. 1.1)。

地質は, 火山碎屑物, 新旧の溶岩, 扇状地堆積物から構成される (福山・小野, 1981)。また, 調査地一帯では文明・安永・大正の大爆発による降下軽石層の分厚い堆積物が見られる。

植生は, 標高 500 ~ 700 m を境にしてそれ以下の高度域では一部クロマツ林の人工林を含む暖帯広葉樹林, それ以上は低木を散在状に含むススキ草地, さらに山頂部付近では裸地となっている。

土地は, 海岸部は集落として, その上の山麓緩斜面から丘陵地にかけては果樹園や畑地として利用されている。

第 2 節 火山活動の概要

桜島の現在の火山活動は火山灰噴火であり, 1955 年の開始以来 30 数年以上続き, とくに 1972 年以

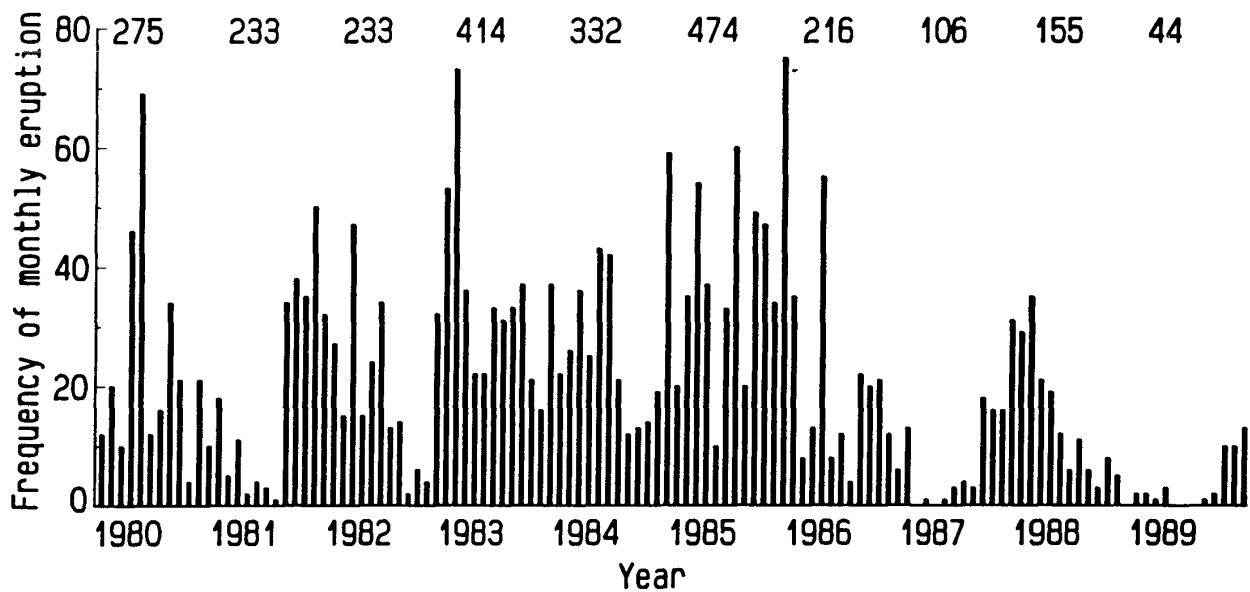


Fig. 1. 2 Transition of frequency of monthly eruption.
(Frequency of annual eruption is expressed in figures.)
図-1.2 桜島火山の月爆発回数の変化。
(図中の数字は年爆発回数)

降一層活発となってきている。Fig. 1. 2 は、1980年から1989年までの10年間における桜島の火山活動を月爆発回数（鹿児島地方気象台、1980～1989）の変化で示したものであり、図中の数字は年爆発回数である。年爆発回数をみると、1980～1982年は200回台であったが、その後1983年から400回前後となり、とくに1985年は1955年の火山活動再開始以来最高の爆発回数を記録した。1986年は再び200回台に減少し、さらに1987年および1988年は100回台まで減少し、1989年は50回を下回った。

第3節 表面流出試験地の概況

表面流出試験地は、桜島北側斜面のアミダ川中流域、標高400m 付近の山腹斜面に位置する (Fig. 1.1)。

桜島北側斜面のアミダ川中流域のクロマツ林内と広葉樹林内にそれぞれ1箇所ずつ0次谷オーダーの試験流域を設定した。両試験流域は水平距離で約200m と互いに隣接している。Fig. 1.3 は、地形測量を行って作成した両試験流域の地形図である。両試験流域とも普段は流水はなく、降雨時のみ表面流が発生している。

クロマツ林内の試験流域は、標高400～413m に位置し、面積は216m²、傾斜は流域の長軸方向において下流部26度、上流部22度である。クロマツ林は約20年生の林分であり、下層にはヒサカキ、ヤブツバキ、ツゲ、アオキ、ススキなどがまばらに生えている。試験地の位置する林地はリルやガリーの発達密度が粗で、その地表面は5cm 前後の針葉の落葉層で覆われている。

広葉樹林内の試験流域は、標高364～372m に位置し、面積は138m²、傾斜は流域の長軸方向において下流部23度、上流部11度であり、クロマツ林地よりわずかに緩い。広葉樹林は壮齢の林分であり、上層はタブノキ、クロキなどの樹種で、下層はヒサカキ、ネズミモチ、ツゲ、アオキなどの樹種で構成されている。試験地の位置する林地は、落葉層が0～2cm と薄く、堆積した火山灰が露出し、クロマツ林に比べ地表面が固い。また、林地はリルやガリーの発達が目立つ。

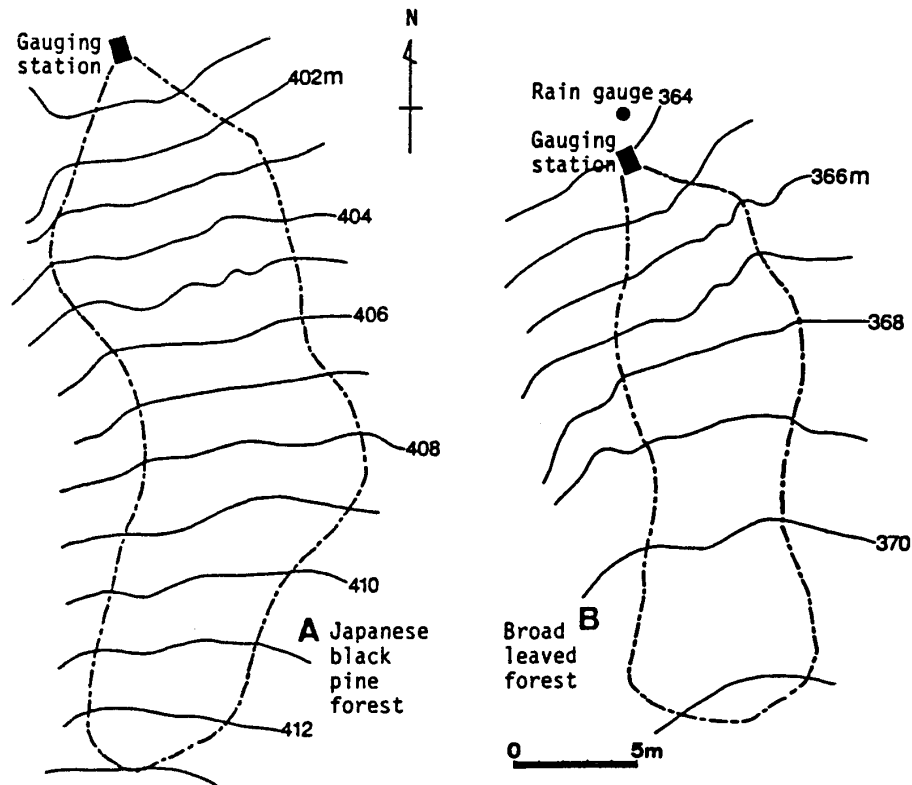


Fig. 1.3 Topography of experimental catchments.

図-1.3 表面流出試験流域の地形。

第4節 方法

1. 表面流出試験

試験流域において表面流出量および降雨量の観測を行った。

試験流域の下流端には、表面流出量を測定するために頂角60度の刃型三角堰と自記水位計を備えた大型プラスチックコンテナ（長さ100cm，幅70cm，深さ60cm）の量水装置を設置した（Photo. 1.1）。水位は量水装置により連続的に記録されるが、試験流域は普段は流水がないため、降雨時のみ観測データが得られる。

雨量観測は、広葉樹林内の試験流域に設置された1回転倒0.5mmの転倒ます型雨量計で行った。

観測期間は、火山活動が非常に活発であった1985年の8月10日から10月14日までの約2ヶ月間、および火山活動が比較的穏やかであった1987年の8月11日から11月5日までの約3ヶ月間の2期間である。

量水装置で測定された水位は水位・流量関係式により流量に変換され、流域からの流出量が計算される。水位・流量関係を表す水位・流量曲線は室内における検定に基づいて決定した。水位・流量曲線は Fig. 1.4 に示され、水位を H (cm)，流量を Q (l/s) とすると次式で表される。

$$Q = 8.320 \times 10^{-3} H^{2.5} \quad (1.1)$$

両試験流域とも普段は流水はなく、降雨時のみ流出が行われている。したがって、得られるハイドログラフはほとんど表面流出による成分である。この表面流出ハイドログラフは変動が激しいことから1分単位で作成し、一雨ごとの水文因子を算出した。算出した水文因子は以下の通りである。

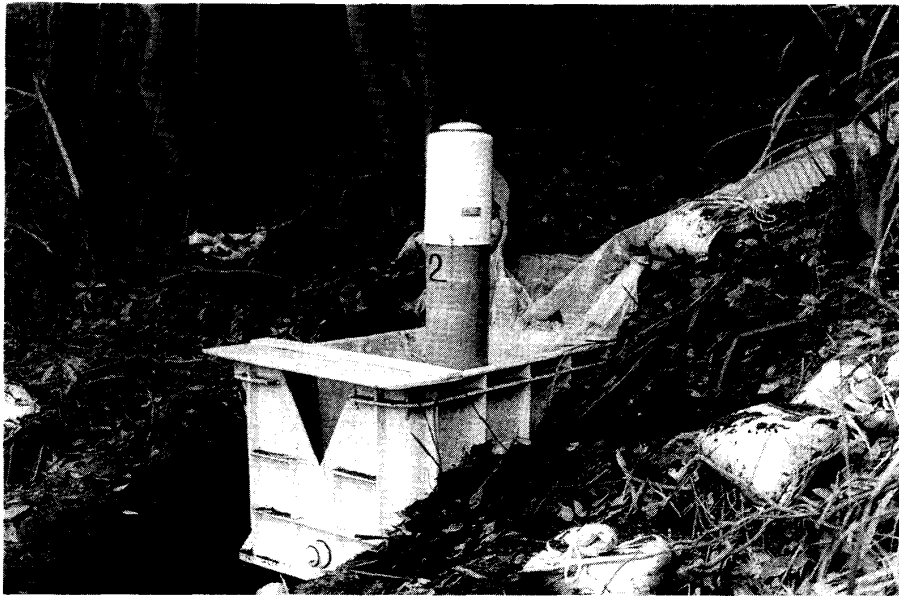


Photo. 1.1 Gauging equipment of surface flow.
写真-1.1 表面流量水装置.

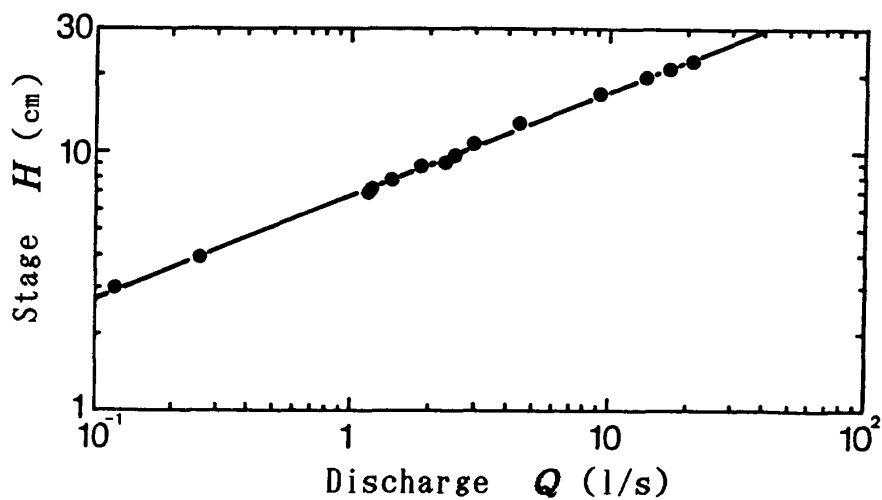


Fig. 1.4 Stage-discharge relation for gauging weir.
図-1.4 表面流量水装置の水位・流量関係.

①総雨量(mm)：流出が行われている期間内の降雨総量。②降雨継続時間(min)。③最大10分間雨量(mm/10min)：1分単位で読み取った降雨記録から求めた流出期間内における10分間あたりの最大雨量。④表面流出量(mm)：表面流出ハイドログラフにおいて流量を積分して求められる流出量。⑤表面流出継続時間(min)：流出が行われている間の継続時間。⑥表面流出率(%)：表面流出量の総雨量に対する比。⑦ピーク流量(mm/s)：ハイドログラフにおける最大流量。⑧先行降雨量(mm)：表面流出開始前の60分間、24時間および10日間の降雨量。

2. 降下火山灰量の測定

広葉樹林内の試験流域において直径52cmのポリバケツを設置，その中に降下した火山灰を採取，炉乾燥重量を計量した。この降下火山灰量を火山活動の指標値とした。

3. 表層部の土質試験

クロマツ林内と広葉樹林内においてそれぞれ2箇所ずつ、表層部の不かく乱試料とかく乱試料を採取、比重・粒度・自然含水比・単位体積重量・透水係数の各土質試験を行った。不かく乱試料は直径55mm×高さ60mmの鋼製円筒を人力で静的に地中に押し込んで採取したものである。各試験の方法は単位体積重量試験と透水試験を除いてJIS規定に準拠している。比重試験と粒度試験の試料は土の性質の変化を防止するために空気乾燥させない方法で調整した。単位体積重量（単位体積あたりの重量）は透水試験用に鋼製円筒で採取した不かく乱試料を併用して測定した。透水試験は小型の定水位透水試験器を使用した以外はほぼJIS規定に準拠している。透水試験の方法は次の通りである。①不かく乱試料を円筒とともに小型透水試験器にセットする。②試験器の上部に静かに給水する。③所定の時間内における透水水量を経時的に約2日間にわたって計量する。

4. 浸透能試験

クロマツ林と広葉樹林の両林分において、簡易散水式浸透能試験を実施した（Fig. 1.5）。試験の具体的方法と手順は以下の通りである。①仕切り棒で傾斜方向の長さ（水平距離）100cm×幅（傾斜に直角な方法）50cmの長方形区を設定する。長方形区は同じ試験地点で傾斜を変化させてそれぞれ5箇所ずつ設定した。②長方形区の最下端に表面流出水受けと計量容器（ビーカー）をセットする。③2000cm³（降雨量にして4mm相当）の水を60～70秒間で長方形区全体に均一に如雨露で散水する。④表面流出水量を計測する。⑤表面流出水量がほぼ一定になるまで③～④の操作を繰り返す。表面流出水量が一定となったところの値を用いて終期浸透能を算出する。

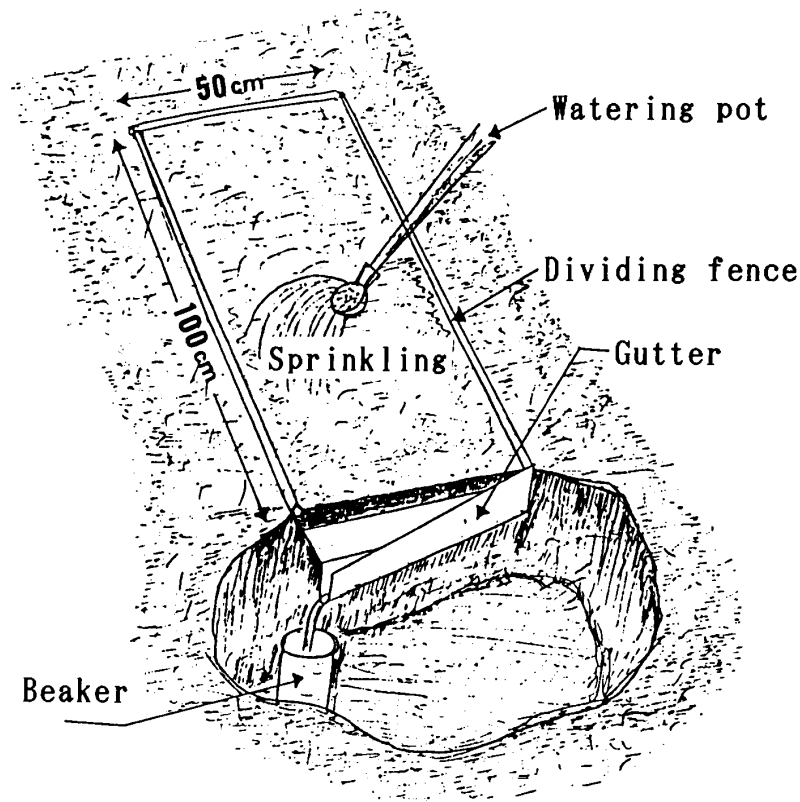


Fig. 1.5 Simplified sprinkling infiltrometer.
 図-1.5 簡易散水式浸透能試験.

第5節 土質試験および浸透能試験結果

Table 1.1 および Table 1.2 は、クロマツ林地と広葉樹林地の表層部の土質工学的性質および浸透能の試験結果を示したものである。比重は、両林分とも2.6~2.7の範囲にあり、ほぼ同じ値を示している。粒径分布や含水比にも両林分に差異はみられない。間ゲキ比は、クロマツ林で1.010~1.164の範囲、広葉樹林で0.770~0.873の範囲であり、相対的に広葉樹林よりクロマツ林で大きい値を示している。また、透水係数は、クロマツ林で 5.05×10^{-3} ~ 9.57×10^{-3} の範囲、広葉樹林で 8.80×10^{-4} ~ 1.90×10^{-3} の範囲であり、広葉樹林よりクロマツ林で大きい値となっている。これは、クロマツ林地と広葉樹林地における降下火山灰の堆積構造の違いに起因するものである。現地での観察によると、クロマツ林の土層表層部は、針葉が三次元的に複雑に絡み合った膨軟な落葉層中に

Table 1.1 Geotechnical properties of ash fall layer at experimental catchments
表-1.1 表面流出試験地の表層部の土質工学的性質

Vegetation	Specific gravity	Texture (%)				Natural water content (%)	Void ratio	Permeability coefficient (cm/sec)
		Gravel	Sand	Silt	Clay			
Japanese black pine	2.644	1.0	66.5	27.0	5.5	11.8	1.034	9.57×10^{-3}
	2.661	1.0	68.9	26.1	4.0	15.1	1.164	6.59×10^{-3}
Broad leaved						15.7	1.010	7.00×10^{-3}
	2.659	0.5	66.5	29.0	4.0	17.0	1.089	5.05×10^{-3}
	2.637	1.4	63.5	31.1	4.0	16.0	0.873	1.90×10^{-3}
						14.5	0.859	1.29×10^{-3}
					15.2	0.772	8.80×10^{-4}	
							0.772	1.13×10^{-3}

Table 1.2 Final constant infiltration rates measured with a simplified sprinkling infiltrometer at experimental catchments

表-1.2 表面流出試験地の散水式浸透能試験結果

Vegetation	Gradient (deg.)	Final infiltration rate (mm/min)	Vegetation	Gradient (deg.)	Final infiltration rate (mm/min)
Japanese black pine	18	3.53	Broad leaved	15	1.74
	20	2.40		23	1.24
	28	1.74		27	1.11
	33	2.50		33	1.17
	42	2.69		38	1.62
mean	2.57	mean	1.38		

火山灰が堆積しているため空隙に富んだ構造となっている。一方、広葉樹林の土層表層部は、落葉が層状に重なり合い、その透き間を火山灰が充填し緊密な構造となっている。散水式による浸透能試験結果においても同様の傾向がみられ、クロマツ林地の浸透能は広葉樹林地のそれより2倍近くの大きな値となっている。

第6節 火山灰被覆斜面の表面流出特性

Table 1.3 は、クロマツ林および広葉樹林試験流域において得られた表面流出量および降雨量の観測データをまとめたものである。以下、観測結果をもとに考察する。

1. クロマツ林地と広葉樹林地の表面流出特性の比較

Fig. 1.6 は、クロマツ林と広葉樹林の両試験流域において得られた表面流出ハイドログラフの例を対比して示したものである。両林分のハイドログラフを比較すると、同じ降雨条件下でも流出状況は異なっている。たとえば、降雨状況によっては広葉樹林では流出が起こり、クロマツ林では起こらない場合がある。また、クロマツ林におけるハイドログラフのピークは広葉樹林のそれより少し遅れて発生している。

Fig. 1.7 は、同じ降雨条件下でのクロマツ林と広葉樹林の表面流出量を比較したものである。図において、×印は1985年のデータ、および○印は1987年のデータであり、破線は両林分の表面流出量が同じ値を示す線である。1985年はすべて破線の上側にプロットされている。すなわち、流出量はすべての降雨においてクロマツ林より広葉樹林で多くなっている。一方、1987年には破線の下側にプロットされる場合も生じている。観測記録によると、流出量は、小さい降雨ではクロマツ林より広葉樹林が多くなっているが、降雨量が大きくなると両林分とも同じ程度か、あるいは広葉樹林よりクロマツ林がやや多くなっている場合もある。このような1985年と1987年の流出状況の違いは火山灰噴火の盛衰に原因していると考えられる。火山活動の変化に伴う流出特性の変化については後述する。

Fig. 1.8 は、クロマツ林と広葉樹林のピーク流量を Fig. 1.7 と同様の方法により比較したものである。Fig. 1.7 と同じ傾向がみられ、1985年はすべて破線の上側にプロットされ、ピーク流量はクロマツ林より広葉樹林で大きくなっている。一方、1987年は破線の下側にプロットされる場合もあり、ピーク流量が広葉樹林よりクロマツ林で大きくなっている場合も生じている。

以上のように、降灰の影響を受けたクロマツ林と広葉樹林の流出特性は同じ降雨条件下でも異なっている。また、両林分の流出特性の違いはとくに火山活動が盛んな時期に顕著に現れている。隣接している両試験流域は同様の地形・地質特性を有しており、また火山活動に伴う降灰の影響も同程度である。両林分の流出状況の違いは、前節で示されたように林地の土壌構造、とくにその表層部の構造の違いによると考えられる。火山灰の被覆が流域の流出特性に及ぼす影響は流域林分を構成する樹種によって異なっている。

2. 火山活動の盛衰に伴う表面流出特性の変化

一般に、火山活動の盛衰に伴って斜面の流出現象は変化すると考えられる。山本・今川(1983)は、有珠火山の噴火(1977~1978年)後、数年にわたり表面流の観測を行っている。その結果、表面流は噴火後経年的に減少していったと報告している。同様に、St. Helens 火山の噴火(1980年)後にも浸透能の改善、表面流出量の減少がみられたことが報告されている(Collins and Dunne, 1986)。有珠火山や St. Helens 火山における観測結果は単発的な火山噴火後の、斜面の浸透能が回

Table 1.3 Hydrologic characteristics at experimental catchments
表-1.3 表面流出試験結果

No.	Date	Rainfall			Surface runoff							
		Total rainfall (mm)	Duration (min)	Maximum rainfall per ten minutes (mm/10min)	Depth of runoff (mm)		Duration (min)		Runoff ratio (%)		Peak runoff depth ($\times 10^{-3}$ mm/s)	
					Black pine f.	Broad leaved f.	Black pine f.	Broad leaved f.	Black pine f.	Broad leaved f.		
1	85. 8.11	3.5	18	2.0	-	.059	-	9.0	-	1.7	-	.226
2	85. 8.11	4.0	25	2.5	-	.340	-	34.0	-	8.5	-	.994
3	85. 8.11	3.0	11	2.5	-	.374	-	24.0	-	12.5	-	.725
4	85. 8.11	6.5	22	4.0	.041	2.036	33.5	41.0	.6	31.3	.054	5.099
5	85. 8.12	14.0	80	4.0	2.145	9.256	87.0	95.5	15.3	66.1	2.049	7.812
6	85. 8.12	4.0	36	1.5	-	.186	-	54.5	-	4.7	-	.141
7	85. 8.12	3.5	8	3.5	.180	2.994	26.5	50.0	5.1	85.5	.382	4.088
8	85. 8.12	7.5	19	4.0	1.107	2.772	39.0	52.0	14.8	37.0	1.479	4.476
9	85. 8.12	3.0	6	3.0	.046	.559	34.0	23.0	1.5	18.6	.075	2.315
10	85. 8.12	6.0	75	2.0	-	.256	-	76.5	-	4.3	-	.228
11	85. 8.12	5.0	19	4.5	.683	1.402	48.5	42.5	13.7	28.0	1.395	5.541
12	85. 8.13	3.0	9	3.0	-	.521	-	27.5	-	17.4	-	1.385
13	85. 8.13	5.0	31	3.5	.855	1.040	49.0	51.0	17.1	20.8	1.395	1.700
14	85. 8.13	3.5	23	2.5	.242	.725	45.5	44.0	6.9	20.7	.463	2.183
15	85. 8.17	10.0	34	4.0	1.165	3.062	72.0	63.5	11.7	30.6	1.395	3.901
16	85. 8.31	51.5	200	5.5	16.445	21.108	250.0	230.0	31.9	41.0	5.355	7.537
17	85. 8.31	11.0	132	2.0	.036	.596	149.0	149.0	.3	5.4	.004	.387
18	85. 9. 1	6.0	56	1.5	.037	.471	88.0	65.5	.6	7.9	.011	2.183
19	85. 9. 7	21.0	177*	1.5*	2.556	6.691	114.0	114.0	12.2	31.9	3.687	9.592
20	85.10.13	37.5	272*	2.5*	16.825	24.672	76.0	91.0	44.9	65.8	13.408	26.391

Table 1.3 (Continued)
表-1.3 (続き)

No.	Date	Rainfall		Surface runoff						Peak runoff depth ($\times 10^{-3}$ mm/s)		
		Total rainfall (mm)	Duration (min)	Maximum rainfall per ten minutes (mm/10min)	Depth of runoff (mm)		Duration (min)		Runoff ratio (%)			
					Black pine f.	Broad leaved f.	Black pine f.	Broad leaved f.	Black pine f.		Broad leaved f.	
21	87. 8.14	20.5	38	11.5	6.730	11.013	58.0	62.0	32.8	53.7	6.750	20.486
22	87. 8.17	6.5	15	6.0	.681	2.269	31.0	23.0	10.5	34.9	1.395	8.675
23	87. 8.17	19.0	55	5.5	7.775	9.027	77.0	70.0	40.9	47.5	7.408	10.566
24	87. 8.23	21.0	47	15.0	2.874	9.606	21.5	36.0	13.7	45.7	6.966	24.140
25	87. 8.25	8.0	11	7.5	2.533	2.381	39.0	31.5	31.7	29.8	4.148	6.745
26	87. 8.26	15.0	40	8.5	6.960	4.289	47.0	34.5	46.4	28.6	9.607	6.493
27	87. 8.26	3.0	11	2.5	.422	.460	30.5	20.5	14.1	15.3	.654	.793
28	87. 8.30	4.0	27	3.0	.071	.501	31.5	24.0	1.8	12.5	.090	2.056
29	87. 8.31	4.5	36	2.0	-	.080	-	46.5	-	1.8	-	.077
30	87. 9.10	5.5	19	5.0	.035	.533	30.5	22.0	.6	9.7	.039	2.056
31	87. 9.10	17.5	46	7.5	5.959	7.611	66.5	61.0	34.1	43.5	6.128	8.381
32	87. 9.11	5.5	39	3.5	.057	.314	98.5	42.0	1.0	5.7	.011	.659
33	87. 9.11	2.5	12	2.0	-	.019	-	26.5	-	.8	-	.025
34	87. 9.13	4.5	23	2.0	.129	.575	52.5	52.0	2.9	12.8	.219	1.814
35	87. 9.23	3.0	20	2.0	.006	.098	17.5	34.0	.2	3.3	.007	.167
36	87. 9.23	4.0	37	2.0	.007	.205	34.0	46.5	.2	5.1	.004	.301
37	87. 9.24	3.5	36	2.0	.090	.266	41.5	35.0	2.6	7.6	.090	.486
38	87. 9.24	24.0	168	4.0	8.036	6.127	191.0	187.5	33.5	25.5	3.397	2.891
39	87. 9.30	14.0	185	1.0	1.177	1.262	190.5	190.0	8.4	9.0	.345	.301
40	87. 9.30	4.0	47	1.5	.098	.241	60.5	70.0	2.5	6.0	.061	.263
41	87.10.11	58.5	370	5.5	30.528	18.504	389.0	383.0	52.2	31.6	7.185	6.493
42	87.10.15	14.0	150	2.0	.625	1.175	170.0	168.0	4.5	8.4	.310	.486
43	87.10.16	19.0	228	1.5	4.775	3.511	256.5	247.5	25.1	18.5	.949	.793
44	87.10.16	6.5	102	1.5	1.171	.885	121.5	121.5	18.0	13.6	1.086	1.288

- No surface runoff.

* Under the influence of ash fall.

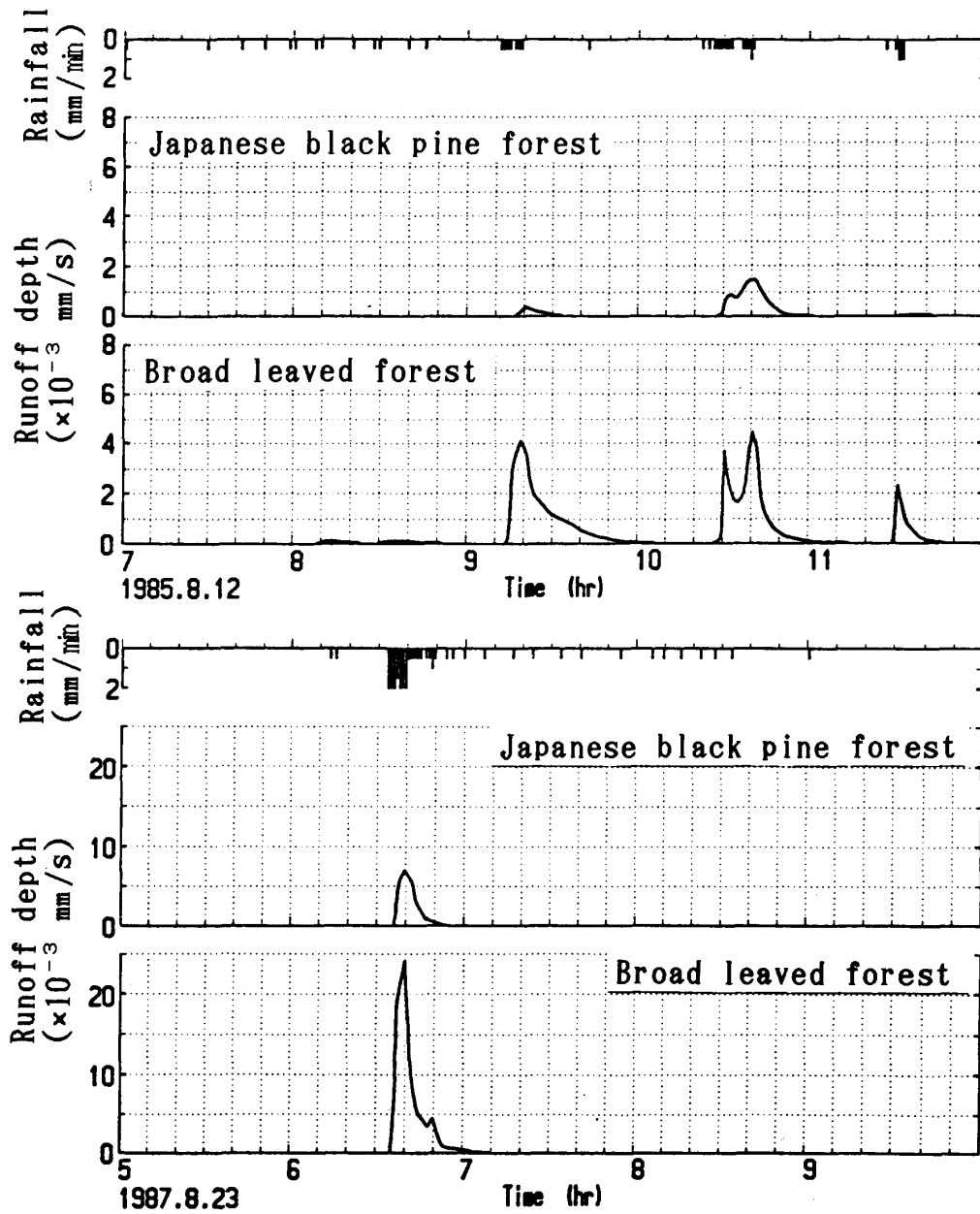


Fig. 1.6 Hydrographs produced by surface runoff.
 図-1.6 表面流出ハイドログラフの例.

復していく過程における観測によって得られたものである。桜島は、火山活動が持続しているため斜面浸透能の全面的な回復過程にはないが、1985年から1987年にかけて火山活動の短期的な衰退が生じた。この火山活動の一時的衰退が斜面の流出にどの程度の影響を及ぼしたかを1985年と1987年の流出の比較から検討した。

第1回目の観測を行った1985年は火山活動が非常に活発であり、観測期間中も連日降灰に見舞われ、林地はほとんど全面が火山灰に覆われていた。一方、第2回目の観測を行った1987年は、観測期間途中の9月から火山活動が活発となり降灰に見舞われるようになったものの、2~8月間は活動が穏やかで降灰も少なく、林地も落葉層が一部回復しつつあった。試験流域における降下火山灰量は、第1回目(66日間)は堆積深に換算して24.8mm(一日平均0.376mm)、第2回目(87日間)

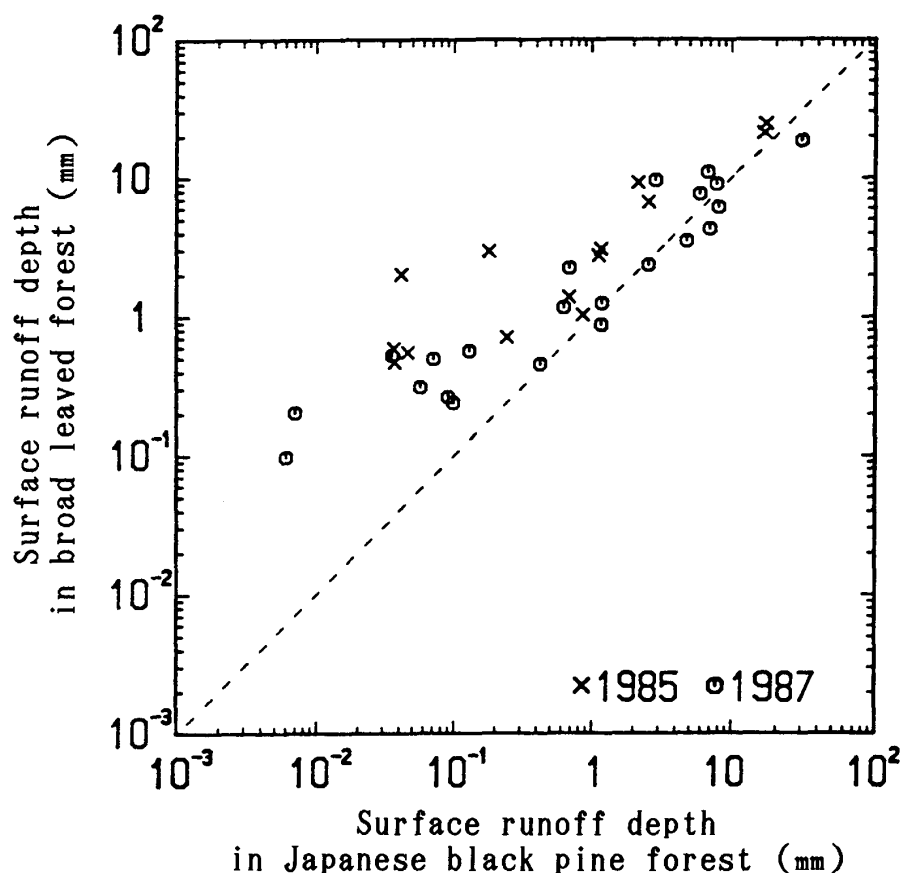


Fig. 1.7 Comparison of surface runoff depth between Japanese black pine forest and broad leaved forest.

図-1.7 クロマツ林と広葉樹林の表面流出量の比較.

は22.2mm (一日平均0.255mm)であり、第2回目は第1回目の約68%であった。なお、第2回目に観測された降下火山灰量は観測期間の後半部に降下したものがほとんどである。

Fig. 1.9は、クロマツ林および広葉樹林における1985年と1987年の一雨総雨量と表面流出量の関係を最大10分間雨量をパラメーターとしてプロットしたものである。1985年は、試験流域は連日降灰に見舞われ、堆積した火山灰は雨水により多量に量水タンク内に流入し、水位欠測がしばしば発生した。その結果、水位データが得られたのは一雨内の最大10分間雨量が6mm未満の降雨時のみであった。1987年は、1985年ほど火山活動が激しくなく、降雨強度の比較的大きな降雨でも水位観測を行うことができた。Fig. 1.9においては、一雨内の最大10分間雨量が6mm未満を○印で、6mm以上を×印で区分して示した。図中の実線は最大10分間雨量が6mm未満の両者の関係について平均線を示したものである。両林分とも一雨総雨量約15~20mmを境にしてそれぞれ直線で近似された。総雨量約15~20mm未満の関係におけるそれぞれの平均線は一雨総雨量を R (mm)、表面流出量を S (mm) とすると、

クロマツ林において、

$$1985年: S = 0.133R - 0.043 \quad (R < 20\text{mm}) \quad (1.2)$$

$$1987年: S = 0.083R - 0.287 \quad (R < 15\text{mm}) \quad (1.3)$$

広葉樹林において、

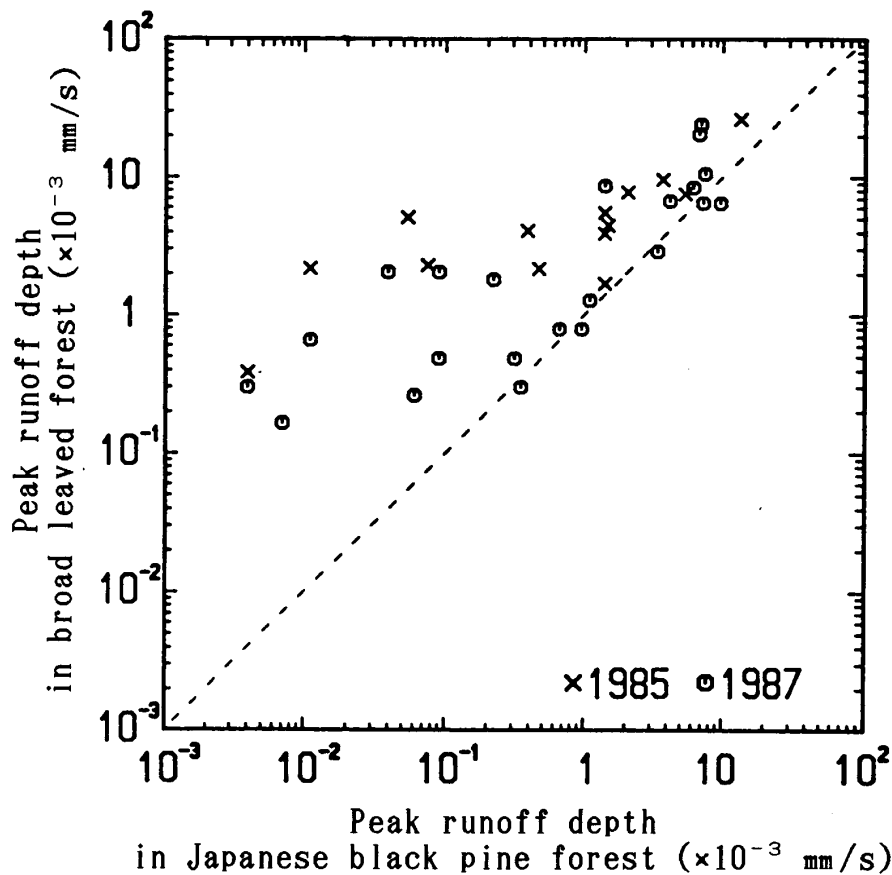


Fig. 1.8 Comparison of peak runoff depth between Japanese black pine forest and broad leaved forest.

図-1.8 クロマツ林と広葉樹林のピーク流量の比較.

$$1985年：S=0.347R-0.424 \quad (R<20mm) \tag{1.4}$$

$$1987年：S=0.152R-0.265 \quad (R<15mm) \tag{1.5}$$

となり、1985年から1987年にかけて総雨量と表面流出量の関係は変化している。すなわち、1985年から1987年にかけて同じ総雨量に対する表面流出量は両林分とも減少している。上式から総雨量5mm、10mm、15mmに対する表面流出率をそれぞれ計算すると、クロマツ林において1985年12.0%、13.0%、13.3%、1987年2.0%、5.0%、6.7%、また、広葉樹林において1985年26.0%、30.0%、32.0%、1987年10.0%、13.0%、13.3%となっている。1985年から1987年にかけての火山活動の衰退に伴う表面流出量の減少の割合を総雨量5mm、10mm、15mmに対してそれぞれ計算すると、クロマツ林において16.7%、38.5%、50.0%、広葉樹林において38.5%、43.3%、41.7%である。

Fig. 1.10は、クロマツ林および広葉樹林における1985年と1987年の最大10分間雨量と表面流出のピーク流量の関係を一雨総雨量をパラメーターとしてプロットしたものである。前述した理由により、1985年は一雨総雨量が15mmを越すような降雨での流出データは1個しか得ることができなかった。Fig. 1.10においては、一雨総雨量が15mm未満を○印で、15mm以上を×印で区分して示した。図中の実線は総雨量が15mm未満の両者の関係について平均線を示したものである。両林分とも最大10分間雨量約4～5mmを境にしてそれぞれ直線で近似された。総雨量15mm未満のときの両者の関係をみると、同じ程度の降雨強度の場合、表面流出のピーク流量は1985年より1987年

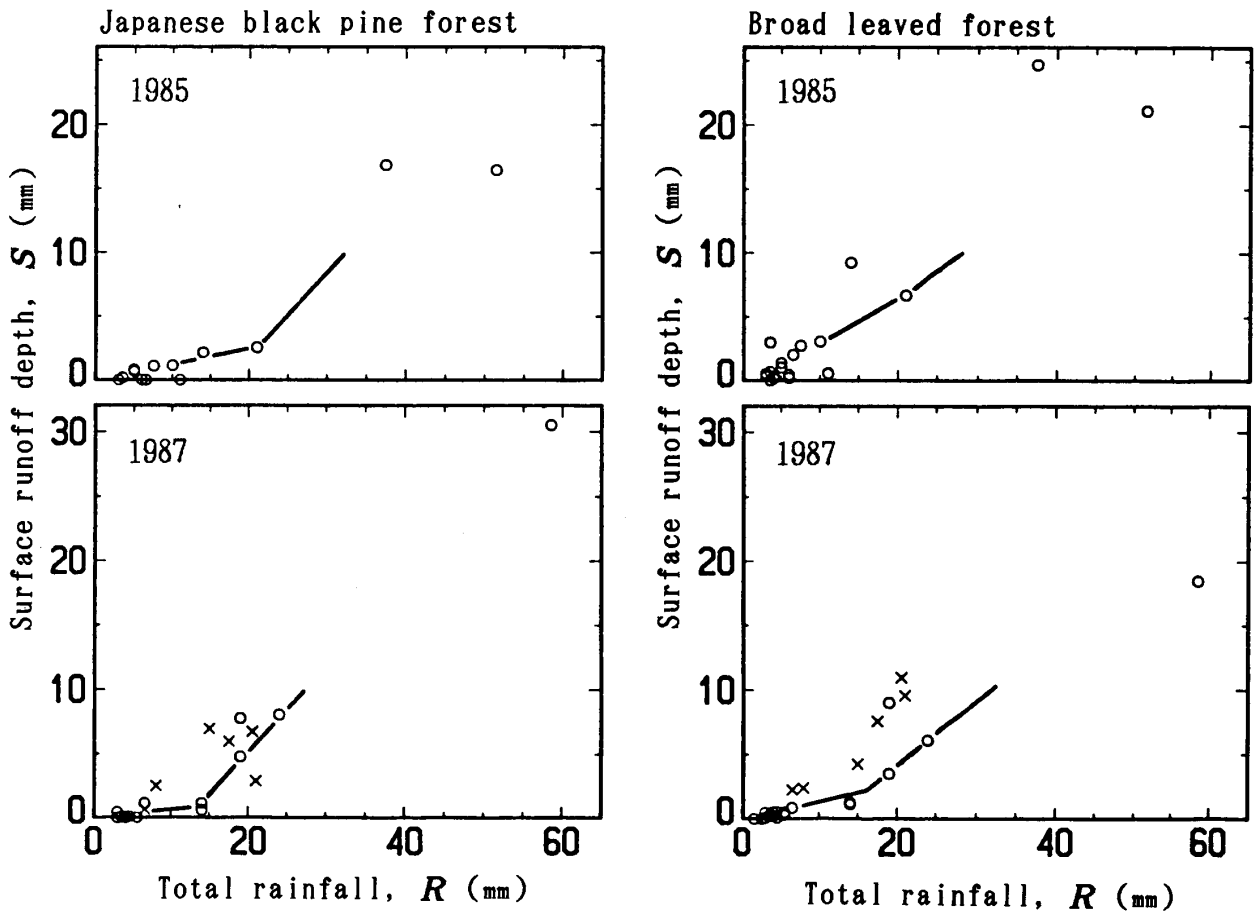


Fig. 1.9 Relationships between surface runoff depth and total rainfall.

Parameter: Maximum rainfall per ten minutes ○ < 6 mm × ≥ 6 mm

図-1.9 クロマツ林および広葉樹林における総雨量と表面流出量の関係。

パラメーター：最大10分間雨量○ < 6 mm × ≥ 6 mm

の方が低くなっている。すなわち、火山活動の衰退に伴い、表面流出量の減少と同時に表面流出のピーク流量も小さくなっていることがわかる。この傾向はクロマツ林より広葉樹林において顕著に表れている。

通常の森林下における土壌の膨軟化は生物活動によってなされている。桜島では火山活動に伴う降灰が長期にわたっているため、地中での生物相は死滅に近い状態にあり、この状態は簡単には回復しないものと想定される。しかし、樹木は生育しており、降灰量の少ない期間は、落葉により空隙に富んだ構造の表層が機械的に形成され、表層部の貯留容量も増加する。このことが、1985年から1987年にかけての表面流の減少に関係しているものと考えられる。火山活動が衰退し降灰や火山ガスなどの影響が完全になくなると、森林植生の活性化、地中生物の回復により、桜島山腹斜面も通常の森林と同様に表面流の発生はほとんどみられなくなるものと思われる。

3. クロマツ林地と広葉樹林地の表面流出発生の降雨条件

火山灰に被覆された斜面の表面流出発生の降雨条件について検討する。1985年および1987年の観測期間に得られた降雨データを表面流出が発生した場合と発生しなかった場合に分け、表面流出発生時の10分間雨量（表面流出非発生の場合は一雨内の最大10分間雨量）と先行降雨量との関係をプ

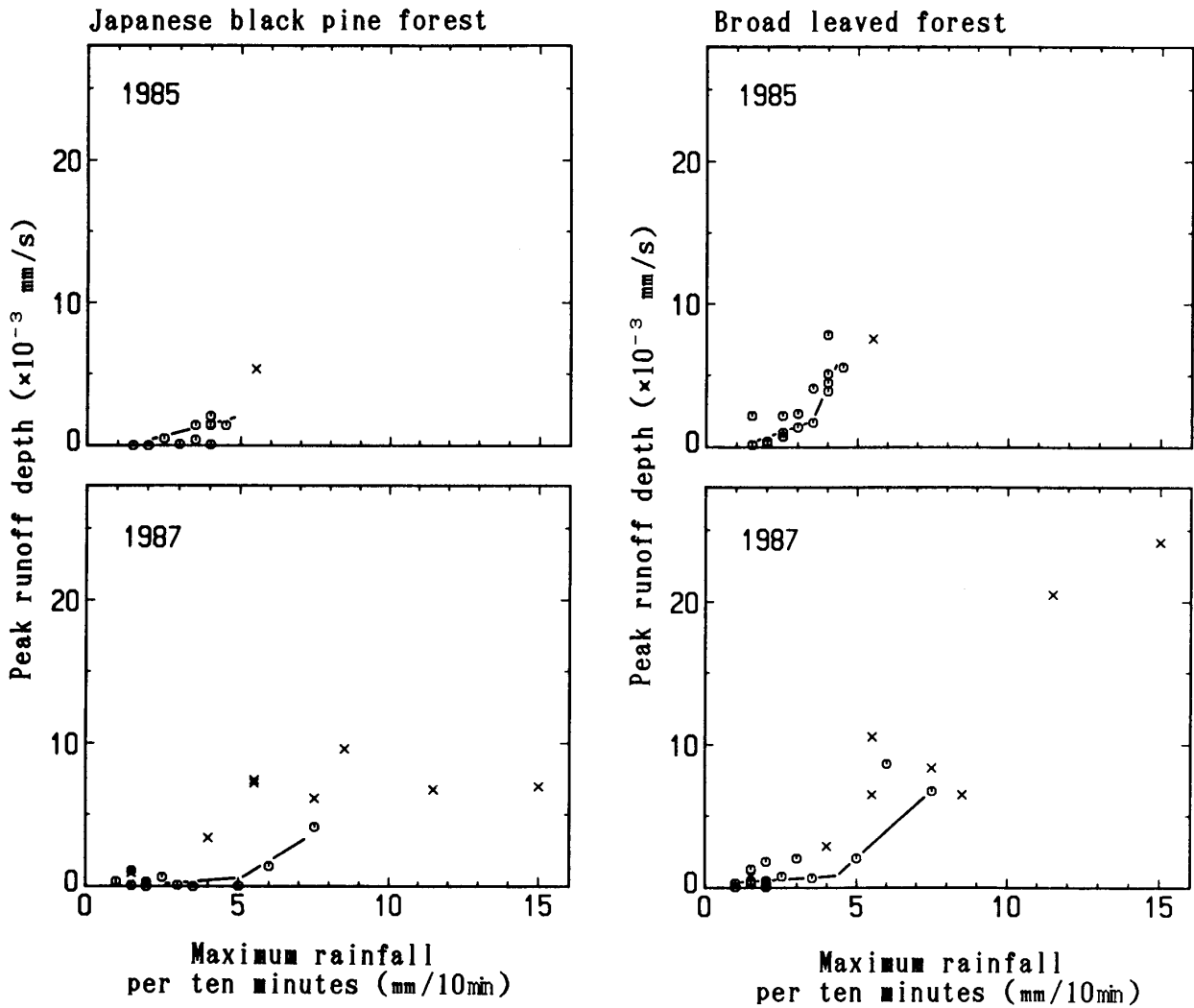


Fig. 1.10 Relationships between peak runoff depth and maximum rainfall per ten minutes.
Parameter : Total rainfall ○ < 15mm × ≥ 15mm

図-1.10 クロマツ林および広葉樹林における最大10分間雨量と表面流出のピーク流量の関係。
パラメーター：一雨総雨量○ < 15mm × ≥ 15mm

ロットした。先行降雨量は流域の土壌の湿り具合を表す指標値である。Fig. 1.11は、先行降雨量として表面流出発生前（表面流出非発生の場合は最大10分間雨量発生前）の60分間の降雨量を採用した場合を示したものである。先行降雨量が多くなると小さい降雨強度でも表面流が発生するようになると思われるが、明瞭ではない。この原因は、斜面表層の新生火山灰の堆積層が、孔隙量が少なく、透水性も低いためにごく表面の貯留容量しか初期損失に関係しないことによると考えられる。その結果、土壌の湿り具合を表す指標値とした先行降雨の影響が現れ難くなっている。

Fig. 1.11から火山灰に覆われたクロマツ林地および広葉樹林地の表面流出発生 の最小限界降雨強度を求めると1.5~2.0(mm/10min)程度である。河原田・長(1985b)は、室内において人工降雨装置により、飽和に近い状態にした桜島火山灰を用いて表面流出実験を行っている。その結果、表面流出発生 の限界降雨強度は、表面の傾斜0度、10度、20度に対して、降灰が表面に10mm堆積しているときそれぞれ17, 10, 8(mm/10min)、また降灰が表面に30mm堆積しているときそれぞれ

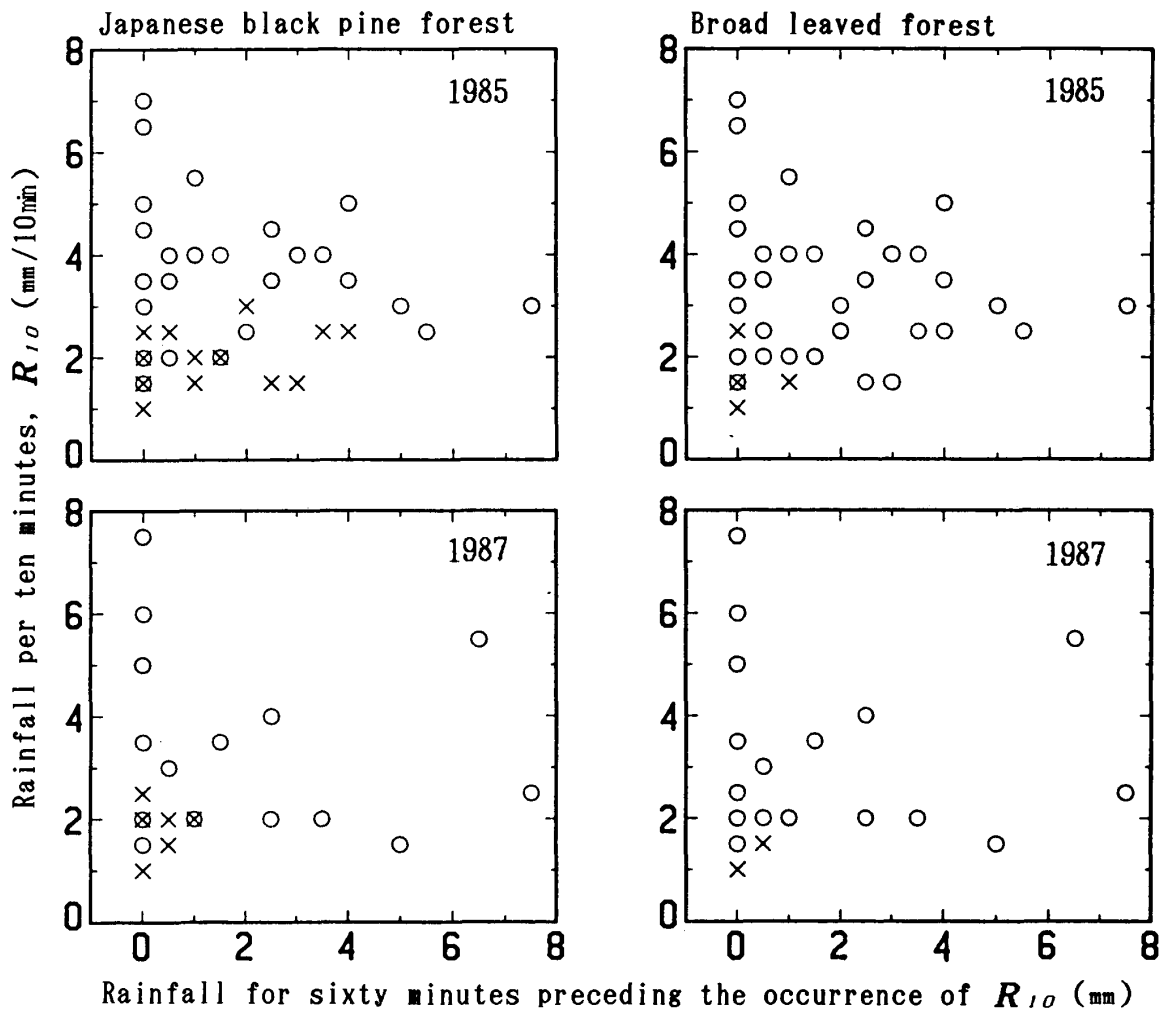


Fig. 1.11 Rainfall conditions at the occurrence of surface runoff.

○ Occurrence × Non-occurrence

図-1.11 クロマツ林地と広葉樹林地の表面流出発生時の降雨条件。

○表面流出発生 ×表面流出非発生

れ14, 8, 7 (mm/10min)であったとし、降灰が表層に堆積すると降灰による目詰まり作用のため表面流出が発生しやすくなることを示している。今回、現地において自然降雨により求めた表面流出発生時の限界降雨強度はこれらの値よりさらに小さい値を示した。

降灰の影響を受けた山地斜面における林地の表面流出発生時の限界降雨強度が小さいことは桜島における土石流・泥流発生時の降雨条件にも密接に関連しているものと考えられる。これについては第2章で検討する。

一般に火山活動の衰退に伴い表面流出発生時の降雨条件も変化すると考えられる。しかし、ここでは両林分とも1985年と1987年の表面流出発生時の最小限界降雨強度に明確な差は認められなかった。この点に関しては、1987年の火山活動が1985年より穏やかであったとはいえ、1987年も降灰に見舞われることはあり、降灰直後の降雨時には地表面の目詰まりが一時的に起こり、弱い雨でも表面流が発生する場合があったことによると考えられる。

第7節 要 約

活発な火山活動を続けている桜島の山腹斜面においてクロマツ林と広葉樹林の2箇所に試験流域を設け、火山灰に被覆された流域における雨水の流出現象を解明した。得られた結果を要約すると次のとおりである。

1) 降下火山灰は、流域地表面に堆積し、土壌表層の浸透能を極端に低下させ、表面流の発生を助長している。火山灰に覆われた林地の表面流発生の最小限界降雨強度は1.5~2.0(mm/10min)程度と非常に小さいものであった。

2) 火山灰が土壌表層の浸透能に及ぼす影響は、流域の樹種によりその程度に差がみられる。今回行ったクロマツ林と広葉樹林で比較すると、広葉樹林地の浸透能はクロマツ林地のその約半分であった。

3) 表面流発生にも流域樹種による特徴がみられ、降雨によっては広葉樹林地で流出が起こり、クロマツ林では起こらない場合がみられた。また、流出のピークはクロマツ林より広葉樹林で早く現れる場合が多かった。

4) 流域樹種間で表面流出特性を比較すると、広葉樹林地の表面流出量やピーク流量は同じ降雨条件でもクロマツ林地のそれより大きい傾向がみられた。

5) 以上のようなクロマツ林地と広葉樹林地における火山灰が表面流出に及ぼす影響の相違は、林地の土壌構造、とくにその表層部の構造の違いに関係している。両試験流域の表層部の土質試験結果によると、間ゲキ比や透水係数は広葉樹林よりクロマツ林で大きい値となっていた。また、現地観察によると、クロマツ林の土層表層部は、針葉が三次元的に複雑に絡み合った膨軟で、空隙に富んだ構造となっており、広葉樹林の土層表層部は、落葉が層状に重なり合い、その透き間を火山灰が充填し緊密な構造となっていた。

6) 火山活動の盛衰と雨水の表面流出現象は密接に関係している。火山活動が穏やかになり、降灰の影響が小さくなると、森林植生の落葉により土壌表層部の孔隙量が増し、その結果、表層の貯留容量も増加し、表面流が発生しにくい状況が形成され、その流出量も減少していく。火山活動が衰退し降灰や火山ガスなどの影響が完全になると、森林植生の活性化、地中生物の回復により、桜島山腹斜面も通常の森林と同様に表面流の発生はほとんどみられなくなるものと思われる。

第2章 活火山流域における土石流・泥流

第1章においては、火山灰や火山ガスの放出により森林植生が破壊され、地表面に堆積した火山灰により土壌浸透能が極端に低下した流域での表面流出現象を桜島火山で行った観測データに基づいて検討した。本章では、同じ桜島調査地において、山腹斜面での表面流による渓床堆積土砂の流動化や斜面の侵食・崩壊に伴い発生すると考えられる火山性荒廃溪流での土石流・泥流の特性について検討する。

桜島南岳は活発な火山活動を続けており、桜島山体上腹部は火山活動に伴う火山灰や火山ガスにより森林植生は後退し、非常に荒廃した状態にある。また、新旧の火山噴出物からなる桜島山体は表面水や地下水の作用により侵食されやすく、山腹では侵食、斜面崩壊、土石流・泥流が頻繁に発生している。活火山における土石流・泥流が人間の生活環境に多大な被害を及ぼすことは桜島だけでなく、有珠火山や St. Helens 火山など他の火山での例が教えるところである。本章では、桜島北岳山体で行われている土石流・泥流の観測記録（春山ほか、1984；春山ほか、1987；Jitousono

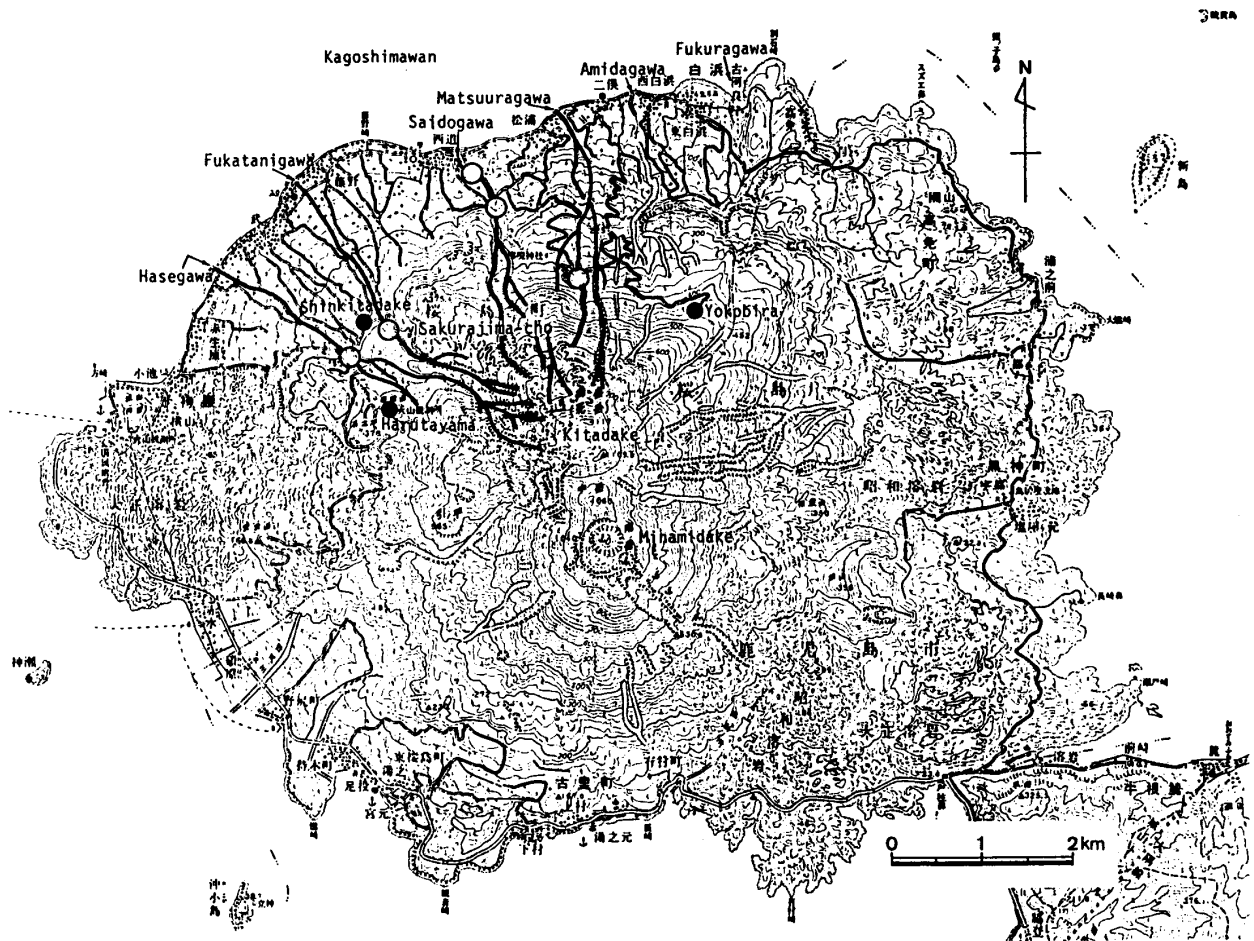


Fig. 2.1 Location and topography of study area.

○ Observatory of debris flow ● Rain gauge

図-2.1 土石流・泥流の調査地。

○土石流・泥流観測地点 ●降雨観測地点

et al., 1988; Jitousono and Shimokawa, 1989; 地頭蘭・下川, 1991) をもとに、活火山流域の土石流・泥流の実態、土石流・泥流の発生条件、および土石流・泥流の流出特性について述べ、さらに火山活動の盛衰に伴う土石流・泥流特性の変化について検討する。

第1節 土石流・泥流調査地の概況

土石流・泥流調査地は桜島北側の北岳山体である (Fig. 2.1)。桜島北岳山体の地形、地質、植生などの特徴については第1章で述べた。北岳山体に流域をもつ長谷川、深谷川、西道川、および松浦川の4溪流5地点において土石流・泥流の観測が行われている。これらの溪流はすべて降雨時のみ流水が発生し、普段は枯れ谷である。観測地点における流域面積は、長谷川観測点 1.35km^2 、深谷川観測点 0.61km^2 、西道川下流観測点 1.43km^2 、西道川上流観測点 1.38km^2 、松浦川観測点 0.35km^2 となっている。

第2節 土石流・泥流の観測・解析方法

桜島の北側斜面における土石流・泥流の発生や流出機構を把握するために土石流・泥流観測装置

が4溪流5地点に設置され、また雨量計が3地点に設置されている (Fig. 2.1)。土石流・泥流観測システムは、ビデオカメラ、ビデオテープレコーダー (VTR)、ワイヤーセンサー、バッテリーなどから構成される。ワイヤーセンサーは土石流・泥流観測地点の上流に5本、約20~100mの間隔で溪流を横断するように張られ、溪岸に沿って延長されビデオカメラとVTRに接続されている。土石流・泥流によりいずれかのワイヤーセンサーが切断されると、ビデオカメラとVTRが作動し土石流・泥流の撮影が開始される。同時に各ワイヤーセンサーの切断時刻が記録される。

VTRに記録された土石流・泥流画像を再生し、一定時間ごとの土石流・泥流の流積と流速を計測した。土石流・泥流の流積は、土石流・泥流が通過する放水路側壁 (撮影箇所) にペンキで描いた水位標によって読み取った水位と放水路断面形から計算した。水位計測の時間間隔は、水位変動が大きい時で約15~30秒間隔、変動が小さい時で約3~10分間隔で行った。土石流・泥流の流速は、土石流・泥流画像内の流体中の転石・流木が一定距離を通過する所要時間や、一定間隔に溪床を横断して張られた各ワイヤーセンサーが土石流・泥流の流下に伴い切断される時間差から計測した。

VTRの再生画像により一定時間ごとに計測した土石流・泥流の流積と流速の積から流量を求め、土石流・泥流のハイドログラフを作成した。土石流・泥流ハイドログラフにおける流量の最大値とハイドログラフの積分値を算出し、それぞれ土石流・泥流のピーク流量と総流出量とした。

第3節 土石流・泥流発生の降雨条件

1. 土石流・泥流発生の記録

Table 2.1は、VTR方式による土石流・泥流観測が開始された1980年から1989年までの10年間に記録された土石流・泥流の個数を示したものである。現在採用している土石流・泥流観測システムにおいては、土石流・泥流の発生は溪床を横断して張られているワイヤーセンサーの切断によって検知している。このシステムではワイヤーセンサー切断後からセンサーの張り換えを行う時点までの期間については土石流・泥流発生の有無は不明である。したがって、表に示された数字は土石流・泥流のすべての発生数ではない。

Fig. 2.2は、1980~1989年の10年間に4溪流5観測地点で記録された212回の土石流・泥流についてその発生月を調べ、月ごとの発生回数の度数分布を示したものである。また、Fig. 2.3は、桜島北側斜面における3降雨観測地点 (春田山、新北岳および横平) の月降水量の1980~1989年の10年間の平均値を求め、その分布状況を示したものである。月ごとの土石流・泥流発生回数と月降水量の分布はよく対応している。桜島においては年降水量の約65%を占める5月から9月に土石流・泥流の発生も集中しており、年間の約80%がこの期間に発生している。ただし、2, 3月は他の月に比べ降水量のわりに土石流・泥流の発生回数が多い。この原因は、冬期は雨が少なく、山腹で火山灰蓄積が行われ、地表面の浸透能が極端に低下した結果、春先の2, 3月頃の比較的小さい降雨で表面流が起り土石流・泥流が発生しているためと考えられる。これは、土石流・泥流発生の降雨条件が季節的に変化することを示唆しているものであり、火山灰の影響を受けた流域における特有の現象であろう。また、土石流・泥流発生源のガリー側壁斜面では冬期に凍結と融解が繰り返され、ガリー床に側壁からの崩落土砂が堆積し、春先には土石流・泥流の材料となる土砂が蓄積されることも関係していると考えられる。これに関しては、諏訪ら (1989) が焼岳における土石流の観測によって土石流発生源のガリー内の残雪と土石の堆積状況の変化から土石流の発生条件に季節的な変化が起こることを指摘している。

Table 2.1 Occurrence-number of debris flow in northern flank of Sakurajima
 表-2.1 桜島北岳山体における土石流・泥流の発生回数

Year	Observatory of debris flow					Total
	Hase-gawa	Fukatani-gawa	Saidogawa (lower)	Saidogawa (upper)	Matsuura-gawa	
1980	1 (1)	-	-	1 (1)	1 (0)	3 (2)
1981	2 (2)	1 (1)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	3 (3)
1982	4 (1)	5 (2)	1 (1)	2 (0)	6 (2)	18 (6)
1983	5 (2)	2 (2)	7 (6)	4 (4)	4 (3)	22 (17)
1984	6 (3)	3 (0)	5 (3)	3 (0)	3 (1)	20 (7)
1985	2 (0)	7 (3)	6 (3)	5 (1)	6 (2)	26 (9)
1986	8 (3)	4 (1)	6 (4)	6 (3)	9 (5)	33 (16)
1987	8 (6)	7 (5)	5 (4)	9 (4)	10 (7)	39 (26)
1988	10 (5)	4 (2)	4 (3)	5 (3)	7 (3)	30 (16)
1989	5 (1)	3 (0)	4 (2)	3 (1)	3 (2)	18 (6)
計	51 (24)	36 (16)	38 (26)	38 (17)	49 (25)	212 (108)

(): With video tape.

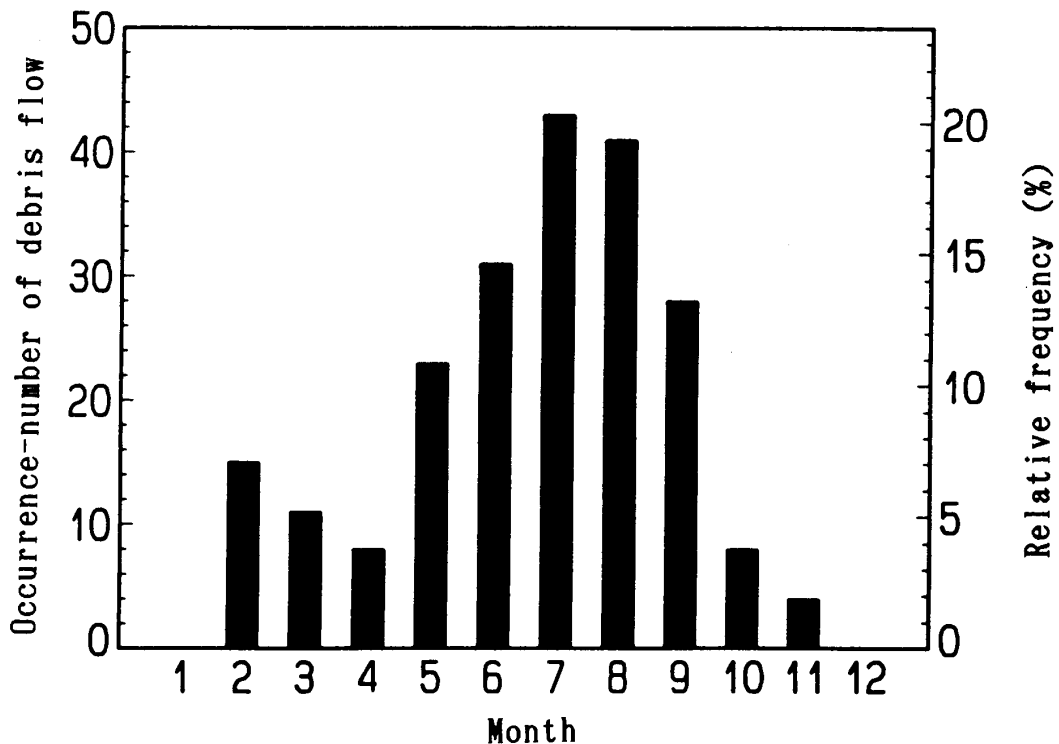


Fig. 2.2 Monthly distribution of occurrence-number of debris flow.
 図-2.2 土石流・泥流の月発生回数の分布.

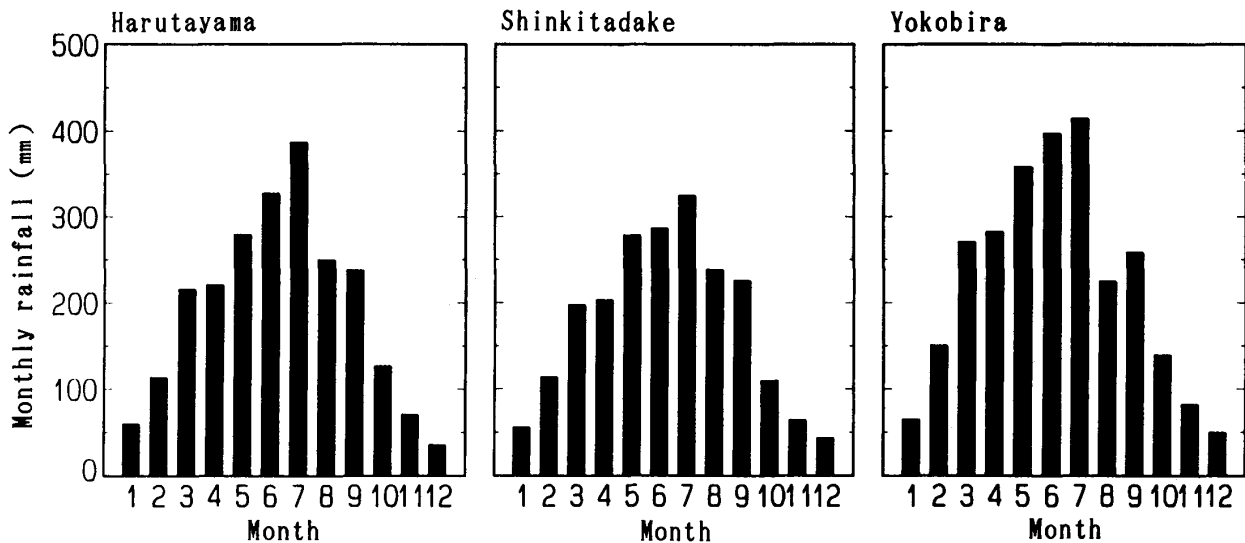


Fig. 2.3 Normal monthly distribution of rainfall at three rain-gauge stations in northern flank of Sakurajima.

図-2.3 桜島北側斜面における3降雨観測地点の月降水量の分布.

2. 土石流・泥流発生時の降雨

土石流・泥流発生誘因は降雨である。ここでは、土石流・泥流の発生と降雨の関係について検討する。1980～1989年の10年間の土石流・泥流発生記録によると、降雨強度の大きい降雨発生直後にセンサーが切断されている。降雨データの解析時間単位を10分間にとると、強い10分間雨量の発生時刻とセンサーの切断時刻は約30分以内の時差でよく対応している。したがってこの10分間雨量（センサー切断時刻直前の10分間あたりの最大雨量）発生時に土石流・泥流が発生したものと推測される。10分間あたりの最大雨量発生とセンサー切断の時間のずれは、土石流・泥流が発生源から観測点までの流下に要する時間、土石流・泥流発生源と降雨観測点の降雨時間の相違などに関係していると思われる。

Fig. 2.4は、センサー切断時刻直前の10分間あたりの最大雨量と降雨開始からこの10分間雨量（＝土石流・泥流発生）までの累加雨量の関係を各溪流ごとに示したものである。また、図中には土石流・泥流発生最小降雨条件の包絡線も示している。包絡線によると、累加雨量の増加に伴ってより小さい10分間降雨強度で土石流・泥流が発生していることがわかる。包絡線から土石流・泥流発生最小限界降雨条件を各溪流ごとに求めると、累加雨量が10mm, 20mm, 30mmのときの10分間雨量は、長谷川においてそれぞれ4mm, 3mm, 2mm, 深谷川において4mm, 3mm, 2mm, 西道川において5mm, 4mm, 3mm, 松浦川において5mm, 3mm, 2mmとなっている。4溪流の土石流・泥流発生最小限界降雨条件はほぼ同じ程度であり、累加雨量が10mmのとき10分間雨量で4～5mm程度、同様に20mmのとき3～4mm程度、30mmのとき2～3mm程度と小さい降雨で土石流・泥流が発生している。これらの値は第1章で述べた火山灰被覆斜面の表面流出発生最小限界降雨強度が1.5～2.0(mm/10min)程度と小さいのによく対応している。

第4節 土石流・泥流の流出特性

1980～1989年の10年間に得られた土石流・泥流画像の観察によると、土石流・泥流は溪流ごとに

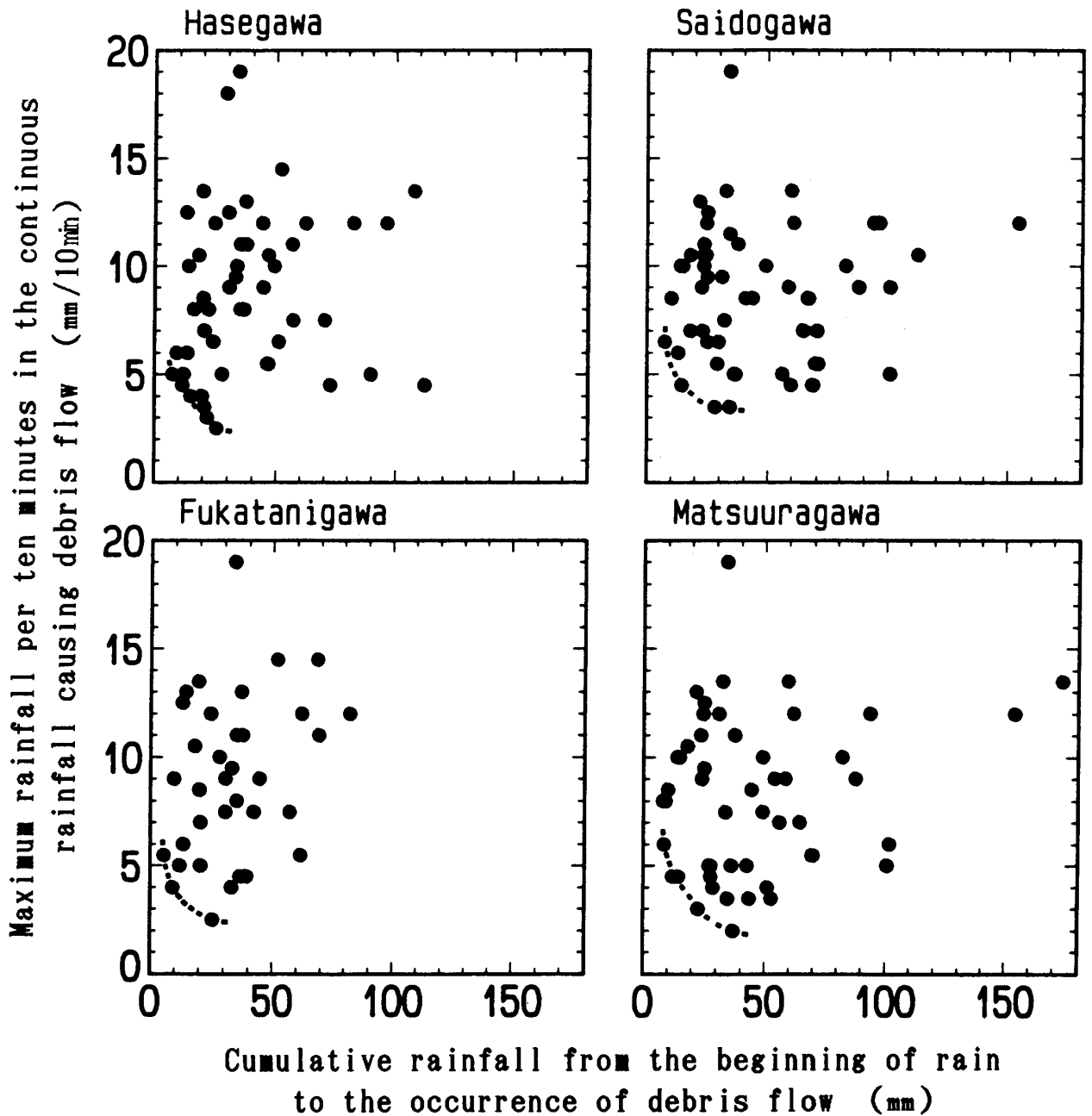


Fig. 2.4 Relationships between the maximum rainfall per ten minutes in the continuous rainfall causing debris flow and the cumulative rainfall from the beginning of rain to the occurrence of debris flow on four catchments.

(The envelope curves represent the lower bound of occurrence of debris flow for each catchment.)

図-2.4 土石流・泥流発生の降雨条件。

(破線は土石流・泥流発生の最小降雨条件の包絡線)

特性を異にしている。たとえば、土石流・泥流の構成材料は、上流部の地質や侵食段階の違いにより溪流ごとに性質を異にしており、長谷川では岩塊が多く含まれ、松浦川では軽石が多く含まれる。深谷川および西道川はこれらの中間的な性質を示している。隣接する流域においても地形、地質、荒廃状況などにより土石流・泥流の流出状況は異なっており、その特性の把握には溪流ごとの検討

が必要である。

1. 土石流・泥流の流速

Fig. 2.5は、VTRに記録された土石流・泥流画像から求めた観測地点における土石流・泥流の流速の時間的変化を各溪流ごとに示したものである。一般に、土石流の流速は先端部分で大きく次

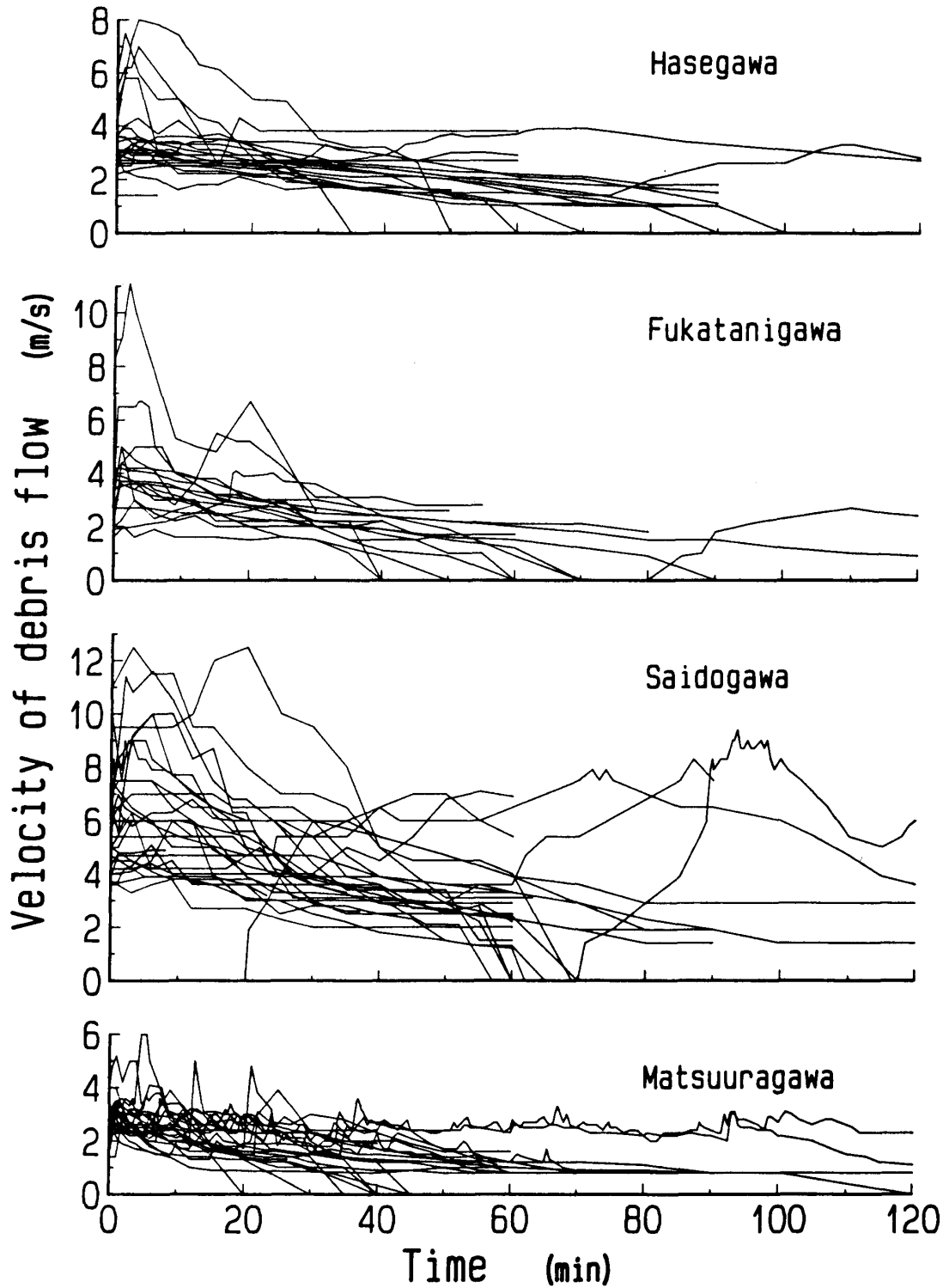


Fig. 2.5 Velocity variations of debris flows with time at four observatories.

図-2.5 観測地点における土石流・泥流の流速の時間的変化。

第に小さくなるが、桜島北側斜面においては流動形態が泥流状のものがほとんどであり、先端速度が最大流速となっていないものも多くみられる。これまで記録された各観測地点における流速の最大値は、長谷川下流で約8 m/s、深谷川中流で約11m/s、西道川下流で約13m/s、松浦川上流で約6 m/sである。

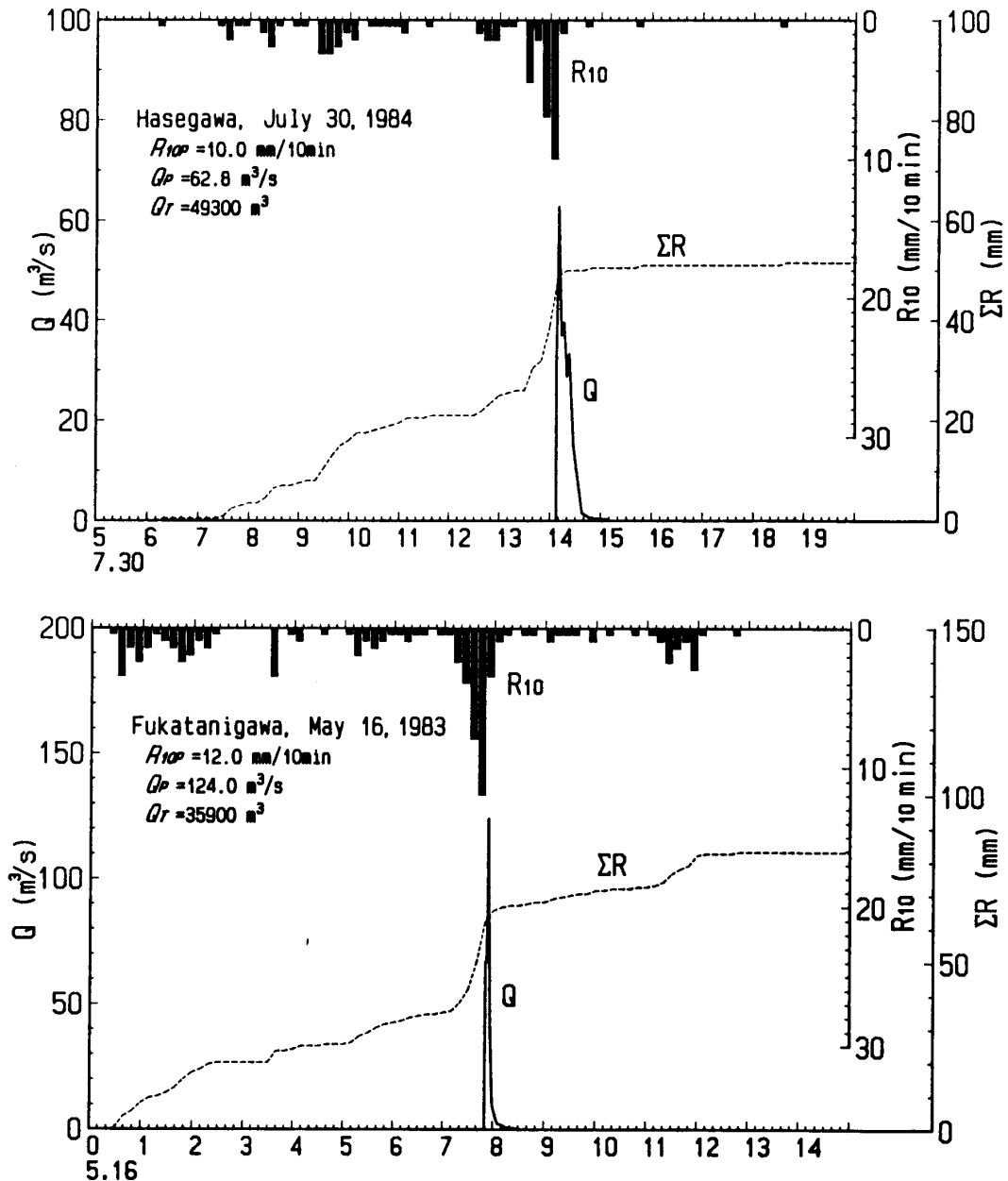


Fig. 2.6 (1) Observed hydrographs of debris flow.

Q : Discharge of debris flow, R_{10} : Rainfall per ten minutes,
 ΣR : Cumulative rainfall, R_{10p} : Maximum rainfall per ten minutes,
 Q_p : Peak discharge of debris flow, Q_T : Total runoff of debris flow

図-2.6 (1) 土石流・泥流ハイドログラフの例。

Q : 土石流の流量 R_{10} : 10分間雨量 ΣR : 累加雨量 R_{10p} : 最大10分間雨量
 Q_p : 土石流・泥流のピーク流量 Q_T : 土石流・泥流の総流出量

VTR に記録された土石流・泥流画像から求めた土石流・泥流のハイドログラフの例を Fig. 2.6 に示す。前述したように、土石流・泥流の発生は最大10分間雨量の発生とよく対応していることがわかる。

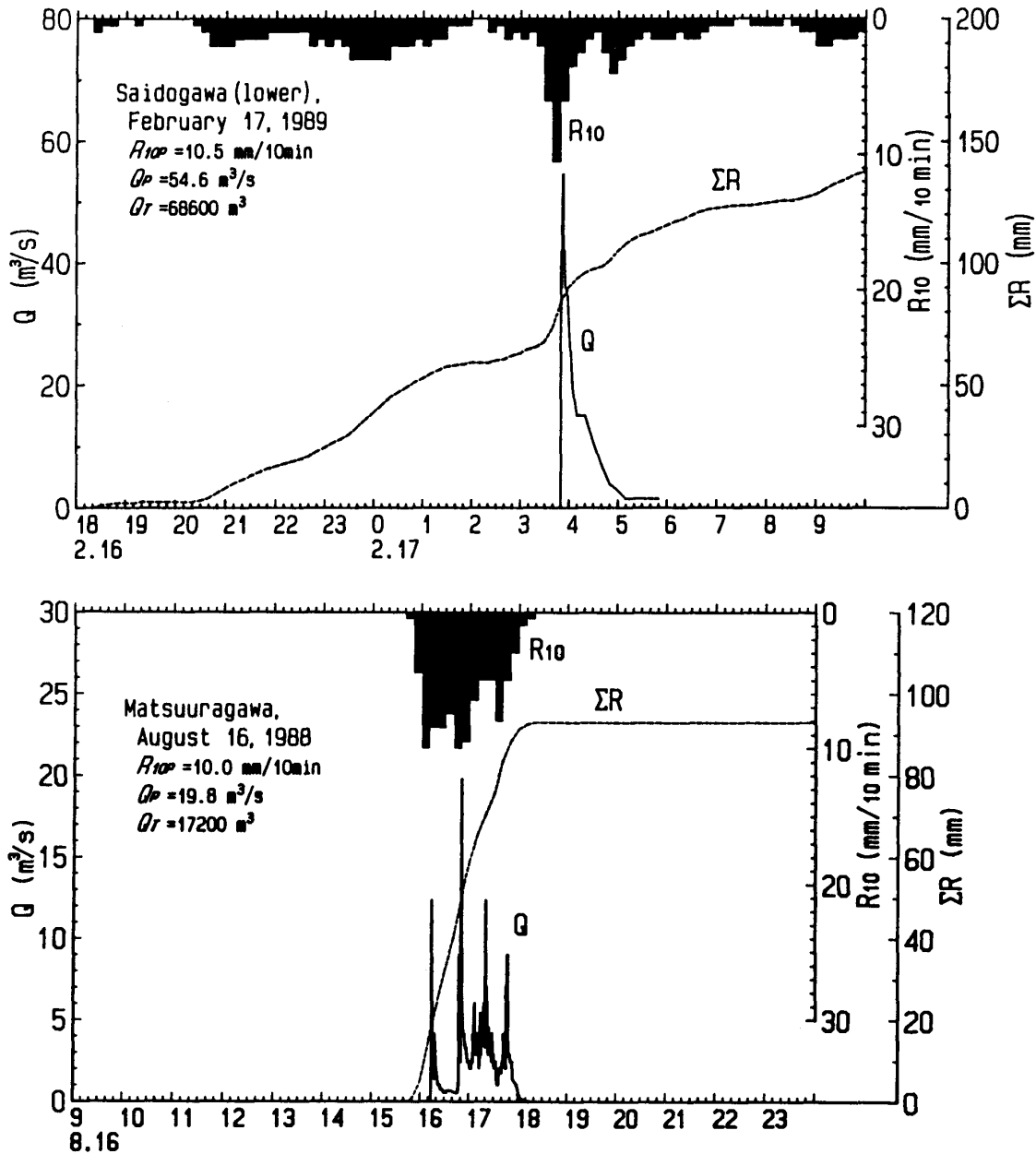


Fig. 2.6 (2) Observed hydrographs of debris flow.

Q : Discharge of debris flow, R_{10} : Rainfall per ten minutes,
 ΣR : Cumulative rainfall, R_{10p} : Maximum rainfall per ten minutes,
 Q_p : Peak discharge of debris flow, Q_T : Total runoff of debris flow

図-2.6 (2) 土石流・泥流ハイドログラフの例。

Q : 土石流の流量 R_{10} : 10分間雨量 ΣR : 累加雨量 R_{10p} : 最大10分間雨量
 Q_p : 土石流・泥流のピーク流量 Q_T : 土石流・泥流の総流出量

2. 土石流・泥流の流出と降雨

1980～1989年に得られた土石流・泥流ハイドログラフから求めた土石流・泥流のピーク流量 Q_P と総流出量 Q_T を Table 2.2 に示す。 Q_P や Q_T は土石流・泥流の規模などの流出特性を代表するものとする。

Fig. 2.7 は、土石流・泥流の総流出量 Q_T とピーク流量 Q_P の関係を観測地点ごとに両対数方眼紙上にプロットしたものである。図中の破線は両者の回帰曲線であり、各観測地点の回帰式は次式で表された。

$$\text{長谷川} : Q_T = 1652 Q_P^{0.813} \quad (r=0.77^{***}) \quad (2.1)$$

$$\text{深谷川} : Q_T = 1646 Q_P^{0.690} \quad (r=0.89^{***}) \quad (2.2)$$

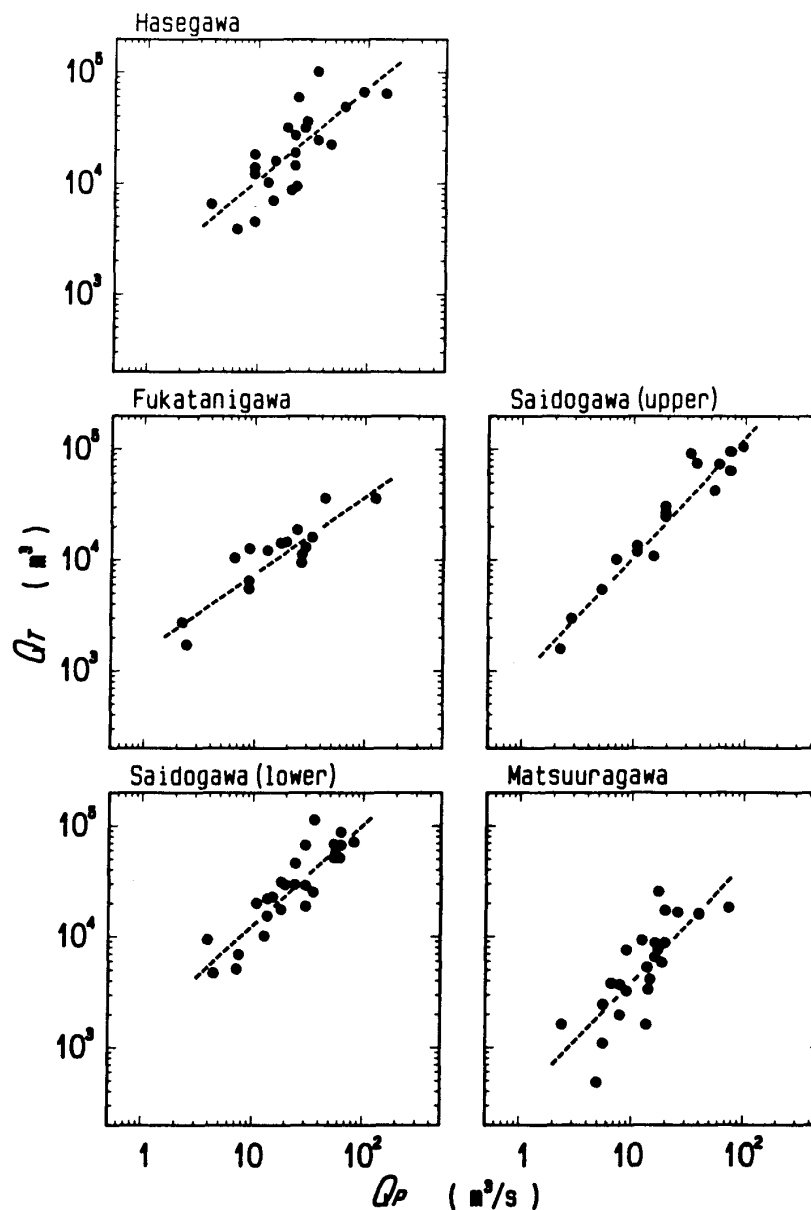


Fig. 2.7 Relationships between total runoff, Q_T (m^3) and peak discharge, Q_P (m^3/s) of debris flow at five observatories.

図-2.7 土石流・泥流の総流出量 Q_T とピーク流量 Q_P の関係。

$$\text{西道川下流} : Q_T = 1568 Q_P^{0.920} \quad (r=0.89^{***}) \quad (2.3)$$

$$\text{西道川上流} : Q_T = 998 Q_P^{1.066} \quad (r=0.96^{***}) \quad (2.4)$$

$$\text{松浦川} : Q_T = 347 Q_P^{1.057} \quad (r=0.79^{***}) \quad (2.5)$$

相関係数 r は各観測地点とも危険率0.1%で高度に有意である。 Q_P が大きくなると Q_T も多くなることからわかる。また、 Q_P と Q_T の関係は集水面積に影響され、 Q_T は Q_P が同程度である場合は集水面積が大きい流域ほど多い。

次に土石流・泥流のピーク流量 Q_P および総流出量 Q_T と降雨因子の関係について検討する。降雨因子としては、土石流・泥流流出終了までの一連続降雨内における10分間、20分間、30分間および60分間の最大雨量、 R_{10P} 、 R_{20P} 、 R_{30P} および R_{60P} と土石流・泥流流出終了までの一連続降雨の累加雨量 ΣR_T を算出した。その結果は Table 2.2 に示される。 Q_P および Q_T と諸降雨因子の関係を片対数方眼紙上にプロットし、回帰分析を行った。指数曲線を当てはめた場合の観測地点ごとの相関係数分布を Fig. 2.8 に示す。Fig. 2.8 によると、ピーク流量 Q_P は R_{10P} 、 R_{20P} 、 R_{30P} などの短時間の降雨強度と相関が高い。Fig. 2.9 は、 Q_P と R_{10P} の関係を観測地点ごとに示したものである。各観測地点とも R_{10P} が増加すると Q_P も増大する傾向がみられる。土石流・泥流の総流出量 Q_T はどの降雨因子とも高い相関関係がみられる。Fig. 2.10 は、 Q_T と R_{60P} の関係を観測地点ごとに示したものである。各観測地点とも R_{60P} が増加すると Q_T も増大する傾向がみられる。

土石流・泥流の総流出量 Q_T と土石流・泥流流出終了までの一連続降雨の累加雨量 ΣR_T に集水面積 A を乗じた値 $A \cdot \Sigma R_T$ との比 $R_Q (= Q_T / A \cdot \Sigma R_T)$ を算出した (Table 2.2)。 R_Q は土石流・泥流の流出率を表す。 Q_T が降雨流出量と土砂流出量の和であることから、土石流・泥流の流出率は1以上となる場合がある。土石流・泥流の流出率 R_Q と Q_P および Q_T との関係を探ると Q_P あるいは Q_T が大きくなると R_Q は高くなる傾向を示した。溪流ごとの比較では、同じ規模の Q_P あるいは Q_T に対する流出率は、長谷川や西道川より深谷川や松浦川で高い傾向がみられた。すなわち、土石流・泥流の流出率はピーク流量あるいは総流出量が同じ程度である場合は集水面積が小さい流域ほど高くなることからわかる。

第5節 火山活動の盛衰が土石流・泥流の発生・流出特性に及ぼす影響

第1章において、火山活動の盛衰に伴い山腹斜面の表面流出現象が変化することが明らかにされた。これに連動して土石流・泥流の発生条件や流出特性も、火山活動の影響を受けるものと予想される。これまで得られた観測資料から、火山活動の短期的な変化が土石流・泥流の発生や規模にどのような影響を及ぼしているか検討する。

1. 降灰回数の把握

火山活動が土石流・泥流の発生や規模に及ぼす影響を評価するには、降灰量を把握する必要がある。しかし調査流域では継続的な降灰量の測定は行われていないため、降灰量に換えて調査流域に降灰をもたらしたと考えられる爆発の回数を南岳爆発の記録と爆発時の風向のデータから推定した。南岳爆発の記録は鹿児島地方気象台 (1980~1989) による桜島火山の観測記録から得られる。観測記録には南岳が爆発したときの日時や噴煙の高さなどが記載されている。風向は同気象台 (1980~1989) による鹿児島市1500m 上空での観測値である。鹿児島市1500m 上空の風向は桜島直上の風向とよく対応しており (加茂ほか, 1977), 南岳爆発に伴う噴煙の方向の推定に使用されている。鹿児島市1500m 上空の風の観測は原則として1日4回行われているため、南岳の爆発に伴う降灰

Table 2.2 Hydrologic characteristics from recorded debris flow on video and rainfall in northern flank of Sakurajima

表-2.2 桜島北岳山体におけるビデオ画像から得られた土石流・泥流因子と降雨因子

Hasegawa

No.	Date	R_{10P}	R_{20P}	R_{30P}	R_{60P}	ΣR_T	V_P	Q_P	Q_T	R_o
1	80. 9.11	12.0	22.0	32.0	44.0	125.0	2.6	26.5	31988	0.19
2	81. 9. 3	6.0	7.5	8.5	12.5	15.5	3.0	22.8	9455	0.45
3	81. 9.25	4.0	6.0	8.5	13.0	28.5	3.0	13.8	7025	0.18
4	82. 7.17	6.0	10.5	12.0	21.0	27.0	7.5	27.8	36373	1.00
5	83. 4.29	8.0	12.0	14.0	17.0	19.0	7.0	46.2	22572	0.88
6	83. 5.16	12.0	20.0	24.0	31.0	68.0	8.0	92.0	66488	0.73
7	84. 3.19	5.5	8.5	10.0	15.5	53.0	5.8	146.7	64054	0.90
8	84. 7.30	10.0	17.0	18.5	24.0	50.5	4.3	62.8	49337	0.72
9	84. 8.25	10.5	16.5	23.0	39.5	84.0	3.0	23.4	59865	0.53
10	86. 5.29	5.0	9.5	14.5	25.0	112.0	3.1	9.3	18414	0.12
11	86. 7.10	8.5	11.0	13.0	20.0	33.0	2.7	3.8	6522	0.15
12	86. 8.28	4.5	8.0	11.0	15.5	16.0	3.4	14.3	16130	0.75
13	87. 7.18	9.0	16.0	21.0	29.0	53.5	3.6	21.6	19030	0.26
14	87. 8. 1	11.0	15.0	18.5	20.0	43.0	2.9	6.5	3877	0.07
15	87. 8.23	12.5	16.0	17.0	19.0	23.0	3.6	21.6	14556	0.47
16	87. 9.10	5.0	8.5	10.5	12.0	14.5	3.6	20.2	8714	0.45
17	87.10.24	4.5	8.0	11.5	21.0	137.5	3.1	9.3	14099	0.08
18	87.11. 2	8.5	16.5	21.5	26.0	31.5	3.9	35.1	24678	0.58
19	88. 2. 5	5.0	7.0	8.0	8.5	9.0	3.1	9.3	4537	0.37
20	88. 5. 4	10.0	19.0	25.0	31.0	50.0	3.5	18.4	31884	0.47
21	88. 7.23	11.0	22.0	26.5	28.5	41.5	3.1	9.3	12209	0.22
22	88. 8.16	22.0	42.0	56.0	86.5	128.0	3.9	35.1	102105	0.59
23	88. 9.11	8.0	15.0	16.0	17.5	23.5	3.3	12.4	10253	0.32
24	89. 8.30	6.5	13.0	14.5	17.0	27.5	3.6	21.6	27344	0.74

Fukatani-gawa

No.	Date	R_{10P}	R_{20P}	R_{30P}	R_{60P}	ΣR_T	V_P	Q_P	Q_T	R_o
1	81. 9. 3	6.0	7.5	8.5	12.5	15.5	3.7	26.3	9479	1.01
2	82. 6.17	4.0	7.5	10.5	17.5	45.5	5.5	6.5	10436	0.38
3	82. 9.19	10.0	15.5	19.5	33.5	47.5	11.1	26.6	11282	0.39
4	83. 3.23	2.5	4.5	6.5	10.0	33.0	2.0	2.4	1718	0.09
5	83. 5.16	12.0	20.0	24.0	31.0	67.0	6.7	124.0	35870	0.88
6	85. 6.21	7.5	8.0	11.5	14.5	47.5	5.0	28.5	13048	0.45
7	85. 8.12	4.5	6.5	7.0	8.0	39.5	5.0	32.5	16197	0.68
8	85.10.13	13.0	24.0	30.5	33.0	33.0	5.0	43.0	36422	1.82
9	86. 7.10	8.5	11.0	13.0	20.0	30.5	4.2	19.1	14603	0.79
10	87. 7.18	9.0	16.0	21.0	29.0	48.0	3.6	8.8	12663	0.43
11	87. 8. 1	11.0	15.0	18.5	20.0	43.0	3.6	8.8	6508	0.25
12	87. 8.17	7.0	13.5	17.5	19.5	23.0	4.1	16.9	14340	1.03
13	87. 9.10	5.0	8.5	10.5	12.0	14.5	3.6	8.8	5490	0.62
14	87.11. 2	8.5	16.5	21.5	26.0	31.5	4.4	23.8	18828	0.98
15	88. 7.23	11.0	22.0	26.5	28.5	41.5	3.9	12.8	12222	0.49
16	88. 9.11	8.0	15.0	16.0	17.5	23.5	2.7	2.2	2739	0.19

Table 2.2 (Continued)

表-2.2 (続き)

Saidogawa(lower)

No.	Date	R_{10P}	R_{20P}	R_{30P}	R_{60P}	ΣR_T	V_P	Q_P	Q_T	R_Q
1	82. 7.24	13.5	23.0	26.5	31.5	73.0	10.0	35.0	25287	0.24
2	83. 2. 2	10.5	16.5	22.0	29.5	38.0	12.5	63.1	67502	1.24
3	83. 3.23	5.5	7.5	9.0	15.0	74.0	4.5	13.6	15488	0.15
4	83. 4.29	10.5	15.5	19.5	25.0	30.5	4.4	4.4	4727	0.11
5	83. 6.12	9.0	17.5	26.5	49.5	104.0	6.0	18.1	31428	0.21
6	83. 6.21	12.0	20.5	28.0	42.5	94.5	12.5	63.1	88148	0.65
7	83. 9.20	9.5	17.0	20.0	26.0	51.5	6.3	12.7	10153	0.14
8	84. 4.19	8.5	17.0	24.0	39.5	87.5	11.6	82.4	71907	0.57
9	84. 6. 8	19.0	31.5	36.5	44.0	52.5	10.0	56.1	57020	0.76
10	84. 7.30	10.0	17.0	18.5	24.0	50.5	6.8	13.6	22148	0.31
11	85. 2.19	5.5	10.0	15.0	25.0	77.5	6.0	24.0	29700	0.27
12	85. 5.14	8.5	14.0	19.0	28.0	48.0	6.0	18.0	17663	0.26
13	85.10. 4	5.5	9.0	12.5	14.5	30.5	5.0	7.5	6948	0.16
14	86. 5. 3	10.0	15.5	18.5	21.0	23.0	7.5	30.0	29164	0.88
15	86. 6.20	12.5	22.0	30.0	46.5	85.5	7.5	30.0	67476	0.55
16	86. 6.26	10.5	14.5	18.5	22.0	23.0	5.4	10.8	20063	0.61
17	86. 7.10	12.0	22.0	30.5	44.5	106.0	7.0	24.5	46278	0.30
18	87. 5. 1	9.0	14.5	19.5	33.5	93.5	9.0	54.6	51515	0.38
19	87. 8.17	9.5	15.5	19.5	26.0	31.5	3.9	3.9	9444	0.21
20	87. 8.23	8.5	15.5	17.0	18.5	19.5	7.5	30.2	18900	0.68
21	87. 9.10	7.0	12.0	13.0	17.0	22.5	4.7	7.1	5137	0.16
22	88. 5. 4	4.5	8.5	11.5	15.5	20.0	6.0	15.1	22937	0.80
23	88. 8.16	10.0	19.5	27.0	54.0	93.0	7.9	35.9	113946	0.86
24	88. 9.20	13.0	19.5	27.5	33.0	36.0	9.4	61.9	51423	1.00
25	89. 2.17	10.5	16.5	22.5	30.5	142.0	9.0	54.6	68560	0.34
26	89. 9.13	10.0	17.0	19.5	23.0	36.5	6.5	19.6	29578	0.57

Saidogawa(upper)

No.	Date	R_{10P}	R_{20P}	R_{30P}	R_{60P}	ΣR_T	V_P	Q_P	Q_T	R_Q
1	80. 9.11	12.0	22.0	32.0	44.0	125.0	5.3	59.4	73782	0.43
2	83. 3.23	5.5	7.5	9.0	15.0	74.0	4.0	14.8	10822	0.11
3	83. 6.12	9.0	17.5	26.5	49.5	94.5	4.8	32.3	91788	0.70
4	83. 8.30	12.5	19.0	23.0	29.5	32.0	5.6	73.5	64519	1.46
5	83. 9.21	12.0	23.0	31.5	44.0	171.0	5.9	94.5	105199	0.45
6	85.10.13	11.0	20.0	29.0	32.5	33.5	5.2	53.6	42558	0.92
7	86. 2.18	4.5	8.0	11.0	21.5	75.0	3.2	5.2	5459	0.05
8	86. 5.29	5.0	9.0	13.5	25.5	129.0	4.2	19.1	27034	0.15
9	86. 7.10	12.0	22.0	30.5	44.5	106.0	4.2	19.1	30763	0.21
10	87. 7.18	9.0	16.0	19.0	28.5	50.0	3.4	6.9	10165	0.15
11	87. 8. 1	11.0	15.0	18.5	20.0	43.0	3.7	10.6	11909	0.20
12	87. 8. 8	5.0	10.0	14.0	24.0	50.0	2.7	2.2	1584	0.02
13	87. 9.10	7.0	12.0	13.0	17.0	22.5	2.8	2.8	2992	0.10
14	88. 5. 4	4.5	8.5	11.5	15.5	20.5	4.2	19.1	24621	0.87
15	88. 7.23	13.5	20.0	22.5	26.0	41.5	3.7	10.6	13535	0.24
16	88. 8.16	10.0	19.5	27.0	54.0	93.0	4.8	36.5	75161	0.59
17	89. 7.28	5.5	10.5	15.0	26.5	78.0	5.6	73.5	95124	0.88

Table 2.2 (Continued)

表-2.2 (続き)

Matsuuragawa

No.	Date	R_{10P}	R_{20P}	R_{30P}	R_{60P}	ΣR_T	V_P	Q_P	Q_T	R_o
1	82. 6.13	5.0	9.5	13.0	23.0	56.0	3.9	6.6	3789	0.19
2	82. 7.20	8.0	10.0	11.0	11.0	11.0	2.8	5.6	1094	0.28
3	83. 5.16	12.0	20.0	24.0	31.0	67.0	6.0	75.0	18401	0.78
4	83. 6.12	9.0	17.5	26.5	49.5	99.5	5.0	39.8	16317	0.46
5	83. 8.30	12.5	19.0	23.0	29.5	32.0	5.2	39.9	16063	1.42
6	84. 7.30	10.0	17.0	18.5	24.0	50.0	3.1	19.8	8807	0.50
7	85. 9. 7	6.0	10.0	12.5	13.0	13.0	3.0	9.0	3239	0.70
8	85.10. 5	5.5	10.0	12.5	19.5	54.5	4.0	14.0	3350	0.17
9	86. 2.18	4.5	8.0	11.0	21.5	75.0	3.1	9.0	7587	0.29
10	86. 5.29	5.0	9.0	13.5	24.5	118.0	3.5	16.1	6524	0.16
11	86. 7.10	12.0	22.0	30.5	44.5	106.0	3.3	12.4	9306	0.25
12	86. 8.28	4.5	9.0	11.0	17.0	17.0	2.4	2.4	1635	0.27
13	86.10.10	12.0	16.5	19.5	26.0	40.5	3.6	18.6	5843	0.41
14	87. 3.19	8.5	14.0	18.5	29.0	55.5	3.0	7.9	1976	0.10
15	87. 4. 9	5.0	7.5	10.0	17.5	37.0	3.2	4.9	486	0.04
16	87. 4.21	7.5	11.5	18.5	29.0	54.5	3.3	5.6	2463	0.13
17	87. 8. 1	11.0	15.0	18.5	20.0	43.0	3.4	13.6	1621	0.11
18	87. 8.17	9.5	15.5	19.5	26.0	31.5	3.5	16.1	8830	0.79
19	87. 8.23	8.5	15.5	17.0	18.5	19.0	3.0	7.9	3691	0.55
20	87.11. 2	12.0	20.5	25.0	30.0	36.0	3.8	25.5	16628	1.30
21	88. 5. 4	4.5	8.5	11.5	15.5	20.5	3.5	17.2	7690	1.06
22	88. 7.23	13.5	20.0	22.5	26.0	40.0	3.4	13.7	5309	0.37
23	88. 8.16	10.0	19.5	27.0	54.0	92.5	3.6	19.8	17248	0.53
24	89. 7.28	13.5	25.0	35.0	68.0	298.5	3.5	17.2	25664	0.24
25	89. 8.30	9.0	12.0	13.5	16.0	28.5	3.4	14.6	4113	0.41

R_{10P} , R_{20P} , R_{30P} , R_{60P} : Maximum rainfall per ten, twenty, thirty and sixty minutes in the continuous rainfall causing debris flow, mm/10min, mm/20min, mm/30min and mm/60min.

ΣR_T : Cumulative rainfall from the beginning of rain to the end of debris flow, mm.

V_P : Peak velocity of debris flow, m/s.

Q_P : Peak discharge of debris flow, m³/s.

Q_T : Total runoff of debris flow, m³.

R_o : Runoff ratio of debris flow, %.

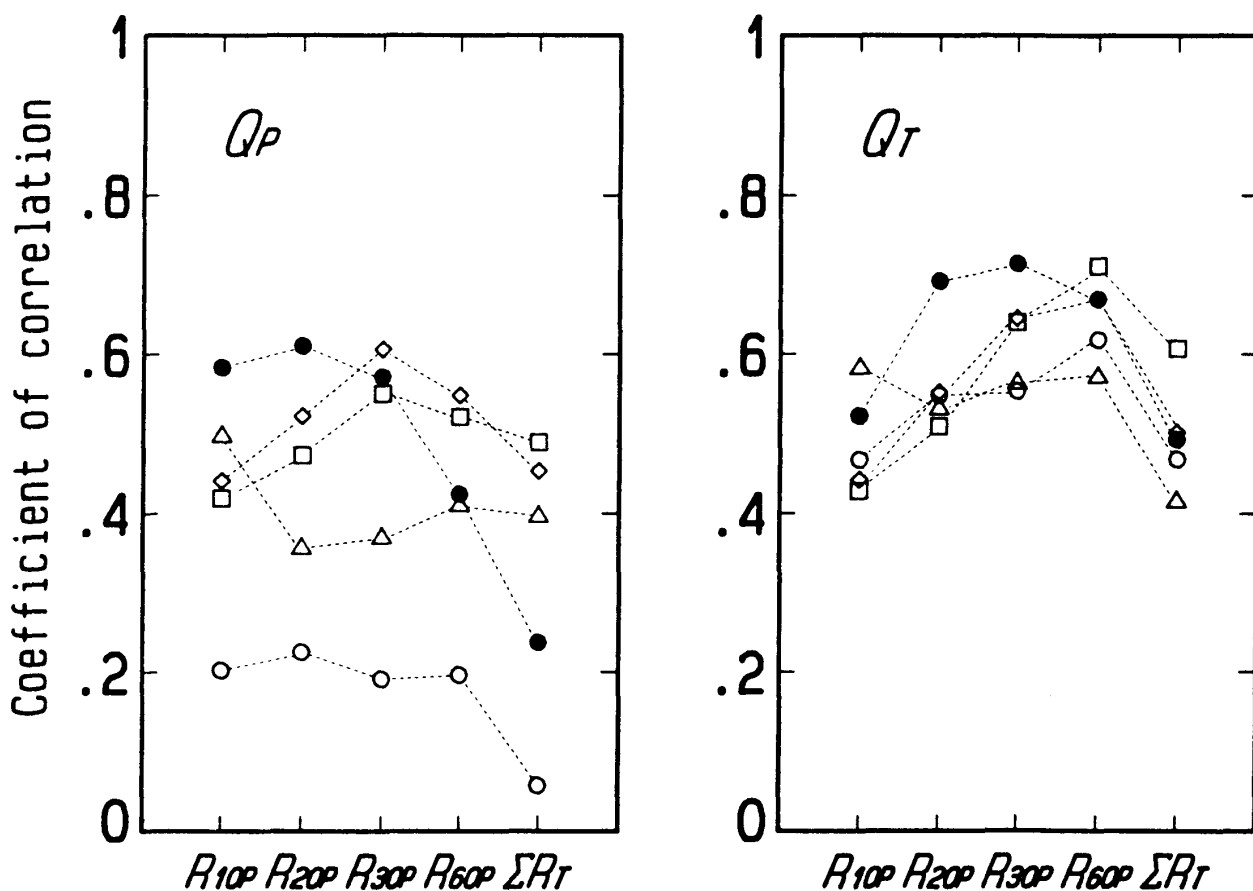


Fig. 2.8 Coefficients of correlation between peak discharge, Q_p and total runoff, Q_T of debris flow, and rainfall factors.

○ Hasegawa △ Fukatanigawa □ Saidogawa (lower)

◇ Saidogawa (upper) ● Matsuuragawa

R_{10p} , R_{20p} , R_{30p} , R_{60p} : Maximum rainfall per ten, twenty, thirty and sixty minutes in the continuous rainfall causing debris flow

ΣR_T : Cumulative rainfall from the beginning of rain to the end of debris flow

図-2.8 土石流・泥流のピーク流量 Q_p および総流出量 Q_T と降雨因子との相関係数。

○長谷川 △深谷川 □西道川下流 ◇西道川上流 ●松浦川

R_{10p} , R_{20p} , R_{30p} , R_{60p} :一連続降雨内における10分間, 20分間, 30分間および60分間の最大雨量

ΣR_T :土石流・泥流流出終了までの一連続降雨の累加雨量

方向の推定には爆発時刻直前の風向観測値を使用した。これらの南岳爆発の記録と風向データから、爆発に伴い調査流域が降灰の影響を受けたと推定される回数を日単位で求めた。

Fig. 2.11は、1980～1989年の10年間の南岳の爆発回数と調査流域の降灰回数の推移を日単位で示したものである。土石流・泥流観測を行っている調査流域は南岳から北～西北西方向に位置しているため、降灰を受けるのは南～南東の風が中心となる夏期に多く、北西の風が中心となる冬期に少ない。1980～1989年の10年間に於ける南岳の爆発回数は2482回であり、このうち調査流域の推定降灰回数は570回（約23%）である。

流域の土石流・泥流特性は、土石流・泥流発生前の一定期間における降灰の頻度に支配されるも

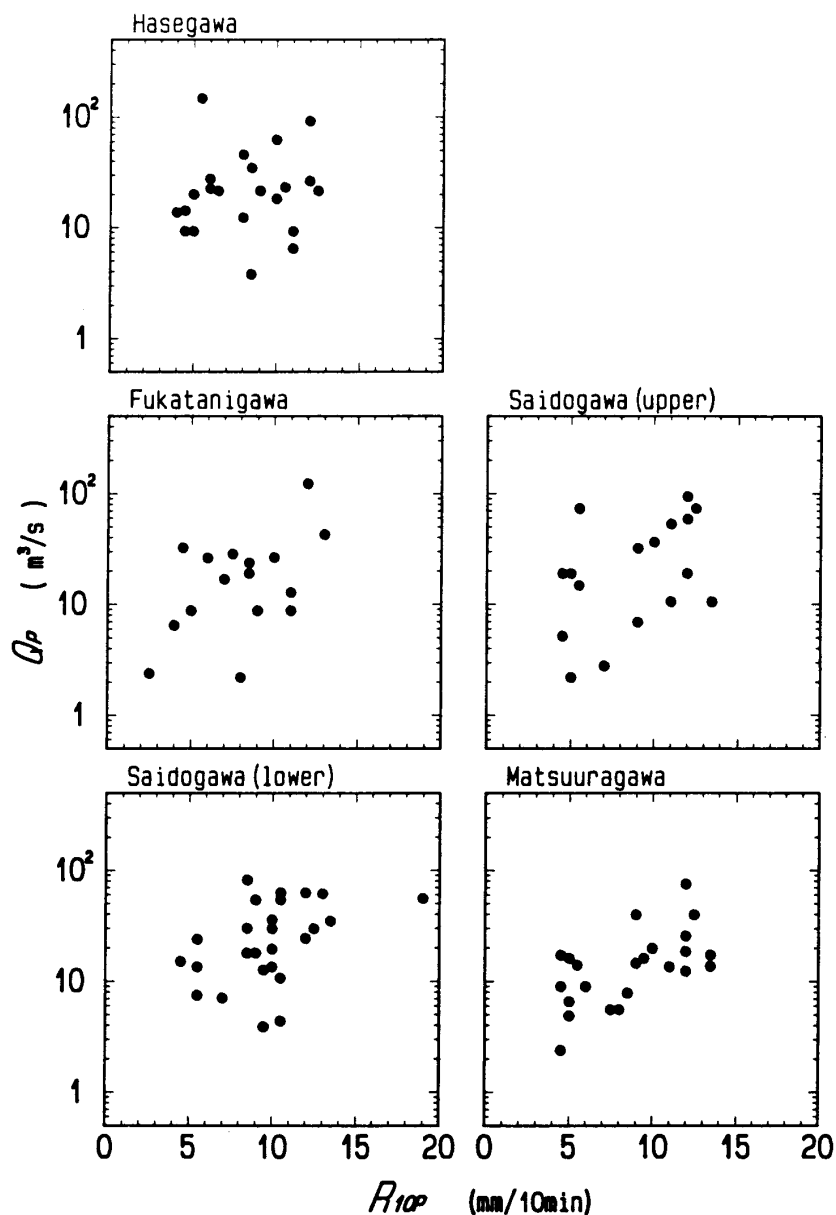


Fig. 2.9 Relationships between peak discharge, Q_p (m^3/s) of debris flow and maximum rainfall per ten minutes, R_{10p} ($mm/10min$) in the continuous rainfall causing debris flow at five observatories.

図-2.9 土石流・泥流のピーク流量 Q_p と最大10分間雨量 R_{10p} の関係.

のと考える。この頻度を先行降灰回数と呼び、任意の日から n 日先行する期間内における降灰回数、すなわち n 日間先行降灰回数を F_n と定義する。 F_n は次式で表される。

$$F_n = \sum_{t=1}^n A_t \quad (2.6)$$

ここで、 F_n は対象とする日の n 日間先行降灰回数、 n は対象とする日からの先行日数 (30日, 60日, 90日)、 A_t は対象とする日から t 日前の日降灰回数である。

Fig. 2.12は、1980~1989年の10年間のそれぞれの日について先行日数 n が30日, 60日および90日の場合の先行降灰回数を計算し、その推移を日単位で示したものである。先行降灰回数は、1980

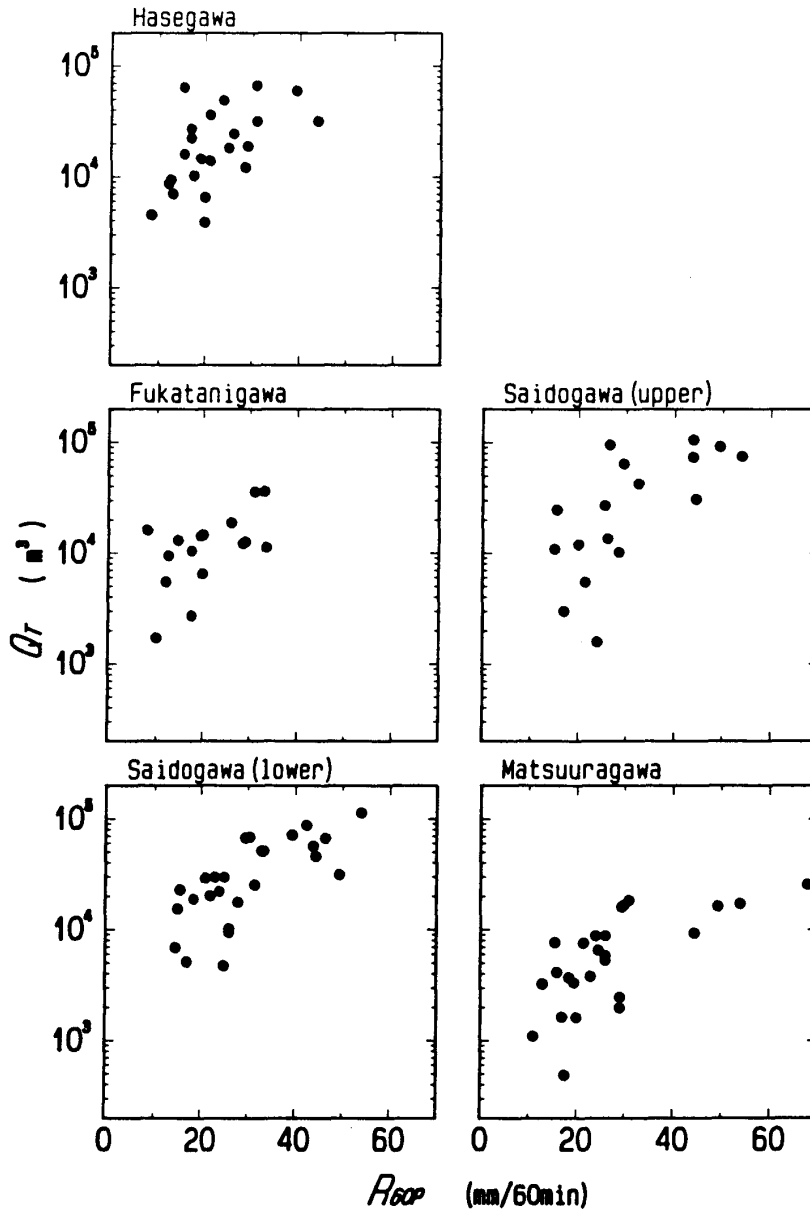


Fig. 2.10 Relationships between total runoff, Q_T (m^3) of debris flow and maximum rainfall per sixty minutes, R_{60P} (mm/60min) in the continuous rainfall causing debris flow at five observatories.

図-2.10 土石流・泥流の総流出量 Q_T と最大60分間雨量 R_{60P} の関係。

～1989年の10年間においても多い時期と少ない時期がある。また、先行降灰回数 F_{30} 、 F_{60} 、 F_{90} の時系列変化はほぼ同じ傾向にある。以下の火山活動の変化が土石流・泥流の発生や規模に及ぼす影響の解析においては、火山活動の指標値として時系列変化傾向がより大まかな90日間先行降灰回数 F_{90} を用いることとする。

2. 火山活動が土石流・泥流の発生に及ぼす影響

現在採用している土石流・泥流観測システムにおいては、その発生は溪床を横断して張られているワイヤーセンサーの切断により検知している。このシステムではワイヤーセンサー切断後からセンサーの張り換えを行う時点までの期間については土石流・泥流発生の有無は不明である。した

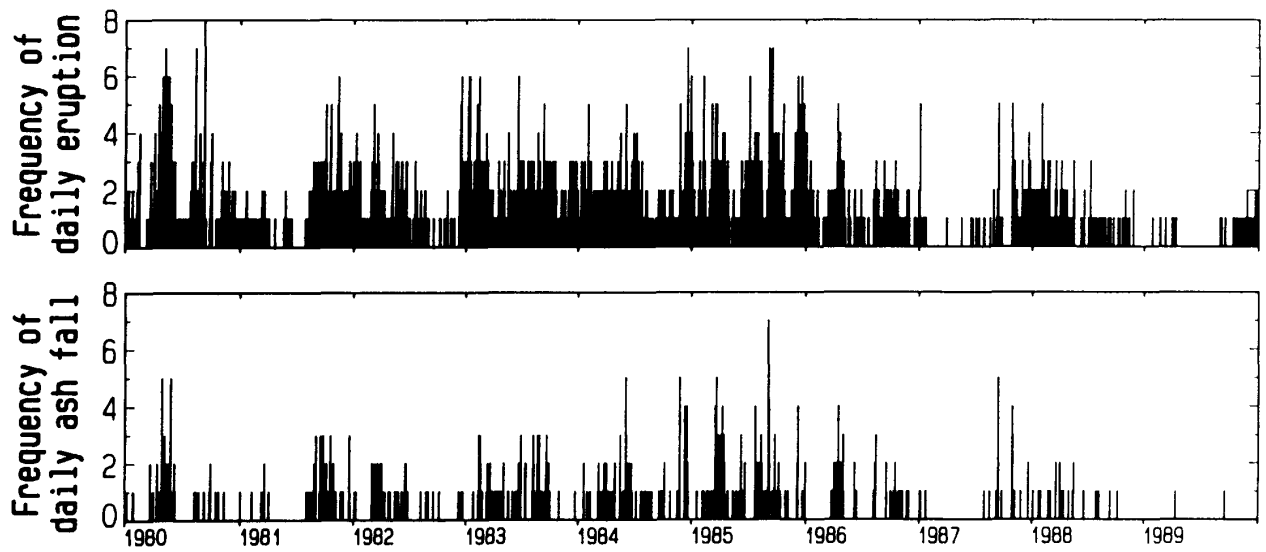


Fig. 2.11 Variations of frequency of daily eruption and ash fall in study area.
 図-2.11 南岳の爆発回数と調査流域の降灰回数の日推移.

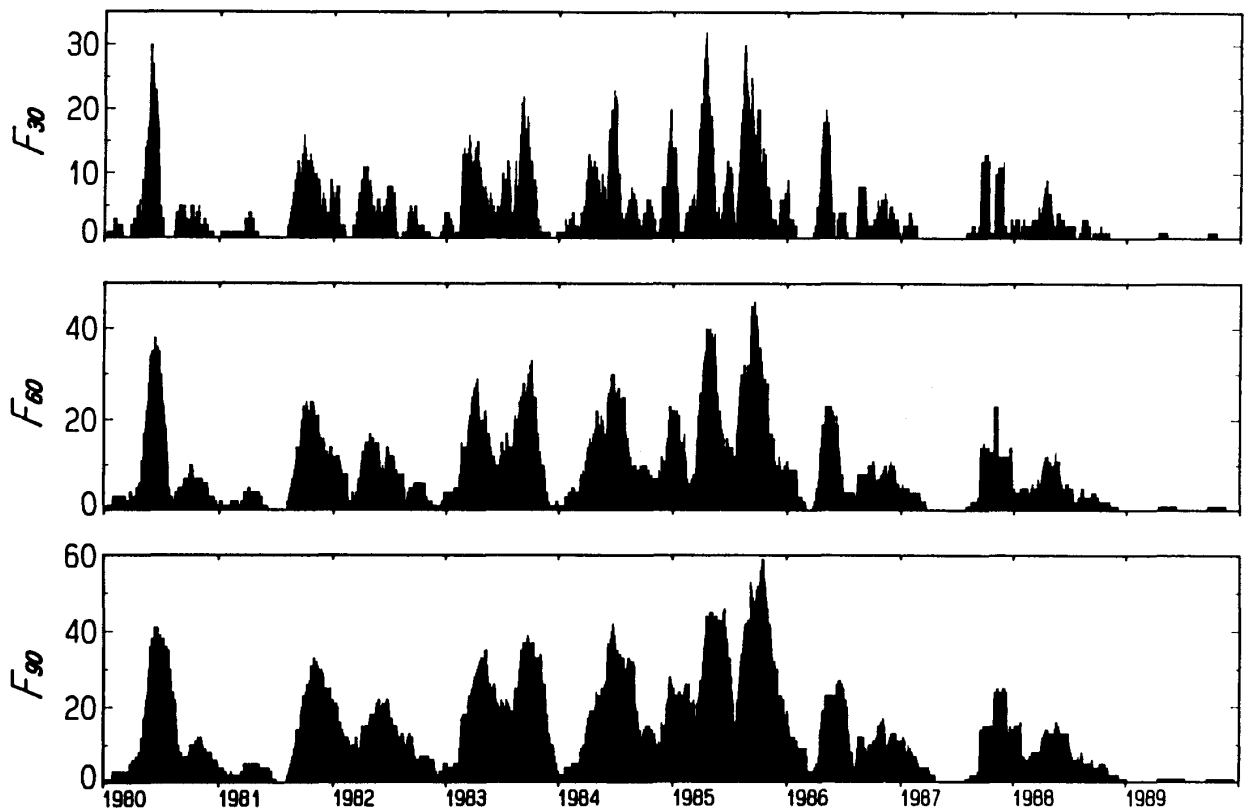


Fig. 2.12 Variations of antecedent frequency of ash fall in study area.

F_{30} , F_{60} , F_{90} : Ash-fall frequency for the preceding thirty, sixty and ninety days

図-2.12 先行降灰回数の日推移.

F_{30} , F_{60} , F_{90} : 30日間, 60日間, 90日間先行降灰回数

がって、すべての降雨についてはその発生・非発生が確認されていない。そこで、溪流を横断して張られているワイヤーセンサーの切断記録からいずれの流域でも土石流・泥流が発生していない期間を求め、その期間における降雨特性と降灰状況から、火山活動の推移が土石流・泥流発生時の降雨条件にどのような影響を及ぼしているかを検討した。解析期間は、詳細なワイヤーセンサー切断記録が得られた1984～1989年の6年間である。

土石流・泥流非発生期間において2 mm以上の10分間雨量 R_{10} を検索し、 R_{10} 発生時刻までの一連続降雨の累加雨量 ΣR を算出した。10分間雨量2 mmという値は、第3節で述べたように、土石流・泥流発生時の最小限界降雨強度であり、これまで蓄積された観測記録によれば10分間雨量2 mm未満では土石流が発生していない。Fig. 2.13は、この10分間雨量 R_{10} と累加雨量 ΣR の関係を3階級の先行降灰回数で区分してプロットしたものである。先行降灰回数の階級は、90日間先行降灰回数 F_{90} が20回未満、20回以上40回未満、および40回以上の3つに区分し、 $F_{90} < 20$ は調査流域の降灰が相対的に少ない期間、 $F_{90} \geq 40$ は降灰が相対的に多い期間、 $20 \leq F_{90} < 40$ は中間的な期間を表す。Fig. 2.12によると、1984～1989年の6年間において、1984年の一部と1986～1989年のほとんどは $F_{90} < 20$ の期間である。 $F_{90} \geq 40$ の期間は1985年にみられる。

Fig. 2.13によると、先行降灰回数 F_{90} が多い階級ほど土石流・泥流非発生時の降雨の上限値は小さくなっており、逆に F_{90} が少ない階級ほど大きな降雨でも土石流・泥流が発生していない場合が多数出現している。これらのことは、降灰が多くなると累加雨量や降雨強度がより小さい降雨で土石流・泥流が発生することを示唆するものである。

以上のように、1984～1989年の6年間という短期間においても火山活動の盛衰に伴って土石流・泥流発生時の降雨条件は変化している。火山活動に伴う火山灰の堆積は山腹斜面の表面流出特性に影響を及ぼしており、その結果、土石流・泥流の発生条件も変化してきていると判断される。桜島のような活火山においては土石流・泥流の発生時の降雨条件は火山活動に密接に影響されている。

3. 火山活動が土石流・泥流の流出に及ぼす影響

本項では、火山活動の変化が土石流・泥流のピーク流量や総流出量にどのような影響を及ぼすかについて検討する。

Fig. 2.14は、Fig. 2.7で示された土石流・泥流の総流出量 Q_T とピーク流量 Q_P の関係を、先行降灰回数 F_{90} で20回未満、20回以上40回未満、および40回以上の3階級に分類してプロットしたものである。調査流域の降灰が相対的に少なかったと推定される $F_{90} < 20$ の期間（○印）と降灰が相対的に多かったと推定される $F_{90} \geq 20$ の期間（●印および×印）の分布を比較すると、●印や×印に分類された土石流・泥流は相対的に Q_P や Q_T の大きい、すなわち、規模の大きい土石流・泥流として分類されるものが多い。また、Fig. 2.9やFig. 2.10に示された土石流・泥流のピーク流量・総流出量と降雨因子との関係を先行降灰回数で分類してプロットした結果、降雨条件が同じでも降灰が相対的に多かった期間は少なかった期間に比べ土石流・泥流のピーク流量や総流出量は大きい傾向がみられた。

以上のことから、火山活動に伴う降灰活動が盛んな期間は穏やかな期間に比較して、降雨条件が同じでも土石流・泥流の規模が大きくなるのがわかる。この理由には、火山活動が盛んな時期は浸透能低下と表面流増加により侵食力が増大すること、土石流・泥流の材料である火山灰が多く蓄積することなどが考えられる。

このように、土石流・泥流の規模は降雨だけでなく火山活動にも密接に関係している。

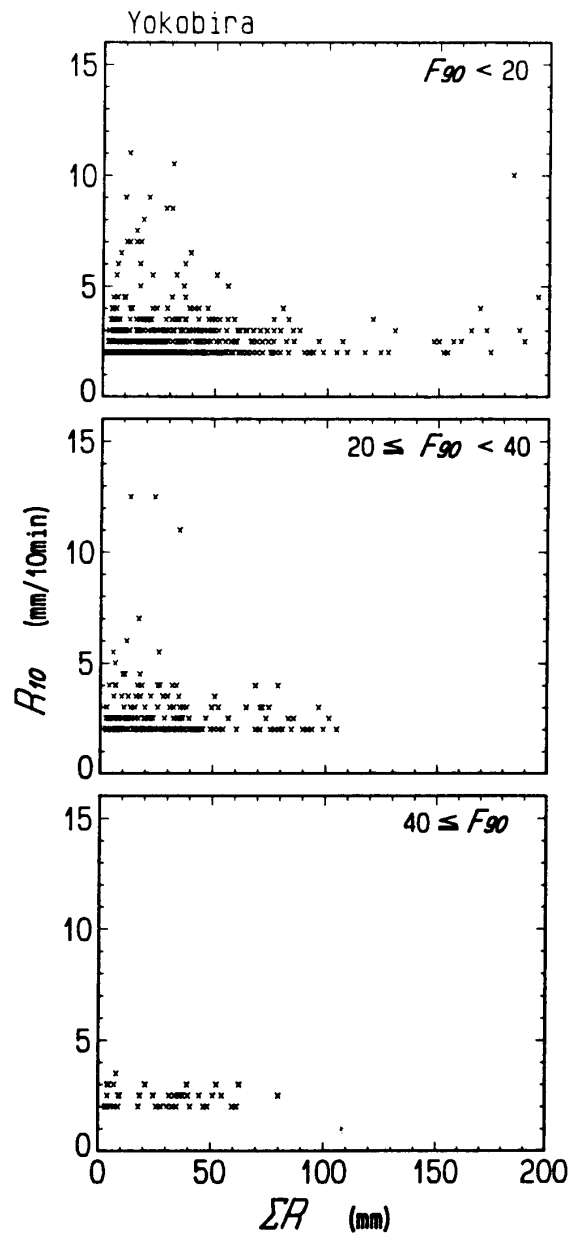


Fig. 2.13 Relationships between rainfall per ten minutes, R_{10} (mm/10min) in the continuous rainfall causing no debris flow and cumulative rainfall, ΣR (mm) from the beginning of rain to the occurrence of R_{10} .

F_{90} : Frequency of ash fall for ninety days preceding the occurrence of R_{10}

図-2.13 土石流・泥流の非発生期間における一連続降雨内の10分間雨量 R_{10} と R_{10} までの累加雨量 ΣR の関係。

F_{90} : 90日間先行降灰回数

第6節 要 約

活発な火山活動を続けている桜島の北岳山体で行われている土石流・泥流観測記録をもとに、活火山流域の土石流・泥流の実態、土石流・泥流の発生条件、および土石流・泥流の流出特性について検討した。さらに火山活動の盛衰に伴う土石流・泥流特性の変化について解析を行った。得られた結果を要約すると次のとおりである。

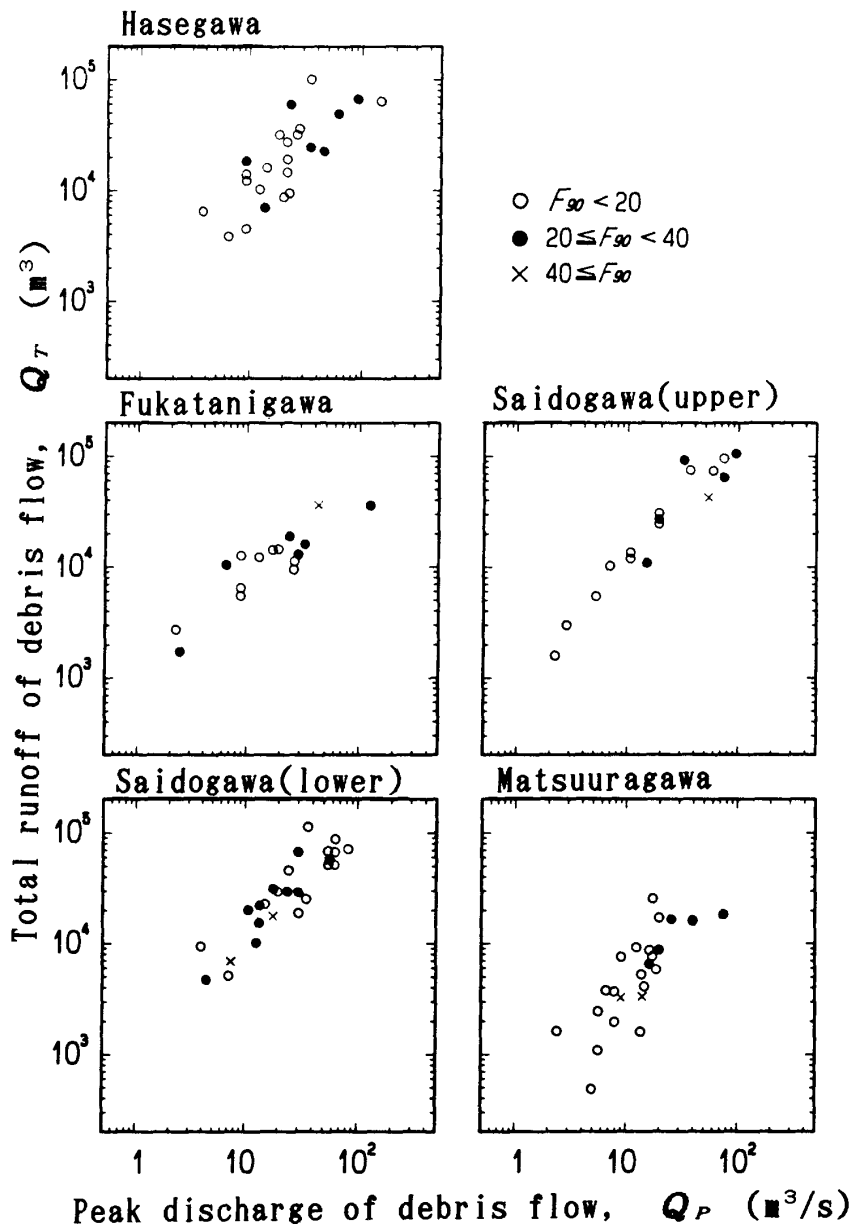


Fig. 2.14 Effects of volcanic activity on peak discharge and total runoff of debris flow.

F_{90} : Frequency of ash fall for ninety days preceding the occurrence of debris flow

図-2.14 火山活動が土石流のピーク流量や総流出量に及ぼす影響。

F_{90} : 90日間先行降灰回数

1) 桜島においては、年降水量の約65%を占める5月から9月に土石流・泥流の発生も集中しており、年間の約80%がこの期間に発生している。土石流・泥流の月発生回数の特徴として、桜島では2、3月の発生回数が降水量に対応せず多い。この原因は、冬期は雨が少なく、山腹で火山灰蓄積が行われ、地表面の浸透能が極端に低下した結果、春先の2、3月頃の比較的小さい降雨で表面流が起こり土石流・泥流が発生しているためと思われる。また、土石流・泥流発生源のガリー側壁斜面における冬期の凍結と融解の繰り返しにより崩落した土砂がガリー床に堆積し、土石流・泥流の材料となっていることも関係していると考えられる。このように、火山灰の影響を受けた桜島山体における土石流・泥流発生の降雨条件は季節的に変化している。

2) 降雨データの解析時間単位を10分間にとると、土石流・泥流の発生は強い10分間雨量の発生とよく対応している。

3) 桜島の土石流・泥流の最小限界降雨条件は、先行累加雨量が10mm のとき10分間雨量で4～5 mm 程度、同様に20mm のとき3～4 mm 程度、30mm のとき2～3 mm 程度という小さい値である。これらの値は第1章で述べた火山灰被覆斜面の表面流出発生 of 最小限界降雨強度1.5～2.0 (mm/10min) とよく対応している。

4) 桜島北側斜面における土石流・泥流は流動形態が泥流状のものがほとんどであり、先端速度が最大流速となっていないものも多くみられる。これまで VTR に記録された土石流・泥流画像から求めた観測地点における流速の最大値は、長谷川下流で約8 m/s、深谷川中流で約11m/s、西道川下流で約13m/s、松浦川上流で約6 m/s である。

5) 土石流・泥流の総流出量 Q_T とピーク流量 Q_P の関係は、両対数方眼紙上で直線関係が認められ、 Q_P が大きくなると Q_T も多くなり、 $Q_T = aQ_P^b$ で表された。また、 Q_P と Q_T の関係は集水面積に影響され、 Q_T は Q_P が同程度である場合は集水面積が大きい流域ほど多い。

6) 土石流・泥流のピーク流量 Q_P および総流出量 Q_T と降雨因子の関係について検討した結果、 Q_P は短時間の降雨強度と相関が高く、 Q_T はすべての降雨因子と相関が高かった。

7) 土石流・泥流の総流出量 Q_T が総雨量に占める割合（土石流・泥流の流出率）を算出した結果、 Q_T が降雨流出量と土砂流出量の和であることから、流出率は1以上となる場合があった。流出率と Q_P および Q_T との関係を求めると Q_P あるいは Q_T が大きくなると流出率は高くなる傾向を示した。

8) 土石流・泥流非発生期間の降雨特性を調べた結果、降灰が相対的に多かった期間は土石流・泥流非発生 of 降雨の上限値は小さくなっており、逆に降灰が少なかった期間は大きな降雨でも土石流・泥流が発生していない場合が多数出現している。すなわち、降灰が多くなると累加雨量や降雨強度が小さい降雨でも土石流・泥流が発生していることが示された。活火山流域においては土石流・泥流発生 of 降雨条件は火山活動に密接に影響されている。

9) 火山活動に伴う降灰活動が盛んな期間と穏やかな期間の土石流・泥流の総流出量 Q_T やピーク流量 Q_P を比較した結果、盛んな期間は穏やかな期間に比較して降雨条件が同じでも Q_T や Q_P が大きくなることが認められた。土石流・泥流のピーク流量や総流出量は、降雨だけでなく火山活動にも密接に関係している。

第3章 第四紀火山碎屑物に覆われた森林流域の流出特性

第1・第2章では、火山活動が人間に及ぼす影響のマイナス的な側面、すなわち、火山活動が土砂災害の増加につながるような現象を取り上げて検討した。この現象は一般に火山の噴火時もしくは噴火後の一時期に現れる。本章では、逆に火山活動が人間の活動にプラス的に作用する現象の一つである火山地域の流域の水源涵養機能について検討を加える。この現象は、火山噴火後長期間が経過し、流域に森林が回復し浸透能が改善されて現れるものである。降下火砕物に覆われた森林流域の流出特性と降下火砕物に覆われていない森林流域の流出特性の比較に基づいて、火山碎屑物が流出に及ぼす影響を実証的に解明すると同時に、火山碎屑物が流域の水源涵養機能に果たす役割についても検討する。

第1節 試験流域の位置および概況

1. 高隈第1号試験流域および高隈第2号試験流域

高隈第1号試験流域および高隈第2号試験流域（以下、1号流域および2号流域と呼ぶ）は、鹿児島大学農学部附属高隈演習林に属し、大隅半島南部の志布志湾に流入している肝属川の支川（申良川）の最上流部に位置している（Fig. 3.1）。高隈演習林は鹿児島県の中央部にある桜島火山のすぐ東側に位置し、演習林内には高隈山から北方へ七岳(881m)・高峠(722m)・鶴岳(885m)を経て狐ヶ岳(557m)に達する稜線が縦断している。この稜線の西側は、急傾斜で鹿児島湾に臨み、始良カルデラの東壁を形成しており、起伏量200~400mの中起伏あるいは起伏量400m以上の大起伏の山地となっている（鹿児島県, 1972）。稜線の東側は、志布志湾に向かって緩く傾斜しており、起伏量200~400mの中起伏あるいは起伏量200m以下の小起伏の山地、丘陵地および台地が広がっている（鹿児島県, 1972）。試験流域は稜線のすぐ東側に位置し、中起伏あるいは小起伏の山地に分類される。

試験流域が位置する高隈演習林の地質は、中生界に属する砂岩と頁岩の互層からなる四万十層群、この四万十層群を貫いた第三紀中新世の花崗岩、始良・阿多両カルデラから洪積世末期に大量に噴

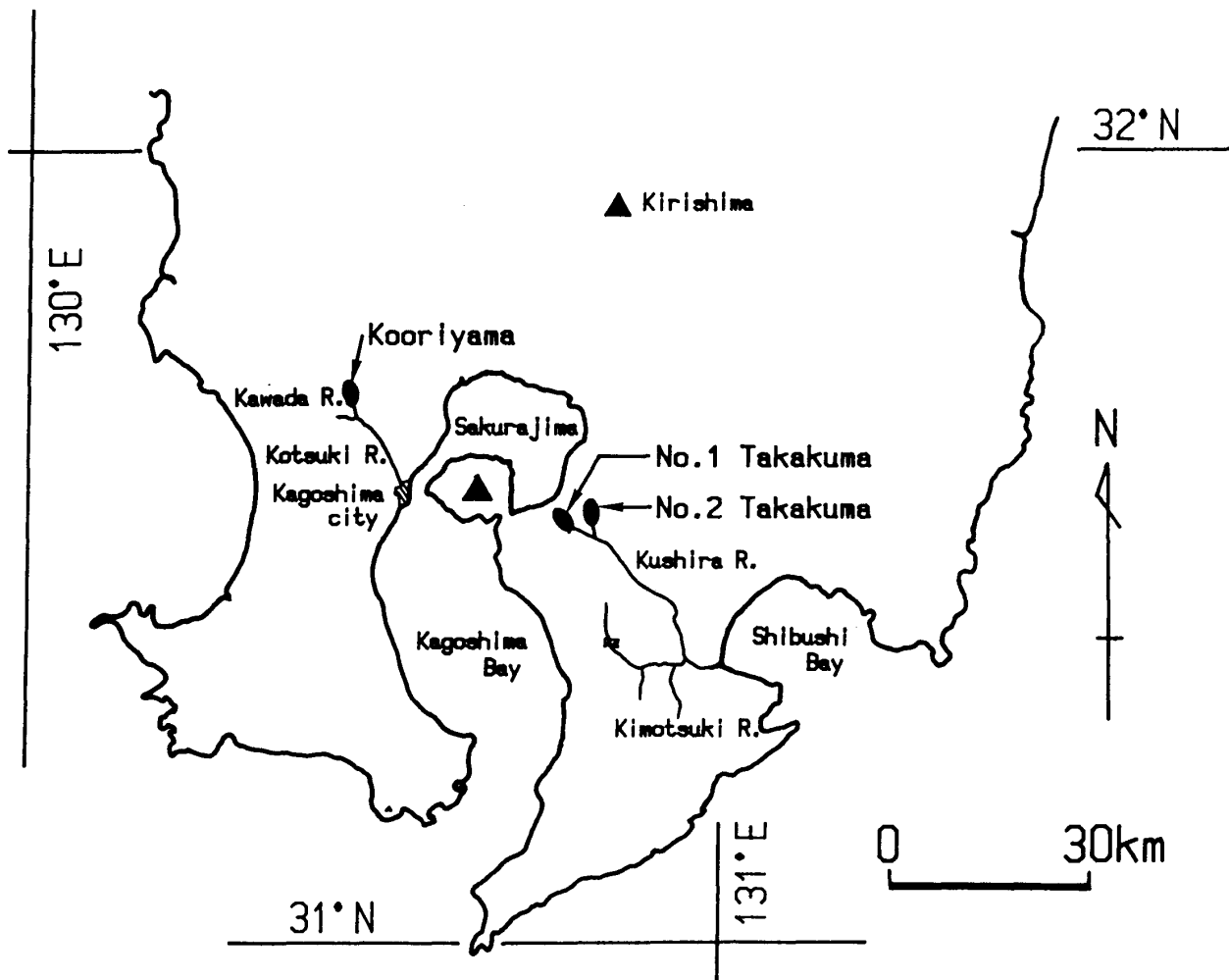


Fig. 3.1 Location of experimental catchments.

図-3.1 試験流域の位置。

出した降下軽石・しらす・溶結凝灰岩などからなり、また、ほぼ全域を霧島および桜島火山から噴出した火山灰・降下軽石が覆っている（鹿児島県，1972）。

試験流域一帯の林況は、イタジイ・イスノキ・アカガシ・ウラジロガシ・タブノキ・マテバシイなど暖帯の常緑広葉樹からなる天然林やスギ・マツ・ヒノキなどからなる人工林である。

高隈演習林管理棟における気象観測によると年平均気温は14～15程度となっている。

2. 郡山試験流域

郡山試験流域（以下、郡山流域と呼ぶ）は、鹿児島市を貫流し鹿児島湾に流入している甲突川の支川（川田川）の上流部に位置している（Fig. 3.1）。郡山試験流域が位置している甲突川上流地域の地形は、起伏量200m以下の小起伏ないし起伏量200～400mの中起伏の火山地、台地平坦面の割合が小さい丘陵地、溶岩台地および溶結凝灰岩台地に分類されている（鹿児島県，1974）。

試験流域一帯の地質は、洪積世末期の火山噴出物であるしらすおよび溶結凝灰岩、新第三紀の凝灰質堆積岩類、安山岩類などから構成されている。凝灰質堆積岩類はよく成層し砂岩・頁岩・泥岩からなり、旧期安山岩上に不整合にのり、新期安山岩に覆われている。

試験流域一帯の林況は、シイ・イチイガシ・ウラジロガシ・シラカシ・タブ・ツバキなどからなる天然林やスギ・ヒノキなどからなる人工林である。

郡山町役場における気象観測によると年平均気温は15～17となっている。

第2節 試験流域の流域条件

流域の流出特性は、流域の地形、地質、植生などの流域条件に密接に関係する。以下、3試験流域の地形、地質、土壌、林況の調査方法とその結果について述べる。

1. 調査方法

(1) 地形調査

試験流域の地形状況を把握するために縮尺5000分の1地形図および航空写真を用いて試験流域の地形解析を行った。計測項目は次の通りである。①流域面積 A (ha)。②最低・最高高度 (m)。③本流総延長 L (m)。④本支流総延長 L_s (m)。⑤流域周囲長 M (m)。⑥本流平均勾配 H/L (°)：本流源頭地点と水位観測点の高度差 H と本流総延長 L との比。⑦流域平均勾配 (°)：流域に50m×50m（地形図上で1cm×1cm）の方眼をかけ、方眼内の等高線本数から各方眼の傾斜を求め、それを流域全体で平均した値。⑧流域平均幅 B (m)： $B=A/L$ 。⑨形状係数： $A/L^2=B/L$ 。⑩密集度 K/M ：流域面積と同面積の円の周囲長 K と流域周囲長 M の比。⑪水系密度 (m/ha)： L_s/A 。⑫起伏量図：流域に50m×50m（地形図上で1cm×1cm）の方眼をかけ、方眼内の最高点と最低点の標高差を起伏量とし、その分布を表した図。⑬傾斜区分図：地形図の等高線間隔を計測して求めた斜面勾配10度ごとの区分図。

(2) 地質および土壌調査

現地調査、縮尺50000分の1地質図および航空写真により試験流域の地質や地質構造を調べ、地質図を作成した。また、現地において土壌調査を行った。

(3) 微地形区分調査

現地調査、縮尺5000分の1地形図および航空写真により斜面形と堆積状況を組み合わせた微地形分類図を作成した。竹下・高木（1977）の方法に従うと、斜面形・堆積区分は次の通りである。①尾根筋緩斜面：傾斜25度未満の狭い稜線状の残積土面。②緩斜面：傾斜25度未満の山腹斜面。緩傾

斜の匍行土、残積土および崩積土を含む。③溪間堆積面：傾斜25度未満の谷間の堆積面、崩積土面や土石流堆積土面。④崩積土面：傾斜25度以上40度未満の、主として凹型斜面上の堆積面。⑤匍行土面：傾斜25度以上40度未満の、主として直型ないし凸型斜面上の匍行土面。⑥急峻匍行土面：40度以上の匍行土面。

(4) 林況調査

森林調査簿、航空写真および現地調査により試験流域の林況を調査した。

2. 調査結果

以下、地形・地質・土壌・林況の各調査結果について流域ごとに記述する。

(1) 高隈第1号試験流域

1号流域は面積43.42ha、標高520~678m に分布し、ほぼ円形の流域形状をなし、水系は放射状に発達している (Fig. 3.2)。流域内には大小7つの流路が存在するが、常時表流水がみられるのは東側の2流路と西側の1流路のみで、残りの4流路は洪水時のみ表流水が発生し普段は枯れ沢となっている。縮尺5000分の1地形図から求めた地形状況を表す因子を Table 3.1 に示す (地頭蘭ほか、1986)。

Fig. 3.3 は、1号流域の起伏量図を示したものである。流域にかけられた50m×50m の方眼数は183個である。全方眼数に占める各起伏量区分の方眼数の割合を Table 3.2 に示す。起伏量21~30m の区分が最も多く、次いで起伏量11~20m の区分と起伏量31~40m の区分が多くなっている。起伏量0~10m の区分は尾根部に分布し、起伏量41~50m の区分は下流部と本流の上流部に存在するのみである。起伏量図から流域平均起伏量を算出すると26(m/0.25ha)である。

Fig. 3.4 は、1号流域の傾斜区分図を示したものである。傾斜区分図において斜面傾斜20度ご

Table 3.1 Some topographic characteristics of three experimental catchments

表-3.1 3試験流域の地形因子

Experimental catchment	Area A (ha)	Altitude (m)	Main stream length L	Total stream length L _s	Circumference length M	Mean gradient of main stream H/L (deg.)	Mean gradient of relief (deg.)	Mean basin width B (m)	Shape factor B/L	Compactness factor K/M	Drainage density L _s /A (m/ha)
			(m)	(m)	(m)	(deg.)	(deg.)	(m)			
No.1 Takakuma	43.42	520-678	725	5900	2650	12.3	27.4	599	0.83	0.88	135.9
No.2 Takakuma	34.02	615-885	950	5260	2600	15.9	26.2	358	0.38	0.80	154.6
Kooriyama	27.41	250-485	1010	1500	2510	10.4	29.5	271	0.27	0.84	54.7

Table 3.2 Percentage for each relief division

表-3.2 起伏量区分ごとの割合 (50m×50m メッシュ)

Experimental catchment	Relief division					
	0~10m	11~20m	21~30m	31~40m	41~50m	51~60m
No.1 Takakuma	7.7 %	24.6	45.9	20.2	1.6	0
No.2 Takakuma	0	12.8	54.5	27.7	5.0	0
Kooriyama	1.9	18.3	35.5	33.7	9.6	1.0

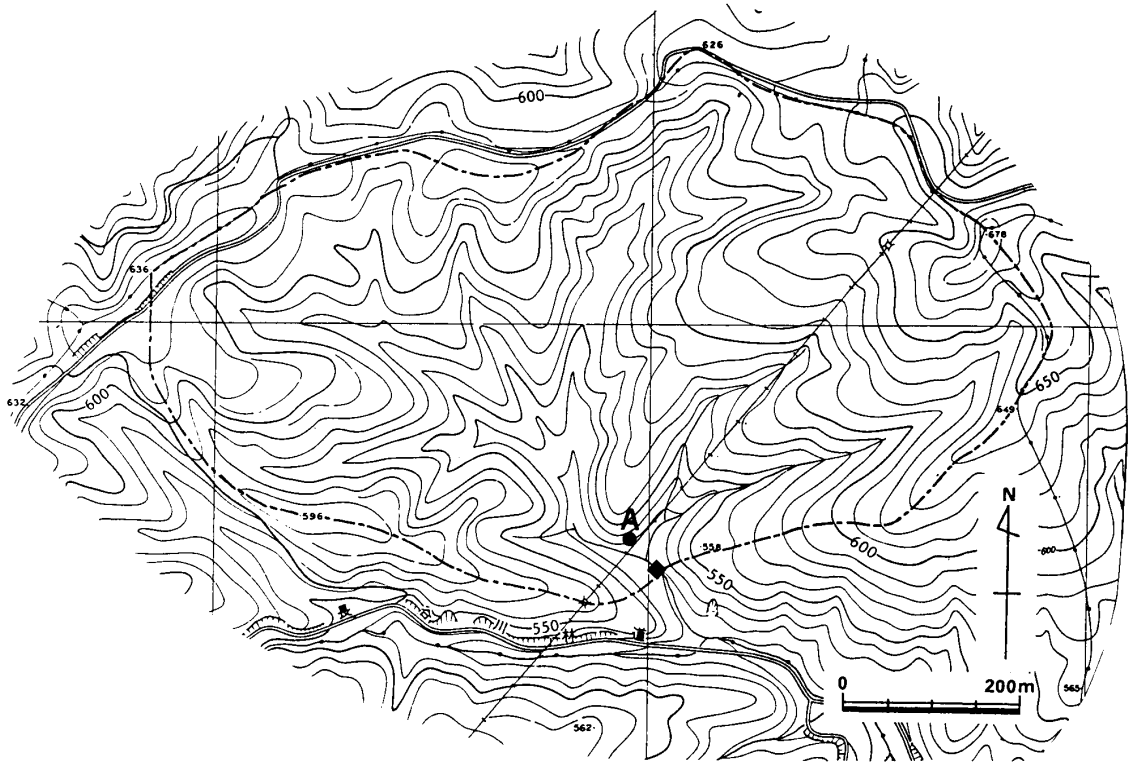


Fig. 3.2 Topography of No.1 Takakuma experimental catchment.

■ : Gauging weir and rain gauge A : Well

図-3.2 高隈第1号試験流域の地形.

■ : 観測施設 A : 地下水位観測地点

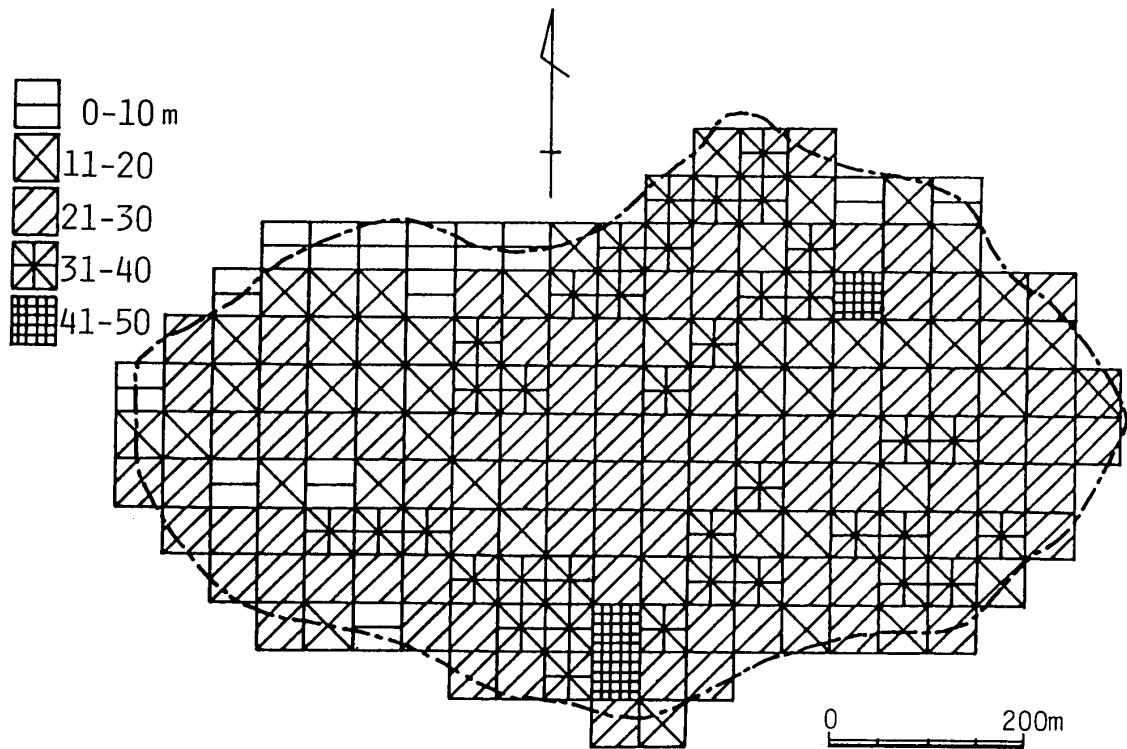


Fig. 3.3 Relief map of No.1 Takakuma experimental catchment.

図-3.3 高隈第1号試験流域の起伏量図.

Table 3.3 Area and area ratio for each slope division

表-3.3 斜面傾斜区分ごとの面積と面積率

Experimental catchment	Slope division					
	0° ~ 20°		20° ~ 40°		40° ~	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
No.1 Takakuma	12.03	(27.7)	27.53	(63.4)	3.86	(8.9)
No.2 Takakuma	10.12	(29.7)	22.79	(67.0)	1.11	(3.3)
Kooriyama	7.98	(29.1)	15.09	(55.0)	4.34	(15.9)

との面積および流域に占める面積率を Table 3.3 に示す。面積的には20~40度の斜面が最も多く、流域の約63%を占めている。

現地調査および縮尺50000分の1地質図（鹿児島県，1972）から作成した1号流域の表層地質図を Fig. 3.5 に示す。流域には中生界に属する砂岩からなる四万十層群，これを覆う形で洪積世末期に始良・阿多両カルデラから大量に噴出した降下火砕物が分布している（鹿児島県，1972）。その大部分は始良カルデラ起源の大隅降下軽石である。降下軽石層は厚い所では十数mに達し（Photo. 3.1），下層になるほどよく締まっており，自立性も高い。その粒径は粗粒で2，3cm から大きなものでは10cm 以上である。また，土層の上層部には流域ほぼ全体にわたり霧島および桜島から噴出した降下火山灰・降下軽石が分布している。1号流域は火山碎屑物に覆われる以前は比較的小起伏の地形を示し，主に砂岩を表層地質とする山地であった。始良・阿多・霧島・桜島などの火山活動に伴い，流域内は火山碎屑物に一樣に覆われ，その後侵食により谷が発達し，現在の地形が形

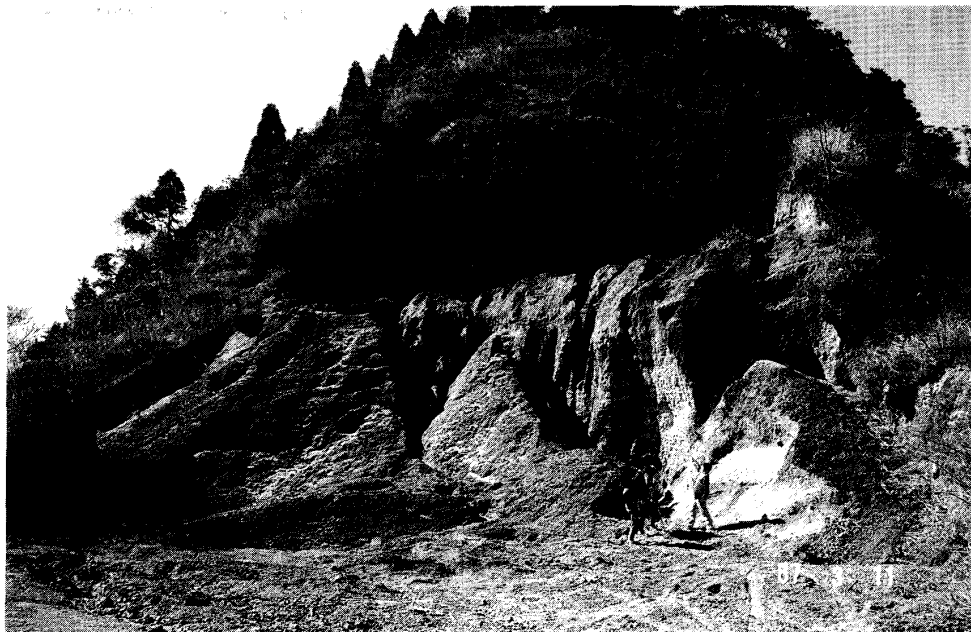


Photo. 3.1 Pyroclastic fall deposits in No.1 Takakuma experimental catchment.

写真-3.1 高隈第1号試験流域の降下軽石層。

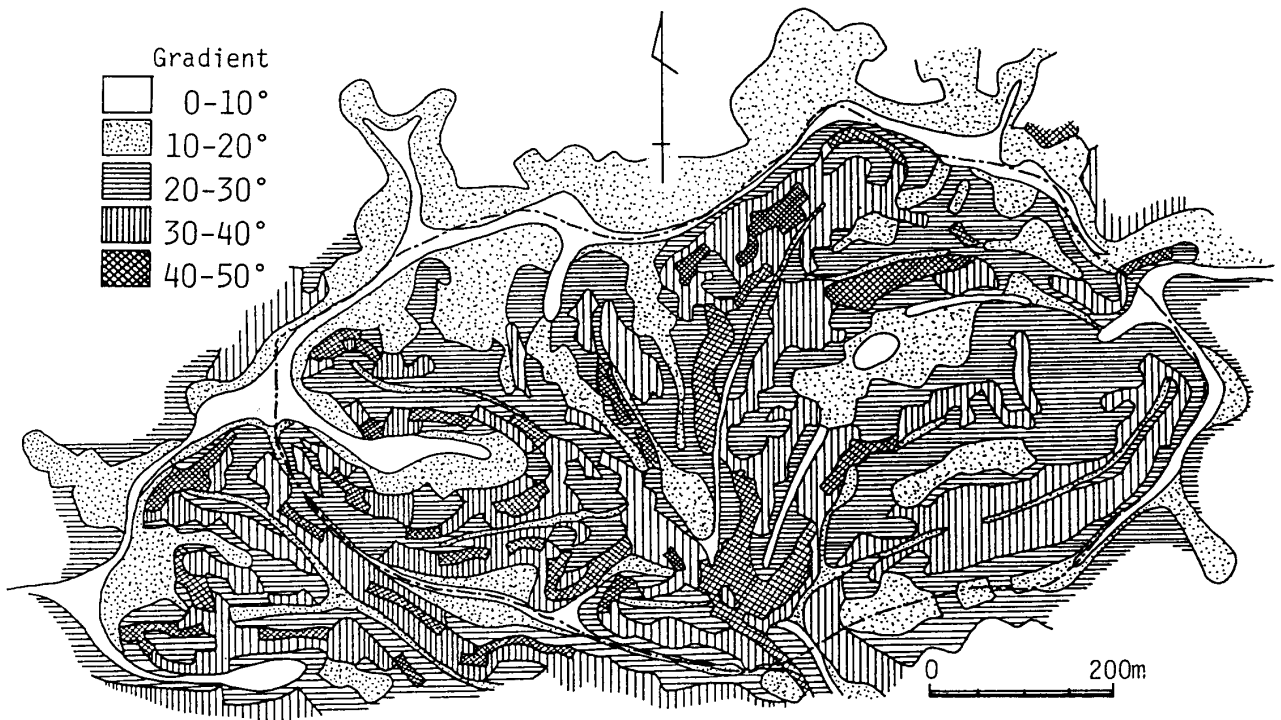


Fig. 3.4 Slope classification map of No.1 Takakuma experimental catchment.
 図-3.4 高隈第1号試験流域の傾斜区分図.

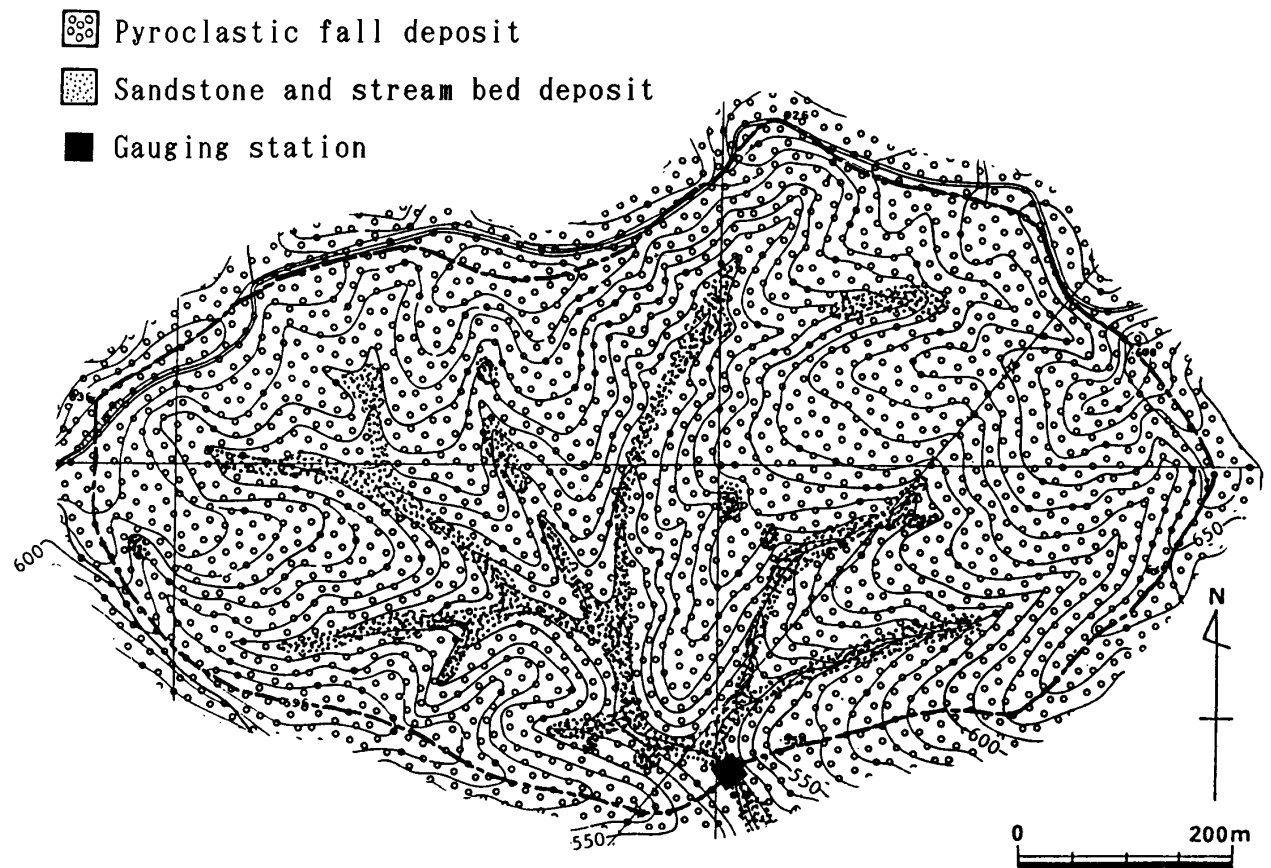


Fig. 3.5 Subsurface geological map of No.1 Takakuma experimental catchment.
 図-3.5 高隈第1号試験流域の表層地質図.

成されたと推定される。したがって、流域の基盤岩（砂岩）の露頭がみられるのは深く刻まれた谷の底のみであり、他の部分は火山碎屑物に被覆されている。

1号流域一帯には、大正3年（1914年）桜島爆発に伴う降下軽石・火山灰が堆積した腐植含量の少ない粗粒の黒色土壌が分布しており、粗粒淡色黒ボク土壌に分類されている（鹿児島県，1972）。試験流域内の土壌断面の観察によると、最表層のAo層には黒色の新鮮な火山灰が含まれ、その下位のA～B層は黒褐色を呈する火山灰および軽石の風化物から成り、さらにその下位のC層はあまり風化されていない軽石から成っている。

Fig. 3.6は、斜面形と堆積状況を組み合わせた微地形区分により求めた微地形分類図である。また、微地形区分別の面積および流域に占める面積率をTable 3.4に示す。匍行土面と緩斜面がほぼ同じ割合で存在しており、両者で流域の約72%を占めている。1号流域の斜面形・堆積区分の特徴として、尾根をはさんで幅の広い緩斜面が分布している。このことは1号流域が一様に火山碎屑物に覆われ、小起伏の地形が形成され、その後侵食により谷が刻まれたことを意味している。

1号流域の植生は、流域の約40%がスギを主体とした林齢約20～70年生の人工針葉樹林、約60%がシイ類、ツバキ、カシ類などを主体とした林齢約35～75年生の常緑広葉樹林である（Fig. 3.7）。

(2) 高隈第2号試験流域

2号流域は面積34.02ha、標高615～885mに分布し、下流部が広がり上流部が狭くなった細長い扇形をなしており、水系は羽状に発達している（Fig. 3.8）。量水観測地点のすぐ上流で2流路が合流しており、東側の流域より西側の流域の面積が大きく水量も多い。表流水は、西側流域で標高800m付近まで、東側流域で標高750m付近まで見られる。流域の下流部の溪流は部分的に急勾配をなし、滝となっているところもある。縮尺5000分の1地形図から求めた地形状況を表す因子をTable 3.1に示す（地頭蘭ほか，1988）。

Fig. 3.9は、2号流域の起伏量図を示したものである。流域にかけられた50m×50mの方眼数は141個である。全方眼数に占める各起伏量区分の方眼数の割合をTable 3.2に示す。起伏量21～30mの区分が最も多く、次いで起伏量31～40mの区分が多くなっている。起伏は相対的に流域の下流部で大きく、上流部で小さくなっている。起伏量図から流域平均起伏量を算出すると28(m/0.25ha)である。

Fig. 3.10は、2号流域の傾斜区分図を示したものである。斜面傾斜は、相対的に流域の下流部で大きく、上流部で小さくなっている。傾斜区分図において斜面傾斜20度ごとの面積と流域に占める面積率を求めた結果をTable 3.3に示す。面積的には20～40度の斜面が最も多く、流域の約67%

Table 3.4 Area and area ratio for each micro-topography and deposit division
表-3.4 微地形区分ごとの面積と面積率

Experimental catchment	Ridgy gentle slope		Gentle slope		Stream bed deposit		Colluvial deposit		Creeping slope		Steep creeping slope	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
No.1 Takakuma	2.82	(6.5)	15.46	(35.6)	1.52	(3.5)	3.08	(7.1)	15.94	(36.7)	4.60	(10.6)
No.2 Takakuma	3.52	(10.3)	14.07	(41.4)	1.54	(4.5)	3.57	(10.5)	9.62	(28.3)	1.70	(5.0)
Kooriyama	3.29	(12.0)	5.77	(21.1)	2.22	(8.0)	2.30	(8.4)	8.35	(30.5)	4.52	(16.5)

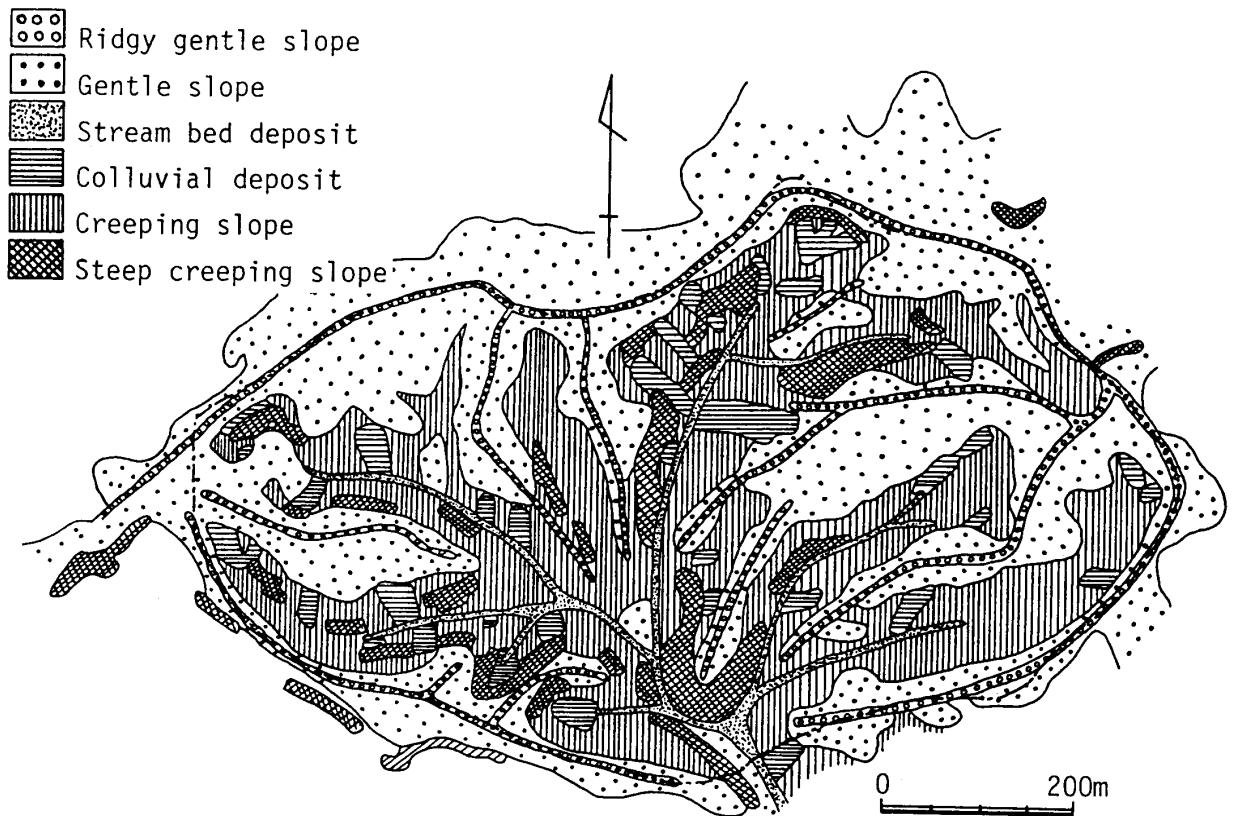


Fig. 3.6 Micro-topography and deposit divisions map of No.1 Takakuma experimental catchment.
 図-3.6 高隈第1号試験流域の微地形分類図.

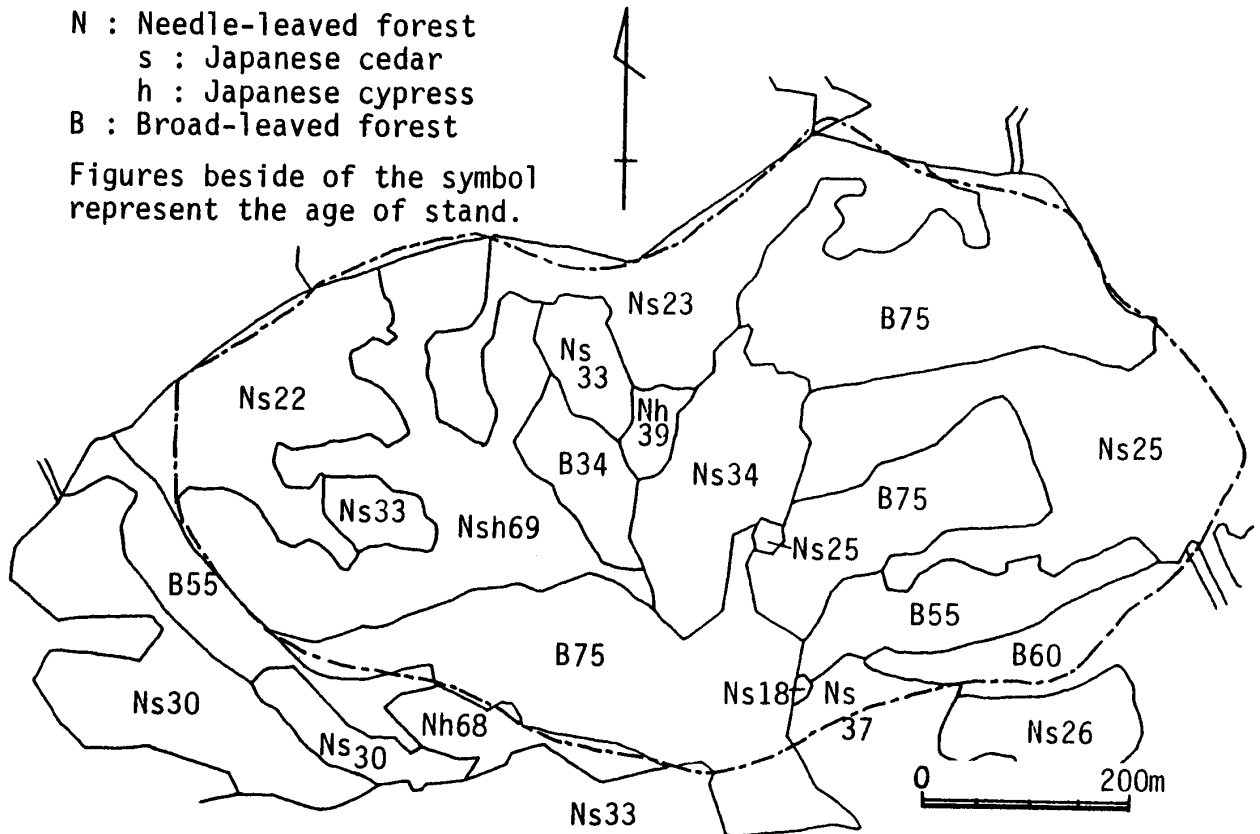


Fig. 3.7 Forest conditions of No.1 Takakuma experimental catchment.
 図-3.7 高隈第1号試験流域の林況.

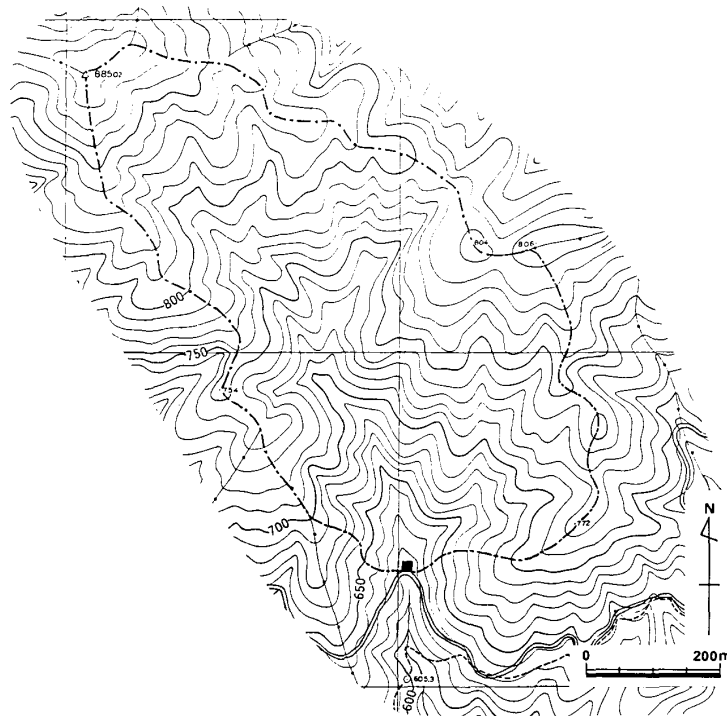


Fig. 3.8 Topography of No.2 Takakuma experimental catchment.

■ : Gauging weir and rain gauge

図-3.8 高隈第2号試験流域の地形.

■ : 観測施設

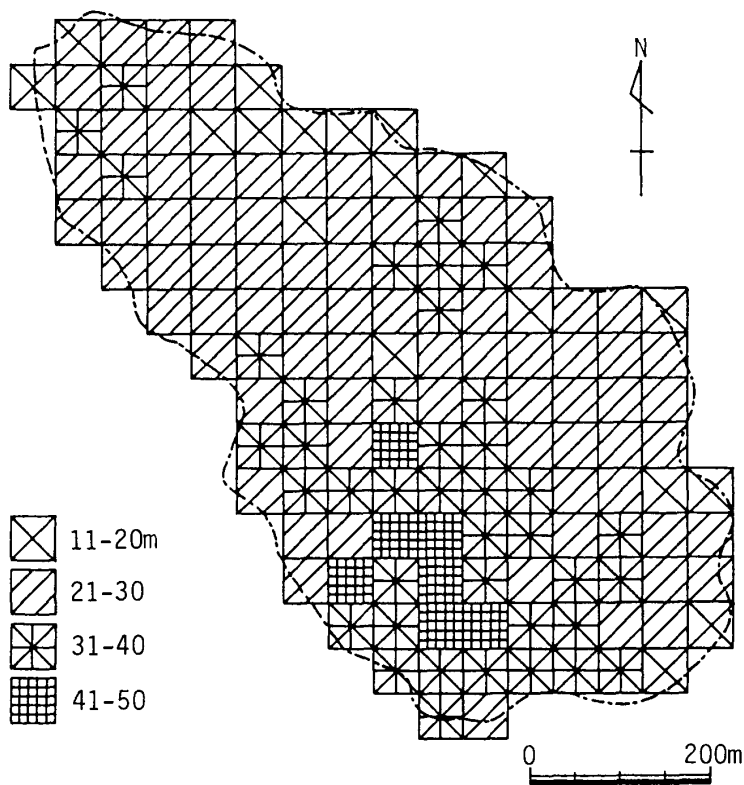


Fig. 3.9 Relief map of No.2 Takakuma experimental catchment.

図-3.9 高隈第2号試験流域の起伏量図.



Photo. 3.2 Typical geological profile in No.2 Takakuma experimental catchment.
 S: Sandstone (Shimanto group), P: Pyroclastic fall

写真-3.2 高隈第2号試験流域の代表的な地質断面.
 S: 砂岩, P: 火山灰・降下軽石

を占めている。

現地調査および縮尺50000分の1地質図（鹿児島県，1972）から作成した2号流域の表層地質図を Fig. 3.11に示す。2号流域の基盤は，1号流域と同様に四万十層群に属する砂岩であり，その上を火山灰・軽石などの火山碎屑物が覆っている（Photo. 3.2）。したがって，流域の基盤岩（砂岩）の露頭が見られるのは谷底部分とその周辺のみである。2号流域の火山碎屑物は1号流域よりやや薄く数 m 程度である。

2号流域一帯にも，1号流域と同様に桜島爆発に伴う降下軽石・火山灰が堆積した粗粒淡色黒ボク土壌に分類される黒色土壌が分布している（鹿児島県，1972）。2号流域内の土壌断面は1号流域とほぼ同様である。

Fig. 3.12は，斜面形と堆積状況を組み合わせた微地形区分により求めた微地形分類図である。また，微地形区分別の面積および流域に占める面積率を Table 3.4に示す。面積的には緩斜面が最も多く，次いで匍行土面が多くなっており，両者で試験流域の約70%を占めている。試験流域の斜面形・堆積区分の特徴として，尾根をはさんで幅の広い緩斜面が分布している。このことは，1号流域と同様に，2号流域が一様に火山碎屑物に覆われ，その後侵食により谷が刻まれたことを示

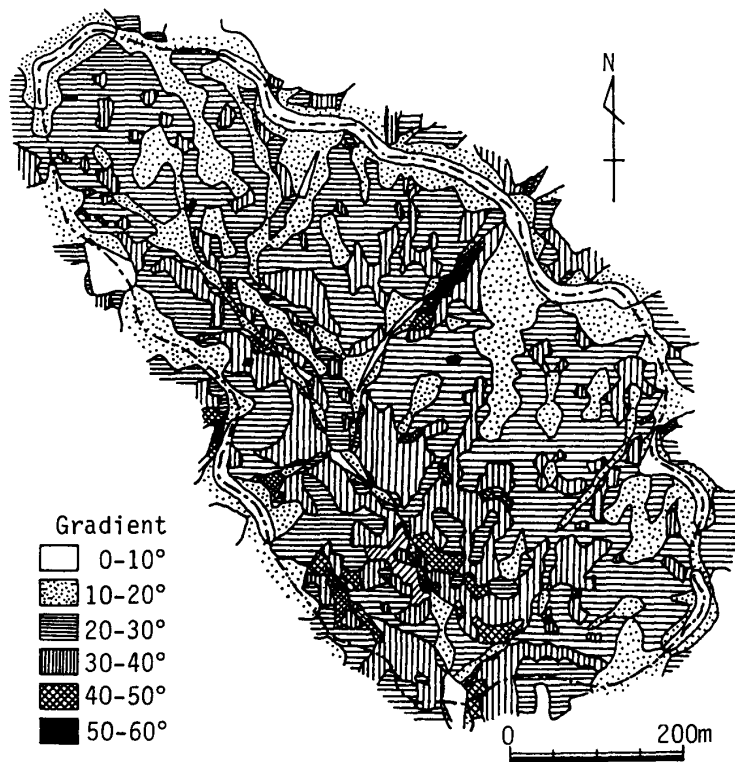


Fig. 3.10 Slope classification map of No.2 Takakuma experimental catchment.
 図-3.10 高隈第2号試験流域の傾斜区分図.

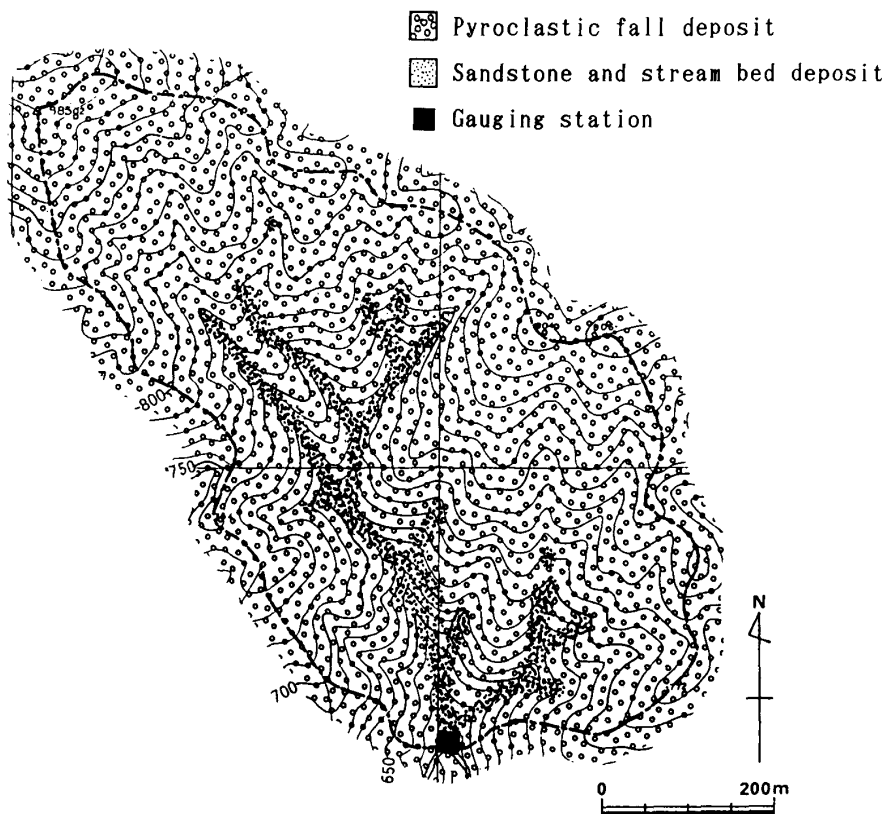


Fig. 3.11 Subsurface geological map of No.2 Takakuma experimental catchment.
 図-3.11 高隈第2号試験流域の表層地質図.

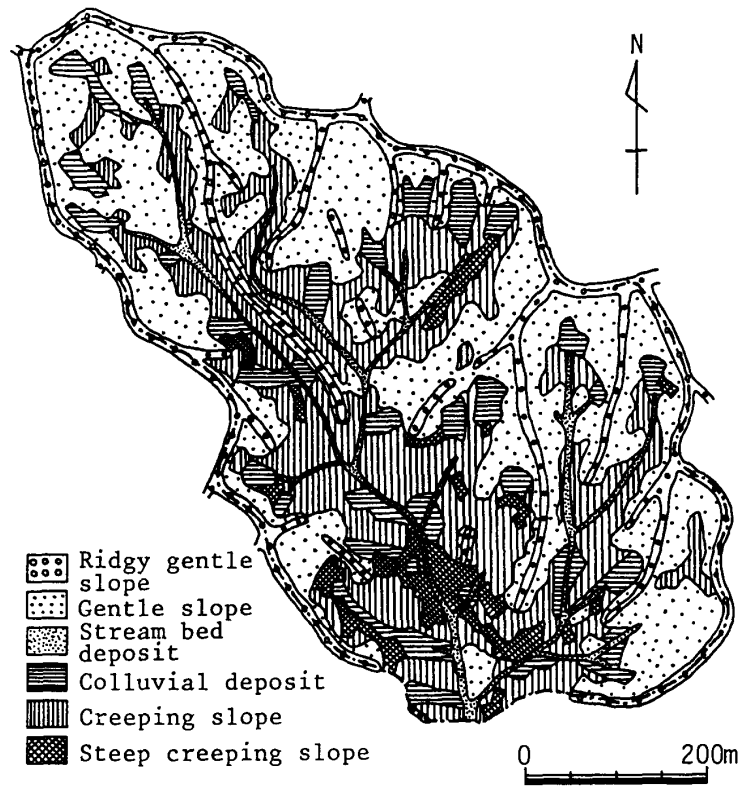


Fig. 3.12 Micro-topography and deposit divisions map of No.2 Takakuma experimental catchment.
 図-3.12 高隈第2号試験流域の微地形分類図.

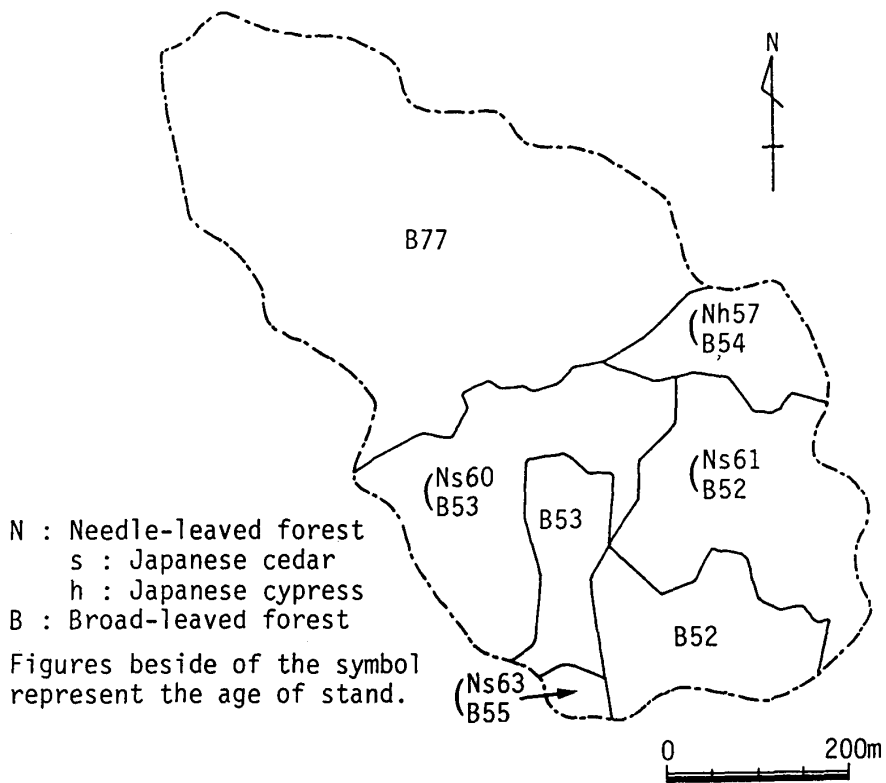


Fig. 3.13 Forest conditions of No.2 Takakuma experimental catchment.
 図-3.13 高隈第2号試験流域の林況.

している。

2号流域の植生は、下流～中流部は林齢約50～60年生のスギと広葉樹あるいはヒノキと広葉樹の混交林や広葉樹林、中流～上流部は風の影響を受け樹高の小さい約80年生の広葉樹林である (Fig. 3.13)。

(3) 郡山試験流域

郡山流域は面積27.41ha、標高250～485m に分布し、下流部が狭く上流部が広がった歪んだ扇形をなしており、水系は羽状に発達している (Fig. 3.14)。表流水は本流の標高370m 付近まで見られる。本流の標高320m 地点には高さ約10m の滝がある。縮尺5000分の1地形図から求めた地形状況を表す因子を Table 3.1 に示す (地頭蘭・春山, 1984)。

Fig. 3.15は、郡山流域の起伏量図を示したものである。流域にかけられた50m×50m の方眼数は104個である。全方眼数に占める各起伏量区分の方眼数の割合を Table 3.2 に示す。起伏量21～30m の区分と起伏量31～40m の区分が多くなっている。起伏量図から流域平均起伏量を算出すると31(m/0.25ha)である。

Fig. 3.16は、郡山流域の傾斜区分図を示したものである。流域の中流部には傾斜の緩い部分があり、水田として利用されている。傾斜区分図において斜面傾斜20度ごとの面積と流域に占める面積率を求めた結果を Table 3.3 に示す。面積的には20～40度の斜面が最も多く、流域の約55%を占めている。

現地調査および縮尺50000分の1地質図 (鹿児島県, 1974) から作成した郡山流域の表層地質図を Fig. 3.17に示す。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 (砂岩・頁岩・泥岩)、および安山岩によって構成されている (鹿児島県, 1974)。標高390m 付近を境にして堆積岩類を新期の安山岩が覆っている。本流の標高320m 地点の滝は断層崖であり、その走向は N35°～45°E である。本流の谷も断層の一部と考えられ、本流右岸側は標高290m 地点まで堆積岩類が分布しているが、本流左岸側は玄武岩質安山岩が分布している。量水堰のある流域最下流部は堆積岩類となっている。郡山流域は1号・2号流域のように火山碎屑物に覆われていない。

郡山流域一帯の土壌は、褐色森林土壌に分類され、土層が厚く腐植に富み構造も発達している (鹿児島県, 1974)。試験流域内での土壌断面の観察によると、最表層の A₀ 層は森林特有の有機物層、その下位の A～B 層は黒色～黒褐色を呈する有機物と無機物の混合層、さらにその下位の C 層は灰褐色～褐色を呈し、岩石が風化した土壌母材層となっている。

Fig. 3.18は、斜面形と堆積状況を組み合わせた微地形区分により求めた微地形分類図である。また、微地形区分別の面積および流域に占める面積率を Table 3.4 に示す。面積的には匍行土面が最も多く、次いで緩斜面が多くなっており、両者で試験流域の約52%を占めている。

郡山流域の植生は、流域の大部分が森林であり、スギ (一部ヒノキ) を主体とした人工針葉樹林が多く約86%を占め、残りはシイ類、ツバキ、カシ類などを主体とした壮齢の広葉樹林である (Fig. 3.19)。



Fig. 3.14 Topography of Kooriyama experimental catchment.
 ■ : Gauging weir and rain gauge

図-3.14 郡山試験流域の地形.
 ■ : 観測施設

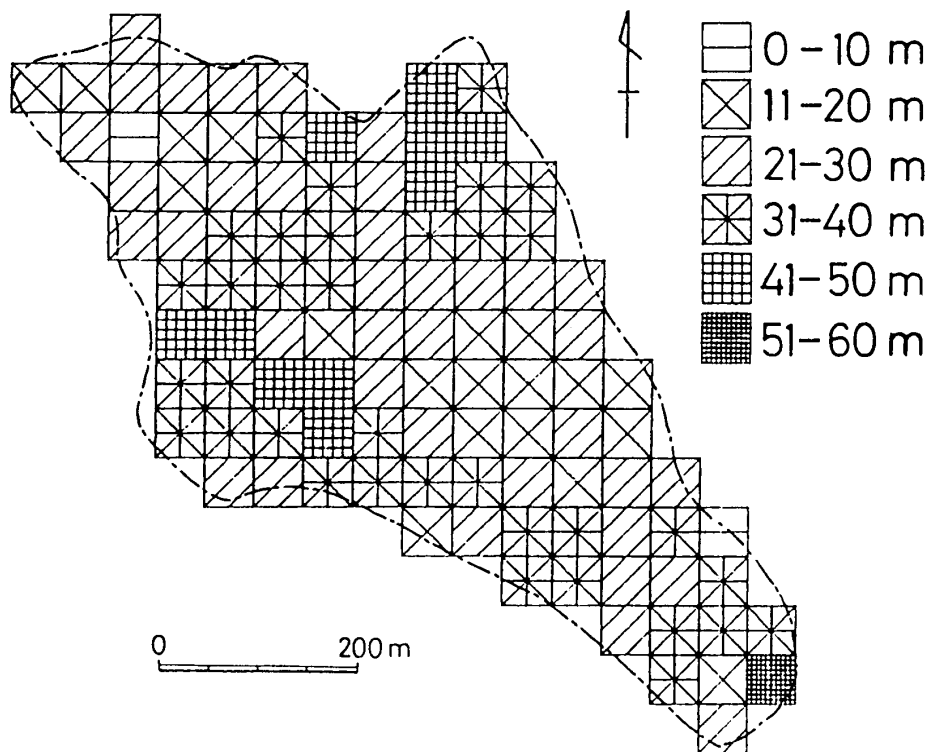


Fig. 3.15 Relief map of Kooriyama experimental catchment.
 図-3.15 郡山試験流域の起伏量図.

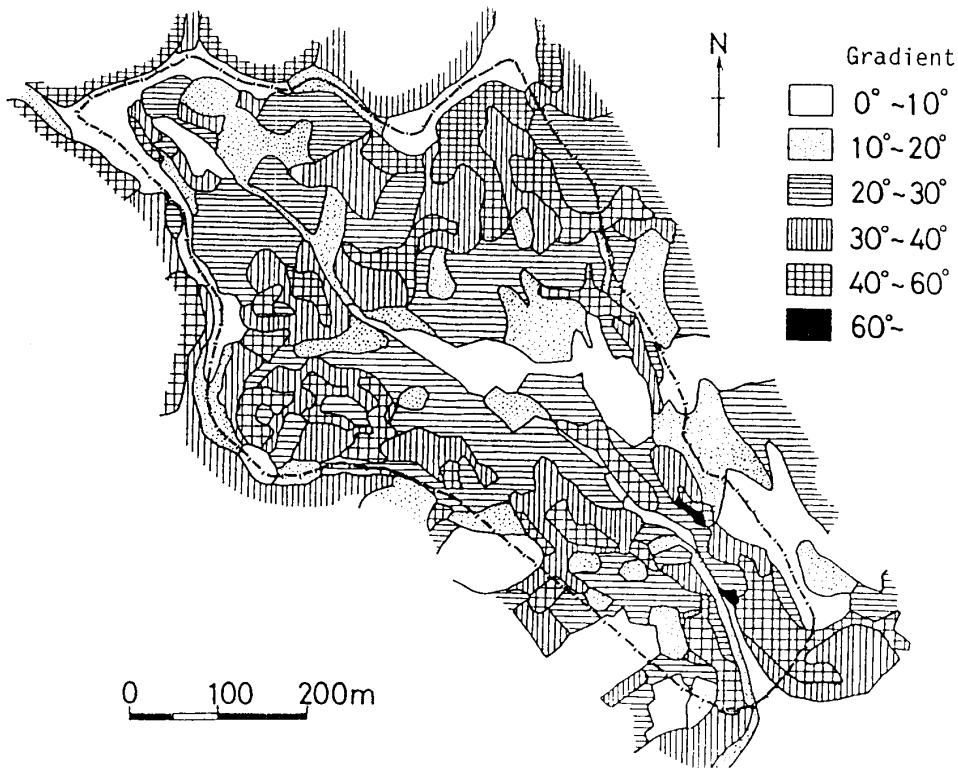


Fig. 3.16 Slope classification map of Kooriyama experimental catchment.
 図-3.16 郡山試験流域の傾斜区分図.

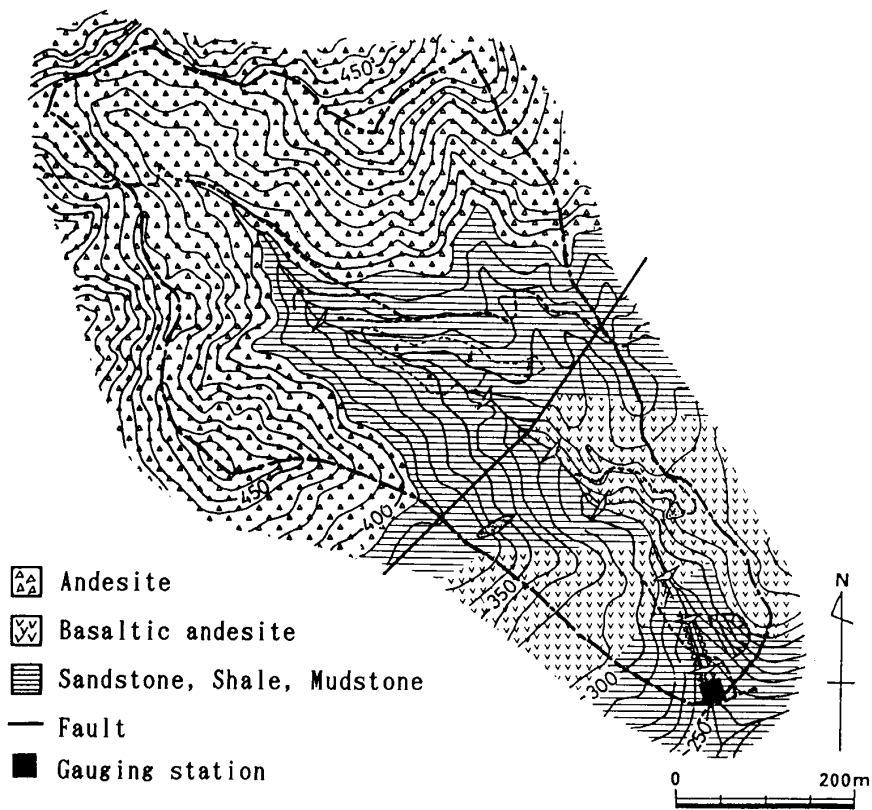


Fig. 3.17 Subsurface geological map of Kooriyama experimental catchment.
 図-3.17 郡山試験流域の表層地質図.

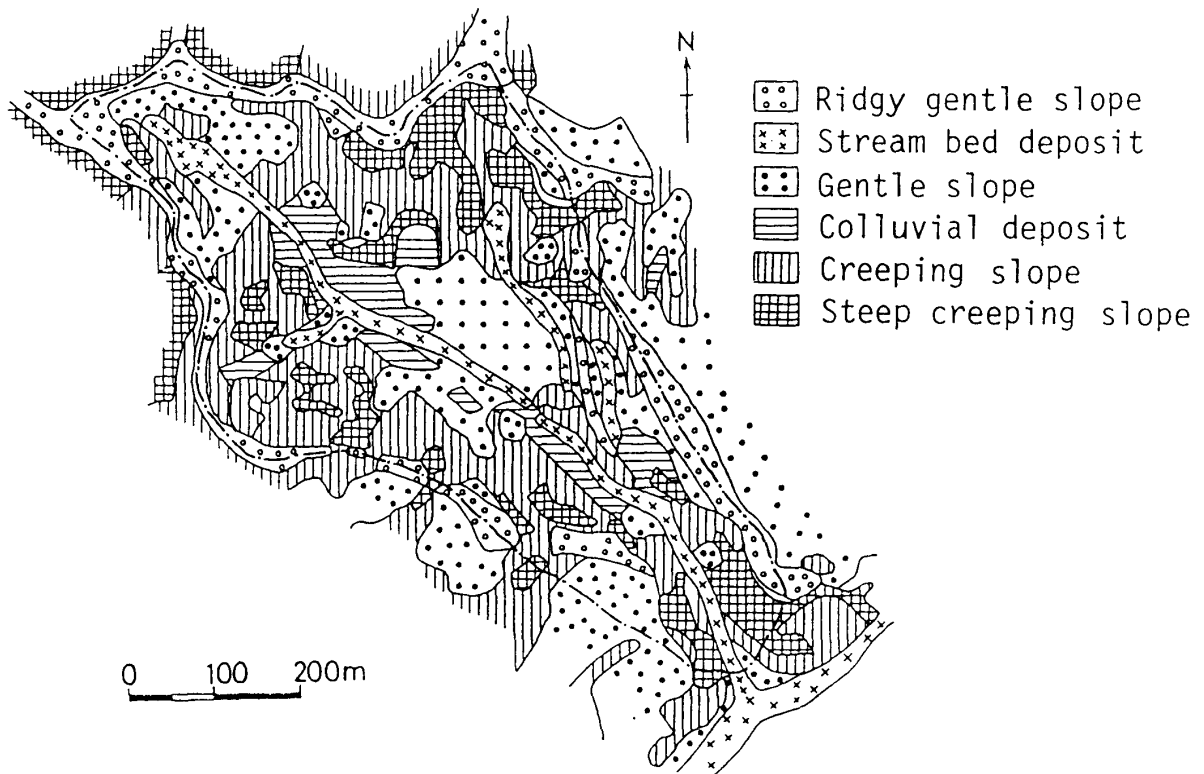


Fig. 3.18 Micro-topography and deposit divisions map of Kooriyama experimental catchment.
 図-3.18 郡山試験流域の微地形分類図.

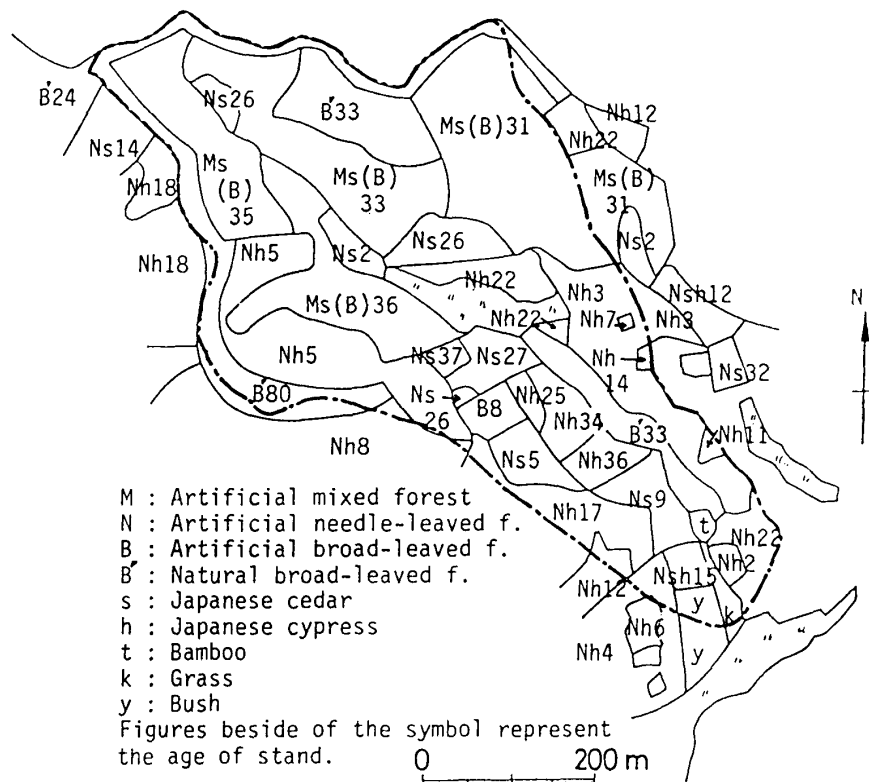


Fig. 3.19 Forest conditions of Kooriyama experimental catchment.
 図-3.19 郡山試験流域の林況.

第3節 雨量・流量観測方法

本節では、3試験流域の水文観測施設の構造、水位観測方法、水位流量関係などについて述べる。

1. 高隈第1号試験流域

水文観測施設は、試験流域の下流端に設置され、量水堰堤、湛水池、水位計および雨量計から構成される（下川ほか、1986）。量水堰は、Fig. 3.20に示されるように、頂角120度の刃形三角堰と長方形堰からなる複合堰であり、水位70cm以下に対しては刃形三角堰によって対応し、水位70cm以上に対しては刃形三角堰に長方形堰を加えた断面によって対応している。水位は振動の影響を防ぐため貯水を観測井戸に導き、フロートを介して測定され、雨量は1回転倒0.5mmの転倒ます型雨量計により測定されている。

水位流量関係は、水位70cm以下に対しては現地におけるキャリブレーションの結果から定めた。水位70cm以上に対しては、水位が70cm以上となる洪水が年に1、2回発生する程度であり、現地における測定値がまだ得られていないため、ここでは刃形三角堰に長方形堰を加えた複合堰の断面のうち三角堰の断面部分の流量計算にはオリフィスの流量算出式が適用でき、また長方形堰の断面部分の流量計算には Govinda-Rao の流量算出式（土木学会、1985）が適用できると仮定し、両式の和により複合堰からの流量を算出することにした。水位流量曲線は、水位を H (m)、流量を Q (m^3/s)とすると次式で表された (Fig. 3.21)。

$0 < H \leq 0.7m$ の場合

$$Q = 2.578H^{2.5} \quad (3.1)$$

$0.7m < H$ の場合

$$Q = 2.188(H - 1.4/3)^{0.5} + 3.5C(H - 0.7)^{1.5} \quad (3.2)$$

ただし、 $0.7 < H \leq 0.75m$ のとき

$$C = 1.667(H - 0.7)^{0.022}$$

$0.75 < H \leq 0.89m$ のとき

$$C = 1.552 + 0.166(H - 0.7)$$

2. 高隈第2号試験流域

水文観測施設は、試験流域の下流端に設置され、量水堰堤、湛水池、流量測定用水槽、水位計および雨量計から構成される（地頭菌ほか、1987）。量水堰は、Fig. 3.22に示されるように、頂角120度の刃形三角堰と長方形堰からなる複合堰であり、水位80cm以下に対しては刃形三角堰によって対応し、水位80cm以上に対しては刃形三角堰に長方形堰を加えた断面によって対応している。水位は振動の影響を防ぐため貯水を堰堤内に埋設した塩化ビニール管の観測井戸に導き、フロートを介して測定される。雨量は1回転倒0.5mmの転倒ます型雨量計により測定されている。

水位流量関係は、量水堰堤の下流側に設けた水槽において越流量を測定する方法により求めたキャリブレーション結果から定めた。水位流量曲線は、水位を H (m)、流量を Q (m^3/s)とすると次式で表された (Fig. 3.23)。

$0 < H \leq 0.8m$ の場合

$$Q = 2.169H^{2.5} \quad (3.3)$$

なお、水位80cm以上の洪水はまだ記録されていない。

3. 郡山試験流域

水文観測施設は、試験流域の下流端に設置され、量水堰堤、湛水池、水位計および雨量計から構

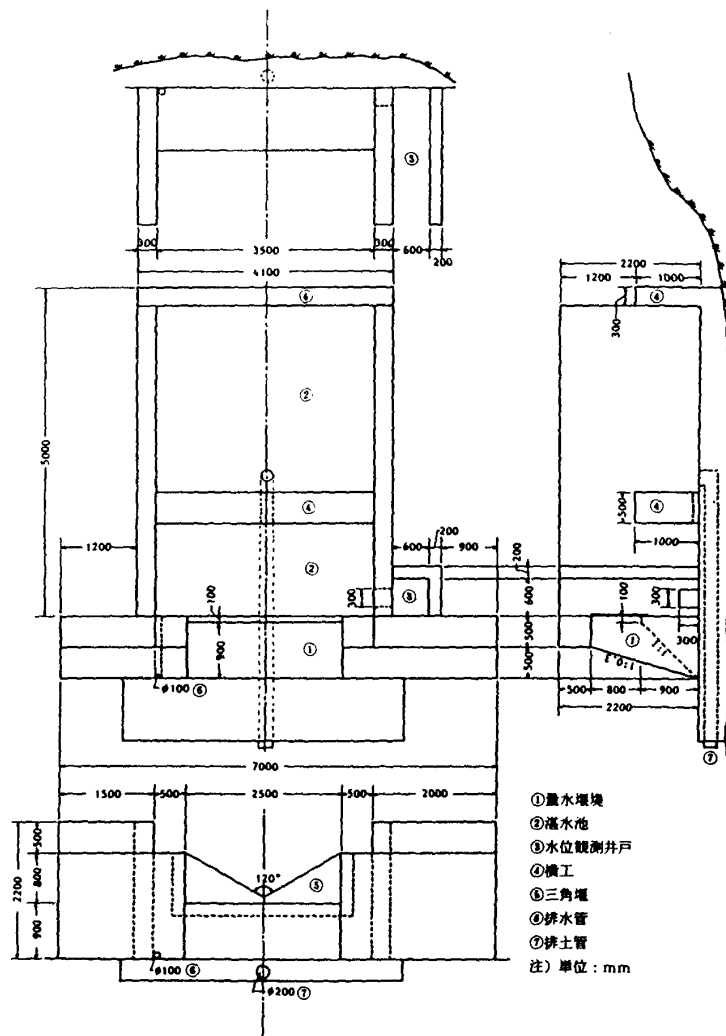


Fig. 3.20 Structure of gauging station of No.1 Takakuma.
 図-3.20 高隈第1号量水施設の構造図.

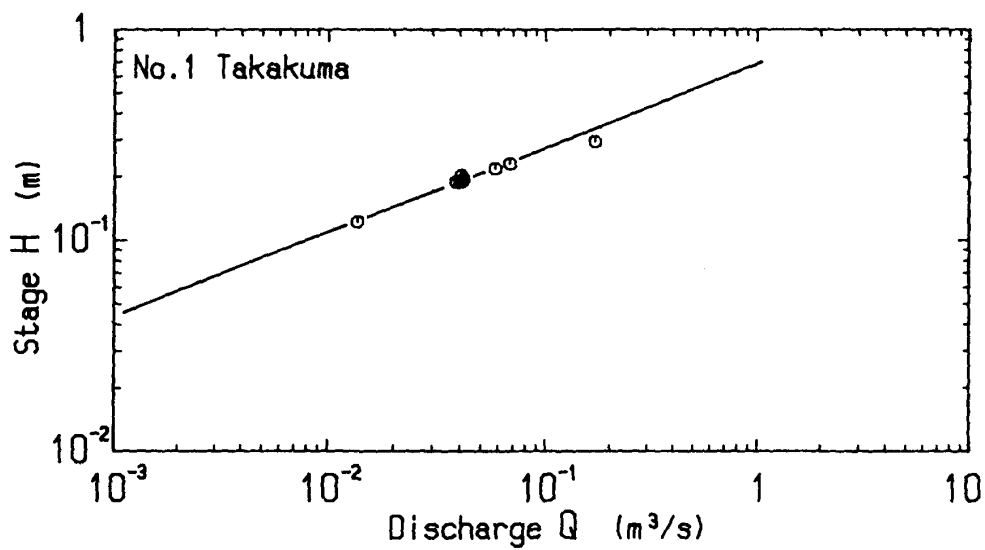


Fig. 3.21 Stage-discharge relation of No.1 Takakuma.
 図-3.21 高隈第1号試験流域の水位流量関係.

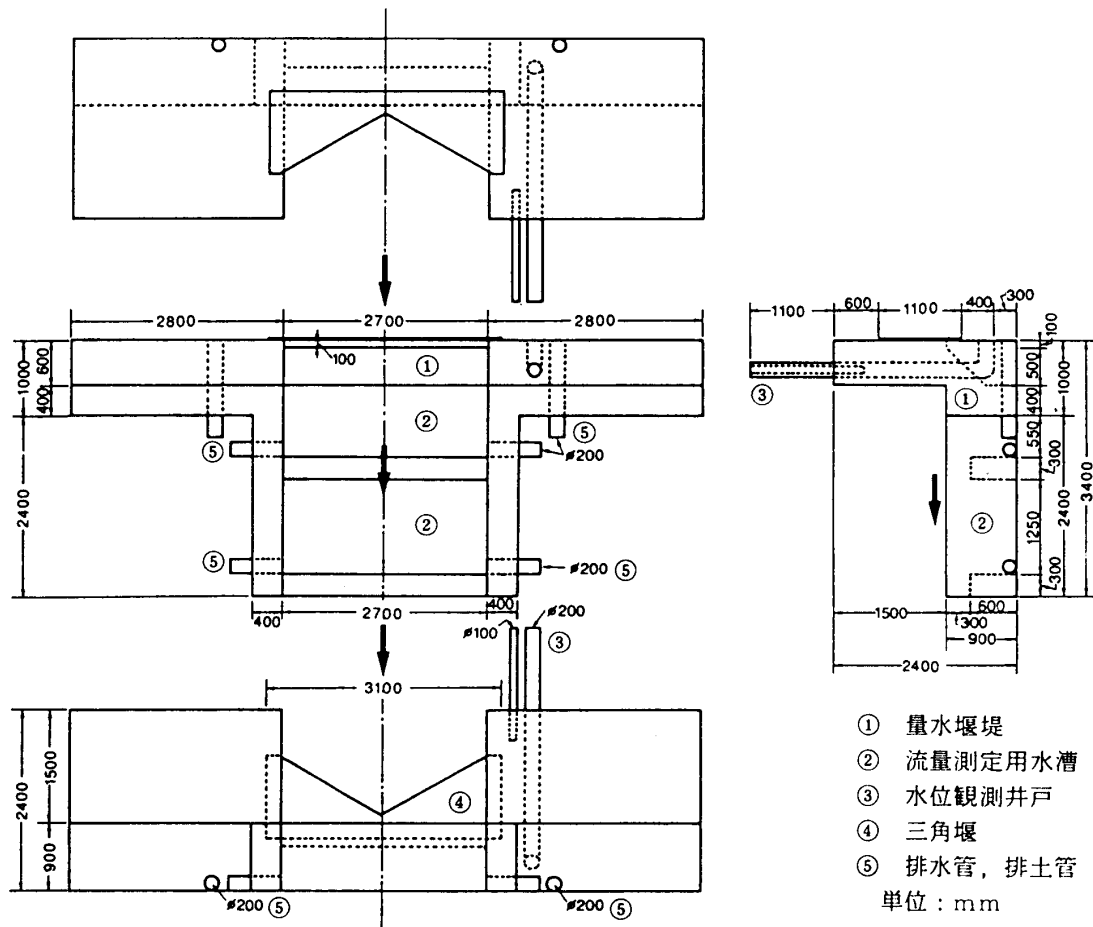


Fig. 3.22 Structure of gauging station of No.2 Takakuma.
 図-3.22 高隈第2号量水施設の構造図.

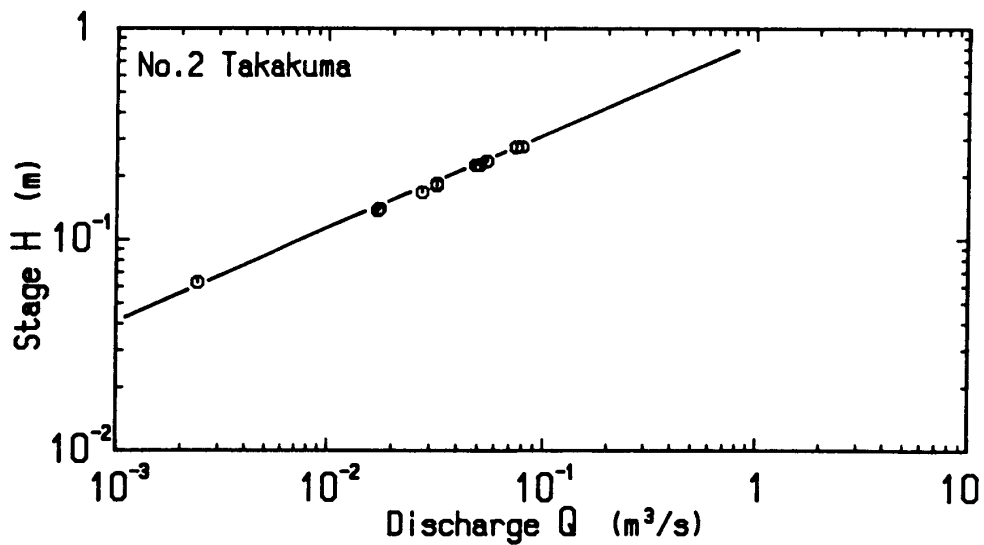


Fig. 3.23 Stage-discharge relation of No.2 Takakuma.
 図-3.23 高隈第2号試験流域の水位流量関係.

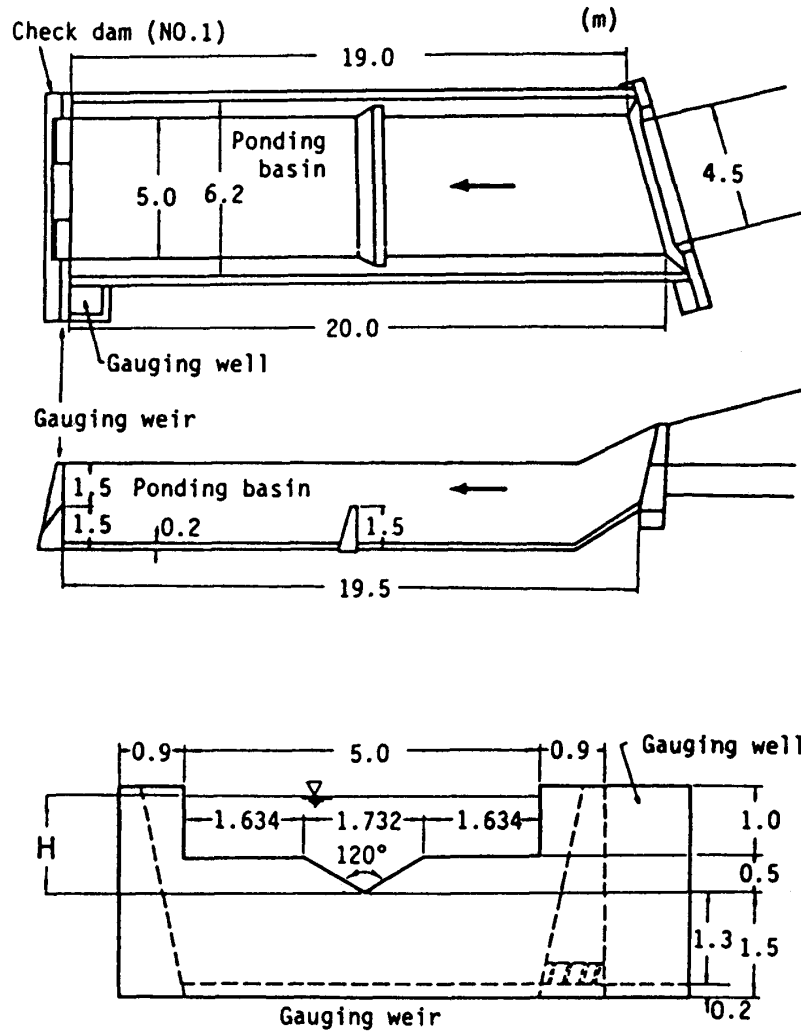


Fig. 3.24 Structure of gauging station of Koriyama.
 図-3.24 郡山量水施設の構造図.

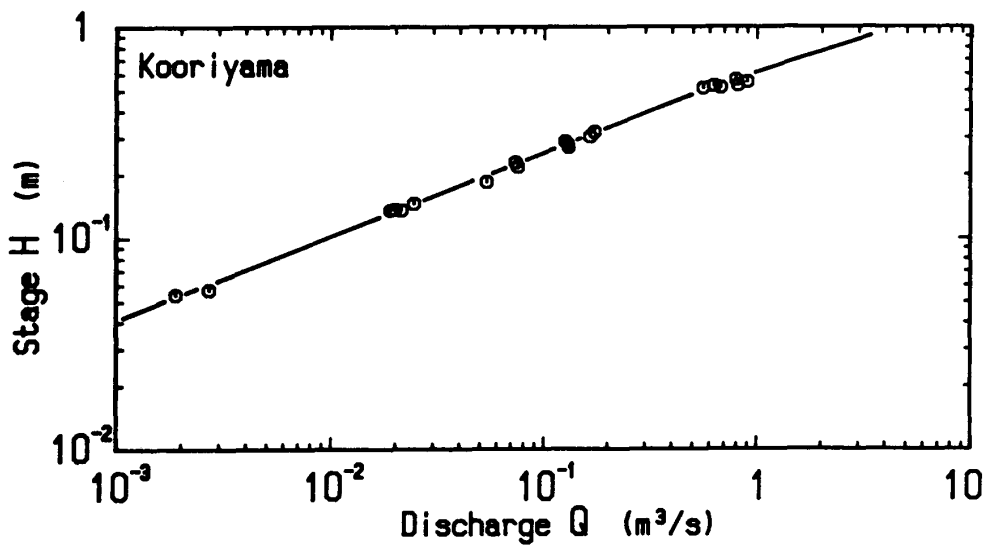


Fig. 3.25 Stage-discharge relation of Koriyama.
 図-3.25 郡山試験流域の水位流量関係.

成される（地頭藪・春山，1985）。また，量水施設の上流部には湛水池への土砂流入を防止するための砂防ダムが7基設置されている。この内2基は満砂しているが，残りの5基は貯砂機能を有している。量水堰は，Fig. 3.24に示されるように，頂角120度の刃形三角堰と長方形堰からなる複合堰であり，水位50cm以下に対しては刃形三角堰によって対応し，水位50cm以上に対しては刃形三角堰に長方形堰を加えた断面によって対応している。水位は振動の影響を防ぐため貯水を観測井戸に導き，フロートを介して測定され，雨量は1回転倒0.5mmの転倒ます型雨量計により測定されている。

水位流量関係は，水位50cm以下に対しては現地におけるキャリブレーションの結果から定めた。水位50cm以上に対しては，1号流域と同様に，刃形三角堰に長方形堰を加えた複合堰の断面のうち三角堰の断面部分の流量計算にはオリフィスの流量算出式が適用でき，また長方形堰の断面部分の流量計算には Govinda-Rao の流量算出式（土木学会，1985）が適用できると仮定し，両式の和により複合堰からの流量を算出することにした。水位流量曲線は，水位を H (m)，流量を Q (m^3/s) とすると次式で表された (Fig. 3.25)。

$0 < H \leq 0.5m$ の場合

$$Q = 2.832H^{2.5} \quad (3.4)$$

$0.5m < H$ の場合

$$Q = 1.222(H - 1/3)^{0.5} + 5.0C(H - 0.5)^{1.5} \quad (3.5)$$

ただし， $0.5 < H \leq 0.55m$ のとき

$$C = 1.667(H - 0.5)^{0.022}$$

$0.55 < H \leq 0.7m$ のとき

$$C = 1.552 + 0.166(H - 0.5)$$

第4節 降雨および流出状況

Fig. 3.26は，3試験流域における1985～1988年（2号流域は1986年8月観測開始）の月降雨量および月流出量の推移を示したものである。月降雨量は，3流域とも互いに近接していることからほぼ同じ傾向にあり，夏期の6，7，8月に多く，冬期の12，1月に少ない。月流出量も同様の傾向にあり，1水年は3流域とも1月から12月までと定められる。1号・2号流域の月流出量は降雨の少ない冬期においても比較的多く，冬期の流出率が高くなっている。

山地流域では一定期間について次の水収支式が成立する（中野，1976）。

$$P = R + L + \Delta S \quad (3.6)$$

ここで， P は降雨量， R は流出量， L は消失量， ΔS は貯留量の変化量である。1水年を対象期間にとれば $\Delta S = 0$ とみなせるため，(3.6)式は次のようになる。

$$P = R + L \quad (3.7)$$

1水年の降雨量 P と流出量 R を実測すれば1水年の消失量 L が算出される。3試験流域の1水年は1月から12月までと定められることから，3試験流域における1985～1988年間の1水年ごとの降雨量，流出量，消失量および流出率をまとめると Table 3.5 のようになる。年降雨量，年流出量，年消失量の4年間平均値（2号流域は2年間平均値）を求めると，1号流域はそれぞれ2787mm，1934mm，853mm，2号流域はそれぞれ3333mm，2375mm，957mm，郡山流域はそれぞれ2498mm，1493mm，1005mm である。消失量＝蒸発散量とみなせば，3試験流域における年蒸発散量は，南

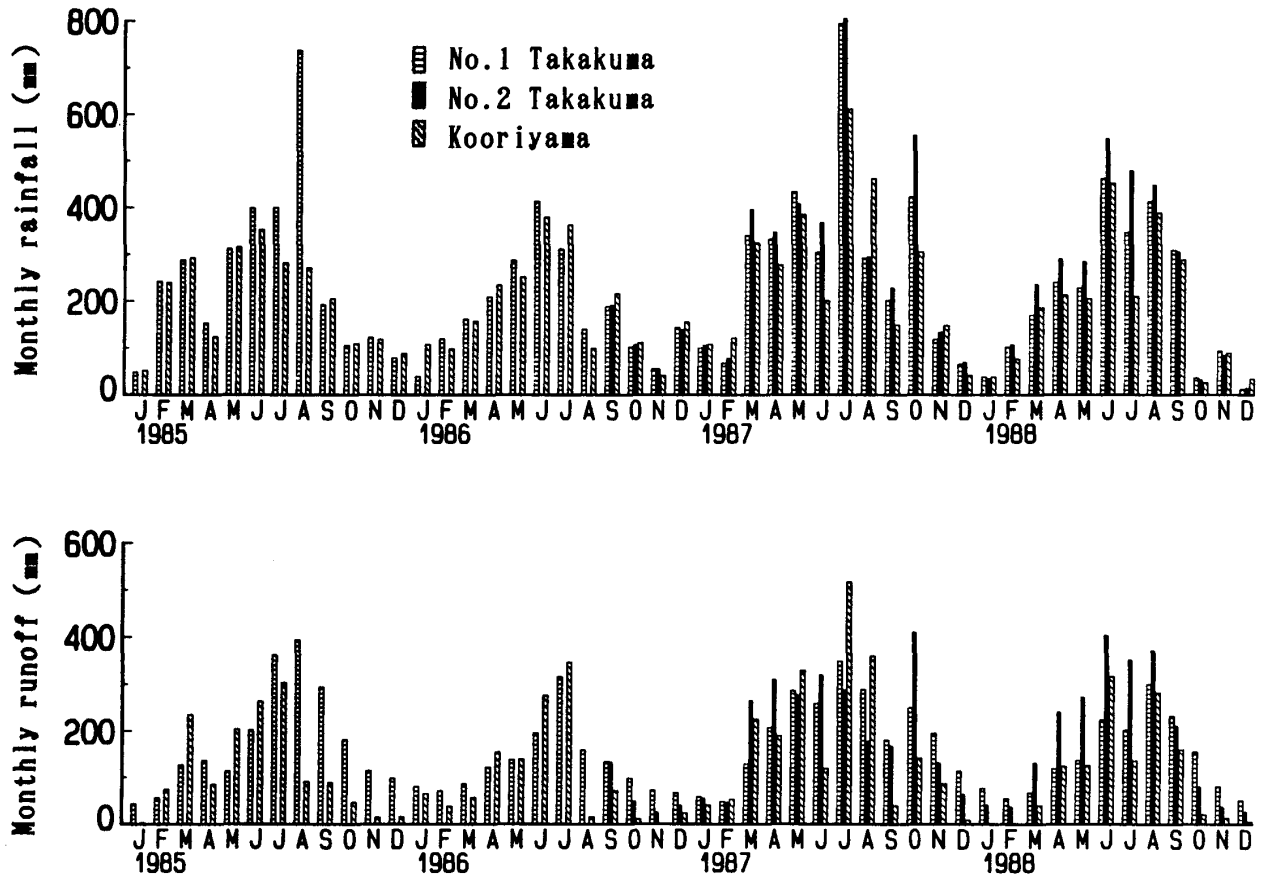


Fig. 3.26 Variations of monthly rainfall and runoff on three experimental catchments.
 図-3.26 3試験流域の月降雨量および月流出量の推移.

Table 3.5 Annual rainfall, runoff, loss and runoff ratio of three experimental catchments
 表-3.5 3試験流域の年降雨量, 年流出量, 年損失量および年流出率

Year	No.1 Takakuma				No.2 Takakuma				Kooriyama			
	Rainfall (mm)	Runoff (mm)	Loss (mm)	Runoff ratio (%)	Rainfall (mm)	Runoff (mm)	Loss (mm)	Runoff ratio (%)	Rainfall (mm)	Runoff (mm)	Loss (mm)	Runoff ratio (%)
1985	3073.5	2120.7	952.8	69.0	-	-	-	-	2448.0	1424.7	1023.3	58.2
1986	2164.0	1540.1	623.9	71.2	-	-	-	-	2210.0	1200.5	1009.5	54.3
1987	3464.5	2368.8	1095.7	68.4	3795.0	2526.5	1268.5	66.6	3131.0	2115.2	1015.8	67.6
1988	2446.5	1707.0	739.5	69.8	2870.0	2224.0	646.0	77.5	2203.0	1231.5	971.5	55.9

九州における標準的な値とされる900~1000mm (金子,1973) とほぼ同様の値を示している。また, 年流出率は, 1号流域68~71%程度, 2号流域67~78%程度, 郡山流域54~68%程度となっている。

第5節 短期流出特性

3試験流域は, 第4節で述べたように, 互いに近接していることからほぼ同じ降雨条件にある。

また、第2節で述べたように、3流域とも流域のほとんどをスギ、広葉樹からなる森林に覆われ、植生条件にも大きな差異はみられない。流域形状には相違がみられるが、流域平均勾配はほぼ同じ程度である。3流域の大きな相違は流域内の火山碎屑物の有無である。すなわち、1号流域は降下軽石を主体とした火山碎屑物に厚く覆われており、また2号流域も1号流域ほどではないが火山碎屑物に覆われている。一方、郡山流域には火山碎屑物はほとんど存在しない。

本節では、大きな相違点である火山碎屑物の有無に注目し、火山碎屑物に覆われた1号・2号流域の短期流出特性を、覆われていない郡山流域の短期流出特性と比較（地頭菌・下川，1990）しながら、火山碎屑物が短期流出特性に及ぼす影響を実証的に検討する。解析に用いた雨量・水位データは、1号流域および郡山流域は1985～1988年に、2号流域は1986～1988年に得られたものである。

1. 水文因子の算出

試験流域の短期流出（洪水流出）特性を把握するために一雨ごとのハイドログラフとハイドログラフを作成した。ハイドログラフおよびハイドログラフ作成の時間間隔は、3流域とも小流域であることから精度よく把握できるように10分間隔で行った。

Fig. 3.27は、短期流出のハイドログラフを模式的に示したものである。短期流出のハイドログラフは、表面流出、中間流出および地下水流出の3つの成分から構成される。表面流出と中間流出は直接流出と呼ばれ、その成分を直接流出量と呼ぶ。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. 3.27に示されるように、ハイドログラフの立ち上がり点の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成分とする方法（金丸・高棹，1975）を採用した。G点の決定方法は次のようである。流量を対数目盛、時間を普通目盛とした片対数方眼紙上にハイドログラフをプロットすると、その減水部は一般にいくつかの直線から

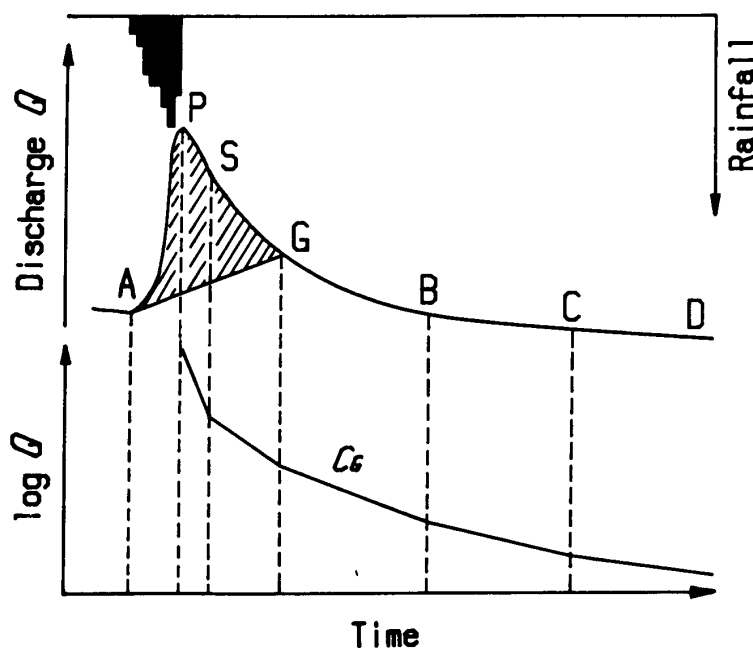


Fig. 3.27 Hydrograph separation.

▨ : Direct runoff C_G : Recession coefficient of groundwater

図-3.27 ハイドログラフの分離.

▨ : 直接流出量 C_G : 地下水減水係数

なる折線に近似される。その第2折線と第3折線の境、すなわち第2折曲点をG点とした。この方法では、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と考えられている。しかし一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分割できない場合がある。この場合は第1折曲点をG点とした。

10分単位で作成された一雨ごとのハイドログラフとハイドログラフから短期流出に関する水文因子を算出した。一雨ハイドログラフの直接流出が行われている期間において算出した水文因子は次の通りである。①総雨量 P (mm)：直接流出が行われている期間の降雨総量。②最大10, 20, 30, 60分間雨量 $P_{10P}, P_{20P}, P_{30P}, P_{60P}$ (mm)：上記期間における10, 20, 30, 60分間あたりの最大雨量。③直接流出量 Q_D (mm)：ハイドログラフの直接流出成分。④直接流出継続時間 T_D (hr)：直接流出が行われた時間。⑤直接流出率 R_D (%)：直接流出量 Q_D と総雨量 P の比。⑥初期流量 Q_I (mm/hr)：増水開始時点の流量。⑦ピーク流量 Q_P (mm/hr)：ピーク時点の流量。

流量を対数目盛、時間を普通目盛とした片対数方眼紙上にプロットされた一雨ハイドログラフの減水部は、一般にいくつかの直線からなる折線で近似される (Fig. 3.27)。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、曲線GBCDは地下水減水曲線と呼ばれている。この減水曲線の表示法には種々の式が提案されているが、ここでは一般によく用いられる次の指数関数式で表すことにする。

$$Q_t = Q_0 e^{-Ct} \quad (3.8)$$

ここで、 Q_0 ：減水曲線のある時点における流量、 C ：減水係数、 t ：時間、 Q_t ：ある時点から t 時間後の流量である。片対数方眼紙上にプロットされた一雨ハイドログラフの減水部 (Fig. 3.27) において、直線で近似された各折線の継続期間に上式を最小自乗法で適合させ減水係数を算出した。とくにG点以降の地下水流出のみが行われ期間の減水係数は地下水減水係数と呼ばれる。ここでは、3試験流域の減水部の比較にGB間の地下水減水係数 C_G (1/hr) を用いることにする。

以上の方法により算出した短期流出特性を表す水文因子を1号、2号、郡山流域についてそれぞれ Table 3.6, Table 3.7, Table 3.8 に示す。解析に用いた一雨データは、1号流域103個、2号流域67個、および郡山流域104個である。

2. 直接流出特性の比較

Fig. 3.28は、1号流域、2号流域および郡山流域において10分間単位で作成したハイドログラフの1例である。3試験流域の面積は数十ha程度と小さいことから、ハイドログラフは降雨の時間的な変動によく応答している。3試験流域は降雨状況は似かよっているが、流出状況はかなり異なっている。以下、短期流出ハイドログラフから得られた3試験流域の直接流出に関する水文因子を比較する。

直接流出量 Q_D は、1号流域0.023~4.374mm (平均0.454mm)、2号流域0.130~5.417mm (平均1.032mm)、郡山流域0.087~32.665mm (平均4.703mm) である (Table 3.6 ~ 3.8)。Fig. 3.29は、総雨量 P と直接流出量 Q_D の関係を3試験流域それぞれプロットしたものである。各流域とも Q_D は P の増加に伴い指数曲線的に増加しており、回帰曲線を求めると、

$$1 \text{ 号流域} : Q_D = 1.449 \times 10^{-3} P^{1.806} \quad (r=0.776^{***}) \quad (3.9)$$

$$2 \text{ 号流域} : Q_D = 7.137 \times 10^{-3} P^{1.522} \quad (r=0.915^{***}) \quad (3.10)$$

$$\text{郡山流域} : Q_D = 2.274 \times 10^{-3} P^{2.025} \quad (r=0.905^{***}) \quad (3.11)$$

で表された (図中実線)。相関係数 r は3流域とも危険率0.1%で高度に有意である。

Table 3.6 Hydrologic characteristics of short-term runoff in No.1 Takakuma experimental catchment

表-3.6 短期流出の水文因子 (高隈第1号試験流域)

No.	Date	P	P_{10P}	P_{20P}	P_{30P}	P_{60P}	Q_D	T_D	R_D	Q_i	Q_P	C_G
1	85. 1. 2	24.0	2.5	4.5	5.0	8.5	.069	5.7	.3	.063	.107	.008
2	85. 2.19	38.0	7.0	9.5	11.5	15.0	.509	9.5	1.3	.086	.566	.004
3	85. 3. 8	16.5	1.5	3.0	4.5	8.5	.272	4.0	1.6	.118	.560	.001
4	85. 3.11	27.0	1.0	2.0	2.5	4.5	.136	9.3	.5	.138	.199	.001
5	85. 3.17	16.5	2.0	3.5	5.0	9.0	.121	4.3	.7	.165	.240	.001
6	85. 6.20	12.0	1.5	3.0	4.0	6.0	.084	3.7	.7	.290	.350	.002
7	85. 6.25	20.5	4.0	7.5	9.5	17.0	.255	3.0	1.2	.286	.661	.033
8	85. 6.25	16.0	5.0	7.0	8.5	11.5	.252	3.0	1.6	.302	.737	.004
9	85. 6.26	12.0	3.5	5.0	6.0	9.0	.082	2.5	.7	.310	.373	.001
10	85. 6.26	19.5	9.5	14.0	18.0	19.5	.647	1.8	3.3	.328	1.732	.010
11	85. 7. 9	11.5	9.5	10.5	11.0	11.0	.468	1.5	4.1	.642	2.109	.014
12	85. 7. 9	8.0	3.5	5.0	5.0	7.5	.065	1.7	.8	.635	.716	.006
13	85. 7.11	13.5	3.5	5.5	7.0	10.5	.107	2.3	.8	.554	.661	.017
14	85. 7.11	8.0	4.0	6.0	7.0	7.5	.061	1.3	.8	.542	.668	.003
15	85. 7.20	12.0	4.0	7.5	8.0	11.5	.134	2.8	1.1	.368	.566	.001
16	85. 8.30	9.5	4.0	8.0	9.0	9.5	.071	1.3	.7	.453	.572	.004
17	85. 9. 1	9.5	5.5	9.5	9.5	9.5	.235	1.5	2.5	.688	1.098	.003
18	85.10. 5	9.0	3.5	5.0	8.0	9.0	.062	2.2	.7	.294	.368	.004
19	85.10.13	11.0	4.0	6.0	7.0	9.5	.073	3.2	.7	.255	.328	.002
20	85.11.20	14.0	4.5	8.0	9.0	9.0	.073	3.8	.5	.146	.196	.002
21	85.11.22	18.5	2.0	4.0	5.5	9.5	.096	5.2	.5	.141	.202	.007
22	85.11.22	12.0	3.5	6.0	8.0	11.0	.103	3.3	.9	.148	.240	.007
23	85.11.24	17.5	2.0	3.0	4.0	6.5	.050	4.8	.3	.146	.189	.025
24	85.11.28	31.0	3.5	6.5	8.0	13.5	.304	6.2	1.0	.143	.323	.003
25	85.12. 6	30.0	2.0	4.0	5.5	9.5	.256	7.7	.9	.138	.226	.003
26	86. 1. 3	8.5	1.0	2.0	2.5	4.5	.030	4.2	.4	.113	.133	.005
27	86. 3.22	10.0	1.0	2.0	3.0	4.5	.068	4.2	.7	.118	.157	.005
28	86. 4.10	29.0	5.5	9.5	13.0	22.0	1.052	4.5	3.6	.141	1.804	.005
29	86. 4.11	29.5	5.5	8.5	13.0	17.5	.946	5.0	3.2	.141	1.494	.001
30	86. 4.15	18.5	3.5	5.5	7.5	10.0	.310	3.3	1.7	.186	.737	.018
31	86. 5. 3	20.0	10.0	15.5	17.0	18.0	.602	2.5	3.0	.154	1.368	.004
32	86. 6.17	9.0	7.0	8.5	8.5	9.0	.142	2.5	1.6	.154	.422	.007
33	86. 7. 5	9.5	3.5	6.5	8.0	9.5	.160	1.7	1.7	.427	.681	.013
34	86. 7.12	23.5	12.0	20.5	21.0	21.5	1.441	2.8	6.1	.345	6.161	.000
35	86. 7.12	10.5	3.0	4.5	5.5	8.0	.090	2.8	.9	.359	.442	.003
36	86. 7.24	50.5	10.0	16.0	21.0	35.5	1.641	3.7	3.2	.345	2.904	.004
37	86. 8.19	9.0	8.0	8.0	8.5	9.0	.023	2.0	.3	.189	.240	.002
38	86. 9. 6	81.0	21.0	35.0	46.5	61.0	4.374	8.3	5.4	.157	8.150	.012
39	86. 9.18	21.0	7.5	11.0	13.0	19.0	.412	2.7	2.0	.165	.903	.000
40	86. 9.18	8.5	3.0	4.5	5.5	8.0	.080	2.3	.9	.189	.306	.001
41	86.10.10	20.0	9.5	13.0	15.0	16.0	.393	3.5	2.0	.138	1.181	.004
42	86.10.22	19.0	5.5	11.0	13.0	16.0	.110	3.3	.6	.118	.236	.003
43	86.11.23	14.5	1.5	2.5	3.0	5.5	.025	4.7	.2	.092	.113	.003
44	86.12.14	14.5	6.5	9.5	12.0	13.5	.116	3.2	.8	.086	.196	.009
45	86.12.18	44.0	8.5	16.0	24.0	36.5	1.395	5.2	3.2	.084	2.936	.000
46	87. 1. 7	10.5	6.5	8.0	9.5	10.5	.067	3.2	.6	.076	.151	.006
47	87. 1.12	10.5	1.5	2.0	3.0	4.5	.023	4.0	.2	.078	.100	.011
48	87. 1.23	16.5	3.0	5.0	7.0	11.5	.096	3.3	.6	.080	.154	.010
49	87. 3. 9	19.5	3.0	4.5	6.0	10.5	.218	4.3	1.1	.086	.262	.024
50	87. 3.13	21.0	2.0	3.5	5.0	8.5	.189	4.8	.9	.102	.202	.018

Table 3. 6 (Continued)

表-3.6 (続き)

No.	Date	<i>P</i>	<i>P</i> _{10P}	<i>P</i> _{20P}	<i>P</i> _{30P}	<i>P</i> _{60P}	<i>Q</i> _D	<i>T</i> _D	<i>R</i> _D	<i>Q</i> _I	<i>Q</i> _P	<i>C</i> _G
51	87. 4. 7	10.0	2.0	3.0	3.5	6.5	.078	2.3	.8	.392	.485	.025
52	87. 4.21	39.5	5.0	10.0	14.5	23.5	.988	3.8	2.5	.229	1.685	.000
53	87. 4.21	12.5	8.5	10.5	11.0	12.5	.676	2.0	5.4	.278	2.444	.013
54	87. 5.27	15.5	6.0	11.0	14.0	15.5	.813	2.2	5.2	.422	2.163	.011
55	87. 5.30	8.0	2.0	3.5	4.5	6.5	.037	1.7	.5	.387	.442	.022
56	87. 6.14	29.0	2.5	4.0	6.0	10.5	.487	5.0	1.7	.387	.648	.009
57	87. 6.20	16.0	3.0	5.5	8.0	14.0	.265	2.7	1.7	.364	.635	.021
58	87. 7. 3	20.0	9.5	16.0	18.0	18.5	.712	2.2	3.6	.262	2.163	.014
59	87. 8. 1	19.5	8.5	13.0	15.5	16.5	.521	2.0	2.7	.572	1.780	.023
60	87. 8. 1	14.5	5.5	10.5	11.5	14.5	.254	1.8	1.8	.566	.968	.029
61	87. 8. 8	26.0	14.0	19.5	21.5	25.5	1.606	2.3	6.2	.422	5.016	.011
62	87. 8. 8	11.5	5.5	9.0	11.0	11.0	.286	1.8	2.5	.427	1.089	.002
63	87. 8.13	14.5	4.5	6.0	7.0	10.5	.091	2.7	.6	.392	.502	.013
64	87. 8.17	36.5	10.0	17.0	24.0	33.5	.694	2.7	1.9	.341	1.674	.017
65	87. 8.23	19.5	13.0	15.0	16.0	18.0	.604	2.7	3.1	.306	2.231	.004
66	87. 8.26	14.5	9.5	14.0	14.0	14.5	.656	1.8	4.5	.294	2.400	.006
67	87. 8.31	14.0	6.0	8.5	10.5	13.5	.218	2.7	1.6	.294	.603	.005
68	87. 9.10	15.5	6.5	11.5	15.0	15.0	.215	2.2	1.4	.251	.572	.005
69	87. 9.11	11.0	7.0	10.0	11.0	11.0	.128	1.8	1.2	.262	.442	.005
70	87. 9.12	9.0	2.5	4.0	6.0	8.5	.044	2.3	.5	.251	.286	.003
71	87.10.30	13.0	8.0	10.0	12.5	12.5	.335	2.0	2.6	.458	1.228	.005
72	88. 2. 5	18.0	11.0	14.5	16.0	17.5	.309	2.3	1.7	.084	.655	.018
73	88. 2.27	8.5	1.5	2.5	3.5	6.0	.031	2.8	.4	.076	.107	.020
74	88. 3.11	28.5	9.5	12.0	14.0	18.0	.865	4.2	3.0	.071	2.904	.026
75	88. 3.15	11.0	6.5	7.5	8.5	10.0	.181	2.3	1.6	.088	.368	.022
76	88. 5. 4	33.0	6.5	10.0	12.5	20.5	1.433	5.0	4.3	.160	2.887	.004
77	88. 5. 7	31.5	6.0	9.0	12.0	21.0	1.122	4.5	3.6	.168	1.940	.006
78	88. 5.15	26.5	3.5	6.0	7.5	12.5	.480	5.5	1.8	.199	.832	.020
79	88. 5.20	45.0	7.0	9.0	11.0	16.0	.861	6.8	1.9	.157	1.347	.016
80	88. 6. 2	40.5	4.0	7.0	10.5	18.5	1.150	5.5	2.8	.193	1.337	.027
81	88. 6. 3	30.5	3.0	4.5	6.0	11.0	.530	6.7	1.7	.255	.629	.001
82	88. 6. 8	10.5	6.5	9.5	10.0	10.0	.451	2.2	4.3	.262	1.527	.008
83	88. 6.10	41.5	6.5	11.0	15.0	19.0	1.087	5.3	2.6	.236	2.487	.004
84	88. 6.11	10.0	4.5	8.0	9.0	10.0	.263	1.8	2.6	.341	.817	.011
85	88. 6.12	17.5	6.0	9.0	12.5	13.5	.602	2.5	3.4	.354	1.462	.029
86	88. 6.12	21.5	5.5	10.0	14.5	18.0	.740	2.5	3.4	.427	2.030	.020
87	88. 6.27	29.0	8.0	13.0	17.0	22.0	1.046	3.5	3.6	.255	2.592	.004
88	88. 6.28	8.5	3.5	4.5	4.5	6.0	.060	2.8	.7	.282	.368	.015
89	88. 7.20	8.5	5.5	8.0	8.0	8.5	.044	1.7	.5	.165	.222	.001
90	88. 8. 5	19.0	4.5	7.5	9.5	12.5	.221	3.3	1.2	.278	.458	.019
91	88. 8.10	14.0	5.5	6.5	8.0	10.5	.078	2.5	.6	.226	.323	.010
92	88. 8.17	13.0	12.5	13.0	13.0	13.0	.493	2.3	3.8	.193	1.441	.000
93	88. 8.19	26.0	7.5	13.0	18.0	24.0	1.681	2.3	6.5	.332	3.970	.028
94	88. 8.21	10.0	3.0	5.0	6.5	10.0	.095	1.8	.9	.359	.453	.027
95	88. 8.22	12.0	5.5	6.5	7.5	9.5	.356	2.0	3.0	.417	1.399	.022
96	88. 8.27	18.0	8.0	13.5	18.0	18.0	.687	1.7	3.8	.525	2.487	.010
97	88. 9.10	14.5	4.5	7.5	9.5	13.0	.153	2.7	1.1	.274	.442	.002
98	88. 9.11	27.0	9.5	15.0	19.0	26.0	.995	2.3	3.7	.266	2.985	.001
99	88. 9.20	42.5	15.5	23.0	25.0	35.0	1.830	3.5	4.3	.236	2.904	.026
100	88. 9.23	10.0	5.0	6.5	8.0	9.5	.067	2.0	.7	.219	.306	.026

Table 3.6 (Continued)

表-3.6 (続き)

No.	Date	<i>P</i>	<i>P</i> _{10P}	<i>P</i> _{20P}	<i>P</i> _{30P}	<i>P</i> _{60P}	<i>Q</i> _D	<i>T</i> _D	<i>R</i> _D	<i>Q</i> _I	<i>Q</i> _P	<i>C</i> _G
101	88.10.5	17.5	4.5	8.0	10.0	14.0	.178	2.8	1.0	.270	.485	.028
102	88.11.23	13.5	6.0	9.0	11.0	13.5	.124	2.0	.9	.098	.278	.018
103	88.11.23	25.0	3.5	6.0	7.0	13.0	.283	6.2	1.1	.107	.328	.021

P :Total rainfall, mm.

*P*_{10P}, *P*_{20P}, *P*_{30P}, *P*_{60P} :Maximum rainfall per ten, twenty, thirty and sixty minutes, mm/10min, mm/20min, mm/30min and mm/60min.

*Q*_D :Direct runoff, mm.

*T*_D :Duration of direct runoff, hr.

*R*_D :Ratio of direct runoff, %.

*Q*_I :Initial discharge, mm/hr.

*Q*_P :Peak discharge, mm/hr.

*C*_G :Groundwater recession coefficient, 1/hr.

Table 3.7 Hydrologic characteristics of short-term runoff in No.2 Takakuma experimental catchment

表-3.7 短期流出の水文因子 (高隈第2号試験流域)

No.	Date	<i>P</i>	<i>P</i> _{10P}	<i>P</i> _{20P}	<i>P</i> _{30P}	<i>P</i> _{60P}	<i>Q</i> _D	<i>T</i> _D	<i>R</i> _D	<i>Q</i> _I	<i>Q</i> _P	<i>C</i> _G
1	86.8.28	25.0	5.0	9.5	12.0	20.5	1.082	3.7	4.3	.176	1.029	.024
2	86.9.6	73.5	19.0	33.5	46.0	56.0	5.417	11.8	7.4	.088	6.571	.011
3	86.9.20	16.0	7.0	13.0	13.0	13.5	.630	4.0	3.9	.250	.997	.015
4	86.10.10	20.0	8.0	14.0	14.5	16.0	.816	7.5	4.1	.077	.727	.019
5	86.10.22	17.5	5.5	9.5	11.5	13.5	.545	11.7	3.1	.043	.272	.006
6	86.10.26	23.5	2.0	3.0	4.0	6.0	.433	13.3	1.8	.041	.151	.029
7	86.11.17	14.5	1.0	1.0	1.5	2.5	.220	17.8	1.5	.030	.060	.014
8	86.11.23	16.5	1.0	2.0	3.0	5.5	.277	14.2	1.7	.027	.092	.000
9	86.11.24	12.0	1.5	3.0	4.0	6.0	.233	12.0	1.9	.036	.104	.022
10	86.12.14	17.5	8.0	10.0	11.5	13.5	.722	11.8	4.1	.051	.382	.028
11	87.1.2	10.5	1.5	2.5	3.5	6.0	.266	8.7	2.5	.051	.165	.009
12	87.1.5	16.5	1.0	2.0	2.5	4.5	.171	7.8	1.0	.057	.126	.022
13	87.1.7	10.0	6.5	8.5	9.0	10.0	.311	7.5	3.1	.066	.243	.003
14	87.2.2	11.5	1.5	2.0	3.0	5.5	.130	5.0	1.1	.059	.126	.015
15	87.3.9	26.5	2.5	4.0	5.5	10.0	.713	9.3	2.7	.098	.343	.006
16	87.3.23	77.5	14.5	29.0	36.0	45.5	5.165	5.5	6.7	.405	8.738	.017
17	87.3.29	21.0	1.5	2.0	3.0	5.5	.443	10.5	2.1	.318	.478	.014
18	87.3.30	14.5	1.5	3.0	4.0	5.5	.341	5.0	2.4	.294	.483	.004
19	87.4.25	45.5	3.5	6.0	7.5	11.0	1.285	10.3	2.8	.165	.676	.027
20	87.5.16	21.5	5.0	7.0	9.0	14.0	.668	4.0	3.1	.279	.863	.021
21	87.6.1	13.5	1.0	2.0	2.5	4.5	.303	7.0	2.2	.318	.428	.007
22	87.6.2	36.5	12.5	24.0	26.5	30.5	2.582	5.7	7.1	.310	8.011	.012
23	87.6.14	12.5	1.0	2.0	3.0	5.5	.159	5.5	1.3	.310	.405	.005
24	87.6.14	55.0	3.0	5.0	6.5	11.0	2.741	12.5	5.0	.326	1.126	.005
25	87.6.20	17.5	3.5	6.5	8.5	15.0	.622	2.7	3.6	.569	1.246	.007

Table 3.7 (Continued)
表-3.7 (続き)

No.	Date	<i>P</i>	<i>P</i> _{10P}	<i>P</i> _{20P}	<i>P</i> _{30P}	<i>P</i> _{60P}	<i>Q</i> _D	<i>T</i> _D	<i>R</i> _D	<i>Q</i> _I	<i>Q</i> _P	<i>C</i> _G
26	87. 7. 3	25.0	8.0	13.0	18.0	19.5	1.370	4.3	5.5	.243	2.897	.009
27	87. 7. 3	11.5	1.5	3.0	4.0	7.0	.280	4.0	2.4	.373	.541	.001
28	87. 8. 1	8.0	5.0	6.5	7.0	7.0	.195	3.3	2.4	.185	.356	.000
29	87. 8. 1	12.0	4.5	8.0	9.5	11.5	.256	3.0	2.1	.268	.509	.006
30	87. 8. 8	9.0	2.5	4.5	5.0	6.5	.340	5.2	3.8	.165	.396	.000
31	87. 8. 8	29.0	12.5	19.0	24.5	28.5	2.092	6.0	7.2	.191	4.523	.025
32	87. 8.13	11.5	3.0	4.5	6.0	7.5	.436	6.3	3.8	.229	.499	.003
33	87. 8.17	34.0	10.0	14.0	22.0	31.0	2.101	6.0	6.2	.176	3.042	.020
34	87. 8.31	23.5	10.0	14.0	16.5	18.5	1.756	5.5	7.5	.360	2.897	.008
35	87. 9. 7	12.5	2.0	4.0	5.0	7.5	.291	5.3	2.3	.243	.391	.029
36	87. 9.10	16.0	4.0	8.0	11.0	15.0	.450	4.7	2.8	.191	.581	.006
37	87. 9.11	11.0	3.5	5.5	6.0	9.0	.192	3.3	1.7	.188	.326	.020
38	87. 9.24	27.5	6.0	10.0	12.0	15.5	1.414	8.0	5.1	.200	1.151	.024
39	87.10. 5	36.5	3.0	5.0	6.5	11.0	1.302	11.0	3.6	.157	.547	.007
40	87.10.30	11.5	7.5	9.0	9.0	9.0	.495	4.0	4.3	.405	1.069	.010
41	88. 3.11	37.0	7.5	11.0	12.0	19.0	1.427	9.5	3.9	.059	.951	.022
42	88. 3.15	12.0	6.0	7.5	8.5	10.5	.420	3.0	3.5	.179	.541	.017
43	88. 4.18	54.5	4.5	8.5	11.5	20.5	3.320	6.2	6.1	.334	2.102	.029
44	88. 5. 4	38.0	6.5	11.5	13.5	19.0	2.331	7.3	6.1	.188	2.475	.014
45	88. 5.15	25.0	2.5	4.5	6.0	10.5	.987	7.0	3.9	.364	.921	.012
46	88. 5.20	52.5	7.0	9.5	11.5	18.5	2.240	7.8	4.3	.223	1.710	.023
47	88. 6. 9	9.0	5.5	7.5	8.0	8.0	.361	2.0	4.0	.414	.856	.016
48	88. 6.10	43.5	7.5	11.0	14.5	21.0	1.359	5.2	3.1	.438	2.488	.011
49	88. 6.11	10.0	5.5	7.5	9.0	10.0	.314	1.8	3.1	.863	1.363	.029
50	88. 6.12	19.0	5.0	7.0	10.0	12.5	.968	2.5	5.1	.870	2.360	.017
51	88. 6.12	19.0	4.0	8.0	11.5	15.5	.650	2.3	3.4	1.176	2.309	.006
52	88. 6.27	30.5	6.5	12.5	16.5	24.5	1.401	3.3	4.6	.343	2.174	.025
53	88. 7.21	17.5	6.0	10.0	14.5	16.5	.940	3.7	5.4	.139	1.373	.023
54	88. 8. 5	42.5	8.0	12.5	17.0	25.0	2.366	4.2	5.6	.206	2.297	.028
55	88. 8.10	10.0	3.5	6.5	7.5	9.5	.203	2.8	2.0	.194	.396	.016
56	88. 8.11	14.0	5.0	7.0	9.0	13.5	.338	2.8	2.4	.200	.547	.024
57	88. 8.14	18.0	7.5	10.5	11.0	15.5	.582	3.2	3.2	.194	.842	.025
58	88. 8.14	18.5	5.0	8.5	11.5	18.0	.803	3.8	4.3	.229	1.151	.013
59	88. 8.17	28.0	13.0	13.5	13.5	20.5	1.554	3.3	5.6	.314	2.567	.012
60	88. 8.19	30.0	12.0	18.0	23.0	29.5	1.934	2.5	6.4	.899	4.360	.004
61	88. 8.22	12.0	4.5	7.0	8.0	10.0	.481	2.0	4.0	.657	1.721	.018
62	88. 8.27	11.5	6.0	11.5	11.5	11.5	.407	1.7	3.5	.356	1.052	.025
63	88. 9. 6	9.0	4.5	6.5	7.0	7.5	.214	3.2	2.4	.151	.360	.028
64	88. 9.20	51.0	14.0	17.0	24.0	43.5	3.543	5.7	6.9	.149	4.200	.029
65	88. 9.23	9.5	2.0	3.5	4.5	7.0	.171	3.3	1.8	.185	.318	.021
66	88.10. 5	13.5	4.0	6.0	8.0	11.0	.429	4.7	3.2	.154	.433	.012
67	88.11.16	10.0	2.0	3.5	4.5	6.5	.130	5.3	1.3	.046	.117	.009

Table 3.8 Hydrologic characteristics of short-term runoff in Kooriyama experimental catchment
表-3.8 短期流出の水文因子 (郡山試験流域)

No.	Date	P	P_{10P}	P_{20P}	P_{30P}	P_{60P}	Q_D	T_D	R_D	Q_I	Q_P	C_G
1	85. 2. 8	70.0	4.0	5.5	7.0	11.0	11.488	42.0	16.4	.006	1.129	.030
2	85. 2.16	25.0	2.0	3.5	4.5	7.5	2.471	26.0	9.9	.013	.325	.017
3	85. 2.18	62.5	2.5	4.5	6.0	10.0	18.500	38.2	29.6	.040	1.580	.024
4	85. 3. 8	56.5	4.5	6.5	8.5	16.0	27.644	46.0	48.9	.087	2.195	.019
5	85. 3.11	16.5	1.0	1.5	2.5	4.0	.987	14.7	6.0	.308	.478	.012
6	85. 3.26	15.0	8.0	14.0	14.5	15.0	.857	9.0	5.7	.138	.336	.010
7	85. 3.27	56.0	6.0	10.0	12.5	18.0	22.025	21.5	39.3	.206	2.569	.020
8	85. 4. 3	20.0	3.0	5.0	6.0	11.5	1.590	10.8	8.0	.104	.492	.025
9	85. 4. 7	43.0	3.0	4.5	5.0	8.0	2.330	17.3	5.4	.093	.583	.016
10	85. 4.11	28.0	3.0	5.0	5.5	6.0	1.392	15.0	5.0	.144	.457	.023
11	85. 5.24	42.5	2.5	4.5	5.5	7.5	3.065	21.0	7.2	.131	.616	.010
12	85. 6. 7	26.0	2.0	3.5	4.0	5.5	1.467	24.0	5.6	.045	.247	.028
13	85. 6.19	77.5	4.5	8.0	12.5	19.0	25.692	30.7	33.2	.082	2.453	.028
14	85. 6.25	15.5	5.5	6.5	6.5	7.5	.814	7.2	5.3	.198	.429	.031
15	85. 6.28	15.0	4.0	6.0	8.0	13.5	1.255	11.2	8.4	.282	.507	.017
16	85. 7.19	37.5	6.5	10.0	12.5	17.5	4.062	16.3	10.8	.087	.937	.017
17	85. 8. 9	34.0	4.5	8.5	9.5	10.0	1.094	27.3	3.2	.018	.144	.027
18	85. 9. 1	14.5	3.5	6.5	7.0	12.5	1.020	10.3	7.0	.237	.485	.011
19	85. 9.28	65.0	3.5	7.0	10.0	17.5	14.526	32.3	22.3	.060	1.551	.021
20	85.10.13	23.0	7.0	7.5	11.0	11.5	.727	11.8	3.2	.045	.224	.029
21	85.10.25	22.0	1.5	2.5	3.0	5.5	.331	25.3	1.5	.015	.064	.014
22	85.11.22	33.0	3.5	6.0	7.0	9.5	2.723	34.7	8.3	.006	.206	.019
23	85.11.28	21.0	1.5	2.5	3.5	6.5	1.174	28.5	5.6	.008	.141	.021
24	86. 1. 3	27.0	1.0	2.0	2.5	5.0	1.023	23.2	3.8	.019	.219	.011
25	86. 2.11	13.5	1.5	2.0	2.5	5.0	.397	25.7	2.9	.024	.068	.018
26	86. 2.14	39.0	6.5	9.5	11.5	21.5	3.422	22.0	8.8	.030	.748	.028
27	86. 2.18	33.5	2.5	4.0	5.5	9.5	5.113	31.8	15.3	.028	.499	.016
28	86. 3.11	14.5	1.5	3.0	4.0	6.5	.611	22.7	4.2	.013	.087	.013
29	86. 3.14	51.5	10.5	12.0	14.5	18.0	6.743	29.2	13.1	.016	.981	.022
30	86. 3.22	24.5	1.5	2.0	2.5	4.0	.459	17.3	1.9	.052	.166	.018
31	86. 3.30	11.5	1.0	1.5	2.0	3.0	.502	18.2	4.4	.075	.141	.006
32	86. 4.14	47.0	3.0	5.0	6.5	11.0	5.015	20.0	10.7	.138	1.059	.017
33	86. 4.26	64.0	3.5	6.0	8.0	11.5	10.346	31.0	16.2	.062	1.240	.015
34	86. 5. 3	36.0	8.5	13.5	19.0	27.5	6.595	19.7	18.3	.181	.992	.018
35	86. 5.14	12.0	2.0	3.0	4.0	5.5	.209	14.5	1.7	.052	.087	.011
36	86. 5.19	48.5	5.0	6.5	8.5	14.0	6.012	27.7	12.4	.030	.906	.024
37	86. 6. 5	33.0	1.5	2.5	3.0	5.5	1.083	22.2	3.3	.078	.252	.019
38	86. 6.25	34.0	14.0	24.5	26.0	28.5	5.416	12.7	15.9	.287	1.595	.000
39	86. 7. 8	9.0	3.5	5.5	8.0	8.0	.708	6.2	7.9	.336	.600	.029
40	86. 7.10	49.5	6.0	11.5	16.0	32.0	4.391	9.0	8.9	.247	1.537	.021
41	86. 7.23	25.0	8.0	14.0	19.5	25.0	1.066	11.7	4.3	.062	.331	.018
42	86. 7.24	86.5	14.5	25.5	29.0	37.0	30.094	27.7	34.8	.066	4.062	.023
43	86. 7.29	9.5	7.5	9.5	9.5	9.5	.163	5.5	1.7	.109	.170	.028
44	86. 8.12	18.0	14.5	18.0	18.0	18.0	.368	12.7	2.0	.018	.093	.029
45	86.10.10	24.0	6.0	9.0	14.0	16.0	.703	21.3	2.9	.014	.128	.016
46	87. 1. 2	8.5	1.0	2.0	3.0	5.0	.272	13.2	3.2	.020	.078	.029
47	87. 1. 5	15.0	1.0	1.5	2.0	3.5	.213	14.2	1.4	.025	.078	.027
48	87. 1.16	13.0	6.0	7.0	7.5	8.5	.784	19.2	6.0	.080	.257	.015
49	87. 1.23	22.5	2.0	3.0	3.5	6.0	1.328	22.7	5.9	.034	.224	.012
50	87. 2. 2	14.5	2.0	3.5	3.5	4.5	.278	21.8	1.9	.021	.062	.016

Table 3.8 (Continued)
表-3.8 (続き)

No.	Date	<i>P</i>	<i>P</i> _{10P}	<i>P</i> _{20P}	<i>P</i> _{30P}	<i>P</i> _{60P}	<i>Q</i> _D	<i>T</i> _D	<i>R</i> _D	<i>Q</i> _I	<i>Q</i> _P	<i>C</i> _G
51	87. 2.11	16.0	2.5	3.5	5.0	7.0	1.381	29.7	8.6	.014	.178	.011
52	87. 3. 4	10.5	1.0	1.5	2.5	4.0	.107	11.2	1.0	.028	.073	.027
53	87. 3. 7	48.5	7.5	15.0	18.5	24.5	6.834	21.7	14.1	.032	1.522	.020
54	87. 3.13	24.5	2.5	4.0	5.5	7.0	2.203	12.7	9.0	.166	.702	.010
55	87. 3.17	37.0	4.0	5.5	7.0	12.0	2.933	18.5	7.9	.159	.702	.011
56	87. 3.19	56.5	12.0	17.0	20.5	29.5	5.851	12.5	10.4	.242	2.453	.025
57	87. 3.30	17.5	3.0	4.0	5.0	7.0	.594	11.8	3.4	.112	.282	.019
58	87. 4.21	51.5	7.0	11.0	16.0	25.5	6.351	16.8	12.3	.037	1.190	.023
59	87. 4.25	43.0	3.5	4.5	7.0	12.0	1.914	14.5	4.5	.087	.521	.017
60	87. 4.30	46.0	7.0	11.0	15.0	26.5	6.675	13.3	14.5	.131	1.580	.019
61	87. 5. 2	48.5	6.0	12.0	15.5	21.5	10.236	16.8	21.1	.331	2.195	.025
62	87. 5.16	26.5	3.0	5.5	7.5	9.0	2.214	24.5	8.4	.292	.529	.004
63	87. 5.27	56.0	10.0	16.5	22.0	27.0	9.138	16.0	16.3	.219	1.699	.022
64	87. 6. 2	10.0	5.0	7.5	8.5	9.5	.176	8.5	1.8	.095	.134	.026
65	87. 6.14	68.5	4.0	7.0	10.0	16.0	4.213	25.8	6.1	.098	1.265	.018
66	87. 7. 7	12.0	7.0	8.5	9.0	11.0	.649	14.2	5.4	.095	.210	.014
67	87. 7.30	52.5	10.0	15.0	16.5	17.0	6.747	17.5	12.9	.073	1.036	.027
68	87. 8. 8	68.5	10.0	14.5	16.5	24.5	12.402	20.3	18.1	.098	1.777	.024
69	87. 8.10	57.5	9.0	12.5	16.0	21.0	22.699	26.5	39.5	.410	3.043	.029
70	87. 8.22	56.0	10.0	14.0	15.0	16.0	5.135	26.2	9.2	.042	.815	.024
71	87. 8.26	40.5	12.0	20.0	30.0	39.5	11.430	15.2	28.2	.575	2.769	.023
72	87. 9.23	61.0	4.5	9.0	12.0	18.0	3.737	41.8	6.1	.013	.658	.017
73	87.10. 5	25.5	1.5	3.0	4.5	8.5	.857	18.3	3.4	.056	.202	.021
74	87.10.16	42.5	1.0	2.0	2.5	5.0	3.410	40.3	8.0	.016	.272	.013
75	87.10.30	11.5	8.0	10.0	11.0	11.5	.427	6.8	3.7	.194	.354	.022
76	87.11. 2	53.0	7.0	11.5	14.5	23.5	9.524	14.7	18.0	.162	1.856	.026
77	87.11.12	10.5	.5	1.0	1.5	2.5	.087	9.8	.8	.058	.085	.023
78	87.11.23	24.5	2.0	3.5	5.0	9.0	.615	20.7	2.5	.014	.121	.010
79	87.11.26	34.5	2.0	3.0	5.0	8.5	1.930	19.3	5.6	.022	.416	.022
80	88. 3.13	9.5	1.5	3.0	3.5	5.5	.165	9.5	1.7	.031	.082	.029
81	88. 3.25	25.0	2.0	3.5	4.5	7.0	1.312	20.7	5.2	.026	.242	.011
82	88. 4.12	61.0	4.0	6.0	9.0	15.5	7.525	14.3	12.3	.052	1.551	.024
83	88. 4.17	46.0	5.0	8.0	10.5	17.0	4.662	28.2	10.1	.101	.937	.011
84	88. 5. 4	26.5	4.0	6.5	7.5	12.5	3.757	13.7	14.2	.138	.834	.029
85	88. 5.14	38.5	3.5	5.5	7.5	12.5	3.895	14.2	10.1	.073	.948	.029
86	88. 5.20	31.5	2.5	4.0	5.5	9.5	1.511	11.8	4.8	.098	.485	.026
87	88. 5.22	15.0	2.0	4.0	4.5	7.0	1.009	12.2	6.7	.141	.384	.007
88	88. 6.10	58.0	4.0	8.0	10.0	17.0	9.685	13.0	16.7	.198	2.569	.029
89	88. 6.23	43.0	3.5	6.0	8.5	11.5	2.583	23.5	6.0	.056	.560	.025
90	88. 6.25	43.5	9.5	15.0	17.5	26.5	5.999	12.2	13.8	.128	1.624	.027
91	88. 6.27	29.0	5.5	8.5	11.5	19.0	2.812	9.2	9.7	.303	1.025	.016
92	88. 7.16	62.0	13.5	25.5	32.5	50.5	8.725	12.5	14.1	.066	2.340	.028
93	88. 7.18	28.0	10.0	20.0	20.5	21.5	3.642	7.3	13.0	.170	1.317	.027
94	88. 7.23	47.5	7.5	8.0	8.5	9.5	3.553	23.8	7.5	.181	.865	.020
95	88. 8.12	40.0	15.0	23.0	28.0	36.0	2.608	18.7	6.5	.017	.567	.028
96	88. 8.13	12.0	4.0	4.5	5.5	7.0	.366	13.5	3.0	.040	.106	.033
97	88. 8.19	14.0	8.0	9.0	9.5	13.0	1.634	10.0	11.7	.287	.720	.026
98	88. 8.27	13.0	9.0	12.5	13.0	13.0	.240	5.2	1.8	.170	.277	.024
99	88. 9. 5	23.0	5.0	7.5	10.0	15.5	1.269	15.2	5.5	.071	.303	.028
100	88. 9.20	32.0	5.0	9.5	12.5	16.5	1.660	18.7	5.2	.037	.282	.026
101	88. 9.21	11.5	2.0	3.0	4.0	6.0	.732	19.8	6.4	.062	.148	.015
102	88. 9.22	39.0	15.0	24.0	29.0	36.5	5.668	13.7	14.5	.068	1.304	.026
103	88. 9.24	81.5	5.0	7.5	10.0	18.5	32.665	27.0	40.1	.277	3.859	.030
104	88.10. 5	16.0	4.5	6.5	7.5	10.5	.408	10.0	2.6	.056	.155	.020

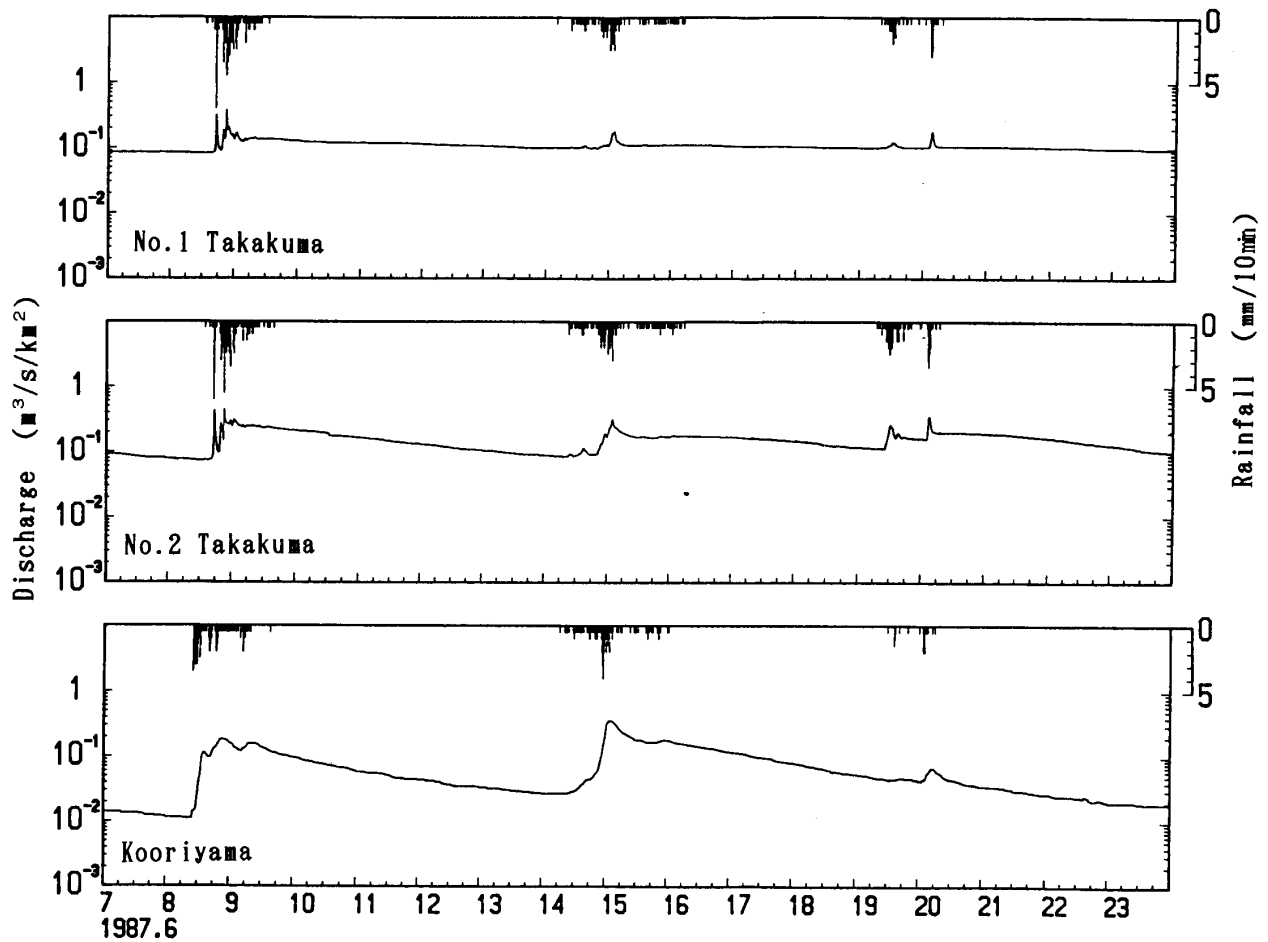


Fig. 3.28 Comparison of flood hydrographs on three experimental catchments.
 図-3.28 3試験流域の短期流出ハイドログラフの比較。

両者の関係を流域間で比較すると、総雨量の増加に対する直接流出量の増加の割合は、郡山流域で大きく、1号・2号流域で小さい。総雨量が30mm, 50mm, 70mmの場合の直接流出量を計算すると、1号流域でそれぞれ0.7mm, 1.7mm, 3.1mm, 2号流域でそれぞれ1.3mm, 2.8mm, 4.6mm, 郡山流域でそれぞれ2.2mm, 6.3mm, 12.4mmである。したがって、同じ総雨量に対する直接流出量は、1号流域が相対的に最も小さく、次いで2号流域、郡山流域の順となる。

ところで、流域に降雨があった場合、流域からの流出量は降雨開始時の土壌の含水状態に影響される。流域の乾湿度を表す指標としては初期流量(増水開始時の流量)、先行降雨などが用いられる。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、初期流量は流域の乾湿度を表す指標になりうるといわれる(岩井・石黒, 1970)。Fig. 3.30は、Fig. 3.29に示された P と Q_D の関係を初期流量 Q_1 で記号分類してそれぞれプロットしたものである。両対数方眼紙を用いたのは、Fig. 3.29に示されたように P と Q_D の間に指数関数的な関係が認められたことによる。Fig. 3.30において、+印と破線Aは Q_1 が0.2mm/hr未満の両者の関係とその回帰曲線であり、また、●印と破線Bは Q_1 が0.2mm/hr以上の両者の関係とその回帰曲線である。 P が同じ程度である場合、 Q_1 が大きい方が Q_D は多くなっている。共分散分析法により破線

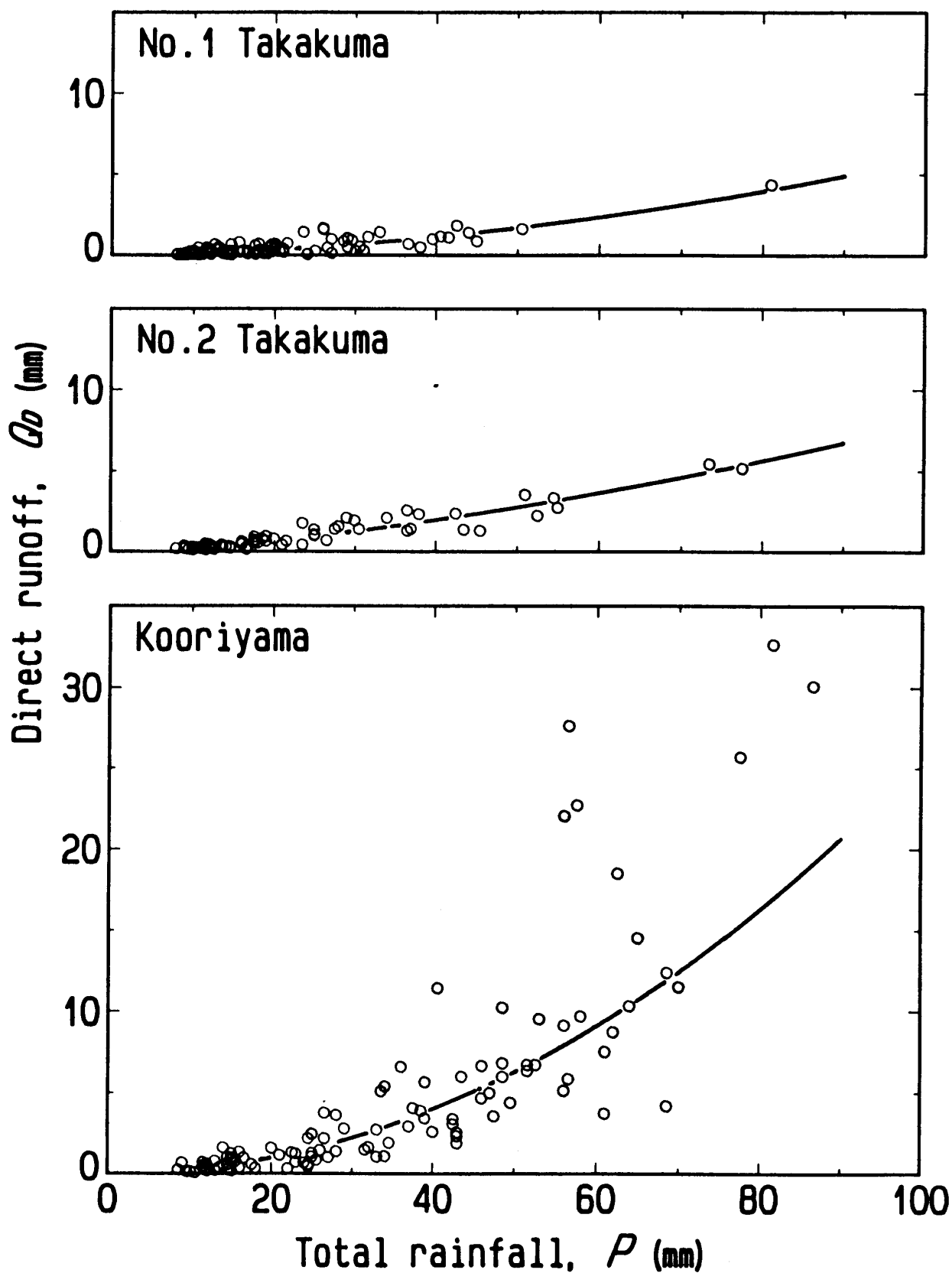


Fig. 3.29 Comparison of relationships between total rainfall, P (mm) and direct runoff, Q_D (mm) on three experimental catchments.

図-3.29 3試験流域の総雨量 P と直接流出量 Q_D の関係の比較.

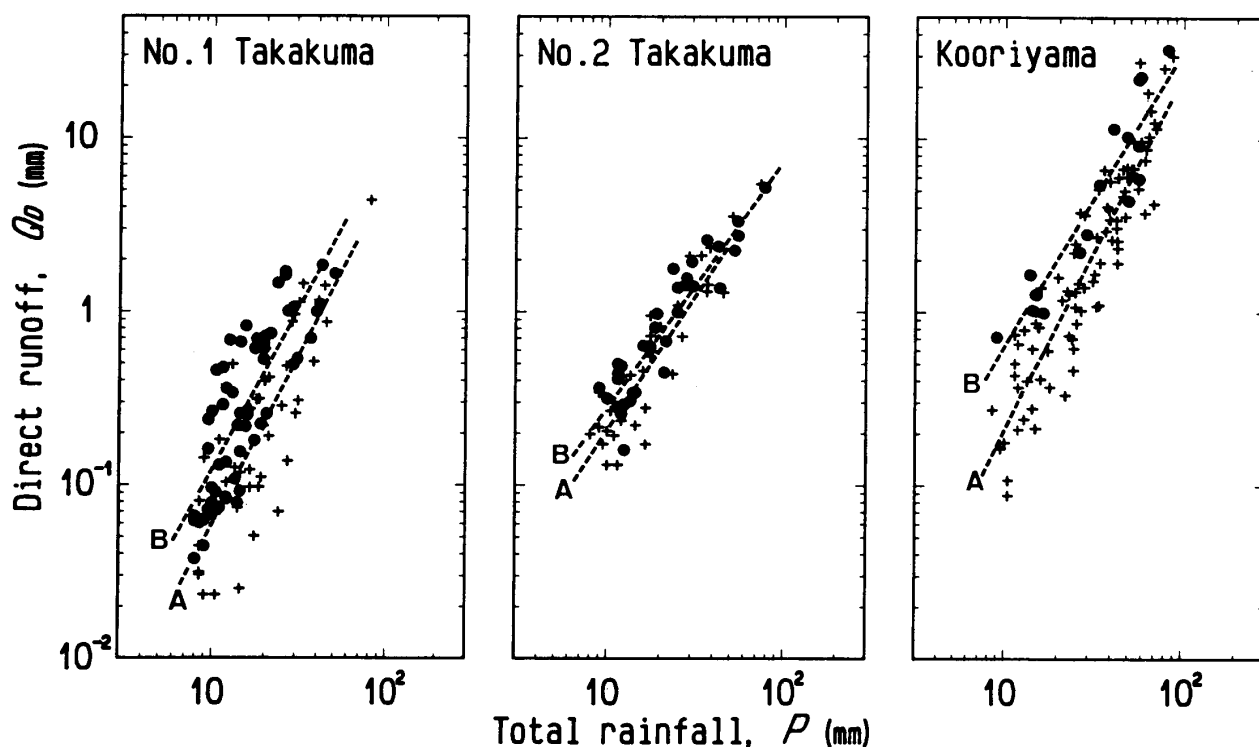


Fig. 3.30 Relationships in Figure 3.29 are plotted on logarithmic paper.

--+-- A : Initial discharge under 0.2 mm/hr

--●-- B : Initial discharge above 0.2 mm/hr

図-3.30 対数表示による総雨量 P と直接流出量 Q_D の関係。

--+-- A : 初期流量0.2mm/hr 未満 --●-- B : 初期流量0.2mm/hr 以上

A と B の回帰式を比較すると、3流域とも回帰係数には差は認められなかったが、回帰定数には有意な差が認められた。したがって、各流域とも総雨量が同じ程度である場合、初期流量が大きいときの方が直接流出量は多くなっており、流域の土壤の乾湿度を表す指標値に初期流量を用いるのは妥当であると考えられる。

直接流出率 R_D は、1号流域0.2~6.5% (平均2.0%)、2号流域1.0~7.5% (平均3.7%)、郡山流域0.8~48.9% (平均10.1%) となっている (Table 3.6~2.8)。Fig. 3.31は、総雨量 P と直接流出率 R_D の関係を3試験流域それぞれプロットしたものである。 R_D は各流域とも P の増加に伴い増大しているが、しだいに増大率は小さくなり、一定値を示すようになる。同じ総雨量に対する直接流出率は1号・2号流域に比較し郡山流域は大きい。

以上のような1号・2号流域と郡山流域の直接流出量および直接流出率の違いの原因は、1号・2号流域内に分布した透水性に優れた降下軽石層の存在によるものと考えられる。すなわち、1号・2号流域では、地中に浸透した雨水の大部分は降下軽石層を介して地下深くまで導かれ基盤をなす砂岩との境界に貯留され地下水流出成分となる。したがって、郡山流域のような一般山地流域に比べ降雨後比較的短時間に流出する中間流出成分に相当する部分が相対的に小さい。このような現象は2号流域に比べ1号流域において顕著に現れており、これは1号流域の火山碎屑物層が2号流域よりさらに厚いことに起因していると考えられる。

3試験流域の短期流出ハイドログラフのピーク流量と直接流出が行われている期間の最大雨量

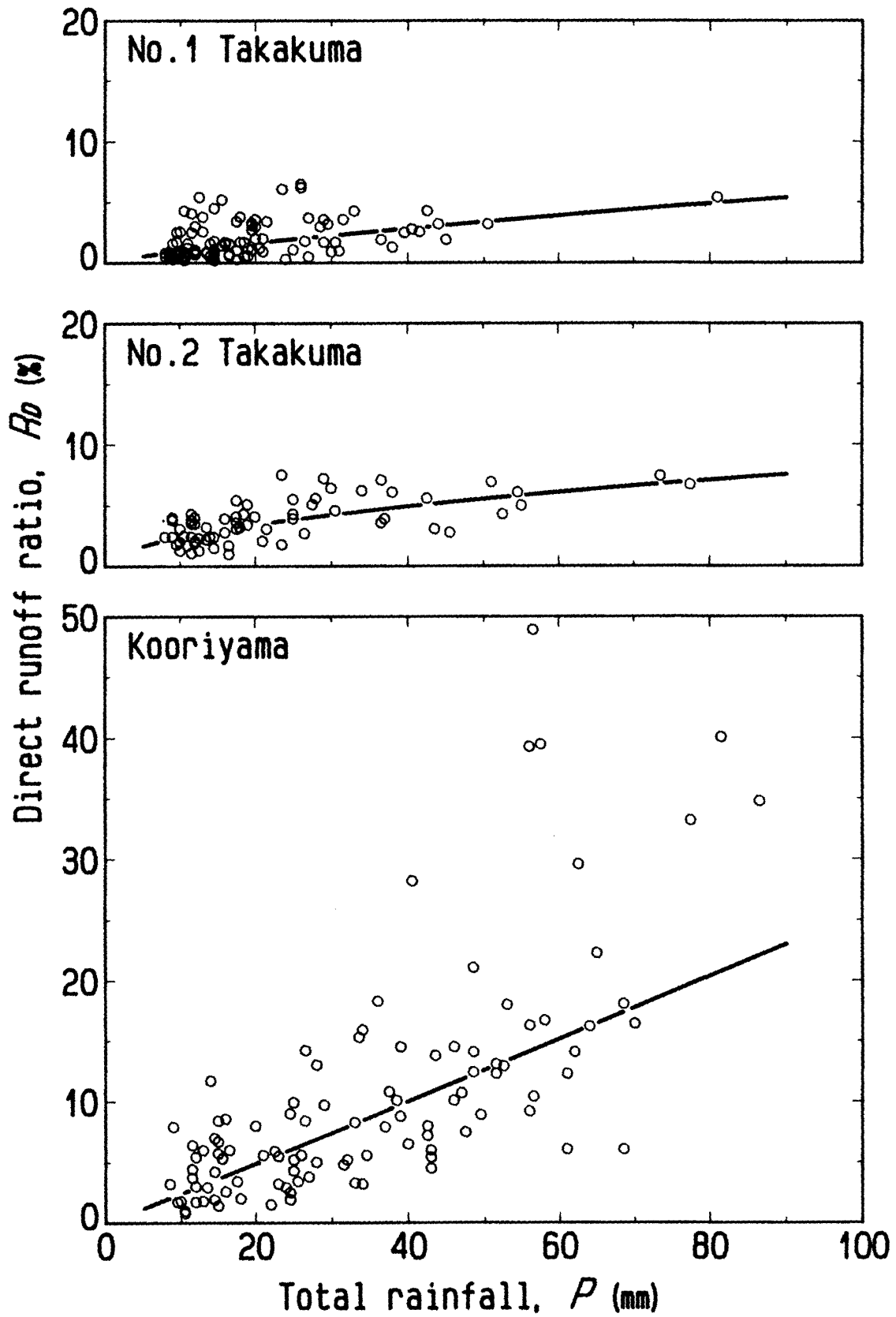


Fig. 3.31 Comparison of relationships between total rainfall, P (mm) and ratio of direct runoff, R_D (%) on three experimental catchments.

図-3.31 3試験流域の総雨量 P と直接流出率 R_D の関係の比較.

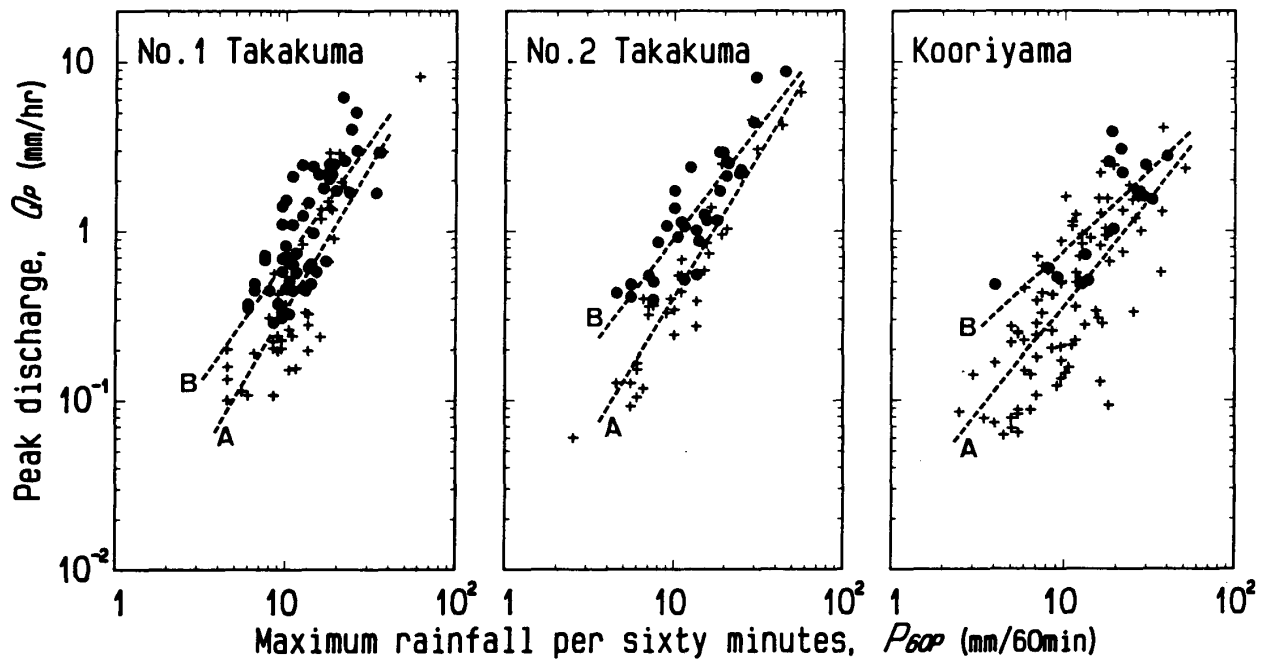


Fig. 3.32 Comparison of relationships between maximum rainfall per sixty minutes, P_{60P} (mm/60min) and peak discharge, Q_P (mm/hr) on three experimental catchments.
 --+-- A : Initial discharge under 0.2 mm/hr
 --●-- B : Initial discharge above 0.2 mm/hr

図-3.32 3試験流域の最大60分間雨量 P_{60P} とピーク流量 Q_P の関係の比較。
 --+-- A : 初期流量0.2mm/hr未満 --●-- B : 初期流量0.2mm/hr以上

(降雨強度) との関係と比較した。Fig. 3.32は、最大60分間雨量 P_{60P} とピーク流量 Q_P の関係を初期流量 Q_1 が0.2mm/hr未満と0.2mm/hr以上の場合に分けて3試験流域それぞれプロットしたものである。図中の破線は両者の間に指数曲線を当てはめた場合のそれぞれの回帰曲線である。 Q_1 の大小に関係なく、すなわち流域の乾湿度に関係なく同じ降雨強度に対するピーク流量は、1号・2号流域に比較し郡山流域は小さい。 Q_P と P_{60P} の比、すなわち、合理式のピーク流出係数を求めると、1号流域は0.01~0.29の範囲にあり平均0.07、2号流域は0.02~0.26の範囲にあり平均0.08、郡山流域は0.01~0.21の範囲にあり平均0.05であった。3試験流域とも比較的小さいピーク流出係数(土木学会, 1985)を示している。郡山流域が小さい原因は流域内に貯砂機能をもつ砂防ダムが5基あり、この砂防ダムが流出を遅らせていること(地頭藪, 1989)が関係している。1号・2号流域は、火山碎屑物に覆われており、透水性の高い流域であることが合理式のピーク流出係数を小さくしている原因と考えられる。

3. 減水特性の比較

短期流出ハイドログラフにおいて地下水流出のみが行われている期間の減水特性を3試験流域について比較した。

Table 3.6~3.8によると、地下水流出のみが行われているGB間(Fig. 3.27)の地下水減水係数 C_G の値は、1号流域0.001~0.033hr⁻¹(平均0.011hr⁻¹)、2号流域0.001~0.029hr⁻¹(平均0.016hr⁻¹)、郡山流域で0.004~0.033hr⁻¹(平均0.021hr⁻¹)であり、3流域の中で1号流域は相対的に小さく、2号流域がこれに次ぎ、郡山流域では大きい値を示している。地下水減水係数は、そ

の値が小さいほど一雨による地下水流出が長時間にわたり行われ、流域の保水能力が高いことを意味しており、1号流域のような火山砕屑物に厚く覆われた流域が透水性だけでなく保水性にも優れていることを示唆するものである。この原因は、降下軽石層からなる大きな貯水タンクの中に多量の雨水が貯留され、時間をかけて徐々に流出していることに関係している。火山砕屑物層は保水性にも優れ、流域の水源涵養機能に対して有益な効果を及ぼしている。

第6節 長期流出特性

本節では、3試験流域の日単位の雨量・流出量データから火山砕屑物に覆われた1号・2号流域の長期流出特性と覆われていない郡山流域の長期流出特性と比較する。解析期間は、1号流域および郡山流域が1985～1988年、2号流域が1986～1988年である。

Fig. 3.33は、1985～1988年（2号流域は1986年8月観測開始）の日雨量および日流出量から求めた3試験流域の日単位ハイドログラフを示したものである。3試験流域とも降雨状況はほぼ同様の傾向を示しているが、流出状況はかなり異なっている。すなわち、1号流域では年間を通して日流出量の変動が小さく安定しており、無降雨日にも大きい流出量が得られている。2号流域も1号流域ほどではないが、年間を通して日流出量の変動が小さく、無降雨日にも大きい流出量がみられ比較的安定している。しかし、郡山流域は日流出量の変動が大きく不安定であり、無降雨日の流出量は1号・2号流域に比べ非常に小さくなっている。

日単位ハイドログラフによると、基底流出量は3試験流域とも夏期に大きく、冬期に小さい。Fig. 3.34は、1月から12月までを1水年とし、1水年の日雨量および日流出量を順序統計量になおして大きい順にプロットした曲線、すなわち雨量継続時間曲線および流量継続時間曲線（流況曲線）と年平均の日流出量の直線を3試験流域の1987水年について示したものである。3試験流域の雨量継続時間曲線はほぼ同様の形状を示し、また年平均の日流出量もほぼ同じ値であるが、流況曲線は傾向がかなり異なっている。流況曲線において、高水位における流量は郡山流域で大きく、次いで2号流域、1号流域の順である。逆に、低水位の流量は1号流域で大きく、次いで2号流域、郡山流域の順である。火山砕屑物に覆われている1号・2号流域は、豊水時と渇水時の流量差が小さく、流出の均等化作用が相対的に大きい流域であることがわかる。火山砕屑物層には有力な雨水流出の調節効果が期待できる。

第7節 火山砕屑物層の地下水位観測

火山砕屑物層内の水の動態を探る目的で1号流域において火山砕屑物層の地下水位の観測を行っている。本節では、この観測結果について述べる。

1. 観測位置および方法

Fig. 3.2に示される1号流域のA地点において火山砕屑物層内の地下水位の観測を行っている。A地点の直下には湧水が見られ、この湧水は火山砕屑物層（降下軽石層）とこの下部にある不透水性の細粒の風化火山灰層の境界から流出している。観測井戸は、火山砕屑物層内にハンドオーガにより掘削した直径約15cmの縦孔に、長さ約3m、外径約14cm、内径約13cmの硬質塩化ビニル管を挿入し、周囲を埋め戻したものである。塩化ビニル管の底部は下層の不透水性の風化火山灰層に達している。塩化ビニル管の挿入部には地下水が流入しやすいように直径1cmの穴を約10cm間隔で四方に開けてある。火山砕屑物層内の地下水位の観測はこの塩化ビニル管内の水位をフロー

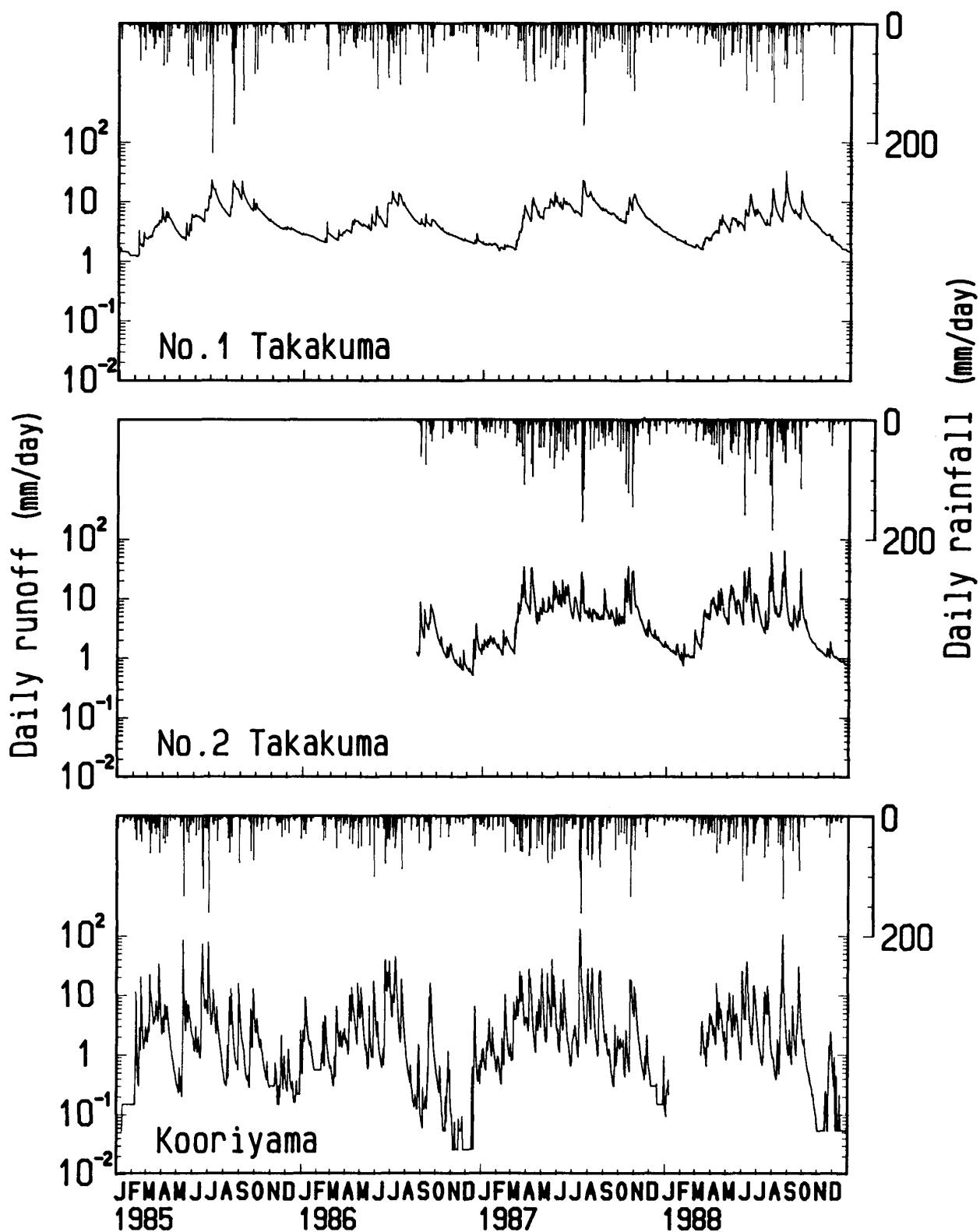


Fig. 3.33 Comparison of annual hydrographs on three experimental catchments.

図-3.33 3試験流域の日単位ハイドログラフの比較.

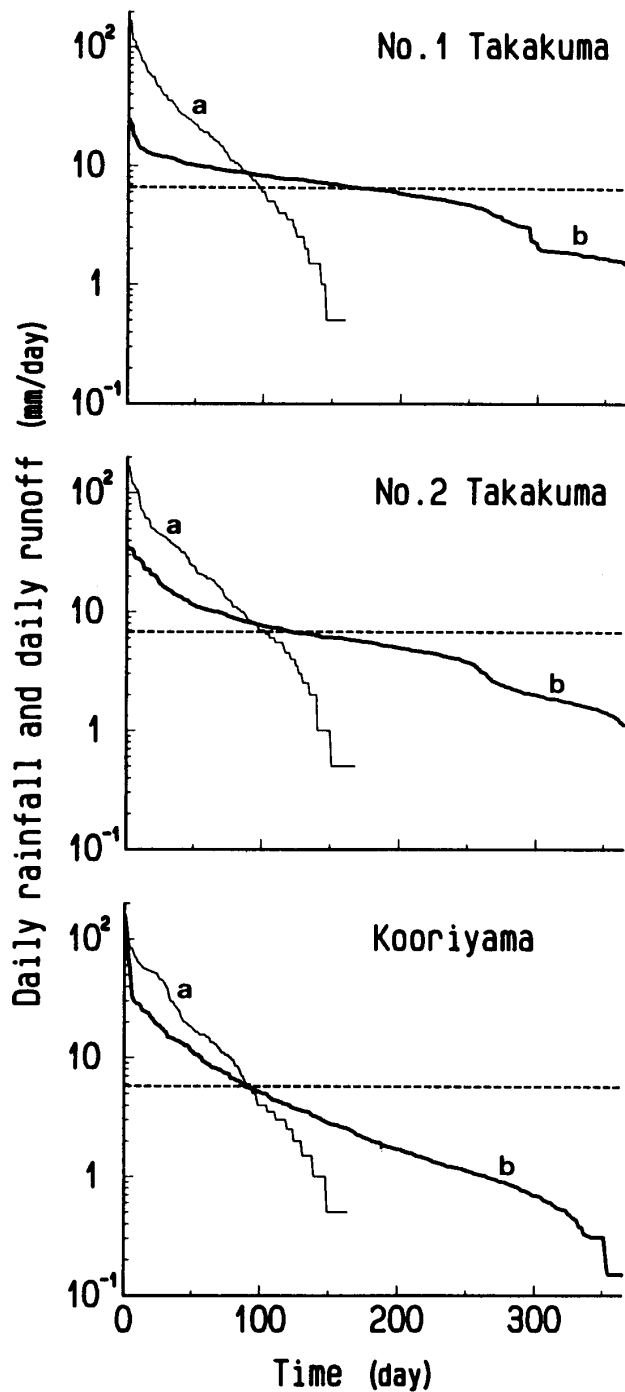


Fig. 3.34 Comparison of depth- and flow-duration curves on three experimental catchments.
 a : Depth-duration curve b : Flow-duration curve ... Annual mean daily runoff

図-3.34 3試験流域の雨量および流量継続時間曲線の比較。

a : 雨量継続時間曲線 b : 流量継続時間曲線 ...年平均日流出量

ト式水位計で連続観測する方法である。観測は1986年6月に開始した。

2. 観測結果と考察

Fig. 3.35は、A地点における火山碎屑物層内の地下水位の観測例を1号流域の量水地点における流量変化と降雨データを並列して示したものである。解析時間単位は1時間である。

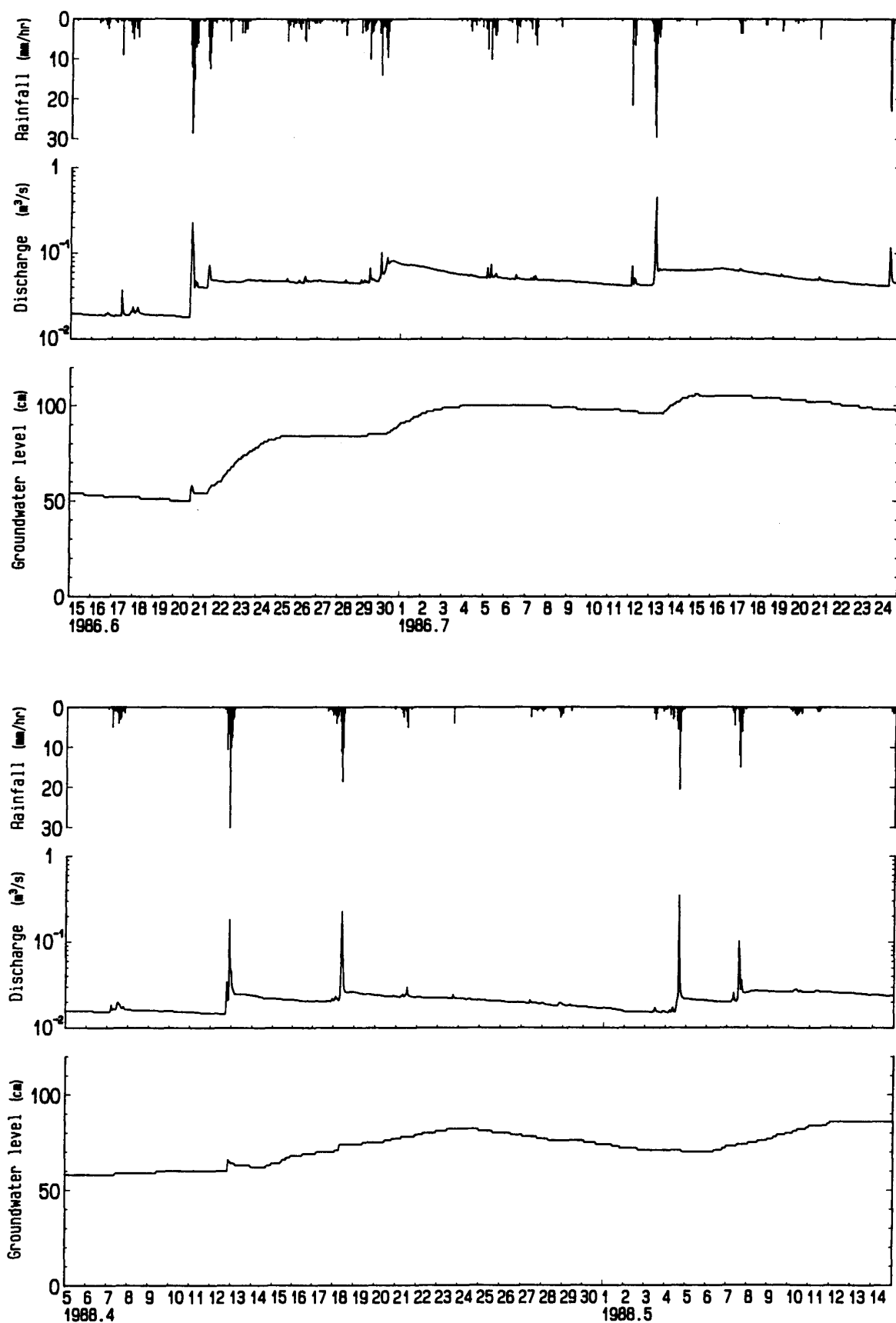


Fig. 3.35 Observed groundwater levels in pyroclastic fall deposits.
 図-3.35 火山碎屑物層内の地下水位変動の観測例.

まず、Fig. 3.35における1986年6月～7月の地下水位変動について検討する。6月20日に総雨量108mm、60分間あたりの最大雨量（最大60分間雨量）33mmという降雨が発生した。地下水位は強い降雨とほぼ同時に上昇をはじめ2時間で8cm上昇した。その後3時間かけて4cm下降し、そのままの状態です15時間ほど経過したのち、再び徐々に上昇している。この上昇は3日半継続し、この間の地下水位上昇は30cmであった。この地下水位上昇期の流域からの流出量は減水することなくほとんど一定値を示している。29～30日の降雨による上昇が始まるまでの5日間程度は一定値を示し、この間に発生した弱い降雨には反応していない。29～30日の降雨は総雨量87mm、最大60分間雨量14mmであり、この降雨による地下水位上昇は3日半程度続き、この間の地下水位上昇は16cmであった。7月8日まで5日間程度は一定値を示し、その後13日の降雨まで徐々に下降している。13日の降雨は総雨量102mm、最大60分間雨量31mmであり、この降雨による地下水位上昇は2日間程度続き、この間の地下水位上昇は10cmであった。その後3日間程度は一定値を示し、徐々に下降している。

Fig. 3.35における1988年4月～5月の地下水位変動にも上記と同様の傾向が認められる。4月12～13日に総雨量76mm、最大60分間雨量30.5mmという降雨が発生した。地下水位は強い降雨とほぼ同時に上昇をはじめ1時間で6cm上昇した。その後3時間で2cm下降し、40時間ほどわずかな下降状態を経過したのち、再び徐々に上昇している。この上昇は4月17～18日の総雨量65mmの降雨が加わり、9日程度継続し、この間の地下水位上昇は20cmであった。この地下水位上昇期の流出状況を見ると減水の割合は非常に小さくなっている。その後2日間程度は一定値を示し、徐々に地下水位は下降しており、同時に流出量も減少している。

以上の観測結果から、試験流域の下流で観測している火山砕屑物層内の地下水位変動の特性をまとめると次のようになる。強度の降雨があると降雨発生とほとんど同時に1、2時間で10cm近くの地下水位の急上昇がみられ、ピークから数時間後には上昇分の半分程度急下降する。1～2日程度の間は一定状態を示し、そののち再び大きく上昇し、この上昇は2～4日間程度続き、その後4～5日間程度は一定値を示し、その後ゆっくりと下降していく。強度の降雨発生とほぼ同時に起こる地下水位の急上昇と急降下に関しては、急激な降雨により浸透水が地下水面に達する前に土中空気の圧力の影響により地下水位が上昇し、土中空気圧力の解放によって地下水位は急下降する（金子, 1973）との指摘がある。しかし、試験流域は空隙の多い火山砕屑物層に覆われており、土中空気圧が生じにくいことから、この地下水位の急上昇と急降下は上記の指摘では説明しにくい。さらに詳細な検討を加えなければならないが、次のような説明が有効と思われる。前述したように、地下水位観測地点の直下には常に湧水が見られることからこの付近の火山砕屑物層は飽和した状態にあると考えられる。降雨があった場合、付近から浸透した雨水は透水性のよい火山砕屑物層の飽和帯に容易に流入し、地下水位の急上昇を起こす。降雨が終了すると、飽和帯からの流出も容易に行われるため地下水位は急降下することになる。そののち再び上昇する地下水位は、流域上部で浸透した雨水の流下に伴うものであり、浸透水は時間的遅れを伴いながら飽和帯に流入する。このため地下水位の上昇と下降は緩やかなものとなる。

火山砕屑物の堆積層は透水性がよい一方、軽石などにみられるように火山砕屑物自体が一般に多孔質であることから保水性も非常によい。その結果、火山砕屑物の堆積層内には多量の地下水が貯留され、地下水は長時間かけて下流に達し、流出しているものと考えられる。

第8節 要 約

本章の課題は、火山活動が流域の水源涵養機能に有益な効果を及ぼすという火山活動の影響のプラスの側面の実証的検討である。南九州火山地帯に設置した試験流域において、火山砕屑物に覆われた森林流域の短期および長期流出特性を、火山砕屑物に覆われていない流域の流出特性と比較することによって、火山砕屑物が流出に及ぼす影響を解明した。得られた結果を要約すると次のとおりである。

1) 解析に用いた3試験流域はほぼ同じ降雨条件にあり、また、3流域とも森林に覆われている。流域形状には相違がみられるが、流域平均勾配はほぼ同じ程度である。3流域の大きな相違は流域内の火山砕屑物の有無である。1号流域は降下軽石を主体とした火山砕屑物に厚く覆われており(厚い所で十数m)、2号流域も1号流域ほどではないが火山砕屑物に覆われている(数m程度)。郡山流域には火山砕屑物は存在しない。

2) 3試験流域における1985~1988年の年降雨量、年流出量、年消失量の4年間平均値(2号流域は2年間平均値)は、1号流域2787mm, 1934mm, 853mm, 2号流域3333mm, 2375mm, 957mm, 郡山流域2498mm, 1493mm, 1005mmであった。

3) 3試験流域の短期流出特性を比較した結果、火山砕屑物に厚く覆われている1号流域の直接流出量は非常に少なく、直接流出率は0.2~6.5%であった。次いで、1号流域ほど厚くはないが火山砕屑物に覆われている2号流域の直接流出量も少なく、直接流出率は1.0~7.5%であった。火山砕屑物が存在しない郡山流域は3流域の中では直接流出量は多く、直接流出率は0.8~48.9%であった。このような1号・2号流域と郡山流域の直接流出量および直接流出率の違いの原因は、1号・2号流域内に分布した透水性に優れた降下軽石層の存在によるものと考えられる。1号・2号流域では、地中に浸透した雨水の大部分は降下軽石層を介して地下深くまで導かれ基盤をなす砂岩との境界に貯留され地下水流出成分となる。したがって、一般山地流域に比べ降雨後比較的短時間に流出する中間流出成分に相当する部分が相対的に小さい。このような現象は2号流域に比べ1号流域において顕著に現れており、これは1号流域の火山砕屑物層が2号流域よりさらに厚いことに起因していると考えられる。

4) 地下水減水係数は、1号流域 $0.001 \sim 0.033\text{hr}^{-1}$ (平均 0.011hr^{-1})、2号流域 $0.001 \sim 0.029\text{hr}^{-1}$ (平均 0.016hr^{-1})、郡山流域で $0.004 \sim 0.033\text{hr}^{-1}$ (平均 0.021hr^{-1})であり、3流域の中で1号流域は相対的に小さく、2号流域がこれに次ぎ、郡山流域では大きい値を示している。地下水減水係数は、その値が小さいほど一雨による地下水流出が長時間にわたり行われ、流域の保水能力が高いことを意味しており、1号流域のような火山砕屑物に厚く覆われた流域が透水性だけでなく保水性にも優れていることを示唆している。この原因は、降下軽石層からなる大きな貯水タンクの中に多量の雨水が貯留され、時間をかけて徐々に流出していることに関係している。火山砕屑物層は保水性にも優れ、流域の水源涵養機能に対して有益な効果を及ぼしている。

5) 3試験流域の日単位ハイドログラフを比較した結果、降雨状況はほぼ同様の傾向を示しているが、流出状況はかなり異なっている。1号流域では年間を通して日流出量の変動が小さく安定しており、無降雨日にも大きい流出量が得られている。2号流域も1号流域ほどではないが、年間を通して日流出量の変動が小さく、無降雨日にも大きい流出量がみられ比較的安定している。一方、郡山流域は日流出量の変動が大きく不安定であり、無降雨日の流出量は1号・2号流域に比べ非常に小さくなっている。

6) 3 試験流域の流況曲線を比較した結果、高水位における流量は郡山流域で大きく、次いで 2 号流域、1 号流域の順である。逆に、低水位の流量は 1 号流域で大きく、次いで 2 号流域、郡山流域の順である。火山砕屑物に厚く覆われている 1 号流域は、豊水時と渇水時の流量差が小さく、流出の均等化作用が相対的に大きい流域であることがわかる。火山砕屑物層には有効な雨水流出の調節効果が期待できる。

7) 火山砕屑物層内の地下水位を観測した結果次のような特性がみられた。強度の降雨があると降雨発生とほとんど同時に 1, 2 時間で 10cm 近く地下水位は急上昇し、ピークから数時間後には上昇分の半分程度急下降する。1~2 日程度の間は一定状態を示し、そののち再び大きく上昇し、この上昇は 2~4 日間程度続き、その後 4~5 日間程度は一定値を示し、その後ゆっくりと下降していく。この現象は以下のように説明される。地下水位観測地点の直下には常に湧水が見られることからこの付近の火山砕屑物層は飽和した状態にある。降雨があった場合、付近から浸透した雨水は容易に飽和帯に流入し、地下水位の急上昇を起こす。降雨終了後、飽和帯からの流出も容易に行われ地下水位は急降下する。そののち再び上昇する地下水位は、流域上部からの浸透水の流下に伴うものであり、浸透水が時間的遅れを伴いながら飽和帯に流入するため地下水位の上昇と下降は緩やかなものとなる。火山砕屑物の堆積層は透水性がよい一方、軽石などにみられるように火山砕屑物自体が一般に多孔質であることから保水性も非常によい。その結果、火山砕屑物の堆積層内には多量の地下水が貯留され、地下水は長時間かけて下流に達し、流出しているものと考えられる。

第 4 章 第四紀火山活動が流況に及ぼす影響の比較評価

第 3 章において、第四紀の火山活動に起因する火山砕屑物が高い保水性を有し、流域の水源涵養機能に有益な効果を及ぼしていることを、小森林流域の観測データから実証的に明らかにした。本章では、この事実をさらに明確にするために、地質の違いによる流域の水源涵養機能の相違を全国に分布する多目的ダム流域の日単位の雨量・流量データを用いて検討する。また流況に及ぼす地形の影響についても検討する。流域の植生条件については、解析流域が比較的大面積の流域で、かつほとんどが山間部に位置することから流域間の植生条件の差を検出することが困難であり、ここではとくに考慮しなかった。このことに関して、ダム流域のような大面積の流域を対象とした流況と植生の間に一定の関係を見いだすことはできなかったという報告もある(志水, 1980)。流域の流出状況を把握するための流況因子としてはさまざまな表示方法が提案されてきている(岸原・石井, 1983)。ここでは、流況曲線から得られる情報を利用し、従来よく使用されてきた流況因子と最近提案された流況因子の両方について算出し、流況因子としての有効性についても検討する。

第 1 節 対象流域および解析資料

1. 対象流域とその分布

解析対象とした流域は Fig. 4.1 に示される 118 個の多目的ダム流域である。解析流域のダム名、水系名、流域面積を Table 4.1 に示す。Table 4.1 内の番号は Fig. 4.1 に示されるダム位置図の番号と一致している。流域面積は 10~494km² の範囲にあり、平均 128km² である。

ところで、降雪地帯の流域は、冬期の降水が雪であるためすぐには流出せず積雪として流域内に貯留され、融雪期に多量の流出をもたらしている。すなわち、流域内に積雪がみられる流域では降水と流出に時間的なズレが生じている(岸原・石井, 1982)。流域地質と流況との関係解析を行うには、雪が流出に影響を及ぼしていることを考慮し積雪のある流域とない流域を区分しておく必要

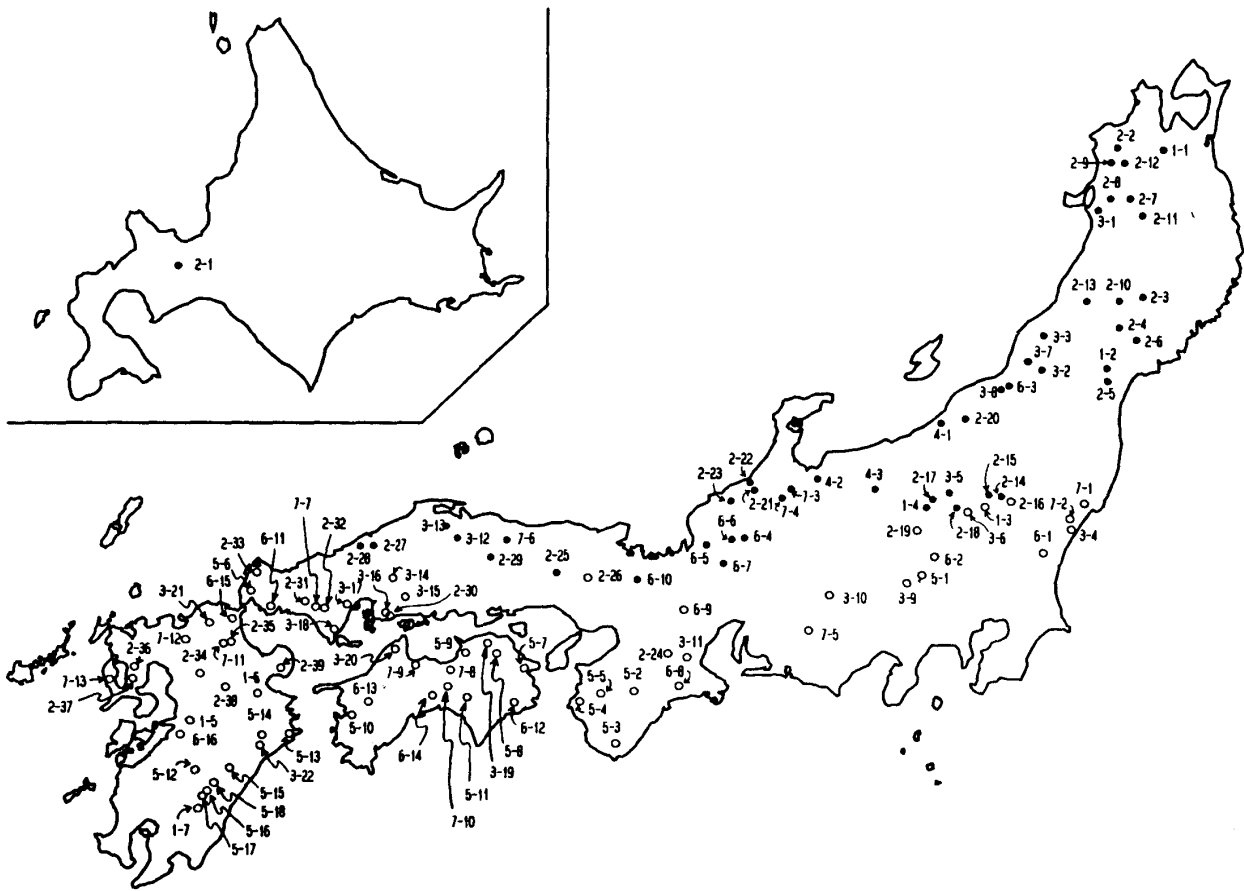


Fig. 4.1 Location of multiple-purpose dams.
 図-4.1 解析に用いた流域の位置。

がある。本論ではこの区分を夏期の流出量と降雪・融雪期の流出量の比較と日単位ハイドログラフにおける融雪流出の有無から判断した。Fig. 4.1において、○印は流出に雪の影響がほとんどみられない流域（70流域）、●印は雪の影響がみられる流域（48流域）である。当然ながら○印流域は太平洋側に、●印流域は日本海側に分布している。Table 4.1内の流域番号に*印がついている流域は流出に雪の影響がみられた●印流域である。以下、○印流域を非積雪地帯の流域、●印流域を積雪地帯の流域と呼ぶことにする。

2. 地質分類と流域の地質判読

流域地質が流況に及ぼす影響は、流域の表層地質のみで説明されるものでなく、地層の形成年代に関係する地質構造や風化度合なども考慮しなければならないが、本章では流域地質と流出状況とのマクロ的な関係解析を行おうとしていることから次のような大まかな地質分類を採用した（地頭藪・竹下，1987）。

- ①第四紀火山岩類：第四紀の火山活動により噴出した安山岩，未固結の火山砕屑物など。
- ②第三紀火山岩類：第三紀の火山活動により噴出した安山岩，流紋岩，凝灰岩などの火山岩。
- ③花崗岩類：花崗岩，花崗閃緑岩，石英閃緑岩，閃緑岩などの花崗岩質の岩石。
- ④第三紀堆積岩類：砂岩，泥岩などからなる第三紀の堆積岩。
- ⑤中生代堆積岩類：砂岩，頁岩，泥岩，礫岩などからなる中生代の堆積岩。

Table 4.1 Topographic and geologic characteristics of study basins
 表-4.1 対象流域の地形・地質

Geological category	No.	Dam	River	Drainage area			Area ratio for each basin slope division (%)		Basin geology
				(km ²)	S _{<20}	S ₂₀₋₄₀	S _{40<}		
Quaternary volcanic rocks	1-1*	沖浦ダム	岩木川	200.8	82	18	0	Pumice flow deposit(Tn~D)69%, Tuff(Tn)15%	
	1-2*	大倉ダム	名取川	88.5	68	32	0	Andesite(D)60%, Tuff(Tn)39%	
	1-3	中禅寺ダム	利根川	125.0	35	55	2	Andesite·Volcaniclastic material(D)36%, Rhyolite(Tn)21%	
	1-4*	品木ダム	利根川	30.9	100	0	0	Andesite·Volcaniclastic material(D)88%	
	1-5	緑川ダム	緑川	359.0	74	26	0	Tuff·Andesite(D)57%	
	1-6	芦川ダム	大分川	118.0	89	10	1	Tuff(D)49%, Volcaniclastic material·Andesite(Tn~D)29%	
	1-7	岩瀬ダム	大淀川	354.0	59	40	1	Pumice flow deposit(D)23%, Andesite(D)14%, Sandstone·Shale(M~Tn)31%	
Tertiary volcanic rocks	2-1*	豊平峽ダム	石狩川	134.0	98	2	0	Andesite(Tn~D)98%	
	2-2*	目屋ダム	岩木川	171.6	30	70	0	Tuff·Andesite(Tn)62%, Mudstone·Sandstone(Tn)27%	
	2-3*	石淵ダム	北上川	154.0	18	79	3	Tuff·Andesite(Tn)66%, Mudstone(Tn)29%	
	2-4*	鳴子ダム	北上川	210.1	44	56	0	Tuff·Andesite(Tn)68%, Andesite(D)3%	
	2-5*	釜房ダム	名取川	195.3	61	39	0	Tuff(Tn)42%, Andesite(D)17%	
	2-6*	金山ダム	北上川	126.9	62	38	0	Tuff·Andesite(Tn)69%, Andesite(D)25%	
	2-7*	森吉ダム	米代川	125.0	92	8	0	Andesite·Tuff(Tn)82%, Andesite(D)16%	
	2-8*	萩形ダム	米代川	86.7	14	86	0	Tuff(Tn)54%, Granite(M)46%	
	2-9*	素波里ダム	米代川	100.0	27	73	0	Tuff(Tn)88%, Andesite(D)4%	
	2-10*	菅瀬ダム	雄物川	172.0	50	50	0	Tuff·Andesite(Tn)93%	
	2-11*	鋸畑ダム	雄物川	320.3	75	25	0	Andesite·Tuff(Tn)54%, Andesite(D)36%	
	2-12*	早口ダム	米代川	48.5	40	60	0	Tuff·Andesite(Tn)79%, Andesite(D)21%	
	2-13*	高坂ダム	最上川	68.2	25	63	12	Andesite(Tn)61%, Mudstone(Tn)39%	
	2-14*	五十里ダム	利根川	271.2	6	91	3	Rhyolite·Tuff(Tn)59%, Granite(M)21%	
	2-15*	川俣ダム	利根川	179.4	5	91	1	Rhyolite·Tuff(Tn)41%, Andesite(D)9%, Sandstone·Slate(P)35%	
	2-16	西荒川	那珂川	24.8	35	65	0	Rhyolite·Tuff(Tn)33%, Andesite(D)29%, Quartz porphyry(M)38%	
	2-17*	相俣ダム	利根川	110.8	61	32	7	Rhyolite·Andesite·Tuff(Tn)71%, Mudstone(Tn)22%	
	2-18*	園原ダム	利根川	493.9	35	65	0	Rhyolite(Tn)42%, Andesite(D)39%	
	2-19	霧樺ダム	利根川	20.4	51	49	0	Andesite(Tn)75%, Andesite(D)25%	
	2-20*	笠堀ダム	信濃川	70.0	1	99	0	Tuff(Tn)57%, Rhyolite(Tn)27%	
	2-21*	犀川ダム	犀川	57.8	0	100	0	Tuff(Tn)93%, Rhyolite(M)7%	
	2-22*	内川ダム	犀川	34.5	0	100	0	Tuff(Tn)95%	
	2-23*	我谷ダム	大聖寺川	86.1	0	100	0	Tuff(Tn)88%, Rhyolite(M)7%	

Table 4.1 (Continued)
表-4.1 (続き)

Geological category	Dam No.	River	Drainage area (km ²)	Area ratio for each basin slope division (%)			Basin geology
				S<20	S ₂₀₋₄₀	S _{40<}	
Tertiary volcanic rocks	2-24	青蘆寺ダム	100.0	30	59	11	Tuff(Tn)46%, Granite(M)24%
	2-25*	引原ダム	48.2	59	41	0	Andesite-Rhyolite(M~Tn)87%, Andesite(D)11%
	2-26	生野ダム	49.0	70	30	1	Rhyolite-Andesite(M~Tn)92%
	2-27*	八戸ダム	164.0	21	76	1	Andesite-Rhyolite(M)75%, Granite(M)21%
	2-28*	浜田ダム	33.8	52	48	0	Tuff-Andesite(Tn~M)45%, Granite(M)28%
	2-29*	湯原ダム	255.0	82	18	0	Andesite(M)31%, Volcaniclastic material(D)14%, Granite(M)32%
	2-30	野呂川ダム	13.0	100	0	0	Rhyolite(M)100%
	2-31	佐渡川ダム	88.4	13	86	1	Rhyolite(M)80%, Sandstone(P)17%
	2-32	向道ダム	152.2	17	83	0	Rhyolite(M)71%, Crystalline schist(M)19%
	2-33	大坊川ダム	15.0	20	80	0	Rhyolite-Andesite(M)74%
	2-34	日向神ダム	84.3	42	57	0	Andesite(Tn)80%, Crystalline schist(P)19%
	2-35	油木ダム	32.6	74	26	0	Tuff-Andesite(Tn)68%, Granite(M)20%
	2-36	岩屋川内ダム	10.7	55	42	3	Basalt-Andesite(Tn~D)100%
	2-37	萱瀨ダム	18.9	3	51	46	Andesite-Tuff(Tn~D)98%
2-38	下釜ダム	185.0	86	13	0	Andesite(Tn~D)90%, Tuff(D)6%	
2-39	安岐ダム	16.5	100	0	0	Andesite(Tn)100%	
Granitic rocks	3-1*	旭川ダム	34.4	26	74	0	Granite(M)67%, Tuff(Tn)33%
	3-2*	木地山ダム	63.0	10	89	1	Granite(M)100%
	3-3*	荒沢ダム	162.0	9	80	11	Granite(M)52%, Volcaniclastic rock(Tn)39%
	3-4	花貫ダム	44.0	99	1	0	Granite(M)95%
	3-5*	矢木沢ダム	167.4	20	78	2	Granite(M)67%, Sandstone-Mudstone(M)28%
	3-6	草木ダム	254.0	6	90	4	Granite(M)53%, Sandstone-Slate(P)23%
	3-7*	三面ダム	305.7	5	95	0	Granite58%, Rhyolite(Tn)20%, Slate-Sandstone-Chert(P)14%
	3-8*	内の倉ダム	47.5	7	93	0	Granite99%
	3-9	広瀬ダム	76.6	0	98	2	Granite(Tn)92%
	3-10	松川ダム	60.0	1	97	2	Granite(M)98%
	3-11	君ヶ野ダム	80.0	6	90	4	Granite(M)72%, Gneiss24%
	3-12*	菅沢ダム	121.2	62	38	0	Granite(M)97%
	3-13*	布部ダム	70.0	37	63	0	Granite(M)93%
	3-14	土師川ダム	307.5	83	17	0	Granite(M)50%, Rhyolite(M)30%

Table 4.1 (Continued)
表-4.1 (続き)

Geological category	No.	Dam	River	Drainage area (km ²)	Area ratio for each basin slope division (%)			Basin geology
					S _{<20}	S ₂₀₋₄₀	S _{40<}	
Granitic rocks	3-15	棕梨ダム	沼田川	160.0	99	1	0	Granite(M)50%, Rhyolite(M)22%
	3-16	二級ダム	黒瀬川	232.0	96	4	0	Granite(M)50%, Rhyolite(M)12%
	3-17	小瀬川ダム	小瀬川	135.0	77	23	0	Granite(M)80%
	3-18	黒杭川ダム	黒杭川	10.0	98	2	0	Granite(M)67%, Gneiss33%
	3-19	長柄ダム	綾川	32.0	42	52	6	Granite(M)55%, Sandstone·Mudstone(M)36%
	3-20	玉川ダム	蒼社川	38.1	37	63	0	Granite(M)100%
	3-21	南畑ダム	那珂川	27.5	55	45	0	Granite(M)96%
	3-22	祝子ダム	五ヶ瀬川	45.2	3	71	26	Granite(P~Tn)56%, Sandstone·Slate(M)38%
Tertiary strata	4-1*	鱒石川ダム	鱒石川	46.0	29	71	0	Sandstone·Mudstone(Tn)100%
	4-2*	白岩川ダム	白岩川	24.0	15	85	0	Sandstone·Mudstone·Conglomerate(Tn)63%, Andesite(D)19%, Tuff(Tn)22%
	4-3*	榎花ダム	信濃川	250.0	16	67	17	Sandstone·Mudstone(Tn)57%, Tuff(Tn)23%, Andesite(D)20%
	5-1	二瀬ダム	荒川	170.0	22	78	0	Mudstone·Sandstone(M)89%
Mesozoic formations	5-2	猿谷ダム	新宮川	215.2	2	67	32	Sandstone·Mudstone(M)91%
	5-3	七川ダム	古座川	102.0	4	8	88	Sandstone·Mudstone(Tp)93%
	5-4	広川ダム	広川	12.6	0	29	71	Sandstone·Mudstone(M)95%
	5-5	二川ダム	有田川	228.8	4	19	77	Sandstone·Mudstone(M)53%, Sandstone·Mudstone(P)39%
	5-6	木屋川ダム	木屋川	84.1	62	38	0	Sandstone(M)71%, Andesite·Rhyolite(M)25%
	5-7	宮川内ダム	吉野川	23.1	2	92	6	Sandstone(M)93%
	5-8	内場ダム	香東川	28.0	8	66	25	Sandstone·Mudstone(M)96%
	5-9	五郷ダム	柞田川	12.4	7	89	3	Sandstone·Mudstone(M)100%
	5-10	須賀川ダム	須賀川	14.0	1	99	0	Sandstone·Shale(M)54%, Hornfels(M)45%
	5-11	永瀬ダム	物部川	295.2	2	81	17	Sandstone·Mudstone(M)53%, Sandstone·Mudstone(P)47%
	5-12	市房ダム	球磨川	157.8	22	74	3	Sandstone·Mudstone(M)57%, Granite(M)26%
	5-13	墨沢ダム	万匠川	18.2	59	41	0	Sandstone·Shale·Slate(M)100%
	5-14	北川ダム	五ヶ瀬川	178.0	80	19	0	Sandstone·Shale·Slate·Conglomerate(M)56%, Sandstone·Slate·Chert(P)31%
	5-15	渡川ダム	小丸川	81.0	0	97	2	Shale·Sandstone·Slate(M~Tp)98%
	5-16	綾北ダム	大淀川	148.3	2	86	12	Sandstone·Shale(M~Tp)97%
	5-17	綾南ダム	大淀川	87.0	5	91	2	Sandstone·Shale(M~Tp)91%
	5-18	立花ダム	一ツ瀬川	41.1	0	89	10	Sandstone·Shale(M~Tp)93%

Table 4.1 (Continued)
表-4.1 (続き)

Geological category	No.	Dam	River	Drainage area (km ²)	Area ratio for each basin slope division (%)			Basin geology
					S _{<20}	S ₂₀₋₄₀	S _{40<}	
Paleozoic formations	6-1	藤井川ダム	那珂川	70.0	100	0	0	Mudstone(P)44%, Sandstone(M)32%
	6-2	下久保ダム	利根川	322.9	50	50	0	Sandstone·Mudstone·Chert·Limestone(P)94%
	6-3*	胎内川ダム	胎内川	72.2	0	100	0	Slate·Sandstone·Chert(P)94%
	6-4*	九頭竜川ダム	九頭竜川	184.5	20	80	0	Sandstone·Slate(P)42%, Rhyolite(M)36%
	6-5*	広野ダム	九頭竜川	42.3	2	98	0	Sandstone·Slate(P)100%
	6-6*	笹生ダム	九頭竜川	70.7	10	90	0	Sandstone·Slate(P)89%
	6-7*	横山ダム	揖斐川	471.0	4	96	0	Sandstone·Mudstone·Tuff(P)87%
	6-8	宮川ダム	宮川	125.6	0	66	34	Chert·Limestone(P)94%
	6-9	日野川ダム	淀川	22.4	41	59	0	Slate(P)55%
	6-10*	大野ダム	由良川	354.0	28	72	0	Mudstone·Sandstone·Chert(P)98%
	6-11	厚東川ダム	厚東川	324.0	70	30	0	Limestone·Sandstone(P)53%, Sandstone(M~Tp)12%
	6-12	長安口ダム	那賀川	494.3	2	90	8	Sandstone·Mudstone(P)56%, Sandstone·Mudstone(M)44%
	6-13	鹿野川ダム	脇川	455.6	21	79	0	Slate·Sandstone(P)86%
	6-14	鏡ダム	鏡川	80.8	15	79	6	Sandstone·Mudstone(P)52%
	6-15	ます淵ダム	紫川	18.5	37	63	0	Slate·Sandstone(P)84%, Metagabbro(P)12%
	6-16	氷川ダム	氷川	57.4	22	74	4	Sandstone·Mudstone(P)73%, Conglomerate·Sandstone·Mudstone(M)25%
Metamorphic rocks	7-1	高柴ダム	鮫川	412.4	9	82	9	Crystalline schist(P·M)65%, Granite(M)22%
	7-2	水沼ダム	花園川	37.0	95	5	0	Crystalline schist(M)47%, Granite(M)44%
	7-3*	室牧ダム	神通川	85.2	20	80	0	Gneiss(P)53%, Andesite·Tuff(Tn)22%
	7-4*	利賀川ダム	庄川	38.0	47	53	0	Gneiss(P)100%
	7-5	新豊根ダム	天竜川	136.3	69	31	0	Crystalline schist(P)49%, Granite30%
	7-6*	佐治川ダム	千代川	21.4	0	100	0	Phyllite·Crystalline schist(P)50%, Rhyolite(Tn)43%
	7-7	川上ダム	富田川	22.2	37	63	0	Crystalline schist(P)82%
	7-8	柳瀬ダム	吉野川	144.6	11	87	2	Crystalline schist(P)95%
	7-9	黒瀬ダム	加茂川	100.6	7	85	8	Crystalline schist(P)78%, Conglomerate·Sandstone·Shale(M~Tp)16%
	7-10	早明浦ダム	吉野川	417.0	4	84	12	Crystalline schist(P)100%
	7-11	陣屋ダム	遠賀川	12.6	34	66	0	Crystalline schist(P)79%, Granite(M)21%
	7-12	力丸ダム	遠賀川	34.1	58	42	0	Crystalline schist(P)49%, Slate·Sandstone(P)28%, Serpentine(P)18%
	7-13	神浦ダム	神浦川	16.5	55	45	0	Crystalline schist(P)97%

*: Snowy basin.

S_{<20}: Area ratio of slope below 20°, %. S₂₀₋₄₀: Area ratio of slope within from 20° to 40°, %. S_{40<}: Area ratio of slope above 40°, %.
(P): Paleozoic, (M): Mesozoic, (Tp): Paleogene, (Tn): Neogene, (D): Diluvium.

⑥古生代堆積岩類：砂岩，泥岩，粘板岩，チャート，石灰岩などからなる古生代の堆積岩。

⑦変成岩類：結晶片岩，片麻岩，千枚岩などの岩石。

対象流域の地質判読には，経済企画庁総合開発局（国土庁土地局）が日本全国にわたり同一の基準で作成して都道府県別に編集した縮尺20万分の1土地分類図内の表層地質図を利用し，流域内に占める同一地質の面積率を求めた。その結果は Table 4.1 内に示される。対象流域の地質判読により代表地質を決定し，上記の7地質区分に分類した。Fig. 4.2 はその結果を示したものである。

Fig. 4.2 によると，第四紀火山岩類および第三紀火山岩類に分類された流域は各地の火山地帯に位置している。東北日本を中心に広く分布している緑色凝灰岩は堆積岩に分類されるが，その構成がほぼ火山性の岩石を示すことから，この緑色凝灰岩からなる流域は第三紀火山岩類の流域に分類した。花崗岩類に分類された流域は日本各地に分布している。その岩石の貫入時代は中生代以前から新第三紀まで広い時代にわたっており，地層の風化度合はさまざまであると思われる。第三紀堆積岩類に分類された流域は少なく，積雪地帯にある3流域のみであった。中生代堆積岩類に分類された流域はほとんど外帯に分布しており，すべて非積雪地帯の流域である。古生代堆積岩類に分類された流域は古生層の非変成帯（秩父帯・丹波帯・足尾帯など）に分布している。変成岩類に分類された流域は古生層の変成帯（三郡帯・領家帯・三波川帯・飛騨帯など）に分布しており，地質

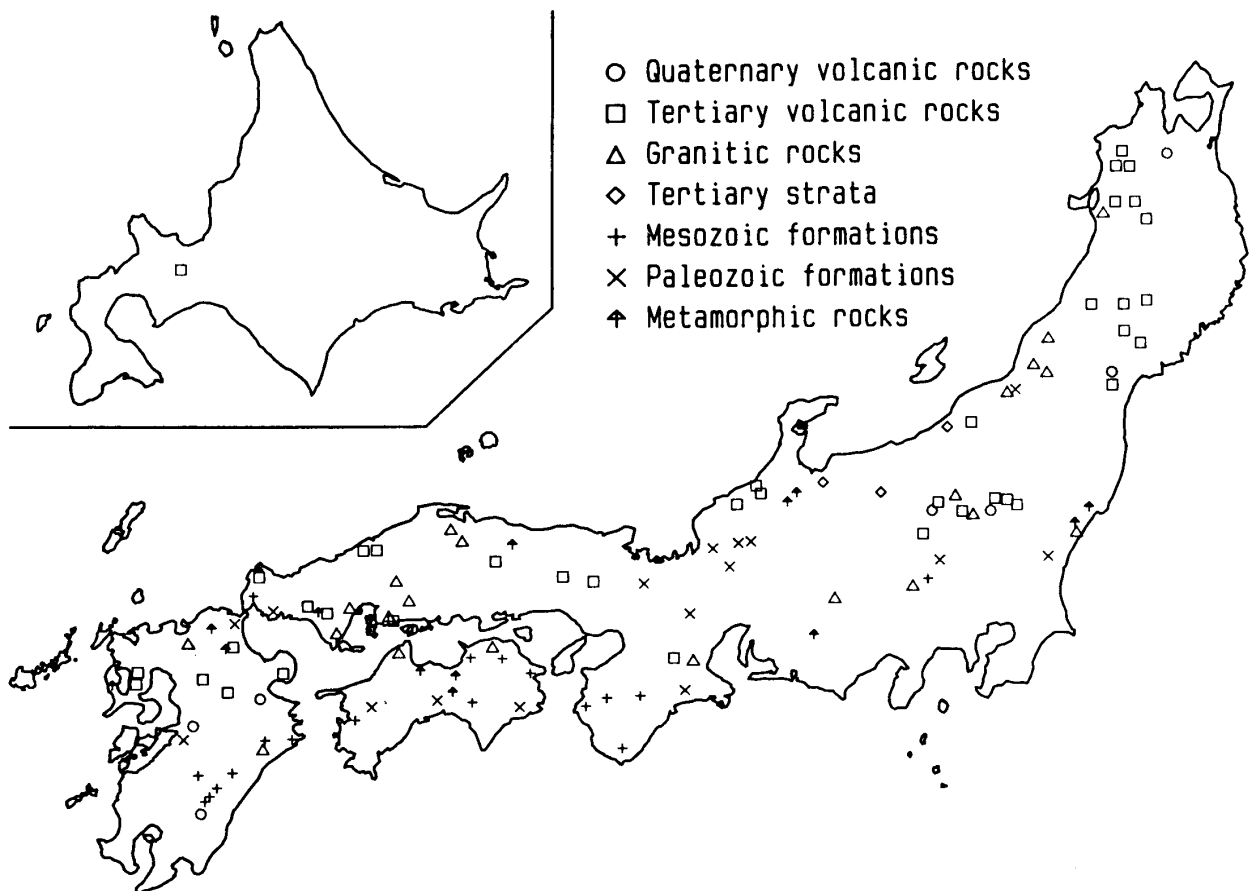


Fig. 4.2 Main geology of basins.

図-4.2 流域の代表地質.

構造がとくに複雑で過去に大規模な地殻変動のあったところである（藤本，1977）。

3. 流量および降水量

流量および降水量の資料は、建設省河川局が編集した多目的ダム管理年報（1975～1979年）によった。多目的ダム管理年報には9時を日界とした日単位の貯水位、流入量、放流量などが記載されている。各値は日平均値であるが、観測回数はダムにより異なり、毎時観測から1日に4～1回の観測とさまざまである。したがって、観測資料の精度はダムごとに異なるが、この問題は流域条件が流出状況に及ぼす影響をマクロ的に把握する目的からすれば無視され得ると考える。流入量は貯水池の水位変化量と放流量（貯水池からの直接放流量や発電の取水量）により算出される。この日流入量を対象河川のダム地点における日流出量とした。また、管理年報には原則として流域全体の降水状態を代表する観測所の日単位降水データが記載されている。降水量の資料にはこのなかの日降水量を用いた。

解析対象流域の年降水量と年流出量の1975～1979年の5年間平均値を算出した。その結果はTable 4.2に示される。非積雪地帯70流域と積雪地帯48流域のそれぞれの年降水量の平均はともに2003mm、それぞれの年流出量の平均は1530mmと2388mmであった。また、対象流域の年流出率の5年間平均値を求め（Table 4.2）、非積雪地帯70流域と積雪地帯48流域の平均を求めるとそれぞれ約73%と約121%であった。積雪地帯の年流出率が非常に高いのは流域降水量の測定不足、とくに冬期の降雪量の測定不足が原因していると思われる。本章のような流域地質と流況との関係を明らかにすることを目的とした解析では非積雪地帯流域と積雪地帯流域を同等に扱うには雪が流況に及ぼす影響を取り除く工夫が必要である。

第2節 流域地質と流況特性

本節では、前節で示した流域地質分類別の流況曲線の特徴を把握する。本論は流域地質が流況に及ぼす影響を把握することが目的であることから、ここでは雪が流況に及ぼす影響を排除するために非積雪地帯70流域を解析対象とする。非積雪地帯流域で第三紀堆積岩類に分類される流域は解析流域中にはなかった。非積雪地帯の70流域は、流域面積が10～494km²の範囲にあり、平均121km²である。

1. 年降水量と日流出量

1水年の日降水量および日流出量（水高のmm/day単位で表す）を順序統計量の形に整理してプロットするとFig. 4.3に示されるような雨量継続時間曲線および流量継続時間曲線（流況曲線）が得られる。流況曲線上の1, 35, 95, 185, 275, 355番目の日流出量（mm/day）を各流域について求め、1975～1979年の5年間の平均値を算出した（Table 4.2）。95, 185, 275, 355番目の日流出量はそれぞれ豊水量、平水量、低水量、渇水量と呼ばれている。

5年間平均の年降水量とそれぞれの日流出量の関係を調べた結果、降水量の多い流域ほど日流出量は大きくなる傾向が認められた。これらの関係の例として、年降水量 P 豊水量 D_{95} および渇水量 D_{355} の関係を Fig. 4.4 に地質分類別に示す。実線および破線はそれぞれの関係の平均線を表している。

年降水量 P と豊水量 D_{95} の関係の平均線を地質間で比較すると、 P に対する D_{95} の変化は、中・古生代堆積岩類と花崗岩類の流域で大きく、第四紀・第三紀火山岩類と変成岩類の流域で小さい。Table 4.3 は、年降水量1500mm, 2000mm, 2500mm および3000mm に対する豊水量を平均線から

Table 4.2 Hydrologic characteristics of study basins
表-4.2 年間データから求めた流況因子

Geological category	No.	Dam	D ₁	D ₃₅	D ₉₅	D ₁₈₅	D ₂₇₅	D ₃₅₅	D _M	D ₉₅₋₃₅₅	Q	P	R _{Q/P}	U	C	R _{U/C}	R _{C/Q}	R _{U/P}	R _{C/P}	
Quaternary volcanic rocks	1-1*	沖浦ダム	37.7	10.4	5.3	3.5	2.6	1.9	4.9	3.4	2.8	1777.5	1414.2	126.8	478.6	713.8	26.9	40.1	34.2	50.9
	1-2*	大倉ダム	43.8	8.9	4.4	2.7	1.9	1.2	4.2	3.2	3.6	1529.4	1764.6	87.6	485.0	430.4	32.0	28.1	28.1	24.5
	1-3	中禅寺ダム	24.4	5.6	4.3	3.3	2.5	1.5	3.7	2.8	2.8	1369.1	1913.2	72.4	236.5	723.0	17.3	52.8	12.5	38.3
	1-4*	品木ダム	15.5	5.8	4.7	3.9	3.2	2.9	4.2	1.8	1.6	1539.8	1542.7	101.2	176.5	898.3	11.4	58.3	11.6	59.1
	1-5	緑川ダム	62.5	7.8	4.6	3.3	2.4	1.6	4.7	3.0	2.9	1727.9	2272.8	77.5	501.8	706.6	29.0	41.7	22.3	32.7
	1-6	芹川ダム	38.1	5.7	3.7	2.9	2.3	1.4	3.7	2.3	3.0	1351.2	1712.0	79.2	307.8	724.6	22.2	54.4	17.5	43.2
	1-7	岩瀬ダム	68.6	7.9	5.0	4.0	3.3	2.4	5.4	2.7	2.2	1954.0	2602.8	75.6	475.3	905.9	24.1	46.6	18.2	35.4
Tertiary volcanic rocks	2-1*	豊平峡ダム	41.7	12.9	4.7	2.6	1.7	1.3	4.9	3.5	3.8	1792.8	1027.2	177.2	700.8	641.4	38.9	35.7	69.4	63.4
	2-2*	目屋ダム	114.9	24.0	8.1	3.5	2.0	1.0	8.3	7.1	9.1	3042.6	1573.8	193.8	1412.1	765.2	46.6	24.9	90.5	48.1
	2-3*	石淵ダム	54.4	17.6	7.3	3.5	2.0	1.2	6.6	6.1	6.3	2411.3	1653.8	150.1	954.5	755.5	39.9	31.3	60.5	46.8
	2-4*	鳴子ダム	36.5	9.9	5.4	3.4	2.6	1.8	4.9	3.6	3.1	1806.5	1933.8	94.8	509.2	605.1	28.3	33.6	27.1	31.8
	2-5*	釜房ダム	29.5	6.6	3.6	2.3	1.6	0.9	3.2	2.7	3.9	1185.5	1250.8	95.7	351.0	508.5	29.7	43.2	28.3	41.5
	2-6*	花山ダム	40.8	8.5	4.4	2.9	2.1	1.4	4.2	3.0	3.2	1535.1	1903.8	93.3	445.1	489.6	29.0	31.9	26.9	33.6
	2-7*	森吉ダム	54.0	15.0	6.8	3.2	1.9	1.0	6.0	5.8	7.4	2175.4	2027.4	107.9	862.9	437.7	40.0	19.6	42.9	21.8
	2-8*	萩形ダム	71.0	18.2	9.1	4.4	2.8	1.7	7.8	7.3	5.4	2836.2	2463.6	127.5	1038.8	673.9	36.7	23.8	47.0	30.7
	2-9*	素波里ダム	115.6	21.5	9.5	4.3	2.5	1.3	8.7	8.1	7.5	3174.5	2388.4	134.5	1336.7	769.4	42.2	24.1	56.7	32.7
	2-10*	皆瀬ダム	51.9	14.1	5.5	3.0	2.0	1.1	5.6	4.5	5.3	2053.8	1205.3	188.1	792.1	692.4	39.0	33.5	75.2	65.9
	2-11*	鋸畑ダム	53.0	16.2	7.3	3.8	2.3	1.4	6.6	5.9	5.1	2392.2	2449.4	98.2	877.0	519.1	37.0	21.4	36.5	21.0
	2-12*	早口ダム	105.8	19.0	8.2	4.0	2.4	1.5	7.7	6.6	5.4	2812.2	2237.0	127.5	1128.3	764.1	40.5	26.9	51.9	34.1
	2-13*	高坂ダム	113.2	21.8	9.3	4.5	2.5	1.4	8.6	7.9	6.8	3126.3	2846.0	110.3	1258.0	609.5	40.4	19.4	44.8	21.3
	2-14*	五十里ダム	54.1	5.6	3.1	1.8	1.2	0.5	2.8	2.6	6.7	1031.4	1480.4	70.2	344.9	388.3	33.7	37.3	23.5	26.5
	2-15*	川俣ダム	36.1	6.2	3.7	2.3	1.4	1.0	3.1	2.7	3.8	1148.0	1224.0	94.4	328.2	490.1	28.7	42.6	27.2	40.1
	2-16	西荒川	52.9	5.5	2.6	1.5	1.1	0.7	2.8	2.0	4.0	1024.6	1591.6	63.7	394.8	350.9	37.9	34.6	24.4	21.9
	2-17*	相俣ダム	26.8	9.3	5.1	2.8	1.7	1.0	4.2	4.1	5.5	1546.2	1330.6	116.5	501.3	574.7	32.5	37.2	38.0	43.1
	2-18*	圃原ダム	30.4	4.6	2.4	1.1	0.6	0.4	2.0	2.0	5.8	656.4	1289.2	52.0	254.9	185.2	38.8	28.2	20.2	14.8
	2-19	霧積ダム	42.3	7.3	3.8	2.2	1.5	1.2	3.4	2.6	3.1	1252.7	1473.3	84.5	399.0	518.2	31.4	41.8	26.6	35.2
	2-20*	笠堀ダム	123.0	31.5	16.2	8.2	4.5	1.9	13.2	14.3	10.0	4803.5	2827.2	171.6	1715.9	1440.8	35.8	29.9	62.2	51.0
	2-21*	犀川ダム	96.6	23.0	12.0	6.7	3.9	2.1	10.4	9.9	6.2	3794.3	3311.4	116.7	1288.9	1110.4	34.1	29.2	40.1	34.0
	2-22*	内川ダム	76.3	20.2	10.9	5.8	3.5	1.8	9.1	9.1	6.4	3317.2	2911.6	114.7	1116.4	957.5	33.9	28.6	39.1	32.7
	2-23*	我谷ダム	69.0	17.8	9.2	5.1	3.4	1.9	8.0	7.3	5.7	2335.4	2950.4	100.2	973.1	825.9	33.4	27.9	33.7	27.8
	2-24	青蓮寺ダム	66.4	4.9	2.6	1.6	1.1	0.7	2.8	1.9	4.0	1028.1	1296.2	77.8	381.1	347.2	35.9	35.5	28.2	27.2
	2-25*	引原ダム	98.2	13.7	7.6	4.7	3.3	2.1	7.2	5.5	3.7	2632.9	2285.0	115.1	831.9	985.2	31.4	38.1	36.1	43.8

Table 4.2 (Continued)
表-4.2 (続き)

Geological category	No.	Dam	D ₁	D ₃₅	D ₉₅	D ₁₈₅	D ₂₇₅	D ₃₅₅	D _M	D ₉₅₋₃₅₅	D _{95/355}	Q	P	R _{CP}	U	C	R _{U/a}	R _{C/a}	R _{U/P}	R _{C/P}
Tertiary volcanic rocks	2-26	生野ダム	107.7	7.0	3.3	1.8	1.2	0.7	3.7	2.6	4.6	1346.4	1782.8	75.1	576.6	356.7	42.1	27.8	31.7	20.7
	2-27*	八戸ダム	38.4	6.5	3.6	2.1	1.3	0.7	3.2	2.9	5.1	1180.8	1621.3	73.0	400.3	407.1	33.9	34.2	24.7	25.1
	2-28*	浜田ダム	35.1	5.4	3.2	2.1	1.3	0.6	2.9	2.6	5.9	1061.9	1647.4	64.5	329.2	397.3	31.3	36.9	20.0	24.3
	2-29*	湯原ダム	54.6	7.3	4.4	2.8	2.0	1.1	4.0	3.3	4.2	1467.2	1586.4	93.1	428.7	574.6	29.4	39.5	27.4	36.7
	2-30	野呂川ダム	74.1	6.1	3.9	2.8	2.3	1.1	3.9	2.7	17.0	1429.9	1310.7	106.8	415.5	698.7	27.1	51.4	29.5	54.2
	2-31	佐渡川ダム	60.7	7.6	3.5	1.8	1.1	0.6	3.6	3.0	7.3	1326.9	1847.2	70.9	555.2	389.4	41.6	29.6	29.6	20.9
	2-32	向道ダム	77.9	9.0	4.2	2.3	1.4	0.8	4.4	3.4	6.0	1614.1	1910.1	83.8	669.1	538.7	41.1	33.8	34.4	28.3
	2-33	大坊川ダム	76.1	8.2	4.0	2.5	1.8	1.2	4.2	2.8	3.4	1550.8	1604.8	96.6	546.0	593.7	35.3	38.4	34.0	37.2
	2-34	日向神ダム	108.7	8.3	3.9	2.1	1.3	0.8	4.6	3.1	5.2	1681.8	2378.4	68.9	758.8	449.6	43.1	28.8	30.2	19.3
	2-35	油木ダム	44.5	6.2	3.3	2.0	1.4	0.8	3.3	2.6	4.3	1201.0	1951.6	60.4	421.3	412.3	34.2	35.5	20.9	21.2
	2-36	岩屋川内ダム	135.9	7.5	3.9	2.3	1.6	0.9	4.3	2.9	4.1	1587.0	2232.5	69.2	632.2	518.5	39.2	33.7	27.3	23.0
2-37	萱瀬ダム	147.4	9.4	4.0	2.1	1.3	0.9	5.0	3.1	4.5	1810.1	2112.8	84.4	847.8	477.3	46.4	27.0	39.3	22.6	
2-38	下笠ダム	122.5	10.6	5.4	3.1	2.2	1.4	6.0	4.0	3.9	2174.6	2733.4	78.7	868.3	668.1	38.6	32.1	30.6	25.0	
2-39	安岐ダム	79.8	4.4	2.2	1.3	0.9	0.3	2.6	1.8	7.0	959.1	1503.8	62.5	421.7	299.1	44.3	31.4	26.8	20.4	
Granitic rocks	3-1*	旭川ダム	75.4	16.5	9.7	6.6	5.3	3.5	9.2	6.2	2.9	3351.5	2152.8	156.6	843.3	1443.8	25.0	43.1	39.2	67.8
	3-2*	木地山ダム	59.0	22.9	9.2	5.4	3.6	2.4	9.0	6.8	3.8	3304.4	1751.2	193.0	1164.9	1443.3	35.4	43.6	69.5	83.7
	3-3*	荒沢ダム	82.9	27.1	12.5	6.2	3.6	2.0	11.0	10.5	6.8	4011.1	2449.2	165.1	1509.5	1031.0	37.8	25.6	63.1	41.9
	3-4	花貫ダム	24.5	1.9	0.8	0.4	0.3	0.1	1.0	0.7	6.6	352.1	1566.0	21.8	170.9	74.1	45.6	23.6	10.3	4.9
	3-5*	矢木沢ダム	69.1	21.1	9.7	4.0	2.4	1.4	7.9	8.3	7.2	2890.6	1560.2	186.2	1177.1	822.0	40.4	28.8	76.1	52.9
	3-6	草木ダム	93.0	6.9	4.0	2.4	1.3	0.9	3.6	3.1	4.7	1331.0	1476.3	90.0	453.1	528.7	33.5	40.2	30.2	36.1
	3-7*	三面ダム	87.9	21.0	12.0	6.5	4.0	2.2	9.8	9.8	5.8	3572.1	2680.6	133.9	1155.3	1071.5	32.6	29.9	43.8	39.9
	3-8*	内の倉ダム	88.8	22.9	13.2	8.1	5.4	3.5	11.4	9.7	4.0	4156.2	2141.2	206.7	1173.7	1771.9	28.2	42.6	60.1	89.2
	3-9	広瀬ダム	49.8	6.0	3.8	2.6	1.8	1.3	3.5	2.4	2.9	1283.7	1371.7	93.4	338.0	596.5	25.9	46.8	24.3	43.6
	3-10	松川ダム	43.2	8.7	3.6	0.8	0.1	0.0	3.2	3.6	96.4	1158.5	1918.0	59.8	653.4	146.9	57.1	11.8	33.9	7.3
	3-11	君ヶ野ダム	92.8	4.6	2.0	0.7	0.2	0.1	2.4	1.9	34.6	879.8	1682.4	49.2	495.6	118.7	55.3	14.8	27.6	6.9
	3-12*	菅沢ダム	27.2	2.7	1.5	1.0	0.8	0.4	1.5	1.2	5.0	548.1	1599.0	34.0	165.5	158.8	29.9	23.6	10.2	10.1
	3-13*	布部ダム	35.8	6.5	3.9	2.7	2.0	1.1	3.6	2.8	3.5	1311.3	1791.2	73.4	333.2	490.5	25.6	37.5	18.8	27.6
	3-14	土師川ダム	42.1	6.1	3.6	2.3	1.6	1.0	3.3	2.6	3.8	1222.9	1713.7	71.3	360.9	450.3	29.7	36.7	21.1	26.2
	3-15	椋梨ダム	33.6	3.8	2.0	1.3	0.9	0.5	2.1	1.5	8.9	749.1	1271.4	57.3	259.7	291.7	34.2	40.0	19.6	22.7
	3-16	二級ダム	48.4	3.2	1.4	0.8	0.5	0.2	1.7	1.3	6.7	621.4	1472.6	40.1	282.2	165.8	44.2	28.6	18.0	11.0
	3-17	小瀬川ダム	45.9	3.6	1.4	0.8	0.6	0.4	1.9	1.0	3.5	712.2	1837.6	38.0	330.0	163.4	45.2	24.5	17.4	9.0
	3-18	黒杭川ダム	36.1	5.0	2.3	1.1	0.7	0.4	2.3	2.0	7.4	834.1	1713.8	45.9	347.2	273.7	41.0	34.2	19.0	15.3

Table 4.2 (Continued)
表-4.2 (続き)

Geological category	No.	Dam	D ₁	D ₃₅	D ₉₅	D ₁₉₅	D ₂₇₅	D ₃₅₅	D _M	D ₉₅₋₃₅₅	Q	P	R _{αP}	U	C	R _{Uα}	R _{C/α}	R _{UP}	R _{CP}	
Granitic rocks	3-19	長柄ダム	88.8	3.0	1.5	0.8	0.5	0.2	1.8	1.3	10.0	672.0	1084.6	59.5	315.5	169.6	45.2	27.9	27.6	15.8
	3-20	玉川ダム	69.7	6.2	4.1	2.7	1.9	1.4	4.0	2.7	3.1	1444.0	1857.8	76.3	420.9	626.1	27.3	45.9	21.1	34.7
	3-21	南畑ダム	68.5	10.7	6.4	4.0	2.7	1.8	5.8	4.5	3.5	2132.3	2670.0	78.9	632.1	894.0	29.2	42.4	23.1	33.5
	3-22	祝子ダム	161.3	17.5	7.8	4.1	2.7	1.6	8.7	6.2	5.0	3165.1	3262.8	97.0	1373.6	935.6	43.6	29.5	42.2	28.6
Tertiary strata	4-1*	鱒石川ダム	74.1	19.2	8.3	3.7	1.7	0.2	7.1	8.0	52.8	2586.1	2500.0	103.0	1115.7	414.0	43.6	15.6	44.8	16.2
	4-2*	白岩川ダム	64.1	15.6	8.4	4.9	2.9	1.1	7.2	7.3	9.8	2640.7	2225.4	119.4	875.8	824.3	33.4	31.0	40.0	37.1
	4-3*	裾花ダム	33.9	8.3	3.9	2.0	1.3	0.9	3.6	3.0	4.6	1308.1	910.6	145.8	477.8	536.7	36.6	41.0	53.8	59.5
	5-1	二瀬ダム	40.0	4.2	2.3	1.2	0.7	0.4	2.1	1.9	6.5	773.3	1200.3	63.4	297.5	253.9	36.6	34.7	24.2	21.1
Mesozoic formations	5-2	猿谷ダム	79.9	6.0	3.3	2.0	1.3	0.7	3.3	2.6	4.8	1218.9	1915.8	63.1	437.2	343.8	34.8	29.5	22.1	18.5
	5-3	七川ダム	178.8	18.9	6.1	2.9	1.8	1.0	8.0	5.1	5.9	2909.5	3555.4	81.3	1479.7	651.8	50.2	23.4	40.8	18.9
	5-4	広川ダム	58.0	5.6	2.5	1.5	0.9	0.2	3.0	2.3	8.3	1079.6	1830.5	57.0	482.5	315.4	43.5	30.3	25.1	17.0
	5-5	二川ダム	85.0	6.5	3.5	2.1	1.4	0.8	3.6	2.7	4.4	1325.5	1770.0	73.9	488.0	454.6	36.6	35.0	27.0	25.8
	5-6	木屋川ダム	54.1	6.3	2.9	1.7	1.0	0.5	3.2	2.4	6.4	1183.4	1756.4	67.0	497.5	331.8	42.1	28.0	28.3	18.7
	5-7	宮川内ダム	206.1	2.6	1.2	0.8	0.5	0.2	2.5	1.0	8.9	929.1	1439.6	58.4	585.9	97.0	55.9	17.3	35.0	7.8
	5-8	内場ダム	126.5	2.7	1.5	0.9	0.6	0.3	2.1	1.2	6.4	761.7	1511.8	49.3	369.3	145.6	45.9	22.1	23.1	10.5
	5-9	五郷ダム	67.6	2.9	1.4	0.8	0.4	0.2	1.8	1.2	8.5	667.1	1374.4	46.3	330.9	119.3	46.0	21.3	22.2	9.0
	5-10	須賀川ダム	84.3	4.9	2.6	1.4	0.9	0.4	3.2	2.1	6.2	1164.6	1555.0	72.1	557.6	284.4	44.9	27.1	33.4	18.6
	5-11	永瀬ダム	140.7	13.5	7.2	4.4	2.9	1.6	7.6	5.6	4.7	2759.2	2755.6	99.1	1023.8	1054.2	36.8	38.8	36.5	38.2
	5-12	市房ダム	103.4	11.2	6.0	3.6	2.5	1.5	6.1	4.4	4.0	2244.8	2393.0	93.4	815.7	803.3	35.9	36.5	33.5	34.0
	5-13	黒沢ダム	79.8	7.3	3.6	2.1	1.5	0.6	4.0	3.1	6.6	1449.6	2572.5	55.8	574.6	482.1	39.5	33.6	22.1	18.7
	5-14	北川ダム	94.2	10.2	5.1	2.7	1.7	1.0	5.2	4.2	5.6	1891.3	2442.4	77.3	765.6	620.6	40.5	33.0	31.2	25.4
	5-15	渡川ダム	145.4	18.9	9.8	5.1	3.0	1.2	9.4	8.6	10.2	3415.1	2995.6	116.7	1339.5	1200.9	39.4	35.0	45.1	41.6
	5-16	綾北ダム	114.1	11.3	5.6	3.1	1.8	1.0	5.9	4.6	6.2	2169.3	3097.0	69.8	910.3	601.3	41.8	28.0	29.1	19.6
	5-17	綾南ダム	122.7	11.0	5.6	3.0	1.7	1.0	5.8	4.6	6.3	2102.8	2811.4	75.3	873.0	628.1	41.5	30.1	31.3	22.7
	5-18	立花ダム	144.2	24.6	11.7	5.8	3.1	1.4	11.0	10.2	8.4	4033.3	3297.2	122.6	1668.0	1286.1	41.4	31.9	50.7	39.1
	Paleozoic formations	6-1	藤井川ダム	57.8	3.9	1.7	1.0	0.6	0.3	2.0	1.4	5.8	720.6	1204.0	59.5	314.8	214.5	42.0	30.9	25.8
6-2		下久保ダム	21.3	3.0	1.6	0.9	0.5	0.3	1.5	1.3	5.6	536.9	929.4	57.1	201.4	197.5	36.5	37.8	21.1	21.3
6-3*		胎内川ダム	111.4	21.0	7.6	2.7	1.5	0.9	7.5	6.6	8.7	2748.1	2771.0	102.1	1353.8	327.3	48.9	11.9	51.0	12.1
6-4*		九頭竜川ダム	135.7	24.2	13.1	7.5	4.8	2.5	11.4	10.6	5.2	4169.4	2252.8	185.7	1354.3	1659.7	32.5	39.9	60.4	74.0
6-5*		広野ダム	59.4	14.3	7.3	4.3	2.4	0.9	6.3	6.4	8.4	2308.2	2636.8	88.1	779.2	608.8	34.1	26.1	30.3	22.7

Table 4.2 (Continued)
表-4.2 (続き)

Geological category	No.	Dam	D_1	D_{35}	D_{95}	D_{185}	D_{275}	D_{355}	D_M	D_{95-355}	D_{95-355}	Q	P	$R_{Q/P}$	U	C	$R_{U/C}$	$R_{C/Q}$	$R_{U/P}$	$R_{C/P}$	
Paleozoic formations	6-6*	笹生ダム	122.0	17.8	8.6	5.0	3.1	1.4	8.2	7.2	6.3	3010.9	2386.4	127.3	1082.8	862.8	36.0	28.8	45.9	36.8	
	6-7*	横山ダム	87.2	12.4	5.4	2.4	1.5	1.0	5.1	4.4	5.4	1868.5	2945.0	63.3	785.2	354.8	42.2	19.2	26.7	12.0	
	6-8	宮川ダム	343.2	16.2	7.5	4.0	2.5	1.2	10.3	6.3	6.4	3765.8	3626.6	103.3	1910.9	940.2	49.5	26.3	51.4	26.9	
	6-9	日野川ダム	48.6	3.5	1.6	0.8	0.3	0.0	1.9	1.6	0.0	692.6	1415.8	46.9	352.8	140.1	50.0	21.3	23.7	9.7	
	6-10*	大野ダム	34.8	7.8	4.3	2.7	1.7	0.9	3.8	3.4	5.1	1393.9	1524.2	91.5	428.4	531.7	31.2	37.6	28.4	34.6	
	6-11	厚東川ダム	49.5	5.6	2.7	1.6	1.0	0.6	2.8	2.1	5.0	1038.9	1557.6	66.6	399.2	376.3	38.2	36.8	25.4	24.5	
	6-12	長安口ダム	202.6	13.2	7.2	4.1	2.4	0.9	7.4	6.3	8.0	2938.3	2895.8	100.8	1163.4	1064.6	38.9	37.1	39.4	37.2	
	6-13	鹿野川ダム	64.7	5.9	3.0	1.9	1.3	0.8	3.4	2.1	3.7	1243.9	1759.0	69.6	479.7	365.2	37.4	30.6	26.3	21.1	
	6-14	鏡ダム	250.6	15.5	7.5	4.3	2.8	1.4	8.4	6.1	6.0	3084.3	3551.0	86.7	1295.8	938.8	42.2	30.7	36.2	26.9	
	6-15	ます淵ダム	68.5	6.8	3.2	1.8	1.2	0.7	3.5	2.5	4.6	1285.9	1959.0	64.5	528.3	376.7	39.5	30.7	25.8	19.6	
	6-16	水川ダム	88.4	7.6	3.9	2.6	2.0	1.3	4.6	2.6	2.9	1662.4	2079.8	80.1	605.8	564.8	36.6	34.1	29.3	27.3	
	Metamorphic rocks	7-1	高柴ダム	37.0	3.4	2.1	1.4	0.9	0.6	2.0	1.5	3.5	722.1	1081.4	65.9	213.6	326.0	28.6	46.2	19.3	30.1
		7-2	水沼ダム	35.9	5.4	3.6	2.6	2.1	1.7	3.4	2.0	2.2	1235.4	1654.6	74.5	257.0	662.4	19.8	55.0	14.8	40.9
		7-3*	室牧ダム	54.6	20.9	11.6	7.4	5.2	2.7	9.9	8.9	4.4	3617.3	1967.3	155.4	968.6	1560.2	27.1	42.9	51.0	79.4
		7-4*	利賀川ダム	75.0	18.0	7.3	4.8	3.6	2.4	7.9	4.9	3.1	2882.4	1480.5	202.9	977.5	1322.8	33.9	46.0	71.7	90.9
		7-5	新豊根ダム	86.4	8.3	4.2	2.4	1.4	0.8	4.6	3.4	5.4	1673.8	2593.0	64.0	694.1	517.0	41.6	30.8	26.6	19.8
7-6*		佐治川ダム	69.7	12.4	6.4	3.8	2.6	1.3	5.9	5.1	5.3	2170.5	2292.2	94.8	724.7	671.5	33.4	31.3	31.7	29.7	
7-7		川上ダム	57.8	6.6	3.2	2.0	1.4	0.9	3.5	2.3	3.6	1294.5	1870.2	68.3	480.8	489.6	36.6	38.3	25.0	26.2	
7-8		柳瀬ダム	221.2	7.7	4.2	2.6	1.7	0.9	5.8	3.3	4.5	2114.4	2024.4	101.8	1017.1	491.5	45.5	25.2	47.0	25.1	
7-9		黒瀬ダム	209.8	6.1	2.1	1.0	0.7	0.5	4.1	1.6	5.0	1500.4	1658.2	86.9	917.1	187.5	58.6	15.0	51.7	12.3	
7-10		早明浦ダム	211.1	9.2	4.3	2.6	1.5	0.5	5.9	3.9	14.0	2442.2	2794.0	85.2	1227.2	602.0	48.4	26.4	41.9	21.8	
7-11		陣屋ダム	41.2	7.3	4.0	2.6	1.7	1.1	3.7	2.9	3.7	1363.0	2273.3	58.4	424.9	500.5	30.0	37.8	17.9	21.8	
7-12		力丸ダム	79.0	6.3	3.0	1.8	1.3	0.7	3.3	2.3	4.6	1206.0	1928.0	61.1	470.8	378.8	37.9	32.4	23.6	19.5	
7-13		神浦ダム	135.9	7.8	3.3	2.1	1.3	0.7	4.2	2.7	5.8	1526.0	1924.8	81.9	673.1	461.7	43.0	31.4	34.5	27.0	

D_1 : 1-day discharge (Annual flood), mm/day .
 D_{35} : 35-day discharge, mm/day .
 D_{95} : 95-day discharge (Plentiful-water discharge), mm/day .
 D_{185} : 185-day discharge (Ordinary-water discharge), mm/day .
 D_{275} : 275-day discharge (Low-water discharge), mm/day .
 D_{355} : 355-day discharge (Scanty-water discharge), mm/day .
 D_M : Annual mean water discharge, mm/day .
 D_{95-355} : Value subtracted 355-day discharge from 95-day discharge, mm/day .
 D_{95-355} : Ratio of 95-day discharge to 355-day discharge.
 Q : Annual runoff, mm .
 P : Annual precipitation, mm .
 $R_{Q/P}$: Annual runoff ratio, %.
 U : Uncontrolled runoff, mm .
 C : Controlled runoff, mm .
 $R_{U/C}$: Ratio of uncontrolled runoff to annual runoff, %.
 $R_{C/C}$: Ratio of controlled runoff to annual runoff, %.
 $R_{U/P}$: Ratio of uncontrolled runoff to annual precipitation, %.
 $R_{C/P}$: Ratio of controlled runoff to annual precipitation, %.

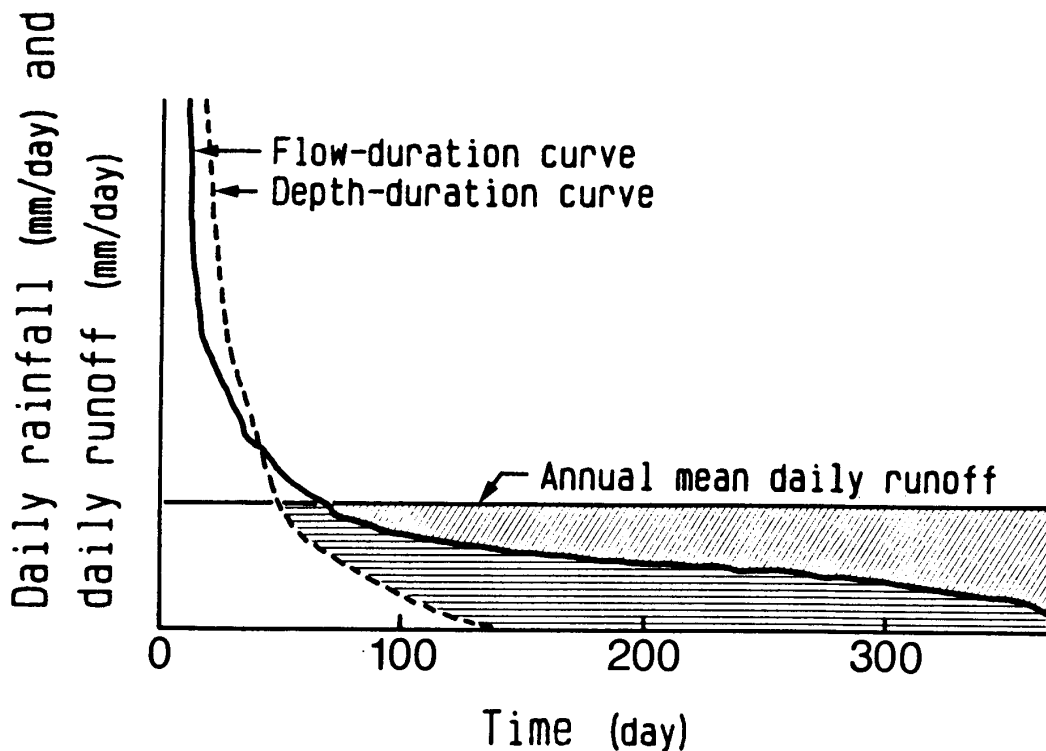


Fig. 4.3 Depth- and flow-duration curves.

▨ Uncontrolled runoff ▤ Controlled runoff

図-4.3 雨量継続時間曲線および流量継続時間曲線.

▨非調節流出量 ▤調節流出量

地質別に求めたものである。豊水量は、年降水量1500mm, 2000mm の場合は第四紀火山岩類で、年降水量2500mm, 3000mm の場合は中生代堆積岩類で大きい値を示している。

渇水量 D_{355} も年降水量 P が多い流域ほど大きい値を示しているが、豊水量ほど顕著な差はみられない。流域の水を利用する立場からすれば低水時の流量が大きい方が望ましい。渇水量は低水時の流出状況を表す指標値として用いられ、流域間で流況の安定度の比較を行う場合に利用されている。降水量の増大とともにわずかではあるが渇水量も増加することから、渇水量を流域間の流況比較に用いる場合は降水条件を同じにする必要がある。Fig. 4.4 に示される P と D_{355} の関係の平均線により地質間の渇水量の大小を比較すると、第四紀火山岩類の流域でとくに大きいのが目立つ。次いで第三紀火山岩類と花崗岩類の流域で大きく、古生代堆積岩類と変成岩類の流域がこれらに次ぎ、中生代堆積岩類の流域では小さい値になっている。Table 4.4 は、年降水量1500mm, 2000mm, 2500mm および3000mm に対する渇水量を平均線から地質別に求めたものである。火山碎屑物などに覆われた第四紀火山岩類流域においてどの年降水量でも渇水量が大きくなっている。

2. 地質分類別の流況曲線

前節において、降雨条件は等しくても豊水量や渇水量などの流量は地質ごとに特徴のあることが示された。そこで、本節では、年降水量区分ごとの地質分類別の平均的な流況曲線を求め、その特徴について考える。

地質分類別の平均的な流況曲線の作図方法は、前項で求めた地質分類ごとの年降水量とそれぞれの日流出量の関係から年降水量区分別の各日流出量を求め、流況曲線を描く方法である。Fig.

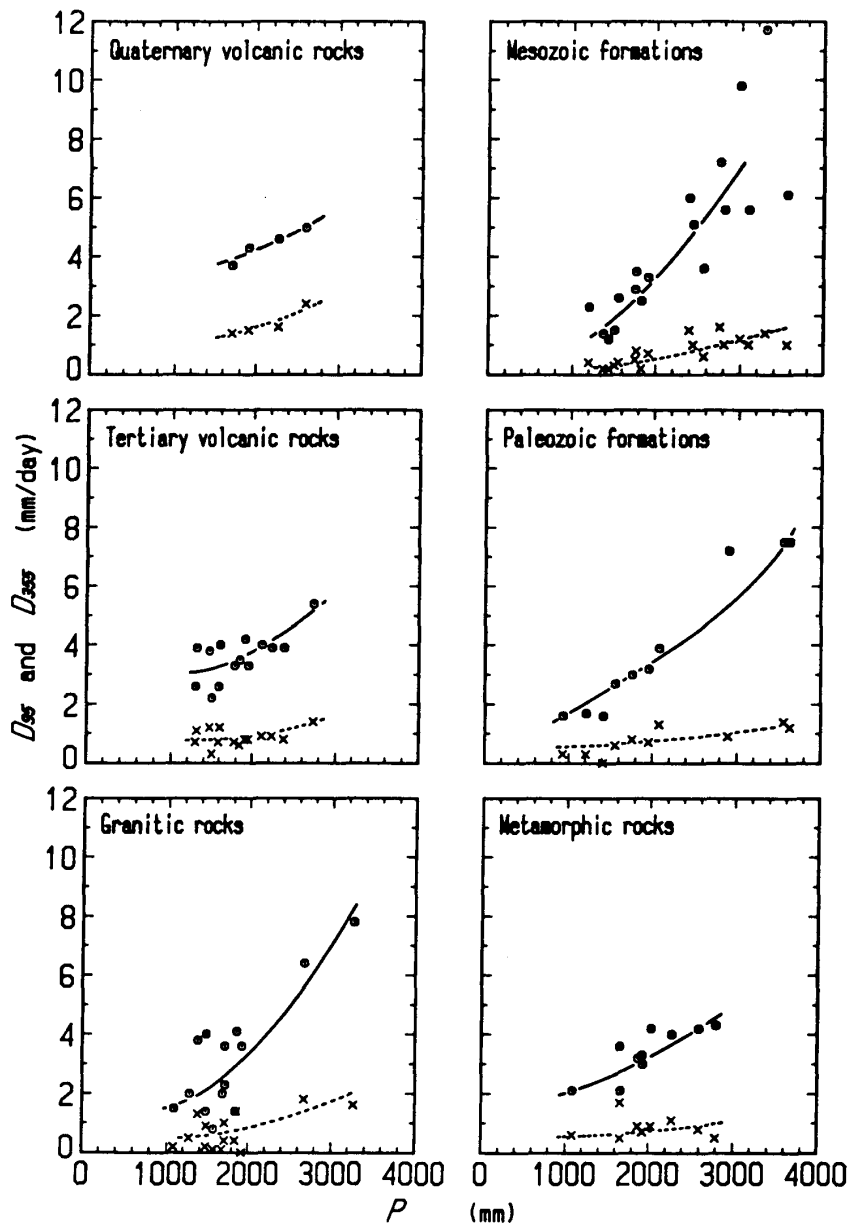


Fig. 4.4 Relationships of 95-day discharge, D_{95} (mm/day) and 355-day discharge, D_{355} (mm/day) to annual precipitation, P (mm) for each basin geology.
 図-4.4 地質分類別の年降水量 P と豊水量 D_{95} および渴水量 D_{355} の関係.

4.5 は、年降水量1500mm, 2000mm, 2500mm の流域に対する平均的な流況曲線を地質別に示したものである。

年降水量1500mm の場合の地質分類別の流況曲線を比較すると、低水位流量では第四紀火山岩類の流域が大きな流量を示し、第三紀火山岩類, 変成岩類の流域がこれに次ぎ、古生代堆積岩類, 中生代堆積岩類, 花崗岩類の流域は小さい。逆に高水位流量では第四紀火山岩類の流域が最も小さくなっている。年降水量が2000mm, 2500mm の場合にも第四紀火山岩類の流域の流量が他の地質の流域に比べ低水位で大きく、高水位で小さくなっているのが目立つ。第四紀火山岩類からなる流域では、降水量の大小に関係なく他の地質の流域に比べ高水位期間は流量が低く、低水位期間は流量

Table 4.3 Mean values of plentiful-water discharge (95-day discharge), mm/day for each basin geology

表-4.3 地質分類別の豊水量(mm/day)の平均値

Geological category	Annual precipitation (mm)			
	1500	2000	2500	3000
Quaternary volcanic rocks	3.5	4.2	4.9	5.6
Tertiary volcanic rocks	3.1	3.8	4.4	4.9
Granitic rocks	2.2	3.4	4.7	6.1
Mesozoic formations	2.1	3.4	5.0	6.8
Paleozoic formations	2.4	3.6	4.8	6.1
Metamorphic rocks	2.7	3.4	4.1	4.8

Table 4.4 Mean values of scanty-water discharge (355-day discharge), mm/day for each basin geology

表-4.4 地質分類別の渇水量(mm/day)の平均値

Geological category	Annual precipitation (mm)			
	1500	2000	2500	3000
Quaternary volcanic rocks	1.1	1.6	2.1	2.6
Tertiary volcanic rocks	0.8	0.9	0.9	1.0
Granitic rocks	0.4	0.7	1.0	1.4
Mesozoic formations	0.4	0.6	0.8	1.1
Paleozoic formations	0.5	0.7	1.0	1.2
Metamorphic rocks	0.8	0.8	0.8	1.8

が高く調整されており、年間を通して流量が一定値に近づくような調節がなされている。水を利用する立場からすれば都合のよい流域であることがわかる。

第3節 地質分類別の流況因子

本節では、流域の流出の一様性を表す指標値として用いられる流況因子のうち流況曲線から得られる因子を算出し、流域地質分類別の特徴を把握する。

1. 豊水・渇水量差および豊水・渇水量比

豊水量と渇水量の差(竹下, 1981)および豊水量と渇水量の比(岸原・田中, 1975; 竹下・高木, 1977)は流域からの流出の一様性を表す指標値として用いられている。すなわち、豊水量と渇水量の差あるいは比が小さいほど高水時と低水時の流量差が小さくなり年間を通して流量が均等化していると評価される。ここで豊水量と渇水量の差を豊水・渇水量差 D_{95-355} , 豊水量と渇水量の比を豊水・渇水量比 $D_{95/355}$ と表すことにする。 D_{95-355} および $D_{95/355}$ を1975~1979年の5年間について

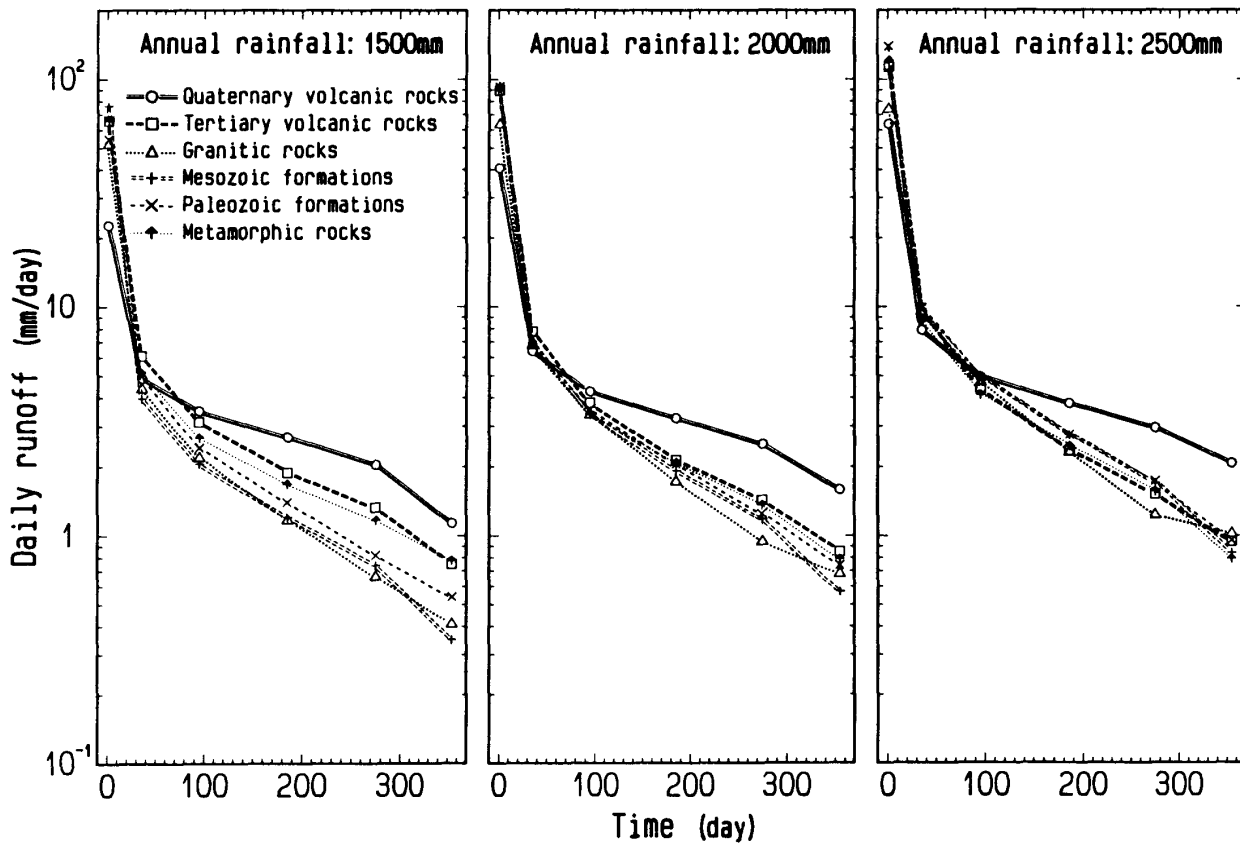


Fig. 4.5 Flow-duration curves for each basin geology in different annual rainfall.

図-4.5 地質分類別の平均的な流況曲線。

計算し、その平均値を求めた (Table 4.2)。

Fig. 4.6 は、非積雪地帯の70流域を対象として年降水量 P と豊水・渴水量差 D_{95-355} の関係を地質分類別に示したものであり、実線は両者の関係の平均線を表している。 D_{95-355} は流域の地質条件が同じでも P が多い流域ほど大きな値を示している。したがって、 D_{95-355} を流域間の流出の一様性の比較に用いる場合、降水条件を同一にする必要がある。 P と D_{95-355} の関係の平均線を地質間で比較すると、 P の増大に対する D_{95-355} の増加の割合は、中・古生代堆積岩類と花崗岩類の流域で大きく、第四紀火山岩類の流域で小さい。第三紀火山岩類と変成岩類の流域はこれらの中にある。

Fig. 4.7 は、非積雪地帯の70流域を対象として年降水量 P と豊水・渴水量比 $D_{95/355}$ の関係を地質分類別に示したものである。両者の間にはかなりのちらばりがみられる。 $D_{95/355}$ は流況曲線における2点の比で表されることから、分母にあたる渴水量の値によって大きく変動する。実線で示した両者の関係の平均線はFig. 4.4における渴水量と豊水量の平均線の比から求めた。平均線を地質間で比較すると、 $D_{95/355}$ は中生代堆積岩類の流域が他の地質に比べ大きい。逆に、第四紀火山岩類の流域は他の地質に比べ小さくなっている。

以上、従来から流出の一様性を表す指標値として用いられている豊水・渴水量差 D_{95-355} および豊水・渴水量比 $D_{95/355}$ を求め流域地質ごとの特徴を検討した結果、既往の研究結果 (岸原・田中, 1975; 竹下・高木, 1977; 志水, 1980) とほぼ同様の結果が確認された。

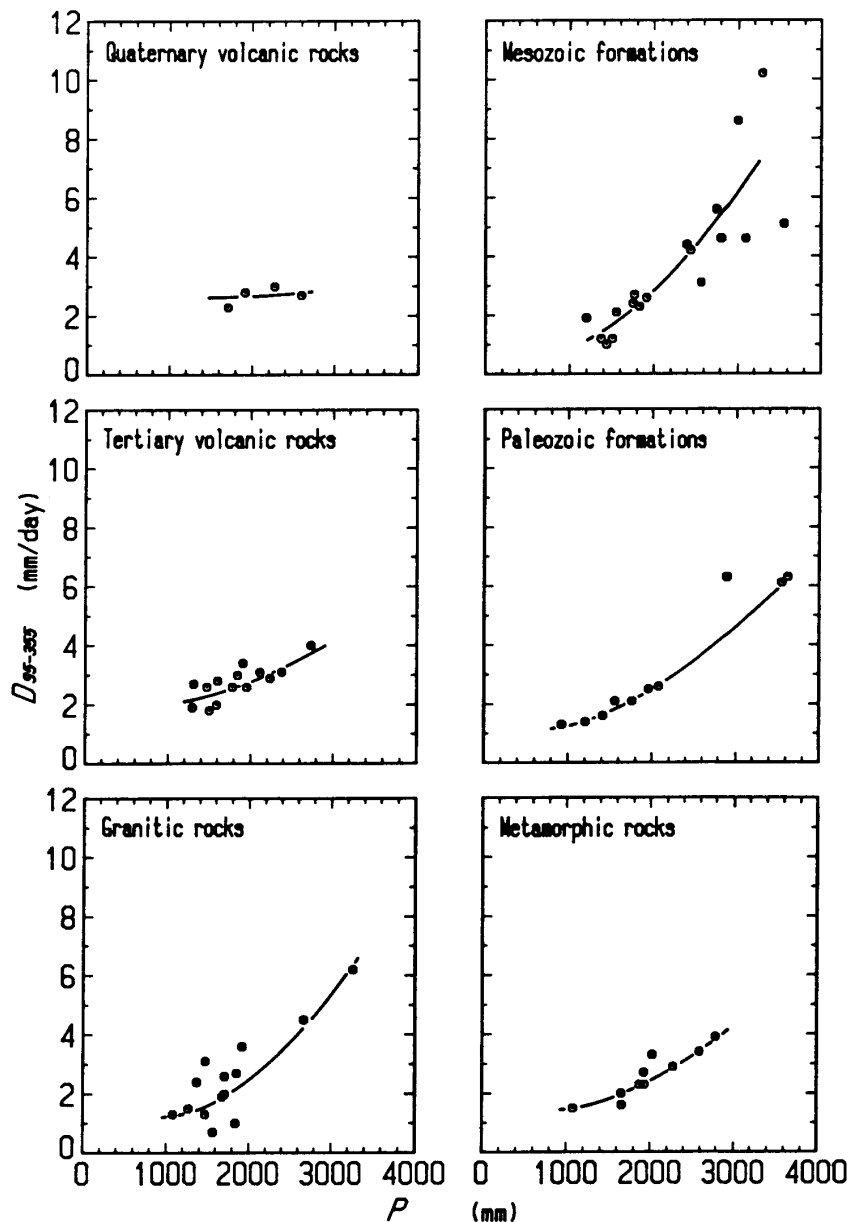


Fig. 4.6 Relationships between annual precipitation, P (mm) and value obtained by subtracting 355-day discharge from 95-day discharge, D_{95-355} (mm/day) for each basin geology.
 図-4.6 地質分類別の年降水量 P と豊水・渇水量差 D_{95-355} の関係。

2. 非調節流出量および調節流出量

Fig. 4.3において、年平均の日流出量の直線は流域からの流出が完全に均等化された場合の流況曲線と考えることができ、利水の面からは非常に都合がよく理想的な流況曲線である。流況曲線と年平均の日流出量の直線で囲まれる部分 (Fig. 4.3において斜線部分) が小さいほど年平均日流出量の直線で表される流出状態に近づく。この斜線部分は流域の流出均等化作用により調節されなかった流出成分であるという意味から非調節流出量と呼ばれ、流出の均等化の程度を表す指標値として提案された (竹下, 1980)。この非調節流出量 U (mm) を1975~1979年の5年間について計算し、その平均値を求めた (Table 4.2)。

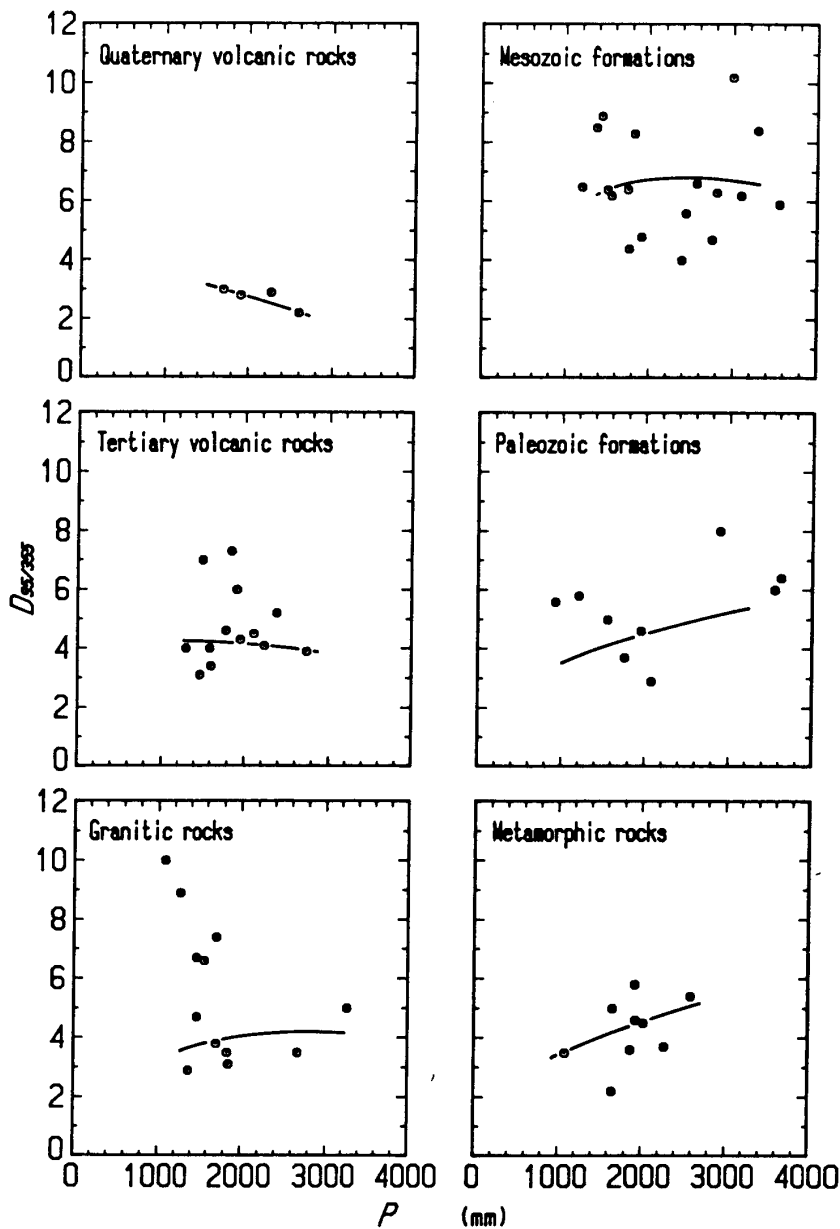


Fig. 4.7 Relationships between annual precipitation, P (mm) and ratio of 95-day discharge against 355-day discharge, $D_{95/355}$ for each basin geology.

図-4.7 地質分類別の年降水量 P と豊水・渇水量比 $D_{95/355}$ の関係。

Fig. 4.8 は、非積雪地帯の70流域を対象として年降水量 P と非調節流出量 U の関係を地質分類別に示したものである。図中の実線は指数曲線を当てはめた場合の回帰曲線である。全地質において降水量の多い流域ほど非調節流出量も大きい。非調節流出量を平均線により地質間で比較すると、第四紀火山岩類で最も小さく、花崗岩類と変成岩類がこれに次ぎ、第三紀火山岩類や中・古生代堆積岩類で大きくなっている。

Fig. 4.3 において破線で示される雨量継続時間曲線は、流域がモルタルなどの不透水性物質に覆われ地中への浸透が全く行われず、降雨はその日のうちにすべて流出したと仮定した場合の流況曲線と考えることができる。現実には流域で地下への雨水浸透が行われるため流出は時間的な遅れ

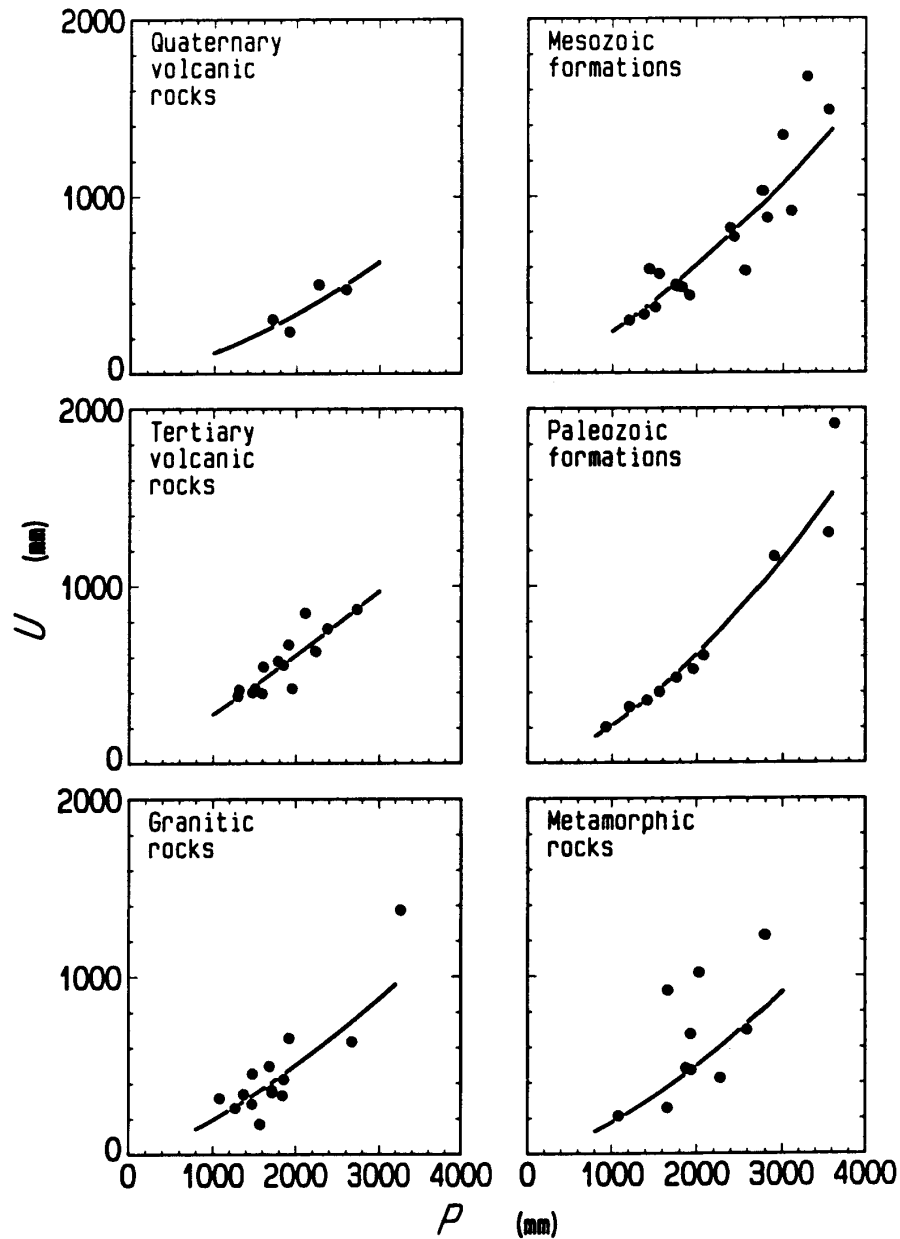


Fig. 4.8 Relationships between annual precipitation, P (mm) and annual uncontrolled runoff, U (mm) for each basin geology.

図-4.8 地質分類別の年降水量 P と非調節流出量 U の関係。

を伴い、Fig. 4.3の実線で示されるような流況曲線の形をとる。したがって、流域の流出均等化作用により破線から実線に流況が変化させられたことになる。Fig. 4.3における横線部分が多いほど流域の流出均等化作用は大きい。この横線部分は調節流出量と呼ばれ、流出の均等化の程度を表す指標値として提案されている(竹下, 1980)。調節流出量 C (mm)を1975~1979年の5年間について計算し、その平均値を求めた(Table 4.2)。

Fig. 4.9は、非積雪地帯の70流域を対象として年降水量 P と調節流出量 C との関係を地質分類別に示したものである。図中の実線は指数曲線を当てはめた場合の回帰曲線である。調節流出量は、降水量の多い流域ほど多くなっているが、ある限度以上の降水量になると一定値を示す傾向も

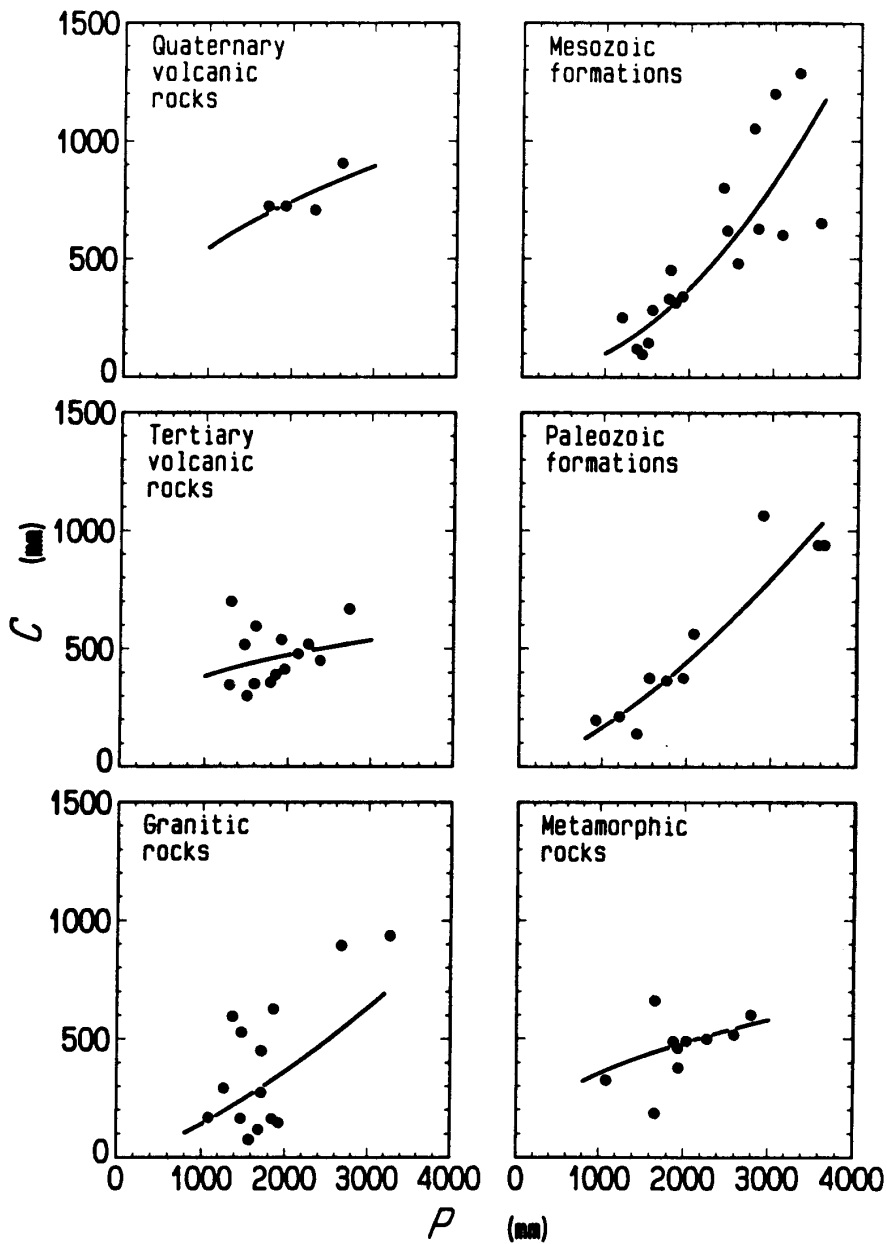


Fig. 4.9 Relationships between annual precipitation, P (mm) and annual controlled runoff, C (mm) for each basin geology.

図-4.9 地質分類別の年降水量 P と調節流出量 C との関係。

認められる。すなわち、流域の流出均等化作用により調節される降水量には限界があることを示唆している。調節流出量を平均線により地質間で比較すると、第四紀火山岩類で最も大きく、第三紀火山岩類と変成岩類がこれに次ぎ、花崗岩類や中・古生代堆積岩類で小さくなっている。

Fig. 4.10は、非積雪地帯70流域を対象にして求めた調節流出量 C と非調節流出量 U の関係を地質分類別を示したものである。図中の破線は C と U が同量値を示す線であり、破線の上側にプロットされる流域は U より C が多い流域、逆に破線の下側にプロットされる流域は C より U が多い流域である。地質分類別に見ると、第四紀火山岩類の流域は破線の上側にすべてプロットされ、第三紀火山岩類、花崗岩類および変成岩類の流域は破線の上下にプロットされ、中・古生代堆積岩

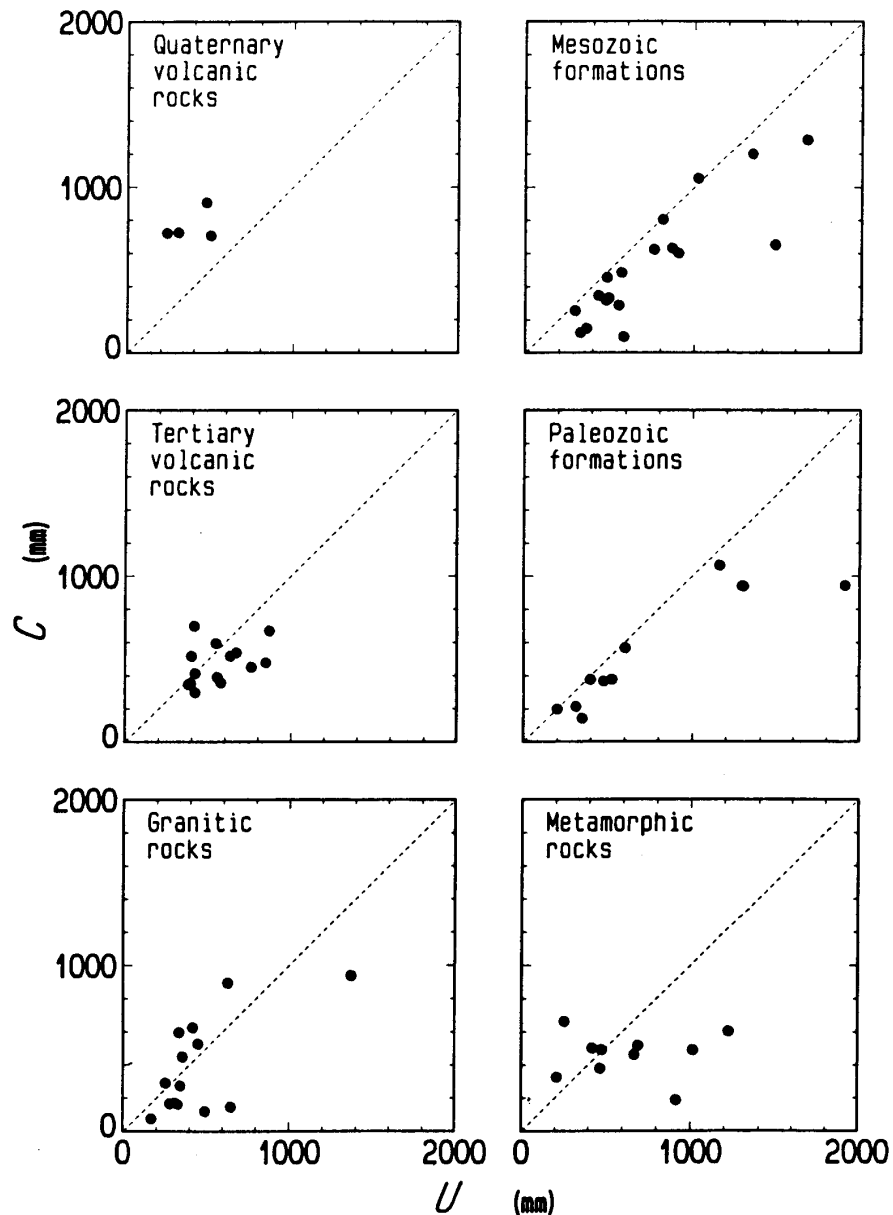


Fig. 4.10 Relationships between annual controlled runoff, C (mm) and annual uncontrolled runoff, U (mm) for each basin geology.

図-4.10 地質分類別の調節流出量 C と非調節流出量 U の関係。

類の流域はほとんど破線の下側にプロットされている。

以上、流況曲線から得られる非調節流出量および調節流出量を用いて地質問の流況を比較した。非調節流出量および調節流出量は、流況曲線の2点の流量データから求められる豊水・渴水量差や豊水・渴水量比と比較し、流況曲線において面積で表現されるため、流量データの一部欠測あるいは測定不備などによる誤差の影響が小さく、流況曲線の形状がより正確に表現される(地頭蘭・竹下, 1986)。しかし、1水年間の日単位の降水量・流量データを使用するためその算出が面倒であるが、この点はコンピューター等の発達により解決されるものである。非調節流出量および調節流出量は、単位が降水量や流出量と同じあることから量的に把握しやすく、流況を表す因子として有

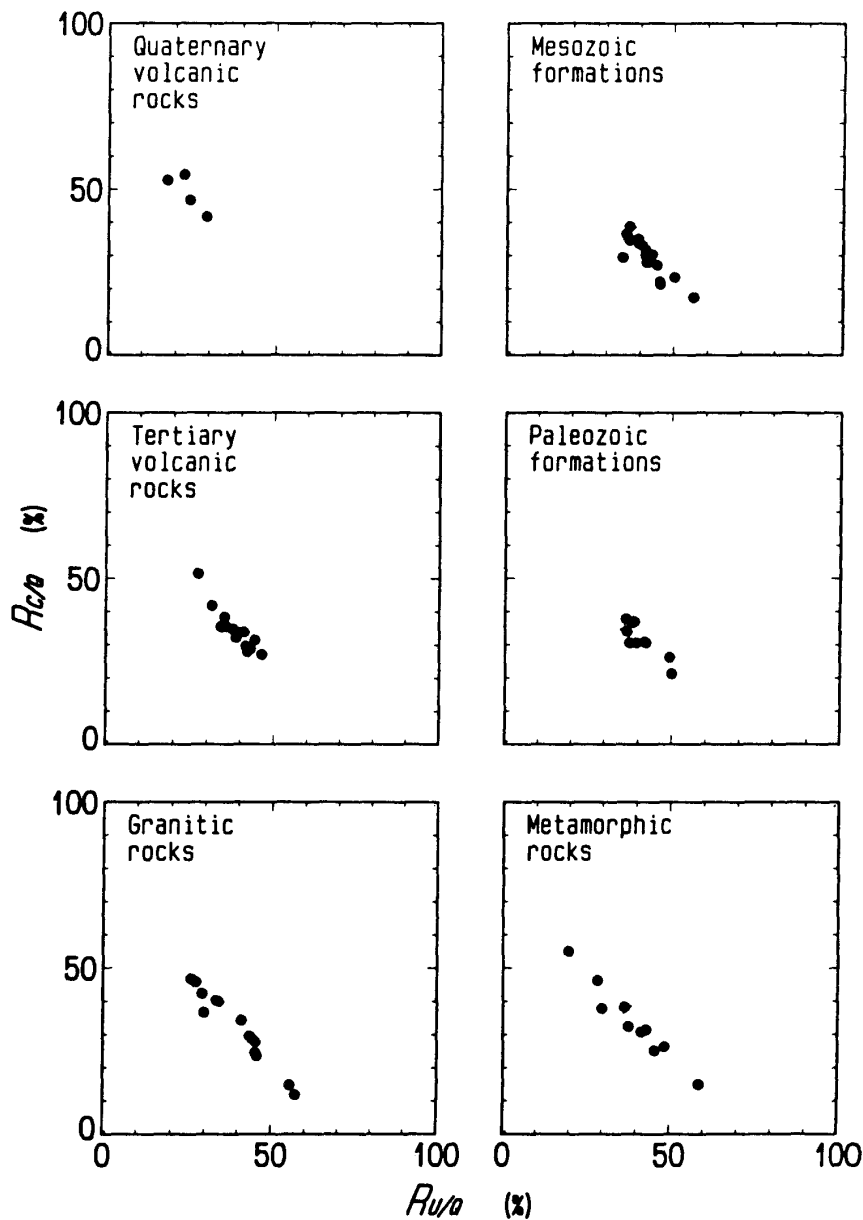


Fig. 4.11 Relationships between (annual controlled runoff/annual runoff), $R_{c/Q}$ (%) and (uncontrolled runoff/annual runoff), $R_{u/Q}$ (%) for each basin geology.
 図-4.11 地質分類別の(調節流出量/年流出量) $R_{u/Q}$ と(非調節流出量/年流出量) $R_{c/Q}$ の関係。

効であると考えられる。

3. 非調節流出量および調節流出量の応用

前項において、非調節流出量 U および調節流出量 C は年降水量 P の増加とともに増大することが指摘された。 U および C を流域間の流出の一様性の比較に用いるには降水条件を同一にする必要がある。そこで、 U および C を年降水量 P および年流出量 Q で割ることにより降水量の影響を排除した。すなわち、 U および C を P で除した値、(非調節流出量/年降水量) $R_{u/P}$ および(調節流出量/年降水量) $R_{c/P}$ と U および C を Q で除した値、(非調節流出量/年流出量) $R_{u/Q}$ および(調節流出量/年流出量) $R_{c/Q}$ を算出した (Table 4.2)。

Fig. 4.11は、非積雪地帯70流域を対象にして求めた(調節流出量/年流出量) $R_{C/Q}$ と(非調節流出量/年流出量) $R_{U/Q}$ の関係を地質分類別に示したものである。すべての地質分類において両者の間には負の相関関係が認められ、 C と U の合計値が年流出量 Q に占める割合は70%前後となっている。Fig. 4.3における U と C の定義からすると残りの約30%は降雨自体が時間的に分散して発生することによるものである(降雨特性による調節量ともいえる)。地質分類別に C および U の Q に占める割合をみると、第四紀火山岩類の流域はすべて U より C の割合が大きく、対照的に中・古生代堆積岩類の流域はほとんど C より U の割合が大きくなっている。第三紀火山岩類、花崗岩類および変成岩類の流域は U より C の割合が大きい流域と C より U の割合が大きい流域の両方がみられ、分散している。第三紀火山岩類の流域は火山地帯に位置しており、竹下・高木(1977)が指摘しているように、表層地質図に現れない火山碎屑物の比較的薄い被覆や温泉風化などの影響が原因していると考えられる。花崗岩類の流域は日本各地に分布し、貫入時代も中生代以前から新第三紀まで広い時代にわたっており、その風化度合もさまざまであることが関係していると思われる。岸原・石井(1984)は花崗岩地帯の流況が風化の程度によりことなることを解析している。変成岩類の流域は大規模な地殻変動のあった変成帯に分布しており、破碎の程度は流域で異なっていることが原因していると考えられる。

Fig. 4.12は、非積雪地帯70流域を対象にして求めた(調節流出量/年降水量) $R_{C/P}$ と(非調節流出量/年降水量) $R_{U/P}$ の関係を地質分類別に示したものである。両者の間には Fig. 4.11でみられたような一定の関係を認めることはできないが、地質分類ごとの C および U の P に占める割合の傾向は Fig. 4.11と同様である。

第4節 積雪地帯の流域の検討

第1節で述べたように、積雪地帯の流域では冬期の降水が流域内にいったん雪として貯留され、融雪期に多量に流出される。したがって、第3節で求めた流況因子を用いて全国に分布している流域の地質と流況の関係を一律に比較するのは適当でない。そこで、積雪地帯と非積雪地帯を同等に検討し得るように降雪・融雪期を除いた夏期の6月～10月間の日雨量・日流出量データから継続時間曲線を求め、非調節流出量および調節流出量を算出することを検討した。Table 4.5は、夏期の6月～10月間のデータから求めた流況因子を1975～1979年の5年平均値で示したものである。6月～10月間のデータから求めた因子は、Table 4.2の年間のデータから求めた因子記号に*をつけて表すことにする。

年間データから求めた Table 4.2内の P に対する6月～10月間データから求めた Table 4.5内の P^* の割合、同様に、 Q に対する Q^* 、 U に対する U^* 、 C に対する C^* の割合を計算し、非積雪地帯70流域の平均値を求めるとそれぞれ約60%、約58%、約64%、約46%であった。同じの方法で積雪地帯48流域の平均値を求めるとそれぞれ約50%、約36%、約35%、約38%である。非積雪地帯の流域では、6月～10月間データから求めた降水量、流出量、非調節流出量、調節流出量の値は年間データから求めたそれらの約5～6割の値であることがわかる。積雪地帯の流域では冬期の降水量が多く、また融雪期の流出量が多いことから、6月～10月間データに冬期の降水量や融雪期の流出量が含まれないために年間データの約4～5割の値となっている。

Fig. 4.13は、全国に分布する118流域を対象にして、6月～10月間のデータから求めた非調節流出量 U^* と調節流出量 C^* を流出量 Q^* で除した(非調節流出量/総流出量) R_{U/Q^*} と(調節流出量

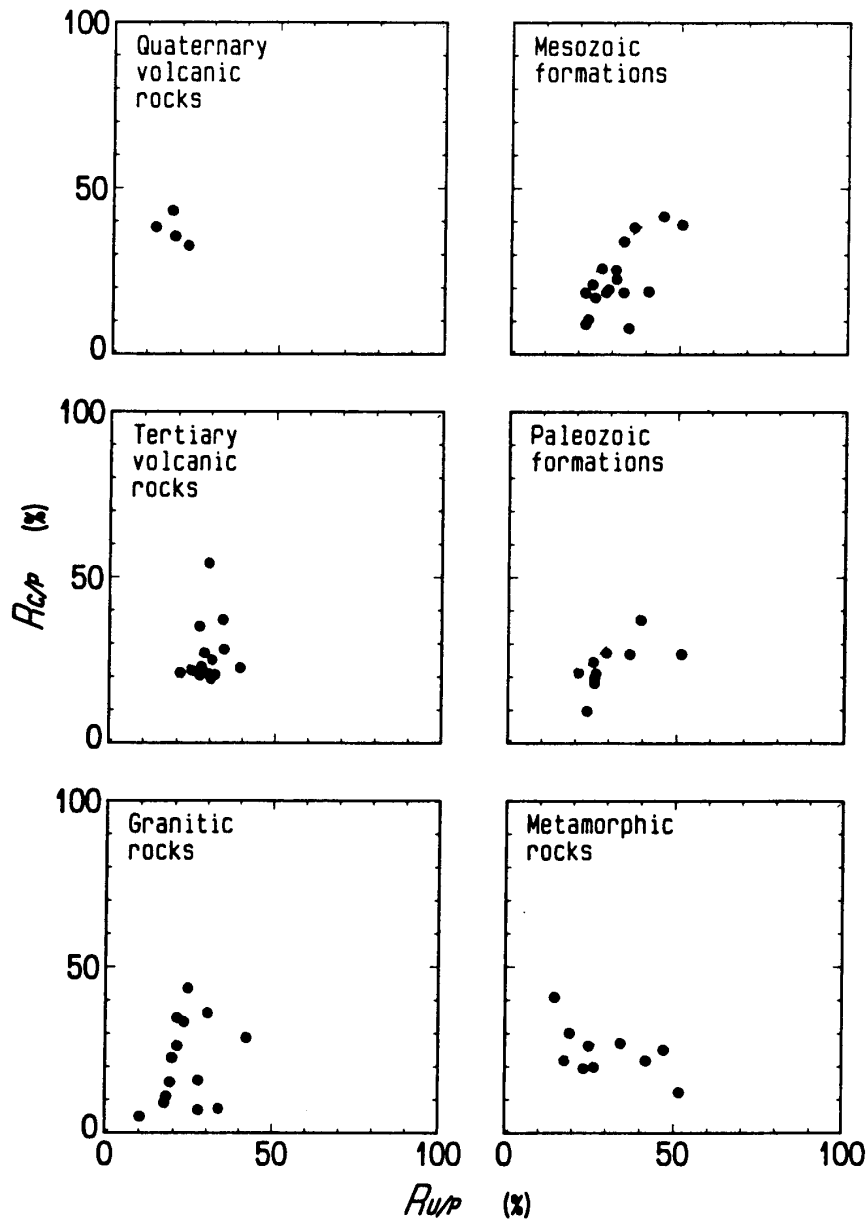


Fig. 4.12 Relationships between (annual controlled runoff/annual precipitation), $R_{C/P}$ (%) and (uncontrolled runoff/annual precipitation), $R_{U/P}$ (%) for each basin geology.

図-4.12 地質分類別の(調節流出量/年降水量) $R_{C/P}$ と(非調節流出量/年降水量) $R_{U/P}$ の関係。

／総流出量) $R_{C/Q}^*$ の関係を Fig. 4.11と同じ方法で示したものである。流域地質ごとの傾向は Fig. 4.11はほぼ同様である。積雪地帯に位置していたため Fig. 4.11においては示されなかった第三紀堆積岩類の流域も3流域であるがプロットされている。第三紀堆積岩類の流域は中・古生代堆積岩類の流域と同じ部類の傾向を示している。

このように雪の影響を受けていない夏期からのデータから求めた非調節流出量や調節流出量は全国の流域を一律に比較できる。非調節流出量や調節流出量は算出期間を自由に設定でき、流域条件が流況に及ぼす影響を検出するには有効な因子であると考えられる。

Table 4.5 Hydrologic characteristics obtained during the period from June to October
 表-4.5 6~10月間データから求めた流況因子

Geological category	No.	Dam	Q^*	P^*	U^*	C^*	$R_{U/Q}^*$	$R_{C/Q}^*$	$R_{U/P}^*$	$R_{C/P}^*$
Quaternary volcanic rocks	1-1*	沖浦ダム	664.3	688.0	134.4	350.4	20.1	53.2	20.8	54.5
	1-2*	大倉ダム	585.0	860.2	160.9	190.8	26.5	34.3	17.8	23.2
	1-3	中禅寺ダム	706.4	1240.8	107.1	321.5	15.1	45.6	8.6	26.1
	1-4*	品木ダム	743.0	937.4	73.0	399.4	9.9	53.6	7.9	43.6
	1-5	緑川ダム	1006.4	1376.2	329.0	357.8	32.9	36.4	23.9	26.5
	1-6	芹川ダム	745.9	1079.4	202.2	340.0	26.6	45.6	18.3	31.8
	1-7	岩瀬ダム	1115.5	1603.2	335.4	408.7	29.5	36.9	20.7	26.8
Tertiary volcanic rocks	2-1*	豊平峡ダム	619.3	542.4	159.5	309.9	25.2	50.4	30.2	59.7
	2-2*	目屋ダム	906.5	768.6	368.5	289.8	40.8	32.0	47.5	37.1
	2-3*	石淵ダム	777.0	911.8	262.6	253.8	33.6	33.3	28.5	28.3
	2-4*	鳴子ダム	661.1	904.2	171.5	243.8	25.6	38.2	19.1	29.1
	2-5*	釜房ダム	521.2	722.2	153.2	193.5	27.7	39.7	19.6	27.3
	2-6*	花山ダム	597.7	867.2	164.7	208.2	27.2	36.1	19.3	27.3
	2-7*	森吉ダム	681.3	882.6	226.7	214.6	33.1	32.5	24.8	24.1
	2-8*	萩形ダム	1032.0	1214.4	357.0	309.7	33.2	32.0	32.0	31.0
	2-9*	素波里ダム	1247.5	1201.8	519.2	353.5	41.0	29.6	42.3	30.3
	2-10*	皆瀬ダム	563.1	659.5	170.8	215.2	29.9	39.7	25.8	35.3
	2-11*	鎧畑ダム	881.3	1170.6	265.0	304.7	29.5	35.7	22.3	26.8
	2-12*	早口ダム	1051.5	1188.0	390.7	345.8	37.7	33.5	33.3	29.6
	2-13*	高坂ダム	1162.7	1274.0	483.0	283.4	41.2	25.3	37.4	22.4
	2-14*	五十里ダム	503.9	907.6	181.1	144.7	36.3	28.5	20.2	16.2
	2-15*	川俣ダム	558.8	749.6	125.6	242.5	22.8	43.4	17.1	32.5
	2-16	西荒川	638.4	1051.2	244.9	161.1	38.0	24.8	22.5	14.8
	2-17*	相俣ダム	703.6	818.8	194.9	255.9	27.9	36.2	23.8	31.0
	2-18*	蘭原ダム	290.5	821.0	96.3	80.5	33.4	27.5	12.2	9.9
	2-19	霧積ダム	815.7	1071.7	229.4	288.5	27.9	35.6	21.1	26.7
	2-20*	笠堀ダム	1417.2	1208.9	552.8	419.9	38.5	30.6	45.1	35.8
	2-21*	犀川ダム	1187.6	1383.4	417.3	391.7	35.3	33.7	30.7	29.1
	2-22*	内川ダム	946.5	1169.8	330.9	316.2	34.9	34.3	28.0	27.7
	2-23*	我谷ダム	864.8	1199.8	285.4	296.5	33.0	35.3	23.7	25.6
	2-24	青蓮寺ダム	614.0	740.2	272.0	157.2	43.1	28.0	34.6	21.7
	2-25*	引原ダム	1007.8	1137.0	352.8	338.7	33.9	35.5	29.7	30.8
	2-26	生野ダム	664.6	1024.2	328.1	109.8	48.2	18.6	31.0	11.4
	2-27*	八戸ダム	405.1	799.7	166.2	124.6	37.9	33.0	19.0	16.0
	2-28*	浜田ダム	389.0	838.0	158.2	103.5	40.0	27.7	18.3	12.7
	2-29*	湯原ダム	537.4	838.8	179.9	188.7	32.3	37.1	20.6	22.9
	2-30	野呂川ダム	705.7	710.3	277.8	268.5	37.4	40.6	34.3	38.4
	2-31	佐波川ダム	564.6	924.6	276.3	135.2	47.8	25.1	29.0	14.8
	2-32	向道ダム	739.6	984.7	344.8	203.5	46.1	28.1	34.0	20.8
2-33	大坊川ダム	716.8	882.4	274.9	251.9	38.3	35.4	31.0	30.3	
2-34	日向神ダム	1057.7	1421.4	509.1	233.9	45.8	23.4	33.3	16.5	
2-35	油木ダム	636.3	1092.2	246.4	187.5	38.2	30.6	22.1	17.2	
2-36	岩屋川内ダム	1038.8	1332.8	454.3	293.8	43.8	29.0	32.8	22.1	
2-37	萱瀬ダム	1145.4	1275.2	598.1	246.5	52.1	21.9	46.0	19.3	
2-38	下笠ダム	1301.8	1621.4	575.6	313.9	42.7	25.1	34.1	19.5	
2-39	安岐ダム	538.2	867.4	271.4	127.2	51.4	23.9	29.2	14.4	

Table 4.5 (Continued)

表-4.5 (続き)

Geological category	No.	Dam	Q^*	P^*	U^*	C^*	$R_{U/Q}^*$	$R_{C/Q}^*$	$R_{U/P}^*$	$R_{C/P}^*$
Granitic rocks	3-1*	旭川ダム	1390.1	1082.4	330.3	628.7	21.9	47.2	28.2	60.7
	3-2*	木地山ダム	1085.0	1208.4	296.0	410.8	27.5	38.1	25.0	34.8
	3-3*	荒沢ダム	1147.2	1013.6	380.0	386.2	33.6	34.1	38.0	38.6
	3-4	花貫ダム	208.2	834.8	86.7	42.3	38.8	23.0	9.3	4.9
	3-5*	矢木沢ダム	1177.3	752.0	391.3	424.1	32.8	36.5	54.4	56.7
	3-6	草木ダム	810.0	988.0	261.2	266.1	32.2	33.4	26.3	27.2
	3-7*	三面ダム	1157.0	1109.0	365.5	414.0	31.9	36.6	33.3	38.2
	3-8*	内の倉ダム	1398.0	1068.8	387.3	607.7	27.2	44.3	37.5	62.6
	3-9	広瀬ダム	705.2	880.3	190.4	274.1	26.3	39.1	21.2	31.1
	3-10	松川ダム	618.3	1041.0	322.5	79.3	52.3	13.1	30.5	7.6
	3-11	君ヶ野ダム	670.7	1021.4	370.4	92.1	54.5	14.4	33.3	8.7
	3-12*	菅沢ダム	215.4	779.6	79.4	59.9	34.1	31.4	9.5	7.9
	3-13*	布部ダム	461.8	819.1	136.9	172.0	28.5	38.5	16.3	21.1
	3-14	土師川ダム	496.4	839.8	176.4	163.5	34.5	34.3	20.2	19.9
	3-15	棕梨ダム	401.2	758.2	166.2	120.8	41.6	30.6	20.9	15.5
	3-16	二級ダム	353.3	857.0	182.0	69.6	50.1	21.8	19.5	8.1
	3-17	小瀬川ダム	359.8	937.2	178.2	74.4	47.8	22.9	18.1	8.2
	3-18	黒杭川ダム	449.8	859.0	185.2	143.9	42.8	31.5	20.3	16.2
	3-19	長柄ダム	409.7	678.4	238.4	50.8	57.8	14.7	33.7	7.5
	3-20	玉川ダム	876.7	1186.6	284.5	344.5	30.7	41.6	22.4	29.4
	3-21	南畑ダム	1182.1	1496.6	351.6	475.5	30.0	40.4	23.2	32.8
	3-22	祝子ダム	2122.0	2034.8	915.1	555.0	42.9	26.4	44.8	27.5
Tertiary strata	4-1*	鯖石川ダム	636.7	925.4	312.9	84.9	46.7	16.7	30.5	9.3
	4-2*	白岩川ダム	870.3	1085.8	349.3	226.7	39.7	27.7	31.6	21.8
	4-3*	裾花ダム	516.9	573.4	181.6	185.8	34.6	36.9	31.1	32.8
Mesozoic formations	5-1	二瀬ダム	489.0	778.8	178.7	142.1	34.0	31.4	22.1	18.2
	5-2	猿谷ダム	652.2	1095.2	279.4	130.3	41.1	23.0	24.0	12.8
	5-3	七川ダム	1679.3	2040.8	861.1	277.2	50.7	17.8	41.3	14.2
	5-4	広川ダム	525.9	975.8	262.3	116.8	48.8	22.8	25.2	11.6
	5-5	二川ダム	706.8	994.3	302.5	191.5	41.4	29.4	28.8	20.1
	5-6	木屋川ダム	519.7	853.0	256.4	124.4	48.8	24.5	30.1	15.2
	5-7	宮川内ダム	710.2	999.5	511.9	5.6	64.2	8.6	42.1	2.2
	5-8	内場ダム	491.0	1011.8	308.3	26.0	59.1	9.5	27.8	3.4
	5-9	五郷ダム	425.4	827.6	253.2	39.1	55.1	13.7	27.5	5.2
	5-10	須賀川ダム	770.2	924.7	444.3	126.8	53.8	20.2	44.0	14.8
	5-11	永瀬ダム	1658.7	1662.2	654.7	548.5	38.4	34.3	38.5	33.7
	5-12	市房ダム	1376.7	1470.9	567.5	416.6	40.5	31.3	37.7	29.4
	5-13	黒沢ダム	899.3	1642.5	381.7	240.1	42.1	27.0	23.0	14.8
	5-14	北川ダム	1244.8	1585.6	518.1	326.3	41.2	26.3	32.4	20.6
	5-15	渡川ダム	2074.0	1962.8	844.8	635.9	40.5	31.0	43.5	34.7
	5-16	綾北ダム	1394.7	2032.0	633.3	292.5	44.9	21.3	30.7	14.9
	5-17	綾南ダム	1287.2	1772.4	586.2	284.6	44.9	22.7	33.3	16.9
	5-18	立花ダム	2581.0	2012.6	1045.3	755.1	40.2	29.5	51.8	38.0

Table 4.5 (Continued)
表-4.5 (続き)

Geological category	No.	Dam	Q^*	P^*	U^*	C^*	$R_{U/Q}^*$	$R_{C/Q}^*$	$R_{U/P}^*$	$R_{C/P}^*$
Paleozoic formations	6-1	藤井川ダム	370.9	640.0	159.7	94.7	39.1	28.4	22.5	14.2
	6-2	下久保ダム	373.7	649.6	121.3	124.5	31.6	34.2	18.0	19.1
	6-3*	胎内川ダム	801.6	1219.7	416.3	124.8	49.9	17.0	33.8	10.9
	6-4*	九頭竜川ダム	1711.1	1257.0	602.5	607.9	34.6	36.9	47.0	50.3
	6-5*	広野ダム	594.2	963.3	202.4	189.2	32.3	35.3	19.7	20.8
	6-6*	笹生ダム	1127.7	1090.2	455.9	315.7	39.4	29.9	40.4	30.2
	6-7*	横山ダム	695.8	1422.0	315.4	117.0	43.9	19.8	21.5	8.6
	6-8	宮川ダム	2562.8	2500.4	1423.1	489.5	53.8	20.7	55.3	20.9
	6-9	日野川ダム	400.4	866.5	252.4	27.6	61.5	8.1	26.9	3.1
	6-10*	大野ダム	484.0	828.6	176.3	151.0	36.3	32.2	20.8	18.0
	6-11	厚東川ダム	476.2	790.0	212.7	144.4	44.5	30.6	26.6	18.2
	6-12	長安口ダム	1859.6	1856.3	803.5	549.6	41.8	31.0	41.9	30.4
	6-13	鹿野川ダム	671.3	998.2	308.8	160.0	44.4	25.2	29.5	16.2
	6-14	鏡ダム	1915.6	2182.6	846.6	462.9	43.3	25.4	38.0	22.6
	6-15	ます淵ダム	680.2	1083.8	323.9	171.9	46.3	26.7	28.1	16.3
	6-16	氷川ダム	1035.0	1264.6	431.8	294.6	41.9	28.7	34.4	23.7
Metamorphic rocks	7-1	高柴ダム	375.9	705.6	110.9	125.9	28.3	34.9	14.9	17.3
	7-2	水沼ダム	610.0	927.8	117.5	285.5	17.6	49.3	11.7	32.2
	7-3*	室牧ダム	1097.4	912.1	250.6	527.4	22.0	49.1	26.3	57.7
	7-4*	利賀川ダム	968.9	1108.0	238.7	403.3	23.1	44.2	20.3	39.1
	7-5	新豊根ダム	977.1	1541.3	411.0	252.5	42.4	25.9	26.6	16.2
	7-6*	佐治川ダム	737.7	1053.2	275.1	229.0	35.9	32.4	25.0	22.2
	7-7	川上ダム	629.7	946.2	253.5	215.0	39.6	34.7	25.8	23.5
	7-8	柳瀬ダム	1449.6	1304.8	838.4	205.8	53.8	17.5	58.8	18.4
	7-9	黒瀬ダム	1102.0	1108.0	747.3	74.6	65.6	8.7	62.2	7.5
	7-10	早明浦ダム	1685.2	1821.8	955.9	289.0	54.0	19.3	49.6	16.6
	7-11	陣屋ダム	763.5	1204.3	233.4	282.4	30.5	36.9	19.1	22.9
	7-12	力丸ダム	674.7	1038.4	296.3	194.1	42.8	30.2	27.2	18.3
	7-13	神浦ダム	963.2	1135.6	505.1	226.2	51.3	24.9	44.9	22.4

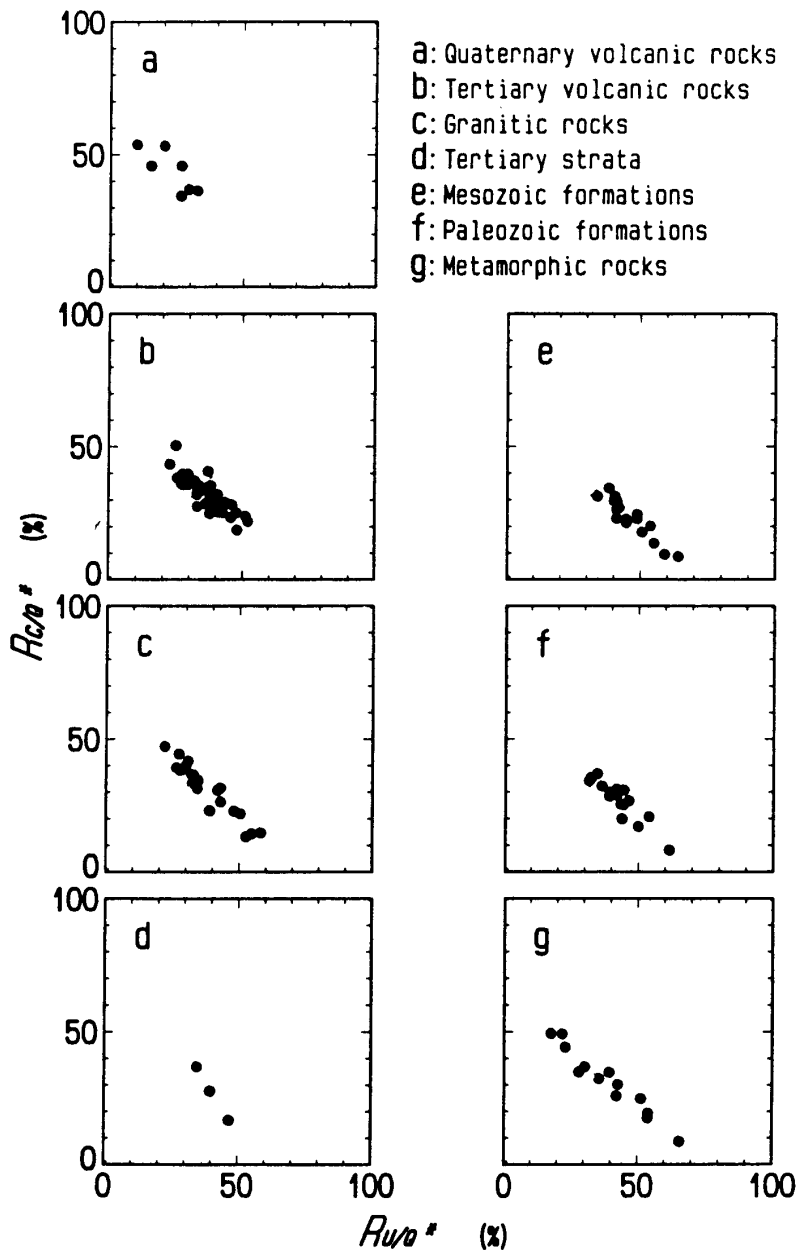


Fig. 4.13 Relationships between $R_{C/Q}^*$ (%) and $R_{U/Q}^*$ (%) by making use of the data obtained during the period from June to October.

図-4.13 6～10月間データから求めた(調節流出量/総流出量) $R_{C/Q}^*$ と(非調節流出量/総流出量) $R_{U/Q}^*$ の関係。

第5節 流域の斜面傾斜と流況

一般に、緩傾斜面は急傾斜面に比べ雨水が地下へ浸透しやすく、また緩傾斜面は土壤層が厚いことから高い貯留機能が期待できる(竹下・高木, 1977)。本節では、流域の斜面傾斜と流況の関係について流域地質別に検討した(地頭菌・竹下, 1988)。流域の斜面傾斜を把握するための資料には流域地質の判読に使用した縮尺20万分の1土地分類図内の傾斜区分図を利用した。対象流域を傾斜区分図におとし、傾斜区分ごとの流域内に占める面積率を求めた。傾斜区分は、0～20度、20～40度、および40度以上の3区分である。その結果はTable 4.1内に示される。ここで傾斜0～20

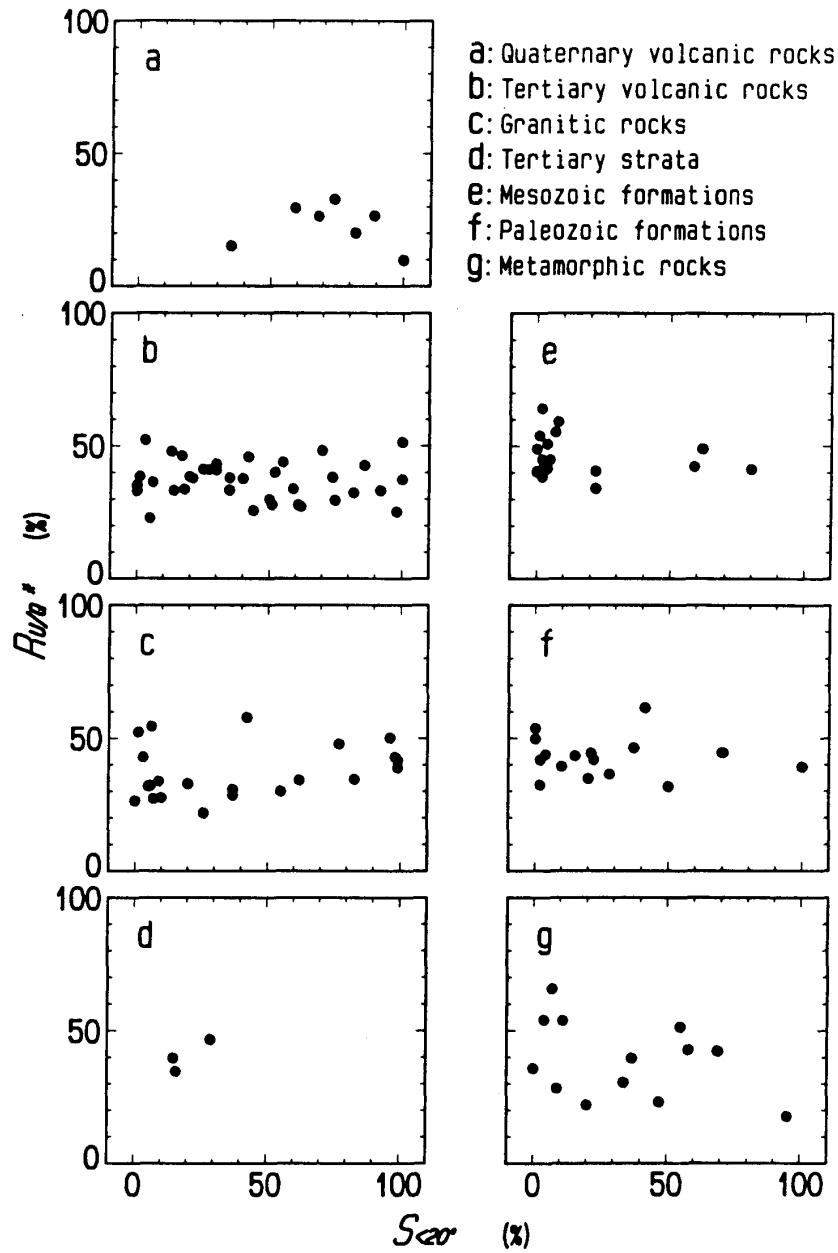


Fig. 4.14 Relationships between $R_{U/Q}^*$ (%) and percentage of gentle slope ($<20^\circ$) to basin area, $S_{<20^\circ}$ (%) for each basin geology.

図-4.14 (非調節流出量/総流出量) $R_{U/Q}^*$ と緩傾斜面積率 $S_{<20^\circ}$ の関係.

度の面積率を緩傾斜面積率 $S_{<20^\circ}$ と呼ぶことにする。流況因子には6月～10月間のデータから求めた(非調節流出量/総流出量) $R_{U/Q}^*$ と(調節流出量/総流出量) $R_{C/Q}^*$ を用いた。

Fig. 4.14およびFig. 4.15は、全国に分布する118流域を対象にして、(非調節流出量/総流出量) $R_{U/Q}^*$ および(調節流出量/総流出量) $R_{C/Q}^*$ と緩傾斜面積率 $S_{<20^\circ}$ の関係を地質分類別に示したものである。地質によっては明確ではないが、 $S_{<20^\circ}$ が大きい流域ほど $R_{U/Q}^*$ は小さくなり、 $R_{C/Q}^*$ は大きくなる傾向がみられる。緩傾斜面の多い流域ほど非調節流出量は減少し、調節流出量は増加する。すなわち、地質条件が同じでも、緩傾斜面の多い流域ほど地下へ浸透する雨水が増して低水位流量は増加、高水位流量は減少し、流況は均等化する。また、それぞれの関係を地質間で比較す

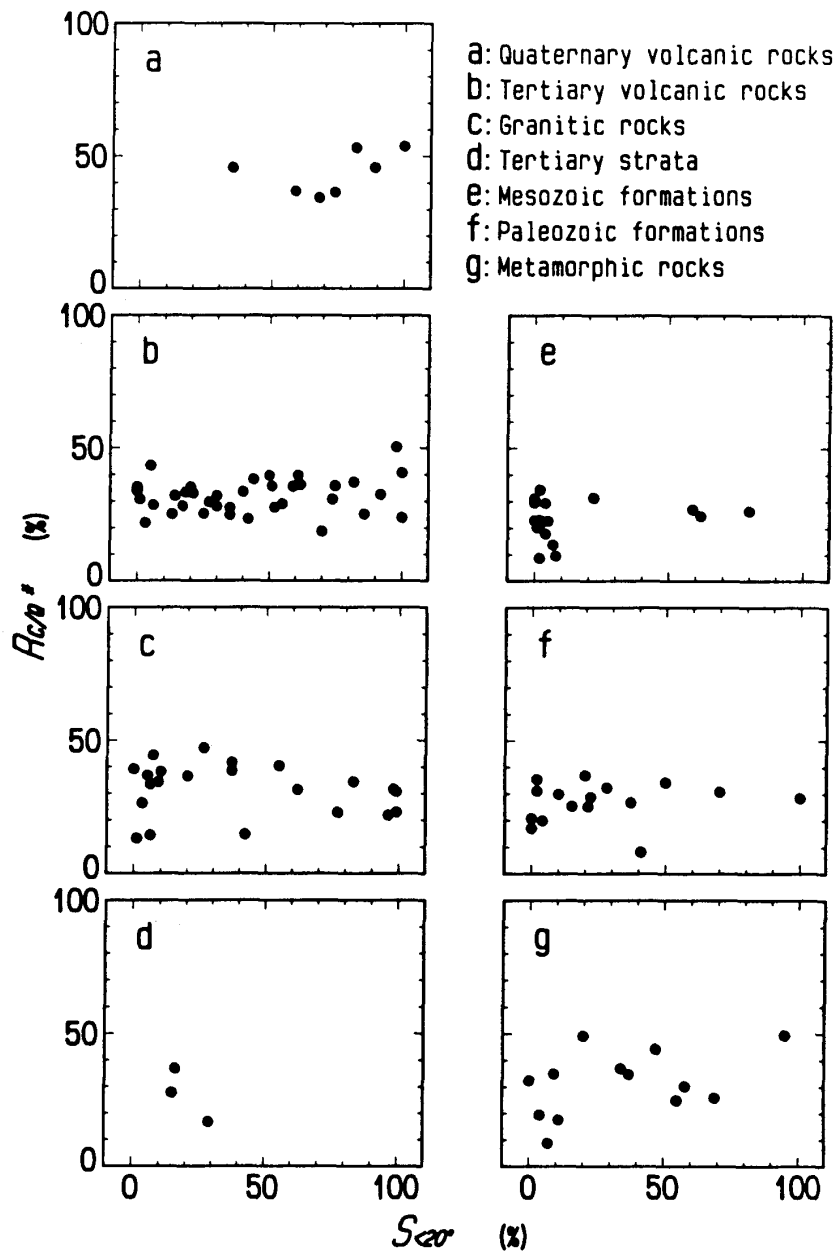


Fig. 4.15 Relationships between $R_{C/Q}^*$ (%) and percentage of gentle slope ($<20^\circ$) to basin area, $S_{<20^\circ}$ (%) for each basin geology.

図-4.15 (調節流出量/総流出量) $R_{C/Q}^*$ と緩傾斜面積率 $S_{<20^\circ}$ の関係。

ると、とくに第四紀火山岩類の流域が同じ程度の流域傾斜でも他の地質に比べて $R_{U/Q}^*$ が小さく、 $R_{C/Q}^*$ が大きい傾向がみられる。

第6節 要 約

本章の課題は、第3章において実証された第四紀の火山活動に起因する火山碎屑物が流域の水源涵養機能に有益な効果を及ぼすという事実を全国に分布する多目的ダム流域の観測データからさらに明確にすることであった。解析に用いた流域は118個の多目的ダム流域であり、流出に雪の影響がほとんどみられない70流域と雪の影響がみられる48流域である。流域の流出状況を把握するため

の流況因子としては流況曲線から得られる情報を利用した。得られた結果を要約すると次のとおりである。

1) 流域地質と流況とのマクロ的な関係解析であることから、流域の地質分類は、第四紀火山岩類、第三紀火山岩類、花崗岩類、第三紀堆積岩類、中生代堆積岩類、古生代堆積岩類、変成岩類の7種に分類した。

2) 流域の水を利用する立場からすれば低水時の流量が大きい方が望ましい。低水時の流出状況を表す指標値に渇水量を用い、降水条件を同じにして地質間の大小を比較すると、第四紀火山岩類の流域でとくに大きく、次いで第三紀火山岩類と花崗岩類の流域、さらに古生代堆積岩類と変成岩類の流域がこれらに次ぎ、中生代堆積岩類の流域では小さい。

3) 流況曲線上において、豊水量と渇水量の差あるいは比が小さいほど高水時と低水時の流量差が小さくなり年間を通して流量が均等化していると評価される。従来から流域の流出の一様性を表す指標値として用いられる豊水・渇水量差と豊水・渇水量比を算出した。これらの流況因子からも火山碎屑物などに覆われた第四紀火山岩類流域からの流出が安定していることが確認された。

4) 流況曲線から得られる因子として最近提案された非調節流出量と調節流出量を算出し、流況を表す因子として有効性について検討した。非調節流出量は流域の流出均等化作用により調節されなかった流出成分を意味し、調節流出量はその逆の意である。したがって、非調節流出量が少ない流域ほど、また調節流出量が多い流域ほど水源涵養機能が高い流域であるといえる。非調節流出量および調節流出量は、流況曲線の2点の流量データから求められる豊水・渇水量差や豊水・渇水量比と比較し、流況曲線において面積で表現されるため、流量データの一部欠測あるいは測定不備などによる誤差の影響が小さく、流況曲線の形状がより正確に表現される。しかし、1水年間の日単位の降水量・流量データを使用するためその算出が面倒であるが、この点はコンピューター等の発達により解決されるものである。非調節流出量および調節流出量は、単位が降水量や流出量と同じあることから量的に把握しやすく、流況を表す因子として有効であると考えられる。

5) 非調節流出量および調節流出量を年降水量や年流出量で割ることにより降水量の影響を排除した因子、 $(\text{非調節流出量}/\text{年降水量})$ 、 $(\text{調節流出量}/\text{年降水量})$ 、 $(\text{非調節流出量}/\text{年流出量})$ 、および $(\text{調節流出量}/\text{年流出量})$ を算出した。 $(\text{調節流出量}/\text{年流出量})$ と $(\text{非調節流出量}/\text{年流出量})$ の関係を求めたところ、両者の間には負の相関関係が認められ、非調節流出量と調節流出量の合計値が年流出量に占める割合は70%前後となっている。残りの約30%は降雨自体が時間的に分散して発生することによるものである。第四紀火山岩類の流域は他の地質に比べ、 $(\text{非調節流出量}/\text{年流出量})$ より $(\text{調節流出量}/\text{年流出量})$ が高く、流域の流出均等化作用が大きいという結果が得られた。

6) 積雪地帯の流域では冬期の降水が流域内にいったん雪として貯留され、融雪期に多量に流出されるため、上記で求めた流況因子では全国に分布している流域の地質と流況の関係を一律に比較するのは適当でない。そこで、積雪地帯と非積雪地帯を同等に検討し得るように降雪・融雪期を除いた夏期の6月～10月間の日雨量・日流出量データから継続時間曲線を求め、非調節流出量および調節流出量を算出した。雪の影響を受けていない夏期みのデータから求めた非調節流出量や調節流出量は全国の流域を一律に比較できる。非調節流出量や調節流出量は算出期間を自由に設定でき、流域条件が流況に及ぼす影響を検出するには有効な因子である。

第5章 総 括

本研究は、火山活動が流域の水文環境に及ぼす影響を人間に対してマイナス的に作用する場合とプラス的に作用する場合の両面から実証的に解明することを目的としたものである。

火山活動がマイナス的に作用する場合とは、火山活動に伴う火山噴出物が噴火直後に周辺の森林植生を破壊し、火山灰被覆による地表浸透能の低下と表面流の発生増大、表面・リル・ガリー侵食、斜面崩壊、土石流・泥流など侵食の激化という一連の現象を引き起こし、人間に多大な被害を及ぼすことである。このような現象は、火山活動が激しく行われていた年代（第三紀～第四紀）には日本各地において頻繁に起こり、その結果、火山地形が形成され、また火山噴出物の被覆により非火山性の山地でも大規模な地形変化が起こったと考えられている（竹下，1987）。現在活発な火山活動を続けている桜島火山においては、小規模の火山活動とはいえマイナス的側面の影響が強く現れている。桜島南岳の火山活動により火山山体は、森林植生が破壊され、山腹では火山灰に被覆に伴う表面流の増大によって侵食、斜面崩壊、土石流・泥流などが頻繁に発生している。その結果海岸部は度々土砂災害に見舞われている。大正3年桜島大噴火（1914年）の際には、その直後大量の火山灰降下に見舞われた大隅半島を中心に土石流・泥流・洪水流による災害が多発した（Shimokawa et al., 1989）。活火山地帯における土砂災害を防止するためには、火山活動が火山体とその周辺流域の水文環境に及ぼす影響を予測することが非常に重要である。

一方、火山活動がプラス的に作用する場合とは、火山噴出物に覆われていた山地に森林植生が回復し、土壌浸透能が改善され、地下への雨水浸透が増大することによって空隙に非常に富む火山性堆積物層が大きな貯水タンクとなり有力な水源涵養体の機能を発揮することである。この事実は、火山地帯の河川の流量が非常に安定していることから経験的に知られてきた。この経験則を適用して、空隙に富む火山性堆積物層に豪雨時の雨水を強制的に浸透させ、洪水調節を行うと同時に地下水の涵養を図ろうというような計画も出されている。こうした計画がダム建設の代替ともなれば国土の有効利用や経済的な面から有益な方策となろう。このような計画が進められるためにも、火山地帯の流出現象の解明と火山碎屑物の貯水機能の定量的な評価は重要な課題である。

以上のような観点にたつて、火山活動が流域の水文環境に及ぼす影響を検討した。以下、各章で明らかにされた点と残された問題点について整理する。

第1章においては、火山活動を続けている桜島山体の火山灰被覆斜面における表面流出現象について検討した。桜島北側斜面において0次谷オーダーの試験流域をクロマツ林と広葉樹林に設定し、一雨ごとの表面流出量と降雨量の観測を火山活動が盛んな時期とやや穏やかな時期の2回行い、その観測結果を解析した。その結果、火山灰の影響を受けた山腹斜面では10分間雨量1.5～2.0mmと非常に小さい降雨で表面流が発生していることが明らかにされた。また、クロマツ林地と広葉樹林地の表面流観測の比較ではクロマツ林地が広葉樹林地より表面流が発生しにくいことが明らかにされた。これは、両林地の土壌構造の違いに関係しており、火山灰、火山ガスの影響下での森林植生の活性化の程度の差でもある。さらに、火山灰影響下の桜島林地の表面流出特性は、火山活動の短期的な盛衰にも敏感に反応している。これは、火山活動が衰退さえすれば温暖多雨な気候条件のもとで桜島では森林植生が回復し、土壌浸透能が改善され、表面流出量が減少することを示唆するものである。これらの観測結果は、火山活動の影響下にある流域での治山・砂防対策に対して有効な指針を与えるものであろう。

第2章においては、桜島山体における土石流・泥流の発生や流出特性について検討した。火山国である日本においては火山流域における土石流・泥流の発生は多大な被害を引き起こしており、その発生や流出機構の解明は重要な課題である。桜島北岳山体において1980年～1989年の10年間に得られた土石流・泥流のビデオ観測データの解析によって、桜島における土石流・泥流は累加雨量が10mmのとき10分間雨量で4～5mm程度、同様に20mmのとき3～4mm程度、30mmのとき2～3mm程度という小さい降雨条件で発生していること、またこの発生降雨条件は火山活動の盛衰により変化することが明らかにされた。さらに、土石流・泥流の規模も降雨だけでなく火山活動にも密接に関係していることが判明した。したがって、活火山流域における土石流・泥流の発生や規模の予測には降雨条件だけでなく火山活動の要因も考慮する必要がある。本章では先行降灰回数という指標値を導入して火山活動を表現することを試みたが、火山活動の定量的把握にはさらに検討を行う必要がある。

第3章においては、火山噴火後、長期間が経過し、火山噴出物の露出していた山地に森林植生が回復した流域での流出現象の解明を試みた。解析に用いたデータは第四紀の火山活動に関連する代表的な流域ともいえる始良カルデラ・桜島火山の周辺に設定した森林流域で観測したものである。火山砕屑物に覆われた流域では、流域内に分布する透水性に優れた火山砕屑物層の存在により中間流出成分が相対的に小さく、雨水の大部分は下層を占める火山砕屑物層を介して地下深くまで導かれ基盤岩との境界に貯留され地下水流出成分となっている。その結果、降雨後短時間に流出する直接流出成分が非常に小さい。さらに、空隙に富む火山砕屑物からなる大きな貯水タンクの中に多量の雨水が貯留され、時間をかけて徐々に流出が行われるため、無降雨時期にも安定した高い基底流量がもたらされている。このことは火山砕屑物層が透水性だけでなく保水性にも優れ、流域の水源涵養機能に対して有益な効果を及ぼしていることを示唆している。今後の検討課題として、火山砕屑物に覆われた流域の透水性・保水性のメカニズムに関するさらに詳細な検討、火山砕屑物に覆われた斜面の土層内での雨水の移動、火山砕屑物の厚さと流域の保水性の定量的な関係などがあげられる。

第4章においては、全国に分布するさまざまな地質の多目的ダム流域の雨量・流量データを用いて、第四紀火山砕屑物が及ぼす流域の水源涵養機能に対する有益な効果を他の地質の流域と比較することによって検討した。流域の流出状況を把握するための流況因子としては流況曲線から得られる情報を利用し、従来よく使用されてきた流況因子と最近提案された流況因子の両方について算出し、流況因子としての有効性についても検討した。その結果、非調節流出量や調節流出量という流況因子、およびそれを応用した流況因子が流域の流況特性を検出するのに有効であることが明らかにされた。これらの流況因子を用いて流域地質と流況との関係解析を行った結果、第四紀火山に関連した地質の流域が他の地質の流域にくらべ流況が安定し、流域の水源涵養機能が最も高いことが明らかにされた。今後の検討課題として、非調節流出量や調節流出量の値の物理的な意味を明らかにし、流域の水源涵養機能の定量的な評価方法について研究する必要がある。

謝 辞

本研究を行うにあたっては多くの方々のご援助を得ている。

まず、研究を行う上で重視した野外観測に関連して、郡山森林理水試験地の開設と観測においては鹿児島県森林保全課、伊集院農林事務所、(財)水利科学研究所に、桜島北側斜面における土石流・泥流観測においては熊本営林局鹿児島営林署、(財)水利科学研究所に、高隈第1号、第2号水文観

測施設の建設および維持管理においては鹿児島大学農学部附属高隈演習林と同大学砂防工学研究室学生諸氏に、桜島表面流出試験地の設置においては砂防工学研究室学生諸氏に、それぞれ多大なご協力を受けた。

また、本研究の遂行にあたっては九州大学農学部竹下敬司教授に終始ご指導いただいた。九州大学農学部戸原義男教授、丸谷知己助教授には原稿のご校閲と有益なご助言をいただいた。研究の実行に際して鹿児島大学大草克己名誉教授からは終始暖かい励ましと九州大学への内地留学の機会を与えていただくなどのご配慮を、鹿児島大学農学部下川悦郎教授には研究の細部にわたるご教示をいただいた。鹿児島大学農学部附属演習林長黒木晴輝助教授、前演習林長林重佐助教授、高隈演習林主任馬田英隆講師をはじめ演習林の職員の方々には水文観測施設建設の際に種々のご便宜をはかっていただいた。

以上、ここに記して深く感謝の意を表します。

末筆ではあるが、当時鹿児島大学工学部教授であった故春山元寿先生には郡山森林理水試験地での水文観測と桜島北側斜面における土石流・泥流観測の機会を与えていただいた。深く感謝の意を表するとともに同先生のご冥福をお祈り申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 阿部謙夫 (1926) : 九州に於ける河川の流量に就て (前編), 土木学会誌, **12**(4), 783-849.
- 2) Blong, R. J. (1984) : Volcanic hazards, Academic Press, Sydney, 424p.
- 3) Collins, B. D. and Dunne, T. (1986) : Erosion of tephra from the 1980 eruption of Mount St. Helens, Geol. Soc. Amer. Bull., **97**, 896-905.
- 4) 土木学会 (1985) : 水理公式集一昭和60年版一, 土木学会, 625p.
- 5) 福山博之・小野晃司 (1981) : 桜島火山地質図, 地質調査所.
- 6) 藤本治義 (1977) : 新地質学汎論, 地人書館, 310p.
- 7) 春山元寿・地頭菌隆・城本一義 (1984) : 桜島における土石流の観測記録, 新砂防, **37**(2), 22-27.
- 8) 春山元寿・地頭菌隆・城本一義 (1987) : 桜島における土石流の観測記録Ⅱ, 鹿児島大学農学部演習林報告, **15**, 39-50.
- 9) 岩井重久・石黒政義 (1970) : 応用水文統計学, 森北出版, 370p.
- 10) Janda, R. J., Meyen, D. F. and Childers, D. (1984) : Sedimentation and geomorphic changes during and following the 1980-1983 eruptions of Mount St. Helens, Washington (1), 新砂防, **37**(2), 10-21.
- 11) Janda, R. J., Meyen, D. F. and Childers, D. (1984) : Sedimentation and geomorphic changes during and following the 1980-1983 eruptions of Mount St. Helens, Washington (2), 新砂防, **37**(3), 5-19.
- 12) 地頭菌隆・春山元寿 (1984) : 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, 鹿児島大学農学部演習林報告, **12**, 25-42.
- 13) 地頭菌隆・春山元寿 (1985) : 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, 鹿児島大学農学部演習林報告, **13**, 159-177.
- 14) 地頭菌隆・下川悦郎・野元俊秀 (1986) : 高隈演習林内の森林理水試験流域における水文観測 (第1報) 高隈第1号試験流域の環境調査と1984年および1985年水文資料解析, 鹿児島大学農学部演習林報告, **14**, 33-50.
- 15) 地頭菌隆・竹下敬司 (1986) : 山地河川の流況と流域条件との関係解析, I. 非調節量による流況の比較, 日林九支研論集, **39**, 279-280.
- 16) 地頭菌隆・竹下敬司 (1987) : 山地河川の流況と流域条件との関係解析, II. 流域地質が流況に及ぼす影響, 鹿児島大学農学部演習林報告, **15**, 15-38.

- 17) 地頭蘭隆・下川悦郎 (1987) : 桜島山腹斜面における表面流出特性, 鹿児島大学農学部演習林報告, **15**, 51-61.
- 18) 地頭蘭隆・下川悦郎・林 重佐・馬田英隆 (1987) : 高隈演習林における水文観測施設 (高隈第2号量水堰堤) の建設について, 鹿児島大学農学部演習林報告, **15**, 83-93.
- 19) 地頭蘭隆・竹下敬司 (1988) : 山地河川の流況と流域条件との関係解析, Ⅲ. 流域の地形・地質と流況の関係, 鹿児島大学農学部演習林報告, **16**, 61-81.
- 20) 地頭蘭隆・下川悦郎・佐伯 孝・海田和孝 (1988) : 高隈演習林内の森林理水試験流域における水文観測—高隈第2号試験流域の地形・地質・植生—, 鹿児島大学農学部演習林報告, **16**, 109-116.
- 21) Jitousono, T., Haruyama, M. and Jomoto, K. (1988) : Features of mud flows in Sakurajima volcano, Kagoshima Int. Conf. on Volcanoes Proceedings, 630-633.
- 22) 地頭蘭隆・下川悦郎 (1989) : 火山灰に覆われた桜島山腹斜面における表面流出, 新砂防, **42**(3), 18-23.
- 23) Jitousono, T. and Shimokawa, E. (1989) : Debris flows in northern flank of Sakurajima volcano, Proc. Int. Symp. on Erosion and Volcanic Debris Flow Technology, Indonesia, V24, 1-20.
- 24) 地頭蘭隆 (1989) : 治山ダム群が流出に及ぼす影響—南九州試験流域における観測例—, 日林九支研論集, **42**, 239-240.
- 25) 地頭蘭隆・下川悦郎 (1990) : 南九州における火山碎屑物に覆われた森林流域の流出特性, 水文・水資源学会誌, **3**(1), 7-16.
- 26) 地頭蘭隆・下川悦郎 (1991) : 桜島における火山活動が土石流・泥流の発生や流出に及ぼす影響, 新砂防, **43**(6), 9-15.
- 27) 鹿児島県 (1972) : 志布志湾地域開発地域, 土地分類基本調査, 岩川5万分の1.
- 28) 鹿児島県 (1974) : 鹿児島地域開発地域, 土地分類基本調査, 川内5万分の1.
- 29) 鹿児島地方气象台 (1980~1989) : 観測資料.
- 30) 加茂幸介・江頭庸夫・石原和弘・河原田礼次郎 (1977) : 桜島における降下火山灰の堆積について, 昭和51年6月豪雨による鹿児島県の土砂および土石流災害に関する調査研究報告, 昭和51年度文部省自然災害特別研究報告書, 77-86.
- 31) 金子 良 (1973) : 農業水文学, 共立出版, 286p.
- 32) 金丸昭治・高棹琢馬 (1975) : 水文学, 朝倉書店, 223p.
- 33) 勝井義雄・中村一明 (1979) : 火山の分布, 岩波講座地球科学7 (火山), 岩波書店, 195-213.
- 34) 河原田礼次郎・長 勝史 (1985a) : シラス地帯河川の水質と流出, 鹿児島大学農学部学術報告, **35**, 221-228.
- 35) 河原田禮次郎・長 勝史 (1985b) : 桜島降灰の表面流出限界降雨強度, 桜島地域学術調査協議会調査研究報告, **2**, 174-176.
- 36) 菊池英彦 (1932) : 我国河川の流量に就て, 土木学会誌, **18**(8), 919-937.
- 37) 岸井徳雄 (1977) : 九州地方の火山灰地帯・非火山灰地帯における諸河川の流出特性, 国立防災科学技術センター研究報告, **17**, 1-16.
- 38) 岸原信義・田中洋二 (1975) : 流域の理水特性に関する研究 (Ⅶ) 流況係数と流域の地形・地質との関連について, 日林誌, **57**, 245-254.
- 39) 岸原信義・石井正典 (1982) : 日本列島の山地流域からの流出に関する研究 (Ⅰ) 流出地帯区分について, 日林誌, **64**, 373-381.
- 40) 岸原信義・石井正典 (1983) : 日本列島の山地流域からの流出に関する研究 (Ⅱ) 流況の表示法と地質区分に関する研究, 日林誌, **65**, 1-8.
- 41) 岸原信義・石井正典 (1984) : 花崗岩地帯の流況と地質・地形との関連について, 95回日林論, 531-532.
- 42) 久野 久 (1976) : 火山及び火山岩, 第2版, 岩波書店, 283p.

- 43) 経済企画庁総合開発局 (国土庁土地局): 都道府県別縮尺20万分の1土地分類図.
- 44) 建設省河川局開発課: 多目的ダム管理年報50~54年度版.
- 45) 小出 博 (1973): 日本の国土 (上) 一自然と開発一, 東京大学出版会, 287p.
- 46) 町田 洋: 火山灰は語る, 蒼樹書房, 324p.
- 47) 守屋以智雄 (1981): 火山災害の諸類型, 地理, **26**(6), 19-30.
- 48) 虫明功臣・高橋裕・安藤義久 (1981): 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, **309**, 51-62.
- 49) 中野秀章 (1976): 森林水文学, 共立出版, 228p.
- 50) 名波義昭 (1988): 地下浸透ダムモデル事業および雪ダムモデル事業について, ダム日本, **527**, 17-29.
- 51) 難波直彦・河原田礼次郎・三輪晃一・長 勝史・若松千秋 (1987): 南九州の小河川流域における土層と流出特性, 鹿児島大学農学部学術報告, **37**, 237-259.
- 52) 太田良平 (1964): シラス研究序説, 地球科学, **72**, 1-10.
- 53) 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, **301**, 109-128.
- 54) 下川悦郎・地頭菌隆ほか (1986): 高隈演習林における水文観測施設 (高隈第1号量水堰堤) の建設について, 鹿児島大学農学部演習林報告, **14**, 57-66.
- 55) 下川悦郎・地頭菌隆 (1987a): 桜島における表面侵食による土砂生産, 新砂防, **39**(6), 11-17.
- 56) 下川悦郎・地頭菌隆 (1987b): 桜島におけるリル・ガリー侵食による土砂生産, 新砂防, **40**(1), 19-24.
- 57) 下川悦郎・地頭菌隆 (1987c): 火山灰の被覆が火山体の侵食速度に及ぼす影響—桜島火山を中心に—, 地形, **8**(4), 269-286.
- 58) Shimokawa, E., Jitousono, T., Yazawa, A. and Kawagoe, R. (1989): An effect of tephra cover on erosion processes of hillslopes in and around Sakurajima volcano, Proc. Int. Symp. on Erosion and Volcanic Debris Flow Technology, Indonesia, V32, 1-35.
- 59) 諏訪 浩・真中朋久・稲庭 篤 (1989): 焼岳上々堀沢における土石流の発生と規模の検討, 京都大学防災研年報, **32B-1**, 229-247.
- 60) Swanson, F. J., Collins, B. D. and Dunne, T. (1983): Erosion of tephra from hillslopes near Mt. St. Helens and other volcanoes, Proc. Symp. Erosion Control in Volcanic Areas, Seattle, July 1982: Ibaraki, Japan, Public Works Research Institute, 183-221.
- 61) 高橋 裕 (1978): 河川水文学, 共立出版, 218p.
- 62) 竹下敬司・高木潤治 (1977): 暖帯林地の水保全環境に関する土壌及び地形的研究, 福岡県林業試験場時報, **26**, 1-51.
- 63) 竹下敬司 (1980): 流域の土地利用状況の変化と流況の変化, 日林九支研論集, **33**, 317-318.
- 64) 竹下敬司 (1981): 森林土壌の水源保全機能に関する解析と評価, 第17回国際林業研究機関連合世界大会論文集, 53-57.
- 65) 竹下敬司 (1982): 桜島火山の降灰に伴う土壌浸透能の変化と火山斜面の侵食, 93回日林論, 413-416.
- 66) 竹下敬司 (1987): 広域火山活動に起因する土壌浸透能の変化とそれに伴う山地の地形変化過程, 地形, **8**(4), 227-248.
- 67) 塚田公彦 (1978): 南薩台地における流出特性, 鹿児島大学教育学部研究紀要 (自然科学編), **29**, 71-79.
- 68) 塚田公彦 (1979): 南薩台地における流出特性 (第2報) 一直接流出と基底流出との関係一, 鹿児島大学教育学部研究紀要 (自然科学編), **30**, 27-39.
- 69) 塚田公彦・上野武朗 (1981): シラス台地およびその周辺流域の水文特性, 水温の研究, **24**(6), 35-43.
- 70) 塚本良則 (1966): 山地流域内に起る水文現象の解析, 東京農工大演習林報告, **6**, 1-79.
- 71) 山本荘毅 (1970): 富士山の水文学的研究—火山体の水文学序説—, 地理学評論, **43**(5), 267-284.

- 72) 山本 博・今川俊明 (1983) : 有珠山1977-1978年噴出物の堆積した斜面における表面流出について, ハイドロロジー, **13**, 25-33.
- 73) 山本 博 (1984) : 有珠山の一斜面における1977-1978年降下火砕堆積物の侵食, 地形, **5**, 111-124.
- 74) 横山勝三 (1972) : 始良カルデラ入戸火砕流の流動・堆積機構, 東京教育大地理学教室地理学研究報告, **16**, 127-167.
- 75) Winograd, I. J. (1971) : Hydrogeology of Ash Flow Tuff: A Preliminary Statement, Water Resources Research, **7** (4), 994-1006.

Summary

In this paper, the effects of volcanic activity on runoff were studied from two viewpoints. One is to examine a few phenomena following volcanic eruption, i.e., covering by tephra, lowering of infiltration capacity, increasing in surface flow and occurrence of debris flow. Another is to examine the role of pyroclastic fall-deposits to be played in the process of headwater-recharge in the catchment underlain by these. The former is concerned with the negative effects of volcano on man's activities, and the latter with its positive effects.

In Chapter 1, an effect of tephra-covering on surface runoff of Sakurajima Volcano was examined on the basis of field investigations. Sakurajima, a volcano standing amidst the Kagoshima Bay in southern Kyushu, Japan, has been characterized by the explosive volcanic activity. The measurements of both the surface runoff and the rainfall were executed in the experimental catchments fixed at a certain Japanese black pine forest and at a broad leaved one on the northern slopes of Sakurajima Volcano during the two periods of eruption-frequencies, the more and the fewer. The results in Chapter 1 are summarized as follows:

1-1) The surface runoff on tephra-covered hillslope was launched simultaneously with the rainfall intensity exceeding 1.5-2.0mm in ten minutes.

1-2) In the broad leaved forest, both the amount and the peak discharge of the surface runoff were greater than those in the Japanese black pine forest. These differences between the phases of surface runoff are caused by the differences between the topsoil structures of both forest-floors.

1-3) Moreover, the characteristics of the surface runoff on hillslope under ash-fall depend on the volcanic activity.

In Chapter 2, some characteristics of debris flow in the volcano were examined. Sakurajima is a stratovolcano, flanks of which have been covered with the older and the younger volcanic products. The hillslopes are largely susceptible to erosion, slope sliding and occurrence of debris flow. In Sakurajima Volcano, debris flows have occurred frequently during rains, creating serious damages to the foot areas. In order to research the occurrence and the runoff mechanism of debris flow quantitatively, the observation facilities of debris flow were established at five points of four ravines in the northern flank of Sakurajima Volcano. In Chapter 2, making use of the video tapes of debris flows and the rainfall records taken during the period from 1980 to 1989, some characteristics of debris flows were described, and the influences of rainfall condition and volcanic activity on the occurrence, the peak discharge, and the total runoff of debris flow were analyzed. The results in Chapter 2 are summarized as follows:

2-1) The materials composing debris flows in the northern flank of Sakurajima Volcano include andesite, pumice, volcanic ash and drift wood, depending on the geological constituents and the degree of erosion in the upper reaches of ravine.

2-2) According to the debris-flow hydrographs and hyetographs taken during the period from 1980 to 1989, a certain correspondence between the occurrence of debris flow and that of the maximum rainfall per

ten minutes is noted. In Sakurajima Volcano, approximately 80% debris flows occur during rainy and typhoon seasons from May to September.

2-3) The relationship between the debris-flow occurrence and the rainfall was examined. The debris flows are to be launched simultaneously with the rainfall intensity exceeding about 4-5mm in ten minutes after the rainfall amount of approximately 10mm, with the intensity exceeding about 3-4mm in ten minutes after the rainfall amount of approximately 20mm, and with the intensity exceeding about 2-3mm in ten minutes after the rainfall amount of approximately 30mm, respectively.

2-4) Effects of the temporal variations of eruption on the debris flow, peak discharge and total runoff of the debris flow were examined. The rainfall intensity for causing the debris flow is smaller during the more frequent volcanic eruptions than during the fewer ones. The rainfall conditions for causing debris flow depend on the volcanic activity. Both the peak discharge and the total runoff of debris flow are larger during the more frequent eruptions than during the fewer ones under the same conditions of rainfall. The runoff characteristics of debris flow in the volcano depend not only on the rainfall but also on the volcanic activity.

In Chapter 3, the characteristics of runoff in the forested watershed covered with volcanic ejecta during the Quaternary period were examined. The effects of volcanoclastic materials on the runoff-characteristics were examined, based on a comparison, concerning the short-term and long-term runoffs, between the watersheds covered with volcanoclastic materials and un-covered with those.

Analyzed watersheds consist of the three experimental watersheds established in southern Kyushu, namely, No.1 Takakuma watershed, No.2 Takakuma watershed and Kooriyama watershed. The area of watershed is 43.42 hectare in the No.1 Takakuma, 34.02 hectare in the No.2 Takakuma, and 27.41 hectare in the Kooriyama, respectively. The No.1 and No.2 Takakuma watersheds are covered with volcanoclastic materials such as volcanic pumice. The deposit of pumice fall in the No.1 watershed is thicker than that in the No.2 watershed. On the other hand, the Kooriyama watershed is not covered with volcanoclastic materials at all. The results in Chapter 3 are summarized as follows:

3-1) To make a quantitative understanding of the runoff-characteristics observable at the three watersheds, a few hydrologic factors of short-term runoff were researched. The duration of direct runoff in the No.1 and No.2 watersheds covered with volcanoclastic materials is shorter than that in the Kooriyama watershed un-covered with those. Therefore, the amount of direct runoff in the No.1 and No.2 watersheds is comparatively little, with the direct-runoff ratio of less than about 10 per cent.

3-2) The characteristics of recession period on the hydrograph at the three watersheds were examined. Compared with the Kooriyama watershed un-covered with volcanoclastic materials, the No.1 and No.2 watersheds covered with those have smaller values of groundwater-recession coefficient, showing more holding capacity of groundwater.

3-3) At the No.1 and No.2 watersheds covered with volcanoclastic materials, a plentiful discharge of base-flow was observed even during the long drought.

Chapter 4 dealt with finding the evidence for the results in Chapter 3 by making use of the hydrologic data obtained at the 118 mountainous basins in Japan. The relationships of the basin-topography and -geology to flow-regime were studied. Basing on a geological viewpoint, the investigated basins were classified into the following seven groups: basins which have been mainly underlain by Quaternary volcanic rocks, those by Tertiary volcanic rocks, those by granitic rocks, those by Tertiary strata, those by Mesozoic formations, those by Paleozoic formations, and those by metamorphic rocks. Percentage of gentle slope ($<20^\circ$) to the basin area was adopted as a factor to represent basin-topography. Factors representing the flow-regime of mountainous basins were obtained from the duration-curve of the basins. The results in Chapter 4 are

summarized as follows:

4-1) Effects of basin-geology on flow-regime were analyzed, with the following result obtained: the function of the headwater-recharge became more inferior in the following order, namely: basins which have been underlain by Quaternary volcanic rocks, those by granitic rocks, Tertiary volcanic rocks and Tertiary strata, those by Paleozoic formations and metamorphic rocks, and those by Mesozoic formations.

4-2) Basin-topography is closely related with basin-geology. Percentage of gentle slope ($<20^\circ$) to the basin area becomes more inferior in the following order, namely: basins underlain by Quaternary volcanic rocks, those by Tertiary volcanic rocks, granitic rocks and metamorphic rocks, those by Paleozoic formations and Tertiary strata, and those by Mesozoic formations.

4-3) Concerning the function of the headwater-recharge, basins underlain by Quaternary volcanic rocks are superior to those by other geologies.