

論文 (Original article)

様々な森林攪乱が流況曲線に及ぼす影響

—宮崎市「去川森林理水試験地」と岡山市「竜ノ口山森林理水試験地」の事例比較—

玉井 幸治^{1)*}, 清水 晃²⁾, 細田 育広³⁾, 宮縁 育夫²⁾, 清水 貴範²⁾,
深山 貴文³⁾, 小南 裕志³⁾, 浅野 志穂²⁾

The Effect of various forest disturbances on water discharge duration curve -The Case Comparison between the Sarukawa experimental watershed in Miyazaki-shi and the Tatsunokuchi-yama experimental watershed in Okayama-shi-

Koji TAMAI^{1)*}, Akira SHIMIZU²⁾, Ikuhiro HOSODA³⁾, Yasuo MIYABUCHI²⁾,
Takanori SHIMIZU²⁾, Takafumi MIYAMA³⁾, Yuji KOMINAMI³⁾ and Shiho ASANO²⁾

Abstract

The effects of forest disturbance on the discharge duration curve were compared among various disturbed cases in the Sarukawa experimental watershed (hereafter Sarukawa), Miyazaki-shi and Tatsunokuchi-yama experimental watershed (hereafter Tatsunokuchi-yama), Okayama-shi. Defining a significance level as 20-30%, the discharge change was judged to be significant in most cases. Although the maximum discharge increase was larger in the Sarukawa than in the Tatsunokuchi-yama, the discharge increase ratio was smaller. More precipitation was thought to reduce the effect of forest coverage on the discharge processes. Discharge increased ratios in both Tatsunokuchi-yama cases were almost equal to be around 50%. Thus, no significant difference in the effect of forest disturbance on discharge was recognized between the cases with disturbed areas of 100% and 84% in the Tatsunokuchi-yama. By contrast, the increased ratios in Sarukawa cases affecting 100% and 43% of the area were around 20% and 13%, respectively. Thus, the difference in the effect of forest disturbance on discharge was recognized between the cases in Sarukawa with the different disturbed areas.

Key words : Warm humid region, Warm dry region, Discharge duration curve, Significance level

要旨

森林攪乱が流況曲線に及ぼす影響を、宮崎市の去川森林理水試験地と、岡山市の竜ノ口山森林理水試験地における事例間で比較を行った。有意水準を20～30%に設定すると、森林攪乱による流出量の変化は多くの場合で有意差があると判断された。竜ノ口山よりも去川では森林攪乱による推定増加流出量の最大値は大きかったが、増加流出割合は小さかった。これは降水量が多い場合には、森林の流出量への影響が相対的に小さくなるためと思われた。流況曲線の100～275日目の範囲において、竜ノ口山における攪乱面積率100%と84%の事例での増加流出割合はともに約50%であり、影響度の違いは見出せなかった。一方、去川における攪乱面積率100%と43%の事例による増加流出割合はそれぞれ約20%と約13%と、違いが認められた。

キーワード：温暖多雨地帯、温暖寡雨地帯、流況曲線、有意水準

1. はじめに

森林からの流出特性は、樹木などによる「蒸発散」と森林土壌を通じての「浸透流出」によって形成される。したがって、森林が攪乱を受けた場合には流出特性が変化する。例えば、山火事(藤枝ら、1979)、マツ枯れ(阿部・谷、1985)、部分伐採(竹下ら、1987)、帯状伐採(Shimizuら、1994、Shimizu、1994)、皆伐とトラクター集材(藤枝ら、1996)など、様々な攪乱形態による流出特性の変化が報告されている。

一方で北村ら(2003)は、4ヶ所の長期森林理水試験地の水収支を比較することにより、気象条件や植物活動の度合いの違いが蒸発散量の違い、ひいては水収支の違いをもたらすことを報告している。このことから、気象条件や植物活動の度合いが異なる地域では、攪乱が「流出特性」に及ぼす影響度が異なると考えられる。

さらに攪乱強度やその後の森林管理の違いによっても、攪乱が「流出特性」に及ぼす影響度が異なるであろう。例えばTamai(2005)は、攪乱後に植林を行なった

原稿受付：平成19年7月17日 Received 17 July 2007 原稿受理：平成20年5月30日 Accepted 30 May 2008

1) 森林総合研究所水土保全領域 Department of Soil and Water Conservation, Forestry and Forest Products Research Institute(FFPRI)

2) 森林総合研究所九州支所 Kyushu Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute(FFPRI)

3) 森林総合研究所関西支所 Kansai Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute(FFPRI)

* 森林総合研究所水土保全領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里1 Department of Soil and Water Conservation, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI), 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan; e-mail:a123@ffpri.affrc.go.jp

場合と自然回復にゆだねた場合との流況曲線の経年変化を比較した。そして攪乱によって変化した流況曲線中の各流出量が攪乱前と同程度に戻るのに要する年数は、植林を行った場合よりも自然回復にゆだねた場合の方が長くなり、渇水流出時ほどその傾向が顕著であることを報告している。

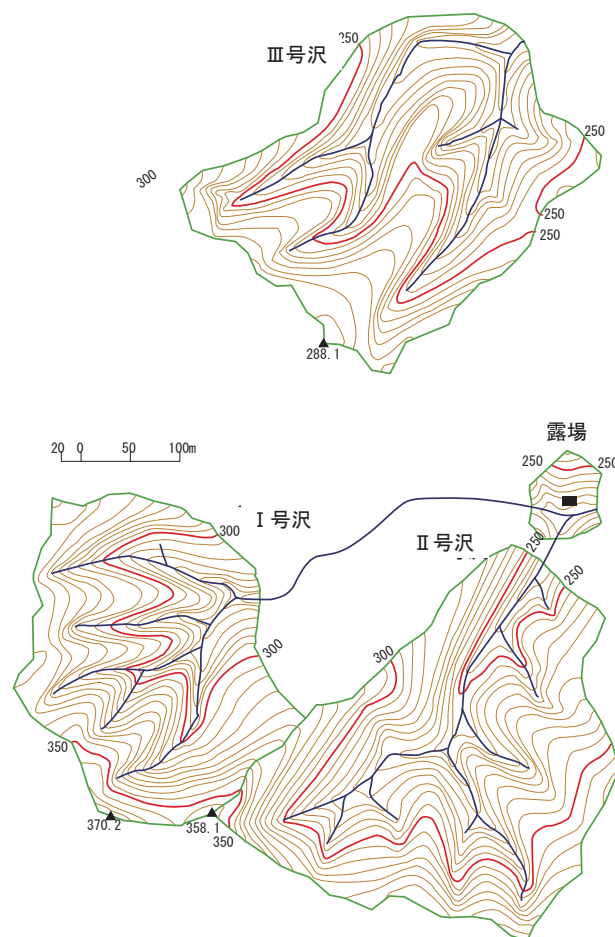
このように、森林攪乱が「流出特性」に及ぼす影響度は、気象条件、植物活動の度合い、攪乱強度やその後の森林管理といった様々な条件で異なると考えられ、したがって異なった地域における様々な森林攪乱の事例を比較することは重要である。そこで本報告では、森林総合研究所の長期森林理水試験地である「去川森林理水試験地」（以降、去川）と「竜ノ口山森林理水試験地」（以降、竜ノ口山）における事例による流況曲線への影響を、対照流域法によって比較する。

なお、去川では竹下ら（1987）が、竜ノ口山では玉井ら（2004）がそれぞれ、森林攪乱が流況曲線に及ぼす影響を解析している。本報告はこれらの解析に若干の捕捉解析と考察を加えたものである。

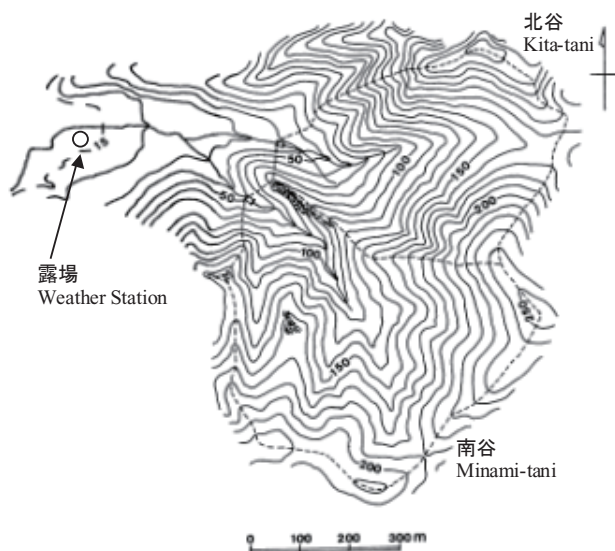
2. 試験地

去川は、大淀川流域の宮崎市高岡町去川国有林（北緯 $31^{\circ} 54'$ 東経 $131^{\circ} 12'$ ）に位置する。標高は $200 \sim 370\text{m}$ である。Ⅰ号沢（ 6.57ha ）、Ⅱ号沢（ 9.17ha ）、Ⅲ号沢（ 8.18ha ）の三つの流域からなり（Fig.1(a)）、1959 年より本格的な水文観測が行なわれている。試験流域の地質は中生層四万十層群からなり、とくに頁岩が優勢である。走向はほぼ N-S で西側に 45 度以上の傾斜で落ち込んでいる。地域内には多くの断層や破碎帯が見られるが、量水施設はこれを避けて設置されている（丸山ら、1960）。観測開始当初における植生は、Ⅰ号沢とⅡ号沢がシイ・カシ類を上層木とした常緑広葉樹林、Ⅲ号沢は谷筋を約 50 年生（1960 年当時）のスギ林が主体であり、尾根部には常緑広葉樹が存在する針広混交林であった。その後、Ⅰ号沢とⅢ号沢は 1965～1966 年に皆伐され、1967 年にⅠ号沢にヒノキを、Ⅲ号沢には流域上部にヒノキ、下部にスギを植栽した。さらに 1982 年にⅡ号沢は、面積率にして沢筋 43% の森林を部分皆伐し、その後は植生の自然回復にゆだねられた（宮縁ら、2007）。現在、この部分は常緑広葉樹林となっている。清水ら（1999）は、1974、1992、1996 年における各流域の単位面積あたりの蓄積量を推定している。そのうち 1974 年の推定値は、Ⅰ号沢で約 $125\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ 、Ⅱ号沢で約 $310\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ 、Ⅲ号沢で $70\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ であった。

竜ノ口山は、旭川左岸の岡山市竜ノ口山国有林（北緯 $34^{\circ} 42'$ 東経 $133^{\circ} 58'$ ）に位置する。標高は $45 \sim 257\text{m}$ である。北谷（ 17.27ha ）・南谷（ 22.61ha ）の二つの流域からなり（Fig.1(b)）、1937 年から観測を行っている。地質は秩父古生層で硬砂岩が優勢である。土壌は植質壤土に分類される礫の多く混じった粘土質層（谷ら、



(a) 去川森林理水試験地
Sarukawa experimental watershed



(b) 竜ノ口山森林理水試験地
Tatsunokuchi-yama experimental watershed.

Figs.1. 去川森林理水試験地と竜ノ口山森林理水試験地の地形図
Topographies of the Sarukawa experimental watershed and the Tatsunokuchi-yama experimental watershed.

1996) である。両流域とも観測開始当初はアカマツ天然林であったが、虫害による枯死が蔓延したため 1944～1947 年にかけて皆伐を行い、北谷、南谷それぞれにおいて単独流域法によって流出量の変化を検討した（中

野、1971)。その後、北谷の森林はほぼ一貫して広葉樹林として成長しているのに対し、南谷では大規模な攪乱だけでも2回受けた事例がある。1959年9月に発生した火災は南谷流域のほぼ全域の植生と落葉層を消失させたが、1960年3月にはクロマツが南谷流域全体に植栽された(岸岡ら、1981)。その後、1978～1980年にはマツクイムシによってクロマツは全滅した(阿部ら、1983)。それ以降は自生した広葉樹が成長し、2005年現在では南谷流域の単位面積あたりの地上部現存量は98.7ton ha⁻¹と、北谷の139.3ton ha⁻¹の約71%にまで回復し、葉面積指数は北谷8.0、南谷7.0と推定された(後藤ら、2006)。

北村ら(2003)は、去川と竜ノ口山を含んだ4ヶ所の長期森林理水試験地における降水量、水収支での損失量、温量指数などを比較した。その解析は、去川を「降水量が多い無積雪地帯に位置する、損失量の多い森林流域」、竜ノ口山を「降水量の少ない無積雪地帯に位置する、損失量の多い森林流域」に分類した。つまり去川と竜ノ口山の両試験地間での特徴的な違いの一つは、降水量の多寡にある。実際、本報告における解析期間中の平均年降水量は、去川(1967～1986年)で2,847mm、竜ノ口山(1937～2002年)で1,201mmであった。

3. 解析方法

1) 対照流域法による基準期間の設定と流況曲線の比較

本報告に用いる長期森林理水観測データは、去川で1967～1986年、竜ノ口山で1937～2002年の日流出量である。九州支場防災研究室(1982)、竹下ら(1996)、農林省林業試験場(1961)、関西支場防災研究室・岡山試験地(1979)、防災研究室・岡山試験地(1981)、後藤ら(2005)によって報告されている。

まずは、竹下ら(1987)、玉井ら(2004)が行なった解析と同様に対照流域法を用いた。そして次のように基準流域・攪乱流域の流況曲線を基準期間内で比較し

た。すなわちある年(year)の基準流域・攪乱流域の流況曲線でi番目に大きな日流出量をそれぞれ $Q_s(\text{year}, i)$ 、 $Q_d(\text{year}, i)$ とする。iごとに、 $Q_s(\text{year}, i)$ と $Q_d(\text{year}, i)$ を対応させたデータセットを作成した。なお閏年で366日目がある場合には、 $i=366$ の値を計算に用いなかった。それぞれのデータセットに対し、 $Q_d(\text{year}, i)$ を目的変数、 $Q_s(\text{year}, i)$ を説明変数とする、(1)式で示すような直線回帰式を求めた。

$$Q_d(\text{year}, i) = a Q_s(\text{year}, i) + b \quad (1)$$

ここで、aは回帰係数、bは回帰定数を示す

基準期間は、竹下ら(1987)、玉井ら(2004)と同様に、去川で1977～1981年、竜ノ口山で1937～1959年、1968～1979年、1998～2002年とした。

2) 森林攪乱の事例の設定

去川では、1965～1966年にⅠ号沢とⅢ号沢が皆伐され、1967年に植林が行なわれた。また1982年にⅡ号沢が、面積率にして沢筋43%の森林を部分皆伐し、その後は植生の自然回復にゆだねられた。そこでⅠ号沢の皆伐を事例1、Ⅲ号沢の皆伐を事例2、Ⅱ号沢の部分皆伐を事例3とする。

一方、竜ノ口山試験地の南谷流域では、藤枝ら(1979)、阿部・谷(1985)が報告している山火事、マツ枯れの他に少なくとも6回の攪乱が記録されている。このうち攪乱面積が7.5haであった灌木の除去等による地拵(1954年)と3.45haであった部分皆伐(1976年)では、その翌年に流出量の増加が非常にわずかながら認められるとしている(Tamai, 2005)。しかし本報告では、森林攪乱の影響が非常に明瞭であり、藤枝ら(1979)、阿部・谷(1985)によって報告されている1959年の林野火災を事例4、1978～1980年のマツ枯れを事例5とする。

5つの事例の概要をTable 1に示す。

Table 1. 森林攪乱の事例の概要
The outline of forest disturbance.

事例番号	基準流域	攪乱流域	攪乱内容	基準期間	攪乱期間	攪乱期間中の 平均年降水量 (mm)	攪乱面積 (ha)	攪乱面積が流 域面積に占め る割合 (%)	攪乱後の 処理
1	Ⅱ号沢	Ⅰ号沢	皆伐		1967-1976	2781.6	6.6	100	ヒノキ植栽
2	Ⅱ号沢	Ⅲ号沢	皆伐	1977-1981	1967-1976	2781.6	8.2	100	ヒノキ・スギ 植栽
3	Ⅰ号沢	Ⅱ号沢	部分皆伐		1982-1986	2999.4	3.8	43	自然回復
4	北谷	南谷	林野火災	1937-1959 1968-1979	1960-1966	1275.0	22.3	100	マツ植栽
5	北谷	南谷	マツ枯れ	1998-2002	1981-1992	1123.6	18.8	84	自然回復

3) 基準期間中の直線回帰式に対する攪乱期間における観測値の有意性の検討方法

この部分は本報告で新たに加えた捕捉解析である。基準期間を対象に求めた(1)式に、攪乱期間の基準流域からの流出量観測値 $Q_{\text{sobs}}(\text{year}, i)$ を代入することによって算出される $Q_{\text{dcal}}(\text{year}, i)$ は、森林が攪乱を受けなかったであろう場合の攪乱流域からの流出量推定値と見なすことができる。竹下ら(1987)、玉井ら(2004)が示したような、基準期間中の直線回帰式を併記した基準流域と攪乱流域からの流出量の散布図では、攪乱期間における流出量を示す点が、直線回帰式よりも左上にプロットされると攪乱流域からの日流出量が相対的に増加したことを、右下にプロットされると相対的に減少したことを意味する。変化量が多く直線回帰式から遠く離れるほど影響度が大きいと解釈されるが、その統計的有意性は直線回帰式の相関係数などによって判断されるため、点と直線回帰式の幾何学的距離だけでその統計的有意性を評価することはできない。直線回帰式に対して変化量が有意に大きな範囲は、(2)式によって表わされる。

$$|Q_{\text{sobs}}(\text{year}, i) - Q_{\text{dcal}}(\text{year}, i)| > t_{n-p-1}(P) \times \hat{\sigma} \quad (2)$$

ここで、 $Q_{\text{sobs}}(\text{year}, i)$ は攪乱期間における攪乱流域からの日流出量観測値、 $Q_{\text{dcal}}(\text{year}, i)$ は攪乱期間における攪乱流域からの(1)式による日流出量推定値であり、攪乱が無かった場合に期待される日流出量に相当する。 $t_{n-p-1}(P)$ は有意水準が P であり、直線回帰式を求めたときのサンプル数が n 、説明変数の数が p であったときの、片側 100% 点を意味する。そして $\hat{\sigma}$ は攪乱期間ではなく、基準期間を対象に(1)式によって計算された $Q_{\text{dcal}}(\text{year}, i)$ の不偏分散を 1/2 乗した値である。本報告の場合、 n は基準期間の年数に等しい。また説明変数は基準流域からの流出量のみであるから、 $p=1$ である。有意水準 P の値は、統計学では 5% や 10% にするのが一般的である。

4) 攪乱による増加流出量と増加流出割合の推定

(3)式によって、攪乱による日流量の推定増加流出量 $\Delta Q_d(\text{year}, i)$ と増加流出割合を算出する。5つの事例は、それぞれ 5～12 年の攪乱期間である。 $\Delta Q_d(\text{year}, i)$ は攪乱期間の各年のそれぞれ $i=1 \sim 365$ について算出される。

$$\Delta Q_d(\text{year}, i) = Q_{\text{sobs}}(\text{year}, i) - Q_{\text{dcal}}(\text{year}, i) \quad (3)$$

また $\Delta Q_d(\text{year}, i)$ を $Q_{\text{dcal}}(\text{year}, i)$ で除して 100 倍

した値を増加流出割合(単位: %)とする。

4. 結果と考察

1) 基準期間中の日流出量の流域間での直線回帰式

去川Ⅱ号沢－Ⅰ号沢(事例1)、去川Ⅱ号沢－Ⅲ号沢(事例2)、竜ノ口山北谷－南谷(事例4, 5)の各流域間で、 $i=1 \sim 365$ の全範囲で、日流出量の直線回帰式を求めた。竜ノ口山北谷－南谷の場合、相関係数は最低でも 0.813 であった。しかし去川Ⅱ号沢－Ⅰ号沢では 365 日の中で 55 日、去川Ⅱ号沢－Ⅲ号沢では 36 日、相関係数が 0.7 を下回った。特に去川Ⅱ号沢－Ⅰ号沢では、 $i=306 \sim 365$ で相関係数が 0.7 以上であったのは、わずかに 5 日のみであった。去川Ⅱ号沢－Ⅲ号沢では、 $i=332 \sim 350$ で相関係数が連続して 0.7 を下回った。これらの日は、今後の解析から除外した。直線回帰式の一例として、豊水量($i=95$)、平水量($i=175$)、低水量($i=265$)、渇水量($i=355$)のものを Figs.2～5 に示した。ただし去川Ⅱ号沢－Ⅰ号沢では、 $i=355$ の日の相関係数は 0.7 を下回ったので、 $i=320$ の日の例を代わりに示した。いずれの図でも、基準流域からの流出量を X 軸、攪乱流域からの流出量を Y 軸にしている。若干の例外はあるものの、多くの攪乱期間の値を示す□や○は、基準期間の値を示す◆よりも左上にプロットされている。これは、攪乱期における攪乱流域からの日流出量が相対的に増加したと考えられる年が多かったことを示している。

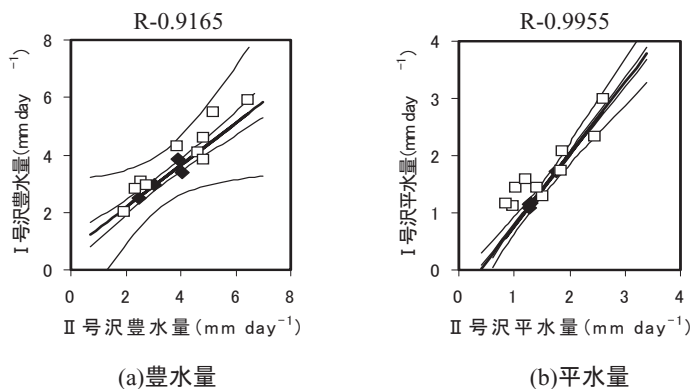
2) 有意とみなせる水準

Figs.2～5 には、横軸に基準流域からの、縦軸に攪乱流域からの日流出量を、有意水準 5% と 30% の範囲を示す線と合わせて示している。太線が回帰直線を示す。4本の細線のうち、内側 2 本が 30%、外側 2 本が 5% の範囲を示している。有意水準 5% の線よりも外側にある点は危険率 5% で有意差があることを、30% よりも内側にある点は危険率 30% でも有意差がないことを、それぞれ意味している。

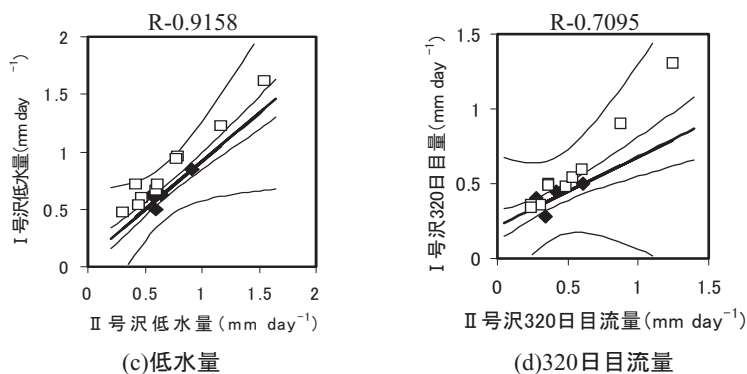
去川Ⅱ号沢－Ⅰ号沢(事例1)と去川Ⅰ号沢－Ⅱ号沢(事例3)の低水量(Fig.2(c)、Fig.4(c))を例に説明する。攪乱期間中の値は□や○によって示されている。この2つの図の中で、統計学で一般的に用いられる危険率 5% で有意差がある範囲にある□や○はない。しかしある程度の有意水準ならば、有意差はあると判断される点が多い。たとえば Fig.2(c) と Fig.4(c) の場合では、10 個の□の全てと 5 つの○のうちの 3 つが、5～30% の 2 本の線間にある。つまり危険率を 30% とした場合には、10 個の□と 3 個の○が、有意差があると判断される範囲にあることになる。そこで(4)式によって、Figs.2～5 に示した事例の各年の値が「有意差がある」と判断される有意水準を求めた。

$$t_{n-p-1}(P) = \frac{|Q_{\text{sobs}}(\text{year}, i) - Q_{\text{dcal}}(\text{year}, i)|}{\hat{\sigma}} \quad (4)$$

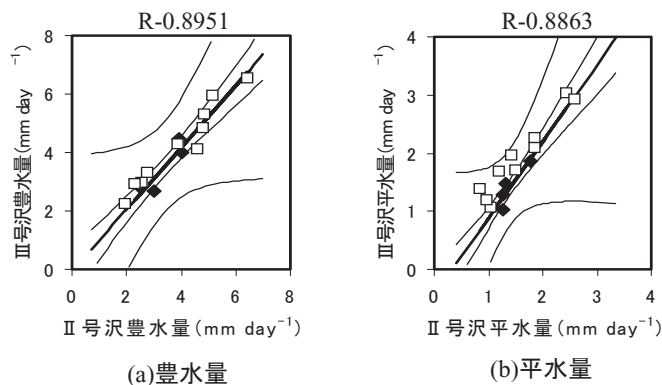
-The Case Comparison between the Sarukawa experimental watershed in Miyazaki-shi and the Tatsunokuchi-yama experimental watershed in Okayama-shi-



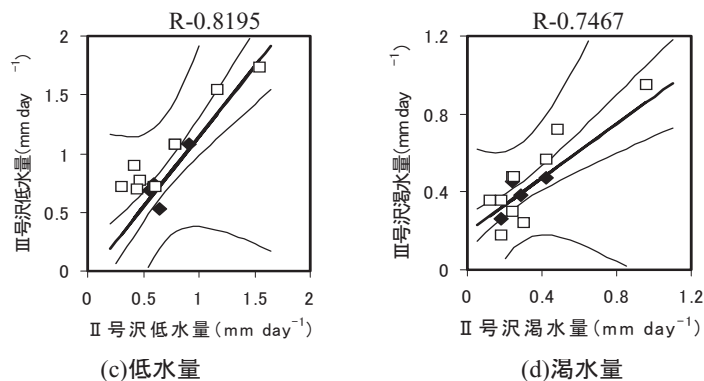
◆：基準期間 (1977 ~ 1981 年)
 □：攪乱期間 (1967 ~ 1976 年)
 太線：基準期間における直線回帰式
 内側の細線：有為水準 30% の範囲を示す線
 外側の細線：有為水準 5% の範囲を示す線
 各図の上の数値は、直線回帰式の相関係数



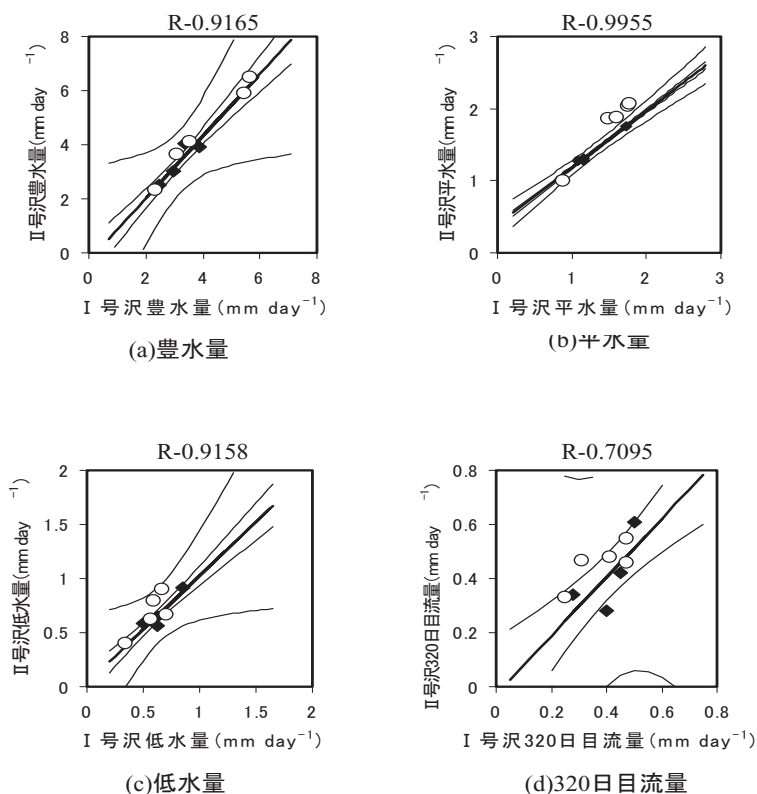
Figs.2. 基準流域と攪乱流域における豊水量、平水量、低水量、320 日目流量の比較
 (事例 1：去川 I 号沢の皆伐による場合), 基準流域：II 号沢、攪乱流域：I 号沢
 Comparisons of plentiful, ordinary, low and 320th daily water discharges between control and disturbed watersheds.
 (The case of clear cut in Sarukawa No.1 watershed), Control watershed: Sarukawa No.2, Disturbed watershed: Sarukawa No.1



◆：基準期間 (1977 ~ 1981 年)
 □：攪乱期間 (1967 ~ 1976 年)
 太線：基準期間における直線回帰式
 内側の細線：有為水準 30% の範囲を示す線
 外側の細線：有為水準 5% の範囲を示す線
 各図の上の数値は、直線回帰式の相関係数

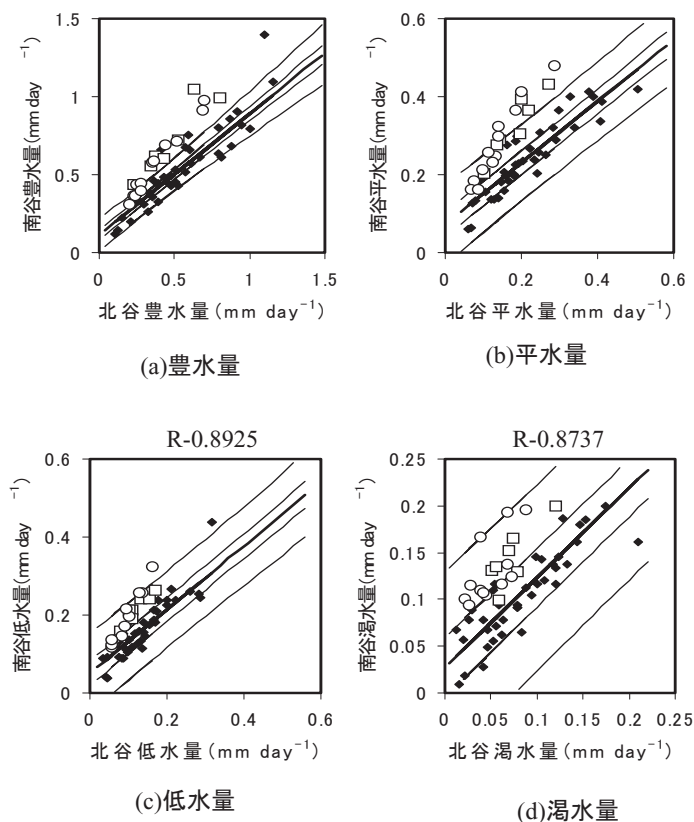


Figs.3. 基準流域と攪乱流域における豊水量、平水量、低水量、渇水量の比較
 (事例 2：去川 III 号沢の皆伐による場合), 基準流域：II 号沢、攪乱流域：III 号沢
 Comparisons of plentiful, ordinary, low and drought water discharges between control and disturbed watersheds.
 (The case of clear cut in Sarukawa No.3 watershed), Control watershed: Sarukawa No.2, Disturbed watershed: Sarukawa No.3.



◆：基準期間（1977～1981年）
 ○：攪乱期間（1982～1986年）
 太線：基準期間における直線回帰式
 内側の細線：有為水準30%の範囲を示す線
 外側の細線：有為水準5%の範囲を示す線
 各図の上の数値は、直線回帰式の相関係数

Figs.4. 基準流域と攪乱流域における豊水量、平水量、低水量、320日目流量の比較
 (事例3：去川Ⅱ号沢の部分皆伐による場合)、基準流域：Ⅰ号沢、攪乱流域：Ⅱ号沢
 Comparisons of plentiful, ordinary, low and 320th daily water discharges between control and disturbed watersheds.
 (The case of partial clear cut in Sarukawa No.2 watershed). Control watershed: Sarukawa No.1, Disturbed watershed: Sarukawa No.2.



◆：基準期間（1937～1959、1968～1979、1998～2002年）
 □：事例4：南谷林野火災の攪乱期間（1960～1966年）
 ○：事例5：南谷マツ枯れの攪乱期間（1981～1994年）
 太線：基準期間における直線回帰式
 内側の細線：有為水準30%の範囲を示す線
 外側の細線：有為水準5%の範囲を示す線
 各図の上の数値は、直線回帰式の相関係数

Figs.5. 基準流域と攪乱流域における豊水量、平水量、低水量、渇水量の比較
 (事例4：竜の口山南谷の林野火災、事例5：マツ枯れによる場合) 基準流域：北谷、攪乱流域：南谷
 Comparisons of plentiful, ordinary, low and drought water discharges between control and disturbed watersheds.
 (The case of partial clear cut in Sarukawa No.3 watershed). Control watershed: Tatsunokuchi-yama Kitadani, Disturbed watershed: Tatsunokuchi-yama Minamidani.

(4) 式で得られた $t_{n-p-1}(P)$ の値の得られる P の値を「有意とみなせる水準」と定義し、Table1 に示した事例ごとに Table2 に示す。去川Ⅱ号沢の部分皆伐を対象とした事例3で基準流域をⅠ号沢とした理由は、 $i>306$ の範囲では相関係数が極めて低いものの、それ以外の範囲ではⅡ号沢－Ⅰ号沢の方の相関係数が相対的に高かったためである。

去川Ⅱ号沢－Ⅰ号沢、去川Ⅰ号沢－Ⅱ号沢の平水量と竜ノ口山北谷－南谷（事例4）での豊水量では、ほとんどの点で有意とみなせる水準は10%以下であった。これは直線回帰式の相関係数がそれぞれ0.9955と0.9283と高かったのが一因である。

有意水準を20～30%に設定した場合には、多くの点で有意差があると判断できた。

3) 攪乱による豊水、平水、低水量の推定増加流出量と増加流出割合

(3) 式によって、攪乱期間各年の $i=1\sim365$ それぞれについて $\Delta Q_d(\text{year}, i)$ を計算した。Table 3 は、豊水量、平水量、低水量、渇水量（事例1, 3 は $i=320$ ）の事例ごとに、 $\Delta Q_d(\text{year}, i)$ の平均値と標準偏差を示したものである。例えば、去川Ⅰ号沢－Ⅱ号沢（事例3）の攪乱期間5年間での豊水量の推定増加流出量の平均は 0.204mm day^{-1} 、標準偏差は 0.217mm day^{-1} であった。総体的に去川での事例のほうが竜ノ口山での事例よりも標準偏差の値は大きかった。推定増加流出量の平均値は、平水量では顕著に去川での事例の方が大きい。他の水量では傾向があまり明瞭ではなかった。それは、去川では $\Delta Q_d(\text{year}, i)$ が負となった日が多いためである（Figs.2～5）。豊水量、平水量、低水量、渇水量（事例1, 3 は $i=320$ ）の中で、竜ノ口山での76日の全てで $\Delta Q_d(\text{year}, i)$ はプラスとなったが、去川での100日のうち17日で $\Delta Q_d(\text{year}, i)$ がマイナスであった。

次に各事例における増加流出割合について述べる。Table 3 に示した増加流出割合は、攪乱期間中における推定増加流出量の平均値を、 Q_{dcal} の平均値で除した値である。推定増加流出量の場合とは逆に、増加流出割合は去川よりも竜ノ口山の方が大きな傾向にあった。それは去川の流出量は竜ノ口山のそれよりもはるかに大きく、特に豊水量は5倍以上も多いためと考えられる。 Q_{dcal} に対する標準偏差の割合も、竜ノ口山における事例のほうが小さいか、同程度であった。

Table 2. 各事例における「有意とみなせる水準」の攪乱期間の各年における値(%)
(事例1と事例2は、320日目流量についての値)
The significance level(%) of discharge changes during discharge periods.

試験地	事例	年	豊水量	平水量	低水量	渇水量
去川	Ⅰ号沢皆伐 (事例1)	1967	14.54	0.32	20.35	35.19
		1968	41.62	0.91	13.08	25.68
		1969	26.64	5.34	16.32	16.69
		1970	26.09	3.09	23.32	48.23
		1971	48.29	0.52	18.31	39.39
		1972	28.82	6.75	18.02	12.59
		1973	7.34	2.46	6.41	18.37
		1974	20.17	0.28	5.64	45.77
		1975	9.04	9.18	21.41	10.60
		1976	25.45	11.83	5.93	21.95
	Ⅲ号沢皆伐 (事例2)	1967	30.70	32.27	40.34	10.13
		1968	37.66	18.51	42.43	25.68
		1969	23.19	26.13	18.07	16.69
		1970	38.19	6.82	21.70	48.23
		1971	47.52	8.95	14.50	39.39
		1972	49.01	34.19	29.33	12.59
		1973	33.80	40.43	21.85	28.21
		1974	24.04	8.15	9.99	14.48
		1975	28.25	47.32	46.27	10.60
		1976	42.30	23.10	20.46	21.95
	Ⅱ号沢部分 皆伐（事例 3）	1982	21.19	0.59	7.09	34.10
		1983	39.51	1.08	35.56	20.44
		1984	47.52	10.43	42.37	33.96
		1985	49.01	0.94	9.27	34.15
		1986	21.99	1.10	28.81	45.18
竜ノ口 山	林野火災 (事例4)	1960	0.20	4.20	10.88	16.51
		1961	0.04	5.49	9.77	13.02
		1962	1.14	19.27	23.39	18.19
		1963	0.00	0.39	8.44	39.98
		1964	0.78	9.75	20.90	18.09
		1965	0.14	2.25	13.54	33.15
		1966	0.08	0.92	10.78	16.63
	マツ枯れ (事例5)	1981	0.00	0.17	5.85	8.69
		1982	0.10	11.08	14.79	22.20
		1983	0.15	2.57	7.58	4.65
		1984	11.48	14.95	29.65	28.32
		1985	1.69	19.43	35.10	19.36
		1986	13.66	28.07	35.57	25.65
		1987	26.20	35.35	33.02	25.02
		1988	0.02	1.01	32.42	30.66
		1989	0.13	0.88	4.59	32.12
		1990	0.02	0.18	1.01	4.95
		1992	2.63	14.72	21.82	22.40
		1994	11.45	5.77	25.64	15.86

Table 3. 森林攪乱の各事例における豊水量、平水量、低水量、渇水量の推定増加流出量と増加流出割合（事例1と事例3の渇水量の値は、320日目の値）。
Estimated increased volumes and ratios caused by forest disturbance in plentiful, ordinary, low and drought water discharge.

事例	水量	Q _{deal} の平均値 (mm day ⁻¹) A	推定増加流出量 (mm day ⁻¹)		増加流出割合 (%)	
			平均値 B	標準偏差 C	平均値 B/A	標準偏差 C/A
I 号沢皆伐 (事例1)	豊水量	3.577	0.345	0.417	10	12
	平水量	1.483	0.238	0.315	16	21
	低水量	0.675	0.173	0.068	26	10
	320 日目流量	0.458	0.131	0.159	29	35
Ⅲ号沢皆伐 (事例2)	豊水量	4.081	0.178	0.407	4	10
	平水量	1.628	0.308	0.238	19	15
	低水量	0.800	0.198	0.159	25	20
	渇水量	0.429	0.035	0.116	8	27
Ⅱ号沢部分皆伐 (事例3)	豊水量	4.438	0.204	0.217	5	5
	平水量	1.570	0.204	0.155	13	10
	低水量	0.600	0.080	0.112	13	19
	320 日目流量	0.386	0.072	0.065	19	17
林野火災 (事例4)	豊水量	0.484	0.227	0.105	47	22
	平水量	0.215	0.108	0.038	50	18
	低水量	0.151	0.066	0.015	44	10
	渇水量	0.097	0.048	0.020	49	21
マツ枯れ (事例5)	豊水量	0.408	0.158	0.090	39	22
	平水量	0.181	0.098	0.055	54	30
	低水量	0.125	0.059	0.039	47	31
	渇水量	0.075	0.056	0.026	75	35

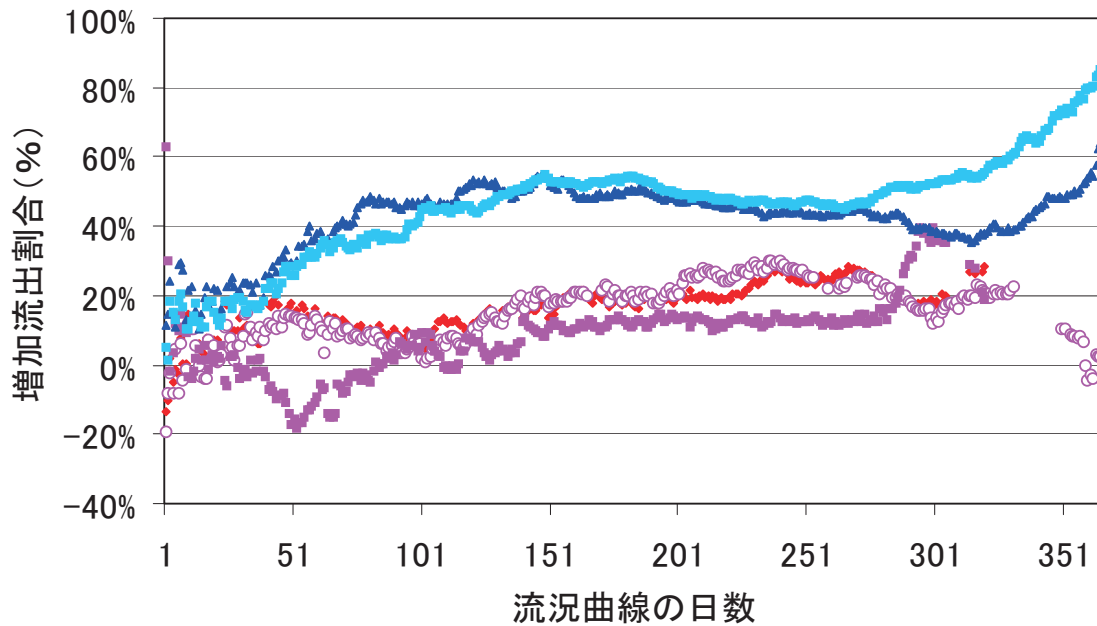
4) 事例間における増加流出割合の比較

Table 3 では、流況曲線のうち豊水量、平水量、低水量、渇水量（事例1, 3は*i*=320）の4日間のみの増加流出割合の平均値と標準偏差の比較を示した。Fig.6では*i*=1～365の全ての範囲における増加流出割合を比較する。竜ノ口山での事例は青系の、去川での事例は赤系の色で示している。去川における事例では、増加流出割合がマイナスになっている場合が竜ノ口山に比べて多い。このうち去川Ⅰ号沢－Ⅱ号沢（事例3）の*i*=30～85と、去川Ⅰ号沢－Ⅱ号沢（事例2）の*i*=350～365といったマイナスとなっている部分は、他の事例とは大きく異なった変動を示している。またマイナスではないものの去川Ⅰ号沢－Ⅱ号沢の*i*=285～295での急激な増加も他の事例とは大きく異なった。これらの点は、さらに観測事例を重ねて検討を加える必要があろう。

i=100～275の範囲で各事例の増加流出割合を比較する。竜ノ口山北谷－南谷（事例4、5）では攪乱面積率がそれぞれ100%、84%であるが、増加流出割合は両方とも約50%程度と大きな違いは認められなかった。それに対し、攪乱面積率100%の去川Ⅱ号沢－Ⅰ号沢（事例1）と去川Ⅱ号沢－Ⅲ号沢（事例2）では増加流出割合が約20%程度でそろっている。先にも述べたように去川では降水量が多いためであろう。去川でも攪乱面積率43%である去川Ⅰ号沢－Ⅱ号沢（事例3）の増加流出割合は約13%程度と、去川Ⅱ号沢－Ⅰ号沢、去川Ⅱ号沢－Ⅲ号沢の場合の約6割であった。これは攪乱面積率の違いによるものであろう。竜ノ口山でも Tamai

（2005）に攪乱面積率の違いによる流出への影響度の違いが報告されている。それによると竜ノ口山で攪乱面積率34%と15%の部分皆伐などの場合でも、本報告の竜ノ口山北谷－南谷に比べると小さいものの流出への影響が見られたが、攪乱面積率11%以下の間伐では流出への影響は認められなかったとしている。

-The Case Comparison between the Sarukawa experimental watershed in Miyazaki-shi and the Tatsunokuchi-yama experimental watershed in Okayama-shi-



Figs.6. 事例間における増加流出割合の比較
Comparison of estimated increased ratios in discharge duration
curve for each disturbed case.

◆：事例1（去川Ⅰ号沢皆伐）、○：事例2（去川Ⅲ号沢皆伐）、■：事例3（去川Ⅱ号沢部分皆伐）、▲：事例4（竜ノ口山林野火災）、■：事例5（竜ノ口山マツ枯れ）

5. まとめ

森林攪乱が流況曲線に及ぼす影響を、降水量が多い無積雪地帯に位置する損失量の多い去川と、降水量の少ない無積雪地帯に位置する損失量の多い竜ノ口山における事例間で比較を行った。その結果、竜ノ口山よりも去川では森林攪乱による推定増加流出量の最大値は大きかったが、増加流出割合は小さかった。これは降水量が多い場合には、森林の影響が相対的に小さくなるためと思われる。流況曲線の100～275日目の範囲において、竜ノ口山における攪乱面積率100%と84%の事例での増加流出割合はともに約50%であり、影響度の違いは見出せなかった。一方、去川における攪乱面積率100%と43%の事例による増加流出割合はそれぞれ約20%と約13%と、違いが認められた。

今後、事例を増やして解析を行う必要がある。例えば、竜ノ口山では攪乱面積率が11%程度よりも小さい事例は間伐のみであり、部分的にも樹木がまったく無くなった場合には、影響度は異なるかもしれない。また去川では攪乱面積率が100%と43%の場合しかない。もっと攪乱面積率が低い事例も必要であろう。

さらに本報告は損失量の多い無積雪地帯における流域間の比較であったが、損失量の少ない地域や積雪による効果なども検討を行う必要があろう。

本報告は、「去川」、「竜ノ口山」両森林理水試験地の観測報告を基にして行った。森林総合研究所九州支所、関西支所の歴代研究職員のほか、量水堰堤の保守管理や

データの整理に従事された多くの方々の働きに負うところの多い報告です。ここに、お礼を申し上げます。

引用文献

- 阿部敏夫・谷 誠・岸岡 孝・小林忠一（1983）松くい虫被害の直接流出に及ぼす影響について，第34回日林関西支講，337-340.
- 阿部敏夫・谷 誠（1985）松くい虫による松枯れが流出に及ぼす影響，日林誌，**67**，261-270.
- Bosch J. M. and Hewlett J. D. (1982) A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration, *J. Hydrol.*, **55**, 3-23.
- 防災研究室・岡山試験地（1981）竜の口量水試験地報告，林業試験場関西支場年報，**22**，56-69.
- 後藤義明・玉井幸治・小南裕志・深山貴文（2005）竜の口山森林理水試験地観測報告（1981年1月～2000年12月），森林総合研究所報告，**4**，87-133.
- 後藤義明・玉井幸治・深山貴文・小南裕志・細田育広（2006）竜の口山森林理水試験地における広葉樹二次林の階層構造に及ぼす攪乱の影響，森林総合研究所報告，**5**，215-225.
- 藤枝基久・岸岡 孝・阿部敏夫（1979）竜の口山南谷流域における山火事が流出に及ぼす影響，日林誌，**61**，184-186.
- 藤枝基久・野口正二・小川真由美（1996）森林流域における土地被覆変化が水文環境に与える影響－皆伐・トラクタ集材を例にして－，日林誌，**78**，43-49.
- 関西支場防災研究室・岡山試験地（1979）竜の口山森林理水試験地観測報告（1959年1月～1977年12月），林業試験場報告，**308**，133-195.
- 岸岡孝・阿部敏夫・谷 誠（1981）竜の口山南谷流域における山火事およびその跡地へのクロマツ植栽による増水ピーク流量の変化，林業試験場関西支場年報，**23**，55-58.
- 北村兼三・中井裕一郎・鈴木 覚（2003）定山溪森林理水試験地の水収支，森林総合研究所北海道支所研究レポート，**70**，1-4.
- 九州支場防災研究室（1982）去川理水試験地観測報告（1967年1月～1976年12月），林業試験場報告，**317**，147－190.
- 丸山岩三・遠藤 尚・吉筋正二・浅田正朗（1960）去川森林理水試験第1回報告去川試験地の地形と地質，林業試験場報告，**123**，47-70.
- 宮縁育夫・玉井幸治・小川泰浩・清水貴範（2007）九州南部の森林流域における2005年台風14号豪雨による出水と土砂流出，地形，**28**，127-142.
- 中野秀章（1971）森林伐採および伐採地の植生変化が流出に及ぼす影響，林業試験場研究報告，**240**，1-251.
- 農林省林業試験場（1961）関西支場岡山分場（竜の口山森林理水試験地），森林理水試験観測報告，174-225.
- Shimizu, T., Tsuboyama, T. and Hosoda I. (1994) Effects of contour-line strip-cutting on stream flow (I) -Long-term runoff characteristics during the warm season-, 日林誌，**76**，393-401.
- Shimizu, T. (1994) Effects of contour-line strip-cutting on stream flow (II) -Short-term runoff characteristics during the warm season-, 日林誌，**76**，492-499.
- 清水 晃・佐藤 保・清水貴範・小川泰浩・宮縁育夫（1999）去川森林理水試験地の植生と蓄積変化，日林九支研論文集，**52**，103-104.
- 竹下 幸・大谷義一・河合英二（1987）山地小流域の流出機構（III）一部分伐採が各種流出量におよぼす影響－，日林九支研論文集，**40**，103-104.
- 竹下 幸・清水 晃・宮縁育夫（1996）去川森林理水試験地観測報告（1977年1月～1986年12月），森林総合研究所研究報告，**370**，31-75.
- 玉井幸治・後藤義明・深山貴文・小南裕志（2004）林野火災とマツ枯れによる森林の衰退が流出量と流況曲線に及ぼす影響－岡山市竜の口山量水試験地の場合－，日林誌，**86**，375-379.
- Tamai K. (2005) A paired-catchment experiment in the Tatsunokuchi-yama experimental forest, Japan –the influence of forest disturbance on water discharge-, *WIT transactions on Ecology and the Environment*, **83**，173-181.
- 谷 誠・阿部敏夫（1996）パイプなどの水みちが発達した斜面土層からの流出水の通減特性，水文・水資源学会誌，**9**，425－437.