

森林流域における渇水時流出量の 年々変動に関わる降水量指標の検討

PRECIPITATION FACTORS AFFECTING YEAR-TO-YEAR FLUCTUATION IN LOW FLOW OF A FORESTED WATERSHED

蔵治光一郎
Koichiro KURAJI

正会員 博(農) 東京工業大学講師 大学院総合理工学研究科 (〒226-8501 横浜市緑区長津田町4259)

To provide an assessment of the effects of the year-to-year fluctuation in precipitation and forest growth on the low flow of a headwater watershed, 61-year precipitation and discharge data in the Shirasaka Watershed in Japan were analyzed. The minimum flow in winter tended to be greater than that in summer in the 1930s and 1940s, whereas the minimum flow in summer tended to be greater than that in winter from 1950 to 1990. The precipitation factors, which have a reasonable degree of correlation with the annual low flow, were different in summer and in winter. Vegetation growth has occurred for 60 years in this watershed and the differences in trends between low flow and precipitation factors may be due to the effect of vegetation growth.

Key Words : forested watershed, low flow, year-to-year fluctuation, precipitation factors

1. はじめに

山地源流域における森林の存在が、渇水時の流出量にどのような影響を与えるかという問題は、水文研究者のみならず森林管理技術者から一般の人々に至るまで広い関心を呼んでいる。この問題に対しては、森林流域は保水能力があり長期間にわたって水を保持するため、渇水を緩和する機能があるという見方がある一方で、森林は遮断蒸発や蒸散により多量の水を消費するため、むしろ逆効果であるという相反した見方が存在する。様々な気候・地質・森林条件下で、森林流域のもつ渇水緩和機能を科学的・定量的に評価することは、水文研究者に課せられた急務の一つである。このような研究を進めるにあたり、渇水は数年に一度の寡雨により発生する現象であることから、年々の降水状況の変動が森林流域の渇水流出量に及ぼす影響を明らかにすることが、まず検討されなければならない基本的課題として挙げられる。

劉ら¹⁾は、年々の降水状況の変動が各年の流況曲線に与える影響を明らかにすることを目的として、東京大学愛知演習林白坂流域の62年間の水文観測記録を解析した。この研究により、流況曲線上における年最大日流出量、50日目～150日目流出量に関しては、その年々変動が年最大日降水量や年降水量の一次式で与えられる降水量指

標の変動に関係していることが明らかになった。しかし、300日目以降の流出量、すなわち渇水時の流出量に関しては、適切な降水量指標が見出されていない。

そこで本研究では、渇水時流出量の年々変動に関わる降水量指標の抽出と、得られた指標の年々変動と渇水時流出量の年々変動の比較を目的として、劉ら¹⁾が対象とした流域と同じ流域を対象として、61年間の水文観測記録を解析した。なお渇水という用語は河川流出量の多寡と水需要のバランスにより水不足を生じる状態を指す社会学的用語としての意味が本義であるが、本論文では単に流出量が相対的に少ない状態を指す用語として用いることとし、水需要とのバランスは考慮していない。

2. 対象流域

対象流域は東京大学愛知演習林白坂流域(愛知県瀬戸市、88.5ha)である。流域の位置と地形図を図-1に示す。流域の標高は294-629m、平均年降水量、平均年流出量(1930~1990年)はそれぞれ1862.9mm、1006.6mmであり、基盤地質は風化花崗岩である。流域の森林は製陶の薪材として明治期に過剰に伐採されほとんど禿山と化していたが、明治末期から少しずつ荒地回復砂防造林が行われ、徐々に森林が回復し現在に至っている。1993年現在

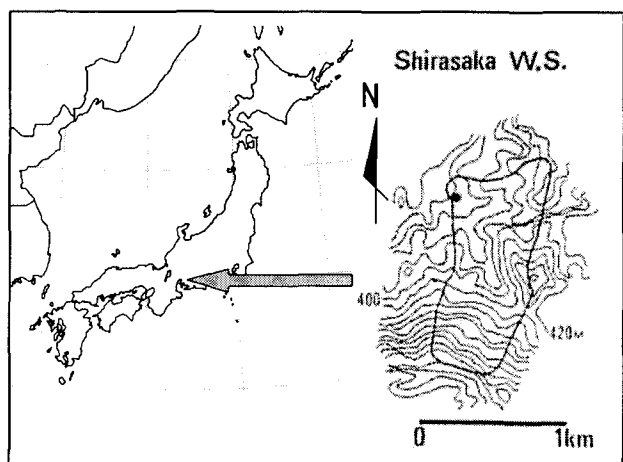


図-1 流域の位置と地形

における樹種別面積率はマツを主体とする針葉樹林29%、コナラを上木とする広葉樹林23%、針広混交林48%である。近年における林分蓄積量の増加は著しく、1964年との比較で、1981年に約1.4倍、1990年には約2.0倍になっている²⁾。この流域において観測・集計され、印刷公表されている日降水量、日流出量データ^{2)~8)}を解析に用いた。降水量は気象露場に設置された指示降水量計で、流出量は量水堰堤における水位観測と水位流出量曲線により、61年間同じ方法で観測されており、欠測はなく、いずれも0.1mm精度で報告されている。

3. 解析方法

(1) 年界

渇水の変動解析に際し、連続的に得られるデータをいつから、どのような間隔で区切っていくかについては慎重な検討を要する。渇水流出量の解析に流況曲線が用いられる例は多く、年の区切りとして暦年界、水年界が用いられることも多い^{2),9)}。この方法は年々変動を明瞭に追跡できるという長所があるが、12月31日と1月1日の間にまたがる渇水を二重にカウントする可能性があること、現象として区別されるべき夏の渇水と冬の渇水を一括して扱ってしまうこと、などの問題点も有する。長所を生かし、問題点を改善するには、暦年界でなく渇水発生率の低い時点を年界にとることと、夏の渇水と冬の渇水を区別し、夏は夏、冬は冬で経年変動を追跡することが必要である。

図-2は61年間(22,279日)の記録中、流出量が0.3(61年間最小流出量)、0.4、0.5mm/dayを記録した日数を月別表示したものである。この流域で5月に渇水が生じることはほとんどないことがわかる。そこで以下では、年界を4月30日と5月1日の間と定義して解析を進める。

(2) 夏冬の区切り

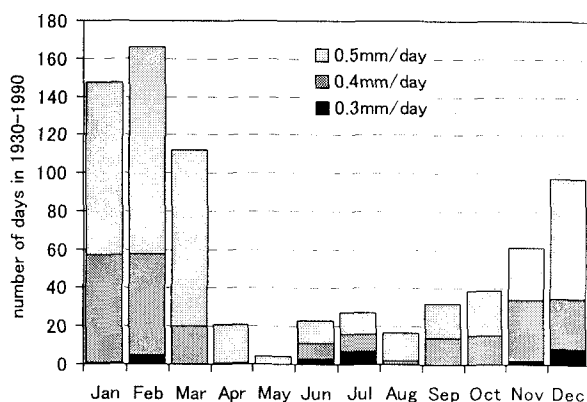


図-2 流出量0.3~0.5mm/dayの日の月別頻度

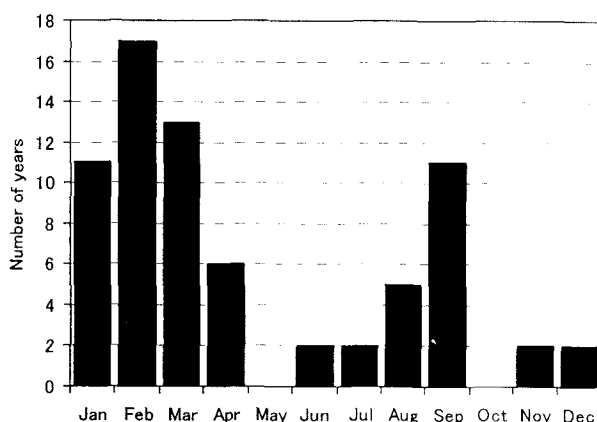


図-3 年最小流出量日の月別頻度

本論文では、蒸発散量の著しい相違や、基底流出に影響を及ぼす諸因子の温度依存性の影響で、冬の渇水と夏の渇水とを区別して取り扱う。このような取扱いをする場合、夏と冬の区切りをいつに設定するかを検討しておく必要が生ずる。

図-3は、4月30日と5月1日の間を年界としたときの、60年間(1930年5月~1990年4月)の年最小流出量日の月別頻度を表示したものである。流況曲線を用いた解析では、渇水流出量という用語は一般に年最小流出量でなく355日目流出量を意味する^{10),11)}が、以下では夏、冬それぞれの最小流出量によって渇水時の流出量を評価する。

「最小流出量日」は以下のように定義する。

- ① 本論文の年界で区切った流出量資料から、最小流出量を記録した日を機械的に選択する。
- ② 複数の最小流出量日がある場合、間隔が1ヶ月以内のものは一連の低水とみなし、それらの最終日をもって最小流出量日とする。
- ③ 間隔が1ヶ月以上のものはその両方を独立した最小流出量日とみなす。(その結果、一年に最小流出量日が2日ある年が7年、3日ある年が2年あった)

図より、5月、10月に最小流出量となる年はなく、冬の低水は主に2月、夏は9月に発生している。10月は夏に

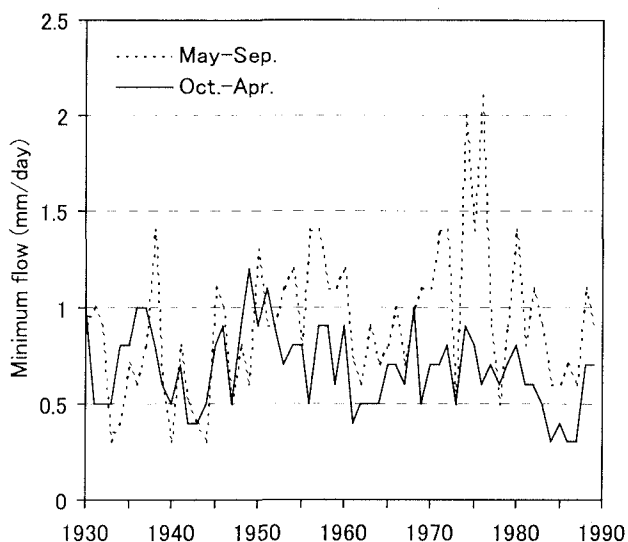


図-4 夏と冬の最小流出量の60年変動

含めても冬に含めてもさほど違いはないと考えられる。そこで本論文では9月30日と10月1日の間を夏と冬の区切りとし、夏、冬それぞれの期間中の最小流出量を上記①～③の方法によって求めた。図-4はこのようにして求められた夏、冬最小流出量の60年変動を示したものである。1930～1950年では冬より夏の最小流出量が少ない年が多いが、1950～1990年では逆に夏より冬の最小流出量が少ない年が多いことがわかる。これは10月を夏、冬どちらへ含めても共通した傾向であった。トレンド分析の結果、夏は10年間に0.06mm/day増加、冬は10年間に0.03mm/day減少の傾向にあった（95%有意）。自己相関及び夏と冬の相関を解析したが、有意な周期性は見られなかった。

(3) 降水量指標

最小流出量と関連がありそうな降水量指標として、本論文では次式で定義される2つの指標 $R_1(N)$ と $R_2(M)$ を検討する。

$$R_1(N) = \frac{\sum_{i=k-N+1}^{k-1} R_i}{N} \quad (1)$$

$N = 1, 2, \dots, 365$

$$R_2(M) = \frac{\sum_{i=M}^{k-1} R_i}{K-1-M} \quad (2)$$

$M = 1/1, 1/2, \dots, 12/31$

ここに、 N は $R_1(N)$ を計算する日数、 k は最小流出量日の番号、 R_i は i 日目の日降水量、 M は $R_2(M)$ の計算を開始する日の番号、「日の番号」とは任意に振った日付連番である。式の意味するところは、 $R_1(N)$ が「最小流出量発生日前日からさかのぼること N 日目までの平均日降水量」、 $R_2(M)$ が「最小流出量発生日以前のある日（ M 日）から最小流出量発生日前日までの平均日降水量」である。

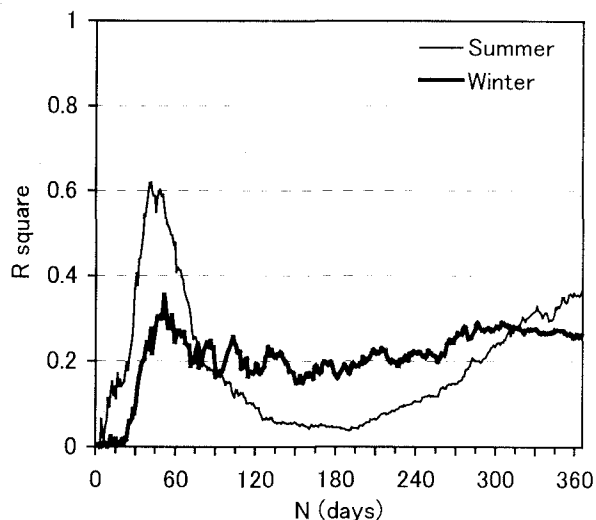


図-5 $R_1(N)$ と最小流出量の相関

4. 結果と考察

(1) 渇水時流出量の年々変動に関わる降水量指標の抽出

$R_1(N)$ と最小流出量の相関関係を $N = 1 \sim 365$ について計算した結果を図-5に示す。夏と冬で顕著な違いがある。夏は $N=41$ のときに決定係数 R^2 は極大値0.62をとる。これは、夏の最小流出量と最小流出量日前41日間平均日降水量の相関が高いことを意味する。それに対して冬は R^2 の最大値は0.4を超えない。冬の場合、最小流出量日前 N 日間の平均日降水量は、最小流出量と相関の高い指標とはいえない。

夏、冬それぞれについて、最小流出量発生日を月別に区分して同様の計算を行った結果を、 $N \leq 200$ について図-6、図-7に示す。夏の場合、各月の R^2 の最大値、 R^2 が最大となる N の値の範囲はほぼ同じである。それに対して冬は、 R^2 が最大となる N の値の範囲は各月でばらついているが、 R^2 の最大値は、いずれの月も冬全体を一括して計算された値より高く（0.65～0.80）、夏全体を一括して計算された値よりもさらに高くなっている。この結果は、冬の場合、最小流出量発生日からさかのぼること N 日目までの積算降水量と、最小流出量との相関が高くなる N の値が、月によって異なることを意味しており、10～12月では $N=40 \sim 50$ 、1月では $N=50 \sim 70$ 、2月では $N=80 \sim 100$ 、3、4月では $N=80 \sim 120$ である。このように N の範囲が月によってばらついていることが、結果として冬全体を一括して計算された R^2 最大値を小さくし、かつ $N \geq 80$ の範囲で R^2 値を高くしていることがわかる。

最小流出量との相関が高くなる N の値は、最小流出量発生日が遅くなるにつれて大きくなる傾向にある。そこで、冬の最小流出量の変動を説明する降水量指標として、 $R_1(N)$ の代わりに、最小流出量発生日以前のある日（ M

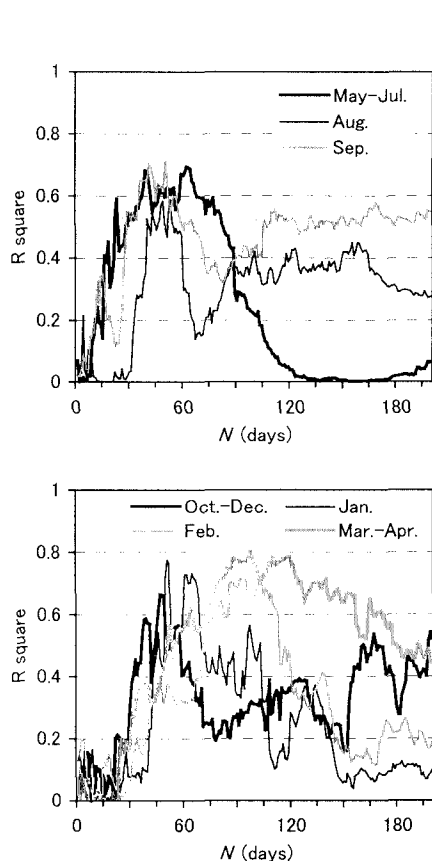


図-6 月別に求めた $R_i(N)$ と最小流出量の相関
上：夏 下：冬

日) から最小流出量発生日までの平均日降水量 ($R_i(M)$) を用いて同様の解析を行った。1月から4月までの最小流出量発生日を対象とし、 M は前年12月31日より1日ずつさかのぼることとした。比較のため、7月から9月までの夏の最小流出量についても同様の解析を行った。結果を図-7に示す。 $R_i(N)$ の場合とは逆に、 $R_i(M)$ は冬の最小流出量と相関が高く ($R^2>0.6$)、夏の最小流出量とは相関が低くなっている。

以上より、最小流出量と比較的相関が高い降水量指標は、夏は最小流出量発生日の前日からさかのぼって41日目までの平均日降水量 ($R^2=0.62$)、冬は10月26日から最小流出量発生日までの平均日降水量 ($R^2=0.67$) (最小流出量日=1月~4月) であることがわかった。

夏と冬で得られた指標が異なることは、夏の渇水と冬の渇水では最小流出量を支配する主要因が異なっていることを示唆している。夏の場合、最小流出量日から42日以上前の降水量の大小は、最小流出量にあまり影響を及ぼさないが、冬の場合、10月下旬以降の降水量の多少が、翌年3月の最小流出量に影響するという結果である。冬に比べて夏の蒸発散量が多いことが、その一つの原因であると考えられる。また、冬は夏に比べて雨が少ないので、雨の多少が最小流出量に影響しやすいという可能性も指摘できる。

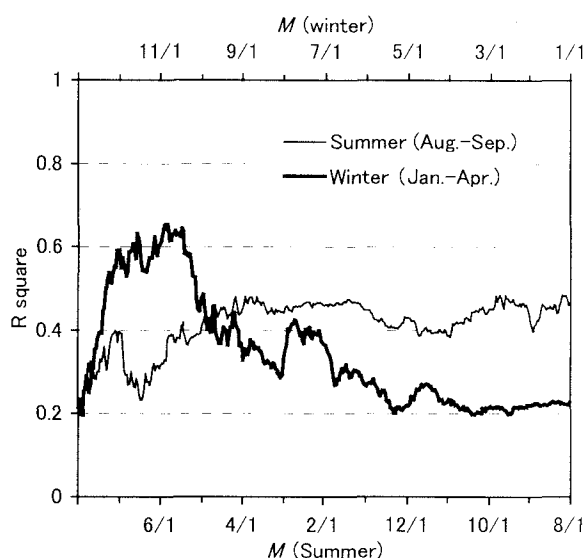


図-7 $R_i(M)$ と最小流出量の相関

(2) 得られた指標の年々変動と最小流出量の年々変動の比較

図-8、図-9はそれぞれ夏と冬で別々に得られた指標の年々変動と最小流出量の年々変動を比較したものである。両者は次元が異なるので平均値で除して正規化した。図-9で実線が途切れているのは、1984年冬は11月7日に最小流出量が観測され、 $R_i(M)=0$ であったため、正規化計算から除いた結果である。平均値、10年間のトレンド、t検定の結果を表-1に示す。夏、冬ともおおむね両者は対応しつつ変動している。細かくみると、夏の1930-40年代は、 $R_i(N)$ よりも最小流出量が下回っている場合が多くみられるが、1950-60年代は $R_i(N)$ が平均値の半分近くに下がっても最小流出量はさほど下がらないケースがみられる。1970-80年代は最小流出量、降水量指標ともに低くなったケースは少ない。冬は位相のみならず振幅もほぼ同じ変動となっていることが特徴である。夏の最小流出量が増加傾向にあるのに対し、降水量指標の増加傾向は統計的に有意でない。また冬の最小流出量が減少傾向にあるが、降水量指標の減少傾向はより大きい。このことは、この流域では60年間に、降水量条件の違いとは独立して夏の最小流出量を増加させ、冬の最小流出量の(少雨傾向に伴う)減少傾向を抑制するなんらかの要因が作用していると考えられる。この流域では1930年から1990年にかけて貧しい森林が徐々に回復し豊かになっていったという変化はあるが、それ以外の変化は現段階では特定できていない。本研究で抽出された、渇水を緩和する要因が、森林の変化によるものだという直接的な証拠がないため、断定はできないが、森林が豊かになっていった流域で、渇水が緩和されるような変化が起きていたことは確かである。

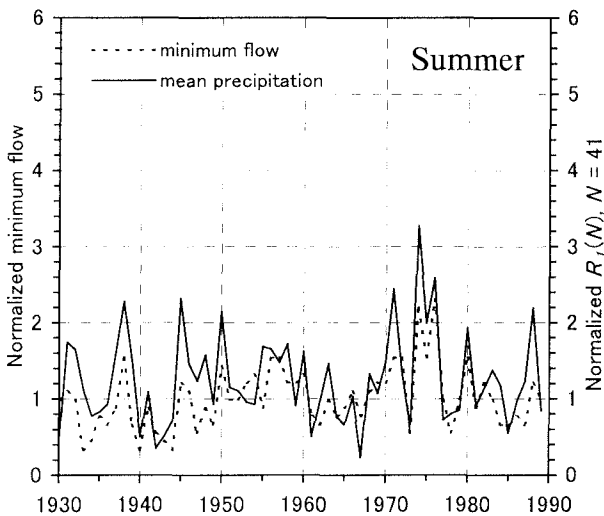


図-8 $R_1(N)$ と夏最小流出量の年々変動

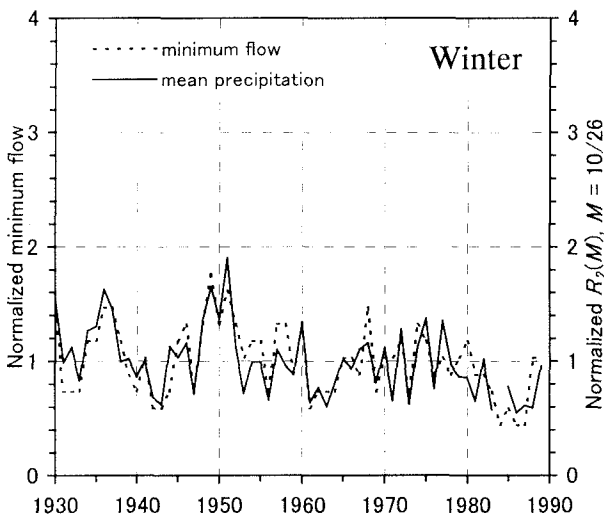


図-9 $R_2(M)$ と夏最小流出量の年々変動

表-1 流出量と降水量指標の平均値とトレンド

	流出量と指標	平均 (mm/day)	トレンド (mm/10ys.)	検定
夏	最小流出量	0.9	+0.06	**
	降水量指標 $R_1(N)$	2.7	+0.03	
冬	最小流出量	0.7	-0.05	**
	降水量指標 $R_2(M)$	2.0	-0.07	***

(注) $N=41$, $M=10/26$

無印：90%有意でない，*：90%有意，**：95%有意，

***：99%有意。

5. 結論

本論文は、年々の降水量の変動や、流域の森林状態が、渇水の発生に関係する最小流出量の変動に及ぼす影響を

定量的に評価することを目的として解析を行ったものである。昭和5年以降61年間同じ方法で欠測なしに観測された貴重なデータが用いられた。このデータは、参考文献欄に示したように、全て印刷公表されており、図書館で入手可能なものである。

渇水時の流出量と年々の降水量との関係は、これまで流況曲線を用いて解析された例はあるが、筆者の知る限りそれが成功した例はない。また森林状態との関係については、定性的に記述された例はあるが、降水量年々変動の影響と独立して森林の影響を定量的に論じた研究は筆者の知る限りない。

本論文で初めて用いられた手法は、年界を暦年界とせず、渇水解析にふさわしい年界の設定をしたこと、夏と冬の渇水を分離して評価したことの2点である。特に後者は、夏と冬で異なる降水量指標が得られたことから証明されたように、渇水現象の本質にかかわる問題であり、解析手法が単純な相関・回帰分析にもかかわらず明瞭な結論を得るに至ったのは、この点が重要な役割を果たしたと考えられる。また、森林の機能と断定はできないが、渇水時流出量が降水量の傾向とは独立して増加傾向にあることが統計的に示されたことは、意味がある。

本論文は、1流域を対象とした研究であるので、各地の森林流域に当てはまる一般則を導いたとはいえないが、対象流域に関しては、これまでの研究では未知であった部分を明らかにすることができた。そして、本論文で提示した手法は、日降水量、日流出量の長期観測がされている各地の流域に適用可能なものであり、他の流域での適用例が増加し、一般則の導出に至ることが期待される。

謝辞： 本研究のベースとなっている61年間の水文データは、東京大学農学部附属愛知演習林歴代教官・職員の長年にわたる継続した努力の賜物である。観測は70年間を経過した現在でも続けられている。そのご努力に心から敬意を表するとともに、貴重なデータのさらなる蓄積を望むものである。本研究を進める過程で、鈴木雅一（東京大学農学部教授、芝野博文（東京大学愛知演習林長・助教授）から終始有益なご助言を賜った。図の作成には東京大学大学院農学生命科学研究科の真板英一氏にご協力頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 劉 若剛, 鈴木雅一, 芝野博文, 太田猛彦：山地流域の流況曲線に与える降水の年々変動の影響, 日本林学会誌, Vol. 80, pp. 184-188, 1998.
- 2) 西尾邦彦, 築瀬憲次, 原 孝秀, 荒木田きよみ：水流出特性に影響を及ぼす流域の地被状況の評価 (I), 第40回日本林学会中部支部大会講演論文集, pp. 261-264, 1992.
- 3) 愛知演習林, 演習林研究部：愛知演習林量水観測結果報告 (I), 演習林 (東大), No. 20, pp. 39-64, 1976.
- 4) 愛知演習林, 演習林研究部：愛知演習林量水観測結果報告

- (II), 演習林(東大), No. 21, pp.48-89, 1977.
- 5) 愛知演習林: 愛知演習林量水観測結果報告 (III), 演習林(東大), No. 22, pp.84-191, 1981.
- 6) 愛知演習林: 愛知演習林量水観測結果報告 (IV), 演習林(東大), No. 23, pp.57-88, 1984.
- 7) 愛知演習林: 愛知演習林量水観測結果報告 (V), 演習林(東大), No. 25, pp.135-151, 1987.
- 8) 愛知演習林: 愛知演習林量水観測結果報告 (VI), 演習林(東大), No. 38, pp.127-146, 1999.
- 9) Suzuki, M., Liu, R., Nishio, K. and Ohta, T. : Forest influences on discharge duration curve using a 56-year daily discharge rate in two small watersheds, Proceedings of the International Symposium on Forest Hydrology, Tokyo, Japan, pp.611-617, 1994.
- 10) 中野秀章, 菊谷昭雄, 森沢万佐男: 林況変化, とくに伐採が溪川流出に及ぼす影響 (I) - 水年・豊水・平水・低水・渇水各流出量への影響 -, 林業試験場研究報告, No. 156, pp.1-84, 1963.
- 11) 虫明功臣, 高橋 裕, 安藤義久: 日本の山地河川の流況に及ぼす流域の地質の効果, 土木学会論文報告集, No. 309, pp.51-62, 1981.
- (1999. 9. 30受付)