

低水流出の低減係数と低減曲線の求め方およびそれらの季節変化

誌名	日本林學會誌 = Journal of the Japanese Forestry Society
ISSN	0021485X
著者	石井, 正典
巻/号	73巻4号
掲載ページ	p. 270-275
発行年月	1991年7月

短 報

低水流の低減係数と低減曲線の求め方
およびそれらの季節変化*

石井正典**

ISHII, Masanori : Method of determining a recession coefficient and recession curves for a low flow and its seasonal changes J. Jpn. For. Soc. 73 : 270~275, 1991

In past research, the runoff several days after the end of a rainfall and thereafter was considered a low flow, and steps of using this runoff data to analyze the recession coefficient and recession curves of the low flow in the days without rainfall were taken. However, in the case of analyzing a low flow by this method, it was affected by the conditions of the rainfall, and the data on runoff sufficient for explaining the reduction coefficient and recession curves in every month could not necessarily be obtained. Accordingly in this study, as a method of analyzing data without being affected by the conditions of rainfall, it was decided to use a long term runoff model, and the model used was that developed by the author. The basins used as objects of analyses were the Shirasaka Basin and the Higashiyama Basin on the University of Tokyo Forest in Aichi Prefecture, and on the whole, the conformity of the model was good, particularly the conformity to a low flow was extremely good. The recession coefficient was at a minimum in January, gradually increasing from February to August, and was at a maximum in August. In addition, it was found that the recession coefficient in September and thereafter decreased rapidly. The seasonal changes of the recession coefficient in this manner was similar to the seasonal changes of the evapotranspiration in these basins, and from this fact, it became known that as has been said so far, recession coefficient changes are affected by evapotranspiration. Furthermore, when the recession curves of the low flows in both basins were compared, they were nearly equal, and this because the geological features in both basins are the same.

I. はじめに

わが国の水資源は、基本的には山地流域からの流出に依存しているのが現状である。長期間にわたり無降雨日が続くような渇水時には、その流域で以後どの程度の流出量があるのかを予測することは、水資源の管理にとって重要な問題の一つである。そこで、本研究は山地流域の水資源の管理上の基礎資料となる低水流の低減特性(とくに、低減係数と低減曲線の月別変化)を明らかにすることを目的とする。

既往の研究では、降雨終了から数日後以降の流出を低水流と考へて、その流出資料を用いて、低水流の低減特性を明らかにする方法(10, 11)であった。しかし、この方法で低水流を解析する場合は、降水条件に左右され、かならずしも月別の低減係数を解析するために十分な流量資料が得られない。そこで、本研究は、降水条件に左右されないで低水流の低減特性

を明らかにする方法として、流出モデルを用いることとした。なお、用いた流出モデルは筆者が開発したものの(7)である。

II. 既往の研究

低水流の低減特性に関する代表的な研究方法には、標準低減曲線による方法と低減曲線を数式の形で表現する方法の二つがあるが、前者の方法は、無降雨期間の低減部をつなぎ合わせて、これを流域の標準的な低減を示す曲線と考へる方法(8, 10)であり、この低減部をつなぎ合わせには、野口(10)は同時化法を用いた。なお、石井(6)はこの方法によるつなぎ合わせには個人の主観が入るので、客観性に乏しく、かならずしも合理的でないことを指摘した。

一方、後者の方法の代表例として、(1)式と(2)式がある(4)。

$$q_L = q_{L0} \exp(-\alpha_L t) \quad (1)$$

* 本研究は平成元年度科学研究費補助金総合研究(A)、課題番号 63304018 の一部である。

** 岩手大学農学部 Fac. of Agric. Univ. of Iwate, Morioka 020

$$q_L = q_{L0} / (\beta_L \sqrt{q_{L0} t + 1})^2 \quad (2)$$

ここで、 q_L ：流出量、 q_{L0} ：流出量の初期値、 t ：時間、 α_L および β_L ：低減係数(定数)である。

(1)式と(2)式は、地下水流出の低減式として、WERNER, and SUNDQUIS(2), ROCHE(1), 高木(11)および石井(5)により理論的・経験的に導かれた。高木(11)は、山地河川の低水流出は(1)式と(2)式の和で表されるとして解析を進めている。一方、石井(7)は、山地流域の流出量は(1)式と(2)式の和で表されるとして解析を進めているが、(1)式は河道・沢筋の貯留量から直接的に流出する成分であり、(2)式は樹冠遮断および土壤水分の不足分を補充した後の貯留量から間接的に流出する成分として、山地流域における低水流出は(2)式のみであるとしている。

野口(10), 石井(6), 高橋ら(13)は、小流域では低減曲線は主として蒸発散作用のため季節によって低減の勾配(低減係数)が異なることを指摘している。虫明ら(9)および安藤ら(3)は山地流域の流況特性に対する地質の効果の有意性を、また、高木(12)は、低減係数 β_L が流域面積に反比例することを示している。

以上のように、低水流出の低減特性の影響要因として、季節、流域の地質、および流域面積があることはすでに指摘されている。

III. 研究方法

1. 長期流出モデル

本研究の長期流出モデルは流出モデルと蒸発散モデルからなる。

1) 流出モデル

著者の流出モデルは文献(7)に示したが、流出モデルの概略は図-1に示した。

図-1に示したように、流出量 q は下部流出量 q_d と上部流出量 q_g の和であるが、 q_d は(3)式、 q_g は(4)式で表すこととした。

$$q_d = k_d D \quad (3)$$

$$q_g = k_g G^2 \quad (4)$$

なお、降水量 p は毛管水貯留量 M と下部重力水貯留量 D に配分するが、 D への配分比 α は(5)式とした。

$$\alpha = \alpha_m + \alpha_n G (M/M_f) p, \quad (\alpha \leq \alpha_{max}) \quad (5)$$

2) 蒸発散モデル

図-1に示したように蒸発散量 e_t は上部重力水貯留量からの蒸発散量 e_g と毛管水貯留量からの蒸発散量 e_m の和であるが、 e_g の関係式は(6)式、また e_m のそれは(7)~(9)式である。

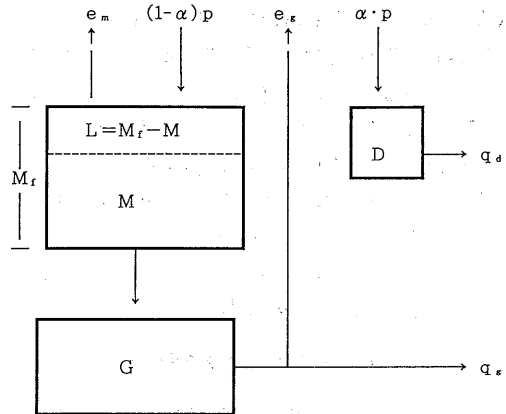


図-1. 流出モデルの概略図

p , 降水量(mm/日); q , 流出量(mm/日); q_d , 下部流出量(mm/日); q_g , 上部流出量(mm/日); e_t , 蒸発散量(mm/日); e_g , 上部蒸発散量(mm/日); e_m , 毛管水蒸発散量(mm/日); e_p , 蒸発散能(mm/日); M_f , 毛管水貯留能(mm); M , 毛管水貯留量(mm); M_c , 臨界水分量(mm); M_0 , 当初毛管水貯留量(mm); L , 土湿不足(mm); D , 下部貯留量(mm); D_0 , 当初下部貯留量(mm); G , 上部貯留量(mm); G_0 , 当初上部貯留量(mm); k_d , 下部貯留係数; k_g , 上部貯留係数; α , 下部配分比; α_m , 定数; α_n , 定数; α_{max} , 下部配分比の最大値; a , 蒸発散係数; a_j , j 月の蒸発散係数; β , 臨界点定数; ϵ , 係数。

$$e_g = \epsilon \cdot G^2 \cdot a \cdot e_p, \quad (\epsilon \cdot G^2 \leq 1) \quad (6)$$

$$e_m = (1 - \epsilon \cdot G^2) a \cdot e_p, \quad (M \geq M_c) \quad (7)$$

$$e_m = (1 - \epsilon \cdot G^2) a \cdot e_p \cdot M/M_c, \quad (M < M_c) \quad (8)$$

$$M_c = \beta \cdot a \cdot e_p \cdot M_f, \quad (M_c \leq M_f) \quad (9)$$

2. 未知定数の求め方とパラメータの決定方法

本研究による未知定数は α_m , α_n , α_{max} , M_f , M_0 , G_0 , β , ϵ , k_d , k_g , $a_1 \sim a_{12}$ の22個と多いが、蒸発散係数 ($a_1 \sim a_{12}$) の未知定数を減らす方法として、文献(7)のように解析を2段階行なった。

なお、上記の解析には、累加流出量の絶対誤差量 σ_M が2mm以内で、しかも、日流出量の相対誤差率 σ_R が最も小さい時をそれぞれのパラメータの最確値とした。ただし、 i 日の流出量の測定値 $q_{0(i)}$ と計算値 $q_{c(i)}$ から、 σ_M と σ_R の関係式はそれぞれ(10)式と(11)式である。

$$\sigma_R = (1/N) \sum_{i=1}^N |(q_{0(i)} - q_{c(i)}) / q_{0(i)}| \quad (10)$$

$$\sigma_M = \left| \sum_{i=1}^N q_{0(i)} - \sum_{i=1}^N q_{c(i)} \right| \quad (11)$$

ここで、 N ：解析総日数、である。

3. 無降雨時の上部流出量の低減式

無降雨時で、上部貯留量に補給量がない状態での上部貯留量の連続式は(12)式である。

$$dG/dt = -(q_g + e_g) \quad (12)$$

(12), (4) および (6) 式から, t 時における上部流出量 q_g は, (13) 式である。なお, (6) 式の $a \cdot e_p$ は一定とした。

$$q_g = q_{g0} / \{ \sqrt{k_g}(1 + \theta) \sqrt{q_{g0} t + 1} \}^2 \quad (13)$$

ここで, q_{g0} : 時間 $t=0$ における流量 (mm/秒) (以下, 初期流量とよぶ), θ : $\varepsilon \cdot a \cdot e_p / k_g$ である。

(13) 式で θ が一定, すなわち, $a \cdot e_p$ が一定の場合は, (13) 式は (2) 式と同様な (14) 式となる。

$$q_g = q_{g0} / \{ \beta_g \sqrt{q_{g0} t + 1} \}^2 \quad (14)$$

ここで, β_g : $\sqrt{k_g}(1 + \theta)$ である。

IV. 解析対象流域の概要

本研究の解析対象流域は, 東京大学愛知演習林白坂流域 (流域面積: 88.5 ha) と東山流域 (106.7 ha) であり, 解析期間は, 昭和 39 年 1 月 1 日から昭和 43 年 12 月 31 日までの 5 カ年 (N: 1827 日) である。

1. 林況と地況

昭和 39 年の白坂流域の森林の調査によると, 林地と崩壊地 (砂防地含む) の面積割合は 91 と 9 である。林種は天然生林と人工林であるが, 天然生林と人工林の面積割合は 78 と 22 である。天然生林の樹種はヒノキ, アカマツおよび広葉樹であり, 人工林の樹種はヒノキ, アカマツ, スギおよび広葉樹である。天然生林の林齢は 10~70 年であって, 平均林齢は 50 年である。一方, 人工林は大正 13 年と同 15 年に植栽したので, 林齢は 40 年と 42 年である。ha 当たり本数は 2,854 本であり, 針葉樹と広葉樹の本数割合は 45 と 55 である。ha 当たり材積は 132.26 m^3 であり, 針葉樹と広葉樹の材積割合は 77 と 23 である。基岩は黒雲母花崗岩であり, 土性は砂壤土, 土壤型は $B_{D(c)}$, B_B , E_r および I_m である。なお, $B_{D(c)}$, B_B , E_r および I_m の面積割合はそれぞれ, 2, 20, 77, 1 である。平均勾配と平均傾斜は 29.8% と 17 度である。

昭和 39 年の東山流域の森林の調査によると, 林種は天然生林であり, 林地と崩壊地の面積割合は 91 と 9 である。樹種はアカマツと広葉樹であり, 林齢は 10~70 年であって, 平均林齢は 43 年である。ha 当たり本数は 1,830 本であり, 針葉樹と広葉樹の本数割合は 15 と 85 である。ha 当たり材積は 91.25 m^3 であり, 針葉樹と広葉樹の材積割合は 61 と 39 である。基岩は黒雲母花崗岩であり, 土性は砂壤土, 土壤型は B_B および E_r である。なお, B_B と E_r の面積割合は 68 と 32 である。平均勾配は 23.0% と 13 度である。

2. 気象・水文状況

解析期間の降水量と流出量の月別変動は類似である

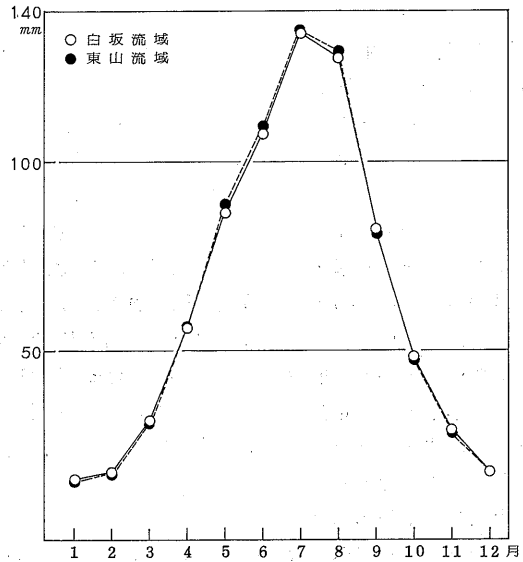


図-2. 蒸発散能の月別変動

が, 個々の変動は必ずしも同様でない。1 月~7 月の白坂流域の降水量は東山流域よりやや大きい, この間の白坂流域の流出量は東山流域よりやや小さい。なお, 白坂流域と東山流域の年降水量は, 1,717.12 mm と 1,679.14 mm であり, 白坂流域と東山流域の年流出量は, 882.24 mm と 917.50 mm である。

本研究に用いた蒸発散能 e_p はハモン式による場合の月平均日蒸発散能であるが, それによる場合の月蒸発散能は両流域とも 1 月が最小で, 7 月が最大である。なお, 白坂流域と東山流域の年平均蒸発散能は 755.00 mm と 757.47 mm である (図-2)。

白坂流域と東山流域の無降雨日の頻度は 58.96% と 60.53% であって, 解析期間の 60% 程度が無降雨日である。これを月別に調べると, その頻度にはかなりの変動があり, その最小は 4 月で, 白坂流域と東山流域の頻度は 46.67% と 49.33% である。反対に, その最大は 11 月で, 白坂流域と東山流域の頻度は 68.67% と 68.67% である。

日流出量の階級別頻度は図-3 に示したが, 両流域の日流出量が 0.5 mm 未満の頻度は 0% である。日流出量が 1.0 mm 未満, 1.0~5.0 mm および 5.0 mm 以上の場合を, それぞれ渇水流量, 平水流量および高水流量とよぶこととすると, 白坂流域の場合, 渇水流量, 平水流量および高水流量の頻度はそれぞれ, 19.43%, 71.98%, 8.59% である。一方, 東山流域の場合, 渇水流量, 平水流量および高水流量の頻度はそれぞれ,

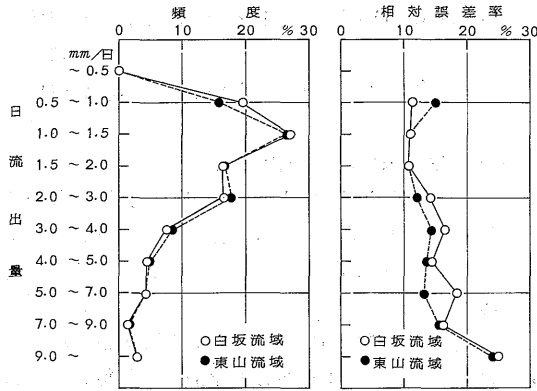


図-3. 日流出量の階級別頻度およびその相対誤差率

15.87%, 74.88%, 9.25%である。

V. 解析結果と考察

1. 長期流出モデルの適用結果

表-1には、蒸発散係数以外の結果を、図-4には、蒸発散係数の結果を示した。

低減係数 β_g の季節変化は蒸発散量の季節変化に密接であることはすでに述べたが、図-5には、両流域の月平均蒸発散量の結果を示した。同図から、蒸発散量の最大は両流域とも8月であり、蒸発散能と蒸発散量の季節変動には相違が認められる。両流域の蒸発散量の月別変動は同様であるが、春期・夏期の白坂流域の蒸発散量は東山流域より大きい。なお、白坂流域と東山流域の年蒸発散量は814.91mmと747.44mmである。

日流出量の相対誤差率 σ_R は表-1に示したが、白坂流域と東山流域の σ_R は12.89%と12.72%である。また、これを階級別の誤差率として図-3に示したが、白坂流域の場合、日流出量が2.0mm未満の誤差率は11%前後ときわめて適合度が良好である。日流出量が2.0mm以上になると、誤差率が次第に上昇し、日流出量が9.0mm以上の誤差率は25%である。一方、東山流域の場合、日流出量が0.5~1.0mmでは白坂流域より誤差率の大きい、それ以外の階級では白坂流域より誤差率が小さい。なお、日流出量が9.0mm以上の誤差率は24%である。

以上のことから、本長期流出モデルの適合度は渇水流量が最もよく、平水流量、高水流量になるにつれて次第に適合度が劣ることがわかった。しかし、適合度が劣る平水・高水流量の頻度は少ないので、本長期流出モデルの適合度は大筋で良好であり、とくに、渇水

表-1. 白坂流域と東山流域の未知定数の解析結果

未知定数	白坂流域	東山流域
α_m	0.048	0.047
α_n	0.000024	0.000029
α_{max}	0.58	0.69
M_f	218	225
M_0	170	192
G_0	86	73
β	0.80	0.62
k_d	0.40	0.43
k_g	0.00007	0.00011
ϵ	0.000017	0.000018
σ_R (%)	12.89	12.72

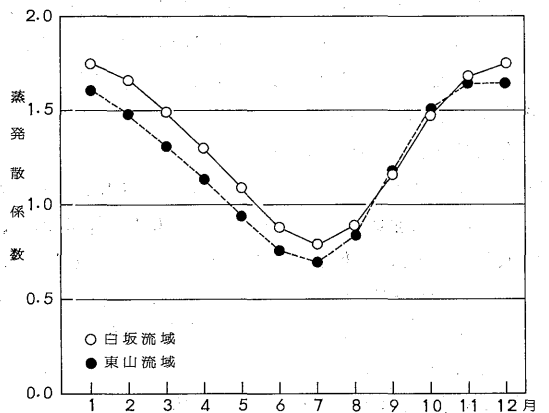


図-4. 蒸発散係数(a)の月別変動

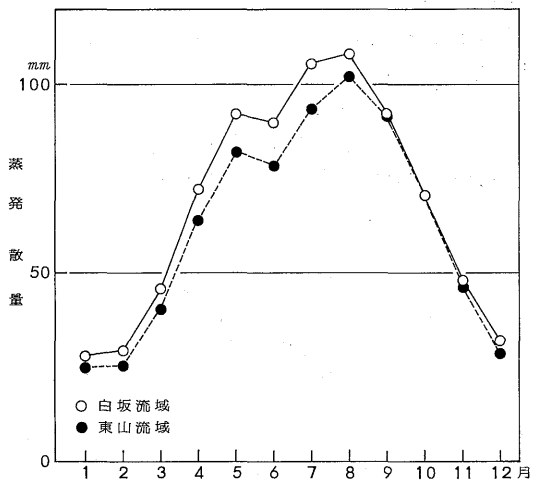


図-5. 蒸発散量の月別変動

流量の適合度がきわめて良好であることから、本研究目的である低水流出の低減特性の解析結果には信頼性があることがわかった。

2. 低水流出の低減係数の季節変化

(13)式に示したように、低減係数 β_g に影響する因子は ϵ , a , e_p , および k_g であるが、このうち、 ϵ と k_g は表-1を、j月の蒸発散係数 a_j は図-4を用いる。また、j月の蒸発散能 $e_{p(j)}$ は解析期間の月平均日蒸発散能を用いる。それらを用いて両流域の低減係数 $\beta_{g(j)}$ を求め、その結果を図-6に示した。

白坂流域の蒸発散係数の最小は1月の0.0102であり、最大は8月の0.0158であって、8月は1月の50%増である。一方、東山流域の蒸発散係数の最小は1月の0.0119であり、最大は8月の0.0165であって、8月は1月の40%増である。

両流域ともに、低減係数と蒸発散量の最大と最小の月は一致し、また、その月変動も類似である。すなわち、低水流出の低減係数は蒸発散量に影響を受けて季節変動することがわかった。

白坂流域の季節別の低減係数は春期、夏期、秋期および冬期でそれぞれ、0.0131, 0.0153, 0.0132, 0.0104であり、東山流域のそれはそれぞれ、0.0140, 0.0158, 0.0148, 0.0122である。したがって、両流域の低減係数の差は蒸発散量が大きくなるにつれて小さくなる傾向を示すが、これは両流域の蒸発散量の季節変化にもとづくものである。

3. 低水流出の低減状況とその季節変化

図-6の低減係数 $\beta_{g(j)}$ とj月の初期流量 $q_{g0(j)}$ からj月の低水流出の低減式を求めるが、解析期間の月平均上部貯留量をj月の初期貯留量 $G_{g0(j)}$ とすると、 $q_{g0(j)}$ は(15)式で求められる。

$$q_{g0(j)} = k_g (G_{g0(j)})^2 \tag{15}$$

以上の方法による場合の白坂流域と東山流域の低水流出の低減式は(16)式と(17)式である。

$$q_{g(j)} = q_{g0(j)} / \{0.0084(1 + 0.2429 a_j \cdot e_{p(j)} \sqrt{q_{g0(j)}} t + 1)\}^2 \tag{16}$$

$$q_{g(j)} = q_{g0(j)} / \{0.0105(1 + 0.1636 a_j \cdot e_{p(j)} \sqrt{q_{g0(j)}} t + 1)\}^2 \tag{17}$$

図-7には白坂流域と東山流域の初期流量を示したが、1月~8月の初期流量の値には違いが見受けられるが、9月~12月のそれはほぼ同様な値である。このような結果は図-5に示した蒸発散量の影響を受けた結果である。

(16)式と(17)式を用いて、30日間無降雨日が続いた場合の白坂流域と東山流域の低水流出を計算し、そのうちの1月、5月、7月および8月の結果を図-8に示した。

1月と8月の低水流出の低減状況はほぼ同様である。これはこの期間の白坂流域の初期流量が東山流域よりやや小さいとともに低減係数も東山流域よりやや小さく、このことが両流域の低減状況をほぼ同様とした原因である。すなわち、両流域の初期流量と低減係数の違いが相殺されたためである。一方、5月と7月の低減状況には違いが見受けられるが、これはこの期間の白坂流域と東山流域の初期流量の違いが大きく、低

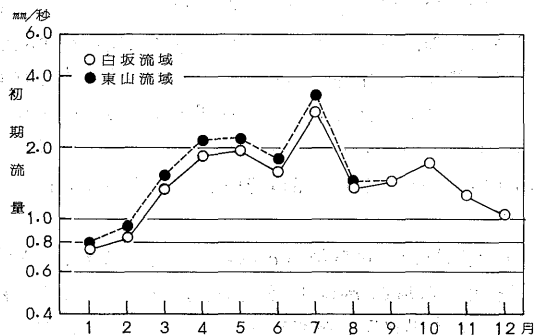


図-7. 初期流量の比較

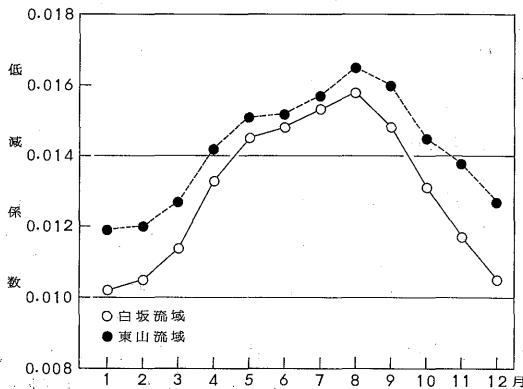


図-6. 低減係数($\beta_{g(j)}$)の月別変動

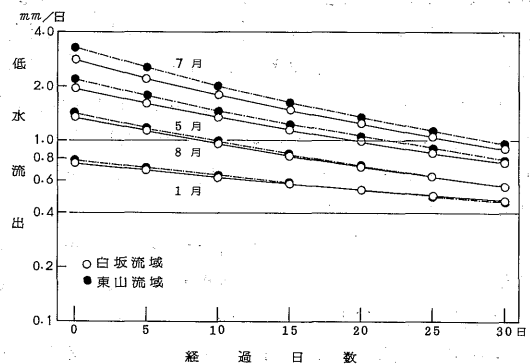


図-8. 無降雨日の低水流出の低減曲線

減係数の違いを相殺されなかったためである。すなわち、白坂流域と東山流域の基岩が黒雲母花崗岩と一致しているから両流域の低減係数にはやや違いが見受けられるが他の地質に比べて大きな違いがないためである。

なお、高橋ら(13)によると、地質別の低減係数は、第四紀火山岩類流域の値は0.006~0.014で最も小さく、花崗岩類流域の値は0.010~0.017で次に小さく、第三紀火山岩類流域の値は0.014~0.022で3番目に小さく、古生層流域の値は0.015~0.023で4番目であり、第三紀層流域の値は0.019~0.025で5番目であり、中生層流域の値は0.023~0.038で最大であるとの結果を示している。

前述のように本研究の対象流域は花崗岩類流域であるが、白坂流域と東山流域の低減係数は高橋らが解析した花崗岩類流域と同様な結果である。このことから、本研究方法のように数年と短期間の資料で月別の低減係数が求められるとともに地質についてもほぼ妥当な結果が得られる可能性があることから、今後は地質等低減係数に影響を及ぼす因子との関係を究明することが可能であることを示唆した。

引用文献

(1) ROCHE, M.: Hydrologie de Surface. 267~275.

- Gauthier-Villars, 1963
- (2) WERNER, P. W., and SUNDQUIST, K. J.: On the groundwater recession curve for large watersheds. Publ. No. 33, 202~212, IAHS, 1951
- (3) 安藤義久・高橋 裕・伊藤 孝: 山地河川の地下水流出の逓減特性とそれに対する流域地質の効果. 第25回水理講演会論文集: 175~182, 1981
- (4) 石井正典・小野茂夫: 低水流出の低減特性についての研究(I). 87回日林論: 335~336, 1976
- (5) ———: 同上(II). 87回日林論: 337~338, 1976
- (6) ———: 水源地域における地下水流出の低減特性について. 水利科学 177: 1~16, 1987
- (7) ———: 水源山地を対象とした長期流出モデルとハモン式を用いた場合の蒸発散係数の季節変化について. 日林誌 71: 99~107, 1989
- (8) 江川太朗: 河川流出の標準逓減曲線とその適用に関する研究. 東京大学博士論文, 1979
- (9) 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 309: 51~62, 1981
- (10) 野口陽一: 森林量水試験の方法論的研究. 東大演報 57: 65~135, 1962
- (11) 高木不折: 低水流出の低減特性に関する研究. 土木学会論文集 128: 1~11, 1966
- (12) ———: 地下水流出の流域における特性変化と場所的スケール. 土木学会論文報告集 270: 99~108, 1978
- (13) 高橋 裕・安藤義久・伊藤 孝・伊藤和央: 山地河川の低水流出の減水特性に関する研究. 土木学会論文報告集 337: 75~82, 1983

(1990年3月12日受理)