

## 低水流出の低減特性についての研究(5)

誌名	岩手大学農学部報告 = Journal of the Faculty of Agriculture, Iwate University
ISSN	05792746
著者	石井, 正典
巻/号	18巻3号
掲載ページ	p. 371-381
発行年月	1987年12月

## 低水流出の低減特性についての研究 (V)

### 低減係数に及ぼす蒸発散量の影響について

石井 正典

(昭和62年5月15日受理)

## I 緒 言

山地流域の低水流出の低減式は、既往、いろいろ提案されているが、筆者はこの中から最も実用的な低減式について検討した(2, 3, 4)。その結果、低減式としては、分数関数的に低減するものが最も実用的であることが分かった。また、この低減式は山地流域の洪水流出の解析に適用されてきた貯留関数法(6, 7)から導くことができた。さらに、この低減式が季節的に変化するが、この変化が蒸発散量の季節的な変化に関係があるようである。

以上、筆者のこれまでの研究成果で上記の成果を得ているが、低減式の低減係数が季節的に変化するので低減式に蒸発散の影響因子を導入する必要がある。

そこで、筆者は低減式にこの影響因子を導入し、この提案した低減式が実際の山地流域にどの程度適合するかについて検討したので報告する。

## II 研 究 方 法

### 1. 貯留関数法を応用した低減式の提案

貯留関数法を応用した低水流出の低減式については、既に、筆者が提案(3, 4)しているが、その概略を示す。

木村(6, 7)は洪水流出の解析に貯留関数法を用いたが、筆者は低水流出にもこの方法が応用できるものと仮定して解析を進めた。

山地流域の低水流出の運動式と連続式は(1)式と(2)式とする。

$$S = kq^p \quad (1)$$

$$dS/dt = r - q \quad (2)$$

ここで、 $S$  : 地下水の貯留量 (mm),  $q$  : 地下水流量 (mm/sec),  $t$  : 時間 (sec),  $r$  : 地下水帯への浸透補給強度 (mm/sec),  $k$  及び  $p$  : 流域固有の定数であり、 $1 \geq p \geq 0$ ,  $k \geq 0$  である。

さらに、 $r=0$  及び  $1 > p > 0$  の条件下での地下水流量は

$$q = q_0 / \left( \frac{1-p}{k \cdot p} q_0^{1-p} t + 1 \right)^{1/(1-p)} \quad (3)$$

となる。ここで、 $q_0$  :  $t=0$  における流量、すなわち、初期流量 (mm/sec) である。

さらに、 $\nu = 1/(1-p)$ ,  $\mu = (1-p)/(k \cdot p)$  とおけば

$$q = q_0 / (\mu^{\nu} \sqrt[\nu]{q_0 t + 1})^{\nu} \quad (4)$$

である。

さらに,  $p=0.5$  と仮定できる場合の地下水流量は

$$q = q_0 / (\beta_0 \sqrt{q_0 t + 1})^2 \quad (5)$$

である. ここで,  $\beta_0$ : 低減係数 ( $1/k$ ) であり, これは, 当該流域の地形・地質・土壌等に影響される流域固有の定数である.

なお, 筆者(4)は山地流域の低水流出の低減式に,  $p=0.5$  と仮定することが可能であることを明らかにしている.

以上は連続式(2)式に蒸発散を考慮しなかった場合であるが, 低水流出は季節的变化があり, この変化が地下水帯からの水分の消失(蒸発散)に関係があると考えられるので次にその点を考慮した低減式について述べる.

## 2. 蒸発散を考慮した低減式の提案

流域の日蒸発散量  $e$ : (mm/day) の関係式については, 既に, 筆者(5)が求めているが, それの概略は下記のとおりである.

$$e_t = a \cdot e_p, \quad (M \geq M_c) \quad (6)$$

$$e_t = a \cdot e_p \cdot M/M_c, \quad (M < M_c) \quad (7)$$

ここで,  $a$ : 月別蒸発散比 ( $a_1 \sim a_{12}$ ),  $e_p$ : 蒸発散能 (mm/day),  $M$ : 任意日の有効水分量 (mm),  $M_c$ : 任意日の臨界水分量 (mm) である.

すなわち, 流域の蒸発散は(6)式のように恒率的に発生する場合と(7)式のように減率的に発生する場合が考えられ, この関係は主として土壌中の水分の乾湿状態に影響を受けるが, (6)式は土壌が湿潤状態, (7)式はそれが乾燥状態にある場合である.

山地流域の地下水帯から蒸発散を考慮した場合の, 地下水流出の運動式と連続式は(8)式と(9)式である.

$$S = kq^{0.5} \quad (8)$$

$$dS/dt = r - q - e \quad (9)$$

ここで,  $e$ : 地下水帯からの蒸発散量 (mm/sec) である.

山地流域では, 地下水帯からの蒸発散は, 一般に沢筋付近で発生すると思われるが, その位置での土壌水分は定常的に湿潤状態にあり, 蒸発散は恒率的に発生すると思われるので, (9)式の  $e$  は(10)式とおける.

$$e = a \cdot e_p \cdot A_g/A_a \quad (10)$$

ここで,  $A_g$ : 地下水帯からの蒸発散が発生する面積 (ha),  $A_a$ : 流域面積 (ha) である.

(10)式で,  $a$  及び  $e_p$  が一定と仮定しても,  $A_g$  は  $S$  または  $q$  によって変動すると思われるが,  $A_g/A_a$  と  $q$  の関係が(11)式で与えられると仮定する.

$$A_g/A_a = \varepsilon \cdot q \quad (11)$$

ここで,  $\varepsilon$ : 定数である.

したがって,  $e$  は(12)式で表される.

$$e = \varepsilon \cdot a \cdot e_p \cdot q \quad (12)$$

さらに,  $a$  及び  $e_p$  が一定の条件下では

$$e = \delta \cdot q \quad (13)$$

ここで,  $\delta = \varepsilon \cdot a \cdot e_p$  である.

さらに,  $r=0$ , すなわち, 地下水への浸透が無視される場合には, (8)式, (9)式及び(10)式から, 低減式は

$$q = q_0 \left\{ \frac{(1+\delta)}{k} q^{0.5} t + 1 \right\}^2 \quad (14)$$

となる。

さらに、 $\beta = (1+\delta)/k$  とおくと、(14)式は

$$q = q_0 / (\beta \sqrt{q_0} t + 1)^2 \quad (15)$$

となる。

なお、 $\beta_0$  と  $\beta$  との関係は

$$\begin{aligned} \beta &= \beta_0 + \delta/k \\ &= \beta_0 + \varepsilon \cdot a \cdot e_p / k \\ &= \beta_0 + \alpha \cdot a \cdot e_p \end{aligned} \quad (16)$$

である。ここで、 $\alpha : \varepsilon/k$  (流域固有の定数) である。

(16)式から、低減係数 ( $\beta$ ) は蒸発散量 ( $a \cdot e_p$ ) に比例することになる。

### 3. 実際の山地流域の低水流出に適用する方法

一般に、流量資料は日流出量 ( $q_d$ : mm/day) で得られる場合が一般的であるから、低減式もそれに応じて変形することになる。また、流量資料の重みをできるだけ等しくすることも考慮しなければならない。

これらのことを考慮して、(15)式は(17)式のように変形する。

$$\sqrt{1/q_d} = \sqrt{1/q_0} \sqrt{(\beta \sqrt{q_0} t + 1) (\beta \sqrt{q_0} t + \beta \sqrt{q_0} + 1)} \quad (17)$$

ここで、 $t$ : 時間 (day),  $\beta$ : 低減係数 (1/day) である。

この場合は非線形であるために、ただちに未知定数の確定値を得ることはできないが、最小二乗線形テラー微分補正法を用いることによって、未知定数  $q_0$  と  $\beta$  の最確値が求められる。

### 4. 適用流域

以上の方法を山地流域に適用するが、低減係数の季節的变化を調べる関係上、年間の資料が得られることを考慮して、非積雪地方の山地流域の流量資料を用いることにした。対象流域は林業試験場九州支場去川森林理水試験地 (以下、試験地と呼ぶ) を用いた。

試験地は3つの試験流域 (1号沢～3号沢) からなり、その位置は宮崎県東諸県郡高岡町和石、高岡営林署去川国有林内にある。

試験地については、去川森林理水試験報告 (8, 10～12) 等に詳述されているので、ここでは本研究に関連する部分について略述する。

地質は中世層四万十層群に属し、基岩としては頁岩が優勢な分布を示し、これに砂岩・石灰岩・礫岩を含む厚い地層を形成し、一部に小断層がある。

土層は3流域とも  $B_A$  型,  $B_C$  型,  $B_D$  型で占められ、2号沢は  $B_A$  型, 1号沢と3号沢は  $B_C$  型が多い。1号沢から3号沢の  $B_D$  型の面積率はそれぞれ10.07, 8.72及び11.88%であって、各流域とも沢筋に10%前後含まれている。

流域面積は1号沢から3号沢でそれぞれ6.556, 9.174及び8.181haである。

平均傾斜は、いずれも32～34度でほぼ等しいが、他の地形因子は2号沢と3号沢が比較的似ており、1号沢が形状係数その他の点で理水上やや不利な条件にある。

気象は海洋性気候型に近いが、日向灘から約25km内陸にあるので、多少大陸的傾向を帯びている。

試験地の本観測は1959年1月から実施されているが、本観測開始時の林況は1, 2号沢とも

シイ類, カシ類を上層木とし, イス, タブその他雑木を下層木とする当地方の代表的な常緑広葉樹で, 1号沢にはシイ類よりカシ類がやや多かったのに対して, 2号沢は逆にシイ類の方が多かった. 両沢ともイスの小径木が特に多く, 植生密度はいずれも極めて高く, 両沢の林相に大差はなかった.

3号沢は約50年生のスギを主木とする針広混交林で, 沢筋ではスギが優勢であるのに対して, 尾根筋では常緑広葉樹が優勢であった. スギと広葉樹の浪交割合は面積比ではほぼ 1:1 であった.

その後, 1号沢の広葉樹木は1965年7月から1966年5月に, 3号沢の針広混交林は1965年7月から1966年7月に, それぞれ皆伐処理が行われ, 前者にはヒノキを, 後者には上部にヒノキ, 下部にスギ(面積比3:7)を, それぞれ, 1967年2月から3月に植栽した. なお, 2号沢は対象流域として, 無処理のまま放置されている.

降水量測定用の観測露場は2号沢の水位計室から80mの距離にあり, 1, 2号沢の合流点脇の平坦地に設置され, 1959年1月以来同一場所にある. 雨量計は受水口径 20cm で転倒マス型パルス積算方式の隔測長期自記雨量計(1回転倒量 0.5mm, 3か月巻き)を使用し, 降水量の測定を行っている. なお, 日降水量の日界は0時である.

1967年4月から1972年3月までの年平均降水量は2598.2mmであり, 本試験地は多雨地帯に属することが認められるが, 特に, 6月から8月の降水量は1389.4mm(53.5%)と夏季に集中している.

日流出量の日界も日降水量と同様に0時である. なお, 降水量・流出量の資料は文献(9)を用いた.

1967年4月から1972年3月までの年平均流出量は1号沢~3号沢でそれぞれ1886.64, 1687.93及び1971.03mmであり, 対照区(2号沢)である壮齢林地の流出量が最小である. 2号沢の年平均流出量は処理区(1号沢, 3号沢)である幼齢林地より200~300mm少なく, 特に, 両者の差は夏季に大きくなる傾向を示している.

参考のために, 3流域がいずれも壮齢林地であった1959年の流出量は1号沢~3号沢それぞれ1820.24, 1817.56及び1883.18mmであって(2), 1号沢と2号沢の流出量の差は認められず, これらに比べて3号沢の流出量が若干多い程度であった. すなわち, 3流域が壮齢林地であった時点での流域間の流出量には特別な差異が認められないで, 処理後の流出量の差は森林伐採による蒸発散量の低下が影響していると思われる.

以上, 試験地の水文・地文特性について述べたが, 本研究に関係がある蒸発断能, 蒸発断比について述べる.

蒸発断能を求める方法は既往いろいろ提案されているが, 本研究ではHAMON法(1)を用いることにした. ただし, 試験地における気温の観測期間は1958年1月から1961年9月までであったので, 宮崎地方気象台の気温資料から解析期間における試験地の気温を推定し, それから蒸発断能を推算した.

1967年4月から1972年3月までの月毎の蒸発断能は気象条件によって分布が異なっているが, 1967年4月から1972年3月までの年平均蒸発断能は781.1mmであって, 月別の最高は7月の133.0mm, 最低は1月の21.3mmである. なお, 5か年平均の日蒸発断能  $e_p$  (mm/day) の月別変化は Fig. 1 に示した.

蒸発断能の最大は7月の4.29mm/dayであり, 最小は1月の0.69mm/dayである. なお,

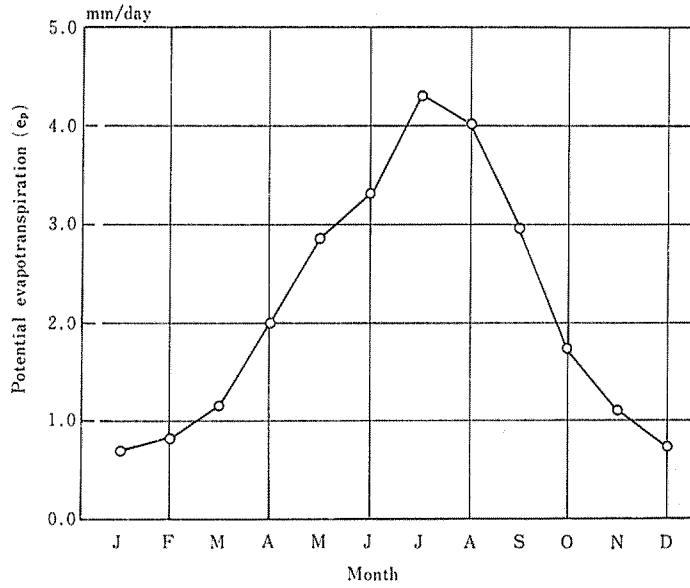


Fig. 1. Results of potential evapotranspiration at Sarukawa experimental watersheds by Hamon's method.

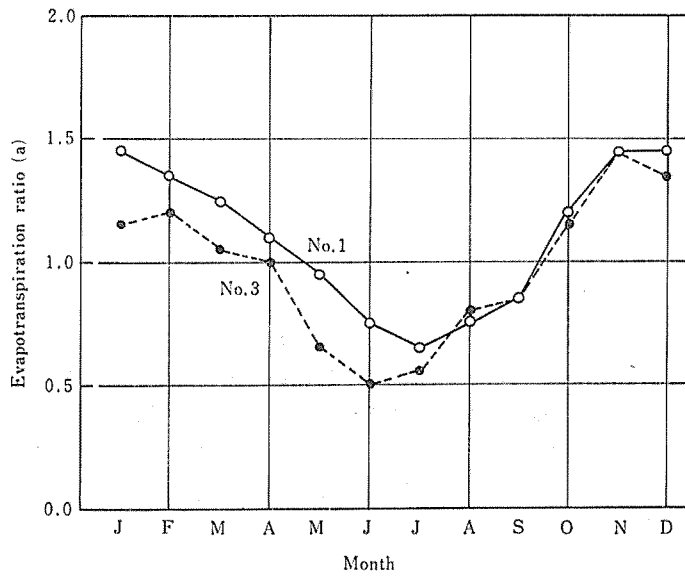


Fig. 2. Results of evapotranspiration ratio for watershed No. 1 and No. 3 of Sarukawa experimental watersheds.

Table 1. Monthly variation of total days ( $\sum m_i$ ) and number of data (n) for recession coefficient by watershed No. 1 and No. 3 of Sarukawa experimental watersheds

Month	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
$\sum m_i$	155	57	76	27	72	31	64	76	91	89	132	110
n	14	10	10	6	15	6	11	13	14	16	15	14

年平均日蒸発散能は2.08mm/dayである。

蒸発散比 a については、既に、筆者(5)が解析しているが、3流域とも夏季の蒸発散比が小さく、また、冬季のそれが大きくなる傾向を示した。なお、蒸発散比 ( $a_1 \sim a_{12}$ ) の月別変化は Fig. 2 に示した。

1号沢で、蒸発散比の最大は11~1月の1.45であり、最小は7月の0.65である。一方、3号沢のその最大は11月の1.45であり、最小は6月の0.50である。すなわち、蒸発散比は夏季に小さく、冬季に大きくなる傾向を示した。

#### 5. 解析に用いた資料の期間と資料の取り方について

同試験地の流量資料は林業試験場研究資料として既に公表(9)されているが、本研究ではこの資料を用いた。したがって、資料は1967年1月~1976年12月の10年間である。

対象流域の低水流出の資料のとり方については、いろいろ考えられるが、本研究では、無降雨日が6日以上連続したときの資料を用いて低減係数を求めた。ただし、無降雨開始後2日間は直接流出量が含まれていると考えられるので、解析からは除外した。

1号沢と3号沢で10年間に得られる資料数は Table 1 に示したが、月によって資料数がかかり変化がある。特に、4月と6月は延べ日数が30日前後と他の月に比べて極めて少ない。

なお、低減係数は月平均値として求めるが、それは、下記の方法である。

$$\beta = \frac{\sum m_i \cdot \beta_i}{\sum m_i} \quad (18)$$

ここで、 $\beta_i$  : 資料 i 番目の低減係数、 $m_i$  : 資料 i 番目の日数、n : 資料数である。

### III 解析結果

#### 1. 日蒸発散量について

本研究では地下水帯からの蒸発散を考慮するが、地下水帯からの蒸発散は、恒率的に生ずると考えられるので、ここでは、同試験地について筆者が既に解析している蒸発散能 ( $e_p$ ; Fig. 1) と流域の蒸発散比 (a; Fig. 2) を用いて日蒸発散量 ( $a \cdot e_p$ ; Fig. 3) の月別変化を求めた。

1号沢で、日蒸発散量の最大は8月の3.01mm/dayであり、最小は1月の1.00mm/dayである。一方、3号沢のその最大は8月の3.21mm/dayであり、最小は1月の0.79mm/dayである。1号沢と3号沢の年平均日蒸発散量はそれぞれ、1.99mm/dayと1.76mm/dayである。

#### 2. 低減係数について

両流域の低減係数の結果は Fig. 4 に示した。

1号沢の低減係数の最大は4月の0.05329/dayであり、最小は1月の0.02250/dayである。一方、3号沢のその最大は9月の0.05116/dayであり、最小は1月の0.01969/dayである。

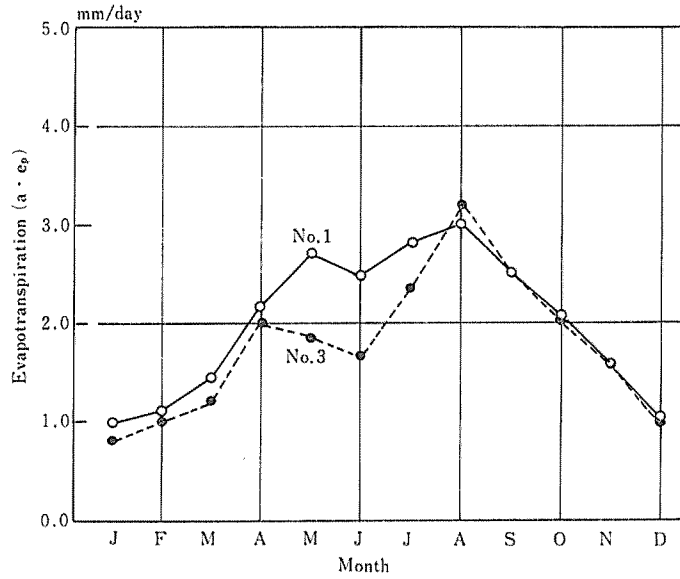


Fig. 3. Results of evapotranspiration for watershed No. 1 and No. 3 of Sarukawa experimental watersheds.

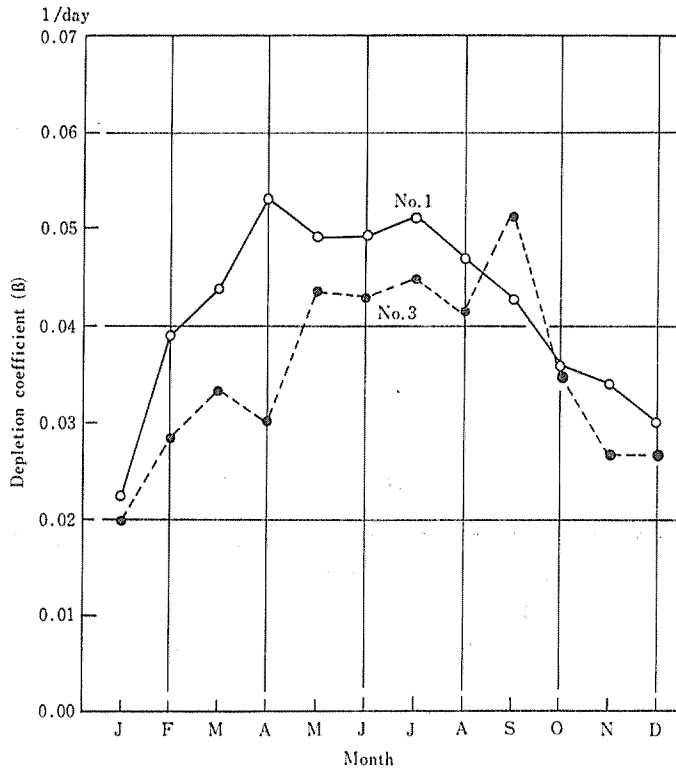


Fig. 4. Results of depletion coefficient for watershed No. 1 and No. 3 of Sarukawa experimental watersheds.



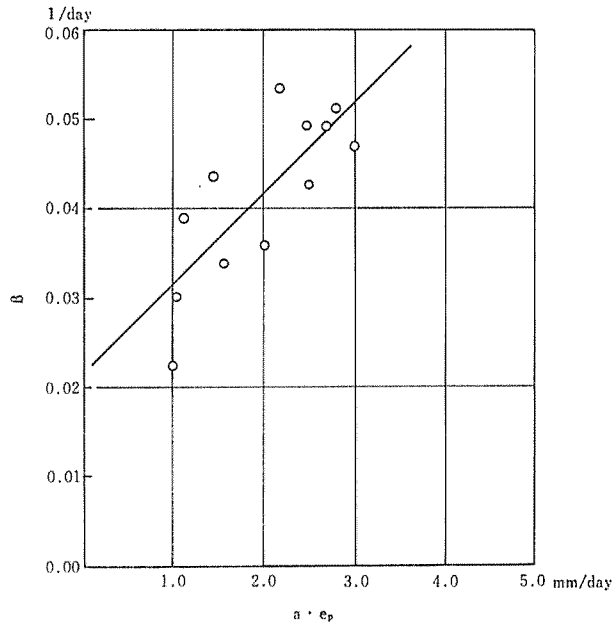


Fig. 5. Relation between evapotranspiration ( $a \cdot e_p$ ) and depletion coefficient ( $\beta$ ) for watershed No. 1 of Sarukawa watersheds.

### 3. 蒸発散量と低減係数の関係について

蒸発散量と低減係数の関係は Fig. 5 に示したが、その関係は一次関数と考えられるので、(16)式が成立することが分かった。

1号沢と3号沢についての蒸発散量と低減係数との関係式を求めると(19)式と(20)式となり、1号沢と2号沢の相関係数はそれぞれ、0.78、0.74であり、ともに有意水準1%で有意であった。

$$\beta = 0.02151 + 0.01005a \cdot e_p, \quad (1号沢) \quad (19)$$

$$\beta = 0.01815 + 0.00976a \cdot e_p, \quad (3号沢) \quad (20)$$

これより、1号沢の  $\beta_0$  と  $\alpha$  はそれぞれ、0.02151、0.01005、3号沢の  $\beta_0$  と  $\alpha$  はそれぞれ、0.01815、0.00976である。

## IV 考 察

本研究は、山地流域の低水流出の低減式に蒸発散の影響因子を導く方法についての検討であるが、去川1、3号沢の結果は前述のとおりである。

### 1. 蒸発散量についての検討

1号沢と3号沢の日平均蒸発散量の月別変化は Fig. 3 に示したが、両流域ともに6月に蒸発散量が低くなっている。この原因は、両流域ともに樹木を植栽した当年から5か年間であったため、流域は幼齢林地であったので、これに対する撫育のための雑草等の刈り払いなどの影響も一つの原因と考えられる。

### 2. 低減式に蒸発散を導入したことに対する検討

1号沢、3号沢ともに低減係数が冬季に小さく、夏季に大きくなる傾向を示したが、この結

果は筆者が東京大学愛知演習林東山流域で解析した結果と同様である(4)。

すなわち、低水流出の低減式の低減係数は季節的变化があって、その変化は地下水帯からの季節的な水分の消失(蒸発散量)の変化が関係していることを裏づけたものと思われる。したがって、筆者が低水流出の低減式に蒸発散の影響因子を導入したことは妥当であったことを示唆している。

### 3. 去川1号沢, 3号沢の低減係数の季節的变化に対する検討

1号沢の低減係数の特徴は夏季と同様に春季の低減係数が予想以上に大きいことである。このように春季の低減係数が大きくなる原因は、1号沢の地形の特性に関係していると思われるが、地形に関する諸因子のなかで、特に方位の影響が大きいと思われる。

1号沢の方位の頻度(8)によると、E面の占める割合がかなり多く、NEを中心として、ほぼその両側の分布が対称をなしている。したがって、1号沢は、春季の日照時間が多くなり、このことが春季の低減係数に影響したと考えられる。

一方、3号沢の低減係数の特徴は、春季、夏季が比較的低く、秋季に大きくなる傾向を示したが、この結果についても、3号沢の平均方位はN26°Eである。このことは1号沢に比べて春季、夏季の日照時間が短くなるので、蒸発散量及び低減係数の季節的变化に影響した原因と思われる。

### 4. 蒸発散量と低減係数との関係に対する検討

(8)式と(9)式に示すように、1号沢と3号沢の $\beta_0$ はそれぞれ、0.02151と0.01815であるが、1号沢の方が若干大きい。 $\beta_0$ は蒸発散に関係ない部分で、流域固有のものであるが、両流域の $\beta_0$ の違いは流域の地形に関する諸因子の中で傾斜の違いが影響していると思われる。なお、1号沢と3号沢の平均傾斜はそれぞれ、34°40'と32°30'で、1号沢が若干大きい。

また、1号沢と2号沢の $\alpha$ はそれぞれ、0.01005と0.00976であって、両流域の差は極めて小さいが、この原因は両流域ともに幼齢林地であったため、蒸発散量に関係する部分には差が認められなかったものと考えられる。

## V 摘 要

以上、山地流域の低水流出の低減曲線には変化があって、冬季に比べて夏季の変化が大きいのは低水流出の流出過程で、地下水帯からの水分の消失(蒸発散)が関係し、それが季節的に異なるからと考えられる。

そこで、筆者は低水流出の流出過程に地下水帯から蒸発散による水分の消失についての影響因子を考慮し、それを、低減式に導入することを試みた。

その低減式の妥当性について、林業試験場九州支場去川試験地の1号沢及び3号沢の資料を用いて検討した。

その結果、両流域ともに低水流出の低減曲線は冬季は緩慢で、夏季は急峻であることが分かった。この季節的な変化が地下水帯からの水分の消失に関係することも確認された。

さらに、低減係数は流域固有の特性(地形・地質など)の影響により変動することも確認された。

したがって、今後、さらに多くの流域についても解析を進めて、低水流出の低減曲線に影響を及ぼす諸因子を明らかにしたい。

## 引用文献

1. HAMON, W. R. (1961) Estimating potential evapotranspiration. Proceeding, American Society of Civil Engineers, Jour. of Hydraulics Division, 87 HY3 Pt. 1: 107~120.
2. 石井正典ほか (1976) 低水流出の低減特性についての研究 (I). 87回日林論: 335~336.
3. 石井正典 (1976) 低水流出の低減特性についての研究 (II). 87回日林論: 337~338.
4. 石井正典 (1987) 山地流域の低水流出に適用する実用的な低減式について 岩手大農報 18: 193~209.
5. 石井正典 (1987) 林相の違いが蒸発散・土壌水分におよぼす影響 岩手大農報 18: 211~225.
6. 木村俊晃 (1959) 洪水流出の推定に関する研究 (1) 貯留関数に関する一考察 土木研究所報告 (102): 10~10~16.
7. 木村俊晃 (1960) 流出地域を想定して解析した総合貯留関数の提案 土木技術資料 2: 487~493.
8. 丸山岩三 (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 林試研報 (123): 45~68.
9. 林業試験場九州支場防災研究室 (1982) 去川森林理水試験地観測報告 (1967年1月~1976年12月) 林試研報 (317): 147~190.
10. 白井純郎ほか (1962) 去川森林理水試験第2回報告 試験地の植生の概要について 林試研報 (140): 89~101.
11. 白井純郎ほか (1965) 去川森林理水試験第3回報告 試験地の土壌について 林試研報 (176): 89~99.
12. 白井純郎ほか (1968) 去川森林理水試験第4回報告 去川試験地の流量, 消失水量, 保留量について 林試研報 (216): 127~166.

STUDY ON THE RECESSION CHARACTERISTICS  
OF LOW FLOW (V)  
EFFECTS OF EVAPOTRANSPIRATION INFLUENCE  
TO RECESSION COEFFICIENT

Masanori ISHII

Summary

There is a variation in the decreasing curve expressing the lower water-effluent in a mountainous watershed. The variation is larger in summer than in winter. Maybe this is because the loss of water caused by the evapotranspiration from the underground water zone varies seasonally on the way of flowing of the lower water-effluent.

The author tried to introduce the factor of the loss of water caused by the evapotranspiration from the underground water zone affecting the flow stage of the lower water-effluent into the decreasing equation.

It was investigated consulting the data on No.1 and No.3 watersheds at Sarukawa experimental site of kyushu Branch of The Forestry and Forest Products Research Institute whether the decreasing equation is valid or not.

The results indicated as follows: both watersheds give a gentle decreasing curve of lower water-effluent in winter and a steep one in summer; the seasonal variation of it depends upon the loss of water caused by the evapotranspiration from the underground water zone; and the coefficient of decrease depends upon the inherent characteristics of watersheds such as geographical and geological features.

Another factors affecting the decreasing curve of lower water-effluent will be obtained by analyzing the further watersheds.