

# 1 水年を通して日蒸発散量を算出する短期水収支法

稲葉 誠博<sup>\*1</sup>・近藤 観慈<sup>1</sup>・沼本 晋也<sup>1</sup>・林 拙郎<sup>1</sup>

1 水年を通して日蒸発散量を算出する短期水収支法を提案し、三重大学大学院附帯施設演習林ぬたの谷流域における日蒸発散量を算出した。提案した短期水収支法は、流況曲線の 95 日目から 365 日目の範囲に等間隔に設定した複数の規準流出量、出水日数を 2 日以上、水収支期間を 10 日以上 100 日以内とする条件からなる。本解析法を適用した結果、1 水年を通して日蒸発散量が算出された。本解析法の設定条件を変えて算出される同一水年における年蒸発散量の較差は 5.2% 以下であった。本解析法の設定条件は流況に応じて調整することが可能である。

キーワード：流況曲線、短期水収支法、日蒸発散量、規準流出量、出水日数

**Nobuhiro Inaba,<sup>\*1</sup> Kanji Kondo,<sup>1</sup> Shinya Numamoto,<sup>1</sup> and Setsuo Hayashi<sup>1</sup> (2009) Approach Using the Short-time Period Water-budget Method of Calculating Daily Evapotranspiration throughout a Water Year. J. Jpn. For. Soc. 91: 63-70.** This study proposed the short-time period water-budget method, and estimated evapotranspiration in the Nutanotani watershed (34°27'N, 136°14'E), Mie University. The proposed method consisted of the following three analytical conditions: several critical discharges are selected between the 95th and 365th discharge in a discharge duration curve, each water budget period includes at least two continuous days of flood duration, and the water budget period is between 10 and 100 days. As for the calculated results by the proposed method, daily evapotranspiration were estimated throughout a water year. The difference between the maximum value and the minimum value of annual evapotranspiration in the same water year was 5.2% or less though the analytical condition of the proposed method was changed. The analytical condition of the proposed method can be adjusted according to the duration characteristics.

**Key words:** critical discharge, days of direct discharge, discharge-duration curve, daily evapotranspiration, short-time period water-budget

## I. はじめに

森林流域にもたらされた降水は、河川流出となる過程で一部は蒸発散により大気中に戻り、一部は流域内の貯留量を変動させる。河川流出量と降水量は観測することが容易であるのに対し、蒸発散量の局所観測は行われるが、流域全体の蒸発散量は直接観測することが難しく、流域水収支法などを用いて算出されることが多い。流域水収支法では、このうち流域内の貯留量の変動を無視できると仮定する条件のもとで、河川流出量と降水量から蒸発散量を推定している。流域水収支法の一つに Linsley (1958) によって提案された短期水収支法がある。短期水収支法は、流域水貯留量が等しくなる条件によって決定される個別の水収支期間を設け、その期間内の水収支から日蒸発散量を算出する方法である。わが国でこの方法を応用した例に、高瀬・丸山 (1978) の方法と、鈴木 (1985) の方法がある。いずれの方法も複数年の水文データから対象期間の平均月蒸発散量、平均年蒸発散量の算出が可能であるが、水収支期間が連続しないため、日蒸発散量の算出されない期間が存在する。このため、1 水年ごとの蒸発散量の季節変化などを検討することは困難であった。

本研究では、従来の短期水収支法を拡張して、1 水年の水文データより日蒸発散量を通年で算出する短期水収支法

(以下、本解析法とする) を提案した。本解析法を用いて、三重大学大学院生物資源学研究所附帯施設演習林ぬたの谷流域 (以下、ぬたの谷とする) の 1 水年ごとの日蒸発散量を算出し、日蒸発散量の季節変化を水年相互に比較した。また、本解析法の設定条件と算出精度の関係や、他流域や複数水年への汎用性について考察した。

## II. 水文試験地の概要

ぬたの谷の流域面積は 30.6 ha であり、標高は 470~990 m の範囲にある (図-1)。流域内の植生は、上流部が常緑・落葉広葉樹を主体とした天然生林、下流部がスギ、ヒノキの人工林である。解析対象期間とした 2003 年 4 月 23 日から 2007 年 6 月 25 日までのぬたの谷のハイエトグラフとハイドログラフを図-2 に示す。解析に使用した日流出量は流域出口に設置された堰堤 (標高 470 m) で、日降水量は苗畑雨量観測点 (標高 625 m) で観測されたものである。苗畑雨量観測点の日降水量が欠測となった期間については、同流域内の尾根雨量計 (標高 760 m)、対象流域外近傍の同演習林内に設置された国土交通省雨量計 (標高 527 m) による日降水量を用いて補正した。上記の解析対象期間には、2004 年の台風 21 号にともなう豪雨により日流出量が欠測となった期間 (2004 年 9 月 16 日から 10 月 1 日) が含まれる (以下、欠測期間とする)。日蒸発散量の算出では、欠測期間と

\* 連絡先著者 (Corresponding author) E-mail: shirousagi\_78@hotmail.com

<sup>1</sup> 三重大学大学院生物資源学研究所森林環境砂防学研究室 〒514-8507 津市栗真町屋町 1577 (Laboratory of Forest Conservation and Erosion Control, Graduate School of Bioresources, Mie University, 1577 Kurimamachiya-cho, Tsu 514-8507, Japan)  
(2007 年 12 月 21 日受付; 2008 年 10 月 8 日受理)

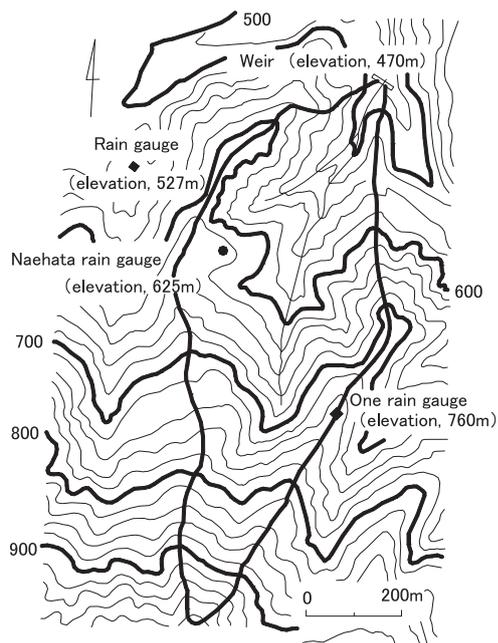


図-1. ぬたの谷流域  
Nutanotani watershed, Mie University.

これらを含む水収支期間は解析対象外とした。また、対象流域の降雪については、江上ら(1995)がぬたの谷の積雪深は浅く、翌日にすぐ融けるものとして扱っていたことから本研究でも同様に扱った。ぬたの谷を含む演習林の植生、地質、土壌などの概要は、荒木ら(1966)や細江ら(1992)に紹介されている。

稲葉ら(2004, 2007)は、低水・渇水期間の連続性を判断しないために、5月1日を水年開始日とする水年設定を用いた。本研究では、5月1日水年により解析を行い、以後、2003年5月1日に始まる水年を2003水年と表記する。

### III. 研究方法

#### 1. 短期水収支法の概要と従来法

流域水収支法によると、ある水収支期間の流域内の蒸発散量  $E$  は、次式

$$E = R - Q \pm \Delta S \quad (1)$$

より求められる。ここに、 $R$  は期間内の総降水量、 $Q$  は期間内の総流出量、 $\Delta S$  は期間内の流域水貯留量の変動量である。(1)式における期間内の流域水貯留量の変動量  $\Delta S$  を推定することは困難であるが、水収支期間を1年間とすると  $\Delta S$  が(1)式の他の項よりも相対的に小さくなるので、 $\Delta S$  を0として蒸発散量  $E$  が求められる。しかし、1年単位で算出された年蒸発散量では、季節変化などを表現できず、さらに短い水収支期間で検討する必要がある。

Linsley (1958) は、ハイドログラフの逓減部であり、かつ逓減の傾きと流出量の一致する出水前後の位置に水収支期間の起点および終点を設定すれば、その水収支期間における流域水貯留量の変化を無視できると仮定し、1年未満の

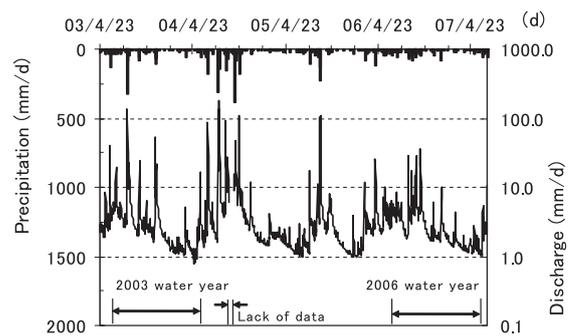


図-2. ぬたの谷のハイトグラフとハイドログラフ  
Hyetograph and hydrograph in the Nutanotani.

2003/4/23から2007/6/25。棒グラフは雨量、実線は流出量。  
From April 23, 2003 to June 25, 2007. Vertical bar, Precipitation; Meander line, Discharge.

期間に(1)式を適用する短期水収支法を提案した。この水収支期間の作成の基準となる流出量(以下、規準流出量  $Q_c$  とする)を一つ設定し、各基底流出段階においてこの規準流出量  $Q_c$  になったときを水収支期間の起点、終点とするのが高瀬・丸山(1978)の方法である。また、①先行する2日間に降雨がなく、当日も無降雨日である日を水収支の起日、終日の候補(以下、先行降雨条件とする)とし、②この期間で、日流出量の差が日流出量の2%以内である日の組を  $t_1, t_2$  とし、③この組のうち、期間が8日以内のもの、60日以上ものを除外するのが鈴木(1985)の方法である。Linsley(1958)の流域水貯留量の考え方と上記の二つの方法より、短期水収支法は規準流出量  $Q_c$ 、先行降雨条件、水収支期間の設定日数によって条件付けられる。

#### 2. 短期水収支法の条件

短期水収支法の条件について以下に検討する。

##### 1) 規準流出量の上限と下限

ハイドログラフの逓減部に規準流出量  $Q_c$  を設定する場合の上限は、流出成分が基底流出のみによって構成されているとみなすことが可能な流出量(以下、初期流出量とする)の最大値が該当する。また、その下限は、次の出水の立ち上がり点、すなわち解析対象期間の最小流出量が該当する。この考え方「初期流出量  $>$  規準流出量  $Q_c >$  最小流出量」に従い、勾配急変点法(近嵐, 1984)により直接流出と基底流出にハイドログラフを分離して初期流出量を求めた。解析対象期間において欠測を含まない水年は2003・2005・2006水年の3カ年である。この3カ年で観測された出水イベントの回数は82回、総降水量は6,443.00 mm、総流出量は4,123.02 mm、直接流出量は1,565.29 mmであり、総流出量より直接流出量を減じた基底流出量は2,557.73 mmであった。この期間のぬたの谷の平均基底流出量(総基底流出量を総観測日数1,096日で除した値)は2.33 mm/d、平均初期流出量は2.61 mm/d、最大初期流出量は8.60 mm/d、最小流出量は0.79 mm/dであった。

上で求めた初期流出量は、ぬたの谷の固有の値であり、

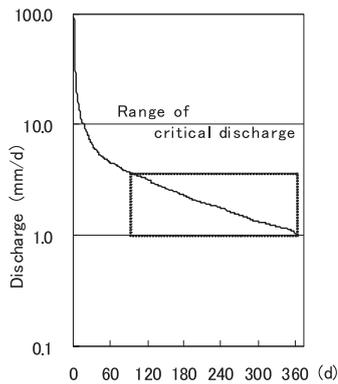


図-3. 平均流況曲線における規準流出量の範囲  
Range of critical discharge in the averaged discharge curve.  
ぬたの谷, 3 水年 (2003・2005・2006 水年) の平均。  
Nutanotani, 2003 water year and from 2005 water year to 2006 water year.

他流域において蒸発散量を算出する場合、改めて初期流出量を求める必要がある。森林総合研究所竜の口山理水試験地で行った直接流出量と基底流出量の分離を行った藤枝・阿部 (1982) は、平均基底流出量が流況曲線の 95 日目から 185 日目の間に存在することを示している。このことから、流況曲線上において基底流出のみで構成されるハイドログラフ逓減部の分布範囲の上限と下限がわかれば、対象流域のハイドログラフに対し直接流出と基底流出に分離しなくても規準流出量  $Q_c$  を設定することが可能となる。そこで、先に求めた初期流出量と流況曲線の順位を調べ、規準流出量  $Q_c$  の上限と下限を流況曲線の日数に変換した。用いた流況曲線はハイドログラフの分離を行った 3 水年の平均流況曲線であり、この平均流況曲線を図-3 に示す。同図は、横軸に日数を、縦軸に対応する日の平均日流出量を示したものである。先に求めた平均基底流出量は 179 日目、平均初期流出量は 156 日目、最大初期流出量は 20 日目、最小日流出量は 365 日目に相当した。このことから、規準流出量  $Q_c$  は、平均流況曲線の 20 日目から 156 日目の間に上限値を持ち、365 日目に下限値をもつことになると考えられた。

ところで、最大初期流出量を規準流出量  $Q_c$  とすると、対象とする出水イベントはその最大出水イベントのみとなる可能性が高い。ここで、この出水イベントにおける初期流出量以後にみられる逓減部の流出に着目したところ、この最大出水イベントの逓減部の最小流出量は 95 日目 (豊水流量) 以後の流出によって構成されていた。このため、95 日目の日流出量を規準流出量  $Q_c$  の上限とすれば、この水年におけるすべての出水に対して水収支期間を設定することが可能となる。以上より、規準流出量  $Q_c$  を設定できる範囲は、流況曲線において 95 日目から 365 日目までと考えられた。

一方、規準流出量  $Q_c$  の設定について、Suzuki (1980) は規準流出量  $Q_c$  の値を変えても蒸発散量に大きな差が生じないことや、鈴木 (1985) は出水ごとに規準流出量  $Q_c$  を変動させ、複数設定しても蒸発散量が算出されることを示し

ている。鈴木 (1985) が行ったように、出水ごとに規準流出量  $Q_c$  を設定すれば、算出される蒸発散量の水収支期間は増えるが、1 水年を通して日蒸発散量を算出するのは難しい。このことから、1 水年を通して日蒸発散量を算出するためには、通年の流出を表している流況曲線に対して規準流出量  $Q_c$  を複数設定することで、季節変化に対応した短期水収支法の計算が可能になると考えた。そこで、流況曲線の 95 日目から 365 日目までに、規準流出量  $Q_c$  を流況曲線の順位に対して等間隔に複数設定した。また、同一日に対して複数の日蒸発散量を算出した場合には、鈴木 (1985) と同様に平均値を採用した。

## 2) 水収支期間に含まれる出水日数

次に、鈴木 (1985) の短期水収支法における先行降雨条件を規準流出量  $Q_c$  と観測流出量の関係に置き換えることを検討する。つまり、短期水収支法の仮定条件である基底流出と直接流出の関係に着目し、観測流出量が規準流出量  $Q_c$  を上回る日数を条件として整理する。観測流出量が規準流出量  $Q_c$  を上回る出水が 1 日だけの場合、短期水収支法においては基底流出と直接流出に分離可能な水収支期間を作成することができない。このため、この出水期間を含む水収支期間が、規準流出量  $Q_c$  に対しては、ハイドログラフの逓減部であり、かつ減衰の傾きと流出量の一致する期間に該当する出水かどうかを判断することは難しい。一方、2 日以上の場合、基底流出と直接流出に分離可能な水収支期間を作成することができるため、ハイドログラフの逓減部であり、かつ減衰の傾きと流出量の一致する期間に該当する出水かどうかを判断することができる。

このことから、規準流出量  $Q_c$  に対してハイドログラフの逓減部であり、かつ減衰の傾きと流出量の一致する期間を含む出水かどうかを判断するためには、連続した出水日 (以下、出水日数とする) が 2 日以上必要であると考えた。例えば、複数の規準流出量  $Q_c$  を設定すると、基底流出の季節変化に対応しない規準流出量  $Q_c$  が存在することがある。冬期の流出ハイドログラフに夏期の規準流出量  $Q_c$  を用いて解析すると、夏期の規準流出量  $Q_c$  を上回る出水日数が連続して 2 日以上存在しないために水収支期間を設定することができない。

以上のことから、基底流出の季節変化に対応した複数の規準流出量  $Q_c$  に、出水日数が 2 日以上条件を用いることにより、日蒸発散量の算出が可能となる。

## 3) 水収支期間の設定日数

流況曲線の順位から複数設定した規準流出量  $Q_c$  と降水量により、(1) 式を用いた日蒸発散量の算出が可能となるが、ある水年の蒸発散量の季節変化を把握するためには、流域水貯留量の変動を 0 とみなせる 1 水年未満の水収支期間を設定する必要がある。この水収支期間の最小期間について、Suzuki (1980) は、日平均蒸発散量の変動を抑え日蒸発散量の算出可能な期間として 10 日間を設定した。また、その最大期間について、高瀬・丸山 (1978) は、季節変化を検討することが可能な期間として 100 日間を設定した。

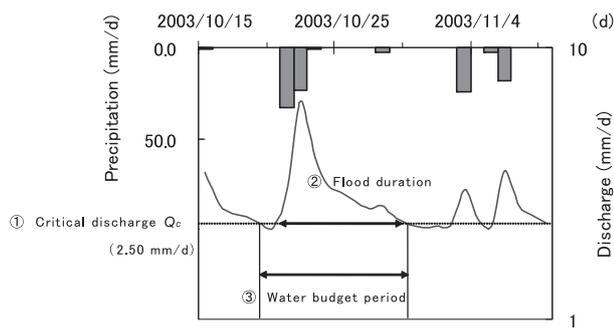


図-4. 本解析法の設定条件

Schematic drawing of the proposed method.

ぬたの谷, 2003/10/15 から 2003/11/19.

Nutanotani, from October 15 through November 19 in 2003.

このため、本解析法では水収支期間を 10 日以上 100 日以下とした。

### 3. 提案する短期水収支法の設定条件

以上の個別の検討をまとめると、本論文で提案する短期水収支法の設定条件は次のようになる。

① 規準流出量  $Q_c$  を、流況曲線の 95 日目 ( $Q_{95}$ ) から 365 日目 ( $Q_{365}$ ) までの範囲に、流況曲線の順位に対して等間隔に複数設定する。使用する流況曲線には、解析期間を含む複数水年の平均流況曲線を用いる。

② 水収支期間の起点は逓減部の日流出量が規準流出量  $Q_c$  を下回る日とし、終点は逓減部が次に規準流出量  $Q_c$  を下回る日の前日とする。このうち、規準流出量  $Q_c$  を上回る出水日数が 1 日のみの場合は、出水日数が 2 日以上となるまで水収支期間の終点を検索する。

③ ②で設定した水収支期間のうち、10 日以上 100 日以下のものを対象とする。

上記に示した本解析法の適用事例を、図-4 に示す。同図は、ぬたの谷における 2003 年 10 月 15 日から 2003 年 11 月 19 日までのハイドログラフとハイトグラフを示している。同図には、本解析法の設定条件①に示した規準流出量  $Q_c$  に、2.50 mm/d を用いた場合が示されている。設定条件②に示した規準流出量  $Q_c$  を下回った 10 月 15 日から次に下回る 10 月 29 日の前日までが 12 日間となり、規準流出量  $Q_c$  を上回った出水日数は 8 日間となる。最後に、設定条件③によって、設定条件②で定まる水収支期間が 12 日間であることから、(1) 式を用いて日蒸発散量を算出することが可能である。

ぬたの谷を対象とする本論文の規準流出量  $Q_c$  の設定は、流況曲線の 95 日目 ( $Q_{95}$ ) から 365 日目 ( $Q_{365}$ ) までの範囲を 5 日間隔とし、55 個設けた。

## IV. 結 果

以下に、提案した本解析法と鈴木 (1985) の方法 (以下、従来法とする) による日蒸発散量の算出結果との比較を行う。

本解析法による日蒸発散量の算出結果を図-5 に示す。同図には、複数の規準流出量  $Q_c$  により算出した日蒸発散量が

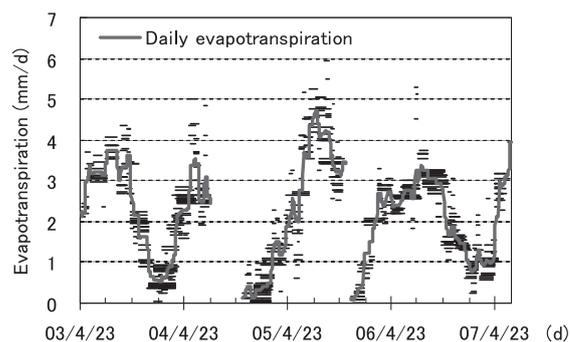


図-5. 本解析法により算出された日蒸発散量

Daily evapotranspiration by the proposed method.

水収支期間 10 日以上 100 日以内, 出水日数 2 日, 55 個。

Water budget period: 10~100 days, flood duration  $\geq 2$  days, number of critical discharge: 55.

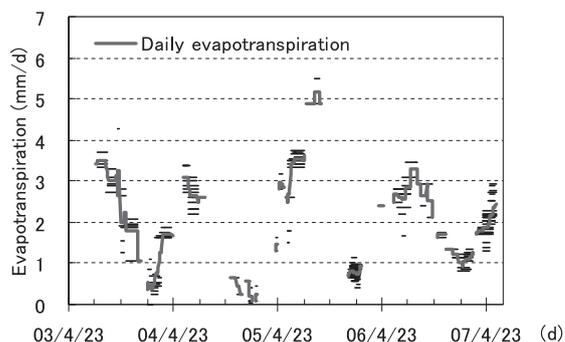


図-6. 従来法により算出された日蒸発散量

Daily evapotranspiration by the conventional method.

水平な細線で、それらの平均値が太線で示されている。同図には、欠測期間 (2004 年 9 月 16 日から 10 月 1 日) が含まれている。欠測期間が日蒸発散量の季節変化において下降減少期間にあたる場合 (2004 年 9 月), 下降減少期間の日蒸発散量 (1.0~2.0 mm/d) が算出されないため、欠測期間の開始日付近では夏期の高い蒸発散量 (細線) で算出されるより高い平均値 (太線) を示し、終了日付近では冬期の低い蒸発散量 (細線) のみで算出されるより低い平均値 (太線) を示した。この傾向は、欠測期間のみではなく、解析対象期間における日蒸発散量の算出開始日や算出終了日においてもみられた。また、欠測期間の他にも、平均日蒸発散量の算出されていない期間が存在した。これは、降雪の影響により冬期の日蒸発散量を正確に算出できていないためと考えられる。降雪については、水文試験地概要で述べたように、江上ら (1995) と同様に、翌日にすぐ融けるものとして扱ったが、冬期において日蒸発散量が極端に小さい値や負の値を示す水収支期間があった。本研究では、日蒸発散量が負の値を示した水収支期間について、平均日蒸発散量の算出対象外とした。そのため、平均日蒸発散量が算出されていない期間 (以下、これを解析不能期間とする) や、平年に比べ極端に小さな値を示す期間が発生した。

そこで、図-5 に示した本解析法の結果を暦年ごとの月平

表-1. 本解析法による月平均の日蒸発散量

Monthly mean daily evapotranspiration by the proposed method.

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2003				—	2.77	3.21	3.32	3.74	3.25	3.01	1.87	1.22
2004	0.58	0.67	1.23	2.25	2.89	2.89	—	—	—	—	—	0.27
2005	0.36	0.55	1.37	1.62	2.19	3.11	4.31	4.31	3.97	3.24	—	0.17
2006	0.80	1.63	2.48	2.61	2.42	2.72	2.89	3.26	3.04	2.75	1.79	1.57
2007	1.11	1.00	1.00	1.25	2.76	—	—	—	—	—	—	—

—, 各月において1日でも蒸発散量が算出されていない場合。

—, Missing daily evapotranspiration  $\geq 1$  day.

表-2. 従来法による月平均の日蒸発散量

Monthly mean daily evapotranspiration by the conventional method.

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2003				—	—	—	—	3.49	3.05	—	1.89	1.55
2004	—	0.58	1.47	—	—	2.87	2.61	—	—	—	—	—
2005	—	—	—	—	—	3.33	—	4.89	—	—	—	—
2006	0.78	—	—	—	—	2.63	2.73	3.19	2.72	—	1.70	—
2007	1.11	1.10	—	1.85	—	—	—	—	—	—	—	—

—, 各月において1日でも蒸発散量が算出されていない場合。

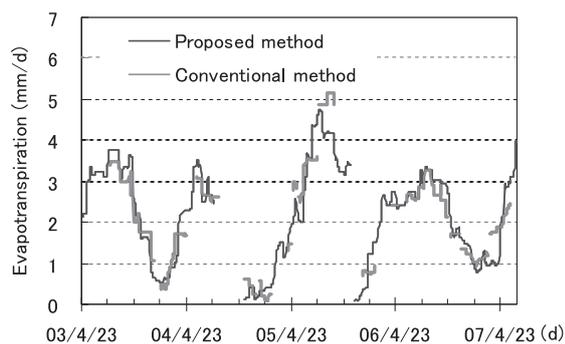
—, Missing daily evapotranspiration  $\geq 1$  day.

図-7. 両解析法による日蒸発散量の比較

Comparison of daily evapotranspiration using both analysis methods.

均日蒸発散量として表-1にまとめて示す。降雪の影響を比較するために、対象期間の最小日蒸発散量の生起月について概観すると、12月から3月と年により異なり、最小値も降雪のなかった2006年の冬期(2007年2月)は1.00 mm/dであり、降雪のあった2005年は0.17 mm/dであった。なお、最大値の発生月は、毎年8月に記録し、日蒸発散量は3.26~4.31 mm/dであった。

従来法による日蒸発散量の算出結果を図-6に示す。同図には、約4年間の個別の水収支期間より算出した日蒸発散量が水平な細線で、それらの平均値が太線で示されている。同図から、欠測期間以外にも日蒸発散量の算出されていない期間が存在する。同図に示した従来法の月平均日蒸発散量の算出結果をまとめたものを表-2に示す。対象期間の最小日蒸発散量と最大日蒸発散量の生起月を概観すると、最小値の月は1月から2月と年により異なり、その範囲は0.58~1.55 mm/dであった。一方、最大値は8月にみられ、3.19~4.89 mm/dであった。しかし、従来法では月平均日蒸発散量を算出できない月が数多くあり、蒸発散量の季節変化が不明であるとともに、複数の水年における季節変化の

違いを詳細に比較・検討することは困難である。

両解析法による日蒸発散量の平均値を図-7に示す。同図には、図-5に示した本解析法の結果が細線で、図-6に示した従来法の結果が太線で示されている。同図の横軸に示した解析対象期間1,525日(欠測期間を含む)のうち、細線で示した本解析法の結果は1,394日算出されているのに対し、太線で示した従来法の結果では952日算出されている。日蒸発散量の算出日数の対象期間に対する割合は、本解析法は対象期間の約9割の期間において算出できているのに対して、従来法は対象期間の約6割の期間しか日蒸発散量を算出できていない。欠測期間と解析不能期間を除けば、本解析法は日蒸発散量を連続して算出できたといえる。また、両解析法の結果が比較できる範囲では日蒸発散量に大きな違いはみられない。

## V. 考 察

### 1. 本解析法の蒸発散量と流域水収支法の損失量との比較検証

短期水収支法より算出した蒸発散量を流域水収支法より算出した損失量と比較することで、算出した蒸発散量の精度を以下検討した。従来法より算出した年蒸発散量と流域水収支法より算出した損失量との比較を行う場合、1水年では日蒸発散量の算出できていない期間が存在しているため、Suzuki (1980)が行ったように複数年の日蒸発散量の値を平均することで年蒸発散量の算出が可能となる。その結果によると、6年間の川向流域の水文データに対して規準流出量  $Q_c$  を一つ用いる短期水収支法を用いて算出した蒸発散量  $E$  と流域水収支法より算出した損失量  $L$  との差の  $L$  に対する割合  $\{(E-L)/L\}$  は、2.2%であった。

本解析法で年蒸発散量を求めるには、算出した日蒸発散量を1年間(365日または366日)の日数分積算すればよい。そこで、図-5に示した本解析法の結果に対し、水年開始日を順次移動し、1年間分の日蒸発散量が算出されている

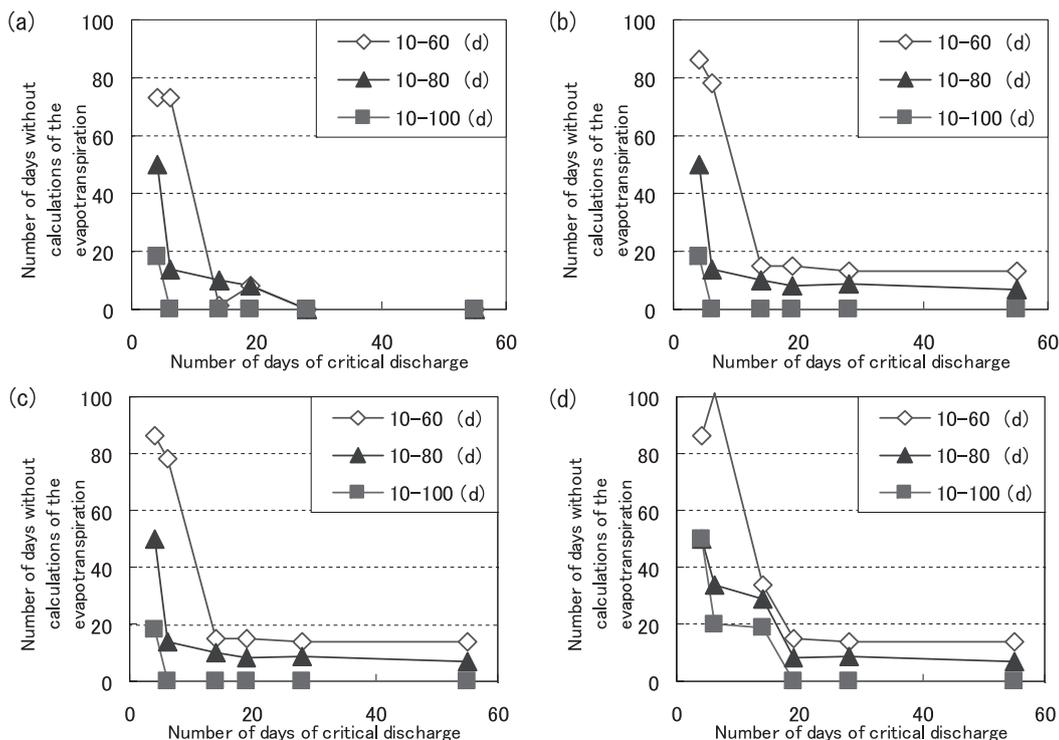


図-8. 算出不能日数と出水日数の関係  
Relationship between the number of days without calculations of the evapotranspiration and the number of days of critical discharge.

2003 水年, (a) 出水日数 2 日以上, (b) 出水日数 3 日以上, (c) 出水日数 4 日以上, (d) 出水日数 5 日以上。  
2003 water year, flood duration (days); (a)  $n \geq 2$ , (b)  $n \geq 3$ , (c)  $n \geq 4$ , (d)  $n \geq 5$ .

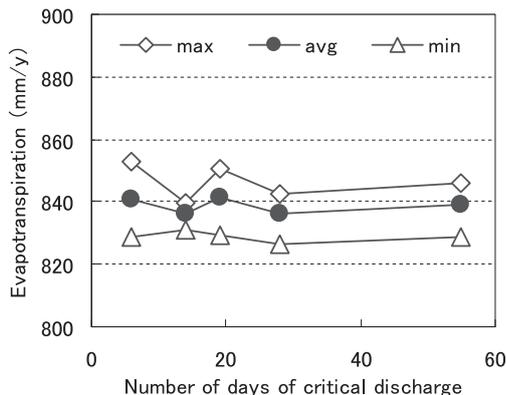


図-9. 規準流出量と年蒸発散量の関係  
Difference of annual evapotranspiration based on the analytical conditions.

2003 水年。  
2003 water year.

301 個の年収支から年蒸発散量を算出した。この 301 個の年収支の年蒸発散量  $E$  から平均年蒸発散量  $E_{avg}$  を算出した。次に、同じ 301 個の年収支に対し総降水量から総流出量を差し引く流域水収支法による損失量  $L$  から平均年損失量  $L_{avg}$  を算出した。その結果、 $E_{avg}$  は 816.74 mm/y,  $L_{avg}$  は 775.29 mm/y であった。また、本解析法より算出した  $E_{avg}$  と流域水収支法より算出した  $L_{avg}$  の差の  $L_{avg}$  に対する割合

$\{(E_{avg} - L_{avg}) / L_{avg}\}$  は、5.3%であった。したがって、本解析法は、蒸発散量の精度において Suzuki (1980) における 6 年間の平均値を用いた場合に比べ劣る結果となったが、データ期間が短くても日蒸発散量を議論できる範囲を広く確保できる点に大きな特徴がある。

2. 設定条件が本解析法の蒸発散量に与える影響

本解析法は、流況曲線に複数設定した規準流出量  $Q_c$  の間隔 (以下、これを選択密度という)、出水日数、水収支期間の設定日数、に応じて算出される日蒸発散量に違いが生じることが考えられる。そこで三つの設定項目の影響を、日蒸発散量の算出不能日数から検討した。この算出不能日数は、対象とする 1 水年 (365 日, または 366 日) において日蒸発散量を算出することができなかった日数を意味する。まず、三つの設定項目に、それぞれ異なる条件を設定した。規準流出量  $Q_c$  の選択密度は、①豊水, 平水, 低水, 渴水流量 (4 個) の他、流況曲線の 95 日目から 365 日目の範囲で 365 日目 ( $Q_{365}$ ) から遡って② 50 日間隔 (6 個), ③ 20 日間隔 (14 個), ④ 15 日間隔 (19 個), ⑤ 10 日間隔 (28 個), ⑥ 5 日間隔 (55 個) とした。出水日数は、① 2 日以上, ② 3 日以上, ③ 4 日以上, ④ 5 日以上とした。さらに、水収支期間の設定日数は、① 10 日以上 100 日以内, ② 10 日以上 80 日以内, ③ 10 日以上 60 日以内とした。設定項目 (規準流出量  $Q_c$  の選択密度 6 個, 出水日数 4 個, 水収支期間の設定日数 3 個) の組み合わせから得られた計 72 組の設定条件

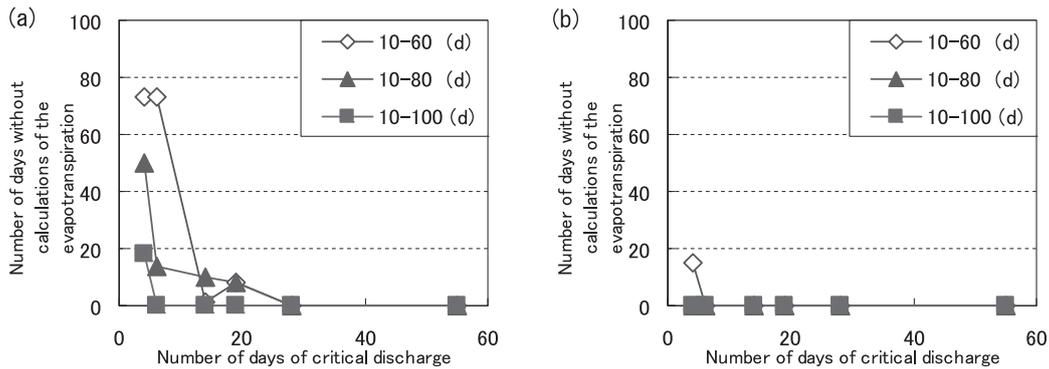


図-10. 流況特性と算出不能日数の関係

Relationship between duration characteristics and the number of days without calculations of the evapotranspiration.

出水日数2日以上。(a) 2003水年の結果, (b) 2006水年の結果。  
Flood duration  $\geq 2$  days. (a) 2003 water year, (b) 2006 water year.

について検討した。

2003水年の日蒸発散量の算出不能日数を図-8に示す。図-8(a)に示す出水日数を2日以上とした場合、1水年を通して日蒸発散量を算出するためには、水収支期間を10日以上100日以内とすると、流況曲線の95日目から365日目の範囲に50日間隔の規準流出量 $Q_c$ が必要である。水収支期間を10日以上60日以内とすると、流況曲線の同じ範囲に10日間隔の規準流出量 $Q_c$ が必要である。次に、図-8(d)に示す出水日数を5日以上とした場合、水収支期間を10日以上100日以内とすると、流況曲線の同じ範囲に15日間隔の規準流出量 $Q_c$ が必要である。ここで、水収支期間を10日以上60日以内とすると、流況曲線の同じ範囲に5日間隔の規準流出量 $Q_c$ を用いても、1水年を通して日蒸発散量を算出できない。したがって、出水日数を短く設定した場合、水収支期間の設定日数を長く設定すれば、規準流出量 $Q_c$ の選択密度によらず、1水年を通して日蒸発散量が算出できる可能性が高まると考えられる。また、水収支期間の設定日数を短く設定しても、規準流出量 $Q_c$ の選択密度を増やすことで、1水年を通して日蒸発散量が算出できる可能性が高まると考えられる。一方、出水日数を長く設定した場合、1水年を通して日蒸発散量を算出するためには水収支期間の設定日数を長く設定する必要がある。

上記の結果から、1水年を通した日蒸発散量の算出には、本解析法の三つの設定項目において出水日数が最も影響を与え、次に規準流出量 $Q_c$ の選択密度、最後に水収支期間の設定日数の順に影響が大きいと考えられた。

### 3. 年蒸発散量の年較差と規準流出量の選択密度の関係

前節の検討において、1水年を通して日蒸発散量を算出できた水収支期間の年蒸発散量に差異が生じた。そこで、解析対象期間のうち観測された降水量・流出量、推定された蒸発散量の3要素が存在した2003水年と2006水年を取りあげ、年蒸発散量の年較差と規準流出量 $Q_c$ の選択密度との関係について検討した。

まず、2003水年を通して日蒸発散量を算出できた22組(規準流出量 $Q_c$ の選択密度50日間隔:3組, 20日間隔:3

組, 15日間隔:4組, 10日間隔:6組, 5日間隔:6組)に対して、年蒸発散量を算出した。規準流出量 $Q_c$ の選択密度ごとに、2003水年の年蒸発散量の最大値、平均値、および最小値を図-9に示す。この22組の年蒸発散量のうち、最大値 $E_{max}$ は852.89 mm/y、平均値 $E_{avg}$ は838.57 mm/y、最小値 $E_{min}$ は826.16 mm/yであった。この結果から、 $E_{max}$ と $E_{min}$ の差の $E_{min}$ に対する割合 $\{(E_{max}-E_{min})/E_{min}\}$ は3.2%であった。また、2006水年を通して日蒸発散量を算出することができたのは45組であり、 $E_{max}$ (776.56 mm/y)と $E_{min}$ (738.31 mm/y)の差の $E_{min}$ に対する割合は5.2%であった。この結果から、1水年を通して蒸発散量を算出できた場合、本解析法の設定条件を変えても、同一水年の年蒸発散量の較差は最小値の5.2%程度とみこまれる。

### 4. 流況の違いが算出不能日数に与える影響

他の流域に本解析法を用いる場合、流況の違いによって算出不能日数が異なることが考えられる。そこで、前節と同様に2003水年と2006水年を取りあげ、算出不能日数を指標として、流況と設定条件の関係を検討した。

2003水年の水収支の内訳は、年間流出量1,633.22 mm/y(標準偏差10.17, 変動係数2.28)、年間降水量2,366.81 mm/yであり、2006年のそれは、年間流出量1,295.69 mm/y(標準偏差3.65, 変動係数1.02)、年間降水量1,990.58 mm/yであった。さらに、図-2に示したヒドログラフから、2003水年は夏期に流出量が多く、冬期に少ない年であり、季節変化の大きい年であった。一方、2006水年は夏期の流出量が少なく、冬期はほぼ平年並みとみられる流出量を記録した年であり、季節変化の小さい年であった。出水日数に2日以上を用いた場合について、2003水年の算出不能日数の結果を図-10(a)に、また2006水年の算出不能日数を図-10(b)に示す。2003水年は、規準流出量 $Q_c$ の選択密度が15日間隔以下のとき、水収支期間の設定日数により1水年を通して日蒸発散量を算出できない場合がみられる。これに対して、2006水年は、豊水、平水、低水、渇水流量の4個以下のときを除き、1水年を通して日蒸発散量が算出できた。

この結果は、同一流域でありながら、対象期間の流況に

よって、1水年を通して日蒸発散量を算出するのに必要な規準流出量  $Q_c$  の最小の選択密度が異なることを示している。つまり、季節変化の大きい水年や流域の場合、短期水収支法の一つである本解析法を用いて1水年を通して日蒸発散量を算出するためには、規準流出量  $Q_c$  の選択密度を高くすることが必要であり、季節変化の小さい水年や流域の場合、規準流出量  $Q_c$  の選択密度を少なくしても1水年を通して日蒸発散量を算出できると考えられる。

## VI. 結 語

本論文で提案した短期水収支法は、流況曲線の95日目から365日目の範囲に設定した規準流出量  $Q_c$  の選択密度、観測流出量の出水日数、作成された水収支期間の設定日数の三つの設定項目からなり、欠測期間と解析不能期間を除けば、1水年を通して日蒸発散量を算出することが可能な方法である。本解析法を用いた結果と、設定条件と算出精度の関係や本解析法の特徴は次のようにまとめられる。

- ① 本解析法から算出した日蒸発散量による年蒸発散量と流域水収支法から算出した年損失量との差の年損失量に対する割合は5.3%であった。
- ② 算出不能日数から本解析法の三つの設定項目を検討した結果、1水年を通じた日蒸発散量の算出には、規準流出量  $Q_c$  を上回った出水日数、規準流出量  $Q_c$  の選択密度、そして水収支期間の設定日数の順に影響を与えることが示された。
- ③ 本解析法により1水年を通して蒸発散量を算出できた場合、設定条件を変えても、同一水年の年蒸発散量の較差は5.2%以下であった。
- ④ 本解析法で用いた三つの設定項目については、対象流域や対象期間の流況によって、規準流出量  $Q_c$  の選択密度を減らすことや、水収支期間の設定日数を短くすることが可能である。

以上より、従来の短期水収支法（鈴木，1985 など）では

1水年を通して日蒸発散量を算出することができない場合でも、本解析法では1水年を通して日蒸発散量が連続して算出できるため、季節変化の把握や流域の植生変化による日蒸発散量の経年変化の影響を検討することが可能になると考えられる。本解析法は、蒸発散量の算出に流況曲線から選択した複数の規準流出量  $Q_c$  を使用しており、短期水収支法として積雪流域への適用の限界はあるにしても、それ以外の流況曲線の作成に十分な水文データが観測された他流域への適用も容易な方法であり、今後さらに詳細な解析を報告する予定である。

なお本研究の一部は、第118回日本林学会大会において発表したものである。

## 引用文献

- 荒木慶雄・浮本 勇・北村治郎（1966）平倉演習林の地形・地質及び土壌について．三重大学農学部演習林報告6：1-9.
- 近嵐弘栄（1984）山地小流域における増水曲線の推定．日林誌66：149-170.
- 江上 泰・林 拙郎・川邊 洋・本多 潔・島地岩根（1995）寡雨年夏期（'87年）における蒸発散量の減少傾向．日林誌77：370-372.
- 藤枝基久・阿部敏夫（1982）竜の口山試験地における森林の成立が流出に及ぼす影響．林試研報317：113-138.
- 細江一之・本多 潔・川邊 洋・林 拙郎（1992）三重大学附属演習林における量水観測と流出特性．三重大学農学部演習林報告17：173-186.
- 稲葉誠博・沼本晋也・近藤観慈・林 拙郎（2004）森林流域における渇水期流量に着目した流況解析．中部森林研究52：251-254.
- 稲葉誠博・近藤観慈・沼本晋也・林 拙郎（2007）水年開始日の設定が低水・渇水流況解析に及ぼす影響—竜の口山森林理水試験地の場合—．日林誌89：412-415.
- Linsley, R.K., Jr., Kohler, M.A., and Paulhus, J.L.H. (1958) Hydrology for Engineers. McGraw-Hill Book, New York. 113-116.
- Suzuki, M. (1980) Evapotranspiration from a small catchment in Hilly Mountains (I) Seasonal variations in evapotranspiration, rainfall interception and transpiration. J. Jpn. For. Soc. 62：46-53.
- 鈴木雅一（1985）短期水収支法による森林流域からの蒸発散量推定．日林誌67：115-125.
- 高瀬恵次・丸山利輔（1978）水収支法による季別流域蒸発散量の推定．農土論文76：1-6.