

山地小流域における蒸発散の 特性に関する基礎的研究(I)

スギ・ヒノキ幼齢林分の蒸発散量について

戎 信宏*・青柳泰夫**・小川 滋***・藤本幸司****

A Fundamental Study of the Characteristics of Evapotranspiration
in a Small Mountainous Watershed (I)

The Evapotranspiration of a Young Sugi and Hinoki Stand

Nobuhiro EBISU, Yasuo AOYAGI, Shigeru OGAWA and Kôji FUJIMOTO

Summary: This study demonstrated the spatial variation of evapotranspiration in a watershed and was intended to improve the accuracy of the estimation of watershed evapotranspiration. This small experimental watershed is located in the Komenono University Forest of Ehime University and it is on a young stand of Sugi and Hinoki. The evapotranspiration was estimated by 4 methods: The small pan evaporation method, the energy balance Bowen ratio method, the simple chambers method and the short-term water budget method. In order to investigate the relation between the evapotranspiration and the soil moisture content, the pF-values of the soil moisture was observed by tensiometers. The following was the results. 1) The pan evaporation was varied over the watershed. It showed that the difference among these evaporations depended on the direction of the slope and the sites of the slope: upper, middle and lower. 2) The evapotranspiration using the energy balance Bowen ratio method was smaller than the other methods. This evapotranspiration had no relation to the soil moisture estimated by tensiometers. 3) The evapotranspiration using the simple chambers was the same results as the pan evaporation. 4) The evapotranspiration using the short-term water budget method was larger than the pan evaporation. It was considered that there was a water leak from the experimental watershed. 5) The pF-values of the soil moisture were different at the ridge and at the valley. This might be influenced by the difference of the evapotranspiration at these sites.

* 附属演習林 University Forest

** 森林工学研究室(現パシフィックコンサルタント(株)) Laboratory of Forest Engineering
(Present Pacific Consultant Co., Ltd.)

*** 森林工学研究室 Laboratory of Forest Engineering

**** 森林計画学研究室 Laboratory of Forest Management

要 旨 山林地小流域内の蒸発散の特性を明らかにし、蒸発散量の推定精度を上げることによって、森林の水源かん養機能、水収支を明らかにする目的で、愛媛大学農学部附属演習林米野々森林研究センター実験林内の幼齢林分の小流域に蒸発散量の推定のための試験地を設定した。この試験地における観測実験は、流域5カ所での小型蒸発計による蒸発量の観測、熱収支法による蒸発散量推定に必要な流域中央部での微気象観測、短期水収支法のための流域末端での量水観測、簡易チャンパー法によるスギ幼齢木、雑木・雑草の蒸発散量の測定の実験であった。また、流域の湿潤状態を調べるため、テンシオメーターによる土壌水分の測定を、上と同じ流域5カ所で行った。実験解析結果によると、1) 小型蒸発計による蒸発量の流域内地点分布が明らかにされた。2) 熱収支法は、観測期間内でポーエン比の高い日が多く、他の推定法と比べて、蒸発散量は小さな値を示した。また、流域内の土壌水分の減少に対し、蒸発散量の変化は、ほとんどみられなかった。3) アクリル製チャンパーによる実験は、測定回数と測定点が少ないが、蒸発計の蒸発量の地点的相違を裏づける蒸発散量の違いが示された。4) 短期水収支法は、試験地外への漏水が考えられ、推定値としては過大な値であった。5) テンシオメーターによる測定によれば、尾根部と谷部ではpF値の上昇が異なり、それは、屋根部と谷部との蒸発散量の違いからくるものと推察された。

1. はじめに

森林の水源確保を目的とした流域管理を行うには、山林地小流域内の蒸発散の特性を明らかにし、蒸発散量の推定精度を上げることによって、森林の水収支機構を解明し、森林の水源かん養機能を定量化する必要がある。蒸発散量の推定法には、空気力学法、熱収支法、水収支法、ライシメーター法等の多くの間接的な方法による場合が多く、推定法の精度が問題とされる。また、蒸発散の研究は、耕地の灌がい制御を目的で行われた数多くの研究があるが、森林の蒸発散に関しては、その観測実験において、植生が林木のため観測計器や施設が大規模になり、測定区域の一地点の観測による推定しかできないか、観測場所が山林地であり、地形は急峻な傾斜地が多く、長時間の観測に多大な労力が必要となり、流域内の蒸発散量の分布やその特性を研究した例は少ない。この研究では、幼齢林分の小流域に試験地を設定して、熱収支法のための微気象観測、短期水収支法のための量水観測、蒸発量の流域分布を調べるための小型蒸発計の多点観測、テンシオメーターによる土壌水分の測定、実際の蒸発散量を簡便に測定する試みとしてのアクリル製チャンパーによる実験を行い、山地小流域内の蒸発散量の分布や特性を検討した。

なお、本報告の一部については、第97回日本林学会大会で発表した。

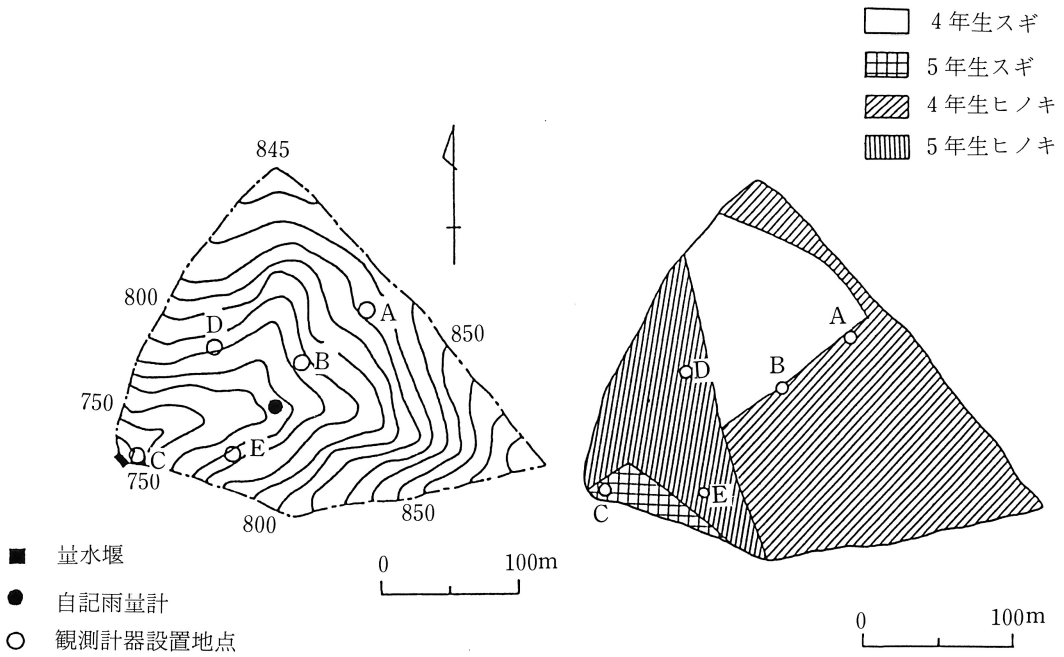
2. 試験地及び実験方法

2-1 試験地の概要

この試験研究に用いた試験地は、図-1、2に示すように、愛媛県松山市東部に位置し、愛媛大学農学部附属演習林米野々森林研究センター内の実験林2林班内のれ-1、2小班の長井田量水試験地である。試験地の、標高は730m~880mの範囲で、地形は北東から南西に次第に低くなっている。流域面積は、44,800m²で、気候は、温帯湿潤気候で、年降水量は、米野々森林研究センターの露場で、約2,000mm程度である。図-3には、この試験地の林相図を示す。試験地内の植生は、スギ・ヒノキの4、及び5年生の幼齢林である。まだ、スギ・ヒノキとも大きくはなく、樹高は、0.5m~1.5m程度であり、他にスズタケ等の雑草や広葉樹の低木もかなり存在する。ここで、蒸発散量の推定に幼齢林分を選んだのは、流域内の蒸発散の特性や分布を調べるため、多点観測を



図一 試験地位置図



図二 長井田量水試験地

図三 林相図

行う必要があり、その時の観測計器の設置しやすさが、主な理由である。この試験地の周囲は、天然生の広葉樹林やスギ・ヒノキの人工林が存在し、試験流域末端から下流約50mの所には、林道が通じている。地質は、西南中央構造線内帯に属し、領家型の黒雲母花崗岩で、土壤は、B_c、B_d型である。

2-2 観測方法及び蒸発散量の推定方法

試験地に設置した各観測計器の一覧表を表-1に示す。各観測についての詳細は各項目で説明する。

表-1 長井田試験地観測計器一覧表

観測地点	観 測 計 器		
A地点	小型蒸発計	テンシオメーター (10cm, 30cm, 50cm)	雨量計
B地点	小型蒸発計	テンシオメーター (10cm, 30cm, 50cm, 80cm)	
	雨量計	熱収支観測計器	風向風速計
C地点	小型蒸発計	テンシオメーター (10cm, 30cm, 50cm)	雨量計
D地点	小型蒸発計	テンシオメーター (30cm, 50cm)	雨量計
E地点	小型蒸発計	テンシオメーター (30cm, 50cm)	雨量計

(1) 小型蒸発計

蒸発計による蒸発量の測定は、蒸発散量の推定方法として古くから用いられているが、ここで用いた小型蒸発計は、直径20cm、高さ10cmのものである。周囲の気象条件、特に日射条件の影響を受けるため、蒸発計からの蒸発量と、土壤面、植被面からの蒸発散量との相関は高いと考えられる。しかしながら、蒸発計の蒸発量は、水面からの量であるため、何等かの係数で蒸発散量に変換する必要があるが、また、周囲の乾燥状態によって、移流の影響を受けやすいので、その取り扱いには注意を要する。この研究では、比較的多数の地点を観測するのに簡便であるため、この蒸発計を昭和60年8月15日より10月27日まで、観測地点AからEまでの、試験地流域内5カ所に設置した。蒸発量の計測方法は、銅製の小型蒸発計をそのまま用いて、流域内の平均的植被面の高さと思われる地上75cmに水平に置き、水量は降雨時のことを考えて10mmとした。そして、降雨時の蒸発量は、各地点の蒸発計の直ぐ近くに雨量計を設置し、観測された雨量との差として算出したが、蒸発量がマイナスになったときは0mmとした。又、計測時間は、流域内の斜面に直接太陽光が当たる時を、日の出とし、その反対を日没とし一日二回、日中の量と夜間の量に分けて測定した。

(2) 熱収支法

ここでの熱収支法は、ボーエン比法を用いた。普通、森林の熱収支は、次式で与えられる。

$$R_n = \lambda E + H + G + J + B + A \quad (1)$$

ここに、 R_n ：純放射量、 λ ：水の蒸発潜熱、 E ：蒸発散量、 H ：顕熱フラックス、 G ：地中熱流量、 J ：林分の気層及び樹木体の貯熱変化量、 B ： CO_2 固定に利用される熱量、 A ：移流による熱輸送量である。

ここで、林分の気層及び樹木体の貯熱変化量、 CO_2 固定に利用される熱量、移流による熱輸送量の各項が他の熱収支項と比較し、十分小さいと仮定すれば、(1)式は、次のように書ける。

$$R_n = \lambda E + H + G \quad (2)$$

また、 λE と H は、次式で表される。

$$\lambda E = -\lambda \rho \cdot \varepsilon / P \cdot K_v \cdot de/dz \quad (3)$$

$$H = -\rho \cdot C_p \cdot K_H \cdot dt/dz \quad (4)$$

ここに、 ρ ：大気密度、 ϵ ：空気の分子量に対する水蒸気分子の比、 P ：大気圧、 C_p ：空気の定比熱、 e ：水蒸気圧、 t ：気温、 z ：高さ、 K_v ：水蒸気の拡散係数、 K_H ：熱の拡散係数である。境界層中では、 $K_v = K_H$ が成立すると仮定すると、ボーエン比 (β) は、次のようになる。

$$\beta = \frac{H}{\lambda E} = \frac{C_p P \Delta t}{\lambda \epsilon \Delta e} = \gamma \frac{T_1 - T_2}{e_1 - e_2} \quad (5)$$

ここに、 γ ：乾湿計定数、 T_1 、 T_2 ：各高度の気温、 e_1 、 e_2 ：各高度の水蒸気圧である。ここで、ボーエン比を用いて、(2)式より H を消去し、次式より蒸発散量を推定する。

$$E = \frac{Rn - G}{\lambda (1 + \beta)} \quad (6)$$

次に、(6)式の各項を求めるための観測方法を述べる。気温と湿度は、通風型温湿度計（検出部はニッケル測温抵抗体）で、350cm、200cm、75cmの三高度に設置した。純放射量は、高さ250cmに設置された通風風防型放射収支計によって測定した。また同じ高度に、全天日射計を設置した。地中熱流量は、1cm、10cm、30cmの自記地温計（検出部は白金測温抵抗体）により、日変化がなくなる深さを50cmと仮定し、温度波積分法にて算出した。ここでは、土壤実験を行わなかったで、固・液・気相の三相の容積熱容量と容積比率は概数として、次式で示すような値を用いた。

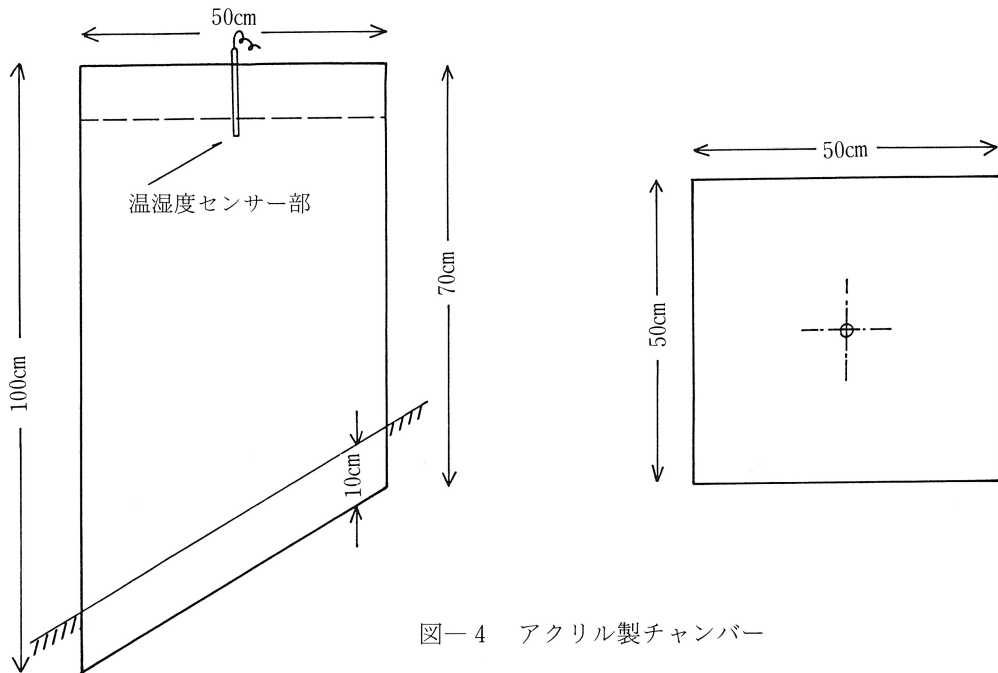
$$\text{土壤容積熱容量} = 0.48 V_s + V_w + 0.0003 V_a \quad (7)$$

ここに、 V_s ：固相（60%）、 V_w ：液相（20%）、 V_a ：気相（20%）である。

さらに、風向、風速は風車型風向風速計を高度250cmに設置し、これらの観測データは、すべて専用記録計または打点式記録計に記録した。ここで、熱収支法による実際の計算は、各データの一時間平均値を用いる予定であったが、求めたボーエン比の日中の変動が大きく、夜間は温湿度勾配の逆転が生じるため、それから算出した蒸発散量の精度に問題があると考えられたので、午前7時から午後6時までの温湿度の平均値からボーエン比を求め、その他のデータは、一時間平均の11時間の積算値を用いて、日中の蒸発散量を計算した。そのため、夜間の蒸発散量の計算は行っていない。なお、観測日は、昭和60年8月26日より10月27日まで行い、その途中台風のため8月31日から3日間欠測があり、また、放射収支計の故障で9月3日から24日まで純放射量が欠測したため、その前後の5日間の一時間平均の全天日射量と純放射量の関係より、欠測日の全天日射量から純放射量を推定した。

(3) アクリル製チャンバーによる実験

アクリル製チャンバーは、密閉型の通風装置を持たないチャンバーで、通風装置の備わったチャンバーと比べるとかなり簡易なチャンバーと言える。実験を行ったのは、昭和60年10月25日と27日の2日間で、この実験の目的は、簡易に実蒸発散量を直接測定できないかということと、蒸発計蒸発量と同様に地点分布を調べることであった。アクリル製チャンバーは、図-4に示すように、縦50cm×横50cmで、高さは、斜面上部で60cm下部で90cmで、実験方法は、試験地のスギの幼齢木と広葉樹の雑木、雑草に、B地点とC地点にそれぞれ2カ所、チャンバーを設置した。そして、二台のデジタル温湿度計（検出部は、白金測温抵抗体と静電容量式高分子膜湿度センサー）により、各地点のスギの幼齢木と広葉樹の雑木、雑草を交互に30分間隔で計測した。そして、温湿度計の一台は、チャンバー外部の気温と相対湿度を計測し、もう一台は、チャンバーを密閉にした状態から15分間のチャンバー内の温度、相対湿度を1分間ごとに目で読み取った。この計測値から蒸発散量を求めるには、実験開始後の初期値から2分間までのチャンバー内の絶対湿度の変化量を求め、その値をチャンバー内の水平投影面積で割って水高とした。ここで、2分間としたことは、できるだけチャンバーをかぶせた影響のない時間内でセンサーの反応時間と実測値を考慮して決めた。この測定方法は、最良と言えないであろうが、現場実験として簡便に場所の違いを相対的に見るならこの程度で十分と考えて、その値を時間換算して、1時間の蒸発散量と見なした。



図一四 アクリル製チャンバー

(4) 短期水収支法

この短期水収支法は、流域の平均的な蒸発散量の値を水収支より求める方法であり、値としては、水収支期間の平均値として求まる。この方法が適用できる流域は、水収支において、流域外への漏水や、流域外からの流入が無視される流域に限られる。ここで、高瀬ら(1)による短期水収支法の原理を示すと次のようになる。

ある流域において流出量 $q(t)$ と流域貯留量 $S(t)$ の間に

$$S(t) = f \{ q(t), dq/dt \} \quad (8)$$

の関係があるとし、 $q(t)$ 、 dq/dt のいずれも等しい時刻 t_1 と t_2 の間で水収支をとると、次式に示す水収支式で、

$$P - Q - L - E - ds = 0 \quad (9)$$

式中の貯留変化量 ds を 0 として次式で蒸発散量が定まる。

$$E = P - Q = \int P(t) dt - \int q(t) dt \quad (10)$$

ここに、 P ：降雨量、 $P(t)$ ：降雨強度、 Q ：流域流出量、 $q(t)$ ：流出強度、 L ：流域外漏水量、 E ：流域蒸発散量である。

この短期水収支法に必要なデータは、長井田試験地の末端に設置されている高さ 70 cm で 90 度 V ノッチの三角堰と試験地内の自記雨量計より得た。この量水観測は、昭和 60 年 6 月 6 日から行われている。なお、量水堰の水位流量曲線は、量水検定の結果、次式で与えられる。

$$Q = 1.425 \times H^{2.5} \quad (11)$$

ここに、 Q ：流量 (m/s)、 H ：水位 (m) である。

今回のデータは、流域貯留量 $S(t_1) = S(t_2)$ となる期間がなく、 ds を無視できなかったため、流域貯留量 S が地下水流出量 q_g に比例すると仮定し、角屋らの補給能モデル(2)より $q_g = \alpha S$ で α を比例定数とすると地下水流出量と流域貯留量は、次式で示され、

$$q_g = \alpha S \quad (12)$$

$$\frac{ds}{dt} = f_g - q_g \quad (13)$$

この、(12)、(13)式の解は、次式のようになる。

$$q_g = f_g \cdot [1 - e^{-\alpha(t-t_0)}] + q_0 e^{-\alpha t} \quad (14)$$

ここに、 q_g は、 t での地下水流出量、 f_g は、地下飽和帯への水分補給能。(14)式で、 $f_g = 0$ のとき α は、地下水流出量の低減係数に一致する。このことよりある時刻 t_1 の地下水流出量 q_g と地下水流出量の低減係数 α が判かれれば、流域貯留量 $S(t_1)$ が計算できる。よって、(10)式は、

$$E = P - Q - ds = \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt - \int_{t_1}^{t_2} q(t) dt + \{S(t_1) - S(t_2)\} \quad (15)$$

となり、ある水収支期間の蒸発散量を求めることが出来る。

(5) テンシオメーター

これは、試験地流域内の土壤水分状態を調べ、蒸発散量との関係を検討する目的で、小型蒸発計を設置した同じ5カ所に深さ10cmから80cmまでに、テンシオメーターを埋設した。B地点だけは、自記のテンシオメーターで、他は読み取り式で、小型蒸発計の測定と同時に各地点のテンシオメーターを1日2回計測した。

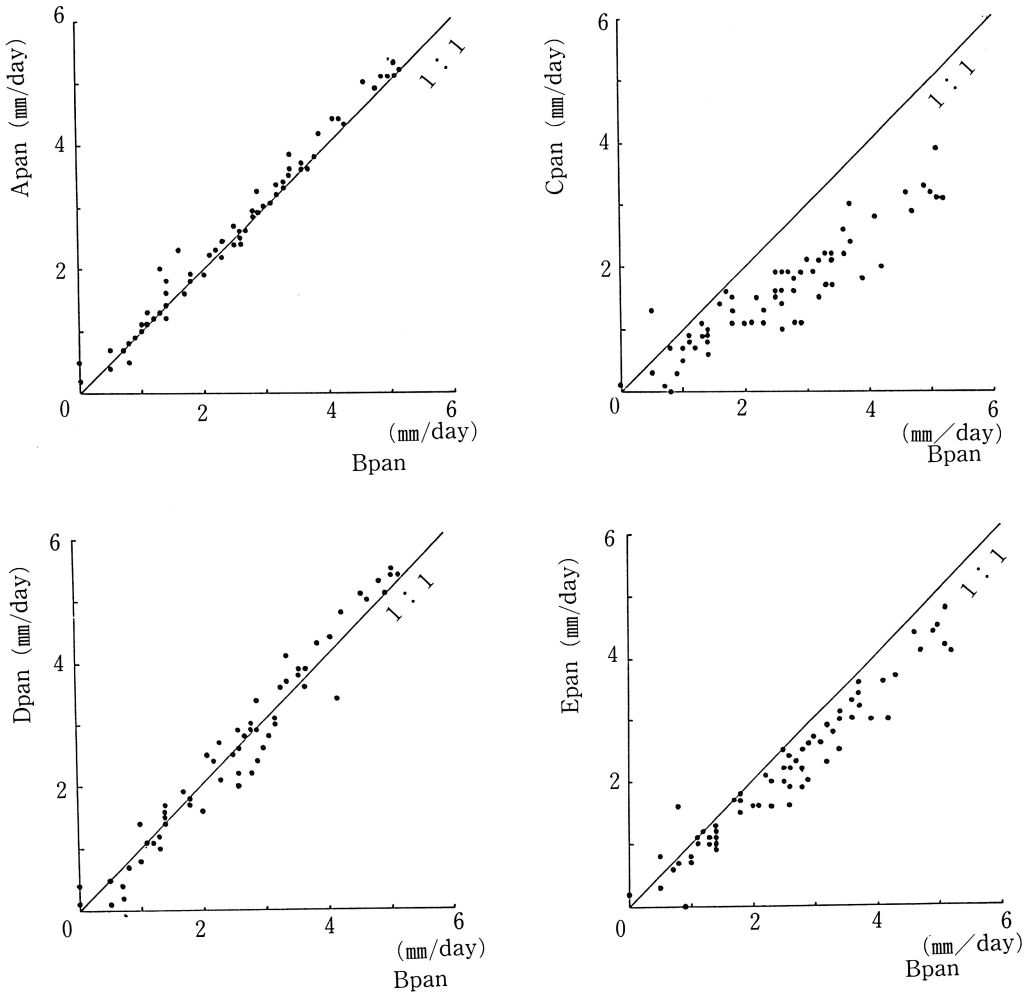
3. 結果と考察

(1) 小型蒸発計による蒸発量

小型蒸発計の蒸発量は、各地点の蒸発散量に対するその地点の微気象環境の違いを示す指標と考えられ、ここでは、流域中央部であるB地点の蒸発量を基準にして各地点の蒸発量と比較した。それを図-5に示すが、ここで言う蒸発量は、日中と夜間を合計した1日の蒸発量で表している。これらの結果より、標高が同じくらいで斜面の方位の違うB地点、D地点、E地点を比較すると、南向き斜面であるD地点は、晴天時の時と思われる蒸発量の4mm以上のときにB地点より蒸発量が多く、それ以下の蒸発量が少ない時は、B地点とあまり変らない。それとは反対に北向き斜面であるE地点は、B地点より少なく、晴天時の時と思われる蒸発量の多い日ほど二地点の差が大きい。また、流域の標高が違うA地点、B地点、C地点では、屋根部であるA地点の蒸発量は、B地点とほぼ差がないか、僅かに多い。谷部であるC地点は、明らかにB地点より蒸発量が少なく、蒸発量の少ない日で0.5mm程度、蒸発量の多い日で1.5mm程度の差がある。これらの蒸発量の差の原因を調べるため、蒸発量と関係のあると考えられる気象因子の、気温、飽差、全天日射量、平均風速の各因子の日中の平均値とB地点の日中の蒸発量の偏相関を計算した。この結果を表-2に示す。この結果より、日射量との相関が一番高く、このことから、小型蒸発計の蒸発量の差の原因は、主として日射量としての各地点のエネルギーの差であると考えられる。しかしながら、C地点で雨天の日と思われる蒸発量の少ない日にも、0.5mm程度の差が見られる。このことは、雨天時の日射量のほとんどは、散乱光によるものであり、C地点とB地点の場所の天空の占める割合の差の違いによることが原因と推察される。また、表-3に各地点の月別日平均蒸発量を示したが、観測期間平均で、B地点よりC地点が43%も少ない。8月と10月の月別平均値を見るとB地点よりC地点の減少割合が大きく、これは太陽高度の季節変化により、谷部と中央部では、日射量の減少割合に差があるためであろう。さらに、蒸発計蒸発量と実蒸発散量の関係を考えて場合、これらの蒸発量の地点的違いは、計器蒸発が水面からの蒸発であるため、流域内が十分に湿潤な時の実蒸発散量もこれと似た分布を示すものと考えられる。

(2) 熱収支法による蒸発散量

熱収支法は、耕地などの実蒸発散量を精度良く測定できると言われる計測法であるが、山林地のような急斜面で吹走距離が十分取れないような所での計測で、また、従来の研究で指摘されているように、雨天時の温湿度勾配がかなり小さいことと、移流の問題もあり、蒸発散量を精度良く求めるのは難しい。ここでは、75cmと350cmの温湿度計の測定値を計算に用いたが、日中の11時



Apan : A地点蒸発計蒸発量, Bpan : B地点蒸発計蒸発量, Cpan : C地点蒸発計蒸発量,
 Dpan : D地点蒸発計蒸発量, Epan : E地点蒸発計蒸発量

図一五 B地点の小型蒸発計蒸発量と他地点の蒸発量

表一 二 B地点の蒸発計蒸発量と各気象因子の偏相関係数

気象因子	気温	飽差	全天日射量	平均風速
偏相関係数	0.18	0.56	0.86	0.47

(データ数 57)

表一 三 各地点の小型蒸発計蒸発量 (mm/day)

	A地点	B地点	C地点	D地点	E地点
8月	3.4	3.3	2.3	3.2	2.6
9月	2.7	2.6	1.6	2.5	2.3
10月	2.4	2.3	1.2	2.2	1.8
平均	2.8	2.7	1.6	2.6	2.2

表一 4 熱収支法による蒸発散量とB地点の小型蒸発計蒸発量, テンシオメーターの pF 値

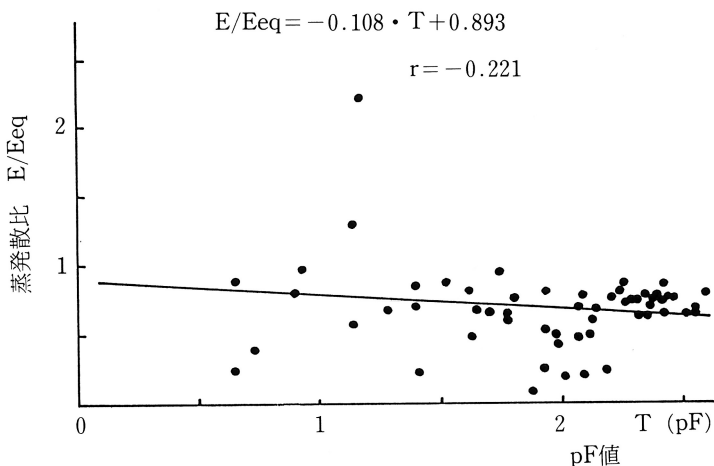
観測期間	熱収支法		小型蒸発計		平衡蒸発量 10cmテンシオメーター	
	E(mm)	E/E _{eq}	E _{pan} (mm)	E _{pan} /E _{eq}	E _{eq} (mm)	pF 値
9. 3- 9.15	1.7	0.74	3.6	1.6	2.3	2.4
9.16- 9.30	0.9	0.64	1.9	1.4	1.4	1.6
10. 1-10.15	1.1	0.73	2.3	1.5	1.5	1.7
10.16-10.27	0.6	0.55	1.8	1.6	1.1	1.8

間の平均値から計算したことで、観測期間60日中ボーエン比が、1 以上になる日が31日もあり、特に10月18日以降は連日1 以上のため、計算で得られた蒸発散量が小さくなり、精度的に少し問題があるので、小型蒸発計蒸発量と土壌水分との関係を見るにとどめ、熱収支法で計算した蒸発散量をこの流域の実蒸発散量と見なした議論はしない。表一 4 に、熱収支法による蒸発散量と、同じ観測期間のB地点小型蒸発計蒸発量の日中の蒸発量と、B地点の10cm深さのテンシオメーターの pF 値の各半月別の平均値と、気象条件を除くため、蒸発散量と蒸発量を平衡蒸発量で割った値も示した。ここで言う平衡蒸発量は、次式で表される。

$$\lambda E_{eq} = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) \quad (16)$$

ここに、E_{eq}：平衡蒸発量、λ：水の蒸発潜熱、R_n：純放射量、G：地中熱流量、Δ：飽和蒸気圧曲線の勾配、γ：乾湿計定数である。

ただし、9月前半と10月後半は、欠測日及び、観測期間外もあるので、15日に満たない。また、8月は、5日間しかないのので、除外した。この表を見ると、蒸発計蒸発量や平衡蒸発量より熱収支法で得た蒸発散量はかなり少なめである。土壌水分との関係を見ると蒸発計蒸発量は、観測期間内で比較的湿潤な9月下旬から上旬にかけて、平衡蒸発量で基準化した値が小さくなる傾向が見られる。これは、蒸発計蒸発量が、湿潤な時より乾燥した時の方が、蒸発量として過大になることを示しているもので、熱収支法による蒸発散量は、この程度の土壌水分の変化では影響を受けまいようである。さらに、熱収支法による蒸発散量とB地点の10cm, 30cm, 50cm, 80cmのpF値の朝夕の平均値を調べたが、10cmの深さでのみ、有意水準10%で負の相関が得られた。これを



図一 6 蒸発散比と土壌水分 (10cm深さテンシオメーター)

図一 6 に示す。ここで、蒸発散量は、平衡蒸発量で割って蒸発散比としている。このことから、この観測期間内では、土壌水分の減少が熱収支法による蒸発散量に与えた影響は、表層部で僅かにあった程度と判断できる。

また、図一 7 に、熱収支法による蒸発散量とB地点蒸発計蒸発量の関係を示したものであるが、かなりばらつきがあることと、周囲の土壌の乾燥湿潤度合で蒸

発計蒸発量と蒸発散量の変化が異なるので、これを用いて他地点で計測した蒸発量を熱収支法による蒸発散量に変換するには、精度的に問題があると思われる。

(3) アクリル製チャンバーによる蒸発散量

ここでは、2日間の実験結果を図-8に示すが、その結果と比較のため、気象観測データの1時間の平均値から、熱収支法による蒸発散量とペンマン法で求めた可能蒸発散量の値も示した。ここで言うペンマン法の可能蒸発散量は、次式で示される。

$$\lambda E_{pen} = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(u) (e_s - e) \quad (17)$$

$$f(u) = 0.35 (1 + 0.537 u) \quad (18)$$

ここに、 E_{pen} ：ペンマン法による可能蒸発散量、 λ ：水の蒸発潜熱、 R_n ：純放射量、 G ：地中熱流量、 Δ ：飽和蒸気圧曲線の勾配、 γ ：乾湿計定数、 u ：平均風速、 e_s ：飽和蒸気圧、 e ：水蒸気圧である。

図中の植生によって、プロットが異なるのは、30分間隔にスギと雑木と交互に実験したためである。また、表-5に、午前7時半より午後4時迄の蒸発散量の総量を示したものである。実験

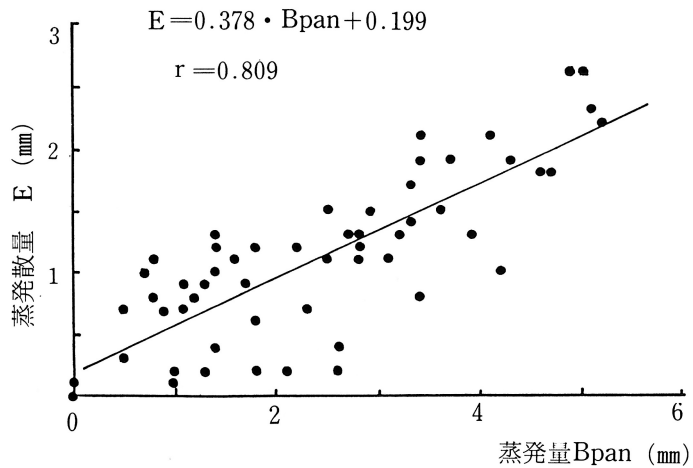


図-7 熱収支法による蒸発散量とB地点の小型蒸発計蒸発量

表-5 チャンバー法と他の方法の蒸発散量 (mm)

月日	B地点		C地点			熱収支法	ペンマン法	
	スギ	雑木	蒸発計	スギ	雑木			蒸発計
10.25	1.4	1.1	2.6	0.6	0.5	1.0	0.4	2.2
10.27	1.2	1.6	2.8	0.8	0.7	1.2	0.7	2.1

日の10月25日は、天候は晴れであるが日中は比較的雲があつたりした。その日の風速は、実験時間内の平均で2.9m/sであり、午前中の方が風が強い。10月27日は、朝方少し雲があつたが、午前10時頃より実験終了まで快晴であつた。平均風速は、1.7m/sであり25日より風は弱い。図-8、表-5からわかるように、小型蒸発計と同様、B地点とC地点の違いは明らかであり、この実験による蒸発散量もC地点の方が少ない。また、27日C地点を見ると、この実験の蒸発散量が午後から急に増加しているが、これは、C地点が午前中まで太陽の直達光が当たらず陰になっている事実と一致する。このことは、B地点とC地点の蒸発散量の差は、この観測期間内において、日射量の差が主たる原因であつたと考えられる。さらに、この実験のB地点の蒸発散量の時間変化をみると、熱収支法による蒸発散量の変化や、ペンマン法で計算した可能蒸発散量の変化ともおよそ類似している。このアクリル製チャンバーによる蒸発散量の測定値は、おそらくはその場所ごとの蒸発散量の日変化の傾向を示すものと思われるが、熱収支法による値と比較し、約2から3倍大きな値であり、また、ペンマン法による値と比較し約0.6から0.7倍であり、今回の実験だけでは、

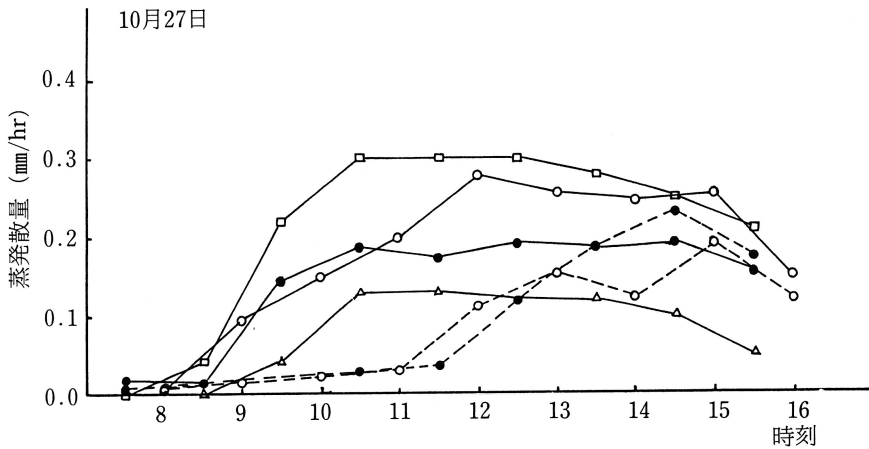
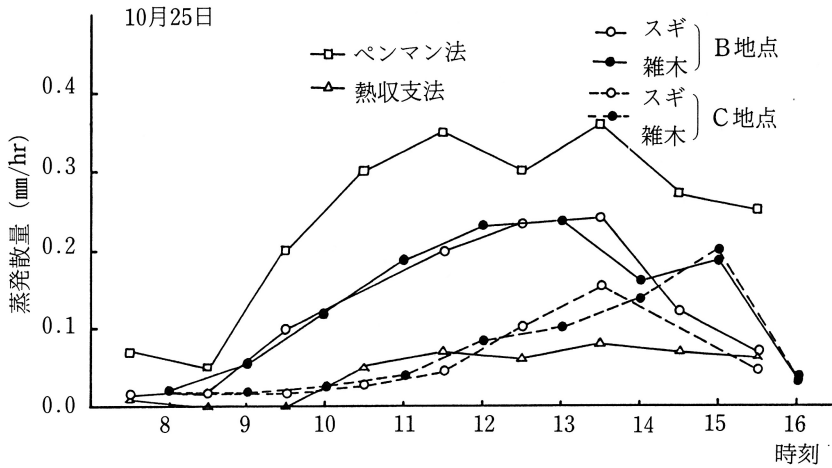


図-8 アクリル製チャンバーの実験による蒸発散量と熱収支法，ペンマン法による蒸発散量

この値が実験場所の実蒸発散量として妥当かどうか判断できない。

(4) 短期水収支法による蒸発散量

短期水収支法は，他の観測方法よりは流域平均の蒸発散量を求める確実な方法であるため，ここでは，流域の平均値を求める目的で行った。水収支期間の決定方法は，鈴木による(3)水収支期間の条件を参考にして決めたが，8月上旬以降の夏期の降雨が非常に少ないため適当な水収支期間が多くとれなかったことで，表-6に示すように，結局，2つの水収支期間しか計算できなかった。この計算に用いた地下水流出の低減係数は，10月20日から11月9日までの流量データに

表-6 短期水収支法による蒸発散量

水収支期間	降雨量 (mm)	流出高 (mm)	低減係数 (day ⁻¹)	貯留量 (mm)	蒸発散量 (mm)	日平均蒸発散量 (mm/day)
9.16-10.26	166.0	25.9	0.0471	9.1	149.2	3.6
11.9-11.27	46.0	3.9	0.0471	0.6	42.7	2.2

よる。さらに、表一七には、9月16日から10月26日の短期水収支法の計算結果と各観測結果から計算した水収支期間日平均蒸発散量を示したものである。これらの結果から、短期水収支法による蒸発散量は、小型蒸発計の蒸発量やペンマン法、熱収支法の蒸発散量

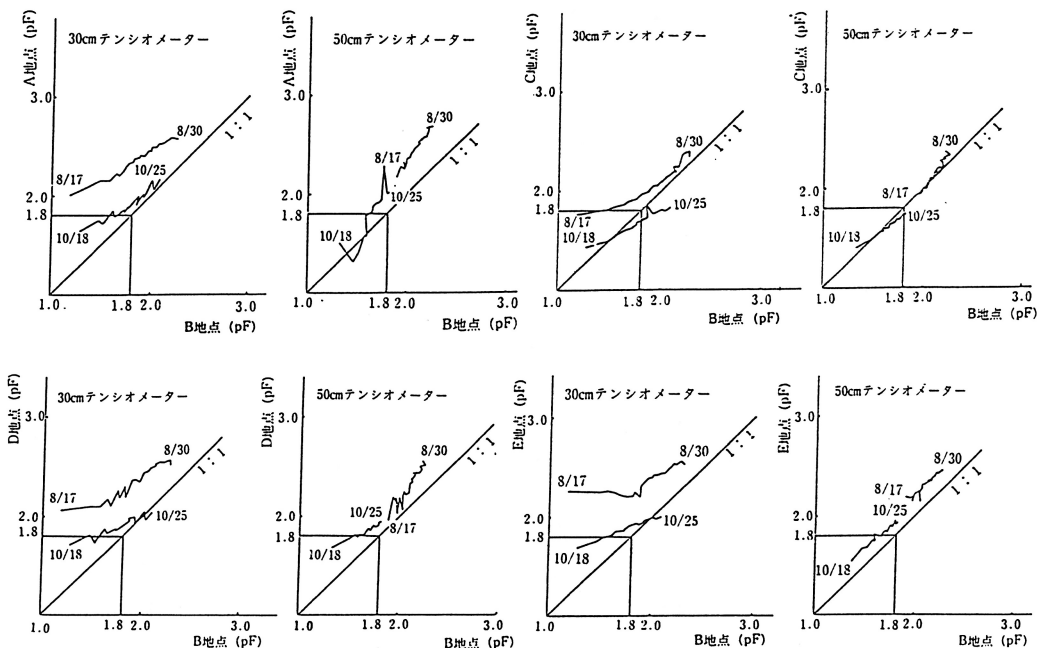
表一七 短期水収支法と他の方法の日平均蒸発散量(mm/day)

短期水収支法	小型蒸発計蒸発量	ペンマン法	熱収支法
3.6	2.7	2.3	0.9

より多い。特に、水収支がとれており漏水等がないような流域においては、短期水収支法による蒸発散量が流域のある期間内の平均の実蒸発散量と見なせるので、通常実蒸発散量より小型蒸発計の蒸発量が少ないことは、周囲の環境に十分な水分がある場合以外有り得ない。恐らくは、この試験地の流域外への漏水のため、過大となっていると考えられる。そのため、短期水収支法による蒸発散量の値を流域平均の蒸発散量とは見なせないであろう。

(5) テンシオメーターによる流域内の土壌水分状態

今回のこのテンシオメーターによる観測結果からは、流域の蒸発散量を求めることはできないが、およそ pF 1.8 以上の時の土壌水分の減少は、その土壌面からの蒸発とその上にある植生の蒸散の影響によるものと考えられるので、流域内5カ所の観測結果を検討した。図一九には、B地点と比較した各地点のpF値1.0以上の値で、無降雨日が、観測期間中比較的長かった、8月17日から8月30日と10月18日から10月25日までの30cmと50cmの深さのpF値の変化をプロットしたものである。今回は、土壌実験によって各地点のpF値と土壌の体積含水率との関係が得られていないので、含水率には変換できなかった。D、E地点は、B地点より30cmの深さが比較的乾燥し、乾燥期間の経時変化をみると、B地点のpF値に対して、D、E地点は変化の様子は類似しており、



図一九 B地点のテンシオメーターのpF値と他地点のpF値

D, E地点の場所的な違いは明確でない。B地点に対し、A地点は30cm, 50cmとも乾燥し、特にA地点の50cm pF 値の変化を見ると、乾燥が進むにつれて1:1の直線から離れる傾向があり、B地点より土壤水分の減少が著しいことを示している。C地点は30cmでは逆にB地点の方がやや乾燥している傾向がみられる。やはりこの結果だけでは、pF 値の変化から各地点の蒸発散量との関係は解らないが、A地点とC地点のpF 値の変化の違いは、その場所の土壤特性の違いもあるのだろうか、蒸発散量の違いも表しているのではないか。

4. ま と め

山地小流域の蒸発散について、幼齢林分を対象としたいくつかの観測実験を行い、蒸発散の流域特性や分布について明らかにしようとし、以下の様なことが判明した。

1) 小型蒸発計の観測では、斜面の方位や斜面での位置によって、蒸発量は異なり、屋根部と谷部での違いが一番大きく、その主たる原因は、日射量の場所的違いであると思われた。また、熱収支法による蒸発散量との関係を見ればばらつきが大きく、各地点の小型蒸発計蒸発量を熱収支法の蒸発散量に変換するのは、無理のようであった。

2) 熱収支観測による蒸発散量は、精度的に若干問題があり、山地小流域における熱収支観測の困難さが見られたが、土壤水分や小型蒸発計の蒸発量と比較検討した結果、熱収支法により推定された蒸発散量は、観測期間内において土壤水分の影響は受けていない様に思われた。

3) アクリル製チャンバーによる蒸発散量の推定では、小型蒸発計蒸発量と同様に、場所の違いによる差が見られた。

4) 短期水収支法による流域平均の蒸発散量を求めようとしたが、小型蒸発計蒸発量より大きくなり、流域の蒸発散量としては過大な値であると考えられ、この原因は漏水によるものと思われた。

5) テンシオメーターによる土壤水分の測定からは、含水率でなく pF 値からの判断であるが、斜面方位より斜面の位置で、蒸発散による影響と思われる土壤水分の減少に差が見られた。

これからの課題として、小型蒸発計の蒸発量では、周囲の土壤の乾燥湿潤状態によって影響され、実際の蒸発散量と異なるため、熱収支法によって蒸発散の流域分布を調べ、さらに検討しなければならないであろう。しかし、熱収支法を精度良く測定するのは、かなり困難であり、観測計器の精度向上と改良が望まれる。また、小型蒸発計蒸発量の分布の主たる原因である、地点ごとの日射量差がどれだけあるのか、検証しなければならないだろう。さらに、土壤水分データは、土壤実験により pF 値と土壤の体積含水率との関係を求めて、再度検討する予定である。短期水収支法は、過大な蒸発散量を示したが、量水観測は、まだ開始されたばかりであるので、今後のデータの蓄積により、これも再検討する予定である。

最後に、観測計器類を快く貸して頂いた、農業工学科農業環境工学研究室、経営農学科農業労働科学研究室、農学部附属制御化施設、ならびに、観測実験に御援助頂いた附属演習林技官の方々、また、図表作成に御援助頂いた長原操さんに厚くお礼申し上げる次第です。

引 用 文 献

- (1) 高瀬恵次・丸山利輔：水収支法による季別流域蒸発散量の推定，農土論集，76，1～6，1978
- (2) 角屋 睦：流出解析手法（その9），農土誌，48（9），673～679，1980
- (3) 鈴木雅一：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（4），115～125，1985

(1986年7月30日受理)