

丘陵地源流域における熱収支観測 Observation of Heat Balance in Forested Watershed

京都大学防災研究所 正員 池 淵 周 一
筑波大学地球科学系 古藤田 一 雄
東京農工大学農学部 丹 下 勲

1. はじめに

本研究は丘陵地源流域における水循環機構を解明する目的で、東京都八王子市の多摩丘陵の一角にある東京農工大学農学部付属丘陵地利用実験実習施設内に 2.2 ha の試験地を設置し、降雨から流出にいたる水文システムの各コンポーネントを総合的に観測するとともに、その観測結果から各コンポーネントの有機的関連構造を分析し、とくに地下水の自然涵養、流動プロセス、蒸発散量の推定に重点をおいた水収支モデルの構成をはかろうとするものである。ここでは熱収支観測をベースにして林地（落葉広葉樹林）の蒸発散量を評価する方法を検討したので、その観測結果ならびに解析結果の一部を報告するものである。なお、観測地域の概要はすでに第26回水理講演会論文集に述べているので参照されたい。

2. 蒸発散量の推定法

均一な植生の草地あるいは水田・作物畑などの比較的草丈の低い植物の存在する地表面からの蒸発散量の実測や推定法は古くから研究され、熱収支法や傾度法などが確立されてかなりよい精度でその推定ができるようになってきた。しかし、樹高の高い林地からの蒸発散量の实測や推定法は観測にかなりの困難をともなう。しかも林地からの蒸発散は、樹高が高いこと、その樹冠面すなわち植被面の空気の粗度が大きいこと、傾度法などを適用するには、樹冠上かなりの高さにまで達する観測塔をたてるか、あるいはバルーンを揚げて観測する必要がある。そこで本研究では、樹冠上ある程度の高さの観測塔で実施できる熱収支法を採用した。すなわち、林地の樹冠面における熱収支の観測によって、林地からの蒸発散量を推定するのである。

いま、樹冠面の上で測定された正味放射量を R_n 、乱流により上方へ輸送される顕熱輸送量を H 、同じく上方への潜熱輸送量を $1E$ （ 1 は蒸発潜熱）、地中へ輸送される熱量を G 、林内植物体の温度上昇に使用される熱量を P_1 、林内気層の温度上昇に使用された熱量を P_2 、同じく気層の水蒸気増加のために使用された熱量を P_3 、同化にともなう熱量を P_4 、移流による熱輸送量を P_5 、とすれば、樹冠面における熱収支式は次のように表わされる。

$$R_n = H + 1E + G + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 \quad (1)$$

一般に、林地のような植被層においては、丈の低い草地や農作物などの植被層に比べれば、かなりの貯熱量変化があると考えられるが、ここでは取扱いを簡単にするため、(1) 式右辺の第 4, 5, 6 項は第 1, 2 項に比べて小さいとしてこれを無視し、また光合成の項および移流項も小さいとして省略すると、(1) 式は次のように示される。

$$1E = R_n - H - G \quad (2)$$

(1) ポウエン比熱収支法

$$1E = (R_n - G)(1 - \gamma / (k + \gamma) \cdot (\Delta T_d / \Delta T_w)) \quad (3)$$

ここに、 γ ：乾湿計定数、 k ：湿球温度と飽和水蒸気圧曲線の傾度、 ΔT_d 、 ΔT_w は 2 つの高度 Z_1, Z_2 での乾球温度差および湿球温度差、である。いま、 $\beta = H/1E$ をポウエン比とすると、 $1 / (1 + \beta) = 1 - \gamma / (k + \gamma) \cdot (\Delta T_d / \Delta T_w)$ となり、

$$1E = 1 / (1 + \beta) \cdot (R_n - G) \quad (4) \quad H = \beta / (1 + \beta) \cdot (R_n - G) \quad (5)$$

が得られる。この意味で(4),(5)式による方法をボウエン比熱収支法と呼んでいる。

(2) 渦相関熱収支法

樹冠上の顕熱鉛直フラックスHを直接、次式で測定し、(2)式に代入して蒸発散量を求めるものである。

$$H = C_p \cdot \rho_a \cdot w' \cdot T_d' \quad (6)$$

ここに、 C_p ：空気の定圧比熱、 ρ_a ：空気の密度、 $w' \cdot T_d'$ ：風速の鉛直成分 w および温度 T_d の変動成分 w' 、 T_d' の積の平均値、である。この方法は樹冠上の風速・温度プロファイルの形に無関係に直接、顕熱フラックスが測定できるという利点がある。

3. 観測法および測器

観測システムの概略はすでに文献1)に述べているので参照されたい。図-1は既システムに新たに林床面正味放射計、乾湿球温度計(20mの高さ)、超音波温度風速計を配置したものである。

4. 観測結果

(1) 樹冠面における熱収支と蒸発散量

$Z = 17.5\text{m}$ での正味放射量 R_n 、 $Z = 16.5$ 、 19.5m の2つの高度での乾湿球温度差 ΔT_d 、 ΔT_w および $Z = 0\text{m}$ での地中熱流量の観測データを(3)式に代入し、いわゆるボウエン比熱収支法によって樹冠面における蒸発散量を推定した。

1) 降雨後の蒸発散量の変化

図-2はこのようにして推定された蒸発散量の日合計値を降雨量と対比して示したものである。蒸発散は散発的に発生する降雨の間をぬうような形で生起するが、降雨直後の蒸発散量は多く、次の降雨日まで徐々に減っていく傾向がみられる。これは土壤水分の減少、地下水位の低下などに起因するのではなかろうか。なお、図-3は地下水位の日変化を($R_n - G$)とともに示したものであるが、地下水位が昼間と夜間でその低下速度を異にしている。

2) 正味放射量と蒸発散量の関係

後述するが、ボウエン比熱収支法では2高度間の乾湿球温度差の精密な測定が不可欠である。一方、正味放射量はその観測が容易であり、しかも日射量との間に高い相関を示すことになる、日射計で代用できよう。こうした点を考えると、工学的意義のある日オーダーでの蒸発散量の推定には正味放射量との

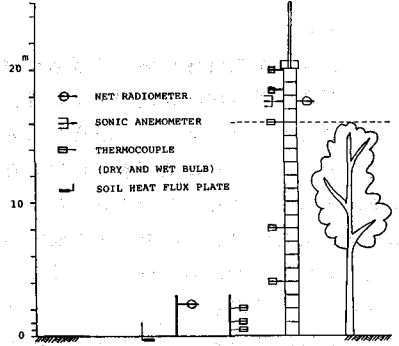


図-1 観測システムの概略図

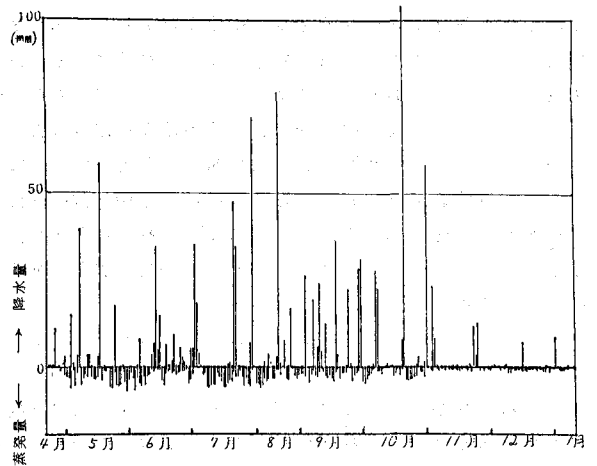


図-2 推定蒸発散量と降水

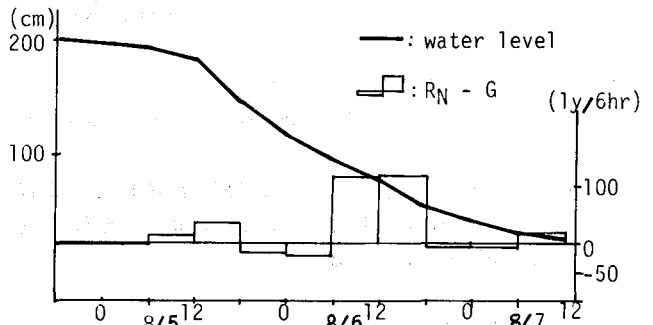


図-3 地下水位のてい減

間での関係式の誘導も有効であろう。その意味で、図-4は正味放射量と推定蒸発散量との関係をプロットしたものである。直線は両者の回帰式であるが、ある程度林内蒸発散量を正味放射量のみで説明できそうである。プロットのバラツキには土壌水分や風速の影響も考えられるので、データをこうした土壌水分や風速でクラスファイし、回帰式の精度を高めていくことも工学的には意義があろう。

3) 熱収支各項の日変化例

図-5は1981年8月25日の樹冠面における熱収支各項の日変化を示したものである。24時間合計値では R_n が255 ly/day, H が40 ly/day, LE が223 ly/day, G が-8 ly/dayであり、林地全体からの蒸発散量は約3.8 mm/dayと推定される。 LE/R_n 比は0.87で正味放射量の約87%の熱量が蒸発散のために消費されている。同様に図-6は1982年7月3日のものである。同図には渦相関熱収支法による結果も併記してある。これらはボウエン比熱収支法で24時間すべてが妥当な値として算定された例であるが、日によって、あるいは時間帯によっては乾湿球温度差の符号に問題があり、蒸発散量を算定できないことがある。とくに朝方と夕方は乾湿球温度差が符号を変える時間帯となり、ボウエン比熱収支法の問題の時間帯である。

4) ボウエン比熱収支法による潜熱フラックスと渦相関熱収支法による潜熱フラックスの比較

図-6の結果に1982年7月4日の結果をも合わせてボウエン比熱収支法と渦相関熱収支法による潜熱フラックスを比較したのが図-7である。なお、図上には日中(8時~18時)のデータ(1時間平均値)のみがプロットされている。両者は1対1でよく対応しているが、時として大きな差異をみることもある。

(2) 林床面における熱収支と蒸発散量

林内に入射した放射は、植被層内で吸収されたり、二次散乱、三次散乱をくりかえしながら林床に達する。林床上1.2mの位置で観測した正味放射量をもとに、先の1981年8月25日および1982年7月3日の林床面での熱収支各項を求めたものが図-8, 9である。また図-10は樹冠上の正味放射量 R_n と林床上の正味放射量 R_{no} の1時間積算値を最繁茂期晴天日の8時から18時までの日中データについてプロットしたものである。晴天日は林床における正味放射量は平均値で R_n の約23%に相当する量となっている。もちろん、 R_{no}/R_n 比は太陽高度の違いや季節によって変化しよう。さらに表-1はこれらデータを用いて樹冠面および林床面における熱収支各項を比較したものである。林床面においては顕熱フラックスが下向きになっている。これはコナラ林のように樹高の高い植被層においては日中、樹冠面の温度はかなり高くなり、顕熱フラックスは樹冠面から上方へ輸送

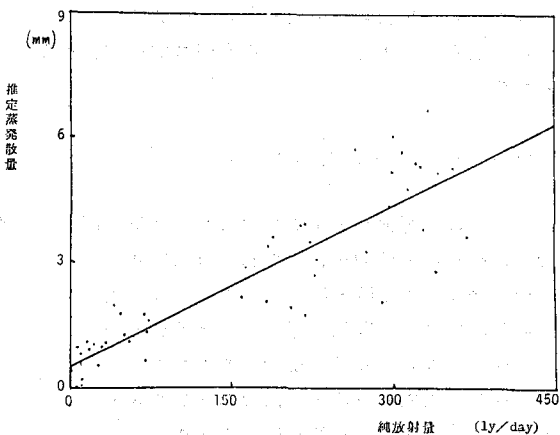


図-4 推定蒸発散量と正味放射量の関係

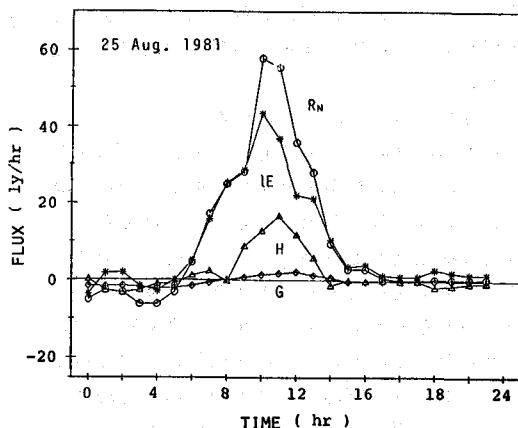


図-5 樹冠面における熱収支項の日変化(1981. 8.25)

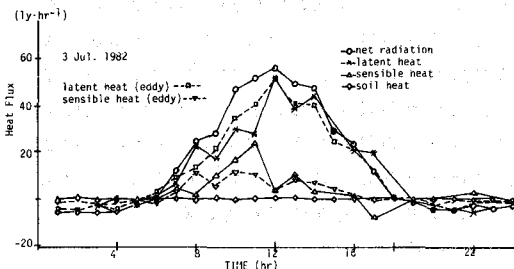


図-6 樹冠面における熱収支項の日変化(1982. 7. 3)

されるが、一方、地表面の温度は樹冠面の温度よりも低いので、顕熱フラックスは下方へも輸送されるのであろう。また林床からの蒸発散量は樹冠面からの蒸発散量(3.9mm/day)で1.1mm/dayとなっており、樹冠面からの蒸発散量の差を単純に蒸散量と考えると、この林地のこの期の蒸散量は約2.8mm/dayとなる。

(3) 林内の正味放射量の鉛直分布

植被層内の正味放射量の鉛直分布は近似的に次式のように樹冠面から下方に向かって指数関数的に減少するといわれている。

$$R_n(z) = R_n \cdot \exp \left\{ -k \int_0^z a(z) dz \right\} \quad (7)$$

ここに、 z は樹冠面から下方に向っての距離、 $a(z)$ は植被層の葉面積密度の鉛直分布関数、 k は植被層による正味放射量のみかけの吸収係数である。著者らは観測塔近くのコナラ樹と同じ径、高さ、ならびに葉面積分布をもつコナラ樹を伐採し、葉面積密度の鉛直分布関数を求めるとともに、高度別に正味放射量を観測した。図-11はその結果であるが、葉面積は15mあたりに集中しており、正味放射量はそれを境に急激に減少し、林床に向って指数関数的に減している。

(4) 林内の気温分布と湿度分布

林内の顕熱輸送や潜熱輸送の分布や方向をみるために林内の気温と水蒸気圧の鉛直分布を測定した。図-12,13はその結果の一例である。気温は樹冠面で最も高く、下方に向って低くなり、上方に向ってもわずかに低くなるが(10時の場合はもっと上方ではわずかに高くなっている)になっている。このことは林地内では顕熱フラックスは樹冠面から地表面に向って流れ、一方、樹冠面上では上向きに流れており、樹冠面付近が一種の熱の源となっていることを示している。一方、林内の湿度鉛直分布は、これを大気中の水蒸気圧で表わしたものであるが、複雑な分布をしている。地表面から2mぐらいまで、5mから10mぐらいまで、そして樹冠面上では水蒸気の鉛直フラックスは上向きに、地表面10mから樹冠面までと、地表面2mから5mぐらいまでは下向きに流れている。

(5) その他

その他、幹径収縮の日変化量を測定し、その林外蒸発皿値との比較(図-14、図中○は風

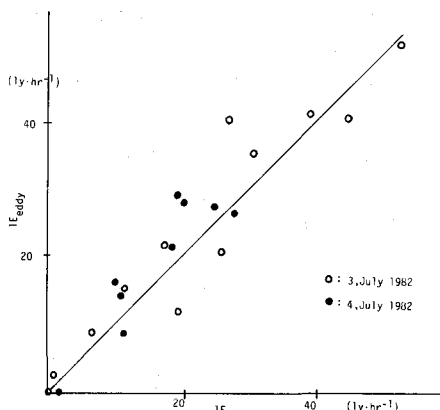


図-7 渦相関熱収支法による潜熱フラックス (IE_{eddy}) とボウエン比熱収支法による潜熱フラックス (IE_{heat}) との比較

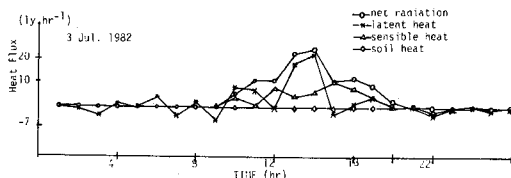


図-8 林床面における熱収支項の日変化 (1981. 8.25)

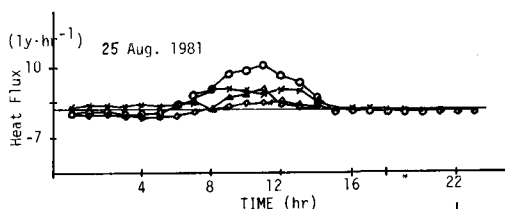


図-9 林床面における熱収支項の日変化 (1982. 7. 3)

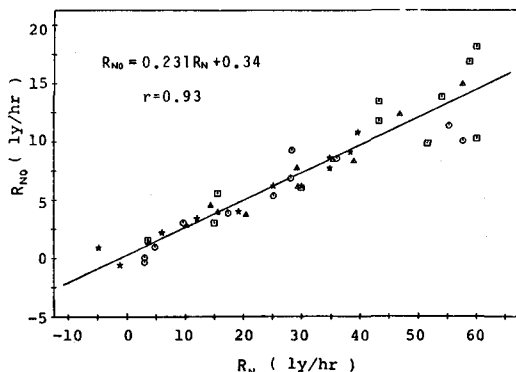


図-10 樹冠上の正味放射量 (R_n) と林床上の正味放射量 (R_{no}) との関係 (1981年)
(○…8月25日, △…8月26日, □…8月30日, ★…10月11日)

表-1 コナラ林の熱収支

単位: cal·cm⁻²·day⁻¹

	R_N	H	LE	G	$\frac{G}{R_N}$	$\frac{H}{LE}$	$\frac{LE}{R_N-G}$	$\frac{LE}{R_N}$
樹冠面の熱収支	261.4	24.5	229.0	7.9	0.03	0.107	0.90	0.88
林床面の熱収支	71.3	-1.8	62.5	7.9	0.11	-0.028	1.03	0.91

最繁茂期晴天日 (1982年8月25, 26, 30日, 10月19日) の平均値

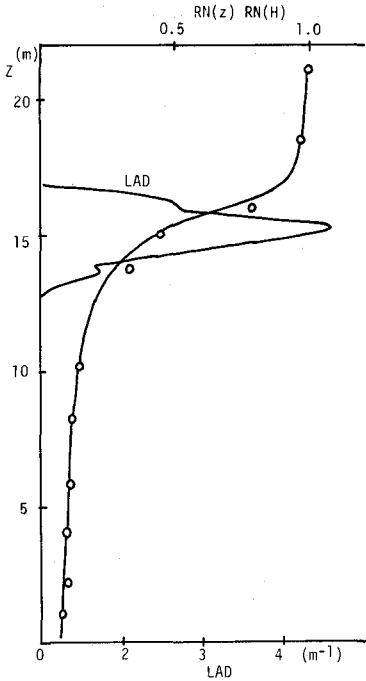


図-11 正味放射量の林地内での鉛直分布

の強い日の測定値) や、幹におけるヒートパルスの移動経過 (図-15参照) からヒートパルス速度を測定し、樹液流量を測定する試みも展開しているが、別の機会に報告したい。ただ、ある一日のヒートパルス速度の測定結果だけであるが、それが潜熱フラックスとよく対応しており、今後、蒸散量の絶対値評価をはかっていく上で見込みのある方法ではなかろうかと考えている。

5. 今後の課題

以上、熱収支観測に基づく林地内蒸発散量の推定を検討した。ボウエン比熱収支法においては樹冠上わずかな高度間での乾湿球温度差の問題 (絶対値, 符号) があること、渦関熱収支法では測定そのものについては問題がないという有利な点があること、などがわかった。ただ、超音波温度風速計といった測器は高価であり、どこでもいつでもというわけにはいかないので、ボウエン比熱収支法による推定精度を向上させる

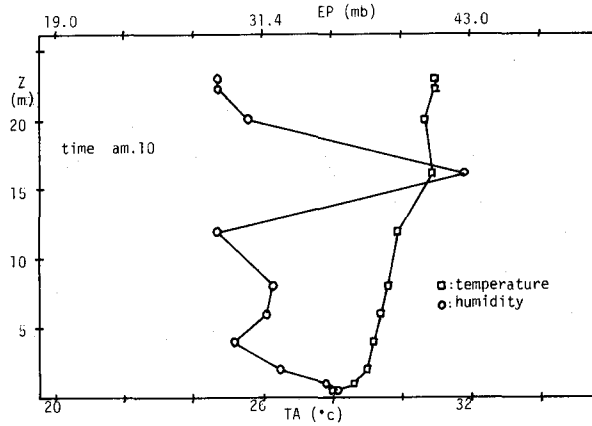


図-12 林内の気温・湿度の鉛直分布 (10時)

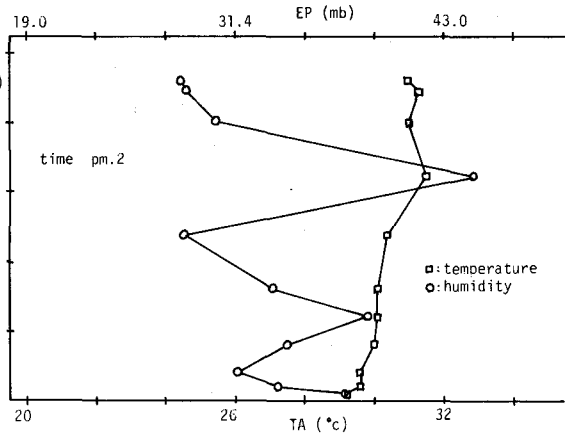


図-13 林内の気温・湿度の鉛直分布 (14時)

工夫も必要である（樹冠上の乾湿球温度差を読みとるための測器の追加、測器間の高度など）。また工学的に日オーダーでの蒸発散量推定となると、先にも述べたように図-4のパラツキを減らす意味でも、またボウエン比熱収支法で推定できる日数、時間数を増加させる意味においても、土壤水分や風速などによるデータ（幸い、この林地では測定している）のクラスファイを検討する必要がある。さらに蒸発散量の絶対値の評価をしていくためには、(1)式各項の測定を試みるとともに、水収支との結合も展開していく必要があろう。

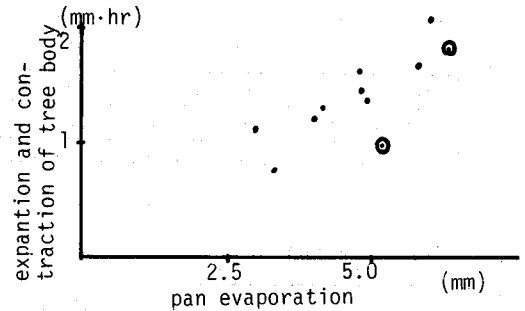


図-14 幹径収縮量と蒸発量との関係

〔参考文献〕

池淵・丹下・田中・古藤田；八王子流出試験地における流出観測 第26回水理講演会論文集、1982.2

〔注〕図-15の説明

a 図の0点に heat pulse を与えた場合、A点（0点から 0.5 cm上流）およびB点（0点から 1.0cm下流）の温度変化がb 図のようになったとすると、ヒートパルス速度Vは次式から求められる。

$$V = (OB - OA) / 2 t_0$$

なお、ヒートパルス速度から樹液流量を算定するためには次式の関係を用いる。

$$Q = P (m + C) V$$

ここに、Q：樹液流量，P：木の密度，m：木の含水率，C：木の乾燥時の比熱，V：ヒートパルス速度である。

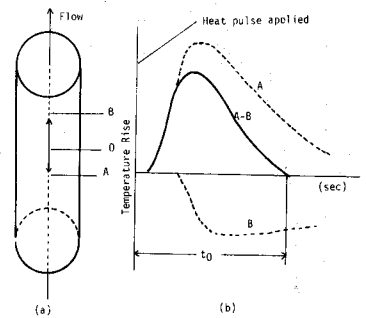


図-15 幹における heat pulse の移動経過