

ボーエン比・熱収支法と渦相関・熱収支法による アカマツの林冠上の潜熱フラックスの測定

Measurement of Latent Heat Flux over a Pine Forest with Bowen Ratio/
Energy Balance Method and Eddy Correlation/Energy Balance Method

杉田 倫明*・古藤田 一雄**

Michiaki SUGITA* and Kazuo KOTODA**

I はじめに

流域の水収支を知るうえで、蒸発散量は主要な要素の一つであるが、事実上流域全体からの蒸発散量を実測することは非常に困難である。そこで、種々の植生に対する蒸発散量が測定されてきた。ところが従来の研究例をふり返ってみると、草地・裸地、耕地と比較して森林地域の測定例が非常に少ない。これは、測定に要する費用と手間が大きいためと思われる。第1表に森林蒸発散測定を行っている代表的地点において用いられている温度センサーとその精度を示した。いずれも、ボーエン比・熱収支法によって測定されている。表よりわかるように、センサーの精度が非常に高く、設置の費用、維持の手間が大きいが想像される。

ところで、精度がもう少し劣るセンサーを用いて、同一の方法で蒸発散量を算出した場合どのような結果が得られるだろうか。安価なものであ

る程度の精度が得られれば、森林地域の蒸発散量の測定がより多くの地点で行えるようになるであろう。本報は、このような観点に立ち、渦相関・熱収支法とボーエン比・熱収支法により同時に蒸発散量の測定を行い、安価なセンサーを用いた場合のボーエン比・熱収支法の精度について考察を行った。

II 理 論

渦相関・熱収支法とボーエン比・熱収支法は、ともに熱収支によって蒸発散量を求めるものである。森林を対象とした時、移流および植物の同化作用による熱の輸送が無視しうるとすれば、林冠上での熱収支式は次のようにならわされる。

$$R_n = LE + H + G + S \quad (1)$$

ここで、 R_n ：正味放射量、 L ：蒸発の潜熱、 E ：蒸発散量、 H ：顕熱フラックス、 G ：地中熱流量、 S ：林床と林冠上の基準高度の間の貯熱量変化で

第1表 ボーエン比算出に使われている温度センサーとその精度

植 生	場 所	セ ン サ ー	精 度	文 献
Pine trees	Thetford, UK	水晶発振子	$\pm 0.01^\circ\text{C}$	Stewart・Thom (1973)
Douglas fir	Vancouver, Canada	ゲルマニウム ダイオード	$\leq 0.01^\circ\text{C}^\dagger$	Black・McNaughton (1971)
ヒノキ	笠間, 日本	Pt	$\pm 0.3^\circ\text{C}$	服部ほか (1981)

† 2 高度の差温を直接求める方法のため、差温の精度

* 筑波大学・院・地球科学研究科 ** 筑波大学水理実験センター

(1984年6月4日受理)

ある。

1) 渦相関・熱収支法

熱収支式中の顕熱フラックスは、渦相関法によれば、次式で与えられる。

$$H = \rho c_p \overline{w' T_a'} \quad (2)$$

ここで、 ρ ：空気の密度、 c_p ：空気の定圧比熱、 w ：風速の鉛直成分、 T_a ：気温で、バーは平均を、プライムは平均値からの偏差をあらわす。 $w' T_a'$ は後述する超音波風速温度計によって求められる。 R_n 、 G 、 S をそれぞれ実測すれば、(1)式から蒸発散量は次式で与えられる。

$$LE_{EE} = R_n - G - S - H \quad (3)$$

ここで、添字EEは渦相関・熱収支法を示す。以下この方法をEE法と称する。

2) ボーエン比・熱収支法

ボーエン比 (β) は次式で与えられる。

$$\beta = \frac{H}{LE} = \frac{c_p P}{0.622 L} \frac{\Delta T_a}{\Delta e} \frac{K_H}{K_E} \approx \frac{c_p P}{0.622 L} \frac{\Delta T_a}{\Delta e} \quad (4)$$

ここで、 P ：大気圧、 e ：水蒸気圧、 Δ ：2高度の差で、 K_H と K_E はそれぞれ、顕熱と潜熱の乱流拡散率で中立大気中では両者は等しい。

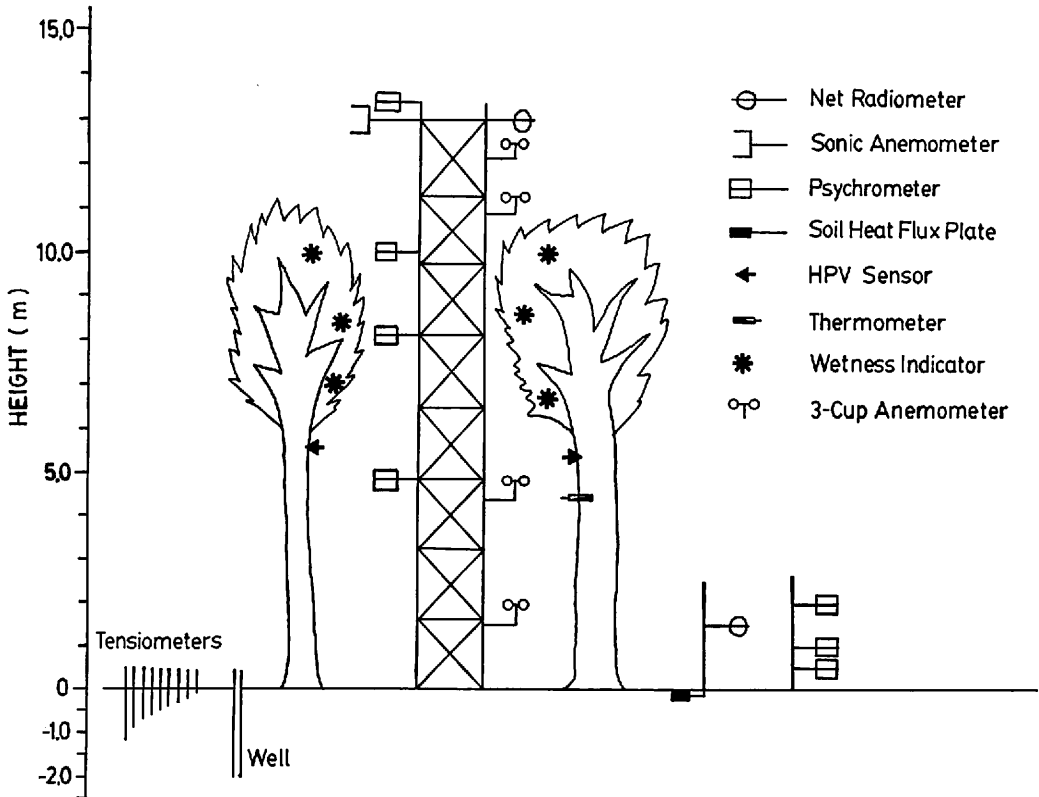
ボーエン比を(4)式で求めれば、(1)式から蒸発散量は次式で与えられる。

$$LE_{BE} = \frac{1}{1 + \beta} (R_n - G - S) \quad (5)$$

ここで、添字BEはボーエン比・熱収支法を示す。以下この方法をBE法と称する。

III 方法

測定は、筑波大学水理実験センター南側に位置する平均樹高10mのアカツツ林(面積1.9ha)において、1983年7月から継続して行っている。第1図に測定システムの概要を示す。正味放射量は、



第1図 観測システムの概要

地上13.5mに設置したFunk型の正味放射計(英弘精機, CN-11型)によって求めた。地中熱流量は、地下1cmに埋設した地中熱流板(英弘精機, CN-81型)によって測定した。林床と基準高度(13.5m)の間の貯熱量変化は、林内および林冠上の1.0, 5.0, 8.0, 10.0, 13.5mに設置した自作の通風乾湿計(小島ほか, 1983)および、地上4.5mのアカマツの幹に挿入した熱電対出力から算出した。貯熱量変化は、早朝と夕方を除いて熱収支式中では小さな要素である(Sugita, 1984)ため、本報では潜熱フラックスの10分間平均値を求める場合のみ考慮に入れ、他の場合はこれを無視した。

渦相関法により顕熱フラックスを求めるために地上13.5mに1次元超音波風速温度計(海上電機, DAT-100型)を設置した。その出力をフラックスメーター(海上電機, UDF-03型)に入れアナログ乗算および平均化することで、顕熱フラク

スが得られる。この場合、(2)式の平均化時間は60秒である。

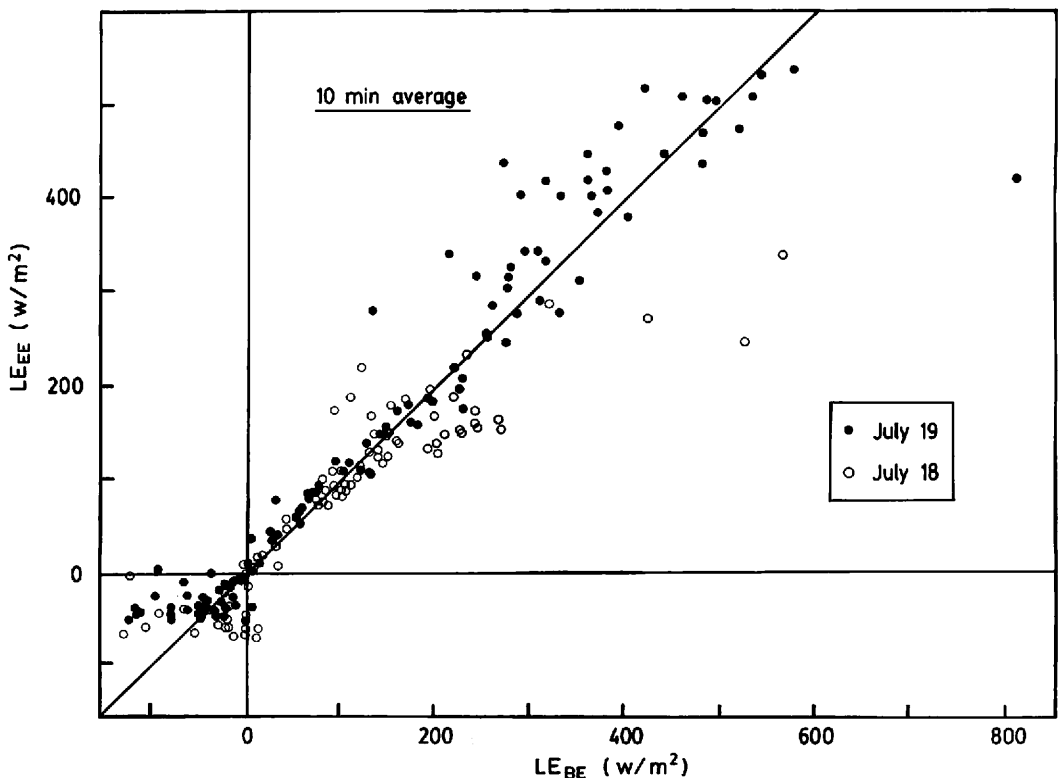
ボーエン比を求めるために、前述の通風乾湿計の地上10mと13.5mのものを用いた。センサーは、銅-コンスタンタン熱電対で直径3.2mm、長さ70mmのステンレスの保護管に納められている。これを塩ビパイプ、アルミニウムの通風筒で2重におおい、外側にアルミ箔をつけて放射の影響を少なくしてある。

以上の測器からの出力をデータロガー(タケダ理研, TR 2731型)を用いて、5秒間隔でサンプリングし、10分ごとにその平均値を出力させた、これを基礎データとし、ミニコンピューター(水理実験センターのMelcom 70/25)によって処理した。

III 結果および考察

1) 10分間平均値と1時間平均値

第2図にEE法とBE法によって求めた潜熱フ



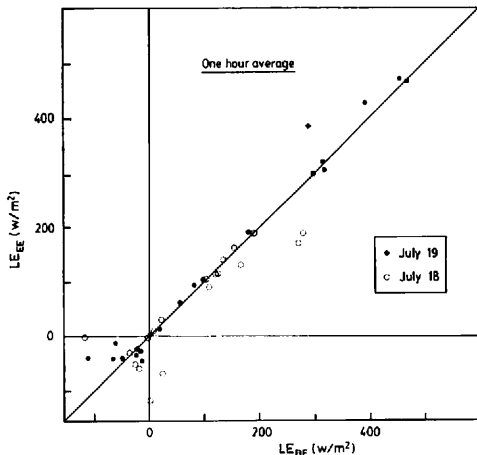
第2図 渦相関・熱収支法とボーエン比・熱収支法により求めた潜熱フラックスの比較(10分間平均)

ラックスの10分間平均値の相関を示す。用いた基礎データは、1983年7月18日4時から7月19日24時の246個である。7月18日は曇天、7月19日は晴天日で、ともに風は弱く移流の影響はないと考えられる。

潜熱フラックスが正の場合、両者はよい相関を示しており、EE法の値を真の値とすると、BE法の誤差は若干の例外を除いて±30%程度におさまっている。フラックスが大きいほど誤差は大きくなるが、7月18日にはBE法の値が大きくなっていくのに対し、7月19日はEE法の値が大きいくており、一定の傾向は見られない。

フラックスが負の場合には、両者の相関は非常に悪い。BE法の誤差が大きくなる原因として、夜間に森林上の気温、水蒸気圧傾度が小さくなるため、求めたボーエン比の精度が悪くなること、(4)式中で仮定した $K_H \approx K_E$ が夜間に成り立たなくなる場合があることなどが考えられる。

第3図にEE法とBE法によって求めた潜熱フラックスの1時間平均値の相関を示す。用いた基礎データは第2図のものと同じである。図より10分間平均値の場合と同様な傾向が認められるが、10分間平均の場合に見られたような極端な値はあ



第3図 渦相関・熱収支法とボーエン比・熱収支法により求めた潜熱フラックスの比較(10分間平均)

らわれない。またEE法の値を真の値とした時の誤差は±20%程度で、10分間平均の場合より誤差は若干小さい。フラックスが負の場合には、10分間、1時間平均の結果で差異は見られない。

フラックスが正の場合に、10分間平均値としてBE法により求めた値の誤差が大きくなる原因を考察するために、第4図に7月19日の10分間平均値として求めた正味放射量(R_n)とBE法とEE法で得られた蒸発散量の比(E_{BE}/E_{EE})の日変化を示した。昼間 E_{BE}/E_{EE} の値が1.0からはなれるのは、 R_n の値が急変している場合であるのがわかる。この結果から、BE法の10分間平均値の誤差が大きくなるのは、温度センサーが周辺の温度変化に十分追隨していないためか、放射による測定誤差によると思われる。

センサーの時定数は、近藤(1982)によると次式で与えられる。

$$t_0 = \frac{c_b \rho_b}{c_p \rho} \frac{d^2}{4a} \frac{1}{(0.4 + 0.45 \sqrt{Re})} \quad (6)$$

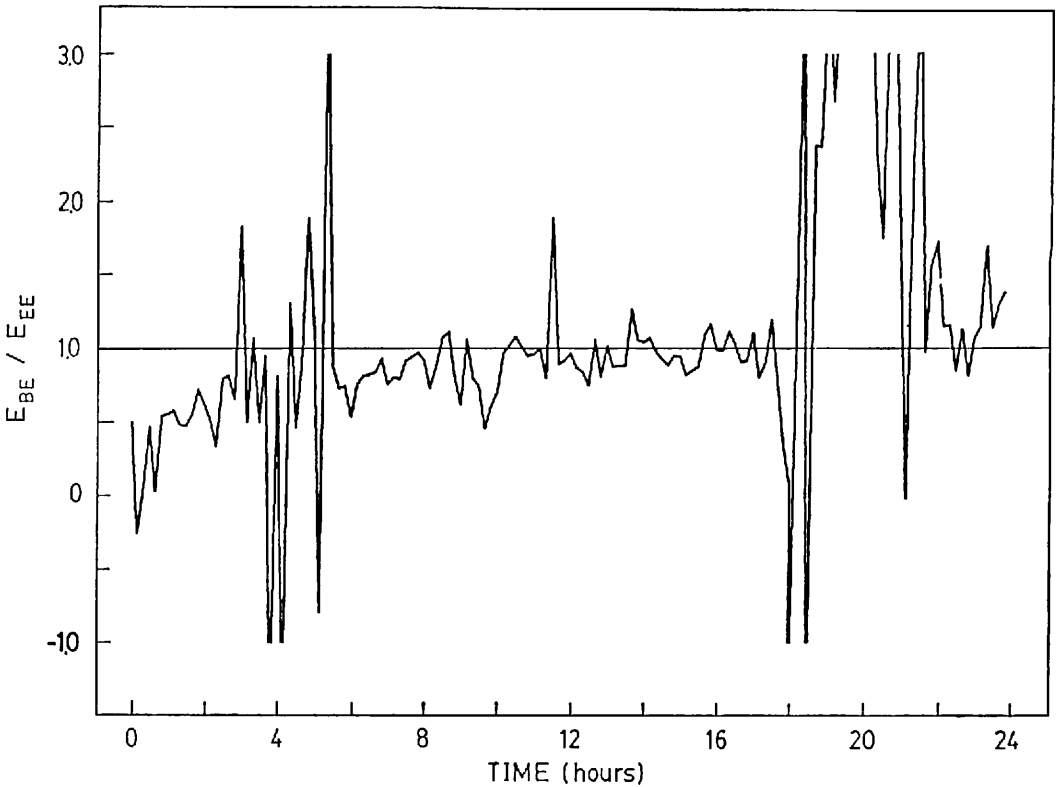
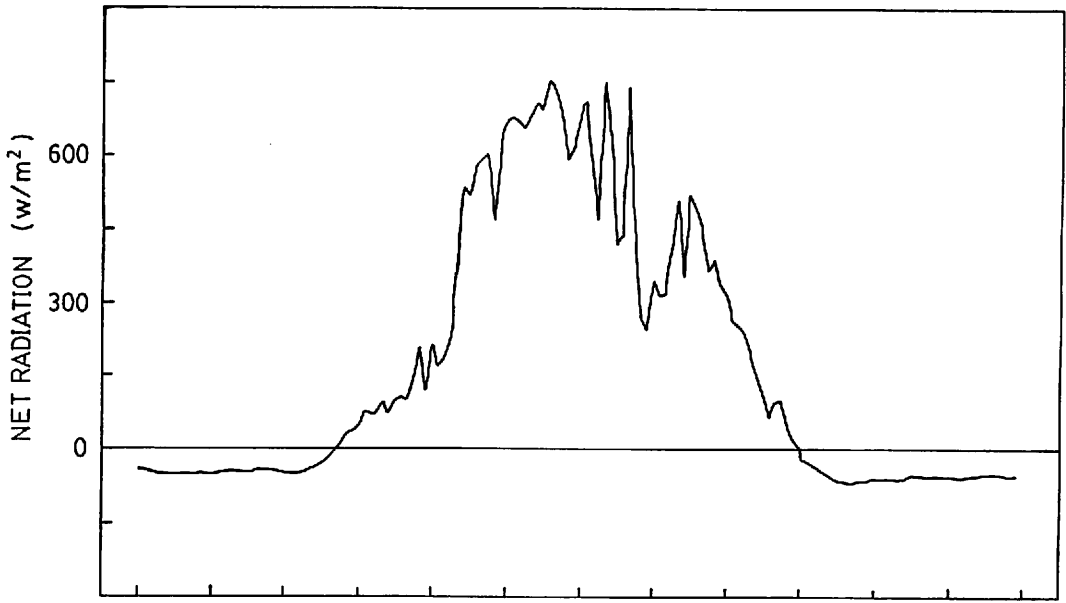
ここで、 t_0 :時定数、 c_b :センサーの比熱、 ρ_b :センサーの密度、 d :センサーの直径、 Re :レイノルズ数で、20°Cの空気を考え通風速度2m/s、 $d=0.32$ 、 $c_b \rho_b=0.58$ (アルミニウム)とすると、 $t_0=25$ secとなる。したがって、10分間の平均時間のはじめに周辺温度が急変したとすれば、はじめの約1.5分¹⁾のデータは誤差を含んでいることになる。

小島ほか(1983)による放射による通風乾湿計の測定誤差のテストによれば、自作の乾湿計の値は、日中、アスマン通風乾湿計と較べて0.4°C高めになったことが報告されている。

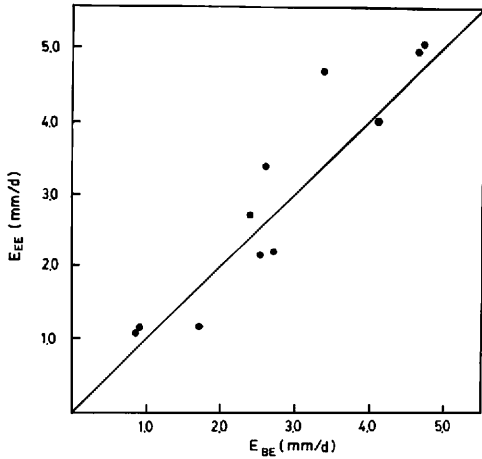
本報の10分間平均値に見られた極端な値の原因がどちらに起因するか明確ではないが、実用上からは、平均時間を1時間程度とする必要があると思われる。

2) 日蒸発散量

水文学の分野では、1日当りの蒸発散量を必要とする場合が多い。そこで、7~9月の種々の天気の日EE法とBE法で蒸発散量を求め、両者



第4図 正味放射量と2種の方法で得られた蒸発散量の比 (E_{BE}/E_{EE}) の日変化 (7月19日, 10分間平均値)



第5図 渦相関・熱収支法とボーエン比・熱収支法により求めた日蒸発散量の比較

を比較した(第5図)。用いたデータは、7月16日、19日、21日～23日、26日、29日、8月3日、15日、9月1日の11日間で、それぞれ1時間平均値を求めて、そのうちの正の値を取り積算したものである。

図より誤差は±20%程度におさまっているのがわかる。またどちらかの方法が大きくなる傾向は見られず、1:1の線を中心として均等に分散している。したがって、長時間の蒸発散量を求めれば、誤差は相殺され小さくなる。

IV おわりに

簡易通風乾湿計を用いたボーエン比・熱収支法の結果を渦相関・熱収支法の値と比較した。その結果、1時間値、日蒸発散量ともに±20%程度の誤差で測定できることがわかった。

謝 辞

測器の作製、設置にあたって水理実験センターの小島豊盛氏にたいへんお世話になりました。また同センター中川慎治博士には、研究にあたり種々御教示いただきました。ここに記し感謝いたします。

注

- 1) 時定数の定義から、気温などを測定する場合、一般には、時定数の3倍ほどの時間が経過してから値を読みとらねばならないとされている。

文 献

- 近藤純正 (1982): 『大気境界層の科学』東京堂出版, 219 p.
- 小島豊盛・古藤田一雄・寄崎哲弘 (1983): 簡易通風乾湿温度計の製作とその性能テスト. 筑波大学水理実験センター報告, 7号, 27-31.
- 服部重昭・近嵐弘栄・竹内信治 (1981): エネルギー収支によるヒノキ林の蒸発散量測定. 日林誌, 63, 125-132.
- Black, T. A. and McNaughton, K. G. (1971): Psychrometric apparatus for bowen ratio determination over forest. *Boundary-Layer Meteorol.*, 2, 246-254.
- Stewart, J. B. and Thom, A. S. (1973): Energy budgets in pine forest. *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, 99, 154-170.
- Sugita, M. (1984): Evapotranspiration from a pine forest. MS. Thesis, Univ. Tsukuba, 64 p. (unpublished)