

大型ウェイングライシメータによる 林木蒸散量計測の試み

MEASUREMENT OF TREE TRANSPIRATION USING LARGE WEIGHING LYSIMETERS

吉田弘¹・端野道夫²

Hiromu YOSHIDA and Michio HASHINO

¹正会員 博(工) 徳島大学助教授 工学部建設工学科 (〒770 徳島市南常三島町2-1)

²正会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科 (〒770 徳島市南常三島町2-1)

The difference of transpiration process between coniferous and broad-leaved trees is one of the most interesting topics in forest hydrology and other study fields. Direct measurement of transpiration is indispensable for detailed discussion on the topics. The lysimeter is the most effective way to directly measure tree transpiration. In this study, large weighing lysimeters were constructed. *Zelkova serrata* (Japanese zelkova) and *cryptomeria japonica* (Japanese cedar) were planted in containers of the lysimeters, and transpiration was measured. The relationship between transpiration and heat pulse velocity which is an reliable index of transpiration rate and actual transpiration rate was investigated. Apparent differences of transpiration rate and process could not be found between two species as far as the results of the measurements.

Key Words : *transpiration, weighing lysimeter, coniferous tree, broad-leaved tree, heat pulse velocity*

1. はじめに

流域での水資源開発・維持計画の策定において、流域水収支を把握するために蒸発散量の的確な推定が不可欠である。本来的に流域での森林状態と雨水流出過程との関係の把握無くして効率的な計画の策定は困難であるが、特に昨今のように、流域での森林保全も考慮に入れた総合的な計画立案が求められる趨勢にあっては、もはや無視しては通れない問題となっている。しかしながら、遮断蒸発過程と蒸散過程とが全く異なった時間と場所で生起する水文素過程であり影響の及び方が異なるという大変厄介な問題を克服しない限り、従来のような両者を一括した手法により推定せざるを得ない。

とりわけ蒸散量は現地において成木での実測が不可能な水文量であり、蒸散過程は、根系による吸水、樹液としての樹幹内の上昇および気孔からの放散という植物生理学的過程の影響下で生起している点で的確な定量化を困難ならしめている。こうした問題に対して、著者らはなるべく現地で容易に入手しうる気象データと樹液流速の指標となるヒートパルス速度とを利用して蒸散量を推定しうる数理モデル(ヒートパルス蒸散モデル)の提案¹⁾を行い、主と

して針葉樹(スギ)の人工林を対象に実蒸散量の推定手法の確立に努めてきた。しかしながら、モデリングの良否を判断するためには、やはり成木に近い樹木での蒸散量の実測値が必要である。さらには現在大きな関心が寄せられている針葉樹と広葉樹における蒸散過程の定量的な比較検討までも視野に入れば、再度基本に戻って、それぞれの蒸散過程を詳細に実測し、両者の特性の違いを同一の方法論によって比較検討する必要がある。ただし、樹高が20メートルにも及ぶ成木の蒸散量を、針葉樹と広葉樹とについて同時並行して計測することなど前述のように不可能であり、自ずと計測対象となる樹木の樹高や諸条件に制約と限界がある。

そこで、樹高や樹齢の点でいくらか譲歩し、樹高がおおよそ5.0m、樹齢が10年生程度の樹木を計測対象としてライシメータにより樹木蒸散量の計測を試みた。比較的大型のライシメータによる蒸発散量計測の報告例としては、筑波大学水理実験センターに設置されているウェイングライシメータ²⁾が著名である。同センターの容器は直径2m、深さ2mの円筒であり、重量変動を容器の変位としての光センサーによって検出するシステムになっている。しかしながら、計測限界が1500kgまでであり、これまでは芝の

ような草本を主体として蒸発散量の計測が続けられている。

本研究では、容器のサイズが1.5m×1.5m×1.0mおよび2.0m×2.0m×1.0mという本邦でも他に例の希な2基の大型ライシメータを徳島県森林総合技術センターの協力を得て、同センター構内に隣接して作成した。それぞれのライシメータで広葉樹（ケヤキ）と針葉樹（スギ）を植樹し、これらの蒸散量計測を同時並行して実施した結果について報告する。

2. 計測施設と方法の概要

(1) 実験設備

2基の大型ライシメータは徳島県森林総合技術センター（徳島市庄町5-69）の協力で、同センター構内に隣接して設置された。2基の諸元を図-1、図-2と図-3に示す。1.5m×1.5m×1.0mの容器を有するライシメータA（図-1&図-2）には、植樹後約半年の樹高約4.0m、樹齢約10年のケヤキが植樹されており、容器、植栽土および樹木の総重量は概ね2.7トンである。容器は定格3.0トンのロードセル（大和製衡社製、CR2-3T-U）3台で支持されており、容器、植栽土および樹木の総重量データは、アンプ（ユニパルス社製、F800-0P2）とA/D変換ボード（I/Oデータ社製、PI0-9032C）を介してパーソナルコンピュータ（NEC PC9801FX/U2）へ1分間隔で収録される。2.0m×2.0m×1.0mの容器の容器を有するライシメータB（図-3）には、樹高約5.0m、樹齢約10年生のスギが植樹されており、植樹より約3年が経過している。容器、植栽土および樹木の総重量は概ね6.7トンであり、定格3.0トンのロードセル（ミネベア社製、C3P1-3T-U）4台で支持されている。容器、植栽土および樹木の総重量データは、ケヤキの場合と同様にして、パーソナルコンピュータへ1分間隔で収録される。公称の計測感度はライシメータAとBとでそれぞれ200gと300gである。土壌表面にはシートを掛けて土壌表面からの蒸発を防止している。

容器の底面には樹木の根腐れを防止するため排水口が設けてあり、ここからの浸透排水量を計測しておく必要がある。そこで、各ライシメータ容器の下部の作業ピット空間内に、0.5mm転倒（1転倒が約15.7cc）の転倒マス式雨量計（横河ウェザック社製、B 011-10）を設置し、排水浸透量を15.7cc毎にカウントし、メモリーバック（東洋電子工業社製、JWA90R）に収録した。

樹液流速の指標となるヒートパルス速度のデータは、ケヤキおよびスギの両方ともに、蒸散流速計（林電工社製、HP2）により30分間隔で計測され、メモリーカードへ収録された後にカードリーダを介してパーソナルコンピュータへ転送して解析に供した。ケヤキ、スギともにごく標準的なヒートパルス速度を示す温帯樹木であることから、ヒータおよびサーミスタの間隔は、10mmと7mmを採用し、直径2.0mm、深さ10mmの小孔を胸高付近に開けて、3本

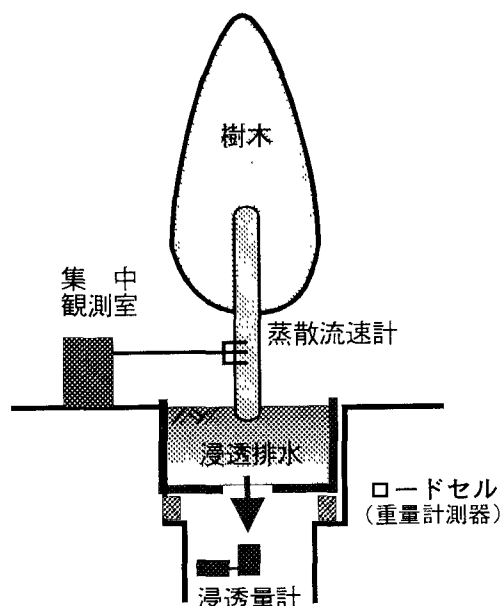


図-1 ライシメータの構造（側面図）

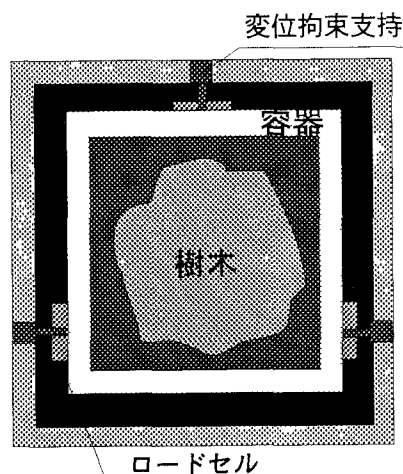


図-2 ライシメータAの平面構造

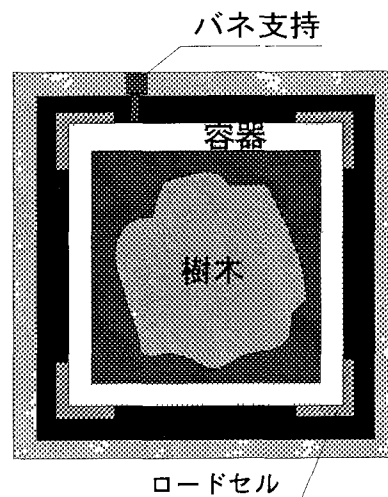


図-3 ライシメータBの平面構造

のセンサ類を設置した。

気象データ（気温、相対湿度、風速、純放射量）はライシメータに隣接する高さ12mの気象観測ポールに設置された気象測器（横河ウェザック社製、温度計：E-734-10、湿度計：E-771-11、風速計：A-722、示差放射計：H-221）により5分間隔で計測され、GPIBインターフェースを介してメモリーカードへ一旦収録された後に、パーソナルコンピュータへ転送して解析に供した。

なお、本年度は2日に一度40リットル程度の水を供給し、サクシオン水頭にして-100cm程度を維持するようにしているため、十分に土壌水分がある条件下での実験となっている。

(2) データの整理方法

樹木が風を受けると重量データが変動するため、防風用の施設を設置することも考えたが、なるべく自然な環境で実験が遂行されるように、ライシメータの周囲には防風施設を設けていない。したがって重量の生データには主として風速の影響による短周期のノイズが重畳されているため、2時間の移動平均を施して重量データを平滑化した。1時間毎に蒸散量を計算するべく、 i 時30分の重量値を $W(i)$ 、 $i+1$ 時30分の重量値を $W(i+1)$ とすると、基本的にはこの1時間における重量変化量を $i+1$ 時における蒸散量と定義できる。しかしながら、このデータには浸透排水による重量減少とライシメータ自体の温度変化にともなう重量変化が見かけの蒸散量として含まれているため、これらの影響を除去しないと実蒸散量を評価することはできない。

浸透排水量については、同時時間帯での積算浸透量 $I(i+1)$ を差し引くことで実蒸散量への補正が可能である。

一方、ライシメータの温度変化特性については、樹木を容器に移し替える前に1回と、今夏の1回の計2回について蒸散量の影響を受けない状態で、見かけ上発生する重量変動とこれへの影響因子との関係を定式化した³⁾。今夏については、樹木に厚さ2mmで三重構造の遮光シートを被せて、蒸散が発生しないように工夫した。その結果、容器底部の補剛用H型鋼の上に設置したサーミスタ温度計の出力値と相関が高く、蒸散が始まる午前6時を起点として、容器の温度偏差 x と総重量の偏差 y とが図-4と図-5に示すようにまとめられた。これらを定式化すると次式のようなものである。

ライシメータA（ケヤキ）：

$$y = 0.349x + 0.270 \quad (1)$$

ライシメータB（スギ）：

$$y = 0.781x - 0.203 \quad (2)$$

上式による補正量を $WT(i+1)$ とおけば、最終的に実蒸散量 $ET(i+1)$ は次式で計算される。

$$ET(i+1) = W(i) - W(i+1) - I(i+1) - y \quad (3)$$

(3) 実蒸散面積の評価

枝葉の繁茂状況が異なるケヤキとスギとを同一の基準で評価するためには、前述の解析で得られた蒸散量を、実際に蒸散に寄与すると考えられる実葉面積で除して、樹木毎の蒸散強度を計算すれば都合がよい。実葉面積の算定には、樹木を下部と上部から写真撮影した結果を利用する。下部からの撮影で、枝葉のない部分が明るく写るため、枝葉のギャップを求めることができる。したがって枝葉に占める面積率は、樹冠の投影面積内で葉の部分が実質的に占めている面積率として算定しうる。また上部から撮影する際に樹冠の最下端に1mの基準スケールを置いているので、これを基に樹冠の支配面積が容易に算定される。以上により樹冠の外縁線内の樹冠投影面積 A とそれに生きた枝葉部分（枯れ枝を除いた）の

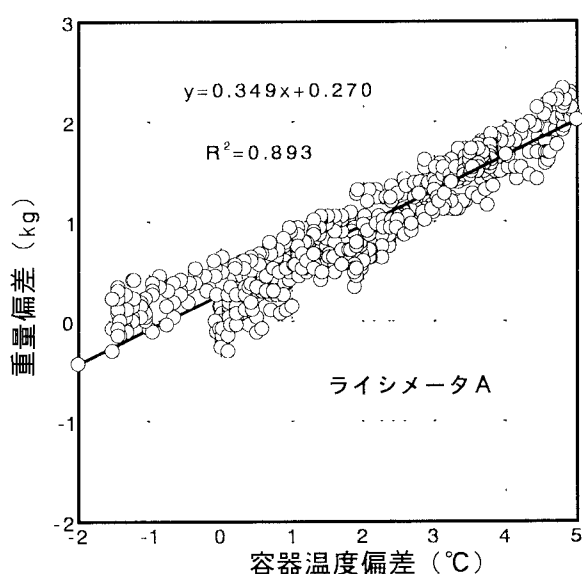


図-4 容器温度偏差と重量偏差の関係
(ライシメータA)

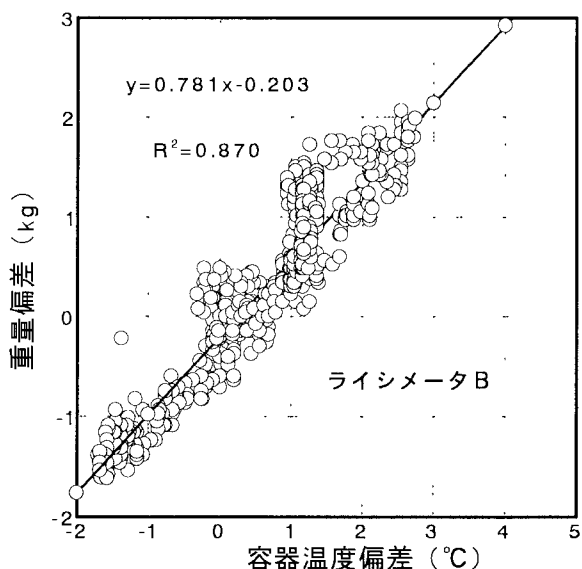


図-5 容器温度偏差と重量偏差の関係
(ライシメータB)

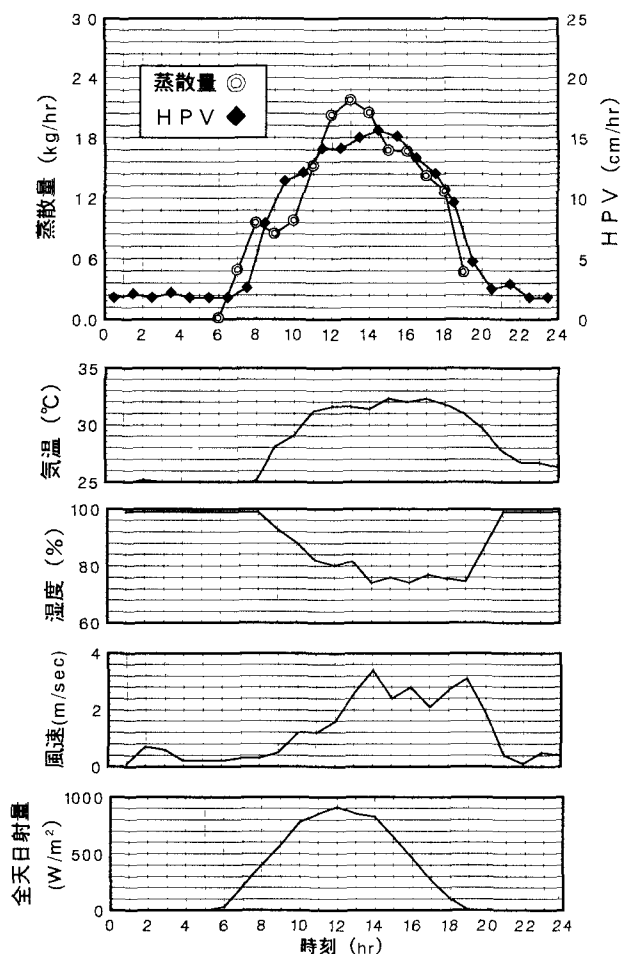


図-6 蒸散量、ヒートパルス速度、気象量の経時変化例
(ケヤキ：1998年8月11日)

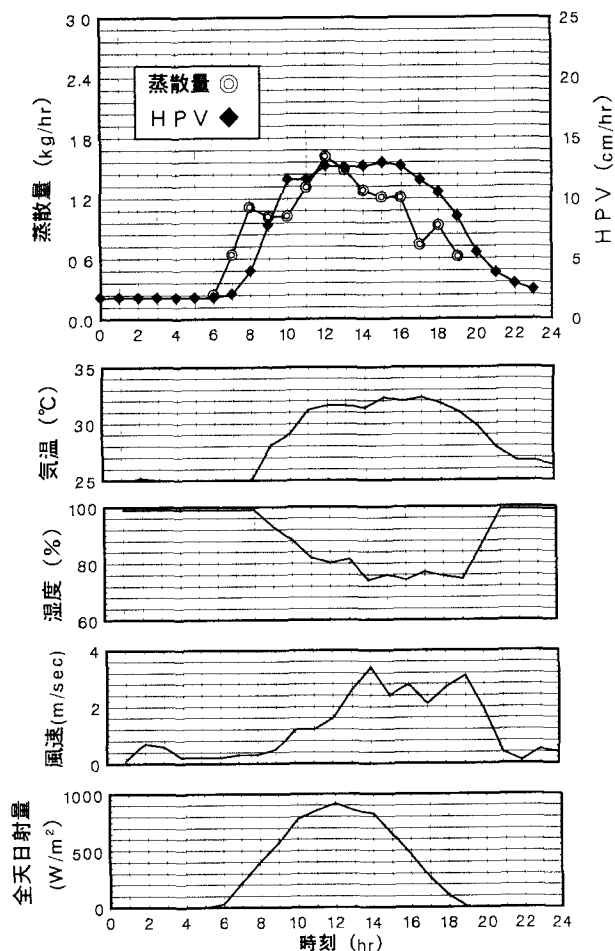


図-7 蒸散量、ヒートパルス速度、気象量の経時変化例
(スギ：1998年8月11日)

占める面積率 P を求めた。なお、通常の樹木であると樹冠の階層性を考慮した葉面積指数 (LAI) を求めることが多いが、今回の対象樹木では、主として外縁部に枝葉が分布していたので、枝葉の重なりを考慮する必要がないと判断した。

その結果、ケヤキとスギでそれぞれ $P_1=72.1\%$ および $P_2=55.6\%$ となった。したがって、ケヤキとスギの樹冠投影面積がそれぞれ $A_1=17671\text{cm}^2$ および $A_2=17892\text{cm}^2$ であったことから、実葉面積はそれぞれ $P_1 A_1=9948\text{cm}^2$ および $P_2 A_2=12741\text{cm}^2$ とできる。

3. 樹種毎における蒸散特性の検討

(1) ケヤキとスギの蒸散量の経時変化特性

1998年8月11日～8月13日に実施した実験結果について、1時間当たりで整理した蒸散量、ヒートパルス速度、気温、湿度、風速、全天日射量の経時変化例を、ケヤキとスギの場合について、図-6と図-7にそれぞれ1例ずつ示す。風と周囲の熱環境に起因する変動を除去しても、結果として蒸散量の経時変化には一部に凹凸が認められた。しかしながら、1日全体を通して見れば、ケヤキとスギのどちらについ

についても、蒸散強度の指標となるヒートパルス速度の経時変化と概ね合致していると判断される。

これらは、気温、湿度、全天日射量の経時変化とも符合している。風速については蒸散量の凹凸と必ずしも対応しているとは言いがたい部分があり、定常的な影響よりはむしろ突発的な風による影響が大きくなると考えられる。

後ほど更に検討を加えるが、図-6と図-7からでは、明らかにスギよりもケヤキの蒸散量の方が大きいことが分かる。これ以外の2日でもほぼ同様である。しかしながら、この結果が直ちに広葉樹は針葉樹よりも多いという根拠にはならない。樹木による実質的な蒸散強度あるいは蒸散効率を評価するためには、実験時における実葉面積を基準とした解析が必要である。

(2) 蒸散量とヒートパルス速度とのずれ時間

既往の研究^{3) 4)}より、樹木のサイズによらず、蒸散量とヒートパルス速度とは「ずれ時間」が存在することが報告されている。観測者によって時間の長さには若干の差異は認められるが、例えば著者らの観測結果からは、樹高が2mのスギ、ヒノキ、サンゴジュについて、蒸散量の経時変化に対してヒート

パルス速度の経時変化は概ね1時間程度遅れること³⁾を確認している。鈴木ら⁴⁾も樹高が約12mのヒノキについてずれ時間がおおよそ1時間程度であることを報告している。今回の結果もこの観点から検討してみると、このことは図-8と図-9に示すように、蒸散量の経時変化が凹凸な関係で若干いびつであるが、蒸散量とヒートパルス速度とを2次元プロットした場合に、両者は閉じた1価の関係というよりは、ループが現れる2価の関係にある点から容易に確認できる。

主として早朝の立ち上がり部分、および夕方の通減部分のいずれをみても、日によって若干の前後はあるが、スギとケヤキで明確な差はなく、従来通り

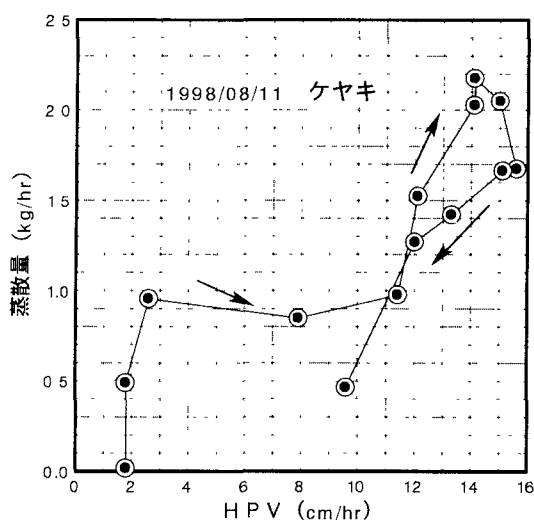


図-8 蒸散量とヒートパルス速度との相関関係
(ケヤキ：1998年8月11日)

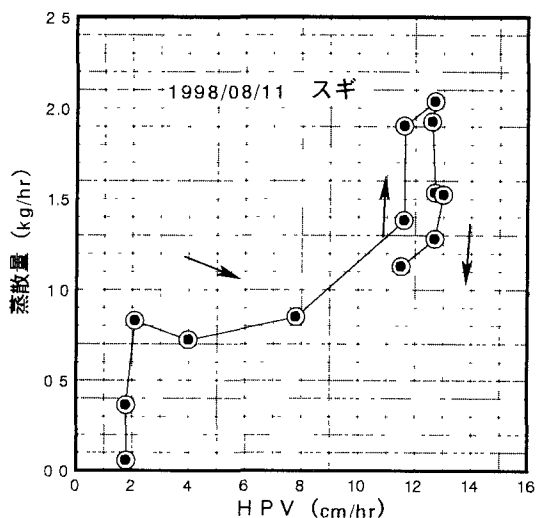


図-9 蒸散量とヒートパルス速度との相関関係
(スギ：1998年8月11日)

ずれ時間は30分から1時間程度と判断される。特に、樹高や樹齢が概ね同じ場合に、広葉樹と針葉樹という樹種の差異が樹木の蒸散特性に及ぼす影響について興味を持たれるが、今回の結果を見る限りでは、両者に大差はなさそうであり、あっても誤差の範囲程度であろう。

4. 広葉樹と針葉樹における蒸散強度の差異

(1) 実質蒸散強度の評価法

図-6から図-9を一見すると、広葉樹であるケヤキの方が針葉樹であるスギよりも蒸散量は大きいという誤解を生む可能性がある。そこで、既に求めてある枝葉の隙間部分を含まない樹木の実質葉面積を基準面積として、樹木として実質葉面積あたりの蒸散強度の差異について検討する。ここでは葉面積のみに着目し、樹高の大小のような個体差に依存する条件については考慮の対象外として、得られた結果を整理する。具体的には、これまでに得られた蒸散量を実験対象木としたケヤキとスギそれぞれの実質葉面積 $P_1 A_1$ およびによって除すことにより実蒸散強度を定義する。

(2) 実蒸散強度による樹種間の比較検討

前述の定義に従って求めた実蒸散強度によるケヤキとスギの比較例を図-10から図-12に示す。これらの図を見ると、日によって両者の大小関係が逆転する場合も見受けられるが、少なくともどちらかがもう一方に対して圧倒的に大きいという事実は認められない。したがって、実葉面積を算出する際の誤差をも考慮すれば、図示の範囲であれば、ケヤキとスギとの間に顕著な蒸散強度の差異は認められないと考えるのが妥当であろう。

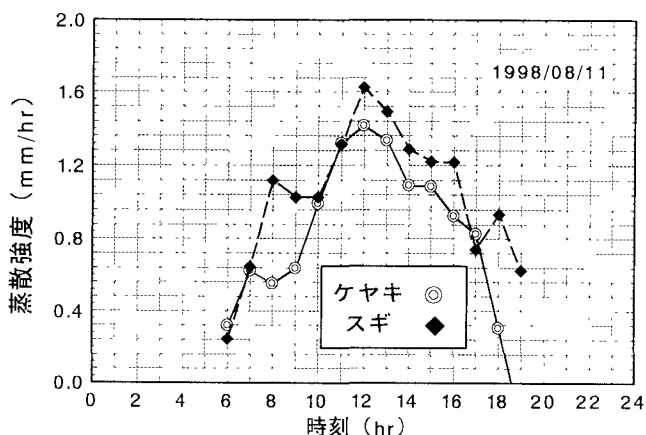


図-10 樹種による実質蒸散強度の比較例
(1998年8月11日)

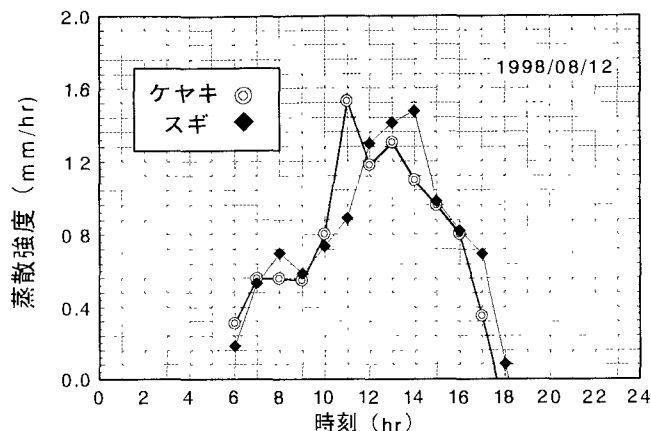


図-11 樹種による実質蒸散強度の比較例
(1998年8月12日)

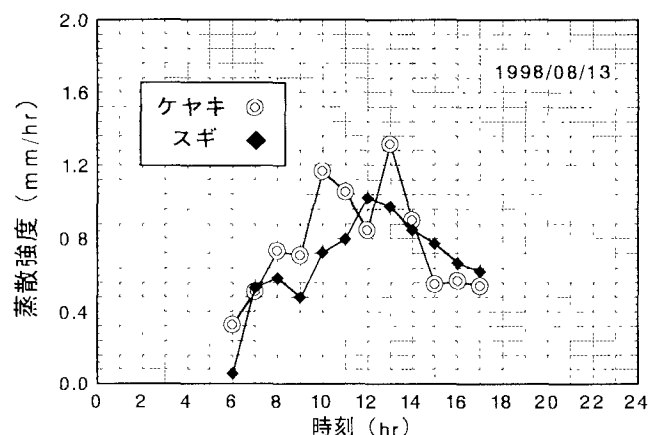


図-12 樹種による実質蒸散強度の比較例
(1998年8月13日)

表-1 日蒸散量の比較 (単位:mm/day)

実験日	8/11	8/12	8/13
ケヤキ	1.109	0.998	0.887
スギ	1.365	1.021	0.869

一方、蒸散量が現れている時間帯（概ね午前6時から午後6時まで）での蒸散量を積算した日蒸散量をケヤキとスギで比較した例が表-1である。日によって多少の大小逆転はあるが、やはり日単位で見ても、蒸散強度の結果と同様に樹種間での顕著な差異は認められない。したがって、この場合に単木と

しての蒸散量の大小を支配するのは、土壌水分の欠乏にともなう吸水制限のような植物生理学的過程に影響を及ぼす外因とそれに対する樹木の感度の差異か、実質蒸散面積の差異、すなわち枝葉の繁茂度が考えられる。林分以上のスケールとなれば、樹木密度が大きな影響因子となってくるだろう。

4. おわりに

本論文では大型ライシメータにより樹高約5mのケヤキ（落葉広葉樹）とスギ（常緑針葉樹）の蒸散量を計測し、それぞれにおける蒸散量と周囲環境との関係や樹種間での差異を比較検討した。その結果、今回の観測の範囲においては、広葉樹と針葉樹とで蒸散量や蒸散過程に明瞭な差異は認められなかった。速断は禁物だが、今後の解析における一つの見通しとして、実質的な蒸散強度で見れば、樹種間で顕著な差異は無い、という一般に言われている知見とは異なる可能性が示唆された。今後は同一の方法論で蒸散効率を論じるために、著者らのヒートパルス蒸散モデルを観測値へ適用し、同定されるモデルパラメータ値の差異や、蒸散係数の大小を通して更なる検討を加えたいと考えている。

謝辞：徳島県農林水産部森林整備課ならびに徳島県森林土木協会より、ライシメータおよび気象観測施設の設置について格別のご協力をいただきました。また、徳島県林業総合技術センターには構内の一角をライシメータ建設用地として提供いただきました。観測、解析に当たっては、昨年度の大学院生福本憲弥氏、4年生の故坂本昌興氏のご協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 吉田弘，端野道夫，村岡浩爾：ヒートパルス速度を利用した蒸散量推定のために数理モデルの提案，水文・水資源学会誌，Vol.6, No.3, pp.244-253, 1993
- 2) Nakagawa, S.: Study on evaporation from pasture, *Environmental Research Center Papers*, The University of Tsukuba, pp.18-26, 1980.
- 3) 福本憲弥:大型ウェイングラシメータを利用した蒸散量推定に関する基礎的研究，徳島大学大学院工学研究科修士論文，pp.26-39, 1998.
- 4) 鈴木雅一：山地流域の蒸散量に関する森林水文学的研究，平成元年度文部省科学研究費補助金研究成果報告書，pp.1-59, 1990.

(1998. 9. 30受付)