

ヒートパルス速度と微気象データを利用した流域蒸散量推定手法の提案 と短期水収支法による比較検討

Estimation of basin transpiration based on heat pulse velocity and micrometeorological
data and comparison with one estimated by water budget method

吉田弘^{*}・端野道夫^{**}・坂宏二^{***}・村岡浩爾^{****}

By Hiromu YOSHIDA, Michio HASHINO, Kohji SAKA and Kohji MURAOKA

This study investigates an estimation method of basin transpiration based on heat pulse velocity and micrometeorological data by making use of solar radiation on several slopes which consist a basin. The basin transpiration is calculated by the weighted mean of transpiration on each slope, taking advantage of the area of each slope. The proposed method is applied to the data observed in the Shirakawadani experimental basin in Tokushima prefecture. The cumulative transpiration over several months agrees with the estimation by water budget method.

keywords: heat pulse velocity, forested basin, transpiration, solar radiation

1. はじめに

土壌・植生・大気連続体 (Soil-Plant-Atmosphere Continuum:略称SPAC) を構成する森林流域において、蒸散過程はこれらの全ての要素と密接に関連する水文素過程である。蒸散過程では樹冠付近の気温、飽差日射量あるいは風速といった微気象条件が起動因子となるが、その影響は根系による土壌水分の吸収を介して森林土壌にも及ぶことから、例えば水源かん養機能の評価上で極めて重要な森林土壌内における水分動態を支配しているといつてよい。これまで著者らは簡便な手法でかつ正確な蒸散量推定法の確立を目指して、ヒートパルス速度を利用した蒸散量推定モデル¹⁾を開発しており、単木で観測したヒートパルス速度によってモデル構造の妥当性について検証してきたが、現状では流域蒸散量としての評価手法にまでは至っていない。実森林流域では、斜面方位、斜面傾斜角あるいは標高による差異等からヒートパルス速度はもちろんのこと、微気象条件、土壌水分条件が空間内で不均一分布をしていると考えられるために、本来的には面的な観測が必要なことはいうまでもない。しかしながら、実森林流域でそうした面的な情報を入手するのは一般に困難であるから、これに代わる簡便でかつ実用的な推定手法を開発する必要がある。そこで本論文では、著者らの蒸散モデル¹⁾を流域全体へとスケールアップして適用する手法の開発を行い、本論文で提案する手

*	正会員	工修	徳島大学助手	工学部建設工学科	(〒770 徳島市南常三島町2-1)
**	正会員	工博	徳島大学教授	工学部建設工学科	(同 上)
***	学生員		徳島大学大学院	工学研究科建設工学専攻	(同 上)
****	正会員	工博	大阪大学教授	工学部土木工学科	(〒770 吹田市山田丘2-1)

法による推定蒸散量と短期水収支法¹⁾とから計算される蒸散量とを比較することで流域スケールでの蒸散量推定法としての妥当性について検討を加えた。

著者らのヒートパルス速度を利用した蒸散量推定モデルは、樹木を一つのタンクと見なして、入力量となる土壌水分の吸水強度 E_s と出力量となる樹冠からの蒸散強度 E_T とから樹木内の水分収支を表現したものである。モデルは植生—大気間の水移動過程を表現する蒸散サブモデルと土壌—植生間の水移動過程を表現する吸水サブモデルとから構成されている。本モデルで必要となる諸量は、Penmanの可能蒸発散量を計算するための気温、相対湿度、純放射量および風速、ヒートパルス速度ならびに土壌水分ポテンシャルである。蒸散モデルおよび降雨遮断タンクモデルの詳細についてはそれぞれ参考文献1)および2)を参照されたい。

2. 実森林流域の概要

解析対象流域は図-1に示す徳島県白川谷森林試験流域である。流域面積は23 ha、標高は740m~1100m、流域平均勾配は21.5°である。地質は砂質片岩と泥質片岩の互層をなしており、流域の大部分を褐色森林土が占める。流域上流側の約2/5が天然落葉広葉樹で、下流側の約3/5がスギの人工林でそれぞれ覆われている。パラメータ同定ならびに後述の水収支解析で用いた流量は流域末端の砂防ダムに設けられた流量堰で、雨量はダムサイト

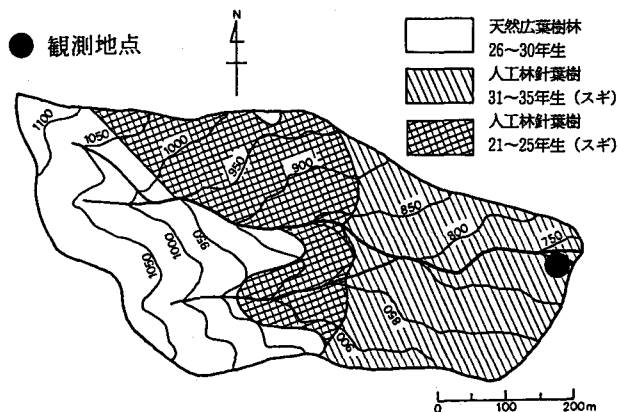


図-1 徳島県白川谷試験流域の概要

の転倒マス型雨量計で日記観測されている。また、気温、相対湿度、風速、純放射量、全日射量は10分ごとに樹冠上約2mの付近で観測されている。ヒートパルス速度はダムサイト付近の約31年生スギ(樹高約20m)を対象とし、胸高付近で20分ごとに観測されている。土壌水分ポテンシャルはヒートパルス速度観測木周辺で、10cmから10cmピッチの7深度で10分ごとに観測されている。なお、本流域では日照時間が観測されていないため、北東約21kmに位置する水資源公団池田総合管理所から提供を受けた観測値を援用している。

3. 流域蒸散量の評価手法

3・1 流域斜面の分割

本流域は主として図-2に示すような4つの斜面(斜面1~斜面4)から構成されている。そこで、蒸散過程は日射環境と密接に関連していることを考慮して、流域をこれら4つ斜面に分割し、各斜面ごとの蒸散量を求めた上で、各斜面の面積を重みとする加重平均値をもって流域蒸散量と定義する。流域内は比較的樹齢の類似した植生分布となっていることから、スケールアップする上での前提として、流域内で樹種、樹齢は均一であり、ヒートパルス速度の観測木による推定値が斜面1を代表できるものと仮定する。

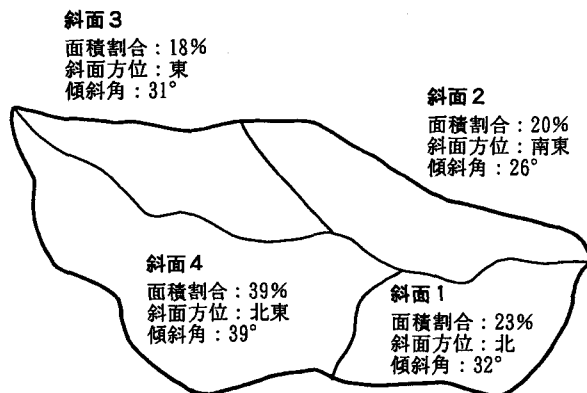


図-2 流域の斜面分割図

3・2 各斜面全天日射量の推定

蒸散量と最も密接に関連する気象量として日射量が挙げられる。図-3に日平均ヒートパルス速度 V_h と日全天日射量 H_o の関係を示す。若干のばらつきは認められるが、総体的に図から判断して両者にはほぼ比例関係があると見なせそうである。そこで本論文ではヒートパルス速度を観測している斜面1での全天日射量を基準としてその他の斜面2～斜面4での全天日射量によって斜面1での推定蒸散量を他の斜面へ比例配分する方法を考える。具体的な計算手順として、日大気圏外放射量 H_A から日水平面全天日射量 H_o への換算は大機の式³⁾ ((1)式)を用いた。斜面での日全天日射量 H はIqbal⁴⁾の方法 ((2)式)によって H_o を日直達日射量 H_D と日散乱日射量 H_s に分した後に、清野・内嶋の式⁵⁾によって時間量へそれぞれ変換した上で、直達日射成分は岡上の式⁶⁾ ((3)式第1項)で、散乱日射成分は全天で均一分布を仮定して計算する⁷⁾ ((3)式第2項)。反射日射については、斜面1と2、斜面3と4とをペアにして H_D と H_s の成分を簡易的に考慮した。斜面のアルベドは厳密には日変化するが、ここでは便宜的に0.15とした。

$$H_o/H_A = 0.19 + 0.51(n/N) \quad (1)$$

$$H_s/H_o = 0.973 - 0.837(n/N) \quad (2)$$

$$H = H_D \left[\{1 - (\sin k \cosh \cos \theta + \cos k \sin \theta)^2\}^{1/2} \cos(\omega t + \alpha) \cos \delta + (\sin k \cosh \cos \theta + \cos k \sin \theta) \sin \delta \right] + \rho H_s (1 + \cos) / 2 \quad (3)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{\sin k \sinh}{\cos k \cos \theta - \sin k \cosh \sin \theta}$$

ここに、 n ：日照時間(hr)、 N ：日照時間(hr)、 ρ ：斜面のアルベド、 k ：斜面傾斜角(rad)、 h ：斜面方位角(rad)、 θ ：緯度(rad)、 δ ：赤緯(rad)、 ω ：地球の自転角速度(rad)、 t ：時刻(hr、正午をゼロとする)である。

日の出、日の入りの時刻の推定にあたっては、デジタルイザにより流域の1/2500地形図を基にしてダムサイトを中心とした放射座標系でのデジタルマップを作製し、太陽高度とその太陽方位での最小入射角とを比較することで決定した。

斜面1に関する全天日射量の現地観測値 H_o と、推定値 $H_{o,est}$ の比較例(1993年1月～10月)を図-4に示す。現在のところ白川谷試験流域では日照時間の観測を行っていないために、北東約21kmに位置する池田での観測値を援用している。したがって両地点での日射環境は当然ながら異なっていると予想されるので、この程度の誤差はやむを得ないと考えられる。推定した全天日射量は前述のようにヒートパルス速度を観測している斜面1での推定蒸散量を他の斜面へ外挿するための指標として取り扱う。後述のように斜面での全天日射量の比を利用して斜面1での蒸散量 E_{T1} から他の斜面2～4での蒸散量 E_{Tj} ($j=2\sim4$)へ外挿したのちに、各斜面

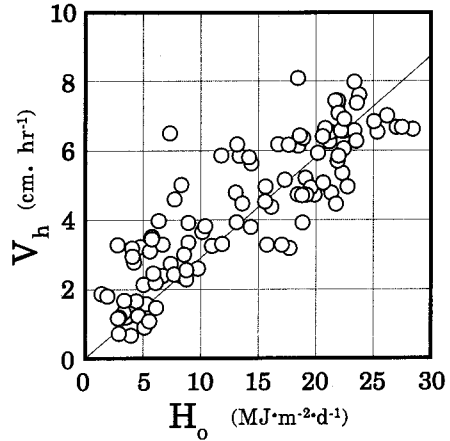


図-3 日平均ヒートパルス速度 V_h と日全天日射量 H_o の関係

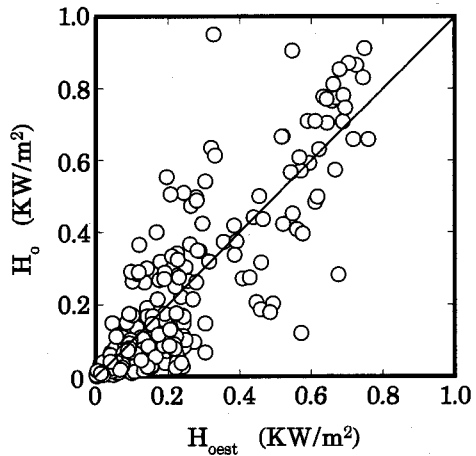


図-4 全天日射量の観測値 H_o と推定値 $H_{o,est}$ の比較

表-1 各分割斜面での月全日射量

(単位: mm)

Slope No.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.
1	508.1	537.3	443.2	407.1	286.8	165.9
2	548.3	603.3	527.6	597.8	552.9	442.5
3	532.8	580.4	504.9	556.3	500.3	388.9
4	528.2	564.4	475.0	472.0	373.0	252.1

面積の重み付き平均値として流域蒸散量が定義されていることから、図-4のばらつきは最終結果に対して大きな影響は与えないと判断される。実用的観点からすれば、異なった地点での日照時間を用いている割にはよく推定できていると考えられる。各斜面の全日射量を1992年6月～10月について比較したものが表-1である。南向き斜面2の全日射量が最も多く、次いで斜面3、斜面4の順となっており、北向きで午後の日射環境が劣る斜面1は最も小さくなることから、定性的にみて妥当な結果と判断される。

3・4 各斜面蒸散量および流域蒸散量の推定

斜面1での蒸散量 E_{T1} を基準とした斜面2～斜面4の蒸散量 E_{Tj} ($j=2\sim4$)への変換は、各斜面の全日射量 H_j ($j=1\sim4$)の比を利用して次式のように計算される。

$$E_{Tj} = E_{T1} (H_j / H_1) \quad (4)$$

また流域蒸散量 E_T への変換は、図-2で分割した各斜面で構成される小流域の面積を重みとする平均値として次式のように定義される。

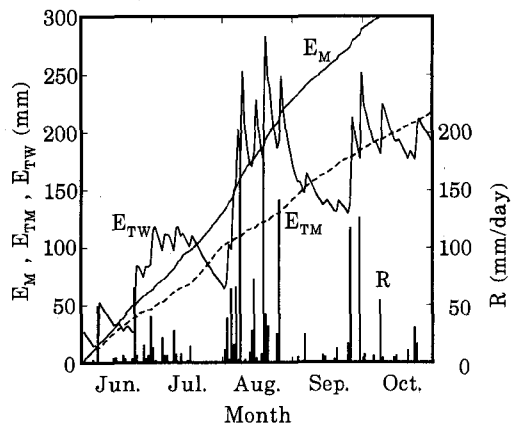
$$E_T = \frac{\sum_{j=1}^N E_{Tj} A_j}{\sum_{j=1}^N A_j} \quad (5)$$

ここに、 A_j ($j=1\sim4$)は斜面1～4が構成する小流域面積である。

4. 実森林流域への適用結果と妥当性の検討

4・1 累積蒸散量の評価

降雨量- (降雨遮断量+流出量)を1992年6月1日から10月31日まで積分して得られた累積蒸散量 E_{TW} を本モデルによる推定蒸散量の累積値 E_{TM} と比較したものが図-5である。参考のために、蒸散量 E_{TM} に遮断蒸発量 E_{VM} を加えた蒸発散量 E_M も併記してある。なお、降雨遮断量 E_{VM} は著者らが開発した降雨遮断タンクモデル²⁾を用いて別途計算されている。定性的にみて全般に E_{TM} と E_{TW} の傾向は一致している。また期末でのトータル蒸散量もほぼ一致しているようであるので、数カ月程度の長い期間をとれば本モデルから推定された蒸散量は定量的にみても流域蒸散量と十分に適合しているといえそうである。

図-5 累積蒸散量 E_{TM} と E_{TW} の比較

さて、図中で6～7月中旬、8月および9月末～10月初旬において、 E_{TW} が E_{TM} を上回る傾向が認められる。この原因については、例えば期間中での降雨量と流出量の関係を検討すればよい。現地での観測記録によると、8月1日～31日の降雨量と流出高がそれぞれ約936mmと約771mmであるのに対し、9月1日～9月23日では約56mmと約93mmのように流出高が降雨量を上回っている。つまり9月での流出量は明らかに前月での降雨が持ち越されたものであるから、降雨期間では雨水が流域内に貯留されるために、見かけの蒸散量として過大評価されていると考えられる。

4・2 短期水収支法による蒸散量との比較検討

1992年5月～11月に関して、著者らのモデルによる蒸散量を E_{TM} 、降雨遮断タンクモデルによる遮断蒸発量を E_{VM} 、短期水収支法⁸⁾による推定蒸散量および推定蒸散量をそれぞれ E_w および E_{TW} ($=E_w - E_{VM}$)と定義し E_{TM} と E_{TW} の比較を図-6で行う。図中で E_{TM} 、 E_{VM} はシンボルで、 E_{TW} は適用期間のバーチャートでそれぞれ表現されている。短期水収支法を適用して蒸発散量 E_w を推定する場合には、流域貯留高 S の変化量 dS/dt が無視し得る状態を見出すか、もしくは貯留量の変化を推定する必要がある。適用期間の起点および終点を見出すための基準流出高 q_c は、流出高 q が貯留高 S のみで決定されていると見なされる基底流出(地下水流出)状態を

対象とすればよい。本流域では比較的降雨イベントが長いために条件を満足する理想的な期間と基準流出高を抽出するのが困難であるが、1992年6月1日から10月31日に関する流出高の記録に基づいて、 q_c として0.102mm/hrを与え、流出高が流出ピークの両側で q_c と一致する時刻をそれぞれ適用期間の起点 t_1 および終点 t_2 と決定した。このときに蒸散量 E_{TW} (mm)は次式で計算される。

$$E_{TW} = E_w - E_{VM} = P - Q - E_{VM} = \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt - \int_{t_1}^{t_2} q(t) dt - E_{VM} \quad (6)$$

8月や9月末～10月初旬のように降雨量の多い降雨イベントを含んだ期間では、短期水収支法による推定値 E_{TW} は本モデルによる蒸散量 E_{TM} の2倍弱の値を示している。また本モデルによる推定蒸散量 E_{TM} は6月～7月に比較して8月、9月および10月の方が小さいが、短期水収支法による推定値 E_{TW} は傾向が全く逆である。この期間における微気象条件から検討すると、6月～7月は梅雨期であるにもかかわらず雨量が少なく、晴天期間が長い。むしろ8月～10月では度重なる台風来襲の影響を受けているために、雨量が多く、晴天日も6月～7月に比較して短い。したがって6月～7月の方で蒸散量は大きくなるのが普通と考えられる。この観点から図-6を検討すれば、定性的に見て、明らかに短期水収支法による推定結果は通常予想される結果と逆であって、雨が多く日射環境の悪いときほど蒸散量が多くなるという矛盾した結果になっている。短期水収支法の適用条件について検討してみても、1992年全体の記録から判断して約0.1mm/hrが最小流量となっており基準流出高の設定値は妥当であるし、起点および終点についても両者が一致する時点抽出していることから特に問題はみられない。概念上、短期水収支法は流出量 Q が流域全貯留量 S の関数とする1タンクモデルの立場を採っており、流域での雨水の配分・流動は単一の $Q-S$ 関係で記述されている。しかしながら一般に土壌層位ごとで水分貯留特性は異なっているのが普通であるから、流域は複数のタンクから構成されていると解釈すべきであって、短期水収支法では流域としての雨水配分特性を十分に考慮できていないと考えられる。したがって、本流域のように降雨量が多く、降雨期間の長い流域で1ヶ月程度の短期間に短期水収支法を適用して得られた結果は必ずしも蒸散量を正確に表現できていない可能性が高い。

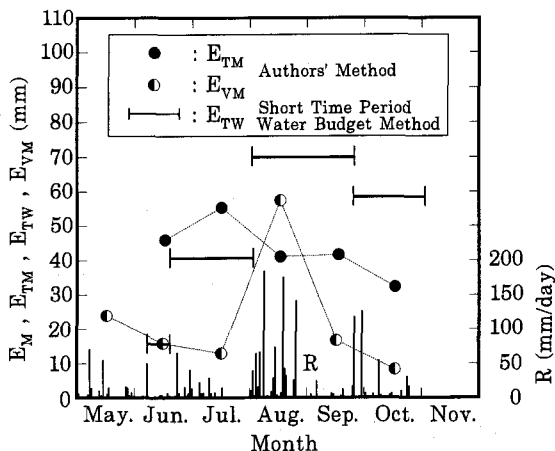


図-6 推定蒸散量 E_{TM} と E_{TW} の比較

4・3 斜面日射環境評価の違いによる影響の検討

ヒートパルス速度を利用したモデルによる推定値について斜面日射環境を考慮した場合(Method A)と斜面の日射環境を考慮せずに計算した場合(Method B)とを比較したものが表-2である。なお、蒸散モデルのパラメータは、対象とする各月ごとに同定されたものを用いている。夏季は斜面間での全天日射量の差が

表-2 各手法による推定月流域蒸散量 (単位: mm)

Method	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.
A	48.0	56.5	43.7	51.3	48.4	40.9
B	45.9	55.3	41.1	41.6	32.3	21.7

数%程度であるため大きな差異は見いだされない。しかし秋季では太陽高度が低くなるため、北向き斜面と南向き斜面とではかなり差異がある。斜面によって日射量が大きく異なる場合の妥当性については、今後、異なった斜面での日射量あるいはヒートパルス速度の観測によって検証する必要がある。

5. おわりに

本論文では、ヒートパルス速度を利用した単木に関する蒸散量推定法を流域スケールに拡張するために、流域を構成する複数の斜面における全天日射量を利用して単木蒸散量から流域蒸散量へ外挿する手法を提案した。1992年6月から10月における期間全体の水収支計算結果と比較したところ、実用的な範囲では一致したが、これまで多数の研究者によって用いられてきた短期水収支法による結果とは必ずしもうまく一致しなかった。特に降雨量の大きな降雨イベントを含む期間でその傾向が大きい。本論文で提案した流域蒸散量推定法は厳密な意味で真値によって定量的に検証されていないが、少なくとも現地での微気象条件より予測される蒸散量の変化傾向と一致している点で定性的に見て妥当な方法であると判断できる。短期水収支法による推定値はおよそ本モデルによる結果とは反対の傾向を示しており、妥当な結果とは判断できない。したがってラフな推定ならともかく定量的妥当性を要求される場合に、流域の貯留特性を単純化して取り扱う短期水収支法には適用限界があるといえよう。それ故に短期間での蒸散量を正確に推定するためには、従来法とは異なって、水収支によらず蒸散過程そのものをモデリングした本論文のような手法の開発が必要である。実流域での蒸散特性を最も反映しているヒートパルス速度によって本モデル構造の妥当性が検証されていること¹⁾を考慮すれば、この点にこそ本手法の意義があり有効性も高いと考えている。

本論文での議論は流域内での面的な観測値に基づいたものではなく、また真の流域蒸散量によって検証されていないという点で課題を残している。今後は流域内の複数地点での観測値を獲得することで、気象量あるいはヒートパルス速度の空間分布を考慮にいれて面的な蒸散量の検証を行いたいと考えている。

本研究の一部は、平成4年度河川環境管理財団による研究助成(研究代表者、端野道夫)ならびに文部省科学研究費(奨励研究(A)、研究代表者、吉田弘)の補助を受けました。また、徳島県治山林道課・(財)徳島県森林土木協会および水資源公団池田総合管理所よりそれぞれ試験流域および気象データの提供を受けました。ここに記して深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 吉田弘・端野道夫・村岡浩爾：ヒートパルス速度と微気象データを利用した林木蒸散量推定法の提案，水文・水資源学会誌，6(4)，1993。
- 2) 吉田弘・端野道夫・村岡浩爾：樹幹流データを利用した降雨遮断タンクモデルによる森林蒸発量の推定法，水文・水資源学会誌，6(1)，pp.19-30，1993。
- 3) 大槻恭一・三野徹・丸山利輔：気象資料から推定したわが国の蒸発散量，農業土木論文集，112，pp.25-32，1984。
- 4) Iqbal, M.: A Study of Canadian Diffuse and Total Solar Radiation, Solar Energy, 22, pp.81-86, 1979。
- 5) 清野豁・内嶋善兵衛：複雑地形地(阿蘇カルデラ)における太陽放射資源量の評価，農業気象，41(3)，pp.247-255，1985。
- 6) 岡上正夫：斜面の受ける日射量を求める簡単な方法，日本林学会誌，39，pp.435-437，1957。
- 7) 柴田和雄・内嶋善兵衛：太陽エネルギーの分布と測定，学会出版センター，p.140，1987。
- 8) 例えばSuzuki, M.: Evaporation from a Small Catchment in Hilly Mountains(I), Seasonal Variations in Evaporation, Rainfall Interception and Transpiration, J. Jap. For. Soc., 62(2), pp.46-53, 1980。