

日蒸発・蒸散量の簡便な分離推定手法の検討

A Simple Method for Separately Estimating Daily Evaporation and Transpiration

アルフィアンシ ユリアヌル *・吉田弘**・端野道夫***

By Alfiansyah YULIANUR, Hiromu YOSHIDA and Michio HASHINO

Evapotranspiration is one of the most important components of hydrological circulation for water resources planning and management. Simple method requiring a few meteorological data which are easily obtained is necessary for analysis on water balance in large-scale area, especially in developing countries. Furthermore, evaporation caused by rainfall interception, and transpiration should be divided, because they are different hydrological processes in themselves. In this study, a simple mathematical models for separately estimating daily transpiration and evaporation in rainfall events were developed. The models were applied to the observation obtained in a small forested mountain basin in Tokushima prefecture, and the validity of the models were investigated.

Keywords : transpiration, evaporation, forested basin, mathematical model
division of evapotranspiration

1. はじめに

蒸発散量は水資源開発・管理計画の策定上で重要な水文循環要素である。近年、たとえば地球規模での水循環過程に大きな役割を果たしていることが明らかになってきた熱帯雨林地方などは概して水文気象観測網の不十分な発展途上国に位置することが多く、当然のことながらきわめて限られた情報しか入手できない状態にある。また広域での蒸発散量を推定する必要があることで、地上情報に頼る限りは面的な情報を入手することは不可能に近い。さらには、蒸発量と蒸散量は異なる水文素過程により生起することから、本来的にはきちんと分離して評価されるべきものであるが、現状ではこれらを分離評価しうる実用的な手法は提案されていない。著者らはこうした現状認識の下で、GMSデータを利用した広域水収支評価手法の開発を目指し、IRデータと雲量データを利用した日降雨量推定モデルの開発に取り組んできた¹⁾。本論文では、山地小流域での流出解析で蓄積されてきた知見を基礎に、広域的な蒸発量、蒸散量推定手法の開発に向けた足がかりとして、簡便な日遮断蒸発量および日蒸散量の推定モデルの開発を試みた。特に日遮断蒸発量については先に開発されたGMS-IRおよび雲量データを利用した日降雨量推定モデルによる推定日降雨量の利用を念頭においた。開発したモデルを山地小流域で観測されたデータにそれぞれ適用し、現地観測データの再現性によりそれぞれのモデルの妥当性について検証することで、将来の広域水収支解析に関する可能性について検討を加えた。

*	学生員	徳島大学大学院	工学研究科開発保全工学専攻	(〒770 徳島市南常三島町2-1)
**	正会員 工博	徳島大学助手	工学部建設工学科	(同 上)
***	フェロー 工博	徳島大学教授	工学部建設工学科	(同 上)

2. モデルの概要

2.1 遮断蒸発モデル

遮断蒸発モデルは、まずGMS赤外輝度温度データと雲量データを利用して日降雨量を推定するGMS日降雨量推定モデル¹⁾と日降雨量から日遮断蒸発量を推定する線形回帰日遮断量推定モデル²⁾とからなる。

(a)GMS日降雨量推定モデル

WEFAX画像データとして配信される赤外輝度温度(IR)データの解像度(1画素)は、 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ (約5km×5km)であり、雲頂温度に対応する輝度温度(0 K°~402 K°)が0~15の16階調の整数値として1時間ごとに受信可能である。本解析では図-1に示すように、IRデータは $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ スケールのグリッドについて日平均値として整理される。このときに階調6(254.41K°~261.41K°)を閾値として、これよりもIRデータの大きな画素の含有率をクールスポット率Fcと定義し、降雨の集中度を表現する指標と位置づけている。本モデルでは従来のモデルとは異なり、IRやFcなどの指標を単独の説明変数とするだけでなく、これらを組み合わせたものも説明変数として採用している点が特徴である。

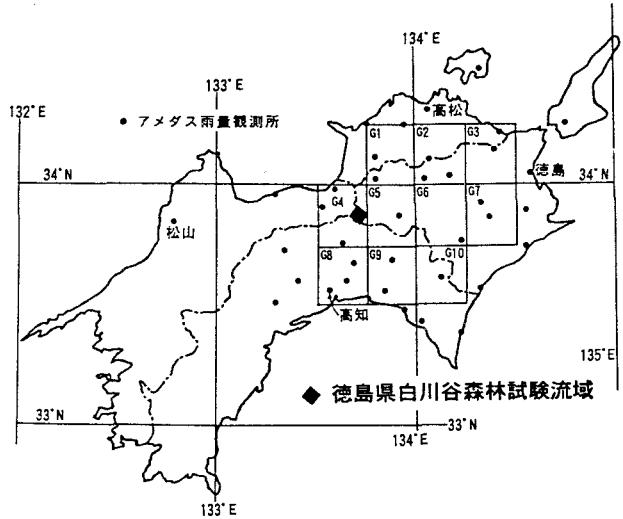


図-1 GMSデータの解析対象地域

一方、雲量データの解像度は $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ (約100km×100km)であり、全層にわたる雲量値が0~100の整数値で表現されている。雲量データには400hPaに相当する高度を境として、それより上の上層雲量UC、それより下の下層雲量LC、およびこれらを合わせた全層雲量TCの3種類があり、1ヶ月ごとに配布される。これは雲量が即時処理される1次データではなくGPVデータ等を利用して作成される2次データであるためである。雲量データについては上層雲量UCと下層雲量LCとの差をCLと定義する。IR、Fc、CL、UC、LCおよびTCの各指標を適宜組み合わせることで複数の説明変数を考案し、様々な組み合わせについて検討する。なお日降雨量Rに関する重回帰式を作成する上で、先に考案した説明変数の3次の項までを式中で考慮する。回帰係数の同定に当たっては日降雨量Rに現地で観測された林外雨量を与え、ステップワイズ回帰法を用いて決定係数が最も大きくなるような説明変数の組み合わせを探索し、そのときの回帰係数を求める。

(b)線形回帰日遮断量推定モデル

線形回帰日遮断量推定モデルは、Horton³⁾が提案した次式のモデルを基礎としている。

$$I = b + K e T_R \quad (1)$$

ここに、I：遮断蒸発量、e：蒸発強度、 T_R ：降雨継続時間、b、K：係数である。彼のモデルでは降雨中蒸発強度eは一定であり、式の中では降雨強度の影響が全く考慮されていないので、降雨量の多い場合や降雨強度の大きい場合には十分に遮断蒸発量を過小評価する傾向がある。こうした点を考慮して、著者らの開発した降雨遮断タンクモデル⁴⁾の考え方を応用し、回帰係数Kに降雨強度および蒸発強度の影響を加味するよう工夫したのが(2)式である。林外雨量Rは定義より平均降雨強度rと降雨継続時間 T_R の積で表されるから、Hortonの(1)式と等置して見ればモデルの第2項について $K e \sim a E_H r$ となっていることがわかる。つまり降雨中蒸発強度に対して降雨強度rの影響を考慮している点と、降雨中蒸発強度を一定と固定せずに気

温とともに変化するHamonの可能蒸発散量を基準蒸発量として採用している点特徴である。本モデルで遮断蒸発量の算定に関して必要となる気象データは日平均気温と林外雨量のみである。

$$I = b + a E_H R \quad (2)$$

ここで、 I ：遮断蒸発量、 R ：降雨量、 E_H ：Hamonの可能蒸発散量、 a 、 b ：回帰係数であり、それぞれ $a = 1.86$ 、 $b = 3.0$ と既に同定されている。本モデルは本来ならば一降雨イベントが適用対象であるが、今回は日降雨量に対して適用し、降雨イベント単位のみならず日単位でのモデルの適用性について検討する。

2.2 重回帰日蒸散量推定モデル

流域の蒸散量を推定するのは一般に大変困難であるが、著者らは樹液流速の指標であるヒートパルス速度を利用したヒートパルス蒸散モデル⁵⁾を構築しており、このモデルにより蒸散量の単独推定が可能である。そこで、ヒートパルス蒸散モデルの日蒸散量推定値 E_{TP} を真値とし、これとHamonの可能蒸発散量 E_H との比 $\phi_d = E_{TP} / E_H$ を蒸散係数 ϕ_d と定義して、 ϕ_d の簡便推定モデルの構築を試みる。これまでのヒートパルス蒸散モデルによる現地観測データの解析結果から、月単位について蒸散量とPenmanの可能蒸発散量との比 ϕ が純放射量、気温、飽差および風速を説明変数として実用的に見て十分な精度で表現できること⁶⁾を明らかにしてきた。こうした経験に基づいて、今解析では気温、日照時間および降雨量のみが入手可能情報とする制約条件の下で全天日射量 Q_g 、日平均気温 T および月降雨量 R_m を説明変数に採用し、これらの3次の項まで考慮に入れた蒸散係数 ϕ_d に関する重回帰モデルの構築と検証を試みた。重回帰モデルの回帰係数の決定にはステップワイズ回帰法を用い、決定係数が最大となるような説明変数の組み合わせを選択し、その場合の回帰係数を求めた。本モデルで必要となる気象データは、日平均気温、日照時間、月降雨量のみである。

3. 解析対象流域の概要

本モデルを適用した流域は図-2に示す徳島県白川谷森林試験流域である。徳島、愛媛および高知県の県境に位置するため、図-1ではG4のグリッドに属する。流域面積は23ha、標高は740～1100m、流域平均勾配は21.5°である。土壌は主として褐色森林土が分布している。植生は下流3/5が人工スギ林（約23～37年生）、上流2/5が天然広葉樹林となっている。林外雨量、樹冠通過雨量および樹幹流下量は約35年生のスギを

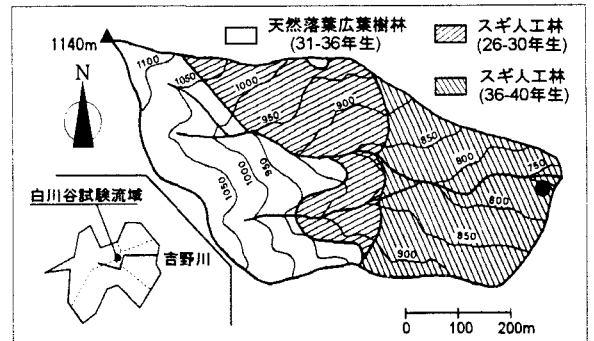


図-2 徳島県白川谷森林試験流域の概要

対象として転倒マス型雨量計により10分間隔で観測されている。少数の転倒マス型雨量計のみでは樹冠通過雨量の空間的偏りの影響が現れる可能性が大きいことから、約7.2m²の大型集水板での観測も併用している。遮断蒸発量は（林外雨量－樹冠通過雨量－樹幹流下量）から算定される。気象量（気温、相対湿度、純放射量、風速）の観測機器は約22mのタワー上に設置されており、樹冠上の約2mの地点で観測されている。ヒートパルス速度は約35年生のスギを対象に胸高付近で表皮から約10mmの深さにセンサーを設置して観測している。土壌水分ポテンシャルは対象とするスギの付近で10cm～70cmの範囲で10cmごとに計測されている。いずれの観測とも図中の●地点で実施されている。

4. モデルの適用と検証

4.1 GMS日降雨量モデルの適用結果

本モデルを1990年と1991年の日降雨量5mmを超えるデータへ適用して選択された説明変数は全部で15個であったが、そのうちで日降雨量との偏相関係数が高い上位5つの説明変数を偏相関係数の大きい順に並べると、 Fc^3 、 Fc^2 、 $(1/Fc)^3$ 、 $(Fc \cdot UC)^2$ 、 $(IR \cdot Fc)^3$ である。上位3つに降雨の集中度に関係する

表-1 モデル適用時の決定係数と推定誤差の一覧

年	決定係数	標準誤差 (mm)	標準誤差率 (%)
1990 & 1991	0.9175	14.8	22.9
1990	0.9595	14.2	15.0
1991	0.6633	15.1	33.6

と考えられる F_c が含まれているのが注目される。表-1にモデル適用時の決定係数と推定誤差の一覧を示す。表中の標準誤差とは、Root Mean Square Errorのことであり、標準誤差を平均値で規準化することにより標準誤差率を定義した。1990年と1991年を通して適用した結果では決定係数が0.9175、標準誤差では14.8mmとなった。2年間の平均降雨量が約65mmであるので、標準誤差率は22.9%となった。1990年のみを対象に適用した場合には、決定係数および標準誤差ともに良好な値が得られている。しかし1991年については、あまり高い精度は得られていない。1990年には約360mmの台風性の降雨イベントがあるのに対して1991年には100mmを超える降雨イベントが1つしかない。したがって説明変数の選択と回帰係数のチューニングに1990年の豪雨イベントが大きな影響を及ぼしている可能性がある。

モデルによる日降雨量の推定結果を図-3に示す。図-

3より、およそ50mmよりも日降雨量の大きいイベントでは過小評価、50mmよりも小さなイベントでは過大評価の傾向が認められ、全般的にみてモデル推定値と観測値は一致しているようである。0.25°×0.25° (25km×25km) という広領域でのGMSデータの平均値と、0.23km² という狭い領域での点観測雨量データとを比較しているため、本来的にはそう高い精度を期待するのは難しいが、今回のように約20%強であれば実用的にはまずまずの精度で推定できたと考えたい。したがって、何らかの方法で日平均気温を推定できるようになれば、気象台のルーチンデータを用いずに遮断蒸発量を推定する手法の開発が見通しが立ったと考える。

表-2 モデル適用時の決定係数と推定誤差の一覧

年	決定係数	標準誤差 (mm)	標準誤差率 (%)
1990 & 1991	0.9111	3.72	25.6
1990	0.9704	2.85	14.5
1991	0.6724	3.73	33.4

4.2 線形回帰日遮断量推定モデルの適用結果

GMS日降雨量推定モデルによる推定日降雨量を林外雨量Rとして与え、1990年と1991年に対して日単位での降雨遮断蒸発量を推定した結果を示す。表-2はモデル適用時の決定係数と推定誤差を一覧にして示したものである。2年間を通しての決定係数は0.9111、標準誤差は3.72mmであった。平均遮断蒸発量が14.5mmであるので標準誤差率では25.6%となる。日降雨量推定時の決定係数および標準誤差率とほぼ同様であるので、日降雨量の推定精度に見合った結果である。この場合も、やはり1990年の方が1991年よりも推定精度は高いようである。各年に単独で適用した場合も日降雨量の推定精度とほぼ同等である。

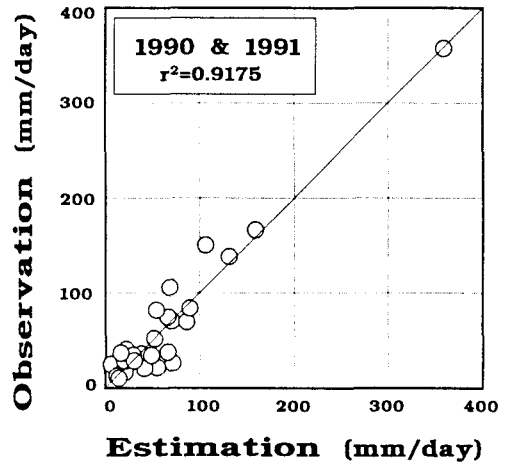


図-3 モデルによる推定日降雨量と観測値の比較

図-4にモデルによる推定日遮断蒸発量と現地での雨量観測データから算定された観測値との比較結果を示す。全般的に見てモデルによる観測値の再現性は良好である。本来的には降雨イベントに対して適用されるモデルであるが、日単位についても適用することが可能であることが示されたと考える。

4.3 重回帰日蒸散量推定モデルの適用結果

重回帰蒸散量推定モデルを1991年～1993年の3年間に適用して月ごとに得られた決定係数、標準誤差ならびに標準誤差率を表-3に示す。冬季でかつ標本データ数の少なかった1月、2月、11月および12月を除いて、蒸散活動の活発な8ヶ月間について決定係数は0.85以上となっている。標準誤差率もこれらの8ヶ月では10%以内に収まっている。

図-5に月ごとについてモデルによって推定された ϕ_a と観測値との関係をまとめて示す。冬季の一部を除いて両者はよく一致しているのがわかる。したがって、予めヒートパルス蒸散モデルを適用しておけば、後はGMSデータ等を用いて全天日射量あるいは日照時間を推定できれば、気象台ルーチンデータを用いずとも日蒸散量を実用的に十分な精度で推定しうる可能性が示されたと考える。

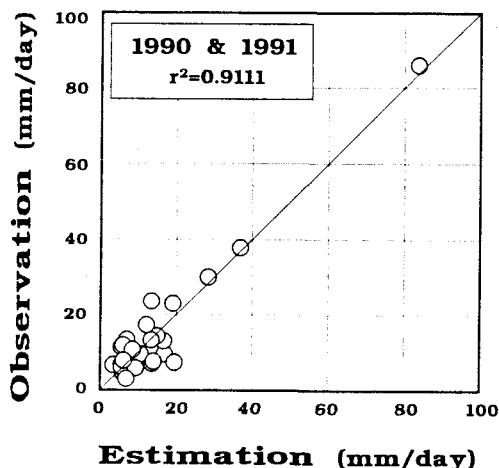


図-4 モデルによる推定日遮断蒸発量と観測値の比較

表-3 モデルの適用時の決定係数と推定誤差の一覧

月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
決定係数	0.50	0.69	0.96	0.91	0.86	0.95	0.88	0.87	0.93	0.94	0.52	0.44
標準誤差	0.18	0.09	0.05	0.14	0.10	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04	0.12	0.29
標準誤差率(%)	13.1	8.56	5.42	8.23	9.34	4.77	5.18	4.19	5.14	6.98	10.7	29.2

5. おわりに

入手可能な水文気象データが制約されているような場合でも実用的に十分な精度で遮断蒸発量と蒸散量を分離して推定しうる手法の開発を目標に、GMS日降雨量推定モデルおよび線形重回帰日遮断量推定モデルとの組み合わせで日遮断蒸発量の推定モデルを構築した。また著者らのヒートパルス蒸散モデルを基礎とした重回帰日蒸散量推定モデルを構築した。これらのモデルを徳島県白川谷森林試験流域での観測データおよびこの流域を含む地域のGMS-IRデータと雲量データを用いて提案した手法の妥当性について検討した。その結果、GMSデータおよび比較的入手しやすい気温、降雨量と日照時間のデータがあれば簡便に遮断蒸発量および蒸散量を日単位で分離して推定する手法の構築に見通しが立った。特に地上の日平均気温と全天日射量あるいは日照時間をリモートセンシングデータ等によって推定することができれば、気象台のルーチンデータを必要としない日遮断蒸発量および日蒸散量の推定手法の開発も夢ではない。ただし、当然のことではあるがモデル定数のチューニングのために、グラントゥールズとして解析対象流域での遮断蒸発特性および蒸散特性を予め捉えておく必要があるのはいうまでもない。今後は地上日平均気温および全天日射量をリモートセンシングデータから推定する手法について検討する予定である。

参考文献

- 1) アルファイン社, 吉田, 端野: 水工学論文集, Vol. 40, pp. 291-296, 1996.

- 2) 吉田, 端野, 梶田: 水文・水資源学会研究発表会要旨集, pp.112-113, 1996.
- 3) Horton: Monthly Weather Review, 47, pp.603-623, 1919.
- 4) 吉田, 端野, 村岡: 水文・水資源学会誌, 6(1), pp.19-30, 1993.
- 5) 吉田, 端野, 村岡: 水文・水資源学会誌, 6(4), pp.350-357, 1993.
- 6) 越智, 吉田, 端野: 年講概要集Ⅱ, pp.792-793, 1996.

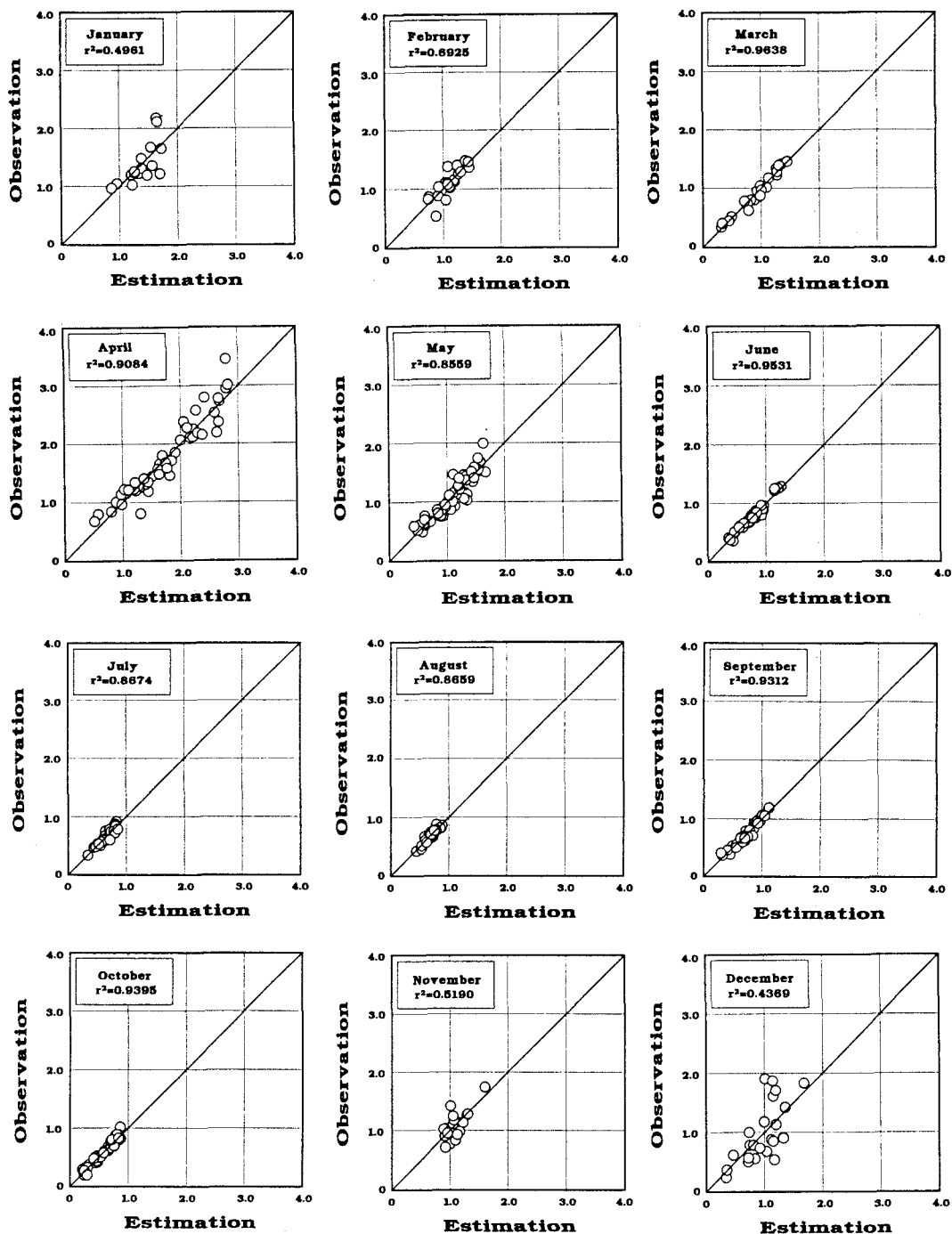


図-5 モデルによる月ごとでの蒸散係数 ϕ の推定値と観測値の比較