水文・水資源学会誌
J. Japan Soc. Hydrol. & Water Resour.
Vol. 11, No. 2 (1998) pp. 141-149

ハモンの可能蒸発散量と線形回帰式を利用した簡易遮断蒸発量推定法の提案

The Estimation of Rainfall Interception Loss Using Hamon's
Potential Evapotranspiration and Linear Regression

ユリアヌール アルフィアンシヤ* (徳島大学大学院工学研究科)

Alfiansyah YULIANUR

Graduate School of Engineering, The University of Tokushima

吉田 弘**・端野道夫**

(徳島大学工学部)

Hiromu YOSHIDA・Michio HASHINO

Faculty of Engineering, The University of Tokushima

A simple model for estimating rainfall interception loss in a rainfall event is proposed. The model is developed, based on the Horton's simple model. It is a key point that the model incorporates the Hamon's potential evapotranspiration into the evaporation during a rainfall event. The model is applied to the incident rainfall, throughfall and stemflow obtained from Shirakawatani experimental forested basin. When Hamon's equation is adopted for computing evapotranspiration rate, the model can describe the event-scale and monthly rainfall interception loss.

Key words : Rainfall interception, Forest evaporation, Linear regression model, Hamon's potential evapotranspiration

Hortonの提案した遮断モデルでは、蒸発係数および蒸発強度は定数とされてきた。しかしながら現地観測や実験を通して蒸発強度は概ね降雨強度に比例するという知見が報告されており、降雨遮断量の大半を占める降雨中蒸発量の算定において、森林微気象の影響を考慮すべきと考えられる。この点を踏まえ、本研究ではHortonのモデルを基礎にして、蒸発強度に降雨強度の影響を考慮するとともに、蒸発強度算定の基礎としてHamon式による可能蒸発散量を採用した簡易回帰モデルを開発した。本モデルを徳島県白川谷森林試験流域で観測された林外雨量、樹冠通過雨量、樹幹流下量ならびに気温データに適用したところ、降雨イベント単位で良好に降雨遮断量を推定することができた。特に雨量要素間での回帰式に基づく伝統的な回帰モデルでは十分に表現できていなかった梅雨期や台風期でも月蒸発量について大幅な推定精度の向上が示された。

キーワード: 降雨遮断, 森林蒸発量, 降雨中蒸発量, 線形回帰モデル, ハモンの可能蒸発散量

I. はじめに

1. 研究の背景

地球温暖化に対する認識が深まるにつれて、近年では地球規模での水文循環現象を把握する必要性が高まっている。特に熱帯雨林地方が大気水循環過程に果たす貢献の大きさが強調されるようになってきており、こうした地域での水収支、特に蒸発散量の的確な評価が急務となっている。しかしながら、これらの地域は概して発展途上国であることが多いため、水文気象観測網の整備が遅れており、解析に必

要なデータが絶対的に不足した状態にある。また一方で、一般に治水・利水安全度は極めて低く、恒常的に国土が洪水と渇水の脅威にさらされている地域という側面も有している。それゆえに、雨量や流量という最も基礎的な水文資料の蓄積が貧弱な地域であっても、十分な精度で広域での蒸発散量を推定しうるモデルが切望されているといえよう。

GCMからリージョナルモデルへのスケールダウンが現在水文学の最もホットな話題の一つであるが、我が国においてもアメダス気象観測網スケール(約17km×約17km)程度の領域について簡便かつ高精度な

*徳島大学大学院生産開発工学専攻 〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1

Graduate School of Engineering, The University of Tokushima, 2-1, Minami-josanjima, Tokushima-shi 770-8506, Japan

**徳島大学工学部建設工学科 〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1

Faculty of Engineering, The University of Tokushima, 2-1, Minami-josanjima, Tokushima-shi 770-8506, Japan

蒸発散量推定法を確立できれば、たとえばGCMによる計算値の検証データとしての面からも極めて重要となるであろう。

2. 既往の研究のレビュー

気象学的方法によらない遮断蒸発量の推定手法は、大別して回帰式を利用するなど簡便な手法で一雨遮断蒸発量を推定する系譜と降雨遮断過程を数理モデルで表現する系譜とからなる。簡便に一降雨イベントでの遮断蒸発量を推定する手法には、樹冠通過雨量および樹幹流量と林外雨量との回帰式に基づく手法と、解析的な手法の2系統がある。

現在一般的に受け入れられている回帰モデルでは、遮断蒸発量 I と林外雨量 R との間で下記のような関係式が想定されている。

$$I = a + b \cdot R \quad (1)$$

ここで、 a, b は係数である。

この形式での整理は歴史が長く、観測資料の蓄積も豊富である。しかしながら、第2項の係数を定数としているため、この整理では一般に結果はばらつき易い。これとは別にHorton(1919)は蒸発強度と降雨継続時間を用いたモデルを提案している。すなわち、Hortonは一降雨イベントにおいて、降雨遮断量が降雨中蒸発量と降雨終了後蒸発量とから構成されること、降雨中の蒸発量は降雨中蒸発強度 e および降雨継続時間 T_R に比例することを考慮に入れて次式のように定式化している。

$$I = V + K \cdot e \cdot T_R \quad (2)$$

ここで、 I は一降雨遮断量であり、 V は樹冠への付着水量、 K は樹冠投影面積に対する蒸発に関与する樹体表面積の比、 e は降雨中蒸発強度、 T_R は降雨継続時間である。Hortonモデルでは降雨中蒸発強度 e は定数と見なされているために、残念ながら遮断蒸発量を規定する気象因子の影響が蒸発強度に考慮されていない。

Hortonの提案したモデルを利用して遮断蒸発量の試算を試みた例に鈴木ら(1979)の研究がある。彼らはHortonモデル式(2)と降雨遮断量と林外雨量との線形回帰結果式(1)とを相互比較して、次式のように降雨中蒸発強度 e を推定し、線形回帰結果を利用した簡単な貯留型モデルを提案した。

$$e = b \cdot R / K \cdot T_R \quad (3)$$

滋賀県桐生試験地における水文気象観測データへモデルを適用し、年間の平均降雨中蒸発強度を推定して年遮断蒸発量の算定を試みている。

解析的手法としては、Rutterモデル(1971)に基づいて開発されたGash *et al.* (1979)のanalytical modelが代表例である。彼らは遮断蒸発量の構成成分として、①樹冠が飽和にならない小さな降雨による蒸発量、②樹冠が飽和になるまでの蒸発量、③降雨終了までの飽和した樹冠からの蒸発量、④降雨終了後の蒸発量、および、⑤幹からの蒸発量を取り上げ、これらの総和として遮断蒸発量が表現されるとした。ただし簡便ではあるものの、樹木の貯留容量が必要であるほかに、5つの成分の和として表現しているため取り扱いが煩雑になるという欠点も有している。

遮断蒸発過程を数理モデルで表現した研究としては、Rutter *et al.* (1971)の貯留型モデルがあまりにも有名である。ただし彼らのモデルでは本来連結されているべき樹冠と樹幹部分が独立してしまっているなど問題も多い。日本においては、武田(1951)が1段タンクながらも貯留型モデルを提案している。これはRutterモデルより実に20年も以前のことであるにもかかわらず、こうしたパイオニア的成果が紹介された論文は意外にも少ない。吉田ら(1993a)は、降雨遮断蒸発量のほとんどを占める降雨中蒸発量を的確に表現するために、直列2段型のタンクモデルを用いて表現した。特に雨滴の衝撃によって樹冠付着水が飛沫状に飛び散る点を考慮に入れるため、蒸発強度を可能蒸発散量と樹冠付着水量との積で表現しているのが特徴である。

II. 蒸発強度および降雨強度を考慮に入れた遮断モデルの定式化

1. Hortonモデルの改良

Hortonのモデルは式(2)で表されるように極めてシンプルな式である。すなわち、第1項で降雨終了後蒸発量が、第2項で降雨中蒸発量がそれぞれ表現されている。もちろん一降雨イベントでは、降雨規模が大きくなるほど圧倒的に第2項の占める割合が大きくなる。

Hortonモデルでは前述のように降雨中蒸発量について、通常は蒸発強度 e および蒸発係数 K が定数として扱われており、現象を十分に反映できていない。本論文では、特に降雨強度の大きなイベントに対しても十分に適用可能なモデルへと改良を加える。改良に際しては、著者らの降雨遮断タンクモデル(吉田ら, 1993a)での蒸発量の取り扱い方を基礎として、降雨中蒸発量の項について検討を加える。

著者らの降雨遮断タンクモデルを簡易的に表現す

図-1 降雨遮断タンクモデル

と図-1 のようである。タンクの水収支式、滴下強度 d 、樹幹流下強度 f および降雨中蒸発強度 E はそれぞれ以下のように表現される。

$$dS/dt = p \cdot r - d - f - E \quad (4)$$

$$d = \alpha \cdot S \quad (5)$$

$$f = \beta \cdot S \quad (6)$$

$$E = \lambda \cdot e_p \cdot S^n \quad (7)$$

ここで、 S はタンク貯留高、 p は樹冠面積が樹木の支配面積に占める割合、 r は平均降雨強度、 e_p は可能蒸発散量、 α 、 β は孔定数、 n 、 λ は係数である。本モデルでは、タンク貯留高 S は樹冠への付着水高あるいは樹冠濡れ面積の大きさに対応する量と考えている。

一定降雨強度の降雨中では、タンクの水分量はほぼ定常状態と見なせるので、 $d+f \gg E$ と仮定すれば、式(5)~(6)を式(4)に代入し、 $dS/dt = 0$ とにおいて最終的に次式を得る。

$$S = p \cdot r / (\alpha + \beta) \quad (8)$$

すなわち式(8)は、降雨中で近似的に樹冠付着水高ないしは樹冠濡れ面積に対応する S が降雨強度に比例すると考えることができることを示している。

降雨中蒸発量や蒸発強度に関して現在大きな問題となっているのは、雨量収支の結果として観測された蒸発量が気象学的に可能な蒸発量を上回る場合が多々あることである。降雨中蒸発強度が降雨強度に比例する(坂本ら, 1998)という観測事実も考えあわせると、これは現実には相変化をとまなう蒸発が樹冠付近で起こっているのではなく、相変化をとまなわない過程として、雨滴の衝撃による雨滴自身や樹冠付着水の飛散現象の結果生じる見かけの蒸発が発生していると考えの方が妥当であると考えられる。

たとえば降雨時に山腹からもうもうと雨煙が立ち

上っている現象を思い起こしてみよう。水谷ら(1997)が報告しているように、降雨中に上空から樹冠付近へ向かう顕熱フラックスはほとんど観測されていないことを考慮すれば、森林の樹冠は大きな粗度を有しているから、相変化をして蒸発しているというよりも、飛沫となって樹冠上に飛散した雨滴が相変化を伴わないで空气中に浮遊していると考えの方が妥当である。もちろん周囲からの移流顕熱等によって、飛散した飛沫は降雨終了後に水蒸気へと変化するが、少なくとも時間単位で見た降雨中の蒸発強度は、かなり大きめに評価されることになる。また降雨強度 r が大きくなると樹冠に付着する雨水量 S も多くなると考えられるため、飛沫化して飛び散る雨水量が増加すると考えることができる(吉田ら, 1993a)。したがって式(7)の解釈として、こうした降雨中蒸発強度 E の振る舞いを説明することが可能である。なお本モデルの基礎となる降雨遮断タンクモデルの考え方、基本構造等の詳細については吉田ら(1993a)を参照されたい。

2. 遮断蒸発量の推定式

(2)式のような形式で降雨遮断量を表現することを試みる。第2項の降雨中蒸発量は降雨継続時間を T_R とすると e の代わりに E を用いることで $E \cdot T_R$ と表現できる。また第1項の降雨終了後蒸発量 V は降雨終了後に樹冠面に残留した雨水量であるから定数である。したがって式(7)と式(8)を式(2)へ代入すれば、最終的に次式のように表現できる。

$$I = V + k \cdot e_p \cdot R \cdot r^{n-1} \quad (9)$$

$$= V + k \cdot e_p \cdot T_R \cdot r^n$$

ここで、 V は定数である。式(2)の K の代わりに係数を k としてまとめると、

$$R \equiv r \cdot T_R \quad (10)$$

$$k \equiv \lambda \cdot [p / (\alpha + \beta)]^n \quad (11)$$

である。

本モデルとHortonモデルとの違いは、蒸発係数と蒸発強度の取り扱い方の違いである。すなわち、第1点は式(2)と式(9)の第2項を比較すれば、蒸発係数について $K \sim k \cdot r^n$ であることから直ちに判るように、従来は定数とされてきた蒸発係数に対して降雨強度の影響が考慮されている点である。第2点は、Hortonモデルでは年間を通して一定とされていた蒸発強度 e に対し、本モデルでは気象条件の変化を反映させるために、可能蒸発散量 e_p を導入した点である。

一方で、経験的な回帰モデル式(1)と比較すると、前述のように経験的回帰モデルでは降雨中蒸発量は林外雨量 R のみに支配されると仮定されているために、式(1)の係数 b は定数である。これに対し、本モデルでは可能蒸発散量 e_p の影響を陽的に考慮し、一定とは仮定していない点で大きく異なる。前述のように時間単位という短い時間スケールで見れば、周囲から熱エネルギーの流入はほとんどないが、森林樹冠面の粗度が大きいために飛沫化した雨滴や附着水が樹冠上で浮遊することになるので、熱収支から見て相当に大きな蒸発強度が観測されることになる。しかしながらイベント単位程度の時間スケールから見ると、浮遊した飛沫が周囲からの移流顕熱によって最終的に気化するのので、移流顕熱も含めた熱収支として矛盾は生じないと考えられる。各降雨イベントで日平均気温をパラメータとして林外雨量と降雨遮断量の関係を整理してみた例が図-2の結果である。データにばらつきは見られるものの、気温が高いほど同じ林外雨量に対して降雨遮断量は大きくなる傾向がうかがえる。一般的に降雨遮断過程においては、森林樹冠面の粗度が大きいために放射エネルギーよりも風速や飽差が効くと考えられるが、熱収支が考慮されていない古典的な回帰手法で整理すると値がばらつくことが多いのは、観測誤差の問題はあるにせよ数時間から数日にわたる時間スケールで考えた熱収支の下で遮断蒸発量が決まる点にも一因があると考えられる。したがって、可能蒸発散量を降雨中蒸発量の項に考慮に入れた本モデルによれば、

図-2 気温をパラメータとした降雨量と遮断蒸発量の関係の整理

従来の手法よりも降雨強度あるいは降雨規模の大きなイベントや蒸発量の季節変化において推定精度の向上が期待できる。

III. パラメータの同定と遮断量の計算方法

1. 降雨イベントの定義

通常で観測される数十mm程度の降雨イベントであれば、降雨継続時間は概ね12時間程度と考えても差し支えない。そこで本論文では、個々の独立した降雨イベントを定義するための指針として、ある降雨イベントとそれに続く降雨イベントとの間にある降雨の中休み時間が12時間を超える場合に、両者を独立した降雨イベントとして区別する方法を考える。

図-3に示すように、降雨データで初めて降雨を記録した時刻を第1降雨イベントの開始時刻 J_1 とする。一連の降雨が終了する時刻を J_2 と定義し、続いて再び降雨が記録される時刻を仮に第2降雨イベントの開始時刻 J_3 とし、 $J_3 = J_2 + 1$ と定義する。このとき降雨の中休み時間に相当する J_2 と J_3 の間隔が12時間以上離れている場合について、両者は別の降雨イベントと見なし、改めて J_1 を第1降雨の開始時刻、 J_2 を第2降雨の開始時刻とそれぞれ定義する。 J_2 と J_3 との間隔が12時間以下である場合にはあくまでも一つの降雨イベント内にあると見なし、中休み時間が12時間以上という所定の条件を満足するまで降雨データを検索する。

2. 可能蒸発散量の算定

本モデルでは、可能蒸発散量としてHamon式による推定量を採用する。したがって、日平均気温のみから可能蒸発散量の推定が可能である。降雨イベントが2日以上にまたがる場合には、より降雨時間の長い方の日平均気温を採用した。Penman式を採

図-3 降雨イベントの定義

用した場合(梶田(1996))も別途検討したが、結果的にはHamon式を利用する場合よりも精度の向上は認められなかったため、本論文ではHamon式の場合に限定して議論する。

3. 林内雨発生閾値の設定

降雨量が小さい場合には、全ての林外雨が樹冠に捕捉されて樹冠通過雨および樹幹流は発生しない。このことを考慮するために、林外雨量と樹冠通過雨量および樹幹流量との相関解析を行い、それぞれが発生する限界値を検討したところ、樹冠通過雨の発生限界がおおよそ1.5mmであったことから、林外雨が全て遮断される閾値として1.5mmを採用した。

4. パラメータの同定と降雨遮断量の推定

前出の式(7)において、降雨中蒸発強度に対する樹冠付着水高の影響度を表現する n の値については、0.0, 0.5, 1.0, 1.5および2.0の5通りを想定した。また、平均降雨強度 r は一降雨イベントでの総降雨量を降雨継続時間で単純に除した値を用いた。それぞれの場合について回帰法により最適なパラメータ V および k を算定し、それらを用いて降雨遮断量を算定した。ただし、Hamon式はアメリカ合衆国の気候に合わせて諸係数がチューニングされている点、および降雨時と晴天時の両方を考慮に入れている点で、解析対象流域の気候条件下では必ずしも正しい可能蒸発散量を与えているとはいえない。したがってそうした影響がモデルパラメータ k に含まれていると考えられる。

IV. 実森林流域データへの適用

1. 対象流域の概要

本モデル適用の対象流域は、図-4に示す徳島県白川谷森林試験流域である。流域面積は23ha、標高は約740~1100m、流域平均斜面勾配は21.5°である。地質は三婆川帯に属し、砂質変岩あるいは砂質変岩と泥質変岩の互層からなる。流域土壌のほとんどは森林褐色土である。林相は流域上流部の約2/5が天然落葉広葉樹林(31~36年生)で、流域の中央から下流にかけての約3/5はスギの人工樹林(26~40年生)となっている。

2. 観測データ

雨量データとしては林外雨量、樹冠通過雨量および樹幹流量を図中の●地点にある約36年生のスギ

図-4 白川谷森林試験流域の概要

を対象に、それぞれ1.0mmの転倒マス型雨量計(樹冠通過雨量については2箇所)で10分ごとに観測している。そのほかに樹冠通過雨量については、なるべく面的な情報を入手するために、水平射影面積約7.2m²集水板で集水し、500ccの転倒マス型流量計で併せて観測している。対象とするスギ周辺における実測結果より、平均樹幹半径が2.24mであったことから、樹木の支配面積は半径2.24mの円面積と仮定して以後の整理を行っている。雨量と同時に現地では、気温、相対湿度、純放射量、全天日射量ならびに風速の観測を実施しているが、データが欠測となる期間については、北東約21kmに位置する水資源公団池田ダム総合管理所での観測値を補正して用いた。なお、両地点で同一期間での気温データに関する対応関係を検討したが、高い相関が得られている。

V. 遮断蒸発量の推定結果

1. パラメータ同定結果

本モデルを1991年、1992年および1994年の雨量・気温観測データへ適用して同定したモデルパラメータとその時の決定係数 ρ^2 を表-1に示す。

表-1の結果より、最適な n の値は1.0と考えられる。パラメータ V と k とは経年変化の現れることが懸念されたが、表-1において1991年とその他で若干の違いが認められるものの実用上で大きな支障はきたさないと考えられることから、全期間を通して唯一の値を同定することを試みる。これは、流域のスギが概ね30年生以上を経過した壮齢林であるために生長量は小さく樹冠の状態に大きな変化は発生しなかったと判断したからである。

以上の結果に基づいて、1991~1994年の3年間を

表-1 同定パラメータと決定係数

Year	n	V	k	ρ^2
1991	0.0	2.27	2.59	0.43
1991	0.5	1.22	2.69	0.76
1991	1.0	1.94	1.56	0.87
1991	1.5	3.09	0.58	0.80
1991	2.0	3.76	0.24	0.73
1992	0.0	1.77	5.02	0.54
1992	0.5	2.16	3.48	0.79
1992	1.0	3.46	1.80	0.85
1992	1.5	4.58	0.79	0.79
1992	2.0	5.50	0.31	0.69
1994	0.0	2.75	3.79	0.50
1994	0.5	2.64	3.19	0.78
1994	1.0	3.45	1.82	0.83
1994	1.5	4.17	0.91	0.79
1994	2.0	4.63	0.43	0.73

表-2 同定パラメータと決定係数

n	V	k	ρ^2
0.00	2.63	3.62	0.45
0.50	2.11	3.14	0.76
1.00	3.07	1.73	0.84
1.50	4.13	0.74	0.77
2.00	4.92	0.29	0.67

通してモデルパラメータを同定した結果を表-2に示す。表-2から分かるように、やはり $n=1.0$ の場合に決定係数 ρ^2 が最も大きくなっている。したがって、最終的に本モデルの最適型を次式と決定した。

$$I = V + k \cdot e_p \cdot R \quad (12)$$

式(2)と式(12)の第2項どうしを比較すれば、 $K \cdot e \sim k \cdot e_p \cdot r$ であることを意味しているから、降雨中蒸発強度は平均降雨強度に比例するというを示唆している。この結果は塚本ら(1988)が報告している実験的事実とも符合している。また、これは式(7)において、 $E = \lambda \cdot e_p \cdot S$ と仮定した場合であり、著者らのグループによる降雨遮断タンクモデルにおける降雨中蒸発強度の定式化と一致する。著者らの遮断タンクモデルでは遮断蒸発量はもとより、時々刻々の樹幹流下強度の変化までも表現できており、本モデルの結果からも、蒸発強度は樹冠付着水高に比例するとした仮定の妥当性が裏付けられたと考える。

一方で、経験的な回帰モデル式(1)と比較すると、 $b \cdot R \sim k \cdot e_p \cdot R$ となって、回帰係数 b が $k \cdot e_p$ となることから、気温の影響を考慮した可能蒸発散量に比例する形式で定式化されたと解釈できる。

2. 遮断蒸発量の推定

一降雨イベント単位での遮断蒸発量について、本モデルによる推定値と現地での雨量観測値を基に雨量収支から算定した遮断蒸発量との関係を図-5に示す。若干のばらつきは認められるが、概ね両者の対応は良好である。月遮断蒸発量として整理した結果を1991年、1992年および1994年の3年について図-6、図-7および図-8にそれぞれ示す。一部で過大あるいは過小評価となっている月もあるが、いずれの年のいずれの月についても概ね良好に再現できていることがうかがえる。特に1992年8月のように台風の襲来を受けた月では、他の月と比較して格段に遮断蒸発量が大きいが、本モデルによつて的確

図-5 降雨イベント単位での本モデルによる推定値と実測値の比較

図-6 月遮断蒸発量の推定結果 (1991年)

図-7 月遮断蒸発量の推定結果 (1992年)

図-8 月遮断蒸発量の推定結果 (1994年)

に再現できている。年遮断蒸発量で見ても再現性は良好である。したがって、林外雨量と気温データのみを用いた簡便な手法でありながらも、図-5～図-8程度の再現結果が得られる点は本モデル最大の長特である。

VI. 既往の推定手法との比較検討

1. 既往の遮断蒸発量算定手法

既往の遮断蒸発量算定手法の代表例として、本モデルと類似した手法である鈴木ら(1979)の提案した試算法(試算法Aおよび試算法B)を取り上げ、徳島県白川谷森林試験流域での観測を利用して、本モデルとの比較検討を試みる。試算法Aは、Hortonモデルに基づく手法であり、試算法Bは、林外雨量と樹冠通過雨量および樹幹流下量との線形回帰係数を利用した簡易タンクモデルにより推定する手法である。Hortonモデルで必要となる降雨中に蒸発強度 $K \cdot e$ を白川谷における3年間の降雨データから推定したところ、 $K \cdot e = 0.369 \text{ mm/h}$ であった。彼らが滋賀県桐生試験地で算定した値が $K \cdot e = 0.164 \text{ mm/h}$ であったことから、白川谷の平均蒸発強度は桐生のその2倍強に達するようであるが、年間を通して非常に多雨な四国山間部と比較的小雨な鈴鹿山系とを比較すれば、妥当な値と考えられる。

2. 各モデルによる推定値の比較検討

3つのモデルによる月遮断蒸発量推定値と現地観測値との比較例を1991年、1992年および1994年について図-9、図-10および図-11にそれぞれ示す。例えば図-10において、1992年では、年遮断蒸発量742mmに対して、本モデル、試算法Aおよび試算法Bによる推定値はそれぞれ、734、689、660mmであり、本モデルの推定精度が最も高い。また試算法Aの方が試算法Bよりも精度は高いようである。月別に検討すると、3月、8月、9月では本モデルがほぼ良好に遮断蒸発量を再現しているのに対して、2つの試算法では明らかに3月で過大評価、8、9月で過小評価となっていることが判る。本モデルの推定値が実測値の季節変化もほぼうまく表現できている原因の一つとして、図-2に示した知見を基に降雨中に蒸発量の項にHamonの可能蒸発散量を導入した点が考えられる。

1991年と1994年は完全に1年間の資料が揃っていないために、残念ながら確定的な議論はできない。そこで、このことを踏まえた上で図-9と図-11について検討を加える。年遮断蒸発量としては本モデル

図-9 本モデルおよび鈴木ら(1979)の試算法による推定値と実測値との比較例(1991年)

図-10 本モデルおよび鈴木ら(1979)の試算法による推定値と実測値との比較例(1992年)

図-11 本モデルおよび鈴木ら(1979)の試算法による推定値と実測値との比較例(1994年)

図-12 降雨イベント単位での試算法Aによる推定値と実測値の比較

ルよりも試算法Aによる推定値の方が実測値に近いようである。しかしながら、月別に検討すると試算法Aによる推定値は過大評価あるいは過小評価していることが多いことがうかがえる。したがって年遮断蒸発量について推定値と実測値がうまく合っているのは、過大評価した月と過小評価した月とでそれらの誤差が都合良く相殺されたためと考えられよう。また、試算法AおよびBでは全般的にみて、夏季では過小評価、冬季では過大評価となる傾向が読み取れる。これは2つの試算法において、年間を通して蒸発強度を一定と仮定したためであろうと考えられる。したがって、遮断蒸発量を定量化するためには、本モデルのように少なくとも遮断蒸発過程と密接に関連する気温等の気象因子の影響を考慮すべきであることが示唆される。

図-12に試算法Aで推定した一降雨イベント単位での遮断蒸発量と観測値との比較結果を示す。非常に小さい降雨量のイベントでは両者は比較的一致す

るが、降雨規模が大きくなるにつれて、全般的に試算法Aは過小評価傾向にあることがうかがえる。逆に、雨量観測精度の低い冬季を除いて、降雨量の少ない月ではむしろ本モデルの推定精度が試算法よりも劣る場合も認められるが、実用的に見て、本モデルと試算法との間で極端に大きな差異はないと考えられる。試算法AおよびBが比較的降雨量の少ない月で観測値を再現できるのは、本来小雨地域である桐生試験地で開発された手法であって、そうした小雨地域での適用に向いているためであろう。したがって、台風や梅雨前線によって雨が集中して降ることの多い四国山間部のような地域への適用で試算法には限界があると考えられる。

Ⅶ. まとめと今後の展開

林外雨量、樹冠通過雨量、樹幹流量と日平均気温のみを用いた一降雨遮断蒸発量の簡易推定モデルを構築し、徳島県白川谷森林試験流域での水文気象観測値へ適用してモデル推定値の妥当性および既往の推定手法との比較検討を試みた。以下に得られた結論を要約すると以下のようである。

- 1) Hortonモデルの降雨中蒸発量の項にHamonの可能蒸発散量を考慮した改良を加えることで、林外雨量、樹冠通過雨量、樹幹流量および日平均気温のみから一降雨遮断蒸発量を推定する回帰モデルを構築した。
- 2) 構築したモデルを徳島県白川谷森林試験流域での水文・気象観測データへ適用したところ3年間を通して決定係数が0.8以上となる唯一の最適パラメータが同定された。
- 3) 一降雨イベント単位で本モデルにより雨量収支から算定された遮断蒸発量が良好に再現された。また、月単位および年単位でも再現性は良好であった。
- 4) 既往の簡便な推定法として、鈴木らの提案した手法を取り上げ、本モデルとの比較検討を行った。その結果、小雨地域を対象として開発された既往の推定手法では降雨規模が大きくなると過小評価される傾向であるのに対し、本モデルでは降雨規模に依らず再現性は良好であった。

今回算定された遮断蒸発量は、あくまでも観測対象としたスギについてである。しかしながら比較的良好に似た樹齢の流域であることから、樹木毎で個性があるとしても平均的な樹冠構造はほぼ同一と仮定できる。そこで実質蒸発面積を考慮するために、葉

面積(蒸発面積)に関するパラメータを導入することで、流域での実遮断蒸発量の推定が可能になると考えている。そのためには、別途に蒸散量を評価するモデル(例えば、吉田ら, 1993b)の存在が不可欠となる。2つのモデルからのアウトプットを利用して年間の流域水収支と合致するような葉面積に関するパラメータを見いだせれば、蒸発量と蒸散量の分離も可能である。

大小様々な降雨規模で遮断蒸発量を算定できる点で、例えば東南アジアの熱帯地域のように短時間に豪雨が集中して降るような地域では、本モデルのように降雨強度や気温の影響を考慮に入れる必要があると考えられる。そうした観点で、本モデルにおいて改善された点は非常に重要であり、別途開発した簡便な降雨量推定手法(例えば、Alfiansyahら, 1996)と併せることによって、流域スケールでの遮断蒸発量推定手法へと発展させることが可能である。

日本で森林理水試験が開始されてから概ね1世紀が経過しようとしており、その間に蓄積された水文・気象資料は膨大である。しかしながら、雨量、流量データがほとんどである上に、観測とその蓄積に多大なコストを要求する湿度や放射量などの気象観測データが同期して観測されたものが少ないために、敢えていえば、これらのデータは休眠状態にある。本論文では、著者らの提案したモデルを用いれば、林分における雨量収支と日平均気温データから容易に精度良く遮断蒸発量を推定できることを示した。本モデルで要求されるデータは、雨量収支と比較的に容易に入手しうる日平均気温のみであるから、高級なデータを要求する手法とは異なって、その適用範囲は格段に広い。また本モデルの考え方は普遍的であって、四国山間部のみならず、全国各地で適用が可能なのであるから、本モデルを各地でのデータに対して適用することで、長年にわたって蓄積されてきた森林理水試験の観測データを再利用することが可能である。そうすれば様々な樹種、樹齢での比較検討から、より総合的な知見を導出することができるものと期待している。

謝辞：本研究の遂行にあたって、徳島県森林整備課ならびに(株)徳島県森林土木協会から試験流域の提供を受けました。また当時学部学生の時堀英樹君(現(株)ウェスコ)には計算、図表の作成等でご協力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- Alfiansyah, Y., 吉田 弘・端野道夫(1996)：GMS-IRデータを利用した日降雨量推定式に関する検討, 水工学論文集, 40, pp.291-296.
- Horton, R.H.(1919)：Rainfall Interception, Mon. Wea. Rev., 47, pp.603-623.
- 梶田英樹(1996)：重回帰モデルによる一降雨遮断量の推定, 平成7年度徳島大学工学部建設工学科卒業論文, 43p.
- 鈴木雅一・加藤博之・谷 誠・福嶋義宏(1979)：桐生試験地における樹冠通過雨量, 樹幹流量, 遮断量の研究(Ⅱ), 日林誌, 61(1), pp.391-398.
- 武田京一(1951)：林地雨量について, 気象集誌, 9(6), pp.19-32.
- 塚本良則・太田猛彦・峯村徹哉(1988)：降雨中の遮断蒸発, 水文・水資源学会1988年研究発表会要旨集, pp.40-41.
- 水谷完治, 谷 誠, 渡辺 力, 安部和時(1997)：落葉広葉樹林における遮断量の推定(2), 水文・水資源学会1997年研究発表会要旨集, pp.157-158.
- 吉田 弘・端野道夫・村岡浩爾(1993a)：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推定法の提案, 水文・水資源学会誌, 6(1), pp.19-30.
- 吉田 弘・端野道夫・村岡浩爾(1993b)：ヒートバルス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), pp.350-357.
- 吉田 弘・端野道夫・梶田英樹(1996)：線形重回帰モデルによる一降雨遮断量の簡便推定法, 水文・水資源学会1996年研究発表会要旨集, pp.112-113.
- (受付：1996年7月15日, 受理：1997年12月16日)