

水文データ時間分解能の 遮断シミュレーションへの影響

EFFECT OF TEMPORAL RESOLUTION OF HYDROLOGICAL DATA ON INTERCEPTION SIMULATION

陸 旻皎^{1,2}
Minjiao Lu^{1,2}

¹ 正会員 工博 土木大学長岡技術科学大学教授 (〒 940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

² 正会員 工博 重慶交通大学兼任教授 (〒 400074 中国重慶市南岸区学府大道 66)

¹ Member Dr. Eng. Professor, Nagaoka University of Technology, Niigata, Japan

² Member Dr. Eng. Adjunct Professor, Chongqing Jiaotong University, Chongqing, China

The objective of this study is to investigate the effect of temporal resolution of hydrological data on interception simulation. Hydrological data with different temporal resolution generated from a 28-year hourly hydrological data set is applied to a simple interception model. The effect is very significant and is quantified by a newly developed formula which relates the annual canopy evaporation with annual effective potential evaporation, canopy capacity and temporal resolution. Using this formula, true annual canopy evaporation invariant to temporal resolution can be derived from annual effective potential evaporation and canopy capacity. The concept of operational parameter value and its calculation algorithm are proposed. The operational parameter values corresponding to their true values and the temporal resolutions are used to drive the interception model with the hydrological data with same resolution, and reproduced true annual canopy evaporation very well. This implies the necessity to use operational parameter(s) according to temporal resolution of the data in hydrological simulation.

Key Words: Temporal resolution, interception model, canopy evaporation, operational parameter

1. はじめに

降雨遮断は植物表面に降った雨を再分配する水文素過程の一つである。植物に当たった雨滴が表面張力によって一時的に保持され、最終的に大気への蒸発、地面への滴下、樹幹流となる。量が限定的であることから、洪水予測ではあまり重要視されて来なかったが、Dingmen¹⁾によれば、多くの森林では年降水量の四分の一以上が遮断損失である。半分以上に達する例も報告されている²⁾。水資源管理の観点からだけでなく、気候システムにおける地表面の熱交換の観点から見ても重要である。

降雨遮断のモデル化は古くから行われている。Horton の 1919 年の研究がそのはじまりとされている。1970 年代までは、主に経験式によるモデル化が主流であった。Rutter らは 1971 年に最初概念モデル³⁾を提案し、1975 年に樹幹モデルを追加し、いわゆる Rutter モデルを完成させた⁴⁾。1979 年に Gash が解析型の Gash モデル⁵⁾を発表し、Rutter モデルと並んで最も使われている降雨遮断モデルとなった。その他にも多くのモデルが提案されているが、上記の 2 モデルほど広く使われるまでには至っていない。Muzylo ら⁶⁾が上記のモデルを含む 15 個の降雨遮断モデルをレビューしている。各モデルの詳細は Muzylo ら⁶⁾を参照されたい。

Muzylo ら⁶⁾が指摘しているように、遮断シミュレーションにおいて、モデル検証の不足と比較研究の欠如の他に、最大の弱点が観測データとパラメーターの不確実性、入力データの不確実性を考慮していないことにある。

本研究では、水文データ、すなわち雨量と蒸発能力の時間分解能の遮断シミュレーションへの影響を、Rutter モデルを簡略化した遮断モデルを用いて調査する。その結果、水文データの時間分解能が遮断蒸発量の計算結果に及ぼす影響を定量的に評価し、遮断シミュレーションにおいて考慮できるようにする。

2. 遮断モデルの概要

本研究では、植生域のみを対象とし、Rutter モデル^{3, 4)}を簡略化した遮断モデルを用いる。その支配方程式が

$$\frac{dS_c}{dt} = p - e - p_t \quad (1)$$

$$p_t = \begin{cases} p - e_p & S_c = C_c \\ 0 & S_c < C_c \end{cases} \quad (2)$$

$$e = e_p \frac{S_c}{C_c} \quad (3)$$

である。ここで、 S_c が樹冠貯留量 [mm]、 C_c 樹冠貯留能力 [mm]、 t が時間 [hr]、 p が降雨強度 [mm/hr]、 e_p が蒸発能力 [mm/hr]、 e が樹冠蒸発強度 [mm/hr]、 p_t 樹冠通過降雨強度 [mm/hr] である。これは Rutter モデルの樹幹モデルと同じである。また、Rutter モデルの樹冠モデルの簡略形でもある。Rutter モデルの樹冠からの排水速度 D は

$$D = D_0 C_c \exp(b(S_c - C_c)) \quad (4)$$

で表される。ここで、 D_0 と b は排水速度を制御するパラメーターで正の値を取る。 b が無限大の場合、樹冠貯留量が樹冠貯留能力より小さければ、 $D = 0$ で、全ての入力が貯留される。また、樹冠貯留能力を越えた場合、 $D = \infty$ で全ての入力が瞬時に排水される。これは支配方程式の式 (2) に相当する。

K. J. Beven⁷⁾ が指摘したように上記の支配方程式を差分で解く場合に時間ステップの影響を受ける。本研究では、このような影響を避けるために以下のように積分形を用いる。

$p \leq e_p$ の場合に、積分の結果が

$$\begin{cases} \frac{S_{c,2}}{C_c} &= \frac{p}{e_p} + \left(\frac{S_{c,1}}{C_c} - \frac{p}{e_p}\right) \exp\left(-\frac{e_p \Delta t}{C_c}\right) \\ P_t &= 0 \\ E &= p \Delta t - (S_{c,2} - S_{c,1}) \end{cases} \quad (5)$$

となる。ここで、 Δt は時間ステップ [hr] で、下付き添字 1 と 2 はそれぞれ計算ステップのはじまりと終りを示す。 P_t と E は Δt 内の樹冠通過雨量 [mm] と樹冠蒸発量 [mm] である。

$p > e_p$ の場合には、まず樹冠貯留量が樹冠貯留能力に達するまでの時間 t_s を以下のように計算する。

$$t_s = \frac{C_c}{e_p} \ln\left(\frac{p - \frac{S_{c,1}}{C_c} e_p}{p - e_p}\right) \quad (6)$$

t_s が Δt より大きい場合、式 (5) を用いて計算する事ができる。 $t_s \leq \Delta t$ の場合に

$$\begin{cases} S_{c,2} &= C_c \\ P_t &= (p - e_p)(\Delta t - t_s) \\ E &= p \Delta t - (S_{c,2} - S_{c,1}) - P_t \end{cases} \quad (7)$$

で計算する。

3. 研究手法とデータの準備

本研究では、時間雨量と蒸発能から異なる時間分解能のデータを作成し、前記のモデルに入力し、樹冠蒸発量への時間分解能の影響を調査する。ただし、計算時間ステップの影響との分離を計るために、計算時間ステップを 1 時間に固定する。そのために、それぞれの時間分解能のデータを 図-1 のように各時間に配分す

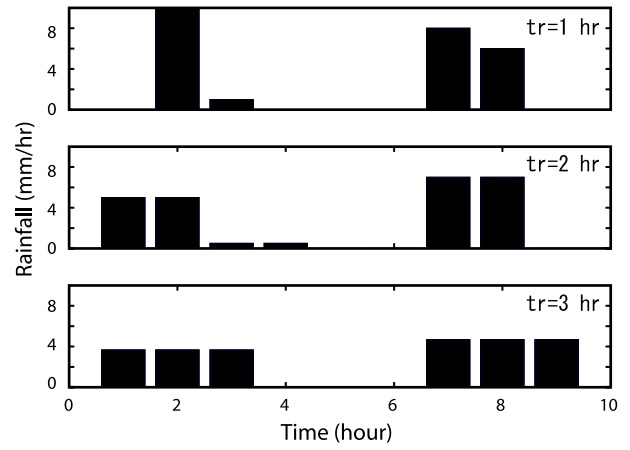


図-1 Rainfall intensity data with different temporal resolution. Top panel: original hourly rainfall data; middle panel: temporal resolution of two hours; bottom panel: temporal resolution of three hours.

る。これは荒いデータを時間ステップの短いモデルに入力する際に良く使う手法で、結果的に時間分解能の時間内の平均化を行ったことになり、降雨期間の伸長、つまり無降雨期間の短縮が起こると同時に、平均降雨強度も低下する。これらにより、樹冠蒸発量が大きく変化することが予想される。

また、異なる植生条件、本研究で言えば樹冠貯留能力では、その影響の度合も変化すると考えられる。本研究では、広い範囲をカバーする 17 種類の樹冠貯留能力 $C_c = 0.01, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 5.0, 7.5, 10.0, 15.0$ のモデルに対し、時間分解能 $tr = 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12, 24, 48, 72, 96, 120$ のデータを作成し、異なる植生条件下の時間分解能の影響を調べる。

本研究では、山本・陸⁸⁾ で使用しているデータを用いる。香川県に位置している土器川流域とその近辺の AMeDAS 地点と国土交通省河川局が管理している土器川流域内雨量観測所のデータで、1978 から 2005 年までの 28 年間の時間値である。観測所のロケーション等は山本・陸⁸⁾ を参照されたい。

降雨に関しては、香川県内の AMeDAS5 地点と河川局観測所 9 地点のデータからティーセン法で求めた被川橋上流域の流域平均雨量を用いる。蒸発能に関しては、4 要素を観測している流域出口付近の AMeDAS 地点多度津のデータを用いて、陸らの方法⁹⁾ で AMeDAS 日照時間から下向き短波放射量 R_{sd} を求め、Priestley-Taylor の式

$$e_p = C \frac{\alpha}{\lambda \Delta + \gamma} R_{sd} \quad (8)$$

を用いて算出する。ここで α が Priestley-Taylor 定数で 1.26 とされることが多い。 $\lambda = 2.257 \text{ MJ/kg}$ が蒸発潜熱、 Δ は温度飽和水蒸気圧曲線の勾配、 γ は乾湿計定数である。 R_{sd} が下向き短波放射 [MJ/hr/m²] であり、本来ならば正味放射と地表面熱フラックスの差を用いるべきであるが、データの入手が困難であるために、下向きの

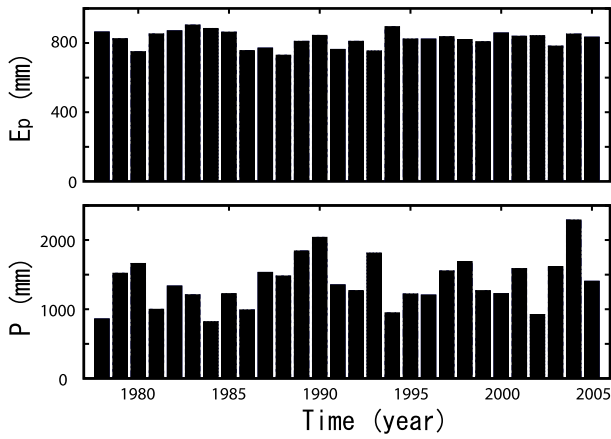


図-2 Annual rainfall and potential evaporation from 1978 to 2005. Upper panel: annual potential evaporation; Lower panel: annual rainfall.

短波放射を用いることになった。 C が補正係数で、山本・陸⁸⁾の長期降雨流出解析で $C = 0.4$ と同定されている。Priestley-Taylor 定数の変動性¹⁰⁾、下向き短波放射の使用、多度津の流域代表性などを考慮し、比較的に小さい値であるが、十分取り得る値である。

図-2 に上記の計算で得られたデータを集計した年蒸発能と年雨量を示す。年蒸発能は毎年 800mm 前後でかなり安定しているが、1978 から 2005 年までの平均年間降水量は約 1300mm で全国的に見て降水量の少ない地域と言える。また、その最大値と最小値は約 2050mm と 800mm で、高い変動性を有している。放射によるエネルギー供給と降雨による水分供給の兼ね合いで年樹冠蒸発量が大きく変化する気候条件とも言える。

4. 時間分解能の樹冠蒸発量への影響

図-3 は前節の雨量と蒸発能データから計算した結果である。全 17 個の樹冠貯留能力に対し、17 枚のグラフがあるが、図中に $C_c = 0.01, 0.4, 1, 3, 10\text{mm}$ の結果のみを示す。各グラフに時間分解能と年樹冠蒸発量との関係を示している。この図から時間分解能が長くなればなるほど、計算年樹冠蒸発量が増加し、緩やかに年蒸発能に近付いていくことが分かる。

また、異なる樹冠貯留能力に対してもその影響が異なる。小さい樹冠貯留能力に対しては、時間分解能が長くなるにつれて急激に蒸発量が増え、次第に緩やかになる。樹冠貯留能力が大きくなるにつれ、短い時間分解能でも蒸発量が大きく、最初から増加が緩やかになっていく。これは、時間分解能が長くなって無降雨期間が短くなっても、貯留能力が大きいために全部蒸発しない内に次の降雨が降り、相対的に影響が小さくなったと考えられる。

グラフ内の一本一本の線は各年の関係を表しており、降雨の年々変動が樹冠蒸発にある程度影響を及ぼしていることが読み取れるが、本研究では、時間分解能の

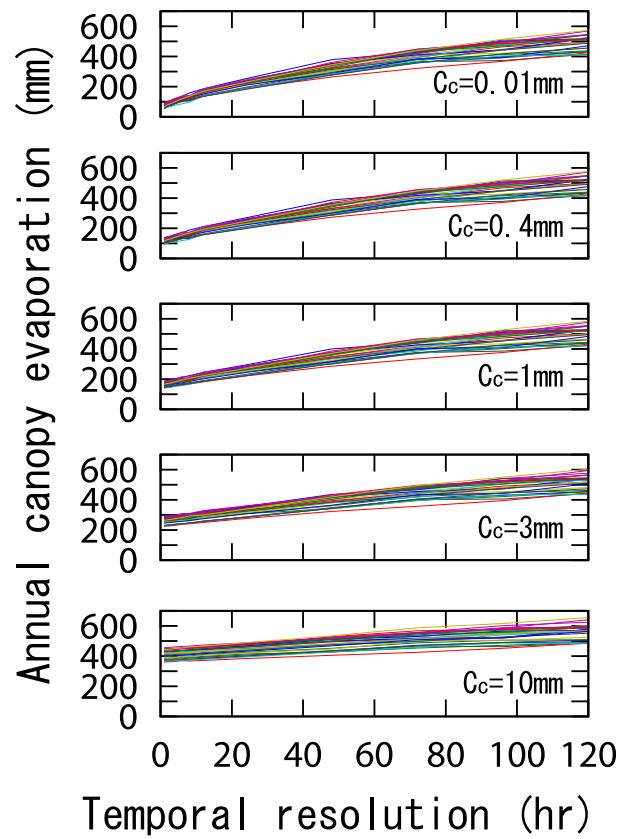


図-3 Calculated annual canopy evaporation.

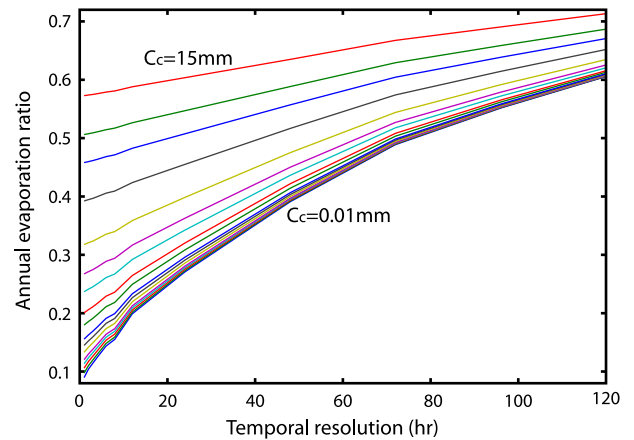


図-4 Mean annual canopy evaporation ratio.

影響を中心に調べるために、その年平均蒸発率、つまり年蒸発量 E_y と実効年蒸発能 $E_{y,max}$ との比 R_y

$$R_y = \frac{E_y}{E_{y,max}} \quad (9)$$

を調べることにした。一部の年では、年降水量が年蒸発能より小さく、年降水量が蒸発の上限となる。本研究では、実効年蒸発能を次式

$$E_{y,max} = \min(E_{p,y}, P_y) \quad (10)$$

で定義する。ここで、 $E_{p,y}$ 、 P_y はそれぞれ年蒸発能と年雨量である。各年の R_y の平均値と、時間分解能と樹冠貯留能力との関係を 図-4 に示す。

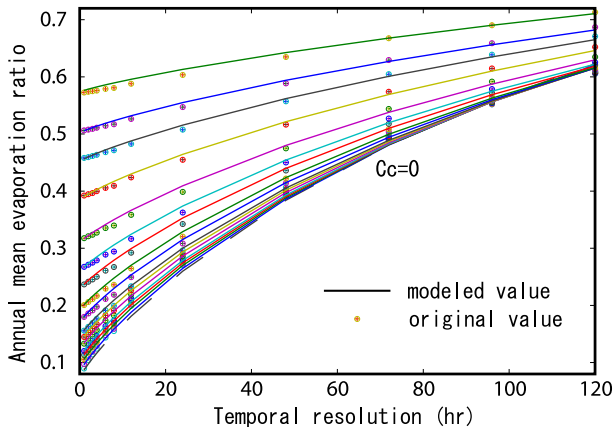


図-5 Mean annual canopy evaporation ratios and their modelled values.

5. 時間分解能の樹冠蒸発量への影響の定式化

図-4 から分かるように、時間分解能が計算年樹冠蒸発量に大きな影響を及ぼしている。遮断モデリングに取り入れるために、その定式化が必要である。本研究では、 R_y が時間分解能と樹冠貯留能力の増大にしたがって 1 に近付くことを考慮し、次式

$$R_y = 1 - \frac{1}{a_1 + a_2 C_c^{a_3}} \exp\left(-\frac{tr^{a_7} - 1}{a_4 + a_5 C_c^{a_6}}\right) \quad (11)$$

で 図-4 の結果を表すことにする。ここで、 $a_1, \dots, a_7$ がパラメーターである。この式が樹冠貯留能力 $C_c = 0$ に適用できないことに留意されたい。その理由として、 $C_c = 0$ 、つまり植生の無い状態では、式 (1) ~ 式 (3) からなる本遮断モデルの支配方程式が成り立たないからである。支配方程式から見れば、 C_c が無限に小さいときに、僅かな雨でも、樹冠貯留能力が満たされ、蒸発能力で樹冠蒸発が起こる。また、降雨の直後に樹冠が乾き、樹冠蒸発が止まる。結果として、降雨期間中に蒸発能力で蒸発することになり、無限に小さくなることはない。さらに、時間分解能が長くなるにつれ、降雨期間が長くなり、樹冠蒸発が大きくなることも容易に読み取れる。ある面積あるいは流域を対象とする場合に、これを解消するために、van Dijk and Bruijnzeel⁽¹¹⁾ のように樹冠カバー率を導入する必要がある。

式のパラメーターの決定において、まず最も分解能の短い 1 時間データの結果を用いて a_1, a_2 と a_3 を求める。そして全データを用いて a_4, a_5, a_6 と a_7 を求める。パラメーターの推定にはいずれも最適手法 SCEM-UA 法⁽¹²⁾を用いた。その結果、 $a_1 = 1.09001$, $a_2 = 0.16176$, $a_3 = 0.76103$, $a_4 = 67.81477$, $a_5 = 14.79503$, $a_6 = 0.67110$ と $a_7 = 0.86057$ を得た。図-5 に 図-4 のデータと上式の結果を示している。各樹冠貯留能力に対して良く適合していることが分かる。式 (11) に $C_c = 0$ のラインも点線で追加している。全ての年平均蒸発効率の平均が

0.367 に対して、平均誤差

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{17} (R_y(i, j) - R_{y,cal}(i, j))}{204}$$

が 0.001 で、平均自乗誤差

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{17} (R_y(i, j) - R_{y,cal}(i, j))^2}{204}}$$

が 0.006 で、モデル式がほぼバイアスなくデータを精度良く再現している。また、水文学で良く用いられている Nash and Sutcliffe⁽¹³⁾ の効率係数

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{17} (R_y(i, j) - R_{y,cal}(i, j))^2}{\sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{17} (R_y(i, j) - \bar{R}_y)^2}$$

でも 99.89% で高い数字を示している。

6. 時間分解能を考慮したモデルパラメーター運用値の導入

式 (11) において $tr = 0$ とすることで、水文データの時間分解能に依存しない年平均蒸発率が得られる。

$$R_{y,0} = 1 - \frac{1}{a_1 + a_2 C_c^{a_3}} \exp\left(\frac{1}{a_4 + a_5 C_c^{a_6}}\right) \quad (12)$$

本研究では、これを樹冠貯留能力 C_c に対応する、この気候条件下での年平均蒸発率の真値と考える。

式 (11) のパラメーターを決定すれば、樹冠貯留能力、年平均降水量と年平均蒸発能力から計算できる。年平均降水量と年平均蒸発能力は一般の水文気象データから容易に入手でき、樹冠貯留能力に関しても NDVI や LAI から推定するさまざまな報告がなされている^(11, 14, 15, 16)。その一例として、Federer らの BROOK90 モデル⁽¹⁶⁾では、樹冠貯留能力を LAI と SAI (Stem Area Index) の線形関数として求めている。樹冠貯留能力が求まれば、この式を用いて広域樹冠蒸発を推定できる。

一方、図-4 と式 (11) から分かるように、遮断モデルを運用する場合に、 $tr = 0$ はあり得ないので、LAI などから得られる樹冠貯留能力をそのまま使うと、樹冠蒸発が過大評価されてしまう。本研究では年樹冠蒸発が同じなるように樹冠貯留能力の真値 $C_{c,t}$ に対して、水文データ時間分解能 tr の対応する運用値 $C_{c,o}$ を次式

$$\frac{\exp\left(-\frac{tr^{a_7} - 1}{a_4 + a_5 C_{c,o}^{a_6}}\right)}{a_1 + a_2 C_{c,o}^{a_3}} = \frac{\exp\left(\frac{1}{a_4 + a_5 C_{c,t}^{a_6}}\right)}{a_1 + a_2 C_{c,t}^{a_3}} \quad (13)$$

から求め、モデルを運用することとした。本研究では、フリーソフト Octave の fzero 関数を用いてこの非線形方程式を解く。fzero の実装には Brent のアルゴリズムが使われている。

ただし、図-5 の $C_c = 0$ の点線の下では、つまり

$$\frac{1}{a_1} \exp\left(-\frac{tr^{a_7} - 1}{a_4}\right) > \frac{\exp\left(\frac{1}{a_4 + a_5 C_{c,t}^{a_6}}\right)}{a_1 + a_2 C_{c,t}^{a_3}} \quad (14)$$

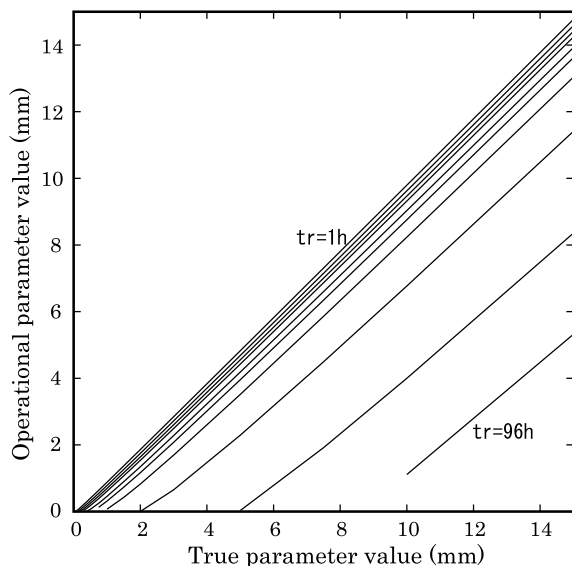


図-6 True and operational values of canopy capacity.

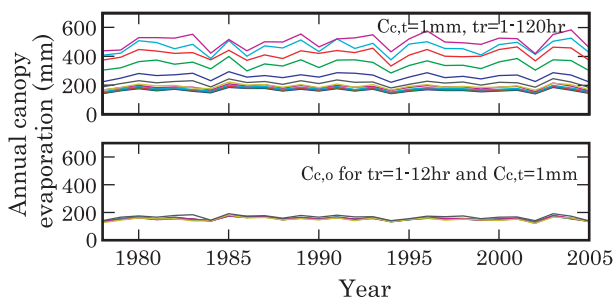


図-7 Annual canopy evaporation derived from the interception model by using true canopy capacity of 1mm(top panel), and by using the operational parameter values(bottom panel).

の場合では、どんなに運用値が小さくしても、同じ年樹冠蒸発を算出できないことを意味する。これは小さい樹冠貯留能力の場合に多く発生する。

図-6 に本研究で用いた全ての樹冠貯留能力を真値とした場合の運用値を示している。時間分解能が長くなるにつれ、影響が大きくなり、運用値が小さくなっている。また、一部で運用値が求まっていないケースも見られる。本研究では、 $C_{c,t} = 0.01$ に対して、 $tr = 1$ でも運用値が求まらなかった。このような小さい樹冠貯留能力が何を意味しているかについて前述のように方程式系の問題も含め、考える必要がある。また、 $tr = 120h$ では、 $C_{c,t} = 15mm$ でも平均化の影響が大きく運用値が求まらず、本研究で用いた全ての樹冠貯留能力に対して、年樹冠蒸発量を再現できないことが示された。

図-7 の上の図は、全ての時間分解能に対して、Rutter ら³⁾ のオウショウクロマツに近い樹冠貯留能力 1mm を直接使って計算された年樹冠蒸発量の年々変動を示している。同じ樹冠貯留能力に対して、時間分解能が長くなる影響で、年樹冠蒸発量が大きく変化する。図-7 の下の図は、それぞれの時間分解能に応じて算出したパラメーター運用値の結果である。時間分解能の違いに関係

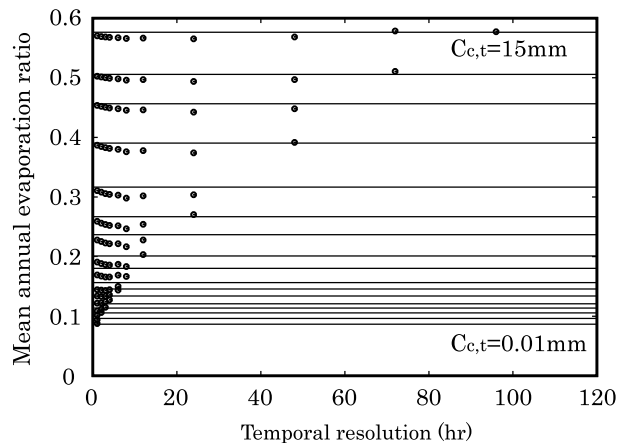


図-8 Annual canopy evaporation ratio calculated from Eq. (11)(lines) and its calculated values derived by the interception model using the operational parameter values(dots).

なく、全ての年においてほぼ同じ年蒸発量が得られている。 $R_{y,0}(C_c = 1mm) \times E_{y,max} = 157mm$ に対し、 $tr = 1hr$ の場合に、真値と運用値の平均年樹冠蒸発量がそれぞれ 164mm と 156mm である。また、 $tr = 12hr$ では、それぞれ 216mm と 166mm である。運用値では、式 (11) の推定値近辺で 10mm 程度しか変わっていないのに真値を使った場合に 52mm も増加した。さらに $tr = 12hr$ では、運用値が既に 0.07mm になり、それ以上長い時間分解能では、式 (11) の推定値に近い蒸発量を算出することができなくなっていた。運用値が得られない $tr = 120hr$ の計算平均年蒸発量は 504mm であった。ここに、日データに相当する $tr = 24hr$ でも算出できないことに特に注意が必要である。

図-8 に上記の運用値から得られた年平均蒸発率を示している。黒い点がそれぞれの時間分解能に対応するパラメーター運用値でモデル計算から得られた 28 年の年蒸発率の平均値で、横線がパラメーターの真値から式 (11) を用いて計算した年蒸発率である。各運用値から求めた値が時間分解能に関係なく、式 (11) から得られた値の周辺に分布している。もちろん、運用値が求まらなかったケースでは、遮断モデルの計算値がない。黒い点と横線との間の乖離は式 (11) の精度の問題と、28 年間の降水量そして降水パターンの年々変動による可能性がある。

以上のことから運用値を導入することによって、年蒸発率を正しく算出することができることが明らかになった。

7. 結論

本研究では、水文データの時間分解能が遮断シミュレーションに及ぼす影響を、Rutter モデルを簡略化した遮断モデルを使って定量的に調べた。データの時間分解能が計算樹冠蒸発量に非常に大きな影響を及ぼす

ことが明らかになった。時間分解能が長くなればなるほど、降雨強度の平滑化と無降雨期間の短縮が起こり、計算樹冠蒸発量が増加する。また、小さい樹冠貯留能力ほどその影響が顕著である。この結果は幅広い17種類の樹冠貯留能力に対し、香川県にある土器川被川橋上流域の流域平均雨量と蒸発能の1978年から2005年までの28年間の時間データを用いて、時間データから最大120時間まで12種類の時間分解能のデータを作成し、時間単位の遮断モデルに適用したものであり、さらに他の気象条件で検証する予定である。

この影響を定量的に表すために、本研究では、年樹冠蒸発率、つまり年樹冠蒸発量と実効蒸発能との比を、樹冠貯留能力と時間分解能との関数として定式化し、式のパラメーターをSCEM法で精度良く決定した。この式から時間分解能が0となる年樹冠蒸発率の真値の計算式が得られ、樹冠貯留能力のみから計算できる。その結果、年樹冠蒸発量を樹冠貯留能力と実効蒸発能から容易に計算できる。今後この式の汎用性を検証して行く予定である。

さらに、遮断モデルの運用にあたり、パラメーターの真値とデータ時間分解能から、パラメーターの運用値を算出して用いる方法が提案され、樹冠貯留能力の真値から各時間分解能に対応する樹冠貯留能力の運用値を求める方法が示された。降雨強度の平滑化と無降雨期間の短縮による計算樹冠蒸発量の増加を抑えるために、時間分解能が長くなるにつれ、樹冠貯留能力の運用値がその真値からはなれ、小さくなって行く。あまりにも長くなった場合に運用値が求まらなくなる。これはどんなにパラメーターを調整しても物理現象を再現できなくなることを意味する。Rutterら³⁾のオウショウクロマツに近い樹冠貯留能力1mmでも日データに相当する $tr = 24hr$ で運用値が算出できなくなっている。実際のモデル運用時に注意を払う必要がある。

上記で求めた運用値を、その時間分解能の水文データとセットで遮断モデルを運用した場合に、樹冠貯留能力から算出される年樹冠蒸発率そして年樹冠蒸発量の真値を時間分解能に関係無く再現でき、パラメーター運用値の有効性が示された。水文モデリングにおいて、パラメーターの真値から、水文データの時間分解能に対応するパラメーター運用値を用いる必要性が示された。

参考文献

- 1) Dingmen, S.: Physical hydrology, Prentice Hall, 2002.
- 2) Calder, I.: Evaporation in uplands, John Wiley & Sons inc., 1990.

- 3) Rutter, A., Kershaw, K., Robins, P. and Morton, A.: A predictive model of rainfall interception in forest. I. derivation of the model from observation in a plantation of Corsican pine, *Agriculture Meteorology*, Vol. **9**, pp. 367–384, 1971.
- 4) Rutter, A., Morton, A. and Robins, P.: A predictive model of rainfall interception in forest. II. generalization of the model and comparison with observations in some coniferous and hardwood stands, *Journal of Applied Ecology*, Vol. **12**, pp. 367–380, 1975.
- 5) Gash, J. H. C.: An analytical model of rainfall interception by forests, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, Vol. **105**, pp. 43–55, 1979.
- 6) Muzylo, A., Llorens, P., Valente, F., Keizer, J. J., Domingo, F. and Gash, J. H. C.: A review of rainfall interception modelling, *Journal of Hydrology*, Vol. **370**, pp. 191–206, 2009.
- 7) Beven, K. J.: Rainfall-runoff modelling, John Wiley & Sons inc., 2003.
- 8) 山本隆広・陸旻皎: 分布型モデルによる長期流出計算とその河川計画への応用可能性、水文・水資源学会誌、Vol. **22**(3), pp. 198–208, 2009.
- 9) 陸 旻皎・小池俊雄・早川典生: アメダスデータと数値地理情報を用いた分布型融雪解析システムの開発、土木学会水工学論文集、Vol. **42**, pp. 121–126, 1998.
- 10) Engstrom, R. N., Hope, A. S., Stow, D. A., Vourlitis, G. L. and Oechel, W. C.: Priestley-Taylor alpha coefficient: variability and relationship to NDVI in arctic tundra landscape, *the Journal of the American Water Resources Association*, Paper No. 01172, 2003.
- 11) van Dijk, A. and Bruijnzeel, L. A.: Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model. Part 1. Model description, *Journal of Hydrology*, Vol. **247**, pp. 230–238, 2001.
- 12) Duan, Q.: Calibration of watershed models, *American Geophysical Union*, 2002.
- 13) Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V.: River flow forecasting through conceptual models –Part I– a discussion of principles, *Journal of Hydrology*, Vol. **10**, pp. 282–290, 1970.
- 14) Deguchi, A., Hattori, S., Daikoku, K. and Park, H.: Measurement of evaporation from the forest floor in a deciduous forest throughout the year using microlysimeter and closed-chamber systems, *Hydrological Processes*, Vol. **22**, pp. 3712–3723, 2008.
- 15) Amatya, D. M., Skaggsa, R. W. and Gregory, J. D.: Effects of controlled drainage on the hydrology of drained pine plantations in the North Carolina coastal plain, *Journal of Hydrology*, Vol. **181**, pp. 211–232, 1996.
- 16) Federer, C. A.: BROOK90: A simulation model for evaporation, soil water, and streamflow, Version 3.1. *Computer freeware and documentation*, Durham, NH: U.S. Forest Service, 1995.

(2009.9.30 受付)