

## 数値モデルによる土壌水分と飽差が蒸散抑制に及ぼす影響の解析

### An analysis of Transpiration Decline Caused by Soil Moisture and Vapor Pressure Deficit Using Mathematical Model

吉田弘<sup>\*</sup>・端野道夫<sup>\*\*</sup>・越智一直<sup>\*\*\*</sup>

By Hiromu YOSHIDA, Michio HASHINO and Kazunao OCHI

Evapotranspiration is one of the most important components of hydrological cycle in forested basins for water resources planning and management. Because transpiration is closely related to soil moisture, it plays an important role especially in the time of drought. This study focuses on transpiration decline caused by the limitation of extractable soil water and the increase of vapor pressure deficit. A mathematical transpiration model developed by authors was applied to the observation obtained in a small forested basin and a critical soil moisture at which transpiration began to decline was identified. The proposed model could describe the transpiration decline in the basin during drought periods.

Keywords : transpiration decline, forested basin, heat pulse velocity, soil moisture vapor pressure deficit

#### 1. はじめに

蒸散過程は気象および土壌環境と密接に関連する水文素過程であり、特に水資源問題と直結する土壌水分動態を支配している点に特徴がある。したがって水資源開発・管理計画の策定上、水源域における蒸散量の的確な推定手法の確立が求められている。蒸散量の評価手法としてはPenman-Monteith式が現在盛んに用いられている。この式には様々な気象因子、植生因子および土壌因子の影響を受ける群落抵抗という重要なパラメータが含まれているが、現在のところ様々な因子と群落抵抗との関係は定式化できていない。また実森林で土壌水分状態と蒸散量の関係についての観測・解析を行った研究事例そのものも現状では少ない<sup>1) 2)</sup>。著者らのグループではこうした状況に鑑み、森林流域における水循環モデルを構築する過程で、そのサブモデルとして樹液流速の指標であるヒートパルス速度を利用した簡便な蒸散量推定手法<sup>3)</sup>の開発に数年来取り組んできた。特にPenmanの可能蒸発散量を基準量としてこれに乗すべき蒸散係数を決定することを研究の主眼としてきたが、蒸散係数と群落抵抗とは相互に換算可能であるから、これは群落抵抗推定手法の開発と言い換えることもできる。本論文では、晴天が続いた平成6年および平成7年夏季での現地観測データへモデルを適用し、土壌水分量の減少にともなう根系での吸水制限（ひいては水分ストレスの増加にともなう気孔の閉鎖）、および飽差の増大にともなう気孔の閉鎖（例えば服部ら<sup>4)</sup>、Tan et al.<sup>5)</sup>）が原因となって発生する蒸散抑制量について、著者らのモデルを用いて両因子が蒸散過程へ及ぼす影響について分離した評価を試みた。

|     |      |    |         |             |                    |
|-----|------|----|---------|-------------|--------------------|
| *   | 正会員  | 工博 | 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) |
| **  | フェロー | 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)              |

## 2. 対象流域と観測の概要

本モデルを適用した流域は図-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26～40年生)、上流2/5が天然広葉樹林となっている。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。

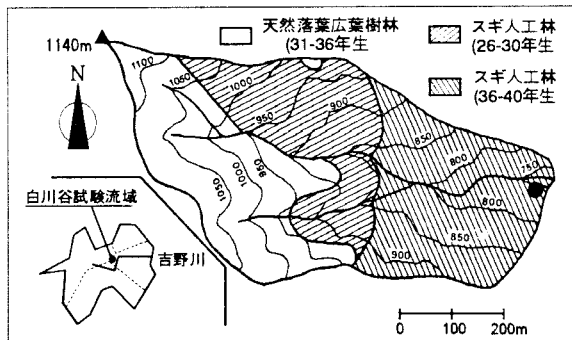


図-1 試験流域の概要

## 3. モデルの概要

著者らのヒートパルス蒸散モデルは図-2に示すように土壌水分の吸水過程を表現する吸水サブモデルと吸い上げられた水が樹幹内を上昇し気孔から放出される過程を表現する蒸散サブモデルとからなる。

### 3.1 蒸散サブモデル

蒸散サブモデルでは、基本的に樹木を一つのタンクと見なしており、このタンクに関し蒸散量と吸水量のバランスを表現する水収支式(連続式)と樹木内の水分動態を規定する水分状態式(運動方程式に相当する)を定式化することで、最終的に次式のような基礎式を得ている。(誘導過程の詳細は参考文献3)を参照のこと)

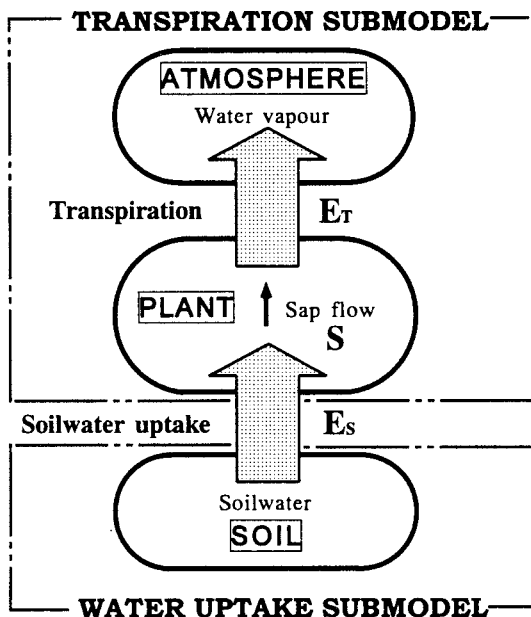


図-2 ヒートパルス蒸散モデルの構成図

$$\text{水収支式} : \frac{d S_{TR}}{d t} = E_T - E_s \quad (1)$$

$$\text{水分状態式} : \gamma \frac{d^2 S_{TR}}{d t^2} + \beta \frac{d S_{TR}}{d t} + S_{TR} = \alpha E_s \quad (2)$$

ここに、 $S_{TR}$ :水分ストレス量(明け方の樹木水分量からの欠損量)、 $E_T$ :蒸散強度、 $E_s$ :吸水強度である。(2)式で第2項を $S_{TR}$ の変化量に比例する抵抗項、第3項を復元項と見なし、右辺の吸水項((1)式を代入すれば蒸散項と交換できる)を強制外力項と見なせば、 $S_{TR}$ に関する強制振動方程式と考えることができる。これまでの模型実験および現地観測データ解析の結果からは $\beta^2 - 4\gamma < 0$ となる場合のみが得られていることから、(2)式は減衰振動の場合に相当する。すなわち基本的に日周期を有する根系からの吸水過程ないしは樹冠での蒸散過程が樹木内での水分変動に及ぼす影響が、強制外力と樹体の有する水だめ効果のような緩衝効果の相互作用を考慮した減衰振動過程の形式で表現されていると解釈できる。換言すれば(2)式で表される水分変動過程を介して、蒸散過程と吸水過程は(1)式のような形式で結びつけられていると考えることもできる。前述のようにヒートパルス速度が胸高付近で観測されていることから、樹冠での蒸散強度よ

りも、むしろ根系での吸水強度と密接に関連すると考え、模型実験結果に基づいて次式のようにヒートパルス速度  $V_h$  と吸水強度  $E_s$  との関係が定式化されている。

$$V_h = K E_s^p \quad (3)$$

成木の蒸散量の実測は困難であることから次式のような蒸散係数  $\phi$  を導入し、Penmanの可能蒸発散量  $E_p$  との積  $\phi E_p$  として蒸散強度  $E_T$  を表現する。蒸散係数は気孔の開閉度を通して蒸散効率を表現したパラメータで、樹木水分の欠損量  $S_{TR}$  や飽差  $\Delta e$  の増大にともなって気孔が閉塞すると考えて、これらの量の指数減少関数として定式化してある<sup>6)</sup>。

$$\phi(S_{TR}, \Delta e) = \phi_m \exp(-\zeta S_{TR} - \eta \Delta e) \quad (\Delta e \geq \Delta e_{cr}) \quad (4)$$

本モデルの未知数は蒸散強度  $E_T$  であるが、Penmanの可能蒸発散量  $E_p$  は気象量から算定できることから、最終的には蒸散係数  $\phi$  を求める問題に帰着する。したがってモデルの未知パラメータを同定し、蒸散係数を決定して蒸散強度を推定するのが本モデルの目的である。

### 3.2 吸水サブモデル

吸水サブモデルは土壌水分量と根系による吸水量との関係を記述し、土壌水分量が吸水過程（ひいては蒸散過程）に及ぼす影響を表現するモデルである。根系での吸水過程は基本的に土壌と根系内との間における水ポテンシャル勾配によって規定されることから、吸水強度  $E_s$  は土壌内のサクション（土壌水分ポテンシャル  $\Psi$ ）の関数として表現する。降雨量が少なく吸水抑制が顕著に現れたと考えられた1995年8月を対象に胸高直径40cm、平均樹冠半径2.24mとしてヒートパルス速度  $V_h$  を樹冠面積当たりの吸水強度  $V_h^*$  に換算した後に日平均値を取り、これをPenmanの可能蒸発散強度  $E_p$  で規準化した値と

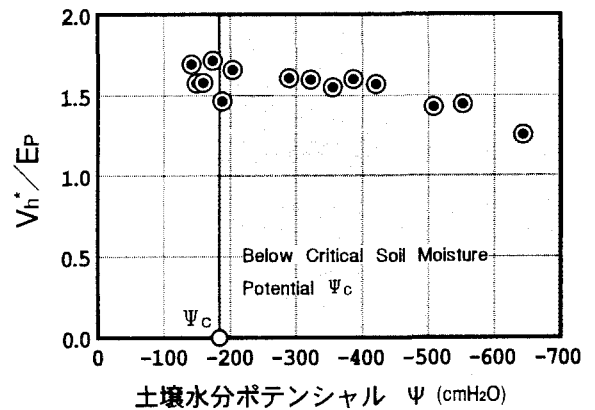


図-3 ヒートパルス速度から換算した吸水強度と土壌水分ポテンシャルの(30cm)関係

深度30cmで観測された土壌水分ポテンシャル  $\Psi$  との関係を描いたのが図-3である。水頭にして-200~-300cmの付近を境に  $\Psi$  が減少すると規準化された吸水強度はほぼ線形的に減少する傾向を示している。吸水強度の関数型としてTajchman et al. は指数減少型を、Blackは線形減少型をそれぞれ報告しているが、本論文では図-3の結果と簡便性の観点からFeddes et al.<sup>7)</sup> のモデリングを参考に図-4のような線形減少型を採用した。

$$\frac{E_s(\Psi)}{E_s^*} = \begin{cases} 1 & (\Psi > \Psi_c) \\ \frac{\Psi - \Psi_L}{\Psi_c - \Psi_L} & (\Psi_c \geq \Psi > \Psi_L) \\ 0 & (\Psi_L \geq \Psi) \end{cases} \quad (5)$$

ここで  $E_s^*$  は気象条件のみで規定される吸水強度を表しており蒸散サブモデルより計算される。したがって  $\Psi$  が  $\Psi_c$  を超え

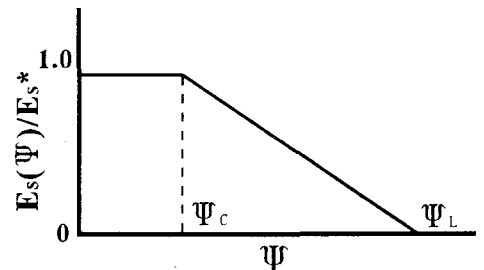


図-4 吸水サブモデルの模式図

て減少しない限り吸水強度は気象量のみで決定される。なお本モデルの未知パラメータは、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $K$ 、 $p$ 、 $\phi_m$ 、 $\zeta$ 、 $\eta$ 、 $\Delta e_{cr}$ 、 $\Psi_c$ 、 $\Psi_L$ 、 $E_{sMAX}$  の12個である。蒸散係数と関連する  $\phi_m$ 、 $\zeta$ 、 $\eta$ 、 $\Delta e_{cr}$  には月変化が認められるが、その他のパラメータについては数年オーダーで変化は見られないという知見を得ている。本モデルでは未知パラメータを同定し、最終的に蒸散係数  $\phi$  を決定するために、パラメータ同定のための検証データとしてヒートパルス速度を採用している。(1)式により  $E_T$  と  $E_s$  とには互換性があるので、

Penmanの可能蒸発散量 $E_p$ をモデルの入力値としてヒートパルス速度を計算し、現地で観測されたヒートパルス速度との間で算定される推定誤差2乗和が最小となるものをシンプレックス法により同定した。

表-1 同定パラメータ

| $\alpha$ | $\beta$ | $\gamma$ | K     | p     | $\Psi_c$ | $\Psi_L$ | $\phi_m$ | $\zeta$ | $\eta$ | $\Delta e_{CR}$ | $E_{SMAX}$ |
|----------|---------|----------|-------|-------|----------|----------|----------|---------|--------|-----------------|------------|
| 0.392    | 0.339   | 1.612    | 110.2 | 0.624 | -183     | -1348    | 0.826    | 23.97   | 0.009  | 11.51           | 0.023      |

4. モデルの適用と検証

4.1 モデルパラメータの同定結果

本モデルを1994年と1995年の6月～10月のデータへ適用して同定されたモデルパラメータを表-1に示す。 $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , K, p,  $\Psi_c$ ,  $\Psi_L$ ,  $E_{MAX}$ は通年の値を、月変化を示す残りのものは8月に関する値を記載してある。蒸散サブモデルの基本構造に関わる $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , K, pは、これまで他の年度のデータに対して同定されたもの<sup>1)</sup>とほぼ同じである。(2)式の判別式 $\beta^2-4\gamma$ は負であるから、従来と同じく減衰振動解が得られている。また吸水サブモデルに関わるパラメータについては、土壌水分の減少にともなう抑制が作用し始める際の臨界土壌水分ポテンシャル $\Psi_c$ が約-183cmとなっている。服部らはヒノキ林分の場合について飽差の影響を分離することで-280cmという値を報告している。また Feddes et al. は約-400cmとしている。解析に供したデータ数が必ずしも十分には多くないこととデータのばらつきを考慮すれば、概ね木本植物について報告されてきた値と類似していると考えられる。ちなみに完全に吸水が停止する「しおれ点」に相当する水頭値 $\Psi_L$ は-1348cmである。これは、たとえば Tajchman et al. が報告した若齢のマツ(*Pinus sylvestris*)林分の値である約-15800cmよりも1オーダー大きい値である。一般にスギは他と比較して水分を多量に要求する樹木であることから土壌水分の減少がより早く影響し始めると考えても、なおこの差は大きいといえる。 $\Psi_L$ はあくまでも蒸散係数が線形的に減少した場合を仮定していることと結果的には観測データを外挿して求められていることから、この値は絶対的なものではなく、一つの目安と考えた方がよいであろう。飽差 $\Delta e$ の増大が及ぼす影響については Morikawa et al.<sup>8)</sup>や服部らによれば、飽差が日平均値で約10hPaを超えると気孔開度に影響を与えることが報告されている。今回のスギ林分の場合は、臨界値が11.5hPaと同定されていることから、飽差の影響についてはヒノキ林分の場合とほぼ同様な結果が得られているようである。

4.2 ヒートパルス速度の再現結果

1994年および1995年の8月についてヒートパルス速度の再現結果を図-5と図-6にそれぞれ示す。1994年は全般的に渇水年であったが7月末と8月中旬に数10mm程度の降雨があったため、必ずしも土壌水分は臨界値を超えて減少していなかった。その一方で1995年8月は降雨がほとんどなくて土壌水分の減少が著しかった。このように同じ月について土壌水分の減少が見られる場合と見られない場合のいずれについても、本モデルによってヒートパルス速度は良好に再現できているようである。時間単位でのヒートパルス速度の経時変化も再現できていることからほぼ妥当に蒸散強度の経時変化も推定できていると判断される。

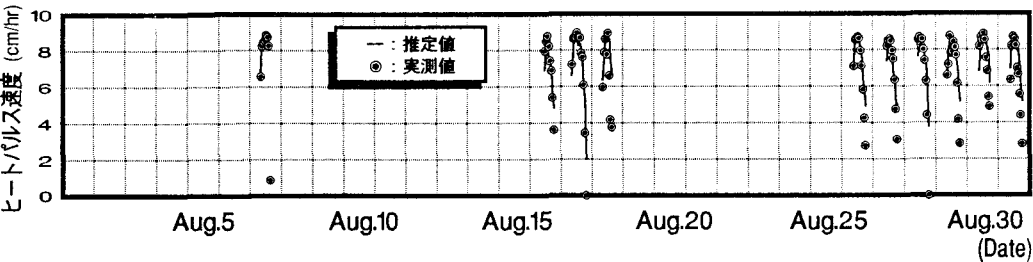


図-5 ヒートパルス速度の再現結果（1994年8月）

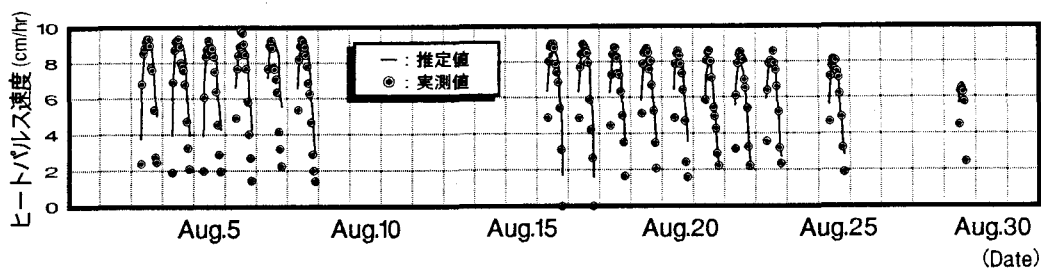


図-6 ヒートパルス速度の再現結果（1995年8月）

## 5. 蒸散抑制作用の評価

### 5.1 土壌水分ポテンシャルの減少にともなう蒸散係数の低下

土壌水分の減少にともなう蒸散強度の減少を評価するために、日平均値について飽差の影響を除去した蒸散係数 $\phi$ と土壌水分ポテンシャル $\Psi$ との関係を描いたものが図-7である。図より概ね $\Psi_c$ の付近を境にして、 $\Psi$ が減少すると $\phi$ もほぼ線形的に減少していることが分かる。したがって本流域のスギ林分は本解析期間で観測された範囲の土壌水分状態においてはBlackのような線形減少型で表現できると判断できる。

### 5.2 蒸散抑制率

土壌水分量の制約を受けない場合の日蒸散量（蒸散サブモデルで算定される）に対する土壌水分および飽差のそれぞれの影響による蒸散抑制量の比率を蒸散抑制率と定義する。図-8は1995年の8月について、土壌水分の減少にともなう蒸散抑制率と土壌水分ポテンシャルの関係について、日平均値の経日変化を描いたものである。8月6日までは土壌水分ポテンシャル $\Psi$ が抑制の作用し始める臨界値である $\Psi_c$ の値よりも大きいため、土壌水分の減少にともなう蒸散抑制作用は現れていない。しかしながら8月7日以降は土壌水分ポテンシャル $\Psi$ が単調に減少しているため、日を追うごとに蒸散抑制率も増大していることがわかる。特に、8月の末においては $\Psi$ が $-650\text{cm(pF)}$ では約2.8に相当する）まで低下しているため蒸散抑制率が0.35程度にまで達している。これ以上に土壌水分ポテンシャルが低下した記録がないために、更なる低下に対しては予想がつかないが、現状ほどの割合ではなくとも蒸散抑制が作用する可能性は十分にある。

図-9には飽差とこれの増加による蒸散抑制率の経日変化が描かれている。ただし、飽差は時間変化が大きいことから1時間ごとのデータで示してある

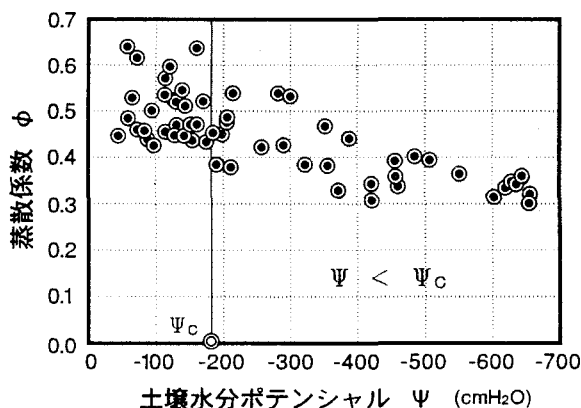


図-7 蒸散係数と土壌水分ポテンシャルの関係（1995年8月）

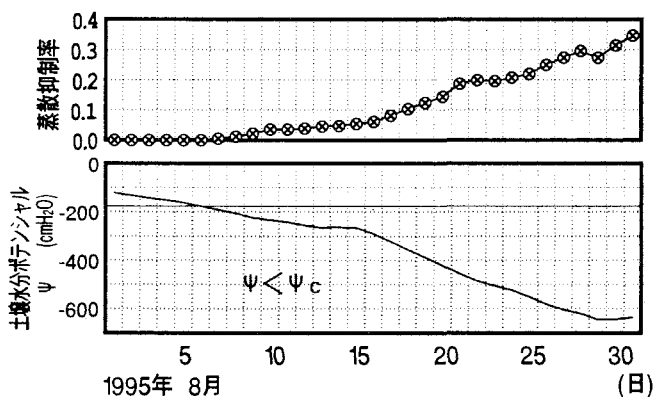


図-8 土壌水分ポテンシャルと蒸散抑制率の経日変化

(4)式での飽差の増大にともなう気孔閉鎖を通した蒸散抑制作用は飽差 $\Delta e$ が抑制作用の臨界値である $\Delta e_{CR}=11.5\text{hPa}$ を超える時間帯が長いほど顕著に現れている。しかしながら、飽差による蒸散抑制率は絶対値で比較すると土壌水分の減少に起因する場合の値よりも小さく、1995年8月の場合では高々0.15程度である。したがって通常時は飽差の増大による影響が無視できないが渇水時に主として効いてくるのは土壌水分の減少にともなう蒸散抑制作用であると考えられる。

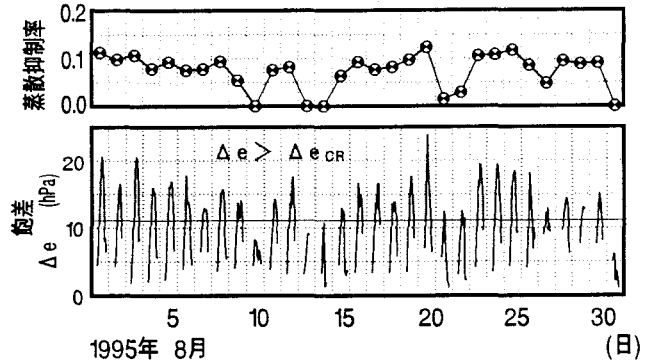


図-9 飽差と蒸散抑制率の経時変化

## 6. おわりに

著者らの開発したヒートパルス蒸散モデルを1994年および1995年の現地観測データに適用し、土壌水分の減少と飽差の増大にともなう蒸散抑制作用の分離評価を試みた。その結果として土壌水分ポテンシャルが約-180cm程度を臨界値として、それ以上に土壌水分ポテンシャルが低下すると気象条件のみの制約を受ける場合よりも蒸散係数は低下すること、さらに約-650cm程度まで土壌水分ポテンシャルが低下すると、蒸散は抑制を受けない場合と比較して約35パーセント程度抑制を受けることを明らかにした。また、飽差の増大による気孔閉塞に起因する蒸散抑制率は夏季の日中に飽差がピークとなる時刻で抑制を受けない場合と比較しておよそ15パーセント程度達することを示した。したがっていわゆる渇水時には、その時々々の土壌水分状態に応じて受動的ながらも蒸散量をコントロールしており、樹木は必ずしもやたらと土壌水分を消費しているわけではないことがうかがえる。夏季であると1ヶ月の蒸散量は50mm程度に達することから、30パーセントの蒸散抑制は流域として水資源を15mm節約した結果となっている。現実の問題として異常小雨期間での渇水対策においては、10mm程度であっても流域の規模によっては貴重な水資源となる。こうした場合には、なるべく蒸散を抑制してくれる樹種が望ましいのはいうまでもないから、針葉樹だけではなく広葉樹まで含めて、今後はこうした知見の蓄積が重要となる。

なお本研究の一部は、文部省科学研究費総合研究(A)(大阪大学、村岡浩爾教授代表)の補助を受けました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1)Tajchman, Hadrch and Lee : Energy Budget Evaluation of the Transpiration - pF Relationship in a Young Pine Forest, Water Resources Research, 15(1), pp.159-163, 1979.
- 2)Black : Evapotranspiration from Douglas Fir Stands Exposed to Soil Water Deficit, Water Resources Research, 15(1), pp.164-170, 1979.
- 3)吉田, 端野, 村岡 : 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), pp.350-357, 1993.
- 4)服部, 玉井, 阿部 : ヒノキ林における土壌水分と飽差が蒸発散に及ぼす影響, 日本林学会誌, 75(3), pp.216-224, 1993.
- 5)Tan and Black : Factors affecting the canopy resistance of a Douglas Fir Forest, Boundary-Layer Meteorology, 10, 1976.
- 6)吉田, 端野, 越智 : ヒートパルス蒸散モデルによる蒸散抑制作用の解析, 水文・水資源学会1995年研究発表会要旨集, pp.36-37, 1995.
- 7)Feddes, Kowalik, Malinka and Zaradny : Simulation of Field Water Uptake by Plants Using a Soil Water Dependant Root Extraction, Journal of Hydrology, 31, pp.13-26, 1976.
- 8)Morikawa, Hattori and Kiyono : Transpiration of a 31-year-old Chamaecyparis Obtusa Endl. stand before and after thinning, Tree Physiology, 2, pp.105-114, 1986.