

# 森林蒸発散におよぼす土壌水分の影響

## Effects of Soil Water Deficits on Forest Evapotranspiration

杉田 倫明\*・古藤田一雄\*\*

Michiaki SUGITA and Kazuo KOTODA

### I はじめに

作物を対象とした、土壌水分と蒸発散の関係については、古くから農学を中心として研究がなされて来た。これは、土壌水分の減少に伴う蒸散の抑制が直接作物の生長・収量に影響してくるからである。たとえば、鴨田ほか(1974)は、種々の野菜を対象に、蒸散および光合成が低下しはじめる時の土壌水分張力の値を室内実験により求めている。このように、室内実験により臨界の値を求めておけば、野外ではその値より土壌水分が減少しないように、かんがいを行えばよいわけである。

ところが、主たる構成要素が多年生植物である森林では、作物を対象とした場合とは異なったアプローチが必要である。というのは、一つには樹木を室内に持ち込んで実験するのが困難であること、またたとえ持ち込めて室内実験の結果が得られても、一本の樹木での結果を多数の樹木の集まりである森林にそのまま適用するには多くの問題点があることなどのためである。それゆえ、森林を対象とした場合、野外において種々の環境条件の下で蒸発散量と土壌水分を同時に測定し、両者の関係を求めねばならない。しかしながら、森林の野外における蒸発散量の測定は、観測設備等の点で容易ではなかったこと、作物のように直接収量に影響をおよぼしにくく興味の対象になりにくかったことなどのため、土壌水分と森林蒸発散量の関係を調べた研究は多くない。

本報では以上のような点をふまえ、平地アカマツ林を対象とした蒸発散と土壌水分の関係について若干の観測結果を示し、従来の研究結果とあわせて森林蒸発散における土壌水分の重要性について考察した。

### II 方法

#### 1) 研究地域

対象とした地域は、海拔高度約27mの台地上の筑波大学水理実験センター南側に位置する面積1.9haの平地アカマツ林である。アカマツ(*Pinus desiflora*)は、1983年6月の調査によると、平均樹高10m、平均胸高直径12.4cmで、葉面積指数は間島・田瀬(1982)によれば、4.2~6.6を有する。アカマツの立木密度は、100㎡あたり27本で、その他に低・中層木としてナラ、ウルシなどが点在する。このようなアカマツ林は、茨城県の南部から北部まで最も一般的に見られる森林植生である(文化庁, 1971)。また、筑波研究学園都市地域におけるアカマツ林の林分調査の結果(岩城・腰塚, 1981; 大楠ほか, 1981)と比較して、本研究地域のアカマツ林は、学園都市地域の平均的なアカマツ林と考えられる。

土壌は、1~10cmのAo層、その下に深さ1.7mまで関東ローム層が存在し、それ以深は粘土層となっている。地下水面は、1984年の場合、3月から8月上旬まで、地表面下1.5~2.0mに存在していた。出口・田瀬(1983)が、1982年8月に行

\* 筑波大学・院・地球科学研究科 \*\* 筑波大学水理実験センター

(1985年7月8日受理)

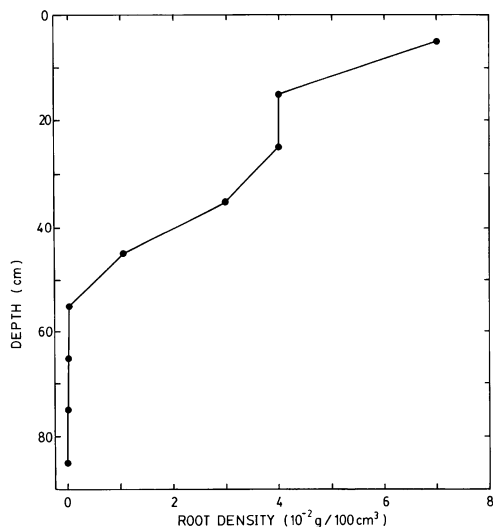
った土壌断面調査によると、根系の存在するのは、地下60cmまでで、0~20cmの深さに集中していた。第1図に根の密度のプロファイルを示す。深度10cmごとに100cm<sup>3</sup>のサンプル管をセットしたサンプラーを用いて土壌を採集し、根のみを取り出してその乾燥重量を求めたものである。ほぼ土壌断面調査によるものと同じ結果が得られている。これらの結果から、本報では地表面下0~60cmまでの層を根系域とする。

## 2) 方 法

観測は、1984年10月から1985年2月にかけて行った。1984年は、降水量が例年に比して著しく少なく、土壌水分が不足しやすい状態にあったと考えられる。本研究地域から約17kmはなれた茨城県柿岡の過去20年間の降水量記録によれば、1984年の年降水量は20年間の平均年降水量の56%にすぎなかった(山下, 1985)。本研究地域における1984年の年降水量は、711.2mmであった。

蒸発散量は、渦相関・熱収支法(杉田・古藤田, 1984)によって求めた。アカマツ林の熱収支は、貯熱量変化、移流、植物の同化作用を無視すると、次式であらわされる。

$$LE = R_n - G - H \quad (1)$$



第1図 アカマツの根の密度の鉛直プロファイル

ここで、 $L$ : 蒸発の潜熱、 $E$ : 蒸発散量、 $LE$ : 潜熱フラックス、 $R_n$ : 正味放射束、 $G$ : 地中熱流束、 $H$ : 顕熱フラックスである。 $R_n$ は、地上13.5mに設置した正味放射計(英弘精器, CN-11型)により求めた。 $H$ は、地上13.5mの設置した超音波風速温度計(海上電気, DAT-100型)を用いて、渦相関法により求めた。 $G$ は、地下1cmに埋設した地中熱流板(英弘精器, CN-9型)によって求めた。以上の3項目の1時間平均値を求め、(1)式から $LE$ の値を評価した。また、蒸発散量の基準値として、次式で与えられる平衡蒸発量( $E_{eq}$ ) (Slatyer and McIlroy, 1961)を用いた。

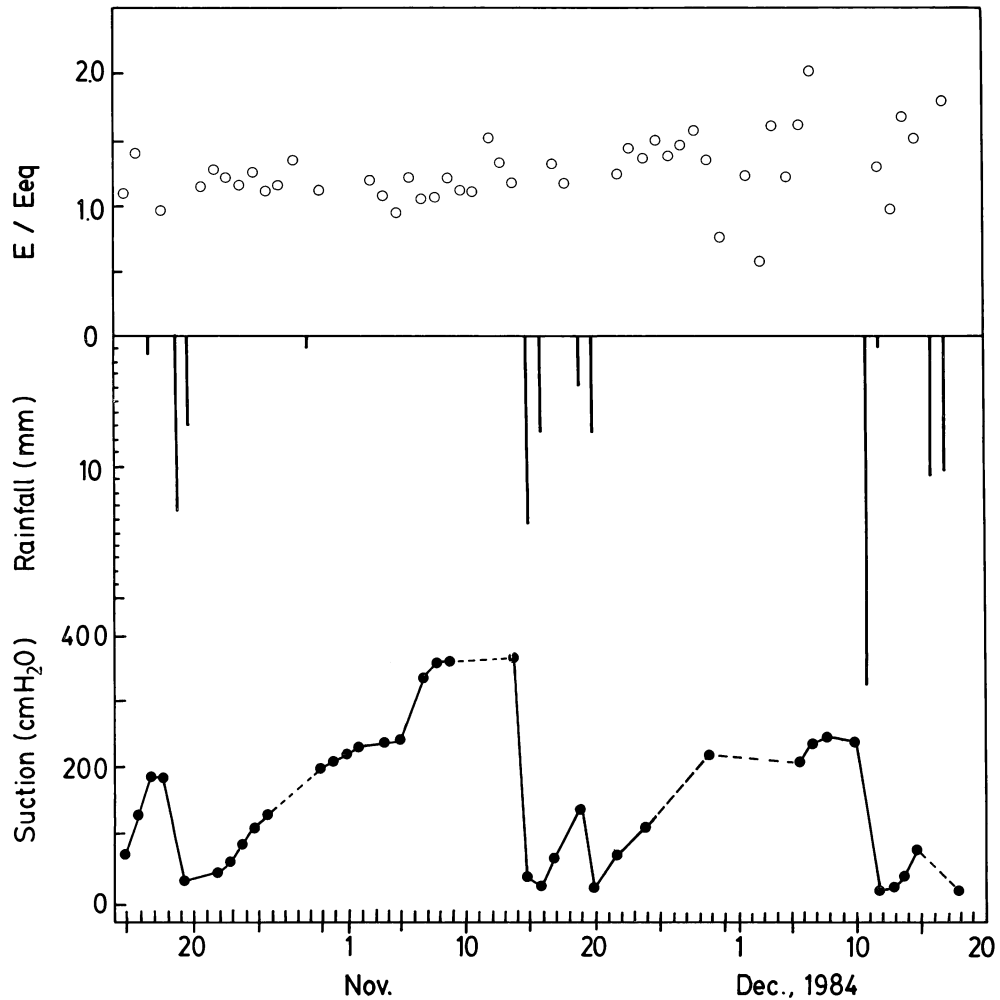
$$E_{eq} = \frac{1}{L} \frac{D}{D + \gamma} (R_n - G) \quad (2)$$

ここで、 $D$ : 飽和水蒸気圧曲線の勾配、 $\gamma$ : 乾湿計定数である。

土壌水分は、テンシオメーターによる水分張力および採土の炉乾燥による土壌水分量の測定の2つの方法により評価した。ポラスカップは、地下10, 20, 40, 60cmの各深度に埋設し、マンオメーターによりほぼ1日に1回の割合でサクシジョンの値を読み取った。サンプラーによる土壌の採取は、地下80cmまで10cm間隔で随時行った。

## III 結果および考察

第2図に、 $E/E_{eq}$ 比、降水量、地下40cmのサクシジョンの値の1984年10月15日から12月19日までの変化を示す。サクシジョンの値は、降雨終了後徐々に大きくなり、次の降雨前に最大値をとる。観測期間中の最大値は、11月14日の366 cm H<sub>2</sub>OでpF 2.6であった。一方、 $E/E_{eq}$ 比は、11月後半まで1.0~1.5の値をとっているが、サクシジョンの値の変化との対応は認められない。すなわち、サクシジョンの値が大きくなり、土壌水分が減少しても、蒸発散の効率は落ちていない。また、12月に入ると $E/E_{eq}$ 比は日々の変化が大きくなるが、やはりサクシジョンの値の変化との対応は認められなかった。 $E/E_{eq}$ 比が大きく変化するの、 $E$ の計算上移流項を無視したためと考えられる。12月に



第2図  $E/E_{eq}$ 、降水量、サクシヨンの値の変化

入ると北西の季節風の吹く日が多くなり、移流項が無視できなくなる場合が出てくる。この時、(1)式で  $E$  を評価すると、移流項が正（エネルギーが森林に入ってくる場合）ならば、 $E$  は過小評価され、逆に負ならば過大評価される。

以上、本研究地域において少なくとも10~12月の間は土壌水分の減少が蒸発散に影響を与えることはなかったといえる。次に、これらの結果をこれまで得られている他の森林を対象とした研究と比較してみよう。Rutter (1968) は、9カ所の森林で行なわれた観測結果を解析し、蒸発散量と有

効土壌水分量<sup>1)</sup>の減少との関係を示した。また、Black (1979) は、2カ所の Douglas Fir の森林での測定結果から、 $E/E_{eq}$  と有効土壌水分量との関係を求めている。一方、Tajchman *et al.* (1979) は、樹高3 m程度の若いマツ林における測定結果から、根系域の平均的 pF 値が3.0を越すと蒸発散が減少すると報じている。土壌水分をあらわす示標としては、土壌-植物-大気の水移動のメカニズムを考えるならば、pF 値を用いるのが望ましいが（榎根, 1980）、ここでは従来の研究との整合を考えて、有効土壌水分消費率 ( $R$ ) を示標

第1表 種々の森林地域における土壌水分と蒸発散の関係

	植 生	土 壤	根系域	有効水分量	臨界有効土壌水分消費率	文 献
1	?	silt loam	1.5m	300mm	?	Rutter (1968)
2	?	silt loam	1.8	400	?	"
3	<i>Pinus taeda</i>	clay	1.7	175	?	"
4	<i>Pinus ponderosa</i>	clay loam	1.8	270	?	"
5	Mixed chaparral species	sandy clay loam	1.0	155	70%	"
6	"	sandy clay loam	1.5	250	50	"
7	<i>Populus tremuloides</i>	?	1.8	300	50~70	"
8	?	sandy clay loam	1.8	190	60~80	"
9	Mixed chaparral species	clay loam	1.0	210	40~60	"
10	<i>Pinus sylvestris</i>	sandy loam	1.8	370	60	Rutter (1967)
11	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	gravelly sandy loam	0.5	88	65	Black (1979)
12	"	"	0.75	82	63	"
13	<i>Pinus sylvestris</i>	humic sandy loam	0.35	?	?	Tajchman <i>et al.</i> (1979)
14	<i>Eucalyptus maculata</i>	?	?	?	60	Dunin and Aston (1984)

とした。Rは次式で与えられる。

$$R = (Wf - W_s) / (Wf - W_w) \quad (3)$$

ここで、Wは水分量で、添字はf: 圃場含水量、s: 土壌水、w: 永久しおれ点をあらわす。また分母の(Wf - Ww)は根系域の有効水分量に等しい。また、土壌水分が減少して蒸発散が抑制されはじめた時の土壌水分量をW<sub>sc</sub>とすると、臨界有効土壌水分消費率(R<sub>c</sub>)は次式で与えられる。

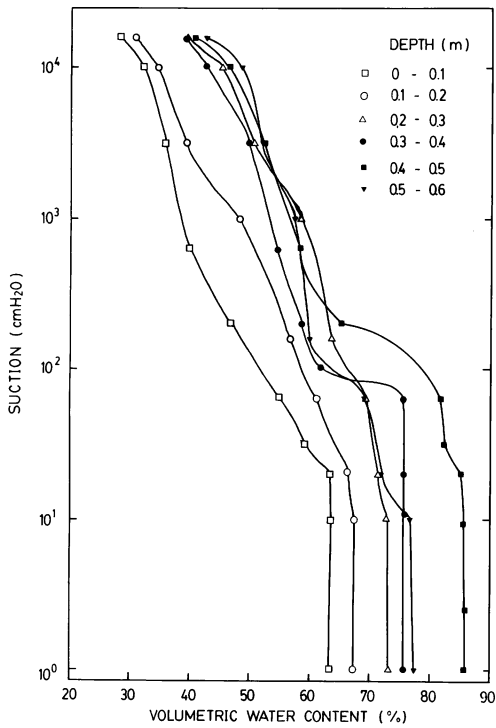
$$R_c = (Wf - W_{sc}) / (Wf - W_w) \quad (4)$$

これらを示標として、従来の研究例をまとめたのが第1表である。R<sub>c</sub>の値は、Black (1979)のものは論文中の数値を用いて計算した。Rutter (1968)のまとめた9例およびDunin and Aston (1984)の1例については、原論文中の図からR<sub>c</sub>の値を読み取った。疑問符があるものは、臨界有効土壌水分消費率の判定が困難なものである。これは、Rutter (1968)の図は、蒸発散量そのもの(平衡蒸発量などで無次元化していない)と土壌水分の関係を示したもので、天気等土壌水分以外の蒸発散への影響が除かれていないためである。

第1表を見ると、大ざっぱにとらえれば植生、有効土壌水分量の差異に係わらず臨界有効土壌水分消費率は50~60%程度の値を取っていることが

わかる。そこで、この結果と本研究地域での結果を比較してみよう。このために、根系域の有効水分量の値をpF試験により求めた。各深度の水分特性曲線を第3図に、根系域の平均の水分特性を第2表に示す。有効土壌水分の値は、192mmで他地域と大きな差はない。観測期間中のpF値の最大値(11月14日、pF 2.6)を水分量になおし、有効土壌水分消費率(R)の値を求めると、32.2%となる。この値は、前述の他地域における50~60%の値と比して十分小さい。したがって、観測期間中に蒸発散の抑制がなかったのは妥当な結果と言えよう。

最後に、森林蒸発散における土壌水分の重要性についてふれておこう。前述のように、根系域が大きく有効土壌水分量も大きい森林植生においても、ある土壌水分以下になれば蒸発散が抑制されることは明らかである。それにもかかわらず、Rutter (1968)、Roberts (1983)などは、森林蒸発散においては土壌水分は重要な因子ではないと主張している。一方、Black (1979)は、土壌水分の重要性を認め、Spittlehouse and Black (1981)の森林の水収支モデルに組み込んでいる。このような同じ結果に対する評価のちがいは、地域ごとの気候、水文条件の差異によるようである。すな



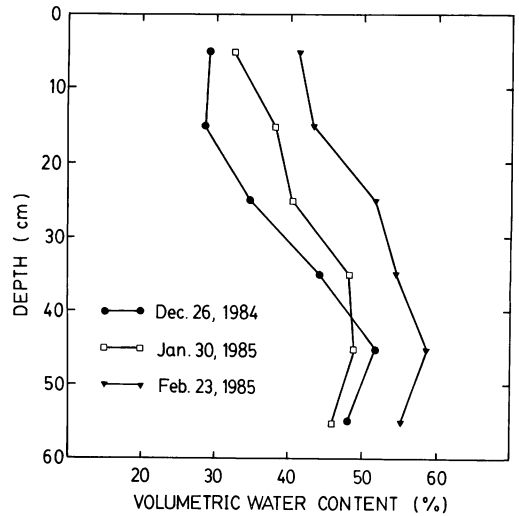
第3図 水分特性曲線

第2表 根系域の水分特性

	圃場 容水量	永久し おれ点	有効土壌 水分量
平均水分量(体積含水率%)	67.3	35.3	32.0
水高(mm)	403.8	211.8	192.0

わち、蒸発散が抑制されだす臨界値が存在しても、その地域でまれにしか土壌水分が臨界値を越さないならば、蒸発散にとって土壌水分の減少は本質的な因子ではないわけである。

このような観点に立つと、ある地域で森林蒸発散にとって土壌水分が重要であるか否かは、年間の土壌水分の変化を調べることで示すことができよう。本調査地域では残念ながら年間の土壌水分の変化はとらえられていない。しかしながら、降水量、地下水位の年変化から考えて、土壌が最も乾燥するのは、11月から2月の冬季であると考えられる。このうち、11月から12月については、第2図にサクシジョンの変化を示した。1月～2月



第4図 根系域における土壌水分プロファイルの変化

は、テンシオメータによる測定が困難であるため、サンプラーによる土壌採取により土壌水分の値を求めた。

第4図に1984年12月26日、1985年1月30日、2月23日の根系域中の土壌水分プロファイルを示す。この期間中、12月16日に21.0mmの降雨があった後1月28日～29日の4.5mmの降雨まで42日間の無降雨日が続いていた。ところが1月30日のプロファイルは12月26日と比しても大きな水分の減少は認められない。このことは、本研究地域では土壌水分の変化は乾燥に対して鈍感であり、かなりの無降雨日が続いても成木した森林からの蒸発散を抑制することがないことを示している。2月に入ると、何日かの降雨により土壌水分は急激に増加している。

#### IV おわりに

得られた結果をまとめると次のようになる。

- 1) 平地アカマツ林における10月から12月にかけての熱収支項、土壌水分の測定結果、この期間においては、土壌水分の減少に伴う蒸発散の抑制は認められなかった。
- 2) 従来の研究結果を、有効土壌水分消費率( $R$ )を示標としてまとめた結果、 $R = 50 \sim 60\%$ 程度

で蒸発散の抑制がおこることが示された。11月～12月の本研究地域では、高々  $R = 32.2\%$  にしかならず、1)の結果の妥当性が得られた。

3) 最も土壌が乾燥すると思われる1月から2月にかけての土壌水分の観測結果から、無降雨日が40日程度続いても大きな土壌水分の減少は起こらず、したがって蒸発散の抑制が年間を通して起こらないことが示唆された。

#### 注

1) 有効土壌水分は、永久しおれ点の土壌水分量 ( $W_w$ ) から圃場容水量のそれ ( $W_f$ ) の間にある土壌水分、すなわち  $W_f - W_w$  を言う。本報では、永久しおれ点を pF 4.2、圃場容水量を pF 1.8 として計算を行った。単位は、根系域あたりの水高、すなわち mm/根系域である。

#### 謝 辞

本研究を行うにあたって気象庁の中川慎治博士に種々のご教示をいただいた。また、測器の作成において水理実験センターの小島豊盛氏に御指導いただいた。ここに記し感謝いたします。

#### 参 考 文 献

岩城英夫・腰塚昭温 (1981) : 平地アカマツ林における有機物・窒素の集積と人為作用。環境科学研究報告集, 筑波大学, B93-R12-2, 37-48。  
大榎政行・及川武久・森川靖 (1981) : 平地アカマツ林の熱収支・水収支特性について。環境科学研究報告集, 筑波大学, B93-R12-2, 15-35。  
鴨田福也・伴義之・志村清 (1974) : 野菜の光合成及び蒸散に関する研究 I 光合成・蒸散の作物間差異及び土壌水分との関係。野菜試報告, A1号, 109-139。  
榎根勇 (1980) : 「水文学」大明堂, 272 p。  
杉田倫明・古藤田一雄 (1984) : ボーエン比・熱収支法と渦相関・熱収支法によるアカマツの林冠上の潜熱フラックスの測定。筑波大学水理実験センター報告, 8号, 83-88。  
出口賢二・田瀬則雄 (1983) : 平地アカマツ林における蒸散活動と土壌水の挙動について。筑波大学水理

実験センター報告, 7号, 39-45。

文化庁 (1971) : 「植生図・主要動植物地図 8 茨城県」, 29 p。

間島政紀・田瀬則雄 (1982) : アカマツ林内の降雨量の空間的分布について。筑波大学水理実験センター報告, 6号, 75-82。

山下孔二 (1985) : 柿岡における降水量の変動。農林水産業における自然エネルギーの効率的利用技術に関する総合研究, 水理実験センター, 11-20。

Black, T. A. (1979) : Evapotranspiration from Douglas Fir stands exposed to soil water deficit. *Wat. Resour. Res.*, **15**, 164-170。

Davies, J. A. (1972) : Actual, potential and equilibrium evaporation for a bean field in Southern Ontario. *Agricul. Meteorol.*, **10**, 331-348。

Dunin, F. X. and Aston, A. R. (1984) : The development and proving of models of large scale evapotranspiration: an Australian study. *Agricul. Wat. Management*, **8**, 305-323。

Roberts, J. (1983) : Forest transpiration: A conservative hydrological process? *J. Hydrol.*, **66**, 133-141。

Rutter, A. J. (1967) : Studies of the water relations of *Pinus Sylvestris* in plantations V. Responses to variation in soil water conditions. *J. Appl. Ecol.*, **4**, 73-81., cited in Rutter (1968)

Rutter, A. J. (1968) : Water consumption by forests. Kozlowski, T. T. ed. : *Water deficits and plant growth Vol. II Plant water consumption and response*. 23-84。

Slatyer, R. O. and McIlroy, I. C. (1961) : *Practical Micrometeorology*. CSIRO, Melbourne, 310p., cited in Davies (1972)

Spittlehouse, D. L. and Black, T. A. (1981) : A growing season water balance model applied to two Douglas Fir stands. *Wat. Resour. Res.*, **17**, 1651-1656。

Tajchman, S., Hädrich, F. and Lee, R. (1979) : Energy budget evaluation of the transpiration-pF relationship in a young pine forest. *Wat. Resour. Res.*, **15**, 159-163。