

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

Transpiration Activity and Soil Water Movement in a Red Pine Forest

出口 賢 二*・田 瀬 則 雄**

Kenji DEGUTSCHI and Norio TASE

I はじめに

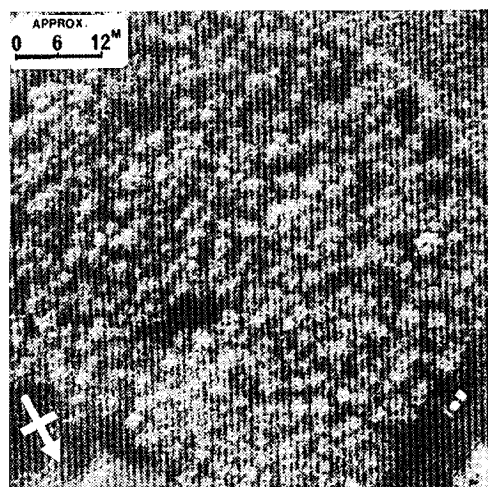
森林根系域における土壌水の挙動は、 $pF1.8$ を越えている乾燥期間中には、根の吸い上げの影響を受ける。しかしながら、根系域の根の分布は空間的に不均一であり、根の発達により土壌構造が変化しており、土壌の保水量も空間的に偏っている。このため根系域での水の移動を詳細に解明することは非常に難しい。

本研究では、対象地域を土壌水の動きが捉えやすいと考えられる平地アカマツ林におき、蒸散活動とそれが土壌水の移動へ及ぼす影響について検討を行なった。

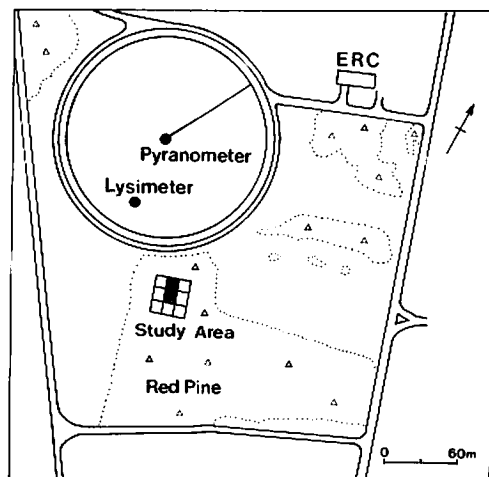
II 地域の概要

筑波大学水理実験センター南隣の平地アカマツ林内の $20m \times 10m$ の1区画(第1図および第2図)を対象とし、観測を行なった。林内のアカマツの分布状況を第3図に示した。立木密度は 26.5 本/ $100m^2$ 、樹高は約 $10m$ 、平均胸高直径は $12.1cm$ である。

林床には $1 \sim 10cm$ 厚のA₀層があり、地表から深さ $1.5 \sim 1.7m$ までは関東ローム層、それ以深には粘土層が存在し、不透水層を形成している。1982年8月の土壌断面調査では、根系域は深さ $60cm$ 付



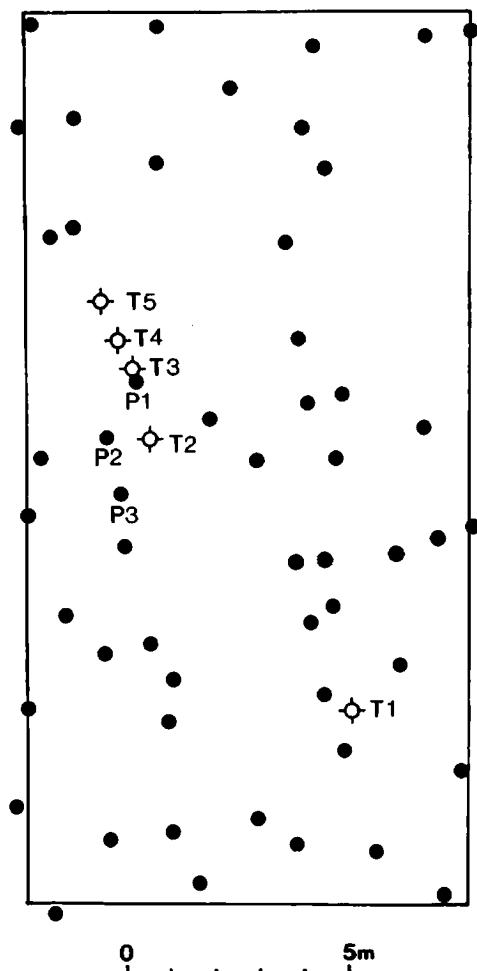
第1図 対象アカマツ林分の気球空中写真



第2図 観測地の概略

* 筑波大学・院・環境科学 ** 筑波大学地球科学系

(1983年4月28日受理)



第3図 アカマツ（黒丸）の分布と観測地点（T：テンシオメータ、P：ヒートパルス）

近までであった。アカマツの根系は、表層から20cmまでの深さに集中し、40cm以深ではその分布（出現頻度）は急激に減少する。テンシオメータを埋設した林内5地点の土壌の飽和透水係数を第1表に示した。透水性は同じ深さではほぼ均一で 10^{-3}cm/sec のオーダーであるが、根が発達している場合には 10^{-2}cm/sec のオーダーにまで達している。

III 観測方法

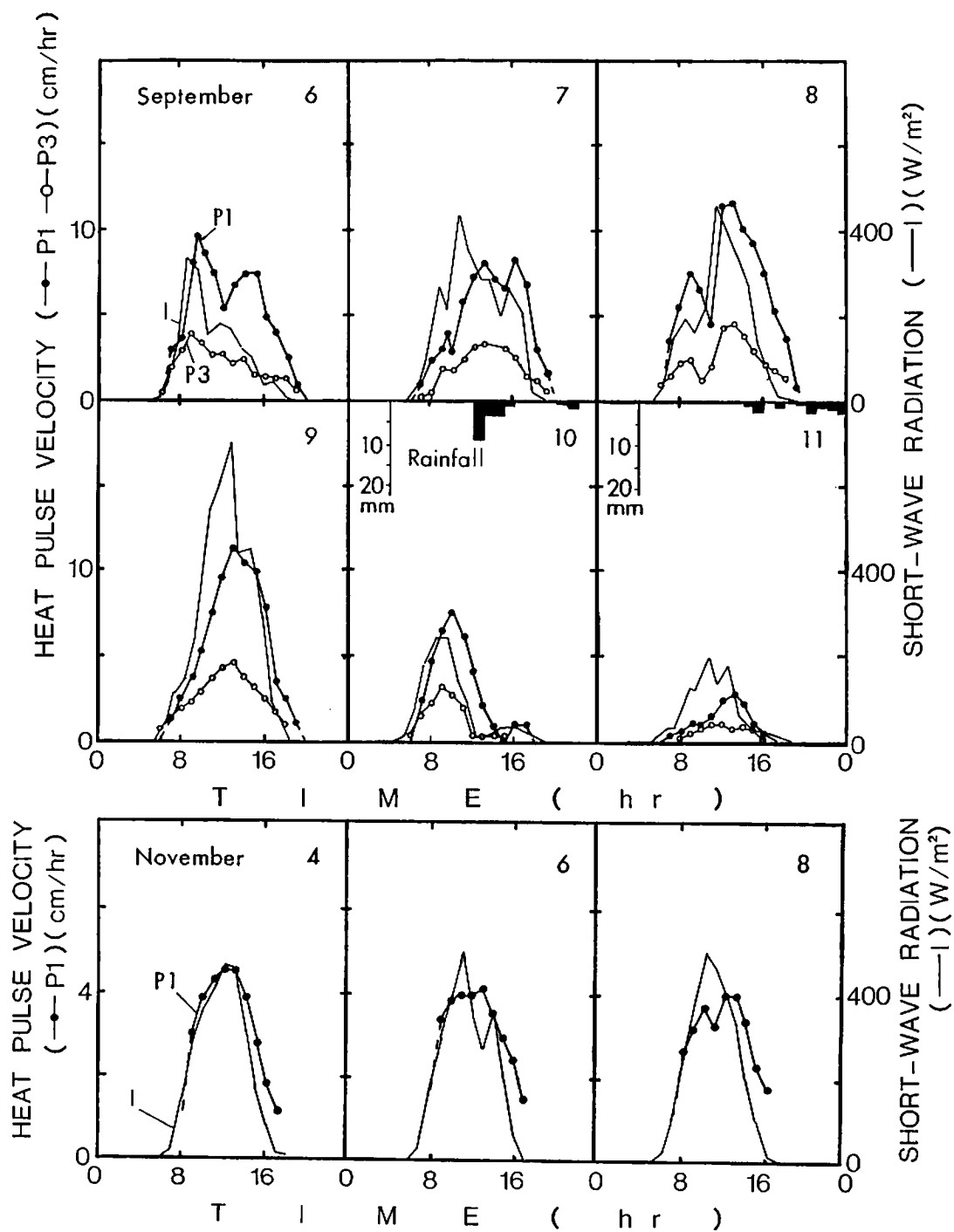
樹液流速測定は、ヒートパルス法を用いて観測した。その理論については、Cross（1962）により、ヒートパルス速度からの蒸散量換算については、大楠ほか（1981）によった。観測日には、日の出から日の入り3時間後まで10～60分間隔で測定した。測定は、林分中央付近のP1（DBH＝17.9cm）、P2（DBH＝15.0cm）、P3（DBH＝9.4cm）の3本のアカマツの地上1.2mの高さにヒーターを挿入し、温度測定地点をヒーター上側は1.0cm、下側は0.7cmに設定した。なお、測定に用いたアカマツの位置は第3図に示してある。

土壌水分張力は、テンシオメータに接続した水銀マノメータにより測定した。テンシオメータの埋設地点は第3図に示したが、ポーラスカップの埋設深度は、深さ5cm、10cmから60cmまでは10cm間隔で、それ以深は80cmと100cmである。測定間隔は、無降雨期の乾燥過程中には午前中に1回、日の入り後（18時30分前後）に1回とした。

観測期間は、土壌水分張力測定では1982年6月

第1表 土壌水分張力測定地点における飽和透水係数（カッコ内は根を含むサンプル）単位： 10^{-3}cm/sec

深 さ (cm)	T1	T2	T3	T4	T5	平 均
0 — 5	2.21 (13.44)	4.00	3.11 (11.72)	1.26 (30.14)	2.05	2.53
5 — 10	2.34 (10.84)	2.40 (12.66)	2.22	4.05 (14.00)	1.99	2.60
15 — 20	0.74 (7.93)	1.85	—	1.00	3.06 (11.43)	1.66
20 — 25	1.72	2.01 (8.76)	—	1.89 (6.29)	3.18	2.20
30 — 35	1.59	4.44	1.72	—	—	2.58
40 — 45	1.86	1.09	2.06	1.92	2.77	2.43
50 — 55	2.03	0.31	0.59	—	—	0.68
60 — 65	1.77	4.62	3.73	2.73	4.06	3.38
80 — 85	1.20	—	2.51	—	1.00	1.57
95 — 100	2.00	2.71	0.88	0.99	—	1.90



第4図 ヒートパルス速度の時間変化

から11月、ヒートパルス速度測定では9月から11月までの間ののべ23日間とした。

IV 解析方法

土壌水分張力(ϕ)と基準高度を深さ100cmとした位置水頭より、水理水頭(H)を求めた。また、pH試験から求めた水分特性曲線より土壌水分量を推定した。このときの回帰式は次式である。

$$\theta = \theta_s \cdot 0.9760 \cdot (\phi/\phi_0)^{-0.0941} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 θ は体積含水率(cm^3/cm^3)、 θ_s は飽和含水率($0.74\text{cm}^3/\text{cm}^3$)、 ϕ は土壌水分張力(cmH_2O)、 ϕ_0 は空気侵入値($14\text{cmH}_2\text{O}$)である。

土壌水分張力と土壌水分量を用いて、任意の深さを通過するフラックスを算定した。土壌水の移動は、一般にリチャーズの方程式であらわされる。すなわち、

$$\partial\theta/\partial t = -\partial q/\partial z \dots \dots \dots (2)$$

$$q = -K(\theta) \cdot \partial H/\partial z \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 q は土壌水フラックス(cm/sec)、 $K(\theta)$ は不飽和透水係数(cm/sec)、 z は深さ(cm)、 t は時間である。 $K(\theta)$ は、Kaihotsu(1982)が谷田部で採取した関東ロームで求めた回帰式を用いた。

すなわち、

$$K(\theta) = 1.048 \cdot 10^{-64} \cdot \theta^{33.096} \dots \dots \dots (4)$$

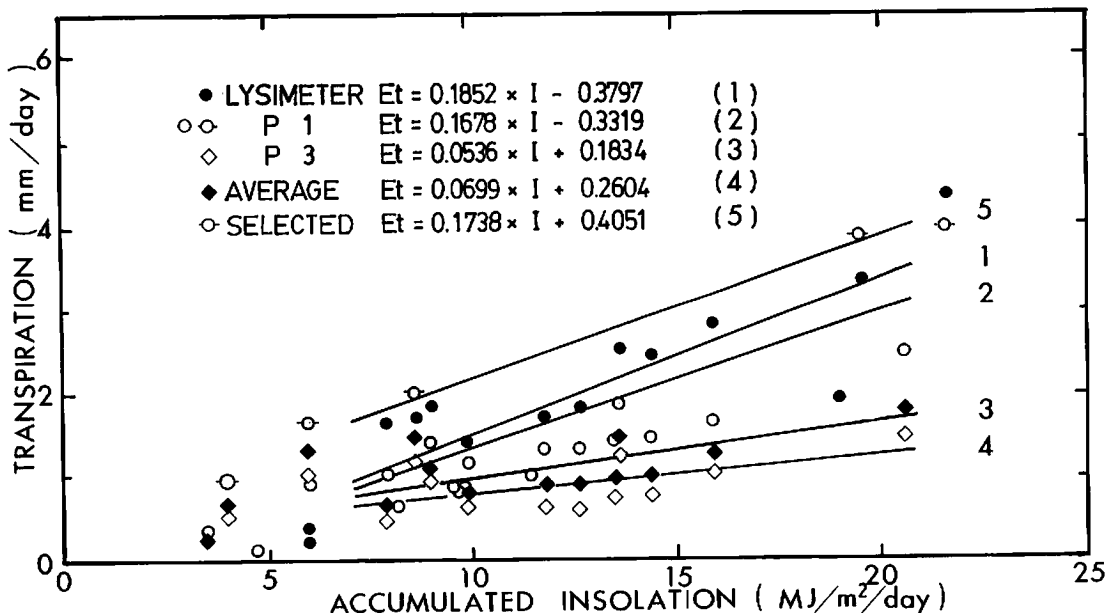
V ヒートパルス法による蒸発散量の推定

蒸散活動をあらわす指標として、ヒートパルス法により樹液流速の時間変化を捉えた(第4図)。

観測中、ヒートパルス速度は、日射の立ち上がりに対し、同時に、わずかに遅れ(1時間程度)を生じた。また、ヒートパルス速度は日射の低下に対しては、常に遅れ、日の入り後も $1\text{cm}/\text{hr}$ 以下の流速が1~3時間程観測された。

9月の観測では、日射量、葉の濡れの有無が直ちにヒートパルス速度に影響した。一方、蒸散活動が低下したと考えられる11月の測定では、日射量の日変化にはわずかに反応を示したが、樹冠が濡れていても上方への水の流れが認められた。したがって、夏季においては、降雨による蒸散抑制効果はかなり大きいことが考えられる。

現状では、ヒートパルス法による蒸散量の推定には若干の問題点が残されているが、一応の日安として算出した蒸散量を日射総量と比較した(第5図)。アカマツの推定蒸散量と日射総量との間



第5図 日射総量と推定蒸散量の関係

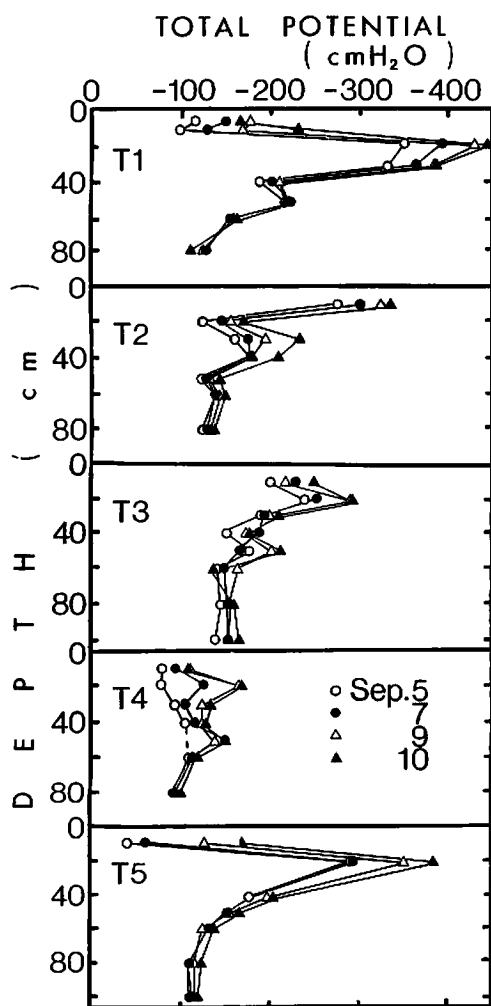
には相関関係がみられ、P1 (DBH=17.9cm) のアカマツでの蒸散量は P3 (DBH=8.9cm) に比べ、常に50~100%多い値を示した。また、この2本のアカマツの推定蒸散量と林分のDBH分布から求めた林分全域からの平均蒸散量と日射総量の関係では、回帰式の傾きが小さくなった。この場合、データ数が少なく、降雨日や降雨翌日の葉が濡れている時のデータも含まれている。データ中、晴天日のみの値から回帰したものが図中(5)式である。この回帰式は、ライシメータのデータから推定した牧草地からの蒸発散量回帰式よりも上側にある。このように用いるデータによ

って、いくつかの回帰式が考えられるが、これはヒートパルス速度測定期間が夏季から秋季にかけてであるため、気温や湿度など他の因子の影響も受けていると考えられる。したがって、今後、多変量解析などのアプローチが必要であろう。

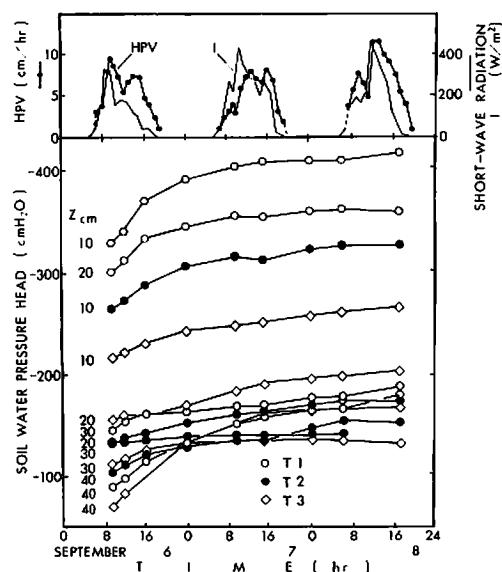
VI 根系域乾燥過程について

森林根系域の乾燥過程は、埋設したテンシオメータにより求めた水理水頭の変化から捉えた。第6図は、1982年9月5~10日の各地点の土壌水の乾燥過程を示したものである。根系域の乾燥化は根の密度の高い部位、すなわち上層部に集中するが、管状孔隙 (root channel) の発達により、降雨後圃場容水量に達した時の水分量が速やかに減少してしまう。したがって、根の集中する部位ではいち早く根の吸い上げにより水分減少がなされ水理水頭が減少し、その上下層との水理水頭差を大きくして、周囲から水を集める。さらに乾燥化が進むと、根系域だけでなく、それ以深からの水の上昇をも引き起こす。したがって、水分量プロファイルはほぼその形態を維持しながら減少することとなった。

また、各地点間の同深度での水理水頭の偏より



第6図 水理水頭プロファイルの時間変化



第7図 ヒートパルス速度と土壌水分張力の時間変化

第2表 根系域全層(0~70cm)と表層(0~30cm)の期間水収支

単位: mm

地 点	期間*	通過雨量	水分変化量 0~70(0~30)	排 水 量 0~70(0~30)	正味消失量 0~70(0~30)	日平均消失量 0~70(0~30)
T 1	I	17.08	-14.94(- 5.62)	31.36(22.93)	63.38(45.63)	5.76(4.15)
	II-1	10.90	-20.27(-10.96)	35.36(14.41)	66.53(36.27)	4.44(2.43)
	III	0.0	- 5.51(- 4.32)	12.48(3.21)	17.99(7.53)	3.60(1.51)
T 2	I	21.46	- 3.82(- 1.52)	-3.70(-14.51)	21.58(8.47)	1.96(0.77)
	II-1	16.20	-16.13(- 6.58)	-4.71(7.86)	27.62(30.64)	1.84(2.04)
	III	0.0	-11.19(- 4.05)	3.64(- 0.89)	14.83(3.16)	2.97(0.63)
T 3	I	17.59	8.50(1.03)	— (-11.44)	— (5.12)	— (0.47)
	II-1	12.00	-18.36(-11.10)	— (- 7.51)	— (15.59)	(1.04)
	III	0.0	- 7.76(- 5.84)	2.23(6.71)	9.99(12.55)	2.00(2.51)
T 4	II-2	1.55	-10.81(- 7.77)	11.81(12.23)	22.71(21.55)	3.24(3.08)
	II	0.0	-10.53(- 5.04)	15.40(4.51)	25.93(9.55)	5.19(1.91)
T 5	II-2	2.0	- 2.08(- 4.42)	19.06(1.50)	23.14(7.92)	3.31(1.13)
	III	0.0	- 7.74(- 7.01)	3.92(5.06)	11.66(12.07)	2.33(2.41)

* I : 6月8~19日, II-1 : 7月9日~24日, II-2 : 7月19日~24日, III : 9月5日~10日, この間の平均蒸散量(第5図の(3)式)はそれぞれ 1.32mm/day, 0.98mm/day, 0.78mm/day, 0.88mm/day であった。

が表層付近を除いて少なかったことから, 乾燥過程中の土壌水の横方向の移動はごく少ないことが示唆された。

VI 土壌水の移動と蒸散活動について

蒸散活動と土壌水の動きの関係を調べるために土壌水分張力及びヒートパルス速度の時間変化を比較した(第7図)。

第7図において, 9月6日夜から7日朝方にかけて, 表層から深さ40cmまで全層で土壌水分張力に明確な減少は認められなかった。6日から8日にかけて天候は曇りがちで, 日射総量は3日間とも, 快晴の5日の日射総量22.2MJ/m²/dayの半分以下(各々6.0, 9.0, 8.6MJ/m²/day)であった。5日にはヒートパルス速度測定は行なわなかったが, 日射量の大きさから9月5日から6日にかけての水分張力の減少は, 9月5日の蒸散活動によって行なわれたものと考えられる。このことからテンシオメータのタイムラグ(最大で3時間程度)を考慮に入れても, 1日の蒸散活動が根の吸い上げを通して土壌水分の移動に与える影響

は, 盛んな時で活動のピークから24時間後まで続くことが判明した。したがって, 日射の高い日には樹冠中の多量の水が蒸散に使われるため, 根から水を補給するために時間がかかるものと考えられる。

次に, テンシオメータ埋設地点での水収支を鉛直一次元について算定した。まず, 根系域を地表から深さ70cmまでの全層部と地表から30cmまでの表層部に分けた。そして, 各層底面を通過するフラックス, 土壌水分量変化, 降雨量を加減して, 1日当りの総水分消失量を求め, 蒸散量一日射総量回帰式から推定した蒸散量と比較検討した。その結果を第2表に示した。全体を通じて夏季の土壌水分消失量は, 根系域で2~6mm/dayでありヒートパルス法から推定した蒸散量を用いて第5図中の(3)式で算出した平均蒸散量は1.78~1.32mm/day, 同(4)式では1.7~3.04mm/dayとなった。これは水分消失がアカマツの根の吸い込みだけでなく, 林床からの蒸発にも関係するためと考えられる。しかし, 水分消失量を蒸散量と考えさらに各地点の水分状態, 根の発達状況の差異を

も含めて考慮するならば、ほぼ満足できる値と考えられる。

VII おわりに

本研究は、水理実験センター南隣のアカマツ林において、アカマツの蒸散活動とそれが土壌水の移動に及ぼす影響について検討した。林床下では降雨後1～2日で重力排水が終わると、上層部で水理水頭の減少がはじまる。その後、この傾向が顕著になり、根からの吸い上げの影響が明確に認められる。また、根系域下層以深では、横方向への水の移動はほとんど認められず、上下方向の水の動きが卓越している。

ヒートパルス法による樹液流速の時間変化は、根の吸い上げとは必ずしも対応しているとはいえないが、1日当りの総量で比較した場合、夏季で各々1～3 mm、2～5 mm前後(第2表参照)と良い対応を示した。したがって、林地の水収支を考える場合、降雨期間を含まない乾燥過程時の林内土層の鉛直一次元収支結果を、一つの目安として用いることができると考えられる。

今後の問題として、林内土壌水の空間分布の把握と、大気-植物-土壌系内の水の流れを捉えるために根とその周辺の水分ポテンシャルの測定が必要であろう。

謝 辞

本研究にあたり、御指導・御配慮をいただいた水理実験センターの教職員の方々、そして地球科学研究科の杉田倫明学兄に感謝いたします。さらに本研究の遂行にあたっては、文部省科学研究費一般研究(B)(課題番号:546205;代表者:高山茂美)および自然災害特別研究(2)(課題番号:57025009;代表者:新藤静夫)の一部を使用した。ここに記して感謝いたします。

文 献

- 石田朋靖・中野政詩(1981):土壌-植物-大気系における土壌水分消費の動態。農土論集, 92, 26～34.
- 石橋秀弘・上野清隆・北村昌美・須藤昭二(1971):林地含水量の推定(T)。日林東北支講, 22, 6～8.
- 大櫛政行・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, B93-R12-2, 15～35.
- 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, 75～82.
- Black, J. and Pavlik, O. (1977): Sap stream velocity as an indicator of the transpirational process, *J. Hydrol.*, 43, 193-200.
- Calder, I. R. (1973): The measurement of water losses from a forested area using a "Natural" lysimeter. *J. Hydrol.*, 31, 311-323.
- Cross, R. L. (1958): The heat method for measuring rate of sap flow in a plant stem, *N. Z. J. Sci.*, 281-288.
- Hillel, D. (1971): Water balance and energy balance in the field, In *Physiological ecology*. Academic Press, New York.
- Kaihotsu, I. (1982): Mechanism of vertical water movement in the Kanto loam formation during and after a rain. Doctoral thesis, Inst. Geosci., Univ. Tsukuba, 129p.
- Spittlehouse, D. L. and Black, T. A. (1981): Measuring and modeling forest evapotranspiration, *Canadian J. Chemical Eng.*, 59, 173-180.