

筑波台地表層火山灰土の土壤水分特性に関する研究

II. 土壤水分とアカマツおよびセンダンの樹液流速

矢野 義治*

YANO, Yoshiharu*: Studies on Water Characteristics of Volcanic Ash Soil on the Tsukuba Upland in Kanto Plain II. The Relation between Soil Moisture Retention and Sap Flow Velocity in the Japanese Red Pine and the Chinaberry Tree

陸上植物に必要な不可欠の水は、土壤中に存在する水分が、根を通じて植物体内に吸収される。植物は水の吸収と同時に生長や再生産に必要な多くの元素も吸収する。植物にとっての水は、種々の植物生理上の機能を果すのみでなく、生長に必要な無機養分の吸収、移動にも関与しており、その機構の解明は重要な研究課題の一つである。

土壤中の水分は、根から茎(幹)を経て葉まで送られ、葉の気孔から大気に水蒸気の状態では放出される。この一連の流れを連続したシステムとして捉えようとする土壌-植物-大気連続体 (Soil-Plant-Atmosphere Continuum: SPAC) の概念 (Cowan 1965) が、1960年代から提案された。SPAC の概念は、水の移動が推進力 (水ポテンシャルの差) に比例し、抵抗に反比例するいわゆる電流の流れにおけるオームの法則で示すことができる。土壌中や植物体内には、水を貯留するコンデンサーの役割をする部分も存在することから、SPAC を通過する水の移動は、流れに対する抵抗と水留め (コンデンサー) を含む直列の伝導系を流れる電流と同様に扱える。土壌-植物系における水の流れの概略を示すと Fig. 1 のようになる。

今回は、葉の部分で消費される水分が、幹を通過する樹液の流れから測定出来る (Marshall 1958, 森川 1974) ことに着目して、土壤水分の変化が樹液流速にどのような影響を及ぼすかを検討するとともに、土壤水分の変化と根系分布との関連についても考察した。

材料および方法

土壤水分の連続変化は、テンシオメータで測定した。アカマツ林では幹から 40 cm, 80 cm, [120 cm の 3ヶ所に 20 cm の深さにポーラスカップの中心がくるように埋設した。測定は6ヶ月間継続したが、今回は土壤水分環境が重力水の状態から初期しおれ点に近い状態まで、樹液流速測定前12日間の変化を示した。樹液流速の測定に供したアカマツ (*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.) は、1978年に移植されたもので胸高直径 18 cm, 樹高 7.2 m のアカマツ林内の1本である。アカマツの根系と土壤硬度はトレンチを掘って観察した。アカマツの幹を中心にテンシオメータ埋設の範囲は、地表の雑草などの下草を刈取って裸地の状態を保った。その概略を Fig. 2 に示す。

センダン (*Melia azedarach* L.) は、ワグネル型 1/2,000 a ポットに植えたもので3年生である。充填した土壌は、園内の火山灰土壌の II_A₁ 層でその水分物理性は既報 (矢野 1985) の通りであ

* 国立科学博物館 筑波実験植物園. Tsukuba Botanical Garden, National Science Museum, Tsukuba, 305.

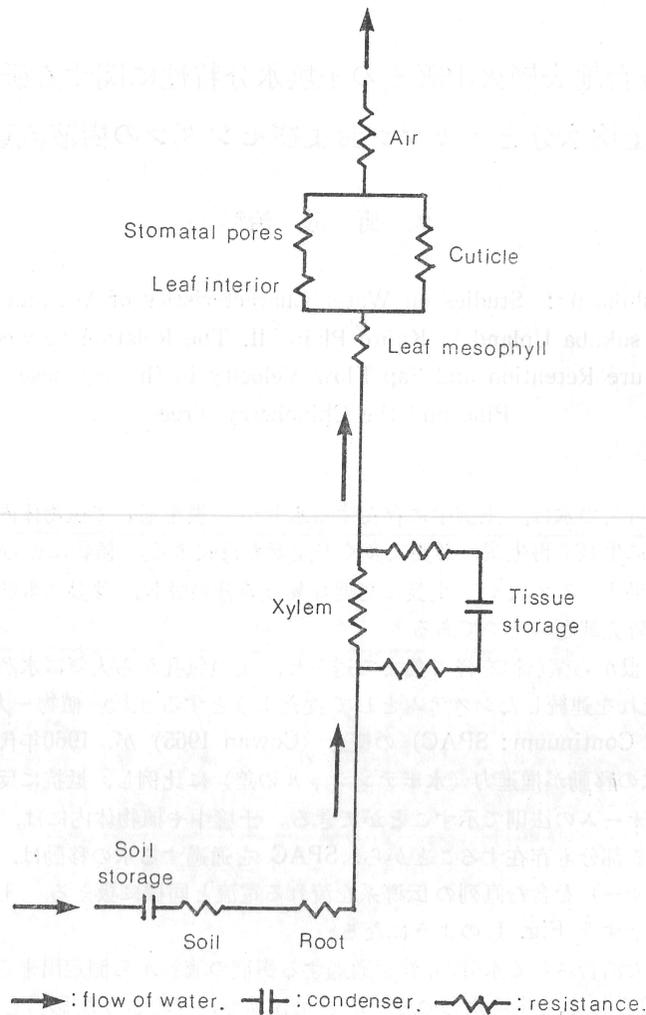


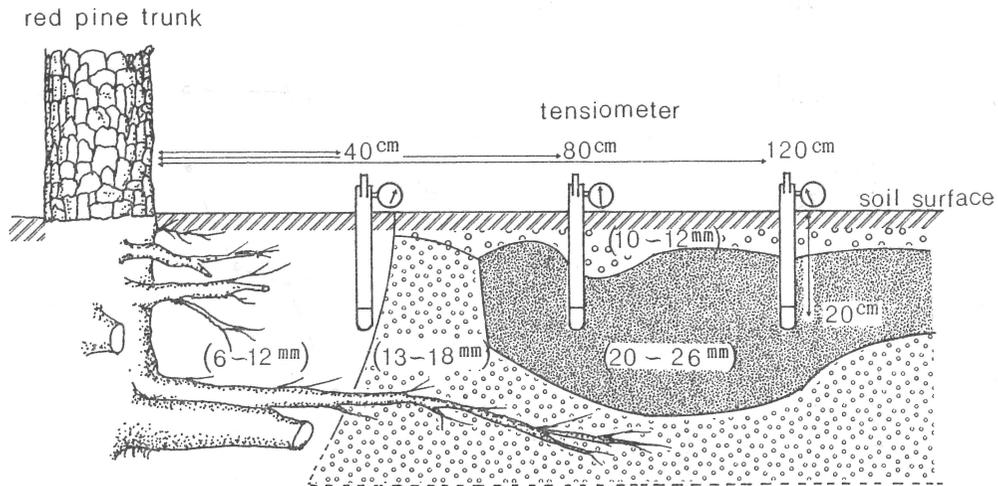
Fig. 1. Simplified diagram treating the flow of water through the soil-plant-atmosphere system as analogous to the flow of electrical current (Cowan 1965).

る。テンシオメータは 5 cm と 15 cm の深さの水分張力が測定できるように埋設した。表層から 5 cm の土壌水分含量は、経時的に採取して重量法で含水比を測定した。

樹幹の樹液流速は、蒸散流速計 (Model HP-1, 林電工株式会社製) を使用した。樹液の流速は色素や放射性同位元素を用いて測定できるが、今回使用したヒートパルス法 (Closs 1958) は取り扱いが簡単であり植物体には少しの損傷をつけるだけで連続して測定できる利点がある。温度、全放射熱量は園内に設置している気象観測から得られたものである。蒸散流速計による測定は、熱源やサーミスタの挿入部位による変動が見られるので、今回は地上 1.2 m の高さで樹幹の西側にセンサーを取り付けて測定した。

結果および考察

アカマツの樹液流速測定前12日間の樹幹周辺の土壌水分変化を Fig. 3 に、測定日の経時変化を Fig. 4 に示す。7月20日に 5 mm の降雨があったが、それ以後30日の樹液流速測定まで土壌



() numbers in parentheses are value of the Yamanaka type hardness meter

Fig. 2. Sketch of the experimental site and vertical variation of compactness by the Yamanaka type soil hardness meter.

の乾燥化が進行した。アカマツ林内の土壌水分は、幹に近い 40 cm の範囲内で乾燥が著しく 80 cm がこれに続き、120 cm では別地点で測定した裸地条件（矢野 1985）の値とほぼ同様の变化を示した。テンシオメータ埋設周辺の土壌表面からの蒸散量は、下草を除去して裸地状態を保っていることから、幹からの距離に関係なく一様であると考えられる。したがって、幹から 80 cm の範囲で乾燥が進んだ原因としては、アカマツの根が土壌水分を吸収して葉より大気中に放出したことによると言える。土壌水分の植物体への吸収および移動については、樹液流速の測定結果と関連して後述するが、土壌水分の吸収は葉からの蒸発散による樹冠部における水ポテンシャルの低下が起因となって、土壌-根系において行われる現象であることが判る。土壌水分の 6 ヶ月間測定においても、降雨が少なく土壌が乾燥するにしたがって、幹周辺の水分張力が高くなる現象が見られた。園内自生のアカマツ林内の測定樹の周辺でも、土壌の乾燥化に伴って幹周辺と離れた地点で水分張力の差が大きくなることが観測された。移植したアカマツの幹から 40 cm 以内は、植穴の影響を受けて土層が粗しょうであり固相率も小さい。このことは幹周辺部の土層全体に占める土壌粒子の小さいことを意味し、土壌単位体積当りの水分保水力が小さいことになることから、幹周辺の乾燥化は保水量の多寡が原因であるとも考えられる。しかし、土壌攪乱を受けていない自生のアカマツにおいても幹周辺で乾燥が著しいことから、幹周辺の水分張力の大きくなる現象は、土層条件よりもアカマツ根による水分の吸収が原因であると言える。これに関連してアカマツの生根重量を、深さ 20 ~ 30 cm の土層から 10 cm³ の土塊を取りその中に含まれる量を測定した。40 cm 地点で 9.6 g、80 cm 地点で 1.0 g、120 cm 地点では 0 g であった。生根重量は主として細根の重量であり、土壌水分を吸収する役割を果たす根毛の重量の測定はできなかった。アカマツの根系分布は、幹周辺部で多く土壌水分の吸収も盛んであり、これが土壌水分張力の変化に影響を及ぼしたと言える。土壌水分の日変化 (Fig. 4) を示すテンシオメータの値は、日の出直後の 6 時で 1 番高く乾燥した状態であったが、日中の 10 時から 13 時の間で低く経過した。植物の蒸発散作用に連動して土壌中の水分が吸収されて土壌水分含量も減少すると考えられるとすれば、当然のことながら、日中で乾燥状態になるはずである。しかし、アカマツ林における測定では、日中において土壌水分張力の低くなる傾向が見られた。

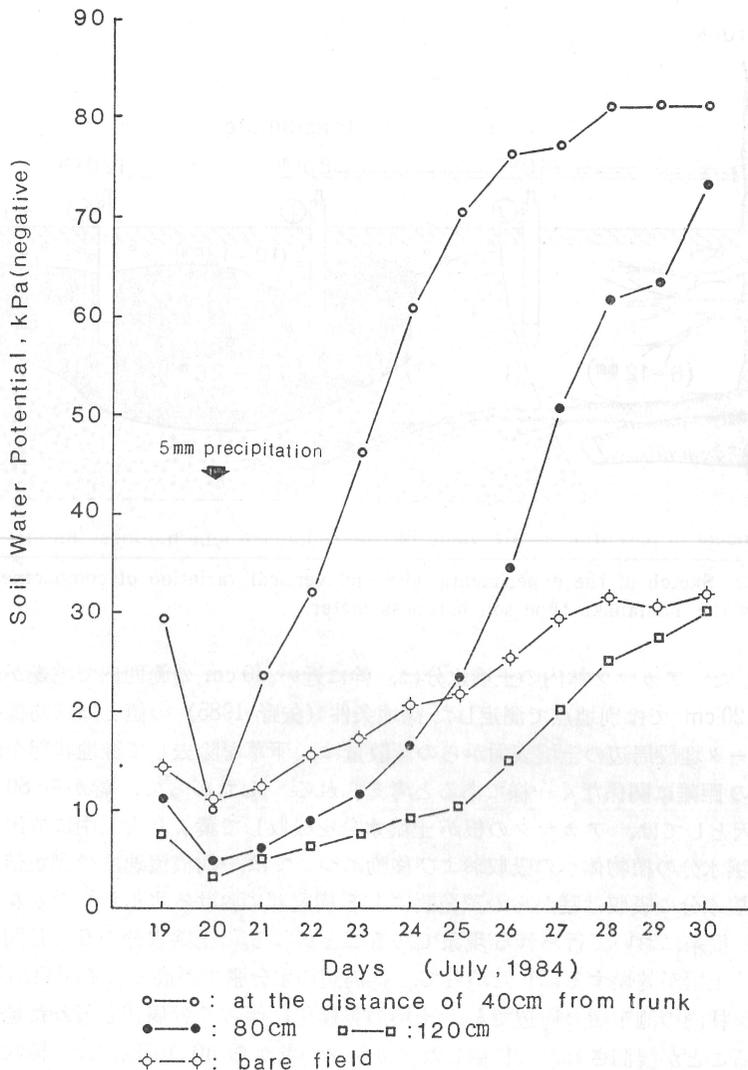


Fig. 3. Fluctuation of soil water potential in 20 cm depth at different distance from red pine trunk.

ワグネルポットに植込んだセンダンに重力水以上のかん水をした後、水の補給を断ち、土壤水分含量と樹液流速速度を経時的に測定した。結果を Fig. 5 に示す。ポットはプラスチック製を使用し、土壤表面および下端の排水口は完全に密閉したので、土壤水分の収支は植物体を通してのみ可能である。第1日午前7時のポット内土壤含水比は85%であった。これ以後の補水を停止して測定を継続した結果、17時には51%まで減少した。第2日の午前8時は、前日の夕刻より多い58%の含水比であった。そして10時には再び51%に減少して、植物体のしおれが著しくなった。補水を停止して28時間後の2日目の12時に十分の水補給を行ってしおれの回復を図った。しおれ現象が現われるまでのポット内土壤水分の変化において、夜間に一時的に増加することが確認された。実験条件から考えてポット内土壤への水流入は植物体を通してのみであり、夜間の含水比の増加現象は植物体が貯留していた水が根から土壤へ環元されたと解される。夜間に土壤含水比が増加する現象は、大気中の水蒸気が凝固して地表面を潤すためだと説明されていた。しかし、完全に水の補給が

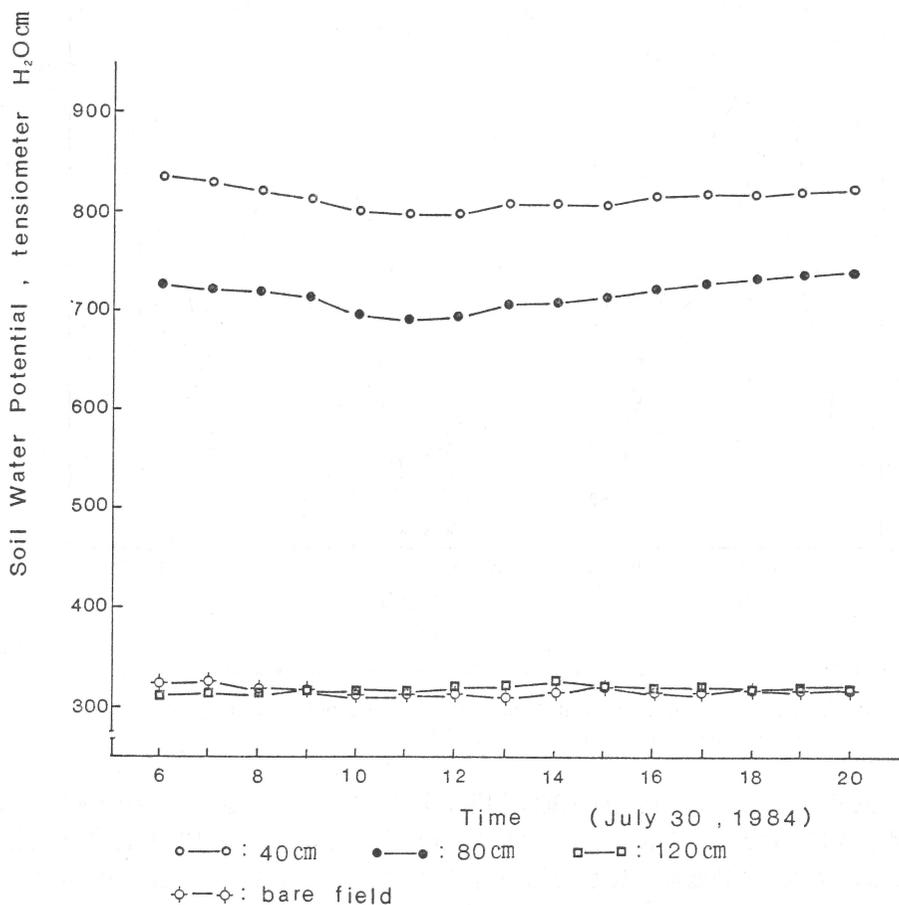


Fig. 4. Diurnal changes of soil water potential in 20 cm depth at different distance from red pine trunk.

遮断された条件下でもしばしば観測されるようになり、近年実験的研究や理論追求がされてきた (Gardner 1955)。土壌水分に変化が生じなくても、温度変化のみにより土壌水分張力が左右されるとの報告 (中山 1983) もされている。いずれにしてもこの現象には多くの未解決の問題が残されている。

土壌からの水分供給が十分な条件のもとにおける樹幹の樹液流速度は、葉から大気中に放出される蒸散量と関連が深いと言われる (森川・佐藤 1976)。樹液流速度は土壌-根系における水吸収機構よりも、葉-大気系の蒸散環境に深く影響される。アカマツの樹液流速度の日変化と気温、日射量の関連を Fig. 6 に示す。樹液流速度は、日の出とともに増大し12時頃に最大値の 20.6 cm/hr を示したのち、午後からの日射量の減少に伴って徐々に遅くなる。測定日午前中の日射量はしばしば雲により遮ぎられて変動が大きかったが、それに連動するかのように樹液流速度も変化した。日射量の増加は、植物の光合成活動を活発にし水分の蒸発散も盛んになり水分消費を増すことになる。今回の測定では葉など先端部における水不足の情報は、かなりの早さで吸収部である根に伝達されることが判った。日没後においても樹液流速度が 3.4 cm/hr と日の出時の 2.1 cm/hr よりも大きいことは、葉における光合成停止後も不足している植物体内の水を補給するために先端部に水を送っていることになる。

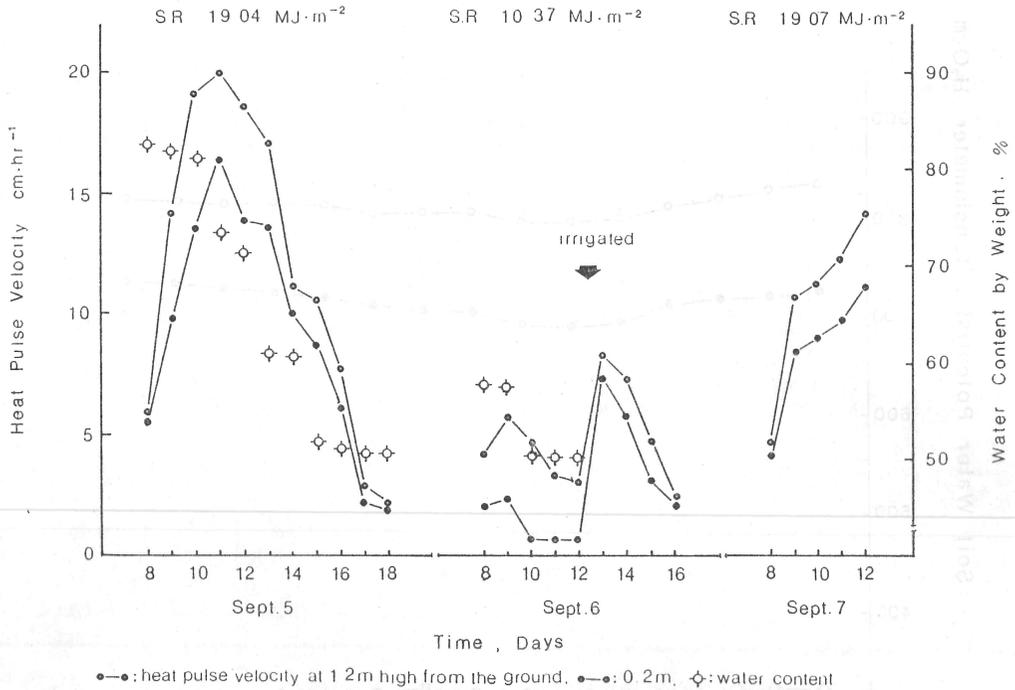


Fig. 5. Diurnal changes of water content and heat pulse velocity of pot grown three years old *Melia azedarach* on 1986.

ポットに植栽したセンダンの樹液流速度は、Fig. 5 に示すように、他の多くの樹種と同様に日の出から日中にかけて増大し、午後から日没にいたり徐々に遅くなる。測定2日目は日の出とともに増大傾向にあった樹液流速度も土壤水分が低下するにしたがって遅くなり、含水比が51%になると0.2mの高さの部位ではほとんど流速が見られなくなった。そして葉にしおれ現象が現われ始めた。実験はここで急いで水を補給したので以後の測定は可能になった。3日目の樹液流速度は1日目とほぼ同程度の状態までに回復した。2日目午前中に観測された樹液流速がほとんど停止した状態におけるポット内土壤水分張力は、表面から15cmの深さの部位の根系の多い層位でpF 2.90であり、表面から5cmの比較的根系の少ない層位ではpF 2.58であった。ここでも根の多い層位で乾燥が進行した。天然の樹林地においてもこの程度の土壤水分張力に低下することはしばしば見られることである。このような状態が一時的かあるいは短時間ならば、しおれも回復するが長時間継続すると植物は枯死することになる。センダンは水分欠乏に敏感に反応する種類の植物であり、初期しおれ点を的確に把むことができる。

水分子の凝集力に関する物理的諸性質から、土壤中の水分含量が減少すればするほど土壤中における水の移動や根による接触吸収が困難になることは明らかである。本報告のように土壤-根系内における土壤中の水移動を、土壤水分の多寡や根系分布と関連して解明しようとする試みは緒に付いたばかりで、今後の研究が期待される。

センダンのポット試験で初期しおれ発現土壤水分含量は、含水比で51%程度pF値で2.90前後であった。火山灰土壌ではこの程度の土壤乾燥状態は植物の生育期間中に何回となく遭遇するであろうが、植物は地中深く根を伸張するなど多様な適応器官を発達させて乾燥に耐えて生活しようとする。植物に必要な欠くべからざる水を、土壤-植物-大気の流れとした系として把握することはますます重要となってくる。また、樹幹の水動態を樹液流速から把握することは、正確で安定した

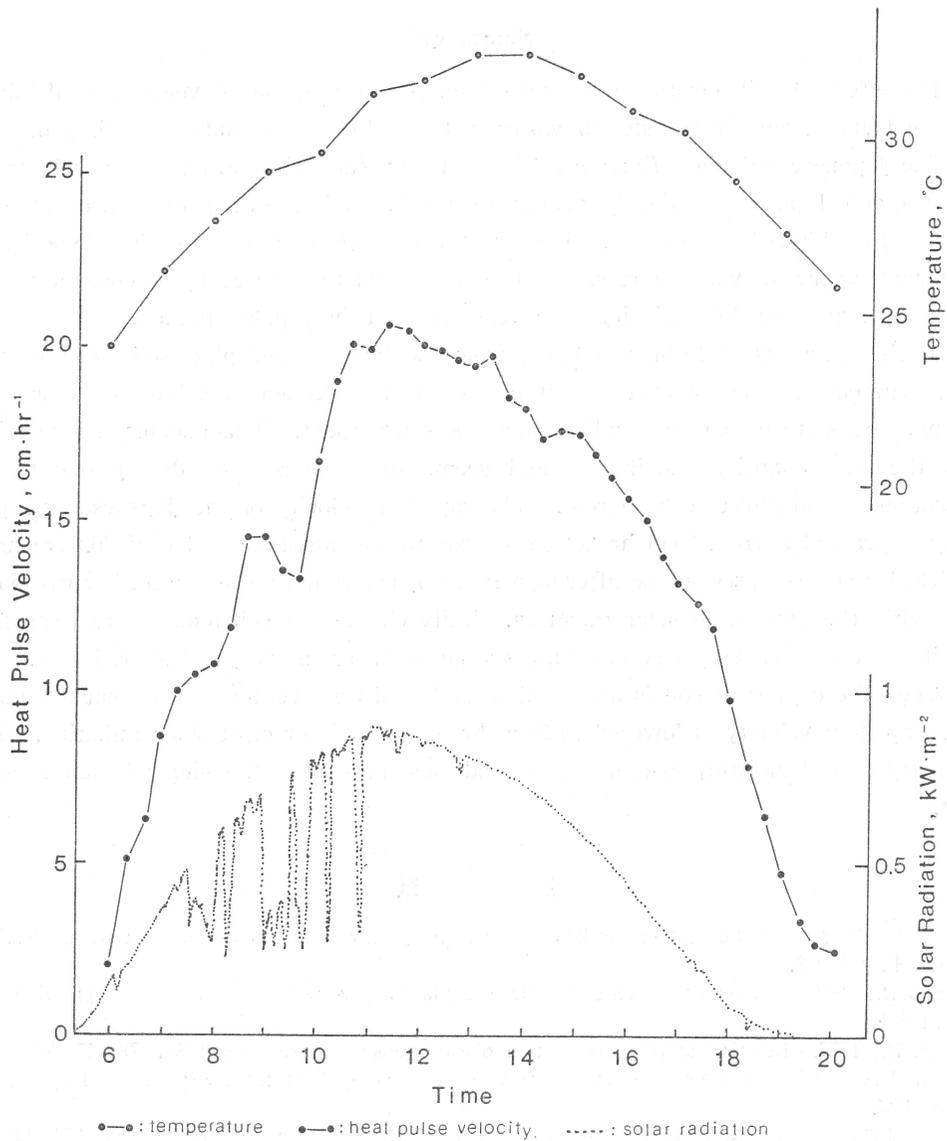


Fig. 6. Diurnal changes of temperature, solar radiation and heat pulse velocity of *Pinus densiflora* on July 30, 1984.

情報が得られるので非常に有用であった。

謝 辞

本小論をまとめるに当り、御校閲をいただいた国立科学博物館筑波実験植物園黒川 造園長に心より謝意を表します。また、種々の御助言と蒸散流速計を心快くお貸し下さった農業環境技術研究所植物生態系研究室佐藤光政室長に感謝いたします。

Summary

The effect of soil moisture environment on the growth and development of plants was conducted from the transfer of water in the soil-plant-atmosphere continuum.

The Japanese red pine (*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.), 7 years after transplantation in our botanical garden and the chinaberry tree (*Melia azedarach* L.) grown on a pot for 3 years were subjected to this test. The chinaberry tree is a species that experienced significant apparent water stress. Soil moisture was measured by a tensiometer and gravimetry, and sap flow velocity was measured by a heat pulse method.

At the distances of 40 cm and 80 cm from the Japanese red pine, soil moisture was high, whereas at the distance of 120 cm the moisture tension was low in the same as the moisture state of bare land where plant roots are absent. This phenomenon coincides with the root quantity distribution and seems to be caused by drying due to the absorption of soil moisture by a root. The sap flow velocity of the Japanese red pine changes gradually from 2 cm/hr before sunrise to the maximum value of 20.6 cm/hr at 12 o'clock and decreases in the afternoon to 2 cm/hr two hour after sunset in correspondence with the amount of solar radiation. Daily changes of soil moisture and sap flow velocity in the chinaberry tree are quite similar to those in the Japanese red pine.

When the drying of soil is advanced a soil moisture content ratio reached about 51%, sap flow velocity is lowered to 3 cm/hr in spite of sufficient solar radiation. The deficiency of soil moisture causes wilting and obstructs the physiological functions of plant.

文 献

- Closs, R. L., 1958. The heat pulse method for measuring rate of sap flow in a plant stem. *N. Z. J. Sci.* 1: 281-288.
- Cowan, I. R., 1965. Transport of water in the soil-plant-atmosphere system. *J. Appl. Ecol.* 2: 221-239.
- Gardner, R., 1955. Relation of temperature to moisture tension of soil. *Soil Sci.* 79: 257-265.
- Marshall, D. C., 1958. Measurement of sap flow in conifers by heat transport. *Plant Physiol.* 33: 385-396.
- 森川 靖, 1974. ヒノキの樹液の流れ —林木の水分収支と関連して—. *東大演習林報告*. 66: 251-293.
- ・佐藤 明, 1976. 幹の樹液流速と樹冠部の木部圧ポテンシャル. *日本林学会誌*. 58: 11-14.
- 中山熙之, 1983. 低水分張力域における保水量の温度変化. *土壤の物理性*. 47: 30-34.
- 矢野義治, 1985. 筑波台地表層火山灰土の土壤水分特性に関する研究 I. 植被が土壤水分におよぼす影響. *筑波実験植物園研報*. 3: 27-34.