

## 論 文

## 根箱を用いた2次元根系成長と土壌水分の観察

堤 大三\*・小杉賢一朗\*・水山高久\*

Observation of 2-Dimensional Root System Development and  
Soil Water Distribution in a Root Box

Daizo TSUTSUMI\*, Ken'ichiro KOSUGI\* and Takahisa MIZUYAMA\*

植物根系による土壌水分吸収や、根系成長に対する土壌水分分布の影響など、根系構造と土壌水分の関係についての研究が盛んに行われている。しかし、植物根系の調査には多大な労力と時間を必要とし、その研究には常に困難が伴う。根箱は根系の2次元構造を観察するのに有効な手法として開発され、多くの根系調査・研究に用いられている。一方、TDRは土壌含水率を非破壊的に、しかも短時間で測定する手法として確立されており、根箱内の土壌水分挙動の連続測定に適している。そこで、根箱とTDRを組み合わせ、2次元根系成長と土壌含水率分布の変化を高解像度でかつ連続的に観察・測定する手法の開発を目的として、実験を行った。本実験では、コイル型TDRプローブを採用し、根箱に高密度で設置する事を可能とした。実験の結果、水分供給位置に影響を受け成長する根系の詳細な形状、根系の土壌水分吸収による含水率分布の経時変化を高解像度かつ連続的に得る事ができ、本実験に用いたシステムが有効である事が確認された。また、コイル型プローブによる土壌含水率測定の有効性は、理論的検証からも確認された。

キーワード：根系成長、根箱、土壌含水率、TDR

Interactions between plant root systems and soil water, i.e. the soil water uptake by plant root system or the effects of soil water distributions on plant root system development, are now under the active investigations. However, observations of plant root systems under the ground take a lot of labors and time, and are very difficult works. Root boxes are used as a tool useful for the observations of 2-dimensional root system architectures in many experimental studies. On the other hand, TDR (time domain reflectometry) has been an established means for measuring the soil water content without destructing the soil domain during the investigation, and is suitable for continuous measurement of soil water distribution in the root boxes. Main aim of the experiment is to establish the new method for the continuous observation and measurement of both 2-dimensional root system development and soil water distribution with a high resolution, combining the root boxes and the TDR. In this experiment, using the coil-type TDR probes made it possible to install them highly densely in the root boxes. The detailed root system architectures that are affected by the soil water distributions and the temporal changes in soil water distributions that are caused by the water uptake by the root systems could be obtained continuously with a high resolution from the experiment results, and it was verified experimentally that the system for use in this experiment works well and also theoretically that the coil-type TDR probes are useful for the measurement of soil water distribution.

Key words: Root system development, Root box, Soil water content, TDR

## 1. はじめに

近年、植物根系の重要性が様々な分野で認識され、その研究が活発に行われるようになってきた。根系は植物体の成長に必要な養水分を吸収する器官である事から、作物学の分野では、作物の収量と根量・分布の関係が検討されており(例えば、川田ら, 1978; 山崎・原田, 1984)、多収量のための理想型根系がどのようなものかについて、種々の条件を想定した考察が行われている(山内, 1998)。また、森林科学の分野では、山地や道路法面で

の斜面安定に樹木の根系構造が寄与しているといわれており、この効果を定量化する検討が進められている(例えば、加藤・執印, 2001; 塚本, 1987)。しかしながら、植物の地上部に関する研究と比較して地下部に関する研究は立ち遅れており、特に根系成長機構については未だに多くの事が未解明のままである。この最大の原因は、植物根系は土壌中に存在するため直接観察する事が困難であるという事であろう。土壌中の植物根系の掘り取り調査は大きな労力と時間的負担を必要とし、仮に根系全体を土壌から掘り出す事に成功したとしても、もとの根

\* 京都大学大学院農学研究科森林科学専攻

\* Division of Forest Science, Graduate School of Agriculture, Kyoto University

系形状を維持する事はきわめて困難である。この問題に対する解決手段の一つとして、根箱を用いた根系成長実験が挙げられる。根箱を用いることによって、あらかじめ設定した空間に2次的に根系を成長させる事が可能となり、根系形状を乱すことなく土壌を取り除く事が容易に行える。また、根箱の材質を選択すれば、成長途中の根系さえも観察する事が可能となる (Kono et al., 1987)。これまでに、根箱を用いて多くの実験が行われている事から (例えば, Galamay et al., 1992; Iijima and Kono, 1991; 初井ら, 1992; 佐々, 1985), 根系構造の観察手法として確立された非常に有効な実験手法であると言える。

初井ら (1992) は、根箱を用いてダイズ根系を成長させた後、根箱を解体し根系形状と土壌含水率を計測して根系による土壌水分吸収についての検討を行っている。また、筆者らは、根系成長と土壌水分移動を組み合わせた2次的な数学モデルを構築し、根系成長に対する土壌水分挙動の影響についての検討を行った (堤ら, 2001; Tsutsumi et al., 2003)。この他にも、根系と土壌水分の関係の重要性が認識され、活発に議論されてきており (Green and Clothier, 1999; 中山ら, 2000; Vrugt et al., 2001), 根系構造と土壌水分分布の両方を高解像度でかつ連続的に観測する手法を確立する必要性が高まってきている。土壌水分の測定手法としては、テンシオメータによる土壌の間隙水圧の測定が一般的であるが、1) -1000cm以下の乾燥した範囲では計測不能、2) 根系がテンシオメータのポーラスカップから水分を吸収してしまう、という理由から、根系による水分吸収を伴う土壌水分の測定には不向きである。一方、Time domain reflectometry (以下TDR) は、近年さかんに用いられ、現在では土壌含水率測定一般的な手法となっている。TDRの測定原理は、土壌中を進んだ後、反射して戻ってくる電磁波の応答波形から含水率を推定するというものであるが、計測方法は簡便であり、計測にかかる時間も非常に短い。また、テンシオメータによる測定手法が抱える上記のような問題も無いため、根箱の土壌水分の2次元分布を高解像度で連続測定するのに適した手法であるといえる。筆者らは、根箱による植物根系成長実験とTDRを用いた土壌含水率測定手法を組み合わせ、2次的な根系構造・土壌水分分布を高解像度でかつ連続的に観測する事を目的とし、実験を行った。本稿では、上記の手法開発のための実験を中心に報告する。

## 2. 実験方法と材料

### 2. 1. 実験場所, 期間, 気温

実験は、京都大学演習林本部試験地内 (京都大学構内, 京都市左京区) の温室で行った。実験期間は、2002年4月19日～5月28日である。この期間の内、4月19日～4月26日は、TDRのキャリブレーションを、4月27日～5月28日は、根系成長実験を行った。根系成長実験期間中の気温変化を図1に示す。図1 a) は、外気の日最低気温, 日最高気温, 日平均気温の推移を表し、図1 b) は、温室内の気温変化を表している。なお、実験期間を通しての外気平均温度は18.8℃, 温室内平均温度は22.3℃であった。

### 2. 2. 根箱

実験に用いた根箱は、合計4個 (No.1～4) 作成した。根箱の正面図・側面図を図2に示す。根系成長の途中経過を観察できるように、根箱の正面と裏面には透明アクリル板を用いた。根箱周縁部には、弾力性はあるが変形しにくい硬質スポンジを用いた。なお、硬質スポンジの表面を通しての水分移動を防ぐため、防水加工を施した。この硬質スポンジを表面・裏面の2枚のアクリル板ではさみ、周縁部をボルト・ナットで固定して内部に土

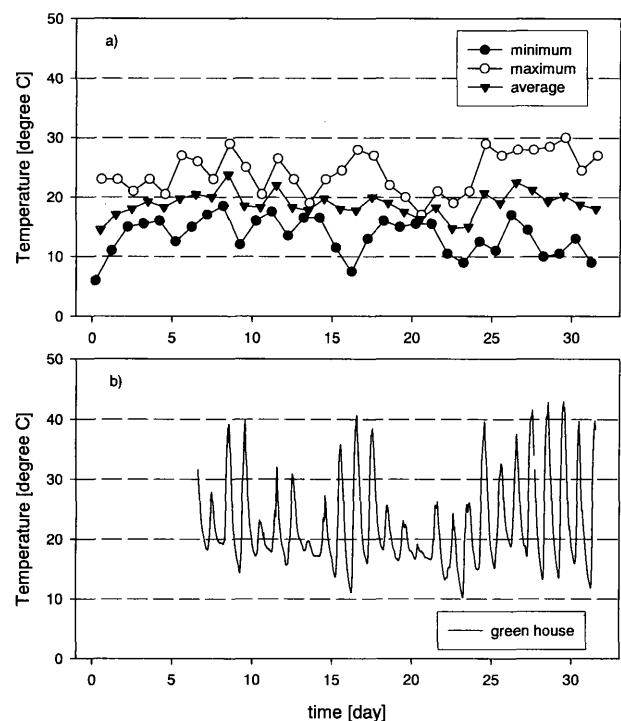


図1 実験期間中の気温の変化  
Fig.1 Temperature changes during the experiment.  
a) 外気温度, b) 温室温度  
a) Outside, b) Inside the greenhouse

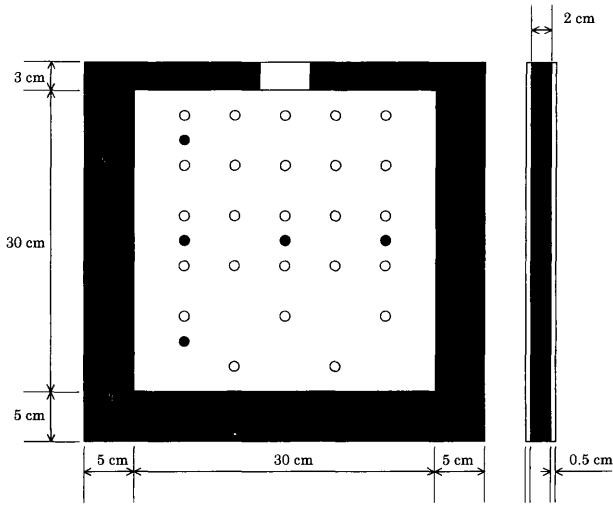


図2 根箱の正面図および側面図  
Fig.2 Front view and side view of the root box  
(○; TDRプローブ, ●; ポーラスカップ)  
(○; TDR probes, ●; porous cups)

壤を充填できる空間 (30×30×2 cm) を作り、根箱とした。根箱の上面は、土壌からの水分蒸発を防ぐため、側面・底面同様、硬質スポンジにてシールした。ただし、植物の播種・地上部成長のため、長さ5 cmの開口部を設けた。実験期間中は、日射や設置面との熱移動による急激な温度変化を防ぐため、根箱の表面・裏面を発泡スチロール板 (厚さ: 3 cm) で覆い、遮光・断熱した。根箱 No. 3, 4 には、図2に白丸で示すような配置に、根箱1個あたり25個のTDRプローブを設置した。また、図2に黒丸で示すような配置に、テンシオメータで使用するポーラスカップを設置、高さを調節できるタンクにシリコンチューブを用いて接続し、常時給水できるようにした。ポーラスカップによる給水位置は根箱によって変化させており、根箱No.1, 3には中央横並びの3点に、根箱No.2, 4には左側縦並びの3点に設置した。

### 2. 3. TDR

土壌水分測定に採用するTDRのセンサー部であるプローブは、解析精度を保つために10cm以上の長さが必要であると言われているため (Dalton and van Genuchten, 1986)、通常のロッド型プローブによる計測では最低でもロッド長さ以上の範囲の土壌水分を計測する事となる。通常のロッド型プローブに対して最近では、ロッド部をコイル状に巻いた形状をしたコイル型プローブが提案されている (Nissen et al., 1998; Vaz and Hopmans, 2001)。このコイル型プローブを用いる事で、必要なプローブ長を確保しつつ、計測範囲をコイルの直径程度に縮小する事が可能である。本研究における、「根箱内の

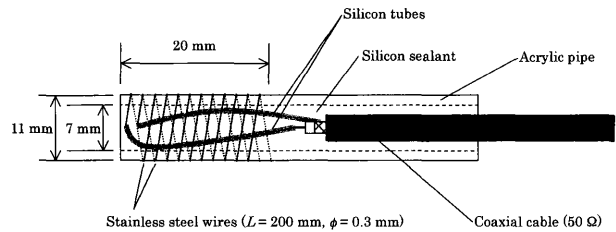


図3 コイル型TDRプローブ  
Fig.3 Coil type TDR probe

土壌水分を高解像度で測定する」という目的には、このコイル型プローブが適しており、これを採用した。しかしながら、コイル型プローブは市販されておらず、目的に応じて作成する必要がある。そこで、根箱内含水率測定に適した形状のコイル型プローブを独自に設計・作成した。設計・作成に当っては既往の研究 (Nissen et al., 1998; Vaz and Hopmans, 2001) を参考にした。図3に、作成したコイル型プローブの詳細図を示す。プローブには、2本のステンレス線 (径0.3mm, 長さ20cm) を用い、アクリル管 (外径11mm, 内径7mm) にコイル状に巻きつけ、一部を接着剤で固定した。コイルの長さは、根箱の厚さに合わせ2 cmとした。よって、2本のステンレス線の間隔は、約1.7mmとなる。ステンレス線はアクリル管内部で、同軸ケーブルに接続したが、1本は同軸ケーブルの中心導線に、もう1本は周縁部導線にそれぞれ固定した。アクリル管内部のステンレス線は接触を避けるため、シリコンチューブで被覆し、さらにアクリル管内への水分進入を防ぐためにシリコン充填材を充填した。

TDRによる土壌含水率測定の利点の一つとして、湿度、測定する土壌の土質、空隙率  $\phi$  [ $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ] の違いに寄らず、TDR検出値  $L_d/L$  を二乗した値である比誘電率  $\kappa$  と含水率  $\theta$  [ $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ] の間にはほぼ一定の関係が成り立つという事があげられる ( $L_d/L$ ,  $\kappa$  は、無次元の単位を持つ値)、(Topp et al., 1980)。このため、通常のロッド型プローブを用いる場合、Toppの式 (Topp et al., 1980) が一般的に用いられている。しかしながら、本研究で用いたコイル型プローブは、ロッド型と形状が大きく異なるため、同じ関係式を使う事はできない。このため、独自に比誘電率  $\kappa$  と含水率  $\theta$  の関係を求めるキャリブレーションを行う必要がある。このキャリブレーションは、根系成長実験を開始する前に行った。以下に、キャリブレーションの手順を述べる。TDRプローブは全て根箱に設置した状態とし、根箱には実験に使用する土壌を実験時と同じ充填密度 ( $0.87\text{g}/\text{cm}^3$ ) で充填した。この後、根箱は、裏面のアクリル板を取り外した状態で水平に設置し、土壌が飽和するまでスプレーを用いて土壌表面に均一に水を供給した。土壌が飽和した直後、根箱全重量

とTDR値を測定した。その後、根箱を水平に設置したまま放置し、自然乾燥によって土壤水分を蒸発させ、一定重量減少するたびに最初に行ったのと同様に根箱全重量とTDR値を測定した。以上の測定項目と、根箱とは別に測定した土壤の空隙率 $\phi$ 、根箱容積[cm<sup>3</sup>]、根箱空重量[g]から、土壤の含水率 $\theta$ を計算し、計7点のTDR検出値 $L_d/L$ と含水率 $\theta$ の関係を求めた。この関係を曲線で近似し、実験における根箱内の土壤含水率計算に使用した。なお、曲線近似の詳細については、次章「結果と考察」で述べる。

## 2. 4. 土壌と植物

実験には、京都大学演習林上賀茂試験地(京都市北区)にて採取した砂質土と市販の有機土壌(ハイポネックス社)を体積比1:1で混合し、これに消石灰を土壤1ℓ当り約4g加え、使用した。土壤の水利特性を求めするため、加圧板法により含水率 $\theta$ -圧力水頭 $\psi$ の関係を測定した。この土壤の含水率 $\theta$ -圧力水頭 $\psi$ の関係、不飽和透水係数 $K$ -圧力水頭 $\psi$ の関係を、図4に示す。図4 a)における白丸は実測値を表し、曲線はKosugi (Kosugi, 1996)によって提案された対数正規分布モデルにより近似したものである。また、図4 b)における曲線は、得られた $\theta$ - $\psi$ 曲線を用いて、同様の対数正規分布モデルにより推定したものである。

実験には、ダイズ(*Glycin max*)を用いた。ダイズの根系は、直根型に近くイネ科植物根系のひげ根型と比較して、単純な形状をしており、根系形状の解析が比較的容易である。また、過去に幾つかのダイズ根系に関する研究が行われており、根箱での根系成長実験に適している事がわかっている(荊井ら, 1992; Raper and Barber, 1970)。これらの理由から、根形成長実験に用いる植物として、ダイズを選択した。

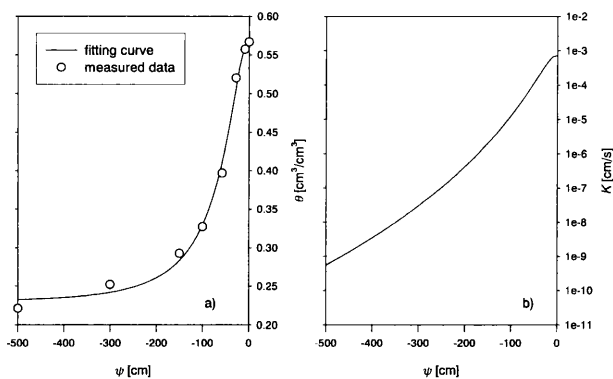


図4 土壌の水利特性 a)  $\theta$ - $\psi$ , b)  $K$ - $\psi$ 関係  
Fig.4 The soil hydraulic property, a)  $\theta$ - $\psi$ , b)  $K$ - $\psi$  relationships.

## 2. 5. 実験手順

TDRプローブのキャリブレーション終了後、根箱(No.3, 4)から土壤を取り除き、新たに全ての根箱(No.1~4)に、あらかじめ決定した密度(0.87g/cm<sup>3</sup>)となるよう、土壤を充填した。この時、根箱に充填したものは別に、土壤の含水率を秤量法にて測定しておき、根箱の初期含水率とした。また、根箱全重量をそれぞれ測定した。根箱は、初め垂直に設置し、TDRプローブを設置した根箱(No.3, 4)は、TDRプローブをTDR本体に接続した。ダイズの種子は、播種の2時間前から、濡れたタオルに包んでおき、根箱開口部から土壤0.5cmの深さに2個ずつ播種した(4月27日)。発芽した時点(播種から7日後、5月4日)で根箱を水平に設置し、TDRによる土壤含水率の測定を開始した。また、根箱に設置されているポーラスカップにそれぞれシリコンチューブを接続、水分の連続供給を開始した。この時、ポーラスカップの圧力水頭を調整するため、水タンクは根箱から-25cmの位置に設置した。さらに、この時点で、根箱当り2個体のダイズのうち、成長の悪い方を取り除いた。その後は、毎日18:00に、各根箱の重量、水タンクの減少量を測定し、必要に応じて根系成長を観察した。給水が無い状態での土壤含水率変化(根系による吸水)を測定するため、播種から30日後(前日5月25日18:00から5月26日21:00まで)にポーラスカップからの連続給水を停止した。播種から32日後(5月28日)の12:30に、TDRによる含水率測定を停止し、根箱を解体して根系を含む土壌ごと10mmメッシュの網の上に移して、流水にて土壤を洗い流し、根系を露出させた。デジタルカメラで根系を撮影し、その形状を記録した。なお、実験の途中で根箱の設置方向を垂直から水平に変更しているが、これは根系成長に対する土壤水分の影響を明瞭にするため、根箱を水平に設置する事で重力による影響を最小限に留めるためである。

## 3. 結果と考察

### 3. 1. TDRキャリブレーションと理論的検証

図5に、実験に用いたTDRプローブのキャリブレーション結果を、根箱No.3, No.4について示す。図5中の白丸は、25個の実測値の平均を表し、エラーバーは標準偏差を表す。図5より、TDR検出値 $L_d/L$ と土壤含水率 $\theta$ の間には、ほぼ一定の関係が成立する事がわかる。この関係は、根箱No.3, No.4について、同様に見られ、その両者は類似していた。また、TDR検出値 $L_d/L$ のプローブ毎のばらつきは、低含水率域で小さいが、高含水率域では大きくなるという傾向が見られた。TDRの検

出値  $L_d/L$  は、土壌の比誘電率  $\kappa$  の影響を受けて変化し、この両者には以下の関係式が成り立つ (Baker and Allmaras, 1990).

$$L_d/L = \sqrt{\kappa} \quad [1]$$

土壌の比誘電率は、その構成要素である、空気、土粒子、水それぞれの比誘電率によって決まるが、空気、土粒子の比誘電率 (それぞれ、1.0, 3.9) に比べ、水の比誘電率 (80) は非常に大きい。このことから、土壌に含まれる水の割合がTDR検出値を大きく左右し、土壌の含水率を推定することができる。このようなメカニズムから、低含水率域では、比誘電率の大きい水が少なく、比較的近い比誘電率を持つ土粒子と空気の占める割合が大きいため、プローブ毎の形状の違いによる特性や土壌との接触状態の違いなどにかかわらず、測定値には、ばらつきが少ない。逆に、高含水率域では、検出値に対して影響の大きい水が占める割合が大きいため、プローブと土壌との接触状態の違いやプローブ毎の特性が測定値に大きく影響し、ばらつきが大きくなったものと想像される。しかしながら、ここでは結果は示さないが、過去に数回行ったキャリブレーションでは各プローブ固有の値を持つ傾向は認められなかった。このため、各プローブの形状等のばらつきは小さく、測定値に対する影響が小さいものと考えられる。よって、プローブ毎のキャリブレーションの違いは土壌とプローブとの接触状態の違いが大きく影響した結果と思われる。もし、キャリブレーションに使用した土壌をそのままの状態、根系生育・土壌含水率測定実験に使用するのであれば、プローブ毎に求めたTDR検出値と土壌含水率の関係を用いるべきであるが、本実験ではキャリブレーションに使用した土壌は根箱から取り出し、新たに土壌を充填して根系成長を開始させたため、個々のプローブに対して求めたキャリブレーション曲線ではなく、各根箱中のプローブの平均値についてのキャリブレーション曲線を根箱内の全てのプローブに適用する事とした。式 [2] に示す関数でこの平均値を近似し、各根箱毎のキャリブレーション曲線として利用した。近似曲線と、式 [2] 中のパラメータを、図 5 に示す。

$$\theta = a(L_d/L - b)^d + c \quad [2]$$

ここで、 $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  はフィッティングパラメータを表す。

以下においては、TDR検出値と土壌含水率との相関について理論的検討を行い、キャリブレーションにより得られた関係の妥当性を検証する。混合法則 (Mixing law) によると (Nissen et al., 1998; Roth et al., 1990),

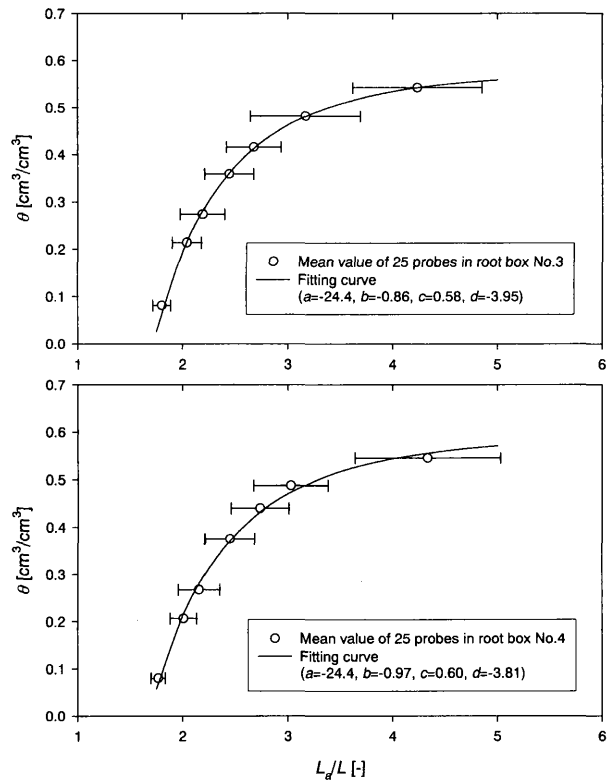


図 5 コイル型TDRプローブのキャリブレーション曲線  
Fig.5 The calibration curves for coil type TDR probes.

通常用いられる 2 ロッドタイプの TDR プローブにより計測される土壌の比誘電率  $\kappa_{soil}$  は、土壌の構成要素である空気、土粒子、水それぞれの体積比  $\phi$ 、 $1-\phi$ 、 $\theta$  と、それぞれの比誘電率  $\kappa_a$ 、 $\kappa_s$ 、 $\kappa_w$  により以下のように表す事ができる。

$$\kappa_{soil} = [(\phi - \theta) \cdot \kappa_a^n + (1 - \phi) \cdot \kappa_s^n + \theta \cdot \kappa_w^n]^{1/n} \quad [3]$$

ここで、 $n$  は土壌の固相形状と電磁波の方向性により決まる、 $-1 < n < 1$  の大きさを持った係数である (Roth et al., 1990)。本実験に用いたプローブは、土壌の他にコイルを巻きつけているアクリル管に接している。このため、さらに混合法則を適用し (Nissen et al., 1998),

$$\kappa_{coil} = [(1-w) \cdot \kappa_{soil}^\alpha + w \cdot \kappa_p^\alpha]^{1/\alpha} \quad [4]$$

と表す。ここで、 $\kappa_{coil}$  はコイルプローブにより測定される比誘電率を、 $\kappa_p$  はプローブ材質の比誘電率を表し、 $w$ ,  $(1-w)$  はプローブ材質、土壌それぞれの重み係数を表し、 $\alpha$  は式 [3] 中の  $n$  と同様の係数である。式 [3] を [4] に代入し、

$$\kappa_{coil} = \left\{ (1-w) \cdot [(\phi - \theta) \cdot \kappa_a^n + (1 - \phi) \cdot \kappa_s^n + \theta \cdot \kappa_w^n]^{\alpha/n} + w \cdot \kappa_p^\alpha \right\}^{1/\alpha} \quad [5]$$

と表せる。なお、比誘電率  $\kappa_{soil}$ ,  $\kappa_a$ ,  $\kappa_s$ ,  $\kappa_w$ ,  $\kappa_{coil}$ ,  $\kappa_p$  および係数  $n$ ,  $w$ ,  $\alpha$  は、全て無次元の単位を持つ値である。土壌の測定値として  $\phi=0.567$ , 各成分の固有値として、 $\kappa_a=1.0$ ,  $\kappa_s=3.9$ ,  $\kappa_w=80$  (Vaz and Hopmans, 2001), プローブ材質はアクリル樹脂であるので  $\kappa_p=2.63$  (化学便覧, 1993), 過去の研究より,  $n=0.46$  (Roth et al., 1990),  $\alpha=-0.1$ ,  $w=0.51$  (Nissen et al., 1998) と仮定し, 式[5]を式[2]に代入して得られる  $L_d/L-\theta$  関係を, 図6に実線で示す。各根箱共に, 含水率の低い領域では, 実測データと混合法則による理論線とは, 比較的良い対応関係を示している。しかし, 含水率が飽和に近い領域ではこれら両者はかけ離れている上, 全体としての傾向も, 前者は上に凸の傾向, 後者は下に凸の傾向を示しており, このままでは本実験で用いるTDRプローブのキャリブレーション曲線を混合法則により, 理論的に説明することはできていない。Nissen et al. (1998) の用いたコイル型プローブ形状との違いが影響していることも考えられるので,  $\alpha$  と  $w$  の値を変数としてパラメータフィッティングを試みたが, ほとんど改善は見られなかった。既往の研究 (Baker and Lascano, 1989) によると, 2ワイヤータイプのTDRプローブ (ロッド径=3.175mm, ロッド間隔=5 cm) の空間的な感知範囲は, 媒体によって異なり, 比誘電率の大きな水で大きく (20×65mm長方形範囲), 比誘電率の小さい空気で小さい (ロッドの周り20mm同心円範囲) と報告されている。このことから, 土壌の含水率が変化すれば, TDRプローブが感知する空間的範囲も変化するものと思われる。この測定範囲の含水率依存性を, 上記の混合法則において考慮すれば, 式[4]の  $w$  は定数ではなく, 土壌含水率  $\theta$  によって変化する関数として扱うべきである。なぜなら, プローブが感知する比誘電率に対して, プローブ材質の比誘電率が寄与する範囲は常に一定であるが, 土壌の比誘電率が寄与する範囲は含水率の上昇と共に増加すると考えられるためである。ここで,  $w$  を  $\theta$  の関数として以下のように定義した。

$$\frac{w_1-w}{w_1-w_2} = \left(\frac{\phi-\theta}{\phi}\right)^{n_w} \quad [6]$$

ここで,  $w_1$ ,  $w_2$  は 0 から 1 の間の大きさを持つ定数,  $n_w$  は -1 から 1 の間の大きさを持つ定数である。 $w_1 > w_2$  ならば,  $w$  は  $\theta$  の増加関数,  $w_1 < w_2$  ならば,  $w$  は  $\theta$  の減少関数である。式[6]を式[5]に代入し, 式[5]の残りのパラメータは先ほどと同様の値を採用し, さらに式[2]に代入し, 実測値を近似したものを, 図6に破線で示し, この時の  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $n_w$  の値も併記した。図6において, 実測データと破線は全ての含水率範囲で非常に良

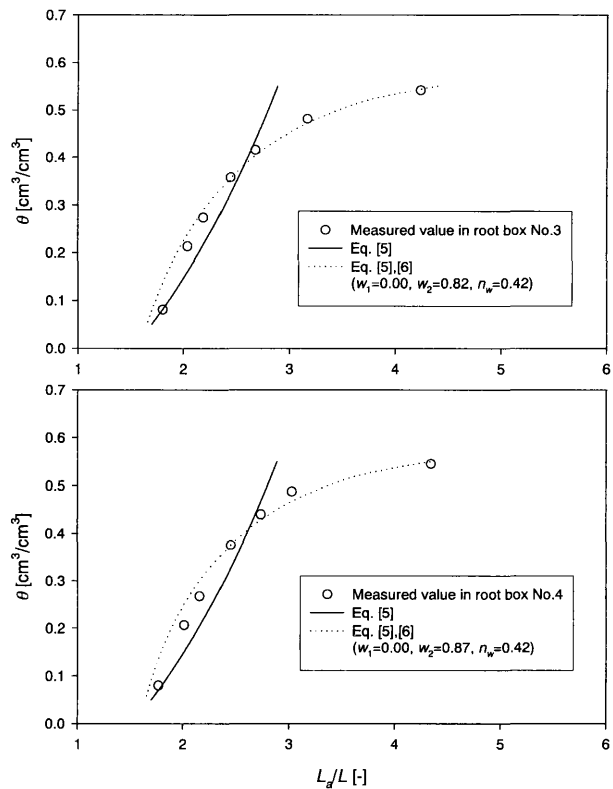


図6 コイル型TDRプローブの理論式による検証  
Fig.6 Verification of the coil type TDR probes by the theoretical considerations.

い対応を示していることがわかる。また, この時の  $w_1$  と  $w_2$  の間には  $w_1 < w_2$  の関係が成り立っており,  $w$  は  $\theta$  の減少関数である。この事は, 土壌含水率  $\theta$  が増加するに従って式[5]における  $1-w$  が増加, すなわち, 土壌の比誘電率による全体への寄与が増加することを表しており, 先に述べた考え方と一致している。このように, 新たに提案した式[6]を用いることによって, 実測値を理論式 (混合法則) で説明できることが示され, 本実験のキャリブレーションで求めた  $L_d/L-\theta$  関係が妥当なものである事が確認された。

### 3. 2. 根系構造

図7から10に, 実験の最後に掘り取った根箱No. 1からNo. 4の根系の2次元分布を, それぞれ示す。各図中の正方形は根箱の領域を, 白丸は給水に用いたポーラスカップの位置をそれぞれ表す。図に示した根系形状は, 画像処理ソフト (Scion image, Scion Co., U.S.A.) を用い, 写真の画像をバイナリー処理したものである。これらの図には, かなり細かい根までが詳細に表示されていて, 空間的に成長した根系を掘り取って調査する場合に比べ, 土壌中での根系の形状が非常に良い状態で再現されている。若干の根が根箱領域から外にはみ出ているが,

この内の一部は実際に根箱の亚克力板と硬質スポンジの間に入り込んで伸長した根である。残りのものは、根系から土壌を取り除く作業中にもとの位置から少しずれたものであると考えられ、この程度の移動は起こり得る。しかし、根系から土壌を取り除く作業を極力慎重に行う事によって、根系形状のずれを最小限に押さえることは可能である。総合的に判断すると、これらの図は土壌中の根系構造を明瞭に、高い再現性で表現しており、本実

験で用いた根箱が根系構造の解析に非常に有効である事が言える。

図7, 9に示した根系は、根箱No.1とNo.3のものであり、水供給位置が中央横向きに配置されている。一方、図8, 10に示した根系は、根箱No.2とNo.4のものであり、水供給位置が左側縦向きに配置されている。全ての根系において、根は水供給位置に近い領域に非常に密に分布しており、根系の成長が水の供給位置に大きく影響

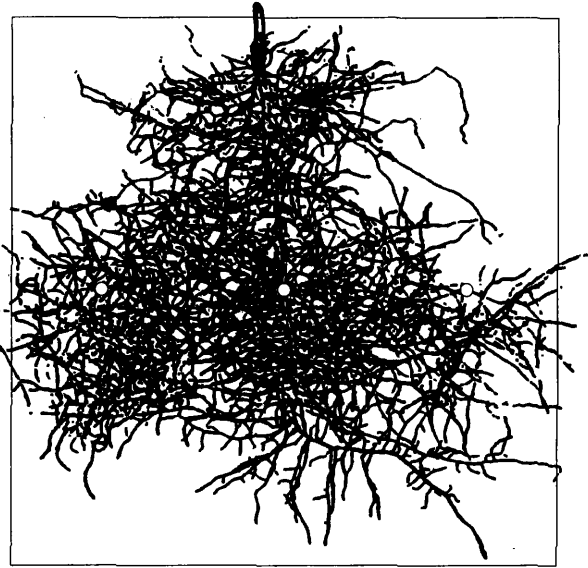


図7 根箱No.1で成長した根系の分布図(白丸は、給水位置を示す)  
Fig.7 Root system architecture developed in root box No.1  
(The circles indicate the points of water supplies)

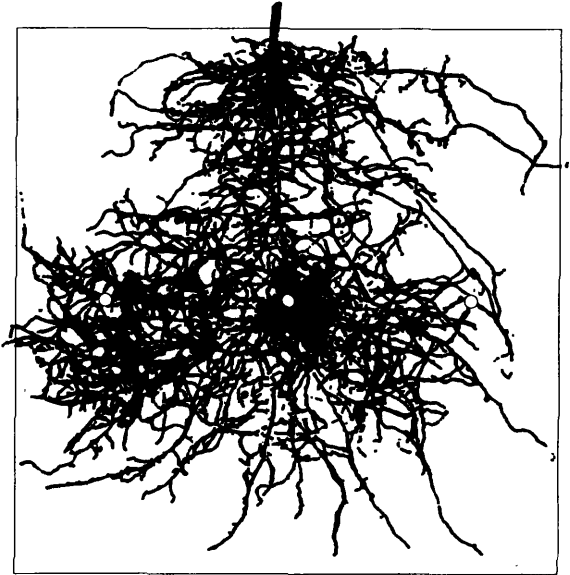


図9 根箱No.3で成長した根系の分布図(白丸は、給水位置を示す)  
Fig.9 Root system architecture developed in root box No.3  
(The circles indicate the points of water supplies)



図8 根箱No.2で成長した根系の分布図(白丸は、給水位置を示す)  
Fig.8 Root system architecture developed in root box No.2  
(The circles indicate the points of water supplies)

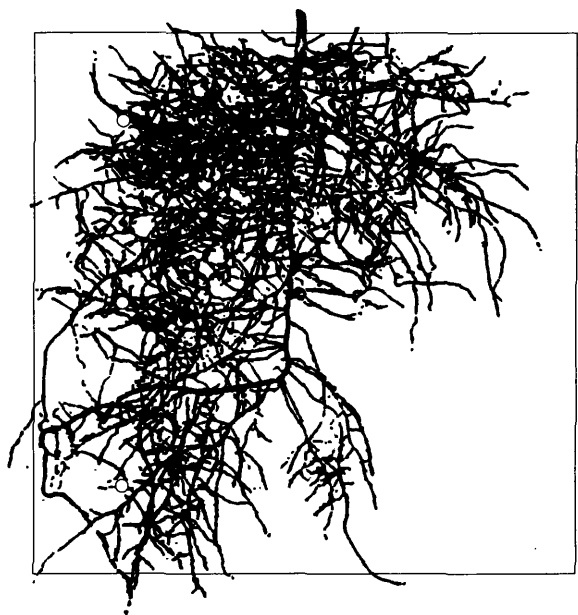


図10 根箱No.4で成長した根系の分布図(白丸は、給水位置を示す)  
Fig.10 Root system architecture developed in root box No.4  
(The circles indicate the points of water supplies)

されていることを示している。また、根箱No.1とNo.3の根系と、根箱No.2とNo.4の根系は、それぞれ非常に類似した形状を呈しており、植物の個体間差、TDR計測の有無による差は小さく、根系成長に対する水供給位置による影響が明確に現れている。個々の根の伸長挙動を見てみると、水供給位置から離れた部分にある根が、水供給位置に向かって曲がって行く様子がいくつかの根で見られ、この現象が根の水分屈性 (Takahashi, 1994; Takano et al., 1995) によるものであることが確認できる。特に、根箱No.4において、始めは根箱を垂直に設置していたため、主根は図の下側に向かってまっすぐ伸長しているが、その後、根箱を水平に設置すると、急激に左側にある水供給位置に向かって屈曲伸長している様子が見られる。根箱No.2については、主根の成長が比較的速かったため、根箱を水平に設置した時点で主根先端部は低部近くにまで達しており、No.2で見られたような急激な屈曲伸長は起こらなかった。しかしながら、根箱No.2, No.4の両方で、側根を含めた根系全体が水供給位置の方向に屈曲伸長する挙動は明確に現れている。なお、播種から発芽までの間、主根が重力方向にまっすぐ伸長し、根箱を水平に設置してからその伸長方向が変化する様子は、実験中の観察によっても確かめられている。根の屈曲伸長に加え、水分供給位置に近い領域ではそれ以外の領域に比べ根の成長が早く、結果的に多くの根が分枝するために全体として根量が多くなっている様子が観察される。このように、根系成長に対する土壌水分の影響は、根の水分屈性と成長速度という形で現れていることが確認できた。本実験では、根箱を設置する状態を垂直、水平と変化させる事で、重力方向を制御する事ができ、根系成長に対する重力の影響を調査する目的に対しても有効な実験手法である事が示された。本稿では、根系の最終形状のみを示したが、成長途中の根系形状も詳細に観察する事ができ、実験に用いた根箱は根系成長機構を解明する事に有効である。

### 3. 3. 土壌含水率分布

図11, 12に、5月26日6:00から21:00の間、TDRにて測定した根箱No.3とNo.4の土壌含水率の2次元分布を、3時間間隔でそれぞれ示す。TDRプローブが設置されている範囲は、根箱上端から2.5~27.5cm, 左端から5.0~25.0cmであるため、その範囲の外側の土壌含水率は表示されない。凡例に示すように、暖色系の色ほど土壌含水率が低く、土壌が乾燥している事を示す。先に示した通り、5月25日18:00から5月26日21:00までの間、根箱への水供給は停止されている。また、5月26日6:00は、水供給停止から12時間経過しているため、その影

響はほとんど残っていないものと思われる。図11, 12両方において、6:00には土壌含水率が比較的高く、全領域にわたり比較的均一に分布している。時間の経過と共に9:00以降、領域の中に含水率の低い部分が現れ、その面積が拡大して行く様子が示されている。この含水率の低下、面積の拡大は、15:00に最大となった後、徐々に緩和して行き、21:00には部分的に乾燥した領域は残っているものの、比較的均一な分布状態に戻っている。また、含水率が低下する領域は、図11では根箱の中央付近に、図12では根箱の左側に偏っており、図9, 10に示した根系分布と完全に対応している。この対応から、根系により土壌水分が吸収され、土壌に乾燥した領域が現れたという事がわかる。このように、図11, 12に示した土壌含水率の2次元分布の変化は、根系による土壌水分吸収の挙動を、時間的、空間的に非常に良く再現している。ここでは、一例だけを挙げたが、全実験期間を通じて、同様のデータが連続的に得られており、根系成長とそれに伴う土壌水分吸収挙動の変化や、土壌水分分布の根系成長への影響を根系成長の全期間にわたり、解析する事が可能である。以上のように、本実験にて行ったTDRによる根箱の土壌含水率測定により、得られる根系形状と十分比較できる程度に高い解像度で土壌含水率の2次元分布を得られる事が示され、開発したコイル型TDRプローブと根箱の実験システムが非常に有効なものである事が確認された。

### 4. おわりに

本実験において開発した、根箱とTDRを組み合わせた実験システムは、根系形状の表示・調査、土壌含水率の高解像度2次元分布の連続測定に非常に有効な手段であることが、実際に行った植物根系の成長実験を通して確認できた。また、独自に作成したコイル型TDRプローブは、本実験の目的に対し十分な測定精度を有している事も確認できた。さらに、コイル型プローブのキャリブレーション線について、従来示されている混合法則に、今回新たに提案した考え方(式[6])を付け加える事で、理論的に説明できることを示した。

本稿では、実験システムの開発・実験方法の確立を中心に報告を行い、得られた結果の詳細な解析結果までは議論していない。しかしながら、本実験により得られた結果は、2次元的な根系成長に対する土壌水分または重力による影響、根系による土壌水分吸収挙動等を高い精度で表している。今後は、これらの結果についての詳細な検討を進めて行く予定である。



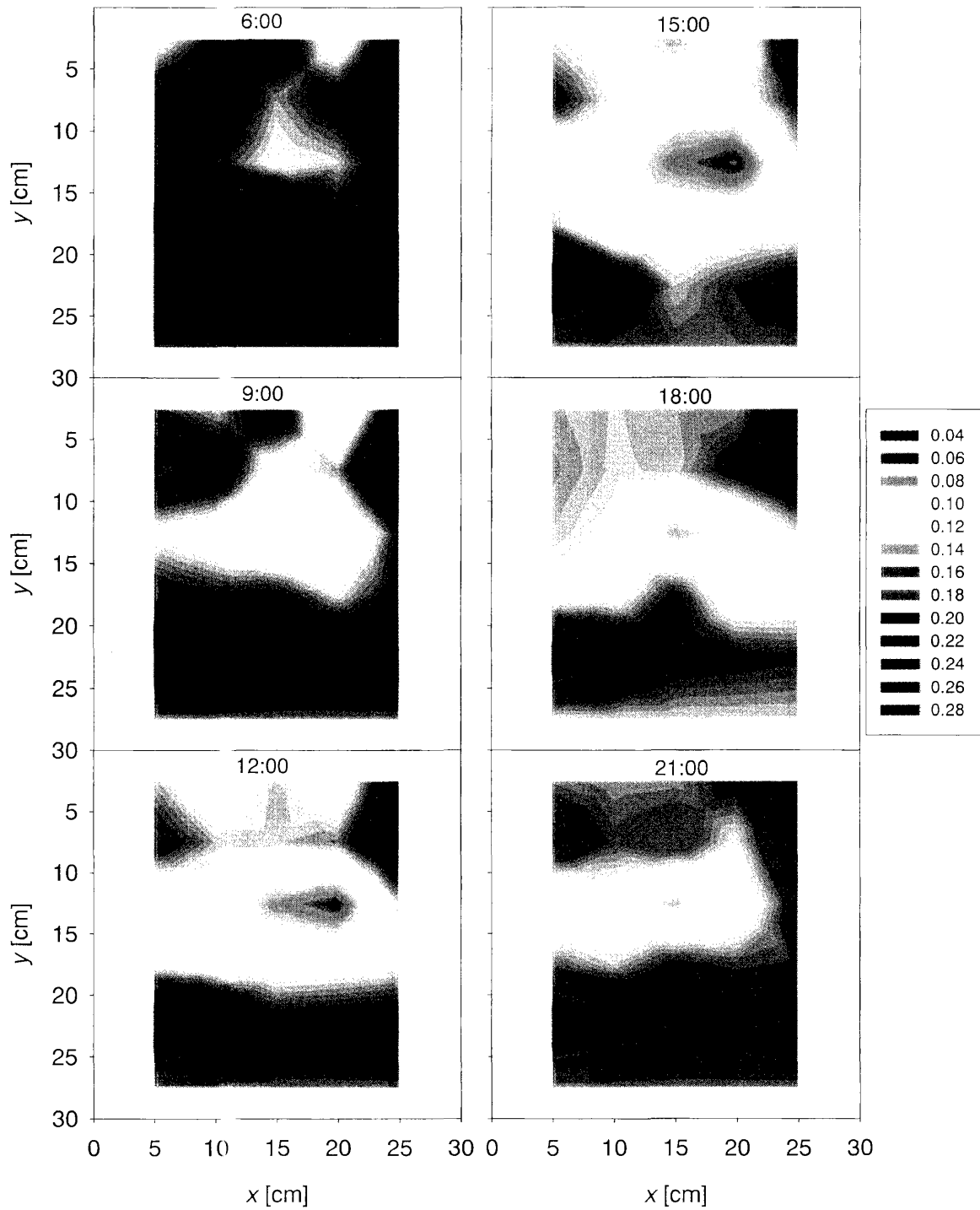


図11 根箱No.3における土壌含水率分布 [cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>] の経時変化  
 Fig.11 The changing distribution of soil water content [cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>] in the root box No.3.

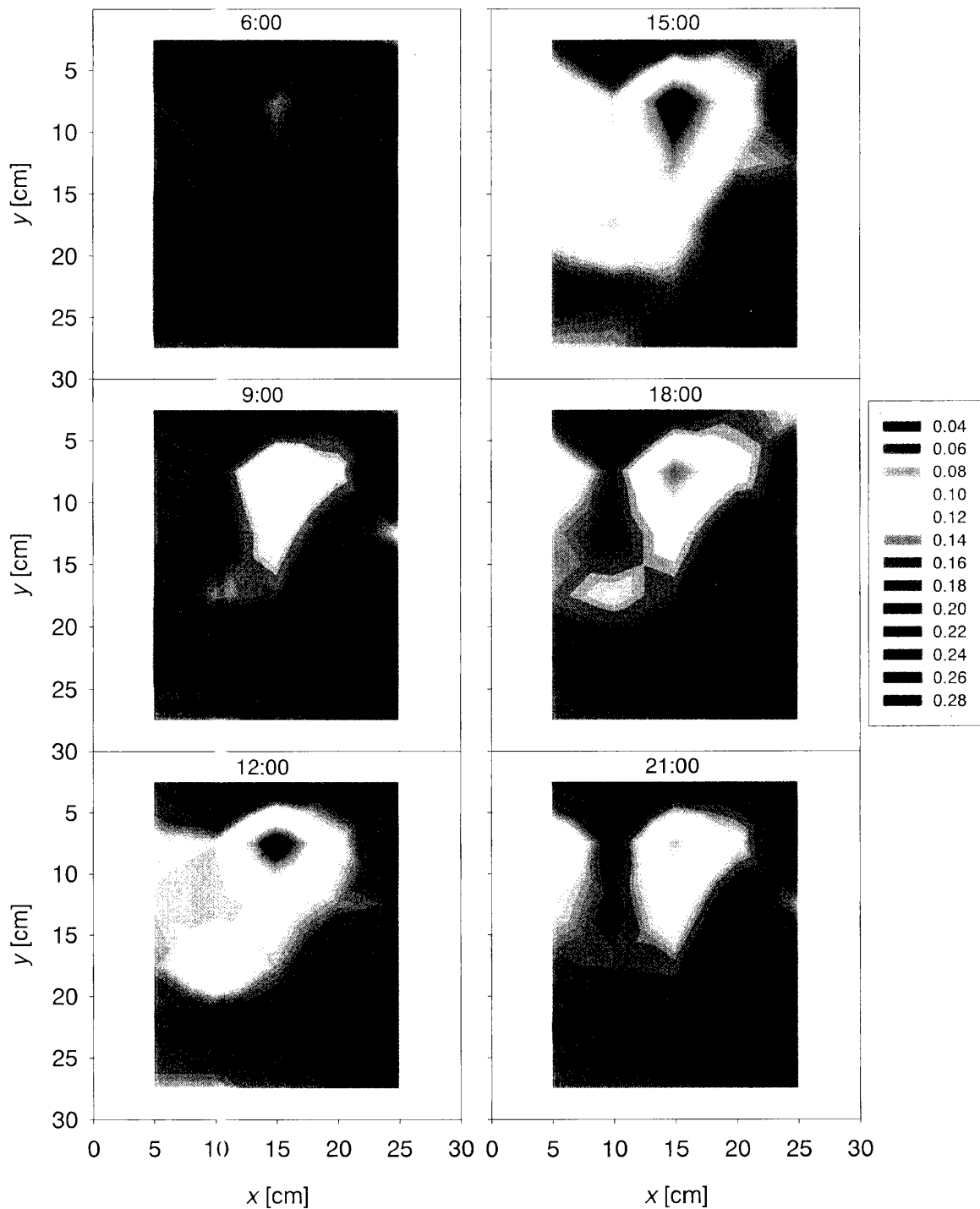


図12 根箱No.4における土壌含水率分布 [cm³/cm³] の経時変化  
 Fig.12 The changing distribution of soil water content [cm³/cm³] in the root box No.4.

## 引用文献

- 1) Baker J.M. and Allmaras R.R. (1990) System for automating and multiplexing soil moisture measurement by time-domain reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54. 1-6
- 2) Baker J.M. and Lascano R.J. (1989) The spatial sensitivity of time-domain reflectometry. *Soil Sci.* 147. 378-384
- 3) Dalton F.N. and van Genuchten M.Th. (1986) The time-domain reflectometry method for measuring soil water content and salinity. *Geoderma.* 38. 237-250
- 4) Galamay T.O., Yamauchi A., Nonoyama T. and Kono Y. (1992) Acropetal lignification in protective tissues of cereal nodal root axes as affected by different soil moisture conditions. *Jpn. J. Crop Sci.* 61(3). 511-517
- 5) Green S. and Clothier B. (1999) The root zone dynamics of water uptake by a mature apple tree. *Plant and Soil* 206. 61-77
- 6) Iijima M. and Kono Y. (1991) Interspecific differences of the root system structures of four cereal species affected by soil compaction. *Jpn. J. Crop. Sci.* 60(1). 130-138
- 7) 加藤誠章・執印康裕 (2001) 攪乱森林土壌における根系の土質強度補強効果に対する土壌水分条件の一面せん断試験を用いた検討. *砂防学会誌.* 54(2). 32-37
- 8) 川田信一郎・副島増夫・山崎耕宇 (1978) 水稻における"うわ根"の形成量と玄米収量との関係. *日本作物学会記事.* 47. 617-628
- 9) Kono Y., Yamauchi A., Nonoyama T., Tatsumi J. and Kawamura N. (1987) A revised experimental system of root-soil interaction for laboratory work. *Environ. Control in Biol.* 25(4). 141-151
- 10) Kosugi K. (1996) Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties. *Water Resour. Res.* 32. 2697-2703
- 11) 初井和朗・野坂治郎・矢野友久 (1992) 植物の根による吸水モデルに関する比較検討. *水文・水資源学会誌.* 5(3). 13-21
- 12) 中山誠憲・小林達明・窪田順平 (2000) 多層根系モデルによるポット苗木の吸水量の測定と解析. *日林誌*82(1). 1-6
- 13) Nissen H.H., Moldrup P. and Henriksen K. (1998) High-resolution time domain reflectometry coil probe for measuring soil water content. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62. 1203-1211
- 14) 日本化学会編 (1993) 化学便覧・基礎編Ⅱ (改定4版, 丸善株式会社, 東京) Ⅱ-503
- 15) Raper C.D. Jr. and Barber S.A. (1970) Rooting system of soybeans. I. Difference in root morphology among varieties. *Agron. J.* 62. 581-584
- 16) Roth K., Schulin R., Fluhler H. and Attinger W. (1990) Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. *Water Resour. Res.* 26(10). 2267-273
- 17) 佐々朋幸 (1985) アカマツ苗木における新梢, 針葉および根の成長の経時変化とその相互関係 —温度条件の違いを中心とした考察—. *林業試験場研究報告.* 332. 21-37
- 18) Takahashi H. (1994) Hydrotropism and its interaction with gravitropism in roots. *Plant and Soil* 165. 301-308
- 19) Takano M., Takahashi H., Hirasawa T. and Suge H. (1995) Hydrotropism in roots: sensing of a gradient in water potential by the root cap. *Planta* 197. 410-413
- 20) Topp G.C., Davis J.L. and Annan A.P. (1980) Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.* 16. 574-582
- 21) 塚本良則 (1987) 樹木根系の崩壊防止効果に関する研究. *東京農工大学農学部演習林報告.* 23. 65-123
- 22) 堤大三・山寺喜成・宮崎敏孝・小杉賢一朗・水山高久 (2001) 屈性現象を想定した根系成長モデルのアカマツ (*Pinus densiflora*) 稚苗への適用. *日本緑化工学会誌.* 26(4). 309-319
- 23) Tsutsumi D., Kosugi K. and Mizuyama T. (2003) Root system development and water extraction model considering hydrotropism. *Soil Sci. Soc. Am. J.* (in press)
- 24) Vaz C.P.M. and Hopmans J.W. (2001) Simultaneous Measurement of soil penetration resistance and water content with a combined penetrometer-TDR moisture probe. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65. 4-12
- 25) Vrugt J.A., Hopmans J.W. and Simunek J. (2001) Calibration of a two-dimensional root water uptake model. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65. 1027-1037
- 26) 山内章編 (1998) 植物根系の理想型. 博友社, 東京
- 27) 山崎耕宇・原田二郎 (1984) 農家水田に生育した水稻の1次根数と収量構成要素との関係. *日本作物学会記事.* 53. 320-325