超音波による根の力学的特性計測システムの試作

山下 智輝・三輪 敬之*

早稲田大学大学院・*早稲田大学理工学部

Noncontact Measuring System of Biomechanical Properties of the Root Using Ultrasonics

Tomoki YAMASHITA and Yoshiyuki MIWA*

*Graduate School, and *Faculty of Science and Engineering, Waseda University, Shinjuku-ku, Tokyo 169, Japan*

In order to investigate the mechanism of rhythmic motions of a root, we attempted to measure biomechanical properties of the root by non-contact via an ultrasonic wave. An experimental system is composed of a newly developed transducer positioner, a CCD camera positioner, a turn table, the pulser/receiver, and so on. In this system, we used the spot focused immersion ultrasonic transducer, and by applying image processing data of a root, it can keep the focal length of the transducer and the ultrasonic beam angle in vertical direction to the surface of a root. In addition, it can measure changes with the lapse of time at any point of a root by the full automation. By using this system, we observed differences of dynamic characteristics of a root in various points in the vertical direction.

(Received May 23, 1995)

1995年5月23日受付

緒言

高等植物の環境応答や形態形成において、器官相互の関係性を力学的な観点から調べた研究は数少ない。この問題に接近する方法として、筆者らは、器官（根や葉）の生長運動におけるリズムの存在やその形成過程に着目した研究を展開してきた。その結果の一つとして、発根後（供試材はエンドウ (*Pisum sativum*) などのマメ科植物）の生長に伴う根先端部分の回旋運動（石川, 1989）には周期 1~2 時間程度の螺旋を原型としたリズムが主根のみならず側根にも存在し、両者の間にはインタラクティブな関係があることを見出した（三輪・山下, 1993）。これらの実験的事実は生長に伴う根内部の剛性（コンプライアンス）が時空間的に一様には変化しないことを示唆するものである。したがって、リズム運動の形成メカニズムを探るうえで、根の伸長軸方向や根軸周りの力学的性質の変化を生長過程と関連付けて調べることは意味あることと考えられる。また、他方において、

このような試みは幼苗における生育状態の良否を判定する計測手段につながる可能性がある。しかしながら、これまでに根の力学的な特性を非接触で、局所的かつ連続的に計測した例はあまり見当たらない。

そこで、本研究ではその一つの方法として、超音波を利用した計測システムを考案開発したので、以下にその概要を報告する。

計測方法

ポイントフォーカスを有した水浸型探触子（中心周波数 5 MHz, 焦点距離 15.5 mm）を用いて、水中内で根に向かって超音波パルスを局所的に照射し、そのときの根から反射してくるエコーの高さを超音波探傷機より検出する。反射エコーは根表面の力学的特性、とくに剛さによって変わると考えられるので（小野ら, 1991; 杉本ら, 1990）、照射箇所を変化させることにより、根軸周りや根軸に沿った根表面の見かけの硬さ変化を相対的にとらえることができる。

これを実現するには、根の多様な形状に自在に対応し

Fig. 1 Principle of the measurement.

Fig. 2 Scanning direction of the probe (Top view).

て、超音波が根表面の任意の計測点に対して垂直に当たり、かつ探触子と計測点との焦点距離をつねに一定に保たなければならない。そこで、Fig. 1 のように探触子の側面に CCD カメラを設置し、得られた根の画像をもとに、探触子の焦点距離や照射角をコンピュータで自動補正する方法を採用することにした。しかし、側面からの根の画像のみでは、超音波の照射領域と計測点が一致しているかを判定できない。そのため、Fig. 2 に示すように、探触子の照射角と焦点距離の補正が完了した後、照射方向に対して垂直水平に探触子を1往復走査させ、そのとき得られた最大エコー高さを根からの反射エコーとした。

システムの構成

本システムは大別すると、前述の超音波探触子、超音波照射角可変装置、CCD カメラ 位置補正装置などから構成される。

超音波照射角可変装置は Fig. 3 に示すように、平行クランク機構で探触子の照射角を変えられる構造となっている。すなわち、リニアステッピングアクチュエータ（コパル SPS20）を介して後方のロッドを上下動させることにより、上下約 20 deg までの任意の角度をコンピュータ上で設定できる。さらに探触子の位置をパソコンから制御可能とするため、ステッピングモータを利用した3次元移動ステージを試作し、探触子照射角可変装置をこれに取り付けた。

被測定物形状認識用の CCD カメラには、計測点の形

状をなるべく詳細にとらえるため、5 倍の顕微鏡対物レンズが取り付けられている。この場合、視野が約 6×7 mm と狭くなるため、根の伸長方向に対して広範囲な計測を行うと、計測点がカメラの視野からはみ出てしまう。そこで CCD カメラを前述の探触子移動ステージと同様な機構を有する XYZ 方向移動ステージに取り付け、探触

Fig. 3 Structure of the probe positioner.

Fig. 4 Schematic diagram of the system.

Fig. 5 Appearance of the system.

子の動きに自動追尾させることとした。これにより、伸長方向に数センチにわたって、連続的な計測が可能となった。

その他に、探触子移動装置および CCD カメラ移動装置を試作した回転ステージ（直径 440 mm）に搭載することにより、探触子が根軸の周りを移動できるようにした。これにより、既長帯から根冠部にいたる間の根軸周りの計測が可能である。

以上を統合した試作システムの構成ならびに外観を Fig. 4, 5 に示す。超音波探傷機より得られた受信エコーは、分解能 12 ビットの A/D 変換装置を介してコンピュータに転送する。また、前述の装置をすべてコンピュータで制御することによって、1 点あたり約 10 秒で多点自動計測できる。

試作システムによる計測例

本試作システムを用いた計測例として、発根後 3 日目のエンドウ (*Pisum sativum*) の根に関して、根先端より約 0.5 mm 上方を起点とし、根軸に沿って 0.5 mm 間隔で根表面からの反射エコー高さを計測した結果を Fig. 6 に示す。根冠から既長帯に向けて反射エコーは一様ではないことがわかる。これは伸長域（分裂帯を含む）や既長域の剛さが場所によって異なることを示すものといえよう。なお、同図では、各計測点での根の直径の違いによる受信エコーの誤差を補正するため、計測に先立って材質が同一である直径 0.3~1.7 mm の丸棒表面から

Fig. 6 Example of experimental data of echo height ratio in the vertical direction.

の受信エコー強度について調べ、根の各計測点での直径からその結果をもとに根の受信エコーを直径 1 mm のエコー高さに換算してある。また、直径 1 mm での丸棒のエコー高さを分母とした比をとることにより、相対的な変化として表してある。

結 言

超音波を用いて根の剛さを非接触で自動計測できるシステムの開発を試みた。本システムは、根の特定箇所における剛さの経時的変化はもとより、根軸周りや Fig. 6 に一例を示したように根軸方向の剛さを計測できることから、根の表面全域における相対的な剛さ分布を生長運動と関連付けて調べられる。また、得られた結果は根内部のダイナミクスと密接に関係していると考えられることから、本システムをさらに発展させることにより、生育状態との関係やリズムの生成メカニズムに関する知見が得られることを期待している。

文 献

- 石川秀夫 1989. マメ科植物の重力屈性. 生物物理 29: 122-128.
- 三輪敬之・山下智輝 1993. 高等植物のリズム運動に関する研究. 日本機械学会第3回バイオメカニクスカンファレンス論文集 No. 930-1: 73-74.
- 小野伸幸・坂口正雄・大橋俊夫 1991. 超音波による動脈壁構造評価の検討. 信学技報 MBE 91-52: 55-57.
- 杉本恒美・上羽貞行・伊東紘一 1990. 集束超音波を用いた生体組織の硬さ計測に関する基礎的研究 (I). 日本超音波医学会講演論文集 56: 231-232.