植物のリズム運動に関する研究*

(試作 3 次元運動計測システムによる葉と根を対象としたリズム現象の測定)

三 輪 敬 之^{*1}, 山 下 智 輝^{*2}

Rhythmic Motions of Plants

(Measurement of Rhythms in Leaves and Roots Using the Newly Developed
Measuring System of 3 Dimensional Motions of Plant Organs)

Yoshiyuki MIWA and Tomoki YAMASHITA

In order to investigate mutual relationships between rhythmic motions of plant organs, we developed a new measuring system, which can automatically record 3 dimensional motions of two plant organs. To detect the position of a tip of an organ without actual contact, we applied image processing to this system. In this system, video camera positioners, which can be controlled in the horizontal and vertical directions using a computer, enable continuous focus on plant organs as they grow. As a result, we were able to determine some relationships between rhythmic motions of a main root and a lateral root, and rhythmic motions of a root and a leaf, using this system. In addition, we found the possibility that rhythmic motions of roots took part in sensing the obstacle and communicating with another plants.

Key Words: Biomechanics, Bio Motion, Image Processing, Rhythm, Plant Organ, Biosystem, Growth Movement, Automatic Measurement, Environmental Response

1. 緒 言

昆虫の歩行, 鳥の飛翔, 魚の遊泳など, 生物は状況に応じたリズム運動をそれぞれの構成要素が自律的に創り出すことにより, 外界の変化に柔軟に対応しているといわれている⁽¹⁾⁽²⁾. 高等植物の器官運動⁽³⁾⁽⁴⁾においては, 長周期の概日性リズムが存在することが古くから知られているものの, 環境応答や形態形成などにみられる個々の器官の振る舞いをリズムに着目して計測した例はこれまでほとんど見当たらない⁽⁵⁾. しかしながら, 様々な環境の変化に対して, 植物の根や葉が動物の手足のように協調的に振る舞うのか, それとも個々別々に無関係に振る舞うのかを明らかにすることは, 植物の生命情報ネットワークや情報伝達系に関する新たな知見をもたらす可能性がある. また, これは植物の外界認識と運動の関係性を明らかにする上でも重要な意味を持つと筆者らは考えている. さらに, 動物と異なり, 脳や神経系, 感覚器官を持たない植物がいかにしてリズムを創っているのか, その形成

メカニズムも極めて興味深い問題である⁽⁶⁾.

そこで本研究では, 上述したような研究を遂行する際の必要な手段として, 先ずは, 植物体全体にわたって複数の器官を任意に選択することができ, 個々の運動を様々な環境条件で長時間連続計測できる計測システムの開発を行った. さらに, 試作システムを用いて, 根や葉の器官が示すリズム運動とその関係性などについて現象論的な観点から調べたので, 以下に報告する.

2. 試作システムの構成

植物器官の自律的な動きは微小であり, 対象物に機械的負荷が加わるとその運動が拘束されるため非接触での計測が必要となる. そこで, 対象器官をCCDカメラで取り込み, それに画像処理を施し位置検出する方法を採用した. また, 図1に示すように計測対象を取り囲むようにCCDカメラを4台配置し, このうち1器官につき隣り合った2台のCCDカメラを用いて, 器官先端部の画像を垂直2方向から取り込むことによって, 2つの器官の3次元的な挙動を同時に記録することとした.

試作システムの構成を図2に示す. リズム運動を精

* 原稿受付 1995年7月21日.

^{*1} 正員, 早稲田大学理工学部(〒169 東京都新宿区大久保3-4-1).^{*2} 正員, 早稲田大学大学院.

Fig.1 Appearance of the system

Fig.2 Constitution of the system

度よく捉えるためには根や葉先端部の微小領域を拡大、観察するのが望ましい。そのためカメラには画像拡大用に5倍の対物レンズを取り付けた。この場合、カメラの視野が 6×7 [mm]と狭くなるため、器官先端部が生長に伴ってカメラの視野から外れてしまう。これを防ぐために、CCDカメラの位置を上下左右に制御できるカメラ移動装置を試作した。本装置の動力機構に2相ステッピングモータと精密ボールネジを用いており、試作したモータ制御装置を介してコンピュータによる高精度な位置制御が可能となっている。さらに、根の運動と葉の運動では計測範囲が異なるため、葉運動計測用と根運動計測用にそれぞれ専用の装置を2台ずつ試作した。図3に装置の構造を示す。

(a) Leaf measuring

(b) Root measuring

Fig.3 Structure of the camera positioner

植物の生長と環境情報の関係を調べたり、画像処理による誤認識をさけるため、外界からの影響をできる限り遮断するとともに、光環境を設定できる環境ボックスを試作した。本装置の寸法は $650 \times 850 \times 850$ [mm]である。ボックス内の照明には蛍光灯を使用しているが、長期間の照明により室温が上昇することを考慮し、ボックスの両側面にDCファンを設置するとともに恒温恒湿制御槽に接続してある。また全側面に扉をつけ、実験作業を容易にした。恒暗状態における画像入力は、器官の背後から月夜程度の微弱光(約 10 [lx])で影をつくり、それを取り込む方法を採用した。光源は 18 [V]電球を使用し、可変電源に接続して光量を調節する。

図4、図5に器官先端部の位置検出過程を示す。本システムでは発生直後の微細な側根先端部を捉えやすくするため、植物器官の画像に細線化処理を施すことにより、器官先端点を抽出している。まず、初期設定時にCCDカメラの画像を入力し、8階調擬似カラー表示をする。その後しきい値を入力し、画像全体(256×200 画素)について2値化処理を施す。この場合、安定した細線化画像を得るためには、しきい値の決定が重要となる。そこで、しきい値入力効率を上げるために、図4(a)に示すようにマウスカーソル先端部付近の画素の様子を拡大表示し、マウスで任意の点の画素の様子を探りながら、適当なしきい値を設定する方法を考案した。次に、2値化画像についてノイズ除去のため枠内の画像のみを拡張、収縮処理を施し、さらに細線化処理を行う。その際、一連の処理の高速化を図るため、マウスにより器官先端部周辺の処理領域枠Aを指定し、計測中はその枠内のみを処理することにした。これにより平均 $1 \sim 2$ [sec]で処理を行うことが可能となり、画像全体で処理した場合に比べ約10倍の高速化が図れた。最後は、枠内で画素の連結度から先端、

Fig.4 Process of setting a measuring point

Fig.5 Process of detecting the tip of an organ

交点の特徴点抽出を行う。マウスで特徴点を指定しその座標を (X, Z_1) とした。ここでは、座標の原点は画像左上とし、水平方向を X 、鉛直方向を Z と設定している。同様に別の方向に設置したCCDカメラの画像を処理し、座標 (Y, Z_2) を求める。両者の結果から器官先端位置の3次元座標 (X, Y, Z) が得られる。計測段階では、処理枠を常に器官の動きに追従させるため、図5(a)に示すように処理枠の中心が前回得られた器官位置座標に一致するように枠が移動する。次に、枠内のみでそれぞれの処理を施して先端位置を検出する。

図6に器官の生長に合わせてカメラ移動させる処理

Fig.6 Correcting a point of the tip in moving CCD cameras

過程を示す。まず、処理枠が器官先端部の動きに対応して移動した際に同図中の破線部に触れると、器官先端部が視野の中心に映るようにカメラを約2[mm]移動させる。それに伴い処理枠を中心方向に位置補正し、さらに枠内の画像を取り込んで器官先端位置を検出し、座標を補正する。その後は通常処理に戻る。以上の処理により、2つの器官に関して、最小1[min]間隔で計測を行うことが可能となった。

3. 実験方法

供試材としてインゲン、エンドウなどのマメ科植物を用いた。これらは種子から発根させた後、アクリル樹脂製チャンバーに根が垂直下方へ向くよう固定し、

(a)After germination

(b)2 days After germination

Fig.7 Rhythmic motions of a root

Fig.8 Rhythmic motions of roots

水耕栽培で生育させた。実験は環境ボックス内で行い、主根と側根、主根と葉、葉2枚など、複数の器官を対象にそれぞれの運動を同時計測した。また、発根後2～3日目の根の生長方向に障害物を設置したときの挙動や、発根させた種子を2個並べ、数時間後1個を取り去ったときの挙動についても調べた。

4. 実験結果

4.1 根のリズム運動について まず、根のリズム運動の発現時期について検討するため、発根直後のエンドウの根先端部の軌跡と、発根後2日目の先端の軌跡を調べた。図7に結果を示す。発生直後の根にはリズム運動はほとんど認められず、2日目以降より約2時間周期のリズミックな螺旋が現れはじめ、生長とともに振幅が増大していくことを見出した。したがって、根のリズム運動は根の発生と同時に形成されるのではなく、生長に伴い形成されると考えられる。この結果は、2日目以降の生長過程において根先端部の根冠部分を切除すると、振幅が減衰しリズムが消滅していく現象と¹⁷⁾、密接な関係があるように思われる。すなわち、根の発生直後においては、リズムを形成するのに必要な機能分化が根内部でまだ十分に行われていないことが予想される。

図8は、発根後6日目のエンドウにおける主根と側根の先端部運動軌跡を同時に計測した結果である。このような計測は本試作システムにより初めて可能となった。同図において、主根は振幅が小さくなっているものの、約2時間の周期でリズム運動している。また、側根は主根の約1/2の周期、約2倍の振幅でリズム運動しているのが分かる。したがって、これはそれぞれの根が周期や振幅に違いこそあれ、螺旋を原型としたリズム運動を同時に行っていることを示すものである。

Fig.9 Rhythmic motions of roots
(After cutting the tip of a lateral root shown in Fig.8) Fig.10 Rhythmic motions of a root
(Setting an obstacle in front of the tip)

その場合、両者が示すリズム運動に相関があるのか否かは極めて興味深い問題である。そこで、この問題について検討するため、上記の計測終了後に側根の先端部を切除して、両者の振る舞いを引き続き調べてみた。その結果を図9に示す。すなわち、側根において振幅が減衰しているが、これは前述したように根冠部分がリズムの生成に関わっているためと考えられる。一方、主根のリズム運動は側根先端部の切除に伴い、活発化し振幅が増大する傾向を示した。このことは、両者のリズムに相補的な関係があることを示唆するものである。仮にそうであるならば、全体的な状況に応じて、根相互間のリズム運動を操作する情報が存在する可能性が考えられよう。

次に、環境情報として、根先端部より1.5 mm以下に障害物を置いた場合の主根先端部の挙動を調べた。結

Fig.11 Rhythmic motions of two roots
(Setting roots closely) Fig.12 Rhythmic motions of two roots
(After removing a root A)

果の一例を図10に示す。すなわち、根は障害物に接近するに伴い、リズム振幅を増大させ、結果として障害物を避けるように屈曲していく。また、発根後3日目のエンドウ2個体を約2[mm]の距離に接近させて設置したときの根先端部の挙動について調べた。その結果、図11に示すように、ほぼ同周期で位相差を伴い、お互

Fig.13 Rhythmic motions of a leaf

Fig.14 Rhythmic motions of two leaves

いが絡まないようリズム運動を行っていることが分かった。その後、個体Aをチャンバから撤去して、Bのみの挙動を調べたところ、図12に示すように、以前とは別の方向へリズム運動に生長運動を行った。以上のことから、リズム運動は環境を感知するためのアンテナとしての役割を果たしている可能性があるばかりで

Fig.15 Rhythmic motions of a leaf and a root

なく、根相互間のコミュニケーションにも関わっていることが想像される。

4.2 葉のリズム運動について インゲンの第1葉の運動に伴う先端部の位置変化を計測した結果を図13に示す。このように従来から知られている概日性リズムを伴った上下運動に重畳して、根のリズム周期に近い短周期のリズム運動が存在する。さらに、水平方向にもリズムカルに運動しており、立体的にくねりながら運動していることを、本システムによりはじめて見出した。また、ほぼ同じ高さにある2つの葉の先端部の挙動を調べた結果の一例を図14に

示す。それぞれの葉の運動において位相がずれていたり、反転したりしている現象が認められた。これより、根の場合と同様、葉のリズム運動においても、それぞれが無関係に振る舞うのではなくて、一定の位相関係が存在する可能性があると考えられる。

4.3 葉と根のリズム運動について 本システムは根と葉の運動を同時に計測できる。そこで、地上部の葉と地下部の根の関係について調べるため、発根後10日目のエンドウの主根と若い葉の先端部軌跡を調べた。結果を図15に示す。この場合、根は振幅が小さいもののリズム運動を行っており、一方、葉も根と同様に約2時間弱周期でリズム運動をしていることが認められた。これは、根と葉のリズム運動において相関があることを示唆するものといえよう。

上述した一連の実験結果をまとめると、葉、根ともにその運動には周期1～2時間程度のリズムが存在し、それぞれの器官が状況に応じて協調的に振る舞っているように推察される。仮にそうであるとするならば、動物における神経オシレータ⁽¹⁾のような伝達系が存在する可能性があり、植物の場合、それに替わる有

力なメカニズムとして筆者らは細胞内圧変化が関わっているのではないかと考えている⁽⁷⁾。

5. 結 言

本研究をまとめると以下になる。

(1) 高等植物の根や葉などの器官を対象とし、任意の2つの器官が示すリズム運動を長時間自動的に調べられる計測システムを開発した。

(2) 試作システムを用いて、マメ科植物の主根と側根、2枚の葉、主根と葉などが示す運動について計測したところ、いずれも周期1～2時間程度のリズムが同時に観察され、個々の器官のリズム運動に相関が存在する可能性を見出した。

(3) エンドウの主根の生長方向に障害物を設置したところ、根はリズム振幅を増大させながら障害物を避けた。また、エンドウの主根を2本接近させた場合、両者のリズム運動に位相関係が認められた。したがって、リズム運動が外界の感知や個体間のコミュニケーションに関わっている可能性が考えられる。

最後に、本研究を遂行するにあたり、多大なる協力をいただいた、当時卒論学生北河裕介君（現富士ゼロックス）に深甚なる感謝の意を表する

文 献

- (1) 鈴木良次, 生物情報システム論, (1991), 113-117, 朝倉書店.
- (2) Strogatz, S.H and Stewart, I., (岡村実奈訳), 生物にみられるリズムの同調現象, 日経サイエンス, 24-7(1994), 58-63.
- (3) Darwin, C. (渡辺仁訳), 植物の運動力, (1987), 237, 森北出版.
- (4) 石川秀夫, マメ科植物根の重力屈性, 生物物理, 29-3, (1989), 122-128.
- (5) 例えば, 中島秀明, 環境応答 (新免輝男編) (1991), 177-190, 朝倉書店.
- (6) 山下智輝, 三輪敬之, 超音波による根の力学的特性計測システムの試作, 生物環境調節, 33-3(1995), 217-219.
- (7) 三輪敬之, 山下智輝, 植物器官におけるリズム運動について, 第4回バイオエンジニアリング部門学術講演会講演論文集 No. 92 0-64(1992-7), 13-15.