

# CCD カメラを用いた葉の固有振動数計測による 植物の水ストレス推定

Estimation of water stress of plant  
by measuring of natural frequency of leaf with CCD camera

佐野 元昭・内川 千春・中川 裕・  
大平 武征・白川 貴志・杉本 恒美

桐蔭横浜大学 大学院工学研究科

(2017年3月18日 受理)

## I. はじめに

土耕栽培においては、地上から過剰な水を散布することが多いが、これは水の無駄遣いのみならず、別の問題点もある。その一つに養分の流出がある。すなわち、土壌に必要な以上の水を与えると、それは重力水として地中に流れ出す。その際、植物の成長に必要な養分まで一緒に流してしまう。そして、その排水は河川等の富栄養化にもつながる。そのため、排水の出ない灌水制御が望ましい。

また、植物が甘い実を結ぶには、植物に与える水を制限し、植物に適度にいわゆる「水ストレス」を与えるのがよいと言われており、その意味でも、植物に与える水を最適に制御すること（最適灌水制御）は重要である。

ところで、このような最適灌水制御を行うためには、植物が今どの位の水分を欲しているか（作物給水ニーズ）を実時間かつ非侵襲的に知る必要があり、これは Speaking Plant Approach (SPA) として研究されてる<sup>1)</sup>。そしてこれまでに、葉の色を利用したり<sup>2)</sup>、

赤外線による温度を用いたり<sup>3)</sup>、葉のしおれを投影面積で調べたり<sup>4)</sup>、気孔を直接モニタする<sup>5)</sup>など様々なアプローチがなされた。

そのような中、我々は土耕栽培を対象に、伝搬音速の違いによる土中水分状態の推定<sup>6)</sup>、および葉の振動計測による植物の水ストレスの推定について検討してきた<sup>7-9)</sup>。その結果、葉柄の弾性による葉の固有振動数は日周変化を示し、健全な葉の場合、その固有振動数は夜間に低く日中に高くなること、また、植物が水ストレスを受けはじめると、その日周変動が逆転し、固有振動数は夜間が高く日中が低くなることなどを見出した<sup>10)</sup>。

さらに、ハイスピードカメラや複数のレーザ変位計による多点同時測定による振動解析の結果、葉自身のたわみ振動の固有振動数の変化よりも、葉柄の弾性による葉全体の振動の固有振動数の変化の方が、植物の水ストレスに対して敏感であることが分かった<sup>11-12)</sup>。すなわち、振動計測は、葉の代表的な1点で行えば十分であり、植物の水ストレス状態の推定には、従来我々が行ってきたレーザ変位計による葉の振動計測で十分ということが分

かった。しかし、レーザ変位計による連続計測の場合、昼夜における葉の運動によって計測スポットが葉から外れてしまうなどの問題点があった。一方、ハイスピードカメラの場合、昼夜の葉の運動の影響は回避できるが、装置自体が高価な上、画像の容量も大きくなってしまい、また、ハイスピードカメラに付属の計測ソフトは定点観測を想定していないなどの難点もある。

そこで今回、汎用の CCD カメラを用いて同様の計測が可能かどうか実験を行った。

## II. 実験方法

### 1. 実験システム

#### (1) 全体のセットアップ

実験セットアップを図1に示す。葉の下にある超音波スピーカは、葉を加振するためのもので、それにより加振された葉の振動を、CCD カメラで撮影して PC に取り込み、運動解析ソフトにより振動解析を行い、葉の固有振動数を計測する。

#### (2) 供試植物

供試植物として、今回は鉢植え栽培された小松菜（発芽後約1ヶ月）を用いた。小松菜は、種から培養土上で育成し、給水法は給水シート（東洋紡、コスモ A-1）による底面給水とした。照光は、朝6時に蛍光灯を点灯（約9,000 lx）、深夜0時に消灯する ON/OFF 制御で行った。気温は  $23 \pm 2$  °C、湿度は  $47 \pm 5$  %RH であった。

#### (3) 超音波スピーカ

本実験では、葉の加振に、超音波による音響放射圧を利用した。超音波音源としては、超指向性スピーカとして知られているいわゆる「パラメトリックスピーカ」（日本セラミック、AS101AW3PF1）を使用した。パラメトリックスピーカには、複数の小型の超音波スピーカが2次元格子状に配列されており、各波源から発する音波の干渉によりホイヘンスの原理にしたがって波頭が生成される。そ

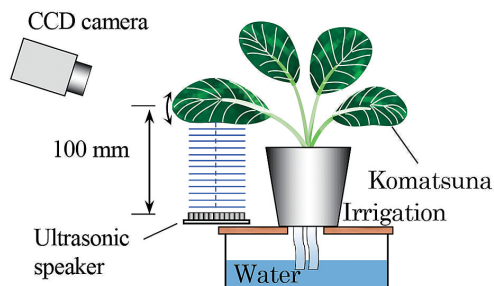


図1 実験セットアップ

して、超音波の直進性により、特定の方向に音波を向けることができるようになっている。ただし、超音波は耳には聞こえないので、その超音波を音声周波数で変調することにより、音声信号を送っている。このスピーカでは、音声を乗せる超音波（キャリア）の周波数は40 kHzであり、本実験では、この40 kHzの超音波による音響放射圧を利用した。

今回の実験では、ファンクションジェネレータ（Tektronix Inc., AFG3022）を用いて、スピーカのコントローラに  $V_{pp} = 2$  V、40 kHzの正弦波を1,000周期（0.025 s）印加した。ただし、このスピーカのコントローラの仕様により、キャリアの放射が停止するのは、入力信号停止後約0.5 sなので、これにより、約0.5 s間葉を下方から押し、その後、押す力がなくなるので、葉が減衰振動を開始する。

#### (4) CCD カメラ

今回の実験の一番の特徴は、葉の振動の計測に、レーザ変位計やハイスピードカメラなどの特殊な装置やカメラでなく、容易に入手可能なごく普通の CCD カメラ（ELECOM, UCAM-DLK130TWH）を用いたことにある。その諸元（撮影条件）を表1に示す。

表1 使用した CCD カメラの諸元

フレームレート	29 fps
シャッタースピード	auto
画素数	320 × 240
画像フォーマット	WMV
画素サイズ	16 ビット



図2 測定ポイント

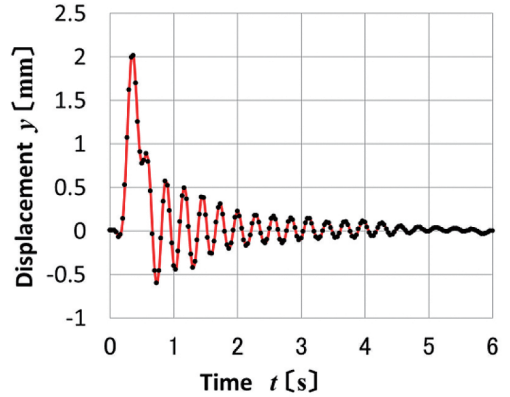


図3 葉の振動変位

## 2. データの取得と解析

### (1) データの取得

撮影は、将来の自動測定を考慮して、動体検出用フリーソフト LiveCapture2 によって葉が加振された際の画像の変化を検出し、その直前からの 10 秒間を自動録画するようにした。

### (2) データの解析

この映像を、Detect 社の解析ソフトウェア (Dipp-Mortion V (2D), ver1.1.24) によって運動解析した。すなわち、図2のマークのように、追跡しやすい注目領域 P1 (16 × 16 ドット) を設定し、それを 32 × 32 ドットの範囲で相関追尾して振動変位を求めた。

データは CSV 形式で保存されるので、まずそれを Excel に読み込み、Savitzky-Golay 法によって平滑化し ( $m = 4$ )、それを、フリーの数値計算ソフトウェア SciLab に付属の FFT 関数により処理し、パワースペクトルを求めた。

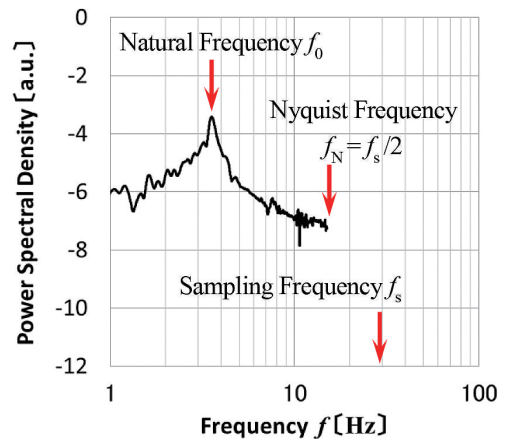


図4 葉の振動のパワースペクトル

0.5 秒間は、音響放射圧によって葉が 1 ~ 2 mm 程度上に押し上げられているが、音響放射圧がなくなる 0.5 秒以降より、きれいな減衰振動を観測することができた。

## 2. 固有振動数の解析

最初の 0.5 秒間は葉が押された状態であるので、その影響を除いた 1 秒後からの減衰振動部分について、パワースペクトルを求めた結果を図4に示す。図よりこの葉の固有振動数  $f_0$  は約 3.4 Hz であるが、29 fps は、サンプリング周波数  $f_s$  としては十分であることが分かる。

## III. 実験結果

### 1. 振動変位の測定

図3に注目点 P1 の  $y$  座標の時間変化の一例を示す。黒丸が測定点であり、線は、Excel の機能により、それを滑らかに結んだものである。図を見ると分かる通り、最初の

### 3. 考察

標本化定理によれば、ナイキスト周波数 $f_N$  ( $= f_s / 2$ ) 以内の周波数成分を超える周波数成分は、 $f_N$ での折り返し(エイリアシング)が生じるが、図4の結果を見る限り、折り返しは見られない。これはSavitzky-Golay法の平滑化により、高周波成分が抑えられたためとも考えられる。

### IV. 結論と今後の課題

今回、フレームレート29 fpsの通常のCCDカメラを用いて葉の振動解析を行った結果、葉の固有振動数程度の低い周波数であれば、十分な精度で求めることができることが確認できた。

今後はこのシステムを用いて、夜間を通して自動的に葉の振動計測を行い、レーザ変位計で計測した際に得られた、葉の固有振動の日周変化が再現できるか検討する。

さらに、その日周変化を利用し、植物の水ストレス状態(作物給水ニーズ)を監視するシステムの構築を目指したい。

### 謝辞

本研究は、JSPS科 研 費 15K07681、16K07974の助成を受けて実施されたものである。

### 【参考文献】

- 仁科弘重：太陽光利用型植物工場の知能化のためのSpeaking Plant Approach技術, 月刊学術の動向, 15 [6], pp.62-70, 2010.
- 兵頭竜二・高見寿隆・松尾憲一・一丸禎樹・下村義昭：長崎県, 植物の受ける水ストレスの測定方法及び装置, 特開 2005 - 308733 .
- 中原正一・井上吉雄：赤外線放射測温によるトマトの水ストレス反応の検出——高糖度トマト栽培における低土壌水分管理への応用——, 農業気象, 53 [3], pp.191-199, 1997.
- 高山弘太郎・仁科弘重・山本展寛・羽藤堅治・有馬誠一：デジタルカメラを用いた投影面積モニタリングによるトマトの水ストレス早期診断, 植物環境工学, 21 [2], pp.59-64, 2009.
- 難波和彦・近藤直・門田充司・笹尾彰：顕微鏡画像による植物気孔の環境応答の計測, 農業機械学会誌, 66 [5], pp.63-73, 2004.
- Tsuneyoshi Sugimoto, Yutaka Nakagawa, Takashi Shirakawa, Motoaki Sano, Motoyoshi Ohaba, and Sakae Shibusawa: Study on Water Distribution Imaging in the Sand Using Propagation Velocity of Sound with Scanning Laser Doppler Vibrometer, Jpn. J. Appl. Phys. 52, 07HC04, 2013
- Motoaki Sano, Tsuneyoshi Sugimoto, Hiroshi Hosoya, Motoyoshi Ohaba, and Sakae Shibusawa: Basic Study on Estimating Water Stress of a Plant Using Vibration Measurement of Leaf, Jpn. J. Appl. Phys., 52, 07HC13, 2013.
- 佐野元昭・有馬越彬・中川裕・杉本恒美：葉の振動計測による植物の水ストレス状態の推定, 桐蔭論叢, 30, pp.155-161, 2014.
- Motoaki Sano, Yutaka Nakagawa, Tsuneyoshi Sugimoto, Takashi Shirakawa, Kaoru Yamagishi, Toshiaki Sugihara, Motoyoshi Ohaba, and Sakae Shibusawa: Estimation of Water Stress of Plant by Vibration Measurement of Leaf using Acoustic Radiation Force, Acoust. Sci. & Tech., 36, pp.248-253, 2015.
- 中川 裕・杉本恒美・佐野元昭・白川貴志・大平武征・内川千春：音響計測を用いた植物の水ストレス症状の検出に関する研究, 桐蔭論叢, 32, pp.193-196, 2015.
- 佐野元昭・中川 裕・安齋拓也・内川千春・大平武征・白川貴志・杉本恒美：ハイスピ

ードカメラを用いた葉の振動計測に関する  
検討, 桐蔭論叢, 32, pp.187-192, 2015.

- 12) 佐野元昭・内川千春・中川 裕・安齋拓也・  
大平武征・白川貴志・杉本恒美：レーザ変  
位計を用いた葉の同時多点振動解析による  
植物の水ストレスの推定, 桐蔭論叢, 34,  
pp.155-158, 2016.