

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

Estimation of water stress of plant with the simultaneous multi-point vibration analysis
of leaf using laser displacement sensors

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

桐蔭横浜大学 大学院工学研究科

(2016年3月12日 受理)

1. はじめに

我々は、土耕栽培を対象として、植物が水を欲するときに必要な水を供給する最適灌水制御を目指している。これができれば、農業用水の大幅な節水 (Reduce) のみならず、農業排水のない理想的な栽培が可能になる。さらに、植物の水ストレスを制御することにより、より美味しい果実や機能性の高い作物など、高付加価値な作物の栽培も期待できる。

それを実現するには、負圧差灌水方式が最適と考えられるが、その負圧を制御する方法として、我々は、地下部の水分分布および地上部の植物のしおれなどが利用できないか検討している。そしてこれまでに、土中を伝播する音速の違いによる土中水分分布の可視化¹⁾や、地上部の植物の非侵襲的な計測、すなわち **Speaking Plant Approach (SPA)**²⁾ に基づく植物の水ストレス (あるいは「作物給水ニーズ」) の推定を行ってきた³⁾。

植物の水ストレス推定に関しては、すでに葉の反射スペクトルを利用した方法⁴⁾、葉温を遠赤外線測定する方法⁵⁾、葉の投影面積

変化をカメラで計測する方法⁶⁾、気孔を観察する方法⁷⁾などが報告されているが、我々は、植物の水ストレスに最も敏感な応答の一つである「しおれ」に着目しており、それを検出する方法として、葉の固有振動数の変化の計測が有効であることを示した^{8,9)}。

ところで、葉の振動変位を計測する際、今までレーザ変位計を用いてきたが、葉の振動には、葉身のたわみ振動のほか、葉柄や茎のたわみによる葉全体の変位振動など、様々な振動が含まれており、葉の1点の振動変位しか追跡できないレーザ変位計では、それらの分離が困難であった。そこで、どの振動が植物の水ストレスに最も敏感であるかを調べるために、レーザ変位計の代わりに、ハイスピードカメラを用いて、葉の減衰振動の様子を高速度撮影し、葉面上の複数の特徴点の振動変位を同時多点計測することにより、葉柄などのたわみによる葉全体の変位振動と、葉身のたわみ振動が分離できないか試みた¹⁰⁾。

その結果、葉身のたわみ振動をある程度分離することができた¹¹⁾。しかし、システム上

¹ Motoaki Sano, Chiharu Uchikawa, Yutaka Nakagawa, Takuya Anzai, Takeyuki Ohdaira, Takashi Shirakawa and Tsuneyoshi Sugimoto: Graduate school of engineering, Toin University of Yokohama, 1614 Kurogane-cho, Aoba-ku, Yokohama 225-8503, Japan.

の理由から計測は手動で行うしかなく、夜間を含む連続計測は困難であった。

これを解決するために、新たに、レーザ変位計 (Keyence Corp., LK-G150) を 3 台用いて、葉の 3 点の振動変位を自動的に同時計測するシステムを構築し、夜間を含む長時間連続計測を実施した。本稿ではその結果について述べる。

2. 実験方法

前述のように葉の 3 点の振動変位を同時計測するために、今回は Fig.1 に示すようにレーザ変位計 3 台を連結した。レーザのスポット間隔はほぼ 20mm とした。

2.1 使用した植物

植物は、発芽から約 1 ヶ月間、底面給水で生育させた鉢植えの小松菜 (*Brassica rapa* var. *perviridis*) を用いた。生育環境は、気温約 20°C、相対湿度約 55%、照明は約 9000 lx (約 120 $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$) で、朝 6:00 に点灯、夕方 18:00 に消灯の ON/OFF 制御を行った。

2.2 葉の加振方法

葉の加振は、パラメトリックスピーカ (日本セラミック, AS101AW3PF1) が発する 40 kHz の超音波の音響放射圧を用いた。スピーカのコントローラの仕様により、40 kHz のキャリア放射が停止するのは、入力信号停止後約 0.5 s なので、今回の計測では、コントローラにファンクションジェネレータ (Tektronix Inc., AFG3022) から $V_{pp} = 2 \text{ V}$ の適当な正弦波を 0.1 s 間印加することにより、0.6 s 間葉を下方から押し、その後起こる葉の減衰振動変位を、上方からレーザ変位計で計測した。

2.3 葉の振動計測

葉の振動変位の計測は、Fig. 2 に示すように、葉の先端を P₁(CH1)、中央を P₂ (CH2)、葉柄付近を P₃ (CH3) とし、これら 3 チャンネルの変位データを、データロガー (Graphtec GL900-APS, 16 Bit, 1 kHz サンプリング) を

介して PC に取り込み、CSV 形式で保存した。保存したデータは、数値計算ソフトウェア SciLab を用いて解析し、そこに含まれる FFT 関数によってパワースペクトルを求め、そのピーク周波数より固有振動数を決定した。

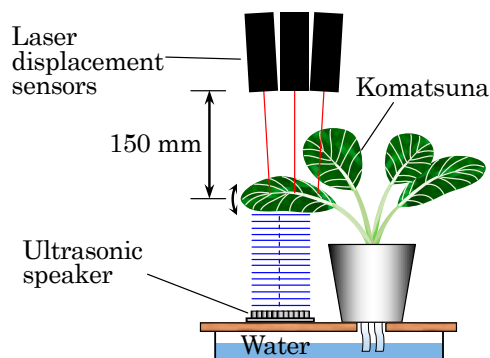


Fig.1 Experimental setup

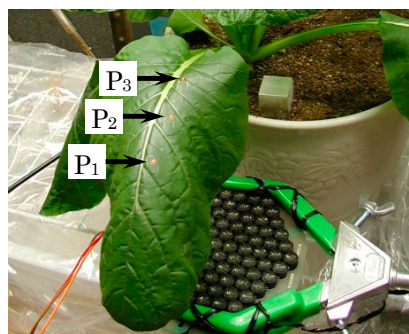


Fig. 2 Measurement points.

3. 実験結果

3.1 葉身のたわみ振動の分離

Fig. 3(a) に、葉のほぼ中心点 P₂ の減衰振動波形を示す。前述のように、最初の 0.6 s 間は、葉が音響放射圧によって持ち上げられている状態なので、パワースペクトルは 1 s 後からの波形について処理した。その結果を同図(b)に示す。約 3.1 Hz のピークのほか 5 ~6Hz 付近にも小さなピークが見られるが、これは葉身のたわみ振動の固有振動数と考えられる。そこで、それを確認するために、レーザスポットの水平位置を x 座標 ($x = 0, 20, 40 \text{ mm}$)、レーザ変位計の計測値を y 座標として、たわみを反映すると考えられる 2 つのベ

クトル $\vec{P_1P_2}=(x_1, y_1)$ 、 $\vec{P_2P_3}=(x_2, y_2)$ のなす角

$$\theta = \cos^{-1} \frac{x_1x_2 + y_1y_2}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2} \sqrt{x_2^2 + y_2^2}} \quad (1)$$

のパワースペクトルを求めたところ、Fig.3(c)に示すように、6.2 Hz 付近のピークが明瞭に

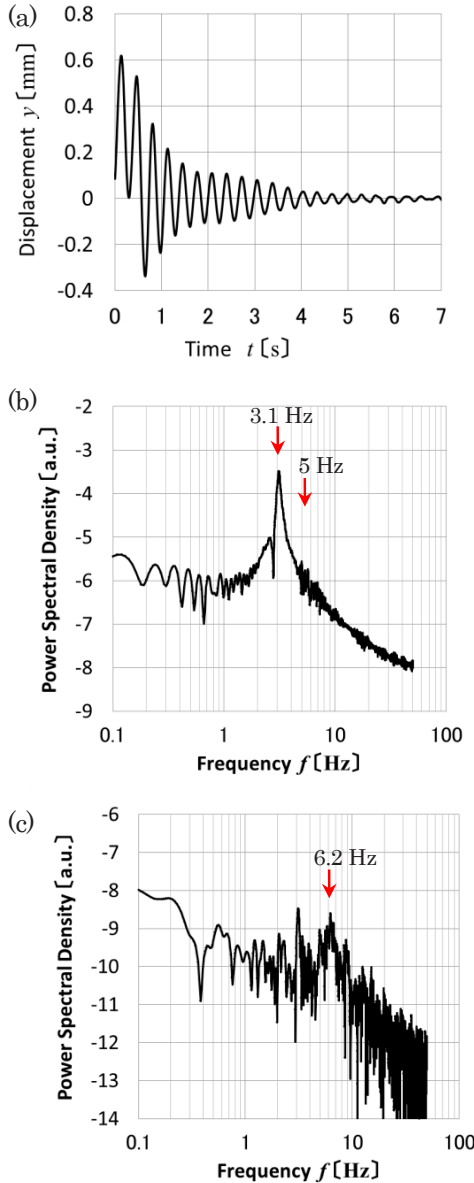


Fig. 3 Example of leaf vibration displacement of P_2 (a), power spectrum of point P_2 (b), and power spectrum of the angle θ between P_1P_2 and P_2P_3 (c).

なった。3.1 Hz 付近のピークは、葉全体の変位振動の固有振動数と思われるが、これは、レーザー変位計の測定点が、葉に固定されたものではなく、レーザービーム上の点であり、それを用いて式(1)を計算したため、葉全体の変位振動を消しきれなかったと考えられる。

以上より、点 P_2 の振動変位は、葉柄のたわみによる葉全体の変位振動、角 θ の変動は、葉身のたわみ振動を表すと考えられる。

3.2 水ストレスに対する固有振動数の変化

これら 2 種類の固有振動数が、植物の水ストレスに対してどのように振る舞うかを調べるために、10/28 の 12:00 以降水切りし、その後のそれぞれの固有振動数を調べたところ、Fig.4 のようになった。Fig.4(a)は P_2 の固有振動数、(b)は葉身のたわみ角 θ の固有振動数を表す。

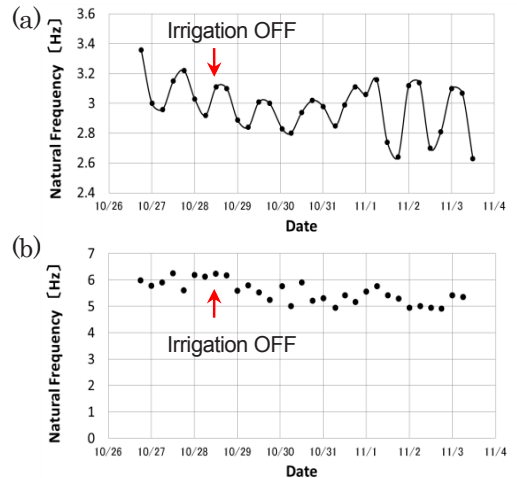


Fig. 4 Temporal change of natural frequency of P_2 (a) and bending angle θ (b).

P_2 の振動は葉柄のたわみによる葉全体の振動に対応するが、その固有振動数はこれまでと同じく日周変動し、6:00 以降、照明を点灯すると増加し、18:00 以降、消灯すると減少した。しかし植物の水ストレスが増加すると、その傾向は反転し、11/1 以降、明るくなると固有振動数が急激に減少し、暗くなると回復した。

一方、葉自身のたわみ振動の固有振動数は、Fig.4(b)のように、ばらつきは大きいものの、日周変動および植物の水ストレスに対して顕著な変化は確認できなかった。

4. おわりに

レーザ変位計 3 台による計測により、以前に報告したハイスピードカメラによる解析と同様の結果が確認された。よって、植物の水ストレスは、葉身のたわみ振動でなく、葉柄のたわみによる葉全体の振動に、より顕著に現れることが明らかになった。また、灌水タイミングとしては、光照射後の応答によって判断できることが示唆された。

ただし、今回の実験における光照射は ON/OFF 制御であり、固有振動数の変化は、この光照射に対するステップ応答と考えられるが、自然光などでは、光量はステップ関数的でなく徐々に変化するので、その場合、今回の傾向がどこまで現れるか検証する必要がある。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 25450387 の助成を受けて実施されたものである。

【参考文献】

- 1) Tsuneyoshi Sugimoto, Yutaka Nakagawa, Takashi Shirakawa, Motoaki Sano, Motoyoshi Ohaba, and Sakae Shibusawa: Jpn. J. Appl. Phys. 52, 07HC04, 2013
- 2) 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.
- 3) Motoaki Sano, Tsuneyoshi Sugimoto, Hiroshi Hosoya, Motoyoshi Ohaba, and Sakae Shibusawa: Jpn. J. Appl. Phys., 52, 07HC13, 2013.
- 4) 兵頭竜二・高見寿隆・松尾憲一・一丸禎樹・下村義昭: 長崎県, 植物の受けるストレスの測定方法及び装置, 特開 2005 - 308733 .
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 佐野元昭・有馬起彬・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.
- 9) 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., 2015 (in press).
- 10) 佐野元昭・杉原敏昭・杉本恒美・中川裕・白川貴志・山畔香・大幅元吉・澁澤栄: 音響振動による作物吸水ニーズの推定に関する研究—ハイスピードカメラを用いた同時多点計測—, 日本音響学会 2014 年春季研究発表会講演論文集, 3-P5-8, p.1359, 2014.
- 11) 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多点振動解析による作物吸水ニーズ推定に関する研究, 日本音響学会講演論文集, 3-P-36, p.1247, 2015.