

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

The Study of Vibration Measurement of Leaf using High Speed Camera

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

桐蔭横浜大学大学院工学研究科

(2015年3月28日 受理)

1. はじめに

地球は青い惑星ともいわれ、表面の約70%が水で覆われている。しかし、そのうち淡水はわずか2.5%に過ぎず、さらに、我々が利用できる河川や湖沼などの地表水は、その淡水のおよそ0.4% (10万 km³) であり、それは地球全体の水の0.01%にも満たない¹⁾。それゆえ世界的な水不足が危惧されている。このような中、農業用水は世界の水使用量の約7割を占めており²⁾、その節約は、来るべき水問題を解決する上で必要不可欠である。

ところで、植物の成長において本当に必要な水は、植物体内に蓄えられる水と、蒸散に使われる水であり、実はそれほど多くない。すなわち、通常の農業において使用される水のほとんどは、地中に浸み込んだり、空中に蒸発したりしてしまい、その多くが無駄になっている。

このため、人工光型植物工場などにおいては、流した水や、蒸発・蒸散した水を回収 (Recycle)、再利用 (Reuse) しており、95%

以上の水利用効率が報告されている³⁾。しかしこれは水耕栽培が対象である。

そこで我々は、土耕栽培を対象に、植物が水を必要とするとき必要最低限の給水を行う最適灌水制御によって、無駄な水を極力減らし節水 (Reduce) を行う、超節水精密農業技術の開発を目指している。この技術を用いれば、将来的には、植物の水ストレス⁴⁾を制御し、おい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。

それを実現するために、我々は、負圧差灌水方式を利用し、その負圧を制御する方法として、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⁵⁾や、地上部の植物の非侵襲的な計測、すなわち Speaking Plant Approach (SPA)⁶⁾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⁷⁾。

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⁸⁾、葉温

Motoaki SANŌ, Yutaka NAKAGAWA, Takuya ANZAI, Chiharu UCHIKAWA, Takeyuki OHDAIRA, Takashi SHIRAKAWA and Tsuneyoshi SUGIMOTO: Graduate school of engineering, Toin University of Yokohama, 1614 Kurogane-cho, Aoba-ku, Yokohama 225-8503, Japan.

を遠赤外線で測定する方法⁹⁾、葉の投影面積変化をカメラで計測する方法¹⁰⁾、気孔を観察する方法¹¹⁾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^{12, 13)}。

ところで、そ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、葉身自体のたわみ振動のほか、葉柄や茎のたわみによる葉全体の振動など、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、それらの分離ができなかった。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振動と、葉身のたわみ振動が分離できないか試みた¹⁴⁾。

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ので、本稿では、葉全体の振動および葉身のたわみ振動のそれぞれの固有振動数が、植物の水ストレスによってどのように変化するのかを、葉がしおれるまで測定したので、その結果を報告する¹⁵⁾。

2. 実験方法

2.1 実験セットアップ

植物としては、発芽後およそ1ヵ月の小松菜 (*Brassica rapa* var. *perviridis*) の葉を用いた。またその際、図1のように、同じ生育条件で育成した2つの株を用い、一方は水切りして水ストレスを与え、もう一方はそのまま通常に灌水して、対照実験を行った。

葉の振動計測を行うためのハイスピードカメラ (HSC) は、図のように葉に向けてセットするが、その際、葉の振動を計測するという観点からは、葉を真横から撮影した方がよい。しかし、葉面上の特徴点を追跡する都合上、葉脈など、特徴点として利用可能な葉面が見える必要があるので、今回の計測では、葉面に対して斜め上方から撮影した。また、この測定は、今のところ自動化できていないので、従来我々が行ってきたレーザ変位計 (Keyence Corp., LK-G150) による継続的な自動計測も並行して行った。なお、HSCによる計測は、水ストレスを与えた株のみ行なった。

葉の加振には、日本セラミック(株)製の40kHz超音波発振子をアレイ状に配置したパラメトリックスピーカ (AS101AW3PF1)

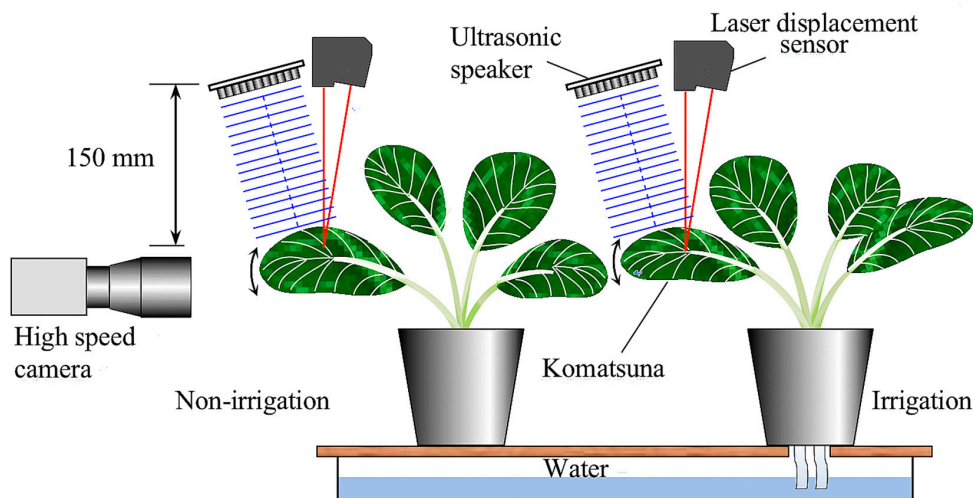


図1 実験セットアップ

による音響放射力を利用し、それに、ファンクションジェネレータ (Tektronix Inc., AFG3022) を用いて $V_{p-p} = 1V$, $f = 40kHz$ の正弦波を 0.1s 間印加した。ただし、コントローラの仕様により、信号停止後 0.5s 間は 40kHz の音が出続けるので、実際には、葉は 0.6s 間加振され、その後、減衰振動が観測される。

一方、ハイスピードカメラは、(株)ディテクトの HAS-L1 を用いた。撮影条件は、表 1 に示す通りである。

表 1 撮影条件

項目	値
フレームレート	500 fps
シャッタースピード	1/1000 s
画素数	640 × 480 ドット

撮影された動画は、付属の解析ソフトウェア (Dipp-Mortion V, ver.1.1.24) によって、注目点を設定してその変位を追跡した。次いで、それを CSV 形式で保存し、数値計算ソフトウェア SciLab によりパワースペクトルを求めた。計測点は、図 2 のように、葉身の中央 P_1 、先端 P_2 、葉柄付近 P_3 、葉身の左右端 P_4 、 P_5 の計 5 か所とし、それぞれ変位を追跡して振動の解析を行った。

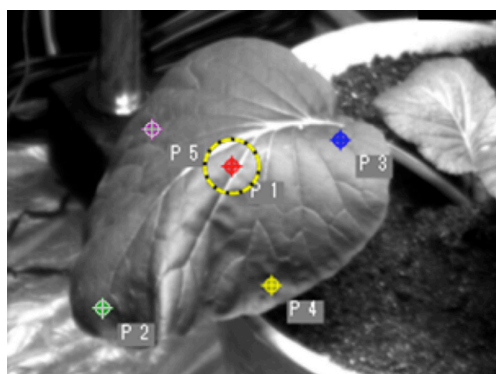


図 2 計測点

3. 実験結果

図 3 に、葉身のほぼ中心 P_1 における減衰振動波形およびそのパワースペクトルを示す。この葉の場合、固有振動数は約 3.4Hz である。また、葉身のたわみを調べるために、2つのベクトル $\vec{P_3P_1} = (x_1, y_1)$ 、 $\vec{P_1P_2} = (x_2, y_2)$ のなす角

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

などのパワースペクトルを求めた。その結果を図 4 に示す。図 4 の (a) は $\angle P_3P_1P_2$ 、(b) は $\angle P_4P_1P_5$ のものである。これを見ると、3.4Hz の他、5.7Hz 付近にもピークが見られる。これが葉自体のたわみ振動の固有振動数

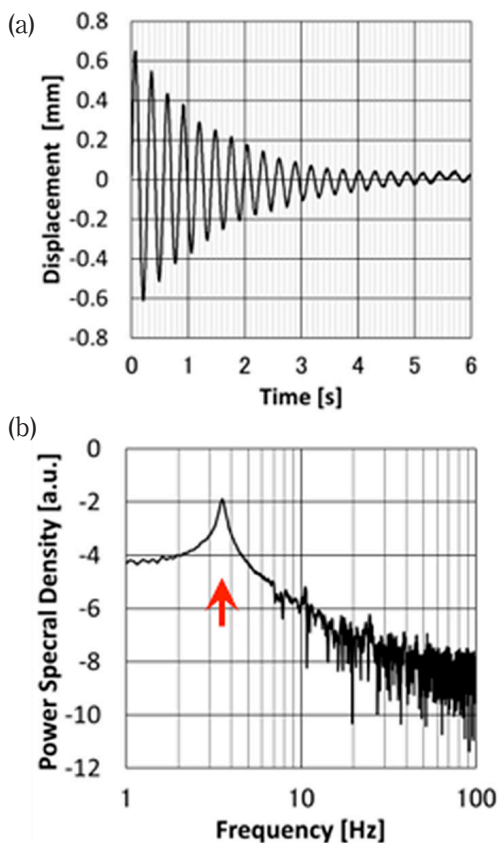


図 3 振動変位の例 (11/25 P_1)
(a) 振動波形 (b) パワースペクトル密度

と考えられる。

これらの固有振動数を、水切り開始からしおれるまで、ほぼ1週間、1日に1度計測した結果を図5に示す。その結果、葉身の中心点P₁における固有振動数（図中のHS-p1）

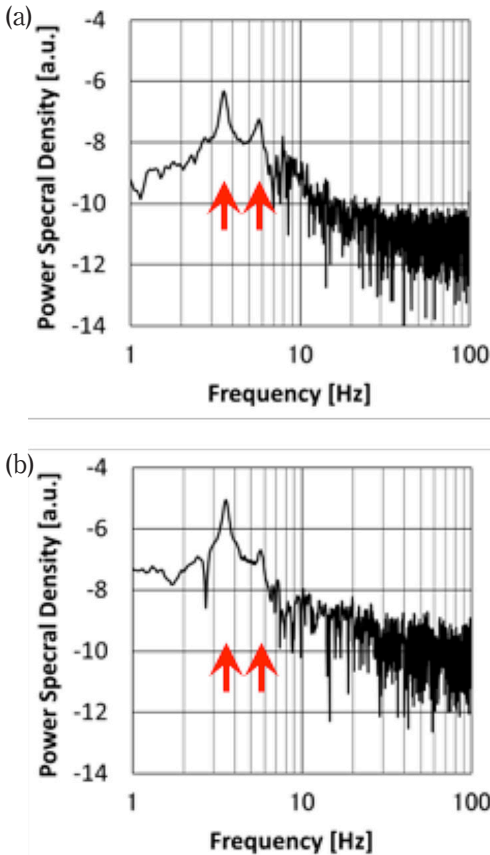


図4 角度変化のパワースペクトル (11/25)
(a) ∠P₃P₁P₂ (b) ∠P₄P₁P₅

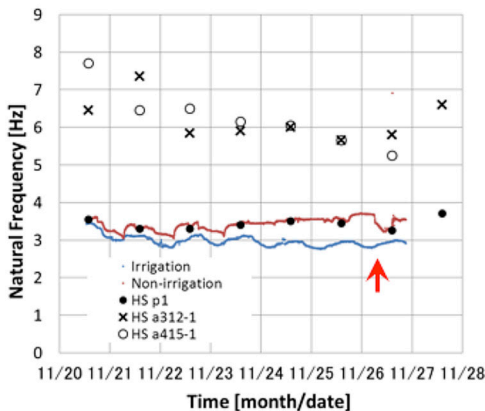


図5 固有振動数の経時変化

は、レーザ変位計の計測 (Non-irrigation) にほぼ一致した。一方、葉身のたわみについては、水ストレスが増加するに従い、長さ方向 P₃P₁P₂ のたわみ (HS a312)、幅方向 P₄P₁P₅ のたわみ (HS a415) とともに、徐々に固有振動数が減少しているように見える。

今回は、計測間隔がほぼ1日と長かったので、細かい振る舞いは分からないが、葉身のたわみ振動については、葉柄のたわみの固有振動数の振る舞いとは異なり、11/26の朝に発生したしおれ（図の矢印）においても、急に固有振動数が落ち込む様子は観測されなかった。これは、切り取った葉における実験結果⁷⁾と同じ傾向である。

4. 考察

4.1 葉の振動モデル

今回、葉身のたわみ振動と葉柄を含む葉全体の振動との分離を試みた。このうち、葉身のたわみ振動は、均質な片持ち梁の振動に近似すれば、その基本角振動数は

$$\omega = \left(\frac{1.875}{l} \right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (2)$$

である¹⁶⁾。ここで、 l は梁の長さであり、これは、葉身の長さに相当する。また、 ρ は葉身の密度、 A はその断面積であり、 ρA は線密度を表すので、葉身の質量を M とすれば、葉身のたわみの固有角振動数は

$$\omega_L = 1.875^2 \sqrt{\frac{E_L I_L}{l^3 M}} \quad (3)$$

と書くことができる。ここで E_L は葉身のヤング率、 I_L は葉身の断面の中立軸のまわりの2次モーメントであり、積 $E_L I_L$ は葉身の曲げ剛性を表す。

一方、葉柄を含む葉全体の振動は、葉身の質量を M とすれば、図6のような先端に質量 M をもつ梁と考えることができ、このときの固有振動は、ばね定数が

$$k = \frac{3EI}{L^3} \quad (4)$$

の単振動に一致する。ここで EI は、葉柄の曲げ剛性を表す。したがって、この振動の固有振動数は

$$\omega_s = \sqrt{\frac{k}{M}} = \sqrt{\frac{3EI}{L^3 M}} \quad (5)$$

で与えられる。ここで、 L は葉柄の根本から葉身の重心までの長さである。なお、その長さの葉柄の質量 m を考慮すると、(4) の M は $M + 0.23m$ のように修正される。

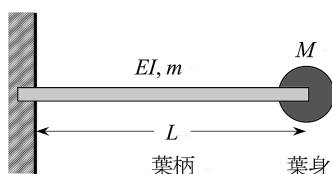


図6 端に質量をもつ梁

ところで、この比を考えると、(3)、(5) より

$$\begin{aligned} \frac{\omega_L}{\omega_s} &= \frac{1.875^2}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{L}{l}\right)^3 \frac{E_L I_L}{EI}} \\ &= 2.0 \sqrt{\left(\frac{L}{l}\right)^3 \frac{E_L I_L}{EI}} \quad (6) \end{aligned}$$

であるが、葉身と葉柄の曲げ剛性 EI はほぼ等しいと考えられ、また、小松菜の場合、葉身の長さ l と、葉身の重心までの葉柄の長さ L の比はおおよそ 1~2 なので、固有振動数の比は、おおよそ 2~2.8 倍になるが、これは図 5 に示した実験結果とほぼ一致する。

葉の固有振動数は、葉身のたわみ振動の場合も葉柄のたわみによる葉全体の振動の場合も、それぞれの曲げ剛性と質量と長さの兼ね合いで決まるが、11/26 朝のしおれによる固有振動数の急激な減少は、葉柄のヤング率の急激な減少を意味していると考えられる。それに対し、葉身のヤング率はしおれにより徐々に減少するものの、急激な変化は起こらないものと想像される。

4.2 土耕栽培における超節水

本研究では、土耕栽培を対象とした超節水技術を開発するのが目的であるが、同じ土を使い続けると、土中に塩類が集積し、連作障害が起きることが知られている。したがって、植物に必要な最低限の水しか与えず、基本的に排水の出ない超節水農業においては、塩類が一層たまりやすく、結局、除塩のための湛水処理に大量の水を消費すると考えられる。

ところで、塩類が集積する最も大きな要因は、化学肥料にあると考えられる。すなわち、化学肥料には、必要な栄養素以外の成分を含むので、植物に吸収されなかった塩類が残って蓄積する。したがって、逆に言えば、余計な塩類を与えなければ、基本的に除塩は不要ということになる。要するに化学肥料を使わず、もともと肥沃な土や天然の肥料を使用すれば、除塩の問題は解決する。

近年、このような除塩の不要な培養土も発売されており¹⁷⁾、これを用いれば、超節水農業における連作障害の問題は解決する。またその結果、無駄な排水は一切なくなるので、環境にもやさしく、さらに土中の大切な養分の無駄な流出もないので、養分が長持ちし、土の入れ替えもほとんど必要なくなる。

5. おわりに

今回、ハイスピードカメラを用いて、葉の減衰振動の様子を多点で同時計測し、葉柄を含む葉全体の振動と葉身のたわみ振動を大まかに分離することができた。また、それぞれの水ストレスに対する応答を、水切りからしおれるまで計測したところ、葉全体の振動は、しおれる寸前に大きく減少する一方、葉身のたわみ振動の方はそのような傾向は見られず、ほぼ直線的に減少するだけであることが分かった。したがって、小松菜に関しては、灌水制御に利用する場合は、葉身のたわみ振動より、葉柄を含む葉の振動を計測した方が有効であると考えられる。

今後は、しおれの前後でのより細かい計測

を通して、水ストレスの検出に対してどのような振動が最も有効かをさらに検証する。また、レーザ変位計やハイスピードカメラではなく、汎用の CCD カメラで同様の計測が可能か検証する予定である。

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) 国土交通省：日本の水資源, p.61, 2013.
- 2) 農林水産省：世界のかんがいの多様性—持続的な水使用と健全な水循環の形成に向けて—, p. 12, 2003.
- 3) 大山克己・吉永慶太・古在豊樹：閉鎖型苗生産システムのエネルギーおよび物質収支 (第2報)—水収支—, 植物工場学会誌, 12 [4], pp.217-224, 2000.
- 4) L. テイツ, E. ザイガー：植物生理学第3版, p.44, 培風館, 2004.
- 5) Tsuneyoshi Sugimoto, Yutaka Nakagawa, Takashi Shirakawa, Motoaki Sano, Motoyoshi Ohaba, and Sakae Shibusawa: Jpn. J. Appl. Phys. 52, 07HC04, 2013.
- 6) 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.
- 7) Motoaki Sano, Tsuneyoshi Sugimoto, Hiroshi Hosoya, Motoyoshi Ohaba, and Sakae Shibusawa: Jpn. J. Appl. Phys., 52, 07HC13, 2013.
- 8) 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.
- 9) 中原正一・井上吉雄：赤外線放射测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.

- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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).
- 14) 佐野元昭・杉原敏昭・杉本恒美・中川裕・白川貴志・山畝香・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.
- 15) 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.
- 16) 谷口修：改訂 振動工学, p.160, コロナ社, 1957.
- 17) 田野島鐵也：植物工場の設備・システム及び設計—土耕型植物工場の特徴及び設備—有機無農薬栽培, 建築設備と配管工事, 50 [2], pp.93-97, 2012.