

葉の振動計測による植物の水ストレス状態の推定

The Estimation of Water Stress of Plants by Vibration Measurement of the Leaf

佐野 元昭・有馬 赳彬・中川 裕・杉本 恒美

桐蔭横浜大学 大学院工学研究科

(2014年3月20日 受理)

1. はじめに

地球には豊富な水が存在するが、そのうち川や湖沼など我々が利用できる水資源は、地球全体の水のおよそ0.01% (10万 km³) に過ぎない¹⁾。一方、水の使用量は増加の一途を辿っており、人類が存続するためには、健全な水循環系を構築しておく必要がある。特に農業用水は、作物生産には欠かせないが、世界の水使用の約7割を占めており²⁾、これを如何に有効利用できるかが、水問題を解決する上で重要な鍵になる。

そこで近年、水の有効利用を考えた節水型の植物工場の研究がすすめられ、閉鎖型人工光植物工場において90%以上の水利用率が達成されている³⁾。しかしこれは、水の再循環 (recycle) を高めたものであり、水の二次利用 (reuse) や、水の節約 (reduce) をしたものである。そこで我々は、植物が必要なときに必要な水を供給する最適灌水制御による超節水精密農業技術の開発を試みている^{4,5)}。

しかし、それを実現するには、植物の吸水ニーズを非侵襲かつ実時間で観測する必要がある。これに対する一つの方法として、Speaking Plant Approach (SPA)⁶⁾がある。これは文字通り、植物の『話し』を聞く試みで

あるが、実際には、様々な測定を通じて、それを推定することになる。

さて植物が健全に生育するには、光、水、空気 (CO₂ や O₂)、栄養素、気温など様々な環境条件が必要になるが、これらの過不足が起きると、植物はストレスを受ける。『植物の水ストレス』は、そのうち水不足によるストレスである⁷⁾。植物は、適度な水ストレスにより、丈夫になったり、甘い果実をつけたりすることが知られている。しかし、過度な水ストレスを受けると、葉はしおれ、限界を超えれば植物自体が枯れてしまう。

植物の水ストレス推定に関しては、たとえば、葉の反射スペクトルを利用した方法⁸⁾、葉温を遠赤外線測定する方法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⁾などが試みられてきた。

ところで、植物は水ストレスを受けると、植物細胞の膨圧が減少し、葉の「しおれ」が生じる。すなわち、しおれは、植物の水ストレスを示す最も敏感な信号の一つと考えられる。実際、篤農家は生長点のしおれ具合をみて、水やりの時期を決めていると言われている。そこで本研究では、このしおれによる葉の弾性の変化に着目し、葉の振動特性からしおれが評価できないか検証を試みた。

2. 葉 1 枚の水分量と固有振動数

その第一段階として、まず切り取った 1 枚の葉について、しおれと固有振動数との関係を計測した。試料は、当研究室で生育した小松菜の葉を用いた。

2.1 実験セットアップ

実験セットアップを図 1 に示す。まず切り取った葉 1 枚を、電子天秤 (Sartorius H110, 分解能 0.0001g) 上にセットする。これは、蒸散等による葉の水分量の減少を計測するためである。このように葉の水分量を測定しながら、葉を振動させ、その振動波形をフーリエ解析することにより、固有振動数を求めた。

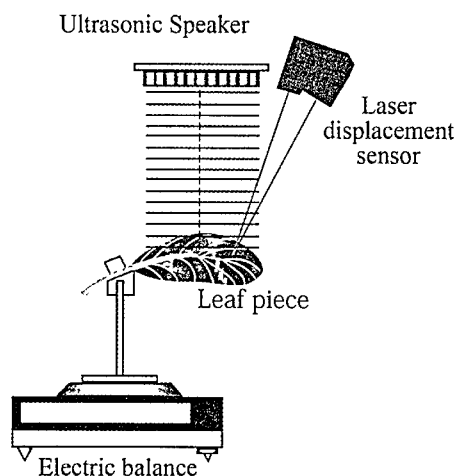


図 1 実験セットアップ

2.2 加振と振動変位の取得

今回の実験では、葉の加振は単発のパルスによって行った。当初、指やスポイトの風圧で加振していたが、自動化に向けて音波による加振を検討していたところ、通常のスピーカでは葉を揺らすことはできなかったが、パラメトリックスピーカを用いれば、葉を大きく揺らすことができることを見出した。

パラメトリックスピーカとは、多数の小さな振動子を格子状に配置することで、大きな開口を実現したもので、各振動子の振動の位

相を調整することにより、放射する音波の収束性や向きが制御できる。ところで、放射する音波の波長が、開口径に対して短いほど、音は広がらずに進むようになるので、高指向性のパラメトリックスピーカでは超音波が利用される。たとえば、周波数 $f = 40$ kHz の超音波の場合、空気中での音速を $c = 340$ m/s とすれば、その波長 λ は

$$\lambda = \frac{c}{f} = 8.5 \text{ mm} \quad (1)$$

なので、直径 10 cm 程度であれば、良好な指向性が得られる。

しかし、人間の可聴域は 20 Hz ~ 20 kHz なので、40 kHz の音は我々には聞こえない。ところが、この超音波を音声周波数で変調すると、その変調された周波数の音が聞こえる。すなわち指向性の高い超音波を搬送波（キャリア）として、音声を届けることができる。これが、高指向性のパラメトリックスピーカの原理である。パラメトリックスピーカで葉が揺れる理由は、この超音波による音響放射圧のためと考えられる。

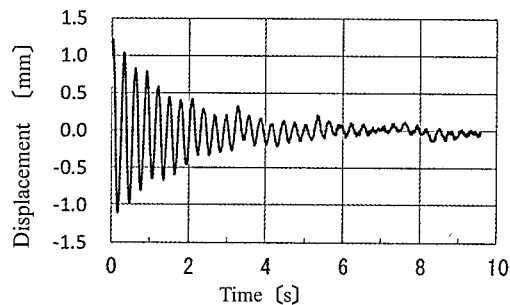
今回の実験では、40 kHz の超音波振動子（日本セラミック製）を 101 個配したパラメトリックスピーカ ASI01AW3PF2 を使い、制御回路に、入力信号としてファンクションジェネレータ (Tektronix AFG3022) から 50 Hz、10 波、 $5V_{pp}$ の正弦バースト波を送信し、それにより放射される 0.5 秒間の超音波によって葉をパルス的に加振した。そして、その後の減衰振動の振動変位を、レーザ変位計 (Keyence LK-G150, 分解能 0.01mm) によって計測し、それをデータロガー (Graphtec GL900-APS, 16Bit, 1kHz サンプルング) を介してノート PC に取り込んだ。

図 2 (a) に、典型的な振動波形を示す。ただし、波形は減衰振動部分を切り出し、十分時間が経った位置を変位 0 としたものである。

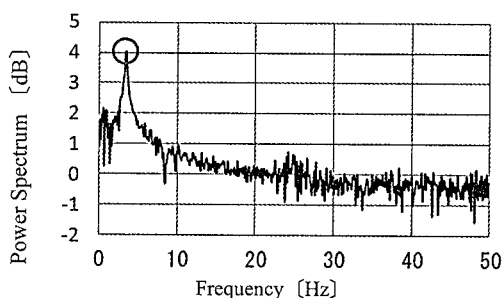
2.3 振動の解析

固有振動数を求めるために、SciLab を用い

てFFT解析し、パワースペクトルを求めた。その結果を図2(b)に示す。



(a) 減衰振動波形



(b) パワースペクトル

図2 典型的な葉の減衰振動

図2(a)を見ると、典型的な減衰振動であるので、最も単純な減衰振動モデル

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\gamma \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0 \quad (2)$$

で考える。ここで $x(t)$ は振動変位、 γ [1/s] は減衰定数、 ω_0 [rad/s] は固有振動数である。これは二階線形常微分方程式であり、その解は、よく知られているように、 $\gamma < \omega_0$ の場合、

$$x(t) = Ae^{\gamma t} \cos(\omega_d t + \alpha) \quad (3)$$

で与えられる。ただし、 A 、 α は定数、また

$$\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2} \quad (4)$$

である。また、 $x(t)$ のフーリエ変換 $X(\omega)$ は、 $t \rightarrow -\infty$ で発散しないように $|t|$ を考えると、

$$\begin{aligned} X(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i\omega t} dt = A \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\gamma|t| + i\omega t} \cos \omega_d t dt \quad (5) \\ &= A \left\{ \frac{\gamma}{\gamma^2 + (\omega - \omega_d)^2} + \frac{\gamma}{\gamma^2 + (\omega + \omega_d)^2} \right\} \end{aligned}$$

になる。これは、 $\omega = \omega_d$ で最大値をとるローレンチアンであるが、図2(b)はそれをよく表している。なお、式(4)より○で囲んだピーク周波数 $f_d = \omega_d / (2\pi)$ から固有振動数 $f_0 = \omega_0 / (2\pi)$ を計算することができるが、 $f_d = 4$ Hz とすると、 $\omega_d = 2\pi f_d \doteq 25$ rad/s であり、また、 i 番目の極大値とその次の極小値 (の絶対値) をそれぞれ P_i 、 P_{i+1} とすれば、減衰定数は

$$\gamma = -\frac{\omega_d}{\pi} \ln \frac{P_{i+1}}{P_i} \quad (6)$$

であるから、この値を見積もると、 $\gamma \sim 1$ を得る。すなわち、 $\omega_d^2 \gg \gamma^2$ であるから、本研究においては、ピーク周波数 f_d を固有振動数 f_0 と考えることにする。

2.4 葉の水分量と固有振動数との関係

切り取った小松葉の葉について、このような固有振動数計測を数分毎に行いながら、葉の水分量の減少を電子天秤で計測したところ、図3の◆のように、葉の水分量が減少するに従い、固有振動数もほぼリニアに減少することが分かった。すなわち、固有振動数の変化を調べることにより、葉のしおれを検出できる可能性が示唆された。

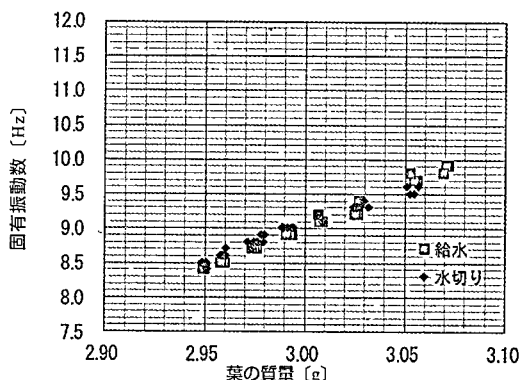


図3 葉の質量と固有振動数との関係

さらに、しおれた後に再給水した際、この関係に履歴現象（ヒステリシス）が見られるか確認した。葉の給水は、試料台から葉を取り外し、葉柄から給水後、その都度、電子天秤のキャリブレーションを行い、その後、葉を取り付けて秤量を行った。その際、葉柄の切り口は、蒸発を抑えるためラップで保護し、また、葉に水分が行き渡るまで1分程度待ってから振動計測を行った。こうすることで、精度よく計測できるようになった。

その結果を図3の■点で示す。これを見ると、ほとんど履歴は見られず、振動数もほぼ元の値に戻ることが分かった。

2.5 若い葉と老成した葉との比較

前節の計測は、比較的老成した葉を用いたので、同様の実験を若い葉でも行った。その結果を図4に示す。これを見ると、老成した葉より若い葉の方が、振動数の変化が大きいたことが予想される。

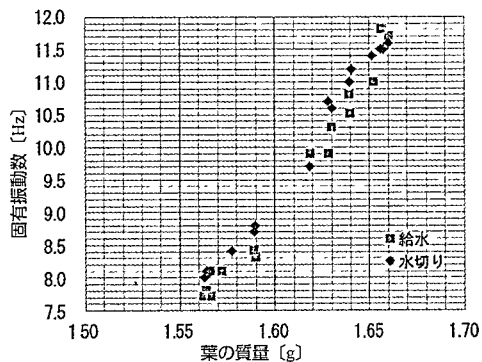


図4 葉の質量と固有振動数との関係

そこで、これを定量的に比較するために、グラフ横軸の「葉の質量」を、「葉の水分減少率」のように規格化してプロットし直したものを図5に示す。ただし、絶乾状態の質量を差し引いた質量が葉の水分量なので、本来はそれについて減少率を計算すべきだが、今回は簡便に、葉の質量を水分量として、葉の質量の減少率を葉の水分量の減少率とした。

この結果、若い葉は、老成した葉の約2倍の傾きで、固有振動数が変化することが分かった。

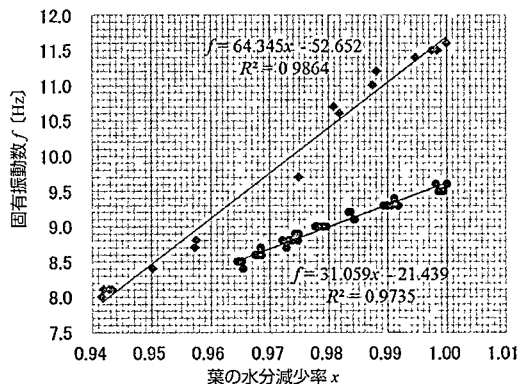


図5 水分減少率に対する固有振動数

すなわち、若い葉の方が水ストレスに対する感度が良いと推察される。

3. 植物の水ストレスと特性振動数

次に、切り取った葉でなく、鉢植えの小松菜について、鉢への給水を断った後で、葉の振動特性がどのように振る舞うかを調べた。

3.1 実験セットアップ

実験セットアップを図6に示す。鉢植えの小松菜の葉1枚を選定し、そこにパラメトリックスピーカを用いて超音波を照射して葉を揺らし、照射停止後の減衰振動の振動変位をレーザ変位計によって計測した。同時に、Webカメラで葉の様子を定点観測した。

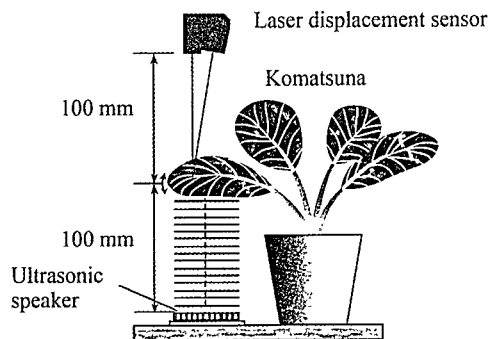


図6 鉢植えの小松菜の振動特性計測

3.2 実験結果

図7の写真①は最初の状態であり、その時の固有振動数はおおよそ3.3 Hzであった。その後、しばらくは鉢の水分を吸収しながら生育を続け、固有振動数は徐々に増加したが、水を断って6日目の朝、葉が急激にしおれ始めると同時に、図の矢印のように固有振動数も急激に減少を始めた。そして写真②の状態にまで葉がしおれたので、その時点で給水を行ったところ、葉はみるみる元の状態に戻り、それと同時に、固有振動数も元の値に戻った。

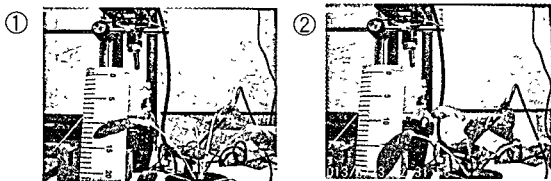
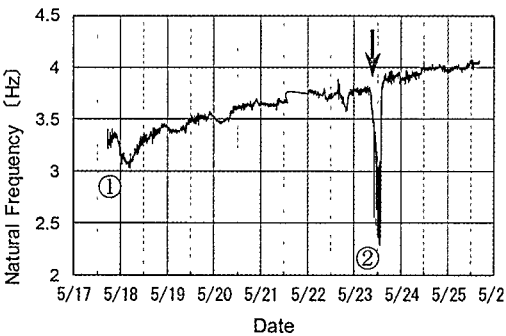


図7 水を断った後の葉の固有振動数変化

4. 考察

4.1 葉の振動モデルについて

切り取った葉では、しおれに伴い固有振動数は減少した。それに対し、鉢植えの葉では、逆に固有振動数は増加した。この理由については以下のように考えられる。

一般に、弾性体の固有振動数は、弾性と質量の比で表され、たとえば、均質な片持ち梁の場合、その基本振動数は

$$f = \left(\frac{1.875}{L} \right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (7)$$

である¹²⁾。ここで L は梁の長さであるが、 ρ は密度、 A は断面積であり、 ρA は線密度すなわち質量を表す。一方、 E はヤング率、 I は断面の中立軸のまわりの2次モーメントであり、 EI は曲げ剛性すなわち弾性を表す。切り取った葉の場合、しおれに伴い、 EI も ρA も減少するが、 EI の減少が勝ったため、固有振動数が減少したものと解釈できる。

一方、鉢植えの場合、系は図8のように葉柄が弾性体で、葉は質量の役割を果たしていると考えられる。すなわち、しおれると、葉柄の弾性は減少するが、それ以上に葉の質量の減少の効果が大きく利き、その結果、固有振動数は上昇したと考えられる。6日目に急激に固有振動数が減少したのは、茎の弾性が急に弱くなったためと考えられる。

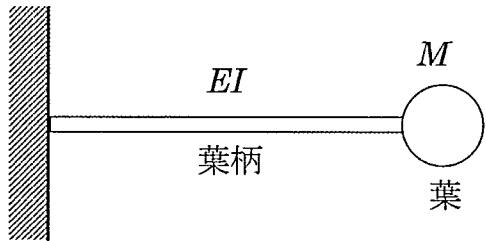


図8 端に質量をもつ梁

4.2 音響放射圧について

空気中を伝わる音波は、空気疎密波であり、圧力が高い密な部分と圧力が低い疎な部分が伝播したものである。このとき、大気圧に対する圧力変動の振幅を音圧というが¹³⁾、平面正弦波の場合、音圧の実効値 p [Pa] と媒質の振動速度の実効値 v [m/s] の比は、音響インピーダンスに一致し、

$$\frac{p}{v} = \rho c \quad [\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})] \quad (8)$$

である。ここで、 ρ [kg/m³] は媒質の密度、 c [m/s] は音速である。

さて、ある壁を考えると、気体分子運動論によれば、壁に与える圧力は、気体分子の壁

に垂直な成分の平均運動エネルギーに比例することが示される。すなわち

$$P = \overline{\rho v^2} = 2E_k = E \text{ [Pa]} \quad (9)$$

で与えられる。ここで、 $\overline{v^2}$ は壁に垂直な速度成分の2乗平均である。すなわち、この圧力 P は、運動エネルギー密度 E_k の2倍であり、それは全エネルギー密度 E に他ならない。

大気圧におけるこの圧力は等方的であるが、音波が存在すると、その進行方向の $\overline{v^2}$ は増加し、その分、異方的な圧力が働く。その圧力は、式 (8) を (9) に代入して

$$P = \frac{p^2}{\rho c^2} \text{ [Pa]} \quad (10)$$

となる。これが音響放射圧である。

今回のパラメトリックスピーカの音圧レベルは 130dB であるが、最小可聴音圧 $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ によってこの音圧 p を Pa で表すと

$$p = 20 \mu\text{Pa} \times 10^{130/20} = 63\text{Pa} \quad (11)$$

である。ここで音響インピーダンスと音速は

$$Z = \rho c = 413 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^3 \quad (12)$$

$$c = 343 \text{ m/s} \quad (13)$$

であるから、これを式 (13) に代入すると

$$P = 0.028 \text{ Pa} \quad (14)$$

を得る。したがって、葉の面積を $S = 35 \text{ cm}^2$ とすると、葉を押す力は、

$$F = PS = 0.098 \text{ mN} = 9.8 \text{ mgw} \quad (15)$$

になる。これは予想よりかなり小さい。この原因は現在検討中である。

5. おわりに

本研究において、植物の水ストレスによる葉のしおれを、葉の振動計測によって検出できる可能性が示唆された。また、経時変化を調べることにより、しおれのタイミングを知ることができた。

しかし、最適灌水制御に結びつけるには、しおれる寸前の振動数の振る舞いを系統的に調べ、その普遍的な特徴を明らかにする必要がある。また、今回は、最も単純な振動モードを調べたが、実際の葉の揺れ方は複雑であるので、レーザ変位計による一点計測ではなく、Web カメラ等による多点計測の技術が必要になる。これができれば、葉の自然な振動を捉えるだけで、水ストレスの状態が判断できるようになり、群落についての水ストレスも評価できると思われる。

謝辞

本研究は、JST CREST の助成金を受けて実施したものである。

【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) Motoaki Sano, Tsuneyoshi Sugimoto, Hiroshi Hosoya, Motoyoshi Ohaba, and Sakae Shibusawa: Jpn. J. Appl. Phys., 52, 07HC13, 2013.
- 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) L. テイツ・E. ザイガー: 植物生理学第3版, p.44, 培風館, 2004.
- 8) 兵頭竜二・高見寿隆・松尾憲一・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.
- 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) 谷口修: 改訂 振動工学, p.160, コロナ社, 1957.
- 13) 実吉純一・菊池喜充・熊本乙彦: 超音波技術便覧 新訂版, p.419, 432, 434, 日刊工業新聞社, 1978.