

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 11 日現在

機関番号：32717

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25450387

研究課題名(和文) 葉の振動計測による植物の水ストレスの評価に関する研究

研究課題名(英文) Study on Estimation of Water Stress of Plant by Vibration Measurement of Leaf

研究代表者

佐野 元昭 (Sano, Motoaki)

桐蔭横浜大学・医用工学部・教授

研究者番号：90206003

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：ハイスピードカメラを用いて葉のたわみ振動の固有振動数と植物の水ストレスとの関係を調べたところ、葉身自身のたわみ振動の固有振動数は、葉がしおれてきてもあまり変化はないが、葉柄のたわみ振動による葉の固有振動数は、しおれと共に大きく減少することが分かった。また健全な葉の場合、葉柄のたわみ振動による葉の固有振動数は日周変動し、日中に増加、夜間に減少するが、その振る舞いは植物の水ストレスにより逆転することが確認された。

以上より、植物の水ストレスの推定には、葉身自身のたわみ振動ではなく、葉柄のたわみ振動による葉の固有振動数を計測するのが有効であり、レーザー変位計などによる単純な振動計測でよいことが分かった。

研究成果の概要(英文)：By examining the relationship between the water stress of plant and the natural frequency of flexural vibration of leaf with a high-speed camera, it was found that the natural frequency of the flexural vibration of leaf blade itself is not so much changed with the wilting. On the other hand, the natural frequency of leaf by flexural vibration of petiole was decreased significantly with wilting. In addition, it was confirmed that the natural frequency of healthy leaf by flexural vibration of petiole shows diurnal variation, and it increases during daytime, but decreases during night. Moreover, this behavior was reversed with the increasing of water stress of plant. Thus, it was concluded that the measurement of the natural frequency of leaf by flexural vibration of petiole is more effective for the estimation of water stress of plant than the measurement of flexural vibration of leaf blade itself. That is, simple vibration measurement using such as a laser displacement meter is enough.

研究分野：信号処理

キーワード：葉の固有振動 植物の水ストレス ハイスピードカメラ 非侵襲計測 超節水精密農業

1. 研究開始当初の背景

将来の水の節約を考える上で、植物(作物)の最適灌水制御は一つの重要な課題である。しかしそれを実現するには、植物がいま水をどれだけ必要としているのか(作物給水ニーズ)を知る必要がある。そこで我々はCREST研究課題「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」の澁澤チーム「超節水精密農業技術の開発」のメンバーとして、作物給水ニーズを非侵襲的かつ実時間に推定する研究を続けてきた。国内外における研究としては、植物体全体の葉面積をカメラで計測する方法[1]や葉の反射スペクトルにおける「レッドエッジ」のブルーシフト現象を利用する方法[2]などが考案されており。我々もハイパースペクトルイメージによる植物の植生指標から、葉の水分量減少(しおれ)を早期に検出できないか検討した。しかしながら植生指数が顕著に変化するのには、実際にはかなりしおれが進んでからということが分かり、目的とするしおれの早期検出には最適ではないことが判明した。そのような中で、植物の葉はしおれると張りがなくなり柔らかくなることに着目し、図1のような装置を用いて、切り取った葉の水分量変化に対する葉の固有振動数変化をレーザ変位計により計測してみたところ、図2のように水分減少(しおれ)に従い固有振動数は減少した[3]。

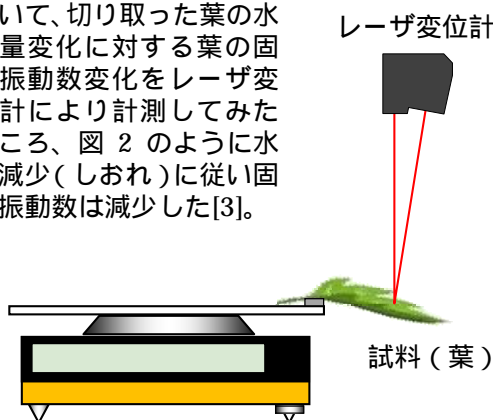


図1 葉の水分量および振動変位計測

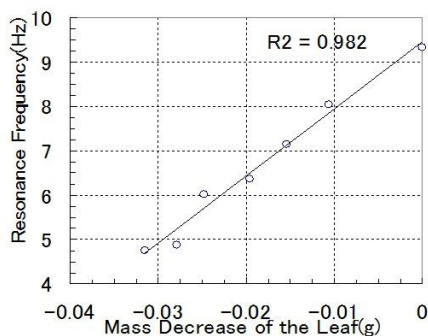


図2 固有振動数の変化と葉の重量変化

このような植物の水ストレスの推定に葉の固有振動数の変化を用いる手法は、国内外でも類を見ない独創的なものであり、もしこれができれば、非侵襲かつ実時間で簡単に水ストレス推定が可能になる。

2. 研究の目的

本提案手法は、何らかの手段によって葉に振動を与え、その固有振動数を計測し、その

変化から植物の水ストレスを推定しようとするものであるが、今までは通常のレーザ変位計を用いた1点のみの計測のため、葉の様々な振動モードの分離が難しかった。そこで本研究では、レーザ変位計に加え、新たにハイスピードカメラを導入し、葉の表面の複数の特徴点を追跡することにより、葉の全体的な運動の計測を行い、複雑な葉の振動モードの分離を試みる。そして、栽培された状態の植物の葉について、複数の点の振動を計測して、その振動特性(振動モード)を解明し、それぞれの振動モードの固有振動数が、植物の水ストレスに対してどのように振舞うのかを明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 葉の加振方法

葉の加振は、当初エアガン等で振動を与える装置を検討していたが、研究を進める中で、超音波の音響放射圧が有効であることが分かり、加振には、日本セラミック(株)製のパラメトリックスピーカ(日本セラミック、AS101AW3PF1)から発振される40kHzの超音波による音響放射圧を用いた。信号はファンクションジェネレータ(Tektronix Inc., AFG3022)で生成し、パラメトリックスピーカのコントローラに $V_{pp} = 1V$ の信号を0.1s間印加した。ただし、コントローラの仕様より、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間音響放射圧により押され、その後、減衰振動が観測された。

(2) 使用した試料

使用した試料は発芽後およそ1カ月の小松菜(*Brassica rapa* var. *perviridis*)を用いた。給水シート(東洋紡, コスモ A-1)によって底面給水を行い、土壌の体積含水率はほぼ $0.3 \text{ m}^3/\text{m}^3$ であった。水分センサは、デカゴン社 EC-5 (センサ用口ガーは Em5b)を用いた。生育は自然光の入らない空調のある室内で行い、蛍光灯(パナソニック製)を用いて、ON/OFFタイマーにより毎日6:00から18:00まで照光した。生育環境を表1に示す。

表1 生育環境

項目	値
温度	$20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$
湿度	$55 \pm 10 \text{ \%RH}$
照光	9000 lx (約 $120 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)

(3) 葉の振動計測

振動計測は、図3のように、レーザ変位計(Keyence Corp., LK-G150)による継続的な自動計測と、ハイスピードカメラ(ディテクト社, HAS-L1)による手動計測を同じ葉に対して並行して行った。ハイスピードカメラのフレームレートは500fps、シャッタースピードは $1/1000\text{s}$ 、画素数は 640×480 ドットである。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。

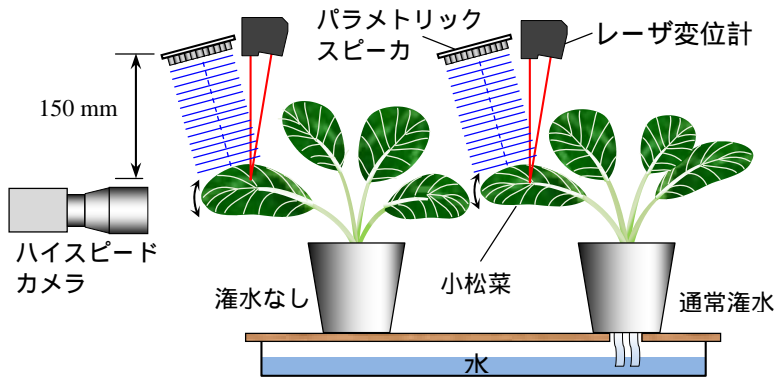


図3 実験セットアップ

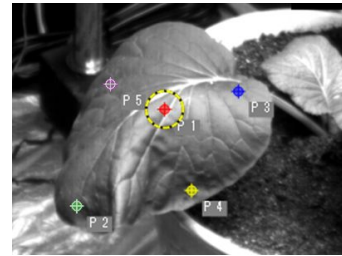


図4 計測点

ハイスピードカメラは、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が、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ため、今回の計測では、図4のように葉面に対して斜め上方から撮影した。追跡する点は、葉身の中央 P₁、先端 P₂、葉柄付近 P₃ の計3か所とした。

(4) 葉の振動解析

各点の追跡は、付属の解析ソフトウェア (Dipp-Mortion V, ver.1.1.24) によって相関追尾した。テンプレート画像は 32×32 ドット、探索範囲を 64×64 ドットとした。精度は 0.25 mm/ドット程度であった。追尾された変位は CSV 形式で保存し、数値計算ソフトウェア SciLab の FFT パッケージによりパワースペクトルを求めた。その際、2 次のサビツキー-ゴーレイフィルタを用いて $m=6$ (すなわち幅 $2m+1=13$ 点) で平滑化を行った。また、FFT の際には、周波数の精度を上げる目的で、データの後ろにデータ長が 10,000 点になるよう 0 データを補完した。その結果、周期 $T=10,000/500 \text{ fps} = 20 \text{ s}$ になり、周波数精度は 0.05 Hz になる。

図5(a)に、葉身のほぼ中心 P₁ における減衰振動波形、同図(b)にそのパワースペクトル密度を示す。この葉の場合、固有振動数は約 3.4Hz である。

また、葉身のたわみ振動の固有振動数を調べるために、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6に示す。図6は $\vec{P_3P_1P_2}$ の変動のパワースペクトルである。これを見ると、3.4Hz の他、5.7Hz 付近にもピークが見られる。これが葉身自体のたわみ振動の固有振動数であると考えられる。

4. 研究成果

(1) 振動の分離

ハイスピードカメラを用いて、葉の先端、

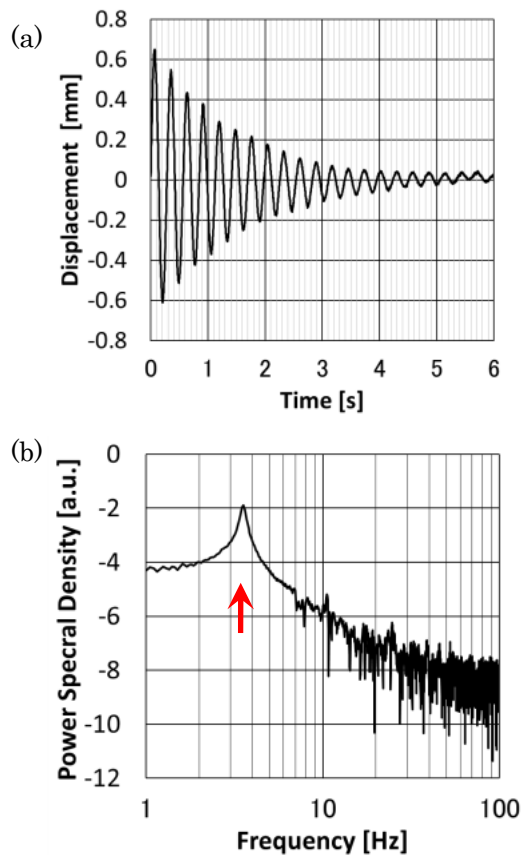


図5 振動変位の例(11/25 P₁)

(a) 振動波形 (b) パワースペクトル密度

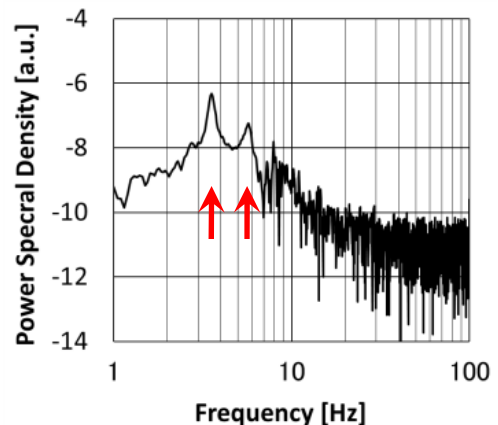


図6 角度変化のパワースペクトル(11/25)

中央、葉柄の付け根付近の振動変位を計測し、葉柄のたわみ振動による葉の変位振動の固有振動数と、葉身自身のたわみ振動の固有振動数とをそれぞれ得ることができた。この結果より、少なくともこのような3点を計測すれば、振動の大まかな分離は可能であることが示された。

(2) 各固有振動の振る舞い

(i) しおれ時の振る舞い

分離した固有振動数の経時変化を、通常に灌水した株と、灌水をやめた株について測定したところ、図7のような変化をした。ハイスピードカメラによって測定した点 P1 を振動変位で、リファレンスとして測定したレーザ変位計により得られた固有振動数の経時変化のうち灌水株(Irrigation)を、非灌水株(Non-irrigation)を で示す。

非灌水株は11/26の朝、照光の開始と同時にしおれ始めたので、昼に上部より灌水を行ったところ、しおれが戻ったが、図7(a)のように、固有振動数もこれに合わせるように6:00より急激に減少し、昼の灌水後は固有振動数も回復していることが分かる。ハイスピードカメラのデータは間隔が荒いが、図7(a)においては、レーザ変位計と同じ傾向を示していることが分かる。しかし図7(b)においては、しおれ時においても大きな変動は見られなかった。

この結果より、葉柄のたわみ振動による葉の変位振動の固有振動数は、しおれによって急激に減少するが、葉身自身のたわみ振動の固有振動数は、しおれによって急激に変化することはないことが示唆された。

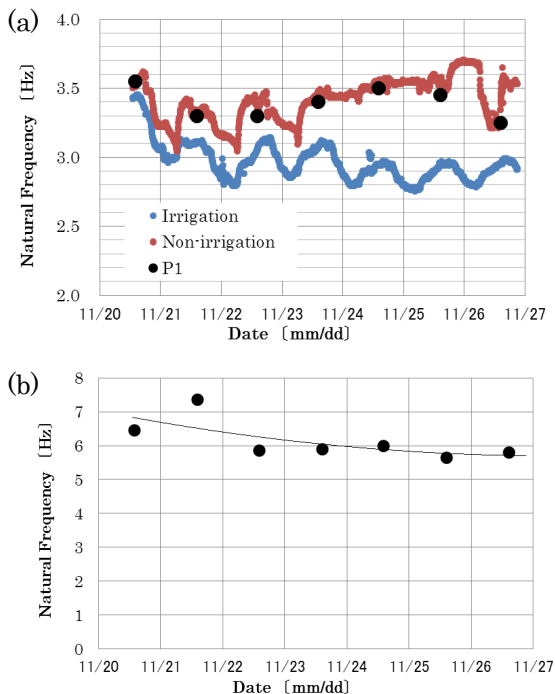


図7 固有振動数の経時変化

- (a) 葉柄のたわみ振動による固有振動数 (ハイスピードカメラの結果)
- (b) 葉身自身のたわみ振動の固有振動数

(ii) 日周変動

図7(a)のように、葉柄のたわみ振動による葉の固有振動数は日周変動を示し、

健全な株においては、照光が開始され蒸散が始まると固有振動数は上昇をはじめ、照光をやめると固有振動数は減少する。

灌水を停止した株については、水ストレスが増すにつれて日周変動は小さくなり、さらに水ストレスが増加すると、変動の傾向が逆転する。

ハイスピードカメラの結果()においても同様の結果が示唆されたが、測定間隔が荒かったため、日周変動については分からなかった。そこで、半日間に細かく計測したところ、図8に示すようになった。葉柄のたわみ振動による葉の固有振動()は照光後に徐々に上昇しているが、葉身自身のたわみ振動の固有振動数()はばらつきが大きいものの、日周変動は無いように見える。

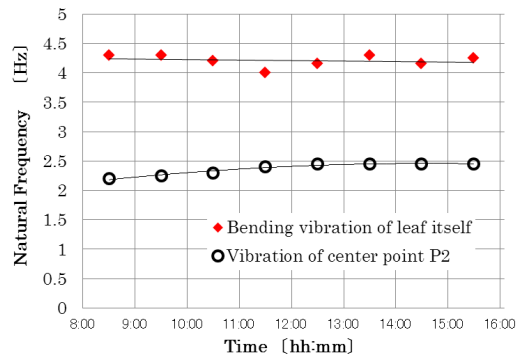


図8 固有振動数の半日における経時変化

ハイスピードカメラによる測定は自動化できなかったが、研究成果の(1)で述べたように、葉の先端、中央、葉柄の付け根付近の3点の振動変位を計測すれば、葉柄のたわみ振動による葉の変位振動の固有振動数と、葉身自身のたわみ振動の固有振動数は分離可能なので、図9のようにレーザ変位計3台を並べて、同様の固有振動数の経時変化の自動測定を行った。

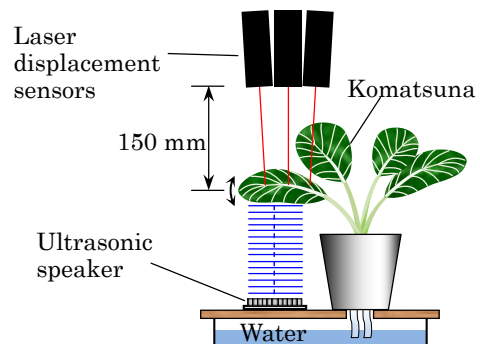


図9 実験セットアップ

その結果、図10に示すようになり、(a)に示すように、葉柄のたわみ振動による葉の変位振動の固有振動数は、上述のような日周変動を示すが、(b)のように、葉身自身のたわみ

振動の固有振動数には、特に日周変動は見られないことが分かった。

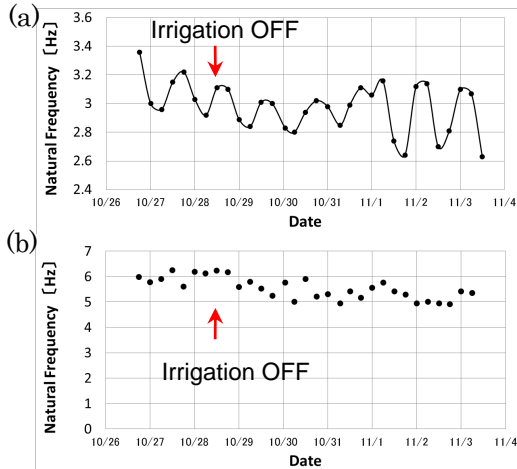


図 10 固有振動数の経時変化

- (a) 葉柄のたわみ振動による葉の変位振動の固有振動数
 (b) 葉身自身のたわみ振動の固有振動数

以上より、植物の水ストレスを推定する上では、日周変動などが大きく見られる、葉柄のたわみ振動による葉の変位振動の固有振動数が適しており、葉身自身のたわみを計測する必要はないので、葉の中心の振動変位など、レーザ変位計 1 個による振動測定で十分であることが分かった。

(3) 植物生理との関係

葉柄のたわみ振動による葉の変位振動の固有振動数が日周変動する減少について、植物生理との関係を大雑把に考察した。葉柄についた葉を、図 11 のような先端に質量のある片持ち梁 (Cantilever beam) で考える。

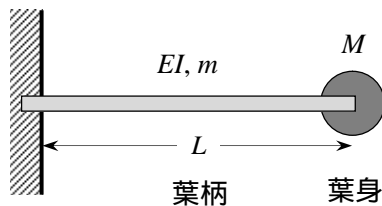


図 11 葉柄を含む葉の振動モデル

このモデルにおいて、葉柄の曲げ剛性を EI (E はヤング率、 I は中立軸のまわりの断面二次モーメント)、 m を葉柄の質量、 M を葉身の質量とする。このとき、この梁の固有振動の基本角振動数は、

$$\omega = \sqrt{\frac{3EI}{L^3(M + 0.23m)}} \quad (2)$$

で与えられることが知られているが[4]、照光によって蒸散が始まるとともに固有振動数が増加することは、式(1)において、葉の質量が蒸散により減少し、その結果として、固有振動数が増加すると解釈することができる。

ただし、葉柄については、夜間は立っ

り、日が出ると、葉に日が当たるように横に寝るので、夜間の方が葉柄の曲げ剛性が大きいように思われるが、この変化は葉柄の曲がりよりも葉柄の根元の角度の変化の影響が大きく、葉柄の曲げ剛性 EI 自体は、昼夜でさほど変化していないと考えられる。

一方、しおれが進んでくると、蒸散による葉の質量の減少効果より、葉柄の曲げ剛性 EI が急激に小さくなる影響が勝り、それに伴って、葉柄を含む葉の固有振動数も小さくなると考えられる。

(5) 今後の展望

(i) ステップ応答による水ストレス推定

今回の実験では、照光は ON/OFF タイマーを用いて毎日 6:00 から 18:00 まで行ったので、健全な場合に見られる葉の固有振動数の日周変動は、この光に対するステップ応答と考えることができる。したがって、その伝達関数を求め、それによって、葉のしおれ状態を推定することが可能なことを示唆している。もしこれが実現すれば、連続的に長時間計測しなくても、ステップ応答特性を計測することにより、より短時間で、植物の水ストレスの状態を推定できる可能性がある。

(ii) 植物群落への応用

現在は、植物の葉 1 枚について、レーザ変位計を用いて固有振動数の計測を行っているが、広域的に CCD カメラなどで群落を撮影し、自然風などによる植物の揺らぎの周波数を、画像解析によって取り出すことにより、葉の固有振動数が推定できると考えられる。したがって、このように植物群落の固有振動数を常にモニタしておけば、水ストレスの状態を把握できる可能性がある。

(iii) 持続可能な超節水農業に向けて

まだ実用段階には至っていないが、この手法により非侵襲的に実時間で植物の水ストレスが推定できれば、必要なときに必要最低限の水を供給できるようになり、超節水農業に大きく貢献するものと思われる。

この際に必要になってくるのが、土壌の水もちであり、現在、ヴェルデナイト®など水もちが非常に良い培養土が市販されているが、この場合、最適灌水制御を行えば重力水は生じないので、肥料やミネラルの流失も防ぐことができ、肥料も必要最低限で済む。ちなみに化学肥料は除塩が必要になるので、結局大量の水を要し、節水にならないだけでなく、除塩によって、土壌に蓄えられていた養分やミネラルも失ってしまうので、折角の肥沃な土壌がやせてしまう。そのため、超節水農業には有機栽培が必要であるが、これは、シュタイナー農法のような持続可能な農法として期待される。

< 引用文献 >

- [1] 仁科他、農業環境工学関連 7 学会 2005

年合同大会講演予稿集、2005、p.390

[2] 特開 2005 - 308733 「植物の受けるストレスの測定方法及び装置」長崎県(兵頭竜二)

[3] Sano, *et al.*, The 33rd Symposium on UltraSonic Electronics 講演論文集, 2012, p.57.

[4] 谷口修: 改訂 振動工学, p.160, コロナ社, 1957.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

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、査読無、第32巻、2015、187-192
https://toin.repo.nii.ac.jp/?action=pages_view_main&active_action=repository_view_main_item_detail&item_id=90&item_no=1&page_id=13&block_id=21

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, Acoustical Science and Technology, 査読有, Vol.36, No.3, 2016, 248-253
DOI:10.1250/ast.36.248

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、査読無、第34巻、2016、155-158

内川千春、杉本恒美、佐野元昭、中川 裕、植物の葉の固有振動数のモデル化に関する研究、桐蔭論叢、査読無、第34巻、2016、掲載予定

〔学会発表〕(計6件)

Motoaki Sano, Takuya Anzai, Yutaka Nakagawa, Tsuneyoshi Sugimoto, Takashi Shirakawa, Kaoru Yamagishi, Takeyuki Ohdaira, Sakae Shibusawa, Estimation of Water Stress of Plant by Vibration Analysis of Leaf with High Speed Camera, 35th Symposium on Ultrasonic Electronics 2014 (USE2014), Meiji Univ. Academy common, 2014.12.5

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、2015年春季研究発表会、中央大学(後楽園キャンパス)、2015.3.18

安齋拓也、佐野元昭、中川裕、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による葉の振動計測と植物の水ストレス、日本生物環境工学会、2015年宮崎大会、シーガイア コンベンションセンター、2015.9.9

Motoaki Sano, Yutaka Nakagawa, Takuya Anzai, Chiharu Uchikawa, Takeyuki Ohdaira, Takashi Shirakawa, Tsuneyoshi Sugimoto, Estimation of Water Stress of Plant by Vibration Analysis of Leaf with High Speed Camera 2, 36th Symposium on Ultrasonic Electronics 2015 (USE2015), EPOCHAL TSUKUBA, 2015.11.7

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、葉の多点振動解析による作物吸水ニーズの推定、日本音響学会、2016年春季研究発表会、桐蔭横浜大学、2016.3.9

杉本恒美、中川裕、白川貴志、大平武征、内川千春、佐野元昭、音響振動による植物吸水ニーズの推定に関する研究 葉モデルを用いた葉の共振周波数に関する基礎検討、日本音響学会、2016年春季研究発表会、桐蔭横浜大学、2016.3.9

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

佐野 元昭 (SANO, Motoaki)

桐蔭横浜大学・医用工学部・教授

研究者番号：90206003

(2)研究分担者

杉本 恒美 (SUGIMOTO, Tsuneyoshi)

桐蔭横浜大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：25450387

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

中川 裕 (NAKAGAWA, Yutaka)

内川 千春 (UCHIKAWA, Chiharu)

大平 武征 (OHDAIRA, Takeyuki)

白川 貴志 (SHIRAKAWA, Takashi)