

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：32717

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K07681

研究課題名(和文)音波振動を用いた植物の育成状態評価に関する検討

研究課題名(英文)Evaluation of growth condition of plants using sound wave vibration

研究代表者

杉本 恒美 (Sugimoto, Tsuneyoshi)

桐蔭横浜大学・工学(系)研究科(研究院)・教授(移行)

研究者番号：80257427

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：植物の育成状態を評価するために葉の共振周波数および、根圏周辺の土壌伝搬音速の計測を音波振動により行った。その結果として、健全な小松菜の場合、葉の共振周波数は安定した日周変動を繰り返していることが判明した。また、土壌伝搬音速は体積含水率に反比例して変化することから、植物根圏内の水分推定に利用できることが判明した。これらの事実を利用して灌水時期を変化させた実験を複数回実施した。その結果、小松菜の場合、植物体にダメージを与えずに節水を行う最適な灌水停止期間は1日程度であると推測された。これらの結果より、植物の育成状態を音波により非接触で評価できる可能性があることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：In order to evaluate the growing state of plants, the resonance frequency of the leaves and the propagation velocity of sound in soil around the rooting zone were measured by acoustic vibration. As a result, in the case of a healthy Komatsuna, it turned out that the resonance frequency of the leaves is repeating a stable diurnal variation. In addition, since the propagation velocity of sound in soil changes in inverse proportion to the volume moisture content, it turned out that it can be used for water content estimation in the plant rooting zone. Experiments in which the irrigation timing was changed by using these facts were carried out a plurality of times. As a result, in the case of Komatsuna, the optimal irrigation stop period of saving water without damaging the plant body estimated to be about one day. From these results, it became clear that there is a possibility to evaluate the growing state of plants without contact with sound waves.

研究分野：音響工学

キーワード：振動計測 非侵襲計測 超節水精密農業 土壌伝搬音速 葉の振動計測

1. 研究開始当初の背景

植物の育成状態に関する直接的な情報は、葉や土壌を破壊的に採取するか、篤農家自身の目視もしくは直接手で触れることが必要とされている。そこで、本研究室では JST 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、育成中の植物給水ニーズを、植物の地上部および根圏部から非侵襲的かつ実時間で推定する研究を続けてきた。

最初に地上部に関する研究としては、植物体全体の葉面積をカメラで計測する方法^{a)}や反射スペクトルにおける「レッドエッジ」のシフト現象を利用して植物の水ストレスを見積もる方法^{b)}などが考案されている。本研究室でも、ハイパースペクトルイメージによる植物の植生指標の評価から、“しおれ”を早期検出できないか検討を進めてきた。しかしながら、検討の結果から目的とするしおれの早期検出目的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、切り取った葉の水分量変化に対する葉の共振周波数変化をレーザ変位計により計測したところ、非常に高い相関が得られることが判明した^{c)}。その後、強力超音波音源を用いることにより長期自動計測が可能であることも明らかにした^{d)}。このような植物の水ストレスの検出に葉の共振周波数を用いる手法は、国内外でも類を見ない独創的なものであり、非侵襲かつ簡便な植物の育成状態評価が可能になることが期待される。

次に根圏部に関しては、例えば植物根圏全体をカバーするような土壌水分分布を計測するには市販の水分センサを多数設置しなければならないために実際の計測は極めて困難である。一方、音響伝搬を用いた場合には測定関心領域をはさんだ位置での観測が可能のため、比較的少ないセンサ数でもその伝搬音速の変化から水分分布の推定が可能である。実際に粘土質の土壌中や砂中における伝搬音速と含水率の相関が見られることは明らかにされている^{e,f)}。しかしながら、実際に植物育成中の状態で計測された例は無かった。そこで、本研究室では植物育成中の培養土における伝搬音速の変化が体積含水率の変化と見事な相関が見られることを世界で初めて明らかにしている^{g)}。

(背景内における参考文献)

[a] 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, p.390, 2005

[b] 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)

[c] M.Sano, et al., Jpn, J. Appl. Phys. 52 (2013) 07HC13

[d] T.Sugimoto, et al., Proc. ISMAB, pp.631-635, (2014.5)

[e] Zhiqun Lu and J.M.Sabatier, SSSAJ Vol.73, No.5 pp.1614-1625,2009

[f] T.Sugimoto, et al., Jpn, J. Appl. Phys. 52 (2013) 07HC04

[g] T.Sugimoto, et al., Proc. IEEE IUS, pp691-694, (2013.7)

2. 研究の目的

植物の育成状態に関する直接的な情報は育成中の植物の葉や根圏土壌を破壊的に採取するか、もしくは篤農家が直接目視や手で触れることによってのみ把握は可能であった。しかしながら、アクティブな音波振動を利用することにより、植物の葉や植物根圏土壌の状態に関する情報を非破壊的に得られる可能性が明らかになってきた。もし、このような手法が実用化されれば、最適な植物育成が実現できるようになることが期待される。そのため、本研究ではこのようなアクティブな音響加振を利用した植物育成状態の評価法に関する検討を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

植物の地上部および根圏部における2つの音波振動を用いた計測法は、それぞれ独立に発展してきた。そこで、2つの計測のコラボ実験を複数回行って、音波振動による計測情報を統合することにより植物育成状態評価が可能になるかどうかについて検討を行った。

(1) 実験セットアップ

Fig.1 に実験セットアップ例の写真を示す。実験は恒温室内(気温約 21℃、相対湿度約 55%)で行われた。実験槽の大きさは約 5.5L で、実験用植物としては育成が早く、年間に複数回の実験が実施可能と思われる小松菜を用いた。なお、写真では播種後 28 日目の小松菜が定植されている。

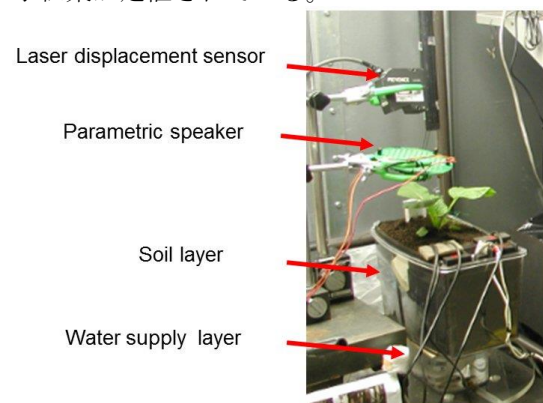


Fig.1. Photograph of the experimental setup.

(2) 葉の振動計測部

葉の振動を計測するためのレーザ変位計 (LK-G150, KEYENCE Corp.) は測定対象の葉の上方約 15 cm に、葉の振動を発生させるための超音波音源 (AS101AW3PF2, 日本セラミック株) は計測葉の上方または下方約 5 cm に設置した。なお、音源等装置の位置は、計測葉の成長と振動状態に応じて、計測しやすくなるように調整した。また、葉を振動させるための加振用音波としては、葉の共振周波数を含む 2Hz~5Hz の帯域幅を持つ波形 (全長 2268ms, Fig.2) を 5 分おきに 1cycle 照射し

て計測葉を振動させ、変位データをサンプリングタイム 10ms で 10 秒間取得した。なお、照明の明るさは約 8000 Lux、点灯時間は 6:00 から 18:00 とした。また、葉の状況を確認するために CCD カメラにより計測時の写真も同時に撮影している。

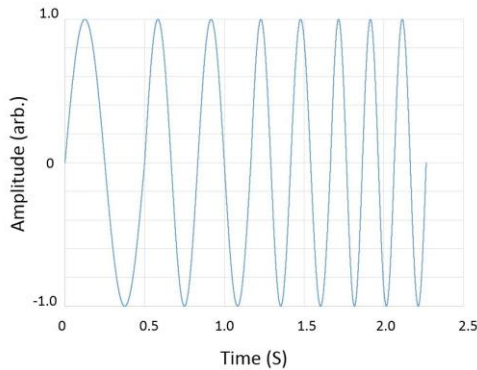


Fig.2. Waveform for excitation of a leaf.

(3) 伝搬音速計測部

Fig.3 に実験槽の構成図を示す。植物の育成部は土壌層と灌水層の 2 層構造になっている。これは給水圧を一定にするために底面給水を行うためである。そのため、灌水層には給水するための給水布が土壌層から垂れ下がっている。灌水時には給水圧を一定にするために土壌層底面と灌水層の水面との距離は一定 (約 3cm 程度) になるように液面制御筒により自動調節されている。

また、土壌内には土壌中の伝搬音速計測のための超磁歪音源(GPC-1, オプト株) 2 個と音波振動の受振器として加速度センサ 2 個 (Ac1, Ac2, NP-3110, 株小野測器) および水分センサ 5 個 (Hch, ch1~ch4, EC-5, Decagon Corp.) が配置されている。地中内の超磁歪音源からの送振波としては正弦波 350Hz, 5cycle を用いた。加速度センサにより受振された信号はデータロガー (GL-900, グラフテック株) を用いて 8 分間隔で計測をおこなった。

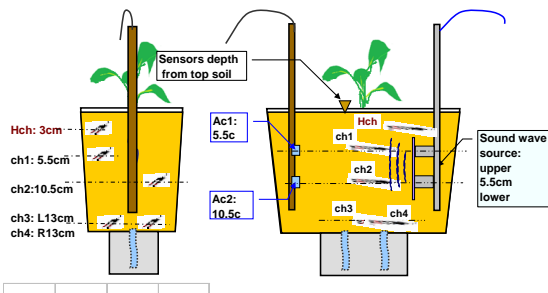


Fig.3. Position of sensors and sound sources.

(4) 伝搬音速の算出方法

ここで土壌中の伝搬速度は、以下のような手順により計測された。

- ・測定波を 50~1000 Hz でフィルタ処理
- ・音源直前で事前計測したリファレンス波と測定波の最初の 1 波程度のみを切り出して、相互相関処理により伝搬時間を算出
- ・伝搬距離から伝搬速度を算出

4. 研究成果

(1) コラボ実験例について

前節に示したような実験セットアップを用いて、葉の振動計測と土壌中の伝搬音速計測の同時実験を複数回実施した。ここでは植物の生育を妨げずに最大限の節水が行なえるかどうかを調べるために、灌水停止により小松菜に水ストレスを加えた場合の実験結果例を示す。小松菜の場合には、葉の共振周波数は、健康時は昼間に最大値、夜間に最小値を取る日周変動を示し、灌水停止等による水ストレス時は最大値が夜間にずれ込む事が確認されているため、共振周波数が最大値をとる時刻を元に水ストレスを判定した。灌水操作の状況を Table 1 に示す。

Table 1. Timing of irrigation control.

定植後の日数	灌水操作等の情報
0	実験槽に小松菜定植
1 9	コラボ実験開始
2 3	灌水停止
2 6	灌水再開
3 3	灌水停止
3 6	灌水再開
3 7	灌水停止
4 0	実験終了

(2) 土中の伝搬音速の変化について

Fig.4 に地表面からの深さ 5.5 cm および 10.5 cm に埋設した加速度センサ (Ac1, Ac2) から得られた土中の伝搬音速変化と同じ深さの水分センサ(ch1, ch2)から得られた体積含水率の変化を示す。従来の結果どおり、音速と体積含水率 (VWC : Volume Water Content) が負の相関を示していることがわかる。また、蛍光灯のオンオフに依存する日周変動も観測されており、計測精度が高いことも見て取れる。

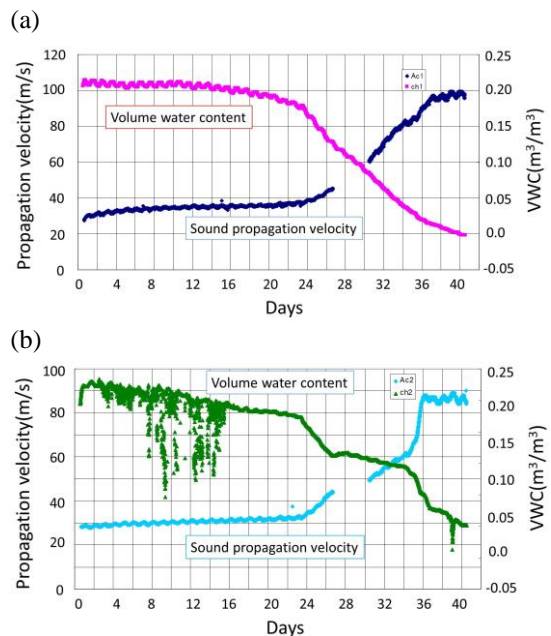


Fig.4. Change in sound propagation velocity and volume water content.

(a) Depth 5.5 cm, (b) Depth 10.5 cm.

深さ 5.5 cm の結果 (Fig.4(a)) では、一旦、灌水を停止した後は、途中で灌水を再開しても WVC および音速も回復している様子が全く見られないが、深さ 10.5 cm の結果 (Fig.4(b)) を見ると、灌水操作に対応した変化を見ることができる。このことは今回の灌水操作により給水された水は土壌表面から深さ 10.5 cm までは到達しているが、深さ 5.5 cm では到達していないことを意味している。

(3) 葉の共振周波数の変化について

葉の振動計測では、植物の成長に伴い振動計測が困難になることがある。今回の実験例においても Fig.5 に示すように 30 日目あたりで、最初の計測葉 1 が下方に伸び、超音波音源および実験槽への接触が起きたため、次の計測葉 2 に対象を切り替えている。

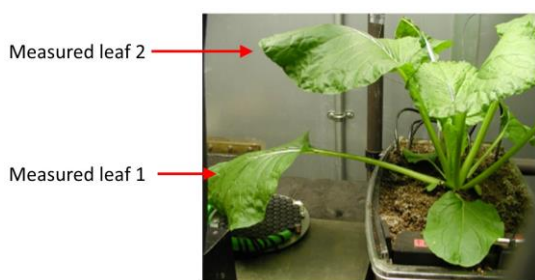


Fig.5. Photograph of measured leaf 1 & 2.

最初に計測葉 1 の共振周波数変化を Fig.6(a) に示す。なお、図中の緑三角、青菱形および赤四角はそれぞれ計測された生データ、生データに対して特異なデータを取り除いた上でスムージング処理を行ったデータおよび日中の共振周波数の最大もしくは最小ピーク位置を示している。図より、実験開始 23 日目に灌水を停止したところ、2 日後の 25 日目に、葉の共振周波数の日内最大値が消灯後にずれたことが観測された。ただし、この時点における目視では“しおれ”は確認されていない。

続いて、計測葉 2 の共振周波数変化を Fig.6(b) に示す。33 日目の灌水停止後、2 日後の 35 日目に葉の共振周波数の日内最大値が消灯後にずれたことが観測された。この時の計測葉 2 の写真を Fig.7 に示す。写真から目視でも“しおれ”が確認された。

(4) コラボ実験のまとめ

以上のコラボ実験結果より、以下のことが明らかになった。

- ・地中内の伝搬音速変化から、植物根圏内の含水率の変化自体はほぼ推定可能である。しかしながら、伝搬音速変化だけでは植物の健康状態変化の早期把握は困難である。
- ・葉の共振周波数変化から、安定した周波数の日周変動にずれが生じたときは、植物に水ストレスが加わり健康状態に影響がある可能性が高い。これは目視による“しおれ”が生じるよりも早い段階で発生するため、早期診断用に利用できる可能性が高い。

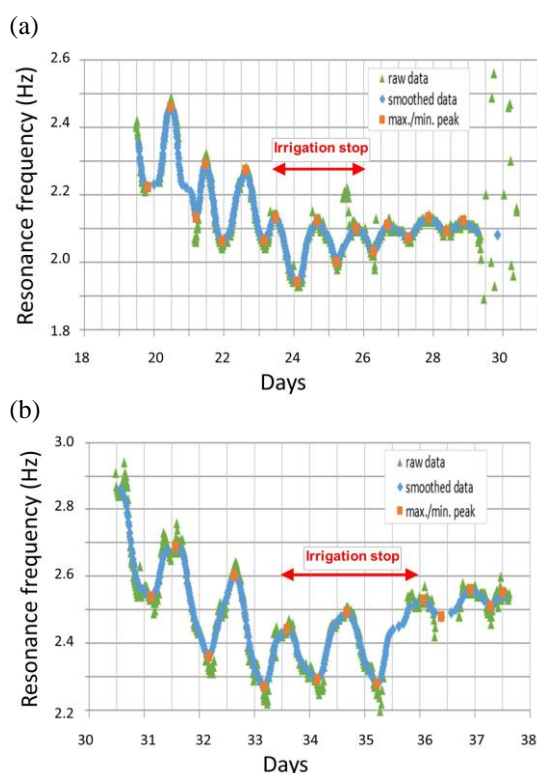


Fig.6. Resonance frequency change.

(a) leaf 1, (b) leaf 2.

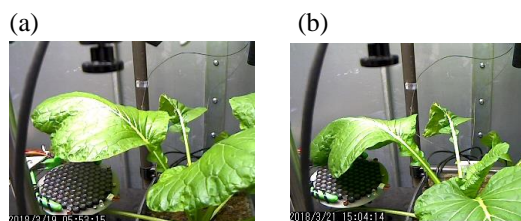


Fig.7. Photograph of leaf 2.(a) day 33, (b) day 35.

(5) 灌水停止期間の長さによる影響について

コラボ実験の結果から、小松菜の葉の共振周波数は、健康時には昼間に最大値、夜間(消灯後)に最小値を取る日周変動を示し、灌水止等による水ストレスを与えた時には最大値が夜間にずれ込む事が確認されている。そのため、葉の共振周波数が最大値をとる時刻を基準として植物の健康状態が診断できる可能性がある。そこで、葉の共振周波数の日周変動が確認された後に、灌水停止期間の異なる複数回の実験を実施した。このとき、共振周波数の1日のうちの最大値が消灯後の18時以降にずれた場合には、灌水を再開することとした。複数回の実験結果をまとめると Table 2 のようになる。

Table 2. Experimental results on irrigation timing.

No	灌水停止期間・回数	葉の共振周波数変化
1	1日間停止を3回	日周変動に変化無し
2	1日間停止を1回 2日間停止を2回	日周変動に変化無し
3	3日間停止を2回	2日後にずれ発生
4	5日間停止を1回 7日間停止を1回	3日後にずれ発生 6日後にずれ発生

この実験結果から、1 日間程度の給水停止であれば、葉の共振周波数の日周変動には変化がなく、小松菜の場合には健康状態には影響がないことが明らかになった。

そこで、以下の条件での灌水制御を行い、植物の健康度を保ったまま節水が可能かどうかの確認実験を実施した。

- (a) 健康時の日周変動が確認できる状態で給水停止。
- (b) 翌日、給水を再開。
- (c) 上記を何度か繰り返し、日周変動の変化および小松菜の状態について観察する。

実験セットアップ等は前節までのものと同じである。灌水操作の状況を Table 3 に示す。

Table 3. Timing of irrigation control.

実験開始からの日数	灌水操作等の情報
0	コラボ実験開始
3	灌水停止
4	灌水再開
7	灌水停止
8	灌水再開
10	灌水停止
11	灌水再開
14	実験終了

計測葉の共振周波数変化を Fig.8 に示す。灌水停止と再開の日数を1日とするサイクルを3回行ったが、成長に伴う共振周波数の低下は見られたが、健康時の日周変動の変化は見られず、目視でも“しおれ”は確認されなかった。

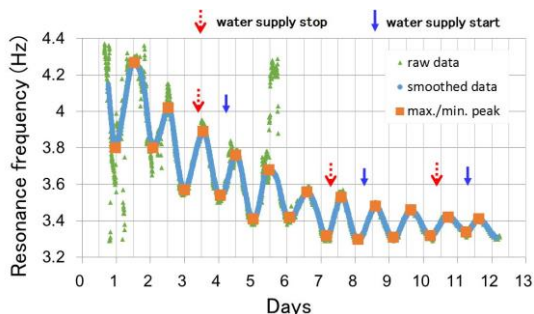


Fig.8. Resonance frequency change of a leaf.

この実験時の給水タンクの重量変化を Fig.9 に示す。この重量変化は底面給水された灌水量の変化を示しているため、灌水停止期間では重量が変化していない。図より2週間程度の実験で約2 kg すなわち約2 l (リットル) 程度の水しか使用していないことがわかる。次に地表面からの深さ 10.5 cm における土壌伝搬音速および体積含水率(VWC)の変化を Fig.10 に示す。図より伝搬音速および VWC のどちらも灌水停止および再開による状況が良く反映されていることがわかる。

(6) 全体のまとめ

今回の研究結果から、植物葉の共振周波数の日周変化を利用することにより、健康状態を維持したまま最小限の水で育成できる可

能性があることが明らかになった。本研究においては音波照射加振とレーザ変位計を用いて検討が行われたが、将来的には小型の扇風機と CCD カメラを用いて同様な計測評価が植物体に非接触で実現する可能性がある。

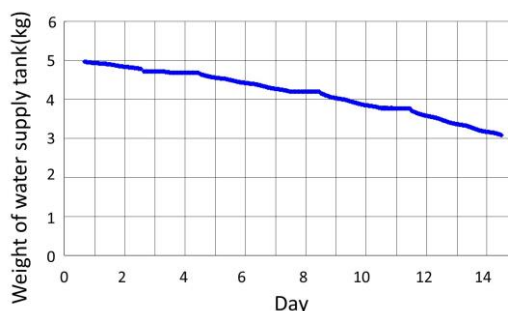


Fig.9. Weight change of a water supply tank.

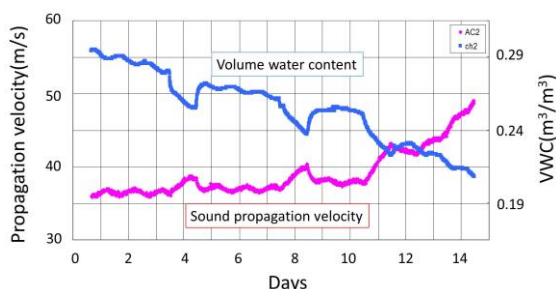


Fig.10. Change in sound propagation velocity and volume water content at 10.5 cm depth.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 12 件)

- (1) Motoaki Sano, Yutaka Nakagawa, Tsuneyoshi Sugimoto, Takashi Shirakawa, Kaoru Yamagishi, Toshiaki Sugihara and Sakae Shibusawa, “Estimation of water stress of plant by vibration measurement of leaf using acoustic radiation force”, *Acoust. Sci. & Tech.* 36, 3, pp.248-253, (2015.6) [doi:10.1250/ast.36.248] 査読有
- (2) 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, (2015.11) 査読無
- (3) 中川裕, 杉本恒美, 佐野元昭, 白川貴志, 内川千春, 大平武征, “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, (2015.11) 査読無
- (4) 白川貴志, 大平武征, 中川裕, 佐野元昭, 杉本恒美, “縦挿し型送受信機を用いた培養土中の体積含水率推定に関する検討”, *桐蔭論叢* 32, pp.197-200, (2015.11) 査読無
- (5) 白川貴志, 大平武征, 中川裕, 佐野元昭, 杉本恒美, “縦挿し型送受信機を用いた土

- 壤中の伝搬速度計測”, 桐蔭論叢 34, pp.135-138, (2016.06) 査読無
- (6) 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 34, pp.139-144, (2016.06) 査読無
- (7) 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, (2016.06) 査読無
- (8) 杉本恒美、中川裕、佐野元昭, “音響放射圧を用いた葉および茎の振動計測による植物健康状態の推定に関する研究”, 超音波 TECHNO, Vol.29, No.3, 「超音波による計測②」, pp.43-47, (2017.6) 査読無
- (9) 佐野元昭、内川千春、中川裕、大平武征、白川貴志、杉本恒美, “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”, 桐蔭論叢 36, pp.197-202, (2017.07) 査読無
- (10) 大平武征、杉本恒美、佐野元昭、白川貴志、中川裕、内川千春, “小松菜を定植した培養土中の音波伝搬速度と体積含水率の検討”, 桐蔭論叢 36, pp.217-222, (2017.07) 査読無
- (11) 内川千春、中川裕、大平武征、佐野元昭、杉本恒美, “植物の葉の固有振動数のモデル化に関する研究(2)”, 桐蔭論叢 36, pp.227-232, (2017.07) 査読無
- (12) 白川貴志、大平武征、中川裕、佐野元昭、杉本恒美, “植物栽培中の培養土における伝搬音速計測に関する検討(2)”, 桐蔭論叢 36, pp.233-236, (2017.07) 査読無

〔学会発表〕(計 5 件)

- (1) 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—”, 日本音響学会春季講演論文集 1-Q-40, pp.1295-1296 (2016.3.9, 桐蔭横浜大学)
- (2) 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”, 日本音響学会春季講演論文集 1-Q-41, pp.1297-1298 (2016.3.9, 桐蔭横浜大学)
- (3) 白川貴志、杉本恒美、佐野元昭、大平武征、中川裕, “音波振動による土壌中の水分分布計測に関する研究-植物栽培中の伝搬音速変化に関する検討(II)-”, 日本音響学会春季講演論文集 1-Q-42, pp.1299-1300 (2016.3.9, 桐蔭横浜大学)
- (4) 佐野元昭、内川千春、中川裕、大平武征、白川貴志、杉本恒美, “通常の CCD カメラを用いた葉の固有振動数解析による植物の水ストレス推定”, 日本音響学会春季講演論文集 3-P-35, pp.1089-1090,

(2017.03.17, 明治大学生田キャンパス)

- (5) 佐野元昭、内川千春、中川裕、大平武征、白川貴志、杉本恒美, “通常の CCD カメラを用いた葉の固有振動数解析による植物の水ストレス推定 2”, 日本音響学会春季講演論文集 3-Q-44, pp.1101-1102, (2018.3.15, 日本工業大学)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 1 件)

名称: 植物の健康状態の評価方法および評価装置ならびに植物の栽培方法
 発明者: 杉本恒美, 佐野元昭, 中川裕
 権利者: 桐蔭学園
 種類: 特許
 番号: 特願 2013-258011
 出願年月日: 2013 年 12 月 13 日
 国内外の別: 国内
 (補足)2018 年 5 月 8 日 特許庁からの拒絶理由通知に対する意見書および手続き補正書を提出済。

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.cc.toin.ac.jp/sc/sugimoto>

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
 杉本 恒美 (TSUNEYOSHI SUGIMOTO)
 桐蔭横浜大学大学院 工学研究科・教授
 研究者番号: 80257427
- (2) 研究分担者
 佐野 元昭 (MOTOAKI SANO)
 桐蔭横浜大学大学院 工学研究科・教授
 研究者番号: 90206003
- (3) 連携研究者
 白川 貴志 (TAKASHI SHIRAKAWA)
 桐蔭横浜大学大学院 工学研究科・研究員
 研究者番号: 30424857
- (4) 連携研究者
 中川 裕 (YUTAKA NAKAGAWA)
 桐蔭横浜大学大学院 工学研究科・研究員
 研究者番号: 50713872
- (5) 研究協力者
 大平 武征 (TAKEYUKI OHDAIRA)
 桐蔭横浜大学大学院 工学研究科・研究員
 研究者番号: 10744526
- (6) 研究協力者
 内川 千春 (CHIHARU UCHIKAWA)
 桐蔭横浜大学大学院 工学研究科・研究員
 研究者番号: 30815600