

論文

植物の葉の固有振動数の日周変動を用いた
灌水制御についての検討

Study on the irrigation control using periodic frequency change of a plant leaf

内川 千春¹・杉本 恒美*・佐野 元昭²・
大平 武征¹・中川 裕¹・白川 貴志¹

桐蔭横浜大学 大学院工学研究科

(2018年3月17日 受理)

I. はじめに

これまでの研究により、小松菜の葉の固有振動数を連続的に計測すると、健康時の小松菜の葉の固有振動数は、点灯前後から徐々に上昇して昼間に最大になり、その後徐々に下降して消灯後の夜間に最小となる日周変動を示すことが確認されている¹⁻⁴⁾。また、水ストレスを与えると日周変動に変化が生じ、固有振動数が最大となる時間帯が消灯後にずれ込むことが明らかになっている。この変化は、目視によるしおれが確認されるよりも早い段階で起こるため、植物の水ストレス状態を非接触で早期に検出する手段として利用できると考えられる。また、土壌における音波の伝播速度の変化は、体積含水率と負の相関関係を示す事が明らかになっており⁵⁾、音波の伝播速度の変化から体積含水率変化を推定することが可能である。そこで、葉の固有振動数の日周変動パターンをもとに小松菜の健康状態を推測し、土壌の音波伝播速度変化から土壌の水分量変化を把握することにより、農業用水の節約のための最適な灌水制御を行う方法について検討している。

1. 植物の葉の固有振動数の日周変動について
健康時の小松菜の固有振動数を、6:00 点灯、18:00 消灯の環境下で連続的に計測したところ約 24 時間周期の変動が見られた。周期には個体差があるが、点灯時刻前後に最小値、12:00 前後から消灯までの間に最大値を取ることが確認されている。また、水ストレスを与えることにより、最大になる時刻が消灯後にずれ込むことが明らかになっている。

Fig.1 は健康時、Fig.2 は水ストレス時の小

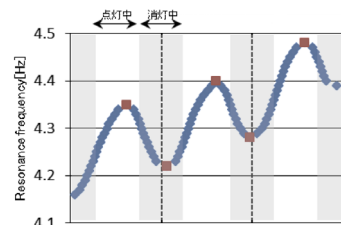


Fig.1 健康時の小松菜の葉の固有振動数変化例

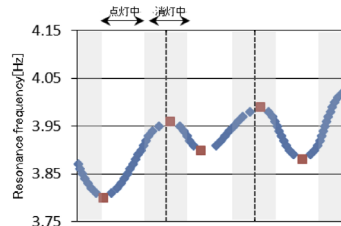


Fig.2 水ストレス時の小松菜の葉の固有振動数変化例

* SUGIMOTO Tsuneyoshi: Professor, Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama, 1614 Kurogane-cho, Aoba-ku, Yokohama 225-8503, Japan

¹ UCHIKAWA Chiharu, OHDAIRA Takeyuki, NAKAGAWA Yutaka and SHIRAKAWA Takashi: Researcher, Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama² SANO Motoaki: Professor, Graduate School of Engineering; Faculty of Biomedical Engineering, Toin University of Yokohama

松菜の固有振動数の日周変動の一例である。グラフの点線は日にちの境目を示し、背景がグレーの時間帯は消灯中、白の時間帯は点灯中であることを示している。四角のプロットは各日ごとの最大値と最小値である。Fig.1より、健康時の小松菜の固有振動数は、点灯中の時間帯に最大値を取ることが確認できる。また、Fig.2より、水ストレス時は最大値を取る時間帯が消灯中にずれてくるのがわかる。

2. 土壌における音波の伝播速度と体積含水率について

土壌における音波伝播速度（音速）の変化は、体積含水率と負の相関関係を示す事が明らかになっている。Fig.3に、土壌への給水を行わずに音速と体積含水率の変化を同時に計測した一例を示す。第1軸は音速、第2軸は体積含水率を示している。土壌水分の減少とともに体積含水率が低下しているのに対し、音速は上昇していることが確認できる。

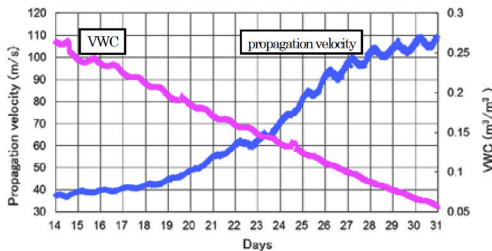


Fig.3 土壌における音速と体積含水率の変化

II. 実験

1. 実験セットアップ

Fig.4に実験セットアップ全景を示す。小松菜育成部は土壌層と給水層の2層構造になっており、土壌内には土壌の音速計測のための音源と受信機（Ac1、Ac2）および水分センサー（ch1、ch2、ch3、ch4）を挿入し、土壌底には給水布を設置した（Fig.5）。下部の給水層の水位は一定に保たれており、給水布を伝って土壌層に常時給水が行われるよ



Fig.4 実験セットアップ全景

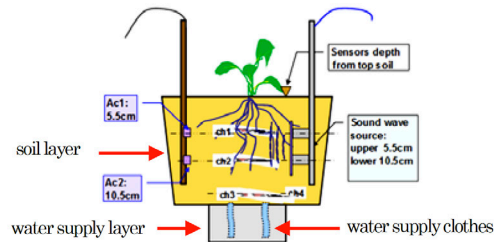


Fig.5 小松菜育成部

Ac1、Ac2：音波受信機

Ch1、ch2、ch3、ch4：水分センサー

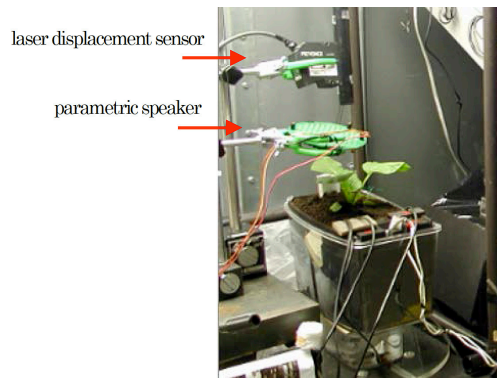


Fig.6 地上部セットアップ

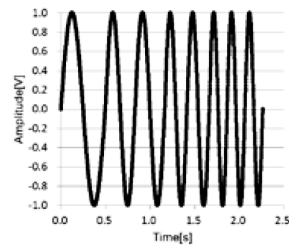


Fig.7 送信波形（全長 2268ms）

2Hz：1 波長、3Hz・4Hz：2 波長、5Hz：3 波長

うにした。Fig.6 は地上部のセットアップである。計測葉の上方5～15cm にパラメトリックスピーカー（AS101AW3PF2、日本セラミック株式会社）、上方約15cm にレーザー変位計（LK-G150、KEYENCE）を設置した。スピーカーから葉の固有振動数を含む2Hz～5Hzの帯域幅を持つ波形（全長2268ms、Fig.7）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。明るさは約8000Lux、点灯時間は6:00から18:00とした。播種後28日目の小松菜を実験セットに定植した後、25日間計測を行った。

2. 灌水制御手順

ここでは、各日の葉の固有振動数の最大値が消灯前であれば健康であるとみなし、以下の手順で節水のテストを行った。

- ① 健康時の日周変動（昼間に最大値、消灯後の夜間に最小値をとる）が確認できる状態で給水を停止する。
- ② 翌日、給水を再開する。
 - ①、②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した。

3. 解析手順

(1) 固有振動数解析

レーザー変位計により得られた振動変位データはcsv形式で保存される。これを数値計算ソフトウェアScilabを用いてFFTすることにより、固有振動数を求めた。

(2) 外れ値の除去と補間

小松菜の葉は消灯後は茎が徐々に立ち上がり、点灯前後に下がっていく上下動をしており、同時に、横方向の位置も多少変化する。このため、計測中に計測葉が他の葉に接触して振動波形が乱れ、外れ値が発生することがある。また、レーザーが葉からはずれるなどにより、一時的に計測不良が起こることがある。日周変動から最大値・最小値を検出するためにはこれらの外れ値を除去する必要がある。そのために、葉の固有振動数を時系列で

プロットしたグラフに対して、ここでは以下の手法を適用した。

- ① 判定点と、その直前の一定幅（width）のデータとの距離を計算する。（Fig.8）
- ② ①で算出された中で距離の最も近いデータをk個選び、その平均値を判定点の異常度とする。
- ③ 異常度がある閾値（threshold）以上であれば、その判定点を外れ値とみなし、ゼロに落とす。

また、異常度算出に用いるデータはゼロ以外という条件をつけたため、width内にゼロに落とされたデータが含まれる場合は、width範囲以前のデータも参照した。（Fig.9）

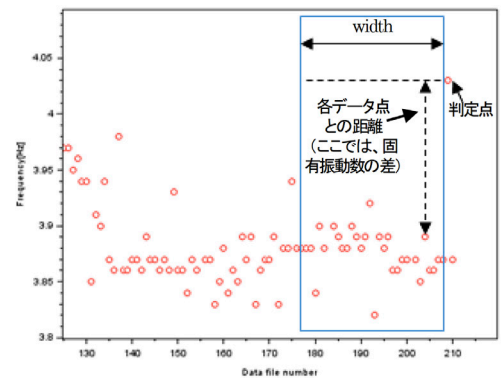


Fig.8 判定点の異常度算出

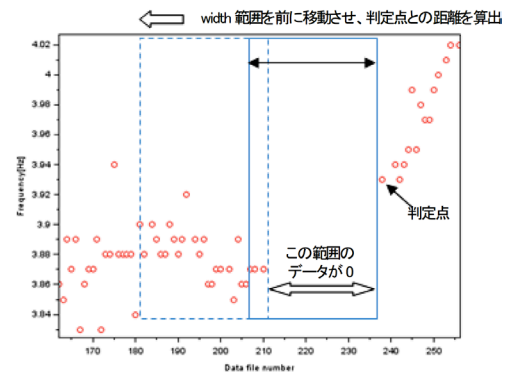


Fig.9 width内にゼロ値が含まれるとき

以下に結果例を示す。

Fig.10 は外れ値を持つ固有振動数データの一例である。この入力に対し、3. (2) ①～③の手順で外れ値をゼロに落とすと、Fig.11 のようになる。

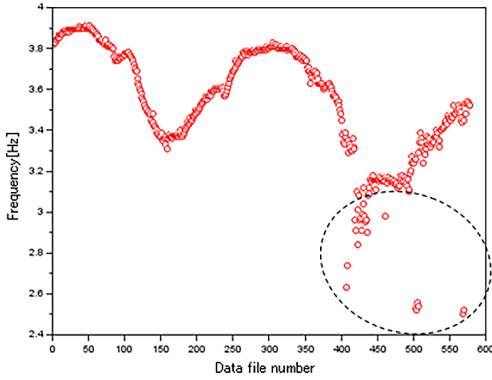


Fig.10 外れ値のある入力データ例

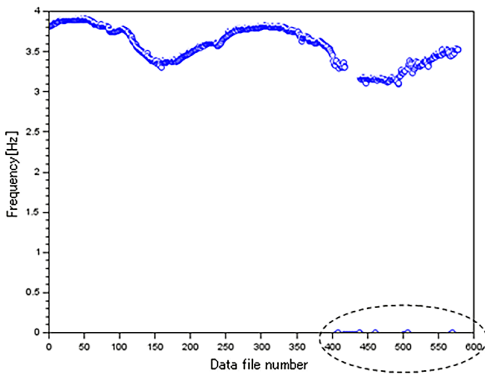


Fig.11 外れ値除去後
width=10, k=5, threshold=0.15

また、外れ値とみなしてゼロに落としたデータ（またはデータ区間）は、前後の固有振動数の平均値として補間した。

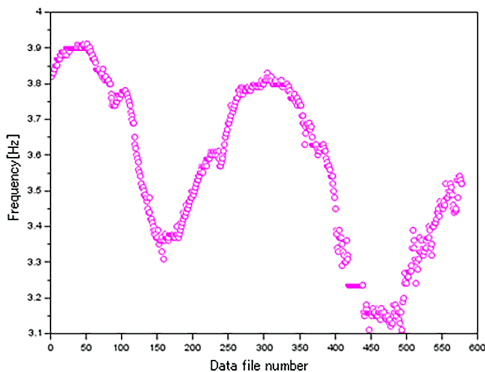


Fig.12 補間後

(3) 平滑化と最大値、最小値の検出

給水制御を行う際、葉の固有振動数の各日の最大値・最小値の時刻を自動的に検出でき

ることが望ましい。そこで、上記(2)の方法により外れ値を除去した後、次の手順で各日の最大値、最小値を検出した。

- ① 移動平均処理をする。以下に、Fig.12のデータにデータ数13で移動平均処理を2回施した結果を示す。

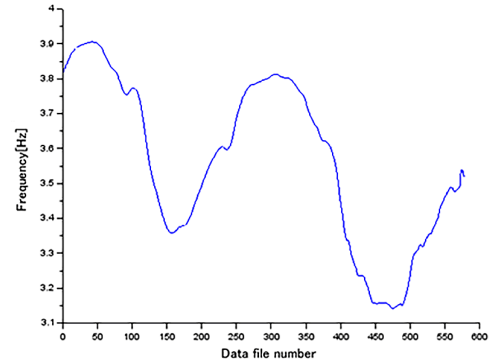


Fig.13 移動平均結果
データ数=13で2回実行

- ② 直前・直後のデータよりも値が大きいデータを最大値の候補、直前・直後のデータよりも値が小さいデータを最小値の候補とする。さらに、任意の24時間区切りで最大値・最小値を検出する。

Fig.14に、Fig.13を入力データとして6:00から翌日6:00までの区切りごとに最大値・最小値を検出した結果例を示す。

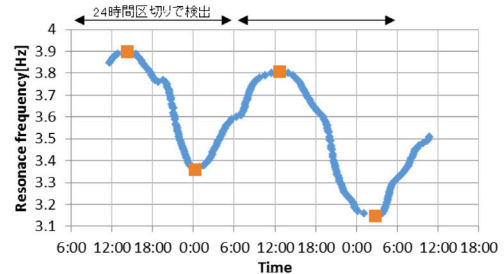


Fig.14 最大値・最小値検出例
■：検出された最大値・最小値

Ⅲ. 結果および考察

定植された小松菜が根付き、安定した計測が可能になった定植後13日目から24日目までの葉の固有振動数の変化をFig.15に示す。グラフ中のプロットの三角は葉の固有振動数、丸は平滑化された固有振動数、四角は各日の最大値、最小値を示している。また、点線矢印は給水停止を、黒矢印は給水再開を示している。

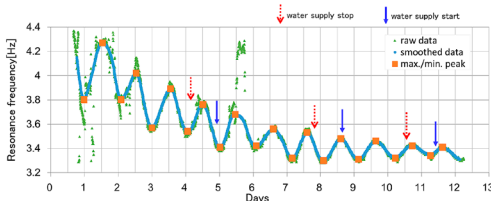


Fig.15 小松菜の葉の固有振動数の日周変動

1日のみの給水停止では健康時の日周変動は保たれており、小松菜にストレスを与えずに節水できていると思われる。

Fig.16は土壌における音速と体積含水率の変化である。横軸は定植後の日数を表している。第1軸は音速、第2軸は体積含水率を示しており、給水停止時の土壌における水分量変化が音速の変化により捉えられていることがわかる。

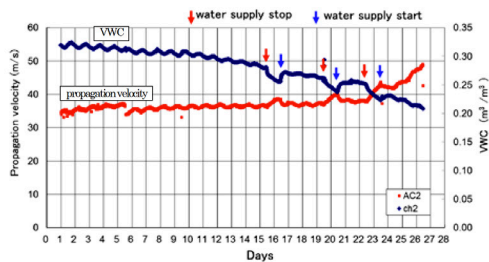


Fig.16 音速および体積含水率変化

Fig.17(a)は実験期間中の給水量の推移と、給水停止による節水効果の予測を示す。横軸は定植後の日数、グレーのバーは各日の給水量を示す。(b)は、(a)における給水停止日のデータを除いて多項式近似した結果である。

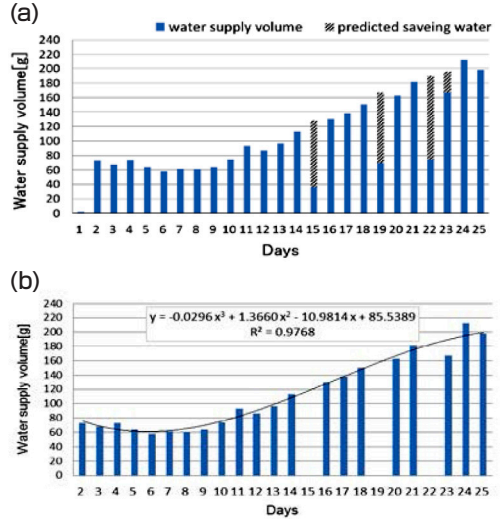


Fig.17 給水量の推移と予測節水量

この近似式をもとに節水量を予測し、(a)に斜線のバーで示した。実験期間中の給水量の合計は2593.7g、予測節水量は301.6gとなった。

Ⅳ. まとめと今後の課題

ここでは、1日のみの給水停止を3回行い、その間の節水効果および葉の固有振動数の日周変動の変化について調べた。その結果、1日のみの給水停止では、水ストレス時の日周変動の変化を起こさずに給水量を減らせることが確認できた。また、音速は給水停止後に上昇、給水再開後に低下しており、土壌水分量の変化をよく捉えていることが確認できた。

今後はより節水量を増やすために、給水停止のタイミングや期間について検討していく予定である。その際、固有振動数の日周変動が明確に把握できることが前提となるが、ここでは日周変動が確認されたのは実験開始後約13日目であった。より早い時期に日周変動を確認し、灌水制御できることが望ましい。また、節水しない対照群を設けて、節水による成長への影響についても確認していく必要がある。

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) T. Sugimoto *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 52, 07HC04, 2013.
- 2) M. Sano *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 52, 07HC13, 2013.
- 3) 佐野 他, 音響講演論文集 (春期) 3-P5-8, p.1359-60, 2014.
- 4) M. Sano *et al.*, *Acoust. Sci. & Tech.*, 36, pp.248-53, 2015.
- 5) 大平 他, 桐蔭論叢, 34, pp.145-8, 2016.