

論文

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（Ⅲ）Study on the relation between propagation velocity of sound and
volume water content in the culture soil where Komatsuna was planted (III)大平 武征²・杉本 恒美*・佐野 元昭¹・
白川 貴志³・中川 裕³・内川 千春³

桐蔭横浜大学 大学院工学研究科

(2019年3月16日 受理)

I. はじめに

地球温暖化に伴い植物を育成するため、水不足は深刻と成っている。特に、農作物の最適な灌水は節水型農業の技術が急務である。

篤農家は作物の生育状態を把握するため、直接目視する事や手で触れるなどの判断情報を必要としている。そこで、我々は培養土に定植した小松菜を用い、(1)内川等は培養土の地上部における葉とその茎の張り具合に着目し、葉の共振周波数変化をレーザ変位計で計測する水ストレス状態を研究してきた¹⁾。また、(2)筆者等は地下部(根圏部)の土壤水分分布を、少ない受信センサの音波振動計測から音波伝搬速度を得、推定可能であることを報告してきた²⁾。そこで、この両研究をコラボレーションし灌水を停止後、小松菜の葉の共振周波数変化から「しおれ」情報を得、同時に根圏部の音波伝搬速度と土壤水分センサで水分を計測し、実験の小松菜育成に最適な灌水時期が推測可能かどうか検討する。

II. 実験方法

1. 実験槽と測定器

図1は実験セットアップの写真である。また、表1は実験に使用した実験機器類を示す。実験槽は土壤槽と灌水槽から成り、定圧灌水を行う構造である。なお、実験槽の容量は約5.5Lとした。実験は恒温室内(気温約21℃、相対湿度約

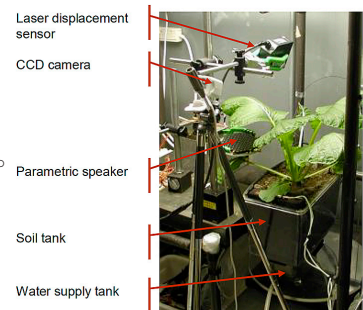


図1 実験槽セットアップ

表1 実験機器類

Equipment name	Type expression	Manufacturer
Function generator	AGF3022	Tektronix Inc.
Laser displacement meter	LKG-150	KEYENCE Corp.
Parametric speaker	AS101AW3PF2	Nippon ceramic Corp.
Magnetostrictive vibrator	GPC-1	OPT Corp.
Acceleration sensor	NP-3110	ONO SOKKI Corp.
Data logger	GL-900	GRAPHTEC corp.

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

¹ SANO Motoaki: Professor, Graduate School of Engineering, Faculty of Biomedical Engineering, Toin University of Yokohama

² OHDAIRA Takeyuki: Guest Researcher. ³ SHIRAKAWA Takashi, NAKAGAWA Yutaka and UCHIKAWA Chiharu: Researcher, Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama

55%)で行い、葉の振動計測には播種 28 日目の最適な小松菜を用いた。また、太陽光を模擬した照明は蛍光灯を用い、約 7000 lux、点灯時間は 6:00 から 18:00 とし、葉の状況を観察するため CCD カメラを設置した。

1) 葉の振動計測

葉の振動計測は葉の上方約 15 cm にレーザ変位計を設置し(図1)、また、葉を振動させる超音波音源は、計測葉の成長状況に応じて上方または下方約 5 cm に移動した。なお、葉の励振波は共振周波数を含む 2 Hz ~ 5 Hz の帯域幅を有する波形(全長 2268 ms、図2)を 5 分おきに 1 cycle 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 10 ms で 10 秒間採取した。

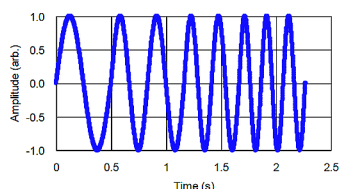


図2 葉の励振波形

2) 根圏部の音波伝搬速度

図3は実験槽の構成図である。小松菜の育成部は灌水の給水圧を一定に保ち、底面灌水を行うため土壌槽と灌水槽の2槽構造にした。更に、土壌槽には土壌内の音波伝搬速度(以下、伝搬音速)を計測するため、超磁歪音源 2 個と音波受振用に 2 個の加速度センサを組み込んだ受信器を設置した。また、土壌水分の体積含水率(VWC)の計測は水分センサ 4 個(ch1~ch4)を設置した。ここで、超磁歪音源の駆動信号は関数発生器より 350 Hz の正弦波 5 サイクルを 8 分おきに土壌へ音波を送信し、受信波計はサンプリングタイム 20 μ s で 40 ms 間測定した。なお、受信器

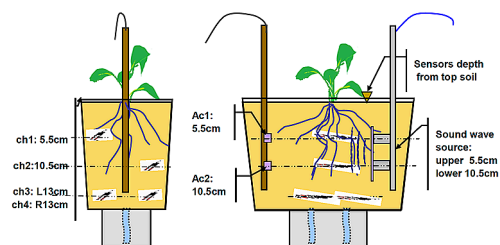


図3 実験槽の構成図と各センサ
左: 側面図、右: 正面図

の各センサは、土壌表面から深さ約 5.5 cm (Ac1) と約 10.5 cm (Ac2) の音波伝搬ラインに設置した。また、VWC の計測は 4 個の誘電率水分センサを土壌表面から深さ約 5.5 cm (ch1)、10.5 cm (ch2)、13 cm (左 ch3、右 ch4) に埋設した(図3)。実験槽は下部の灌水槽の給水布から毛细管作用で底面灌水(h = 3 cm)を行う構造になっている。なお、伝搬速度は音波源と受信器との伝搬距離(約 14 cm)を初波受信波の到達時間で除し計算した。

III. 実験結果

1. 葉の共振周波数の変化

葉の振動計測では、時おり、植物の成長に伴い実験機器と接触して計測が困難になることがある。本実験例においても図4に示すように 30 日目付近で、最初の計測葉 1 が下方に伸び、超音波音源や実験槽縁に接触が有ったため、次の計測葉 2 に切り替えて

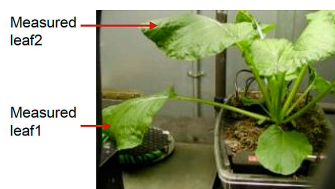


図4 定植後 30 日目の計測葉 1 と 2 の状態

いる。実験は 2 回の灌水停止を行い、図5(a)は計測葉 1、(b)は計測葉 2 の共振周波数変化で、上述の理由で両計測葉を切り替えた結果を示す。図5(a)、(b)の赤三角(▲)は、日中における葉の共振周波数ピークの最大値と最小値を示す。ここで、一回目の灌水停止を 23 日目に行なったところ、図5(a)の計測葉 1 は 25 日目に共振周波数の最大値が消灯後にシフトした(ずれた)ことが観測された。しかし、この時点では、目視による「しおれ」は確認できなかった。そこで、図6の写真に示す計測葉 2 に切り替え、図5(b)に示す 2 回目の灌水停止を 33 日目に行ったところ、35 日目の消灯以降から 36 日目に掛けて共振周波数の最大値が大きくシフトした(ずれた)こと

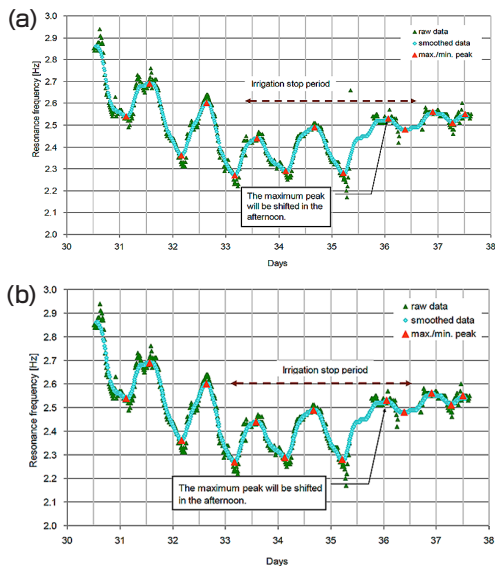


図5 葉の共振周波数変化
(a) 計測葉1、(b) 計測葉2



図6 計測葉2の33日目の状態



図7 計測葉2の35日目の「しおれ」状態

が確認され、図7の写真に示す「しおれ」が確認できた。

2. 伝搬音速とVWC

図8は関数発生器より超磁歪音源への正弦波5サイクル①と受信器の加速度センサ2個の受信波形である埋設深さ5.5

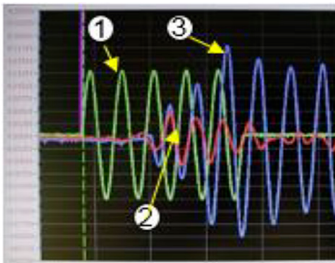


図8 音源正弦波形と加速度センサ受信波形

cm ②と10.5 cm ③の波形を示す。次に、図9(a)、(b)は伝搬音速とVWCの関係を示す。この計測で各加速度センサと水分センサの位置は、培養土面から5.5 cm (Ac1、ch1)と10.5 cm (Ac2、ch2)の深さに設置した結果

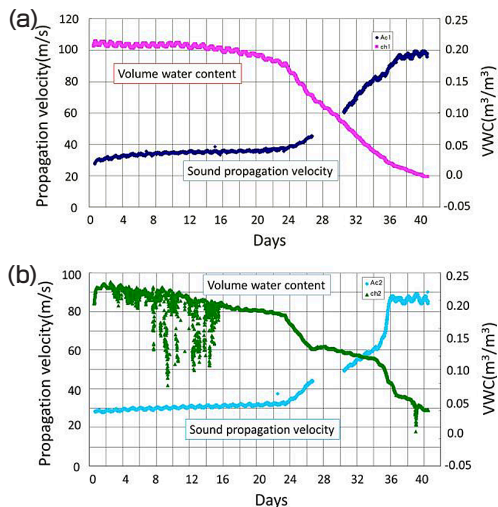


図9 伝搬音速とVWC

(a) 加速度センサ Ac1 と水分センサ ch1
(b) 加速度センサ Ac2 と水分センサ ch2

を示し、両者はこれまでの報告と同じように、伝搬音速とVWCが負の相関を示すことが分かる。

実験における2回目の灌水停止では、図7に示す計測葉2は35日目に「しおれ」を確認したことを述べた。そこで、伝搬音速とVWCの変化が良く現れている図9(b)を見ると、35日目から36日目に掛け、VWCは約 $0.12 \text{ m}^3/\text{m}^3$ から $0.07 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 付近まで急に減少を示し、逆に、伝搬音速は約 65 m/s から 80 m/s に急上昇を示した。この結果から実験植物が「しおれ」状態を現す時、その根圏部の土壤水分は急激に減少している事が分かった。これらの事から、土壤の伝搬音速変化は土壤水分センサと同じように、土壤水分の推測が可能である事が考えられる。

IV. まとめ

本コラボレーション実験の結果より、以下のことが明らかになった。

(1) 葉の共振周波数変化から、安定した日周変動のずれが確認され始めた時は、植物に水ストレスが加わった影響と推測される。

これは目視による「しおれ」が生じる時よりも早く見られたため、早期の判断の手掛かりになる可能性が高いと考えられる。

(2) 実験槽土壌内の伝搬音速変化から、植物根圏内の含水量の変化は、おおよそ推定可能である。しかしながら、伝搬音速変化だけでは、植物の生育健康状態の変化を早期に把握する事は困難であることが分かった。

以上のことから、今回の研究結果では、植物の葉における共振周波数の日周変化を利用し、植物の健康状態を維持したまま最小限の灌水で育成できる可能性があることが明らかになった。本研究では植物の葉を音波により励振し、レーザ変位計を用いて計測したが、更なる計測法として小型の静音ファンと CCD カメラを用い、植物体に非接触で同様な計測評価が実現する可能性を示唆していると考ええる。

謝辞

* 本研究は、JSPS 科研費 15K07681 の助成を受けて実施されたものである。

【参考文献】

- 1) Chiharu Uchikawa, T. Ohdaira *et al.*, "Estimating plant water stress by simultaneous multi-point vibration analysis of leaves using a laser displacement meter" *Tohin Ronso* 34, pp.155-158, (2016.06). No peer review
- 2) Takeyuki Ohdaira, C. Uchikawa *et al.*, "Study of sound wave propagation velocity and volume moisture content in culture soil grown in Komatsuna", *Tohin Ronso* 36, pp.217-222, (2017.07). No peer review
- 3) Tsuneyoshi Sugimoto, Yutaka Nakagawa, Takashi Shirakawa, Motoaki Sano, Motoyoshi Ohaba, and Sakae Shibusawa: "Study on Water Distribution Imaging in the Sand Using Propagation Velocity of Sound with Scanning Laser Doppler Vibrometer", *Jpn. J. Appl. Phys.* 52, 07HC04, 2013.
- 4) 中川裕・杉本恒美：音波振動を用いた土壌中の水分分布測定に関する基礎研究, *桐蔭論叢*, 24, pp.235-238, 2011.
- 5) 中川裕・杉本恒美：土壌中の水分分布計測に関する基礎研究——音波振動と土壌水分センサを用いた計測に関する検討——, *桐蔭論叢*, 26, pp.51-56, 2012.
- 6) 中川裕・杉本恒美：音波振動を用いた土壌水分分布計測に関する検討——土壌水分分布の音響映像化法に関する検討——, *桐蔭論叢*, 28, pp.231-235, 2013.
- 7) 中川裕・杉本恒美：植物栽培中の培養土における体積含水率と伝搬音速の関係に関する検討, *桐蔭論叢*, 30, pp.193-194, 2014.
- 8) 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.*, 36, pp.248-253, 2015.
- 9) Motoaki Sano, Tsuneyoshi Sugimoto, Hiroshi Hosoya, Motoyoshi Ohaba and Sakae Shibusawa: "Basic Study on Estimating Water Stress of a Plant Using Vibration Measurement of Leaf", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 52, 07HC13, 2013.