

# 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

Study on the relation between sound wave propagation velocity and volume water content in the culture soil where Komatsuna was planted

大平 武征・杉本 恒美・佐野 元昭  
白川 貴志・中川 裕・内川 千春

桐蔭横浜大学 大学院工学研究科

(2017年3月18日 受理)

## I. はじめに

近年、地球規模の水不足を背景に農作物の最適な灌水に付いて幾つかの節水型農業の研究報告が見られる。農作物の栽培では灌水タイミングを把握するため土壌水分の分布状態を良く知ることが大切である。現在、土壌水分を計測する計測器として誘電率水分センサやテンシオメータなどがあるが、土壌水分の分布状態を把握するには個々の水分センサは検知範囲の制約から多くの水分センサを埋設する必要がある。そのような中、著者らは音波伝搬速度が土壌水分に影響される可能性があることに着目し、音波伝搬速度が水分分布計測に適していることを報告してきた<sup>1-5)</sup>。そこで、本研究では小松菜栽培中の培養土内の音波伝搬速度変化から、土壌水分の変化が推測できるかどうかを目的とした実験を行ったので報告する。

## II. 実験方法

### 1. 実験槽と測定機器

図1は小松菜を培養土に植えた実験槽の写真を示し、各計測機器と共に恒温室(気温約22℃、相対湿度約55%)に設置している。図2は各計測センサのセットアップを示す。音波音源(超磁歪振動子)は実験槽壁にポリエチレンフィルムを介し土壌表面から深さ約10.5cmに取り付けている。音波音源制御の



図1 Photograph of the experimental setup tank.

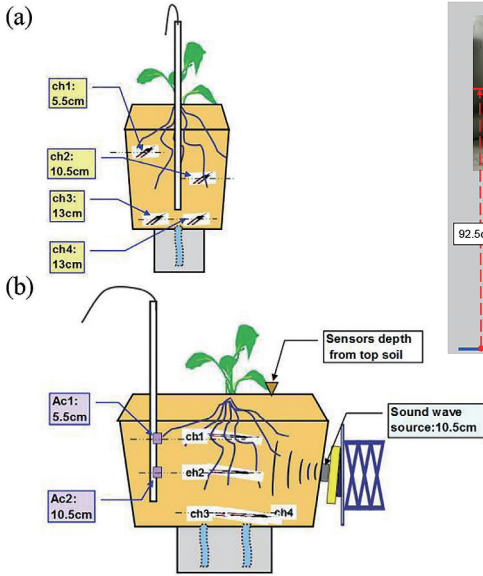


図2 Experimental setup of the sensors.  
(a) Side view1, (b) Side view2.

関数発生器 (Tektronix Inc., FG) は正弦波 300Hz, 5cycle,  $V_{pp} : 5V$ 、サンプリングタイム 5min、トリガー信号 1s を設定、受信波はフィルターアンプを介しロガー (グラフテック社、GL-900) へ接続。トリガー信号より 10% 早く測定開始するようにサブトリガー信号を設定している。受信器は 2 個の受信センサ (加速度センサ) を組み込み土壤表面から深さ約 5.5cm (Ac1) と約 10.5cm (Ac2) の音波伝搬ラインに埋設している。また、体積含水率の計測は 4 個の誘電率水分センサを土壤表面から深さ約 5.5cm (ch1)、10.5cm (ch2)、13cm (右 ch3、左 ch4) に埋設し、実験槽は槽底面から負圧差灌水を行う構造になっている。なお、音波伝搬速度は音波音源と受信器との伝搬距離 (約 13.5cm) と初波受信波の到達時間から計算できる。

## 2. 負圧差灌水の実験セットアップ

図3は負圧差灌水システムの展開図で、恒温室の床を基準 (GL) とする各実験容器の高低差を示している。水の流れは、水頭が一番高い給水タンク①を精密電子秤②に載せ、フロート式液面制御筒③により負圧差灌水槽④

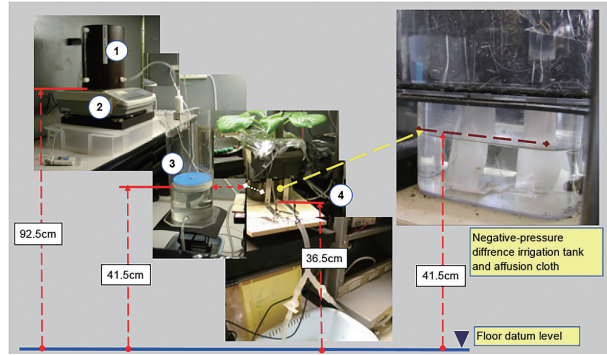


図3 The diagram of negative-pressure difference irrigation.

の液面を一定に保ち、給水布の毛細管現象で実験槽底面より負圧差灌水をする。給水タンク①の減少量 (g) すなわち灌水量は精密電子秤②の付帯ロガーで記録する。なお、太陽光を模擬した蛍光灯は照度約 8000Lux、点灯時間は 6:00 から 18:00 とする。

## III. 実験結果

### 1. 土壤体積含水率

図4(a)は4個の誘電率水分センサ (参照図2) の土壤体積含水率 (VWC) を示す。グラフより、実験開始から 5 日過ぎに負圧差灌水を停止したところ、水分センサ ch1 を除く ch2、3、4 は急激な VWC の減少を示し、9 日目の灌水再開で ch2、3、4 は素早い応答の増加後、11 日以降は緩やかな増加を示す。更に、21 日過ぎに再び灌水を停止した結果、ch2、3、4 はステップ状の急激な下降現象が見られる。これは、太陽を模擬した蛍光灯の ON-OFF 点灯 (6:00 - 18:00) に連動した日周変動であることが分かる。

図4(b)は定植初期の根付近に設置した水分センサ ch1 (深さ 5.5cm) と成長後の想定根圏に設置した ch2 (深さ 10.5cm) の結果を示す。ch1 は 5 日過ぎの灌水停止から VWC が緩やかに減少を始め、9 日目の灌水再開には影響されず 10 日過ぎに上昇を示している。この緩やかな減少と増加は、ch1 が

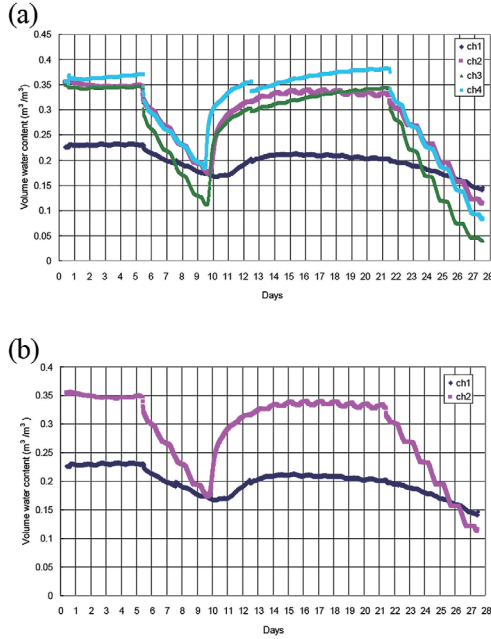


図 4 The volume water content of the moisture sensors, (a) From ch1 to ch4 and (b) ch1 and ch2.

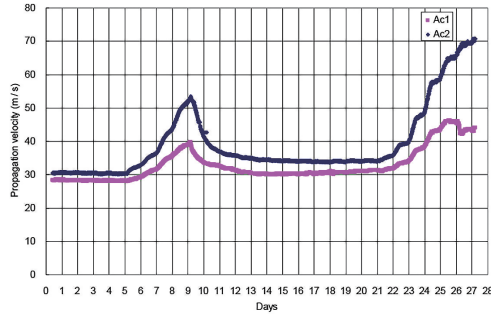


図 5 The propagation velocity of sound wave.

定植初期の根と土壌が混在する水分領域で灌水の停止と再開には直ぐ影響されないことを示す。これに対し ch2 は定植経過日数が浅く成長根が殆ど無い土壌主体のため、灌水の停止と再開が直ちに VWC 変化を捉えていることが分かる。

## 2. 音波伝搬速度

図 5 は受信センサ Ac1 (深さ 5.5cm) と Ac2 (10.5cm) の音波伝搬速度を示す。ここで、図 4(b) の水分センサ (ch1: 5.5cm、ch2: 10.5cm) による結果と対比すると、Ⅲ・

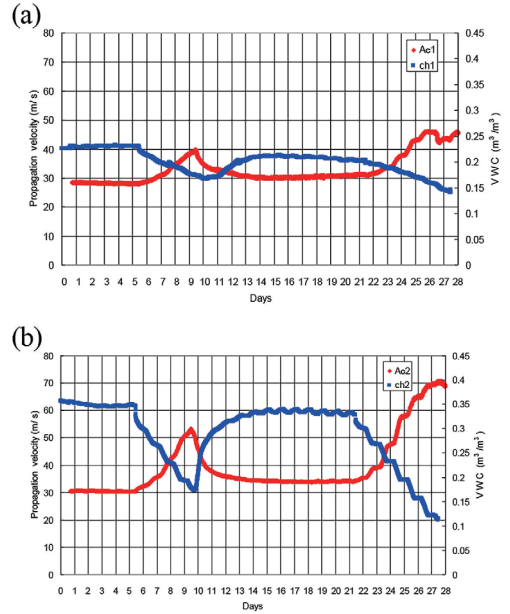


図 6 The propagation velocity of sound wave and volume water content, (a) Acceleration sensor Ac1 and moisture sensor ch1, (b) Acceleration sensor Ac2 and moisture sensor ch2.

1 節で述べた図 4(b) —水分センサ (ch1、2) の変化傾向に対し、受信センサ (Ac1、2) の変化は逆の関係、すなわち、負の相関関係を示す。また、図 5 では受信センサ Ac2 が 5 日過ぎと 21 日過ぎの灌水停止に対し、小松菜の成長が著しい時期と重なり、音波伝搬速度がステップ状の上昇を顕著に示している。これは太陽光を模擬した蛍光灯の ON-OFF 点灯 (6:00 - 18:00) に応じた日周変動が見られ、図 4(b) —水分センサ ch2 と同様な結果を示している。

次に、経日変化に対する音波伝搬速度と体積含水率 (VWC) を 2 軸グラフで表すと、図 6(a) は受信センサ Ac1 (深さ 5.5cm) と水分センサ ch1 (深さ 5.5cm) の関係、図 6(b) は受信センサ Ac2 (深さ 10.5cm) と水分センサ ch2 (深さ 10.5cm) の関係を示す。このグラフからも音波伝搬速度と VWC は負の相関関係であることが分かる。ここで、図 6(a) において 9 日過ぎの灌水再開で受信センサ Ac1 と水分センサ ch1 の変曲点にずれ

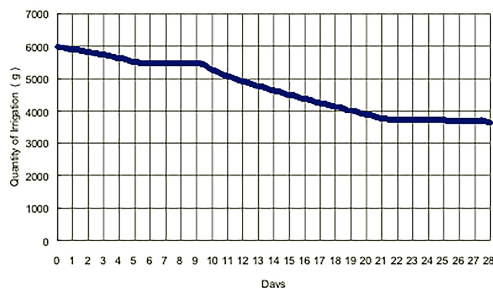


図7 The quantity of negative-pressure difference irrigation.

が見られる。これは、Ⅲ・1節で述べた水分センサ ch1 が小松菜の根付近の土壤水分 (VWC) を示し、逆に、受信センサ Ac1 は根、土壤粒、水分を包含する領域の土壤水分を音波伝搬速度変化で捉えていることが分かる。この Ac1 の検知応答は図 6(b) の受信センサ Ac2 (10.5cm) と水分センサ ch2 (10.5cm) でも同様に見ることができ、何れも 9 日過ぎの灌水再開に素早い応答を示し音波伝搬速度は土壤水分変化を確実に計測できる事がわかる。

### 3. 灌水量の変化

図 7 は実験槽の底面より負圧差灌水を行った灌水量 (図 3 精密電子秤②) の変化を示す。5 日過ぎから 9 日目に掛け灌水が一定を示すのは、灌水を停止したためである。9 日過ぎから 21 日目に掛け灌水の減少が見られ、この間、小さいながらステップ状の増減変化を繰り返し、太陽光を模擬した蛍光灯の ON-OFF 点灯 (6:00 - 18:00) に連動した日周変動が見て取れる。

## IV. 結論と今後の課題

小松菜栽培中の培養土内の音波伝搬速度の変化から、土壤水分の変化が推測できるかどうかを目的とする実験を行った。実験の結果、培養土内の根圏における音波伝搬速度の変化より土壤水分変化を把握できることが明らかになった。また、音波伝搬速度と水分センサ

による体積含水率の変化を比較検討した結果から、両者は負の相関関係があることを確認した。

今後は、レーザ変位計を用いた葉の振動解析<sup>6,7)</sup>から植物の健康状態を推測する研究と連携することにより、「水ストレス」から「しおれ」状態に至る音波伝搬速度の変化から根圏の水分分布を把握し、植物の最適な灌水管理を見出して行く予定である。

### 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) 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.
- 2) 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.
- 3) 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——音波振動と土壤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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.

- 7) 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.